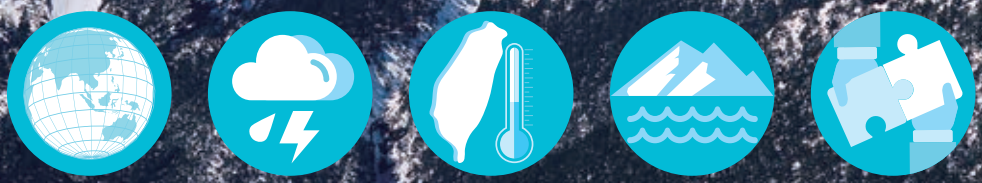


電子版

國家氣候變遷科學報告2024

現象、衝擊與調適

國家科學及技術委員會
環境部
聯合出版





國家氣候變遷科學報告2024

現象、衝擊與調適

國家科學及技術委員會
環境部
聯合出版

編撰說明

《國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適》(以下簡稱科學報告) 是 2023 年初我國通過「氣候變遷因應法」(以下簡稱氣候法) 後，國家科學及技術委員會 (以下簡稱國科會) 以及環境部依法共同發布的科學報告。

國科會長期推動氣候變遷科學研究並提供相關科研成果，讓外界掌握最新科學資訊，國科會科研團隊過往已完成《臺灣氣候變遷科學報告 2011》與《臺灣氣候變遷科學報告 2017》兩份報告。此次報告的編撰為國科會延續上述氣候變遷科學資訊的更新，由「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 (簡稱 TCCIP)」計畫自 2022 年第三季籌備並啟動編撰工作。編輯團隊歷時一年多的時間，經由 68 位作者的撰述，25 位學者專家的審閱，完成 600 餘頁共 31 萬餘字的國科會 TCCIP 計畫版本之《臺灣氣候變遷科學報告 2023》。

依據氣候法，國科會與環境部於 2024 年 3 月共同召開跨部會聯席會議針對 TCCIP 計畫版本之科學報告進行意見徵詢，編輯團隊參採部會意見修訂後，定稿並更名為《國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適》。此份報告延續國科會科學團隊過往完成的兩份氣候變遷科學報告架構，以氣候變遷科學、衝擊與調適為主軸，共分五章 : 前三章為氣候變遷科學趨勢以及未來推估，後兩章則為衝擊與調適。第一章說明全球與東亞的氣候變遷；第二、三章分別討論臺灣氣候變遷趨勢與未來推估；第四章彙編氣候變遷對水領域、坡地、海岸、糧食生產與安全、生態、人類健康、城鄉規劃等議題之衝擊資訊；第五章則說明氣候變遷風險與調適架構之科學論述與知識方法學，作為部會與地方調適建構與規劃之參考。

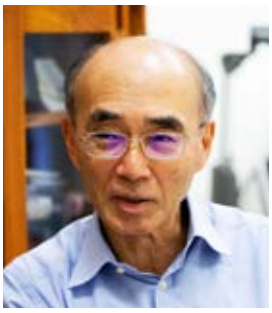
科學報告彙編國內外氣候變遷觀測、推估與衝擊研究、調適方法論的重要資訊，更新 2017 科學報告後的重要氣候變遷科研成果。本次報告參考超過 1200 篇國內外學術

期刊文獻與部會研究報告，文獻收錄以 2023 年 6 月以前出版品為主。本報告採參專家學者與部會先進針對文字語意、科學論述、文獻引用與詮釋提供的超過 600 則審閱意見修訂後定稿。

科學報告的資訊盡可能收錄與參考相關國內外科研成果，為氣候變遷相關科學研究階段性成果之彙編，絕大部分內容仍以科學研究與學術產出為依據，無法完整涵蓋且充分反應政府相關部門的政策規劃或施政方向；另一方面，考量氣候變遷科研成果正快速與大量累積中，建議讀者參考此科學報告的同時，持續關注國內外相關科研成果之更新與發展。此科學報告反應科學社群對於現階段國家推動調適工作的期許，希望國家在氣候治理上，除了積極推動淨零減碳工作，也應加強重視調適工作的規劃與落實。編輯團隊期待本報告彙編的科學資訊對調適政策的研擬與推動有所助益。

最後謹代表科學報告編輯委員會向所有參與撰寫的主筆、作者群，以及提供寶貴修正意見的學者專家、部會先進表達感謝，讓這本科學報告可以在歷經一年半的時間，順利完成與出版。

主編







國家氣候變遷科學報告2024
作者群

主編

許晃雄
中央研究院・環境變遷研究中心

李明旭
國立中央大學・水文與海洋科學研究所

第一章
全球與東亞氣候變遷

許晃雄
中央研究院・環境變遷研究中心

王嘉琪
中國文化大學・大氣科學系

李時雨
中央研究院・環境變遷研究中心

曹俊和
國立臺灣海洋大學・海洋環境資訊系

梁禹喬
國立臺灣大學・大氣科學系

郭怡君
國立臺灣大學・海洋研究所

陳昭安
國家災害防救科技中心

陳英婷
中央研究院・環境變遷研究中心

曾于恒
國立臺灣大學・海洋研究所

曾琬鈴
國立臺灣大學・氣候變遷與永續發展學位學程

黃偌栩
國立臺灣大學・海洋研究所

蔡宜君
中央研究院・環境變遷研究中心

賴昭成
國立臺北教育大學・自然科學教育學系

駱世豪
中央研究院・環境變遷研究中心

第二章
臺灣氣候變遷分析

王嘉琪
中國文化大學・大氣科學系

江　鈞
臺北市立大學・地球環境暨生物資源學系

李亭萱
中央氣象署

李清縢
中央氣象署

洪志誠
臺北市立大學・地球環境暨生物資源學系

涂建翊
國立彰化師範大學・地理學系

許晃雄
中央研究院・環境變遷研究中心

郭怡君
國立臺灣大學・海洋研究所

陳英婷
中央研究院・環境變遷研究中心

曾于恒
國立臺灣大學・海洋研究所

童裕翔
國家災害防救科技中心

黃婉如
國立臺灣師範大學・地球科學系

蔡宜君
中央研究院・環境變遷研究中心

羅資婷
中央氣象署

第三章
臺灣未來氣候變遷推估

陳正達
國立臺灣師範大學・地球科學系

王俊寓
國家災害防救科技中心

王嘉琪
中國文化大學・大氣科學系

杜佳穎
中央研究院・環境變遷研究中心

林思穎
國家災害防救科技中心

林修立
國立臺灣師範大學・地球科學系

許晃雄
中央研究院・環境變遷研究中心

郭怡君
國立臺灣大學・海洋研究所

陳昭安
國家災害防救科技中心

陳英婷
中央研究院・環境變遷研究中心

曾于恒
國立臺灣大學・海洋研究所

童裕翔
國家災害防救科技中心

黃婉如
國立臺灣師範大學・地球科學系

蔡宜君
中央研究院・環境變遷研究中心

鄭兆尊
國家災害防救科技中心

第四章
臺灣氣候變遷衝擊

4.1 水議題

李明旭
國立中央大學・水文與海洋科學研究所

游保杉
國立成功大學・水利及海洋工程學系

石棟鑫
國立陽明交通大學・土木工程學系

楊道昌
國立成功大學・水利及海洋工程學系

曾宏偉
國立成功大學・水利及海洋工程學系

劉子明
國家災害防救科技中心

蕭逸華
國家災害防救科技中心

林祺恒
國家災害防救科技中心

4.2 坡地

林銘郎
國立臺灣大學・土木工程學系

陳麒文
國立臺灣大學・地質科學系

朱芳儀
國家災害防救科技中心

4.3 海岸

陳偉柏
國家災害防救科技中心

張志新
國家災害防救科技中心

梁庭語
國家災害防救科技中心

4.4 糧食生產與安全

農業

姚銘輝
農業部農業試驗所

徐永衡
國家災害防救科技中心

劉雨蓁
國家災害防救科技中心

畜牧業

施意敏
農業部畜產試驗所北區分所・畜產輔導系

闕帝旺
國家災害防救科技中心

涂柏安
農業部畜產試驗所北區分所・畜產輔導系

養殖漁業

侯清賢
國立高雄科技大學・永續漁業發展研究中心
國立高雄科技大學・漁業科技與管理系

蔡至恒
國立高雄科技大學・漁業科技與管理系

盧柏溢
國立高雄科技大學・永續漁業發展研究中心

海洋漁業

陳佳香
農業部水產試驗所・海洋漁業組

張可揚
農業部水產試驗所・海洋漁業組

4.5 生態

陸域生態

林奐宇
國立宜蘭大學・森林暨自然資源學系

陳毓昀
國立東華大學・自然資源與環境學系

海域生態

陳郁凱
農業部水產試驗所

李明安
國立臺灣海洋大學・海洋資源與環境變遷博士學位學程

4.6 健康

陳保中
國家衛生研究院・國家環境醫學研究所
國立臺灣大學・公共衛生學院

王淑麗
國家衛生研究院・國家環境醫學研究所

吳威德
國家衛生研究院・國家環境醫學研究所

林靜君
國立臺灣大學・公共衛生學院

蔡宗霖
國家衛生研究院・國家環境醫學研究所

吳瑞軒
國家災害防救科技中心

4.7 城鄉空間

城鄉土地利用

詹士樑
國立臺北大學・不動產與城鄉環境學系

紀佳法
國家災害防救科技中心

都市熱島

林子平
國立成功大學・建築學系

尤思喻
國立成功大學・建築學系

王柳臻
國立成功大學・建築學系

第五章 氣候變遷風險評估與調適

李明旭
國立中央大學・水文與海洋科學研究所

詹士樑
國立臺北大學・不動產與城鄉環境學系

陳永明
國家災害防救科技中心

李欣輯
國家災害防救科技中心

紀佳法
國家災害防救科技中心

張珈瑋
國家災害防救科技中心

CONTENTS

編撰說明 I
作 者 群 III
執行摘要 1

第一章 全球與東亞氣候變遷 23

1.1 前言 25
1.2 溫度、降水 26
1.2.1 地表溫度觀測
1.2.2 地表溫度未來推估
1.2.3 降水量觀測
1.2.4 降水量未來推估
1.2.5 降水與蒸發量
1.3 海洋 42
1.3.1 海洋：海溫、海洋酸鹼度、海洋鹽度和海洋環流
1.3.2 冰雪圈：海冰、陸冰、冰川、永凍土、冰雪
1.3.3 海平面高度
1.4 極端天氣與氣候 55
1.4.1 極端溫度事件
1.4.2 極端降水
1.4.3 乾旱事件
1.4.4 風暴系統：熱帶氣旋、溫帶氣旋、劇烈對流風暴與大氣河
1.4.5 複合事件
1.5 全球與東亞季風活動特徵之變遷 79
1.5.1 全球季風活動氣候特徵與未來變遷
1.5.2 各季風區域季風降水特徵及未來變遷
1.5.3 東亞季風降水未來氣候變遷
1.5.4 全球鋒面頻率之氣候狀態及模擬
1.5.5 東亞鋒面
1.6 空氣品質 88
1.6.1 全球空氣品質的歷史變遷
1.6.2 氣候變遷對全球空氣品質的影響
1.6.3 COVID-19 對全球空氣品質的衝擊
1.6.4 COVID-19 對全球輻射強迫以及氣候的衝擊
參考文獻 94

第二章 臺灣氣候變遷分析 133

2.1 前言 135
2.2 溫度長期趨勢及變異 136
2.2.1 平均氣溫
2.2.2 最高氣溫
2.2.3 最低氣溫
2.2.4 氣溫日夜溫差
2.2.5 臺灣的季節變遷
2.3 降雨長期趨勢及變異 149
2.3.1 年降雨量
2.3.2 季節降雨變化
2.4 風速長期趨勢及變異 153
2.4.1 年平均風速
2.4.2 年最大風速
2.5 海溫及海平面變化 159

2.5.1 臺灣海峽
2.5.2 東海與西北太平洋
2.5.3 南海
2.5.4 海洋酸化
2.6 極端天氣與氣候 ····· 169
2.6.1 極端高、低溫
2.6.2 極端降雨、乾旱
2.6.3 寒潮
2.6.4 颱風
2.6.5 臺灣午後對流之過去變遷
2.6.6 梅雨
2.7 臺灣空氣品質變遷 ····· 193
2.7.1 空氣品質的歷史變遷
2.7.2 COVID-19 對臺灣空氣品質的影響
參考文獻 ····· 198

第三章 臺灣未來氣候變遷推估 205

3.1 前言 ····· 208
3.2 溫度 ····· 216
3.2.1 平均溫度變化
3.2.2 季節長度變化
3.3 降雨 ····· 222
3.3.1 年平均降雨
3.3.2 季節降雨變化
3.4 海平面高度推估 ····· 232
3.5 極端天氣與氣候推估 ····· 233
3.5.1 高溫、低溫
3.5.2 極端降雨、梅雨、午後對流
3.5.3 乾旱
3.5.4 颱風風雨未來推估
3.6 臺灣空氣品質之未來變化 ····· 259
3.6.1 臺灣空氣品質未來趨勢
參考文獻 ····· 262

第四章 臺灣氣候變遷衝擊 269

4.1 水議題 ····· 270
4.1.1 淹水
4.1.1.1 國內淹水災況研究
4.1.1.2 氣候變遷淹水衝擊評估
4.1.2 乾旱
4.1.3 水資源
4.1.3.1 水資源現況及趨勢
4.1.3.2 氣候變遷對水資源供給之影響
4.1.3.3 氣候變遷下地下水變化趨勢
4.1.4 水議題調適
4.1.4.1 淹水調適
4.1.4.2 乾旱及水資源調適
4.1.5 氣候變遷下的水議題調適科研缺口
4.1.5.1 資料面與研究量能

CONTENTS

4.1.5.2 預警機制及智慧管理調適
4.1.5.3 水議題長期發展方針
4.1.6 結語
參考文獻
4.2 坡地 ····· 308
4.2.1 前言
4.2.2 氣候變遷對坡地的影響及衝擊
4.2.3 調適方法
4.2.3.1 工程方法
4.2.3.2 環境友善的方法
4.2.3.3 利害關係人參與
4.2.4 坡地災害調適與缺口
4.2.4.1 科研面
4.2.4.2 治理面
4.2.4.3 思維面
4.2.5 結語
參考文獻
4.3 海岸 ····· 327
4.3.1 前言
4.3.2 海平面上升溢淹衝擊
4.3.2.1 臺灣海平面上升情境推估
4.3.2.2 海平面上升溢淹範圍推估方式
4.3.2.3 海平面上升溢淹範圍推估結果
4.3.3 颱風暴潮與巨浪衝擊
4.3.3.1 颱風暴潮與巨浪對海岸的影響
4.3.3.2 颱風暴潮偏差與巨浪的推估方式
4.3.3.3 颱風暴潮與巨浪衝擊分析
4.3.4 氣候變遷海岸調適與科研缺口
4.3.4.1 海岸調適案例
4.3.4.2 風險評估缺口
4.3.4.3 政策與治理缺口
4.3.5 結語
參考文獻
4.4 糧食生產與安全 ····· 349
4.4.1 農業
4.4.1.1 前言
4.4.1.2 臺灣糧食安全及農作物生產
4.4.1.3 氣候變遷調適與科技研發調適缺口
4.4.2 畜牧業
4.4.2.1 前言
4.4.2.2 畜產生產現況
4.4.2.3 氣候變遷下對畜牧產量之影響
4.4.2.4 氣候變遷風險評估與調適科技研發缺口
4.4.3 漁業
4.4.3.1 前言
4.4.3.2 養殖漁業
4.4.3.3 海洋漁業
4.4.4 結語
參考文獻
4.5 生態 ····· 409
4.5.1 陸域生態
4.5.1.1 臺灣的陸域生態與生物多樣性
4.5.1.2 氣候變遷對陸域生態系的衝擊
4.5.1.3 氣候變遷調適與科研缺口
4.5.2 海域生態
4.5.2.1 國內外有關氣候變遷對海域生態衝擊的研究
4.5.2.2 我國近年有關海洋生態保育之各種調適作為
4.5.2.3 海洋生態與氣候變遷之科研缺口
4.5.3 結語

參考文獻
4.6 健康 ····· 457
4.6.1 氣候變遷影響人體健康之氣候特徵與途徑
4.6.2 氣候變遷對人體健康之衝擊評估
4.6.2.1 心血管疾病
4.6.2.2 傳染性疾病
4.6.2.3 過敏性呼吸系統疾病及慢性阻塞性肺病
4.6.2.4 心理健康
4.6.3 氣候變遷與健康調適
4.6.4 氣候變遷健康調適科研缺口
4.6.5 結語
參考文獻
4.7 城鄉空間 ····· 489
4.7.1 城鄉土地利用
4.7.1.1 都市地區
4.7.1.2 鄉村地區
4.7.1.3 國土保育地區及海洋資源地區衝擊評估
4.7.1.4 科研與調適缺口
4.7.2 都市熱島
4.7.2.1 都市熱島研究與衝擊
4.7.2.2 臺灣都市熱島現況
4.7.2.3 都市熱島與能源使用
4.7.2.4 都市熱島與人體熱舒適
4.7.2.5 未來情境對都市熱島的影響
4.7.2.6 都市熱島調適及科學缺口
4.7.3 結語
參考文獻

第五章 氣候變遷風險評估與調適 527

5.1 氣候變遷風險及調適 ····· 529
5.1.1 氣候變遷風險定義
5.1.2 氣候變遷調適定義
5.1.3 國內外氣候變遷調適架構
5.1.4 國家氣候變遷調適架構
5.2 科研缺口與展望 ····· 541
5.2.1 科研面
5.2.2 治理面
5.3 結語 ····· 563
參考文獻 ····· 565

附錄：專有名詞 / 詞彙表 ····· 581



國家氣候變遷科學報告2024
執行摘要

第一章　全球與東亞氣候變遷

1. 自1850年以來的觀測紀錄顯示明確的全球暖化趨勢，且近年來暖化趨勢急遽增強：2001年至2020年全球表面溫度相較1850年至1900年高出0.99°C (0.84°C至1.10°C)；2012年以來，全球地表溫度大幅上升，2016年至2020年是1850年至2020年之間最熱的五年。全球各地增溫幅度不一，陸地高於海洋，極區增溫比中低緯度顯著，尤其是北半球高緯度地區特別明顯。(圖1.2.1；圖1.2.2；1.2.1節)

2. 氣候歸因模擬探討近百年來全球暖化的原因，發現 20世紀後期的暖化主要導因於人為排放過多溫室氣體，自然驅動因素的影響相對不顯著。(圖1.2.1；1.2.1節)

3. 不同溫室氣體排放情境 (SSP) 模擬推估顯示，全球表面溫度都將持續增溫至少至21世紀中葉。21世紀末，低排放情境SSP1-1.9的全球地表平均溫度上升約1.0°C至1.8°C，高排放情境SSP5-8.5則可能高達3.3°C至5.7°C。SSP5-8.5 情境下，增溫超過2°C極可能在2041年至2060年期間發生。其餘情境推估顯示，全球地表升溫超過1.5°C將在2030年代初期實現。不同情境模擬均顯示，北半球暖化程度高於南半球、陸地升溫趨勢大於海洋且高緯度趨勢大於中低緯度的特性。(圖1.2.3；圖1.2.4；1.2.2節)

4. 自 1950 年代以來，全球大多數區域的極端高溫事件的強度和發生頻率增加，而極端低溫的強度和發生頻率則減少。人為活動造成的溫室氣體增加是這些極端高低溫度事件增減的主要驅動因素。未來全球大多數地區與陸地地區的極端高溫與熱浪事件將更為頻繁且持續。(1.4.1節)

5. 1950年以來的觀測紀錄顯示，整體而言，陸地降水量有些微增加的趨勢，但不同地區呈現不同降水趨勢。熱帶地區、非洲北部、部份歐洲與中亞以及海洋大陸在1980年至2019年間降水增加，南美洲中部、北美西部、北非以及中東則呈現減少的趨勢。(1.2.3節)

6. 模式推估全球平均降水量將隨溫室氣體排放程度增強而增加，陸地降水增加比全球或海洋區域更為明顯。全球每增溫1°C，全球平均降雨量可能增加2%至3%。

相對於21世紀末，短期 (2021年至2040年) 降水變化推估的不確定性較高，並且不同排放情境之間的降水變化差異不顯著。造成不確定性的來源，可以分為以下幾類：氣候系統的自然變異、氣候模式、以及自然與人為氣膠的影響。北半球溫帶區域的降水變化率比全球陸地平均的變化率更為顯著。(圖1.2.5；1.2.3節；1.2.4節)

7. 自1950年代以來，較完整的陸地觀測資料顯示，已經可以偵測到強降雨事件的頻率、強度與降雨量增加的訊號，並且大部分觀測到的增加訊號可以歸因為人為因素導致。暖化情境下，每增溫1°C，極端降雨事件頻率與強度增加約7%。未來推估顯示，隨著全球暖化程度升高，幾乎所有陸地地區的極端降水都可能增加，較罕見的極端事件具有更高的增加比例。(圖 1.4.4；1.4.2節)

8. 氣象乾旱事件的過去趨勢，現有證據有限且區域趨勢估計不一致，不確定性較高。隨著全球暖化加劇，區域的乾旱頻率、強度與造成災害的機率都將成比例增加，更頻繁與嚴重的氣象乾旱範圍也跟著擴大。(圖 1.4.7；圖 1.4.11；1.4.3節)

9. 過去觀測紀錄顯示，全球3級至5級熱帶氣旋所佔比例與快速增強事件的頻率普遍呈現增加趨勢，西北太平洋熱帶氣旋活動有往高緯度遷移的跡象。未來推估顯示熱帶氣旋的降雨量與強度、強熱帶氣旋比例都會隨著暖化程度增強而增加。21世紀末，西北太平洋颱風生成數量減少且生命期縮短，並呈現向極區遷移的趨勢，颱風的最大風速與降雨都將增強。(圖 1.4.9；1.4.4節)

10. 結合多重極端災害的複合事件，在暖化的未來可能更加頻繁或嚴重。多數地區的複合事件極可能變得更加頻繁和強烈。(1.4.5節)

11. 歷史資料顯示全球大多數海域的海表面溫度呈現上升趨勢，以北半球高緯度地區最為明顯。自1850年以來，全球平均上升0.88°C，其中有0.60°C的升溫是發生於1980年之後。氣候模式推估世紀末全球海溫上升趨勢有極高的可信度，在SSP1-2.6平均增加0.86°C，SSP5-8.5則增加2.89°C。海溫持續暖化也將促使海洋極端事件，例如海洋熱浪與海洋層化效應，更容易發生。(圖 1.3.1；圖 1.3.3；1.3.1節)

12.觀測顯示自1950年起，全球海洋pH值逐漸降低，酸化趨勢明顯，並且在各種排放情境推估，酸化趨勢隨著暖化程度增加將更為明顯。暖化造成的海水酸化將進一步影響海水對於二氧化碳吸收的程度，降低海洋的碳匯功能。(圖 1.3.1；1.3.1節)

13.由觀測證據顯示，大西洋經向翻轉環流是否呈現減弱趨勢，以及其趨勢是自然變異或受人為作用影響，尚未有定論。然而，在暖化情境的未來推估，大西洋經向翻轉環流皆呈現明確減弱趨勢。從1955年至2010年期間的水文資料顯示，黑潮在過去大致呈現加速趨勢且有離岸偏移趨勢，且在夏季較為顯著。(圖 1.3.6；圖 1.3.7；1.3.1節)

14.目前海冰觀測顯示，北極海冰減少最為顯著，尤其在9月海冰開始形成的時節；南極的海冰減少較不顯著，但這幾年的觀測顯示南極海冰快速減少。在所有排放情境推估的暖化情境，南北極海冰皆呈現顯著減少趨勢。在最高排放情境 (SSP5-8.5)，北冰洋9月海冰預計在2050年左右可能完全消失，在低排放情境SSP1-2.6與SSP1-1.9，世紀末北冰洋海冰則仍不會完全消失。(圖 1.3.8；圖 1.3.1b；1.3.2節)

15.觀測紀錄顯示，格陵蘭島與南極大陸的兩個全球主要陸冰冰層，皆呈現隨著時間加速減少的趨勢，進而造成全球海平面上升；冰川質量與北半球春雪覆蓋面積的長期觀測也呈現減少趨勢，然而在部分區域，例如北美和西伯利亞等地，積雪覆蓋面積反而有所增加；永凍土溫度在過去觀測紀錄呈現增溫趨勢。(圖 1.3.8；圖 1.3.9；1.3.2節)

16.依據所有排放情境推估，格陵蘭冰層和南極冰層在本世紀都將持續減少，並且幾乎肯定冰川體積、地表永凍土體積與北半球季節性積雪覆蓋面積也將減少。(1.3.2節)

17.海平面的高度在過去80萬年中呈現了顯著的波動，然而自19世紀中葉以來，全球平均海平面上升速率明顯加快，高於過去兩千年的平均速率。過去100年間的海平面上升速度，高於過去三千年中的任何一個世紀，且在最近20多年速率更

是明顯加快。人類活動造成的暖化，導致海水熱膨脹，是海平面上升的主因。在暖化情境推估，海平面高度上升將隨著暖化情境加強而加劇。至21世紀末，海平面高度將上升0.38公尺 (SSP1-1.9) 到0.77公尺 (SSP5-8.5)。在暖化情境下，海水的熱膨脹仍是海平面上升的最主要因素。在2100年之後，深海持續吸收熱量以及格陵蘭和南極冰原持續融化，全球平均海平面將持續上升 (圖 1.3.9；圖 1.3.1e；1.3.3節)。

18.自1900年以來的觀測紀錄顯示，北半球季風環流與降雨量呈現多年代際變化。自1980年以來，北半球季風呈現雨量增加及夏季延長的特徵。南半球季風活動受較強烈的年際變化及區域差異影響，在觀測資料中並無顯著長期變化趨勢。整體而言，全球季風受明顯的年際與年代際變化，以及區域間差異影響，無顯著的整體變化趨勢。(圖 1.5.2；1.5.1節)

19.在未來情境推估中，全球季風降雨可能增強，然而季風環流卻會相對減弱，主要原因是水氣增加。空間分布上，季風降雨增加具明顯南北向不對稱性，北半球增加幅度大於南半球，亞洲及非洲季風將增強，北美季風則減弱。(圖 1.5.3；1.5.2節)

20.北半球的南亞與東亞區域，人為活動造成的氣膠排放作用不利季風降水，然而未來推估則受溫室氣體增加所主導，各區域的季風降雨量均呈現上升趨勢。(圖 1.5.3；圖 1.5.4；1.5.2節)

21.季風活動的未來推估顯示，東亞地區由於季風肇始提前及夏季延長，季風降雨增強，主要貢獻來自梅雨雨帶的增強；區域上以東南亞和中國南部最為明顯。季風降水在所有未來情境推估中均為增加，且模擬時間越長、排放情境越嚴重，增加越多。然而受到氣膠排放、人為作用與氣候內部變異等因素影響，模式對季風降水的推估仍具相當程度的不確定性。 東亞季風降水增加具高度信心 (High confidence)，季風季節增長的信心度則為中等 (medium confidence)。(1.5.3節)

22.根據高排放情境 (RCP8.5) 推估，整體而言，全球鋒面頻率高值區有往較高緯區

域移動的趨勢。東亞鋒面的未來推估 (RCP8.5，2071年至2100年) 顯示冬季極鋒區與副熱帶的鋒面頻率略為下降；在黃河到長江之間，朝鮮半島、日本及日本東部海面的鋒面頻率則略為增加。北緯20°以南在菲律賓、臺灣東方外海上鋒面活動有明顯增加趨勢。春季則於北緯30°至北緯40°之間有明顯鋒面頻率增加，尤其是長江以北的中國沿海及日本。北緯20°至北緯30°之間鋒面頻率減少，尤其是華南地區到臺灣一帶。整體來說，鋒面極值區有往北移動的趨勢。(圖 1.5.6；1.5.4節；1.5.5節)

23.從1850年到1970年代，氣膠及其前驅物濃度呈現上升的趨勢，污染物排放、濃度及生命期等變化對氣候造成冷卻的效果，可部分抵銷溫室氣體造成的暖化。1970年代中期以後，各國開始關注及控制污染物排放，改善空氣品質，氣膠及其前驅物造成的淨輻射冷卻作用減弱，地球降溫的效果也隨之減弱。2010年至2019年間，全球一氧化碳濃度持續下降；二氧化硫及二氧化氮在北美、歐洲呈現持續下降趨勢，在南亞反而上升趨勢，東亞地區則是增加後下降的情況；值得注意的是臭氧，除了在美西及歐洲有下降趨勢，其他地區都是上升趨勢。(圖 1.6.1；1.6.1節)

24.全球暖化加速消耗臭氧，低污染地區地表臭氧減少，但污染反而更嚴重。在高排放情境 (RCP8.5) 情境下，全球暖化造成2100年平均氣膠濃度約增加0.21 mg m^{-3}。在全球暖化的情況下，熱浪頻率增加導致高污染臭氧或氣膠增加。亞洲地區的冬季是高污染好發季節，全球暖化導致亞洲地區大尺度環流改變，包括北極振盪指數增加、冬季季風減弱等，亞洲冬季將更容易發生高污染事件。(1.6.2節)

第二章　臺灣氣候變遷分析

1. 臺灣各測站溫度的長期變化趨勢一致，有逐年暖化的情況並具有年代際尺度的低頻振盪訊號，增溫趨勢越靠近現代越明顯。以百年測站而言，平均升溫趨勢由每10年約0.15°C增加至0.27°C，夏半年則由0.15°C增加至0.32°C。冬半年由0.15°C增加至0.29°C (近50年趨勢)，近30年的冬半年增溫趨勢則趨緩 (未通過顯著性檢定)。(圖2.2.1；2.2.1節)

2. 臺灣各測站溫度顯示冬半年增溫趨勢較夏半年明顯，日最低溫的增溫趨勢亦較日最高溫增溫明顯，是日夜溫差縮小的主要原因。(圖2.2.2；圖2.2.3；圖2.2.4；2.2.2節；2.2.3節；2.2.4節)

3. 根據百年測站資料分析，夏季提早開始、延後結束，最高溫日期提早，最高氣溫升高。冬季延後開始、提早結束。最低溫日期延後，最低氣溫升高。整體來說，近50年來每10年夏季延長約6.31天至12.88天；冬季縮短約6.19天至12.20天。(圖2.2.5；表2.2.1；2.2.5節)

4. 臺灣各測站資料顯示，年總雨量及季節雨量有明顯的年際及年代際振盪，但沒有長期變化趨勢，且趨勢變化普遍未通過顯著性檢定。(2.3節)

5. 臺灣各測站資料顯示，年平均風速、最大風速及季節平均最大風速皆呈現減弱的趨勢，亦有年代際尺度的低頻振盪訊號。(2.4節)

6. 根據潮位站及衛星資料，臺灣海峽海域的海溫增加 (1957年至2016年間，年平均海溫增溫趨勢為每10年0.23°C)。海平面上升趨勢 (1993年至2015年平均值約為每年增加2.2 ± 0.3毫米) 略低於全球平均 (每年增加3.2 ± 0.1毫米)。(2.5節)

7. 測站資料顯示極端溫度的變化趨勢為高溫天數增加，低溫天數減少。(圖2.6.1；2.6.1節)

8. 極端降雨日數 (R80mm、R200mm與R350mm) 的變化各地沒有一致性，亦沒有

顯著的長期變化趨勢。僅山區的年際變化幅度在2000年後較大。(2.6.2節)

9. 根據百年測站資料分析，冬季寒潮發生的頻率和低溫持續日數皆顯著的下降。以臺北為例，近50年每年寒潮發生次數減少約3.8次，低溫日數減少約14.5天。(圖2.6.6；2.6.3節)

10.使用測站資料計算之年最大連續不降雨日及標準化降雨指數 (SPI12) 沒有長期變化趨勢，但中、南部測站的年際變化幅度較大、且在1960年後臺南、恆春及臺東站的氣象乾旱事件發生頻率明顯增多。(2.6.2節)

11.統計氣象乾旱事件的發生頻率，發現具有明顯區域特性及低頻振盪特徵，造成雨量偏低的原因皆與大尺度環流條件相關。(2.6.2節)

12.影響臺灣的颱風個數及強烈颱風個數，長期變化趨勢不明顯，且呈現年代際變化特徵。(圖2.6.7；圖2.6.8；2.6.4節)

13.颱風路徑的變化受到大尺度環流影響，與全球溫度上升的關聯性不顯著。(2.6.4節)

14.北部地區夏季 (6月至8月) 午後對流發生頻率及降雨強度有增加的趨勢，山區則減少，中南部平地為發生頻率降低但降雨強度增加。(圖2.6.10；2.6.5節)

15.梅雨季的雨量長期趨勢、雨日降雨強度及極端降雨強度 (PR90) 在5月分皆有增加的趨勢，6月分則沒有明顯變化趨勢。(2.6.5節)

16.梅雨季午後對流發生頻率及降雨強度皆有增加的趨勢。(2.6.5節)

17.根據觀測資料，臺灣從1990年代後，各類污染物平均濃度呈現下降趨勢 (圖2.7.1；2.7節)。但是人為活動產生的硝酸鹽有增加的趨勢 (圖2.7.2；2.7節)。

第三章　臺灣未來氣候變遷推估

1. 未來的臺灣氣候變遷推估主要是應用CMIP6模擬資料的統計降尺度結果，以基期 (1995年至2014年) 氣候值為基準，進行短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年) 與長期 (2081年至2100年) 這3個20年氣候時段評估。在四種SSP情境下平均溫度的變化，臺灣在短期平均增溫0.6°C至0.8°C。在世紀末，不同情境出現明顯差別，從SSP1-2.6增溫1°C，至SSP5-8.5增溫3.4°C，且升溫較顯著的區域皆為臺灣西北部。(圖3.2.1；3.2.1節)

2. 以全球暖化程度 (Global Warming Level, GWL) 評估臺灣增溫幅度，GWL 1.5°C至GWL 4°C增溫的中位數介於0.6°C至2.7°C。(圖3.2.3；3.2.1節)

3. 未來溫度季節長度變化的推估方面，在SSP5-8.5情境下，本世紀末夏季持續變長，超過210天，冬季持續變短，少於30天；惟有在SSP1-2.6情境下，夏季與冬季的長度能維持在世紀中的情況，分別為150天及45天左右。(圖3.2.5；3.2.1節)

4. 臺灣的降雨量推估，年平均降雨在短期與中期的增加幅度較小，於世紀末增加較多。在SSP5-8.5情境下，世紀末時，平均增加約15%，但多模式的降雨變化率分布範圍介於-6%至+83%，顯示推估結果的不確定性高且一致性低。空間上的分布結果也呈現低一致性。惟有在SSP5-8.5情境下的世紀末，西南部降雨有較大增加率 (+10%) 且具一致性。(圖3.3.2；3.3.1節)

5. 降雨季節分布推估結果顯示，臺灣未來的乾季 (11月至4月) 將越來越乾，濕季 (5月至10月) 將越來越濕，乾濕對比將隨全球暖化程度增加而更加嚴重。(圖3.3.4；圖3.3.5；3.3.2節)

6. GWL 3°C及GWL 4°C情境，乾季降雨減少約10%至15%，主要在東北部及東半部地區，且模式一致性較高。濕季降雨增加幅度，在GWL 3°C時將小幅增加5%至15%。但在GWL 4°C時，中南部沿海、臺東及澎湖區域可增加超過30% (模式一致性高)。(圖3.3.6；3.3.2節)

7. 臺灣周遭海平面高度推估方面，在SSP1-2.6、SSP2-4.5及SSP5-8.5情境下，基隆及高雄兩個位置的模式推估範圍中位數分別介於0.48米至0.82米與0.41米至0.78米。(3.4節)

8. 海平面高度同時受到溫度、鹽度變化伴隨密度改變以及與極區冰川融化及河川逕流流入等物理過程影響。同時冰原模擬過程的潛在不確定因子，使模式推估趨勢低一致性、不確定性較高。臺灣南北海平面變化的差異受到區域性洋流及海水熱結構的影響，仍需藉高解析度數值模式產製動力降尺度資料瞭解其細節。(3.4節)

9. 根據少數高解析度大氣模式推估結果顯示，相對於基期，21世紀中末期，影響臺灣颱風個數將分別減少約10%與50%；周遭強颱出現的頻率則是增加約105%與60%；影響期間颱風最強時的近颱風中心最大風速增加約5%與9%；臺灣陸地上颱風降雨強度普遍增加20%與40%。受降雨強度增加但是颱風頻率減少的因素下，臺灣陸地上颱風降雨累積在世紀中稍有增加、世紀末則是減少約10%至50%。(圖3.5.24；3.5.4節)

10. 極端氣候未來推估的部分，與乾旱有關的年最大連續不降雨日數呈現增加趨勢，在世紀末隨著暖化情境加劇，增加趨勢更為明顯，且南部的增加情況比北部更嚴重。(圖3.5.18；3.5.3節)

11. 標準化降雨指數則顯示，世紀末隨著暖化情境加劇，全臺乾旱事件越來越多，短時間尺度乾旱事件 (SPI3) 發生時的強度及頻率會增強。(圖3.5.23；3.5.3節)

12. 推估未來春季為少雨趨勢，其可能原因與提供水氣的低層西南風減弱以及東亞鋒面帶北移有關。(3.5.3節)

13. 極端高溫 (日高溫超過36°C天數)，在4種全球暖化程度 (GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C、GWL 4°C)，分別增加5.4天、10.6天、28天與54.5天。 若以最劣SSP5-8.5情境的推估，本世紀末平均增加74.6天。增加天數較多的區域包括臺北盆地、中部近山區與高屏近山區。(圖3.5.1；3.5.1節)

14.極端低溫變化趨勢在所有暖化情境皆呈現天數減少。在4種GWL下，平均每年分別減少4.1天、6.6天、8.8天與10天。由於位處副熱帶的臺灣受寒潮爆發影響的機率較小，導致多模式推估趨勢的一致性低、不確定高。(圖3.5.7；3.5.1節)

15.日最低溫最小值的上升趨勢具有高模式一致性。在4種GWL下，溫度增加介於0.7°C至3°C，增溫幅度較高的區域為西部 (GWL 4°C情境)。(圖3.5.9；3.5.1節)

16.高暖化情境 (RCP8.5) 下的21世紀末，夏季增溫導致大氣垂直穩定度增加，不利於午後對流發生，使得午後對流的降雨頻率變少，但水汽蒸發散量增加降雨強度將增強。(圖3.5.10；3.5.2節)

17.高暖化情境 (RCP8.5) 下的21世紀末梅雨季，臺灣西半部迎風面的極端降雨事件天數及強度皆為增加，在東部地區則皆是減少。(圖3.5.11；3.5.2節)

18.在SSP3-7.0情境的21世紀中後期 (2060年之後)，梅雨季降雨量從6月中旬延遲至6月下旬發生，降雨強度增強。這與南海地區西南風增強的時間往後延遲，傳輸至下游的臺灣產生劇烈降雨時間往後遞延有關。(圖3.5.12；3.5.2節)

19.隨著全球暖化程度的加劇，未來推估年最大一日降雨量 (Rx1day) 降雨強度將增加，特別是在SSP5-8.5情境下，中部地區的增加幅度可能達40%。(圖3.5.14；3.5.2節)

20.水文頻率分析顯示降雨量隨著暖化嚴重程度增加，目前每50年才發生一次的降雨強度，於暖化程度達4°C時就會變成10年發生一次，極端降雨對臺灣的影響日益嚴重。(圖3.5.17；3.5.2節)

21.推估未來臺灣秋冬季的氣候條件將使空氣品質更為惡化。主要是因為低層風速變弱、穩定度增加、邊界層變淺不利於污染物傳送與擴散，以及東北季風日數減少。(3.6.1節)

22.大氣的增溫加速臭氧光化反應，導致臭氧濃度增加。目前臺灣空氣品質不良主要來自$PM_{2.5}$與臭氧，但未來臭氧造成空氣品質不良的狀況可能會更頻繁發生，後續的影響值得進一步研究。(圖3.6.1；3.6.1節)

第四章　臺灣氣候變遷衝擊

4.1　水議題

1. 依據AR5 RCP8.5情境下氣候變遷淹水衝擊模擬成果顯示，基期至世紀中、世紀末可能發生淹水的範圍普遍呈現增加趨勢，其中大約14%的鄉鎮處於較高的洪水風險，而3%鄉鎮淹水情勢將在氣候變遷下更為嚴峻。這些地區需要及早規劃防洪措施和防洪策略，以降低洪水風險。(4.1.1節)

2. 依據未來枯水期降雨的研究 (AR6 SSP2-4.5、SSP5-8.5及GWL 2°C情境)，未來北區、中區、南區之連續不降雨日數皆有一致延長情況，在GWL 2°C 情境下分別為+16.9%、+11.1%及+13.7%，且大部分月分水源潛能量 (Q85) 有減少趨勢，在最為嚴峻情況下其河川水量低流量減少幅度約介於-18.2%至-49.5%之間；另外，發生「梅雨延遲」及「颱風降雨延遲」的可能性有增加趨勢 (AR5 RCP4.5情境)，亦即未來極端水文情況將更加頻繁發生。(4.1.2節；圖4.1.2.1；圖4.1.2.2；圖4.1.2.3；圖4.1.2.4；圖4.1.2.5)

3. 依據AR5 (RCP4.5世紀中、RCP8.5世紀中) 及AR6 (GWL 2°C及GWL 4°C) 情境下臺灣北區、中區、南區及東區水資源之綜整分析，年雨量的增加幅度從+1%至+16%，年流量幅度從-1%至+27%；豐水期間，雨量改變幅度從+1%至+9%，流量從-2%至+31%；而枯水期間之雨量呈減少趨勢，變化量從-2%至-12%，流量幅度從-13%至+12%。此種豐枯季水量分布不均之情況，將對未來水資源之供給帶來更多的挑戰。(4.1.3節；圖4.1.3.2；圖4.1.3.3；表4.1.3.2；表4.1.3.3)

4. 現況供水量在AR5的RCP8.5情境下，北部可能減少3.3%至6.0%、中部可能減少3.9%至4.3%、南部可能減少2.7%，東部則可能有枯旱及高濁度期間供水不穩定問題。地下水以AR4的A1B情境正負一倍標準差作為未來推估結果，地下水九分區可能減少比例介於-19.6%至-54.6%，或增加比例介於+20.9%至+48.1%。 (4.1.3節)

5. 水議題涵蓋多個權責單位，未來在氣候變遷的調適策略上需要以跨部會合作或統合管理方式來進行，盤點實際用水量並妥善分配調適能量，以科學資料作為循證基礎輔佐國家水資源戰略訂定，使各調適選項可發揮最大之共效益，確保水資源

利用效益的最大化，以降低氣候變遷對水領域之衝擊。(4.1.6節)

4.2 坡地

1. 在AR5 RCP8.5情境下，北部地區基期平均崩塌率為0.16%至0.47%，21世紀末則為0.23%至0.77%，顯示未來氣候變遷對北部地區坡地衝擊有加劇趨勢。(4.2.2節)

2. 在AR5 RCP8.5情境下，中部地區基期平均崩塌率為1.3%至3%，21世紀末則為1.4%至4%，整體土砂衝擊具提升趨勢。(4.2.2節)

3. 南部地區基期平均崩塌率1.7%至2.9%，在21世紀中增加至3.2%，21世紀末則下降到1.3%。(4.2.2節)

4. AR6全球暖化程度2°C情境下，中南部山區維持高風險等級，北部與東部山區風險等級提高；4°C情境下，部分山區風險等級明顯加重。(4.2.2節)

4.3 海岸

1. 依據IPCC AR6全球暖化程度1.5°C與2.0°C的推估結果，臺灣海平面上升的程度分別為20公分和34.5公分。(4.3.2節)

2. 在全球暖化程度2.0°C下，臺灣因海平面上升造成的海岸溢淹範圍較全球暖化程度1.5°C更加深入內陸，且淹水深度更深。1.5°C各縣市淹沒面積百分比為0.08%至2.71%；2.0°C各縣市淹沒面積百分比增至0.30%至4.30%，兩種情境皆以雲林縣淹沒面積百分比最高。在全球暖化程度1.5°C情境下，沿海地區海岸溢淹深度超過1.5公尺的縣市包含新北市、彰化縣、雲林縣、嘉義縣及臺東縣；在全球暖化程度2.0°C情境下，沿海地區海岸溢淹深度超過1.5公尺的縣市除了上述縣市，增加桃園市、新竹縣市、臺南市、高雄市與花蓮縣。(4.3.2節)

3. 在AR5 RCP8.5情境下，未來臺灣沿海地區面臨大於1.2公尺颱風風暴潮衝擊之海岸線長度將增加12.5%；而面臨大於12.0公尺颱風風浪衝擊之海岸線長度將增加3.6%。(4.3.3節)

4.4 糧食安全

1. 臺灣以熱量計算之糧食自給率的變化，由43%下降至31%。(4.4.1.2.1節)

2. 依據國外Peng et al. (2004) 研究指出氣候暖化可能會造成亞洲主要水稻產區 10%至15%的產量損失，尤其在旱季夜間溫度升高1°C則減產10%，白天溫度升高在28°C至34°C之間，每升高1°C則產量下降高達7%至8%。(4.4.1.2.2節)

3. 依據國科會TCCIP團隊利用作物生長模式 (DSSAT) 之分析，未來水稻在世紀中及世紀末產量整體呈趨勢下降，平均分別減少13%及18%。(4.4.1.2.2節)

4. 在AR5 RCP8.5情境下，世紀中及世紀末之玉米產量改變率分別減少10%及17%，影響區域仍以北部及東部地區最為明顯。(4.4.1.2.2節)

5. 依據AR5 RCP8.5全球暖化程度2°C及4°C下之溫濕度指數的變化，畜禽熱緊迫(THI≧72) 的紅色警戒區域，逐漸由南往北、從平原往淺山擴展。(4.4.2節)

6. 2010年後，沿海地區的高溫危害發生事件數開始增加，並對養殖漁業生產造成養殖物種合適度改變、養殖期混亂、作業不確定性提升、突發性暴斃死亡、水質穩定度降低、作業成本增加、魚病發生率提升等生產面向的問題。 (4.4.3.2.3節)

7. 使用統計降尺度網格日溫度資料，結合我國水產養殖漁產業常見連續性低溫與高溫災害事件指標，分析AR6之全球暖化程度 (+1.5°C與+2°C)，並計算相對於基期(1976年至2005年) 之極端溫度事件改變量 (次)。相較於基期，全球暖化情境下彰化沿海地區的低溫事件發生次數減少；反之，高溫危害與暴露變化則持續加劇。(4.4.3.2.5節)

8. 依據2014年至2019年間資料，烏魚主要漁獲位置有逐漸北移的趨勢，漁場環境位置有受到氣候變遷的影響。(4.4.3.3.1節)

9. 水試所研究預測環境變化之影響，每當海水溫度上升攝氏1度，劍尖槍鎖管之漁獲量將會下降15%，影響的產值可能銳減達兩億元。(4.4.3.3.1節)

10.櫻花蝦為臺灣西南海域重要漁獲物種，生命週期短，其豐度容易受到環境變動的影響。適合生存的水溫大約為11°C至25°C，水溫是影響櫻花蝦繁殖行為最重要的因素。分析2005年至2019年資料 (戴靖萱等，2020)，東港櫻花蝦產量呈下降趨勢，此結果與海洋環境的變化形成蝦群分布的改變有一定程度之影響。(4.4.3.3.1節)

4.5 生態

1. 依照國家植群多樣性調查的分類結果，可將臺灣森林細分為21種類型，除了7類型森林的形成與地形有關，分布面積狹小，多限縮在珊瑚礁岩、河灘、石灰岩地、火災跡地、崩塌地等局部地區；其餘14類森林的分布面積較為廣泛，且其分布與氣溫與雨量梯度有顯著相關，可作為區域氣候下的代表性植群 (Li et al., 2013)。(4.5.1.1節)

2. 王文千 (2019) 對83種臺灣繁殖鳥類進行氣候變遷脆弱性評估，結果指出，有41種鳥類具有氣候變遷高暴露度；對溫度及雨量較敏感的鳥類則分別有16種及22種；綜合食性、孵育幼鳥等特性後，有46種鳥類因應氣候變遷衝擊的能力較低。(4.5.1.2節)

3. 氣候變遷亦可能導致高海拔特有種生物之棲地嚴重縮減，並造成其族群降低。以高海拔特有種信義熊蜂為例 (Lu & Huang, 2023)，因信義熊蜂喜好針葉林及草原植被，不喜闊葉林、混淆林、農田及開發區。在AR5 RCP2.6至RCP8.5情境下，由於林相改變造成其適存棲地將縮減41%至87%不等，南部山區於世紀末將無適棲之處。(4.5.1.2節)

4. 依據AR4的15種未來情境資料針對臺灣冷杉與鐵杉在2020年至2039年期間的適生研究 (Lin et al., 2014)，將近一半情境指出臺灣冷杉與鐵杉的適生範圍將顯著向高海拔移動，適生面積將逐漸減少。(4.5.1.2節)

5. 依據RCP4.5及RCP8.5針對水青岡的模擬 (Lin, 2020)，得知2100年適生面積為現生之7.10%或0.87%，研究發現水青岡森林缺乏向高海拔退縮路徑，而呈現就地縮小、滅絕之趨勢。(4.5.1.2節)

6. 未來氣候變遷使低溫環境範圍變狹窄，可能使埋葬蟲與麗蠅的競爭模式單一化，對埋葬蟲較有利的競爭形式可能不復存，進而限縮其分布或造成族群縮小。(4.5.1.2節)

7. 氣候變遷仍持續發展中，以臺灣海峽為例，自2012年起暖化停滯伴隨的海表增溫停滯現象已逐漸被快速增溫取代，增溫的幅度約為0.63°C decade^{-1} (Lee et al., 2021)，而海水暖化可能導致水溫垂直和水平分布型態改變，亦迫使棲息其中的生物發生適應上的改變。(4.5.2.1節)

8. 依據 McRae et al. (2022) 研究，珊瑚能夠承受超過季均溫以上的水溫緩慢上升，但若水溫短期內超過其夏季平均最高水溫2°C以上，則會白化。但珊瑚若處於短期快速地升溫狀態 (連續8天達32°C)，則有50%至100%的珊瑚會白化。(4.5.2.1節)

9. Lee et. al. (2022) 的研究亦指出，鯖鰺魚類、鎖管、帶魚屬、鬼頭刀等主要沿近海漁業資源的總量變化與北太平洋環流振盪 (North Pacific Gyre Oscillation, NPGO) 指數呈正相關，並預測在RCP8.5的情境下，2035年臺灣沿近海總漁獲量預估將下降2.41%。(4.5.2.1節)

4.6 健康

1. 氣候危害事件發生時，會經由影響特定傳播類型導致特定病原體疾病傳播度惡化 (如氣溫升高情境下，透過影響蚊蟲傳播進而造成登革熱或屈公病等蟲媒性傳染病傳播強度及廣度提升之情形發生) (圖4.6.2.1)，這說明氣候危害事件發生時，會經由影響特定傳播類型導致特定病原體疾病傳播度惡化 (Mora et al., 2022)。(4.6.2.2節)

2. 水患事件也可能間接提高水媒疾病染病風險，除人體接觸污染的地表水、洪水、動物排泄物外 (Suk et al., 2020)，若災民因避災而與齧齒類動物共存於避災區，也可能提高感染鉤端螺旋體風險 (Watson et al., 2007)。另外，當颱風季節降雨量每日超過80mm時，志賀桿菌病罹病率也顯著增加為原來兩倍 (Chen et al., 2022)。(4.6.2.2節)

3. 相較夏季平均溫度的環境，由熱浪導致的慢性肺病死亡風險約提高為1.8%至8.2%之間 (Witt et al., 2015)；當室內溫度升高至平均溫度以上，將容易導致中度至重度慢性阻塞性肺病 (Chronic Obstructive Pulmonary Disease, COPD) 的患者發生呼吸困難、咳嗽和咳痰惡化 (McCormack et al., 2016)。(4.6.2.3節)

4. 國內空氣污染物質與呼吸系統疾病相關性研究結果指出，空氣污染加劇將造成過敏性結膜炎 (Allergic Conjunctivitis, AC) 和過敏性鼻炎 (Allergic Rhinitis, AR) 之風險增加 (Hsieh et al. 2020; Zhong et al. 2019)，其中NO_2、O_3和氣溫變化與結膜炎發病率呈正相關，而鼻炎則主要與NO_2濃度呈正相關。(4.6.2.3節)

5. 因綠地空間存在較多的過敏原，而可能使孩童AR致病風險顯著提高約8.4%，包含戶外溫濕度變化亦是AR主要的致病因子 (Lee et al., 2020)。空氣污染 (PM_{10}、$PM_{2.5}$和NO_2濃度增加) 會導致COPD患者的肺功能和血氧飽和濃度下降，並提高肺氣腫嚴重程度 (Tran et al., 2022)。(4.6.2.3節)

6. Kim et al. (2019) 在分析12個國家共341個地區的都市資料後，論證較高的環境溫度與自殺風險的增加有關。美國與墨西哥資料也發現，溫度變化和自殺呈現線性關係，當月均溫 (average monthly temperature) 每增加1°C，其月均自殺率 (monthly suicide rate) 會隨之增加約0.68%至2.1% (Burke et al., 2018)。(4.6.2.4節)

7. 依據Chen et al. (2019) 針對臺灣民眾的研究，當民眾長期暴露於高低溫環境下，當年均溫高於中位數23°C的地區 (圖4.6.2.3)，每增加1°C會導致重鬱症 (major depressive disorder) 的發生率增加約7%，其中對65歲以上的族群影響最高。(4.6.2.4節)

8. 龍世俊等人 (2018) 具體提出對於氣候變遷健康調適4個需強化的科學研究方向，包含建立氣候健康衝擊整合性預警模式、減緩氣候變遷與促進健康之共效益健康調適策略研究、新型態氣候變遷與健康調適之衛生教育或健康促進工具發展及策略研究、深化本土氣候變遷與健康調適研究之科學能量，其中最需要先推動的應是建立氣候健康衝擊模式及工具。(4.6.4節)

4.7 城鄉空間

1. 面對日漸擴張且人口高度聚集的都市腹地，為了建構及落實氣候變遷下的因應能力及策略，能否整合氣候變遷科學與人文社會關鍵議題，並導入風險、衝擊、脆弱度及調適規劃等理論中探討評估與管理面向，將是關聯臺灣都市及城鄉地區能否永續發展的首要課題。(4.7.1.1節)

2. 目前投入探討長期氣候與空間互動變遷情境下之災害脆弱度，及考量調適介入後之風險削減關聯性的研究則較缺乏，建議未來可增加投入結合土地利用變遷空間分析與脆弱度指標評估，進行調適策略預先研擬，再判斷其於未來情境中的潛在調適能力，藉此有效整合未來都市空間發展、土地利用與調適策略動態調整情境，以降低災害風險，並避免不當調適情況。(4.7.1.1節)

3. 坡地衝擊及風險評估在臺灣發展現況雖不乏指標建置及操作案例，且多能以空間圖層方式呈現評估結果，但較偏向過往傳統的坡地災害評估，建議未來可加強考量氣候變遷下坡地崩塌危害因子之衝擊及風險，以協助研擬未來時空變遷尺度下之調適策略與脆弱熱點資源投入。(4.7.1.2節)

4. 許多研究雖已針對農地提出衝擊及脆弱度評估結果，但有效的農地調適將需整合未來氣候變遷因子納入國土空間進行整體考量與規劃，除考量與周邊土地及人類社會經濟活動之互動影響關係，也需權衡農地生產與生態系統服務功能間之利益。(4.7.1.2節)

5. 鄉村空間氣候變遷衝擊上，學者以「農地類型」與「氣候變遷下之農地脆弱度等級」的組合，區分「多元使用型(環境生態保育型) 」、「農業生產維持型」、「農業環境平衡型」、「農業生產增值型」四類，分別建構農地氣候變遷之調適目標，據以進一步研擬農地調適的策略與行動計畫。(4.7.1.2節)

6. 國土保育地區及海洋資源地區方面，海洋及海岸地區中之相關重要保護區或防護區，不乏氣候及環境變遷衝擊評估技術及現況風險案例建立，建議未來可持續投入考量長期氣候變遷影響，探討可能的危害因子對區位範圍或保護標的之衝擊，以將各保護區或防護區在依循有關上位法令及計畫指導下，協助將考量現況為主

體的保護及保育工具，推展為具降低長期氣候變遷風險效力的轉型式調適策略。(4.7.1.3節)

7. 各類空間依其特性在氣候變遷衝擊之調適各有因應的策略作為，唯行政區之管轄範圍包含各類空間，因此需要綜合考量，國土計畫將氣候變遷議題納入到空間規劃，即為整合行政區內各類空間調適作為的平台之一。(4.7.1.4節)

8. 建議土地利用領域未來可投入研發結合土地變遷技術與脆弱度指標之空間複合性風險評估技術，藉此有效結合未來整體空間活動發展、土地利用與調適策略，以此進行整合性調適策略先期研擬，再判斷其於未來情境中的潛在調適能力，作為預先評估調適執行效益的方法之一，包含協助探討轉型式調適策略之效力。(4.7.2.4節)

9. 高度的城市發展將帶來環境、生態、健康、社會經濟等影響，且將因此造成環境失去平衡與氣溫調節的功能，使都市地區氣溫明顯高於周圍郊區，都市熱島效應日益嚴重。以雙北市為例，因盆地地形容易蓄熱，且為高度都市發展區域，市區中心溫度比郊區高出 3°C 以上的情況愈來愈頻繁，顯示都市戶外熱環境條件日益嚴峻。(4.7.2.1節)

10. IPCC AR6 WGIII (Pathak et al., 2022) 報告中指出可透過建築設計節省能源成本，亦有助於提升室內熱舒適以及增進人體健康；而透過推行都市綠化、藍帶規劃，以及涵水、透水鋪面等都市雨水資源管理措施，可改善都市蓄熱問題，並提升都市整體的熱舒適程度。(4.7.2.3節)

第五章　氣候變遷風險評估與調適

1. 使用任何風險定義進行評估的目標，皆是為了規劃及確定管理手段以降低風險至所設定的損傷目標或達到社會廣泛可接受的風險程度。本章摘要國內外重要風險定義、風險組成因子 (表5.1.1)，作為我國相關重要政策與科研等應用參考。(5.1.1節)

2. 調適行動主要為對抗預期將發生事件，目的在於降低對氣候變遷的脆弱度或提高系統的韌性。本章摘述國內外調適定義，協助我國各層級有關機關及單位建構調適基礎認知。(5.1.2節)

3. 本章整合文獻所提及之操作重點，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (TCCIP) 提出之「國家氣候變遷調適架構」各操作階段內容之說明，內容包含第1階段「辨識氣候風險及調適缺口」及第2階段「調適規劃與行動」(圖5.1.2)，以協助各界後續進行氣候變遷風險評估與調適規劃有關方案之研擬參考。(5.1.3節；5.1.4節)

4. 本章彙整第四章各小節所提出之國內科研技術在衝擊評估資料、工具及方法之應用障礙與缺口，以提供各界未來投入風險評估科研能力之精進建議，包括基礎監測的研究推動、不同空間尺度的資料的研發，預測模式的建置等面向。(5.2.1節)

5. 本章提出科研面向近期可增加考量推動的新興研究議題，包含複合風險、不當調適、漸進式及轉型式調適、動態調適路徑規劃、調適及減緩共效益等，並論述各議題之定義、國內外研究發展現況、可參考應用的評估方法或調適技術、及我國未來科研應投入之重點建議等，作為我國未來跨領域、跨部門調適治理之考量參考。(5.2.1節)

6. 未來複合性災害風險評估目的不僅是預防短期災害，更應是可應用於規劃長期性氣候變遷危害與土地使用交互影響的調適方法。(5.2.1節)

7. 國內外已提出不當調適主要研究架構包含 (1) 路徑架構 (Pathways Framework)；(2) 預防性架構 (Precautionary Framework)；(3) 評估架構 (Assessment Framework)；

(4) 反饋架構 (Feedback Framework)； (5) 整合空間風險分析觀點的不當調適評估路徑架構 (Maladaptive Evaluation Pathways)；(6) 適用於國家尺度的調適政策規劃之監測與評估架構。(5.2.1節)

8. 氣候變遷衝擊不斷增強的未來，原本社會所依賴的漸進式調適已逐漸無法有效控制風險在可接受的程度，轉型式調適為一必要嘗試發展及推動的調適策略型態。本章彙整轉型式調適在推動制度和行為的限制與障礙，並建議轉型式調適初期可透過漸進式調適的協助，以減輕轉型過程對隨時間推移不斷變化的社會價值觀之衝擊，此將有助於克服社會及制度障礙，促進調適轉型成功。(5.2.1節)

9. 調適規劃與決策必須適當考量氣候隨著時間推移的變遷程度，以因應未來發展及社會價值觀下的共同發展目標。調適路徑工具之發展可協助各級政府未來在不確定性的氣候風險下，欲解決的氣候風險優先順序，及評估各時期可投入資源及願承受的風險，進而予以規劃在連續時間推移下的多樣調適選項組合，並可作為決策者及利害關係人溝通的基礎，助於提出取得共識之調適決策。(5.2.1節)

10. 規劃調適時若能同時考慮連結減緩效力，將可增加額外利益及帶來市場以外的效益，並可管控不當調適的發生，但潛在的障礙、交易和風險經常被忽視，其中關鍵原因即為調適和減緩在慣例上仍是分開思考與執行的兩種行動。後續建議需針對跨政策間的效益進行綜合評估，包含綜效、權衡、共效益及衝突等面向，未來整合減緩及調適的相關研究仍需投入進行更多的實證評估，以探究不同措施之間綜效的差異，作為共效益方案最優規劃之參考依據。(5.2.1節)

11. 為協助各部門在調適規劃與推動過程可能遭遇的障礙與限制，並考量「氣候變遷因應法」為我國氣候變遷事務必須依循之新興法令，本章彙整治理機制中需留意及迴避之衝突與障礙等社會制度面向，包含論述調適跨層級及跨部門治理機制、調適障礙與限制、調適公平性及脆弱族群、法令之競合等議題。(5.2.2節)



第一章
全球與東亞氣候變遷

許晃雄[1]、王嘉琪[2]、李時雨[1]、曹俊和[3]、梁禹喬[4]、郭怡君[5]、陳昭安[6]、陳英婷[1]、曾于恒[5]、曾琬鈴[7]、黃偌栩[5]、蔡宜君[1]、賴昭成[8]、駱世豪[1]

[1]中央研究院環境變遷研究中心
[2]中國文化大學大氣科學系
[3]國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系
[4]國立臺灣大學大氣科學系
[5]國立臺灣大學海洋研究所
[6]國家災害防救科技中心
[7]國立臺灣大學氣候變遷與永續發展學位學程
[8]國立臺北教育大學自然科學教育學系

摘要

大氣、海洋與冰雪圈以及生物圈的觀測提供了暖化明確的證據。自1850年以來全球地表溫度持續增暖，且在近年暖化程度急遽增強加速，人為排放的溫室氣體對氣候變化的貢獻證據越來越充分。不同共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP；參見文字框1) 下，全球地表溫度都至少持續增溫到世紀中葉，除非在未來幾十年內大幅減少溫室氣體排放，否則本世紀的暖化必然超過1.5°C與2°C。自1950年以來，全球大多數區域顯示，極端高溫事件 (包括熱浪) 的頻率和強度已增加，而極端寒冷事件則減少。人為活動造成的溫室氣體增加是這些極端溫度事件變化的主要驅動因素。極端高溫事件的頻率，很可能隨著全球暖化程度呈現非線性增加，罕見極端高溫事件的相對增加率將更大。

人類導致的暖化也驅動了全球氣候變化。整體而言，陸地降水量有些微增加的趨勢，熱帶地區、非洲北部、部分歐洲與中亞以及海洋大陸降水增加；南美洲中部、北美西部與北非以及中東則呈現降水減少的趨勢。模式推估全球平均降水量將逐漸增加，陸地降水增加比全球或海洋區域更為明顯。全球暖化下，每增加1°C，全球平均年降雨量可能增加2%至3%，極端降雨事件頻率與強度增加約7%，多數地區的暴雨事件極可能變得更加頻繁和強烈。極端濕潤與乾旱事件的嚴重程度將會加劇，受乾旱影響的土地總面積將增加且變得更加頻繁和乾燥。熱帶氣旋的降雨量、強度與強熱帶氣旋比例都會隨著暖化程度增強而增加。世紀末西北太平洋颱風生成數量減少且生命期縮短，並呈現西北太平洋的熱帶氣旋向極區遷移的趨勢。然而，颱風伴隨的最大風速與降雨都是增強的。

總結全球暖化對海洋、冰雪圈與海平面上升的衝擊，海洋溫度與熱含量的增加已成為全球性問題，其範圍從表面到底層分布極廣，溫度上升衍生出海洋熱浪的增加與海洋層化效應的增強。海洋酸化呈現全球性趨勢。大西洋經向翻轉環流的減弱，在觀測方面雖尚未定論，但未來推估皆明確指出減弱的趨勢。黑潮在過去觀測大致呈現加速趨勢且有離岸偏移，並且在夏季較為顯著。冰雪圈已經受到顯著的影響，特別是北極海冰，預計可能在2050年完全消失。另一方面，格陵蘭和南極的冰層在快速減少，加速全球海平面上升。觀測顯示冰川、春季積雪和永凍土的質量持續減少，然而在北美和西伯利亞等地，積雪覆蓋面積反而有所增加。海平面高度在過去80萬年中呈現顯著的波動，但自19世紀中葉以來，其升高速度已超過過去2000年的平均值，主要是由於海水熱膨脹和冰

川、陸冰的融化；未來推估至2300年，海平面將會持續升高。

過去數十年間，全球季風呈現明顯的年際與年代際變化，由於不同區域間有明顯差異，整體而言無顯著變化趨勢。在未來情境推估中，季風環流減弱，但因為暖化使得水氣增加，全球季風降水可能增強。全球平均氣溫每上升1°C，全球季風陸域降水量，在各SSP情境的平均降水量可能增加1.3%至2.4%。未來變遷推估顯示，季風降水增加量具明顯南北向不對稱性，北半球會高於南半球。

在季風活動未來變遷推估中，東亞地區由於季風肇始提前及夏季延長，季風降水增強。降水增強主要來自梅雨的增強，尤以東南亞和中國南部最為明顯。季風降水在所有未來情境推估中均為增加，且隨模擬時間增加與排放情境的嚴重程度依次提升。雖然模式推估對季風模擬仍具不確定性，然而對於東亞區域在21世紀之季風降水增加具高度信心，對於季風季節增長的信心度則為中等 。

從1850年到1970年代，氣膠及其前驅物濃度呈現上升的趨勢，對氣候造成冷卻的效果，可部分抵銷溫室氣體造成的暖化。1970年代中期以後，各國開始關注及控制污染物排放，改善空氣品質，氣膠及其前驅物造成的淨輻射強迫減弱，讓地球降溫的效果也隨之減弱。全球暖化加速消耗臭氧，低污染地區地表臭氧減少，但在整體污染地區反而增加。在CMIP5高排放情境 (RCP8.5) 情境下，全球暖化造成2100年平均氣膠濃度約增加0.21 mg m^{-3}，熱浪頻率增加導致高污染臭氧或氣膠增加。

1.1 前言

本章主要依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次氣候變遷評估報告 (6th Assessment Report, AR6)，並參考第五次評估報告 (AR5)、全球升溫1.5°C特別報告 (Special Report on Global Warming of 1.5°C, SR15)，以及變遷氣候中的海洋與冰雪圈特別報告 (Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, SROCC)，綜整全球地表溫度、降水、海洋、冰雪圈、極端天氣與季風，在過去幾十年的變化，以及在各種不同溫室氣體排放情境中的未來變遷趨勢。

1.2 溫度、降水

1.2.1 地表溫度觀測

大氣、海洋與冰雪圈以及生物圈的觀測提供了暖化明確的證據。在過去的幾十年中，達到了幾個世紀甚至千年以來前所未見的高溫，變化速度在過去2000年、甚至更長的時間內絕無僅有。根據古氣候重建的溫度資料顯示，自1850年以來全球地表溫度持續增暖 (圖1.2.1)。近年來全球暖化的程度急遽增強加速，21世紀的前20年 (2001年至2020年) 全球地表平均溫度相較1850年至1900年間高出0.99°C (0.84°C至1.10°C)。過去百年來，全球平均溫度增暖的速度飆高，已超越過去10萬年中最暖的數個世紀的溫度紀錄。自2012年以來，全球地表溫度大幅上升，2016年至2020年更成為1850年至2020年之間最熱的5年。

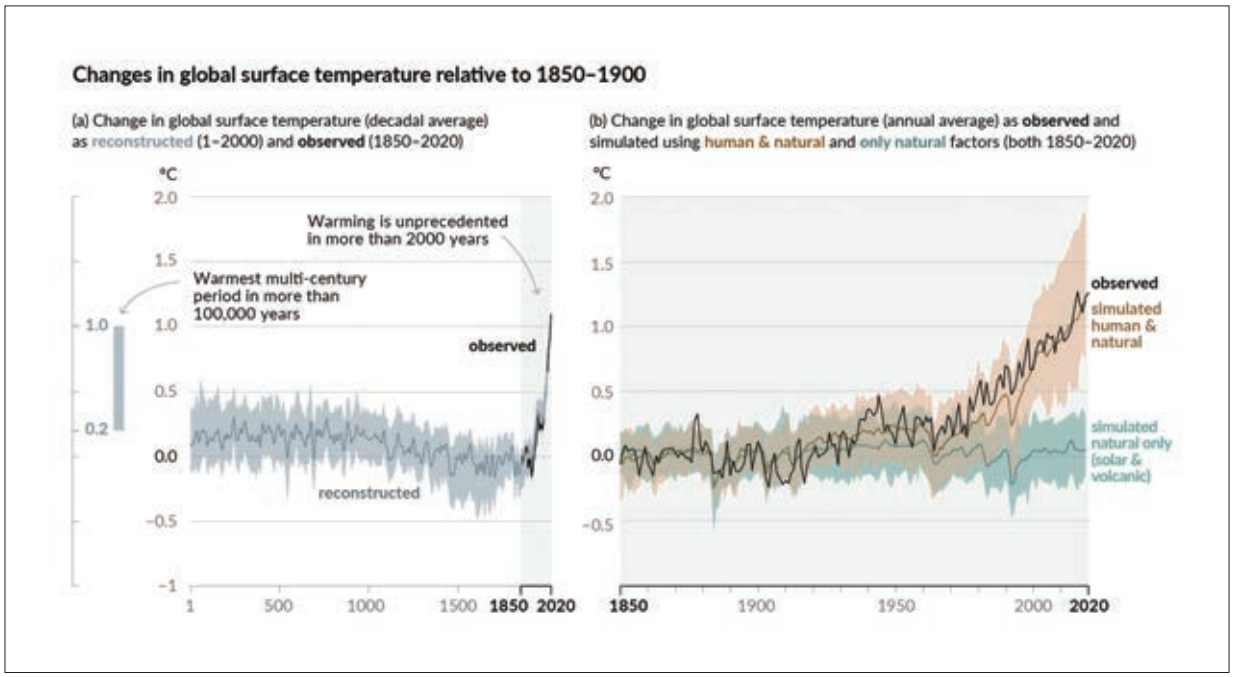


圖1.2.1　(a) 全球表面氣溫的變化，灰色實線為從古氣候檔案中重建的溫度距平，黑色實線為觀測的溫度距平，基期為1850年至1900年期間每10年的平均。左側垂直長條顯示過去10萬年中最暖的幾個世紀的估計溫度 (間冰期)。灰色陰影區顯示溫度重建的非常可能範圍(參見文字框3)。(b) 過去170年全球表面氣溫變化 (黑線)，基期為1850年至1900年平均。比較第六期耦合模式比對計畫 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) 兩組氣候模擬，包括人為和自然驅動因素 (棕色) 以及僅自然驅動因素 (太陽和火山活動，綠色)。實色線條為系集平均值，彩色陰影為模擬的非常可能範圍。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure SPM.1)

從IPCC AR2到AR5，人類對近期氣候變化的貢獻證據越來越充分與加強，在本次AR6評估中更加明確，包括在區域尺度和極端天氣方面的影響。人類影響指的是導致或促進氣候反應的人類活動，例如人為排放的溫室氣體，隨後改變大氣輻射特性，導致氣候系統中的大氣、海洋和陸地部分升溫。其他影響氣候的人類活動，包括排放氣膠和其他短暫氣候影響因子，以及土地利用變化，例如都市化。

以模式模擬探討全球暖化的原因以及人類活動所造成的影響 (圖1.2.1b)，模擬結果中僅靠自然驅動因素造成的增溫幅度並不顯著 (綠線)，而加入人為活動因素後 (棕線)，在1900年後的增溫影響越來越顯著且和觀測的溫度變化曲線相當重疊，人類活動對全球暖化的影響無庸置疑。1980年代後，全球地表溫度持續上升，但在各地仍有不同的暖化區域特性與海陸的差異 (圖1.2.2)：陸地的增溫高於海洋 (1.59°C [1.34°C至1.83°C] 與0.88°C [0.68°C至1.01°C])，極區增溫又比中低緯度更為顯著，尤其是北半球高緯度區域。臺灣所在的亞洲的增溫也較全球平均多。

隨著全球暖化加劇，氣候系統中的許多變化也相應地變得更加明顯：極端高溫、海洋熱浪、暴雨等極端氣象事件的頻率和強度增加；在某些地區，農業和生態乾旱(參見1.4.3 乾旱事件) 的發生率增加；強度較大的熱帶氣旋的比例增加；北極海冰、雪覆蓋和永凍土減少。

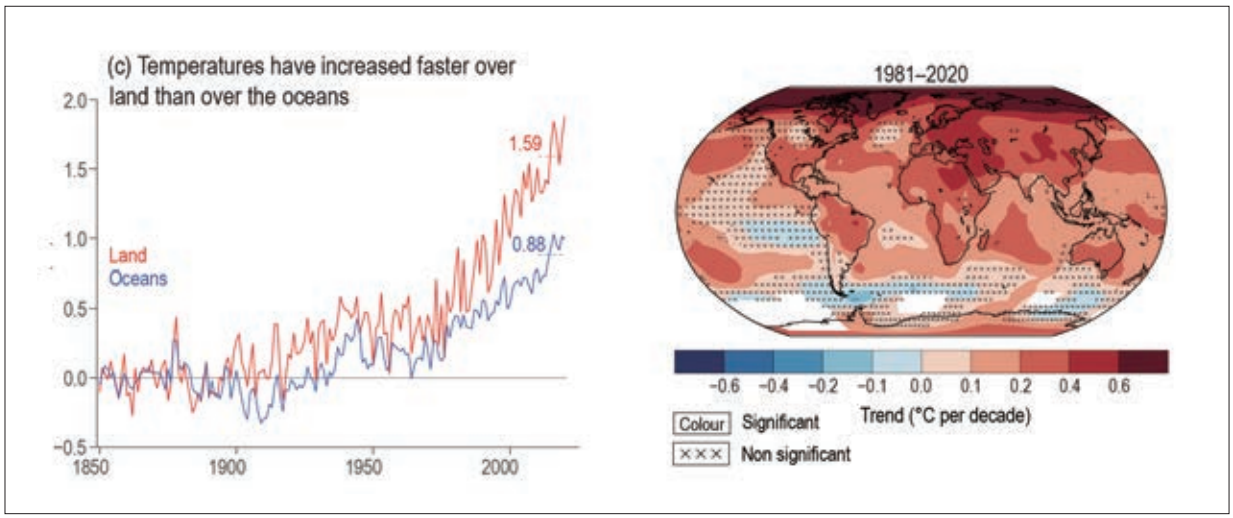


圖1.2.2 (左圖) 1850年至2020年的地表溫度距平，藍、紅線分別表示海洋與陸地溫度，並標示出最後10年的升溫數值 (摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.11)。(右圖) 1981年至2020年期間HadCRUTv5每10年的地表溫度趨勢 (°C decade^{-1})，x區域表示不顯著。(摘自IPCC AR6, WGI, Cross-Section Box TS.1, Figure 1)

文字框 1 ｜ SSP 排放情境

科學家依據全球各種經濟發展趨勢，擬訂各種不同的發展情境 (scenario)，將未來每年溫室氣體排放量的推估值導入地球系統模式 (Earth System Model, ESM) 進行長期氣候模擬，得到相對應的全球地表平均溫度變化。此模擬架構與評估方法最常被應用於全球氣候變遷研究，如IPCC AR4、AR5乃至AR6都是用類似的方法，差別是使用的溫室氣體排放濃度情境設定不同 (整理如表BOX 1.2.1)。例如：AR5中的五種代表濃度路徑 (Representative Concentration Pathway, RCP) 分別為溫室氣體排放情境嚴重度極低、低、中、高、極高 (由RCP1.9、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0至RCP8.5)。隨著世代演進，暖化情境設定越來越複雜卻更加真實且合理，多樣化的暖化情境設定對於下游氣候變遷資料應用也有更多選擇。

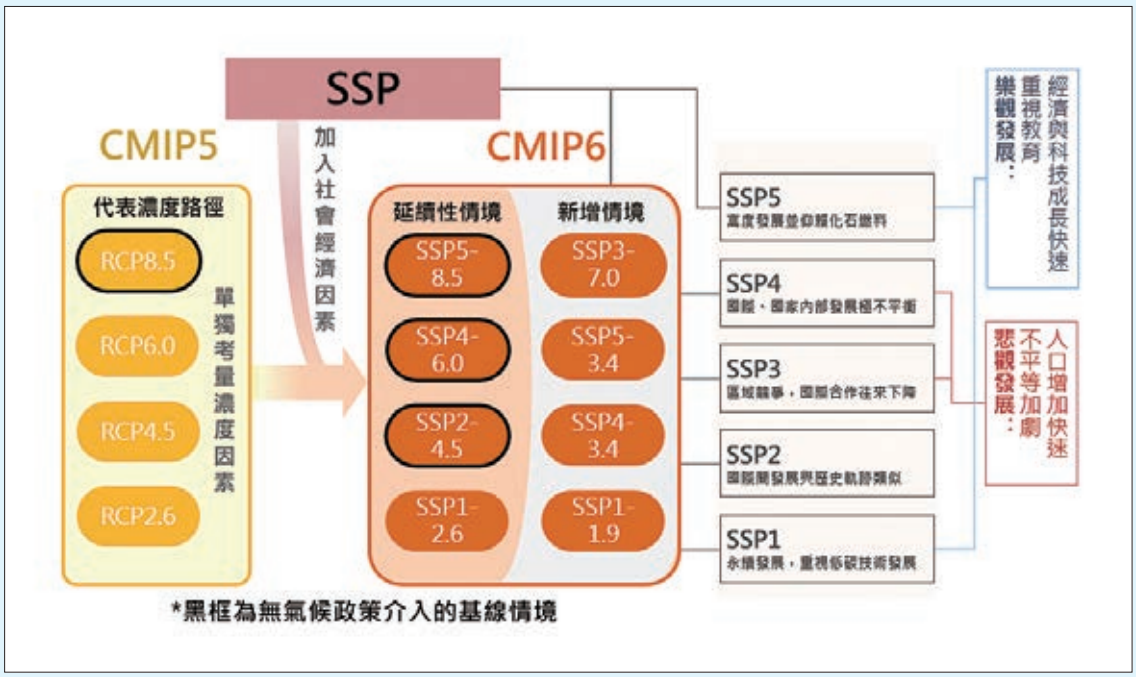
表BOX 1.2.1　IPCC各世代所使用相關氣候資料說明

世代	AR4	AR5	AR6
氣候資料組	CMIP3	CMIP5	CMIP6
推估起始年	2001	2006	2015
常用情境	B1, A1B, A2	RCP1.9, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 (RCP：代表濃度路徑)	SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 (SSP：共享社會經濟路徑)
參考文獻	Meehl et al., 2007	Taylor et al., 2012	Eyring et al., 2016; O'Neill et al., 2016

最新公布的AR6報告中使用CMIP6新一代ESM的模擬結果，有別於AR5只使用代表濃度途徑 (Representative Concentration Pathway, RCP) 做為氣候變遷推估排放情境，而是使用共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP) (Riahi et al., 2017) 為新一代氣候變遷情境的重要組成，結合氣候變遷研究界多個研究社群成果，為社會經濟情境與氣候情境共同交織成的新情境框架。SSP以全

球或區域性的社會與經濟發展程度做為區分，不同SSP主要差異來自對全球人口增長、受教育機會、城市化、經濟增長、資源可用性、技術發展和需求驅動因素的不同假設，區分為SSP1至SSP5等5種不同社經發展情境。各種SSP設定均隱含著減緩氣候變遷衝擊，與調適行動的社會經濟挑戰。圖BOX 1.2.1說明SSP1為永續發展的理想情境；SSP2為與歷史發展相似的中間路線；SSP3與SSP4分別代表區域競爭及不平等發展，皆強調高挑戰性的調適；SSP5則為高度仰賴化石燃料的高發展、高排放情境。

CMIP6暖化情境最主要的特徵，即加入氣候政策之後，以落實不同減緩目標所導致的溫室氣體排放濃度和相對應的輻射強迫力 (圖BOX 1.2.1)，並以共享社會經濟路徑與代表濃度途徑的數字組合 (SSP-RCP) 表示CMIP6資料中的情境 (如：SSP1-2.6為SSP1與RCP2.6組合的情境)。另外，AR6中亦引用AR5 CMIP5分析成果，故當情境名稱為RCP時，代表描述的資料為CMIP5。為銜接與比較CMIP5暖化情境，將SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0及SSP5-8.5做為4個主要模式模擬情境。



圖BOX 1.2.1　SSP情境設定說明與其對應的RCP情境 (資料來源：本報告產製)

以下為SSP暖化情境的相關說明：

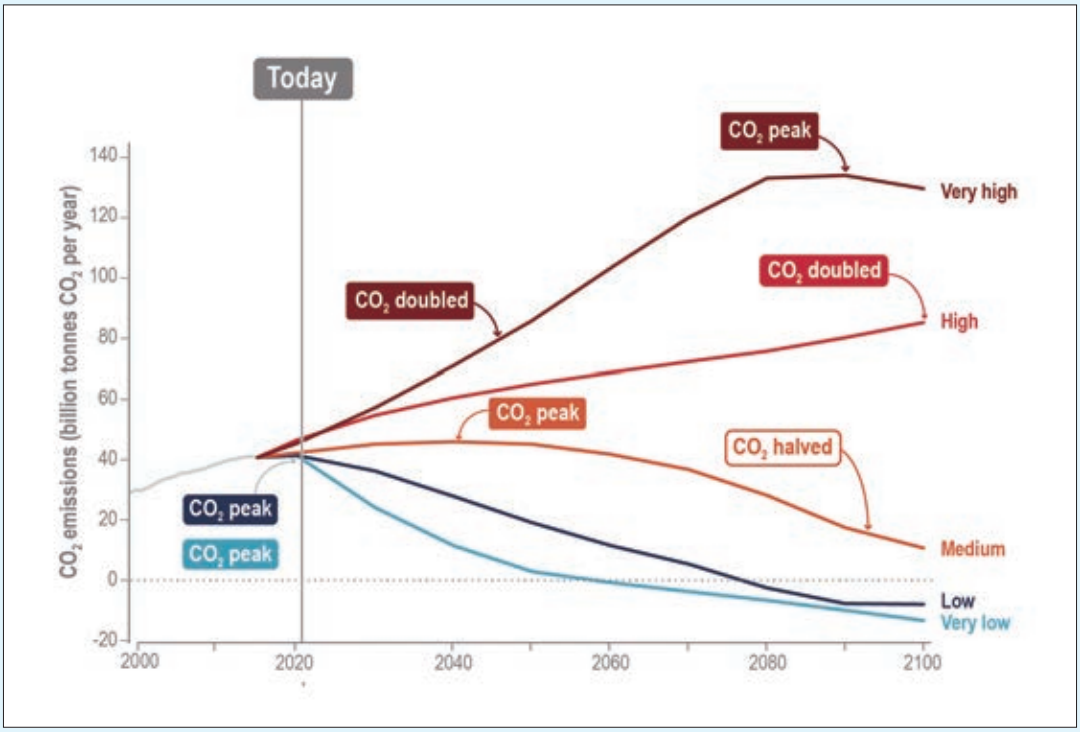
SSP1-1.9：強調快速、深度減排，預計在世紀中達成淨零排放，以達成巴黎協定期望限制升溫在1.5°C，但執行過程中仍可能暫時突破限制門檻，於世紀末控制在1.5°C以下。

SSP1-2.6：實現巴黎協定的限制目標。

SSP2-4.5：被視為接近現況，基於既有氣候政策的未來趨勢。

SSP3-7.0：以目前的排放量持續增加，無減緩目標下的基線情境。

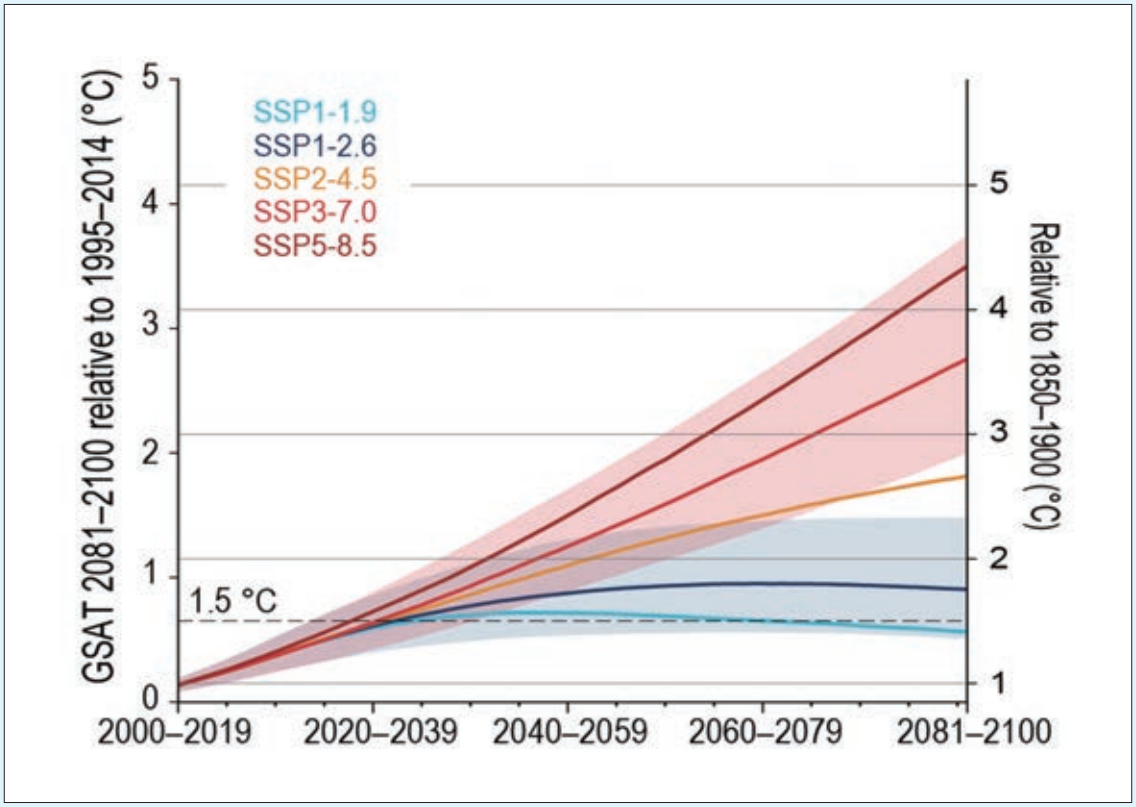
SSP5-8.5：非常高度溫室氣體排放情境，雖然較不可能發生，但可視為未來可能的最極端情況。



圖BOX 1.2.2　IPCC AR6排放路徑設定。不同的共享社會經濟路徑 (SSP) 可能導致未來不同溫室氣體 (以二氧化碳為大宗) 排放量SSP1-1.9 (very low)，SSP1-2.6 (low)，SSP2-4.5 (medium)，SSP3-7.0 (high)，SSP5-8.5 (very high)。(摘自IPCC AR6, WGI, Infographic TS.1)

圖BOX 1.2.2為CMIP6針對未來推估，設計了自2015年至2100年依照多種不同的共享社會經濟路徑 (SSPs)，計算並發展出相對應的溫室氣體排放濃度變化路

徑。將不同溫室氣體加入ESM模式模擬，可得到相對應的全球平均溫度變化 (圖BOX 1.2.3)。



圖BOX 1.2.3　CMIP6 SSP暖化情境下模擬全球平均溫度變化。不同顏色線代表不同SSP溫度變化，左側座標為相對1995年至2014年的變化，右側座標為相對工業革命前 (1850年至1900年) 的變化。陰影區為多模式5%至95%可信賴區間。(摘自IPCC AR6, WGI, Cross-Section Box TS.1, Figure 1)

1.2.2　地表溫度未來推估

全球暖化已成既定事實，針對未來可能發生的各種情況，AR6透過不同溫室氣體排放選擇的情境模擬 (SSP)，提供人類集體選擇做為參考。在所有的排放情境下，全球地表溫度將至少持續增加到本世紀中葉，除非在未來幾十年內大幅減少二氧化碳和其他溫室氣體排放，否則本世紀的暖化必然超過1.5°C與2°C。

圖1.2.3顯示1950年至本世紀末的全球地表溫度變化 (包括觀測與模式歷史模擬與未來推估) (IPCC, 2021: Technical Summary)。相對於1850年至1900年，極低溫室氣體排放情境SSP1-1.9下的2081年至2100年全球地表平均溫度很可能會上升1.0°C至1.8°C，而高溫室氣體排放情境SSP5-8.5下的升溫幅度很可能會高達 3.3°C至5.7°C。在所有情境評估中 (SSP5-8.5除外)，20年平均全球地表升溫超過1.5°C將在2030年代初期發生。在極高溫室氣體排放SSP5-8.5和高排放SSP3-7.0情境下，世紀末全球地表溫度將上升超過2°C (圖1.2.3)。根據SSP5-8.5情境的模擬，增溫超過2°C的情形甚至在2041年至2060年期間就極有可能提早發生。隨著情境由低至高排放，模式間推估的差異也逐漸擴大，但整體增溫趨勢一致。

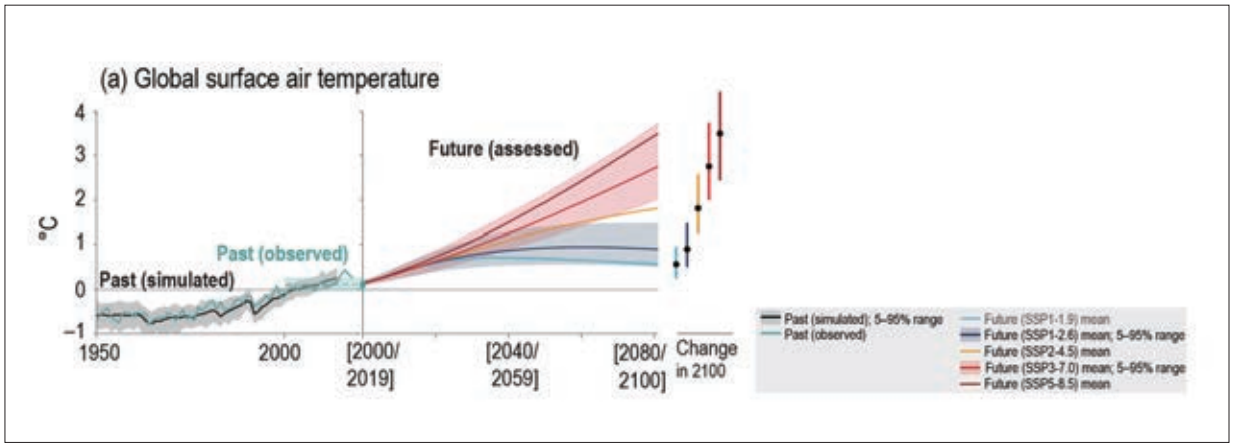


圖1.2.3　綠線與灰線分別為過去觀測與模擬的全球地表溫度變化，基期均為1995年至2014年平均值。垂直黑直線右側為5個不同SSP情境下推估的未來溫度變化，展示不同的排放選擇如何影響關鍵的大尺度指標，強調人類集體選擇的重要性。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure TS.8)

根據巴黎氣候協定關注的全球暖化程度 (Global Warming Level, GWL；參見文字框2) 1.5°C、2°C以及3°C，相對於1850年至1900年，全球平均地表溫度的增溫變化總結如下：(1) SSP2-4.5、SSP3-7.0或SSP5-8.5，平均約在2030年左右超過1.5°C；(2) SSP3-7.0或SSP5-8.5，平均約在2043年左右超過2°C；(3) SSP5-8.5，平均約在2062年左右超過3°C。整體而言，隨著時間演進，增溫幅度加劇。

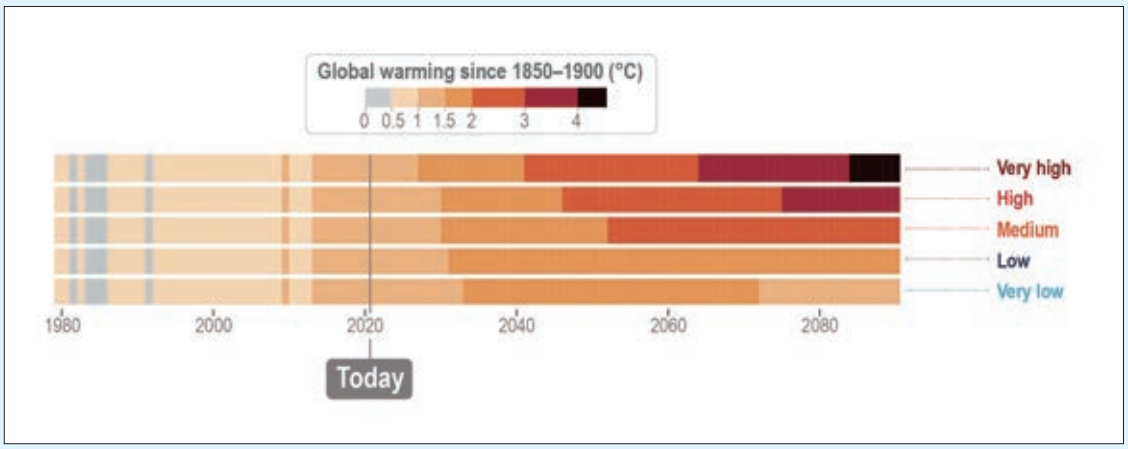
年代際或年際的變化中，全球溫度趨勢仍會有時下降有時上升，但在百年尺度的升溫趨勢方面仍是相當明確。若從2020年開始實行強有力的排放減緩措施，根據極低排放情境SSP1-1.9的模擬，全球暖化將有望趨緩，溫度得以在21世紀後半葉緩緩下降。

文字框 2 ｜全球暖化程度 (GWL)

方法由來

2015年《巴黎協定》目標為將全球暖化限制在2°C或1.5°C，氣候科學研究社群從原先依據不同排放路徑推估未來短、中、長期暖化程度的氣候變化研究，開始朝向評估特定全球暖化程度下的氣候變遷與衝擊 (James et al., 2017)。之後IPCC於2018年提出《全球升溫1.5°C特別報告》(Special Report on Global Warming to 1.5°C, SR15) (IPCC, 2018)，提供全球升溫1.5°C的衝擊評估結果與氣候變遷相關資訊。而後， AR6 (IPCC, 2021) 大量導入此作法於相關衝擊評估。氣候衝擊驅動因子 (Climate Impact Drivers, CIDs) 即是以全球暖化不同程度來提供相關量化推估資訊。

將SSPs情境資料導入ESM氣候模式模擬，得到相對應全球暖化程度 (圖BOX 1.2.4)。從最新的美國國家海洋大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 全球觀測資料顯示，1850年至2023年1月全球地表溫度已經增加0.87°C，也符合模擬結果，若依照現今全球溫室氣體排放程度分級，目前全球暖化程度已進到GWL 1°C。



圖BOX 1.2.4　全球地表溫度在不同排放路徑下不同暖化程度 (溫度變化相對於工業革命前1850年至1900年) 對應的發生時間點。CO_2排放濃度Very low (SSP1-1.9)，Low (SSP1-2.6)，Medium (SSP2-4.5)，High (SSP3-7.0)，Very high (SSP5-8.5)。 (摘自IPCC AR6, WGI, Infographic TS.1)

在ESM氣候模式裡，溫室效應氣體的濃度變化主導了全球平均溫度變化。IPCC AR6為提供具有可信度且一致化的推估資訊，科學家評估CMIP6眾多模式GWL不同門檻值的發生時間，得到如表BOX 1.2.2的整合數據，再藉由統計方法評估各時段最有可能發生的全球暖化程度。不同的排放路徑於短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年)、長期 (2081年至2100年) 的暖化情況 (註：本報告將持續使用此短、中、長期對應的年分)，無論是何種路徑， GWL 1.5°C最早都將在2021年至2040年期間發生；在中度排放程度以上，GWL 2°C最早可能發生的時期在2041年至2060年；若各國氣候政策與溫室效應氣體排放減量失敗，則GWL 4°C最早可能發生的時期在2081年至2100年。

表BOX 1.2.2　全球平均溫度相對於1850年至1900年的變化。(單位：°C，資料來源：IPCC AR6 TS Cross-Section Box TS.1, Table 1)

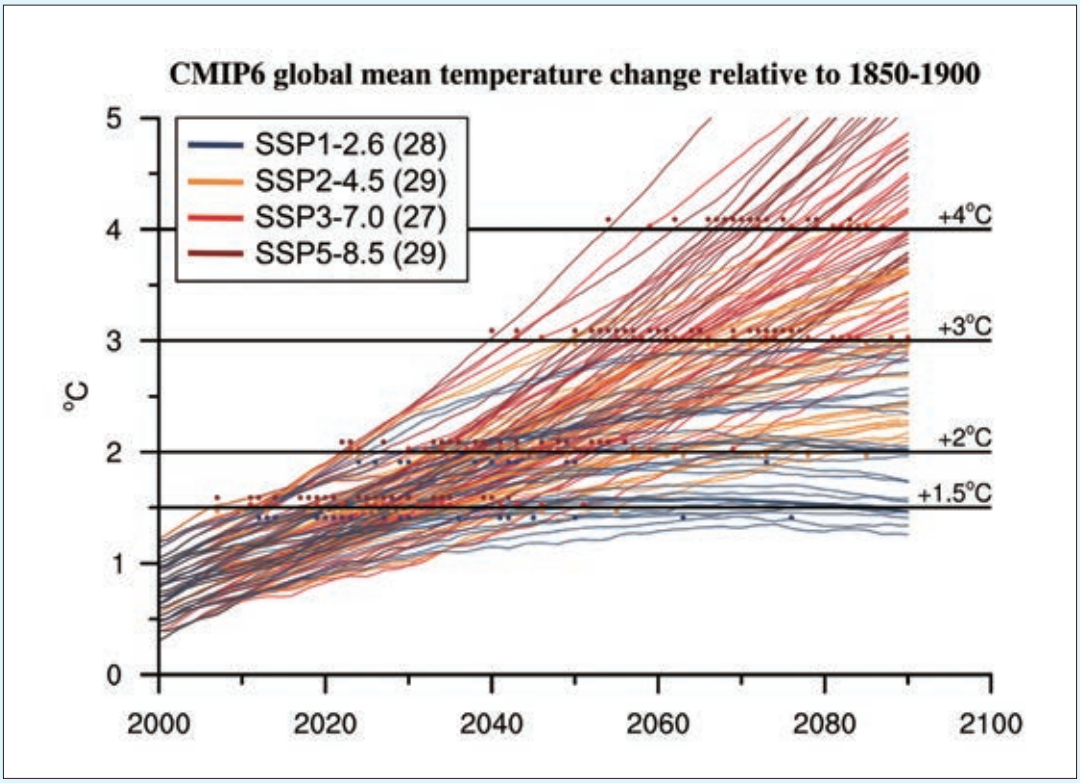
	短期 (2021年至2040年)		中期 (2041年至2060年)		長期 (2081年至2100年)	
情境	最佳推估	可能範圍	推估	範圍	推估	範圍
SSP5-8.5 (Very high)	1.6	1.3至1.9	2.4	1.9至3.0	4.4	3.3至5.7
SSP3-7.0 (High)	1.5	1.2至1.8	2.1	1.7至2.6	3.6	2.8至4.6
SSP2-4.5 (Medium)	1.5	1.2至1.8	2.0	1.6至2.5	2.7	2.1至3.5
SSP1-2.6 (Low)	1.5	1.2至1.8	1.7	1.3至2.2	1.8	1.3至2.4
SSP1-1.9 (Very low)	1.5	1.2至1.7	1.6	1.2至2.0	1.4	1.0至1.8

GWL 如何設定

AR6評估全球平均溫度變化的「發生時間」(如表BOX 1.2.2) 是根據多重證據的綜合結果，這類簡化的資訊對一般大眾或決策者尚可滿足。但落實應用氣候變遷衝擊評估與調適規劃應用研究需要的是，各別模式模擬達到不同全球暖化程度時，臺灣承受的變遷的詳細空間資訊。以下說明如何評估CMIP6各別模式原始推估的全球暖化程度。首先須蒐集全球氣候模式地表溫度資料 (自工業革命前1850

年即開始進行模擬)，相關資訊可參考CMIP6各成員模擬資料 (https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/)。計算每個模式相對於工業革命時期前全球平均地表氣溫變化，達到不同升溫程度的時間，以銜接後續CMIP6統計降尺度日資料庫的建立，進一步進行後續不同領域衝擊評估。

假想各別氣候模式代表不同廠牌的汽車，其模擬計算核心如車子的引擎，對於溫室氣體所模擬的溫度變化反應也不同，有些敏感，有些遲鈍。每個模式GWL評估是參考AR6及多數相關文獻的做法，使用模式的全球平均氣溫，計算達到不同全球暖化程度的時間。根據歷史模擬自1850年推估到未來時期全球平均溫度的時序變化，以20年移動窗區 (第10年代表)，計算各別模式相對於工業革命前升溫首次到達1.5°C、2°C、3°C與4°C目標的發生時間 (如圖BOX 1.2.5)。



圖BOX 1.2.5　CMIP6全球平均溫度相對於1850年至1900年的20年滑動平均變化 (每條線代表單一模式溫度變化，線上的點為該模式升溫至不同門檻值的發生時間)。根據CMIP6模式未來推估相對於歷史模擬1850年至1900年升溫變化，計算全球暖化通過1.5°C、2°C、3°C、4°C目標時間 (溫度曲線以第10年代表20年平均值)。(資料來源：臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6統計降尺度版，2023)

統計結果整理如表BOX 1.2.3，GWL 1.5°C (110組模擬) 最早與最晚發生時間為2007年與2076年，中位數為2028年；GWL 2°C (99組模擬) 發生時間為2042年； GWL 3°C使用 (66組模擬) 發生時間為2065年；GWL 4°C (31組模擬) 發生時間為2076年。各別模式發生的全球暖化程度對應年分參考 「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」計畫 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 資料說明 (AR6統計降尺度日資料說明文件)。

表BOX 1.2.3　CMIP6模式推估全球暖化程度 (GWLs) 的年分統計表

GWL	1.5°C	2°C	3°C	4°C
系集數量	110	99	66	31
各別情境：模式個數	SSP1-2.6：25 SSP2-4.5：29 SSP3-7.0：27 SSP5-8.5：29	SSP1-2.6：14 SSP2-4.5：29 SSP3-7.0：27 SSP5-8.5：29	SSP1-2.6：0 SSP2-4.5：12 SSP3-7.0：25 SSP5-8.5：29	SSP1-2.6：0 SSP2-4.5：1 SSP3-7.0：13 SSP5-8.5：17
時間中位數 (最早-最晚)	2028[1] (2007-2076)	2042 (2022-2085)	2065 (2040-2090)	2076 (2054-2087)

1　氣候變遷偵測與指標專家小組 (ETCCDI) ：主要是為了協助大眾更容易地理解和應對氣候變遷問題而設立的。提供了許多有關氣候變遷指標的定義及計算方式，以及相關的軟體套件及應用指導，讓使用者可以更方便地進行氣候變遷研究及分析。更多資訊請參考 https://www.wcrp-climate.org/etccdi

隨著全球升溫幅度的增加，各地暖化的情形加劇。模擬不同升溫幅度對各地增溫的影響如圖1.2.4，升溫幅度由低至高分別類似SSP1-2.6、SSP2-4.5以及SSP5-8.5的情境。不同情境模擬均有北半球高於南半球、陸地升溫趨勢大於海洋 (約1.4倍至1.7倍)、高緯度趨勢大於中低緯度的特性。這些差異是由多種因素所影響，包括陸地與海洋的比熱差異、北半球陸地面積多於南半球、海洋環流的影響。北半球高緯度地區的溫度升高量預計是全球升溫量的 2 倍至 4 倍，這種現象被稱為北極放大現象，反射太陽輻射的海冰與

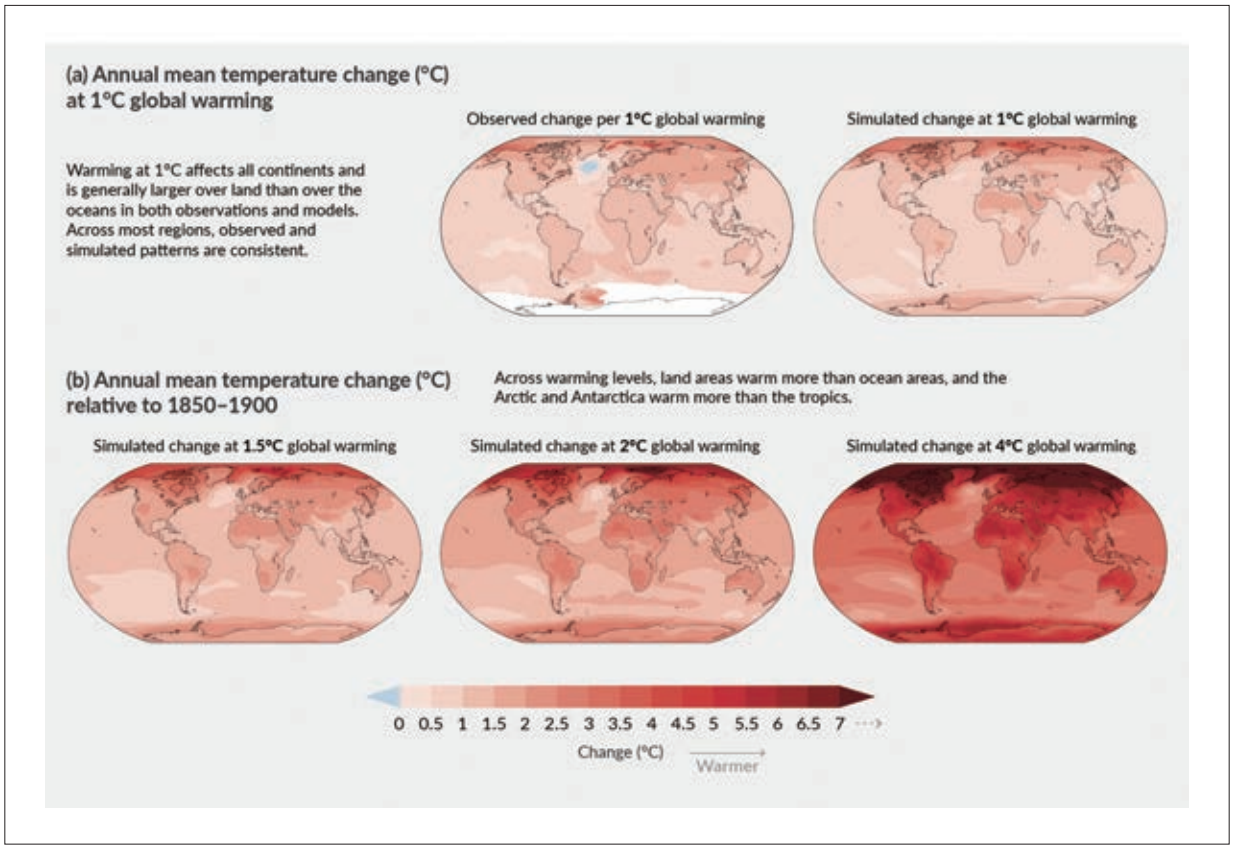


圖1.2.4　(a) 左圖顯示1850年至2020年全球平均氣溫 (Global Surface Air Temperature) 每升高1°C對應的觀測年平均地表溫度變化 (°C)，右圖則是模型模擬結果。(b) GWL 1.5°C、GWL 2°C以及GWL 4°C時，模式模擬的年平均溫度變化。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure SPM.5)

雪減少，地表吸收的太陽輻射增加。暖化程度的增加使各地極端事件變得更加嚴重，每增加0.5°C都會明顯提高高溫極端天氣的頻率和強度。

地球的氣候系統已經演變數百萬年，各種大自然留下的古氣候證據提供過去氣候變化的紀錄。過去氣候狀態的重建，顯示大氣中的CO_2濃度和全球地表溫度變化密切相關，兩者的變化曲線相當相似 (IPCC, 2021: Technical Summary)。若暖化持續加劇，根據SSP5-8.5情境模擬，到了2300年，將出現過去幾百萬年來未曾見過的暖化程度，不只突破百萬年前上新世中期 (mid-Pliocene) 的地面溫度，甚至將會逼近千萬年前始新世早期 (early-Eocene) 的高溫紀錄，人類活動所造成的暖化效應將在全球各地發生，尤其是人類居住的陸地，地球將進入前所未有的高溫狀態。

1.2.3 降水量觀測

自20世紀中葉以來，人類導致的氣候變化已經驅動了全球水循環的變化，進而改變全球和區域尺度上水循環的變異。降水觀測缺乏完整的長期紀錄，每組資料時間長度也不同，尤其是1950年以前資料相當短缺，因此各資料的降水紀錄差異較大 (參見IPCC AR6, WGI, Table 2.6)，不同資料之間，早期的觀測趨勢並未顯示一致的長期變化 (摘自IPCC AR6, WGI, Figure 1.2.6)。不過仍有的部分年分資料呈現較可信的一致變化，如1950年、1970年與2000年至2019年皆有陸地降水較多的觀測紀錄，在每10年的平均也可以看到一致性的距平結果。整體而言，陸地降水量有些微增加的趨勢。不同地區有各自的區域降水趨勢特性，全球降水氣候計畫2.3版 (Global Precipitation Climatology Project, GPCP V2.3) 近40年 (1980年至2019年) 降水資料顯示，熱帶地區、非洲北部、部分歐洲與中亞、海洋大陸皆有降水增加的現象，南美洲中部、北美西部與北非、中東則呈現降水減少的趨勢。

依據數組再分析資料對1973年至2019年水氣變數的趨勢分析，全球地表平均比濕與氣柱水氣總量 (total column water vapour) 增加，對應了降水有些微增加的趨勢 (摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.13-2.15)。全球暖化下，高溫空氣中可容納較多的水氣量 (飽和水氣壓)，但空氣中的水氣壓增加速度小於飽和水氣壓增加的速度，相除之下，全球地表相對濕度仍為減少趨勢，尤其是2000年以後。

透過模擬探討人類活動對陸地降水量所造成的影響，無論是全球或是不同緯度帶的分析，如果僅考慮自然驅動力的模擬，降水都未出現明顯趨勢。如果加入人為活動因素影響的模擬，降水在1990年以後就有開始逐漸增加的現象，尤其以北半球高緯度地區增加幅度最為明顯。除了南半球中緯度地區以外，在其餘緯度帶，人類活動影響均造成降水增加趨勢。這些模擬證實人類活動的確對降水的長期變化造成影響 (參見IPCC AR6, WGI, Figure 3.15)。

1.2.4 降水量未來推估

模式推估在21世紀全球平均降水量將逐漸增加，全球水循環將繼續加劇。在SSP1-

2.6情境下，世紀末全球降水約增加2.9% (1.0%至5.2%)；在SSP3-7.0情境下，約增加4.7% (2.3%至8.2%)。相對於全球或海洋，陸地上的降水增加更為明顯。考量陸地降水與人類活動範圍較息息相關，全球陸地降水的增加將帶來更多的衝擊 (圖1.2.5)。本世紀末2081年至2100年 (長期) 各情境模擬的平均陸地降水均比1995年至2014年更豐沛。依各模式降水量排序的5%至95%區間，各排放情境下，全球陸地降水變化範圍如下：極低排放SSP1-1.9情境為-0.2%至4.7%，低排放SSP1-2.6為3.3% (0.0%至6.6%)，中排放SSP2-4.5為1.5%至8.3%，高排放SSP3-7.0為5.8% (0.5%至9.6%)，極高排放SSP5-8.5則為0.9%至12.9%。溫室氣體排放量越高，總累積量越高，全球陸地降水增加量越多且越迅速。

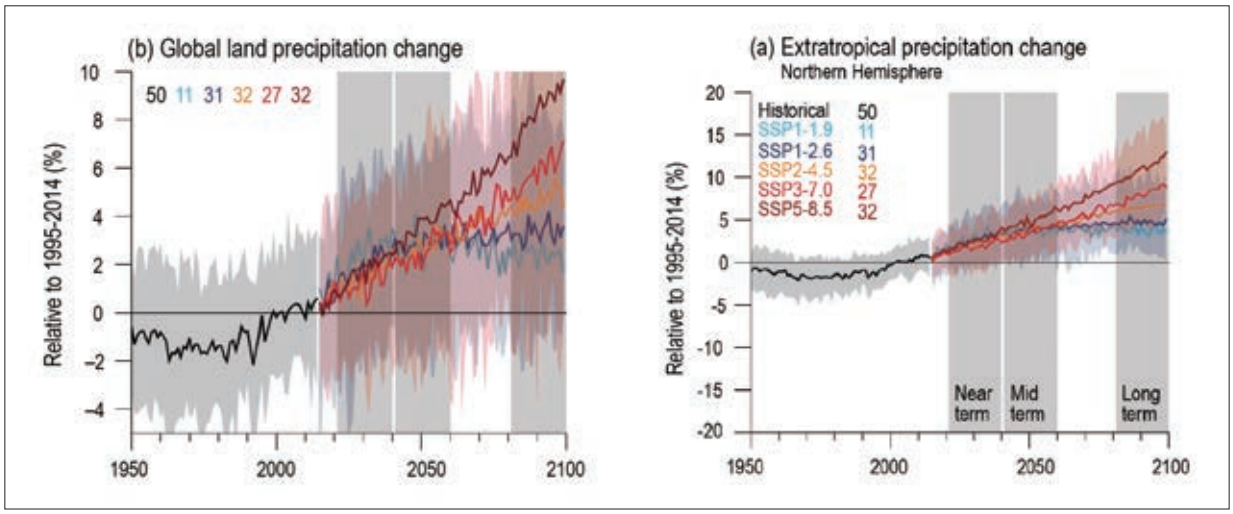


圖1.2.5　歷史與系集模式的未來各情境模擬平均降水變化率 (相較於1995年至2014年平均)。(左圖) 全球陸地降水；(右圖) 北半球30°N至90°N中高緯度降水。陰影為SSP1-2.6與SSP3-7.0各模式結果排序5%至95%的範圍，情境標示右側數字為使用的模式數量。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 4.2b, 4.4a)

相對於21世紀末的明確降水推估變化結果，2021年至2040年間降水變化推估的不確定性較高 (圖1.2.5)，如不同SSP之間的降水變化差異不顯著，主要是由氣候內部的自然變異性、模型不確定性、自然與人為氣膠影響的不確定性所造成。亦即2021年至2040年的推估結果顯示，雖然人為溫室效應對溫度有明顯影響，但對變動較大的降水影響程度尚未明顯高於前述之自然與科學的不確定性。然而在更長久的未來，如果溫室氣體累積越多，影響就更明顯。以SSP5-8.5情境的北半球中高緯度陸地降水變化率為例，依各模式推估降水量排序5%至95%，在2041年至2060年、2041年至2060年以及2081年

至2100年，分別為0.6%至4.9%、1.5%至8.8%以及4.7%至17.2%。北半球溫帶區域的降水增加變化率比全球陸地降水更為顯著。

全球暖化下，每增加1°C，全球年平均降雨量可能增加2%至3%，但極端降雨事件頻率和強度預計會增加約7%，多數地區的暴雨事件極可能變得更加頻繁和強烈(參見1.4.2 極端降水)。模擬不同升溫幅度對各地全年降水量的影響如圖1.2.6，升溫幅度由低至高分別類似SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5的情境。GWL 1.5°C時，赤道太平洋與非洲北部年降水增加，高緯度地區、赤道太平洋和部分季風區的年降水增加，而副熱帶地區與熱帶部分地區年降水減少，尤以地中海附近與低緯度北大西洋最為明顯 (圖1.2.6)。不同GWL的降水變遷特徵相似，惟暖化程度越高，變化量越大。

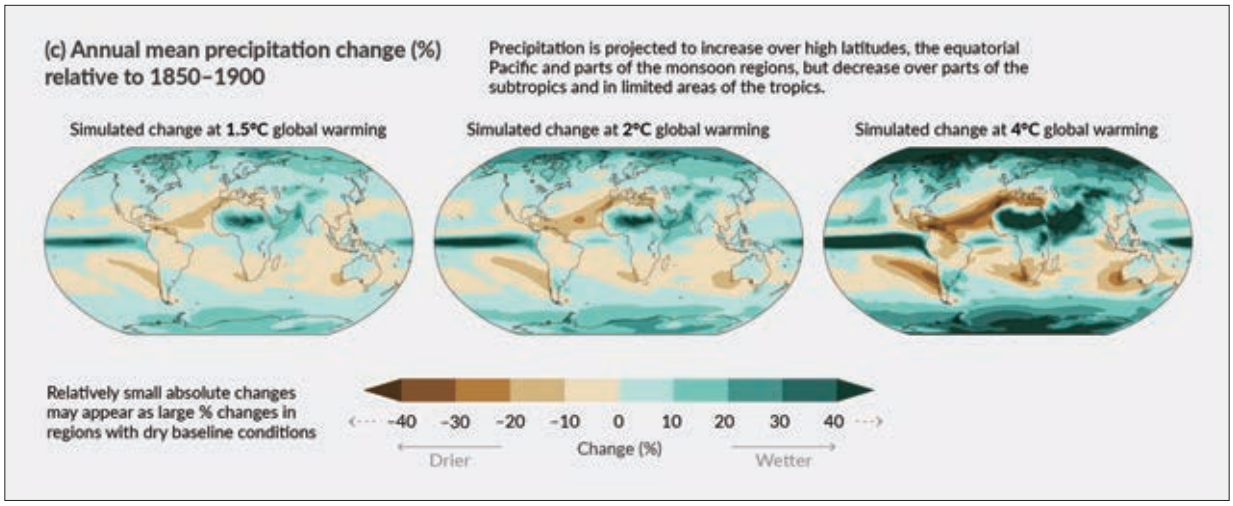


圖1.2.6　GWL 1.5°C、GWL 2°C以及GWL 4°C時，模擬的年平均降水變化率 (%)。基期皆為1850年至1900年。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure SPM.5)

1.2.5　降水與蒸發量

除了溫度與降水的改變，全球水循環與水資源運用也相當重要，1980年至2019年間降水減去蒸發量 (P-E) 的變化趨勢分布與降水相當類似 (圖1.2.7)，熱帶與季風區P-E為增加趨勢，副熱帶則為減少。統計全球與陸地、海洋的P-E，多數觀測資料顯示全球P-E為正值，即降水大於蒸發量。陸地區域P-E在過去1980年至2019年為增加趨勢，且為正值 (降水大於蒸發)，但75%的陸地趨勢並不顯著。在各組觀測資料中，多數觀測資料在

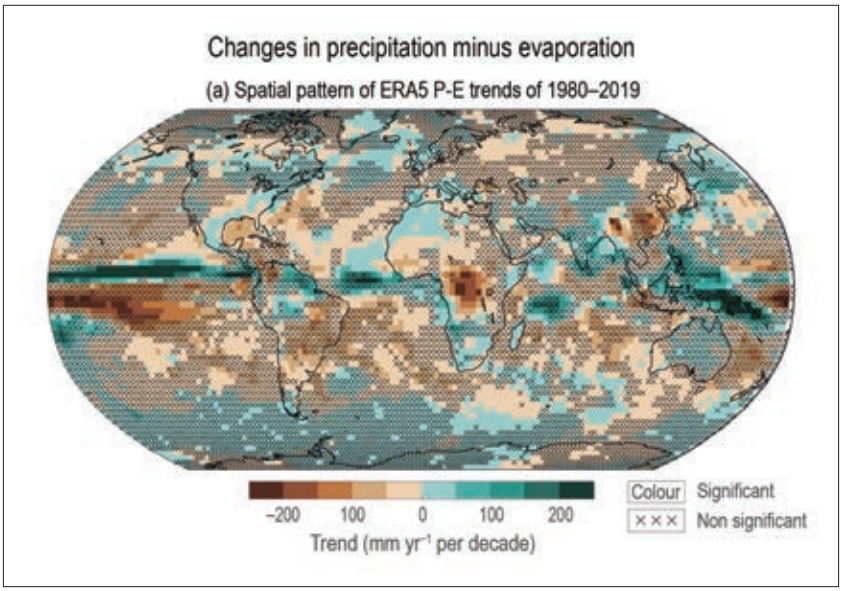


圖1.2.7　1980年至2019年降水減去蒸散量 (P-E) 趨勢。 x區域表示不顯著。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.16)

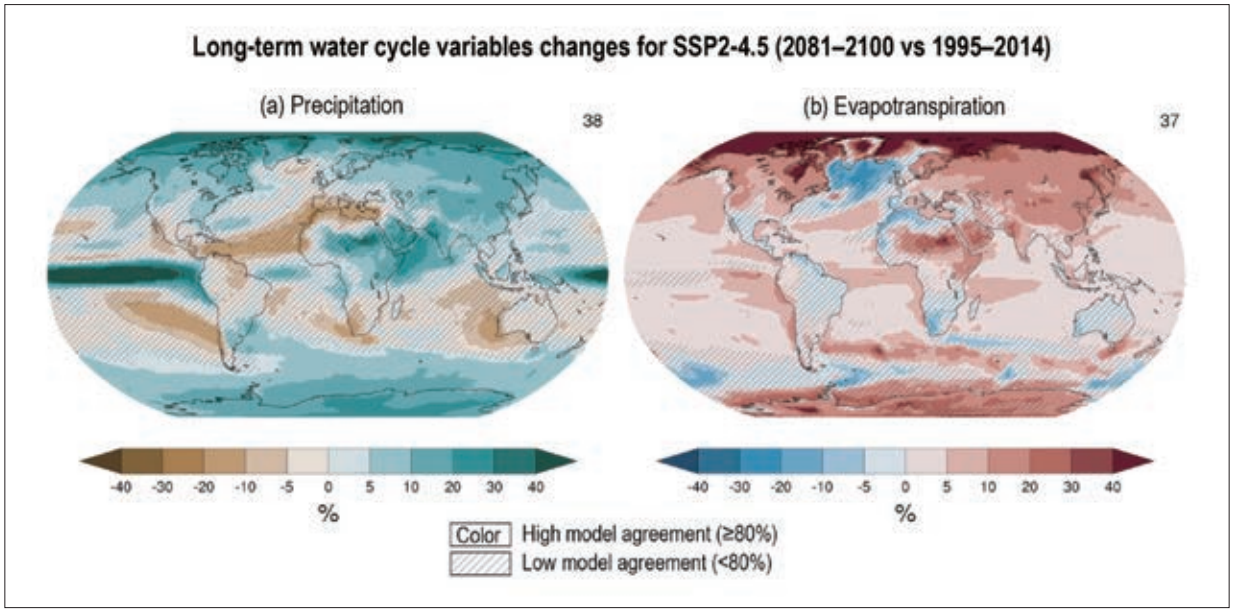


圖1.2.8　SSP2-4.5情境下，2081年至2100年降水變化率與蒸散量變化率 (%)。基期為1995年至2014年，右上數字為分析的模式數量。斜線覆蓋的區域表示呈現一致的變化訊號之模式數量少於80%。(摘自IPCC AR6, WGI, Box TS.6, Figure 1)

海洋區域P-E為減少趨勢，此趨勢主要受到蒸發量主導。但是如圖所示，大部分區域 (以x標示) 的變化未具統計顯著性。

SSP2-4.5情境下的降水與蒸散量變化如圖1.2.8。降水趨勢與圖1.2.6相似。蒸散量部

分，超過80%的模式推估一致顯示海洋蒸散量將增加，僅大西洋北部為減少趨勢；陸地蒸散量也多呈現正趨勢，其中南半球陸地各模式的結果較不一致。整體而言，高緯度增加的訊號較中低緯度強，尤其是北半球。

在暖化情況下，極端的濕潤與乾旱事件的嚴重程度將會增加，大氣環流的變化亦會影響這些極端事件發生的位置和頻率。在所有排放情境下，世界大多數地區的水循環變異性和相關極端事件將增加得更快。受乾旱影響的土地總面積將增加，且乾旱將變得更加頻繁和嚴重 (參見1.4.3 乾旱事件)。

1.3 海洋

1.3.1 海洋：海溫、海洋酸鹼度、海洋鹽度和海洋環流

地表溫度相對於1850年至1900年，全球平均上升0.88°C，其中有0.6°C的升溫是發生在1980年以後 (圖1.3.1a)。根據近年研究 (Bulgin et al., 2020)，全球海溫的增溫趨勢 (1981年至2018) 約為每10年上升0.9°C (圖1.3.2a,b)，除了南極海域與東太平洋南半球副熱帶的部分區域以外，基本上全球海面均為增溫，尤其在北半球高緯度地區最為明顯。以過去40年來看 (圖1.3.2c至f)，大西洋洋盆以1990年至1999年增溫最為顯著，東太平洋區域於2010年至2018年增溫明顯，2000年至2009年期間則為全球海溫變化趨緩的區間。利用數十個全球模式模擬未來暖化情境的海溫變化趨勢有極高的可信度，在SSP1-2.6的情境下，1995年至2014年和2081年至2100年之間平均增加0.86°C，而在SSP5-8.5則會增加2.89°C。全球海洋熱含量自1970年持續增加 (圖1.3.3)，且在21世紀將繼續上升。由於深層海洋循環較緩慢，即使在低排放情境，至少仍將持續到2300年。

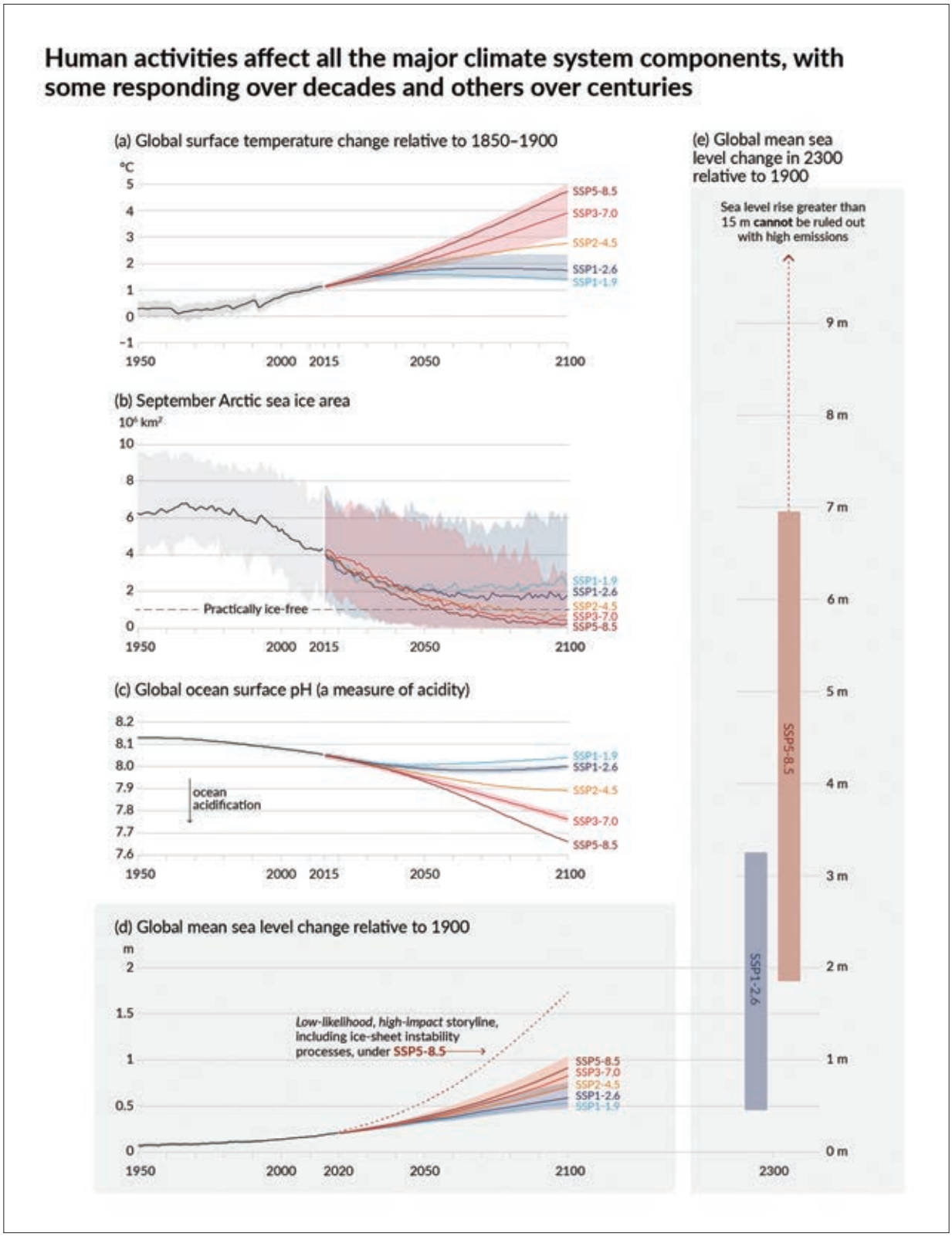


圖1.3.1　主要海洋變遷因子在過去觀測與不同人為排放溫室氣體暖化情境下之推估：(a) 全球地表溫度改變量 (基期1850年至1900年)，(b) 9月北極海冰，(c) 全球海洋酸鹼度，(d) 1950年至2100年的全球海平面高度改變量 (基期1900年)，(e) 2300年的全球海平面高度變化 (基期1900年)。(摘自IPCC AR6, 2021, Figure SPM.8)

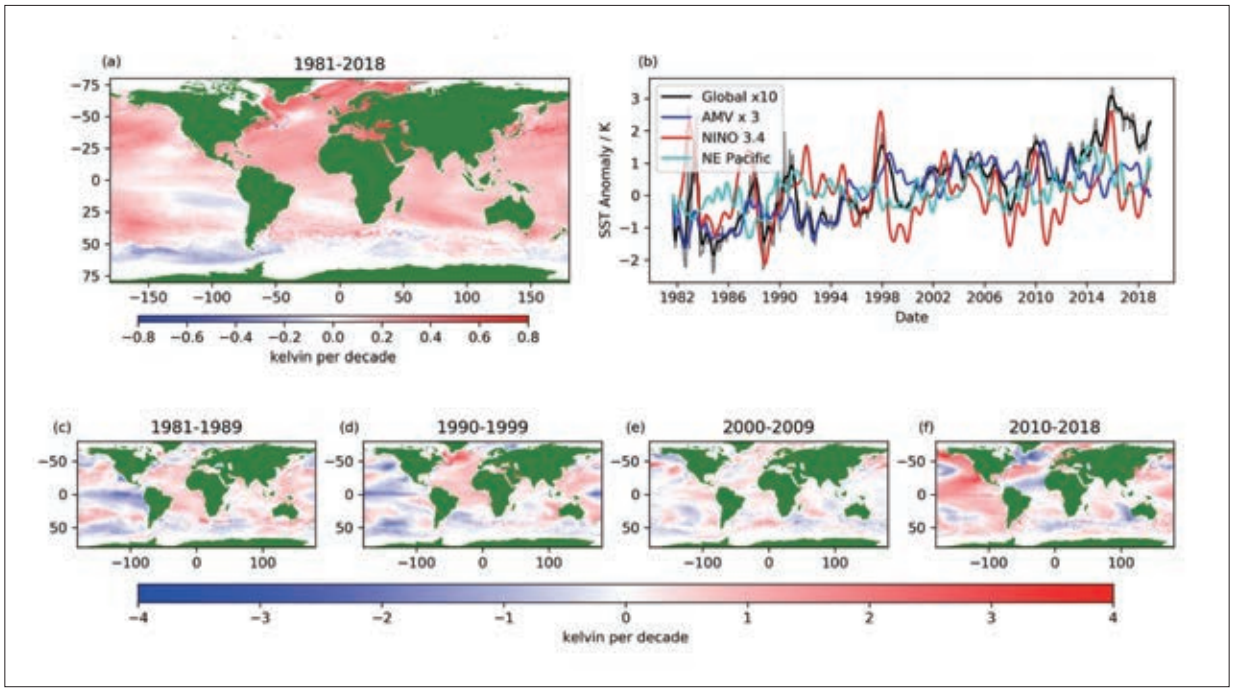


圖1.3.2 (a) 1981年至2018年全球海表溫度距平 (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) 趨勢 (單位：K decade^{-1})。(b) 1981年至2018年全球SSTA時間序列 (黑線)。(c) 1981年至1989年、(d) 1990年至1999年、(e) 2000年至2009年和 (f) 2010年至2018年間的年代際趨勢。(摘自Bulgin et al., 2020, Figure 1)

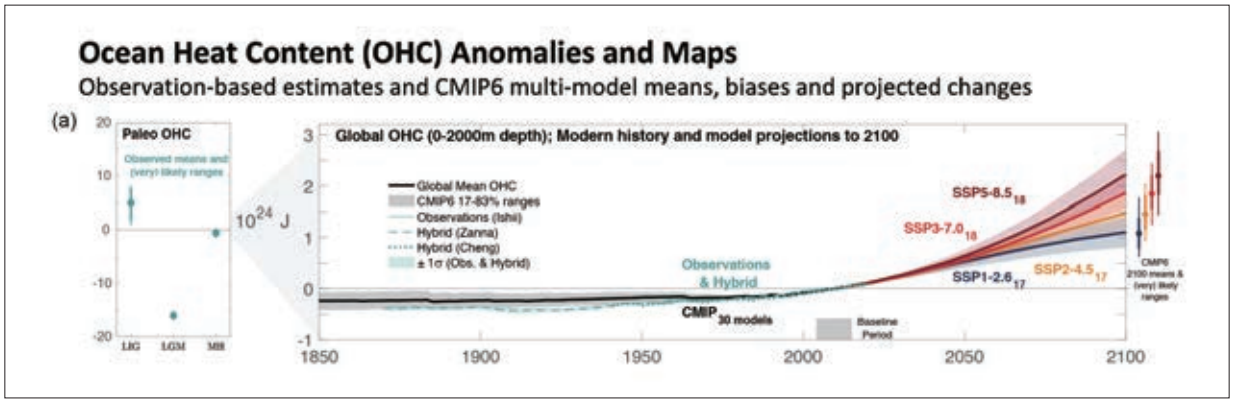


圖1.3.3 海洋熱含量在過去觀測及不同溫室氣體暖化情境下，其隨時間的變化。黑線為全球海洋上層2000公尺的海洋熱含量相對於2005年至2014年的氣候平均的異常值。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 9.6)

在西北太平洋東亞地區，圖1.3.4為CMIP6中SSP5-8.5暖化情境下，28組低解析度及5組高解析度模式之海表溫度變化系集平均 (以解析度1°為界)。不論高低解析度模式之系集平均，海表溫度在中高緯度增溫得較為明顯，與大氣表面溫度變化的分布相似。臺灣東岸有自低緯度向北流經的黑潮，相對於全球或同緯度地區而言，溫度增加幅度較少

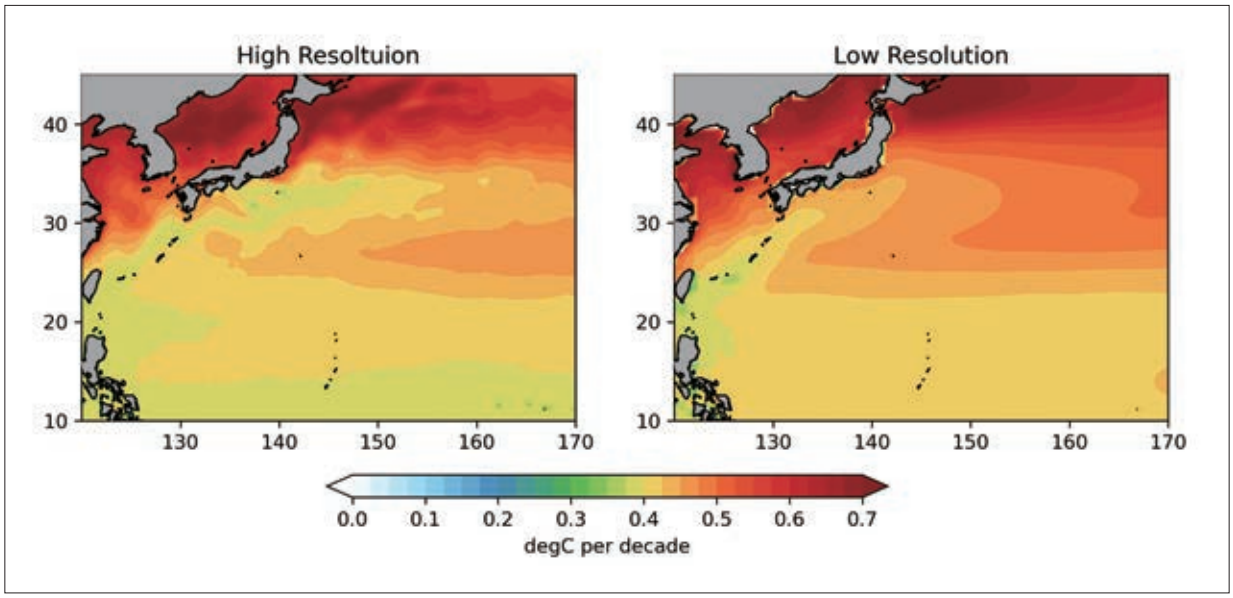


圖1.3.4　CMIP6的SSP5-8.5暖化情境下高低解析度模式系集平均之海表溫度變化趨勢 (單位：℃ decade^{-1})。左、右分別為高解析度模式 (空間解析度小於100 km) 及低解析度模式 (空間解析度大於100 km)。(資料來源：本報告產製)

(每10年約增加0.4°C)；且因為高解析度模式之黑潮較強，增溫的幅度又較低解析度來得少。臺灣海峽及東海西北側靠大陸沿岸區域則較不受黑潮的影響，越接近中國沿岸，海表溫度增加趨勢越顯著 (每100年約增加5°C) (Sato et al., 2006; Sung et al., 2021)。

除了平均狀態的改變，另一個值得注意的是海洋極端事件的發生 (如海洋熱浪) 與海溫結構改變 (如海洋層化)：海洋熱浪是指近海表面溫度異常高且持續一段時間的現象，可能對海洋生態系統造成嚴重和持久的影響 (Smith et al., 2023; Wernberg et al., 2021)，甚至影響到社會經濟 (Smith et al., 2021)。1980年代以來，海洋熱浪發生頻率增加了大約1倍，且變得更加強烈和持久，特別是2014年至2016年東北太平洋發生了破紀錄的長期持續海洋熱浪，並從阿拉斯加灣向北美西海岸擴展，是引發2015年至2016年超強聖嬰的重要前驅訊號 (Tseng et al., 2017)。海洋層化 (圖1.3.5) 指的是由於海表面升溫，較下層高或高緯度表層海水因降雨的淡化效應 (Ke-xin & Fei, 2022; Li et al., 2020; Sallée et al., 2021; Yamaguchi & Suga, 2019)，海洋表面的海水密度降低，導致上下層海水不易交換的現象。研究指出1960年至2018年間全球海洋層化約增加了5%，平均每10年約增加0.9%。大約70%的海洋層化發生在海面下200 m內，此一現象在太平洋、大西洋與印度洋皆可觀察到。近表層海水溫度上升 (Li et al., 2020) 貢獻了90%的層化現象，鹽度上升的貢獻較小。在未來暖化情境，海水溫度將持續上升，海洋層化現象將會隨著溫室氣體累積量增加而加強。

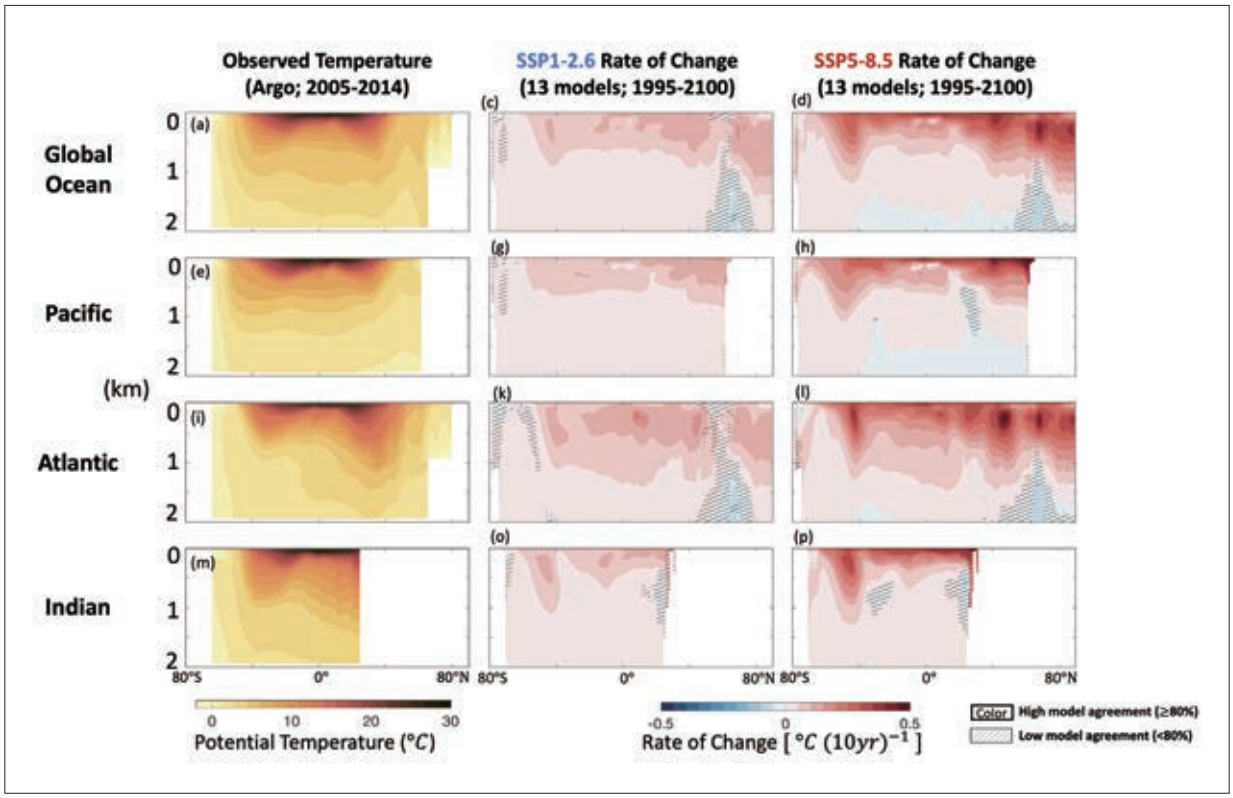


圖1.3.5　全球、太平洋、大西洋和印度洋，海表面以下2,000 m內東西向平均海水位溫的緯度-深度分布圖和其變化速率。從左到右列分別為觀測值 (2005年至2014年，°C)，暖化情境SSP1-2.6與SSP5-8.5 的變化速率 (1995年至2100年，°C decade^{-1})。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 9.7)

海洋酸化與海水中的pH值及碳酸鈣溶解度直接相關，過去全球海洋的平均pH值大致維持8至8.2左右 (Garcia-Soto et al., 2021)，觀測上可以看到全球海洋pH值從1950年起便逐漸降低，隨暖化情境加劇更是逐漸遞減 (圖1.3.1c)，可見在暖化下海洋逐漸酸化的趨勢相當明確。海水pH值與碳酸鈣的溶解度有直接相關，由於pH值變化會影響碳酸鹽類在海水中的酸鹼平衡，如pH值降低 (變酸)，碳酸鈣溶解度會提高。儘管部分生物面對pH值的變化並不敏感，但研究顯示，以碳酸鈣為外骨骼的生物，例如：造礁珊瑚 (Mollica et al., 2018)、翼足類 (Bednaršek et al., 2021; Mekkes et al., 2021)、鈣板藻等，在逐漸酸化的環境下會降低鈣化作用的效率，導致碳酸鈣的外骨骼或外殼破損。此外，酸化影響原來海水對於二氧化碳吸收的程度，儲存於海水中的溶解態無機碳 (Dissolved Inorganic Carbon, DIC；大部分為碳酸鹽離子) 在新的酸鹼平衡下，若因溶解度改變而從離子態轉為二氧化碳形式，釋放到水中後再擴散至大氣中，反而可能使得海洋這個最大的碳匯轉換為碳源。

觀測顯示全球海洋pH值從1950年起便逐漸降低，自1980年代以來，全球海洋表層pH值每10年下降約0.016至0.02 (Lauvset et al., 2015; Hurd et al., 2018; Gehlen et al.,

2020)。雖然由於時間與空間上的觀測數量不足，這項數據可信度較低，仍有研究認為在過去的20年中，全球表層海洋pH值變化趨勢已經強過自然變異 (Lauvset et al., 2015; Bindoff et al., 2019; Gehlen et al., 2020)。全球次表層 (1,000 m以上) 的pH值在過去20年到30年中也持續下降 (Lauvset et al., 2020)；在海洋深層 (2,000 m以下) 過去也觀察到局部海洋盆地pH值下降，如高緯度北大西洋與南冰洋。模擬推估顯示，在各種暖化情境下，pH值都將逐漸遞減，海洋酸化趨勢相當明確 (圖1.3.1c)。

海洋鹽度主要受到降水與蒸發影響，同時也因為淡水流入、洋流、海溫與海冰等複雜因子而變化，空間分布相當不平均。在1950年至2019年間，南大洋、熱帶太平洋地區、北太平洋北部與東印度洋地區的海表鹽度減少，大西洋、南太平洋與西印度洋鹽度則增加 (IPCC AR6, WGI, Ch2)。由於不同海域鹽度受到不同因子的影響，暖化情境下的鹽度變遷推估也較為困難。在全球暖化影響下，地中海降雨以及周遭河流注入淡水量減少，造成該海水鹽度增加 (Adloff et al., 2015; Parras-Berrocal et al., 2020; Soto-Navarro et al., 2020; Theodoropoulos & Karaouzas, 2021; Delworth et al., 2022)，進一步改變了地中海流出水 (Mediterranean Outflow Water, MOW) 甚至大西洋深海的鹽度特徵。由於地中海深受氣候變遷影響明顯 (Adloff et al., 2015; Parras-Berrocal et al., 2020; Soto-Navarro et al., 2020)，且可經由窄長的直布羅陀海峽 (寬10多公里，水深約300 m) 流出高鹽度海水而影響大西洋，因此地中海被視為對氣候變化反應最靈敏的熱區 (“Hot spot”; Giorgi, 2006)。依據推估，在SSP5-8.5 (於2100年多了8.5 W m^{-2}的大氣輻射) 情境下，2040年至2100年間地中海平均降雨量可減少20%至40% (Delworth et al., 2022)，並且河水流入量減少15%至30% (Sante et al., 2021)。在這大環境變遷下，地中海經由直布羅陀海峽流入大西洋的海水鹽度勢必增加，影響大西洋經向翻轉環流 (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC; Rahmstorf, 1998; Ivanovic et al., 2014; Swingedouw et al., 2019; Aldama-Campino & DÖÖs, 2020)。Ivanovic et al. (2014) 表示若地中海鹽度增加2倍，直布羅陀海峽緯度 (約北緯35°) 以北的AMOC將減弱，有趣的是，在該緯度以南的AMOC將增強，形成複雜的溫鹽環流重組的情況，證實面積不到大西洋1/40的地中海，在AMOC和全球尺度氣候變遷中扮演重要角色，不過實際的變動機制仍需科學家進一步探討。

觀測證據顯示，AMOC在20世紀末期到21世紀初期有減弱的趨勢 (圖1.3.6)，不過此一減弱趨勢是自然變異或是受人為排放溫室氣體影響尚未有定論 (Bryden et al., 2005;

Caesar et al., 2018; Fu et al., 2020; Latif et al., 2006; Latif et al., 2022; Rahmstorf et al., 2015)，如最近觀測發現AMOC自2010年又開始增強 (Moat et al., 2020)。

Desbruyères et al. (2019) 發現表面海水密度變化可能是AMOC變異性的主要驅動因子，而表面密度變化主要受表面熱通量變化主導，最近10年AMOC的增加，可能與近10年大氣變化造成的北大西洋極端低溫事件有關 (Josey et al., 2018)，因為北大西洋高緯度地區冷卻的影響，隨著海洋表面的冷卻，密度增加而強化海水下沉，加強AMOC (Tseng et al., 2022)。模式模擬結果也顯示目前AMOC 的變化趨勢仍在工業革命前的模擬變異範圍內 (Tsusijo et al., 2020)。但討論到未來暖化情境時，即使模式模擬分歧較大，所有SSP情境下的AMOC在21世紀末皆會減弱，但不會完全停止 (圖1.3.6)。

在西北太平洋海域裡最活躍的環流系統是流經臺灣東岸的黑潮，其具有高動能和熱能輸送的特性，在區域大氣與海洋的氣候調節扮演重要角色，黑潮流速與流軸的變化也會同時引起臺灣周遭海域的海溫與海面高度等變異。研究指出，黑潮水入侵東海以及南海的變化，對臺灣周遭海域溫度與海平面變化有同等重要的影響 (Kuo & Tseng, 2021; Wang & Wu, 2022; Wang & Oey, 2014)。

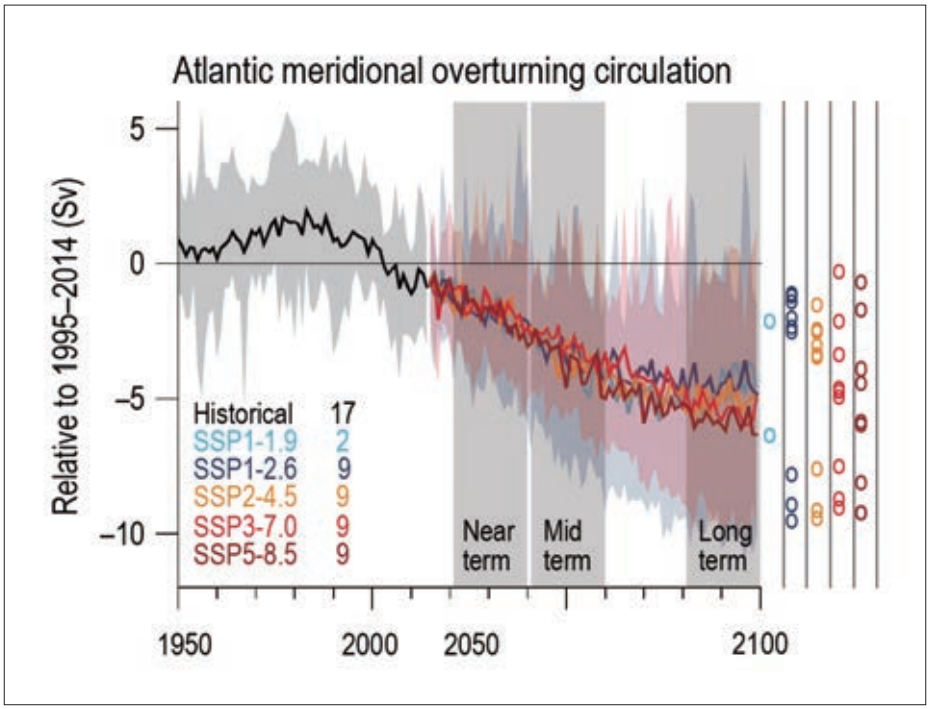


圖1.3.6　大西洋經向翻轉洋流的模擬強度變化在歷史與暖化情境之模擬。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 4.6)

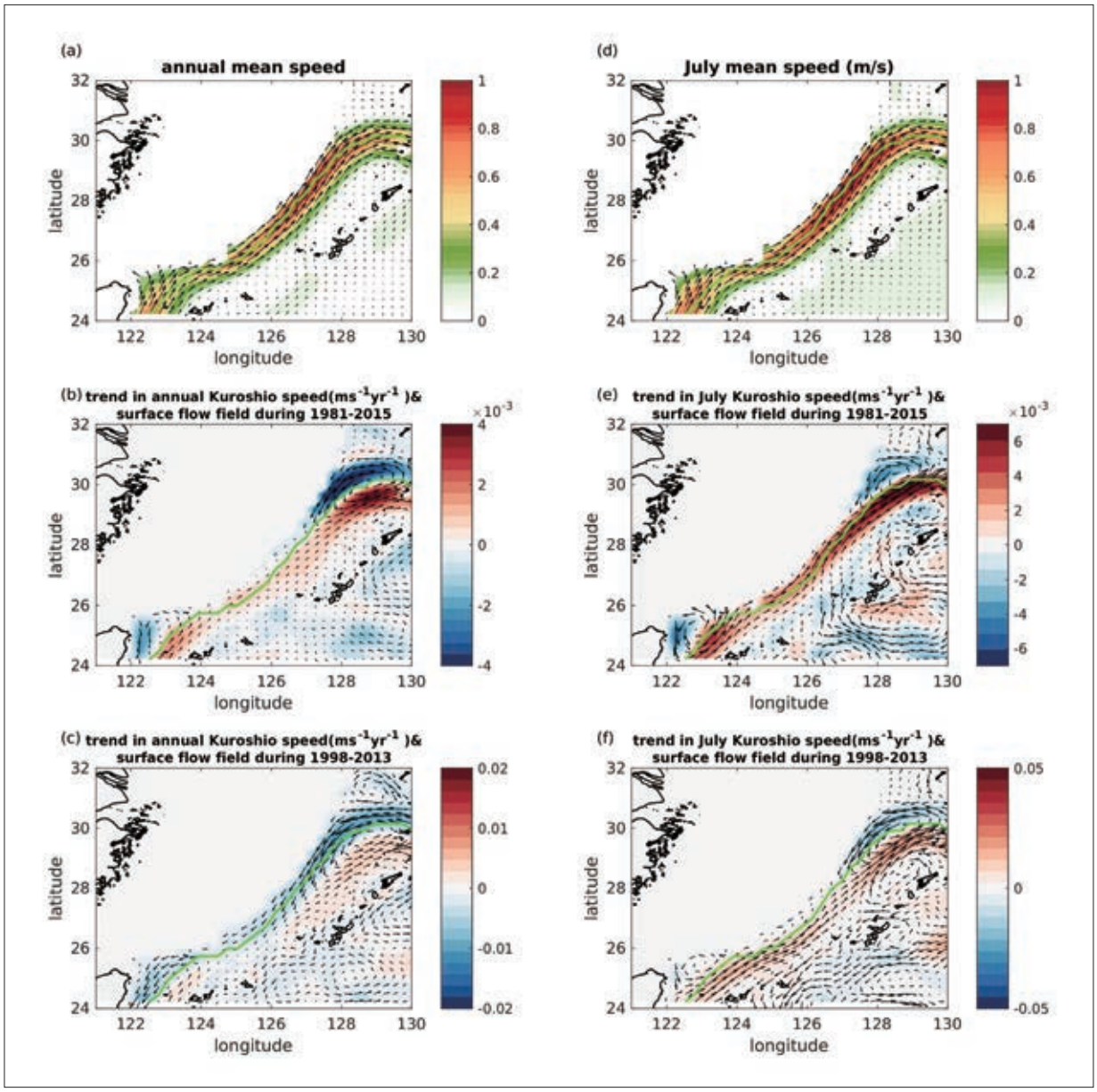


圖1.3.7　黑潮流速的 (a) 氣候平均；(b) 1981年至2015年變化趨勢；(c) 1998年至2013年變化趨勢。(d至f) 為夏季的結果。(摘自Kuo et al., 2023, Figure 7)

黑潮的變化主要受到大尺度風應力旋度以及上層海洋熱變化的影響 (Cheon et al., 2012; Sakamoto et al., 2005; Tseng et al., 2016)，從1955年至2010年期間的水文資料，可以發現東海海域的黑潮似乎有加速現象，在暖化停滯 (Warming Hiatus) 期間，黑潮則呈現減弱趨勢 (Liu et al., 2021)。圖1.3.7 a至c為Kuo et al. (2023) 使用區域海洋模式模擬1981年至2015年介於臺灣與日本間黑潮的變遷，此時間區段的黑潮在0 m至200 m的年平均流速約為0.06 m s^{-1}至1 m s^{-1}，顯示些微偏強但並不明顯的趨勢 (每年約0.001 m s^{-1}) 且有離岸偏移的現象，然而在暖化停滯期間卻有減弱的趨勢，黑潮流速減弱將導致其入

侵黑潮水通量的增加 (Guo et al., 2006; Wei et al., 2016; Liu et al., 2021)。此外，黑潮於暖化較強期間流速增強的趨勢在夏季較顯著，即使在暖化停滯期間的夏季仍維持較弱的增強趨勢 (圖1.3.7d至f)。

1.3.2　冰雪圈：海冰、陸冰、冰川、永凍土、冰雪

海冰的消失以北極海最為顯著 (圖1.3.8a)，尤其是在9月海冰開始形成的時節最明顯。相對的，南極的海冰消失較不顯著 (圖1.3.8b)，2015年之前甚至有增加的趨勢，然而這幾年的觀測 (最新紀錄詳見網站資訊https://nsidc.org/arcticseaicenews/2023/02/antarctic-sea-ice-minimum-settles-on-record-low-extent-again) 顯示南極海冰正快速減少。在所有SSP情境的推估 ，南北極海冰皆呈現顯著減少。在SSP5-8.5的最高排放情境下，北極海9月海冰在2050年左右可能完全消失，唯有在低排放情境SSP1-2.6與SSP1-1.9，世紀末北極海冰才不會完全消失 (圖1.3.1b)。

全球最重要的兩個陸冰冰層 (ice sheet) 地區為格陵蘭島與南極大陸 (圖1.3.8c)。格陵蘭冰層質量在1992年至2020年減少了4,890 Gt，相當於全球平均海平面上升13.5 mm (Box et al., 2022)：在1992年至1999年期間平均每年減少39 Gt，在2000年至2009年期間平均每年減少175 Gt，在2010年至2019年期間平均每年減少243 Gt。南極冰層質量在1992年至2020年減少了2,670 Gt，相當於全球海平面上升7.4 mm：在1992年至1999年期間平均每年減少49 Gt，在2000年至2009年期間平均每年減少70 Gt，在2010年至2019年期間平均每年減少148 Gt。兩個主要冰層質量的減少皆有加速的趨勢。在所有的SSP情境，格陵蘭冰層和南極冰層將在本世紀持續融化。暖化情境下的世紀末2100年，在SSP1-2.6情境，格陵蘭冰層對全球平均海平面上升的相關貢獻可能為0.01 m至0.10 m，在SSP2-4.5為0.04 m至0.13 m，在SSP5-8.5則為0.09 m至0.18 m。南極冰層融化在SSP1-2.6情境對全球平均海平面上升貢獻0.03 m至0.27 m，而在SSP2-4.5與SSP5-8.5情境下，則分別為0.03 m至0.29 m與 0.03 m至0.34 m。

在過去觀測紀錄裡，冰川、北半球春雪與永凍土等冰雪圈重要現象皆在逐漸減少中。冰川的質量在1993年至2019年減少了6,200 Gt，相當於全球平均海平面上升17.1 mm，在所有SSP情境下將繼續消失。自有觀測紀錄開始，冰川消失的質量在2010年

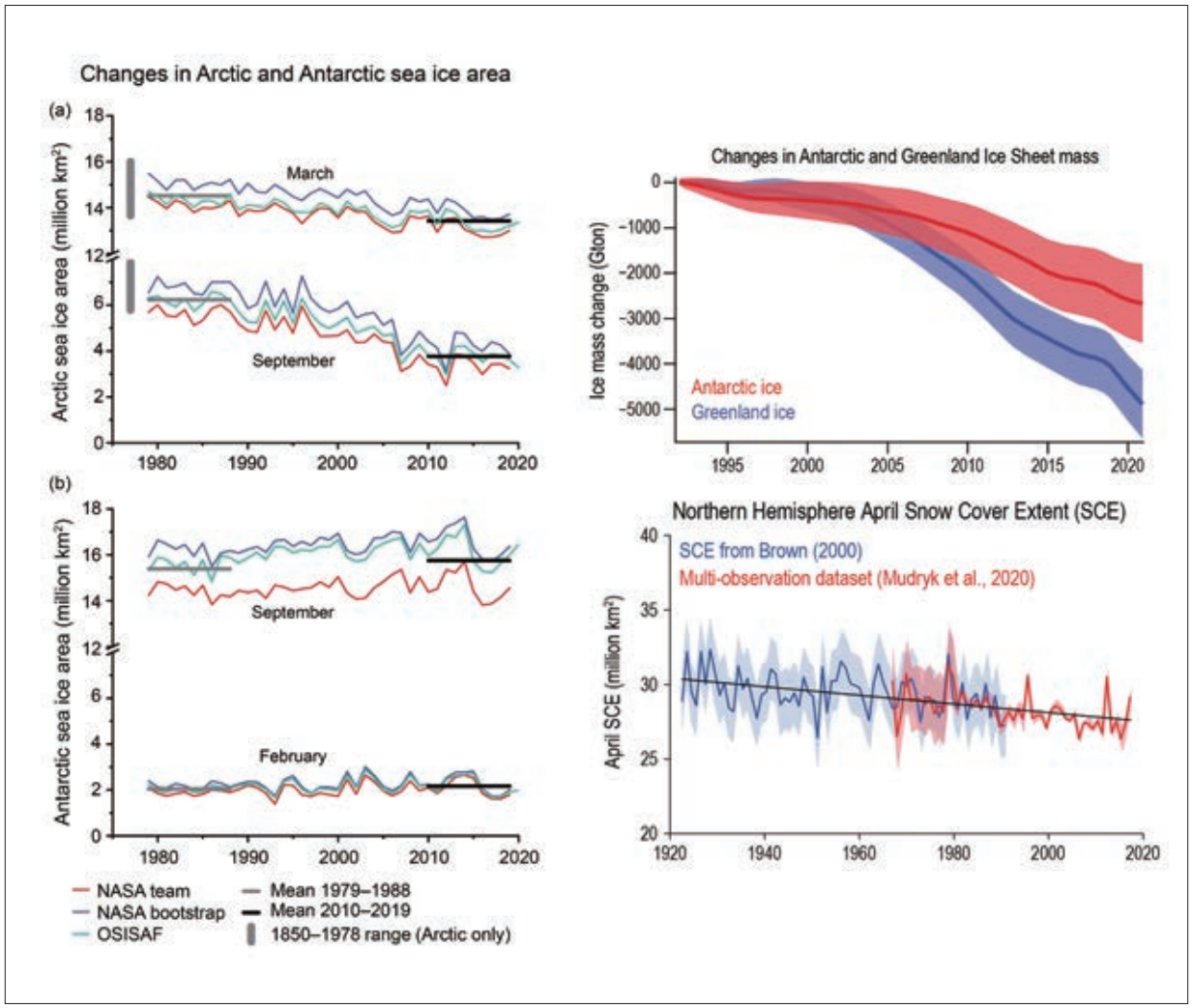


圖1.3.8 (a) 北極與 (b) 南極海冰之季節觀測值。(c) 南極與格陵蘭島的陸冰冰層總質量之歷史觀測值。(d) 北半球春天積雪延伸範圍之歷史觀測值。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.20, 2.24, 2.22)

至2019年比過往任何十年都要多。且自1978年以來，北半球春季的雪覆蓋面積一直在減少 (圖1.3.8d)，早在1950年代就已經開始了這種趨勢。在全球暖化的情況下，北半球季節性積雪覆蓋面積的進一步減少幾乎是確定的。值得注意的是，北半球有些地區過去幾十年雪覆蓋面積有增加的趨勢，例如北美、西伯利亞等地區 (Pulliainen et al., 2020)。未來推估全球平均氣溫每上升1°C，北半球春季積雪範圍減少約8% (摘自IPCC AR6, WGI)。關於永凍土的紀錄，在過去30年至40年中，也觀測到整個永久凍土區域的永凍土溫度增高。模擬推估皆指出，若全球持續變暖將導致近地表的永凍土體積減少。未來推估全球平均氣溫每上升1°C，地表3公尺內永凍土體積減少約25% (摘自IPCC AR6, WGI)。

1.3.3　海平面高度

從過去地質同位素資料分析與近代儀器觀測，可以看到全球海平面高度在過去80萬年呈現振盪起伏 (圖1.3.9a)，然而自19世紀中葉以來，全球平均海平面上升速率高於前2,000年的平均速率 (圖1.3.9b)，過去100年間 (圖1.3.9c) 各類觀測資料一致顯示海平面上

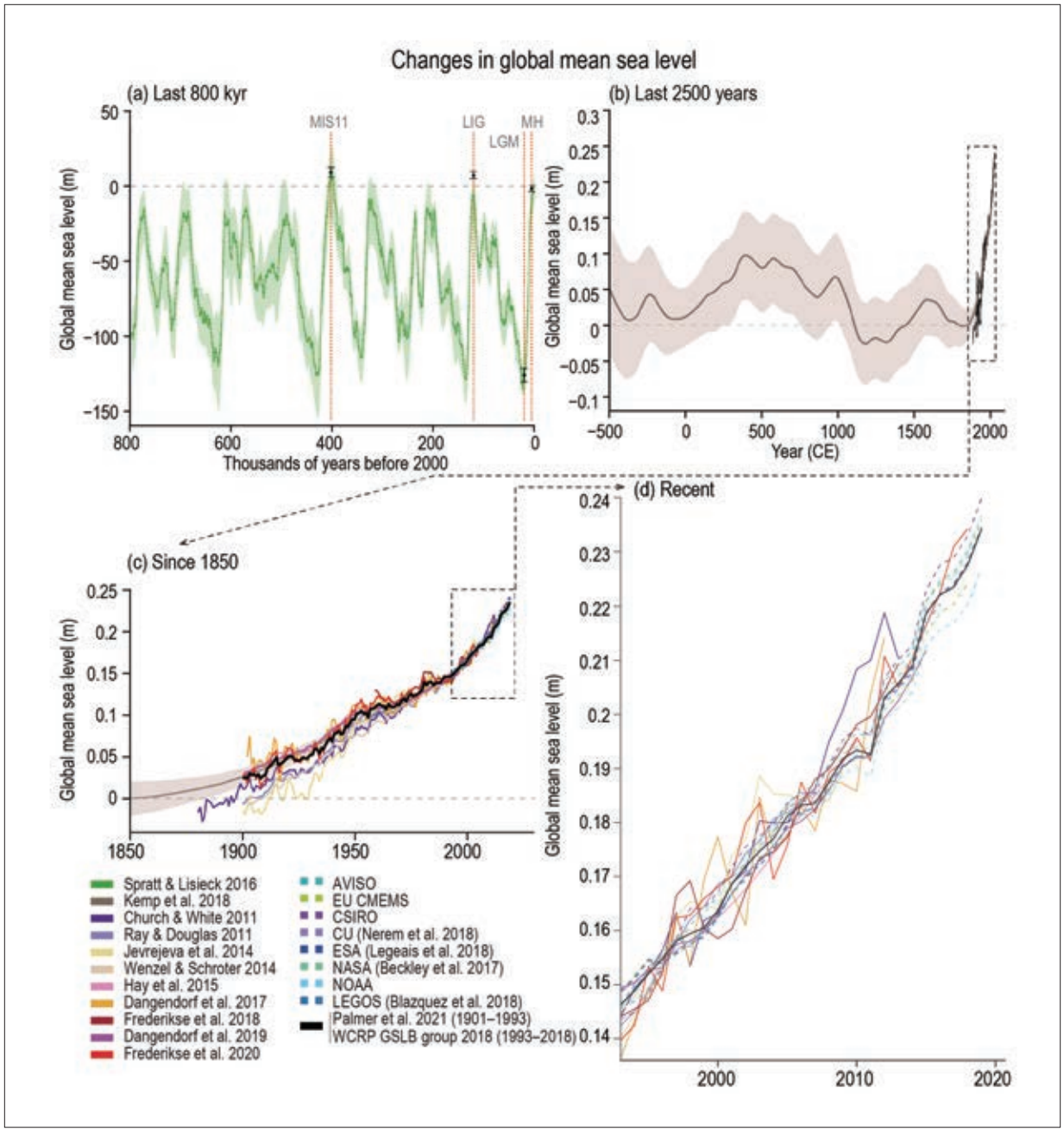


圖1.3.9　全球平均海平面之歷史變遷。(a)過去80萬年冰芯氧同位素分析重建的海平面。(b)過去2500年根據各種代理數據以及儀測測量的重建。(c) 自1850年以來的潮位站和後來的衛星高度計估計值。(d) 根據近年來潮位站以及測高儀的資料。 (摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.28)

升速度明顯加快，比過去３千年中的任何一個世紀都上升得更快，且在最近20多年速率更是明顯加快 (圖1.3.9 d)。分段來看，自20世紀60年代末以來，全球平均海平面上升加速，1971年至2018年期間的平均速率為每年2.3 mm，增加到2006年至2018年期間的每年3.7 mm。在暖化的預測之下 (圖1.3.1d)，海平面高度的上升隨著暖化情境而加劇。到2100年，海平面高度將上升0.38 m (SSP1-1.9) 至0.77 m (SSP5-8.5)。

海平面上升一般可分為幾個因素：冰川和陸冰融化、海水熱膨脹、陸地水量與地殼垂直運動等因素造成。由於沒有單一模式可以直接計算海平面變化的所有貢獻，因此不同因素貢獻到海平面的變化是分開計算，然後再加總。將不同的貢獻因子區分開來，並且比較過去觀測紀錄與模式模擬，可發現在人為暖化影響下，海水熱膨脹是海平面上升的主因。在未來暖化情境下，海水的熱膨脹仍是海平面上升最主要因素。2100年之後，因深海繼續吸收熱量、格陵蘭和南極洲冰原持續融化，全球平均海平面將繼續上升數個世紀，並在未來數百年內保持高值 (圖1.3.1e) 。

21世紀末，全球海平面上升在SSP1-2.6、SSP2-4.5及SSP5-8.5暖化情境下，將分別上升約0.47 m、0.56 m及0.76 m，四分位距分別約為0.15 m、0.2 m及0.25 m，其中海洋增溫的熱膨脹效應佔約3成至4成，其他為極區冰川融化及河川逕流流入 (Hermans et al., 2021)。海平面高度上升量與海表溫度增加量為正相關但非線性關係，溫度增加越多時，海平面高度上升量更多 (Hermans et al., 2021)。由海平面高度上升的水平分布 (圖1.3.10) 可知，在21世紀末時，臺灣周遭平均海平面上升相

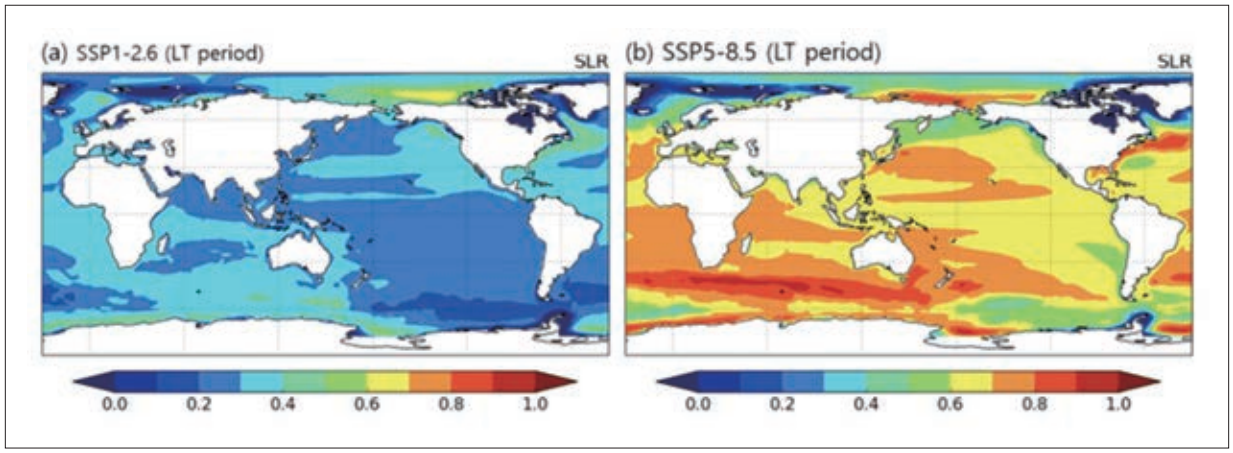


圖1.3.10　CMIP6的 (a) SSP1-2.6與 (b) SSP5-8.5暖化情境下模擬全球海平面高度上升分布 (2081年至2100年平均與基期1995年至2014年平均之差異)。(摘自Sung et al., 2021)

對於全球而言較高 (約0.6 m至0.7 m)，且臺灣東岸的變化較大 (Sung et al., 2021)，此空間上的分布可能與海水熱膨脹效應或受大氣風場驅動之海洋環流改變有關 (Yamanaka et al., 2021)。

Yamanaka et al. (2021) 利用第五期耦合模式比對計畫 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) 中幾個解析度較粗的模式暖化結果當作高解析度海洋模式的邊界條件，降尺度驅動海洋1/10° (約10 km) 空間解析度之海洋模式，模擬發現臺灣東西側海表溫度增加幅度不同 (圖1.3.11)，在代表濃度途徑 RCP8.5 (RCP2.6) 的情境下，東側約為2.5°C (0.7°C)，西側約為3°C (1°C)。降尺度海洋模式模擬的水平分布變化，與解析度較粗的全球模式結果類似，但整體而言增溫幅度較弱。海平面高度上升程度同樣在東西側有不同的變化幅度 (圖1.3.12)，在RCP8.5 (RCP2.6) 的情境下，東側約為70公分 (42公分)，西側約為64公分 (40公分)，其水平分布變化與幅度也與全球模式結果相似。然而，此篇研究較著重在日本附近海域的分析，圖1.3.11與圖1.3.12只呈現西北太平洋較大範圍的結果，臺灣周遭海域仍缺乏更細緻的分析成果。

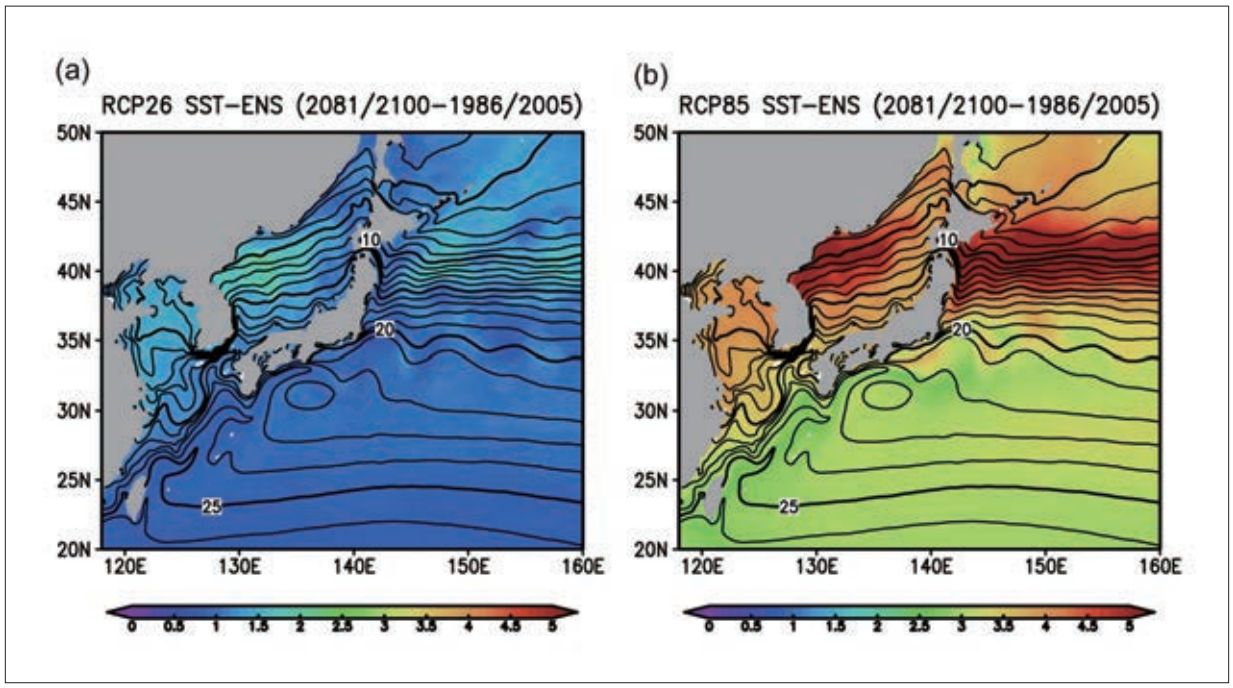


圖1.3.11 CMIP5 (a) RCP2.6與 (b) RCP8.5暖化情境下區域降尺度海洋模擬的海表溫度上升分布 (2081年至2100年平均與1986年至2005年歷史模擬平均之差異)。(摘自Yamanaka et al., 2020)

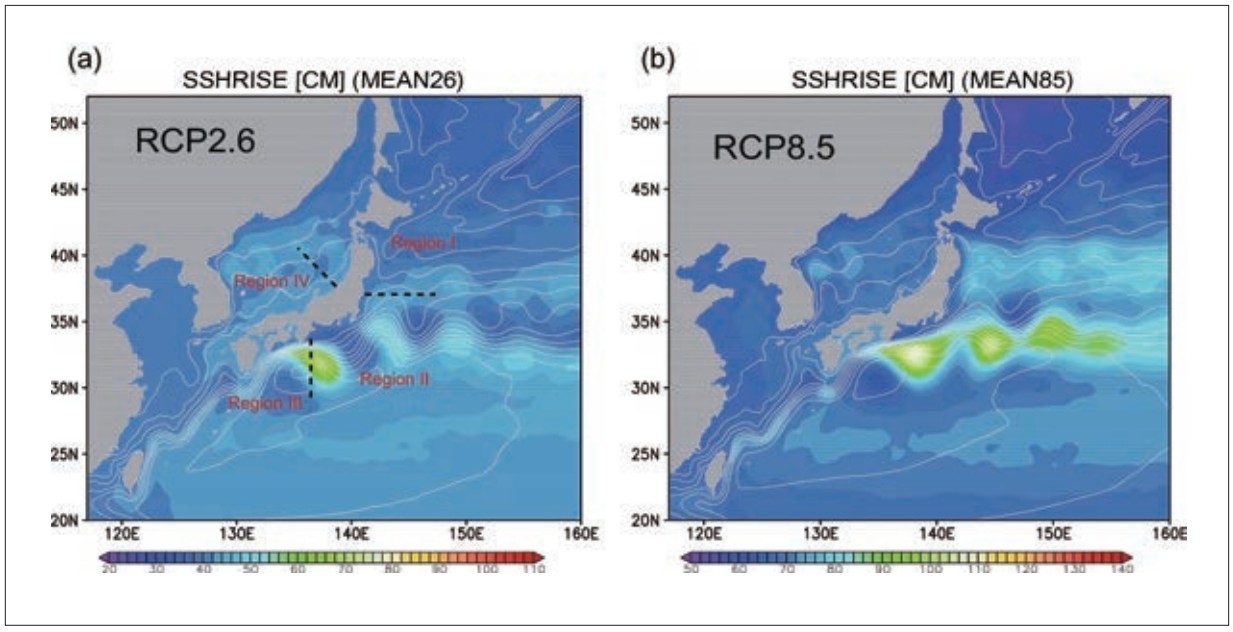


圖1.3.12　CMIP5 (a) RCP2.6與 (b) RCP8.5暖化情境下區域降尺度海洋模擬的海平面高度上升分布 (2081年至2100年平均與1986年至2005年歷史模擬平均之差異)。(摘自Yamanaka et al., 2020)

1.4 極端天氣與氣候

本節評估了極端氣候的過去觀測變化，主要針對極端溫度事件與極端降雨事件，以及未來在GWL 1.5°C、2°C和4°C的推估。極端降雨相關的部分，將統整關於極端降雨、乾旱、風暴導致的極端降雨，以及在AR6越來越重視的複合事件。

1.4.1　極端溫度事件

全球溫度近年的變化趨勢

從IPCC「促進氣候變遷調適之風險管理—針對極端事件及災害」特別報告 (IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, SREX) (IPCC, 2012) 和AR5 (IPCC, 2014) 到現在的AR6報告以來，已經使用許多基於每日溫度的指標來檢驗全球暖化的趨勢 (例如，The Commission for Climatology/World Climate Research Program/Commission

for Oceanography and Marine Meteorology joint Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI, 氣候變遷偵測與指標專家小組；Dunn et al., 2020)。大多數研究結果都表明，全球大多數地區的觀測紀錄都呈現明顯的暖化信號。自AR5 (IPCC, 2014) 報告以來，已經提出暖化趨勢不斷增強、極端高溫強度和發生頻率增加，同時，相對應的極端低溫強度和發生頻率則減弱的觀點，並在AR6中進一步確認了這一結果。儘管區域、空間和時間上的極端溫度增強趨勢可能有所不同，但全球暖化效應的證據是鐵證如山，無法被撼動 (IPCC AR6, WGI, Section 11.3.2)。

全球暖化的趨勢可以從幾個溫度指標進行分析(參見文字框5)，暖晝天數 (Frequency of warm days, TX90p)、暖夜天數 (Frequency of warm nights, TN90p)、冷晝天數 (Frequency of cold days, TX10p)、冷夜天數 (Frequency of cold nights, TN10p)、日最低溫極小值 (Annual Coldest daily minimum temperature, TNn) 和日最高溫極大值 (Annual hottest daily maximum temperature, TXx)。根據IPCC AR6的報告，全球暖晝天數和暖夜天數指標增加，而冷晝天數和冷夜天數指標減少。由全球陸地平均TXx和TNn距平 (基期為1961年至1990年) 時間序列顯示 (IPCC AR6, WGI, Figure 11.2)，TXx與全球陸地平均溫度變化一致，皆為隨時間增長變強，並且兩者增溫趨勢皆比全球平均溫度的增溫趨勢強45% (IPCC AR6, WGI, Section 2.3.1)。陸地變暖意味著TNn會上升得更為劇烈，自1960年以來，至今TNn已經上升約3°C左右 (IPCC AR6, WGI, Figure 11.2)。從不同的觀測數據中分析發現，本世紀以來全球平均溫度和大多數陸地地區極端氣溫有一致性增暖趨勢 (Fischer & Knutti, 2014; Donat et al., 2016a; Dunn et al., 2020)，而TNn和TXx指標也都有一致上升的結果，但是TNn增暖趨勢大於TXx指標 (Dunn et al., 2020; IPCC AR6, WGI, Figure 11.2)。

全球增暖趨勢會因區域不同而有不同的結果，在TXx、TNn指標的空間上顯示，大多數的地區趨勢一致變暖，歐洲、南美洲西北部地區TXx增暖得最為強烈，而TNn指標顯示在北極有很強烈的增暖訊號 (圖1.4.1)。另外，每年暖晝天數指標的增加趨勢與全球陸地平均溫度、TXx和TNn一致，在大多數地區都有增強的趨勢 (圖1.4.1c)，而每年冷夜天數指標則從1950年代開始發生頻率逐漸減少，幾乎所有陸地區域都有顯著性的減少 (Alexander et al., 2016; Dunn et al., 2020)。

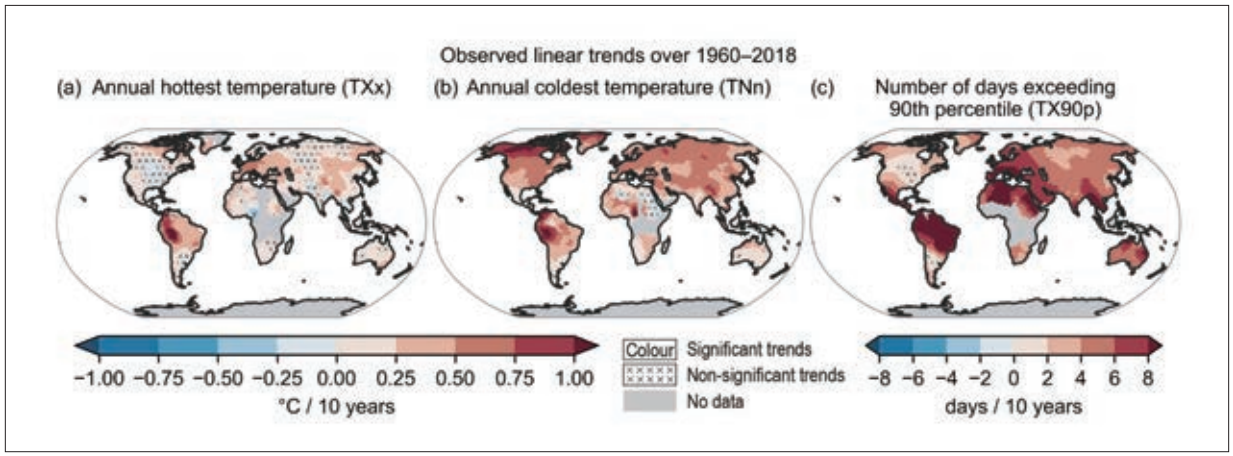


圖1.4.1　1960-2018年極端溫度指標之線性趨勢。(a) 日最高溫極大值 (TXx)、(b) 日最低溫極小值 (TNn) 距平、(c) 暖晝 (TX90p) 指標1960年至2018年線性趨勢之空間分布。TX90p的門檻值是選取1961年至1990時段的90百分位。沒有被標註灰色叉記號之區域，代表趨勢達到90%以上顯著之信心門檻。每格網格點需在1960年至2018年間至少有約39年 (66%) 以上的資料，並且資料年分至少能延伸至2009年，才會被計算線性趨勢。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.9)

東亞地區溫度變化趨勢

正如之前IPCC報告中的評估，東亞區域近年來面臨嚴重的極端高溫議題 (IPCC AR6, WGI, Section 12.4.2)，從歷史觀測資料結果顯示，極端高溫發生的頻率和強度顯著增加，極端低溫的頻率和強度顯著減少 (Donat et al., 2013b; Wang, H. et al., 2013; Lu et al., 2016; Zhou et al., 2016; Lin et al., 2017; Yin et al., 2017)。證據也顯示極端高溫 (低溫) 發生的頻率和強度的顯著增加 (減少)，對人類活動有一定程度的影響 (IPCC AR6, WG1, Table 11.7; Imada et al., 2014, 2019; Lu et al., 2016, 2018; Takahashi et al., 2016; Zhou et al., 2016; Wang et al., 2017a; Ye & Li, 2017; Kim et al., 2018; Seong et al., 2021)。

全球極端溫度未來的變化推估

根據IPCC全球升溫1.5°C特別報告 (Chapter 3, Hoegh-Guldberg et al., 2018; SR15)，GWL 1.5°C和GWL 2°C對極端溫度的預測評估與AR5的評估一致，且在未來暖化氣候下，全球大多數地區與陸地地區的極端高溫將更加頻繁，熱浪發生頻率和持續時間很可能增加，而極端低溫則將更少見，是幾乎可以確定的 (Chapter12, Collins et al., 2013)。GWL 2°C情境相比GWL 1.5°C情境，會造成全球多數陸地地區有更頻繁、更強和更長持續時間的高溫極端事件，並影響許多人口稠密地區。SR15報告中指出，最極端的高溫事件頻率「非常可能」(very likely) 增加，而極端低溫事件頻率和強度將減少，寒潮的持續時間也將縮短。

文字框 3 ｜信心度與不確定性

AR6中的不確定性處理延續了AR5所採用的方法 (參考2017科學報告，圖文框1.1)。信心度用來定性描述，另加上使用可能性量表，以定量方式呈現不確定性，同時AR6更增加了評估過程的可追溯性。相關推估的結果多根據文獻的證據、一致性、信心度以及可能性進行評估。這兩個指標分別是：

1. 信心度 (Confidence)：基於證據的類型、數量、品質、一致 (例如數據、機制理解、理論、模式、專家判斷)，以及一致性程度，對發現的有效性進行定性評估。

2. 可能性 (Likelihood)：對發現的不確定性進行定量測量，以機率方式表示 (例如基於觀測的統計分析或模式結果，或兩者皆有，以及作者團隊的專家判斷或從專家觀點的正式定量調查，或兩者皆有)。

以下評估流程說明，參考IPCC AR6 Chapter1 Box1.1說明。當科學家們對於某氣候現象 (或趨勢) 可用的證據先進行評估，得出足夠的一致性結論，再將其結合為一個指標進行信心水準評估，並使用5個程度表示：非常低、低、中等、高和非常高[1]信心度。如果判斷得出足夠的信心度和定量 (機率性) 證據，就會再以可能性陳述來表示。可能性的陳述通常是科學家對於該證據，已經具有高或非常高信心水準。可能性的表示方式包括：幾乎確定 (99%至100%的機率)、非常可能 (90%至100%)、可能 (66%至100%)、或許可能 (33%至66%)、不可能 (0%至33%)、非常不可能 (0%至10%)、幾乎不可能 (0%至1%)。

空間圖如何呈現

觀測和推估未來氣候變遷的空間資訊，通常以地圖形式呈現歷史趨勢 (基於觀測資料)，以及未來相對於基期的多模式推估變化。這些地圖通常包含關於結果

1　當對某一發現的信心度被評估為低時，不一定意味著對其相反情況的信心度為高，反之亦然。同樣地，低信心度並不意味著對該發現的不信任，反而意味著該陳述是基於目前可用知識的最佳結論。未來更多的研究證據可能會改變評估中的信心水準。

的穩健性或不確定性資訊，如趨勢的顯著性或模式之間的變化一致性。對於觀測到的趨勢，使用統計顯著性來測試確定穩健性。然而，對於多模式平均變化，模式之間的變化方向 (模式一致性)，使用簡單或更全面的方法來表示穩健性和不確定性。AR6在空間圖表示穩健性和不確定性的目的是：(1) 可以在不同空間度 (全球、區域) 一致的方法，同時滿足不同需求；(2) 在不同章節間保持視覺上的一致性； (3) 讓讀者盡可能容易理解地圖上不同資訊層次。

因此AR6在空間上呈現方式說明於表BOX 1.4.1。需要強調的是，與以前的報告一樣，這些方法適用在網格尺度上，從而增加了穩健性。AR6區域評估和方法 (例如趨勢檢測和歸因) 是針對氣候區域進行的，而不是在網格尺度上進行的。空間上小區域尺度和大區域尺度都是相關 (例如調適發生在較小尺度，但也在國家的大範圍空間尺度)。

表BOX 1.4.1　AR6在空間圖上所呈現不確定性相關資訊

方法	類別	定義	視覺化 Code
A.觀測 (顯著性)	**A.1. 顯著**	顯著 (0.1 顯著水準) 趨勢	顏色 (無覆蓋)
	A.2. 非顯著	非顯著趨勢	交叉 
B. 模式推估，簡單方法 (一致性)	**B.1. 模式一致性高**	≥80%模式變化符號一致 第6章 (<5模式系集數)：超過 (n–1)/n模式變化符號一致	顏色 (無覆蓋)
	B.2. 模式一致性低	<80%模式變化符號一致 第6章：少於 (n–1)/n模式變化符號一致	對角線 
C. 模式推估，進階方法 (顯著變化與一致性)	**C.1. 穩健訊號** (顯著變化且一致性高)	≥66%模式顯示變化大於變異門檻γ及≥80%模式變化符號一致	顏色 (無覆蓋)
	C.2. 無變化或無穩健變化	<66%模式顯示變化大於變異門檻γ	反對角線 
	C.3. 衝突訊號 (顯著變化但一致性低)	≥66%模式顯示變化大於變異門檻γ但<80%模式變化符號一致	交叉線 

方法A適用於觀測，包括兩個類別，一個用於具有顯著趨勢的區域 (無覆蓋)，另一個用於無顯著趨勢的區域 (“×”覆蓋)，通常使用顯著性水準為0.1的雙尾檢定。

方法B是模式未來推估的簡單方案。它包括兩個類別，一個用於模型一致性 (至少80%的模式在變化的方向上一致，以無覆蓋方式呈現)，另一個用於非一致性 (細線)。應注意，模式一致性使用「模式民主」進行計算 (即不捨棄或加權模式)。在CORDEX研究中，80%被廣泛使用，部分原因是在某些情況下可用的系集數量較小；這也有助於減少模式相依性對最終結果的影響。儘管大部分變數 (如溫度) 對於暖化驅動的變化具有高度的信心，但對於類似降水或區域評估來說，它被認為過於嚴格。

方法C是模式推估的進階替代方案，包括三個類別：「穩健變化」、「衝突變化」和「無變化或無穩健變化」(請參閱表BOX 1.4.1中的詳細資訊)。前兩個類別可以解釋為氣候變遷訊號在內部變異中可能出現的區域 (即在≥66%的模式中超過變異門檻值)。

上述討論的B、C兩種方法允許在推估變化一起呈現，並且適用於不同的傳達目的。方法B僅傳達變化方向的一致性，獨立於其相對於內部變異的顯著性，而方法C將推估變化置於內部變異的背景中，並允許突顯出衝突信號的區域。需要注意的是，在不同章節之間，對於相同變量可以應用不同的方法，以呈現不同的目的。對於從多模式系集中的未來氣候推估中表示穩健性或不確定性，並沒有一種適合所有情況的方法。主要原因是顯著性取決於感興趣的空間尺度：雖然不會在每個位置檢測到顯著的趨勢，但呈現顯著趨勢的位置足以表示該區域的變化是顯著的，特別是對於極端情況 (例如全球陸地區域的年最大一日降水量可能已經加劇，即使只有約10%的氣象站顯示出顯著的趨勢；圖1.4.7)。

整體而言，根據圖1.4.2陸地上極端溫度變化的幅度大於全球平均溫度的變化，尤其是在中緯度陸地區域 (Fischer et al., 2014; Seneviratne et al., 2016; Sanderson et al.,2017; Wehner et al., 2018b; Di Luca et al., 2020)。圖1.4.2為不同暖化程度下TXx和TNn的溫度變化強度，即使在GWL 1.5°C，TXx和TNn的強度上就有不小的增強趨勢；TNn增強趨勢大

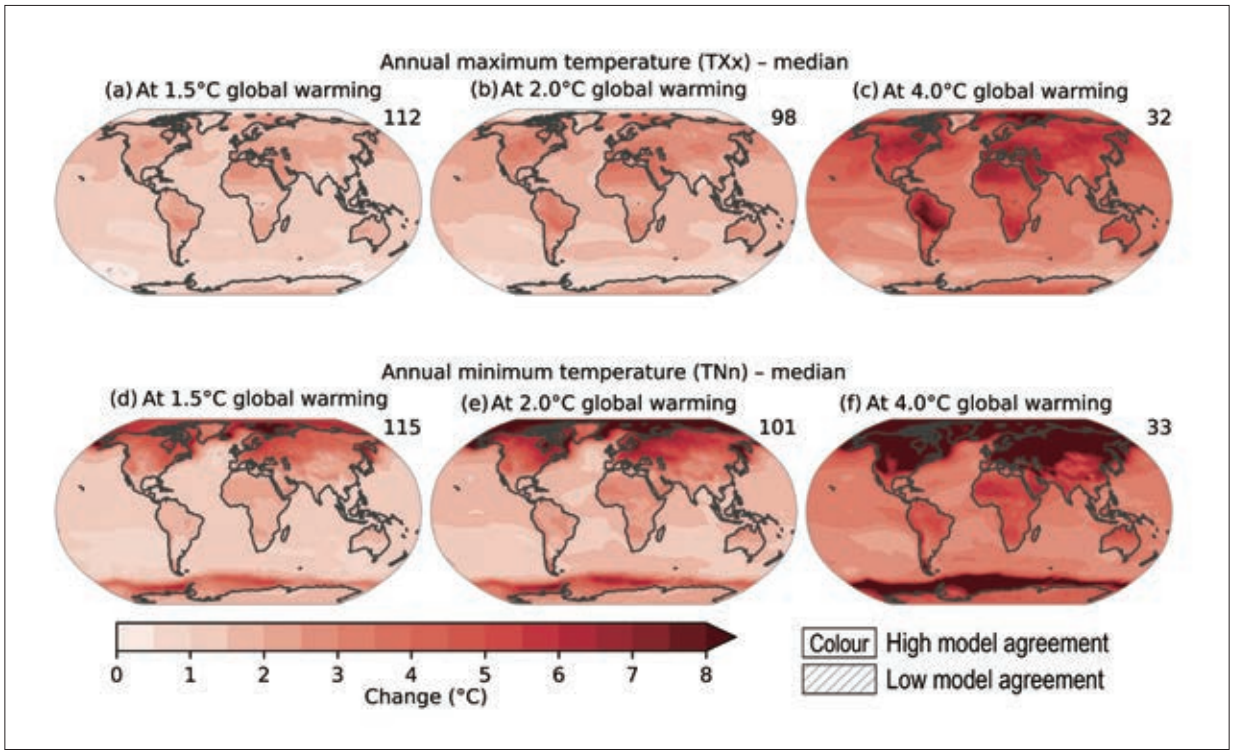


圖1.4.2　極端溫度指標之未來推估結果。(a至c) 分別為GWL 1.5°C、GWL 2°C和GWL 4°C的日最高溫極大值 (TXx) 和 (d至f) 分別為GWL 1.5°C、GWL 2°C和GWL 4°C的日最低溫極小值 (TNn) 距平。基期為1850年至1900年。(摘自IPCC AR6, Figure 11.11)，右上角的數字表示包含的模式數量。當某區域上≥80%模式顯示變化趨勢一致時，表示該區域之趨勢有高可信度；反之，則為低可信度，並用斜線覆蓋該區域。

於TXx，在中高緯度TXx的增強趨勢更急遽。

CMIP6的模擬顯示，全球每升溫0.5°C就可顯著增加極端高溫的強度和頻率，減少極端低溫的強度和頻率 (IPCC AR6, WGI, Figure 11.6, Figure 11.8, Figure 11.12)。升溫不到0.5°C，TXx的變化就可以高於自然變異的水準，並且CMIP6多模式結果指出，陸地上TXx的10年重現期事件和50年重現期事件的中位數66%範圍，在GWL 1°C和GWL 1.5°C之間不重疊 (IPCC AR6, WGI, Figure 11.6)，再次證明升溫0.5°C就會造成極端事件有顯著性的增加。

總結來說，在所有陸地區域上 (整合IPCC AR6, WGI, Table 11.4, 11.7, 11.10, 11.13, 11.16, 11.19)，即使在GWL 1.5°C下 (基期為1995年至2014年)，極端高溫事件的強度和頻率「很可能」增加，而極端低溫事件的強度和頻率則「很可能」減少。另外，在GWL 4°C時，以上現象的發生機率變成「幾乎可以確定發生」。雖然以上發生機率可信度適

用於AR6大多數區域，但仍有少數地區的可信度較低，例如，在GWL 1.5°C (4°C) 時，中美洲北部、北美中部和北美西部地區溫度變遷仍無法達到「中等 (很可能) 」信心程度，所以在引用此類極端溫度資料於區域時，仍須注意推估結果的信心度。

東亞地區極端溫度未來變化推估

AR6報告根據CMIP5模擬未來推估顯示，21世紀末，東亞地區極端高溫事件「非常可能」變得更加強烈或頻繁，特別是在RCP6.0和RCP8.5的情境下 (Dosio et al., 2018; Lin et al., 2018; Nasim et al., 2018; Shin et al., 2018; Hong et al., 2019; Su & Dong, 2019; Khan et al., 2020; Kumar et al., 2020)。熱指標 (Heat Index, HI) 被用來研判極端高溫的衝擊。這項指標同時考量溫度與濕度，能更進一步呈現人、動物、植物對高溫的耐受度。當熱指標大於41°C時，定義為「危險熱負荷 (Dangerous heat stress) 」門檻。本世紀末，在SSP5-8.5情境下，東亞區域在HI高於41°C門檻的天數，每年將增加50天至150天 (圖1.4.3)。而同樣的門檻在SSP1-2.6的情境下，東亞區域每年將增加約30

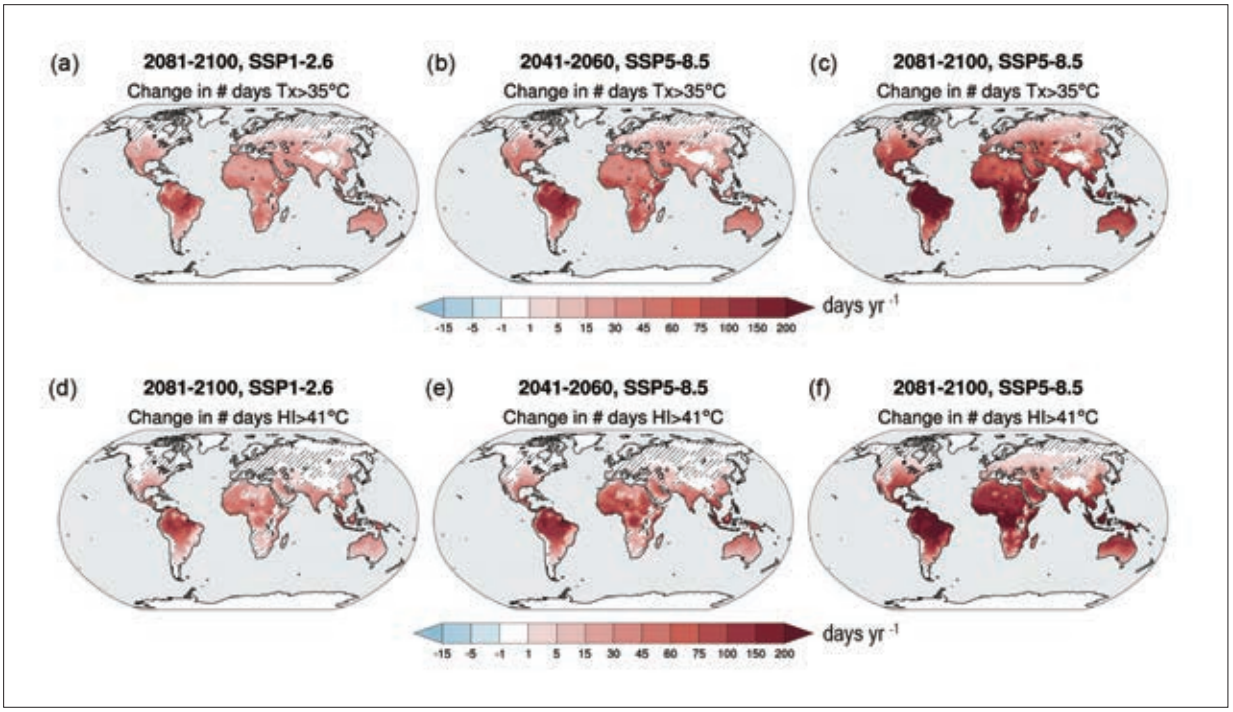


圖1.4.3　極端高溫發生天數在不同門檻、不同情境和不同時段的空間分布。(a至c)分別為21世紀末 (SSP1-2.6)、21世紀中 (SSP5-8.5) 和21世紀末 (SSP5-8.5) 超過「高熱負荷 (High heat stress) 」門檻的天數；(d至f)為相對應的時段，但使用「危險的熱負荷 (Dangerous heat stress) 」門檻。「高熱負荷 (High heat stress) 」門檻定義為當最高溫度大於35°C，「危險的熱負荷 (Dangerous heat stress) 」門檻則定義為當熱指標 (Heat index) 大於41°C的天數。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 12.4; Schwingshackl et al., 2021)

天左右。另一方面，使用「高熱負荷 (High heat stress) 」門檻定義 (最高溫度Tx>35°C) 也可見東亞地區在SSP5-8.5的情境下，到世紀中超過高熱負荷門檻以上的天數預計每年將增加約1天至30天，而到世紀末則會到達每年增加約60天。上述SSP5-8.5和SSP1-2.6情境間的差異 具高信心度 ，表示全球增溫越劇烈，極端高溫事件的增幅也會更加劇烈 (圖1.4.3)。

1.4.2 極端降水

不同尺度極端事件的熱力與動力變化

天氣與氣候變化 (包括極端變化) 同時受到熱力 (如水氣增減) 與動力 (如環流變動) 因素影響。研究顯示 (Fischer & Knutti, 2016; Sun et al., 2021)，全球極端降水增加比例與Clausius-Clapeyron關係的理論值 (亦即氣溫每上升1°C，飽和水氣量便會增加7%) 呈現類似趨勢，但是變化量較低。人為溫室氣體濃度增加，造成溫度與飽和水氣量上升，間接導致極端降水增加，如地表每升溫1°C，降水可增加4%至8%，此為熱力貢獻。熱力貢獻的空間分布均勻，區域性差異小，各模式推估的變遷趨勢一致性高 (參見IPCC AR6, WGI, Box 11.1, Figure 11.15)。熱力變化間接影響大氣環流形成動力貢獻，但受區域氣候特性影響，所引起的降雨變化具明顯的區域性 (參見IPCC AR6, WGI, Box 11.1, Figure 11.15)，而且僅在少數區域 (如赤道東太平洋雨量增多，副熱帶南北大西洋、印度洋與東南太平洋雨量減少)，模式推估呈現一致的變遷趨勢。整體而言，動力貢獻在模式間的差異相當大，比熱力貢獻有更高的不確定性 (Shepherd, 2014; Trenberth et al., 2015；Pfahl et al., 2017)。雨量變遷增加趨勢與熱力貢獻增加趨勢較為類似，顯示暖化導致的水氣增加是雨量增加的主要原因 (摘自IPCC AR6 WGI, Box 11.1, Figure 11.15)。

觀測趨勢與人為活動影響

SREX (Seneviratne et al., 2012) 分析觀測資料，指出陸地強降雨事件可能增加地區比減少的地區更多，然而在許多地區，趨勢仍不具有統計學上的顯著性，且存在相當的區域與季節性變異。更新的觀測研究則發現更明確一致的變化趨勢，指出自20世紀中期以來，大多數陸地區域的日平均降水強度都有所增加 (高信心程度)，且在全球和陸地區域尺度上極端降雨強度增強。其中，超過50 mm的日降水機率增加 (Benestad et al., 2019)，陸地上的年最大一日降雨量 (Rx1day) 在潮濕和乾燥的地區都顯著增加 (Du et

al., 2019; Dunn et al., 2020)，例如：北美洲、歐洲、亞洲 (圖1.4.4；Sun et al., 2021)，以及全球季風區域 (Zhang & Zhou, 2019)。就統計顯著性而言，Rx1day增加的地區 (測站) 比減少的還要多 (圖1.4.4)。Rx1day強度增加比例與全球平均溫度上升之間，呈現與Clausius-Clapeyron關係一致的比例變化 (Fischer & Knutti, 2016; Sun et al., 2021)。在全球至區域尺度上，最大連續5日累積降雨量 (Rx5day; 參見第二章文字框6｜極端指標定義) 的長期變化在許多方面與Rx1day相似 (Zhang & Zhou, 2019; Sun et al., 2021)。此外，日雨量排名前5%降雨日之總降水量 (R95pTOT)，其佔年平均降雨之比例也顯著增加 (Dunn et al., 2020)。由1950年至2016年間的日降水資料，輕度、中等和強日降水強度都顯示增強 (Contractor et al., 2021)。

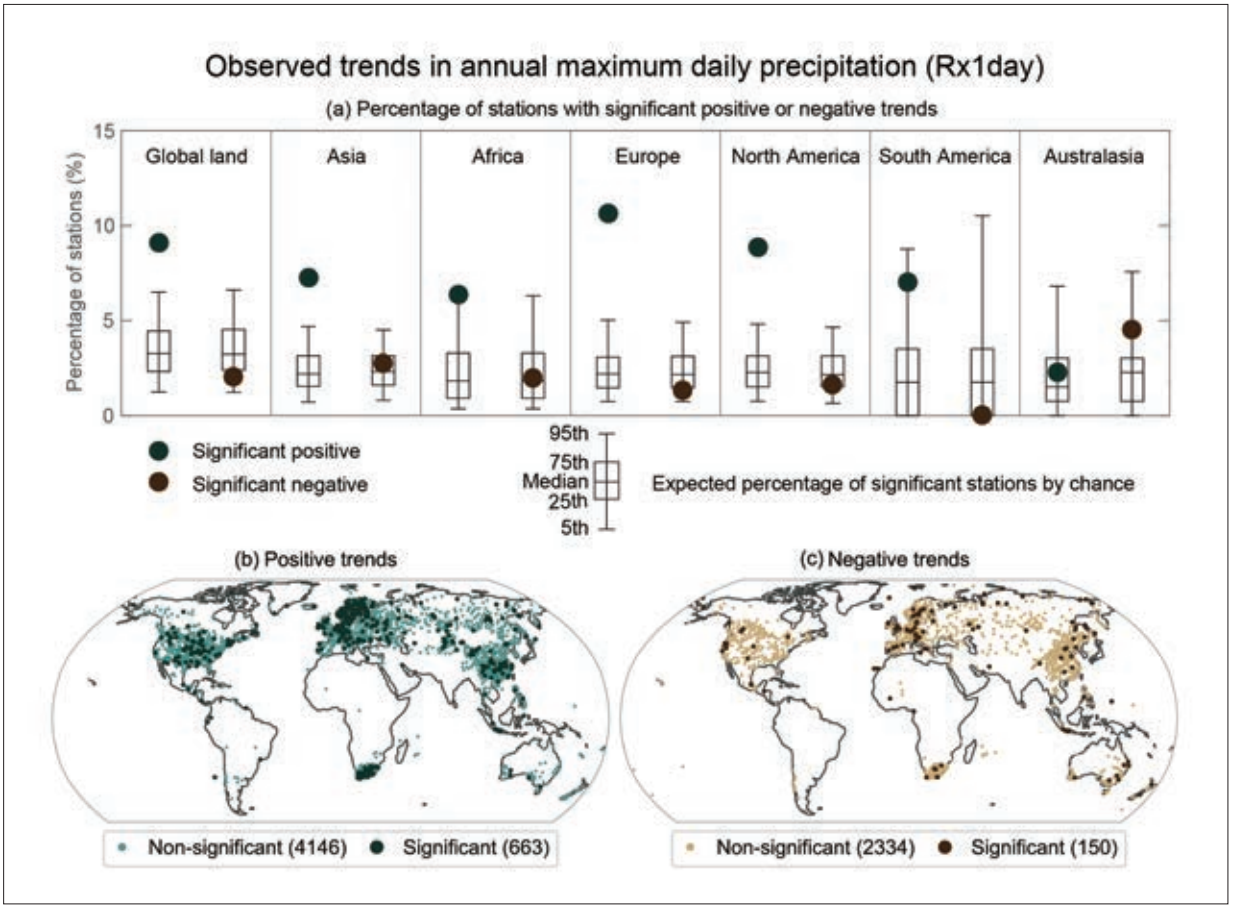


圖1.4.4　1950年至2018年間8345個測站年最大日降雨量 (Rx1day) 觀測趨勢與統計顯著性 (通過5%標準的雙尾檢定)。(a) 具有統計顯著趨勢的測站百分比；綠色顯示增加趨勢，棕色為減少趨勢。盒鬚圖方框標記中位數，第25個百分位數和第75個百分位數。上下橫線分別為第97.5個百分位數和第2.5個百分位數。(b) 增加趨勢測站與 (c) 減少趨勢測站的空間分布。深色 (淺色) 表示趨勢顯著 (不顯著) 的測站。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.13)

以全球而言，在大部分有良好觀測紀錄的陸地地區 (例如亞洲、歐洲、北美洲)，強降雨事件頻率、強度和/或降雨量都增加。強降雨強度增強，很可能是由人為因素引起 (Dong et al., 2021; Fischer et al., 2014; Shiogama et al., 2016)，其中溫室氣體排放增加是主要貢獻者。在非洲、澳洲、中南美洲，變化信心程度較低。在區域尺度上，可以支持人類活動對極端降雨影響的證據比較有限且不太穩健。

東亞趨勢

自1950年代以來，亞洲極端降水變化整體呈現顯著的增加趨勢 (高信心程度)。在1950年至2018年，超過2/3的測站中觀察到Rx1day和Rx5day增加，其增加趨勢具有統計顯著性 (圖1.4.4；Sun et al., 2021)。在東亞地區，Nayak et al. (2018) 的研究顯示日本過去的極端降雨變化隨著暖化升溫加劇而增強；Baek et al. (2017) 由夏季降雨的長期觀測紀錄，顯示韓國極端降雨增加與20年日降雨重現值增加，但是連續乾日天數增加，夏季降雨分布變得更為極端。在中國，極端降水沒有整體一致的趨勢 (Liu et al., 2019b; Chen et al., 2021)，有區域增加，有些地區減少。然而這樣的增加趨勢是否歸因於人為活動影響，目前研究尚未得到一致結論。

全球未來推估

暖化的未來，在大多數中緯度地區與熱帶地區，強降雨事件將更加頻繁和劇烈 (Collins et al., 2013)。IPCC AR5之後的研究，提供更多明確的證據支持先前的評估結果，包括極端降雨的觀測趨勢增加、人為因素對過去變化影響與未來推估。在IPCC AR5報告尚無法證實極端降雨強度Rx1day增強與暖化作用情境的關係 (Pendergrass et al., 2015; Sillmann et al., 2017)，IPCC AR6報告的推估則顯示，在所有暖化情境，每增溫1°C都會呈現相似的極端降雨變化率 (Sillmann et al., 2019; Li et al., 2021)。

隨著GWL升高，極端降水的發生通常會變得更強且更頻繁。極端降水幾乎在所有陸地區域都會增加 (高信心程度)，以亞洲與北美最明顯，只有很少數地區例外，例如在輕微暖化程度的地中海盆地周圍的南歐區域。極端降水的減少，主要發生於副熱帶海洋區域，並且與因風暴路徑變化而引起平均降水減少高度相關。

極端降雨機率增加的推估，會隨著事件罕見程度，其增加幅度更大 (圖1.4.5；Fischer & Knutti, 2015; Kharin et al., 2018; Li et al., 2021)。使用SSP情境的CMIP6模擬

顯示，在GWL 4°C每10年一遇和每50年一遇事件的頻率，將分別增加約2倍和3倍 (Li et al., 2021)。此處使用的極端降雨指標定義請參考第二章文字框 6｜極端指標定義。圖1.4.5顯示在每升溫1°C的情境，Rx1day增加約7% (如4°C相對於增加30%)。至於Rx5day的10年和50年重現值，增幅略微小一些 (Li et al., 2021)。對於Rx1day和Rx5day的50年重現值，在GWL 1.5°C和GWL 2°C之間，多模式系集變化90%範圍沒有重疊 (圖1.4.5)，這顯示即使增溫幅度不大也可能導致極端降雨的顯著增加 (Li et al., 2021)。

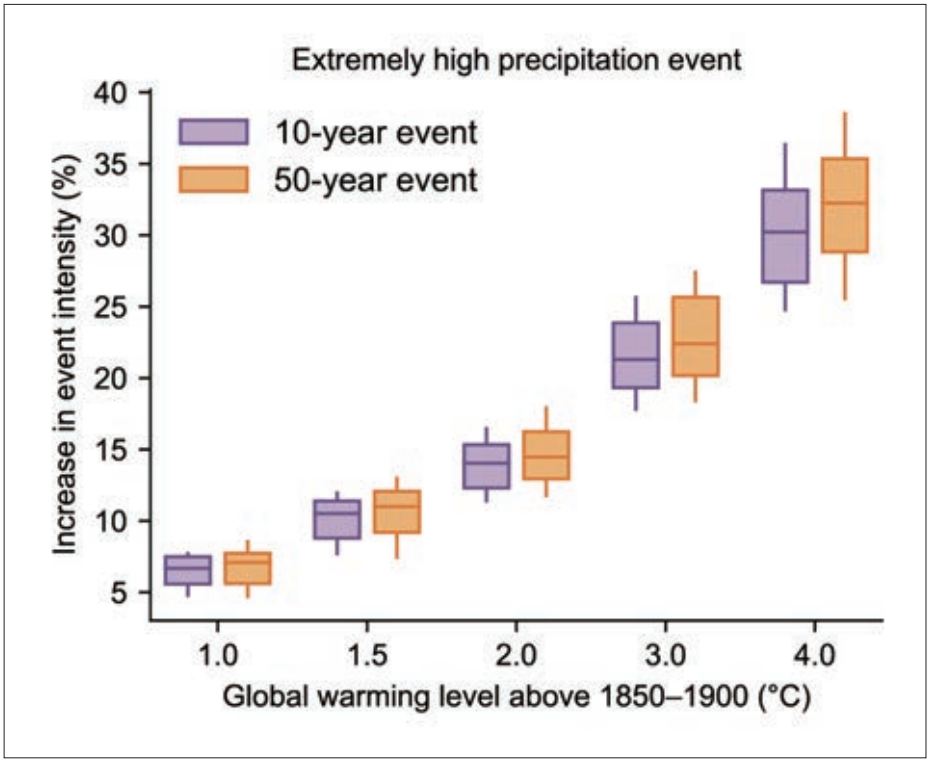


圖1.4.5　CMIP6模式在全球陸地區域。相對於1850年至1900年的GWL 1°C、GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C 和GWL 4°C (橫軸)，年最大日降雨量 (代表極端降水事件強度)，在10年 (紫色) 和50年 (橙色) 事件重現值的推估變化率 (縱軸)。方框中水平線與上下框線分別代表所有模式模擬的變化率的中位數與66%的不確定性範圍，而盒鬚圖上下界間距代表90%的不確定性範圍。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.15)

以上結果顯示較罕見的極端降雨事件強度在暖化情境下增加的幅度比平均值的增加幅度大，亦即極端的變得更極端 (Pendergrass, 2018; Mizuta & Endo, 2020; Wehner, 2020)。不同暖化程度下，Rx1day變遷的空間分布非常相似 (圖1.4.6)，如赤道與極區附近增加最多，在目前的乾旱地區也都有顯著增加，並且在區域尺度上，極端降雨與全球暖化程度之間具有近線性的關係，與Seneviratne & Hauser (2020) 的結果一致。值得注

意的是，在低暖化情境 (GWL 1.5°C)，副熱帶的雨量變遷不顯著 (斜線區)，但到了GWL 4°C，雨量增加就很明顯。這項對比反映出暖化程度越高，變遷程度越大。

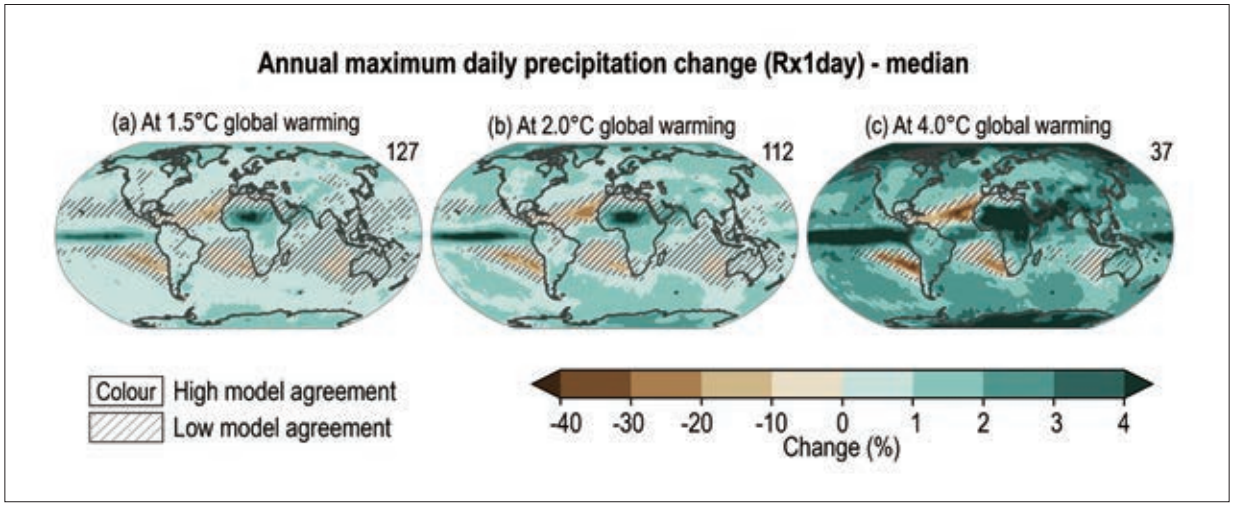


圖1.4.6　GWL 1.5°C、GWL 2°C和GWL 4°C時，年最大日降雨量Rx1day變化的分布。右上角數字為模擬組數。沒有斜線陰影處表示有高於80%模式推估呈現一致的變化方向，斜線陰影處表示模式一致性低的區域。 (摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.16)

東亞未來推估

圖1.4.6顯示GWL 1.5°C至GWL 2°C之間的微幅差異，便可能導致極端降雨的增加，且模式之間在空間分布的一致性也提升。同樣的，亞洲極端降雨增強趨勢隨著全球暖化程度上升，且可能性更為明確。CMIP6多模式的中位數推估顯示，在95%以上的區域，Rx1day和Rx5day的10年和50年重現值將增加，即使在2°C暖化程度也是如此。在各排放情境皆顯示，隨著暖化程度升高，增加幅度會更大 (Li et al., 2021)，在東亞地區的極端降雨重現值增強，有更高比例的變化。

儘管存在地區差異，推估結果顯示多數東亞地區極端降雨增加。Nayak et al. (2018) 的研究顯示，在全球暖化推估的日本未來極端降雨變化，隨著升溫加劇而增強；Sui et al. (2018) 顯示GWL 2°C程度，在中國東北部與青藏高原有顯著的極端降雨增強；Li et al. (2018) 發現不同全球暖化程度之間，在極端降雨重現值增強並非等比例，GWL 2°C相對於GWL 1.5°C暖化程度，極端降雨百年重現值變化可由1.6倍上升至2.4倍。Chen et al. (2022) 利用高解析度大氣模式，推估暖化情境下的東亞春雨與梅雨季極端降雨變化顯示，春雨季盛行降雨雨帶往北擴張，雖然盛行降雨區平均降雨變化不大，但連續不降雨

天數增加、降雨天數減少，強降雨事件發生頻率增加；相對的，在梅雨季盛行降雨區，強降雨事件強度增加且發生更為頻繁，因此平均降雨增加。

1.4.3　乾旱事件

降水缺乏通常是引發乾旱的主要因素，大氣蒸發需求過剩、土壤含水量不足以及水文條件缺乏也會造成不同類型的乾旱。乾旱事件依據物理條件與使用指標可分類為：氣象乾旱、農業生態乾旱與水文乾旱。降水缺乏與蒸散作用直接對可用水量造成影響；土壤含水量不足有時會因大氣蒸發增加而加劇，進而導致農業生態乾旱；河川流量與地表水的不足則會造成水文乾旱。

觀測趨勢與人為活動影響

過去近幾十年來，亞馬遜地區 (2005年、2010年)、中國西南部 (2009年至2010年)、北美西南部 (2011年至2014年)、澳洲 (1997年至2009年)、加州 (2014年)、中東 (2012年至2016年)、智利 (2010年至2015年) 等地區均記錄到嚴重的降雨不足事件 (van Dijk et al., 2013; Mann & Gleick, 2015; Rowell et al., 2015; Marengo & Espinoza, 2016; Dai & Zhao, 2017; Garreaud et al., 2017, 2020; Marengo et al., 2017; Brito et al., 2018; Cook et al., 2018)。然而，在標準化降水指數 (Standardized Precipitation Index, SPI)、乾旱頻率和乾旱嚴重程度，全球並沒有長期顯著變化趨勢 (Orlowsky & Seneviratne, 2013; Spinoni et al., 2014; Spinoni et al., 2019)。若從區域角度看，非洲 (中部非洲和東南非洲) 和南美的幾個地區 (南美東北部、南美季風、南美西南部和南美南部)，則反映出這些地區由於長期降雨量不足導致的氣象乾旱 (圖1.4.7)。在人為因素對乾旱趨勢的歸因研究方面，由於事件中人為與非人為氣候因素間複雜的相互作用，以及不同的方法論、模式和數據來源，因此存在相當的不確定性 (Angélil et al., 2017)。

全球而言，同是基於Penman-Monteith蒸散模型的標準化降水蒸發散指數 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 和帕默爾乾旱嚴重指數 (Palmer Drought Severity Index, PDSI) 的趨勢顯示，在過去幾十年受乾旱影響的地區 (如西非、南非、地中海和東亞地區)，其乾旱頻率和嚴重程度較SPI略微增加 (Dai & Zhao, 2017; Spinoni et al., 2019; Song et al., 2020) (圖1.4.7)，與土壤含水量觀測趨勢結

果一致。對比圖1.4.7的三種指標，考量大氣蒸發散過程的乾旱指數，相較於利用降水指數的評估，呈現更嚴重的乾燥趨勢。大氣蒸發需求 (Atmospheric Evaporative Demand, AED) 使得農業生態乾旱比氣象乾旱更為嚴重 (García-Herrera et al., 2019; Williams et al., 2020)，乾季土壤含水量減少 (Padrón et al., 2020)，會增加植物水分壓力 (Allen et al., 2015; Grossiord et al., 2020; Solander et al., 2020)，容易引發更嚴重的森林火災 (Abatzoglou & Williams, 2016; Turco et al., 2019; Nolan et al., 2020) 。

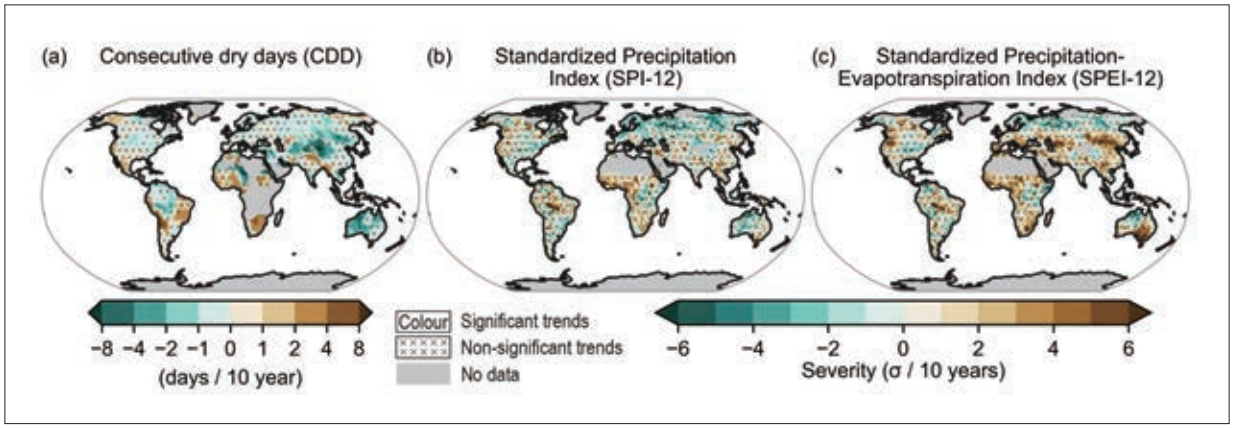


圖1.4.7 (a) 1960年至2018年之年最長連續不降雨日 (CDD) 的線性趨勢；(b) 1951年至2016年之標準化12個月降水指數 (SPI-12) 和 (c) 標準化12個月降水蒸發散指數 (SPEI-12) 的觀察線性趨勢。灰色代表缺乏足夠數據的區域，x區域表示統計趨勢不顯著。因此，無重疊的顏色區域表示趨勢具有統計顯著性。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.17)

