

行政院環境保護署編印

# 水質自然淨化工法 操作維護彙編

計畫執行單位：國立台灣大學生態工程研究中心

計畫執行人員：張文亮 博士、林裕彬 博士、

游進裕 博士、徐貴新 博士、徐爾烈 博士、

陳秋揚 博士、袁孝維 博士、尤少彬 博士

執行期間：95 年 02 月 7 日 至 95 年 12 月 31 日

印製年月：95 年 12 月

# 目 錄

<b>第一篇 總綱 .....</b>	<b>-1-</b>
<b>第二篇 水質自然淨化工法之簡易操作維護 .....</b>	<b>-3-</b>
2.1 前置處理作業 .....	-3-
2.2 表面流式人工濕地之簡易操作維護判斷 .....	-6-
2.3 地下流式人工濕地與植栽濾床人工濕地之簡易操作維護判斷 .....	-7-
2.4 水生植物系統之簡易操作維護判斷 .....	-8-
2.5 草溝與草帶處理工法之簡易操作維護判斷 .....	-9-
2.6 地下滲濾處理工法之簡易操作維護判斷 .....	-10-
2.7 水質自然淨化不同處理工法之操作維護一般性異常處理原則 .....	-11-
<b>第三篇 水質自然淨化工法操作維護之管理 .....</b>	<b>-13-</b>
3.1 植生處理法(Plant Treatment).....	-13-
3.1.1 表面流式人工濕地(Free Water Surface, FWS) .....	-13-
3.1.2 地下流式人工濕地(Subsurface Flow System, SFS)與植栽濾床人工濕地(Vegetated Submerged Beds, VSB) .....	-39-
3.1.3 水生植物系統(Aquatic Plant System, APS) .....	-50-
3.1.4 草溝(Grassed Waterway) .....	-64-
3.1.5 草帶(Vegetated Filter Strip) .....	-73-
3.1.6 人工浮島(Artificial Floating Island, AFI).....	-82-
3.2 土壤處理法(Soil Treatment).....	-92-
3.2.1 慢滲系統(Slow Rate Systems, SR).....	-92-
3.2.2 漫地流(Overland Flow Systems, OF) .....	-104-
3.2.3 快滲(Rapid Infiltration Systems, RI).....	-114-
3.2.4 地下滲濾(Subsurface Wastewater Infiltration System, SWIS) .....	-121-
3.3 接觸氧化法(Contact Oxidation Treatment) .....	-127-

<b>第四篇 水質自然淨化工法操作維護之原理</b> .....	<b>-141-</b>
4.1 水質自然淨化工程維護管理原則 .....	-142-
4.2 人工濕地的專家評估系統 .....	-146-
4.3 水生植物在人工濕地水質淨化功效之評估及管理 .....	-152-
4.4 人工溼地的維護與管理——人畜共染的病毒與病媒蚊 .....	-187-
4.5 人工溼地的維護與管理——蚊子 .....	-189-
4.6 人工溼地的維護與管理——老鼠 .....	-200-
4.7 人工溼地的維護與管理——福壽螺 .....	-205-
4.8 人工溼地的維護與管理——水分的管理 .....	-209-
4.9 人工溼地的維護與管理——水量量測與控制 .....	-214-
<b>參考文獻</b> .....	<b>-221-</b>

# 圖目錄

圖 1、表面流式人工濕地示意圖.....	-13-
圖 2、後曝氣處理在於使溶氧限制保持於 6mg/l.....	-28-
圖 3、香蒲為濕地主要的水質淨化植物.....	-28-
圖 4、濕地位置平面圖.....	-30-
圖 5、系統經由水流傳輸移除氮磷的速率.....	-31-
圖 6、濕地單元位置圖.....	-32-
圖 7、濕地單元配置平面圖.....	-34-
圖 8、濕地單元配置，包含一個負責前處理的曝氣池與兩個平行濕地單元.....	-36-
圖 9、濕地在各單元植栽適宜植物.....	-37-
圖 10、出流閘門結構利用水位控制達到調節水力停留時間.....	-37-
圖 11、利用橫跨濕地單元的穿孔管線來分配入流污水，上有碎石.....	-37-
圖 12、地下流式濕地(SFS)示意圖.....	-39-
圖 13、米諾的植栽濾床人工濕地系統多種不同的操作模式.....	-47-
圖 14、水生植物系示意圖.....	-50-
圖 15、加州聖地牙哥水栽試驗植物現地計畫.....	-57-
圖 16、草溝斷面示意圖.....	-64-
圖 17、草帶示意圖.....	-73-
圖 18、草帶設計示意圖.....	-79-
圖 19、人工浮島示意圖.....	-82-
圖 20、人工浮島測量位置.....	-87-
圖 21、慢速滲透系統的水力途徑.....	-92-
圖 22、慢滲系統中土地處理部份的人事需求.....	-94-
圖 23、漫地流系統示意圖.....	-104-
圖 24、快滲系統示意圖.....	-114-
圖 25、地下滲濾(SWIS)示意圖.....	-121-
圖 26、95 年度新海橋人工濕地四月份子子生物調查採樣點分佈.....	-192-
圖 27、95 年度新海橋人工濕地六月份子子生物調查採樣點分佈.....	-193-
圖 28、95 年度新海橋人工濕地九月份子子生物調查採樣點分佈.....	-193-

圖 29、水中 BOD 與蚊子幼蟲生長密度之關係 .....	-194-
圖 30、水中溶氧與蚊子幼蟲生長密度之關係 .....	-195-
圖 31、水深與蚊子幼蟲生長密度之關係 .....	-196-
圖 32、95 年度新海橋人工濕地鼠類調查採樣點分佈 .....	-204-
圖 33、水磨坑溪人工濕地之福壽螺調查與水生植物分佈情形 .....	-208-
圖 34、台北市水磨坑溪人工濕地巴歇爾水槽 .....	-214-
圖 35、巴歇爾水槽構造圖 .....	-215-
圖 36、水流剖面圖 .....	-215-
圖 37、喉道寬為 1 呎之巴歇爾水槽潛流流量校正圖 .....	-217-
圖 38、理想化無束縮之堰流情形 .....	-218-
圖 39、三角堰之截面圖形 .....	-218-

# 表 目 錄

表 1、表面流式人工操作項目與週期 .....	-16-
表 2、人工濕地操作中所建議的監測項目 .....	-25-
表 3、西傑克遜市人工濕地設計標的 .....	-27-
表 4、水質量測 .....	-29-
表 5、濕地場址 .....	-31-
表 6、濕地設計標的 .....	-33-
表 7、濕地氮磷總移除率 .....	-35-
表 8、濕地設計標的 .....	-36-
表 9、水質量測 .....	-38-
表 10、VSB 與 SFS 操作項目 .....	-41-
表 11、水生植物的操作項目與週期 .....	-52-
表 12、不同布袋蓮水池類型污泥清理頻率 .....	-54-
表 13、1987 與 88 年入流及出流水的各項水質特性 .....	-59-
表 14、各項入流廢水及出流水之水質檢測項目 .....	-62-
表 15、監控的參數及頻率 .....	-63-
表 16、草溝的植物維護項目週期 .....	-69-
表 17、草溝的維護需求 .....	-69-
表 18、預估維護經費 .....	-72-
表 19、草帶的操作項目與週期 .....	-77-
表 20、草帶的維護項目 .....	-77-
表 21、人工浮島的分類 .....	-83-
表 22、人工浮島的操作項目與週期 .....	-85-
表 23、施用污水典型監測計畫表 .....	-96-
表 24、蓄水池流出物監測 .....	-98-
表 25、農地場址的土壤監測 .....	-99-
表 26、農業地區的植被監測 .....	-100-
表 27、植物採樣－農地類型和植物部位 .....	-100-
表 28、慢滲的操作項目與週期 .....	-103-

表 29、漫地流的操作項目與週期 .....	-111-
表 30、以農業速率或低於農藝速率施用有機汙泥的典型場址監測需求...	-116-
表 31、液態有機汙泥的表層施用法及設備 .....	-118-
表 32、液態有機汙泥的表層下施用法、施用特性及限制 .....	-118-
表 33、脫水有機汙泥的施用法與設備 .....	-118-
表 34、快滲的操作項目與週期 .....	-120-
表 35、地下滲濾的操作項目及週期 .....	-124-
表 36、去氮除磷生物處理操作參數 .....	-129-
表 37、生物除氮除磷單元異常現象與處理對策 .....	-130-
表 38、磷去除不良之原因與對策 .....	-130-
表 39、氮去除不良之原因與對策 .....	-131-
表 40、滴濾池異常現象及處理對策 .....	-134-
表 41、原水濃度與接觸材間隔 .....	-135-
表 42、接觸曝氣法異常原因及對策 .....	-137-
表 43、接觸氧化操作項目與週期 .....	-137-
表 44、監測的項目與頻率 .....	-145-
表 45、腐生系統評估水域生態系統 .....	-147-
表 46、特倫特生物指數計分系統 .....	-150-
表 47、香蒲在水耕液中根長的分佈機率 .....	-153-
表 48、水生植物低孔隙率栽種對水中氮磷的淨化 .....	-157-
表 49、台北縣新海橋人工濕地水生植物對自然變動環境之適應 .....	-160-
表 50、水生植物混種與單一種類在水中磷之吸收 .....	-162-
表 51、水生植物混種與單一種類在水中氮之吸收 .....	-162-
表 52、新海橋人工濕地蘆葦之溶氧傳輸 .....	-165-
表 53、美國工兵署推薦人工濕地水生植物物種 .....	-166-
表 54、台灣人工濕地不同水質特定區域經常出現的水生植物 .....	-168-
表 55、新海橋人工濕地的入、出流量與水質 .....	-194-
表 56、新海橋人工濕地水文、水質因子與蚊子幼蟲密度之關係 .....	-194-

表 57、人工濕地優勢種水生植物生育與對應水域蚊子幼蟲生長密度調查	-197-
表 58、19 處台灣人工濕地至 2006 年止其操作運轉過程對水質自然淨化	-198-
表 59、新海橋人工濕地鼠類、植生與水文之關係.....	-203-
表 60、2005 年 6 月水磨坑溪人工濕地福壽螺卵與植物、水深之關係 .....	-206-
表 61、2005 年 8 月水磨坑溪人工濕地福壽螺卵與植物、水深之關係 .....	-207-
表 62、台北新海橋人工濕地水生植物蒸散係數 .....	-211-
表 63、台灣人工濕地的水量平衡 .....	-213-
表 64、不同規格之巴歇爾水槽流況類型 .....	-216-
表 65、不同規格之巴歇爾水槽自由流公式相關係數 .....	-216-
表 66、巴歇爾水槽喉道大於 1 呎潛流流量校正係數 .....	-217-

## 照片目錄

照片 1、菖蒲.....	-170-
照片 2、芋頭.....	-170-
照片 3、異花莎草.....	-171-
照片 4、覆瓦狀莎草.....	-171-
照片 5、碎米莎草.....	-172-
照片 6、毛軸莎草.....	-172-
照片 7、假香附子.....	-173-
照片 8、稗.....	-173-
照片 9、鱧腸.....	-174-
照片 10、布袋蓮.....	-175-
照片 11、水鱉.....	-175-
照片 12、大安水蓑衣.....	-176-
照片 13、空心菜.....	-176-
照片 14、燈心草.....	-177-
照片 15、李氏禾.....	-177-
照片 16、青萍.....	-178-
照片 17、水丁香.....	-179-
照片 18、台灣水龍.....	-179-
照片 19、田字草.....	-180-
照片 20、水竹葉.....	-180-
照片 21、粉綠狐尾草.....	-181-
照片 22、蓮花.....	-181-
照片 23、浮葉型的苔菜.....	-182-
照片 24、圓葉節節菜.....	-182-
照片 25、田蔥.....	-183-
照片 26、蘆葦.....	-184-
照片 27、翼莖闊苞菊.....	-184-
照片 28、紅蓼.....	-185-

照片 29、水毛花.....	-185-
照片 30、莞草.....	-186-
照片 31、香蒲.....	-186-
照片 32、台北縣渡南橋人工濕地三角堰.....	-220-
照片 33、台北縣大漢溪心海橋人工濕地三角堰.....	-220-

## 第一篇 總綱

行政院環境保護署自民國 91 年起，針對河川水質污染整治方面，在順應世界之環境永續發展潮流，與應用生態工程淨化水體水質興起之下，期在下水道建設完成前應急處理，可以減低污染量，並落實環境保育之目的，引進歐、美、日本各國已有相當程度研究之成果報告與施行技術之水質自然淨化的不同工法，例如植生處理、土壤處理、接觸氧化等工法，並陸續在台灣地區建置不同水質自然淨化工法案例場址，而以表面流人工濕地建置場址為最多。

然因著國內獨特的氣候特性、地質與地貌、植物種類等因素，無法全然採用國外設計參數以規劃設計水質自然工法場址，亟須使用國內水質自然淨化工法之本土化參數為參考，然這些本土化的設計參數，尚需要透過國內學者專家進行多方面研究，使設計參數更趨符合，也因此相關本土化設計參數尚未完整以前，為了應因目前現階段已建置完工場址之操作維護需要，行政院環境保護署於 93 年度針對美國環保署、陸軍工兵團，日本等出版的各項設計手冊以及重要內容為主，加上國內水質自然淨化工法的論文及規劃報告彙整，進行各工法之整理與分析歸納，完成第一版「水質自然淨化工法操作維護彙編」內容，提供水質自然淨化工法之操作維護者使用參考。並在民國 95 年進行該彙編的增修訂定內容，致使該彙內容更趨本土化完整性，以落實國內對於水質自然淨化不同工法之操作維護管理，以確實達到水質自然淨化的效益為依歸。

在 95 年度本彙編增修訂定內容共計四篇，除了本篇「總綱」，說明彙編編列與修訂目的，以及規範使用內容目標之外，其三篇分別是：

第二篇為「水質自然淨化工法之簡易操作維護」篇，主要分為「前置處理作業」一以說明維護操作前應注意的事項內容，以及不同處理工法(包括表面流式人工濕地、地下流式人工濕地與植栽濾床人工濕地、水生植物系統、草溝與草帶處理工法、地下滲濾處理工法)之簡易操作維護判斷內容，並針對場址異常現象提出「水質自然淨化不同處理工法之操作維護一般性異常處理原則」內容。

第三篇為「水質自然淨化工法操作維護之管理」篇，依據三大類十一項不同處理工法分類說明操作、維護管理與監測項目作法，而其工法類別內容分為，分別在植生處理工法方面，有表面流式人工濕地(FWS)、地下流式人工濕地(SFS)與植栽濾床人工濕地(VSB)、水生植物系統、草溝、草帶、人工浮島(AFI)計六項；在土壤處理工法方面，有慢滲系統(SR)、漫地流(OF)、快滲(RI)、地下滲濾(SWIS)計四項；以及接觸氧化工法方面。

第四篇為「水質自然淨化工法操作維護之原理」，依據台灣地區性條件，分類章節說明本土化之操作維護原理內容。其內容分別為：水質自然淨化工程維護管理原則、人工濕地的專家評估系統、水生植物在人工濕地水質淨化功效之評估及管理、人工濕地的維護與管理，其中人工濕地的維護與管理內容，包括；人畜共染的病毒與病媒蚊、蚊子、老鼠、福壽螺、水分的管理、水量量測與控制之說明。

本彙編之近程目標，並非訂出台灣地區的水質自然淨化工法操作維護技術規範(準則)，而是提供各場址維護操作人員參考使用，遠程之目標則為水質自然淨化工法操作維護技術規範之基礎。因此在這基礎之下，本彙編的內容是針對水質自然淨化不同處理工法之操作維護管理的項目內容與方法作說明，並詳細記載各工法之操作維護原理以及應注意事項，以提供各界人士在進行場址操作維護之依據。至於水質自然淨化不同工法處理的特性、設計參數、案例說明等，請參閱「水質自然淨化工法彙編」。

## 第二篇 水質自然淨化工法之簡易操作維護

### 2.1 前置處理作業

在進入場址維護操作作業以前，應該針對該場址建置特性要有所瞭解，以確認可以依據操作內容進行維護管理。

#### 2.1.1 確認場址工法類型

首先需確認場址操作系統，是以何種工法進行水質自然淨化運作。由於水質自然淨化工法有許多不同類型工法，其定義也有所不同：

1. 表面流式人工濕地(Free Water Surface,FWS)：係由水池、土壤與水生植物等組合，藉由各項機制改善水質之工法。
2. 地下流式人工濕地(Subsurface Flow System, SSF)：係使用柱塞流流體模式模擬水流在填充濾材傳輸的路徑，並藉由過濾材的接觸機制，過濾水中顆粒及轉化水中的營養鹽。
3. 植栽濾床人工濕地(Vegetated Submerged Beds, VSB)：與地下流式人工濕地有相同機制工法，然所不同係在濾材上方種植水生植物。
4. 水生植物系統(Aquatic Plant System,APS)：為利用水生植物特性處理工業或家庭廢水的系統。
5. 草溝(Grassed Waterway)：係種植草類以防止沖蝕之土築溝渠，透過植物性緩衝，產生之沈澱及過濾等機制淨化水質。
6. 草帶(Vegetated Filter Strip)：亦稱植生緩衝帶，與草溝類似，主要是用來接受地表逕流進行薄層流處理，透過林木及草帶增加水流停滯時間，提高營養鹽去除功效。
7. 人工浮島 (Artificial Floating Island, AFI)：為利用各種材料組合基座，並在基座上鋪設水生植物，使其浮動於水體環境，建造成人工棲息地，來改善水質、美化景觀與保護水岸線等
8. 慢滲系統 (Slow Rate Systems, SR)；為透過植生草地介質，經過蒸發散消耗、土壤滲漏與逕流再回收等機制改善水質。
9. 漫地流 (Overland Flow Systems, OF)；係污水流經過土壤表面之過濾作用，並透過平緩坡度形成薄面流機制作用來改善水質。
10. 快滲系統(Rapid Infiltration Systems, RI)：係由滲濾單元(如碎石等)組成，以淹灌模式來淨化水質。
11. 地下滲濾 (Subsurface Wastewater Infiltration System, SWIS)：係透過污水經由土壤滲濾至地下水層的過程中，經由各種物理、化學、及生物機制將污染物質的吸附及分解，

以達到淨化水質目的。

12. 接觸曝氣法(Contact Aeration)：係於曝氣槽內裝置濾料，經過充氧的污水以一定速度流經濾料，使生物膜附著於濾料表面，在生物膜微生物的作用下，污水得以淨化。

### 2.1.2 確認場址系統啟動的範圍

當場址工程施工完成後，即可進入場址營運操作系統的啟動。然而因每處場址建置範圍及設計處理機制有分厭氧段、好氧段、或開放水域區、密植區、生態池、沉澱池、集水井等不同，對於維護操作管理者在啟動系統時，需尤加注意各單元系統間聯接過程以及方式，並確認場址系統啟動之後，水的流動是否依建置系統各單元程序淨化水質，以作為設計上的改善。

而確認場址系統啟動的範圍，應從場址引取水源處開始，至場址末端排放水源為止之範圍內系統。

### 2.1.3 確認場址分段啟動處

為了要穩定場址水源供應來源，以使場址能夠正常營運操作，對於場址內水源流量控制設置處，其操作維護人員應要確認其位置，以進行水量分段調節控制。

而確認場址分段啟動處，是確認場址內所設置水量控制開關位置處，以進行水量調配功能。

### 2.1.4 確認場址例行性操作維護與監測項目

由於每處場址設計建置作法的不同，對於維護操作與監測項目與頻率也不同，宜參考各場址之維護操作手冊，並依據其場址維護操作手冊內容，進行確認場址例行性操作維護與監測項目內容，否則至少應依據本彙編不同工法之操作維護管理與監測項目內容與週期頻率進行確認。

### 2.1.5 場址操作維護注意事項

1. 缺乏場址入流量的測量，會難以管理場址內水分的收支平衡。因場址在供應水量進行水質自然淨化上，對於是否引取過多或過少都將無法了解，並進而無法知道場址的水力停留時間及水質淨化改善對於污染移除量多寡，故應加增設具開放性之量水堰或量水槽。
2. 對於水域之底泥淤積的問題，因國內在引灌原水上懸浮固體濃度太高，且大部份水體都遠超過歐、美、日各國之水中懸浮固體濃度，將加速處理單元淤積、惡臭，應加設沉澱池前處理。
3. 水生植物過密的問題，優勢種水生植物生長太快，以致於植物生長過密，造成水質

厭氧，影響 BOD 淨化成效，增加 S.S. 負荷量與產生脫氧效應。每年應維持 4~5 月，10~11 月移除草一次。

4. 底泥襯砌容易漏水的問題，無論使用皂土、黏土層晶化、不透水布等方法處理，台灣人工濕地底泥滲漏量平均仍為 59.65mm/day，相當於砂質地滲漏量。維護期間持續引水，水中顆粒的天然沉降讓底部細質化(或稱晶化)，或人工在水中踩踏，增加密質化與促進底部排出空氣(尤其初設場址)。
5. 生物性防治的問題：為了避免福壽螺過多，深水處宜置青魚、鱧魚，淺水處宜置烏龜，為了避免蚊子過多，水保持流動，水生植物生長不宜過密，並置入小型飼蚊魚類，如青鱒、大肚魚、馬口魚、鬥魚等。
6. 飲水裝置的損毀：洪水、暴雨後對引水設施的維護、檢查，台灣人工濕地多用馬達抽水，易受洪水沖毀，暴雨激增 S.S. 淤塞馬達，所以抽水馬達損毀，無法操作，幾乎是所有人工濕地所面臨的困擾，故有備用馬達。
7. 排水設施的改善：良好的人工溼地會設計兩個以上的排出口，以供清淤使用。例如水磨坑溪的人工溼地、舊鐵橋人工溼地，甚至排出口還有不同排水高度的排出孔，以使用不同流速去排不同深度的淤泥，因此，每 3-5 年排泥處理是必要維護。
8. 植物殘枝與淤泥的的處置：良好的濕地管理是將植物、淤泥現場乾燥後，植物在現址陸域就地掩埋，淤泥是製成人工島、護填邊坡，而非隨意棄置，因此再維護上需要預先考慮遺棄場址與方式。
9. 持續性水量、水質與生物性監測：主要包括每月一次水量( $m^3/day$ )；水質：BOD<sub>5</sub>、S.S.、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、TP 等項目，與每季蚊子的觀察，並且將監測結果傳至環保署。

## 2.2 表面流式人工濕地之簡易操作維護判斷

操作維護判斷項目	內容	是否符合		建議處理原則	
		是	否		
例行性監測操作項目	(1).每日是否測量與紀錄入流及出流處的流量，並檢查進水口是否被堵塞情形。			記錄回報至_____單位。	
	(2)每週是否監測其入流與出流之水溫、溶氧、pH、導電度記錄。			記錄回報至_____單位。	
	(3).每月是否監測入流與出流之水中生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )、懸浮固體(SS)、氯離子(Cl <sup>-</sup> )、硝酸鹽(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )、氨氮(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )、總凱氏氮(TKN)、總磷(TP)濃度記錄。			記錄回報至_____單位。	
	(4).是否有定期追蹤水域內水生植物種類與移除外來侵略物種。			每_____一次。	
	(5).是否有定期追蹤水域內水深記錄。			每_____一次。	
維護管理項目	結構硬體設施	(1).是否有定期追蹤結構硬體設施裂縫情形。場址經常產生裂縫之處為_____			(1).每_____追蹤檢查一次。 (2).建議應立即施作修補動作，以防止後續昂貴的維修費用。
		(2).是否有定期施作底泥淤積的清除，以增加水域水體體積。			每_____施作一次水域內底泥清除工作，並將清淤出來底泥運送至_____地方，進行_____處理
		(3).是否有定期維護機具設備保養工作			建議應建立機具輪休保養機制，以延長機具使用壽命。
	水生植物管理	(1).是否有定期應調整水域內各系統單元水位深度，以維持水生植物的生長			(1).每_____追蹤檢查一次。 (2).建議應維持水面深度至少 30cm。
		(2).是否有定期施作水域內之水生植物撈取與砍伐作業			(1).每_____施作檢查一次。 (2).建議應每年至少施作兩次水生植物移除作業，最好在 4~5 月份以及 10~11 月份。
	生物管理	(1).是否有定期捕捉場址內鼠類、流浪狗等動物			(1).每_____施作檢查一次。 (2).建議應定期捕捉鼠類等動物，避免危害人體傳染病滋生。
	蚊蟲管理	(1).是否有定期(至少每週一次)監測水域內蚊蟲調查作業			(1).每_____施作檢查一次。 (2).建議應增加水的流動性，其次可在水域內飼養三星攀鱸。
	氣味管理	(1).場址是否有惡臭的味道			(1).建議宜增加水的流動性，並且定期處理水域內已死亡的水生植物移除、和底泥清除的工作。

