

污泥利用面面觀

西元一九七〇年晚春的一個早晨，我們一行人坐著林肯轎車，從美國新英格蘭麻州古城波士頓出發，沿著高速公路向西疾馳。到過新英格蘭的人，無疑都會認為秋天是那邊最好的季節。滿山遍野的紅葉，宛如一片火海，扣人心弦。不過新英格蘭的春天，雖然短得不能再短，仍然扮演了從肅殺嚴冬過渡到林木蔥鬱盛夏的角色。原野上綠草如茵，襯托出枝頭嫩黃新葉，像一幅圖畫，真是美得不能再美。

我們的地是約有二十萬居民的春田市。麻州是美國南北戰爭時期北軍的大後方，春田市正是軍火製造中心，對北軍勝利有很大貢獻。春田市位在康乃狄格河上，國人耳熟能詳的耶魯大學就在這條河邊。那時候春田市在康河龐大島上有一座污水處理廠，但是只有初級處理，而且容量不足，被麻州議員指責為最大的污染源，因為有時候應付不了超量進流生污水，只好偷偷向康河排放。同時美國聯邦政府也已經硬性規定，都市污水處理廠至少要有二級處理。而且為了維護康河的水體水質標準，經過數學模式電腦計算，龐大島的污水處理廠也必須設置二級處理設施。在這種多重壓力之下，筆者服務的公司匆匆忙忙受邀，負責提升處理廠處理能力和容量的規劃設計工作。在美國，至少是那時候，顧問工程公司並不作興投標比價或者拉生意這一套，而是由業主主動邀請。不過由於我們公司的合夥人，不時在週末和春田市政府的工務局長打打高爾夫球，和這次受邀多少有些關係。

到達龐大島污水處理廠，和工作人員寒暄一番後，立刻展開實地查勘和訪談，使得筆者原先從報章電視報導中得到，對這個污水處理廠惡劣印象，完全改觀。原來這個廠是在西元一九三七年建造完成，當時號稱美國數一數二最新穎尖端污水處理廠，來取經的人士絡繹不絕，有的還是老遠從國外來的。從開廠起就一直在廠裡工作的一些老職員，談到那時候的風光，真是眉飛色舞，使人想到國人「白頭宮女話玄宗」這句話。

那時候我們看到的處理廠設施，包括粗篩、沉砂池、固體破碎機、初級沉澱池，以及污泥處理系統等。後者有加熱嫌氧消化槽、污泥淘洗槽、真空脫水機和污泥焚化爐等¹。這污泥淘洗槽對今日環工同仁來說，恐怕難免有些陌生。原來污泥經過嫌氧消化後，鹼性（Alkalinity）大增。同時為了改善消化污泥脫水效率，通常要添加氯化鐵。不幸這氯化鐵必須先中和掉鹼性，剩下來的才能改善消化污泥過濾性質。因此鹼性愈高，消耗氯化鐵量愈多，不僅費用可觀，又會增加污泥量，非常不合算。於是有人出了點子，認為鹼性其實絕大部份是碳酸和碳酸根，水溶性很大，何不利用清水先把消化污泥淘洗一番，去掉鹼性，節省氯化鐵用量。在龐大島污水處理廠，這清水就是就近從康河抽取，淘洗後讓污泥沉出，澄清水仍然回到康河裡。這種做法，現在看起來可以說是有些不可思議，不過在那時候，有很多地方採用。據筆者記憶所及，美國大都市中，至少巴的摩爾市也一度有過這種設備。

我們公司的規劃，是擴建該廠為活性污泥二級處理廠。其中污泥處理系統包括，初級沉澱池、污泥先經過重力縮濃池，活性污泥先經過浮除處理，然後把兩股污泥合起來，利用溼式氧化槽、沉澱池、真空脫水機等，製成污泥餅，再運到垃圾掩埋場掩埋處置。這溼式氧化槽是污泥在高壓高溫下注入氧氣，把有機物強力氧化，也叫做靜波法（Zimpro Process），需要時間短，又可以有效減少污泥量，而且比較容易脫水，只是能量消耗很大。早期國內推動水肥處理時，也考慮到引進靜波法，後來沒有實現。

