

# 評估人工濕地在處理廢(污)水之功能與影響

黃富昌<sup>1</sup>、陳慶和<sup>1</sup>、邱英嘉<sup>1</sup>、  
林諒昭<sup>2</sup>、吳承恩<sup>2</sup>、陳淳圓<sup>2</sup>、賴允偉<sup>2</sup>、劉彥君<sup>2</sup>、蕭博瑞<sup>2</sup>

1 南亞技術學院土木系環工組副教授 2 南亞技術學院土木系環工組學生

## 摘要

國際間學者對濕地多年的研究結果顯示，除了具有維護生態棲息地、保護自然資源的功能外，兼具防洪、保護海岸、蓄洪抗旱、調節氣候和淨水的功能，因此，不失為一可以處理污染河水的有效工具。近二十多年來，國際間許多研究發現，人工溼地在嚴謹的操作與控制狀況下，具有淨化廢(污)水的潛力，目前世界上超過1000個溼地系統被實際應用。人工濕地系統(constructed wetland system)係是將生態工程技術應用於廢(污)水管理及處理上的一種自然淨化程序，具有省能源、低成本、無二次污染、不破壞生態等優點。利用溼地生態中的物理作用(包括沉澱、過濾及吸附等作用)、化學作用(包括氧化還原、吸附、離子交換及錯合反應等)及生物作用(包括微生物的同化吸收作用、礦化分解作用及植物的同化吸收作用等)來淨化水質。目前在台灣，人工溼地尚處於小規模試驗階段，大多應用人工溼地來處理生活廢水、農畜養殖廢水及部分工業廢水。台灣的水資源由於受限於地形的關係，加上工業化程度增加，廢(污)水隨意排放以及河川保護不力等影響，再加上國內環保意識的抬頭，國人對於環境及民生用水日趨重視，因此如何運用有效的方式改善已受污染的河水並加以淨化，是當前刻不容緩的重要議題。有鑒於此，本文乃彙整國內外應用人工濕地在處理廢(污)水之技術，期望能提供學者、先進們做為進一步研究之重要參考資訊。

關鍵詞：溼地、廢(污)水、淨化

## 一、前言

人工濕地是一種非自然環境形成，而是由人工特意開墾，以人為操縱與控制的方式，利用濕地自然生態系統(能承受高污染物質的水生植物，達到最佳處理效果)，淨化廢(污)水的處理設施。因此不但具有濕地中可以淨化水質的各種機制與特性，包括：過濾、吸附、沈澱、生物分解、生物吸收等，同時也擁有濕地的景觀以及提供生物棲息的場所。近幾年來，國人已經逐漸的了解溼地在生態環境上之重要性，尤其對沿岸的候鳥棲息地特別重視，然而溼地的功能不僅於此，對於水質淨化、氣候調節、休閒遊憩、生態復育及生態教育上都有很大的貢獻。

「濕地」係指陸地與水域間經常或間歇被潮汐或洪水淹沒的土地，不但是「水」、「土」交界的重要推移區，具有特殊的物理環境，同時也是地球上生產力最豐沛的生態系統。如何保護、發揮和運用這些濕地的多樣性功能，近年來已經成為國際間重要的研究議題。除了自然濕地外，近年來國外對於協助廢(污)水處理、調洪滯流、景觀休憩和生態復育之人工濕地，發展更為快速，成效更為顯著。我國對於濕地之相關研究越來越

多；至於人工濕地之研究探討，則尚屬起步階段，非常值得深入研究，俾使各類型濕地能充分發揮其功效。人工溼地(constructed wetland)主要是利用天然溼地的自淨功能來淨化人類所產生排放之廢(污)水，具有淨水及生態保育的功能，即是將生態工程技術應用於廢(污)的管理及處理上的一種自然淨化程序，與一般傳統之廢(污)水處理系統做比較，具省能源、低成本、無二次污染、操作維護簡單、不破壞生態等優點，又可以提供生態棲息空間、土地復育、自然景觀等優點。人工溼地在善用水資源的技術上，是為一個具有經濟效益的自然處理方法，此外，若將經人工溼地處理後之廢(污)水回收再利用，可達到水資源永續再利用之目的。

未來亦可運用人工溼地，作為部份含重金屬事業廢水，水質提升規劃之運用，達到護水、淨水之功能。藉由控制進流水中污染物濃度及濕地內之氧化還原狀態，期能產生穩定結合重金屬，使濕地有效扮演重金屬去除之主要去除處，且不致對濕地生態產生衝擊。