### 2.3 地下流式人工濕地與植栽濾床人工濕地之簡易操作維護判斷

操作維護判斷項目	內容		是否符合		建議處理原則
			是	否	
例行性監測操作項目	(1).每日是否測量入流及出流處的流量，並檢測入出水流是否被碎屑物質堆積情形。				記錄回報至_____單位。 若有阻塞現象，建議進行反沖洗作業。
	(2)每週是否監測其入流與出流之水溫、溶氧、pH、導電度記錄。				記錄回報至_____單位。
	(3).每月是否監測入流與出流之水中生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )、懸浮固體(SS)、氯離子(Cl <sup>-</sup> )、硝酸鹽(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )、氨氮(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )、總凱氏氮(TKN)、總磷(TP)濃度記錄。				記錄回報至_____單位。
	(4).是否有定期收割與補植植物。				每_____一次。
	(5).是否有定期調控與記錄水位。				每_____一次。
維護管理項目	結構硬體設施	(1).是否有定期追蹤場址土體被動物挖洞或木本植物生長破壞之裂縫情形。			(1).每_____追蹤檢查一次。 (2).建議應立即施作修補動作，以及捕捉動物或移除植物措施，以防止場址日後造成嚴重漏水現象的產生。
	植物管理	(1).是否有定期應調整場址內系統單元水位深度，以維持植物的生長			(1).每_____追蹤檢查一次。 (2).建議至少應淹沒鋪設礫石層高度。
		(2).是否有定期施作場址內植物收割與移除作業			每_____施作檢查一次。
	生物管理	(1).是否有定期捕捉場址內鼠類、流浪狗等動物			(1).每_____施作檢查一次。 (2).建議應定期捕捉鼠類等動物，避免危害人體傳染病滋生。
	蚊蟲管理	(1).是否有定期(至少每週一次)監測場址內蚊蟲調查作業			(1).每_____施作檢查一次。 (2).建議應保持水的流動性。
	氣味管理	(1).場址是否有惡臭的味道			(1).建議宜增加水的流動性，並且定期處理場址內已死亡的植物移除的工作。

## 2.4 水生植物系統之簡易操作維護判斷

操作維護判斷項目	內容	是否符合		建議處理原則
		是	否	
例行性監測操作項目	(1).場址是否有前處理設施，如初沉池、過濾池、沉澱池。			若無前處理設施，建議在水體進入水生植物系統進行水質淨化前，宜加設之，以有效降低水中雜質與沉澱污泥。
	(2).每日是否測量入流及出流處的流量與各系統單元水深記錄，並檢查各單元系統內進水口是否被堵塞情形。			記錄回報至_____單位。
	(3)每週是否監測其入流與出流之水溫、溶氧、pH、導電度記錄。			記錄回報至_____單位。
	(4).每月是否監測入流與出流之水中生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )、懸浮固體(SS)、氯離子(Cl <sup>-</sup> )、硝酸鹽(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )、氨氮(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )、總凱氏氮(TKN)、總磷(TP)濃度記錄。			記錄回報至_____單位。
	(5).是否有定期追蹤水域內水生植物種類與移除外來侵略物種。			每_____一次。
維護管理項目	硬體設施	(1).是否有定期追蹤結構硬體設施裂縫情形。 場址經常產生裂縫之處為_____		(1).每_____追蹤檢查一次。 (2).建議應立即施作修補動作，以防止後續昂貴的維修費用。
	污泥管理	(2).是否有定期施作底泥淤積的清除，以增加水域水體體積。		每_____施作一次水域內底泥清除工作，並將清淤出來底泥運送至_____地方，進行_____處理
	植物管理	(1).是否有依據場址位置特性條件(如高灘地、鹽份地等)，選擇植物種類		(1).具能承受暴雨特性之水生植物種類為：大安水蓼衣、孛齊、水丁香、水毛花、蘆葦與香蒲 (2).具承受強風洪水特性之水生植物種類為：大安水蓼衣、過長沙、香蒲、孛齊、蘆葦 (3).具能耐鹽特性之水生植物種類為：蘆葦與香蒲 (4).具輸氧特性之水生植物種類為：蘆葦與香蒲
		(2).是否有定期施作水域內之水生植物撈取與砍伐作業		(1).每_____施作檢查一次。 (2).建議應每年至少施作兩次水生植物移除作業，最好在 4~5 月份以及 10~11 月份。
	蚊蟲管理	(1).是否有定期(至少每週一次)監測水域內蚊蟲調查作業		(1).每_____施作檢查一次。 (2).建議應增加水的流動性，其次可在水域內飼養三星攀鱸。

## 2.5 草溝與草帶處理工法之簡易操作維護判斷

維護項目	內容	是否符合		建議處理原則
		是	否	
一般情形	維護通道路線堵塞。			清理堵塞以便通行順暢。
	任何設施（包含分流設施與前處理設施）未能依預計之設計運作。			以預行認可設計運作需求作修補。
	垃圾與廢棄物累積於設施。			清理設施的廢棄物與垃圾。
	於暴雨小於水質設計暴雨時，水流繞過設施。			調整來確保水流不會繞過設施。
	損害的結構部分。			補修或替換任何損害的結構部分。
	出入流管線或格柵被沈積物與垃圾阻塞。			移除阻塞物使出入流設施通暢。
	有毒或危險的植物在設施內或周圍生長，可能對維護人員與公眾構成危險。			使用非化學方法或是其他管理機關許可的方法從受影響區域移除有毒與危險的植物。修補並適當地再植栽任何受侵擾區域至原本狀況，甚至改進設計規格。必須時以適當並安全使用特定廢水處置方法處理。
	顯示有石油、汽油或其他污染物。			依慣例實行安全方式移除石油、汽油或其他污染物。
前處理設施	沈積物污水坑工作人員測量有15cm高的垃圾與沈澱物。			移除沈澱物。必須時以適當並安全使用特定廢水處置方法處理。
	水流流動不穩定或阻塞，導致水流通過整個草溝流動不均勻分佈。			調整水流擴散與清理，以便水流能穩定通過整個草溝。
處理區域	任何部分處理區域表面有達5cm高的沈澱物堆積。			移除草溝表面上的沈澱物。必須以適當並安全使用特定廢水處置方法處理。完成時，草溝應從邊對邊調整並向出流處自由地排水。必要時應再植栽。
	少量的連續水流通過草帶，即使沒有週週降雨，草溝底部的渠道有侵蝕與泥濘。			沿著草溝區間排放慢速流，或繞過沿著草溝的基流。修護草溝處理區域的侵蝕與渠道損壞。
	暴雨期間污水停滯於草溝並無法順利排放。			移除沈積物或垃圾阻塞、修正草溝從入流口至出流口的坡度、移除水堤阻塞、增加地下水排水或轉換至潮濕的草地。
植栽	超過10%的裸露面積。			裸露地點應立即穩定並再植栽。假若許可，改以適合土壤的植物重新植栽。
	植物過度生長（超過25cm）；危險的植物開始侵入。			修剪高度至8cm左右並移除之，清理野草。
	因為缺乏光線或是落葉掩蓋，致使處理區域植物生長不易。			假若能夠，修剪植物過度突出懸橫部分，移除鄰近斜坡的灌木植物。
通道路徑	出現垃圾碎片可能危害運輸工具的輪胎（玻璃或金屬）。			移除會損傷輪胎的垃圾。
	沈陷、坑洞、土地鬆軟、凹痕或其他表面缺失呈現，阻礙維護通道。			回復路面為均勻平滑，沒有沈陷、坑洞、土地鬆軟、凹痕跡象。
	路面植栽高度超過15cm或阻礙維護通道。			清理或修減至5cm高並使維護通道順暢。
	存在阻礙物使通道寬度縮減低於365cm。			清理阻礙物使通道維持至少365cm寬。
	路面沈積物的增長。			移除沈積物使符合設計規範。
	30cm高的路基有超過20cm寬、15cm深的土壤沖蝕。			穩定並修護邊坡，使道路免於侵蝕並與周圍道路相吻合。

## 2.6 地下滲濾處理工法之簡易操作維護判斷

操作維護判斷項目	內容		是否符合		建議處理原則
			是	否	
例行性監測操作項目	(1).操作維護人員是否確認對於場址內規範操作維護計畫書之各項維護項目內容已熟悉。				
	(2).每日是否針對出入流控制施作入流及出流流量量測，並比對設計流量。				設計流量為：_____。 記錄回報至_____單位。 若有污泥、落葉樹枝與圾垃等阻塞現象，建議立即清除。
	(2).每週是否監測其入流與出流之水溫、溶氧、pH、導電度記錄。				記錄回報至_____單位。
	(3).每月是否監測入流與出流之水中生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )、懸浮固體(SS)、氯離子(Cl <sup>-</sup> )、硝酸鹽(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )、氨氮(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )、總凱氏氮(TKN)、總磷(TP)濃度記錄。				記錄回報至_____單位。
	(4).是否確認各系統單元間操作記錄，尤其是輪替操作情形。				記錄回報至_____單位。
	(5).是否定期追蹤各操作系統單元內之水體水位深度。				(1).每____追蹤檢查一次。
維護管理項目	結構設施	是否有定期追蹤場址內截流設施、厭氧槽、土壤濾床、與電氣設備設施是否有損壞與被破壞情形。			(1).每____追蹤檢查一次。 (2).有關電氣設備維護建議，宜每季或每年請廠商進行整體系統測試； (3).有關土壤濾床維護建議，宜提供穩定水量的供應，並定期規劃單元輪休操作機制，以為恢復場址滲濾能力。 (4).有關厭氧槽處理宜每年施作一次抽取槽內污泥作業。

## 2.7 水質自然淨化不同處理工法之操作維護一般性異常處理原則

一般操作維護人員無論是管理哪種類型水質自然淨化工法，最終目的是期待設施場址能夠維持正常運轉操作，使供應之污水能夠透過場址設施以達到水質自然淨化，改善水體的品質，因此對於遇到操作發生異常現象時，除了參考場址操作維護手冊以外，對於一般性異常處理原則，可以參考以下六點：

1. 在洪水時期，需要有一個類似洩洪道設施，讓洪水可以通過簡易的洩洪道，迅速洩洪，降低對場址直接的沖擊；
2. 在洪水來臨前，宜將抽水馬達取走。若來不及收取，應在洪水退洪之後，迅速檢查馬達狀況，是否已損壞與需更新措施，並同時也需檢查每個單元系統間聯絡管路以及引水管是否有阻塞現象，並施作進一步的清理工作。
3. 乾旱時期，宜加強抽水馬達的抽水補注與取水，以維持場址供應水量的穩定；
4. 水裡濁度偏高時期，宜考慮在入水口前加設沉澱設施；
5. 接近河川下游地區之人工濕地，在海水倒灌期間，應停止抽水，以防止場址內土壤的鹽化產生；
6. 禽流感期間，應在場址人員入口週圍處豎立招牌，並請民眾能與濕地內野生動物保持距離；而在登革熱發病時期，宜加強人工濕地排水管理，並且施作砍伐植物作業，以減少植物生長密度。



## 第三篇 水質自然淨化工法操作維護之管理

### 3.1 植生處理法 (Plant Treatment)

#### 3.1.1 表面流式人工濕地(Free Water Surface,FWS)

表面流式人工濕地由水池、土壤與水生植物等組合，藉由各項機制改善水質。整個系統的人員運作可簡單分為操作項目、維護管理與監測三個項目，敘述如下：

- 操作項目
  - ✓ 系統啟動操作
  - ✓ 例行操作
  - ✓ 水文操作
- 管理維護項目
  - ✓ 植物管理維護
  - ✓ 濕地結構管理維護
  - ✓ 生物管理維護
  - ✓ 蚊蟲管理
  - ✓ 氣味管理
  - ✓ 特殊管理維護
- 監測

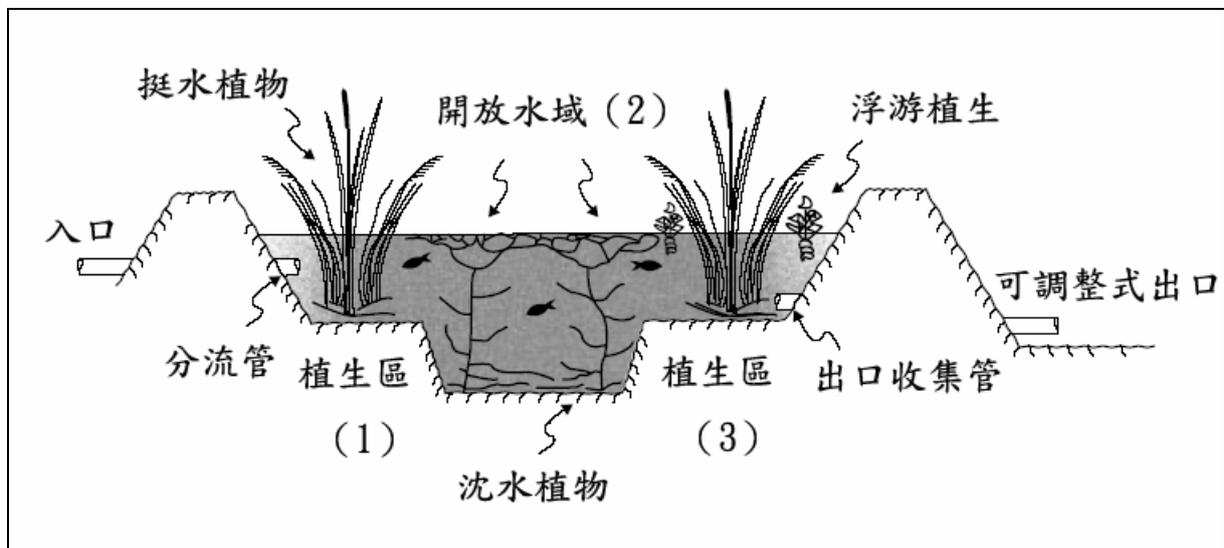


圖 1 表面流式人工濕地示意圖 (資料來源：USEPA, 2000)

#### 一、操作項目

表面流式人工濕地建造完工後，若以時間做為區分，則操作方式可區隔有系統啟起操作維護與一般例行操作維護；以操作項目區隔則有水文操作維護、監測操作與其他特殊操作。總括而言如下所示：

- 系統啟動操作
  - ✓ 廢水引入與生態體系培育；
  - ✓ 保持水位與植物等高；
  - ✓ 提高入流負荷與水位，以提升濕地處理能力；
  - ✓ 定期檢測系統。
- 例行操作計畫
- 水文操作
  - ✓ 水位操作；
  - ✓ 流量控制。

### (一) 系統啟動

表面流式人工濕地硬體工程完成後，需要長期的操作時間(數月)，才能逐漸展現污染淨化、景觀綠美化及生態保育上的效能。因此，時間為溼地技術的重要參數，將溼地系統的系統啟動操作階段，敘述如下：

- 啟動初期階段
  - ✓ 廢水引入與生態體系培育；
  - ✓ 保持水位與植物等高；
  - ✓ 提高入流負荷與水位，以提升濕地處理能力；
  - ✓ 定期檢測系統。

#### 1. 廢水引入與生態體系培育

人工濕地系統完成之後，逐步引進生活污水，開始培育溼地生態。人工溼地中之生態系統(包括植物覆被、生物膜、植物根系及床體空隙等)往往需經幾個月，或甚至幾年後才會達到穩定狀態。待濕地各處理污水的相關機制、環境穩定後，才能顯現穩定去除效能。亦即，溼地系統在連續入流後，需一段時間適應廢水性質、操作條件，才能獲得穩定之效能，此時間稱為系統起動期(start-up period)。

表面流人工濕地在植被與草墊層尚未建立成熟之前，此系統將不會達到預計中的最佳效能。而植被成熟所需時間的長短，受限於「植被栽種密度」和「氣候季節」因素；如在春季以高密度的方式栽種植物，那麼在次年生長季結束前，植群將會達到完全成熟的狀態。又如在較冷地區的秋季末期以低密度的方式栽種時，欲達到成熟狀態恐需花費三年以上的時間。

#### 2. 保持水位與植物等高

在理想狀態下，表面流人工濕地的系統啟動，應在植被成熟後六週才能開始作用，此段時間是為使植栽能夠順利生長並適應濕地水位高度。但如果在時程上無法等待六週，那麼至少應該把水位高度控制在植被高度左右，以維持植被生長；不過如此仍然會使新生植物死亡，並延長濕地系統到達最佳成效的時間。

#### 3. 提高入流負荷與水位

啟動初期，利用水流來控制系統，逐漸將水位提高至預期的水位高度，目的為使新生植被的上層能夠挺出水面繼續生長。如果進入濕地系統的水流含有大量污染物質（如化糞池的排水），那麼就需要將污水先行稀釋或是以再循環的方式，降低污染物質，直到植被完全的成熟為止。

#### 4. 定期檢測系統

在系統啟動期間，操作者需每週檢查濕地狀態數次。檢查項目包含植物的健康與生長程度、土堤或壩體結構是否有問題、水位是否需要調整、以及蚊蟲的孳生狀況。在表面流式人工濕地系統內，某些植生無法生長的大面積區域，可以再種植大型水生植物 (macrophytes) 以避免逆循環 (flow of short-circuiting) 發生。另外，在啟動時期所累積的觀察經驗，將有助於決定系統成熟後監測的頻率。

如果人工溼地系統的起始階段進入冬季，則系統達到穩定狀態的時間需要較長。反之，若進入夏季則系統較快穩定。

### (二) 操作維護計畫擬定

在濕地系統的設計階段，應該先編寫濕地的「操作與維護計畫」來確保濕地的品質與功能；但在後續進行操作的過程中，可能會發現實際系統與原計畫有所出入，此時可以根據系統實際的特質來加以修改。「操作與維護計畫」需包含各項細節的時程安排，如：河堰與濕地的整理、溝渠的除草、整體系統的檢查與監測等；同時計畫也需包含上述各項細節的效能評估與維護上所需的金額。事實上人工溼地系統需要操作及維護的項目並不多。一份完整的操作維護計畫需注意下列事項：

- 控制水深設施的設計
- 清理與維護各項設施的內外層、調節閘與監測設備的時程表
- 檢查堤岸與其他結構物損壞情形的時程表
- 監測沈積物堆積厚度
- 水位的高低範圍，含水面波動時可接受的水位範圍
- 建立與運作濕地的過程中，可能需要由外界水源的補給，以確保適當的水位。
- 安排最便利且比較連續的維護時程表，如果在設計中有污水處理的部分。「短時間內高流量的污水」排入濕地會比「低流速、連續流動的污水」，對濕地造成較高的損耗與破壞。
- 如果在濕地中有「水流進出濕地」、「水流回收或改向」、或是「水流循環於各單元」等設計，那麼在操作維護計畫中，也需包含這些細節的維護時程表。

### (三) 水文操作

濕地環境成熟穩定後，可以變動與提高引進大量污水處理，可試驗濕地污水效能能力與極限。改變入流流量操作，變化不同入流等操作，以紀錄與觀察濕地效能在各項水文與環境操作因素影響下，人工濕地對於污水處理的能力變化。而水文操作敘述下：

- 水位操作；
- 流量控制。

### 1. 水位操作

在表面流式的濕地中，水流必須流經所有濕地的表面才能達到功效；所以應定期檢查濕地內水流是否流動，碎屑沈積物是否堵住水流、以及水流是否在某區域中停滯。另外，濕地內適當的水深與流動是極為重要的因子。停滯的水流會降低污染物的移除，同時也會增加病媒蚊的孳生機率，並造成美學上的不雅觀。所以水流與水位亦需進行定期的檢查操作人員需至少每日觀察進水口是否堵塞，並加以清理。

在冬季的時候，水位高度可以提高一些，以增加水流滯留時間並避免植物凍死。

### 2. 流量控制

流量控制於人工溼地可用來控制系統放流水水質及處理效能的方法。入流量大小影響水力停留時間、污染物負荷及水力負荷，以至於決定放流水水質及處理效能良窳。在系統啟動階段時先以較小的負荷操作，控制較小的入流；隨著淨化機制的穩定而逐漸增加入流量。

表面流式人工溼地水深控制於約 0.5m，而生態池則是由四周往中央處逐漸加深至最深處約 1.2m，但可能引起安全上之疑慮。因此，建議標示水深並建立警示標誌。

表 1 表面流人工操作項目與週期

操作項目	週期
測量或估算入流及出流位置的流量，並檢查進水口是否堵塞	每日一次
溫度、溶氧、pH、導電度	每週一次
生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )、總懸浮固體物(TSS)、氯離子(Cl <sup>-</sup> )、氮氧化物(NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> +NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )、氨(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )、總凱氏氮(TKN)、總磷(TP)	每月一次
植被檢查，移除外來侵略物種	定期
檢查水流水位，避免增加病媒蚊的孳生機率及美學上的不雅觀	定期

(資料來源：EPA, 2000)

## 二、維護管理

表面流式人工濕地的維護管理妥善，能夠延長濕地系統處理廢水年限，增加濕地功能性等。而濕地維護管理項目如下所示：

- 結構維護管理
  - ✓ 濕地設施裂縫維修；
  - ✓ 淤積物清除；
  - ✓ 設施保養；

- ✓ 避免外力破壞。
- 植物管理
  - ✓ 水位調整維持植物生長；
  - ✓ 防範植物根部破壞結構體；
  - ✓ 植物收割與淤積清理；
  - ✓ 裸土再植栽。
  - ✓ 外來種植物管制；
  - ✓ 草料處理。
- 生物管理
  - ✓ 掘洞動物防制；
  - ✓ 隔離爬蟲類與人類接觸；
  - ✓ 鳥類保護與防疫；
  - ✓ 流浪動物管制；
  - ✓ 攻擊性昆蟲與害蟲防制。
- 蚊蟲管理
  - ✓ 蚊蟲採樣監測；
  - ✓ 蚊蟲消滅方式。
- 氣味管理
- 特殊事件維護管理
  - ✓ 暴雨事件維護；
  - ✓ 地震事件維護。

### (一) 結構體管理

人工濕地的各項結構管理在於維持系統持續不斷的運作，與延長濕地施用年限。任何細微的損壞、侵蝕與裂縫，都會因不斷污水流動，使損壞繼續擴大；因而濕地暫停運作增加維修經費。因此結構體應定期（如每月）檢驗，確保如下結構體細節不致影響濕地處理廢水運作：

- 水流設施裂縫維修；
- 淤積物清除；
- 設施保養；
- 避免外力破壞。

#### 1. 濕地設施裂縫維修

壩堤(dikes)、洩洪道(spillways)、與其他控制水流的設施需要進行定期的檢查。如果有突發的洪水事件時，更應立即檢查其結構體是否安全。在高流量或是結冰季後冰層快速融化時，也應立即檢查濕地外圍是否受到沖蝕。如有任何的破損、沖蝕、堵塞都應以最快的速度進行補修，以防止更大災害的發生，與後續昂貴的維修費用。

#### 2. 淤積物清除

水池於長期污水沈澱作用下累積之下，會有淤積大量淤積物；長久之下若未清理淤積物，水池儲存容量縮小，能夠淨化曝氣之廢水處理量也會縮減，且容易使落葉與植物掉落枝幹淤積，妨礙水池中的水生動物游動，容易產生惡臭氣味、滋生蚊蟲等。若原待處理之廢水懸浮顆粒含量較少，或是水池面積廣大或容積夠大，則可以處理清淤時間間隔可以較久。濕地淨化設施儲水容積較小，或處理廢水中懸浮雜質濃度高，容易在流動時沈澱，使儲水設施與水道淤積，則有必要利用雨季或廢水處理高峰期前，清除淤積於水道與處理水池的沈澱物，使水道能夠順利流動污水循環，處理廢水設施能夠引進水量較多。除定時外，若遇旱季或廢水進流量低時節，都可以特別處理儲水設施中的沈澱物，恢復水池淨化能力。原則上一年應清理一次水池淤泥。

### 3. 設施保養

海灣附近的濕地機電設備易受海風或風沙侵襲而鏽化。若氣象顯示有長期暴雨或颱風來臨，應特別針對濕地內的機電設備加以檢驗、測試，大雨來時與過後都能順利操作排放濕地系統過多水量。

在槽處理廢水的人工濕地，部分是建造於河川底床上，或是建造於河川兩側的洪水平原上。主要淨化設施是建立於底床的在槽處理，應當於冬季或是枯水期河川流量低於基流量時，簡易區隔河水，檢驗底床構造的完整性與穩定性，修補暴雨期間過大的洪水量或石泥流等對底床構造的破壞，維修恢復構造物的廢水處理能力。另外，淤積於底床的沈澱物與不屬於底床建物的石粒與垃圾，都於此時一併清理。河道兩岸的護岸等構造，如蛇籠、植被等，平時需定時檢查固定性與結構完整性，不被洪水沖毀；暴雨前後，立即檢驗損壞部分，加以彌補整理，保護兩岸不被河水繼續沖損。

### 4. 避免外力破壞

受到濕地內的小動物破壞，如鼠類的咬齧、鳥類建立巢穴與蟲蝕等。社區附近的自然淨化處理人工濕地因公園生態化，會有居民等遊憩，機電設備也容易受到人為的破壞。操作維護人員於濕地檢測時，應加以注意機電設施是否有所損壞，而立即修復。另外，濕地的機械電動設施定時檢測運作是否正常、定時保養修護，電線網路的完整性也是檢測重點。

#### (二) 植物管理

植被是否能更成功的生長，取決於濕地內水位深度的管理與控制。雖然濕地植物可以「暫時」忍受環境的改變，但卻無法在超過其耐受度太多或太長時間的條件下生長，因此必須進一步施作其植物管理。包括：

- 調整水域內之水位深度，以維持植物生長；
- 防範植物根部破壞結構體；
- 植物收割與淤積清理；
- 裸土再植栽。
- 外來種植物管制；
- 草料處理。

### 1.調整水位維持植物生長

在冬季的時候，水位高度可以提高一些，以增加水流滯留時間並避免植物凍死。而「交替流量(alternating flows)」或是「降低水位」的運用，則有助於水中有機質的氧化，並增加濕地內植物的新生與植群的補充(recruitment)。