在大多數地區，人類活動對於氣象乾旱的趨勢影響仍不明確，但對於特定事件嚴重程度的影響貢獻具有中等信心程度。農業生態乾旱的增長趨勢，以及人類活動對此趨勢的貢獻已被證實，在某些區域已具有中等可信度：人類活動使得受影響土地區域的溫度上升、相對濕度下降和淨輻射增加 (高信心程度)，大氣蒸發散需求增加，並進一步導致受影響土地面積增加。

東亞乾旱趨勢

東亞氣象乾旱的觀測趨勢目前僅有低信心程度，並無顯著趨勢 (Spinoni et al., 2019; Li et al., 2020)。農業生態乾旱方面則顯示乾燥趨勢增加，特別是約自1990年以來，在東亞的北部 (中國北部、部分俄羅斯、日本) 與中國西南部都可以偵測到，但研究間仍有不一致的趨勢 (Greve et al., 2014; Chen & Sun, 2015b; Cheng et al., 2015; Qiu et al., 2016; Dai & Zhao, 2017; Jia et al., 2018; Spinoni et al., 2019; Li et al., 2020; Padrón et

al., 2020)。在人為作用對農業生態乾旱趨勢的貢獻程度方面，目前研究進展有限。

水文乾旱在東亞地區有所增加，尤其是中國北部 (Zhao & Dai, 2017)。然而數據研究有限且信號混雜，現有證據顯示東亞水文乾旱的變化可能同時受到氣候驅動因素和人為因素的影響。長江流域的水文乾旱增加，主要由降水缺乏引起，但潛在蒸發增強和人類活動也有增強乾旱的趨勢 (Zhang et al., 2018)。由土壤含水量和河川流量變化顯示，農業活動已加劇中國北部的乾旱情況 (Liu et al., 2015)。

未來推估

隨著未來全球暖化加劇，區域的乾旱頻率、強度與造成災害的機率都將成比例增加 (高信心程度，Wartenburger et al., 2017; Greve et al., 2018; Xu et al., 2019)。CMIP6推估的連續不降雨日天數 (圖1.4.8) 呈現與降雨減少類似的空間分布，明顯可見隨著暖化由GWL 1.5°C增加到GWL 4°C，氣象乾旱將更嚴重與頻繁、範圍擴大，尤其是非洲、南美

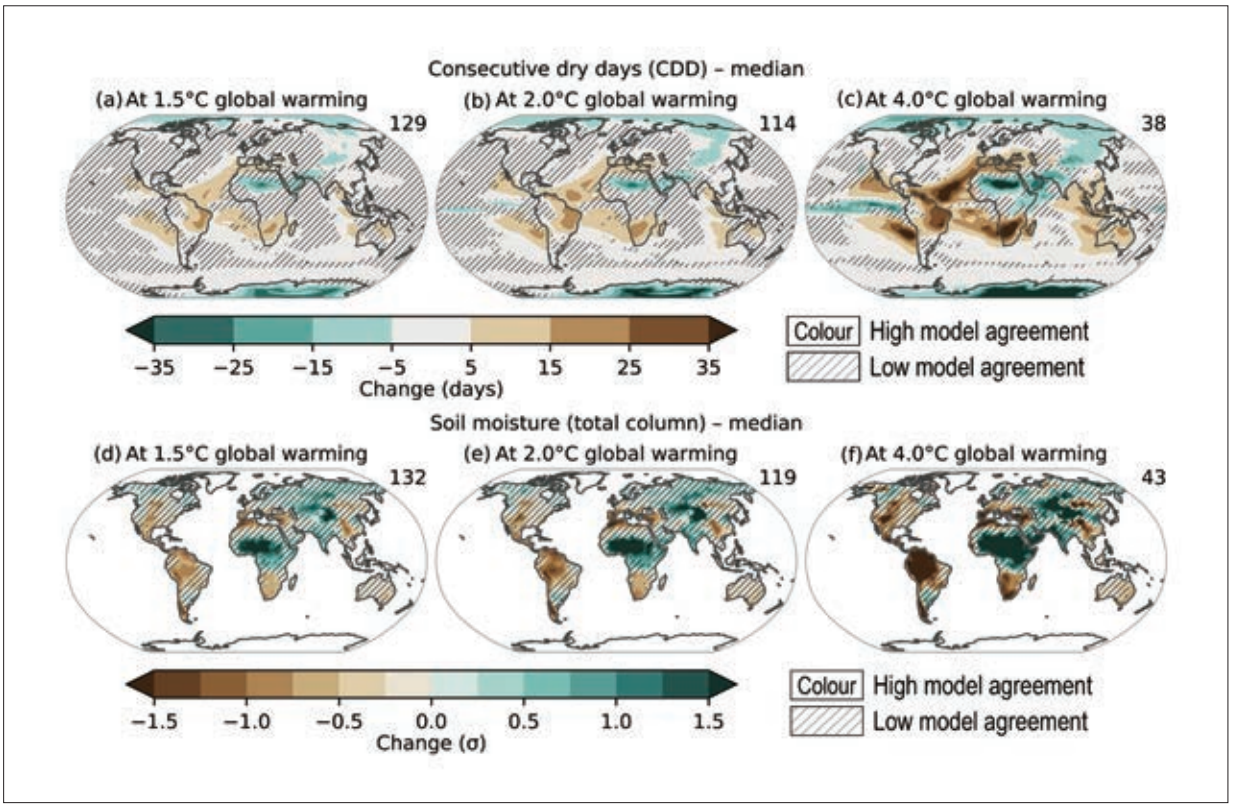


圖1.4.8　CMIP6模式推估全球升溫1.5°C、2°C和4°C時。(a至c) 年最長連續不降雨日 (CDD) 的變化與 (d至f) 年平均土壤含水量變化。右上角數字表示使用的模擬組數。沒有斜線陰影處表示有高於80%模式推估呈現一致的變化方向，斜線陰影處表示模式一致性低的區域。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.19)

洲以及地中海附近區域。模式推估的降雨變化與乾旱期間長短的改變一致，但無法反應乾旱強度的變化 (Ukkola et al., 2020)。

■土壤含水量缺乏

暖化氣候推估中土壤含水量下降的區域，並不完全與降雨減少的區域重疊，而且由於大氣蒸發需求增加與相關的蒸發散增加導致土壤含水量缺乏的區域比受降雨不足影響的區域更多 (圖1.4.8；Orlowsky & Seneviratne, 2013; Dai et al., 2018)。在所有暖化程度，頂層土壤中的濕度的減少將會比降雨量減少更多 (Lu et al., 2019)，使得嚴重土壤含水量不足的區域擴大到大部分的南歐和中歐、北美洲南部、南美洲和東亞 (圖1.4.8)。土壤含水量衰退可進一步衝擊全球水循環，甚至導致極端氣候災害的多變性，間接加劇農業乾旱問題。量化此一趨勢需要掌握不同深度土壤含水量的全球趨勢，惟目前這方面資訊仍相當缺乏，且土壤內各層含水量模擬仍是模式的一大挑戰，亟待突破。

■農業生態乾旱與水文乾旱

推估未來農業生態乾旱變化時，PDSI和SPEI乾旱指標常被用來輔助說明土壤含水量的推估結果。利用PDSI或SPEI乾旱指標，未來推估顯示全球更嚴重和更頻繁發生的農業生態乾旱趨勢，影響範圍比氣象乾旱更大，包含了北美洲、歐洲、非洲、中亞與東亞、澳洲南部等地區 (Cook et al., 2014; Chen & Sun, 2017a, b; Gao et al., 2017b; Lehner et al., 2017; Zhao & Dai, 2017; Naumann et al., 2018; Potopová et al., 2018; Dai, 2021)。

隨著暖化程度增加，農業生態乾旱的區域會增加 (高信心程度)。降雨減少加劇區域乾旱，大氣蒸發需求增加，導致農業生態乾旱更為嚴重，強度增強或持續時間增長，而且隨著暖化程度加劇而加劇。隨著全球變暖，土壤含水量減少和相關乾旱的變化，許多地區植被的環境應力將會增加，影響植被的生長，可能降低全球陸地的碳匯效率。在高排放情境與GWL 4°C時，這樣的影響具高信心程度。

■東亞推估

Zhou et al. (2014) 利用連續不降雨日指標，推估東亞北部將趨於潮濕，南部則趨於乾燥。Kusunoki (2018) 推估日本連續乾日天數將會增加 (乾燥趨勢)。隨著全球增暖，亞洲地區氣象乾旱推估的變化信心程度較低，當全球暖化至GWL 4°C時，僅東南亞地區顯示氣象乾旱增加 (中等信心程度)。

氣象乾旱隨著暖化升溫程度增加而變化的趨勢，因模式、區域或指標而異，在區域空間分布顯示低信心程度 (Zhou et al., 2014; Dunn et al., 2020; Li et al., 2020; Spinoni et al., 2020)。東亞水文乾旱趨勢則仍具不確定性，現有證據有限且趨勢不一致。

1.4.4 風暴系統：熱帶氣旋、溫帶氣旋、劇烈對流風暴與大氣河

風暴，如熱帶氣旋 (颱風)、溫帶氣旋、劇烈對流風暴以及大氣河事件，通常在陸地帶來極端降雨與洪水，造成重大災情。劇烈天氣不是經常發生的事件，大多發生於局部地區且持續時間短暫，因此量化氣候變化對這些極端事件的影響與推估具有相當程度的挑戰性。自從AR5以來，模式在物理過程與水平解析度的進展，提升了這方面研究的評估與了解。本節將討論熱帶氣旋 (颱風)、溫帶氣旋、劇烈對流風暴與大氣河的過去趨勢與未來推估，以及對極端降雨的影響。

熱帶氣旋 (颱風)

熱帶氣旋的形成、發展和軌跡時常受到大氣和海洋的大尺度環流條件 (Christensen et al., 2013) 影響，例如哈德里環流、沃克環流和季風環流。大氣環境內部存在季節內至年代際的各種時間尺度變異，例如馬登—朱利安振盪 (Madden–Julian Oscillation, MJO)、北半球夏季季內振盪、聖嬰現象、大西洋多年代際振盪 (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)，與太平洋海表面溫度年代際振盪 (Pacific Decadal Oscillation, PDO)，這些自然變異的作用提高了偵測人為因素影響熱帶氣旋活動改變的困難度。這些氣候變異未來變化的不確定性，也增加了推估熱帶氣旋活動變化的不確定性。例如在暖化氣候中，哈德里環流的擴張趨勢 (中等信心程度)，可能導致熱帶氣旋軌跡的緯度變化 (Altman et al., 2018; Sharmila & Walsh, 2018; Studholme & Gulev, 2018)。另一方面，模式推估之未來海溫變化分布，也會強烈影響區域熱帶氣旋活動的變化 (Yoshida et al., 2017)，然而目前這些變化仍存在相當程度的不確定性。

探討氣候變遷對熱帶氣旋活動之影響，高水平解析度的模式通常能夠更真實地呈現熱帶氣旋的特性。一般而言，熱帶氣旋等級依據風速由小至大可分類為1級至5級 (各級風速門檻參見https://www.noaa.gov/jetstream/tropical/tropical-cyclone-introduction/tropical-cyclone-classification)，而水平解析度介於10 km至60 km的模

式，比較能夠模擬出4級至5級熱帶氣旋，水平解析度為1 km至10 km的模式甚至能夠解析氣旋眼牆結構。在模式架構上，具有大氣海洋交互作用的模式，通常比僅考慮大氣的模式更能真實反應熱帶氣旋的發展。然而受限於運算資源，大多數具有海氣交互作用的氣候模式，水平解析度仍不足以解析呈現熱帶氣旋相關的特性，模擬能力仍有待提升。

■觀測趨勢與人為活動影響

過去40年的觀測紀錄與研究顯示：全球3級至5級熱帶氣旋所佔比例與快速加強事件的頻率，普遍呈現增加趨勢 (Kossin et al., 2020; Kishtawal et al., 2012; Balaguru et al., 2018; Bhatia et al., 2019)；熱帶氣旋達到最大風速的平均位置已開始往較高緯度偏移 (Kossin et al., 2014; Knapp et al., 2018)，西北太平洋熱帶氣旋活動也有往較高緯度遷移的跡象 (Oey & Chou, 2016; Liang et al., 2017; Nakamura et al., 2017; Altman et al., 2018; Daloz & Camargo, 2018; Lee et al., 2020; Yamaguchi & Maeda, 2020a; Kubota et al., 2021)，這些趨勢具有中等信心程度； Yamaguchi & Maeda (2020b) 則發現西北太平洋颱風移動速度減慢。在人為作用對颱風活動影響方面：Zhang et al. (2020) 顯示人為活動對熱帶以外地區颱風移動速度減慢有影響；Bindoff et al. (2013) 與 Knutson et al. (2019) 認為人為因素已經影響過去北大西洋颱風活動改變；Bhatia et al. (2019) 與 Murakami et al. (2020) 則認為目前熱帶氣旋活動的變化，不能完全為自然變異所解釋；Reed et al. (2020) 則呈現了人為作用對颱風強降雨增加之貢獻。

■全球未來推估

就全球來看，Knutson et al. (2020) 對於21世紀後期的颱風推估研究有相當完整的說明，在此之後的研究，整體而言結果是一致的，對相關變化的信心評估也有一致結論，顯示隨著全球變暖，熱帶氣旋平均最大風速和4級至5級熱帶氣旋的比例很可能會增加 (Murakami et al., 2012; Tsuboki et al., 2015; Wehner et al., 2018a; Knutson et al., 2020)，但對4級至5級熱帶氣旋未來頻率增加的推估則一致性較低 (Wehner et al., 2018a; Knutson et al., 2020)。

依據GWL 1.5°C至GWL 4°C的評估，隨著全球變暖，熱帶氣旋的降雨量、強度與強熱帶氣旋比例都會隨著暖化程度增強而增加 (Knutson et al., 2020)，全球熱帶氣旋平均降雨 (中位數) 增加11%至28% (高信心程度)。各海洋區域的熱帶氣旋降雨量也將增加 (中等信心程度)。熱帶氣旋平均最大風速 (氣旋強度) 也會隨著暖化程度增強而增加 (中

度至高度信心程度)，熱帶氣旋達到最大強度 (類別4至5) 的機率平均 (中位數) 增加10%至20% (高度信心)。由於熱帶氣旋低層水氣輻合 (Convergence) 增強，助長了降雨量增加 (Knutson et al., 2015; Phibbs & Toumi, 2016; Patricola & Wehner, 2018; Liu et al., 2019a)，使得降雨增加比例可能會高於Clausius-Clapeyron 的理論值 (即氣溫每上溫1°C，飽和水氣量增加7%)。

■東亞未來推估

隨著熱帶地區在暖化氣候下往高緯擴張，促使熱帶氣旋往高緯度移動 (Yamada et al., 2017; Yoshida et al., 2017; Roberts et al., 2020b)，在西北太平洋某些區域4級至5級強熱帶氣旋的頻率可能會因此增加，熱帶氣旋達到最大風強度的平均位置也可能會向西北太平洋較高緯度區域遷移。在高解析度大氣模式的推估顯示暖化情境下，世紀末西北太平洋颱風生成數量減少 (Tsou et al., 2016; Endo et al., 2022)，且生命期縮短 (Hong et al., 2021)。雖然颱風生成數量減少，颱風伴隨的最大風速與降雨卻是增強的 (Tsou et al., 2016; Hsu et al., 2021)，這些颱風活動的變化，深受暖化情境下此區域副熱帶高壓增強的影響。

溫帶氣旋

■觀測趨勢與人為活動影響

過去研究顯示溫帶氣旋與極端降雨事件的高相關性 (Pfahl & Wernli, 2012; Catto & Pfahl, 2013; Utsumi et al., 2017)。Reboita et al. (2015) 與 Wang, X. et al. (2016) 利用多筆再分析資料，顯示南半球溫帶氣旋數量有增加趨勢 (高信心程度)，然而在北半球則是相反 (Tilinina et al., 2013; Chang et al., 2016)。過去觀測紀錄在強烈溫帶氣旋的數量與強度方面 (例如最大風速)，顯示明顯的年際與年代際變化 (Feser et al., 2015; Reboita et al., 2015; Wang, X. et al., 2016; Varino et al., 2019)。人類活動對溫帶氣旋長期趨勢影響程度的評估，仍只有低信心程度。

■未來推估

溫帶氣旋造成的平均降雨與最大降雨率會隨著全球變暖而增加，增加的幅度與大氣水氣增加有關 (高信心程度) (Zappa et al., 2013b; Marciano et al., 2015; Pepler et al., 2016; Michaelis et al., 2017; Yettella & Kay, 2017; Zhang & Colle, 2017; Barcikowska et al., 2018; Hawcroft et al., 2018; Zarzycki, 2018; Kodama et al., 2019; Bevacqua et

al., 2020a; Reboita et al., 2021)。未來推估顯示溫帶氣旋強度變化不大 (Yettella & Kay, 2017)；在風暴路徑軌跡變化可能會導致局地極端風速增強 (中等信心程度)。暖化情境下，大西洋與歐洲溫帶氣旋數量減少 (Zappa et al., 2013b)；北太平洋方面，溫帶氣旋數量未來將會減少 (Chang, 2014; Kar-Man Chang, 2018)，移動路徑則會往極區偏移 (Seiler & Zwiers, 2016)。

劇烈對流風暴

■觀測趨勢與人為活動影響

劇烈對流風暴的定義因文獻和地區而異，且觀測資料在長期時空分布的缺乏，不易對劇烈對流風暴的觀測趨勢進行綜合評估。對於劇烈對流風暴或中尺度對流系統，目前僅有特定區域的研究，並未有全球完整的觀測趨勢評估。例如美國的對流風暴與劇烈雷雨風暴沒有顯著增加 (Kunkel et al., 2013; Kossin et al., 2017)，然而在相關的極端降雨顯示更多更強的降雨趨勢 (Kunkel et al., 2013; Easterling et al., 2016)。由於劇烈對流風暴的特性，使得探討這類事件時空變化與人為活動影響深具困難 (Kunkel et al., 2013)。部分研究顯示與劇烈對流風暴相關的極端降雨增加，例如Kawase et al. (2020) 透過故事線方法呈現日本在2018年7月極端降雨事件與近期日本暖化的關聯。劇烈對流風暴 (例如龍捲風、冰雹、降雨、風和閃電) 由於詳盡數據紀錄的時間較短，對過去冰雹、風和龍捲風活動的趨勢，以及是否受到人為活動影響，都缺乏信心。

■未來推估

在未來推估的部分，對於劇烈對流風暴的推估也僅限於區域或個案研究，難以有全球或全面的評估。透過氣候模式模擬全球暖化的推估結果顯示，由於來自低層水氣增加，熱帶與副熱帶地區對流可用位能在暖化氣候中增加，因此推測對於劇烈對流風暴是更有利發展的環境 (Sobel & Camargo, 2011; Singh et al., 2017; Chen J. et al., 2020)，但模式之間仍有相當的不確定性 (Allen, 2018)。

大氣河

大氣河是一個空間分布狹長 (數百公里寬) 而垂直發展淺 (數公里深) 的強水平水氣輸送廊道，由熱帶傳送暖濕空氣至中高緯度地區 (Zhu & Newell, 1998; Bozkurt et al., 2018; Mattingly et al., 2018; Little et al., 2019; Viale et al., 2018) 造成大量降雨。大氣河事件登陸後在局地受地形舉升影響造成極端降雨、洪水，甚至暖濕空氣造成冰河與積雪消融，

改變陸地蓄水量 (Froidevaux & Martius, 2016; Paltan et al., 2018; Waliser & Guan, 2017; Adusumilli et al., 2019; Ionita et al., 2020; Payne et al., 2020)。其登陸後受複雜地形的影響不易詳細估計，提升了估計大氣河相關降雨量的困難度 (Behrangi et al., 2016)。

■觀測趨勢與人為活動影響

大氣河研究大多著重在北美西岸、溫帶與極區 (Guan & Waliser, 2015; Waliser & Guan, 2017) 之影響，也會在春末夏初期間影響東亞，帶來極端降雨 (Kamae et al., 2017)。針對大氣河事件的長期觀測趨勢，相關的研究分析有限。北美西海岸登陸的大氣河活動有增加趨勢 (Gershunov et al., 2017; Sharma & Déry, 2020)；Gonzales et al. (2019) 探討大氣河在北美西岸的變化對水文領域應用於區域流量的時間與幅度之影響。整體而言，自從20世紀中期，在東北太平洋有增加的趨勢 (低信心程度)。

■未來推估

在全球暖化情境下，全球暖化的熱力作用讓大氣水氣增加，有助於大氣河變得更富有水氣，進而增強與持久 (高信心程度) (Payne et al., 2020)。可以預期在持續的暖化環境，大氣河事件更強的水氣傳送將會增加強降雨事件的強度於美國西岸 (Ralph & Dettinger, 2011; Lavers et al., 2015; Warner & Mass, 2017)、北美東北岸 (Hsu & Chen, 2020)、西歐 (Lavers et al., 2015; Ralph et al., 2016; Ramos et al., 2016) 與東亞 (Kamae et al., 2019)。大氣河在北美西岸登陸的頻率強度與持續時間，推估是增加的 (Gershunov et al., 2019)，然而Espinoza et al. (2018) 推測全球大氣河事件數量是些微減少。

綜合目前了解，隨著全球暖化，熱帶氣旋、溫帶氣旋、區域性的劇烈對流風暴，以及大氣河，這些系統導致相關的平均降雨和最大降雨量將會增加 (高信心程度)。圖1.4.9總結本節提到的劇烈天氣在過去與未來的變遷分布：

在全球方面：(1) 熱帶氣旋、溫帶氣旋和大氣河的平均雨量與最大雨量增加—過去觀測由於可靠數據不足，僅有低信心程度，然而在未來推估則是高信心程度；(2) 更強烈熱帶氣旋比例增加—過去觀測僅有中等信心程度，未來推估具有高信心程度；(3) 全球熱帶氣旋生成頻率減少或沒有變化—過去觀測由於可靠數據不足，僅有低信心程度，在未來推估則是中等信心程度；(4) 溫帶氣旋的風速變化，會受各區域氣旋數量改變以及風暴路徑變化影響—過去觀測由於可靠數據不足，僅有低信心程度，在未來推估則是中等信心程度。

區域變化方面：(1) 西北太平洋的熱帶氣旋向極區遷移—過去觀測與未來推估皆為中等信心程度；(2) 影響美國的熱帶氣旋移動速度減慢，導致降雨增加—過去觀測為中等信心程度，未來推估則缺乏相關研究；(3) 影響美國的劇烈風暴平均降雨和最大降雨增加，春季劇烈風暴頻率和季節長度增加—過去觀測可靠數據不足，僅有低信心程度，未來推估則是中等信心程度。

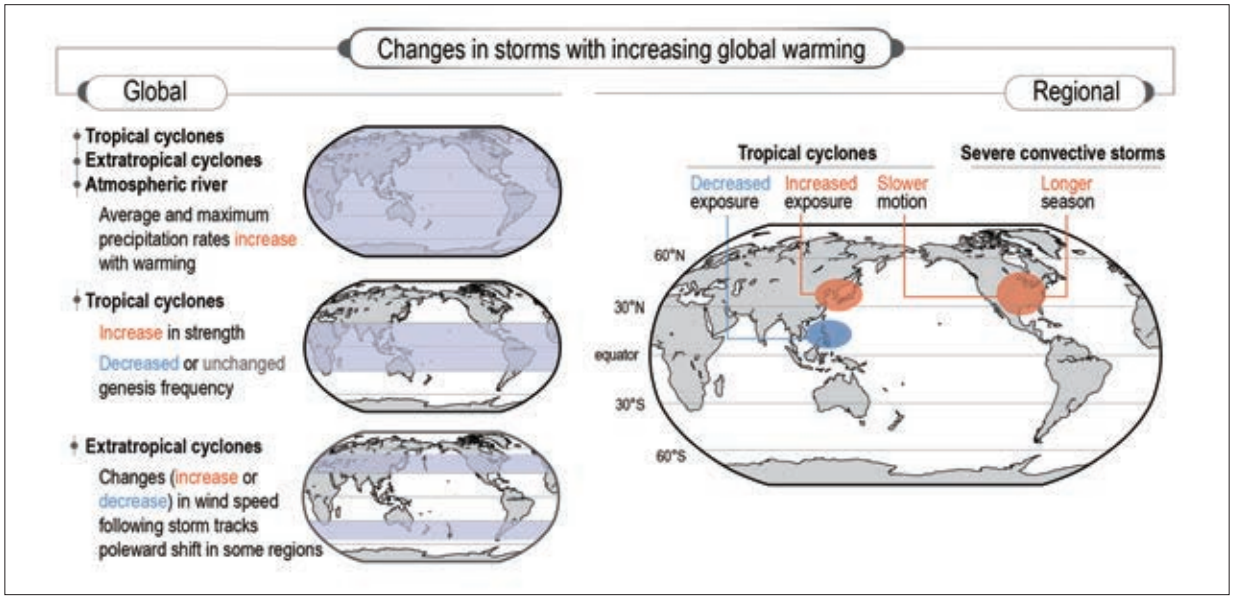


圖1.4.9　熱帶氣旋、溫帶氣旋、大氣河與劇烈對流風暴活動在過去觀測與未來推估變化的示意圖。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.20)

1.4.5　複合事件

複合事件定義與目前趨勢

SREX將複合事件定義為：(1) 同時或連續發生2個或多個極端事件；(2) 極端事件的背景條件相結合，強化了事件影響與衝擊；(3) 多種事件本身並非極端事件，但加乘在一起時會導致極端事件或影響。

因此，極端事件發生的型態可不限於單一類型，複合事件類型的極端事件綜合多種不同的極端現象，例如熱浪、乾旱與野火事件，可能會同時發生，進而加倍提高人類社會與環境衝擊和風險。Zscheischler et al. (2018) 則將複合事件定義為：多種驅動因素或危害的組合導致社會或環境風險。

依據定義，複合事件可分為四類：(1) 前置事件 (preconditioned events)：天氣驅動或氣候驅動的前置事件，加劇了造成衝擊的氣候影響因素；(2) 多變量事件 (multivariate events)：多個驅動因素或氣候影響因素導致某種衝擊；(3) 時間複合事件 (temporally compounding events)：接續發生的現象事件造成影響；(4) 空間複合事件 (spatially compounding events)：多個災害分布在鄰近地區導致的聚集影響。(Zscheischler et al.,2020)

2個或多個氣象或氣候事件的結合，不一定是極端事件，它們可以同時發生、相隔不久或同時發生在不同地區，但事件彼此加乘，導致極端影響遠大於個別極端事件加總的影響。例如，同時發生的極端降水和極端強風可以導致基礎設施損壞 (Martius et al., 2016)；風暴潮和極端降雨事件的結合會造成沿海洪水 (Wahl et al., 2015)；乾旱與高溫的結合可能導致樹木死亡 (Allen et al., 2015)；野火增加冰雹和閃電的發生次數 (Zhang et al., 2019a)。氣旋、鋒面和雷雨風暴系統組成的複合暴雨類型，比單一風暴類型更容易引起極端降雨和極端強風 (Dowdy & Catto, 2017)。沿海與河口地區，洪水事件可能受到風暴潮、極端降雨和河川流量之間的相互影響，同時還有海平面上升、波浪、潮汐以及河口地區的地下水等因素，這類具有多個驅動因素的洪水通常被稱為「複合洪水」(Wahl et al., 2015; Moftakhari et al., 2017; Bevacqua et al., 2020b)，在過去觀測已經偵測到這類事件的增加趨勢 (Wahl et al., 2015; Bevacqua et al., 2019)。

在熱浪乾旱複合事件方面，自SREX和AR5以來的觀測研究顯示，許多地區出現乾旱和熱浪複合的情況。在大多數陸地區域，通常夏季溫度和降水呈現相反關係，有利於極端高溫的天氣系統也不利於降雨，因此，乾旱和熱浪之間具有高相關性 (Zscheischler & Seneviratne, 2017)。降水偏低和極端高溫特徵的乾旱事件已經在美國加州 (AghaKouchak, 2014)、澳洲東部內陸 (King et al., 2014) 和歐洲大部分地區 (Orth et al., 2016) 發生。而熱乾條件同時發生，則會促使野火事件的發生 (Schubert et al., 2014; Littell et al., 2016; Dowdy, 2018; Hope et al., 2019)，例如美國西部 (Abatzoglou & Williams, 2016)，特別是加州 (Williams et al., 2019)。觀測趨勢顯示，在澳洲天氣條件的長期趨勢有助於野火發生，這個趨勢可歸因於人類活動 (Dowdy, 2018)。

未來推估

隨著暖化程度增強，複合氣候事件的強度與頻率可能會增加。在全球暖化程度高的

情況下，同時發生熱浪和乾旱事件的頻率與強度將繼續增加，而全球每升溫0.5°C，此類事件的頻率與強度會更高 (高信心程度)。在某些地區，複合式的高溫、乾燥和多風天氣事件，將在全球暖化程度更高的情況下，更加頻繁發生 (高信心程度)。此外，全球暖化程度變得更高，沿海地區的複合洪水事件也將會增加 (高信心程度)。

鑒於全球暖化下，有高度信心推估未來熱乾複合事件增加，野火事件天氣類型會更為頻繁發生與嚴重，特別是在熱帶雨林區 (SRCCL; IPCC, 2019a)。在容易發生野火的地區，例如地中海與中國大興安嶺，研究推估未來乾旱與熱浪嚴重度增加，可能會導致野火頻率增加 (Tian et al., 2017; Ruffault et al., 2018)。隨著全球變暖，即使在GWL 1.5°C至GWL 2°C之間的情況下，糧作地區同時受到氣候極端事件影響的可能性也越來越高 (Gaupp et al., 2019)。由於氣候極端事件在許多地區變得更為頻繁，因此不同地點同時發生極端事件，也就是複合事件的狀況可能增加。

複合事件在暖化的未來可能更加頻繁或嚴重。這些複合事件通常對生態系統和社會造成比單獨發生時更嚴重的影響。隨著氣候變化，使單一極端事件變得更加嚴重，原本可能性低、影響程度高的極端事件 (Low-likelihood, High-impact Events Associated With Climate Extremes, LLHI)，由於這些事件的組合發生，可能創造前所未有的複合事件，加劇極端事件的強度和相關影響。

1.5 全球與東亞季風活動特徵之變遷

1.5.1 全球季風活動氣候特徵與未來變遷

全球季風區域依據環流場與降水型態有諸多定義方式。本報告依循AR6定義，將全球季風定義為全年降水變化 (夏季降水減去冬季降水) 大於2.5 mm day^{-1}的區域 (Kitoh et al., 2013) ，並以此訂出區域季風區 (圖1.5.1)。下文所描述季風變化趨勢在此定義下，除特別提及環流外，以降水量變化為主。

全球季風活躍區域可大致區分如圖1.5.1。全球季風活動的氣候變遷特徵在AR5中

可發現，20世紀下半葉全球季風與陸地之季風降水均減弱，受限於資料特性間的可比較性與再分析資料的不確定性，此一季風活動與季風降水相關推論屬於低信心度 (Low Confidence)。從古氣候觀測的角度，近年來基於高解析度代用指標的應用，使科學家取得較可信之季風活動的歷史重建成果：以全新世中期 (Holocene) 為例，在較暖氣候情境下，季風系統及降水相對較強，然而對照上述北半球1950年代至1980年代的季風降水下降趨勢 (如圖1.5.2)，由觀測與模擬結果推測是肇因於人為氣膠 (anthropogenic aerosol) 排放的抵銷效應。

由近年的全球季風陸域降水觀測發現，季風降水量自1900年代至1950年代微幅上升 (北半球尤甚)，1950年代至1980年代下降，其後則轉變為逐漸上升的趨勢 (Kitoh et al., 2013; Wang et al., 2018, Wang, B. et al., 2021; Huang et al., 2019)，而其變化歷程反映北半球季風環流與降水量之多年代際變化 (Wang et al., 2014, 2017; Monerie et al., 2019)。分析1980年至2010年間GPCP及氣候預報中心合併分析降水 (Climate Predition Center merged analysis of precipitation, CMAP) 資料可發現，自1980年起，北半球季風呈現降水量增加及夏季延長的特徵 (Deng et al., 2018; Han et al., 2019)。南半球季風活動則主要受較強烈的年際變化及區域差異影響，在GPCP及CMAP資料中並無顯著長期變化趨勢 (Deng et al., 2018)。

總結前述，AR5報告中發現上個世紀的全球季風降水下降趨勢在1980年代已逐漸反轉，目前北半球夏季季風降水可能 (Likely) 具上升趨勢，而南半球的季風活動主要受較強的年際變化影響，因此在百年尺度上並無顯著趨勢變化。古氣候資料則顯示：北半球季風活動自全新世中期以來漸趨弱，並且南北半球之間的季風活動呈現負相關。

在SSP情境推估中，全球季風降水在21世紀可能 (Likely) 增強，季風環流卻會相對減弱。全球季風陸域降水量在全球平均氣溫每上升1°C的條件下，在各SSP情境平均的降水量可能增加1.3%至2.4%，此增強是由於濕度上升的熱力回饋，同時也受到因環流減弱所導致抵銷作用 (Chen Z. et al., 2020)，在中長期未來變遷推估中，季風降水增加量具南北不對稱性，北半球會大於南半球，而東西向亦存在降水增加的不對稱性，是由於亞洲及非洲季風的增強，以及北美季風的減弱所導致 (Lee & Wang, 2014; Mohtadi et al., 2016; Pascale et al., 2017; Wang, B. et al., 2021)。

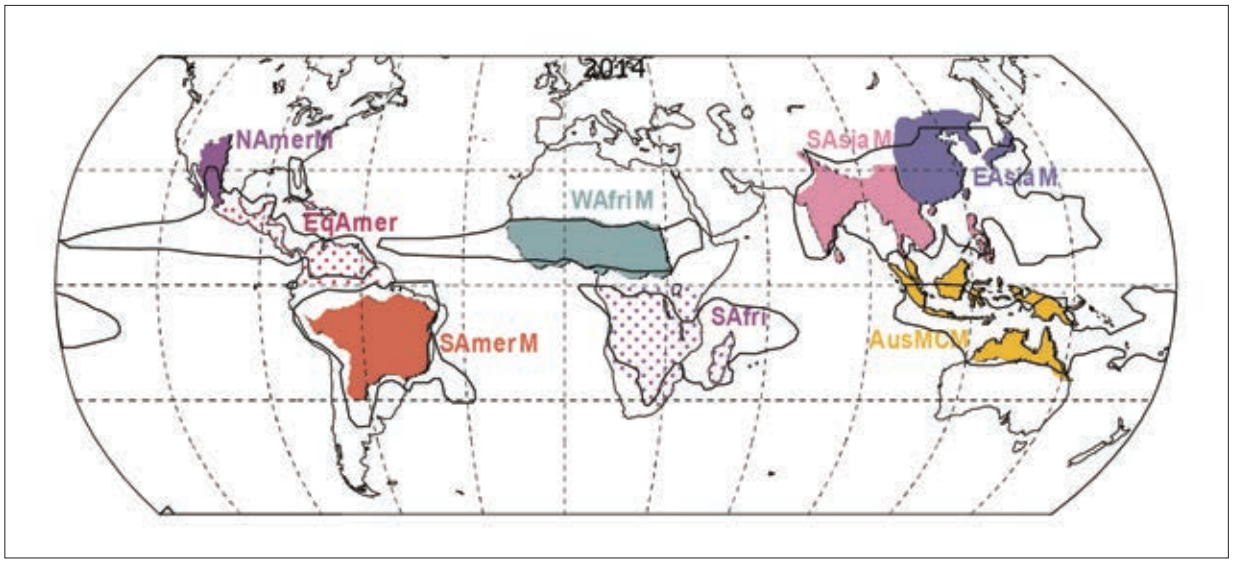


圖1.5.1　全球季風活躍區域　(粗黑線為全球季風範圍，其餘顏色則為區域性季風影響範圍：NAmerM代表受北美季風影響區域；EqAmer代表南美赤道季風區；SAmerM代表南美季風區；WAfriM代表西非季風區；SAfri代表南非季風區；SAsiaM代表東南亞及南亞季風區；EAsiaM代表東亞季風區；AusMCM代表澳洲與海洋大陸季風區)。(摘自IPCC, AR6, WGI, Box TS.13, Figure 1a)

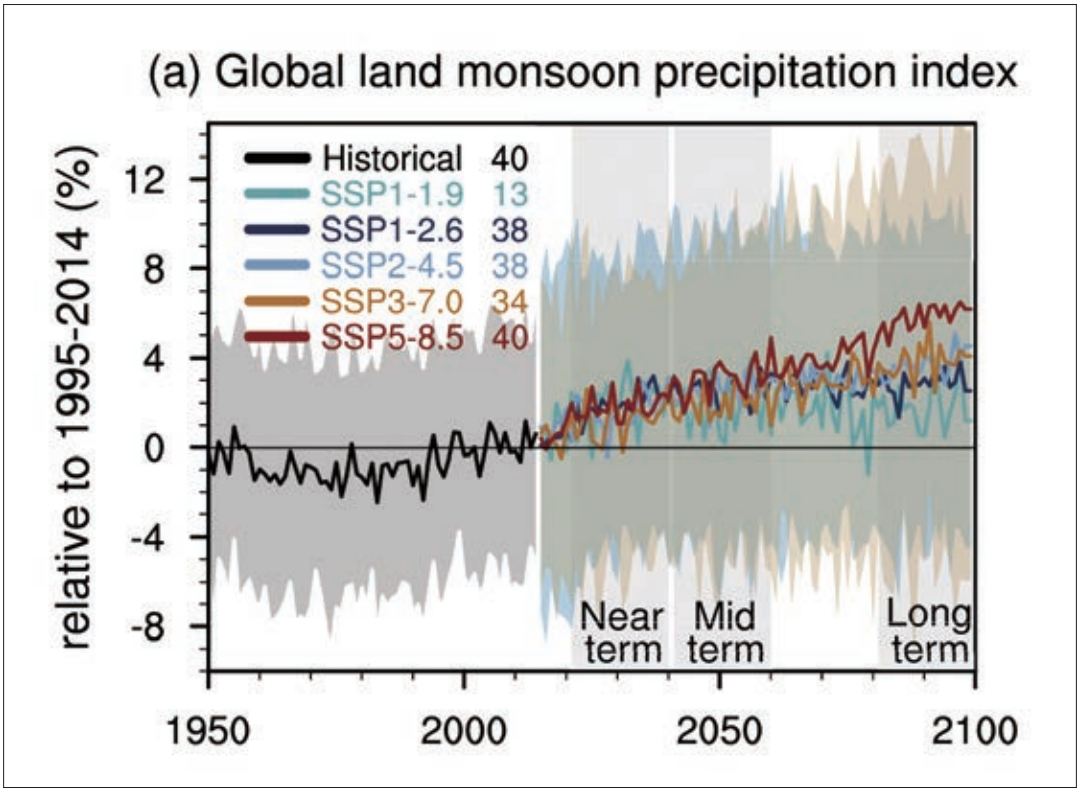


圖1.5.2　全球陸地之季風降水指數距平值。(季風降水指數定義為在全球季風範圍內進行區域權重的平均降水量。) 圖中黑線為基期 (1950年至2014年)，其餘5條線分別為CMIP6之5個SSP情境，Near term為2021年至2040年；Mid term為2041年至2060年；Long term為2081年至2100年之未來推估。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 4.14)

1.5.2 各季風區域季風降水特徵及未來變遷

AR6報告針對各季風區域應用9個CMIP6模式進行系集平均，以探討人為活動可能之效應，各季風區域在基期 (1950年至2014年) 的季風降水變化趨勢及未來情境降水量推估，分別如圖1.5.3及圖1.5.4所示，模擬組別分為NAT (自然效應)、ALL (包含人為與自然)、GHG (僅考慮溫室氣體) 及AER (僅考慮人為排放氣膠) 等組，由圖1.5.3中可發現位於北半球的SAsiaM及EAsiaM區域，人為排放氣膠減少季風降水的抵銷作用顯著，而未來推估則受溫室氣體主導 (圖1.5.4)，各區域的季風降水量均具上升特徵。

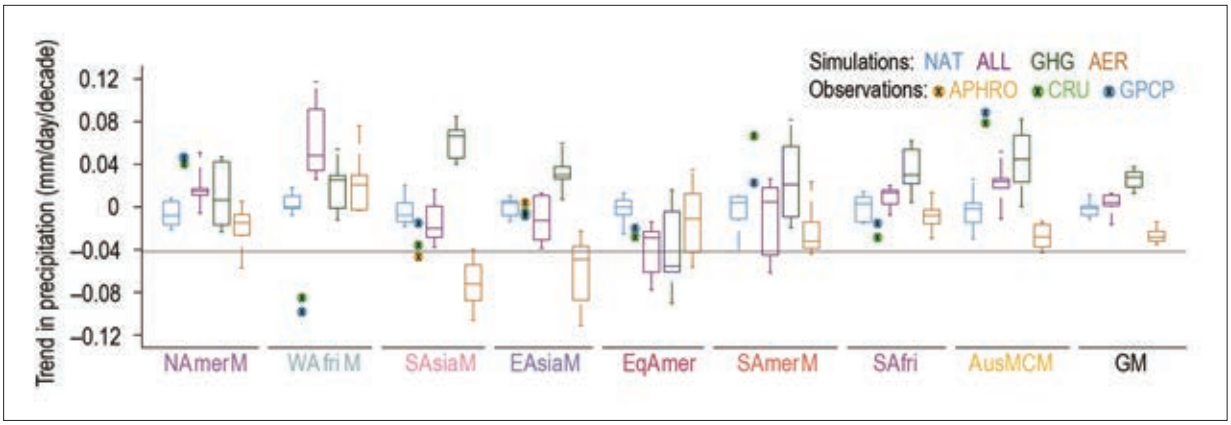


圖1.5.3 各區域季風區在DAMIP (The Detection and Attribution Model Intercomparison Project) 各輻射強迫力實驗下之季風降水 (定義為區域夏季降水量與冬季降水量之差值超過2.5 mm day^{-1}) 變化趨勢 (NAT:自然強迫力/ALL:自然及人為強迫力/GHG:溫室氣體強迫力/AER:氣膠強迫力)。趨勢之基準為DAMIP九個模式依系集數目之加權系集平均。圖中圓圈代表三組不同觀測資料。 (摘自IPCC AR6, WGI, Box TS.13, Figure 1b)

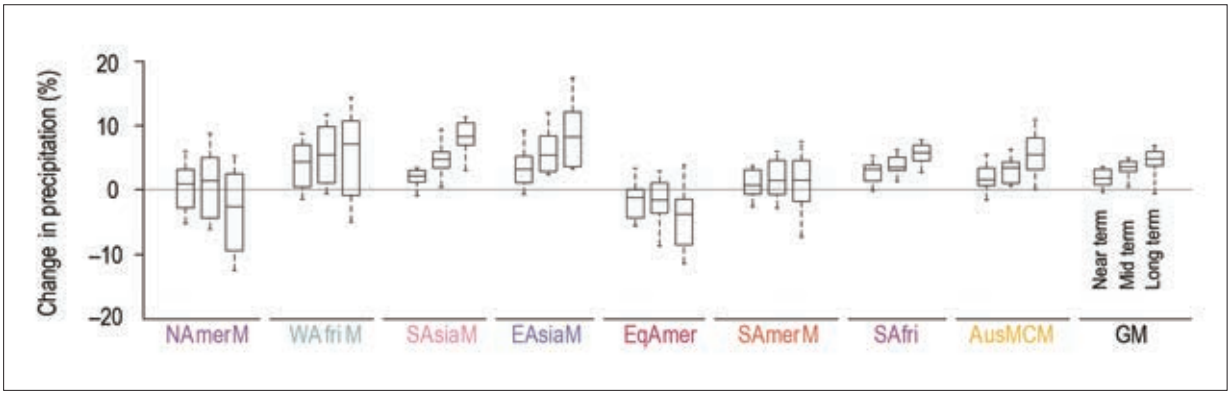


圖1.5.4 各區域季風區在SSP2-4.5情境下，在短期 (Near term, 2021年至2040年)、中期 (Mid term, 2041年至2060年) 及長期 (Long term, 2081年至2100年) 的季風降水量距平之模式系集未來推估 (合計24個CMIP6模式) 。 (摘自IPCC AR6, WGI, Box TS.13, Figure 1c)

在21世紀的區域季風推估中，可發現區域間的對比及降水與環流的變化，氣溫每上升1°C，可能 (Likely) 將使各區域一年中最乾與最濕月分的降水量差值增加3%至5%。由圖1.5.4可發現北美區域季風降水在長期的未來推估中將會減少，而南亞、東南亞及東亞區域的季風降水則隨近、中、長期之未來逐漸增加。

由古氣候重建資料及現今觀測資料均可發現，季風降水在不同時間的自然變異 (natural variability) 相當大，使得定量區域及更小空間尺度的季風降水未來變遷推估充滿挑戰。在短期 (near term, 2021年至2040年)，未來推估的不確定性主要來自於氣候內部變異 (internal variability)，而AMOC可能弱化非洲及亞洲的季風、加強南半球的季風環流，而在長期未來推估的結果中可發現南亞及東南亞季風的未來變遷將越趨一致。

1.5.3 東亞季風降水未來氣候變遷

東亞季風降水主要來自於夏季季風，在AR5的未來情境推估中，東亞季風區域的夏季季風降水增強，伴隨季風肇始 (onset) 的提前及夏季的延長。由CMIP5未來模擬推估中可發現，21世紀的東亞季風環流增強，同時伴隨降水量的增加，其主要來自梅雨雨帶南端的貢獻，該變化伴隨西北太平洋副熱帶高壓及東亞副熱帶噴流的南移，主要降水變化在東南亞與中國南部，在中國中部和東部的梅雨降水則無顯著變化 (Horinouchi et al., 2019)。以高解析度MRI-AGCM全球模式進行的未來暖化推估，發現在現今梅雨帶的南側降水增加，北側減少，但是不確定性較大 (Ose, 2019)。至於北太平洋副熱帶高壓的變遷，各模式的推估並未呈現一致的變遷趨勢 (Kitoh, 2017)。

未來情境模擬實驗 (Wang, Z. et al., 2016; Tian et al., 2019) 發現，由於歐亞大陸增溫 (Endo et al., 2018) 及海陸溫差增大等，21世紀的東亞季風環流將會增強。然而，由於氣膠排放情境 (Wilcox et al., 2020)、人為驅動力 (anthropogenic external forcing) 和內部變化 (internal variability) 間交互作用 (Wang, B. et al., 2021) 的不確定性，各區域水循環針對世紀末 (2080年至2099年) 的推估也具有較大的不確定性 (Endo et al., 2018)。

南北半球間之質量交換可做為南半球環流與東亞季風降水的連結，然而此連結在使用CMIP5氣候模式於RCP8.5未來情境模擬推估中顯示將會減弱 (Yu et al., 2018)。比較

GWL 1.5°C及GWL 2°C情境，可發現僅增溫0.5°C的差異，也會造成東亞區域大範圍降水的增強 (Lee et al., 2018; Liu et al., 2018; Chen et al.,2019) 及極端事件頻率與強度的提升 (Chevuturi et al., 2018; Li, D. et al., 2019)。

在CMIP6的季風活動未來變遷推估中，所有未來情境的季風降水均增加 (Chen et al., 2020)，然而伴隨模擬時間增加與在排放情境下，模式間的差異會提升。除SSP1-1.9情境在東亞區域未來推估的降水及逕流量為持平或減少外，其餘情境均顯示東亞區域未來季風降水將增加，且其將隨模擬時間增長與排放情境的嚴重程度提升。此外，自CMIP6未來模擬中發現，由於東亞區域夏季肇始的提前及消退的延後，將使夏季長度增加 (Ha et al., 2020)。

總結前述，雖然CMIP5與CMIP6在季風模擬仍具不確定性，然而對於東亞區域在21世紀之季風降水增加為具高度信心 (High Confidence)，對於季風季增長的信心度則為中等 (Medium Confidence)。

1.5.4 全球鋒面頻率之氣候狀態及模擬

鋒面在天氣及氣候尺度上皆有重要貢獻，為局部地區帶來明顯的天氣狀態改變，在中、高緯度可能貢獻超過75%的極端雨量，在主要風暴路徑上則可能達到約90% (Catto & Pfah, 2013)。在氣候分析上，對鋒面的偵測一般採用 Hewson (1998) 發展之方法，尋找空間中熱力參數快速變化的區域，例如濕球位溫梯度變化最大處。過去研究多針對全球尺度的鋒面頻率變化分析，Berry et al. (2011a, b) 根據數種再分析資料指出，由1989年至2009年間，鋒面頻率在北半球已明顯減少，但是由於太平洋副熱帶高壓擴張的關係，中太平洋到東太平洋的副熱帶鋒面頻率明顯增加。Catto et al. (2014, 2015) 及Blazquez & Solman (2018) 評估CMIP5 模擬之鋒面及相關降水，發現鋒面頻率能被妥善的模擬出來，但頻率高值區位置略有偏差，且鋒面降水可能有高估的情況。根據CMIP5模式在RCP8.5的情境推估，則發現鋒面頻率高值區有往高緯移動的趨勢。類似的移動趨勢也曾出現在CMIP3模擬中 (Chang et al., 2013; Grieger et al., 2014)。

1.5.5 東亞鋒面

鋒面降雨是華南地區及臺灣重要的水資源，近年發生在臺灣的氣象乾旱，多與春雨及梅雨較少有關 (Hsu and Chen, 2002; Chen et al., 2009)。因降雨過程受到天氣系統的環流型態影響，具有明顯的季節及區域特徵 (Lu & May, 2003)，局部地區的降雨變化不見得與全球趨勢同步。

東亞地區的季節可依降雨及環流型態區分為5個自然季節 (Natural Season)：冬季 (12/2至2/14)、春季 (2/15至5/15)、梅雨季 (5/16至7/24)、颱風季 (7/25至9/27) 及秋季 (9/28至12/1) (Chou et al., 2009)。在5個季節中，除了颱風季外，皆受到鋒面影響。由秋季開始，伴隨亞洲冬季季風出現在中、高緯度地區的極鋒系統，隨著冬季季風增強，鋒面可影響的區域逐漸向低緯地區延伸。除了位在北緯40°左右的極鋒區外，北緯20°至北緯30°之間的副熱帶也有活躍的鋒面活動 (如圖1.5.5)。隨著季節進入春季，冬季季風減弱，南方水氣增加，可看到極鋒頻率下降，副熱帶鋒面頻率略增。梅雨季則因客觀偵測方法未達完善，暫時無法討論。

Wang C. et al. (2021) 使用29個CMIP5模式分析東亞地區鋒面模擬，與RCP8.5於21世紀末的推估 (2071年至2100年)，由於鋒面的模擬在模式間差異較大，研究中針對鋒面

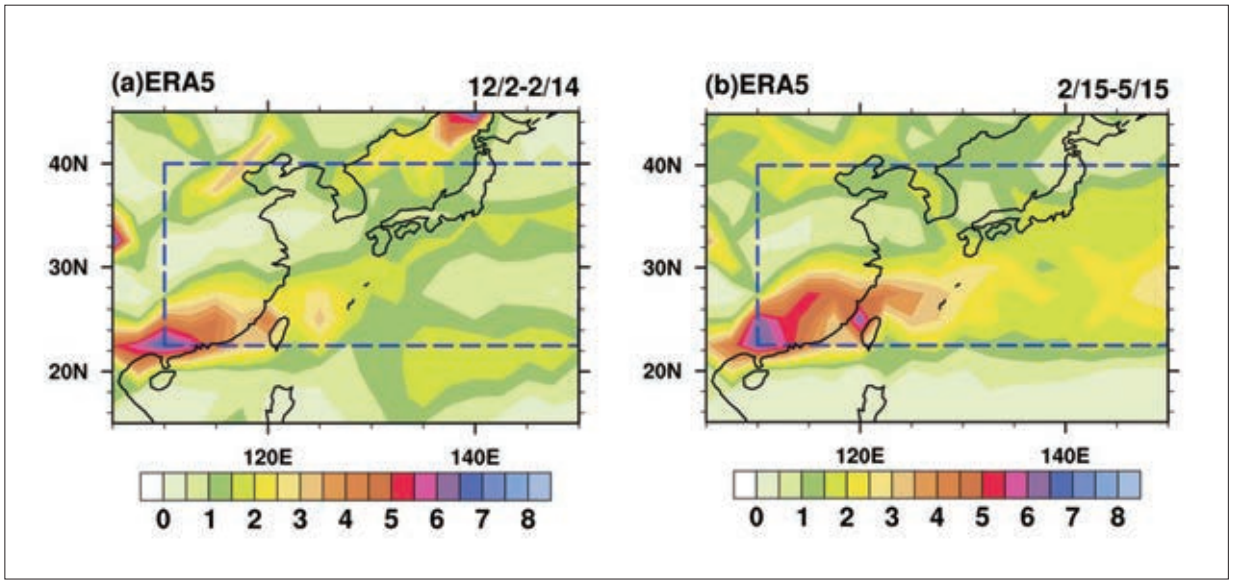


圖1.5.5　東亞地區以自然季節區分之鋒面天數。 (a) 冬季 (12/2至2/14)；(b) 春季 (2/15至5/15)，單位： day season^{-1}，資料：ERA5，1979年至2005年平均，2.5°×2.5°。(摘自 Wang et al., 2021)

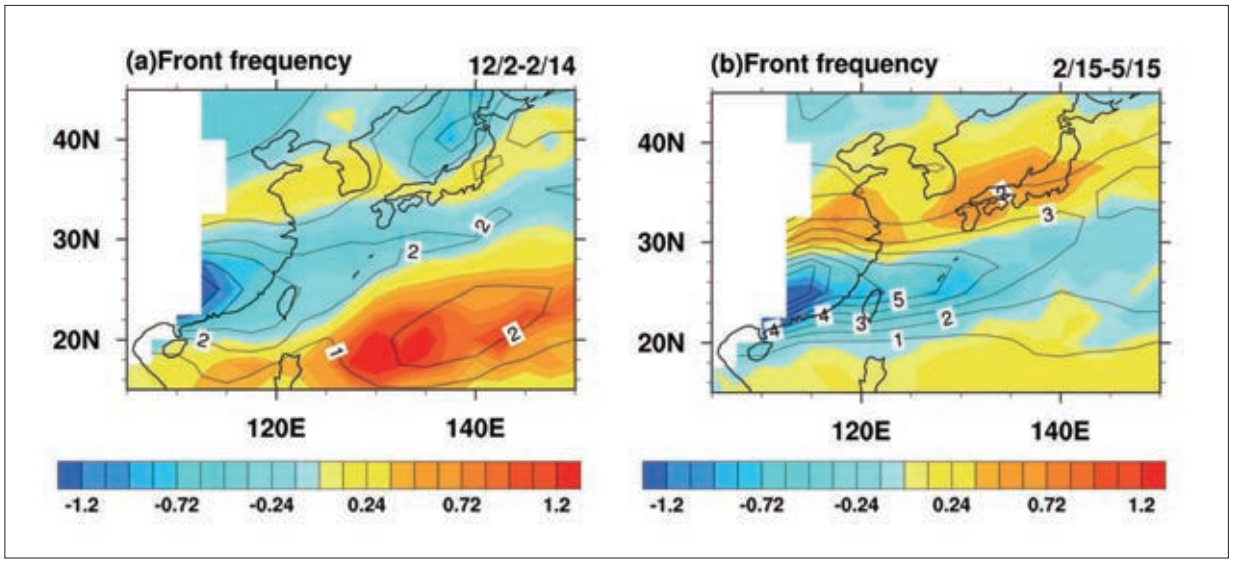


圖1.5.6　CMIP5模擬東亞地區之鋒面天數及未來變化，等值線為歷史模擬 (1976年至2005年平均；單位：day season^{-1})，色階為RCP8.5情境於世紀末之變化量 (2071年至2100年；單位：day season^{-1})。(a) 冬季 (12/2至2/14)；(b) 春季 (2/15至5/15)，僅選用表現較佳的模式。(摘自 Wang et al., 2021)

頻率的空間分布計算其表現指數 (performance index, Reichler & Kim, 2008) 及空間相關性 (pattern correlation)，選出在東亞地區 (圖1.5.5藍色虛線方框區域) 表現較佳的6個至7個模式做系集平均 (如圖1.5.6)。

與歐洲中期天氣預報中心第五版再分析資料 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF Reanalysis v5, ERA5) 比較 (圖1.5.5)，CMIP5較佳模式的系集平均 (圖1.5.6等值線) 能良好掌握冬季及春季鋒面頻率的位置及強度。未來推估 (RCP8.5，2071年至2100年；圖1.5.6色階) 則顯示冬季在極鋒區和副熱帶鋒面的氣候極大值區域，鋒面頻率略微下降，在北緯30°至北緯40°之間，黃河到長江之間的地區，延伸至朝鮮半島、日本及日本東部海面上，則鋒面頻率略微增加。北緯20°以南及菲律賓、臺灣東方外海上的訊號雖有明顯增加，但屬於熱帶天氣系統，並非中緯度具有斜壓特徵的鋒面。春季則於北緯30°至北緯40°之間有明顯鋒面頻率增加，尤其是長江以北的中國沿海及日本。北緯20°至北緯30°之間鋒面頻率減少，尤其是華南地區到臺灣一帶。整體而言，鋒面極值區有往北移動的趨勢。

統計26個CMIP5模式的鋒面頻率變化趨勢 (如圖1.5.7)，也有相同的區域變化特徵：在北緯30°至40°之間，有較多模式推估鋒面頻率增加；在北緯20°至北緯30°之間及北緯

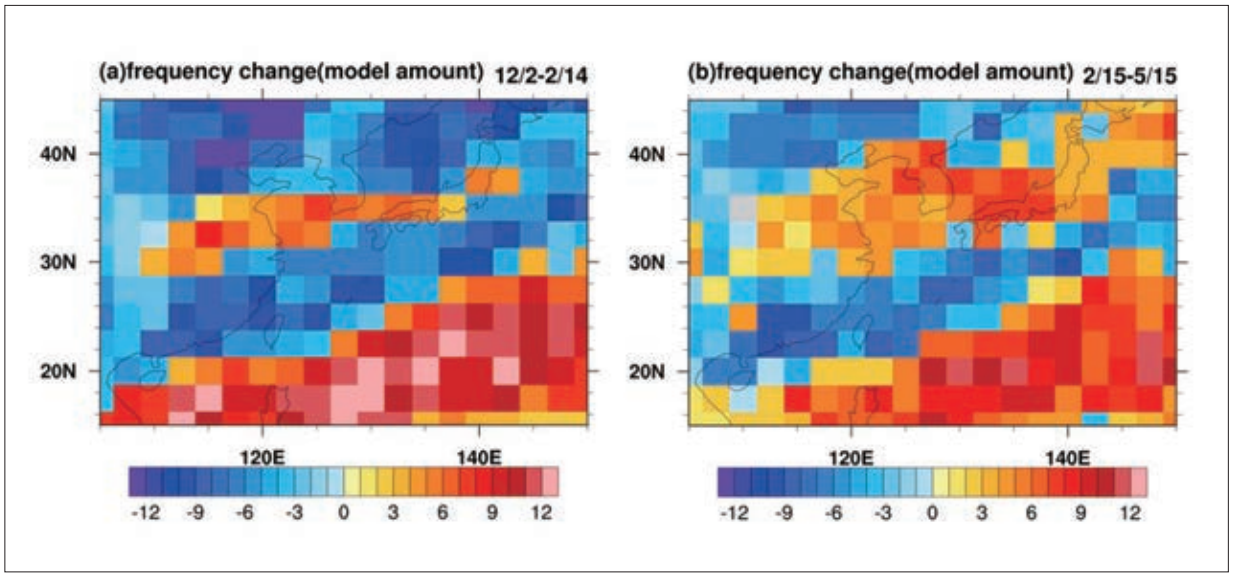


圖1.5.7　CMIP5模式鋒面頻率變化趨勢統計結果。(a) 冬季、(b) 春季，共使用26個模式，僅考慮RCP8.5情境於世紀末 (2071年至2100年) 相較於歷史模擬 (1976年至2005年) 變化量通過90% 信心度的模式，紅色 (藍色) 網格代表有較多模式模擬出鋒面頻率增加 (減少) 趨勢，紅藍色階數字代表該趨勢的模式個數。(摘自 Wang et al., 2021)

40°以北的地區，則有較多模式推估鋒面頻率減少。模式個數已扣除變化趨勢沒有通過統計檢定的模式。

選用CMIP5模式中對鋒面頻率模擬較佳的模式，分析其大尺度環流的變化 (如圖1.5.8)，發現未來 (RCP8.5，2071年至2100年) 冬季時，中、高緯度地區陸地上海平面氣壓降低，顯示大陸冷高壓在暖化的情境下減弱。日本及其東部海面往西南延伸到臺灣、華南、中南半島和南海一帶則海平面氣壓升高，將加強臺灣、華南及南海一帶的低層 (850百帕) 東北風 (圖1.5.8a)。

類似情況也出現在春季，只是變化量較小，同時春季於華南地區出現一個反氣旋式的環流距平 (圖1.5.8b)。用來偵測鋒面的850hPa濕球位溫梯度 (圖1.5.8c)，可看到在北緯20°以北普遍減少，主要減少的區域落在極鋒區和副熱帶鋒面區。水氣通量的變化，冬季在中國南部出現一個反氣旋式環流距平，此環流在春季變得更強，具有明顯往北傳送的通量 (圖1.5.8d)，造成北緯30°附近濕球位溫梯度降低，在北緯30°以北則有水氣輻合，且濕球位溫梯度的增加，可能是春季鋒面頻率高值區略微往高緯移動的原因。

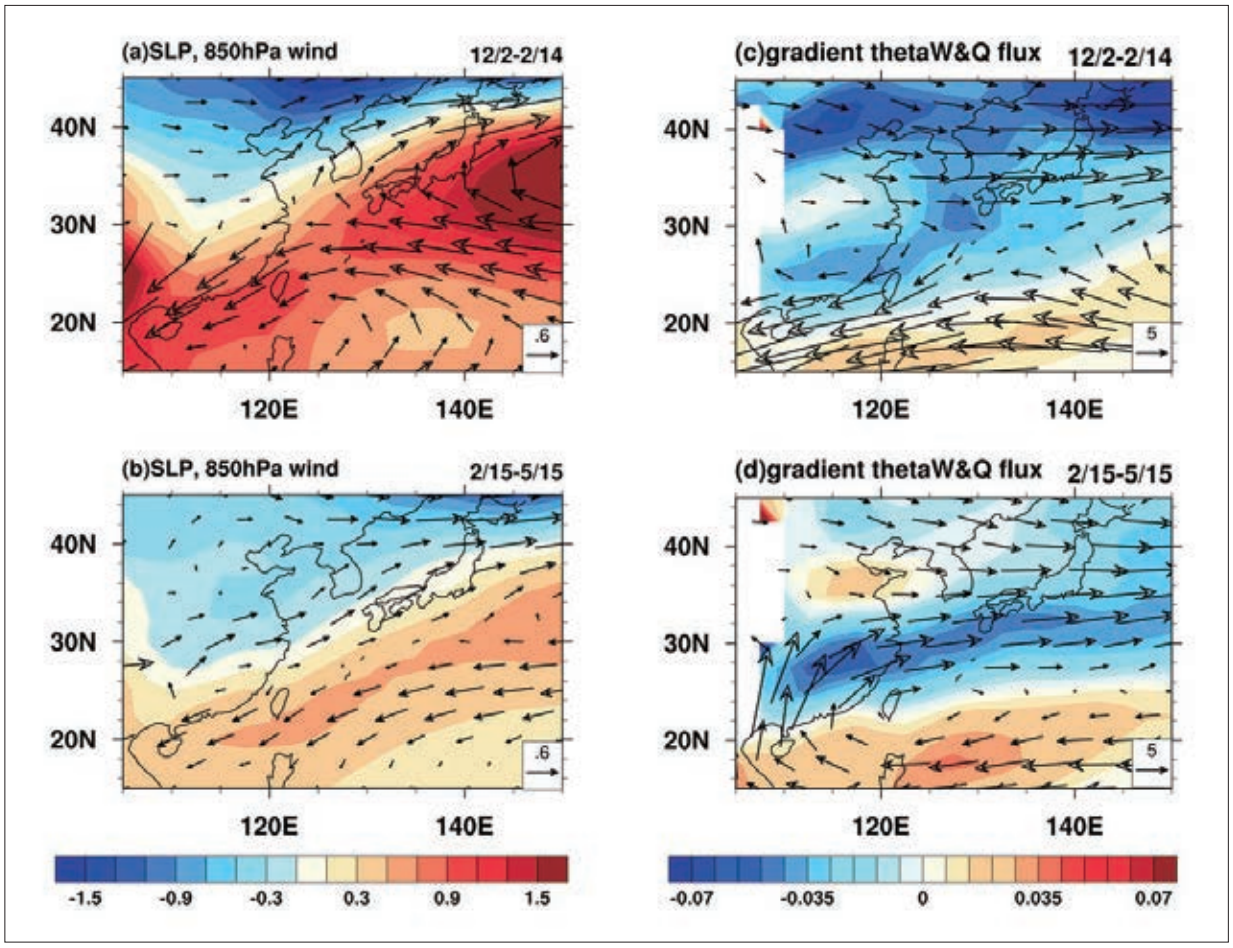


圖1.5.8　CMIP5表現較佳模式之大尺度環流變化 (未來推估減歷史模擬)。(a) 和 (b) 分別為冬季及春季海平面氣壓變化 (色階，單位：hPa) 及850 hPa風場變化 (箭頭，單位：m s^{-1})。(c) 和 (d) 為冬季及春季850 hPa濕球位溫梯度變化 (色階，單位：K 100 km^{-1}) 及水氣通量 (箭頭，單位：g m kg^{-1} s^{-1})。(摘自Wang et al., 2021)

1.6 空氣品質

1.6.1　全球空氣品質的歷史變遷

大氣中有些短生命期的物質會影響氣候；這些物質對環境和健康也造成影響而被認為是空氣污染物。大氣中常見的污染物以氣膠 (aerosol，或稱懸浮微粒Particulate Matter, PM) 及反應性氣體為主，PM成分複雜，常見的有硫酸、硝酸、氨、含碳物質、沙塵、海鹽等，反應性氣體則有臭氧 (O_3)、氮氧化物 (NO_X)、二氧化硫 (SO_2) 和一氧化碳

(CO) 等。由於這些污染物的生命期約幾天到幾個月之間，與溫室氣體相比屬短生命期物種，因此分布的時空變化相當大，主要集中排放源區附近且受大氣條件影響。

在2010年至2019年期間，從衛星資料和地面測站資料顯示，全球污染物的空間分布有明顯變化。AR6統整過去研究顯示：全球CO濃度持續下降；SO_2及二氧化氮 (NO_2) 在北美、歐洲呈現持續下降趨勢，在南亞反而呈上升趨勢，東亞地區則是增加後下降的情況；值得注意的是O_3，除了美西及歐洲有下降趨勢，其他地區都是上升趨勢 (IPCC AR6, WGI)。氣膠對氣候的影響主要可以分成直接及間接效應。直接效應意指氣膠可吸收或反射太陽輻射，直接造成大氣冷卻或增溫；間接效應則指氣膠可影響雲的微物理性質，進而改變雲的反照率及生命期，進一步影響天氣系統及氣候 (Haywood and Boucher, 2000; Lohmann and Feichter, 2005; Twomey, 1977)。氣膠對氣候的影響，會受到氣膠種類、地理位置、垂直高度等影響，相當複雜，至今仍是模式裡極大的不確定性因素。從1850年到1970年代，PM以及其前驅物濃度呈現上升的趨勢，污染物排放、濃度及生命期等變化對氣候造成冷卻的效果，可部分抵銷溫室氣體造成的暖化。而1970年代中期以後，各國開始關注及控制污染物排放，改善空氣品質，使得PM與其前驅物造成的淨輻射強迫減弱 (圖1.6.1)，讓地球降溫的效果也隨之減弱。從AR5到AR6，地球

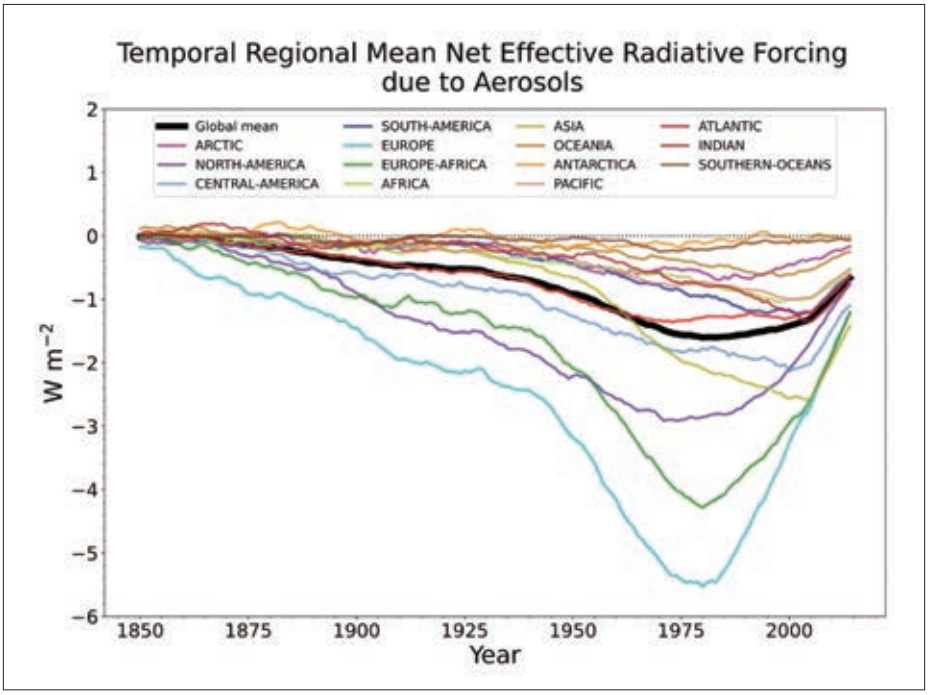


圖1.6.1 地球系統模式所模擬1850年至2014年PM造成的區域平均輻射強迫 (W m^{-2})。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 6.11)

系統模式所涵蓋的面向更完整，包括大氣化學、生地化循環等都陸續納入地球系統模式裡，但從其中複雜的過程，例如自然源氣膠的排放與沉降等，仍有相當大的不確定性，亟須進行相關研究。

1.6.2 氣候變遷對全球空氣品質的影響

氣候變遷可影響大氣條件 (例如逆溫、通風狀況、平流層—對流層交換)、化學反應及生物源排放量等，進而影響污染物濃度 (Kirtman et al., 2013; von Schneidemesser et al., 2015)，AR6統整過去觀測及模式結果提出：(1) 全球暖化加速消耗O_3，使低污染地區的地表O_3減少；但在污染地區，反而使地表O_3增加；(2) PM成分複雜，目前的研究大多局限於全球尺度或歐洲、美洲、南亞和東亞這三區，其他地區的研究十分缺乏。根據Westervelt et al. (2016) 與Xu & Lamarque (2018)，在PM及其前驅物排放固定，溫室氣體排放採用RCP8.5的情境下，全球暖化造成2100年平均PM濃度約增加0.21 mg m^{-3}。

另一方面，氣候變遷造成極端天氣的頻率增加，也會影響到空氣品質。最常被提到的是在全球暖化情況下，熱浪頻率增加，導致高污染O_3或PM事件增加。亞洲地區的冬季是高污染好發季節，Zou et al. (2017) 利用再分析資料研究2013年1月中國冬季高污染情況，認為全球暖化造成該年秋季時北極海冰減少以及該年冬季初大雪，溫度的變化造成大氣環流改變，中國北方處於弱風，不利污染物擴散。他們亦分析CMIP5對未來推估，認為未來全球暖化造成北極冰圈的變化，將使亞洲冬季更容易發生高污染事件。Cai et al. (2017) 分析CMIP5資料亦顯示在RCP8.5的情境下，類似2013年1月高污染時的天氣特徵 (大氣穩定度增加、近地面北風及中層西北風均減弱) 將更頻繁出現，且此環流特徵與北極振盪指數增加、和亞洲冬季季風減弱有關。研究亦指出全球暖化導致亞洲地區大尺度環流改變，包括北極振盪指數增加、冬季季風減弱等，都顯示未來亞洲冬季更容易發生高污染事件。

整體而言，目前科學研究顯示，全球暖化造成全球或區域尺度空氣品質有變差的趨勢，但由於污染物的時空尺度變化相當大，若要評估國家或都市尺度的影響，則需要高解析度數值模擬及資料分析，方能有更進一步的了解。

1.6.3 COVID-19 對全球空氣品質的衝擊

2019年12月，中國武漢市爆發COVID-19疫情，並蔓延到全世界，造成大流行，各國政府為控制疫情傳播，在2020年至2021年期間進行交通運輸或人類活動的管控，連帶也減少工業與經濟活動。

根據觀測資料估計，COVID-19造成NO_2濃度減少13%至48%，$PM_{2.5}$濃度減少10%至33%，而O_3濃度約增加0%至4% (Gkatzelis et al., 2021)，在區域或都市尺度減少情況更為明顯。Chauhan & Singh (2020) 分析世界主要城市，包括紐約 (New York)、洛杉磯 (Los Angeles)、薩拉哥薩 (Zaragoza)、羅馬 (Roma)、杜拜 (Dubai)、德里 (Delhi)、孟買 (Mumdai)、北京 (Beijing) 以及上海 (Shanghai) 等，在2019年12月到2020年3月的$PM_{2.5}$濃度，並與2017年至2019年的濃度做比較，發現可能由於世界各國為了遏止COVID-19疫情，倡導保持社交距離，2020年3月各大城市的$PM_{2.5}$濃度有下降的情況 (圖1.6.2)。

區域尺度的研究也有類似結果。Sharma et al. (2020) 分析印度22個城市的標準污染物濃度發現，包括PM_{10}、$PM_{2.5}$、CO及NO_2等污染物在2020年春季的濃度比2017年至2019年春季濃度減少10%至43%不等，但O_3濃度反而約增加17%；印度各地區的空氣品質指標 (Air Quality Index, AQI) 降低15%至44%不等，顯示在2020年疫情封鎖期間，由於人為活動降低，印度的空氣品質有明顯改進。至於中南半島一帶，2020年馬來西亞因為COVID-19發布了行動管制令Malaysia Movement Control Order (MCO)，Abdullah et al. (2020) 發現由於交通工具和工業活動減少，68個測站的$PM_{2.5}$濃度減少程度可達58%。泰國曼谷在2020年3月至4月期間，因疫情造成交通活動變少，CO及NO_2濃度降低，反而使O_3濃度明顯比2019年同期濃度增加 (Dejchanchaiwong & Tekasakul, 2021)。Bai et al. (2022) 分析中國地區1388個測站在2020年2月至3月$PM_{2.5}$濃度資料，發現中國主要城市的$PM_{2.5}$濃度相比於前5年的同時期，減少可達30%至60% (圖1.6.3)。

不僅地面觀測資料顯示空氣品質受COVID-19疫情影響，衛星遙測也有相似的結果。Filonchyk et al. (2020) 分析臭氧監測儀 (Ozone Monitoring Instrument, OMI) 所估計的東亞污染物排放資料，顯示人為活動減少，導致東亞地區CO和NO_2排放量減少20%至30%。不僅東亞地區空氣品質有改善的情況，2020年初印度及阿拉伯聯合大公國的NO_2相較於疫情前降低約17%至23%，氣膠光學厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 降低約

3%至20% (Alqasemi et al., 2021; Hu et al., 2022)。東歐波蘭地區的中級解析度成像分光輻射度計 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 資料則顯示，2020年4月至5月AOD比2018年至2019年同期少了約20% (Filonchyk et al., 2021)。除了短生命期的污染物濃度明顯因疫情而降低，根據研究，COVID-19疫情也對2020年CO_2排放量造成短時間的影響，大約減少7%排放量 (Forster et al., 2020; Friedlingstein et al.,

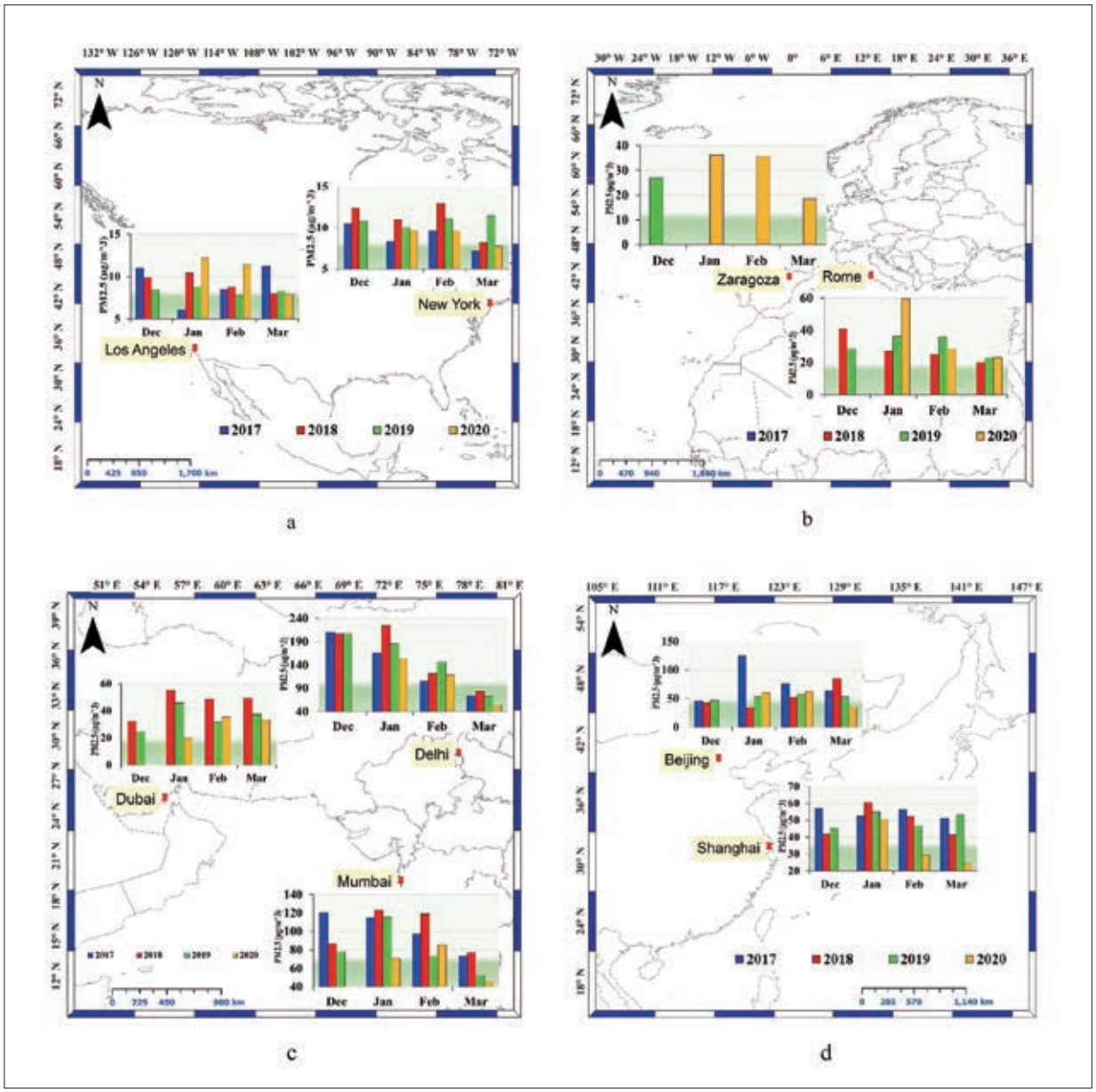


圖1.6.2　世界各主要城市在2017年 (藍色直條)、2018年 (紅色直條)、2019年 (綠色直條) 以及2020年 (黃色直條) 12月到隔年3月的平均$PM_{2.5}$濃度。(a) 美洲的紐約及洛杉磯，(b) 歐洲西班牙的薩拉哥薩及義大利羅馬，(c) 阿拉伯半島的杜拜以及印度的德里、孟買，(d) 中國的北京與上海。(摘自Chauhan & Singh, 2020)

2020; Le Quéré et al., 2020)，但2020年整年的CO_2濃度仍持續上升，顯示疫情並未造成CO_2長期的影響。

以上研究顯示COVID-19的疫情顯著減少人類活動，連帶改善空氣品質；從另一方面來說，COVID-19的疫情是一次真實的地球實驗室，人類若要改善目前各地空氣品質不良的情況，必須從控制及改進各種交通工具及工業活動著手。

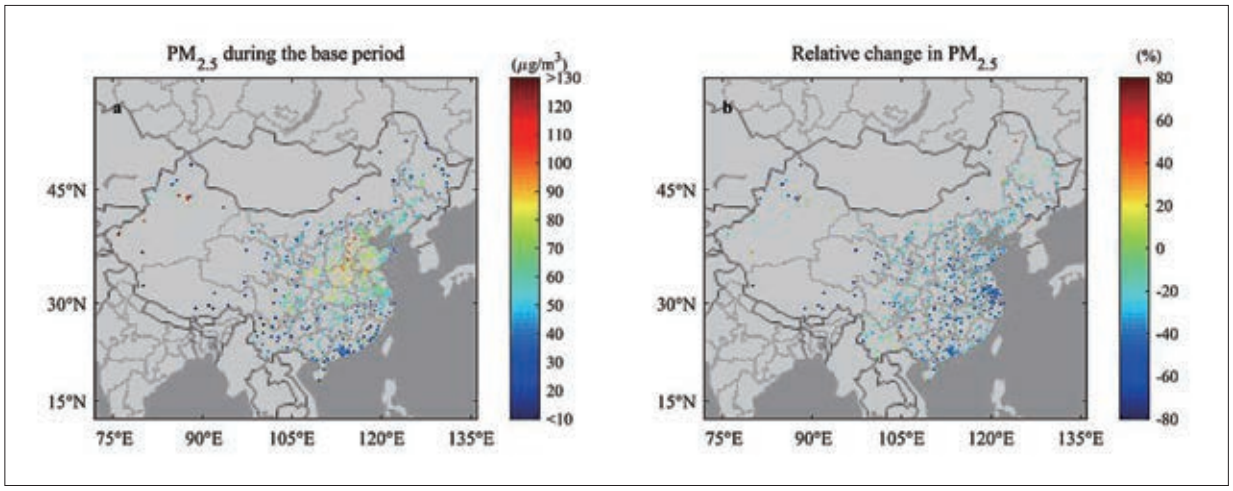


圖1.6.3　中國地區2015年至2019年平均$PM_{2.5}$濃度 (左圖) 以及2020年2月至3月平均$PM_{2.5}$濃度降低的比例 (%)。(摘自 Bai et al., 2022)

1.6.4　COVID-19 對全球輻射強迫以及氣候的衝擊

根據IPCC AR6，COVID-19疫情減少空氣污染，導致2020年總輻射強迫短暫出現小幅上升的情況，主要來自人為活動產生的氣膠減少。由於COVID-19造成全球人類活動受限制的時間不長，地球系統模式模擬的結果顯示輻射強迫變化量不大，2020年春天因為疫情造成總輻射強迫增加0.025 W m^{-2}至0.2 W m^{-2}，其中氣膠與雲交互作用貢獻+0.1 W m^{-2}至+0.3 W m^{-2}、CO_2減少使輻射強迫降低0.01 W m^{-2}，以及NO_X減少 (對流層臭氧也減少) 造成輻射強迫減少0.04 W m^{-2}。另一方面空中交通減少造成凝結尾卷雲減少，也降低輻射強迫約0.04 W m^{-2}，到2020年底增加的趨勢則減緩至2020年春天的一半 (Forster et al., 2020; Gettelman et al., 2021; Weber et al., 2020; Yang et al., 2020)。COVID-19疫情造成污染物排放減少及AOD降低 (Gkatzelis et al., 2021; Ming et al., 2021; van Heerwaarden et al., 2021)，但2020年全球平均溫度或降水並未觀測到有明顯變化。

參考文獻

王俊寓、童裕翔，陳永明 (2023)。**AR6臺灣氣候變遷圖資產製成果**。國家災害防救科技中心，NCDR 111-A28。

童裕翔、陳正達、劉俊志、陳永明 (2019)。**統計降尺度 (日) 資料評估與應用**。國家災害防救科技中心，NCDR 107-T19。

TCCIP技術報告 (2021)。**統計與動力降尺度方法**。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_publish_data_document_one.aspx?dd_id=20210609212941

TCCIP資料說明 (2023)。**AR6統計降尺度日資料-資料說明文件**。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_publish_data_document_one.aspx?dd_id=20220708151649

國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(2023)。**臺灣氣候變遷關鍵指標圖集： AR6統計降尺度版**。國家災害防救科技中心。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_05_03.aspx

Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 113*(42), 11770-11775. https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113

Abdullah, S., Mansor, A. A., Napi, N. N. L. M., Mansor, W. N. W., Ahmed, A. N., Ismail, M., & Ramly, Z. T. A. (2020). Air quality status during 2020 Malaysia Movement Control Order (MCO) due to 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) *pandemic. Science of the Total Environment, 729*, 139022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139022

Adloff, F., Somot, S., Sevault, F., Jordà, G., Aznar, R., Déqué, M., Herrmann, M., Marcos, M., Dubois, C., Padorno, E., Alvarez-Fanjul, E., & Gomis, D. (2015). Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios. *Climate Dynamics, 45*, 2775-2802. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2507-3

Adusumilli, S., Borsa, A. A., Fish, M. A., McMillan, H. K., & Silverii, F. (2019). A decade of water storage changes across the contiguous United States from GPS and satellite gravity. *Geophysical Research Letters, 46*(22), 13006-13015. https://doi.org/10.1029/2019gl085370

AghaKouchak, A. (2014). A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought. *Hydrology and Earth System Sciences, 18*(7), 2485-2492. https://doi.org/10.5194/hess-18-2485-2014

Aitor Aldama-Campino & Kristofer DÖÖs (2020). Mediterranean overflow water in the North Atlantic and its multidecadal variability, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 72*(1), 1-10. https://doi.org/10.1080/16000870.2018.1565027

Alexander, L.V. (2016). Global observed long-term Changes in temperature and precipitation

extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Weather and Climate Extremes, 11*, 4–16. https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.007

Allen, C. D., D. D. Breshears, & N. G. McDowell, (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the *Anthropocene. Ecosphere*, *6*(8), 1–55. https://doi.org/10.1890/es15-00203.1

Allen, J.T. (2018). *Climate Change and Severe Thunderstorms. In: Oxford Research Encyclopedia of Climate Science.* Oxford University Press, Oxford, UK (pp. 1–65). https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.62

Alqasemi, A. S., M. E. Hereher, G. Kaplan, A. M. F. Al-Quraishi, & H. Saibi (2021). Impact of COVID-19 lockdown upon the air quality and surface urban heat island intensity over the United Arab Emirates. *Science of The Total Environment, 767*, 144330. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144330

Altman, J., Ukhvatkina, O. N., Omelko, A. M., Macek, M., Plener, T., Pejcha, V., Cerny, T., Petrik, P., Srutek, M., Song, J., Zhmerenetsky, A. A., Vozmishcheva, A. S., Krestov, P. V., Petrenko, T. Y., Treydte, K., & Dolezal, J. (2018). Poleward migration of the destructive effects of tropical cyclones during the 20th century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(45), 11543-11548. https://doi.org/10.1073/pnas.1808979115

Angélil, O., Stone, D., Wehner, M., Paciorek, C. J., Krishnan, H., & Collins, W. (2017). An independent assessment of anthropogenic attribution statements for recent extreme temperature and rainfall events. *Journal of Climate, 30*(1), 5-16. https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0077.1

Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockström, J., & Lenton, T. M. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science, 377*(6611). https://doi.org/10.1126/science.abn7950

Baek, H. J., Kim, M. K., & Kwon, W. T. (2017). Observed short‐and long‐term changes in summer precipitation over South Korea and their links to large‐scale circulation anomalies. *International Journal of Climatology, 37*(2), 972-986. https://doi.org/10.1002/joc.4753

Bai, H., W. Gao, Y. Zhang, & L. Wang (2022), Assessment of health benefit of PM2.5 reduction during COVID-19 lockdown in China and separating Contributions from anthropogenic emissions and meteorology. *Journal of Environmental Sciences, 115*, 422-431. https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.022

Balaguru, K., Foltz, G. R., & Leung, L. R. (2018). Increasing magnitude of hurricane rapid intensification in the central and eastern tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters, 45*(9), 4238-4247. https://doi.org/10.1029/2018gl077597

Barcikowska, M. J., Weaver, S. J., Feser, F., Russo, S., Schenk, F., Stone, D. A., Wehner, M. F., & Zahn, M.

(2018). Euro-Atlantic winter storminess and precipitation extremes under 1.5 C vs. 2 C warming scenarios. *Earth System Dynamics, 9*(2), 679-699. https://doi.org/10.5194/esd-9-679-2018

Bednaršek, N., Naish, K.-A., Feely, R. A., Hauri, C., Kimoto, K., Hermann, A. J., Michel, C., Niemi, A., & Pilcher, D. (2021). Integrated Assessment of Ocean Acidification Risks to Pteropods in the Northern High Latitudes: Regional Comparison of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity. *Front. Mar. Sci. 8*, 671497. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.671497

Behrangi, A., Guan, B., Neiman, P. J., Schreier, M., & Lambrigtsen, B. (2016). On the quantification of atmospheric rivers precipitation from space: Composite assessments and case studies over the eastern North Pacific Ocean and the western United States. *Journal of Hydrometeorology, 17*(1), 369-382. https://doi.org/10.1175/jhm-d-15-0061.1

Benestad, R. E., Parding, K. M., Erlandsen, H. B., & Mezghani, A. (2019). A simple equation to study changes in rainfall statistics. *Environmental Research Letters, 14*(8), 084017. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2bb2

Berry, G., Jakob, C., & Reeder, M. (2011a). Recent global trends in atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters, 38*(21). https://doi.org/10.1029/2011GL049481

Berry, G., Reeder, M. J., & Jakob, C. (2011b). A global climatology of atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters, 38*(4). https://doi.org/10.1029/2010GL046451

Bevacqua, E., Maraun, D., Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Vrac, M., Mentaschi, L., & Widmann, M. (2019). Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. *Science advances, 5*(9), eaaw5531. https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw5531

Bevacqua, E., Vousdoukas, M. I., Zappa, G., Hodges, K., Shepherd, T. G., Maraun, D., Mentaschi, L., & Feyen, L. (2020b). More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change. *Communications Earth & Environment, 1*(1). https://doi.org/10.1038/s43247-020-00044-z

Bevacqua, E., Zappa, G., & Shepherd, T. G. (2020a). Shorter cyclone clusters modulate changes in European wintertime precipitation extremes. *Environmental Research Letters, 15*(12), 124005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbde7

Bhatia, K. T., Vecchi, G. A., Knutson, T. R., Murakami, H., Kossin, J., Dixon, K. W., & Whitlock, C. E. (2019). Recent increases in tropical cyclone intensification rates. *Nature Communications, 10*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-019-08471-z

Bindoff, N. L. et al., (2013) Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K.Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley

(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (pp. 867–952). https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324.022

Bindoff, N.L., W.W.L. Cheung, J.G. Kairo, J. Arístegui, V.A. Guinder, R. Hallberg, N. Hilmi, N. Jiao, M.S. Karim, L. Levin, S. O' Donoghue, S.R. Purca Cuicapusa, B. Rinkevich, T. Suga, A. Tagliabue, & P. Williamson, (2019). Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 447-587. https://doi.org/10.1017/9781009157964.007. (pp. 447–587). https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/

Blázquez, J., Solman, S.A. (2019). Relationship between projected changes in precipitation and fronts in the austral winter of the Southern Hemisphere from a suite of CMIP5 models. *Clim Dyn 52*, 5849–5860. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4482-y

Box, J. E., Hubbard, A., Bahr, D. B., Colgan, W. T., Fettweis, X., Mankoff, K. D., Wehrlé, A., Noël, B., van den Broeke, M. R., Wouters, B., Bjørk, A. A., & Fausto, R. S. (2022). Greenland ice sheet Climate disequilibrium and Committed sea-level rise. *Nature Climate Change, 12*(9), 808-813. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01441-2

Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, *150*, 131-147. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7

Brito, S. S. B., Cunha, A. P. M., Cunningham, C. C., Alvalá, R. C., Marengo, J. A., & Carvalho, M. A. (2018). Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology, 38*(2), 517-529. https://doi.org/10.1002/joc.5225

Bryden, H. L., Longworth, H. R., & Cunningham, S. A. (2005). Slowing of the Atlantic meridional overturning Circulation at 25°N. *Nature, 438*(7068), 655-657. https://doi.org/10.1038/nature04385

Bulgin, C. E., Merchant, C. J., & Ferreira, D. (2020). Tendencies, variability and persistence of sea surface temperature anomalies. *Scientific Reports, 10*, 7986. https://doi.org/10.1038/s41598-020-64785-9

Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G., & Saba, V. (2018). Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning Circulation. *Nature, 556*(7700), 191-196. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5

Cai, W., K. Li, H. Liao, H. Wang, & L. Wu (2017), Weather Conditions Conducive to Beijing severe haze more frequent under Climate Change. *Nature Climate Change, 7*(4), 257-262. https://doi.org/10.1038/nclimate3249

Catto, J. L., & Pfahl, S. (2013). The importance of fronts for extreme precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118*(19), 10-791. https://doi.org/10.1002/jgrd.50852

Catto, J. L., Jakob, C., & Nicholls, N. (2015). Can the CMIP5 models represent winter frontal precipitation?. *Geophysical Research Letters, 42*(20), 8596-8604. https://doi.org/10.1002/2015GL066015

Catto, J. L., Nicholls, N., Jakob, C., & Shelton, K. L. (2014). Atmospheric fronts in current and future climates. *Geophysical Research Letters, 41*(21), 7642-7650. https://doi.org/10.1002/2014GL061943

Chang, E. K. (2014). Impacts of background field removal on CMIP5 projected changes in Pacific winter cyclone activity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119*(8), 4626-4639. https://doi.org/10.1002/2013jd020746

Chang, E. K., Guo, Y., Xia, X., & Zheng, M. (2013). Storm-track activity in IPCC AR4/CMIP3 model simulations. *Journal of climate, 26*(1), 246-260. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00707.1

Chang, E. K., Ma, C. G., Zheng, C., & Yau, A. M. (2016). Observed and projected decrease in Northern Hemisphere extratropical cyclone activity in summer and its impacts on maximum temperature. *Geophysical Research Letters, 43*(5), 2200-2208. https://doi.org/10.1002/2016gl068172

Chauhan, A., & Singh R. P. (2020). Decline in PM2.5 Concentrations over major Cities around the world associated with COVID-19. *Environmental Research, 187*, 109634. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109634

Chen, H., & Sun, J. (2015). Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate, 28*(13), 5430-5447. https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00707.1

Chen, H., & Sun, J. (2017a). Anthropogenic warming has caused hot droughts more frequently in China. *Journal of Hydrology, 544*, 306-318. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.044

Chen, H., & Sun, J. (2017b). Characterizing present and future drought changes over eastern China. *International Journal of Climatology, 37*, 138-156. https://doi.org/10.1002/joc.4987

Chen, S. T., Kuo, C. C., & Yu, P. S. (2009). Historical trends and variability of meteorological droughts in Taiwan. *Hydrological sciences journal, 54*(3), 430-441. https://doi.org/10.1623/hysj.54.3.430

Chen, J., Dai, A., Zhang, Y., & Rasmussen, K. L. (2020). Changes in convective available potential energy and convective inhibition under global warming. *Journal of Climate, 33*(6), 2025-2050. https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0461.1

Chen, L., Qu, X., Huang, G., & Gong, Y. (2019). Projections of East Asian summer monsoon under 1.5°C and 2°C warming goals. *Theoretical and Applied Climatology, 137*, 2187-2201. https://doi.

org/10.1007/s00704-018-2720-1

Chen, C. A., Hsu, H. H., Liang, H. C., Chiu, P. G., & Tu, C. Y. (2022). Future Change in extreme precipitation in East Asian spring and Mei-yu seasons in two high-resolution AGCMs. *Weather and Climate Extremes, 35*, 100408. https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100408

Chen, Y., Li, W., Jiang, X., Zhai, P., & Luo, Y. (2021). Detectable intensification of hourly and daily scale precipitation extremes across eastern China. *Journal of Climate, 34*(3), 1185-1201. https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0462.1

Chen, Z., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., & Jiang, J. (2020). Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 projections. *Geophysical Research Letters, 47*(14), e2019GL086902. https://doi.org/10.1029/2019GL086902

Cheng, S., Guan, X., Huang, J., Ji, F., & Guo, R. (2015). Long‐term trend and variability of soil moisture over East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120*(17), 8658-8670. https://doi.org/10.1002/2015jd023206

Cheon, W. G., Park, Y. G., Yeh, S. W., & Kim, B. M. (2012). Atmospheric impact on the northwestern Pacific under a global warming scenario. *Geophysical research letters, 39*(16). https://doi.org/10.1029/2012GL052364

Chevuturi, A., Klingaman, N. P., Turner, A. G., & Hannah, S. (2018). Projected changes in the Asian‐Australian monsoon region in 1.5°C and 2.0°C global‐warming scenarios. *Earth's Future, 6*(3), 339-358. https://doi.org/10.1002/2017ef000734

Chou, C., Huang, L. F., Tseng, L., Tu, J. Y., & Tan, P. H. (2009). Annual cycle of rainfall in the western North Pacific and East Asian sector. *Journal of Climate, 22*(8), 2073-2094. https://doi.org/10.1175/2008JCLI2538.1

Christensen, J.H. et al., (2013). Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K.Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 1217–1308). https://doi.org/10.1017/Cbo9781107415324.028

Collins, M. et al., (2013). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K.Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 1029–1136). https://doi.org/10.1017/Cbo9781107415324.024

Contractor, S., M.G. Donat, & L. Alexander, (2021). Changes in Observed Daily Precipitation Over Global Land Areas Since 1950. *Journal of Climate, 34*(1), 3–19. https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0965.1

Cook, B.I., J.E. Smerdon, R. Seager, & S. Coats, (2014). Global warming and 21st Century drying. *Climate Dynamics, 43*(9–10), 2607–2627. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2075-y

Cook, B.I., J.S. Mankin, & K.J.Anchukaitis, (2018). Climate Change and Drought: From Past to Future. *Current Climate Change Reports, 4*(2), 164–179. https://doi.org/10.1007/s40641-018-0093-2

Dai, A. (2021). Hydroclimatic trends during 1950–2018 over global land. *Climate Dynamics, 56*(11–12), 4027–4049. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05684-1

Dai, A. & T. Zhao, (2017). Uncertainties in historical Changes and future projections of drought. Part I: estimates of historical drought Changes. *Climatic Change, 144*(3), 519–533. https://doi.org/10.1007/s10584-016-1705-2

Dai, A., T. Zhao, & J. Chen, (2018). Climate Change and Drought: a Precipitation and Evaporation Perspective. *Current Climate Change Reports, 4*(3), 301– 312. https://doi.org/10.1007/s40641-018-0101-6

Daloz, A.S. & S.J. Camargo, (2018). Is the poleward migration of tropical Cyclone maximum intensity associated with a poleward migration of tropical Cyclone genesis? *Climate Dynamics, 50*(1), 705–715. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3636-7

Dejchanchaiwong, R., & P. Tekasakul, (2021). Effects of Coronavirus Induced City Lockdown on PM2.5 and Gaseous Pollutant Concentrations in Bangkok. *Aerosol and Air Quality Research, 21*(4), 200418. https://doi.org/10.4209/aaqr.200418

Delworth, T. L., Cooke, W. F., Naik, V., Paynter, D., & Zhang, L. (2022). A weakened AMOC may prolong greenhouse gas-induced Mediterranean drying even with significant and rapid Climate Change mitigation. *PNAS, 119*(35). https://doi.org/10.1073/pnas.2116655119

Deng, K., S. Yang, M. Ting, Y. Tan, & S. He, (2018). Global Monsoon Precipitation: Trends, Leading Modes, and Associated Drought and Heat Wave in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate, 31*(17), 6947–6966. https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0569.1

Desbruyères, D. G., Mercier, H., Maze, G., & Daniault, N. (2019). Surface predictor of overturning Circulation and heat Content Change in the subpolar North Atlantic. *Ocean Science, 15*(3), 809-817. https://doi.org/10.5194/os-15-809-2019

Di Luca, A., R. de Elía, M. Bador, & D. Argüeso, (2020). Contribution of mean Climate to hot temperature extremes for present and future Climates. *Weather and Climate Extremes, 28*, 100255. https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100255

Donat, M.G., L. Alexander, N. Herold, & A.J. Dittus, (2016). Temperature and precipitation extremes in Century-long gridded observations, reanalyses, and atmospheric model simulations.

Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(19), 11174–11189. https://doi.org/10.1002/2016jd025480

Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J., Willett, K. M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A. M., Kruger, A. C., Marengo, J., Peterson, T. C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., … Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118*(5), 2098-2118. https://doi.org/10.1002/jgrd.50150

Dong, S., Sun, Y., Li, C., Zhang, X., Min, S., & Kim, Y. (2021). Attribution of extreme precipitation with updated observations and CMIP6 simulations. *Journal of Climate, 34*(3), 871-881. https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-1017.1

Dosio, A., L. Mentaschi, E.M. Fischer, & K. Wyser, (2018). Extreme heat waves under 1.5°C and 2°C global warming. *Environmental Research Letters, 13*(5), 054006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab827

Dowdy, A.J. (2018). Climatological Variability of Fire Weather in Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57*(2), 221–234. https://doi.org/10.1175/jamc-d-17-0167.1

Dowdy, A.J. & J.L. Catto, (2017). Extreme weather Caused by Concurrent Cyclone, front and thunderstorm occurrences. *Scientific Reports, 7*, 1–8. https://doi.org/10.1038/srep40359

Du, H., Alexander, L. V., Donat, M. G., Lippmann, T., Srivastava, A., Salinger, J., Kruger, A., Choi, G., He, H. S., Fujibe, F., Rusticucci, M., Nandintsetseg, B., Manzanas, R., Rehman, S., Abbas, F., Zhai, P., Yabi, I., Stambaugh, M. C., Wang, S., ... Wu, Z. (2019). Precipitation from persistent extremes is increasing in most regions and globally. *Geophysical Research Letters, 46*(11), 6041-6049. https://doi.org/10.1029/2019gl081898

Dunn, R. J., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., Lippmann, T., Allan, R., Aguilar, E., Barry, A. A., Brunet, M., Caesar, J., Chagnaud, G., Cheng, V., Cinco, T., Durre, I., De Guzman, R., Htay, T. M., Wan Ibadullah, W. M., ... Bin Hj Yussof, M. N. (2020). Development of an updated global land in situ - based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125*(16). https://doi.org/10.1029/2019jd032263

Easterling, D.R., K.E. Kunkel, M.F.Wehner, & L. Sun, (2016). Detection and attribution of Climate extremes in the observed record. *Weather and Climate Extremes, 11*, 17–27. https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.01.001

Endo, H., Kitoh, A., & H. Ueda, (2018). A Unique Feature of the Asian Summer Monsoon Response to Global Warming: The Role of Different Land–Sea Thermal Contrast Change between the Lower and Upper Troposphere. *SOLA, 14*, 57–63. https://doi.org/10.2151/sola.2018-010

Endo, H., Kitoh, A., & Mizuta, R. (2022). Future Changes in extreme precipitation and their association with tropical Cyclone activity over the western North Pacific and East Asia in 20 km AGCM simulations. *SOLA,18*, 58-64,. https://doi.org/10.2151/sola.2022-010

Espinoza, V., D.E. Waliser, B. Guan, D.A. Lavers, & F.M. Ralph, (2018). Global Analysis of Climate Change Projection Effects on Atmospheric Rivers. *Geophysical Research Letters, 45*(9), 4299–4308. https://doi.org/10.1029/2017gl076968

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev., 9*, 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

Feser, F., Barcikowska, M., Krueger, O., Schenk, F., Weisse, R., & Xia, L. (2015). Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe—A review. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141*(687), 350-382. https://doi.org/10.1002/qj.2364

Filonchyk, M., V. Hurynovich, & H. Yan, (2021). Impact of Covid-19 lockdown on air quality in the Poland, Eastern Europe. *Environmental Research, 198*, 110454. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110454

Filonchyk, M., V. Hurynovich, H. Yan, A. Gusev, & N. Shpilevskaya, (2020). Impact Assessment of COVID-19 on Variations of SO2, NO2, CO and AOD over East China. *Aerosol and Air Quality Research, 20*(7), 1530-1540. https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0226

Fischer, E.M. & R. Knutti, (2014). Detection of spatially aggregated Changes in temperature and precipitation extremes. *Geophysical Research Letters, 41*(2), 547–554. https://doi.org/10.1002/2013gl058499

Fischer, E.M. & R. Knutti, (2015). Anthropogenic Contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change, 5*(6), 560–564. https://doi.org/10.1038/nclimate2617

Fischer, E.M., J. Sedláček, E. Hawkins, & R. Knutti, (2014). Models agree on forced response pattern of precipitation and temperature extremes. *Geophysical Research Letters, 41*(23), 8554–8562. https://doi.org/10.1002/2014gl062018

Fischer, E.M. & R. Knutti, (2016). Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nature Climate Change, 6*(11), 986– 991, https://doi.org/10.1038/nclimate3110

Forster, P. M., Forster, H. I., Evans, M. J., Gidden, M. J., Jones, C. D., Keller, C. A., Lamboll, R. D., Quéré, C. L., Rogelj, J., Rosen, D., Schleussner, C., Richardson, T. B., Smith, C. J., & Turnock, S. T. (2020). Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. *Nature Climate Change, 10*(10), 913-919. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0883-0

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão,

L. E. O. C., Arneth, A., Arora, V., Bates, N. R., ⋯& Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data, 12*(4), 3269-3340. https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020

Froidevaux, P. & O. Martius, (2016). Exceptional integrated vapour transport toward orography: an important precursor to severe floods in Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142*(698), 1997–2012. https://doi.org/10.1002/qj.2793

Fu, Y., Li, F., Karstensen, J., & Wang, C. (2020). A stable Atlantic meridional overturning Circulation in a Changing North Atlantic Ocean since the 1990s. *Science Advances, 6*(48), eabc7836. https://doi.org/10.1126/sciadv.abc7836

Gao, X., Zhao, Q., Zhao, X., Wu, P., Pan, W., Gao, X., & Sun, M. (2017). Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050. *Science of The Total Environment, 595*, 191-200. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.226

García-Herrera, R., Garrido-Perez, J. M., Barriopedro, D., Ordóñez, C., Vicente-Serrano, S. M., Nieto, R., Gimeno, L., Sorí, R., & Yiou, P. (2019). The European 2016/17 drought. *Journal of Climate, 32*(11), 3169-3187. https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0331.1

Garcia-Soto, C., Cheng, L., Caesar, L., Schmidtko, S., Jewett, E. B., Cheripka, A., Rigor, I., Caballero, A., Chiba, S., Báez, J. C., Zielinski, T., & Abraham, J. P. (2021). An overview of ocean climate change indicators: Sea surface temperature, ocean heat content, ocean pH, dissolved oxygen concentration, Arctic Sea ice extent, thickness and volume, sea level and strength of the AMOC (Atlantic meridional overturning circulation). *Frontiers in Marine Science, 8*. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.642372

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences, 21*(12), 6307-6327. https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso‐Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology, 40*(1), 421-439. https://doi.org/10.1002/joc.6219

Gaupp, F., J. Hall, D. Mitchell, & S. Dadson, (2019). Increasing risks of multiple breadbasket failure under 1.5 and 2 C global warming. *Agricultural Systems, 175*, 34–45. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.05.010

Gehlen, M., Chau, T.T.T., Conchon,A., Denvil-Sommer, A., Chevallier, F., Vrac, M., & Mejia, C., (2020). Ocean acidification [in "Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 4"]. *Journal of Operational Oceanography, 13*(sup1), S64–S67. https://doi.org/10.1080/1755876x.2020.1785097

Gershunov, A., T. Shulgina, F.M. Ralph, D.A. Lavers, & J.J. Rutz, (2017). Assessing the Climate-scale variability of atmospheric rivers affecting western North America. *Geophysical Research Letters, 44*(15), 7900–7908. https://doi.org/10.1002/2017gl074175

Gershunov, A., Shulgina, T., Clemesha, R. E., Guirguis, K., Pierce, D. W., Dettinger, M. D., Lavers, D. A., Cayan, D. R., Polade, S. D., Kalansky, J., & Ralph, F. M. (2019). Precipitation regime change in western North America: The role of atmospheric rivers. *Scientific Reports, 9*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-46169-w

Gettelman, A., R. Lamboll, C. G. Bardeen, P. M. Forster, & D. Watson-Parris, (2021). Climate Impacts of COVID-19 Induced Emission Changes. *Geophysical Research Letters, 48*(3), e2020GL091805. https://doi.org/10.1029/2020GL091805

Giorgi, F. (2006). Climate Change hot-spots. Geophys. *Res. Lett., 33*(8), L08707. https://doi.org/10.1029/2006GL025734

Gkatzelis, G. I., Gilman, J. B., Brown, S. S., Eskes, H., Gomes, A. R., Lange, A. C., McDonald, B. C., Peischl, J., Petzold, A., Thompson, C. R., & Kiendler-Scharr, A. (2021). The global impacts of COVID-19 lockdowns on urban air pollution. *Elementa: Science of the Anthropocene, 9*(1). https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00176

Gonzales, K. R., D. L. Swain, K. M. Nardi, E. A. Barnes, & N. S. Diffenbaugh, (2019). Recent warming of landfalling atmospheric rivers along the west coast of the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124*(13), 2018JD029860, https://doi.org/10.1029/2018jd029860

Greve, P., Orlowsky, B., Mueller, B., Sheffield, J., Reichstein, M., & Seneviratne, S. I. (2014). Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience, 7*(10), 716-721. https://doi.org/10.1038/ngeo2247

Greve, P., L. Gudmundsson, & S.I. Seneviratne, (2018). Regional scaling of annual mean precipitation and water availability with global temperature Change. *Earth System Dynamics, 9*(1), 227–240. https://doi.org/10.3929/ethz-b-000251688

Grieger, J., G. C. Leckebusch, M. G. Donat, M. Schuster, & U. Ulbrich, (2014). Southern Hemisphere winter Cyclone activity under recent and future Climate Conditions in multi-model AOGCM simulations. *Int. J. Climatol., 34*, 3400–3416. https://doi.org/10.1002/joc.3917

Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist, 226*(6), 1550-1566. https://doi.org/10.1111/nph.16485

Guan, B. & D.E. Waliser, (2015). Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120*(24), 12514–12535. https://doi.org/10.1002/2015jd024257

Guo, X., Miyazawa, Y., & Yamagata, T. (2006). The Kuroshio Onshore Intrusion along the Shelf Break of the East China Sea: The Origin of the Tsushima Warm Current. *Journal of Physical Oceanography, 36*(12), 2205-2231. https://doi.org/10.1175/JPO2976.1

Ha, K.-J., S. Moon, A. Timmermann, & D. Kim, (2020). Future Changes of Summer Monsoon Characteristics and Evaporative Demand Over Asia in CMIP6 Simulations. *Geophysical Research Letters, 47*(8), 1–10. https://doi.org/10.1029/2020gl087492

Han, Z., Su, T., Huang, B., Feng, T., Qu, S., & Feng, G. (2019). Changes in global monsoon precipitation and the related dynamic and thermodynamic mechanisms in recent decades. *International Journal of Climatology, 39*(3), 1490–1503. https://doi.org/10.1002/joc.5896

Hawcroft, M., E.Walsh, K. Hodges, & G. Zappa, (2018). Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical Cyclones. *Environmental Research Letters, 13*(12), 124006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaed59.

Haywood, J. M. & Boucher, O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Rev. Geophys., 38*, 513–543.

Hermans, T. H., Gregory, J. M., Palmer, M. D., Ringer, M. A., Katsman, C. A., & Slangen, A. B. (2021). Projecting global mean sea‐level change using CMIP6 models. *Geophysical Research Letters, 48*(5). https://doi.org/10.1029/2020gl092064

Hewson, T. D., (1998). Objective fronts. *Met. Apps, 5*, 37-65. https://doi.org/10.1017/S1350482798000553

Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijioka, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, & G. Zhou, (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 175-312. https://doi.org/10.1017/9781009157940.005

Hong, C., Tsou, C., Hsu, P., Chen, K., Liang, H., Hsu, H., Tu, C., & Kitoh, A. (2021). Future changes in tropical cyclone intensity and frequency over the western North Pacific based on 20-km Hiram and MRI models. *Journal of Climate, 34*(6), 2235-2251. https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0417.1

Hong, J.-W., J. Hong, E.E. Kwon, & D.K. Yoon, (2019). Temporal dynamics of urban heat island Correlated with the socio-economic development over the past half-century in Seoul, Korea. *Environmental Pollution, 254*, 112934. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.102

Hope, P., Black, M. T., Lim, E., Dowdy, A., Wang, G., Fawcett, R. J., & Pepler, A. S. (2019). On determining the impact of increasing atmospheric CO2 on the record fire weather in eastern Australia in February 2017. *Bulletin of the American Meteorological Society, 100*(1), S111-S117. https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0135.1

Horinouchi, T., S. Matsumura, T. Ose, & Y.N. Takayabu, (2019). Jet–Precipitation Relation and Future Change of the Mei-Yu–Baiu Rainband and Subtropical Jet in CMIP5 Coupled GCM Simulations. *Journal of Climate, 32*(8), 2247–2259. https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0426.1

Hsu, H.-H. & C.-T. Chen, (2002). Observed and Projected Climate Change in Taiwan. *Meteorol Atmos Phys 79*, 87-104. https://doi.org/10.1007/s703-002-8230-x

Hsu, H.-H., & Y.-T. Chen, (2020). Simulation and Projection of Circulations Associated with Atmospheric Rivers along the North American Northeast Coast. *J. Climate, 33*, 5673–5695. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0104.1

Hsu, P., Chen, K., Tsou, C., Hsu, H., Hong, C., Liang, H., Tu, C., & Kitoh, A. (2021). Future changes in the frequency and destructiveness of Landfalling tropical cyclones over East Asia projected by high‐resolution AGCMs. *Earth's Future, 9*(3). https://doi.org/10.1029/2020ef001888

Hu, Z., Q. Jin, Y. Ma, Z. Ji, X. Zhu, & W. Dong, (2022). How Does COVID-19 Lockdown Impact Air Quality in India? *Remote Sensing, 14*(8), 1869. https://doi.org/10.3390/rs14081869

Huang, X., Zhou, T., Zhang, W., Jiang, J., Li, P., & Zhao, Y. (2019). Northern hemisphere land monsoon precipitation changes in the twentieth century revealed by multiple reanalysis datasets. *Climate Dynamics, 53*(11), 7131-7149. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04982-z

Hurd, C. L., Lenton, A., Tilbrook, B., & Boyd, P. W. (2018). Current understanding and Challenges for oceans in a higher-CO2 world. *Nature Climate Change, 8*(8), 686–694. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0211-0

Imada, Y. et al., (2014). The Contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013 [in "Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective"]. *Bulletin of the American Meteorological Society, 95*(9), S52–S54. https://doi.org/10.1175/1520-0477-95.9.s1.1

Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shiogama, & M. Arai, (2019). The July 2018 High Temperature Event in Japan Could Not Have Happened without Human-Induced Global Warming. *SOLA, 15A*, 8–12. https://doi.org/10.2151/sola.15a-002

Ionita, M., V. Nagavciuc, & B. Guan, (2020). Rivers in the sky, flooding on the ground: the role of atmospheric rivers in inland flooding in Central Europe. *Hydrology and Earth System Sciences, 24*(11), 5125–5147. https://doi.org/10.5194/hess-24-5125-2020

IPCC, 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B. et al., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United

Kingdom and New York, NY, USA, 582 pp.. https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B. et al., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.1132), www.ipcc.ch/ report/ar5/wg2

IPCC, 2018: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels andrelated global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the Context of strengthening the global response to the threat of Climate Change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T.Waterfield (eds.)]. In Press, (pp.32). https:// www.ipcc. Ch/sr15/chapter/spm

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, (pp.3-24). https://doi.org/10.1017/9781009157940.001

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.*

Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.3-32). https://doi.org/10.1017/9781009157896.001

IPCC, 2021: Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.33-144). https://doi.org/10.1017/9781009157896.002.

IPCC, 2021: Technical Summary. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Chen, D., M. Rojas, B.H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S.H. Faria, E. Hawkins, P. Hope, P. Huybrechts, M. Meinshausen, S.K. Mustafa, G.-K. Plattner, and A.-M. Tréguier, 2021: Framing, Context, and Methods. InClimate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.147–286). https://doi.org/10.1017/9781009157896.003

IPCC, 2021: Chapter 2. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 287–422). https://doi.org/10.1017/9781009157896.004

IPCC, 2021: Chapter 4. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

Change [Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.553–672). https://doi.org/10.1017/9781009157896.006

IPCC, 2021: Chapter 6. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Szopa, S., V. Naik, B. Adhikary, P. Artaxo, T. Berntsen, W.D. Collins, S. Fuzzi, L. Gallardo, A. Kiendler-Scharr, Z. Klimont, H. Liao, N. Unger, and P. Zanis, 2021: Short-Lived Climate Forcers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 817–922). https://doi.org/10.1017/9781009157896.008

IPCC, 2021: Chapter 9. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.1211–1362). https://doi.org/10.1017/9781009157896.011

IPCC, 2021: Chapter 11. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate . In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K.

Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.1513–1766). https://doi.org/10.1017/9781009157896.013

IPCC, 2021: Chapter 12. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Ranasinghe, R., A.C. Ruane, R. Vautard, N. Arnell, E. Coppola, F.A. Cruz, S. Dessai, A.S. Islam, M. Rahimi, D. Ruiz Carrascal, J. Sillmann, M.B. Sylla, C. Tebaldi, W. Wang, and R. Zaaboul, 2021: Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.1767–1926). https://doi.org/10.1017/9781009157896.014

Ivanovic, R. F., Valdes, P. J., Gregoire, L., Flecker, R., & Gutjahr, M. (2014). Sensitivity of modern climate to the presence, strength and salinity of Mediterranean-Atlantic exchange in a global general circulation model. *Climate Dynamics, 42*(3-4), 859-877. https://doi.org/10.1007/s00382-013-1680-5

James, R., Washington, R., Schleussner, C. - F., Rogelj, J. & Conway, D. (2017), Characterizing half - a - degree difference: a review of methods for identifying regional climate responses to global warming targets. *WIREs Clim Change, 8*, e457. https://doi.org/10.1002/wcc.457

Jia, B., J. Liu, Z. Xie, & C. Shi, (2018). Interannual Variations and Trends in Remotely Sensed and Modeled Soil Moisture in China. *Journal of Hydrometeorology, 19*(5), 831–847. https://doi.org/10.1175/jhm-d-18-0003.1

Josey, S. A., Hirschi, J. J.-M., Sinha, B., Duchez, A., Grist, J. P., & Marsh, R. (2018). The recent Atlantic Cold anomaly: Causes, Consequences, and related phenomena. *Annual Review of Marine Science, 10*, 475-501.

Kamae, Y., W. Mei, S.P. Xie, M. Naoi, & H. Ueda, (2017). Atmospheric rivers over the Northwestern Pacific: Climatology and interannual variability. *Journal of Climate, 30*(15), 5605–5619. https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0875.1

Kamae, Y., W. Mei, & S.-P. Xie, (2019). Ocean warming pattern effects on future Changes in East Asian atmospheric rivers. *Environmental Research Letters, 14*(5), 54019. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab128a

Kar-Man Chang, E. (2018). CMIP5 Projected Change in Northern Hemisphere Winter Cyclones with Associated Extreme Winds. *Journal of Climate, 31*(16), 6527–6542. https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0899.1

Kawase, H., Imada, Y., Tsuguti, H., Nakaegawa, T., Seino, N., Murata, A., & Takayabu, I. (2020). The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming. *Bulletin of the American Meteorological Society, 101*(1), S109-S114. https://doi.org/10.1175/bams-d-19-0173.1

Ke-xin, L., & Fei, Z. (2022). Effects of a freshening trend on upper-ocean stratification over the Central tropical Pacific and their representation by CMIP6 models. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 195*, 104999. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2021.104999

Khan, N., Shahid, S., Ahmed, K., Wang, X., Ali, R., Ismail, T., & Nawaz, N. (2020). Selection of GCMs for the projection of spatial distribution of heat waves in Pakistan. *Atmospheric Research, 233*, 104688. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104688

Kharin, V. V., Flato, G. M., Zhang, X., Gillett, N. P., Zwiers, F., & Anderson, K. J. (2018). Risks from climate extremes change differently from 1.5°C to 2.0°C depending on rarity. *Earth's Future, 6*(5), 704-715. https://doi.org/10.1002/2018ef000813

Kim, Y.-H., S.-K. Min, D.A. Stone, H. Shiogama, & P. Wolski, (2018) Multimodel event attribution of the summer 2013 heat wave in Korea. *Weather and Climate Extremes, 20*, 33–44. https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.03.004

King, A.D., D.J. Karoly, M.G. Donat, & L.V. Alexander, (2014). Climate Change turns Australia' s 2013 big dry into a year of record-breaking heat [in "Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective"]. *Bulletin of the American Meteorological Society, 95*(9), S41–S45. https://doi.org/10.1175/1520-0477-95.9.s41

Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, G.J. Boer, R. Bojariu, I. Camilloni, F.J. Doblas-Reyes, A.M. Fiore, M. Kimoto, G.A. Meehl, M. Prather, A. Sarr, C. Schär, R. Sutton, G.J. van Oldenborgh, G. Vecchi & H.J. Wang, (2013). Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kishtawal, C.M., N. Jaiswal, R. Singh, & D. Niyogi, (2012). Tropical Cyclone intensification trends during satellite era (1986–2010). *Geophysical Research Letters, 39*(10), 1–6. https://doi.org/10.1029/2012gl051700

Kitoh, A., Endo, H., Krishna Kumar, K., Cavalcanti, I. F., Goswami, P., & Zhou, T. (2013). Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118*(8), 3053-3065. https://doi.org/10.1002/jgrd.50258

Kitoh, A., (2017). The Asian Monsoon and its Future Change in Climate Models: A Review. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II, 95*(1), 7–33. https://doi.org/10.2151/jmsj.2017-002

Knapp, K. R., Velden, C. S., & Wimmers, A. J. (2018). A global climatology of tropical cyclone eyes. *Monthly Weather Review, 146*(7), 2089-2101. https://doi.org/10.1175/mwr-d-17-0343.1

Knutson, T. R., Sirutis, J. J., Zhao, M., Tuleya, R. E., Bender, M., Vecchi, G. A., Villarini, G., & Chavas, D. (2015). Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical Downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios. *Journal of Climate, 28*(18), 7203-7224. https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0129.1

Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2019). Tropical cyclones and climate change assessment: Part I: Detection and attribution. *Bulletin of the American Meteorological Society, 100*(10), 1987-2007. https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0189.1

Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2020). Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bulletin of the American Meteorological Society, 101*(3), E303-E322. https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0194.1

Kodama, C., B. Stevens, T. Mauritsen, T. Seiki, & M. Satoh, (2019). A New Perspective for Future Precipitation Change from Intense Extratropical Cyclones. *Geophysical Research Letters, 46*(21), 12435–12444. https://doi.org/10.1029/2019gl084001

Kossin, J.P., K.A. Emanuel, & G.A. Vecchi, (2014). The poleward migration of the location of tropical Cyclone maximum intensity. *Nature, 509*(7500), 349–352. https://doi.org/10.1038/nature13278

Kossin, J.P., T. Hall, T. Knutson, K.E. Kunkel, R.J. Trapp, D.E. Waliser, and M.F. Wehner, (2017). Extreme storms. In: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 257-276. https://doi.org/10.7930/J07S7KXX

Kossin, J.P., K.R. Knapp, T.L. Olander, & C.S. Velden, (2020). Global increase in major tropical Cyclone exceedance probability over the past four decades. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 117*(22), 11975–11980. https://doi.org/10.1073/pnas.1920849117

Kubota, H., Matsumoto, J., Zaiki, M., Tsukahara, T., Mikami, T., Allan, R., Wilkinson, C., Wilkinson, S., Wood, K., & Mollan, M. (2021). Tropical cyclones over the western North Pacific since the mid-nineteenth century. *Climatic Change, 164*(3-4). https://doi.org/10.1007/s10584-021-02984-7

Kumar, S., K. Chanda, & S. Pasupuleti, (2020). Spatiotemporal analysis of extreme indices derived from daily precipitation and temperature for Climate Change detection over India. *Theoretical and Applied Climatology, 140*(1), 343–357. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03088-5

Kunkel, K. E., Karl, T. R., Brooks, H., Kossin, J., Lawrimore, J. H., Arndt, D., Bosart, L., Changnon, D., Cutter, S. L., Doesken, N., Emanuel, K., Groisman, P. Y., Katz, R. W., Knutson, T., O' Brien, J.,

Paciorek, C. J., Peterson, T. C., Redmond, K., Robinson, D., ⋯ Wuebbles, D. (2013). Monitoring and understanding trends in extreme storms: State of knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society, 94*(4), 499-514. https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00262.1

Kuo, Y.-C., & Tseng, Y.H. (2021). Influence of anomalous low-level Circulation on the Kuroshio in the Luzon Strait during ENSO. *Ocean Modell., 159*, 101759. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2021.101759

Kuo, Y.-C., Yu, Y., & Tseng, Y.-H. (2023). Interannual Changes of the summer Circulation and hydrology in the East China Sea: A modeling study from 1981 to 2015. *Ocean Modell., 181*, 102156.

Kusunoki, S. (2018). Future Changes in precipitation over East Asia projected by the global atmospheric model MRI-AGCM3.2. *Climate Dynamics, 51*(11–12), 4601–4617. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3499-3

Latif, M., Böning, C., Willebrand, J., Biastoch, A., Dengg, J., Keenlyside, N., Schweckendiek, U., & Madec, G. (2006). Is the thermohaline Circulation Changing? *Journal of Climate, 19*(18), 4631-4637.

Latif, M., Sun, J., Visbeck, M., & Hadi Bordbar, M. (2022). Natural variability has dominated Atlantic meridional overturning Circulation since 1900. *Nature Climate Change, 12*(5), 455-460.

Lauvset, S. K., Carter, B. R., Pèrez, F. F., Jiang, L. ‐ Q., Feely, R. A., Velo, A., & Olsen, A. (2020). Processes Driving Global Interior Ocean pH Distribution. *Global Biogeochemical Cycles, 34*(1), e2019GB006229. https://doi.org/10.1029/2019gb006229

Lauvset, S. K., Gruber, N., Landschützer, P., Olsen, A., & Tjiputra, J. (2015). Trends and drivers in global surface ocean pH over the past 3 decades. *Biogeosciences, 12*(5), 1285–1298. https://doi.org/10.5194/bg-12-1285-2015

Lavers, D. A., F. M. Ralph, D. E. Waliser, A. Gershunov, & M. D. Dettinger, (2015). Climate Change intensification of horizontal water vapor transport in CMIP5. *Geophysical Research Letters, 42*(13), 5617–5625. https://doi.org/10.1002/2015gl064672

Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J., Abernethy, S., Andrew, R. M., De-Gol, A. J., Willis, D. R., Shan, Y., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Creutzig, F., & Peters, G. P. (2020). Temporary reduction in daily global CO_2 emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change, 10*(7), 647-653. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x

Lee, D., Min, S., Fischer, E., Shiogama, H., Bethke, I., Lierhammer, L., & Scinocca, J. F. (2018). Impacts of half a degree additional warming on the Asian summer monsoon rainfall characteristics. *Environmental Research Letters, 13*(4), 044033. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab55d

Lee, J.Y. & B. Wang, (2014). Future Change of global monsoon in the CMIP5. *Climate Dynamics, 42*(1–2), 101–119. https://doi.org/10.1007/s00382-012-1564-0

Lee, T. C., Knutson, T. R., Nakaegawa, T., Ying, M., & Cha, E. J. (2020). Third assessment on impacts of climate change on tropical cyclones in the Typhoon Committee Region–Part I: Observed changes, detection and attribution. *Tropical Cyclone Research and Review, 9*(1), 1-22. https://doi.org/10.1016/j.tcrr.2020.03.001

Lehner, F., Coats, S., Stocker, T. F., Pendergrass, A. G., Sanderson, B. M., Raible, C. C., & Smerdon, J. E. (2017). Projected drought risk in 1.5°C and 2°C warmer climates. *Geophysical Research Letters, 44*(14), 7419-7428. https://doi.org/10.1002/2017gl074117

Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., & Wehner, M. (2021). Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models. *Journal of Climate, 34*(9), 3441-3460. https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-1013.1

Li, D., T. Zhou, & W. Zhang, (2019). Extreme precipitation over East Asia under 1.5°C and 2°C global warming targets: a Comparison of stabilized and overshoot projections. *Environmental Research Communications, 1*(8), 085002. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab3971

Li, G., Cheng, L., Zhu, J., Trenberth, K. E., Mann, M. E., & Abraham, J. P. (2020). Increasing ocean stratification over the past half-century. *Nature Climate Change, 10*(12), 1116-1123. https://doi.org/10.1038/s41558-020-00918-2

Li, L., She, D., Zheng, H., Lin, P., & Yang, Z.-L. (2020). Elucidating diverse drought Characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. *J. Hydrol., 21*(7), 1513–1530. https://doi.org/10.1175/jhm-d-19-0290.s1

Li, W., Z. Jiang, X. Zhang, L. Li, & Y. Sun, (2018). Additional risk in extreme precipitation in China from 1.5°C to 2.0°C global warming levels. *Science Bulletin, 63*(4), 228–234, https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.12.021

Liang, J., C. Wang, & K.I. Hodges, (2017) Evaluation of tropical Cyclones over the South China Sea simulated by the 12 km MetUM regional Climate model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 143*(704), 1641–1656. https://doi.org/10.1002/qj.3035

Lin, L., Wang, Z., Xu, Y., Zhang, X., Zhang, H., & Dong, W. (2018). Additional intensification of seasonal heat and flooding extreme over China in a 2°C warmer world compared to 1.5°C. *Earth's Future, 6*(7), 968-978. https://doi.org/10.1029/2018ef000862

Lin, P., He, Z., Du, J., Chen, L., Zhu, X., & Li, J. (2017). Recent changes in daily climate extremes in an arid mountain region, a case study in northwestern China's Qilian mountains. *Scientific Reports, 7*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-017-02345-4

Little, K., D.G. Kingston, N.J. Cullen, & P.B. Gibson, (2019). The Role of Atmospheric Rivers for Extreme Ablation and Snowfall Events in the Southern Alps of New Zealand. *Geophysical Research Letters, 46*(5), 2761–2771. https://doi.org/10.1029/2018gl081669

Littell, J.S., D.L. Peterson, K.L. Riley, Y. Liu, & C.H. Luce, (2016). A review of the relationships between

drought and forest fire in the United States. *Global Change Biology, 22*(7), 2353–2369. https://doi.org/10.1111/gcb.13275

Liu, Y., Pan, Z., Zhuang, Q., Miralles, D. G., Teuling, A. J., Zhang, T., An, P., Dong, Z., Zhang, J., He, D., Wang, L., Pan, X., Bai, W., & Niyogi, D. (2015). Agriculture intensifies soil moisture decline in Northern China. *Scientific Reports, 5*(1), 11261. https://doi.org/10.1038/srep11261

Liu, J., H. Xu, & J. Deng, (2018). Projections of East Asian summer monsoon Change at global warming of 1.5 and 2°C. *Earth System Dynamics, 9*(2), 427–439. https://doi.org/10.5194/esd-9-427-2018

Liu, M., G.A.Vecchi, J.A. Smith, & T.R. Knutson, (2019a). Causes of large projected increases in hurricane precipitation rates with global warming. *npj Climate and Atmospheric Science, 2*(1), 1–5. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0095-3

Liu, M., Y. Shen, Y. Qi, Y.Wang, & X. Geng, (2019b). Changes in Precipitation and Drought Extremes over the Past Half Century in China. *Atmosphere, 10*(4), 203. https://doi.org/10.3390/atmos10040203

Liu, Z. J., Zhu, X. H., Nakamura, H., Nishina, A., Wang, M., Zheng, H. (2021). Comprehensive observational features for the Kuroshio transport decreasing trend during a recent global warming hiatus. *Geophysical Research Letters, 48*(18), e2021GL094169.

Lohmann, U. & Feichter, J. (2005). Global indirect aerosol effects: a review. *Atmos. Chem. Phys., 5*, 715–737. https://doi.org/10.5194/acp-5-715-2005

Lu, C., Y. Sun, H. Wan, X. Zhang, & H. Yin, (2016). Anthropogenic influence on the frequency of extreme temperatures in China. *Geophysical Research Letters, 43*(12), 6511–6518. https://doi.org/10.1002/2016gl069296

Lu, C., Y. Sun, & X. Zhang, (2018). Multimodel detection and attribution of Changes in warm and Cold spell durations. *Environmental Research Letters, 13*(7), 074013. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb3e

Lu, J., G. J. Carbone, & J. M. Grego, (2019). Uncertainty and hotspots in 21st Century projections of agricultural drought from CMIP5 models. *Scientific Reports, 9*(1), 4922. https://doi.org/10.1038/s41598-019-41196-z

Lu, M.-M. & R.-J. May, (2003). A study on the long-term variations of Taiwan and global precipitation. *Atmos. Sci., 31*, 199-220 (in traditional Chinese with English abstract).

Mann, M. E. & P. H. Gleick, (2015). Climate Change and California drought in the 21st Century. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 112*(13), 3858–3859. https://doi.org/10.1073/pnas.1503667112

Marciano, C. G., G. M. Lackmann, & W. A. Robinson, (2015). Changes in U.S. East Coast Cyclone dynamics with Climate Change. *Journal of Climate, 28*(2), 468–484. https://doi.org/10.1175/

jcli-d-14-00418.1

Marengo, J.A. & J.C. Espinoza, (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology, 36*(3), 1033–1050. https://doi.org/10.1002/joc.4420

Marengo, J.A., R.R. Torres, & L.M. Alves, (2017).Drought in Northeast Brazil– past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology, 129*(3–4), 1189–1200. https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8

Martius, O., S. Pfahl, & C. Chevalier, (2016). A global quantification of Compound precipitation and wind extremes. *Geophysical Research Letters, 43*(14), 7709–7717. https://doi.org/10.1002/2016gl070017

Mattingly, K.S., T.L. Mote, & X. Fettweis, (2018). Atmospheric River Impacts on Greenland Ice Sheet Surface Mass Balance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123*(16), 8538–8560. https://doi.org/10.1029/2018jd028714

Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F. B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E., (2007). THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bulletin of the American Meteorological Society, 88*(9), 1383-1394. https://doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1383

Mekkes, L., Sepúlveda-Rodríguez, G., Bielkinaitė, G., Wall-Palmer, D., Brummer, G.-J. A., Dämmer, L. K., Huisman, J., van Loon, E., Renema, W. & Peijnenburg, K. T. C. A. (2021). Effects of Ocean Acidification on Calcification of the Sub-Antarctic Pteropod Limacina retroversa. *Front. Mar. Sci. 8*, 581432. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.581432

Michaelis, A.C., J.Willison, G.M. Lackmann, & W.A. Robinson, (2017). Changes in winter North Atlantic extratropical Cyclones in high-resolution regional pseudo–global warming simulations. *Journal of Climate, 30*(17), 6905–6925. https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0697.1

Ming, Y., Loeb, N. G., Lin, P., Shen, Z., Naik, V., Singer, C. E., Ward, R. X., Paulot, F., Zhang, Z., Bellouin, N., Horowitz, L. W., Ginoux, P. A., & Ramaswamy, V. (2021). Assessing the influence of COVID‐19 on the Shortwave radiative fluxes over the east Asian marginal seas. *Geophysical Research Letters, 48*(3). https://doi.org/10.1029/2020gl091699

Mizuta, R. & H. Endo, (2020). Projected Changes in Extreme Precipitation in a 60-km AGCM Large Ensemble and Their Dependence on Return Periods. *Geophysical Research Letters, 47*(13), 1–8. https://doi.org/10.1029/2019gl086855

Moat, B. I., Smeed, D. A., Frajka-Williams, E., Desbruyères, D. G., Beaulieu, C., Johns, W. E., Rayner, D., Sanchez-Franks, A., Baringer, M. O., & Volkov, D. (2020). Pending recovery in the strength of the meridional overturning Circulation at 26°N. *Ocean Science, 16*(4), 863-874.

Moftakhari, H.R., G. Salvadori, A. AghaKouchak, B.F. Sanders, & R.A. Matthew, (2017). Compounding

effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(37), 9785–9790. https://doi.org/10.1073/pnas.1620325114

Mohtadi, M., M. Prange, & S. Steinke, (2016). Palaeoclimatic insights into forcing and response of monsoon rainfall. *Nature, 533*(7602), 191–199. https://doi.org/10.1038/nature17450

Mollica, Nathaniel R., Guo, Weifu, Cohen, Anne L., Huang, Kuo-Fang, Foster, Gavin L., Donald, Hannah K., & Solow Andrew R. (2018). Ocean acidification affects Coral growth by reducing skeletal density. *PNAS. 115* (8) 1754-1759.

Monerie, P.A., J. Robson, B. Dong, D.L.R. Hodson, & N.P. Klingaman, (2019). Effect of the Atlantic Multidecadal Variability on the Global Monsoon. *Geophysical Research Letters, 46*(3), 1765–1775. https://doi.org/10.1029/2018gl080903

Murakami, H., Wang, Y., Yoshimura, H., Mizuta, R., Sugi, M., Shindo, E., Adachi, Y., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Ose, T., & Kitoh, A. (2012). Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM. *Journal of Climate, 25*(9), 3237-3260. https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00415.1

Murakami, H., Delworth, T. L., Cooke, W. F., Zhao, M., Xiang, B., & Hsu, P. (2020). Detected climatic change in global distribution of tropical cyclones. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 117*(20), 10706-10714. https://doi.org/10.1073/pnas.1922500117

Nakamura, J., Camargo, S. J., Sobel, A. H., Henderson, N., Emanuel, K. A., Kumar, A., LaRow, T. E., Murakami, H., Roberts, M. J., Scoccimarro, E., Vidale, P. L., Wang, H., Wehner, M. F., & Zhao, M. (2017). Western North Pacific tropical cyclone model tracks in present and future climates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122*(18), 9721-9744. https://doi.org/10.1002/2017jd027007

Nasim, W., Amin, A., Fahad, S., Awais, M., Khan, N., Mubeen, M., Wahid, A., Rehman, M. H., Ihsan, M. Z., Ahmad, S., Hussain, S., Mian, I. A., Khan, B., & Jamal, Y. (2018). Future risk assessment by estimating historical heat wave trends with projected heat accumulation using SimCLIM climate model in Pakistan. *Atmospheric Research, 205*, 118-133. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.01.009

Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., & Feyen, L. (2018). Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters, 45*(7), 3285-3296. https://doi.org/10.1002/2017gl076521

Nayak, S., K. Dairaku, I. Takayabu, A. Suzuki-Parker, & N.N. Ishizaki, (2018). Extreme precipitation linked to temperature over Japan: Current evaluation and projected Changes with multi-model ensemble downscaling. *Climate Dynamics, 51,* 4385–4401. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3866-8

Nolan, R. H., Boer, M. M., Collins, L., Resco de Dios, V., Clarke, H., Jenkins, M., Kenny, B., & Bradstock,

R. A. (2020). Causes and consequences of eastern Australia's 2019–20 season of mega‐fires. *Global Change Biology, 26*(3), 1039-1041. https://doi.org/10.1111/gcb.14987

Oey, L.-Y. & S. C. Chou, (2016). Evidence of rising and poleward shift of storm surge in western North Pacific in recent decades. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 121*, 5181–5192. https://doi.org/10.1002/2015jc011516

O' Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M., (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev., 9*, 3461–3482. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016

Orlowsky, B. & S.I. Seneviratne, (2013). Elusive drought: Uncertainty in observed trends and short- and long-term CMIP5 projections. *Hydrology and Earth System Sciences, 17*(5), 1765–1781. https://doi.org/10.5194/ hess-17-1765-2013

Orth, R., J. Zscheischler, & S.I. Seneviratne, (2016). Record dry summer in 2015 Challenges precipitation projections in Central Europe. *Scientific Reports, 6*, 28334. https://doi.org/10.1038/srep28334

Ose, T., (2019). Characteristics of Future Changes in Summertime East Asian Monthly Precipitation in MRI-AGCM Global Warming Experiments. Journal of the Meteorological Society of Japan. *Series II, 97*(2), 317–335. https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-018

Padrón, R. S., Gudmundsson, L., Decharme, B., Ducharne, A., Lawrence, D. M., Mao, J., Peano, D., Krinner, G., Kim, H., & Seneviratne, S. I. (2020). Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nature Geoscience, 13*(7), 477-481. https://doi.org/10.1038/s41561-020-0594-1

Paltan, H., M.Allen, K. Haustein, L. Fuldauer, & S. Dadson, (2018). Global implications of 1.5 C and 2 C warmer worlds on extreme river flows. *Environmental Research Letters, 13*(9), 94003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad985

Parras-Berrocal, I. M., Vazquez, R., Cabos, W., Sein, D., Mañanes, R., Perez-Sanz, J., & Izquierdo, A. (2020). The Climate Change signal in the Mediterranean Sea in a regionally Coupled atmosphere–ocean model. *Ocean Science, 16*, 743–765. https://doi.org/10.5194/os-16-743-2020

Pascale, S., Boos, W. R., Bordoni, S., Delworth, T. L., Kapnick, S. B., Murakami, H., Vecchi, G. A., & Zhang, W. (2017). Weakening of the North American monsoon with global warming. *Nature Climate Change, 7*(11), 806-812. https://doi.org/10.1038/nclimate3412

Patricola, C.M. & M.F.Wehner, (2018). Anthropogenic influences on major tropical Cyclone events. *Nature, 563*(7731), 339–346. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0673-2

Payne, A. E., Demory, M., Leung, L. R., Ramos, A. M., Shields, C. A., Rutz, J. J., Siler, N., Villarini, G., Hall, A., & Ralph, F. M. (2020). Responses and impacts of atmospheric rivers to climate change. *Nature*

Reviews Earth & Environment, 1(3), 143-157. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0030-5

Pendergrass, A.G. (2018). What precipitation is extreme? *Science, 360*(6393), 1072–1073. https://doi.org/10.1126/science.aat1871

Pendergrass, A.G., F. Lehner, B.M. Sanderson, & Y. Xu, (2015). Does extreme precipitation intensity depend on the emissions scenario? *Geophysical Research Letters, 42*(20), 8767–8774. https://doi.org/10.1002/2015gl065854

Pepler, A. S., Di Luca, A., Ji, F., Alexander, L. V., Evans, J. P., & Sherwood, S. C. (2016). Projected changes in east Australian midlatitude cyclones during the 21st century. *Geophysical Research Letters, 43*(1), 334-340. https://doi.org/10.1002/2015gl067267

Pfahl, S. & H.Wernli, (2012). Quantifying the relevance of Cyclones for precipitation extremes. *Journal of Climate, 25*(19), 6770–6780. https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00705.1

Pfahl, S., P.A. O'Gorman, & E.M. Fischer, (2017). Understanding the regional pattern of projected future Changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change, 7*, 423. https://doi.org/10.1038/nclimate3287

Phibbs, S. & R. Toumi, (2016). The dependence of precipitation and its footprint on atmospheric temperature in idealized extratropical Cyclones. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121*(15), 8743–8754. https://doi.org/10.1002/2015jd024286

Potopová, V., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Farda, A., Türkott, L., & Soukup, J. (2018). Projected changes in the evolution of drought on various timescales over the Czech Republic according to Euro - CORDEX models. *International Journal of Climatology, 38*(S1). https://doi.org/10.1002/joc.5421

Preuschmann, Swantje, Haensler Andreas, Kotova Lola, Dürk Nikolaus, Eibner Wolfgang, Waidhofer Carina, Haselberger Christoph & Jacob Daniela, (2017). The IMPACT2C web-atlas – Conception, organization and aim of a web-based climate service product. *Climate Services, 7.* https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.03.005

Pulliainen, J., Luojus, K., Derksen, C., Mudryk, L., Lemmetyinen, J., Salminen, M., Ikonen, J., Takala, M., Cohen, J., Smolander, T., & Norberg, J. (2020). Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018. *Nature, 581*(7808), 294-298. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2258-0

Qiu, J., Q. Gao, S.Wang, & Z. Su, (2016). Comparison of temporal trends from multiple soil moisture data sets and precipitation: The implication of irrigation on regional soil moisture trend. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 48*, 17–27. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.11.012

Rahmstorf, S. (1998). Influence of mediterranean outflow on Climate. *EOS Trans. Am. Geophys. Union, 79*, 281.

Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., & Schaffernicht, E. J. (2015). Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning Circulation. *Nature Climate Change, 5*(5), 475-480.

Ralph, F.M. & M.D. Dettinger, (2011). Storms, floods, and the science of atmospheric rivers. *Eos*, *Transactions American Geophysical Union, 92*(32), 265–266. https://doi.org/10.1029/2011eo320001

Ralph, F. M., Prather, K. A., Cayan, D., Spackman, J. R., DeMott, P., Dettinger, M., Fairall, C., Leung, R., Rosenfeld, D., Rutledge, S., Waliser, D., White, A. B., Cordeira, J., Martin, A., Helly, J., & Intrieri, J. (2016). CalWater Field studies designed to quantify the roles of atmospheric rivers and aerosols in modulating U.S. West Coast precipitation in a changing climate. *Bulletin of the American Meteorological Society, 97*(7), 1209-1228. https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00043.1

Ramos, A.M., R. Tomé, R.M. Trigo, M.L.R. Liberato, & J.G. Pinto, (2016). Projected Changes in atmospheric rivers affecting Europe in CMIP5 models. *Geophysical Research Letters, 43*(17), 9315–9323. https://doi.org/10.1002/2016gl070634

Reboita, M. S., Reale, M., Da Rocha, R. P., Giorgi, F., Giuliani, G., Coppola, E., Nino, R. B., Llopart, M., Torres, J. A., & Cavazos, T. (2021). Future changes in the wintertime cyclonic activity over the CORDEX-CORE southern hemisphere domains in a multi-model approach. *Climate Dynamics, 57*, 1533–1549. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05317-z

Reboita, M. S., R. P. da Rocha, T. Ambrizzi, & C. D. Gouveia, (2015). Trend and teleconnection patterns in the Climatology of extratropical Cyclones over the Southern Hemisphere. *Climate Dynamics, 45*(7–8), 1929–1944. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2447-3

Reed, K. A., A. M. Stansfield, M. F. Wehner, & C. M. Zarzycki, (2020). Forecasted attribution of the human influence on Hurricane Florence. *Science Advances, 6*(1), eaaw9253. https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9253

Reichler, T. & J. Kim, (2008). How well do Coupled models simulate today's Climate? *Bull. Am. Meteorol. Soc., 89*, 303–311.

Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change, 42*. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

Roberts, M. J., Camp, J., Seddon, J., Vidale, P. L., Hodges, K., Vannière, B., Mecking, J., Haarsma, R., Bellucci, A., Scoccimarro, E., Caron, L., Chauvin, F., Terray, L., Valcke, S., Moine, M., Putrasahan, D., Roberts, C. D., Senan, R., Zarzycki, C., ⋯ Wu, L. (2020). Projected future changes in tropical cyclones using the CMIP6 HighResMIP Multimodel ensemble. *Geophysical Research Letters,*

47(14). https://doi.org/10.1029/2020gl088662

Rowell, D.P., B.B.B. Booth, S.E. Nicholson, & P. Good, (2015). Reconciling Past and Future Rainfall Trends over East Africa. *Journal of Climate, 28*(24), 9768–9788. https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0140.1

Ruffault, J., T. Curt, N.K. Martin-StPaul, V. Moron, & R.M. Trigo, (2018). Extreme wildfire events are linked to global-change-type droughts in the northern Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 18*(3), 847–856. https://doi.org/10.5194/nhess-18-847-2018

Sakamoto, T. T., Hasumi, H., Ishii, M., Emori, S., Suzuki, T., Nishimura, T., & Sumi, A. (2005). Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high - resolution Climate model. *Geophysical Research Letters, 32*(14).

Sallée, J.-B., Pellichero, V., Akhoudas, C., Pauthenet, E., Vignes, L., Schmidtko, S., Garabato, A. N., Sutherland, P., & Kuusela, M. (2021). Summertime increases in upper-ocean stratification and mixed-layer depth. *Nature, 591*(7851), 592-598.

Sanderson, B. M., Xu, Y., Tebaldi, C., Wehner, M., O'Neill, B., Jahn, A., Pendergrass, A. G., Lehner, F., Strand, W. G., Lin, L., Knutti, R., & Lamarque, J. F. (2017). Community climate simulations to assess avoided impacts in 1.5 and 2°C futures. *Earth System Dynamics, 8*(3), 827-847. https://doi.org/10.5194/esd-8-827-2017

Sante, D. F., Coppola, E., & Giorgi, F. (2021). Projections of river floods in Europe using EURO-CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations. *Int. J. Climatol, 43*. https://doi.org/10.1002/joc.7014

Sato, Y., Yukimoto, S., Tsujino, H., Ishizaki, H., & Noda, A. (2006). Response of North Pacific ocean circulation in a Kuroshio-resolving ocean model to an Arctic Oscillation (AO)-like change in Northern Hemisphere atmospheric circulation due to greenhouse-gas forcing. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 84*(2), 295-309.

Schubert, S.D., H.Wang, R.D. Koster, M.J. Suarez, & P.Y. Groisman, (2014). Northern Eurasian heat waves and droughts. *Journal of Climate, 27*(9), 3169–3207. https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00360.1

Schwingshackl, C., J. Sillmann, A.M. Vicedo-Cabrera, M. Sandstad, & K. Aunan, (2021). Heat Stress Indicators in CMIP6: Estimating Future Trends and Exceedances of Impact-Relevant Thresholds. *Earth's Future, 9*, e2020EF001885. https://doi.org/10.1029/2020ef001885

Seiler, C. & F.W. Zwiers, (2016). How will Climate Change affect explosive Cyclones in the extratropics of the Northern Hemisphere? *Climate Dynamics, 46*, 3633–3644. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2791-y

Seneviratne, S.I., M.G. Donat, A.J. Pitman, R. Knutti, & R.L.Wilby, (2016). Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related Climate targets. *Nature, 529*(7587), 477–483. https://doi.org/10.1038/nature16542

Seneviratne, S.I. & M. Hauser, (2020). Regional Climate Sensitivity of Climate Extremes in CMIP6 Versus CMIP5 Multimodel Ensembles. *Earth's Future, 8*(9), e2019EF001474. https://doi.org/10.1029/2019ef001474

Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L., Allen, S., Benito, G., … Zwiers, F. (2012). *Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, and Q. Dahe (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.109–230). https://doi.org/10.1017/cbo9781139177245.006

Seong, M.-G., S.-K. Min, Y.-H. Kim, X. Zhang, & Y. Sun, (2021). Anthropogenic Greenhouse Gas and Aerosol Contributions to Extreme Temperature Changes during 1951–2015. *Journal of Climate, 34*(3), 857–870. https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-1023.1

Sharma, A. R. & S. J. Déry, (2020). Variability and trends of landfalling atmospheric rivers along the Pacific Coast of northwestern North America. *International Journal of Climatology, 40*(1), 544–558. https://doi.org/10.1002/joc.6227

Sharma, S., M. Zhang, Anshika, J. Gao, H. Zhang, & S. H. Kota, (2020). Effect of restricted emissions during COVID-19 on air quality in India. *Science of The Total Environment, 728*, 138878. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138878.

Sharmila, S. & K.J.E.Walsh, (2018). Recent poleward shift of tropical Cyclone formation linked to Hadley Cell expansion. *Nature Climate Change, 8*(8), 730–736. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0227-5

Shepherd, T.G. (2014). Atmospheric Circulation as a source of uncertainty in Climate Change projections. *Nature Geoscience, 7*(10), 703–708. https://doi.org/10.1038/ngeo2253

Shin, J., R. Olson, & S.-I. An, (2018). Projected Heat Wave Characteristics over the Korean Peninsula During the Twenty-First Century. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 54*(1), 53–61. https://doi.org/10.1007/s13143-017-0059-7

Shiogama, H., Imada, Y., Mori, M., Mizuta, R., Stone, D., Yoshida, K., Arakawa, O., Ikeda, M., Takahashi, C., Arai, M., Ishii, M., Watanabe, M., & Kimoto, M. (2016). Attributing historical changes in probabilities of record-breaking daily temperature and precipitation extreme events. *SOLA, 12*(0), 225-231. https://doi.org/10.2151/sola.2016-045

Sillmann, J., Stjern, C. W., Myhre, G., Samset, B. H., Hodnebrog, Ø., Andrews, T., Boucher, O., Faluvegi, G., Forster, P., Kasoar, M. R., Kharin, V. V., Kirkevåg, A., Lamarque, J., Olivié, D. J.,

Richardson, T. B., Shindell, D., Takemura, T., Voulgarakis, A., & Zwiers, F. W. (2019). Extreme wet and dry conditions affected differently by greenhouse gases and aerosols. *npj Climate and Atmospheric Science, 2*, 24.. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0079-3

Sillmann, J., C.W. Stjern, G. Myhre, & P.M. Forster, (2017). Slow and fast responses of mean and extreme precipitation to different forcing in CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters, 44*(12), 6383–6390. https://doi.org/10.1002/2017gl073229

Singh, M.S., Z. Kuang, E.D. Maloney, W.M. Hannah, & B.O.Wolding, (2017). Increasing potential for intense tropical and subtropical thunderstorms under global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(44), 1657–11662. https://doi.org/10.1073/pnas.1707603114

Smith, K. E., Burrows, M. T., Hobday, A. J., King, N. G., Moore, P. J., Gupta, A. S., Thomsen, M. S., Wernberg, T., & Smale, D. A. (2023). Biological Impacts of Marine Heatwaves. *Annual Review of Marine Science, 15*(1), 119-145. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-121437

Smith, K. E., Burrows, M. T., Hobday, A. J., Sen Gupta, A., Moore, P. J., Thomsen, M., Wernberg, T., & Smale, D. A. (2021). Socioeconomic impacts of marine heatwaves: Global issues and opportunities. *Science, 374*(6566), eabj3593.

Sobel, A.H. & S.J. Camargo, (2011). Projected Future Seasonal Changes in Tropical Summer Climate. *Journal of Climate, 24*(2), 473–487. https://doi.org/10.1175/2010jcli3748.1

Solander, K. C., Newman, B. D., Carioca de Araujo, A., Barnard, H. R., Berry, Z. C., Bonal, D., Bretfeld, M., Burban, B., Antonio Candido, L., Célleri, R., Chambers, J. Q., Christoffersen, B. O., Detto, M., Dorigo, W. A., Ewers, B. E., José Filgueiras Ferreira, S., Knohl, A., Leung, L. R., McDowell, N. G., … Xu, C. (2020). The pantropical response of soil moisture to El Nino. *Hydrology and Earth System Sciences, 24*(5), 2303-2322. https://doi.org/10.5194/hess-24-2303-2020

Song, X., Y. Song, & Y. Chen, (2020). Secular trend of global drought since 1950. *Environmental Research Letters, 15*(9), 094073. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba20d

Soto-Navarro, J., Jordá, G., Amores, A., Cabos, W., Somot, S., Sevault, F., Macías, D., Djurdjevic, V., Sannino, G., Li, L., & Sein, D. (2020). Evolution of Mediterranean Sea water properties under climate change scenarios in the Med-CORDEX ensemble. *Climate Dynamics, 54*(3-4), 2135-2165. https://doi.org/10.1007/s00382-019-05105-4

Spinoni, J., Barbosa, P., De Jager, A., McCormick, N., Naumann, G., Vogt, J. V., Magni, D., Masante, D., & Mazzeschi, M. (2019). A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 22*, 100593. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100593

Spinoni, J., Barbosa, P., Bucchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Christensen, J. H., Christensen, O. B., Coppola, E., Evans, J., Geyer, B., Giorgi, F., Hadjinicolaou, P., Jacob, D., Katzfey, J., Koenigk, T.,

Laprise, R., Lennard, C. J., Kurnaz, M. L., Li, D., ⋯ Dosio, A. (2020). Future global meteorological drought hot spots: A study based on CORDEX data. *Journal of Climate, 33*(9), 3635-3661. https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0084.1

Spinoni, J., G. Naumann, H. Carrao, P. Barbosa, & J. Vogt, (2014). World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *International Journal of Climatology, 34*(8), 2792–2804. https://doi.org/10.1002/joc.3875

Studholme, J. & S. Gulev, (2018). Concurrent Changes to Hadley Circulation and the Meridional Distribution of Tropical Cyclones. *Journal of Climate, 31*(11), 4367–4389. https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0852.1

Su, Q. & B. Dong, (2019). Projected near-term Changes in three types of heat waves over China under RCP4.5. *Climate Dynamics, 53*(7), 3751–3769. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04743-y

Sui, Y., X. Lang, & D. Jiang, (2018). Projected signals in Climate extremes over China associated with a 2°C global warming under two RCP scenarios. *International Journal of Climatology, 38*, e678–e697. https://doi.org/10.1002/joc.5399

Sun, C., Z. Jiang, W. Li, Q. Hou, & L. Li, (2019). Changes in extreme temperature over China when global warming stabilized at 1.5°C and 2.0°C. *Scientific Reports, 9*(1), 14982. https://doi.org/10.1038/s41598-019-50036-z

Sun, Y., Hu, T., Zhang, X., Li, C., Lu, C., Ren, G., & Jiang, Z. (2019). Contribution of global warming and urbanization to changes in temperature extremes in eastern China. *Geophysical Research Letters, 46*(20), 11426-11434. https://doi.org/10.1029/2019gl084281

Sun, Q., X. Zhang, F. Zwiers, S. Westra, & L. Alexander, (2021). A Global, Continental, and Regional Analysis of Changes in Extreme Precipitation. *Journal of Climate, 34*(1), 243–258. https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0892.1

Sung, H. M., Kim, J., Lee, J. H., Shim, S., Boo, K. O., Ha, J. C., & Kim, Y. H. (2021). Future changes in the global and regional sea level rise and sea surface temperature based on CMIP6 models. *Atmosphere, 12*(1), 90.

Swingedouw, D., Colin, C., Eynaud, F., Ayache, M., & Zaragosi, S. (2019). Impact of freshwater release in the Mediterranean Sea on the North Atlantic climate. *Climate Dynamics, 53*(7-8), 3893-3915. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04758-5

Takahashi, C. & M. Watanabe, (2016). Pacific trade winds accelerated by aerosol forcing over the past two decades. *Nature Climate Change, 6*(8), 768–772. https://doi.org/10.1038/nclimate2996

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society, 93*(4), 485–498. https://doi.org/10.1175/

bams-d-11-00094.1

Theodoropoulos, C., & Karaouzas, I. (2021). Climate Change and the future of Mediterranean freshwater macroinvertebrates: a model-based assessment. *Hydrobiologia, 848*, 5033–5050. https://doi.org/10.1007/s10750-021-04691-x

Tian, X., L. Shu, M.Wang, & F. Zhao, (2017). The impact of Climate Change on fire risk in Daxing' anling, China. *Journal of Forestry Research, 28*(5), 997–1006. https://doi.org/10.1007/s11676-017-0383-x

Tian, F., B. Dong, J. Robson, R. Sutton, & S.F.B. Tett, (2019). Projected near term Changes in the East Asian summer monsoon and its uncertainty. *Environmental Research Letters, 14*(8), 084038. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab28a6

Tilinina, N., S. K. Gulev, I. Rudeva, & P. Koltermann, (2013). Comparing Cyclone Life Cycle Characteristics and Their Interannual Variability in Different Reanalyses. *Journal of Climate, 26*(17), 6419–6438. https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00777.1

Trenberth, K. E., J. T. Fasullo, & T. G. Shepherd, (2015). Attribution of Climate extreme events. *Nature Climate Change, 5*(8), 725–730. https://doi.org/10.1038/nclimate2657

Tseng*, Y. H. & Co-authors (2016). North and equatorial Pacific ocean Circulation in the CORE-II hindcast simulation. *Ocean Modell., 104*, 143-170.

Tseng, Y.-H., Ding, R., & Huang, X.-m. (2017). The warm Blob in the northeast Pacific—the bridge leading to the 2015/16 El Niño. *Environmental Research Letters, 12*(5), 054019.

Tseng, Y.-H., Tsao, S.-E., Kuo, Y.-C., & Tsai, J.-Y. (2022). TIMCOM model datasets for the CMIP6 Ocean Model Intercomparison Project. *Ocean Modelling, 179*, 102109.

Tsou, C. H., Pei-Yu, H., Tu, C. Y., Cheng-Ta, C., Tzeng, T. P., & Cheng, C. T. (2016). Present simulation and future typhoon activity projection over western North Pacific and Taiwan/east Coast of China in 20-km HiRAM Climate model. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 27*(5), 6.

Tsuboki, K., Yoshioka, M. K., Shinoda, T., Kato, M., Kanada, S., & Kitoh, A. (2015). Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change. *Geophysical Research Letters, 42*(2), 646-652. https://doi.org/10.1002/2014gl061793

Tsujino, H., Urakawa, L. S., Griffies, S. M., Danabasoglu, G., Adcroft, A. J., Amaral, A. E., Arsouze, T., Bentsen, M., Bernardello, R., Böning, C. W., Bozec, A., Chassignet, E. P., Danilov, S., Dussin, R., Exarchou, E., Fogli, P. G., Fox-Kemper, B., Guo, C., Ilicak, M., … Yu, Z. (2020). Evaluation of global ocean–sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the ocean model Intercomparison project phase 2 (OMIP-2). *Geoscientific Model Development, 13*(8), 3643-3708. https://doi.org/10.5194/gmd-13-3643-2020

Turco, M., Jerez, S., Augusto, S., Tarín-Carrasco, P., Ratola, N., Jiménez-Guerrero, P., & Trigo, R. M.

(2019). Climate drivers of the 2017 devastating fires in Portugal. *Scientific Reports, 9*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-50281-2

Twomey, S. A. (1977). The influence of pollution on the shortwave albedo of *clouds, J. Atmos. Sci., 34*, 1149–1152.

Ukkola, A.M., M.G. De Kauwe, M.L. Roderick, G. Abramowitz, & A.J. Pitman, (2020). Robust Future Changes in Meteorological Drought in CMIP6 Projections Despite Uncertainty in Precipitation. *Geophysical Research Letters, 47*(11), e2020GL087820. https://doi.org/10.1029/2020gl087820

Utsumi, N., H. Kim, S. Kanae, & T. Oki, (2017). Relative Contributions of weather systems to mean and extreme global precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122*(1), 152–167. https://doi.org/10.1002/2016jd025222

Van Dijk, A. I., Beck, H. E., Crosbie, R. S., De Jeu, R. A., Liu, Y. Y., Podger, G. M., Timbal, B., & Viney, N. R. (2013). The millennium drought in southeast Australia (2001-2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society. *Water Resources Research, 49*(2), 1040-1057. https://doi.org/10.1002/wrcr.20123

Van Heerwaarden, C. C., Mol, W. B., Veerman, M. A., Benedict, I., Heusinkveld, B. G., Knap, W. H., Kazadzis, S., Kouremeti, N., & Fiedler, S. (2021). Record high solar irradiance in Western Europe during first COVID-19 lockdown largely due to unusual weather. *Communications Earth & Environment, 2*(1). https://doi.org/10.1038/s43247-021-00110-0

Varino, F., Arbogast, P., Joly, B., Riviere, G., Fandeur, M., Bovy, H., & Granier, J. (2019). Northern hemisphere extratropical winter cyclones variability over the 20th century derived from ERA-20C reanalysis. *Climate Dynamics, 52*(1-2), 1027-1048. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4176-5

Viale, M., R. Valenzuela, R.D. Garreaud, & F.M. Ralph, (2018). Impacts of Atmospheric Rivers on Precipitation in Southern South America. *Journal of Hydrometeorology, 19*(10), 1671–1687. https://doi.org/10.1175/jhm-d-18-0006.1

Von Schneidemesser, E., Monks, P. S., Allan, J. D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W. T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., & Sutton, M. A. (2015). Chemistry and the linkages between air quality and climate change. *Chemical Reviews, 115*(10), 3856-3897. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00089

Wahl, T., S. Jain, J. Bender, S.D. Meyers, & M.E. Luther, (2015). Increasing risk of Compound flooding from storm surge and rainfall for major US Cities. *Nature Climate Change, 5*, 1093. https://doi.org/10.1038/nclimate2736

Waliser, D. & B. Guan, (2017). Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers. *Nature Geoscience, 10*, 179. https://doi.org/10.1038/ngeo2894

Wang, B., Biasutti, M., Byrne, M. P., Castro, C., Chang, C., Cook, K., Fu, R., Grimm, A. M., Ha, K.,

Hendon, H., Kitoh, A., Krishnan, R., Lee, J., Li, J., Liu, J., Moise, A., Pascale, S., Roxy, M. K., Seth, A., ... Zhou, T. (2021). Monsoons climate change assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society, 102*(1), E1-E19. https://doi.org/10.1175/bams-d-19-0335.1

Wang, B., Li, J., Cane, M. A., Liu, J., Webster, P. J., Xiang, B., Kim, H., Cao, J., & Ha, K. (2018). Toward predicting changes in the land monsoon rainfall a decade in advance. *Journal of Climate, 31*(7), 2699-2714. https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0521.1

Wang, B., Liu, J., Kim, H., Webster, P. J., Yim, S., & Xiang, B. (2013). Northern hemisphere summer monsoon intensified by mega-el nino/Southern Oscillation and Atlantic multidecadal oscillation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 110*(14), 5347-5352. https://doi.org/10.1073/pnas.1219405110

Wang, C., Hsu, H., & Chen, Y. (2021). Observed and projected frontal activities in East Asia. *Journal of Climate*, 34, 3067–3085. https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0959.1

Wang, H., Chen, Y., Xun, S., Lai, D., Fan, Y., & Li, Z. (2012). Changes in daily climate extremes in the arid area of northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology, 112*(1-2), 15-28. https://doi.org/10.1007/s00704-012-0698-7

Wang, J., & Oey, L.-Y. (2014). Inter-annual and decadal fluctuations of the Kuroshio in East China Sea and Connection with surface fluxes of momentum and heat. *Geophysical Research Letters, 41*(23), 8538–8546.

Wang, P. X., Wang, B., Cheng, H., Fasullo, J., Guo, Z. T., Kiefer, T., & Liu, Z. Y. (2014). The global monsoon across timescales: Coherent variability of regional monsoons. *Climate of the Past, 10*(6), 2007-2052. https://doi.org/10.5194/cp-10-2007-2014

Wang, P. X., Wang, B., Cheng, H., Fasullo, J., Guo, Z., Kiefer, T., & Liu, Z. (2017). The global monsoon across time scales: Mechanisms and outstanding issues. *Earth-Science Reviews, 174*, 84-121. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.006

Wang, X.L., Y. Feng, R. Chan, & V. Isaac, (2016). Inter-comparison of extratropical Cyclone activity in nine reanalysis datasets. *Atmospheric Research, 181*, 133–153. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.010

Wang, Z., H. Zhang, & X. Zhang, (2016). Projected response of East Asian summer monsoon system to future reductions in emissions of anthropogenic aerosols and their precursors. *Climate Dynamics, 47*(5–6), 1455–1468. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2912-7

Wang, Y. L., & Wu, C. R. (2022). Rapid surface warming of the Pacific Asian marginal seas since the late 1990s. *Journal of Geophysical Research: Oceans, e2022JC018744.101*(C7), 16273-16289

Wang, Z., Y. Jiang, H. Wan, J. Yan, & X. Zhang, (2017). Detection and Attribution of Changes in Extreme Temperatures at Regional Scale. *Journal of Climate, 30*(17), 7035–7047. https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0835.1

Warner, M.D. & C.F. Mass, (2017). Changes in the Climatology, Structure, and Seasonality of Northeast Pacific Atmospheric Rivers in CMIP5 Climate Simulations. *Journal of Hydrometeorology, 18*(8), 2131–2141. https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0200.1

Wartenburger, R., Hirschi, M., Donat, M. G., Greve, P., Pitman, A. J., & Seneviratne, S. I. (2017). Changes in regional climate extremes as a function of global mean temperature: An interactive plotting framework. *Geoscientific Model Development, 10*(9), 3609-3634. https://doi.org/10.5194/gmd-10-3609-2017

Weber, J., Y. M. Shin, J. Staunton Sykes, S. Archer-Nicholls, N. L. Abraham, & A. T. Archibald (2020), Minimal Climate Impacts From Short-Lived Climate Forcers Following Emission Reductions Related to the COVID-19 Pandemic. *Geophysical Research Letters, 47*(20), e2020GL090326. https://doi.org/10.1029/2020GL090326

Wehner, M.F. (2020). Characterization of long period return values of extreme daily temperature and precipitation in the CMIP6 models: Part 2, projections of future Change. *Weather and Climate Extremes, 30*, 100284. https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100284

Wehner, M. F., K. A. Reed, B. Loring, D. Stone, & H. Krishnan, (2018). Changes in tropical Cyclones under stabilized 1.5°C and 2.0°C global warming scenarios as simulated by the Community Atmospheric Model under the HAPPI protocols. *Earth System Dynamics, 9*(1), 187–195. https://doi.org/10.5194/esd-9-187-2018

Wehner, M., Stone, D., Mitchell, D., Shiogama, H., Fischer, E., Graff, L. S., Kharin, V. V., Lierhammer, L., Sanderson, B., & Krishnan, H. (2018). Changes in extremely hot days under stabilized 1.5 and 2.0°C global warming scenarios as simulated by the HAPPI multi-model ensemble. *Earth System Dynamics, 9*(1), 299-311. https://doi.org/10.5194/esd-9-299-2018

Wernberg, T., Smale, D. A., Frölicher, T. L. & Smith, A. J. P. (2021). *ScienceBrief Review: Climate change increases marine heatwaves harming marine ecosystems.* In: Critical Issues in Climate Change Science, edited by: P. Liss, C. Le Quéré, & P. Forster. https://doi.org/10.5281/zenodo.5596820

Westervelt, D., L. Horowitz, V. Naik, A. Tai, A. Fiore, & D. L. Mauzerall, (2016). Quantifying PM2.5-meteorology sensitivities in a global Climate model,*Atmospheric Environment, 142*, 43-56.

Wilcox, L. J., Liu, Z., Samset, B. H., Hawkins, E., Lund, M. T., Nordling, K., Undorf, S., Bollasina, M., Ekman, A. M., Krishnan, S., Merikanto, J., & Turner, A. G. (2020). Accelerated increases in global and Asian summer monsoon precipitation from future aerosol reductions. *Atmospheric Chemistry and Physics, 20*(20), 11955-11977. https://doi.org/10.5194/acp-20-11955-2020

Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Gershunov, A., Guzman‐Morales, J., Bishop, D. A., Balch, J. K., & Lettenmaier, D. P. (2019). Observed impacts of anthropogenic climate change on wildfire in California. *Earth's Future, 7*(8), 892-910. https://doi.org/10.1029/2019ef001210

Williams, A. P., Cook, E. R., Smerdon, J. E., Cook, B. I., Abatzoglou, J. T., Bolles, K., Baek, S. H., Badger, A. M., & Livneh, B. (2020). Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought. *Science, 368*(6488), 314-318. https://doi.org/10.1126/science.aaz9600

Xu, Y., & J. F. Lamarque, (2018). Isolating the meteorological impact of 21st Century GHG warming on the removal and atmospheric loading of anthropogenic fine particulate matter pollution at global scale. *Earth's Future, 6*(3), 428-440.

Xu, Y., Zhang, X., Wang, X., Hao, Z., Singh, V. P., & Hao, F. (2019). Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: A case study in northern China. *Journal of Hydrology, 579*, 124147. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124147

Yamada, Y., Satoh, M., Sugi, M., Kodama, C., Noda, A. T., Nakano, M., & Nasuno, T. (2017). Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global Nonhydrostatic model. *Journal of Climate, 30*(23), 9703-9724. https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0068.1

Yamaguchi, M. & S. Maeda, (2020a). Increase in the Number of Tropical Cyclones Approaching Tokyo since 1980. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II, 98*(4), 775–786. https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-039

Yamaguchi, M. & S. Maeda, (2020b). Slowdown of Typhoon Translation Speeds in Mid-latitudes in September Influenced by the Pacific Decadal Oscillation and Global Warming. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II, 98*(6), 1321–1334. https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-068

Yamaguchi, R., & Suga, T. (2019). Trend and variability in global upper‐ocean stratification since the 1960s. *J. Geohys. Res., C, 124*(12), 8933-8948.

Yamanaka, G., Nakano, H., Sakamoto, K., Toyoda, T., Urakawa, L. S., Nishikawa, S., Wakamatsu, T., Tsujino, H., & Ishikawa, Y. (2021). Projected climate change in the western North Pacific at the end of the 21st century from ensemble simulations with a high-resolution regional ocean model. *Journal of Oceanography, 77*(3), 539-560. https://doi.org/10.1007/s10872-021-00593-7

Yang, Y., L. Ren, H. Li, H. Wang, P. Wang, L. Chen, X. Yue, & H. Liao, (2020). Fast Climate Responses to Aerosol Emission Reductions During the COVID-19 Pandemic. *Geophysical Research Letters, 47*(19), e2020GL089788. https://doi.org/10.1029/2020GL089788

Ye, Z. & Z. Li, (2017). Spatiotemporal Variability and Trends of Extreme Precipitation in the Huaihe River Basin, a Climatic Transitional Zone in East China. *Advances in Meteorology, 2017*, 3197435. https://doi.org/10.1155/2017/3197435

Yettella, V. & J.E. Kay, (2017). How will precipitation Change in extratropical Cyclones as the planet

warms? Insights from a large initial Condition Climate model ensemble. *Climate Dynamics, 49*(5), 1765–1781. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3410-2

Yin, H., Y. Sun, H. Wan, X. Zhang, & C. Lu, (2017). Detection of anthropogenic influence on the intensity of extreme temperatures in China. *International Journal of Climatology, 37*(3), 1229–1237. https://doi.org/10.1002/joc.4771

Yoshida, K., M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami, & M. Ishii, (2017). Future Changes in Tropical Cyclone Activity in High-Resolution Large-Ensemble Simulations. *Geophysical Research Letters, 44*(19), 9910–9917. https://doi.org/10.1002/2017gl075058

Yu, T., Guo, P., Cheng, J., Hu, A., Lin, P., & Yu, Y. (2018). Reduced connection between the east Asian summer monsoon and southern hemisphere circulation on interannual timescales under intense global warming. *Climate Dynamics, 51*(9-10), 3943-3955. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4121-7

Zappa, G., L.C. Shaffrey, K.I. Hodges, P.G. Sansom, & D.B. Stephenson, (2013). A Multimodel Assessment of Future Projections of North Atlantic and European Extratropical Cyclones in the CMIP5 Climate Models. *Journal of Climate, 26*(16), 5846–5862. https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00573.1

Zarzycki, C. M., (2018). Projecting Changes in Societally Impactful Northeastern U.S. Snowstorms. *Geophysical Research Letters, 45*(21), 12067–12075. https://doi.org/10.1029/2018gl079820

Zhang, D., Zhang, Q., Qiu, J., Bai, P., Liang, K., & Li, X. (2018). Intensification of hydrological drought due to human activity in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Science of The Total Environment, 637-638*, 1432-1442. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.121

Zhang, G., H. Murakami, T.R. Knutson, R. Mizuta, & K. Yoshida, (2020). Tropical Cyclone motion in a Changing Climate. *Science Advances, 6*(17), eaaz7610. https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz7610

Zhang, W. & T. Zhou, (2019). Significant Increases in Extreme Precipitation and the Associations with Global Warming over the Global Land Monsoon Regions. *Journal of Climate, 32*(24), 8465–8488. https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0662.1

Zhang, Y., J. Fan, T. Logan, Z. Li, & C.R. Homeyer, (2019). Wildfire Impact on Environmental Thermodynamics and Severe Convective Storms. *Geophysical Research Letters, 46*(16), 10082–10093. https://doi.org/10.1029/2019gl084534

Zhang, Z. & B.A. Colle, (2017). Changes in Extratropical Cyclone Precipitation and Associated Processes during the Twenty-First Century over Eastern North America and the Western Atlantic Using a Cyclone-Relative Approach. *Journal of Climate, 30*(21), 8633–8656. https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0906.1

Zhao, T. & A. Dai, (2017). Uncertainties in historical Changes and future projections of drought. Part II: model-simulated historical and future drought Changes. *Climatic Change, 144*(3), 535–548.

https://doi.org/10.1007/s10584-016-1742-x

Zhou, B., Q.H. Wen, Y. Xu, L. Song, & X. Zhang, (2014). Projected Changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles. *Journal of Climate, 27*(17), 6591–6611. https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00761.1

Zhou, B., Y. Xu, J. Wu, S. Dong, & Y. Shi, (2016). Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: Analysis of a high-resolution grid dataset. *International Journal of Climatology, 36*(3), 1051–1066. https://doi.org/10.1002/joc.4400

Zhu, Y. & R.E. Newell, (1998). A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers. *Monthly Weather Review, 126*(3), 725–735. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0725:apafmf>2.0.co;2

Zou, Y., Y. Wang, Y. Zhang, & J.-H. Koo (2017), Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China. *Science Advances, 3*(3), e1602751.

Zscheischler, J. & S.I. Seneviratne, (2017). Dependence of drivers affects risks associated with Compound events. *Science Advances, 3*(6), e1700263. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700263

Zscheischler, J., Westra, S., Van den Hurk, B. J., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., AghaKouchak, A., Bresch, D. N., Leonard, M., Wahl, T., & Zhang, X. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change, 8*(6), 469-477. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3

Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R. M., Van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., Mahecha, M. D., Maraun, D., Ramos, A. M., Ridder, N. N., Thiery, W., & Vignotto, E. (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment, 1*(7), 333-347. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z



第二章
臺灣氣候變遷分析

王嘉琪[1]、江　鈞[2]、李亭萱[3]、李清縢[3]、洪志誠[2]、涂建翊[4]、許晃雄[5]、郭怡君[6]、陳英婷[5]、曾于恒[6]、童裕翔[7]、黃婉如[8]、蔡宜君[5]、羅資婷[3]

[1]中國文化大學大氣科學系
[2]臺北市立大學地球環境暨生物資源學系
[3]中央氣象署
[4]國立彰化師範大學地理學系
[5]中央研究院環境變遷研究中心
[6]國立臺灣大學海洋研究所
[7]國家災害防救科技中心
[8]國立臺灣師範大學地球科學系

摘要

臺灣各測站溫度的長期變化趨勢一致，有逐年暖化的情況並具有年代際尺度的低頻振盪訊號，增溫趨勢越靠近現代越明顯。以6個百年署屬測站而言，平均升溫趨勢由每10年約0.15°C增加至0.27°C，夏半年則由0.15°C增加至0.32°C。冬半年由0.15°C增加至0.29°C (近50年趨勢)，近30年的冬半年增溫趨勢則趨緩 (未通過顯著性檢定)。日最高溫及日最低溫的變化趨勢類似於平均氣溫，且日最低溫的增溫趨勢較日最高溫明顯，是日夜溫差縮小的主要原因。以溫度定義之冬、夏季節長度呈現夏季延長，冬季縮短的趨勢。夏季提早開始、延後結束，最高溫日期提早，最高氣溫升高。整體來說，近50年來每10年夏季延長約6.31天至12.88天。冬季延後開始、提早結束。最低溫日期延後，最低氣溫升高。近50年每10年冬季縮短約6.19天至12.20天。年雨量的長期變化趨勢不明顯，各地區的年總雨量變化趨勢及季節雨量的趨勢皆沒有一致的特徵，且普遍未通過顯著性檢定。年平均風速、最大風速及季節平均最大風速大致呈現減弱的趨勢，亦有年代際尺度的低頻振盪訊號。

臺灣周遭海域的海溫變化與全球平均一致。主要增溫季節為冬季與春季，並與聖嬰現象有關。根據潮位站及衛星資料，臺灣海峽海域的海溫增加 (1957年至2016年間，年平均海溫增溫趨勢為每10年0.23°C)。臺灣周遭海平面變化趨勢受到聖嬰現象與太平洋年代際振盪影響，1993年至2015年平均值約為每年升高2.2 ± 0.3 毫米 ，略低於全球平均值的每年3.2 ± 0.1 毫米。

極端溫度的變化趨勢呈現高溫天數增加，低溫天數減少，夜晚氣溫降低的幅度越來越小。極端降雨日數 (R80mm、 R200mm、R350mm) 的變化各地沒有一致性，亦沒有顯著的長期變化趨勢，但在山區有較明顯的年際變化，且於2000年後變化幅度增大。冬季寒潮發生的頻率和低溫持續日數皆顯著的下降，以臺北為例，近50年寒潮發生頻率減少約3.8次，低溫日數減少約14.5天，但近30年的變化趨勢變緩。平均持續日數，近30年減少約1.1天。平均24小時降溫幅度的長期趨勢為增加且緯度越往北越為明顯。

年最大連續不降雨日及標準化降雨指數 (SPI12) 沒有長期變化趨勢，但中、南部測站的年際變化幅度較大，且在1960年後臺南、恆春及臺東站的氣象乾旱事件發生頻率明顯增多。過去嚴重乾旱事件最常發生的區域為中、南部，其次是北部。最常發生的季節

為春季，其次是秋、冬季。氣象乾旱發生的頻率具有明顯區域特性及低頻振盪特徵，造成雨量偏低的原因皆與大尺度環流條件相關。

影響臺灣的颱風個數及強烈颱風個數，長期變化趨勢不明顯，且呈現年代際變化特徵。颱風路徑的變化受到大尺度環流影響，與全球溫度上升的關聯性不顯著。梅雨季 (5月至6月) 午後對流發生頻率及降雨強度有增加的趨勢，夏季 (6月至8月) 在北部地區發生頻率有增加的趨勢，其他地區則減少，降雨強度在北部地區有增加的趨勢，山區有減弱的趨勢。梅雨季的雨量長期趨勢、雨日降雨強度及極端降雨強度 (PR90) 在5月皆有增加的趨勢，顯著增加的地區集中在北部、中部及南部山區。6月則沒有顯著變化趨勢。

臺灣從1990年代後，各類污染物平均濃度呈現下降趨勢，但O_3濃度持平，且人為活動產生的硝酸鹽有增加的趨勢。整體來說，北部降低的趨勢大於南部。

2.1 前言

本章彙整與臺灣歷史氣候變遷相關的分析與研究成果，第2.2小節至2.4小節使用中央氣象署署屬測站資料分析溫度 (日最高溫、日最低溫、日夜溫差)、雨量 (年總雨量、分區及季節雨量) 及風速 (年平均風速、最大風速) 3種常用氣象變數的長期趨勢及變異。溫度相關變數分為全年、夏半年 (5月至10月) 與冬半年 (11月至4月) 作臺灣整體的長期趨勢分析，最後以溫度分析夏季及冬季的季節長期變遷趨勢。年總雨量因各地區降雨型態差異較大，分為平地、山區及外島討論。季節雨量以自然季節區分並分地區討論雨量趨勢變化。風速分析包含長期趨勢分析、分區風速趨勢分析及季節最大風速分析。本報告僅呈現區域平均後各變數隨時間變化之趨勢，各別測站之氣候狀態及詳細變化趨勢可參閱中央氣象署之「1897-2020臺灣氣候統計圖集」。須注意本報告的氣候平均值為1961年至1990年間的平均，使用的資料至2022年；「1897-2020臺灣氣候統計圖集」採用1991年至2020年的資料計算氣候平均值，使用的資料至2020年，計算後的距平值與本報告不同，但變化趨勢沒有明顯影響。第2.2小節至2.4小節中長期變化趨勢的統計檢定方法為Mann-Kendall test，檢定統計量以5%為標準。

第2.5節說明臺灣周遭海域的海溫及海平面變化，討論造成變化的可能原因，並與全球變化趨勢比較；第2.6節針對極端現象分析，包含夜晚及白天的極端高低溫、極端降水、乾旱及容易致災的天氣現象，如：寒潮、颱風、夏季午後熱對流及梅雨季降雨整體趨勢分析，除了使用氣象署測站資料，也使用「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」計畫(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP)網格化降雨資料，再分析資料等。最後第2.7節彙整臺灣空氣品質的過去變遷及原因。

TCCIP網格化降雨資料與鄰近署屬站資料的差異比較可參考Tung et al. (2022)，兩種資料的時空相關性高，但夏季 (6月至8月) 平均日雨量在西南部迎風面山區仍有蠻大的不確定性；秋季 (9月至11月) 則在中央山脈東側山區有較大不確定性。

2.2 溫度長期趨勢及變異

此節的分析分為資料長度超過百年的6個署屬測站 (臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮及臺東) 及超過70年的14個署屬測站 (基隆、臺北、新竹、臺中、臺南、高雄、恆春、宜蘭、花蓮、成功、臺東、大武、彭佳嶼及澎湖)。使用的時間解析度為日資料，6個百年署屬測站的時間長度由1900年至2022年，共123年；14個署屬測站由1950年至2022年，共73年。其中臺北、新竹、臺南及高雄站因遷站關係有缺漏值，皆補以替代測站的日資料。6個百年署屬測站溫度變化趨勢彙整於本節末端表格中，藉以呈現各地區域差異，更詳細的分析可以參考中央氣象署之「1897-2020臺灣氣候統計圖集」。

2.2.1 平均氣溫

圖2.2.1為日平均氣溫距平值時間序列圖。從百年測站的全年平均氣溫時間序列圖來看 (圖2.2.1a)，平均氣溫於1920年至1940年緩慢上升，1940年至1980年持平，但又於1980年後開始有較大幅度的增溫，此增溫幅度明顯高於其他時段。此外，1970年之後平均氣溫在各測站之間的差異值 (以灰色陰影表示) 明顯較前期大，代表不同地區在1970年後有不同的溫度變化情形。比較「1897-2020臺灣氣候統計圖集」中各別測站的平均氣溫時序圖，發現臺南及恆春在1975年至1990年之間氣溫下降，臺中及花蓮溫度

持平，臺北及臺東則持續升溫。由近30年、近50年及長期 (1900年至2022年) 的趨勢值來看，分別是每10年升溫0.27°C、0.25°C及0.15°C，可以發現近年的溫度上升趨勢越來越明顯。將溫度分成夏半年 (5月至10月；圖2.2.1c) 及冬半年 (11月至4月；圖2.2.1e) 來探討。夏半年及冬半年的平均氣溫長期變化趨勢和全年平均氣溫的變化相似，以每10年0.15°C的幅度增加。比較3種平均溫度的50年趨勢值可以發現，冬半年的增溫幅度比夏半年大。冬半年的溫度變化有相較於夏半年明顯的低頻振盪，因此近30年的趨勢值較小，且沒有通過統計檢定。

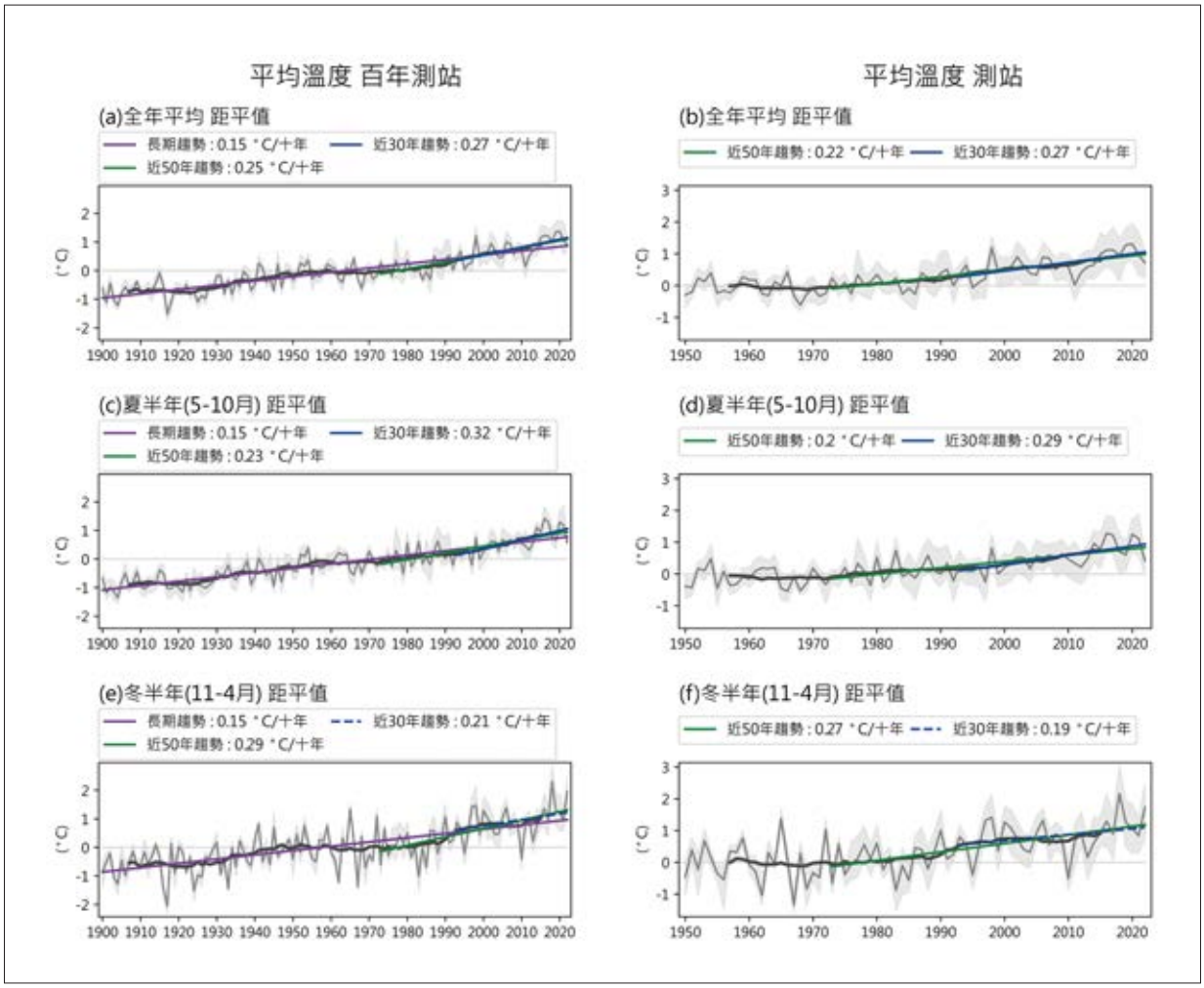


圖2.2.1　日平均氣溫距平值時間序列圖。左側為6個百年署屬測站平均，右側為14個署屬測站平均，(a, b) 全年平均，(c, d) 夏半年 (5月至10月) 平均，(e, f) 冬半年 (11月至4月) 平均。橫軸為年分，縱軸為溫度距平值，參考的氣候值為各測站1961年至1990年的平均。灰色陰影為所用測站的溫度分布範圍，灰色實線為測站平均值，黑色實線為15年滑動平均值。近30年、近50年及長期 (1900年至2022年) 趨勢線分別以藍、綠及紫色表示，實線表示趨勢值通過5%顯著性檢定，虛線則是未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

14個署屬測站的全年平均溫度 (圖2.2.1b) 自1990年開始顯著增溫，越近期的趨勢值越大。夏半年 (圖2.2.1d) 與冬半年 (圖2.2.1f) 呈現出與全年平均溫度相似的年際變化特徵。各測站之間的平均溫度差異 (以灰色陰影表示) 在1970年後較為明顯，突顯出不同地區在1970年後有不同的溫度變化情形。此外，冬半年有明顯的10年以上週期變化，與Chen et al. (2008) 的發現一致，臺灣的秋季 (9月至11月) 溫度具有11年的準週期振盪特性。

2.2.2　最高氣溫

圖2.2.2為日最高溫長期變化趨勢，以日最高溫計算年平均值後，扣除氣候平均得到此距平值時間序列圖。從百年測站的全年日最高溫時間序列圖來看 (圖2.2.2a)，溫度呈現出階段性的變化，1900年至1950年之間緩慢上升，1950年至1985年之間轉為緩慢下降，1990年起開始再轉為增溫現象。此外，1920年至1955年與2010年至2022年之間日最高溫在各測站之間差異較為明顯，代表不同地區在這兩時段之間呈現出不一致的溫度變化情形。比較「1897-2020臺灣氣候統計圖集」中各別測站的絕對最高氣溫時序圖，可以發現臺南與恆春具有明顯年代際振盪的特徵，臺南在1920年至1980年間，恆春在1940年至1970年間最高氣溫較高，在這段時期的前後溫度則偏低。臺北由設站起持續升溫至1960年後開始降溫到1985年左右，再轉為升溫。2010年後僅臺東站的最高氣溫呈現下降趨勢，其他百年測站皆明顯升溫。由近30年、近50年及長期 (1900年至2022年)增溫趨勢可發現，日最高溫的增溫幅度不如平均氣溫 (2.2.1節) 來得明顯，但仍然可以看出近期的增溫幅度有越來越大的現象。夏半年 (圖2.2.2c) 和冬半年 (圖2.2.2e) 的近50年及長期趨勢變化和全年的變化趨勢相似。但冬半年在1985年至2000年之間明顯升溫，2000年後溫度趨緩並微幅下降，2010年後溫度再度明顯上升，與全球暖化停滯現象時期 (約1998年至2012年) 重疊，可能受此現象影響，因此冬半年的近30年趨勢值較小，且未通過統計檢定。

由14個署屬測站的平均日最高溫長期變化 (圖2.2.2b) 可以看出，在1950年至1985年之間，溫度變化近乎持平，而後轉為明顯增溫的情形。分析夏半年 (圖2.2.2d)、冬半年 (圖2.2.2f) 日最高溫的長期變化趨勢，可以看到夏半年的變化和全年的溫度變化相似，但冬半年與6個百年署屬測站一樣在1985年至2010年之間有較大溫度變化，因此冬半年的近30年趨勢值較小，且未通過統計檢定。

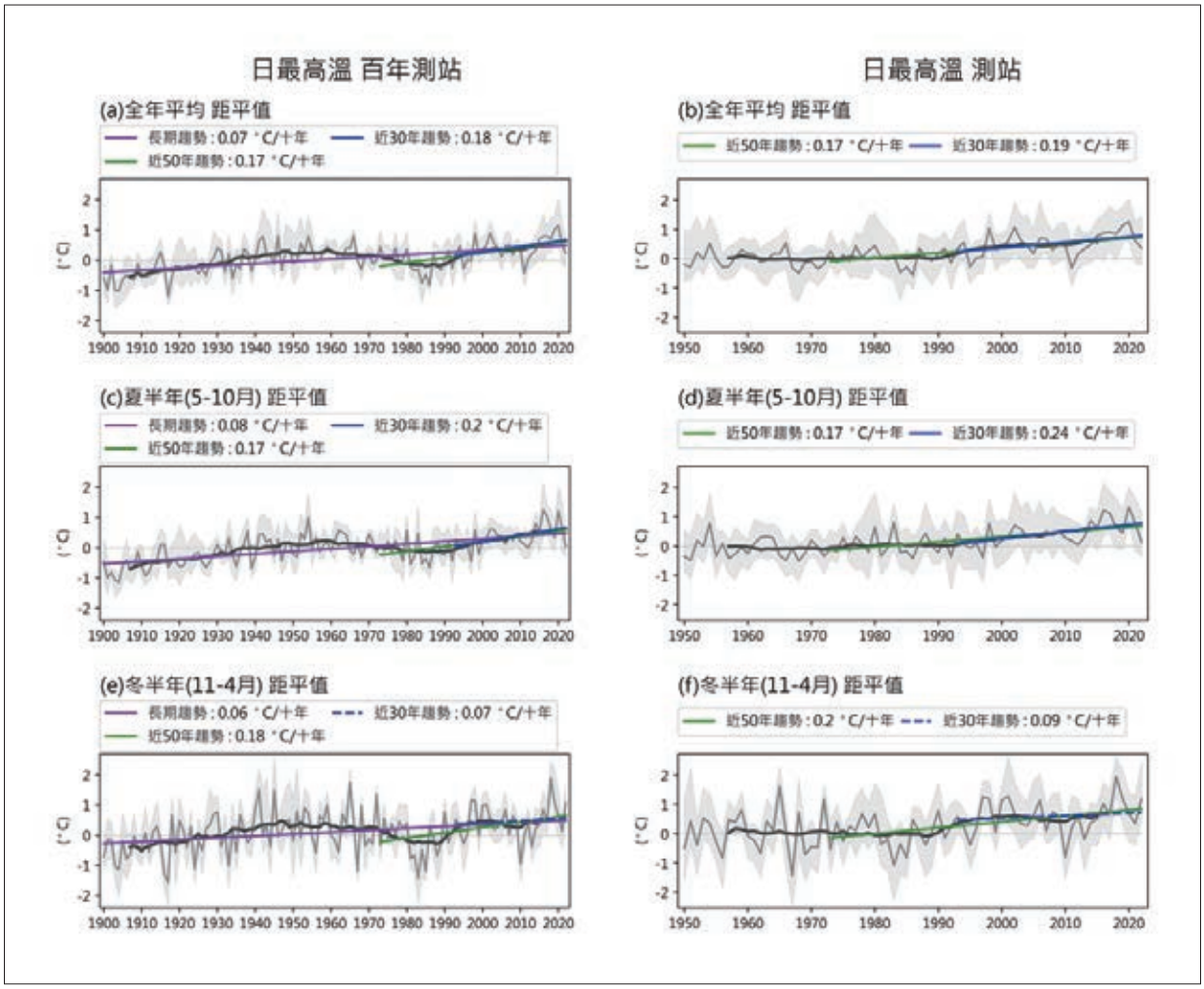


圖2.2.2　日最高溫距平值時間序列圖。左側為6個百年署屬測站平均，右側為14個署屬測站平均，(a, b) 全年平均，(c, d) 夏半年 (5月至10月) 平均，(e, f) 冬半年 (11月至4月) 平均。橫軸為年分，縱軸為溫度距平值，參考的氣候值為各測站1961年至1990年的平均。灰色陰影為所用測站的溫度分布範圍，灰色實線為測站平均值，黑色實線為15年滑動平均值。近30年、近50年及長期 (1900年至2022年) 趨勢線分別以藍、綠及紫色表示，實線表示趨勢值通過5%顯著性檢定，虛線則是未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

2.2.3　最低氣溫

圖2.2.3為日最低溫長期變化趨勢，以日最低溫計算年平均值後，扣除氣候平均得到此距平值時間序列圖。從6個百年署屬測站的全年平均值來看 (圖2.2.3a)，日最低溫在1900年至1925年之間緩慢下降，1930年至1950年之間轉為顯著上升，1950年至1970年之間變化持平，直到1970年後呈現出顯著的上升趨勢，因此30年及50年的趨勢值較長期趨勢值大。比較「1897-2020臺灣氣候統計圖集」中各別測站的絕對最低氣溫時序

圖，各測站之趨勢變化一致沒有明顯區域差異。夏半年 (圖2.2.3c) 與冬半年 (圖2.2.3e) 的溫度年際變化和全年平均最低溫的變化相似，但冬半年溫度變化幅度明顯較夏半年大，在2000年之後單一測站的距平值可大於2°C以上，甚至2015年之後距平值高達3°C。整體來說，從1925年後有顯著的上升趨勢，在1950年至1970年之間溫度轉為持平，但在1970年後則是顯著上升趨勢。由30年、50年及整段時間 (1900年至2022年) 的趨勢來看，可明顯看出越近期增溫趨勢越大的現象。冬半年由於在2000年至2010年間溫度較為持平，與全球暖化停滯現象時期 (約1998年至2012年) 重疊，可能受此現象影響，造成近30年的增溫趨勢減小。

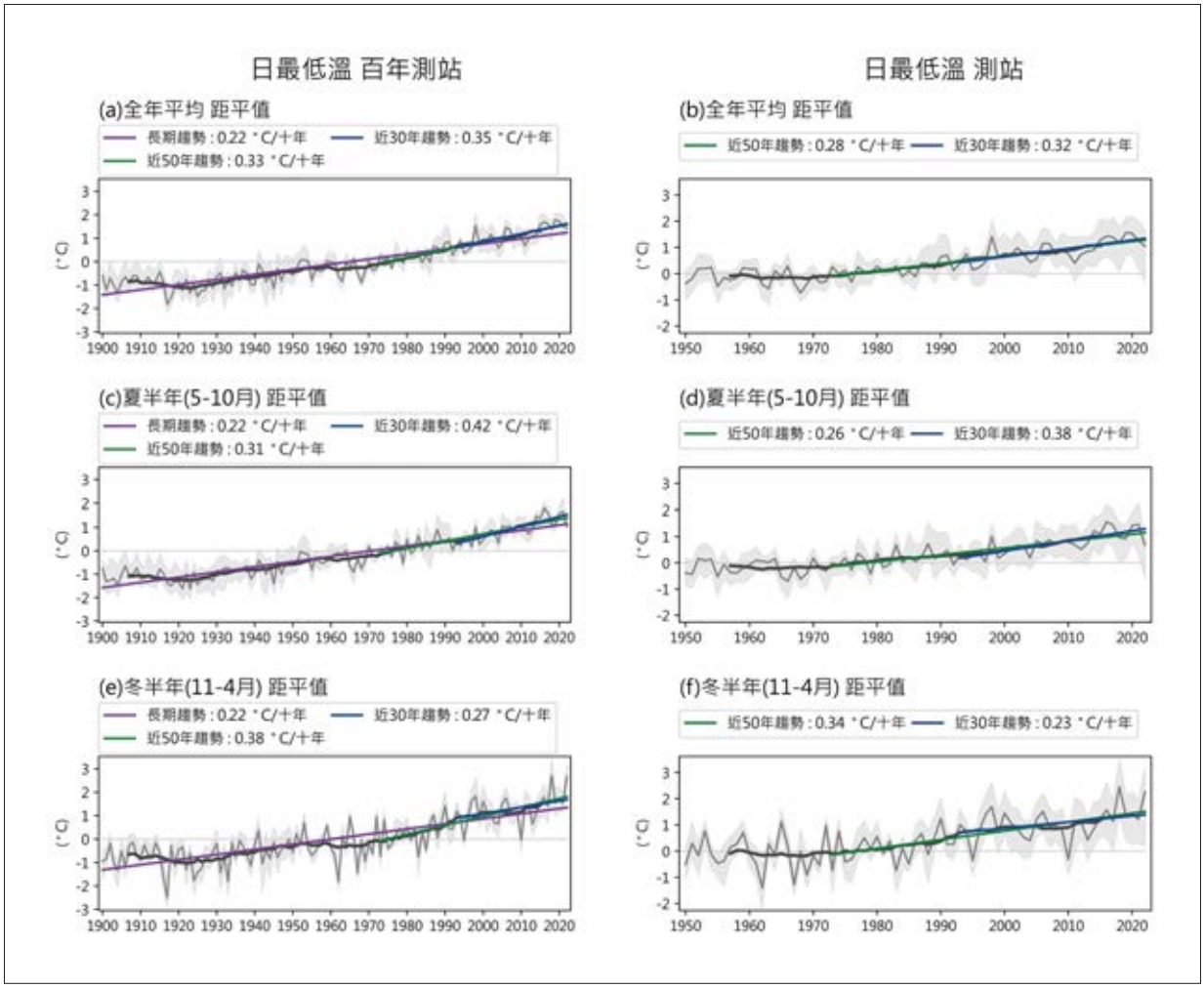


圖2.2.3　日最低溫距平值時間序列圖。左側為6個百年署屬測站平均，右側為14個署屬測站平均，(a, b) 全年平均，(c, d) 夏半年 (5月至10月) 平均，(e, f) 冬半年 (11月至4月) 平均。橫軸為年分，縱軸為溫度距平值，參考的氣候值為各測站1961年至1990年的平均。灰色陰影為所用測站的溫度分布範圍，灰色實線為測站平均值，黑色實線為15年滑動平均值。近30年、近50年及長期 (1900年至2022年) 趨勢線分別以藍、綠及紫色表示，實線表示趨勢值通過5%顯著性檢定，虛線則是未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

14個署屬測站的平均日最低溫，無論是全年 (圖2.2.3b)、夏半年 (圖2.2.3d) 或冬半年 (圖2.2.3f) 的長期變化都可看出，在1950年至1990年之間溫度緩慢上升，從1990年之後呈現出快速上升的趨勢。此外，1990年後日最低溫在各測站之間的差異較為明顯 (灰色陰影)，代表各測站之間的日最低溫變化有不一致的情形。和6個百年署屬測站一樣，冬半年在2015年之後也呈現出單一測站的距平值可高達3°C的現象，明顯比夏半年的距平值高出約1°C。

2.2.4 氣溫日夜溫差

圖2.2.4為日夜溫差 (日最高溫減日最低溫) 的長期變化趨勢。由6個百年署屬測站來看 (圖2.2.4a)，全年平均日夜溫差的年際變化在1900年代初期上升，1920年後持平至1945年後緩慢下降，1970年後明顯下降。造成各時期日夜溫差變化的原因不同，由前述2.2.2節最高氣溫及2.2.3節最低氣溫的結果可知，日最低氣溫上升的趨勢較為明顯，是造成日夜溫差長期趨勢下降的主要原因，但1970年至1990年間是因為日最高氣溫下降而有明顯下滑，1990年後開始的下降趨勢則是因日最低溫上升。全年、夏半年 (圖2.2.4c) 及冬半年 (圖2.2.4e) 的長期趨勢相近，以每10年約0.16°C幅度下降。冬半年在近30與近50年日夜溫差縮小的趨勢皆比夏半年明顯。整體可看出近期日夜溫差縮小的幅度稍微增加，且年代際變化較為明顯。14個署屬測站平均的日夜溫差距平值 (圖2.2.4右側)，無論是全年、夏半年或冬半年都呈現出相似的年際變化特性，日夜溫差以線性趨勢逐年下降，其中冬半年的下降趨勢最為明顯。

以下表格彙整6個百年署屬測站近30年及近50年溫度趨勢 (表2.2.1至表2.2.4)。其中，表2.2.2臺南站於1993年至2022年間的最高溫度趨勢值為負值。經檢視「1897-2020臺灣氣候統計圖集」臺南站最高氣溫時序圖 (p.18)，雖然臺南站於1998年至2001年間遷至永康站，但遷站前後沒有明顯溫度跳動的情況，其近30年及近50年變化趨勢為負值的主要原因是1965年至1980年間有一段溫度偏高的時期，1980年至1990年間溫度偏低，1990年至2010年間溫度持平，2010年至 2015年間又有一段溫度偏低的時期，因此造成近30年及近50年趨勢非常接近零，甚至出現負值，同時這兩段時期的溫度變化趨勢皆沒有通過5%顯著性檢定。此低頻振盪亦影響到全年平均溫度的趨勢變化。不管是平均溫度、最高溫度或最低溫度，皆在冬半年有數個測站之近30年溫度變化趨勢趨緩且未通過

統計檢定，可能與全球暖化停滯現象 (約1998年至2012年) 有關。

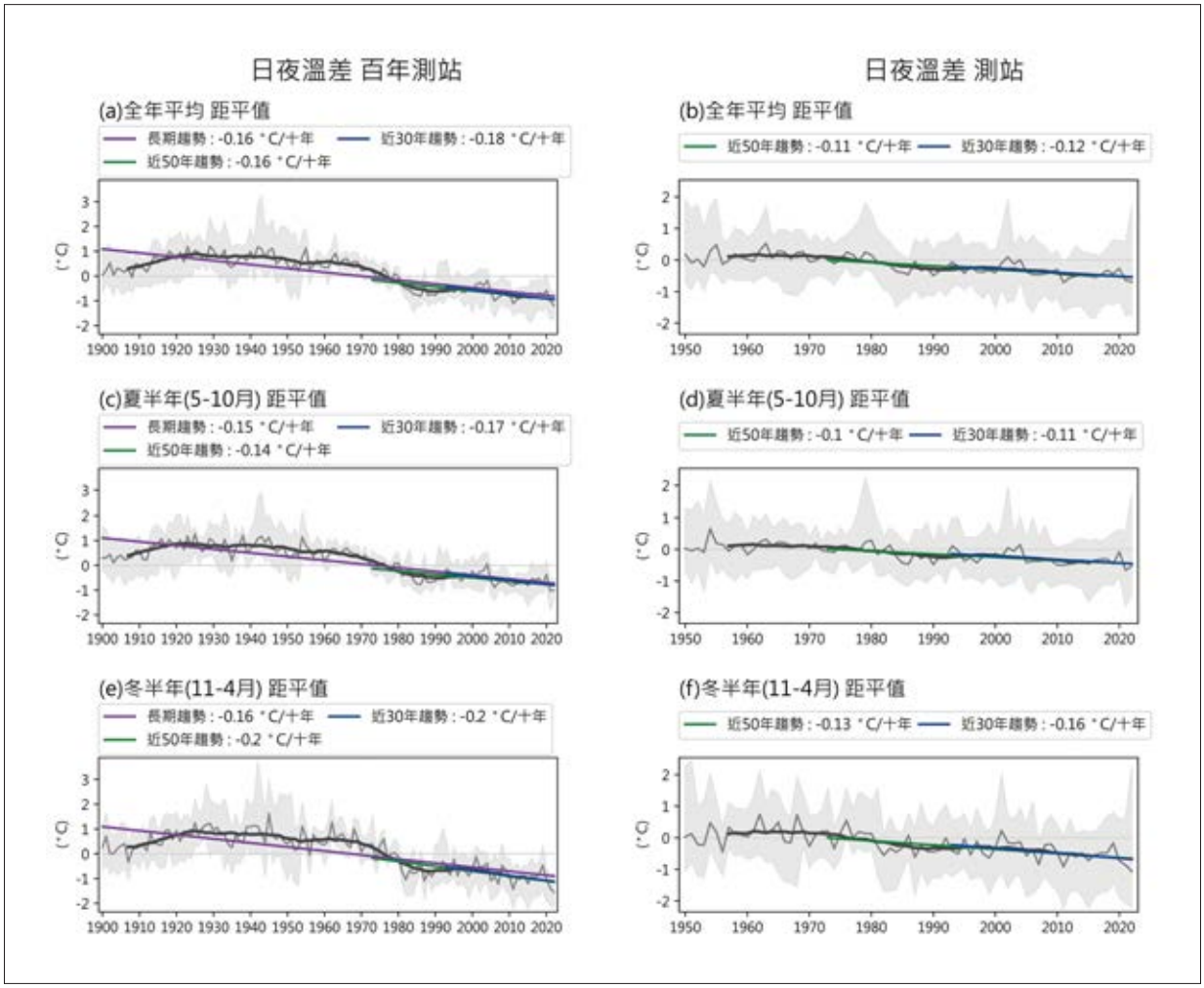


圖2.2.4　日夜溫差距平值時間序列圖。左側為6個百年署屬測站平均，右側為14個署屬測站平均，(a, b) 全年平均，(c, d) 夏半年 (5月至10月) 平均，(e, f) 冬半年 (11月至4月) 平均。橫軸為年分，縱軸為溫度距平值，參考的氣候值為各測站1961年至1990年的平均。此處的距平值為負值，並非指日夜溫差為負值。負距平值代表該年的日夜溫差低於長期 (1961年至1990) 平均的日夜溫差。灰色陰影為所用測站的數值分布範圍，灰色實線為測站平均值，黑色實線為15年滑動平均值。近30年、近50年及長期 (1900年至2022年) 趨勢線分別以藍、綠及紫色表示，實線表示趨勢值通過5%顯著性檢定，虛線則是未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

表2.2.1　6個百年署屬測站年平均溫度近30年及近50年變化趨勢彙整表。粗體字表示趨勢值通過5%顯著性檢定。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

平均溫度 趨勢值 (°C / 10 年)		全年	夏半年	冬半年
臺北	1993 年至 2022 年	0.44	0.46	0.37
	1973 年至 2022 年	0.35	0.32	0.40
臺中	1993 年至 2022 年	0.30	0.32	0.28
	1973 年至 2022 年	0.34	0.28	0.43
臺南	1993 年至 2022 年	0.21	0.23	0.12
	1973 年至 2022 年	0.23	0.20	0.28
恆春	1993 年至 2022 年	0.31	0.33	0.26
	1973 年至 2022 年	0.21	0.19	0.24
花蓮	1993 年至 2022 年	0.21	0.27	0.12
	1973 年至 2022 年	0.20	0.20	0.22
臺東	1993 年至 2022 年	0.23	0.30	0.10
	1973 年至 2022 年	0.20	0.22	0.21

表2.2.2　6個百年署屬測站最高溫度近30年及近50年變化趨勢彙整表。粗體字表示趨勢值通過5%顯著性檢定。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

最高溫度 趨勢值 (°C / 10 年)		全年	夏半年	冬半年
臺北	1993 年至 2022 年	0.55	0.55	0.41
	1973 年至 2022 年	0.32	0.32	0.38
臺中	1993 年至 2022 年	0.23	0.30	0.23
	1973 年至 2022 年	0.20	0.18	0.30
臺南	1993 年至 2022 年	-0.05	-0.04	-0.12
	1973 年至 2022 年	0.01	0.03	-0.02
恆春	1993 年至 2022 年	0.11	0.20	0.02
	1973 年至 2022 年	0.11	0.11	0.09
花蓮	1993 年至 2022 年	0.08	0.18	-0.01
	1973 年至 2022 年	0.20	0.22	0.19
臺東	1993 年至 2022 年	0.11	0.16	-0.02
	1973 年至 2022 年	0.17	0.19	0.18

表2.2.3　6個百年署屬測站最低溫度近30年及近50年變化趨勢彙整表。粗體字表示趨勢值通過5%顯著性檢定。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

最低溫度 趨勢值 (°C / 10 年)		全年	夏半年	冬半年
臺北	1993 年至 2022 年	0.43	0.49	0.37
	1973 年至 2022 年	0.40	0.38	0.44
臺中	1993 年至 2022 年	0.36	0.40	0.32
	1973 年至 2022 年	0.42	0.35	0.53
臺南	1993 年至 2022 年	0.37	0.37	0.30
	1973 年至 2022 年	0.38	0.34	0.46
恆春	1993 年至 2022 年	0.40	0.45	0.36
	1973 年至 2022 年	0.32	0.30	0.38
花蓮	1993 年至 2022 年	0.30	0.36	0.19
	1973 年至 2022 年	0.24	0.23	0.28
臺東	1993 年至 2022 年	0.30	0.37	0.15
	1973 年至 2022 年	0.26	0.27	0.26

表2.2.4　6個百年署屬測站日夜溫差近30年及近50年變化趨勢彙整表。粗體字表示趨勢值通過5%顯著性檢定。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

日夜溫差 趨勢值 (°C / 10 年)		全年	夏半年	冬半年
臺北	1993 年至 2022 年	0.12	0.04	0.09
	1973 年至 2022 年	0.02	-0.02	-0.05
臺中	1993 年至 2022 年	-0.09	-0.08	-0.11
	1973 年至 2022 年	-0.20	-0.16	-0.23
臺南	1993 年至 2022 年	-0.40	-0.38	-0.38
	1973 年至 2022 年	-0.36	-0.28	-0.41
恆春	1993 年至 2022 年	-0.21	-0.19	-0.32
	1973 年至 2022 年	-0.20	-0.16	-0.27
花蓮	1993 年至 2022 年	-0.18	-0.19	-0.22
	1973 年至 2022 年	-0.04	-0.01	-0.07
臺東	1993 年至 2022 年	-0.18	-0.16	-0.25
	1973 年至 2022 年	-0.07	-0.06	-0.10

2.2.5 臺灣的季節變遷

此節使用6個百年署屬測站的日平均氣溫資料及應用Yan et al. (2011) 的方法定義季節的起始與結束時間 (詳細方法參考文字框4｜臺灣季節定義)，並依此計算季節長度、季節峰值溫度與峰值發生時間，以探討臺灣的季節變遷。

文字框 4 ｜臺灣季節定義

本報告在分析臺灣季節相關的變化趨勢時採用的定義說明如下：

本報告使用中央氣象署6個百年署屬測站的日平均氣溫資料，並應用Yan et al. (2011) 的方法，將日平均氣溫資料以傅立葉轉換做分解後再合併得到長週期之日平均氣溫。其中長週期指週期為近一年及以上的變化訊號，目的在於將季節 (約3個月) 以下的訊號濾除。過去透過中央氣象署測站的波譜分析結果發現，長週期主要由一年及半年 (前兩個頻率) 的訊號主宰 (李庭慧等人，2018)。

接著以1961年至1990年間的長週期日平均氣溫計算年循環之氣候值，取最冷日 (最暖日) 前後45 天窗區中頭尾兩天的溫度計算平均值，作為定義冬 (夏) 季起始與結束的門檻值。利用門檻值篩選每年長週期日平均氣溫變化與對應的日期，就可找出每年的冬、夏季的起始與結束時間、季節長度、季節峰值溫度與峰值發生時間，以探討臺灣的季節變遷。本報告中的2.2.5節與3.2.2節以上述定義分析臺灣歷史與未來的季節長度 (夏季與冬季) 的變化趨勢。

圖2.2.5為臺灣6個百年署屬測站的季節起訖日期與峰值日期分布。可以看到臺北 (圖2.2.5a) 在20世紀初，夏季從7月初開始到8月底結束，到了21世紀初，夏季則提早於5月底開始，並延後到近9月底才結束。夏季由為期2個月擴展至4個月。高溫峰值出現的日期變化不大，大多落在8月初前後。20世紀初，臺北冬季始於12月，至3月中結束，在20世紀末則延至1月冬季才開始，並提早於2月中結束，冬季只維持了1個半月。低溫峰值發生的日期變化不大，多發生在1月底。

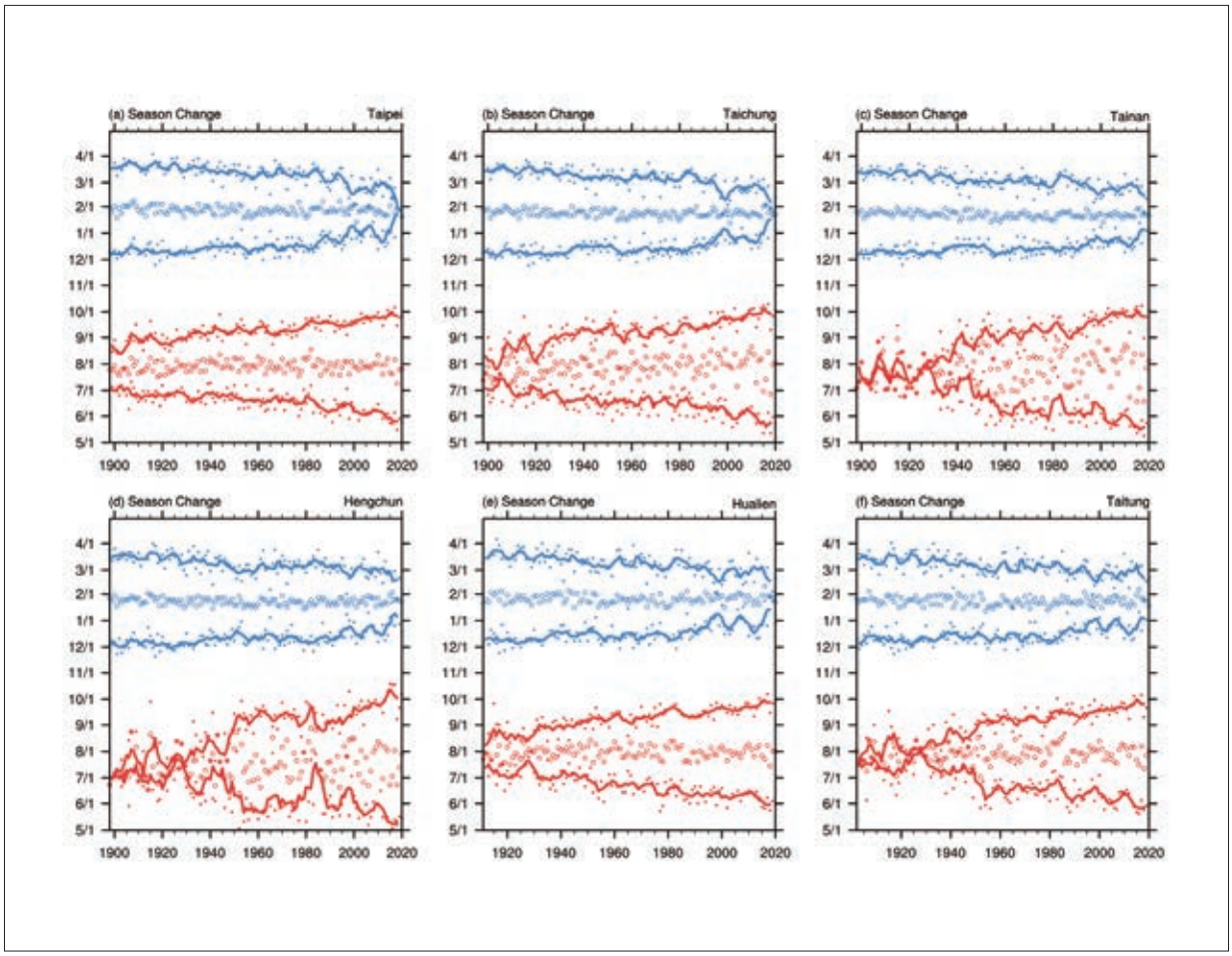


圖2.2.5　臺灣6個百年署屬測站的季節變化趨勢。依序為 (a) 臺北、 (b) 臺中、(c) 臺南、(d) 恆春、(e) 花蓮與 (f) 臺東。夏季與冬季分別以紅色與藍色表示。橫軸為年分，縱軸為日期，實心圓點為季節始末日期，實線為其5年移動平均，空心圓點為峰值日期。(資料來源：中央氣象署，依李庭慧等人 [2018] 之方法重繪，本報告產製)

臺中 (圖2.2.5b) 與花蓮 (圖2.2.5e) 變化類似，20世紀初，夏季從6月底開始到8月中結束，到了21世紀初，夏季提早於5月底開始，延後至近9月底才結束。夏季從1個半月擴展至4個月。高溫峰值出現的日期相較於臺北較為分散，不過大多落在8月初前後。20世紀初，冬季開始於12月，到3月中結束，世紀末則延至12月底冬季才開始，3月初冬季結束。低溫峰值發生的日期變化不大，也多發生在1月底。冬季在1995年至2020年間有個明顯但短暫的變化，冬季開始的時間延後，結束的時間提早，造成冬季長度明顯變短，隨後又延長，尤其臺北、臺中及花蓮變化較為明顯。

臺南 (圖2.2.5c)、恆春 (圖2.2.5d) 及臺東 (圖2.2.5f) 在1950年以前較難界定出夏季的時間範圍，由5月中至9月中都有可能，爾後夏季逐漸提早開始且延後結束，開始與

結束的時間分別往前與往後擴展了半個月，在1985年至2020年之間曾發生3次夏季延後開始的現象。冬季則相反，延後開始且提早結束。冬季的時間範圍從12月中到3月中縮短為從12月底到3月初。這三個測站的夏季溫度在20世紀前期較低，因此容易低於以1961年至1990年作為氣候值訂出的氣候閾值，造成夏季的起始及結束時間在1950年以前較難界定 (李庭慧等，2018)。

分別計算6個百年署屬測站季節的起始與結束時間、峰值與季節長度的百年 (1921年至2020年間) 及50年 (1971年至2020年間) 趨勢 (表2.2.5)。6個測站的百年趨勢皆顯示夏季起始時間每10年提前2.81天至5.6天、結束時間每10年延後2.69天至6.81天，季節長度每10年延長5.5天至11.89天。冬季則是起始時間每10年延後1.64天至3.11天、結束時間每10年提前1.53天至3.11天、冬季季節長度每10年縮短3.42天至6.22天。百年趨勢都通過5%顯著性檢定。各測站夏季長度的變化幅度都比冬季大，此現象在南部測站更為明顯。整體來說，各站一致的趨勢變化為夏季提早開始、延後結束，夏季更長，最高氣溫升高。冬季延後開始、提早結束，冬季更短，最低氣溫升高。

50年趨勢呈現夏季起始時間每10年提前3.19天至6.7天、結束時間每10年延後3.12天至6.18天，夏季季節長度每10年延長6.31天至12.88天。冬季起始時間每10年延後3.78天至6.09天、結束時間每10年提前2.35天至6.10天、冬季季節長度每10年縮短6.19天至12.20天。50年趨勢也幾乎都通過5%顯著性檢定。整體一致的趨勢變化類似百年趨勢。比較50年與百年趨勢，夏季臺北、臺中與恆春以及冬季全部的測站，50年趨勢都比百年趨勢明顯。臺南、花蓮及臺東於夏季近50年趨勢反而較緩和，可能是因為一直維持在高溫，趨勢反而不明顯。比較各測站緯度地域性，均是測站所在位置越靠近 (遠離) 赤道，夏季 (冬季) 長度變化趨勢越為明顯。恆春站可能是由於較靠近海邊，受到三面海洋調節，且測站位置緯度最低，冬季長度變化較其他北邊的測站小。

圖2.2.6為6個百年署屬測站夏季及冬季日數隨時間的變化。夏季日數從20世紀初的2個月逐漸增加至21世紀初的4、5個月，各測站年際變化大，尤其是在1950年前後，呈現驟變 (abrupt change)，1950年以前各站差異大，1950年以後各站日數差異較小。1950年以前北部測站夏季長度長於其他測站。恆春與東部測站在1950年後，夏季長度迅速增加，從短於其他測站轉為與其他測站相近。2015年以後各測站夏季天數更是明顯增加，尤其是恆春站。冬季持續從20世紀初的3個多月逐漸減短至21世紀初的1、2個