## 二、文獻回顧

### 1. 濕地

在濕地的眾多定義中，IUCN(The World Conservation Union，世界自然保育聯盟)定義濕地(wetland)係「有水生植物生長的地區」。而其中涵義最廣，且普遍為國際間所使用者，當屬 1971 年間於伊朗蘭薩簽訂的「針對水鳥棲息地之國際重要濕地公約」之第一條：「不論天然或人為、永久或暫時、靜止或流水、淡水或鹹水，由沼澤(marsh)、泥沼地(fen)、泥煤地(peat land)或水域所構成之地區，包括低潮時水深六公尺以內之海域。」此定義中包含了「內陸濕地」與「海岸濕地」。因此，人工濕地就是以改進濕地淨化水質的功能為設計的，而藉由人工濕地處理在二級處理中無法消除的氮及磷等營養鹽，並更進一步去除二級放流水中剩餘的生化需氧量(BOD)、化學需氧量(COD)及懸浮固體(S.S)。

「蘭薩公約」可說是一項帶有強烈道義責任的重要聲明，立約的目的在於保護水鳥，避免其棲地的侵害喪失，該公約立約的原則與精神如下：(1)認知人類和環境有著相互依存之關係；(2)重視濕地具調節水量、淨化水質、提供特有動植物棲地，尤其是水鳥等基本生態功能；(3)確信濕地為經濟、文化、科學及遊憩之寶貴資源，濕地一旦消失便很難再加以恢復；(4)希望避免現存及未來出現的濕地遭受侵害和消失；(5)認知水鳥因季節遷移會穿越不同國境，故為全球共有之資產；以及(6)盼望藉由結合具遠見的國家政策與國際合作行動，來達成保育濕地及動植物族群。

### 2. 人工濕地基本概念

自然濕地在美國某些地區當作廢(污)水排放與收集的用地，至今已有超過一百多年的歷史。當人們開始監測這些接受廢(污)水的自然濕地時，人們便開始認知到濕地淨化水質的潛能，因而逐步模仿，成就了人工濕地的研究熱潮。「人工濕地」是應用生態工程技術，以處理廢(污)水或彌補自然損失的人為設施，具有將污染物涵容同化及轉換的能力，也兼具自然濕地生態系統中物理、化學和生物間交互作用處理之特性，既不需能源輸入，也具有不必經常維護管理與自給自足等優點<sup>(1)</sup>。但是，一些人為活動不經意形成的濕地，也可能具有特殊意義。過去，陽明山國家公園管理處在竹子湖一處窪地填埋

土地，希望闢建停車場，卻因民間保育人士發現該處有保育類植物「台灣水韭」，而引發是否為「濕地」的爭議。最後，陽明山國家公園管理處終於決定保留該一濕地，作為研究教育的場所<sup>(2)</sup>。因此，對於「人工濕地」的認定、保護利用問題，政府相關機關有必要格外審慎。

在經濟發展與生態保育兩種理念的衝突下，應用人工濕地以取得開發與保育平衡的作法，日漸受到重視。由於功能與目的的不同，人工濕地大致歸類為下列四種<sup>(3)</sup>：

### **(1)水質處理為目的之人工濕地**

無論是天然濕地或人工濕地，由於其中生物的分解或吸附等作用，對於淨化水質都有相當的功用。然而，如果任意將高濃度、高污染的廢(污)水排入天然濕地中，將可能超過濕地的負荷能力，而嚴重污染天然濕地的水質，造成野生動植物的死亡、棲息地的惡化，破壞濕地的生態平衡。但如能運用人工濕地的技術，不僅能淨化水質，還能有效去除高污染的廢污水。由於這種處理式的人工濕地能夠自行設計，同時兼具自然界的永續性，因此具有成本花費較少和所需外加能量亦少的優點<sup>(4)</sup>。

### **(2)彌補自然功能之人工濕地**

美國於 1972 年間制訂的清潔水法(Clean Water Act of 1972)，就已納入「濕地填埋開發利用的管理制度」。依據清潔水法的規定，美國工兵署(Army Corp of Engineers)被授與濕地開發(permit)的審核發照許可過程，但環境保護署(EPA)則保留最終的准駁權。根據美國的規定，地主要取得這些許可之前，應當避免對濕地造成不利的影響。如果衝擊無法避免，則需儘量減低對濕地的影響。

