

# 水源區土地開發及利用對水資源之衝擊

報告人：溫清光

- 民國三十三年生
- 國立成功大學土木工程學系博士
- 現任國立成功大學環境工程系教授

評論人：張石角

- 民國二十四年生
- 倫敦大學帝國理工學院哲學碩士
- 現任台灣大學理學院地理學系教授

評論人：黃書禮

- 民國四十四年生
- 美國賓夕法尼亞大學博士
- 現任中興大學都市計劃研究所教授兼所長

# 水源區土地開發及利用對水資源之衝擊

溫清光

## 一、前言

土地之開發與利用對水資源之利用，有很密切之關聯性。土地的開發常造成地表植被破壞與沖刷，地表逕流的改變，而使水土流失，影響水源之濁度和水庫的淤積。開發後的使用，人類的生產與消耗行為一方面產生廢水污水，直接影響到水源的水質，另一方面產生廢污、廢埃蓄積於地表面，一遇下雨沖洗進入水體，造成非點源之污染，所以土地的開發與利用，對水源會造成三種主要的影響：第一是增加集水區之逕流係數使水易流失且增加洪峯流量；第二是造成土壤之沖刷和水庫淤積；第三是造成點源與非點源之污染，使水質惡化，失去利用之價值。

本報告的主要目的是探討土地開發利用，對水源集水區逕流係數及洪峯的影響；土壤流失對水庫淤積的影響；及土地利用所引起之點源及非點源污染，對水質之影響。

## 二、土地開發及利用之形態

土地使用分類方法很多，本文採用內政部所公告之「區域計畫法施行細則」(1)第十三條及第十四條之畫分法為依據：區域土地之使用可分為都市土地和非都市土地兩大類。都市計畫包括已公布之都市計畫區，新訂或擴大都市計畫區，非都市土地使用又可分為下列七種：

1. 農業區：又分為特定農業區和一般農業區，優良農田或曾經投資建設重大農業改良設施必須特別保護之農田屬於特定農業區。特定農業區以外供農業使用之土地稱為一般農業區。