龐大島污水處理廠污泥處理系統的改變，也反映了當時環工界的主流構想。加熱嫌氧消化槽需要容量較大，設備複雜，管理困難。最大好處是產生沼氣，可以回收能源。由於那時候能源價格便宜得不得了，所以有逐漸被高能量消耗，但是迅速有效方法替代的趨勢。筆者服務的公司甚至考慮過引進當時英國已經在使用的高壓高溫蒸煮污泥方法，據說對破壞有機物組織更為有效，特別囑咐筆者到土耳其參與伊斯米市上下水道工程規劃工作時，中途在倫敦稍作停留，去考察一個有上述設備的污水處理廠。結果發現成效不錯，但是熱交換器故障率高，因此當時沒有採用。

這種由於能源價格低廉而採用高能量消耗但有效的污泥處理方法趨勢，維持了相當長一段時期。後來有的地方乾脆採用好氧污泥消化，設備簡單到不能再簡單，也比較沒有臭氣問題。國內好些水肥處理廠用的是好氧消化。西元一九七〇年代的能源危機，徹底改變了這種趨勢，加熱嫌氧

消化槽又成為污泥處理主流，主要原因是嫌氧槽不但耗能低，而且還產生沼氣，本身就是能源。如近年美國加州缺電嚴重，好些境內大型污水處理廠，正在努力打破不合時宜法規限制，用沼氣來發展多餘電量賣給公眾使用。

由於環保觀念的興起，資源回收成為永續發展的一環，逐漸受到重視，污泥的利用，也成為熱門話題。其實早在西元十八世紀，以提出進化論聞名全球的達爾文先生的父親，在他所著植物學中就提到利用污水灌溉²，理由之一想必是污水中含有植物營養成分。污泥來自污水，難免使人動起用作肥料的念頭。有些污水處理廠很久以前就在做污泥堆肥，或乾燥污泥餅，來用作肥料或土壤改良劑。美國環工界人士，鑒於一般民眾對污泥這個名稱，多少有些抗拒心理，因此特別推出生物固體（Biosolids）這名稱來替代，希望能提昇社會大眾對污泥利用的接受度。

污泥利用除了作為肥料或者土壤改良劑外，另外一條途徑是把脫水污泥或焚化後污泥渣，經過高溫（1500~1600°C）熔融處理，全盤分解有機成分，徹底消滅致病微生物，即使重金屬這類毒性物質，也被充分固定，無法溶出，達到無害化目的。這種玻璃化產物，通常可以用來做建築中的角材和磁磚等³。上述兩大類污泥利用方法，比較起來，性質上頗有差異。把污泥作為肥料或者土壤改良劑，不僅費用上較為便宜，而且更接近自然界物質循環系統的運作，可以生生不息。國際間如美國就偏向用於土壤。不過為了保障國民及使用人員健康安全，避免環境遭受二次污染，美

國已在立法上和技術發展上著實下了不少功夫。其他污泥利用方法包括把污泥製成燃料，或是填地等，為數尚屬有限。

對污泥土壤利用有重大影響的，無疑是其中可能含有毒性物質和感染性物質。都市污水處理廠毒性物質主要來源是工業廢水。因此美國聯邦環保署特別推動了一項工業廢水預處理計算，規定服務區內有工業存在的都市污水處理廠，必須釐訂工業廢水預處理要求，並且嚴格執行。如果都市污水處理廠不願意釐訂和執行工業廢水預處理要求，這個污水處理廠產生的污泥，即被當作有害廢棄物。這方法相當有效，因為要把污泥當作有害廢棄物來處置所增加的費用，大概沒有一個都市污水處理廠承受得了。事實上都市污水處理廠為了有效操作生物處理單元，包括活性污泥、嫌氣消化槽等，本來已經有一套預處理要求，只要稍加修訂，便可以符合聯邦環保署規定，又可以省卻不少麻煩，因此大多抱著何樂而不為的心態。這裡值得一提的是工業廢水也包括照相館、牙醫診所、學校化驗室等排出的廢水，因此相當於台灣地區所稱的事業廢水。