月，但在2015年後日數快速減少，各站差異不大。近年，冬季長度減少的速度比夏季長度增加速度快也符合表2.2.5的分析，近50年的趨勢較近百年趨勢更明顯。

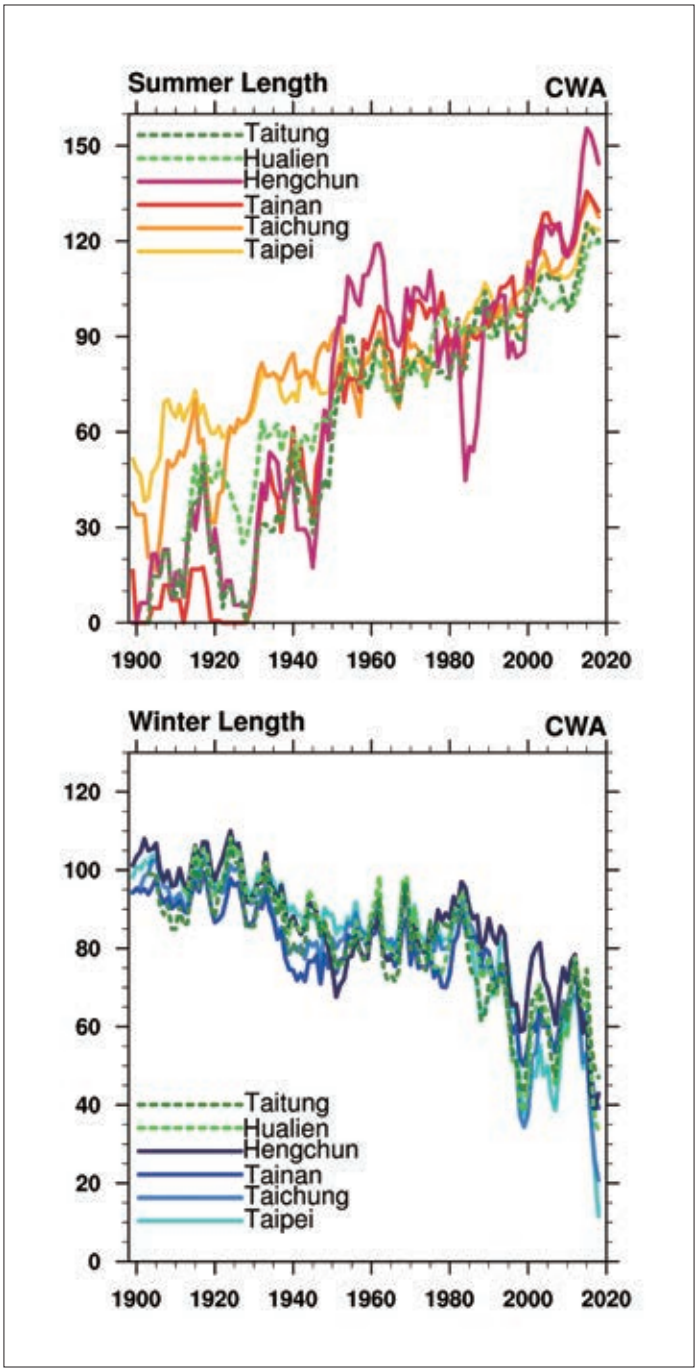


圖2.2.6　臺灣6個百年署屬測站的夏季 (上) 及冬季 (下) 長度日數。顏色由淺至深色為地理位置由北至南的測站，虛線為東部測站。(資料來源：中央氣象署，依李庭慧等人 [2018] 之方法重繪，本報告產製)

表2.2.5　臺灣6個百年署屬測站冬、夏兩季之百年 (1921年至2020年間) 與50年 (1971年至2020年間) 長期變遷趨勢。單位為每10年之日數與溫度變化量 (day decade^{-1}、°C decade^{-1})。負值表示日期提早、日數減少或溫度下降。正值表示日期延後、日數增長或溫度上升。粗體為通過5%顯著性檢定。(資料來源：中央氣象署，依李庭慧等人 [2018] 之方法，本報告產製)

		夏季					冬季				
		起始	峰值	結束	長度	峰值溫度	起始	峰值	結束	長度	峰值溫度
臺北	1921-2020	**-2.81**	-0.14	**2.69**	**5.50**	**0.19**	**3.11**	0.01	**-3.11**	**-6.22**	**0.20**
	1971-2020	**-4.58**	-0.77	**3.50**	**8.08**	**0.33**	**6.09**	0.08	**-6.10**	**-12.20**	**0.38**
臺中	1921-2020	**-2.73**	0.31	**3.10**	**5.83**	**0.10**	**2.50**	0.02	**-2.42**	**-4.92**	**0.19**
	1971-2020	**-5.45**	-0.55	**5.14**	**10.60**	**0.22**	**5.83**	**0.74**	**-4.52**	**10.35**	**0.41**
臺南	1921-2020	**-5.60**	0.63	**6.29**	**11.89**	**0.17**	**1.64**	-0.10	**-1.79**	**-3.42**	**0.14**
	1971-2020	**-4.15**	0.10	**4.77**	**8.92**	**0.17**	**13.87**	**0.63**	**-2.51**	**-6.28**	**0.28**
恆春	1921-2020	**-4.42**	0.98	**6.81**	**11.23**	**0.13**	**1.98**	0.15	**-1.53**	**-3.51**	**0.09**
	1971-2020	**-6.70**	-0.78	**6.18**	**12.88**	**0.20**	**4.67**	**0.91**	**-2.72**	**-7.38**	**0.22**
花蓮	1921-2020	**-3.72**	-0.04	**3.62**	**7.34**	**0.17**	**2.51**	0.08	**-2.40**	**-4.91**	**0.13**
	1971-2020	**-3.19**	-0.28	**3.12**	**6.31**	**0.20**	**5.02**	**1.08**	**-3.06**	**-8.09**	**0.25**
臺東	1921-2020	**-5.06**	0.25	**5.40**	**10.47**	**0.18**	**2.03**	0.07	**-1.90**	**-3.92**	**0.10**
	1971-2020	**-4.64**	-0.63	**3.84**	**8.48**	**0.20**	**3.84**	**0.87**	-2.35	**-6.19**	**0.19**

2.3 降雨長期趨勢及變異

本節分析6個百年署屬測站 (臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮及臺東) 於1900年至2022年間的雨量長期趨勢，並選取自1950年 (含) 起有資料的署屬測站，做1950年至2022年各區域的雨量趨勢討論，分為平地 (淡水、臺北、新竹、臺中、臺南、高雄、恆春、花蓮、成功、臺東、大武、宜蘭及基隆)、山區 (竹子湖、鞍部、日月潭及阿里山) 及外島 (彭佳嶼、蘭嶼及澎湖)。最後以6個百年署屬測站做季節雨量的趨勢分析，季節以自然季節區分為春季 (2月至4月)、梅雨季 (5月至6月)、颱風季 (7月至9月)、秋季 (10月至11月) 及冬季 (12月至1月)。

2.3.1　年降雨量

圖2.3.1為1900年至2022年6個百年署屬測站平均的年總降雨量，可以看到臺灣整體雨量變化沒有明顯長期趨勢，正負距平 (多雨年、少雨年) 差異在1930年至1970年間及2000年後較大。各測站之間的年總降雨量有明顯的差異 (以灰色陰影表示)，同時有明顯的年際及年代際振盪。各別百年署屬測站之分析可參閱「1897-2020臺灣氣候統計圖集」，除臺北之百年趨勢 (每10年增加23.58毫米) 通過5%統計顯著性檢定，其他各站及各時期皆未通過統計檢定。進一步分析年總降雨量在臺灣平地、山區及外島的差異變化 (圖2.3.2)。圖中可以看到，平地測站有較大的雨量差異 (灰色陰影)，山區雨量有較大的年際變化，但各區域無一致的趨勢變化，且皆未通過統計顯著性檢定。

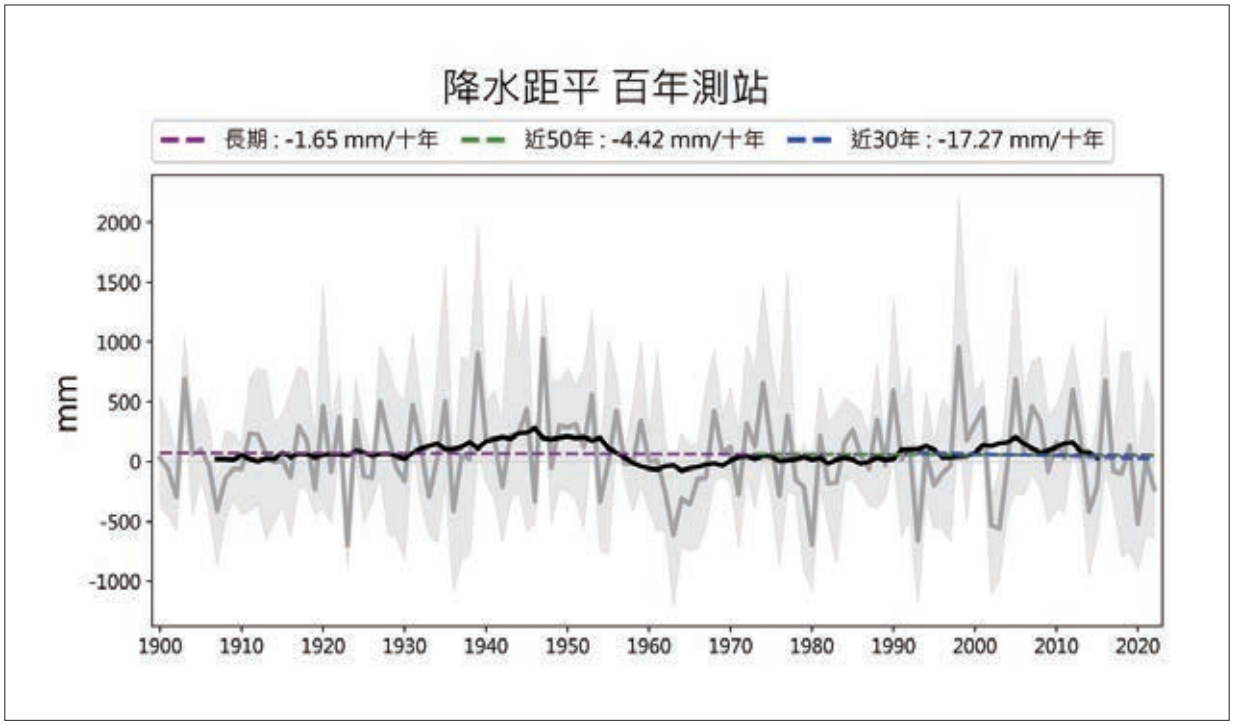


圖2.3.1　6個百年署屬測站平均年總降雨量距平值時間序列圖。橫軸為年分，1900年至2022年，縱軸為相對於各測站氣候值 (1961年至1990年) 的雨量距平，灰色陰影為所用測站的雨量距平分布範圍，灰色實線為測站平均距平，黑色實線為15年滑動平均值。近30年、50年及長期 (1900年至2022年) 趨勢線分別以藍、綠及紫色表示，實線表示趨勢值有通過5%顯著性檢定，虛線則是未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

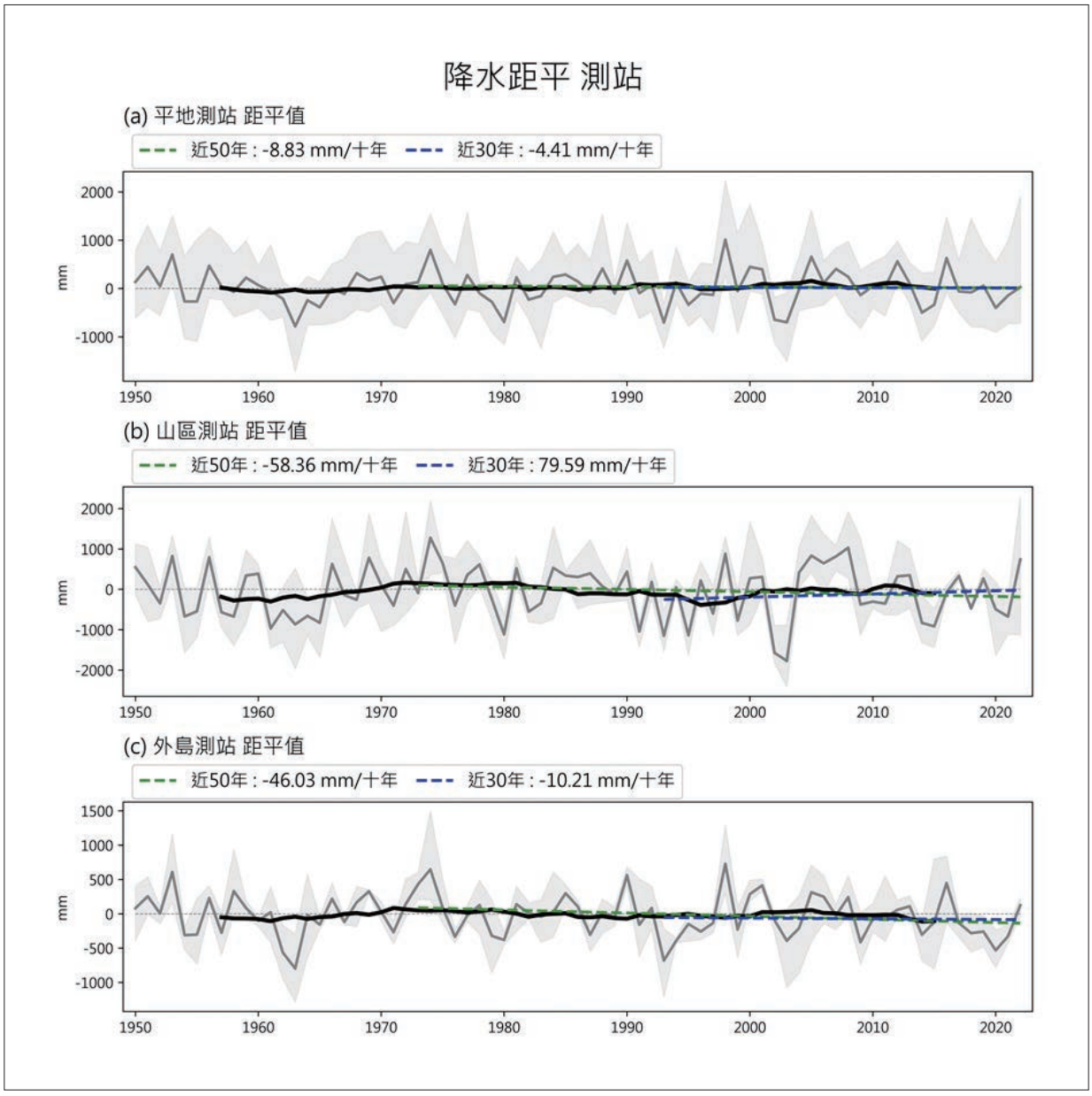


圖2.3.2　分區平均年總降雨量距平值時間序列圖。(a) 平地測站、(b) 山區測站 (海拔高度200米以上)、(c) 外島測站。橫軸為年分，1950年至2022年，縱軸為相對於各測站氣候值 (1961年至1990年) 的雨量距平，灰色陰影為所用測站的雨量距平分布範圍，灰色實線為測站平均距平，黑色實線為15年滑動平均值。近30年及近50年趨勢線分別以藍色及綠色表示，實線表示趨勢值有通過5%顯著性檢定，虛線則是未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

2.3.2　季節降雨變化

由於年總雨量總和了不同季節的雨量，同時也包含了極端降雨，無法明確區分不同季節的差異，因此，此節分析各季節雨量的長期趨勢 (圖2.3.3)，圖中顯示春季臺北及臺

中雨量減少最多，雖未通過統計檢定，但是減少的趨勢近年大幅提高。花蓮站春季雨量的近50年趨勢有通過5%顯著性檢定，為每10年減少21毫米。6個百年署屬測站於梅雨季的變化趨勢皆沒有通過統計檢定，但是臺北與臺中近30年的雨量趨勢相較於近50年的趨勢大幅提高，恆春則大幅減少。颱風季的雨量趨勢僅臺東站的近30年趨勢有通過5%顯著性檢定，為每10年減少148 毫米。秋季在花蓮的長期趨勢有通過5%顯著性檢定，每10年增加20毫米。冬季雨量趨勢沒有明顯變化，且未通過統計檢定。

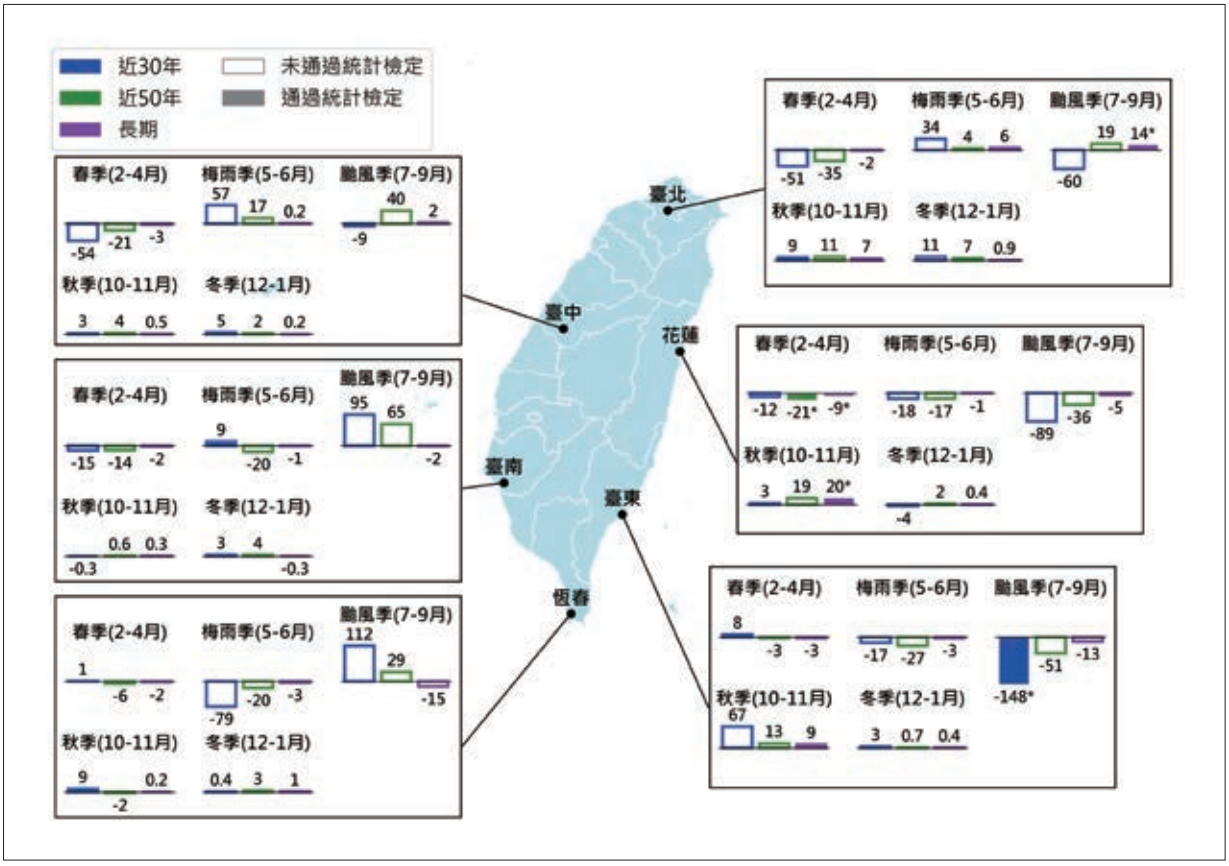


圖2.3.3　6個百年署屬測站的季節雨量趨勢變化。季節定義為春季 (2月至4月)、梅雨季 (5月至6月)、颱風季 (7月至9月)、秋季 (10月至11月)、冬季 (12月至1月)。長條圖及數字由左至右分別為季節雨量之近30年、近50年及長期 (1900年至2022年) 趨勢值，單位：mm decade^{-1}。實心長條及 * 號代表趨勢值有通過5%顯著性檢定，空心代表未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

整體來說，分區季節雨量的趨勢變化不大，僅少數季節及測站通過顯著性檢定。儘管如此，由於近年已有多次乾旱事件及極端降雨事件，仍須注意部分地區在特定季節的雨量變化，例如北部至中部地區近30年的春季雨量有較大的減少趨勢，南部在梅雨季雨量減少；東部地區在夏季也有較大的減少趨勢，但南部則是增加。

2.4 風速長期趨勢及變異

本節分析年平均風速及年最大風速的趨勢變化。以6個百年署屬測站 (臺北、臺中、臺南、恆春、花蓮、臺東) 的資料，分析1900年至2022年的風速長期趨勢。也選取自1950年 (含) 起有紀錄的署屬站資料，分區討論1950年至2022年之間的風速趨勢。分區方式為北部 (淡水、新竹、臺北)、中部 (臺中)、南部 (臺南、高雄、恆春)、東部 (基隆、宜蘭、花蓮、成功、臺東、大武)、山區 (竹子湖、鞍部、日月潭、阿里山) 及外島 (彭佳嶼、蘭嶼、澎湖)。最後使用百年署屬測站的資料分析各季節最大風速的趨勢變化。

2.4.1 年平均風速

圖2.4.1為6個百年署屬測站的年平均風速於1900年至2022年之間的變化。臺北站 (圖2.4.1a) 在1920年以前風速較大 (正距平)，1920年至1940年與1950年至1960年之間風速偏弱 (負距平)，而1940年至1950年與1960年至1975年兩階段有較大的風速，至1980年後風速持續地快速減小 (負距平)，因此近30年及近50年風速趨勢值為顯著負值，而且越近期的下降趨勢越明顯。臺中站 (圖2.4.1b) 的風速變化特性和臺北站相似，也是1980年後風速持續地減小。

臺南站 (圖2.4.1c) 的風速年際變化和其他測站明顯不同，風速在1982年前後有明顯差異，1950年至1982年之間風速較弱，1982年之後風速增強，但長期來看，仍可看出風速逐年減小的現象。此外，由中央氣象署的風速儀器歷史資紀錄得知，1982年至1984年間的風速急劇變化主要是由於觀測環境的改變 (測站附近有興建大樓，導致風速突然減小) 和儀器位置改變 (由平地遷至大樓樓頂測量，導致風速突然增強)，風速資料因此呈現出不連續的情形。

恆春 (圖2.4.1d) 及臺東站 (圖2.4.1f) 則於1980年前後有顯著的轉變，恆春站風速持續地略低於氣候平均，臺東站則是明顯地風速減弱，因此風速長期趨勢有較大的下降幅度。花蓮站 (圖2.4.1e) 的風速年際變化明顯和其他測站不相同，雖然1980年後風速明顯下降，但在2000年之後風速增強，是唯一一個近30年及近50年的風速趨勢值呈現出正值的測站。整體而言，百年署屬測站除了花蓮站外，風速皆減弱。

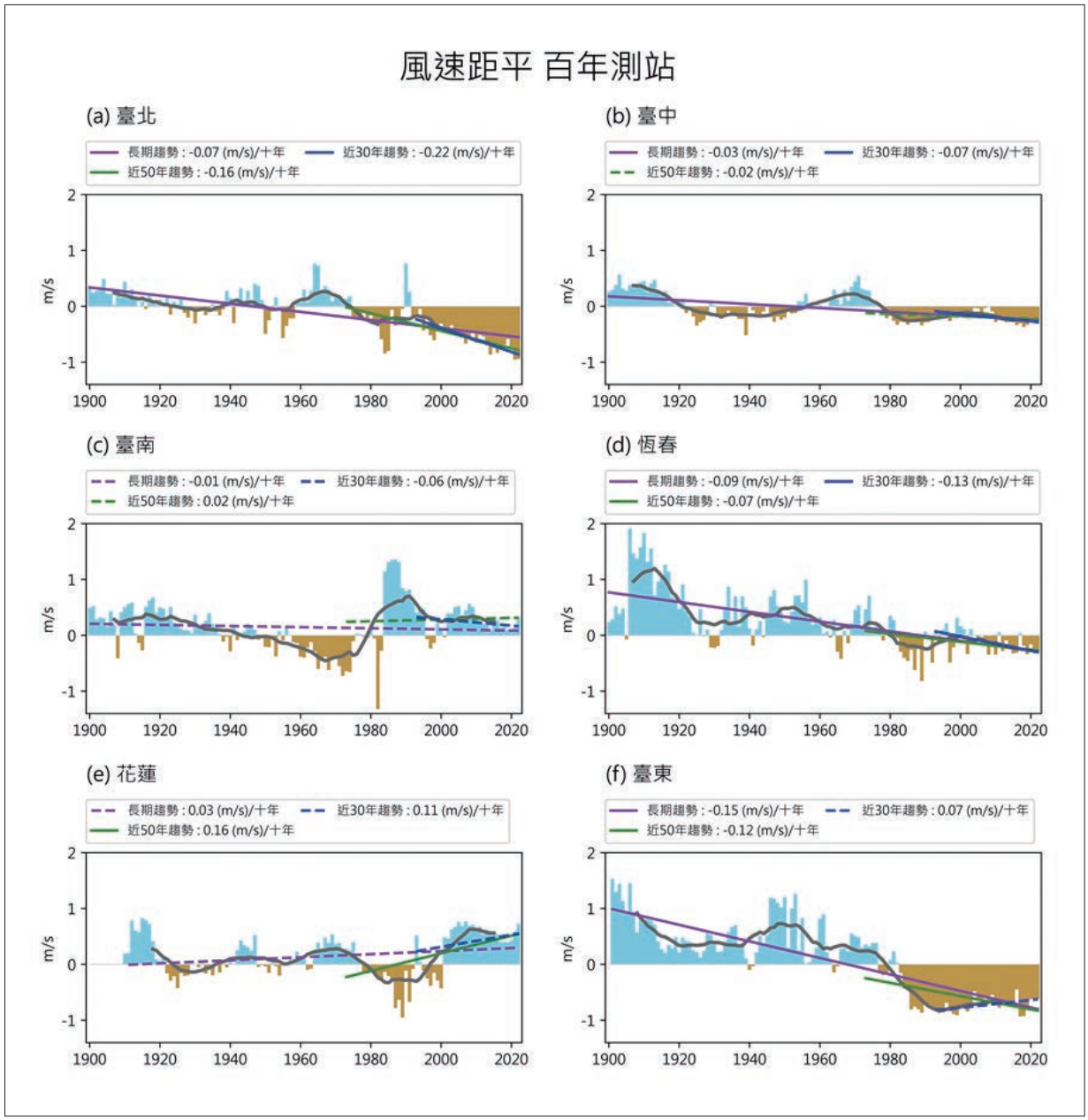


圖2.4.1　1900年至2022年6個百年署屬測站年平均風速的距平值時間序列圖。測站分別是 (a) 臺北、(b) 臺中、(c) 臺南、(d) 恆春、(e) 花蓮與 (f) 臺東測站。橫軸為年分，1900年至2022年，縱軸為相對於各測站氣候值 (1961年至1990年) 的風速距平，正距平為藍色柱狀，負距平為咖啡色柱狀，曲線為15年滑動平均值。近30年、近50年及長期 (1900年至2022年) 趨勢線分別以藍、綠及紫色表示，實線表示趨勢值通過5%顯著性檢定，虛線則未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

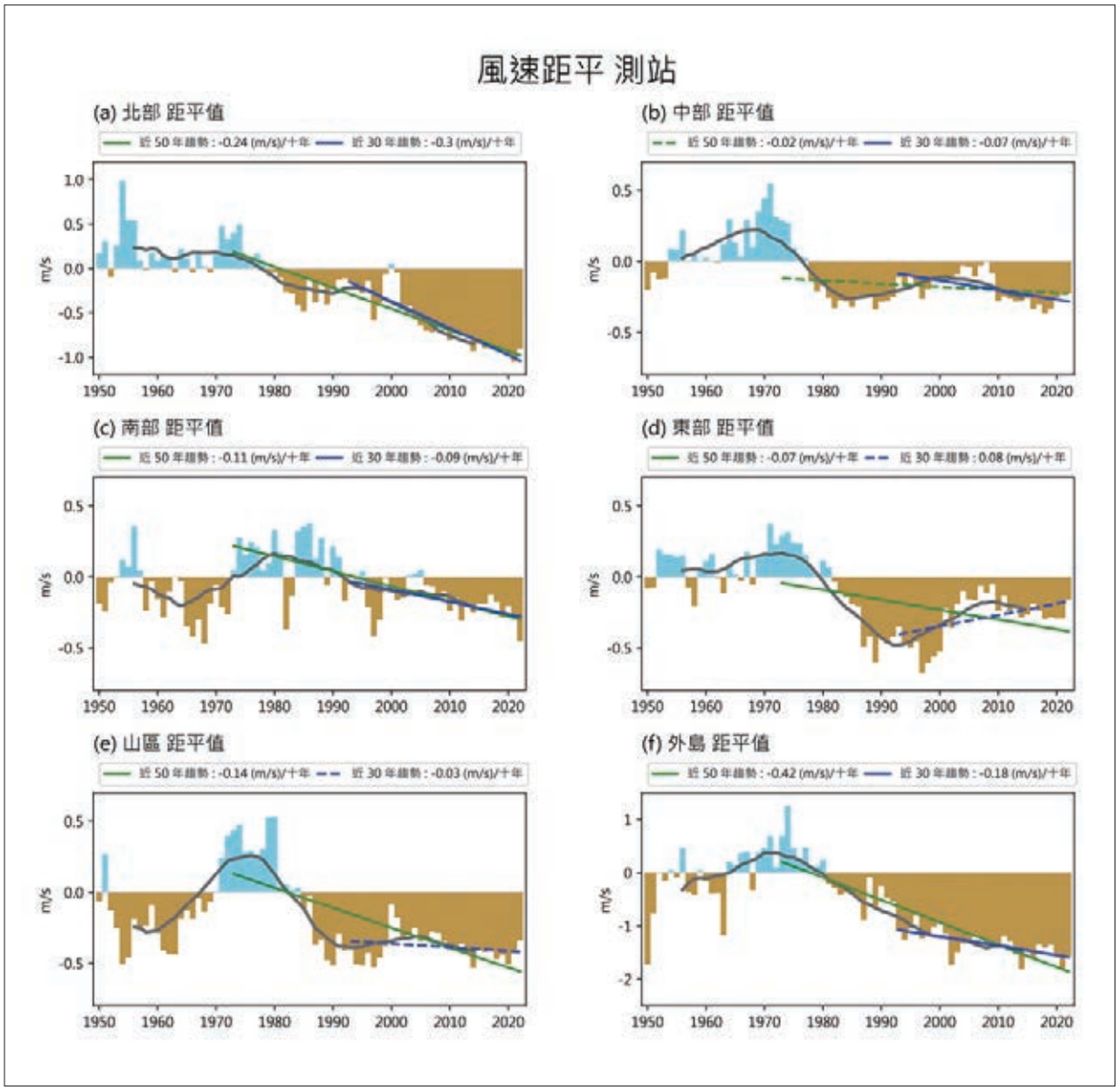


圖2.4.2　分區測站平均的年平均風速於1950年至2022年之間的變化。分別是 (a) 北部、(b) 中部、(c) 南部、(d) 東部、(e) 山區及 (f) 外島。橫軸為年分，縱軸為相對於各測站氣候值 (1961年至1990年) 的風速距平，正距平為藍色柱狀，負距平為咖啡色柱狀，曲線為15年滑動平均值。近30年及近50年趨勢線分別以藍及綠色表示，實線表示趨勢值通過5%顯著性檢定，虛線則未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

2.4.2　年最大風速

圖2.4.3為1900年至2022年6個百年署屬測站的年最大風速之距平值時間序列圖，臺北、臺中、恆春與臺東站年最大風速年際變化有相似特徵，1970年前最大風速偏大，1970年後最大風速轉為偏小，其中臺北、臺東站風速偏弱的情況較明顯。臺南及花蓮站相較於其他測站沒有明顯前後時期的正、負距平分布特性，不過從長期趨勢值可以看到皆為顯著負趨勢值。

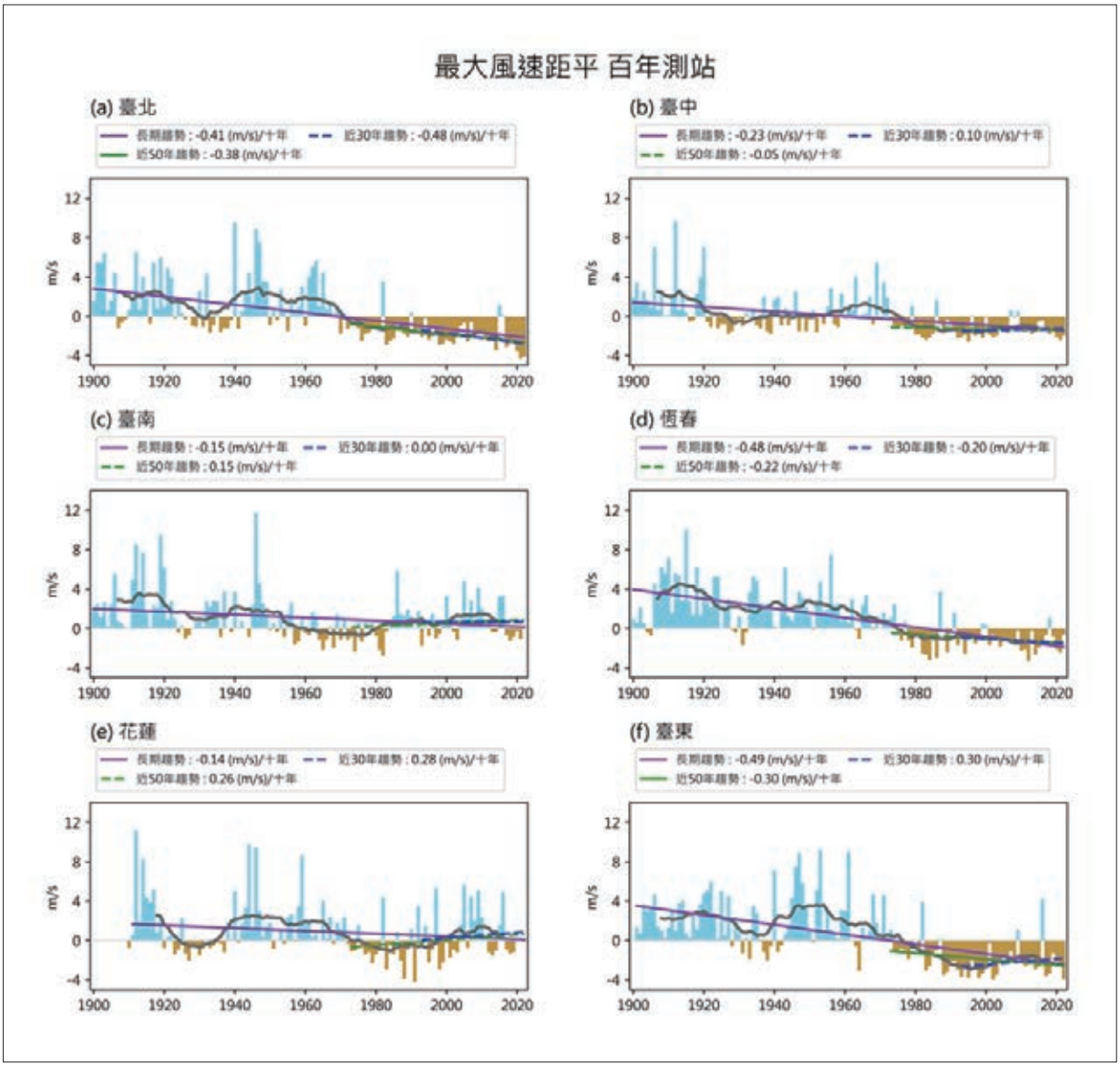


圖2.4.3　1900年至2022年6個百年署屬測站年最大風速的距平時間序列圖。分別是 (a) 臺北、(b) 臺中、(c) 臺南、(d) 恆春、(e) 花蓮及 (f) 臺東測站。風速正距平為藍色柱狀，負距平為咖啡色柱狀，曲線為15年滑動平均值。近30、近50年及長期 (1900年至2022年) 趨勢線以藍、綠及紫色表示，實線表示趨勢值有通過5%顯著性檢定，虛線則未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

圖2.4.4為分區平均的年最大風速於1950年至2022年之間的變化。可明顯看到1970年代前後有明顯風速減弱的情況，且減弱的幅度逐年增大，除中部地區近50年變化趨勢不顯著，其餘地區大部分的近30年及近50年趨勢值顯著下降，其中北部、山區及外島地區下降幅度較大。

進一步分析年最大風速在不同季節的變化，季節分別是春季、梅雨季、颱風季、秋季、冬季。圖2.4.5為6個百年署屬測站年最大風速在各季節的近30年、近50年及長期

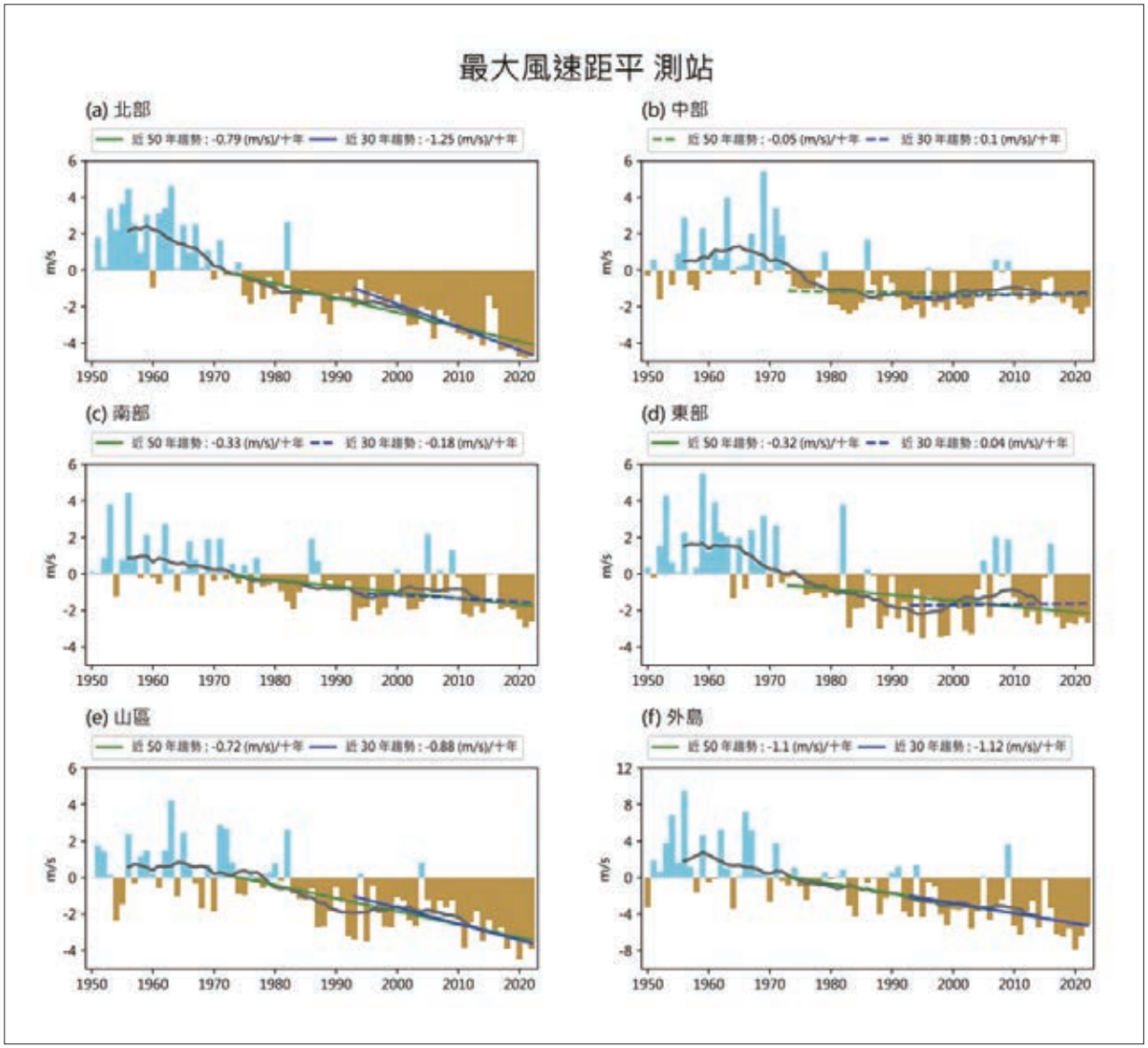


圖2.4.4　分區平均年最大風速於1950年至2022年之間的變化。分區為 (a) 北部、(b) 中部、(c) 南部、(d) 東部、(e) 山區及 (f) 外島地區。風速正距平為藍色柱狀，負距平為咖啡色柱狀，曲線為15年滑動平均值。近30年及近50年趨勢線以藍及綠色表示，實線表示趨勢值有通過5%顯著性檢定，虛線則未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

(1900年至2022年) 趨勢值，圖中顯示最大風速無論在哪個季節都呈現減小的趨勢。其中，臺北、恆春與臺東最大風速減弱的趨勢較其他測站大，而且趨勢值均通過顯著性檢定。此外，颱風季臺北與臺東站的長期趨勢負值明顯大於其他季節，恆春站颱風季的趨勢值和其他季節相似，反而是冬季有最大負趨勢值，花蓮站雖然長期趨勢有略減小情形，但近30年與近50年的趨勢值在春季、梅雨季與冬季卻是顯著增加，臺中與臺南的最大風速並無顯著性的季節變化。

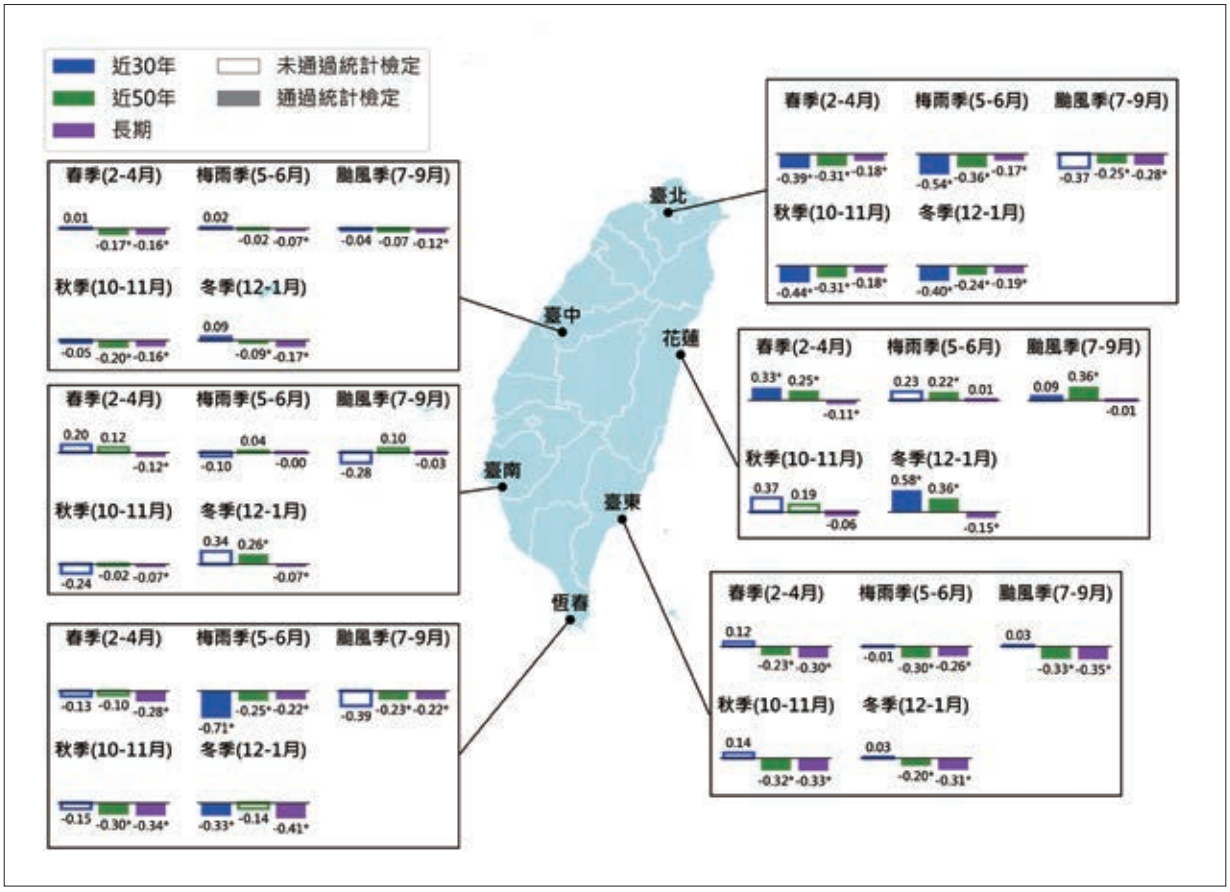


圖2.4.5　6個百年署屬測站各季節最大風速趨勢值。季節分為春季、梅雨季、夏季、颱風季及冬季。長條圖由左至右分別為近30年、近50年及長期 (1900年至2022年) 趨勢值，單位：(每10年) m s^{-1}，實心及 * 號標誌代表趨勢值通過5%顯著性檢定，空心代表未通過。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

2.5 海溫、海平面變化以及海洋酸化

海洋在氣候調節上扮演相當重要的角色，全球暖化過程中所伴隨的區域性海溫與海平面變化將對臺灣民生與海洋生態等帶來更顯著的衝擊。根據近年研究，全球海溫的增溫趨勢 (1981年至2018年) 約為每10年0.09°C (Bulgin et al., 2020)，其中臺灣周遭海域與全球平均有一致的變化趨勢 (參考圖1.2.2)，1981年至1999年大幅增溫，在1998年至2012年間短暫停滯 (暖化停滯，Warming Hiatus)，且在2010年後再度大幅增溫，幾次的大幅增溫現象都與強聖嬰現象有關 (詹森等人，2018)。在1957年至2016年間，臺灣海峽海域有明顯增溫大約1.4°C，年平均海溫增溫趨勢為每10年0.23°C，主要的增溫季節發生在冬季與春季，其中幾次快速增溫都伴隨較強的聖嬰事件 (詹森等人，2018)。另一方面，臺灣周遭海域海水溫度改變所引起的熱膨脹效應以及其他動力因素也促使海平面有所變化。

本節整理近年來臺灣周遭海域的海溫與海平面高度變化的科學文獻進展，由於臺灣周遭海域的海洋氣候變遷有顯著的空間分布與年代際的差異，我們以下將分別說明臺灣海峽、東海與西北太平洋、南海等海域的長期變遷以及臺灣周遭海域的海洋酸化趨勢。

2.5.1 臺灣海峽

臺灣海峽水深較淺 (主要水域約小於100米水深)，海水垂直分層較弱。海表溫度的空間變化大致上由南往北遞減，且東側高於西側。夏季海表溫度約29°C至30°C，最主要的溫度梯度發生在由夏季季風所引起的海水湧升區域 (Tang et al., 2002)。冬季水溫空間變化較大，較冷的大陸沿岸水南下佔據海峽西北側 (小於16°C)，與北上較溫暖的黑潮支流 (大於19°C) 約在雲彰隆起[1]附近形成一道鋒面。冬季寒冷的大陸沿岸流會由東海入侵臺灣海峽，入侵的幅度主要受到東北季風的影響 (Jan et al., 2002)，其年際變化可能因氣候變異等影響而十分顯著，並間接造成海洋生態資源的衝擊。根據觀測的海溫資料顯示 (Lee et al., 2021)，由1998年至2012年暖化停滯期間伴隨的海表增溫停滯的現象在2012年後已再被增溫取代，2012年至2018增溫趨勢約為每10年0.63°C (圖2.5.1)，增溫

1 指位於濁水溪出海口，雲林及彰化外海一帶海底隆起的高地，水深平均約 30 米至 40 米之間。

幅度仍以冬季較為顯著 (圖2.5.2)，且主要在臺灣海峽北部，研究顯示冬季顯著增溫可能與冬季海洋鋒面的推移有關。

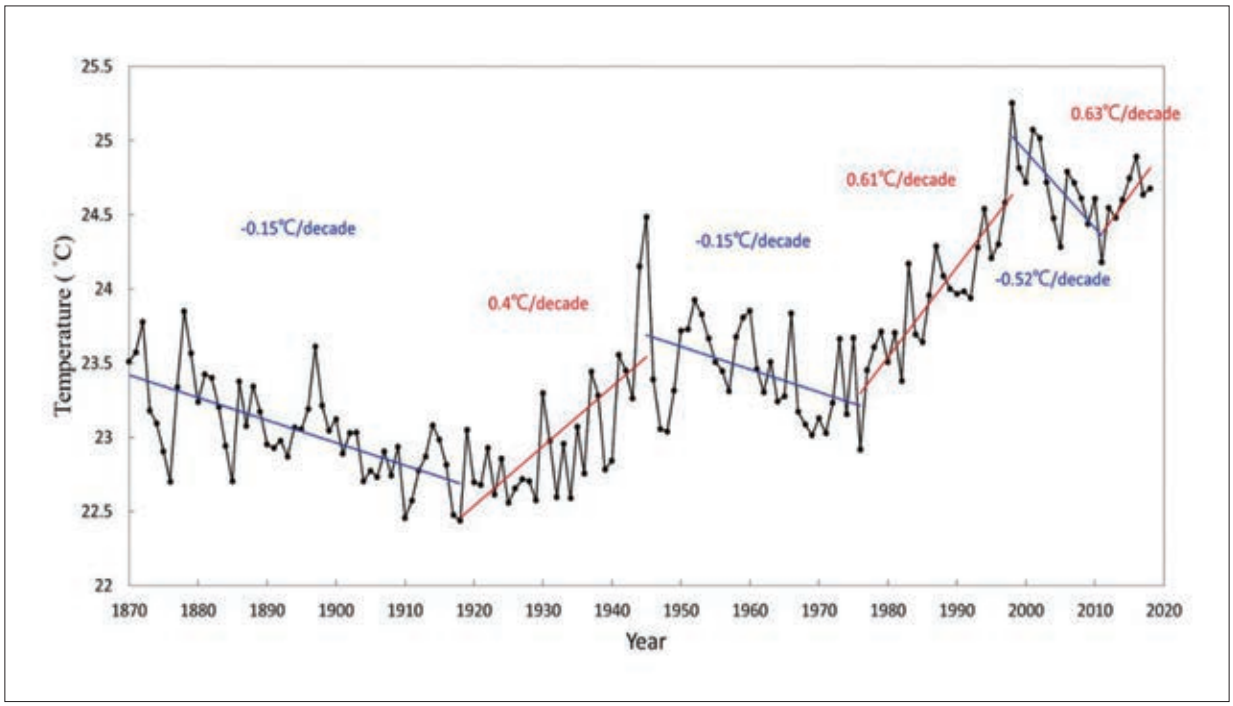


圖2.5.1　臺灣海峽長期海溫變遷趨勢。橫軸為年分，縱軸為年平均海溫。 (摘自Lee et al., 2021, Figure 4)

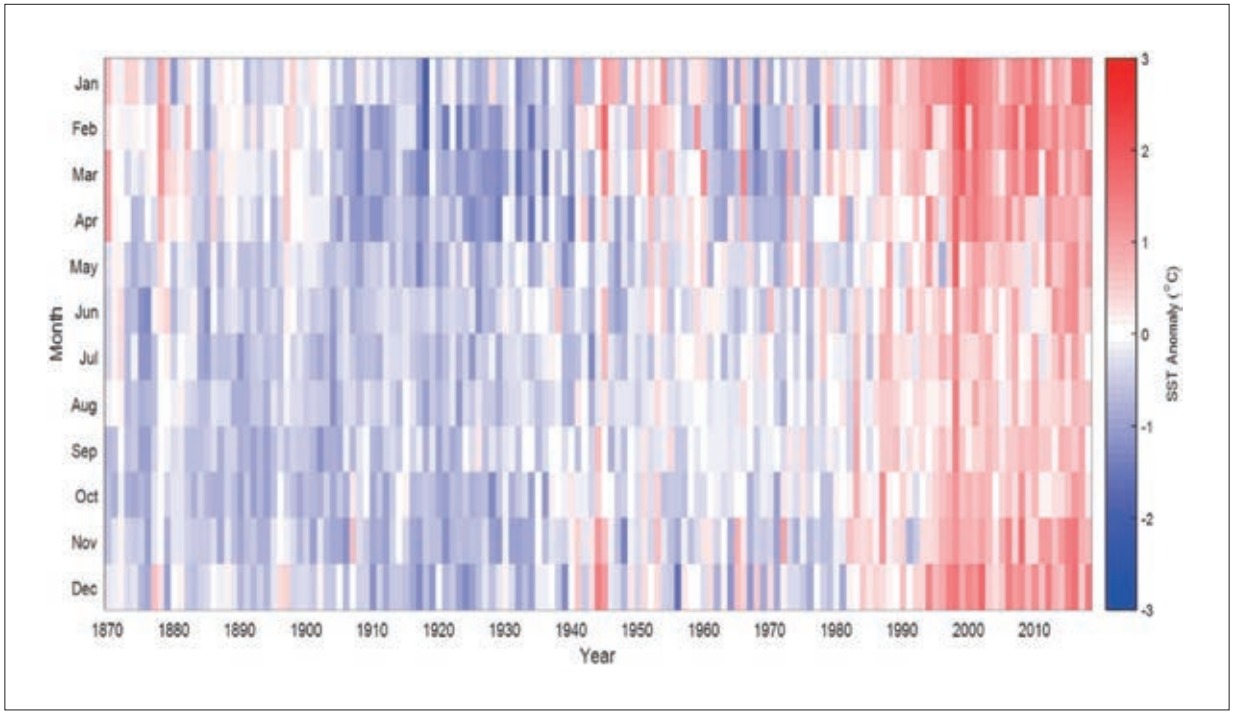


圖2.5.2　臺灣海峽月平均海表溫度距平 (參考的氣候值為1940年至1990年的月平均)。橫軸為年分，縱軸為月分。紅色表示正距平，藍色為負距平。 (摘自Lee et al., 2021, Figure 6)

臺灣位處於西北太平洋，此區域在1961年至2003年間的海平面變化率超過全球平均變化率1.5倍，海平面上升為十分重要的研究課題 (Tseng et al., 2010)。此外，部分沿岸區域因超抽地下水或過度的地表承載，也影響其海平面上升率 (Wang, 1998)。Lan et al. (2017) 利用臺灣沿海潮位站資料計算1993年至2015年間的絕對海平面高度趨勢 (absolute sea-level trends) (表2.5.1)，平均值約為每年增加2.2 ± 0.3毫米，此結果與衛星高度計數據接近，但這速率略低於1993年至2012年期間觀察到的全球平均值 (每年增加3.2 ± 0.1毫米) (Cazenave & Cozannet, 2014)。原因可能與2013年後臺灣周遭平均海平面明顯下降有關，該研究推測可能與聖嬰事件以及太平洋年代際振盪有關連 (圖2.5.3)。整體而言，臺灣周圍的長期海平面趨勢將持續受到當前和未來全球平均海平面上升的影響。

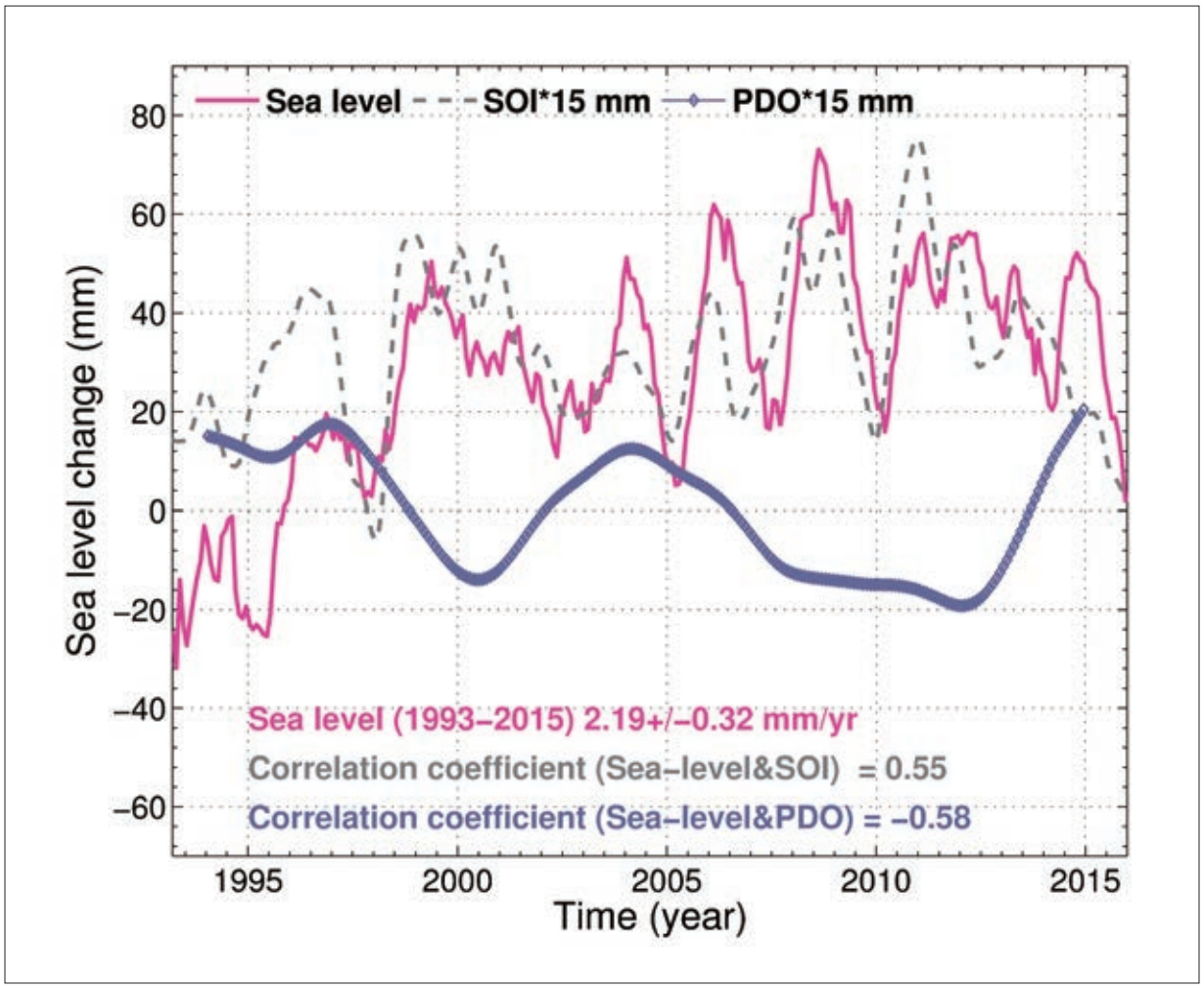


圖2.5.3 臺灣周遭海平面高度變化 (粉紅色曲線)、南方振盪指數 (灰色虛線) 和太平洋海表面溫度年代際振盪 (PDO) 指數 (藍色曲線) 於1993年至2015年間的變化。(摘自Lan et al., 2017, Figure 5)

表2.5.1 臺灣沿海潮位站資料所計算1993年至2015年絕對海平面高度趨勢 (absolute sea-level trends) (摘自Lan et al., 2017, Table 1)

Table 1. Absolute sea-level trends and vertical motion rates abtained in this study.

Station	Date Period	Coordinates		Absolute Sea-Level Trend (mm/yr)		Vertical Land Motion Rates (mm/yr)		GPS Period	Dist. (km)	*C.C.*
		Lat.(°N)	Lon.(°E)	Tide gauge (TG)	Altimetry 1993-2015	ALT-TG	GPS			
Keelung (KL)	1993-2015	25.155	121.752	2.7±0.3(±0.6)	2.3±0.3	1.5±0.5	N/A	N/A	N/A	0.73
Longdong (LD)	2001-2015	25.098	121.918	1.6±0.6(±1.1)	2.4±0.3	-2.5±0.9	-3.5±0.1	2003-2012	0.01	0.73
Gengfang (GF)	1993-2008	24.892	121.869	3.5±0.6(±0.9)	2.4±0.3	4.2±0.7	N/A	N/A	N/A	0.62
Su-ao (SA)	1997-2015	24.593	121.867	1.1±0.4(±0.6)	2.3±0.3	-5.2±0.5	-4.6±0.1	2002-2012	0.02	0.68
Hualien (HL)	1997-2015	23.981	121.624	-0.5±0.5(±1.1)	1.9±0.5	-6.2±1.0	N/A	N/A	N/A	0.25
Chenggong (CHG)	1993-2015	23.097	121.380	1.3±0.4(±1.0)	2.0±0.6	-2.1±0.9	1.5±0.1	2002-2012	0.60	0.20
Fugang (FG)	1993-2015	22.791	121.192	2.9±0.4(±0.6)	2.2±0.5	1.8±0.5	-1.2±0.1	2003-2012	0.00	0.57
Lanyu (LY)	2001-2015	22.058	121.507	1.9±1.1(±1.3)	3.0±0.5	-0.4±0.7	N/A	N/A	N/A	0.85
Houbihu (HBH)	1998-2015	21.946	120.745	1.6±0.8(±1.5)	2.5±0.5	-17.8±1.3	-23.4±0.3	2009-2012	0.32	0.23
Syunguangzui (SGZ)	1993-2015	21.986	120.712	2.4±0.4(±0.7)	2.5±0.5	-10.3±0.6	N/A	N/A	N/A	0.49
Donggang (DG)	1998-2015	22.465	120.438	2.8±0.7(±1.0)	2.2±0.4	-5.7±0.7	N/A	N/A	N/A	0.73
Kaohsiung (KS)	1993-2014	22.614	120.288	2.7±0.4(±0.6)	2.2±0.4	0.6±0.4	-0.9±0.1	2004-2012	0.01	0.82
Jiangjun (JG)	1993-2015	23.213	120.083	2.5±0.5(±0.7)	2.2±0.4	-3.1±0.5	N/A	N/A	N/A	0.69
Dongshi (DS)	1993-2015	23.450	120.139	2.4±0.5(±0.9)	2.3±0.5	-31.0±0.7	-32.4±0.1	2004-2012	0.27	0.43
Wengang (WG)	1993-2015	23.467	120.123	1.8±0.6(±1.1)	2.4±0.5	-23.5±0.9	N/A	N/A	N/A	0.43
Penghu (PH)	1993-2015	23.560	119.577	2.2±0.4(±0.6)	2.4±0.4	5.6±0.4	N/A	N/A	N/A	0.70
Boziliao (BZL)	1995-2015	23.619	120.138	2.1±0.6(±1.1)	2.5±0.5	-26.8±0.9	N/A	N/A	N/A	0.37
Taichung Port (TCP)	1993-2015	24.288	120.533	3.7±0.5(±1.2)	3.2±0.8	-3.9±1.1	-3.3±0.1	2004-2012	0.39	0.44
Hsinchu (HSC)	1993-2015	24.849	120.921	2.8±0.4(±1.2)	2.9±0.8	1.0±1.1	-3.3±0.1	2004-2012	0.42	0.23
Mean		1993-2015		2.2	2.2±0.3	-6.5	-7.9	2002-2012	0.23	0.54

Note: Lat. and lon. represent latitude and longitude, respectively. N/A represents no GPS station close to the tide guage sites. The positive value in vertical land motion represents uplift, and negative means subsidence. *C.C.* refers to correlation coefficient. Column 5 regarding TG estimates shows two kinds of standard deviations; one is calculated by least squares adjustment,and the other in brackrts is calculated using the standard deviations of the relative sea-level trends and vertical land motion rates by error propagation theory.

2.5.2 東海與西北太平洋

西北太平洋海域裡最重要的環流系統是流經臺灣東岸、經過東海到日本再向東轉向的黑潮，流速極快的黑潮能夠大量輸送低緯度熱能至中高緯度，在大氣與海洋的氣候調節扮演重要角色 (1.3.1節)。東海與西北太平洋海溫變化主要受到海洋平流和海氣熱通量影響，研究指出，冬季東海長期增溫 (每年增加0.067 ± 0.03°C) 的過程中除了受到海氣熱通量的作用，黑潮水入侵的增加也有同樣重要的影響 (Oey et al., 2013)。

Wang et al. (2019) 利用NOAA OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) 研究1982年至2011年間東海海表溫度的變化，結果顯示年平均海表溫度以每10年0.21 ± 0.08°C 的速率顯著增加，每年最低和最高海溫也有顯著的變暖趨勢 (圖2.5.4)。以空間上而言，年平均海溫快速增溫的區域位於長江口附近。以季節來說，冬季的增溫比夏季明顯。雖然夏季海表溫度的長期趨勢不顯著，但夏季海表溫度呈現相當大的年際變化 (Kuo et al., 2023)。

另外，Xu et al. (2015) 利用衛星測高計及潮位站資料研究東海與黑潮長期的海平面高度變化，研究發現黑潮主軸東側的海平面上升速率高於西側，且由於黑潮的屏障作用，使西北太平洋與東海陸棚區的海平面高度變化相關性偏低。整體而言，平均海平面於1993年至2010年間上升45.0毫米，上升速率為每年2.5 ± 0.4毫米，低於全球平均上升速率，相對較慢的海平面上升速率可能是受到區域性海洋系統的影響。Yuan et al. (2021) 利用多衛星資料及模式校正產製高解析度 (經緯度1分網格) 長期海平面變遷資料，結果顯示在2013年至2019年間西北太平洋邊緣整體海平面上升趨勢約為每年2.55毫米至3.42 毫米 ，並透過高解析度資料進一步指出在大陸沿岸有較高的海平面上升趨勢，可達每年6 毫米 (圖2.5.5)。

2.5.3 南海

呂宋海峽位於臺灣南側與菲律賓呂宋島間，黑潮於菲律賓東方北流至此時常入侵至南海，在冬季此現象伴隨顯著海表溫度鋒面 (Chang et al., 2022)，由東側黑潮入侵區向西遞減，然而此梯度在夏季並不顯著 (Yuan et al., 2006)，黑潮入侵北南海帶來的熱通量對冬季南海海盆的熱容量 (溫度) 平衡扮演重要的角色 (Qu et al., 2004)。

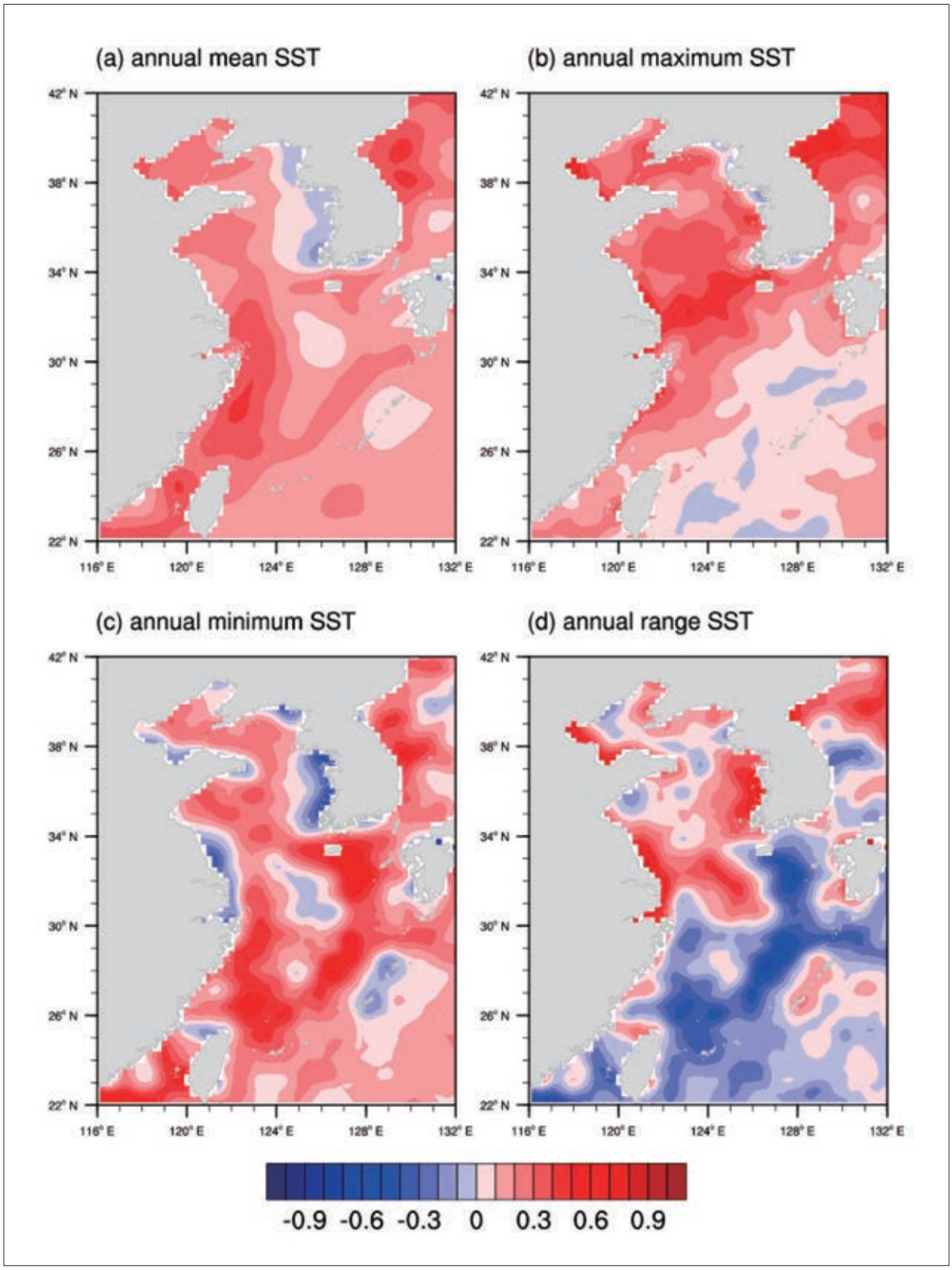


圖2.5.4　東海海表面溫度於1982年至2011年間的線性趨勢空間分佈 (單位：°C decade^{-1})。(a) 年平均海表面溫度，(b) 海表面溫度年最大值，(c) 海表面溫度年最小值，(d) 海表面溫度年溫差。(摘自Wang et al., 2019, Figure 5)

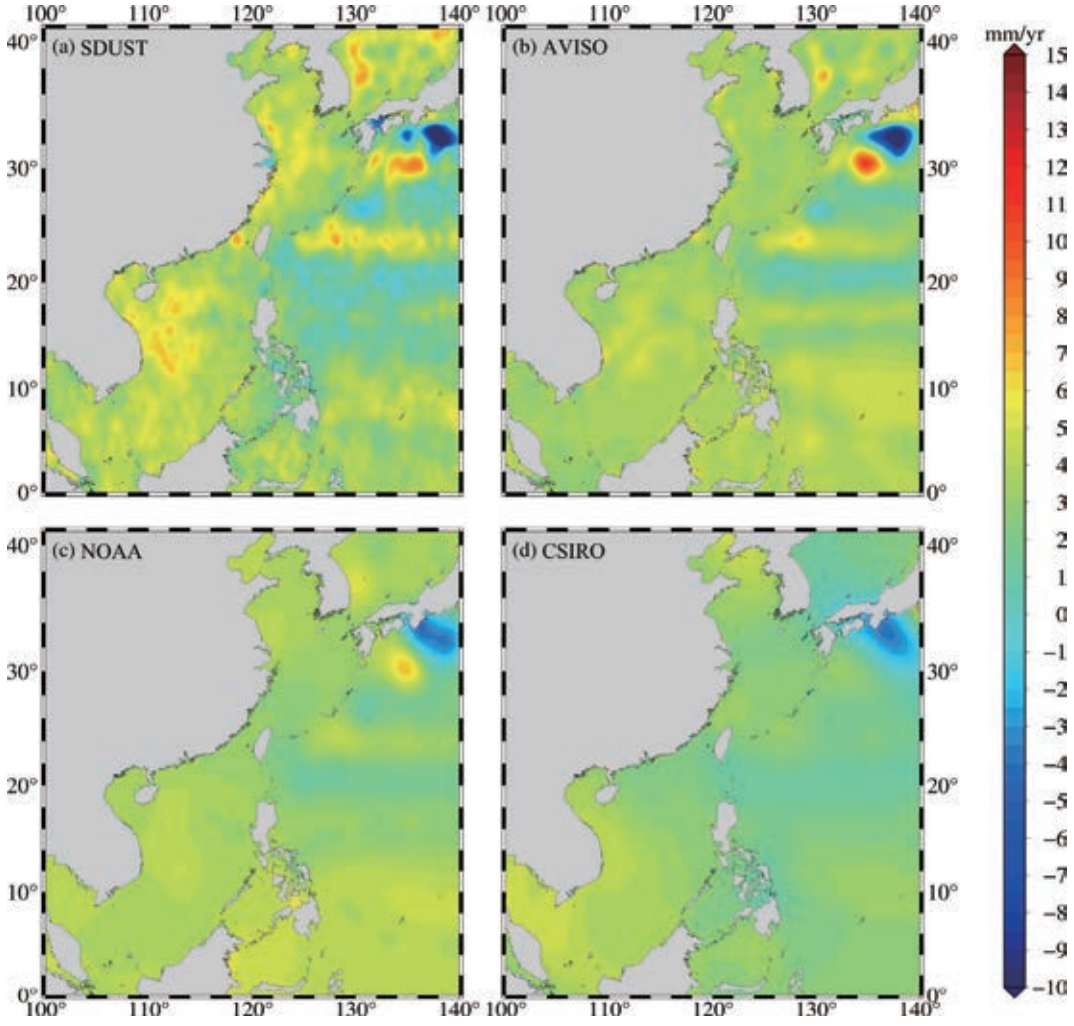


圖2.5.5　臺灣黑潮及其鄰近海域1993年至2019年間海平面高度變化趨勢。(a) 山東科技大學產製高解析度 (經緯度1分網格) 資料，(b) AVISO多衛星測高儀資料 (經緯度15分網格)，(c) 美國大氣與海洋局衛星測高儀實驗室產製資料 (經緯度30分網格)，(d) 澳洲聯邦科學與工業研究組織 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) 產製資料 (經緯度60分網格)。(摘自Yuan et al., 2021, Figure 3)

南海在1970年至1998年間海表增溫速率約為每年0.015°C，然而此增溫現象在1999年後有停滯的現象 (圖2.5.6)。Jiang et al. (2021) 研究發現這個增溫停滯現象與南海增強的冬季季風有關，此現象類似反聖嬰期間因增強的沃克環流使西北太平洋的反氣旋環流增強，這個增強的冬季季風是減緩南海盆地尺度變暖的大氣驅動力。大尺度氣候變異所伴隨的季風異常可能會受到黑潮入侵南海伴隨的熱通量變化，進一步將太平洋大尺度海

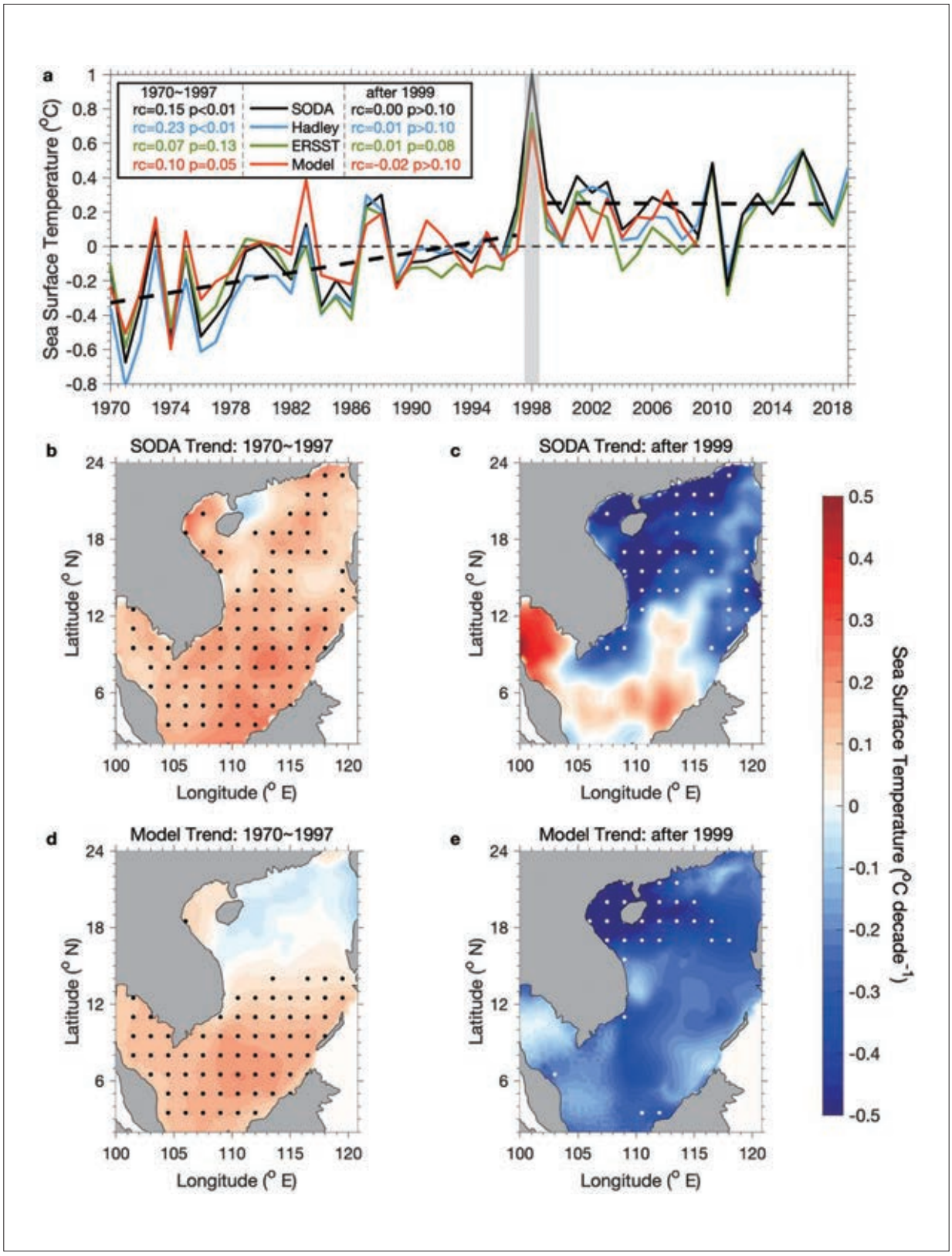


圖2.5.6　南海海表面溫度變化與趨勢的空間分布。(a) 為時間序列，黑色、藍色及綠色分別為3種再分析資料，紅色為模式模擬；(b) 為SODA再分析資料於1970年至1997年間的海表面溫度趨勢；(c) 為SODA再分析資料於1999年後的趨勢；(d) 為模式模擬於1970年至1997年間的趨勢；(e) 為模式模擬於1999年後的趨勢。(摘自Jiang et al., 2021, Figure 1)

溫變異的訊息傳入南海海盆 (Qu et al., 2004)，呂宋海峽的海水通量在1999年至2005年有增強的現象 (Chen et al., 2020; Wei et al., 2016)，此現象進一步增強北南海上層海洋的氣旋式環流，增加南北間的海水混和，間接造成北南海增溫的停滯，此發現對未來南海和鄰近海洋的氣候預測可能有重要影響 (Jiang et al., 2021)。

Li et al. (2002) 利用TOPEX/Poseidon衛星測高資料研究1993年至2000年間南海的海平面變化趨勢，他們發現在淺層大陸棚海平面上升速率普遍較低，整體約為每年10毫米、最高上升速率發生在呂宋島西部約為每年增加27毫米。海平面的快速上升可歸因於南海上層海洋的迅速增溫。海平面變化具有季節差異，從1993年至2016年衛星資料可發現4月至9月海平面增高趨勢較大，10月至3月較小 (參考Fu et al., 2019, Figure 5)，整體平均海平面上升趨勢減緩為每年4.42 ± 0.25毫米 (Fu et al., 2019)。研究指出南海的海平面變化趨勢與南方振盪指數 (Southern Oscillation Index, SOI) 以及PDO有高度相關性，在反聖嬰期間或PDO負相位期間，南海海平面有正的距平值 (Wang et al., 2017; Fu et al., 2021)，而1993年至2000年之間PDO由正相位轉為負相位，因此這段期間海平面上升趨勢較大 (每年11 毫米 , Cheng & Qi, 2007)。

2.5.4 海洋酸化

海洋酸化源自工業革命後大氣的二氧化碳濃度不斷上升，大約每年有將近三分之一的人為二氧化碳排放透過海氣交換進入海水中 (Sabine et al., 2004)。海水與二氧化碳作用形成碳酸 (H_2CO_3)，其中一部分的碳酸會再解離，形成碳酸氫根 (HCO_3^-) 與碳酸根 (CO_3^{2-})，此三項統稱溶解態無機碳 (dissolved inorganic carbon, DIC)。同時碳酸解離過程會釋放出氫離子 (H^+)，降低pH值。因此全球二氧化碳的增加將使海水pH降低、降低碳酸鈣飽和度 (Ω)，使得由碳酸鈣材質構成殼體的生物有溶解的危機、造成海洋生態的可能危害 (Doney et al., 2009)。(註：當Ω>1時，海水碳酸鈣礦物過飽和狀態，因此利於其在海水中產生固態沉澱；當Ω=1時，海水的碳酸鈣礦物處於平衡狀態；當Ω<1時，碳酸鈣礦物處於未飽和狀態，不利於其在海水中沉澱，反而易使其在海水中溶解。)

上述大氣進入海洋的二氧化碳海氣交換總量受控於大氣與海洋的二氧化碳分壓 (pCO_2) 差值 ($dpCO_2$)，當大氣二氧化碳增加，透過海氣交換進入海洋也會增加pCO_2 。影響海水pH值主要因素，除了海氣交換主要還有溫度的變化以及生物分解。溫度上升會使海水中的

溶解態無機碳以及氫離子增加，生物分解則消耗氧氣產生二氧化碳，增加pCO_2，降低pH值，形成酸化現象。在生物與物理過程大致維持不變的情形下，全球大洋的pCO_2多半與大氣二氧化碳分壓同步增長 (~2μatm yr^{-1}) (Sutton et al., 2017)。而二氧化碳分壓 (pCO_2) 則與pH呈反向關係，因此大洋海水酸化速率大約類似，介於-1.6×10^{-3}至-1.8×10^{-3} pH unit yr^{-1} (Lui & Chen, 2015)，酸化的程度主要受控於每年大氣中的二氧化碳增長速率 (~2μatm yr^{-1})。然而大陸邊緣海域附近因其流場複雜，生產力較強，此區域碳化學 (carbonate chemistry) 更易受到區域的生物與物理 (bio-physical) 的過程所影響而與大洋有所不同，因此pCO_2增長與酸化速率皆常與大洋有所不同 (Laurelle et al., 2018; Ma et al., 2023) (圖2.5.7)。

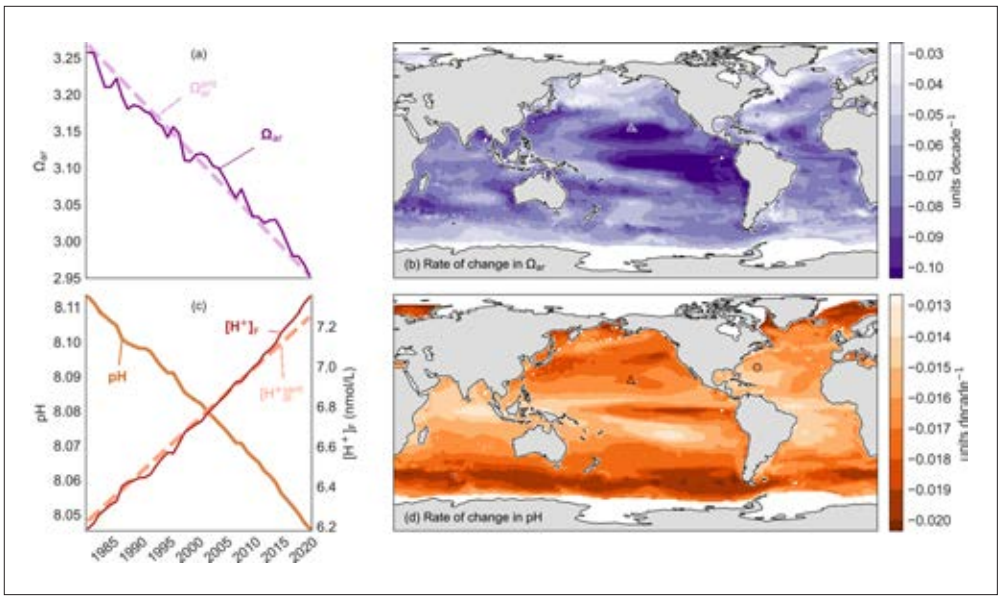


圖2.5.7　全球海水 (a) 霰石飽和度 (aragonite saturation state, Ωar) (註：霰石是一種碳酸鈣礦物) 在1982年至2021年間的時間變化。(b) 霰石飽和度的空間分布趨勢。(c) pH值與氫離子 (H^+) 在1982年至2021年間的時間變化。(d) pH值的空間分布趨勢。(摘自Figure 2, Ma et al., 2023)

臺灣附近的東海與黑潮區域，因東海底層受黑潮中層影響 (Kuroshio Intermediate Water)，其漸增強的生物生產力與次表層海水的分解作用使pH值遞減較大洋快 (Liu et al, 2015)。至於表層海水，東海之黑潮區域因為近年東亞邊緣海域暖化速率較快，表層海水酸化速率也因此顯著高於其他大洋區域 (Tsao et al., 2023)。不過臺灣附近海域pH值資料缺乏長期且連續的觀測資料，根據Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) (http://marine.copernicus.eu/) 提供Global Ocean Biogeochemistry Hindcast (GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029) 資料顯示，於1993年至2020年間臺灣附近海域 (21°N至27°N, 118°E至124°E) 海洋酸化速率約1.7× 10^{-3} pH unit yr^{-1}。

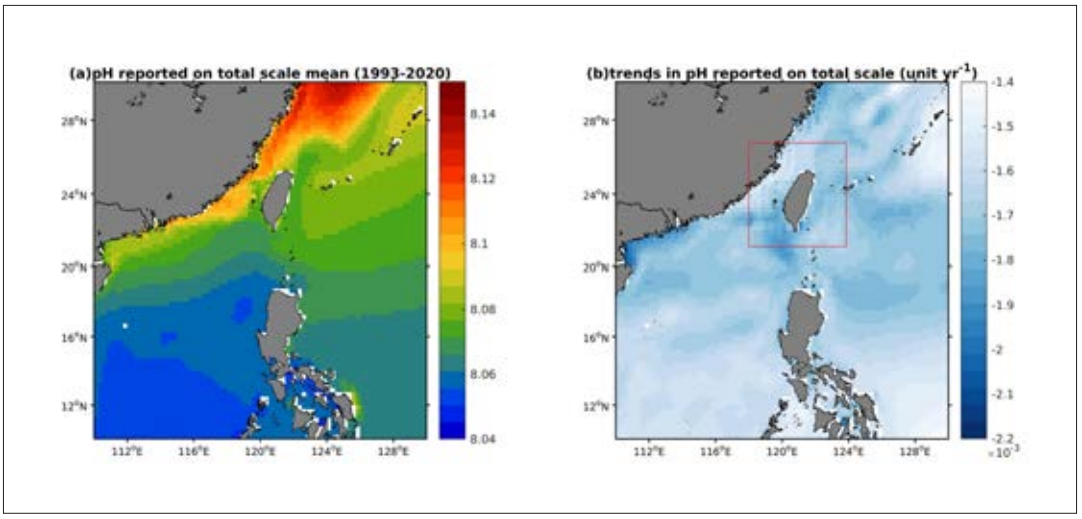


圖2.5.8 臺灣附近海域表層pH值於1993年至2020年間 (a) 平均值 (b) 線性趨勢變化。紅框區域平均值為1.7×10^{-3}pH unit yr^{-1}。資料來源為Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) Global Ocean Biogeochemistry Hindcast (GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029) (http://marine.copernicus.eu/) (資料來源：本報告產製)

未來臺灣周遭海域的酸化速率將取決於大氣二氧化碳是否持續快速增加、以及此海域是否仍以較快速率暖化、伴隨沿岸優養化 (eutrophication) 與海洋低氧區 (hypoxia) 是否增加與擴大，然而這些部分需要高解析度臺灣附近海域生地化與物理耦合模型進行更可靠的模擬驗證與確認。過去以全球模式研究預估南海、東海、日本海等邊緣海域其酸化情形都將持續，碳酸鈣飽和度可能在未來60年至350年下降至低於1 (Luo and Boudreau., 2016)。若真達此狀態碳酸鈣生物殼體將有溶解之危機、恐怕將構成海洋生態的危機。

2.6 極端天氣與氣候

本節探討臺灣過去百年來極端天氣之長期趨勢、變化特徵及氣候特性等，使用相關氣候指標及氣象署測站資料呈現極端高、低溫度及降雨的變化趨勢。接著針對容易造成極端溫度及降雨的特定天氣現象分析，包含乾旱事件、寒潮、颱風、午後對流及梅雨，除了使用氣象署測站資料，也使用TCCIP網格化降雨資料、再分析資料等。Tung et al. (2022) 比較TCCIP網格化降雨資料與鄰近氣象署測站資料，發現兩組資料的時空相關性高，但夏季 (6月至8月) 平均日雨量在西南部迎風面山區仍有蠻大的不確定性；秋季 (9月至11月) 則在中央山脈東側山區有較大不確定性。極端降雨指標 (RX1day、RX5day、R99pTOT、SDII) 兩組資料的相關性超過0.8。由於TCCIP網格資料的雨量分布

較為均勻，RX1day、RX5day、R99pTOT有被低估的傾向，而CDD則有被高估的傾向。

2.6.1　極端高、低溫

本節使用4種與溫度相關之氣候變遷指標 (Peterson, 2005) 分析氣象署測站資料 (圖2.6.1)，以暖晝天數 (TX90p)、冷晝天數 (TX10p)、暖夜天數 (TN90p) 及冷夜天數 (TN10p) 代表極端高、低溫的變化 (計算方式參考文字框 6｜極端指標定義)。為了避免遇到參考時期不連續性問題，參考Zhang et al. (2005) 方法以留一方法 (leave-one-out)對參考時期1961年至1990年區間做指標計算，並扣除各測站氣候值 (1961年至1990年)來計算距平值。

白天達到高溫門檻的日數 (極端暖晝，圖2.6.1a) 及夜晚達到高溫門檻的日數 (極端暖夜天數，圖2.6.1b)，無論是百年署屬測站或是各區域平均的時間序列均顯示近10年來，超過的日數大幅增加，尤其夜晚達到高溫門檻的日數增加最為明顯。各區域夜晚的極端高溫日數在1995年後明顯增加，且年際變化大，尤其是中部與南部地區。整體而言，夜間的高溫日數增加較白天明顯。在冷晝天數 (TX10p) (圖2.6.1c) 與冷夜天數 (TN10p) (圖2.6.1d) 的長期時間序列圖中顯示，相較於極端高溫指標，各區域的年際變化較小。極端冷晝指標在2000年後才有明顯的日數下降趨勢，但極端冷夜指標則有長期明顯的日數下降趨勢。更詳細的分析同樣可以參考中央氣象署之「1897-2020臺灣氣候統計圖集」。

2.6.2　極端降雨、乾旱

本節以氣象署測站資料分析暴雨及氣象乾旱現象並彙整與臺灣氣象乾旱相關的科學報告及研究成果。暴雨分析依氣象署雨量分級，以大雨、豪雨及大豪雨門檻值為標準，分別計算R80mm、R200mm及R350mm之日數 (參考文字框 6｜極端指標定義)。氣象乾旱則以年最長連續不降雨日數 (maximum number of Consecutive Dry Days, CDD) 及標準化降雨指標 (Standardized Precipitation Index, SPI; McKee et al., 1993)，又稱氣象乾旱指標，分別做分析探討。CDD扣除各測站氣候值 (1961年至1990年) 以距平值來呈現。SPI使用6個百年署屬測站的12個月累積雨量計算，表示為SPI12。當SPI指數小於0則表示累積雨量低於氣候狀態，小於-1即定義為各種不同程度的乾旱，一般來說小於-2即為非常嚴重之乾旱。

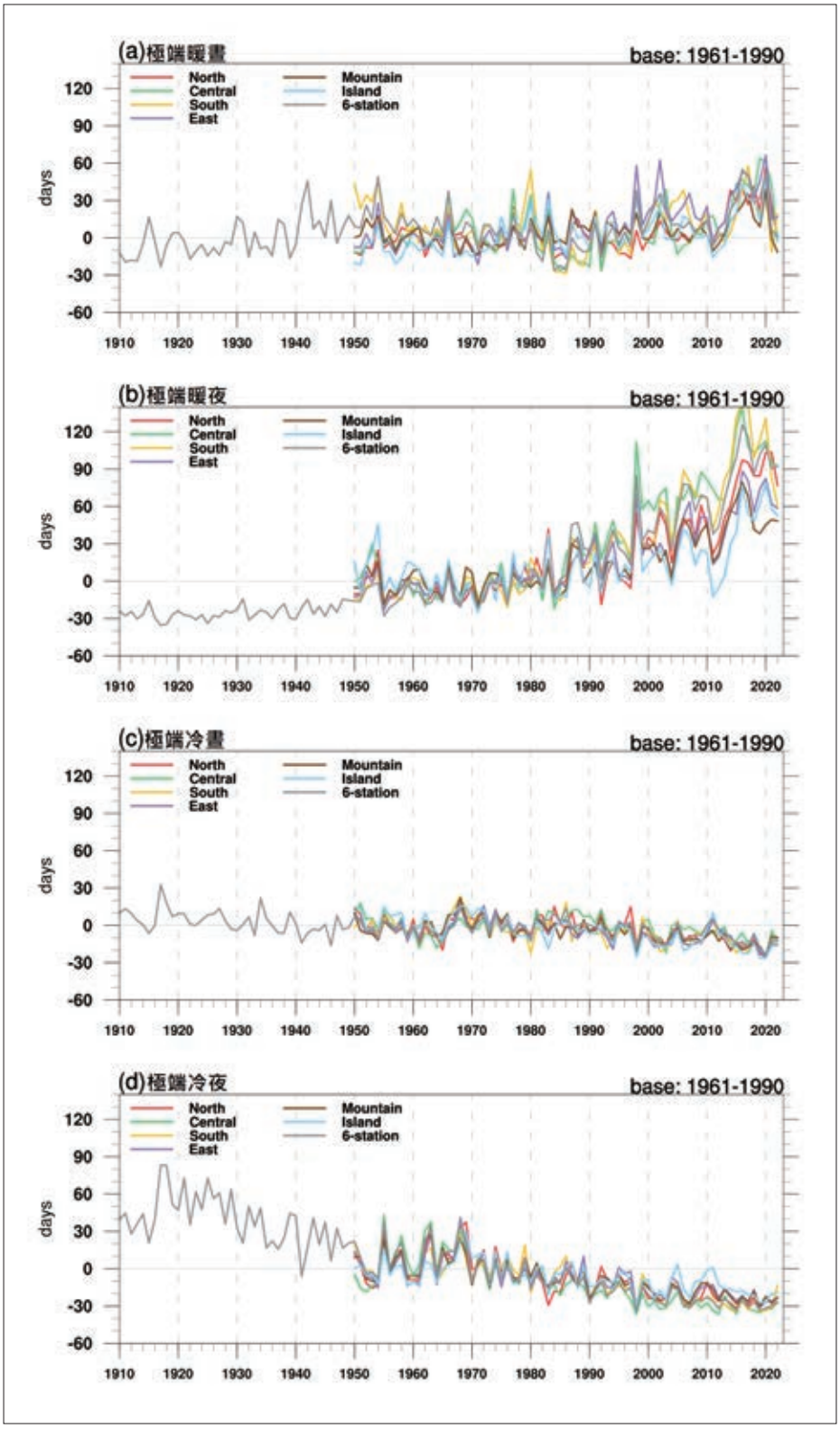


圖2.6.1　極端溫度指標。(a) 暖晝天數 (TX90p)、(b) 暖夜天數 (TN90p)、(c) 冷晝天數 (TX10p)、(d) 冷夜天數 (TN10p) 指標之距平時間序列圖，各測站氣候值為1961年至1990年之平均。線條顏色分別代表北部 (紅色)、中部 (綠色)、南部 (黃色)、東部 (紫色)、山區 (咖啡色)、外島 (淺藍色) 及6個百年署屬測站 (灰色) 數值。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

圖2.6.2為大雨、豪雨、大豪雨日數的逐年變化。由大雨日數可知，各地區的大雨日數年際變動幅度較大，無一致性的變化，亦沒有顯著的長期變化趨勢。在豪雨與大豪雨日數的時間序列分析上，都可以看到山區的年際變化較為顯著，而且於2000年後日數的距平值有增加的情形。

圖2.6.3為年最長連續不降雨日數 (CDD) 的逐年變化，圖中明顯看到年最長連續不降雨日並無長期變化趨勢，其中，中部、南部測站較其他地區有明顯正、負距平值。南部地區的無雨日數在近10年比前期有日數偏少現象。百年測站中僅臺北及恆春的百年趨勢通過5%顯著性檢定，分別為每10年增加0.26天及0.7天 (參考「1897-2020臺灣氣候統計圖集」)。圖2.6.4為6個百年測站SPI12的時間序列，各測站並無顯著長期上升趨勢。其中，臺北站在1995年之後SPI12的振幅有增大的跡象；臺南、恆春及臺東站在1960年之後SPI12數值小於-2發生的次數較多，代表這3個測站的乾旱事件發生頻率在近期明顯增多。

臺灣氣象乾旱事件發生的頻率具有明顯區域特性及低頻振盪特徵。洪致文與施明甫 (2017) 定義「臺灣氣象乾旱指數[2]」並分析臺灣歷年氣象乾旱事件，發現其氣候特徵為夏季乾旱發生頻率最低，而秋季至隔年春季則有相對較高的乾旱發生頻率。秋季在1980年代後發生乾旱的頻率增加。此外，受PDO相位影響，1950年至1970年代屬於少雨期，因此冬季及春季在1970年代前乾旱發生頻率較高。陳昭安等人 (2023) 亦指出臺灣最常發生乾旱的季節，並非原本就少雨的冬季，而是發生在春季。乾旱發生的區域，以中南部最多，其次是北部，東部最少。翁叔平與楊承道 (2013) 以臺灣測站降雨資料計算標準化降雨蒸發散指數[3] (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010) 分析臺灣百年來的乾濕變化特徵，發現有3種區域型態：(1) 以臺灣西部平原為主的西部型，此型態在1960年代後有一致性的變乾轉折；(2) 局限在北部海岸的北部型，此型態在1970年代中期後有變濕的轉折；(3) 花東縱谷一帶的東南型，在1960年代後變乾，同時有相對明顯的來自降雨的多年代乾濕交替變化。他們認為3種型態的乾濕轉折都與溫度距平的變化相關，此溫度變化則與大尺度環流的改變相關。此研究指出之乾濕變化特徵與使用6個百年署屬測站的SPI12結果一致 (圖2.6.4)。

2　「臺灣氣象乾旱指數」採用臺灣全島低於或等於海拔 150 公尺的平地觀測站雨量資料，藉由 90 天窗區內連續不降水日數的計算，以超過歷史數據一個百分化的標準，來測定在這個窗區內的乾期發生時間。

3　修改自標準化降雨指數，加入以測站溫度推算的地表潛在蒸發散量來計算。

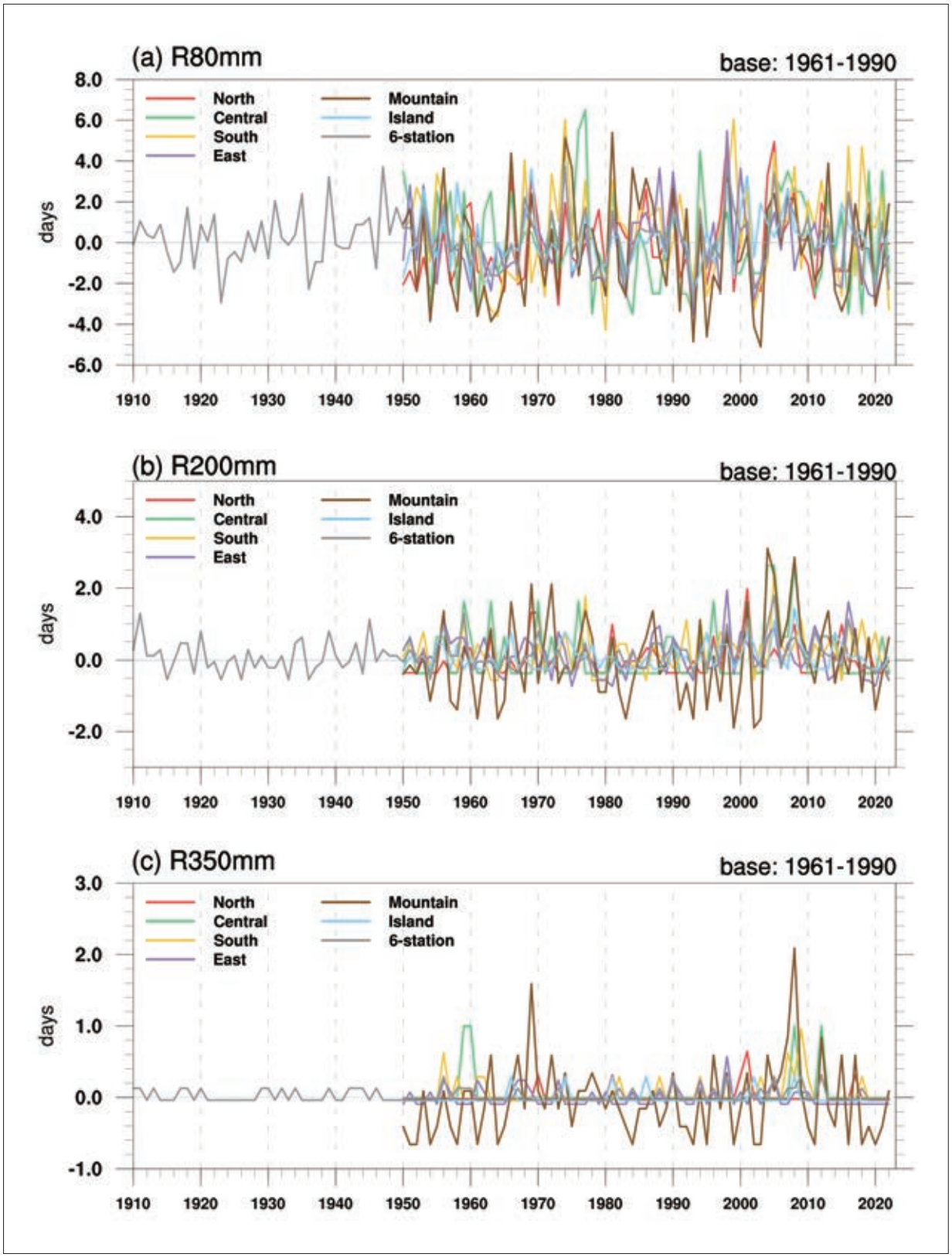


圖2.6.2　自1910年至2021年每年雨量超過 (a) 大雨門檻80毫米、(b) 豪雨門檻200毫米及 (c) 大豪雨門檻350毫米總日數之距平時間序列圖。各測站氣候值為1961年至1990年之平均。線條顏色分別代表北部 (紅色)、中部 (綠色)、南部 (黃色)、東部 (紫色)、山區 (咖啡色)、外島 (淺藍色) 及6個百年測站 (灰色)。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

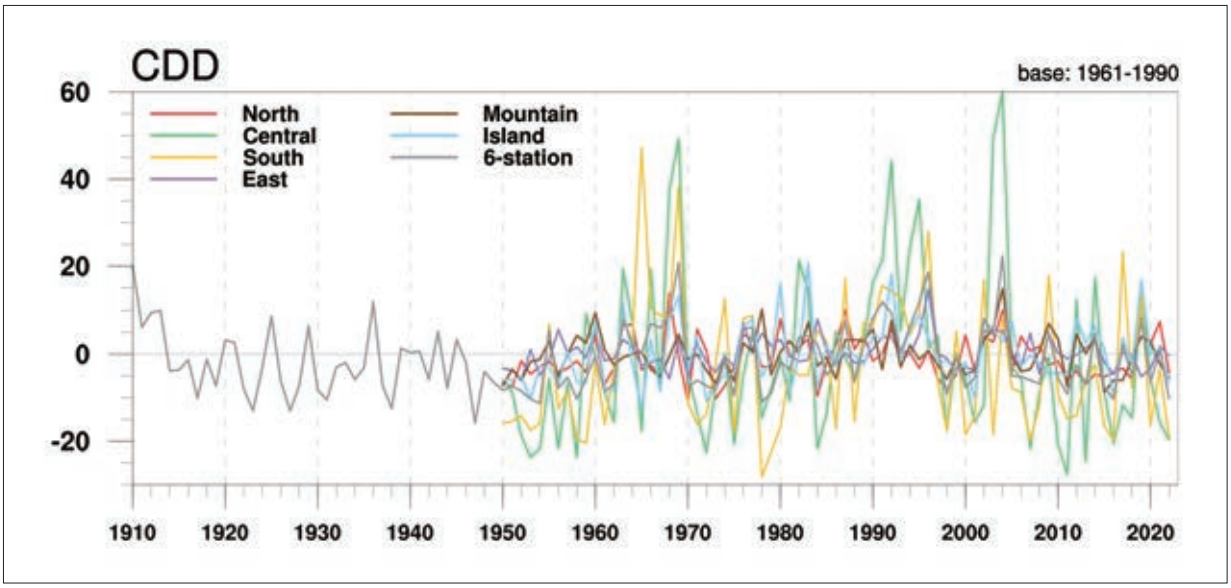


圖2.6.3　自1910年至2021年每年連續不降雨日數之距平時間序列圖。氣候值為1961年至1990年之平均。線條顏色分別代表北部 (紅色)、中部 (綠色)、南部 (黃色)、東部 (紫色)、山區 (咖啡色)、外島 (淺藍色) 及6個百年署屬測站 (灰色)。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

臺灣氣象乾旱的發生主要受到大尺度環流影響，且有季節上的差異 (卓盈旻與盧孟明，2013；陳昭安等人，2023)。冬季及春季受冬季季風強弱及熱帶對流系統 (季內振盪) 活躍程度影響 (卓盈旻與盧孟明，2013)。春季同時也受到太平洋副高影響 (陳昭安等人，2023)，當副高較弱時，菲律賓東方海面會出現氣旋式環流距平，此時臺灣附近的低層風場相對於季節平均呈現東北風距平，將帶來較乾冷的空氣，使原本春季盛行西南風減弱，不利春雨發展。發生在梅雨季及颱風季的氣象乾旱，主因是副熱帶高壓明顯增強且西伸，臺灣上空受到反氣旋式環流距平影響，大氣環境較為乾燥與穩定，不利天氣系統發展與降雨 (卓盈旻與盧孟明，2013；陳昭安等人2023)。

2020年至2021年臺灣發生百年來最大型的乾旱，對農業產生嚴重衝擊，可參考朱容練等人 (2022) 與黃紹欽等人 (2022) 彙整的乾旱事件歷程。李明營等人 (2023) 針對百年大旱事件分析，指出百年大旱不是單一因素造成的極端事件，而是許多因素同時出現的複合現象。在2020年6月至9月受到極端偏強的副熱帶高壓影響，秋、冬兩季則受到反聖嬰及菲律賓海偏暖影響。延續到了2021年春季，主要因為菲律賓海海溫偏暖，再加上部分PDO負相位的影響，2021年3月至5月則受到熱帶季內振盪影響。

綜合而言，過去研究皆指出臺灣的氣象乾旱具有明顯的區域差異及季節特徵，並明

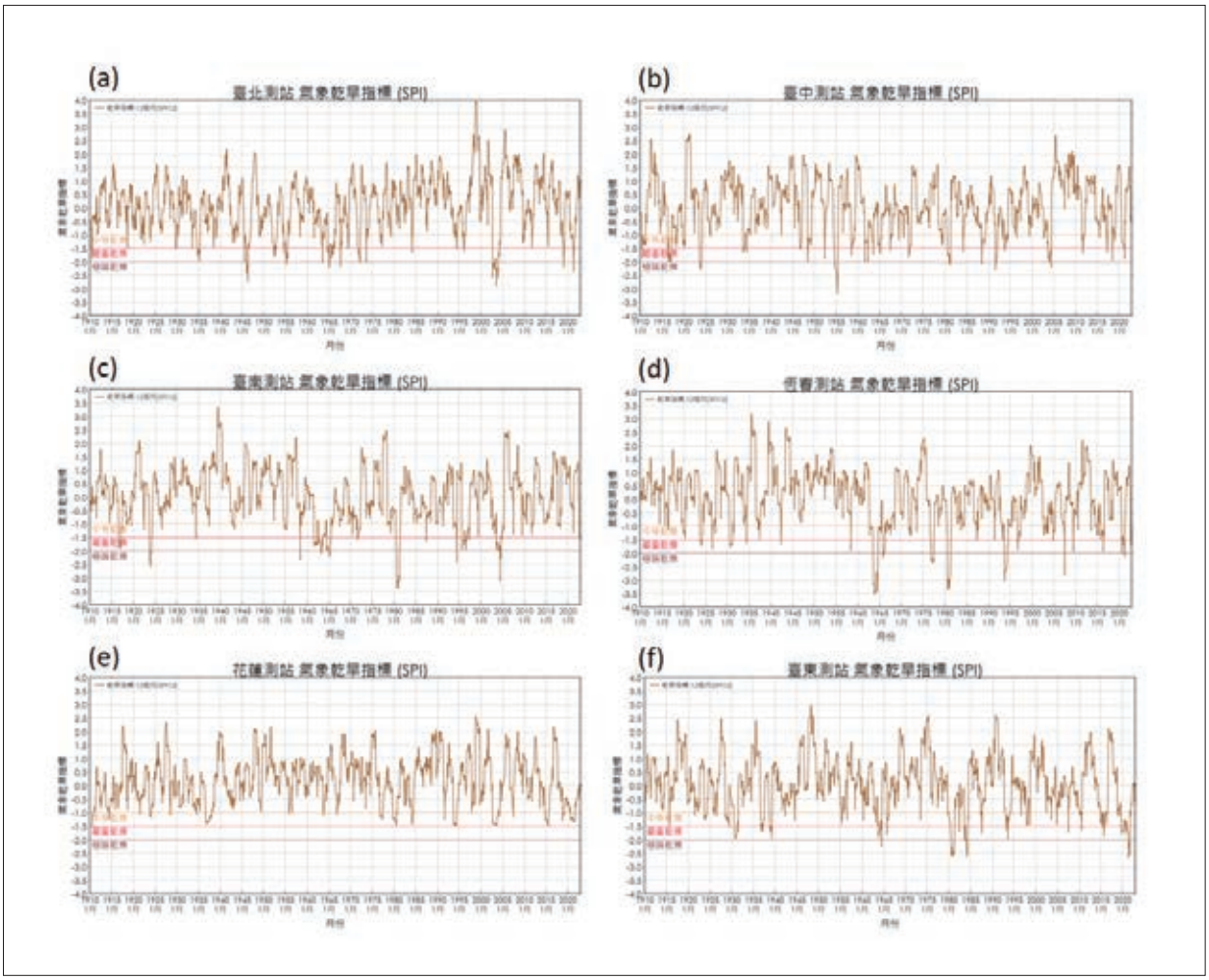


圖2.6.4　6個百年署屬測站自1910年至2022年氣象乾旱指標。使用12個月累積雨量計算 (SPI12)。(a) 臺北，(b) 臺中，(c) 臺南，(d) 恆春、(e) 花蓮及 (f) 臺東測站。(資料來源：中央氣象署，本報告產製)

顯的受到大尺度環流配置、大氣低頻振盪及熱帶海表面溫度影響，具有多重時間尺度的變化特徵。

2.6.3　寒潮

張智鈞等人 (2020) 分析臺灣百年來的寒潮變遷，使用全臺5個超過百年資料的署屬氣象站，臺北、臺中、臺南、恆春以及花蓮，參照盧與李 (2009) 提出的研究方法定義寒潮，選取時間範圍內冬季 (12月至隔年1月) 的日最低溫，並計算日最低溫的24小時及48小時溫度變化，當日最低溫低於第10百分位數 (PR10) 時，或48小時溫度降幅大於第90

百分位數 (PR90) 的溫度降幅時，定義為寒潮的開始。當日最低溫回升到大於第20百分位 (PR20) 或24小時升溫幅度大於PR90時，定義為寒潮結束。以2003年至2004冬季為例(圖2.6.5)，總共有4次寒潮發生。

分析的寒潮特徵包含寒潮發生頻率 (Cold Surge Frequency, CSF)，低溫日數 (Cold Days, CD)、平均持續日數 (Duration, DUR)，以及寒潮發生日的平均24小時降溫幅度 (DT)。寒潮特徵在近30年、近50年及近100年的線性變化趨勢 (圖2.6.6) 在時空分布上並不均勻，從1900年至2011年以來寒潮發生頻率和低溫日數皆有顯著的下降，以臺北為例，近50年寒潮發生頻率減少約3.8次，低溫日數減少約14.5天，但近30年的變化趨勢變緩，寒潮發生頻率僅減少0.2次，低溫日數僅減少約1.2天，且皆未通過顯著性檢定。平均持續日數則因地而異，臺南及花蓮近100年寒潮持續日數減少的趨勢較明顯，約減少1.4天，臺北及恆春是近30年較明顯，分別約減少1.1及0.8天，臺中則無明顯趨勢。由於整體溫度升高，24小時降溫幅度要更大，才能降到符合寒潮標準的溫度，並被定義為寒潮發生日。因此，平均24小時降溫幅度除恆春外，近100年趨勢為各地一致的增加且越往北越為明顯。

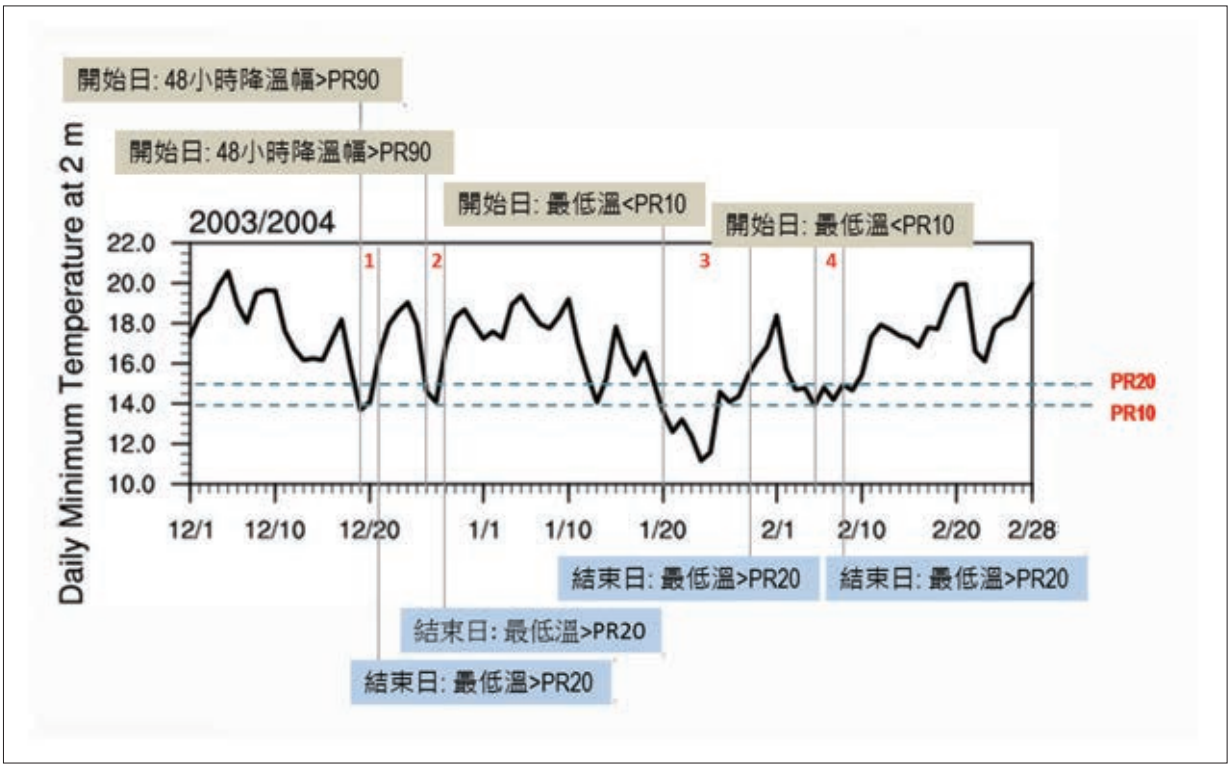


圖2.6.5　寒潮定義示意圖。以2003年至2004年冬季為例，共有4次寒潮發生。(摘自洪志誠等人，2018)

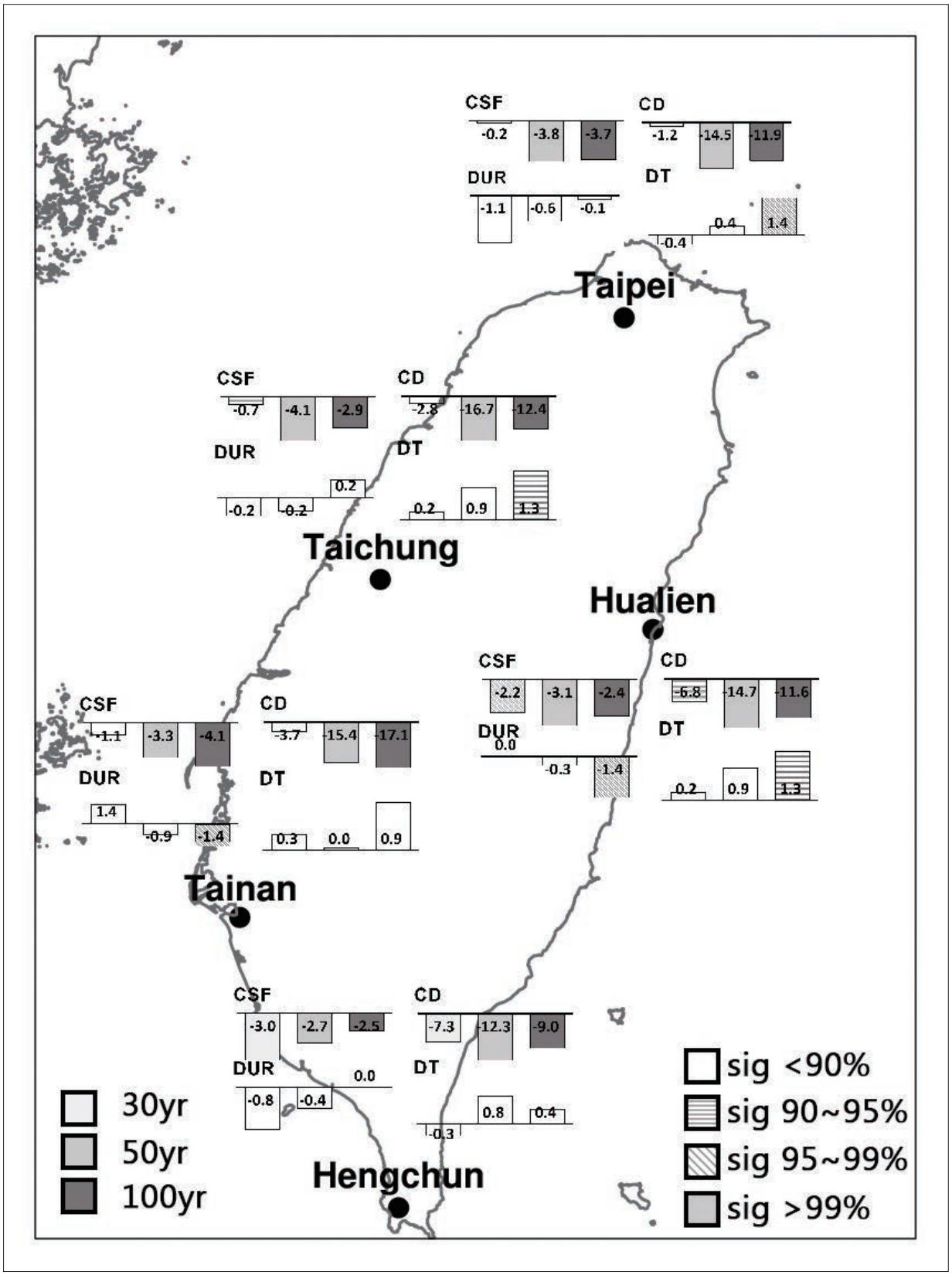


圖2.6.6　使用5個臺灣百年署屬測站計算之寒潮特徵的線性趨勢，顏色由淺至深分別為近30年、近50年及近100年之趨勢。CSF為寒潮發生頻率，CD為低溫日數、DUR為平均持續日數，以及DT為發生日的平均24小時降溫幅度。 (摘自張智鈞等人，2020)

2.6.4　颱風

臺灣位處於西北太平洋颱風主要移動路徑上，常年遭受颱風伴隨的強風、豪雨所影響，造成災害損失。不過颱風也為臺灣帶來豐沛的降水量，是供應臺灣水資源重要的天氣系統。聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次氣候變遷評估報告 (6th Assessment Report, AR6) 指出，受到全球暖化影響，颱風強度有增強趨勢，移動路徑偏北，緯度較高的東亞地區 (日本、韓國) 受颱風影響機率將會提高，東南亞地區 (菲律賓、越南) 則相對降低 (IPCC AR6, 2021)，臺灣正好位於 2 個區域中間，受颱風影響的不確定性相對較大。本小節將針對1950 年至2021 年間，影響臺灣的颱風特性，做進一步介紹。

使用李清勝與盧孟明 (2012) 所提出颱風影響臺灣的客觀定義，以及美國聯合颱風警報中心 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC) 所提供的颱風路徑資料，計算每年影響臺灣的颱風個數 (圖2.6.7)。從長期平均來看，一年約有5個颱風進入離臺灣海岸線300公里範圍內的區域，每年個數有所不同，少則1個至2個，至多可達9個至10個，年際之間差異大。從長期變化來看，逐年增加或減少的趨勢不明顯，於2000年至2008年期間，每年平均個數提高至6.3個，之後又逐漸減少，呈現年代際變化特徵。具有較強破壞力的強烈颱風，出現在臺灣周遭海域的頻率，同樣具有年代際變化特徵 (圖2.6.8)。1950年代至1960年代中期和2000年至2016年間，個數均偏多，平均每年有2.3個，其餘時期的影響個數相對偏少，平均每年僅有1個，顯示全球溫度上升和颱風影響臺灣的頻率高低，關聯性並不顯著，特別是強烈颱風個數。

生成於西北太平洋海域的颱風是否會影響臺灣，通常需要大尺度環流相互配合。從年循環來看，4月開始，颱風就有機會影響臺灣，並一直持續到11月為止，其中又以6月至10月影響機率最高，占年總個數的80%以上 (Tu & Chen, 2019)，此與大尺度大氣和海洋條件的季節變化有所關聯，特別是副熱帶高壓脊的南北擺盪 (Chen et al., 2017; Tu & Chen, 2019)。由於該時期包含了夏季和秋季，兩季節的大尺度環流特徵並不完全相同，因此有研究分別針對夏、秋季進行分析。夏季期間 (6月至8月)，颱風經過120°E至130°E、20°N以北的頻率明顯偏高，於緯度上的變化則以年際變化為主，年代際訊號相對弱。秋季 (9月至10月) 則明顯不同，年代際特徵較年際變化顯著，轉變時間點落在1998年，颱風通過20°N以北的機率增加，連帶對該區域的降水產生影響 (圖2.6.9) (Tu

et al., 2020)。若整體來看，西北太平洋颱風的生成和移動路徑變化，秋季 (9月至11月) 於1998年之後進入颱風不活躍期，包含生成個數減少、生命週期縮短、累積氣旋能量 (Accumulated Cyclone Energy, ACE) 降低等，路徑上往南海和中南半島的颱風個數明顯減少，不過往臺灣和中國東南沿岸的颱風個數卻增加 (Hsu et al., 2017)，年代際變化特徵十分明顯 (Hong et al., 2016; Hsu et al., 2017)。

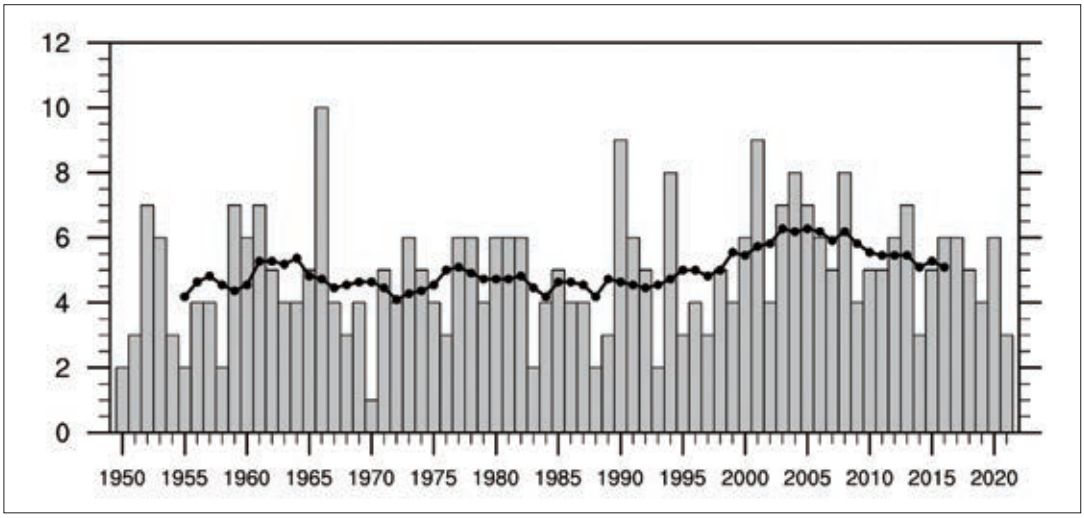


圖2.6.7　1950年至2021年期間，每年進入臺灣海岸線300公里範圍內，且停留12小時 (含) 以上的颱風 (生命週期內最大風速 ≧ 35 knots) 個數時間序列圖。黑實線代表11年滑動平均，橫軸代表年分，縱軸代表每年影響臺灣的颱風個數。(依李清勝與盧孟明 [2012] 之定義重繪。本報告產製。)

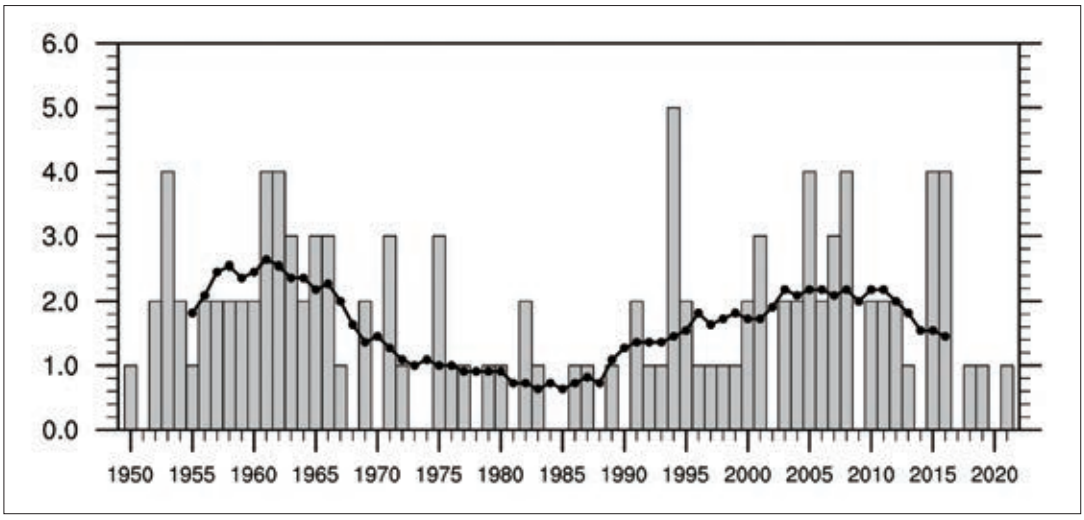


圖2.6.8　1950年至2021年期間，每年進入臺灣海岸線300公里範圍內，且停留12小時 (含) 以上的颱風，達到強烈颱風等級 (生命週期內最大風速 ≧ 95 knots) 的個數時間序列圖。黑實線代表11年滑動平均，橫軸代表年分，縱軸代表每年影響臺灣的強烈颱風個數。(依李清勝與盧孟明 [2012] 之定義重繪。本報告產製。)

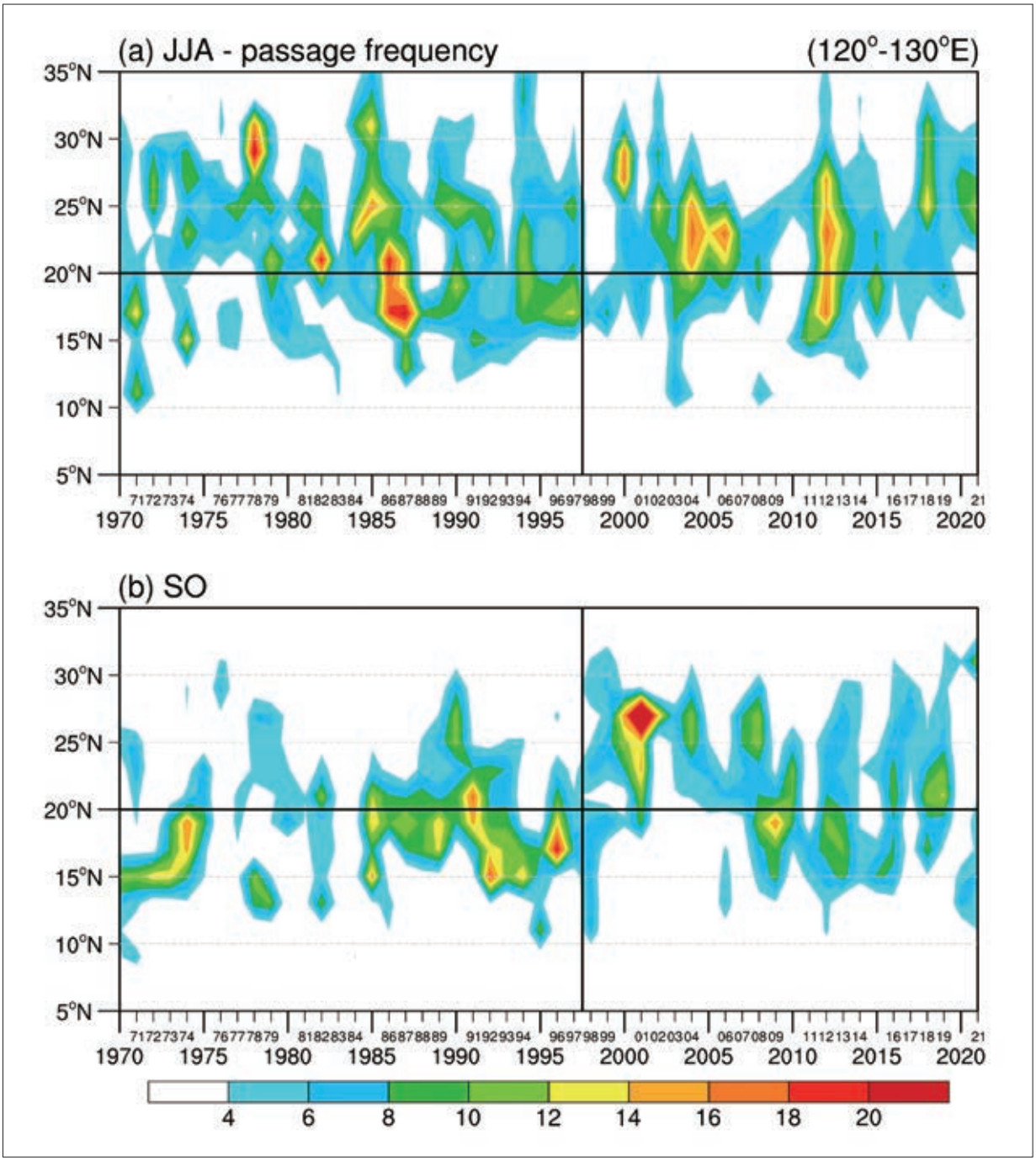
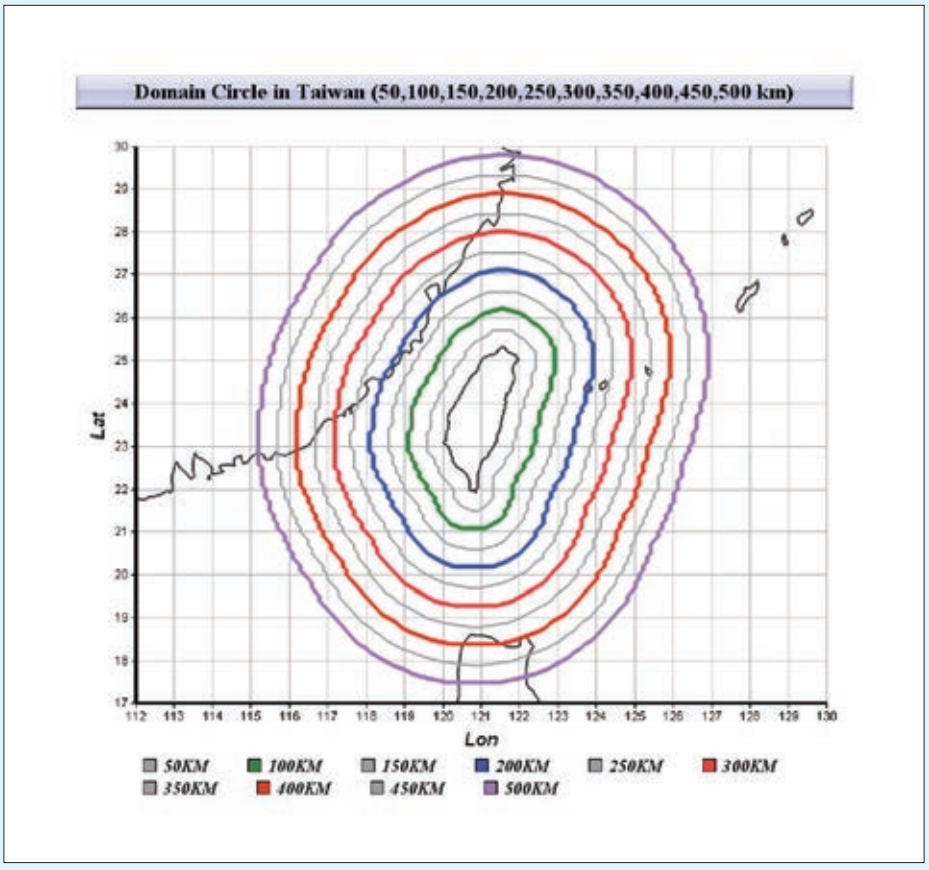


圖2.6.9　1970年至2021年期間，通過120°E至130°E範圍的颱風頻率時間序列圖。(a) 夏季 (6月至8月)、(b) 秋季 (9月至10月)。橫軸代表年分，縱軸代表緯度，南北方向資料網格解析度為2個緯度。(依Tu et al. [2020] 之方法重繪，本報告產製)

文字框 5 ｜侵臺颱風定義

如何客觀的界定一個颱風是否影響臺灣？學者或研究單位為了不同的研究或作業目的，而有不同的客觀判定方式。以中央氣象署為例，便是以臺灣本島為中心，設立一個方形範圍 (118°E至124°E、20°N至27°N)，當颱風移動至此範圍內，平地氣象觀測站所觀測到的颱風風力達到放假標準 (即平均風達到7級風 [13.9 m s^{-1}] 以上或陣風達到11級風 [28.5 m s^{-1}] 以上)，同時對臺灣產生災害，就視為侵臺颱風 (謝信良等人，1988)。不過，由於颱風災害的認定有一定的主觀性，所以學界大多採用固定長形或方形的影響範圍 (Chu et al., 2007; Chen et al., 2010; Hung, 2013)，一旦颱風中心進入該預定影響範圍內，且中心平均風速每小時達到 (含) 34海浬以上，就將該颱風視為「侵臺颱風」。



圖Box 2.6.1　根據臺灣海岸線邊界所定義的50公里至500公里的範圍，圖中每個間距為50公里，橫軸和縱軸分別代表經度和緯度。(摘自李清勝與盧孟明，2012)

這樣的方式，在判讀上顯然簡單許多，不過由於是方形範圍，因此邊緣離臺灣本島的距離並不相等，對於從範圍邊緣短暫通過，且對臺灣毫無影響的颱風，仍會被計算進來，為了減少這樣的誤差，有必要再重新去思考和定義更為客觀，且合適於氣候分析研究與颱風預報應用的影響臺灣之颱風。

李清勝與盧孟明 (2012) 分析1970年至2009年的6月至10月間，所有颱風中心位置與臺灣氣象觀測站間的距離，以及當時測站所觀測到的降雨量，發現降雨量會隨著颱風中心離測站愈遠而減少，當距離超過300公里之外，測站降雨量便無明顯的變化。因此，以臺灣海岸邊界形狀為基準，往外擴展300公里，可作為界定颱風影響臺灣的範圍。所以，當颱風中心進入到此範圍內，至少停留12小時，且近中心平均最大風速達到 (含) 每小時34海浬以上，就稱該颱風為「影響臺灣的颱風」，本小節有關於侵臺颱風的個數變化，即採用此定義。

2.6.5　臺灣午後對流之過去變遷

臺灣暖季 (5月至9月) 除了鋒面及颱風降雨外，午後對流降雨也是重要的水資源來源 (Wang & Chen, 2008; Chen et al., 2011; Huang et al., 2016)。午後對流常發生在地表溫度最高溫後的下午時段，常具有「局部短延時強降雨」的特徵 (Jou et al., 2015)，因此容易造成積淹水的災害。以長期平均來看，在梅雨季 (5月至6月)，儘管午後對流帶來的雨量不如鋒面降雨多，但也位居次要 (Wang & Chen, 2008; Chen et al., 2011)。而在夏季 (6月至8月)，午後對流的雨量約占總雨量的40%至50% ，降雨發生日數亦約占40%至50%，是臺灣夏季最常見的天氣系統 (Huang et al., 2015)。然而由於臺灣的地形特殊，不同區域的午後對流特徵也不同。Huang et al. (2015) 利用臺灣地面測站資料，發現夏季時中央山脈迎風面山區的午後對流發生頻率明顯高於其他地區 (圖2.6.10a)。降雨強度較強的區域為迎風面山區及臺北盆地 (圖2.6.10c)。

就長期趨勢而言，Huang & Chen (2015) 發現1982年至2012年間臺灣梅雨季午後對流的發生頻率有增加的趨勢，且降雨強度也有增強的現象。而針對夏季，Huang et

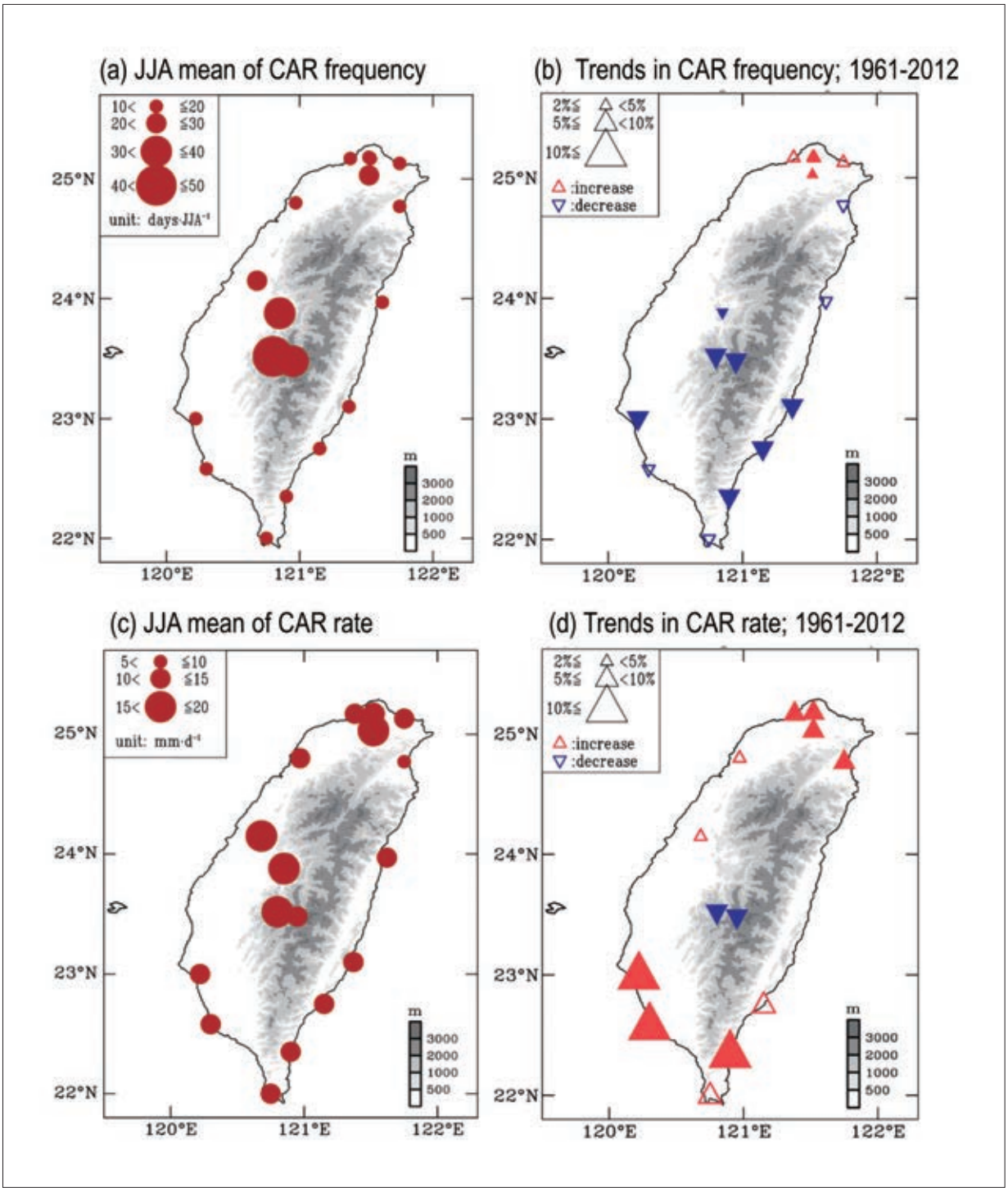


圖2.6.10　夏季午後對流發生頻率及降水強度特徵，使用臺灣地面測站資料。(a) 午後對流發生頻率於1960年至2012年間的平均；(b) 午後對流發生頻率在1961年至2012年間的線性趨勢變化百分比率，百分比率=每年變化量/氣候平均值x100%；(c) 午後對流降水強度於1960年至2012年間的平均 (單位：mm day^{-1})；(d) 午後對流降水強度在1961年至2012年間的線性趨勢變化百分比率。實心三角形表示通過10%顯著性檢定，空心表示未通過。(摘自Huang et al., 2015)

al. (2015) 利用臺灣地面測站資料檢視1961年至2012年間夏季午後對流的趨勢特徵 (圖2.6.10b)，發現北部的午後對流發生頻率有增加的趨勢，但在其他地區卻是減少的趨勢。造成此區域性差異的原因，可能是由於北部地區的熱力不穩定度增加且海風的輻合增強，其他地區則是熱力不穩定度減少，海風的輻合減弱。另一方面，圖2.6.10d顯示夏季午後對流的降雨強度僅在山區測站有減弱的現象，在其他地區則是增強的趨勢，尤其南部增強的幅度最為明顯。進一步分析環境場認為可能與水氣輻合的長期趨勢變化有關，其雖然在低海拔地區有增強的現象，但在高山區域反而有減少的現象。另外，Chen et al. (2007) 也同樣注意到臺北盆地的夏季午後對流加劇 (1961年至2005年)，並其將此歸因於城市熱島效應增強。Lin et al. (2011) 比較衛星觀測資料及中尺度模式模擬的結果，同樣發現都市熱島效應可能增強都市下風處山區的降雨強度，模式中不同的土地用途分類則會影響降雨位置。

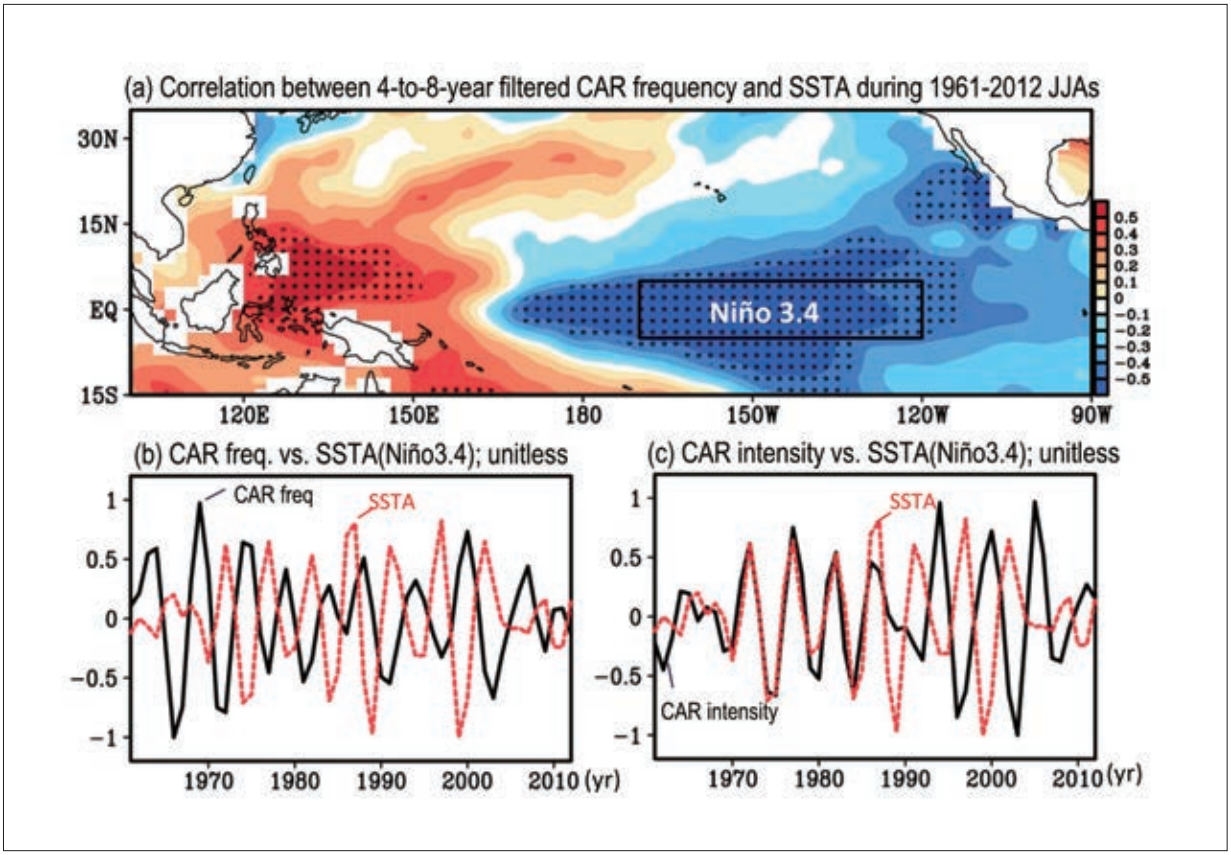


圖2.6.11　臺灣夏季午後對流降水事件與聖嬰現象之關聯。(a) 1960年至2012年間夏季午後對流發生頻率之4年至8年週期變化與海溫的相關性，打點表示通過10%顯著性檢定。(b) 標準化臺灣夏季午後對流發生頻率 (黑線) 與東太平洋海溫 (紅色虛線) 之時間序列，數值已經過4年至8年濾波及標準化處理。(c) 類似 (b)，但為夏季午後對流降水強度的結果。 (摘自Huang et al., 2019)

Huang et al. (2015) 發現臺灣夏季午後對流發生頻率具有10年至20年及4年至8年的週期，而降雨強度則具有4年至8年週期。Huang et al. (2015) 認為10年至20年週期與東太平洋海溫的10年至20年週期相關，海表面溫度改變引起的大氣環流變異是可能的原因。此外，Huang et al. (2019) 亦發現臺灣夏季午後對流的4年至8年週期變化與東太平洋海溫4年至8年週期變化有關 (圖2.6.11a)。午後對流發生頻率與東太平洋海溫呈現負相關 (圖2.6.11b)，當海溫變冷時臺灣午後對流變得更頻繁的發生，由於東太平洋海溫變冷時，臺灣東方的副熱帶高壓增強，造成低層風場輻合增強，局地熱力不穩定增加，有助於午後對流形成，反之亦然。午後對流降雨強度與海溫在1980年代前後有不一樣的關係 (圖2.6.11c)，在1980年代前期 (後期) 與海溫呈現正相關 (負相關)。這可能是因在1980年代前期海溫較暖 (冷) 時，支持午後對流降雨強度的水氣通量增加 (減少)，但在1980年代後期兩者的關係則相反。由於臺灣的區域面積不大，當大尺度環流有稍微偏移時，就有可能產生不同的午後對流降雨特徵，過去認知的現象可能已產生變化，或是將產生變化，因此應當持續地了解氣候變遷下臺灣午後對流降雨特徵的變化。

2.6.6 梅雨

梅雨是東亞氣候的特徵之一，臺灣的梅雨期一般落在5月中旬至6月中旬，滯留鋒面配合地形影響，容易造成豪雨事件 (陳泰然，1994；Wang et al., 2005)，但也是東亞地區重要的水資源，對農業灌溉極為重要 (陳慶昌等人，2007；Hung & Hsu, 2008)。本節分析梅雨的長期趨勢，包含總雨量、雨日降雨強度和極端降雨。

使用TCCIP網格化降雨資料分別計算5月分、6月分日雨量的線性趨勢 (1960年至2020年) (圖2.6.12)，5月分雨量全臺大部分地區有增加的趨勢，顯著增加的地區主要集中在北部、中部及南部山區。6月分雨量變化趨勢有明顯空間上的差異，西部及東部雨量減少；北部、中部山區、高雄及屏東則偏向增加，但大多未通過顯著性檢定。雨日降雨強度 (Simple Daily Intensity Index, SDII) (圖2.6.13) 具有年際變化特徵且6月分的變化幅度較5月分大。5月分的雨日降雨強度有顯著增加的趨勢，平均每年增加0.063 毫米 (通過5%顯著性檢定)，但6月分趨勢幾乎持平且未通過檢定。

梅雨期極端降雨強度的變化以日雨量第90百分位 (PR90) 為指標 (圖2.6.14)。比較

1960年至1980年及2000年至2020年兩個時期的極端降雨強度，發現5月分極端降雨強度增加，6月分反之。極端降雨集中在山區 (圖2.6.15a)，6月分雨量明顯高於5月分，分布範圍由山區延伸到西南部平原。極端降雨的雨量變化 (圖2.6.15b) 為後20年平均減前20年平均，2個月分皆可以看到極端雨量的變化在山區較大，尤其6月分的變化有類似線性趨勢 (圖2.6.12) 的空間分布。綜合上述，近60年的臺灣梅雨期雨量變遷，全臺整體變化的幅度5月分較6月分明顯的增加。降雨特徵在中部及南部山區為總雨量增加、雨日降雨強度和極端降雨的強度皆增加；平地及沿海區域，除了北部雨日降雨強度增加外，其他變化較不明顯。

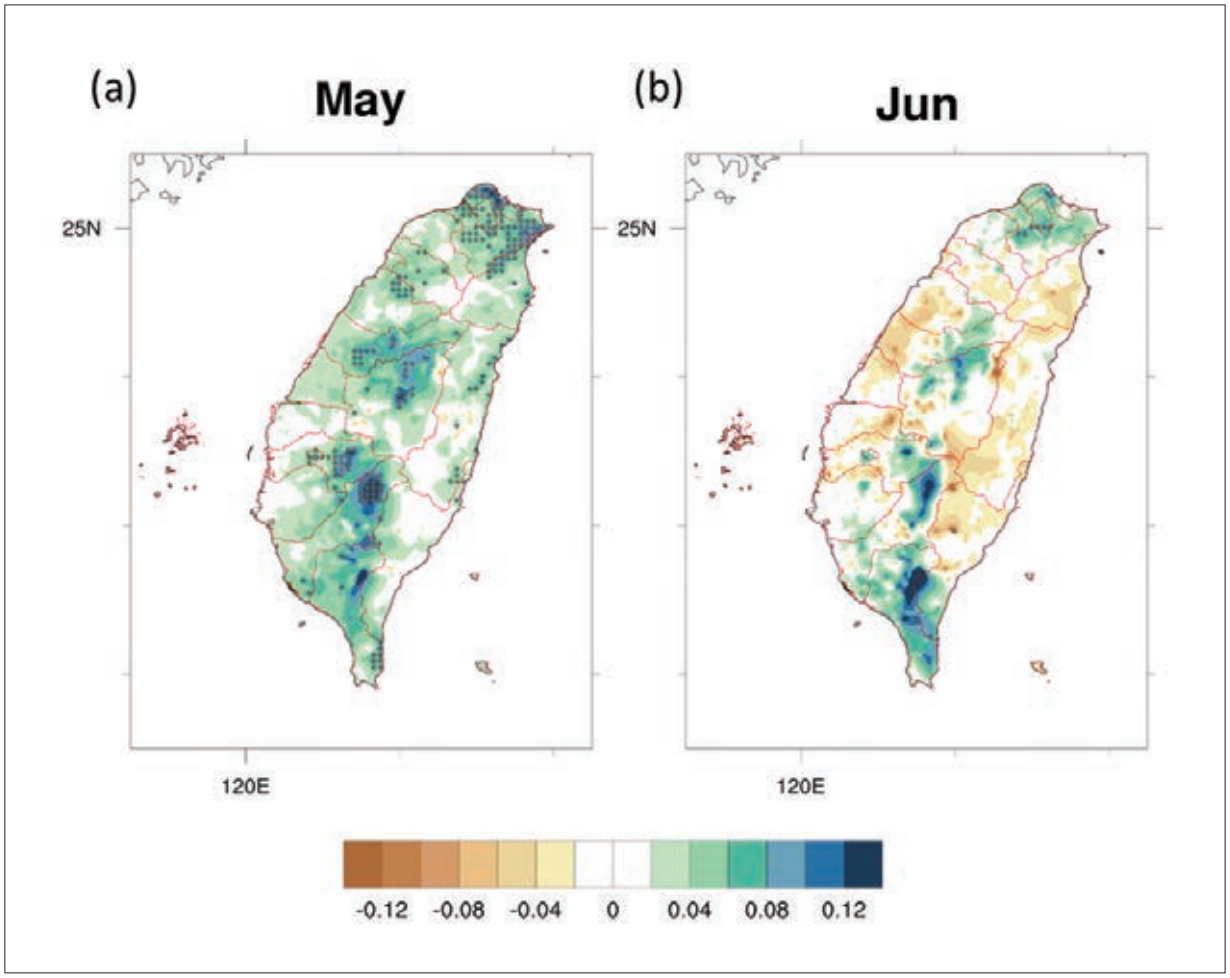


圖2.6.12　臺灣梅雨期月平均日雨量之線性趨勢 (1960年至2020年)。(a) 5月 (b) 6月，單位為 mm year^{-1}，打點地區表示通過5%顯著性檢定。(資料來源：本報告產製)

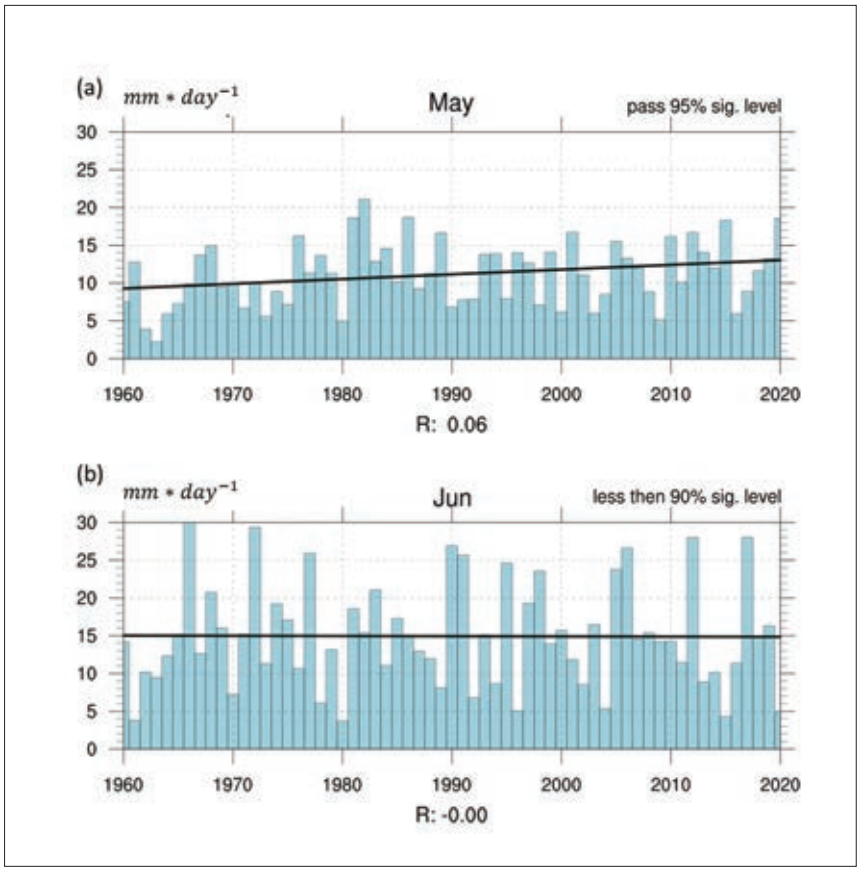


圖2.6.13　臺灣梅雨期雨日降雨強度 (SDII) (長條圖) 及線性趨勢 (黑線)。(a) 5月，(b) 6月。橫軸為時間、縱軸為SDII指標，R為迴歸係數。(資料來源：本報告產製)

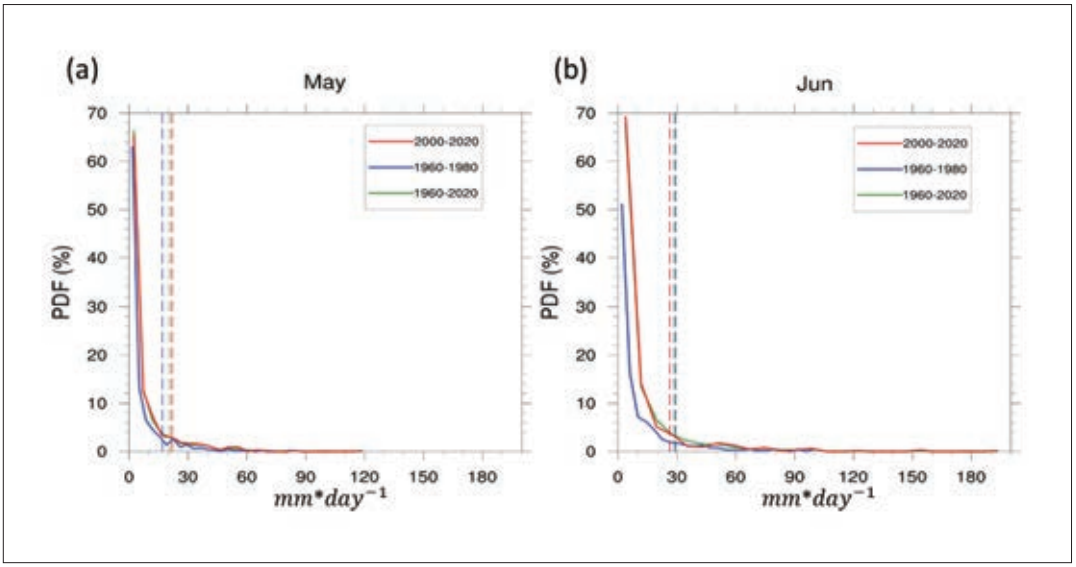


圖2.6.14　臺灣梅雨期日雨量的機率分布圖。(a) 5月，(b) 6月。實線是機率分布曲線，虛線為日雨量第90百分位 (PR90) 參考線，綠色為1960年至2020年間的平均，藍色為1960年至1980年間的平均，紅色為2000年至2020年間的平均。橫軸為日雨量 (毫米)，縱軸為百分機率 (%)。(資料來源：本報告產製)

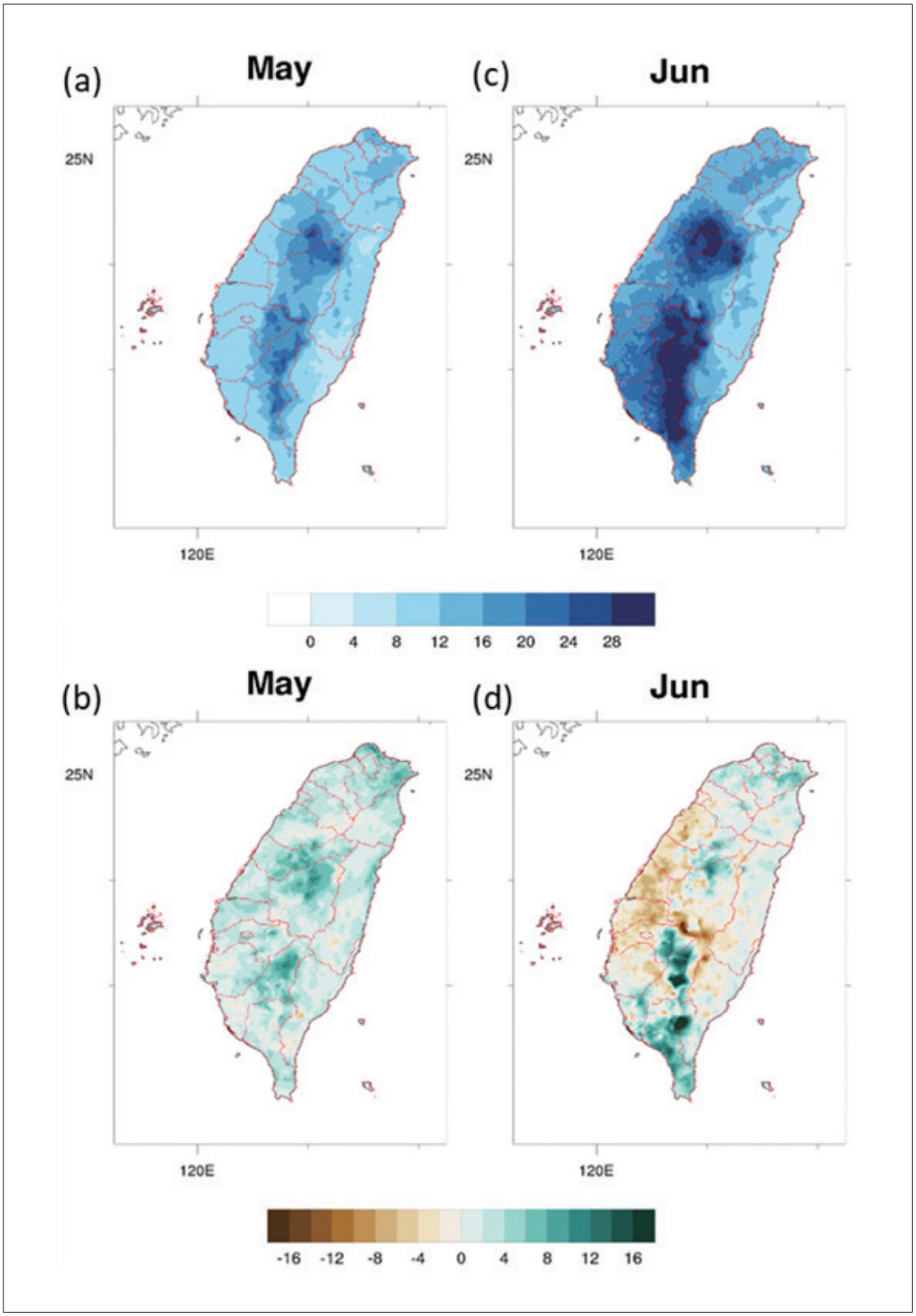


圖2.6.15　臺灣梅雨期極端降雨日雨量 (PR90) 之空間分布及長期變化。單位為毫米。(a)、(c) 分別為5月、6月極端降雨日雨量 (PR90) 於1960年至2020年間的空間分布；(b)、(d) 分別為5月、６月極端降雨日雨量的變化，變化量為2000年至2020年之平均減1960年至1980年之平均。(資料來源：本報告產製)

文字框 6 ｜極端指標定義

參考世界氣象組織 (World Meteorological Organization, WMO) 的氣候變遷偵測與指標專家小組 (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)[1] 定義的氣候變遷指標，評估極端事件的頻率或嚴重程度，挑選出適用於臺灣氣候特徵的22項指標，並參考相關文獻進行調整，詳細說明參考臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6統計降尺度版 (2023)，關鍵指標包含11項溫度指標與12項降雨指標，如表BOX 2.6.1 (本報告另增大豪雨日R350mm指標)。

表BOX 2.6.1　23項評估臺灣氣候變遷的關鍵指標 (資料來源：臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6統計降尺度版)

溫度指標	降雨指標
日最高溫極大值 TXx	最大一日降雨量 Rx1day
日最低溫極大值 TNx	最大連續五日累積降雨量 Rx5day
日最高溫極小值 TXn	雨日 RR1
日最低溫極小值 TNn	雨日總降雨量 PRCPTOT
冷夜天數 TN10p	雨日降雨強度 SDII
冷晝天數 TX10p	10 毫米雨日 R10mm
暖夜天數 TN90p	20 毫米雨日 R20mm
暖晝天數 TX90p	大雨日 R80mm
極端高溫持續指數 HWDI	豪雨日 R200mm
極端低溫持續指數 CWDI	大豪雨日 R350mm
日夜溫差 DTR	最長連續不降雨日 CDD
	最長連續降雨日 CWD

1　氣候變遷偵測與指標專家小組 (ETCCDI)：主要是為了協助大眾更容易地理解和應對氣候變遷問題而設立的。提供了許多有關氣候變遷指標的定義及計算方式，以及相關的軟體套件及應用指導，讓使用者可以更方便地進行氣候變遷研究及分析。更多資訊請參考 https://www.wcrp-climate.org/etccdi

溫度指標

1. **日最高溫極大值 TXx (Annual maximum value of daily maximum temperature)**
   一年之中，日最高溫的最大值，單位為℃。

2. **日最低溫極大值 TNx (Annual maximum value of daily minimum temperature)**
   一年之中，日最低溫的最大值，單位為℃。

3. **日最高溫極小值 TXn (Annual minimum value of daily maximum temperature)**
   一年之中，日最高溫的最小值，單位為℃。

4. **日最低溫極小值 TNn (Annual minimum value of daily minimum temperature)**
   一年之中，日最低溫的最小值，單位為℃。

5. **冷夜天數 TN10p (Annual count of days when daily minimum temperature is less than the 10th percentile)**
   一年之中，日最低溫低於基期當天第10百分位數的總天數，單位為天。
   ■說明　使用基期 (基期年分的選擇視分析目的而定，例如在第二章分析臺灣歷史氣候變遷時，使用的基期為1961年至1990年。而在第三章中評估未來推估時，則使用1995年至2014年。) 的日最低溫資料，取樣每一日曆天及該日曆天前、後各2天—總共5天的30年資料—合計150筆資料。利用這150筆資料計算第10百分位數的溫度，作為該日曆天的門檻值。將每日最低溫與前面得到的該日門檻值比較，若低於門檻值則為冷夜，再計算一年之中的冷夜天數。

6. **冷晝天數 TX10p (Annual count of days when daily maximum temperature is less than the 10th percentile)**
   一年之中，日最高溫低於基期當天第10百分位數的總天數，單位為天
   ■說明　使用基期的日最高溫資料，取樣每一日曆天及該日曆天前、後各2天—總共5天的30年資料—合計150筆資料。利用這150筆資料計算第10百分位

數的溫度，作為該日曆天的門檻值。將每日最高溫與前面得到的該日門檻值比較，若低於門檻值則為冷晝，再計算一年之中的冷晝天數。

7. 暖夜天數 TN90p (Annual count of days when daily minimum temperature is greater than the 90th percentile)

一年之中，日最低溫高於基期當天第90百分位數的總天數，單位為天。

■說明　使用基期的日最低溫資料，取樣每一日曆天及該日曆天前、後各2天—總共5天的30年資料—合計150筆資料。利用這150筆資料計算第90百分位數的溫度，作為該日曆天的門檻值。將每日最低溫與前面得到的該日門檻值比較，若高於門檻值則為暖夜，再計算一年之中的暖夜天數。

8. 暖晝天數 TX90p (Annual count of days when daily maximum temperature is greater than the 90th percentile)

一年之中，日最高溫高於基期當天第90百分位數的總天數，單位為天。

■說明　使用基期的日最高溫資料，取樣每一日曆天及該日曆天前、後各2天—總共5天的30年資料—合計150筆資料，統計得到日最高溫的第90百分位數的溫度，作為該日曆天的門檻值。將每日最高溫與前面得到的該日門檻值比較，若高於門檻值則為暖晝，再計算一年之中的暖晝天數。

9. 極端高溫持續指數 HWDI (Heat wave duration index)

一年之中，連續3天以上日最高溫高於基期第95百分位數之事件總天數，單位為天。

■說明　使用基期的日最高溫資料，統計基期內所有天數的日最高溫第95百分位數，作為判斷是否為極端高溫事件的溫度門檻值，計算一年之中連續3天以上日最高溫高於門檻值的事件數，得到所有事件數的天數總和。

10. 極端低溫持續指數 CWDI (Cold wave duration index)

一年之中，連續3天以上日最低溫低於基期第5百分位數之事件總天數，單位為天。

■說明　使用基期的日最低溫資料，統計基期內所有天數的日最低溫第5百分位數，作為判斷是否為極端低溫事件的溫度門檻值，計算一年之中連續3天以上日最低溫低於門檻值的事件數，得到所有事件數的天數總和。

11. 日夜溫差 DTR (Daily temperature range)

一年之中，日最高溫與日最低溫差值之年平均值，單位為℃。

降雨指標

1. 最大一日降雨量 Rx1day (Maximum 1-day precipitation)

一年之中，日降雨量的最大值，單位為mm。

2. 最大連續五日累積降雨量 Rx5day (Maximum consecutive 5-day precipitation)

一年之中，連續5日累積降雨量的最大值，單位為mm。

3. 雨日 RR1 (Wet days)

一年之中，日降雨量達到1毫米以上的總天數，單位為天。

4. 雨日總降雨量 PRCPTOT (Annual total precipitation in wet days)

一年之中，所有雨日的總降雨量，單位為mm。

5. 雨日降雨強度 SDII (Simple daily intensity index)

一年之中，雨日的平均降雨量，即所有雨日的總降雨量除以雨日天數，單位為mm day^{-1}。

6. 10 毫米雨日 R10mm (Annual count of days when daily precipitation is greater than or equal to 10mm)

一年之中，日降雨量達到10毫米以上的總天數，單位為天。

7. 20 毫米雨日 R20mm (Annual count of days when daily precipitation is greater than

or equal to 20mm)
一年之中，日降雨量達到20毫米以上的總天數，單位為天。

8. 大雨日 R80mm (Annual count of days when daily precipitation is greater than or equal to 80mm)
一年之中，日降雨量達到80毫米以上的總天數，單位為天。

9. 豪雨日 R200mm (Annual count of days when daily precipitation is greater than or equal to 200mm)
一年之中，日降雨量達到200毫米以上的總天數，單位為天。

10. 大豪雨日 R350mm (Annual count of days when daily precipitation is greater than or equal to 350mm)
一年之中，日降雨量大於 (含) 350毫米的總天數，單位為天。

11. 最長連續不降雨日 CDD (Maximum number of consecutive dry days)
一年之中，日降雨量少於1毫米之連續最長天數，單位為天。若遇跨年事件則併入隔年指標數值。

12. 最長連續降雨日 CWD (Maximum number of consecutive wet days)
一年之中，日降雨量達到1毫米以上之連續最長天數，單位為天。

2.7 臺灣空氣品質變遷

本節彙整臺灣空氣品質的歷史變遷，並初步說明COVID-19對空氣品質的影響。臺灣從1990年代陸續設置空氣品質監測站，早期設備以監測二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_X)、臭氧 (O_3)、一氧化碳 (CO) 以及粒狀污染物 (PM_{10}) 為主，2005年以後由於細懸浮微粒 ($PM_{2.5}$) 對環境及健康的衝擊逐漸受到重視，陸續增加$PM_{2.5}$監測儀。累積至今達20

年的地面觀測逐時資料，由於監測數據品質良好，除原本推動空氣品質保護及防制空氣污染工作的目的之外，亦被學界運用於研究空氣品質長期變化、空氣污染事件解析、以及空氣品質與農業、健康的關連性等課題。

2.7.1　空氣品質的歷史變遷

臺灣空氣品質變遷狀況可從環境部 (前行政院環保署) 每年發表的空氣品質監測年報窺見一二。最近一期的空氣品質監測年報 (行政院環保署，2021) 顯示，臺灣2012年至2021年期間PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_X和CO年平均濃度呈現下降趨勢，唯有O_3濃度持平 (圖2.7.1)。造成臺灣空氣品質變遷的原因相當複雜，包括氣候變遷、排放控制 (包括本土和境外排放)、都市及產業發展、人類活動、交通工具使用習慣 (例如捷運開通或使用汽油和柴油車變成使用電動車) 等等，不易單從觀測資料評估氣候變遷的影響，因此本小節主要從觀測資料回顧臺灣空氣品質以及各污染物變遷情況，有關氣候變遷對空氣品質影響相關研究，請參考第一章1.6節及第三章3.6節。

Cheng & Hsu (2019) 分析2006年至2017年環境部 (前行政院環保署) $PM_{2.5}$濃度，顯示臺灣$PM_{2.5}$濃度有減少的趨勢，而北部$PM_{2.5}$濃度降低的趨勢大於南部。進一步分析1979年至2017年ERA-interim再分析資料，顯示冬季地表風速減少，加上南部位在東北季風背風面，抵銷了控制排放的效果。風速變化趨勢可參考本章2.4節。$PM_{2.5}$組成成分相當複雜，早期僅有少數研究性質的密集觀測實驗結果，Chou et al. (2022) 更進一步回顧$PM_{2.5}$組成的歷史變遷，比較2003年至2009年期間中研院環境變遷研究中心多次密集實驗結果與環境部測站2017年至2021年平均$PM_{2.5}$ 組成 (圖2.7.2)，顯示臺北、臺中、花蓮及高雄等4地區的$PM_{2.5}$總濃度下降48%至55%，大致上組成成分沒有明顯變化，非海鹽硫酸鹽 (nss-sulfate) 在西半部約佔$PM_{2.5}$總質量的20%，由於排放控制策略得當，高屏地區元素碳 (elemantary carbon, EC) 的$PM_{2.5}$總質量佔比下降，值得注意的是4個地區的硝酸鹽佔比都上升。由於硝酸鹽生成過程與NO_X、VOC、O_3等反應過程會互相影響，不僅與排放量有關，溫度及日照等氣象參數也會影響反應速率。除了地面觀測資料，Lee et al. (2019) 分析2005年至2015年之間的衛星資料，顯示此10年間臺灣NO_2約減少了24%。Singh et al. (2020) 分析2003年至2018年鹿林山 (2862m高) $PM_{2.5}$濃度，亦發現來自中南半島生質燃燒的有機碳 (Organic Carbon, OC) 以及非海鹽源鉀離子濃度有減少的

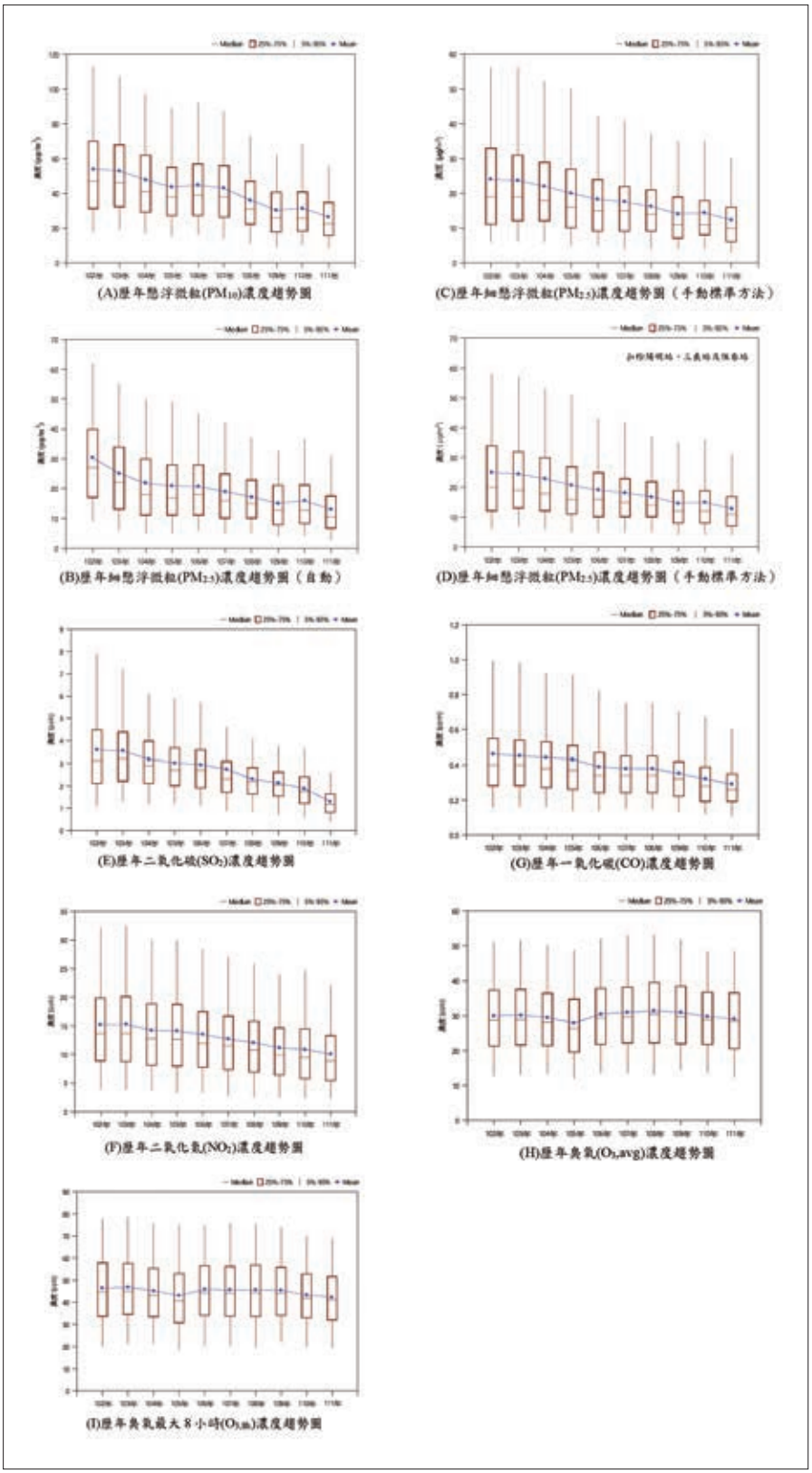


圖2.7.1　臺灣2012年至2021年常見污染物之年平均。(a) PM_{10}、 (b) $PM_{2.5}$ (自動觀測)、 (c) $PM_{2.5}$ (手動標準方法觀測)、 (d) $PM_{2.5}$ (手動標準方法觀測，扣除陽明站、三義站、恆春站)、 (e) SO_2、 (f) NO_2和 (g) CO、 (h) O_3及 (i) O_3最大8小時濃度趨勢圖。 (摘自環保署 [現為環境部]，2021年報。子圖順序為先由上至下，再由左至右。)

趨勢，而來自人為活動的硝酸鹽則有增加的趨勢。

從各種觀測資料顯示，臺灣地區主要污染物濃度都呈現下降趨勢，只有O_3是唯一近10年來濃度持平的污染物，甚至2020年全臺灣高污染事件日 (AQI>100) 中，有72%來自高濃度O_3，28%來自$PM_{2.5}$ (環保署，2021)，因此氣候變遷對硝酸鹽、NO_X、VOC和臭氧影響的研究，是目前迫切需要的 (Chuang et al., 2022)。

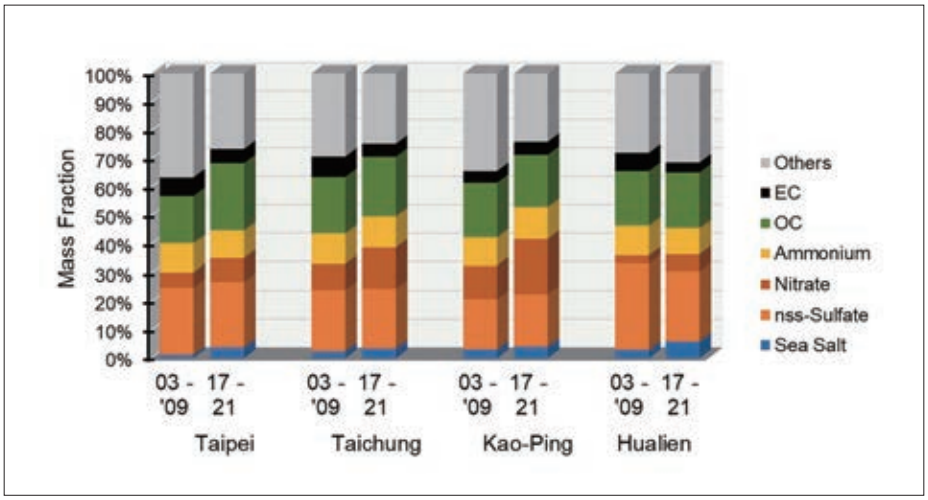


圖2.7.2　$PM_{2.5}$化學組成隨時間的變化。左直條是2003年至2009年中央研究院環境變遷研究中心密集觀測實驗平均值，右直條為環保署2017年至2021年測站觀測年平均值。由左而右分別為臺北、臺中、高屏及花蓮4區。 (摘自Chou et al., 2022)

2.7.2　COVID-19 對臺灣空氣品質的影響

2019年底COVID-19疫情自中國開始往外擴散並造成全世界大流行，在疫情初期(2020年春天)，臺灣並未進行強制警戒，Chang et al. (2021) 分析此時期臺北市跟新北市的空氣品質資料，發現上班日的空氣品質略變差，假日的空氣品質則稍微改進；進一步分析交通資料發現，民眾使用捷運及共享腳踏車的比例下降8%至18%，使用小客車及機車的情況增加11%至21%，顯示當時雖然臺灣的生活步調大致正常，但人民的交通習慣仍然有所改變，反而造成主要污染物濃度上升3%至7%不等。2020年春季起，全世界各國陸續降低工業、經濟活動、跨國交通等活動強度，臺灣也連帶受到影響，Wong et al. (2022) 分析環保署地面測站的主要污染物濃度，包括PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、O_3和CO的2020年平均濃度比起2018年至2019年減少1.3%至24%，整年的高污染事件日少了

30%。2020年到2021年初，臺灣的疫情比起世界各國相對輕微，直到2021年5月中，因疫情嚴重而進入3級警戒並持續到7月底， Huang et al. (2023) 分析在國立臺灣大學所收集到的資料 (圖2.7.3)，發現3級警戒期間的$PM_{2.5}$濃度比起3級警戒前 (2021年3月到5月初) 減少49%，其中來自交通活動的硝酸鹽減少可達90%，顯示如果政府能控制交通流量，將可明顯降低$PM_{2.5}$濃度。

臺灣位於亞洲大陸邊緣，冬、夏季受不同環流系統影響，易受來自不同地區的長程傳送污染物影響，因此COVID-19疫情除了明顯影響本地的污染物排放，也影響來自境外的污染物濃度。Griffith et al. (2020) 以衛星資料分析2017年至2020年春節期間的NO_2濃度，發現中國的中部到北部NO_2濃度減少約24%，在境外污染的事件裡，臺灣北部$PM_{2.5}$濃度減少達一半以上。Lai & Brimblecombe (2021) 則以金門、馬祖和馬公等外島測站以及北海岸富貴角的污染物濃度資料，搭配逆軌跡分析，發現比較靠近中國的金門和馬祖站，NO_X和$PM_{2.5}$濃度降低的趨勢較明顯，由實際地面觀測以及衛星遙測資料都指出，中國在COVID-19疫情管制期間，傳送到臺灣的污染物濃度比疫情前減少。

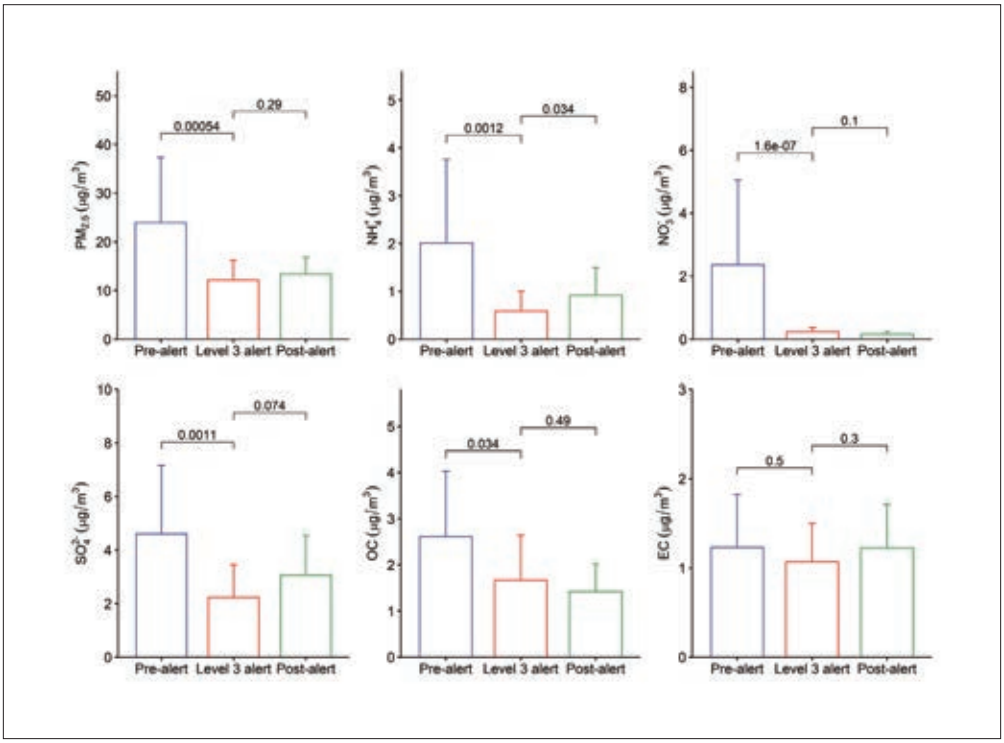


圖2.7.3　COVID-19對常見污染物濃度的影響。上排由左至右分別為$PM_{2.5}$、NH_4及NO_3，下排由左至右分別為SO_4、OC及EC。圖內長條由左至右分別為3級警戒前 (2021年3月4日至5月12日，藍色)、警戒期間 (2021年5月15日至7月26日，紅色) 及警戒後 (2021年7月29日至10月5日，綠色)，資料來自國立臺灣大學。 (摘自Huang et al., 2023)

參考文獻

呂致穎、洪景山、徐嘉鴻、張兆庠、張博雄、黃馨儀、詹智雄、潘琦、劉坤波、羅資婷 (2023)。**1897-2020臺灣氣候統計圖集**。交通部中央氣象署。ISBN 978-986-531-506-1

朱容練、葉森海、黃柏誠、吳宜昭、陳淡容、王安翔、林欣弘、江宙君、徐理寰、于宜強 (2022)。**2020- 2021 旱災歷程與應變**。國家災害防救科技中心業務報告，NCDR 110-A15。

李庭慧、黃威凱、許晃雄 (2018)。台灣氣溫季節循環的長期變遷。**大氣科學，46** (3)，294-316。

李明營、洪浩哲、許晃雄、王品翔 (2023)。2020-2021臺灣百年大旱原因分析。**大氣科學，51** (1)，30-55。

李清勝、盧孟明 (2012)。從氣候觀點探討影響臺灣颱風的定義問題。**氣象學報，48** (4)，25-38。

行政院環境保護署 (2021)。**110年空氣品質監測年報**。https://www.epa.gov.tw/Page/672FA2BDDEAA22C7/71fedbd8-9829-49e0-b02b-0addb5bd470a

卓盈旻、盧孟明 (2013)。臺灣地區近百年極端乾期變化分析。**大氣科學，41** (2)，171-188。

洪致文、施明甫 (2017)。臺灣氣象乾旱指數的建立與嚴重乾旱事件分析。**大氣科學，45** (2)，145-164。

洪志誠、周佳瑩、黃安億 (2018)。**不同海溫情境下臺灣寒潮的未來推估**。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (I)，42。

翁叔平、楊承道 (2013)。應用標準化降水蒸發散指數分析臺灣百年來乾溼變化的低頻特徵與遙地相關。**大氣科學，41** (2)，139-170。

張智鈞、洪志誠、董德輝 (2020)。臺灣冬季寒潮歷史變遷與未來推估。**大氣科學，48** (2)，205-233

國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」 (2023)。**臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6 統計降尺度版**。國家災害防救科技中心。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_05_03.aspx

張智鈞、洪志誠、董德輝 (2020)。台灣冬季寒潮歷史變遷與未來推估。**大氣科學，48** (2)，205-233

陳昭安、李明營、童裕翔、許晃雄 (2023)。**臺灣乾旱事件的過去、現在與未來**。TCCIP技術報告。

陳泰然 (1994)。臺灣梅雨季之豪雨研究。**大氣科學，22** (4)，455-477。

陳慶昌、嚴明鉦、王世宇 (2007)。臺灣與東亞之夏季季風降雨變化。**大氣科學，35** (4)，305-351。

黃紹欽、李宗融、黃柏誠、吳宜昭、王安翔、于宜強 (2022)。**臺灣極端氣候與天氣事件回顧與**

分析 . 2021：枯旱大地：百年大旱：2021 乾旱成因與影響。國家災害防救科技中心。

詹森主編 (2018)。**臺灣區域海洋學 (二版)**。國立臺灣大學出版中心。

盧孟明、李思瑩 (2009)。臺灣寒潮定義-分析以臺北測站為代表之適當性。**大氣科學，37** (1)，1-10。

謝信良、王時鼎、鄭明典、葉天降 (1998)。**百年 (1897-1996) 侵臺颱風之統計分析及應用**。中央氣象局之百年颱風資料庫。

Bulgin, C. E., Merchant, C. J., & Ferreira, D. (2020). Tendencies, variability and persistence of sea surface temperature anomalies. *Sci. Rep., 10*, 7986.

Cazenave, A., & Cozannet, G. L. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future, 2*(2), 15-34.

Chang, H.-H., C. D. Meyerhoefer, & F.-A. Yang, (2021). COVID-19 prevention, air pollution and transportation patterns in the absence of a lockdown. *Journal of Environmental Management, 298*, 113522. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113522

Chang, Y., Shih, Y. Y., Tsai, Y. C., Lu, Y. H., Liu, J. T., Hsu, T. Y., Yang, J. H., Wu, X. H., & Hung, C. C. (2022). Decreasing trend of kuroshio intrusion and its effect on the chlorophyll-a concentration in the Luzon Strait, South China Sea. *GIScience & Remote Sensing, 59*(1), 633-647. https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2051384

Chen, J.-M. F.-C. Lu & C.-F. Shih. (2008). Decadal Oscillation of Fall Temperature in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean., 19*(5), 497-504.

Chen, J.-M., L. Tim, & C.-F. Shih, (2010). Tropical cyclone and monsoon induced rainfall variability in Taiwan. *J. Clim., 23*, 4107-4120. https://doi.org/10.1175/2010JCLI3355.1

Chen, J.-M., P.-H. Tan, L. Wu, J.-S. Liu, & H.-S. Chen, (2017). Climatological analysis of passage-type tropical cyclones from the Western North Pacific into the South China Sea. *Terr. Atmos. Ocean. Sci., 28*, 327-343. https://doi.org/10.3319/TAO.2016.10.04.02

Chen, T. C., S. Y. Wang, & M. C. Yen, (2007). Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei. *J. Appl. Meteorol. Climatol., 46*, 1324–1340.

Chen, T. C., W. R. Huang, & M. C. Yen, (2011). Interannual variation of the late spring-early summer monsoon rainfall in the northern part of the South China Sea. *J. Clim., 24*, 4295–4313.

Chen, Y., Zhai, F., & Li, P. (2020). Decadal variation of the Kuroshio intrusion into the South China Sea during 1992–2016. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 125*(1), e2019JC015699.

Cheng, F.-Y., & C.-H. Hsu, (2019). Long-term variations in PM2. 5 concentrations under changing meteorological conditions in Taiwan. *Scientific reports, 9*(1), 1-12.

Cheng, X., & Y. Qi, (2007). Trends of sea level variations in the South China Sea from merged altimetry data. *Global and Planetary Change, 57*(3-4), 371-382.

Chou, C. C., Lung, S. C., Hsiao, T., & Lee, C. (2022). *Regional and urban air quality in East Asia: Taiwan*. Handbook of Air Quality and Climate Change, 1-38. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_71-1

Chuang, M.-T., C.-F. Wu, C.-Y. Lin, W.-C. Lin, C. C. K. Chou, C.-T. Lee, T.-H. Lin, J. S. Fu, & S. S.-K. Kong, (2022). Simulating nitrate formation mechanisms during PM2.5 events in Taiwan and their implications for the controlling direction. *Atmospheric Environment, 269*, 118856, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118856

Chu, P.-S., X. Zhao, C.-T. Lee, & M.-M. Lu, (2007). Climate Prediction of Tropical Cyclone Activity in the Vicinity of Taiwan Using the Multivariate Least Absolute Deviation Regression Method. *Terr. Atmos. Ocean. Sci., 18*(4), 805-825. https://doi.org/10.3319/TAO.2007.18.4.805(A)

Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO2 problem. *Annual review of marine science, 1*, 169-192. https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834

Fu, Y., Zhou, X., Zhou, D., Li, J., & Zhang, W. (2021). Estimation of sea level variability in the South China Sea from satellite altimetry and tide gauge data. *Advances in Space Research, 68*(2), 523-533.

Fu, Y., Zhou, X., Zhou, D., Sun, W., & Jiang, C. (2019). Sea level trend and variability in the South China Sea. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4*, 589-593.

Griffith, S. M., W.-S. Huang, C.-C. Lin, Y.-C. Chen, K.-E. Chang, T.-H. Lin, S.-H. Wang, & N.-H. Lin, (2020). Long-range air pollution transport in East Asia during the first week of the COVID-19 lockdown in China. *Science of The Total Environment, 741*, 140214. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140214

Hong, C.-C., Y.-K. Wu, & T. Li, (2016). Influence of climate regime shift on the interdecadal change in tropical cyclone activity over the Pacific Basin during the middle to late 1990s. *Climate Dynamics, 47*, 2587–2600. https://doi.org/10.1007/s00382-016-2986-x

Hsu, P.-C., T.-H. Lee, C.-H. Tsou, P.-S. Chu, Y. Qian, & M. Bi, (2017). Role of scale interactions in the abrupt change of tropical cyclone in autumn over the western North Pacific. *Climate Dynamics, 49*(9–10), 3175–3192. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3504-x

Huang, W.-R., H.-H. Hsu, S.-Y. Wang, & J.-P. Chen, (2015). Impact of atmospheric changes on the low-frequency variations of convective afternoon rainfall activity over Taiwan. *J. Geophys. Res. Atmos., 120*, 8743–8758. https://doi.org/10.1002/2015JD023568

Huang, W.-R., Y.-H. Chang, H.-H. Hsu, C.-T. Cheng, & C.-Y. Tu, (2016). Dynamical Downscaling Simulation and Future Projection of Summer Rainfall in Taiwan: Contributions from Different Types of Rain Events. *J. Geophys. Res. Atmos., 121*, 13973-13988. https://doi.org/10.1002/2016JD025643

Huang, W.-R., Y.-H. Chang & P.-H. Huang, (2019). Relationship between the Interannual Variations of Summer Convective Afternoon Rainfall Activity in Taiwan and SSTA(Niño3.4) during 1961-2012: Characteristics and Mechanisms. *Scientific Reports, 9*, 9378. https://doi.org/10.1038/s41598-019-45901-w

Huang, W.-R. & K.-C. Chen, (2015). Trends in Pre-Summer Frontal and Diurnal Rainfall Activities during 1982-2012 over Taiwan and Southeast China: Characteristics and Possible Causes. *International Journal of Climatology, 35*, 2608–2619.

Huang, C.-H., Y.-R. Ko, T.-C. Lin, Y.-H. Cheng, Y.-C. Chen, & Y.-C. Ting, (2023). Implications of the Improvement in Atmospheric Fine Particles: A Case Study of COVID-19 Pandemic in Northern Taiwan.*Aerosol and Air Quality Research, 23*, 220329. https://doi.org/10.4209/aaqr.220329

Hung, C.-W. (2013). A 300-year typhoon record in Taiwan and the relationship with solar activity. *Terr. Atmos. Ocean. Sci., 24*(4), 737-743. https://doi.org/10.3319/TAO.2013. 02.18.01(A)

Hung, C.-W., & H.-H. Hsu, (2008). The First Transition of the Asian Summer Monsoon, Interseasonal Oscillation, and Taiwan Mei-yu. *Journal of Climate, 21*(7), 1552–1568.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Jan, S., Wang, J., Chern, C. S., & Chao, S. Y. (2002). Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait. *Journal of Marine Systems, 35*(3-4), 249-268.

Jiang, G. Q., Jin, Q., Wei, J., Malanotte-Rizzoli, P., Gordon, A. L., & Li, M. (2021). A reduction in the sea surface warming rate in the South China Sea during 1999–2010. *Climate Dynamics, 57*(7-8), 2093-2108.

Jou, B.J.D., Y.C. Kao, R.G.R. Hsiu, C.J.U. Jung, J.R. Lee, & H.C. Kuo, (2015). Observational Characteristics and Forecast Challenge of Taipei Flash Flood Afternoon Thunderstorm: Case Study of 14 June 2015. *Atmospheric Sciences, 43*, 265-284. (in Chinese with an English abstract)

Kuo, Y. C., Yu, Y., & Tseng, Y. H. (2023). Interannual changes of the summer circulation and hydrology in the East China Sea: A modeling study from 1981 to 2015. *Ocean Modelling, 181*, 102156.

Lan, W. H., Kuo, C. Y., Kao, H. C., Lin, L. C., Shum, C. K., Tseng, K. H., & Chang, J. C. (2017). Impact of geophysical and datum corrections on absolute sea-level trends from tide gauges around Taiwan, 1993–2015. *Water, 9*(7), 480.

Lai, I., & P. Brimblecombe, (2021). Long-range transport of air pollutants to Taiwan during the COVID-19 lockdown in Hubei province. *Aerosol Air Qual. Res. 21*, 200392.

Laruelle, G. G., Cai, W., Hu, X., Gruber, N., Mackenzie, F. T., & Regnier, P. (2018). Continental shelves as a variable but increasing global sink for atmospheric carbon dioxide. *Nature Communications, 9*, 454. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02738-z

Lee, C.-S., K.-H. Chang, & H. Kim, (2019). Long-term (2005–2015)trends analysis of OMI retrieved NO2 columns in Taiwan. *Atmospheric Pollution Research, 10*(3), 960-970, https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.004

Lee, M. A., Huang, W. P., Shen, Y. L., Weng, J. S., Semedi, B., Wang, Y. C., & Chan, J. W. (2021). Long-Term Observations of Interannual and Decadal Variation of Sea Surface Temperature in the Taiwan Strait. *Journal of Marine Science and Technology, 29*(4), 7.

Li, L., Jindian, X., & Rongshuo, C. (2002). Trends of sea level rise in the South China Sea during the 1990s: An altimetry result. *Chinese Science Bulletin, 47*, 582-585.

Lin C. Y., W.C. Chen, P.-L. Chang, & Y.F. Sheng (2011): Impact of urban heat island effect on the precipitation over complex geographic environment in northern Taiwan. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50*(2), 339-353. https://doi.org/10.1175/2010JAMC2504.1

Lui, H., Chen, C. A., Lee, J., Wang, S., Gong, G., Bai, Y., & He, X. (2015). Acidifying intermediate water accelerates the acidification of seawater on shelves: An example of the East China Sea. *Continental Shelf Research, 111*, 223-233. https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.08.014

Lui, H.-K., & Chen, C.-T. A. (2015). Deducing acidification rates based on short-term time series. *Scientific Reports, 5*, 11517. https://doi.org/10.1038/srep11517

Luo, Y., & Boudreau, B. P. (2016). Future acidification of marginal seas: A comparative study of the Japan/East Sea and the South China Sea. *Geophysical Research Letters, 43*(12), 6393-6401. https://doi.org/10.1002/2016gl068760

Ma, D., Gregor, L., & Gruber, N. (2023). Four decades of trends and drivers of global surface ocean acidification. *Global Biogeochemical Cycles, 37*(7), e2023GB007765. https://doi.org/10.1029/2023gb007765

McKee, T. B., N. J. Doesken, & J. Kliest, (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, American Meterological Society, Boston, MA. 179-184.

Oey, L. Y., Chang, M. C., Chang, Y. L., Lin, Y. C., & Xu, F. H. (2013). Decadal warming of coastal China Seas and coupling with winter monsoon and currents. *Geophysical Research Letters, 40*(23), 6288-6292.

Peterson, T.C. (2005). Climate Change Indices. *WMO Bulletin, 54* (2), 83-86.

Qu, T., Kim, Y. Y., Yaremchuk, M., Tozuka, T., Ishida, A., & Yamagata, T. (2004). Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea?. *Journal of Climate, 17*(18), 3644-3657.

Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., Wanninkhof, R., Wong, C. S., Wallace, D. W., Tilbrook, B., Millero, F. J., Peng, T., Kozyr, A., Ono, T., & Rios, A. F. (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO2. *Science, 305*(5682), 367-371. https://doi.org/10.1126/science.1097403

Singh, A., C. C. K. Chou, S.-Y. Chang, S.-C. Chang, N.-H. Lin, M.-T. Chuang, S. K. Pani, K. H. Chi, C.-H. Huang, & C.-T. Lee, (2020). Long-term (2003–2018)trends in aerosol chemical components at a high-altitude background station in the western North Pacific: Impact of long-range transport from continental Asia. *Environmental Pollution, 265*, 114813. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114813

Tang, D., Kester, D. R., Ni, I. H., Kawamura, H., & Hong, H. (2002). Upwelling in the Taiwan Strait during the summer monsoon detected by satellite and shipboard measurements. *Remote sensing of environment, 83*(3), 457-471.

Tsao, S.-E., Shen, P.-Y., & Tseng, C.-M. (2023). Rapid increase of pCO2 and seawater acidificationalong Kuroshio at the east edge of the East China Sea. *Marine Pollution Bulletin, 186*, 114471. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114471

Tseng, Y.-H., L.C. Breaker & E.T-Y. Chang, (2010). Sea level variations in the regional seas around Taiwan. *J. Oceanogr.66*(1), 27-39.

Tu, J.-Y., & J.-M. Chen, (2019). Large‐scale indices for assessing typhoon activity around Taiwan. *International Journal of Climatology, 39*(2), 921-933. https://doi.org/10.1002/joc.5852

Tu, J.-Y., J.-M. Chen, L. Wu, & C.-Z. Chi, (2020). Inter‐decadal and inter‐annual variability of meridional tropical cyclone activity during September–October in the northwestern North Pacific after 1998. *International Journal of Climatology, 40*(3), 1686-1702. https://doi.org/10.1002/joc.6295 i.org/10.1002/joc.6295

Tung, Y.-S., C.-Y. Wang, S.-P. Weng, & C.-D. Yang, (2022). Extreme index trends of daily gridded rainfall dataset (1960–2017)in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci. 33*, https://doi.org/10.1007/s44195-022-00009-z

Vicente-Serrano, S., S. Beguería, & J. López-Moreno, (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Climate, 23*(7), 1696-1718.

Wang, S. Y., & T. C. Chen, (2008). Measuring East Asian summer monsoon rainfall contributions by different weather systems over Taiwan. *J. Appl. Meteorol. Climatol., 47*, 2068–2080.

Wang, C.-C., G. T. Chen, T. Chen, & K. Tsuboki, (2005). A Numerical Study on the Effects of

Taiwan Topography on a Convective Line during the Mei-Yu Season. Mon. Wea. *Rev., 133*(11), 3217–3242.

Wang, Y. (1998). Sea-level changes, human impacts and coastal responses in China. *J. Coast. Res., 14*, 31-36.

Wang, H., K. Liu, Z. Gao, W. Fan, S. Liu, & J. Li, (2017). Characteristics and possible causes of the seasonal sea level anomaly along the South China Sea coast. *Acta Oceanologica Sinica, 36*, 9-16.

Wang, Q., Y. Li, Q. Li, Y. Liu, & Y. N. Wang, (2019). Changes in means and extreme events of sea surface temperature in the East China Seas based on satellite data from 1982 to 2017. *Atmosphere, 10*(3), 140.

Wei, J., P. Malanotte-Rizzoli, M.-T. Li, & H. Wang, (2016). Decomposition of thermal and dynamic changes in the South China Sea induced by boundary forcing and surface fluxes during 1970–2000. *J Geophys Res Oceans 121*, 7953–7972.

Wong, Y. J., H.-Y. Shiu, J. H.-H. Chang, M. C. G. Ooi, H.-H. Li, R. Homma, Y. Shimizu, P.-T. Chiueh, L. Maneechot, & N. M. Nik Sulaiman, (2022). Spatiotemporal impact of COVID-19 on Taiwan air quality in the absence of a lockdown: Influence of urban public transportation use and meteorological conditions. *Journal of Cleaner Production, 365*, 132893. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132893

Xu, Y., Lin, M., Zheng, Q., Ye, X., Li, J., & Zhu, B. (2015). A study of long-term sea level variability in the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica, 34*(11), 109-117. https://doi.org/10.1007/s13131-015-0754-0

Yan, Z. W., J. J. Xia, C. Qian, & W. Zhou, (2011). Changes in Seasonal Cycle and Extremes in China during the Period 1960-2008. *Adv. Atmos. Sci., 28*(2), 269-283.

Yuan, D., Han, W., & Hu, D. (2006). Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 111*(C11).

Yuan, J., Guo, J., Zhu, C., Hwang, C., Yu, D., Sun, M., & Mu, D. (2021). High-resolution sea level change around China seas revealed through multi-satellite altimeter data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 102*, 102433. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102433

Zhang, X., G. Hegerl, F.W. Zwiers, & J. Kenyon, (2005). Avoiding inhomogeneity in per-centile-based indices of temperature extremes. *J. Clim., 18*(11), 1641-1651.