### **(3)調洪緩流為目的之人工濕地**

調洪緩流，是利用河川流域內的濕地調節洪流之控制手段。台灣有一些河口、洪水平原、高灘地和沿河魚塢等，應該具有作為調洪型濕地之潛力。然而，目前許多河川都以硬性堤防作為防洪的主要手段，使得使用軟性調洪措施的機會大為減低。

### **(4)養殖為目的之人工濕地**

養殖型濕地，目的在孕育生態資源及水產養殖而設置，主要的意義在生態復育或平衡，對於水資源管理的相關性，顯然較不直接。

## **3.濕地處理系統**

一般而言，濕地處理廢水系統可分為自然濕地處理系統(Natural Wetland)及人工濕地處理系統(Constructed Wetland)兩種。自然濕地處理系統就是再淨化廢污水排放至自然濕地中，利用濕地本身的自淨作用降低水中的營養鹽含量及其他物質的濃度，也就是利用廢污水中的物質提供濕地植物的生長養分，但是所排放之污染物質若高於濕地本身的自淨能力，則可能造成對自然濕地的污染。人工濕地系統通常可分為自由表面流系統(Free Water Surface System, FWS)及地下水流系統(Subsurface Flow System, SFS)兩種：

### **(1)自由表面流系統**

自由表面流系統(Free Water Surface System, FWS)或稱為 constructed surface flow (SF)

wetlands，係指濕地的水面高於土壤面，也就是說水可在表面自由流動的人工濕地，通常此種人工濕地中所種植的水生植物以挺水性植物及漂浮性植物為主，並由附著在地下莖及根部區的微生物進行處理污染物質。

## (2) 地下水流系統

地下水流系統(Subsurface Flow System, SFS)或稱為 constructed subsurface-flow (SSF) wetlands，係指水面位於土壤面之下，也就是不能於濕地表面看到水層的人工濕地系統，此種濕地中一般種植挺水性或草本植物，此種系統是利用土壤或礫石表面生物膜之生長，而幫助處理污染物質，但會產生孔隙阻塞之問題，所以必需配置過濾設備或反沖洗設施，減少系統水頭上的損失。濕地的功能與重要性如表 1 所示。

表 1 濕地的功能與重要性

| 社會經濟價值   | 環境品質價值  | 魚類及野生動物價值   |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>· 洪水之控制</li> <li>· 海浪損害之防護</li> <li>· 海岸侵蝕之控制</li> <li>· 地下水與水源供應</li> <li>· 木材與其他自然資源</li> <li>· 能源資源(泥炭)</li> <li>· 家畜放牧</li> <li>· 釣魚及貝類採收</li> <li>· 獵捕</li> <li>· 遊憩資源</li> <li>· 景觀美質</li> <li>· 教育及科學研究</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 水質保持</li> <li>· 污染過濾</li> <li>· 沈澱物去除</li> <li>· 製造氧氣</li> <li>· 營養物循環</li> <li>· 化學及營養物吸收</li> <li>· 水棲動物的生產力</li> <li>· 微氣候的調節</li> <li>· 世界氣候<br/>(臭氣層)的調節</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 提供魚類及甲殼類棲息地</li> <li>· 提供水鳥及其他鳥類棲息地</li> <li>· 提供毛獸及其他野生動物棲息地</li> </ul> |

## 4. 人工濕地去除水中污染物之應用

根據環保法令所規範之陸域水體環境基準或放流水標準，分別有營養鹽(如氨氮、總磷等)、生化需氧量、化學需氧量、懸浮固體、大腸桿菌群、重金屬與農藥等各項，目前專家學者的研究資料中，均將上述各項指標納入報告之中，以符合實際應用需求。以下亦以上述各項指標來探討人工濕地的處理效能。

### (1) 營養鹽的去除

地表水體中的營養鹽，如氮、磷、沈積物、病原菌等典型的污染物質，主要來自於農業活動。

氮在自由表面流動式與地下流動式兩種系統中的去除機制相似，主要透過微生物新陳代謝的過程將氮以氣態的型式去除，雖然植體也會對氮進行攝取，但其攝取速率受到氮負荷量之影響。生物性的硝化/脫硝作用則能有效除氮。氮在好氧狀態下由硝化菌氧化成硝酸鹽，硝酸鹽隨後在厭氧狀態下被脫硝菌還原成自由態氮。通常在表面流與地下流動式的人工濕地中，脫硝菌群要遠比硝化菌族群還多。只要系統中存在足夠的可溶性有機碳，脫硝反應通常可以輕易地在介質或水層底部的還原區域中發生，所以硝化作用是氮去除的限制機制<sup>(8、15)</sup>。