2. 鄉村區：供農村人口集居之地區。

3. 山坡地保育區：為保護水土及自然資源所劃定之地區。

4. 工業區。

5. 森林區。

6. 風景區。

7. 其他使用區域用區。

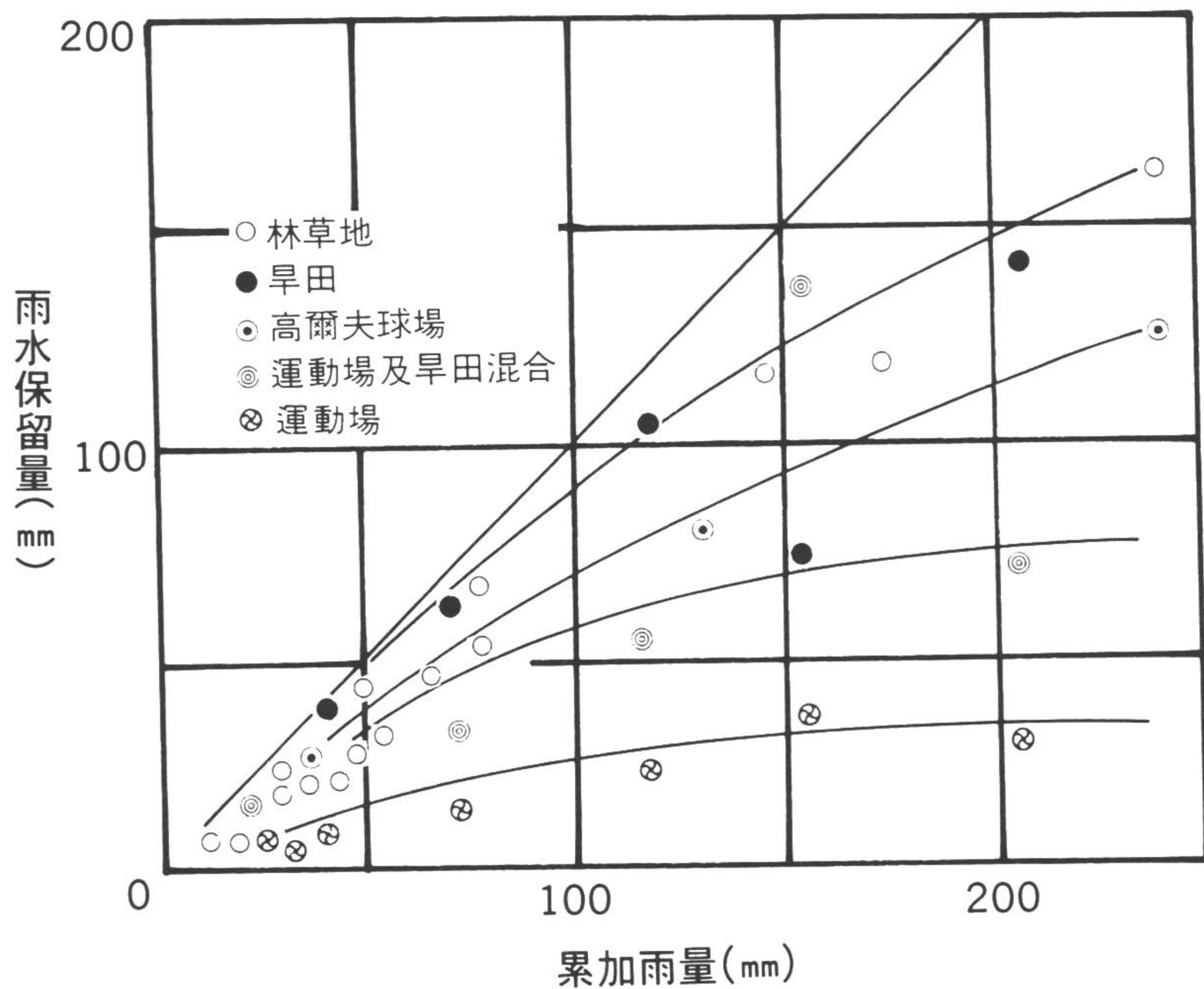
本省水源保護區大部分坐落在河川上游集水區。其土地利用除少部分是都市土地外，大部分屬於非都市土地。尤以森林區、山坡地保育區占主要部分，農業區、牧業區及風景區占的面積雖不多，但對水源之水質影響不小。

### 三、土地利用對水量之影響

土地的開發利用，常改變地表的裸露或植被，因而影響逕流係數，地表逕流量和洪峯流量，Bosch和Hewlett(2)(一九八二)歸納近百個實驗林區，認為砍伐森林會增加河川流量，而造林則導致溪流量之減少，夏禹九(3)(一九九〇)統計，Bruijnzeel蒐集的資料，也得到相似的結論，雖然砍伐森林會增加河川之流量，但相對的雨水儲存在地表或土壤的保留量減少，日本小林及丸山(4)(一九八九)在五條吉野地區，測定山林改造成農地後五年，雨水保留能力的大小，發現改造後的保留能力降低。降低之百分率與累積降雨量有關，當累積降雨量為一百公厘時，保留能力減少約二六%，但研究土地利用對雨水保留能力時應考慮開發前後表層土質及形態，如果表層土壤為粘土時，開發前常經年壓實，透水性低，故逕流量大，但開發後表層受撓動，逕流量反而變小。因此開發後之雨水保留能力反而增加。

土地使用的形態對雨水保留能力有很大之影響。日本杉山(4)(一九八九)在中之條試驗場觀測林草地、旱田、高爾夫球場及運動場等之雨水保留量，結果如圖一所示。林草地與旱田之雨水保留量最大，高爾夫球場次之，而運動場最小。

土地使用方式對洪峯流量及洪峯到達時間有極明顯的影響。陳信雄(4)(一九九〇)在南投縣魚池鄉日月潭北部蓮華池試驗集水區(屬於小區域集水，集水面積三至九公頃)進行森林砍伐比例對洪峯流量及到達時間之模擬、模擬結果，林木砍伐比例為二〇%時，洪峯流量增加二倍，洪峯



圖一 林草地、高爾夫球場、運動場之雨水保留量(4)