工業廢水預處理計畫雖然控制了主要毒性物質來源，但是由生活污水帶來的無窮數致病細菌、病毒和寄生蟲卵等，對污泥土壤利用的影響，更屬不容忽視，必須有進一步的規範，以確保相關工作人員和生產農產品的安全，不致引起對健康的威脅。

在開始探討對感染性物質立法規範以前，似乎有必要介紹美國的放流水許可制度。西元一九

四八年實施的聯邦水污染防治法，是美國第一次為水污染防治立法。以後已經經過多次修訂。其中最重要的是西元一九七二年修訂版，由於引進生態觀念，並且開創一系列重大改革，因此通稱為清潔水法。據說在修訂過程中，尼克遜總統正在為競選連任傷腦筋，極其希望能夠實施一項叫得響的環保行政的措施，來對應民眾要求政府對環境污染實實在在在做點事的心態。結果幕僚人員找到塵封已久的西元一八九九年垃圾法，其中規定聯邦政府得經由陸軍工兵團核發排放許可。雖然當時並沒有像完整的放流水標準這類配套措施，來作為排放許可的條件，不過幕僚人員覺得排放許可這個名稱，的確可以給人以對污染者正面、積極、有效管制的印象。因此清潔水法第四章規定，聯邦環保署應建立全國污染物排放消除系統（The National Pollutant Discharge Elimination System，簡稱為NPDES）許可計畫，成為清潔水法的核心。所有廢污水排放者，都要先取得許可，才能排放。如果違背許可所規定的條件，立刻會受到處分，嚴重的甚至要停工。而且在換發新許可時，還可以加嚴排放標準，逐漸走向零污染排放⁴。許可制度很像我國過去的「尚方寶劍」，直截了當，無往不利，無怪很多其他國家，都要仿效。

針對污泥土壤利用，可能對國民健康和生活環境的影響，美國國會在西元一九八七年修訂清潔水法時，新增規定要求聯邦環保署，就都市污水處理廠污泥，可能含有的感染性物質，釐訂標準限值。為便利都市污水處理廠達成這項限值，聯邦環保署應該發展出污水處理實務規範，供都市污

水處理廠選擇應用。同時如果對某些物質，用標準限值來管制，確有實際上困難時，也可以用指定處理方法或器材代替。為求落實上面所提污泥管制，新修訂清潔水法中也規定，都市污水處理廠原有排放許可，必須加以修正，納入污泥管制要求。這樣「輕描淡寫」一提，實質上已使污泥管制成為水污染防治核心的一部份。

美國聯邦環保署依法在西元一九九三年公佈了洋洋大觀的污泥管制規則，主要目的之一是控制污泥所含感染性物質。原則上將可以土壤利用的污泥分為A及B等兩級。A級污泥是經過妥善處理後，使感染性物質減少到可檢出濃度以下。B級污泥也要經過大幅度降低感染性物質處理，但是還沒有達到A級污泥的品質標準。A級污泥可以使用於土壤，或銷售給他人用於土壤，或作其他生產用途。至於B級污泥在使用上要受到避免一般民眾接觸，以及可生產農產品種類等限制，以減少環境和健康風險，使其安全程度達到和A級污泥相當的水準。由於對使用B級污泥的這些限制，一般都市污水處理廠都盡量想辦法使處理後污泥能夠達到A級標準。

美國聯邦環保署釐訂的A級污泥致病及指標性微生物標準限值包括**5**：

1. 每4公克污泥中所含腸病毒小於一個單位。
2. 每4公克污泥中所含寄生蟲存活卵子小於1個。
3. 每4公克污泥中所含沙門菌數小於3MPN，或每公克污泥中含有糞便大腸桿菌小於1000MPN。

