

水生植物在污水處理上之運用

荊樹人

嘉南藥理科技大學環境工程與科學系 教授
嘉南藥理科技大學生態工程技術研發中心 主任

摘 要

水生植物在一個濕生環境中與共生的其他物種，會因為從水體中取得新陳代謝所需要的物質而達到處理污水的功能。達到處理污水的機制包括了生物性、化學性、物理性的淨化機制。不過這些機制的速率與處理量均有限，如果不謹慎設計操控在其範圍之內，雖然淨化能力依然存在，但是對於生態景觀方面會產生負面的結果。若能有效的利用水生植物，不但能夠達到環境污染的改善，同時也可以獲得生物多樣化的生態以及與民眾和諧共存的景觀。成敗與否，端賴對於水生植物的認識與友善審慎的設計與運用。

關鍵字：水生植物、人工濕地

壹、前 言

人類經濟發展與生活形態的改善，對於環境連帶產生各種的污染行為。不論污染物的產生型態為何（固態、液態、或是氣態），經過自然界物理、化學或是生物之自淨反應之後，絕大部分會進入自然水體及土壤之中。這些人類行為所生的物質，直接或間接經由食物鏈進入各種生物體內，當然包括人類在內。至於這些物質對於自然生態環境或是人類產生何種影響，恐怕不是短時間內有具體結論

的，不過有一點可以確定，那就是這些物質所產生的正面影響是微乎其微。在自然生態環境中，濕地（wetlands）由於經常位於陸地與水體之間的介面，因此是一個物質累積轉換十分完整的系統（尤其是對於水體環境部分），也因為營養物質來源豐富，便成為自然生物很理想的繁衍與棲息的地方，容易形成生物多樣化的生態。濕地環境中，水生植物（macrophyte）是主要的生態單元，在物質轉換的過程中擔任重要的角色。一百多年前，由於人類的污水在進入大型水體之前先流入濕地，便觀察到濕地有淨化水質的功能(IWA, 2000)。但是長期累積污水中物質的結果，反而造成原來濕地生態因為水質變化而出現「優勢水生植物物種」，優勢物種快速的侵略整個濕地環境，逐漸生物相變單純化了。物種的減少會使的一些食物鏈斷裂，許多原有棲息的生物也逐漸消失了；此外，人類所產生的廢污水中許多物質也可能直接或間接造成生物的毒害。所以利用水生植物達到污染水質淨化的結果，需要有縝密的設計規劃，才能有效的運用水生植物的優點，而不會對於環境產生負面的衝擊。本文針對水生生態系統與廢污水污染之間的關係，提出一些淺見謹供各界人士之參考，並請不吝賜教。

貳、水生植物處理污水的機制

在多樣化生物的濕地生態環境中，水生植物（macrophyte）是最主要的架構，也是達成水質有效改善重要因素。以下針對水生植物在水質淨化機制中，能夠提供的淨化行為做一簡略的整理。

生物性處理機制：

水生植物在水生生態中因為新陳代謝反應，可以從水中吸收物質，同時也經由光合作用提供水生環境氧氣。系統中微生物群利用這些氧氣有效的分解水中基質或有機物，以獲得能源與合成繁衍所需要的化合物，這是濕地系統分解有機物的主要機制。硝化反應也能夠因此而達成，達到降低水中氨氮的功能。此外水生植物也提供附著生長式微生物生長所需要的表面，使得能夠分解有機物質的微生物數量增加(林瑩峰等，2001；何茂賢等，2002；張弘昌等，2004)。植物在新陳代謝過程中，會釋放微量有機物至水體，可以提供異營性微生物作為利用硝酸鹽或是亞硝酸鹽為電子接受物的碳源，完成脫硝反應降低水中的總氮濃度，(林瑩峰等，2000；施凱鐘等，2002；許原哲等，2003)。

物理性處理機制：

密集生長的水生植物群因為高密度植體，對於通過的水流中懸浮固體能夠產生過濾的功能(荊樹人等，1998 與 2001)。同時密集的接觸也產生水中物質有效吸附於植體表面，使得表面附著生長的微生物能夠有機會分解溶解性的有機物質。