磷在人工濕地中最主要的去除機制是透過吸附、吸收，以及與介質中的鋁、鐵等物質形成低溶解度的化合物，併同沈澱作用形成不可溶的狀態將磷滯留。以磷為處理對象的人工濕地比起應付其他污染物在設計上需要更大的面積<sup>(8, 15)</sup>。

## (2) 重金屬的去除

重金屬在人工溼地中主要的去除機制為吸附、離子交換、與有機物螯合、過濾、生物吸收，雖然部份植物具有吸收及超累積微量元素於其組織體內能力，對於受污染的土壤及水域環境，利用此能力以移除有毒重金屬及微量元素，此種處理方法稱植物淨化處理方法。

在濕地裡佔優勢性之浮水性植物物種，如浮萍及滿江紅，對鐵及銅有高達 78 倍的生物濃縮效應。布袋蓮對含銀的工業廢水可在極短時間內給予有效率的移除。存在於濕地的不同植物物種，布袋蓮、天胡荽、青萍、滿江紅等濕地植物，也於近年被熱絡的討論其對鎳、鋅、鐵、鈷、鉻、鉛、銅、鎘等重金屬之累積吸收情形<sup>(5, 6)</sup>。

根據國內研究報告，人工濕地處理重金屬除植物的生物濃縮作用外，植物體本身與底泥之間亦有交互作用發生，導致植物根部累積量通常較上部組織為高之外，底泥累積量亦相當可觀，如鉛在人工濕地的分布狀況，於底泥所提供之去除率可達 70% 以上<sup>(5, 6)</sup>。

## (3) 懸浮固體的去除

由於人工溼地系統中的生態與水文環境，包括水生植物體本身與其殘渣形成的過濾機制、緩慢的流速增加固體沉降的效果，均可有效降低水中的懸浮固體含量。被過濾或沉降後的有機固體的部分也會經由微生物的分解轉換為其他基質，提供其他生物新陳代謝之所需，使得物質有效的進入自然轉換機制中。

## (4) 有機物的去除

在人工濕地中，有機物的去除，主要的機制為微生物的分解，例如在 4-1 節中所提氮之分解過程脫硝作用，微生物即需要碳源來進行此反應，故水中有機物因而消耗。有機物之去除效果必須視其種類而定，微生物並不能將水中各種有機物加以分解，一般而言，生化需氧量(BOD)之去除效果在 90% 以上，化學需氧量(COD)之去除效率只有 50-70 %。再者，水中 COD/BOD 之比值越大，COD 去除效果越差<sup>(5, 6, 7, 8)</sup>。

## (5) 致病原的去除

水體中致病原為細菌、病毒、原生動物、寄生蟲等，當水體進入濕地後這些微生物亦成為濕地生態系之成員，在經過濕地時，其中植物及其枯萎部份與殘渣，將使流速減緩並使微生物沉澱、過濾或吸附後，造成其自然死亡或被掠食，達到濕地將其去除的效果。

## (6) 農藥之去除

依據王姿文等<sup>(7)</sup>所發表有機性農藥達有龍(Diuron)在人工濕地中降解之初步探討，顯示在水力停留時間約 2 天操作下，自由表面流動式濕地與表面下流動式濕地對達有龍去除率並無顯著差別，約為 61-88%；進出流水之 COD 降解效率平均為 64%。顯示達有龍在人工溼地中可能被微生物所礦化分解或植物體吸收。

## 5.人工濕地應用於校園污水處理

由於校園廢(污)水的水質與水量均不穩定性(污染負荷高低變化大、寒暑假水量驟降)，因而造成廢(污)水處理費用與能源上的浪費，且傳統污水廠之設置費用高，使得各校設置廢水處理設施的意願並不高。校園內之廢(污)水來源單純，應用人工溼地處理，不但操作、維護簡單，可讓學生直接參與操作，進而達到環境教學之目的；且廢(污)水處理過程中，並無添加任何化學藥劑，處理後之污水可以作為多方面之運用，如非接觸性之景觀用水、灑掃用水、廁所沖洗用水等；同時人工溼地系統為一個自然操作方法，其設計可配合周遭景觀，以達到另一美化之目的。

## 6.與濕地保護相關的國際公約

### (1)世界文化及自然遺產公約

(UNESCO-Convention Concerning the Protection of the World Culture and Natural Heritage, Paris, 1972)；