到達時間提早一·四倍；砍伐比例三〇%時，洪峯流量增加三·三倍，到達時間提早一·五倍。

估計小集水區土地使用對洪峯流量的影響，可以採用周氏法(5) (Chow's method) 估計，若再配合美國土壤保持局制定之逕流數CN，更可估計土地開發前後，洪峯流量變化的比例。周氏法為一九六二年水文專家周文德博士所創，其推估小面積之尖峯逕流量為：

$$Q_p = 2.78AXYZ \quad (1)$$

式中  $Q_p$  = 尖峯流量，cms；

$A$  = 集水面積， $\text{km}^2$ ；

$X$  = 逕流因子 =  $P_e / T_e$ ， $\text{cm} / \text{hr}$

$Y$  = 氣象因子 (Climate factor)；

$Z$  = 洪峯消滅因子

$$P_e = \text{超滲降雨量} = \frac{(P - \frac{508}{CN} + 5.08)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (2)$$

$T_e$  = 有效降雨延時，假設等於總降雨延時，hr

$P$  = 規劃區之設計降雨量，cm

$CN$  = 逕流數

土地開發使用將會直接影響地表逕流數，進而影響 $X$ 值。美國土壤保持局建議農業、郊區及都市土地使用之逕流數 $CN$ 值如表一。由公式(1)及表一可計算出土地開發前後，洪峯逕流量

之比值。今舉一例說明之。

土地開發前為覆蓋良好之林地，其土質為C型土壤，今開發高爾夫球場，草地覆蓋面積為八五%，開發前後土質、坡度及其他所有氣象及洪峯消滅因子均保持不變，求在一次降雨量為一百公厘（ $P = 10\text{cm}$ ）開發前和開發後最大逕流量之比值。

解：

由於開發只改變地表覆蓋，其他因子不變，所以只有CN值改變。由表一由原來林地C土壤類群覆蓋良好之 $CN = 70$ ，增加到高爾夫球場覆蓋良好之 $CN = 74$ 。由(1)式設開發前後之洪峯流量分別為 $Q_p$ 、 $Q_p'$ ，超滲降雨量為 $Pe$ 、 $Pe'$ ，則

$$\frac{Q_p}{Q_p'} = \frac{Pe}{Pe'} = \frac{(P - \frac{508}{70} + 5.08)^2}{P + \frac{2032}{74} - 20.32} \times \frac{P + \frac{2032}{74} - 20.32}{(P - \frac{508}{74} + 5.08)^2}$$

$P = 10\text{cm}$  代入上式得

$$\frac{Q_p}{Q_p'} = 0.83 \quad \frac{Q_p'}{Q_p} = 1.20$$

即開發後變成高爾夫球場使用時，洪峯約增加二〇%，其餘不同土地使用，亦可參考表一估計之，並不是所有的土地開發使用都會增加洪峯，凡是開發時使CN值變大者，洪峯會增加，反之會變小。一般而言，大部分土地開發利用，均使地表不透水比例增加，而加大了逕流量。

小面積的土地開發利用，雖會增加地表逕流量，但對河水的總流量影響不大，不過同一流域

〈表一〉美國土壤保持局建議之農業、郊區及都市土地使用之逕流曲線數(6)  
(先期潮濕程度為II，且 $I_a=0.25$ )

土地	使用	狀況	水文土壤類群			
			A	B	C	D
已開墾之土地(1)	：沒有水土保持處理 ：有水土保持處理		62	72		
草原或牧場 (Pasture or range land)	：情況惡劣 ：情況良好		39	68		
天然牧場(Meadow)	：情況良好		30			
林地 (Wood or Forest land)	：稀疏的森林、覆蓋不良、沒有覆蓋物 ：覆蓋良好(2)		25	45		
開放之空間、草地、公園、高爾夫球場、墓地等	情況良好：有75%或更多的草覆蓋 情況尚可：有50%到75%之草覆蓋		49	39		
商業區(85%之不透水率)			88	92		
工業區(72%之不透水率)			81	89		
住宅區：(3) 土地之平均尺寸 等於或少於1/8英畝	平均之不透水率(%) (4)					
1/4英畝	65					
1/3英畝	38					
1/2英畝	30					
1英畝	25					
有鋪面之停車場、屋頂、汽車道等						
街道與道路： 有緣石及排水管且有鋪面 礫石 鬆土						
			72	76	98	
			82	85	98	
			87	89	98	
			89	91	98	