值得一提的，有些寄生蟲卵子，雖然在處理中已經死亡，但是看起來還是卵子，因此標準中特別說明要存活的才算。檢定一個卵子是否存活，要經過一定程序。不過有經驗的檢驗工作人員，可以在顯微鏡下從外觀作出正確判斷。至於MPN是上下水道界常用的單位，意思是最可能數值。

標準中列有腸病毒一項，對一般人來說似乎只是夏天流行的一種兒童疾病。其實腸病毒種類很多，其中包括三型小兒麻痺病毒，二十三型克沙奇病毒，加上陸續發現的，現在已排到六、七十種。克沙奇病毒會肇致病毒性腦膜炎等疾病。腸病毒物質的染色體為RNA (Ribonucleic Acid, 核糖核酸)，不像人類是DNA (Deoxyribonucleic Acid, 去氧核糖核酸)，所以比較容易發生突變。

為了達成前面所提的A級污泥標準限值，美國聯邦環保署也提供了下面六項污泥處理實務規範⁴：

1. 高溫定時熱處理，主要條件如下：
2. 高pH及高溫處理，pH保持在12以上，至少經過72小時。在這段期

高溫定時熱處理的主要條件

污泥含固體量%	處理溫度°C	時間min
≥7	≥50	≥20
<7	≥50	≥30

間，將溫度升高52°C以上，至少維持12小時。處理後並且要經過風乾，使污泥含固體至少為50%。

3. 其他處理方法，必須嚴格監測處理前後污泥品質，並能確定到標準限值。

4. 使用作用機制尚未十分明瞭的處理方法，原則上應加強監測處理後污泥品質，確定達成A級污泥標準限值，同時必須採取適當防止吸引如蒼蠅、老鼠、鳥類等挾帶致病物質媒體措施。

5. 使用已經確認，可將經過傳統處理污泥，進一步減少致病物質的處理方法，包括堆肥、熱烘乾、熱處理、高溫好氧消化、Beta放射線處理、Gamma放射線處理、熱消毒等，必須有合適配套監測計畫，以確定符合A級污泥要求。

6. 使用相當於上述5.的新處理方法，可申請由聯邦環保署鑑定，然後適用**5**辦理。

污泥管制規則實施後，不少都市污水處理廠頗寄望於高溫嫌氧消化槽來達成A級污泥要求，因為這種處理方式有減少消化槽容量、有效消化通常認為困難的活性污泥、增加有機物消化量，以及減輕脫水後污泥臭氣等優點。目前成功操作中的有加拿大溫哥華獅門污水處理廠的兩段式高溫嫌氧消化槽，及美國北卡州教堂山污水處理廠四段式嫌氧消化系統，包括前三個高溫嫌氧消化階段（溫度均為52°C），以及最後一個中溫嫌氧消化階段（溫度為37°C），成效不錯，但設備稍嫌過於複雜**7**。大致說來，高溫嫌氧消化槽還有很多可以研究改善的餘地，不過很可能成為「明日之星」。

雖然在聯邦環保署不斷大力推動下，目下美國使用污泥的農地，據估計還不到1%。就在這

當口，美國唯一全國性報紙「今日美國」，在西元二〇〇〇年7月13日刊出，聯邦環保署微生物學家路易士揭發該署隱瞞真相，未向民眾說明利用污泥在致病物質上的疑慮，並且指出國家職業保健及安全局為保障B級污泥使用人員健康安全所建議的極其嚴格要求，不無顯示該局對使用污泥的慎重保留態度。這件事被「全國吹哨子中心」知道後，立刻向聯邦環保署長提出請求，調查該署貿然同意在農地使用污泥的錯誤措施。這個「全國吹哨子中心」設立的目的，就是要捍衛公務人員對其本身服務機構重大缺失「吹哨子」的權利。針對這項指控，聯邦環保署長已要求國家科學院檢討該署污泥管制計畫是否有需要改進的地方。同時國家職業保健及安全局也發表聲明澄清，該局的建議只是為了保障工作人員，並不是評估污泥利用計畫⁸。這件事看起來應該不致影響美國推動污泥土壤利用的大方向。