### (2)國際間瀕臨絕種野生動物貿易公約

(The Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, CITES, 1973)；

### (3)遷移性野生動物保育公約

(Convention on Migratory Species of Wild Animals, Bonn, 1979)；

### (4)生物多樣性公約

(Convention on Biological Biodiversity, 1991)；

### (5)氣候變化綱要公約

(Framework Convention on Climate Change, FCCC, 1992)；以及

### (6)二十一世紀議程(Agenda 21)(1994)。

## 三、評析應用人工濕地之處理功效

### 1.作用機制

生態系本身具有自我恢復的功能，舉凡如植物對於污染物的吸附、過濾及其他降解污染的情形。據此，利用濕地的自淨能力來處理人類所產生的廢(污)，除可將廢(污)水水質淨化，減少對環境的污染外，亦可維持自然濕地或人工濕地之生態系統之功能。除此之外，可考慮二級以上處理過廢(污)水經過濕地系統淨化後，其放流水可考慮回收再行利用之可行性，以達到水資源永續利用之目的。一般而言，污染物的去除是在濕地植物、水體和濕地基質的相互作用下完成的，這些過程包含物理過程、化學過程和生物過程。

#### (1)物理過程

在濕地系統中發生去除污染物的物理過程是在植物和基質的作用下完成的。植物的存在可阻攔污水的通行，促進水體進行懸浮固體物的沉降及過濾等作用。以土壤和礫石

充當過濾床用以過濾廢(污)水，幫助懸浮固體物的去除。

## (2)化學過程

物質之間的化學反應使可溶性化合物轉化成不溶狀態，從而從水體中沉澱出來。暴露於大氣和陽光下能使有機殺蟲劑分解和殺死病原體。由植物分泌的抗生素類化合物也具有去除廢(污)水中病原體的作用。此外，在懸浮固體、基質、植物體及有機物碎片表面進行吸附及離子交換作用，亦有助於磷酸鹽、重金屬的去除作用。

## (3)生物過程

人工濕地系統亦是生物系統的一種，生物作用的過程對污染物的去除也具有相當重要的作用。附隨著植物體或基質表面中的微生物，進行有機質之礦化、氮化、硝化及脫硝、同化等作用，去除含碳、氮化合物。光合作用、呼吸作用、發酵作用、氮化作用、去氮化作用和磷的去除等六種的生物反應過程被認為是在濕地系統中能夠有效去除污染物的「生物過程」。光合作用係由濕地植物去完成的，光合作用的結果是在去除水體中有機碳的同時，增加水體氧氣量，這是因為植物葉片呼出的氧氣增加靠近水表面的大氣中氧的壓力，因而促進氧氣擴散入水中。發酵作用係指在缺氧的條件下，有機碳分解成為富含能量的化合物，如甲烷、乙醇和揮發性脂肪酸等，發酵作用是藉由存在於水體和基質中的微生物作用下進行。氮化/去氮化過程是由微生物的攝取促成的，可有效去除氮(氨氮及硝酸氮)、磷及重金屬，最終使氮元素從廢(污)水中去除，其中揮發的物理過程也有助於氮的去除。磷的生物去除過程發生在生物膜內，生物膜是在基質和存在於基質的微生物發展起來的。植物從水裡吸收溶解性的營養元素和其他污染物，並將它們轉化為植物生物量。水中的營養元素和污染物通過植物體運到地下儲存器官，當植物年老和死亡時，這些物質就作為枯枝落葉積存在基質裡。

人工濕地污染物的去除過程如表2所示；人工濕地的去除機制與影響之污染物質如表3所示。

## 2.人工濕地植物種類

Tanner et al.<sup>(9、10)</sup>認為適合在人工濕地種植的植物種類應具備下述的特性：(1)生態的可接受性，即所選種的植物不是有害雜草，對周邊自然生態環境的生態遺傳整體性不會構成危害；(2)能適應當地的氣候條件，具有一定的抗病蟲害能力；(3)能忍耐污染物和水生的環境條件；(4)容易繁殖和快速生長；以及(5)淨化能力強，可以通過直接的吸收、同化和儲存或間接的通過增強微生物的轉化作用來達到去除污染物的效果。

國際水協會(International Water Association, 簡稱IWA)於2000年曾提出植物在濕地淨化水質功能中所扮演的角色，如表4所示<sup>(13)</sup>。