化學性處理機制：

代謝後的植物植體氧化產生有機酸的部分，也能夠產生離子交換的功能。同時部分化合物能夠與水中有機物產生螯合反應，將有機物從水中分離，進而由微生物進行分解。

上述簡略將水生植物在濕生環境中與水中物質互動的關係可以看出，水生植物的確具有處理污水的能力，不過這些淨化機制的速度與淨化污染的函量（capacity）是有一定的限度。如果超過其限度，則很容易產生優勢物種的形成，甚至影響原有生態環境的平衡。所以在利用水生植物處理污水的過程中，需要審慎的估算與設計，並謹慎的操作與維護，才能達到預期的成效。

參、污水淨化與自然環境的關係

人類自古以來所產生的污染物，便是經過自然生態的機制完成物質轉換進而回歸自然，同時達到平衡的狀態，這種平衡便是自然界的「自淨作用」。如果給於自然界污染的負荷不大於其自淨作用的能力範圍（涵容能力），就不會有明顯污染環境或是破壞生態的狀況發生。但是人類技術的改進加上人口的增加與集中，各種污染物質不僅數量增加，而且種類也複雜了。經過長時間的集中排放，自然生態系統物質轉換機制的平衡狀態，便開始改變。此時，適於該受污染環境的物種便逐漸增加，而成爲優勢種。原來生物多樣化的自然濕地物種漸漸消失，濕地本身也變成了人類的污水處理廠。過去一般認爲濕地的消失只是人類對於其空間的奪取，現在從生態保育的角度來看，即使保留住自然濕地，但是其中物種卻因爲污染而消失，那麼保留住一片大型污水塘又有什麼保育生態的意義呢？濕地生態是地球表面生態系統極爲重要的一環，但是保育濕地除了要留住它們的空間，更要給它們一個能夠永續生存的乾淨環境。

人類產生的污水，進入其導引的管線（不論是人造的或是自然的）之後，便開始分解反應，臭味就是某些物質分解的結果之一。這些污染物達到最後穩定的狀態之前，例如有機物達到分解成二氧化碳與水，必須完成應有的分解反應過程，這個過程根據污染物質的種類與質量，需要一定的空間、時間及能量；而且分解過程中，一定會產生一些令人不悅的中間產物。現在問題是我們要讓這些中間產物在何時、何處發生。如果不去刻意的管理或處理，這些反應便會在排放的管道之中發生，從化糞池（或是建築物污水處理設施）開始，經過小排水溝、中排水溝、大排水溝逐漸集中累積，如果到達接收水體（河川或埤塘）之前，物質還沒有穩定，那麼水中氧氣被消耗完了，水體厭氧的結果就是大家常見的又黑又臭的河川。這些河川的水很可能就是大家所「保護」濕地的水源。

厭氧水體的問題不只是又黑又臭的表象，因為缺少氧氣以致於水中的生物會消失，原本多采多姿的自然水體便消失了。過去提到污水處理，建築師或是環境工程師的第一個想法就是設置污水處理廠，也就是將污水中的污染物集中到處理廠一併處理，將令人不悅的過程封閉在下水道系統及污水處理廠中，以達保護環境與水體。當然這是既專業又有效的作法，不但符合環保法規的要求，也符合建築法規的規定。但是為什麼到現在為止，也不見各主管機關開始規劃設置呢？

事實上，污水處理設施的設置與操作有其先天上的困難：

- 一、污水處理廠需要有效的操作，第一個要件是完整的下水道系統，這樣才能集中污水，達到處理的目的。但是密集完整的下水道系統，則需要龐大的人力物力以及冗長的施工時間，才能完成。對於舊有的市集及街道區域內，其施工過程更是艱鉅，甚至無法進行。
- 二、設置污水處理廠所需的空間及成本，不是一般小型規劃計畫能夠輕易完成的，需要很多繁瑣溝通協調的工作。
- 三、污水處理廠必須穩定的操作，才能達到其效能，換言之一般污水處理廠需要穩定的污水來源，以維持系統中活性污泥的生長及排放。一般社區甚至地方政府，對於穩定操作污水處理廠的經費與人力（專責人員），都是很沈重的負擔。如果因為操作維護成本無法負荷，導致放棄操作，那麼原本的問題依然沒有解決，還浪費了大筆的公帑設置污水廠。
- 四、污水處理廠能夠在短時間消除大量污染物的主要原因，是人為提供大量的能源（主要用於曝氣）與添加化學藥品。這個機制需要很高的電費及藥品費用，加上機械設備的維修保養工作，對於各級單位都是一個相當大的財務負擔。這些能源的使用，與「節能減碳」的目標是背道而馳的。