註：(1)對於農業土地使用曲線數之更詳細介紹，請參考美國國家工程手冊第四部NEH-4，第九章。

(2)覆蓋良好是指土地之覆蓋沒有牧草、雜草或矮林等。

(3)曲線數的計算是假設房屋與道路的逕流是直接流向街道，且僅有極少數屋燈頂之水流向有可能產生滲透的草地。

(4)對於這些曲線數，剩餘的透水面積(草地)，可視為良好情況的牧草地。

(5)在一些溫暖氣候的地方，曲線數可使用95。

內，陸續有很多小面積之土地開發利用，經年累積，將會對下游造成影響，Bownder (3) (一九八二)，Bruijnzeel (3) (一九八六)認為大面積之森林砍伐，並變成農地和牧地是造成北印度與中國洪災的主要因素。

#### 四、土地利用對土壤沖蝕之影響

土地的開發利用會影響土壤結構及地表植被，而影響土壤的沖蝕大小。表二是Wiersum (3) (一九八四) 所列出林地及耕地土壤沖蝕量的大小，由表二可明顯看出天然林的沖蝕性很低。人工林的覆蓋良好，土壤沖蝕量很低，但若被撓動或焚燒，沖蝕性增加數十倍，一般農樹作物若有良好的覆蓋，沖蝕性雖較大但與人工林相近。但如果覆蓋不良或除草，則沖蝕量大增。

〈表二〉各種熱帶林和農樹作物的表面沖蝕量

(單位：噸/公頃/年)

地 表 狀 況	最 小	中 位 數	最 大
1. 天然林 (18/27) *	0.03	0.3	6.2
2. 移植、休耕期 (6/14)	0.05	0.15	7.4
3. 人工林，未撈動 (14/20)	0.02	0.6	6.2
4. 人工林，輕微移動或燃燒	5.9	53.4	104.8
5. 多層樹園 (4/4)	0.01	0.06	0.14
6. 移植，收穫期 (7/22)	0.4	2.8	70.0
7. 農樹覆有作物或稻草等 (9/17)	0.10	0.75	5.6
8. 農樹作物，除草 (10/17)	1.2	47.6	182.9
9. 作物與作物收成期間之青年樹林 (2/6)	0.6	5.2	17.4

\* (a/b) : a : 位置數 / b : 觀測數

一般土壤之沖蝕量大部分採用 Wis chemior 一九五八年所發展出來之萬用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE)。

$$A = RKSLCP \quad (3)$$

式中 A = 土壤年流失量，噸/公頃/年

R = 降雨沖蝕指數

K = 土壤沖蝕因子

SL = 地形因子，無單位

C = 作物密植因子，無單位

P = 土地管理因子，無單位

在第(3)式中土壤的年沖蝕量除了降雨沖蝕指數R以外，其餘各因子都與土地的開發與利用有關。土壤沖蝕因子，K與土壤粗砂（0.1~0.2mm）場粒細砂（0.002~0.10mm）和有機質含量、土壤構造和透水性有關。土地開發利用會改變土壤的構造和透水性，甚至組成，故會影響K值和年沖蝕量。

坡度因子S與地表之坡度S有關：

$$S = 10.0_s + 0.03 \quad \text{畝 } S < 8\%$$

$$S = 17.2_s - 0.55 \quad \text{畝 } S \geq 8\%$$

坡長因子L與坡長 $\lambda$ 有關，台灣陡坡地可用下列表示

$$L = (\lambda / 22.1)^{0.334}$$

式中 $\lambda$ 為坡長，單位為公尺。土地的開發與利用，有時會改變坡度因子S和坡長因子L，例如坡地開發成高爾夫球場，常會改變地表坡度和長度。

作物管理因子C的意義是代表在相同的土壤、坡度和降雨量下，特定之作物系統或覆蓋情況下，與耕犁後休閒情況下土壤流失量之比。作物管理因子相當複雜，與地表覆蓋、作物系統、肥力高低、栽培方法、生長季節、殘株處理和降雨分布有關。C值大小，美國已有詳細研究，台灣較缺乏，在自然田間狀態下，一些代表性之C值如表三。