### 2.防範植物根部破壞結構體

在場址內的植物需視情況收割、增加肥料或是施灑石灰。高頻率的刈草有助於草地擴張與根系生長，降低土壤被侵蝕，並避免灌木叢與樹林族群的建立。但須注意樹木經年生長，根部是否有刺穿場址之土堤結構與底層結構之虞，影響場址底層結構與邊坡穩定性安全。

### 3.植物收割與淤積清理

曝氣池或淨水池內的水生植物覆蓋面積，於濕地建造初期時，考量污水清除率會設計水生植物覆蓋率。在濕地系統正常啟動操作後，水生植物覆蓋面積比率需參考場址水質淨化處理成效，與植物季節性生長速率，重新調整每月收割去除覆蓋水域面積。

因此除定時收割外，水質監測的數據可作為收割時間與割除數量的重要參考資料。挺水植物與深水植物若生長繁衍過密，或是死亡和枯萎的植物未即時清理堆積於根部底，造成水流不容易流動，並產生滯水，以及病蟲蚊等蚊蟲容易在滋生，清除不易；因此濕地設計水流動線上，應控制水生植物生長與繁衍，不致影響濕地水質自然淨化系統處理運作。

### 4.裸土再植栽

一年生植物會季節性枯萎、死亡，裸露出表土層，若未即時重新栽種植物，會產生侵蝕風化與土壤流失。若是發生於土堤結構會發生崩塌情況，或於引水路會產生堆積、堵塞，更有可能於閘門淤塞影響操作。因此濕地內枯萎草地需及時移除、重新栽種，減少土壤表土裸露。

位於社區附近的人工濕地，為達親民與賞心悅目，會在平地植被草地，增加休憩、娛樂功能，若未妥善維護管理，任由民眾遊憩踐踏，以及季節性枯萎或未定時澆灌造成枯萎，和暴雨季節排水不佳長時浸溺，均會產生植栽死亡、土壤表土裸露與土壤流失情況。

土丘邊坡的覆蓋植物，若根莖未能深入土壤、補強土丘結構措施，土丘會有崩塌、雨水沖刷流失之慮，需對土丘邊坡加以保護補強。因此在維護管理人工濕地上，應建立溢洪道排水系統，引導多餘水量排出場址水域外，並應建立場址定期性周邊環境巡邏，及時發現裸露區域施作重新植栽。

在暴雨、颱風侵襲前，濕地內的植物需修剪，減除老幹殘枝與易折損之植物，避免暴雨吹損枝幹樹葉等，阻塞導水路與損壞閘門等，使排水系統無法順利排放多於水量。

### 5.外來水生種植物管制

需定期施作水域內水生植物的植被調查，以檢查是否有外來的侵略物種。尤其是若為優勢物種，會大量繁衍驅逐本土物種並影響水質淨化處理的成效，擾亂本地水生植物生態系統。

## 6. 草料處理

大面積的濕地每年割除的植物產量大，若是植物可做為飼料，則可利用大型機具（割草機等）收割、曬乾與綑綁，加工做成飼料賣予附近的動物飼養場，具經濟效益可以回補每年的濕地經營經費。若人工濕地植物收割面積不大，或是割除的植物不能作為動物飼料，不具經濟效益，則割除的草物可以曬乾、絞碎，混合其他物料做成植物性堆肥，作為濕地植物種植施肥所用，尤其是其植物攝取廢水中滋養物，做成肥料將更有助於肥沃土壤。但若是濕地處理廢水中含有重金屬或其他毒性物質，植物攝取並降低水中重金屬與污染物質含量百分比，收割植物後則要審慎處理，不致再次污染環境。

### （三）生物管理

在表面流人工濕地中，會挖掘洞穴的動物、具危險性的爬蟲類、蚊蟲與臭氣等都是濕地中令人困擾與麻煩問題。某些動物會破壞濕地的結構、傳遞傳染病等，生物管理包含以下：

- 掘洞動物防制；
- 隔離爬蟲類與人類接觸；
- 鳥類保護與防疫；
- 流浪動物管制；
- 攻擊性昆蟲與害蟲防制。

#### 1. 掘洞動物防制

大批出沒會挖掘洞穴的動物，像是麝鼠或是河鼠，會使用香蒲或是蘆葦做為食物或是巢材，因此會造成系統內水生植物嚴重的破壞。麝鼠(musk rats)或其他會挖掘洞穴的動物會破壞土堤，影響邊坡結構體的安全。如有此狀況發生，可在土堤內安裝隔版，堆砌礫石、岩石、火山灰風化的膠狀黏土(bentonite)等物質，來阻擋動物的挖掘。如果還是無法有效阻止動物的挖掘，那麼可用陷阱捕捉動物並進行暫時的移除，待防護設備施工完成後，再將其放回。而動物所挖掘的洞穴，可用膠狀黏土封閉整個洞穴隧道，或是加水封閉其出口。

#### 2. 隔離爬蟲類與人類接觸

危險的爬蟲類在中南美洲是常見的動物，大部分是蛇類、特別是北美毒蛇(moccasin)與鱷魚。要直接控制這些動物是很難的，設立警告標示、築圍籬、提高人行的木板道路、人行道路下挖空洞建立蛇道供給蛇爬行穿越、在人行路徑旁除草等，都是降低人類與危險動物的接觸方式。操作人員必須保有危機意識，並有一套完整預防方案來避免危險的發生。社區濕地若有蛇類的出現，應請當地消防單位或專業機構進行捕獲，並檢討傳入途徑、是否有蛇窩存在。保育類的蛇群捕捉後可交至當地動物機關或學術單位保管、野地放養。

#### 3. 鳥類保護與防疫

出現於濕地的鳥類大約可分留鳥與候鳥。因為禽流感的潛在威脅與保育觀念，盡量減少人與鳥類的接觸與餵食，可設立觀賞鳥類平台、鳥類解說告示牌等，隔離人與鳥類的活動範圍。對來自疫區的候鳥進行監測，防止傳染病流竄，甚至危害本地人畜健康。除對候鳥做活體監測外，對於死亡於濕地的鳥類，也同時需要加以檢驗死亡因素，是否受到人畜共通的傳染疾病所致死。於候鳥大量南下時節，或境內有商業價值特殊鳥類，操作維護人員巡邏時注意有外人侵入捕捉或是利用陷阱工具捕捉。而候鳥的各項紀錄工作也可以配合當地保育團體或學術機關進行監測。

#### 4. 流浪動物管制

流浪的野狗或是野貓，會循人類蹤跡進入濕地環境。對於濕地生態環境會有所衝擊，獵食濕地內的野生動物、野狗群相互交配、群集滋事，並有可能攻擊操作維護人員或是遊憩的民眾。部分野狗身體帶有傳染疾病也會感染當地的動物群系，造成生物染病死亡。因此有必要聯絡當地有關動物協會進行協助，必要時進行捕捉與驅離。減少流浪狗貓對於濕地的破壞。

#### 5. 攻擊性昆蟲與害蟲防制

虎頭蜂群會於樹林的枝幹結窩，並針對過往的動物或人群認定為侵略地盤，進行螫螫行為，急救不當會有死亡之虞。雖然現今少有蜂窩、受到虎頭蜂群攻擊事件。拆除濕地樹木虎頭蜂窩，免螫螫操作人員的日常監測與操作維護工作與遊憩遊客安全。拆除蜂窩行動需請當地專業人士進行較為妥當。在蜂窩拆除之前，應於蜂窩地域範圍外圍隔出警告區域，避免人誤踏遭受攻擊。

紅火蟻原本產於南美洲，但因為天敵少且適應力強，迅速入侵危害各大洲。會主動攻擊入侵地盤的人群，造成生命安全之虞。紅火蟻入侵可能的途徑：受蟻巢污染的種苗、植栽等含有土壤的走私園藝產品。受蟻巢污染之進口培養土（如蛭石、泥炭土、珍珠石）。夾帶含有蟻后的蟻巢之貨櫃夾層或貨櫃底層。需多加注意檢驗傳入的可能途徑。目前主要的撲殺方法是利用化學藥劑，對於濕地環境有所影響。其他方式包括利用沸水水淹法、生物防治方法（寄生真菌、寄生蚤蠅）等，對於紅火蟻入侵初期有成效。若紅火蟻擴散十分嚴重就需考慮使用化學藥劑的可能性。另外，及早發現區域內有類似蟻窩，可聯絡國家紅火蟻防治中心或各地方政府農業單位協助清除（國家紅火蟻防治中心，<http://www.fireant-tw.org/homepage.php>）。

目前各地方農地、池塘與有蓄水養殖區域，都已遭受外來福壽螺侵襲，福壽螺適應環境的能力很強，再加上繁殖能力也很強，因此迅速成為臺灣農田、溝渠常見的螺類。濕地培育的植物等容易受到侵害。目前比較有效常見的方式是利用化學藥劑防制，不過容易對人體與環境造成破壞，十分不適合於濕地內使用。人工捕螺摘卵，為減少螺量和控制擴散的有效方法，具有簡單易行、見效快的特點。尤其是螺害還未大面積擴散之前更易見效。因此，掌握在福壽螺越冬或產卵盛期前進行人工捕捉，或是利用青花魚與鴨群進行除害。

在福壽螺的發生地，有計劃地組織飼養鴨群，在螺卵盛孵期放鴨以啄食幼螺。估計成鴨如果不餵食其他飼料，每隻鴨子每天可以吞食 50-100

個幼螺。青魚可以將福壽螺的殼咬得極為細碎，吐出口外，只取螺肉部分大快朵頤。適合大面積與隨意放養。

#### (四) 蚊蟲管理

目前台灣蚊子種類有 131 種，常見有埃及斑蚊、白線斑蚊、熱帶家蚊及地下家蚊。在台灣主要以蚊蟲為媒介的傳染疾病包括瘧疾、日本腦炎與登革熱。埃及斑蚊和白線斑蚊是登革熱的重要傳染媒。日本腦炎的病媒蚊因地點而有所不同。在臺灣，以三斑家蚊、環紋家蚊和白頭家蚊為重要。

濕地蚊蟲管理預防與減低蚊蟲產量是濕地典型複雜的課題，應當因地制宜。另外，早先的『蚊蟲根除』目標已轉變為『蚊蟲管理』。『蚊蟲管理』是指將蚊蟲族群數目減至最低程度，至少是在可忍受或是無危害的程度。管理最好方法是混合不同的研究，合併多方面且相輔相成的方法，包含將濕地設計為不適合蚊蟲繁衍，巧妙設計水質與植栽組成使蚊蟲於此生長不易。

- 蚊蟲採樣監測
- 蚊蟲消滅辦法
  - ✓ 水環境
  - ✓ 植物
  - ✓ 生物媒介

##### 1. 蚊蟲採樣監測

在濕地內部或周圍預選數地點，定期汲水採樣監測幼蟲族群（最少每週）。利用幼蟲採樣資料推估成蚊可能來自其他棲息地或往其他棲息地散播。幼蟲數量推估成蚊數量值，可與真正成蚊資料比對，找出真正屬於本地蚊蟲孕育繁衍數量。而數據資料必須參考當地文獻紀錄，或是其他地點的相似場址，或該場址於過去其他時間的樣本資料。

成蚊族群的需定期監測（最少 1~2 星期一次）。在場址內或附近地方利用光線為陷阱採集樣本；同時在濕地內其他位置進行採集做為參考數據。採樣分析重要性是能估算所有蚊蟲活動過程，查出濾過性病毒的傳播。定期動物血清檢驗（例如雞等），查出濾過性病毒的活動，可視為附加的檢查成效。

##### 2. 蚊蟲消滅辦法

溼地是蚊子理想的繁殖地。因此，利用溼地處理廢水在公共衛生上最受關注的問題便是病媒蚊是否會在溼地中孳生，並衍生出登革熱、日本腦炎等傳染病。而蚊子的存在對感官而言亦是一個惱人的問題。文獻中提到人工溼地中較有效的病媒蚊防治法，包括：

- 放養食蚊魚(mosquitos fish)掠食蚊子。
- 提高植物採收及清除枯萎組織的頻率；因為植物密度太高會降低外部干擾(如食蚊魚掠食困難)、增加食物來源，而增加子子的密度。
- 採放流水循環迴流，以維持溼地前段保持好氧環境；因為好氧條件蚊子較不易繁殖，也較有利於食蚊魚生長。

### (1) 水環境

蚊蟲控制方式包含：去除讓水流停滯的障礙物，以避免回流產生、在水面上製造陰影（因為雌蚊會有避免在陰影水面上產卵的習性）、擴大浮萍植物面積、或是栽種其他浮水植物。

水質對於蚊蟲產量是重要的決定因素。無濃烈有機材料污染的暴雨水可能產生較少的蚊蟲問題，高濃度滋養物的污廢水將會產生較高、多的植物與蚊蟲問題。掠食蚊蟲者也無法順利在高污染水域中存活。

週期性排水或淹水能有效地中斷蚊蟲產生；建議在平行濕地單元，兩個或更多單元中利用乾涸和淹水兩種方式交替使用，使水位交替降低水位。建議決定濕地乾涸時間可依蚊蟲種類、植栽形式、季節因子與考慮其他排水系統，可避免造成濕地產生餘水停滯超過五天；不過通常要考慮場置特性做決定。

必需要時利用抽水機以維持水持續流過濕地，有助於減少蚊蟲族群；淺灘處產生紊流也對於幼蟲有害，並且提高水中溶氧量增進水質。其他水管理技術減少蚊蟲族群包含機械式通風系統（對水面產生擾動減低幼蟲存活），或灑水系統干擾蚊蟲在濕地中排卵；這些都需要設計階段考慮進去。

### (2) 植物

植物對蚊蟲是相當重要的，可以提供幼蟲保護不受掠食蚊蟲者侵擾與水面物理擾動，提高食物的來源。無植物維護的濕地一般也無法援助蚊蟲族群。水池邊緣的植物對很多蚊蟲種類相當重要，例如：澳洲的濾過性病毒帶原者-環喙家蚊和美國的媒斑蚊。尖音家蚊和沼蚊需要依靠深水植物和飄浮植物存活，瘧蚊和其他種類則會在表面水藻中找到避難所。

### (3) 生物媒介

從食物鏈的觀點看，有許多生物是以蚊蟲為食的，例如：水中的魚類、水生昆蟲、渦蟲、水螅有很多是以蚊子的幼蟲為主要的食物。而許多鳥類、蜻蜓、蝙蝠、蛙、壁虎等捕食性生物則捕食飛行中的蚊蟲。此外，有許多植物要靠蚊蟲來協助傳粉。毛腳燕(martins)、燕子(swallows)或是蝙蝠每日可吃上千隻的蚊子，所以提供這些動物的育巢箱將有助於蚊子數量的控制。

美國佛羅里達州研究人員利用人工繁殖安邦巨蚊 (*Toxorhynchites amboinensis*)，這種體型巨大可孳生於人工容器。幼蟲是肉食性，主要是以其他蚊蟲幼蟲為食，成蟲又是以花蜜為主時，對人類無害，有利於『以蚊克蚊』。

食蚊魚類是唯一在濕地有實用價值的商業上生物媒介，可以是完善控制程式估算的估計組成，可以單獨或是與化學藥劑一同使用。

水質對於魚類存活是重要問題，污染會嚴重地減少魚類並提高蚊蟲產量。淺灘處的水域，密集的植栽會影響像魚的掠食蚊蟲者移動尋找蚊蟲幼蟲。為保護掠食蚊蟲者，植物需定期收割與採集。

在進行任何一種防制處理之前，都應仔細檢視濕地與其周圍的生態環境，並適時請教專家學者的協助。當檢視濕地環境是否會有蚊蟲孳生，除

了考慮整體的濕地之外，必須包含更細緻的物體，如：舊鐵桶、廢棄輪胎、森林區的不透水窪地、中空的枯立倒木、控制水流的設施、開放性水管、與其他任何可能蓄水的東西。蚊蟲孳生的問題，其來源通常是在可蓄水但容易忽略掉的物體上，而不是在一大片的濕地上。

## (五) 氣味管理

在良好的濕地中，並不會產生令人困擾的臭氣問題，反而是在含氧量低的開放水域，因為水中含有過高的生物需氧量與氮，所以會有臭味分子逸散出來造成困擾。因此，減少水中有機物質與氮，將可以用來控制臭氣逸散。另外，在植被茂盛區域的單元，設置含氧量高的開放水域，將有助於系統內氧氣的溶解。另外值得注意的是，如果無法移除濕地內易揮發的臭氣分子（如硫化氫），那麼加上濕地內的某些設計（如：增加溶氧量用的紊流設計、出水口的跌水設計、水躍（hydraulic jumps）等），將會使臭氣逸散的問題更加嚴重。保持濕地水流順暢有助於減少氣味產生，避免水體於濕地環境停留過久產生氣味。定時死亡植物移除、清理污泥與垃圾也會減少不良氣味於濕地萌生，且有助於減少蚊蟲滋生。

## (六) 特別事件維護管理

### 1. 暴雨事件維護管理

台灣汛期為每年五月初至十一月底。這七個月的期間內，是台灣地區雨量最豐沛的梅雨及颱風季節。連綿不決的豪雨或是降雨強度高的颱風，都會造成濕地內水量增加，若不能及時妥善排水，容易造成濕地內積水、滋養蚊蟲與病菌，且濕地的草地或非水生植物長期泡水，根部潰爛。因此於每年的非汛期時節，應對濕地內的排水系統作進行清淤與排水檢測，務使大量水流能夠排洩暢通。而汛期期間適逢植物生長季節，定時收割與修剪渠道兩岸植物、水池的水生植物與清除管路或水池的枯萎植物，防止植物落葉與枝幹阻塞水流通道。在槽式人工濕地尤其需在汛期前後或是乾旱季節，進行工程養護，減少因為淤塞減少功能發揮，或是暴雨再次破壞已受損傷護岸與結構性不穩的蛇籠。

濕地內的土堤或是裸露土壤，平時如不能妥善修整維護重新植栽與強護，會受到暴雨的沖蝕，流進渠道造成淤積等。汛期前後對於裸露或是植物生長不良區域，重新植栽與減少土壤沖蝕的可能。土堤或是增加污水流動的土丘，強化土壤密實度與增加具保護的植物與護坡，不至於降雨強度高的暴雨侵襲下潰散。

### 2. 地震事件維護管理

台灣處於太平洋地震帶，地震發生次數頻繁。因為濕地內的人工建物並不多，真正造成建物安全憂慮的地震強度不多。但若是處於活動斷層，對於濕地安全有比較重大安全之虞，台灣活動斷層共 42 條。因此地震過後，可能會有破壞的渠道與水電設備，能需特別地勘查。若地震使渠道或是其他設施產生裂縫或結構不穩當，重新填補與整理是必須的。機電設備也是必須維護，尤其是閘門、電動馬達與地下管路等，若閘門受地震外力

扭曲，會影響開啟的操作與水流控制。機電設備因為地震的搖晃，會使內部電子機械破壞。地震過後特別操作檢視破壞程度，並加以修復。

### 三、監測操作

以溼地系統處理廢水，除了上述流量測量外，至少需要對以下作採樣分析：

- 入流及出流水進行水質採樣分析；
- 水深與流量測量；
- 生物指標觀察。

這些監測工作為人工溼地是否符合成功操作的重要因素。監測所得的資料必須正確地收集，並讓操作人員判定以決定是否改變操作。

#### (一) 水質採樣分析

在採樣頻率上，溫度、溶氧(DO)、酸鹼值(pH)、導電度至少需每週一次，生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、懸浮固體(SS)、氯離子(Cl<sup>-</sup>)、硝酸鹽與亞硝酸鹽(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、氨氮(NH<sub>3</sub><sup>+</sup>-N)、總凱氏氮(TKN)、總磷(TP)則至少需每月一次。在固定入流量操作下，水質的變化狀況可判定溼地系統處理效能是否達到穩定。而出流水質是否能符合「放流水標準」，為人工溼地操作的最重要目標。入、出流水水質的採樣分析，也是操作維護費中的重要項目。

#### (二) 水深與流量測量

建議至少每日需一次測量或估算入流及出流位置的流量(表 2)。流量是了解污染物在溼地中淨化效能的重要數據，為了方便流量的測量，可裝設流量計。進流水或出流水的抽水，為溼地系統操作中少數需要動力能源的項目，並為溼地操作維護費中的重要項目。水深的測量資料可了解溼地中的水流性質是否正常。

#### (三) 生物指標觀察

生物指標的監測資料可提供操作人員了解溼地植物及動物群落是否正常。從野生動物保育觀點而言，保持溼地生態的完整性是重要的，而生態的完整性控制著溼地的操作效能。

表 2 人工溼地操作中所建議的監測項目

建議參數	採樣位置	最小採樣頻率
水質：溫度、溶氧、pH、導電度	進流口及出流口	每週
水質：BOD <sub>5</sub> 、SS、Cl <sup>-</sup> 、NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> +NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> -N、TKN、TP	進流口及出流口	每月
水質：重金屬、有機物、毒性	進流口及出流口	每季
流量	進流口及出流口	每日
降雨量	鄰接溼地區域	每日
水深	進流口及出流口	每日
優勢的植物種類	靠進流口、靠溼地中央及靠出流口	每年

(資料來源：Kadlec & Knight,1996)

## 四、國外案例

### (一)、密西西比州西傑克遜市

#### 1. 背景

西傑克遜市人工濕地系統建立於 1990 年以及 1991 年，共可分為兩個階段。它額外提供了密西西比整個沿海地區污水的出流水處理以及處理容量。西傑克遜市所建構的濕地處理系統位於密西西比海灣北邊，其中包含了三個平行的處理系統共 56 英畝。

這個處理系統一開始的構想是用以處理每日 160 萬加侖的污水。起初對於整個服務區域（主要以家庭污水為其來源）皆可提供有效的涵容能力。然而，隨著嚴重的降雨事件，整個處理系統的水力涵容超出負荷，且過多的分流直接進入海灣，因此為了忽略支流定期流入量，人工濕地系統的涵容能力就增加為每日 260 萬加侖。

#### 2. 系統描述

根據設計，西傑克遜市的自然處理系統包含下列的構造：

- 一個 75 英畝的瀉湖/儲存系統
- 一個 380 英畝的土地施用系統
- 三個濕地處理系統(CWTS1, CWTS2, CWTS3)共 56 英畝
- 一個 0.2 英畝的後曝氣池。

所有的出流水經過三個處理系統處理過後透過流出物收集渠集中送至裝配有兩個漂浮通風裝置的後曝氣池內。而後曝氣池的出流水經過一個引水槽(Parshall flume)測量其流量，之後再經由出水管排出海灣。

人工濕地系統的第一個階段始於 1990 年二月，整個土木工程及種植植物在 1990 年七月完工，並於 1990 年八月啟動，第一階段完整的植物覆蓋完成於 1990 年十月。第二階段始於 1990 年十月，並於八個月後完成，污水於 1990 年十月開始流入，並於 1991 年四月完成種植，植物完整覆蓋則於 1991 年六月。

從 1991 年完成植物覆蓋後開始測量水質，結果顯示西傑克遜市的人工濕地系統有效降低 BOD<sub>5</sub> 以及總懸浮微粒濃度至 8mg/l，這個削減發生於最難削減的 BOD<sub>5</sub> 以及總懸浮微粒濃度上。

表 3 西傑克遜市人工濕地設計標的

	入流水質	出流設計標的	
BOD <sub>5</sub> (mg/l)	45	10	
TN(mg/l)	12.5	30	
NH <sub>3</sub> -N(mg/l)	-	2	
pH	-	6-8.5	
DO(mg/l)	-	6	
大腸桿菌(col/100ml)	-	2200	
濕地設計流量=1.6(mgd)			
	Cell A(acres)	Cell B(acres)	Cell C(acres)
濕地系統 NO.1	12	10	
濕地系統 NO.2	9.7	7.8	4.0
濕地系統 NO.3	9.2	3.3	

西傑克遜市的人工濕地最關鍵的目標之一就是氮氮消滅，在十二的月中只有三個月出流水中氮氮的值超過限制，而高的氮氮也伴隨著高的 TKN 負荷(每日每公頃 3 磅以上)或是高的流量(每日 2 百萬加侖以上)。控制洪峰流量、TKN 負荷以及水位調節為此濕地系統最常用以去除氮的操作方法。

### 3.操作與維護管理

人工濕地系統利用較低的操作及維持系統以及較少的能量消耗卻可以提供一個較高階層的污水處理效果。在西傑克遜市的人工濕地系統，透過自然產生的細菌及菌類植物吸收或沈積為底泥進行污水的處理，這些微生物可以幫助改善或移除有機物以及因為污染造成的營養鹽。

- 操作項目
  - ✓ 水文操作
- 維護管理
  - ✓ 植物管理
  - ✓ 生物管理

#### (1) 水文操作

瀉湖的入流水每隔 10 英尺利用 2 英吋的鑽孔平均分配於各濕地單元內，從濕地系統一開端處即以這個方式來分配入流水，而這也是整個人工濕地系統對於污水處理是否有效的關鍵。

出流水停留於這個單元至少十二天以上，以確保出流水都維持高的品質。此外，為了計算不同季節各單元內微生物的反應速率，故利用不同的水深來改變其停留時間，因為微生物在高溫時有較快的反應，因此在夏季時可以降低停留時間，但仍須維持必須的有效反應時間；相反的，在冬季氣溫較低時，微生物的反應速率較緩慢，因此必須提高水位以增加停留時間。深水區依照濕地單元長度對水流提供有效的重分配。不鏽鋼出水堰可控制單元內的水深並促進出流水經過處理系統。