第三章
臺灣未來氣候變遷推估

陳正達[1]、王俊寓[2]、王嘉琪[3]、杜佳穎[4]、林思穎[2]、林修立[1]、
許晃雄[4]、郭怡君[5]、陳昭安[2]、陳英婷[4]、曾于恒[5]、童裕翔[2]、
黃婉如[1]、蔡宜君[4]、鄭兆尊[2]

[1]國立臺灣師範大學地球科學系
[2]國家災害防救科技中心
[3]中國文化大學大氣科學系
[4]中央研究院環境變遷研究中心
[5]國立臺灣大學海洋研究所

摘要

未來的臺灣氣候變遷推估，主要是應用統計降尺度後的第6期耦合模式比對計畫 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) 模擬資料，以基期 (1995年至2014年) 氣候值為基準，進行短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年) 與長期 (2081年至2100年) 3個20年時段氣候變化的評估。在4種不同共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP) 情境下，臺灣在短期的平均增溫為0.6°C至0.8°C。長期氣候變化，在世紀末時段，不同情境出現較明顯的差別，從SSP1-2.6增溫1°C，至SSP5-8.5增溫3.4°C，但升溫較顯著的區域皆為臺灣西北部。以全球暖化程度為基準，評估在不同暖化程度的臺灣增溫幅度介於0.6°C至2.7°C之間，小於全球平均增溫幅度。在季節長度變化的未來推估方面，本世紀末夏季持續變長至超過150天，冬季持續變短至少於30天。惟有在SSP1-2.6情境下，夏季與冬季的長度能維持在世紀中的情況，分別為150天及45天左右。

臺灣未來降雨量變化推估方面，年平均降雨在短期與中期的增加幅度較小，於長期世紀末有較明顯的增加。在SSP5-8.5的情境下模式平均推估降雨增加約15%，但不同模式的降雨變化率分布於-6%至+83%，顯示推估結果的不確定性高。空間上的分布結果也呈現低一致性。惟有在SSP5-8.5情境下的世紀末，西南部有降雨較大增加率 (+10%) 且具一致性。以全球暖化程度 (Global Warming Level, GWL) 為基準也呈現相似的結果，全臺降雨變化幅度隨暖化程度增加而增加 (由GWL從1.5°C至4°C所對應的上升幅度為1.6%至14%)。西南部在GWL 4°C狀態下呈現高模式一致性，降雨增加可超過30%。降雨季節分布變化推估結果顯示，乾季 (11月至4月) 越來越乾，濕季 (5月至10月) 越來越濕，其不均勻將隨全球暖化而變得更加嚴重。以GWL推估結果為例，GWL 3°C及GWL 4°C時，乾季降雨減少10%至15%，主要在臺灣東北部及東半部地區，且模式一致性較高。濕季降雨增加幅度，在GWL 3°C小幅增加5%至15%。但在GWL 4°C時，中南部沿海、臺東及澎湖區域可增加超過30%，這些未來乾濕季雨量的變化將使臺灣的水資源調度更加困難。

極端高溫以日高溫超過36°C天數 (TX36)，呈現未來持續性高溫事件的變化趨勢。在1.5°C至4°C的4種GWL下，TX36分別增加5.4天、10.6天、28天與54.5天。 若以最劣SSP5-8.5情境的推估，本世紀末平均增加74.6天。增加天數較多的區域包括臺北盆地、

中部近山區與高屏近山區。低溫事件用極端低溫持續指數 (Cold Wave Duration Index, CWDI) 進行評估，結果發現所有暖化情境皆呈現天數減少。以GWL 1.5°C至GWL 4°C的結果為例，平均每年分別為減少4.1天、6.6天、8.8天與10天。由於位處副熱帶的臺灣受寒潮爆發影響的機率較小，採樣不足導致多模式推估低溫事件變化趨勢的一致性低、不確定高。但日低溫最小值 (TNn) 的上升趨勢具有高模式一致性，4種GWL溫度增加介於0.7°C至3°C，增加幅度較高的區域為西部 (GWL 4°C時)。極端降雨的型態變化部分，在未來暖化情境下，夏季增溫結構特徵將導致大氣垂直穩定度增加，不利於午後對流發生，使得午後對流的降雨頻率變少，但水汽蒸發散量增加，降雨強度將增強。在梅雨季，臺灣西半部迎風面極端降雨事件天數及強度皆為增加，而在東部地區則是減少。此外，21世紀中後期，梅雨季降雨量最大的發生時間，從6月中旬往後延至6月下旬，且降雨強度亦將增強，此因南海地區西南風增強的時間往後延遲，所以傳輸至下游的臺灣產生劇烈降雨時間也往後遞延。

未來推估年最大一日降雨量 (Rx1day) 降雨強度將增加，隨著全球暖化程度的加劇，極端一日暴雨強度呈現逐漸增強的趨勢，特別是在SSP5-8.5的排放情境下，中彰投地區的增加幅度可能達60%。在GWL 1.5至GWL 4°C增暖下，增加幅度分別為8%、10%、14.1%和28.6%。水文頻率分析也顯示降雨量隨著暖化嚴重程度增加，尤其在GWL 4°C情境下，10年重現期距降雨量 (return value 10, rv10)，已接近現今氣候 (基期) 50年重現期距降雨量 (return value 50, rv50)。

極端氣候未來推估的部分，與乾旱有關的年最長連續不降雨日呈現增加趨勢，在世紀末隨著暖化情境加劇而增加得更為明顯，且南部的增加情況比北部更嚴重。標準化降水指數則顯示，世紀末隨著暖化程度越嚴重，全臺乾旱事件越來越多，短時間尺度乾旱事件 (SPI3) 發生時的強度及頻率會增強。而事件延時則受熱帶海溫變化影響較大，但目前不確定性仍高。另外，推估未來春季為少雨趨勢，其可能原因與低層的東北風變異有關，造成春季提供水氣的西南風減弱。

由於CMIP模式空間解析度不足，無法直接模擬出實際颱風的強度，影響臺灣颱風部分的模擬與推估，使用的是以高解析度全球模式推估進一步用區域模式動力降尺度模擬結果。相對於基期的21世紀中期與末期，期間分別對應的侵臺颱風發生個數減少約10%與50%，但強颱出現頻率則是增加約105%與60%；颱風影響期間的近中心最大風

速增加約5%與9%；當颱風強度最強時，距中心半徑200 km內的區域平均降雨增加約20%與35%；颱風所造成臺灣陸地的降雨強度普遍增加20%與40%；受降雨強度增加但是颱風頻率減少的因素影響下，臺灣陸地上颱風降雨在世紀中稍有增加，但在世紀末減少約10%至50%不等。

臺灣周遭海平面高度的未來推估，在SSP1-2.6、SSP2-4.5及SSP5-8.5情境下，基隆及高雄兩個位置的多模式推估上升幅度在世紀末分別將介於0.48 m至0.82 m及0.41 m至0.78 m。然而受到海水溫度、鹽度變化伴隨密度改變，以及與極區冰川融化、河川逕流流入等複雜物理過程影響，以及冰原模擬過程的潛在因子了解不足，使氣候模式未來推估趨勢的一致性較低。臺灣南北海平面變化的差異受到區域性洋流及海水熱結構的影響，仍需藉高解析度區域海洋模式動力降尺度資料以瞭解其變化細節。

以動力降尺度模擬結果驅動空氣品質模式，在排放量不變的情形下，推估未來臺灣秋冬季的空氣品質將會變差，主要是受到低層風速變弱、穩定度增加、邊界層變淺不利於污染物傳送與擴散，再加上東北季風日數減少的影響。此外大氣的增溫加速臭氧光化反應，導致臭氧濃度增加。目前臺灣空氣品質不良主要來自$PM_{2.5}$與臭氧，但未來因臭氧濃度增加造成空氣品質不良的情況將更容易發生。

3.1 前言

聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 於2021年發佈第六次氣候變遷評估報告 (The Sixth Assessment Report, AR6) 的第一工作小組報告「氣候變遷2021：物理科學基礎」，其中針對區域氣候變遷與推估，較過去報告提供了更多資訊，包含從全球與區域氣候的連結、極端天氣與氣候事件的改變以及災害風險評估所需要的氣候資訊，並且提供了區域氣候變遷圖集以及互動式圖集網頁給一般大眾參考。報告揭示自工業革命以來，全球平均溫度上升趨勢明顯，導致近年來越加嚴重氣候變化，各地熱浪、乾旱、颱風……等極端天氣與氣候事件發生頻率、強度產生變化，從第二章中針對臺灣過去百年測站溫度變化，以及相關的極端氣候指標的分析結果，也同樣多半呈現上升趨勢。

而針對未來推估方面，IPCC AR6以新提出的全球未來不同社會經濟發展途徑 (參見第一章的文字框1)，運用CMIP6氣候模式系集推估未來全球與區域氣候變遷，在影響社會甚鉅的極端天氣與氣候事件改變方面，未來發生頻率、強度的改變，將持續隨著全球平均氣溫上升而進一步再增強。由於目前CMIP6氣候模式因模擬能力與水平空間解析不足，無法精確地提供局部地區的氣候特性改變，因此，本章將以進一步針對臺灣氣候所得到的動力與統計降尺度結果 (TCCIP技術報告，2021；TCCIP資料說明，2023)，提供以CMIP氣候模式推估為基準的臺灣未來氣候變遷推估資料的相關說明 (參見文字框7)。在統計降尺度方面，因CMIP6氣候模式已經有日資料的輸出，目前所使用的統計降尺度方法運用高解析度的臺灣網格化氣溫與降雨日資料，將氣候模式資料的空間解析度加高，並移除模式的系統性誤差，提供合理的區域氣溫與降雨日資料的統計機率密度分佈 (Cannon et al., 2015)。由於高解析度日資料可以計算標準極端天氣與氣候指標，易與AR6中的結果對應比較，而氣候平均改變的推估還是可以由統計降尺度後的日資料計算獲得，以保持資料的一致性。另外，「臺灣氣候變遷分析系列報告：2020-2021百年乾旱與未來推估」(陳昭安等人，2023) 與「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集： AR6統計降尺度版」(國家災害防救科技中心，2023) 為本章中描述乾旱與極端指標分析結果的重要文獻。空污部分則引用Tsai et al. (2024) 成果為關鍵依據。

除了全球未來不同社會經濟發展途徑的氣候未來推估外，本章也以GWL (Haustein et al., 2017) 做為未來氣候推估的基準，AR6報告中也同樣使用兩種呈現方式。由於CMIP氣候模式的氣候敏感度差異大，將使不同社會經濟發展途徑在選擇時段所呈現的模式未來推估，不只是模式架構、特性所造成的差異，也包含模式對於相同溫室氣體排放情境所產生反應的差異。為了去除這些複雜問題，科學家發展出以氣候模式在暖化增溫到達相同程度時，截段取出對應的氣候資料，降低因未來情境不同所造成的氣候推估分布的差異，也更適合針對在特定氣候暖化程度進行區域變化特性的比較 (參見第一章的文字框2)。

另外，由於像颱風或暴雨等極端天氣事件的改變往往需要更完整地伴隨氣象場的進一步分析，以探討未來氣候變遷對極端天氣事件的影響，因此針對臺灣的颱風或暴雨所使用的，是以AR5 RCP8.5情境下的高解析度全球模式推估所驅動之動力降尺度資料。雖然所使用的不是AR6的未來情境，但是與AR6中的SSP5-8.5情境相似，都是在世紀末有較高全球平均溫度上升的推估。

文字框 7 ｜降尺度資料說明

氣候變遷資料若要應用於臺灣，要先建立高時—空解析度、時序型降尺度資料。過去的技術只能呈現月或季節變化的推估資訊，僅可得到長期平均的氣候變化趨勢。本次科學報告進一步應用新的降尺度資料，可應用於評估未來極端氣候變化，表BOX 3.1.1分別針對動力與統計降尺度資料進行說明。

表BOX 3.1.1　統計與動力降尺度資料特性說明 (摘自TCCIP技術報告，2021。WRF全名為Weather Research and Forecasting Model，天氣研究和預報模式)

	統計降尺度	WRF動力降尺度
使用全球模式	地球系統模式	HiRAM全球氣候模式
暖化情境	CMIP6 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5	CMIP5 RCP8.5 世紀中 (2041年至2065年) 世紀末 (2075年至2099年)
全球暖化程度	1°C、1.5°C、2°C、3°C、4°C	1°C 、2°C、4°C
時間解析度	日	小時
降尺度方法	統計演算法 (QDM)	大氣物理熱力與動力方程
產製花費時間	產製快速	耗時、需要大量運算資源
變數	溫度 (最高、最低、平均)、雨量	颱風雨量、風場、氣壓、輻射、相對濕度等
應用層面	平均或極端氣候變化趨勢	極端事件分析及衝擊模擬，以及其他應用，例如能源、淹水等

統計降尺度

統計降尺度方法與步驟可參考TCCIP資料說明 (2023)。雖然全球模式歷史模擬 (historical) 時期為1850年至2014年，但考量統計降尺度日資料的產製，需要

使用CMIP6全球模式日資料，同時要使用網格化觀測日資料進行偏差修正，因此降尺度的資料也設定在網格化觀測資料最早時間點1960年、結束時間為全球模式歷史模擬 (historical) 最終年2014。未來推估則為全球模式使用 4 組社會經濟-排放情境 (SSP-RCPs) 的模擬結果，資料長度為2015年至2100年，包含SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0與SSP5-8.5 (表Box 3.1.2)。

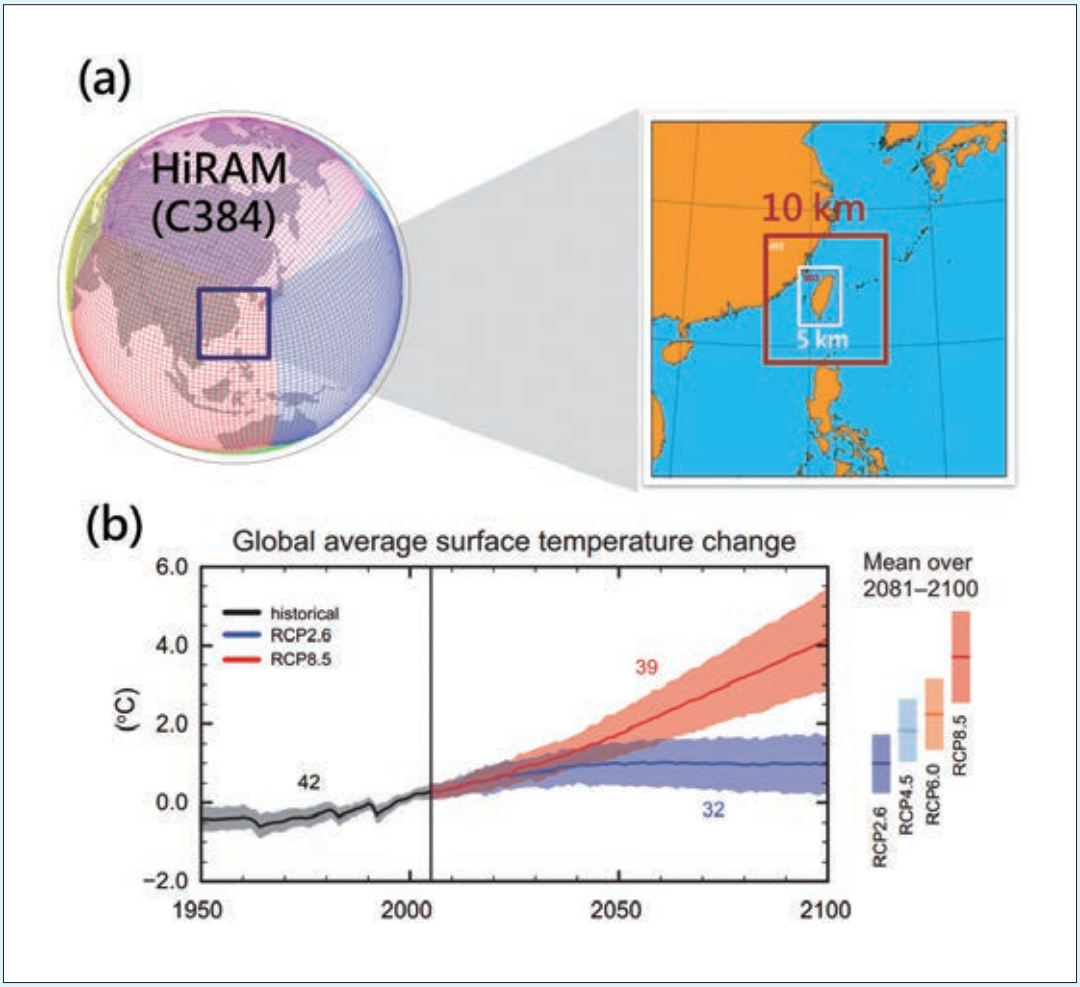
表BOX 3.1.2　統計降尺度資料說明 (包含情境、模式數量、時間與變數)(摘自TCCIP資料說明，2023)

暖化情境	模式數量	資料時間範圍	氣候變數
historical	31 (28)	統計降尺度資料：1960年至2014年	平均氣溫 最高氣溫 最低氣溫 降雨量
SSP1-2.6 SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5	28 (25) 29 (26) 27 (23) 29 (26)	2015年至2100年	

而後將各別全球模式GWL達到相對應的氣候時間區段日資料，計算臺灣的平均溫度或降雨變化，以及相關的極端氣候指標。

動力降尺度

災害領域未來暖化情境推估，需要高時—空解析度極端事件大氣模擬資料，進行相關氣候變遷衝擊模擬。動力降尺度資料以物理模式模擬，應用GFDL-HiRAM全球模式，使用4組代表CMIP5暖化最嚴重RCP8.5情境下的海溫，進行高解析度全球氣候模擬，再應用WRF進行臺灣區域5km解析度動力降尺度 (圖BOX 3.1.1a)。未來推估模擬包含21世紀中、21世紀末，以及GWL 2°C、GWL 4°C高時空解析度資料 (圖BOX 3.1.1b)。由於模擬過程複雜，可產製多變數資料，因此建置過程相對於統計降尺度，需要花費較長時間與電腦計算資源，詳細說明可參考TCCIP技術報告 (2021)。



圖BOX 3.1.1　動力降尺度模擬示意圖。使用GFDL-HiRAM (C384) 高解析度 (25 km) 全球模式模擬，再以WRF區域氣候模式使用2層槽狀網格進行臺灣區域5km解析度動力降尺度。(b) 使用AR5 RCP8.5的 4 組海溫進行如圖 (a) 步驟進行降尺度。現今氣候模擬50年分 (2組不同初始場、每組25年)，2°C (世紀中，約於紅色實線的2035-2060年處) 與4°C (世紀末，約於紅色實線的2075-2100年處) 分別100年分模擬 (4組海溫、每組25年)。(資料來源：[圖a] 本報告產製，[圖b] IPCC AR5, Working Group 1, SPM Figure SPM.7)

文字框 8 ｜暖化情境模擬比較

IPCC出版的全球氣候變遷評估報告 (AR, Assessment Report)，使用的未來推估全球氣候變化物理基礎，是以CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) 計畫結合全球各地氣候研究中心應用各自發展的氣候模式，設定全球未來可能的暖化情境，進行長時間氣候模擬的資料。從CMIP3以特定的溫室氣體排放情境，至AR6則加入更複雜且強調減緩與調適的社會經濟發展情境，除了模式解析度與個數增加，並更新推估的開始年，目的是增加未來情境模擬的真實度，呈現可能發生的實際狀況。相關版本比較可參考表BOX 3.1.3。

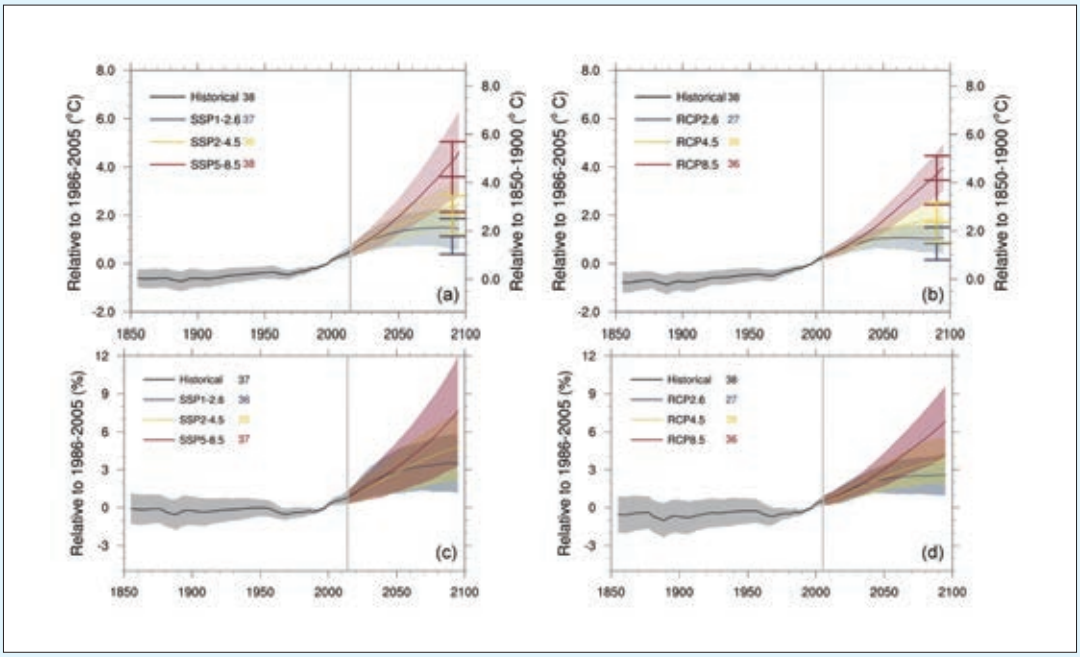
表BOX 3.1.3　IPCC各版本評估報告使用的全球模式資料特徵比較 (資料來源：Tebaldi et al., 2021、本報告產製)

評估報告	AR6	AR5	AR4
資料組	CMIP6	CMIP5	CMIP3
推估起始年	2015	2006	2001
常用暖化情境	社會經濟發展情境 SSPs (1-2.6, 2-4.5, 3-7.0, 5-8.5)	代表濃度途徑 RCPs (2.6, 4.5, 6.0, 8.5)	排放情境特別報告 SRES (B1, A1B, A2)
空間解析度	60 km至125 km	100 km至250 km	250 km至350 km
模式數	60個	42個	24個

隨時間演進發展出越來越先進而複雜的地球系統模式，以下以常用的兩個氣象變數溫度及降雨，從大範圍全球平均，到臺灣區域範圍尺度，呈現不同版本的相互比較。

全球

雖然CMIP6 (SSPs) 與CMIP5 (RCPs) 使用相對應的輻射驅動力 (相關說明參考Box 3.1.1)，然而CMIP6相較CMIP5於21世紀末長期 (2081年至2100年) 推估結果，全球平均溫度與降雨呈現增加較嚴重的情況 (圖BOX 3.1.2)，原因來自兩者使用的暖化情境不同，以及CMIP6有更多模式對於溫室氣體排放較為敏感 (Tebaldi et al., 2021)。



圖BOX 3.1.2　CMIP6與CMIP5全球模式溫度 (a)、(b) 與 (c)、(d) 降雨推估變化趨勢比較。左側為CMIP6 SSPs、右側為CMIP5 RCPs。如圖標所示以不同顏色代表暖化情境，其後面數字為使用的模式個數 (引用自Tebaldi et al., 2021) 。

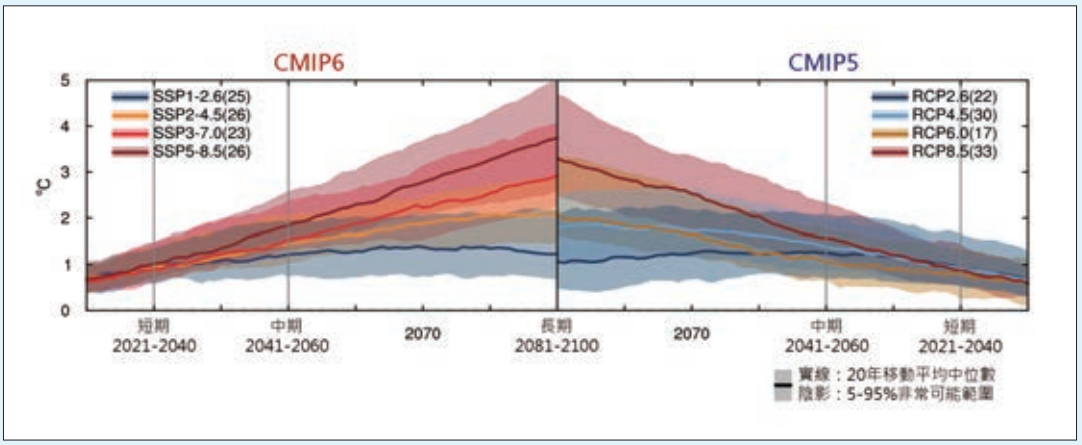
臺灣

臺灣區域則使用「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 的統計降尺度資料進行評估。與全球模式一樣設定現今氣候 (1986年至2005年) 為參考期，溫室氣體高排放情境 (SSP5-8.5) 於長期 (2081年至2100年) 推估上升約3.7°C；相對的低排放情境 (SSP1-2.6) 只會升溫1.23°C。整體而言，CMIP6推估升溫幅度略大於CMIP5模式，同時以最新的CMIP6的推估結果比較，臺灣的溫度增加情況略小於全球平均[1] (圖BOX 3.1.4)。

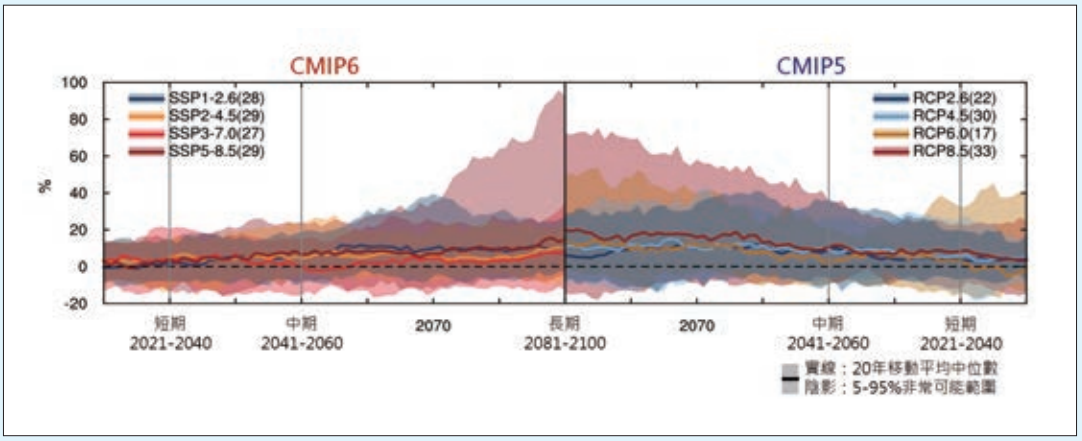
降雨部分，由於模擬的不確定性高，使得個別模式差異明顯，不似溫度推估變化趨勢穩定。同樣用20年滑動時序平均的方式呈現未來變化趨勢 (圖BOX 3.1.4)，以降雨變化率 (未來—基期) ／(基期) [單位：%] 表現未來推估情況。在21

1　21世紀末長期 (2081年至2100年) 平均溫度變化，全球平均值相對於基期 (1995年至2014年) 為增加3.99°C (Tebaldi et al., 2021)，臺灣則是增加3.5°C (國家災害防救科技中心，2023)。

世紀中期 (2041年至2060年) 推估降雨上升分別約10.6%與6.6%，且暖化情境間差異不明顯；長期 (2081年至2100年) 推估降雨分別上升約19.8%與14.6%。系集平均結果發現，雖然年平均雨量推估變化不似溫度增加趨勢顯著，仍可見暖化程度越大、降雨增加越多，兩個版本的推估降雨變化趨勢也一致，即呈現未來本世紀中期微幅上升，到長期才有顯著增加。



圖BOX 3.1.3　CMIP6與CMIP5統計降尺度推估的臺灣年平均溫度未來變化 (單位：℃)。使用20年滑動平均溫度，相對於參考期1986年至2005年變化的時間序列，實線為各暖化情境的模式系集中位數，陰影為SSP1-2.6 (藍色)、SSP2-4.5 (黃色)、SSP3-7.0 (紅色) 與SSP5-8.5 (暗紅色) 的5%至95%模式範圍。(資料來源：本報告產製)



圖BOX 3.1.4　CMIP6與CMIP5統計降尺度推估的臺灣年平均降雨未來變化 (單位：℃)。使用20年滑動平均溫度，相對於基期1986年至2005年變化的時間序列，實線為各暖化情境的模式系集中位數，陰影為SSP1-2.6 (藍色)、SSP2-4.5 (黃色)、SSP3-7.0 (紅色) 與SSP5-8.5 (暗紅色) 的5%至95%模式範圍。(資料來源：本報告產製)

3.2 溫度

3.2.1 平均溫度變化

以2015年為CMIP6氣候模擬推估資料的起始年分，進行4組SSPs未來情境臺灣區域平均溫度隨時間變化的分析，並以現今氣候 (1995年至2014年) 為基準計算距平 (圖3.2.1)，可以發現臺灣未來短期 (2021年至2040年) 的區域平均氣溫上升差異不明顯，增溫0.6°C至0.8°C (中位數)；中期 (2041年至2060年) 不同情境稍有差異，SSP1-2.6增溫1°C、SSP5-8.5則增溫1.6°C；長期 (2081年至2100年) 推估則出現比較明顯的差別，SSP1-2.6維持中期的增溫幅度 (1°C)，但SSP5-8.5則暖化程度增長至3.4°C。

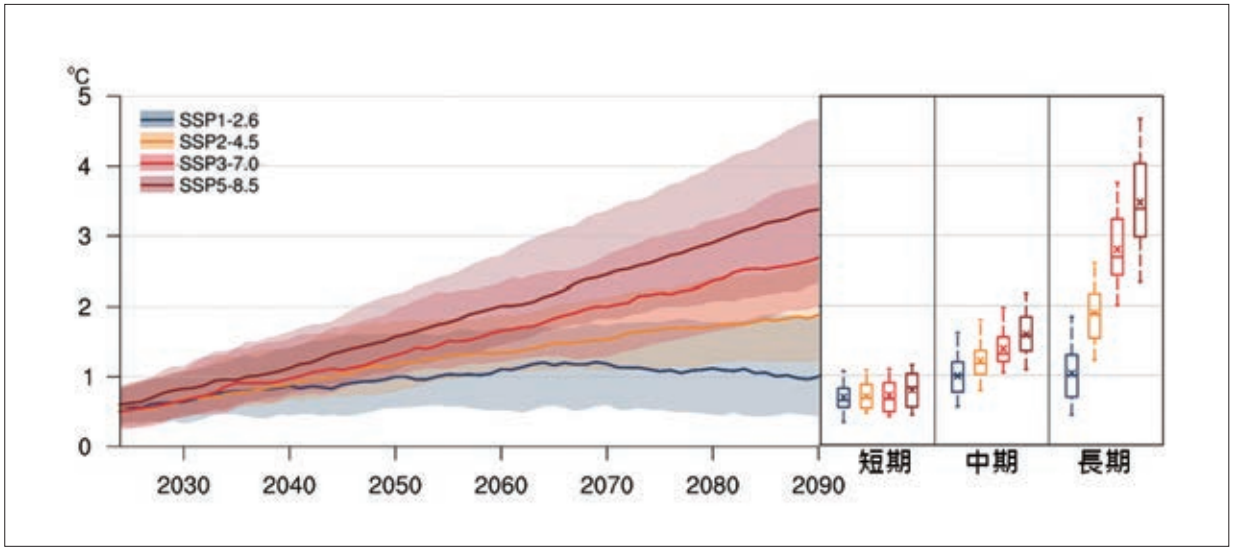


圖3.2.1　以CMIP6氣候模式評估不同SSPs情境下臺灣區域平均溫度距平的長期變化 (單位：°C)，現今氣候平均計算時段為1995年至2014年，長期變化曲線以每20年的滑動平均代表。左側時間序列圖中以不同顏色代表不同SSP情境，實線為所有氣候模式模擬結果的中位數、陰影區為所有模式系集的第5百分位至第95百分位數值區間。右側盒鬚圖為短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年) 與長期 (2081年至2100年) 氣候平均第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下)，同樣以顏色區分不同SSP情境、圖中X記號為系集平均值。(資料來源：本報告產製)

進一步檢視臺灣各時期溫度上升的空間分布 (圖3.2.2)，在短期 (2021年至2040年)，各種不同未來發展情境的區域差異較不明顯，唯有在SSP5-8.5的情境下，臺灣西北部地區升溫略高。在中期 (2041年至2060年)，各種不同情境的區域差異較短期略微增

加，但各種不同情境下，升溫較顯著的區域還是以臺灣西北部地區為主。而世紀末長期(2081年至2100年) 的氣溫增暖未來推估，在不同情境間開始呈現比較明顯的差異，其中SSP1-2.6情境維持在世紀中期的增溫幅度 (約1.5°C)，但在SSP5-8.5情境下則可增加至3.5°C。即越嚴重的溫室氣體排放與增加時，臺灣各地增溫幅度越高。由模式模擬推估結果可見，如果全球積極進行減碳策略 (如SSP1-2.6情境)，雖然無法立即在臺灣減緩增溫情況，但未來世紀末長期的溫度變化，可以維持增溫幅度與21世紀中期相仿。上述增暖的結果在不同模式間的一致性相當高，雖然幅度還是有差別，圖3.2.2中以不同模式推估值的中位數呈現推估結果，較不受個別模式離群值的影響。

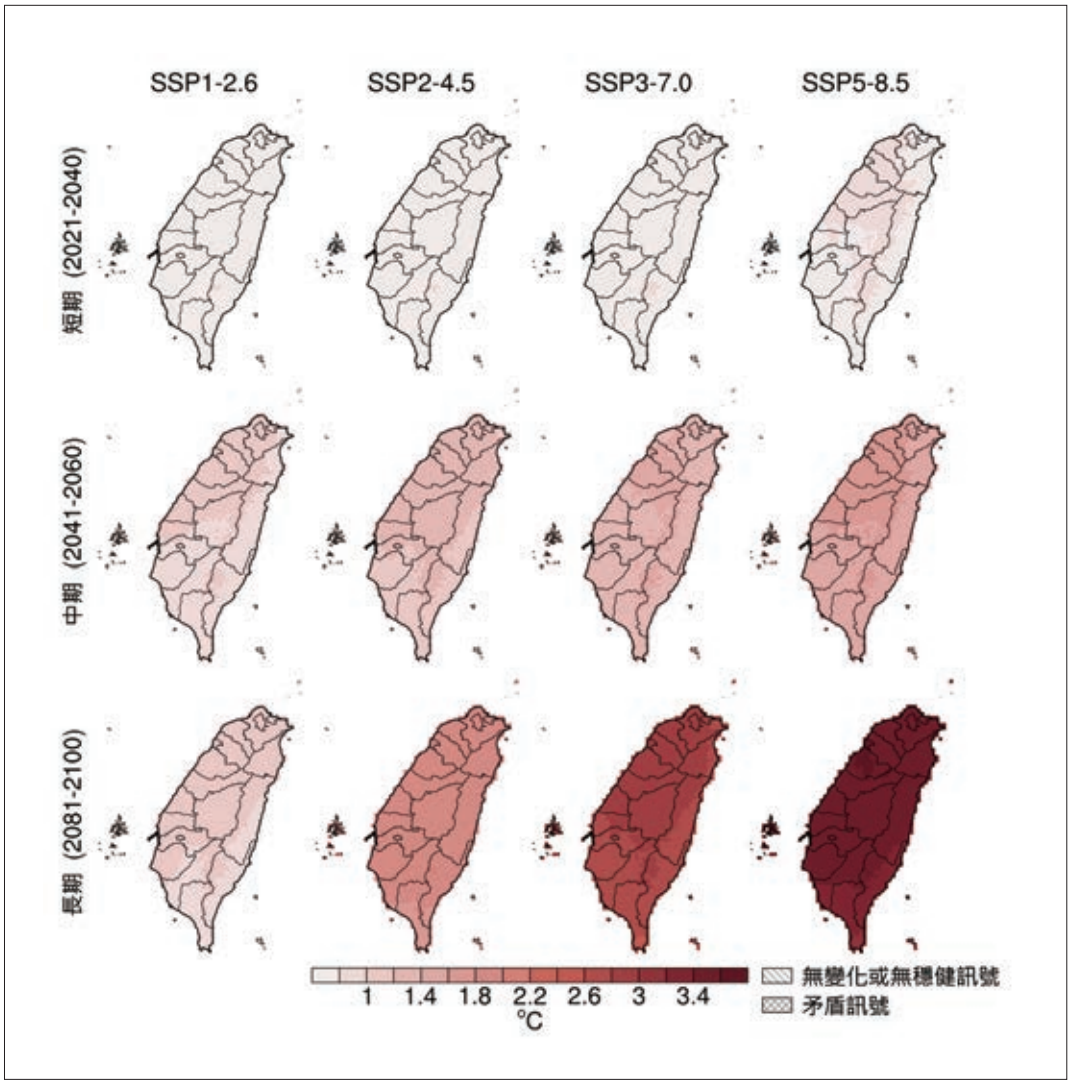


圖3.2.2　使用CMIP6模式系集的中位數，評估不同SSPs情境下以及不同時期的未來平均溫度距平的空間變化 (單位：°C)，現今氣候平均值的計算時段為 1995年至2014年。左至右分別為SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5情境；上至下為短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年)、長期 (2081年至2100年) 時段。(資料來源：本報告產製)

GWLs是以全球地表溫度平均增溫與工業革命前相比，達到特定溫度時的方式探討全球各地的氣候變遷，各區域的增溫幅度不盡然與全球平均相同 (請參考IPCC AR6, TS, Figure TS.5b)，在GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C、GWL 4°C時段，氣候模式推估臺灣的平均溫度相對於基期1995年至2014年 (GWL 1°C) 的增加幅度，以及所有模式推估結果中位數的空間分布，如圖3.2.3所示，臺灣在基期的年平均溫度分佈在圖的左上方 (圖3.2.3a)。使用CMIP6統計降尺度推估的未來臺灣年平均溫度變化，模式20年氣候平均的中位數分別為增加0.6°C、1.1°C、1.9°C與2.7°C (圖3.2.3b)。比較不同GWL與臺灣的溫度變化情況，加上基期1995年至2014年所對應的GWL 1°C，臺灣相對升溫在GWL 1.5°C、GWL 2°C 時段較全球地表溫度平均暖化速率大，但是在GWL 3°C、GWL 4°C時段，全球暖化速率反而略大於臺灣。空間分布 (圖3.2.3c) 則呈現北部增溫幅度略大於南部地區。

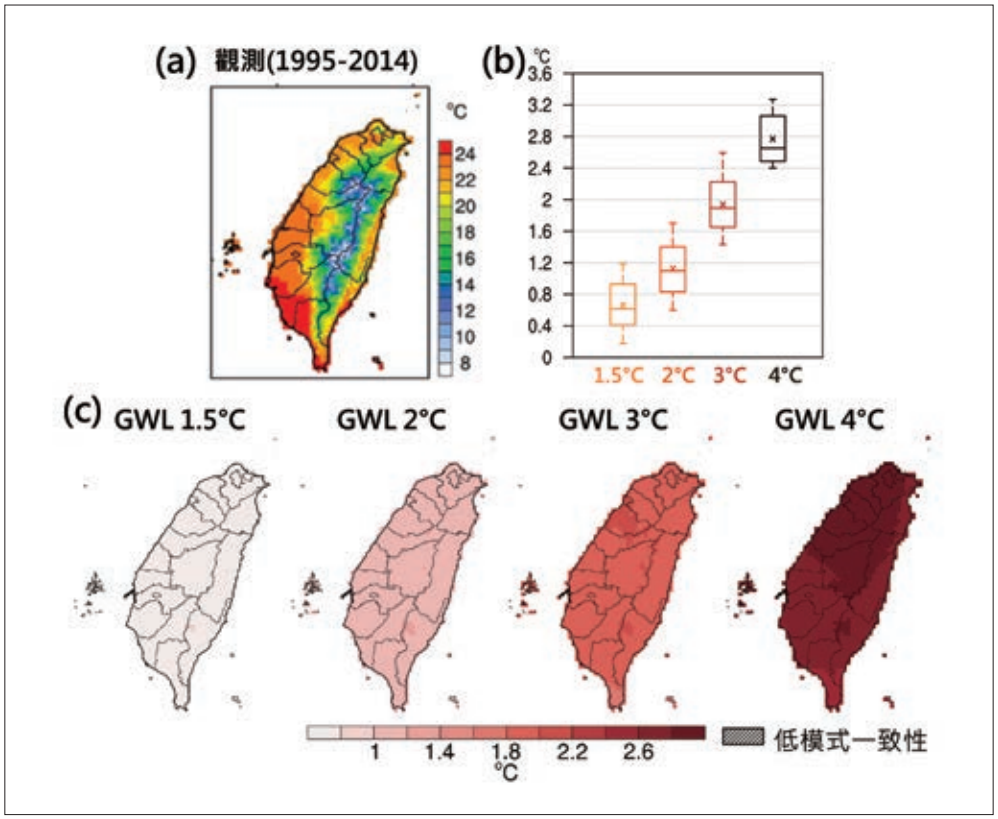


圖3.2.3　歷史與GWL下臺灣平均溫度變化。其中歷史氣候使用TCCIP網格化觀測，未來推估則為統計降尺度資料。(a) 圖為基期 (1995年至2014年) 觀測氣候年平均溫度分佈 (單位：°C)；(b) 圖為GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C、GWL 4°C相對於模式現今氣候 (1995年至2014年)，以盒鬚圖第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下) 呈現模式氣候平均溫度變化分佈範圍 (單位：°C)，X記號為系集平均值。(c) 圖為GWL溫度變化 (模式中位數) 空間分布 (單位：°C)，斜線區域為低模式一致性。GWL下各模式或各情境的詳細時間區間可參考臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6統計降尺度版 (2023)。(資料來源：本報告產製)

3.2.2 季節長度變化

臺灣處於熱帶與副熱帶交界，冬寒夏熱，春秋季氣候溫和。全球暖化下，四季更迭也可能發生改變。此節應用Yan et al. (2011) 的方法於觀測與模式資料，分析冬夏季的起始、終結時間與長度以及炎熱寒冷的程度，探討臺灣的季節長度變遷。

以CMIP6模式歷史模擬 (1960年至2014年) 的統計降尺度日溫度分析臺灣夏季與冬季季節長度變化，模式大致可掌握6月中至9月中的夏季與12月中至3月中的冬季分布，不過模式間的差異不小 (圖3.2.4)。比較觀測與模式日溫度模擬資料所呈現的季節長度的過去變化，模式也大致可以模擬出觀測資料的長期趨勢，呈現夏季提早開始、延後結束，冬季則是延後開始、提早結束的情形 (圖3.2.4)，此外全年最高溫的日期變得較為分散，但全年最低溫的日期變得較為集中。自1990年代至2005年，觀測之夏季與冬季長度均低於模式模擬值，可能反應模式模擬之夏季高溫與冬季低溫均比觀測值更強。

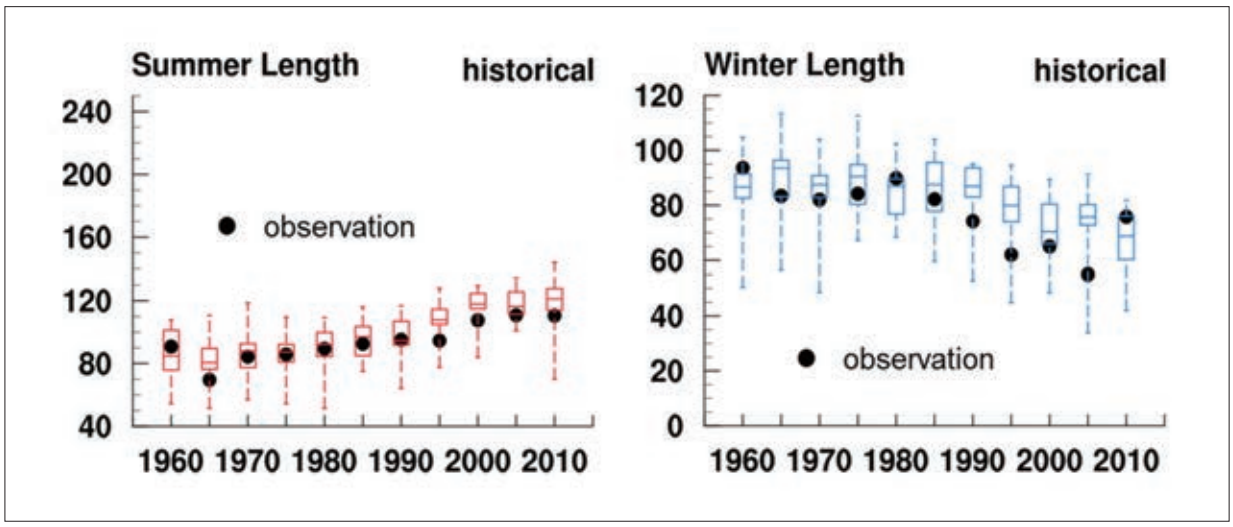


圖3.2.4 觀測與CMIP6 模式所模擬臺灣夏季 (左圖) 與冬季 (右圖) 季節長度的長期變化比較圖。觀測資料與CMIP6歷史模擬每5年平均成一個區間加以比較該區間的差異，圖中黑點為臺灣6個百年測站平均的季節長度，不同模式的結果以盒鬚圖呈現 (由上而下分別為最大值、第三四分位數、中位數、第一四分位數以及最小值)。(資料來源：本報告產製)

圖3.2.5為CMIP6模式資料推估，在不同暖化情境下的臺灣冬夏季季節長度變化。夏季在2020年至2040年期間隨時間增長，各情境間的差異不大，但2040年後隨著暖化情境的嚴重程度，夏季天數增加趨勢的差異也隨之增加。在SSP1-2.6情境下，自2040年

後，夏季大約穩定，都維持在150天左右，其他情境則都是隨著時間持續增加。到了21世紀末，夏季天數在SSP5-8.5情境將達近7個月。冬季則是在2020年至2030年期間各情境差異不大，但在2030年之後，將隨著暖化情境的嚴重程度加劇，冬季天數減少的趨勢也加快。在SSP1-2.6情境，從2050年後，大約穩定，都維持在45天左右，其他未來情境的冬天則都隨時間越來越短。在SSP2-4.5與SSP3-7.0情境，至2080年至2090年之間已無冬季，在SSP5-8.5情境下，更是在2060年冬季就已消失，冬季天數減少的趨勢較夏季天數增加的趨勢更明顯。在SSP5-8.5情境下，到了21世紀末，臺灣全年相較於現今，夏季長達近7個月，幾乎無冬季的存在，全年幾乎都是在溫暖至炎熱的情況，臺灣的氣候狀態會更接近熱帶國家的溫度氣候特性。

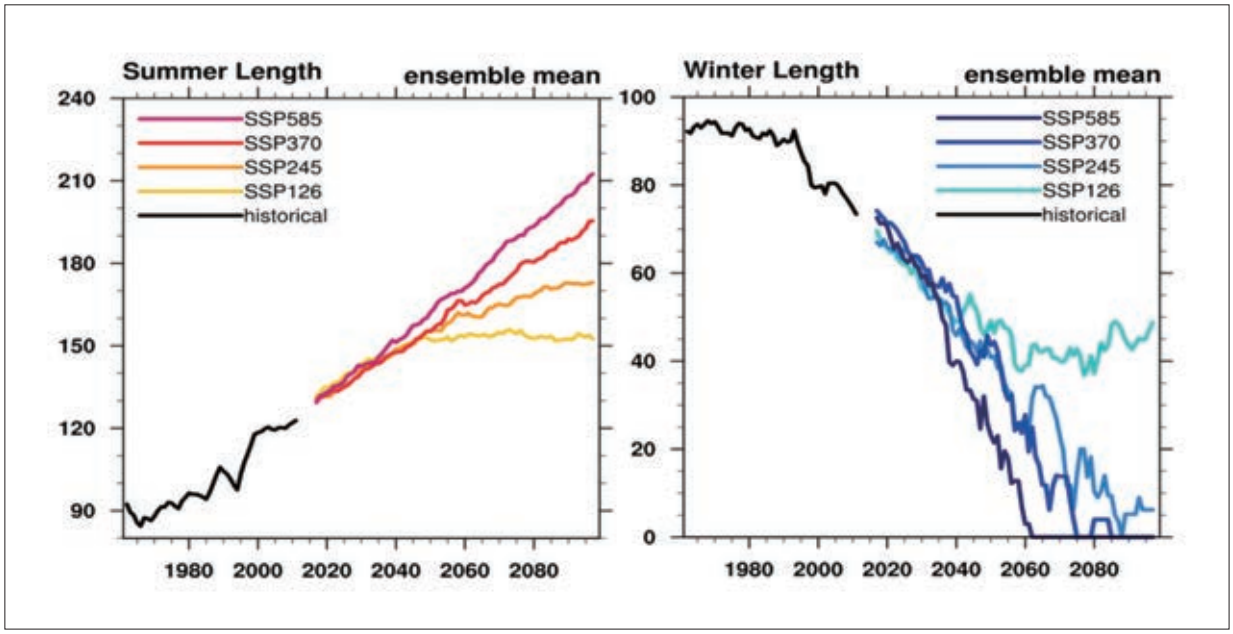


圖3.2.5　CMIP6模式系集平均後的臺灣夏季 (左圖) 與冬季 (右圖) 季節長度天數，在不同未來情境下，隨時間的變化，包含歷史模擬 (黑線) 與未來推估 (左圖以暖色系代表夏季推估、右圖以冷色系代表冬季推估)，顏色由淺至深，分別為SSP1-2.6、SSP2-4.5、與SSP3-7.0以及SSP5-8.5情境。未來推估 (2015年至2100年) 的季節分析，採用歷史模擬1961年至1990年基期的門檻值。(資料來源：本報告產製)

不過仍需注意如同歷史模擬，CMIP6中不同模式推估還是有一些差異，以自2020年開始每20年的區間分析各模式推估冬季與夏季的分布與差異 (圖3.2.6)，可以發現除了在2020年至2039年期間模式推估夏季天數的差異較小，到了21世紀末，2080年至2099年期間模式推估的差異明顯地加大。推估未來冬季天數，模式間的差異一般比推估夏季天

數更大，即使是在近未來的2020年至2039年期間，除了世紀末2080年至2099年期間，暖化較明顯的情境，冬季天數已經接近下限，模式間的差異反而變小。

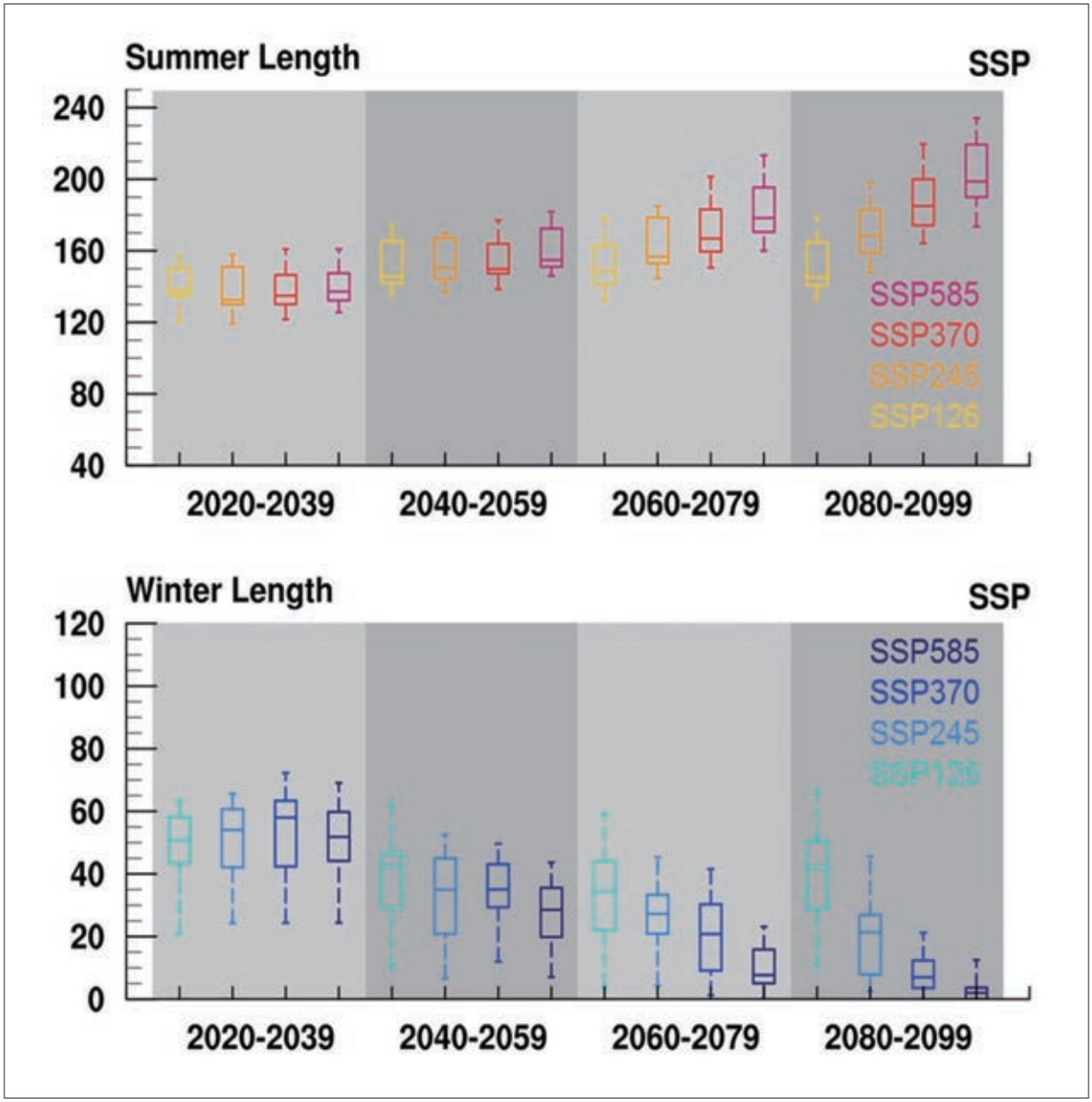


圖3.2.6　CMIP6模式在不同未來情境下所模擬臺灣夏季 (上圖) 與冬季 (下圖) 季節長度在不同時期的變化。CMIP6模式自2020年開始以每20年的區間加以比較模式在不同情境的變化差異，不同模式結果分布以盒鬚圖呈現 (由上而下分別為最大值、第三四分位數、中位數、第一四分位數以及最小值)。每個時段中盒鬚圖顏色由淺至深分別為SSP1-2.6、SSP2-4.5與SSP3-7.0以及SSP5-8.5情境。(資料來源：本報告產製)

3.3 降雨

3.3.1 年平均降雨

以模式現今氣候 (1995年至2014年) 為基準，計算4組SSPs未來情境臺灣年平均降雨隨時間變化 (圖3.3.1)，可以發現臺灣未來短期 (2021年至2040年)，甚至到中期 (2041年至2060年)，不同情境間的系集平均降雨變化率差別很小，且增加幅度不明顯，反而不同模式間的差異程度大於降雨增加幅度與不同情境間的差異，直至長期 (2081年至2100年) 推估，最嚴重排放情境SSP5-8.5才會有較大的變化 (約增加15%)。

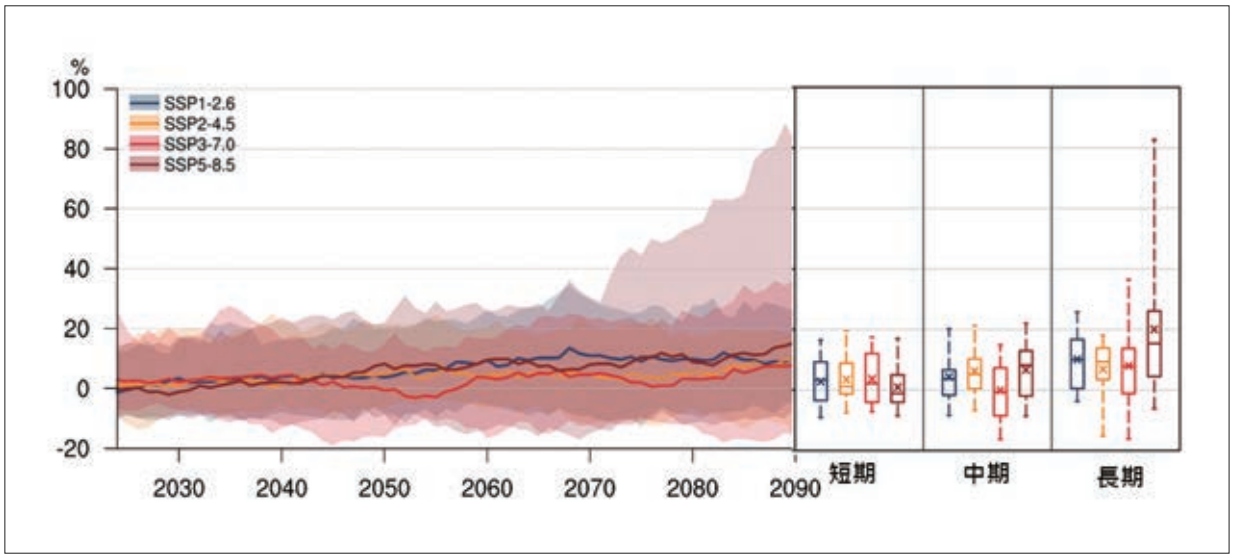


圖3.3.1　以CMIP6氣候模式評估不同SSPs情境下，臺灣區域平均降雨距平的長期變化 (單位：%)，現今氣候平均計算時段為 1995年至2014年，長期變化曲線以每20年的滑動平均代表。左側時間序列圖，以不同顏色代表不同SSP情境，實線為所有氣候模式模擬結果的中位數、陰影區為所有模式系集的第5百分位數至第95百分位數值區間。右側盒鬚圖為短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年) 與長期 (2081年至2100年) 氣候平均第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下)，同樣以顏色區分不同SSP情境、圖中X記號為系集平均值。(資料來源：本報告產製)

雖然不同暖化情境下的系集平均結果差異不大，但隨著模擬推估期間越長，不同模式推估結果的差異越加顯著，特別是暖化最明顯的情境。比較臺灣世紀末長期 (2081年至2100年) 的不同模式推估結果，不同CMIP6模式在SSP5-8.5情境下，模式分佈的5%至

95%範圍落在-6%至83%，如此大範圍的數值落差，主要原因是由於降雨過程除了受到暖化後水氣增加的影響之外，也與局部地區的環流變化有關，目前氣候模式對於暖化情境下的降雨趨勢模擬仍然有很大的不確定性，模式一致性較低，此情況與過去 (「臺灣氣候變遷科學報告 2017」，第六章) 降雨不確定性分析的結果一致。

進一步檢視臺灣CMIP6模式，在各時期降雨改變率推估結果分布中位數的空間分布 (圖3.2.2)，在短期 (2021年至2040年) 臺灣各地的降雨變化率小 (中位數增加0%至5%)，各種不同未來發展情境的區域差異也不明顯，模式間結果的一致性也低。在中期 (2041年至2060年)，各種不同情境的區域改變有較大的差異，在SSP1-2.6情境下，降雨變化率與短期相似，除了西部沿海地區增加為5%至10%，在SSP2-4.5與SSP5-8.5情境下的降雨變化率相似，各地降雨變化率多半都是增加5%至10%之間，較為特別的是在SSP3-7.0情境，中部以北多數區域的降雨略為變少 (-5%至0%)，但多數區域模式間結果的一致性低。而在世紀末長期 (2081年至2100年) 的降雨變化率分佈未來推估，SSP5-8.5情境與其他情境間有較為明顯的差異，西南部地區的增加幅度可以達到30%以上。在其他不同情境下，也多半呈現西南部降雨增加率較大 (都能達到10%)，此外，在SSP5-8.5情境下，西南部地區的降雨增加，模式間結果有較高的一致性。

不同GWL的降雨變化分布如圖3.3.3，全臺降雨變化率依全球暖化上升程度逐步增加。相對於基期1995年至2014年，在GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C、GWL 4°C時段，系集平均全臺平均年降雨分別增加1.6%、2.6%、5.3%與14% (圖3.3.3b右上盒鬚圖)，不同模式推估的差異範圍也隨著全球平均暖化程度增加而增加。在全球平均暖化程度2°C以下，臺灣各地年平均降雨量沒有明顯變化趨勢 (增加0%至5%)，各地的變化差異也有限 (圖3.3.3c圖下方)。在全球平均暖化程度達到3°C以上時，臺灣西部平地、南部區域及澎湖的年平均降雨量有比較明顯增加的趨勢。特別是在GWL 4°C，西南部降雨增加的幅度可以到30%以上，而且模式間的一致性高。由於部分區域在基期平均雨量少，因此未來推估即使降雨量僅有些微增加，仍可能有較高的變化率。

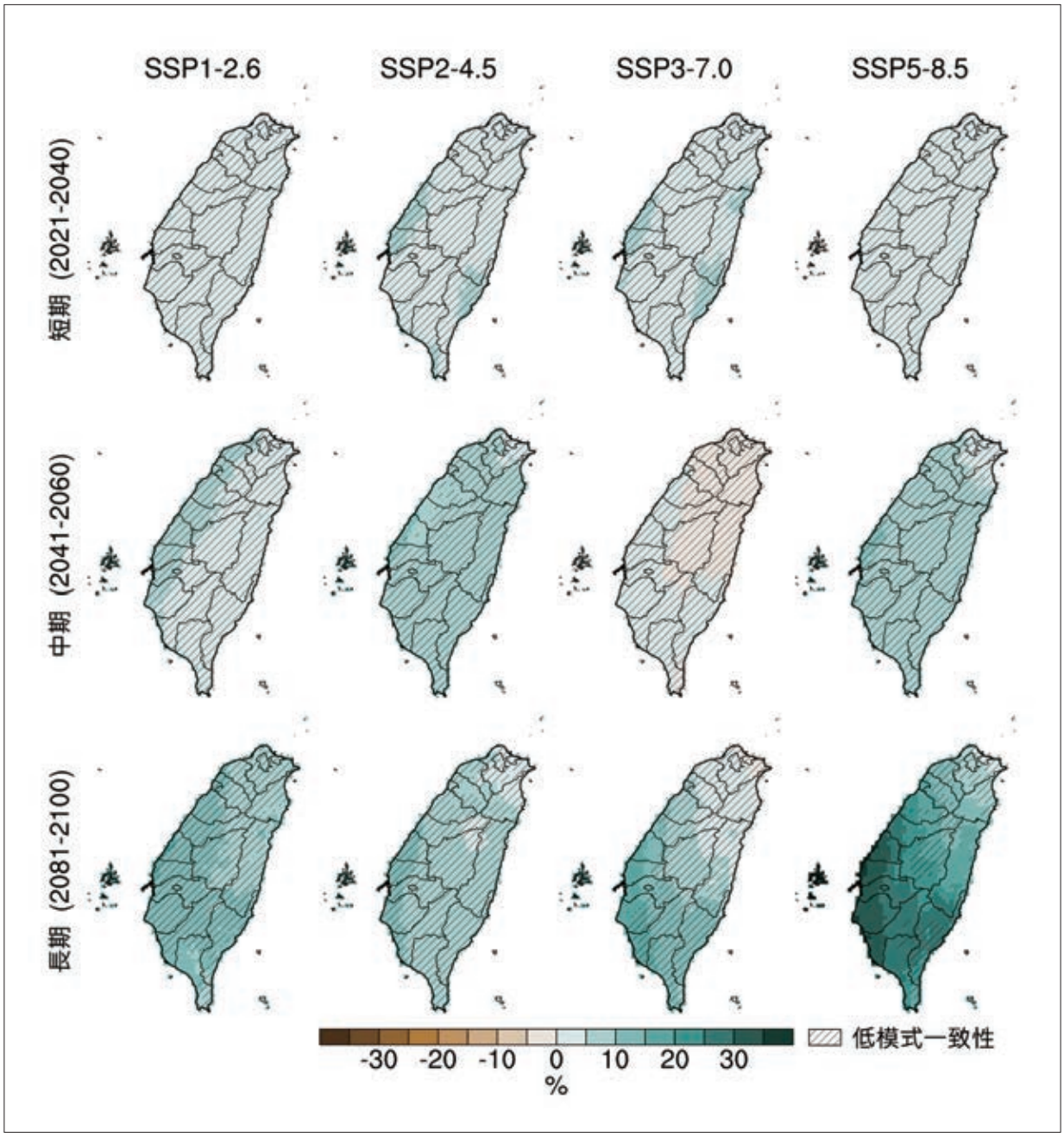


圖3.3.2　使用CMIP6模式系集的中位數，評估不同SSPs情境下以及不同時期的未來平均s年降雨距平的空間變化 (單位：%)，現今氣候平均值的計算時段為 1995年至2014年。由左至右分別為SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5情境；由上至下為短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年)、長期 (2081年至2100年) 時段。斜線區域為低模式一致性。(資料來源：本報告產製)

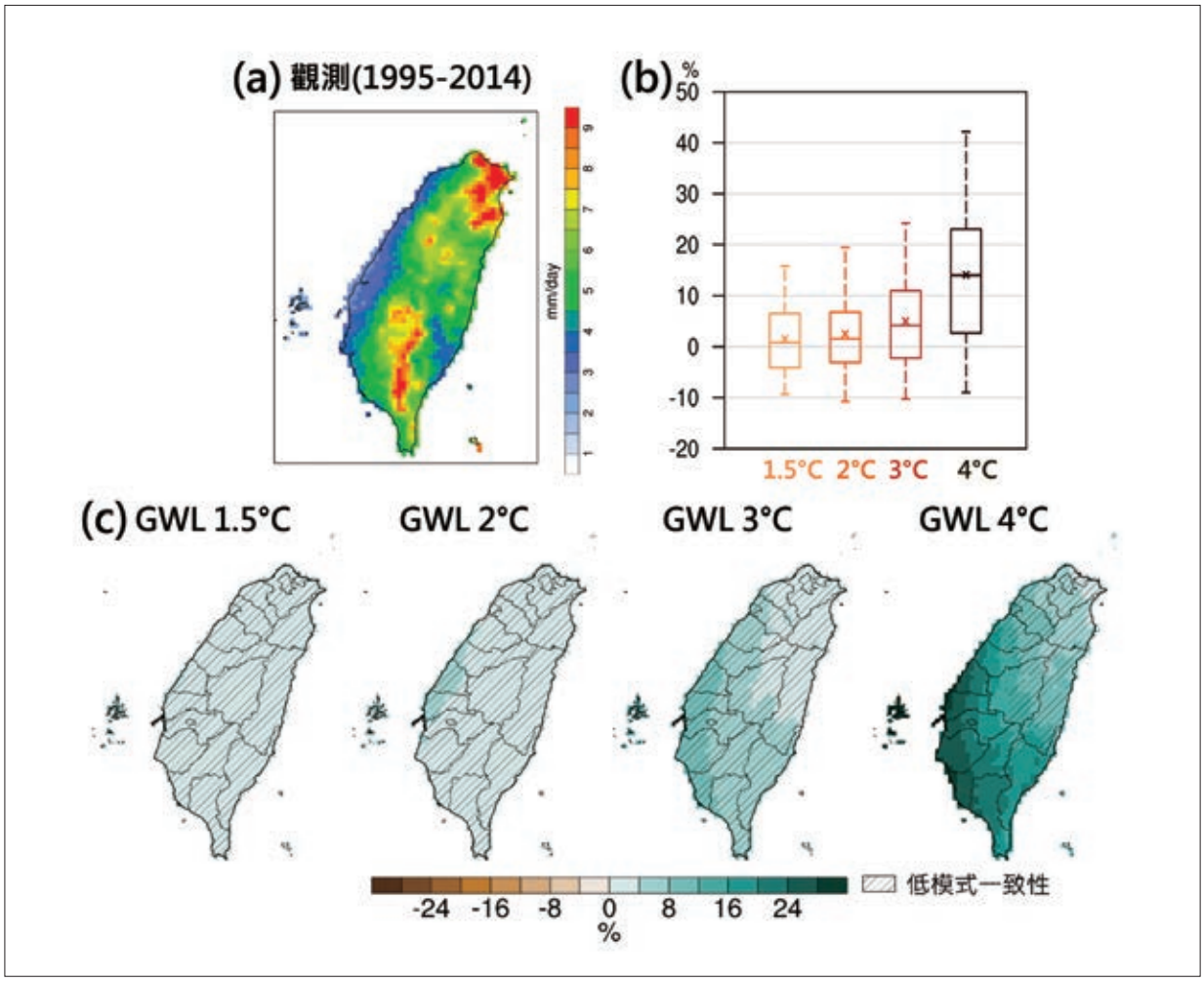


圖3.3.3　歷史與不同GWLs下臺灣氣候平均降雨變化。(a) 圖為基期 (1995年至2014年) 觀測氣候年平均降雨分佈 (單位：mm day^{-1})；(b) 圖為GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C、GWL 4°C 相對於模式現今氣候 (1995年至2014年)，以盒鬚圖第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下) 呈現模式的變化範圍 (單位：%)，X記號為系集平均值。(c) 圖為不同GWL下臺灣氣候平均降雨變化 (模式中位數) 空間分布 (單位：%)， 斜線區域為低模式一致性。(資料來源：本報告產製)

3.3.2　季節降雨變化

由於臺灣各地的降雨有明顯的季節變化，因此除了年平均降雨變化之外，本節進一步以3種季節分類方式評估不同季節降雨的長期氣候變化趨勢。第一種以年降雨循環特徵為出發點，將乾季設定為11月至4月、濕季為5月至10月區分，常應用於水文、水資源領域；第二種是為了解更細部的降雨變化，依照自然降雨氣候特徵，分為春季 (2月至4月)、梅雨季 (5月至6月)、颱風季 (7月至9月)、秋季 (10月至11月) 以及冬季 (12月至1月)

進行分析；最後一種則是類似溫度季節長度變化 (參見3.2.2節) 的方式，評估降雨季節長度變化。

乾、濕季變化

「臺灣氣候變遷科學報告2017」使用CMIP5統計降尺度資料，分析臺灣乾、水濕季降雨變化，結果顯示暖化情境下降雨呈現「乾越乾、濕越濕」的變化趨勢。本節進一步使用最新的CMIP6統計降尺度日降雨資料進行評估。圖3.3.4為各種不同SSP暖化情境下，相對於基期1995年至2014年，乾季 (11月至4月) 的全臺平均降雨隨時間的變化率，所推估的短期 (2021年至2040年) 模擬結果，各情境降雨變化幅度小且沒有明顯差別，到了世紀末的長期 (2081年至2100年) 推估，在SSP3-7.0與SSP5-8.5情境下，隨著暖化程度的加劇，降雨減少較為明顯。但在SSP1-2.6與SSP2-4.5情境下，無論短、中、長期，乾季降雨量變化幅度都不大，不過需注意的是不同模式間的差異相當大。

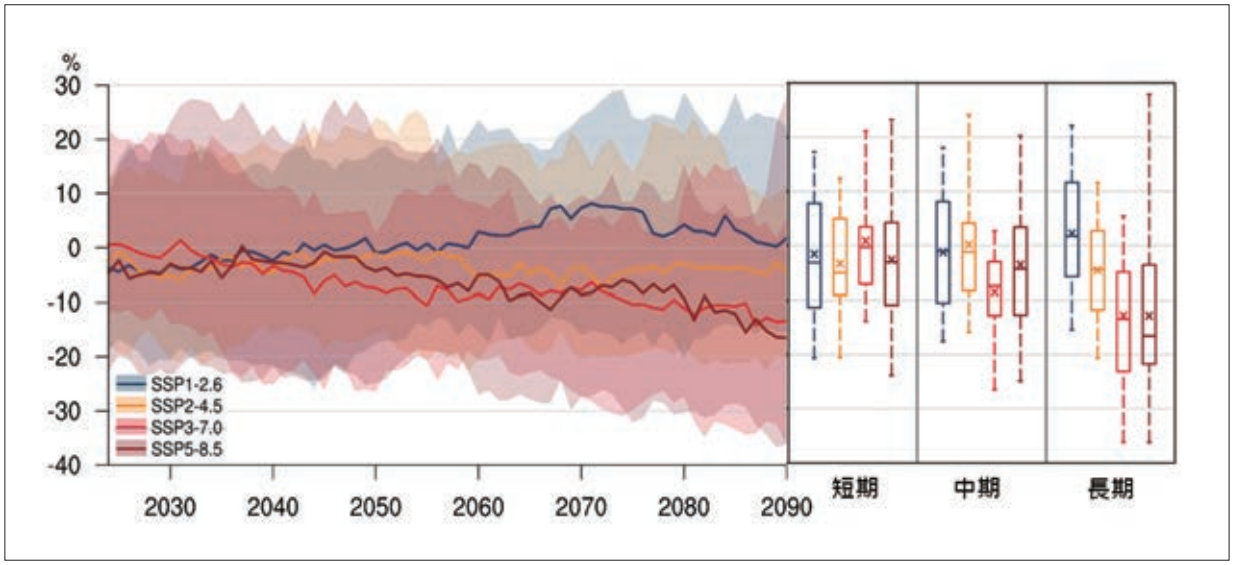


圖3.3.4　與圖3.3.1繪製方式一樣，但所呈現的是乾季 (11月至4月) 降雨長期變化趨勢。(資料來源：本報告產製)

濕季 (5月至10月) 全臺平均降雨長期變化趨勢則與乾季相反 (圖3.3.5)，模式推估未來降雨變化率在各種不同SSP暖化情境多半是增加的。值得注意是，在SSP5-8.5情境下，世紀末的長期 (2081年至2100年) 推估顯示不同氣候模式幾乎都呈現降雨增加，使模式推估變化的平均值與中位數都增加到20%以上，雖然不同模式間的差異也有大幅的增加。

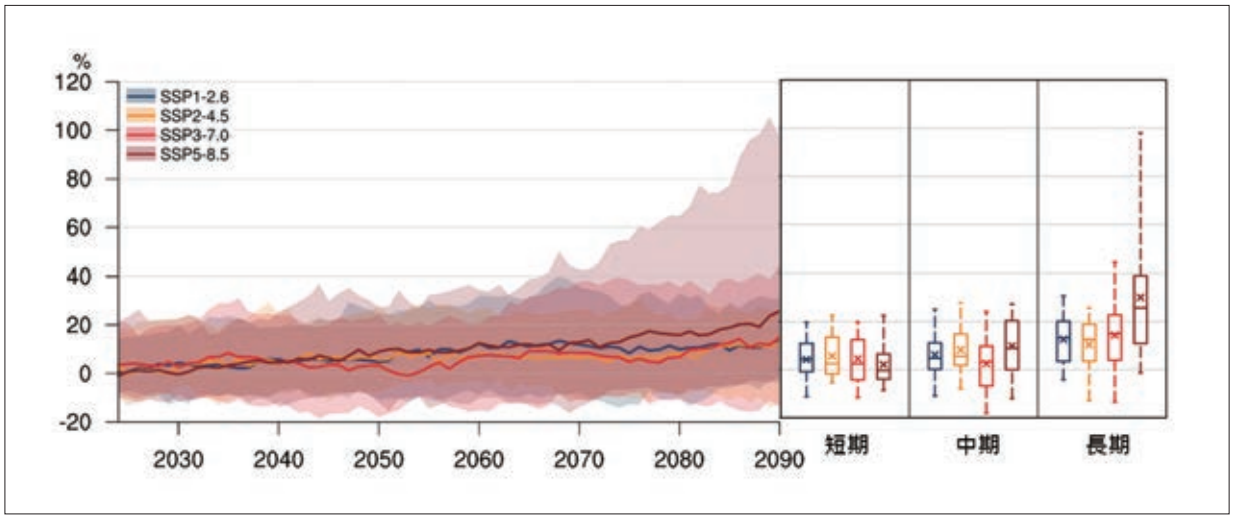


圖3.3.5 與圖3.3.4繪製方式相同，但所呈現的是濕季 (5月至10月) 降雨長期變化趨勢。(資料來源：本報告產製)

圖3.3.6為不同暖化程度 (GWLs) 時的臺灣季節降雨變化的空間分布。對於乾季而言，在GWL 1.5°C至GWL 2°C，西南部原本少雨的區域，反而模式推估平均有降雨率略為增加的趨勢 (低模式一致性)，儘管全臺其他區域多半在乾季降雨減少，特別是東北部與東部地區。當GWL上升到3°C至4°C 時，全臺各地乾季降雨減少的趨勢更加明顯，尤其是東北部與東部地區，減少的幅度可以到10%至15%，而且不同模式間有較高的一致性。由於北海岸與東北山區在臺灣整體為乾季時的平均雨量不小，暖化較強的情境下冬季東北季風減弱 (張智鈞等人，2020；You et al., 2022)，使區域地形降雨明顯減少。

相對地，對於濕季而言，在GWL 1.5°C至GWL 2°C，全臺各地的降雨反而是有微幅增加的趨勢 (多半在0%至5%之間，雖然模式間一致性低)，當GWL 3°C時，全臺各地濕季的降雨增加的幅度上升至5%至15%之間，而在GWL 4°C時，全臺各地濕季降雨增加幅度更為明顯，而且模式間有相當高的一致性，中、南部沿海、澎湖與臺東的降雨可能增加超過30%。

進一步分析GWL臺灣乾季與濕季區域平均降雨變化率的模式推估值機率分布，並以盒鬚圖呈現 (圖3.3.7)，可以簡要看出先前所陳述的臺灣乾、濕季降雨變化特徵，特別是隨著全球暖化程度上升越高，「乾季越乾、濕季越濕」的趨勢將越來越明顯。雖然還是必須注意不同模式推估的差異，但是在當GWL上升到3°C以上時，有75%以上的模式呈現同樣的季節降雨增減特徵。

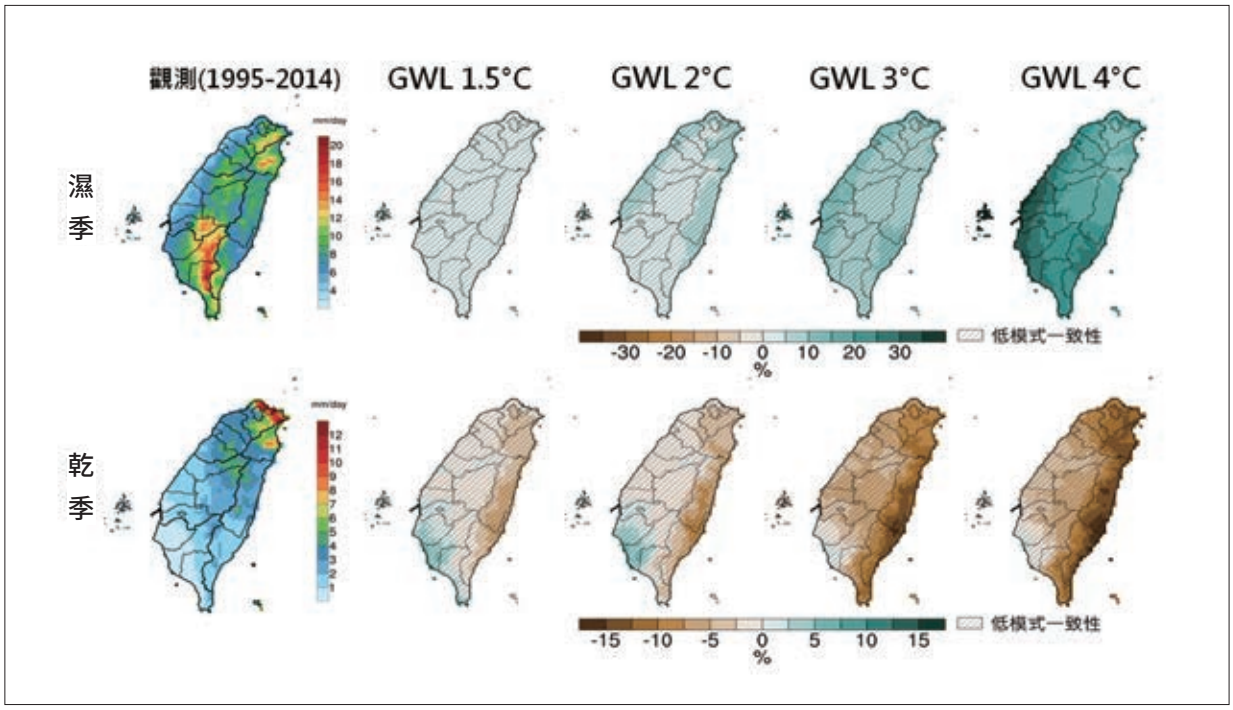


圖3.3.6　歷史與不同GWL下臺灣平均濕 (上) 、乾 (下) 季的降雨空間變化。圖最左側為基期 (1995年至2014年) 觀測濕 (上)、乾 (下) 季平均降雨分佈 (單位：mm day^{-1})，圖右為不同GWL下推估臺灣濕 (上)、乾 (下) 季平均降雨變化 (模式中位數) 空間分布 (單位：%)，斜線區域為低模式一致性。(資料來源：本報告產製)

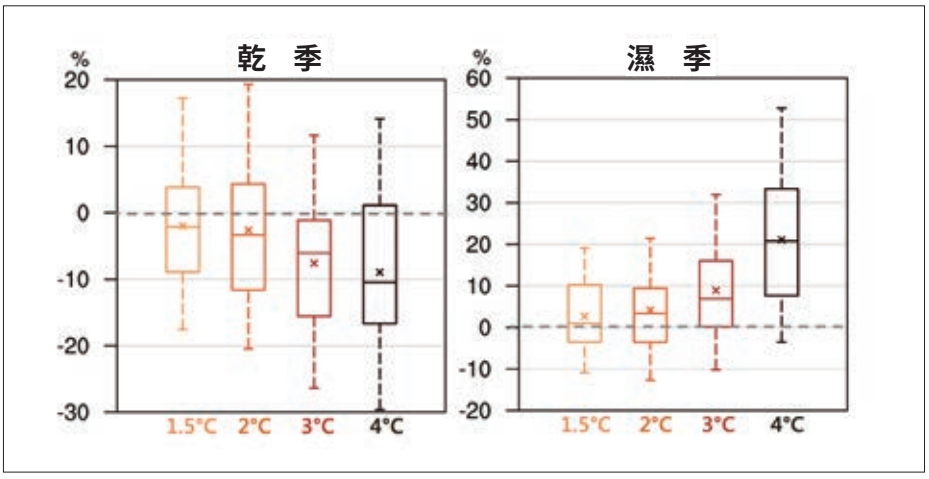


圖3.3.7　與圖3.3.3中的左圖繪製方式相似，但是圖中呈現變數改為乾季 (左圖) 與濕季 (右圖) 在不同GWL下的降雨空間變化率盒鬚圖。(資料來源：本報告產製)

自然季節

以中央氣象署統計評估臺灣雨量氣候特徵方式，區分出春季 (2月、3月、4月)、梅雨 (5月、6月)、颱風季 (7月、8月、9月)、秋季 (10月、11月) 以及冬季 (12月、1月) 降雨

(中央氣象署，2023)。本節將進一步探討臺灣的降雨自然季節在不同GWL增暖時段的變化。前述乾、濕季降雨變化在暖化情境下將趨向兩極化，也可以再進一步了解所對應的不同自然季節降雨型態改變的貢獻。

冬季至隔年春季是中、南部的枯水期，其降雨的貢獻度約佔全年的1成，但對於北部、東北部則約佔全年的2成至3成 (中央氣象署，2023)，此季節的降雨量若不足，將造成北部發生乾旱的機會增加。藉由自然降雨季節分析，發現在GWL 3°C、GWL 4°C時，乾季降雨在北部、東北部減少，分別是來自於冬、春季雨量的減少，其中又以冬季減少最顯著 (約-15%) (圖3.3.8)，而主要原因是暖化情境下東北季風的減弱 (張智鈞等人，

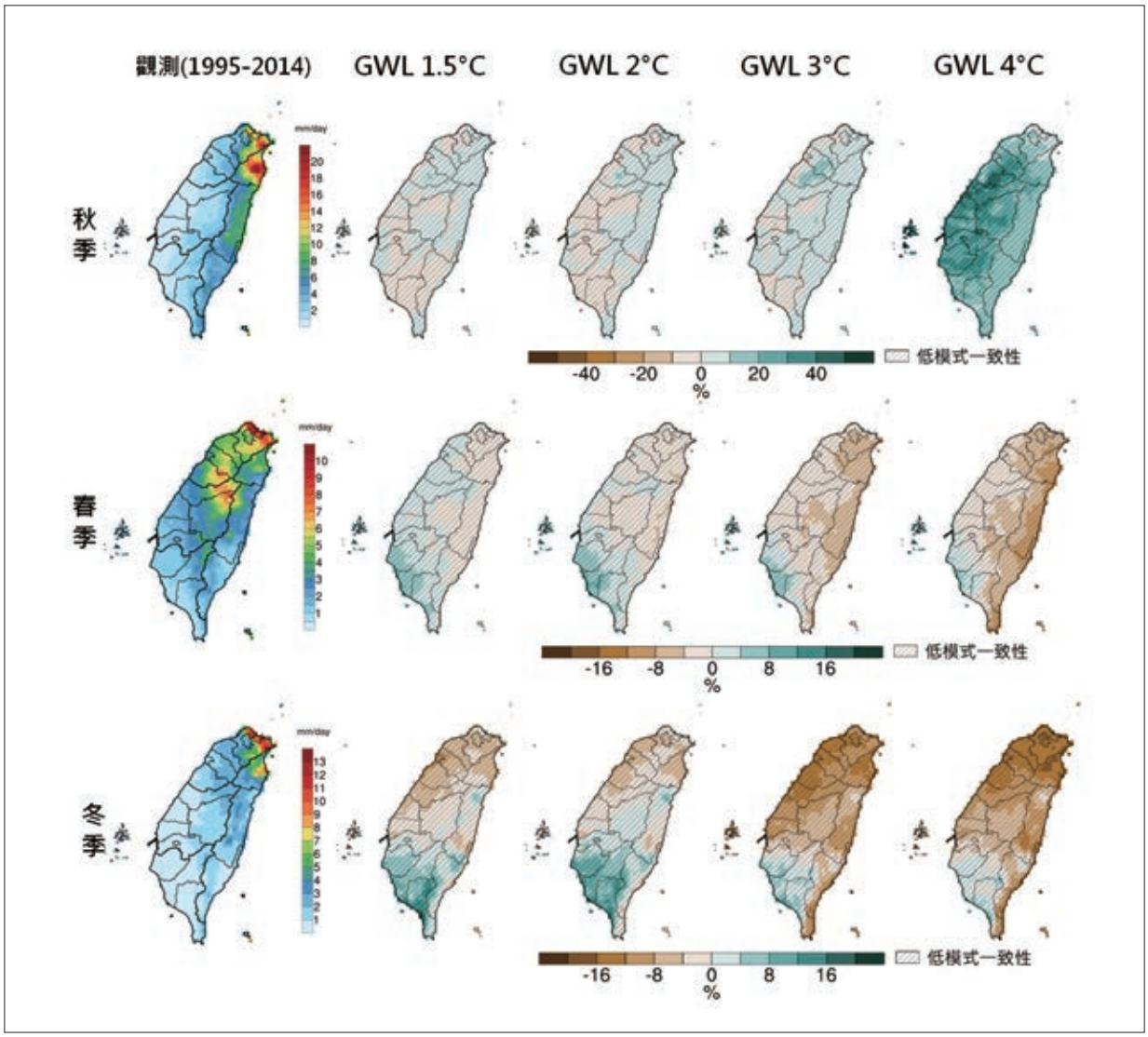


圖3.3.8　與圖3.3.6的繪製方式相似，但是圖中呈現變數改為由上至下，分別為秋季、春季、冬季在觀測與不同GWL下的降雨空間變化。(資料來源：本報告產製)

2020；You et al., 2022)，臺灣西南部乾季原本雨量就少，反而在暖化情境下，降雨量有略增的趨勢。臺灣秋季降雨集中在東北與東部 (翁叔平與楊承道，2018)，GWL由1.5°C升溫至3°C，降雨變化小，只有在GWL升溫至4°C時，臺灣西部降雨有較為明顯的增加，雖然秋季西部降雨原本就小，而且模式的一致性低。

圖3.3.9為GWLs梅雨季、颱風季降雨變化評估結果。梅雨季西部平地隨著GWL由1.5°C升溫至4°C，降雨變化比例依序由-4%至4% (低模式一致性)、12%至16% (低模式一致性) 增加至28%以上 (高模式一致性)。颱風季降雨變化亦有類似的情況且增幅更顯著，西部平地GWL 3°C增加10%至20% (高模式一致性)，GWL 4°C更增加至40%以上 (高模式一致性)。

5月、6月梅雨季的降雨改變，主要是因為伴隨梅雨鋒面大尺度暖水汽的西南氣流，呈現增強趨勢且帶來更多的雨量 (Tung et al., 2020)。CMIP6颱風季統計降尺度的降雨量，雖可直接反映颱風季氣候模式模擬推估的未來降雨趨勢，但過去研究 (Arakane et

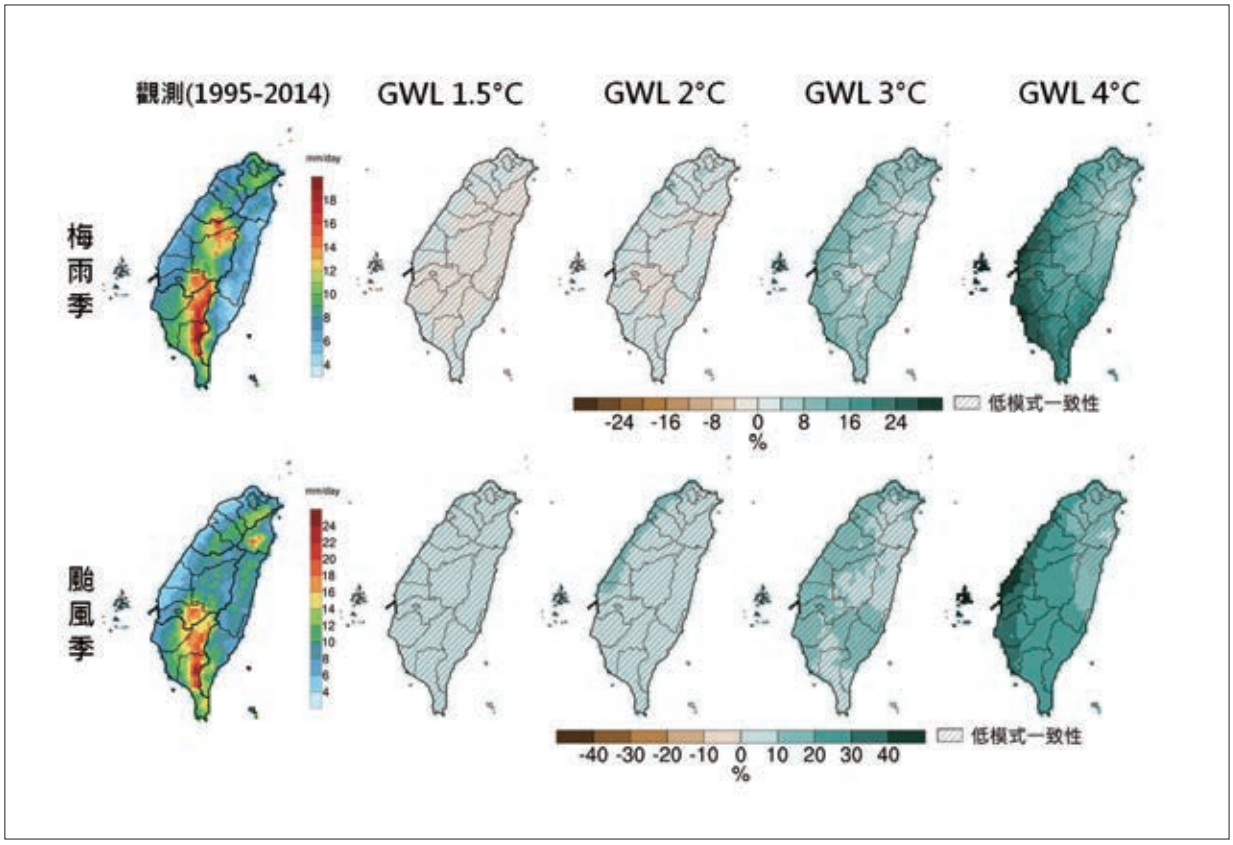


圖3.3.9　與圖3.3.8中的繪製方式相似，由上至下，分別為梅雨季、颱風季在觀測與不同GWL下的降雨空間變化。(資料來源：本報告產製)

al., 2019, Arakane & Hsu, 2021) 說明模式必須能夠解析颱風活動，才能對於東亞季風槽與西北太平洋副熱帶高壓有較好的模擬表現，才能有較佳的降水模擬。但目前多數CMIP6氣候模式的水平解析度不足，無法解析颱風活動與相關的強降雨現象，影響到颱風季推估結果之可信度。雖然高解析度大氣模式 (水平網格小於60 km)，比較有能力模擬颱風相關的強降雨以及伴隨的大氣環流 (Chen et al., 2019)，分析結果呈現未來暖化情境下，颱風季由於西北太平洋的颱風數目減少，導致平均降雨減少，但以模式目前模擬颱風與其相關降雨仍有相當大的誤差，以目前模式的結果呈現颱風季未來降雨變化推估仍有相當的不確定性。

春季降雨長度變化

陳昭安等人 (2023) 使用CMIP6氣候模式統計降尺度日降雨資料，在排除表現較差的模式，並且使用有完整4組情境資料模擬的模式結果 (Chen et al., 2021)，進行臺灣春雨季節長度分析。發現在世紀末較嚴重的暖化情境 (SSP3-7.0與SSP5-8.5) 下，春雨季起始時間由2月中延後至3月初 (圖3.3.10)，特別在2060年之後有明顯延後的變化，呈現乾季延長或春雨季縮短。在較緩和的暖化情境 (SSP1-2.6與SSP2-4.5)，春雨起始時間到世紀末並沒有明顯變化。

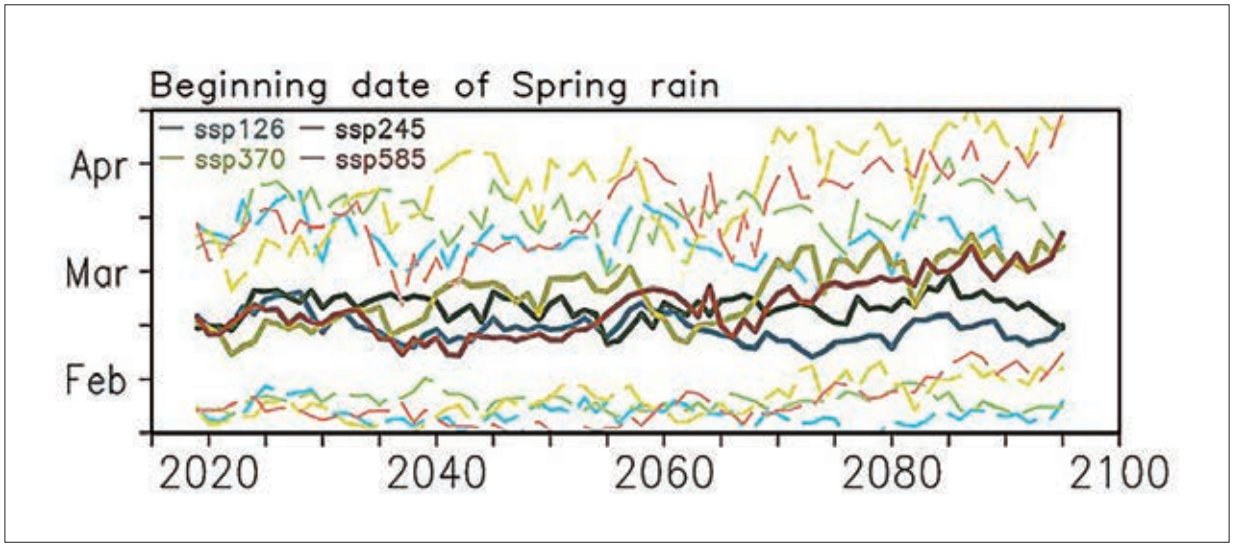


圖3.3.10　CMIP6統計降尺度推估之臺灣春季降雨起始時間。不同顏色實線代表各暖化情境模式系集平均的時間序列，虛線代表模式相對於系集平均，模式推估分佈結果一個標準差的範圍。(摘自陳昭安等人，2023)

3.4 海平面高度推估

CMIP6氣候模式模擬推估未來暖化情境，全球模式中多數海洋模式受限於計算資源的限制，空間解析度仍約100 km左右，以臺灣本島而言，只佔最多2個至3個網格點。低空間解析度雖仍可模擬大範圍的海洋變動趨勢，但比網格尺度更小的中小尺度動力過程都無法直接模擬，往往需仰賴各種簡化的參數化方法代表這些無法解析的過程，模擬海洋實際動力過程受到限制。以臺灣周遭海域為例，在空間解析度較低的模式中無法解析處處可見的中尺度渦漩，因此無法精準模擬出黑潮與渦漩交互作用所產生的變異性與能量傳輸 (Tseng et al., 2016)。臺灣面積小，且周遭海底地形崎嶇複雜，海洋中充滿著不同中小尺度的動力過程，需要高解析度的模式模擬結果，才能更加了解未來暖化下周遭海域較細緻的變化與影響。

根據IPCC AR6中提出的評估結果 (資料來源：https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool)，臺灣周遭海平面高度，相對於1995年至2014年的未來變化推估方面 (以所有氣候模式結果的中位數代表)，基隆的海平面在SSP1-2.6、SSP2-4.5及SSP5-8.5暖化情境下，在世紀末可能上升分別約0.48 m、0.57 m及0.82 m，但不同模式推估的差異不小 (四分位差約為0.20 m、0.23 m及0.26 m)。高雄的海平面在SSP1-2.6、SSP2-4.5及SSP5-8.5暖化情境下，在世紀末可能上升分別約為0.41 m、0.56 m及0.78 m，但同樣地不同模式推估的差異也不小 (四分位差約為0.25 m、0.27 m及0.29 m)。海平面高度上升幅度可以用海表增溫值的函數加以表示，彼此為非線性的正相關 (Hermans et al., 2021)，海平面高度同時受到溫度、鹽度變化所伴隨的密度改變以及與極區冰川融化、河川逕流流入等物理過程影響，其中熱膨脹效應佔約3成至4成。值得注意的是，因為模式低一致性和證據有限，冰原過程的潛在影響具較高的不確定性。臺灣南北海平面趨勢的差異受到區域性洋流 (如黑潮) 分布和海水熱結構變化的影響，需再藉高解析度數值模式產製降尺度資料，以分析其中物理過程與更細節的空間分布。21世紀末時，臺灣周遭平均海平面上升較全球平均 (SSP1-2.6、SSP2-4.5及SSP5-8.5暖化情境下，分別為0.44 m、0.56 m及0.77 m) 高，且臺灣東岸的變化較西岸大 (Sung et al., 2021)，此空間上的分布特性與海水熱膨脹效應以及受大氣風場驅動之海洋環流改變有關 (Yamanaka et al., 2021)。

3.5 極端天氣與氣候推估

本章節說明全球暖化對臺灣的極端天氣及氣候現象的影響，討論的主題包括颱風風雨、乾旱、暴雨、極端高溫與低溫。除了使用CMIP6統計降尺度日資料，過去已發表的研究成果多是使用CMIP5統計降尺度日資料。由於高解析度的模擬推估對極端天氣事件的模擬掌握得比較好，且CMIP統計降尺度資料缺乏颱風資訊，部分的研究使用科技部TCCIP計畫 (2017) 所產製的AR5 RCP8.5情境下之高解析度全球模式推估動力降尺度資料。

3.5.1 高溫、低溫

IPCC AR6 (Seneviratne et al., 2021) 指出平均溫度上升將使得低溫事件減少、高溫事件增加、強度增強，且持續時間變長。特別是中緯度地區，未來將更容易出現歷史未曾出現的極端溫度。東亞地區呈現極端高溫增加、極端低溫減少，非常可能來自於人為溫室氣體排放所導致 (IPCC AR6, Chaper 11, Fig, 11.4, 11.5)。「臺灣氣候變遷科學報告2017」(周佳等人，2017)，將歷史觀測資料分兩個時期 (1980年至1999年與2000年至2017年)，以統計機率分布的方式分析夏季日最高溫與冬季日最低溫，也呈現高溫天數增加的情況。臺灣未來推估也呈現一樣的情況，以下引用以CMIP6統計降尺度日溫度資料做出的「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集： AR6統計降尺度版」(國家災害防救科技中心，2023) 之中的溫度指標，來呈現未來極端高、低溫變化。

高溫

臺灣雖然四面環海，但位處副熱帶地區夏季極為高溫炎熱，熱浪事件的發生與太平洋副熱帶高壓籠罩、颱風外圍下沉區、乾燥的西南風影響有關。其中以太平洋副熱帶高壓的位置與強度最有關係，當太平洋副熱帶高壓籠罩多日的情況下，伴隨著穩定的下沉氣流、對流不易發展，即容易出現持續的高溫事件 (駱世豪與陳正達，2021)。連續多日的高溫事件往往伴隨著乾燥與少雨，對於健康、農作、生態等環境造成嚴重衝擊 (Chen et al., 2021)。本節以日高溫超過36°C天數 (TX36) 以及極端高溫持續指數 (Heat Wave Duration Index, HWDI)，分析臺灣未來持續性高溫事件的趨勢變化。並以每年日高溫極大值 (TXx) 與日低溫極大值 (TNx)，呈現全球暖化情境下臺灣溫度特徵的改變。

高溫 36°C天數

依據中央氣象署定義日最高氣溫達36°C以上即會發布高溫資訊，在此每年日高溫超過36°C的天數 (TX36) 代表高溫事件的指標。山區溫度較低高溫不易超過36°C，為免影響到全臺平均的高溫日數評估結果，故只取海拔高度500 m以下的網格進行分析。圖3.5.1a為相較於1995年至2014年 (GWL 1°C) 的TX36推估變化，最右側的盒鬚圖顯示在GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C、GWL 4°C，TX36分別增加5.4天、10.6天、28天與54.5天 (中位數)；若以最極端的SSP5-8.5在長期的推估變化來看，全臺平均增加74.6天 (盒鬚圖左側長期裡的暗紅色結果)，95百分位甚至增加135.2天。

關於空間上的變化 (圖3.5.1b)，GWL 1.5°C情境中有不少區域無顯著增加。其他GWL情境中，除了屏東南部外，高溫36°C天數皆為統計上顯著且一致地增加，其中增加天數較多的區域包括臺北盆地、中部近山區與高屏近山區，同時包含盆地、內陸近山區及山谷 (河谷、縱谷) 等地區。主要與附近伴隨的天氣系統，且這些區域缺乏海風調節，加上地形封閉等因素有關。由於網格化資料為區域 (空間解析度為0.05°) 平均，其極端值常不如測站觀測值極端。以TX36為例，以網格化資料計算得到的天數常會低於測站觀測所計算出的天數。

極端高溫持續指數

另一個常用來評估高溫事件的HWDI，其定義為一年之中連續3天以上日最高溫高於基期 (1995年至2014年) 第95百分位之事件總天數。設定此指數的門檻值為各地區第95百分位的溫度，無高山地區缺值的問題。圖3.5.2為多模式推估結果，各種暖化情境一致，在未來推估短期 (2021年至2040年) 增加約14天至17天，增加並不明顯；至中期 (2041年至2060年) 則開始出現不同暖化情境的差異，排放情境最嚴重SSP5-8.5增加41天，相對的SSP1-2.6高溫天數增加則不明顯；長期 (2081年至2100年) 差異更大，溫室氣體排放最嚴重 (SSP5-8.5) 與減排 (SSP1-2.6) 的情境，高溫天數差別有87天 (模式高度一致性) ，顯示減少溫室氣體排放，將直接反映至高溫天數的減少。

HWDI的增加天數亦與全球暖化程度直接關連，圖 3.5.3以模式中位數說明，相對於現今氣候 (GWL 1°C)，GWL 1.5°C至GWL 4°C的天數分別將增加13天、28天、57天與88天。其中在GWL 4°C的情況下，中、南部相對於其他地區將有更顯著的增加天數。相關分析與李庭慧與許晃雄 (2017) 分析CMIP5的未來推估結果一致，HWDI的增加是受到中、高緯度北太平洋上層大氣暖化的影響。

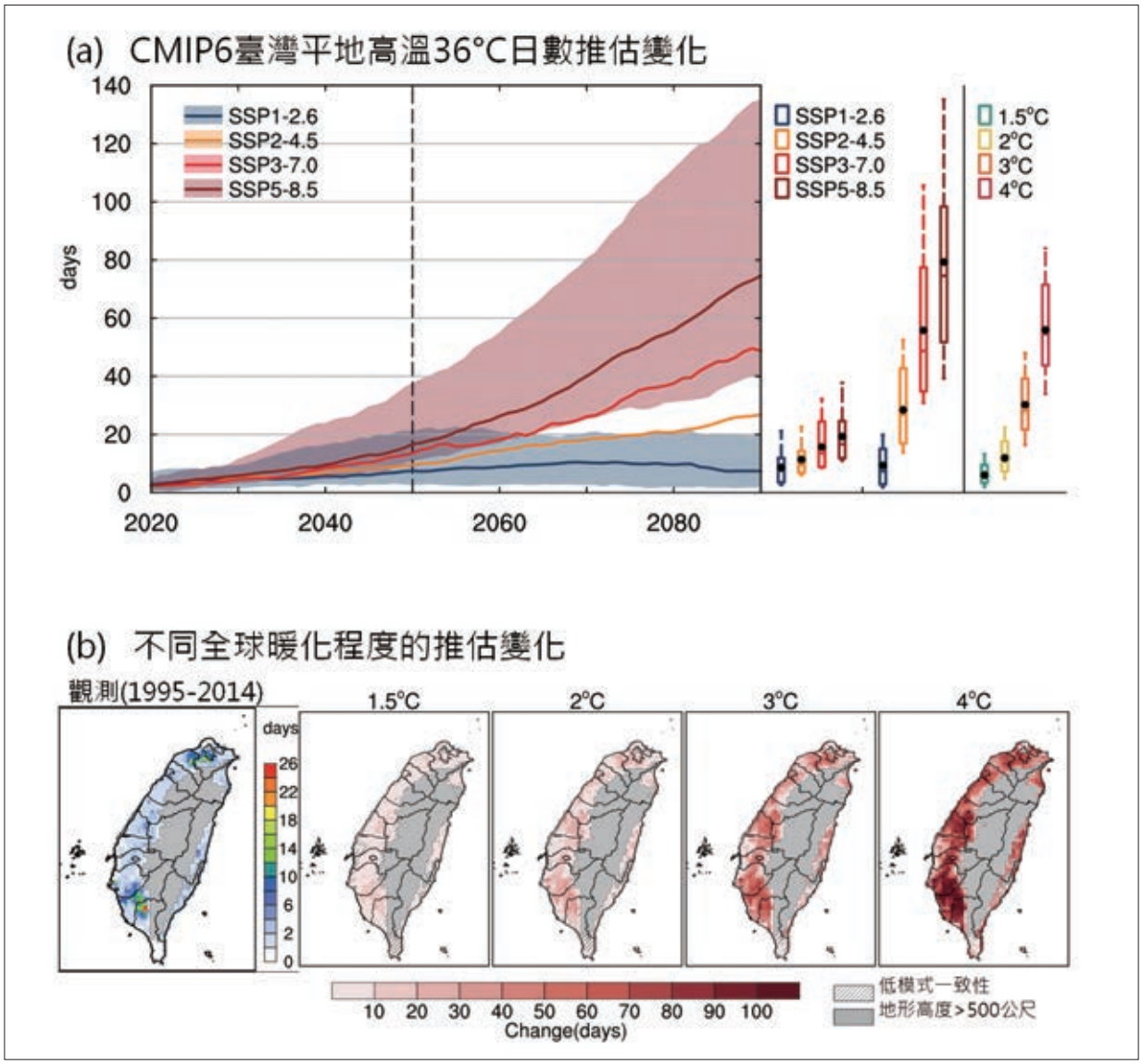


圖3.5.1 (a) CMIP6模式推估平地TX36的天數 (只計算海拔500公尺以下網格平均值；計算TX36使用的門檻值經測站與網格資料比較分析後調整)。左圖為20年滑動平均的2020年至2090年平均溫度變化 (相對於基期1995年至2014年)，實線為各SSP-RCPs的系集中位數，陰影為SSP1-2.6 (藍色)、SSP2-4.5 (黃色)、SSP3-7.0 (紅色) 與SSP5-8.5 (暗紅色) 的5%至95%模式範圍，直虛線對應2050年 (2041年至2060年平均值，代表世紀中期)，時間序列最右側為2090年 (2081年至2100年平均值，代表長期)。右圖為中期、長期以及不同GWL的盒鬚圖，數值分布由下至上分別為第5至17至50至83至95百分位，其中17%至83%為可能範圍，5%至95%為非常可能範圍，黑點代表系集平均。(b) 網格化觀測資料與GWL結果。左圖為0.05°網格化觀測資料於1995年至2014年的TX36平均值空間分布，右圖為不同GWL的系集平均推估變化，反斜線區域表示無變化或無穩健訊號 (<66%模式有顯著變化)，交叉線區域表示矛盾訊號 (≥66%模式有顯著變化但<80%模式有一致性)。(資料來源：本報告產製)

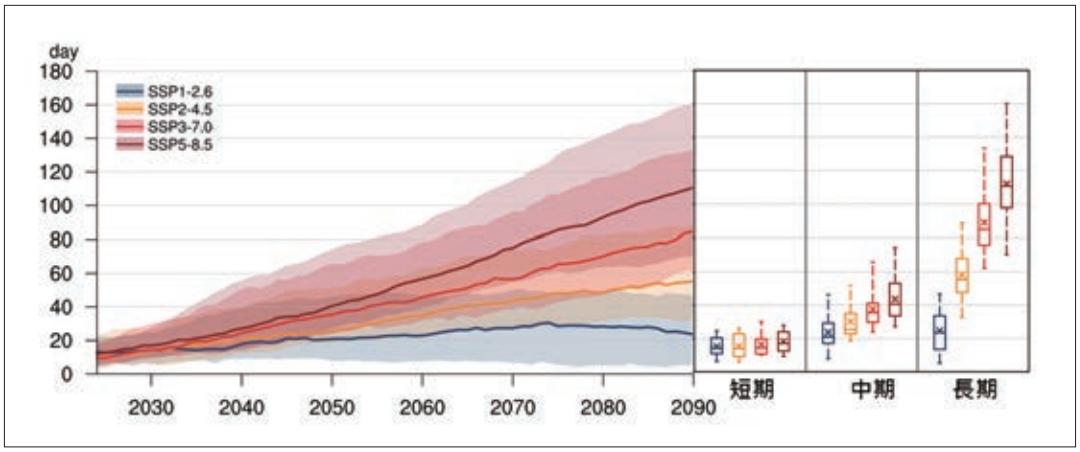


圖 3.5.2　使用CMIP6多模式評估SSPs情境極端高溫持續指數HWDI變化趨勢 (單位：天)。以現今氣候 (1995年至2014年) 為參考期，每20年的滑動平均計算。左側時序圖以不同顏色代表情境，實線為模式中位數、陰影區為第95至第5百分位數值區間。右側盒鬚圖為短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年)、長期 (2081年至2100年) 氣候平均第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下)，以顏色區分不同情境、X記號為系集平均值。(資料來源：本報告產製)

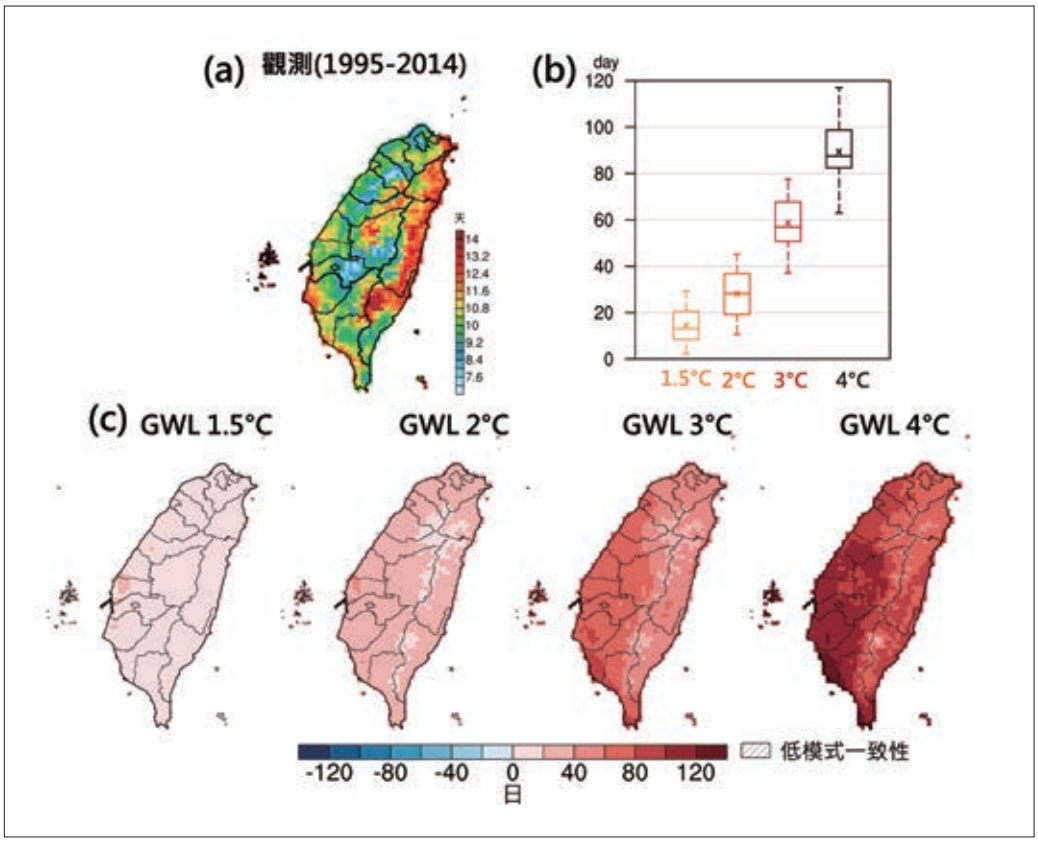


圖 3.5.3　歷史與GWL下極端高溫持續指數HWDI變化趨勢。(a) 圖為TCCIP網格化觀測 (1995年至2014年) (單位：天)；(b) 圖為GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C、GWL 4°C 相對於模式現今氣候 (1995年至2014年)，以盒鬚圖第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下) 呈現全臺平均變化 (單位：天)，X記號為系集平均值。(c) 圖為不同GWL (模式中位數) 空間分布，斜線區域為低模式一致性。(資料來源：本報告產製)

日最高溫與最低溫極大值

前述TX36與HWDI皆是以發生天數度量高溫事件，然而暖化情境下每年出現的TXx，亦是許多基礎工程設計需要的重要資訊，如：能源設施、道路工程、建築結構……等。此外，全年TNx隨著全球暖化的增溫情況也值得關注，TNx常發生在臺灣夏季夜晚，晚上高溫持續上升將影響人體的生理機能與糧食作物的生產效率。TXx的變化趨勢，無論不同情境、時期的增溫幅度，均類似平均溫度 (參見3.3節) 增加情況。相關結果可參考「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集： AR6統計降尺度版」(國家災害防救科技中心，2023)。以TNx趨勢來看，到21世紀末長期 (2081年至2100年) 推估 (圖3.5.4)，才會出現暖化情境不同所導致的差異，但在暖化最嚴重的情境下，夏季夜晚高溫增加幅度將比白天高溫更嚴重。以全球暖化程度模式中位數呈現 (圖3.5.5)，將模式現今氣候 (GWL 1°C) 設定為基期，GWL 1.5°C至GWL 4°C將使得臺灣分別增加1°C、1.5°C、2.4°C、3.3°C。除了GWL 1.5°C模式一致性較低外，其他皆呈現高模式一致性。

低溫

觀測資料發現，全球增溫造成極區冬季溫度屢創新高，使得該地區冰原與海冰面積大量減少。然而在此背景下，仍可見低溫事件的發生，例如2021年2月極地渦旋的劇烈變化，造成了美國德州極端低溫事件。臺灣位於東亞地區，與其冬季低溫最相關的是東亞冬季季風 (East Asian Winter Monsoon system, EAWM) 強度變化。張智鈞等人 (2020) 分析CMIP5結果顯示，暖化情境下，因EAWM的強度減弱，使寒潮的發生頻率、低溫日數以及寒潮持續日數都呈現顯著減少趨勢。You et al. (2022) 分析CMIP6模式也顯示，在GWL 1.5°C與GWL 2°C的情況下，冬季東亞主槽位置向東移，使得EAWM呈現減弱趨勢。本節將「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集： AR6統計降尺度版」(國家災害防救科技中心，2023) 中的CWDI以及每年TNn，說明未來低溫事件的趨勢變化情況。

極端低溫持續指數

極端低溫持續指數 (CWDI) 是以1995年至2014年內所有天數的日低溫第5百分位數作為溫度門檻值後，計算連續3天以上日低溫低於門檻值的事件，得到平均每年所有事件數的天數。圖3.5.6說明不分暖化情境將呈現極端低溫天數減少趨勢，未來推估短期變化不明顯，中期 (2041年至2060年) 則呈現不同暖化情境的差異，SSP1-2.6平均每年減少5.8天 (中位數)，SSP5-8.5則減少8.1天 (中位數)；長期 (2081年至2100年) 推估則更明顯說明溫室氣體減排情境 (SSP1-2.6) 使極端低溫事件天數減少。

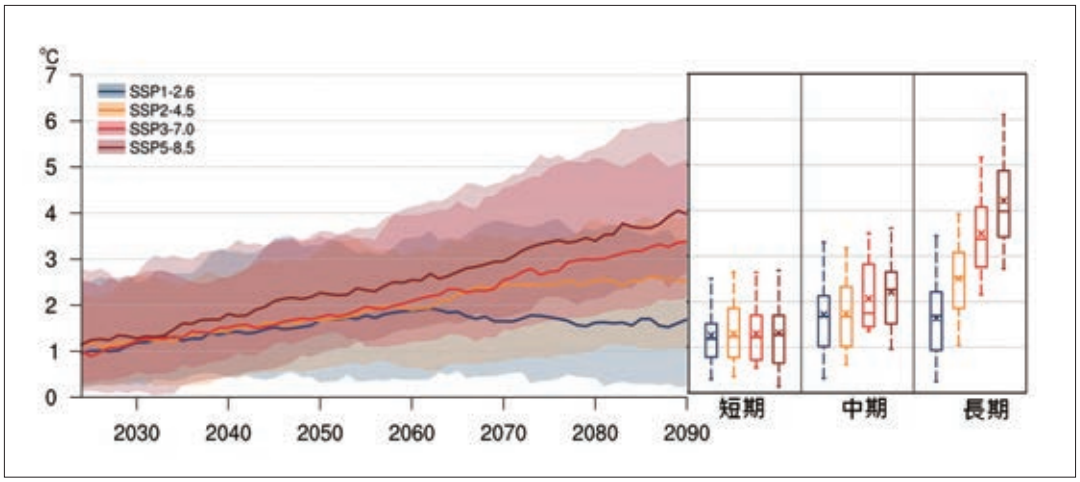


圖3.5.4　各SSPs情境每年日低溫最大值 (TNx，單位：℃) 未來變化趨勢 (參考圖3.5.2說明)。(資料來源：本報告產製)

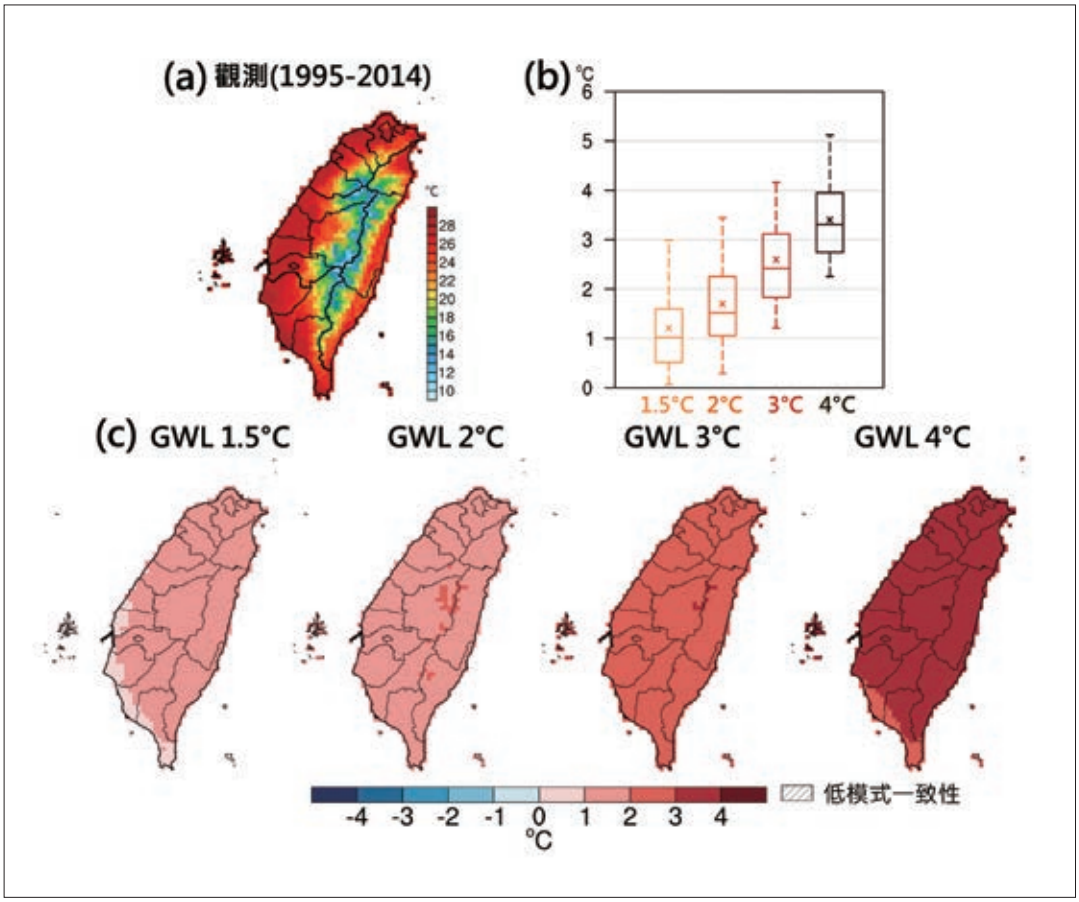


圖3.5.5　歷史與GWL下的TNx。(a) 圖為1995年至2014年觀測 (單位：℃)；(b) 圖為GWL 1.5℃、GWL 2℃、GWL 3℃、GWL 4℃相對於模式現今氣候 (1995年至2014年)，以盒鬚圖第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下) 呈現全臺氣候平均溫度變化 (單位：℃)，X記號為系集平均值。(c) 圖為GWL溫度變化 (模式中位數) 空間分布 (單位：℃)，斜線區域為低模式一致性。(資料來源：本報告產製)

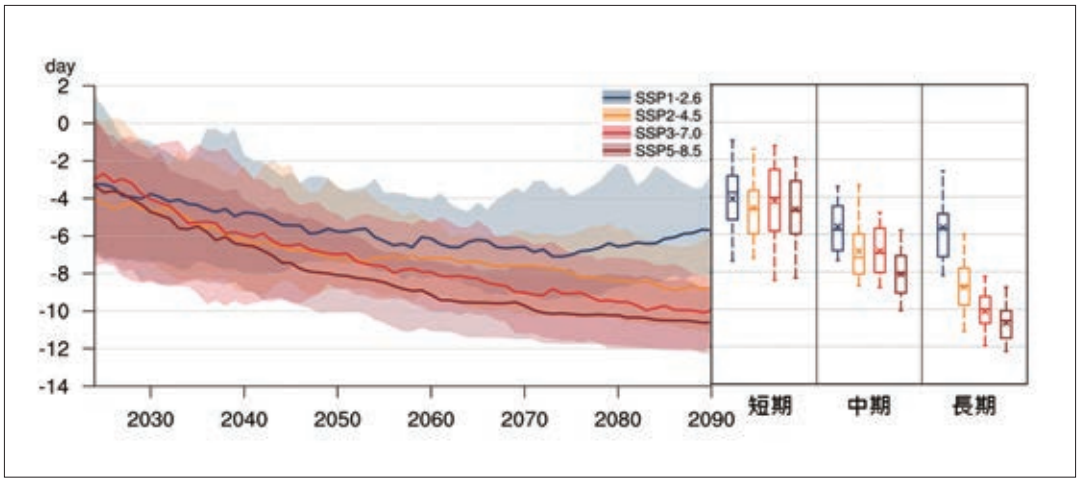


圖3.5.6　SSPs情境下，CWDI (單位：日) 長期變化趨勢 (類似圖3.5.2說明)。(資料來源：本報告產製)

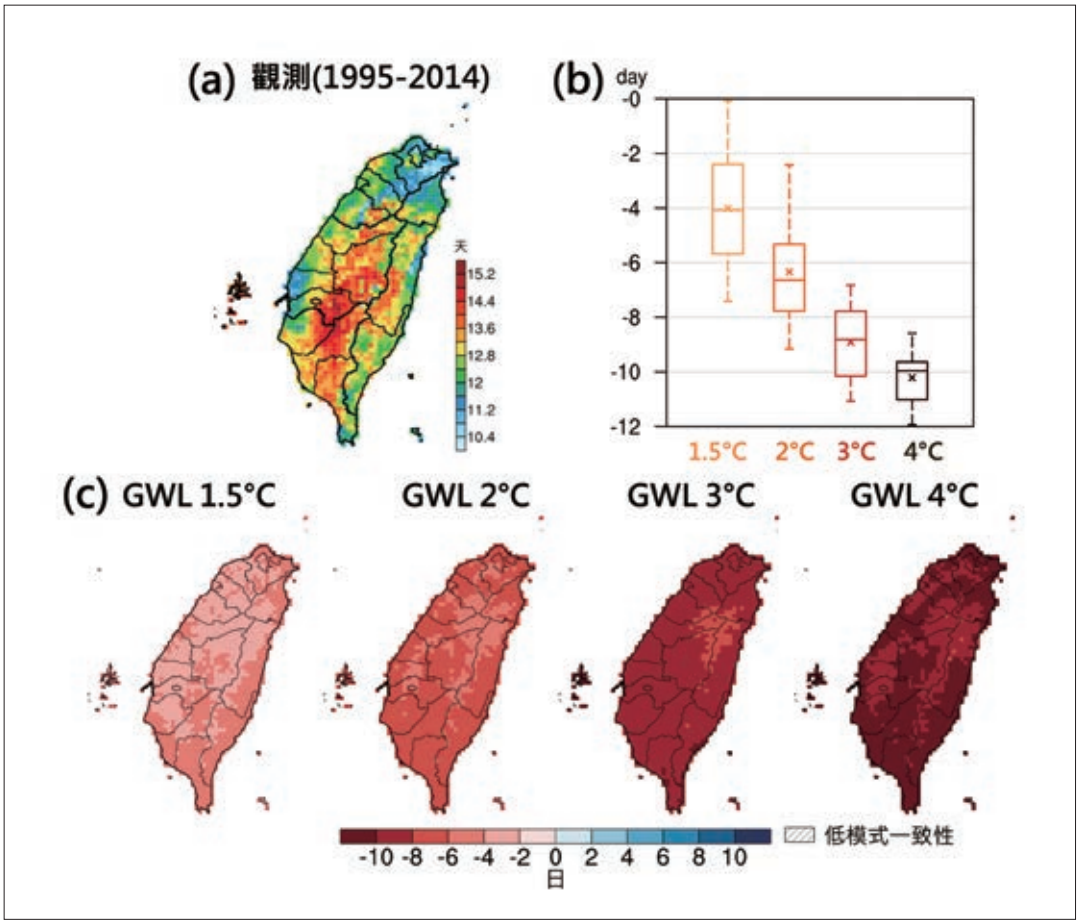


圖3.5.7　歷史與GWL下的CWDI。(a) 圖為TCCIP網格化觀測 (1995年至2014年) (單位：天)；(b) 圖為GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C、GWL 4°C相對於模式現今氣候 (1995年至2014年)，以盒鬚圖第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下) 呈現全臺平均變化 (單位：天)，X記號為系集平均值。(c) 圖為不同GWL (模式中位數) 空間分布，斜線區域為低模式一致性。(資料來源：本報告產製)

極端低溫持續天數隨著不同的全球暖化程度呈現的下降趨勢 (圖3.5.7)，GWL 1.5°C至GWL 4°C平均每年分別為減少4.1天、6.6天、8.8天與10天 (中位數)。過去研究 (Kharin et al., 2013; Sillmann et al., 2013) 發現，全球暖化為極端低溫天數減少的主要因子。除了受到全球增溫的影響之外，由於冬季臺灣周遭大尺度範圍的環流場變化，且臺灣位處中、低緯度，受寒潮爆發影響的機率較小，因此隨全球暖化程度增加，CWDI天數持續減少。

日低溫最小值

每年TNn通常出現在每年冬季，也可用來評估極端低溫的強度變化趨勢。圖3.5.8說明各種的暖化情境下，呈現一致性的低溫上升趨勢，短期內無明顯溫度上升情況，中期則開始可分辨出溫室氣體排放情境的效果差異，至長期則溫室氣體減排與高度排放效果差異明顯。Kim et al. (2015) 發現全球TNn持續上升，與人為溫室氣體排放有顯著相關，此結論應用至未來不同溫室氣體排放情境的推估趨勢同樣適用。TNn的變化趨勢 (見圖3.5.9) 隨著全球暖化程度呈現上升趨勢，GWL 1.5°C至GWL 4°C分別為增溫0.7°C、1.3°C、2.1°C與3°C (中位數)。空間分布所有GWLs都呈現高模式一致性，且GWL 4°C增溫幅度較嚴重多在臺灣西部地區。

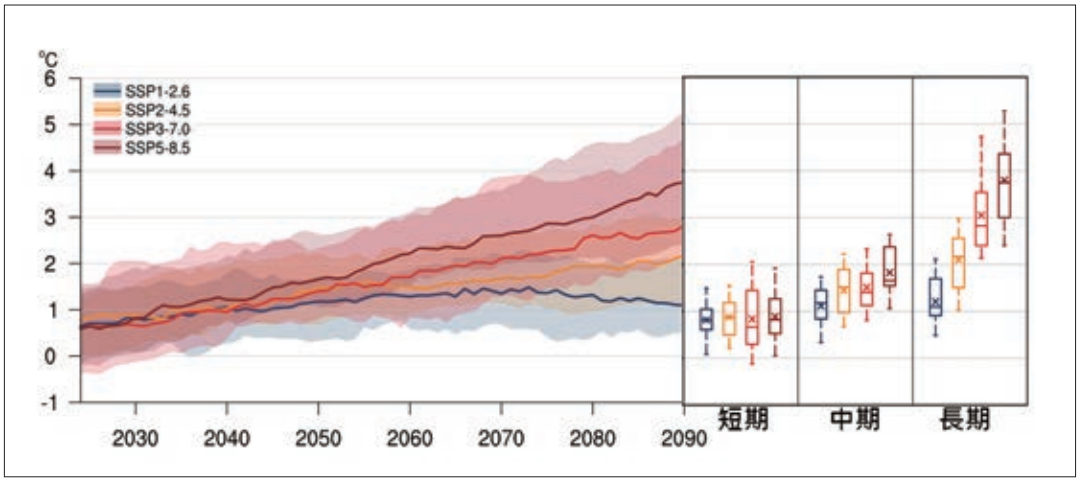


圖3.5.8　SSPs情境下的TNn (單位：°C) 長期變化趨勢 (類似圖3.5.2說明)。(資料來源：本報告產製)

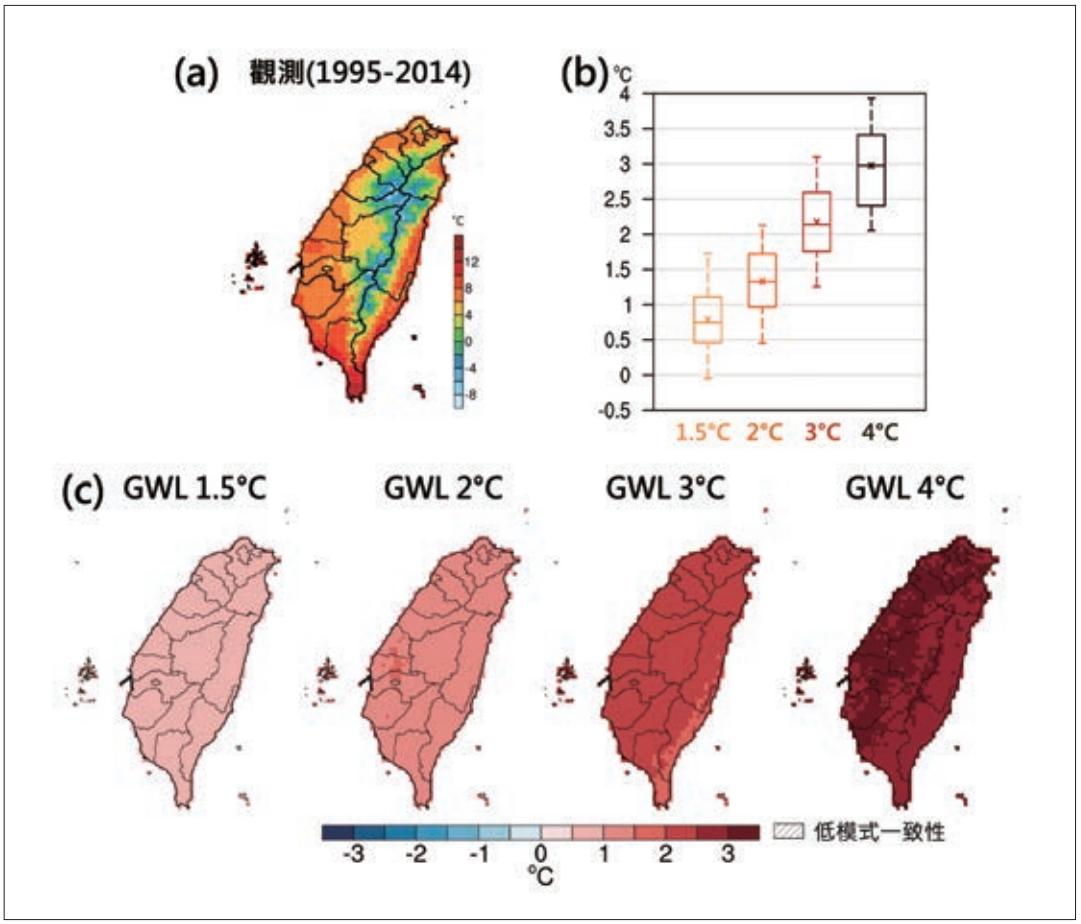


圖3.5.9　類似圖3.5.3.5，但為日最低溫極小值 (TNn)，單位：°C。(資料來源：本報告產製)

3.5.2　極端降雨、梅雨、午後對流

臺灣發生的暴雨除了颱風 (3.5.4節) 之外，多來自鋒面、西南氣流或是強烈的午後對流等天氣系統所造成。由於CMIP6的全球模式的空間解析度粗，不易對臺灣的降雨分布做詳細評估，因此需借助具有較高時空解析度的全球氣候模式動力降尺度資料，或是統計降尺度資料進行推估。

本節介紹了動力降尺度資料在未來暖化情況下，對臺灣夏季午後陣雨與梅雨季暴雨頻率、強度的變化所進行的推估，並探討了多模式對梅雨季降雨頂峰值發生時間的推估結果。同時，使用統計降尺度日降雨資料來分析Rx1day和工程上常用的重現期降雨指標，並呈現暖化情境下臺灣極端降雨的氣候變化趨勢。

梅雨季暴雨與夏季午後陣雨

現今研究未來極端降雨變化，常採用全球氣候模式及區域動力降尺度模式的推估資料結果，Huang et al. (2016) 則使用動力降尺度資料 (HiRAM-WRF)，分析RCP8.5情境下，21世紀末臺灣夏季不同類型天氣系統之降雨日發生頻率和強度的未來變化。結果顯示夏季午後對流的降雨頻率變少，但是降雨強度將增強 (圖3.5.10)。進一步分析暖化情境下的環境場發現，除了太平洋副熱帶高壓增強往西南延伸，暖化程度的垂直差異也會導致大氣穩定度的增加，不利於午後對流發生。不過常伴隨太平洋副熱帶高壓增強的西南氣流增強與低層輻合增加，則有利於將海面上產生的降雨系統移入臺灣。而未來臺灣與鄰近區域的低層水氣增強，一旦降雨事件發生，其強度可能較以往更加劇烈。

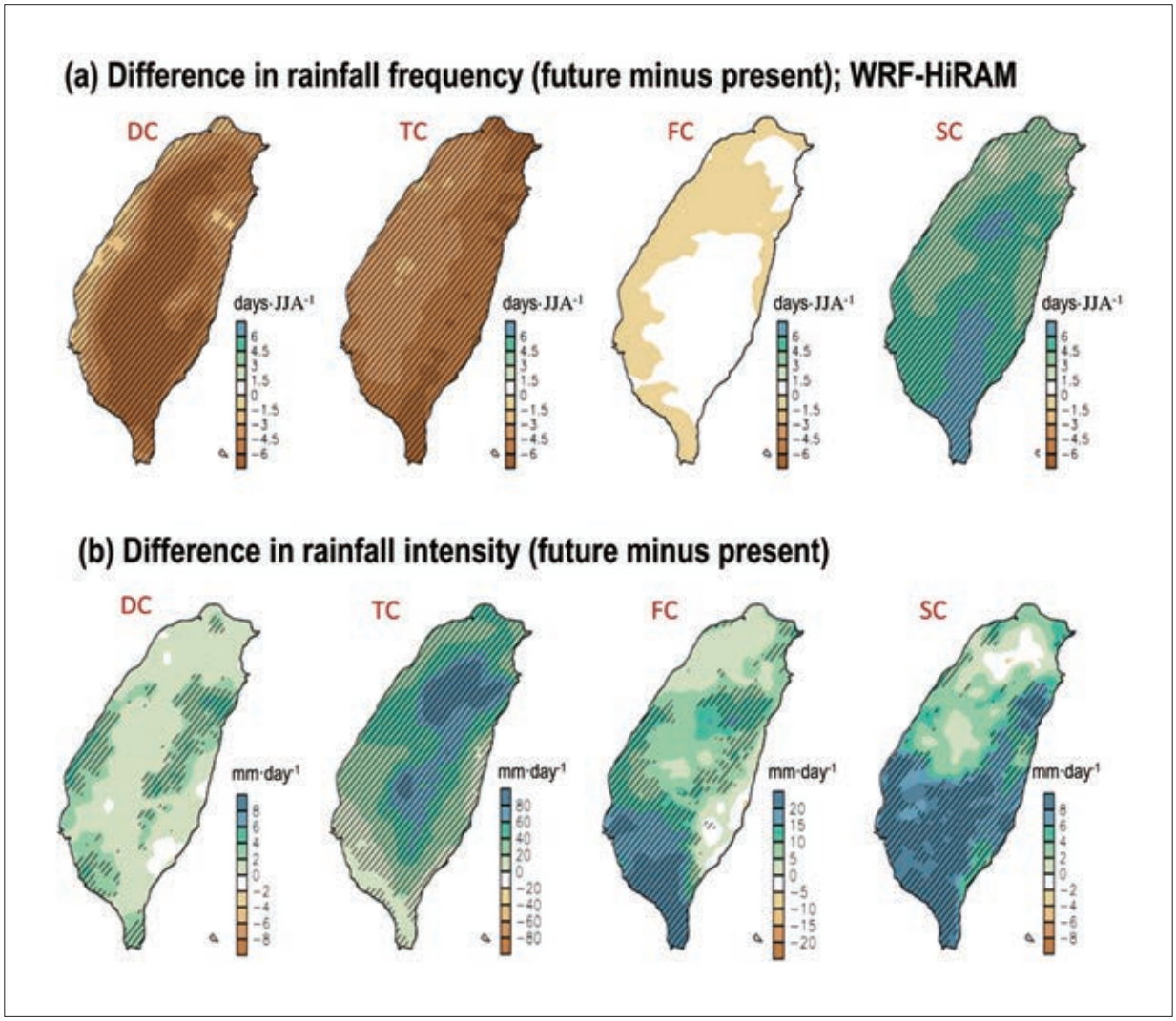


圖3.5.10　WRF-HiRAM推估夏季 (JJA) 四種天氣事件：(a) 每3個月 (6月至8月) 的發生頻率 (day) 與 (b) 降雨強度 (mm day^{-1}) 的變化 (即RCP8.5情境下，21世紀末未來推估減去現今時期)。其中DC為午後降雨，斜線區表示該變化通過90%可信度統計檢定。 (摘自Huang et al., 2016)

臺灣發生致災性的鋒面降雨時常在梅雨季 (5月至6月)，Tung et al. (2020) 分析CMIP5全球氣候模式推估結果，發現在RCP8.5情境下，臺灣梅雨季降雨於21世紀末將有增強的現象。另外針對梅雨季極端降雨，觀測的梅雨季PR90 (有雨日的降雨強度的第90百分位) 日雨量有地區上差異：在少雨的東部約為30至40 mm day^{-1}、西部平地約為40 mm day -1至50 mm day^{-1}、西南平原約為50 mm day -1至70 mm day^{-1}、迎風面的中南部山區大於70 mm day^{-1} (Huang et al., 2019, Fig 4)。Huang et al. (2019) 使用動力降尺度資料計算日雨量超過PR90之平均日雨量，及R90N (PR90中的極端降雨事件天數)，結果顯示在RCP8.5情境下，21世紀末梅雨季極端降雨事件天數及強度在西半部地區皆為增加，而在東部地區則皆是減少 (圖3.5.11a, b)。造成此現象的原因，可能是在未來暖化情

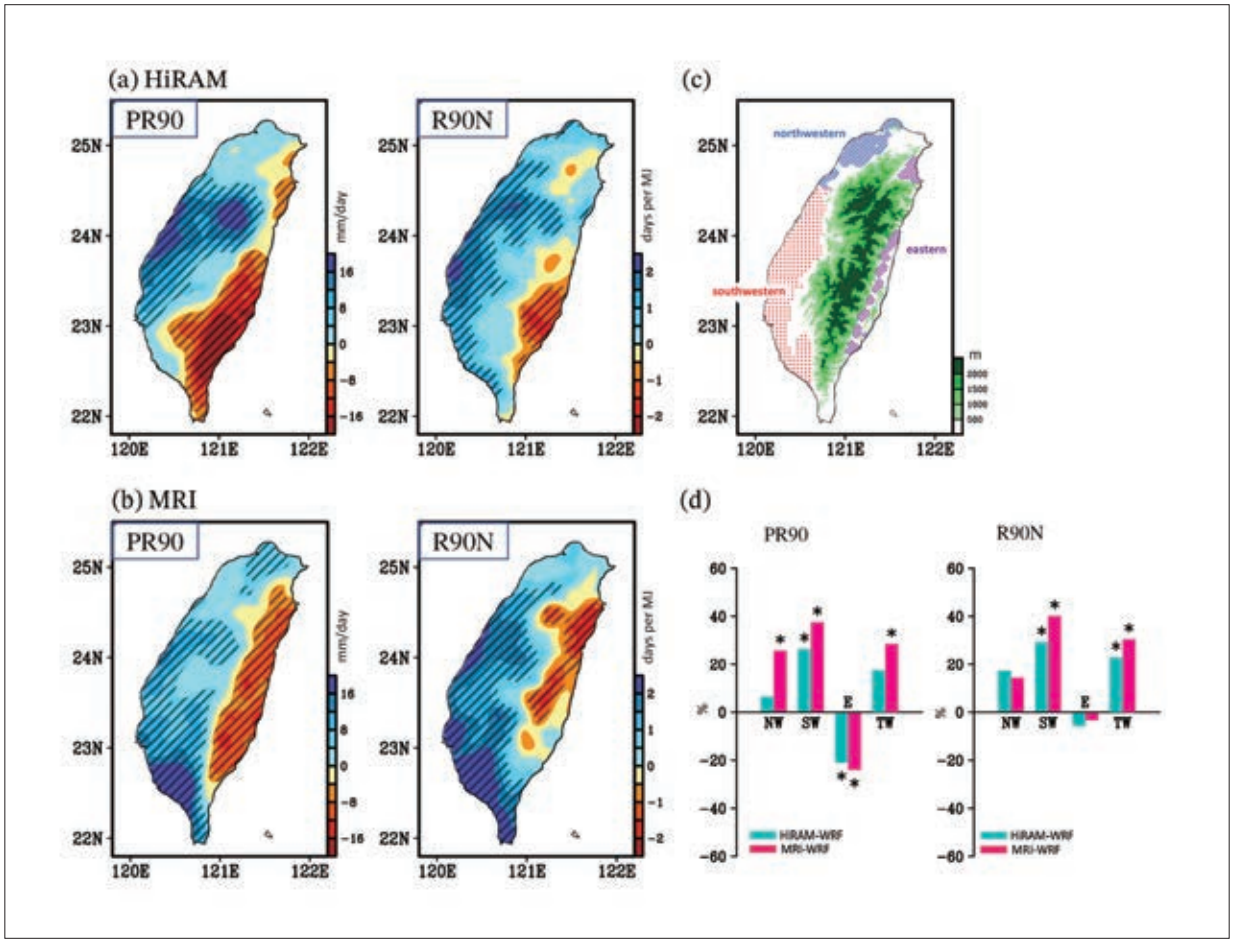


圖3.5.11　(a) HiRAM-WRF推估梅雨季降水日雨量的PR90、R90N變化 (即未來推估減去現今時期)。(b) 類似 (a)，但為MRI-WRF的結果。斜線區表示該變化通過90%可信度統計檢定。(c) 為臺灣地形及不同區域之農業區分布，藍色代表西北區、紅色代表西南區、紫色代表東區。(d) 將 (a) 和 (b) 針對全臺灣及不同農業區的結果進行量化 (即未來推估減去現今時期，除以現今時期，乘以100%) 藍色為HiRAM-WRF的結果，紅色為MRI-WRF的結果。＊表示該變化通過90%可信度統計檢定。 (摘自Huang et al., 2019)

境下，臺灣西半部迎風面的風場輻合、水氣通量都增加，但東半部背風面則是減弱。若針對臺灣農業區來看 (圖3.5.11c, d)，西南部受影響的幅度較為顯著 (25%至40%)。

除了關心降雨強度的變化，梅雨季大雨發生的時間與臺灣南部乾季結束、旱象解除有很大關係。近期研究發現，臺灣梅雨季大雨發生的時間 (降雨年循環的第一個峰值) 有延遲的現象，在1990年代前，降雨峰值約在5月下旬達到頂峰，而在1990年代後，則延遲至6月中旬 (Wang et al., 2015; Tung et al., 2020; Huang et al., 2022)。針對此延遲現象，Huang et al. (2022) 使用CESM2-LE及CMIP6多個全球氣候模式的推估結果進行分析，發現在SSP3-7.0的情境下，21世紀中後期，臺灣梅雨季降雨峰值的延遲

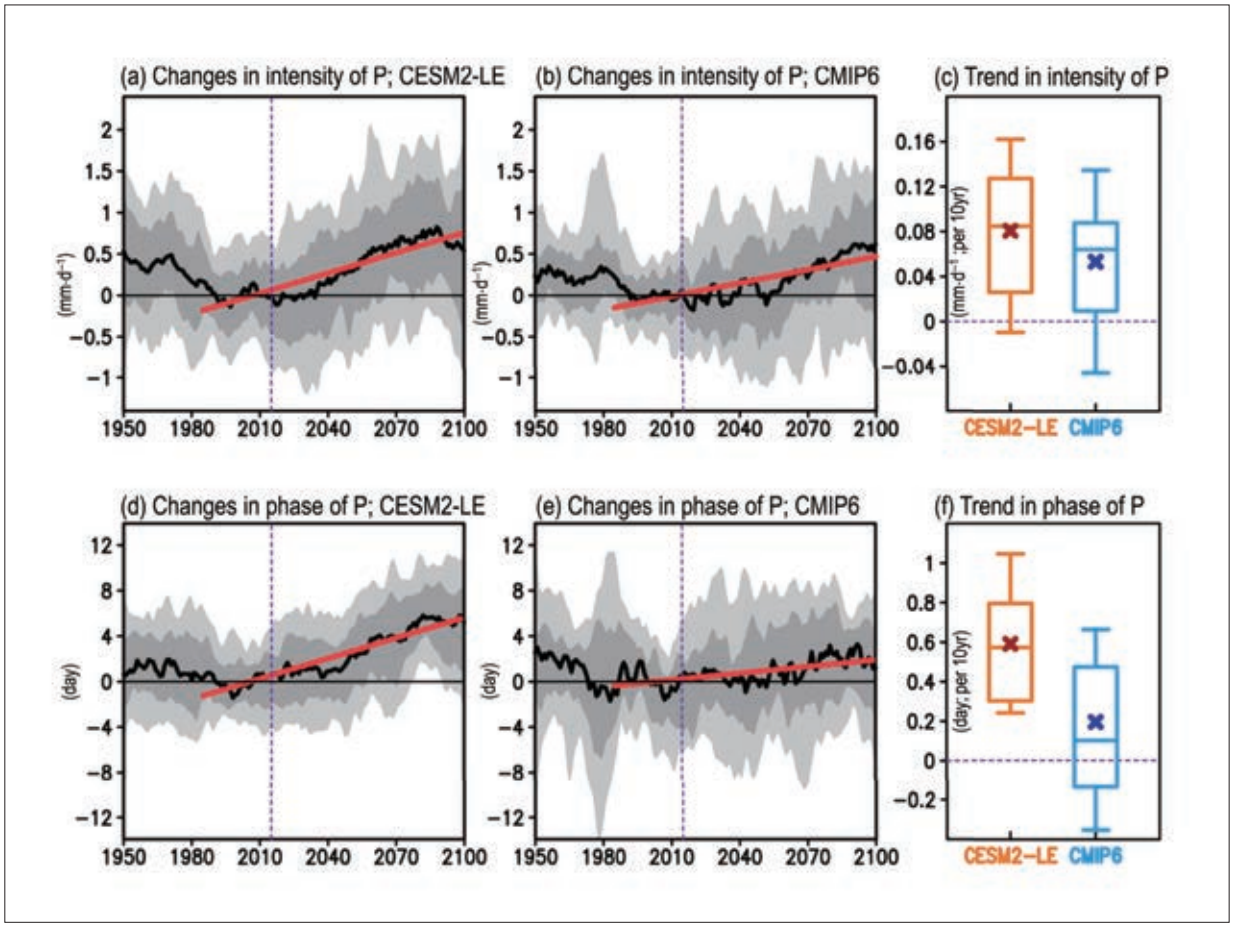


圖3.5.12　(a) 由CESM2-LE估計初夏 (5月至6月) 降雨變異量 (移除1985年至2014年平均值) 的時間序列。黑線為模式系集平均，紅線為1985年至2100年的趨勢線，紫色虛線為2015年即SSP3-7.0開始模擬的年分。淺灰色和深灰色陰影分別對應第75 (第25) 和第90 (第10) 百分位數之間的結果。(b) 與 (a) 類似，但為CMIP6的結果。(c) 盒鬚圖為從CESM2-LE和CMIP6中所估計之1985年至2100年降雨趨勢，如 (a) 和 (b) 中的紅線。(d至f) 分別與 (a至c) 類似，但為初夏發生最大降雨之時間的相位變化。(摘自Huang et al., 2022)

現象將加劇 (圖3.5.12d,e)，從6月中旬往後至6月下旬，降雨峰值的強度亦將增強 (圖3.5.12a,b)。進一步分析暖化情境下的環境場，顯示南海地區西南風增強，但增強的時間往後延遲，導致水氣傳輸到臺灣產生劇烈降雨的時間往後延遲。然而，從圖3.5.12c,f中，可見不同模式對於此現象的未來推估結果仍有些差異，因此這個議題需未來多多深入研究。

年最大一日降雨量 (Rx1day) 趨勢與重現期暴雨強度變化

由於臺灣各區域極端降雨特徵複雜，Tung et al. (2022) 使用1960年至2017年TCCIP網格化觀測資料分析Rx1day空間變化趨勢，發現2000年後西南部區域呈現顯著的增加趨勢 (通過統計檢定)。進一步使用CMIP6統計降尺度未來推估資料 (國家災害防救科技中心，2023) 發現，不論是何種暖化情境下，Rx1day皆增加 (圖3.5.13)。不同暖化情境下的差異在中期 (2041年至2060年) 以後較明顯。SSP3-7.0與SSP5-8.5情境下的模式推估結果差異較大，SSP5-8.5的範圍介於31%至135% (可能出現)，少數模式有相當極端的增加趨勢。從不同時期的推估結果發現，嚴重排放情境長期 (2081年至2100年) 的推估結果，Rx1day降雨強度變化最嚴重的區域在中部地區增加40%，同時全臺的暴雨增加情況顯著，且具高模式一致性 (見圖3.5.14)。

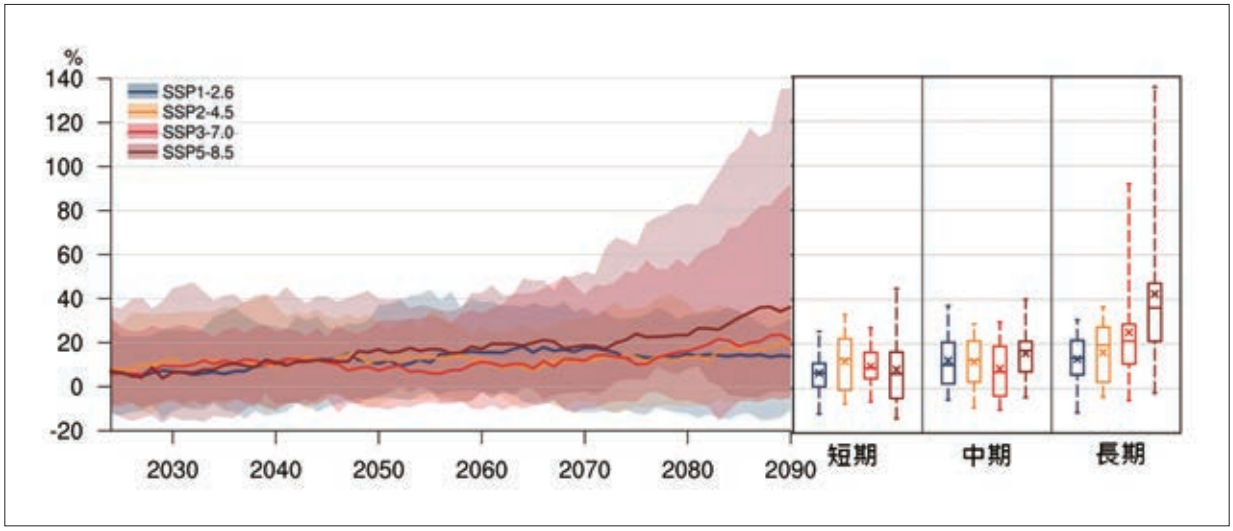


圖3.5.13　使用CMIP6多模式評估SSPs情境之Rx1day變化趨勢 (單位：%)，以現今氣候 (1995年至2014年) 為參考期，每20年的滑動平均計算。左側時序圖以不同顏色代表情境，實線為模式中位數、陰影區為第95至5百分位數值區間。右側盒鬚圖為短期 (2021年至2024年)、中期 (2041年至2060年)、長期 (2081年至2100年) 氣候平均第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下)，以顏色區分不同情境、X記號為系集平均值。(資料來源：本報告產製)

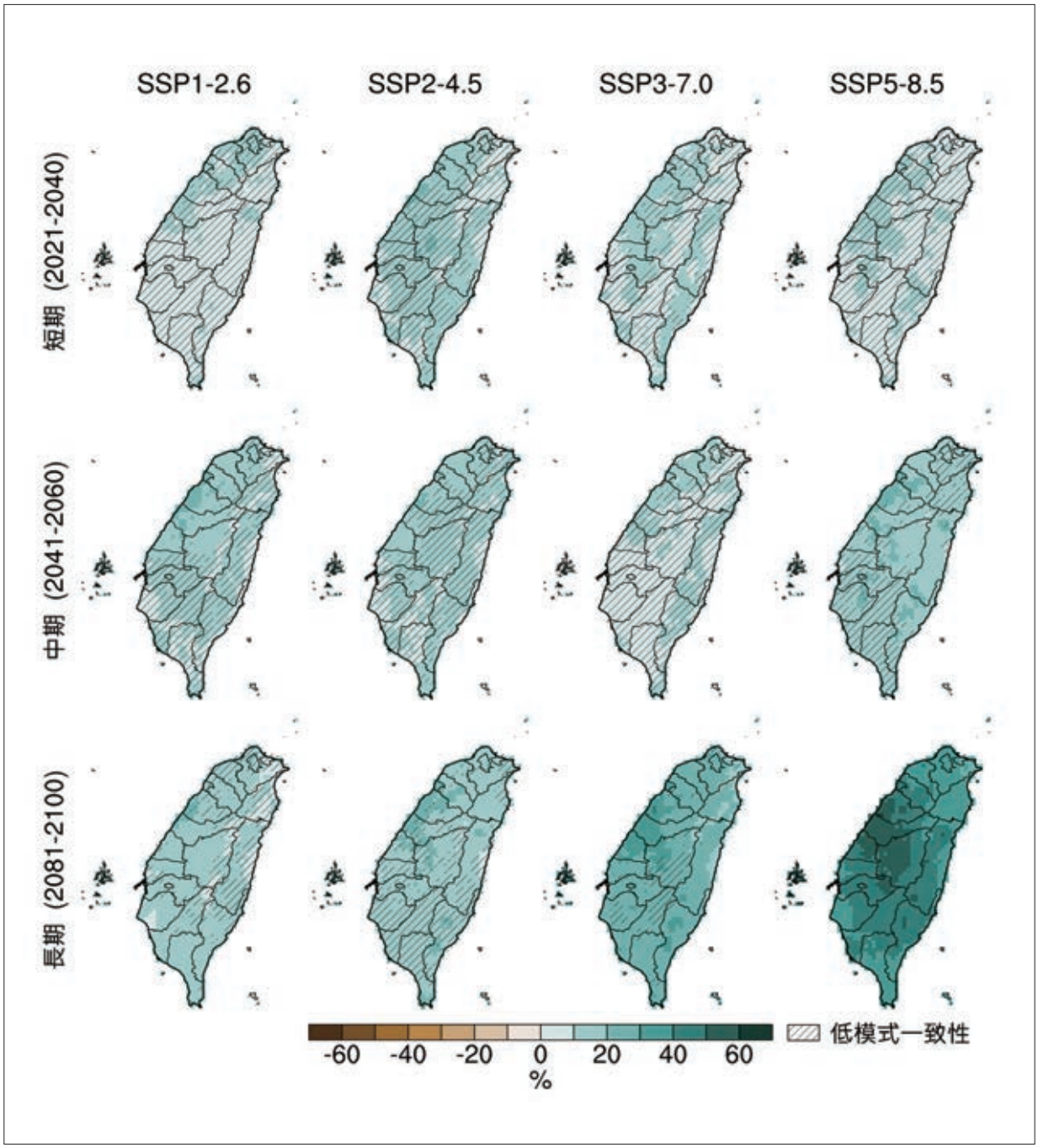


圖3.5.14　使用CMIP6模式中位數評估SSPs情境下，不同時期 (相對於1995年至2014年) Rx1day空間變化 (單位：%)。左至右為SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5；上至下為短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年)、長期 (2081年至2100年)。以斜線區域呈現低模式一致性趨勢。(資料來源：本報告產製)

圖3.5.15呈現在全球暖化達到GWL 1.5°C至GWL 4°C情境下，相對於基期1995年至2014年，Rx1day的變化情況。系集平均推估結果顯示，隨著全球暖化程度的加劇，極端一日暴雨的強度也有增加越強的趨勢，在不同情境下，相對增加幅度分別為8%、

10%、14.1%與28.6%。然而，在GWL 1.5°C至GWL 2°C情境下，大多數區域的推估結果皆為低模式一致性，而在GWL 4°C情境下，幾乎全臺的推估結果皆呈現高一致性的增加趨勢。值得注意的是，基期高屏山區原本就具有較高的Rx1day強度，未來推估結果顯示其增加趨勢也相當顯著。

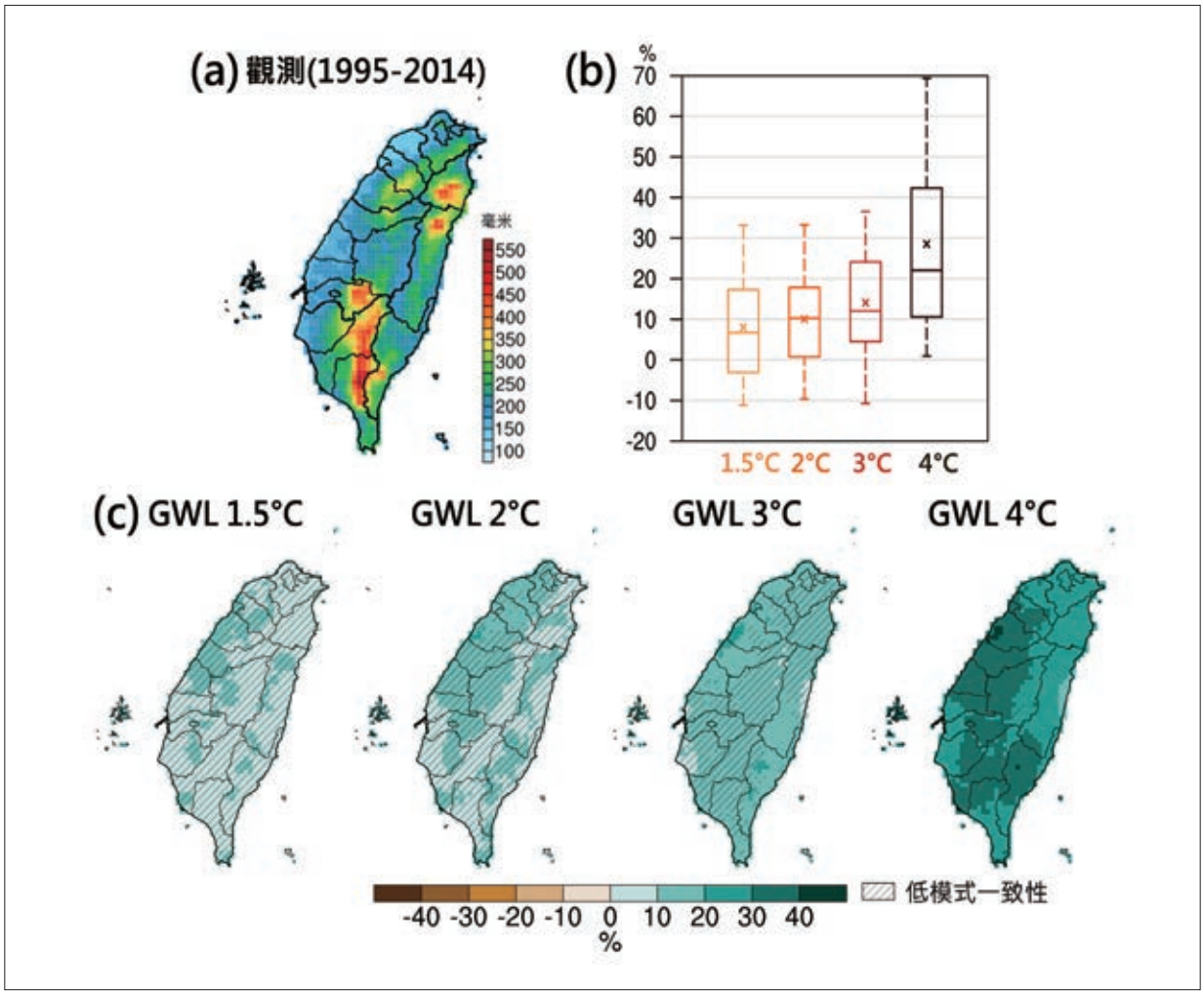


圖3.5.15　歷史與GWL下的Rx1day。(a) 圖為1995年至2014年網格化觀測 (單位：mm)；(b) 圖為GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C、GWL 4°C相對於模式現今氣候 (1995年至2014年)，以盒鬚圖第95、75、50、25、5百分位數 (由上至下) 呈現全臺氣候平均變化 (單位：%)，X記號為系集平均值；(c) 圖為不同GWL (模式中位數) 空間分布 (單位：%)。斜線區域為低模式一致性。(資料來源：本報告產製)

近年來，極端降雨事件頻繁發生，對於許多工程設計如坡地穩定和防洪措施等帶來挑戰。在許多情況下，防護工程的設計標準是根據過去發生過最強降雨量來制定的。當某場極端降雨事件發生後，要利用有限的降雨資訊呈現長期歷史結果，了解該事件在過

去歷史上是否發生過，類似的降雨強度大約是多久發生一次，在工程應用上的做法即是水文頻率分析。都市溝渠與河岸堤防的淹水防護標準，通常使用10年與50年降雨重現值做為極端降雨的評估依據。為了進行全臺網格的水文頻率分析，以下應用TCCIP網格化日降雨資料，首先計算觀測 (1995年至2014年) 與各模式在不同情境下的Rx1day，並在GWL 2°C與GWL 4°C時，使用鄭克聲與連琮勛 (2015) 的方法呈現rv10與rv50變化。

根據圖3.5.16，觀測資料呈現的水文頻率分析空間分布，符合觀測Rx1day的降雨增

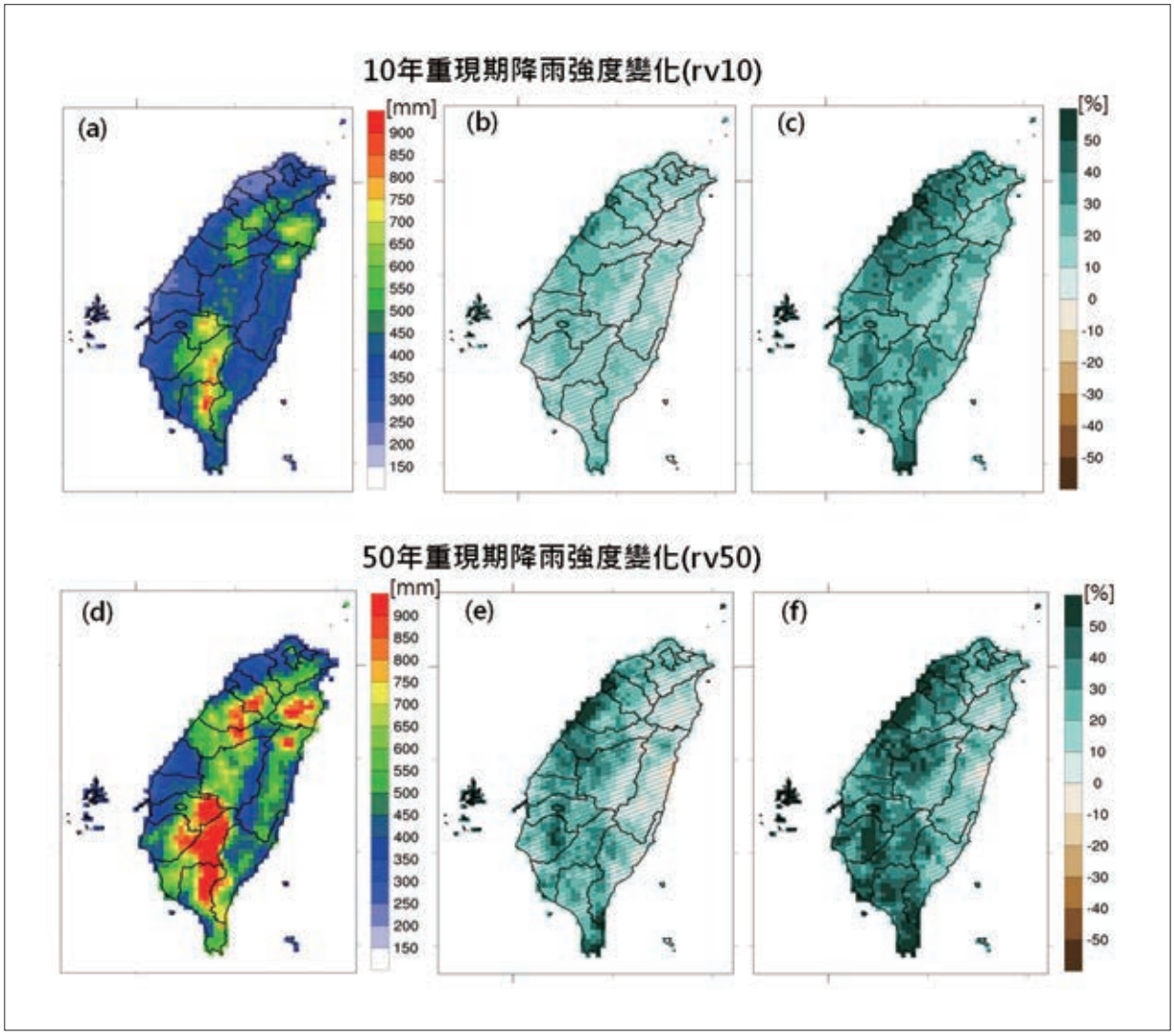


圖3.5.16　應用Rx1day網格化資料，參考「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集： AR6統計降尺度版」(國家災害防救科技中心，2023)，計算歷史與GWLs下rv10 (圖a, b, c) 與rv50 (圖d, e, f) 極端降雨強度變化 (相對於模式基期1995年至2014年)。圖 (a,d) 為觀測1995年至2014年 (單位：mm)；圖 (b,c) 為GWL 2°C (99組模式)、圖 (e, f) 為GWL 4°C (31組模式)，以多模式降雨變化率 (單位：%) 的中位數呈現。其中斜線區域代表低模式一致性。(資料來源：本報告產製)

加幅度，在GWL 2°C情境下，北部和中部平地的rv10顯著增加了30%至40%。而在GWL 4°C情境下，全臺的rv10增加幅度更大，約比GWL 2°C增加了10%至20%。這種趨勢變化的結果，不論是增幅還是空間分布，都與在GWL 2°C、GWL 4°C下的Rx1day一致 (圖3.5.15)。此外，在GWL 2°C情境下，除了北部和中部平地外，rv50在臺南山區與恆春增加40%至50%。而在GWL 4°C情境下，rv50也呈現增加幅度放大的情況。值得注意是，rv50降雨強度變化在臺灣西半部變嚴重的趨勢明確。

圖3.5.17以空間平均值的方式，呈現全臺水文頻率年降雨量的變化情況。在GWL 1°C情境下 (即為模式基期：1995年至2014年)，rv10為350 mm，而在GWL 2°C 和GWL 4°C情境下，分別為407 mm (增加16%) 和468 mm (增加34%)。就rv50來看，則是在GWL 1°C情境下為485 mm，而在GWL 2°C和GWL 4°C情境下，分別為581 mm (增加20%) 和673 mm (增加39%)。上述結果說明，臺灣水文頻率年降雨量，依全球暖化嚴重程度而增加，rv10在GWL 4°C情境下已接近在GWL 1°C情境下 (基期) 的rv50，這意味著目前每50年才發生一次的降雨強度，於暖化程度達4°C時就會變成10年發生一次，極端降雨對臺灣的影響日益嚴重。

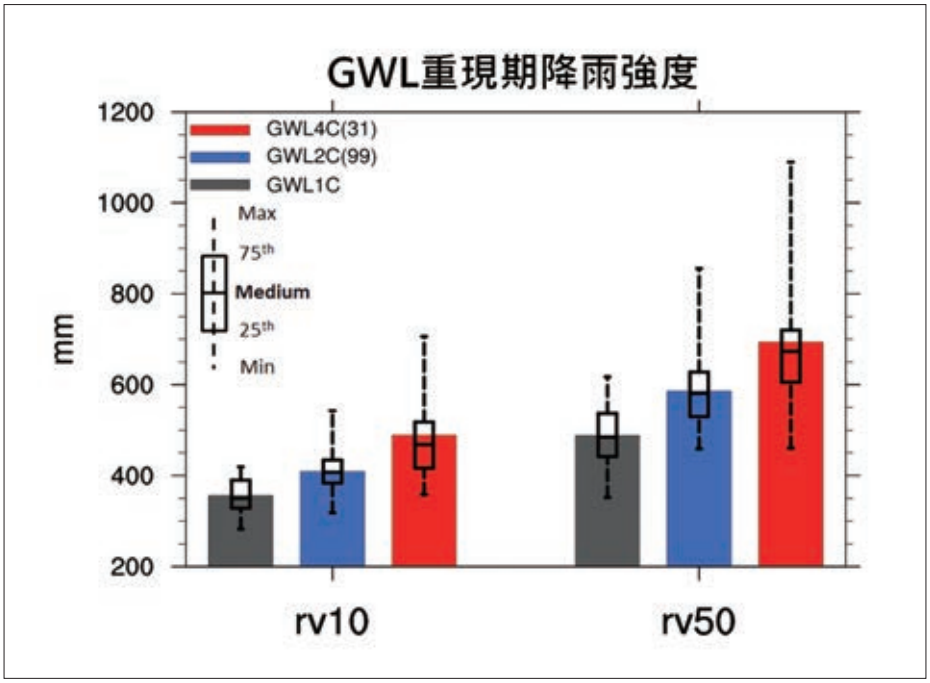


圖3.5.17　使用圖3.5.13的結果，以長條圖 (系集平均) 加上盒鬚圖 (由上至下代表：最大至75百分位至中位數至25百分位至最小值) 呈現GWL 1°C (黑色)、GWL 2°C (藍色) 與GWL 4°C (紅色) 的rv10、rv50全臺空間平均 (單位：mm)。(資料來源：本報告產製)

3.5.3　乾旱

乾旱事件的發生因素複雜，本章節以未來推估降雨情況的改變，導致氣象乾旱為出發點進行討論。根據2021年IPCC AR6之科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告，在未來暖化情境下，CDD呈現增加趨勢，世紀末隨著暖化情境加劇而增加得更為明顯，且南部的增加情況比北部更加嚴重。直接影響是乾季 (11月至4月) 的雨量，其中的關鍵又以春季 (2月至4月) 改變 (參考3.3節) 值得關注。本節使用CDD與SPI，說明模式推估臺灣的乾旱特徵。先呈現春季的情況，再加以延長至前一年的秋季，以完整呈現整個乾季的未來推估變化。以下內容部分引用自「臺灣氣候變遷分析系列報告：2020-2021百年乾旱與未來推估」(陳昭安等人，2023) 與「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6統計降尺度版」(國家災害防救科技中心，2023)。

連續不降雨日數

世紀末春季CDD的日數變化 (圖3.5.18a至d) 顯示，CDD隨著排放情境越嚴重 (由SSP1-2.6至SSP5-8.5) 而增加，南部地區此季節不降雨日數原本就較長，其中以嘉義、臺南、高雄、屏東與臺東地區天數增加較多，CDD變化率 (圖3.5.18e至h) 與日數變化一致，普遍高於20%，值得注意的是中部增加比例最高圖3.5.19為整個乾季 (秋季至冬季至春季) CDD變化。隨著暖化變嚴重而持續時間拉長，CDD天數增加的分布與春季類似，但持續天數更長 (圖3.5.19d)。CDD的變化率分布，在東半部的增加比例較高 (圖3.5.19g至h)，其次是北部與南部地區。然而在梅雨季 (5月、6月) 與颱風季 (7月至9月) 的雨季期間，CDD的未來推估變化不大，相關結果與3.3節的平均降雨推估趨勢一致，呈現乾越乾、濕越濕的情況。整體而言，未來暖化情境下，CDD增加，集中在原本降雨就相對偏少的乾季。其中春季CDD增加比例較高，降雨偏少的範圍與期間更加擴張與延長。

從3.2節分析結果，雖然梅雨季與颱風季降雨增加，然而在每一年的雨季來臨前，臺灣面臨少雨、甚至連續不降雨的時間將更為延長。為了解乾旱的嚴重程度 (持續時間)，圖3.5.20、圖3.5.21進一步呈現所有網格點的CDD發生機率分布。

圖3.5.20呈現基期 (1995年至2014年) 正常的春季，最常發生的CDD大約在14 day year^{-1}至21 day year^{-1} (2週至3週) (黃色直條)，隨著排放嚴重度增加，CDD的機率密度分

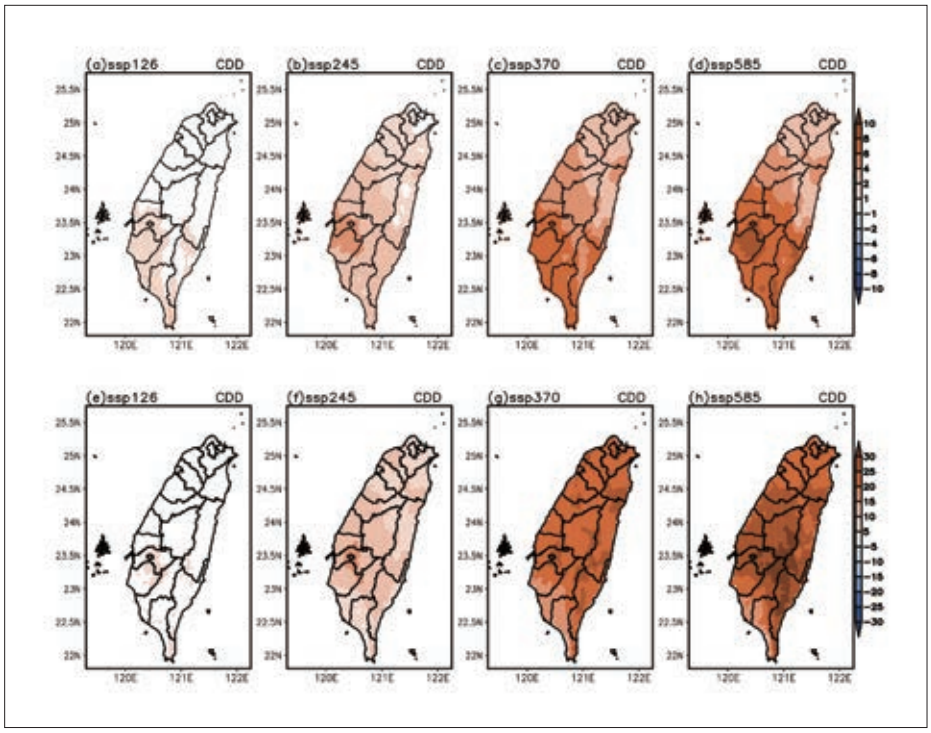


圖3.5.18 暖化情境下推估世紀末之 (a至d) 春季CDD的變化 (單位：day year^{-1})；(e至h) 變化率 (單位：%)。變化與變化率的估算是以1995年至2014年基期的CDD為參考基準。(摘自陳昭安等人，2023)

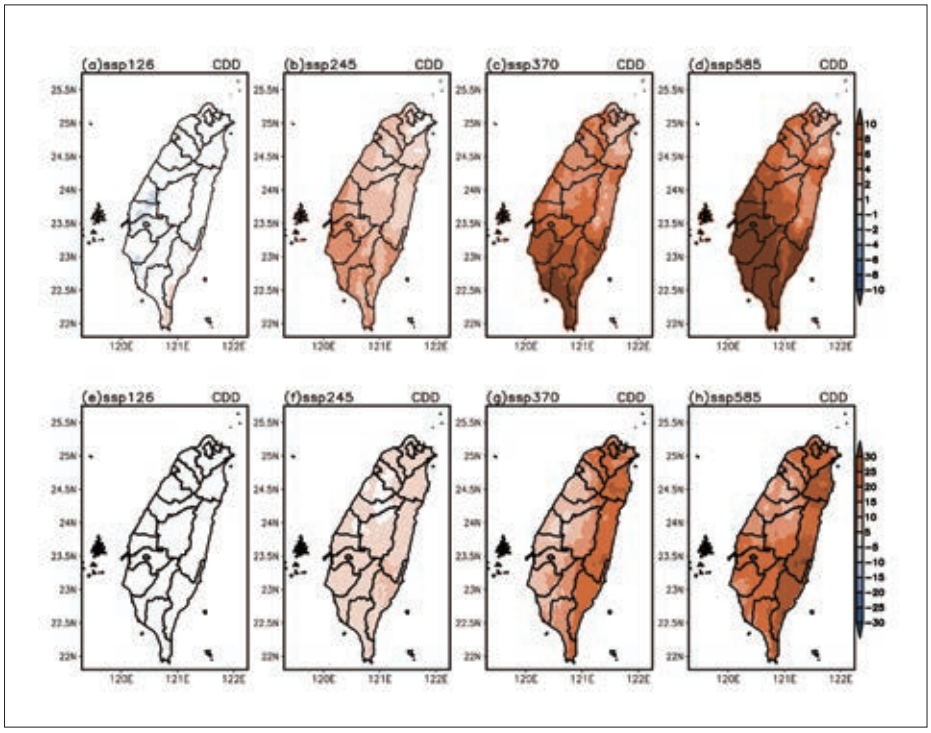


圖3.5.19 同圖3.5.18，但為秋季至春季 (10月至4月) 的結果。(摘自陳昭安等人，2023)

布在世紀中與世紀末變化的趨勢越趨一致，即較短天期CDD (1週至2週) 發生頻率減少 (綠色與紅色空心長條)；而長天期的CDD發生次數增加。高於30天以上較罕見的CDD事件，增加的次數加倍 (圖3.5.20c至d右上縮圖) 。

分析歷史基期的乾季 (秋季至隔年春季)，最常發生的CDD每年大約14天至42天 (2週至6週) (圖3.5.21)。未來暖化情境推估顯示，原本常見的CDD發生頻率減少，但持續6週以上的事件發生頻率增加。天數大於120天的CDD，發生頻率倍數增加，代表部分區域CDD將跨越了秋季直到春季，形成更長的乾季。

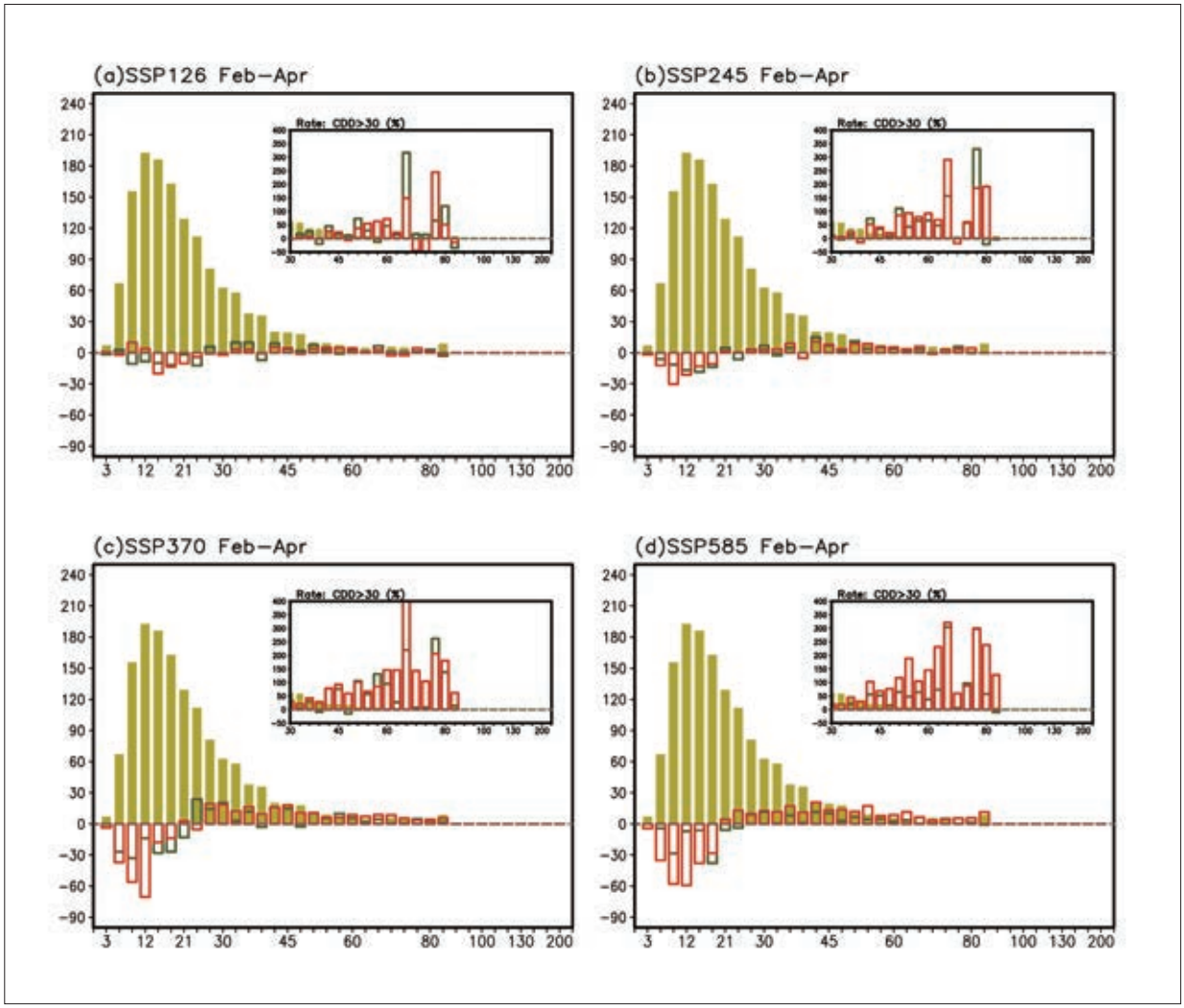


圖3.5.20　春季全臺CDD機率密度分布，橫軸代表CDD指標 (單位：天)，縱軸代表發生頻率次數 (單位：次/月/年)。黃色直條代表基期的氣候平均分布，暖化中期的變化以綠色空心直條表示，世紀末的變化以紅色空心直條表示。30日以上連續不降雨日的頻率變化率 (單位：%) 呈現在右上角縮圖。(摘自陳昭安等人，2023)

依不同GWLs (圖3.5.22) 分類後計算CDD，也呈現暖化程度越嚴重，CDD越長的情況。從增溫1.5°C至4°C的程度，全臺平均CDD分別增加4.1%、4.8%、8.5%與10.3%，同時模式具有一致性的範圍逐漸擴大，部分南部地區及山區在增溫4°C時已具有模式一致性。

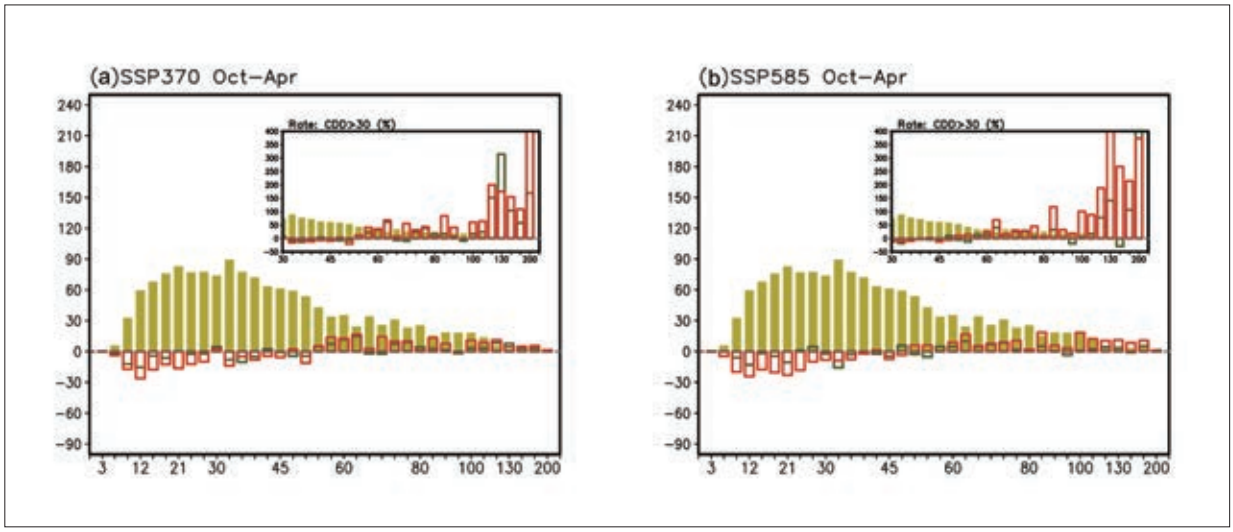


圖3.5.21　同圖3.5.20，但為乾季在 (a) SSP3-7.0與 (b) SSP5-8.5排放情境之結果。(摘自陳昭安等人，2023)

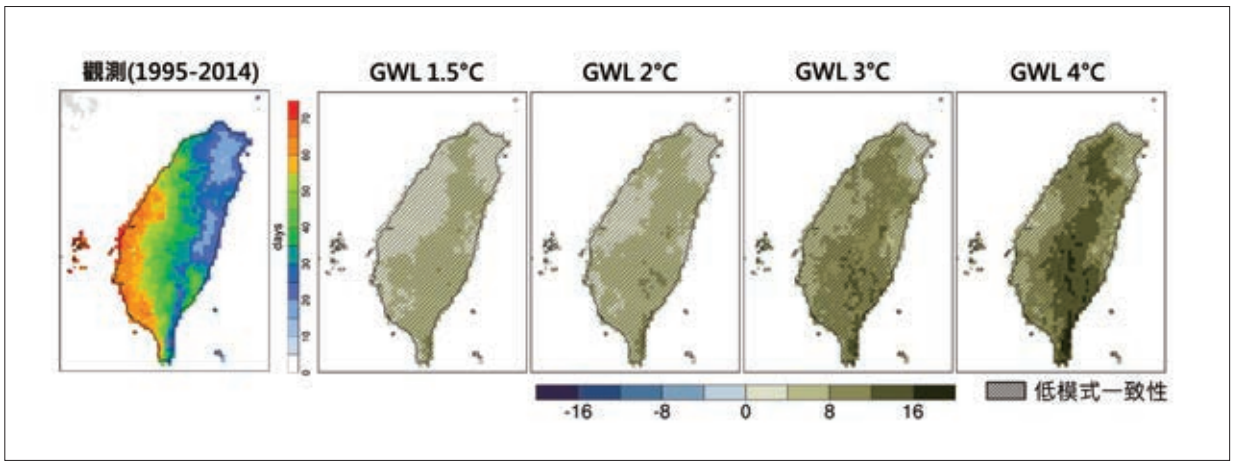


圖3.5.22　歷史與GWLs下，CDD變化率 (單位：%)。斜線區域為模式低一致性。(資料來源：本報告產製)

標準化降雨指標

3個月SPI (SPI3, McKee et al., 1993)，為一般常用來評估氣象乾旱的指標。陳昭安等人 (2023) 使用CMIP6統計降尺度資料計算SPI3，統計分析4種排放情境系集平均的指標數值分布結果 (圖3.5.23)。除了SSP1-2.6以外，各種排放情境隨著暖化程度越嚴重，SPI3負值越來越多。在較嚴重的SSP3-7.0與SSP5-8.5情境則特別明顯，這樣的趨勢至世紀末更加顯著 (圖3.5.23c至d)，而春季偏濕的情況似乎越來越少。乾季 (秋季到春季) 的SPI3分布也呈現類似春季世紀末的訊號。

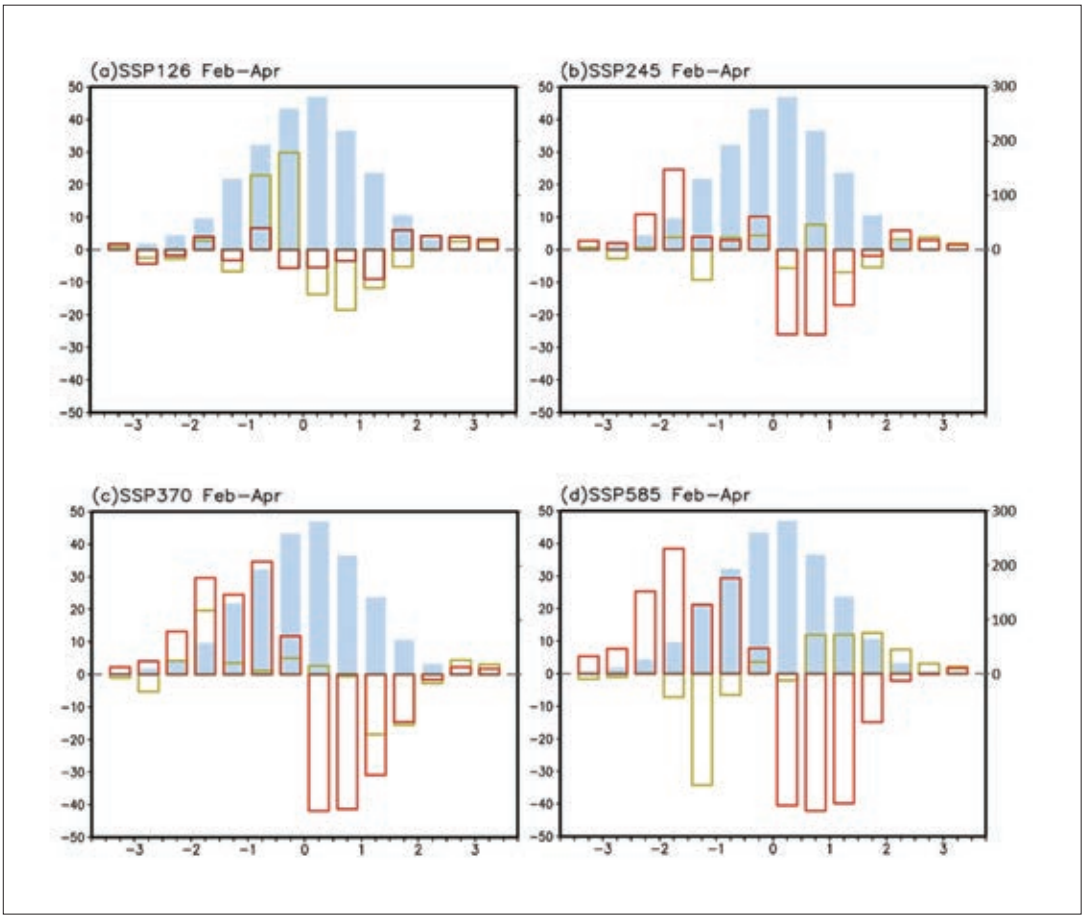


圖3.5.23　SPI3於春季 (a) SSP1-2.6、(b) SSP2-4.5、(c) SSP3-7.0及 (d) SSP5-8.5情境下，發生頻率分別於世紀中 (黃色空心直條) 與世紀末 (紅色空心直條) 的變化。橫軸代表指標數值分布，縱軸代表每年發生次數，淺藍色直條為基期的機率密度分布。(摘自陳昭安等人，2023)

李昱琪等人 (2019) 使用CMIP5統計降尺度及動力降尺度RCP8.5的推估資料計算SPI，並計算4種乾旱特性於世紀末的變化情形。4種乾旱特性分別是乾旱發生頻率 (Drought Frequency, DF)、乾旱延時 (Drought Duration, DD)、乾旱嚴重度 (Drought

Severity, DS) 以及乾旱強度 (Drought Intensity, DI)[1]。簡而言之，在RCP8.5情境下，動力降尺度的推估顯示，臺灣乾旱特性的變化趨勢有區域上的差異，短時間尺度之乾旱 (SPI3) 發生頻率及乾旱強度都會增加，長時間尺度 (SPI12) 則不一定。北部及東部不管長短時間尺度的乾旱頻率、嚴重度及強度都增加；乾旱延時則受全球熱帶海溫分布影響 (國家災害防救科技中心，2023)。統計降尺度的推估顯示，臺灣整體而言，短時間尺度的乾旱事件 (SPI3) 發生時的強度會增強，但其他乾旱特性易受海溫分布影響；長時間尺度的乾旱事件 (SPI12) 在世紀中期及末期呈現較為一致的變化，其乾旱發生頻率傾向於減少，且乾旱發生時的持續時間會縮短。

從過去相關文獻也發現，使用高解析度大氣模式與CMIP5海氣耦合模式推估，一致顯示自南海至臺灣東北外海有東北至西南向的帶狀降雨減少區域，這個少雨分布，主要與低層的東北風變異有關 (Chen et al., 2019; Dai et al., 2022)，造成春季提供水氣的西南風減弱。類似的環流變化，與過去臺灣重大乾旱事件的春季環流合成分析相當一致。Chen et al. (2022) 利用高解析度大氣模式的大量系集模擬資料分析，呈現春季有更頻繁的長天期連續不降雨日數、季節降雨減少與相似的環流變化。綜合過去文獻與本節的分析結果，顯示未來暖化氣候條件下，臺灣春雨將減少且連續不降雨日數增加，以及有乾季延長、濕季縮短的趨勢。

臺灣持續6個月以上的嚴重乾旱事件，與濕季 (5月至10月) 梅雨與颱風降雨貢獻高度相關。高解析度大氣模式 (Chen et al., 2019) 與CMIP5海氣耦合模式的推估 (Dai et al., 2022) 呈現相反的趨勢，特別是颱風季。高解析度大氣模式HiRAM與MRI_AGCM推估顯示，未來東亞颱風季季節平均降雨減少，同時颱風活動減少 (Tsou et al., 2016; Endo et al., 2022，3.5.1節)。這些颱風活動的變化深受暖化情境下，大尺度環流與副熱帶高壓變化的影響。從過去觀測紀錄的乾旱事件環流合成分析，呈現在菲律賓東部海面有反氣旋式環流變異，與副熱帶高壓西伸的環流變化 (圖2.5.6)，在高解析度大氣模式的暖化情境的模擬，颱風季也呈現類似的環流結構。相反的，在CMIP5海氣耦合模式的推估 (Dai et al., 2022) 與CMIP6統計降尺度臺灣降雨資料皆顯示，未來濕季 (含颱風季) 降雨增加。綜

1 由SPI定義乾旱事件的方式為：當SPI為連續負值且有至少一次小於-1 (含) 以上即定義為一次乾旱事件。定義出乾旱事件後。乾旱特性DF為總年分中所有乾旱事件的次數，DD表示每次乾旱事件持續的時間，DS為加總某次乾旱事件的SPI絕對值，乾旱強度DI則為乾旱嚴重度 (DS) 除以乾旱延時 (DD)。
總年分N年間所有乾旱事件的加總或平均則為乾旱總延時 (total Drought Duration, tDD)、乾旱總嚴重度 (total Drought Severity, tDS) ，以及乾旱平均強度 (mean Drought Intensity, mDI)。

觀而言，由於目前模式發展的技術限制，此類嚴重乾旱事件牽涉到颱風季的降雨推估趨勢，仍有相當的不確定性。

3.5.4　颱風風雨未來推估

影響臺灣的颱風都是在西北太平洋生成的，第一章提到高解析度全球模式的推估顯示暖化情境下，颱風活動範圍往北擴張 (Yamada et al., 2017; Yoshida et al., 2017; Roberts et al., 2020)，強度最大時的發生位置也向北偏移，強烈颱風頻率可能增加；21世紀末西北太平洋颱風生成數量減少、生命期縮短，但伴隨的最大風速與降雨都是增強的 (Tsou et al., 2016; Yamada et al., 2017; Lok & Chan, 2018; Knutson et al., 2020; Endo et al., 2022; Hsu et al., 2021)。Chih et al. (2023) 將TCCIP HiRAM全球模式推估的西北太平洋颱風進一步作動力降尺度，得到較佳的模擬結果，發現在RCP8.5情境下，強烈颱風的強度在21世紀末增強了約6.5%，且颱風強度最強時的位置也較基期偏西，對陸地的威脅變強。

至於影響臺灣颱風的推估，Tsou et al. (2016) 分析RCP8.5情境下21世紀末颱風變化，發現未來影響臺灣的颱風事件發生頻率減少但強度變強，與其相關的颱風中心半徑200 km內的平均降雨也增強。透過熱帶氣旋生成潛勢指數 (Genesis Potential Index, GPI) 分析，指出未來大尺度環境不利於颱風生成 (中層水氣減少和低層相對渦度減弱)，然而一旦生成颱風，其強度將增強 (海表面溫度上升和垂直風切減弱)。

鄭兆尊等人 (2024) 沿用在2.5節提到的影響臺灣颱風的客觀定義 (李清勝與盧孟明，2012)，分析RCP8.5情境下，動力降尺度資料中所有的影響臺灣颱風，結果顯示颱風經過臺灣附近時，21世紀中、末的海表面氣溫相對於基期分別增加1.5°C、3°C；水氣量增加約15%、25%；颱風個數減少約10%、50%；強颱出現的頻率增加約105%、60%；影響期間颱風最強時的近颱風中心最大風速增加約5%、9%；颱風最強時距颱風中心半徑200 km內的區域平均降雨增加約20%、35% (圖3.5.24)。前述的數字僅是圖3.5.24中的系集平均，盒鬚圖內的範圍都是可能發生的，其中以強颱頻率分析不確定性最大，模式使用了未來不同的海溫暖化空間分布，是導致颱風頻率變化差異的主要來源 (國家科學及技術委員會，2016)。此結果顯示推估情境下雖然影響臺灣颱風個數減少，但是颱

風強度、降雨量都有所增加，與西北太平洋颱風的變遷趨勢相同。上述未來推估是單一模式的系集模擬結果，信心程度的描述可以參考第一章提到AR6報告所提：最大雨量增加具高信心程度；強烈颱風比例的增加有高信心程度；生成頻率減少或沒有變化則具中等信心程度。未來颱風數目的減少，也反映在每年影響臺灣颱風的數目，由最常見的每年4個至5個，21世紀中變為3個至4個、21世紀末變為1個至2個 (圖3.5.25)，21世紀末發生每年零颱風的機率大增。

臺灣陸地上颱風強降雨與強風的發生，和颱風路徑息息相關，但是颱風路徑推估的不確定性太大，未來颱風路徑在臺灣偏北、偏南比例的變化並無太大意義。為避免颱風路徑差異此一不確定性大的因素，鄭兆尊等人 (2024) 分析臺灣陸地上的風、雨強度變化時，考慮了颱風中心跟降雨的空間分布關係進行合成分析，以動力降尺度資料計算當颱風中心在特定經緯度附近時，臺灣陸地上颱風的平均風、雨強度以及未來的變化率。在RCP8.5情境下，21世紀中、末的臺灣颱風的風、雨強度多呈現增加趨勢，陸地上平均時雨量強度在世紀中增加約20%、世紀末增約40%，西部平原地區增加較為顯著 (圖3.5.26a至c)。地面平均風速變化比降雨強度的趨勢小，在世紀中及世紀末分別增加約8%及10% (圖3.5.26d至f)。

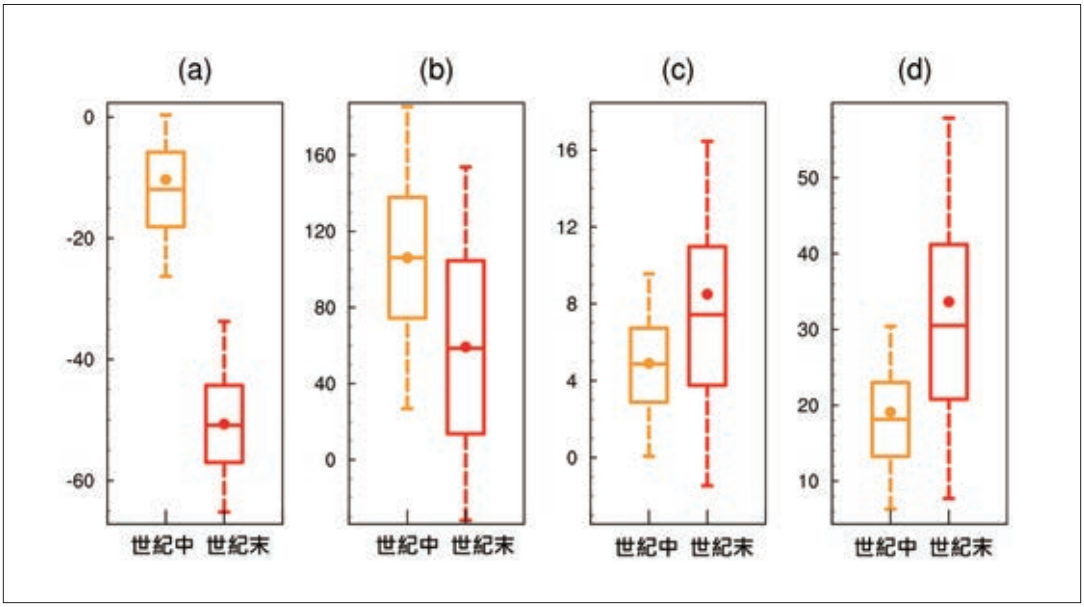


圖3.5.24 RCP8.5情境下，21世紀中 (黃色)、世紀末 (紅色) 的 (a) 影響臺灣颱風頻率、(b) 強颱頻率、(c) 颱風最強時近中心最大風速、 (d) 颱風最強時距中心200 km內平均雨量等4項颱風指標未來改變率的盒鬚圖。圓點表示系集平均，盒鬚圖表示第95、75、50、25、5百分位 (單位：%)。(資料來源：鄭兆尊等人，2024)

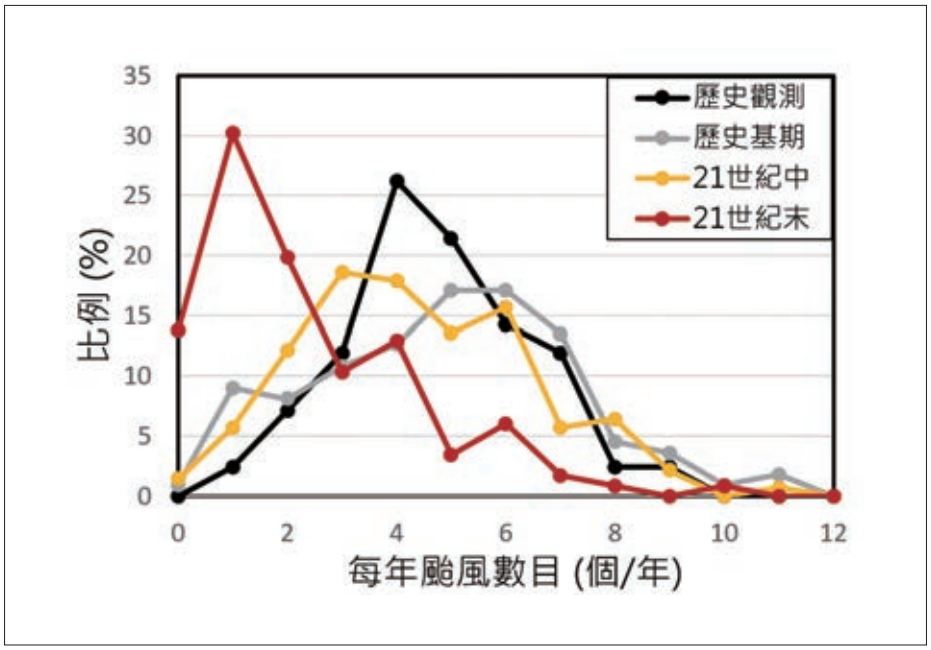


圖3.5.25　RCP8.5情境下，不同時期每年侵臺颱風數目的比例 (出現的年數除以全部年數)。其中黑色為歷史觀測 (1979年至2020年)、灰色為模式歷史基期 (1979年至2015年)、黃色為模式推估21世紀中 (2031年至2065年)、紅色為模式推估21世紀末 (2071年至2099年)。(資料來源：鄭兆尊等人，2024)

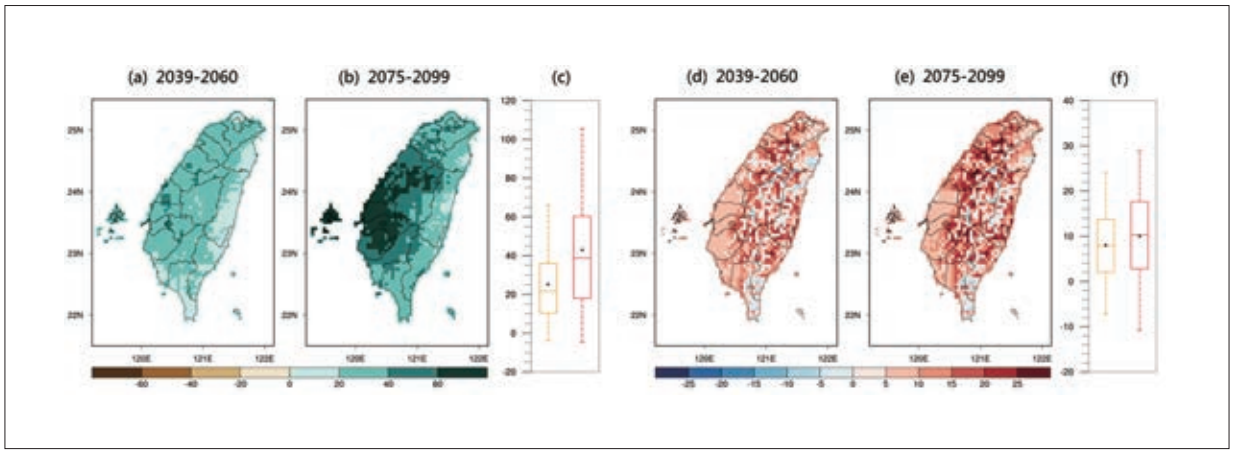


圖3.5.26　**RCP8.5情境下，21世紀中、末，影響臺灣颱風的平均風雨變化趨勢 (單位：%)**。(a) 至 (c) 為降雨強度的改變、(d) 至 (f) 為風速的改變。盒鬚圖 (c) 與 (f) 中，黃、紅色分別代表21世紀中、末；圓點表示系集平均，盒鬚圖呈現的是改變率的第95、75、50、25、5百分位。(資料來源：鄭兆尊等人，2024)

颱風累積雨量的空間分布會受到颱風路徑的影響。鄭兆尊等人 (2024) 以前述的颱風時雨量變化趨勢，搭配歷史颱風路徑，來討論局部地區的累積雨量變化。發現在假設未來颱風路徑與歷史觀測相同，但是颱風頻率減少 (世紀中減少10%、世紀末減少50%)，導致

影響時間也相同地減少狀況下，平均颱風降雨累積量在世紀中有增加 (0%至20%)，但是在世紀末，則臺灣西、南部可能減少10%至30%、東、北部減少30%至50% (圖3.5.27)。

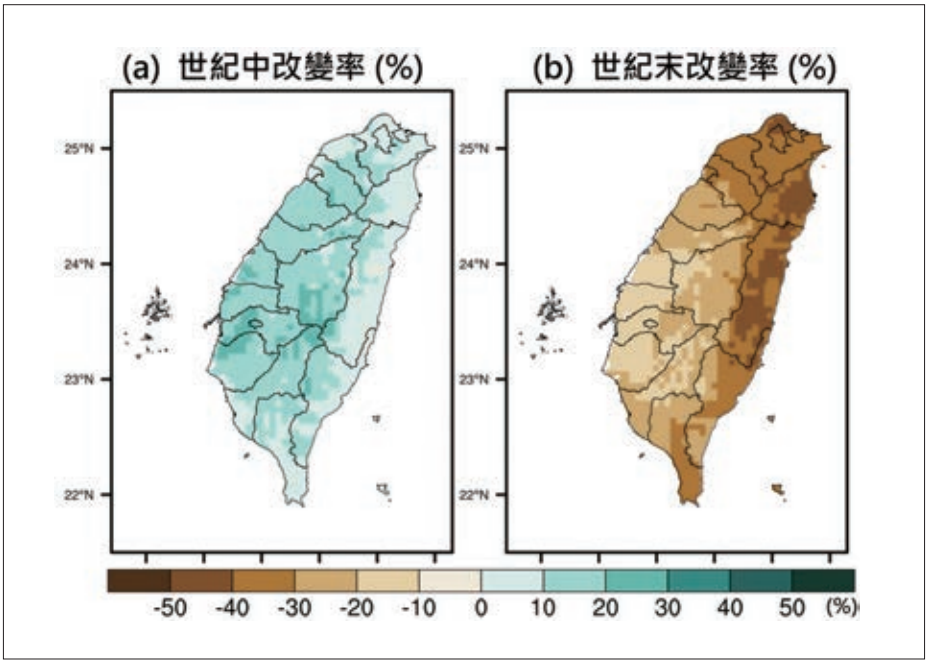


圖3.5.27 RCP8.5情境下，考慮颱風頻率變化下，(a) 21世紀中與 (b) 21世紀末影響臺灣颱風的平均年累積降雨變化率 (單位：%)。(資料來源：鄭兆尊等人，2024)

3.6 臺灣空氣品質之未來變化

3.6.1 臺灣空氣品質未來趨勢

臺灣地處副熱帶地區，位於歐亞大陸及太平洋交界，加上地形起伏大且地貌變化複雜，要評估暖化對臺灣空氣品質的影響，不適合使用粗解析度的全球模式 (可參考第一章1.6節)，故需使用區域模式進行高解析度模擬。由於此類研究的長期模擬需耗費大量電腦資源，故不易進行 (Fox-Kemper et al., 2021)。Tsai et al. (2024) 使用美國國家大氣研究中心發展的WRF與美國環保署發展的第三代空氣品質模式 (Community Multiscale Air Quality Model, CMAQ)，採用擬暖化的方式 (Tsai et al., 2023)，在排放量固定 (基準年為2010年) 的情境下，進行臺灣2011年至2015年的空氣品質模擬實

驗。模擬結果顯示GWL 2°C及GWL 4°C情境下，若排放量維持不變，未來臺灣整體空氣品質有變差的趨勢 (圖3.6.1)；以季節區分，秋冬兩季空氣品質變差的情況比春夏兩季嚴重。

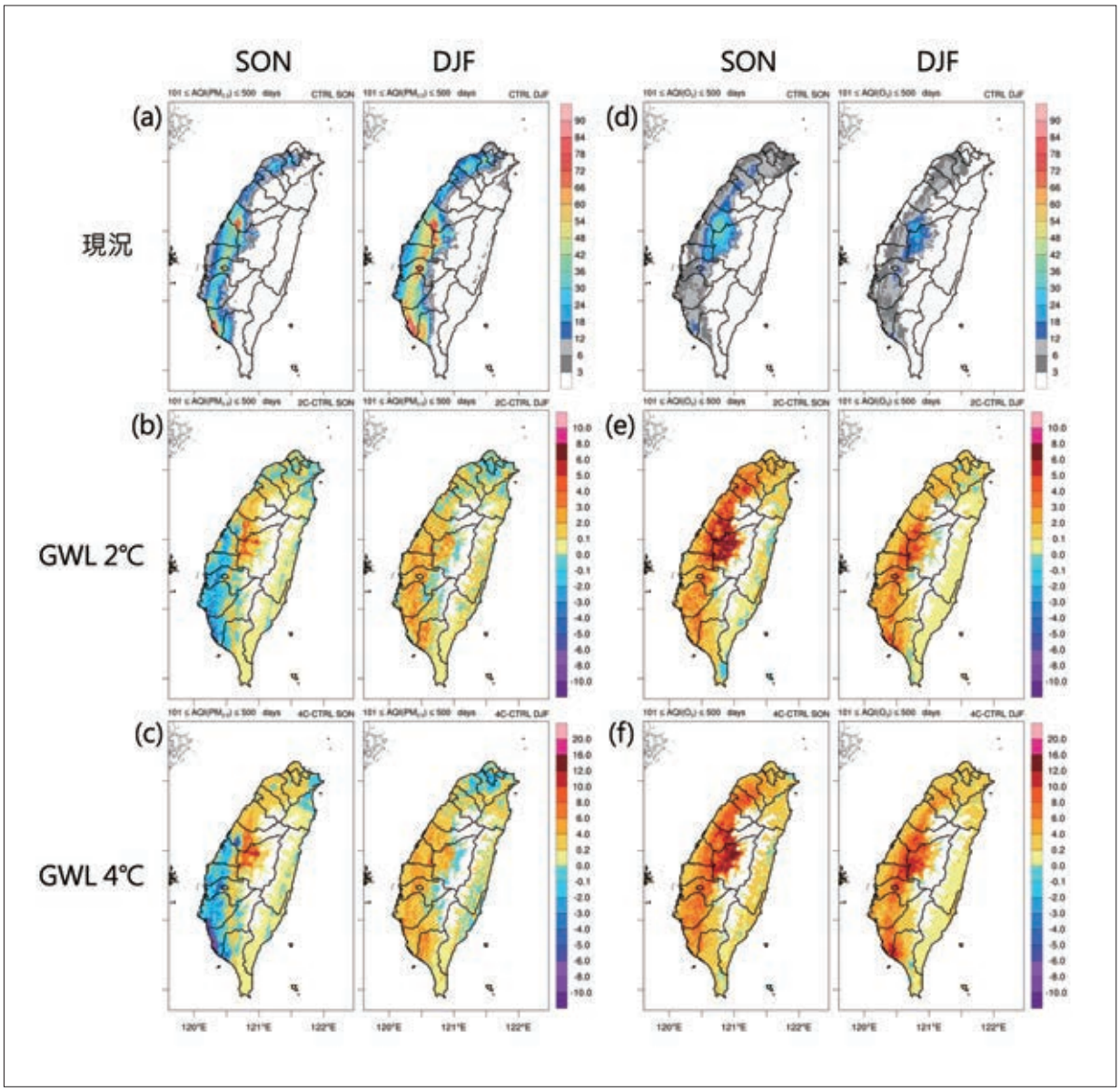


圖3.6.1　(a) 至 (c) $PM_{2.5}$及 (d) 至 (f) 臭氧，每季空氣品質不良 (AQI>100) 天數 (高度1,500 m以上地區未計算)。(a) 與 (d) 為2011年至2015年平均，(b) 至 (c) 及 (e) 至 (f) 為未來GWL 2°C和GWL 4°C情境下，AQI>100天數變化量 (空氣品質指標 Air Quality Index, AQI)。(資料來源：Tsai et al., 2024)

造成臺灣空氣品質不良的主要污染物是細懸浮微粒 ($PM_{2.5}$) 和臭氧 (O_3)，從圖3.6.1 (a) 至 (c) 可看出在全球暖化的情況下，秋季$PM_{2.5}$空氣品質不良日數呈現西南部減少、中北部增加的情況；冬季除了北部少數地區，其他地區的空氣品質不良日數增加1天至6天。O_3對暖化的反應比$PM_{2.5}$更加顯著，如圖3.6.1 (d) 至 (f) 所示，在GWL 4°C情境下，秋冬季O_3空氣品質不良日數可增加10天以上。

進一步採用停滯指數 (air stagnation index，Horton et al., 2014) 以及通風指數 (ventilation index，Kiefer et al., 2019) 分析氣象因子與空氣品質變化的相關性，顯示造成空氣品質變差的主因是暖化情境下低層風速變弱，不利於污染物傳送與擴散；另一方面，也有其他因素抵銷低層風速變弱的效果。例如秋季西南部雖然低層風速降低，但因暖化造成降雨增加，由於濕沉降可移除大氣中污染物，造成西南部空氣品質變好的趨勢 (圖3.6.2)。冬季的情況與秋季不同，反而北部的東北季風日數增加，風速增加有利污染物擴散，造成冬季北部空氣品質稍微改善的趨勢。與$PM_{2.5}$空氣品質不良日數相比，O_3空氣品質不良日數在秋冬季均增加，這是因為西南部的降雨對移除氣體的效果並不明顯，無法抵銷低層風速變弱的影響，此外，暖化情境下，提高大氣溫度，加速臭氧光化反應，導致臭氧濃度增加，使空氣品質降低。以上結果顯示未來因O_3造成空氣品質不良的狀況可能會更頻繁發生，後續的影響值得進一步研究。

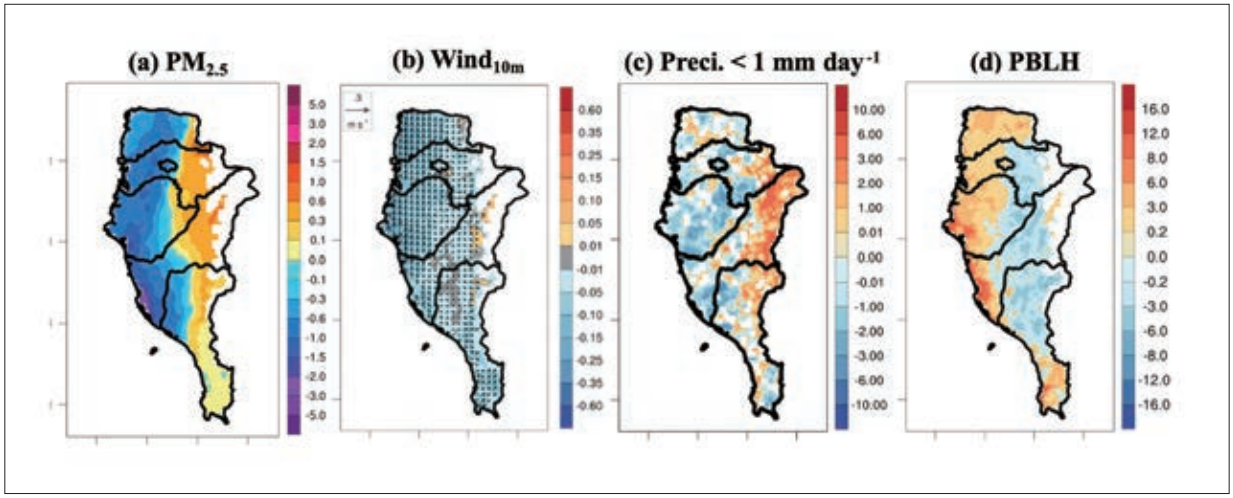


圖3.6.2　GWL 2°C情境下，臺灣南部地區秋季平均 (a) $PM_{2.5}$濃度變化 (單位：μg m^{-3})、(b) 10 m風速 (單位：m s^{-1}) 風向變化，(c)日降雨量<1 mm日數變化以及 (d) 邊界層高度變化 (單位：m)。(資料來源：Tsai et al., 2024)

參考文獻

王俊寓、童裕翔、陳永明 (2023)。**AR6臺灣氣候變遷圖資產製成果**。國家災害防救科技中心，NCDR 111-A28。

李昱祺、王嘉琪、翁叔平、陳正達、鄭兆尊 (2019)。氣象乾旱特性未來趨勢推估。**大氣科學，47**(1)。

李庭慧、許晃雄 (2017)。臺灣熱浪特性分析與變遷推估。**大氣科學，45** (4)，281-303。

李清縢、盧孟明 (2012)。從氣候觀點探討影響臺灣颱風的定義問題。**氣象學報，48** (4)，25-38。

周佳、李明安、許晃雄、洪志誠、盧孟明、陳正達等 (2017)。**氣候變遷科學報告2017-物理現象與機制**。國家災害防救科技中心。

翁叔平、楊承道 (2013)。應用標準化降水蒸發散指數分析百年來乾濕變化的低頻特徵與遙地相關。**大氣科學，41** (2)，139-170。

翁叔平、楊承道 (2018)。臺灣地區日降雨網格化資料庫 (1960-2015) 之建置與驗證。**臺灣水利，66** (4)，33-52。

國家科學及技術委員會 (2016)。**臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫期末報告**。國家科學及技術委員會。

國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(2023)。**臺灣氣候變遷關鍵指標圖集： AR6統計降尺度版**。國家災害防救科技中心。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_05_03.aspx

中央氣象署 (2023)。**氣候百問二、臺灣的溫度和雨量特徵第16項"臺灣季節雨量分布比率為何？"**。https://www.cwa.gov.tw/V8/C/K/Encyclopedia/climate/climate2_list.html#climate2-09

張智鈞、洪志誠、董德輝 (2020)。臺灣冬季寒潮歷史變遷與未來推估。**大氣科學，48**，205-232。

陳昭安、李明營、劉子明、許晃雄、羅資婷、陳永明、童裕翔、吳芊瑩、洪浩哲、鄭兆尊與林思穎 (2023)。**2020-2021極端乾旱事件與未來推估**。國家災害防救科技中心。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_publish.aspx

鄭兆尊、簡毓瑭、林思穎、王俊寓 (2024)。**不同氣候變遷時期下之臺灣颱風推估差異分析**。國家災害防救科技中心，NCDR 112-T24

鄭克聲、連琮勛 (2015)。具離群值資料之水文頻率分析。**農業工程學報，61** (3)，29-41。https://www.airitilibrary.com/Common/Click_DOI?DOI=10.29974/JTAE.201509_61(3).0002

駱世豪、陳正達 (2021)。灣熱浪特性受人為影響的量化歸因分析。**大氣科學，49**，1-29。

TCCIP技術報告 (2021)。**統計與動力降尺度方法**。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_publish_data_document_one.aspx?dd_id=20210609212941

TCCIP資料說明 (2023)。**AR6統計降尺度日資料-資料說明文件**。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_publish_data_document_one.aspx?dd_

id=20220708151649

Arakane, S., Hsu, H., Tu, C., Liang, H., Yan, Z., & Lin, S. (2019). Remote effect of a tropical cyclone in the Bay of Bengal on a heavy-rainfall event in subtropical East Asia. *npj Climate and Atmospheric Science, 2*(1). https://doi.org/10.1038/s41612-019-0082-8

Arakane, S., & Hsu, H. (2021). Tropical cyclone footprints in long-term mean state and Multiscale climate variability in the western North Pacific as seen in the JRA-55 reanalysis. *Journal of Climate, 34*(18), 7443-7460. https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0887.1

Cannon,A. J., S. R. Sobie, & T. Q. Murdock, (2015). Bias correction of simulated precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve relative changes in quantiles and extremes? *J. Climate, 28*, 6938–6959. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1

Chih, C. P., Wu, C., Huang, Y., Li, Y., Shen, L., Hsu, H., & Liang, H. (2023). *Intense tropical cyclones in the western North Pacific under global warming: A dynamical Downscaling approach*. https://doi.org/10.22541/essoar.167591076.65860406/v1

Chen, C., Hsu, H., Hong, C., Chiu, P., Tu, C., Lin, S., & Kitoh, A. (2019). Seasonal precipitation change in the western North Pacific and East Asia under global warming in two high-resolution AGCMs. *Climate Dynamics, 53*(9-10), 5583-5605. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04883-1

Chen, C., Hsu, H. H., & Liang, H. (2021). Evaluation and comparison of CMIP6 and CMIP5 model performance in simulating the seasonal extreme precipitation in the western North Pacific and East Asia. *Weather and Climate Extremes, 31*, 100303. https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100303

Chen, C., Hsu, H., Liang, H., Chiu, P., & Tu, C. (2022). Future change in extreme precipitation in east Asian spring and Mei-Yu seasons in two high-resolution AGCMs. *Weather and Climate Extremes, 35,* 100408. https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100408

Chen, C., Wang, Y., Wang, Y., Lin, S., Chen, C., Lu, M., & Guo, Y. L. (2021). Projection of future temperature extremes, related mortality, and adaptation due to climate and population changes in Taiwan. *Science of The Total Environment, 760*, 143373. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143373

Dai, L., Cheng, T. F., & Lu, M. (2022). Dai, L., Cheng, T. F., & Lu, M. (2022). Anthropogenic warming disrupts intraseasonal monsoon stages and brings dry-get-wetter climate in future East Asia. *npj Climate and Atmospheric Science, 5*(1). https://doi.org/10.1038/s41612-022-00235-9

Endo, H., Kitoh, A., & Mizuta, R. (2022). Future changes in extreme precipitation and their association with tropical cyclone activity over the western North Pacific and East Asia in 20 km AGCM simulations. *SOLA, 18*(0), 58-64. https://doi.org/10.2151/sola.2022-010

Fox-Kemper, B., H. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. Drijfhout, T. Edwards, N. Golledge, M. Hemer, R. Kopp, & G. Krinner, (2021). *Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. Climate Change 2021:*

The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited, Cambridge University Press.

Haustein, K., Allen, M. R., Forster, P. M., Otto, F. E., Mitchell, D. M., Matthews, H. D., & Frame, D. J. (2017). A real-time global warming index. *Scientific Reports, 7*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-017-14828-5

Hermans, T. H., Gregory, J. M., Palmer, M. D., Ringer, M. A., Katsman, C. A., & Slangen, A. B. (2021). Projecting global mean sea‐level change using CMIP6 models. *Geophysical Research Letters, 48*(5). https://doi.org/10.1029/2020gl092064

Horton, D. E., Skinner, C. B., Singh, D., & Diffenbaugh, N. S. (2014). Occurrence and persistence of future atmospheric stagnation events. *Nature climate change, 4*(8), 698-703. https://doi.org/10.1038/nclimate2272

Hsu, P., Chen, K., Tsou, C., Hsu, H., Hong, C., Liang, H., Tu, C., & Kitoh, A. (2021). Future changes in the frequency and destructiveness of Landfalling tropical cyclones over East Asia projected by high‐resolution AGCMs. *Earth's Future, 9*(3). https://doi.org/10.1029/2020ef001888

Huang, W., Chang, Y., Hsu, H., Cheng, C., & Tu, C. (2016). Dynamical downscaling simulation and future projection of summer rainfall in Taiwan: Contributions from different types of rain events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121*(23). https://doi.org/10.1002/2016jd025643

HUANG, W., HUANG, P., CHANG, Y., CHENG, C., HSU, H., TU, C., & KITOH, A. (2019). Dynamical Downscaling simulation and future projection of extreme precipitation activities in Taiwan during the Mei-Yu seasons. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 97*(2), 481-499. https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-028

Huang, W., Liu, P., Lee, S., & Wu, C. (2022). Changes in early summer precipitation characteristics over South China and Taiwan: CESM2‐LE and CMIP6 multi‐model simulations and projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127*(17). https://doi.org/10.1029/2022jd037181

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 1–30). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan,

R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, (pp. 3-24). https://doi.org/10.1017/9781009157940.001

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 3—32). https://doi.org/10.1017/9781009157896.001

IPCC, 2021: Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 33—144). https://doi.org/10.1017/9781009157896.002.

Kiefer, M. T., Charney, J. J., Zhong, S., Heilman, W. E., Bian, X., Hom, J. L., & Patterson, M. (2019). Evaluation of the ventilation index in complex terrain: a dispersion modeling study. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58*(3), 551-568. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0201.1

Kim, Y., Min, S., Zhang, X., Zwiers, F., Alexander, L. V., Donat, M. G., & Tung, Y. (2016). Attribution of extreme temperature changes during 1951–2010. *Climate Dynamics, 46*(5-6), 1769-1782. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2674-2

Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2020). Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bulletin of the American Meteorological Society, 101*(3), E303-E322. https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0194.1

Lok, C. C., & Chan, J. C. (2018). Changes of tropical cyclone landfalls in South China throughout the twenty-first century. *Climate Dynamics, 51*(7-8), 2467-2483. https://doi.org/10.1007/s00382-017-4023-0

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17*(22), 179-183.

Roberts, M. J., Camp, J., Seddon, J., Vidale, P. L., Hodges, K., Vannière, B., Mecking, J., Haarsma, R., Bellucci, A., Scoccimarro, E., Caron, L., Chauvin, F., Terray, L., Valcke, S., Moine, M., Putrasahan, D., Roberts, C. D., Senan, R., Zarzycki, C., … Wu, L. (2020). Projected future changes in tropical

cyclones using the CMIP6 HighResMIP Multimodel ensemble. *Geophysical Research Letters, 47*(14). https://doi.org/10.1029/2020gl088662

Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, & B. Zhou, (2021). *Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate*. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 1513–1766). https://doi.org/10.1017/9781009157896.013

Sung, H. M., Kim, J., Lee, J., Shim, S., Boo, K., Ha, J., & Kim, Y. (2021). Future changes in the global and regional sea level rise and sea surface temperature based on CMIP6 models. *Atmosphere, 12*(1), 90. https://doi.org/10.3390/atmos12010090

Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O’ Neill, B., Sanderson, B., van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K. B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Meehl, G., … Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6, *Earth Syst. Dynam., 12,* 253–293, https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021

Tsai, I. C., Hsieh, P. R., Cheng, C. T., Tung, Y. S., Lin, L. Y., & Hsu, H. H. (2023). Impacts of 2 and 4° C global warmings on extreme temperatures in Taiwan. *International Journal of Climatology, 43*(2), 702-719. https://doi.org/10.1002/joc.7815

Tsai, I. C., Hsieh, P. R., Hsu, H. H., Tung, Y. S., Chen, Y. M., & Cheng, C. T. (2024). Climate change-induced impacts on $PM_{2.5}$ in taiwan under 2 and 4° C global warming. *Atmospheric Pollution Research, 15*(6) 102106. https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102106

Tseng, Y., Lin, H., Chen, H., Thompson, K., Bentsen, M., Böning, C. W., Bozec, A., Cassou, C., Chassignet, E., Chow, C. H., Danabasoglu, G., Danilov, S., Farneti, R., Fogli, P. G., Fujii, Y., Griffies, S. M., Ilicak, M., Jung, T., Masina, S., … Yeager, S. G. (2016). North and equatorial Pacific Ocean circulation in the CORE-II hindcast simulations. *Ocean Modelling, 104*, 143-170. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.06.003

Tsou, C., Huang, P., Tu, C., Chen, C., Tzeng, T., & Cheng, C. (2016). Present simulation and future typhoon activity projection over western North Pacific and Taiwan/East Coast of China in 20-km Hiram climate model. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 27*(5), 687-703. https://doi.org/10.3319/tao.2016.06.13.04

Tung, Y., Wang, S., Chu, J., Wu, C., Chen, Y., Cheng, C., & Lin, L. (2020). Projected increase of the east Asian summer monsoon (Meiyu) in Taiwan by climate models with variable performance.