表2 污染物去除的過程

| 去除的污染物類型        | 污染物的去除過程               |
|-----------------|------------------------|
| 有機物以 BOD 作為測量指標 | 生物降解、沉澱、微生物吸收          |
| 有機污染物，如殺蟲劑      | 吸附、揮發、光解作用、和生物及非生物降解   |
| 氮               | 沉澱、氮化、去氮化、植物和微生物吸收     |
| 磷               | 沉澱、過濾、微生物吸收、植物吸收和揮發    |
| 病原體             | 自然死亡、沉澱、過濾、補食、紫外線降解、吸附 |
| 氨氮、亞硝酸氮和硝酸氮     | 微生物硝化作用及轉化作用，如氮化、硝化和脫硝 |
| 磷酸鹽、重金屬         | 離子交換、沉澱、吸附和植物吸收、同化作用   |
| 懸浮固體            | 沉澱、過濾                  |

表3 人工濕地的去除機制與影響之污染物質

| 機制   |          | 影響的污染物質                    | 概述   |
|--|----------|----------------------------|--|
| 物理性  | 沈澱       | P-可沈澱固體物。                  | 利用重力將固體物沈澱。  |
|  |          | S-膠體狀固體物。                  |  |
|  |          | I-BOD、氮、磷、重金屬、鈍性有機物、細菌及病毒。 |  |
| 物理性  | 過濾       | S-可沈澱與膠體狀固體物。              | 粒狀物質因水流流過介質、植物根部或魚時以機械性的方式被過濾。                         |
| 物理性  | 吸收       | S-膠體狀固體物。                  | 粒狀物間的吸引力量(凡得瓦力)。                                       |
| 化學性  | 沈澱       | P-磷、重金屬。                   | 形成不溶性的物質或與這些物質發生共同沈澱。                                  |
|  | 吸附       | P-吸附磷、重金屬。                 | 在介質或植物組織表面。  |
|  |          | S-鈍性有機物。                   |  |
| 化學性  | 分解       | P-鈍性有機物。                   | 由氧化、還原或藉由紫外線的照射將較不穩定的化合物分解或轉變。                         |
| 生物性  | 微生物的新陳代謝 | P-膠體狀固體物、BOD、氮、鈍性有機物、重金屬。  | 藉由懸浮、底棲、或依賴植物維生的微生物將膠體與可溶性有機物去除。生物性的硝化/脫硝作用。重金屬生物性的氧化。 |
|  | 植物的新陳代謝  | S-鈍性有機物、細菌、病毒。             | 有機物由植物吸收利用，根區分泌物對糞生病原體具毒性。                             |
|  | 植物吸收     | S-氮、磷、重金屬、鈍性有機物。           | 在合適的生長條件下，植物會利用這些物質。                                   |
|  | 自然衰減     | P-細菌、病毒。                   | 自然衰減、或生長環境不適合時。  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• P = 主要作用；S = 次要作用；I = 附帶作用(偶爾發生的去除效果)。</li> <li>• 新陳代謝包括同化與異化作用。</li> </ul> |          |                            |  |

表4. 植物組織在不同濕地位置中所扮演的角色

| 植物性質      | 處理機制上的角色   |
|-----------|--|
| 水面上的植物組織  | 光線衰減→抑制植物性浮游生物的生長；<br>影響微部氣候→對溫度的隔絕作用；<br>降低水面風速→避免顆粒再懸浮；<br>美學上令人愉悅的外觀；以及<br>營養物儲存。               |
| 水中的莖及葉組織  | 過濾效應→過濾大的顆粒殘骸；<br>降低水流速度→增進沉降效果、避免顆粒再懸浮；<br>提供細菌附著生長所需面積；<br>排出光合作用產生的氧→增進好氧分解；以及<br>營養物攝取。        |
| 底泥中的根及地下莖 | 提供細菌附著生長所需面積；<br>底泥表層穩定化→減少受侵蝕；<br>釋出氧增進好氧分解及硝化；<br>防止SSF濕地中礫石間隙的堵塞；<br>營養物的攝取；以及<br>釋出有機物→促進脫硝作用。 |

林瑩峰等<sup>(8、13)</sup>對於人工濕地植物的選擇，考慮普遍性及本土性、水質、浸水問題、氣候及標高、計畫目標等因素，說明如下：

### **(1) 普遍性及本土性**

人工濕地最普遍的挺水植物為莎草、蘆葦及香蒲，而最常使用的浮水植物為布袋蓮(如表5所示)，選擇具本土性植物，不僅可增加植物存活率，亦可避免因其他植物的引入，造成環境生態的另一個衝擊。在某些區域，有些植物可能是罕見缺乏的。據此，可嘗試使用濕地鄰近地區的本土型水生植物來克服此一問題。