經過人工濕地系統的處理，出流水被帶至後曝氣池，在那裡流速跟水質會在最後的排出前再一次的量測。



圖 2 後曝氣處理在於使溶氧量限制保持於 6mg/l

## (2)植物管理

人工濕地系統的單元底部設計為稍微傾斜，以便保養時排水用。每一個濕地單元有三個亦或是更多的深水區，每個區域深 5 英尺、寬 20 英尺，這些深水區是保留給深根的濕地植物，利用深根植物重新分配流經系統的出流水並且提供通氣。這個區域中較深的水可以提供終年棲息者生活，特別是蚊子魚以及依靠濕地為生的鳥類。

操作西傑克遜市的人工濕地系統是以淺水處為基礎，逕流情況在前半濕地單元中發生。水深在單元的下游處最深，約為一英尺。這個操作策略的優勢為在淺水區高溶氧的發生以及濕地單元為較高速率的區域。

西傑克遜市的人工濕地系統一開始種植的植物為香蒲和蘆葦，此外它也提供了另外 43 種其他的濕地植物種，以提供生物多樣性。

由於入水口處被特定深度的水淹沒，因此逕流模式並未完全發展，淺水區提供了氮的移除並可連續獲得氧氣，即使位於堰最低處的地方。每個單元中的深水區主要提供額外的氧氣以供應硝化作用使用，但當浮萍覆蓋整個表面時，將無法發揮其效益。每個單元中單一較大的深水區較多個狹窄的區域可以使充足的浮萍移動並且維持大氣反應。



圖 3 香蒲為濕地主要的水質淨化植物

### (3) 生物管理

出流水品質的提升額外獲得的好處是在西傑克遜市的人工濕地系統對於野生動物造成了特殊的好處，這個新的濕地棲息地對許多脊椎及無脊椎動物提供了食物以及遮蔽，水中遍佈無脊椎動物亦提供了魚類以及鳥類的食物來源，當中 45 種濕地植物結合開放水域以及淺水區亦導致生物多樣性且物種數量的提高。1991 年起發現了 62 種鳥類，其中大約 37 種變成依賴濕地生存者，冬季、春季以及秋季的優勢鳥種為鴨子、黑臉田雞、沼澤麻雀以及涉禽類，夏季的則至少有七種鳥類築巢，終年生活於濕地的也有 30 種之多。

麝鼠與河鼠利用蘆葦植物做為食物以及築巢材料，幾乎使其完全被移除，而對於香蒲的危害則較小，這些危害使得在第一階段設計改種植香蒲，而在後續階段中香蒲被推薦為底層植物的唯一選擇，而多樣開花濕地植物被計畫種植於新單元內部的植物。

這個系統維持大量的鳥類以及其餘野生動物生存，在這個濕地中鳥類跟其餘野生動物被發現對於出流水大腸桿菌有重大的影響，也就是說濕地最後的出流水通常比由潟湖流入濕地中得出流水含有較高的大腸桿菌數量。

#### 4. 水質監測

BOD<sub>5</sub> 的出流水濃度於植物成長完成後(1991 年六月)維持 5mg/l 以下，SS 的出流水濃度從 1991 年九月開始維持於 8mg/l 以下，NH<sub>3</sub>-N 的出流水濃度決定於 TN 的負荷，當總氮負荷低於每日 167 磅(31lb/ac/d)時多維持於 2mg/l 以下。

表 4 水質量測

	Month	BOD <sub>5</sub>		SS		TN In	NH <sub>3</sub> -N Out
		In	Out	In	Out		
1991	6	28	9	40	15	7.3	1.2
	7	13	5	41	15	4.4	1.3
	8	23	5	49	10	15.2	1
	9	19	2.5	35	5	17.7	2.3
	10	27	4	36	4.5	14.5	3.5
	11	46	3	29	4	13.5	3.9
	12	39	4	17	7	6.9	1.3
1992	1	23	4	12	8	11	1.4
	2	19	5	12	4	14.5	1.6
	3	19	5	16	5	15.4	1.7
	4	28	4	18	4	12.2	1.2
	5	24	4.5	31	6.5	6.9	0.05

## (二)、亞利桑納州 ShowLow 城

### 1. 背景

Show Low 城市在 1958 年建造他們第一座污水處理系統，這個系統是由串連整個城鎮的污水管以及兩個處理用的穩定池所構成。出流水直接排

入連接這個污水處理廠的 Show Low Creek，最終流入 Fool Hollow Lake。其營養鹽負荷過高因而導致湖泊優養化的產生，也使得魚類死亡。

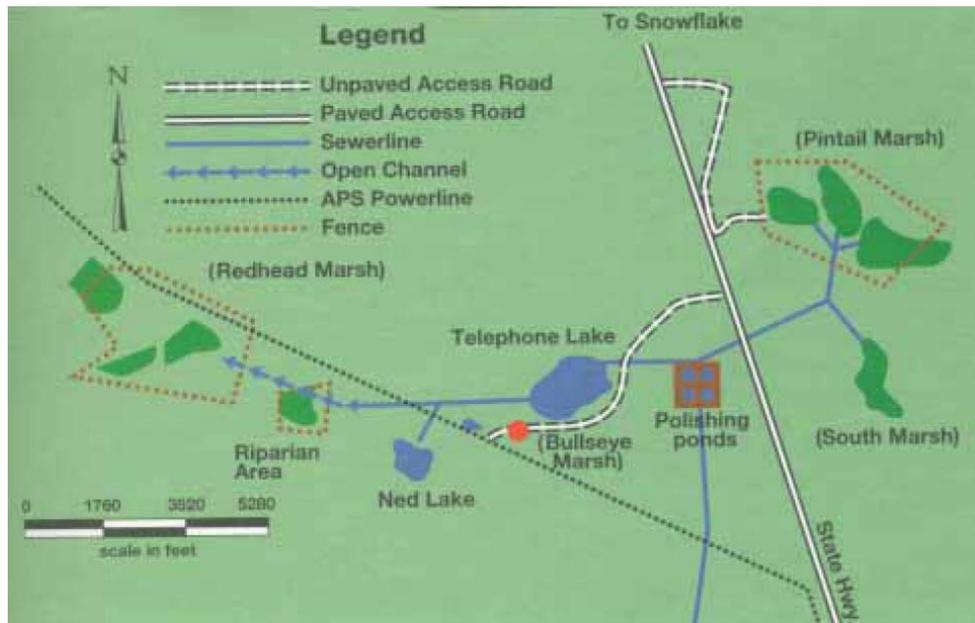


圖 4 濕地位置平面圖

## 2.場址描述

位於 Pintail Lake 以及 Redhead Marsh 的人工濕地位於美國亞利桑納州的 Show Low 市北方四哩處，這個濕地位於阿帕契國家公園所管理的國家森林服務區內。

### (1) 處理設備

Show Low 的污水處理廠包含兩個可以進行串聯或是並聯的曝氣池、一個含有兩個 1150gpm 泵的運轉站、四個同樣可以進行串聯或是並聯的生物穩定池、一個加氯消毒室以及提供出流水蓄水以及淨化的 Telephone Lake，並在河岸建構營養鹽移除區域，以使野鳥水禽棲息的沼澤地重新恢復利用。

### (2) 設計與規劃

濕地的發展始於 1978 年在 Pintail Lake 建構第一個人工濕地後，而在 1985 年建構 Redhead Marsh 時進行更大的擴展，由於出流水的體積開始超出處理容量，因此改變是非常必要的。現存的系統主要設計用以處理 13500 人一天所產生的 1.42 百萬加侖廢水。下表為本區所有濕地的場址大小。

表 5 濕地場址

Telephone Lake.....	45acres	Bullseye Marsh.....	1acre
Pintail Lake.....	57acres	Ned Lake.....	15acres
South Marsh.....	19acres	Riparian Area.....	15acres
Redhead Marsh.....	49acres	Total Acres =	201 acres

這個系統設計結合許多的湖泊以及沼澤，使濕地的效能更加完善，其中包含靈活的管理選擇可符合時間變化，以及污水處理系統設計提供出流水到達 Redhead Marsh 前的額外處理。

## 2. 水文操作

操作此一複合式濕地的主要技術包含水的管理，水量、水質以及水的傳送路線等都影響著管理濕地棲息地的樣貌，有彈性的設計可允許管理上有不同的選擇。例如，水利用水位面高低來控制水域的結構，可以利用水的轉向來使部分池塘乾枯，這些都可用以維持以及達成植物管理的目標。

## 3. 濕地監測

監測濕地是為了達成亞利桑納州政府對 Show Low 環境品質的要求，其餘外加的監測是由亞利桑納州漁業署與美國森林署所制訂。

當水流過此一系統，水質將會得到改善。例如，來自 polishing ponds 的二級放流水流入 Telephone Lake 後會進入一個明渠傳送至河岸附近的區域，接著會再經過另一個明渠而進入 Redhead Marsh 中的一個池子內，在這個傳送的過程中水質將會有大幅度的改善。下圖即為此一系統經由水流傳輸移除氮磷的速率。

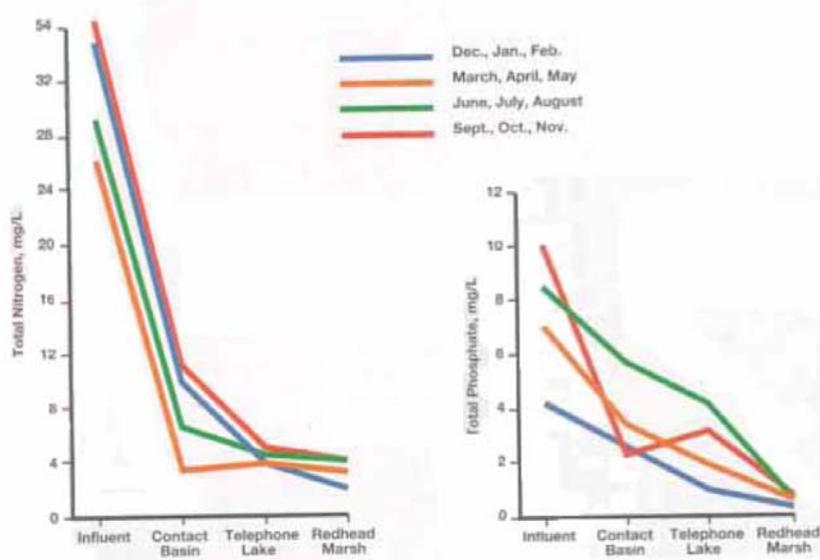


圖 5 系統經由水流傳輸移除氮磷的速率

### (三)、內華達州 Incline Village 城

#### 1. 背景

內華達州的 Incline Village 利用一個人工濕地對二級放流水進行處理，此一系統利用現存的濕地進行自然過程以達污水處理以及益於野生動物之效。這個系統對於環境保護有下列幾項目標：

- 有效益以及經寄的對放流水進行處理；
- 擴張野生動物現存的濕地棲息地；
- 提供遊客教育方面的經驗。

## 2.場址描述

本濕地系統是以一個 20 哩長的導管把出流水運送至濕地進行處理，其中濕地處理單元、鴻溝以及輸送水的管道是構成此一人工濕地的主要構造，在此 770 公畝的場址中建造了許多明顯的區塊，包含：

- 人工濕地
- 自然暖水濕地
- 季節性儲存/水禽區
- 出流水儲存區
- 高灘地

共有八個人工濕地單元為主要的放流水處理區，此一濕地處理區域並沒有表面排水，因為水會蒸氣的逸散。每個單元中心底部有一個很深的溝渠，用以防止非預期的植物生長，以及溝渠中的島供給水禽一個陸地區域可提供作為棲息築巢之地。而自然暖水濕地提供一個天然的植物動物棲息地，而非為處理過程的一部份。

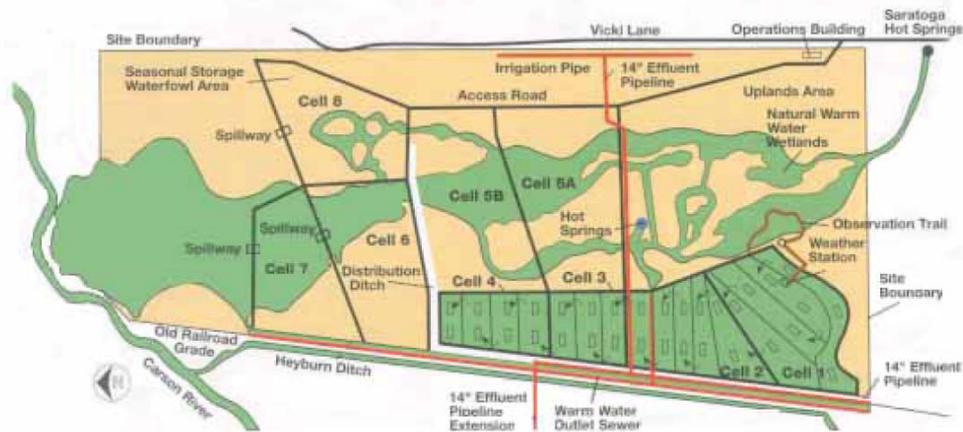


圖 6 濕地單元位置圖

## 3.水文操作

出流水流經 390 公畝的濕地系統單元，並且透過蒸發、蒸散(經由植物)、以及滲透(經由土壤)進行處理。這個系統利用現存的溫水濕地與可適應終年氣候溫度波動的水井進行操作，並且遵循州政府以及 EPA 水質要求。

出流水溢流到分配渠道前從單元 1 流經單元 2、3、4，而單元 3、4 的溢流被轉入單元五儲存以及蒸發。水被收集在單元 6、7 以及 8 中。

可以利用氣象儀以及監測儀器測量降雨、蒸發散、滲透率以及地下水品質，這些資料可以用來估算場址的蒸發率並且計算出地下水水質標準。

人工濕地的大小需要利用出流水的蒸發散，以及滲透率等水平衡方式來進行計算，其中蒸散率是以 Penman 法來進行計算，並且根據當地可獲得的資料進行限制。扣掉蒸散量以及滲透可得到此場址水的淨損失，最終利用出流水體積扣掉淨損失可以得到一個估算的必須面積大小。

這個操作的成敗取決與滲透，每個月至少需要有 1.1 英吋的滲透，當滲透率達到這個比率，場址大小僅需要 175 英畝即可，但若無法達到則可能需要 450 公畝的大小。

表 6 濕地設計標的

流量 (每年平均) (mgd)		1.66
流量 (日最大量) (mgd)		2.68
入流水質	SS (mg/l)	20
	BOD <sub>5</sub> (mg/l)	20
	TDS (mg/l)	240
	TP (mg/l)	6.5
	TN (mg/l)	25
	濕地面積	Cell 1(acres)
Cell 2(acres)		33.2
Cell 3(acres)		27.3
Cell 4(acres)		23.4
Cell 5(overflow ares)(acres)		117.3
Cell 6&7(floodplain area)(acres)		105.6
Cell 8(seasonal storage)(acres)		42.5
濕地水深		深水濕地(ft)
	開放水域(ft)	2.0-3.0

#### 4.水質改善成效

由於沒有任何的表面排水，因此並沒有表面水質標準需要遵守，即使所有表面蒸散或滲漏損失水質改善程度仍可由其流經各單元時觀測得到。

經過七年後，氮磷皆有相當的減少，即使是冬天也不例外。營養鹽在最終的處理單元也只要一開始濃度的 2~3%。

蒸散的結果可以從總溶解固體以及氯離子的增加觀測到，但是並無直接的證據顯示離子在較下游的單元中不停的增加；顯然地，溶解物質從上游傳送至下游單元可能會經由其餘過程而趨向某個平衡。

#### (四)、亞利桑納州 Pinetop-Lakeside 市

##### 1.背景

Jacques Marsh 為一個 Pinetop-Lakeside 公共衛生局污水管理系統人工濕地的一個構成要素，此一系統為美國森林署、亞利桑納州漁業處以及 Pinetop-Lakeside 公共衛生局合作的結果。這個人造的沼澤是由國家森林署所建造的一個沒有歷史的池塘、湖泊以及濕地，然而就存在於此場址中的植物以及野生動物來說算是一個接近自然濕地的沼澤。

##### 2.場址描述

這個人工濕地位處亞利桑納州的 Pinetop-Lakeside 市北方一英哩處，是亞利桑納州東北方的重要城市，而此濕地系統由國家森林管理處進行管理。

Jacques Marsh 與其餘大部分的人工濕地不同，因為它佔用任何天然池或排水區域。選擇此一場址是因為它有足夠深度的黏土可提供開溝排水的建構以及低的滲透率。

為了輸送回收水，故安置一個輸水管，出水口允許水直接抽至七個水池當中的五個，混泥土結構的池塘可容許水從一個水池流入另一個當中，這些結構設備有告示板，維持預設的水位高度，這個可調節的管裡水位方式是操作此一沼澤的關鍵因子。

V 形的棲息島設計來降低波浪的沖蝕，這個設計目的可提供築巢場址的安全，在島的周圍亦使用柵欄保護馴養的家畜。

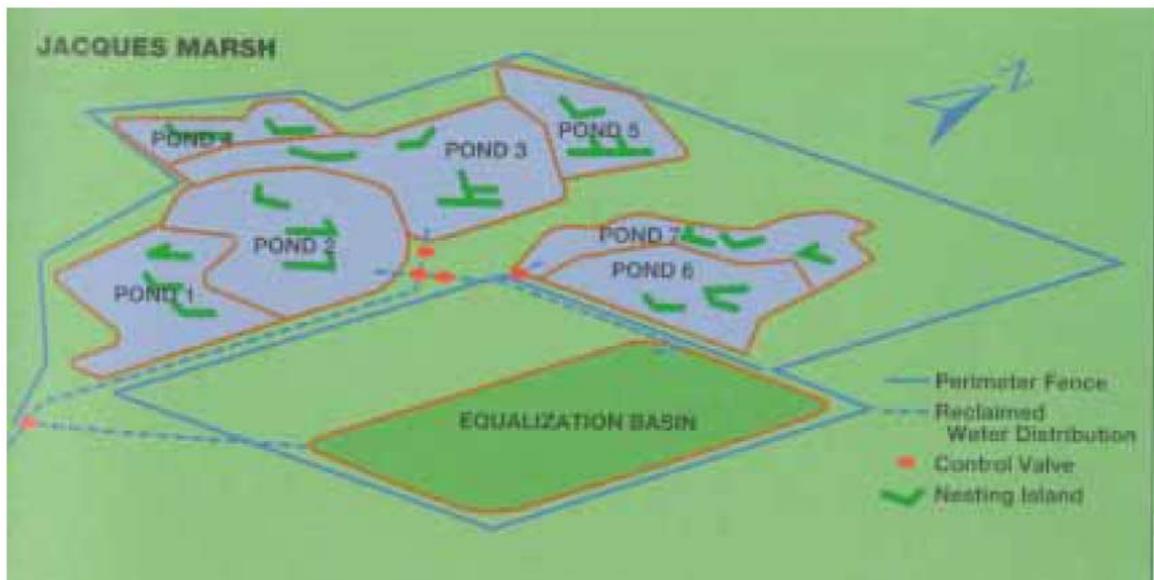


圖 7 濕地單元配置平面圖

### 3. 水文操作

本地的出流水是由 Pinetop-Lakeside 公共衛生局的處理場所製造的，其性質如下：

	Range	Mo. Avg.
<b>Biological Oxygen Demand</b>	2-3 mg/l	2.4 mg/l
<b>Total Suspended Solids</b>	1-13 mg/l	6.4 mg/l
<b>Turbidity</b>	2.1-5.4 ntu	3.6 ntu

這些污水透過每年的棲息地管理計畫，分配流入七個水池中，水禽的棲息需求以及植物的需求為最主要的影響池塘沼澤管理因子。

當水由沼澤中的某個水池流入另一個時，氮磷也跟著被移除，這些營養鹽會被植物以及動物攝取並且提供整體的生產力。下表為 1991 年 2、3、4 以及 5 月的氮磷總移除率：

表 7 濕地氮磷總移除率

	TN(mg/l)	TP(mg/l)
出流	20.35	7.90
Pond 1	6.23	4.10
Pond 2	5.35	4.75

#### 4. 監測

監測表面水質，Pinetop-Lakeside 公共衛生局選擇了三個淺井，以一季為單位進行地下水水質監測，確保水質不受影響。

### (五)、阿拉巴馬州蒙哥馬利郡

#### 1. 背景

位於阿拉巴馬州中蒙哥馬利郡南部的城鎮，其人口超過 1500 人。直到 1985 年之前，該鎮的廢水已依定流量被排放至 10 英畝大的水池。在 1985 年由阿拉巴馬州環保署訂定一個新排放標準。這標準使該城鎮的排放標準受到嚴格的要求。當此廢水池已無法到達該標準時，一個行政命令發布給該鎮要求改善其排放系統。

#### 2. 場址概述

濕地處理系統包含了下列主要的構成元素：

- 一個 8.9 英畝的曝氣池。
- 兩個 7.英畝的人為溼地單元。
- 一個 0.1 英畝的後曝氣池。

這個城鎮現存的穩定池被修建，可以提供更多有效的預先處理。修建的過程包含了重新安置入流與出流點和加入流動的機械通風裝置。池子裡有七英畝是通氣的，剩下的區域為沉澱區。這些修正增加了 BOD<sub>5</sub> 的需求和 NH<sub>3</sub>-N 的除去效率，降低有機體及固體佔據溼地單元的空間，而且在從頭到尾的處理過程中提供了額外的適應性。

溼地單元是被緊鄰安裝。每個單元佔了 7.5 英畝而且外觀比(長與寬)的比為 4.6:1。當保養維修，單元層輕微的傾斜，排出方便。大部分 15 英畝的溼地單元皆少於兩呎高，每個單元有較深的區域，大約為四呎深寬二十呎。較深的濕地仍然保持根深蒂固的濕地植被，因此這些區域配置為水棲動植物一年的棲息地，尤其是水鳥與食蚊魚。

兩個溼地單元類似的操作，給了城鎮管理河流的能力，即使某一的單元正在休養或是保養維修。此外，當運轉時或支援測試和搜索，每個單元的流動率可以有各式各樣的適應性。

探討流出溼地單元後進入後曝氣池，這個系統的構成為時常碰到分解氧氣的限度在允許的情況下做說明。75000 加崙的池子配備了流動機械式曝氣裝置，最後從後曝氣池流出的流動率被引水槽座連續的觀測。

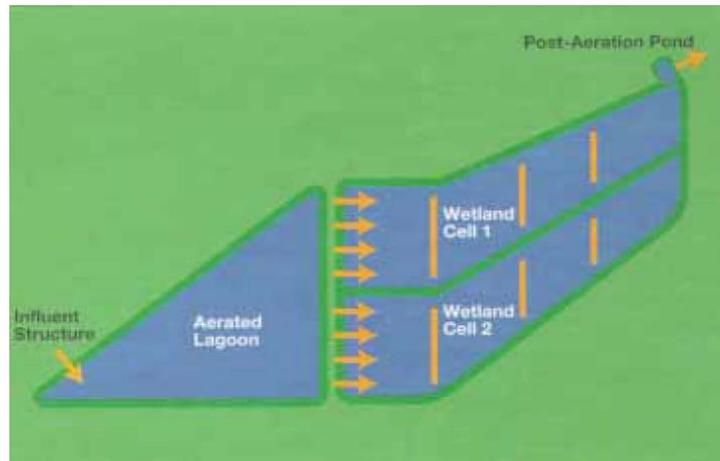


圖 8 濕地單元配置，包含一個負責前處理的曝氣池與兩個平行濕地單元

表 8 溼地設計標的

每天平均流量(0.24 百萬加侖/天)	
入流水質	
BOD <sub>5</sub>	40 mg/l
SS	100mg/l
TN	20mg/l
NH <sub>3</sub> -N	10mg/l
出流水質標準	
BOD <sub>5</sub>	10(18) <sup>a</sup> mg/l
SS	30mg/l
NH <sub>3</sub> -N	2(5) <sup>a</sup> mg/l
pH	6~9 單位
面積	
瀉湖	10 英畝
濕地單元	7.5 個/每英畝

### 3.操作與管理

- 操作項目
  - ✓ 水文操作
- 維護項目
  - ✓ 植物管理

#### (1) 水文操作

入流為水流經過處理系統和降低在溼地單元起端。該系統被設計需花 30 天流經溼地單元。事實上其週期性可由單元微生物變化率作出解釋。溫度越高反應速率越快，反應時間可因夏天縮短時間，但仍需接觸時間去有效移除污染。相反的，在冬天較冷的氣溫之下，其反應速率較緩慢，需要

增加時間去提升水位。鋁製標誌被放置在 3 個出水口，沿著單元濕地每單位寬度一個。控制單元水深，促使水流流經過處理系統。在溼地單元處理之後，污水流至池塘，接受曝氣。

## (2) 植物管理

在此濕地系統中，污水被自然生成的細菌和真菌分解，該沉澱物生成在水平面下植物的莖和葉子上。這些微生物幫助轉換及移除有機物和營養物。兩個濕地單元的植物被挑選模擬自然溼地，包含種出使栽種 68000 香蒲及蘆葦。來自單位面積池塘的污水，以 1 英吋的洞以 10 英尺間隔相鄰。



圖 9 濕地在各單元植栽適宜植物



圖 10 出流閘門結構利用水位控制達到調節水力停留時間



圖 11 利用橫跨濕地單元的穿孔管線來分配入流污水，上有碎石。

## 4. 監測

1989 年 6 月開始建構濕地，並於 1990 年 5 月開始計畫。1990 年八月植物已幾乎覆滿溼地，已開始建造溼地單元。從此除了  $\text{NH}_3$  以外，溼地的