五、污水處理廠的操作根據環保法規的規定，必須由專業的人員操作、管理與申報，也就是所謂的專責人員。這個人事的設置，也是很大的經費負擔。

基於上述的原因，各級主管機關對於採用機械式的污水處理設施來解決污水處理問題的態度都較為保守，更遑論水資源再利用了。

以利用太陽能為能源的水生植物作為淨化工具之人工濕地系統，處理社區生活污水，不僅設置成本低、操作維護簡單、能源需求很少、不需專業技術、淨化水接近自然水體，更重要的是系統展現生態保育之生物多樣化的結果，使得生活污水再利用的理想，又有了可能實現的方法(陳欽昭等，2003；吳堅瑜等，2003；林瑩峰等，2004；李穆生等，2005)。此時對於廢污水淨化技術的應用，多了另一種思維——自然淨水技術。由於自然淨水技術，包括利用水生植物的人工濕地系統，在設計上需要考量其自然生態的形成同時又具有淨化廢污水的功能，因此在結合保育自然濕地的技術中，便有其既定的價值與意義。

人工濕地技術的應用與觀念在國內已經逐漸普遍化，其應用的範圍也很多樣化(荊樹人等人，2008)。由於各個不同單位為了不同目的而規劃濕地生態技術應用，我們發現有許多單位與人士對於濕地技術有一些誤解或是錯誤的期待。因而可能在未來應用之時，未獲其利之前卻先受其「不悅」的生態狀況的干擾或負面的影響。如果因此，便對濕地技術產生排斥或抗拒的想法，那麼一個不錯的生態工法變失去其幫助大家改善環境的機會，那就令人遺憾了。雖然人工濕地有許多好處，但不是萬能的，我們發現若要人工濕能夠成功的達到設計的期望，是需要後續的操作與維護(林瑩峰等，2006)。

如果在設置濕地運用水生植物是為了淨化廢污水，在設計上除了濕地本身生態景觀的考量之外，最主要的設計因素應該在於污水淨化功能的估算(荊樹人等人，2008)。

我們可以將人工濕地的設計分為兩個部分來思考：

- 一、從污水進入到淨化至要求的水質之間，這個部分的濕地很類似當初人類直接引污水進入自然濕地的狀況。其中生物將不容易多樣化，因為會有優勢物種的形成。再因為這個部分的濕地所接觸的水具有污染性，因此設計者需要考量環境衛生的問題，尤其是在與人們接觸頻繁的環境中。
- 二、從污水淨化到要求的水質之後，因為水質經由人工濕地淨化至接近自然水體之背景質時，其中含有物質的濃度低，適合多種植物的競爭而共同存在。這時在衛生無慮的情況之下，才適合規劃生態保育、自然景觀等項目。

將上述的想法歸納之後，我們可以將生態景觀水池與人工濕地（淨化型）結合，先經過人工濕地將污水淨化後，再進入景觀水池形成生物多樣化的目的。如此不但可以解決景觀水池的水源問題，同時也降低了污水污染環境的程度，水資源再利用也能夠達成，豈不一舉多得。但是問題出現了，人工濕地畢竟需要環境工程專業的協助與水質分析，才能確保原來生態景觀規劃的安全性。

肆、人工溼地的種類

人工溼地（constructed wetlands system, CW）因為水生植物的應用不同，大致分為兩大類，一類是表面水自由流動式（free water surface flow CW, FWS）；另一類為表面下流動式（subsurface flow CW, SSF）（IWA，2000）。

FWS 系統可由種植不同的大型水生植物（macrophytes），分為五種：

一、挺水植物型（emergent macrophytes）

常用的水生植物有：蘆葦類（*Phragmites spp.*）、燈心草類（*Juncus spp.*）、香蒲類（*Typha spp.*）、狼尾草類（*Pennisetum spp.*）、薑屬類（*Cyperus spp.*）等