### **(2) 水質**

流入濕地的水，若含較高之鹽度，則需選擇耐鹽性之濕地植物，此外，因水污染的問題，植物對於污染物的抗污能力也需納入考量，一方面可透過植物降解水中污染物，一方面亦可避免植物因適應不良而死亡。依據林瑩峰等<sup>(10)</sup>研究發現蘆葦的耐鹽度較香蒲高，並適合種於淡水中生長。

### **(3) 浸水問題**

不同種類之水生植物可忍受之浸水深度各異。一般而言，生長快速之挺水性植物含有較多的木質素，較能適應變動的水深，因此較適合人工濕地系統。例如蘆葦和香蒲可忍受之水深分別為0.05~0.5m及0.1~0.75m(IWA, 2000)。

### **(4) 氣候及標高**

一般而言，多年生的植物比一年生的植物更適合使用於人工濕地。然而，在溫帶地區的秋冬季節，使地面上之植物組織枯萎而冬眠，而在生長季節來臨時，地下組織又可重新生長，此種季節變化的生長特性會影響植物的功能。反觀，在亞熱帶氣候條件下，植物生長季節較長，冬眠期較短或甚至不明顯，植物的功能較不受影響。此外，人工濕地技術應用在高海拔地區時，遭遇的問題便是所使用的植物必須能夠越冬。

### **(5) 計畫目標**

污染防治是建設人工濕地的主要目標，而景觀則是次要目標，因此可選擇具美化功能的植物，如蓮花、美人蕉及鳶尾等。人工濕地若兼具水鳥棲地的功能，亦可種植提供水鳥棲息隱蔽的植物，如菱角；若是設置於農地，並考慮其作物採收功能，則可選擇種植空心菜。植物對水中磷酸鹽的去除能力。在連續監測試驗中，各種植物對於合成污水中的磷酸鹽，約在三至四天即可達到穩定的去除效果，其去除率分別為香蒲100%、空心菜98.9%、竹葉菜98.6%、水芙蓉97.7%、球花蒿草96.8%、香附86.8%。就其生長狀況及種植難易而言，香蒲、竹葉菜、空心菜及球花蒿草較佳。

表5. 台灣人工濕地常見的濕地植物種類

| 屬性 | 中名/學名  | 俗名  |
|----|--|---|
| 挺水 | 長梗滿天星 ( <i>Alternanthera philoxeroides</i> (Moq.) Griseb.)<br>曇華 ( <i>Canna indica</i> Linn.)<br>芋 ( <i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott)<br>鴨拓草 ( <i>Commelina communis</i> Linn.)<br>香附子 ( <i>Cyperus rotundus</i> Linn.)<br>荸薺 ( <i>Eleocharis dulcis</i> (Burm. f.) Trin. ex Henschel)<br>鳶尾 ( <i>Iris tectorum</i> Maxim.)<br>水丁香 ( <i>Ludwigia octovalvis</i> (Jacq.) Raven)<br>五節芒 ( <i>Miscanthus floridulus</i> (Labill.)<br>象草 ( <i>Pennisetum purpureum</i> Schumach.)<br>蘆葦 ( <i>Phragmites communis</i> (L.) Trin.)<br>戟葉蓼 ( <i>Polygonum thunbergii</i> Sieb & Zucc.)<br>野慈菇 ( <i>Sagittaria trifolia</i> Linn.)<br>三白草 ( <i>Saururus chinensis</i> (Lour.) Baill.)<br>水燭 ( <i>Typha angustifolia</i> Linn.)<br>茭白筍 ( <i>Zizania latifolia</i> (Griseb.) Stapf) | 空心蓮子草<br>美人蕉<br>青芋<br>竹葉菜<br>莎草<br>水燈心草<br>紫羅蘭<br>水燈香<br>芒草、管草<br>狼尾草<br>蘆葦<br>水聲壁草<br>水芋<br>塘邊草<br>香蒲、水蠟燭<br>茭白筍 |
| 浮水 | 布袋蓮 ( <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms.)<br>大滕 ( <i>Pistia stratiotes</i> L.)<br>菱 ( <i>Trapa bispinosa</i> Roxb.)  | 鳳眼蓮<br>水碼頭<br>菱角  |
| 浮葉 | 薤菜 ( <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk.)<br>蓮 ( <i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn.)   | 空心菜<br>蓮確、荷確  |