自癒系統已經能達到嚴格要求的標準，且尋找其他節省成本的自然自癒方法。下方表列從 1900 年 8 月起每月水質監測數據。

表 9 水質量測

	Month	BOD <sub>5</sub>		SS		TN In	NH <sub>3</sub> Out
		In	Out	In	Out		
1990	8	102	5	137	10	20	0.57
	9	27	8	101	18	11	0.66
	10	30	3	168	18	19	0.78
	11	27	3	127	10	14	0.93
	12	15	4	71	9	10	2.60
1991	1	20	5	52	10	8	1.10
	2	13	4	18	4	11	0.74
	3	26	7	40	8	19	0.89
	4	22	10	97	15	10	0.70
	5	21	9	52	20	80	0.35
	6	29	10	72	25	5	0.84
	7	33	7	69	10	21	6.43
	8	56	7	183	7	20	0.90
	9	24	4	87	12	10	0.99
	10	30	8	125	18	6	0.75
	11	32	4	106	7	11	0.21
	12	33	12	64	16	11.5	0.87
1992	1	39	4	83	19	10	0.38
	2	22	4	32	4	6.7	0.15
	3	34	4	58	5	10	0.22
	4	31	4	119	3	12	0.51

### 3.1.2 地下流式人工濕地(Subsurface Flow System, SFS)與植栽濾床人工濕地(Vegetated Submerged Beds, VSB)

地下流式人工濕地為使用塞柱流流體模式模擬水流在填充濾材傳輸的路徑，並以透過濾材的接觸過濾顆粒及轉化水中的營養鹽。而植栽濾床人工濕地則在濾材上方種植植物，但實際上主要仍透過濾材達到淨化水質的目的，故兩者可視為同樣機制的水質淨化工法。

- 一般操作
  - ✓ 系統啟動操作
  - ✓ 水文操作
- 維護管理
  - ✓ 植物管理
  - ✓ 結構維護管理
  - ✓ 生物管理
  - ✓ 氣味管理
- 監測

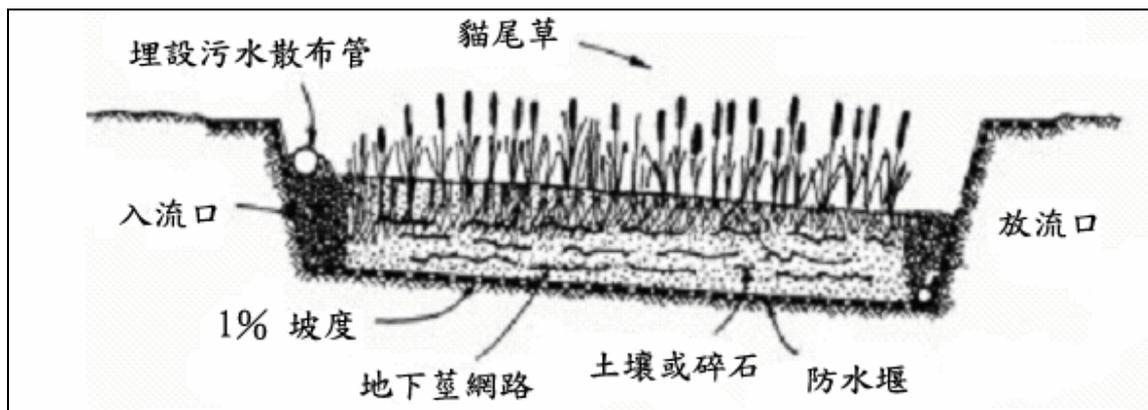


圖 12 地下流式濕地(SFS)示意圖 (資料來源：U.S.EPA, 1991)

#### 一、一般操作

植栽濾床系統主要移除生物需氧量與總懸浮固體的方式，是透過介質(media)的顆粒來攔截污染物。而操作人員於此階段的操作項目如下：

- 系統啟動操作
  - ✓ 水位調控或施肥
- 水文操作
  - ✓ 水位高低的調整
  - ✓ 維持流量均勻
  - ✓ 清除淤積

#### (一) 系統啟動

##### 1. 水位調控與施肥

在系統啟動階段，操作人員主要負責濕地的水位調控。一般而言，在植栽濾床系統植栽完成後，濕地將會被注滿水至介質表面。而當植物開始生根時，水位則可以漸漸的降低。在啟動時期也可以使用肥料來提供植物足夠的養分，直到後續的污水有足夠營養物質為止。

植栽濾床濕地內的植物可以攝取污水中的營養鹽，但是其效果並不顯著。植物在系統中所扮演的角色並不是非常重要，因此整體系統要達到最佳狀態僅需一年不到的時間（特別是在使用高承載力的基質時）。

## （二） 水文操作

成熟的人工濕地可視為一個天然的濕地，所以在人為的操作與維護的部分，應與自然濕地相同，採取「被動性」管理，而非主動性的干涉與管理。當濕地產生問題時，任何操作的介入其強度都必須適當而且小心，且在操作過程中與操作完成後，都需要不斷的監測濕地的變化情形。濕地運作的操作項目，如下：

- 水位高低的調整
- 維持水流一致性
- 清除淤積

### 1. 水位高低的調整

在一個成熟的濕地中，水位與水流的控制是唯一會對濕地有顯著性改變的兩個因子。改變水位的高低，將會影響水力停留時間、水中溶氧程度與植被的生長狀態。因此，當濕地水位發生明顯改變時，需要馬上著手進行調查並找出可能的原因，如：結構體發生裂縫或堵塞、土堤破損、暴雨排水面積增加等。

在不同季節調控不同的水位，可以避免水生植物凍死。在溫度較低的秋季，可將水位調整高約 50 公分左右，直到冬季來臨形成薄冰層為止。一旦水面完全凍結之後，便可降低水位，使水面與冰層或雪層中間空出一個空氣絕熱層，以維持濕地溫度。這種操作方式，不論是在表面流式人工濕地或是植栽濾床人工濕地兩者都是有效的。

濕地內適當的水深與流量是極為重要的因子。停滯的水流會降低污染物的移除，同時也會增加病媒蚊的孳生機率，並造成美學上的不雅觀；所以流量與水位亦需進行定期的檢查。濕地的水深需要定期的調整，依季節性準則或是對於長期累積岩屑於介質孔隙增加阻力作反應。而地下流式人工濕地應檢查是否有形成表面流。

### 2. 維持流量均勻

濕地系統是否能夠達成預定的效果，「維持出入水流的一致性」是一個非常重要的因子。因此，出入水流應該定期的檢測，並移除碎屑堆積物質，以防止水流受堵。壩體或是隔版的表面如有碎屑與其他細菌性黏菌，應該要進行移除。而流入與流出濕地的水中管線，也該定期沖洗。而在清除堆積物的過程中，不妨使用高壓噴水設備或是其他器械，以增加清理的便利性。

### 3. 清除淤積

在支流匯入濕地時，懸浮固體通常會在入水口處形成堆積，而堆積的結果降低水力停留時間，所以每隔一段時間，就必須要清除這些堆積質。在植栽濾床系統中要清理堆積污泥是非常困難的，因為清理過程必須將濕地中的蓄水完全排出並移動已裝設好的施設，因此，植栽濾床系統並不適合用來處理含有高懸浮物質的污水（如具高藻類的池塘所溢出的水流）。

**表 10 VSB 及 SFS 操作項目**

操作項目	週期
調控不同的水位，避免水生植物凍死	不同季節
檢測入出水流，移除碎屑堆積物質，沖洗水下管線	定期
收割蘆葦，助於濕地氮的移除	生長季高峰期，生長季停止前
焚燒植被，控制害蟲的生長	冬季
土堤與壩體的除草，去除樹木的種子	定期
檢查是否有形成表面流	定期

（資料來源：EPA, 2000）

## 二、維護管理

濕地維護管理與操作項目有相同基本概念，當濕地達到類似天然濕地的平衡狀態，除非特殊緊急問題發生，操作人員只需對濕地提供最基本的維護管理。維護管理項目：

- 植物管理
  - ✓ 水位調整；
  - ✓ 植物收割與移除；
  - ✓ 裸土再植栽；
  - ✓ 防制野生動物破壞。
- 結構管理
  - ✓ 除草；
  - ✓ 防範侵蝕；
  - ✓ 避免動物挖洞與樹木生長破壞。
- 生物管理
  - ✓ 防制動物破壞；
  - ✓ 隔離爬蟲類與人類接觸；
  - ✓ 蚊蟲控制；
  - ✓ 流浪動物管制；
  - ✓ 攻擊性昆蟲與害蟲防制。
- 氣味控制

### （一）植物管理

於能夠精準調整水位高低與其他參數的濕地系統內，植物是不需要特別介入管理的。植被管理的目的，主要是維持原計畫中所栽種的植被種類為主。

- 水位調整

- 植物收割與移除
- 裸土再植栽
- 防制野生動物破壞

### 1. 水位調整

人為操作的介入需包含一些前處理程序，如小型、低頻率的改變水位與收割等過程。而當濕地內植被減少時，也必須進行水位調整、降低污染物質、噴灑農藥與再重種植等操作，以回復濕地內的植被種類。

### 2. 植物收割與移除

濕地中的植物群會自我維護，而且每年都會成長、死亡或是再生長。在適當的環境下，植物會自然的擴散到其他沒有植被的地區，並且避開環境條件太差而無法生長的地區；但如果植被生長良好，並擴展至含氧量高的開放水域，則必須進行收割，以維持水中含氧量。

收割與落葉移除需視系統的設計來進行。在某些表面流式人工濕地的植物移除，需要一套完整的處理程序，以達到植被管理的目的；但在一個設計良好或是運作良好的植栽濾床濕地中，定期收割的必要性就變得不是那麼重要。另外，在生長季高峰期與生長季停止前，收割蘆葦將有助於濕地內氮的移除，不過磷的移除效果則比較有限。在冬季利用焚燒植被的方式，也可用來控制害蟲的生長。

地下流式人工濕地通常會利用的深水植物包含香蒲(香蒲科)、蘆葦(莎草科)、蘆葦(禾本科)等。在歐洲禾本科植物是較常利用於濕地植栽。因為它有幾項優勢，能快速生長與不會成為動物與鳥類的食物來源。但是在美國某些地方不允許利用禾本科植物，因為禾本科植物是具侵略性的植物，且憂慮會破壞本地的天然濕地與植物生態系統。而在這些案例中允許使用香蒲與蘆葦。某些小型的在槽系統會使用個別生息地，植栽具水耐性的裝飾性植物。地下流式人工濕地的植栽並不是系統主要地滋養物移除機制，也不要求要收割。冬季時，累積於底床碎石層的堆積植物可以提供冬季月份隔絕保溫的效益。深水植物的根部為微生物繁衍提供基質，且挺水植物轉換氧從葉部到根部，在地下莖與根部表面有需氧的微型區域。地下流式人工濕地其餘的深水環境傾向於缺乏氧氣。

地下流式人工濕地的植物管理不需要定時的收割與移除收割的草料。植物對污染物的攝取相對是次要的路徑，所以定時的收割與移除不會提供處理效益的意義。移除累積的乾草也不完全需要，冬季時累積的乾草可以供應保溫與隔離、防止冰冷溫度進入濕地底床。

### 3. 裸土再植栽

濕地內的土堤與溝渠要注意植物生長的完整性，如遇到有裸露的土壤表面，需重新植栽植物，預防土壤的流失與侵蝕，特別是嚴寒的冬季之前，應特別地加以巡邏檢視是否有裸露區塊，以免寒霜進入地層會影響廢水處理。

### 4. 防制野生動物破壞

依照為系統所選的植物種類與流域位置，植物管理同時也需要求野生動物管理。像河鼠與麝鼠的動物已知會消耗光濕地內所有的深水植物。只要濕地內的水位適當的維持，這些動物並不會被吸引進濕地內。

## (二) 結構管理

濕地結構管理主要是維護土堤與壩堤。土堤與壩體維護管理需要為：

- 除草；
- 防範侵蝕；
- 避免動物挖洞與樹木生長破壞。

將濕地放流至淺水時，可以從河床上定期的去除樹木的種子。如果樹木已達成熟狀態，那麼將可提供整個植群遮蔽的效果，甚至在某些情況下，還可以增加凝聚、沈積與脫硝作用的進行。

## (三) 生物管理

會挖掘洞穴的動物、具危險性的爬蟲類、蚊蟲與臭氣等都是濕地中令人困擾與麻煩問題。因地下流式人工濕地與表面流式人工濕地環境相類似，因此於生物管理也是極為相似：

- 防制動物破壞；
- 隔離爬蟲類與人類接觸；
- 蚊蟲控制；
- 流浪動物管制；
- 攻擊性昆蟲與害蟲防制。

### 1. 防制動物破壞

大批出沒會挖掘洞穴的動物，像是麝鼠或是河鼠，會使用香蒲或是蘆葦做為食物或是巢材，因此會造成系統內植被嚴重的破壞。為解決這個問題，在濕地設計階段時，可以將土堤坡度降低至 5：1 或是使用粗糙的石材進行來施工。暫時性的提高濕地水面，也可以阻擋動物侵擾。使用陷阱捕捉並再放生的方式也是可行，不過大部分的情況下，以陷阱撲殺可能也是必要的作法之一。建築圍籬也是方式之一，不過幾乎沒有什麼效果。

### 2. 隔離爬蟲類與人類接觸

危險的爬蟲類在中南美洲是非常常見的動物，大部分是蛇類、特別是北美毒蛇(moccasin)與鱷魚。要直接控制這些動物是很難的，設立警告標示、築圍籬、提高人行的木板道路、和在行人路徑旁除草等，都是降低人類與危險動物的接觸方式。操作者必須保有危機意識，並有一套完整預防方案來避免危險的發生。

### 3. 蚊蟲控制

蚊蟲控制在地下流式人工濕地中並不需要特別注意，只要將濕地水位保持低於介質表面頂端，即使蚊蟲幼蟲無活動產卵空間。另外，流動的水環境也可妨礙蚊蟲產卵繁衍。

在暖季可以在濕地中放養食蚊魚屬或蜻蜓的幼蟲，以達蚊蟲控制的效果。雖然食蚊魚屬的魚類不耐寒冷，仍可用在北邊較冷的地區，但條件就是需要每年補充新的魚苗。另外，食蚊魚亦無法在落葉堆積過密的濕地中存活，特別是在香蒲的成長季節。其他自然的生物防治方法，包含擺設蝙蝠與鳥類的巢穴、利用毛腳燕與燕子補食蚊蟲的天性，都是非常具有效果的。而微生物殺幼蟲劑，如 BT 菌(*Bacillus thuringiensis israelensis*)、BS 菌(*Bacillus sphaericus*)在某些濕地內，也是有成功的案例紀錄。蚊蟲控制在地下流式人工濕地中並不需要特別注意，只要將水位保持低於介質表面頂端。

#### (四) 氣味控制

一般而言，地下流式人工濕地因為水流主要流動於地下環境，地表水面過低，較無氣味問題。應使濕地水流狀態流暢無阻塞，避免成為滯水過久產生氣味。定期死亡植物移除、清理污泥與垃圾也會減少不良氣味於濕地萌生，且有助於減少蚊蟲滋生。

### 三、監測操作

定期監測是濕地控制管理不可缺少的部分之一。因其監測項目與表面流式人工濕地相同，詳見表 2。應定期監測項目有：

- 出流與入流率；
- 水質；
- 水位；
- 生物性指標。

都是需要定期監測與評估的。生物條件的監測包含：

- 微生物族群數量；
- 水質監測；
- 優勢植栽的覆蓋度；
- 底棲性大型無脊椎動物與魚類等。

監測一段時間之後所累積下來的資料，將有助於發現潛在的問題，並作為最佳修正方案的選擇依據。

### 四、案例討論

#### (一)、路易斯安那州 Mandeville 城

##### 1. 背景

Mandeville 位於路易斯安那州的 Pontchartrain 河的北岸，其末端為新奧蘭多市的石子路橋。在 1997 年，Mandeville 人口約為 10,000 人，且其近郊的社居也在快速擴展中。美國路易斯安那州以及美國環保署第六區域推薦使用植栽濾床人工濕地為建構新的污水處理構造之單元，這個系統設計流量為 1.5mgd，於 1989 年開始建構，並於 1990 年二月開始操作，其出流水排入 Chinchuba 海灣中。其限制排放濃度 BOD5 為 10mg/l，TSS 為 15

mg/l，NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub> 為 5 mg/l，fecal coliform 為 200/100 mL，以及 pH 值最高為 9。

## 2. 濕地設計

這個新系統建構在三個社區內原有功能型瀉湖處，且其中一個原本的單元仍舊保留用於暫時的處理用，待整個新系統完成後廢棄。第二個原始的單元則加深並改變為部分混合曝氣用的瀉湖。新瀉湖的水力停留時間大約為 15 天。第三個原始的瀉湖單元則轉換為三單元的植栽濾床人工濕地礫石層。植栽濾床人工濕地單元操作為平行的，其餘構成系統的要素尚包含了一個長條螢幕、礫石室、最終紫外線消毒以及一個出流的泵站。

這個系統設計的尺寸標準為每 1mgd 流量大小約為 5 英畝，1~2 天的水力停留時間，以及特殊的長寬比(10:1)以確保連續的流動情況。這些標準假定植栽濾床人工濕地的入流約維持 30mg/l 的 BOD<sub>5</sub> 以及總懸浮微粒接在曝氣瀉湖中處理。所有這些的標準皆被應用於 Mandeville，除了由於原先設計使得無法符合 10:1 的特殊比例這一個項目，在 Mandeville 中三個植栽濾床人工濕地的比例約為 2.5:1。

## 3. 啟動階段

這個系統在建構之初就立即開始啟用，在這個型式的一些系統中，一開始利用乾淨的水填充河床，當植物幼芽生長四到六週即引入污水。在這個案例當中，瀉湖的出流水的引入在種植植物階段即開始，而日常用水則在瀉湖操作後開始流經地下流式。在這個場址中並沒有任何特殊的開始過程，然而，卻必須有一個獨特可長年使用的維護過程，這個維護過程從拔除雜草以幫助生長到香蒲生長範圍的擴張都包含在內，甚至還包括完整的植物生長及移除和處理這些生長的植物。

## 4. 監測

在 1991 年，美國環保署選擇 Mandeville 系統進行一個詳細的八週成果評估。這項成果包括單獨的系統入流水流量計、植栽濾床人工濕地入流水及出流水、追蹤言就不同的水力停留時間以及每週的混合採樣及水質測試(包含 BOD, COD, TSS, TKN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>, TP, DO, pH 以及溫度)。

這項研究期間於 1991 年六月中旬開始，並完成於 1991 年九月底，其中平均流速為 1.16mgd，顯示這個系統可以達到 77% 的第二年操作設計容量，這反映出其成長非常快速且適合建造於這個社區，其餘水質調查資料列於下表。而在追蹤研究中，僅有單元二以及單元三進行測試，因為單元一的值不小心被關閉，結果為當流速為 1.352mgd 時，可得到水力停留時間為 17.8 小時，這與相同流速的理論值 18 小時相當符合(假設孔隙率 42% 的岩石或砂礫河床)。如果單元一也參與操作，相信整個系統的水力停留時間會更接近一天的理論值。

在這個系統氮的濃度在未處理的污水中並無明顯的季節傾向，但在瀉湖的出流水中在冬季有較高的值，顯示在地下流式中並無有效的處理，造成此一現象的原因為這個系統的出流水出了其排出的限制。這個情況顯示瀉湖在寒冷的天氣中並未有效的進行硝化作用。

Parameter	System Influent	Wetland Influent	Wetland Effluent
BOD (Total) mg/L	154	41	10
BOD (Soluble) mg/L	ND <sup>1</sup>	21	8
COD (Total) mg/L	349	79	43
COD (Soluble) mg/L	ND	40	31
TSS mg/L	132	59	7
VSS mg/L	ND	39	5
TKN mg/L	ND	5	3
NH <sub>4</sub> -N mg/L	ND	1.4	2.1
Organic N mg/L	ND	3.1	1.1
NO <sub>3</sub> -N mg/L	ND	4	0.2
TN mg/L	ND	9	3
TP mg/L	ND	3	4
Fecal Coliforms#/100ml	ND	TNTC	TNTC <sup>2</sup>
DO mg/L	ND	2.4	1.8
pH	6.9	6.9	7.0
Temperature °C	ND	31.8	30.5

<sup>1</sup>ND = No data available.

<sup>2</sup>TNTC = Too numerous to count, sample taken prior to disinfection

## 5. 結論

- 控制河床水位面的方法與允許河床保持排水，可以改善這個系統。
- 改變這個系統(包括在旁邊及低於四分之一處增加各種樣式的出流孔、在單元內安裝排水的輸送管)會降低出流水處水位面，以致於礫石表面會較為乾燥。
- 表面流很快經過入口及出口處，並且不會導致阻塞，主要為缺乏水力梯度坡度所致，此項已經於 1991 年被 EPA 研究證實。
- 水力梯度為平底的系統可以裝備一個水位控制儀器在系統末端出流口處。
- 在這個系統蘆葦可以吸引河鼠以及麝鼠這些偏好以蘆葦等植物為食物或築巢材料的動物，河鼠會吃大部分的蘆葦並且在其內部鑽洞，而這是造成各單元間水滲漏的原因之一，我們可以利用小的麻袋填充水泥以及砂石可以改正這種滲漏的問題。
- 植栽濾床人工濕地少量獲取氧氣將無法有效進行氮的硝化作用，而在 Mandeville 系統中，我們可以由曝氣湖提供有效的氮移除來獲得氮的排放限制。

## (二)、紐約州米諾村

### 1. 背景

米諾村是美國紐約州西拉鳩斯市西邊的一個小型住宅區，在 1993 年，其每日平均污水處理量約為 0.35mgd，但其尖峰流量有紀錄者最高約為 1.6mgd，曾在 1990 年以及 1993 年努力減少滲透以及入流量卻沒有成功，因此紐約州政府環境保護協會 New York State Department of Environmental Conservation (NYSDEC) 強制規定米諾村必須改善這種違反規定的排放。

在 1994 年這個村決定利用植栽濾床人工濕地系統來處理初級的排放水至二級排放水標準。植栽濾床人工濕地系統在潮濕的氣候可以處理 640000gpd 的流量，而乾燥的氣候條件下可以處理 160000gpd，但實際建構的系統叫原本設計來的小，最終的處理效能約為 130000gpd，本系統的處理目標也因此修正為 BOD<sub>5</sub> 濃度小於 30mg/l。

### 2. 濕地設計

這個植栽濾床人工濕地系統包含了三個可以進行平行操作模式、結合平行與連續模式以及連續模式的操作單元，單元一、二的尺寸大約相等，而單元三則明顯較小並且呈現不規則型態。在入口的底部深度約為 0.5 公尺，而其坡度約為 1%，因此出口處的深度為 0.9 公尺，其整體平均深度為 0.76 公尺。每一個單元被分割成兩半部，其中一半種植 Phragmites，而另外一半在兩個單元中種植大筲草，一個則未種任何植物，此方法可以加以比較為種植區域與大筲草，以及大筲草與 Phragmites 間的差異，其示意圖如下圖所示。此外，在米諾的植栽濾床人工濕地系統也包含了多種不同的操作模式，如串聯操作方式等，亦可由下圖窺知一二。

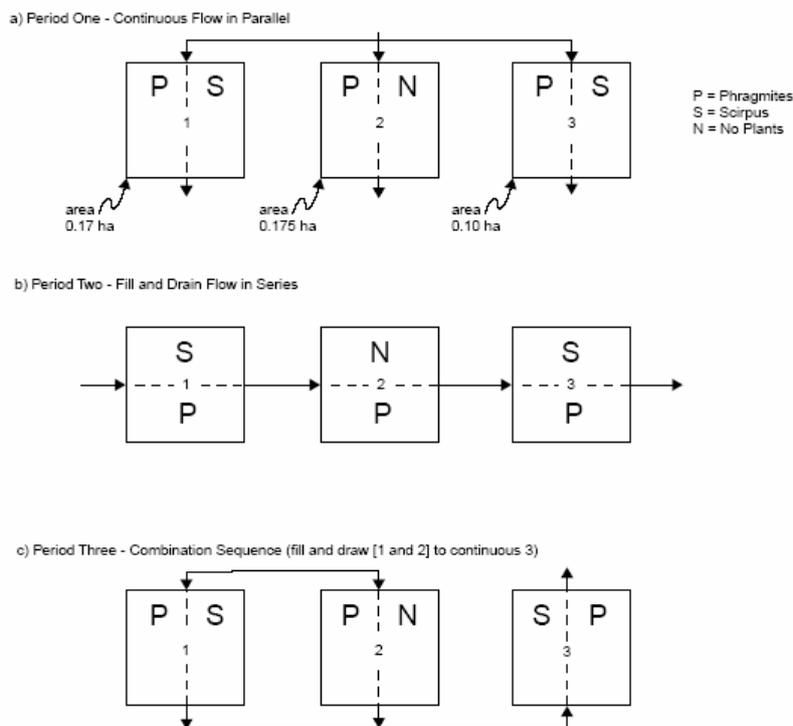


圖 13 米諾的植栽濾床人工濕地系統多種不同的操作模式

### 3. 啟動

米諾的工作因為必須遵守協定，故完成於惡劣的天氣條件以及緊湊的建構時間，在 1995 年，這些濕地單元僅接受現行過濾後的二級排放水。

### 4. 系統操作

米諾的植栽濾床人工濕地系統用以處理一級污水可以分成三個階段。第一階段為 1996 年一月到 1997 年三月，這個階段中系統就如同傳統的植栽濾床人工濕地系統一般以三個平行的單元進行操作；第二個階段為 1997 年四月到 1998 年三月，這三個單元以連續的方式進行操作並且利用一個連續的 fill-and-drain 模式進行；最後一的階段為 1998 年三月至今，這個系統利用一個特別的填滿-排出模式，單元一及單元二以平行且輪流的填滿-排出模式進行，彷彿按照順序的一組反應爐，而單元三則跟隨著前兩個單元以連續流操作，且水位維持相同高度。