二、浮水植物型（floating macrophytes）

常用的水生植物有：布袋蓮（*Eichhornia crassipes*）、浮萍（*Lemna spp.*）、水芙蓉（*Pistia stratiotes*）等

三、著根浮水植物型（bottom-rooted floating macrophytes）

葉片為浮水性，根部為著生於底泥中，如蓮花類（*Nymphaea spp.*, *Nelumbo spp.*, *Nuphar spp.*）等

四、挺水植物浮水型（emergent macrophytes with floating mat）

一些挺水植物聚生在一起之後，其根部交叉生長同時累積植物殘渣之後形成類似墊片物（mat）而浮在水中。具有此種行爲的植物包括：蘆葦、香蒲、石蓮花（*Hydrocotyle umbellata*）等

五、沉水植物型（submersed macrophytes）

常用的水生植物有：水草類（*Elodea spp.*）、耆草類（*Myriophyllum spp.*）等

SSF 系統一般依水流動方式可分為兩類：

一、水平流動型 (horizontal-flow system)

進流由一端進入，水平流向另一端出口，常用的水生植物有：蘆葦、香蒲等

二、垂直接流動型 (vertical-flow system)

進流由表面逐步向下滲流至底部的集流管，常用的水生植物有：蘆葦、香蒲等

伍、人工溼地的功能

人工濕地系統生態中包括了在水中及底泥中之各類生物，如大型動植物、微生物、原生動物等，因此水中的各類物質在此生態中均有其循環的機制。某些物質會在循環機制中離開系統，有些則可能累積在系統中。一個達到穩定狀態的溼地系統（如自然溼地），對水中物質去除的能力有限而且緩慢。如果要加速溼地系統中的污染物去除速率，則需加入人爲的操作及控制行爲，這便是應用人工溼地的一個目標。例如，磷酸鹽在一個封閉的生態系統中將會在其中循環累積，但是若能將生物體自系統中持續的移除，則能有效的減少系統中磷酸鹽的含量並且增進系統對污水中磷酸鹽去除的效能(荊樹人，2000)。表一中簡單的列出

表一、各類污染物在人工溼地中的處理機制與其效能

Table 1. Treatment process and performance of pollutants in constructed wetlands

污染物	處理機制
懸浮固體	過濾、沉澱
有機物	微生物分解
氮	水解、硝化、脫硝、揮發、吸附、生物吸收
磷	生物吸收、吸附
致病原（細菌、病毒、原生動物、寄生蟲等）	沉澱、過濾、吸附後，自然死亡或被掠食
重金屬	吸附、離子交換、與有機物螯合、過濾、生物吸收
水體化學輔助	氧氣、酸鹼度

由於影響人工濕地系統行爲的因素很多，包括氣候、土壤性質、植物種類、廢污水特性、操控參數等。因此，必須建立適用於本土的資料庫以及操控參數，才能達到有效地利用人工濕地系統淨化廢污水的目的。

陸、自然淨水技術與濕地永續保育的關係

有了人工濕地技術的概念之後，回頭來思考它對於自然濕地保育能否結合呢？人工濕地在一般社區應用設計時，會將其淨化後的污水再進一步應用於生態水池，並希望能夠增加生物多樣化的目的。那麼反過來思考，既然國內自然濕地生態系統面臨水污染的威脅，是否能夠應用和自然濕地十分類似的系統來保護它呢？如果在自然濕地水源進入的一小塊局部區域（需要根據水質水量估算其面積），應用其原有的濕地生態規劃為具有人為操作淨化功能的人工濕地，先淨化進入濕地的水，並儘量將污染物質留在前端的人工濕地系統中，以維護大部分自然濕地的清淨，是否是一個值得細思的構想呢？

由於水生植物的行爲，人工濕地系統就表象上與自然濕地無異，操作上不需要能源，維護上也很簡易，具有永續應用的功能。這種結合的規劃，是將生態工法應用於生態保育最直接的作法，提供大家參考。

柒、結 論

生態工法之自然生態技術如運用水生植物的人工濕地系統的確有設置費用低、操作簡單、生態保育等功能及優點，但是如果應用在廢污水的淨化時，不但設置前需詳加估算與設計，後續也需要耐心的照顧與整理。這樣系統才能在兼顧景觀的狀況下，永續為削減污水的污染物工作下去。事先多費一點心去規劃，未來才有永續經營的可能性。