另一方面，美國農業部在西元二〇〇〇年12月公佈的有機食品標準中，明文規定禁止使用污泥為肥料，利用基因改變工法，或放射線處理。鑒於美國在西元一九九九年生產有機食品總值達美金60億元，全國約有一萬二千座有機農場，並且還在不斷增加中，上項禁令，對推廣污泥土壤利用，是個不小的打擊⁹。

對於利用污泥作為農業土壤用途，台灣地區和日本一樣，都只有重金屬及砷等無機毒性物質的標準限值³，並未考慮感染性病菌、病毒及寄生蟲卵等公共衛生項目，和美國在這方面的高度

關切，成為鮮明對照，似有探討餘地。台北市政府目前正在努力推動餽水利用。餽水所含感染性物質，的確比污泥要少得多，但是由於不少餽水回收利用是在家庭後院，或者陽台盆景中，和民眾接觸機會很大，對感染性物質，應該也不能掉以輕心，完全忽視。

都市污水處理廠常利用高溫熔融技術處理污泥，產生建築角材、道路用材料，以及磁磚等。如在日本，逐年均有增加，西元一九九九年時約佔全國污泥處置量的14%。熔融處理的確可以達到減量、穩定和衛生目的，目前有表面熔融爐、迴旋熔融爐及焦炭床熔融爐等三種設施。熔融通常分兩階段進行，第一階段為高溫熔化，第二階段為冷卻。後者分水冷卻、空氣冷卻及結晶化等三種方式。結晶化是在冷卻時先維持900~1100°C數小時，再進一步冷卻。熔融處理最後產品受冷卻方式影響很大。用水冷卻時顆粒較細，呈玻璃質，適合作混凝土角材。用空氣冷卻時，多呈玻璃質塊狀，較宜作道路基材、滲水磚等。結晶化熔渣強度較高。熔融處理的缺點是設備費用高，成本高，約為堆肥的三倍半，比焚化法約高二成，不過比固化法還是便宜，而且有高利用價值³。因此在找不到合適污泥土壤利用市場時，是一種相當值得考慮的選擇。

本文承旅美友人吳登中博士提供資訊，謹此致謝。

（本文原刊環境工程會刊第12卷第3期，民國90年8月出版）

參考文獻

- 1 "City of Springfield, Massachusetts. Report on Sewage and Industrial Waste Disposal. Aug. 1971" Camp, Rresser & Mckee, Consulting Engineers, Boston, Mass.
- 2 任台生譯，「達爾文傳」，國際文化事業有限公司，台北市，1984。
- 3 張思凡，「都市生活污水處理廠污泥資源化再利用之回顧及展望」，環境工程會刊，中華民國環境工程學會，第11卷，第2期，民國89.5，pp. 59-80。
- 4 The Clean Water Act of 1987. Water Pollution Control Federation, USA, 1987.
- 5 Bastian, R. K. and Smith Jr, J.E., "Is It Really Class A," Water Env. & Technology, Water Env. Federation, USA, Vol. 13, No. 5, May 2001, pp. 39-42.
- 6 李秉穎，「腸病毒震撼」，遠流出版事業股份有限公司，台北市，2000.9.1。
- 7 Shimp, G.E. et al., "The Future of Solids Treatment", Water Env. & Technology, Water Env. Federation, USA, Vol. 12, No. 11, Nov. 2000, pp. 35-39.
- 8 "NIOSH Report Sparks Latest Biosolids Controversy", Water Env. & Technology, Water Env. Federation, USA, Vol. 12, No. 10, Oct. 2000, pp. 18-21.
- 9 "USDA Bans Use of Biosolids in Production of Organic Agricultural Products", Water Env. & Technology, Water Env. Federation, USA, Vol. 13, No. 3, Mar. 2001, p.16.