#### (1) 傳統的平行操作

比起原本的設計，米諾的地下流式系統在移除 BOD<sub>5</sub> 方面顯得非常粗略，雖然這三個單元平行操作，但確有著不同的水力停留時間。這個成果的錯誤來自於僅以有限資料(大部分的植栽濾床人工濕地系統用以處理潟湖以及池塘出流水)來設計的方程式。這個方程式假設 BOD<sub>5</sub> 移除與溫度有關，然而污染物的移除在米諾這個地方並未發線與溫度有重大的關連性。

在米諾的植栽濾床人工濕地系統，處理 TSS,TKN 以及總磷的移除在各個時期與其他的植栽濾床人工濕地式系統都非常相似，SS 以及 BOD 的移除相當的好，反之 TKN 與總磷的移除就顯得不佳。

Clarkson 的研究發現，比較單元內種植與未種植區的處理成果，未種植的那一半單元與種植的一半單元處理所有污染的效果一致，他們也發現在 Phragmites 單元(種植 Scirpus)可以移除更多的 COD，TKN 以及總磷。

#### (2) 連續流、連續的填滿-排出操作

米諾的植栽濾床人工濕地系統中的三個單元利用連續流、連續的填滿-排出操作進行操作將近 12 個月，表面水是利用排出水的閘門開關來控制的，當閘門關閉時，出流水會經由較高的出流管流出。

一個典型的循環開始於污水流經填滿的單元一，單元一的排水閘門會在單元二以及單元三的閘門關閉時打開，二十四小時過後將單元一的排水閘門關閉並打開單元二的活門，再經過二十四小時，單元二的閘門關閉並打開單元三的活門，由於米諾的單元一到三都有其特殊的海拔高度，故可以進行此種操作。當流速達到 130000gpd 的狀況下，在進行排水時單元一及單元二約需花費四到五小時以達到其最高水位，而單元三則需要約三小時；進行填滿時單元一、二需要二十四小時，而單元三僅需時二小時。

這種方式下去除 BOD<sub>5</sub> 的效果較傳統方法為佳，當系統以一較高的流速進行處理時其出流水平均皆低於 15mg/l，TSS 的處理也相當良好，單在 TKN 以及總磷的移除上就沒有明顯的改善。而這個操作方式的一個重要改善就是降低硫化氫的臭味。

#### (3) 輪流平行填滿-排出(連續流)操作

這個操作始於 1997 年三月，其中單元一及單元二進行輪流平行填滿-排出(連續流)操作，而單元三則維持飽和模式進行操作。其污染移除成果在 BOD<sub>5</sub> 以及 TSS 仍舊維持良好的表現，且在氮的移除上也有重大的增加。

## 5. 討論

- 填滿-排出的操作可以有效增加 BOD<sub>5</sub> 以及氮的移除。
- 在傳統的植栽濾床人工濕地系統中，BOD<sub>5</sub> 的移除與溫度無關。
- 當場址鄰近住家時，因為潛在的嚴重臭味問題，傳統的植栽濾床人工濕地系統必須設計較低的有機負荷率。

### 3.1.3 水生植物系統 (Aquatic Plant System,APS)

水生植物系統為利用水生植物處理工業或家庭廢水的人工系統。設計達到特定廢水處理目標。水生植物系統主要可以分為兩類：

- 1.系統種植如布袋蓮、浮萍與圓葉植物等浮動水生植物。
- 2.系統種植如水蘊草、水荖草與水田芥等深水水生植物。

水生植物系統的操作、維護與監測項目如下所示：

- 操作項目
  - ✓前處理機制操作
  - ✓曝氣操作
- 維護管理
  - ✓結構維護管理
  - ✓植物管理
  - ✓蚊蟲管理
  - ✓污泥管理
- 監測操作

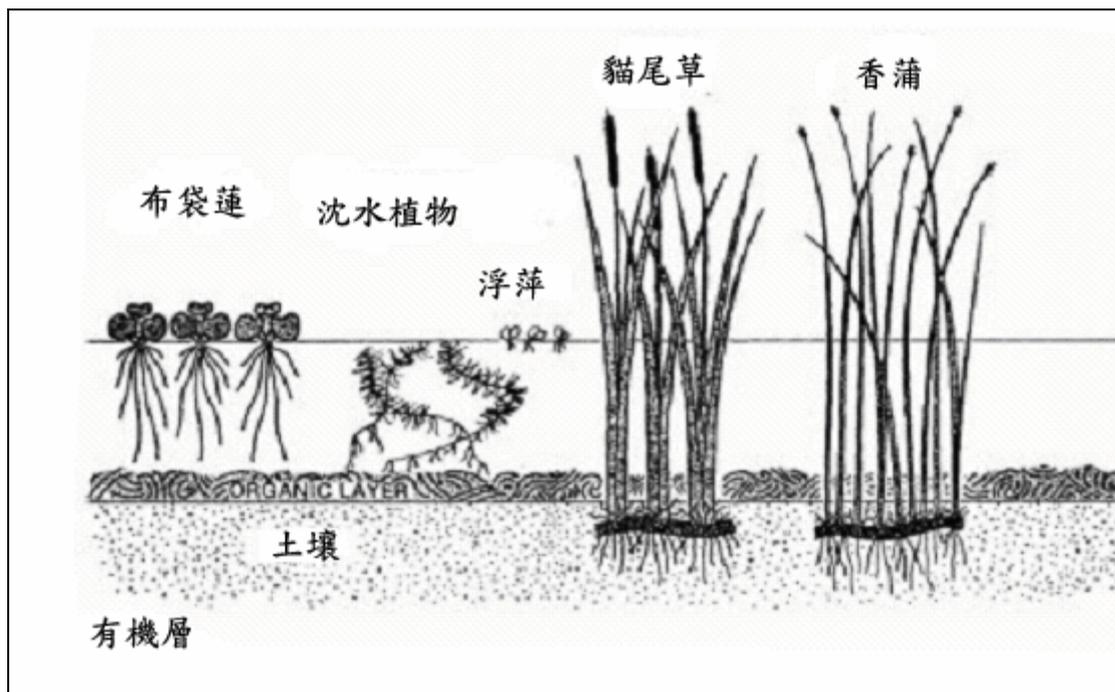


圖 14 水生植物系統示意圖 (資料來源：U.S.EPA，1988)

#### 一、操作項目

水生植物系統透過水生植物產生生化反應與物理機制達到淨化水質功效。但水生植物處理效能不能長期確保一致。若能將污水流入系統內之前有前處理操作，進入系統後利用曝氣操作，都有助於提高水生植物系統處理污水效能與防制蚊蟲效果。水生植物系統操作項目如下：

- 前處理機制操作
  - ✓清淤與停滯時間控制

## ●曝氣操作

- ✓曝氣補充方法
- ✓蚊蟲防制
- ✓噴灑時間控制
- ✓清除生物污泥

### (一)、前處理機制操作

#### 1. 清淤與停滯時間控制

水生植物系統會受到氣候、水生植物生長密度等因素影響，廢水處理效能並不穩定。因此於入流系統前，可作簡易的前處理動作，增加後續流入水生植物水池時處理效率。前處理的機制可以有短期曝氣池、初沈池與循環過濾池，這些都會有效的降低水流中的雜質與沈澱污泥。不過，需加以注意前處理機制的清理與停滯時間等。若能增加降低水中磷的處理機制，更能減少水生植物水池的藻類滋生。

### (二) 曝氣管理

曝氣是用於氣味與蚊蟲控制。水池的曝氣可使  $DO > 1 \text{ mg/l}$ ，使水池適合食蚊魚生長與降低  $H_2S$  氣體產生。

而曝氣管理會有幾項重點：

- 曝氣補充方法
- 蚊蟲防制
- 噴灑時間控制
- 清除生物污泥

#### 1. 曝氣補充方法

美國聖地牙哥使用較佳的氣泡噴灑器 (bubble diffusers)，使  $DO$  約在  $0.5-1.0 \text{ mg/l}$  之間。曝氣系統容量也約在兩倍生物需氧量負載。於日光期間，一自動化系統將回收與釋放使維持  $DO > 1 \text{ mg/l}$ 。當布袋蓮系統於光合作用，將會自動傳送氧氣至根部，有助於降低曝氣補充設備與能源消耗。

一曝氣補充方法是利用噴灑灌溉。在此方法中，廢水不斷被循環噴灑至布袋蓮上。此方法有經常利用於冬季作溫度控制，因此建議使用此方法應使用對溫度有較大適應力的植物。

#### 2. 蚊蟲防制

而聖地牙哥對於補充曝氣所做的噴灑灌溉經驗，發現有增加曝氣與降低蚊蟲族群的雙重成效。降低蚊蟲族群數量的原因，可能是於夜晚的似雨噴灑，擾亂水面與空氣間接妨礙蚊蟲產卵。

#### 3. 噴灑時間控制

不過根據聖地牙哥經驗顯示，長期噴灑後對於布袋蓮有黃化枯萎現象。將噴灑週期改進為每 12 小時一次，有助於改善此負面效果。另外，雖然噴灑有利於提高溶氧量與降低蚊蟲數量，但會大幅提高抽水的費用而降低此方法的實用性。

目標為沿著水池的平均 DO 濃度維持在 1-2mg/l。假若 DO 濃度低於 1 mg/l，應增加額外的曝氣或是減少入流量等，直到水池恢復。這操作可利用探針自動化探測 DO 濃度並直接進行增加曝氣與減少入流管理。

#### 4.清除生物污泥

經過數月操作，良好的氣泡噴灑器可以製造出濃厚的生物污泥組織，特別是如果曝氣是間歇性會更加嚴重。而每月於水池內利用粗刷子可以有效的控制生物污泥量的成長。

表 11 水生植物的操作項目與週期

操作項目	週期
收割栽植物	定期
灑水	傍晚
收割布袋蓮	3-4 週 1 次
密集式的整修浮萍類植物	(溫暖時期) 每週 1 次

(資料來源：U.S.EPA, 1988)

## 二、維護管理

水生植物的選擇需有容易繁殖與快速繁殖優點，系統透過生化反應與物理機制達到淨化水質功效。植物生長攝取滋養物後，透過割除方式淨化水體。因此植物生長速率與收割頻率會影響淨化成效。水體環境若管理不當，容易滋生蚊蟲造成病蟲害，因此可透過食蚊魚、前處理過程與生物藥劑等，降低蚊蟲族群數量。而曝氣動作也有助於降低蚊蟲數量與水質淨化。水生植物系統維護管理項目：

- 結構維護管理
- 植物管理
  - ✓ 氣溫條件；
  - ✓ 植物選擇；
  - ✓ 植物收割；
  - ✓ 草料處理。
- 蚊蟲管理
- 污泥管理

### (一) 結構管理

良好的入水流分系統與獨特系統結構可以有效的降低氣味與蚊蟲滋生問題，水池上端的有機負荷率維持在厭氧狀態，與回流機制都有助於降低此兩種問題。另外，供給與回收水流可以控制水池的有機負荷量。而長寬 10:1 的水池，能表現出最佳效果，且降低短循環系統方式。而擋版和入水流分配設施的多樣性，有助於維持水流的停留時間。多重出入口也有助於系統分配與回收污水，降低污染物濃度。多重歧管可以保持水流以低速進入水管，維持出水口水流穩定。

## (二) 植物管理

### 1. 氣溫條件

氣候與水溫對於水生植物是有重大的影響。布袋蓮的水生植物系統於美國通常位於氣候溫暖的南部。適合布袋蓮生長的水溫大約介於 21°C 與 30°C 之間。超過 12 小時 -3°C 氣溫即會摧毀葉片，暴露於 -5°C 超過 48 小時即會損壞植物。因此過冷的季節與區域不適宜使用水生植物系統；除非利用將系統建造於溫室中或保持氣溫於適當的範圍內。而浮萍的水生植物系統能適應大約如 7°C 低溫的區域。

### 2. 植物選擇

常見的水生植物系統的水生植物有布袋蓮、圓葉植物、浮萍與部分沈水植物。布袋蓮是非常多產的光合作用植物，於部分溫熱帶區域溫度較高季節，布袋蓮族群會快速大量繁殖，雖有利於污水處理但也次嚴重的問題。圓葉植物於冬季與溫暖季節對於氮與磷的攝取無大差異，因此於冬季時分布袋蓮無法有效生長與處理污水時，圓葉植物可以替代彌補不足。浮萍具快速繁殖能力，約比布袋蓮快 30%。浮萍系統的水池有較低藻類濃度，可以於低空氣濃度環境生長，且能做為鳥類與動物的食物來源。沈水植物的光合作用是於水中進行，可能會被藻類遮蔽和對厭氧環境的敏感性，使對移除效率降低。且晚上會進行呼吸作用，會與水生動物競爭氧氣。

### 3. 植物收割

水生植物收割次數與數量，依水質、植物生長狀態與生長率、動物與昆蟲（如象鼻蟲）捕食有關。收割水生植物主要的目的，是讓植物保有較高的新陳代謝，以便吸取水中的營養物質，達到去除水中營養鹽的功效。例如，透過經常性收割布袋蓮（約三到四周一次）將可有效達到去除水中營養物質。水中磷的去除，也唯有靠修整植物的方式，才能夠有效的排除。在某些受象鼻蟲影響而降低布袋蓮數量的地區，如以選擇性的方式來收割布袋蓮，將可以避免其他植物受到影響。而在溫暖時期，則需以每週一次密集式的修整浮萍類植物，以達到去除水中營養物質的功能。

### 4. 草料處理

收割後的布袋蓮，通常經過乾燥、掩埋或平鋪於地面上、或是栽種於土壤中。不過，風乾過程會產生顯著的氣味。水生布袋蓮可以很快的變成堆肥。不過如果植物不夠乾燥，那麼所富含的水分將會降低堆肥的效果，並且產生不必要的液體。另外，將浮萍平鋪於地面上即使不用風乾，也可以做為動物的食物來源。對於布袋蓮或是其他植物進行持續地修整，將有助於水生植物生態系統的生長。

## (三)、蚊蟲管理

在美國很多地區，水處理系統是否能夠被採納使用，所考慮的重要因子經常是病媒蚊的滋生情況。而客觀地評斷病媒蚊滋生的標準，主要是以蚊子的數量是否低於具傳染疾病能力的族群數量、或是被騷擾可忍受度來決定。用來控制蚊子族群數量有下列幾種方式：

### 1. 池塘畜養食蚊幼蟲的魚類

2. 利用較佳的前處理過程，減少水生植物系統水體中有機質數量，以保持水體在好氧狀態
3. 再循環性廢水來處理受污染廢水
4. 增加收割與栽種水生植物的頻率
5. 於傍晚時間進行灑水(water spraying)
6. 使用化學藥劑(殺幼蟲劑)或使用生物防治藥劑，如 BT 菌(*Bacillus thuringiensis israelensis*)
7. 利用曝氣設備(aeration equipment)，增加溶氧量

用有效的進行蚊蟲控制，包括維持 DO 於 1mg/l 與增加收成頻率。利用化學藥劑對於水生植物系統較無法達到功效，因為蚊蟲幼蟲會躲在漂浮植物葉面子下，使化學藥劑無法直接作用。

在有機質過高的池塘，水體常呈現無氧狀態或厭氧狀態，因此食蚊魚類（通常是 *Gambusia* 屬的魚類）非常容易死亡於有機直負擔過重情況，而導致蚊子族群量增加。同時冬季低溫也會影響食蚊魚的活動，因此若要全年使用水生植物系統，必要不斷補充魚苗等。其他類似於食蚊魚效果的生物包含金魚、蛙類、草蝦等。若有必須控制水藻，可利用吳郭魚與日本鯉魚等。除了魚類的族群量降低的因素之外，在百合科(hyacinth)植物盤根錯節的地方，蚊子的密度也會大幅提高。因為盤根錯節的水生植物，並不會使得魚類容易生長，相反的，植物會將水體劃分成數個封閉水域(pockets of water form)，有氣穴存在而於群無法到達，反而增加了蚊子於水中氣穴繁衍幼蟲。

#### (四)、污泥管理

污泥是由廢水固質與植物碎屑組成。污泥通常是水生植物系統水池最後被移除。布袋蓮水生植物系統可有效於預先處理污泥累積的效用清理布袋蓮水池頻率依賴於處理的層級與建議植物收割頻率。污泥清理頻率如下：

表 12 不同布袋蓮水池類型污泥清理頻率

水池類型	清理頻率
淺水高效率系統的主要單元	每年 1 次
第二單元	2-3 年
第三單元	2-3 年
深水第二單元（定期收割）	5 年 1 次
第二單元（不定期收割）	每年 1 次
季節性使用的系統	每年 1 次

（資料來源：U.S.EPA, 1988）

#### (五)、氣味控制

因為單元的水可能一直是厭氧狀態，所以有必要控制溢出的氣味。後曝氣可應用在這些狀況。冬季季節性浮萍系統也需關注氣味問題。這些單元可能由於水中溫度引發密度變化，而於春秋兩季過度運轉。在過度運轉時節水底物質復甦可能是導因於可厭的氣味。非但浮萍系統的單元可能會發生這些問題，其他類型系統於冬季也會發生。典型解決方式是將這些水

池設置再離居住低至少 0.4 公里的地方。季節氣溫不同也可能在水池創造比重流與短循環，除非能提共足夠的阻礙。

### 三、監測

水生植物處理系統監測項目與人工濕地相同，詳見表 2。監測項目有：

- 出流與入流率；
- 水質；
- 水位；
- 生物性指標。

都是需要定期監測與評估的。其中 DO 每日最少需要量測兩次。期望目標為沿著水池的平均 DO 濃度維持在 1-2mg/l。假若 DO 濃度低於 1 mg/l，應增加額外的瀑氣或是減少入流量等，直到水池恢復。生物條件的監測包含：

- 微生物族群數量；
- 水質監測；
- 優勢植栽的覆蓋度；
- 底棲性大型無脊椎動物與魚類等。

尤其為了避免蚊子族群數量的增加，所飼養的魚類數量也要監控，還包括植被覆蓋的密度。與人工濕地的監測目的一樣，紀錄一段時間之後所累積下來的資料，將有助於發現潛在的問題，並作為最佳修正方案的選擇依據。

### 四、案例討論

#### (一) 加州聖地牙哥市

##### 1. 背景

聖地牙哥這座城市的水源供應至少 90% 來自輸入水，依預訂的需求，在 2000 年之前認定可用的水資源會短缺，聖地牙哥早在 1950 年代即開發滿足未來的水資源需求，早期試圖間接的處理廢水，藉由沖洗和蒸餾海水直到適於飲用需求，然而並未成功。

廢水再利用的計畫名為 Aqua I，運作於 1981 年九月至 1986 六月。附帶的試驗性植物包含下列的處理過程：用百合科植物間接的處理，用石灰穩定懸浮物、壓砂過濾、逆滲透技術，碳的吸附，臭氧、紫外線光消毒和百合科植物的消化造成甲烷的生成。Aqua I 的處理設施的容量為 114 m<sup>3</sup>/d (30,000 gpd)。

##### 2. 濕地設計

為了聖地牙哥的混合水域系統，過程設計包含以下的考慮：

- 污染的表面載荷率
- 操作水深
- 過程動力學

● 水溫效應。

水生系統被考慮成混合物，由於廢水需求通氣的特性。

### 3.操作項目

#### (1) 水文操作

聖地牙哥的研究學者相信操作水深對於水域系統是相當重要的，相對於過程實行和定義了水力的延遲時間，以及在池塘系統的混合條件。建議操作水深對於混合階梯進流的水生百合科植物系統，通風為 0.9-1.2 公尺。

混合階梯進流百合科植物系統的實行，再循環和補充通氣證實了穩定相對於流出物的品質。即使在階梯進流發展前，流出物水質很好(BOD<sub>5</sub> 和 SS 少於 50mg/l)，不管池塘的條件 DO 標準低或不存在，以及池塘有顯著氣味。

在聖地牙哥有兩個限制條件操作百合科植物系統，規定操作的習慣不可以在其它地點作因子考慮。一個百合科植物系統必須沒有氣味和沒有蚊子。

這些限制是必需的，由於在池塘中最小的溶氧量 1mg/l，每畝中沒有蚊子的幼蟲。

#### (2) 溫度效應

所有水生處理系統的實行為水溫的相依，根據實驗的研究和文獻資料的呈現，發現到一個修改的 van't Hoff-Arrhenius 溫度關係，可以預估水溫在廢水處理中使用水生系統的效應。根據實驗研究，水生的百合科植物和植物系統，預估溫度係數大約 1.09。

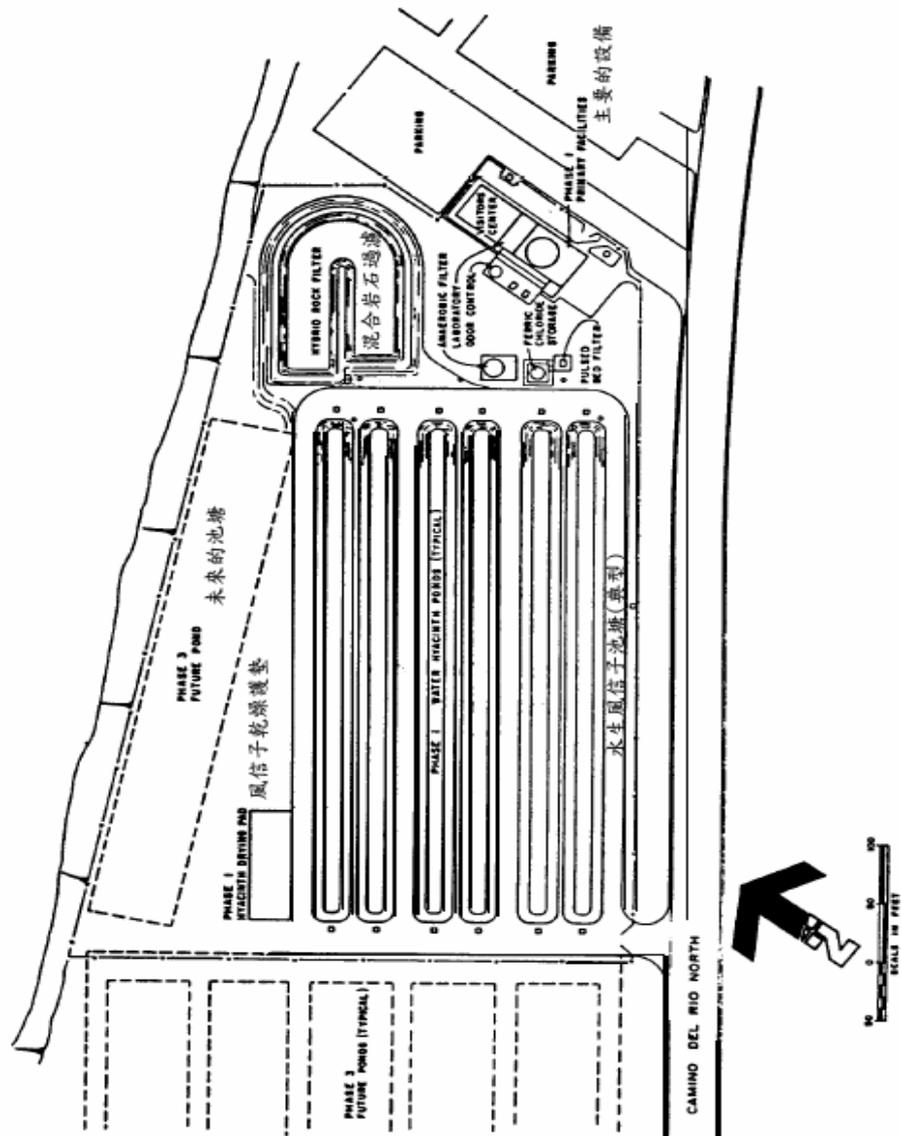


圖15 加州聖地牙哥水栽試驗植物現地計畫

#### 4. 收割與百合科植物產值

收割伴隨著在試驗性的設施主要提供了開放式水表面，以及低植物密度，使得更有效率的控制蚊子幼蟲。百合科植物在收成的時候用卡車裝載，從池塘移回來。

百合科植物產值在第一年的運作明顯高於有相似設備的佛羅里達州。第二年的平均產值，67 乾公噸/ha-yr (30 t/ac-yr)，

較其它裝置更為獨特。較低的第二年產值可能是在池塘中有系統的收割，並且維持較低植物密度的結果，由於主要收割的目的在於蚊子的控制，已經沒有試圖將處理成果與百合科植物生產力相關連。

## 5. 氣味和氣味控制

試驗性植物的設計包含了防備，控制氣味從不同的處理過程。控制氣味的預備包括：

- 在分開的建築物圍住主要的集水區和旋轉圓盤濾器，以及經由碳吸附作用裝置，退散從建築物的空氣消耗。
- 在厭氧的濾器泥狀覆蓋層薄膜反應器(SBFFR)和混合岩石濾器(HRF)加速硫化物和含鐵的氯化物。
- 在每個通風的出入口提供碳濾毒罐吸收氫硫化物和其他的氣味。通風的出入口包含了通風裝置，在廢水倒入池塘之前，增加處理廢水的 DO 濃度。