Meteorological Applications, 27(1). https://doi.org/10.1002/met.1886

Tung, Y., Wang, C., Weng, S., & Yang, C. (2022). Extreme index trends of daily gridded rainfall dataset (1960–2017) in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 33*(1). https://doi.org/10.1007/s44195-022-00009-z

Wang, S. S., Lin, Y., & Wu, C. (2016). Interdecadal change of the active - phase summer monsoon in East Asia (Meiyu) since 1979. *Atmospheric Science Letters, 17*(2), 128-134. https://doi.org/10.1002/asl.603

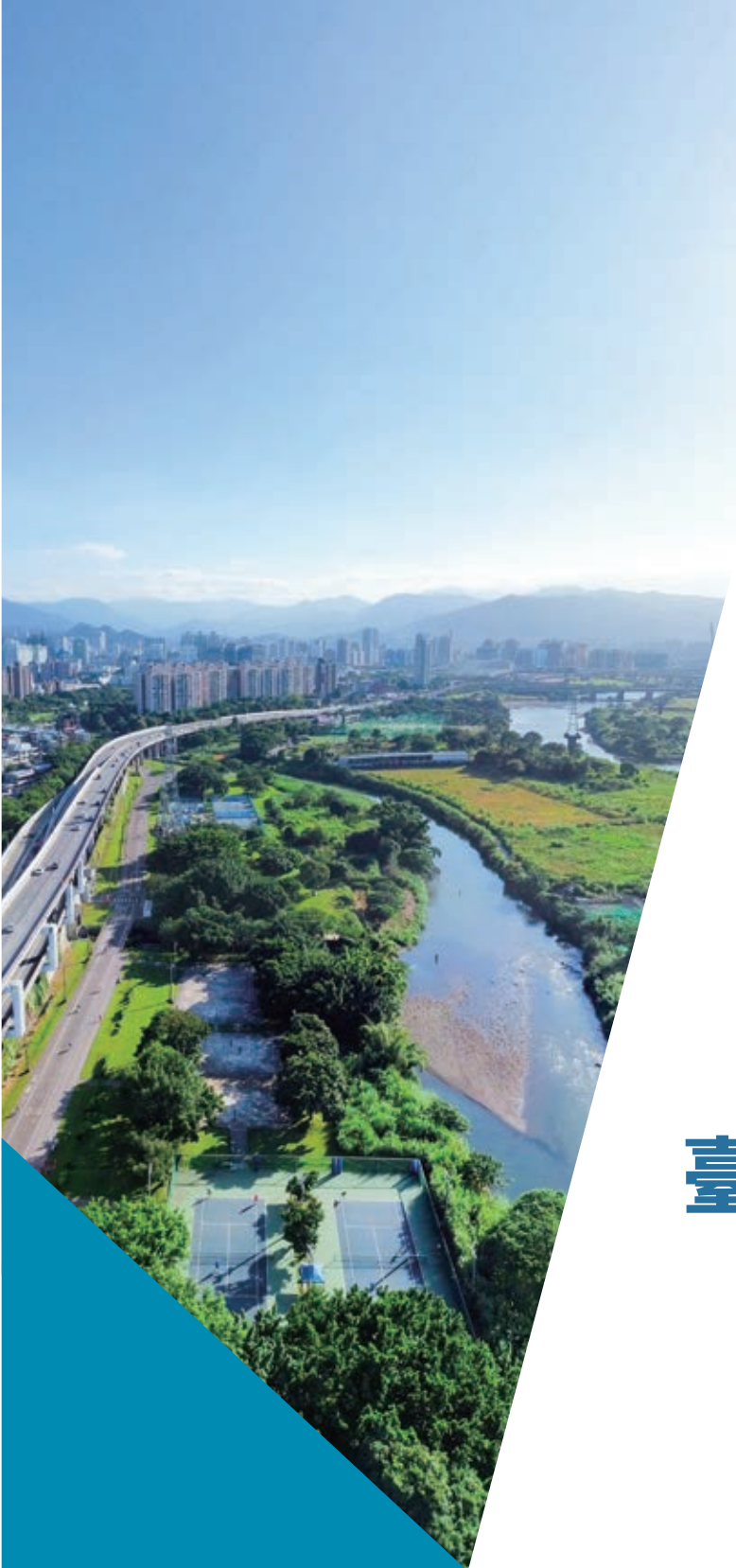
Yamanaka, G., Nakano, H., Sakamoto, K., Toyoda, T., Urakawa, L. S., Nishikawa, S., Wakamatsu, T., Tsujino, H., & Ishikawa, Y. (2021). Projected climate change in the western North Pacific at the end of the 21st century from ensemble simulations with a high-resolution regional ocean model. *Journal of Oceanography, 77*(3), 539-560. https://doi.org/10.1007/s10872-021-00593-7

Yamada, Y., Satoh, M., Sugi, M., Kodama, C., Noda, A. T., Nakano, M., & Nasuno, T. (2017). Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global Nonhydrostatic model. *Journal of Climate, 30*(23), 9703-9724. https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0068.1

Yan, Z., Xia, J., Qian, C., & Zhou, W. (2011). Changes in seasonal cycle and extremes in China during the period 1960–2008. *Advances in Atmospheric Sciences, 28*(2), 269-283. https://doi.org/10.1007/s00376-010-0006-3

You, Q., Jiang, Z., Yue, X., Guo, W., Liu, Y., Cao, J., Li, W., Wu, F., Cai, Z., Zhu, H., Li, T., Liu, Z., He, J., Chen, D., Pepin, N., & Zhai, P. (2022). Recent frontiers of climate changes in East Asia at global warming of 1.5°C and 2°C. *npj Climate and Atmospheric Science, 5*(1). https://doi.org/10.1038/s41612-022-00303-0

Yoshida, K., Sugi, M., Mizuta, R., Murakami, H., & Ishii, M. (2017). Future changes in tropical cyclone activity in high - resolution large - ensemble simulations. *Geophysical Research Letters, 44*(19), 9910-9917. https://doi.org/10.1002/2017gl075058



第四章
臺灣氣候變遷衝擊

4.1 水議題

李明旭[1]、游保杉[2]、石棟鑫[3]、楊道昌[2]、曾宏偉[2]、劉子明[4]、蕭逸華[4]、林祺恒[4]

[1]中央大學水文與海洋科學研究所、[2]成功大學水利及海洋工程學系、[3]陽明交通大學土木工程學系、[4]國家災害防救科技中心

摘要

臺灣全年降雨量達885.02億噸，算是相當豐沛，但扣除蒸發散及入海損失後，可利用水量僅160.55億噸，占降雨總量之18%；又由於地域性及季節性分配不均，80%降雨集中在豐水期，主要降水為颱風，其次為梅雨，而南部的豐枯差異又較北部嚴重，枯水期僅占年雨量 10%。臺灣的水資源運用仍以地面水為主，因為降雨時空差異需要蓄水設施調配水量，但水利設施調蓄能力有限，泥沙淤積又降低調蓄能力，衍生地下水資源管理的挑戰。尤其是在枯旱時期，民生、農業及工業用水等不同用水標的之競合，往往使得用水調配更加艱鉅。

氣候變遷的衝擊使得豐枯水期降雨極端化，極端化的強降雨，可能造成淹水災害變得更嚴重，尤其是地層下陷區與沿海低窪地區，容易發生淹水災情，而氣候暖化造成海平面上升，將導致更嚴重之淹水災害發生。未來氣候變遷情境下，21世紀末彰化、雲林、嘉義和臺南的沿海鄉鎮淹水風險將增加，需要及早規劃防洪調適策略以降低淹水風險。降雨極端化將使枯水期降雨偏少，未來全臺四區之連續不降雨日數皆有延長情況，大部分月分水源潛能量 (Q85) 亦有減少趨勢；此外，季節性降雨變遷將使「梅雨延遲」及「颱風降雨延遲」的可能性增加，受氣候變遷影響之未來極端水文情況將更加頻繁發生。檢視臺灣近年來的乾旱事件，於2014年至2015年、2017年至2018年，以及2020年至2021年總共經歷三場嚴重乾旱事件，而2022年至2023年南部超過600多天降雨偏少，且梅雨降雨亦不如預期，造成農業停灌休耕與衝擊公共供水之穩定性，氣候變遷對未來水資源供給將帶來更多挑戰。

整體而言，氣候變遷對水資源的衝擊是全面性的，影響範圍涵蓋自然生態及人

類社會所有與水有關之民生、農業以及工業用水，聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次氣候變遷評估報告 (6th Assessment Report, AR6) 的第二組工作報告 (Working Group II, WGII) 亦指出氣候變遷衝擊及風險將變得更為複雜，且更難以管理。多種氣候及非氣候風險相互作用，進而導致複合性的整體風險以及跨領域及區域的連動性風險。因應臺灣未來水資源風險增加，應運用更多科學資料進行風險評估與調適規劃研究，擬定具科學循證基礎之跨部會調適策略與行動方案。本節除整理近年臺灣水議題相關衝擊研究外，也彙整最新科研資料應用及策略研究成果，提出未來調適科研之缺口，希冀提供相關主管單位未來規劃推動的參考依據。

4.1.1 淹水

於「氣候變遷科學報告2017—衝擊與調適面向」報告中，整理造成淹水災害主要成因、過去相關災害狀況、以及彙整至2017年之氣候變遷淹水災害衝擊評估研究內容。本節著重彙整2017年至今，國內外淹水衝擊減災調適規劃及相關研究成果，藉此瞭解各單位及學者針對氣候變遷淹水災害衝擊評估之最新科研進展。透過政府委辦計畫與相關學術補助計畫可看出，各單位積極整合學研團隊量能，結合不同領域進行災害綜合管理。研究方向除了因應氣候變遷之軟硬體工程與社會制度相關調整外，國內各界亦整合淹水災害相關各式數據進行評估、擬定相關策略以及評估技術精進等。基本上，極端降雨造成之淹水災害，容易對低窪地區、地層下陷區、沿海地區等造成較嚴重災情，而沿海區域除了上游降雨逕流影響外，更可能因氣候暖化造成海平面上升，導致更嚴重之淹水災害發生。

4.1.1.1 國內淹水災況研究

地層下陷是增加淹水風險的原因之一，容易造成逢雨必淹之情況，例如2017年尼莎颱風及海棠颱風、2019年0812豪雨、2021年盧碧颱風及0806豪雨等事件，皆造成雲嘉南及高屏地區不少淹水災況與損失。上述地區為臺灣地層下陷明顯受災區域，此部分即有不少研究針對地層下陷區進行淹水風險評估，例如國家科學及技術委員會 (2017) 針對屏東平原發展高空間解析度即時互動淹水模擬技術應用於地層下陷影響之分析，成果顯示補注湖引水操作下，引水時間要能超過洪峰流量發生的時間，對河道洪峰流量及洪峰水位方可達到降低之效果，並藉由減少河道流量與降低河道水位，以降低因河道水位過

高而溢淹的風險；成果亦顯示在新埤水文站下游洪峰水位之降低效應不明顯，低於5cm洪峰水位降低量，主要是因下游感潮河段受潮位影響，水位降低效應則較不明顯。張紹峰與羅偉誠 (2021) 探討位在濁水溪沖積扇上的彰化及雲林地區之地層下陷整治策略，分別針對兩個縣市規劃設立補注井方案，分別為扇頂人工湖補注井和溪州人工湖補注井兩個方案，在人工湖區運用工程規劃分析的供水能力設井補注，同樣補注水量下不同設井深度對近年來下陷趨勢增大地區進行整治效益評估，分析成果顯示，在補注井持續運作下，地層下陷續有改善之趨勢。

另外在沿海地區，除了地勢高低會影響淹水風險之程度，亦會因天文潮、暴潮帶來加乘的影響。李心平等人 (2018) 針對高雄市暴潮衝擊進行評估及調適策略的擬定，進行重現期10年、25年、100年之一日暴雨淹水模擬，並考慮有無暴潮之情況，成果以經濟部水利署之淹水深度 (0m至0.3m、0.3m至0.5m、0.5m至1.0m、1.0m至3.0m、3.0m以上共5個等級) 及淹水時間 (0hr至1hr、1hr至3hr、3hr至6hr、6hr至12hr、12hr以上共5個等級) 危險度分級予以評估可能的災害程度，分析成果顯示，暴潮主要影響在南高雄，就北高雄來說主要影響來自於降雨，影響區域為典寶溪及後勁溪下游附近；南高雄則在鹽埕區可能受到較大的風險，且暴潮影響除了淹水深度加劇，亦影響到積水的退水時間。

除了上述相關地區為易受災區外，部分專家學者亦針對不同土地利用區域進行淹水災害評估。例如陳雅惠等人 (2018) 對於農業普查的原始資料、農地利用現況以及降雨淹水潛勢等相關資訊進行整合，並以臺灣農業重要產區雲嘉南為探討對象，瞭解不同降雨情境下之淹水潛勢，與其潛在之農損金額，由研究成果得知，雲嘉南地區以臺南市農地使用面積為最高 (91,081 公頃)、雲林縣次之 (78,077 公頃)、嘉義縣則約為767公頃，所探討情境包含1日降雨量達200mm、350mm、450mm以及600mm，其中雲林縣無論在各種降雨情況下，所受淹水潛勢範圍較廣，故潛在受災比例及金額相對嘉南地區較高，四種情境潛在受災比例分析成果為22.02%、38.32%、45.85%、53.67%，總計潛在農損金額前兩種情境可能超過100,000 萬元，後兩種情境甚至有可能超過200,000萬元。可藉此研究提供農業保險、作物生產區、設施農業等相關建議。

河川沖淤狀況，亦是提升河道溢淹災情的因素之一，謝東洲等人 (2019) 探討近幾年因石門水庫阿姆坪防淤隧道帶來的改變下，加上氣候變遷影響造成的淡水河主河道

沖淤及未來防洪能力的評估。研究成果顯示，在氣候變遷RCP 8.5暖化情境下，21世紀末(2075年至2099年) 推估之最大洪峰量相較於基期 (1979年至2003年) 至少增加50%以上，防洪安全部分，21世紀末下游河道有溢堤之可能，整體而言，阿姆坪防淤隧道對淡水河及大漢溪主河道沖淤變化影響有限，未來河道長期變化趨勢仍將會以下刷為主。

4.1.1.2 氣候變遷淹水衝擊評估

1. 淹水模擬與成果分析

因應氣候變遷淹水衝擊，相關部會及學研單位過去已累積相當程度的科研成果，應用不同的方式進行氣候變遷淹水衝擊分析，包含設計型降雨與極端降雨事件，以下綜整說明：

(1) 極端降雨事件

Li et al. (2021) 應用AR5 RCP8.5動力降尺度MRI-WRF颱風事件資料，進行大甲溪極端降雨淹水災害模擬，探討土地利用九大類分布範圍之影響，並提出針對相關農業作物之調適策略建議，以及進行該區域重點作物之災害損失評估。九大類土地利用影響最多為農業用地，成果顯示21世紀末相較20世紀末可能發生淹水之農業用地將增加1.89倍，故該研究亦針對該區的重點作物進行後續調適規劃，包含調整作物區、增加工程調適作為等，藉此計算相對合理的調適效益；Hsiao et al. (2022) 針對宜蘭地區，應用AR5動力降尺度HiRAM-WRF颱風事件資料進行近未來 (2040年至2065年) 相對基期 (1979年至2008年) 之降雨變化率分析，分析成果顯示北部和大部分沿海地區降雨變化率下降，蘭陽溪上游和南海地區降雨變化率上升。接著使用該氣候資料進行淹水衝擊模擬，並計算不同時期之不同淹水深度 (0.3m、0.5m、1m、2m、3m含以上) 之淹水發生機率，以0.3m淹水最大分布面積來看，世紀中相對基期約增加1.7倍。後續將上述分析成果產製淹水危害圖與衝擊圖，並嘗試將圖資應用於農業、畜牧業及養殖漁業之淹水災害影響評估，藉此提供未來調適規劃之參考。Chen et al. (2022) 以24小時累積雨量超過600mm作為淹水危害度指標，並搭配AR5 RCP8.5情境下之基期 (1985年至2003年) 與世紀末(2075年至2099年) 之極端降雨資料，產製全臺灣淹水危害脆弱度圖，並搭配人口密度產製全臺灣淹水風險圖，以5個等級進行各鄉鎮市區做風險等級畫分，亦針對老年人口及水稻作物影響進行淹水危害脆弱度的探討。研究發現，最嚴重的洪水風險等級位於彰化、雲林、嘉義和臺南的沿海鄉鎮，這些地區需要及早規劃防洪措施和防洪策略，以降低洪水風險；其中大約14%的鄉鎮處於較高的洪水風險，而3%鄉鎮淹水情勢將在氣候

變遷下更為嚴峻。趙益群等人 (2023) 應用土地利用變遷工具評估未來都市發展對淹水風險之影響。透過上述土地利用發展推估成果，搭配經濟部水利署第三代淹水潛勢圖 (定量降雨24小時500mm)，評估出在舊臺南市區鹽水溪流經區域中，商業、住宅及工業區在2036年的淹水面積較2019年的淹水面積增加約21%。

(2) 重現期設計降雨

因應氣候變遷影響下，內政部建築研究所 (2020) 針對短延時強降雨之頻率增加而發生更嚴重的淹水災況進行分析，並探討有效降雨與地表逕流的流動機制，進行氣候變遷情境演算分析，以及評估土地使用規劃後之淹水深度改變與減洪成效評估。由承洪目標區在氣候變遷情境重現期5年之降雨事件境況模擬結果，透過土地使用規劃減洪調適策略下，承洪目標區之最大水深與最大出流量均降低，尤以調整上游農業區使用型態水深與出流量減少百分比中5.77%、8.11%有明顯的減洪效果，顯示調整承洪目標區上游農業區使用型態後，在此情境之逕流增加影響下，仍可調適重現期5年以下之豪雨事件，藉由上述相關分析，歸納出淹水調適策略及適合的土地使用規劃，予以降低淹水風險。趙益群等人 (2021) 整合土地利用變遷及二維淹水模式，分析臺南市安南區未來土地發展及暖化影響下之淹水災害衝擊強度，參考經濟部水利署逕流分擔與出流管制的概念，搭配集水區上游土地管理方式，進行下游減洪調適效益之評估，由此研究模擬成果得知，氣候變遷情境下之10年重現期距降雨較現況增加約79%，將會造成排水系統無法負荷，為減緩土地開發與氣候變遷造成的淹水衝擊，該研究建議可透過上游山坡地管理調適方案進行測試，進而瞭解山坡地管理可減少下游出流口洪峰量不同程度的影響。

2. 風險與調適平台建置及參考圖資產製

在國內氣候變遷淹水衝擊評估中，目前依據CMIP5資料已有完整的全臺分析結果，如國家災害防救科技中心之Dr.A氣候變遷災害風險調適平台，結合經濟部水利署之淹水潛勢圖資料以及內政部的人口分布資訊，製作了全臺灣各鄉鎮縣市、最小統計區 (單元人口小於450人) 之淹水災害風險圖等分析成果，所提供的資料共包含危害度圖、脆弱度圖、暴露度圖、風險圖、危害—脆弱度圖、標準差圖 (SD)、信噪比圖 (SNR)，以提供相關單位參考。另外，在國家科學及技術委員會支持下，亦成立了臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 (Taiwan Climate Change Estimation Information and Adaptation Knowledge Platform Project, TCCIP) ，提供各式不同時間及空間尺度之氣候變遷資料提供外界使用，亦針對各式災害與調適知識做蒐整與分享，並且應用了相關氣候變遷推估

資料，進行各式災害衝擊評估，瞭解其未來可能會面對之風險。在淹水風險評估中，目前是採用CMIP5中暖化情境為RCP8.5之最劣情境作為條件，HiRAM-WRF推估資料進行動力降尺度至5公里網格之颱風事件時資料進行淹水災害模擬，包含現況與未來各場颱風事件可能帶來之淹水衝擊，提供各界進行減災與調適等相關規劃。

在臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台中，對於危害分析部分，是使用HiRAM-WRF動力降尺度颱風事件資料之總累積雨量及最大6小時、12小時、24小時累積雨量等共四個指標，排序前30%場次進行降雨概況評估，先行依據上述四個指標計算基期 (1979年至2008年) 之平均雨量分布 (如圖4.1.1.1之基期雨量分布圖所示)，再針對世紀中 (2039年至2065年)、世紀末 (2075年至2099年) 分別相對基期計算降雨變化率分布，如圖4.1.1.1之降雨變化率所示。可看出基期在宜蘭山區及南高屏局部山區之雨量相對較高，從桃園至嘉義之西部沿海地區，雨量則相對偏低；世紀中相對基期之降雨變化率於西南部沿海及東半部地區增加情況較為顯著，桃竹苗至臺中之部分區域則呈現減少趨勢；世紀末相對基期的分布中，可看出全臺普遍呈現增加的趨勢，僅於總累積雨量降雨變化率中，於恆春鎮及臺東縣呈現局部減少。整體而言，全臺在各時期平均趨勢上，世紀末相較世紀中普遍呈現增加趨勢。由上述分析得知，整體降雨強度都呈現增加，短延時強降雨的情形會更趨頻繁。

在衝擊分析部分，依據上述氣候變遷情境，使用與產製水利署第三代淹水潛勢圖同一版本之SOBEK淹水模組進行淹水災況模擬與颱風事件淹水發生機率分析。模擬成果顯示淹水災況約99%集中於最大24小時累積雨量排序前30%場次，故相關分析皆針對該範圍內之場次進行計算。以淹水深度0.5公尺 (含) 以上為主要分析指標，依淹水發生機率由低到高呈現淺藍至深藍的色階，成果如圖4.1.1.2所示。可發現基期至世紀中、世紀末可能發生淹水的範圍普遍呈現增加趨勢，則在臺北地區可看出世紀中可能發生淹水範圍較世紀末較多，此原因則為所使用之颱風事件資料中，世紀中排序前面之極端事件場次降雨情形較世紀末極端場次雨量多。故由此可知，雖整體降雨情況與淹水衝擊皆呈現逐步增加趨勢，但局部地區亦會因各個事件單一情況 (如降雨強度、事件降雨延時等) 而有不同的變化。

故藉由上述評估，可搭配不同之因素進行不同時期降雨與淹水衝擊概況與之間的影響情形作更深入的瞭解，因此相關分析成果，即適合提供相關單位作為未來風險評估與調適規劃之參考依據，針對未來可能發生之災害程度與較易發生災害之區域，進行後續之減災與調適規劃，提早防範降低受災風險。

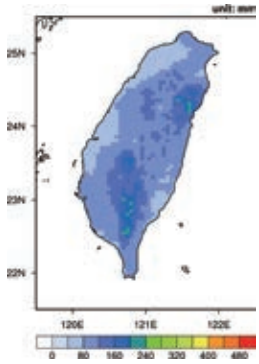
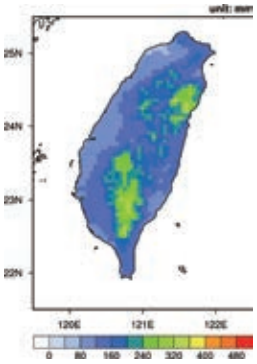
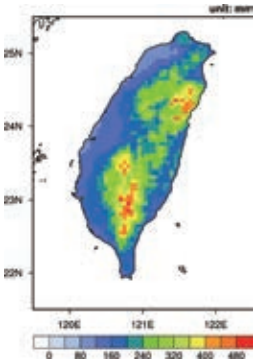
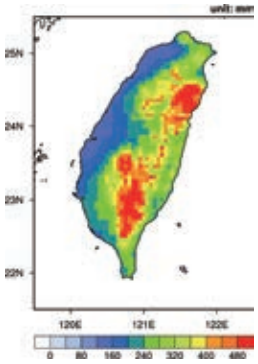
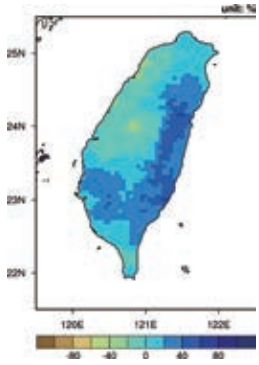
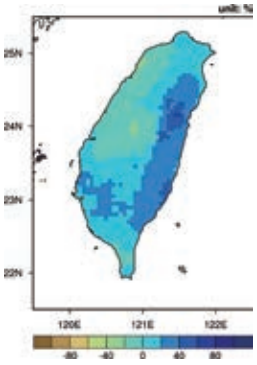
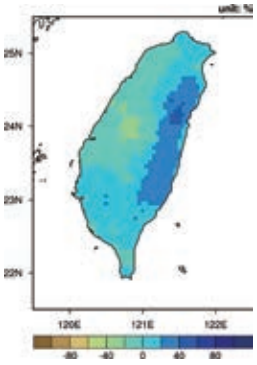
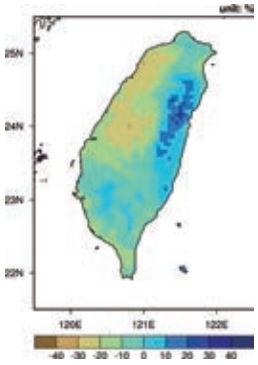
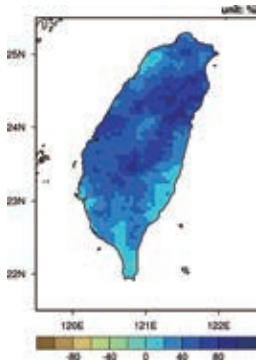
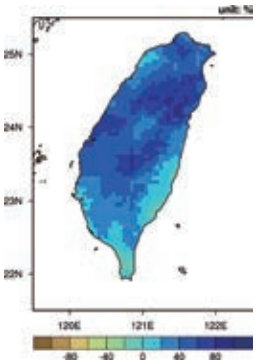
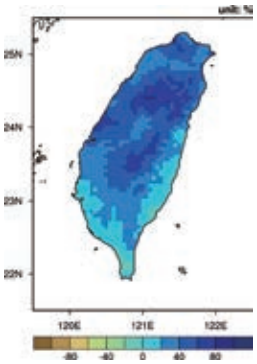
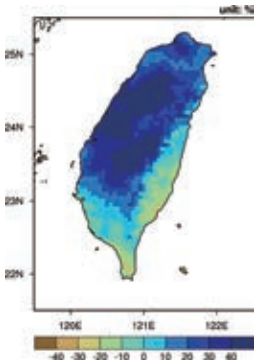
		最大6小時累積雨量	最大12小時累積雨量	最大24小時累積雨量	總累積雨量
基期平均雨量分布					
降雨變化率	世紀中相對基期				
	世紀末相對基期				

圖4.1.1.1　全臺灣危害分布圖

(資料來源：TCCIP計畫產製)

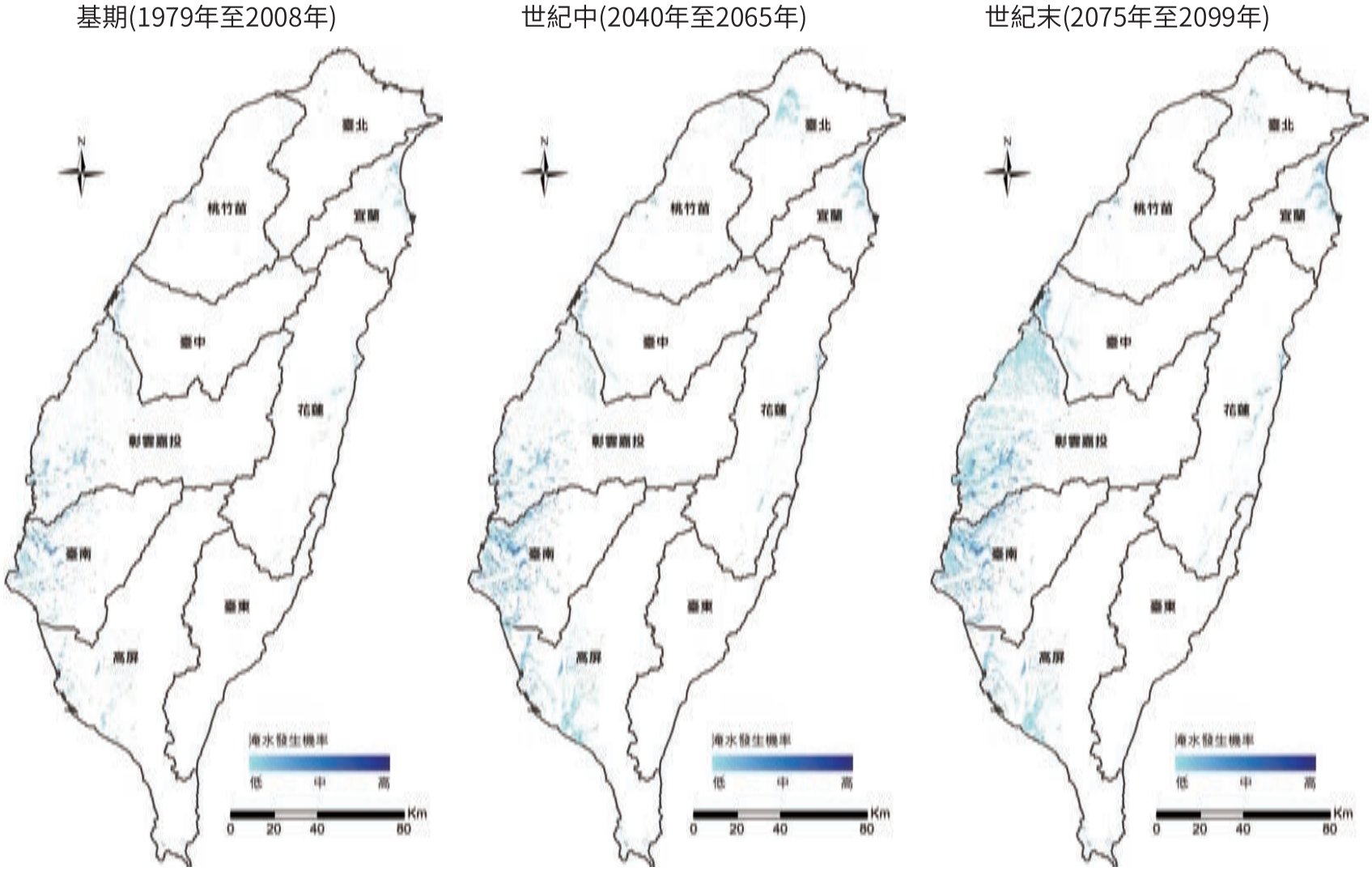


圖4.1.1.2　全臺灣各分區淹水深度0.5公尺含以上之淹水發生機率趨勢分布圖
(資料來源：TCCIP計畫產製)

4.1.2　乾旱

臺灣近年來於2014年至2015年、2017年至2018年以及2020年至2021年總共經歷三場嚴重乾旱事件，而2022年至2023年南部超過600天降雨偏少，且梅雨降雨亦不如預期，導致農業被迫停灌休耕與衝擊公共供水之穩定性。乾旱事件對民生、農業以及工業影響層面深遠，對於半導體等高用水產業影響尤甚。本節主要聚焦於回顧2017年之後在氣候變遷影響臺灣的乾旱衝擊與風險之科學研究相關文獻。近期國內已應用不同氣候變遷情境資料 (例如：AR5或AR6情境資料) 於乾旱特性分析或乾旱衝擊研究。其中，採用的AR5情境資料以RCP4.5與RCP8.5為主；而AR6情境資料則以未來中期SSP2-4.5、未來中期SSP5-8.5以及升溫2°C條件為主。以下分別就3個影響乾旱可能發生之面向來彙整其研究結果。

■氣象乾旱與連續不降雨日數之變遷：降雨量比歷年平均降雨量為低往往為乾旱發生之前兆，故回顧整理氣候變遷對氣象乾旱與連續不降雨日數之衝擊相關文獻。

■影響水庫「蓄豐濟枯」功能之季節雨量變遷：臺灣因豐、枯水期間之降雨量分布不均勻，因此需要水庫來「蓄豐濟枯」，尤其南部地區最為明顯。水庫「蓄豐」即蓄存颱風季節降雨量於水庫之內，以提供枯水期水源。次年颱風季節來臨前之梅雨季節降雨量則是另一種補充水庫之重要水源，當這兩個季節雨量如有異常不足時，水庫「蓄豐濟枯」之功能恐無法正常發揮，也是產生乾旱之可能因素。

■水文乾旱變遷：河川低流量是枯水期提供水量之重要來源，尤其是沒有水庫系統之河川，比如高屏溪等河川。河川流量超越機率85%水量 (一般稱Q85) 常作為河川低流量之代表，也被採用作為水源潛能量評估 (水權登記審查) 之依據。因此，氣候變遷影響下對於河川低流量之衝擊，也可視為水文乾旱變遷之重要指標。

整體而言，綜整國內氣候變遷乾旱衝擊研究之彙整結果發現，影響乾旱可能發生的3個面向：(1) 氣象乾旱與連續不降雨日數；(2) 影響水庫「蓄豐濟枯」功能之季節雨量；(3) 水文乾旱，在不同氣候變遷情境下，上述3個面向均顯示對乾旱發生的可能性與嚴重程度有一致增加現象。此3個面向於「臺灣氣候變遷科學報告2017」釋出迄今之國內研究成果彙整如下。

1. 氣象乾旱與連續不降雨日數變遷

首先回顧AR5氣候變遷情境資料之標準化降雨指數 (Standardized Precipitation Index, SPI) 衝擊分析。李昱祺等人 (2019) 基於TCCIP AR5降尺度產品，採用SPI進行臺灣地區未來乾旱特性分析，評估氣候變遷情境下21世紀三個時期 (初、中、末) 之乾旱特性相較於基期之變化情況。其中，於RCP8.5情境下21世紀末之分析結果指出：

■整體而言，全臺短時間尺度乾旱 (SPI3) 之發生頻率與強度都會增加，但持續時間特性上中部、南部乾旱趨於縮短；北部、東部乾旱趨於增長。

■長時間尺度乾旱 (SPI12) 於北、東部乾旱發生頻率增加且強度增加；中、南部發生頻率減小且持續時間縮短，但發生之強度增強。

而連續不降雨日數亦可視為另一種氣象乾旱指標，倘若在氣候變遷影響下連續不降雨日數有增加趨勢，乾旱危機勢必持續擴大。經濟部水利署水利規劃試驗所 (2022) 採用TCCIP AR6統計降尺度產品進行氣候變遷衝擊分析，以臺灣10條主要水系35處控制點作為研究區域，評估各個水系連續不降雨日數 (日雨量低於1.0 mm) 於CMIP6氣候變遷3種情境 (未來中期SSP2-4.5、未來中期SSP5-8.5以及升溫2°C條件) 下之可能變化情況，並據以統計臺灣北部、中部以及南部之氣候變遷衝擊，分析結果說明如下：

■臺灣北區情境連續不降雨日數有一致增加情況，區域整體於基期之連續不降雨日數約為25日，而在未來中期SSP2-4.5、未來中期SSP5-8.5以及升溫2°C條件分別增加：+15.0%、+19.5%以及+16.9%。

■臺灣中區情境連續不降雨日數有一致增加情況，區域整體於基期之連續不降雨日數約為33日，在未來中期SSP2-4.5、未來中期SSP5-8.5以及升溫2°C條件分別增加：+8.5%、+13.7%以及+11.1%。

■臺灣南區情境連續不降雨日數有一致增加情況，區域整體於基期之連續不降雨日數約為39日，在未來中期SSP2-4.5、未來中期SSP5-8.5以及升溫2°C條件分別增加：+12.8%、+15.9%以及+13.7%。

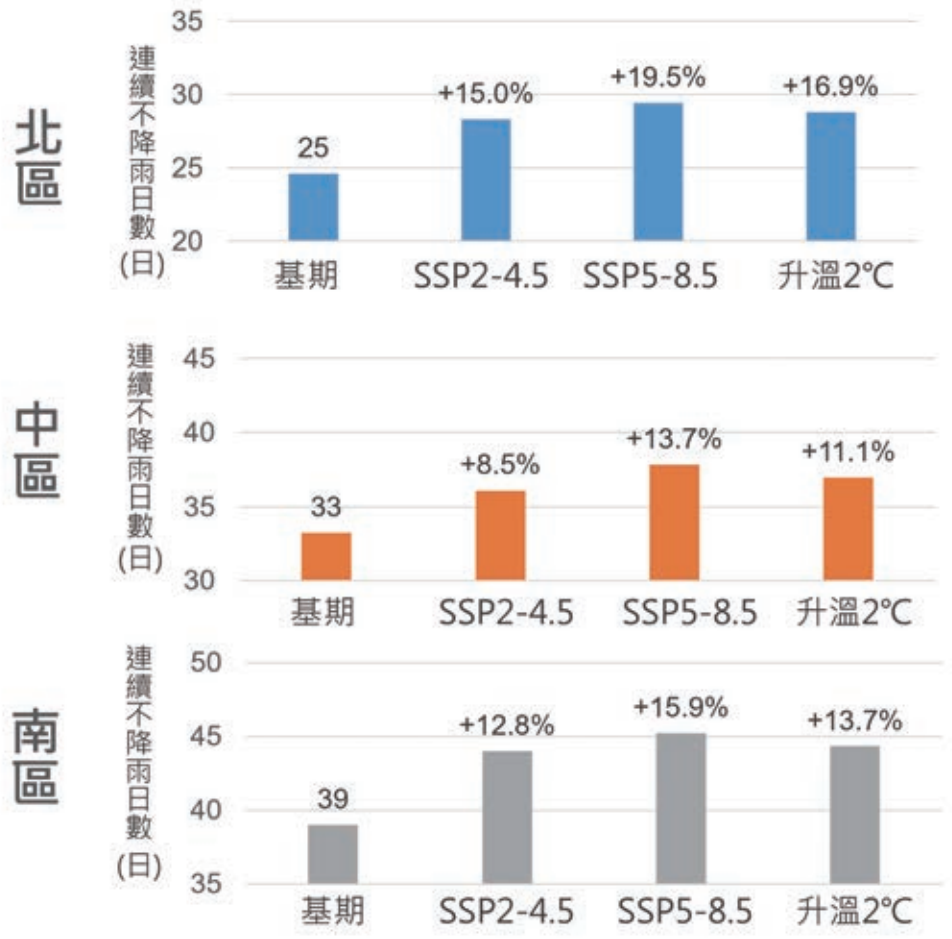


圖4.1.2.1　不同氣候變遷情境下連續不降雨日數增減情況

註: [1]圖片中基期時段為1995年至2014年，而SSP2-4.5與SSP5-8.5則係針對未來時段2041年至2060年之分析結果；[2]1995年連續不降日數之變化趨勢係依據區域內集水區面積作為權重計算而得之整體平均值，北區、中區以及南區數據引用自經濟部水利署水利規劃試驗所 (2022)。

整體而言，在氣候變遷影響下未來北區、中區、南區之連續不降雨日數皆有一致延長情況 (圖4.1.2.1)，各個分區之集水區皆可能受長期無雨影響而造成更加乾燥情況，在升溫2°C條件下連續不降雨日數增加幅度約介於+11.1%至16.9%之間。

2. 影響水庫「蓄豐濟枯」功能的季節雨量變遷

在氣候變遷影響下，梅雨與颱風季節降雨特性改變可能衝擊水庫「蓄豐濟枯」之功能性，進而導致乾旱發生與否。臺灣氣候變遷科學報告2017釋出迄今，梅雨與颱風季節期間降雨特性之研究成果回顧如下：

曾宏偉等人 (2022) 參考陳昭銘 (2008) 季節劃分方式，以臺南地區為研究對象，綜合考慮水文變異與氣候變遷影響，推估基期與未來情境下梅雨季節期間 (5月至6月) 與颱風季節期間 (7月至9月) 之總雨量機率密度函數，以探討氣候變遷對於梅雨季節與颱風季節期間總雨量之衝擊。其中，氣候變遷情境資料選用TCCIP AR5降尺度資料，基期設定為1986年至2005年，未來時段為2031年至2050年，並以全部全球環流模式之推估資料作為系集，評估結果如下：

RCP4.5情境下梅雨延遲與颱風降雨延遲之發生機率與總量：

■「梅雨延遲」(其定義為5月雨量偏少，主要雨量發生於6月之情況) 發生機率由13.4%增加至14.7%，而梅雨季節總量亦有增加情況，由920mm增加至992mm。

■「颱風降雨延遲」(其定義為7月雨量偏少，主要雨量發生於8月至9月之情況) 發生機率由12.5%增加至14.6%，而颱風季節總量亦有增加情況，由1,421mm增加至1,541mm。

RCP4.5情境下梅雨與颱風降雨之聯合發生機率：

■氣候變遷下梅雨與颱風降雨之聯合發生機率如圖4.1.2.2。未來情境下「梅雨正常」與「颱風降雨正常」之聯合發生機率雖然增加，但「梅雨延遲」與「颱風降



圖4.1.2.2　基期與RCP4.5情境下梅雨與颱風降雨之聯合發生機率

註：粗體底線數字代表邊際發生機率 (資料來源：曾宏偉等人，2022)

雨延遲」之邊際發生機率亦有增加情況，即雨量相對豐沛之機率增加，但同時梅雨延遲與颱風降雨延遲之機率亦有所增加，亦即未來會朝極端水文情況更加頻繁發生之方向發展。

根據上述研究結果，梅雨颱風的延遲將影響水庫蓄豐濟枯的功能，應就不同區域之水資源供需系統進行整體性評估，以釐清梅雨颱風對季節性變遷的影響。

3. 水文乾旱變遷

河川流量超越機率85%的水量 (以下簡稱Q85) 一般為河川低流量的代表，也被採用作為水源潛能量評估 (水權登記審查) 之依據。因此，河川斷面之Q85可以視為的水文乾旱指標之一，來反映水源潛能量在氣候變遷情境下的變遷趨勢。

(1) 河川每月水源潛能量 (Q85) 變遷趨勢

經濟部水利署水利規劃試驗所 (2022) 分析臺灣10條主要水系在不同氣候變遷情境下各月分Q85流量，其分析結果指出大多數月分Q85流量呈現減少趨勢，僅少數豐水期月分例外。其中，以高屏溪最為顯著，高屏溪攔河堰斷面1月至5月每月Q85流量在未來中期SSP2-4.5、未來中期SSP5-8.5以及升溫2°C條件下均有減少情況，且3種未來情境中以未來中期SSP5-8.5情境減少幅度最為明顯 (如圖4.1.2.3)。在未來中期SSP5-8.5系集模式中，有

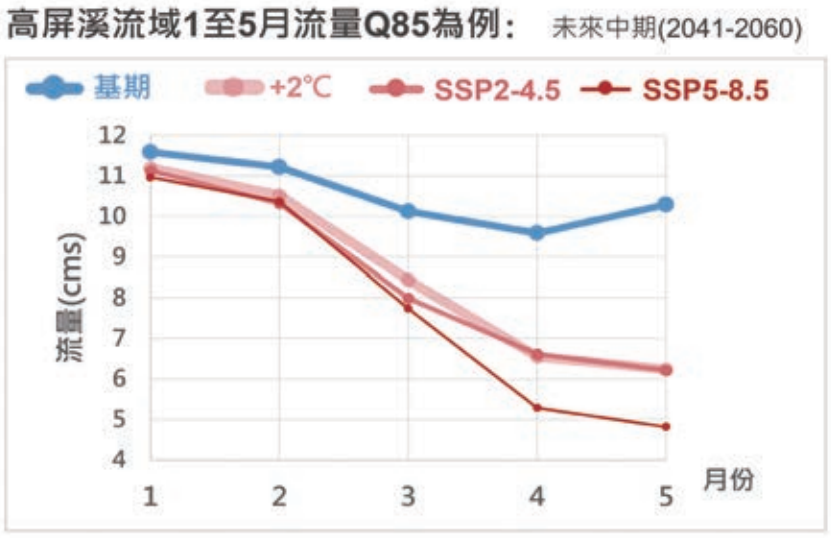


圖4.1.2.3　不同氣候變遷情境下高屏溪流域之水源潛能量
(資料來源：經濟部水利署水利規劃試驗所，2022)

62%至96%的模式其分析結果顯示：未來的水源潛能量少於基期的水源潛能量，尤其在枯水期3月至5月，流量低於基期的水源潛能量之機率甚高。臺灣北區、中區以及南區在3種氣候變遷情境 (SSP2-4.5情境、SSP5-8.5情境、及全球暖化程度2°C情境) 下，每月水源潛能量之變遷趨勢分析結果指出：大部分月分水源潛能量 (Q85) 具有減少趨勢。

整體而言，在氣候變遷影響下未來北中南之河川水量低流量皆有一致減少情況 (圖4.1.2.4)。在最為嚴峻情況下其河川水量低流量減少幅度約介於-18.2%至-49.5%之間。一般而言，河川水量於枯水期尾聲往往已處於低流量階段，若氣候變遷進一步造成低流量減少，可能加劇供水、生態以及水質等問題。

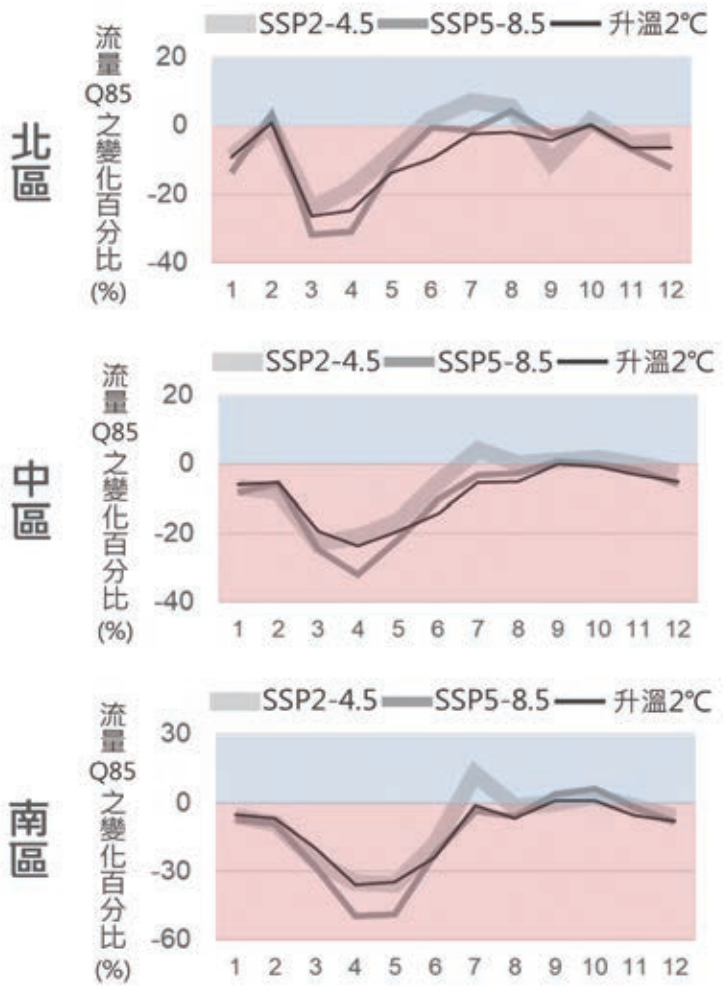


圖4.1.2.4　不同氣候變遷情境下各月分流量Q85之變化

註: [1]圖片中AR6 SSP2-4.5與SSP5-8.5係針對未來時段2041年至2060年之分析結果 (相較於基期1995年至2014年)；[2]北區、中區以及南區數據引用自經濟部水利署水利規劃試驗所 (2022)。

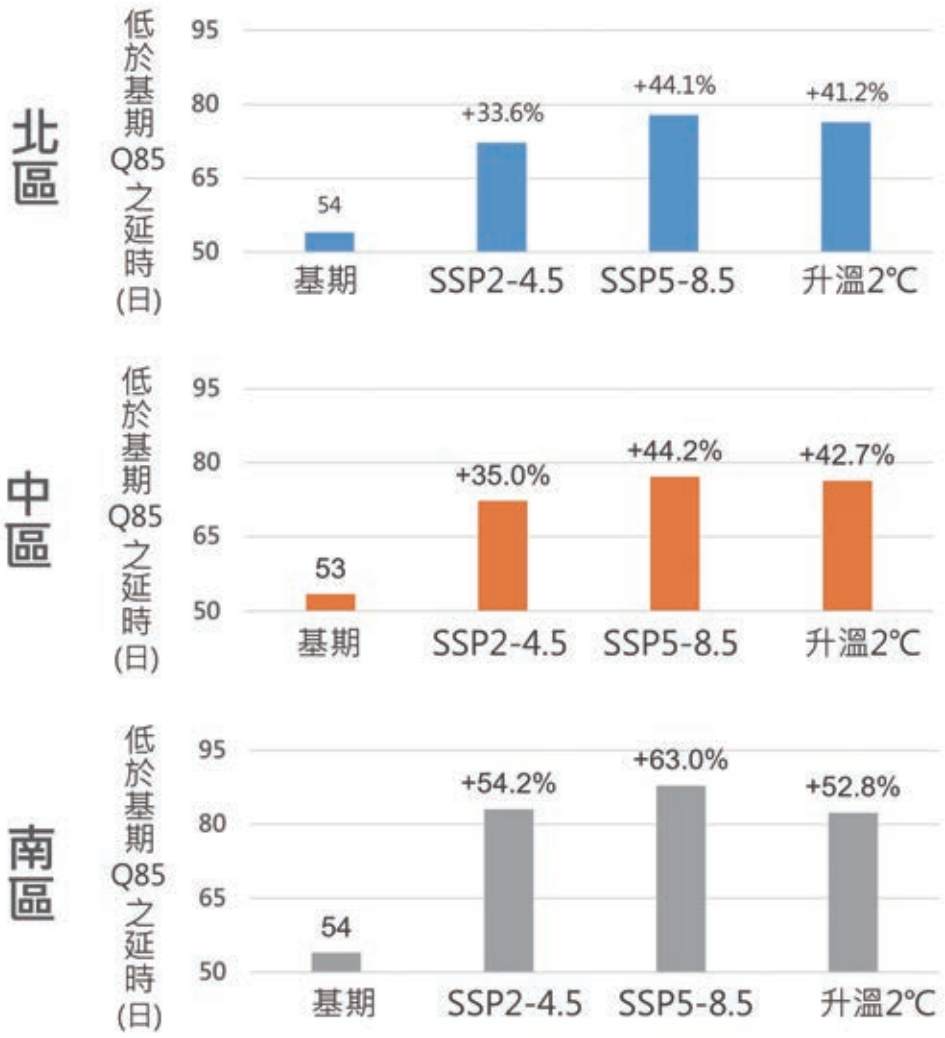


圖4.1.2.5　河川流量低於基期水源潛能量 (Q85) 的延時

註: [1]圖片中基期時段為1995年至2014年，而SSP2-4.5與SSP5-8.5則係針對未來時段2041年至2060年之分析結果；[2]低於基期Q85之延時變化趨勢係依據區域內集水區面積作為權重計算而得之整體平均值，數據引用自經濟部水利署水利規劃試驗所(2022)。

(2) 河川流量低於基期水源潛能量 (Q85) 的延時

前述分析發現在氣候變遷情境下臺灣10條主要水系各月分之水源潛能量 (Q85) 大多具有減少趨勢。本節進一步彙整河川流量低於基期水源潛能量 (Q85) 的延時如圖4.1.2.5，顯示南區未來河川流量低於基期水源潛能量 (Q85) 的延時將延長50%以上，相較北區與中區更為嚴重。因此，未來河川枯水期低流量的延時可能拉長，更需要仰賴水庫提供「蓄豐濟枯」的功能。臺灣北區、中區及南區在基期低於水源潛能量 (Q85) 的延

時大約在54天左右，各區相差不多，但在三個不同氣候變遷情境下均顯示未來低於基期水源潛能量 (Q85) 的延時將更長，尤其南部地區約延長50%以上。面對河川低於基期水源潛能量 (Q85) 的延時可能拉長之情況下，未來水資源調度管理將更為艱辛。

4.1.3 水資源

4.1.3.1 水資源現況及趨勢

臺灣年平均雨量約為2,500毫米，逕流量約為647.42億立方公尺，但枯水期(11月至4月)流量僅152.54億立方公尺，占平均年總逕流量之23.56%，豐枯差距明顯。臺灣水資源運用因先天降雨時空分布不均，須透過水庫「蓄豐濟枯」以維持供水穩定，全臺計有95座水庫 (經濟部水利署公告)，設計總容量約29.3億立方公尺，歷經921地震、莫拉克風災及極端降雨等事件，目前淤積量約8.7億立方公尺，淤積率約29.7%。

臺灣全年降雨量達885.02億噸相當豐沛，但扣除蒸發散及入海損失後，可利用水量僅160.55億噸，占降雨總量之18%；近十年 (2013年至2022年) 平均用水量約163.72億噸，仍以農業用水量為大宗約116億噸，生活用水約32億噸 (約占19%) 及工業用水約16億噸 (約占10%)，而地下水抽水量仍有超越天然補注量之情況 (經濟部水利署統計)，如圖4.1.3.1所示。又由於地域性及季節性降雨分配不均，80%降雨集中在豐水期，主要降水為颱風，其次為梅雨，而南部的豐枯差異又較北部嚴重，如表4.1.3.1所示。臺灣的水資源運用仍以地面水為主，因為降雨時空差異需要蓄水設施調配水量，但水利設施調蓄能力有限，泥沙淤積又降低調蓄能力，衍生地下水資源管理的挑戰，其中九大地下水分區之濁水溪沖積扇、嘉南平原及屏東平原有地下水超抽問題 (經濟部水利署，2014；經濟部水利署，2015)。

依據經濟部水利署用水統計年報 (104至108年度) 統計分析，農業用水量包括提供灌溉用水 (佔91%)、養殖用水 (佔8%) 及畜牧用水 (佔比小於1%)，換算後灌溉用水量約占總用水量之65%，而其中約有86%的灌溉用水取自不穩定之河川流水及壩堰，因此除農業灌溉利用外，並不易為民生與工業用水使用；另取自供水穩定之水庫約11億噸，佔灌溉用水量10% (農業部，2016)。



圖4.1.3.1　臺灣地區平均水資源量及利用量 (2013年至2022年)

(資料來源：經濟部水利署，臺灣各區水資源經理基本計畫，本報告整理重製)

表4.1.3.1　臺灣水資源分區豐枯水期流量比例 (1949年至2022年)

單位：百萬立方公尺

水資源分區 \ 期間	全年	豐水期 (5月至10月)	枯水期 (11月至4月)
北	15376	9580 (62%)	5796 (38%)
中	15109	11750 (78%)	3359 (22%)
南	17630	15657 (89%)	1973 (11%)
東	16615	12347 (74%)	4268 (26%)
全臺	64730	49334 (76%)	15396 (24%)

(資料來源：111年水文年報總冊，本報告整理重製)

農業灌溉用水並具有空間特性及時間特性，在空間特性上，在東部地區之灌溉用水比例雖佔85%以上，較有節水空間，但無其他標的移用需求亦缺乏調蓄設施與跨區調度技術，節水雖可降低總用水量，卻對整體水資源利用無實質助益。此外，在時間特性上，農業灌溉用水是唯一能夠配合豐枯水期彈性用水之標的，能夠有效利用多元的水資源，並同時具有環境維護與生態等效益；豐水期時，因水量充足且無其他標的移用需求，水庫亦常常洩洪，川流入海，無助水資源利用；配合水田灌溉特性，可採超量引灌操作模式，使水稻於耕作期間田面長時間維持湛水狀態，灌溉用水經由入滲進入地下水層，充分發揮水田補注地下水之功能，維持地下水高水位；據研究估計灌溉用水每年補注地下水達20億噸，約等於6座翡翠水庫的有效容量。枯水期時，可視水文狀況機動啟

動分區輪灌以達到水土資源的永續利用，降低旱災對農民之衝擊；尤以水庫型灌區，於枯水期全面配合彈性調度，提高水資源利用韌性。

統計臺灣過去110年的年總降雨量趨勢變化並不顯著，但是在1961年至2020年，少雨年發生次數明顯比1960年以前增加 (臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫，TCCIP)。以水資源常用之標準降雨指數 (SPI) 計算結果亦指出1960年至2019年整體降雨為上升趨勢 (Huang et al., 2022)。極端化之降雨趨勢可能影響用水調配，以近年來用水量的變化趨勢來看，工業及農業較無明顯變化，惟農業用水部分因配合枯旱調度而有較大幅度之變動，如2015年及2020年度嚴重枯旱事件，辦理大規模停灌休耕或各項抗旱節水措施，均為近年農業用水之低點。

4.1.3.2 氣候變遷對水資源供給之影響

「臺灣氣候變遷科學報告2017」釋出後，陸續已有許多臺灣本土研究以AR5或最新AR6資料進行研究，結果顯示雖然降雨或流量增減程度不同但趨勢大致相同，其差異可能來自模式數量不同；未來流量變化率結果係由水文模式計算而得，流量模擬受到其他水文通量如蒸發散量與地下水出流等皆可能影響降雨逕流的計算，而致使流量變化級距與降雨量變化級距有所不同；供水量情況乃參考經濟部水利署 (2021) 之水資源經理報告，供水量減少比例係將因氣候變遷減少之供給量除以現況供給量而得。綜整研究結果，整體而言全臺之年雨量及流量為增加之情況，豐水期間之雨量或流量有增加情況，而枯水期間之雨量或流量則有減少情況 (圖4.1.3.2及圖4.1.3.3)，此種豐枯季水量分布不均之情況，可能造成未來水資源供給上更多困難與挑戰。各區之降雨及流量變化情形簡述如下：

1. 北部地區

■雨量：年雨量為增加趨勢 (黃振洋，2021)，豐水期雨量為增加趨勢，枯水期雨量為減少趨勢 (林冠州，2022；林宗毅，2019)；各指標在AR5及AR6之模式中位數範圍，年雨量為+1%至+13%，豐水期範圍+4%至+9%，枯水期範圍-3%至-11% (劉子明等人，2023；鄧澤宇等人，2020)，模式5%至95%範圍參考表4.1.3.2。

■流量：年流量為有增有減 (黃振洋，2021)，豐水期有增有減 (林冠州，2022；劉子明

表4.1.3.2　氣候變遷降雨量變化率

分區	指標	AR5		AR6	
		RCP4.5世紀中變化率 (%)	RCP8.5世紀中變化率 (%)	GWL 2°C變化率 (%)	GWL 4°C變化率 (%)
北	年雨量	+13 (-3至37)	+12 (-4至37)	+1 (-10至17)	+6 (-9至17)
	豐水期雨量	+9	+8	+4	-
	枯水期雨量	-8	-11	-3	-
中	年雨量	+14 (-6至37)	+14 (-5至39)	+1 (-12至19)	+12 (-11至46)
	豐水期雨量	+7	+8	+2	-
	枯水期雨量	-10	-12	-2	-
南	年雨量	+14 (-5至37)	+16 (-3至42)	+1 (-13至17)	+14 (-9至64)
	豐水期雨量	+3	+5	+1	-
	枯水期雨量	-9	-9	-2	-
東	年雨量	+15 (-2至39)	+15 (-1至41)	+2 (-12至17)	+16 (-12至43)
	豐水期雨量	+6	+7	-	-
	枯水期雨量	-6	-12	-	-

註：表格中之數值表示所有模式之中位數數值 (模式5%數值至模式95%數值)；RCP4.5為較穩定之情境、RCP8.5為高度排放情境，世紀中之時期為2036年至2065年，模式數分別為29個及33個；GWL 2°C及GWL 4°C情境為全球暖化程度到達2°C及4°C時期之情境，為相對模式基期 (1995年至2014年)之變化率結果，模式數分別為86個及26個，由於各模式到達GWL之時期不同，若用在調適使用供參考之時期GWL 2°C約落在2041年至2060年 (中期)；GWL 4°C約落在2081年至2100年 (長期)。(彙整於臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 [TCCIP] 與經濟部水利署水利規劃試驗所 [2022] 計畫成果)

等人，2022)，枯水期為減少趨勢 (林宗毅，2019)；各指標在AR5及AR6之所有模式中位數範圍，年流量為-1%至+12%，豐水期流量+3%至+19%，枯水期流量-3%至-13% (劉子明等人，2023；鄧澤宇等人，2020)，模式5%至95%範圍參考表4.1.3.3。

■供水量：現況供水量574.4萬噸/日，以AR5在RCP8.5情境下，最多可能減少供給19.1至34.6萬噸/日 (經濟部水利署，2021a)，相當於現況供水量減少3.3%至6.0%。

2. 中部地區

■雨量：年雨量為增加趨勢 (劉子明等人，2023)，豐水期為上升趨勢，枯水期為減少趨勢 (陳艾琳，2020)。各指標在AR5及AR6之模式中位數範圍，年雨量為+1%至+14%，豐水期雨量+2%至+8%，枯水期雨量-2%至-12% (經濟部水利署水利規劃試驗所，2022；劉子明等人，2023；鄧澤宇等人，2020)，模式5%至95%範圍參考表4.1.3.2。

表4.1.3.3　氣候變遷流量變化率

分區	指標	AR5		AR6	
		RCP4.5世紀中變化率 (%)	RCP8.5世紀中變化率 (%)	GWL 2°C變化率 (%)	GWL4°C變化率 (%)
北	年流量	+12 (-6至+42)	+10 (-9至+43)	-1 (-17至+22)	+4 (-16至+19)
	豐水期流量	+19 (-8至+55)	+18 (-7至+57)	+3 (-20至+29)	+15 (-14至+41)
	枯水期流量	-1 (-16至+24)	-4 (-22至+17)	-3 (-24至+16)	-13 (-34至+4)
中	年流量	+18 (-11至+49)	+18 (-7至+55)	-1 (-19至+27)	+14 (-18至+70)
	豐水期流量	+23 (-11至+56)	+24 (-8至+66)	-1 (-19至+26)	+16 (-17至+82)
	枯水期流量	+3 (-25至+32)	+1 (-34至+34)	-1 (-24至+29)	-8 (-26至+43)
南	年流量	+17 (-7至+46)	+19 (-4至+51)	-1 (-20至+23)	+17 (-16至+97)
	豐水期流量	+18 (-8至+47)	+21 (-3至+56)	-2 (-20至+25)	+18 (-16至+101)
	枯水期流量	+11 (-32至+77)	+11 (-35至+65)	+3 (-30至+79)	-4 (-29至+97)
東	年流量	+21 (-5至+55)	+22 (-3至+57)	+2 (-19至+26)	+27 (-18至+83)
	豐水期流量	+24 (-5至+56)	+26 (-4至+68)	+4 (-20至+35)	+31 (-14至+104)
	枯水期流量	+10 (-23至+65)	+12 (-17至+50)	-8 (-29至+31)	-7 (-34至+26)

註：表格中之數值表示所有模式之中位數數值 (模式5%數值至模式95%數值)；RCP4.5為較穩定之情境、RCP8.5為高度排放情境，世紀中之時期為2036年至2065年，模式數分別為29個及33個；GWL 2°C及GWL 4°C情境為全球暖化程度到達2°C及4°C時期之情境，為相對模式基期 (1995年至2014年) 之變化率結果，模式數分別為86個及26個，由於各模式到達GWL之時期不同，若用在調適使用供參考之時期GWL 2°C約落在2041年至2060年 (中期)；GWL 4°C約落在2081年至2100年 (長期)。流量計算方法乃挑選主要集水區之供水取水點為控制點，並以鄰近流量站為參考測站；以北部地區主要供水之一的大漢溪為例，其主要控制點為石門水庫及流三峽河取水點，所對應之流量模擬參考測站則為石門水庫以及三峽流量站；流量推估非線性過程，受到其他水文通量如蒸發散量與地下水出流等皆可能影響降雨逕流的計算而致使流量變化級距與降雨量變化級距有所不同。(彙整於臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 [TCCIP] 與經濟部水利署水利規劃試驗所 [2022] 計畫成果)

■流量：年流量為增加趨勢 (劉子明等人，2023)，豐水期流量有增有減，枯水期流量有下降趨勢 (李兆庭，2022)；指標在AR5及AR6之所有模式中位數範圍，年流量-1%至+18%，豐水期流量-1%至+24%，枯水期流量-8%至+3% (劉子明等人，2023；鄧澤宇等人，2020)，模式5%至95%範圍參考表4.1.3.3。

■供水量：現況供水量269.3萬噸/日，以AR5在RCP8.5情境下，減少22.3萬噸至24.72萬噸 (經濟部水利署，2021a)，相當於現況供水量減少3.9%至4.3%。

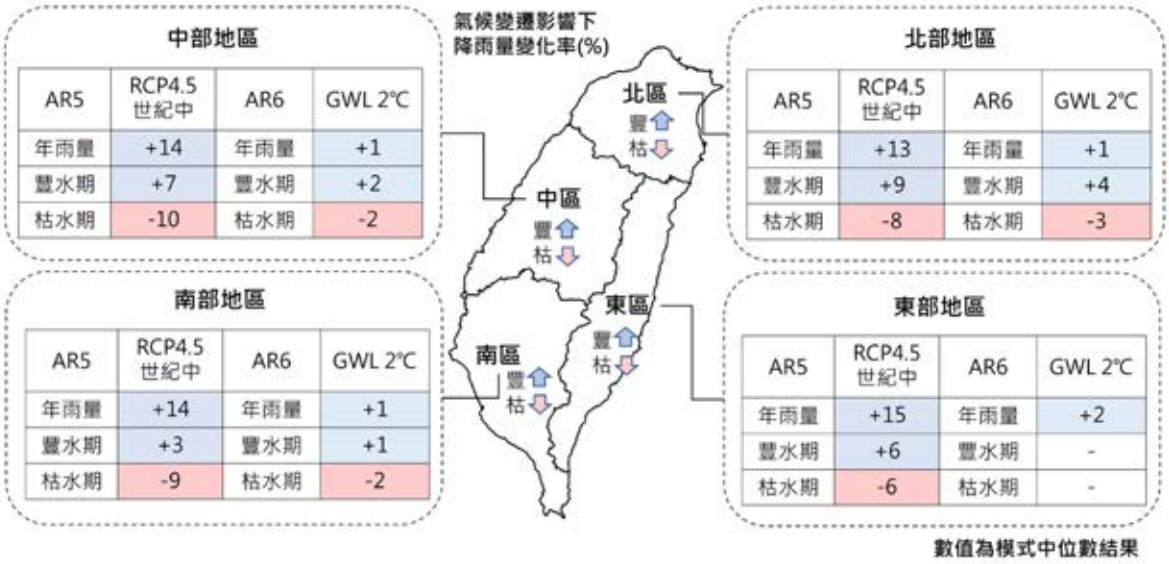


圖4.1.3.2　氣候變遷影響下降雨量變化率 (模式中位數)

註：[1]圖上數值為模式中位數結果。[2]因各區豐枯水期占比不同影響對年雨量之貢獻 (例如南部與北部地區豐水期雨量分別增加3%及9%，但年雨量增加幅度類似)。(彙整於臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 [TCCIP] 與經濟部水利署水利規劃試驗所 [2022] 計畫成果)

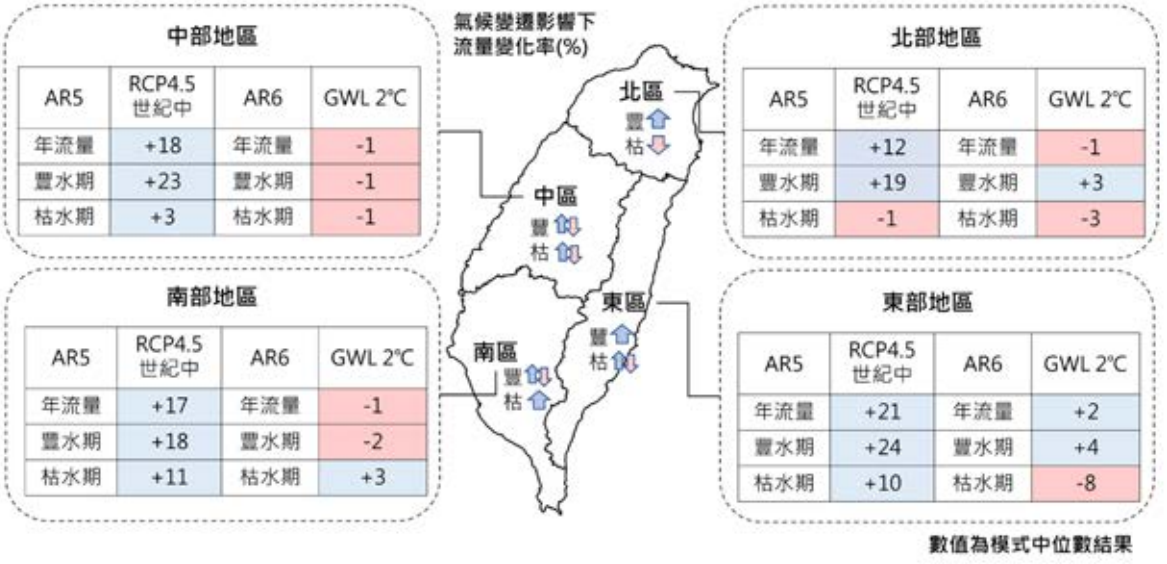


圖4.1.3.3　氣候變遷影響下流量變化率 (模式中位數)

註：[1]圖上數值為模式中位數結果。[2]因各區豐枯水期占比不同影響對年流量之貢獻 (例如南部與北部地區豐水期雨量分別增加18%及19%，但年流量增加幅度不同)。[3] (彙整於臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 [TCCIP] 與經濟部水利署水利規劃試驗所 [2022] 計畫成果)

3. 南部地區

■雨量：年雨量為增加趨勢 (許民錠與陳守泓，2022；鄧澤宇等人，2020)，豐水期雨量為增加趨勢，枯水期雨量為減少趨勢 (曾宏偉等人，2022)；各指標在AR5及AR6之模式中位數範圍，年雨量範圍+1%至+16%，豐水期雨量+1%至+5%，枯水期雨量-2%至-9% (劉子明等人，2022；經濟部水利署，2021)，模式5%至95%範圍參考表4.1.3.2。

■流量：年流量為增加趨勢 (劉子明等人，2023；鄧澤宇等人，2020)，豐水期為增加趨勢，枯水期互有增減 (經濟部水利署水利規劃試驗所，2022)；各指標在AR5及AR6之模式中位數範圍，年流量範圍-1%至+19%，豐水期流量-2%至+21%，枯水期流量-4%至+11% (劉子明等人，2023；鄧澤宇等人，2020)，模式5%至95%範圍參考表4.1.3.3。

■供水量：現況供水量310萬噸/日，以AR5在RCP8.5情境下，減少15.7萬噸 (經濟部水利署，2021)，相當於現況供水量減少2.7%。

4. 東部地區

■雨量：年雨量為增加趨勢，豐水期為增加趨勢，枯水期為減少趨勢；年雨量範圍+2%至+16%，豐水期雨量+6%至+7%，枯水期雨量-6%至-12% (劉子明等人，2023；鄧澤宇等人，2020)，模式5%至95%範圍參考表4.1.3.2。

■流量：年流量為增加趨勢，豐水期為增加趨勢，枯水期互有增減；各指標在AR5及AR6之模式中位數範圍，年流量範圍+2%至+27%，豐水期流量+4%至+31%，枯水期流量-8%至+12% (劉子明等人，2023；鄧澤宇等人，2020)，模式5%至95%範圍參考表4.1.3.3。

■供水量：現況供水量27.2萬噸/日，枯旱及高濁度期間可能有供水不穩定問題 (經濟部水利署，2021)。

4.1.3.3　氣候變遷下地下水變化趨勢

地下水為國內重要供水來源之一，須約佔總用水量之33%，地下水需透過降雨入滲補注，停留時間比地表水長，若過度利用則可能嚴重干擾水文循環平衡，地下水資源的超限使用將對環境生態產生重大影響。2017年科學報告將地下水補注量視為地下水可永續使用的上限，將其定義為地下水供水潛能量，而氣候變遷對地下水資源的影響，主要為降雨量變化所導致的補注量變化，近年氣候變遷地下水相關研究較少有完整性系統研究，因此本小節整理經濟部水利署 (2014；2015) 對於臺灣九大地下水分區之研究，採用AR4資料進行氣候變遷推估，以1980年至1999年為基期評估2020年至2039年之氣變情境下地下水補注量之變化，以相對較平均之A1B情境正負一倍標準差作為未來推估結果如下，建議未來可採用AR6資料進行更新：

■臺北盆地：常年補注量約122.8百萬噸/年，受到氣候變遷影響可能變動範圍介於-19.6%至+34.4%，補注量增加率較高，因此未來臺北盆地下水補注量有增加的趨勢。

■桃園中壢台地：常年地下水補注量約322.7百萬噸/年，受到氣候變遷影響可能變動範圍介於-31.2%至+20.9%，減少量相對較高顯示未來桃園中壢台地地下水補注可能減少。

■蘭陽平原：常年補注量約325.9百萬噸/年，受到氣候變遷影響可能變動範圍為-22.9%至+32.7%，地下水補注量增加比率較高，因此未來蘭陽平原地下水補注量有增加的趨勢。

■新苗地區：常年地下水補注量約245.0百萬噸/年，受到氣候變遷影響可能變動範圍介於-38.7%至+45.4%，顯示未來新苗地區地下水補注可能增加。

■臺中地區：臺中地區常年地下水補注量約552.0百萬噸/年，受到氣候變遷影響可能變動範圍介於-25.1%至+27.3%，增加量相對較高但兩者相近，顯示未來臺中地區地下水補注處於相對平衡狀態。

■濁水溪沖積扇：常年補注量約926.93百萬噸/年，受到氣候變遷影響可能變動範圍介於-34.3%至+42.4%，增加量高於減少量顯示未來濁水溪沖積扇地下水補注量可能增加。

■嘉南平原：地下水補注量約722.2百萬噸/年，受到氣候變遷影響可能變動範圍介於-19.9%至+30.4%，增加量相對較高顯示嘉南平原未來地下水補注量可能增加。

■屏東平原：地下水補注量約724.0百萬噸/年，受到氣候變遷影響可能變動範圍介於- 28.3%至+25.2%，減少與增加率相近。

■恆春平原：地下水補注量約33.7百萬噸/年，受到氣候變遷影響變動範圍介於-54.6%至+48.1%，增加率與減少率相近且變動範圍較大，顯示氣候變遷對恆春平原之地下水補注影響顯著。

■花東縱谷地區：常年地下水補注量約503.1百萬噸/年，受到氣候變遷影響變動範圍介於-34.4%至+34.4%，減少與增加率相同。

4.1.4 水議題調適

4.1.4.1 淹水調適

透過設施規劃與防洪系統能力提升亦為防災與調適之重要執行任務之一，以及搭配調適評估及其相關制度的擬定等，方能更完備的對抗氣候變遷帶來之衝擊。

1. 改善洪水預警系統

氣候變遷影響可能導致水利設施保護標準不足等情況，經濟部水利署 (2019) 執行了水災智慧防災計畫執行從2020年至2024年，與國科會「前瞻基礎建設計畫 - 數位建設 - 水資源物聯網計畫」，開始佈建大規模智慧環境感測系統建置「智慧防汛網」、「地下水智慧監測網」、「自來水智慧型水網」，即時取得相關資訊作為決策依據。其中，經濟部水利署 (2020) 於宜蘭縣政府管轄範圍進行更新洪水預警系統、淹水災害情境分析、自主防災社區淹水預報研究等，改善防洪能力，並朝向智慧化、雲端作業

發展。其中共建置363處感測設備 (包含水位計195支、淹水感測器81處、抽水站旁蒐設備19站、雨量站89處)；國家科學及技術委員會 (2022) 在新北市擬定氣候變遷調適策略，並應用關鍵基礎設施災害潛勢圖進行相關圖資套疊，瞭解可能受災程度，協助業者擬定相關防災措施；除了上述評估，該研究亦針對氣候變遷風險度進行分析，以及汛洪預警系統之技術提升等，發展防災相關科技，以利後續因應策略研擬與減少相關經濟損失。

2. 調適策略規劃與制度擬定

因應氣候變遷下，落實相關減災調適策略有其必要性。如蔡綽芳等人 (2017) 以二維漫地流模式進行現況和氣候變遷強降雨之模擬分析，並配合淹水成因探討，應用空間調適策略，將滯洪觀念帶入土地利用規劃內，亦可從中進行調適策略落實於都市空間規劃中，後續可將其成果進行地區性的整體調適效益評估；另外，堤防的建立可能影響土地利用之管理策略，故張學聖與徐敏純 (2021) 結合堤防效應的風險分析與風險認知面向，以臺南市為例，進行堤防效應之探討，並藉由風險變遷特徵分析探索該區域剩餘風險變遷之情形，再結合淹水災點空間型態分析指認堤防效應的潛在地區，最後藉由主觀認知的調查瞭解地方居民風險認知。

都市發展迅速，因此近幾年對於都市地區對抗洪水之跨域整合更為重視，例如國家科學及技術委員會 (2018；2019；2020) 委辦國立臺北大學不動產與城鄉環境學系以及銘傳大學都市規劃與防災學系，進行了氣候變遷下未來城市的洪水韌性評估與建構，以及整合自動化監測、水工試驗、技術與數據評估等，並以社會學習及流域治理思維，研擬面對與災共存之相關規劃與策略。另外，經濟部水利署、內政部建築研究所及地方政府等相關單位亦有針對各區現有設備、系統以及制度，進行新增或修正，藉此提升人民的防災意識，並針對氣候變遷災害進行策略擬定。

經濟部水利署持續推動相關淹水治理與調適研究，自2010年開始執行易淹水地區水患治理計畫 (2010年至2013年)，接著進行流域綜合治理計畫 (2014年至2019年) 及前瞻基礎建設計畫—縣市管河川及區域排水整體改善計畫 (2017年至2024年) 等，此部屬於改善各區河川、區域及農田排水、雨水下水道、海堤海岸防護等相關工程調整。

為降低淹水風險，經濟部水利署亦於2020年開始推動在地滯洪的治水策略，作為完成治

理計畫前的臨時因應措施，針對長期因豪雨導致淹水災害的雲林縣有才村當作示範區，在該村的西南側規劃2公頃在地滯洪，藉由加高田埂及架設閘門控管逕流量等工程方法，將原本有才寮排水承受的洪水量，透過農田當作淹水暫置區，藉此來共同分擔龐大的水量，此方法可降低渠道的負荷，也能減輕村落中的淹水災害。在2021年7月底的西南氣流造成之豪雨，雲林縣最大24小時累積雨量超過300mm，造成溪水暴漲，上述規劃的在地滯洪示範區約承納了3,600立方公尺的洪水，因此減少洪峰時排入渠道的水量，待雨勢趨緩及渠道水位下降後，再將暫置於農田的水量排入有才寮排水，有效降低有才村淹水風險。

為解決相關調適治理缺口僅完善相關工程方法等規劃，經濟部水利署持續進行中央管流域整體改善與調適規劃 (2021年至2026年) 等相關計畫，予以銜接工程調適及風險管理等觀念，並結合考量環境保育及策略管理，其中因應氣候變遷將持續推動整體改善及調適規劃、基礎設施防護及調適措施、土地調適作為、建造物更新改善及操作維護及營創調和環境等相關工作 (經濟部水利署，2019)。統計各河川局主辦至2023年之相關流域整體改善與調適規劃計畫，包含蘭陽溪、和平溪、磺溪、後龍溪、頭前溪、大安溪、烏溪、濁水溪、北港溪、朴子溪、鹽水溪、曾文溪、高屏溪、東港溪、卑南溪、秀姑巒溪、花蓮溪等17個集水區進行辦理，重點項目包含流域治理、河川管理、風險評估等。除了上述經濟部水利署持續推動外，國科會、環保署、營建署等相關單位，亦持續研擬相關調適示範與策略，透過各部會的積極參與，結合政策規劃與科學計畫量能，更有效提出能讓全民共同參與之相關調適指引。

4.1.4.2 乾旱及水資源調適

乾旱調適有賴整體水資源運用的提升，故乾旱及水資源調適從水的供給面、需求面及綜合管理等3個面向進行氣候變遷調適科研成果蒐集整理。臺灣的水資源運用仍以地面水為主，因為降雨時空差異需要蓄水設施調配水量，但水利設施調蓄能力有限，泥沙淤積又降低調蓄能力，衍生整體水資源管理的挑戰。尤其是在枯旱時期，民生、農業及工業用水等不同用水標的之競合往往使得用水調配更加艱鉅。

1. 水資源之供給面

氣候變遷之水資源供給，仍須依靠水庫調豐濟枯之能力，臺灣在新興水庫開發不易的情況下，應增加現有水庫入流量與庫容以強化水庫供水能力，若無法落實上游集水區

的永續經營管理，對水資源涵養劣化影響最為明顯 (何嘉浚等人，2019；曾俊偉等人，2020；李忠勳與葉信富，2020)。另外利用保水設施系統串聯以增加運用彈性，例如埤塘串聯、生態公園之蓄水池或提高田埂高度等手段，對於供水均有顯著之助益。 (Chien et al., 2021；Hsu et al., 2019；經濟部水利署，2021)。另外河川伏流水(Hyporheic water) 亦為另一個取水方式，例如高屏溪之高屏溪攔河堰上游已增設伏流水取水設施作為高濁度時期備援用水。伏流水包含部分地表水，為地表地下水交換區域，具有較易取得與較佳水質的優點，以九大地下水分區進行伏流水潛勢評估，顯示最高潛勢區為蘭陽平原，而最低潛勢區則為桃園中壢台地 (科技部，2020)。然而地下水資源 (包含伏流水) 的開發，需全面蒐集盤點該處水文資料 (如降雨量、地下水位、河川水位及河川流量)、地文資料 (如水力傳導係數、含水層厚度、河川坡度及河川沖淤情形) 等基本資訊，以及開發地下水資源之供水目的、類型，確認土地開發情形以及調查地表水/地下水質，或是潛在的土壤/地下水/排放廢水等污染源。盤點調查後根據水力傳導係數、坡度等水文地文特性後篩選合適開發的場域 (科技部，2021)，以避免對該地區造成不可逆之影響。政府為降低氣候變遷對缺水風險的影響目前已核定油羅溪、大安溪、烏溪及荖濃溪進行伏流水開發計畫以穩定區域供水 (經濟部水利署，2022)。

經由適當之川流水、水庫壩堰、地下水、水資源回收中心及農業用水調配等聯合調配運用可有效減輕供水壓力進而降低缺水風險 (李兆庭，2022；經濟部水利署，2018、2021；經濟部水利署水利規劃試驗所，2017)。但是聯合調配達到極限時仍須依靠新興水源，如再生水回用或海水淡化可為水資源供給缺口之備援水源，但衍生之能源消耗問題仍需後續研究 (Li et al., 2017； Hsu et al., 2019)。

2. 水資源之需求面

需求面調適需考慮不同用水標的需求，國內因應天然旱災，往往以農業節水和休耕應變，但休耕補償存在極大社會成本，因應氣候變遷的調適策略應有更具系統性與永續性，兼顧不同用水標的需求。例如考慮到糧食安全時，精進灌溉管理與減少輸水滲漏將是對用水需求與糧食安全可兼顧之調適措施 (Li et al., 2017；Lee et al., 2018)。提高用水效率亦有不同的方式，例如溝灌、噴灌或抽取埤塘用水，改變耕作方式如旱田直播或錯開整田期，作物品種改良如耐旱作物或二期轉作等 (許民錠與陳守泓，2022)。或增加水源涵養及提升韌性，例如造林、建構完善綠色基礎設施、坡地綠覆蓋、低衝擊開發設施與滯洪池，健全陸域水土保持功能，平衡水資源供需，強化民生及工業用水之效率與公平性等 (Fan, 2021)。

在臺灣水資源常面對淡水資源總量及能源使用的限制，故執行面上經濟可行性為最重要的因素 (Lee et al., 2018)。這部分國內應用水權量估算或原水成本計算等方式，計算各項措施之成本效益作為決策參考之用。例如Huang et al. (2021) 以臺灣中部地區為例，計算原水成本的方式，評估氣候變遷下之農業用水補償及工業部門供水之最佳組合，評估農業用水補償政策合理的調水補償價格。

3. 水資源之綜合管理面

氣候變遷對水資源的影響是複雜的系統性問題，已無法以單一方式應對，欲達到最大效益，各項調適選項須透過管理手段進行整合。執行上應先針對氣候變遷風險及調適目標，建立評估架構用以涵蓋所有可能風險及確認有效之選項，關於詳細之風險評估與調適規劃之論述請參閱第5章。水議題各項風險的評估方式，可參考IPCC AR5之風險定義進行水資源風險鑑別、TaiCCAT六步驟以及風險模板或世界資源研究所 (WRI) Aqueduct 水風險指標如用水壓力、用水消耗、供水年間變化以及供水季間變化等 (劉子明與鄧澤宇，2019；張薰云，2021；國科會，2022)。

在適當之架構下建構決策支援系統，整合公共用水與農業用水以兼顧不同使用者之需求。例如供給面整合地面水與地下水，在需求面整合公共用水與農業用水，以兼顧不同使用者以及不同層級的需求 (童慶斌等人，2018)。管理複雜的系統性問題，可運用人工智慧提取關鍵訊息，量化後的指標數據可作為決策前端之科學循證基礎，如水情預報、氣候變遷水文模型不確定性分析與評估、優化多目標水庫運行、極端水文事件減災適應策略。量化後的氣候變遷資料可套配在不同之長短期調適策略之中，提供不同面向之資訊判讀，支援決策者進行永續及高效率之調適管理。 (Chang & Guo, 2020；國科會，2022)。

4.1.5 氣候變遷下的水議題調適科研缺口

因應近年來之洪災及嚴重乾旱事件國內已累積許多經驗，於水資源營運管理上充分展現出抗旱韌性與完善洪災應變作為。然而隨著氣候變遷與社會經濟條件快速變化，未來勢必須面對更多嚴峻之挑戰。近年來部會科研計畫及學研機構已對分散式水資源調適措施、新興水源及備援用水機制、短期之用水需求推估及風險評估方法等議題進行研究，但對於新興水源後續衍生問題、水資源跨域研究及短期預警機制、農業用水需求在

不同區域與期作之影響、氣候變遷資料應用研究等議題則需要更多研究。針對上述議題，對未來氣候變遷之風險評估與調適提出以下建議：

4.1.5.1　資料面與研究量能

1. 提升資料解析度

依據文獻蒐集及相關衝擊與調適案例，可得知在淹水風險評估可使用之氣候變遷情境資料中，時資料僅有少數氣候模式之颱風事件資料，其他模式資料普遍為日、月、年等時間尺度，因此較缺乏時雨量之多模式可進行比較及綜合評估。在資料空間尺度，以全球氣候變遷資料尺度，大致為水平空間解析度25公里，在臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台目前提供推估資料之解析度為可至5公里網格動力降尺度，但對於臺灣繁複的地形來說，5公里解析度還是未足以反應臺灣整個地形及降雨分佈趨勢，針對淹水災害分析而言，目前資料精細度略顯不足，期盼能提升相關資料的解析度，予以減少資料前處理的工項與時間，方能更有效應用，提升分析成果的可參考性。

2. 加強氣候變遷資料詮釋

國內科研單位及相關政府部門已導入氣候變遷資料，進行系統模式模擬供需水狀況，但氣候變遷資料具有不確定性，僅利用單一情境或時段之推估結果較無法瞭解其他可能風險，例如：水資源經理報告 (2021) 僅考慮最劣情境 (RCP8.5) 下之供水情況。國內對於流量推估及相關上下游整合之研究亦尚少。因此，氣候變遷資料分析的不確定性如何引入決策的風險評估仍有改善空間，需投入更多研究能量。

近年來受益於多模式之發展，AR6資料增加更多模式以考慮更多氣候變遷之可能變化，但氣候變遷資料具有高度不確定性，建議應增加資料不確定性研究。不確定性主要來源包含：氣候變遷情境不確定性、氣候模式不確定性以及氣候變遷期程不確定性等。面對不同氣候模式預測的不確定性，IPCC主要從全部氣候模式推估值中保留90%推估值所涵蓋之非常可能範圍 (very likely range) 進行分析，排除較為極端的10%推估值，以避免納入過於極端的推估結果。例如氣候變遷對流量影響之推估，以模式中位數 (50%) 推估結果來看呈現為豐水期增加枯水期減少，但如果考慮所有模式之變動範圍，其百分比差異則相當大，存在著高度的不確定性。

3. 科學資料應用需要更深入研究

模式為介接氣候變遷推估資料進行水議題氣候變遷衝擊評估之重要工具，國內相關部會署及學研單位常用幾個淹水模式，大致採用規則格網具有穩定性高的特性並可進行批次模擬，但僅支援序列計算，模擬架構大多由降雨逕流、一維渠流、二維漫地流等三個模組進行整合，降雨逕流採用美國土壤保持局 (The U.S. Soil Conservation Service, SCS) 之逕流曲線法 (Curve Number method, CN method) 計算各子集水區逕流量作為模式的上游邊界，下游邊界以河川、排水出口潮位進行設定，整體而言現有設定方法係以河道、下水道溢淹範圍為主要模擬標的。若要評估氣候變遷對地下水資源之影響，從模式角度則需要有具備耦合地表水與地下水模擬功能之模式，才足以提供較具物理機制之整合性評估。考量國內外學者推崇多模式、多評估方法之綜合結果，避免單一模式與單一方法可能造成極端現象，建議結合不同的淹水模擬工具，整合各工具之優點(如可採非規則格網、支援平行計算等)，進行淹水多模式的評估，予以彌補氣候變遷淹水災況分析的不確定性。

4.1.5.2 預警機制及智慧管理調適

1. 加強颱風降雨與梅雨變遷的研究

臺灣水庫設計主要仰賴每年颱風季節帶來足夠的雨水將水庫蓄滿，以滿足枯水期用水需求。但在近年颱風侵臺次數減少，降雨量有限導致水庫蓄水情況惡化後，造成枯水期用水緊張。因此，臺灣水庫「蓄豐濟枯」功能正常與否對乾旱發生有非常重要影響。目前IPCC全球氣候模式未能提供颱風侵臺路徑與降雨量的推估，建議未來能加強與臺灣鄰近國家比如日本、韓國等國在區域氣候模式 (Regional Climate Model) 的合作開發，以期對颱風降雨能有更合理推估。另外，梅雨不來、偏少或延遲會導致枯水期延長，因此梅雨在氣候變遷情境下的推估將有助於瞭解枯水期結束時間點的變化趨勢，以提供水庫供水管理參考，減緩嚴重乾旱的衝擊。

2. 盤點河川洪水蓄存的可能性

臺灣河川坡陡水急，豐水期水量不易蓄水，往往需要依賴水庫蓄存豐水期水量，但目前仍有些河川不宜興建水庫。以高屏溪為例雖然具有豐沛水源，然未能蓄存以提供枯水期水源而排入大海，甚為可惜。早期有美濃水庫提案，但因地方反對而停建；後有南水北調到曾文水庫蓄存，卻因莫拉克颱風受損而暫停。因此，建議盤點具有類似蓄存高屏溪豐水期水量的工程與非工程可能方案。非工程方法比如蓄存豐水期水量於河川高灘

地，以延遲豐水期水量快速排出，進而抬升下游高屏溪攔河堰Q85的低水量。

3. 提升觀測設備的精度及基礎觀測資料品質

氣候變遷導致之水循環改變，可由近年來極端暴雨事件或枯旱事件發生機率頻繁，多數測站測到歷史上未發生之降雨強度，或歷史上極低之流量紀錄等，這些破紀錄事件顯示區域降雨特性可能已與過去不同，測站特性變化可能對於雷達降雨觀測精度產生影響，亦可能影響後續氣候模型之參數設定，現行觀測單位慣用之水文觀測儀器是否可完整記錄需要更多研究，建議可針對特定地區建置強降雨之觀測設備，或針對臺灣不同區域特性發展因地制宜觀測方法以符合需求，提升基礎資料的觀測品質。

4. 持續提升乾旱預警與預報能力

乾旱綜合管理計畫 (integrated drought management programme, IDMP) 為世界氣象組織 (World Meteorological Organization) 與全球水資源夥伴 (Global Water Partnership) 共同推動之計畫，其主要目的為提供乾旱政策與管理上指引方針以處理乾旱相關議題。IDMP提出乾旱管理應考慮：(1) 監測與預警、(2) 脆弱度與衝擊評估以及 (3) 風險減緩、準備、回應。聯合國減災辦公室 (United Nations Office for Disaster Risk Reduction 2021) 則建議未來在乾旱風險管理上應由被動抗旱因應轉為聚焦於乾旱預防措施，而乾旱監測與預警即為其中重要之環節，其主要目的為在乾旱事件發生之前就儘早啟動超前部署，以達到強化抗旱韌性之目的。除了透過分析連續不降雨日數及低降雨/低流量的年季變化，掌握過去變遷趨勢以提供水資源管理及規劃參考外，更應加強未來氣候變遷下的乾旱風險評估與調適等研究，面對乾旱頻率與規模持續提升的趨勢而言，仍需持續精進乾旱預警與預報能力，以預防並減緩乾旱發生之衝擊。

5. 運用人工智慧建構水資源管理決策系統

氣候的衝擊及風險逐漸複雜，可靠和準確的短期預警機制對於水資源管理和減輕自然災害至關重要。近年發展之人工智慧擅長從大量數據中高效提取關鍵資訊以提供複雜問題決策，可支援決策者實現永續及高效的水資源管理 (Chang & Guo, 2020)。建議應整合科研成果並投入人工智慧研究，進行各用水部門水量協調及需水預測，如民生與工業用水需求推估，或農業用水需求在不同區域與期作之影響。可能發展方向如水文預報、氣候變遷下之水文建模不確定性分析與評估、優化多目標水庫運行的人工智慧技術、極端水文事件減災調適策略。

4.1.5.3 水議題長期發展方針

1. 國家水資源戰略

水利單位面對近年已有效發揮水資源管理、調度、以及伏流水與地下水開發等因應措施。因應臺灣未來水資源風險增加，應運用更多科學資料進行風險評估與調適規劃研究，支持跨部會調適策略擬定之科學循證基礎，由中央整合並督導水利、環保、農業、工業、國土及地方政府等相關單位，除持續供水面的管理、調度外，宜更強化各單位的需水面管理。

完整之氣候變遷水資源風險評估需包含未來供給潛能與需求情境推估，所涉及時間尺度可達本世紀中與世紀末，目前國內對於未來需水量推估引用資訊，主要為經濟部水利署至2036年之用水需求推估，對於更長時間尺度之未來用水需求推估建議應投入相關科學研究。由於未來需水量變化涉及許多影響因子，例如未來社會經濟、產業、人口、城鄉產業發展等，需要建立不同社會經濟發展情境，進而推估不同區域之用水需求，例如參考IPCC AR6不同全球暖化程度情境或社會經濟成長預估模型等，對應建立本土需水量推估，扣合國際氣候變遷評估之社會經濟情境，搭配未來水資源供給之衝擊評估，以更系統性評估氣候變遷水資源風險，進而擬定因應氣候變遷之國家水資源戰略。

2. 公眾溝通

政府與學研單位的相關研究量能，可看出對於氣候變遷情境可能帶來之淹水衝擊的重視程度，但還是有部分民眾對於相關的調適推動願景抱持疑惑。因歷史颱風及豪雨帶給局部地區嚴重的淹水災情，導致居民認為防災就是要做到不淹水才是有解決的極端觀念，因此把氣候變遷的影響及過去造成的災害損失混為一談，造成溝通上的缺口，因此氣候變遷知識教育與宣導更趨重要。目前相關單位有建立網站，例如行政院環保署的同舟共濟臺灣氣候變遷調適平台、國科會的臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台、教育部的防災教育資訊網等，以及消防署防救災組織、臺灣災害管理學會、地方鄉鎮區公所組成的防救災團體等組織建立，並且辦理研討會、專家座談、社區說明會等相關活動，可藉此引導大家瞭解調適知識，搭配自我防災及政府相關系統及宣導，並跳脫過去受災的想法，評估該如何面對未來氣候變遷可能帶來的淹水災情，藉此降低受災風險及損失。

3. 水相關調適方案後續衍生問題之研究

水資源之調適措施目的在填補現況或未來之供水缺口，而部分非常態性的措施後續衍生影響須做更多研究，例如大規模農業停灌休耕補助對經濟之影響、新興水源如海水淡化或再生水回用等措施耗費的能源之成本效益分析或枯水期缺水導致之水力發電量不足，以火力發電替代發電對碳匯之影響等，建議應一併納入策略評估中。另外各方案對社會之影響亦需要考慮。面對氣候變遷導致的水資源衝突，雖然可運用綜合水資源管理 (Integrated Water Resources Management, IWRM) 解決與水有關的問題以改善社會福祉，但它不能完全掌握計劃干預措施的整體社會影響，故社會影響評估 (Social Impact Assessments, SIA) 同樣重要 (Lee et al., 2021)。

4. 乾旱管理計畫與乾旱緊急計畫的水資源管理策略

臺灣在近年幾場嚴重乾旱事件已充分展現出抗旱韌性與穩定性。然而隨著氣候變遷與社會經濟條件快速變化，未來在水資源經營管理上勢必面對更多嚴峻之挑戰。由於在氣候變遷影響下極端事件可能變得更加頻繁，為進一步強化臺灣水資源韌性與穩定性，針對氣候變遷下乾旱風險評估與調適，建議參考英國水資源經營管理架構 (圖4.1.5.1)。在規劃面宜融入氣候變遷情境中可能帶來得衝擊，在操作面上宜依據乾旱嚴重程度分別訂定乾旱管理計畫與乾旱緊急計畫，以提供乾旱期間與面對極端乾旱時更為精進的抗旱操作與因應架構 (游保杉等人，2022)。

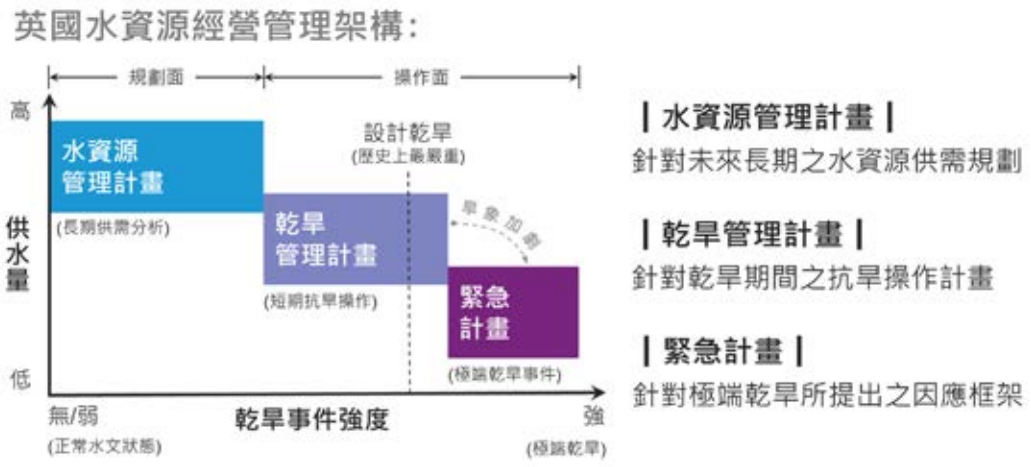


圖4.1.5.1　英國水資源經營管理架構

註:改繪自Affinity Water (2021) Drought Management Plan 2022, page 23.Figure 6. Approximation of relationships between out plans.

4.1.6 結語

氣候變遷對水資源的衝擊是全面性的，影響範圍涵蓋自然生態及人類社會所有與水有關之民生、農業以及工業用水，IPCC AR6 WGII報告亦指出氣候變遷衝擊及風險將變得更為複雜且更難以管理。多種氣候及非氣候風險相互作用，進而導致複合性的整體風險以及跨領域及區域的連動性風險。考慮氣候變遷帶來的多方面影響，不同用水部門間須進行全面性的風險評估，尤其是水、農業及能源領域間的相互影響，例如氣候變遷使水資源短缺，氣象乾旱導致土壤水分及地下水量減少導致水文乾旱，上升的氣溫又使作物灌溉用水需求增加；乾旱、河川流量季節性變化及水溫升高，影響水力發電和火力發電效率；另外能源和工業部門對淡水的需求的增加可能引發跨部門的水資源競合等。上述例子顯示選擇調適選項須先釐清各項目之關鍵問題及交互影響，再進行供需間軟硬體的配合及制度上的調整，但是無論是區域供水系統串聯或管理調配水資源，仍有可能面臨軟硬體調整之極限，故各項減少脆弱度之調適作為仍應持續推動。

近年臺灣之研究及政府單位報告結論指出，降雨極端化、枯水期連續不降雨日數增加、流量豐枯差距日益明顯等因素，已使得水資源調配變得更加複雜，逐步上升的氣溫將加劇水循環及增加水資源的調配難度。近年來水議題的範疇與過去科學報告整理之關鍵問題類似，例如降雨豐枯極端化問題、集水區保育、地下水保育、新興備源水源、用水分配、地下水超抽、海平面上升及地層下陷導致淹水加劇等議題，但各議題受到全球暖化加劇之衝擊程度不一，故氣候變遷調適策略的執行先後順序及強度均須配合調整。水議題涵蓋多個權責單位，建議建立跨部會合作機制或統合管理單位，盤點實際用水量分配確保最大化水資源利用及存蓄，以利在水資源有限的情況下妥善分配調適能量，確保各選項間可發揮最大之共效益，並制定法令及編列預算以維持氣候變遷基礎資料研究，如基礎觀測技術提升工作及加強模擬資料解析度的研究等，以科學資料作為循證基礎完善國家水資源戰略訂定。除了綜合水資源管理之外，宜推動由下而上策略以加強公眾對於氣候變遷影響水議題急迫性之認知。

參考文獻

內政部建築研究所 (2020)。**因應氣候變遷土地使用規劃減洪調適策略績效評估研究**。國立成功大學執行。

李心平、黃志偉、陳彥璋、董東璟、李自強、韓榮華 (2018)。高雄市暴潮衝擊評估與調適策略。**中華防災學刊，10** (2)。

李昱祺、王嘉琪、翁叔平、陳正達、鄭兆尊 (2019)。臺灣氣象乾旱特性未來趨勢推估。**大氣科學，47** (1)，66-91。

李忠勳、葉信富 (2020)。臺灣南部流域長期降雨與逕流量變異之探討。**臺灣鑛業，72** (1)，10-24。

李兆庭 (2022)。**水資源系統串接之頻譜網路最佳化分析**。國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學研究所碩士論文。

何嘉浚、曾俊偉、李嘉若、林鎮洋、莊智瑋 (2019)。集水區土地利用變遷及降雨量變化對水資源涵養能力影響之研究。**臺灣林業科學，34**，217-233。

陳雅惠、王瓊芯、李俊霖、陳郁蕙 (2018)。農業損失空間分析與政策涵義：以雲嘉南淹水潛勢地區為例。**調查研究-方法與應用，41**，7-55。

張紹峰、羅偉誠 (2021)。**濁水溪沖積扇之地層下陷整治策略探討**。第25屆水利工程研討會，131-132。

張學聖、徐敏純 (2021)。堤防效應下之水災風險變遷與風險認知研究。**都市與計劃，48** (2)，107-132。https://doi.org/10.6128/CP.202106_48 (2).0001。

張薰云 (2021)。**應用世界資源研究所之水風險指標於評估桃園水資源受氣候變遷衝擊**。國立臺灣大學氣候變遷與永續發展國際學位學程碩士論文。

許民錠、陳守泓 (2022)。牡丹水庫集水區降雨分布與長期趨勢分析。**地理研究，76**，139-159。

國家科學及技術委員會 (2017)。地**層下陷區洪氾與水資源綜合管理研究-以屏東平原及沿海地區為例-子計畫：高空間解析度即時互動淹水模擬技術研發及水資源利用之研究 (III)**。國立屏東科技大學土壤與水工程國際碩士學位學程執行。

國家科學及技術委員會 (2018)。**氣候變遷下未來城市之洪水韌性評估與建構-一個跨領域之整合性時空模擬架構 (I)**。國立臺北大學不動產與城鄉環境學系執行。

國家科學及技術委員會 (2019)。**氣候變遷下未來城市之洪水韌性評估與建構-一個跨領域之整合性時空模擬架構 (II)**。國立臺北大學不動產與城鄉環境學系執行。

國家科學及技術委員會 (2020)。**氣候變遷下未來城市之洪水韌性評估與建構-一個跨領域之整合性時空模擬架構 (3/3)**。國立臺北大學不動產與城鄉環境學系執行。

國家科學及技術委員會 (2022)。**臺灣氣候智慧調適與跨領域氣候風險評估之研究-發展氣候智慧調適演算法-跨領域風險評估與動態調適路徑建構 (第3年)**。國立中興大學土木工程學系執行。

國家科學及技術委員會 (2022)。**極端災害下之韌性城鄉與防災調適-極端災害下之韌性城鄉與防災調適-新北市 (I)**。國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心執行。

曾俊偉、陳起、吳憶茹、林鎮洋 (2020)。應用集水區水文模式SWMM評估德基水庫集水區之水資源涵養量。**臺灣林業科學，35**，103-121。

曾宏偉、楊道昌、郭振民、張廣智、郭純伶、鄭欽韓、游保杉 (2022)。氣候變遷下可能水文情境資料特性分析：以臺南地區為例。**農業工程學報，68** (1)，25-38。

游保杉、曾宏偉、楊道昌、郭振民 (2022)。淺談臺灣水資源經營管理與策進建議。**水資源管理會刊。24** (1)，11-20。

童慶斌、曹榮軒、彭柏文、陳沛芫、李苑華、鍾秉宸 (2018)。氣候智慧水資源核心研究。**臺灣土地研究，21** (2)，181-208。

農業部 (2016)。氣候變遷下農業灌溉水資源調適因應策略。**農政與農情，285**。

經濟部水利署 (2014)。**氣候變遷下臺灣九大地下水資源區地下水潛能變化之研究(1/2)**。財團法人成大研究發展基金會執行，經濟部水利署委辦計畫。

經濟部水利署 (2015)。**氣候變遷下臺灣九大地下水資源區地下水潛能變化之研究(2/2)**。財團法人成大研究發展基金會執行，經濟部水利署委辦計畫。

經濟部水利署 (2018)。**水庫集水區保育計畫之經濟效益評估研究**。國立臺灣大學執行，經濟部水利署委辦計畫。

經濟部水利署 (2019)。**因應氣候變遷洪災韌性提升策略建構(1/2)**。財團法人成大研究發展基金會執行。

經濟部水利署 (2019)。**水災智慧防災計畫(109-113)**。

經濟部水利署 (2020)。**109年宜蘭縣智慧防汛網建置與測試計畫**。宜蘭縣政府執行。

經濟部水利署 (2021)。**臺灣各區水資源經理基本計畫**。

經濟部水利署 (2021)。**109年各標的用水統計年報**。

經濟部水利署 (2022)。**臺灣水文年報總冊**。

經濟部水利署 (2022)。**伏流水開發工程計畫第二期 (核定本)**。

經濟部水利署水利規劃試驗所 (2022)。**氣候變遷對重要供水水系水源水量影響分析**。

林宗毅 (2019)。**發展氣候、水資源和糧食跨領域整合模式與結合氣候智慧調適演算法之應用-以桃園為例**。國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學研究所，碩士論文。

林冠州 (2022)。氣候變遷下流域環境及永續農業調適策略之制定及評估-以石門水庫上游集水區為例。**農業工程學報，68** (4)，63-79。

黃振洋 (2021)。**氣候變遷下石門水庫集水區衝擊評估：AR5多模式推估資料之應用**。國立中央大學水文與海洋科學研究所，碩士論文。

陳艾琳 (2020)。**以水足跡指標建立氣候變遷下之再生水廠效益評估方法**。國立臺灣大學工學院環境工程學研究所，碩士論文。

科技部 (2020)，**區域穩定供水與減災總合策略研究與成效評估-總計畫暨子計畫:以指標評估方法結合數值模式量化分析河川伏流水豐枯時期地表地下水交換機制(III)**。中央大學應用地質研究所執行，科技部補助專題研究計畫。

科技部 (2021)，。**區域地下水智慧管理模式及技術研發-區域地下水智慧管理模式及技術研發(4/4)**。國立中央大學土木工程學系執行。

趙益群、陳俊哲、蕭逸華、李欣輯、許至璁、陳永明 (2021)。**土地變遷模式與二維淹水模式整合初探：以臺南市安南區淹水減災為例**。國家災害防救科技中心。技術報告，NCDR 109-T17。

趙益群、李欣輯、蕭逸華、陳永明 (2023)。土地利用變遷工具於未來都市淹水衝擊之應用研究。**中國土木水利工程學刊，35** (7)。

劉子明、林祺恒、童裕翔、陳正達 (2023)，以TCCIP AR6統計降尺度日資料探討臺灣未來水資源衝擊。**土木水利，50** (3)，1-9。

鄧澤宇、劉子明、鄭克聲 (2020)，**水資源領域氣候變遷危害與衝擊圖資建製成果**。國家災害防救科技中心。

蔡綽芳、柳文成、董娟鳴、陳柏翰、陳志鴻、呂韋儒 (2017)。氣候變遷下減洪規劃應用於都市計畫通盤檢討之探討－以新北市蘆洲都市計畫區為例。**建築學報，99_S**，49-71，https://doi.org/10.3966/101632122017030099011

謝東洲、蕭逸華、陳麒文、李欣輯、趙益群、葉克家 (2019)。氣候變遷下淡水河主河道防洪及沖淤探討，**中國土木水利工程學刊，31** (4)，327-336。

Chang, F., & Guo, S. (2020). Advances in hydrologic forecasts and water resources management. *Water, 12*(6), 1819. https://doi.org/10.3390/w12061819

CHIEN, W. H., HO, C. C., CHIU, W. C., WANG, T. S., & TSAI, Y. C. (2021). A Study on the Benefits of Water Resources Utilization for Connecting Farm Ponds in Taoyuan. *Taiwan Water Conservancy, 69*(4), 1-11. https://doi.org/10.6937/TWC.202112/PP_69(4).0001

Chen, Y., Lin, H., Liou, J., Cheng, C., & Chen, Y. (2022). Assessment of flood risk map under climate change RCP8.5 scenarios in Taiwan. *Water, 14*(2), 207. https://doi.org/10.3390/w14020207

FAN, C. (2021). Prospect of Adaption Perspectives for Water Resource Management in Post-Warming Era. *Taiwan Water Conservancy , 69*(3), 1-5. https://doi.org/10.6937/TWC.202109/PP_69(3).0001

Hsu, C., & Hung, C. (2019). *Sustainable development of climate change resources: About recycling of water resources in maple Park, Taichung, Taiwan.* E3S Web of Conferences, 117, 00016. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911700016

Hsiao, Y., Chen, C., Chao, Y., Li, H., Ho, C., Hsu, C., & Yeh, K. (2022). Development and application of

flood impact maps under climate change scenarios: A case study of the Yilan area of Taiwan. *Frontiers in Environmental Science, 10*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.971609

Huang, Y., Lee, C, & Hong, Y. (2021). Water Supply Portfolio Planning and Policy Evaluation under Climate Change: A Case Study of Central Taiwan. *Water, 13,* 567. https://doi.org/10.3390/w13040567

Huang, S., Mahmud, K., & Chen, C. (2022). Meaningful trend in climate time series: A discussion based on linear and smoothing techniques for drought analysis in Taiwan. *Atmosphere, 13*(3), 444. https://doi.org/10.3390/atmos13030444

Lee, M., Yu, C., Chiang, P., & Hou, C. (2018). Water–energy nexus for multi-criteria decision making in water resource management: A case study of Choshui river basin in Taiwan. *Water, 10*(12), 1740. https://doi.org/10.3390/w10121740

Lee, C., Huang, K., Kuo, S., Cheng, C., Tung, C., & Liu, T. (2021). Development of a social impact assessment for the water environment: A professional perspective. *Water, 13*(23), 3355. https://doi.org/10.3390/w13233355

Li, M., Tseng, K., Tung, C., Shih, D., & Liu, T. (2017). Assessing water resources vulnerability and resilience of southern Taiwan to climate change. Terrestrial, *Atmospheric and Oceanic Sciences, 28*(1), 67-81. https://doi.org/10.3319/tao.2016.08.23.02(cca)

Li, H., Hsiao, Y., Chang, C., Chen, Y., & Lin, L. (2021). Agriculture adaptation options for flood impacts under climate change—A simulation analysis in the Dajia river basin. *Sustainability, 13*(13), 7311. https://doi.org/10.3390/su13137311

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2021). *GAR Special Report on Drought 2021*. Geneva.

4.2 坡地

林銘郎[1]、陳麒文[2]、朱芳儀[3]

[1]國立臺灣大學土木工程學系、[2]國立臺灣大學地質科學系、[3]國家災害防救科技中心

摘要

臺灣地處於環太平洋地震帶，受到板塊運動和季風等自然力量的影響，坡地災害頻繁發生。過去的土砂災害經驗不斷提醒我們需要加強防災措施。歷年來已制定相關法規，如災害防救法、水土保持法等，並投入基礎調查及科學研究，包括土石流潛勢溪流調查、氣候變遷推估資料產製等。在氣候變遷對坡地的影響及衝擊上，根據IPCC的第六次評估報告 (The Sixth Assessment Report, AR6) 指出，氣候變遷可能導致崩塌等與水相關的災害增加，對山區居民、基礎設施與經濟帶來嚴重風險。國內研究顯示，氣候變遷可能會增加極端降雨事件的頻率與強度，這可能對坡地災害產生嚴重影響。過去，國內的研究多以歷史降雨資料為基礎，用於評估氣候變遷對坡地災害的影響，並以氣候變遷推估資料幫助瞭解未來氣候情境下坡地災害的變化趨勢。近年來，隨著電腦運算效能的提升及氣候變遷模式的精進，坡地災害所使用之氣候變遷推估資料及研究方法也變得更加多元，有效減少未來評估的不確定性，並提高結果的可信度。綜整相關研究顯示，RCP8.5情境下，北部區域平均崩塌率由基期0.16%至0.47%，21世紀末提升為0.23%至0.77%，中部區域平均崩塌率則由1.3%至3%變為1.4%至4%，可能的衝擊將增加。而南部區域平均崩塌率由基期1.7%至2.9%，在21世紀中增加至3.2%，21世紀末則下降至1.3%，未來的衝擊具不確定性。在調適方面，傳統方法主要是以反應性和自主性為主，包括硬體結構措施和早期預警系統等。然而，越來越多國家採用基於生態系統的調適方法和以自然為本的解決方案，並重視社區與利害關係人的參與。未來在研究和調適上更應注重科研、治理及思維等方面的強化，以提升在氣候變遷對坡地衝擊評估及調適的完整規劃。

4.2.1 前言

臺灣地處於環太平洋地震帶，活躍的板塊運動使我國地質構造複雜且破碎，並造就陡峭地形，全島有70%以上的面積為山坡地及高山林地。同時，臺灣也位於東亞季風區，受到東北季風、西南季風、梅雨季及颱風等天氣系統的影響，整體平均降雨量豐沛，且季節性降雨差異大。地震及極端降雨使土壤鬆動，坡面岩屑、岩石等材料崩落，造成邊坡土石的不穩定，並驅動土壤沖蝕、地滑、土石流等自然現象的發生。當這些自然現象造成人類生命財產、社會經濟等損失時，統稱為坡地災害。近年來，因人類經濟發展對空間的需求增加，生活足跡逐漸往山坡地移動，道路開發和社會經濟活動，過度的開發及超限利用，將使坡地災害的發生更加頻繁。本小節將回顧臺灣過去發生之重大坡地災害事件及「臺灣氣候變遷科學報告 2017」(國家災害防救科技中心，2018) 所提出的坡地災害衝擊之重點成果，評述近年來科學研究中的新進展。

依據土體不同的運動型態及材料種類，經濟部地質調查及礦業管理中心 (原經濟部中央地質調查所) 將其分為落石、岩體滑動、岩屑崩滑及土石流四類，如表4.2.1.1所示 (楊樹榮等人，2011)。本節中岩屑崩滑、岩體滑動部分概以崩塌稱之。本節主要說明氣候變遷下崩塌及土石流的衝擊結果。

表4.2.1.1　坡地災害類型

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">運動型態</td><td colspan="3">材料分類</td></tr>
<tr><td rowspan="2">岩石</td><td colspan="2">工程土壤</td></tr>
<tr><td>岩屑</td><td>土</td></tr>
<tr><td colspan="2">墜落</td><td rowspan="2">落石</td><td colspan="2" rowspan="3">岩屑崩滑</td></tr>
<tr><td colspan="2">傾覆</td></tr>
<tr><td rowspan="2">滑動</td><td>圓弧形</td><td rowspan="2">岩體滑動</td></tr>
<tr><td>平面型</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2">流動</td><td colspan="3">土石流</td></tr>
</table>

(資料來源：楊樹榮等人，2011)

臺灣歷史上發生許多重大坡地災害事件，如1990年歐菲莉颱風挾帶豪雨，花蓮秀林鄉銅門村發生土石流災害，造成29人死亡、多人失蹤及多處房屋倒塌；1996年賀伯颱風造成全臺多處交通停駛，臺北地區多處淹水，中南部沿海則有海水倒灌之情事，南投信義豐丘村野溪爆發土石流，土砂掩埋14公頃果園，造成21戶房屋毀損，2人死亡；1999

年集集大地震 (又稱921大地震) 造成南投九份二山大面積崩塌，活埋40位村民，並形成數個堰塞湖，其他地區有多起房屋倒塌、公路嚴重下陷等災情，死亡人數超過2,000人；2001年納莉颱風在臺北多處地區創下單日降雨量紀錄，並引發多起土石流災害，共有94人死亡，10人失蹤，工商及農林漁牧損失超過82億元；2009年莫拉克颱風的累積降雨量超過臺灣年平均雨量2,500mm極端降雨造成崩塌、交通中斷、橋梁斷裂等災情，其中，最嚴重則為高雄甲仙小林村發生大規模崩塌，導致491名村民罹難，另在那瑪夏、六龜等區域也發生土石流沖毀民宅等災情；2015年蘇迪勒颱風主要影響大臺北及宜蘭地區，其中，新店廣興里、烏來忠治里等多處發生崩塌及土石流 (資料來源：國家災害防救科技中心－全球災害事件簿網站)。歷史災害的經驗為我們帶來省思及改變，為因應及預防坡地災害的發生，部會署頒布相關法規，並投入科學研究及調適措施研發。

例如在1996年賀伯颱風發生土石流災害後，農業部農村發展及水土保持署 (原行政院農業委員會水土保持局) 展開土石流潛勢溪流的調查與劃設，並傳遞土石流防災的觀念及常識，自2005年開始針對具土石流潛勢溪流的村里，培訓當地民眾成為土石流防災專員，提升社區自主防災能力；1999年9月21日集集大地震後，總統於2000年7月頒布「災害防救法」，並因應實務操作持續修訂；因應2009年莫拉克颱風造成小林村滅村重大災害，訂定大規模崩塌的定義，並展開全臺大規模崩塌潛勢區調查，至今篩選出98處優先辦理區 (資料來源：土石流及大規模崩塌防災資訊網)。近年來，受氣候變遷的影響，災害發生的頻率與強度在未來可能有所提升，為提前掌握可能的變化與衝擊，國家科學及技術委員會 (國科會) 推動「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 產製符合臺灣地形特性的降雨資料，並於聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC, 2007, 2014) 第四次評估報告 (the 4th Assessment Report, AR4) 及第五次評估報告 (the 5th Assessment Report, AR5) 公布後，整理國內氣候變遷相關研究，於2011年及2017年發布臺灣氣候變遷科學報告，供國內氣候變遷科研參考。

「臺灣氣候變遷科學報告 2017」(國家災害防救科技中心，2018) 第二章的災害衝擊指出，劇烈降雨是誘發坡地災害的關鍵因子，並盤點衝擊研究使用的降雨資料及評估模式。災害衝擊主要分為崩塌及土石流兩類，而評估方式亦分為兩類，以歷史事件推估氣候變遷極端事件降雨量，或是直接使用氣候變遷推估資料。透過歷史降雨資料評估坡

地災害潛勢的研究中，多採用多變量分析的羅吉斯迴歸，搭配100年重現期連續3天累積雨量、100年重現期最大48小時雨量等降雨指標，結合氣候變遷下的降雨強度推估，評估可能的土砂衝擊。另一方面，以氣候變遷推估資料進行分析，多數研究使用CMIP3統計降尺度資料，訂定降雨驅動因子，建置崩塌風險評估模式，瞭解氣候變遷可能帶來的衝擊。吳亭燁等人 (2014) 及李欣輯等人 (2015) 以TRIGRS及FLO-2D數值模式，搭配TCCIP計畫產製之颱風降雨資料 (MRI-WRF)，模擬氣候變遷下崩塌與土石流綜合的災害衝擊。除透過模式模擬坡地災害潛勢外，也以指標呈現氣候變遷下的坡地災害風險 (陳韻如等人，2014)。IPCC (2012；2014) 將風險定義為危害度、暴露度、及脆弱度三因子的交集 (圖4.2.1.1)，危害度主要為氣候事件，暴露度是指保全對象或範圍，例如人口密度，而脆弱度則是保全對象對危害的敏感程度及調適能力。陳韻如等人 (2014) 將危害度設為發生極端降雨 (24小時累積雨量達350mm以上) 之機率，脆弱度則是歷史崩塌地等地質地形條件，人口密度為暴露度，並以三因子之乘積作為坡地災害風險。進一步，劃分等級，繪製風險圖資，呈現氣候變遷下坡地災害風險熱區。



圖4.2.1.1　風險組成
(資料來源：IPCC, 2014)

近年來，隨著電腦效能提升及氣候變遷模式精進等條件，在坡地災害所使用之氣候變遷推估資料及研究方法皆更加多元，概可分為氣候變遷推估資料及衝擊評估方法兩面向。

在氣候變遷推估資料部分，「臺灣氣候變遷科學報告 2017」(國家災害防救科技中心，2018) 中多使用CMIP3模式資料進行集水區之坡地災害衝擊評估。隨著模式資料的演進，朱芳儀等人 (2022) 使用CMIP5動力降尺度資料MRI-WRF來推估大漢溪氣候變遷下崩塌衝擊。MRI-WRF只有基期 (1979年至2003年) 及21世紀末 (2075年至2099年) 二時期，對於政策或中短期措施的規劃，較難應用參考。TCCIP計畫使用美國地球物理流體力學實驗室 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL) 發展的HiRAM全球模式，透過動力降尺度產製出具有臺灣地形氣候特徵之基期 (1979年至2008年)、21世紀中 (2039年至2065年)、及21世紀末 (2075年至2099年) 三時期的颱風事件資料HiRAM-WRF。HiRAM-WRF提供21世紀中時期的氣候資訊，並可用來模擬崩塌潛勢，瞭解坡地衝擊。從過去到現在氣候變遷推估資料的演進，提供更多時期及更龐大的資料，以利我們掌握未來氣候變遷的可能性及其帶來的坡地衝擊。

衝擊評估方法部分，除過去常用之數值模式、經驗模式、統計模式等方法外，機器學習及人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 方法也有所發展。例如，林彥廷等人 (2021) 及吳俊毅等人 (2022) 透過機器學習方法評估崩塌潛勢；水土保持局 (2019b) 以過去累積的大量崩塌資料庫，包含颱風事件、雨量、崩塌地圖層等，透過AI發展坡地崩塌風險評估模式，以快速運算，可應用於崩塌預警系統，協助防災應變決策。此外，農業部農村發展及水土保持署 (原行政院農業委員會水土保持局) 所開發之巨量空間資訊系統BigGIS，在多年的資料整合後，已積累大量官方土砂災害資料，可作為全面性的坡地災害潛勢資訊來應用。

4.2.2　氣候變遷對坡地的影響及衝擊

根據IPCC第二工作小組「衝擊、調適與脆弱度」報告 (AR6 WGII) 跨章節第5章「山區 (mountains)」指出，過去30年，山區坡地與氣候和天氣相關的災害有增加的趨勢 (Froude & Petley, 2018; Stäubli et al., 2018)，其中洪水、土石流及崩塌等災害對山區人口影響最大 (Stäubli et al., 2018)。崩塌是全球最致命的災害之一，1995年至2014年因崩塌而死亡的人數超過150,000人 (Haque et al., 2019)。山區自然災害可能產生複合性和連動性的衝擊，對人民、生態系統、及基礎設施造成嚴重影響，並導致重大的外溢效應，進而產生破壞性的衝擊 (Nones & Pescaroli, 2016; Kirschbaum et al., 2019; Schauwecker et al., 2019)。根據逾

300份的觀測衝擊影響參考資料，確認其對世界所有主要山區和各種系統的重大影響。結果顯示，氣候變遷對山區衝擊的貢獻程度為中等到高，意味著山區自然和人類系統對氣候變遷具有高敏感性。崩塌等與水相關的災害將在1.5°C到3°C全球暖化程度中顯著增加，這將對許多山區的人民、基礎設施、及經濟帶來嚴重風險。未來季節性增加之極端降雨等變化，將可能產生連動風險與複合性災害，導致原始事件發生地外的區域也受到影響 (Cui & Jia, 2015; Beniston et al., 2018; Shugar et al., 2021)。

風險三因子為危害度、暴露度、及脆弱度，坡地災害風險可為崩塌、土石流等造成保全對象損失的機率或可能性；坡地災害衝擊可表示為降雨危害度X地質脆弱度，而災害風險則需視關注對象之暴露度而定。坡地災害風險三因子如表4.2.2.1所示。

表4.2.2.1　坡地災害風險三因子

風險因子	因子
危害度	氣候：時雨量、累積雨量
暴露度	關注對象的分布空間：人口分布、收容處所、聚落、基礎設施、崩塌地
脆弱度	依對象而定： 人—受災韌性、環境與災害意識、環境與災害教育 收容處所—建築結構韌性、重要設施韌性、充足安全的水資源、收容能力 聚落—防災能力、人口組成、教育程度、充足安全的水資源、應變計畫 基礎設施—建築結構韌性 崩塌地—地文地質
衝擊 (危害度×脆弱度)	崩塌及土石流的機率或程度

(資料來源：何謹余等人，2020)

Yang et al. (2023) 指出，臺灣1958年到2021年間發生自然災害的頻率與強度越來越高。在颱風、洪水、地震等多種災害中，水文氣象災害最為常見，並且超過97%的水文氣象災害會直接或間接造成崩塌災害。

相關研究依據不同的氣候變遷推估資料，評估臺灣未來氣候變遷下的降雨變化趨勢。「臺灣氣候的過去與未來」 (國家災害防救科技中心，2018) 一書顯示，RCP8.5情

境下，21世紀末臺灣濕季 (5月到10月) 降雨將可能增加，以南部地區較為明顯，另外，每年平均侵臺颱風數將減少，但強颱比例與降雨強度有增加的趨勢。在未來降雨漸趨極端的情況下，對於坡地災害將可能造成影響。

國家科學及技術委員會(2018)應用動力降尺度連續時雨量資料，計算基期及21世紀末兩時期每一小時的有效累積降雨量，並排序所有的雨量值，選取第99.5百分位作為該網格點誘發崩塌的數值。進一步，以兩時期的變化百分比評估氣候變遷下降雨變化趨勢。結果顯示，21世紀末相較於基期，有效累積雨量增加的區域主要位於西半部，減少的區域則主要在東半部，變化幅度介於+51.4%至-39.3%。

臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台，透過危害指標及動力降尺度資料HiRAM-WRF資料，繪製全臺24個集水區之危害指標圖，以瞭解氣候變遷下各集水區極端降雨變化趨勢。依不同延時訂定出不同的危害指標，相關分析參考圖4.1.1.1。若以不同指標選用各集水區基期及21世紀中排名前30%之颱風事件作為極端事件，計算各集水區之降雨變化率，以最大24小時累積雨量變化率來看，在RCP8.5情境下，21世紀中相較基期，整體降雨趨勢皆增加之集水區主要分布在東北部，變化幅度有達50%至75%以上的集水區主要發生於立霧溪、花蓮溪、卑南溪。全臺24個集水區之危害指標圖可參考「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」的調適百寶箱坡地頁面。

進一步，可將氣候變遷推估資料搭配具有地文地質特性的模式進行崩塌潛勢模擬，評估氣候變遷下可能的崩塌衝擊。依據蒐整之研究結果，以代表性集水區之方式，綜整呈現臺灣北、中、南三區在氣候變遷下的崩塌衝擊趨勢，如圖4.2.2.1。北部地區包含大漢溪上游、新店溪集水區；中部地區有濁水溪、大甲溪集水區；南部地區則有曾文溪上游、高屏溪集水區。北部地區透過MRI-WRF動力降尺度資料搭配TRIGRS數值模式、經驗模式、及羅吉斯迴歸統計模式評估氣候變遷下的坡地衝擊。在RCP8.5情境下，北部地區之基期平均崩塌率為0.16%至0.47%，21世紀末則為0.23%至0.77%，整體結果顯示，未來坡地衝擊有加劇的可能。當中，位於大漢溪上游集水區的下蘇樂、石磊、泰崗等地區位於現況衝擊高且未來衝擊增加之區域，應提前進行更細部的衝擊評估，並思索因應策略 (李欣輯等人，2018；Chen et al., 2019；朱芳儀等人，2022)。中部地區主要選用MRI-WRF動力降尺度資料各時期所有事件、平均雨量或總雨量排序前10%颱風事件進行衝擊評估。透過HEC-HMS模式評估上游的流量，並以TRIGRS數值模式瞭解上游產

砂量，再應用FLO-2D、羅吉斯迴歸模擬土石流，分析集水區整體的土砂變化及衝擊。RCP8.5情境下，21世紀末相較基期，中部地區平均崩塌率提升，由1.3%至3%變為1.4%至4%，土石流平均土方量也具提升趨勢，由22.1萬立方公尺至165.2百萬立方公尺變為24.9萬立方公尺至783.6百萬立方公尺。整體結果顯示，氣候變遷可能造成的衝擊將增加 (李欣輯等人，2016；吳亭燁等人，2017；李欣輯等人，2017)。南部地區是使用MRI-WRF、HiRAM-WRF動力降尺度資料搭配TRIGRS模式進行坡地衝擊評估。MRI-WRF資料是依最大24小時累積降雨量排序，挑選基期及21世紀末前10場，而HiRAM資料則是依最大24小時累積降雨量排序，挑選基期及21世紀中前30%颱風事件進行模擬。南部地區基期平均崩塌率為1.7%至2.9%，21世紀中為3.2%，21世紀末則是1.3% (李欣輯等人，

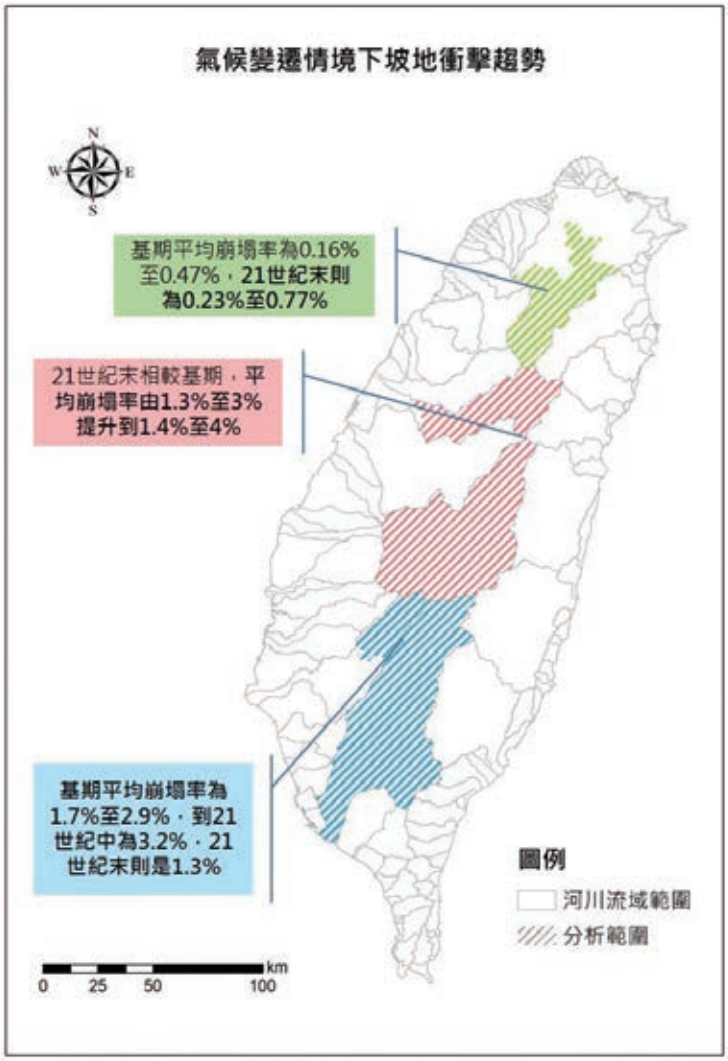


圖 4.2.2.1　氣候變遷情境下的坡地衝擊趨勢
（資料來源：TCCIP計畫產製）

2015；國家科學及技術委員會，2022)，未來氣候變遷可能帶來的衝擊具不確定性。

陳韻如等人 (2024) 透過指標疊加統計法，評估全臺氣候變遷下之坡地災害衝擊趨勢，並針對特定單元計算坡地災害風險等級。以評估全球暖化程度2°C情境下最小人口統計區之坡地災害風險為例，危害度指標採用CMIP6統計降尺度日雨量資料，分析1日降雨量超過350mm的機率，以此表示全球暖化程度下之極端降雨危害度；脆弱度指標則是使用經濟部地質調查及礦業管理中心 (原經濟部中央地質調查所) 2014年及2016年公告之岩屑崩滑、岩體滑落、落石、順向坡等資料，及農業部林業及自然保育署 (原行政院農業委員會林務局) 2018年崩塌地圖層進行評估；暴露度指標為最小人口統計區之人口密度，最小人

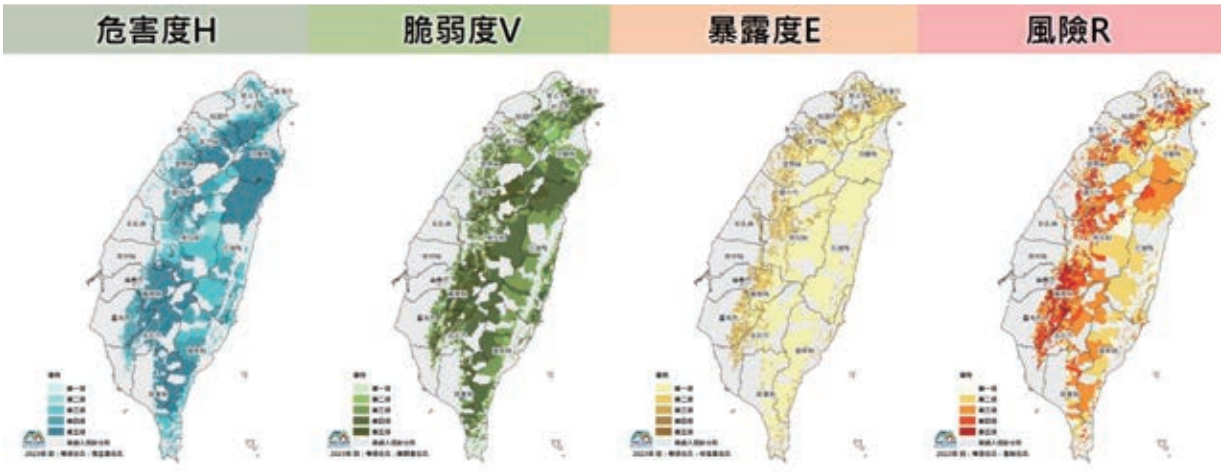


圖 4.2.2.2　風險圖組成
(資料來源：陳韻如等人，2024)

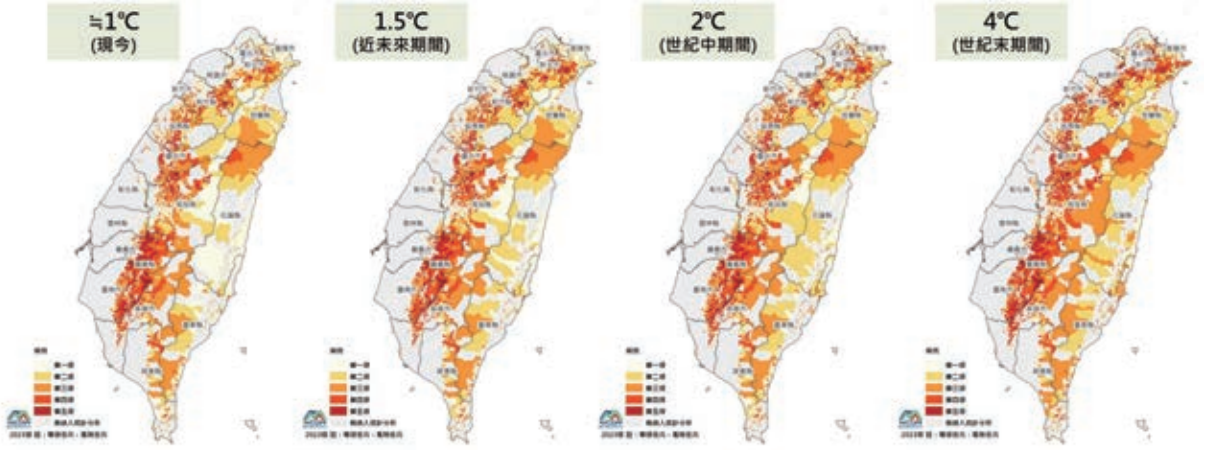


圖 4.2.2.3　全球暖化程度不同情境下最小人口統計區之坡地災害風險
(資料來源：陳韻如等人，2024)

口統計區是內政部統計人口或社會經濟彙整資料之最小空間單元，每一單元人口數小於400 人。將三指標分級結果相乘後再分級，即得到2°C情境下最小人口統計區之坡地災害風險 (圖4.2.2.2)。透過暖化情境推估的降雨資料、坡地地文特性及最小人口統計區之人口密度，評估不同情境下的坡地災害風險變化趨勢 。結果顯示，AR6 全球暖化程度2°C情境下，中南部山區維持高風險等級，北部與東部山區風險等級提高；4°C情境下，部分山區風險等級明顯加重 (圖4.2.2.3)，更詳盡之資料請參閱氣候變遷災害風險調適平台。指標疊加法可快速評估風險，辨識高風險區位，提供氣候變遷調適規劃參考。

4.2.3 調適方法

IPCC AR6 WGII報告跨章節第5章「山區」提到傳統的調適方法，主要是針對特定氣候衝擊或災後復原的反應性和自主性，如建立壩堤和堤防等硬結構措施，以及早期預警系統和土地管理等措施 (McDowell et al., 2019; Rasul et al., 2020)。然而，面對難以預測的災害，越來越多國家採用提高意識、備災及災害應變計畫 (Allen et al., 2016; Allen et al., 2018; Hovelsrud et al., 2018)，並廣泛實施基於生態系統的調適 (Ecosystem-based Adaptation, EbA)，以減輕淺層崩塌所帶來的風險 (Renaud et al., 2016; Klein et al., 2019)。何謹余等人 (2020) 研究新北市坡地減災、調適相關策略及措施，整理新北市減災2.0方案與新北市氣候變遷調適方案內容，針對降低坡地災害風險提出相應之減災/調適措施，如表4.2.3.1所示。而所有調適策略的推動，除了需要政府由上而下的資源整合及投入外，也需要社區及個人的參與，調適行動才可能被落實 (吳佩芝，2019)。本節將氣候變遷調適概分為工程方法、環境友善方法、及利害關係人參與的三大重點來說明。

表4.2.3.1　降低風險之調適措施

風險因子	坡地減災及調適措施
危害度	氣候變遷減緩 (例如：淨零排放)
暴露度	疏散避難、遷村、重要設施結構安全 (不安全會讓人暴露在危險中)
脆弱度	防災/調適教育、資訊能力、警戒傳遞能力、社區防災/韌性社區、企業防災、校園防災、結構安檢與補強、維生管線管理與緊急處理、防救災資源資料庫管理執行計畫、儲備物資與物資運補計畫、應變計畫、坡面減災工程、植生工程、山坡地管理、排水系統、颱洪應變與氣象監測預警計畫

(資料來源：何謹余等人，2020)

4.2.3.1 工程方法

雖然氣候變遷衝擊評估的時間尺度較大，遠至21世紀中2065年或21世紀末2099年，但就短期需即時因應的面向來看，工程方法確實是相當有效的處置方式之一。水土保持局 (2019a) 以CCHE2D輸砂動床模式結合AR5情境的降雨變化，評估氣候變遷下秀姑巒溪支流富源溪集水區的土砂情形，並提出相應之調適策略，如構築防砂壩、護岸、固床工、整流工程等，短期以工程手段穩定河道為主。氣候變遷下大規模崩塌及不安定土砂防減災計畫第二期 (行政院農業委員會，2022) 提到，在大規模崩塌潛勢區的處理需求上，會依崩塌地情形規劃不同的處理對策，其中，工程方法主要是緊急處理及局部治理，以維護在地居民安全，後續再配合細部監測及地質探查等，擬定中長期處理方案。隨著科技演進，也發展衛星影像、空載光達、無人機、GIS圖台、3維建模、無人化施工等新興科技及工程技術，提供更精準的工程規劃設計及施作 (水土保持局，2022a)。

4.2.3.2 環境友善的方法

因應整體生態意識抬頭、公民參與、資訊公開等趨勢，除傳統工程方法外，如何落實生態調查、使用生態預鑄槽減少現地擾動、依生態調查結果營造棲地環境、及維持生態廊道暢通等，推動具環境友善的方法為近年發展趨勢 (水土保持局，2019a)。受氣候變遷影響臺灣地區降雨型態已由過去短延時低強度轉變為長延時高強度，對坡地災害高潛勢區影響將更加劇烈，若僅以現行的治山防洪工程手段處理已不足因應氣候變遷可能帶來的衝擊，無法有效降低風險 (水土保持局，2018)。農業部農村發展及水土保持署 (原行政院農業委員會水土保持局)為因應氣候變遷下之極端氣候，提升山坡地韌性承災能力，除了工程治理手段外，進一步將以自然為本的解決方案（Nature-basedSolutions，NbS）導入保育治理策略，兼顧防災與生態保育，期許營造永續的環境。2022年農業部農村發展及水土保持署 (原行政院農業委員會水土保持局) 根據水砂運移機能退化或棲地改善等需求，挑選全臺七處集水區 (南山溪、打狗溪、沙河溪、樟湖溪、保力溪、台坂溪、大不岸溪)，嘗試以NbS進行調適操作，期能累積經驗，提供未來推動方式之參考 (水土保持局，2022b)。

4.2.3.3 利害關係人參與

在備災及制定因應計畫中，最初可透過繪製潛勢圖資，掌握衝擊趨勢，率定優先擬定調適策略的需求區域 (蔡光榮等人，2021；水土保持局，2017)。進一步，則可辦理高風險區的土砂災害區盤查、防災應變強化及資訊交流等 (行政院農業委員會，2022)。最後，則是實際落實。若方案或行動最終無法實際施行，即無法產生實際的效益，因此，利害關係人參與對於氣候變遷調適行動的推動是相當重要且必要的。國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心 (2014) 提出多元利害關係人參與式的實務操作指南，當中包含關鍵利害關係人辨識、案例、評估工具等，期望該手冊可以協助政府機關、部會署等單位，透過多元利害關係人的參與，針對氣候變遷問題擬定出合宜的調適策略與方案。Corner et al. (2018) 也說明數據可視化是不可或缺的一環，如圖資等，並且應將欲傳遞的重要資訊與利害關係人過去經驗或感興趣的議題相互扣接，提升參與者對於氣候變遷資訊的理解。朱芳儀等人 (2022) 以利害關係人訪談結果，選定新竹尖石的秀巒部落為研究區，嘗試納入不同層級的利害關係人，透過參與式訪談，建構當地關注議題網絡，並傳遞氣候變遷衝擊資訊，開啟利害關係人對於氣候變遷坡地衝擊議題的討論，以及一同擬定調適方向的初步構想。透過坡地衝擊圖資的研究發展扣接當地歷史事件經驗，提供利害關係人對於氣候變遷衝擊的理解空間，進一步討論可能的調適對策，共同率定出建置氣候變遷教學平台、培育種子教師、產製氣候變遷風險地圖、監測預警應變APP開發等13項調適選項。案例操作經驗顯示，圖資及歷史經驗對於衝擊資訊傳遞、利害關係人討論調適方向提供良好的立基點，在社區操作氣候變遷調適工作上有所幫助。

4.2.4 坡地災害調適與缺口

前述主要盤點至2017年科學報告以來，臺灣在氣候變遷坡地研究之進展，包含氣候變遷推估資料的新增、使用情境的變化、坡地衝擊推估模式的增加，以及調適行動的操作測試等。順應科技進步、科學循證基礎、氣候變遷知識及意識增強等進步，近年氣候變遷坡地研究更加蓬勃發展，部會署也漸趨重視。從現今研究及調適測試操作中可發現，尚有可強化之處，概可分為科研、治理、思維三面向，提供部會署及相關單位未來在氣候變遷坡地衝擊及調適整體規劃參考。

4.2.4.1 科研面

由於坡地穩定性與地質地形、地震、降雨、人為開發等因子相關，並非單一因子決定，因此，從降水到樹冠、地表，再進一步到地下，進而影響邊坡穩定的整個運作機制複雜。Yang et al. (2023) 指出山坡地的水文穩定性已有相當多研究，但要準確估計由山坡地水文引起的穩定和不穩定的時間及後果仍十分困難。如不同尺度水文過程和觸發機制間的物理因果關係、植被和物種對地下逕流的影響等皆是挑戰。在資料及模擬面向，建議進一步探索坡面水文和穩定性的相互作用機制，開發更有效的監測技術和預測模型，並整合跨學科知識及研究。另外，目前研究多只關注事件降雨的變化所帶來之影響。然而，氣候變遷下，氣溫變化以及澇旱交替降雨變化對坡地災害衝擊的改變較少被討論。近年來許多歐美的研究指出，乾濕季氣候及季節性氣候皆對坡地災害的發生有顯著的影響 (Handwerger et al. 2022; Luna, L. V., & Korup, O. 2022)。隨著可用之氣候變遷推估資料大量增加，這些議題皆應一併納入考量。

除前述之邊坡水文穩定性、危害度因子變化影響等議題外，整體性的複合連動性議題更是相當重要。由於複合連動性議題作用機制及條件複雜，不同機制模式的扣接、氣候推估資料的應用性等皆是待突破之處。待未來氣候變遷資料更加多元、科研基礎等條件更臻完善，應將淺山坡地農業生產、堰塞湖二次災害、土砂影響水庫庫容及供水系統、上游土砂輸送變化對於海岸線影響等複合連動性議題納入考量，以探索氣候變遷下坡地環境內的複合連動性議題，瞭解可能帶來的衝擊災害。

4.2.4.2 治理面

陳亮全等人 (2018) 提到，受氣候變遷影響及社會經濟環境改變，水文氣象災害特性也將有所變化，並對現有防災體系帶來挑戰，氣候變遷下災害衝擊的整體性風險治理是國家應重視且關注的議題。整體性風險治理意旨不能就單一風險進行考量，而需理解各風險間縱橫交錯的複雜關係，如人類活動如何衝擊自然環境、自然環境變化如何影響生態等，需採永續科學的方式進行探究，亦即需跨領域、跨尺度等跨界整合評估，整合多方觀點，掌握整體風險。面對這樣整體性的風險可以採公私部門合作、擴大公眾參與等新型態的治理模式來因應，並發展跨域、跨部門、跨界面等整合性的風險治理思維及推動機制。

4.2.4.3 思維面

氣候變遷可能改變未來降雨趨勢及特性，若僅以歷史極端事件評估氣候變遷可能帶來的坡地災害，將無法掌握未來極端事件可能造成的損失，這凸顯二個問題，包含對氣候變遷資訊及知識的不足及不瞭解氣候變遷可能對自身帶來的影響，導致對於氣候變遷潛在風險之調適因應有所落差，當面臨難以預料的災害風險時，將可能造成生命財產等巨大損失。在水土保持局 (2022a) 氣候變遷下大規模土砂災害衝擊調適對策研究計畫中，主要透過發展新興科技、視覺化平台、水文模式及基礎資料調查等面向，透過掌握科學資料與數據來建構因應氣候變遷之調適量能。

4.2.5 結語

坡地災害是臺灣面臨氣候變遷的重要挑戰之一。為了應對這些災害，臺灣政府已採取了多項措施，例如土石流潛勢溪流的調查和劃設、培訓土石流防災專員、制定相關法規並修訂以因應實際需求、進行大規模崩塌潛勢區的調查工作、以及推進氣候變遷研究，為坡地災害防救災提供了重要的科學支持。然而，面對氣候變遷的挑戰，包括未來降雨強度和極端降雨事件頻率的改變、以及氣候變遷推估資料的不確定性等，我們仍需持續努力，加強科學研究，以深入瞭解坡地災害的形成機制，並建立預警技術和防災對策。政府與學界應加強合作，投入資源在相關研究領域，以提升對坡地災害的認識和應對能力。同時，加強社區防災能力也至關重要。建立有效的溝通和協作機制，能夠提高社區居民對坡地災害的警覺性和應變能力。政府、學界、民眾等利害關係人應共同努力，形成全方位的防災合作體系。此外，政府應評估現有法規的有效性，並根據氣候變遷的實際需求，進行修訂和完善，也是減少坡地災害風險的關鍵。公眾教育也是重要的一環，能夠提高大眾對坡地災害風險的認識和防災意識。總而言之，為了應對臺灣氣候變遷下的坡地災害，政府、學界、和社會各界應共同努力，加強科學研究、社區防災能力、及法規執行等多方面手段，以確保公眾的安全並建立永續的社會。

參考文獻

行政院農業委員會水土保持局 (2017)。**氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫第一期 (106至109年度)**。行政院農業委員會水土保持局，計畫編號：106保發-13.1-保-01。

行政院農業委員會水土保持局 (2018)。**氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫 (變更) (變更後核定本)**。行政院農業委員會水土保持局，計畫編號：107保發-13.1-保-01。

行政院農業委員會水土保持局 (2019a)。**氣候變遷下集水區土砂管理之風險評估與動態調適策略研究**。行政院農業委員會水土保持局，計畫編號: 108 保發-10.1-保-01-06-001 (12)。

行政院農業委員會水土保持局 (2019b)。**應用人工智慧技術發展坡地崩塌風險評估模式**。行政院農業委員會水土保持局，計畫編號SWCB-108-139。

行政院農業委員會 (2022)。**氣候變遷下大規模崩塌及不安定土砂防減災計畫第二期 (110至115年) (核訂本)**。行政院農業委員會。

行政院農業委員會水土保持局 (2022a)。**111年度氣候變遷下大規模土砂災害衝擊與調適對策研究成果報告書**。行政院農業委員會水土保持局，計畫編號 S SWCB-111-136。

行政院農業委員會水土保持局 (2022b)。**水土保持工程生態檢核制度與案例分享 (簡報)**。行政院農業委員會水土保持局。

朱芳儀、李欣輯、林丞庭、鄭兆尊、姜欣妤、林銘郎 (2022)。**未來升溫情境下之坡地衝擊工具研發與圖資建置**。國家災害防救科技中心。技術報告，NCDR 110-T05。

李欣輯、吳亭燁、魏曉萍、施虹如、蘇元風、陳偉柏、劉俊志、陳永明 (2015)。**氣候變遷極端颱風豪雨於高屏溪之全流域災害衝擊評估**。國家災害防救科技中心。技術報告，NCDR 103-T18。

李欣輯、施虹如、吳亭燁、趙益群、陳偉柏、鄭兆尊、陳淡容、張駿暉、陳永明 (2016)。**氣候變遷於21世紀末對濁水溪流域之災害損失量化評估**。國家災害防救科技中心。技術報告，NCDR 104-T09。

李欣輯、趙益群、吳亭燁、施虹如、蕭逸華、鄭兆尊、陳淡容 (2017)。**暖化情境下極端颱洪災害風險評估與減災調適：以大甲溪流域為例**。國家災害防救科技中心。技術報告，NCDR 105-T30。

李欣輯、吳亭燁、陳麒文、鄭兆尊、童裕翔 (2018)。**暖化情境下極端颱洪災事件之坡地災害衝擊評估：以大漢溪及新店溪集水區為例**。國家災害防救科技中心。技術報告，NCDR 106-T09。

吳亭燁、魏曉萍、陳偉柏、李欣輯、陳永明、蘇元風、劉俊志、施虹如、葉克家 (2014)。**氣候變遷極端颱風豪雨事件之坡地、河川、都會以及海岸之衝擊評估**。國家災害防救科技中心。技術報告，NCDR 102-T19。

吳亭燁、李欣輯、陳永明 (2017)。氣候變遷資料應用於土石流衝擊與土方量之推估。**中華水土保持學報，48** (4)，163－174。

吳佩芝 (2019)。氣候變遷調適—地方創生與社區健康。**護理雜誌，66** (3)。

吳俊毅、張惟淳、林聖諭 (2022)。不同崩塌事件建立羅吉斯回歸與深度神經網路崩塌潛勢模型之比較。**水土保持學報，52** (1)，2875-2894。

何謹余、童慶斌、王浣雅 (2020)。減災與氣候變遷調適在區域治理上之融合研究—以坡地災害為例。**農業工程學報，66** (4)，245－270。

林彥廷、顏筱穎、張乃軒、林宏明、韓仁毓、楊國鑫、陳俊杉、鄭宏逵、徐若堯 (2021)。應用AI學習技術於坡地崩塌預測分析—以高雄市小林村為例。**土木水利，48** (2)。https://doi.org/10.6653/MoCICHE.202104_48 (2).0007

陳韻如、陳偉柏、林又青、劉佩鈴、施虹如、蘇元風、陳永明、張志新 (2014)。**氣候變遷衝擊下災害風險地圖。**國家災害防救科技中心技術報告。技術報告，NCDR 102-T17。

陳亮全、郭士筠、周桂田、林子倫、林李耀、林宗弘、洪鴻智 (2018)。「氣候變遷災害衝擊之整合性風險治理」永續科學計畫。**臺灣土地研究，21** (2)，153-180。https://doi.org/10.6677/JTLR.2018.21.02.000-000

陳韻如、林宣汝、劉俊志、童裕翔、陳永明 (2024)。**坡地災害氣候變遷風險圖研發與應用。**國家災害防救科技中心。技術報告，NCDR112-T10。

國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心 (2014)。**氣候變遷調適策略政策評估機制之研究—多元利害關係人參與式評估之實務操作指南 (2014年版)。**

國家科學及技術委員會 (2018)。**坡地領域之全台風險評估成果。**臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (I)，期末報告， (附錄2.2.2)。

國家災害防救科技中心 (2018)。**臺灣氣候的過去與未來「臺灣氣候變遷科學報告 2017—物理現象與機制」重點摘錄。**

國家科學及技術委員會 (2022)。**臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (4/4) (MOST 107-2621-M-865-001)結案報告—第七章坡地領域衝擊分析與調適方法研究期末報告。**國家科學及技術委員會。

楊樹榮、林忠志、鄭錦桐、潘國樑、蔡如君、李正利 (2011)。**臺灣常用山崩分類系統，**THE 14TH CONFERENCE ON CURRENT RESEARCHES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING IN TAIWAN。

蔡光榮、李明熹、廖怡雯、蔡雨 、李佳諠、陳胡榮 (2021)。氣候變遷引致南臺灣高屏地區偏遠河階聚落複合型土砂災害調查分析。**臺灣鑛業，73** (3)，30-47。

Allen, S. K., Linsbauer, A., Randhawa, S. S., Huggel, C., Rana, P., & Kumari, A. (2016). Glacial lake outburst flood risk in Himachal Pradesh, India: An integrative and anticipatory approach considering current and future threats. *Natural Hazards, 84(3),* 1741-1763. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2511-x

Allen, S., Ballesteros-Canovas, J., Randhawa, S., Singha, A., Huggel, C., & Stoffel, M. (2018). Translating the concept of climate risk into an assessment framework to inform adaptation

planning: Insights from a pilot study of flood risk in Himachal Pradesh, northern India. *Environmental Science & Policy, 87,* 1-10. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.013

Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacona, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejéda, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., ⋯ Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: A review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere, 12(2),* 759-794. https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018

Cui, P., & Jia, Y. (2015). Mountain hazards in the Tibetan Plateau: Research status and prospects. *National Science Review, 2(4),* 397-399. https://doi.org/10.1093/nsr/nwv061

Corner, A., Shaw, C. & Clarke, J. (2018). *Principles for effective communication and public engagement on climate change: A Handbook for IPCC authors.* Oxford: Climate Outreach.

Chen, C., Tung, Y., Liou, J., Li, H., Cheng, C., Chen, Y., & Oguchi, T. (2019). Assessing landslide characteristics in a changing climate in northern Taiwan. *CATENA, 175,* 263-277. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.023

Froude, M. J. & D. N. Petley. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Science, 18*(8), 2161-2181. https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018

Hovelsrud, G. K., Karlsson, M., & Olsen, J. (2018). Prepared and flexible: Local adaptation strategies for avalanche risk. *Cogent Social Sciences, 4*(1), 1460899. https://doi.org/10.1080/23311886.2018.1460899

Haque, U., Da Silva, P. F., Devoli, G., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wilopo, W., Andersen, P., Lu, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D., Wu, J., & Glass, G. E. (2019). The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014). *Science of The Total Environment, 682,* 673-684. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415

Handwerger, A. L., Fielding, E. J., Sangha, S. S., & Bekaert, D. P. S. (2022). Landslide sensitivity and response to precipitation changes in wet and dry climates. *Geophysical Research Letters, 49,* e2022GL099499. https://doi.org/10.1029/2022GL099499

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX). Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing

Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Kirschbaum, D., Watson, C. S., Rounce, D. R., Shugar, D. H., Kargel, J. S., Haritashya, U. K., Amatya, P., Shean, D., Anderson, E. R., & Jo, M. (2019). The state of remote sensing capabilities of cascading hazards over high mountain Asia. *Frontiers in Earth Science, 7.* https://doi.org/10.3389/feart.2019.00197

Klein, J. A., Tucker, C. M., Steger, C. E., Nolin, A., Reid, R., Hopping, K. A., Yeh, E. T., Pradhan, M. S., Taber, A., Molden, D., Ghate, R., Choudhury, D., Alcántara-Ayala, I., Lavorel, S., Müller, B., Grêt-Regamey, A., Boone, R. B., Bourgeron, P., Castellanos, E., … Yager, K. (2019). An integrated community and ecosystem-based approach to disaster risk reduction in mountain systems. *Environmental Science & Policy, 94,* 143-152. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.034

Luna, L. V., & Korup, O. (2022). Seasonal landslide activity lags annual precipitation pattern in the Pacific Northwest. *Geophysical Research Letters, 49*(18). https://doi.org/10.1029/2022gl098506

McDowell, G., Huggel, C., Frey, H., Wang, F. M., Cramer, K., & Ricciardi, V. (2019). Adaptation action and research in glaciated mountain systems: Are they enough to meet the challenge of climate change? *Global Environmental Change, 54,* 19-30. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.012

Nones, M., & Pescaroli, G. (2016). Implications of cascading effects for the EU floods directive. *International Journal of River Basin Management, 14*(2), 195-204. https://doi.org/10.1080/15715124.2016.1149074

Renaud, F. G., U. Nehren, K. Sudmeier-Rieux & M. Estrella. (2016). Developments and Opportunities for Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaptation. In: *Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction and Adaptation in Practice* [Renaud, F. G., K. Sudmeier-Rieux, M. Estrella and U. Nehren (eds.)]. Springer International Publishing, Cham, pp. 1-20. ISBN 978-3-319-43633-3

Rasul, G., Pasakhala, B., Mishra, A., & Pant, S. (2020). Adaptation to mountain cryosphere change: Issues and challenges. *Climate and Development, 12*(4), 297-309. https://doi.org/10.1080/17565529.2019.1617099

Stäubli, A., Nussbaumer, S. U., Allen, S. K., Huggel, C., Arguello, M., Costa, F., Hergarten, C., Martínez, R., Soto, J., Vargas, R., Zambrano, E., & Zimmermann, M. (2018). Analysis of weather- and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases. In: *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction* [Mal, S., R. Singh and C. Huggel (eds.)]. Springer, Cham, Switzerland, pp. 17-41. ISBN 9783319564692.

Schauwecker, S., Gascón, E., Park, S., Ruiz-Villanueva, V., Schwarb, M., Sempere-Torres, D., Stoffel, M., Vitolo, C., & Rohrer, M. (2019). Anticipating cascading effects of extreme precipitation with pathway schemes - Three case studies from Europe. *Environment International, 127,* 291-304.

https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.072

Shugar,D. H., Jacquemart, M., Shean, D., Bhushan, S., Upadhyay, K., Sattar, A., Schwanghart, W., McBride, S., Van Wyk de Vries, M., Mergili, M., Emmer, A., Berger, C. D., McDonnell, M., Bhambri, R., Allen, S., Berthier, E., Carrivick, J. L., Clague, J. J., Dokukin, S. A. Dunning, H. Frey, S. Gascoin, U. K. Haritashya, C. Huggel, A. Kääb, J. S. Kargel, M. ⋯ Westoby, M. J. (2021). A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science, 373*(6552), 300-306, https://doi.org/10.1126/science.abh4455

Yang, Y., Yeh, H., Huang, C., & Chen, H. (2023). Reviews and syntheses: Promoting the advancement of Hillslope hydrology and stability in Taiwan from the perspective of critical zone science. *Water, 15*(6), 1234. https://doi.org/10.3390/w15061234

4.3 海岸

陳偉柏[1]、張志新[1]、梁庭語[1]

[1]國家災害防救科技中心

摘要

氣候變遷引起的海平面上升是一個全球性問題，對於臺灣這樣四面環海的國家尤其重要，然而，全球海平面上升的推估差異量相當大，且近年來的研究顯示低估了南極洲海冰融化對海平面的貢獻，最新研究表明，未來東南亞巨型城市將是新的海平面上升熱點，對當地低窪地區造成更大的淹水威脅。此外，颱風所帶來的風暴潮和巨浪對全球沿海低窪地區的人類生命和財產造成威脅，對臺灣海岸及其低窪地帶造成非常嚴重的衝擊。本節探討了未來海平面上升情境下，臺灣海岸地區的永久淹沒範圍，以及分析暖化條件下颱風引起的暴潮偏差、風浪對海岸地區造成的影響，以期作為研擬海岸調適策略的參考方向。

4.3.1 前言

暖化現象引起的海平面上升是一個具有全球尺度的重要性課題，對海岸線的退縮以及低窪地區的淹水威脅具有重大影響。對於臺灣這樣四面臨海的島嶼國家來說，瞭解未來海平面上升的情勢至為關鍵。然而，全球海平面上升的推估差異量相當廣泛，從0.3m到2.0m，甚至可能更高，這取決於考慮的代表濃度途徑 (RCP) 排放情境和方法 (Horton et al., 2014; Kopp et al., 2014)。此外，近年的研究指出，目前全球海平面上升的推估方式很大程度上低估了南極洲海冰的融化對於海平面上升的貢獻 (DeConto & Pollard, 2016)。最新的研究結果揭示，東南亞巨型城市，如印度的加爾各答、清奈，泰國的曼谷、仰光，越南的胡志明市，菲律賓的馬尼拉，將成為新的海平面上升熱點 (Becker et al., 2023)。海平面上升所造成的衝擊不僅在國土流失、增加海岸溢淹發生機率，對海岸侵蝕、土地鹽化、近岸生態、海岸保育等也將會帶來不同程度的影響。有關暖化對

海洋溫、鹽與海平面高度的影響，可參閱本報告1.3.1、1.3.2及1.3.3節。颱風所帶來的風暴潮和巨浪不斷增加對全球沿海低窪地區的威脅，對人類生命和財產造成極大衝擊 (Neumann et al., 2015; Nicholls et al., 2007; Smith, 1996)，同時，這也對臺灣的海岸和低窪地區產生嚴重影響。在颱風登陸前，風力逐漸推動海水進入海岸地區，當颱風的低氣壓系統影響海面時，海平面進一步抬升，形成風暴潮。風暴潮是由颱風的風力和低氣壓區引發的一種類似海嘯的現象 (Yu et al., 2019)，其高度可達數公分至數公尺。如果風暴潮發生在沿海地形平緩地區且逢漲潮時，暴潮位 (即天文潮加上風暴潮) 可能超過最高天文大潮，而造成嚴重的複合型海岸淹水災情。有關複合事件的定義、趨勢以及未來推估，可參閱本報告1.4.5節。在過去數十年，臺灣的海岸防護機關已開始評估臺灣在應對氣候變遷下的調適能力，例如水利署為了增強臺灣應對氣候變遷下海岸災害的能力，進行了海岸地區在不同氣候變遷情境下的災害情境分析。此外，包含沿海地區海岸災害的衝擊模擬、脆弱度和風險評估，並繪製風險地圖，最終制定調適策略和行動計畫，並評估其效益。水利署根據情境資料進行分析和規劃工作，將臺灣面臨氣候變遷下脆弱的海岸地區分為西南海岸和西北、東北海岸 (經濟部水利署，2010、2011、2012、2013)。本節綜合國內外的研究成果，不僅推估了臺灣海岸地區在未來海平面上升情境下，可能永久淹沒的範圍，還分析了暖化條件下，颱風引起的暴潮偏差和風浪對海岸的衝擊，為了臺灣未來海岸調適策略擬定，提供科學循證基礎分析的參考依據。然而，由於原始地形資料的限制，尺度小於1公尺的水工構造物，無法納入模擬考慮。

4.3.2　海平面上升溢淹衝擊

4.3.2.1　臺灣海平面上升情境推估

IPCC CMIP6 (Intergovernmental Panel on Climate Change, Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) 模式使用共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP) 情境來模擬全球各地的海平面上升量。依據臺灣國家氣候情境設定，1.5°C與2°C的全球暖化程度 (GWL)，TCCIP計畫使用SSP1-2.6在2023年至2042年的第95百分位海平面上升平均值作為1.5°C情境、SSP3-7.0在2037至2056年的第95百分位海平面上升平均值作為2°C情境 (藉由IPCC AR6 WGI Cross-Section Box TS.1, Table 1對照社會經濟路徑 [SSP] 情境與全球暖化程度 [GWL])，進行臺灣海平面上升量值計算，因為上

述兩種排放情境達到1.5°C及2°C的時間，與國際最新氣候調適資訊及氣候變遷情境設定年份最為吻合。為使專注於評估未來沿海洪水風險的研究人員便於使用資料，美國太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 研發海平面推估工具 (Sea Level Projection Tool, SLPT)，並開放使用者下載IPCC CMIP6不同情境下之海平面上升預測數據。考量在全球尺度的海平面推估工具分析中，臺灣僅有基隆與高雄兩個測站資料點，以此兩站的平均作為臺灣整體海平面上升量值。依據海平面推估工具數據計算分析結果，1.5°C與2°C全球暖化程度下，預估臺灣未來海平面上升量值分別為20cm和34.5cm。此海平面上升量值為初步估計，存在不確定性，未來仍可使用更精確、高時空解析度海平面上升量，模擬臺灣海平面上升溢淹衝擊。

4.3.2.2 海平面上升溢淹範圍推估方式

精確的洪水模擬和預測需要大量的高解析度地形數據 (Chang et al., 2021a; Chen et al., 2019)，TCCIP計畫從內政部地政司衛星測量中心取得機載光學雷達資料、空間解析度1公尺之臺灣本島範圍內數值地形模型，用以提供水動力數值模式推估海平面上升後，臺灣海岸溢淹範圍；此外，水動力數值模式計算範圍內之地文資料，例如土地利用資料和對應的每種土地利用類型，也一併由內政部地政司取得。為預測未來海平面上升後，可能形成之臺灣海岸永久淹沒範圍，TCCIP計畫應用最先進之半隱式、跨尺度水科學整合系統模式 (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model, SCHISM) 作為海平面上升可能造成之海岸溢淹模擬工具，SCHISM模式具備高效能、數值穩健性及多用途應用等特徵，已成功應用於許多臺灣海岸水動力相關研究 (Chen & Liu, 2017; Liu et al., 2008; Chen & Liu, 2014; 2016; Chen et al., 2017; Chang et al., 2021b; Chen et al., 2019; Hsiao et al., 2019; Chang et al., 2021a; Hsiao et al., 2022)，可用以推估臺灣沿海地區在不同海平面上升情境下，可能發生的地表海水溢淹程度，並使用基於SCHISM的深度平均水平二維 (2DH) 配置模式 (以下簡稱 SCHISM-COAST-2DH) 來模擬和預測由天文潮汐及海平面上升之加乘作用所引起之海岸溢淹。此外，為提高圖資可靠度，海平面上升溢淹衝擊圖僅考慮長期影響的海平面上升增量與規律變化的天文潮汐，不包括短時且不確定性較高之暴潮偏差量。

4.3.2.3 海平面上升溢淹範圍推估結果

TCCIP計畫採用動態天文潮汐 (Dynamic Astronomical Tide, DAT, Hsiao et al., 2022) 模擬方式，推估海平面上升所造成的海岸溢淹範圍，即配合1.5°C與2.0°C全球暖化程度下，臺灣本島預估未來海平面上升20cm和34.5cm兩個固定高度，並同時考慮動態天文潮汐，將海平面上升高度與動態天文潮汐共同設為SCHISM-COAST-2DH模式的外海開放邊界。圖4.3.2.1至圖4.3.2.4展示彰化縣、雲林縣、嘉義縣及臺南市，於升溫1.5°C及2.0°C全球暖化程度下，海平面上升後，在天文大潮時所造成之海岸溢淹範圍及深度，左圖為1.5°C全球暖化程度，右圖為2.0°C全球暖化程度，全臺各縣市於1.5°C與2.0°C全球暖化程度下，可能產生的最大淹沒面積佔該縣市總面積之百分比，以及最大溢淹深度等級，整理於表4.3.2.1，以雲林縣在1.5°C與2.0°C全球暖化程度下淹沒面積佔該縣市面積比例最高，分別可達2.71%及4.30%，各縣市總面積詳列於表4.3.2.1。在2.0°C全球暖化程度下，桃園市、新竹縣市、雲林縣、嘉義縣的最大溢淹深度超過2.0m，其餘縣市數據請詳見表4.3.2.1。

各縣市於2.0°C全球暖化程度下的溢淹範圍及深度，普遍較1.5°C全球暖化程度範圍更加廣泛且淹水深度更深。彰化縣 (圖4.3.2.1) 主要溢淹範圍位於沿岸沙洲與魚塭，溢淹深度大約介於0.5m至2.0m之間。值得注意的是，在彰化縣的海埔新生地一帶，2.0°C全球暖化程度 (海平面上升34.5cm) 加上天文大潮條件下，最高溢淹深度可達1.0m至2.0m。雲林縣 (圖4.3.2.2) 南部地區、接近與嘉義縣交界處，溢淹情況的變化更為顯著，主要溢淹範圍位於沿岸魚塭、濕地與海埔新生地，部分地區溢淹可超過2m，北港溪出海口附近濕地與聚落有較大範圍且較深的溢淹情形。嘉義縣 (圖4.3.2.3) 中部沿岸養殖魚塭區於兩種海平面上升情境下，部分地區溢淹可超過2m，而2°C全球暖化程度所造成之溢淹範圍較1.5°C情境更為廣闊。臺南市 (圖4.3.2.4) 主要溢淹範圍位於沿岸沙洲、魚塭、低地等，普遍溢淹深度介於0.2m至0.6m，但在2.0°C全球暖化程度下 (圖4.3.2.4，右圖)，少部分地區溢淹深度可達1.0m至2.0m。

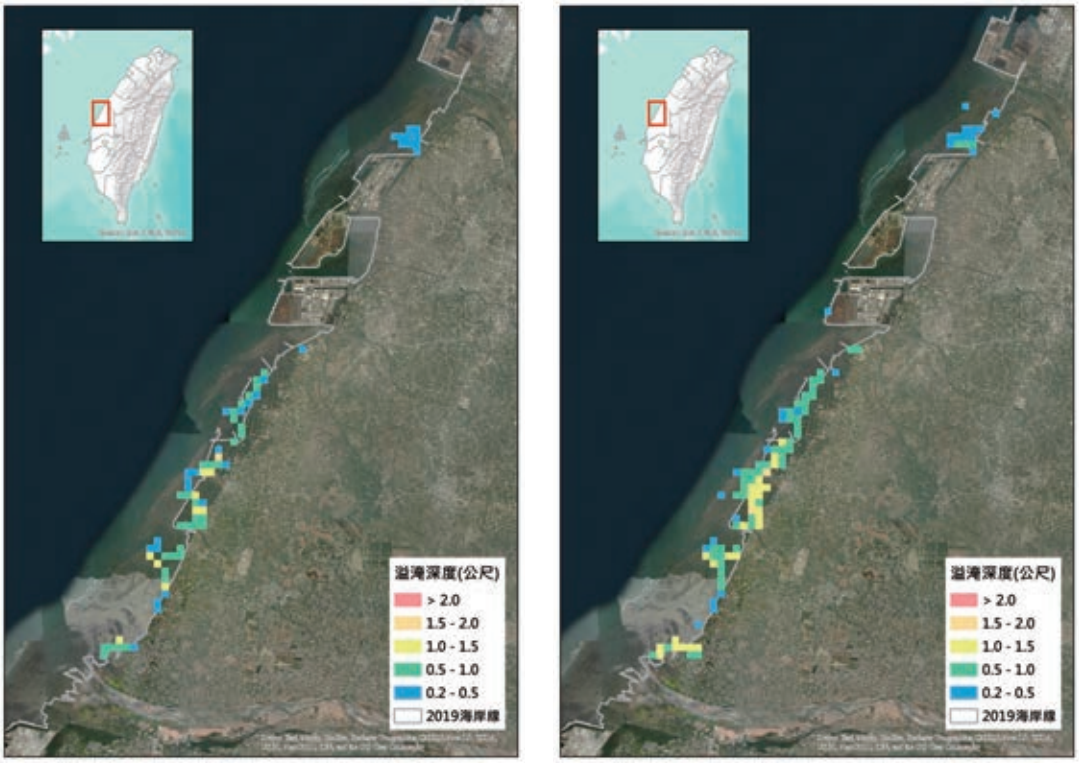


圖4.3.2.1　彰化縣海平面上升溢淹衝擊圖 (左：1.5°C情境；右：2°C情境)
(資料來源：TCCIP計畫產製)

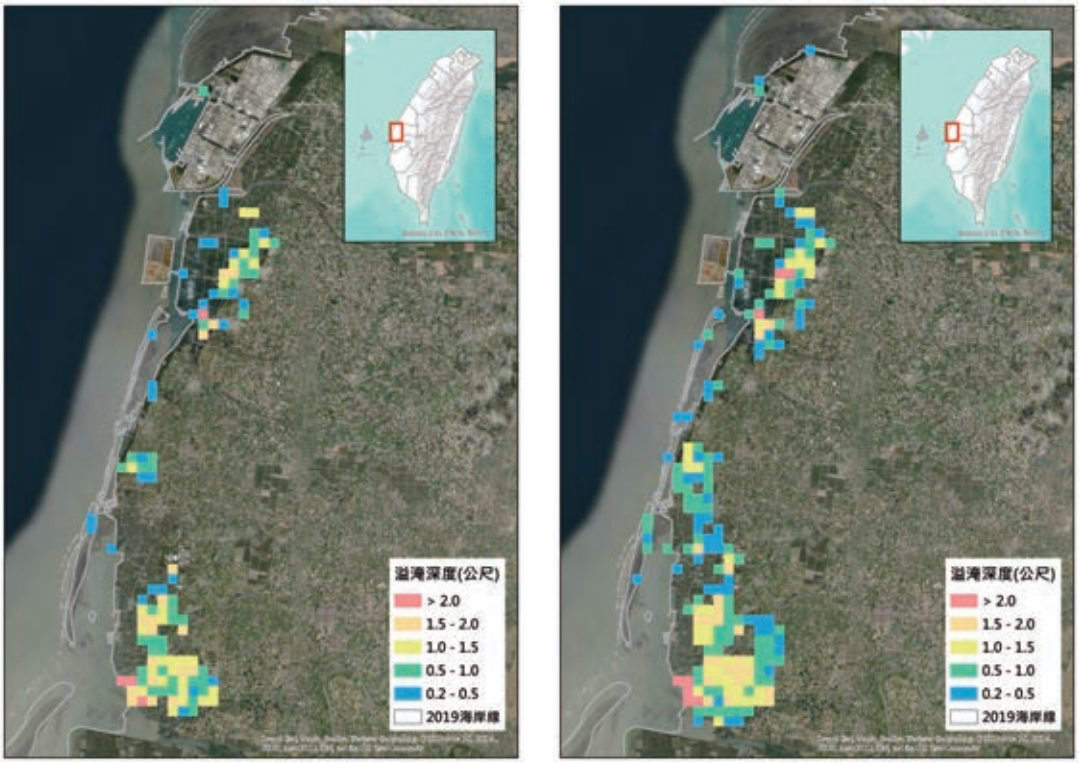


圖4.3.2.2　雲林縣海平面上升溢淹衝擊圖 (左：1.5°C情境；右：2°C情境)
(資料來源： TCCIP計畫產製)

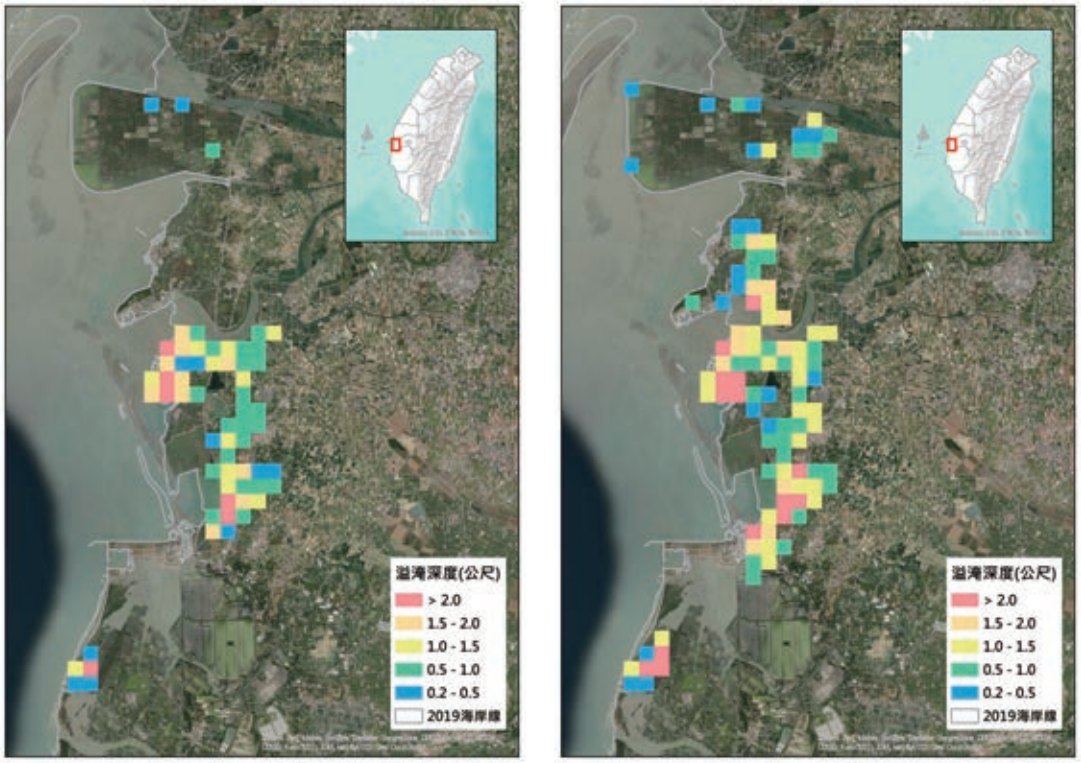


圖4.3.2.3　嘉義縣海平面上升溢淹衝擊圖 (左：1.5°C情境；右：2°C情境)
(資料來源： TCCIP計畫產製)

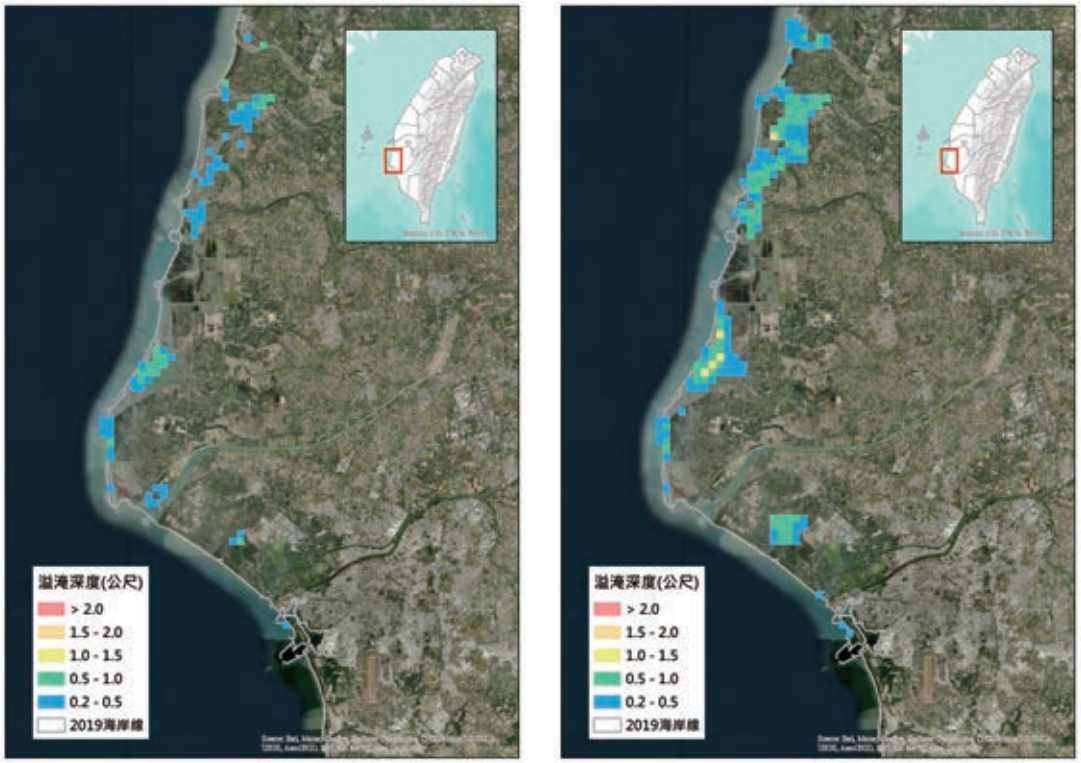


圖4.3.2.4　臺南市海平面上升溢淹衝擊圖 (左：1.5°C情境；右：2°C情境)
(資料來源： TCCIP計畫產製)

表4.3.2.1　全球暖化程度 (GWL)1.5°C及2°C海平面上升情境下，各縣市淹沒面積占比及最大深度等級

縣市 (總面積, km^2) [1]	1.5°C情境		2.0°C情境	
	淹沒面積百分比	最大深度等級	淹沒面積百分比	最大深度等級
新北市 (2053)	0.79%	1.5m至2.0m	1.50%	1.5m至2.0m
基隆市 (133)	1.51%	0.5m至1.0m	2.26%	0.5m至1.0m
桃園市 (1221)	0.78%	1.0m至1.5m	1.00%	>2.0m
新竹縣市 (1532)	0.83%	0.5m至1.0m	1.09%	>2.0m
苗栗縣 (1820)	1.33%	1.0m至1.5m	1.61%	1.0m至1.5m
臺中市 (2215)	0.84%	0.5m至1.0m	0.91%	0.5m至1.0m
彰化縣 (1074)	2.40%	1.5m至2.0m	2.89%	1.5m至2.0m
雲林縣 (1291)	2.71%	>2.0m	4.30%	>2.0m
嘉義縣市 (1964)	0.85 %	>2.0m	1.40%	>2.0m
臺南市 (2192)	2.52 %	0.5m至1.0m	3.29%	1.5m至2.0m
高雄市 (2952)	0.08%	0.5m至1.0m	0.48%	1.5m至2.0m
屏東縣 (2776)	0.45%	0.5m至1.0m	1.04%	1.0m至1.5m
宜蘭縣 (2144)	0.43%	0.5m至1.0m	0.56%	0.5m至1.0m
花蓮縣 (4629)	0.11%	1.0m至1.5m	0.30%	1.5m至2.0m
臺東縣 (3515)	0.82%	1.5m至2.0m	1.24%	>2.0m

(資料來源：TCCIP計畫產製)

1　各縣市總面積資料來源：內政部戶政司 111 年底土地面積資料。

4.3.3 颱風暴潮與巨浪衝擊

4.3.3.1 颱風暴潮與巨浪對海岸的影響

2013年颱風海燕 (Haiyan) 引起的風暴潮嚴重破壞菲律賓沿海環境並造成大量人員傷亡，根據重新模擬追報 (hindcasting) 結果顯示，超級颱風海燕導致雷伊特灣 (Leyte Gulf) 發生2.5m的風暴潮 (Lee & Kim, 2015)。風暴潮具備速度快、威力大之特性，對海岸地區造成的影響非常大。風暴潮會對海岸地區的建築物、道路和港口等基礎設施造成嚴重的損壞，在風暴潮的衝擊下，海水會湧上陸地，造成沿海地區的淹水和嚴重的水患，海水的浸泡和沖刷還會破壞海岸地區的土地和植被，進而對當地生態環境造成長期的影響，此種複合式災害造成的多重衝擊，未來可能更容易發生，且更為嚴重 (有關複合事件的定義、趨勢以及未來推估，可參閱本報告1.4.5節)。颱風暴潮可能對河口地區造成海水倒灌、排水不易，增加淹水風險，並影響河口生態系統及河口城市的淡水供應等負面影響。而風暴潮引發洪水的嚴重程度則受近岸水域深淺程度、大範圍海岸線地形、海流方向和潮汐影響 (Mori et al., 2014)。此外，颱風帶來的巨浪也會對臺灣海岸造成極大的破壞。巨浪是由颱風風暴引起的海面波浪，其高度可達數十公尺。巨浪具有非常強烈的沖擊力和破壞力，一旦沖擊到海岸線上的建築物、道路和港口，會造成嚴重的損壞，甚至導致傷亡事故，例如，2016年颱風莫蘭蒂 (Meranti) 引發超過12m的巨浪，巨浪沖倒綠島南寮漁港的燈塔 (Chang et al., 2018)。巨浪和暴潮的破壞力還會對當地的漁業、海洋生態系統及海岸地形地貌 (例如海岸沖淤等)，造成長期的影響，包括增加漁船航行風險及降低捕撈效率。巨浪或暴潮可能導致船隻翻覆或受損，威脅船員的生命，並且可能影響魚群的遷徙和分布，使得漁獲更加困難。另外巨浪和暴潮可能加速海岸侵蝕，影響海洋生態系統，使得海岸線退縮，破壞濕地、珊瑚礁等海岸生態系統。此外，風浪和海水位升高會加劇低窪沿海地區的洪水，因為總水位是平均海平面、潮汐、風暴潮、波揚 (wave setup) 的組合，而這些風浪與風暴潮通常由同樣的颱風事件引起 (Shih et al., 2018; Wolf, 2009)。因此，颱風的風暴潮和巨浪對臺灣海岸造成的衝擊不可忽視，必須分析其現況 (基期) 以及氣候變遷後的衝擊，用以擬定未來海岸災害的調適策略。

4.3.3.2 颱風暴潮偏差與巨浪的推估方式

採用物理模式，對颱風驅動的風暴潮與風浪等劇烈海況進行數值模擬的相關技術

已十分成熟 (Babanin et al., 2011; Cardone et al., 1996; Liu et al., 2017; Moon et al., 2003)，因此，TCCIP計畫應用全耦合潮波流數值模式SCHISM-WWM-III (SCHISM耦合Wind Wave Model III風浪模式，Roland et al., 2012) 以分析颱風暴潮及風浪對臺灣近岸的衝擊。SCHISM-WWM-III全耦合潮波流數值模式所使用之原始海域地形由兩部分網格化資料所構成，大範圍區域採用2022年釋出之最新全球尺度、空間解析度15弧秒 (15 arc-second，約400m×400m) 之GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) 海陸域格點化地形，GEBCO資料由船測與衛星遙測所整合而成；而臺灣周邊的局部海域地形則使用內政部地政司所提供東經100°至東經128°，北緯4°至北緯29°，空間解析度200m×200m之網格化數值地形數據。將上述兩組海底測深數據加以融合後，即可做為SCHISM-WWM-III模式所需之地文資料，融合方式即將全球尺度資料與局部尺度資料重複處取200m精度數據，其餘部分則取400m解析度資料，以此方式，便可獲得臺灣近岸海域高空間解析及高精度海底地形，以利提高模擬結果之可靠度，海洋水動力模擬範圍內之水深空間分布如圖4.3.3.1所示。

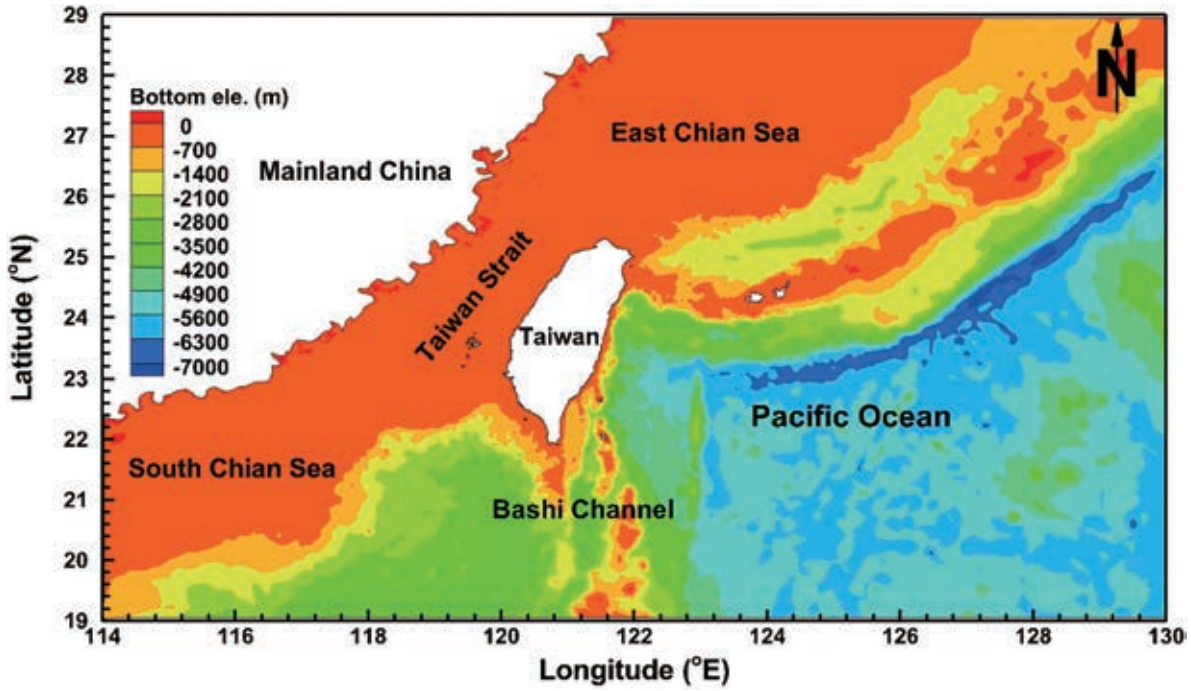


圖4.3.3.1　颱風暴潮與風浪模擬計算區域海底地形分布 (地形負值表示海平面以下，單位：m)
(資料來源：TCCIP計畫產製)

4.3.3.3　颱風暴潮與巨浪衝擊分析

為評估暴潮偏差量對海岸造成的最大影響，TCCIP計畫以1978年至2018年共125場最大颱風暴潮偏差追報模擬結果 (九大路徑之歷史颱風軌跡如圖4.3.3.2所示) 分析基期臺灣海岸颱風暴潮偏差衝擊。其中，多數颱風路徑為1號至6號，7號至9號路徑偏少。圖4.3.3.3左圖為基期颱風暴潮偏差衝擊圖，本文將暴潮偏差衝擊分為5個級距，分別為極低，≦ 0.3m；低，0.3m至0.6m；中，0.6m至0.9m；高，0.9m至1.2m；極高，> 1.2m。以臺灣全島尺度呈現時，可見相對較高之颱風暴潮偏差集中於北部、東北部、嘉義縣、臺東縣及部份屏東縣海岸。根據本報告3.5.4節所述，分析RCP8.5世紀末情境下，動力降尺度資料中，所有影響臺灣的颱風，結果顯示，颱風影響期間近颱風中心最大風速增加約5%至9%，平均為8%。圖4.3.3.3右圖則為以RCP8.5暖化情境、固定颱風路徑並提高8%颱風風速條件下，所模擬與產製之未來颱風暴潮偏差衝擊圖。根據模擬結果顯示，在RCP8.5情境下，未來臺灣面臨各級距的颱風風暴潮偏差衝擊，即 ≦ 0.3m、0.3m至0.6m、0.6m至0.9m、0.9m至1.2m、> 1.2m，之海岸線長度改變率分別為：0%、-5.8%、-6%、-0.7%、+12.5%，顯見臺灣本島未來可能面臨超過1.2m颱風暴潮偏差衝擊的海岸線將顯著增加。

在基期情境下，臺灣海岸最大颱風風浪衝擊如圖4.3.3.4左圖所示，同樣以1978年至2018年 (基期) 共125場最大颱風風浪追報模擬結果，分析在基期情境下，臺灣海岸颱風風浪衝擊。颱風風浪衝擊亦區分為5個級距，分別為，極低，≦ 3.0m；低，3.0m至6.0m；中，6.0m至9.0m；高，9.0m至12.0m；極高，> 12.0m；以臺灣全島尺度呈現時，可見發生較大之颱風風浪高多集中東部海岸，例如，宜蘭縣南段、花蓮縣北段與南段、臺東縣南段及屏東縣海岸，且示性波高 (significant wave height) 可達約9.0m。圖4.3.3.4右圖為RCP8.5暖化情境、固定颱風路徑並提高8%颱風風速條件下，所模擬與產製之未來颱風風浪衝擊；根據模擬分析結果顯示，在RCP8.5情境下，未來臺灣海岸面臨各級距的颱風風浪衝擊，即 ≦ 3.0m、3.0m至6.0m、6.0m至9.0m、9.0m至12.0m、> 12.0m，之海岸線長度改變率分別為：-0.9%、-0.2%、-1.9%、-0.7%、+3.6%，與颱風暴潮偏差衝擊分析結果相同，臺灣本島未來可能面臨超過12.0m巨浪衝擊的海岸線將顯著增加。TCCIP計畫另外產製以縣市為單位之臺灣本島各個臨海鄉鎮市區颱風暴潮偏差與風浪衝擊圖，並分析在基期及RCP8.5暖化情境下，各臨海行政區面臨不同級距衝擊的海岸線比例與變化率。以宜蘭縣為例，基期 (圖4.3.3.5左圖) 及RCP8.5暖化情境下 (圖

4.3.3.5右圖)，頭城、壯圍、五結、蘇澳、南澳等靠海五鄉鎮颱風暴潮偏差衝擊圖，比較兩個情境可發現，在RCP8.5暖化情境下，頭城鎮、壯圍鄉、五結鄉等三個鄉鎮面臨高暴潮偏差衝擊 (即颱風暴潮偏差高度介於0.9m至1.2m與超過1.2m級距) 的海岸線比例將大幅增加。類似的情況也可於宜蘭縣五鄉鎮颱風風浪衝擊圖中發現，相較於基期 (圖4.3.3.6左圖)，在RCP8.5暖化情境下 (圖4.3.3.6右圖) 蘇澳鎮及南澳鄉面臨高風浪衝擊 (即颱風風浪高度介於9.0m至12.0m與超過12.0m級距) 的海岸線比例亦有顯著的增加。其餘臺灣本島海岸鄉鎮區細緻化的颱風暴潮偏差與風浪衝擊圖資，及其分析數據可參考國科會TCCIP計畫網站。

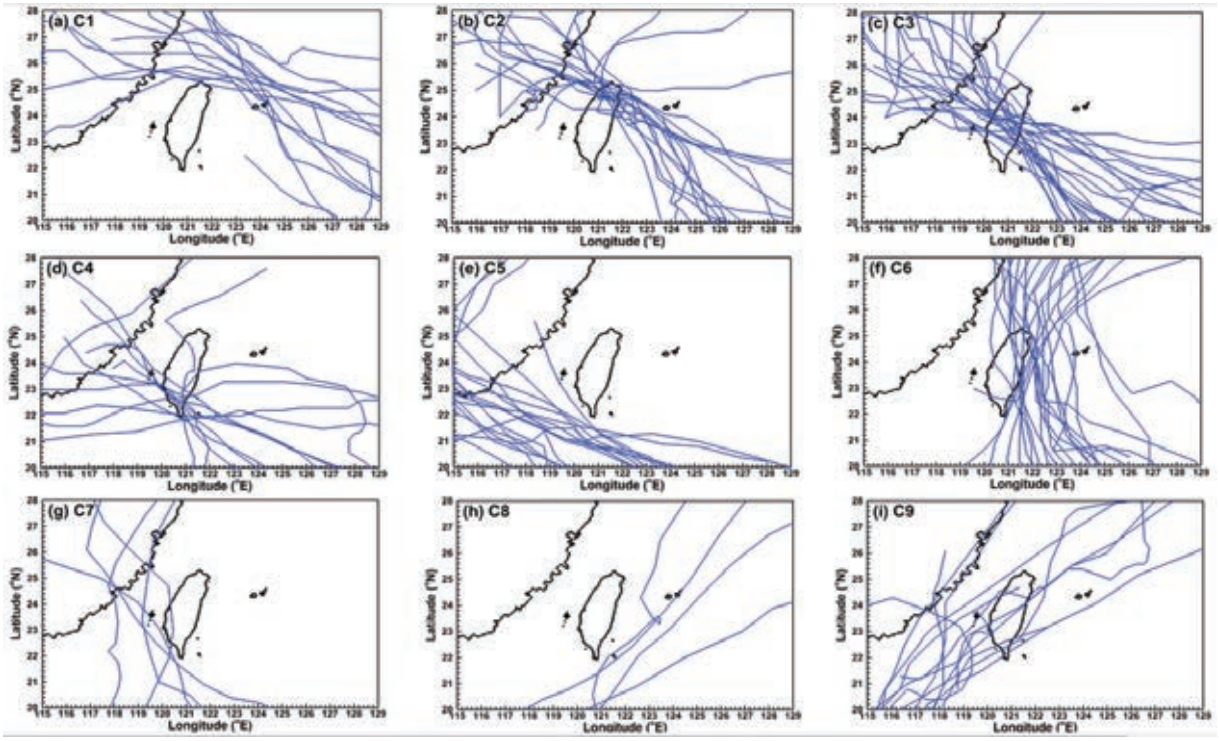


圖4.3.3.2　1979至2018年之歷史颱風事件軌跡分為九種路徑 (藍色實線)
(資料來源：TCCIP計畫產製)

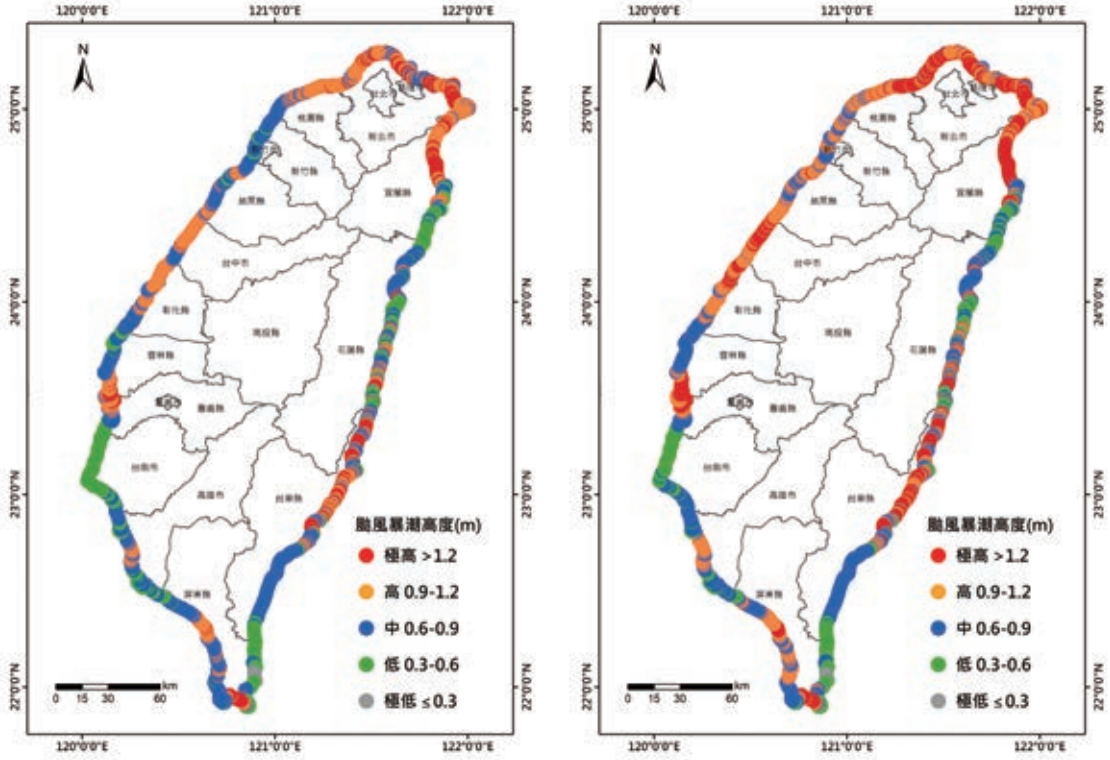


圖4.3.3.3　臺灣海岸最大颱風暴潮偏差衝擊圖 (左圖基期情境；右圖RCP8.5情境)
(資料來源：TCCIP計畫產製)

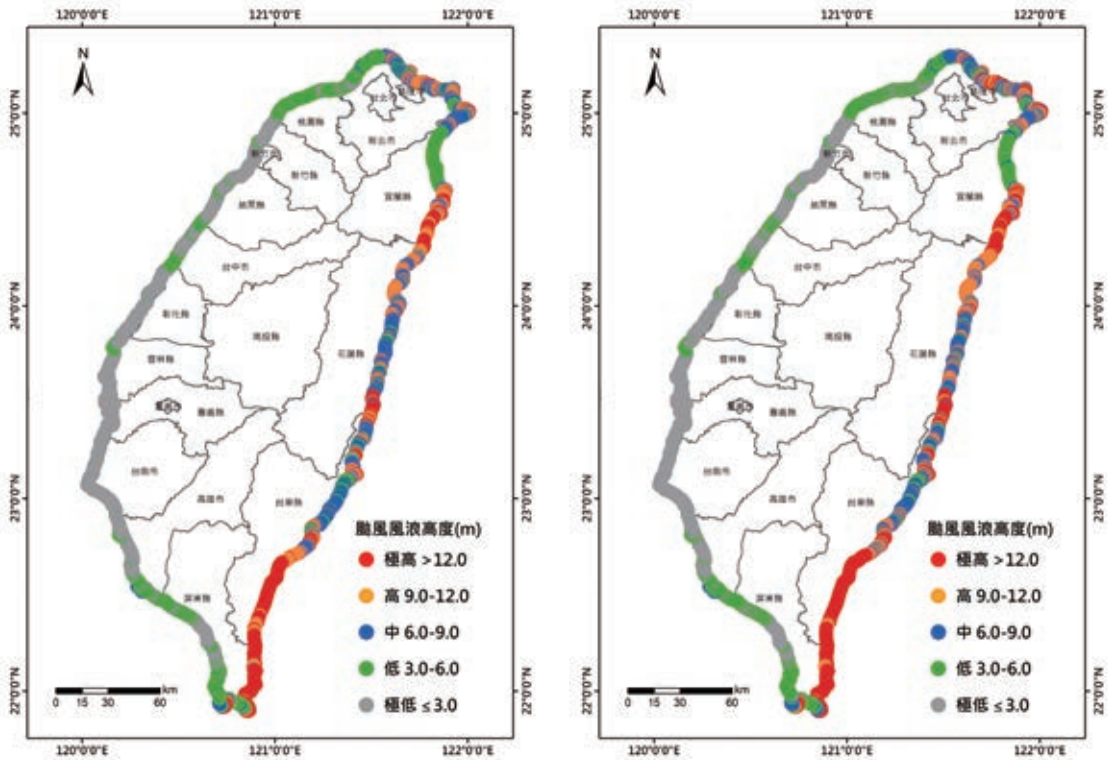


圖4.3.3.4　臺灣海岸最大颱風風浪衝擊圖 (左圖基期情境；右圖RCP8.5情境)
(資料來源：TCCIP計畫產製)

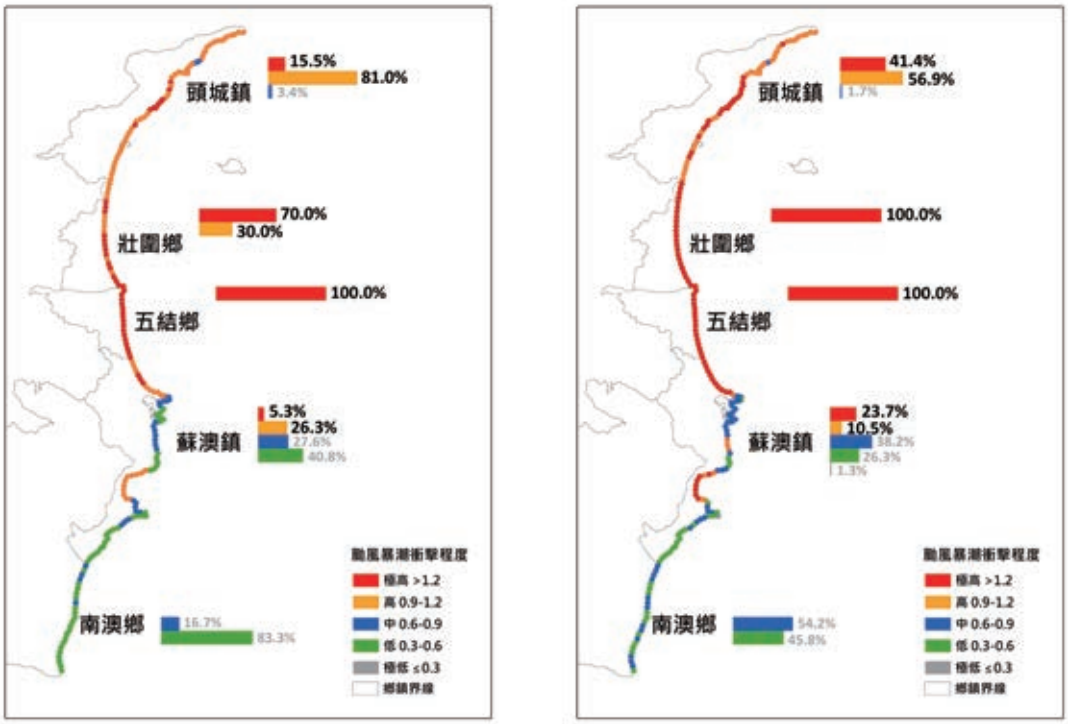


圖4.3.3.5　宜蘭縣各臨海行政區，在基期 (左圖) 與RCP8.5 (右圖) 情境下，臺灣海岸最大颱風暴潮偏差衝擊及各級距所佔該行政區海岸線百分比圖 (資料來源：TCCIP計畫產製)

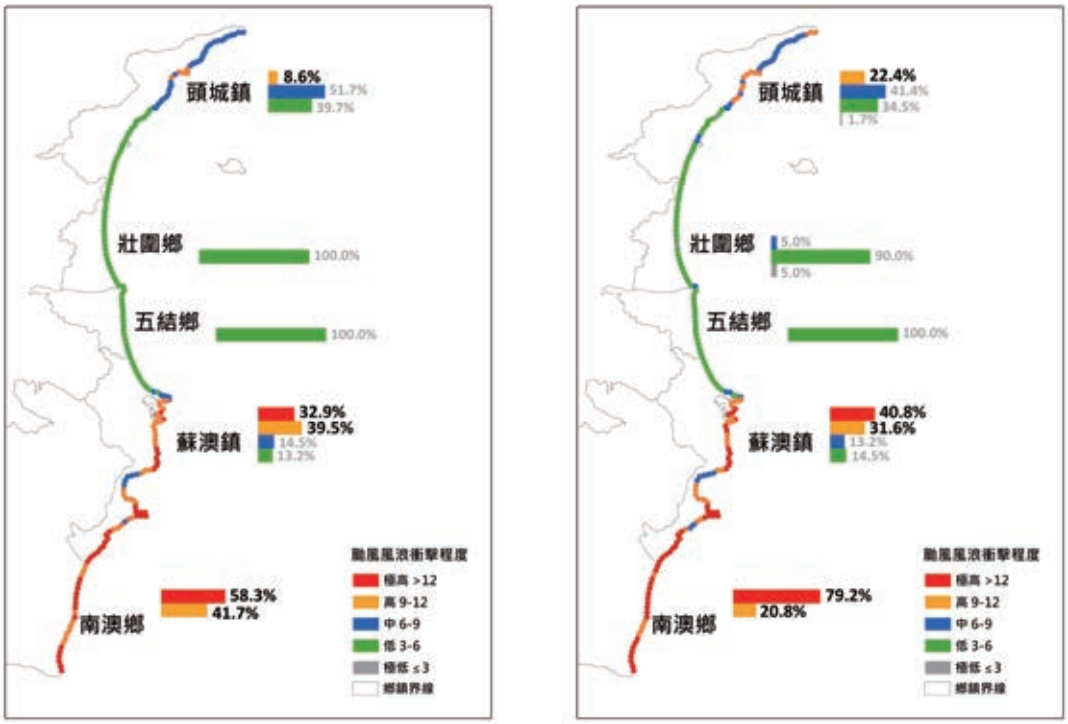


圖4.3.3.6　宜蘭縣各臨海行政區，在基期 (左圖) 與RCP8.5 (右圖) 情境下，臺灣海岸最大颱風風浪衝擊及各級距所佔該行政區海岸線百分比圖 (資料來源：TCCIP計畫產製)

4.3.4　氣候變遷海岸調適與科研缺口

4.3.4.1　海岸調適案例

實際施行的國內外海岸領域調適案例，可作為海岸地區未來調適規劃的參考，在選擇調適方法時，地方政府、當地居民與主管機關之間的意見交流與磨合至關重要。對於興建大型防潮閘門或防洪牆等專案，土地收購所牽涉的問題更是需要全方位考量，如居民是否同意離開居住地、合理的收購價格以及後續住宅安排等，必須有完整的配套。此外，收購易重複受災且未來風險潛勢高的區域土地，轉換為低度利用國土，例如英國雅培廳管理調整計畫或美國藍田計畫等，也面臨當地居民風險認知及經濟活動轉換等變數。近年來，海岸景觀的防護性、美觀性及親水性更受重視，而原本的硬性構造 (如消波塊、堤防等) 或可改以潛堤沒入海中，同時也需滿足安全性及美觀性的雙重考量。例如，透過種植紅樹林或人工沙丘養護等方式，除了達到減碳及防護的效果，也可節省經費。

進一步說明前述案例：美國紐澤西州木橋鎮 (Woodbridge Township) 的藍田收購計畫 (Blue Acres Buyout Program) 以及英國艾塞克斯郡雅培廳的沿岸管理調整計畫 (Abbotts Hall Managed Realignment Scheme) 為例：

美國紐澤西州木橋鎮屬於特殊水患區，歷年因豪雨或颶風導致的淹水災情嚴重。根據未來推估，海平面上升以及紐澤西州本身的地層下陷影響，導致部分沿岸社區未來將面臨常態且極端的水患。1995年開始，紐澤西州環保局推出藍田收購計畫，運用政府經費收購易遭受洪患的房地產，收購後拆除房屋並將權狀移交給州政府，而這些被收購的土地變為禁止開發區域，將永久保存為開放空間，可供公眾休閒使用，並成為未來風暴和洪水的天然緩衝區。藍田計畫實施後，被美國聯邦緊急事務管理署認可為全國最佳實踐，最終木橋鎮總收購範圍達48公頃，住宅區與既存沼澤地變更為禁建區，也進一步打造成氾濫平原復育地區，成為物種豐富的鹽沼棲地。

英國艾塞克斯郡雅培廳 (Abbotts Hall, Essex) 面臨海平面上升所帶來的洪患問題，但海堤本體老化且昂貴的持續維護費用，並不符合成本效益，加上雅培廳被認定為具國際野生動植物重要性的區域，也因擁有理想的鹽沼再生條件而被認為是合適的鹽沼棲息地復育地點，這些條件促成了沿岸管理調整方案的設計與實施。藉由移除沿海防禦構

造，允許海水流入沿海區域，促進鹽沼生態系發展，最終有80公頃的耕地恢復成鹽沼、灘地、沿岸草地和過渡的棲息地。新的潮間帶淹沒區形成自然且永續的沿岸防禦，並有助於減緩該區域周圍的沿岸擠壓 (Coastal Squeeze) 問題，是具成本效益且能適應海平面上升的解決方案。

由調適案例的施行經驗反饋可知，著重整體規劃，運用多樣化的調適方案，因地制宜、截長補短，海岸調適措施才能達到實現居民期望、政府規劃及有效防範氣候變遷衝擊的三贏局面。

藉由海岸衝擊模擬評估，可以瞭解在氣候變遷影響下，臺灣海岸地區所面臨的關鍵問題以及目前科學研究所能夠解決的程度。相似的氣候變遷衝擊可能同時對全球的海岸產生不同程度的影響，然而由於個別環境條件的差異、科研能力、政策方向和民眾接受程度等因素，適用的調適方法也會因地制宜，而產生不同的調適科研缺口 (Bradley et al., 2015; Colenbrander et al., 2017; Mills et al., 2015; Sinay & Carter, 2020)。以下將臺灣海岸地區可能存在的調適科研缺口，分為風險評估缺口以及政策與治理缺口，於4.3.4.2節與4.3.4.3節進行探討。

4.3.4.2 風險評估缺口

風險評估缺口可從未來海岸變遷的不確定性、颱風路徑推估的不確定性、海洋資料獲取不易、精進監測資料的時空間解析度、複合型風險的探討等角度切入探討。

1. 未來海岸變遷的不確定性

各類型的海岸衝擊模擬皆需要精確的近岸地形，才能有更好的模擬結果，但海岸地形變動很快，可能會因為一場颱風豪雨事件或設施興建，導致岸線與近岸高程產生變化，在推估未來海岸衝擊時，可能會因海岸地形的不同而影響模擬的結果與評判，有效的海岸管理與規劃策略，需要可靠的海岸地形變遷推估，目前已有模式可進行未來海岸線或海岸地形變遷趨勢模擬，但還需要更多不同的空間尺度，更優化的模式，以縮小評斷差距 (Hurst et al., 2021; Ranasinghe, 2020)。

2. 颱風路徑推估的不確定性

颱風的形成和發展受到多種因素交互作用，包括：大氣條件、海洋溫度、地形等，這使得颱風路徑和強度變化的推估難以有一致性。本文所進行的颱風暴潮和颱風風浪預測，係基於過去已經發生過的颱風資料，並對其強度 (風速) 進行增強後所建立的模擬成果。然而，在理論上無法完全涵蓋所有歷史以外的颱風路徑和強度情況。換言之，對於颱風暴潮和颱風風浪的分析結果仍然存有一定的不確定性。此外，目前僅以推估之歷史最大暴潮偏差量進行衝擊分析，易出現不確定性，未來可考慮以整體機率分布方式，例如，重現期，可使衝擊分析更具備統計學理意義。

3. 海洋資料獲取不易

海洋水文資料的獲取具有困難性，且頻率和量測地點難以固定，這導致水文觀測資料相當缺乏。然而，大部分海岸模式需要依賴現場實測資料來驗證模式的結果，以確保模式所做的推估具有準確性。因此，珍貴且為數不多的水文觀測資料，造成模式校驗的難度。

4. 精進監測資料的時空間解析度

為便於維運，目前海上浮標多數布置於近海處，因此，遠洋的海面監測資料相當匱乏，以致於降低資料整體的空間解析度。此外，臺灣及其離島因板塊作用推升及海岸地區地層下陷所造成的地形變化，可視為相對的海平面擾動，亦需要長期監測數據作為評估的依據。雖然，衛星可以彌補浮標在空間分布的不足，但衛星資料目前仍無法達到定點每小時的時間解析度，因此，更高的時間與空間解析度依舊是海洋、海岸科學研究中重要的突破方向。

5. 複合型風險的探討

近年，風險研究的方向逐漸從單一風險轉變至複合型風險的評估與探討，即將原先不同系統的風險以線性或給予權重的方式疊加，例如，欲討論海平面上升與強降雨造成的複合式淹水風險時，簡單的作法是兩者分開模擬推估後，再將海平面上升形成的淹沒範圍直接疊加降雨造成的淹水範圍，以作為複合式淹水風險的評估依據，然而，系統與系統之間的交互作用可能是非線性，且可能會以間接的方式增加 (減少) 整體風險，例如，海平面上升會加劇海岸侵蝕、土壤鹽化，而間接使得海岸生物喪失棲息地，所以，需要以更宏觀的視角，全面且整體的考量複合型風險。

4.3.4.3 政策與治理缺口

政策與治理缺口可從法規面的政策落實程度，以及海岸開發管理的空間規劃使用等角度切入探討。

1. 政策落實程度

海岸的問題漸受重視，海岸相關法規、政策也推行多年，如：海岸管理法、整體海岸管理計畫、海岸保護計畫、海岸防護計畫等，並有專責主管機關整合原本各機關所負責的海岸地區議題，而國家氣候變遷調適行動方案與全國國土計畫等也將氣候變遷的議題帶入，在減災規畫思考時也會引入調適的思維，但中央規畫的願景，因各地環境、經費支持、民眾觀感等原因，減災或調適的方法並非全都能落實，欠缺適宜科學數據支持的地點，是科學研究者可以繼續努力的方向，持續滾動檢討修正現行海岸地區治理相關法規的不足之處。

2. 海岸開發管理

在海岸調適過程中，有時會因海岸區域面臨的衝擊型態，建議進行海岸區域的土地使用方式轉換，土地利用的轉換會連帶影響原地區的生活形式、設施規劃和產業型態，進而需推動產業轉型，此時受影響民眾的認同程度與會是調適方案推動的關鍵因素之一，如能提供更多民眾所需的科學資訊，能協助民眾做出更無悔的決定，也能讓推動當局更綜觀的考量調適方案的執行細節。

4.3.5 結語

臺灣位處於西北太平洋，特殊的地理位置經常受到颱風災害的影響。然而，海平面上升、海岸淹水危害以及颱風暴潮、風浪衝擊等現象，對臺灣及離島的社會、經濟和環境帶來了嚴重的威脅。因此，面對氣候變遷的環境，海岸領域目前最迫切的科研缺口是建立一套完整的海岸災害風險評估和管理框架。這個風險評估應該整合多學科知識，包括颱風、海洋學和氣候變化等領域的專業知識，以全面評估和預測海岸地區的災害風險。

此外，需要投入更多關於海岸侵蝕機制、沉積運動和海洋動力學等方面的研究，以提高對海岸地區的風險認識和預警能力。不同利害關係人在應對臺灣海岸地區面對氣候變遷風險，具有不同的角色和責任。政府部門應強化海岸地區管理，從治理面進行整體性規劃，並提供相應的資金和政策支持。同時，政府應該推動海岸災害風險管理的相關研究和技術創新，以提高海岸地區的災害預警和應急能力。民眾可以通過加強自我防範意識和災害教育，提高對海岸地區風險的認知。另外，民眾也應該支持和參與當地的環境保護和生態修復工作，以提高海岸地區對極端氣候事件的適應能力。企業界可以發揮創新和科技的力量，投入研發和應用相關技術，例如海岸工程、防洪技術、氣象監測系統等，以提高海岸地區的風險管理和防護能力。學術界和研究機構在臺灣海岸地區風險管理方面扮演著關鍵角色。他們可以加強跨學科的合作，促進海岸科學、氣象學、工程學等領域之間的知識交流和合作。同時，持續推動海岸災害風險評估和監測技術的研究，提供科學依據和技術支持，以改進海岸地區的風險管理能力。

展望未來，臺灣因應海岸地區氣候風險與韌性提升有巨大的發展潛力。綜合利害關係人的努力和合作，可以建立一個更加安全、永續且繁榮的臺灣海岸環境。未來的研究和科技創新將繼續提供更精確的風險評估和預警系統，並發展出更有效的防災措施和建設技術。同時，推動永續發展將有助於減緩氣候變遷影響，並確保臺灣海岸地區的生態環境得到保護和恢復。臺灣面臨著海平面上升、海岸淹水危害以及颱風暴潮風浪衝擊等風險，但通過政府、民眾、企業界和學術界的積極參與和努力，可以降低災害風險，保障人民的生命和財產安全，同時推動臺灣的永續發展。

參考文獻

經濟部水利署 (2010)。**強化臺灣西南地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫 (1/2)**。台北市：經濟部水利署 (台北辦公區)。

經濟部水利署 (2011)。**強化臺灣西南地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫 (2/2)**。台北市：經濟部水利署 (台北辦公區)。

經濟部水利署 (2012)。**強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫 (1/2)**。台北市：經濟部水利署 (台北辦公區)。

經濟部水利署 (2013)。**強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫 (2/2)**。台北市：經濟部水利署 (台北辦公區)。

Babanin, A. V., Hsu, T., Roland, A., Ou, S., Doong, D., & Kao, C. C. (2011). Spectral wave modelling of typhoon Krosa. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 11*(2), 501-511. https://doi.org/10.5194/nhess-11-501-2011

Becker, M., Karpytchev, M., & Hu, A. (2023). Increased exposure of coastal cities to sea-level rise due to internal climate variability. *Nature Climate Change, 13*(4), 367-374. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01603-w

Bradley, M., Van Putten, I., & Sheaves, M. (2015). The pace and progress of adaptation: Marine climate change preparedness in Australia s coastal communities. *Marine Policy, 53,* 13-20. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.11.004

Cardone, V. J., Jensen, R. E., Resio, D. T., Swail, V. R., & Cox, A. T. (1996). Evaluation of contemporary ocean wave models in rare extreme events: The "Halloween storm" of October 1991 and the "Storm of the century" of March 1993. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 13*(1), 198-230. https://doi.org/10.1175/1520-0426(1996)013<0198:eocowm>2.0.co;2

Chang, C., Shih, H., Chen, W., Su, W., Lin, L., Yu, Y., & Jang, J. (2018). Hazard assessment of typhoon-driven storm waves in the Nearshore waters of Taiwan. *Water, 10*(7), 926. https://doi.org/10.3390/w10070926

Chang, T., Chen, H., Fu, H., Chen, W., Yu, Y., Su, W., & Lin, L. (2021a). An operational high-performance forecasting system for city-scale pluvial flash floods in the southwestern plain areas of Taiwan. *Water, 13*(4), 405. https://doi.org/10.3390/w13040405

Chang, T.-Y., Chen, H., Hsiao, S.-C., Wu, H.-L., Chen, W.-B., (2021b). Numerical Analysis of the Effect of Binary Typhoons on Ocean Surface Waves in Waters Surrounding Taiwan. *Front. Mar. Sci., 8,* 749185. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.749185

Chen, W., Chen, H., Lin, L., & Yu, Y. (2017). Tidal current power resources and influence of sea-level rise in the coastal waters of Kinmen island, Taiwan. *Energies, 10*(5), 652. https://doi.org/10.3390/en10050652

Chen, W., Chen, H., Hsiao, S., Chang, C., & Lin, L. (2019). Wind forcing effect on hindcasting of typhoon-driven extreme waves. *Ocean Engineering, 188,* 106260. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106260

Chen, W., & Liu, W. (2014). Modeling flood Inundation induced by river flow and storm surges over a river basin. *Water, 6*(10), 3182-3199. https://doi.org/10.3390/w6103182

Chen, W., & Liu, W. (2016). Assessment of storm surge Inundation and potential hazard maps for the southern coast of Taiwan. *Natural Hazards, 82*(1), 591-616. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2199-y

Chen, W., & Liu, W. (2017). Investigating the fate and transport of fecal coliform contamination in a tidal estuarine system using a three-dimensional model. *Marine Pollution Bulletin, 116*(1-2), 365-384. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.031

Colenbrander, D., & Bavinck, M. (2017). Exploring the role of bureaucracy in the production of coastal risks, city of Cape Town, South Africa. *Ocean & Coastal Management, 150,* 35-50. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.11.012

DeConto, R. M., & Pollard, D. (2016). Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature, 531*(7596), 591-597. https://doi.org/10.1038/nature17145

Horton, B. P., Rahmstorf, S., Engelhart, S. E., & Kemp, A. C. (2014). Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300. *Quaternary Science Reviews, 84,* 1-6. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.002

Hsiao, S., Chen, H., Chen, W., Chang, C., & Lin, L. (2019). Quantifying the contribution of nonlinear interactions to storm tide simulations during a super typhoon event. *Ocean Engineering, 194,* 106661. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106661

Hsiao, S., Fu, H., Chen, W., Chang, T., Wu, H., & Liang, T. (2022). Assessment of future possible maximum flooding extent in the midwestern coastal region of Taiwan resulting from sea-level rise and land subsidence. *Environmental Research Communications, 4*(9), 095007. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac8f15

Kopp, R. E., Horton, R. M., Little, C. M., Mitrovica, J. X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D. J., Strauss, B. H., & Tebaldi, C. (2014). Probabilistic 21st and 22nd century sea - level projections at a global network of tide - Gauge sites. *Earth's Future, 2*(8), 383-406. https://doi.org/10.1002/2014ef000239

Lee, H. S., & Kim, K. O. (2015). Storm surge and storm waves modelling due to typhoon Haiyan in November 2013 with improved dynamic meteorological conditions. *Procedia Engineering, 116,* 699-706. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.353

Liu, W., Chen, W., & Kuo, J. (2008). Modeling residence time response to freshwater discharge in a mesotidal Estuary, Taiwan. *Journal of Marine Systems, 74*(1-2), 295-314. https://doi.

org/10.1016/j.jmarsys.2008.01.001

Liu, Q., Babanin, A., Fan, Y., Zieger, S., Guan, C., & Moon, I. (2017). Numerical simulations of ocean surface waves under Hurricane conditions: Assessment of existing model performance. *Ocean Modelling, 118,* 73-93. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.08.005

Hurst, M.D., Muir, F.M. E., Rennie, A., & Hansom, J.D. (2021). *Dynamic Coast - Future Coastal Change.* Technical Report, Scotland's Centre of Expertise for Waters (CREW).

Mills, M., Leon, J. X., Saunders, M. I., Bell, J., Liu, Y., O'Mara, J., Lovelock, C. E., Mumby, P. J., Phinn, S., Possingham, H. P., Tulloch, V. J., Mutafoglu, K., Morrison, T., Callaghan, D. P., Baldock, T., Klein, C. J., & Hoegh‐Guldberg, O. (2015). Reconciling development and conservation under coastal squeeze from rising sea level. *Conservation Letters, 9*(5), 361-368. https://doi.org/10.1111/conl.12213

Moon, I., Ginis, I., Hara, T., Tolman, H. L., Wright, C. W., & Walsh, E. J. (2003). Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under Hurricane wind forcing. *Journal of Physical Oceanography, 33*(8), 1680-1706. https://doi.org/10.1175/2410.1

Mori, N., Kato, M., Kim, S., Mase, H., Shibutani, Y., Takemi, T., Tsuboki, K., & Yasuda, T. (2014). Local amplification of storm surge by super typhoon Haiyan in Leyte Gulf. *Geophysical Research Letters, 41*(14), 5106-5113. https://doi.org/10.1002/2014gl060689

Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment. *PLOS ONE, 10*(6), e0131375. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131375

Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J.E., Mclean, R.F., Ragoonaden, S. & Woodroffe, C.D. (2007). *Coastal Systems and Low-Lying Areas. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Van Der Linden, P.J. and Hanson, C.E., Eds., Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315–356.

Ranasinghe, R. (2020). On the need for a new generation of coastal change models for the 21st century. *Scientific Reports, 10*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-58376-x

Roland, A., Zhang, Y. J., Wang, H. V., Meng, Y., Teng, Y., Maderich, V., Brovchenko, I., Dutour-Sikiric, M., & Zanke, U. (2012). A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. Journal of Geophysical Research: *Oceans, 117*(C11), n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2012jc007952

Shih, H.J., Chen, H., Liang, T.Y., Fu, H.S., Chang, C.H., Chen, W.B., Su, W.R., & Lin, Y.Y. (2018). Generating potential risk maps for typhoon-induced waves along the coast of Taiwan. *Ocean. Eng. 163,* 1–14. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.045

Sinay, L., & Carter, R. W. (2020). Climate change adaptation options for coastal communities and local governments. *Climate, 8*(1), 7. https://doi.org/10.3390/cli8010007

Smith, K. (1996). Environmental Hazards: *Assessment Risk and Reducing Disaster, 2nd ed.* Routledge: London, UK.

Wolf, J. (2009). Coastal flooding: impacts of coupled wave–surge–tide models. *Nat Hazards 49,* 241–260. https://doi.org/10.1007/s11069-008-9316-5

Y Yu, Y., Chen, H., Shih, H., Chang, C., Hsiao, S., Chen, W., Chen, Y., Su, W., & Lin, L. (2019). Assessing the potential highest storm tide hazard in Taiwan based on 40-Year historical typhoon surge Hindcasting. *Atmosphere, 10*(6), 346. https://doi.org/10.3390/atmos10060346

4.4 糧食生產與安全

姚銘輝[1]、徐永衡[2]、劉雨蓁[2] (農業)
施意敏[3]、闕帝旺[2] 、冷柏安[3] (畜牧業)
侯清賢[4、5]、蔡至恒[5]、盧柏溢[4] (養殖漁業)
陳佳香[6]、張可揚[6] (海洋漁業)

[1]農業部農業試驗所、[2]國家災害防救科技中心、[3]農業部畜產試驗所北區分所・畜產輔導系、[4]國立高雄科技大學・永續漁業發展研究中心、[5] 國立高雄科技大學・漁業科技與管理系、[6]農業部水產試驗所海洋漁業組

摘要

全球糧食安全受氣候變遷衝擊的影響是各國所關注的重要議題，尤其聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 於2021年公布之第六次評估報告 (The 6th Assessment Report, AR6) 指出，未來全球溫度將朝向加速暖化及降雨型態極端化的預測下，這將衝擊人類生活，尤其糧食安全是氣候變遷衝擊下受全球關心的民生議題，也是需提前因應調適的研究課題，畢竟人類需要食物以維持生存。全球糧食生產及供應，過去在作物育種研發、栽培制度改變及機械化生產的進展，整體糧食生產及供應量有長足進步，但在氣候變遷衝擊下各項糧食作物產量的評估，糧食安全將深具挑戰，尤其氣候變遷導致災害發生頻率增加，更可能致使每年糧食供應不穩定。至於提供蛋白質重要來源的畜牧及漁產業同樣面對氣候變遷所帶來的衝擊，畜養動物雖可在設施內生產，但全球暖化將導致乳牛泌乳量減少、雞蛋減產及豬隻產肉率下降等情況，高溫及高濕環境下病蟲害孳生及疫情爆發，威脅畜產業的永續發展。臺灣過去遠洋及近海漁業發達，但仍需面對漁權糾紛及海洋資源日漸枯竭等問題，近年來漁產業逐漸以養殖漁業為主力，但依據AR6評估報告指出，水產養殖漁業亦將面臨洪水、疾病、寄生蟲、有害藻華等極端事件。臺灣糧食自給率僅31%，相較於歐美國家或鄰近日本及韓國皆屬偏低，確保糧食穩定供應是政府施政重要議題，雖然科研界對氣候變遷未來情境更為清晰，但也發現環境惡化程度已加速發生，調適作為及減緩機制的確立更顯迫切。國內學研界及各部會長期皆有氣候變遷計畫，也有豐富成果及調適技

術推動，但由於氣候變遷衝擊是全面性，並且不應僅單獨強調生產量，而是各產業如何與環境生態共存，強調以自然為本的解方 (Nature-based Solutions, NbS)，將農業生產與生態維護整合，避免對環境資源的過度消耗，生產過程也強調資源利用效率的提升，同時，雖然農業部門之溫室氣體排放僅占2%，除生產過程減少溫室氣體排放的技術研發外，增加土壤、森林及海洋的碳匯，更能彰顯農業對於淨零排放及環境永續的貢獻。

整體而言，未來氣候變遷對農業生產及糧食安全將產生威脅，謀求調適解決方法以建構韌性農耕體系刻不容緩，但糧食體系是非常複雜的，除農產品供應及需求量外，市場競爭力、生產成本、農民收益及適地適作等因素皆應整體考量，僅限於單一因素考量 (例如生產量) 不符合現況需求，將導致研發之調適策略窒礙難行。本節除說明臺灣農業生產及糧食安全所面臨衝擊外，也解析各項糧食構成因素之脆弱度，提出未來調適科研之研發缺口，希望緩解氣候變遷對於臺灣農業的衝擊，以營造永續之糧食安全策略及生產環境。

4.4.1　農業

4.4.1.1　前言

IPCC於2021年8月9日公布AR6，其採用的情境結合「共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 與代表濃度路徑 (Representative Concentration Pathways, RCPs)」，其中SSPs代表社會經濟發展、RCPs代表溫室氣體 (簡稱GHG) 排放或濃度變化所造成的輻射強迫力結果，簡稱為SSP排放情境 (SSP‐RCPs)。因應此報告的公布，臺灣氣候變遷科學團隊 (包含國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺計畫 (Taiwan Climate Change Projection InformationPlatform, TCCIP)」) 發布臺灣未來氣候趨勢分析。臺灣地區未來短期 (2021年至2040年) 的區域平均氣溫增溫0.6°C至0.8°C (中位數)，其差異不大；世紀中期 (2041年至2060年) 不同情境稍有差異，SSP1-2.6增溫1°C、SSP5-8.5則增溫1.6°C；長期 (2081年至2100年) 推估則出現比較明顯的差別，SSP1-2.6維持中期的增溫幅度1°C，但SSP5-8.5則暖化程度增長至3.4°C。AR6 SSP1-2.6情境下，從2040年後夏季大約穩定都維持在150天左右，冬季日數從2050年後大約穩定都維持在45天左右，其他情境下夏季都是隨著時間持續增加，冬天則反之。未來年總降

雨量將增加，單日暴雨強度增加，但連續不降雨日數亦是增加，即降雨型態將極端化；影響臺灣颱風個數減少，但強颱比例增加。

1996年舉行的世界糧食高峰會 (The World Food Summit) 定義糧食安全 (food security) 為：任何人在任何時候均能實質且有效地獲得充分、安全且營養的糧食，以達符合其飲食及糧食偏好之活力健康生活。氣候變遷衝擊糧食供應體系，由現況可知不論是農業、漁業及畜產業皆深受氣候變遷影響，進而威脅到國家的糧食安全。我國以熱量計算之綜合糧食自給率僅31%，顯示我國糧食進口依存度過大，而國內糧食作物生產屢受氣象災害侵襲，耕地過小不易以機械化降低成本，農地休耕及移作他用等問題，皆影響糧食生產且難以擴大其增產潛能，因此應透過政策推動以確保國內長期且穩定的糧食生產，同時也宜透過合作及協議確保國外進口糧食供應無虞。氣候變遷對糧食安全及生產的影響面極廣 (圖4.4.1.1)，其中除糧食供應量本身外，還包括農業環境、農民收益、價格成本及貿易運輸等，我國應積極評估整體糧食安全之脆弱度及恢復力，研擬調適策略以因應氣候變遷造成之衝擊，同時加強研發災變天氣下農業減災科技，對未來我國糧食生產決策作完整規劃，以確保糧食安全及農業永續發展。

IPCC於2022年發布AR6第二冊「衝擊，調適及脆弱度」的報告 (IPCC, 2022)。在此份報告中指出，糧食安全是永續發展重要指標，但整體糧食生產及消費是複雜系統，受許多因素相互影響，尤其是氣候因素，氣候變遷衝擊下影響生產區域、產量及品質，將使全球糧食安全陷於更不確定的情境，並且氣候變遷衝擊隨著時間的推移而惡化，尤其本世紀中之後影響速度將加快。自1960年以來，全球主要農作物的產量增加2.5倍至3倍，主要原因是育種、施肥、灌溉和病蟲害綜合管理等技術改善或提升，但許多研究發現近期氣候變化對作物產量造成嚴重衝擊，特別是在非洲、拉丁美洲和加勒比地區的影響最大 (Duan et al., 2022)。雖然有些作物在不同生育階段，對氣候因子敏感度之研究尚未完全瞭解，但整體而言，氣候變遷對大部分作物的影響都是呈負面趨勢的 (高度信心)，不論是糧食或其他農作物推測在熱帶、亞熱帶和半乾旱等地區將減產且幅度相近。而現有農場管理技術的調適能力在世紀中可達成減少產量損失約8%，至世紀末約11% (Hasegawa et al., 2022)，但仍不足以抵消氣候變遷帶來的衝擊。

面對氣候變遷對於農業生產及糧食安全的衝擊，AR6調適報告建議推廣混作 (mixed cropping) 生產以達到控制雜草、害蟲和疾病的機會，尋求農業栽培友善環境，同時強

調以自然為本的解決方案 (Nature-based Solutions, NbS)，將農業生產與生態維護整合，例如減少無機肥料的使用以降低農田溫室氣體排放，減少耕犁次數以增加土壤碳匯，提升農田水分利用效率以增加土壤保水能力，維護生物多樣性及減少物種流失。過去農業生產以工業化思維出發，強調大面積種植單一品種，機械化種植收穫以降低成本增加收益。然而，當氣候風險威脅農業生產，單一化栽培模式面對氣候風險將失去對災害調適的韌性，也可能導致病蟲害的大規模爆發；小面積及多元化農作物種類的耕作制度，在維護生物多樣性下也能降低生產風險 (Simelton et al., 2021)。

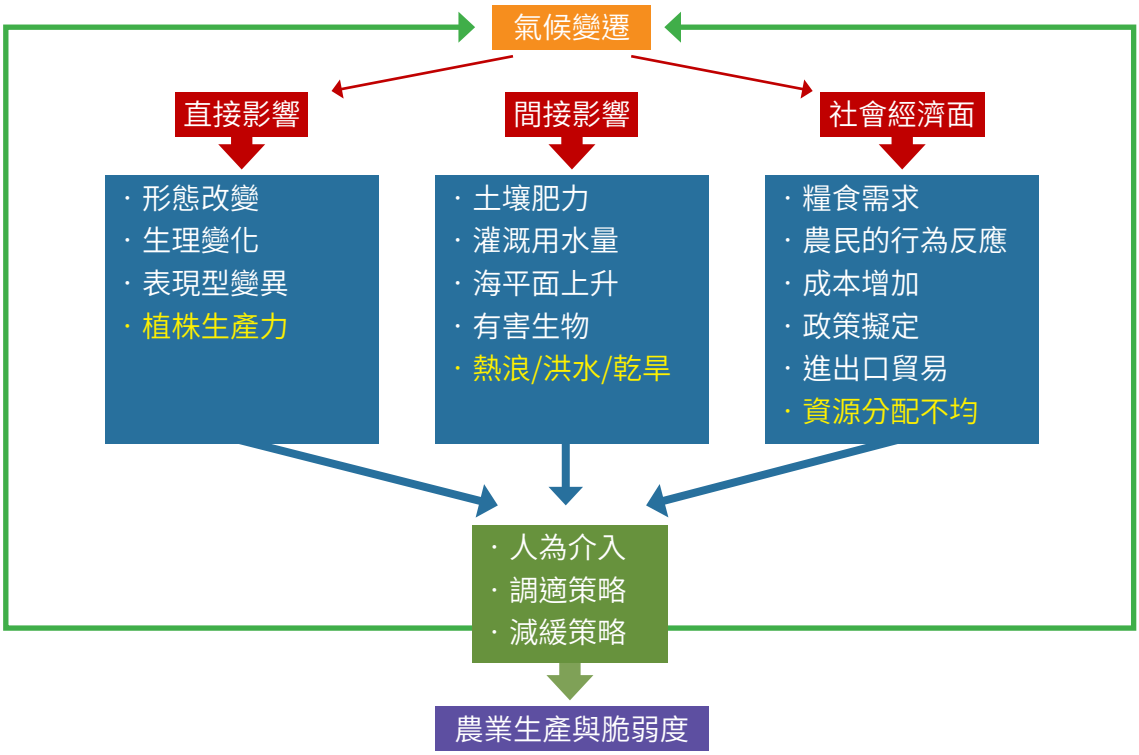


圖4.4.1.1　氣候變遷對農業生產的直接、間接和社會經濟影響
(資料來源：Raza et al., 2019, Figure 1.)