參考文獻

1. 李穆生、陳幸芬、林瑩峰、荆樹人、李得元、張翊峰、施凱鐘、陳泓璋、陳佳宜，2005，以生態工程處理及再利用鄉村型社區污水之台南縣經驗，國際生態工程及水利技術研討會，台北，pp.331-344。
2. 何茂賢、荆樹人、林瑩峰、李得元、黃子榜，2002，表面流動式人工溼地處理污染性河水之營養鹽，第八屆海峽兩岸環境保護研討會，新竹，pp382-389。
3. 吳堅瑜、荆樹人、林瑩峰、李得元、游程凱、宋金樹、張天化，2003，以實場人工溼地系統直接處理社區污水效能之研究，第二十八屆廢水處理技術研討會，台中，pp.1-116。
4. 林瑩峰、王姿文、荆樹人、李得元、施凱鐘、楊雅淨、陳庭剛，2000，表面流人工溼地對水中硝酸鹽之去除效能，雲林，第 25 屆廢水處理技術研討會，第 882-887 頁。
5. 林瑩峰、荆樹人、李得元、王姿文、施凱鐘、張庭憲、劉皓、陳韋志，2001，廢水中之氮磷比對人工溼地營養鹽去除之影響，第 26 屆廢水處理技術研討會論文集，高雄。
6. 林瑩峰、荆樹人、李得元、張翊峰、余元傑、施凱鐘、張弘昌、李穆生，2004，社區水資源再利用與永續經營，第九屆水再生及再利用研討會，中壢，pp.21。
7. 林瑩峰、荆樹人、李得元、張翊峰、余元傑，2006，「人工濕地的操作與維護管理」，第三十一屆廢水處理技術研討會，台中，pp.177。
8. 施凱鐘、林瑩峰、荆樹人、李得元、陳韋志、林秉璋，2002，種植不同水生植物的小型人工溼地之脫硝潛能及地下水硝酸鹽去除，第八屆海峽兩岸環境保護研討會，新竹，pp424-431。
9. 荆樹人、林瑩峰、王姿文、李得元、陳益銘、蘇青瑾，1999，人工溼地去除水中懸浮固體功能之探討"，第 24 屆廢水處理技術研討會，中壢，第 697-702 頁。
10. 荆樹人、李得元、林瑩峰、王姿文、何茂賢、魏家美、鍾雯如、吳民貴，2001，人工溼地去除校園廢污水中懸浮固體之效能，第 26 屆廢水處理技術研討會論文集，高雄。
11. 荆樹人、林瑩峰、施凱鐘、陳欽昭，2008，「人工濕地在不同水體污染之實際應用」，第一屆海峽兩岸人工濕地研討會，大陸武漢。

12. 陳欽昭、荆樹人、林瑩峰、李得元、游程凱、樓仲軒，2003，氧化塘與人工溼地系統連接操作處理社區污水，第二十八屆廢水處理技術研討會，台中，pp.1-131。
13. 許原哲、荆樹人、林瑩峰、林敏朝、翁正哲、李得元、施凱鐘、陳欽昭，2003，以人工溼地降低醫院放流水中硝酸鹽濃度之研究，第二十八屆廢水處理技術研討會，台中，pp.1-123。
14. 張弘昌、荆樹人、林瑩峰、李得元、張翊峰、劉邵希、樓仲軒，2004，不同浮水性水生植物在生態池中淨化污水能力之探討，第二十九屆廢水處理技術研討會，台南，pp.1-83。
15. International Water Association, 2000 Constructed Wetlands for Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation. IWA Publishing, London.

Application of Macrophyte on Wastewater

Shuh-Ren Jing

Abstract

With the coexistence of macrophyte and other species in a hydraulic system, pollutants in water can be effectively removed via the metabolism of these species. The mechanisms for reaching wastewater treatment include biological, physical, and chemical reactions. Nevertheless, the reaction rates and treating capacity are limited due to the natural characteristics of the system. When the hydraulic system is operated overloaded, many negative phenomena would be appeared even though the treatment ability is still remained. On the other hand, if the system using macrophyte can be carefully designed and operated, wastewater cannot only be treated, but biodiversity and pleasant landscape can also be formed. Success or failure all depends on the true recognition and careful management while using macrophyte.

key words : macrophyte 、 constructed wetland