氣味控制的測量替主要的設施準備，成功地預防氣味在鄰近的試驗植物。除了在 SBFFR，當碳的濾毒罐耗盡需要更換時，碳的濾毒罐在 SBFFR 和通氣的出入口也控制了氣味。數個氣味的事件結合 HRF，大多的問題發生在第一次數個月的運作。在起始 1 個月後，由於氣味的問題，這個裝置在 1984 年 6 月被取出了設備。當含鐵的氯化物加入了 HRF 的流入物在六月末，氣味變的較不強烈且較不時常發生。然而，氣味的隔離事件被記錄，當形成池塘發生在 HRF 的表面大多數由於塞滿了中間。

最嚴重的氣味問題伴隨著百合科植物的池塘。在流出物的箱子和通氣的管子要注意氫硫化物。最主要氣味的原因是在廢水中硫酸鹽的減少，在底層爛泥堆積，使得氫硫化物在厭氧的條件。解決氣味的問題在於改變池塘運作的方法，如前面討論，為了有效提升 DO 的濃度，滿足氧氣在廢水的需求，產生 DO 的殘留至少在 1 mg/l。

## 6. 蚊蟲控制

最主要傳染媒介控制的目標在評估蚊子在百合科植物池塘的繁殖潛力，以及找出有效的措施控制蚊子的數量。觀察改變蚊子幼蟲的數量和食蚊魚，成年蚊子和無脊椎的蚊子掠食者，附帶的觀察有關池塘的生態也一併實施。

當池塘中維持足夠的食蚊魚數量，蚊子會充分地控制。然而，較低的 DO 遍及池塘和冬天較低的水溫，魚的族群減少，需要其它的蚊子控制措施。

## 7. 討論

根據 3 號池塘的成果，推斷出一個階梯進流系統，能增加池塘的處理容量。流入物的引進以 15.2 公尺間隔，導致整個池塘幾乎均勻的載荷分配和有效的處理，流出物 BOD<sub>5</sub> 和 SS 濃度遠低於次要處理的限制。然而，遍佈池塘需要連續的通風維持有氧的條件，才可消除氣味的發展。空氣的需求與池塘的 BOD<sub>5</sub> 荷載成正比。再循環提供進來的廢水初始的稀釋，幫助分佈載荷遍佈於池塘。較高的再循環率，流出物混濁增加。高混濁度會導致過度的氯需求，因此增加了加氯消毒耗費。

## (二)、德州奧斯丁

### 1. 背景

德州從 1970 年代開始，已經了解如何利用布袋蓮來增進池塘排出物之穩定性。包括奧斯丁市在內，各地已進行許多關於百合科植物田野調查、試樣調查及大規模研究。應用水生百合科植物改善廢水處理是個有效的方法，但其有一個問題：冬天被凍壞的植物無法循環使用。

1977 年，布袋蓮被引進到一個面積約為 1.2 公頃充滿氮的子集水區，其後的好幾年，都被用在季節性地改善水質。但此子集水區的結構並不適合布袋蓮，在每年冬季來臨時，總是會把植物們凍死。因此溫室被提出來用以保護冬季的布袋蓮，使其整年都可以用在廢水處理。

在 Hornsby Bend 擴大及創新計劃案中，布袋蓮被引進至三個設置有溫室的子集水區。這個 Hornsby Bend 布袋蓮效能計劃由美國環保局建築補助計劃案出資；也是由美國環保局出資的第一個溫室布袋蓮效能計劃。

### 2. 一般操作

#### (1) 操作特性

為達成功的廢水處理，首要就是維持子集水區中水百合之穩定性。由於此處的水百合是由一瀉湖移株，故前六個月的不規律入流量操作，目的為使水百合可適應此地環境。1987 及 1988 年入流及出流水的各項水質特性 (BOD<sub>5</sub>, SS, NH<sub>3</sub>-N, and NO<sub>3</sub>-N) 如下表所示：

表 13 1987 與 88 年入流及出流水的各項水質特性

Date	pH		BOD <sub>5</sub> , mg/L		TSS, mg/L		VSS, mg/L		NH <sub>3</sub> -N, mg/L	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
9/87	8.4	7.1	97	30	140	31	90	28	22.9	38.6
10/87	8.3	7.8	39	11	120	19	169	22	26.5	43.0
11/87	8.3	7.8	153	9	245	21	240	17	26.1	39.3
12/87	8.2	7.7	106	14	142	24	111	14	41.9	39.1
1/88	8.1	7.6	79	18	127	17	96	16	121.1	31.0
2/88	8.1	7.7	84	45	84	36	71	12	95.6	36.4
3/88	8.1	7.6			155	41	91	37	77.6	42.0
4/88	7.9	7.6	357	139	162	47	160	49	76.8	42.5
5/88	7.9	7.4	143	34	121	26	68	8	43.5	21.9
5/88	8.0	7.7	156	30	117	30	79	23	47.0	33.9
7/88	8.1	7.7	99	28	132	19	104	12	24.7	37.4

\* Monthly average of approximately 12 samples (composites) per month.

為使未來有相對穩定的承載率 (loading rates)，入流廢水的速率應保持固定。本區未滿足 30mg/l 的 BOD<sub>5</sub> 及 90mg/l 的 SS，使月平均流量保持在最大值不超過 7570m<sup>3</sup>/d。1989 年六月，科羅拉多河不允許任何的池塘排出廢水流至其中。各項有關未來廢棄物的計劃 (包括利用 HBHF 排出物)，估計可灌溉附近 80 公頃的農地。當此計劃實施後 1986 年的二月，此子集水區的 BOD<sub>5</sub> 濃度只有約 10mg/l。

## (2) .溫室設計

三個布袋蓮子集水區被面積約為 2 公頃的溫室結構覆蓋以防止寒冬凍壞植物。溫室由鋼筋混凝土結構組成，而其所使用的強化玻璃纖維透光率為 65%。溫室的透光率會影響植物生長，故玻璃纖維面板隨時都在監控中。

溫室邊牆高約 3.4 公尺，且設計七個可讓人及機具通過的門。在開放的通道中有擺置可移動的障礙物用來防止蛇或其他掠食者入侵吃掉食蚊動物。這些障礙物同時也防止以池塘為家的大型齧齒類動物靠近。在溫室的門上及屋頂上各處都設有通風裝置，且這些通風裝置上還裝有紗網防止成蚊飛出。

由在奧斯丁地區進行的其他布袋蓮計劃經驗可知，腐植質的累積通常在相對較高的速率及集水區的入口底處發生。希望部分被抽乾的區域可進行底泥清理而不需要再補充植物或是其他生物。有關在嚴寒氣候下操作 HBHF，這裡也有幾個無法解答的問題。第一個就是在寒冷的氣候下布袋蓮的生存狀況。因為在 1985-86 年間的冬天室外溫度較溫和且在使用溫室時沒有補充熱能的問題。1986 年夏季室外溫度升高到約 37°C，但並未造成溫室內植物因過熱死亡(此時溫室內溫度為 55°C)。另一個問題就是光線的穿透率：因為經過長時間後，玻璃纖維的透光率會減低。

## 3.維護管理

### (1) .植物管理

溶氧濃度在自然的通風下可高達 5mg/l。每天都會將小型植物及瓦礫碎片自通氣裝置移走以保持植物有足夠的氧氣行光合作用。

在初期的五個月並未收成，但其後每年的七月及八月都會持續地有收成。耕鋤機被用來將子集水區周圍(邊長約 1.2-1.8 公尺)的布袋蓮移除。此舉除了可使通風良好外，也使蚊子幼蟲的掠食者容易進入。收成的植物首先先曬乾除水，之後與活性污泥混合然後回收至市立公園及再生部門。這個回收計劃在 1987 年開始執行。

### (2) .蚊蟲控制

如何有效控制蚊子是設計集水區的重要考量之一。首要方法通常是利用食蚊子幼蟲及成蟲的掠食者，包括：食蚊魚，草蝦，青蛙及一些食蟲植物。在本計劃中有八個開放區域，其水中含氧設計為適合草蝦及食蚊魚生存的環境。這些區域的面積有 55.7 平方公尺及 74.2 平方公尺兩種且在外圍設有圍籬以防布袋蓮生場至此區改變其含氧。光線可穿透水面使在底部的藻類可成長。這些開放區域也確保了食蚊魚可存活。在經過第一階段的布袋蓮植物處理過的廢水，會流經此區的一個兩段流降(總高度差約為 3.4 公尺)。於此處理後的排出廢水其溶氧濃度可達 5mg/l 以上。

應用生物控制來減少蚊子數量也十分有效，尤其是利用蜻蜓。蜻蜓的幼蟲以蚊子幼蟲為食而其成蟲也以蚊子成蟲為食。但值得注意的是當天氣變冷時，會有蚊子成蟲移入。

#### 4. 監控計劃

為了評估布袋蓮處理污水的效能，入流廢水及出流水的幾項水質特性(BOD<sub>5</sub>, SS, VSS, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N and TP)都在監控中。在 1986 年間研究工作包括了：發展 BOD<sub>5</sub>, SS 及營養鹽去除之數理模式與布袋蓮系統內之硝化過程。在這樣特殊的生態環境中，持續的研究及監測是必須的。生物的穩定及成功的濕地廢水處理並非一蹴可及，但這個計劃具有可靠的處理效能值得繼續研究與觀測。

### (三)、佛羅里達州奧蘭多市

#### 1. 背景

奧蘭多市內的鐵橋廢水處理廠 Iron Bridge Wastewater Treatment Facility, IBWTF)建造於 1979 年。其為達三級廢水處理，用初級澄清法及生物旋轉盤(RBCs)去除含碳的 BOD<sub>5</sub>、水中生物旋轉盤去除氮化物、以化學加成反應及沉澱作用去除含磷物，然後以快濾池最後處理。此廠之排放標準為 5mg/l 的 BOD<sub>5</sub>，5mg/l 的 SS，3mg/l 的 TN，及 1mg/l 的 TP，且最大允許排放量為每天 90000 立方公尺。

濕地設計目的：

- 試驗布袋蓮植物是否能達到預期的除污(特別是硝化物)效果。
- 試驗布袋蓮植物在冬天的除污能力。
- 試驗布袋蓮植物在經過嚴寒氣候後的復原能力。
- 檢驗是否需要加入微量營養鹽。
- 檢驗 Amasek 設計之應用性及可信賴度。
- 顯示特殊的操作修正是有必要的。

這個試驗系統是在穩定狀態條件下實驗。在 1983 年的 11 月及 12 月，每兩週會分析一次入流廢水及出流水的水樣水質(BOD<sub>5</sub>, SS, TN, and TP)，而在 1984 年的二月一日至三月十五日則是每天分析一次。此外，還會定期性測量農作物密度、總農作物質量、及入流水與出流水之微量營養鹽濃度。

#### 2. 一般操作

鐵橋廠址於 1984 年底開始種植布袋蓮植物。直到 1985 年七月整個系統才被建構完成，在這段期間系統達到了營養鹽去除的要求。在 1985 七月 Amasek 接管了此系統的操作。在一份奧蘭多市的報告書中，Amasek 將 1985 七月至 1986 二月間所遇到的各項問題為做了總結：

- 在 Amasek 接管後，他發現農作物提供了象鼻蟲食物來源使其數量大增，此外還有雜草(alligator-weed)入侵的現象。
- Amasek 嘗試以選擇性的收割來增加農作物的生存力。然而，未被收成的作物並未達預期效果，並且過多的藻類使水中的懸浮物(SS)增加。
- 當象鼻蟲的數量增加時，噴灑殺蟲劑(Sevin)的計畫開始實施。新種的布袋蓮植物也被引進來增加農作物的成長。

- 農作物存活率因噴灑殺蟲劑而有所改善，但是農作物的成長情形並不一致且其覆蓋率也與設計不相符。
- 1986年7月，農作物面臨了嚴重的生長問題。營養鹽的去除持續在觀察中，雖然去除率有顯著下降。
- 在經過數次討論後，發現有幾個原因可能造成農作物的生長問題：(a) 金屬污染，鋁為最可能的金屬。(b) 生物間的交互影響或生物競爭，主要競爭可能來自藻類。(c) 必須營養鹽的缺乏，主要考量為磷。(d) 微量營養鹽的不足。
- 在1986年2月中，為了重新恢復農作生長並且有效控制固體污染物，布袋蓮的除污系統被暫時中止。對東邊的池塘進行施肥，使氮、磷、鐵、鈣等的濃度提升。其後進行一連串的實驗，檢驗加入這些物質所帶來的影響，並且量化水質中營養鹽對植物而言為毒性或缺乏的濃度。
- 在二月下旬，植物生長外型有了嚴重的問題，而挺水性農作物數量也開始減少。東邊池塘對於多加入的營養鹽並沒有顯現出毒性抑或是不足的情形。
- 1986年2月，西邊的水流恢復也使得植物健康情形立即好轉。這證實了一個疑慮：從鐵橋區排出的廢水中並未含有毒性氯化物，而其後也有其他的實驗佐證。因此微量元素之不足成為了主要影響植物生長的可能性。為了更確切的評估是否真是如此，鐵橋區的水質與植物也已經與其他區域 Amaske 的系統相較。

### 3. 監測

#### (1) 出入流水監測

總言之，植物的生長問題主要為鉬酸鹽(molybdate)之不足，而其原因可能為：

- 降雨及瀉湖布袋蓮植物將鉬酸鋁的過濾，
- 鉬元素與硫酸鹽的交互作用，
- 沉積物的低 pH 值及系統的緩衝作用差，太酸的土壤阻礙了鉬元素的獲取。

為了改善鐵橋區布袋蓮植物的生長，鉬元素(molybdeum)及硼元素(boron)被加入到系統之中，為增加土壤鹼性，含鐵硫化物及石灰或是蘇打粉取代含鐵氯化物也被使用在改善，加入了上述物質使鹼性增加至60mg/l(如碳酸鈣)。下表為各項入流廢水及出流水之水質檢測項目：

表 14 各項入流廢水及出流水之水質檢測項目

Date	Wastewater Flow, m <sup>3</sup> /d	BOD <sub>5</sub> , mg/L		SS, mg/L		TN, mg/L		TP <sup>a</sup>	
		Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
6/86	16,680 <sup>b</sup>	3.24	4.58	3.06	6.31	12.52	8.09	0.37	0.24
7/86	17,450 <sup>b</sup>	4.12	1.73	3.85	1.86	12.44	8.06	0.33	0.11
8/86	16,850 <sup>b</sup>	3.33	3.70	3.58	4.28	12.77	7.62	0.55	0.19
9/86	32,500 <sup>c</sup>	6.16	2.66	5.23	2.91	12.66	7.96	0.75	0.15
10/86	31,190 <sup>c</sup>	4.43	3.11	2.70	3.56	14.49	9.66	0.89	0.22
Average	23,250	4.87	3.11	3.84	3.62	13.00	8.16	0.61	0.22

<sup>a</sup> Phosphorus is added to the hyacinth system Influent as a nutrient supplement.

<sup>b</sup> West hyacinth pond in operation.

<sup>c</sup> Both hyacinths ponds in operation.

<sup>d</sup> Both ponds in operation for portions 01 the period

## (2) 水質監測

Amasek 系統對於整個區域的水質有良好的監控。監控的參數及頻率如下表所示：

表 15 監控的參數及頻率

Parameter	Frequency
Influent Flow	Daily
Air Temperature	5 days/week
Wastewater Temperature	5 days/week
pH	5 days/week
Conductivity	5 days/week
DO	5 days/week
Rainfall	Daily
Wind Velocity	5 days/week
Wind Direction	5 days/week
Chlorine	Twice/week
TKN	Twice/week
NH <sub>4</sub> -N	Twice/week
NO <sub>2</sub> -N	Twice/week
NO <sub>3</sub> -N	Twice/week
T N	Twice/week
OP	Twice/week
TP	Twice/week
BOD <sub>5</sub>	Twice/week
TSS	Twice/week
TDS	Once/week
Na	Once/week
K	Once/week
Fe	Once/week
Ca	Once/week
Mn	Once/week
Mg	Once/week
Mn	Once/week
B	Once/week
Zn	Once/week
Cu	Once/week
Mb	Once/week
Cr	Once/week
Al	Once/week
Pb	Once/week
Hg	Once/week
Ni	Once/week
Cd	Once/week
SO <sub>4</sub>	Once/week
Plant Constituents	As Needed
Harvested Biomass	As Needed
Stocked Biomass	As Needed
Standing Crop Biomass	Once/week
Weevils	Once/week
Sameodes	Once/week
Mosquitoes	Once/week
Encroaching Vegetation	Daly
Root Macroinvertebrates	As Needed
Fungal Isolates	As Needed

### 3.1.4 草溝 (Grassed Waterway)

操作維護對於草溝來說，也是相當重要的一環。草溝的去除效能主要是利用草的生物性和阻滯水流特性，故在草類的維護上就必須要注意。在維護草溝管理方面，如下所示：

- 操作項目

- ✓ 初期排水；
- ✓ 前處理機制操作；
- ✓ 特殊污染物處置；
- ✓ 監測

- 維護管理

- ✓ 維護計畫
- ✓ 結構維護管理
- ✓ 植物管理

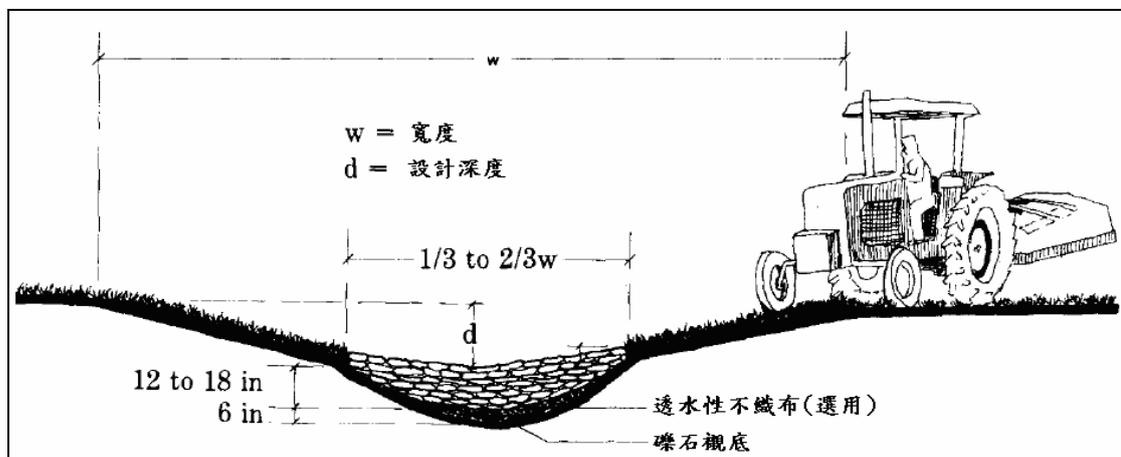


圖 16 草溝斷面示意圖 (資料來源：USDA, 1986)

#### 一、一般操作

草溝系統為引進污水的進入植物污水處理區域，透過植物性緩衝產生之沈澱及過濾機制淨化水質，操作項目如下所示：

- 初期排水

- ✓ 鋪設透明塑膠布；
- ✓ 分水法。

- 前處理機制操作

- ✓ 水流控制；
- ✓ 沈澱物去除。

- 特殊污染物處置

- ✓ 石油與其他污染物防範與移除

- 監測

### (一) 初期的排水

草溝完成植草之後，在初期時需將有可能流入溝中之逕流排除，因為此時所種植之草類並未完全著根生長前，隨即排水至草溝極可能受損。排水之方法有二：

#### 1. 鋪設透明塑膠布：

鋪設在草溝內及兩側較低窪處，以引導雨水由塑膠布上排除。

#### 2. 分水法：

將可能流入溝中之逕流，利用分段截流等方法來排除，俟草類生長完密之後，加以恢復排水至草溝。為了避免造成新的沖蝕問題，宜多設截流設施，以充分分散逕流，保護初期之草溝。

### (二) 前處理設施

#### 1. 水流控制

草溝處理廢水的主要方式是利用通過污水處理帶的緩慢均勻薄面流與處理區域產生作用，若因為水流流動不穩定或阻塞，導致水流通過整個草溝處理區域流動不穩定均勻分佈，將會降低處理的效能。重新清理阻塞區域、調整水流分佈與流動擴散情形，使水流能穩定均勻地流過整個草溝處理區域。

#### 2. 沈澱物去除

污水池經維護人員測量發現有累積超過 6 英吋高的沈澱物，包括垃圾與淤泥等沈澱物時，停止廢水處理並移除累積的沈澱物，恢復應有的功能運作。必要時運用適當與安全的特殊廢水處置方式。

### (三) 特別污染處置

#### 1. 石油與其他污染物

草溝處理區域內應只施灌待處理廢水，若因其他人為疏忽致使有石油、汽油或其他污染物流入處理區域內，污染待處理廢水、影響緩衝帶的植物生長與污染處理區域內的土壤。操作維護人員立即檢視污染物的來源，並加以補救、阻止污染繼續擴大，對於草溝的汽油、石油與污染物應參考管理機構與環保單位許可的特別方式移除，並追蹤是否由遺漏或後續的其他相關影響產生。

### (四) 監測

草溝系統的系統監測簡單，主要著重於監測系統水流動狀況與水質等。主要項目簡述如下：

- 出入水流量監測
- 水質監測
- 重金屬與其他污染物監測
- 土壤監測

- 生物監測

系統監測應防止入流量超過處理帶的最大負荷、出流水質符合國家標準、場址附近區域不受污水污染影響（尤其是農地等）等。

## 二、維護管理

- 維護計畫

- ✓ 水力維持；
- ✓ 溝渠、雜物清理；
- ✓ 定期除草與灌溉；
- ✓ 裸露地再植栽。

- 結構管理

- ✓ 沈澱物與垃圾清理
- ✓ 通道路徑表面維護

- 植物管理

- ✓ 灌溉
- ✓ 除草與收割
- ✓ 裸露地補植
- ✓ 施肥
- ✓ 其他

### （一）維護計畫

草溝系統的使用時間直接與它的維護頻率有直接地比例關係。假若適合的設計與規律地維護，草溝系統可長久使用。草溝系統的維護課題包含：

- 水力維持；
- 溝渠、雜物清理；
- 定期除草與灌溉；
- 裸露地再植栽。

收割物應從溝渠中移除，並做為本地的堆肥材料。累積的沈澱物也應手工移除，避免草溝有濃度過高水流。肥料與殺蟲劑的施灌應降至最低。

另一項良好維護計畫的方向是修補渠道中危險的區域。例如：假若渠道發生凹痕或是孔隙，應利用適當地土壤搗實、填補來修護渠道。草地覆蓋需是濃密的生長，如果並非如此就需要重新種植。於操作維護期間任何滯水應於管理機關認可之排水地點，以公共衛生下水道方式排放。殘餘物棄放（淤泥、收割後的草料等）必須符合本地政府等管理機關的標準。草溝系統的維護通常包含草地或濕地植物覆蓋維護。

### （二）結構管理

結構管理有以下三個項目需加以維護管理：

- 沈澱物與垃圾清理
- 通道路徑表面維護
- 植物清理

### 3. 沈澱物與垃圾清除

為滯水池規律地檢查植栽緩衝帶。在滯水池假若有阻塞物產生（例如垃圾累積、侵入性植物等），或專用的排水斜坡沒有啟動與維護，植栽緩衝帶可以變成蚊蟲產卵於滯水的阻斷利器（除非設計水池在 48-72 小時內完全排水）。部分結構體設備需定期更換整備，加以修補補強受損區域或替換損壞部分。

入流口與出流口、輸水管線、與攔污柵等柵欄，容易有沈澱物或垃圾堆積造成阻塞，影響水流流動與流動狀況。應定期檢驗測試管線流通狀況、出入流口淤積情形等，定期清除沈澱物與淤積垃圾；或於暴雨等特殊事件過後，發現草溝處理區域水流流動為非穩定均勻流動，應立即停止廢水處理，檢查並清除是否於管線等內有沈澱物等淤積。除此之外，累積於任何設施的垃圾與廢棄物，需定時或超過限制的積累程度立即清除，以免妨礙設施運作。

鄰近於陰溝與渠道的沈澱物累積，都需在任何地點或覆蓋植栽堆積達到 75mm 盡快移除。包含分流設施與前處理設施等各種設施會於操作維護時，因人為因素或其他無法順利依預期之設計運作，必要的修補受損害區域，使其可以重新恢復功用；或經許可下依現時現況適當更動調整原始設計，使各項設施得以繼續順利完整發揮功用。

### 2. 通道路徑維護

於通道路徑經交通來往、暴雨侵蝕或其他因素，可能會有沈陷、坑洞、土地鬆軟、凹陷或其他表土缺失情況，影響並阻礙維護通道；回填補土、壓實路面，使路面恢復均勻平滑，沒有沈陷、坑洞、土地鬆軟、凹痕跡象，使日常操作維護動作運作正常。另外，也需加以注意垃圾碎片（玻璃或金屬）等可能損害維護的車輛輪胎，都應立即加以清除以免影響維護進行。

路面的植物生長超過 15cm 或其他情形會阻礙維護通道交通，將植物高度修剪維持至 5cm 與清理雜物，維持維護通道的順暢。若通道存在阻礙物或其他，使通道寬度縮減少於 365cm 寬度，維護人員應清除阻礙物使路面寬度恢復至少 365cm 寬，方便維護車輛通行。