4.4.1.2　臺灣糧食安全及農作物生產

4.4.1.2.1　糧食自給率

糧食自給率 (food self-sufficiency rate) 係指國內消費之糧食由國內生產供應之比率。考量糧食主要在維持人類生存，若按糧食提供熱量加以計算，呈現國人維生所需糧食之自給程度，稱之「以熱量計算之糧食自給率」。圖4.4.1.2為30年 (1990年至2021年) 來臺灣以熱量計算之糧食自給率的變化，由43%下降至31%，下降原因是黃豆、小麥及

玉米等大宗糧食作物仰賴大量進口，但適合臺灣氣候種植且完全機械化之稻米，則因為國人飲食習慣西化，每人年消費量顯著下降，至2021年僅剩下43公斤。糧食自給率是世界各國所重視，因確保糧食供應穩定是政府的責任，在具有作物耕地的國家無不以提高糧食自給率為目標，美國、加拿大、澳洲、法國的糧食自給率皆超 100%，而與我國農耕環境相近之國家，如日本41%及韓國45%，顯示臺灣糧食自給率相對甚低。臺灣過去曾高達20萬公頃的休耕農地，到2013年時，雖然目前休耕農地面積已經降至11萬公頃左右，但多數是在政府以活化農地的政策下，用來種植花卉或地方特產，而不是糧食作物，使得臺灣糧食自給率逐年下滑。

臺灣地狹人稠的情形，所需糧食皆由國內自行生產是不切實際的想法，例如我國每年進口500萬公噸玉米，即便臺灣所有耕地皆種植玉米也無法達到需求量，因此，減少進口量也是提升糧食自給率的手段之一，分析我國進口玉米9成以上皆為飼料用，肉類食品雖提供必要蛋白質及脂肪，但過多攝取反而造成身體的負擔，尤其脂肪攝取過多與心血管疾病有密切關係。事實上，依據IPCC AR6分析報告指出，未來全球各項糧食作物單位面積生產量皆下降下，調適作為難以僅針對生產量 (或供應量)，唯有減少消費才能有效改變現況，畢竟 1 公斤牛肉需要9公斤的穀類才能產出，豬肉需4公斤，雞肉需2公斤。以提升糧食利用效率為論點，在氣候變遷衝擊糧食生產的大環境下，鼓勵調整

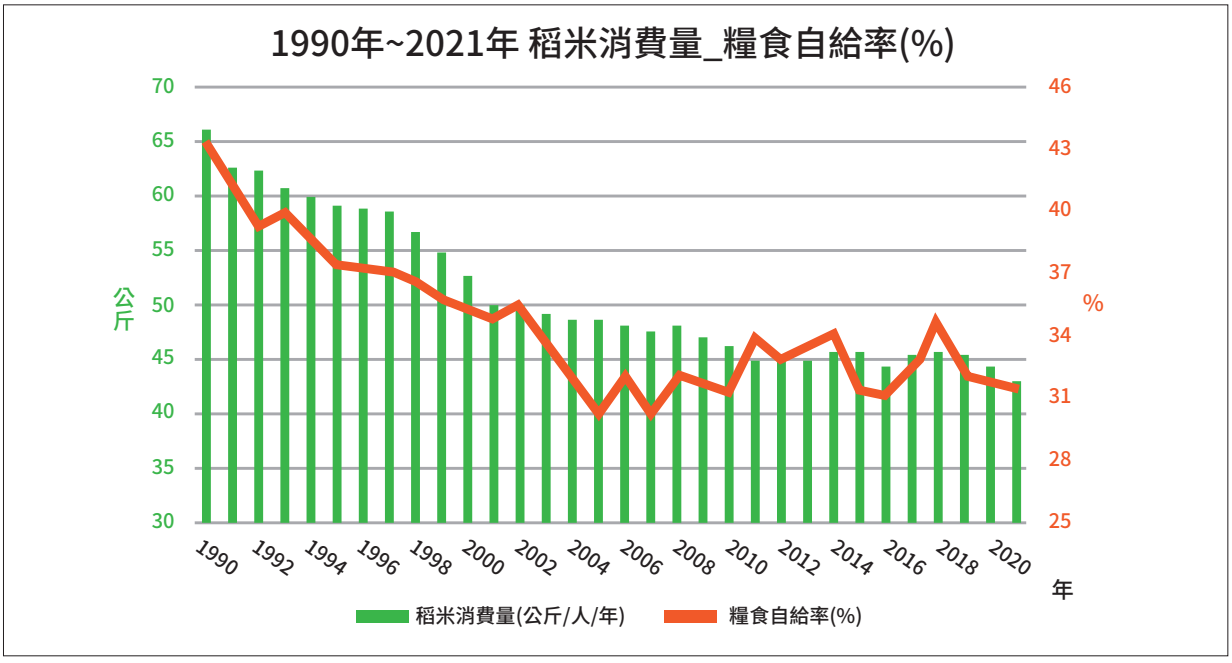


圖4.4.1.2　1990年至2021年臺灣糧食自給率及稻米食用量之變化
(資料來源：農業部農業試驗所)

膳食習慣以降低對糧食需求量，是兼顧糧食安全與國民健康之雙贏策略，同時能讓社會大眾有共鳴，使其理解生活中的改變對於個人健康或糧食安全皆有助益。若國人飲食習慣比照日本人少脂肪及多碳水化合物的飲食攝取習慣，經計算每年即可大幅減少玉米的進口量，再配合恢復種植休耕地及持續推動「大糧倉」政策，可提高我國糧食自給率。另一方面，減少糧食浪費也是聯合國糧農組織 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 所極力推動的議題。根據糧農組織的《糧食和農業狀況》報告 (FAO, 2019)，世界上約有14%的糧食在收穫後到達零售商前損失；而2021年聯合國環境規劃署的食物浪費指數報告 (UNEP FOOD WASTE INDEX REPORT 2021) (Forbes H et al., 2021) 指出，另有17%的食物浪費在零售業和消費者，尤其是家庭中被浪費。由糧農組織統計資料，全球每年損失和浪費的食物可以養活12.6億飢餓人口。

4.4.1.2.2　農作物生產現況及未來評估

臺灣糧食自給率偏低主因為糧食作物大量進口所致，至於根莖類作物、蔬果類、禽畜類及漁產品皆可維持在80%以上，所以農作物生產現況說明仍以糧食作物為主，尤其各縣市皆有種植之水稻及玉米作為評估目標。我國稻米一年共兩期作，平均種植面積約27萬公頃，糙米產量年平均約127萬公噸。因氣候適合種植水稻，長年育種目標以提高米質及降低災損為目標，種植及採收過程皆機械化，符合減少勞力缺口及穩定生產的農業栽培需求，目前水稻仍是臺灣最重要糧食作物，依據研究氣候暖化可能會造成亞洲主要水稻產區10%至15%的產量損失，尤其在旱季夜間溫度升高1°C則減產10%，白天溫度升高在28°C至34°C之間，每升高1°C則產量下降高達7%至8% (Peng et al., 2004)。隨者氣候變遷的衝擊，TCCIP團隊利用DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 作物生長模式將未來氣候資料輸入以評估未來水稻及玉米產量 (圖4.4.1.3)，其中產量改變率為與基期的比較差異，水稻在世紀中及世紀末產量改變率整體趨勢下降，平均分別減少13%及18%。整體而言，未來水稻產量朝向減產趨勢，並隨不同氣候升溫情境而加速減產趨勢，減產原因為升溫縮短營養生長期，在生質量累積不足下，穀粒充實不飽滿而減產，就影響區域以北部及東部地區最為明顯 (Yao & Lur, 2021)。另一方面，穀物內營養成分的轉變也是值得關注的議題，依據研究在大氣中升溫及二氧化碳濃度增加下，水稻的營養品質將明顯降低，包括蛋白質、微量元素及維生素B (Zhu et al., 2018)，科學研究上針對營養價值的改善作為其育種目標稱為biofortification，是未來因應氣候變遷之作物育種方向之一 (Rezvi et al., 2022)。玉米在全臺皆可種植，2021年種植面積1.5萬公頃，產量13.5萬公噸，其中國產飼料玉米產量

為7.5萬噸，然而每年需進口飼料玉米500萬公噸，生產量與進口量之間有很大差距，世界玉米出口大國依序包括美國、巴西、阿根廷、烏克蘭，以上四個國家的玉米出口量佔全球玉米貿易量9成左右，臺灣玉米進口以美國及巴西為大宗。臺灣玉米產量平均每公頃4.6公噸，TCCIP團隊分析未來氣候情境下臺灣玉米產量仍為減產趨勢 (圖4.4.1.3) (姚銘輝等，2023)，在RCP8.5情境下，世紀中及世紀末之玉米產量改變率分別減少10%及17%，影響區域仍以北部及東部地區最為明顯。至於其他糧食作物如大豆及小麥，臺灣氣候條件或成本考量並不合適種植，未來仍需仰賴進口。

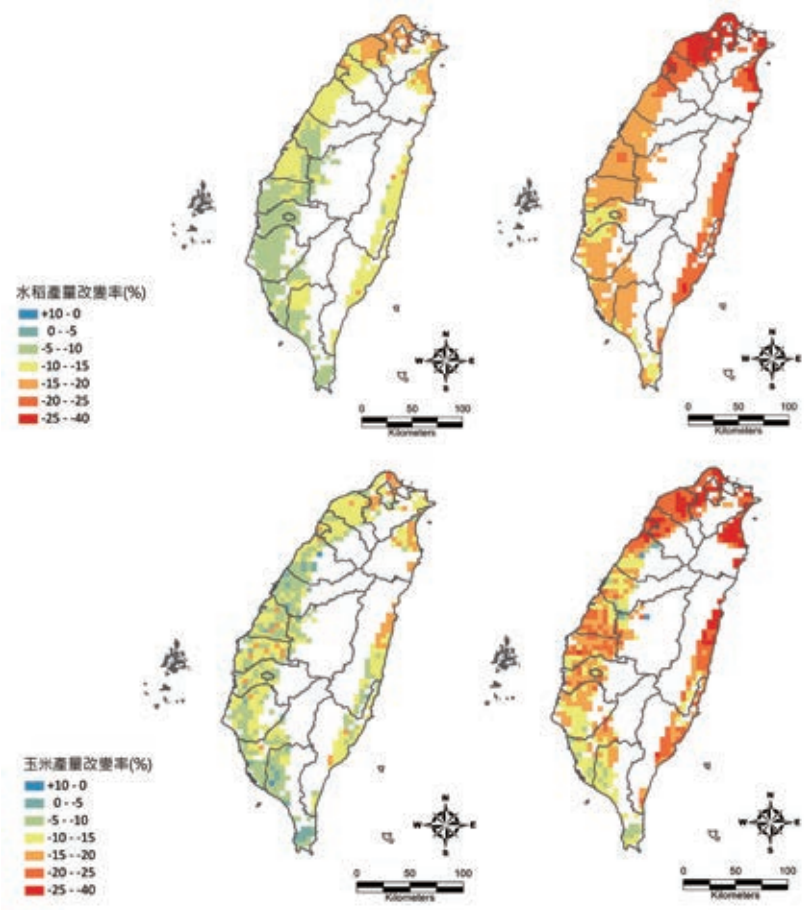


圖4.4.1.3　未來氣候情境下 (RCP8.5) 水稻及玉米產量改變率
(資料來源： TCCIP計畫產製)

4.4.1.2.3　未來氣候情境對農業生產之影響

近年氣象觀測資料顯示，臺灣農耕環境已逐漸朝向未來氣候預測趨勢發展，年際間氣候所造成農業災損也逐漸改變，例如2016年後侵臺之颱風次數明顯減少，水資源不足下發生2020年至2021年大乾旱，暴雨、暖冬及夏季高溫頻繁發生，在此氣候型態下將對農業生產有極大衝擊，對農作物生產的影響分別說明如下：

季節更替的變化：作物生長及栽培制度的形成是依據長年之天氣條件演進而成，包括品種選育、種植時期，栽培管理及採收價格等，當氣候急遽改變下則影響既有栽培制度及農民種植意願，甚至攸關產業的發展。AR6 SSP1-2.6情境下，冬季日數從2050年後大約穩定都維持在45天左右，其他情境下冬季都是隨著時間持續減少。此氣候型態的變化趨勢，對落葉果樹生長模式影響甚遠，種植於坡地的落葉果樹在其開花生理有所謂需冷量或稱低溫需求 (chilling requirement)，是指落葉果樹於冬季休眠期間需要累積一段時間的低溫才能打破休眠 (黃群哲，2021)，但目前冬季低溫持續時間縮短及低溫程度不足下，例如2018年至2019年發生暖冬，衝擊落葉果樹產業，也因果樹未開花造成蜜蜂缺乏蜜源而減產。為因應未來增溫及難以預測的氣候栽培環境，建議加速低需冷量之果樹品種選育 (Parker & Abatzoglou, 2019)，或由熱帶常綠果樹取代落葉果樹種植，也是因應冬季低溫期縮短的調適手段 (Fraga & Santos, 2021)。農業部(原行政院農業委員會)針對長期氣候變遷推動「建構因應氣候變遷之韌性農業體系研究」政策型科研計畫，包括因應氣候變遷衝擊之糧食供應政策研擬、調整農作物栽培制度及強化作物逆境防範等，即希望對於未來氣候情境所帶來農業生產衝擊有所準備。

農業供水的穩定：TCCIP團隊利用高解析度全球氣候模式HiRAM (High Resolution Atmospheric Model) 推估東亞和西北太平洋區域天氣系統的變遷趨勢，21世紀末侵臺颱風數量將減少50%，平均颱風降雨累積量臺灣西、南部可能減少10%至30%，東、北部減少30%至50%；此外，根據第3章3.2及3.3節之未來氣候模擬推估結果，臺灣的梅雨季平均溫度與高溫頻率將增加；降雨於世紀末也有增加的趨勢，且極端降雨事件的發生頻率增加(簡毓璿，2021)。侵臺颱風減少導致乾旱事件發生事件明顯，乾旱將衝擊水稻一期作插秧工作，坡地作物包括茶樹及果樹也將因缺水而減產。農業部 (原行政院農業委員會) 針對農業用水推動農業水資源精準管理科技決策支援體系之建構政策型科研計畫，由農業用水供需盤點，鏈結即時水情建立農業水資源智慧決策支援平臺，據以強化農業灌區用水調度以提升水資源利用效能，同時提出農業部門因應乾旱調適策略，公布11項易受缺水衝擊的乾旱高度敏感作物 (包括梨、茶、短期葉菜、竹筍、梅、枇杷、菊花、草莓、西瓜、百合及其他類等)，並擬實施大區輪作制度，以「稻作四選三」政策為基礎，鼓勵稻作兩年四期作其中一期轉作旱作雜糧等作物，達到減少農業用水需求的目的。

極端天氣的發生：農業災害是造成農作物生產及農產品價格的重要決定因素，以2022下半年因東北季風及颱風的共伴效應，造成臺灣東北部地區豪雨不斷，尤其宜蘭

西帽山測站年雨量竟高達12,000mm (臺灣平均年雨量約2,500mm)；同一時間，南部曾文水庫蓄水量卻僅30%，政府單位宣布次年南部水稻一期作因缺水辦理全面節水停灌措施，顯見臺灣面積不大，但不同區位發生災害的類型差異甚大，更顯示臺灣作物生產因應氣候變遷調適之複雜度。面對多變的災害類型及強度，農業部 (原行政院農業委員會) 針對災害預警及應變推動農林氣象災害風險指標建置及災害調適策略之研究政策型科研計畫，除普設農業氣象站及增加氣象預報點位外，也建立災前預警推播及防範建議訊息發布管道，災害發生中則提供作物受災警戒區及災損通報機制，即時掌握災情以辦理救助，迅速復耕以平穩物價，作為短期災害應變的積極作為。

4.4.1.3 氣候變遷調適與科技研發調適缺口

黃國慶等人 (2020) 配合農地調適規劃程序，深化前項成果，連結中央政策方向，自2016年起，輔導地方縣市與協力團隊，透過推動小組會議、農地調適矩陣問卷、農地調適策略深度訪談等工具，進而研擬各縣市之農地調適熱點及類型、農地調適策略與行動計畫等，針對地方縣市彙整出包括農地規劃利用、水資源規劃利用、品種選擇與技術研發、提升業人力調配能力及省工機械利用、災後重建與復原機制、設施農業、智慧農業、農業產銷整合規劃、農業支援性服務等9項策略類型；19項調適策略方向；56項行動計畫等 (如表4.4.1.1)。而該項成果應可作為相關農業風險評估後，調適策略研擬之重要參考依據。

1. 繪製作物適地適作栽培地圖

農作物生產及銷售受多種因子影響，其中生長氣象環境是影響最大之要素，由過去農損數值及未來氣候預測趨勢，農作物生產應依據災害風險建立適地適作之農耕制度。Sloat et al. (2020) 分析1973年至2012年間全球主要糧食作物適合生育區間，在無灌溉前提下，氣候暖化對玉米、小麥和水稻的衝擊較大，而大豆收穫面積則可擴大158%，當然，作物種植適區的遷移可能會產生巨大的環境成本，除土地適宜性和氣候考量外，也取決於社會經濟和政治因素。臺灣地形複雜，作物種植缺乏適栽區的規劃，由於高溫出現頻率越高，南部或平地種植風險逐漸增高，包括病蟲害難以控制，亦是未來農作物防治議題。另特定作物有向北及向高山種植的趨勢，這是農民對氣候變遷的一種調適，但受限於法規未來仍難以擴展。唯建議應以較大面向及較長時間尺度去思考氣候變遷調適，其中適栽區規劃可降低災害風險及穩定生產，用以確保未來農耕永續及糧食供應穩定，另農業領域除作物生產外，也應強調對環境友善，包括減少環境破壞、增加碳儲存、保護野生動物棲息地和生物多樣性。

表4.4.1.1　縣市農地調適策略與行動計畫綜整表

類型	調適策略	行動計畫
農地規劃利用	農產業空間布建作業	加強農地資源環境調查 農地重劃 調整沿海地區土地使用型態
	啟動生態保育綠色網絡，強化森林水源、國土保安與調適能力	農業生態系統資源盤查 推動國公有造林及林產產銷輔導計畫 推動海岸林生態復育 推動野溪治理計畫與管理 輔導多樣性作物種植 輔導調整耕作制度活化農地 推廣對地綠色環境給付計畫 加強山坡地水土保持
水資源規劃利用	加強水資源前瞻規劃	發展節能、節水的新型態農業，發揮農田水利三生及防減災功能
	強化灌排系統	排水系統整體規劃與評估 日常疏浚 抽水系統整備與管理 強化農田排水系統 增設農業灌溉用水調蓄空間
品種調整與技術研發	新品種、耕作方式和技術改善	推廣有機與友善環境工作輔導計畫 調整作物耕作時期與輪作制度 研發與推廣抗逆境品種
	病蟲害防治與監控	推動區域性共同防治作業 建置智慧化動植物疫病蟲害戰情分析平臺
提升農業人力調配能力及省工機械應用	加強農業人力投入	建立農業人力資源媒合平臺 建構農業人力調派機制 引進外籍移工
	農業人力培植與建立專業輔導平台	成立農業技術團，招募農業人力，輔導農業技術升級 推動氣候變遷與農業相關課程與資源輔助
	農機具推廣與應用	農機缺口盤點 推廣農機共享服務 農機整合示範推廣
災後重建與復原機制	強化農業天然災害救助機制	簡化天然災害救助程序 提供災後緊急金融服務 成立災後緊急應變小組 建立氣候災害監測及評估系統
	健全農業保險機制	擴大農業保險項目
	建立災前氣候調適與應變能力	農業防災教育訓練 (全國型/地方型) 建立地方性氣候測站 農業知識育成課程

類型	調適策略	行動計畫
設施農業	推廣與輔導設施農業	盤點強固型網室作物類型 輔導易災農地強固型溫網室設施 推廣溫、網室栽培技術 輔導溫網室廠商設廠 提升農政單位輔導量能，促進產業升級
智慧農業	推動與輔導智慧農業技術應用	推廣環控智慧農業觀念 建置智慧農業示範區 推動科技農業環控技術 輔導農作技術升級 建置智農聯盟生產模式與輔導
農業產銷整合規劃	穩定作物供需	輔導擴建集貨場及冷藏倉儲設備 建立有機農產品專用集貨場及冷藏倉儲設備
	規劃產銷 自主媒合平台	推動農業物聯網及智慧產銷履歷 推動區塊鏈生產履歷 規劃智慧合約為基礎之農產品自主媒合平臺

(資料來源：黃國慶等人，2020)

2. 整合糧食安全調適科技

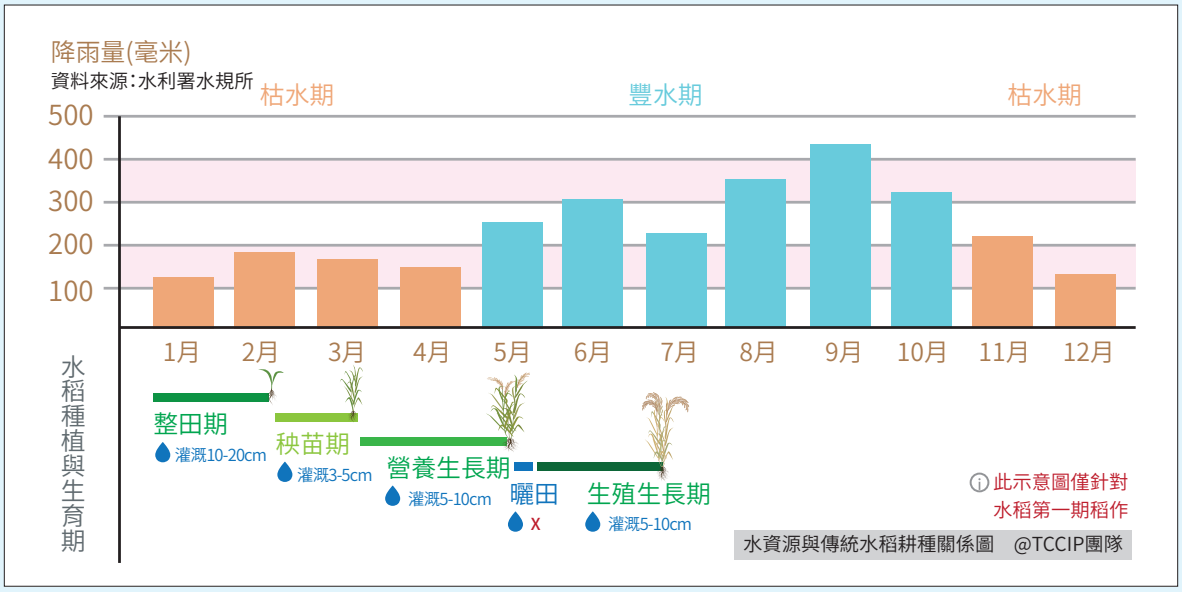
臺灣氣候多變及地形複雜，農業本身作物種類繁多且耕作面積小，整體耕作制度規劃及調適策略研擬需兼顧消費需求面及農民權益。過去執行科研計畫對於災害分析及氣候變遷調適皆有豐富成果，但因基準或調查分析方式不同，研發成果間難以彙整，未來建議可利用TCCIP所提供氣候資料及氣候情境為基準，作為各項研究項目的分析基準，方便橫向或縱向的整合。另外，以糧食安全或作物生產脆弱度之未來衝擊分析外，應以「糧食需求面」作為生產規劃的依據，因應未來臺灣人口減少及國人飲食習慣，加強推動食農教育，讓國民習慣減少浪費食物，並可擇定低碳飲食以多蔬食少吃肉之方法，達成淨零飲食習慣，同時建議彙編整體因應氣候變遷之農業調適報告，依據未來不同氣候情境，分析各項衝擊及相對應之調適作為，整合農、漁、畜、林等產業，對農業生態、病蟲害及生物多樣性的衝擊也應納入考量，作全面性的綜合評估，否則僅由單一產業調適容易偏頗，所研擬之調適策略也容易與其他產業衝突而窒礙難行。雖然整份調適報告涵蓋面極廣，不易在短期內完成，但僅需規劃架構及內容後，逐年分階段性完成分析及撰寫，最終仍能完成我國的因應氣候變遷之農業調適報告。

文字框 1 ｜未來乾旱災害事件因應：水稻旱田直播

案例描述：新竹縣新豐鄉為石門水庫供水管線末端，桃竹苗地區因工業及民生用水甚鉅，參考過去休耕次數及未來水資源供應量分析，該地區水稻種植將面臨缺水頻繁發生，尤其是春季水稻一期作插秧更是敏感期。

由於插秧期整田所需水量約占整期作用水1/3，若改為以種子播種之旱田種植方式將可節省整田用水，調適計畫與當地水稻代耕業者合作，經過兩年實際種植及觀測結果，證明此方式不會影響農民收益，並能兼顧節水、省工及減少農機使用。

在氣候變遷衝擊 (缺水) 及農業永續發展建立合適的調適作為，可供各界在研發調適案例時參考。



圖BOX4.4.1.1　旱田直播需水量-以第一期稻作為例
(資料來源：TCCIP計畫產製)

3. 研發淨零技術及低碳栽培制度

導致氣候變遷產生的成因與人類大幅排放溫室氣體有關，從源頭控制以減緩氣候變遷對全球的威脅是釜底抽薪的方式，淨零排放是國際熱門關切議題，如何將大氣中二氧化碳濃度有效控制，以抑制升溫趨勢是全球共識。我國政府也積極部署在2050年達到淨零排放目標，而落實淨零政策需要各政府部門及產業共同承擔，農業部門雖然碳排僅佔2%，但基於政府責任及維護農業永續發展，也具體訂定2040年達到淨零目標，包含要達成減少溫室氣體排放50%、推動公私有地造林面積、建立農林漁畜低碳永續循環場域、農業綠能發電滿足農業用電等多項執行目標，全面加速推動我國農業淨零排放目標。農田是排放甲烷 (CH_4) 及氧化亞氮 (N_2O) 的重要來源，建立低溫室氣體排放之栽培模式，並運用於50萬公頃作物生產農地上具有減少碳排重大意義，另農業用電相較於工業或民生用電是屬於少量，但蘭花溫室或菇菌生產場，除設施頂部鋪設太陽能板產電外，節能技術導入以減少用電對淨零議題或降低生產成本皆具有實質利益。

4. 農業廢棄物減排作為

農業不僅於耕作時產生碳排，農業除作物產品外，亦會產生大量農業廢棄物，如稻稈、稻殼、咖啡渣、網子、綑綁繩、塑膠袋等，其依性質可分為可分解類、不可分解類，因掩埋或焚燒等處理廢棄物行動，亦容易產生碳排及環境污染。農業部 (原行政院農業委員會) 據以公告「農業事業廢棄物再利用管理辦法」，目前已有公告11項國內大宗農業廢棄物公告期再利用方式，且依據農業部 (原行政院農業委員會) 統計資料顯示，每年國內產生農業廢棄物大約為500多萬公噸，以2021年農業廢棄物產生量及妥善處理量仍有些許落差，其中稻稈仍有不少比例就地焚燒掩埋。應持續推廣開發製炭技術，建立碳匯相關知識，以及加強農民對農業廢棄物之處理作為，對於農民有所助益。除加強農業廢棄物處理作為外，使用可重複及利於回收之農業資材，以從源頭減少農業廢棄物產生，間接達到減碳效益 ，使政府更容易達成減碳之目標。

4.4.2 畜牧業

4.4.2.1 前言

IPCC AR6指出相較於工業革命前 (1850年至1900年)，人類活動已導致約1°C的升溫，無論各種情境，2040年地球表面升溫將超過1.5°C。臺灣海平面上升速度是全球平均的2

倍，全年平均氣溫約上升1.6°C且有增溫加數速的趨勢。在SSP1-2.6情境下，從2040年後夏季大約穩定都維持在150天左右，冬季日數從2050年後大約穩定都維持在45天左右，其他情境下夏季都是隨著時間持續增加，冬天則反之。年總降雨趨勢變化不明顯，但最大日暴雨強度及年最大連續不降雨日數增加趨勢明顯。農業損失過去25年 (1996年至2020年) 平均為109億元，近15年 (2006年至2020年) 平均為112億元，近5年 (2016年至2020年) 平均上升至135億元。近年來，不僅溫度升高且高溫的日數也隨之增加，高溫日數變化詳細內容請參考2.2.1節。高溫已成常態，國內畜禽飼養必須面臨未來更高溫的挑戰。

氣候變遷以各種方式影響畜禽生產力和畜產品生產 (Porter et al., 2014; Rojas-Downing et al., 2017)。越來越多的證據表明，溫度升高逐漸增加全球畜禽熱緊迫壓力並影響畜禽生產力 (Das et al., 2016；Godde et al., 2021)。大多數畜禽對氣溫的舒適區域落於10°C至30°C範圍之間 (A. Nardone et al., 2006)。在高溫環境下，溫度每上升1°C，畜禽的採食量將降低3%至5%，進而造成畜禽生產力及繁殖效率降低，並增加動物疾病的罹病率 (Das et al., 2016)。在SSP5-8.5情境下之21世紀中葉，將增加中低緯度的地區畜禽面臨熱緊迫的頻度，適合芻料及穀物生產的土地將減少 (Thornton et al., 2021)。

根據農業部 (原行政院農業委員會) 統計國內畜產品產值為1,858億元，占農業總產值的34.66%，其中豬肉、雞肉、雞蛋及牛乳占畜產品產值的88.49%。豬怕熱、雞跟乳牛更怕熱，在高溫熱緊迫的條件下，畜禽採食量降低且體內熱負荷升高，導致產肉率、產蛋率及產乳率等經濟產能降低。熱緊迫亦會干擾畜禽內分泌變化，導致發情、受胎率、胚胎著床等繁殖性能表現低落。另高溫易使微生物、寄生蟲孳生，進而降低動物的抵抗力與增加動物感染疾病的發生率。

依據環境部 (原環境保護署) 2022年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告，2020年農業部門溫室氣體排放源占比，水稻種植 (18.00%)、禽畜的腸道發酵 (17.35%)、畜禽糞尿管理 (26.92%) 及尿素施用 (0.88%)。畜禽腸胃發酵及畜禽糞尿處理的碳排放量，佔農業部門總排量44.27%。此外，因應高溫氣候國內環控豬舍及雞舍及降溫牛舍的啟用，畜禽用水、用電增加，在國內水、電資源逐漸不足條件下，國內畜禽飼養的條件越加嚴峻。

此外，國內禽畜飼糧的安全供應，尤其臺灣地區畜禽所需之飼糧長期仰賴國外進口，如何提高國內飼料與芻料的供應、優化國內農業資源物的加值應用、透過生產調適

以減少畜禽熱緊迫的經濟損失、開發低碳畜禽養殖方法，減少畜禽腸道發酵與糞肥的甲烷排放，多年生牧草地的土壤碳匯評估，建構資源循環再利用的生產系統，逐步達成2050年淨零碳排之目標。

4.4.2.2 畜產生產現況

依據農業部 (原行政院農業委員會) 統計2021年畜產產品的生產量值達1,858億元，占農業總產值的34.66%，其中豬產量達82.5萬公噸，產值767億元，占總產值的14.31%。白色肉雞42.5萬公噸，產值280.7億元，占總產值5.24%。有色肉雞23.9萬公噸，產值248.1億元，占總產值4.63%。牛乳44.9萬公噸，產值117.6億元，占總產值2.19%。雞蛋8.3億個，產值23.7億元，占總產值4.30%。因此，豬肉、雞肉、雞蛋及生乳為國內畜產之大宗，年產值1,644億元，占畜產品產值88.49%，農業產值的30.67%，詳如圖4.4.2.1、圖4.4.2.2所示。

由國內畜禽產業的飼養頭數逐年增加，及飼養戶數明顯減少，表示農戶飼養規模日漸擴大，每戶飼養戶所需之飼料費用與每日產生禽畜糞肥的處理費用逐年增加。隨著氣

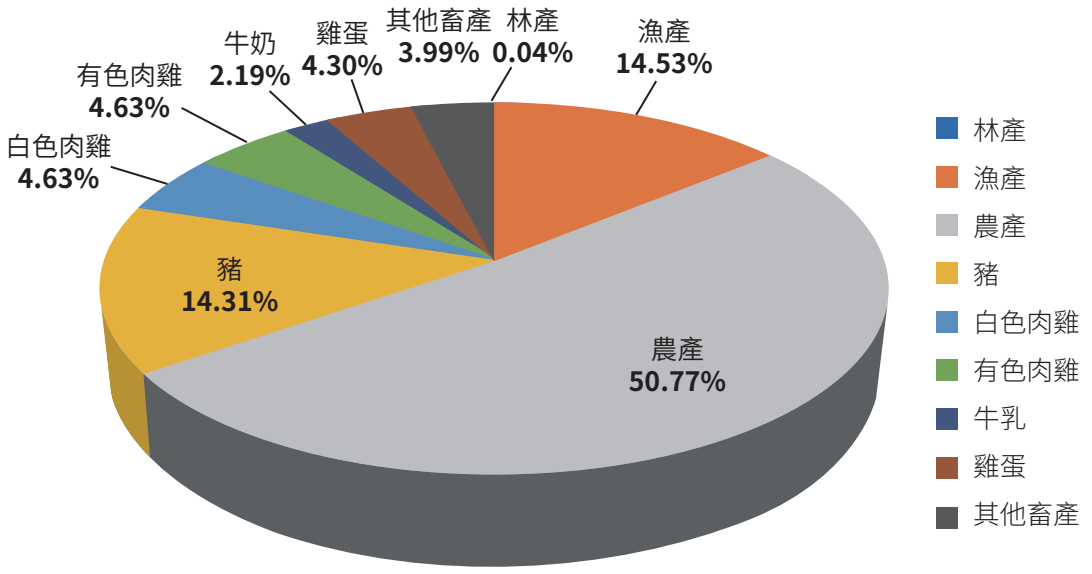


圖4.4.2.1 2021年臺灣農產品生產總值占比
(資料來源：行政院農業委員會，2021b)

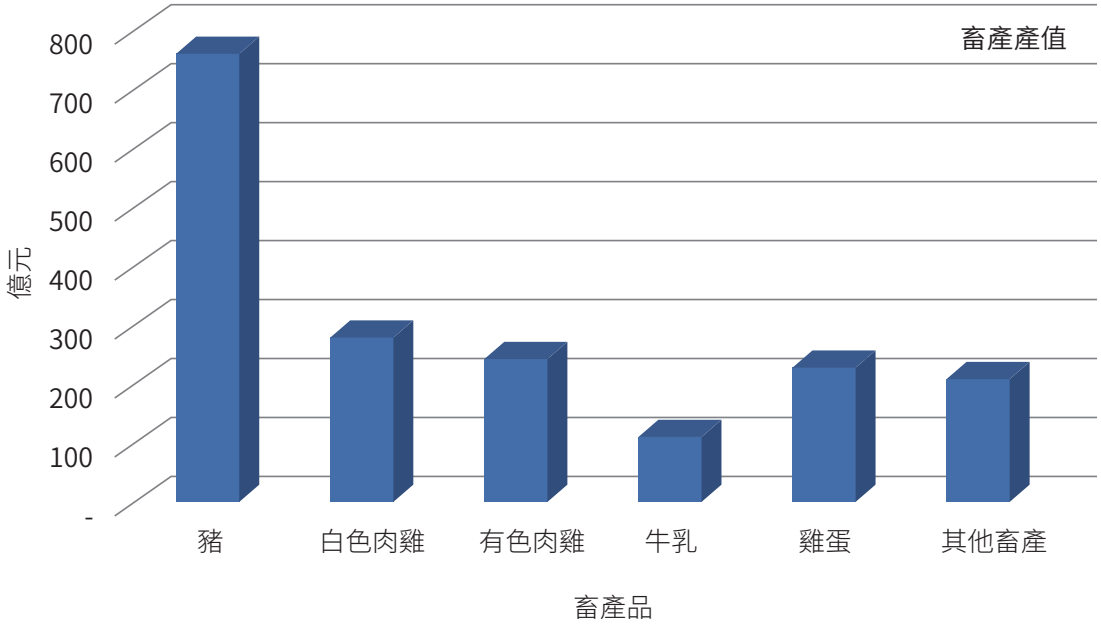


圖4.4.2.2　2021年臺灣畜產產值圖
(資料來源：行政院農業委員會，2021b)

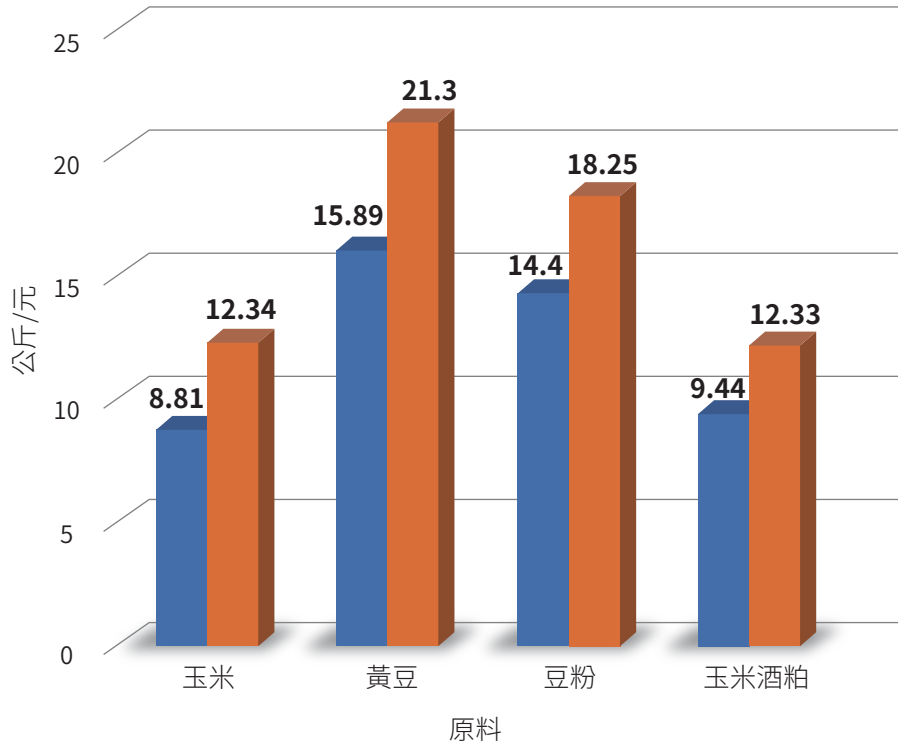


圖4.4.2.3　臺灣飼料原料行情圖
(資料來源：農業部畜產試驗所)

候變遷國內氣溫逐年升高，超過30°C的高峰期，使得畜禽面臨熱緊迫的經濟性能損失，不論是產肉率、飼料效率或是疾病的預防等，都必須付出更多飼養成本，尤其國內畜禽飼養所需之飼料原料長期仰賴進口。

依據中華食物網資料統計，2022年臺灣玉米的行情價12.34元/公斤已較2018年至2022五年平均8.81元/公斤上漲1.4倍，黃豆上漲1.3倍，豆粉上漲1.7倍，臺灣飼料原料價格變化趨勢如圖4.4.2.3所示。由於飼料成本高漲及氣溫升高造成畜禽熱緊迫，雞隻產蛋率下降、豬隻產肉率下降、乳牛的生乳產量亦減少。近年來雞蛋蛋價來到歷年高峰55元/公斤 (2023年3月6日)，蛋價除受到高、低溫影響外，且受到禽流感影響，導致產量減少及價格上升，另由2023年11月1日畜產品價格查詢系統可知，2011年豬 (毛豬) 價平均為77.25元/公斤，2022年平均上漲至82.08元/公斤。國內生乳收購價則上漲2元/公斤，以暖季為例生乳價格由2022年4月平均為27.34元/公斤，2023年4月調漲至29.34元/公斤。國內乳製品的需求節節上升，2021年液態乳進口量57,534公噸，其中鮮乳40,017公噸，保久乳12,922公噸，其他液態乳4,595公噸，液態乳進口單價達 33.3元/公斤，已超越國內生乳收購價。國內飼養之荷蘭牛原屬溫帶的乳牛，必須面對臺灣高溫高濕的熱緊迫。

近年全球因重大澇災造成農作物產量銳減，及新冠肺炎疫情影響國際運輸，以及飼料原物料因國際通貨膨脹及烏俄戰爭能源價格上漲，導致進口飼料與乾草成本持續高漲，飼料成本上漲與乳牛產量減少，波動將反映於牛乳價格。另外，尤其2025年臺灣與紐西蘭進口零關稅的衝擊，對國內乳牛產業無異雪上加霜。

4.4.2.3 氣候變遷下對畜牧產量之影響

評估畜禽面臨熱緊迫的程度，常採用溫濕度指數表示 (temperature-humidity index,THI)。依據St-Pierre et al. (2003) 研究美國重要畜禽 (乳牛、小牛、肉牛、育肥牛、母豬、商品豬、肉雞、蛋雞和火雞) 的經濟損失，結合溫濕度指數、每日熱緊迫持續時間和熱負荷指數等參數進行經濟損失評估，明確指出高溫、高濕環境不利於畜禽的生產。Mellado et al. (2018) 研究指出THI 82 與THI 74相較，高THI易造成母豬的受胎率及仔豬的育成率降低。Renaudeau D. & Dourmad J. (2022) 研究指出，若無氣候變遷調適方案，歐盟養豬產業將因動物性能下降和生產成本上升而受到影響。主要因熱緊迫造成母豬隻的採食量降低，降低豬隻的飼料換肉率產，其餘的繁殖障礙如發情異常、配種

不易、流產等，種公豬的精液品質不佳。另方面由於高溫促進病原體及病媒傳播，進而產生間接影響到飼料品質和環境衛生，使豬隻的罹病率增加。

國內評估畜禽遭受熱緊迫主要依據1971年美國國家科學研究委員會 (The National Research Council, NRC) 研究報告之計算公式，THI公式：(1.8 x T+32) - (0.55 - 0.0055 x RH) x (1.8 x T - 26)，其中T為氣溫以°C為單位，RH為相對濕度以%單位表示。以豬隻而言，THI介於72-78為溫和熱緊迫，78至89為中度熱緊迫，89以上屬嚴重熱緊迫。雞隻飼養後期，當環境溫度超過28°C至30°C時，加上濕度增高，便會引起明顯的熱緊迫反應，造成雞隻採食量降低與熱中暑死亡。乳牛遭受熱緊迫時最先表現在呼吸速率的變化，當畜舍內THI開始升高至74，乳牛呼吸速率則急速增加，開始表現熱緊迫的生理特徵。以臺灣畜舍THI變化而言，每年處於熱緊迫狀態的熱季約佔6.73個月 (5月至10月) (THI≧72)。

國科會TCCIP團隊採用AR5 動力降尺度時序資料進行模擬，並分析未來氣候情境下溫濕度指數的變化，且以THI≧72為熱緊迫的臨界值進行分析 (圖4.4.2.4)。國內畜禽產業主要分布在彰化縣以南之縣市，在全球暖化程度2°C及4°C，紅色警戒區域，由南往

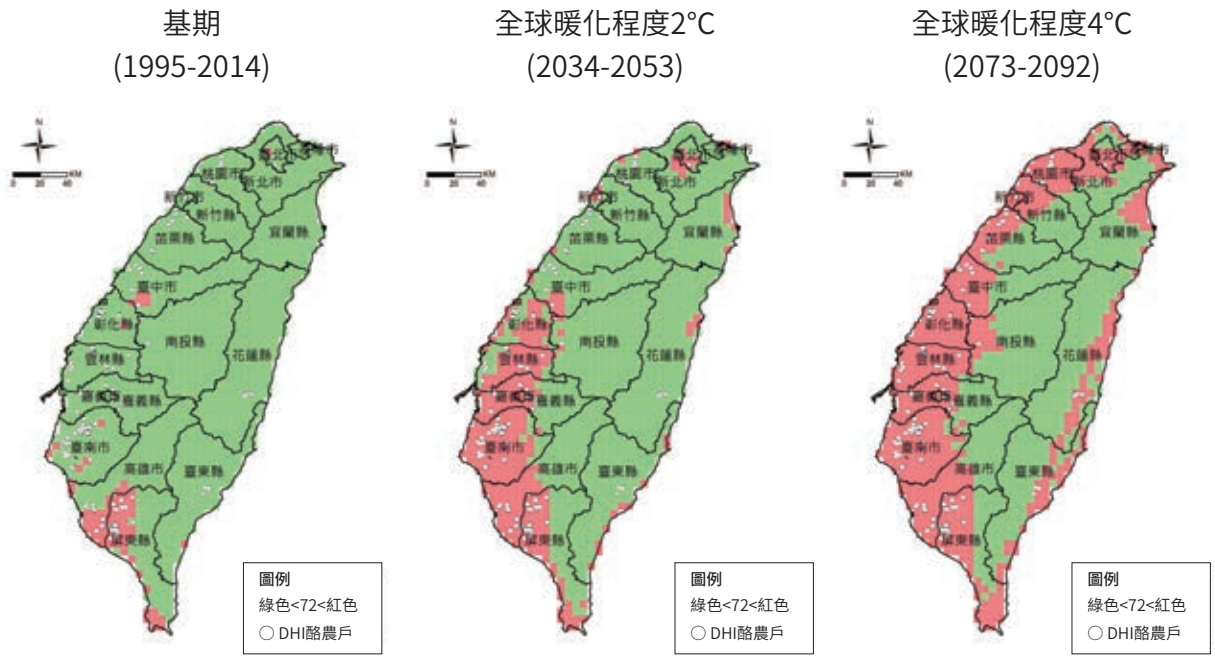


圖4.4.2.4　氣候變遷下臺灣地區溫濕度指數 (THI) 變化趨勢
(資料來源： TCCIP計畫產製)

北、從平原往淺山擴展，逐漸造成畜禽熱緊迫，影響區域擴及北部及東部。以基期年而言，雲嘉南與屏東等畜禽飼養縣市，已達紅色區域的臨界值，隨著全球暖化2°C的情境，彰化縣與雲林縣紅色警戒區域則不斷擴增，北部區域尚有綠色安全區域。全球暖化4°C則西部沿岸的縣市擴大紅色警戒區域，剩下東部宜花東尚有綠色區域。由臺灣地區溫濕度指數 (THI) 的變化趨勢得知，臺灣未來畜牧業產量將受熱緊迫影響，造成畜牧產量 (雞蛋、牛乳、豬肉等) 下降，臺灣畜牧業者為了減緩高溫帶來的衝擊，於農舍進行擴大增加活動空間，降低畜禽因壅擠過熱，以及室內設置降溫設施 (電扇、灑水器、空調)，相對形成產量降低與耗能增加之循環，因此氣候變遷下臺灣地區的畜禽飼養的發展將面臨嚴重的挑戰。

4.4.2.4 氣候變遷風險評估與調適科技研發缺口

臺灣畜牧產業的發展，受限於土地取得不易，大部分的耕地需進行農糧作物的生產。豬雞牛乳的產值達1,644億元，每年進口玉米大豆及乾草高達1,043億元，表示進口飼料成本占比高達 63.44%。每年進口的液態乳達5.7萬公噸約占國內牛乳44.9萬公噸的12.69% (行政院農業委員會，2021b)。隨2025年臺紐進口零關稅的衝擊，國外進口液態乳將用力叩關，關貿協議下美豬美牛的進口壓力，國產雞蛋的產量失衡必需緊急進口。在未來氣候變遷下，國內飼養畜禽所需長期仰賴進口的原料如玉米粉、大豆粉與乾草等，面臨進口不易之問題，尚有禽畜糞尿管理的甲烷排放急需處理，發展本土飼糧生產模式及以自然為本的低碳生態系畜禽飼養模式勢在必行。

1. 低碳節能畜禽飼養技術開發

(1) 強化禽畜糞肥的利用：政府推動改建東海豐畜殖場為「東海豐農業循環園區」，將豬糞尿發酵的甲烷燃燒轉換為電力，以展示沼氣綠能發電之未來性。

(2) 畜禽飼料配方的調整：添加甲烷抑菌劑或是改變瘤胃微生物的菌落族群，降低畜禽腸道發酵產生甲烷。餵飼穀物發芽的水培牧草，不僅增加乳量並可降低泌乳牛甲烷的排放。畜禽飼料配方的調整，以恢復生態系，創造生物多樣性及落實永續土地管理，減緩氣候變遷為目標。

(3) 持續推動電動農機具於畜牧場域之應用：以電動動力取代柴油動力，如國產電

文字框 2 ｜精準畜禽飼養管理：數位農業於乳牛場之應用

數位農業於乳牛場之應用：

面對氣溫逐年升高的氣候變遷，乳牛因熱緊迫造成乳量下降之威脅越趨嚴重，除畜舍等降溫設備改善外，面對乳牛夏季採食量降低及飼糧易酸臭等現場問題，少量多餐的餵飼方式是目前國內酪農戶積極努力的方向。面對牧場勞力短缺，如何達到少量多餐的餵飼方式，是目前亟待解決的問題。

引進國外自動餵飼系統，可精準投料分群飼養所需的營養配方，由送餐車依送餐排程送料，提供乳牛少量多餐的餵飼模式。臺灣經濟研究的經濟效益評估，投入1300萬之自動化餵飼設備，於餵飼630頭泌乳牛之情況下，節省柴油35,000公升/年，節省飼料成本540,000元/年，增加產乳量223,200公斤/年。



圖BOX4.4.2.1　自動餵飼系統及電動餐車送料
(資料來源：農業部畜產試驗所)

動自動餵飼機、自動擠乳機、電動搬運車、清糞機器人及省水省電等自動監控系統開發。

(4) 提高能源自給率：目前政府已推動屋頂型太陽能發電系統，亦包含雞舍及畜牧業所搭建之棚舍皆有設置，過去僅靠日間太陽能發電，夜間則無法使用，故建議太陽能光電系統應引入儲能設備，可減少電費支出，亦可達到省電效果。另推動污泥厭氧消化槽所產生沼氣，經純化後的所產生之天然氣 (甲烷)，兩者搭配使用可提升畜牧業能源自給率，減緩對於公共電力依賴，亦可節省降溫設施之耗能。

2. 農畜資源物的循環利用

(1) 推動農畜合作開發新穎性飼料原料：如何減少進口飼料原料，提高國產飼料原料來源，畜試所開發飼料配方責無旁貸。以狼尾草養菇又養牛為例，畜禽的沼渣沼液灌溉狼尾草地，狼尾草取代木屑栽培杏鮑菇，栽培菇蕈後的栽培介質富含益生元 (prebiotic)、抗菌、抗真菌和抗氧化等特性，可作為畜禽動物保健飼料添加物 (施意敏，2019)。循環再利用、轉廢成金、零廢零碳排，把上游的廢料當成下游的原料，達減少溫室氣體效應之目標。

(2) 建構農業資源物加工再製轉運中心：國內每年產生的農業資源物相當可觀，如花生藤、大豆稈、稻稈等，皆是以春秋二期作的方式生產，畜禽的飼料則需每日長期穩定的供應，農與畜的量能無法平衡。因此，需建構農業資源物加工再製轉運中心，將農業資源物乾燥、粉碎、造粒為飼料型態，不僅減少運輸成本減碳排，亦可達到穩定供應畜禽飼糧之目標。

3. 結合數位科技及創新技術

(1) 數位科技協助產業轉型：參照美國農部推動數位農業獎勵計畫，根據美國農業部經濟研究署 (Economic Research Service) 數位農業 (Digital Agriculture) 科技應用與發展報告，擬定保護管理計畫 (The Conservation Stewardship Program, CSP) 及獎勵農民使用數位農業，增強畜牧產業對氣候變遷之抵禦能力。

(2) 強化動植物疫病蟲害防治：強化動植物疫病蟲害監測、防治及因應能力，利用長期氣候資料及病蟲害監測資料建立預警系統，提供我國農政單位於氣候變遷

下之防疫應變策略為之重要；國內應持續加強人畜共通傳染疾病 (如禽流感、口蹄疫等) 及植物作物疾病 (細菌、病毒、真菌等引發疾病) 之相關研究，並導入相關氣候變遷資料分析，提供政府作為短、中、長期分析監控，並研擬疾病發生預警與決策支援模式。

4.4.3 漁業

4.4.3.1 前言

臺灣四面環海為海島地形，臺灣西岸臺灣海峽又是冷暖洋流交會區域，其東岸為黑潮洋流，致使臺灣周遭洄游性魚群豐富，提供豐沛的漁獲，國民生活與海密不可分，也造就臺灣漁業發達之狀況。根據IPCC報告指出，臺灣海域溫度未來趨勢必然升高，將會為臺灣漁業帶來嚴重衝擊影響，已成為今日重要課題之一。

臺灣漁業主要分為養殖漁業及海洋漁業，近年來氣候變遷影響下，養殖漁業受到氣溫不斷攀升，甚至低溫寒害事件亦不斷發生，以及暴雨侵襲導致產量下降，甚至未來海平面上升恐造成淹沒低窪地區之養殖業等問題，臺灣養殖漁業不得不面對氣候變遷調適。過去，國內較少以氣候資料進行產量衝擊評估，於2017年科學報告公布後，國內已有利用AR5、AR6氣候變遷推估資料進行未來養殖漁業衝擊評估。調適方面已不僅於海岸防護等硬體措施，依據不同衝擊評估適合養殖區域及魚種，並提供不同金融保護措施，以利維持養殖業者生計，利於提升在氣候變遷對養殖漁業之韌性。

海洋漁業受海溫改變，導致臺灣傳統漁場逐漸消失，甚至影響洄游性魚類的時間，產業恐面臨未來無魚可捕之情形，為因應氣候變遷影響，農業部水產試驗所 (以下簡稱水試所) 所利用2014年至2019年間氣候資料進行烏魚漁場分析，明顯漁場有逐漸北移趨勢，其他魚種棲地研究皆有改變。面對未來氣候變遷日益嚴重，臺灣漁業勢必強化海洋環境監測、產業管理及漁獲量調控等面向進行擬定調適政策。

臺灣不僅農業發達，漁業亦是如此，漁產品甚至是臺灣每個家庭每餐必備佳餚之一，甚至FAO曾指出全球每人平均魚類消費量刷新紀錄，每人每年達到20.5公斤 (The

State of World Fisheries and Aquaculture, SOFIA)，突顯出氣候變遷影響下，臺灣漁業未有效管理後，將可能出現魚類減少或消失，並且導致糧食安全發生疑慮，甚至影響部分人民生計，應持續發展養殖創新技術，促進產業、海洋生態之永續性及公平性。

4.4.3.2 養殖漁業

4.4.3.2.1 環境變化對全球實現水產糧食安全潛在威脅

漁產品為提供全球各地數億人口糧食、營養、收入與生計的重要來源，世界人均水產品供應量於2014年創下20公斤的歷史新高，成為世界食品貿易大宗食品之一。根據FAO估計2030年時水產養殖產量將超過海洋捕撈漁業，未來人類食用水產將由養殖漁業供給(FAO, 2020)，預估2050年時養殖水產品將成為供給全球約97億人口的動物性蛋白質 (FAO, 2018)，並提供龐大就業機會 (約5,046萬人)，約佔全球沿海地區44%GDP (IPCC, 2022)。然而，氣候變遷成為未來水產養殖業實現糧食安全與永續發展面臨的主要問題之一，以及維持糧食安全的關鍵，如圖4.4.3.1所示。 (Ho et al., 2018)。



圖4.4.3.1 氣候變遷可能對水產養殖漁產業之產業價值鏈衝擊與影響
(資料來源：侯清賢教授研究團隊)

長期性的環境變遷與極端天氣事件導致的環境變動，已對養殖生產值與量造成衝擊與不確定性。養殖漁產業面臨的氣候危害因子包括：氣溫上升、海平面上升、降雨模式改變、乾旱和平均氣溫上升等危害；極端氣候事件面臨的風險含括：極端強降雨事

件、連續性高溫、極端低溫、颱風等。然而，這些自然環境變化將導致養殖環境惡化、物種突發性死亡與流失等漁業生產面的衝擊，造成漁民的經營損失，以及生產量與價格的不穩定與波動，並直接間影響水產品供需市場 (FAO, 2009；IPCC, 2022)，以及全球落實糧食安全與聯合國「2030 SDGs」產生重大干擾(圖 4.4.3.2) (Ho et al., 2018；UNEP 2021)。

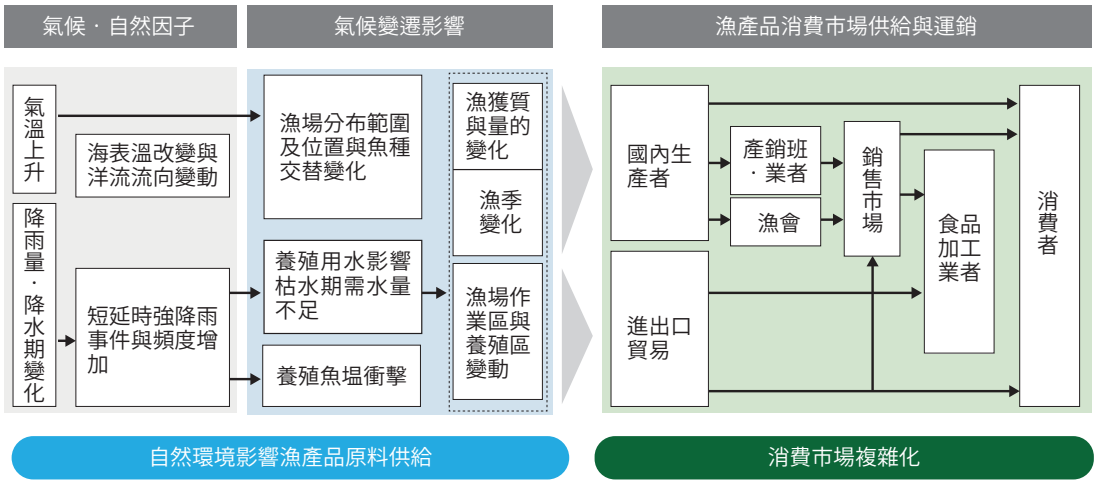


圖4.4.3.2　氣候變遷對我國養殖水產糧安影響與衝擊
(資料來源：侯清賢教授研究團隊)

4.4.3.2.2　水產養殖漁產業於我國糧食安全扮演角色

臺灣屬海島型國家，位於有利漁業發展的地理位置的亞熱帶，水產養殖漁業逐漸成為重要的初級產業，提供國人所需之動物性蛋白質。根據漁業年報統計，2021年臺灣漁業總產量約100.96萬公噸，產值約897.36億元，養殖漁業生產量為總產量約28.39萬公噸(圖 4.4.3.3)，產值約369.53億元 (圖 4.4.3.3) (中華民國臺閩地區漁業統計年報，2021)。2016年糧食供需年報統計，漁產品佔每人每日蛋白質比例為6.99%，漁產品提供之動物性蛋白質佔總動物性蛋白質的16.33%，其平均每人每年消費約26.42公斤 (圖 4.4.3.4) (糧食供需年報，2021)。

4.4.3.2.3　氣候變遷對我國養殖漁產業的產業價值鏈衝擊與影響

生產面

因水產養殖漁業產業發展過於迅速，土地與水資源使用過度，養殖魚塭經多年養殖後，土地大多劣化，加上沿岸工業化造成沿岸污染與水質惡化等壓力，導致養殖漁業處

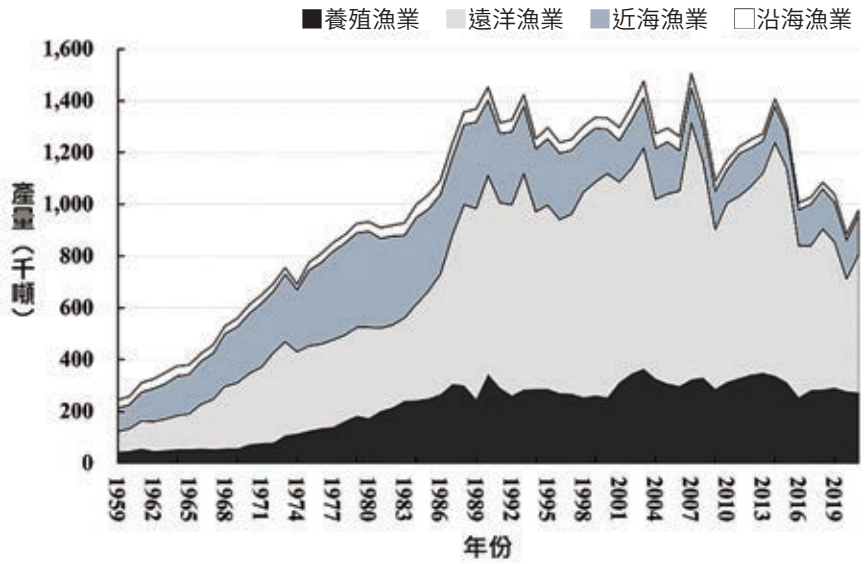


圖4.4.3.3　1950年至2021年臺灣養殖漁產業生產量變化趨勢

(資料來源：行政院農業委員會漁業署，2021b)

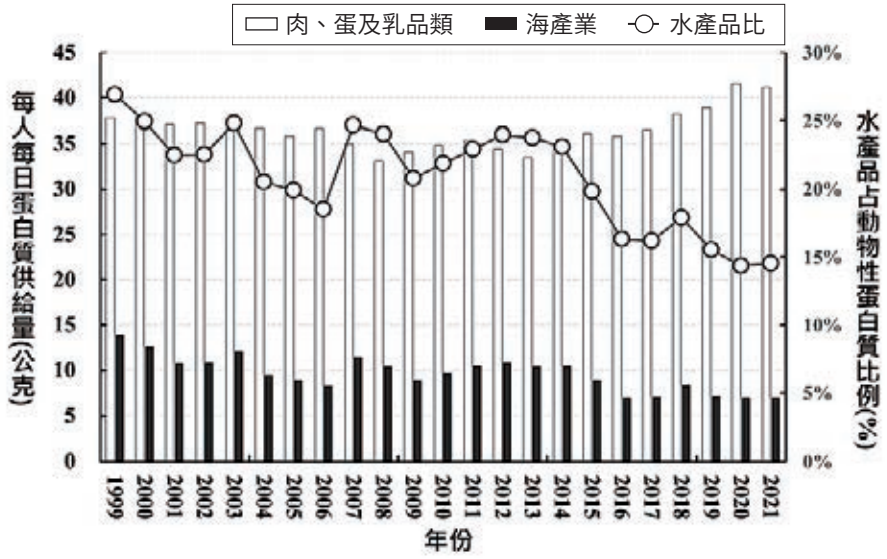


圖4.4.3.4　1999年至2021年臺灣動物性蛋白質供應量與水產品占比

(資料來源：行政院農業委員會，2021a)

於不穩定狀態，超抽地下水導致地層下陷的問題導致養殖面積逐漸縮減，養殖漁業面臨的負面問題逐漸衍生。除養殖生產環境問題外，臺灣水產養殖漁業面臨的問題與全球趨勢相似，氣候變遷已對養殖生產的值與量造成正負面影響與生產不確定性。2000年至2010年期間，我國全臺養殖漁產業區重鎮之沿海地區的低溫危害發生頻繁，其中又以2006年至2009年低溫寒害發生事件數最高 (圖 4.4.3.5)。2010年後，沿海地區低溫寒害發生事件數開始下降，但極端型霸王級寒流的發生頻度與威力則開始逐漸加劇，例如：2016年0122寒害事件、2018年0108與0202寒害事件、2021年寒害事件等 (表 4.4.3.1) (行政院農業委員會，2022a)。2010年後，沿海地區的高溫危害發生事件數開始增加，並對養殖漁業生產造成養殖物種合適度改變、養殖期混亂、作業不確定性提升、突發性暴斃死亡現象、水質穩定度降低、作業成本增加、魚病發生率提升等問題等生產面向問題(圖 4.4.3.5)。

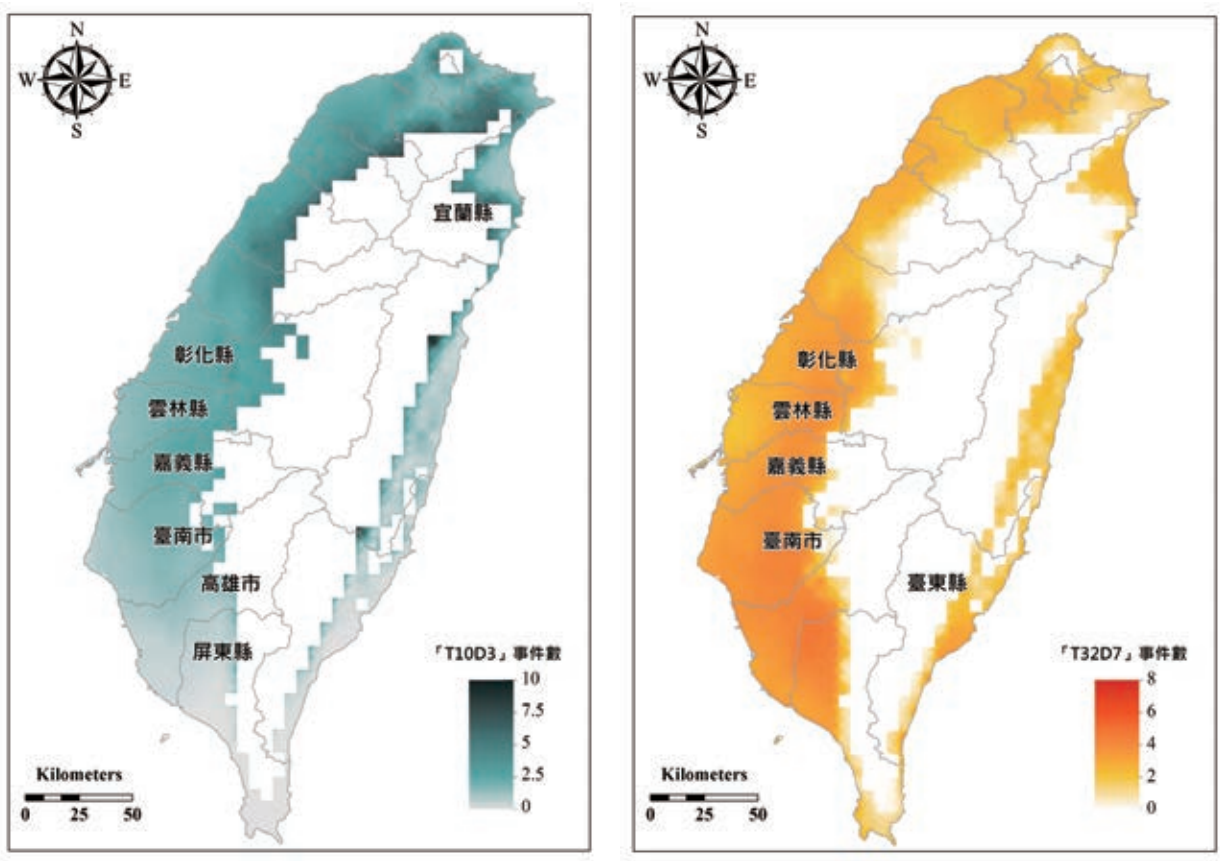


圖4.4.3.5　AR6暖化情境之低溫與高溫危害基期事件數
(左圖：T10D3代表連續3天低溫10°C；右圖：T32D7代表連續7天高溫32°C)
(資料來源：侯清賢教授研究團隊)

表4.4.3.1　2007年至2021年連續性低溫寒害事件對養殖漁產業損失統計

單位：公頃、處；金額：新臺幣千元

年份	事件	產物損失		受災範圍
		面積	金額	
2007	1月29日至1月30日	9	124	嘉義縣、彰化縣
2008	12月30日至1月4日	20	120	彰化縣
	2月05日至3月11日	175	81,814	宜蘭縣、嘉義縣、臺南縣、臺南市、澎湖縣
2009	1月09日至1月14日	82	18,134	雲林縣、嘉義縣、臺南縣、臺南市、高雄縣
2010	1月11日至1月13日	28	1,840	彰化縣、嘉義縣
	3月9日	6.66	1,280	嘉義縣、臺南縣
2011	1月1日至3月31日	794	232,058	彰化縣、雲林縣、嘉義縣、臺南市、高雄市、澎湖縣
2016	1月22日	11,757	6,631,498	新竹縣、雲林縣、臺南市、嘉義縣、彰化縣、宜蘭縣、屏東縣、高雄市、花蓮縣、澎湖縣、臺東縣
2018	1月8日	441	21,308	臺南市、彰化縣、嘉義縣
	2月2日	151	30,014	臺南市、高雄市、新竹縣、雲林縣、澎湖縣
2021	2020年12月3日至2021年1月15日	3,346	96,573	臺南市、高雄市、宜蘭縣、彰化縣、嘉義縣、雲林縣、屏東縣、臺東縣、澎湖縣

【統計定義】
產物:淡水與鹹水魚塭之養殖物損失
設施:魚塭塭堤及相關設施

(資料來源：行政院農業委員會，2022a)

除溫度型危害外，臺灣因位處於多雨的熱帶、亞熱帶區域，當降雨型態出現極端化現象，短時間內的極端強降雨導致的淹水，以及長時間不降雨產生的乾旱等問題，對養殖漁業生產都造成負面影響。當短時間內的降雨量過多，可能使魚塭排水不及，促使養殖魚池溢淹導致魚類脫逃，造成損失；或是使魚塭的水鹽度變化劇烈，漁民無法立即對養殖池進行調整，導致魚類死亡；乾旱則使養殖漁業在取水上更加困難。此外，颱風暴雨引發土石流、漂流木與污染物，嚴重影響養殖池與沿岸養殖海域的水質與環境，例如：2018年0823豪雨事件 (表 4.4.3.2) (行政院農業委員會，2022a)。與此同時，海平面上升，造成海水入侵進而限縮養殖面積，促使土地鹹化更趨嚴重。

表4.4.3.2　2007年至2021年短延時強降雨災害事件對養殖漁產業損失統計

單位：公頃、處；金額：新臺幣仟元

年分	漁損災害事件	產物損失		設施損失		受災範圍
		面積	金額	處數	金額	
2007	0402強風豪雨災害	15	4,500	-	-	澎湖縣、臺南市
	0809聖帕颱風	1,628	190,070	3	2,500	彰化縣、雲林縣、嘉義縣、屏東縣、臺東縣、花蓮縣、臺南縣、宜蘭縣
	1012柯羅莎颱風	62	6,141	-	-	宜蘭縣、新竹縣、苗栗縣、嘉義縣、臺南縣、臺南市、新竹市、花蓮縣
2008	0718卡玫基颱風	249	46,616	-	-	南投縣、雲林縣、臺南縣、高雄縣、屏東縣、澎湖縣
	0728鳳凰颱風	101	18,765	11	1,315	宜蘭縣、嘉義縣、屏東縣、花蓮縣
	0911辛樂克颱風	138	64,217	7	661	宜蘭縣
	0928薔密颱風	2	4,286	-	-	宜蘭縣
2009	0622蓮花颱風	29	5,226	2	35,310	嘉義縣、臺南縣、臺南市、屏東縣、澎湖縣
	0808莫拉克颱風	7,129	3,688,615	40	472,778	新竹縣、苗栗縣、彰化縣、南投縣、雲林縣、嘉義縣、臺南縣、臺南市、高雄縣、屏東縣
	1006芭瑪颱風	10	5,214	-	-	宜蘭縣
2010	0729豪雨	1	168	3	20	嘉義縣
	0919凡那比颱風	850	718,923	2	240	屏東縣、高雄縣、臺南縣、嘉義縣、花蓮縣
	1021梅姬颱風	69	45,270	-	-	宜蘭縣
2011	0831南瑪都颱風	3	26,077	1	2,500	屏東縣、嘉義縣、臺東縣、澎湖縣
2012	0610豪雨及0618泰利颱風	18	2,890	10	442	嘉義縣、新竹縣、澎湖縣、屏東縣、臺南市
	0801蘇拉颱風	91	56,764	9	38,219	花蓮縣、宜蘭縣、新竹縣、苗栗縣、臺南市
	0823天秤颱風	25	19,375	2	100	花蓮縣、臺東縣、屏東縣
2013	0711蘇力颱風	20	5,544	-	-	雲林縣、新竹縣、宜蘭縣
	0821潭美及0829康芮颱風	1,984	92,390	2	4,350	高雄市、雲林縣、嘉義縣

年分	漁損災害事件	產物損失		設施損失		受災範圍
		面積	金額	處數	金額	
	0921天兔颱風	-	-	5	16,942	屏東縣
2014	0723麥德姆颱風	13	9,522	456	36,030	花蓮縣、嘉義縣、宜蘭縣
	0807豪雨	5	5,325	-	-	高雄市
2015	0808蘇迪勒颱風	269	114,890	6,749	302,292	基隆市、彰化縣、雲林縣、嘉義縣、臺南市、高雄市、屏東縣、宜蘭縣、花蓮縣、澎湖縣
	0928杜鵑颱風	15	3,962	650	37,337	新竹市、雲林縣、嘉義縣、宜蘭縣、花蓮縣
2016	0708尼伯特颱風	1	1,555	3,002	15,300	臺東縣、屏東縣、嘉義縣
	0914莫蘭蒂颱風	51	59,547	-	-	屏東縣、花蓮縣、澎湖縣、高雄市、臺南市、金門縣
	0927梅姬颱風	96	45,646	3	397	嘉義縣、苗栗縣、花蓮縣、宜蘭縣、高雄市、臺南市、雲林縣、彰化縣、新北市、臺東縣
2017	0601豪雨	13	5,641	1	1	雲林縣、苗栗縣、新北市
	尼莎及海棠颱風	64	181,411	1	1,500	屏東縣、嘉義縣、花蓮縣、宜蘭縣
	1011豪雨	2	1,608	-	-	花蓮縣
2018	0823熱帶低壓	1,056	470,224	-	-	臺南市、高雄市、嘉義縣、雲林縣、屏東縣
2021	1007圓規颱風	6	1,846	-	-	花蓮縣
	0812西南氣流豪雨	2,505	516,948	-	-	臺南市、彰化縣、雲林縣、嘉義縣、屏東縣
【統計定義】 產物:淡水與鹹水魚塭之養殖物損失 設施:魚塭塭堤及相關設施						

(資料來源：行政院農業委員會，2022a)

市場銷售與經濟面

因受氣候變遷對生產量與質以及設備損失的影響，將造成產能下降或中斷，例如：極端強降水型事件亦對漁業生產造成產量變化，及 (或) 現有資產沖銷或提前報廢，將間接導致水產品停產、供應鏈中斷、運輸困難提高等市場銷售與供應問題。此外，現有資產沖銷或提前報廢 (如：如高風險地區的財產損害、基礎設施維護或建置成本，導致業者營運成本提高等經濟層面負面影響)。

4.4.3.2.4　我國漁政單位執行減緩與調適政策

根據2022年COP27會議通過之《沙姆沙伊赫調適議程 (Sharm-El-Sheikh Adaptation Agenda)》與調適路徑及框架定義，「氣候變遷」問題的解決途徑可分為「減緩(Mitigation)」與「調適(Adaptation)」兩類。「氣候減緩」係指藉由行動，「減緩」氣候變遷發生的速度與規模；「調適」係指當氣候災難無可避免時，可藉由政策或方案實施，儘可能提高地方組織或其產業之氣候「韌性」(Resilience)」，以「調適」氣候變遷之衝擊，期能從氣候事件中斷狀態，迅速復原、維持運作。根據我國漁政單位於養殖漁產業調適政策施政方向，其減緩與調適定義如下：

減緩：為維持產業經濟活動下，藉由減量作為，降低漁產業碳排放量，以期「減緩」氣候變遷發生速度和規模。產業端目前發展面向包含：減少生產過程可能產生碳排、降低水俥用電量、納入智慧化生產機具 (如自動投餌機等) 等 (圖 4.4.3.6與圖 4.4.3.7) (行政院農業委員會，2022b)。然而，漁政單位策略發展則以鼓勵使用再生能源等長期政策為主。

調適：根據漁產業實際或未來預測之氣候可能產生的衝擊與改變，以縝密規劃、完整裝備與執行調適措施的行動，協助產業強化自身的「韌性」，達因應未來氣候風險與產業轉型目標。例如：發展氣候智慧漁業科技、城市基礎設施、建構災害預警與應變體系、強化漁業災害救助與保險體系、調整漁業經營模式，加強產銷預警調節機制等 (圖4.4.3.8與圖 4.4.3.9) (行政院農業部委員會，2022b)。

4.4.3.2.5　內陸養殖漁產業未來潛在氣候風險評估

藉由國科會TCCIP統計降尺度網格日溫度資料 (5km解析度)，結合我國水產養殖漁產業常見連續性低溫與高溫災害事件指標，分析AR6之全球暖化程度 (+1.5°C與+2°C)，並計算相對於基期 (1976年至2005年) 之極端溫度事件改變量 (次)。相較於基期，全球暖化情境下彰化沿海地區的低溫事件發生次數減少。其中，+2°C情境較+1.5°C情境下之低溫事件發生數變少 (圖4.4.3.8)；反之，高溫危害與暴露變化則持續加劇 (圖4.4.3.9)。

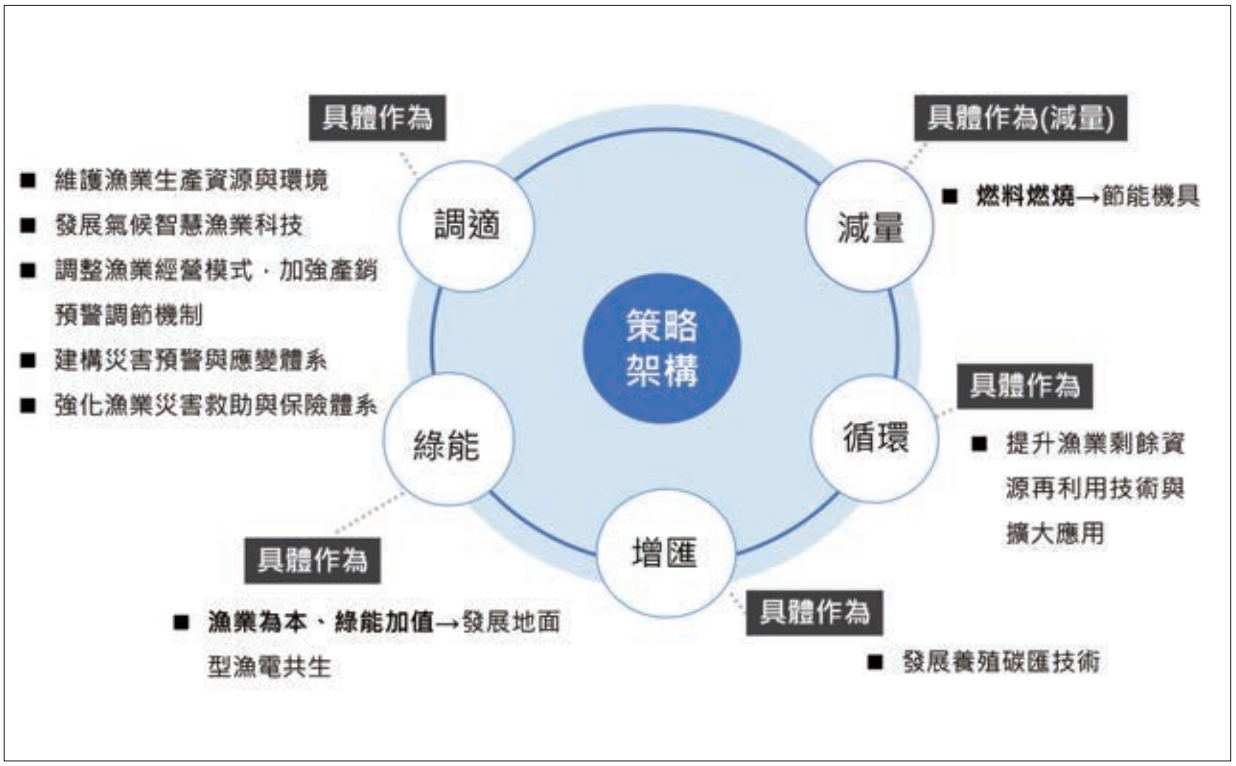


圖4.4.3.6　我國漁業部門因應氣候變遷與淨零策略架構
(資料來源：侯清賢教授研究團隊彙整自行政院農業委員會，2022b)

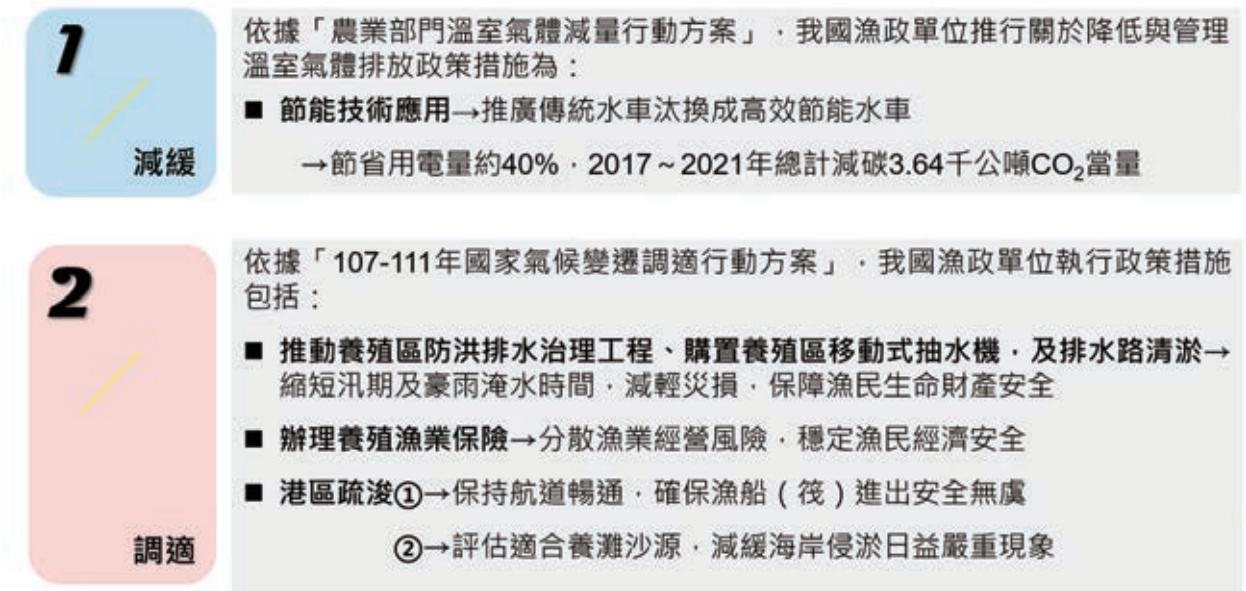


圖4.4.3.7　我國漁業部門因應氣候變遷與淨零策略架構
(資料來源：侯清賢教授研究團隊彙整自行政院農業委員會，2022b)

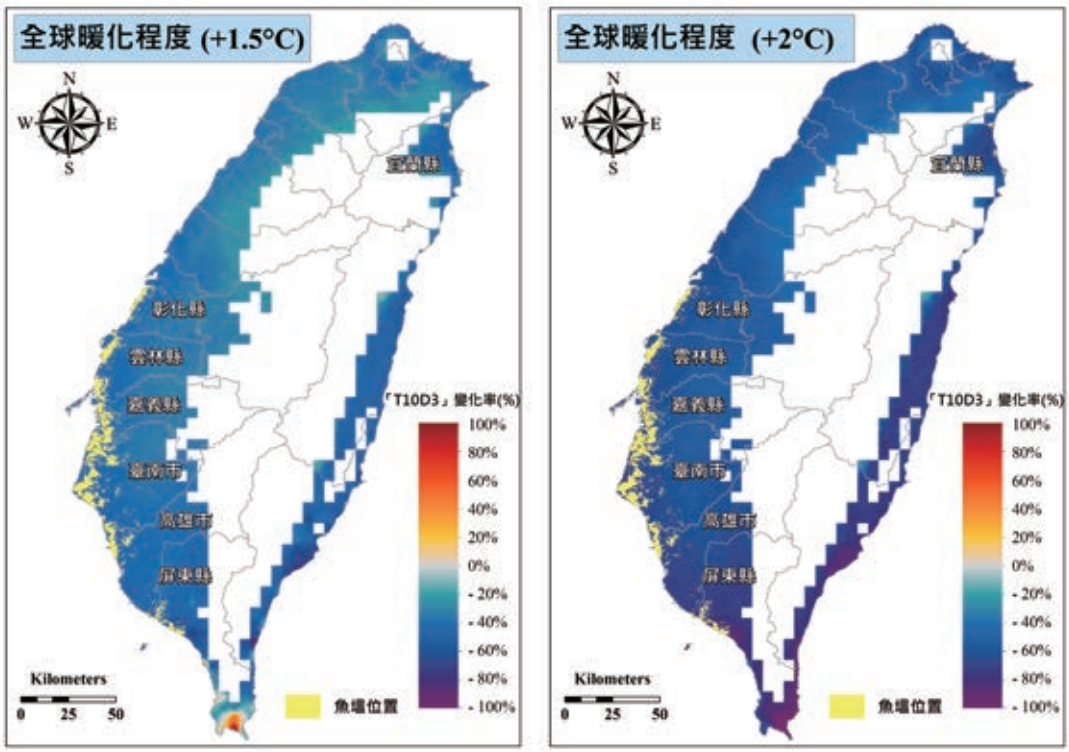


圖4.4.3.8　AR6全球暖化程度之虱目魚養殖漁產業低溫危害變化率 (T10D3代表連續3天低溫10°C) (資料來源：侯清賢教授研究團隊)

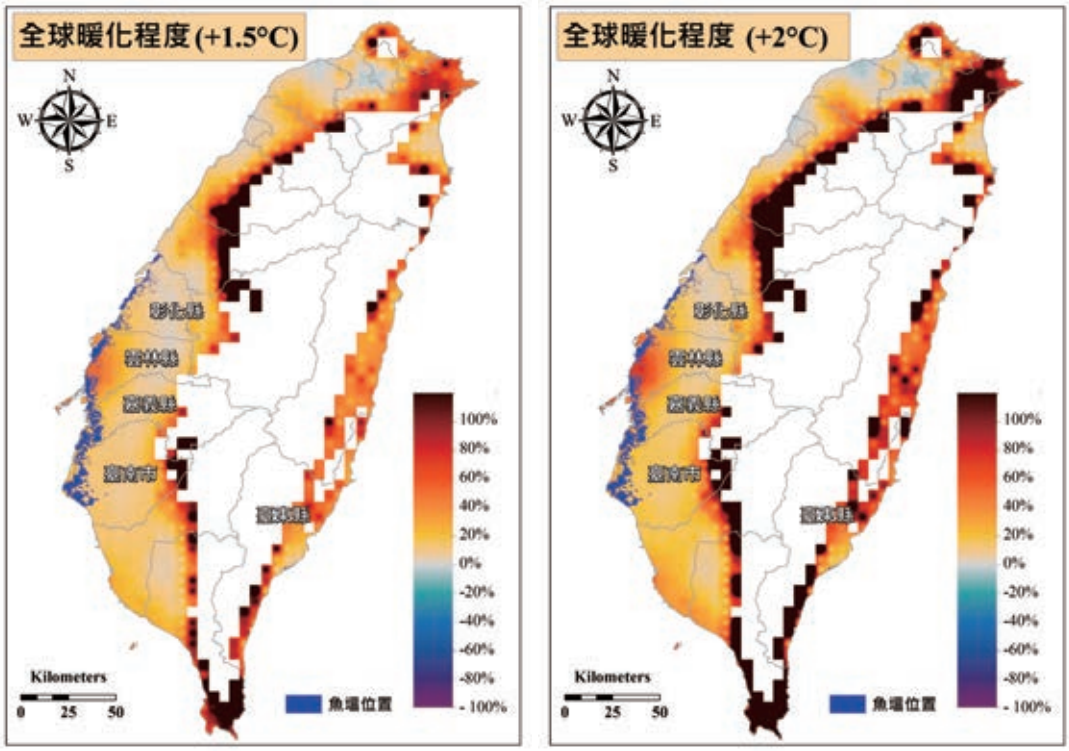
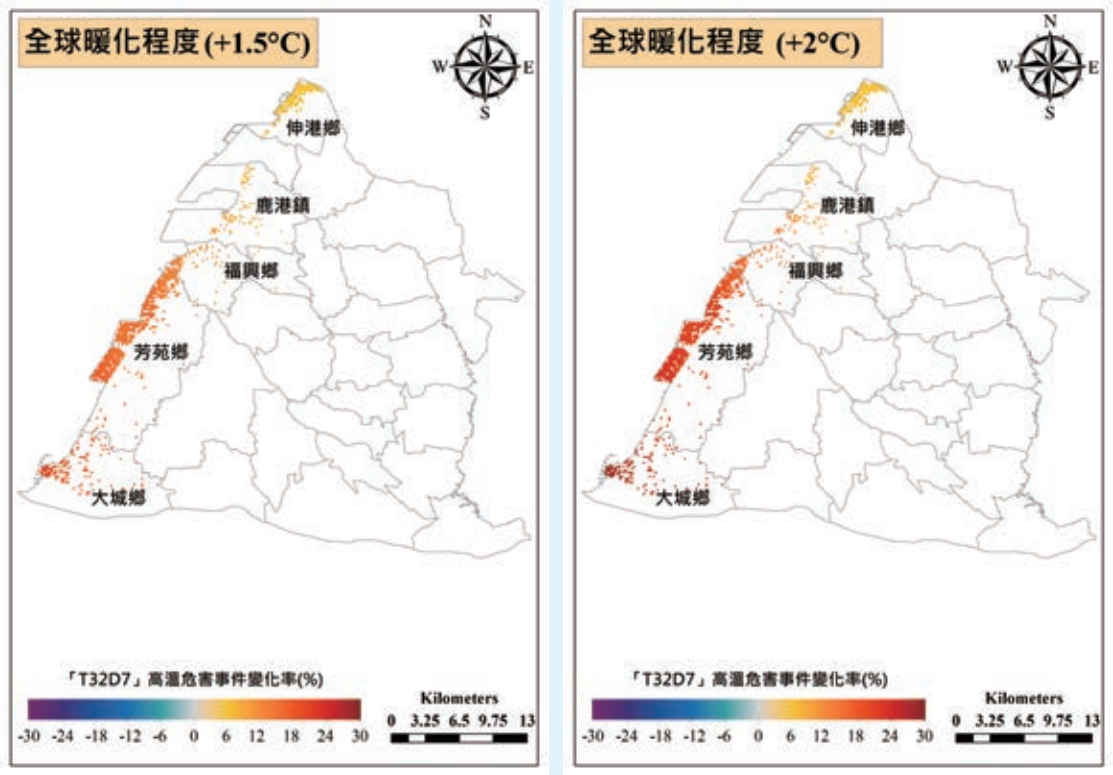


圖4.4.3.9　AR6全球暖化程度之文蛤養殖漁產業高溫危害變化率 (T32D7代表連續7天高溫32°C) (資料來源：侯清賢教授研究團隊)

文字框 3 ｜未來高溫與極端強降雨災害事件因應：文蛤養殖為例

高溫風險描述：隨著全球氣溫持續升溫與連續性高溫事件發生頻度增加，高溫現象已對文蛤養殖漁產業生產造成衝擊。與連續性低溫寒害現象造成的衝擊不同，連續高溫並非對養殖物種造成直接影響，而是經由水質的改變，間接影響導致物種的生長或造成死亡減產等現象。然而，為減緩高溫對漁業生產過程可能的衝擊，彰化芳苑地區的經營者採取的調適作為，不同經營者現行已採取應對作為，主要以智慧科技設備導入，協助業者隨時監測水質，如發生池水水溫過高的情況時，將以導入海水的方式進行池水溫度的降溫，藉此調整水質與水色以降低連續性高溫事件可能對文蛤養殖漁業生產的衝擊。根據AR6未來情境的分析結果顯示，因受各鄉鎮的危害程度不同，同縣市不同鄉鎮的文蛤養殖區面臨相同的高溫氣候指標時，其暴露風險亦不同 (如下述風險圖所示)。



圖BOX4.4.3.1　AR6全球暖化程度下，彰化文蛤養殖生產區高溫危害 (T32D7) 風險圖
(資料來源：侯清賢教授研究團隊)

4.4.3.2.6　氣候變遷養殖漁業生產區潛在風險與調適缺口

臺灣漁業經營日漸困難，未來漁業增產更加不易。為滿足國民對漁產品的需求，應進行漁業生產供應方式調整，調適策略需同時考慮與解決氣候、氣候相關與非氣候因子之綜合性風險，並對應全球暖化程度的評估結果，分析產業可能面臨的轉型風險與物理風險，以及為產業轉型時潛在機會，擬定對應的調適規劃 (Ho et al., 2016)。

生產與技術面

1. 智慧化生產技術導入

臺灣的漁政單位已開始針對養殖物種與區域進行環境監測的資料，執行養殖生產區環境資料的連續性測量、蒐集與彙整，並將蒐集到的資訊彙整至地理資訊系統或建立資料庫，藉由技術團隊定期評估訊息，以及辨識預警信號向使用者提出反饋，並做為使用者於管理決策中的考量，亦提供經營者進行作業與魚病防治的判斷依據，例如：經營者是否應投餵魚餌、池水的水位判定、水質調控等。未來，整合性環境監測系統可持續透過鼓勵或以漸進式方式，鼓勵經營者自行蒐集簡易的水質參數資料，如：水溫、鹽度、溶氧等，成為校正監測系統資料庫的重要參考依據。

2. 養殖物種的開發與技術創新

技術的開發與創新的調適策略目的為開發或降低養殖物種或養殖系統對長期性氣候變遷或極端天氣災害的敏感度，或透過預警系統技術的提升，降低潛在風險與衝擊的程度。近年來，國際養殖技術的創新能力快速提升，特別是空間技術應用於水產養殖漁業經營管理，以因應與調適氣候變遷的長短期衝擊與影響，已逐漸發揮重要作用。

3. 基於氣候風險的生產區域適合度重新規劃

臺灣早期的水產養殖漁業分區與選址方式與全球的養殖業發展相似，養殖生產區域的地理位置選取過程中，多數依針對單一養殖場或養殖區進行臨時性選取，並未進行生產區的整合性的使用規劃考量，亦較少關注氣候變遷或短期的極端氣候災害的潛在風險。然而，許多國家的中央與地方的漁政單位已開始將氣候變遷造成的潛在風險議題，逐步納入生產區的空間規劃，進行生產區的通盤檢討與未來國土使用規劃。

透過氣候風險評估結果，判定未來經營者可能面臨的潛在風險與威脅，針對未來的養殖生產區域進行適合度重新規劃。例如：未來生產區的極端氣候事件發生頻度增加

(如：極端強降雨、極端高溫、極端低溫、連續天數乾旱、海平面上升與海水倒灌等)，大宗養殖物種的合適的地理位置是否需要移動至合適區域；如無法移動的生產區，應透過生產區的養殖設施結構整體規劃(如：儲運冷鏈技術導入)與營運成本調節，提升生產區的氣候韌性與維持漁業產能。

制度面

1. 公正轉型機制的建立

(1)建立利害關係人合作機制

現行的臺灣漁業管理法規、工具與施政方向，雖然有望達到漁業管理的永續目標，並因應氣候變遷可能帶來的挑戰。然而，如要能真正將調適策略或工具運用於長短期氣候災害的影響的調節，仍需要解決一些關鍵性問題，特別是利害關係人於政策制定過程中扮演角色與參與程度。過去臺灣相關管理政策擬定時，多數僅將利害關係人列為顧問角色，因而忽略利害關係人的直接觀察訊息與現場實際狀況。然而，政策制定過程中應開始逐步將漁業經營者或相關利害關係人的共同參與，將可促使漁村社區更為瞭解長短期氣候災害可能的風險與衝擊類型，並進一步成為協助解決未來氣候風險的重要角色。例如：即時的調適措施、預警系統的建立、投資行為的取捨等。

(2)利害關係人的氣候教育與調適能力建構

針對決策系統各層級之利益關係人進行氣候知識教育和應變能力建構之投資，以提升社區學習針對特定情況應對措施之長期性能力，藉此降低風險並強化自身韌性。具體活動包括：決策過程中使用多種知識系統和區域氣候資訊，並讓當地社區、原住民和利益關係人參與調適治理安排和規劃。藉由氣候素養提倡和善用地方科學知識系統、提倡公眾對地方性風險和因應潛力之意識，提升地方對調適治理安排之瞭解程度，互動和信心，將能有效改變或提升管理成效。

2. 政策、法規於產業轉型過渡期的支援

近年來，自然災害與氣候變遷引起的災害頻度、嚴重性、風險逐漸提升，世界各國開始推動或擬定減輕氣候損失的調適方案。其中，擬定協助產業執行轉型時可能所需的政策支援，為目前多數國家擬定調適政策主要的政策議題之一，特別是針對家計型漁業的政策或法規的支援，已被證明為協助經營者迅速自災害中恢復正常生產，並提高社會保障與落實公正轉型 (Just Transition) 的重要議題。

(1)開發新型態的漁業保險與承保區域檢視

臺灣目前已針對部分大宗養殖物種 (如虱目魚、石斑、吳郭魚等魚種)，開發降水型保險與溫度型保險兩種保單，並針對容易受環境衝擊與影響區域進行投保之推廣，如：高雄永安、彌陀等。政府共同資助的保險條款已逐漸成為經營者於事件後快速重產能的重要工具，提升漁業經營者因應極端強降雨與低溫事件的因應能力，並提升事件後的回復產能的速度。未來漁政單位除持續開發因應氣候變遷趨勢的漁損保單類型，如：開發高溫、乾旱，並針對現行承保區域檢討或因氣候變遷產生的新生產區的投保必要性。同時，建議思考如何提升個體戶漁業經營者或家計型漁業的保險分配規則上的靈活性與彈性，藉此提升業者共同加入投保的意願，協助彌補或回復至正常經營前可能的經濟損失與負擔。例如：政府以補助金的形式向個體戶漁業經營者提供補償，以替換損壞或流失的設施或設備，並允許臨時調整分配法規，彌補養殖條件恢復正常前的收入損失。

(2)產業過渡期的金融政策支持

臺灣水產養殖漁業為高風險的經濟活動，生產過程受到氣候變遷帶來的高度不確定性與諸多負面影響。然而，產業的高風險特性導致金融業者選擇放棄提供漁業經營者進行融資，或僅願意針對部分養殖物種進行金融服務與貸款，即使順利取得融資，經營者仍可能需面對利率提升等問題，特別是家計型的個體戶養殖漁業經營者。然而，融資或高利息的問題亦導致家計型漁業經營者無足夠的能力或財政支援進行相關調適作為的落實或未來規劃，故選擇不採取任何相關作為。

為能提供產業足夠的韌性，部分金融單位已開始透過快速貸款、縮短放款時間、擴大經營者的貸款額度等政策調整的方式，提升經營者因應氣候變遷的韌性能力。然而，調適作為的資金成本投入，多數都非能立即對生產或經銷面相產生正向效益，故經營者自身經濟能負擔的信貸額度，並能同時具有效或高效率的調節氣候變遷或極端氣候可能的衝擊，將成為支援產業於過度期執行調適政策是否成功的重要關鍵，故未來建議可透過合適的管理政策或小額貸款紓困政策的制定，達到產業過渡期提升韌性與朝向轉型邁進的關鍵。

市場產銷與經濟面

臺灣漁產品供需市場對水產養殖漁業的可獲得性與水產品供給的依賴性較大，且面臨土地競爭壓力大、水資源較為缺乏。因此，未來以漁業經營者生計為主的調適策略，

除需考慮漁政部門的整體政策規劃方向外，亦需將經營者或當地漁村生計問題一同納入規劃，共同制定相關的調適策略。然而，這些策略規劃並非只針對氣候相關問題，而需透過養殖漁業的產品多樣性或替代性的增加，減輕或降低氣候變遷可能對經營者生計產生的衝擊。

1. 建立市場產銷多元化通路

近年來，隨著因行動通訊、資訊產業與新的整合技術的發展，促使消費者的生活型態與消費方式開始改變，並導致臺灣漁業逐漸發展出越來越多元的運銷商業模式，該現象於臺灣電商的蓬勃發展與技術的精進，包括：影音串流技術、宅配服務、第三支付等，技術與法規逐漸完整趨勢下，電子商務開始做到使用者友善，易用性與普及性高，且因使用者的提升交易成本逐漸走低。然而，此種方法未來仍可能面對零售通路集中化、大型化後，通路商明顯擁有較大議價能力，而導致家計型漁業經營者的利益受損，故未來農政單位應於政策推行時加注政策力量的支持，維持通路的多元性，才能避免通路獨一化等問題。

2. 開發潛在的消費市場與投資機會

長期性氣候變遷與極端天氣災害事件亦可能帶來新的機會，特別是消費市場的開發與進入。全球暖化造成的氣候變化 (如：連續高溫與低溫事件)，將可能造成現行的水產養殖物種的養殖地理位置與區域改變，例如：暖水性魚類的養殖區域可能逐漸往北移動。以虱目魚養殖為例，因虱目魚的活動水溫為11.0°C至41.5°C，養殖適水溫為25°C。2010年前，主要養殖生產以屏東、高雄與臺南為主；2010年後，因受到全球暖化與氣溫升溫的影響，生產區開始逐漸往北部擴張與移動，如：彰化、雲林、新竹等沿海地區已開始養殖虱目魚，因全球暖化造成的暖冬現象有利於虱目魚的成長，越冬虱目魚之死亡率下降，促使原本不適合養殖的生產區的合適性提升；其原本主要生產區 (如屏東)，因氣候持續升溫，故開始改養原本不適合養殖的熱帶魚種四指馬鮫 (俗稱午仔魚)。因此，氣候變遷造成的環境變動亦可能對養殖漁業生產的產生正面效益，其增加的生產量將可能開發或進入消費市場，形成新型的市場結構。

4.4.3.3　海洋漁業

4.4.3.3.1　氣候變遷對海洋漁業衝擊的研究

氣候變遷被視為對海洋生態系統和人類福祉的主要威脅 (IPCC, 2007; Doney et al., 2012; Brugère, 2015; Kais & Islam, 2018; Etongo & Arrisol, 2021; Huynh et al., 2021; Ramos et al., 2022)，根據AR6的國際評估報告，過去四十年間，每一個十年都比之前1850年以來的任何十年都還要更暖。由於世界各國不同海域受到氣候變遷影響的程度不一，很難概一而論，因此目前透過觀測系統獲得氣候變遷影響海洋生態系統的資訊非常有限 (Barange et al., 2018)。已經觀測到的有太平洋和印度洋海平面變化模式超過大西洋 (Enfield & Mestas-Nunez, 2000)。主要是因為太平洋西部和印度洋東部有世界最大面積的表層溫暖水流，氣候壓力導致流域範圍內初級生產力、魚類數量及生態系統結構產生很大的變化 (Chavez et al., 2003)。但在2022年的研究，發現海水溫度上升已經擴大到北大西洋及印度洋部分地區，海水溫度創有史以來最高紀錄。(Tanaka & Van Houtan, 2022)。在整個21世紀，極端海平面事件將變得更加頻繁和劇烈，今天的海洋比任何時候都暖和，也導致更多的沿海洪水和海岸線退縮 (IPCC, 2021a)。氣候變遷正在引起海洋物種分佈的變化，像是由海水溫度、氧氣和其他生物地球化學特性的引起的生態變化，都會改變物種分佈、生長、繁殖、豐度和營養生態系統結構等 (IPCC, 2019b)。海面溫度升高，對海洋環境影響最大 (Hoerterer et al., 2020)。不斷上升的海洋溫度迫使魚類放棄它們的歷史領地，轉移到較冷的水域，當氣候變化及其有害影響迫使魚類遷移時，影響整個生態系統，漁民的生計也跟著被打亂，隨著種群的轉移，許多漁民被迫面臨一個抉擇：跟隨魚群向北，或追求不同的物種 (Goldfarb 2017; Ramos et al., 2022)。

Richardson & Poloczanska (2008) 研究強調海洋的所有部分都受到多種人類活動的影響，例如富營養化、捕魚、棲息地破壞、缺氧、污染和物種引入等。這些多重壓力因素可能掩蓋了氣候變化更微妙的影響。Lam et al. (2020) 綜合氣候變遷對熱帶海洋漁業的影響，在海洋變暖、酸化、缺氧和海平面上升的考驗下，藉由AR5排放情境 (RCP8.5) 的推估，與2000年代相比，到2050年，一些熱帶專屬經濟區熱帶魚類種群的最大捕撈潛力預計將下降40%。由於氣候因素所驅動的漁業產量減少和魚類種類組成的改變將大幅增加調適能力有限的熱帶國家的脆弱性。在氣候跟人為的雙重壓力擾亂漁民和漁業社區並威脅糧食安全，漁撈的目標物種正在改變其地理分佈，除了經歷範圍收縮、擴張或分散之外，預計這些模式將在未來幾十年繼續甚至擴大。這些變化將會改變陸

地和海洋生態系統，改變群落結構和功能，此外還會導致生物多樣性和漁民生計的喪失 (Hwakins et al., 2009; Selden & Pinsky, 2019) 這將會對依賴漁業國家的漁民生計、糧食安全和當地文化以及整個海產品供應鏈產生影響。這些變化衝擊所有類型的捕魚活動 (Ojea et al., 2020; Woods et al., 2021)。

雖然國際上都有意識到健康海洋對減緩氣候變遷的重要性，但在國家和區域海洋治理中，相關法規欠缺明確的氣候調適目標及缺乏有效的法律和經濟政策誘因措施，這可能導致執行不充分或沒有執行實際適應措施 (Lindegren & Brander, 2018; Tittensor et al., 2019)。這也說明，氣候變遷正在改變整個世界海洋的生態系統和漁業氣候，也在挑戰目前的漁業管理方式，未來需要實施有效的漁業調適管理政策，才能保護和管理海洋生物資源，以抵御氣候變遷的衝擊，表4.4.3.3落實漁業管理以因應氣候變遷之四個研究面向：氣候變遷衝擊、生態過程、漁業管理以及建議，提供海洋環境面對氣候變遷衝擊的資訊，以做為有效實踐落實漁業管理的參考 (Bryndum‐Buchholz et al., 2021)。

鑑於氣候變遷是一種全球現象，衝擊海洋社會生態系統，因此，漁業迫切需要因應這些變化。將目前氣候壓力所帶來的漁業衝擊分為三方向：海洋環境生態變化、漁民生計影響、以及社會參與溝通 (Woods et al., 2021)，本文根據這三個面向導入說明臺灣目前的科學研究成果，以進一步提出調適方向。

表4.4.3.3　落實漁業管理以因應氣候變遷之四個研究面向

氣候變遷衝擊 Climate change impacts	生態過程Ecological processes	漁業管理Fisheries management	建議 Recommendations
海洋變暖；海洋循環、水柱分層、海水酸化；減少氧合；融化的海冰；極端事件。	族群分布、豐度以及研究氣候與生態事件時間相互關係之物候學(phenology)之興起。 生態系統包括初級生產、棲地可及性、動態食物鏈之關係。 個別物種生存、成長率、生殖等變化。	預警處理、基於生態系統的科學方法；單一族群與多族群之資源評估、選擇性控制、努力量限制、捕獲量限制、封閉捕魚、捕魚空間限制管理。	政策和立法中明確的氣候變化適應目標；創新的決策框架；基於氣候增強生態系統的漁業管理方法；氣候相關監測海洋資源和生態系統；轉向氣候穩定的永續性和公平管理目標；為新的多邊漁業管理做準備。

(資料來源：Bryndum‐Buchholz et al., 2021)

1. 海洋環境生態變化

呂學榮與李明安 (2013) 指出氣候變遷造成臺灣周邊海域暖化的趨勢，沿近海漁業之主要衝擊包括漁場分布改變、捕獲量減少以及極端氣候的衝擊，這些已影響洄游魚種遷徙，例如暖水性洄游魚類 (如正鰹、黃鰭鮪、花腹鯖等) 相對加入量增強，冷水性洄游魚類 (如長鰭鮪、大目鮪、白腹鯖等) 則相對加入量減少，形成冷暖水性魚種消長。還有烏魚越冬洄游南界北移，造成烏魚、鯖鰺等之漁獲量日益減產。除此之外，研究也顯示臺灣沿近海受到海溫上升衝擊的漁業，包括近海鮪延繩釣、鯖鰺大型圍網、鰻苗漁業、魩仔魚漁業、與石斑等養殖漁業，帶來不少之衝擊，在長期水溫上升的趨勢下，季節別漁獲種類有明顯的改變，冬季型漁獲比例逐年遞減，總漁獲量因而降低。

水試所自1970年即進行烏魚 (Mugil cephalus) 資源調查等相關研究，過去研究指出影響烏魚漁獲量之因素有很多，例如資源量的變動、氣象因子及海況因子等，但至目前為止，尚無法完全掌握影響漁獲量變動之因素。其他相關研究結果亦表示，影響烏魚汛期漁獲量變動之因素眾多，包括海域環境的變動、海洋氣象因素、長期氣候變遷、大陸不良漁法的撈捕作業等諸多因素，都會形成烏魚的棲息環境、生態、洄游路徑及魚群變動。經由分析2014年至2019年間資料，顯示烏魚主要漁獲位置有逐漸北移的趨勢 (圖4.4.3.10)，漁場環境位置有受到氣候變遷的影響。因此，有經驗的漁民已學會改變捕撈地點以及捕撈方式，以增加漁獲收入 (張致銜等人，2021)。

Chang et al. (2021) 整合1997年至2016年中西太平洋漁業委員會及美洲熱帶鮪魚委員會延繩釣漁業數據，透過物種分布模型 (species distribution model) 進行長鰭鮪分佈分析，之後以系集預測 (Ensemble Forecast) 探討氣候變遷對長鰭鮪分佈的影響。研究結果發現，海面下100m溶氧量及海表面溫度對長鰭鮪潛在分佈之影響最為重要。長鰭鮪偏好棲地為海面下100m溶氧量介於0.2mmol/L至0.25mmol/L，及海表溫度介於13°C至22°C海域。研究顯示氣候變遷衝擊鮪魚棲地及漁業，南太平洋長鰭鮪分布將往南移約5°緯度，南緯30°以北的鮪延繩釣漁業釣獲率將減低。預計到2080年，南太平洋國家和領土的專屬經濟區 (Exclusive Economic Zone,EEZ) 的長鰭鮪相對豐度將減少。該研究建議未來臺灣到該海域作業之遠洋延繩釣漁業的目標魚種可以考慮在長鰭鮪之外，增加大目鮪以及黃鰭鮪等。

Bell et al. (2021) 研究提出如果海洋以目前的速度繼續變暖下去，到2050年10個太

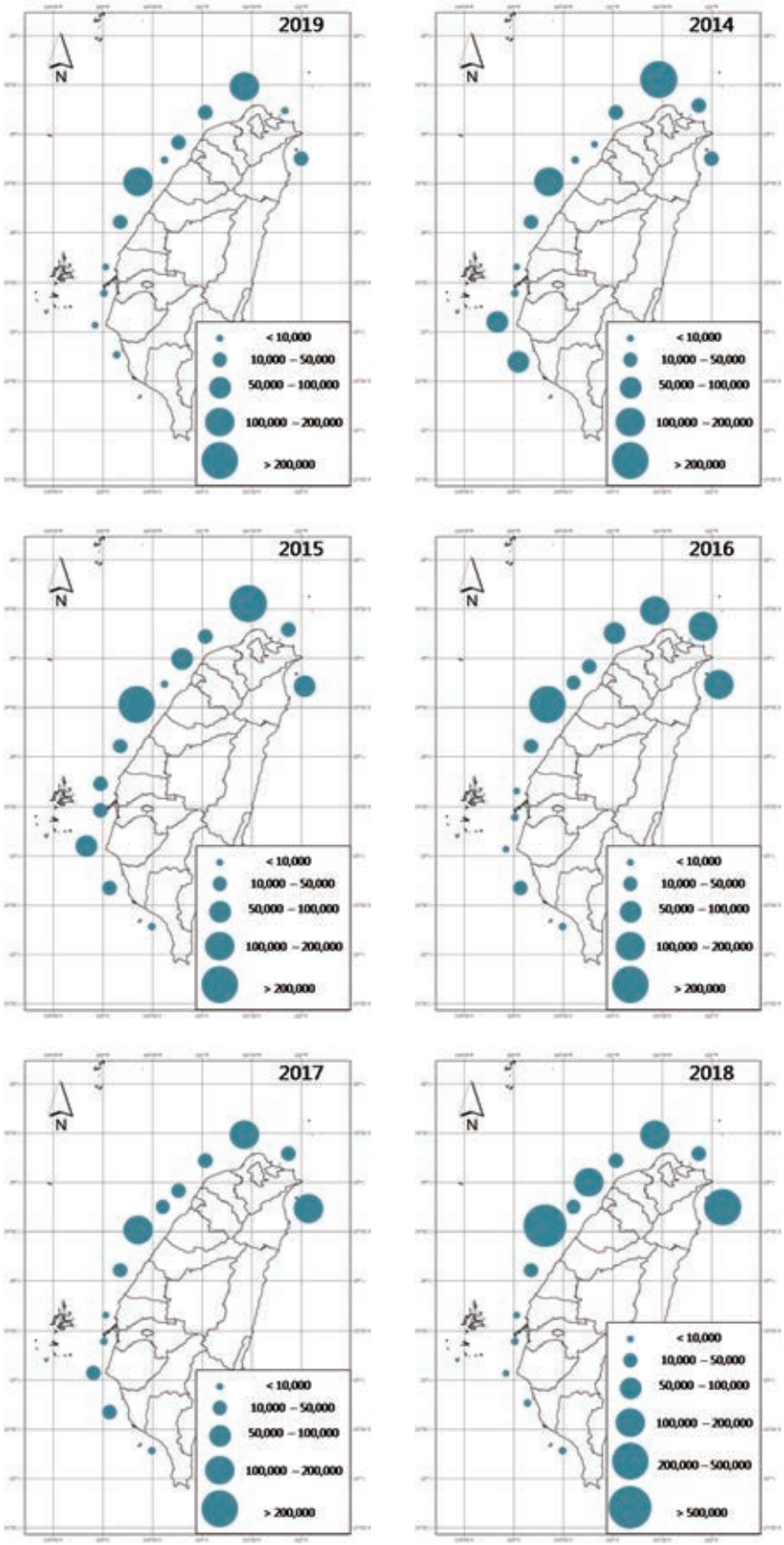


圖4.4.3.10　2014年至2019年臺灣沿近海域烏魚漁獲量變動
(資料來源：張致銜等人，2021)

平洋小島嶼發展中國家加起來的鮪魚捕撈量預計將平均下降20%。這10個國家的捕撈量都將下降減少。小島嶼國家和發展中國家已經不成比例地遭受氣候危機的影響，儘管其對氣候危機惡化的貢獻要小得多。該研究提出防止鮪魚遷徙和確保區域漁業繼續繁榮的兩條途徑的策略。首先是根據《巴黎協定》大幅減少化石燃料排放並將全球變暖限制在1.5°C以內，這將減緩海洋變暖，並在很大程度上阻止鮪魚的重新分佈。另一方面則在政治框架內運作，是不管鮪魚的分佈如何。允許太平洋小島嶼發展中國家仍然從鮪魚中獲得經濟利益。

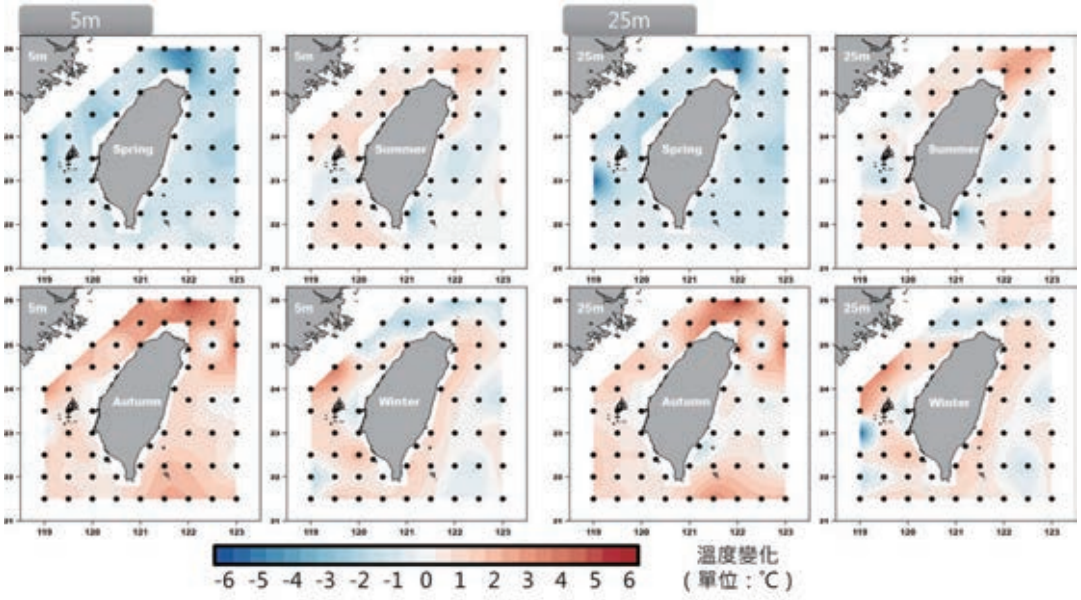
2. 漁民生計影響

基於氣候變遷與人為因素導致的海洋環境壓力因素所引發的相關威脅影響糧食安全和社會結構，導致當地漁業資源和生計需求的壓力增加。事實上，臺灣漁業早就感受海水升溫壓力。水試所藉由分析2003年至2020年間臺灣周邊海域五大分區測站的資料，說明夏季海面水溫變動趨勢，如圖4.4.3.11說明四季不同水深 (5m、25m) 之空間變動趨勢，發現所有測站之溫度變化皆呈現上升。圖4.4.3.11以夏季為例之分區變動趨勢，顯示海面水溫上升0.95°C至2.49°C，造成此一現象之原因仍需進一步研究 (嚴國維等人，2021)。

海洋升溫、海域環境變動、棲地破壞、人為過度捕撈、工業化的捕撈技術增強等綜合因素影響下，致使捕撈漁業產量產生變動。目前的研究顯示，受到海水暖化影響可能衝擊漁民生計的本土魚群包括：劍尖槍鎖管、櫻花蝦、鯖魚、黃鰭鮪等四種，分述如下：

水試所自2009年開始執行臺灣北部海域劍尖槍鎖管 (俗稱小卷) 資源評估研究，其漁獲方式多為火誘網 (包括棒受網、扒網、焚寄網等燈火漁業)，臺灣北部是主要漁獲海域。劍尖槍鎖管盛產期是每年5月至9月，彭佳嶼湧升區海面水溫為25°C，是劍尖槍鎖管最適宜的溫度 (張可揚等人，2016)。水試所研究預測環境變化之影響，每當海水溫度上升1°C，劍尖槍鎖管漁業之單位努力漁獲量將會下降15%，影響的產值可能銳減達兩億元。本研究進一步建置棲地適合度指數 (Suitability Index; SI)。SI介於0 到1之間，當SI為0時代表此環境不適合物種生存，反之當SI為1時則表示此環境適合物種生存。另，也配合IPCC AR6排放情境 (SSP2-4.5) 推估劍尖槍鎖管資源趨勢，圖4.4.3.12鎖管資源雖較目前為低，但長期來看趨勢並無明顯下降。圖4.4.3.13是利用排放減緩情境 (SSP1-2.6) 說明未來劍尖槍鎖管棲地變化之推測，研究說明算術平均模式 (Arithmetic Mean Model, AMM) 顯示在北方三島與接近北緯30°海域之棲地適合度增加。

(a)



(b)

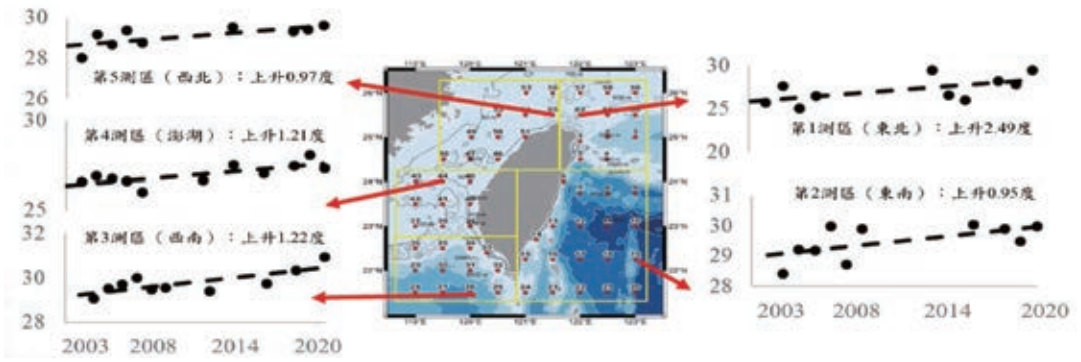


圖4.4.3.11　2003年至2020年臺灣周邊海域夏季海面水溫分析調查 (a) 四季不同水深(5m、25m)之空間變動趨勢 (b)以夏季為例之分區變動趨勢

(資料來源：嚴國維等人，2021)

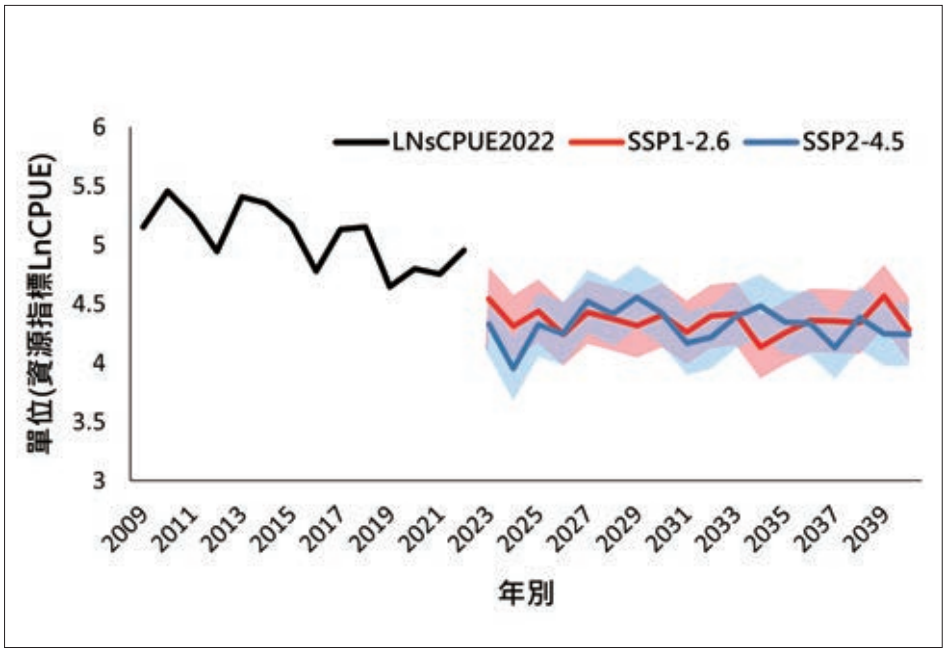


圖4.4.3.12　以SSP1-2.6 及SSP2-4.5推估2040年劍尖槍鎖管資源趨勢
(資料來源：TCCIP計畫產製)

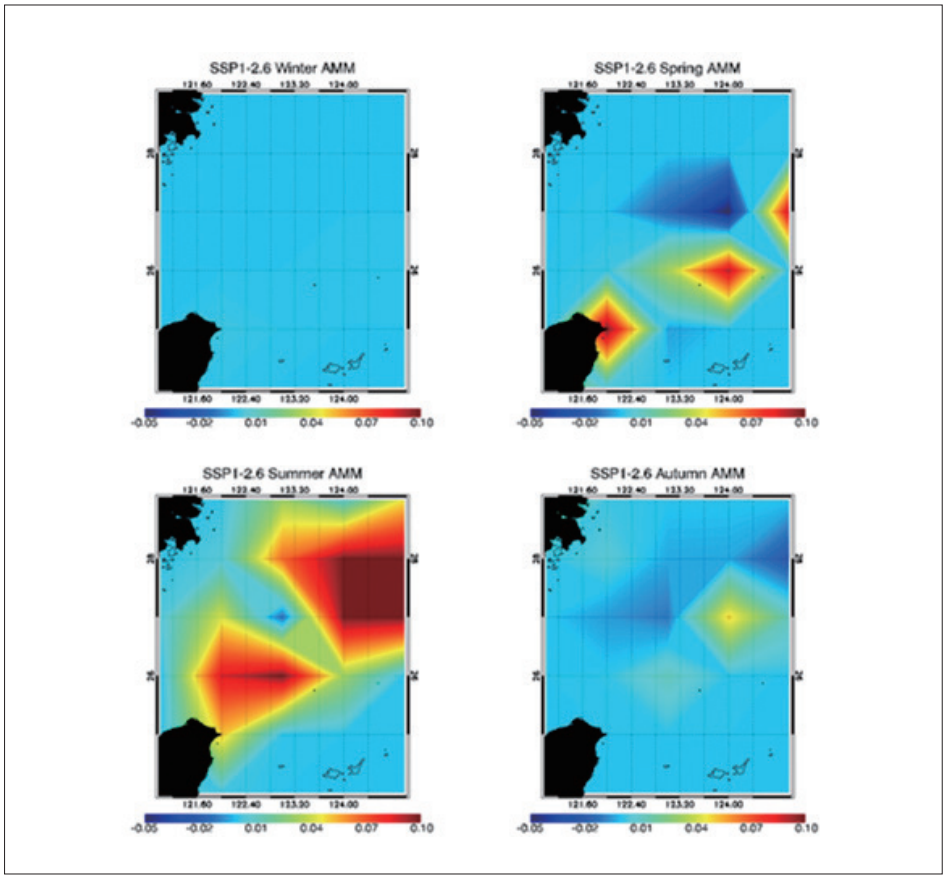


圖4.4.3.13　SSP1-2.6 AMM模式推估未來劍尖槍鎖管棲地適合度時空變化
(資料來源：TCCIP計畫產製)

櫻花蝦為臺灣西南海域重要漁獲物種，生命週期短，其豐度容易受到環境變動的影響。適合生存的水溫大約為11°C至25°C，水溫是影響櫻花蝦繁殖行為最重要的因素。分析2005年至2019年資料，東港櫻花蝦產量呈下降趨勢，漁獲量下降不全然是指資源量也下降，除了可能是海洋環境的變化形成蝦群分布的改變，降低漁民的作業效率，也有可能是產銷班自主性休漁，作業天數的減少，都有可能影響漁獲量下降。未來需持續監測才能精確探討櫻花蝦資源量的改變，以尋求因應對策 (戴靖萱等人，2020)。

有「鯖魚故鄉」之稱的南方澳，在2022年3月漁民盼不到等不到年年洄游的鯖魚，讓當地人感概以前一天可以捉七、八百噸，現在一天捉不到一噸，漁民希望學者專家能給予改善現況以及建議 (鄧凱元，2022)。根據2014年至2021年漁業統計年報，這期間花腹鯖的漁產量維持約4萬至6萬公噸之間 (圖4.4.3.14)，2018年是產量高峰約為6萬4千公噸，2019年漁產量最地降至約4萬2千公噸，可見漁獲資源的不穩定。水試所自2019年展開臺灣東北部鯖魚產卵場海域魚卵密度調查，利用「日魚卵生產模式 (Daily edd production method)」方法，進行探討宜蘭灣花腹鯖產卵親魚群現存量評估。2020年研究顯示花腹鯖魚豐度最大值是出現在東澳灣口。2021年的調查發現最大值出現在三貂角外海，說明主要產卵場位置有呈現北移現象 (圖4.4.3.15) (陳瑞谷，2023；陳瑞谷等人，2022)。

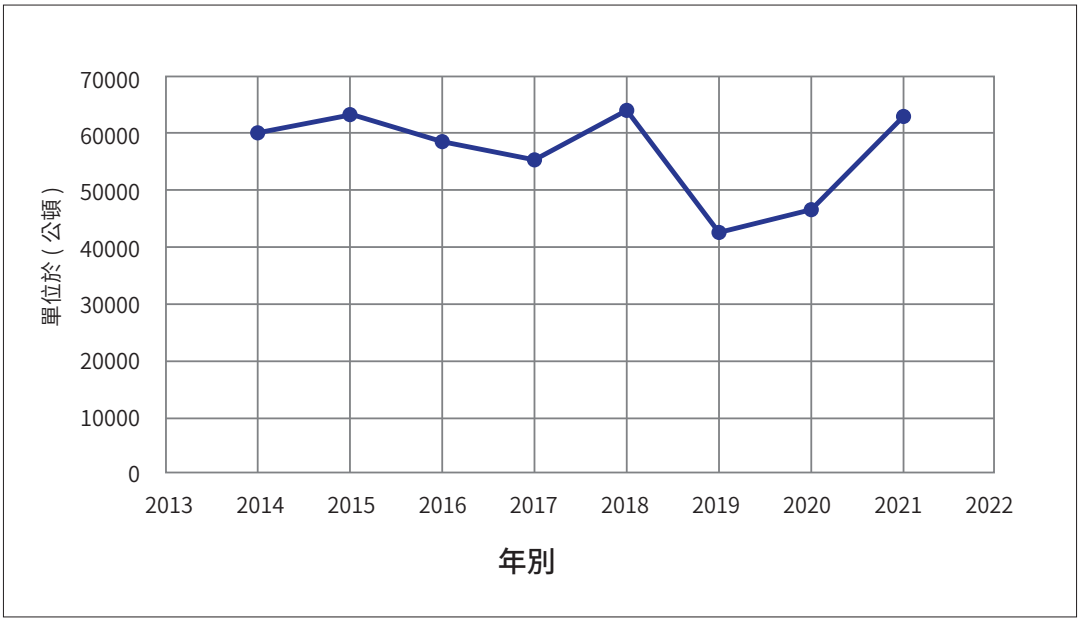


圖4.4.3.14　2014年至2021年花腹鯖漁業產量統計
(資料來源：行政院農業委員會漁業署，2021a)

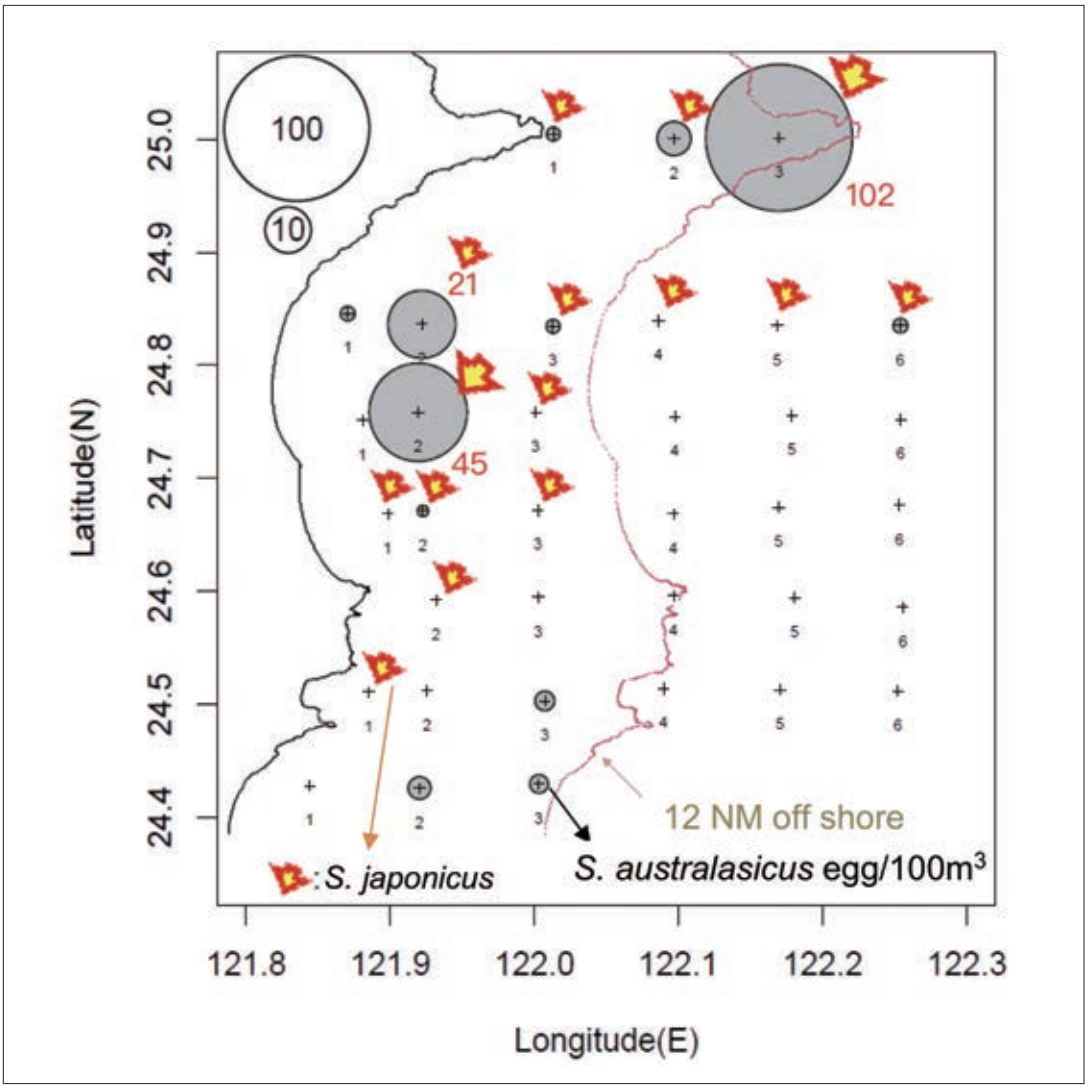


圖4.4.3.15　宜蘭灣海域花腹鯖與白腹鯖魚卵分布概況

註：圖中黑色小數字為站次，紅色數字為花腹鯖卵數，左上方黑色大數字為比例尺，灰色圓形為花腹鯖卵數，箭頭指出有採集到白腹鯖站次 (資料來源：陳瑞谷，2023)

氣候變遷造成傳統漁場有些改變，像是2022年臺東新港漁港小型黃鰭鮪魚卻較往年盛產，在黃鰭鮪盛漁期都過了的4月，新港漁民還能一天捕獲1000尾，比往年多出2倍至3倍，看似受益於氣候變遷的短期效益，但真正的原因還無法得知，在氣候變遷狀態下，有些魚類就是會早到、延遲或遷徙至他處，這都需要建立長期監測資料並進行資源預測的研究，才能掌握真正的漁獲狀況 (盧太城，2022)。

3. 社會參與溝通

由於氣候壓力引起漁期以及漁場的變化，因為漁業環境面對的困境除了氣候變遷還

有人為因素的影響，相關權益關係人都需要依賴科學知識為基礎以調整因應漁業永續等相關議題。像是氣候變遷認知、生計轉型、傳統和地方知識體系、資源管理監測、社會經濟等各種影響措施。根據Ye & Gutierrez (2017) 的研究，自2009年以來，全球過度捕撈魚類種群的百分比已在30%左右波動。雖然已開發國家正在改進其管理漁業資源的方式漁業方面，但是開發中國家在產能過剩、單位努力產量和種群狀況方面面臨日益惡化的局面。即使國際貿易和漁業協定讓經濟可以相互依存，但是開發中國家的管理和治理能力相對有限，在經濟規模與社會發展的差異，加劇了這種情況，也形成科學研究的缺口。

基於上述，可以理解目前大家普遍都認識到漁業對全球糧食安全、生計和經濟的重大貢獻，各種旨在實現漁業永續的觀念已經到位，如何蒐集海洋漁業相關之環境科學知識之整合與推廣，利用正式與非正式傳播方式，以結合漁民、科學家、環保公益團體、政府部門、與漁政單位等共同對話及政策溝通，是減緩調適氣候變遷與糧食安全等議題衝突的解決方向。

4.4.3.3.2　氣候變遷風險評估與調適科研缺口

1. 成功的調適案例

(1) 國內案例

臺灣周邊海域漁獲種類豐富，隨著季節呈現多樣的面貌，因此，政府雖然限制漁業經營以主漁業1種，兼營漁業以3種為限，藉以提供漁民彈性出海需求，並增加漁民的生計來源。像臺灣北部海域大都已採混營模式，不受限於特定漁法或魚種，藉以增加收入。在4月至10月間捕獲鎖管，6月左右改捕獲鰹類 (圓花鰹或扁花鰹)。在冬天捕撈赤鯨、板鯛等底棲魚類或白帶魚 (王凱毅等人，2014)。

海洋保護區的設立是漁業調適氣候變遷的好方法之一，綠島沿岸海域環境很適合硨磲貝 (giant clam) 生長，在過去，海中的硨磲貝族群數量豐富，近年來，受到氣候變遷、環境變化 (如颱風)、漁民捕撈等原因，數量已逐漸減少。因此，為保育綠島海域之硨磲貝生態資源，臺東縣政府雙管齊下，自2013年起委託水試所執行綠島海域硨磲貝資源調查，研究成果顯示綠島石朗與柴口海洋保護區內的硨磲貝平均殼長較非保護區大，說明保護區具有保育成效。隔年，臺東縣政府於2014年公告修正綠島資源保護區相關措施，規定「柴口分區」、「石朗分區」及「龜灣分區」海域為不可採捕保護區，做為

保育硨磲貝資源的後盾。臺東縣政府與水試所合作以科學研究掌握長期硨磲貝資源，作為修正保護區復育策略的根據，也讓漁民理解保育的必要，讓硨磲貝有安全的棲地環境(張致銜等人，2019)。

(2) 國外案例

Schemmel et al. (2016) 為應對海洋漁業氣候變化壓力和其他多重壓力，利用參與式管理方法，透過漁民、科學家、非政府組織和監管機構之間的合作，開發低成本、低技術含量的方法，透過使用一種簡單的工具，即低成本的野外顯微鏡，加強對產卵季節的評估。進而評估夏威夷珊瑚礁漁業中主要目標魚類季節性產卵高峰、月光產卵週期和成熟時的大小，運用漁民傳統知識和實踐與現代科學方法，提供有意義的生物資訊，成功地支持永續漁業管理並建立當地適應不斷變化的海洋條件的能力。該研究展示合作協作資源監測和地方參與方法的好處，以支持漁業共同管理，以維持依賴資源的社區其糧食生存和文化安全。該研究的好處包括漁民對資源自然循環的解增加，這導致捕魚行為的行為變化，以及國家監管機構對地方管理和修訂法規的必要性的瞭解增加。社區監測可以提供漁業評估所需的資訊，並允許在有效管理和保護行動所需的時間範圍內提出解決方案。最後，像這樣的參與式監測計劃可以促進漁民、科學家和監管機構之間的關係發展，從而在群體之間建立信任。

Spijkers et al. (2021) 鑒於將有關氣候變遷影響的資訊轉化為可操作的資訊很困難，這主要是由於海洋系統及其不確定性很大，使用敘事情景 (narrative scenarios) 探索由於氣候變化相關的海洋資源變化而導致漁業衝突的基於證據的未來情景，基本上提出一個工具，以在高度不確定的情況下發展和提高預期能力和決策。基於現有的衝突多發地區，基於相互作用的政治、社會、經濟和環境驅動因素以及相關條件 (例如，執法狀況、捕撈強度、種群狀況、特定種群對環境變化) 有可能加劇衝突。提供以世界四個地區為背景的創造性和複雜的敘述：東北大西洋、東海、西非海岸和北極。場景引發的問題可以幫助建立預期的治理能力。這也是漁業管理的重要組成部分。將基於風險的敘述納入漁業管理政策和決策制定可以成為採取氣候適應性行動以實現更永續的未來的有力工具。

FAO (2022) 關注在非洲沿海漁業是數百萬人重要食物和生計來源。然而，沿海地區的海洋生物多樣性面臨越來越大的考驗。氣候變遷壓力危及水生物種並成為威脅沿海生態系統 (包括紅樹林) 的主要挑戰之一。在非洲象牙海岸 (Côte d'Ivoire) 和塞內加爾 (Senegal)，運用聯合國國際組織科學能力與當地社區合作，執行通過沿海漁業實踐願

景與改善漁業治理和價值鏈相關的永續紅樹林管理全球環境基金資助的西非倡議項目。2021年於700公頃的試點範圍內實施紅樹林恢復、協助自然更新和保護活動，採用當地社區和非政府組織參與的參與式和包容性方法。該項目還支持塞內加爾沿海蝦類管理計劃的實施，並開展社區能力建設，特別關注女性牡蠣加工者，並通過當地語言的各種媒體提高認識。

上述國內外的成功調適案例說明參與式監測計劃可以促進漁民、科學家和監管機構之間的關係發展，在群體之間建立信任是基本的機制。擴大管理方法和工具的範圍，以加快向適應性漁業管理的轉變，並考慮氣候變化對魚類種群、漁業和依賴它們的社會經濟的影響，需要投入更多的科學技術社會資源來支持漁業部門適應當前和未來的氣候變化。

2. 調適科研缺口

目前科學研究的調適以及缺口可以從長期漁業監測與生態調查、技術資訊支援、科學知識三方面進行改善：

長期漁業監測與生態調查：漁業面對氣候壓力的衝擊，長期漁業監測與生態調查成為彌平缺口的最重要的方向。海洋漁業系統正在並繼續受到氣候變遷的影響，產業、漁民和政府之間的衝突主要來自於海洋物種分佈變化導致生態系統重新配置，潛在地影響捕撈種群和非捕撈種群所形成的資源再分配的挑戰，針對這些衝突有效的調適方法為增加海洋魚類生產的潛力，採取綜合方法來實施氣候變遷下漁業管理的有效行動。這將依賴科學為基礎進行長期漁業監測與生態調查，將為政府間機構提供資訊管理，促進區域適應。理想情況下，這需要通過使用綜合海洋觀測系統和先進的採樣技術 (例如水下滑翔機、無人機和水下無人機或eDNA) 以及使用透明的生態系統狀況報告來擴大調查的空間和時間覆蓋範圍。

技術資訊支援：氣候變化對漁業造成一些明顯的威脅，也對漁民生計產生直接的影響。無論是生計多樣化或是改變目標魚種的調查，在傳統漁具的改變、移動新的漁撈地點等，都需要技術資訊的支援，可以結合傳統面對面方式和數位科技教育齊頭並進培訓不同世代漁民。這些培訓工具跟人際關係將成為有形資本。知識交流提供漁民建立與氣候變遷相關漁業知識和技能，累積漁民經驗知識，以激勵措施鼓勵漁民協助地區的漁業

監測，可以在漁民生計發揮有形價值。

建構科學知識：受到國際倡議的重視，如永續發展目標SDGs (United Nations, 2015)、IPCC AR6 (IPCC, 2022)、以及FAO (2022) 等都提出學術研究關注對減緩漁業氣候變遷具有非常重要的科學傳播影響力，提供有效地建構具有氣候適應能力的證據，才能彌平目前數據匱乏情況，例如減少人為壓力、保護關鍵特徵和避難所、保持多樣性、恢復棲地或社群，以及重新安置生物等，以採用評估和管理方法。科學知識的建立須結合在地的漁民經驗知識，才能有跡可循氣候壓力所影響的漁業種群、漁業活動轉型的障礙、在地漁獲的產銷變化等。在宏觀海洋漁業研究的規模上，永續治理或漁業的轉型調適將需要更雄心勃勃的科學合作與協調規模，資訊和知識的有效流動，以及專業知識、研究基礎設施和能力建設的共享。透過社會參與溝通，建立漁業權益關係人間彼此信任，推動與應用以科學知識為基礎的氣候變遷監測資訊，是實施漁業轉型調適的重要趨勢。

雖然已經有大量證據表明氣候變遷對海洋系統的影響，加上海洋漁業與其他主要糧食生產系統 (農業、畜牧業和水產養殖業) 有很大不同，主要是漁業在不受控制的海洋環境中捕獲野生生物。由於依賴漁業的國家和國際漁業組織大多沒有為氣候變化帶來的預期變化規模做好準備，本文參考Galappaththi et al. (2021) 以及Salvador E Lluch-Cota et al. (2023)，自應變海洋環境變化、漁民生計影響、以及社會參與溝通三部分的彌平科學研究調適以及缺口分述如下：

應變海洋環境變化的調適方向：將環境變量和風險納入漁業評估和管理建議、改變傳統捕魚技術、改變捕魚地點或改變目標魚種、為漁民提供漁具多樣性或適應能力的培訓。漁業部門提供漁獲即時資訊以補償生產力的變化、建立科學可靠的極端事件預警系統的能力。

漁民生計影響的調適方向：推動漁民生計多樣化、結合傳統知識與新科技獲取完善的氣候資訊、更直接的漁獲行銷方式、提升在漁船燃料消耗效率以及收穫的生產力和選擇性的技術水準、納入不同漁業的當地知識以提高漁業管理的彈性，加強現有的漁業管理市場。

社會參與溝通的調適方向：推動大眾知情氣候壓力影響下漁業脆弱性現況，建構共同學習的能力建設機會，產官學研共同攜手合作監測魚類遷徙以及漁獲交流，自共同學

習、或是邊做邊學達到有效溝通。增加當地漁業和資訊溝通，允許當局、漁民、漁業團體之間共同承擔管理和利用漁業資源的責任。是成功的適應氣候壓力的好方法。

4.4.4 結語

農業糧食安全及生產消費涉及層面廣且需較長時間，調適策略也不盡相同，但無論如何，對於氣候衝擊需有全面性的因應規劃及確實可行的策略。農業部門面對氣候變遷，在短期應著重災害防範及應變作為以減少農損，長期則強調氣候變遷調適及建構韌性栽培體系。面對多變天候及持續惡化的農業栽培環境，災害防範強調「避災」及「減災」，除建立早期預警及迅捷的災害通報系統外，作物栽培制度也應朝向智慧農業發展，擴增農業氣象資源服務(如增設氣象站及預報服務)，提供農民實際運用於耕作中，而作物種植區選擇也應依據災害風險低的區位及情境規劃。聯合國農糧組織 (FAO) 一直倡導氣候智慧型農業 (Climate Smart Agriculture, CSA) (FAO, 2022a; 2022b)，主要目的是讓農民耕作過程與氣候變遷之間能夠平衡共存，在農作物種植期間減少溫室氣體排放以減緩氣候惡化，另一方面，善用氣候資訊規劃農作物種植種類及種植時機，讓糧食系統永續穩定的運作。整體氣候長期趨勢已相當明顯，作物種植應朝向低風險及可調適的方向規劃。

臺灣畜牧產業的發展，受限於土地取得不易，大部分的耕地需進行農糧作物的生產。豬雞牛乳的產值達1,644億元，每年進口玉米大豆及乾草高達1,043億元，表示進口飼料成本占比高達 63.44%。每年進口的液態乳達5.7萬公噸約占國內牛乳44.9萬公噸的12.69% (行政院農業委員會，2021b)。在未來氣候變遷下，國內飼養畜禽所需長期仰賴進口的原料如玉米粉、大豆粉與乾草等，面東南亞國家共同競爭進口飼糧，美加澳等國則以外交途徑或是關稅政策，強銷豬肉、雞肉與牛乳。國內面臨列強環伺的條件下，發展本土以自然為本的低碳生態系飼養模式勢在必行。

臺灣漁業經營日漸困難，未來漁業增產更加不易，為滿足國民對漁產品的需求，應進行漁業生產供應方式之調整，並應重視我國環境資源狀況，優先考慮國人對水產品的需求。此外，為因應不同全球升溫情境下可能漁產業整體產業鏈產生之氣候風險分級，以及產業鏈各節點於氣候風險下之機會評估，漁產業安全與達成之可能機會將依據風險

成因而不同。未來產業潛在機會包括：透過引進節能設備，以降低能源能耗、通過節能措施降低運營成本，提高生產效率，降低對外部原料的依賴、藉由容器與包裝的改良，延長保質期、提高因應燃油價格飆升風險的抵禦能力、針對現有商品和服務的需求的潛在增加或減少，開拓新市場、生物塑料科技的導入等。根據漁產業實際或未來預測之氣候可能產生的衝擊與改變，以縝密規劃、完整裝備與執行調適措施的行動，協助產業強化自身的「韌性」，達因應未來氣候風險與產業轉型目標。例如：發展氣候智慧漁業科技城市基礎設施、建構災害預警與應變體系、強化漁業災害救助與保險體系、調整漁業經營模式，加強產銷預警調節機制等。

參考文獻

王凱毅、張可揚、廖正信、吳繼倫 (2014)。臺灣北部海域棒受網漁業現況。**水試專訊，47**，16-18。

呂學榮、李明安 (2013)。因應氣候變遷-海洋漁業的衝擊與調適。**農政與農情，252**，15-17。

行政院農業委員會 (2021a)。**糧食供需年報 (110年)**。行政院農業委員會。 (瀏覽日期：2023/3/14) https://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/book/Book.aspx

行政院農業委員會 (2021b)。**農業委員會農業統計年報 (110年)**。行政院農業委員會 (瀏覽日期：2023/4/30)。https://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/book/Book.aspx

行政院農業委員會 (2022a)。**天然災害漁業損失統計**。行政院農業委員會。 (瀏覽日期：2023/3/16) https://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/official/OfficialInformation.aspx

行政院農業委員會 (2022b)。**邁向農業淨零排放**。行政院農業委員會。 (瀏覽日期：2023/2/15) https://ccpo.coa.gov.tw/

行政院農業委員會漁業署 (2021a)。**民國110年 (2021) 漁業統計年報**。行政院農業委員會漁業署。https://www.fa.gov.tw/cht/PublicationsFishYear/

行政院農業委員會漁業署 (2021b)。**中華民國臺閩地區漁業統計年報**。行政院農業委員會漁業署。(瀏覽日期：2023/3/16)https://www.fa.gov.tw/cht/PublicationsFishYear/

行政院環境保護署 (2022)。**中華民國國家溫室氣體排放清冊報告**。行政院環境保護署。https://unfccc.saveoursky.org.tw/nir/2021nir/uploads/05_content.pdf

施意敏 (2019)。狼尾草菇包調製為飼料保健品 乳牛泌乳不易受夏季高溫影響。**畜產報導，228**，20-21。

張可揚、陳玉姬、劉康熙 (2016)。臺灣北部海域劍尖槍鎖管漁業現況。**水試專訊，55**，41-44。

張致衡、黃建智、賴繼昌、黃星翰、翁進興 (2021)。臺灣沿近海烏魚漁業資源變動現況。**水試專訊，73**，1-7。

張致衡、翁進興、楊清閔、陳高松、黃侑勛、陳文泰、陳哲明、吳龍靜 (2019)。綠島沿岸硨磲貝資源調查與復育策略，**水試專訊，67**，1-6。

陳瑞谷 (2023年1月5日)。**水試所確認宜蘭灣為花腹鯖與白腹鯖產卵海域**。行政院農業委員會水產試驗所新聞稿。https://www.tfrin.gov.tw/News_Content.aspx?n=241&s=242532

陳瑞谷、黃鼎傑、陳人裕、劉康熙、張海龍 (2022)。**以非漁業依賴方法進行鯖鰺漁業資源生態研究**。水產試驗所年報2021年 (頁8)。基隆：行政院農業農委會水產試驗所。

黃群哲 (2021)。近15年臺灣冬季低溫累積狀況及暖冬對桃產業可能之影響。**技術服務季刊，128**，7-12。

黃國慶、李承嘉、詹士樑、葉大綱 (2020)。**109年度推動氣候變遷下農地資源空間規劃之農地調適**

策略計畫。農委會委託研究。

鄧凱元 (2022)。孩子被捉、還餓肚子、鯖魚的臺灣苦旅。**天下雜誌，750**，62-66。

盧太城 (2022年4月8日)。比鬼頭刀先到 新港漁港小黃鰭鮪魚爆量。**中央通訊社**。https://www.cna.com.tw/news/aloc/202204080101.aspx

戴靖萱、翁進興、黃建智、張可揚 (2020)。以泛線性模式進行臺灣西南海域正櫻蝦資源趨勢評估。**水產研究，28** (2)，1-11。

簡毓瑭 (2021)。HiRAM模式降尺度推估結果看臺灣梅雨季之溫度與雨量變遷趨勢。**臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台電子報，051**。

嚴國維、潘佳怡、曾秀茹、蘇博堃、陳瑞谷 (2021)。**臺灣周邊海域漁場環境監測 (第3年/全程4年)**。行政院農業部水產試驗所海洋漁業組。https://www.tfrin.gov.tw/News_Content.aspx?n=226&s=241916

A. Nardone, B. Ronchi, N. Lacetera & U. Bernabucci. (2006) Climatic effects on productive traits in livestock. *Veterinary Research Communications* ,*30*, 75–81 .

Bell, J. D., Senina, I., Adams, T., Aumont, O., Calmettes, B., Clark, S., Dessert, M., Gehlen, M., Gorgues, T., Hampton, J., Hanich, Q., Harden-Davies, H., Hare, S. R., Holmes, G., Lehodey, P., Lengaigne, M., Mansfield, W., Menkes, C., Nicol, S., … Williams, P. (2021). Pathways to sustaining tuna-dependent Pacific island economies during climate change. *Nature Sustainability, 4*(10), 900-910. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00745-z

Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M. C. M., Cochrane, A. L., Funge-Smith, S., & Paulain, F. (2018). *Impacts of Climate Change on Fisheries and Aquaculture, Synthesis of Current Knowledge, Adaptation and Mitigation Options*. Rome: FAO

Brugère, C. (2015). Climate change vulnerability in fisheries and aquaculture, a synthesis of six regional studies. *FAO Fisheries Circular No. 1104*, FAO,Rome, Italy.

Bryndum‐Buchholz, A., Tittensor, D. P., & Lotze, H. K. (2021). The status of climate change adaptation in fisheries management: Policy, legislation and implementation. *Fish and Fisheries, 22*(6), 1248-1273. https://doi.org/10.1111/faf.12586

Chang, Y.J.*, Hsu, J., Lai, P.K., Lan, K.W., Tsai, W.P. (2021) Evaluation of the impacts of climate change on albacore distribution in the South Pacific Ocean by using ensemble forecast. *Frontiers in Marine Science, 8,* 731950.

Chavez, F. P., Ryan, J., Lluch-Cota, S. E., & Ñiquen C., M. (2003). From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science, 299*(5604), 217-221. https://doi.org/10.1126/science.1075880

Das, R., Sailo, L., Verma, N., Bharti, P., Saikia, J., Imtiwati, & Kumar, R. (2016). Impact of heat stress on health and performance of dairy animals: A review. *Veterinary World, 9*(3), 260-268. https://doi.org/10.14202/vetworld.2016.260-268

Duan Ju-Qi, J.S. Yuan, X.W. Xu & J.U. Hui. (2022). Interpretation of the IPCC AR6 report on agricultural systems. *Climate Change Research, 18*, 422-432.

Doney SC, Ruckelshaus M, Duffy JE, Barry JP, Chan F, English CA, Galindo HM, Grebmeier JM, Hollowed AB, Knowlton N, Polovina J, Rabalais NN, Sydeman WJ, Talley LD (2012) Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. *Annual Review of Marine Science, 4*, 11-37.

Enfield, D. & Mestas-Nunez, A. (2000). *Global modes of ENSO and non-ENSO SST variability and their associations with climate.* the Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory. https://www.aoml.noaa.gov/phod/docs/enfield/final_proofs.pdf

Etongo D, Arrisol L (2021) Vulnerability of fishery-based livelihoods to climate variability and change in a tropical island: insights from small-scale fishers in Seychelles. *Discover Sustainability, 2,* 48.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2009). Climate change implications for fisheries and aquaculture. *Food and Agriculture Organization,* Rome. https://www.fao.org/3/i5707e/i5707e.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2018). The State of Food Insecurity in the World 2018. *Food and Agriculture Organization,* Rome. https://www.fao.org/3/I9553EN/i9553en.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2019). *The State of Food and Agriculture 2019.* Moving forward on food loss and waste reduction. Rome. https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2020). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2020.* Transforming food systems for affordable healthy diets. Rome, FAO. https://doi.org/10.4060/ca9692en

Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2022). T*he State of World Fisheries and Aquaculture 2022.* Towards Blue Transformation. Rome, FAO. https://doi.org/10.4060/cc0461en

Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2022a). *FAO Strategy on Climate Change 2022-2031.* Rome, FAO. https://www.fao.org/3/cc2274en/cc2274en.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2022b). *Managing risks to build climate-smart and resilient agrifood value chains.* The role of climate services. Rome. https://doi.org/10.4060/cb8297en

Fraga, H., & Santos, J. A. (2021). Assessment of climate change impacts on chilling and forcing for the main fresh fruit regions in Portugal. *Frontiers in Plant Science, 12.* https://doi.org/10.3389/fpls.2021.689121

Forbes H., T. Quested, & C. O’ Connor. (2021). *FOOD WASTE INDEX REPORT 2021.* United Nations Environment Programme.

Galappaththi, E. K., Susarla, V. B., Loutet, S. J., Ichien, S. T., Hyman, A. A., & Ford, J. D. (2021). Climate change adaptation in fisheries. *Fish and Fisheries, 23*(1), 4-21. https://doi.org/10.1111/faf.12595

Godde, C., Mason-D' Croz, D., Mayberry, D., Thornton, P., & Herrero, M. (2021). Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. *Global Food Security, 28,* 100488. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488

Goldfarb, M. (2017). *Feeling the heat: How fish are migrating from warming waters.* https://e360.yale.edu/features/feeling-the-heat-warming-oceans-drive-fish-into-cooler-waters. Accessed on 26 April 2023

Hasegawa, T., Wakatsuki, H., Ju, H., Vyas, S., Nelson, G. C., Farrell, A., Deryng, D., Meza, F., & Makowski, D. (2022). A global dataset for the projected impacts of climate change on four major crops. *Scientific Data, 9*(1). https://doi.org/10.1038/s41597-022-01150-7

Hawkins S. J., Sugden H. E., Mieszkowska N., Moore P., Poloczanska E., Leaper R., et al. (2009). Consequences of Climate Driven Biodiversity Changes for Ecosystem Functioning of North European Rocky Shores. *Mar. Ecol. Prog. Ser. 396,* 245–259. https://doi.org/10.3354/meps08378

Ho, C.H., Chen, J.L., Yagi, N., Lur, H.S., & Lu, H.J. (2016). Mitigating uncertainty and enhancing resilience to climate change in the fisheries sector in Taiwan: Policy implications for food security. *Ocean & Coastal Management, 130,* 355–372. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.06.020

Ho, C.H., Lur, H.S., Yao, M.H., Liao, F.C., Lin, Y.T., Yagi, N., &Lu, H.J. (2018). The impact on food security and future adaptation under climate variation: a case study of Taiwan' s agriculture and fisheries. *Mitig Adapt Strateg Glob Change, 23,* 311–347. https://doi.org/10.1007/s11027-017-9742-3

Ho, C., Lur, H., Yao, M., Liao, F., Lin, Y., Yagi, N., & Lu, H. (2017). The impact on food security and future adaptation under climate variation: A case study of Taiwan' s agriculture and fisheries. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 23*(3), 311-347. https://doi.org/10.1007/s11027-017-9742-3

Hoerterer, C., Schupp, M. F., Benkens, A., Nickiewicz, D., Krause, G., & Buck, B. H. (2020). Stakeholder perspectives on opportunities and challenges in achieving sustainable growth of the blue economy in a changing climate. *Frontiers in Marine Science, 6.* https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00795

Huynh PTA, Le ND, Le STH, & Nguyen HX. (2021). Vulnerability of Fishery-Based Livelihoods to Climate Change in Coastal Communities in Central Vietnam. *Coastal Management, 49,* 275-292.

IPCC, 2007: the physical science basis: summary for policymakers. http://www.ipcc.ch Accessed on

23 May 2023

IPCC, 2019a: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

IPCC, 2019b: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. In press.

IPCC, 2021a: Climate Change 2021 - the Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, In Press, Published: 9 August 2021.

IPCC, 2021b: Climate Change 2021: Summary for Policymakers. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 3—32). https://doi.org/10.1017/9781009157896.001

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, (pp. 3056). https://doi.org/10.1017/9781009325844

Kais SM, Islam MS. (2018). Impacts of and resilience to climate change at the bottom of the shrimp commodity chain in Bangladesh: A preliminary investigation. *Aquaculture 493,* 406-415.

Lam, V. W., Allison, E. H., Bell, J. D., Blythe, J., Cheung, W. W., Frölicher, T. L., Gasalla, M. A., & Sumaila, U. R. (2020). Climate change, tropical fisheries and prospects for sustainable development. *Nature Reviews Earth & Environment, 1*(9), 440-454. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0071-9

Lindegren, M., & Brander, K. (2018). Adapting fisheries and their management to climate change: A review of concepts, tools, frameworks, and current progress toward implementation. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 26*(3), 400-415. https://doi.org/10.1080/23308249.2018.144

5980

Lluch-Cota, S. E., Del Monte-Luna, P., & Gurney-Smith, H. J. (2023). Transformational adaptation in marine fisheries. *Current Opinion in Environmental Sustainability, 60,* 101235. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101235

Mellado, M., Gaytán, L., Macías-Cruz, U., Avendaño, L., Meza-Herrera, C., Lozano, E. A., Rodríguez, Á., & Mellado, J. (2018). Effect of climate and insemination technique on reproductive performance of gilts and sows in a subtropical zone of Mexico. *Austral journal of veterinary sciences, 50*(1), 27-34. https://doi.org/10.4067/s0719-81322018000100106

National Research Council. Committee on Physiological Effects of Environmental Factors on Animals. (1971). *A guide to environmental research on animals.* National Academies of Sciences.

Ojea, E., Lester, S. E., & Salgueiro-Otero, D. (2020). Adaptation of fishing communities to climate-driven shifts in target species. *One Earth, 2*(6), 544-556. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.012

Parker, L. E., & Abatzoglou, J. T. (2019). Warming winters reduce CHILL accumulation for peach production in the southeastern United States. *Climate, 7*(8), 94. https://doi.org/10.3390/cli7080094

Peng, S., Huang, J., Sheehy, J. E., Laza, R. C., Visperas, R. M., Zhong, X., Centeno, G. S., Khush, G. S., & Cassman, K. G. (2004). Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 101*(27), 9971-9975. https://doi.org/10.1073/pnas.0403720101

Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., Cochrane, K., Howden, M., Iqbal, M.M., Lobell, D.B., & Travasso, M.I. (2014). *Food Security and Food Production Systems.Climate Change 2014 (Chapter 7) : Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Working Group II Contribution to the IPCC 5th Assessment Report, Geneva, Switzerland.

Ramos JE, Tam J, Aramayo V, Briceño FA, Bandin R, Buitron B, Cuba A, Fernandez E, Flores-Valiente J, Gomez E, Jara HJ, Ñiquen M, Rujel J, Salazar CM, Sanjinez M, León RI, Nelson M, Gutiérrez D, & Pecl GT (2022) Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System. *Scientific Reports, 12,* 4800.

Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants, 8*(2), 34. https://doi.org/10.3390/plants8020034

Renaudeau, D., & Dourmad, J. (2022). Review: Future consequences of climate change for European Union pig production. *animal, 16,* 100372. https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100372

Rezvi, H. U., Tahjib‐Ul‐Arif, M., Azim, M. A., Tumpa, T. A., Tipu, M. M., Najnine, F., Dawood, M. F.,

Skalicky, M., & Bresti , M. (2022). Rice and food security: Climate change implications and the future prospects for nutritional security. *Food and Energy Security, 12*(1). https://doi.org/10.1002/fes3.430

Richardson, A. J. and Poloczanska, E. S. (2008). Ocean Science: Under-resourced, under threat. *Science, 320* (5881), 1294-1295. https://doi.org/10.1126/science.1156129

Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., & Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management, 16,* 145-163. https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001

Schemmel, E., Friedlander, A. M., Andrade, P., Keakealani, K., Castro, L. M., Wiggins, C., Wilcox, B. A., Yasutake, Y., & Kittinger, J. N. (2016). The codevelopment of coastal fisheries monitoring methods to support local management. *Ecology and Society, 21*(4). https://doi.org/10.5751/es-08818-210434

Selden, R., & Pinsky, M. (2019). *Climate change adaptation and spatial fisheries management. Predicting Future Oceans,* 207-214. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817945-1.00023-x

Simelton, E., Carew-Reid, J., Coulier, M., Damen, B., Howell, J., Pottinger-Glass, C., Tran, H. V., & Van Der Meiren, M. (2021). NBS framework for agricultural landscapes. *Frontiers in Environmental Science, 9.* https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678367

Salvador E Lluch-Cota , Pablo del Monte-Luna , & Helen J Gurney-Smith.(2023). Transformational adaptation in marine fisheries. *Current Opinion in Environmental Sustainability, 60*(1), 101235. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101235

Sloat, L. L., Davis, S. J., Gerber, J. S., Moore, F. C., Ray, D. K., West, P. C., & Mueller, N. D. (2020). Climate adaptation by crop migration. *Nature Communications, 11*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-020-15076-4

Spijkers, J., Merrie, A., Wabnitz, C. C., Osborne, M., Mobjörk, M., Bodin, Ö., Selig, E. R., Le Billon, P., Hendrix, C. S., Singh, G. G., Keys, P. W., & Morrison, T. H. (2021). Exploring the future of fishery conflict through narrative scenarios. *One Earth, 4*(3), 386-396. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.02.004

St-Pierre, N., Cobanov, B., & Schnitkey, G. (2003). Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of Dairy Science, 86,* E52-E77. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(03)74040-5

Tanaka, K. R., & Van Houtan, K. S. (2022). The recent normalization of historical marine heat extremes. *PLOS Climate, 1*(2), e0000007. https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000007

Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M. (2021). Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty‐first century. *Global Change Biology, 27*(22), 5762-5772. https://doi.org/10.1111/gcb.15825

Tittensor, D. P., Beger, M., Boerder, K., Boyce, D. G., Cavanagh, R. D., Cosandey-Godin, A., Crespo, G. O., Dunn, D. C., Ghiffary, W., Grant, S. M., Hannah, L., Halpin, P. N., Harfoot, M., Heaslip, S. G., Jeffery, N. W., Kingston, N., Lotze, H. K., McGowan, J., McLeod, E., … Worm, B. (2019). Integrating climate adaptation and biodiversity conservation in the global ocean. *Science Advances, 5*(11). https://doi.org/10.1126/sciadv.aay9969

United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.* New York, USA. https://www.unfpa.org/resources/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development

General, N. U. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development.*

[UNEP] United Nations Environment Programme. (2021). *Making Peace with Nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies.* Nairobi. https://www.unep.org/resources/making-peace-nature

Woods, P. J., Macdonald, J. I., Bárðarson, H., Bonanomi, S., Boonstra, W. J., Cornell, G., Cripps, G., Danielsen, R., Färber, L., Ferreira, A. S., Ferguson, K., Holma, M., Holt, R. E., Hunter, K. L., Kokkalis, A., Langbehn, T. J., Ljungström, G., Nieminen, E., Nordström, M. C., … Yletyinen, J. (2021). A review of adaptation options in fisheries management to support resilience and transition under socio-ecological change. *ICES Journal of Marine Science, 79*(2), 463-479. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab146

Ye, Y., & Gutierrez, N. L. (2017). Ending fishery overexploitation by expanding from local successes to globalized solutions. *Nature Ecology & Evolution, 1*(7). https://doi.org/10.1038/s41559-017-0179

Zhu, C., Kobayashi, K., Loladze, I., Zhu, J., Jiang, Q., Xu, X., Liu, G., Seneweera, S., Ebi, K. L., Drewnowski, A., Fukagawa, N. K., & Ziska, L. H. (2018). Carbon dioxide (CO2) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries. *Science Advances, 4*(5). https://doi.org/10.1126/sciadv.aaq1012

4.5 生態

林奐宇[1]、陳毓昀[2] (陸域生態)
陳郁凱[3]、李明安[4] (海域生態)

[1]宜蘭大學森林暨自然資源學系、[2]東華大學自然資源與環境學系、[3]農業部水產試驗所、[4]臺灣海洋大學海洋資源與環境變遷博士學位學程

摘要

生態系是一個具有階層性的自然系統，包含生物與生物之間、生物與環境因子之間，都有著錯綜複雜的交互作用關係。這種高度複雜的系統與外在環境 (包含氣候) 有著密切連結，並且互相影響。氣候變遷與全球氣溫的升高，不僅影響個別物種的生存與適應，同時將藉由生態系的交互作用關係，將其影響擴大至生態系統的變化與反饋。諸如我們觀察到的生物分布範圍改變、開花結實週期的提早或遲滯、海洋環流的變化、珊瑚礁及海草床之異常死亡或生產力改變等，都被研究認為與氣候變遷有程度不等的相關。然而，不同生物對氣候變遷的敏感度與適應能力不一，生態學界首要根據物種分布、生活史、播遷能力、族群變動和其他物種關係等，找出對氣候變遷敏感或是容易產生變化的物種、族群、生態系等，發掘真正脆弱與高風險的生態系統，方能進一步規劃風險管理策略，以利相關部門研擬調適與因應措施。本節將以陸域生態及海域生態兩部分，彙整近年氣候變遷對生態系衝擊之相關研究，說明現階段已知之氣候變遷趨勢以及對生態系的衝擊，並論述目前之科研缺口，希能成為政府推動氣候變遷衝擊與調適研究之優先補強項目。

4.5.1 陸域生態

4.5.1.1 臺灣的陸域生態與生物多樣性

植物為陸域生態系統中的基礎生產者，大部分植物利用光合作用將陽光的能量轉為生物量，這些生物量經由各種交互作用而為系統中各種生物所用，因此植物的特

性和分布是為各種生物系統的重要特徵。全臺灣陸域面積中，森林及天然草原生態系佔61.1%，其餘多為已開發利用型態如農業 (19.70%)、交通建築 (13.96%) 及其他等 (5.63%)。本節僅彙整森林及草原生態系相關之科學研究。

1. 植被分布

臺灣山區的植被以天然植被及人工林為主。天然植被係指少有人為利用及破壞之植生覆蓋土地，人工林則主要為具有經常性或系統性的經營管理作為之植被。天然植被因氣候條件不同，又有森林及草原兩類。臺灣的森林覆蓋面積219.7萬公頃，佔全國土地的60.71%；其中有168.7萬公頃為天然林 (包含原生林及次生林)，佔全部森林面積的79%，高山與火災後演替草地約1.4萬公頃，佔0.39%；人工林面積約為51萬公頃，約佔全部森林面積的21%，其中29萬公頃屬生產性人工林、16.9萬公頃為保護性人工林、其餘則為半天然林或稚樹生長之林地 (林務局，2015)。以林型及優勢樹種來看，闊葉林面積147.0萬公頃 (67%) 為最主要、針葉林面積29.9萬公頃 (14%)、針闊葉混淆林面積17.1萬公頃 (8%)、竹木混淆林11.5萬公頃 (5%) 以及竹林11.3萬公頃 (5%)，另有2.9萬公頃 (1%) 土地為新植或稚樹生長中的待成林地 (林務局，2015)。人工林主要分布海拔2,500公尺以下，其中屬「可營林區位」林地約6萬公頃，目標希望提升到12萬公頃至16萬公頃為永續經營使用，提高國產木材生產及發揮森林碳匯功能。本節將以天然植被與人工林兩大類別進行探討，前者將以回顧氣候變遷衝擊與保育研究缺口為主，對後者則僅論述氣候變遷下經營管理調適之方向。

2. 天然植被與氣候的關係

臺灣的氣候在北回歸線以南屬於熱帶，以北則屬亞熱帶，全島中央有山脈縱貫，各地區之光照、雨量、溫度等環境及氣候特性隨緯度、海拔及中央之山脈東西兩側等位置而有不同。本島地形陡峻起伏，從海拔梯度來看，溫度之垂直變化甚為劇烈，故自平原上溯至高山，有熱帶、亞熱帶、溫帶及亞高山等森林形相及組成變化。縱貫本島南北之中央山脈走向與盛行季風斜交，形成東北部與西南部的氣候差異，例如基隆、宜蘭在冬季東北季風籠罩下低溫多雨，嘉南、高屏夏季則受西南氣流影響常有劇烈地形降雨等。依照國家植群多樣性調查的分類結果，可將臺灣森林細分為21種類型，除了7類型森林的形成與地形有關，分布面積狹小，多限縮在珊瑚礁岩、河灘、石灰岩地、火災跡地、崩塌地等局部地區，如喀斯特森林 (高位珊瑚礁森林) 等；其餘14類森林的分布面積較為廣泛，且其分布與氣溫與雨量梯度有顯著相關，可作為區域氣候下的代表性植群 (圖4.5.1.1、表4.5.1.1) (Li et al., 2013)。

表4.5.1.1　臺灣主要森林型

	森林類型	海拔高度(m)	分布區域與特色
1	亞高山灌叢	3,200至3,700	高山型氣候，冬季寒冷降雪、溫差大，以夏季為生長季節。代表植物如玉山箭竹，常形成高山草原景觀。
2	鐵冷杉林	2,500至3,400	高山型氣候，主要分布範圍約在雪線以上。代表植物如臺灣冷杉、鐵杉等終年常綠的針葉樹。
3	檜木霧林	1,700至2,600	常年為雲霧覆蓋，濕度高、日照時數較短，孕育出富含蘚苔與附生植物的雲霧林。代表植物如紅檜、臺灣扁柏等巨木。
4	臺灣水青岡霧林	1,400至2,100	位於臺灣北部山區稜線，面向東北季風的坡面側。冬季降雨豐沛、常年雲霧繚繞。落葉性的臺灣水青岡是冰河時期的孑遺物種，也是本型森林的優勢與特徵物種。
5	櫟林霧林	1,400至2,300	約在雲霧帶的下邊界，與檜木林有混生現象。高大的殼斗科植物是本型森林特色。
6	楠櫧林	400至1,800	是終年常綠的闊葉森林，分布在臺灣山區海拔中、下段。烏心石是本型森林較為人所知的重要樹種。
7	楨楠林	0至1,400	主要分布在北回歸線以北，冬季稍有低溫；例如北部烏來、福山森林多屬此型。在特別潮濕的地方，則有大量樹蕨類植物 (如筆筒樹) 分布。
8	榕楠林	0至600	北回歸線以北的低海拔地區為主，偏好稍乾熱環境。與人為活動區域重疊高，多呈現破壞後的次生狀態。常見植物如茄苳、九芎、鵝掌柴等。
9	亞熱帶冬季季風林	0至1,200	每年有4個月以上受東北季風影響，冬季濕冷、無乾季，雲霧覆蓋頻度為全臺之最。強風吹襲使森林高度約僅10m，東北角及陽明山東側森林為代表。
10	熱帶山地霧林	1,200至1,600	分布於中央山脈南段稜脊，缺乏屏障而風速強勁，常有雲霧覆蓋。受強風影響，森林高度約僅10m，有許多熱帶型稀有植物，如柳葉石櫟為代表。
11	熱帶亞山地闊葉林	200至1,600	分布於中央山脈南段，與前一型森林相較，位於距離稜線較遠、或海拔略低之區域。森林高度約12m。
12	熱帶山麓闊葉林	0至700	位於南部低海拔區域，與人為活動重疊高，目前多僅存於偏遠的溪谷地區。具有豐富的熱帶型森林形相，常見植物如一樹成林的白榕、欖仁舅等。
13	熱帶離島闊葉林	0至250	分布於綠島及蘭嶼。海洋隔離了植物種子的傳播，使得大種子的殼斗科與樟科樹種並不常見，而以五加科、楝科、桑科、茜草科等易於鳥傳植物為主。常年承受強勁海風，致森林低矮。
14	熱帶冬季季風林	0至1,200	位於恆春半島。冬季受東北季風吹襲、溫度偏低，但夏季氣溫炎熱。同時棲息著偏好冷涼及喜愛溫暖氣候的不同植物。森林高度僅約9m，形成植株密度極高的風衝矮林。

註：臺灣14類主要森林型分別分布於不同海拔及緯度區段，其形成因素與氣溫及雨量梯度有顯著相關。藍色代表高山型森林，分布在全島海拔2,500m以上山區；綠色代表亞熱帶型森林，主要分布北回歸線以北；北回歸線以南屬熱帶型森林，以橘色標示。(資料來源：Li et al., 2013)

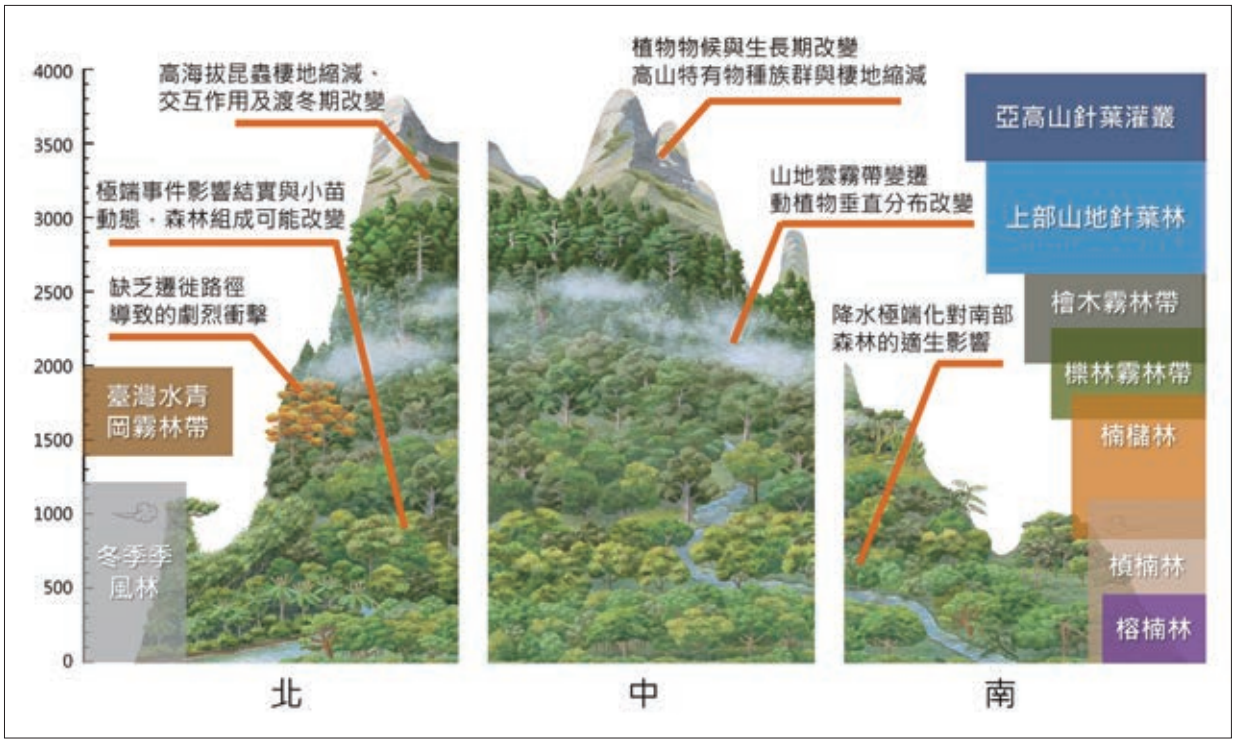


圖4.5.1.1　臺灣天然植被的海拔分布，以及已知氣候變遷對各海拔區域的可能衝擊
註：森林隨著海拔的氣候與環境差異，有著不同的外觀形相與組成。海拔2,000m至2,500m為盛行雲霧帶，以上有針葉樹純林成群出現。(資料來源：林奐宇老師團隊產製；繪圖：王瑛)

3. 動、植物的多樣性

臺灣陸域範圍迄今共調查記錄了5,188種野生維管束植物 (臺灣植物紅皮書編輯委員會，2017)、約1,500種無維管束植物 (苔蘚、藻類)、1,108種陸域脊椎動物 (兩棲類40種、陸域爬行類94種 (陳元龍等人，2017)、鳥類627種、陸域哺乳類85種 (鄭錫奇等人，2017)、淡水魚類262種，陸域無脊椎動物多樣性高，然目前尚無確切物種數估算。

動物的分布除了受環境及氣象因子影響，也深受植被組成及生物間交互關係影響，因此動物類群的分布無法比照植被類型的方式分區。儘管如此，各海拔及緯度區域中，仍有其代表性動物。以外溫型的兩棲爬蟲類為例，在臺灣本島北、中、南段之低、中、高海拔各有代表性物種，如高海拔的山椒魚；鳥類與哺乳類動物的分布以海拔梯度之區隔較為明顯，在臺灣本島內的緯度區隔則不明顯 (表4.5.1.2)。在617種經過評估之陸域脊椎動物中，則有4種為區域或野外滅絕，105種陸域脊椎動物為易危、瀕危或極危等級 (臺灣植物紅皮書編輯委員，2017)。不同等級的受脅動植物面臨的威脅主要有採集及獵捕壓力、棲地破壞 (棲地消失及資源短缺)、及生育地持續改變等。

表4.5.1.2　臺灣本島各區域特色動物物種

動物類群	海拔位置	北部	中部	南部
兩棲爬蟲類	高海拔	觀霧山椒魚	臺灣山椒魚	阿里山山椒魚
	中海拔	斯文豪氏赤蛙	莫氏樹蛙	拉都希氏赤蛙
	低海拔	斯文豪氏赤蛙	莫氏樹蛙	拉都希氏赤蛙
鳥類	高海拔	高山草原：鷓鴣、臺灣叢樹鶯、岩鷚；針葉林樹冠層：火冠戴菊鳥、煤山雀；林下層：栗背林鴝、黃羽鸚嘴、灰頭花翼畫眉		
	中海拔	樹冠層：青背山雀、冠羽畫眉、白耳畫眉、紅山椒鳥；林下層：繡眼畫眉、白尾鴝、藪鳥		
	低海拔	樹冠層：紅嘴黑鵯、五色鳥、樹鵲；林下層：黑枕藍鶲、小彎嘴、山紅頭		
哺乳類	高海拔	臺灣野山羊	高山田鼠	水鹿
	中海拔	臺灣森鼠	黃喉貂	黑熊
	低海拔	穿山甲	石虎	臺灣彌猴

註：資料提供者為楊懿如 (兩棲爬蟲類)、許皓捷 (鳥類)、顏士清 (哺乳類)。受到緯度及季風梯度影響，臺灣北、中、南之海拔帶區分略有不同。本表以高海拔 (2,500m以上)、中海拔 (1,200m至2,500m)、低海拔 (1,200m以下) 對動物的海拔分布做概略區分。

4. 物種間的交互關係與生態系統的穩定性

一個生態系內的各種資源，如養分、水分、光線、食物、巢位等，構成生物的生長與生存要素，使生物間產生各種交互關係，進而形成該生態系之網絡。當環境因子維持穩定，則物種間的交互作用通常將趨於動態平衡，最終形成穩固的生態系統。然而，氣候變遷導致環境因子產生具方向性的改變 (例如溫度的緩慢升高)，極可能導致生物交互關係的改變與重組，進而發生難以預期的族群擴張或滅絕衝擊。這些交互關係包括競爭 (competition)、捕食 (predation)、互利 (mutualism)、單利 (commensalism) 或促進作用 (facilitation) 等。

■競爭：兩個物種所需的資源相同時，即產生競爭關係，在該資源匱乏或變遷發生的情況下，競爭可能變得強烈，甚至導致較具競爭優勢者大量掠取資源，產生競爭排除並使對手族群消失。植物之間往往競爭陽光、水分、各種養分，有時亦可能競爭傳粉者及種子傳播者。動物之間可能競爭食物、巢位等。

■捕食：食物鏈上的上下兩層之生物間為捕食者與被捕食者的關係，有些捕食關係會造成被捕食者的族群受到抑制，例如遊隼捕捉小型鳥類；有些捕食關係則僅造

成被捕食者身體部分受損，損害嚴重時可能使之喪命，但多數時候僅影響短期或長期健康，如寄生蟲對宿主之影響。

■互利：兩物種相互提供資源或服務，形成互利的關係，如花朵與傳粉者之關係。當互利之雙方有高度專一性時，形成緊密之互利關係，例如馬兜鈴與黃裳鳳蝶。互利之雙方不具專一性時，其關係較鬆散，但也易衍生出服務或資源競爭，例如多種植物對蜜蜂授粉服務之競爭。互利關係也常見於植物與種子傳播者 (鳥類、哺乳類)。

■單利或促進：一物種之行為或生長特性可能為另一物種提供資源或服務，卻未減損該物種的健康和生長，是為單利關係。例如，在開闊地區，先驅樹種為其他後至之苗木提供遮陰而提高其存活率。當環境變遷影響其中一個物種的生活行為時，具有互利、單利或促進的另一方，很可能受到連帶的衝擊與影響。

4.5.1.2　氣候變遷對陸域生態系的衝擊

在氣候變遷的影響下，生物原本適應的物理、化學及生物環境逐漸改變，將會改變各物種生長速率或繁殖成功率，或驅使各族群或族群內的部分個體向其他區域遷移，尋求最佳棲地，以利族群繁衍。無法及時遷移至較好的棲地或演變出更好的適應行為者，則面臨在原有棲地滅絕的命運。

目前全球森林與氣候變遷相關研究，主要集中在北半球中緯度，對熱帶森林的研究較少。以山地森林而言，普遍認為暖化可能導致森林植物的向上遷徙，對高海拔或山頂植群造成威脅與衝擊。不管是預測模型或是實證觀察，在全球不同地點都發現符合此一趨勢的案例：例如安第斯山觀測到森林樹種以每年2.5m至3.5m速率往高海拔遷徙 (Feeley et al., 2011)，西歐山區的長期資料則顯示氣候暖化導致植物的分布範圍以每10年平均29m速率往高海拔移動 (Lenoir et al., 2008)。植物是森林最主要的組成分子，當各種植物出現程度不等的分布範圍改變時，極可能導致森林物種組成發生變化，進而打破原有的生態平衡。

臺灣近年有關氣候變遷對陸域生態系影響之科學研究，主要聚焦在「動態與組成變化」、「分布範圍的改變」、「物候改變與不同步現象」三個主要議題。以下針對各議題彙整說明我國近年的研究發現。

1. 氣候變遷造成植物動態與組成的變化

依據文獻的研究，颱風強度及頻度過高或過低都可能造成森林群落的形態及生活史多樣性下降 (Hogan et al., 2018)。風力強度對樹冠的高度及總生物量有明顯的負面影響 (Rau et al., 2022)，強風會造成大量落葉，使林下光度提高 (Lin et al., 2011)，對林下植物生長有利，可以提高林下植物多樣性。然而，當風力超過一定值，可能造成長期的影響，甚至造成樹木死亡，進一步影響森林結構。Lin et al. (2011) 長期追蹤福山森林的葉面積指數 (Leaf Area Index, LAI) 發現，福山森林在1994年遇多個颱風侵襲後，林冠葉面積指數經過11年才恢復原來的緻密度。因此環境的變化可能直接改變森林的外型，甚至影響群落組成，使森林趨向更能因應這些環境衝擊之組成及形態特徵。依據前章3.5.1的分析，未來颱風發生的頻率雖然降低，但強度、雨量和風速將會增強，對森林結構至組成變化的影響可能加劇，其中小苗庫的豐富度及樹苗的存活率對森林更新有著重要的影響。Martini et al. (2022) 分析福山森林動態樣區的小苗資料，發現小苗存活率與雨量有顯著的正相關，且乾旱時期的小苗受周圍密集樹苗所帶來的負密度制約效應影響較大。然而，在高雨量的年分，過濕環境中的小苗較易受病害侵擾而有較高的死亡率。因此相較於成熟的樹木，森林樹苗的動態變化更為劇烈。環境變化對森林的影響，小苗動態是一個需要關注的重點。

2. 氣候變遷造成動植物分布範圍的改變

(1) 氣候變遷對動物之衝擊

王文千 (2019) 對83種臺灣繁殖鳥類進行氣候變遷脆弱性評估，結果指出，有41種鳥類具有氣候變遷高暴露度；對溫度及雨量較敏感的鳥類則分別有16種及22種；綜合食性、孵育幼鳥等特性後，有46種鳥類為低適應力。研究發現影響山區鳥類降遷的因素包含：(i) 氣候限制 (無法忍受低溫，冬季降遷至溫暖的低海拔)，(ii) 食物限制 (高海拔冬季食物短缺，故降遷至低海拔覓食)，(iii) 幼雛被捕食 (低海拔有較多捕食幼鳥的天敵，故上遷至高海拔躲避)；亦觀察到太魯閣國家公園部分山區鳥類冬季降遷至較低海拔尋找食物並度冬，高海拔度冬之鳥類則依賴少量的冬季蜜源生存。氣候變遷影響開花時間，將會影響這些鳥類的覓食和降遷行為 (許皓捷等人，2010；許育誠等人，2020)。Tsai et al. (2021) 利用公民科學家資料庫對104種鳥類進行棲息範圍追蹤，發現有超過半數 (60種) 鳥類會在非繁殖季移至鄰近繁殖地之其他海拔範圍棲息，中高海拔繁殖鳥類冬季多下遷至較低海拔；中低海拔繁殖鳥類則在冬季向較高海拔遷移。食物資源限制為該現象的最佳解釋。Tsai et al. (2021) 亦揭露，可隨著季節變動而在不同海拔棲地間遷移的鳥

類數量遠比預期高出許多。許多鳥類因氣候的直接或間接影響而有季節性海拔遷移的行為，移居不同棲地可以減低調解體溫的能量損耗、在食物較豐富之處獲得能量或避免幼雛被捕食。未來氣候變遷導致氣溫提高，間接影響植被生長、開花、結果，以及天敵的分布，可能會改變遷移鳥類與不遷移鳥類的共域時間，改變這些鳥類之間的交互關係。氣候變遷除了可能影響植物生長、開花、結果現象，亦導致天敵分布的改變，對部分鳥類造成衝擊，甚至改變鳥類在山區降遷覓食的特性。

氣候變遷亦可能導致高海拔特有種生物之棲地嚴重縮減，並造成其族群降低。Lu & Huang. (2023) 分析指出，高海拔特有種信義熊蜂最佳棲地需具「最乾季平均氣溫」低於10°C、四季溫度變動小、季雨量介於180mm至250mm間等條件。此外，信義熊蜂喜好針葉林及草原植被，不喜闊葉林、混淆林、農田及開發區。RCP2.6至RCP8.5情境下，適存棲地將縮減41%至87%不等，且南部山區將無適棲之處。此外，棲地破碎化將進一步限縮族群大小與降低族群基因多樣性。設立保護區恐不足以解決此問題，唯有減緩暖化方能保護此物種。另外，紫斑蝶屬及青斑蝶屬之蝶類為著名的遷徙性蝶類，然因氣候變遷之故，已觀察到這些越冬斑蝶在大武地區渡冬期縮短，數量亦大幅減少 (趙仁方，2012)。

(2) 氣候變遷對植物之衝擊

Kuo et al. (2021) 針對臺灣6處高山山頂 (海拔介於3,255m至3,610m)，依循全球高山環境觀測研究計畫(Global Observation Research Initiative in Alpine Environment, GLORIA)標準，進行環境因子量測與植物組成變化監測。2010年至2019年的土溫及降水監測資料顯示，所有山頂的溫度皆顯著增加，冬季平均升溫幅度0.2°C $year^{-1}$至0.3°C $year^{-1}$，冬季年低溫日數則減少約50%；此外，在植物生長季早期經常有低降水量與極端高溫的共同出現，可能導致高山植物發生缺水與生長下降情形。在6處高山山頂中，其中海拔較低的3處觀察到較多的嗜熱性 (thermophilic) 物種出現；山區總雨量雖無明顯變化，但嗜濕性 (moist-philic) 物種數量卻有下降情形。認為氣溫升高、短暫乾旱及潛在蒸散量增加等因素共同作用下，可能會逐漸改變高山植物的組成，對高山生態系造成衝擊 (Kuo et al., 2022)。Lin (2020) 以RCP4.5及RCP8.5模擬發現，本型森林迄2100年適生面積僅餘現生之16.08%或2.58%，適生海拔則上升了173m或268m。此等海拔已近中央山脈脊梁位置，面積狹小、土壤淺薄、風速強勁，不利於植物定根生長 (圖4.5.1.2)。 依據上述研究發現，亞高山灌叢植被的適生面積與物種數量可能逐漸減少。

在鐵冷杉的研究部分，趙偉村 (2022) 分析合歡山6公頃冷杉林動態樣區在2008年及2022年的每木調查資料，發現臺灣冷杉與鐵杉的個體數均有下降，但臺灣冷杉的總生物量增加，鐵杉則有許多巨木死亡但無幼樹補充，導致總生物量下降。實測資料支持臺灣冷杉族群維持穩定，而海拔較低的鐵杉族群有衰退情形。Lin et al. (2014) 以AR4的15種未來情境資料臺灣冷杉與鐵杉在2020年至2039年期間的適生分布，分別有7種與8種情境支持臺灣冷杉與鐵杉的適生範圍出現顯著向高海拔移動的趨勢。同時，Lin (2020) 以RCP4.5及RCP8.5模擬發現，本型森林迄2100年適生面積為現生之50.42%或41.29%，適生海拔則上升了231m或403m。Chiu et al. (2022) 依據升溫0.5°C、1.0°C、1.5°C及2.0°C情境模擬臺灣冷杉的可能分布變化，發現最適棲地將分別僅餘現生之70.2%至10.0%不等。此外，檜木霧林帶的適生面積也有相同縮減趨勢。Lin (2020) 以RCP4.5及RCP8.5模擬發現，本型森林迄2100年適生面積為現生之53.96%或33.57%，適生海拔則上升了312m或542m。Xu et al. (2023) 利用AR6 SSP2-4.5 與 SSP5-8.5情境模擬霧林帶紅檜與錐果櫟的變化，顯示紅檜適生棲地減少24.2%至66.0%，並有68.8%棲地與櫟林帶的錐果櫟擴散區重疊。 Xu et al. 的研究顯示，對於海拔分布區域相鄰或部分重疊的樹種而言，氣候變遷可能使得原有的適生區域發生遷移，亦可能使適生區域的重疊度提高；在此情形下，原來分布在較高海拔之物種，就可能遭遇來自低海拔之樹種的強烈競爭。目前在鐵冷杉林帶與檜木霧林帶模擬預測研究均一致認為，鐵冷杉與檜木霧林帶之適生面積可能隨氣候變遷發生明顯縮減與海拔升高，但目前尚無實際觀測證據，需要更多實地監測資料證實。

在北插天山、鳥嘴山、銅山等地的臺灣特有種臺灣水青岡，以及陽明山區的昆欄樹研究中，均發現這些族群原分布範圍已鄰近山塊頂部，隨著氣候暖化及適生區域的海拔提升，常因向高海拔退縮路徑有限，因而失去大部分的適生棲息度，導致面臨嚴重的氣候變遷。陳子英 (2021) 在銅山、大白山、蘭坎山設置樣區比較臺灣水青岡族群結構，發現海拔較低的大白山與蘭坎山族群不穩定，且小樹更新狀況不佳。海拔較低個體的健康狀況明顯不佳，易枯立死亡或受颱風吹折。海拔較高的銅山族群林下雖亦無稚樹補充，但並未觀察到成熟個體有衰退現象。依據RCP4.5及RCP8.5針對臺灣水青岡的模擬 (Lin, 2020)，得知2100年適生面積為現生之7.10%或0.87%，研究發現臺灣水青岡森林缺乏向高海拔退縮路徑，而呈現就地縮小、滅絕之趨勢。同樣依據昆欄樹文獻 (Lin & Chiu, 2019)，在RCP4.5情境下，發現昆欄樹至2050年的適生棲地發生向上遷移的變化，但陽明山區最高海拔僅一千餘公尺，導致該區域昆欄樹族群向上遷徙空間有限，且

本區域環境又處於昆欄樹生態棲位裡偏向暖熱的一端，因此承受到最明顯的氣候變遷衝擊。在這上述所有樹種中，又以臺灣水青岡霧林為受衝擊程度最高的森林類型，且模擬預測與實際監測呈現一致結論，屬未來氣候變遷調適的重要標的。

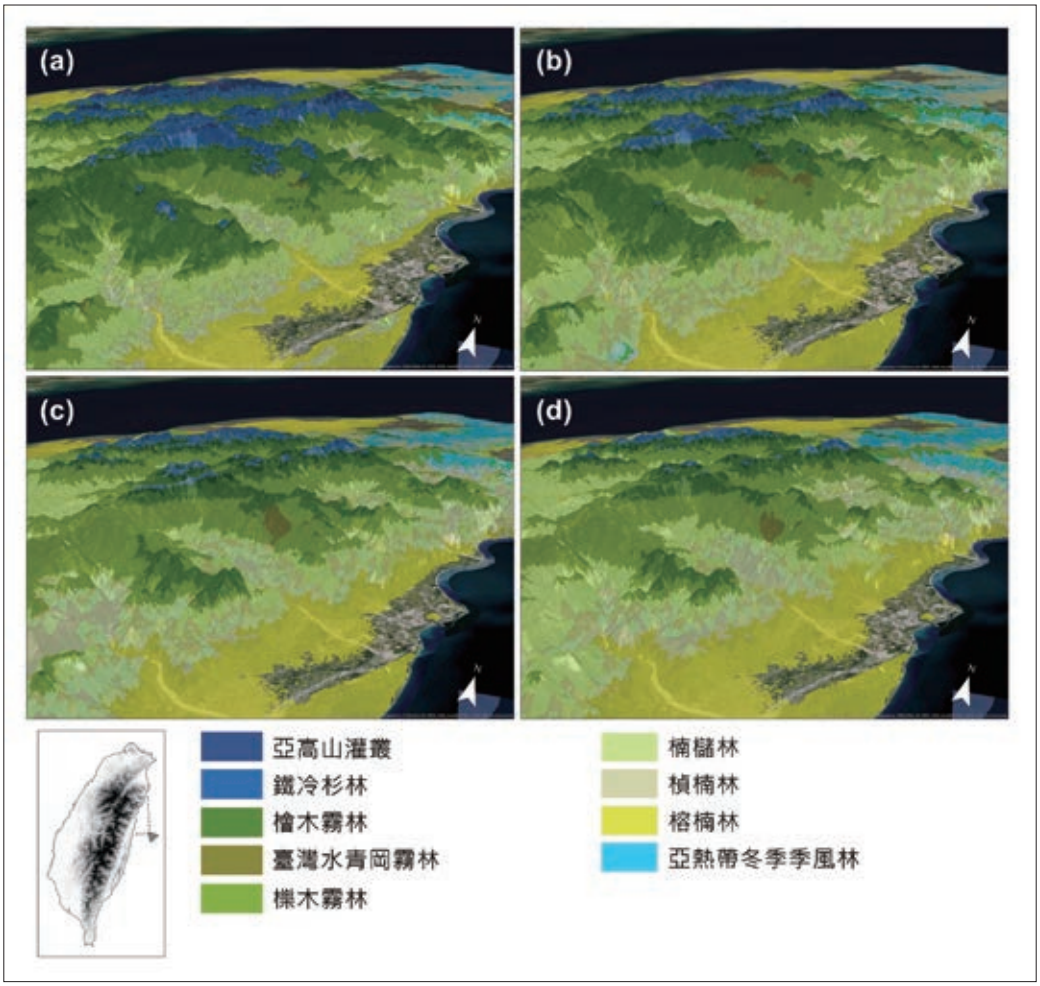


圖4.5.1.2　AR5 RCP4.5臺灣天然森林的分布與未來三階段變化圖

註：(a) 歷史期間1986年至2006年、(b) 2030年至2040年、(c) 2060年至2070年、(d) 2090年至2100年期間，顯示高海拔森林容易受到氣候變遷的衝擊，導致適生面積縮減。(資料來源：林奐宇老師團隊產製)

(3) 物候改變與動植物交互作用之失序

Shiao et al. (2015) 研究觀霧地區青背山雀及棕面鶯，兩種鳥類均於3月產卵，若溫度較高則產卵時間提早，遇低溫則延後。棕面鶯的產卵時間較青背山雀稍晚，且食性多樣化，因此產卵時間對溫度的敏感度較低。育雛期若遇大雨，易因巢穴潮濕或淹水導致失敗。青背山雀育雛成功率也會因為低溫而降低。氣候變遷將使低溫日數變短，有利於這兩種中低海拔鳥類之繁殖。然而，若在春末夏初出現強降雨，則可能降低育雛成功率，使其

族群變小。亞洲埋葬蟲的交配期受光週期 (photoperiod) 誘發，Tsai et al. (2020) 指出，不同海拔之亞洲埋葬蟲族群的交配期最適溫度並無差異。但在自然環境中，海拔造成的溫度梯度迫使各海拔族群必須利用不同光週期誘發交配，以適應棲地的氣溫差異：低海拔族群多在冬季交配、中海拔族群全年可見交配行為、高海拔族群則僅於夏季交配。該研究利用AR5 RCP8.5情境模擬氣候變遷對不同海拔族群的影響，發現中、低海拔亞洲埋葬蟲將因交配季溫度條件不佳而有高滅絕風險，高海拔的族群則不受影響。若交配季彈性變動，則低海拔族群將提早交配時間，中海拔族群則將延展交配時間但是所有的夏季交配者將面臨育幼失敗，高海拔族群則仍舊不受影響。依據上述的文獻，得知氣溫、降雨及光照均影響動物的交配與育雛行為，氣候變遷將導致整體生殖時序的改變。

此外，氣候變遷可能改變同一食性的動物之間的競爭關係，造成原有交互作用的改變。Chan et al. (2019) 對合歡山之埋葬蟲進行的野外調查與實驗即發現，埋葬蟲與麗蠅這兩種腐食者 (以死亡動物屍體為食) 的幼蟲，在食物資源競爭模式隨著海拔升高、氣溫降低而有不同。在高海拔低溫環境中，埋葬蟲搜尋食物所需時間變長，但也有較長的時間可以埋藏食物，低溫也降低麗蠅產卵的機率，因此降低兩種幼蟲的直接競爭。在低海拔的高溫環境下，埋葬蟲與麗蠅搜尋食物的時間縮短，產卵數亦增加，然而，高溫和麗蠅幼蟲活動使食物加速腐敗，降低了可食性，並因此干擾埋葬蟲的繁殖成功率。埋葬蟲與麗蠅的競爭關係隨著海拔梯度上的溫度差異，可能在取食和干擾型競爭模式之間變換，可能是物種分布限制的成因之一。未來氣候變遷使低溫環境範圍變狹窄，可能使埋葬蟲與麗蠅的競爭模式單一化，對埋葬蟲較有利的競爭形式可能不復存，進而限縮其分布或造成族群縮小。

除了對動物的影響外，日照、南方振盪與極端低溫現象對植物開花結實有明顯的影響，同時物候失序帶來動植物交互關係改變，可能對高專一性物種產生劇烈衝擊，導致族群數量的劇烈波動。福山森林動態樣區研究顯示，森林物種的開花及結果時間和強度有明顯的年間變異，開花 (flowering) 物候變化受到氣象因子的影響，尤其與日照及聖嬰現象帶來的高溫有關 (Chang-Yang et al., 2016)。結果 (fruiting) 物候除與氣候因子相關，亦受霜害影響。徐堉峰 (2021) 對北插天山、銅山、鳥嘴山臺灣水青岡森林的鱗翅目昆蟲進行族群監測，發現2019、2020、2021年連續三年春季水氣不足，臺灣水青岡受缺水影響而開芽狀況不佳，且年間的開芽時間紊亂缺乏一致性，同時觀察到專食嫩葉的鱗翅目昆蟲數量有逐年減少的趨勢，顯示臺灣水青岡上的鱗翅目昆蟲多樣性近年來可能

明顯受極端氣候之影響。因此氣溫上升所導致植物生長季節的延長，尤其是在高海拔山區，意味著植物將提早發芽、展葉、開花等生理現象，雖然使生長速率或生產量提高，但也可能帶來生物交互作用失序的風險。

4.5.1.3　氣候變遷調適與科研缺口

1. 基礎研究與長期監測的不足

(1) 亟需長期與完整的生物監測資料

氣候變遷是以數十年至百年為尺度，臺灣現有生物監測資料多屬短期資料且缺乏長期計畫支持，是用來評估氣候變遷對陸域生態衝擊時最大的缺口。以動物調查資料為例，目前僅以臺灣繁殖鳥類大調查 (BBS Taiwan) 屬於長期、大範圍、有系統的調查監測計畫，其他動物類群並無類似的監測網絡，導致在探討其他動物類群的氣候變遷影響時，多限於局部地區或特定案例，無法推展為全面性的完整評估。植群資料的空間覆蓋程度相對完整，包含林務局推動的國家植群多樣性調查計畫與全國森林資源調查計畫等，皆設有涵蓋全島不同森林的調查樣區，進而成為建構森林與物種棲位、評估氣候變遷與適生棲地變化的基礎資料。然而，前述調查資料均缺乏對同一地點的多年度複查，因此無法掌握森林隨時間的組成與結構變化，進而印證森林在長期氣候變遷下的實際變化。國內目前對於時間尺度涵蓋較完整的調查系統包含了福山、合歡山、南仁山及墾丁高位珊瑚礁森林動態樣區，以每5年至7年固定複查之機制，分別累積15年至30年不等的監測期間，是探討氣候變遷對森林影響的重要資料；此外，林務局2008年設立之GLORIA 高海拔山區草原生態系監測樣區以5年為期對多處中央山脈頂峰進行物種與地溫變化監測，迄2021年已陸續有重要研究發現產出 (Kuo et al., 2021, 2022)。複查樣區需要長期且穩定的經費支持，故空間涵蓋程度不足或研究取樣重複數較低是其缺陷，例如合歡山動態樣區近年觀測到的臺灣冷杉及鐵杉族群消長情形與氣候變遷預測趨勢不一致，但因缺乏其他地點的調查資料，故難根據單一地點觀測結果遽下結論。因此，建議政府機關應就長期監測系統之選點與規模擴充納入政策討論，並視預算給予長期穩定支持。

此外，科技主管部門宜鼓勵在相同生態系、但不同地點的研究計畫進行橫向合作，充分發揮彼此比較及交叉驗證的科學價值。以冷杉林生態系為例，目前在雪山與合歡山地區皆有較長期的監測計畫進行，但分屬不同政府部門的委託研究案。若科技主管部門

能進一步促進此類調查成果進行合作比較分析，應可獲得更多證據以探討氣候變遷對高山生態系的影響。

在霧林帶部分，同樣有森林長期動態監測樣區缺乏的問題。在調查數據不足狀況下，現階段僅能利用模式推估評估氣候變遷對森林植被的影響。本期TCCIP計畫已將降雨、濕度、雲霧覆蓋度等因子納入植被變遷統計模型，希能更適切地反映出雲霧林帶的可能變化。當然，若能有足夠資源支持地面調查，將更有機會取得直接資料進行研究。

則在國內亦有部分相關研究量能較為不足，例如陸域水生態之衝擊研究，氣候變遷帶來的各項極端事件亦會影響溪流系統及其內之生物，然目前大多數的溪流生態系 (包括溪流出海口) 研究均聚焦於水質和棲地品質對魚類的影響。則外來種入侵之分析研究亦較缺乏，根據國際上的研究指出，健康的森林少有外來種，在臺灣，外來物種亦多出現在人為開發或干擾較大的地區，如森林邊緣、道路兩側。目前外來種研究多重視其棲地利用、與本地種的競爭、人為飼育情形，少有與氣候相關之監測和研究，氣候變遷是否會在天然生態系統中創造外來種的入侵條件，有賴各系統長期監測提供資訊。

(2) 基礎生物學研究應獲得支持

國內近年已觀測到一些可能與氣候變遷有關的生物表現，例如開花時序、植物展葉物候紊亂、昆蟲族群數量與植物物候相關及族群波動劇烈化等，但國內並無基礎生物學研究可佐證植物花芽誘發、發育及休眠等現象與環境因子的直接或間接關係。這些基礎生物學研究是探討氣候變遷與生物機制反應的重要資訊，亦是進一步建立生物機制模型 (process-based model) 的起點。建議政府機關可選擇具有經濟、文化或保育價值之物種，優先推動其基礎生物學研究，尤其是環境溫度、降水及極端旱澇與生長反應的關係，以利評估氣候變遷情境下如乾旱、高溫或低溫對這些重要物種的衝擊並擬定調適方法。

(3) 研究關注議題宜均等化，以利發掘氣候變遷對生態系的整體衝擊

前述之長期監測可提供各生物族群的長期動態變化，若搭配氣候監測資料及生物學基礎研究，有助瞭解氣候變遷對單一族群的影響。然而生態系的複雜度除了源於物種多樣性，還有各種交互作用。以往科學研究以專家專長為導向，儘管可得到單一課題之深入研究成果，然而獨立研究間的關聯度較低，難以進行生態系之整體評估。未來可針對各生態系統啟動專家會議，討論並規劃整體性的生態系研究藍圖，辨識出藍圖中的研究

資訊缺口，作為科學研究因應策略之參考。

研究關注區域的不均，則是另一個潛在的問題。依據本報告的整理，可發現目前與氣候變遷有關的陸域生態研究，均集中在高海拔或瀕危生態系。不可否認，這些生態系確實面臨最立即的氣候變遷衝擊，但在研究焦點高度集中狀況下，可能忽略其他生態系的潛在衝擊。例如熱帶型植群與氣候變遷的相關性研究、西部植群及生物多樣性與受乾旱氣候型態變化的影響、外來入侵物種隨氣候變遷與人為開發的棲地擴張等，亦是值得關注的生態議題。

然而，臺灣低海拔原生植被多已被破壞殆盡，人為開發利用是僅存少數棲地面臨的立即威脅，且其急迫程度遠高於氣候變遷的影響。因此，就低海拔生態系而言，政府部門不僅應聚焦於氣候變遷的影響，更需要針對棲地風險評估、物種搶救保存、私有農林土地的生態服務給付等議題投入更多關注。

2. 林業與自然保育現行調適作為及科研缺口

森林佔有陸域生態系最大的面積，亦是本生態系統最重要的生產者；而氣候變遷科研成果最終亦需反映至目的事業主管機關並融入國家自然資源管理政策，方能發揮其應有價值。林俊成等人 (2019) 曾參考Nabuurs et al. (2017) 之氣候智慧林業(Climate-Smart Forestry, CSF) 框架，提出森林管理調適措施，做為增進國內氣候變遷林業調適能力之建議，主要建議包含：(1) 利用生產力和氣候適應性更強的物種，重建完整的林地；(2) 促進生態系統服務的推廣和保護；(3) 於衰退的森林中加強更新，並鼓勵種植氣候適應物種；(4) 合併或鼓勵未比鄰林主之間的合作，尤其是維持現況未經營的林主；(5) 減少低生產泥炭地的排水；(6) 減少暴風或火災干擾的風險，並新植抗旱物種；(7) 提高區域木材原料市場的透明度，提高階層使用效果；(8) 促進建築行業的木材使用；(9) 綠化廢棄的農田；(10) 在偏遠地區和/或低生產力地區建立大型嚴格的森林保護區。

本報告則依據前列各建議項目，檢視近年國內調適方法、科研推動情形如下，並就應補強缺口，分述如下：

(1) 依保育標的特性檢討與調整保護區範圍

有韌性的森林生態系統將保持可持續的碳平衡，並保護水土資源，優化基於森林對

氣候減緩和調適的效果。盧道杰等人 (2012) 完成全臺43處自然保留區、野生動物保護區與自然保護區的成效評估，藉此改善並提升各保護 (留) 區的經營管理效能。近年林務局 (2018、2022a) 國土生態保育綠色網絡所執行的建置計畫，已針對森林及河川地景進行空間檢討與縫補，營造相串連的系統，增加生物棲息與遷徙的機會。

(2) 盤點氣候變遷高衝擊地點，進行森林動態調查監測

以實際監測方式瞭解生態系與物種受衝擊的程度，針對高易危者 (如族群下降、更新不良、物候與生物交互關係失序) 採行協助遷移或基因庫保存等措施，減緩氣候變遷衝擊。例如：針對特定樹種進行多樣性調查、種原備份、輔助繁殖與協助遷移研究 (陳子英，2016)、建立全臺灣高海拔生態系植群長期監測樣點，搭配溫度資料進行植物動態變化之分析 (林政道，2022)、對珍貴稀有植物進行種原收集與繁殖，減緩滅絕壓力 (林業試驗所，2019、2023)等。

(3) 篩選氣候適應較佳的樹種進行造林或補植，提高綠色資材之循環利用

有關人工林經營與氣候變遷調適部分，林奐宇 (2022) 研究重要經濟樹種生長速率與氣候環境因子關係，針對不同氣候變遷情境篩選適宜性較高的種類，作為未來不同地理區位造林地之經營調適之備選樹種。林務局 (2022b) 則導入新科技與設計應用，增加竹產品多元性，落實綠色資材循環再利用，推動「以竹代鋼」、「以竹代塑」，增進木竹材的碳固定效果。然而，在氣候變遷之抗熱、抗旱及適應其他逆境物種選育研究部分，在農業、畜牧業、漁業等領域2017年以後均有相關研究，但在林業尚無科研計畫進行，有待補強充實。

(4) 合併或鼓勵未比鄰林主之間的合作，綠化廢棄的農田，提高木材使用

提高森林的連續覆蓋，除增進木材生產與農村經濟發展，更能增加對土地與生物的保護作用。此外，新植林地生產額外的木質原料，實現更多的二氧化碳匯。此外，提高區域木材原料市場的透明度，可更好地利用木質原料，增加環境友好建築，並減少溫室氣體排放 ，改善城市環境。

4.5.2　海域生態

4.5.2.1　國內外有關氣候變遷對海域生態衝擊的研究

臺灣的面積雖然只佔地球陸地面積約0.025%，但是周邊海域蘊含的海洋生物可達到全球海洋物種數的10%，原因之一，即為臺灣周邊擁有多樣的海洋生態系，而多樣化的棲地類型可以廣納不同的生物種類，因此單位面積的多樣性比例極高。整體而言，臺灣周邊的海洋生態系可以初步將其區分為沿岸生態系及離岸生態系，沿岸生態系係指臺灣本島周遭的海岸棲地，由於地質、地形、氣候、潮汐與波浪作用等差異，使得沿岸棲地呈現多樣化的型態，包括軟底質的泥沙灘、河口潟湖、鹽沼、紅樹林、海草床等，這些棲地大多分布於地勢和緩的西部海岸，此外北部、南部與東部沿岸則有硬底質的岩礁、珊瑚礁與藻礁等亦屬沿岸棲地；離岸生態系則泛指位於大陸棚或東部海域的大洋區，為許多重要漁業資源棲息所在，而影響大洋生態系的主要環境因子包含海流、水溫、鹽度等，造成各海域不同的基礎生產力與次級生產力 (浮游動物) 特徵。

氣候變遷仍持續發展中，以臺灣海峽為例，自2012年起暖化停滯伴隨的海表增溫停滯現象已逐漸被快速增溫取代，增溫的幅度約為0.63°C decade (Lee et al., 2021)，而海水暖化可能導致水溫垂直和水平分布型態改變，亦迫使棲息其中的生物發生適應上的改變。學理上而言，氣候變遷所導致的海平面上升對泥沙灘、河口潟湖、濕地、紅樹林與海草床的威脅較大，海水暖化對於珊瑚礁與大洋的影響較大，而海水酸化對藻礁與珊瑚礁有極大威脅 (Chiu et al., 2017)。然而，多數的生態系由於缺少長期的基礎數據作為背景資訊，不易比較分析過往與現今之差異，故難以斷定目前的觀察到的現象與氣候變遷間直接的因果關係。目前結論較為肯定的研究案例並不多，例如1998年聖嬰現象造成珊瑚白化、颱風侵襲造成珊瑚礁受損、鱙魴、鯖鰺等漁業資源的長期變動、2008年反聖嬰現象導致澎湖寒害造成魚類大量死亡等少數案例。本章節延續「臺灣氣候變遷科學報告2017」之架構，概述2017年之後國內各主要具有代表性的海洋生態系，有關其與氣候變遷間關係之科學研究報告，持續建立有關潛在受衝擊熱區之科學數據，並從中發展面對氣候衝擊之調適策略。

國際上有關氣候變遷生態理論架構與模式建構的研究甚多，多以全球或全洋區大尺度的觀測資料進行模式推導與建構 (Baltar et al., 2019; Bryndum-Buchholz et al., 2019;

Heneghan et al., 2019; Ani & Robson, 2021; McLean et al., 2021; Heneghan et al., 2021; Tittensor et al., 2021)，且不斷地有創新的研究結果。由於過去用單一生態系所建立的模型由於不確定性太高，例如Heneghan et al. (2021) 比較8種不同模式建構基礎的全球生態模型，在同樣的升溫情境下，不同模式預測的整體生物量差異在-35%到+3%，而在同樣的基礎生產力 (PP) 變異情境下，預測的整體生物量差異在-17%到+15%之間，顯示不同的研究間仍有許多的分歧。因此，近年的研究則嘗試以考量多生態系的整合式模型 (Fisheries and Marine Ecosystem Model Intercomparison Project) 來預測不同氣候變遷情境下各洋區生物量的變化 (Bryndum-Buchholz et al., 2019)，或者是以集成模型 (ensemble modelling) 的方式，將各不同演算法的基礎模型預測結果再生成新的模型進行預 測 (Ani & Robson, 2021; Heneghan et al., 2021; Tittensor et al., 2021)。

Tittensor et al. (2021) 以最新世代的耦合氣候模式比對專案 (CMIP6版本) 對於未來 (2015年至2099年) 全球海洋生態系的狀態進行了最新的預測，目前模擬結果顯示無論在高強度減碳調適 (strong-mitagation) 或是高度碳排放 (high-emission) 的情境下，由於暖化仍持續加劇，最終造成全球海洋生物數量下降的幅度將比前一版本 (CMIP5) 預測的還要嚴重 (唯有對於基礎生產力在高碳排情境的預測有較高的不確定性)。CMIP6模式結果指出在2030年後生物量下降的幅度逐年加劇，而在高碳排情境2060年後生物量將快速且大幅度的下降，此預測結果也再一次的凸顯減碳的重要性 (圖4.5.2.1)。

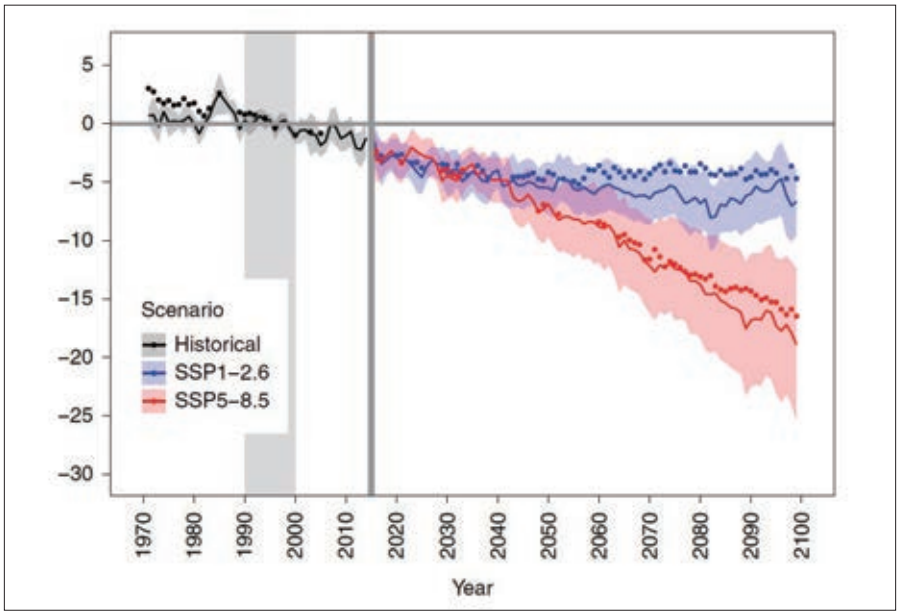


圖4.5.2.1 CMIP6預測未來全球海洋生物量的變化趨勢

註：藍色部分為高強度減碳調適情境，紅色部分為高度碳排放情境。(資料來源：Tittensor et al., 2021)

相較於複雜的模型，Heneghan et al. (2019) 則是將海洋生態系中各營養階層的生物量以體型大小乘以個體數的關係表示，將各階層能量的流動簡化為等幅下降、異速下降或不規則型三種的模式，模擬不同生態位階生物豐度組成比例受到各種氣候變遷物理因子變化所產生的消長。例如，水溫上升將提高生物新陳代謝率，整個營養階層能量的消耗也因此增加，如此可以提供下一個階層的能量就變少了，最終將使整體生物量下降。藉由這樣簡化的模式，有助預測及理解面對營養鹽缺乏、含氧量下降、海洋酸化、營養位階變動等氣候變遷衝擊下，整體海洋生態系之變動方向。相較於複雜的模型，簡化、直觀的模型強調的是量化影響生態系結構及功能的主要驅動力，讓模型能夠更貼近生物的現實狀態。而由於生物的體型與數量在小範圍及短時間內可能會有很大的變動，因此簡化的模式適用於評估大規模整體生態系在較長時間尺度的變動狀態。

1. 沿岸生態系

(1) 珊瑚礁

全球氣候變遷普遍被認為是當今對珊瑚礁最嚴重的威脅，海水溫度的上升及海洋酸化，預期將為珊瑚礁生態帶來極負面的影響，即使僅攝氏1度至2度的溫度上升也可能形成大規模的珊瑚白化事件，因此近年國內針對珊瑚對抗熱逆境之生理機制進行了深入的研究：

以中觀生態池 (mesocosm) 模擬三種水溫情境對墾丁國家公園海域鐘形微孔珊瑚及細枝軸孔珊瑚的影響 (Keshavmurthy et al., 2022)，包括過去1998年聖嬰現象造成的大規模珊瑚白化事件的水溫 (29°C)、2018年前後之白化事件水溫 (31°C)，以及IPCC所預測2050年水溫 (33°C) 為參考 (圖4.5.2.2)，結果顯示兩種珊瑚於29°C以及31°C的熱逆境歷經一週後仍未有明顯白化，處於健康的狀態，而當水溫若高達33°C，快速生長型的細枝軸孔珊瑚死亡率明顯較高，成長緩慢的鐘形微孔珊瑚熱耐受能力較佳。本研究推論在溫度壓力下珊瑚宿主雖能與較耐熱的共生藻共生而提升其熱耐受能力，此適應或調適能力也許無法趕上未來環境的變遷，但珊瑚本身的熱耐受能力可能對於未來可否生存佔有更重要的關鍵。

而比較臺灣南部海域處於不同溫度微棲地環境的三種珊瑚 (McRae et al., 2022)，發現在長期較緩慢的升溫情境下 (30°C持續12週)，珊瑚成長量與存活率最高者為細枝軸孔珊瑚，其次為銳枝鹿角珊瑚，鐘形微孔珊瑚的成長量最低，有顯著的種間差異；然而上

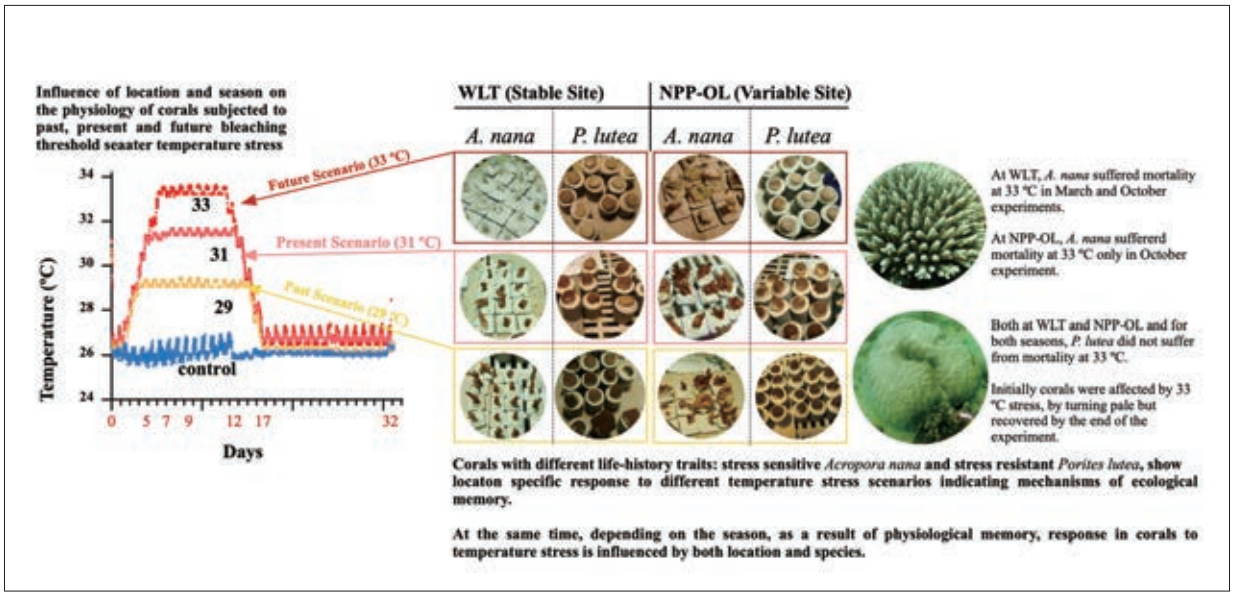


圖4.5.2.2　過去、近期及未來三種水溫架構測試兩種珊瑚的熱耐受能力
(資料來源：Keshavmurthy et al., 2022)

述珊瑚若處於短期快速地升溫狀態 (連續8天達32°C)，則有50%至100%的珊瑚會白化。整體而言，珊瑚能夠承受超過季均溫以上的水溫緩慢上升，但若水溫短期內超過其夏季平均最高水溫2°C以上，則會白化。

共生藻因與珊瑚有著不可或缺的共生關係，研究指出墾丁國家公園海域內受到升溫海水影響或溫差變化大的區域，珊瑚的共生藻會以較具耐熱性的種類 (Durusdinium spp.) 為優勢 (Keshavmurthy et al., 2019)，而且共生藻種類會隨著季節而變化，藉由改變體內既有不同抗熱性之共生藻相對豐度，來度過熱逆境所帶來之生存壓力。另外，過去有關海膽的研究調查較少，Dang et al. (2020) 在墾丁、綠島、蘭嶼的研究指出，冠海膽屬 (Diadema spp.)、刺棘海膽屬 (Echinothrix spp.) 的數量與新生珊瑚的豐度呈顯著正相關，顯示在過度漁撈的珊瑚礁區，草食性的海膽可能有控制藻類數量的功能，有助新生珊瑚爭取生長空間，具有幫助珊瑚礁回復氣候衝擊的作用。

珊瑚是個共生體 (Coral holobiont)，除了珊瑚蟲與共生藻外，共伴微生物在過去經常被忽略，其中以共伴細菌為最大族群，其生態功能包括提供養分、產生抗菌物質維持珊瑚健康、參與氮的循環代謝等，但海洋酸化對於珊瑚微生物相的衝擊，目前瞭解仍相當有限。以兩種常見的淺海珊瑚為例，鹿枝軸孔珊瑚在二氧化碳分壓1000 ppm維持2個月的情況下，多數白化或死亡，團塊微孔珊瑚則依然存活；然而鹿枝軸孔珊瑚碳酸鈣骨

骼中菌相並無明顯變化，團塊微孔珊瑚的菌相組成則大幅改變 (Yang et al., 2020)。近期發現珊瑚骨骼中的厭氧光合自營的綠硫菌與厚壁菌門的細菌具有固氮能力，在珊瑚骨骼中可能參與氮的循環代謝，對於珊瑚的活存與環境變遷之間的關係可能是未來研究珊瑚共伴菌的重要方向。

除了以上珊瑚礁生理機制方面的研究外，珊瑚礁遭受氣候衝擊的生態韌性 (ecological resilience；經環境干擾後的珊瑚礁生態系，維持或恢復與干擾前相同的結構或功能的能力) 也是近年的研究重點，本理論認為珊瑚礁生態系統的整體恢復，必須結合生態、環境、管理、社會經濟四個子系統，建立一套適應性韌性基礎管理架構 (Adaptive resilience-based Management, ARBM) 提供永續管理決策。利用墾丁國家公園周邊海域的長期調查資料 (Bang et al., 2021)，並結合專家意見以珊瑚多樣性、漁獲量、藻類覆蓋率、颱風路徑、觀光人潮、污染源、潮汐湧升、水溫等14個跨面向的因子作為量化指標，估算四種不同組合模式的韌性分數，整體結果顯示南灣地區為國家公園內生態韌性最高的地區，主要是因為此區有潮汐造成的湧升將底層冷水向上抬升，大幅降低了本區珊瑚所受到的熱逆境，而研究結果亦指出各模式有其優缺點，唯有當與各海域生態韌性有高度影響力的因子被納入時模式評估最有效力。