土地管理因子P的意義是代表在某特殊控制措施下之土壤流失量與上下行耕犁下土壤流失量

之比。沖蝕控制措施包括等高栽植、等高條帶栽植、等高耕犁和階段等。台灣山坡地的水土保持措施（管理）因子，列於表四。土壤表面處理很難推估P值，因為表面耕犁後處理狀況對P值的影響很大。例如耕犁後保持粗糙狀況或推平或築壟等，P值均不同。

〈表三〉台灣之作物管理因子(7)

作物	C 值
百喜草 (密植)	0.01
玉米	0.30
水稻	0.10
花生	0.30
柑橘 (覆蓋作物)	0.20
馬鈴薯	0.25

〈表四〉台灣之水土保持措施因子(7)

處理	P 值
平台階段	0.14
內斜式平台階段	0.05
外斜式平台階段	0.35
水平蓄水式平台階段	0.01
水平排水式平台階段	0.03
草帶法	0.20
山邊溝 (百喜草覆蓋)	0.02

土壤沖蝕流失，將在河川流速低的地方淤積，造成河床堆高和水庫容積減少，尤以水庫之淤積對水資源利用之影響最大，本省因雨量集中，尤其是中南部，有百分之八十左右之雨量集中在每年的五月到十一月，爲了有效利用雨水，必須設置許多水庫儲存，土壤的沖蝕，將威脅到水庫的壽命和減少水資源之利用。

## 五、土地開發利用對水質之衝擊

土地開發利用會影響土壤之沖蝕，而土壤養分（氮磷）之輸出與土壤之流失量有關。因土壤沖蝕而產生水體或水庫氮和磷的負荷，一般以下面二式表示：

$$\text{氮： } Y_n = 10 \cdot Y_s \cdot C_n \cdot R_n \quad (4)$$

$$\text{磷： } Y_p = 10 \cdot Y_s \cdot C_p \cdot R_p \quad (5)$$

式中  $Y_n$ 、 $Y_p$  = 因沖蝕而產生之總氮、總磷年負荷量公斤/年。

$Y_s$  = 土壤流失量，公噸/年

$C_n$ 、 $C_p$  = 土壤中總氮、總磷之含量，克/100克。

$R_n$ 、 $R_p$  = 氮磷之滋養係數（1到5）。

由(4)、(5)二式可知水體之氮磷負荷與土壤流失量成正比。

土地的使用將產生點源和非點源的污染。例如土地都市化後變成住宅或商業區所產生之生活污水，每人每日約有200公升，內含約40克之 $BOD_5$ ，12克之總氮和2克之總磷之點源污染量。此

外人類的活動也會產生污染物累積在地表面，當暴雨後沖洗至水體造成非點源污染。又如土地開墾成綜合性工業區。平均每日約產生60立方公尺／公頃之廢水，其中含25公斤BOD<sub>5</sub>／公頃和30公斤SS／公頃，而當暴雨時也會沖洗地面造成工業區的非點源污染。表五是歐美日各種土地使用所產生之單位面積非點源之污染量。表六是翡翠水庫點源及非點源之單位污染量。表七是美國城市各種土地利用所產生之非點源污染量。由這些表可看出，林地幾乎沒什麼點源污染的產生，非點源之污染量也最小。農地非點源之污染較林地多。若土地開發成社區或都市，不但會產生極為可觀之點源污染物，而非點源之污染也最大。至於林地開發成遊樂設施，所產生之污染性質與社區類似；例如飯店、遊憩中心等。與水直接接觸之活動，也會產生極大之污染。表八是泛舟所產生之污染物及污染量。由該表可知大腸菌之污染不可忽視。

山坡地開發成果園對水質也會產生影響，詹連昌氏等（一九八五）在苗栗卓蘭偵測山坡地果園經營對水源水質的影響。經過三年取樣分析，所得結果，發現降雨量大小為影響其水質的主要因素。但山坡地各種作物及耕作經營方式、土壤性質均可影響農耕地逕流水的水質。

## 六、結論與建議

### (一) 結論：

1. 水源區土地開發利用，將會減低土壤對雨水保留能力，增加河川逕流量和洪峯，並縮短洪

峯到達時間。

2. 土地的開發利用，將使土壤沖蝕量增加，造成河道和水庫的淤積，降低水資源利用容量。
3. 土地的開發利用，將造成土壤養分之流失，尤其土地都市化後將產生大量之生活污水、工業廢水等點源污染，並增加非點源的污染量，使水體水質變壞減少利用之價值。