#### 四、結語

人工濕地在台灣近來逐漸廣泛地使用於河川及大排等地面水體水質的提昇，除因人工濕地具有去除污染物之功能，且亦兼具低初設費用、低操作維護費用、提供生態多樣性棲息地及景觀的功能。人工濕地用於廢水氮氮之去除，發生於生化需氧量較低且仍有足夠氧氣供給時。一般而言，氮氮於濕地中去除效應，植物的直接吸收或於適當 pH 值狀況下溢散於空氣。然而，硝酸鹽氮之去除主要藉濕地中微生物之脫硝作用達成，單純之化學反應考量，當硝酸鹽消失去除後，硫酸鹽將為主要之電子接受者。硝化及脫硝反應通常可在人工濕地環境中同時進行，達到去除營養鹽氮之目的。地處熱帶的台灣，人工濕地運用於微生物分解作用進而達到水質提昇具有運用潛力。

#### 參考文獻

- 1.林瑩峰，“濕地對於水資源之保育管理及永續利用?子計畫三：水產養殖廢水之人工濕地處理及循環再利用之研究【I】”，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告 (NSC88-2621-Z-041-001)，台北市(1999)。
- 2.邱文彥、楊磊、張揚祺，“陽明山竹子湖濕地水文水質之調查研究”，國家風景區管理處委託研究計畫，台北市(1999)。
- 3.Knight, R. L., “Wildlife Habitat and Public Use Benefits of Treatment Wetlands”, *Wat. Sci. Tech.*, 35(5), pp.35-43(1997).
- 4.Mitsch, W. J., “Ecological engineering-a cooperative role with the planetary life-support system. *Environmental Science*, 27 (3), 438-455(1996).

- 5.廖少威、陳世杰，“以水生植物淨化復育濕地進流廢污水微量元素之研究”，第二十五屆廢水處理技術研討會論文集，第 926-934 頁(2000)。
- 6.荊樹人、林瑩峰、錢紀銘、李得元、何茂賢、陳韋志、張弘昌，“蒸發散效應對人工溼地系統處理效能上之影響”，第二十八屆廢水處理技術研討會，第 1-138 頁，台中(2003)。
- 7.王姿文、林瑩峰、荊樹人、李得元、黃獻文、陳瑋琪、黃國銓、黃炯棋“有機性農藥-達有龍(Diuron)在人工濕地中降解之初步探討”，第二十六屆廢水處理技術研討會論文(2001)。
- 8.林瑩峰、荊樹人、李得元、王姿文、施凱鐘、張庭憲、劉皓、陳韋志，“廢水中之氮磷比對人工溼地營養鹽去除之影響”，第二十六屆廢水處理技術研討會論文(2001)。
- 9.Tanner, C. C., Sukias, J. P. S. and Upsdell, M. P., “Substratum phosphorus accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands”, *Wat. Sci. Tech*, 40(3), pp.147~154(1999).
- 10.Tanner, C. C., D'Eugenio J., McBride G. B., Sukias J. P. S. and Thompson K., “Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms”, *Ecological Engineering*, 12, pp.67~92(1999).
- 11.李黃允，“以二階段人工濕地去除生活污水中之營養鹽”，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所，高雄(2001)。
- 12.荊樹人、林瑩峰、李得元、王姿文、郭富雯、楊勝傑、黃再模，“水生植物對於污水中磷酸鹽去除效果的探討”，第二十二屆廢水處理技術研討會(1997)。
- 13.王姿文、林瑩峰、荊樹人、李得元、宋玉齡、陳欽昭、陳香瑩、簡嘉佑，“種植不同本土型水生植物之小型人工溼地淨化污水之效能比較”，第二十三屆廢水處理技術研討會(1998)。
- 14.Lee, M.A., J.S. Stansbury, and T.C. Zhang, “The effect of low temperatures on ammonium removal in a laboratory-scale constructed wetland.” *Water Environment Research*, 71(3), pp.340-347(1999).
- 15.施凱鐘、林瑩峰、荊樹人、李得元、陳韋志、李佳原，“不同類型人工溼地去除地下水硝酸鹽之特性比較”，第27屆廢水處理技術研討會論文集，台北(2002)。
- 16.Lin Y.F., Jing S.R., Lee D.Y. and Wang T.W., “Removal of solids and oxygen demand from aquaculture wastewater with a constructed wetland system in the start-up phase,” *Water Environment Research*, 74(2), pp.136(2002).
- 17.郭文健、張立弘，“生活污水之濕地處理及再利用研究”，第六屆水再生及再利用研討會，第84-91頁(2001)。