(2) 海草床

在全球面臨氣候變遷的威脅下，海洋固碳的重要性受到重視，其中紅樹林、海草床、鹽沼等沿岸生態系統更蘊藏著龐大的碳封存潛力。根據海洋保育署2023年發布「臺灣沿海重要碳匯生態系統調查與評估計畫」調查報告，我國紅樹林面積約680.7公頃、海草床約5,456.4公頃 (含東沙5,420公頃)，鹽沼約188.3公頃，近年並持續調查估算此三大生態系統碳匯量，以利2050年淨零排碳目標路徑規劃。此外，海洋保育署於2022年起與農業部水產試驗所合作，於澎湖池西適合海草生長的沙質海域進行卵葉鹽草、單脈二藥草及甘草等之栽植試驗，未來評估若生長狀況良好，將擴大面積種植，進行海草復育。

海草床高生物量及底質特性使得其地下部成為重要碳匯，然有關其生產量及分解作用因為研究方法上的困難，在過去很少被明確的量化。為瞭解潮間帶海草床地下部生產量對於長期碳吸存的重要性，Zou et al. (2021) 研究南臺灣潮間帶海草床兩種海草 (演替末期之泰來草及演替前期之單脈二藥草) 的地下部生產量 (belowground production)。這兩種海草地下部的替換率比地上部要長 (圖4.5.2.3)，所以地下部的生物量比地上部

高。兩種海草的地上部生產力顯著高於地下部，但大部分皆在一年內分解完畢。演替末期的泰來草因為翻轉率及分解率都低，所以比演替初期的單脈二藥草儲存在底質更多的碳。估算泰來草地下部生產量的碳吸存速率是0.3 g C m^{-2} yr^{-1}至4.7 g C m^{-2} yr^{-1}，單脈二藥草則為1.5 g C m^{-2} yr^{-1}至2.3 g C m^{-2} yr^{-1}，能貢獻達53%的潮間帶低潮位長期底土有機碳匯量。地下部生產力是潮間帶海草床碳匯的重要來源，且生長緩慢的大型海草能夠透過地下部儲存較多的碳，在未來海草床碳收支的估算中應該被量化納入。

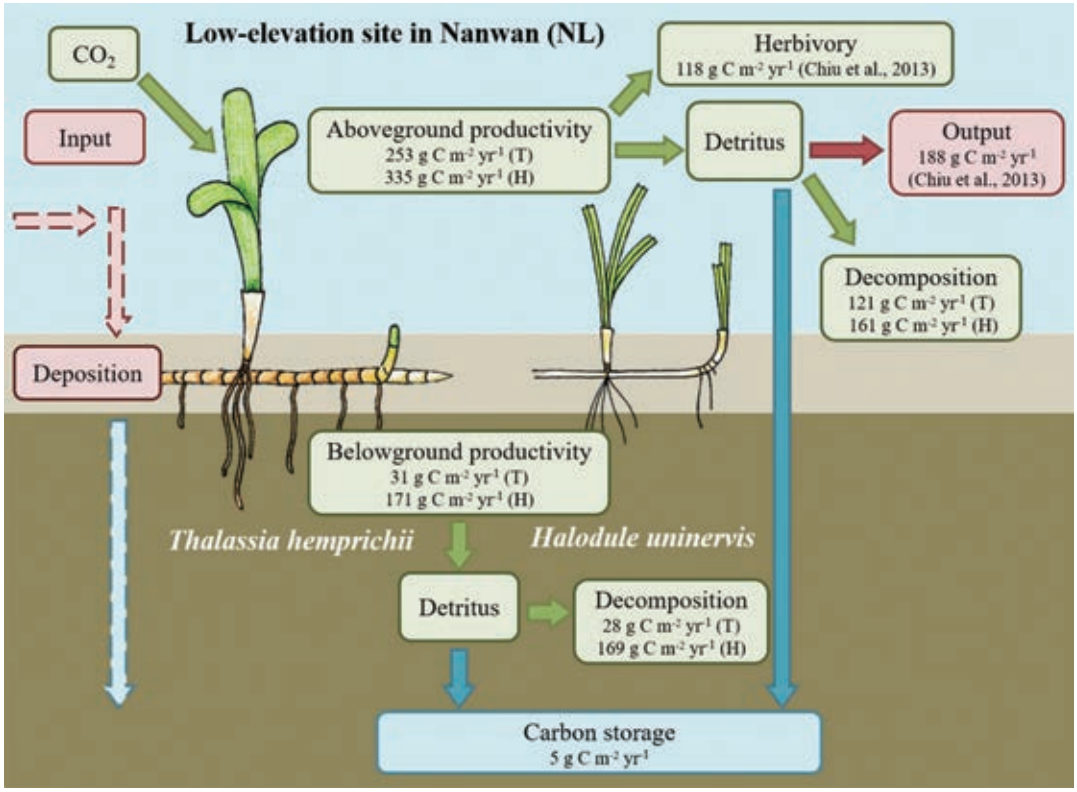


圖4.5.2.3　墾丁南灣潮間帶泰來草及單脈二藥草海草床的碳收支流程
(資料來源：Zou et al., 2021)

氣候變遷伴隨的水溫升高、強降雨、海平面上升等效應可能會對海草床生態系造成衝擊， 延續Zou et al. (2021)之研究， Chen and Lin (2022) 發現墾丁大光及南灣海域的泰來草 (圖4.5.2.4) 的地上部及地下部在面對環境變化時會做出不一樣的反應；而單脈二藥草 (圖4.5.2.5) 的地上部及地下部之反應則較為一致，且雨季時河川帶入的大量營養鹽會促進其生長量。總體來說，海草地下部面對環境改變時的形態適應在不同物種之間存在差異，因此未來環境因子的變動將影響海草床組成比例，而目前我國紀錄的海草種類有12種，種間的差異也會影響後續海草床整體碳匯貢獻量之估算。

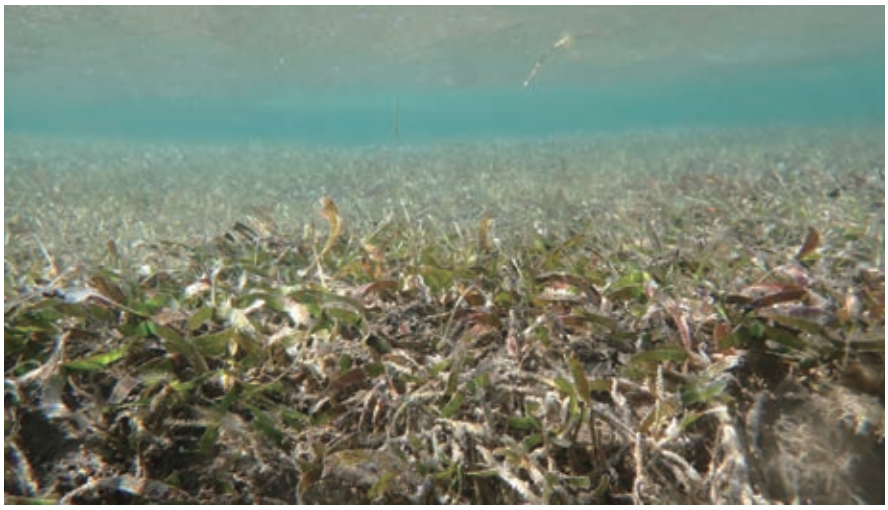


圖4.5.2.4　屏東海口的泰來草 (攝影：水產試驗所許嘉閔)

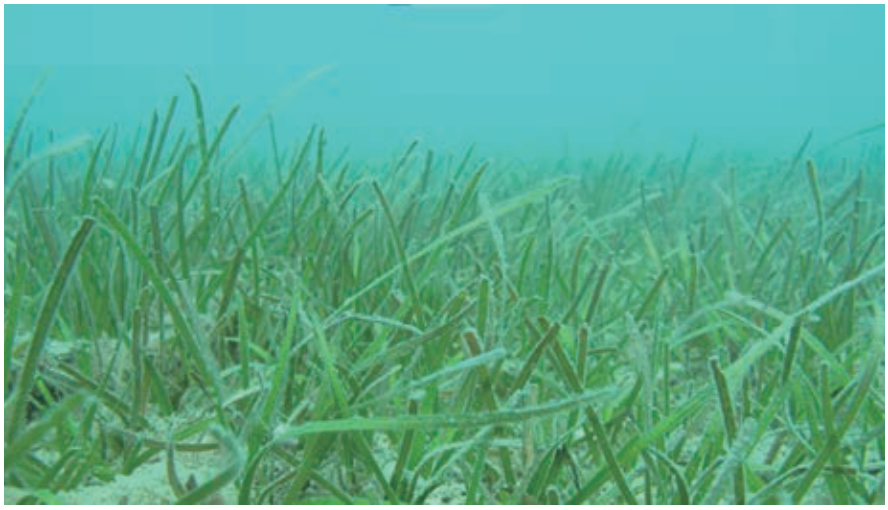


圖4.5.2.5　澎湖海域的單脈二藥草 (攝影：水產試驗所洗宜樂)

海洋酸化對於海草床會造成什麼樣的影響? Liu et al. (2022) 以中觀生態池進行的實驗顯示，模擬海洋酸化將二氧化碳分壓提高至1,200 ppm維持12週的情形下，泰來草的地下部成長量提高，碳氮比上升，然而地下部的氮含量是下降的；而在水溫由25°C上升至31°C的情境，光合作用最大光效能 (Fv/Fm)、基礎生產力、葉片生長速率、分解率、碳吸存量都是上升的，然而直立莖密度、葉片氮含量則是下降的。而在兩個因子共同作用的情境，泰來草的生產量、光合作用最大光效能 (Fv/Fm)、葉片生長速率、碳吸存量均達到最高水準，顯示較高的二氧化碳分壓情境似乎能抵銷高水溫的負面衝擊。然而，未來如果水溫上升到明顯不利海草生長的高溫33°C至34°C，目前的研究推論能否成立？仍是未來需繼續研究的課題。

聖嬰南方振盪事件 (El Nino Southern Oscillation, ENSO) 在較長的時間尺度上，對潮間帶熱帶海草床的影響為何？Lin et al. (2018) 分析2001年至2017年墾丁潮間帶泰來草床的長期監測資料，結果顯示ENSO影響墾丁雨季的降雨量，改變海草的庇護高度、生物量、相對生長速率、覆蓋度與密度。在聖嬰時期因雨量少，陸源營養少，葉片乾燥，導致海草生物量損失，並刺激高潮位海草萌發新植株；反聖嬰時期則因陸源營養多，使附生藻增加，進而覆蓋泰來草。且降雨減少曝曬壓力，使混生於低潮不耐乾旱的海草族群增加，導致泰來草生存空間減少、密度下降。綜合上述結果，颱風的干擾海草能夠迅速恢復；季節則週期性改變海草地上部的生長與生產力；而ENSO事件長達半年至一年，不僅影響海草的生長狀況，甚至改變整個潮間帶海草與附生藻種類組成，對海草床有最大的影響。

(3) 濕地與紅樹林

臺灣擁有豐富的濕地資源，由內陸到海岸分布著涵蓋農田、埤塘、魚塭、草澤、鹽沼、紅樹林、潟湖、泥沙灘等多樣化的濕地類型。目前臺灣有42處國家重要濕地、41處暫定地方級重要濕地，共83處受保護的國家重要濕地。濕地除了生態價值外，尚有防洪滯洪、水質淨化、水資源保育及利用、景觀及遊憩、歷史文化、民俗傳統等多方面的價值，與周邊的社會、經濟、公私土地利用、汙染、開發等息息相關。為維持濕地生態系統健全與穩定，促進整體環境之永續發展，內政部營建署於104年制定公布之「濕地保育法」，濕地定義係指「天然或人為、永久或暫時、靜止或流動、淡水或鹹水或半鹹水之沼澤、潟湖、泥煤地、潮間帶、水域等區域，包括水深在最低低潮時不超過六公尺之海域」，並且針對人工濕地、重要濕地、保育與利用計畫、異地補償、生態補償、基金設立以及零淨損失等事項，均以專章進行了明確的定義與規範。政府研究資訊系統 (GRB) 於2017年至2023年間之研究計畫，以濕地為關鍵字初步統計結果有210筆，以紅樹林為關鍵字則有76筆，在理、工、農、社會各面向之研究相對完整。濕地的生物與環境條件，使其能從大氣中吸收二氧化碳轉換為有機碳捕集於濕地土壤、底泥或植物碎屑中，具有極佳的碳匯功能。在我國海岸濕地近年的研究，除了其碳吸存能力的估算，濕地因為底部厭氧環境亦為溫室氣體甲烷 (CH_4) 及氧化亞氮 (N_2O) 的產生源，因此近年許多研究仍持續精進相關參數的估算 (Lin et al., 2020; Lin et al., 2021b)。我國紅樹林面積約680.7公頃，為各種天然濕地類型中面積最大者，而臺灣鹽沼與紅樹林的生長環境相似，所遭遇到的氣候變遷壓力也頗為類似，故以下乃以紅樹林為主篇幅述之。

分布於熱帶和亞熱帶沿岸的紅樹林生態系，其高生產力與碳吸存功能對全球碳循環與氣候變遷有重要的影響，因此被稱為「藍碳」。然而近年來越來越多研究發現，紅樹林同時也是顯著的溫室氣體排放來源，除了二氧化碳之測量外，對於暖化潛勢更強的甲烷 (CH_4)，相關研究甚少。Li et al. (2018) 量化臺灣西海岸北、中與南部主要紅樹林生態系的碳循環，發現臺灣紅樹林碳吸存能力比全球平均值還要高，為陸地森林的6倍，其中儲存於樹幹中的碳約佔一半，剩餘部分則以枯枝落葉形式掉落於地上，而高達83%的的枯枝落葉會在一年內分解，隨後以顆粒態或溶解態的有機碳經由潮水帶出紅樹林，提供鄰近海域生態系能量來源。由於多數枯枝落葉分解很快，只有約7%所吸收的碳能儲存於紅樹林底土內，因此，分解作用是決定紅樹林碳吸存量的關鍵因子。Lin et al. (2021a) 測量臺灣西部沿海十處水筆仔及海茄苳紅樹林之10cm底土內的甲烷排放量，結果顯示海茄苳透過呼吸根 (pneumatophores) 作為甲烷氣體排放的管道，佔土壤碳埋藏率約170.7%至894.8%；而水筆仔甲烷排放則佔土壤碳埋藏率約12.7%至313.9%，幾乎完全抵消了紅樹林的藍碳功能，因此甲烷排放在計算紅樹林碳吸存量時為不可忽略的碳支出。而未來在復育或改善紅樹林環境時，應盡量避免淡水有機汙染的輸入，以減緩紅樹林的甲烷排放量。臺灣目前僅存四種紅樹林中，僅海茄苳與水筆仔的碳收支被量化，南部主要樹種欖李與五梨跤的調查闕如，且過去碳收支研究多忽略溫室氣體排放、紅樹林地下部生物量及草食作用量，未來期能完成臺灣四種紅樹林碳收支完整拼圖，建構紅樹林生態系功能健康指標與多目標多元共治永續管理策略。

紅樹林主要分布於河口與潟湖等海陸交界處，其根系可以減緩水流，加速泥沙沉積，以發揮固岸、抑浪的功能。然而紅樹林若過度擴張對生物多樣性與洪患調節恐造成負面影響，例如新竹市政府於2014年便投入經費進行在香山濕地大規模疏伐，並於後續調查發現臺灣旱招潮蟹的數量恢復良好，而農業部於2022年宣布廢止關渡自然保留區轉為國家級重要濕地，成了我國第一個退場的自然保留區，未來可適當疏伐紅樹林。為了解決過度擴張及陸化，許多地區開始進行疏伐或全面移除紅樹林，然而全面移除可能會影響到紅樹林的儲碳能力，並導致其生態功能的喪失，Ho et al. (2018) 於芳苑進行三種不同程度的疏伐試驗，指出中度疏伐應為解決紅樹林過度擴張的最佳選擇。

2. 離岸生態系

(1) 黑潮大洋區

臺灣東部海域廣大的外洋區主要受黑潮所影響，黑潮暖水源自於北赤道洋流，流幅

寬約150km，影響深度達1000m左右，攜帶大量的熱能及鹽類由南向北傳輸。過去研究指出太平洋年代際振盪 (PDO) 透過影響北太平洋風場對黑潮具有調控的作用，因此PDO的變動趨勢與黑潮的變異間兩者存在高度相關 (Wu, 2013; Wang & Wu, 2019)。然而在1990年代末至2012年至2013年的全球暖化趨緩期間，大氣條件產生了變異，此氣候變遷會如何影響黑潮？

Wang & Wu (2018) 分析1993年至2013年的衛星觀測地轉流 (geostrophic velocity) 資料，確認了位於呂宋海峽東側外海的黑潮上游存在著增強的趨勢，表層流速逐漸增強約18%。由於赤道信風的強弱會影響北赤道洋流，也就是黑潮的上游，因此若風速強、流速增快，黑潮容易直接由臺灣東部海面往北移動，較少向西入侵南海。而在這個狀況下，臺灣東部以北至東海的黑潮主流域則呈現減弱且增暖的趨勢，表層流速減弱約12.5%，原因歸因於氣旋式大洋風場趨勢及暖池暖化。Tsai et al. (2018) 分析1985年至2017年衛星海表溫與流場資料，亦指出長期以來呂宋海峽的黑潮入侵持續減少，而黑潮持續向北流至臺灣東部後主流流速卻減弱，也因此強化了黑潮入侵臺灣東北部陸棚的現象。但是，這個可預測性在1998年之後被擾亂，原因在於PDO的影響力被北太平洋第二模態取代 (Wang & Wu, 2019)。在1990年後期，PDO轉換至負相位所引起的黑潮長週期變化 (圖4.5.2.6)，影響了氣候系統的能量平衡，使得推估黑潮未來年際變異性變的困難。

氣候及環境條件變化會影響生態系中生產者數量或分布的變化，亦會影響掠食者及魚類的洄游路徑和捕食狀況。黑潮變動對於臺灣氣候及漁業經濟有相當重大的影響，日本鰻 (Anguilla japonica) 為重要經濟養殖魚種，完全仰賴捕撈天然鰻苗，因此捕獲量的年間變化對產業有相當大的影響。日本鰻在馬里亞納海溝的深處產卵，鰻苗會隨著北赤道洋流及黑潮長距離的輸送至東亞各國沿岸，臺灣為最早可以捕獲鰻苗的國家，而北赤道洋流及黑潮的流速強弱變化，將造成臺灣與日本的所捕獲鰻苗日齡、體長以及數量的差異 (Hsiung et al., 2022)。Lin et al. (2017) 研究發現當西北太平洋區域的鹽度鋒面極端的往南移，日本鰻的產卵場也會隨之異常地往低緯度移動，導致東亞區域的捕獲量在1983年、1992年和1998年大量減少。此外也發現上述情形並不是完全由聖嬰現象所造成，且並不一定是強聖嬰事件就會發生，例如2015年及2016年的強聖嬰就沒有發生鹽度鋒面極端南移與鰻苗大量減少的現象。然而，這些極端的事件與氣候組合模態 (Combination mode, C-mode) 有很好的相關性。結果顯示因為受到C-mode氣候變遷的

影響，改變了西北太平洋的降雨型態，也導致鹽度鋒面極端的南移，進而造成日本鰻魚產卵場往南移動，不利於鰻苗隨著北赤道洋流-黑潮系統傳輸到東亞區域，進而嚴重地影響到東亞國家的鰻苗捕獲量。

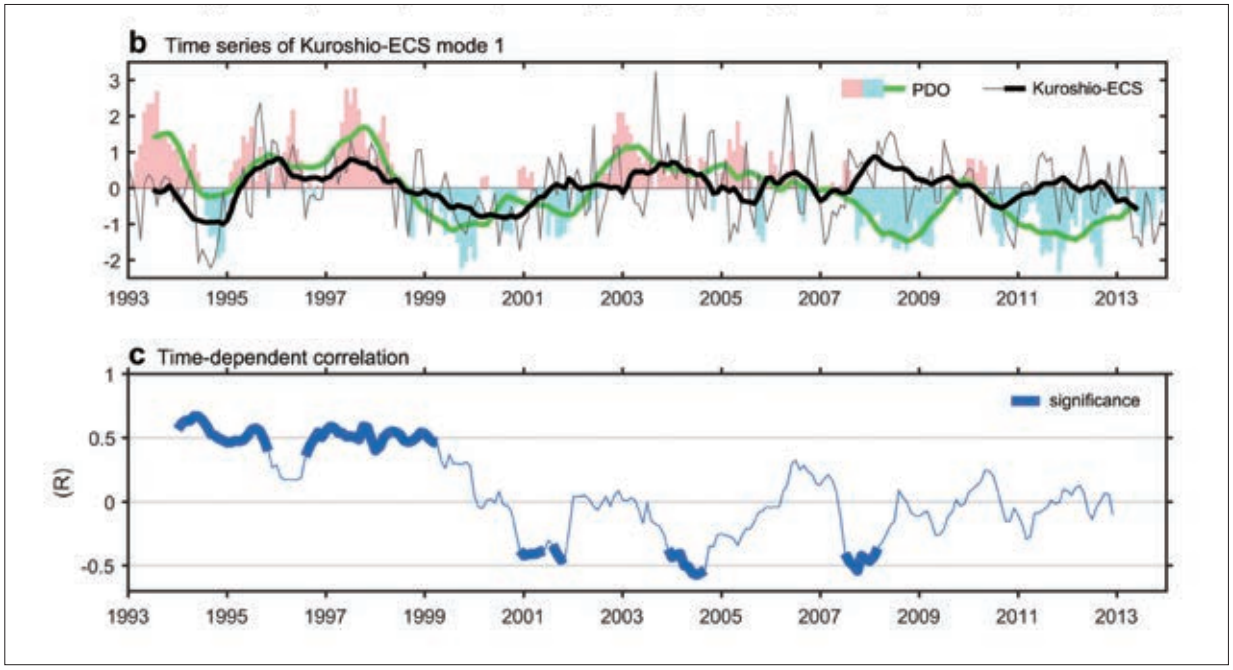


圖4.5.2.6　(上) PDO指數的移動平均值與黑潮在東海陸棚段的流速特徵向量之時間序列圖；(下) 兩者相關係數 (time-varying) 在1999年之前多為高度正相關，其後呈間斷性相關或無相關性 (資料來源：Wu et al., 2013)

(2) 基礎生產力

海洋浮游植物貢獻的基礎生產力 (primary production) 是大洋生態系食物鏈運轉以及支撐漁業資源的基礎，同時也扮演著透過生物幫浦機制吸收大氣二氧化碳調節氣候的關鍵角色，因此海洋基礎生產力在全球變遷作用下的反應以及受影響程度，是當今國際非常重要的研究議題。然而，由於影響基礎生產力變化的因子眾多，營養鹽、微生物環、溶氧、光照、水溫與浮游植物葉綠素a濃度之間的關係極其複雜，同時又受到各種海流與湧升流的影響，加以基礎生產力的海上實測因為受限於實驗方法，很難有較長時間及空間尺度的資料，因此難以直接觀察實證氣候變遷的影響，因此近年有關臺灣周邊海域陸棚區及大洋區有關基礎生產力之研究，仍著重於解碼、量化影響基礎生產力變化極其複雜的機制。

光合作用效率—可見光亮度曲線 (photosynthetic-irradiance curve, PB-E curve) 是浮游植物行光合作用固定水中二氧化碳效率和與光強度間的變化關係，可利用此函數關

係進一步推算出基礎生產力。Gong et al. (2017) 以上述關係估算東海陸棚冬季透光層中的基礎生產力平均值為186 ± 117 mg C m^{-2} day^{-1} (圖4.5.2.7)，而由於冬季水團的垂直混合均勻，因此光照並非主要影響因子，水溫差異與營養鹽的多寡才是造成東海陸棚基礎生產力不均的主因，並指出衛星遙測推導的基礎生產力數值可能有高估的情形，仍需船測資料實證以避免高估。

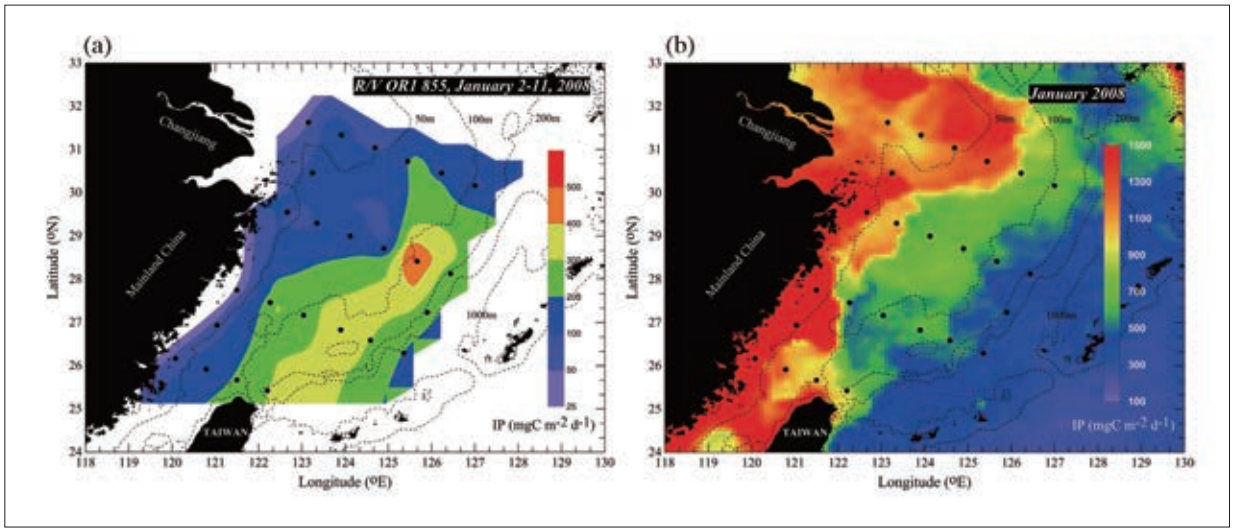


圖4.5.2.7　利用PB-E curve估算之透光層基礎生產力 (a) 與衛星測量數值分布 (b) 之比較 (兩者單位不同) (資料來源：Gong et al., 2017)

Tseng et al. (2020) 估算臺灣海峽透光層中的基礎生產力為123±86 g C m^{-2} $year^{-1}$，並描述各季節的基礎生產力變化，以營養鹽濃度最高的冬季最低，而營養鹽濃度最低的夏季卻是最高，主要是冬季水團垂直混和強，而夏季有光層深度較深所致。Chen et al. (2022) 研究顯示流經臺灣東部的黑潮強度與沿岸湧升現象呈現正相關，而溶解態的無機營養鹽也因湧升而被帶至有光層，尤其是近岸區100m以淺的硝酸鹽濃度最為顯著 (0.49 μM)，相較於大洋區高出178%，也因此促成近岸區浮游植物的生長，葉綠素a濃度高出大洋區達83%，並且以微型浮游植物 (picophytoplankton, <2 μm) 為優勢，造就了此區的高基礎生產力。而位於臺灣海峽南端的臺灣淺灘 (Taiwan Bank)，受到南海暖流與黑潮支流的影響，在夏季時會形成地形湧升將底層營養鹽向上輸送而造就此處的高基礎生產力 (Hsiao et al., 2021)。

近年來雖然利用衛星海洋水色資料可以透過所謂的VGPM模式 (Vertical General Production Model) 間接推算出近即時的全球海洋基礎生產力空間變化資料 (Tilstone et al., 2015; Li et al., 2020)，但是該方式是否能準確地被運用在區域海洋的研究仍然存

疑。有鑑於此，國內也有許多研究探討VGPM應用於臺灣周邊海域的準確性，Shih et al. (2021) 研究指出，由於衛星觀測資料來自於海水表層，基礎生產力在有光層會隨著深度成指數型下降的假設與實測資料可能會有相當的誤差。比較南海的長期實測資料與模式推導估值，結果顯示無論在東北季風或西南季風期間，VGPM的估值都高出實測值約50%，主要的原因在於衛星估算的有光層深度與實測有光層深度並不一致，然而VGPM在水平大範圍、較長時間尺度上的基礎生產力估值是可信的。本研究亦指出基礎生產力與水溫間呈顯著的負相關，氣候變遷造成的暖化在較低緯度的南海將導致基礎生產力的下降。Tseng et al. (2019) 及Lan et al. (2020) 等研究亦針對VGPM模式估算基礎生產力在臺灣周邊海域的適用性進行了相關探討，結果顯示在臺灣海峽、東北角湧昇及黑潮等分區，MODIS Aqua衛星的VGPM基礎生產力估值與實測值間都有良好的相關性，然而在大陸沿岸水區域兩者間的相關性則不顯著。

(3) 仔稚魚與浮游動物

深入的瞭解影響仔稚魚種類組成及分布的原因，以及研究仔稚魚群聚動態與海洋物理及生物環境間的交互作用過程，對於魚類族群動力學、漁業資源管理以及實施海洋保護區等重要課題都相當重要。然而，氣候變遷的影響仍持續發展中，瞭解環境改變對於魚類及仔稚魚所產生的影響程度，為漁業資源管理主要的議題之一。農業部水產試驗所於2003年開始執行「臺灣周邊海域漁場環境監測計畫」(Taiwan Cooperative Oceanic Fisheries Investigations, TaiCOFI)，利用試驗船觀測有系統地建立周邊海域水文與生物時空分布資訊，以期進一步瞭解長期海洋環境變遷與生物棲息間的動態關係。

氣候變遷所造成的水文環境改變可能對仔稚魚群聚組成造成衝擊，例如水溫可能直接影響到成魚產卵的時間、魚卵及仔稚魚的漂浮期長短等，而洋流交匯的消長、海水湧升的強度等亦造成魚類攝食、生殖、成長及產卵的條件改變，進而改變仔稚魚群聚、分布、成長及存活率等特性 (Chen et al., 2016; Tiedemann et al., 2018)。Chen et al. (2021) 利用TaiCOFI資料分析指出，冬季東北季風盛行期間，大陸沿岸水混合水入侵臺灣海峽與黑潮支流形成鋒面，而冷暖水之強弱消長存在明顯的年際變異，影響了每年的鋒面位置，仔稚魚群聚組成主要受海域的水溫及鹽度分布形式共同影響而產生年際變異，兩者有著中度的相關性，然仔稚魚豐度變化與氣候變異指數間無明顯的關係存在。Yen et al. (2022) 分析水產試驗所2007年至2019年於周邊海域蒐集的仔稚魚樣本 (圖4.5.2.8)，發現在2007年至2009年豐度較高的底層魚類仔稚魚，於2010年起已逐漸為表層及中層魚類取代，而表層魚類仔

稚魚豐度呈現變動往上的趨勢，在往後數年都有較好的表現，直至2019年表層性魚種仔稚魚之數量較2015年至2018 年減少許多，但即便豐度下降，仍處於主成分最高的一個分類。利用目前累積的長期資料，觀測到不同水層屬性的仔稚魚組成發生改變，惟與相關性分析結果未能明確指向何環境因子所導致，仍須持續累積資料進行深入的檢視與探討。

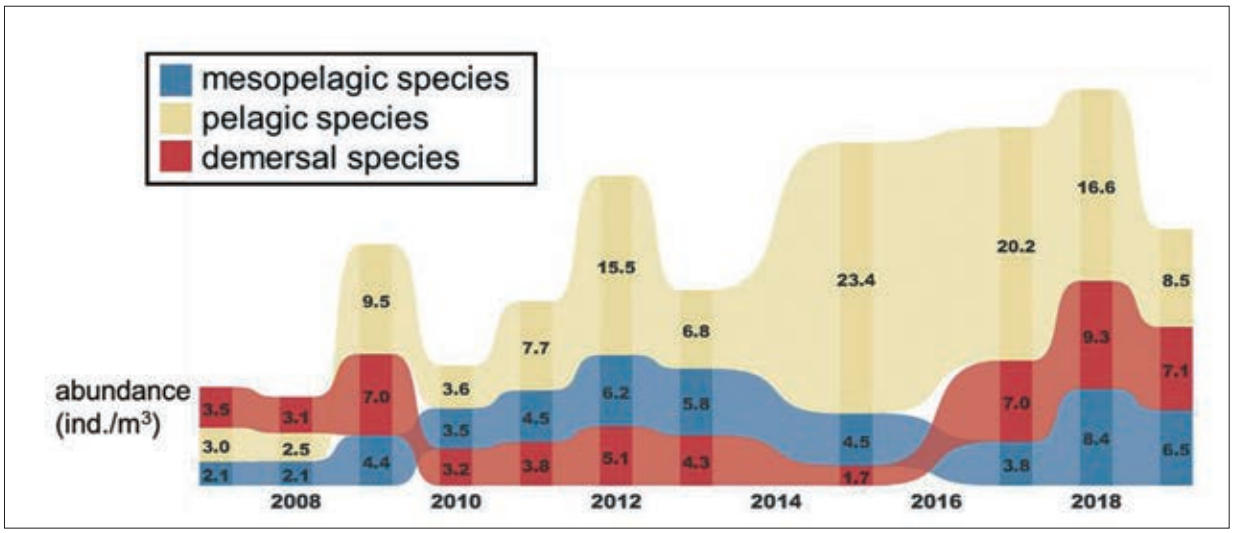


圖4.5.2.8　2007年至2019年臺灣周邊海域表層、中層及底層性的仔稚魚平均豐度變化
(資料來源：Yen et al., 2022)

我國位於西北太平洋的陸棚區，並沒有在大規模氣候現象 (如聖嬰與反聖嬰) 影響的主要範圍內，所以我們似乎無法直接感受到它的威力。但這只是人類的感受而已，透過漁業捕撈所獲得的資訊，我們可以觀察到氣候變遷對於海洋魚類的影響，例如鰻苗加入量之變動 (Ho et al., 2021)，魩仔魚魚種交替，烏魚產卵場及來游量之變動 (Lan et al., 2017)，臺灣淺灘鯖鰺資源起伏 (Hsiao et al., 2021)，烏鯧於臺灣海峽之分布變化 (Mondal et al., 2023) 等現象均與氣候變遷有關。Lee et. al. (2022) 的研究亦指出，鯖鰺魚類、鎖管、帶魚屬、鬼頭刀等主要沿近海漁業資源的總量變化與北太平洋環流振盪 (North Pacific Gyre Oscillation, NPGO) 指數呈正相關，並預測在RCP8.5的情境下，2035年臺灣沿近海總漁獲量預估將下降2.41%。雖然許多研究持續於大型海洋生態系進行仔稚魚長期調查，但氣候變遷造成魚類族群加入量變動其間的機制，以及魚類族群及生態系對於環境衝擊的回復力 (resilience) 為何？仍尚未完全明瞭。在高緯度地區由於魚類相組成相對較單純，例如沙丁魚、鯷魚、鯡魚、鱈魚等單一物種豐度極高，其與環境變遷間之關係較易觀測，相較之下熱帶及亞熱帶沿近海區域較缺乏類似大量出現的種類，因此在臺灣周邊海域魚類族群仔稚魚豐度的年間變化幅度較難以用來檢驗氣候變遷與單一族群資源間的關係。

國內有關於浮游動物與大規模氣候現象間關係的研究，Molinero et al. (2018) 嘗試分析2000年至2012年間東亞冬季季風 (East Asian winter monsoon，EAWM)及太平洋年代際振盪 (PDO) 現象對於東海南部浮游動物中最具代表性的橈足類之影響機制，各因子間的理論影響路徑如圖4.5.2.9所示，東海在冬季期間受EAWM季風所影響，而PDO的「暖相位」(或「正相位」) 期間強化了阿留申低壓 (Aleutian Low) 與西方邊界流，此時期西太平洋表水溫將偏冷，尤其以冬季為甚，因此研究期間東海南部的表水溫也呈現了顯著的年際變化，而水溫的變化與浮游植物的組成密切相關，並透過食物鏈關係影響橈足類的豐度，由此可知氣候變遷將透過水溫與食性關係對橈足類豐度造成影響，反之若氣候變遷情境加劇，向南流入臺灣海峽的冷水受到抑制，亦將造成橈足類組成與豐度的改變。

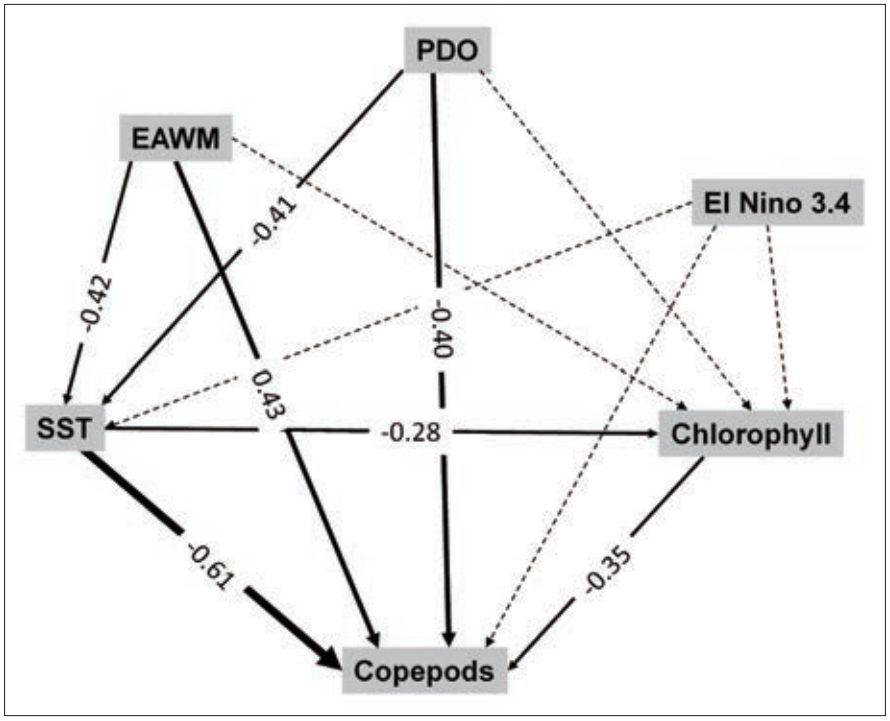


圖4.5.2.9　氣候變遷影響海洋橈足類理論機制，實線為達統計顯著者，係數代表關係的方向與強度。(資料來源：Molinero et al., 2018)

4.5.2.2　我國近年有關海洋生態保育之各種調適作為

聯合國於2015年提出17項「2030永續發展目標」(Sustainable Development Goals，SDGs)，第14項目標即為「保育海洋生態」，倡議人類應維護生物多樣性並防止海洋環境劣化，確保海洋資源的永續發展。以全球性尺度而言，臺灣位處西北太平洋海域，此區的海水異常升溫現象 (Marine Heatwaves) 強度不算高，造成的生物大量死亡

事件或者是棲地環境所受衝擊都不大，而東太平洋則是受衝擊最嚴重的地方 (Smith et al., 2023)。然而，相較於氣候變遷的影響，其實人類活動對於臺灣海域生態系的破壞更為直接、快速與劇烈。例如泥沙灘、河口潟湖、濕地與海草床常面臨工業區、港口與垃圾場等開發案的威脅，紅樹林、珊瑚礁與藻礁常受到汙水排放的影響，而岩礁與大洋受到的人為干擾程度相對較小。在尚未釐清氣候變遷對海洋生物影響機制前，便應該研擬可行的調適與預防策略，將已造成嚴重衝擊的人為因子加以控管，使生態系維持健康狀態，才有機會減輕未來氣候變遷所可能帶來更大的衝擊。我國在因應氣候變遷的海洋生態系調適部分，由於涉略生物、環境、科研、經濟、社會、法規層面甚廣，尚無完整簡單的單一方案可以採用，比較可行的是在各個層面的關鍵點去小小的突破，積沙成塔的效果將逐步累積，對於整體海洋生態系的未來必然會有相當的助益。以下將我國近年有關海洋生態保育的各種調適作為彙整為三大面向，並就各面向做簡要的說明：

1. 維護健全海洋生態系，提昇因應氣候變遷調適能力

劃設海洋保護區 (Marine Protected Area, MPA) 係復育海洋生物多樣性及漁業資源最有效的方法，MPA在各國所劃設面積的比例也被納入2010年生物多樣性公約的《愛知目標》11及2015年《聯合國永續發展目標》的一項目標，用以評估海洋保育工作之成效。2022年召開之第15屆聯合國生物多樣性公約大會，各締約國達成2030年保護至少30%的陸地和海洋的共識，並納入「其他有效保護措施之區域」(Other Effective Conservation Measures, OECMs) 概念，將為了其他目的而劃設、有效管理而一併發揮生態保護功效的面積也納入計算，例如水下文化資產 (沉船)、軍事設施或其他。

截至2023年12月，我國目前有6種類型共69處的海洋保護區 (MPA) (圖4.5.2.10)，海域保護面積約有8.38%，並期公私協力朝30 x 30努力。然而過去我國MPA的主要問題之一，在於缺乏調查與適當管理，僅有少數成功的案例，因此現階段除增加MPA面積外，讓既有保護區發揮實質效果亦相同重要。為此，海洋委員會海洋保育署於2019年起定期召開「臺灣海洋保護區整合平臺」會議，邀請各中央目的事業主管機關與會，並視討論議題邀請地方政府、專家學者與NGO參加，截至2023年累計召開15次會議，議題包含海洋保護區評估指標試算、劃設基準、保護區類型檢視、國際分類標準歸納、海洋生態熱點盤點等，近期尚因應國際保護區趨勢，提出OECM認定、30 x 30聯盟規劃、保護區評鑑機制研議、一保護區一巡守隊等以達跨域合作，提高海洋保護區經營管理效益。

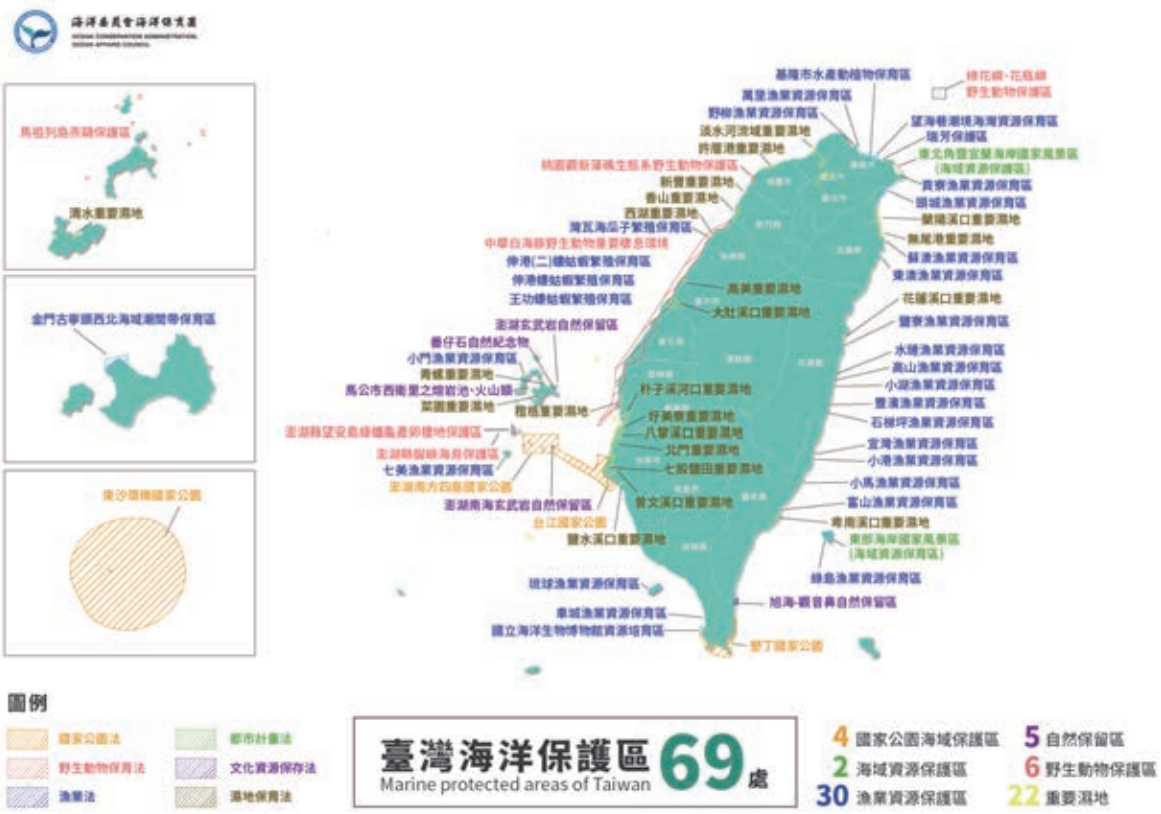


圖4.5.2.10　臺灣各種類型之海洋資源保育區
(資料來源：海洋保育署網頁)

近年有關國內海洋保護區進行了不少的科學研究，Chen et al. (2018) 透過經濟學觀點分析探討臺灣28個漁業資源保護區所提供的生態系服務功能，以貨幣價值予以量化使民眾可更容易真實感受到生態系經濟價值的存在。Chao (2018) 以綠島海洋保護區成功為案例，探討政府推動、中間團體與社區參與之間的協調與資源整合之分析。Chung et al. (2019) 以澎湖南方四島保育區為例，嘗試發展可平衡各方利益的海洋保護區設計與區分模式。Hung et al. (2021) 探討彰化沿海濕地之美食奧螻姑蝦保護區之執行成效，結果顯示螻姑蝦的主要棲地可能已經轉移，而缺乏經費與定期檢視保護區成效也是執行上面對的困難，並對保護區未來經營上提出相關建議。Chung and Jao (2022) 則是回顧臺灣46個海洋保護區的管理架構與實施成效，並提出執行上可加強整合性與永續性的建議。邵廣昭 (2022) 則強調海洋保護區網絡的建置，因為大多物種之幼生為漂浮性，其生活始終漂流、擴散及洄游所歷經之距離及時間長短不同，途中會經歷各種不同的棲地，因此建議以海流系統考慮重點保護區，例如西部海域以中國沿岸冷水影響範圍，東部及南部則以黑潮流系影響範圍優先選擇熱點形成保護區網絡。我國西部沿海離岸風場海域的風機持續建置中，

原有的漁業活動受到限制，使得離岸風場海域成為海洋生物的「類保護區」，如何讓類保護區的功能提升增裕漁業資源，人工建置的馬尾藻藻場將扮演相當重要的角色。水產試驗所近年發展「離岸風場藻貝類養殖之海洋碳匯應用」技術 (圖4.5.2.11)，投入人工藻場的建置研究與應用，成功開發中國半葉馬尾藻及粉葉馬尾藻等2種藻苗繩與藻磚的附苗與育苗技術，並透過模擬離岸風機設置海域表層和底層環境，已掌握快速建置人工藻場的關鍵技術。藻體在生長過程會吸收大量二氧化碳，未來可望貢獻我國的海洋碳匯能力，而人工藻場多層次的立體空間則提供了大量餌料生物的棲息環境，更成為海洋生物重要的產卵場、哺育場及覓食場，能提高海洋生物的多樣性，有助於改善劣化的海洋生物棲地。



圖4.5.2.11　馬尾藻人工藻床試驗與棲息生物
(資料來源：農業部網頁)

2. 建立長期海域生態調查監測體系

綜觀過去我國有關海洋觀測及生態研究相關資料，多分散於政府部門、研究單位等地，資料無法有效利用。為建構完整海洋大數據，海洋委員會轄下之國家海洋研究院於2022年完成建置「國家海洋資料庫及共享平台」(National Ocean Database And Sharing System, NODASS)，目前整合53個資料集涵蓋111個子項，彙集10大類海洋相關核心資料，提供時空查尋、圖資搜尋、生態資料查詢、繪圖套疊、資料動態展示等多元服務，初步達成海洋資料流通共享之政策目標。未來將持續結合人工智慧、深度學習、資料同化與臨近預報之技術，提供立體觀測、實時監測、與整合預測之海洋智慧治理與服務，朝國家智慧治理海洋之目標前進。

在氣候變遷與個別生態系研究的層級，由於需要累積長期生態監測資料作為比較的基準點，首先應寬列充裕資金支持有系統的基礎科學研究，建立長期海域生態調查監測體系。國家海洋研究院於2020年執行「我國海洋生態調查監測網與監測規範建立之整體規劃」(林幸助等人，2020)，研究指出首先應研擬訂定適用不同類型海洋生態系的生態調查與監測規範，第二步驟篩選國內具有代表性且適宜設置長期監測站之區域及地點，進行調查與監測作業，形成臺灣海洋生態監測網。第三則是必須建置海洋生態監測資料庫，建置標準化原始資料及倉儲資料庫，以利未來大眾及研究者共享並深入分析長期生態資料。

建議作為設置長期監測站之熱點篩選依據如下：(1) 已設立保護區；(2) 大眾關注之地點 (如重要保育類動物的熱區)；(3) 各海洋生態系類型中之代表性地點；(4) 已累積長期性觀測資料，並建立生態資料庫之地點；(5) 適宜進行長期生態監測站設置之地點；(6) 考慮北、中與南部之氣候差異及東、西海岸之地理差異；(7) 各類型海洋生態系至少擇一設置長期生態監測站。該報告中針對北海岸、西北海岸、西南海岸、南海岸、東海岸、主要離島、臺灣海峽、花東外海及南海北部 (高屏陸坡)，共提出53個建議設置長期監測站之熱點 (詳閱該報告表3-1)。不同保護區或監測點各有不同層級的主管機關負責，相關的生態調查與監測應由各自的主管機關來負責編列預算及執行。為避免資源重複投入，應通盤檢討各保護區負責機關的人力與經費之情況，配合目前監測規劃，挑選其中部分地點作為海洋生態長期監測站，長期目標是結合全國產、官、學及民眾之力量，形成遍佈於臺灣周邊海域以及主要離島的海洋生態監測網 (圖4.5.2.12)。

海洋公民科學 (citizen science) 是一種公民參與科學調查的方法，透過全國公民在廣泛的區域及時間尺度，擴大科學家執行調查與監測海洋資料的能力，常見的有物種分布調查、外來種紀錄與移除、海洋垃圾、MPA或是敏感生物保育等議題，而實施的內容包含標定、測量、採樣、分析、標識等。海洋保育署有鑑於公民科學家資料蒐集的廣泛性，以及其延伸的教育推廣功能，於2022年研擬「臺灣海洋公民科學家行動策略」，逐步擴展並期望確保海洋公民科學資料的品質與完整性，同時也將引導支持更多民眾投身參與海洋公民科學，一同為海洋環境帶來正向改變。

3. 落實海洋生態系之經營與管理

過去我國海洋保育的工作零星散落在各法規，如《野生動物保育法》、《漁業法》等，亦無法回應現今產生跨領域的問題，而國內數十個海洋保護區除了分散由不同行政

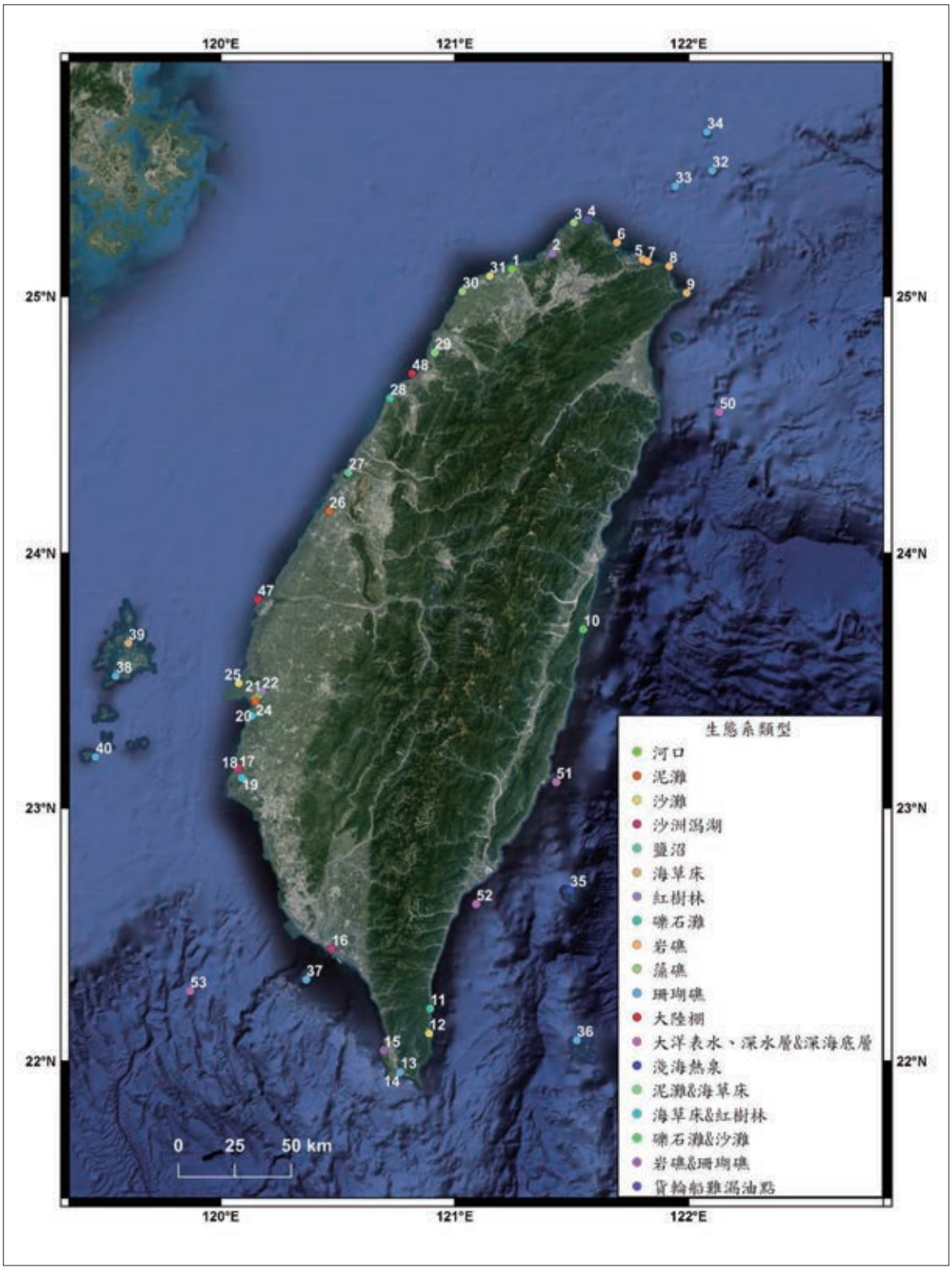


圖4.5.2.12　由各熱點串連而成的臺灣海洋生態調查監測網絡
(資料來源：林幸助等人，2020)

單位主責，也因為缺乏有效執法計畫而多未能達成管理目標。為此，我國甫於2018年新成立「海洋委員會」統合規劃海洋政策與推動海洋事務，並在2019年通過《海洋基本法》後，著手推動《海洋保育法》、《海域管理法》及《海洋產業發展條例》等海洋三法之立法工作，其中《海洋產業發展條例》業於2023年經立法院三讀通過，另《海洋保育法》(草案)，業由行政院於2024年2月15日函送立法院審議，將作為整體海洋保育的專責法律規範。

隸屬海委會之海洋保育署，以持續性的科學基礎、資訊公開、與公私部門合作三項基本原則，檢視臺灣海洋環境與生物的變化，利用科技與群眾參與，建立海洋保育與國人的連結，近年在海洋保育上已有許多創新作為。在推動立法與修法的同時，為能加速推展各項保育工作，海保署擬定各種保育計畫與工作準則，包括「海洋生態系調查指引」、「海洋保育類野生動物救援組織網」、「鯨豚觀察員制度」、「鯨豚保育計畫」、「友善釣魚行動方案」、「白海豚保育計畫」、「黑嘴端鳳頭燕鷗保育計畫」等，並已預告「海龜保育計畫草案」及「三棘鱟保育計畫草案」；新增修訂《海洋野生動物評估分類作業要點》、《海洋野生動物重要棲息環境劃設作業要點》等，做為劃設保護區之基準；配合國際公法發展及新興議題推動《海洋污染防治法》修訂，朝徵收海洋污染防治費、成立海洋污染防治基金、強化陸源廢棄物之源頭管理及海上處理廢棄物等方向努力。以上各項內容可參閱海保署歷年出版之年報。

此外，全國增設16處海洋保育站，召募54 名海洋保育巡查員，致力執行「向海致敬—海岸清潔維護計畫」、「海洋污染監測與應處計畫」、「向海致敬—臺灣海域生態環境守護計畫」等計畫。於110年出版《2021 臺灣海域生態環境報告》，做為監測環境變動的基礎，同時搭配各項海洋廢棄物治理作為，出版了《海洋廢棄物年報》。在公私協力的部分，與諸多民間夥伴合作，包含「海洋保育在地守護計畫」的地方團體、參與環保艦隊的漁民朋友及協助輔導的漁會、參與潛海戰將的各界潛水朋友等，並藉由臺灣鯨讚繪本、海洋生態戀月曆、臺灣百種海洋動物圖鑑等各類出版品，拓展教育推廣之範圍。

近年由於網路社群媒體發達，無論是政府宣導教育或是民間自發性的海洋保育觀念都更容易觸及大眾，也更容易為大眾所接受，例如慢漁 (slow fishing)、底食 (bottom feeder) 原則、臺灣海鮮選擇指南、生態標章、里山里海倡議等，應加強運用社群媒體引導民眾由親海、知海，進而愛海，未來相關保育措施也將更容易推動。

4.5.2.3 海洋生態與氣候變遷之科研缺口

氣候變遷對於海洋生物以及生態系造成的影響，是當今全球科學家最關注的議題。全球氣候變遷的壓力促使海洋生物在個體層次發生演化上的改變，生物的時空分布變異亦將改變其生態系中的地位與功能，此時生態系中的能量流動亦隨之改變，衝擊將由個體傳遞至整個生態系，而水溫上升、海洋酸化、海流改變、成層現象、融冰、海平面上升等因子彼此間並非獨立，對於生物所造成的常為複合式的衝擊 (Baltar et al., 2019)，因此需要一個整合性的理論架構，才能更準確地預測整體的生態系受到衝擊後的改變 (Tittensor et al., 2021)，然而如何將其間的關係量化是相當不容易的。

另一部分的研究則著重於實地現象的觀察記錄與後續的推論。以全球尺度來看，氣候變遷對海洋生物多樣性造成什麼樣的衝擊？Worm & Lotze (2021) 進行文獻回顧，低緯度地區的生物種類會因為高溫衝擊而減少，中緯度地區的多樣性則因為熱帶地區生物向高緯處遷移而變高。而各模式預測都顯示全球中低緯度的地區基礎生產力未來將會持續下降，進而造成生物多樣性及更高營養階層的改變。Williamson & Guinder (2021) 則是將全球海洋區分為13種生態系，並探討氣候變遷對各生態系的影響。Kim et al. (2019) 報導了地中海水溫暖化所造成的海洋生態衝擊，並預測該區水溫將受季風影響而持續上升，Nicolás et al. (2019) 則探討加拿大所屬太平洋海域之鮭魚、螃蟹、貝類等漁業所受衝擊以及其社會經濟面的影響。

回顧近年國內有關氣候變遷與海洋生態的研究，除了珊瑚礁與大洋性的漁業資源有較多資料可供參考外，直接與氣候變遷相關的研究案例仍較少，其中一個主要的原因來自於許多生態系缺乏過去長期背景資料可供比較分析。整體而言，國內有關於海洋中經濟性物種的研究較多，但仍多著重於探討個別物種與因子間關係的基礎研究，較缺乏與其他營養階層關係的探討，也無法瞭解生態系統層面的影響及機制，而有關非經濟物種的研究資料則較少，因此目前國內海洋生態相關研究尚難以建立評估及預測氣候衝擊的模式，需要更多的基礎科學研究的支持和發展。

陸域及海域生態系統之碳儲存可分為土壤、森林及海洋三大碳匯路徑，惟現階段最新版的「中華民國溫室氣體排放清冊報告 (2022年)」中，《土地利用與林業部門》章節內容仍僅收錄土壤與森林之碳匯，有關海洋系統則尚未發展符合MRV (measurement,

reporting, verification, MRV) 機制之量化標準，亦無法盤點其碳儲量與變動情形，因此尚未納入清冊。為此，在行政院成立之「淨零排放路徑專案工作組」運作架構下之「環境系統之碳匯」技術領域小組，由農業部主政於2023年投入執行「海洋與漁業碳匯技術及效益評估研究」，針對海洋及漁業碳匯量進行基礎調查及整體評估，目前執行「建立海洋及濕地碳匯量測方法學及本土碳匯係數」、「海域養殖藻類的碳匯技術及應用效益評估」、「發展複合式養殖經營模式」以及「建構增匯管理措施及水產植物復育技術」等研究計畫，最終目標是完成建立符合臺灣產業特性之海洋碳匯量測方法學，以提升海洋碳匯效益量化之可行性，期能精準計算我國整體碳匯量。

4.5.3　結語

近年來，氣候變遷導致四季遞嬗特性改變、溫度及雨量變化幅度加大，這些效應對農業生產之衝擊逐漸顯現，引發關注。然而，比起單調物種組成的農業系統，自然生態系的複雜網絡蘊含的韌性可能模糊化衝擊與其強度。氣候變遷是長時間尺度的變化，比較基線之建立需及時，觀測亦需考慮一致性、長期及整體性。國內現有之生物監測資料多缺乏上述特性，致使生態系的評估缺乏全面性及準確性；即使經由模型方法進行預測推估，亦缺少充足的調校與驗證資料。少數較長期之監測計畫，如森林動態樣區相關監測、高海拔草原生態系樣區、臺灣繁殖鳥類大調查等，不但為學界提供重要資料，亦有可觀之研究產出，可作為氣候變遷衝擊的評估基礎。目前國科會推動長期社會生態研究 (Long-Term Socio-Ecological Research, LTSER)，已逐步於各地啟動長期監測研究，監測主要目標為生態系統與社會系統的交互作用。建議推動長期監測工作。

此外，隨著運算科技之進步，各種氣候變遷衝擊模型之建立與運算有大幅進步，然而越是精細的模型，所需的生物參數越多，尤其是生物物候及其調控機制實為不可或缺的資訊。目前我們對生物的生理調控機制之瞭解，大多來自實驗室中少數模式生物，其參數難具代表性。我們建議國內除了模式物種的深入研究外，應加強推動自然生態系中主要物種之基礎生物學研究，以提升氣候變遷衝擊評估之精準度。

降低氣候變遷對於海洋生態系的衝擊，最迫切的是建立生態環境本身的韌性。以全球性尺度而言，臺灣位處西北太平洋海域，此區的海水異常升溫衝擊 (Marine

Heatwaves) 強度不算高，造成的生物大量死亡事件或者是棲地環境所受影響都不大，而東太平洋則是受衝擊最嚴重的地方 (Smith et al., 2023)。相較於氣候變遷的影響，其實人為活動對於臺灣海域生態系的破壞更為直接、快速與劇烈。例如泥沙灘、河口潟湖、濕地與海草床常面臨工業區、港口與垃圾場等開發案的威脅，紅樹林、珊瑚礁與藻礁常受到汙水排放的影響，而岩礁與大洋受到的人為干擾程度相對較小。因此，在科學研究尚未釐清氣候變遷對海洋生物影響機制前，便應先行研擬可行的預防性策略，先將已造成嚴重衝擊的人為因子加以控管，使生態系能維持健康狀態，才有機會減輕未來氣候變遷所可能帶來更大的衝擊。

我國在因應氣候變遷的海洋生態系調適部分，由於涉略層面甚廣，我國在各項海洋相關施政之成效如何？是否有進步或必須改進之處？又如何進行整體成效評估？或許海洋健康指數 (Ocean Health Index, OHI) 的評估架構值得參考。OHI於2012 年首度發表於自然 (Nature) 期刊後，成為各國學者關注之指標，相關研究陸續發展 (Branch et al., 2013; O'Hara et al., 2020) 。為了能全球性跨尺度比較各項指標，資料來源與品質受到一定的限制，因此許多國家開始依據在地條件進行不同的加權與調整，以品質更好的數據建立適用該國的、獨立的海洋健康評估系統 (OHI+)。因此，建議未來以臺灣自身的統計及監測資料建構OHI+，較能正確適宜的反映臺灣實際的海洋健康狀況，針對劣勢區塊提出改善建議，提供管理者宏觀的視野作為海洋治理與施政之參考，進而提升整體海洋環境的健康程度。

參考文獻

王文千 (2019)。**臺灣繁殖鳥類氣候變遷脆弱性評估** (碩士論文)。國立成功大學。

林奐宇 (2022)。**氣候變遷下經濟林最適產區評估與天然林關鍵棲地監測之研究**。行政院農業委員會林業試驗所。

林政道 (2022)。**臺灣高海拔山區草原生態系調查與監測**。行政院農業委員會林務局。

林幸助、邵廣昭、黃守忠 (2020)。**我國海洋生態調查監測網與監測規範建立之整體規劃**。國家海洋研究院成果報告書 (NAMR109012)，p.p. 98。

林俊成、吳孟珊、詹為巽、徐韻茹 (2019)。因應氣候變化發展氣候智慧林業。**林業研究專訊，26**(4)， 68-75。

林瑞興、呂亞融、柯智仁、曾子榮、楊正雄、陳宛均 (2016)。**2016臺灣鳥類紅皮書名錄**。行政院農業委員會特有生物研究保育中心。

林務局 (2015)。**第四次森林資源調查報告**。行政院農業委員會林務局。

林務局 (2019)。**林業永續多元輔導方案**。行政院農業委員會林務局。

林務局 (2018)。**國土生態保育綠色網絡建置計畫 (107至110年)**。行政院農業委員會林務局。

林務局 (2022a)。**國土生態保育綠色網絡建置計畫 (111至114年)**。行政院農業委員會林務局。

林務局 (2022b)。**新興竹產業發展計畫 (111至114年)**。行政院農業委員會林務局。

林業試驗所 (2019)。**國家植物園方舟計畫 (108至111年度)**。農業部林業試驗所。

林業試驗所 (2023)。**國家植物園方舟計畫 (112至115年度)**。農業部林業試驗所。

邵廣昭 (2022)。海洋的「類保護區」，要比缺乏有效管理的「海洋保護區」更能發揮保護功能！**獨立評論@天下**。https://opinion.cw.com.tw/blog/profile/52/article/11976

陳子英 (2016)。**臺灣水青岡林生物多樣性調查及保育機制之研究**。行政院農業委員會林務局。

陳子英 (2021)。**氣候變遷下高易危生態系調適、監測與保育之研究計畫—臺灣水青岡生態系之調適、監測與保育研究**。行政院農業委員會林務局。

陳元龍、林德恩、林瑞興、楊正雄 (2017)。**2017臺灣陸域爬行類紅皮書名錄**。行政院農業委員會特有生物研究保育中心。

徐堉峰 (2021)。**氣候變遷下高易危生態系調適、監測與保育之研究計畫—以臺灣水青岡與槲櫟森林的昆蟲為例**。行政院農業委員會林務局。

許育誠 (2020)。**全球氣候變遷鳥類遷徙路徑研究—太魯閣國家公園候鳥及留鳥**。內政部營建署太魯閣國家公園管理處。

許皓捷、李培芬、張原謀、彭鈞毅 (2010)。**太魯閣國家公園鳥類群聚之研究 (二)**。內政部營建署太魯閣國家公園。

楊懿如 (2010)。臺灣蛙類的分布及棲地利用。**臺灣博物季刊，29**(3)，46-49。

趙仁方 (2012)。**台東越冬斑蝶生態教育研習暨監測計畫**。行政院農委會林務局臺東林區管理處。

趙偉村 (2022)。**合歡山冷杉林森林動態樣區複查委辦計畫**。行政院農業委員會林務局。

臺灣植物紅皮書編輯委員會 (2017)。**2017臺灣維管束植物紅皮書名錄**。行政院農業委員會特有生物研究保育中心。

鄭錫奇、張簡琳玟、林瑞興、楊正雄、張仕緯 (2017)。**2017臺灣陸域哺乳類紅皮書名錄**。行政院農業委員會特有生物研究保育中心。

盧道杰、趙芝良、徐霈馨、葉美智、陳瑋苓、羅柳墀、何立德、陳維立、賴欣欣、裴家騏、徐嘉鴻、張弘毅、王中原 (2012)。保護 (留) 區經營管理效能評估計畫初期成果。**臺灣林業，38**，20-28.

Ani, C. J., & Robson, B. (2021). Responses of marine ecosystems to climate change impacts and their treatment in biogeochemical ecosystem models. *Marine Pollution Bulletin, 166,* 112223. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112223

Branch, T. A., Hively, D. J., & Hilborn, R. (2013). Is the ocean food provision index biased? *Nature, 495*(7442), E5-E6. https://doi.org/10.1038/nature11974

Baltar, F., Bayer, B., Bednarsek, N., Deppeler, S., Escribano, R., Gonzalez, C. E., Hansman, R. L., Mishra, R. K., Moran, M. A., Repeta, D. J., Robinson, C., Sintes, E., Tamburini, C., Valentin, L. E., & Herndl, G. J. (2019). Towards integrating evolution, metabolism, and climate change studies of marine ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution, 34*(11), 1022-1033. https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.07.003

Bryndum‐Buchholz, A., Tittensor, D. P., Blanchard, J. L., Cheung, W. W., Coll, M., Galbraith, E. D., Jennings, S., Maury, O., & Lotze, H. K. (2019). Twenty‐first‐century climate change impacts on marine animal biomass and ecosystem structure across ocean basins. *Global Change Biology, 25*(2), 459-472. https://doi.org/10.1111/gcb.14512

Bang, A. H., Kuo, C., Wen, C. K., Cherh, K., Ho, M., Cheng, N., Chen, Y., & Chen, C. A. (2021). Quantifying coral reef resilience to climate change and human development: An evaluation of multiple empirical frameworks. *Frontiers in Marine Science, 7*. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.610306

Chang‐Yang, C., Sun, I., Tsai, C., Lu, C., & Hsieh, C. (2016). ENSO and frost codetermine decade‐long temporal variation in flower and seed production in a subtropical rain forest. *Journal of Ecology, 104*(1), 44-54. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12481

Chan, S., Shih, W., Chang, A., Shen, S., & Chen, I. (2019). Contrasting forms of competition set elevational range limits of species. *Ecology Letters, 22*(10), 1668-1679. https://doi.org/10.1111/ele.13342

Chao, R. F. (2018). The transformation of organizational partnership in the management of common-pool resource: a case study of marine protected areas in green island, Taiwan. *Revista de Cercetare i Interven ie Socială, 60*, 122-142.

Chen, Y., Chen, W., Wang, Y., & Lee, M. (2016). Winter assemblages of ichthyoplankton in the waters of the East China Sea shelf and surrounding Taiwan. *Fisheries Science, 82*(5), 755-769. https://doi.org/10.1007/s12562-016-1012-x

Chen, J., Lin, Y., & Chuang, C. (2018). Improving the management of Taiwanese fishery resource conservation zones based on public perceptions and willingness to pay for ecosystem services. *Journal of Coastal Conservation, 22*(2), 385-398. https://doi.org/10.1007/s11852-017-0586-5

Chen, Y., Pan, C., Wang, Y., Tseng, H., Su, B., & Lee, M. (2021). Interannual variability of larval fish assemblages associated with water masses in winter in the Taiwan Strait during 2007–2013. *Fisheries Science, 87*(1), 131-144. https://doi.org/10.1007/s12562-020-01489-z

Chen, K., & Lin, H. (2022). High-resolution mapping of seagrass biomass dynamics suggests differential response of Seagrasses to fluctuating environments. *Diversity, 14*(11), 999. https://doi.org/10.3390/d14110999

Chen, C., Lu, C., Jan, S., Hsieh, C., & Chung, C. (2022). Effects of the coastal uplift on the Kuroshio ecosystem, eastern Taiwan, the western boundary current of the North Pacific Ocean. *Frontiers in Marine Science, 9*. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.796187

Chiu, M. C., C. W. Pan, & H. J. Lin, 2017: A framework for assessing risk to coastal ecosystems in Taiwan due to climate change. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 28,* 57-66. doi: 10.3319/TAO.2016.06.30.01(CCA).

Chiu, C., Tzeng, H., Lin, C., Chang, K., & Liao, M. (2022). Spatial distribution and climate warming impact on abies kawakamii forest on a subtropical island. *Plants, 11*(10), 1346. https://doi.org/10.3390/plants11101346

Chung, H. E., Gullett, W., & Rose, G. (2019). Development of a model for enhancing justice in MPA designation and zoning and its application to Taiwan's south Penghu marine National Park. *Coastal Management, 47*(6), 570-593. https://doi.org/10.1080/08920753.2019.1669101

Chung, H. E., & Jao, J. (2022). Improving marine protected area governance: Concerns and possible solutions from Taiwan's practice. *Marine Policy, 140*, 105078. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105078

Dang, V. D., Cheung, P., Fong, C., Mulla, A. J., Shiu, J., Lin, C., & Nozawa, Y. (2020). Sea urchins play an increasingly important role for coral resilience across reefs in Taiwan. *Frontiers in Marine Science, 7.* https://doi.org/10.3389/fmars.2020.581945

Feeley, K. J., Silman, M. R., Bush, M. B., Farfan, W., Cabrera, K. G., Malhi, Y., Meir, P., Revilla, N. S., Quisiyupanqui, M. N., & Saatchi, S. (2011). Upslope migration of andean trees. *Journal of Biogeography, 38*(4), 783-791. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02444.x

Gong, G., Chen, T., & You, W. (2017). Mixing control on the photosynthesis-irradiance relationship and an estimate of primary production in the winter of the East China Sea. Terrestrial, *Atmospheric and Oceanic Sciences, 28*(6), 1041-1053. https://doi.org/10.3319/tao.2017.06.28.01

Heneghan, R. F., Hatton, I. A., & Galbraith, E. D. (2019). Climate change impacts on marine ecosystems through the lens of the size spectrum. *Emerging Topics in Life Sciences, 3*(2), 233-243. https://doi.org/10.1042/etls20190042

Heneghan, R. F., Galbraith, E., Blanchard, J. L., Harrison, C., Barrier, N., Bulman, C., Cheung, W., Coll, M., Eddy, T. D., Erauskin-Extramiana, M., Everett, J. D., Fernandes-Salvador, J. A., Gascuel, D., Guiet, J., Maury, O., Palacios-Abrantes, J., Petrik, C. M., Du Pontavice, H., Richardson, A. J., … Tittensor, D. P. (2021). Disentangling diverse responses to climate change among global marine ecosystem models. *Progress in Oceanography, 198,* 102659. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102659

Hogan, J., Zimmerman, J., Thompson, J., Uriarte, M., Swenson, N., Condit, R., Hubbell, S., Johnson, D., Sun, I., Chang-Yang, C., Su, S., Ong, P., Rodriguez, L., Monoy, C., Yap, S., & Davies, S. (2018). The frequency of cyclonic wind storms shapes tropical forest dynamism and functional trait dispersion. *Forests, 9*(7), 404. https://doi.org/10.3390/f9070404

Ho, C. W., Huang J. S., & Lin H. J. (2018) Effects of tree thinning on carbon sequestration in mangroves. *Marine and Freshwater Research 69,* 741-750. https://doi.org/10.1071/MF17151

Ho, C., Wu, L., Lu, Z., Lu, B., & Lan, Y. (2021). Potential effect of the intrusion of the Kuroshio current into the South China Sea on catches of Japanese eel (Anguilla japonica) in the South China Sea and Taiwan Strait. *Journal of Marine Science and Engineering, 9*(12), 1465. https://doi.org/10.3390/jmse9121465

Hung, Y., Chang, Y., Truong, M. N., Yang, J., Hsu, T., & Hsiao, S. (2021). Improving marine protected area with coordination platform: Mud shrimp conservation in Taiwan case study. *Marine Policy, 131,* 104607. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104607

Hsiao P. Y., Shimada T., Lan K. W., Lee M. A., & Liao C. H. (2021) Assessing summertime primary production required in changed marine environments in upwelling ecosystems around the Taiwan Bank. *Remote Sensing, 13*(4):765. https://doi.org/10.3390/rs13040765

Hsiung, K., Kuo, Y., Lin, Y., Tseng, Y., & Han, Y. (2022). North equatorial current and Kuroshio velocity variations affect body length and distribution of the Japanese eel Anguilla japonica in Taiwan and Japan. *Scientific Reports, 12*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-06669-8

Keshavmurthy, S., Kuo, C., Huang, Y., Carballo-Bolaños, R., Meng, P., Wang, J., & Chen, C. A. (2019). Coral reef resilience in Taiwan: Lessons from long-term ecological research on the coral reefs of kenting National Park (Taiwan). *Journal of Marine Science and Engineering, 7*(11), 388. https://doi.org/10.3390/jmse7110388

Keshavmurthy, S., Chen, T., Liu, P., Wang, J., & Chen, C. A. (2022). Learning from the past is not enough to survive present and future bleaching threshold temperatures. *Science of The Total Environment, 852,* 158379. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158379

Kim, G., Seo, K., & Chen, D. (2019). Climate change over the Mediterranean and current destruction of marine ecosystem. *Scientific Reports, 9*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-55303-7

Kuo, C., Su, Y., Liu, H., & Lin, C. (2021). Assessment of climate change effects on Alpine summit vegetation in the transition of tropical to subtropical humid climate. *Plant Ecology, 222*(8), 933-951. https://doi.org/10.1007/s11258-021-01152-2

Kuo, C., Liu, Y., Su, Y., Liu, H., & Lin, C. (2022). Responses of Alpine summit vegetation under climate change in the transition zone between subtropical and tropical humid environment. *Scientific Reports, 12*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-17682-2

Lan, K., Zhang, C. I., Kang, H. J., Wu, L., & Lian, L. (2017). Impact of fishing exploitation and climate change on the grey mullet Mugil cephalus stock in the Taiwan Strait. *Marine and Coastal Fisheries, 9*(1), 271-280. https://doi.org/10.1080/19425120.2017.1317680

Lan, K., Lian, L., Li, C., Hsiao, P., & Cheng, S. (2020). Validation of a primary production algorithm of vertically generalized production model derived from multi-satellite data around the waters of Taiwan. *Remote Sensing, 12*(10), 1627. https://doi.org/10.3390/rs12101627

Lee, M., Huang, W., Shen, Y., Weng, J., Semedi, B., Wang, Y., & Chan, J. (2021). Long-term observations of Interannual and decadal variation of sea surface temperature in the Taiwan Strait. *Journal of Marine Science and Technology, 29*(4). https://doi.org/10.51400/2709-6998.1587

Lee, M. A., S. Mondal, J. H. Wu & M. Boas, (2022). Total Catch Variability in the Coastal Waters of Taiwan in relation to Climatic Oscillations and possible impacts. *Journal of the Fisheries Society of Taiwan, 49,* 127-143. https://doi.org/10.29822/JFST.202206_49(2).0006

Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science, 320*(5884), 1768-1771. https://doi.org/10.1126/science.1156831

Li, C., Chytrý, M., Zelený, D., Chen, M., Chen, T., Chiou, C., Hsia, Y., Liu, H., Yang, S., Yeh, C., Wang, J., Yu, C., Lai, Y., Chao, W., & Hsieh, C. (2013). Classification of Taiwan forest vegetation. *Applied Vegetation Science, 16*(4), 698-719. https://doi.org/10.1111/avsc.12025

Li, S., Chen, P., Huang, J., Hsueh, M., Hsieh, L., Lee, C., & Lin, H. (2018). Factors regulating carbon sinks in mangrove ecosystems. *Global Change Biology, 24*(9), 4195-4210. https://doi.org/10.1111/gcb.14322

Li, W., Tiwari, S. P., El-Askary, H. M., Qurban, M. A., Amiridis, V., ManiKandan, K. P., Garay, M. J., Kalashnikova, O. V., Piechota, T. C., & Struppa, D. C. (2020). Synergistic use of remote sensing and modeling for estimating net primary productivity in the Red Sea with VGPM, Eppley-VGPM, and CbPM models Intercomparison. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 58*(12), 8717-8734. https://doi.org/10.1109/tgrs.2020.2990373

Lin, T., Hamburg, S. P., Lin, K., Wang, L., Chang, C., Hsia, Y., Vadeboncoeur, M. A., Mabry McMullen, C. M., & Liu, C. (2011). Typhoon disturbance and forest dynamics: Lessons from a northwest Pacific subtropical forest. *Ecosystems, 14*(1), 127-143. https://doi.org/10.1007/s10021-010-9399-1

Lin, W., Lin, Y., Lien, W., Wang, Y., Lin, C., Chiou, C., Anthony, J., & Crossman, N. (2014). Expansion of protected areas under climate change: An example of mountainous tree species in Taiwan. *Forests, 5*(11), 2882-2904. https://doi.org/10.3390/f5112882

Lin, Y., Wu, C., & Han, Y. (2017). A combination mode of climate variability responsible for extremely poor recruitment of the Japanese eel (Anguilla japonica). *Scientific Reports, 7*(1). https://doi.org/10.1038/srep44469

Lin, H., Lee, C., Peng, S., Hung, M., Liu, P., & Mayfield, A. B. (2018). The effects of el niño - southern oscillation events on intertidal seagrass beds over a long - term timescale. *Global Change Biology, 24*(10), 4566-4580. https://doi.org/10.1111/gcb.14404

Lin, C., & Chiu, C. (2019). The relic Trochodendron aralioides Siebold & Zucc. (Trochodendraceae) in Taiwan: Ensemble distribution modeling and climate change impacts. *Forests, 10*(1), 7. https://doi.org/10.3390/f10010007

Lin, H.-Y, (2020). *Predicting the potential distributions of plant species and forests in Taiwan under present and future climates.* Doctoral dissertation. National Taiwan University, Taipei, Taiwan.

Lin, W., Wu, J., & Lin, H. (2020). Contribution of unvegetated tidal flats to coastal carbon flux. *Global Change Biology, 26*(6), 3443-3454. https://doi.org/10.1111/gcb.15107

Lin, C., Kao, Y., Lin, W., Ho, C. & Lin, H. (2021a). Effects of Pneumatophore Density on Methane Emissions in Mangroves. *Forests, 12,* 314. https://doi.org/10.3390/f12030314

Lin, W., Chiu, M., Lin, C., & Lin, H. (2021b). Effects of sediment characteristics on carbon dioxide fluxes based on interacting factors in Unvegetated tidal flats. *Frontiers in Marine Science, 8.* https://doi.org/10.3389/fmars.2021.670180

Liu, P., Chang, H., Mayfield, A. B., & Lin, H. (2022). Assessing the effects of ocean warming and acidification on the seagrass Thalassia hemprichii. *Journal of Marine Science and Engineering, 10*(6), 714. https://doi.org/10.3390/jmse10060714

Lu, M., & Huang, J. (2023). Predicting negative effects of climate change on Taiwan' s endemic bumblebee Bombus formosellus. *Journal of Insect Conservation, 27*(1), 193-203. https://doi.org/10.1007/s10841-022-00415-1

Martini, F., Chang‐Yang, C., & Sun, I. (2022). Variation in biotic interactions mediates the effects of masting and rainfall fluctuations on seedling demography in a subtropical rainforest. *Journal of Ecology, 110*(4), 762-771. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13833

McRae, C. J., Keshavmurthy, S., Meng, P., Rosset, S. L., Huang, W., Chen, C. A., Fan, T., & Côté, I. M. (2022). Variable responses to chronic and acute elevated temperature of three coral species from reefs with distinct thermal regimes. *Marine Biology, 169*(7). https://doi.org/10.1007/s00227-022-04071-6

McLean, M., Mouillot, D., Maureaud, A. A., Hattab, T., MacNeil, M. A., Goberville, E., Lindegren, M., Engelhard, G., Pinsky, M., & Auber, A. (2021). Disentangling tropicalization and deborealization in marine ecosystems under climate change. *Current Biology, 31*(21), 4817-4823.e5. https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.08.034

Molinero, J. C., Tseng, L., Abbate, C. L., Ramirez-Romero, E., & Hwang, J. (2018). Interannual changes in zooplankton echo subtropical and high latitude climate effects in the southern East China Sea. *PLOS ONE, 13*(5), e0197382. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197382

Mondal S., Lee M. A., Chen Y. K., & Wang Y. C. (2023) Ensemble modeling of black pomfret (Parastromateus niger) habitat in the Taiwan Strait based on oceanographic variables. *PeerJ, 11,* e14990. https://doi.org/10.7717/peerj.14990

Nabuurs, G., Delacote, P., Ellison, D., Hanewinkel, M., Hetemäki, L., & Lindner, M. (2017). By 2050 the mitigation effects of EU forests could nearly double through climate smart forestry. *Forests, 8*(12), 484. https://doi.org/10.3390/f8120484

Nicolas T., S. Rashid, P. Le Billon & W. Cheung, (2019). Climate change impact on Canada's Pacific marine ecosystem: The current state of knowledge. *Marine Policy. 104,* 163-176. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.02.035

O'Hara, C. C., Scarborough, C., Hunter, K. L., Afflerbach, J. C., Bodtker, K., Frazier, M., Stewart Lowndes, J. S., Perry, R. I., & Halpern, B. S. (2020). Changes in ocean health in British Columbia from 2001 to 2016. *PLOS ONE, 15*(1), e0227502. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227502

Rau, E., Gardiner, B. A., Fischer, F. J., Maréchaux, I., Joetzjer, E., Sun, I., & Chave, J. (2022). Wind speed controls forest structure in a subtropical forest exposed to cyclones: A case study using an individual-based model. *Frontiers in Forests and Global Change, 5.* https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.753100

Shiao, M., Chuang, M., Yuan, H., & Wang, Y. (2015). Effects of weather variation on the timing and success of breeding in two cavity-nesting species in a subtropical montane forest in Taiwan.

The Auk, 132(3), 671-684. https://doi.org/10.1642/auk-15-10.1

Shih, Y., Shiah, F., Lai, C., Chou, W., Tai, J., Wu, Y., Lai, C., Ko, C., & Hung, C. (2021). Comparison of primary production using in situ and satellite-derived values at the SEATS station in the South China Sea. *Frontiers in Marine Science, 8.* https://doi.org/10.3389/fmars.2021.747763

Smith, K. E., Burrows, M. T., Hobday, A. J., King, N. G., Moore, P. J., Sen Gupta, A., Thomsen, M. S., Wernberg, T., & Smale, D. A. (2023). Biological impacts of marine Heatwaves. *Annual Review of Marine Science, 15*(1), 119-145. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-121437

Tilstone, G. H., Taylor, B. H., Blondeau-Patissier, D., Powell, T., Groom, S. B., Rees, A. P., & Lucas, M. I. (2015). Comparison of new and primary production models using SeaWiFS data in contrasting hydrographic zones of the northern North Atlantic. *Remote Sensing of Environment, 156,* 473-489. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.013

Tiedemann, M., Fock, H. O., Döring, J., Badji, L. B., & Möllmann, C. (2018). Water masses and oceanic eddy regulation of larval fish assemblages along the Cape Verde frontal zone. *Journal of Marine Systems, 183,* 42-55. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.03.004

Tittensor, D. P., Novaglio, C., Harrison, C. S., Heneghan, R. F., Barrier, N., Bianchi, D., Bopp, L., Bryndum-Buchholz, A., Britten, G. L., Büchner, M., Cheung, W. W., Christensen, V., Coll, M., Dunne, J. P., Eddy, T. D., Everett, J. D., Fernandes-Salvador, J. A., Fulton, E. A., Galbraith, E. D., … Blanchard, J. L. (2021). Next-generation ensemble projections reveal higher climate risks for marine ecosystems. *Nature Climate Change, 11*(11), 973-981. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01173-9

Tsai Y. C., M. C. Wu & Y. Chang, (2018). *Intrusion of the Kuroshio Into Northeast of Taiwan.* IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, Spain, 2018, (pp. 5602-5605). https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519293

Tsai, H., Rubenstein, D. R., Fan, Y., Yuan, T., Chen, B., Tang, Y., Chen, I., & Shen, S. (2020). Locally-adapted reproductive photoperiodism determines population vulnerability to climate change in burying beetles. *Nature Communications, 11*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-020-15208-w

Tsai, P., Ko, C., Chia, S. Y., Lu, Y., & Tuanmu, M. (2021). New insights into the patterns and drivers of avian altitudinal migration from a growing crowdsourcing data source. *Ecography, 44*(1). 75-86. https://doi.org/10.1111/ecog.05196

Tseng H. C., W. L. You, C. X. Chang, K. Y. Chuang, H. M. Yeh, & G. C. Gong, (2019). *Applicability assessment for global standard algorithm of marine primary production in the seas surrounding Taiwan around the Tropic of Cancer in the northwest Pacific.* OCEANS 2019 - Marseille, Marseille, France, (pp. 1-4). https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2019.8867177.

Tseng, H., You, W., Huang, W., Chung, C., Tsai, A., Chen, T., Lan, K., & Gong, G. (2020). Seasonal

variations of marine environment and primary production in the Taiwan Strait. *Frontiers in Marine Science, 7.* https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00038

Wang, Y., & Wu, C. (2018). Discordant multi-decadal trend in the intensity of the Kuroshio along its path during 1993–2013. *Scientific Reports, 8*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-018-32843-y

Wang, Y., & Wu, C. (2019). Enhanced warming and intensification of the Kuroshio extension, 1999–2013. *Remote Sensing, 11*(1), 101. https://doi.org/10.3390/rs11010101

Williamson P. & Guinder V. A., (2021). Chapter 5 – *Effect of climate change on marine ecosystems.* In: Letcher T. M. (Ed.), The Impacts of Climate Change: a comprehensive study of physical, biophysical, social, and political issues, (pp 115-176). Elsevier.

Worm B. & H. K. Lotze, (2021).Chapter 21 - *Marine biodiversity and climate change. Editor*(s): Trevor M. Letcher, Climate Change (Third Edition), Elsevier, (pp 445-464).

Wu, C. (2013). Interannual modulation of the Pacific decadal oscillation (PDO) on the low-latitude western North Pacific. *Progress in Oceanography, 110,* 49-58. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2012.12.001

Wu, C.-R., Wang, Y.-L., & Chao, S.-Y. (2019). Disassociation of the Kuroshio Current with the Pacific Decadal Oscillation Since 1999. *Remote Sens. 11,* 276. https://doi.org/10.3390/rs11030276

Xu, W., Jiang, J., Lin, H., Chen, T., Zhang, S., & Wang, T. (2023). Assessment of the impact of climate change on endangered conifer tree species by considering climate and soil dual suitability and interspecific competition. *Science of The Total Environment, 877,* 162722. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162722

Yang, S., Lu, C., Tang, S., Das, R. R., Sakai, K., Yamashiro, H., & Yang, S. (2020). Effects of ocean acidification on coral Endolithic bacterial communities in Isopora palifera and Porites lobata. *Frontiers in Marine Science, 7*. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.603293

Yen, K., Pan, C., Chen, C., & Lien, W. (2022). Spatiotemporal characteristics of fish larvae and juveniles in the waters around Taiwan from 2007 to 2019. *Animals, 12*(15), 1890. https://doi.org/10.3390/ani12151890

Zou, Y., Chen, K., & Lin, H. (2021). Significance of belowground production to the long-term carbon sequestration of intertidal seagrass beds. *Science of The Total Environment, 800,* 149579. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149579

4.6 健康

陳保中[1、2]、王淑麗[1]、吳威德[1]、林靜君[2]、蔡宗霖[1]、吳瑞軒[3]

[1]國家衛生研究院國家環境醫學研究所、[2]臺灣大學公共衛生學院、[3]國家災害防救科技中心

摘要

氣候變遷健康相關影響雖已有不少研究成果，同時也有跨國跨議題的國際合作研究，也關注特定脆弱族群的健康議題，但對於極端天氣事件對心理健康、婦幼與青少年健康乃至其它可能的健康衝擊等相關主題之研究仍有所不足 (WHO, 2021)。

極端天氣事件帶來的水患與高溫是傳染性疾病的主要驅動因素，對人體健康有不良影響 (如因颱風帶來的強降雨所導致之洪患/土石流，臺灣鉤端螺旋體病例數增加；氣溫升高，造成登革熱疫情爆發，於2015年全國43,784名民眾感染，約有228名民眾因此喪命)；高溫事件不只造成熱傷害，亦有可能增加呼吸和心臟血管死亡的風險 (如因受極端低溫影響，臺灣2021年死亡人數較2020年增加萬餘人)。氣候變遷除直接或間接影響人體的心理健康問題外，也可能會誘發新的急慢性和長期精神疾病。然而我國目前對於氣候變遷與人體健康的研究仍然相對不足，針對易受氣候變遷影響下之不同健康議題的相關科學研究需積極投入。

前一版科學報告 (童慶斌等人，2017) 及國衛院論壇氣候變遷與健康議題專書 (氣候變遷與健康委員會，2017) 闡明氣候變遷對人類健康危害之三個分級，從初級的氣候直接健康危害 (如熱浪、森林大火與水災有關的死亡與創傷)，到二級間接影響 (例如：乾旱、飲用水和糧食產量變化、節肢動物和病原體的分佈改變使傳染性疾病增加)，以及三級影響 (氣候變化，影響到人的健康與社會秩序)；著重於傳染病 (病媒威脅) 與非傳染病 (熱危害)、水資源的安全性、以及闡述健康脆弱族群與健康不平等問題，並建議未來政策需要的因應上，要以聚焦的方式規劃。因此本節初步針對氣候變遷對健康影響進行描述，並嘗試以心血管疾病、傳染性疾病、呼吸系統疾病及心理健康疾病為例，鋪陳勾

勒 (1) 相關研究現況剖析、(2) 釐清問題與挑戰、(3) 提出調適科研缺口之衝擊評估流程暨調適架構藍圖，提供國內後續研究方向訂定之參考依據，期許未來透過聚焦深入之相關生化科研成果，輔助支持調適規劃與策略擬定，進而有效降低未來氣候變遷對人類健康衝擊之整體影響，以提升國民健康福祉與韌性。

4.6.1 氣候變遷影響人體健康之氣候特徵與途徑

氣候變遷會改變短期氣象條件及長期氣候條件，進而影響空氣、水等自然環境品質，並會受到建成環境的影響，如都市空間內的綠覆蓋率、建物隔熱通風與交通建設規劃等，均為影響都市或建物增溫、空氣品質及水環境中病媒滋生程度等之自然環境系統變項。環境品質變差會導致健康系統中的傳染病、熱危害、過敏性疾病、心肺疾病等風險增加 (龍世俊等人，2018)。氣候變遷危害因子可透過多樣直接及間接的管道，進而威脅人體健康 (顏采如等人，2019)。直接管道如極端高溫事件促使熱相關疾病及心血管疾病就診率與死亡率上升。另外，至今全球平均溫度已較工業化前升高約1°C，此也間接地提高極端天氣事件發生頻率和環境惡化程度 (Haustein et al., 2017; Watts et al., 2019)，進而造成近年的出生世代於各階段的成長期及生存期，都將面臨嚴峻氣候變遷下健康劣化風險的挑戰 (Watts et al., 2019)，例如氣候變遷促使持續增溫的背景下，再經由自然環境及建成環境之中介影響，可能導致傳染病蔓延、空氣污染惡化、糧食產量變化、生理與心理的壓力增加等，若生活於都市擁擠環境條件及通風能力較差的建築物內，將更加速傳染病傳播速率及提高疾病就診率與死亡率 (龍世俊等人，2018; Ruszkiewicz et al., 2019; Romanello et al., 2021)。除了自然環境變遷外，社會環境變遷也為必須關注的間接管道類型，例如氣候變遷不斷提高季節氣候變異幅度，臺灣面臨高齡化及社會與醫療資源失衡，將更加重老人或糖尿病患原有病情 (吳佩芝，2019)。城鄉地區及不同脆弱族群 (尤其是老人、小孩、婦女、慢性疾病族群、社經地位較低、戶外勞工及原住民族等對象) 遭受氣候變遷暴露風險與健康危害的衝擊不均之問題，也將日益惡化 (WHO, 2013)。

4.6.2 氣候變遷對人體健康之衝擊評估

近期國內外科學界已建置多樣評估方法探討氣候變遷影響下與人體健康有關之衝擊，並將成果致力應用於研發完善的健康調適策略。龍世俊等人 (2018) 彙整文獻 (表4.6.2.1) 後，依據衝擊健康的氣候條件類型，分為溫度變化、降雨變化、及溫度與降雨協同影響等三類進行探討。「臺灣氣候變遷科學報告2017第二冊—衝擊與調適面向」(童慶斌等人，2017) 及國家衛生研究院論壇出版之氣候變遷與健康議題專書 (氣候變遷與健康委員會，2017) 描述氣候變遷影響人體健康疾病，可概分為心血管疾病、傳染性疾病、呼吸系統疾病及心理健康等，因此本節首要聚焦於此4種健康議題類型，分別彙整近期氣候變遷健康衝擊評估之發展，以供國內後續執行健康風險辨識之參考。

表4.6.2.1　氣候變遷關聯健康衝擊影響面向及議題

氣候特徵	物理條件	健康衝擊議題
溫度變化	極端高溫	脫水現象 總心血管疾病就診率與死亡率 心房顫動 缺血性心臟疾病就診率 心肌梗塞死亡率及發作頻率 熱中風就診率 缺血性中風就診率 總呼吸系統疾病就診率及死亡率 慢性肺阻塞性肺病就診率 心理健康危害
	極端低溫	總心血管疾病死亡率 總呼吸系統疾病就診率及死亡率
降雨變化	不同飲水傳染之水媒疾病	眼睛感染 呼吸道感染 腸疾病 過敏性皮膚疾病 傳染病蔓延季節及範圍
溫度及降雨協同影響	氣溫及濕度變化	蟲媒傳染病(瘧疾[瘧蚊]、登革熱[白線斑蚊及埃及斑蚊]、日本腦炎[三斑家蚊、環紋家蚊及白頭家蚊])

(資料來源：龍世俊等人，2018)

4.6.2.1 心血管疾病

近期國際積極投入探討溫度與心臟血管疾病死亡率之相關性的研究，例如美國密西

根州的研究成果指出，當達到極端高溫閾值時，與心肌梗塞住院比例增加有關 (Ogbomo et al., 2017)；於伊朗的研究顯示低溫對心臟血管死亡率有顯著影響 (Moghadamnia et al., 2018)；在波多黎各調查則發現高溫同時與中風和心臟血管疾病的死亡風險有關 (Méndez-Lázaro et al., 2018)；近期調查西班牙52個城市的研究中，也發現暴露於高、低溫氣候條件下的程度與觸發心臟血管和呼吸系統疾病而導致死亡的風險有關 (Iñiguez et al., 2021)，目前國際上對極端溫度事件並無一定界定標準，閾值標準之訂定需視當地溫度之百分位數而定，極端低溫為1、5、及10百分位溫度值，而極端高溫則為99、 97、95及90百分位溫度值。我國衛生福利部在因應氣候變遷之健康衝擊政策白皮書中所訂定高溫預警行動方案分級標準 (衛生福利部，2018)，主要依據2018年2月中央氣象局公告標準進行高溫預警行動方案分級與低溫三級警戒範圍設定，且近期已配合標準進行低溫警戒值滾動修正 (表4.6.2.2)，據此高低溫閾值建議民眾採取相對應防護措施，以避免疾病死亡風險。

表4.6.2.2　極端高、低溫預警行動方案分級標準

警戒範圍	溫度	
	高溫	低溫
定義	地面最高氣溫上升至攝氏36°C以上之現象	低溫係指海拔200公尺以下之平地最低氣溫低於10°C以下的現象
黃色燈號 (預警期)	預測當日最高溫達36°C	預測當日平地最低氣溫10°C以下
橙色燈號 (警戒期)	符合以下兩種情境之一： 1. 預測當日最高溫達38°C以上 2. 預測最高溫達36°C以上，並已持續3日以上	符合以下兩種情境之一： 1. 預測當日平地最低氣溫6°C以下 2. 預測平地最低氣溫10°C以下且連續24小時平地氣溫低於 12°C
紅色燈號 (應變期)	預測最高溫達38°C以上，並已持續3日以上	預測平地氣溫連續24小時低於 6°C

(資料來源：衛生福利部因應氣候變遷之健康衝擊政策白皮書 [2018]，更新自交通部中央氣象署。)

極端溫度影響心臟血管疾病機制為主動脈血壓上升 (Hintsala et al., 2014)，極端高溫對人體健康之影響為立即性效應，而極端低溫對人體健康之影響則具有延遲效應 (Chung et al., 2015)。每日溫度變異性 (每日高低溫差值) 亦因氣候變遷而提高，Kim et al. (2016) 研究結果顯示當溫差增加1°C時，不同疾病之死亡風險均隨之提升 (總心血管疾病增加0.81%，總呼吸系統疾病增加0.90%)。

我國參與的數項跨國研究中，其中一項成果主要探討自1972年至2009年極端溫度

造成的人體不適現象，也發現臺灣民眾暴露於高溫下之心臟血管疾病和呼吸系統死亡風險增加率有高度相關 (Chung et al., 2017)；另一項分析五大洲27個國家567都市的病患死亡病例研究成果同樣指出，極端高、低溫與心臟血管有關疾病的死亡風險具正相關，其中每1,000筆死亡案例分別有2例因極端高溫及9例由極端低溫的天氣條件所引發 (Alahmad et al., 2023)。Yang et al. (2018) 使用臺灣2008年至2010年死亡登記檔案資料庫的研究發現，當日平均溫度較低時，對全因及心臟血管疾病死亡率具短期 (4天至6天) 影響 (Yang et al., 2018)。另一項研究指出，當平均溫度低於27°C時，心臟病和代謝綜合症候群患者 (cardiologic and metabolic syndromes, CMS) 因院外心臟驟停 (out-of hospital cardiac arrest, OHCA) 急診就醫 (emergency room visit, ERV) 的風險將會增加 (Wang et al. 2018)。依據臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 (Taiwan Climate Change Projection and Information Platform, TCCIP) 提供之臺灣歷史氣候重建資料 (Taiwan ReAnalysis Downscaling data, TReAD) 計算結果，自2016年至2020年間，臺灣平均溫度與平均最高溫分別增加0.11°C與0.32°C，溫度的上升、驟降及突如其來的溫差，易使心血管、呼吸道與慢性疾病患者，發生心肌梗塞或氣喘等病症猝發，甚至造成猝死。林于凱等人 (2015) 研究指出，我國全死因及心血管疾病之死亡風險主要受到低溫暴露影響，其中低溫下造成的心血管疾病死亡率更高於全死因。再以地區性細分，極端低溫導致的死亡風險以桃竹苗地區最高；雲嘉南及高屏地區雖可觀察到極端高溫導致全死因死亡，但心血管死亡效應並未顯著受到高溫影響；然花東地區的心血管死亡則與高溫呈現顯著相關。依據黃鈴雅等人 (2012) 研究推論，本世紀我國高溫天數將會越來越多，故低溫導致的死亡事件比例將會減少，但因人口老化趨勢，未來由極端高溫觸發的死亡比例將可能逐漸增加。萬擎等人 (2016) 透過藉由羅吉斯迴歸找出對重大心血管不良事件具顯著影響的氣候及環境因子，結果指出顯著變數包含二氧化氮、$PM_{2.5}$、風速及能見度等，其中能見度呈現負相關，說明能見度越低越容易引發心血管不良事件。當溫度提高，會增加二次空氣污染物質(如臭氧及細懸浮微粒)的生成，另陽光入射量增加、雲層量減少及降雨量降低，則會延長空氣污染物質的停留時間，人體暴露於空氣污染物質會提高心血管疾病死亡率及發病率 (Franchini & Mannucci, 2012; Dong et al., 2013; Beelen et al., 2014; Zhang et al., 2015)，係因當細懸浮微粒及超細懸浮微粒透過穿透肺泡進入血液循環後，對心臟功能造成損傷，進而引發血栓及動脈粥樣硬化等健康危害 (龍世俊等人，2018)，顯示溫度上升的氣候條件下，仍會經由不同中介因子對心血管疾病患者產生影響。另一值得探討的方向是，極端高溫條件下，因昏迷、意識不清或OHCA急診送醫的病患，其每小時暴露相對風險在滯後16小時至18小時達到峰值，顯示

因周圍環境變化所引起之急性健康反應風險在每日層級與每小時層級可能有所不同，應進一步比較確認以擬訂極端環境條件之最適應的措施 (Wang et al., 2021)。

現國內雖已設置極端高、低溫預警行動方案，但此最高溫與最低溫閾值標準範圍缺乏實際的本土健康科研之科學實證支持，且除了每日溫度外，並無提及其他氣候變遷氣象指標 (如：溫差、相對濕度等)。因此，我國健康領域科學研究對於心血管疾病之最高溫與最低溫風險閾值訂定需持續投入更多科學分析予以佐證實務上的風險判定能力，建議未來可整合如溫差、濕度、輻射及熱綜合指數等氣候指標，一併進行風險驅動關聯性之分析與探討，並建立極端溫度對應死亡風險之分區資訊，以作為各分區後續建構高低溫預警系統及衛生部門調適策略研擬之參考依據。

4.6.2.2　傳染性疾病

全世界約有58%與人類有關的傳染病會因氣候災害發生而提高傳染強度。氣溫升高有助於疾病病原體和媒介的生存、繁殖和分佈，並且會改變病原體及媒介的傳輸方式和棲息地範圍 (Metcalf et al., 2017)。氣候變遷導致的極端天氣事件 (如洪水、乾旱、變暖、熱浪、森林大火及海平面上升等)，會提高病原體的生命力及致病力，並會加強人類接觸的頻率與影響免疫力。這說明氣候危害事件發生時，會經由影響特定傳播類型導致特定病原體疾病傳播度惡化 (如氣溫升高情境下，透過影響蚊蟲傳播進而造成登革熱或屈公病等蟲媒性傳染病傳播強度及廣度提升之情形發生) (圖4.6.2.1)，這說明氣候危害事件發生時，會經由影響特定傳播類型導致特定病原體疾病傳播度惡化 (如氣溫升高情境下，透過影響蚊蟲傳播方式及區域進而造成登革熱或屈公病等蟲媒性傳染病傳播強度及廣度提升之情形發生)，詳細氣候危害影響途徑暨相關文獻可參閱MoraLAB互動式網頁 (Mora et al., 2022)。

因氣候變遷導致強降雨事件頻繁發生，進而增加大量地表逕流，其會進一步透過水體自然連動及循環機制，匯聚大量沉積物及營養物質導致藻類過度繁殖，而影響水生生物穩定性及水質；或強降雨造成原水濁度過高，使淨水系統無法有效移除水中致病原；受損的污水及防洪設施，可能促使強降雨衍生之地表逕流將病原體引入下水道、地下水或流域，進而污染供水與飲水水質 (Pörtner et al., 2022) 或食物鏈，提高水媒疾病的染病風險 (Shea et al., 2007; Hess et al., 2020)，例如強降雨事件導致河口水生環境較不穩

定，因而直接及間接促使病原體種群變化，國內研究指出日均降雨量與腺病毒檢出率呈正相關 ($r^2 \geq 0.75$) (Shih et al., 2021)。另外，水患事件也可能間接提高水媒疾病染病風險，除人體接觸污染的地表水、洪水、動物排泄物外 (Suk et al., 2020)，若災民因避災而與齧齒類動物共存於避災區，也可能提高感染鉤端螺旋體風險 (Watson et al., 2007)，鉤端螺旋體病亦為未來需持續關注的傳染性疾病。國內2009年莫拉克風災時，暫居於避難所2週以上的災民，其阿米巴性痢疾致病風險即顯著增加約20% (從36.8%增為56.1%; p=0.001) (Lin et al., 2015)，此也顯示大型災害避難者同時受到外在飲用水品質下降及自身免疫力降低的危害影響，而具較高的罹病風險。另外，當颱風季節降雨量每日超過80mm時，志賀桿菌病罹病率也顯著增加為原來兩倍 (Chen et al., 2022)。

降雨不均或降雨量減少會形成乾旱，而間接影響植物病原菌的生態系統 (Patz et al., 2005; Ebi & Paulson, 2007)，以及病媒蟲的分布區域與物種的消長 (Easterling et al., 2000)，從而影響疾病傳播之時節及範圍。以蟲媒介傳播疾病 (Vector-borne diseases, VBD) 為例，早春的高溫及高降雨量的氣候變化，促進病媒蚊繁殖並加強西尼羅河病毒 (West Nile virus, WNV) 在鳥類和蚊子族群間的擴散範圍與速度，進而使西尼羅河病毒感染病例於2018年暴增兩千多例。同樣與氣候條件具極大關聯性的登革熱，為國內重要之病媒傳播疾病之一，其中增溫、濕度提升和降雨量增加等氣候條件有利於登革熱病毒傳播，甚至延長登革熱的感染時期 (Wang et al., 2020)。臺灣登革熱病例發生高峰期多發生在每年九月至十二月間 (Lin et al., 2012a)，受氣候變遷溫度及濕度變化影響，將促使登革熱盛行的空間及時間尺度改變 (Wu et al., 2007)。白線斑蚊雖為登革熱、屈公病及茲卡病毒的中度傳播媒介，且特別好發於人口居住及活動密集區，但其生物適應環境變化能力強，故也能於郊區及農村發現蹤跡，甚至可隨氣候條件改變而進一步將病毒傳播至偏鄉地區 (Semenza & Suk, 2018)。除降雨天數外，近年研究發現空氣污染物質如PM_{10}最小濃度、$PM_{2.5}$最小濃度等，除影響人類免疫系統作用外，也可能透過延長病媒蚊繁殖及登革熱病毒生命週期，進而提升傳播強度 (Lu et al., 2022)。

增溫氣候條件下被觀察到有利提高沙門氏菌繁殖速度及染病數 (Cherrie et al., 2018)，例如志賀氏菌為亞洲、非洲及拉丁美洲常見病菌之一，感染機率與增溫幅度為顯著關聯的線性增加，其中溫度達33°C至37°C時的致病力最強 (Badr et al., 2023)。而高溫與高濕度同時存在的氣候條件則有利延長食媒性疾病 (Food-borne diseases, FBD) 病原體生存時間、繁殖能力與傳染力，例如曲狀桿菌為已開發國家民眾腹瀉最常見的致

病菌之一，在高溫與頻繁降雨交互作用下，提升曲狀桿菌存活時間與擴展分布的地理空間。依據研究推估結果，北歐地區曲狀桿菌染病病例數直至2040年末，可能相較基期(2000年至2015年) 增加25%，而2080年則可能倍增至196% (Kuhn et al., 2020)。

氣候變遷下極端氣候事件發生的頻率與強度為傳染性疾病風險的主要驅力，然而我國對氣候條件驅動的傳染性疾病傳播管道、中介致病因子及特定疾病風險間之暴露閾值及其相互連結性，仍需投入更多科研能力強化基礎資料之建置，包含釐清易染病族群之脆弱因子及空間分佈，以促進健康調適策略之擬定與執行。

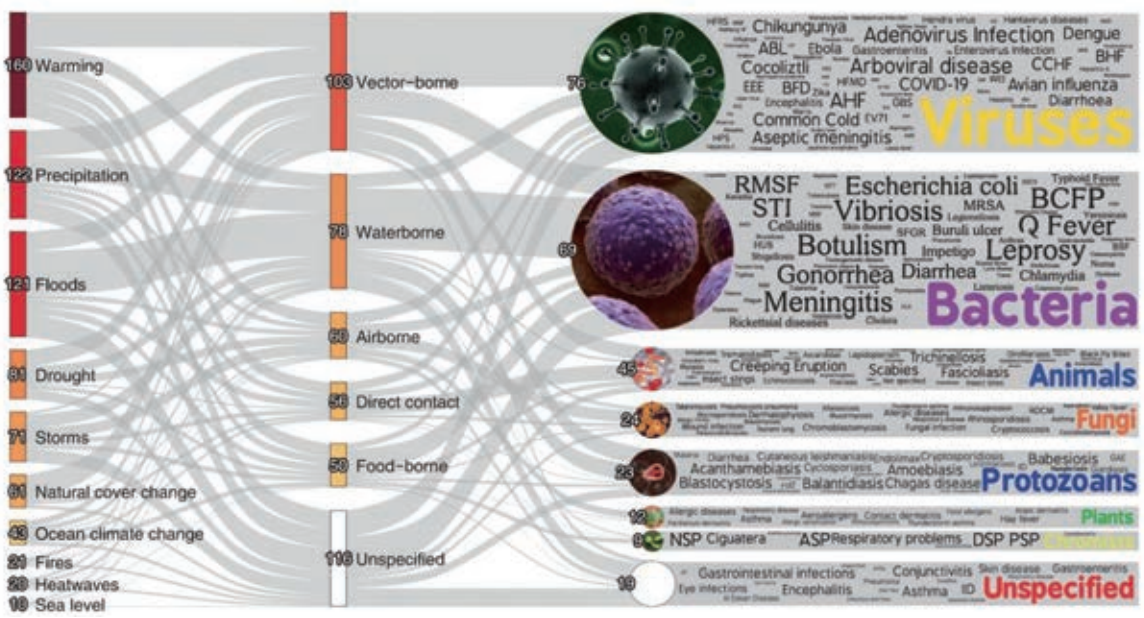


圖4.6.2.1　氣候危害通過影響特定傳播類型導致特定病原體疾病衝擊的途徑

註：線條的粗細與特定的致病性疾病數量成正比。直帶顏色越深表示疾病數量的比例越高。每個節點的數字表示特定的致病性疾病的種類數量 (資料來源：Mora et al., 2022)

4.6.2.3　過敏性呼吸系統疾病及慢性阻塞性肺病

氣候變遷會影響空氣污染物濃度及傳播路徑，例如颱風與雷暴易致使花粉粒破裂，而提高花粉過敏症患者吸入高濃度過敏原的風險，並導致潛在氣喘發作。此外，氣候變遷也會影響過敏原植物物種之授粉模式和花粉量，並透過人口移動而擴展呼吸系統疾病的發生範圍及時間 (D'Amato et al., 2020)；海平面上升則會提高海岸社區的室內濕度，引發居住環境轉為潮濕及有利黴菌滋生，居民呼吸系統健康風險也因此可能增加30%至

50% (Demain, 2018)；相較夏季平均溫度的環境，由熱浪導致的慢性肺病死亡風險約提高為1.8%至8.2%之間 (Witt et al., 2015)；當室內溫度升高至平均溫度以上，將容易導致中度至重度慢性阻塞性肺病 (Chronic Obstructive Pulmonary Disease, COPD) 的患者發生呼吸困難、咳嗽和咳痰惡化 (McCormack et al., 2016)。氣候條件也影響著其他室外空氣污染物，以地面臭氧 (Ozone, O_3) 來說，會增加氣喘發作的頻率及對感染的易感性，並促進COPD生成。美國環境保護署 (United States Environmental Protection Agency) 指出，O_3會提高氣喘發作的頻率及對病原體的易感性，長期接觸臭氧不僅會促使肺部發炎及促進慢性阻塞性肺病生成，也會增加因呼吸系統疾病而死亡的風險，此與高溫天數 (> 32°C) 的多寡緊密相關，並且在室內溫度與室內空氣污染 (包括$PM_{2.5}$和NO_2) 交互作用下，將對健康產生更大的負面效應 (McCormack et al., 2016)。

都市化與人類活動促使溫室氣體排放，間接提高空氣中細懸浮微粒 (particulate matter 2.5 , $PM_{2.5}$) 濃度 (空氣品質變遷資訊請參閱第二章2.7節及第三章3.6節)。另外，土地利用與土地覆蓋變遷也會使沙塵暴發生頻率與強度增加 (Shukla et al., 2019)，而提高大氣中的懸浮微粒濃度。此亦會引致人體過敏性呼吸系統疾病的罹病風險 (Haines & Ebi 2019; Solomon & LaRocque, 2019)。因此，氣候與空污因子交互作用下對呼吸道疾病死亡率及氣喘就診率的影響實不容忽視 (Sheffield et al., 2011; De Sario et al., 2013; Zhang et al., 2015)。在工業化國家已觀察到空氣污染觸發的環境系統變化與增加過敏性呼吸道疾病 (包括氣喘和鼻炎) 罹病率有關，而開發中國家的罹病率也持續攀升 (Cecchi et al., 2020; D'Amato et al., 2020; Fairweather et al., 2020)。在兒童健康領域的研究中，證實一氧化氮、二氧化氮 (NO_2) 和$PM_{2.5}$與兒童肺功能惡化有關 (D'Amato et al., 2020)。

國內空氣污染物質與呼吸系統疾病相關性研究結果指出，空氣污染加劇將造成過敏性結膜炎 (Allergic Conjunctivitis, AC) 和過敏性鼻炎 (Allergic Rhinitis, AR) 之風險增加 (Hsieh et al. 2020; Zhong et al. 2019)，其中NO_2、O_3 和氣溫變化與結膜炎發病率呈正相關，而鼻炎則主要與NO_2濃度呈正相關。AC與AR之過敏性患者應注意周圍環境的空氣污染和天氣變化，並需進行相應的調適作為 (如降低濕度)。另一研究則指出，因綠地空間存在較多的過敏原，而可能使孩童AR致病風險顯著提高約8.4%，包含戶外溫濕度變化亦是AR主要的致病因子 (Lee et al., 2020)。空氣污染 (PM_{10}、$PM_{2.5}$和NO_2濃度增加) 會導致COPD患者的肺功能和血氧飽和濃度下降，並提高肺氣腫嚴重程度 (Tran et al., 2022)。依據研究發現，PM_{10}、$PM_{2.5}$和NO_2的10年暴露濃度會顯著誘發低血氧症狀

(Exercise induced oxygen desaturation)，另PM_{10}和$PM_{2.5}$與肺氣腫的嚴重程度、以及肺氣腫患者的動態性肺過度充氣情形 (Dynamic hyperinflation) 相關，但短期暴露則未觀察到顯著影響 (Lee et al., 2022)。

國外對氣候變遷導致空氣污染物濃度及傳播路徑改變，進而觸發呼吸系統及慢性阻塞性肺疾病的風險評估已有相當程度科研投入及證據論述，然國內目前仍多著墨於後端空氣污染與氣象因子對健康之共同影響機制，而未針對起因，亦即釐清氣候變遷下氣象因子確實如何影響空氣污染物生成及其傳輸進行深入探討，這將無法對於國內氣候變遷環境確係經由影響空氣品質，進而造成呼吸系統健康衝擊提出有力證據支持，建議未來可考量於多樣氣候變遷推估情境下，進行不同季節空氣污染物質動態與疾病風險間的關聯性預測分析，以作為後續研擬適合特定時期及範圍的調適因應策略之基礎。

4.6.2.4　心理健康

氣候變遷會直接或間接導致身心壓力 (physical and mental stress) (圖4.6.2.2)。除了可能加劇民眾原存在的心理健康問題，也會誘發新的急慢性和長期精神疾病 (Clayton et al., 2017)。對於弱勢或較敏感的族群，包括婦女、老人、兒童、具精神疾病史、低收入或社交網路缺乏等脆弱族群，在氣候變遷背景下，將可能使其更容易罹患精神有關疾病 (Torres &d Casey, 2017)。對於曾經歷極端天氣事件的兒童而言，其心理健康的影響不僅是最常見的創傷後壓力症候群，通常也伴隨著憂鬱及焦慮的症狀 (Barkin et al., 2021)。因此除生理的影響外，心理影響亦為另一人體健康領域需投入關注之層面。國



圖4.6.2.2　全球氣候變遷直接和間接影響與腦部疾病因素示意圖
(資料來源：Ruszkiewicz et al., 2019)

外研究發現，氣候變化將造成憂鬱、焦慮、創傷後壓力症候群、物質使用和自殺比率等之增加 (Ruszkiewicz et al., 2019)，其中在氣溫高於20°C的情境時，若單日溫度每升高1°C，將可能會導致約70人自殺 (Carleton, 2017)。調查2002年至2012年約200萬美國居民的資料發現，心理健康的優劣與短期暴露於極端天氣、氣候暖化和熱帶氣旋等事件的程度有關；該項研究指出，若每月氣溫從原本30°C以下增加為超過30°C時，會提高心理疾病患病機率；整合美國與墨西哥資料也發現，溫度變化和自殺呈現線性關係，當月均溫 (average monthly temperature) 每增加1°C，其月均自殺率 (monthly suicide rate) 會隨之增加約0.68%至2.1% (Burke et al., 2018)。Kim et al. (2019) 在分析12個國家共341個地區的都市資料後，論證較高的環境溫度與自殺風險的增加有關。

現階段國內僅有少數研究探討高溫與精神疾患者住院率增加之風險關聯性 (陳永明，2018; Sung et al., 2011; Sung et al., 2013a)。陳永明 (2018) 之研究係針對溫度與重鬱症罹病風險進行關聯性評估，其運用TCCIP所推估RCP8.5情境資料，結合地理資訊系統進行氣候變遷情境下未來各鄉鎮重鬱症風險之空間分析，該項結果指出重鬱症最低風險溫度閾值界限為20°C至23°C，且長期居住於高溫地區會顯著增加罹病風險。而Chen et al. (2019) 進一步觀察分析指出，因臺灣民眾長期暴露於高低溫環境下，當年均溫高於中位數23°C的地區 (圖4.6.2.3)，每增加1°C會導致重鬱症 (major depressive disorder) 的發生率增加約7%，且對65歲以上的族群發病率之影響更高，其中男性屬於高風險群；而在20歲至64歲的族群中，則是女性的風險較高。而重鬱症累積發病率在溫度介於20°C至23°C的地區居民中最低，居住於溫度大於23°C或是小於20.3°C的地區民眾，則顯示具有較高的累積發病率 (圖4.6.2.4)。

除氣候因子直接影響外，受災後的心理健康也為另一需關注議題。美國在經歷過卡崔娜颶風 (Hurricane Katrina) 災害後，導致心理健康疾病之盛行率增加約4% (Obradovich et al., 2018)。國內研究文獻顯示，因2009年的莫拉克颱風而撤離的青少年，在3個月之後約有25.8%患有創傷後壓力症候群，同時也存在更嚴重的憂鬱及行為相關問題 (Yang et al., 2011)。而較年長的原住民，在風災過後一年的憂鬱症盛行率從43.3%，些微上升至46.6%。另以年長原住民在風災前的心理健康為比較基準，原本在風災前心理健康的年長原住民，其中8%罹患創傷後壓力症候群，約27.3%則患有憂鬱症 (Chen et al., 2015)。而王俊豪 (2014) 針對莫拉克與凡那比颱風災區的農村居民對氣候災害帶來公共衛生衝擊的感受情形及對災後心理健康的影響之調查結果顯示，居民若對於災後環境衛生污染與非傳染性

疾病災情嚴重程度感受越深，對其心理健康狀況影響也會越高。

未來國內宜針對各項氣候因子及災害類型，對直接及間接觸發心理疾病之影響關聯性投入更多研究，並予以深入探討及論證，藉此進一步研擬心理疾病相對衍生路徑之調適策略。

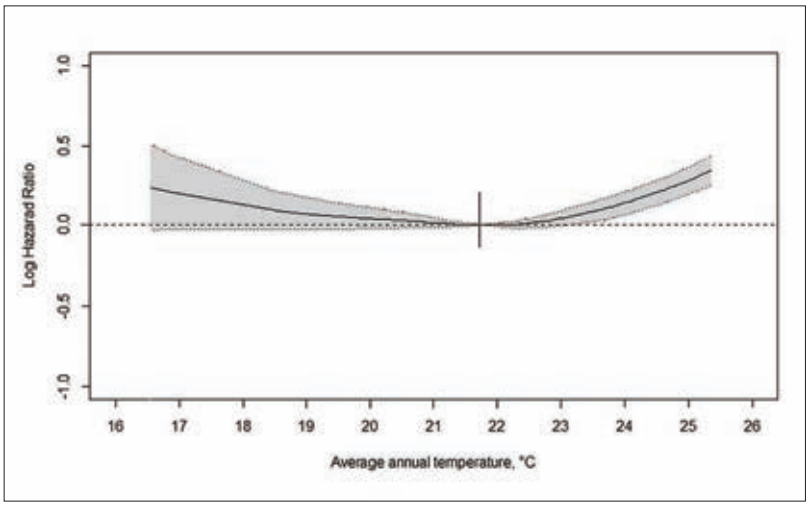


圖4.6.2.3　溫度與重鬱症發病率的反應曲線長期暴露於溫度和重鬱症發病率的劑量－反應曲線。註：實線表示對數風險比，灰色區域表示95%信賴區間。(資料來源：Chen et al., 2019)

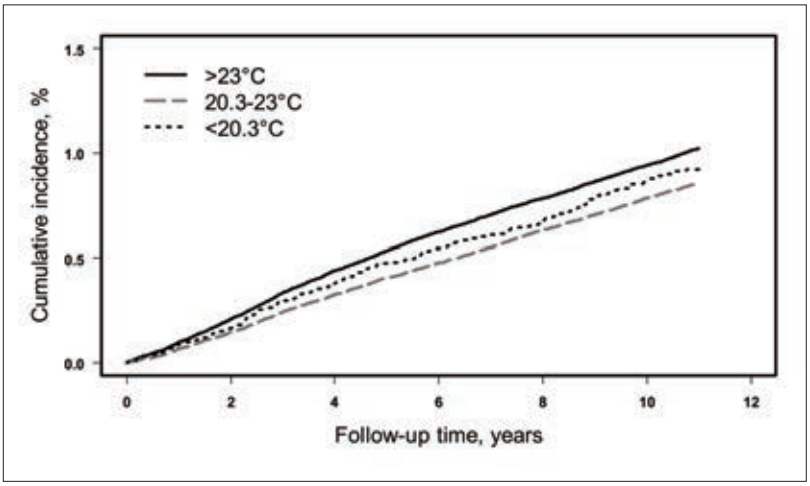


圖4.6.2.4　臺灣三種溫度區間臺灣民眾重鬱症的累積發病率
(資料來源：Chen et al., 2019)

4.6.3 氣候變遷與健康調適

目前積極推動人體健康及公共衛生調適的城市仍多屬國民所得較高的國家，餘全球多數城市則尚未對氣候變遷之健康調適作為採取積極規劃及行動，因此目前健康調適發展，包括認知、預算、規劃及行動等範疇仍有許多努力空間，特別是經濟相對弱勢國家更需加強著重 (Araos et al., 2016)。世界衛生組織 (WHO) 於2015年，以醫療體系的角度概述因應氣候變遷各面向之調適作為 (表4.6.3.1；顏采如等，2019)，足堪為整體健康領域進行調適規劃之借鑒。Ebi & Semenza (2008) 則提出以社區為本的調適作為擬訂策略，此較能將不同需求與意見同時納入考量，進而依據社區尺度進行健康調適流程推動，該流程共有8個步驟，包含 (1) 社區對外交流暨各類資源串連、(2) 氣候變遷情境分析、(3) 繪製及彙整社區資產、(4) 利害關係人共同參與、(5) 調適方案優先排序、(6) 資源盤點及動員、(7) 落實調適方案、(8) 調適成效評估及修正。氣候變遷調適是人類社會全新的挑戰，聯合國及其他非營利組織均建構知識平台，以供各方作策略擬訂、執行辦法、輔助工具及施行經驗分享。於「Climate Adaptation Knowledge Exchange」平台所提供調適參考案例顯示，氣候變遷衝擊較大的鄉村型社區，其主要以「健康」為調適優先推動標的 (Watts et al., 2015)，然對都市型社區而言，則需以提高氣候韌性、永續環境營造為目標，透過創新與綠色經濟的誘因與核心價值做為氣候變遷調適發展的重要驅動力 (吳佩芝，2019)。

另文獻亦指出，低收入和中等收入國家 (low- and middle-income countries, LMIC) 的貧困人口受到氣候變遷最嚴重的影響，但這些環境中的證據基礎也是最少，在社會經濟、人口和脆弱度方面存在重大知識差距和局限性 (Scheelbeek et al., 2021)。為了在中低收入國家採取有效的循證政策制定行動，迫切需要加強氣候變遷調適措施對健康影響的證據基礎；其可行步驟為提高氣候變遷嚴重影響的國家 (如撒哈拉以南以及南亞和東南亞的許多國家) 進行氣候變遷調適作為評估的研究能力，這包括氣候風險 (如天然災害) 發生前的準備 (例如數據收集的設置和協議) 以及量身定制的研究培訓。提供氣候變遷調適作為評估衡量對健康影響的數據收集和報告模板，報告應標準化，內容涵蓋研究背景、健康效應的完整細節和量化結果、是否有調適不良情事以及調適作為施行之財務和時間成本；而進一步的研究不僅應該調查所採取的調適舉措的類型，還應該量化這些舉措在社會不同群體中實現既定目標的有效性，以及在不同背景下實施這些方案的可行性。基於證據的決策是公共政策的重要基石，迫切需要在評估氣候變遷調適對策

表4.6.3.1　醫療體系因應氣候變遷之作為

領導與治理	優先因應氣候風險、將氣候調適融入健康政策、建立合夥關係、制定保護健康和緊急事故的法規政策。
專業人員教育訓練	醫事人員的職前與在職訓練，新興傳染病的偵測與治療、推廣低碳生活方式。
健康促進	脆弱度與調適能力評估、向社區民眾宣導有關減少溫室氣體排放和氣候適應作為之益處 (主動交通、蔬食、隔熱建築等)，發展社區健康營造。
風險整合、監測與預警報	氣候風險評估，改善熱浪、傳染病等預警報系統。
健康與氣候研究	監測氣候相關的疾病症狀並加強氣象與健康資料之間的連結。
科技與設備	發展具永續性的醫療服務、採購環境友善的服務與醫材。
管理環境決定健康的因子	提升能源效用、廢棄物管理、減緩溫室氣體排放和環境污染。
氣候調適之健康計畫	優先對健康能產生共同受益之計畫和方案，提高應對氣候災害和緊急事故的能力。極端氣候發生期間提供實證基礎和實務導向的健康資訊。
災難防備	增強氣候災害 (熱浪、颶風、水災等)的防災能力。
氣候與醫療照護融資	投資在健康監測系統和公共衛生的計畫以增強醫療體系的調適力。發展並創新模式，鼓勵發展環境友善的醫療服務。

(資料來源：顏采如等人，2019。彙整自Bell, 2011; Marinucci et al., 2014; Pencheon et al., 2009; Weaver et al., 2010)

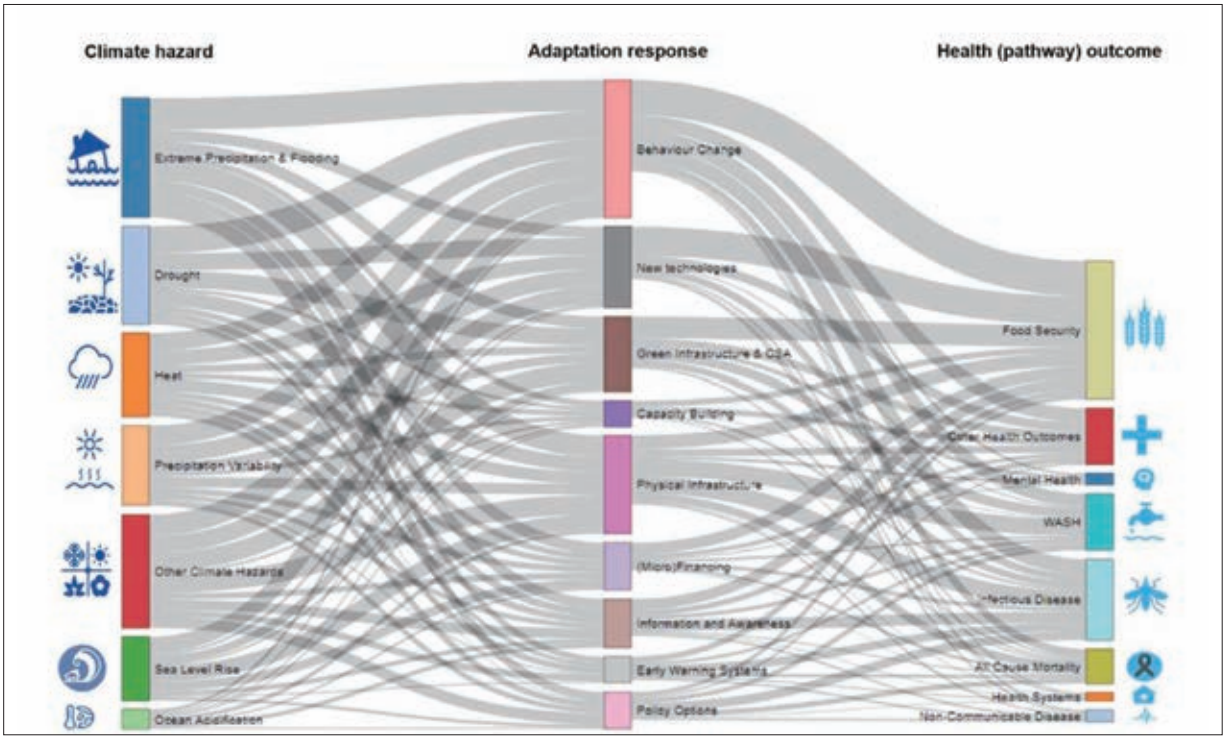


圖4.6.3.1　氣候危害、調適作為和健康結果
(資料來源：Scheelbeek et al., 2021)

時更多地考慮健康結果，包括預先指定和精心設計的正式評估。迅速改進證據基礎的關鍵是標準化方法的規範和調適作為對健康影響的評估結果；此外，進一步瞭解調適作為對全因死亡率和特定原因健康結果的影響，特別是與婦女以及兒童等弱勢群體相關的影響，對於循證決策至關重要，例如在氣候危害發生時 (乾旱)，採取適當的調適作為 (建設綠色基礎設施及發展氣候智能型農業 [Climate smart agriculture, CSA])，將可有效提升健康效應 (改善糧食安全)，依循此已驗證之氣候危害-調適作為-健康效應評估流程，可有效確認調適作為減緩氣候危害對健康衝擊之效益，進而擬訂最適氣候變遷調適對策 (Scheelbeek et al. 2021) (圖4.6.3.1)。

研究報告指出傳染性疾病會因環境危害、暴露接觸及族群自身脆弱度，影響其流行與擴散，進而造成嚴重的人類健康衝擊。而這些層面均可歸因於氣候變遷，如氣溫上升、洪水、暴雨乃至生態改變而影響病原體/病媒昆蟲適應性等，以及因外在環境改變，而導致人類族群更易於與暴露接觸，及不同年齡層及社經族群因對外在環境的敏感性及可適應性不同，在氣候變遷下，而有不同的健康衝擊效應 (Semenza & Paz, 2021)。例如下痢現仍是中低社經地位兒童的前三名告假疾病的原因 (Diseases & Injuries, 2020)，如前所述，颱風季節強降雨與志賀桿菌病罹病率顯著增加有關 (Chen et al., 2022)。因此高度建議進行氣候敏感性致病菌的調查，以及容易淹水地區下水道和排水管的設置，有助於促進族群健康、增加其韌性，降低抗生素的不當使用和病原體抗藥性，且透過有效的季節性預警，以降低醫療或疫苗的支出 (Dhimal & Bhandari, 2023)。未來當探討傳染性疾病的傳播、對健康的影響及預期風險，以整體而言應針對國內常見環境危害風險 (如颱風、暴雨、高溫及熱浪等)、暴露接觸頻率以及族群脆弱度進行相關政策制定。同時鑑於因氣候變化引起的過敏性疾病患病率越來越高，早期確認因果關係，在醫療諮詢期間，患者可以獲得氣候適應和復原力的醫療建議 (Luschkova et al., 2022)。近幾十年來，亞太地區過敏性疾病流行率上升的危險因素，肇因於城市化進程加快、空氣污染和氣候變化等環境因素，高於世界其他地區，因此，基於亞太地區不同國家的環境暴露程度不同，本地區應對過敏性疾病的戰略，應將重點放在積極的政府政策上，因地制宜地進行空氣污染防制。此需要在立法、行政和社區層面採取協調一致的戰略來實質性的努力施行以改善空氣品質 (Pawankar et al., 2020)。

另針對氣溫升高情境之調適選項，綠地空間扮演重要角色。城市綠地除可減緩地表逕流與熱島效應，還可降低空氣污染，從而降低一些與城市生活相關的環境風險。

國內研究指出減少綠地破碎度可降低都市溫度，進而減少心血管疾病死亡率 (Shen and Lung, 2016)，證明良好的都市綠地規劃是重要的心血管疾病健康衝擊調適策略之一，但不可忽略的是，於前述章節內容亦有提及綠地空間暴露可能會影響兒童和青少年的過敏症狀，因此，對於調適選項之選擇規劃仍需進行通盤考量，以避免對特定族群造成影響。

4.6.4　氣候變遷健康調適科研缺口

雖然近年國內於健康領域的氣候變遷研究已有初步的進展，但整體而言，若要實際落實於調適應用仍有相當大的發展空間。龍世俊等人 (2018) 具體提出對於氣候變遷健康調適4個需強化的科學研究方向，包含建立氣候健康衝擊整合性預警模式、減緩氣候變遷與促進健康之共效益健康調適策略研究、新型態氣候變遷與健康調適之衛生教育或健康促進工具發展及策略研究、深化本土氣候變遷與健康調適研究之科學能量，其中最需要先推動的應是建立氣候健康衝擊模式及工具。臺灣健康領域的基礎科研資料不足，進而無法進一步建立相關的推估模型，例如:欠缺臺灣本土氣候風險指標與大型世代研究資料，以及臺灣本土氣候變遷與健康影響之預測模式；而在分析方法上可使用之模式雖多，但仍需透過更多研究來比較不同分析模式間結果的差異與一致性，或是找出最適合評估氣候變遷對臺灣民眾生理與心理健康影響最適之模式等，都需要更進一步的進行深入研究。健康調適科研的缺口分述如下：

1. 健康資料庫建置與指標之研發

(1) 全人口代表性的大型世代研究建立和預警參數之調查追蹤

自2017年以後，中國進行了兩個重要的大型世代研究：其中一個針對全國和寧夏回族自治區，以2012年至2016年為基準值，追蹤至2017年至2019年，發現每升高1°C的溫差變化，心臟血管疾病的發病率增加了6% (Kang et al., 2021)。另一個研究則對2012年至2015年在西北農村進行了追蹤，低溫和高溫都與心臟血管相關疾病的臨床就診風險增加有關。特別是在寒冷期後的第6天到第22天，心臟血管就診風險達到了相對風險1.55倍的累積效應 (Zhao et al., 2018)。由此前瞻型的大型流行病學世代研究，較能明確建立溫度變化對心臟血管健康的影響關係，其他氣候變遷敏感性主題，如病原體感染、免疫功能、心理社會因素等對相關疾病的衝擊預警亦然。

(2) 綜合性評估指數之研發

熱傷害為氣候變遷對健康最直接的衝擊，為瞭解並建立有效風險評估指標，國內已有不少研究成果，確認各項氣候因子所建立之溫度指數對健康效應 (如死亡率) 之影響 (Lin et al. 2011; Lin et al. 2012b; Sung et al. 2013b)，近期國內已發表應用綜合溫度熱指數 (wet bulb globe temperature, WBGT) 與廣義加成模型 (generalized additive model, GAM)，結合臺灣的全死因死亡率、熱相關疾病就診與急診等健康數據，建立高溫預警系統選擇適當閾值的新方法 (Cheng et al., 2019)，可提供未來探討氣候變遷所導致的熱傷害脆弱度之前期研究。且國內研究成果闡明，WBGT相較於傳統的乾球溫度和體感溫度 (apparent temperature, AT)，更適合作為熱相關傷害風險評估指標 (Cheng et al. 2019; Lung et al. 2021)，因此2021年起中央氣象署針對預防戶外活動者之熱傷害風險設置WBGT分級標準，提供預報予民眾查詢，以做為自我保護避免熱衰竭等熱傷害情形發生之參考依據 (表4.6.4.1)。各國亦針對預防高溫所導致之熱傷害風險，採用不同氣象因子制定其自有之高溫監測指標及分級預警機制 (表4.6.4.2)。一項針對1999年至2011年夏季的溫帶氣候下熱浪期間的研究顯示，與乾球溫度、濕熱指數 (Humidex, HUM) 及AT的變化相比，生理等效溫度 (Physiological equivalent temperature, PET) 指數的變化可以更精確地描述熱浪期間每日心臟血管死亡率的變化 (Shartova et al., 2018)。另一項針對2001年至2013年澳洲對夏季的研究發現，在炎熱或潮濕的條件下，各類疾病入院率提高。在熱浪發生的情況下，溫度指數 (Simplified Wet Bulb Globe Temperature, SWBGT) 最適合用於心臟血管入院的情況，濕度指數則最能預測呼吸道疾病入院的情況，而熱濕綜合指數最適合腎臟入院情況 (Goldie et al., 2018)。伊朗的二個研究顯示當PET值較高時，會明顯增加呼吸和心臟血管死亡的風險，其中，當PET為30°C時，lag 0天至30天為1.67倍，95%CI：1.16-2.40 (Sharafkhani et al., 2018)；此外，另一項研究表明高熱效應 (PET的第99個百分位為44.9°C，相對於第75個百分位的43.4°C) 也明顯增加總心臟血管死亡率 (Dastoorpoor et al., 2022)。此外，晝夜溫差與健康議題關聯分析也是重要研究方向。在溫度較低的國家 (如加拿大、愛爾蘭和英國) 和溫度較高的國家(如巴西和哥倫比亞)，晝夜溫差與死亡風險的關聯性相當明顯，且溫差對死亡風險的持續影響時間可達4天至7天，其他溫度適中的國家在溫差顯示出最高的相對風險，並且持續時間為7天至14天 (Lee et al. 2018)。這些研究結果表明，WBGT、PET及溫差在不同地區和氣候條件下對健康衝擊可能有重要影響。更進一步的深入研究其相關性將有助於我們更瞭解這些指標與不同健康影響之間的關聯，進而彙整研發出國內最適之綜合性評估指數，並依循制定相應的預防措施和健康指導。

表4.6.4.1　綜合溫度熱指數分級標準

預警程度	分級標準
注意 (cautious)	WBGT小時最高值達32
警戒 (alert)	WBGT小時最高值達34或連續三天 WBGT小時最高值達 32
危險(dangerous)	WBGT 小時最高值達 36 或連續三天 WBGT 小時最高值達 34
高危險(high dangerous)	WBGT 小時最高值達 38 或連續三天 WBGT 小時最高值達 36

註：健康氣象-熱指數及警示全臺各鄉鎮五日逐三小時預報輔助說明。
(資料來源：交通部中央氣象署)

表4.6.4.2　各國建立高溫監測指標及分級預警機制 (本報告產製)

監測指標	美國 (NOAA)	加拿大 (環境部氣象局)	日本 (國土交通省氣象廳)	香港
	Heat Index	Humudex	WBGT	暑熱指數
計算	量測高溫與濕度的綜合指數，提供更實質的感受溫度。	根據乾球溫度與露點溫度計算。	考量有無實際日曬，根據自然濕球溫度 (Tw)、黑球溫度 (Tg) 與乾球溫度綜合計算 (Td)。 戶外有日曬時，計算公式為 -0.7Tw + 0.2Tg + 0.1Td。 戶外無日曬或室內時，計算公式為 -0.7Tw + 0.3Tg。	根據自然濕球溫度 (Tnw)、黑球溫度 (Tg) 和乾球溫度 (Ta) 綜合計算出來，其數值相等於0.80Tnw + 0.05Tg + 0.15Ta。
分級	Caution (<32) Extreme caution (33-39) Danger (40-51) Extreme Danger (>52)	No Discomfort (<29) Some Discomfort (30-39) Great Discomfort (40-45) Dangerous (46-54) Heat Stroke Imminent (>54)	≥ 31:危險 (原則上停止運動) 28-31:高度警戒 (停止劇烈運動) 25-28:警戒 (多休息) 21-25:注意 (積極補充水分) < 21:基本安全	當暑熱指數達到:30至32 (黃色)，表示部分工作環境的熱壓力頗高;32至34以下 (紅色)，表示部分工作環境的熱壓力甚高;大於34 (黑色)，表示部分工作環境的熱壓力極高。並依工作量分四等級，提供戶外露天工作的休息安排。

(3) 強化監測系統之資料整合與維護

水平整併各類健康、氣象、環境監測、病蟲媒、社會經濟指標與地理資訊系統等資料庫，並輔以貫時性資料之垂直追蹤，使未來相關政策之規劃能奠基於全面且長期之健康衝擊與調適評估。目前中央氣象署、國民健康署與中央研究院已合作建置手機應用程式「樂活氣象」中之「健康氣象」，提供WBGT及日夜溫差等指數預報，利用手機 GPS 定位方式，可線上取得目前所在地之未來五天WBGT及溫差之鄉鎮地理解析度預報，能事先得知熱傷害及溫差之風險等級，提前預防，且此應用程式中亦提供一般民眾及年長者、戶外工作者等高脆弱或高暴險族群在不同熱傷害及溫差等級之即時因應措施，以保障民眾健康。基於此一成功經驗，建議未來可推廣至其他方面，例如在勞工方面，可建置「高氣溫戶外作業熱危害預防行為資訊網」，以相同方式，線上取得工作所在地之即時氣象數據資料後，即可確認熱危害風險等級與查閱管理預防措施；建置即時、不間斷的疾病通報與監測系統，以有效達成疾病控制與健康維護。提高生物性傳媒快篩技術之改良與開發，及出入境健康監測與管控，以防治未來可能的新興傳染性疾病。

2. 氣候變遷與非傳染性疾病之研究

研究結果顯示 (Yang et al., 2021)，在考慮氣候模型、排放情景、共享社會經濟路徑 (Shared socioeconomic pathways, SSP) 和未來人口老齡化等變數，特別是在未來高排放情境下，高溫相關的超額死亡率會顯著增加。此外，隨著全球暖化程度的增加，在2050年代之前，與溫度相關的心臟血管死亡人數預計會逐漸增加，在21世紀下半葉將更加明顯 (Chen et al., 2017; Huang et al., 2018; Zhang et al., 2018)。這些研究也考慮了人口變化和適應性因素，但預計與熱相關的壽命損失年仍會增加。在近期巴西的研究中，對21個城市進行了類似的預測，結果顯示未來氣候變化可能對心臟血管死亡率產生影響 (Silveira et al. 2021)。而臺灣相關研究目前有探討城市形態通過空氣污染物和熱量對心血管死亡率及心理健康 (如自殺) 的潛在影響和途徑 (Shen & Lung, 2020; Shen et al., 2022)，結果顯示，適當的城市規劃和政策可以降低心血管死亡率及預防自殺的發生。另國內目前對於氣候變遷與呼吸道疾病之相關研究，主要針對空氣污染物質與疾病致病機轉相關性之探討，但這些研究並未解釋氣候變遷與空氣污染間之因果關係，即影響途徑為氣候變遷下氣象因子變化影響空氣污染物生成、傳輸，再進而影響健康，亦或是因空氣污染 (含溫室氣體和其上游污染物等排放、生成) 趨於嚴重，而直接間接造成氣候變遷加劇，最終造成健康衝擊。這些知識缺口若能有效弭平，方能為未來氣候變遷情境之健康衝擊效應變化提供良好預測基礎。再者，對於不同年齡層及社經族群長期暴露於空

氣污染環境的後續致病風險評估及相關暴露閾值效應仍需更多研究，以瞭解可能的健康衝擊效應。此外，不同暴露來源的延遲效應所適用之統計分析模式亦須進行比較確認，以制定最適的模式選用準則。未來可以此類研究成果為本，更進一步探討不同氣候情境下，氣候變遷對臺灣本土人口健康效應之影響。

3. 氣候變遷與傳染性疾病之研究

氣候變遷所引起之極端氣象事件 (如洪水、乾旱、熱浪及森林大火等) 會於不同層面影響傳染性疾病傳播，國際開始針對傳播媒介對極端氣象事件後的相應變化進行探討(如病原體/病媒蚊的生態適應性轉變、及河口地區/供水系統病原體種群增減等)，並瞭解各種不同暴露對疾病傳播所扮演之角色，且進一步確認規劃脆弱度地區/族群應有的調適作為。而國內雖亦就相關議題開始進行初步研究，如為有效應對登革熱的威脅，利用開放式地理資訊架構為基礎建構防疫系統，建立跨裝置登革熱防疫系統以輔助疫情的風險管理、疫情調查、防疫區規劃、智慧偵測防疫熱區與其他決策支援所需的工具，以使第一線防疫人員可以透過整合式的疫情資訊、電子化與自動化的流程、搭配其他政府機關所提供的開放資料，達到即時監控目的 (Chan et al., 2018)，也為氣候變遷情境下臺灣本土傳染性疾病流行傳播方式變化預測提供研究契機。利用高雄2014-2015年登革熱病例數結合氣候數據(平均溫度及相對濕度)開發預測登革熱病例數的統計模式之研究成果顯示，提前5天預測模式可有效預測登革熱病例的發生 (相關性0.9)，未來的研究可以考慮將所有可用的氣候因素的長期數據記錄納入模型中，在降雨、溫度和濕度等關鍵預測因子之間確立交互關係，以精進早期預警 (Cheng et al., 2020)。但氣候變遷所引起之極端氣象事件發生後後續傳染性疾病的延遲效應與相關致病因子 (暴露) 閾值效應，以及國內脆弱度地區/族群之健康調適作為制定，仍有待透過更多研究進行分析。

4. 氣候變遷健康調適作為效益評估之研究

目前對於各種氣候變遷調適措施的實際效果評估相對有限，需要透過跨領域合作，如結合農業、淹水、畜牧等專業領域，從不同面向切入，進行不同策略的效果、長期持續性以及對不同族群的適用性之綜合性評估，釐清各階段調適措施之優劣，進而反饋優化上游調適措施，以改善滿足健康衝擊缺口。其次，提高氣候變遷與健康風險評估和預測能力至關重要，需要更準確的數據和模型，以更好地預測氣候變遷對健康疾病風險的變化趨勢並提供相應的警示和指導。持續追蹤評估氣候變遷對於公共衛生的衝擊，依更新之資訊定期評估氣候變遷風險，並依據風險評估，彙整建構健康防護系統與調適策

略，以確保相關資源之運用與得以積極回應新興之需求。最後，對於社會、經濟和政策因素對調適後續衍生問題的具體影響瞭解有限，需要進一步研究不同社區和地區的背景，並探討相關政策的有效性和可持續性，將研究成果轉化為實際行動和政策需要有效的知識傳播和行動策略，加強科學家、政策制定者和社區之間的溝通和合作。

4.6.5 結語

氣候變遷所帶來的氣候環境變化，將對國人健康造成劇烈影響。本章節以國內常見的心血管疾病、傳染性疾病、呼吸系統疾病及心理健康為例闡述可能造成之健康衝擊，並列舉現有之科研缺口及建議未來研究方向。過去國內健康的研究較偏重於研究疾病的死亡率，忽視疾病預防的重要性，且氣候變遷健康調適的研究相對不足。若要提高氣候變遷與健康風險評估和預測能力，落實氣候變遷調適策略，更多調適相關健康科學的研究需要被推動，包括健康資料庫的建置、氣候危害綜合性指標的開發、疾病預測模式的建立，及最重要的氣候變遷健康調適效益評估之研究等，對未來健康風險評估與調適的落實均相當重要，此外，針對健康脆弱族群，相關調適策略推動應兼顧且避免更加脆弱。

因應氣候變遷之高度不確定性，應就不同氣候變遷風險情境做量化風險評估，進行系統性的調適規劃與執行策略的擬定。例如建立氣候與季節敏感疾病風險地圖、考量脆弱族群需求的照護機制、提升醫療設施的能源效率、持續追蹤氣候變遷對人體的健康衝擊、定期評估氣候變遷的健康風險等，據以建構動態彈性健康防護體系與動態調適路徑與策略規劃，以確保相關資源之運用與得以回應新興之需求。就科研層面而言，應深化氣候變遷與健康衝擊、調適策略之整合性跨領域研究，以支持國家健康調適規劃與政策擬定之整體發展，提升全民健康韌性。

參考文獻

王俊豪 (2014)。氣候災害對農村公共衛生與心理健康之影響—以颱風災害為例。**新竹教育大學人文社會學報，7** (1)，1-32。

吳佩芝 (2019)氣候變遷調適—地方創生與社區健康。**護理雜誌，66** (3)，6-13。

林于凱、俞菘維、林沛練、王玉純 (2015)。臺灣不同地區之氣溫與全死因及心血管疾病死亡風險之相關分析。**臺灣公共衛生雜誌，34** (1)，103-14。

氣候變遷與健康委員會 (2017)。**氣候變遷與健康**。國家衛生研究院，苗栗縣。

陳永明 (2018)。**臺灣氣候的過去與未來**。國家災害防救科技中心，新北市。

黃鈴雅、王玉純、柳中明、王根樹、宋鴻樟 (2012)。氣溫變化和心血管及呼吸道疾病死亡的相關。**臺灣醫學，16** (5)，471-478。

童慶斌、朱容練、陳永明、陳韻如、郭士筠、劉俊志、李培芬、林幸助、李明旭、盧虎生、蘇慧貞、張靜貞、詹士樑、許泰文、李河清 (2017)。**臺灣氣候變遷科學報告2017 第二冊 衝擊與調適面向 (完整版)**。國家災害防救科技中心，新北市。

萬擎、謝邦昌、廖佩珊 (2016)。氣候及環境因子對重大心血管不良事件預測及相關因素探討。 **數據分析，11** (4)，21-50。

衛生福利部 (2018)。**因應氣候變遷之健康衝擊政策白皮書 (二版)**。衛生福利部綜合規劃司，臺北市。

龍世俊、周淑婉、陳正平、溫蓓章、蘇慧貞、蔡宜君、沈育生 (2018)。**氣候變遷與健康調適科學計畫。臺灣土地研究，21** (2)，209-239。

顏采如、朱明若、林金定、林名男、王英偉，2019。氣候變遷下健康促進醫院的未來發展。**健康促進研究與實務，2** (1)，1-10。

Alahmad B, Khraishah H, Royé D, Vicedo-Cabrera AM, Guo Y, Papatheodorou SI, Achilleos S, Acquaotta F, Armstrong B, Bell ML, Pan SC, de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M, Colistro V, Dang TN, Van Dung D, De' Donato FK, Entezari A, Guo YL, Hashizume M, Honda Y, Indermitte E, Íñiguez C, … Koutrakis P. (2023). Associations Between Extreme Temperatures and Cardiovascular Cause-Specific Mortality: Results From 27 Countries. *Circulation, 147*(1), 35-46. https://doi.org/10.1161/circulationaha.122.061832

Araos, M., Berrang-Ford, L., Ford, J. D., Austin, S. E., Biesbroek, R., & Lesnikowski, A. (2016). Climate change adaptation planning in large cities: A systematic global assessment. *Environmental Science & Policy, 66,* 375-382. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.06.009

Badr, H. S., Colston, J. M., Nguyen, N. H., Chen, Y. T., Burnett, E., Ali, S. A., Rayamajhi, A., Satter, S. M., Van Trang, N., Eibach, D., Krumkamp, R., May, J., Adegnika, A. A., Manouana, G. P., Kremsner, P. G., Chilengi, R., Hatyoka, L., Debes, A. K., Ateudjieu, J., … Kosek, M. N. (2023). Spatiotemporal

variation in risk of shigella infection in childhood: A global risk mapping and prediction model using individual participant data. *The Lancet Global Health, 11*(3), e373-e384. https://doi.org/10.1016/s2214-109x(22)00549-6

Barkin, J. L., Buoli, M., Curry, C. L., Von Esenwein, S. A., Upadhyay, S., Kearney, M. B., & Mach, K. (2021). Effects of extreme weather events on child mood and behavior. *Developmental Medicine & Child Neurology, 63*(7), 785-790. https://doi.org/10.1111/dmcn.14856

Beelen R, Raaschou-Nielsen O, Stafoggia M, Andersen ZJ, Weinmayr G, Hoffmann B, Wolf K, Samoli E, Fischer P, Nieuwenhuijsen M, Vineis P, Xun WW, Katsouyanni K, Dimakopoulou K, Oudin A, Forsberg B, Modig L, Havulinna AS, Lanki T, … Hoek G. (2014). Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet, 383*(9919), 785-95. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)62158-3

Bell, E. (2011). Readying health services for climate change: A policy framework for regional development. *American Journal of Public Health, 101*(5), 804-813. https://doi.org/10.2105/ajph.2010.202820

Burke, M., González, F., Baylis, P., Heft-Neal, S., Baysan, C., Basu, S., & Hsiang, S. (2018). Higher temperatures increase suicide rates in the United States and Mexico. *Nature Climate Change, 8*(8), 723-729. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0222-x

Carleton, T. A. (2017). Crop-damaging temperatures increase suicide rates in India. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(33), 8746-8751. https://doi.org/10.1073/pnas.1701354114

Chan, T.-C., Lin, B.-C., Kuo, C.-L., & Chiang, L.- hsiang. (2018). Using an Open GIS Framework and Epidemiological Intelligence for Dengue Surveillance. *Online J Public Health Inform,10*(1). https://doi.org/10.5210/ojphi.v10i1.8550

Cecchi, L., D'Amato, G., & Annesi‐Maesano, I. (2020). Climate change and outdoor aeroallergens related to allergy and asthma: *Taking the exposome into account. Allergy, 75*(9), 2361-2363. https://doi.org/10.1111/all.14286

Chen, Y., Hsu, W., Lai, C., Tang, T., Wang, P., Yeh, Y., Huang, M., Yen, C., & Chen, C. (2015). One‐year follow up of PTSD and depression in elderly Aboriginal people in Taiwan after Typhoon Morakot. *Psychiatry and Clinical Neurosciences, 69*(1), 12-21. https://doi.org/10.1111/pcn.12227

Chen, K., Horton, R. M., Bader, D. A., Lesk, C., Jiang, L., Jones, B., Zhou, L., Chen, X., Bi, J., & Kinney, P. L. (2017). Impact of climate change on heat-related mortality in Jiangsu province, China. *Environmental Pollution, 224*, 317-325. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.011

Chen, N., Lin, P., & Guo, Y. L. (2019). Long-term exposure to high temperature associated with the

incidence of major depressive disorder. *Science of The Total Environment, 659,* 1016-1020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.434

Chen, N., Chen, Y., Wu, C., Chen, M., & Guo, Y. (2022). The impact of heavy precipitation and its impact modifiers on shigellosis occurrence during typhoon season in Taiwan: A case-crossover design. *Science of The Total Environment, 848,* 157520. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157520

Cheng, Y., Lung, S. C., & Hwang, J. (2019). New approach to identifying proper thresholds for a heat warning system using health risk increments. *Environmental Research, 170,* 282-292. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.059

Cheng, Y., Lee, F., Hsu, Y., Slud, E. V., Hsiung, C. A., Chen, C., Liao, C., Wen, T., Chang, C., Chang, J., Wu, H., Chang, T., Lin, P., Ho, H., Hung, W., Chou, J., & Tsou, H. (2020). Real-time dengue forecast for outbreak alerts in southern Taiwan. *PLOS Neglected Tropical Diseases, 14*(7), e0008434. https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008434

Cherrie, M. P., Nichols, G., Iacono, G. L., Sarran, C., Hajat, S., & Fleming, L. E. (2018). Pathogen seasonality and links with weather in England and Wales: A big data time series analysis. *BMC Public Health, 18*(1). https://doi.org/10.1186/s12889-018-5931-6

Chung, Y., Lim, Y., Honda, Y., Guo, Y. L., Hashizume, M., Bell, M. L., Chen, B., & Kim, H. (2015). Mortality related to extreme temperature for 15 cities in Northeast Asia. *Epidemiology, 26*(2), 255-262. https://doi.org/10.1097/ede.0000000000000229

Chung, Y., Noh, H., Honda, Y., Hashizume, M., Bell, M. L., Guo, Y. L., & Kim, H. (2017). Temporal changes in mortality related to extreme temperatures for 15 cities in Northeast Asia: Adaptation to heat and maladaptation to cold. *American Journal of Epidemiology, 185*(10), 907-913. https://doi.org/10.1093/aje/kww199

Clayton, S., Manning, C. M., Krygsman, K., & Speiser, M. (2017). *Mental health and our changing climate: impacts, implications, and guidance.* American Psychological Association and ecoAmerica: Washington, DC; 2017.

D'Amato, G., Chong‐Neto, H. J., Monge Ortega, O. P., Vitale, C., Ansotegui, I., Rosario, N., Haahtela, T., Galan, C., Pawankar, R., Murrieta‐Aguttes, M., Cecchi, L., Bergmann, C., Ridolo, E., Ramon, G., Gonzalez Diaz, S., D'Amato, M., & Annesi‐Maesano, I. (2020). The effects of climate change on respiratory allergy and asthma induced by pollen and mold allergens. *Allergy, 75*(9), 2219-2228. https://doi.org/10.1111/all.14476

Dastoorpoor, M., Khodadadi, N., Masoumi, K., Khanjani, N., Idani, E., Borsi, S. H., Goudarzi, G., Raji, H., & Sharafkhani, R. (2022). Physiological equivalent temperature (PET) and non-accidental, cardiovascular and respiratory disease mortality in Ahvaz, Iran. *Environmental Geochemistry and Health, 44*(8), 2767-2782. https://doi.org/10.1007/s10653-021-01063-1

Demain, J. G. (2018). Climate change and the impact on respiratory and allergic disease: 2018.

Current Allergy and Asthma Reports, 18(4). https://doi.org/10.1007/s11882-018-0777-7

De Sario, M., Katsouyanni, K., & Michelozzi, P. (2013). Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe. *European Respiratory Journal, 42*(3), 826-843. https://doi.org/10.1183/09031936.00074712

Dhimal, M., & Bhandari, D. (2023). Climate change and imperatives to ascertain causes of infectious diarrhoea in low-income and middle-income countries. *The Lancet Global Health, 11*(3), e308-e309. https://doi.org/10.1016/s2214-109x(23)00012-8

Diseases, G.B.D., & Injuries, C. (2020). Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet ,396,* 1204-1222. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30925-9

Dong, G., Qian, Z. (., Wang, J., Chen, W., Ma, W., Trevathan, E., Xaverius, P. K., DeClue, R., Wiese, A., Langston, M., Liu, M., Wang, D., & Ren, W. (2013). Associations between ambient air pollution and prevalence of stroke and cardiovascular diseases in 33 Chinese communities. *Atmospheric Environment, 77,* 968-973. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.034

Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R., & Mearns, L. O. (2000). Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science, 289* (5487), 2068-2074. https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2068

Ebi, K. L., & Paulson, J. A. (2007). Climate change and children. *Pediatric Clinics of North America, 54*(2), 213-226. https://doi.org/10.1016/j.pcl.2007.01.004

Ebi, K. L., & Semenza, J. C. (2008). Community-based adaptation to the health impacts of climate change. *American Journal of Preventive Medicine, 35*(5), 501-507. https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.018.

Fairweather, V., Hertig, E., & Traidl‐Hoffmann, C. (2020). A brief introduction to climate change and health. *Allergy, 75*(9), 2352-2354. https://doi.org/10.1111/all.14511

Franchini, M., & Mannucci, P. M. (2012). Air pollution and cardiovascular disease. *Thrombosis Research, 129*(3), 230-234. https://doi.org/10.1016/j.thromres.2011.10.030

Goldie, J., Alexander, L., Lewis, S. C., Sherwood, S. C., & Bambrick, H. (2018). Changes in relative fit of human heat stress indices to cardiovascular, respiratory, and renal hospitalizations across five Australian urban populations. *International Journal of Biometeorology, 62*(3), 423-432. https://doi.org/10.1007/s00484-017-1451-9

Haines, A., & Ebi, K. (2019). The imperative for climate action to protect health. *New England Journal of Medicine, 380*(3), 263-273. https://doi.org/10.1056/nejmra1807873

Haustein, K., Allen, M. R., Forster, P. M., Otto, F. E., Mitchell, D. M., Matthews, H. D., & Frame, D. J. (2017). A real-time global warming index. *Scientific Reports, 7*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-017-14828-5

Hess, J., Boodram, L. G., Paz, S., Stewart Ibarra, A. M., Wasserheit, J. N., & Lowe, R. (2020). Strengthening the global response to climate change and infectious disease threats. *BMJ, 371,* m3081. https://doi.org/10.1136/bmj.m3081

Hintsala, H., Kenttä, T. V., Tulppo, M., Kiviniemi, A., Huikuri, H. V., Mäntysaari, M., Keinänen-Kiukaannemi, S., Bloigu, R., Herzig, K., Antikainen, R., Rintamäki, H., Jaakkola, J. J., & Ikäheimo, T. M. (2014). Cardiac Repolarization and autonomic regulation during short-term cold exposure in hypertensive men: An experimental study. *PLoS ONE, 9*(7), e99973. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099973

Hsieh, S., Hsieh, C., Tseng, C., & Yiin, L. (2020). Allergic rhinitis: Association with air pollution and weather changes, and comparison with that of allergic conjunctivitis in Taiwan. *Atmosphere, 11*(11), 1152. https://doi.org/10.3390/atmos11111152

Huang, J., Li, G., Liu, Y., Huang, J., Xu, G., Qian, X., Cen, Z., Pan, X., Xu, A., Guo, X., & He, T. (2018). Projections for temperature-related years of life lost from cardiovascular diseases in the elderly in a Chinese city with typical subtropical climate. *Environmental Research, 167,* 614-621. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.08.024

Iñiguez, C., Royé, D., & Tobías, A. (2021). Contrasting patterns of temperature related mortality and hospitalization by cardiovascular and respiratory diseases in 52 Spanish cities. *Environmental Research, 192,* 110191. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110191

Kang, Y., Tang, H., Zhang, L., Wang, S., Wang, X., Chen, Z., Zheng, C., Yang, Y., Wang, Z., Huang, G., & Gao, R. (2021). Long-term temperature variability and the incidence of cardiovascular diseases: A large, representative cohort study in China. *Environmental Pollution, 278,* 116831. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116831

Kim, J., Shin, J., Lim, Y., Honda, Y., Hashizume, M., Guo, Y. L., Kan, H., Yi, S., & Kim, H. (2016). Comprehensive approach to understand the association between diurnal temperature range and mortality in East Asia. *Science of The Total Environment, 539,* 313-321. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.134

Kim, Y., Kim, H., Gasparrini, A., Armstrong, B., Honda, Y., Chung, Y., Ng, C. F., Tobias, A., Íñiguez, C., Lavigne, E., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Ragettli, M. S., Scovronick, N., Acquaotta, F., Chen, B., Guo, Y. L., Seposo, X., Dang, T. N., … Hashizume, M. (2019). Suicide and ambient temperature: A multi-country multi-city study. *Environmental Health Perspectives, 127*(11). https://doi.org/10.1289/ehp4898

Kuhn, K. G., Nygård, K. M., Guzman-Herrador, B., Sunde, L. S., Rimhanen-Finne, R., Trönnberg, L., Jepsen, M. R., Ruuhela, R., Wong, W. K., & Ethelberg, S. (2020). Campylobacter infections expected to increase due to climate change in Northern Europe. *Scientific Reports, 10*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-70593-y

Lee, W., Bell, M. L., Gasparrini, A., Armstrong, B. G., Sera, F., Hwang, S., Lavigne, E., Zanobetti,

A., Coelho, M. D., Saldiva, P. H., Osorio, S., Tobias, A., Zeka, A., Goodman, P. G., Forsberg, B., Rocklöv, J., Hashizume, M., Honda, Y., Guo, Y. L., … Kim, H. (2018). Mortality burden of diurnal temperature range and its temporal changes: A multi-country study. *Environment International, 110,* 123-130. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.018

Lee, H., Wu, Y., Kusumaning Asri, A., Chen, T., Pan, W., Yu, C., Su, H., & Wu, C. (2020). Linkage between residential green spaces and allergic rhinitis among Asian children (case study: Taiwan). *Landscape and Urban Planning, 202,* 103868. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103868

Lee, K., Wu, S., Kou, H., Chen, K., Chuang, H., Feng, P., Chung, K. F., Ito, K., Chen, T., Sun, W., Liu, W., Tseng, C., & Ho, S. (2022). Association of air pollution exposure with exercise-induced oxygen desaturation in COPD. *Respiratory Research, 23*(1). https://doi.org/10.1186/s12931-022-02000-1

Lin YK, Ho TJ, Wang YC. (2011). Mortality risk associated with temperature and prolonged temperature extremes in elderly populations in Taiwan. *Environ Res. 111*(8): 1156-63.

Lin, C., Schiøler, K. L., Jepsen, M. R., Ho, C., Li, S., & Konradsen, F. (2012a). Dengue outbreaks in high-income area, Kaohsiung city, Taiwan, 2003–2009. *Emerging Infectious Diseases, 18*(10), 1603-1611. https://doi.org/10.3201/eid1810.111929

Lin, Y., Chang, C., Li, M., Wu, Y., & Wang, Y. (2012b). High-temperature indices associated with mortality and outpatient visits: Characterizing the association with elevated temperature. *Science of The Total Environment, 427-428,* 41-49.

Lin, C., Chen, T., Dai, C., Yu, M., Lu, P., Yen, J., & Chen, Y. (2015). Serological investigation to identify risk factors for post-flood infectious diseases: A longitudinal survey among people displaced by typhoon Morakot in Taiwan. *BMJ Open, 5*(5), e007008-e007008. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-007008

Lung, S. C., Yeh, J. J., & Hwang, J. (2021). Selecting thresholds of heat-warning systems with substantial enhancement of essential population health outcomes for facilitating implementation. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(18), 9506.

Lu, H., Lin, F., Huang, Y., Kao, Y., & Loh, E. (2022). Role of air pollutants in dengue fever incidence: Evidence from two southern cities in Taiwan. *Pathogens and Global Health, 117*(6), 596-604. https://doi.org/10.1080/20477724.2022.2135711

Luschkova, D., Traidl-Hoffmann, C., & Ludwig, A. (2022). Climate change and allergies. *Allergo Journal International, 31*(4), 114-120. https://doi.org/10.1007/s40629-022-00212-x

Marinucci, G., Luber, G., Uejio, C., Saha, S., & Hess, J. (2014). Building resilience against climate effects—A novel framework to facilitate climate readiness in public health agencies. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 11*(6), 6433-6458. https://

doi.org/10.3390/ijerph110606433

McCormack, M. C., Belli, A. J., Waugh, D., Matsui, E. C., Peng, R. D., Williams, D. L., Paulin, L., Saha, A., Aloe, C. M., Diette, G. B., Breysse, P. N., & Hansel, N. N. (2016). Respiratory effects of indoor heat and the interaction with air pollution in chronic obstructive pulmonary disease. *Annals of the American Thoracic Society, 13*(12), 2125-2131. https://doi.org/10.1513/annalsats.201605-329oc

Méndez-Lázaro, P. A., Pérez-Cardona, C. M., Rodríguez, E., Martínez, O., Taboas, M., Bocanegra, A., & Méndez-Tejeda, R. (2018). Climate change, heat, and mortality in the tropical urban area of San Juan, Puerto Rico. *International Journal of Biometeorology, 62*(5), 699-707. https://doi.org/10.1007/s00484-016-1291-z

Metcalf, C. J., Walter, K. S., Wesolowski, A., Buckee, C. O., Shevliakova, E., Tatem, A. J., Boos, W. R., Weinberger, D. M., & Pitzer, V. E. (2017). Identifying climate drivers of infectious disease dynamics: Recent advances and challenges ahead. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 284*(1860), 20170901. https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0901

Moghadamnia, M. T., Ardalan, A., Mesdaghinia, A., Naddafi, K., & Yekaninejad, M. S. (2018). The effects of apparent temperature on cardiovascular mortality using a distributed lag nonlinear model analysis: 2005 to 2014. *Asia Pacific Journal of Public Health, 30*(4), 361-368. https://doi.org/10.1177/1010539518768036

Mora, C., McKenzie, T., Gaw, I. M., Dean, J. M., Von Hammerstein, H., Knudson, T. A., Setter, R. O., Smith, C. Z., Webster, K. M., Patz, J. A., & Franklin, E. C. (2022). Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. *Nature Climate Change, 12*(9), 869-875. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01426-1

Obradovich, N., Migliorini, R., Paulus, M. P., & Rahwan, I. (2018). Empirical evidence of mental health risks posed by climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 115*(43), 10953-10958. https://doi.org/10.1073/pnas.1801528115

Ogbomo, A. S., Gronlund, C. J., O'Neill, M. S., Konen, T., Cameron, L., & Wahl, R. (2017). Vulnerability to extreme-heat-associated hospitalization in three counties in Michigan, USA, 2000–2009. *International Journal of Biometeorology, 61*(5), 833-843. https://doi.org/10.1007/s00484-016-1261-5

Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature, 438*(7066), 310-317. https://doi.org/10.1038/nature04188

Pawankar, R., Wang, J., Wang, I., Thien, F., Chang, Y., Latiff, A. H., Fujisawa, T., Zhang, L., Thong, B. Y., Chatchatee, P., Leung, T. F., Kamchaisatian, W., Rengganis, I., Yoon, H. J., Munkhbayarlakh, S., Recto, M. T., Neo, A. G., Le Pham, D., Lan, L. T., ⋯ Oh, J. W. (2020). Asia Pacific association of allergy asthma and clinical immunology white paper 2020 on climate change, air pollution, and biodiversity in Asia-Pacific and impact on allergic diseases. *Asia Pacific Allergy, 10*(1), e11.

https://doi.org/10.5415/apallergy.2020.10.e11

Pencheon, D. (2009). Health services and climate change: What can be done? *Journal of Health Services Research & Policy, 14*(1), 2-4. https://doi.org/10.1258/jhsrp.2008.008147

Pörtner H-O, Roberts DC, Adams H, et al. (2022). Climate change (2022). Impacts, adaptation and vulnerability: IPCC Geneva, Switzerland

Romanello, M., McGushin, A., Di Napoli, C., Drummond, P., Hughes, N., Jamart, L., Kennard, H., Lampard, P., Solano Rodriguez, B., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Cai, W., Campbell-Lendrum, D., Capstick, S., Chambers, J., Chu, L., Ciampi, L., Dalin, C., … Hamilton, I. (2021). The 2021 report of the Lancet countdown on health and climate change: Code red for a healthy future. *The Lancet, 398*(10311), 1619-1662. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)01787-6

Ruszkiewicz, J. A., Tinkov, A. A., Skalny, A. V., Siokas, V., Dardiotis, E., Tsatsakis, A., Bowman, A. B., Da Rocha, J. B., & Aschner, M. (2019). Brain diseases in changing climate. *Environmental Research, 177,* 108637. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108637

Scheelbeek, P. F., Dangour, A. D., Jarmul, S., Turner, G., Sietsma, A. J., Minx, J. C., Callaghan, M., Ajibade, I., Austin, S. E., Biesbroek, R., Bowen, K. J., Chen, T., Davis, K., Ensor, T., Ford, J. D., Galappaththi, E. K., Joe, E. T., Musah-Surugu, I. J., Alverio, G. N., … Berrang-Ford, L. (2021). The effects on public health of climate change adaptation responses: A systematic review of evidence from low- and middle-income countries. *Environmental Research Letters, 16*(7), 073001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac092c

Semenza, J. C., & Suk, J. E. (2018). Vector-borne diseases and climate change: A European perspective. *FEMS Microbiology Letters, 365*(2). https://doi.org/10.1093/femsle/fnx244

Semenza, J. C., & Paz, S. (2021). Climate change and infectious disease in Europe: Impact, projection and adaptation. *The Lancet Regional Health - Europe, 9,* 100230. https://doi.org/10.1016/j.lanepe.2021.100230

Sharafkhani, R., Khanjani, N., Bakhtiari, B., Jahani, Y., & Sadegh Tabrizi, J. (2018). Physiological equivalent temperature index and mortality in Tabriz (The northwest of Iran). *Journal of Thermal Biology, 71,* 195-201. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.11.012

Shartova, N., Shaposhnikov, D., Konstantinov, P., & Revich, B. (2018). Cardiovascular mortality during heat waves in temperate climate: An association with bioclimatic indices. *International Journal of Environmental Health Research, 28*(5), 522-534. https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1495322

Shea, K.M., & American Academy of Pediatrics Committee on Environmental Health. (2007). Global climate change and children's health. *Pediatrics, 120*(5), e1359-67.

Sheffield, P. E., Knowlton, K., Carr, J. L., & Kinney, P. L. (2011). Modeling of regional climate change effects on ground-level ozone and childhood asthma. *American Journal of Preventive*

Medicine, 41(3), 251-257. https://doi.org/10.1016/j.amepre.2011.04.017

Shen, Y., & Lung, S. C. (2016). Can green structure reduce the mortality of cardiovascular diseases? *Sci Total Environ 566,* 1159-67.

Shen, Y., & Lung, S. C. (2020). Multiple impacts and pathways of urban form and environmental factors on cardiovascular mortality. *Science of The Total Environment, 738,* 139512. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139512

Shen, Y., Lung, S. C., & Cui, S. (2022). Exploring multiple pathways and mediation effects of urban environmental factors for suicide prevention. *Environmental Pollution, 294,* 118642. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118642

Shih, Y., Chen, J., Chen, Y., Yang, P., Kuo, Y., Chen, T., & Hsu, B. (2021). Impact of heavy precipitation events on pathogen occurrence in estuarine areas of the Puzi river in Taiwan. *PLOS ONE, 16*(8), e0256266. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256266

Shukla, P.R., J. Skea, R. Slade, R. van Diemen, E. Haughey, J. Malley, M. Pathak, J. Portugal Pereira (eds.) Technical Summary, 2019. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

Silveira, I. H., Cortes, T. R., De Oliveira, B. F., & Junger, W. L. (2021). Projections of excess cardiovascular mortality related to temperature under different climate change scenarios and regionalized climate model simulations in Brazilian cities. *Environmental Research, 197,* 110995. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110995

Solomon, C. G., & LaRocque, R. C. (2019). Climate change — A health emergency. *New England Journal of Medicine, 380*(3), 209-211. https://doi.org/10.1056/nejmp1817067

Suk, J. E., Vaughan, E. C., Cook, R. G., & Semenza, J. C. (2020). Natural disasters and infectious disease in Europe: A literature review to identify cascading risk pathways. *European Journal of Public Health, 30*(5), 928-935. https://doi.org/10.1093/eurpub/ckz111

Sung, T., Chen, M., Lin, C., Lung, S., & Su, H. (2011). Relationship between mean daily ambient temperature range and hospital admissions for schizophrenia: Results from a national cohort of psychiatric inpatients. *Science of The Total Environment, 410-411,* 41-46. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.028

Sung, T., Chen, M., & Su, H. (2013a). A positive relationship between ambient temperature and bipolar disorder identified using a national cohort of psychiatric inpatients. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology, 48*(2), 295-302. https://doi.org/10.1007/s00127-012-0542-5

Sung, T., Wu, P., Lung, S., Lin, C., Chen, M., & Su, H. (2013b). Relationship between heat index and mortality of 6 major cities in Taiwan. *Science of The Total Environment, 442,* 275-281. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.068

Torres, J. M., & Casey, J. A. (2017). The centrality of social ties to climate migration and mental health. *BMC Public Health, 17*(1). https://doi.org/10.1186/s12889-017-4508-0

Tran, H. M., Chen, T., Lu, Y., Tsai, F., Chen, K., Ho, S., Wu, C., Wu, S., Lee, Y., Chung, K. F., Kuo, H., Lee, K., & Chuang, H. (2022). Climate-mediated air pollution associated with COPD severity. *Science of The Total Environment, 843,* 156969. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156969

Wang, Y., Chen, Y., Ko, C., Guo, Y. L., & Sung, F. (2018). Pre-existing comorbidity modify emergency room visit for out-of-hospital cardiac arrest in association with ambient environments. *PLOS ONE, 13*(9), e0204593. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204593

Wang, W., Chen, H., Lin, C., Assavalapsakul, W., & Wang, S. (2020). Imported dengue fever and climatic variation are important determinants facilitating dengue epidemics in southern Taiwan. *Journal of Infection, 80*(1), 121-142. https://doi.org/10.1016/j.jinf.2019.08.010

Wang, Y., Sung, F., Chen, Y., Cheng, C., & Lin, Y. (2021). Effects of extreme temperatures, fine particles and ozone on hourly ambulance dispatches. *Science of The Total Environment, 765,* 142706. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142706

Watson, J. T., Gayer, M., & Connolly, M. A. (2007). Epidemics after natural disasters. *Emerging Infectious Diseases, 13*(1), 1-5. https://doi.org/10.3201/eid1301.060779

Watts, N., Adger, W. N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., Chaytor, S., Colbourn, T., Collins, M., Cooper, A., Cox, P. M., Depledge, J., Drummond, P., Ekins, P., Galaz, V., Grace, D., Graham, H., Grubb, M., Haines, A., … Costello, A. (2015). Health and climate change: Policy responses to protect public health. *The Lancet, 386*(10006), 1861-1914. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(15)60854-6

Watts, N., Amann, M., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Boykoff, M., Byass, P., Cai, W., Campbell-Lendrum, D., Capstick, S., Chambers, J., Dalin, C., Daly, M., Dasandi, N., Davies, M., Drummond, P., Dubrow, R., Ebi, K. L., Eckelman, M., … Montgomery, H. (2019). The 2019 report of the Lancet countdown on health and climate change: Ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate. *The Lancet, 394*(10211), 1836-1878. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(19)32596-6

Weaver, H. J., Blashki, G. A., Capon, A. G., & McMichael, A. J. (2010). Climate change and Australia's healthcare system - risks, research and responses. *Australian Health Review, 34*(4), 441. https://doi.org/10.1071/ah09829

Witt, C., Schubert, J. A., Jehn, M., Holzgreve, A., Liebers, U., Endlicher, W., & Scherer, D. (2015). The effects of climate change on patients with chronic lung disease. *Deutsches Ärzteblatt*

international. https://doi.org/10.3238/arztebl.2015.0878

World Health Organization (WHO). (2013) . *Protecting health from climate change: vulnerability and adaptation assessment.*

World Health Organization (WHO). (2015). *Operational framework for building climate resilient health systems.*

World Health Organization (WHO). (2021). Climate change and health research: *Current trends, gaps and perspectives for the future.*

Wu, P., Guo, H., Lung, S., Lin, C., & Su, H. (2007). Weather as an effective predictor for occurrence of dengue fever in Taiwan. *Acta Tropica, 103*(1), 50-57. https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2007.05.014

Yang, P., Yen, C., Tang, T., Chen, C., Yang, R., Huang, M., Jong, Y., & Yu, H. (2011). Posttraumatic stress disorder in adolescents after typhoon morakot-associated mudslides. *Journal of Anxiety Disorders, 25*(3), 362-368. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2010.10.010

Yang, L. T., Chang, Y. M., Hsieh, T. H., Hou, W. H., & Li, C. Y. (2018). Associations of ambient temperature with mortality rates of cardiovascular and respiratory diseases in Taiwan: a subtropical country. *Acta Cardiologica Sinica, 34*(2), 166. https://doi.org/10.6515/ACS.201803_34(2).20171101A

Yang, J., Zhou, M., Ren, Z., Li, M., Wang, B., Liu, D. L., Ou, C., Yin, P., Sun, J., Tong, S., Wang, H., Zhang, C., Wang, J., Guo, Y., & Liu, Q. (2021). Projecting heat-related excess mortality under climate change scenarios in China. *Nature Communications, 12*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-021-21305-1

Zhang, Y., Wang, S.G., Ma, Y.X., Shang, K.Z., Cheng, Y.F., Li,X., Ning, G.C., Zhao, W.J., & Li, N.R. (2015). Association between Ambient Air Pollution and Hospital Emergency Admissions for Respiratory and Cardiovascular Diseases in Beijing: a Time Series Study. *Biomed Environ Sci, 28*(5), 352-363. https://doi.org/10.3967/bes2015.049

Zhang, B., Li, G., Ma, Y., & Pan, X. (2018). Projection of temperature-related mortality due to cardiovascular disease in Beijing under different climate change, population, and adaptation scenarios. *Environmental Research, 162,* 152-159. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.12.027

Zhao, Q., Zhao, Y., Li, S., Zhang, Y., Wang, Q., Zhang, H., Qiao, H., Li, W., Huxley, R., Williams, G., Zhang, Y., & Guo, Y. (2018). Impact of ambient temperature on clinical visits for cardio-respiratory diseases in rural villages in northwest China. *Science of The Total Environment, 612,* 379-385. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.244

Zhong, J., Lee, Y., Hsieh, C., Tseng, C., & Yiin, L. (2019). Association between the first occurrence of allergic conjunctivitis, air pollution and weather changes in Taiwan. *Atmospheric Environment, 212,* 90-95. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.045

4.7 城鄉空間

詹士樑[1]、紀佳法[2] (城鄉土地利用)
林子平[3]、尤思喻[3]、王柳臻[3] (都市熱島)

[1]國立臺北大學不動產與城鄉環境學系、[2]國家災害防救科技中心、[3]國立成功大學建築學系

摘要

空間為各類活動系統的載體，存在著各領域因應氣候變遷作為的互動關聯，本節從空間面向整理臺灣近期氣候變遷衝擊評估與調適規劃成果，內容包括兩個部分，其一是整體性彙整各類空間的氣候變遷相關科研成果，聚焦都市、鄉村、國土保育地區及海洋資源地區等三類空間，其二為都市熱島效應，由於全球都市化人口比例持續增高，依據都市及區域發展統計彙編2021年統計資料，臺灣都市人口佔總人口數已接近80% (國家發展委員會，2023)。都市的人口與產業高度聚集，活動系統具高度複雜性，隨著氣候變遷都市氣溫逐年升高的趨勢明確，對都市空間的衝擊廣泛，涵蓋日常生活、產業、能源消耗等，對於都市的調適因應是一項重大挑戰，因此在本節加以彙整，提供未來議題探討的參考。

因應氣候變遷衝擊的調適作法，隨著空間類型而有差異，綜合自然環境與社經發展，可以概分為都市、鄉村、山地、流域、海岸海洋等，其中都市與鄉村因系統具高度動態與複雜特性，包含農業生產與自然生態等多重功能，這兩類空間在目前國土規劃架構下，佔有重要的功能與角色。 本段延續前一版氣候變遷科學報告架構，就都市與鄉村兩種型態的國土空間，對近年在氣候變遷調適因應的相關研究成果進行收集整理，從氣候變遷衝擊、脆弱度評估以及調適等三面向，呈現不同空間型態下的研究概況。另就管理而言，行政管轄範圍包含各類空間需綜合考量，縣市國土計畫即為其一，本節據此綜合整理目前之研究進展，從中獲致未來的參考應用知識，及後續推動的努力方向。

在全球暖化、快速經濟發展與都市化的共同影響下，都市地區的氣溫逐年攀升，

加上密集的能源使用、大量人工熱源排放、具涵水功能的綠帶與水域面積降低等，加劇升溫趨勢，形成惡性循環。都市是一複雜的「環境－生態－社會」系統，水域、綠地、山丘、台地等地形環境，不只影響都市的土地利用分布，隨著開發過程，同時也會對溫度、濕度、風速、風向、以及輻射特徵等造成影響，再依隨都市內部複雜的反饋及相互作用，成為規劃都市發展與調適因應的重大挑戰。除了自然地形地勢以及周遭環境條件，也必須了解人為活動造成的影響，本節另也透過對都市熱島議題的研究彙整、盤點與分析，提供具有科學依據的現況說明與建議。

4.7.1　城鄉土地利用

4.7.1.1　都市地區

都市因人口居住密集及高強度的經濟活動，使得在氣候變遷影響下具有高敏感度，因此建構及強化都市地區調適氣候變遷風險的能力為極具關鍵的挑戰，目前國際上已有許多與氣候變遷衝擊、減緩及調適的有關計畫及行動在都市中快速推展。都市研究應比照「聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (IPCC)」所建構的科研基礎，以協助都市因應未來氣候變遷的風險 (盧鏡臣等人，2015)，並追求永續發展機會 (周素卿，2015)。氣候變遷對都市社會與經濟的影響效應，將可能擴大非氣候的直接與間接社會壓力，如貧窮人口生計、自然資源劣化對社區影響等新興風險管理議題。現在都市已為人類居住及活動的主要區域，且全球超過50% 的總人口居住於都市地區，預期2030年將可能達到 60% 以上 (周素卿，2015)。各都市因應氣候變遷影響的行動差異，導致在受到衝擊時，反映出空間內不同的脆弱度及回復力 (蕭新煌與許耿銘，2015)。面對日漸擴張且人口高度聚集的都市腹地，為了建構及落實氣候變遷下的因應能力及策略，能否整合氣候變遷科學與人文社會領域關鍵議題，並導入風險、衝擊、脆弱度及調適規劃等理論中探討評估與管理面向，將是關聯臺灣城鄉地區能否永續發展的首要課題。

1. 都市空間衝擊評估

(1) 都市水資源與水患衝擊評估

臺灣因都市發展及人為活動需求下，不斷提升不透水地表面積比例，導致每逢極端降雨事件，就造成地表逕流大幅增加 (Liu et al., 2021)，使得水患成為都市地區主要

災害類型，加上受氣候變遷作用下，未來降雨分布型態及強度可能因氣候變遷而大幅度改變，都市地區所受到的社會經濟損失與威脅將會越趨嚴重 (鄒克萬等人，2014；Liu et al., 2021)。臺灣受雨季和夏、秋季之 (颱風) 強降雨影響下，加上河川坡度多陡峭且蜿蜒，易造成河川中下游區域排水系統失效、甚至引發潰堤導致決堤或氾濫，而造成中下游大範圍淹水及損傷事件。政府為了確保人民和財產安全，需提前規劃如加強都市排水系統、河堤、雨水下水道等防洪治理工程及建構必要的調適措施 (Liu et al., 2021)。2018年6月20日水利法修正通過，新增「逕流分擔」與「出流管制」專章，突顯了政府調整以土地空間管理方式作為水患治理思考起點，及加入地表逕流分擔的概念 (董娟鳴等人，2020)。整體綜合治水策略中的流域綜合治理計畫 (2014年至2019年) 與土地利用規劃有關的計畫目標即是「強化土地開發利用之出流管制，逐步加強過渡至逕流分擔」。於此計畫中，內政部主責全面檢視有關土地開發行為、都市或非都市等使用分區變更，進行嚴格審議規範，並將出流管制、低衝擊開發、海綿城市等概念，導入符合出流管制之滯蓄洪設施規定後，進一步協調各目的事業主管機關，將逕流分擔原則納入技術規範 (張學聖等人，2018)。

雖有許多研究指出，影響都市淹水危害度的重要因素之一為空間分布型態，然而國內近期仍多關注於都市土地利用與淹水損失間關聯性，較少針對都市土地空間分布對淹水實際影響進行探討。顧嘉安與劉家彤 (2020) 以臺中市村里尺度下六種土地利用類型，透過 FLO-2D 淹水模型模擬都市淹水潛勢，並利用多元迴歸分析方法探討各村里的土地利用型態與淹水潛勢之間的關聯。研究結果顯示建築用地之土地利用型態密集度對都市地區淹水情形具最明顯且直接的影響；而都市土地利用型越多元，淹水情形呈現越不嚴重。

「保護基準與逕流分擔」為控制現況土地利用型態不超出所建構的水利設施之可負荷能力，可視為流域整體規劃之方法 (張學聖等人，2018)。目前國內多藉由開發前後逕流變化的比較，評估土地利用與逕流間相互影響，以提出各種方案與情境模擬結果 (蘇惠珍等人，2009；張學聖與廖晉賢，2013；張學聖與謝昕穎，2015)。這些研究雖探討了土地利用與逕流間之關係，但缺乏明確定義土地使用之逕流責任及評估土地單元可分擔量。內政部營建署「都市總合治水綱要計畫」中已提出各土地使用類型逕流分配量規範，分配量主要依據各土地使用類型之滯蓄洪能力而訂定 (張學聖等人，2018)。

「出流管制」為避免未來土地開發行為加重現有水利設施之負擔 (張學聖等人，2018)。張學聖等人 (2018) 嘗試建立水責任架構，作為土地規劃由下而上銜接逕流分擔與出流管制的因應對策，並以臺中市大里溪流域進行實證分析。該研究提出一個新穎逕流管理觀念，如果水患視為損害，而加劇水患歸為過失，則土地開發增加的逕流所加劇水患的情形，應可列為過失責任。雖然目前國內缺乏法規規定造成或加劇水患應背負的責任，但研究建議流域整體系統後續管理，需仰賴政府部門規劃整體逕流分擔責任及標準，長期推動國土保育金、生態補償或找補機制等配套制度，以落實流域整體系統之規劃管理。

現在治水觀念已由單一點逐漸轉為全面考量，亦即將整體空間互動關係皆視為保護對象。量化淹水危害度對規劃調適及管理策略相當關鍵，且近期已有許多國內外文獻採用各樣的方法來評估淹水風險。顧嘉安與劉家彤 (2020) 進一步建議，為了使城鄉地區更具災害韌性，未來土地空間分析可依據不同氣候變遷及環境變遷情境模擬結果，整合社會經濟脆弱度因素進行改善水患之土地利用空間發展型態整體規劃，但目前國內很少研究可清楚描繪出社會經濟脆弱度 (Liu et al., 2021)。社會脆弱度為利用系統性指標，例如收入、性別、地區人口密集度、社會資源多寡及弱勢群體比例等，以評估選定地區的社會經濟情形在面對災害衝擊時潛在受損的程度，以及可能具有的因應、抵抗及調適能力。當一地區社會脆弱度越高時，即表示該地區可能遭受的損害越高，同時抵抗與調適能力越弱。社會脆弱度為相對的比較關係，並不代表實際的脆弱度值 (蕭新煌與許耿銘，2015)。評估區域社會脆弱程度高或低主要採用對比的影響比較 ，當災害發生時，社會脆弱度較高的區域代表可能發生較為嚴重的損傷 (Liu et al., 2021)。在高雄典寶溪的淹水風險評估案例中，採用設計調查問卷，應用模糊德爾菲法確定影響社會脆弱度的主要因素，再運用層級分析法確定主要社會脆弱度因素的權重，計算出社會脆弱度的主要影響因子，並產出社會脆弱度地圖，最後再統整水文模式產製的危害圖及社會脆弱度地圖，建構出供規劃調適時的風險地圖 (Liu et al., 2021)。洪政耀與林雪美 (2014) 提出社會脆弱度指標包含離婚與喪偶率、教育程度、扶養比、醫療資源、聯外道路、人口密度、災害識覺、調適行為等，可用於評估一地區居民的社會脆弱度。蕭新煌與許耿銘 (2015) 則提出都市氣候風險之社會指標。

災害脆弱度評估指標建立案例中，洪鴻智等人 (2014) 運用暴露度、敏感度、調適能力概念，建立流域脆弱度評估指標體系，並應用於探討高屏溪與曾文溪流域在莫拉克颱

風災害損失關聯特性。劉怡君與洪鴻智 (2022) 採用暴露度、敏感度、調適能力等3個面向建構地區尺度的颱洪災害脆弱度指標，並針對高屏溪流域進行脆弱度評估。張學聖與劉佩佳 (2015) 也分別就暴露度、敏感度與恢復力 (韌性)，綜整所蒐集之各類淹水災害研究所採納的指標後，再將地區脆弱度定義為統整潛在衝擊與調適能力下的結果，應用於探討脆弱度指標整合，並將空間關聯性納入脆弱度評估流程，以判別地區尺度間重要影響因子差異 (張學聖與劉佩佳，2015)。

國外已有許多研究探討災害、脆弱度與恢復力 (韌性) 指標，而我國在都市氣候脆弱度範疇近年相關實證研究已持續增加，說明臺灣科學界已逐漸清楚氣候變遷將引發的災害類型，未來可透過相關脆弱度指標之建立與評估應用，有系統的建立氣候變遷下不同脆弱度之空間調適方案與策略。

(2) 都市維生基礎建設衝擊評估

依據國家氣候變遷調適政策綱領 ([改制前] 行政院經濟建設委員會，2012) 中所述之重要維生基礎建設類型，包含交通系統與通訊系統、電力系統、供油系統、水利及供水系統等。在行動計畫中，交通系統之脆弱度採以暴露度、敏感度與調適能力等3種指標綜合計算，再分別以各指標找出相對應的關鍵原因進行調適策略規劃。依據李仕勤等人 (2018) 分析，交通設施建設位置多處於平原、山區及海岸帶，長期暴露於外在負面衝擊環境條件下，故屬偏高暴露度；於敏感度面向，如供油、供電與供水等系統的維生基礎設施，相當仰賴交通設施提供運輸功能，特別是在災難發生時發揮人員及物資補給作用；在調適能力上，因氣候持續變遷與異常，外在環境持續變化，交通設施的調適能力評估皆只達中等。黃俊能與郭燿禎 (2013) 回顧國際風險評估方法後，初步提出適用於臺灣關鍵基礎設施的風險評估機制，並以臺北車站作為評估對象，但並未考量氣候變遷危害影響。氣候變遷主要危害型態包含氣溫升高、降雨型態改變、海平面上升、強度及頻率升高的極端氣候事件等，這些對鐵公路設施可能造成的衝擊包括公路鋪面隆起、鐵軌挫曲、邊坡崩塌、運輸場站與場站聯外道路淹水，進而使交通中斷，衝擊經濟與民生 (李仕勤等人，2018) 。為因應氣候變遷所產生之衝擊，國內近年來發展鐵公路設施的風險評估方法，希望能有效研擬調適策略與調適行動計畫，以提升面臨氣候變遷之調適能力。張瓊文等人 (2016) 以「降雨型態改變」影響重大鐵公路系統服務功能，對社會、經濟及交通運輸可能受影響之範圍與程度，進行鐵公路系統結合坡災與淹水危害度的脆弱度及風險評估，並繪製出空間風險地圖。另外，林曜滄等人 (2019) 運用 GIS 技術，開發

公路橋梁災害管理平台，此平台中建立橋梁、防災資源、自然環境、社經環境、地形、航照影像等資料庫，以空間整合資訊方式，輔助橋樑氣候變遷風險評估及決策。此研究雖引用IPCC AR5所提出的風險定義，但未進行完整的氣候變遷風險評估。臺灣地區橋梁受地震、坡地土質，及氣候變遷下氣候異常所帶來的豪大雨影響，經常加重山區發生超大洪水及土石流，加上臺灣河川受早期大量採砂因素，橋梁受沖刷情形愈來愈嚴重，但目前臺灣仍缺乏導入氣候變遷危害進行橋梁風險評估的參考案例。交通鐵公路、公路、及橋梁等系統，急需投入以空間呈現的氣候變遷衝擊之脆弱熱點指認，以協助高風險區位的調適策略及措施之因應規劃。

氣候變遷下之都市產業經濟轉型將帶動都市「經濟－能源－環境」三者的連續關係 (李叢禎與彭信坤，2015)，因此都市地區能否永續發展，除了仰賴能源供應穩定度，另也需減輕能源設施之建設對整體環境的潛在影響風險。王京明與邱齡慧 (2016) 探討氣候變遷下，高溫熱浪衝擊之風險管理的調適選項預期成本效益量化分析評估。此研究運用澳大利亞麥考瑞大學 (Macquarie University) 所開發的 CATLoG 隨機成本效益分析軟體，以評估臺灣電力部門面臨氣候風險及調適決策之經濟可行性。此外，臺灣為高度依賴火力發電的國家，其中燃煤機組之發電量達870億度電以上，超過整體發電量的4成。雖然目前燃煤電廠並非以淡水作為冷卻水，但未來可能因電力需求增加而導致水資源於電力部門之供應隨之增加。氣候變遷造成夏季極端高溫熱浪事件的發生頻率增加，將提高能源部門夏季供電量 ，但目前替代電源方案尚未成熟，使得未來能源部門面臨電力供應的壓力，需著手因應暖化增溫之水-能衝擊急迫性。王迺卉等人 (2020) 即探究電力部門對水資源需求風險增加，進而評估未來水資源增耗程度對電廠的衝擊，並透過不確定性分析方法推估供電量所累加的火力電廠耗水量。低碳轉型為能源部門對氣候變遷另一因應措施，再生能源開發需考量地理空間區位及影響地理空間環境的關鍵因素，包含再生能源開發行為與相關的土地利用、能源治理與海岸資源保育等利益衝突，近期已成為臺灣的重要課題 (高仁川，2022)。例如王筱雯等人 (2022) 嘗試採取不同環境保護限制程度及發展區域面積考量下，盡可能迴避重要環境與自然資源範圍，規劃具綠能發展潛力的適宜開發區位。經濟部現階段在推動再生能源發展時，已納入利害關係人的溝通；例如：漁電共生專區導入環境與社會檢核機制，透過環境敏感與生態圖資套疊，並充分盤點利害關係人及公開蒐集社會經濟意見後，進行議題辨認審查；開發業者需就擇定場址之社會環境生態議題導入因應對策，減少光電開發過程中對社會及環境的影響。再生能源是我國推動能源淨零轉型的主軸，未來再生能源建置，宜強化考量社會經濟關鍵構

面，並評估潛在受開發影響的弱勢族群之社會脆弱度，及將利害相關人納入溝通及決策體系，以彌補被科學界所忽略的知識，期能避免社會所感受的實際風險及不當調適風險，達到政策預期推動的效力及目標。

供水穩定度管理成效，將會影響國家經濟發展及自然環境是否可永續利用。臺灣供水設施過去受到水文條件、環境變遷、土地利用及經濟發展等因素影響，現在又必須考量氣候變遷衝擊，因而臺灣的水資源供應問題，有必要因應氣候變遷衝擊，重新檢討目前水資源與土地利用的策略，並建構完整的水資源調適策略。依據「水資源領域氣候變遷調適行動方案 (112年至115年) (初稿)」，水資源供水設施的主要管道可分為水庫蓄水、水庫取水、河川引水、淨水、輸水及地下水抽用等，該方案 (初稿) 以此進行脆弱度評估 (經濟部等，2023)。供水關鍵基礎設施防護安全，仰賴各土地系統相依性與部門間的協調合作，但目前臺灣仍相當缺乏供水系統受氣候變遷影響之風險與脆弱度相關正式研究文獻，特別是應加強探討供水設施及系統在空間上風險及脆弱度分布情況。另外，產業結構的改變也會影響供水區位壓力，例如高科技製造業與服務業以往集中於北部地區，而傳統產業和農林漁牧業主要分布於中部與南部地區，但近年來南部和中部科學園區的發展大大提高工業用水需求 (周嫦娥，2015)。建議後續可加強探討產業用水區位於未來發展空間變遷之關聯性，此將是必要建置的水資源空間調適策略規劃基礎之一，以考量結合後續土地規劃之調整，促進土地利用、社會經濟、及水資源的永續發展。

2. 都市空間調適因應

(1) 都市水資源與水患調適

過去忽視城鄉發展與氣候變遷風險間的互動影響，現今各國意識到結構式調適策略存在能力極限，特別是水患地區，因而逐漸導入非結構式調適措施，其中空間管理被視為非結構式調適的方式之一。過去的研究觀察到結構性調適工程建構後反而增加受災風險增加，稱為堤防效應。堤防效應出現的關鍵在於對土地空間管理考量不足，已然成為全球調適管理與規劃者均必須面對的課題 (張學聖與徐敏純，2021)。

然而即使納入非結構式調適概念進行水患調適規劃，如海綿城市、低衝擊開發、逕流分擔及出流管制等，仍須留意各種方式仍有其適用空間尺度，應考量研擬大尺度的上位指導計畫 (張學聖等人，2018)。臺灣近期已有空間調適規劃案例，蔡綽芳等人 (2017) 採用二維漫地流模式進行現況和氣變變遷強降雨之模擬分析，探討淹水成因後研擬空間

調適策略，依淹水危害程度區劃空間調適策略，並導入都市計畫通盤檢討觀點落實空間調適，再針對空間調適策略結果，評估地區性整體調適效益，該研究利用文獻彙整出各式策略後，藉由專家學者檢視所規劃的策略在實務操作之適用性與合宜性，提出各淹水深度較高之已建成區、淹水深度較高之計畫發展區、淹水深度較低之已建成區、淹水深度較低之計畫發展區等4種空間分區之適切調適策略組合。鄒克萬等人 (2014) 以都市規劃的角度提出建議，整體空間規劃除劃設淹水潛勢圖外，應另依淹水潛勢程度檢討現有土地使用計畫，例如將高淹水潛勢地區劃設為具有蓄洪功能公園用地或開放空間；而低淹水潛勢地區，才考量劃設為住宅、商業等用地空間。

除了導入非結構性空間調適規劃技術外，也可善加應用脆弱度及韌性概念進行調適策略或行動之研擬。調適能力的建構必需考量整體都市發展策略，連結脆弱度與韌性，以建立調適與都市治理過程對恢復力 (韌性) 長期的循環作用 (洪鴻智等人，2021)。氣候風險評估包含鑑識危害度和脆弱度，危害度為無法藉由現有技術迴避或改變的氣候危害來源，因此降低脆弱度才能有效降低危害影響。國內研究如Chi et al. (2020) 引用Barnett & O'Neill(2013) 的研究，轉換脆弱度概念分析社區尺度的調適策略與調適行為，再予以全面檢討調適之適切性 (表4.7.1.1)。另外調適行動目的為因應未來預期即將發生的危害影響，除了降低脆弱度策略外，也可藉由提高系統的恢復力 (韌性)。洪鴻智等人 (2021) 採用指標導向方法，建構都會颱洪災害韌性構成指標，此指標組成概念為將恢復力(韌性)整體需要的環境條件予以區分為災前條件、災時應變、及災後調適等3個階段，並搭配韌性空間分布資訊，對應指標評估結果檢視未來須改善的環境條件。國內雖有許多研究利用土地空間分析進行調適策略研擬 (鄒克萬等人，2014；宋郁玲等人，2018；張學聖等人，2018；Liu et al., 2021)，但投入探討長期氣候與空間互動變遷情境下之災害脆弱度，及考量調適介入後之風險削減關聯性的研究則較缺乏。建議未來可增加投入結合土地利用變遷空間分析與脆弱度指標評估，進行調適策略預先研擬，再判斷其於未來情境中的潛在調適能力，藉此有效整合未來都市空間發展、土地利用與調適策略動態調整情境，以降低災害風險，並避免不當調適情況，例如劉怡君與洪鴻智 (2022) 即利用災前脆弱度指標空間分布情形，釐清造成高屏溪流域於莫拉克風災時損傷的關鍵脆弱度，再將脆弱度視為驅動因素探討是否影響民眾調適行為及其減災效力。

表4.7.1.1　風險概念下之調適作用之分類及說明

調適分類		定義	策略或行動
降低暴露度		降低一個部門、系統或社會團體對氣候衝擊的暴露度	重大的環境改變 (擴大防坡提、海牆及護岸系統，開發低窪土地、排水功能的溼地、開墾利用大片土地或提高地表)；大尺度的社會性工程，例如跨國或跨區域性的遷移整個社區。
降低脆弱度	降低敏感度	降低容易受到災害影響的部門、系統或社會團體。	改善建築設計及法規，使得結構較不易於受到風浪的破壞；抬升房屋以降低淹水的風險；建構輕便的房屋；養灘；短距離的重置整個住家，但鄰近原本的地點；土地改造及維持受限使用區域；軟結構性的海岸保護方法 (例如利用溼地作為屏障或種植紅樹林)。
	提高調適能力	提高一個系統、部門或社會團體調整變遷的調適能力，以幫助降低脆弱度。	加強海岸規劃制度以幫助政府確保調適反應是公平且有效；提高海岸管理執行上的認知 (例如規勸民眾不要清除紅樹林)以幫助擴大海岸系統的恢復力；促進正式及非正式的保險系統發展，以幫助民眾在洪患事件後的重建工作；提高可用的金融及信用服務，以幫助個體戶及社會儲蓄或借貸投資在調適策略上；加強正式或非正式的社會福利系統，以幫助社區避免在震盪的時間區間落為貧窮；加強在公共衛生服務上的提供，以幫助社區調整變遷中的健康風險；確保整體可用的教育，以協助個體戶進行更多非正式的調適決策，另一方面也能增加個體戶的收入；提高勞工的流動性，將可帶來資金匯入的利益，因此加大個體戶資金的穩定度，並提高教育及健康照護的可用性和其他類似的利益。

(資料來源：Barnett & O'Neill, 2013)

(2) 都市基礎建設調適

在交通系統面向，李仕勤等人 (2018) 回顧國外關於鐵公路氣候變遷調適方案研擬程序與重點，及如何評估調適方案制訂與執行優先順序。該研究透過檢視第二期調適行動方案之成效發現，鐵公路主管機關負責執行之行動計畫以資料蒐集分析與工具準備作業為主，例如鐵公路設施的規範建立或檢討 (如高鐵局執行訂定「鐵路橋梁耐震設計性能規範 (草案)」、公路總局執行「公路排水設計規範因應氣候變遷檢討服務計畫」)、風險評估 (如臺鐵局執行「建置鐵路邊坡管理系統」納入鐵路安全行車 6 年計畫 [2015-2020] 辦理) 以及監測管理等 (如公路總局執行「公路防救災資訊系統維護管理及功能擴充服務」)，未來仍需加強發展交通系統調適措施及評估執行效力的案例。

王京明與邱齡慧 (2016) 針對高溫熱浪風險下，冷氣運轉對供電需求的衝擊，提出可

供臺灣電力公司運用的10 項調適選項作為風險處理對策，並利用成本效益評估方式進行優先順序排序，其中第 1 項更改建築能源尖峰效率規章與標準、第 6 項提高冷氣度的參考溫度及第 5 項裝置絕緣隔熱系統等調適選項被評估為具較高有效性，建議可列為優先考量推動的措施，該究也提出9項新增調適選項，並建議納入未來成本效益評估。

臺灣長期發展水資源設施與建設，受氣候變遷提升脆弱度的情形下，水資源供需問題可由設施管理面與需求管理面作為首要的改善方向，進而再檢討必要的硬體設施 (童慶斌等人，2018) 。童慶斌等人 (2018) 認為水資源核心管理計畫擬推動關鍵議題需要研究與實務並行，目前水資源部門擬定了多元開發、節約用水、彈性調度與有效管理等四大策略，需要依各項策略基礎，研擬行動方案來解決物理環境限制，而核心計畫的重點議題即能與實務需求相互支援。水資源管理需有準確的數據作為決策的依據，但臺灣目前各用水標的用水量之統計方式仍存在調整空間，例如水利統計農業用水包括灌溉用水、養殖用水和畜牧用水，例如灌溉用水以引用水量估算，而非實際用水量；畜牧單位用水量和養殖單位面積用水量是否合理也需進一步討論；工業用水量以單位面積日用水量乘以工業面積，再乘以年工作日數計算，此以單位面積用水量推估工業用水量，長期也受到質疑 (周嫦娥，2015)。建議各部門別合理用水量可考慮水足跡 (water footprint) 作為評估工具之一，以確實評估農業用水和工業用水的合理用水量 (周嫦娥，2015)。水利署於第二期維生基礎設施領域調適行動計畫中，已完成水庫設施更新改善工程及評估、庫區清淤、疏濬清淤、堤防護岸、抽水站、滯洪池、建立防汛志工災情通報系統等硬體措施加強；農田水利處也辦理渠道及構造物更新改善工程 (陳育如，2018)。水資源供需考量包括維持穩定供水及合理需求，有必要投入發展知識整合與調適支援決策工具，除了建立用水區位於未來發展空間變遷之關聯性探討外，加強發展氣候智慧水服務系統 (童慶斌等人，2018)，也為一個可考量應用的調適決策工具。

4.7.1.2　鄉村地區

1. 鄉村空間衝擊評估

(1) 鄉村農地及生物多樣性衝擊評估

農業部自2013年開始推動農地調適規劃，包括程序研擬以及實作地區操作確認，於2017年起推展至各縣市政府，研擬農地因應氣候變遷調適之相關策略及行動計畫。農業部將縣市農地調適規劃推動作業分為兩個階段程序進行，第一階段為2016年至2017

年，將重點放在縣市農地脆弱度評估作業及氣候變遷調適教育，讓地方縣市了解氣候變遷相關的思維、脆弱度評估作業，並對後續調適策略研擬、國土計畫應用、脆弱度評估應用等相關資訊預作準備；第二階段則為2018年至2019年，配合農地調適規劃程序，將農地脆弱度評估成果帶入，透過推動小組會議、農地調適矩陣問卷、農地調適策略深度訪談等工具，進而研擬各縣市之農地調適熱點及類型、農地調適策略與行動計畫等。最後2020年則透過研討會與工作坊等互動過程，對於農業部門在氣候變遷調適成果進行整體的說明與宣傳，期能作為未來接軌各部門乃至空間單位的協作與應用基礎 (黃國慶等人，2020)。

李承嘉等人 (2016) 以「農地類型」與「氣候變遷下之農地脆弱度等級」的組合，區分「多元使用型 (環境生態保育型) 」、「農業生產維持型」、「農業環境平衡型」、「農業生產增值型」四類，分別建構農地氣候變遷之調適目標，據以進一步研擬農地調適的策略與行動計畫。延續該項成果，葉佳宗等人 (2019) 進一步整合農地調適規劃經驗與研擬成果，藉由不同面向的觀點與互動，繪製農產業風險地圖，用以檢視氣候變遷衝擊對農產業的可能影響程度，做為未來農產業相關政策與施政資源投入之重要參考。

農產業風險地圖的產製過程主要是透過農地脆弱度評估的經驗，以及IPCC AR4與IPCC AR5的內容定義，將農地脆弱度評估成果，以特定模式適度的轉換為農產業風險地圖；接著，積極討論農產業風險地圖與其他農業相關空間資訊之關係與應用方向；最後，嘗試研擬農產業空間政策因應氣候變遷評估機制與進行相關個案之示範操作，並以整個工作流程與成果提供相關縣市作為後續應用之參考。在此基礎下，黃國慶等人 (2019、2020) 採用IPCC AR5的主要架構為基礎建立農產業風險評估準則，根據各項準則元素的基礎特性，配合農地脆弱度評估成果與內容，初擬農產業風險地圖評估架構，作為農產業風險地圖繪製與評估的起點，並以臺中市與嘉義縣為示範地區，進行不同類型的初步評估。其中，農產業風險係由危害度、脆弱度、暴露度所組成，其中危害度參考農產業天然災害，建議以颱風、暴雨、乾旱與高低溫等四種氣候事件，為能更聚焦各項事件所造成的衝擊，彙整颱風與暴雨之淹水潛勢地區為代表，則危害類型可包括淹水潛勢、高低溫與乾旱等三項。脆弱度方面，為能有效連結過去調適規劃成果，並維持既有評估架構之規範，則引用農地脆弱度評估架構中之調適能力與敏感兩項資料；在暴露度方面則分別以農地與作物覆蓋為對象，其中操作過程中係以農地區塊為主要分析單元，透過面積權重，再以村里/作物覆蓋區位作為最後呈現的內容。

(2) 鄉村山坡地衝擊評估

臺灣有75%的土地屬於山坡地， 而山坡地除了受地形陡峭及地震活動影響外，季節性的颱風豪雨，易引發嚴重的坡地災情。山坡地土地不當的開發利用， 已造成許多坡地成為災害的高潛勢地區，為了限制坡地保育及降低損失，水土保持署即公布屬於環境敏感區之一的土石流潛勢溪流，用以作為可能受土石流衝擊的空間範圍基礎 (李欣輯與楊惠萱，2012；賴俊榮與何世華，2011)。為了有效降低坡地災害，不應只考量環境及工程面向的脆弱度，體制與社經條件更會影響災害衝擊發生時的災中調適及災後恢復的能力。李欣輯與楊惠萱 (2012) 發展一坡地災害社會脆弱度指標，並應用空間圖層呈現技術，協助指認導致防救災時脆弱因素的熱點區位，以針對性地投入資源加強防救災能力之建構。張志新等人 (2016) 以鄉鎮為單元產製全臺坡地災害風險地圖，主要依據水土保持署公告的山坡地範圍或土石流潛勢溪流，作為坡地鄉鎮分析範圍，研究分析的坡地災害風險因子包括降雨危害、綜合地文、歷史災害、崩塌比率、道路密度、人口密度與人類發展指標等7項。賴俊榮與何世華 (2011) 以南投信義鄉人和村人和聚落為研究案例，整合環境敏感區區位導入坡地土地利用變遷模式，模擬未來坡地土地利用行之變遷，探討現況與未來的崩塌區位及面積差異，以作為先期改善的規劃基礎及後續山坡地防災措施之管理區位參考。蔡光榮等人 (2021) 蒐集2007年至2017年之極端降雨事件，探討南化水庫集水區土砂災害發生驅力、災害風險認知、坡地崩坍發生機制及大規模崩塌後之土砂災害運移變遷特性等整合分析。范正成等人 (2013) 透過地文因子蒐集與篩選檢定、降雨參數選定，以邏輯斯回歸建置崩塌潛勢評估模式結合3種GCMs及3種未來情境，進行氣候變遷對高屏溪流域崩塌發生潛勢之推估。何謹余等人 (2020) 將氣候變遷調適與減災之風險概念以ISO/CD 1409 所定義的風險因素為基礎，提出風險評估指標及因子，並以新北市坡地進行氣候風險分析。坡地衝擊及風險評估在臺灣發展現況雖不乏指標建置及操作案例，且多能以空間圖層方式呈現評估結果，但較偏向過往傳統的坡地災害評估，建議未來可加強考量氣候變遷下坡地崩塌危害因子之衝擊及風險，以協助研擬未來時空變遷尺度下之調適策略與脆弱熱點資源投入。

2. 鄉村空間調適因應

(1) 鄉村農地及生物多樣性調適

林冠州 (2022) 利用SWAT模式分析石門水庫上游集水區於未來氣候變遷RCP4.5及RCP8.5情境下流域各月份水足跡及作物產量之變化，以此評估相關作物轉作對於石門水庫上游集水區水質改善及糧食產量增產之效益及可行性。蕭逸華與李欣輯 (2019) 針對大

甲溪流域在暖化情境之淹水衝擊下之災害調適策略，包括工程方法及非工程方法，並進行調適效益的評估。在農地空間調適方面，林文苑 (2022) 執行宜蘭縣溪北地區農地土地利用變遷分析之研究，期能做為未來國土計畫與縣市國土功能分區的規劃參考之一，並研擬農業調適與災害防救方案。另外有許多研究整合強調以農作物生產量、生產效率及農作產出品質之供給服務，探討整體農地生態系統服務之相輔關係，例如陳彥勳與李盈潔 (2020) 以景觀指數角度綜整提出農地景觀指數與生態系統服務之間的關係 ，並提出農地生態系統服務管理之政策建議，包含供給服務、調節服務、及文化服務等。農地生態系統的調節服務，主要強調氣溫調節、吸收溫室氣體、地表入滲及調洪蓄水等對人類生活環境的正面效益，因此農地分布區位需要考量與人類生活環境 (建地) 的互動程度，農地調適服務應結合既有綠帶，以增加農地與公共空間綠帶的連接度 (陳彥勳與李盈潔，2020)。研究也發現利用臺灣夏季天數、一日水稻田可蒸散潛熱功率及當期稻作耕地面積進行水稻田降溫能量計算，結果發現水稻田與建地共用邊界越多，代表越多建地可接收水稻田降溫的氣候調節服務，但越多建地與水稻田共用邊界，將使水稻田分布空間破碎化，則不利於供給服務 (陳彥勳與李盈潔，2020)。

國內針對氣候變遷農業調適策略之討論方面，農業部於2011年的「因應氣候變遷農業調適政策會議」中，確立臺灣農業面對氣候變遷的宗旨將以秉持健康、效率與永續發展的農業施政方針，研擬低風險、低碳排與新商機為願景的調適策略，其中包括維護農業資源與生態環境、加強農業產業調適、建構糧食安全體系、強化天然災害防救能力、擴大農業節能減碳，以及建立監測預警機制等面向及其策略措施如表4.7.1.2所示。

土地政策制度是影響農地變遷主要的驅力之一，促進農地釋出政策不僅可能擴張建地覆蓋率，對於農地生產及周邊環境都將造成影響，除造成生態系統服務功能降低外，更可能提高財產於未來氣候變遷危害之暴露度。許多研究雖已針對農地提出衝擊及脆弱度評估結果，但有效的農地調適將需整合未來氣候變遷因子納入國土空間進行整體考量與規劃，除考量與周邊土地及人類社會經濟活動之互動影響關係，也需權衡農地生產與生態系統服務功能間之利益。

(2)鄉村山坡地調適

張志新等人 (2016) 利用建立的坡地風險地圖套疊國土測繪中心之土地利用調查成果，分析坡地災害風險範圍之土地利用，並區分為增加或減少災害風險的土地利用型

表4.7.1.2　農業部提出之農業調適策略

調適策略面向	策略措施
維護農業資源與生態環境	1.友善使用農業用地；2.發揮邊際土地之生態及滯洪功能；3.提升農業儲水功能及用水效率； 4.建立生物多樣性風險管理策略
加強農業產業調適	1.研發抗逆境品種及設施；2.發展環境友善生產模式；3.建立漁業作業新秩序；4.推廣縮短食物里程消費觀念
建構糧食安全體系	1.提升糧食自給機能；2.確保糧食生產能力；3.建構糧食風險管理體系
強化天然災害防救能力	1.科技防災整備；2.全流域整體治理；3.強化農村自主防護
擴大農業節能減碳	1.發展節能減碳新技術及設施；2.推行「農產品碳足跡」制度；3.強化農業碳匯功能
建立監測預警機制	1.建立農業體系脆弱度評估指標；2.建構監測與預警機制

(資料來源：農業部網站，http://www.coa.gov.tw/view.php?catid=21675)

態，提出因應氣候變遷之空間調適建議。何謹余等人 (2020) 研究新北市坡地減災及調適相關策略與措施，將新北市減災2.0方案與新北市氣候變遷調適方案內現有行動計畫整理出共90項，整理過程中將兩方案內計畫項目重複、計畫內涵相同但計畫名稱不同之項目及性質相同之行動計畫進行整併後，提出21個對應坡地風險因子的策略與措施 (參閱4.2節表4.2.2.1及表4.2.3.1)。

4.7.1.3　資源保育及環境敏感空間衝擊評估

除前述所提之土地使用型態外，都市及鄉村地區空間範圍同時也包含各樣資源及環境敏感區位，而本節主要探討對象為國內依不同法令所劃設之各環境敏感區於氣候變遷衝擊評估與調適發展情形。海洋及海岸地區涵蓋多樣依中央主管機關權責法令劃設的環境敏感區位，如海岸管理法、濕地保育法、漁業法、國家公園法、野生動物保育法、文化資產保存法、森林法等，劃設型式上可區分為保護區、保留區、保育區等管理及管制型式。全國國土計畫在海岸、離島及海域的氣候變遷調適指導主要議題中，包含聚焦海岸土地使用於氣候變遷下的風險、及氣候變遷下海岸及海洋生態資源之衝擊。臺灣在海洋及海岸地區現況衝擊研究及計畫，仍較著重於傳統防災、社會經濟活動發展適宜性、人為干擾驅使之生態保育等面向之衝擊評估，較少整合未來氣候變遷危害因子數據及資料進行評估，例如王國樑等人 (2022) 以花蓮海岸為研究案例進行海岸災害風險評估，採以測站歷史數據及探測資料，分析海岸侵蝕、暴潮溢淹、洪氾溢淹及地層下陷等災害潛勢，再整合災害危害

度及災害影響範圍內人文社經損傷與防災應變能力之脆弱程度，最後提出海岸災害潛勢地圖，作為整體海岸管理計畫中海岸防護區劃設及防災調適資源投入參考方法之一；在生態保育方面，張懿與張水鍇 (2022) 針對46處依據野生動物保育法、國家公園法、漁業法、文化資產保存法、發展觀光條例 (都市計畫法) 等法規所劃設之海洋保護區，主要評估在人為干擾影響下，現行相關海洋保護區經營管理措施之成效；Lu et al. (2021)及陸曉筠等人 (2022) 檢視國家重要濕地保育政策因應環境及社經壓力情形，盤點全國國家重要濕地之資源投入與壓力來源，並將氣候變遷作為間接驅動壓力源的其中一項因子，但主要採用專家問卷方式進行包含沿海型及內陸型等區域位置在內的重要濕地之脆弱度評估。郭瓊瑩等人 (2013) 針對沿海保護區範圍進行調整，主要考量保護標的空間分布與現行相關環境敏感區位重疊狀況，作為保護區劃設範圍初步調整依據之一。海洋及海岸地區中之相關重要保護區或防護區，不乏氣候及環境變遷衝擊評估技術及現況風險案例建立，建議未來可持續投入考量長期氣候變遷影響，探討可能的危害因子對區位範圍或保護標的之衝擊，以將各保護區或防護區在依循有關上位法令及計畫指導下，協助將考量現況為主體的保護及保育工具，推展為具降低長期氣候變遷風險效力的轉型式調適策略。

4.7.1.4　科研與調適缺口

本節回顧近期都市空間及鄉村空間各別於氣候變遷衝擊評估與調適應用之案例文獻後，彙整提出下列後續在科研及調適規劃上的建議。

前述各類土地空間依其特性，在氣候變遷衝擊之調適各有因應的策略作為，唯行政區之管轄範圍包含各類空間，因此需要綜合考量，國土計畫將氣候變遷議題納入到空間規劃，即為整合行政區內各類空間調適作為的平台之一。國土計畫法於2016年5月1日公告實施，且已公告實施全國國土計畫及各直轄市、縣 (市) 國土計畫，後將於2025年4月30日前公告各直轄市、縣 (市) 國土功能分區圖。國土計畫的研擬需連結氣候變遷相關科研成果，透過整合空間計畫的指導功能，確立國土功能分區劃設、土地使用管理，及國土減災復育等指引，以引導國土資源保育及利用，期達成安全、有序、和諧之國土永續發展。直轄市、縣 (市) 國土計畫書依循規劃指引，應研訂「氣候變遷調適計畫」，其與「部門空間發展計畫」間的關聯，目前各縣市計畫書的處理方式上，一為將氣候變遷相關資訊作為部門空間發展之參考，另一則是綜合考量各部門發展計畫後，綜整進行氣候變遷調適之規劃設計，兩種方式均存在其對氣候變遷衝擊於計畫研擬的理解。唯就後者

而言，部門間的調適整合需有更多的資訊支援與協調過程。各直轄市、縣 (市) 面對氣候變遷衝擊之處理方式、使用資料以及研提之調適策略與方案等，皆依地方特性而有多元執行方式，其中在災害風險及脆弱度指標的建構與相關實證研究已累積豐富的成果，並已逐漸嘗試應用於規劃不同系統空間的防災調適方案與策略，但導入氣候變遷危害情境進行評估的案例，仍需持加強投入推展。後續可加強考量未來氣候變遷風險，利用風險評估成果指認不同時期的風險區位，並整合區位於未來發展空間社會驅力關聯性及現有的災害反應式調適能力，以協助規劃不同時期氣候變遷衝擊下的調適資源投入與策略。未來氣候變遷調適規劃應考量潛在受開發影響的弱勢族群之社會脆弱度，並將利害相關人納入溝通及決策體系，以權衡社會感受實際風險與風險評估結果的落差，除可促進政策預期推動的效力及目標，也能避免不當調適風險。