## (二) 建議：

1. 國內有關各種土地使用類別，所產生之非點源污染量的研究非常少，建議增加。
2. 林地相對水質之影響或果園農作物對水源水質之影響研究很少，建議林業界、水土保持界及環境科學工程界合作研究。
3. 國內正大力推展休閒活動，但有關遊憩活動場所及對水源水質影響的調查與研究很少，建議應及早從事研究。

〈表五〉 歐美日非點源污染各區產生的污染負荷

單位：公斤／公頃／年

發生源	TN	TP	依據
農地	一·四六～三·三六 二·五 六～九 四	〇·三六～〇·九 〇·二 〇·一八 〇·一	TWPC Utformark等 日本琵琶湖區 美國EPA
山林	二·二五 五 五 二·二五～四·五	〇·七 〇·三 〇·三 〇·六	TWPC Sonzogni & Lee Utformark等 日本琵琶湖區 美國EPA
農地	二六·五 一〇 二七·八 四	〇·二七 〇·三 〇·三 〇·三	OECD 美國EPA 日本琵琶湖區 Utformark等

都市區	一五五 〇	一 〇·五 三	Sonzogni & Lee Utformark等 美國EPA
-----	----------	---------------	---------------------------------------

〈表六〉翡翠水庫區單位面積產生之污染量

發生源	TN	TP	流達率
山林，公斤／公頃／年	三·三	〇·六	一·〇
農地，公斤／公頃／年	二·五	〇·三	一·〇
社區，公斤／公頃／年	一·〇	一·〇	一·〇
其他，公斤／公頃／年	一·〇	一·〇	一·〇
家庭污水，克／人／日	一·〇	一·〇	一·〇
觀光客，克／人／日	二	一	〇·三
豬，克／隻／日	四·八	〇·五	〇·八

〈表七〉美國合流式下水道城市產生非點源單位面積污染量

單位：公斤／公頃／年

發生源	BOD <sub>5</sub>	SS	VS	PO <sub>4</sub>	N
住宅區	三·七	七五·五	四三·七	〇·一五	〇·六一
商業區	一四·八	一〇三·一	六五·〇	〇·三五	一·三七
工業區	五·六	一三四·八	六六·五	〇·三七	一·二八
其他	〇·五	一二·五	二·一	〇·四六	〇·二七

〈表八〉泛舟產生之單位污染量

人，每人	大腸菌 隻	總氮 毫克	總磷 毫克
2 × 10 <sup>6</sup>	761	11.3	2.3
舟，每平方公尺表面	73 × 10 <sup>4</sup>	42	2.3



## 參考資料

1. 區域計畫法，內政部，民國六十三年一月三十一日總統令公布。
2. Bosch, J.M. and Hewlett, J.D. (1982), "A Review of Catchment Experiments to Determine the Effect of Vegetation Changes on Water Yield and Evapotranspiration." *J. of Hydrology*, vol155 P.3。
3. 夏禹九（一九九〇），「台灣水土保持及集水區經營研究——肆、土地利用影響部分」，行政院農委會及台灣大學地理研究所，六九頁。
4. 陳信雄，（一九九〇），「上游集水區土地利用對流量歷線影響之研究（四）」，農委會七十八年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，二一一頁。
5. 王如意、易任，「應用水文學」，國立編譯館，茂昌圖書公司。
6. 王如意、楊德良、房文傑（一九九〇），「小集水區設計逕流量推估方法之研究（一）」，農委會七十八年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，一七三頁。
7. 吳久雄、林俐玲、盧光輝（一九九〇），「台灣山坡地土壤流失量之推估」，農委會七十八年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，四一頁。
8. 溫清光等（一九八九），「高屏溪流域河川水質規劃」，國立成功大學環境工程系暨研究所，研究報告第七十九號。
9. 小島貞男著，張清源譯，「翡翠水庫之水質預測與污染防治對策」，台北翡翠水庫管理局。

10. Mills W.B. et al, "Water Quality Assessment, Part I" EPA-600/6-82-004a, 1982。
11. 溫清光（一九九一），「曾文水庫風景特定區觀光開發通盤檢討：附冊水質環境預測與評估」，國立成功大學環工系研究報告。