國土規劃為可統整空間內不同時期的環境變遷、社會人文與經濟活動等評估成果的政策規劃工具，而不斷加劇的氣候變遷將影響原本各空間使用區位的適宜性配置，因而國土空間需要整合各風險驅力及被影響對象進行通盤性的彈性規劃，包含自然環境及社會經濟面向，並隨未來時間推移下，因地制宜地提出適合不同區位屬性的調適方案及策略。建議未來可投入研發結合土地利用變遷技術與脆弱度指標之空間複合性風險評估技術，藉此有效結合未來整體空間活動發展、土地利用與調適策略，以此進行整合性調適策略先期研擬，再判斷其於未來情境中的潛在調適能力，作為預先評估調適執行效益的方法之一，包含協助探討轉型式調適策略之效力及可行性。國土計畫近期將完成第三階段工作，對於未來在計畫的開發管理以及通盤檢討二部分，如何調適氣候變遷衝擊，需有更多的案例以累積經驗，進而建立明確的運作機制。

4.7.2　都市熱島

1958年出版的英國皇家氣象學會學報，由學者Gordon Manley (1958) 最早提出「都市熱島(Urban Heat Island, UHI)」這個詞彙，用來指認都市氣溫高於郊區氣溫的現況，氣象學則將因人為開發行為造成的都市地區升溫現象稱為「都市熱島效應 (Urban Heat Island Effects)」，透過熱島效應可以對都市氣候造成影響，其中又依不同都市的所屬氣候條件、地理環境、都市型態等，出現不同的都市熱島衝擊，除高溫外，亦可能造成空氣品質惡化、能見度下降，改變降水型態與降雨區、影響日照時數等 (Gordon Manley

1958；林炯明，2010；國家實驗研究院，2017)。

2022年IPCC氣候變遷第六次評估報告工作小組二 (Working Group II) 一衝擊、調適與脆弱度 (Sixth Assessment Report, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability) 中的第6章 都市、聚落、關鍵基礎設施 (Cities, Settlements and Key Infrastructure) 提到將有更多人口集中於都市，暴露在高溫以及極端天氣的風險，對原本就相對高溫且高濕度的氣候區域來說，將較其他地區的人更快面臨超過「危險」等級門檻的生活環境極限 (IPCC, 2022)。

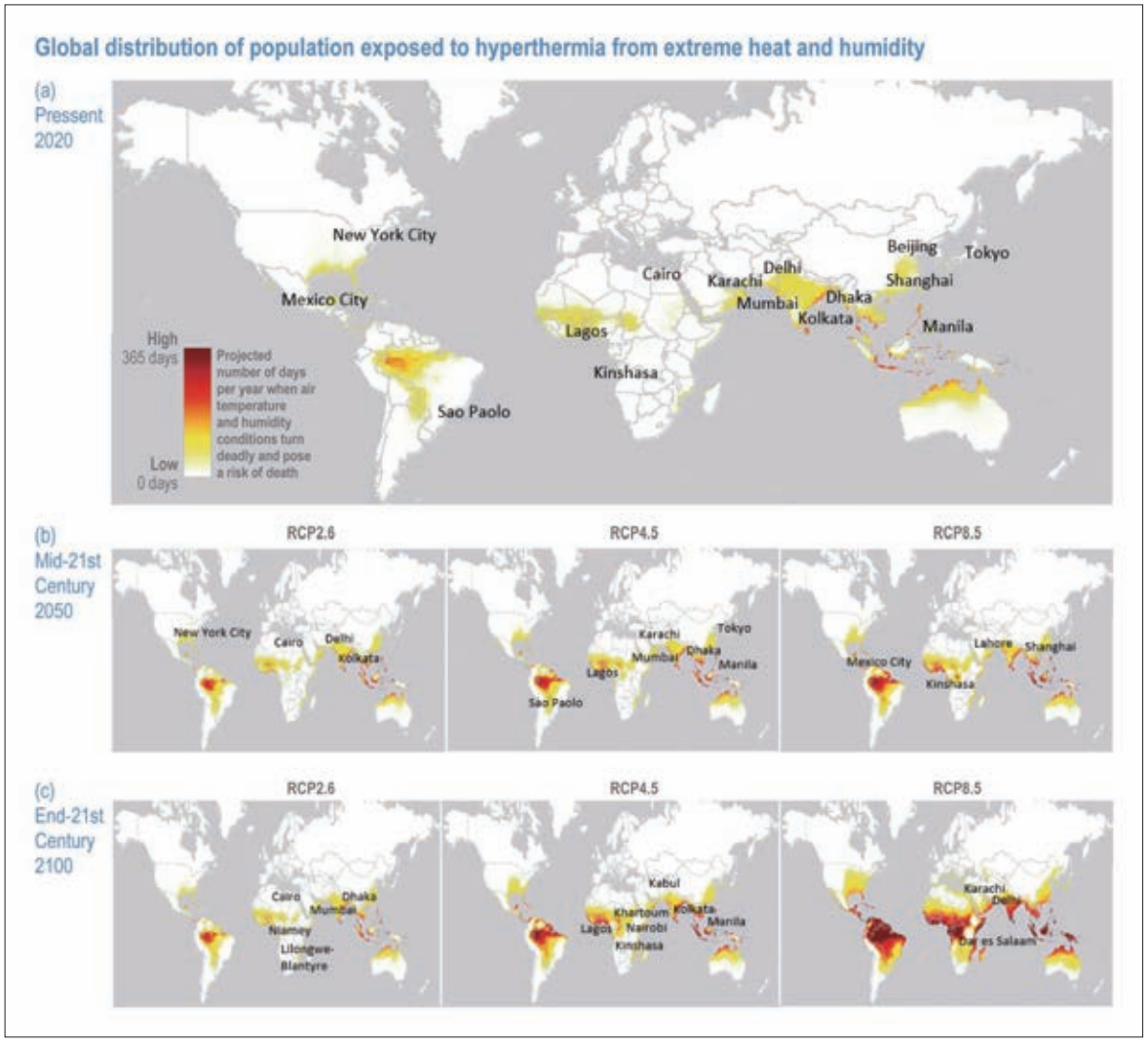


圖4.7.2.1　全球未來面對極端高溫以及高濕度的人口推估
(資料來源：IPCC WGII CH.6 Figure. 6.3)

IPCC (2022) 整合不同型態的都市，亦揭示都市核心區域的氣候改變，透過周邊生活圈交流脈絡，造成近郊更大範圍的氣候風險增加。換言之，除了核心都市本身受到影響，同時會一併擴大衝擊的影響範圍，導致近郊非核心地區的脆弱度上升；由此可知，重視大型都市的問題之外，也須積極關注中小型規模都市的個別問題以及規劃調適方針。

4.7.2.1　都市熱島研究與衝擊

高度的城市發展，將帶來環境、生態、健康、社會經濟等影響，在快速經濟發展與都市化下，大量的水泥建築物、不透水鋪面、各類經濟活動產生熱源、高密度開發活動等進入都市，以及原有自然藍綠覆蓋範圍縮減，造成環境失去平衡與氣溫調節的功能，使都市地區氣溫明顯高於周圍郊區，都市熱島效應日益嚴重。以雙北市為例，因盆地地形容易蓄熱，且為高度都市發展區域，市區中心溫度比郊區高出3°C以上的情況愈來愈頻繁，顯示都市戶外熱環境條件日益嚴峻，如何減緩並調適戶外高溫成為重要問題。此外，根據研究顯示，位於高溫市中心住宅的室內高溫，相較低溫郊區住宅更為耗電 (林奉怡，2019)。由此可知都市熱島帶來的衝擊，並不僅止於高溫不適、公共健康等，同樣也攸關社會經濟以及能源使用行為。此章節將從「監測與分析」開始說明透過科學研究，量測並推估都市熱島效應，並彙整臺灣都市熱島的現況，分析都市熱島相關衝擊，以及未來情境下都市熱島影響。

1. 都市熱島觀測與分析

(1)衛星影像與遙測資料

在都市熱島的研究中，衛星影像與遙測資料是觀測地表溫度 (Land Surface Temperature, LST) 與分析都市熱島重要工具之一，經演算後能有效呈現都市中地表與覆蓋物的表面溫度，研究顯示反演得出的LST具有相當程度的表徵性 (Avdan & Jovanovska, 2016)。其中，衛星影像更被廣泛應用於萃取都市中土地利用與土地覆蓋 (Land Use or Land Cover, LULC) 之資訊：透過分析空間高解析多光譜影像衛星資料，進行分類演算法識別地表土地利用分類 (Gxumisa & Breytenbach, 2017)。

探討都市發展時，局部氣候分區 (Local Climate Zone, LCZ) 常被用於分析土地開發對都市熱環境的影響，LCZ可對對都市形態進行分類，考量項目包含了土地覆蓋、

建物、植被等項，同時也針對都市中的地表粗糙長度 (Roughness) 與天空可視率 (Sky View Factor, SVF) 等重要參數進行量化，透過結合LCZ與都市氣候圖資，有助於進行都市熱環境評估，並協助提供決策者適合特定地區的調適與減緩建議策略 (Chen et al., 2019a)。

關於遙測資料，除可應用於都市熱島觀測以及都市土地利用規劃外，不同時期的歷史影像也有助於顯示具體的都市開發造成的環境變動程度，如：植被減少、空地比例下降、都市範圍擴展等，進而量化都市開發的實際影響程度。透過分析與了解都市開發對環境與氣候的影響，將有助都市規劃者制定長期且合適的都市發展模式，以平衡都市開發與環境保護 (Mukherjee & Singh, 2020)。除了較大範圍的衛星影像外，依照需求的區域尺度規模，亦可提供較高空間解析度的影像；另外，無人飛行載具也可應用於較小範圍的都市研究以及LST分析，惟需另行搭配對應之感測器才能對LST進行評估，因此較少直接應用於都市熱島相關研究 (Smith et al., 2021)。

(2)環境觀測資料與地表資訊

為了更好地理解都市熱島現象及問題，如何取得更貼近都市尺度且細緻的氣候觀測資料是為不可或缺的重要關鍵；臺灣氣象觀測業務正式運作迄今已逾百年，由中央氣象署分布全國的上百個氣象站 (包含人力進駐氣象站以及自動監測氣象站)，提供精確、維護良好、可靠的數據，惟因氣候監測站的設置條件，主要為不受人為行為影響或具有氣象特殊意義的位置，監測分析尺度為中尺度 (Meso-scale)，與一般進行都市活動分析的近地表微氣候尺度 (Micro-scale) 間存在相當程度的差距。另選擇在都市地區架設密集的觀測網，針對近地尺度進行連續觀測進行分析，以取得更貼近實際都市影響的降尺度 (downscaling) 的科學資料，例如：國立成功大學高密度地面氣溫測量網 (High-density Street-level Air temperature observation Network, HiSAN)、國立臺灣大學系統舒適度＋計畫等；再結合蒐集並應用地表資訊如土地使用、土地覆蓋、建築物高度資訊等，有助於更好的掌握都市建成環境狀況，直至街廓以及建築物尺度之氣候環境觀測。

其中，為了補足不同尺度資料取得的缺口，透過同時整合傳統氣象站的氣候數據、微尺度地表測量、地表溫度 (LST) 以及使用機載設備測量的光探測和測距 (LIDAR) 等方式，以解決大範圍觀測的不便、衛星數據分辨率不足，以及當前都市建成環境數據有限等問題 (Chen et al., 2016a)。亦可根據建築類型的獨特類型、變化和空間分佈、建築特

徵、建築材料以及綠色和透水鋪面的分佈，納入每個都市獨特的建築形態，以都市冠層參數 (Urban Canopy Parameterization, UCP) 的形式提供天氣、氣候和空氣質量等分析模型，模擬都市表面對上覆大氣的影響 (Ching et al., 2019)。

(3)歷史氣候資料與網格化預報資料

網格化資料可加強並細緻環境資料的空間分布，有助於即時資料展示與預警作業，美國利用3公里解析度網格化資料，應用在航空、太陽能、風能、農業、惡劣天氣與野火管理等進行預報 (Blaylock et al., 2018)；更有研究透過不同的網格大小，在歐洲8個都市中進行氣候預估分析，指出地中海與大陸型氣候都市之適當網格大小約為8公里 (Giunta et al., 2019)；亦有研究使用5公里網格預報模式進行韓國首爾高溫特定事件分析 (Jänicke et al., 2020)，而我國中央氣象署區域預報模式，則可提供東亞地區15公里及3公里解析度網格化資料；由此可知不同的氣候條件，以及不同的使用目的，不同的網格化資料可更完整呈現實際的環境條件。由國科會TCCIP計畫所產製之臺灣歷史氣候重建資料 (Taiwan ReAnalysis Downscaling data, TReAD) 長期氣候資料，是透過WRF模式 (Weather Research and Forecasting Model) 將歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 2017年所產出的第5版再分析資料ERA5 (ECMWF Reanalysis version 5) 進行動力降尺度 (Dynamic Downscaling) 至2公里解析度。其中，在模擬近地表的地貌分布時，使用當時土地利用及雲量分布等資料，統整全臺不同區域與縣市因監測點位密度及分布所產生的數據採量差異，及統計分析不夠具表徵等問題，詳如第三章－「降尺度資料說明」。國立成功大學建築學系建築與氣候研究室 (Building and Climate Lab, BCLab) 都市熱島研究團隊，擷取TReAD中2011至2018年期間的月平均逐時氣候資料，使用包含：近地2公尺的空氣溫度、相對濕度、輻射資料，以及距地10公尺風場資料 (風速為平均逐時資料，風向則為十六方位定向逐時眾數資料) 共五種氣象變數，製作臺灣都市熱環境的氣候地圖。

4.7.2.2　臺灣都市熱島現況

過去臺灣都市的熱島強度約在2°C到2.5°C左右，以臺北市為例：臺北市在2020年6月29日測得38.9°C的高溫，打破了臺北市6月份的最高氣溫紀錄，當日都市中心與周邊近郊的溫差以及熱島強度達3.5°C。2020年7月24日，臺北市更出現了39.7°C的高溫，打破了臺北測站自1896年建站以來，共124年的最高溫度紀錄，由當日臺北市的溫度分布

可發現：臺北盆地中央因地形下凹，導致容易蓄熱、散熱不易，在萬華、中正、大同區形成高溫中心。透過追蹤臺北市2020至2023年間7月都市熱島強度與範圍變化趨勢，結果顯示市中心的溫度持續增加，且伴隨高溫區逐漸擴張與延伸至桃園一帶，樣樣皆顯示臺灣都市面臨嚴峻的熱島問題，且高溫中心範圍擴大的情形更是不可小覷。以臺北市市區的溫度分布情形為例，如下圖所示：



圖4.7.2.2　臺北市市區於2020年7月24日之溫度分布圖

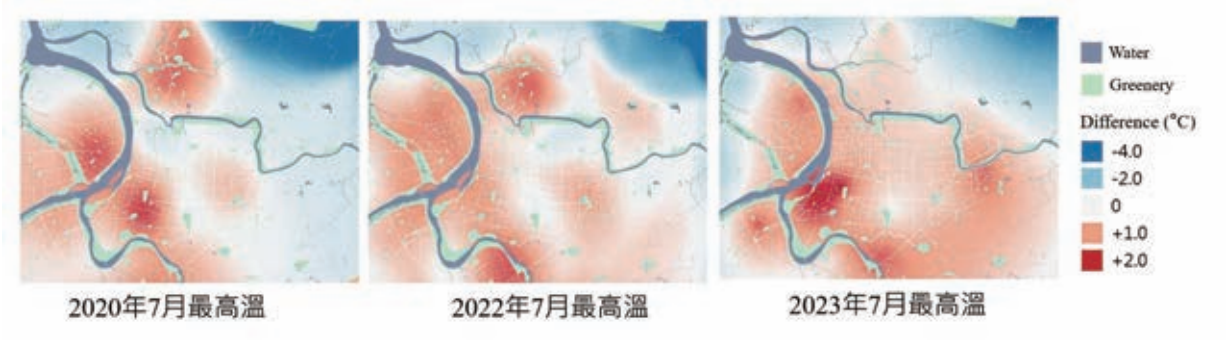


圖4.7.2.3　近年臺北 7 月都市熱島趨勢以及高溫擴張轉移分布圖

都市化發展增加了建成區的結構密度，可涵水的綠帶與水域面積減少、不透水的水泥與柏油路等鋪面及建築物增加，皆導致都市蓄熱加劇，此外，都市大量的人工熱源 (如空調使用、交通排放等)，使得都會與郊區間的溫差更趨顯著。研究指出，上述都市相關因素可能導致降水異常、都市地區惡劣天氣、都市下風向降水增強等 (Heisler & Brazel, 2010; Lin et al., 2011)。

綜合亞洲、歐洲和美洲都市多項觀測報告和相關研究，證明都市開發過程以及結構改變會引起局部對流出現變化，並導致降水模式以及降雨區域出現變動。通過整合眾多相關觀測計量模型研究，提出了「都市熱島效應」、「地表粗糙度大」、「懸浮微粒濃度高」共三項主要影響因素，以及多種機制導致都市降水異常的現象。都市的地表粗糙度確實會影響都市地區內部與周圍的氣流及風場，並在都市誘發的降水型態中產生重要作用 (Han et al., 2014)。因此，都市熱島效應和懸浮微粒濃度，對於濕熱氣候地區的都市氣候影響關係十分密切。

在都市懸浮微粒濃度較高的條件下，當空氣濕度大且同時出現強對流時，降水量可能會增加，尤其是在濕熱氣候地區的夏季時期，對流雷暴活動可在短時間內引起大量降水。因此，都市的空氣污染物排放，以及蓄熱高溫形成的局部對流可能導致市區和下風處的夏季降雨強度以及發生頻率增加，使得都市變得更加脆弱 (Choi et al., 2009)。

針對都市行人尺度進行熱環境分析及研究評估，並尋求提升熱舒適 (Thermal Comfort) 的措施與作為，不只可減緩都會區高溫化以及都市熱島擴張之問題，如若透過控制都市建築物能源使用情形，亦有助益於減少周邊建築群空調能源使用量，進而減少空調廢熱排放，降低戶外溫度，進而得以再緩和都市蓄熱，且餘熱難以排除的都市熱島現象。影響因素眾多且複雜，其中街廓建物間的熱通量交換以及風速，可視為非常重要的兩個影響因子 (Herrmann & Matzarakis, 2011; Lin et al., 2010)，都市內容易因建築物遮蔽或是街道座落的方向，造成白天太陽輻射量的差異，影響熱通量交換 (Cao et al., 2015; Takebayashi, 2015)；同時亦可能阻擋都市內自然風之流動。

採用LCZ分類方法查看都市類型，並結合中尺度氣候預測模型的都市冠層模型 (Urban Canopy Model, UCM) 和WRF，以全臺灣作為研究區域，生成行人層面的溫度分佈，對都市氣候進行評估。協助都市規劃者更恰當地制定不同地區的熱島緩解策略

(Chen et al., 2021)。依土地覆蓋和建築特徵，以及測站測量的氣候數據，建立了臺南以及臺北都市氣候圖 (Urban Climate map, UCmap)，構建熱負荷和風環境圖 (Chen et al., 2016b, 2019)。結合補中英全名ENVI-met模型來模擬臺南的室外熱環境 (Shih et al., 2020)。臺北市作為研究區域，使用地表溫度和地理資訊來評估亞熱帶都市特性，提出四種減熱策略：一、增加水體和植被的數量以及範圍，具有更大的覆蓋率和連貫性；二、在再生/開發過程中考慮建築物的高度、陰影等的影響；三、增加中低層建築之間的間距和綠化：四、緊湊低層建築的建造，避免使用鐵皮以及鋼浪板等建材(Yang & Lin, 2016)。

4.7.2.3 都市熱島與能源使用

都市地區大量使用能源、化石燃料等過程產生人工熱源外，密集的建築物亦多採用易蓄熱、易吸熱之表面材料，導致都市地區溫度明顯上升，又因大規模的開發行為，將原有的大面積綠植或空地，改為人造鋪面、結構或道路，失去原先土地蘊含的透水、含水與冷卻降溫的功能，反覆導致都市核心區域高溫不退的情況。

IPCC AR6 WGIII (Pathak et al., 2022) 報告中明確指出可透過建築設計 (包括加強遮蔭、自然通風、綠屋頂、垂直綠化等設計) 節省能源成本，亦有助於提升室內熱舒適以及增進人體健康；而透過推行都市綠化、藍帶 (水域、河川、池塘等) 規劃、以及涵水、透水鋪面等都市雨水資源管理措施，可改善都市蓄熱問題，並提升都市整體的熱舒適程度；另外透過推廣民眾進行戶外步行以及騎腳踏車等友善環境活動，除可降低公用事業和醫療保健成本，亦有助於緩解「能源不足」或是「過度仰賴空調系統」等問題。

在國內部分，高雄市鼓勵建築物內安裝綠化設施，以達節約能源和減少碳排放。並確立「適合擴展綠地」以及「適合發展綠色能源」等之區域，作為後續政策實施之建議 (Lin et al., 2019a)。臺南市作為研究區域，全年收集當地氣溫及相對濕度數據，使用EnergyPlus 獲得空調系統所需小時數和能耗，並用於模擬和分析微氣候對全市住宅過熱風險和空調能耗的影響 (Hwang et al., 2020; Chao et al., 2021)。臺南市作為研究區域，估計道路交通、建築物中電力和天然氣的使用以及系統內綠地和水體吸收的二氧化碳量。量化不同區域的碳預算，估算屋頂型太陽能板的減碳潛力，提供都市節能減碳的建議策略 (Lin et al., 2017a)。使用建築能耗的動態模擬和來自地理資訊系統的建築資訊，

開發了具有高空間分辨率的都市能源使用地圖。並通過建築能源模擬和不確定性分析確定建築能源使用強度 (EUI) 的基準值，可作為製定能源政策的重要參考依據 (Lin et al., 2017b; Chao et al., 2021)。

4.7.2.4　都市熱島與人體熱舒適

全球極端氣候劇烈影響，夏季高溫日天數逐漸增加，外加都市擴張，開發行為改變環境，加劇都市高溫化的情形，造成戶外熱壓力上升，而且時常感覺悶熱不適，不只影響生活品質，也導致冷氣用電量增加。研究結果顯示，高溫可造成空氣污染物揮發增加、光化學反應加速，影響臭氧濃度，其中揮發性有機化合物，可導致頭暈、過敏、氣喘等直接影響/損壞中樞神經系統、引發癌症的風險 (World Health Organization, 2005, 2013; Zanobetti & Peters, 2014; Katsouyanni & Analitis, 2009; Hertig, 2020; Dak Kopec, 2012)。因此，民眾在高溫都市環境中可能同時暴露在空氣污染及熱危害雙重衝擊之下，影響健康與公共安全。

IPCC AR6 WGIII的報告中第5、8、9章，以及Technical Summary裡都明確提及 提升室內以及室外的熱舒適 (Thermal Comfort) 的必要性，尤其在未來極端的氣候條件下 (如：更冷的冬天或更熱的夏天)，對能源消耗量將產生極大影響，此外，熱舒適的議題，將影響公眾健康 (Pathak et al., 2022)。

國內外環境監測及生物環境衝擊相關的各項研究盤點，檢視人體熱舒適範圍與室外熱環境條件之間的關係，提出適用不同氣候帶的選擇性指標 (Potchter et al., 2018)。使用臺灣歷史重建資料、即時環境監測資料，以及Google OpenStreetMap街景推估天空可視率 (SVF)，估算熱舒適參數，如：生理等效溫度 (Physical Equivalent Temperature, PET)、通用熱氣候指數 (Universal Thermal Climate Index, UTCI)、綜合溫度熱指數 (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) 等，並針對戶外大型活動進行熱舒適風險評估與分析 (Yu et al., 2021; Yu et al., 2020)。以全臺灣作為研究區域，從收集的 2,071 份問卷結果與熱舒適指標進行分析，顯示mPET適合亞熱帶氣候居民行為和感知反應良好 (Lin et al., 2019b)。臺南市作為研究區域，採用風險識別方法，整合 ENVI-met 預測模型與RayMan診斷模型，並加入IPCC AR4中SRES A1B未來情境推估每小時天氣，構建2011年至2040年、2041年至2070年和2071年至2100年，分別代表近期、中期和遠期未來，

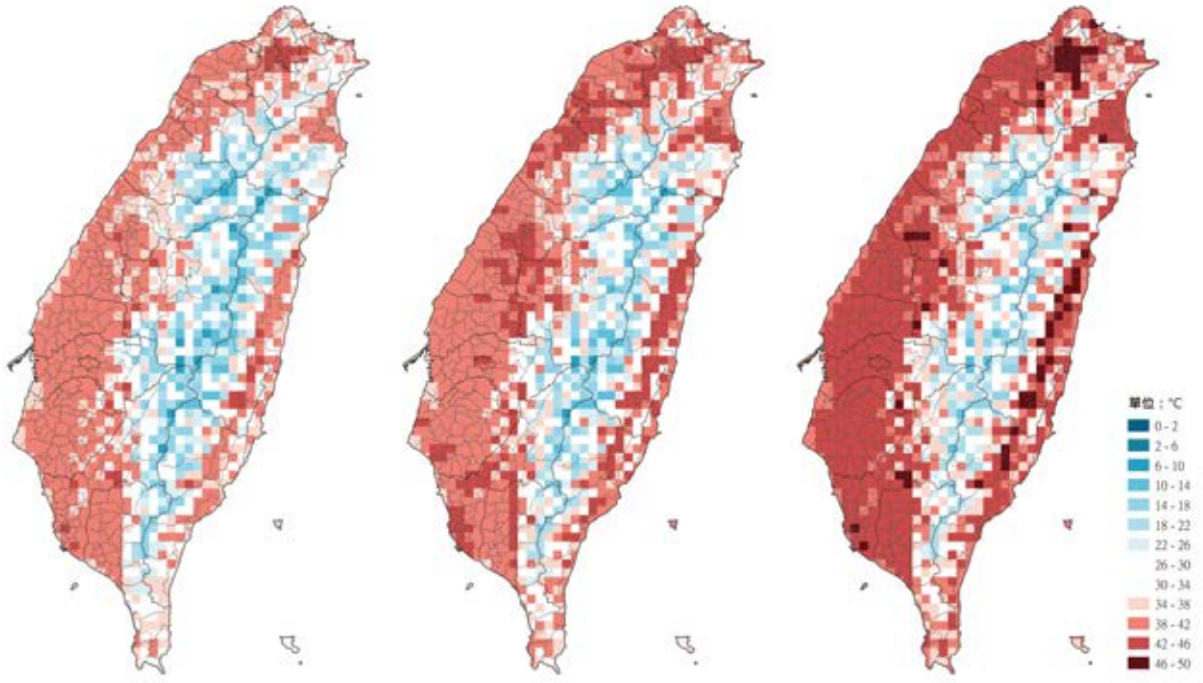
進行識別熱應力空間分佈和評估未來熱舒適度的變化。確認民眾以及遊客的高熱風險區域、暴露度以及脆弱度 (Huang et al., 2018)

4.7.2.5 未來情境對都市熱島的影響

2023年世界經濟論壇 (World Economic Forum) 發布風險報告，提到未來10年間影響全球的最大兩個風險「無法減緩氣候變遷 (failure to mitigate climate change)」以及「無法調適氣候變遷 (failure to adapt to climate change)」，如何調適人為改變環境對都市造成的衝擊，包括都市熱島以及強降雨等等，將會成為不可忽視的必要措施 (The Global Risks Report, 2023)。考量臺灣複雜地形對預測模式產生的影響，TCCIP計畫使用高解析度全球大氣模式 (High Resolution Atmospheric Model, HiRAM, 解析度25公里) 模擬結果，再應用經區域模式 (Weather Research Forecast, WRF) 降尺度至5公里的模式資料，並進行都市尺度資料的細節加強與修正，預測臺灣未來的氣候變化趨勢。使用TCCIP計畫以CMIP5實驗中28組模式的平均海溫暖化趨勢建置海溫，產製的基期 (1995年至2014年)、RCP8.5情境下的升溫2°C (2034年至2053年) 與升溫4°C (2073年至2092年) 共三個時間段，以溫度與生理等效溫度 (PET) 作為指標，對都市高溫風險的現況與未來趨勢進行分析與評估。

未來的升溫情境皆顯示：都市發展將造成都市熱島範圍擴張且強度增加，有鑑於此，進行更細緻且更貼近實際都市發展型態的升溫情境模擬，將有助於預測推估不同的未來情境，進行更全面的規劃；如果僅依現況來進行都市開發規劃與降溫因應，則非常可能在建成後數十年間，面臨「計畫趕不及變化」左支右絀的窘境，藉由更細緻的預估情境，輸入不同程度的高溫預估模式，沙盤推演以得出恰適的規劃策略。

因應未來升溫情境的都市降溫策略，應趨向零耗能建築 (Zero-Energy Building, ZEB) 策略來進行規劃－透過分析立面、照明控制、太陽能輔助冷卻和除濕、自然通風、建築結構中的熱量儲存和調節濕氣等綜合因素，避免仰賴室內環境控制手段 (空調、人工照明等)，減少過度為了維持舒適的基本條件，而產生的不必要能源耗損。同時考量實際的都市環境情境，配合戶外環境及使用需求來降低都市熱島的衝擊。



a.生理等效溫度_基期 (1995年至2014年)　b.生理等效溫度_升溫2°C (2034年至2053年)　c. 生理等效溫度_升溫4°C (2073年至2092年)

圖4.7.2.4　全臺生理等效溫度 (PET) 分布圖

註：如上a、b、c分別是以基期、RCP8.5全球暖化情境下升溫2°C以及升溫4°C的模式氣候資料，針對7月14:00之生理等效溫度進行推估，可發現高度發展之都市地區的數值皆明顯高於周邊郊區，都市熱島現象十分明顯，且隨RCP8.5全球暖化情境的推進 (左至右)，生理等效溫度的數值亦有逐年上升的趨勢。

4.7.2.6　都市熱島調適及科學缺口

《氣候變遷因應法》已於2023年2月公告為《溫室氣體減量及管理法》之進階版本，內容更是明確提出我國將在2050年達成溫室氣體淨零排放的目標，該法也將是未來我國氣候管理等一應相關法規的主要法源，除了規範都市開發以及各種人為活動的碳排放量，亦加強對於高溫危害、空氣品質惡化等項的重視與管控。有鑒於近年氣候變遷下的各種極端天氣衝擊，在避免大規模破壞既有環境的前提下，如何保持大眾生活品質，以及追求更為永續的都市發展模式，是未來各項產業發展必須審慎思考的重要議題。

1. 推動都市環境的降溫效益

由於建築產業以及良好的都市規劃，特別是「都市綠化與藍帶規劃 (Urban green

and blue infrastructure)」項目，在推動以及實踐聯合國永續發展目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) 上，具備相當大的潛力，透過優化建築與都市規劃以推行環境調適，不只可藉由提升熱舒適度，進而減少全球所有地區的能源成本壓力，同時帶來健康效益；綜觀而言，可提高勞動生產率、創造就業機會的優勢，以及減少能源不足以及能源安全的問題。

目前美國領先能源與環境設計 (Leadership in Energy and Environmental Design, LEED) 及日本建築物綜合環境性能評價體系 (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency , CASBEE) 等多個綠建築評估體系都已將熱島減緩納入必要的評估項目。CASBEE為日本可持續建築協會發展出的系統，其中用以評估都市熱島的CASBEE-HI乃根據都市通風 (背景風、盛行風、建物配置)、日照陰影 (喬木、屋簷遮蔭面積)、地表鋪面 (綠覆率、透水鋪面、日照反射率材質)、建築表面(垂直綠化、屋頂綠化)、設備排熱 (室外機安裝位置、耗能當量) 等，對都市熱島會產生衝擊及影響的環境因子進行量化分析，日本環境省的熱島對策技術檢核清單中，即採用了許多CASBEE中的環境模擬以及推估結果進行政策以及規範的參考。

臺灣的綠建築標章 (EEWH) 作為綠建築評估體系的建構項目與分類標準，具備較全面的環境考量，其中EEWH社區類手冊針對都市熱島的評估列在「健康舒適」範疇中，在對都市熱島的評估中，僅以簡易評估法分為「地表降溫效益」、「戶外遮蔭效益」及「戶外通風效益」等三個分項指標評估，並由過去研究經驗分別以個別加權係數進一步計算熱島環境得分，期能更貼近生態都市實務操作模式，有利於政策實施。惟社區類之外的分類皆尚未納入評估，推動成效仍有進步空間 (王安強與黃國倉，2018)。

2. 落實適合地方特性的降溫策略

在「國家氣候變遷調適政策綱領」原則性調適政策規劃下，考量其無法因應並針對每個縣市的各別既有現況及問題，此外，近年各地方政府也開始意識到氣候的問題，開始啟動相關的計畫及政策擬定，分析現況問題並訂立調適氣候的目標與對策，如何依地方特性推動適合地方的因應以及調適策略，為落實降溫的重要關鍵，此處列舉臺北市、臺中市、臺南市執行相關計畫的成果及流程作為說明案例。

臺北市和臺中市為身居盆地地形之都市，其中，臺北市的萬華、中正、大同區位於

盆地地形的中央，在高度的都市發展與地形劣勢下，蓄熱而形成高溫區 (林子平等人，2023；林子平等人，2022；Chen et al., 2019a)；臺中市的高溫區則是集中產業發展較為集中的大里、烏日區，以及臺中火車站及發展較早的舊市區一帶，且同樣具有盆地地形之劣勢 (林子平等人，2023)；臺南市則因為都市地鄰近海洋，受到大面積水域對都市溫度調節的影響，日間高溫區集中於內陸區域，溫度由海岸向內陸逐步增加，夜間則反之呈現都市地區高溫、內陸溫度較低之現象，與其所受海陸風循環相關 (Chen et al., 2018, 2019b)。可發現上述各都市的高溫背景條件皆不相同，故需針對不同都市特徵，分別規劃適當之通風、遮蔭、綠植等相關降溫因應措施。

臺北市由於高度都市化發展，造成建築物密集、街道狹窄、人口活動集中，除了導致通風散熱不易外，空調、交通工具等人工排熱更加劇了臺北市都市熱島效應。又因盆地地形，夏季蓄熱嚴重，盆地中心地區 (萬華、中正區一帶) 更是長年夏季高溫熱點。臺北市政府針對市區熱環境進行調查，分析夏季高溫分布特徵，除指認出高溫的空間分布，同時針對臺北市數個示範區域擬定熱島緩解策略，初步草擬相關都市設計準則條文，規劃後續將建構可量化評估「建築基地開發對都市高溫化影響程度」的工具，並研擬適用全市範圍的降溫都市設計準則，落實緩解熱島效應，提升戶外熱舒適性 (臺北市政府都市發展局，2021; 2022)。

臺中市依據過去文獻經驗及臺中市氣候特性 (Lin & Matzarakis, 2007)，將PET大於45.5°C的地區框選出並指認為熱區，作為政府未來將優先投入資源進行改善與調適策略的地區；並提出四大主要熱島降溫策略：水綠降溫、通風散熱、遮蔭涼適、節能減排，研擬納入不同尺度的都市空間規劃，針對高溫熱區提出整改善構想，結合水綠降溫、通風散熱、遮蔭涼適、節能減排等四大策略面向設立都市降溫之目標性導向策略，提出短-中期、長期之熱島降溫行動方案或相關擬定措施，並參考各國風廊政策擬定方式，以粗糙度網格及最小路徑法指認出風廊路徑，根據風阻特性及尺度等將都市風廊分為三個層級，並依等級研擬不同程度的管制 (臺中市政府，2021)。

臺南市建築物受日照及氣溫影響，頂層居室相當悶熱難耐，在颱風季節豪大雨來襲、地震頻繁、高溫炎熱氣候交替作用下，容易使屋頂防水層龜裂進而導致漏水，進而使建築物產生結構受損 (如鋼筋混凝土結構出現白華現象、龜裂、鋼筋外露與鏽蝕等)，不只嚴重影響市容景觀，亦導致都市居民生活品質以及健康安全產生潛在風險。臺南市

政府工務局依2019年9月12日臺南市建築開發建言座談會之建議，配合地方環境及改善都市的防災、居住生活安全之問題，歸納綜整建築可改善生活及節能等相關因素，加上對現代住宅永續與低碳的策略，研究發展其建築改善設施，發展出臺南「文化、樂齡、涼適」進展方向及「遮棚、熱舒適步道、空調友善設施、樂齡設施、屋頂設施、建築通風設施、複層牆、垂直綠化設施」等8個設施標的，同時提出臺南建築物改善草案初步條文，以落實緩解熱島效應並提升戶外熱舒適性 (林子平等人， 2020)。

4.7.3 結語

空間規劃具備促進整合氣候及環境變遷、社會經濟活動、生物多樣性保育等永續發展功能，是氣候變遷調適的重要工具之一。國土計畫法強調「為因應氣候變遷，確保國土安全」的目標，在全國國土計畫之「氣候變遷調適策略及國土防災策略」中，指認氣候變遷議題，並依各領域及各地區提出調適策略，顯示臺灣連結氣候變遷因應與空間規劃之重視。

國土空間關聯氣候變遷調適面向廣泛，包含水資源及水患災害、維生基礎設施、民眾健康、農地、生物多樣性、海洋及海岸地區等不同屬性空間領域，過往土地利用關聯之空間管理及管制計畫，在氣候變遷推估資料及技術仍處於發展過程的背景下，主要重點在調適規劃程序性的探討，以及現況環境敏感區位作為當時區位及範圍規劃與使用管制之依據，因此對考量長期氣候變遷各樣危害因子驅動下高風險區之風險指認及可供各領域共同參考之空間圖說，未來仍具投入研究需求，此也有助建構全國國土計畫上位整合及直轄縣、市國土計畫區域指導下空間調適之參考依據。土地利用變遷受到各空間社會經濟發展、全球及區域氣候與環境變遷情況等動態元素間的互動驅使，並直接或間接地與區域氣候產生相互影響，進而改變地區內的物理環境而引發災害或使原本災害情況加劇。回顧過往空間有關的研究文獻，據以整合未來經濟發展情境及氣候變遷情境之長期性土地使用變遷預測，並考量各類型空間的社會活動發展與生態關聯性，用以建構可供調適政策或措施研擬參考之區位評估資訊及提升調適有效性預先評估能力，將有利於逐步完備國土規劃所需之基礎依據與氣候變遷風險資訊，達到國土空間永續利用。

都市熱島 (Urban Heat Island, UHI)，最初以環境觀測數據分析得出的理論現象之姿

現身，揭示了都市與郊區之間的溫度差異，都市過度蓄熱的問題根源為人口過度集中、人工結構以及建築物分布密集、缺乏降溫的植栽綠地與水文、散熱以及空氣流通不足等；隨著都市快速發展，以及全球暖化加劇，極端高溫出現的頻率增加，都市熱島不再只是單純的環境現象，而是一個牽涉不同尺度以及不同領域的全球重要議題。儘管都市溫度節節上升，但並非無力回天。都市熱島的成因中仍有大半屬於人為因素導致，應可有更積極的調適行為介入以達緩解都市高溫之目標。

都市密集開發趨勢下，不止造成能源需求和溫室氣體排放量上升，由於建築能源規範和法規，通常基於成本效益和歷史氣候數據進行考量，未來氣候變化的不確定性，將導致新建築設計的參數預測相對困難；為避免導致無法因應未來熱舒適條件，可以通過適當的規劃、行動和策略，並透過開發多功能之方案、技術和材料，以減少溫室氣體排放，同時提高建築物的適應能力，例如透水鋪面系統、生物混凝土等材料與技術應用，不只可減少建築物生命週期排放，亦有助減緩都市熱島問題。透過對都市熱島問題的深入了解，促進民眾、政府、建築師、都市規劃者、營建工程業界和維護管理者間的對話與資訊交流，選擇適當且可行的都市降溫對策，期能透過提升各領域的環境意識與參與意願，改善都市高溫現況，以及提升都市面對未來氣候變遷與高溫的調適能力。

參考文獻

王京明、邱齡慧 (2016)。高溫熱浪衝擊下之電力風險管理與調適因應分析。**經濟研究，52** (1)，1-37。

王安強、黃國倉 (2018)。**創新低碳綠建築環境科技計畫「綠建築對都市熱島緩和及舒適度提升之量化效益評估研究」**。內政部建築研究所。

王迺卉、陳怡君、馮國倫、馬鴻文 (2020)。火力電廠能源與水資源交織之不確定性分析。**先進工程學刊，15** (2)，61-66。

王國樑、黃偉柏、姜重宇、古婉婷 (2022)。海域資料在海岸風險評估之應用—以花蓮海岸為例。**土木水利，19** (6)，15-23。

王筱雯、趙子元、連威迪、董安龍、林雨柔 (2022)。臺灣光電轉型「最小衝突」戰略情境與土地規模等地選址模式。**地理學報，103**，65-84。

郭瓊瑩、陸曉筠、紀佳法 (2013)。**臺灣沿海地區自然環境保護計畫資源調查操作手冊：102年度研訂臺灣沿海地區自然環境保護計畫資源調查操作手冊暨海岸復育諮詢服務**。內政部國土管理署。

行政院經濟建設委員會 (2012)。**國家氣候變遷調適政策綱領**。行政院101年6月25日院臺環字第1010036440號函核定。

國家發展委員會 (2023)。**都市及區域發展統計彙編**。國家發展委員會。https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=3767B021A1D7691F

李仕勤、朱珮芸、曾佩如、任雅婷、戴子純、吳清如 (2018)。鐵公路氣候變遷調適行動方案之研究。**運輸計劃季刊，47** (4)，245-270。

李欣輯、楊惠萱 (2012)。坡地災害社會脆弱度指標評估與應用。**都市與計劃，39** (4)，375-406。

李承嘉、詹士樑、戴政新、吳貞儀、黃國慶 (2016)。**氣候變遷下地方農地調適策略之實作探討—因應氣候變遷從地方做起：臺灣推動氣候變遷調適的過程、經驗與知識**。詹氏書局。

李叢禎、彭信坤 (2015)。因應氣候變遷的都市產業轉型及政策。**都市與計劃，42** (1)，39-57。

宋郁玲、林貝珊、涂建翊 (2018)。以社會脆弱性與韌性建構脆弱性單元的可能性分析。**地理學報，89**，1-42。

何謹余、童慶斌、王淙雅 (2020)。減災與氣候變遷調適在區域治理上之融合研究—以坡地災害為例。**農業工程學報，66** (2)。

林子平、洪國安、歐星妤 (2020)。**推動臺南特色建築初期發展計畫**。臺南市大台南不動產開發商業公會、臺南市不動產開發商業公會聯合委託研究報告。臺南市政府工務局。

林子平、趙立衡、林子安 (2022)。**臺北市戶外熱環境特徵調查及熱舒適提昇計畫**。臺北市政府。

林子平、趙立衡、林子安 (2023)。**臺北市開發基地降溫指標及都市設計準則專業服務委託案**。臺北市政府。

林子平、歐星妤、王柳臻、陳秉鈞、蔡沛淇、魏育瑛、王禹方 (2023)。**永續城鄉宜居環境－臺中都市熱島效應空間策略計畫**。臺中市政府。

林文苑 (2022)。宜蘭縣農地土地利用變遷分析之研究—以溪北地區為例。**建築與規劃學報，21** (1-2)，1-20。

林炯明 (2010)。都市熱島效應之影響及其環境意涵。**環境與生態學報，3** (1)，1-15

林奉怡 (2019)。**建構都市規模下的微氣候、住宅能源需求及熱風險空間分佈地圖的開發研究** (博士論文)。國立成功大學。https://hdl.handle.net/11296/5fen5s

林冠州 (2022)。氣候變遷下流域環境及永續農業調適策略之制定及評估—以石門水庫上游集水區為例。**農業工程學報，68** (4)，63-79。

林曜滄、宋裕祺、劉新達、張廷犖、盧明德、賴明俊 (2019)。公路橋梁防災與快速評估平台開發。**技師期刊，85**，40-45。

周素卿 (2015)。都市與氣候變遷特刊序。**都市與計劃，42** (1)，1-5。

周嫦娥 (2015)。臺灣水資源需求現況與管理策略工具。**土木水利，4** (42)，19-29。

范正成、楊智翔、張世駿、黃效禹、郭嘉峻 (2013)。氣候變遷對高屏溪流域崩塌潛勢之影響評估。**中華水土保持學報，44** (4)，335-350。

洪政耀、林雪美 (2014)。區域災害系統評估坡地災害風險程度—以臺東縣海端鄉為例。**地理學報，75**，29-56。

洪鴻智、徐牧謙、洪至萱 (2021)。都會颱洪災害韌性變遷及其與脆弱度、調適力之連結。**地理學報，99**，59-81。

洪鴻智、劉怡君、簡頌愔 (2014)。河川流域颱風災害損失與地區脆弱度—莫拉克颱風為例。**地理學報，74**，87-106。

高仁川 (2022)。海岸國土利用及能源治理的衝突與調和—以美國海岸管理法的「聯邦一致性條款」為中心。**臺北大學法學論叢，123**，1-81。

國家實驗研究院 (2017)。**熱島？熱倒！臺灣也有熱島效應嗎？國家實驗研究院**。https://www.narlabs.org.tw/xcscience/cont?xsmsid=0I148638629329404252&sid=0I164525413563887208&sq

臺中市政府都市發展局、國立成功大學建築學系建築與氣候研究室 (2021)。**臺中永續城鄉宜居環境—臺中都市熱島效應空間策略計畫**。臺中市政府都市發展局

臺北市政府都市發展局 (2021)。**臺北市戶外熱環境特徵調查及熱舒適提昇計畫**。臺北市政府都市發展局都市設計科、國立成功大學建築學系建築與氣候研究室。

臺北市政府都市發展局 (2022)。**臺北市開發基地降溫指標及都市設計準則**。臺北市政府都市發展局都市設計科、國立成功大學建築學系建築與氣候研究室。

陳育如 (2018)。我國重大維生基礎設施因應氣候變遷調適作業辦理情形之審計。**政府審計季刊，**

38 (3)，42-54。

陳彥勳、李盈潔 (2022)。農地景觀特徵之生態系統服務功能初探。**農林學報，67** (4)，233-248。

張志新、林又青、王俞婷 (2016)。坡地災害風險分級與土地調適策略擬定。**災害防救科技與管理學刊，5** (1)，73-93。

張學聖、徐敏純 (2021)。堤防效應下之水災風險變遷與風險認知研究。**都市與計劃，44** (2)，107-132。

張懿、張水鍇 (2022)。**海洋保護區經營管理成效評估及輔導計畫 (委託研究結案報告)**。海洋委員會海洋保育署。

張學聖、廖晉賢 (2013)。臺南市土地使用計畫之水災風險分析。**都市與計劃，40** (1)，59-79。

張學聖、劉佩佳 (2015)。考量空間關聯之地區洪災脆弱性研究—以雲林縣易淹水地區為例。**地理學報，79**，1-30。

張學聖、謝昕穎 (2015)。調洪式土地使用規劃架構之研究。**建築學報，91**，81-98。

張學聖、蘇麗元、程韋涵 (2018)。從逕流責任觀點下探討減洪土地使用規劃。**都市與計劃，45** (1)，81-101。

張瓊文、蕭為元、張益城、謝奇良、李家齊 (2016)。鐵公路系統氣候變遷脆弱度及風險地圖之研究。**運輸計劃季刊，45** (4)，251-276。

陸曉筠、紀佳法、邱文彥 (2022)。濕地資源盤點與脆弱度評估 (專題報導)。**內政部營建署城鄉發展分署111年度濕地保育電子公報**，7-22。

黃俊能、郭燿禎 (2013)。關鍵基礎設施風險評估機制之建立—以台北車站重要交通場站為例。**前瞻科技與管理，3** (1)，1-29。

黃國慶、李承嘉、詹士樑、葉大綱 (2020)。**109年度推動氣候變遷下農地資源空間規劃之農地調適策略計畫**。農業部。

黃國慶、李承嘉、詹士樑、葉大綱 (2019)。**108年度推動氣候變遷下農地資源空間規劃之農地調適策略計畫**。農業部。

童慶斌、曹榮軒、彭柏文、陳沛芫、李苑華、鍾秉宸 (2018)。氣候智慧水資源核心研究。**臺灣土地研究，21** (2)，181-208。

葉佳宗、劉小蘭、詹士樑、陳維斌、林映辰、黃國慶 (2019)。**農地資源空間規劃總顧問指導計畫**。農業部農業管理計畫。

經濟部 (2023)。**能源供給及產業領域氣候變遷調適行動方案 (112-115年) (初稿)**。經濟部。https://www.climatetalks.tw/%E6%98%93%E5%8F%97%E8%A1%9D%E6%93%8A%E9%A0%98%E5%9F%9F%E8%AA%BF%E9%81%A9%E8%A1%8C%E5%8B%95%E6%96%B9%E6%A1%88%E5%85%AC%E8%81%BD%E6%9C%83

鄒克萬、顧嘉安、郭幸福 (2014)。以馬可夫鍊細胞自動機模型模擬極端洪水對都市土地利用型態

之影響：以台北市為例。**都市與計劃，41** (1)，43-46。

董娟鳴、傅金城、呂韋儒 (2020)。暴雨管理策略應用於臺灣地區性都市設計審議實務之研究。**都市與計劃，47** (1)，53-86。

劉怡君、洪鴻智 (2022)。從災害韌性觀點探討流域之脆弱度、衝擊與調適。**都市與計劃，49** (1)，71-98。

蔡光榮、李明熹、廖怡雯、蔡雨 、李佳諠、陳胡榮 (2021)。氣候變遷引致南臺灣高屏地區偏遠河階聚落複合型土砂災害調查分析。**臺灣礦業，73** (3)，30-47。

蔡綽芳、柳文成、董娟鳴、陳柏翰、陳志鴻、呂韋儒 (2017)。氣候變遷下減洪規劃應用於都市計畫通盤檢討之探討-以新北市蘆洲都市計畫區為例。**建築學報，99**，49-71。

賴俊榮、何世華 (2011)。環境敏感區未考量下之土地利用規劃。**水土保持學報，43** (4)，429-448。

蕭逸華、李欣輯 (2019)。暖化情境下農業淹水災害之調適效益分析—以大甲溪流域為例。**農業工程學報，65** (1)，83-95。

蕭新煌、許耿銘 (2015)。探悉都市氣候風險的社會指標：回顧與芻議。**都市與計劃，42** (1)，59-86。

盧鏡臣、周素卿、廖昱凱 (2015)。落差與接軌？從國際發展看臺灣的都市氣候治理與研究。**都市與計劃，42** (1)，7-38。

蘇惠珍、戴秀雄、楊舒茜、陳昶憲 (2009)。臺灣實施集水區洪水出流管制可行性規範。**水保技術，4** (2)，102-111。

顧嘉安、劉家彤 (2020)。探討都市土地利用型態與淹水潛勢之空間關聯—以原臺中市為例。**都市與計劃，47** (1)，27-52。

Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors, 2016,* 1-8. https://doi.org/10.1155/2016/1480307

Barnett, J., & O'Neill, S. J. (2013). Minimising the risk of maladaptation. *Climate Adaptation Futures,* 87-93. https://doi.org/10.1002/9781118529577.ch7

Blaylock, B. K., Horel, J. D., & Galli, C. (2018). High-resolution rapid refresh model data analytics derived on the open science grid to assist wildland fire weather assessment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 35*(11), 2213-2227. https://doi.org/10.1175/jtech-d-18-0073.1

Cao, A., Li, Q., & Meng, Q. (2015). Effects of orientation of urban roads on the local thermal environment in Guangzhou city. *Procedia Engineering, 121,* 2075-2082. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.209

Chao, C., Hung, K., Chen, S., Lin, F., & Lin, T. (2021). Application of a high-density temperature measurement system for the management of the Kaohsiung house project. *Sustainability,*

13(2), 960. https://doi.org/10.3390/su13020960

Chen, Y., Chen, C., Matzarakis, A., Liu, J., & Lin, T. (2016a). Modeling of mean radiant temperature based on comparison of airborne remote sensing data with surface measured data. *Atmospheric Research, 174-175,* 151-159. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.01.004

Chen, Y. Cheng, F., Yang C., & Lin T. (2021). Explore the Accuracy of the Pedestrian Level Temperature Estimated by the Combination of LCZ with WRF Urban Canopy Model through the Microclimate Measurement Network. *Environmental Sciences Proceedings, 8*(1),14. https://doi.org/10.3390/ecas2021-10349

Chen, Y., Lin, T., & Lin, C. (2016b). A simple approach for the development of urban climatic maps based on the urban characteristics in Tainan, Taiwan. *International Journal of Biometeorology, 61*(6), 1029-1041. https://doi.org/10.1007/s00484-016-1282-0

Chen, Y.C., Yao, C.K., Honjo, T., & Lin, T.P. (2018). The application of a high-density street-level air temperature observation network (HiSAN): Dynamic variation characteristics of urban heat island in Tainan, Taiwan. *Science of the Total Environment, 626,* 555-566.

Chen, Y., Lo, T., Shih, W., & Lin, T. (2019a). Interpreting air temperature generated from urban climatic map by urban morphology in Taipei. *Theoretical and Applied Climatology, 137*(3-4), 2657-2662. https://doi.org/10.1007/s00704-018-02764-x

Chen, Y.C., Liao, Y.J., Yao, C.K., Honjo, T., Wang, C.K., & Lin, T.P. (2019b). The application of a high-density street-level air temperature observation network (HiSAN): The relationship between air temperature, urban development, and geographic features. *Science of the Total Environment, 685*, 710–722.

Chi, C.F., Lu, S.Y., & Lee, J.D. (2020). Ostensibly effective adaptive measures could potentially be maladaptations: A case study of the Jiadung coastal area, Pingtung County, Taiwan. *Coastal Management, 48*(6), 643-676. https://doi.org/10.1080/08920753.2020.1803575

Chi, C.F. (2022). Climate change maladaptive pathways and mechanisms in coastal area: A case study of the Jiadung Township, Pingtung County, Taiwan. Doctoral Dissertation, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University. Kaohsiung City, Taiwan.

Ching, J., Aliaga, D., Mills, G., Masson, V., See, L., Neophytou, M., Middel, A., Baklanov, A., Ren, C., Ng, E., Fung, J., Wong, M., Huang, Y., Martilli, A., Brousse, O., Stewart, I., Zhang, X., Shehata, A., Miao, S., … Niyogi, D. (2019). Pathway using WUDAPT's digital synthetic city tool towards generating urban canopy parameters for multi-scale urban atmospheric modeling. *Urban Climate, 28,* 100459. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100459

Choi, G., Collins, D., Ren, G., Trewin, B., Baldi, M., Fukuda, Y., Afzaal, M., Pianmana, T., Gomboluudev, P., Huong, P. T., Lias, N., Kwon, W., Boo, K., Cha, Y., & Zhou, Y. (2009). Changes in means and

extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific network region, 1955-2007. *International Journal of Climatology, 29*(13), 1906-1925. https://doi.org/10.1002/joc.1979

Giunta, G., Salerno, R., Ceppi, A., Ercolani, G., & Mancini, M. (2019). Effects of model horizontal grid resolution on short- and medium-term daily temperature forecasts for energy consumption application in European cities. *Advances in Meteorology, 2019,* 1-12. https://doi.org/10.1155/2019/1561697

Gxumisa, A., & Breytenbach, A. (2017). Evaluating pixel vs. segmentation based classifiers with height differentiation on SPOT 6 imagery for urban land cover mapping. *South African Journal of Geomatics, 6*(3), 436. https://doi.org/10.4314/sajg.v6i3.12

Han, J., Baik, J., & Lee, H. (2014). Urban impacts on precipitation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 50*(1), 17-30. https://doi.org/10.1007/s13143-014-0016-7

Heisler, G. M., & Brazel, A. J. (2015). The urban physical environment: Temperature and urban heat islands. *Agronomy Monographs,* 29-56. https://doi.org/10.2134/agronmonogr55.c2

Herrmann, J., & Matzarakis, A. (2011). Mean radiant temperature in idealised urban canyons—examples from Freiburg, Germany. *International Journal of Biometeorology, 56*(1), 199-203. https://doi.org/10.1007/s00484-010-0394-1

Hertig, E. (2020). Health-relevant ground-level ozone and temperature events under future climate change using the example of Bavaria, southern Germany. *Air Quality, Atmosphere & Health, 13*(4), 435-446. https://doi.org/10.1007/s11869-020-00811-z

Huang, K., Yang, S., Matzarakis, A., & Lin, T. (2018). Identifying outdoor thermal risk areas and evaluation of future thermal comfort concerning shading orientation in a traditional settlement. *Science of The Total Environment, 626,* 567-580. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.031

Hwang, R., Lin, T., & Lin, F. (2020). Evaluation and mapping of building overheating risk and air conditioning use due to the urban heat island effect. *Journal of Building Engineering, 32,* 101726. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101726

IPCC. (2022). in *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Jänicke, B., Kim, K. R., & Cho, C. (2020). A simple high-resolution heat-stress forecast for Seoul, Korea: Coupling climate information with an operational numerical weather prediction model. *International Journal of Biometeorology, 64*(7), 1197-1205. https://doi.org/10.1007/s00484-020-01893-1

Katsouyanni, K., & Analitis, A. (2009). Investigating the synergistic effects between meteorological variables and air pollutants: Results from the European PHEWE, EUROHEAT and CIRCE projects. *Epidemiology, 20,* S264. https://doi.org/10.1097/01.ede.0000362883.27030.8f

Kopec, D. A. (2012). Instructor's guide: *Environmental psychology for design (2nd ed.)*. Fairchild Books, (pp.250). ISBN: 978-1609011413

Lin, C., Chen, W., Chang, P., & Sheng, Y. (2011). Impact of the urban heat island effect on precipitation over a complex geographic environment in northern Taiwan. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50*(2), 339-353. https://doi.org/10.1175/2010jamc2504.1

Lin, F. Y., Hwang, R. L., & Lin, T. P. (2019a). Establish high-resolution hourly weather data for simulating building energy consumption in different regions. *E3S Web of Conferences, 111,* 04032. EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911104032

Lin, F., Lin, T., & Hwang, R. (2017a). Using geospatial information and building energy simulation to construct urban residential energy use map with high resolution for Taiwan cities. *Energy and Buildings, 157,* 166-175. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.040

Lin, T., Lin, F., Wu, P., Hämmerle, M., Höfle, B., Bechtold, S., Hwang, R., & Chen, Y. (2017b). Multiscale analysis and reduction measures of urban carbon dioxide budget based on building energy consumption. *Energy and Buildings, 153,* 356-367. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.084

Lin, T., & Matzarakis, A. (2007). Tourism climate and thermal comfort in sun moon lake, *Taiwan. International Journal of Biometeorology, 52*(4), 281-290. https://doi.org/10.1007/s00484-007-0122-7

Lin, T., Matzarakis, A., & Hwang, R. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment, 45*(1), 213-221. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.002

Lin, T. P., Yang, S.R., Chen, Y. C., & Matzarakis, A. (2019b). The potential of a modified physiologically equivalent temperature (mPET) based on local thermal comfort perception in hot and humid regions. *Theoretical and Applied Climatology, 135.* https://doi.org/10.1007/s00704-018-2419-3

Liu, W., Hsieh, T., & Liu, H. (2021). Flood risk assessment in urban areas of southern Taiwan. *Sustainability, 13*(6), 3180. https://doi.org/10.3390/su13063180

Lu, S.Y., Chi, C.F., & Chiau, W.Y. (2021). *Pressure on wetlands and vulnerability evaluation.* International Wetland Convention in Taiwan. Taipei.

Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 84*(359), 70-72. https://doi.org/10.1002/qj.49708435910

Mukherjee, F., & Singh, D. (2020). Assessing land use–land cover change and its impact on land surface temperature using LANDSAT data: A comparison of two urban areas in India. *Earth Systems and Environment, 4*(2), 385-407. https://doi.org/10.1007/s41748-020-00155-9

Pathak, M., Slade, R., Shukla, P.R., Skea, J., Pichs-Madruga, R., & Ürge-Vorsatz, D. (2022). *Technical Summary. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.* Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. https://doi.org/10.1017/9781009157926.002

Potchter, O., Cohen, P., Lin, T., & Matzarakis, A. (2018). Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment, 631-632,* 390-406. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276

Shih, W., Ahmad, S., Chen, Y., Lin, T., & Mabon, L. (2020). Spatial relationship between land development pattern and intra-urban thermal variations in Taipei. *Sustainable Cities and Society, 62,* 102415. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102415

Smith, P., Sarricolea, P., Peralta, O., Aguila, J. P., & Thomas, F. (2021). Study of the urban microclimate using thermal UAV. The case of the mid-sized cities of Arica (arid) and Curicó (Mediterranean), Chile. *Building and Environment, 206,* 108372. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108372

TAKEBAYASHI, H. (2015). Evaluation of wind environment in street canyon for use in urban calimate map. *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), 80*(715), 795-801. https://doi.org/10.3130/aije.80.795

The Global Risks Report. (2023). *World Economic Forum 91–93 route de la Capite CH-1223 Cologny/Geneva Switzerland.* ISBN-13: 978-2-940631-36-0

World Health Organization (WHO). (2006). *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide.* World Health Organization.

World Health Organization (WHO). (2013). *Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution–REVIHAAP Project: Final Technical Report.* WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark.

Yang, S., & Lin, T. (2016). An integrated outdoor spaces design procedure to relieve heat stress in hot and humid regions. *Building and Environment, 99,* 149-160. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.001

Zanobetti, A., & Peters, A. (2014). Disentangling interactions between atmospheric pollution and weather. *Journal of Epidemiology and Community Health, 69*(7), 613-615. https://doi.org/10.1136/jech-2014-203939



第五章
氣候變遷風險評估與調適

李明旭[1]、詹士樑[2]、陳永明[3]、李欣輯[3]、紀佳法[3]、張珈瑋[3]

[1]國立中央大學水文與海洋科學研究所
[2]國立臺北大學不動產與城鄉環境學系
[3]國家災害防救科技中心

摘要

臺灣為存在高度複合災害風險的國家，在氣候變遷衝擊程度不斷加劇下，自然環境及人類生活於可見的未來有可能遭遇更頻繁與巨大的災害，過往所發生的災害類型、衝擊程度及影響路徑等，將因氣候變遷的影響而越來越難以預測，原先建構的反應性 (reactive) 防災調適措施及作為，也可能隨風險程度持續擴大而逐漸降低其有效性。氣候變遷的影響是全面的，需要所有利害關係人參與及共同思考如何著手規劃使國家、社會及環境永續發展的氣候調適策略。2023年2 月公告的「氣候變遷因應法」調適專章明文規定中央目的事業主管機關研擬調適行動方案、調適目標與調適計畫、地方主管機關研擬調適執行方案及推動調適能力建構等有關辦理事項，其中調適有關方案研擬之完備程度，將取決於各事業目的主管機關風險評估建構及調適規劃之能力。為使我國未來調適規劃與執行得以朝向整合跨領域及跨部門協作的治理思維，本章研析國內外相關文獻，綜整論述氣候變遷風險與調適定義、國家氣候變遷調適架構，及科研缺口與未來治理展望等關鍵議題。

相較於溫室氣體減量事務，多可透過量化減碳效益而相對具體，由於氣候變遷調適之目的在降低未來氣候變遷所可能造成之風險，若未能將現況與未來氣候風險予以量化，則各項調適推動之效益便難以評估，亦容易造成規劃措施較屬於傳統防災應變型的作為。本報告前列章節雖已彙整關鍵部門及領域研擬調適計畫所需之未來氣候推估科學資訊、領域衝擊評估技術與調適研究回顧、科研缺口等重要參考資訊，但本章主要針對系統性的氣候變遷調適管理過程，即為始於現況與未來風險評估並鑑別未來調適缺口，再進而規劃可降低未來氣候變遷風險的調適措施與持續監測修正的過程。建構規劃與推動過程中之相關利害關係人在風險及調適的認知與參與，及各部門領域調適規劃之操作流程與機制，為我國必要優先推動的工作。調適是否成功執行且具長期有效性，則需進行監測與階段性效益評估，包含探討調適措施是否降低風險和脆弱度、有助於社會與生態系統韌性建構、促進經濟永續發展、及是否具調適治理和制度彈性等方面。

氣候變遷調適規劃與推動為一複雜且需動態調整的研擬與執行過程，除氣候及社會生態系統發展的不確定性外，也需考量同一時空尺度內，其他危害因子的複合、連續、累加等相互作用，及對有關保護或保全對象之衝擊動態因果連結，以降低系統間不當調適的發生機率及影響。國內過往較著力於單一特定領域所受衝擊之調適因應，且多投入具短期效力的災害因應調適，並隨災害影響程度加劇，而提升因應量能的漸進式調適為

主，往往忽略發展長期且永續的轉型式調適策略的重要性，例如國土空間的調適規劃與全體利害關係人在氣候風險議題上，是否能將長期氣候變遷風險的時間尺度，整合應用於評估調適的未來成本與效力之更迭。於氣候議題上僅依賴漸進式調適將無法因應氣候風險的不確定性，且阻礙了創新調適思維的發展，也降低跨領域及跨部門在調適議題上尋求減緩共效益的機會。國家調適治理機制需整合跨部門及跨層級的協作，除會面臨難以克服的氣候不確定性外，也需循環性針對各時期調適過程中存在的社會經濟、物理環境、生態、地方文化等障礙與限制提出有效的解決方案，以促進調適執行達到預期效力，並避免不完善的規劃驅使脆弱族群更形脆弱。本章節參考國內外關注的調適關鍵議題，並盤點國內相關研究進展情形與方法後，希冀提供我國提升跨領域、跨部門調適的治理思維，進而使未來各部門的調適規劃與執行能具體回應降低長期氣候變遷的風險及符合社會期待的永續發展願景。

5.1 氣候變遷風險及調適

調適工作為跨領域與跨部門之複雜議題，國際持續對調適與風險評估，提出不同方法與操作經驗。以下摘要國內外重要風險定義、風險組成因子、風險評估流程與方法，作為我國相關重要政策與科研等應用參考。

5.1.1 氣候變遷風險定義

欲落實風險評估，需釐清風險的定義與組成。聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次評估報告 (the Sixth Assessment Report, AR6; IPCC, 2022) 指出，風險為對人類社會系統或自然生態系統所造成的可能損害程度，而組成因子包含危害度、暴露度及脆弱度 (圖5.1.1)。

目前定義風險的主要因子涵蓋危害度、暴露度、脆弱度等因子，危害度指可能發生的氣候相關物理事件、趨勢或物理影響，可造成生命損失、傷害或其他健康影響，及財產、基礎設施、生計、服務、生態系統及環境資源的損害和損失；暴露度指存在於可能受不利影響的地方和環境中的人群、生計、物種或生態系統、環境功能、服務和資源、

基礎設施，或經濟、社會或文化資產等其受不利影響之程度；脆弱度則是敏感度及調適能力的集合，包括對危害的敏感性或易感性以及缺乏應對的調適能力 (IPCC, 2022)。氣候的變遷 (包含環境自然變異機制與人為的氣候變遷)，以及社會經濟的變遷，而調適跟減緩行動的效果、社會經濟的發展 (如人口與產業結構的變化) 等因子都會影響脆弱度、危害度與暴露度，造成風險的變化。

其他國內外風險定義可參考表5.1.1 (何謹余等人，2020)，使用任何風險定義進行評估的目標，皆是為了規劃及確定管理手段以降低風險至所設定的損傷目標或達到社會廣泛可接受的風險程度。依據上述定義，使用「風險」的用字時需注意其適用性，如風險不適合作為概率或機率的同義字或僅用於解釋物理危害度，如僅強降雨頻率與強度增加，則不適用「淹水風險」等用字，僅於前述氣候危害對人類與生態造成之影響與衝擊 (如人員傷亡、財物損失、水資源受汙染等) 方能稱為淹水風險。我國「氣候變遷因應法」第3條將氣候變遷風險明文定義為「氣候變遷衝擊對自然生態及人類社會系統造成的可能損害程度……而氣候變遷風險的組成因子為氣候變遷危害度、暴露度及脆弱度」，各研究單位及政府部門應依此作為通用的氣候變遷風險定義。



圖5.1.1　風險組成示意圖 (IPCC, 2014)

表5.1.1　風險定義說明及來源

風險定義	內容說明
風險 = 概率 × 後果	風險是概率和後果的乘積，後果：潛在的財富損失
風險 = H × C × E	H：自然危害度，E：在風險中的要素，C：後果
Rt = Rs × E = (H × V) × ERs = H × V	Rs：特定風險，H：危害度，V：脆弱度，Rt：總風險，E：在風險中的要素
風險 = 危害度 × 脆弱度	風險是危害度和脆弱度的產物
R(DI) = P(H) × P (S\H) × P (T\S) ×P(L\T)	(DI)：個人風險，P(H)：危害度，P(S\H)：空間影響的概率，P(T\S)：時間影響的概率，P(L\T)：個人生活損失的概率
Rt = Σ (Rs × E) = Σ (H × V × E)	Rt：總風險，Rs：具體風險，V：脆弱度，E：在風險中的要素
Risk = E × H × V	E：在危險中的元素；H：自然災害事件的危害，V：脆弱度
風險 = (危害度×脆弱度) /災害管理	處於危害之中的要素與災害管理作用是相反
R(PD) = P(H) × P(S\H) × V(P\S) x E	R(PD)：特定風險(財產)，P(H)：危害度，P(S\H)：滑坡影響財產的概率，V(P\S)：脆弱度，E：財產價值
Rs = P(Hi) × Σ (E x V x Ex)	
Rt = ΣRs (Landslide events 1,⋯, n)	Rs：特定風險，Rt：總風險，P(Hi)：特定滑坡程度的危害(Hi)，E：有風險元素的總價值，V：脆弱度，Ex：暴露度
Risk = H × E × V	
Risk = H × V × Amount	H：危害度，E：暴露度，V：脆弱度，Amount：在風險的要素
Risk = (H × V) / Coping Capacity	H：危害度，V：脆弱度，Coping Capacity：減少災害風險的因應能力程度
Risk = (H × E × V) / Capacity	H：危害度，E：暴露度，V：脆弱度，Capacity： (軟+硬對策)/2
Risk = (H × E × V)	H：自然危害度，E：暴露度，V：脆弱度， (用於土石流)
Risk = (H,E,V)	H：自然危害度，E：暴露度，V：脆弱度
Risk = (H,E,S)	H：自然危害度，E：暴露度，S：敏感度

(資料來源：何謹余等人，2020)

5.1.2　氣候變遷調適定義

在生物學領域，調適可解釋為有機體因應周邊環境所產生的變化 (Engle, 2011)。但在氣候變遷領域，調適是調整自然或人類系統，並利用有益的發展機會或減輕可能的負面影響，以因應改變的環境 (NRC, 2010)。在地方尺度，調適又可簡易說明為幫助提升社區生計韌性的因應行動 (Rojas Blanco, 2006)。聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC, 2007) 定義調適為因應實際或預期

的氣候及其改變造成的影響與過程；對人類系統而言，調適目的為尋求減少負面衝擊或發掘有利的機會；但對部分自然系統來說，人類的介入可促使生態系統針對預期的氣候及其影響進行調整。我國於民國112年2月公告之「氣候變遷因應法」第3條第2項，明文率定氣候變遷調適指「人類與自然系統為回應實際、預期氣候變遷風險或其影響之調整適應過程，透過建構氣候變遷調適能力並提升韌性，緩和因氣候變遷所造成之衝擊或損害，或利用其可能有利之情勢」。

調適廣泛應用於人類社會發展，從工程技術，例如海岸防護；到行為轉換，如糧食和遊憩活動項目的選擇；管理方面，例如改變農作行為慣例；及公共政策，如制定規範條例等 (Ayers & Huq, 2009)。調適的空間尺度可從地方到區域，時間尺度可從短期至長期 (IPCC, 2001)。依據執行時間的差異，又可區分為預期性 (anticipative) 或反應性 (reactive)；依準備或外在介入程度，另可分為規劃性 (planned) 或自主性 (autonomous) 等調適類型 (Tol et al., 2008) ；依執行型態又可區分為，如後撤型、適應型、保護型、預防型、忍受型、恢復型等 (IPCC, 2001)。無論為何種調適類型，皆可能對社會及生態系統產生立即性、延遲性或累積性的影響 (IPCC, 2001)。

調適行動主要為對抗預期將發生事件 (Granberg & Glover, 2013)，目的在於降低對氣候變遷的脆弱度 (Swart & Raes, 2007) 或提高系統的韌性 (Smit & Pilifosova, 2001)。理想的調適應為動態及彈性的發展型態，且能隨時依新的氣候刺激及風險情況進行調整，但調適由許多系統、領域、時間範圍、發展過程和行動者所組成，加上易受到氣候變遷及制度調整影響，因而在執行結果及效力上具有高度地不確定性 (Barnett & O'Neill, 2010; Jones et al., 2013)，造成氣候變遷調適有關規劃及決策工作的執行相當困難。

假設氣候變遷調適決策不當，所執行的調適不僅可能無效，甚至會引起外加的衝擊損傷；或因忽略考量欲解決問題與其他系統間的相互依賴性，而無意間提高了其他連結的系統風險 (Scheraga & Grambsch, 1998)，而決策指引錯誤的結果不僅將虛耗投入的調適資源，更嚴重的情況是造成系統暴露於未來氣候的風險下將越趨脆弱 (McDowell et al., 2010)。

調適規劃過程，必需考量更廣的社會、環境生態背景，而不只是發展調適工具和行動的清單。後續藉由分析國內外風險評估及調適架構方法，進而協助我國各層級政府機關後

續研擬氣候變遷調適行動及執行方案時，得以建構在永續調適的思考基礎下進行規劃。

5.1.3 國內外氣候變遷調適架構

氣候變遷調適工作涉及廣泛且難以量化，其跨領域特性及未來風險評估不確定性，併同氣候變遷衝擊地域獨特性，導致不同國家乃至於區域所面臨風險及治理方式皆有差異。歐盟委員會白皮書 (The European Commission's White Paper) 指出調適架構作用為促進及指導國家、區域、地方或特定部門進行調適措施和政策之規劃，以提高對氣候變遷衝擊的韌性 (Commission of The European Communities, 2009)。國際間除相關推動原則及報告架構外，尚無統一化方法架構，而是納入地域性、政府與決策架構、因應問題等不同因子，歸納重點並由專業團隊與各相關單位與利害關係人討論後提出架構。各架構間互相比較難度高，亦難以直接引入至臺灣直接參照進行調適規劃，但各有其獨特性及參考價值。林丞庭等人 (2021) 在回顧國內外調適架構後，提出盤點之共通性構面及其內涵比較，表5.1.2中各架構於操作階段所定義的步驟名稱不盡相同，但關鍵構面細部因子具共通性，大致可概分為了解及界定問題或保護標的、評估現況或未來氣候變遷風險、調適項目規劃及效益管考與檢討。

5.1.4 國家氣候變遷調適架構

「國家氣候變遷調適架構」是一個系統化操作過程，可用於協助研擬跨領域及跨部門氣候變遷調適策略。氣候變遷調適架構並非逐步性或線性的進行操作，調適過程的各個階段可以同時進行或採以不同的順序，雖然特定情況下部分構面或細部操作步驟甚至可以省略 (Bierbaum et al., 2013)，但調適架構操作仍可視為一循環性之風險評估及調適規劃的機制 (Ebi, 2011)。

在釐清國際上所採用之方法後，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (TCCIP) 初步提出6構面之「氣候變遷調適架構」(林丞庭等人，2021)，實施於該計畫項下7個領域關鍵議題之風險評估及調適示範操作，包含淹水、坡地、水資源、農業、海岸、漁業、公衛等，並彙整推動調適示範操作經驗後，考量風險評估及調適規劃之實務

表5.1.2　國內外調適架構比較分析

框架	UKCIP	UNDP APF	EU 指引	國科會 TaiCCAT (童慶斌等人，2016)	ISO 14090(2019a) ISO 14091(2019b)	UN NAPs	國科會 TCCIP
年分	2003	2004	2013	2016	2019	2021	2022
構面1	辨識問題與目標	界定及設計調適計畫	準備與設定	界定問題與設定目標	先期規劃	問題與落差	界定範疇
構面2	提出決策關鍵	評估現有脆弱度	評估氣候變遷風險及脆弱度	評估與分析現況風險	評估衝擊與機會	前期準備 分析氣候變遷風險及脆弱度	檢視資源及現況氣候風險
構面3	評估風險	評估未來氣候風險	辨識調適選項	評估與分析未來風險			評估未來氣候風險
構面4	辨識選項 評估選項 進行決策	研擬調適策略	評估調適選項	界定與評估調適選項	調適規劃	檢視各層級調適選項	綜整決策
構面5	執行推動	持續推動調適策略	執行	規劃與執行調適路徑	推動執行	策略執行	推動執行
構面6	監測、評估及檢討		監測與評估	監測與修正調適路徑	監測評估 報告交流	監測與檢核	檢討修正

(資料來源：本報告更新彙整自林丞庭等人，2021；TCCIP, 2022)

推動複雜性，及參考ISO (14090及14091) 之指引出版分類及回顧國內外不同階段各構面執行特點，TCCIP於2022年將所提出的6構面架構，調整區分為「辨識氣候風險及調適缺口」及「調適規劃與行動」2大階段。其中第1階段「辨識氣候風險及調適缺口」三個構面，分別為界定範疇、檢視資源及現況氣候風險、評估未來氣候風險等；第2階段「調適規劃與行動」，則包括綜整決策、推動或執行調適選項、檢討或修正調適選項。於2023年10月4日，行政院核定之「國家氣候變遷調適行動計畫 (112-115年)」，各部會已參考此架構作為研擬基礎(環境部氣候變遷署，2023)。此架構也與國內各部會視其業務屬性及實務需求，所研擬的相關氣候變遷風險評估指引進行內涵比對，包含國家發展委員會 (2018) 提供地方政府研擬調適計畫之「地方氣候變遷調適計畫規劃作業指引」；經濟部工業局 (2021) 為了協助國內製造業因應氣候變遷影響及強化調適能力，所出版之「製造業氣候變遷調適指引」；經濟部能源局 (2022) 為了輔導能源產業進行氣候變遷風

險評估之「能源部門因應氣候變遷風險評估指引」；經濟部水利署 (2022) 針對水資源及水環境風險及調適工作，統整國內外相關文獻提供內部概念性參考之「水利署氣候變遷調適參考指引」；交通部運輸研究所 (2022) 以強化公路系統調適能力目的，所規劃之「公路系統規劃階段強化調適能力作為與指引」等。

「國家氣候變遷調適架構」包含2階段6構面 (TCCIP, 2022)，第1階段「辨識氣候風險及調適缺口」含三個構面 (圖5.1.2)，分別為界定範疇、檢視資源及現況氣候風險、評估未來氣候風險等；第2階段「調適規劃與行動」，則包括綜整決策、推動或執行調適選項、檢討或修正調適選項。除國內外部會及組織所提出的指引外，國內外學術所發表的研究中也不乏發展氣候變遷調適架構操作的示範範例 (何謹余等人，2020; Gan et al., 2019; Tung et al., 2019; Bierbaum et al., 2013; Ekstrom & Moser, 2011; Moser & Ekstrom, 2010)，但「國家氣候變遷調適架構」之研擬目的，除了供私部門及小尺度空間 (如地方社區) 進行風險評估及調適措施規劃參考外，同樣考量中央部會易受衝擊領域氣候變遷調適行動方案及地方調適執行方案研擬應用需求。以下整合前述各文獻所提及之操作重點，進行「國家氣候變遷調適架構」各構面要項內容之說明：

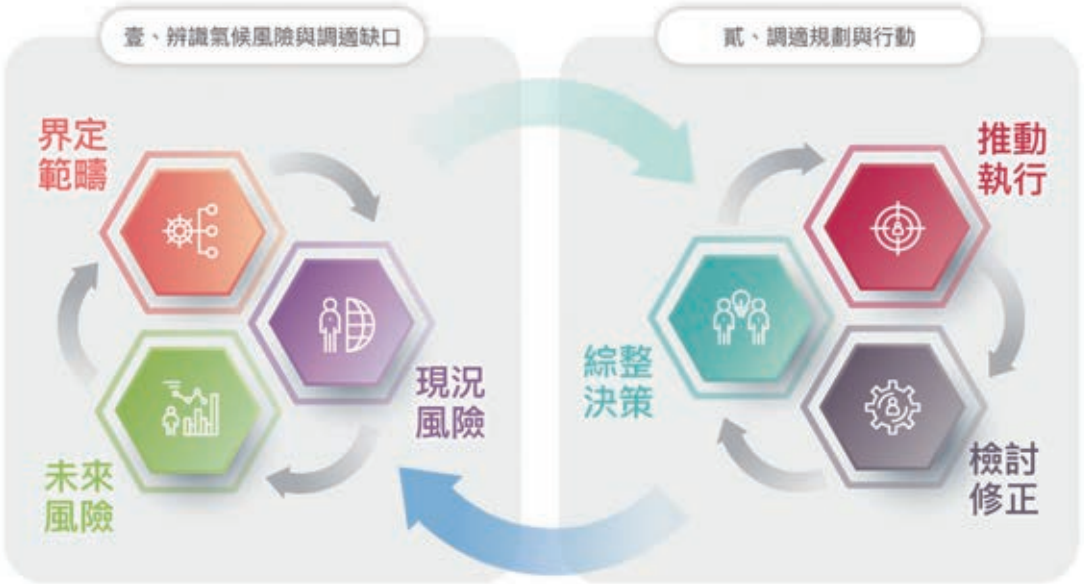


圖5.1.2　國家氣候變遷調適架構
(資料來源：TCCIP, 2022)

1. 界定範疇

(1) 確定主、協辦機關之權責業務及目標

目前國內外調適行動計畫雖處於初步發展階段，大部分的評估已專注於鑑別關鍵的氣候變遷風險，並規劃對其權責或欲保護的生命財產、資源標的，進行現況和未來的風險和脆弱度評估 (交通部運輸研究所，2022; 經濟部能源局，2022; Tung et al., 2019; Carmin et al., 2012; Ingram et al., 2012; Lackstrom et al., 2012; Glick et al., 2011; NRC, 2010; Rowland et al., 2011; West et al., 2009)。進行風險管理目的是為了降低風險至可接受的程度 (何謹余等人，2020)，構面1需確定主、協辦機關之權責業務及目標 (保全對象)。

(2) 權責業務目標之氣候危害類型

辨識主、協辦機關之權責業務及目標 (保全對象) 後，即可分析目標範圍內潛在的危害因子作為辨識氣候危害類型的起點，例如確定氣候變遷對我國製造業之衝擊影響 (工業局，2021)；及交通部運輸研究所 (2022) 彙整「臺灣氣候變遷科學報告 2017—衝擊與調適面向」內容及交通部統計要覽中天然災害資料後，提出影響臺灣公路系統之主要氣候類危害類型。

(3) 暴露時間及其空間範圍

盤點及確認權責業務目標 (保全對象) 之氣候危害類型後，及另需確認該保全對象暴露於各種危害下的熱點時間尺度及空間範圍 (紀佳法等人，2023)，以利後續協助確認在特定時期及範圍，辨識出可能影響的利害關係人。

(4) 邀集有關機關、學者及民間團體界定評估範疇

依據「氣候變遷因應法」第十九條，中央目的事業主管機關應邀集中央及地方有關機關、學者、專家、民間團體經召開公聽會程序後訂修該領域調適行動方案；及第二十條，直轄市、縣 (市) 主管機關應邀集有關機關、學者、專家、民間團體舉辦座談會或以其他適當方法廣詢意見，訂修氣候變遷調適執行方案。Tung et al. (2019) 也指出需邀集有關機關、學者及民間團體協助界定評估範疇之適宜性，利用成立調適委員會進行關鍵問題定義、跨學科分析和調適目標設定等工作。Bierbaum et al. (2013) 也強調，為了制定適當的調適計畫，需要一個由利害關係人組成的調適委員會。「能源部門因應氣候變遷風險評估指引」也敘述能源廠 (處) 與利害關係人溝通的目標，除了掌握利害關係人關心的議題和參與度外，另一作用為在利害關係人了解氣候變遷風險評估結果後，能產生

支持調適行動及合作機會的正面效果 (經濟部能源局，2022)。Tung et al. (2019) 也指出利害關係人參與對於提高調適策略的信任感和可信度具有重大正面作用，並可使民眾認為調適決策具完整考量和公平性 (Richards et al., 2004) 。依據「氣候變遷因應法」調適專章十九條及第二十條所列利害關係人之對象，包含有關機關執行者及決策者、學者、專家、民間團體等。能源廠 (處) 在利害關係人鑑別時，建議參考 AA1000 利害關係人議合標準2015年版 (Stakeholder Engagement Standard, AA1000 SES 2015) 所提五大原則。除辨識上述法令所列之利害關係人對象時，建議也可採用近期的風險評估成果盤整初步的利害關係人清單，後續另再以最新未來風險評估成果予以調整。以下簡列可依據風險評估成果進一步予以檢視的利害關係人類型：

- ■所處之空間位置或從事的主要產業為容易受到影響的特定社區或地區民眾；
- ■中央和地方政府及相關團體 (如地方政府、協會、各政府部門和諮詢小組等)；
- ■基礎設施管理機構 (如負責港口、空運、陸運交通、水資源、能源和資產等管理)；
- ■產業團體或特定產業，包括公園綠地管理和自然資源管理單位、建築、健康、旅遊、農業、綜合企業、林業和漁業、保險和財務、礦業及緊急應變管理單位等；
- ■民間協會和非政府組織 (NGOs)，包括負責建築環境、自然環境以及原住民族等與界定之問題有關人士。

2. 檢視資源及現況氣候風險

(1) 盤點及辨識可掌握資源

盤點及辨識可掌握資源，應盤點領域主辦機關之知識、技術、科學研究團隊或人力、財務能力、相關氣候變遷風險評估及調適計畫投入與管理機制情形等調適資源。盤點主辦機關資源投入情形相關作業可包含但不限於此3項工作：(1) 主辦機關調適行動或執行計畫相關法規檢核；(2) 權責業務目標 (保全對象) 涉上位、相關計畫與相關管理機制辦理情形；及 (3) 彙整歷年投入資源與計畫等。相關資源投入盤點成果可作為後續氣候變遷風險評估影響議題之選定，例如受衝擊的保護標的或保全對象，及什麼情況下易受到衝擊及其範圍、程度等 (Tung et al., 2019)；而現況對應風險議題所採取的調適措施或策略，可作為未來研擬調適行動或執行計畫之規劃基準，如屬主辦機關原定期執行之計畫，則可考量後續調適缺口，予以調整計畫內容，以發揮未來調適效力，也可避免調適資源重複投入。

(2) 評估現況氣候風險

現況風險評估以現況災害風險評估為主體，應運用歷史氣候觀測相關資訊進行現況衝擊與脆弱度之量化或質化評估，包含經濟、社會、健康、環境、生態、文化、脆弱族群及部門等之衝擊程度與風險空間分佈情形。依據何謹余等人 (2020) 所述現況，地區災害防救計畫每兩年需修訂一次，故建議將二年內的風險評估視為現況風險。現況風險評估方法可採用多種定性和定量方法進行評估，包括案例研究和比較分析法、情境分析法、敏感度分析法、訊息共享方法、關鍵物種監測法、專家問卷調查法 (何謹余等人，2020; Barrett et al., 2011; EPA, 2011; Ford et al., 2010; Füssel, 2007; NPS, 2010; Hulme & Dessai, 2008)。經濟部能源局 (2022) 採用不同降雨條件下的淹水潛勢圖，以此評估能源廠 (處) 可能淹水深度及影響範圍，並以此界定可能淹水的氣候閾值，亦建議可利用政府公告之氣候災害警戒值，作為保護標的 (保全對象) 受到氣候衝擊的閾值參考。

3. 評估未來氣候風險

未來氣候變遷風險指在長時間尺度推移過程之氣候變遷因子所造成的風險 (何謹余等人，2020)。評估未來氣候變遷風險，應執行未來氣候變遷情境設定及風險評估時，可參採定期公開之最新氣候變遷科學報告內容或氣候科學資訊之建議，予以設定之調適應用情境，評估未來氣候變遷危害度與脆弱度對權責業務 (保全對象) 之衝擊或風險。國內指引包含經濟部水利署 (2022)「水利署氣候變遷調適參考指引」、交通部運輸研究所 (2022)「公路系統規劃階段強化調適能力作為與指引」、經濟部能源局 (2022)「能源部門因應氣候變遷風險評估指引」等，而在未來氣候變遷風險情境設定上，皆採用國家災害防救科技中心及環境部所共同建議之全球暖化程度下固定暖化情境。全球暖化程度下固定暖化情境之設定建議，將有利未來各部會調適行動方案及地方調適執行方案立足於共通的風險評估及調適規劃之溝通對話基礎。Tung et al. (2019) 提出建議評估及分析未來的風險所使用的模板，應考慮氣候和社會經濟的未來變化情境與基線差距，此可透過選擇適當氣候情境和社會經濟變遷因素 (例如人口成長和土地利用變遷等) 之代表性排放濃度路徑 (RCP) 來決定未來情境，再藉由比較基線和未來情境計算未來風險 (Tung et al., 2019)。何謹余等人 (2020) 考量未來氣候變遷風險評估之相關操作需簡化以利區域治理單位應用，因而提出將氣候影響係數乘上現況風險因素，得出未來危害度變化率，進而計算未來風險值。計算出未來風險超過現況風險的程度後，可用以辨識調適投入的目標或熱點區位，另建議未來氣候變遷風險評估成果應盡可能呈現受影響之經濟、社會、健康、環境、生態、文化、脆弱族群及部門等衝擊程度之風險圖資或數據，及對應風險

因子之未來調適缺口。最後根據評估和分析現況和未來風險的缺口後，進行氣候調適選項之設定及評估操作。

4. 綜整決策

(1) 利害關係人參與界定風險評估及調適選項之合理性

當完成風險評估，下一階段即步入辨識、評估及選擇應對現況和未來氣候變遷的調適選項 (NPS 2010)。利害關係人 (有關機關、學者及民間團體) 除協助界定評估範疇之適切性外，也需參與調適選項規劃及設定之合理性決策，以期滿足社會廣泛預期的調適目標。利害關係人參與決策的方法，主要透過提供具體的風險評估結果，進而共同設計調適選項的過程 (Preston et al., 2010; Fazey et al., 2010; Few et al., 2007; Smit & Wandel, 2006)，通常是整合利害關係人和政府機關共同關注的風險議題，並制定強力的調適策略，同時納入利害關係人的價值觀 (Preston et al., 2010; World Bank, 2008; Brunner, 2005)，藉此設計出具高度共識的調適策略，以降低氣候風險。

(2) 進行調適選項之設定及優先排序評估

氣候變遷的時間和程度的不確定性為造成調適選項優先排序困難的原因之一 (NRC, 2008)。雖然過去科學界已提出許多架構、工具和方法，可以幫助決策者在面對氣候不確定性時做出決策 (Kareiva, 2008)，但許多都只適用於特定地點或受可用資源限制，甚至必需對氣候變遷有一定程度的了解 (Federspiel, 2012; Hammill & Tanner, 2011)。調適選項排序應尋求可逆性、保留未來選擇彈性、及能夠調適多元衝擊且可靈活調整等特性 (Wilby & Vaughan, 2011)。調適選項排序方法包含動態調適路徑 (Tung et al., 2019; Werners et al., 2021)、系統動力學 (Gohari et al., 2017)、成本效益分析 (Bierbaum et al., 2013)、多準則分析 (ISO 14090, 2019a)、未來環境變遷模擬調適情境效力評估 (ISO 14090, 2019a)，及評估調適選項執行與無作為調適情境間的差距 (Bierbaum et al., 2013)。Tung et al. (2019) 以動態調適路徑為例，調適選項設定需同時考量現況應該做的選項，以及為因應未來風險區間所做的調適選項，並應設定調適效力之檢核區間，評估是否需要調整調適選項組合，並建議調適路徑發展為融合災害風險降低與氣候變遷調適，加入時間或是參數變化，使決策者或利害關係人得以進行滾動檢視與評估。藉由模擬各種不同的情境與搭配不同的調適選項，當某個調適選項或組合讓系統表現達到不可接受狀態，該時間點可稱為系統的臨界點 (tipping point)，從開始評估的起點至臨界點的時間，即為該調適選項 (組合) 的有效期 (Haasnoot et al., 2012)。當某一個調適選項到

達臨界點，就可視為該調適路徑上的轉換點，代表該路徑已無法讓系統維持在可接受的狀態直到終點，所以要考量轉換至其他的調適路徑。經濟部工業局 (2021)「製造業氣候變遷調適指引」則針對較高風險之衝擊項目，列出未來規劃執行之調適行動計畫，並依照急迫性、 衍生效益、經濟效益、技術可行性及制度可行性五個面向進行分析，以提出各面向的優先程度及比較五個面向之間對於企業的重要程度， 綜合考量後產出各項調適計畫執行的優先排序。

5. 推動或執行調適選項

(1) 調適執行進度掌握

於推動執行調適選項時，應掌握及評估調適策略、政策或計畫的實施進展是否符合規劃期程 (Tung et al., 2019)，以確保設定的調適選項落實，及得以按照期程完成預期所需的能力建構工作 (紀佳法等人，2023)。

(2) 建立指標或檢視成效機制

調適能力評估為可以確定降低氣候變遷影響脆弱度的方法。於推動執行調適選項時，應考量規劃建立可定期監測和評估策略、政策或計畫之調適有效性的系統性指標；若無法建立妥適監測與評估指標，可透過訪談、焦點團體、專家諮詢等有關資訊取得方式，協助評估及檢視調適執行成效。目前對於調適行動或計畫較少有對其成功和失敗進行評估的研究 (Solecki & Rosenzweig, 2012; Vose et al., 2012; Preston et al., 2010; Means et al., 2010)。過往評估和監測工作著重於檢視調適能力的過程，並非進行調適效益的指標建構 (Culver et al., 2013; Preston et al., 2010)。調適能力的評估通常是定性或半定量的方式，如果採用定量或半定量指標，則可與其他風險成分進行定量組合。何謹余等人 (2020) 將風險因子對應降低風險的調適措施，藉由初步權重給分，評估對風險的減緩效益，此研究建議未來可考慮採用菲爾德法發展調適效益的評估方式。

6. 檢討或修正調適選項

(1) 評估調適執行成效

未來氣候以及人口增長、經濟發展、應對策略以及其他社會和人口問題的不確定性可能會阻礙氣候調適行動 (Moore et al., 2012; McCollum et al., 2011)。透過循環檢視過程，利害關係人可以定期評估調適計畫和實施的調適行動之適切性，包含考量評估設定的調適目標或缺口之滿足程度及因應關鍵風險之有效性，並依據更新的風險評估結果對

先前所規劃的調適選項進行調整 (EPA, 2011; NPS, 2010; NRC, 2010)，許多文獻亦已提出可用於評估調適是否成功的指標性評估架構 (Culver et al., 2013; Horton et al., 2012; Vose et al., 2012; Winkler et al., 2012; McCollum et al., 2011)。

(2) 檢視潛在跨領域及跨區域之影響

辨識調適策略、政策或計畫實施內容潛在的跨領域及跨區域正負面影響，提供未來方案調整及改善之參考，例如調適選項執行後產生風險轉移或風險替代的現象 (Chi et al., 2021)；另外，留意調適與減緩間之權衡與綜效，並逐漸建構調適選項或方案執行與減緩行動相互作用下，可能產生的正負面影響，例如衍生不當調適路徑或機制 (Chi et al., 2021; Chi et al., 2020; Juhola et al., 2016; Barnett & O' Neill, 2010)。

(3) 彙整規劃及行動過程障礙，提出解決方案

彙整執行調適規劃與行動過程所遭遇之障礙 (紀佳法等人，2023; Bertana et al., 2022; Bierbaum et al., 2013; Moser & Ekstrom, 2010)，並提出未來解決或克服困難之建議。

本報告利用相關文獻回顧，針對「國家氣候變遷調適架構」2階段6構面之內涵進行說明，希冀可提供各部會及地方政府於「氣候變遷因應法」修法通過後，未來研擬調適行動及執行方案之規劃與決策參考。

5.2 科研缺口與展望

5.2.1 科研面

本節彙整第4章回顧國內外文獻後，所發現之國內科研技術在衝擊評估資料、工具及方法等應用障礙，以提供各界未來投入風險評估科研能力之精進建議。詳細科研缺口盤點，請參閱第4章各小節內容。

1. 風險評估相關資料

資料缺乏類型包含淹水領域缺乏多模式時雨量；乾旱預警與預報能力也需精進，

特別是針對乾旱頻率與規模之預測。海岸領域需要完備不同空間的預測模式，首要需建構全臺海岸地形變遷推估資料、現場實測資料、水下觀測資料等，以期促進模式校驗並提高推估準確性；海岸領域需加強海岸線或海岸地形變遷趨勢模擬資訊，以使海岸衝擊模擬更為精確，另需建構較完整的海洋水下觀測資料，供海岸模式進行驗證；現行遠洋的海面監測資料仍相當匱乏，以致於降低資料整體的空間解析度。養殖漁業建議需加強物種養殖區域的環境監測資料，以提升風險預警及調適決策能力。海洋漁業需擴大且持續地進行現行之漁業監測與生態調查的時空覆蓋範圍；人類健康領域缺乏完整的臺灣本土氣候風險指標、大型世代研究資料、歷史觀測晝夜溫差資料、對生理的等效溫度(Physiological equivalent temperature, PET) 指數和綜合溫度熱指數、氣遷變遷與健康影響關聯之不同預測模式驗證。在資料尺度方面，水資源領域需要5公里以下解析度颱風時雨量資料；海岸領域則需要多元空間尺度資料，用以優化模式的評估誤差；陸域生態在評估對氣候變遷對衝擊時，現存的生物監測資料不足以完整用於探討全面性動物類群的氣候變遷影響，而植群資料空間覆蓋程度雖相對完整，但調查資料缺乏同一地點的持續複查，故難以掌握森林隨時間的組成與結構變化，也影響對森林在長期氣候變遷推估結果的驗證能力，如森林動態樣區相關監測、高海拔草原生態系樣區、臺灣繁殖鳥類大調查等。評估未來如乾旱、高溫或低溫等因子對重要物種的衝擊，建議需持續加強推動基礎生物學研究 ，包含探討氣象因子與物種生長反應的關聯性。

2. 風險評估方法與工具

在衝擊評估工具方面，為使水資源議題可完善未來氣候模型之參數設定，需提高區域降雨特性觀測資料精度，建議建置強降雨觀測設備或依區域特性發展合適的觀測方法。坡地領域需探究坡面水文和穩定性的相互作用機制，以此開發更完備的監測技術及模型預測等工具；另外，氣溫及澇旱交替降雨等變化也需加強探討，應開發納入乾濕季及季節性氣候對坡地災害影響之評估工具。健康領域現況於氣候變遷與健康影響相關推估模型建立不易，主因為受到基礎科研資料不夠完善，例如欠缺各疾病大型世代研究資料。土地利用方面，未來需研發可結合土地利用變遷技術與脆弱度指標之空間複合性風險評估技術。

在衝擊評估資料產製技術方面，水資源領域具有提高臺灣區域氣候模式應用資料需求，建議未來可與鄰近國家合作進行颱風侵臺路徑與降雨量推估。目前海洋個別物種研究雖豐富，但缺乏與其他營養階層關係的探討，故難以瞭解整體生態系統的影響機制，

未來需要更多的基礎科學研究投入發展，以有助於建立生態系評估及預測氣候衝擊模式。氣候變遷與健康風險關聯評估方面，目前雖發展許多分析模式，但比較各模式間結果一致性的分析研究仍需加強投入，以不斷提升模式評估結果之信度與效度。土地利用領域建議未來可持續加強整合及建構氣候變遷危害情境、發展空間社會驅力關聯性及現有的災害反應式調適能力進行風險評估之案例。

各領域提出降低推估方法工具之不確定性方法包含淹水領域提出可結合不同的淹水模擬工具，整合各工具之優點 (如可採非規則網格、支援平行計算等)進行淹水多模式的評估，予以彌補氣候變遷淹水災況分析的不確定性；乾旱及水資源領域則建議透過多重模式之系集模擬，擇以中位數降低不確定性；坡地領域建議可透過使用系集模擬所產製之不同情境的大量資料來降低氣候變遷下坡地衝擊的不確定性、及風險圖改用多模式日資料進行分析；海岸領域提出需要更完整的海洋水下觀測資料，以提升模式校驗；海洋漁業領域則以系集模擬方式，預測氣候變遷對長鰭鮪分佈的影響；人類健康領域建議進行氣候變遷與健康影響多預測模式間之比較。

3. 複合風險

IPCC第六次評估報告 (2022) 警告，現況的氣候危害度在未來推估的結果中，將越趨嚴峻，除氣候變遷危害發生的頻率越趨增加外，也將大大提高天然災害衝擊人類社會和自然環境的嚴重程度。依據世界銀行針對自然危害熱點區域的報告指出，世界上約有380萬平方公里及7億9千萬人口同時高度暴露於2種災害；約有50萬平方公里及1億零5百萬人口暴露於3種或3種以上災害 (Dilley et al., 2005)，例如海岸地區同時暴露於颱風、海岸侵蝕、海平面上升、風暴潮頻率增加及鹽水入侵等 (Hauer et al., 2016)；另外，都市區由於具較高的人口密度、基礎設施和投資資源，因此也極易受到多種災害的影響 (Jones et al., 2015)。當多個危害同時發生或存在於同一空間時，將會加劇風險程度 (KC et al., 2021)，因此急需準備和調適多種氣候事件，以朝向韌性且永續的社會發展。然而，過去研究主要著重評估單一自然或氣候所造成的危害度，例如強降雨事件、乾旱、淹水、崩塌、風暴潮等。單一危害分析雖可探討一定時空尺度下單一危害風險及其影響過程，但難以整合評估多樣驅力下所造成的複合性風險。臺灣約有73%的土地面積潛在處於三種以上天然災害的環境，約有73%人口同時面臨三種以上災害威脅(盧鏡臣等人，2015)，加上地質與地勢高峻陡峭，一旦遭遇極端降雨事件，河川流域內容易發生淹水與坡地災害；且因不同海拔之自然環境特徵迥異，各區域的社經條件亦有所

差異，故所面臨的災害類型或損失型態也不盡相同，形塑出極為複雜與複合的災害風險(劉怡君、洪鴻智，2022)。氣候變遷影響下，已使得臺灣都市土地、自然系統與空間使用存在複合性風險的威脅 (盧鏡臣等人，2015)。社區尺度的複合性災害主要由各式災害連鎖與累加 (如崩塌、堰塞湖、土石流與淹水)，導致社區在撤離、避難與其他及時因應措施上，具有高度的決策困難 (蔡元芳等人，2018)。為了更全面性的了解未來多樣氣候風險的衝擊及達到更成功的調適，後續必需逐步將複合及連動風險議題考量於我國調適有關的策略、體系與管理等面向，並進行檢討及提出因應解方。

在IPCC出版第六次評估報告之前，風險被視為主要來自潛在氣候變遷衝擊的影響。氣候變遷調適後的風險和減緩，例如與潛在不當調適風險相關的風險，雖已被科學證實及討論，但並未整合進風險思考架構，而相關的風險關係，例如調適和減緩之間的資源競爭、或提高政策不穩定性的風險等，都還只是個別的討論議題。氣候變遷有關決策經常為不同風險間權衡的結果，例如政策規劃者擔憂海岸災害，就不可避免需考慮海平面上升風險造成海岸資產損失風險，但又需考量地方是否支持研擬的海岸災害管理計畫。

應用於人類和自然系統氣候變遷風險理論中，風險決定因素包含危害度 (hazard)、暴露度 (exposure) 和脆弱度 (vulnerability)，以及複合風險 (multi-risk) 的相互作用或累加性。具體來說，危害度是指可能對人類和自然系統造成損害及損失的物理現象；暴露度則是指存在於可能受不利影響的地方和環境中的人群、生計、物種或生態系統、環境功能、服務和資源、基礎設施，或經濟、社會或文化資產等其受不利影響之程度 (IPCC, 2014)，亦即可能受到風險驅力因子影響的敏感目標；脆弱度包含易受影響及缺乏應付和調適能力的程度。Simpson et al. (2021; 圖5.2.1) 建議在有多重災害的情況下，氣候變遷風險評估可分為三類：(1) 決定因素之間存在交互作用的風險； (2) 決定因素內部和彼此之間的驅動力皆存在交互作用的風險；(3) 風險間的交互作用。

自 IPCC 第三次評估報告以來，代表因應量能的調適能力已被概念化為脆弱度的一個組成部分，但區分調適能力和脆弱度將可使決策者可更清楚考量應採取的調適行動，及評估欲執行的調適行動是否會引起潛在的正面或負面結果，調適行動包含管理變遷的漸進式 (incremental) 或轉型式 (transformative) 行動、被動式 (reactive) 和主動性 (proactive) 行動，以及無為 (inaction) 與引起不當調適的行動等。國際上新提出的風險評估觀點之一，將因應行動視為風險的額外決定因素，並強調風險決定因子及風險間

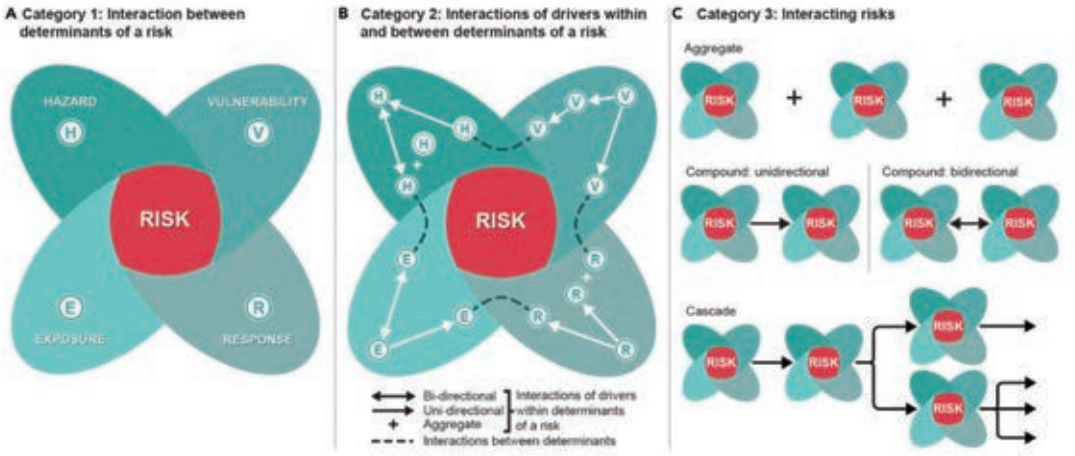


圖5.2.1　氣候變遷風險動態機制的三種類型
(資料來源：Simpson et al., 2021)

的相互作用型態，包含複合 (aggregate)、連鎖性 (cascade) 和累加性 (compound) 等3種類型，用以說明之間的因果鏈結關係 (Simpson et al., 2021)。早期國內陳禹銘等人 (2009) 定義複合式災害為兩種以上危害造成，且災害可能同時或接連發生。張學聖、廖晉賢 (2013) 認為複合性災害為連結關係，且具擴散、累積與連續等特性。陳亮全等人 (2007) 認為複合性災害為單一災害發生而引發其它災害，並提出原生災害及衍生災害關聯性觀點，例如崩塌與土石流間連續關係。此外，氣候變遷和社會經濟發展過程，也應視為影響風險發生機率和生態環境複合性災害過程強度的外部驅動因素之一。上述風險過程的描述中雖尚未體現時空動態，但風險因子間相互作用及反饋循環機制都顯示風險連續事件的高度連貫性，例如坡地崩塌與淹水災害連續因果連結。

複合風險 (multi-risks) 源於不同危害的相互作用，其可驅動於單一極端事件、多個重疊性危害、或連續性危害等，與暴露系統或部門間的交互影響事件 (IPCC, 2022)。單一事件有其原本的風險特性 (Hauer et al., 2016; Jones et al., 2015)，但大多數地方都面臨不止一種類型的極端事件 (KC et al., 2021)。複合風險結合兩個重要的風險管理基礎理論，即複合危害 (multi-hazards) 和複合脆弱度 (multi-vulnerability)。換言之，複合風險考量的基本組成元素包含危害度及風險組成要素 (暴露度和脆弱度) (IPCC, 2012; UNISDR, 2004)，意即包含分析的區域空間內所有危害的程度、暴露的敏感目標及其隨時間變化的脆弱度。換言之，複合危害即意指不同的危害事件威脅到相同的暴露目標，可發生於同一時間點或連續性發生，例如連續性影響 (cascade effects)；複合脆弱度指

各種可能暴露的敏感目標，如人口、基礎設施、文化遺產等受到各種潛在災害的衝擊程度，並可能會隨時間推移及不同危害事件的發生，使得暴露目標的脆弱度產生變化。過去臺灣研究中，較少提及應將危害度及脆弱度同時複合考量，建議未來需考慮連續性危害的效應，或也可總和所有危害的風險程度後，鑑識整體空間上受到複合危害影響最嚴重的地區，予以先期規劃因應的調適策略或行動。

2009年莫拉克風災使臺灣逐漸對複合性災害管理面向進行檢討與因應，並逐漸朝向考量社經衝擊及受災經驗門檻的循環學習過程 (張學聖與廖晉賢，2013)。然而臺灣目前災害防治多以單一災害進行管制，且災害模擬與減災規劃也較針對單一災害類型進行評估，較少談論複合性、連續性及累加性的風險。現有評估技術發展，沈哲緯等人 (2015) 研提整合降雨形成的崩塌-土石流之複合災害潛勢評估模式，據此探討極端降雨對山坡地社區之連鎖衝擊。方思怡 (2014) 針對曾文水庫集水區進行大尺度複合式災害風險評估。蔡元芳等人 (2018) 結合 FLO-2D 與 HEC-RAS 淹水數值模式，初步探討土石流造成河道河床堆積情況對鄰近河道聚落與設施的洪澇危害影響，結果發現複合式災害概念之鏈結與累加特性，並驗證洪澇危害評估需考量土石流影響。張學聖、廖晉賢 (2013) 在彙整多種國內外空間分析方法後，嘗試利用雙變數空間自相關分析，透過不同尺度敏感性分析，探究莫拉克風災各類災害顯著的空間關聯現象，以鑑別潛在區域面對複合性災害時的應對策略。

複合性災害風險評估方法目前並無特定模式或架構，張學聖、廖晉賢 (2013) 回顧文獻後，整合複合性災害及風險主要評估類方法區分為三種，首先為探索複合災害的時間與空間關係，主要應用於透過災害空間與時間範圍分析，提供決策者決定區域範圍需對那些災害進行回復; 第二種為解析災害鏈結衍生的二次災害關係，主要利用風險概念及透過災害事件敘述統計調查，評估風險機率與災害損失間的脆弱度；最後一種為研擬減災與應變過程的損害關係，並透過自然災害規模的評定方法，強調災害事件個別指標除需衡量所釋放的能量強度，也需考量災損衝擊之嚴重程度。未來複合性災害風險評估目的不僅是預防短期災害，更應是可應用於規劃長期性氣候變遷危害與土地使用交互影響的調適方法。

4. 不當調適

理想的調適應為動態且具彈性，要能隨時改變以反應新的刺激及情況 (Wilder et al., 2010)，但調適由許多系統、領域、時間範圍、發展過程和行動者所組成，加上容易受

到氣候變遷及制度調整的影響，因而在結果上具有高度不確定性，也就容易在後續對社會產生不當的調適衝擊 (maladaptation) (Jones et al., 2013; Barnett & O' Neill, 2010)。

不當調適可簡單敘述為提高風險的調適 (Barnett & O'Neill, 2010)。主要研究不當調適的學者Barnett和O'Neill (2010; 2013) 描述其為所採取的行動，表面上雖可迴避或降低氣候變遷負面衝擊的脆弱度，但卻提高其他系統、部門或社會團體於現在或未來的脆弱度，此也是近期較被廣泛引用的主要定義 (Chi et al., 2021)。近期IPCC AR6 (2022)定義不當調適為可能導致相關不利氣候結果風險增加的行動，包括透過提高溫室氣體排放、增加或轉移對氣候變遷的脆弱度、不公平性的結果、或侵害到不同族群現在或未來的福祉。雖然大多數研究定義認為不當調適的發生將提高脆弱度，但近期已有研究著手討論不當調適是否可從韌性觀點進行分析 (Schipper, 2020)。

一般都假設調適的執行只存在正面結果 (Bertana et al., 2022)，然而大多數情況下，不當調適反而是意外衍生的結果，主因並非每個調適執行後都能產生正面效益，除可能形成無效調適或產生負面回饋而提高脆弱度外，甚至會排放額外的溫室氣體，增加未來調適負擔，例如在空間上，成功加強某一尺度的韌性，卻使其它尺度脆弱度提高 (Beckman, 2011; Juhola et al., 2016)；或是對於一個族群調適，可能被判定為成功的行動，但對另一個族群卻可能是失敗的，甚至造成危害 (McEvoy & Wilder, 2012; Dow et al., 2006; Adger & Vincent, 2005)，最終因此損失或壓縮他人調適的空間 (Eriksen & Brown, 2011)。

不當調適的論述通常伴隨橫跨地理空間及時間尺度的案例研究 (Heyd & Brooks, 2009)，也涵蓋了一定範圍內的部門，包括農業、公共建設、水資源管理及衛生等 (Scheraga & Grambsch, 1998; Reilly & Schimmelpfennig, 2000)，但國際上仍很少有案例詳細探討為何會提高不當調適的發生原因 (Barnett & O'Neill, 2010)，雖然近期在國內外研究上已有相當程度推展 (Clarke & Murphy, 2023; Juhola & Käyhkö, 2023; KKarimi et al., 2023; Bertana et al., 2022; Chi et al., 2022; Chi et al., 2020)，然而欲建立一致的評估及規劃架構可用於避免不當調適的發生並非易事 (Bertana et al., 2022; Granberg & Glover, 2013)。現在國內外研究已被提出的主要架構包含 (1) 路徑架構 (Pathways Framework; Barnett & O'Neill, 2010)；(2) 預防性架構 (Precautionary Framework; Hallegatte, 2009)；(3) 評估架構 (Assessment Framework; Magnan et al., 2016)；(4) 反饋架構 (Feedback Framework; Juhola et al., 2016)；以及 (5) 整合空間風險分析觀點

的不當調適評估路徑架構 (Maladaptive Evaluation Pathways; Chi et al., 2021)；(6) 近期則有研究開始嘗試建立適用於國家尺度的調適政策規劃之監測與評估架構 (Juhola & Käyhkö, 2023)。

現在所建立的調適措施也許可滿足過去及現在的發展條件，但卻未必能應付未來的需求。當未來氣候風險在近十年，甚至本世紀前都難以準確評估，不當調適就幾乎確定會發生。如果欲做到更完善的長期性規劃，就必需盡可能避免所執行的調適作為及規劃的調適策略衍生不當調適風險。

5. 漸進式及轉型式調適

許多氣候變遷的因應行動較著重於調適氣候變遷產生的實質負面影響，而忽視驅動氣候變遷的因素。過往有效的應付式 (cope) 及漸進式 (incremental) 調適策略及措施，其因應能力已隨氣候變遷衝擊幅度逐漸增強而明顯降低 (IPCC, 2022; Juhola et al., 2016; Kates et al., 2012)，面對未來持續增高的氣候變遷風險及不確定性，轉型式 (transformative) 調適將會是較有效且永續的方法 (IPCC, 2022)。應付式調適為主要作用於維持受氣候變遷影響的社會生態系統，仍可處於原本狀態或正常運作的策略 (Kates et al., 2012; Perrings, 2006)，以農業為例，在農作物受損後，再予以重新種植 (Fedele et al., 2019)；漸進式調適為對社會生態系統進行細微和小規模的調整 (Kates et al., 2012; Adger & Jordan, 2009)，主要著重於預期性增強對氣候變遷影響的防護能力，例如作物抗旱失敗，則規劃增強灌溉系統的供水能力 (Fedele et al., 2019)；轉型式調適為透過改變社會生態系統的基本屬性，以調適氣候變遷及其影響 (IPCC, 2022)，例如作物適栽區遭災害毀損，即重新規劃原有的土地使用及空間分配 (Fedele et al., 2019)。

轉型式調適與漸進式調適其中一項明顯的差異為是否以永續性因應為目標，亦即從短期應付策略，例如加強基礎設施和重新安置居住於暴露地點的民眾，朝向重新規劃與風險共存的條件後進行系統性轉變，例如設計及利用集水區儲存強降雨下的水資源 (Bracken et al., 2016; Termeer et al., 2017)，或考慮住家搬遷、恢復上游濕地等，以解決根本的脆弱因子 (IPCC, 2022; Fedele et al., 2019)。目前調適研究領域仍主要探討漸進式調適的規劃與執行 (Mustelin & Handmer, 2013; Kates et al., 2012; Smith et al., 2011)，希望在氣候變遷下仍可維護現有系統、發展路徑和行政慣例 (IPCC，2022)。Ajulo et al. (2020) 回顧近期文獻後，提出轉型式調適與科技技術、社會及政

治等面向間之相互關聯性概念架構。Filho et al. (2019) 提出三個準則用以初步判定是否為轉型式調適，包含調適是否採取更廣泛規模或強度、對執行區域或系統而言為新創立的調適型態、轉換調適執行場址或改變地區特性。Colloff et al. (2021) 調查6個國家的轉型式調適，並將各國所採取的具體措施彙整提供參考。Fedele et al. (2019) 則利用6項轉型式調適特徵，彙整非生產性農田轉變為農林業系統的措施，以調適降雨量減少的衝擊。

國內外有關轉型式調適的研究案例仍不多，主要原因之一是受到既存的制度和行為限制 (Jeffers, 2020; Kates et al., 2012)，並需要協調利害關係人間的未來願景，例如促進經濟增長需求與降低碳排目標 (Blythe et al., 2018)。另一個原因為應付式及漸進式調適通常較易獲得公眾支持，例如工程性的調適措施 (Novalia & Malekpour, 2020)，而轉型式調適則可能會獲得較少的社會或政治支持，因為可能耗費較多的投資人力、財力和時間，及相對需要較長時間才會產生投資效益 (Adger et al., 2005; Kuntz & Gomes, 2012)，因此轉型式調適發展過程會遭遇較多的障礙 (Meharyar et al., 2022; Novalia & Malekpour, 2020; Fook, 2017; Kates et al., 2012; Rickards & Howden, 2012)，也更加難以落實執行 (Magnan et al., 2020)。

轉型式調適規劃過程需要許多利害關係人參與，因為需要共同投入轉型的專業知識，以有效解決當地調適的障礙 (Shi 2019; Singh et al., 2019)，此也關聯是否可從漸進式調適轉向永續的轉型式調適。Galvin (2021) 探討涉及推動永續轉型式調適時，各類利害關係人在參與規劃的互動過程中所觀察到的社會變化現象。Filho et al. (2023) 調查南半球國家漸進式調適在能力上的限制及推動轉型式調適遭遇的障礙。Amundsen et al. (2018) 彙整提出地方政府尺度轉型過程的影響因素。Mehryar et al. (2022) 提出氣候變遷背景下造成轉型失敗的三個決策障礙面向 (圖5.2.2)。Clarke et al. (2016) 強調造成調適轉型失敗的三個重大障礙面向，包括社會和文化價值觀，特別是對地方情感依賴；政府機關對傳統技術的依賴，使得未能產生新的規劃方法；及受到既存行政制度與規範的慣例鎖定。推動轉型式調適需針對決策者、研究人員和執行者建構幾項重要的能力，包含領導規劃能力、探究及了解系統風險議題能力、及從執行過程中學習及檢討的能力 (Lavorel et al., 2019; Clarke et al., 2018; Lonsdale et al., 2015)。當轉型式調適因治理過程障礙遭遇失敗時，即需要從中檢討後進行治理過程的調整，以避免轉型成為不當調適 (Clarke & Murphy, 2023)。轉型式調適初期可透過漸進式調適的協助，以減輕轉型過程

對隨時間推移不斷變化的社會價值觀之衝擊，此將有助於克服社會及制度障礙，促進調適轉型成功。

於氣候變遷衝擊不斷增強的未來，原本社會所依賴的漸進式調適已逐漸無法有效控制風險在可接受的程度，轉型式調適為一必要嘗試發展及推動的調適策略型態。成功推動的轉型式調適，除了永續社會-生態系統的發展，也可避免不當調適。此外，已有研究指出轉型式調適的發展過程，很可能更有機會成功實現巴黎協議所訂定之將全球溫度控制在1.5°C的目標 (Amundsen et al., 2018)。

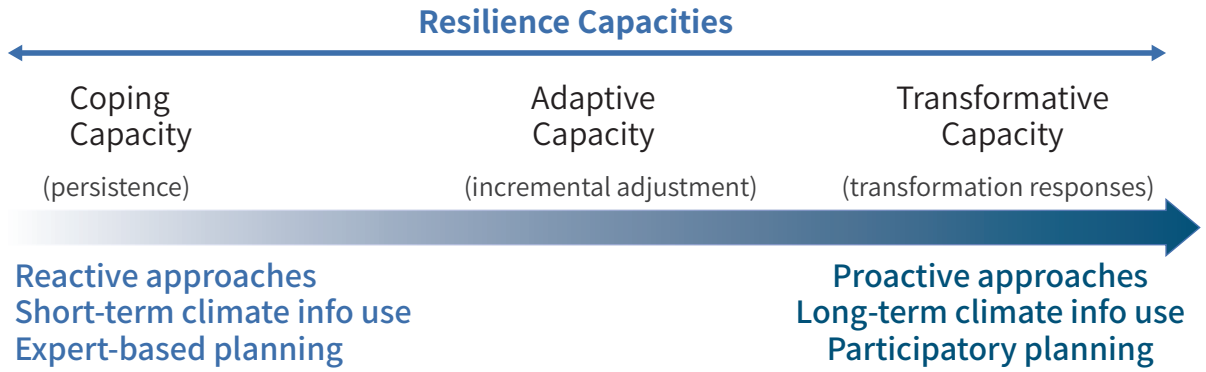


圖 5.2.2　氣候變遷背景下三個決策面向
(資料來源：Mehryar et al., 2022)

6. 動態調適路徑規劃

IPCC (2022) 定義調適路徑 (Adaptation pathway) 為在短期和長期調適目標下，一系列的調適選項之權衡。這過程需確認是否有意義的解決人們的問題或是避免不當調適。未來在氣候變遷風險不確性下，調適路徑為可幫助實現永續調適決策的工具之一 (Zandvoort et al., 2017)。

為協助各級政府未來所研擬的調適方案足以因應各時期國家調適應用情境下的調適能力，需考量及確認相關調適投資投入是否可滿足風險因應目標。調適路徑為其中一種適合供決策者及利害關係人共同針對調適規劃與執行進行優先排序的溝通方法，並可協助各部會權衡隨時間推移下，綜整出未來可接受的氣候變遷風險。此外，調適路徑也有助於提出較符合成本效益的調適選項 (何謹余等人，2020)，不僅可避免不足或過度的資源投入，同時也可規劃彈性且有效的調適選項組合，進而穩定與控管各領域及部門在國

家調適應用情境的風險程度。

當建構所有規劃的調適路徑後，即可評估各條路徑的可行性及有效性，包含成本、跨領域及空間的影響，供決策者或是利害關係人得以有足夠資訊進行最佳路徑之選擇及決策 (何謹余等人，2020)。調適路徑規劃需視各時期氣候風險推估資訊調整及各期調適選項執行後的實際發揮效力進行動態檢驗，並確認規劃及投入各調適選項所需建構資源及時間，決策後的調適路徑能力才可具預期效力，以滿足設定的短期、中期、及長期的目標風險缺口 (Hermans et al., 2017)。

國內外已有許多運用調適路徑進行調適規劃的操作案例，例如Haasnoot et al. (2012) 使用整合評估檢定模型 (Integrated Assessment Meta Model, IAMM) 進行假設性淹水風險的調適管理路徑規劃與驗證；Werner et al. (2013) 在建構風險閾值和臨界點之合理性後，用於探討不同重現期強降雨情境下排水系統措施的調適能力；Maru et al. (2014) 運用系統動力學理論方法，進行澳洲偏遠原民社區因應未來不同程度火災風險之潛在調適路徑；Buurman & Babovic (2016) 應用調適路徑工具，整合調適政策制定及實際選項分析，用以探討新加坡解決淹水問題的排水政策和措施之有效性；Hermans et al. (2017) 測試不同利害關係人共同參與協作及學習調適規劃過程，以規劃荷蘭湖泊供水系統的調適路徑；Babaeian et al. (2021) 運用調適路徑方法結合土水評估 (SWAT) 模型於RCP4.5 及RCP8.5情境下，進行評估伊朗流域農業水資源管理行動在未來氣候變遷風險下的調適能力，並規劃強健的調適路徑 (圖5.2.3)。國內運用案例中，童慶彬等人 (2015) 在擬定跨領域氣候變遷調適決策六大步驟後，強調調適路徑工具輔助長期調適決策之重要性，並以2011年經濟部水利署南部區域水資源經理基本計畫之水資源調配管理措施成效進行初步探討。何謹余等人 (2020) 整合氣候變遷調適與災害風險降低的架構，建立風險評估模板結合動態調適路徑方法，應用於坡地災害調適選項之規劃。

調適規劃與決策必需適當考量氣候隨著時間推移的變遷程度，以因應未來發展及社會價值觀下的共同發展目標。在調適決策的觀點上，需要建構一結構性工具可統合處理複雜系統間相互影響的動態變化及氣候變遷不確定性。調適路徑工具之發展即可協助各級政府未來在不確定性的氣候風險下，欲解決的氣候風險優先順序，及評估各時期可投入資源及願承受的風險，進而予以規劃在連續時間推移下的多樣調適選項組合，並可作為決策者及利害關係人溝通的基礎，助於提出取得共識之調適決策。

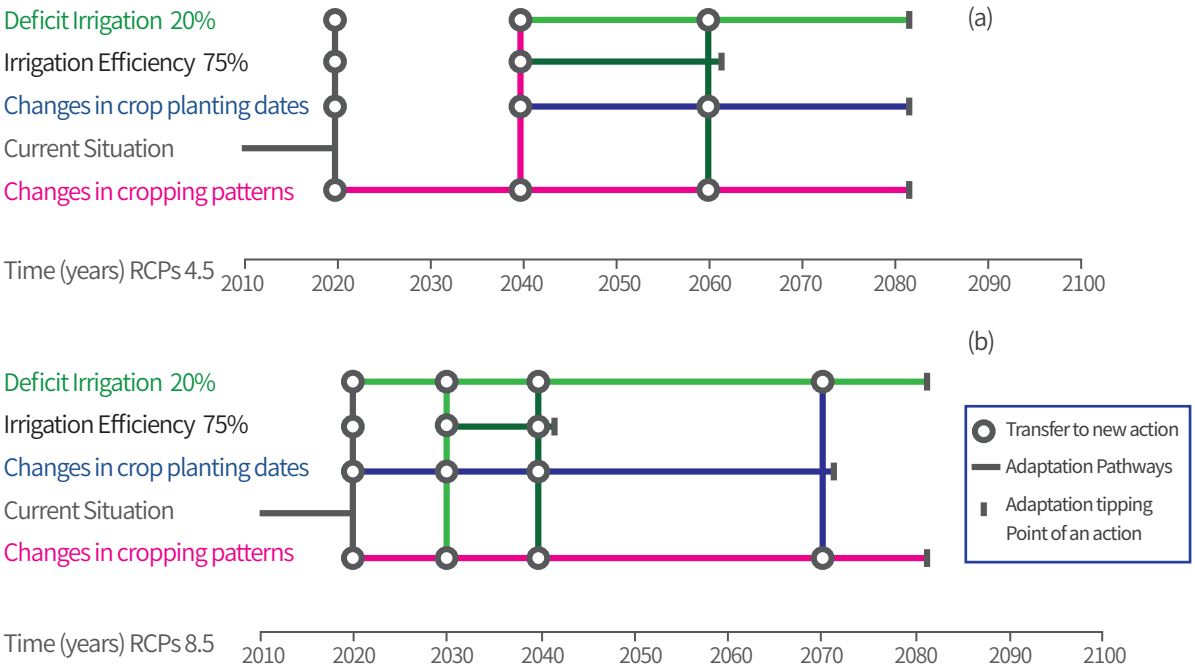


圖5.2.3　農業水資源管理系統在RCP4.5及RCP8.5情境下之調適路徑範例
(資料來源：Babaeian et al., 2021)

7. 調適及減緩共效益

規劃調適時若能同時考慮連結減緩效力，將可增加額外利益及帶來市場以外的效益，並可管控不當調適的發生，例如水力發電設施運轉降低糧食安全；或因灌溉增加導致外加的能源消耗等。調適及減緩的共效益主要可體現於農業、林業、生態系統、水資源和能源等部門，但潛在的障礙、交易和風險經常被忽視，其中關鍵原因即為調適和減緩在慣例上仍是分開思考與執行的兩種行動。Klein et al. (2007) 為可使綜效大於個別實施時的效益，提出4種整合減緩和調適目標的方法，以產生正面共效益：(1) 具有調適效益的減緩行動；(2) 具有減緩效益的調適行動；(3) 促進減緩和調適措施的共同發展過程；(4) 促進整合減緩和調適措施的政策及策略。儘管調適與減緩同樣旨在解決氣候變遷問題，但實際上調適和減緩政策於執行上的特點卻仍有許多不同之處 (表5.2.1)。

都市面積雖然僅占全球土地面積的2%，但卻消耗了全球2/3的能源，同時產出超過70%的CO_2 排放，且90%都市位於海岸地區，也同時面臨海平面上升與海岸暴風雨等毀滅性的氣候災害風險 (王思樺等人，2016)，因此都市地區在應對氣候變遷影響時，極需同時關注調適和減緩。Sharifi (2021) 藉由文獻回顧，探討能源、交通、廢棄物、水資源、綠色

基礎設施、都市規劃和治理等部門之多樣措施間的相互作用，研究發現與綠色基礎設施較緊密相關的措施，如建築、能源系統和交通等，具有較高的共效益 (圖5.2.4)。Grafakos et al. (2019) 運用都市氣候變遷規劃架構評估都市減緩和調適行動計畫之間的整合程度，成功探討了不同類型的減緩與調適之間的相互關係，研究設計一個共效益評估系統，對9個都市氣候變遷行動計畫中的調適和減緩整合程度進行比較和排序，並提出分析後的相互關係清單。

表5.2.1　國際氣候調適和減緩政策之間的差異

差異面向	減緩政策	調適政策
部門範疇	所有部門都能降低溫室氣體排放	單一部門對特定氣候衝擊
地理尺度的影響	全球尺度	地方及區域尺度
時間尺度的影響	長期	短至中期
治理層級	國際及國家層級	區域及地方層級
有效性	確定性較高	較不確定
額外效益 (或共效益)	可取得多樣額外利益	在沒有氣候衝擊的情況下，通常也會產生附帶利益
行動者利益	來自額外利益	幾乎完全來自降低氣候衝擊和附帶效益
汙染者付費	是	否
監測	相對簡單 (評估溫室氣體排放)	更為複雜 (評估降低的氣候風險)

(資料來源：Grafakos et al., 2019)

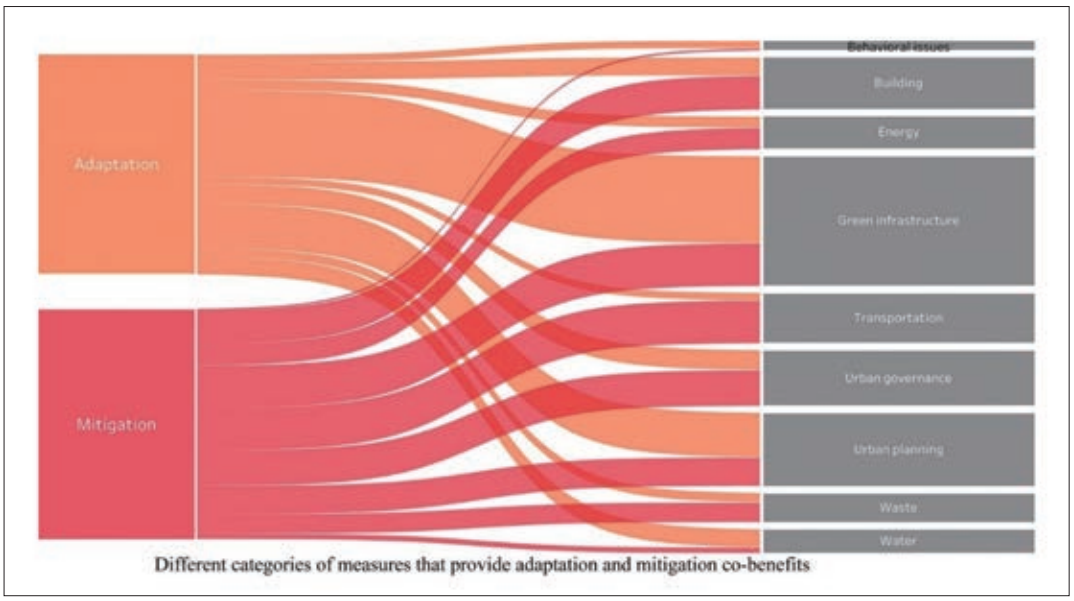


圖5.2.4　不同類型措施關聯調適及減緩之共效益
(資料來源：Sharifi, 2021)

國內因應都市熱島效應影響面向，包括都市炎熱氣候、提高能源浪費與供給壓力、減少日照時數、減少相對濕度、增加都市水患發生率，並影響空氣品質造成空氣汙染(孫振義與簡子翔，2016)。臺灣已有許多文獻討論都市綠帶與都市熱環境、都市街道、熱島效應等之間的相互關係 (邱英浩等人，2014；孫振義等人，2010)。具體實施做法，例如孫振義 (2017) 提出街道環境控制方法，可同時改善街道熱舒適性及有助降低空調能源消耗與碳排放，但該研究顯示相較通風條件與綠化降溫等方式，遮陰為更有效的措施；其他措施還包含減少人為熱排放量、改善鋪面材質 (屋頂綠化)、擴增綠地面積、維護大型水域周邊環境等 (孫振義與簡子翔，2016)。臺灣都市建成區缺乏可調整空間，使得調適與減緩在實施方式上、規模與效力皆受到限制 (Jim, 2013)。蔡育新等人 (2023) 研究提出都市空間規劃整合調適、減緩與共效益之可行措施清單，以及小尺度街區開放空間之都市更新，具碳儲存之減緩效益、減少地表逕流之調適效益及非氣候部門的永續共效益。沈揚庭與盧沛文 (2017) 研究建議適性皮層概念，亦即在智慧建築的皮層上與韌性防災概念相互結合，將可發展出同時具備調適與減緩功能的韌性建築。

為了因應氣候變遷，世界各地的能源部門必需採取有效應對措施，包含實施調適方案確保關鍵基礎設施的韌性，並盡可能降低能源生產及傳輸過程的溫室氣體排放。Hennessey et al.(2017)研究認為整合氣候變遷調適和減緩可為加拿大能源部門帶來四個共同利益：(1) 減少資源競爭，指的是能源效率提高帶來成本的降低；(2) 減緩效力成果可降低調適在科學上的不確定性；(3) 減緩和調適措施之間的協同作用可達成共有的實施目標；(4) 透過明確的調適累積效益，提高減緩措施的社會認同。

近期以自然為本的解決方案 (Nature-based Solutions, NBS) 被高度提倡為可同時有效降低氣候風險及有助於減緩的有效方式之一，例如種植和保育紅樹林、恢復鹽沼或保護泥灘地等等恢復及保育海岸生態系統的措施 (Airoldi & Beck, 2007)，不僅具有降低氣候風險效力，也可協助移除大氣中的溫室氣體，並可減輕逐漸加劇的氣候變遷衝擊，以維持自然系統提供前述氣候服務的能力。都市綠基盤各類效益間的綜效遠高於權衡關係，而都市在推行氣候政策時若能強調市民日常生活有感的共效益，會較容易爭取到民眾支持與配合，進而達成減緩、調適及其他都市發展目標的達成 (李盈潔與蔡雅妃，2023)。Morecroft et al. (2019) 亦提出評估自然生態系統為本的調適及減緩行動共效益之7項原則，提供作為共效益方案之規劃參考。

當評估減緩與調適政策的效益時，由於政策具多樣性，且有跨部門及跨空間特性，建議除評估政策的個別效益外，也需針對跨政策間的效益進行綜合評估，包含綜效、權衡、共效益及衝突等面向 (江立揚等人，2023；黃國慶等人，2023；蔡育新等人，2023；Grafakos et al., 2019)。Sharifi (2021) 研究認為，未來整合減緩及調適的相關研究仍需投入進行更多的實證評估，以探究不同措施之間綜效的差異，作為整合方案最優規劃之參考依據。

5.2.2 治理面

1. 調適跨層級及跨部門治理

氣候變遷調適的治理涉及制度建立、規範及組織之建構 (Huitema et al., 2016)。制度代表一種行為規則，用以管理系統、規範行為及組織的架構 (Jones, 2010; Ostrom, 2005)。制度規則和行為規範影響個人及社會系統如何反應所面對的震盪和變遷 (Jones et al., 2010)。人類社會領域包含正式及非正式的管理制度 (Næss et al., 2005)，例如法律、政策、管理機關及民間社會組織等，這些都是規劃調適時必要存在的部分 (Brown, 2002)。調適氣候變遷的風險包含多樣管理與執行層級 (Adger et al., 2009; Adger et al., 2005)，一般概略可分為國家政府、地方政府、私人及個體戶等三個層級 (Tol et al., 2008)。不同層級間的相互連動關係，增加了規劃及執行調適時需要面對的障礙及限制之影響程度。過去調適多投入在研究國家層級的規劃及決策 (Tompkins, 2005)，但地方層級調適規劃的相關研究已快速增加 (Measham et al., 2011)。高層級的政府單位主要參與調適的治理工作，如資金預算分配、刺激各層級的調適動機等 (Ford et al., 2011)，如澳洲政府調適行動很大比例工作在產出調適研究架構、較大尺度的指引政策、或提供氣候推估資訊等高位的指導型計畫 (Granberg & Glover, 2013)。地方政府代表一個核心制度 (Næss et al., 2005)，因調適經常執行在地方政府層級 (Ford et al., 2011)。雖然調適參與者的角色因不同國家而有差別，但幾乎所有的國家除了相關政府部門外，也包含非政府之利害關係人及社區層級決策者等 (Granberg & Glover, 2013; WRI, 2009)。部分的非政府組織參與許多地方尺度的調適工作 (Measham et al., 2011)，例如地方環境行動國際委員會 (International Council for Local Environmental Initiatives, ICLEI)。但目前針對個人、非政府組織或社會系統於調適活動的參與狀況則較少有研究討論 (Ford et al., 2011)。

調適決策於不同制度下，經常會遭遇制度上的衝突 (Brown, 2002)。從個人、地方、乃至國家，因知識能力、可用資源和相對責任的不同，導致欲執行的調適作為及措施之規模與順序產生歧見 (Laukkonen et al., 2009)，例如非政府組織和政府機關同時發展調適目的相同的計畫，但所預期落實的項目及程度將有差異，因為各自所具有的任務、管理範疇、政治目的、資金預算等皆不相同 (Moser & Ekstrom, 2010)，進而形成不同的調適發展順序，因應各自著重的氣候變遷風險面向 (WRI, 2009)。另外，調適目的需視由誰來執行調適及對誰進行調適而決定，例如對已發展完善制度及較富裕的社會 (個人) 而言，所尋求的調適將可能首要以維持現有狀況或生活標準為主；而對於開發中國家，調適目的可能將較著重於持續提升經濟發展及民眾生活水平；對於邊緣化社會系統，首要目標為盡可能保護生計及財產不受氣候或其他風險影響 (Adger et al., 2009)。調適順序衝突可能會導致調適無效或產生不當調適的後果 (Kopke & O'Mahony, 2011)。

國家政府層級尺度的調適政策可能會限制地方政府的調適能力 (Urwin & Jordan, 2008)，例如有些國家政府的調適決策和規劃為了滿足國家整體發展現況，而採取單一由上而下 (top-down) 的政治命令進行調適，而經常造成高度投資於硬體的工程建設，不僅無法建構所需的調適效力，甚至提高地方的不當調適風險 (WRI, 2009) 。因此，許多國家開始採取由下而上 (bottom-up) 的地方型計畫 (WRI, 2009)，增加考量地方觀點再行規劃調適行動及順序，此對於國家調適政策規劃者相當重要，但必需確保不同管理層級之間的良好溝通及協調，才可促進正面互動及學習迴圈 (Kemp et al., 2007)。

每個調適決策都會影響其他面向及管理機關的命令，現在仍缺乏理想的管理規則可應用於解決可能的衝突。調適管理必需要各利害關係人於不同制度間進行協調 (Tol et al., 2008)，以協助避免調適的重複執行或持續形成調適缺口。協調包含水平式協調，如不同的機關之間；垂直式協調，如全球、國家及地方的參與者；或跨部門式協調，如政府和企業間 (WRI, 2009)。不同機關及組織的目標、工作程序、組織文化、自主權等因素，都可能成為協調時的挑戰，因此調適決策者必需確定有哪些機構和過程需要協調，並建立清楚的調適協調程序及流程，用以促進蒐整政府機關與利害關係人間調適的相關性、改善氣候資訊提供及資料應用方式、及提升氣候變遷認知等工作。調適協調目的為確定一致的調適目標，及建構共同管理調適政策和行動的能力，以提高調適實踐於地方尺度時可發揮預期的效力。隨著氣候變遷治理制度的發展，參與治理氣候變遷調適的行動者不可避免必須考量更多利害面向後再進行決策，例如定義問題、決定負責管轄層級、落實

治理的方式、採用的政策工具 ，及治理者介入管理的時間點等方面。研究已開始重視探討調適治理面向的正義議題，並探討不同國家的治理方式及策略將產生哪些可能的因果關係，包含可能擴大現況的不平等情形、限制可取用的資源，或經由分散風險所產生的不公義現象等 (Huitema et al., 2016)。為了確保科學訊息可協助調適政策規劃，國家應投入預測及界定一定暖化程度下的衝擊情境，作為調適急迫性的比對基礎 (IPCC, 2018)。

除了區域及地方尺度的治理，全球尺度的調適治理更是近期探討的新興議題。在巴黎協議之前，各國在其預期的國家自定貢獻 (Intended Nationally Determined Contributions, INDC) 報告中，提出一系列特定部門的調適治理指標，並就所有指標進行討論及交流。一般而言，自由民主國家在公共事務的推展，通常會伴隨著政策執行成效的評估標準與指標之制定，並以其評估結果研判決策者或行政機關所應承擔的責任。事實上，調適是一個相對模糊的概念，儘管越來越多研究已投入分析與探討調適效力評估的方法論或基礎背景數據之建構 (包含調適基線、作用時間軸線、成效因果關係等)，但至今仍難以提出合理的治理效力評估指標，至少仍不如減碳效力管考指標具有明確的可比性 (Persson, 2019)。因此，巴黎協議為衡量全球調適治理目標達成情形，將不得不建立更多元性的評估指標以作為比較各國治理效力的基礎。

當調適治理思考層次從區域及地方尺度提升至全球尺度，也因而逐漸聚焦調適國際融資分配機制重要性，例如調適基金、全球環境基金及綠色氣候基金等 (Dzebo, 2019)，調適融資雖國際上已被視為相當重要的調適治理議題 (Weiler et al., 2018; Pickering et al., 2017)，但目前仍缺乏實證研究進一步探討國際資助及融資基金對區域及地方實際執行調適的指導作用及效力。分析和盤點我國的氣候衝擊和對應的調適措施是很重要的調適治理工作，以期能更適切地連結跨國間有效合作及規劃共同調適的時間點。

2. 調適障礙與限制

國外已有許多文章或報告研究調適障礙與限制對調適規劃及決策的重要影響 (Bertana et al., 2022; Schipper, 2022; Bierbaum et al., 2013; Moss et al., 2013; Ford et al., 2011; Morgan, 2011; Jones, 2010; Moser & Ekstrom, 2010; Adger et al., 2009)。研究通常將調適限制及調適障礙視為相同概念，甚至可交換使用，但部分的研究則是有所區分 (Moser & Ekstrom, 2010)。廣義而言，調適限制可定義為某種情況或因子使調適無效並且難以克服 (Adger et al., 2009)。生態及物理限制構成了調適的自然限制，範圍從生態系統

到地理及地質上的限制 (Jones, 2010)，像生物物種生理上對氣候變遷的忍受度無法克服的情況 (Bierbaum et al., 2013) 即為限制。而表面上可克服的限制，則稱為障礙 (Moser & Ekstrom, 2010)，無法克服這些障礙就可能會造成不當的調適規劃結果 (Jones, 2010)。

調適規劃受限於許多因子 (Ford et al., 2011)，包括現存法令、規範、風險感知、制度面向、政治考量和其他慣例等 (Moss et al., 2013; Pelling, 2011; Rotmans & Loorbach, 2008)，這些障礙皆會阻礙政府、社區、組織及個人的調適，進而提高整體社會風險。調適規劃面臨的難題包含 (Granberg & Glover, 2013)：(1) 氣候變遷衝擊可能會橫跨社會和自然系統；(2) 目前知識基礎仍不足以確定所需要的調適因應作為；(3) 對於調適行動無一致性；(4) 一般公共政策經常面臨的問題，如獲得足夠可運用的資金、創造足夠的制度能力、訓練和教育等。

調適不只受到這些限制及障礙的影響，也包含未來氣候變遷衝擊的不確定性。不確定性不只是缺乏對現在情況及未來事件知識的辨識，也與調適政策發展中的政治、文化和制度背景有關 (Morgan, 2011)。而這樣的不確定性對各層級決策者產生相當大的困境，因此更需要提出重要的障礙以改善調適策略的決策及執行 (Granberg & Glover, 2013; Dessai & Hulme, 2004)。

表5.2.2整理國際上對於調適障礙與限制類型。IPCC指出調適障礙與限制包括物理與生態限制、技術限制、投資障礙、資訊及風險認知障礙、社會與文化障礙等，可能會影響調適的能力建構 (IPCC, 2007)。學者Adger et al. (2009) 提出調適限制與障礙可分為三個面向，包括生態物理、經濟 (含社會及文化範疇) 及技術。國際自然保護聯盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 將東南亞海岸地區各自然系統所受到的氣候變遷損傷，分為珊瑚礁、海草、紅樹林及泥灘地、漁業資源、觀光資源等不同系統，探討衍生至人類社會的調適障礙 (Morgan, 2011)。Bierbaum et al. (2013) 檢視美國過去有關調適障礙的文獻後，將這些研究提出的障礙分為氣候變遷資訊與決策、缺乏持續投入調適的資源、決策破碎性、制度上的約束、缺乏領導者、不同風險感知及文化價值等六個面向，但排除自然系統中的物理及生態限制，因為其認為是難以克服的。而英國海外發展研究所 (The Overseas Development Institute, ODI) 將調適障礙分成人類及資訊、自然及社會等三大系統 (Jones, 2010)，但此研究同樣只討論有關人類系統的社會障礙。Moser & Ekstrom (2010) 的研究中，則是依據調適決策過程，逐步說明各步驟可能存在的社會－生態系統的障礙。

表5.2.2　國際間調適障礙之分類

資料來源	調適障礙分類說明
IPCC (2007)	IPCC第4次評估報告將障礙及限制分為物理與生態限制、技術限制、投資障礙、資訊及風險認知障礙、社會與文化障礙。
Adger et al. (2009)	將調適限制與障礙分為三個面向，包括生態物理、經濟 (含社會及文化範疇)、及技術。
Jones (2010)	將調適障礙分成人類及資訊、自然、及社會等三大系統，但此研究只討論與人類相關的社會障礙。
Morgan (2011)	IUCN (International Union for Conservation of Nature) 將東南亞海岸地區各自然系統所受到的氣候變遷損傷，分為珊瑚礁、海草、紅樹林及泥灘地、漁業資源、觀光資源等不同系統，探討衍生至人類社會的調適障礙。
Bierbaum et al. (2013)	將調適障礙分為氣候變遷資訊與決策、缺乏持續調適的資源、決策破碎性、制度上的約束、缺乏領導者、不同風險感知及文化價值等六個面向，但排除自然系統中的物理及生態限制，因為其認為是難以克服的。
Waters et al. (2014)	將調適障礙分為社會心理障礙、資源障礙、不確定性障礙、治理障礙、政策障礙等五種類型。
Ford & King (2015)	將調適障礙分為缺乏政治意願和領導者、法律障礙、缺乏調適財政資源、參與者之間的協調不足、共同決策的失敗、利害關係人之間的調適目標衝突、不明確的調適責任、氣候資訊不確定性。
Lee et al. (2022)	將調適障礙分為時間尺度與排序間衝突、不確定性、制度不完整與低彈性、作業破碎姓、缺乏認知與溝通、缺乏可用資源、未明定主責管理機關、缺乏跨學科的脆弱度研究、缺乏高治理層級政治協議及上位領導者。

氣候變遷調適規劃是採用現況及未來氣候推估資訊以建立行動的決策過程，但調適規劃及決策者在評估降低風險的調適項目時，導入地方知識或生態管理技術為不可或缺的要素，並需避免只有考慮工程手段。整體調適規劃及決策過程，必需考量更廣泛的社會和環境背景，其中各層級的意見協調與重要利害關係人參與將是調適取得成功的必要條件。調適障礙可能會阻礙決策過程中各階段的連結與執行，避免調適規劃階段中可能遭遇的障礙就相當重要，因此釐清並考量調適障礙於調適規劃及決策架構之研擬，將有助於建構可滿足社會預期目標的調適能力，縮小欲調適風險的能力缺口，並降低不當調適的影響(Chi et al., 2016)。現在國際上已出現不少可供國內參考應用於探討調適障礙面向連結降低不當調適風險的研究 (Bertana et al., 2022; Moser & Ekstrom, 2010)。

3. 調適公平性及脆弱族群

2015年「巴黎協議」(Paris Agreement) 首度提倡各締約方在研究氣候變遷議題時，「應當尊重、增進和考量它們各自對人權、健康權、原住民權利、在地社群權利、移徙者權利、兒童權利、身心障礙者權利、處境脆弱者權利、發展權，以及性別平等、婦女賦權和世代間公平等的義務」；我國「國家氣候變遷調適政策綱領」政策原則之一，也強調「考量脆弱族群與不同性別之需求」；「氣候變遷因應法」調適專章第十七條第八項也說明政府應「強化脆弱群體因應氣候變遷衝擊之能力」。人權、社會公義、貧窮及脆弱族群等重要議題皆會因為氣候變遷而加重影響，因此國際上致力於協助在社會、經濟、健康、身心發展、支持體系等層面較為脆弱的族群，並盡可能提升其因應氣候變遷的調適能力 (傅玉琴，2019)。

調適在空間的發展規劃若未能充分考量多元民眾和社會的差異，往往是因為民眾無法表達真正的需求與意見 (Rahder & Milgrom, 2004)，尤其是社會邊緣族群的需求，包括不同的種族、階級、性別、肢障的民眾等脆弱族群，即經常會被忽略或是受到壓制 (蕭新煌與許耿銘，2015)。臺灣的災後重建造成數個明顯未考量受災民眾意見的不當措施案例，例如莫拉克風災後，政府快速將受強降雨重創的那瑪夏鄉居民進行遷村，過程中政府缺乏與居民深度溝通，忽視受災戶對災後重建及永續部落的期待目標，最終不僅導致部落分裂，甚至永久屋設計型式還對原民文化與生活習慣產生衝擊 (謝文中等人，2011)；洪啟東與傅玟盛 (2013) 在藤枝新舊部落的災後遷村計畫的研究中發現當重大風災後，政府在遷村的過程忽略族群本身的文化特殊性，或重建政策偏向滿足某一族群，而創造族群之間的衝突，反而更加深了社會脆弱度。蔡松倫等人 (2022) 同樣調查莫拉克風災後原住民永久屋基地社區之重建情況，發現在未整合考量原住民參與意見及溝通機制的情況下，對災民的災後復原之回復程度、經濟及社會情況等，產生潛在不利的影響。以上案例說明近期調查及檢討災後政府介入的治理過程的研究案例相當多，主要探討議題包含災後遷村過程草率與缺乏溝通，使得在歷史上具離散經驗的脆弱族群者，需再次面對貧困、部落或社群組織瓦解、及社會關係中斷，因而導致更加脆弱，且更難以在往後災害中復原 (洪啟東與傅玟盛，2013；台邦-撒沙勒，2012)，甚至導致難以降低對災害高潛勢地區土地使用的依賴 (董娟鳴等人，2015)。宋郁玲等人 (2018) 指出政府在救災過程中，注重效率而缺乏權力下放，所以造成參與其中的地方民眾未能得到充分的溝通。官大偉 (2015) 以泰雅族人與石門水庫集水區之災害管理為背景，嘗試以在地原住民的角度理解災害，並應用「災前預防」、「災時應變」、「災後復原」之三階段循環

災害管理模式橋接原住民知識與現代災害管理的溝通，以平衡原住民社群與國土保安間的利益。

人類面對災害風險的反應，不僅關聯地方實質環境條件與過往經驗，同時也反映了資源分配不均與社會不平等之結果 (Adger, 2006)。洪鴻智與盧禹廷 (2015) 研究發現，脆弱族群對從事災前與災後調適的意願較低，其中一個可能原因為缺乏資源與能力進行調適，此將使脆弱族群更易受氣候變遷災害威脅，而提升脆弱度與災害風險。董娟鳴 (2021) 研究臺南市麻豆地區高齡居民淹水災時狀態與避災行為模式，發現災時需求所面臨課題包含及時資訊取得之需求 (資訊接收困難、災害識覺、反應緩慢等)、避難決策與移動需求 (避難移動困難、避難過程之經濟困難等)、避難收容需求 (生活機能需求、心理需求、特殊醫療需求、無障礙生活空間需求等)，並比較高齡災民實際需求與地區災害防救計畫、水患自主防災社區計畫供給落差。在影響調適策略選擇因素中，認知心理研究非常強調個體屬性的重要性，特別是社會經濟屬性，如所得、性別、脆弱程度、教育程度、居住年期、財產擁有狀況等，皆會影響居民風險知覺、災害知識、資源取得與調適措施執行能力，因而可能影響所採取的調適行為 (Hung & Chen, 2013; Sales, 2009; Brouwer et al., 2007)，其中所得、教育程度較高、居住年期較長與擁有住宅者等屬性與調適較具正相關 (Deressa et al., 2009; Paton et al., 2007)，但從量化研究中，指出階級、族群、性別、年齡等是造成民眾受災風險差異的重要原因，同時也擴大了災後韌性的差異以及社會不平等 (洪鴻智與盧禹廷，2015)。政府部門救災計畫中經常忽略災後重建過程的社會面向脆弱度，包括種族、階級、性別、年齡、身體障礙情形、對土地情感及經濟依賴、社會網絡關係 (如宗教與親友網絡) 之掌握度、社區災後恢復及地方重建計畫共識等因子 (宋郁玲等人，2018) 。目前利害關係人仍較關注於降低災害物理層面的脆弱度，未來應持續提高對社會脆弱度的重視，避免衍生更嚴重的社會脆弱度及觸發不當調適風險。

4. 法令及政策之整合

2016 年行政院發布「國土計畫法」，將國土空間利用秩序推動法制化，並於2018年公告「全國國土計畫」，「全國國土計畫」係為確保國土安全，保育自然環境及人文資產，促進資源與產業合理配置，針對我國管轄之陸域及海域，所訂定引導國土資源保育及利用之空間發展計畫；同時也指導直轄市、縣 (市) 國土計畫之空間發展配置，並規範國土保育地區、海洋資源地區、農業發展地區和城鄉發展地區等四大國土功能分區劃設，以達成引導國土空間合理配置目標。「國土計畫法」第 1 條規定，「為因應氣候變

遷，確保國土安全，保育自然環境與人文資產，促進資源與產業合理配置，強化國土整合管理機制，並復育環境敏感與國土破壞地區，追求國家永續發展，特制定本法。」此表明過往相關空間管理及管制法令間之競合關係，包含多層級政府體制及多重主管機關之管轄權責模糊，而「國土計畫法」即導向以適切指導作用來管理國土空間發展及土地使用型態，並盡可能尋求各部門計畫發展目標之一致性。

過去各目的事業主管機關，多只考量自身權責及發展目的為規劃導向，因而經常造成空間發展及使用上之重疊管理及管制衝突。「國土計畫法」第8條將國土計畫分為「全國國土計畫」及「直轄市、縣 (市) 國土計畫」2類，其中「直轄市、縣 (市) 國土計畫」、「國家公園計畫」、「都市計畫」、及各目的事業主管機關擬訂之部門計畫，皆應遵循「全國國土計畫」。「氣候變遷因應法」第17條陳述為因應氣候變遷，政府應推動調適能力建構，其中第2項明文指出「強化因應氣候變遷相關環境、災害、設施、能資源調適能力，提升氣候韌性」；同法第19條，「中央目的事業主管機關應就易受氣候變遷衝擊之權責領域，訂定四年為一期之該領域調適行動方案」，及第20條「直轄市、縣 (市) 主管機關應依行動綱領、國家調適計畫及調適行動方案，邀集有關機關、學者、專家、民間團體舉辦座談會或以其他適當方法廣詢意見，訂修氣候變遷調適執行方案」。依據「國土計畫法」第17條第1項規定，「各目的事業主管機關興辦性質重要且在一定規模以上部門計畫時，除應遵循國土計畫之指導外，並應於先期規劃階段，徵詢同級主管機關之意見」；同條第二項規定，「中央目的事業主管機關興辦部門計畫與各級國土計畫所定部門空間發展策略或計畫產生競合時，應報由中央主管機關協調；協調不成時，得報請行政院決定之」；及第三項規定，「第一項性質重要且在一定規模以上部門計畫之認定標準，由中央主管機關定之」。依據內政部營建署之「性質重要且在一定規模以上部門計畫認定標準」第2條所述，「本法第17條第1項所稱性質重要且在一定規模以上之部門計畫，指住宅、產業、運輸、重要公共設施、能源及水利之中長程或個別興辦事業計畫，涉及空間發展或土地使用計畫達一定規模者」，需參照「性質重要部門計畫之一定規模認定原則」。因此，中央目的事業主管機關「易受氣候變遷衝擊之權責領域調適行動方案」及「直轄縣、市主管機關之氣候變遷調適執行方案」之規劃方案內容，若規劃達一定開發或使用土地空間需求，應於在先期規劃階段即需徵詢同級主管機關意見或進行跨部門協調，以避免氣候變遷調適方案與「國土計畫」空間發展及土地指導原則之產生競合及消極的路徑依賴 (張學聖與魏良諭，2020)。

5.3 結語

國內於2023年「氣候變遷因應法」公布實施，除修正原有關溫室氣體減量之管理及管制條文外，新增調適專章為另一重大突破，將調適與減緩兼容並重地融入國家治理系統的法制規範，已然為全球先驅國家之一。為因應氣候風險評估及調適規劃實務需求，本節蒐整及回顧國內外文獻，論述風險及調適定義、國家氣候變遷調適架構之流程操作、及未來可關注之科研缺口與展望等議題，提供有關調適實務辦理及研究的人員，未來投入推動資源之參考。

本章節彙整國內外氣候變遷風險與調適之定義，可供參考及建立基礎理論之認知，而就國家氣候變遷調適規劃與執行有關工作，亦彙整國內外最新發展之調適架構，依據國科會TCCIP平台計畫關鍵領域實務測試結果及考量我國政府部門運作機制，提出符合實務推動需求之國家氣候變遷調適架構，蒐整學術研究及我國政府部門現有的風險評估及調適指引等有關文獻，概述調適架構6構面下的執行項目、目的、及動態調適路徑之溝通工具等，供進行氣候風險評估與調適研擬之先期參考資料。

接續第4章回顧各關鍵領域調適科研現況與缺口，本章也加以分類彙整，提出可投入科研能力建構面向之建議。本章也參考國內外調適科研發展趨勢與關注程度，包含科研面的風險評估相關資料、風險評估方法與工具、複合性風險、不當調適、漸進式及轉型式調適、調適及減緩共效益等缺口與展望，及治理面之調適跨層級及跨部門治理、調適公平性及脆弱族群等新興研究課題進行統整性論述，包含可供參考的定義、分析架構、分析方法、國內外實際研究案例等，並進一步建議國內未來可深入探究之科研方向。另外，為協助各部門在調適規劃與推動過程可能遭遇的障礙與限制，並考量「氣候變遷因應法」為我國氣候變遷事務必需依循之新興法令，本章節也初步探討於治理機制中需留意及迴避之衝突與障礙，並提出法令及政策之整合議題。

氣候變遷會動態影響我國整體社會經濟活動及自然環境條件的變遷，在調適整體規劃與執行過程中，即需盡可能顧及氣候變遷各個治理環節及提出完善的調適方案，除需克服未來氣候變遷風險的不確定性外，利害關係人參與方式及程度也是調適能否發揮預期效力的重要關鍵之一。在此前提下，跨部門及跨層級的協作與治理即顯得相當重要，

在科研面向更需持續整合跨學科領域的研究能量提升，以期共同參與產出調適規劃與決策所需之先期參考資訊，逐步使我國各部門及領域得以朝向永續發展，並建構符合廣泛社會期待且因地制宜的氣候變遷調適方案與行動。

參考文獻

王思樺、黃書禮、李叢禎、蕭儀婷 (2016)。都市能源使用CO_2排放變動趨勢之降尺度分析－以臺北都會區與高雄市為例。**都市與計劃，43** (4)，369-394。

台邦．撒沙勒 (2012)。災難、遷村與社會脆弱性：古茶波安的例子。**臺灣人類學刊，10** (1)，51-92。

交通部運輸研究所 (2022)。**公路系統規劃階段強化調適能力作為與指引**。交通部運輸研究所。

江立揚、王思樺、張昱諄、黃書禮 (2023)。都市發展計畫對因應氣候變遷之綜效與權衡：以臺北都會區為例。**都市與計劃，50** (2)，219-240。

李盈潔、蔡雅妃 (2023)。綠基盤因應氣候變遷之綜效、權衡與共效益初探—以台北都會區為例。**都市與計劃，50** (2)，195-218。

宋郁玲、林貝珊、涂建翊 (2018)。以社會脆弱性與韌性建構脆弱性單元的可能性分析。**地理學報，89**，1-42。

沈哲緯、何明錦、辜炳寰、冀樹勇、陳致向 (2015)。整合崩塌－土石流災害潛勢評估模式之建立－以新北市汐止區為例。**建築學報，91**，141-166。

何謹余、童慶斌、王淩雅 (2020)。減災與氣候變遷調適在區域治理上之融合研究—以坡地災害為例。**農業工程學報，66** (2)。

官大偉 (2015)。原住民生態知識與當代災害管理-以石門水庫上游集水區之泰雅族部落為例。**地理學報，76**，97-132。

林丞庭、李欣輯、陳永明 (2021)。**氣候變遷調適框架回顧與分析**。國家災害防救科技中心。

邱英浩、汪至佳、江志成 (2014)。植栽及透水鋪面對街道表面溫度之模擬。**建築學報，88**，61-78。

紀佳法、張珈瑋、李欣輯、陳永明、林丞庭 (2023)。**氣候變遷調適規劃架構及溝通工具**。國家災害防救科技中心。

洪啟東、傅玟盛 (2013)。重大災害後的族群社經脆弱現象觀察與分析：以莫拉克颱風災後重建的杉林慈濟大愛園區為例。**災害防救科技與管理學刊，2** (1)，51-70。

洪鴻智、盧禹廷 (2015)。沿海居民的氣候變遷與颱洪災害調適。**都市與計劃，42** (1)，87-108。

陳亮全、吳杰穎、劉怡君、李宜樺 (2007)。土石流潛勢區內居民疏散避難行為與決策之研究-以泰利颱風為例。**中華水土保持學報，38** (4)，325-340。

陳禹銘、許秋玲、樊國恕 (2009)。我國複合災害風險系統架構之探討。**危機管理學刊，6** (2)，1-12。

孫振義 (2017)。熱季街道環境與熱舒適性關係之研究。**都市與計劃，44** (4)，375-39。

孫振義、簡子翔 (2016)。夏季臺北都會區熱島效應之研究。**都市與計劃，43** (4)，437-462。

孫振義、林憲德、呂罡銘、劉正千、陳瑞鈴 (2010)。台南市地表溫度與地表覆蓋關係之研究。**都市與計劃，37** (3)，369-391。

國家發展委員會 (2018)。**地方氣候變遷調適計畫規劃作業指引**。國家發展委員會。https://dra.ncdr.nat.gov.tw

張學聖、廖晉賢 (2013)。臺南市土地使用計畫之水災風險分析。**都市與計劃，40** (1)，59-79。

張學聖、魏良諭 (2020)。國土空間規劃回應氣候變遷之比較分析-以台南市為例。**規劃學報，38** (2)，1-28。

傅玉琴 (2019)。弱勢民眾對氣候變遷影響因子及因應行為之認知與態度之研究。**生活科學學報，22**，1-41。

童慶斌、劉子明、林嘉佑、李明旭 (2015)。氣候變遷水資源風險評估與調適決策之探討。**土木水利，42** (4)，30-45。

童慶斌、劉子明、林嘉佑、曹榮軒 (2016)。**科技部TaiCCAT計畫－氣候變遷調適行動計畫建構指引**。科技部。

經濟部工業局 (2021)。**製造業氣候變遷調適指引**。經濟部工業局。

經濟部水利署 (2022)。**水利署氣候變遷調適參考指引**。經濟部水利署。

經濟部能源局 (2022)。**能源部門因應氣候變遷風險評估指引**。經濟部能源局。

黃國慶、詹士樑、柯景婷、李家齊 (2023)。氣候變遷調適共效益評估架構之探討—以農地調適為例。**都市與計劃，50** (2)，273-296。

董娟鳴 (2021)。地區災害防救工作落實於淹水地區高齡者避難收容課題研究-以823水災臺南市麻豆區三里高齡居民避難收容為例。**建築學報，118**，89-112。

董娟鳴、林文苑、涂庭儀、蔡皓年 (2015)。從永久屋興建與居民居住狀況探討災後永久屋政策執行之課題-以高雄市六龜區新發裡新開部會為例。**建築學報，92**，99-124。

臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 (TCCIP) (2022)。**調適構面2022**。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ark_02_method.aspx?p=tccip

蔡元芳、林庚翰、蘇文瑞、陳晉琪 (2018)。山區聚落複合式災害之危害評估。**地理學報，88**，1-30。

蔡育新、徐嘉信、林家靖 (2023)。街區開放空間之氣候變遷規劃綜效與共效益—建物重建對主次要道路之驅動。**都市與計劃，50** (2)，159-194。

蔡育新、徐嘉信、王絢、林家靖 (2021)。因應氣候變遷之都市街區規劃設計策略與永續「共效益」－建物重建階段。**都市與計劃，48** (1)，27-48。

蔡松倫、曾敏惠、鄧傳忠、落合知帆 (2022)。莫拉克颱風災後永久屋基地之建成環境特徵分析。**地理學報，101**，55-84。

劉怡君、洪鴻智 (2022)。從災害韌性觀點探討流域之脆弱度、衝擊與調適。**都市與計劃，49** (1)，71-98。

蕭新煌、許耿銘 (2015)。探悉都市氣候風險的社會指標：回顧與芻議。**都市與計劃，42** (1)，59-86。

盧鏡臣、周素卿、廖昱凱 (2015)。落差與接軌? 從國際發展看臺灣的都市氣候治理與研究。**都市與計劃，42** (1)，7-38。

謝文中、鄭夙芬、鄭期緯 (2011)。這是「房子」，不是「家屋」：從解釋性互動論探討莫拉克風災後原住民的遷徙與衝擊。**臺大社工學刊，24**，135-166。

Airoldi, L., & Beck, M.W. (2007). Loss, status and trends for coastal marine habitats of Europe. Oceanography and Marine Biology:*An Annual Review, 45,* 345-405.C40 (2018). Climate change risk assessment guidance. C40. New York.

AccountAbility. (2015).*AA1000-Stakeholder Engagement Standard 2015.* AccountAbility.

Adger, W.N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change, 16*(3), 268-281.

Adger, W.N., & Jordan, A. (2009). *Governing sustainability.* Cambridge University Press.

Adger, W.N., & Vincent, K. (2005). Uncertainty in adaptive capacity. *Comptes Rendus Geoscience, 337*(4), 399-410.

Adger, W.N., Dessai, S., Goulden, M., Hulme, M., Lorenzoni, I., Nelson, D.R., Næss, L.O., Wolf, J., & Wreford, A. (2009). Are there social limits to adaptation to climate change? *Climatic Change, 93*(3), 335-354.

Adger, W.N., Arnell, N.W., & Tompkins. E.L. (2005). Successful adaptation to climate change across scale. *Global Environmental Change, 15,* 77-86.

Ajulo, O., Von-Meding, J., & Tang, P. (2020). Upending the status quo through transformative adaptation: A systematic literature review. *Progress in Disaster Science, 6,* 100103.

Amundsen, H., Hovelsrud, G.K., Aall, C., Karlsson, M., & Wstskog, H. (2018). Local governments as drivers for societal transformation: towards the 1.5°C ambition. *Current Opinion in Environmental Sustainability, 31,* 23-29.

Ayers, J. M., & Huq, S. (2009). Supporting adaptation to climate change: What role for official development assistance? *Development Policy Review, 27*(6), 675-692. https://doi.org/10.1111/j.1467-7679.2009.00465.x

Babaeian, F., Delavar, M., Morid, S., & Srinivasan, R. (2012). Robust climate change adaptation pathways in agricultural water management. *Agricultural Water Management, 252,* 106904.

Barnett, J., & O' Neill, S. (2010). Maladaptation. *Global Environmental Change, 20*(2), 211-213. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.11.004

Barnett, J., & O'Neill, S. J. (2013). Minimising the risk of maladaptation. *Climate Adaptation Futures,* 87-93. https://doi.org/10.1002/9781118529577.ch7

Barrett, J., Rose, J., Deonarine, S., Clemetson, A., Pagach, J., Parker, E. A., & Tedesco, M. (2011). *Sentinel monitoring for climate change in the Long Island Sound estuarine and coastal ecosystems of New York and Connecticut.* Long Island Sound Study, 2.

Beckman, M. (2011). Converging and conflicting interests in adaptation to environmental change in central Vietnam. *Climate and Development, 3*(1), 32-41.

Bertana, A., Clark, B., Benney, T. M., & Quackenbush, C. (2022). Beyond maladaptation: Structural barriers to successful adaptation. *Environmental Sociology, 8*(4), 448-458. https://doi.org/10.1080/23251042.2022.2068224

Bierbaum, R., Smith, J. B., Lee, A., Blair, M., Carter, L., Chapin, F. S., Fleming, P., Ruffo, S., Stults, M., McNeeley, S., Wasley, E., & Verduzco, L. (2013). A comprehensive review of climate adaptation in the United States: More than before, but less than needed. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 18*(3), 361-406. https://doi.org/10.1007/s11027-012-9423-1

Blythe, J., Silver, J., Evans, L., Armitage, D., Bennett, N.J., Moore, M. L., Morrison, T.H., & Brown, K. (2018). The Dark Side of Transformation: Latent Risks in Contemporary Sustainability Discourse. *Antipode, 50,* 1206-1223. https://doi.org/10.1111/anti.12405

Bracken, L.J., Oughton, E.A., Donaldson, A., Cook, B., Forrester, J., Spray, C., Cinderby, S., Passmore, D., & Bissett, N. (2016). Flood risk management, an approach to managing cross-border hazards. *Natural Hazards, 82,* 217-240.

Brouwer, R., Akter, S., Brander, L., & Haque, E. (2007). Socioeconomic vulnerability and adaptation to environmental risk: A case study of climate change and flooding in Bangladesh. *Risk Analysis, 27*(2), 313-326. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924. 2007.00884.x

Brown, K. (2002). Innovations for conservation and development. *Geographical Journal, 168*(1), 6-17.

Brunner, R. D. (2005). *Adaptive governance: integrating science, policy, and decision making.* Columbia University Press.

Buurman, J., & Babovic. (2017). Adaptation Pathways and Real Options Analysis: An approach to deep uncertainty in climate change adaptation policies. *Policy and Society, 35*(2), 137-150. https://doi.org/10.1016/j.polsoc.2016.05.002

Carmin, J., Nadkarni, N., & Rhie, C. (2012). Progress and challenges in urban climate adaptation planning: results of a global. *Progress and Challenges in Urban Climate Adaptation Planning: Results of a Global,* 30-30.

Chi, C.F. (2022). *Climate change maladaptive pathways and mechanisms in coastal area: A case study of the Jiadung Township, Pingtung County, Taiwan*. Doctoral Dissertation, Department

of Marine Environment and Enginerring, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung City, Taiwan.

Chi, C.F., & Lu, S.Y. (2016). Linking Barriers for Adaptation and Maladaptation to Climate Change: A brief review. *The 38th Ocean Engineering Conference in Taiwan.* Taipei.

Chi, C.F., Lu, S.Y., & Lee, J.D. (2020). Ostensibly effective adaptive measures could potentially be maladaptations: A case study of the Jiadung coastal area, Pingtung County, Taiwan. *Coastal Management, 48*(6), 643-676. https://doi.org/10.1080/08920753.2020.1803575

Chi, C.F., Lu, S.Y., Hallgren, W., Ware, D., & Tomlinson, R. (2021). Role of spatial analysis in avoiding climate change maladaptation: A systematic review. *Sustainability, 13*(6), 3450. https://doi.org/10.3390/su13063450

Clarke, D., & Murphy, C. (2023). Incremental adaptation when transformation fails: The importance of place-based values and trust in governance in avoiding maladaptation. *Journal of Environmental Psychology, 88,* 102037.

Clarke, D., Murphy, C., & Lorenzoni, I. (2016). Barriers to transformative adaptation: Responses to flood risk in Ireland. *Journal of Extreme Events, 3*(2), Article 1650010. https://doi.org/10.1142/S234573761650010X

Clarke, D., Murphy, C., & Lorenzoni, I. (2018). Place attachment, disruption and transformative adaptation. *Journal of Environmental Psychology, 55,* 81-89. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2017.12.006

Colloff, M.J., Gorddard, R., Abel, N., Locatelli, B., Wyborn, C., Bulter, J.R.A., Lavorel, S., van Kerhoff, L., Meharg, S., Múnera-Roldan, C., Bruley, E., Fedele, G., Wise, R.M., & Dunlop, M. (2021). Adapting transformation and transforming adaptation to climate change using a pathways approach. *Environmental Sciecne and Policy, 124,* 163-174.

Commission of The European Communities. (2009). Adapting to climate change: *Towards a European framework for action.* Commission of The European Communities.

Culver, M., Bierwagen, B., Burkett, V., Cantral, R., Davidson, M.A., & Stockdon, H. (2013). Introduction and context. In: Coastal impacts, adaptation and vulnerabilities. *A technical input to the 2013 National Climate Assessment.* [Burkett, V., & Davidson, M. (eds.)]. ISLAND Press.

Deressa, T. T., Hassan, R. M., Ringler, C., Alemu, T. & Yesuf, M. (2009). Determinants of farmers' choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia, *Global Environment Change, 19* (2), 248-255. 10.1016/j.gloenvcha.2009.01.002

Dilley, M., Chen, R.S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A.L., Arnold, M., Agwe, J., Buys, P., Kjekstad, O., Lyon, B. & Yetman, G. (2005) *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis.* Washington, D.C. International Bank for Reconstruction and Development/the World Bank and Columbia University. Washington, DC.

Dow, K., Kasperson, R.E., & Bohn, M. (2006). Exploring the Social justice implications of adaptation and vulnerability. In: *Fairness inadaptation to Climate Change* [eds by Adger, W.N., Paavola, J., Huq, S., & Mace, M.J.]. The MIT Press.

Dzebo, A. (2019). Effective governance of transnational adaptation *initiatives. International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics, 19*(4-5), 447-466.

Ebi, K. (2011). Climate change and health risks: assessing and responding to them through 'adaptive management'. *Health Affairs, 30*(5), 924-930.

Ekstrom, J.A., Moser, S.C., & Torn, M. (2011). *Barriers to adaptation: a diagnostic framework.* PIER Research Report CEC-500-2011-004. Public Interest Energy Research, Sacramento, CA.

Eriksen, S., & Brown, K. 2011. Sustainable adaptation to climate change. *Climate and Development, 3,* 3-6.

Engle, N.L. (2011). Adaptive capacity and its assessment. *Global Environmental Change, 21,* 647-656.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2011). *Climate change vulnerability assessment: Four case studies of water utility practices.* EPA/600/R-10/077 F. U.S. Environmental ProtectionAgency, Global Change Research Program, National Center for Environmental Assessment, Washington, DC.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2011). Climate Change Vulnerability Assessments: *Four Case Studies of Water Utility Practices.*

EU (European Commission). (2013). *Non-paper Guidelines for Project Managers: Making vulnerable investments climate resilient.* European Commission.

Fazey, I., Gamarra, J. G., Fischer, J., Reed, M. S., Stringer, L. C., & Christie, M. (2010). Adaptation strategies for reducing vulnerability to future environmental change. *Frontiers in Ecology and the Environment, 8*(8), 414-422. https://doi.org/10.1890/080215

Fedele, G., Donatti, G.I., Harvey, C., Hannah, L., & Hole, D.G. (2019). Transformative adaptation to climate change for sustainable social-ecological systems. *Environmental Science & Policy, 101,* 116-125.

Federspiel, S. (2012). Climate change adaptation planning, implementation, and evaluation: needs, resources, and lessons for the 2013 National Climate Assessment. University of Michigan School of Natural Resources and Environment. *Ann Arbor, 62.*

Few, R., Brown, K., & Tompkins, E. L. (2007). Public participation and climate change adaptation: Avoiding the illusion of inclusion. *Climate Policy, 7*(1), 46-59. https://doi.org/10.1080/14693062.2007.9685637

Filho, W.L., Salvia, A.L., Balogun, A.L., Pereira, M.J.V., Mucova, S.A.R., Ajulo, O.M., Ng, A., Gwenzi,

J., Mashonjowa, E., Aina, Y.A., Li, C., Totin, E., Pinho, P., Campbell, D., Chanza, N., & Setti, A.F.F. (2023). Towards more sustainable responses to natural hazards and climate change challenges via transformative adaptation. *Cities, 141,* 104525.

Filho, W.L., Wolf, F., Moncada, S., Salvia, A.L., Balogun, A.L.B., Skanavis, C., Kounani, A., & Nunn, P.D. (2019). Transformative adaptation as a sustainable response to climate change: insights from large-scale case studies. *Environmental Science & Policy, 101,* 116-125.

Fook, T.C.T. (2017). Transformational processes for community-focused adaptation and social change: a synthesis. *Climate Development, 9*(1), 5-21.

Ford, J.D. & King, D. (2015). A framework for examining adaptation readiness. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 20,* 505-526.

Ford, J.D., Berrang-Ford, L., & Paterson, J. (2011). *A systematic review of observed climate change adaptation in developed nations. Climate Change, 106,* 327-336.

Ford, J. D., Keskitalo, E. C., Smith, T., Pearce, T., Berrang‐Ford, L., Duerden, F., & Smit, B. (2010). Case study and analogue methodologies in climate change vulnerability research. *WIREs Climate Change, 1*(3), 374-392. https://doi.org/10.1002/wcc.48

Füssel, H. (2007). Adaptation planning for climate change: Concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustainability Science, 2*(2), 265-275. https://doi.org/10.1007/s11625-007-0032-y

Galvin, K.A. (2021). *Transformational adaptation in drylands. Current Opinion in Environmental Sustainability, 50,* 64-71

Gan, C.C.R., Chu, C.M.Y., Lin, J.D., Lin, M.N., & Wang, Y.W. (2019). Health-promoting hospitals in the face of climate change: the way forward. *Health Promotion Research and Practice, 2*(1), 1-9.

Glick, P., Stein, B.A., & Edelson, N.A. (2011). *Scanning the conservation horizon: a guide to climate change vulnerability assessment.* National Wildlife Federation, Wachington, p 176.

Gohari, A., Mirchi, A., & Madani, K. (2017). System dynamics evaluation of climate change adaptation strategies for water resources management in central Iran. *Water Resources Management, 31*(5), 1413-1434. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1575-z

Grafakos, S., Trigg, K., Landauer, M., Chelleri, L., & Dhakal, S. (2019). Analytical framework to evaluate the level of integration of climate adaptation and mitigation in cities. *Climatic Change, 154,* 87-106.

Granberg, M., & Glover, L. (2013). Adaptation and maladaptation in Australian national climate change policy. *Journal of Environmental Policy & Planning, 16*(2), 147-159. https://doi.org/10.1080/1523908x.2013.823857

Haasnoot, M., Middelkoop, H., Offermans, A., Beek, E. V., & Deursen, W. P. (2012). Exploring pathways for sustainable water management in river deltas in a changing environment.

Climatic Change, 115(3-4), 795-819. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0444-2

Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change, 19*(2), 240-247.

Hammill, A., & Tanner, T. (2011). Harmonising climate risk management: *Adaptation screening and assessment tools for development co-operation.*

Hauer, M. E., Evans, J. M., & Mishra, D. R. (2016). Millions projected to be at risk from sea-level rise in the continental United States. *Nature Climate Change, 6*(7), 691-695. https://doi.org/10.1038/nclimate2961

Hennessey, R., Pittman, J., Morand, A., & Douglas, A. (2017). Co-benefits of integrating climate change adaptation and mitigation in the Canadian energy sector. *Energy Policy, 111,* 214-221.

Hermans, L.M., Haasnoot, M., ter Maat, J., & Kwakkel, J.H. (2017). Designing monitoring arrangements for collaborative learning about adaptation pathways. *Environmental Science & Policy, 69,* 29-38.

Heyd, T., & Brooks, N. (2009). Exploring cultural dimemsions of adaptation to climate change. In: *Adapting to Climate Change: Thresholds, Values, Governance* [eds by Adger, W.N., Lorenzoni, I., & O'Brien, K.L.]. Canbridge Press.

Horton, R. M., Solecki, W. D., & Rosenzweig, C. (2012). *Climate change in the Northeast: a sourcebook.*

Huitema, D., Adger, W.N., Berkhout, F., Massey, E., Mazmanian, D., Munaretto, S., Plummer, R., & Termeer, C.C.J.A.M. (2016). The governance of adaptation: choices, reasons, and effects. Introduction to the Special Feature. *Ecology and Society, 21*(3), 37.

Hulme, M., & Dessai, S. (2008). Predicting, deciding, learning: Can one evaluate the 'success' of national climate scenarios? *Environmental Research Letters, 3*(4), 045013. https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/4/045013

Hung, H. C., & Chen, L. Y. (2013). Incorporating stakeholders' knowledge into assessing vulnerability to climatic hazards: Application to the river basin management in Taiwan. *Climatic Change, 120*(1-2), 491-507. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0819-z.

Ingram, K., Dow, K., & Carter, L. (2012). Southeast region technical report to the National Climate Assessment. Presented to the Gulf of Mexico Climate Outreach Community of Practice, New Orleans, LA, 16-18 April.

IPCC. (2001). *Climate Change 2001:* Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press.

IPCC. (2007). *Climate Change 2007:* Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press.

IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.* A Special Report of Working.

IPCC. (2014). Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, (pp. 1-32).

IPCC. (2018). Annex I: Glossary. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* Cambridge University Press.

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press.

ISO. (2019a). *ISO 14090. Adaptation to climate change—Principles, requirements and guidelines.*

ISO. (2019b). *ISO 14091. Adaptation to Climate Change –Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment.*

Jeffers, J. (2020). Barriers to transformation towards participatory adaptation decision-making: Lessons from the Cork flood defences dispute. *Land Use Policy, 90, 104333.*

Jim, C.Y. (2013). Sustainable urban greening strategies for compact cities in developing and developed economies. *Urban Ecosystems, 16,* 741-761.

Jones, L. (2010). *Background Note: Overcoming social barriers to adaptation.* Overseas Development Institute, UK.

Jones, B., O' Neill, B. C., McDaniel, L., McGinnis, S., Mearns, L. O., & Tebaldi, C. (2015). Future population exposure to US heat extremes. *Nature Climate Change, 5*(7), 652-655. https://doi.org/10.1038/nclimate2631

Jones, R. N., Young, C., & Handmer, J. (2013). Valuing adaptation under rapid change.

Juhola, S., Glaas, E., Linnér, B., & Neset, T. (2016). Redefining maladaptation. *Environmental Science & Policy, 55,* 135-140 https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.014

Juhola, S., & Käyhkö, J. (2023). Maladaptation as a concept and a metric in national adaptation policy- Should we, would we, could we? *PLOS Climate, 2*(5), e0000213.

Juhola, S., Klein, N., Käyhkö, J., Neset, T.S.S. (2017). Climate change transformations in Nordic agriculture? *Journal of Rural Studies, 51,* 28-36.

Kates, R.W., Travis, W.R., & Wilbanks, T. (2012). Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. *PNAS, 109*(9), 7156-7161.

Kareiva, P. (2008). Synthesis and Assessment Product 4.4: Adaptation options for climate-sensitive ecosystems and resources-synthesis and conclusions. In: USGCRP (ed) *The U.S. Climate Change Science Program.* U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Karimi, V., Bijani, M., Hallaj, Z., Valizadeh, N., Haghighi, N.F., & Karimi, M. (2023). Adaptation and Maladaptation to Climate Change: Farmers' Perceptions. In: *Strategizing Agricultural Management for Climate Change Mitigation and Adaptation* [eds by Bandh, S.A.]. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32789-6_7

KC, B., Shepherd, J. M., King, A. W., & Johnson Gaither, C. (2021). Multi-hazard climate risk projections for the United States. *Natural Hazards, 105*(2), 1963-1976. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04385-y

Kemp, R., Loorbach, D., & Rotmans, J. (2007). Transition management as a model for managing processes of co-evolution towards sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 14*(1/2), 78—91.

Klein, R. J. T., Huq, S., Denton, F., Downing, T. E., Richels, R. G., Robinson, J. B., & Toth, F. L. (2007). Inter-Relationships between Adaptation and Mitigation. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In *Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability,* edited by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, and C. E. Hanson, 745–777. Cambridge: Cambridge University Press.

Kopke, K., & O'Mahony, C. (2011). Preparedness of key coastal and marine sectors in Ireland to adapt to climate change. *Marine Policy, 35,* 800-809.

Kuntz, J.R.C., & Gomes, J.F.S., (2012). Transformational change in organisations: a selfregulation approach. *Journal of Organizational Change Management, 25,* 143-162. https://doi.org/10.1108/09534811211199637.

Lackstrom, K., Dow, K., Haywood, B., Brennan, A., Kettle, N., & Brosius, A. (2012). *Engaging climate-sensitive sectors in the Carolinas.* Technical report CISA-2012-03. Carolonas Integrated Sciences and Assessments, Columbia, p 180.

Laukkonen, J., Blanco, P.K., Lenhart, J., Keiner, M., Cavric, B., & Kinuthia-Njenga, C. (2009). *Combining climate change adaptation and mitigation measures at the local level. Habitat International, 33,* 287-292.

Lavorel, S., Colloff, M.J., Locatelli, B., Gorddard, R., Prober, S.M., Gabillet, M., Devaux, C., Laforgue, D.,

& Peyrache-Gadeau, V., (2019). Mustering the power of ecosystems for adaptation to climate change. *Environ. Sci. Policy, 92,* 8-97. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.010

Lee, S., Paavola, J., & Dessai, S. (2022). Towards a deeper understanding of barriers to national climate change adaptation policy: A systematic review. *Climate Risk Management, 35, 100414.*

Lonsdale, K., Pringle, P., & Turner, B. (2015). Transformative adaptation: What it is, why it matters & what is needed. *In UK climate impacts programme.* Oxford, UK: University of Oxford.

Magnan, A.K., Schipper, E.L.F., Burkett, M., Bharwani, S., Burton, I., Eriksen, S., Gemenne, F., Schaar, J., & Ziervogel, G. (2016). Addressing the risk of maladaptation to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 7,* 646-665.

Magnan, A. K., Schipper, E. L. F., & Duvat, V. K. E. (2020). Frontiers in climate change adaptation science: Advancing guidelines to design adaptation pathways. *Current Climate Change Reports, 6*(4), 166–177. https://doi.org/10.1007/s40641-020-00166-8

Maru, Y.T., Smith, M.S., Sparrow, A., Pinho, P.F., & Dube, O.P. (2014). A linked vulnerability and resilience framework for adaptation pathways in remote disadvantaged communities. *Global Environmental Change, 28,* 337-350.

McCollum, D. W., Tanaka, J. A., Morgan, J. A., Mitchell, J. E., Maczko, K. A., Hidinger, L., Fox, W.E., & Duke, C. S. (2011). Climate change effects on rangelands: Affirming the need for monitoring. *RMRS-Human dimensions research program discussion paper. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins.*

McDowell, J. Z., Moe, C. L., & Hess, J. J. (2010). Adaptation or maladaptation: *vulnerability to competing economic and climatic exposures in the Bolivian Highlands.* Emory University, Rollins School of Public Health: Atlanta, GA, USA.

McEvoy, J., & Wilder, M. (2012). Discourse and desalination: potential impacts of proposed climate change adaptation interventions in the Arizona - Sonora border region. *Global Environmental Change, 22,* 353 - 363.

Means, E., Laugier, M., Daw, J., Kaatz, L., & Waage, M. (2010). Decision support planning methods: Incorporating climate change uncertainties into water planning. *Water Utility Climate Alliance White Paper, 102.*

Measham, T.G., Preston, B.L., Smith, T.F., Brooke, C., Gorddard, R., Withycombe, G., & Morrison, C. (2011). Adapting to climate change through local municipal planning: *barriers and challenges. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 16,* 889-909.

Mehryar, S., Sasson, I., & Surminski, S. (2022). Supporting urban adaptation to climate change: What role can resilience measurement tools play? *Urban Climate, 41,* 101047.

Moore, S., Zavaleta, E., & Shaw, R. (2012). Decision Making Under Uncertainty: *An Assessment of Adaptation Strategies and Scenario Development for Resource Managers.*

Morecroft, M.D., Duffield, S., Harley, M., Pearce-Higgins, J.W., Stevens, N., Watts, O., & Whitaker, J. (2019). Measuring the success of climate change adaptation and mitigation in terrestrial ecosystems. *Science, 366,* 1329.

Morgan, C.L. (2011). *Limits to adaptation.* IUCN. Bangkok.

Moser, S. C., & Ekstrom, J. A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 107*(51), 22026-22031. https://doi.org/10.1073/pnas.1007887107

Moss, R.H., Meehl, G.A., Lemos, M.C., Smith, J.B., Arnold, J.R., Arnott, J.C., Behar, D., Brasseur, G.P., Broomell, S.B., Busalacchi, A.J., Dessai, S., Ebi, K.L., Edmonds, J.A., Furlow, J., Goddard, L., Hartmann, H.C., Hurrell, J.W., Katzenberger, J.W., Liverman, D.M., ⋯ Wilbanks, T.J. (2013). Hell and high water: practice-relevent adaptation science. *Science, 342*,696-698.

Mustelin, J., & Handmer, J. (2013). Triggering transformation: Managing resilience or invoking real change. *Proceedings of transformation in a changing climate conference, 19.*

Næss, L.O., Bang, G., Eriksen, S., & Vevatne, J. (2005). Institutional adaptation to climate change: flood responses at the municipal level in Norway. *Global Environmental Change, 15,* 125-138.

Novalia, W., & Malekpour, S. (2020). Theorising the role of crisis for transformative adaptation. *Environmental Science & Policy, 112,* 361-370. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.07.009

NRS (National Research Service). (2010). *National Park Service climate change response strategy. National Park Service, Fort Collins.*

NRC (National Research Council). (2008). *Potential impacts of climate change on U.S. transportation: Special Report 290.* National Research Council, National Academies Press, Washington.

NRC (National Research Council). (2010) *Adapting to the Impacts of Climate Change, America's Climate Choices: Panel on Adapting to the Impacts of Climate Change.* National Academy Press.

Ostrom, E. (2005). *Understanding Istitutional Diversity.* Princeton University Press, NJ.

Paton, D., Gregg, C. E., Houghton, B. F., Lachman, R., Lachman, J., Johnston, D. M., & Wongbusarakum, S. (2007). The impact of the 2004 tsunami on coastal Thai communities: Assessing adaptive capacity. *Disasters, 32*(1), 106-119. https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2007. 01029. x

Pelling, M. (2011). *Adaptation to Climate Change: From Resilience to Transformation.* Routledge Press, London.

Perrings, C. (2006). Resilience and sustainable development. *Environment and Development Economics, 11*(4), 417-427.

Persson, Åsa. (2019). Global adaptation governance: an emerging but contested domain. *WIREs Climate Change, 10*, e618.

Pickering, J., Betzold, C., & Skovgaard, J. (2017). Special issue: Managing fragmentation and complexity in the emerging system of international climate finance. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics, 17*(1), 1-16.

Preston, B. L., Westaway, R. M., & Yuen, E. J. (2010). Climate adaptation planning in practice: An evaluation of adaptation plans from three developed nations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 16*(4), 407-438. https://doi.org/10.1007/s11027-010-9270-x

Rahder, B., & Milgrom, R. (2004). The uncertain city: Making space(s) for difference. *Canadian Journal of Urban Research, 13*(1), 27-45.

Richards, C., Carter, C., & Sherlock, K. (2004). *Practical approaches to participation.* Aberdeen: Macaulay Institute.

Reilly, J., & Schimmelpfennig, D. (2000). Irreversibility, Uncertainty, and Learning: Portraits of Adaptation to Long-Term Climate Change. *Climatic Change, 45,* 253-278.

Rojas Blanco, A. V. (2006). Local initiatives and adaptation to climate change. *Disasters, 30*(1), 140-147. https://doi.org/10.1111/j.1467-9523.2006.00311.x

Rotmans, J., & Loorbach, D. (2008). Transition management: Reflexive governance of social complexity through searching, learning and experimenting. *Managing the Transition to Renewable Energy.* Edvard Elgar Press, Cheltenham.

Rowland, E.L., Davison, J.E., & Graumlich, L.J. (2011). Approaches to evaluating climate change impacts on species: a guide to initiating the adaptation planning process. *Environmental Management, 47,* 322-337.

Sales, R. F. (2009). Vulnerability and adaptation of coastal communities to climate variability and sea-level rise: Their implications for integrated coastal management in Cavite City, Philippines. *Ocean & Coastal Management, 52*(7), 395-404. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.04.007

Schipper, E.L.F. (2020). Maladaptation: when adaptation to climate change goes very wrong. *One Earth, 3*(4), 409-414.

Scheraga, J., & Grambsch, A. (1998). Risks, opportunities and adaptation to climate change. *Climate Research, 11,* 85-95. https://doi.org/10.3354/cr011085

Sharifi, A. (2021). Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. *Science of The Total Environment, 750,* 141642.

Shi, L. (2019). Promise and paradox of metropolitan regional climate adaptation. *Environmental Science & Policy, 92,* 262-274.

Singh, C., Solomon, D., Bendapudi, R., Kuchimanchi, B., Iyer, S., & Bazaz, A. (2019). What shapes vulnerability and risk management in semi-arid India? Moving towards an agenda of sustainable adaptation. *Environmental Development, 30,* 35-50.

Simpson, N.P., Mach, K.J., Constable, A., Hess, J., Hograth, R., Howden, M., Lawrence, J., Lempt, R.J., Muccione, V., Mackey, B., New, M.G., O' Neill, B., Otto, F., Pörtner, H.O., Reisinger, A., Roberts, D., Schmidt, D.N., Seneviratne, S., Strongin, S., ⋯ Trisos C.H. (2021) . A Framework for complex climate change risk assessment. *One Earth, 4,* 489-501.

Smit, B., & Pilifosova, O. (2001). Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. *Sustainable Development, 8*(9), 9.

Smit, B., & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change, 16*(3), 282-292. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008

Smith, M.S., Horrocks, L., Harvey, A., & Hamilton, C. (2011). Rethinking adaptation for a 4°Cworld. *Philosophical Transactions of The Royal Society A, 369,* 196-216.

Solecki, W., & Rosenzweig, C. (2012). US cities and climate change: urban, infrastructure, and vulnerability issues. *Technical Input Report Series, US National Climate Assessment.*

Swart, R., & Raes, F. (2007). Making integration of adaptation and mitigation work: Mainstreaming into sustainable development policies? *Climate Policy, 7*(4), 288-303. https://doi.org/10.1080/14693062.2007.9685657

Termeer, C.J.A.M., Dewulf, A., & Biesbroek, G.R. (2017). Transformational change: governance interventions for climate change adaptation from a continuous change perspective. *Journal of Environmental Planning and Management, 60*(4), 558-576.

Tol, R. S., Klein, R. J., & Nicholls, R. J. (2008). Towards successful adaptation to sea-level rise along Europe's coasts. *Journal of Coastal Research, 242,* 432-442. https://doi.org/10.2112/07a-0016.1

Tompkins, E.L. (2005). Planning for climate change in small islands: insights from national hurricane preparedness in the Cayman Island: adaptation to climate change: perspectives across scales. *Global Environmental Change, 15*(2), 139-149.

Tung, C., Tsao, J., Tien, Y., Lin, C., & Jhong, B. (2019). Development of a novel climate adaptation algorithm for climate risk assessment. *Water, 11*(3), 497. https://doi.org/10.3390/w11030497

Urwin, K., & Jordan, A. (2008). Does public policy support or undermine climate change adaptation? Exploring policy interplay across different scales of governance. *Global Environmental Change, 18,* 180-191.

UKCIP. (2003). adaptation: *Risk, uncertainty and decision-making,* Technical Report. https://www.ukcip.org.uk/wp-content/PDFs/UKCIP-Risk-framework.pdf

UNDP. (2004). Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: *Developing Strategies, Policies*

and Measures. https://www.adaptation-undp.org/sites/default/files/downloads/adaptation_policy_frameworks_for_climate_change__developing_strategies_policies_and_measures_0.pdf

UNISDR. (2004). *Living with risks: a global review of disaster reduction initiatives.* United Nations Publication, Geneva, Switzerland.

UN (United Nations). (2021). *National Adaptation Plans 2021. Progress in the formulation and implementation of NAPS.* United Nations Climate Change.

Vose, J., Peterson, D. L., & Patel-Weynand, T. (2012). *National climate assessment—forest sector technical report.* wallis A. (2011) US regions planning for climate adaptation, School of Public Affairs, University of Colorado, Denver.

Waters, E., Barnett, J., & Puleston., A. (2014). Contrasting perspectives on barriers to adaptation in Australian climate change policy. *Climatic Change, 124,* 691-702.

Weiler, F., Klöck, C., & Dornan, M. (2018). Vulnerability, good governance, or donor interests? The allocation of aid for climate change adaptation.World Development, 104, 65-77.

Werners, S.E., Pfenninger, S., van Slobbe, E., Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., & Swart, R.J. (2013). Thresholds, tipping and turning points for sustainability under climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability, 5,* 334-340.

Werners, S. E., Wise, R. M., Butler, J. R., Totin, E., & Vincent, K. (2021). Adaptation pathways: A review of approaches and a learning framework. *Environmental Science & Policy, 116,* 266-275. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.11.003

West, J.M., Julius, S.H., Kareiva, P., Enquist, C., Law,ler, J.J., Petersen, B., Johnson, A.E., & Shaw, M.R. (2009). US natural resources and climate change: concepts and approaches, for management adaptation. *Environmental Management, 44,* 1001-1021.

Wilder, M., Scott, C.A., Pablos, N.P., Varady, R.G., Garfin, G.M., & McEvoy, J. (2010). Adapting Across Boundaries: Climate Change, Social Learning, and Resilience in the U.S.–Mexico Border Region. *Annals of the Association of American Geographers, 100*(4), 917-928.

Wilby, R., & Vaughan, K. (2011). Hallmarks of organisations that are adapting to climate change. *Water and Environment Journal, 25*(2), 271-281. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00220.x

Winkler, J., Anderson, J., & Hatfield, J. (2012). *Midwest technical input report.* Prepared for the U.S. National Climate Assessment.

World Bank (2008). Climate Resilient Cities: *A Primer on Reducing Vulnerabilities to Disasters.* World Bank.

WRI (World Resources Institute). (2009). *The National Adaptive Capacity Framework - Key*

Institutional Functions for a Changing Climate. World Resources Institute. Washington, USA.

Zandvoort, M., van de Brugge, R., van de Vlist, M.J., & van der Brink, A. (2017). Dealing with uncertainty in collaborative planning: developing adaptive strategies for the Ijsselmeer. *Journal of Environmental Planning and Management, 62*(2), 248-265.



附錄：專有名詞 / 詞彙表

附錄：專有名詞/詞彙表

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
Absolute Sea-level Trends	海平面變化趨勢	海平面相對於地球中心的變化趨勢，不考慮附近陸地的升降。 (2.5.1節)
Accumulated Cyclone Energy (ACE)	累積氣旋能量指數	在特定時空範圍內，所有熱帶風暴 (中心最大平均風速達63 km h^{-1}) 的累積動能，為綜合性評估指標，反映熱帶氣旋季節的活躍程度。該指數大小與熱帶氣旋的個數、強度及生命期長短有關。 (2.6.4節)
Air Quality Index (AQI)	空氣品質指標	依據監測資料將當日空氣中臭氧 (O_3)、細懸浮微粒 ($PM_{2.5}$)、懸浮微粒 (PM_{10})、一氧化碳 (CO)、二氧化硫 (SO_2) 及二氧化氮 (NO_2) 濃度等數值，以其對人體健康的影響程度，分別換算出不同污染物之副指標值，再以當日各副指標之最大值為該測站當日之空氣品質指標值。 (1.6.3節、2.7.1節、3.6.1節)
Allergic Conjunctivitis (AC)	過敏性結膜炎	眼球外側透明薄層 (結膜) 發炎。 (4.6.2.3節)
Allergic Rhinitis (AR)	過敏性鼻炎	鼻腔內黏膜因發炎反應形成的紅腫現象。(4.6.2.3節)
Apparent temperature (AT)	體感溫度	將人體所感受到的冷暖程度，轉換成同等之溫度。(4.6.5節)
Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency (CASBEE)	建築物綜合環境性能評價體系	日本可持續建築協會發展出的系統，可用以評估建築物、基地周遭及都市開發對整體環境品質及可能造成的負荷。(4.7.2.6節)
Consecutive Dry Day (CDD)	年最長連續不降雨日	一年之中，連續未達雨日門檻之持續日數，單位為天。 (1.4.3節、2.6.2節、3.5.3節)
Convergence	輻合	一般指近地面處空氣向低壓中心聚集。(1.4.4節、2.6.5節)
Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)	第五期耦合模式比對計畫	耦合模式比對計畫的目標為，在多模式的基礎上更好的瞭解過去、現在及未來的氣候變化，包括自然的氣候演變以及反應輻射強迫力變化的影響。第五期於2008年開始準備，由20個氣候模擬團隊，主要以四種溫室氣體濃度路徑 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0與RCP8.5) 進行實驗模擬。 (1.3.3節、1.4.2節、1.5.3節、1.5.4節、1.5.5節、3.3.2節、3.5.1節、3.5.2節、3.5.3節、4.1.1.2節、4.2.1節、4.2.2節、4.5.2.1節、4.7.2.5節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)	第六期耦合模式比對計畫	於2014年開始的第六期計畫除了第五期計畫中考慮的溫室氣體濃度路徑外，加入了社會經濟發展情境，稱為共享社會經濟路徑 (SSP)。SSP設定均隱含著減緩氣候變遷衝擊，與調適行動的社會經濟挑戰 (更多細節請參考本報告中第一章文字框的SSP排放情境)。(1.2.1節、1.3.1節、1.3.3節、1.4.1節、1.4.2節、1.4.3節、1.5.1節、1.5.2節、1.5.3節、第3章摘要、3.1節、3.2.1節、3.2.2節、3.3.2節、3.4節、3.5.1節、3.5.2節、3.5.3節、4.1.2節、4.3.2.1節、4.2.2節、4.5.2.1節)
Cardiologic and Metabolic Syndromes (CMS)	心血管疾病代謝症候群	心血管疾病危險因子總稱。(4.6.2.1節)
Chronic Obstructive Pulmonary Disease (COPD)	慢性肺阻塞性肺病	呼吸道長期發炎導致無法恢復之呼吸道阻塞，造成氣體無法通暢地進出呼吸道之疾病。(4.6.2.3節)
Cold Wave Duration Index (CWDI)	極端低溫持續指數	一年之中，連續3天以上日最低溫低於基期第5百分位數之事件總天數。(第三章摘要、3.5.1節)
Climate Smart Agriculture	氣候智慧型農業	氣候智慧型農業是一種因應氣候型態變化所構建之農業栽培制度。強調在永續地提高農業生產力與農民收入，建立適應氣候變遷的能力，盡可能減少或避免溫室氣體排放。(4.4.1節)
Catch per unit of effort	單位努力漁獲量	當某一漁業資源經長期利用後，漁業學家為瞭解系群資源狀態及其變動情形，以制訂相關漁業管理措施，期能達到資源合理的開發與永續利用，一般都先進行單位努力漁獲量研究。單位努力漁獲量為系群資源豐度與漁船漁獲能力的乘積；因此，單位努力漁獲量的年別變化係受到漁船漁獲能力及年別系群資源量變動所影響。若將影響漁船漁獲能力等因子經標準化後，單位努力漁獲量則可作為資源豐度指標。 (4.4.3節)
Decadal	年代	約以10年為週期的氣候變化現象。 (第一章摘要)
Debris flow	土石流	土石流為一種「自然現象」，但若因發生土石流時，導致人命傷亡，建築物、橋梁、公共建設毀損，造成生命或財產損失，才可稱為「土石流災害」。 (4.2.1節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
East Asian Winter Monsoon (EAWM)	東亞冬季季風	北半球亞洲地區擁有世界上最大的陸地與海洋 (太平洋)，由於太陽輻射比熱不均及海陸的比熱差異，使得亞洲季風區成為世上季風氣候最顯著的區域。根據其發生的時間地點可分為印度季風區、東亞季風區以及西北太平洋季風區，其中以東亞季風區冬季季風最為顯著，臺灣受東亞冬季季風影響，強烈的冷空氣及北風伴隨高壓南下，影響臺灣陸地與周邊海域。(3.5.1節、4.5.2.1節)
Ecosystem-based Adaptation (EbA)	基於生態系統的調適	是一種利用自然解方及生態系服務來調適氣候變遷的策略。例如：以紅樹林作為天然的防洪措施，保護沿海棲地。(4.2.3節)
EEWH	綠建築標章	我國以「生態 (Ecology)、節能 (Efficiency)、減廢 (Waste Reduction)、健康 (Health)」為主軸作為綠建築評估體系的建構項目與分類標準。(4.7.2.5節)
The joint CCI/ CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)	氣候變遷偵測與指標專家小組	世界氣象組織下的一個專家小組，主要任務為協助氣候變遷相關的偵測與指標方面的國際合作；開發及公布從海面下至大氣對流層間有關氣候變遷/變化的指數及指標。(1.4.1節)
Exclusive Economic Zone	專屬經濟區	一國的專屬經濟區是指其領海以外並毗鄰的區域，從海岸基線向海延伸至200海哩 (370公里) 的距離。當專屬經濟區重疊時，該規則會出現例外情況。也就是說，國家海岸基線之間的距離小於400海哩 (740公里)。如果發生重疊，每個國家都有責任劃定實際的海洋邊界。(4.4.3節)
Food security	糧食安全	任何人在任何時候均能實質且有效地獲得充分、安全且營養的糧食，以達符合其飲食及糧食偏好之活力健康生活。(4.4.1節)
Food self-sufficiency rate	糧食自給率	國內消費糧食由國內生產供應的比率。若按糧食提供熱量加以計算，呈現國人維生所需糧食之自給程度，稱之「以熱量計算之糧食自給率」。(4.4.1節)
Genesis Potential index (GPI)	熱帶氣旋生成潛勢指數	依據大尺度的環流特徵估算熱帶氣旋生成潛勢的空間分布。(3.5.4節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
Global Precipitation Climatology Project (GPCP)	全球降水氣候計畫	國際研究計畫結合雨量測站與衛星以及探空數據，估算出全球2.5度網格的降水量資料。(1.2.3節、1.5.1節)
Global Warming Level (GWL)	全球暖化程度	全球平均溫度上升的程度。科學家藉由此評估方法，了解並提醒全球溫度上升至不同程度，導致氣候環境改變所造成的影響，當作警鐘或提醒。(1.4.1節、1.4.2節、1.4.4節、1.4.1節、第3章摘要、3.1節、3.2.1節、3.3.1節、3.3.2節、3.5.1節、3.5.2節、3.5.3節、3.6.1節)
Habitat	棲地、棲息地	指一處包含多個「物種群 (包括動物、植物及其它生物)」共同生活與生長的自然環境。因此，棲地一詞不僅只於單一物種的棲息地點，而是指許多物種聚集、共同居住、共同使用的環境空間。棲地的種類與居住物種之組成，主要受到溫度、水分、光線及土壤等因素影響，因此環境因子的改變 (包含氣候變遷)被科學家認為是影響棲地及物種組成變化的重要原因。(4.5節)
Heat Wave Duration Index (HWDI)	極端高溫持續指數	一年之中，日最高溫高於第95百分位數氣候值且連續3天以上之事件的總天數，單位為天。(3.5.1節)
Heat Stress	熱緊迫	畜禽遭受某些因子之刺激而導致體內恆定狀態的改變即為緊迫，依其來源分為生理緊迫源 (如缺氧、疾病…等)、心理緊迫源 (緊張、焦慮、驚嚇…等) 及環境緊迫源 (冷、熱)；熱緊迫即屬於環境緊迫的一種，因為環境高溫導致動物體內恆定狀態的改變。(4.4.2節)
Hindcasting	追報	將過去事件的已知數據 (可能為觀測或監測資料) 輸入模式，檢測模式輸出與已知結果的相符程度，例如由過去風的紀錄推算過去發生的波浪特性，稱為波浪追報。(4.3.3節)
Humidex (HUM)	濕熱指數	加拿大氣象學家專門設計用於描述體感溫度的一個指數。(4.6.5節)
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	聯合國政府間氣候變遷專門委員會	聯合國下的一個跨政府組織，在1988年由世界氣象組織與聯合國環境署合作成立，專責研究由人類活動所造成的氣候變遷。每5年至6年發表針對全球氣候變遷的歷史回顧及未來推估的評估報告。

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)	IPCC「促進氣候變遷調適之風險管理—針對極端事件及災害」特別報告	本報告研究彙整針對極端氣候事件的風險管理與知識，作為後續氣候變遷調適的參考。(1.4.1節、1.4.2節、1.4.5節)
Joint Typhoon Warning Center (JTWC)	美國聯合颱風警報中心	美國國防部在夏威夷珍珠港設立的機構，負責協助太平洋和印度洋海域熱帶氣旋警報的發布。(2.6.4節)
Land surface temperature (LST)	地表溫度	透過衛星搭載熱紅外波段監測，經演算後得出都市中地表與覆蓋物表面的溫度，為分析都市熱島重要工具參數之一。(4.7.2.1節)
Land Use Land Cover (LULC)	土地利用與土地覆蓋	展示地表上不同地貌以及土地之上覆蓋地物的分布，如空地、植被、建築物、水體等。(4.7.2.1節)
Local Climate Zone (LCZ)	局部氣候分區	依照不同的地表結構特性，分類出17種土地利用模式與類型，作為都市地表分區定義參考。(4.7.2.1節、4.7.2.2節)
Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)	領先能源與環境設計	美國綠色建築委員設置「綠建築評分認證系統」，評估建築績效是否具備永續性質以及符合規範。(4.7.2.6節)
Low-frequency oscillation	低頻振盪	大氣中在兩個或多個狀態往復變化的氣候現象，週期較天氣現象的時間尺度長，通稱為大氣低頻振盪。例如：週期在20天左右的月內振盪、20天至90天左右的季內振盪、2年至7年左右的聖嬰現象、超過十年以上的太平洋年代際振盪等。(2.2.1節、2.2.4節、2.6.2節)
Low-likelihood, High-impact Events Associated With Climate Extremes (LLHI)	可能性低、影響程度高的極端事件	用於定義雖然發生機率不高，但是一旦發生會帶來極大衝擊的事件。(1.4.5節)
Landslide	崩塌	指邊坡土石之崩落或滑動現象。(4.2.1節、4.2.2節、4.2.3節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
Landslide Dam	堰塞湖	係熔岩流、火山泥流、冰河冰磧物或山崩土石等形成之天然壩阻塞溪流所形成。因為堰塞湖壩體材料疏鬆，膠結不良，極容易潰決，造成下游地區生命財產的重大損失。(4.2.1節)
Large-scale landslide	大規模崩塌	係指崩塌面積超過10公頃或土方量達10萬立方公尺或崩塌深度在10公尺以上的崩塌地。(4.2.1節、4.2.3節)
Madden-Julian Oscillation (MJO)	馬登-朱利安振盪	又稱熱帶季內振盪或30日至60日振盪。為北半球冬季大氣對流層上層與下層出現「反相、沿赤道向東移行的環流結構」，因此熱帶地區沿赤道東移之季內尺度的振盪現象，對熱帶與全球天氣影響程度僅次於聖嬰-反聖嬰事件。(1.4.4節)
Mediterranean Outflow Water (MOW)	地中海流出水	一股由直布羅陀海峽流出的高鹽度海水，為北大西洋東部中層海水的重要組成。(1.3.1節)
Meridional Overturning Circulation (MOC)	經向翻轉洋流	南北向翻轉的深層洋流系統，相對於較淺層洋流(如黑潮) 移動緩慢、循環週期長，在大西洋特別明顯，是全球溫鹽環流的一部分。(1.3.1節)
Micro-scale	微氣候尺度	進行都市分析的環境觀測尺度，以都市-街廓-行人活動的水平、垂直空間尺度為主。(4.7.2.1節)
(Model) Ensemble	(模式) 系集	使用氣候模式模擬時，常在初始條件中加入微小的差異，期望在經過長時間的模擬後，得到不同的結果。此類結果稱為系集，可用來分析模擬結果的不確定性。(1.3.1節、1.4.1、1.4.2節、1.5.2節、3.2節、3.3、3.5.2節)
Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	中級解析度成像光輻射度計	搭載於美國太空總署 Terra 和 Aqua 衛星上的一個重要感測器。提供 36 個頻道，波長從可見光、近紅外、中紅光及熱紅外範圍。這些資料有助於對全球的陸地、海洋和較低層大氣動力發展和過程的了解。例如其波段資料可用來分析大氣氣溶膠的含量、空氣品質的監測、海洋水色分析、潮流與漁汛調查等。(1.6.3節、4.5.2.1節)
National Center for Atmospheric Research (NCAR)	美國國家大氣研究中心	機構名稱。(3.6.1節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	美國國家海洋大氣總署	機構名稱。(1.4.1節、2.5.2節、4.6.5節)
Natural Season	自然季節	中央氣象署 (前中央氣象局) 依據臺灣雨量氣候特徵區分出五個自然季節：春季 (2、3、4月)、梅雨 (5、6月)、颱風季 (7至9月)、秋季 (10、11月) 以及冬季 (12、1月)。(2.3節前言)
Non-sea-salt Sulfate (nss-sulfate)	非海鹽硫酸鹽	指大氣中的硫酸鹽懸浮微粒扣除海鹽飛沫貢獻的硫酸鹽。(2.7.1節)
Nature-based Solutions (NbS)	以自然為本的解決方案	利用自然及健康生態系統的力量來保護人類、改善基礎設施，並確保一個穩定且生物多樣性豐富的未來。(4.2.3節)
Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST)	全球最佳網格化海表面溫度資料	由NOAA產製的長期網格化海表面溫度，整合了多種觀測資料，包含衛星觀測、船舶觀測、海洋浮球及Argo浮標資料。(2.5.2節)
Out-of Hospital Cardiac Arrest (OHCA)	院外心臟停止	患者到院前心肺功能停止。(4.6.2.1節)
Pacific Decadal Oscillation (PDO)	太平洋海表面溫度年代際振盪	一種大尺度海洋低頻振盪，發生於北緯20度以北的北太平洋的海表面溫度低頻振盪現象。正相位發生時，北美洲沿岸海域海表面溫度上升，中緯度的中與西太平洋則下降；負相位發生時，冷暖區顛倒。此振盪發生時，熱帶太平洋海溫與聖嬰/反聖嬰相似，兩者間關係密切；此振盪以年代尺度變化，相較於聖嬰/反聖嬰的年際尺度，變化較為緩慢。(1.4.4節、2.5.5節、2.6.2節)
Palmer Drought Severity Index (PDSI)	帕默爾乾旱嚴重指數	根據溫度與物理水平衡模式，使用溫度與降水估計地表的相對乾燥度，是常用的乾旱指標。此指數為標準化數值，通常範圍從-10到+10，代表由乾到濕。(1.4.3節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
Phenophase	物候相	生物的生活史各階段，是為物候相 (phenophase)，例如植物的葉芽及花芽發育及生長、葉片脫落、動物的繁殖行為及遷徙行為、昆蟲羽化及兩棲類的變態等等。生物的物候相會在一定時間內變換，觸發因子可能是內生性的，例如生物時鐘，但物候相的轉變亦常受環境因子誘發，例如光週、水分、溫度。氣候對花期的調節及種子生產則間接影響小苗庫的豐富度。(4.5.1節)
Physiological equivalent temperature (PET)	生理等效溫度	熱舒適指標之一，定義人體能量平衡的情形下受到周遭環境影響，換算為等同無風無日照下的室內溫度的空氣溫度。參考參數包括：需空氣溫度/相對濕度/平均輻射溫度/風速等數據，也可設定不同的衣著形式以及活動代謝量。(4.6.5節、5.2.1節)
Protected areas	保護區	依據國際自然保護聯盟 (IUCN) 對於保護區之定義以「特別劃設的陸域或海域地區，致力於生物多樣性、以及自然與相關的文化資源等的保護以及維持；並藉法律或其它有效方法管理的地區」。臺灣現行保護區種類可區分為「國家公園」、「國家自然公園」、「自然保留區」、「野生動物保護區」、「野生動物重要棲息環境」、「自然保護區」等6類型，針對重要物種及其棲地、特殊自然地景等以法令規範相關開發及使用行為，以保護標的物。(4.5節)
Red List	紅皮書名錄	紅皮書名錄指一處地區受威脅 (或瀕臨滅絕) 物種的清單，且其產生經由一定的科學評估程序，主要是依循IUCN發布的評估標準。紅皮書名錄或是報告通常被視作物種保育的重要依據，並且是用來進行保育資源分配的重要工具。臺灣目前共發布了6份紅皮書名錄，涵蓋鳥類、爬蟲類、兩生類、魚類、哺乳類及維管束植物等類群。(4.5.1節)
Potential debris flow torrent	土石流 潛勢溪流	係指依據現地土石流發生之自然條件，其影響範圍內具有保全住戶等因素，綜合評估後，判斷有可能發生土石流災害之溪流。(4.2.1節、4.2.2節、 4.2.5節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
Potencial Large-scale landslide area	大規模崩塌潛勢區	係指依據現地大規模崩塌發生之自然條件，且崩塌面積超過十公頃、土方量達十萬立方公尺或崩塌深度在十公尺以上者，其影響範圍內具有保全住戶等因素，綜合評估後，判斷有可能發生大規模崩塌災害之地區。(4.2.1節、4.2.3節、4.2.5節)
Representative Concentration Pathway (RCP)	代表濃度路徑	為IPCC於AR5中使用的溫室氣體濃度的推估路徑，應用於氣候模式中，以利我們瞭解不同推估路徑下的地球氣候狀態。(1.2.2節、1.3.2節、1.3.2節、3.1節、4.3.1節、5.2.1節、1.2.2節)
Reclaimed Water	再生水	指廢 (汙) 水或放流水，經處理後可再利用之水；依其處理水源不同，分為系統再生水及非系統再生水。系統再生水：指取自下水道系統之廢 (汙) 水或放流水，經處理後可再利用之水。非系統再生水：指取自未排入下水道系統之廢 (汙) 水或放流水，經處理後可再利用之水。(4.1.4.2節)
Recurrence Interval / Exceedence Probability	重現期距/超越機率	重現期距用來表示發生大於或等於該降雨量所需要的平均年數，亦稱作迴歸週期 (Return period)，常以大寫字母T表示，超越機率為重現期距之倒數 (1/T)，常以大寫字母P表示。例如T=50表示重現期距50年，超越機率為1/50。(第三章摘要、4.1.1.2節)
Resilient agriculture	韌性農業	針對氣候變遷衝擊，農業部門提升衝擊調適能力，強化韌性 (恢復力) 和降低脆弱度。可概分為短期以減少災害，長期以調整耕作制度建構更具永續性之農業生產模式。(4.4.1節)
Standardized Precipitation Index (SPI)	標準化降雨指數	由科羅拉多州氣候中心的 Tom Mckee、NolanDoesken 和 John Kleist 於 1993 年制定。是一個標準化指數，廣泛應用於呈現過去一段時間氣象乾旱程度的指數，常用在說明乾旱的嚴重程度。(1.4.3節、2.6.2節、第三章摘要、3.5.3節、4.1.2節)
Standard Deviation (SD)	標準差	表示一組數值資料中的各數值，相對於該組數值資料之平均數的分散程度，計算各數值與平均數的差，取其平方後加總，再除以數值個數，得變異數；變異數開根號後得「標準差」。(4.1.1.2節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
Signal-to-Noise Ratio (SNR)	信噪比	又稱訊號雜訊比，一種度量，用於比較所需訊號的強度與背景雜訊的強度。(4.1.1.2節)
Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA)	海表溫度距平	海洋表面溫度與歷史氣候平均值的差異。 (1.3.1節)
Shared Socioeconomic Pathway (SSP)	共享社會經濟路徑	新一代社會經濟情境與氣候情境共同交織成的新情境框架。以全球或區域性的社會與經濟發展程度作為區分，不同SSPs主要差異來自對全球人口增長、受教育機會、城市化、經濟增長、資源可用性、技術發展和需求驅動因素的不同假設，區分為SSP1至SSP5五種不同社經發展情境。
Significance Test (Test of Significance)	顯著性檢定	檢定一個觀測或實驗數值 (或其對應之 p值) 是否與某一統計量母體有顯著差異來判斷其獨特性的統計方法，比如觀測或模擬的某一溫度變化，是否已經超出已知的溫度變化範圍，足以判定其為異常現象。(第二章摘要、2.2.2節、2.2.3節、2.2.4節、2.2.5節、2.3.1節、2.3.2節、2.4.1節、2.4.2節、2.6.5節、2.6.6節)
Significant Wave Height	示性波高	長時間連續觀測之所有波浪高度中，最大的1/3組平均後所得到的數值稱為示性波高。(4.3.3節)
Simple Daily Intensity Index (SDII)	雨日降雨強度	一年之中，雨日的平均降雨量，即所有雨日的總降雨量除以雨日天數，單位為毫米／天。 (2.6.6節)
Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)	變遷氣候中的海洋與冰雪圈特別報告	IPCC於2019年發布的氣候變遷特別報告，彙整氣候變化對海洋與冰雪圈影響的最新研究結果，提出數據與建議供決策者參考。報告舉例說明結合科學知識與在地、原住民知識可建立更適合的風險管理及增強韌性的方法。(1.1 節)
Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	標準化降水蒸發散指數	修改自標準化降雨指數，加入以測站溫度推算的地表潛在蒸發散量來計算。(1.4.3節、2.6.2節)
Southern Oscillation Index (SOI)	南方振盪指數	南方振盪指南太平洋熱帶地區沃克環流的低頻變化，與聖嬰現象有密切關聯。以海面氣壓的變化設計的指數，計算方式是大溪地海面氣壓減澳洲達爾文海平面氣壓並做標準化。(2.5.5節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform (TCCIP)	「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」	配合國科會「建構面對氣候緊急狀態下之韌性臺灣」中程綱要計畫之分項計畫所建立的關鍵整合服務平台。提供學研單位科學研究、政府調適施政、一般民眾科普知識以及產業應用所需。(1.4.1節、2.1節、2.6節、2.6.2節、3.1節、3.2節、3.5節、第四章、5.1.2節、5.1.4節)
Thermal Comfort	熱舒適	人體對周遭環境溫度、濕度、風速的感受與受到影響的指標。(4.7.2.2節)
TN10p	冷夜天數	一年之中，日最低溫低於基期當天第10百分位數的總天數，單位為天。(1.4.1節、2.6.1節)
TN90p	暖夜天數	一年之中，日最低溫高於基期當天第90百分位數的總天數，單位為天。(1.4.1節、2.6.1節)
TX10p	冷晝天數	一年之中，日最高溫低於基期當天第10百分位數的總天數，單位為天。(1.4.1節、2.6.1節)
TX90p	暖晝天數	一年之中，日最高溫高於基期當天第90百分位數的總天數，單位為天。(1.4.1節、2.6.1節)
Universal Thermal Climate Index (UTCI)	通用熱氣候指數	熱舒適指標之一，評估周遭環境對身處其中的人體造成的熱壓力程度，能反映溫度、平均輻射溫度、濕度和風速等氣象因子的變化。(4.7.2.4節)
Urban Canopy Model, (UCM)	都市冠層模型	該模式尺度介於中尺度 (Meso-scale) 與都市街區尺度之間，該模式可應用於研究建築物與都市氣候、蓄熱以及熱交換相關研究。(4.7.2.2節)
Urban Climate Map (UCmap)	都市氣候圖	整合都市熱環境氣候資訊，呈現都市中熱壓力分布，整合氣候因素、土地使用、建築物、熱環境等重要資訊於圖資。(4.7.2.2節)
Urban Heat Island (UHI)	都市熱島	都市過度蓄熱的問題根源為人口過度集中、人為結構以及建築分布密集、降溫的植栽綠地缺乏、散熱以及空氣流通不足等，造成都市比鄰近郊區明顯高溫現象。(4.7.2節、4.7.2.7節)
Urban Heat Island Effects	都市熱島效應	透過熱島效應對都市氣候造成影響，除了造成高溫以外，亦可能改變降水型態與降雨區、影響日照時數等。(4.7.2節)
Warming Hiatus	暖化停滯	指全球平均地表溫度的變化維持一段沒有明顯增溫的時期，通常指1998年到2012年這段時期。(1.3.1節、2.5節)

英文全名 (縮寫)	中文全名	簡要說明 (章節)
Wave Setup	波揚	波浪傳至近岸淺灘產生碎波後，因波浪動量與質量輸送的向岸遞減情形，造成平均水位向岸方向抬升的狀況，稱為波揚。(4.3.3節)
Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)	綜合溫度熱指數	熱危害評估指標之一，綜合評價人體暴露在周遭環境中，承受熱負荷程度，參考參數包括氣溫、相對濕度、輻射熱以及風場 (氣流)。(4.6.5節、4.7.2.4節)

國家氣候變遷科學報告2024：現象、衝擊與調適

發 行 者：國家科學及技術委員會
106214 臺北市和平東路二段106號
02-2737-7992

環境部
100006臺北市中正區中華路一段83號
02-2311-7722

發 行 人：吳政忠、薛富盛
主　　編：許晃雄、李明旭
編輯委員：林李耀、王嘉琪、陳正達、詹士樑、陳永明、李欣輯、鄭兆尊
編輯小組：童裕翔、周至中、陳昭安、紀佳法、蕭逸華、劉子明
視覺設計：商訊文化事業股份有限公司



發行年月：民國113 年 4 月
ISBN 978-986-5436-51-3(平裝)

封面圖片：齊柏林 空中攝影
財團法人看見・齊柏林基金會 提供
©台灣阿布電影股份有限公司 版權所有



《國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適》

分析全球、東亞與臺灣氣候變遷趨勢

推估臺灣未來可能氣候變遷衝擊

提供各界氣候變遷調適規劃參考