#### （三）植物管理

每年至少兩次檢查草溝區域受侵蝕與植栽損害情形。最好是濕季結束之前，將夏季的維護與主要秋季溢流前，列入維護計畫來確保草溝為冬季做好準備。植物管理項目包含：

- 灌溉方面
- 除草與收割
- 裸露地補植
- 施肥
- 其他

### 1.灌溉方面

植草後應視降雨情況，適當的給予澆水灌溉，以避免草類枯萎死亡，導致效能降低。若此地無灌溉設施，則應把握降雨時間，在雨中或雨後隨時種草。

### 2.除草與收割

為了維護草溝的效能，所以在植草 3-4 週後，宜施除草，將雜草清除且應隨時注意以防止雜草入侵生長。種草 2-3 月後宜行割草和施肥，以刺激苗株的生長，以後視需要再進行割草。每年乾旱季前應割草一次，將覆蓋過厚的莖葉清除，保持草溝的斷面並利於春季的萌芽。但為防止沖蝕，割草時僅割除草高的 1/3。

草地高度與割草頻率不會對於污染物的移除有很大影響；通常，割草次數為安全與美觀、或為抑制雜草與木本植物著想，只需一年一至二次割草。殘枝落葉傾向保留於草溝區域，尤其是沿著污水處理帶。廢棄物移除應透過週期性檢驗來決定，但廢棄物應於收割之前移除完成。若植物過度生長超過 25cm 高度，修剪高度至 8cm 左右並移除野草。受鄰近的灌木植物樹蔭遮掩缺乏光線或是過多落葉掩蓋，致使處理區域的植物生長不易。操作人員應修剪植物過度突懸部分、甚至移除鄰近斜坡的灌木植物、落葉清理移除。

### 3.裸露地再植栽

植草後 3-12 週，如有缺株要隨時補植，以後則視草類覆蓋密度再行補植。植栽區域若有超過 10% 的裸露面積，應於裸露區域立即再植栽，原本設計栽種的植物種類無法順利生長，假若許可，改以適合本地土壤的植物重新栽種。

於草溝內發現有毒或危險的植物在草溝設施附近周圍生長，可能會對操作維護人員或是民眾造成危險。利用非化學方法移除，或是其他管理機關所許可的方法從侵入地區移除可能的危險與有毒植物。另外，重新植栽移除危險植物而裸露的區域至原本狀況。若受侵擾的區域過大，重新施灌廢水處理應注意再植栽植物生長狀況，重新調整施灌模式與頻率；良好情況是於再植栽後二星期後植物根部穩固，足以在承受水流動與處理廢水，再恢復施灌頻率與水流速度等處理模式。

### 4.施肥

種草後約一個月，需施肥一次，以後視需要再行追加。施肥量每平方公尺約 0.05-0.41 公斤。當覆蓋完成後，每年春季刈草後各施肥一次更佳。

### 5.其他

防止人畜踐踏，以免造成草類死亡；定期檢查溝內是否有土、石塊或殘株廢物壓在溝內，以維護其入滲效率；雨後的維護也需要加強。

經過幾年草溝運作後，草溝內的植被除原本設計栽種的植物種類外，會逐漸有其他種類植物經由各式傳播途徑於草溝落地生根，若為一年生植物種類，需加以注意是否可能會於秋末與冬季死亡、枯萎，造成土壤裸露有受水流動侵蝕的危機，應加以移除重新植栽設計廢水處理植物種類。若

入侵植物無法處理廢水或不符、可能會影響設計之廢水處理過程的植物種類，應立即移除以免影響草溝廢水處理運作。

表 16 草溝的植物維護項目週期

維護項目	週期
適當給予澆水灌溉	視降雨情況
除雜草	植草 3-4 週後
若有缺株，要隨時補植	植草 3-12 週後
施肥一次	種草後約 1 個月
刈草及施肥	種草 2-3 個月後
檢查草溝內是否有土、石塊或殘株，以維護入滲效率	定期

(資料來源：U.S.EPA, 1988)

表 17 草溝的維護需求

維護項目	需維護管理行為的情形	維護管理行為
一般情形	維護通道路線堵塞。	清理堵塞以便通行順暢。
	任何設施(包含分流設施與前處理設施)未能依預計之設計運作。	以預行認可設計運作需求作修補。
	垃圾與廢棄物累積於設施。	清理設施的廢棄物與垃圾。
	於暴雨小於水質設計暴雨時，水流繞過設施。	調整來確保水流不會繞過設施。
	損害的結構部分。	補修或替換任何損害的結構部分。
	出入流管線或格柵被沈積物與垃圾阻塞。	移除阻塞物使出入流設施通暢。
	有毒或危險的植物在設施內或周圍生長，可能對維護人員與公眾構成危險。	使用非化學方法或是其他管理機關許可的方法從受影響區域移除有毒與危險的植物。修補並適當地再植栽任何受侵擾區域至原本狀況，甚至改進設計規格。必須時以適當並安全使用特定廢水處置方法處理。
	顯示有石油、汽油或其他污染物。	依慣例實行安全方式移除石油、汽油或其他污染物。
前處理設施	沈積物污水坑工作人員測量有 15cm 高的垃圾與沈澱物。	移除沈澱物。必須時以適當並安全使用特定廢水處置方法處理。
	水流流動不穩定或阻塞，導致水流通過整個草溝流動不均勻分佈。	調整水流擴散與清理，以便水流能穩定通過整個草溝。
處理區域	任何部分的處理區域表面有達 5cm 高的沈澱物堆積。	移除草溝表面上的沈澱物。必須時以適當並安全使用特定廢水處置方法處理。完成時，草溝應從邊對邊調整並向出流處自由地排水。必要時應再植栽。
	少量的連續水流通過草帶，即使沒有週週降雨，草溝底部的渠道有侵蝕與泥濘。	沿著草溝區間排放慢速流，或繞過沿著草溝的基流。修護草溝處理區域的侵蝕與渠道損壞。
	暴雨期間污水停滯於草溝並無法順利排放。	移除沈積物或垃圾阻塞、修正草溝從入流口至出口口的坡度、移除水堤阻塞、增加地下排水或轉換至潮濕的草地。
植栽	超過 10% 的裸露面積。	裸露地點應立即穩定並再植栽。假若許可，改以適合土壤的植物重新植栽。

維護項目	需維護管理行為的情形	維護管理行為
	植物過度生長（超過25cm）；危險的植物開始侵入。	修剪高度至8cm左右並移除之，清理野草。
	因為缺乏光線或是落葉掩蓋，致使處理區域植物生長不易。	假若能夠，修剪植物過度突出懸橫部分，移除鄰近斜坡的灌木植物。
通道路徑	出現垃圾碎片可能危害運輸工具的輪胎（玻璃或金屬）。	移除會損傷輪胎的垃圾。
	沈陷、坑洞、土地鬆軟、凹痕或其他表面缺失呈現，阻礙維護通道。	回復路面為均勻平滑，沒有沈陷、坑洞、土地鬆軟、凹痕跡象。
	路面植栽高度超過15cm或阻礙維護通道。	清理或修減至5cm高並使維護通道順暢。
	存在阻礙物使通道寬度縮減低於365cm。	清理阻礙物使通道維持至少365cm.寬。
	路面沈積物的增長。	移除沈積物使符合設計規範。
	30cm高的路基有超過20cm寬、15cm深的侵蝕。	穩定並修護路肩使道路免於侵蝕並與周圍道路相吻合。

### 三、案例討論

#### （一）、加州新開發或重建區域之暴雨最佳化管理作業

##### 1.背景

草溝為有植生覆蓋在邊坡和底部的開放的、淺的渠道；在收集逕流後，慢慢地傳輸至下游的排水點。草溝主要設計用來處理逕流，是藉由植生和地底土壤，或是入滲至地水層中來過濾逕流。草溝可為天然或是人造，其會捕捉懸浮土壤和金屬等顆粒污染物，增加入滲，減少暴雨逕流流速。草溝可作為暴雨排水系統的一部份，並且代替草皮和暴雨下水道系統。

計畫目標有二：

- 如果有良好的設計、植生與操作，草溝可以提供良好的水質處理效果，並可符合美觀要求。
- 道路旁為最佳的草溝建造場址。並且在具有可行性時，都應考量此利用目的。

##### 2.水文操作

流速依據當地要求設計，或是設計為年逕流量體積的 85% 排除量，並且低於降雨強度。草溝之設計水深不得超過草長 10cm。避免的形成渠道化的情況。若是大區域應分割成許多區塊，使用複合方式處理。

建議草溝邊坡坡度為 2-6% 之間。如果傳輸效果無虞，可使坡度更緩。坡度愈陡則流速愈快，會減少滯留的時間，所以可能需要動力分散裝置，或是連續性阻攔隔板以增加滯留時間。陡坡地區若使用連續性阻攔隔板增加滯留時間，還可增加入滲量。

大部分草溝的設計是採用最小水力滯留時間 9 分鐘，此一數據是根據西雅圖市政府與華盛頓州生態部於 1992 年在華盛頓州西雅圖地區所做的實驗而得的，但此一實驗無有力的證明支持。草溝最短長度為能提供水力滯留時間至少 10 分鐘。除非有設置分隔狹道，否則底部寬度最長不超過 3.05m。設計暴雨時之最大水深為不超過草高度 10.2cm。渠道坡度不超過 2.5%。

草溝植生能有效防制逕流，增加水與植物及土壤表面接觸的機會。一般會選擇細緻的、密實生長的、防水的草類。如果可行的話，在植生建立時期可用分散逕流來取代灌溉。若逕流分散不可行，則種植區域需鋪置適當沖蝕防制物質。

### 3. 維護管理

草溝系統的使用壽命和維護頻率有直接的關係。如果適當的設計且定時的維護，則草溝的壽命是無限期的。草溝的主要維護目的，為保持水力及移除污染物的效率，並且維護植生為濃密、健康的狀態。

維護工作包括週期性的刈草，但不可將草修至短於設計水深。維護工作還包括野草控制、乾季灌溉、裸露地的植生重建，和垃圾及阻擋物的清除。除完的草必須從草溝中移除，並且置於當地專門處理場。累積的底泥也應該清除，預防水流在草溝中集中。盡量避免使用除草劑和肥料。

#### (1) .植物管理

為使其有良好功能，需要一層厚的植生敷蓋。草溝以片狀種植，且遠離相鄰邊坡，以減少地鼠的破壞。邊坡植生不要使用土袋植生法，以防止結構被地鼠或是齧齒性動物破壞。不論是草類或是其它，其條件，如低生長率(力)、耐旱程度和是否為原生種等，需在設計手冊中詳細說明；並且優先考量生長季節為濕季之植物。在無特別灌溉的地區應考慮種植耐旱植物。

#### A. 灌溉：

在一年中，無須灌溉的季節植草，可以成功的建造草溝。然而，有可能雨量不足，而需要暫時的灌溉系統。

在奧司汀(Austin)地區所做的實驗指出，即使在冬眠期，植生對於污染物的去除仍有效果。因此乾季時植生的灌溉需求不高，僅需維持不致乾枯即可。場址地形應使草溝能有適當的坡度與斷面面積。

#### B. 割草：

許多設計規範建議，規律的刈草可以保持地表濃密的植生。最近的研究(Colwell et al., 2000)表示，刈草頻率或是植生高度對於污染物移除的影響不大。建議草高為 15.2cm。若不考慮滯留時間，則草帶長度至少為 30.5m。草類高度和刈草頻率對於污染物移除的影響不大。因此，為符合安全與美觀的考量，刈草頻率以一年 1 到 2 次即可，還有必須抑制木本植物的生長。

#### C. 其他：

若使用草磚，需注意彼此之間不可有縫隙，並且交錯排列，以防止渠流產生。使用壓草機壓碾，以確保草皮與土壤之間無空氣貯存。若使用種子，需於雨後進行至少 75 天的沖蝕防制管理。

## (2) .結構管理

大部分採用梯形渠道，但其它形狀，如拋物線狀，可以提供更佳的水質處理效果，並且比直線狀渠道邊坡容易刈草。使用天然窪地作為草溝設置位置，並且以天然排水路線作為維護設施。

道路旁排水溝應視為潛在的草溝或是緩衝帶場址，並且盡其可能的往此目標開發。如果水流被草皮之間間縫導引，則在植生區域高起處放置鋪面。每一塊草皮至少需要 30cm 寬，以防止阻塞。

若為在槽設施，則草溝可設計為間庫暴雨處理設施和運輸系統，設計尖峰流量為 100 年洪水頻率。邊坡坡度不可超過 3:1(H:V)。定期檢驗草溝中易有死水的地方；若有水阻塞(如底泥沈積、入侵植物生長)，或是排水坡度無良好維護，則草帶會變成蚊子滋生地。

## (3) .污泥清理

每年對草帶進行至少 2 次的土壤沖蝕與植物危害調查，最好是在雨季結束時，以排定暑期維護時程，清除底泥與雜物；並且在秋季初次逕流前，確保設施已為冬季預備。更甚，每次大雨過後的勘查，是更為重要的。勘查重點為碎屑、廢棄物、漂浮物及底泥沈澱。

當溝內任何地方或是植生處的底泥沈澱累積至 7.5cm 時，應予與清除。垃圾很容易在草帶堆積，尤其是沿著公路部分，因其需要定期的檢驗與清除，尤其是雜草清除方式為去除比刈除佳。

## 4.維護經費

加州運輸局(Caltrans)依支流面積 2ha 的區域，估算草溝每年維護經費約 \$2,700 元(台幣 86400 元)。雖然大部分的維護經費為刈草然而總經費的多寡，取決於刈草頻率。許多案例中，草溝是作為逕流傳輸，並且需要定期刈草。因此維護工作主要為植生管理。

表 18 預估維護經費

項目	單位	草溝大小(深度和頂寬)		註釋
		深度 1.5 呎， 底寬 1 呎，頂寬 10 呎	深度 3 呎， 底寬 3 呎，頂寬 21 呎	
草皮整理-刈草	\$ 0.85/1000 平方呎	\$ 0.14/直線呎	\$ 0.21/直線呎	草皮維護面積=(頂寬+10呎)*長度。每年刈草約 8 次。
一般草皮維護	\$ 9.00/1000 平方呎/年	\$ 0.18/直線呎	\$ 0.28/直線呎	草皮維護面積=(頂寬+10呎)*長度
雜物和垃圾清除	\$ 0.10/直線呎/年	\$ 0.10/直線呎	\$ 0.10/直線呎	—
植生重建	\$ 0.30/平方碼	\$ 0.01/直線呎	\$ 0.01/直線呎	每年重植面積預估為草皮維護面積的 1%
計畫管理 監督	\$ 0.15/直線呎/年	\$ 0.15/直線呎	\$ 0.15/直線呎	每年調查 4 次
調查	\$ 25/次	—	—	—
總計	—	\$ 0.58/直線呎	\$ 0.75/直線呎	—

(資料來源：SEWRPC,1991)

### 3.1.5 草帶 (Vegetated Filter Strip)

草帶需要適當的使用與維護才能發揮草帶的功效，草帶主要要求為植物管理；必要時需對管理維護人員做操作管理教育訓練。而草帶的操作維護項目如下：

- 操作維護計畫
  - ✓ 侵害與植栽損壞調查
  - ✓ 植物收割
  - ✓ 廢棄物移除
  - ✓ 緩衝帶檢測
- 植物管理
  - ✓ 植物修整
  - ✓ 植物再植栽
  - ✓ 施肥
  - ✓ 清理堵塞與定期檢修
  - ✓ 草料處理
- 結構物維護管理
  - ✓ 沈積物移除
  - ✓ 通道維護
  - ✓ 裸露地再植栽
  - ✓ 路面維修
- 特殊污染物處置
  - ✓ 石油與其他污染物處置
- 監測

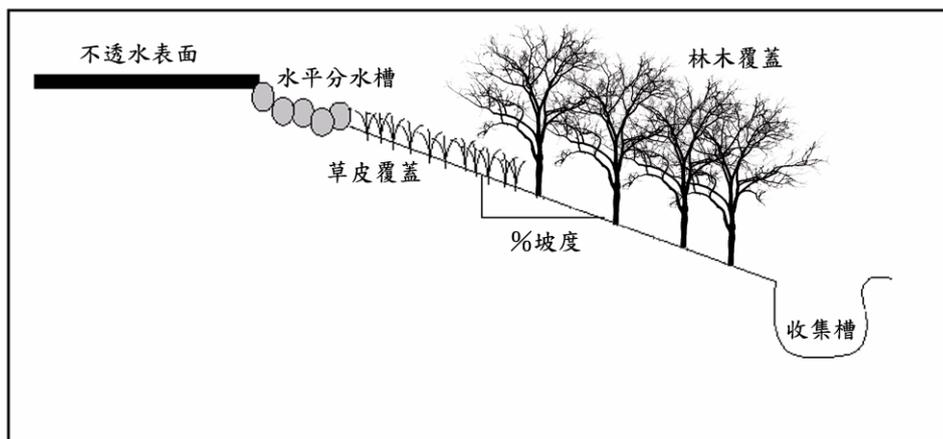


圖 17 草帶示意圖 (資料來源：City of Chula Vista, 2000)

#### 一、操作維護計畫

操作維護計畫應於草帶施工時期，依照設計需求與現實環境條件擬定。而後在根據現實環境變動來變化與調整計畫施作細節。下列所述之細節應包含在草帶整體的操作維護計畫之中。典型的管理維護活動與頻率如下：

- 侵害與植栽損壞調查
- 植物收割
- 廢棄物移除
- 緩衝帶檢測

#### 1. 侵害與植栽損壞調查

每年至少兩次檢查草帶區域受侵蝕與植栽損害情形。最好是濕季結束之前，將夏季維護與主要秋季溢流前列入計畫來確保草帶為冬季做好準備。但是，週期暴雨逕流後的額外檢查也是必須列入計畫。同時檢驗草帶是否存在垃圾、廢棄物與檢查沈澱物累積區域。

#### 2. 植物收割

近期於生物過濾沼澤地的研究，指出草地高度與割草頻率只有少許影響於污染物的移除；通常，割草次數為安全與美觀或為抑制雜草與木本植物著想，只需一年一至二次。

#### 3. 廢棄物移除

殘枝落葉傾向於保留於草帶區域，尤其是沿著快速帶。廢棄物的移除應透過週期檢驗來決定，但廢棄物應於收割之前移除完成。

#### 4. 緩衝帶檢測

為滯水池規律地檢查植栽緩衝帶。在滯水池假若有阻塞物產生（例如垃圾累積、侵入性植物等）或專用的排水斜坡沒被啟動與維護，植栽緩衝帶可已變成蚊蟲產卵散播於水平面的阻斷利器（除非設計水池在 48-72 小時內完全排水）。

## 二、結構物維護管理

結構物維護管理有以下幾項重點：

- 沈積物移除
- 通道維護
- 裸露地再植栽
- 路面維修

#### 1. 沈積物移除

草帶各個單元設計是用以攔截與過濾水中的岩石碎片或沈積物質為目的，然而當這些沈積物質數量較多時，將淤積於草帶之上而降低其原有功能。所以草帶維護保養一年至少需要進行四次，而且當洪水降雨超過一英吋時，也需要馬上進行維護。如果草帶上有沈積碎石發生時，則需馬上的檢查其狀態，看看是否造成水流的集中，而降低草帶功效。

移除草帶上的沈積物需要在沈積物完全乾糙的情況下進行，而且移除這些物質時，需要棄置於適當的棄土場或是回收場，以免觸犯相關法規。

水池與緩衝帶的維護責任應歸屬於一有權責的單位，此單位有法律約束與可實行的維護，以計畫認可方式或本地許可模式實行。

主要的溢洪道應配攔污柵，攔污柵可提供維護提供通道。當前池約有50%的容量損失後，前池的沈澱物應移除。洪水池並不會吸收從設計據點接收逕流，若從滯洪池挖掘沈澱物，不考慮毒素或危險的物質，並安全地施灌與利用堆肥。當某據點的土地利用提出時，需於沈澱物廢棄前要求作沈澱物試驗。沈澱物從滯洪池移除應根據水流侵蝕與沈澱物控制規範來進行運作。

## 2. 通道維護

維護的取道權與通道權需延伸至從公共或私人道路的水池。維護通道最少需要30cm寬；有一不超過15%的最大坡度；並合適於穩固地禁得起各種維護裝備與運輸工具。

維護通道需延伸通過前池、安全工作台、豎板與出水口，並能滿足維護車輛於通道迴轉。

## 3. 裸露地植栽

在任何部分的處理區域有高達5cm沈積物堆積，應加以移除。完成時，草帶應從邊對邊調整並向出流處自由地排水。因為溝渠水流或高速流導致侵蝕或沖刷面積。若凹痕或裸露區域低於30cm寬，以填補壓碎的砂礫方式修補損壞區域。假若裸露地超過30cm寬，草帶需重新分類與再植栽。小型裸露地，當裸露為明顯時可與頂端斜坡植物做連結，並於草帶以20cm間格種植。

## 4. 路面維護

於通道路徑有沈陷、坑洞、土地鬆軟、凹陷或其他表土缺失情況，影響並阻礙維護通道；回填補土、壓實路面，使路面恢復均勻平滑，草帶運作正常。另外，也需加以注意垃圾碎片（玻璃或金屬）等可能損害維護的車輛輪胎，都應立即加以清除以免影響維護進行。

路面的植物生長過高阻礙維護通道交通，需修整植物高度，維持維護通道交通的順暢。若通道存在阻礙物或其他，使通道寬度縮減少於365cm寬度，維護人員應清除阻礙物使路面寬度恢復至少365cm寬，方便維護車輛通行。穩定並修護路肩使道路免於侵蝕並與周圍道路相吻合。

# 三、植物管理

草帶植物管理需視現地的環境情況來擬定管理維護計畫。植物管理項目如下：

- 植物修整
- 植物再植栽
- 施肥
- 清理堵塞與定期檢修
- 草料處理

## 1. 植物修整

植物在生長季時至少每一個月修整一次。草地高度修剪維持在5-10cm。而植被每年至少需要檢查一次其侵蝕與沖蝕狀態，並以最不會破壞地表土壤的方式，來修整植被維持其生長。

## 2. 植物再植栽

當植被剛剛栽種或是在復原階段時，於「第一個生長季」需每兩週檢查一次。而當草帶植被已經完全建置好之後，不論是否在生長季，每年需至少檢視兩次其植被健康狀態、密度、與多樣性。植被覆蓋的面積必需要達85%以上，所以如果植被破壞面積超過50%，則需依原計畫進行植被的栽種與檢查。植栽的維護對於草帶是非常重要的，特別是確保水流不會有逆循環（short-circuit）。

## 3. 施肥

所有在整修植被的過程中所使用的肥料、機械操作、農藥使用或是其他用以維持植物最佳生長的方式，不得與生態保護這個目標相互衝突。而在所有植被的修整過程，都應盡可能的避免使用肥料與農藥。植栽的維護對於草帶是非常重要的，特別是確保水流不會有逆循環（short-circuit）。另外也需注意於草帶上收割等維護動作不會使土壤表面產生凹痕或是破洞，這些對於水流動都會產生影響。

一旦草帶系統建立並正確地運作，灌溉、施肥與損壞修補等定期維護仍是需要的。但是，肥料應限制為天然的選擇允許某些種類（通常是本土植物）繁盛，當其他種類衰退時。為維護特別的植栽進行過度的施肥與灌溉顯示是昂貴的，特別是於不尋常的乾旱與炎熱季節。超量播種與再植栽應限制於無法順利與能力生長的種類。

## 4. 清理堵塞與定期檢修

定期檢驗溝渠侵蝕、植栽密度足跡與交通器具造成草地的損傷與水流於草帶上產生繞行的情況。檢查淤塞的小卵石與移除混合的沈澱物、溝渠植栽檢驗與裸露地植栽，草帶系統第一年檢驗兩次，此後為每年檢驗一次即可。水流的擴散也需檢驗依設計運作。

當洪水事件發生時，所有的草帶地區都應該要檢查是否有堵塞，形成水塘溢流的狀況。如果發生溢流狀況時，則需採取校正措施，以維護草帶功效。

## 5. 草料處理

收割後的草料可以絞碎後做為當地畜牧業的飼料、或是經處理，絞碎後經曝曬與處理後做為植物堆肥，做為未來系統植栽施肥時所利用。

# 四、特殊污染物處置

## 1. 石油與其他污染物

若因其他人為疏忽致使有石油、汽油或其他污染物流入處理區域內，污染待處理廢水、影響緩衝帶的植物生長與污染處理區域內的土壤。立即檢視污染物的來源，加以補救、阻止污染繼續擴大，汽油、石油與污染物移除應參考管理機構與環保單位許可的特別方式移除，並追蹤是否由遺漏或後續的其他相關影響產生。

## 五、監測

草帶系統的系統監測一般而言比較簡化，主要重點是水質的檢測等。簡述如下：

- 出入流水量監測
- 水質採樣
- 地下水監測
- 土壤採樣
- 植物與沈澱物監測
- 生物指標監測

出入流水量監測可利用自動化儀器每日監測，保持系統水流如計畫設計流量穩定。水質監測應盡量保持每星期監測，保證出水流水質如管理機關規定，水質監測項目可參考管理機關規範項目。地下水與土壤採樣可委外機關協助，探查是否有污染份附近土壤。

表 19 草帶的操作項目與週期

操作項目	週期
草帶維護保養	一年 4 次
修整草地	(生長季) 每月 1 次
檢查植被侵蝕與沖蝕狀態	每年 1 次
植被整修	(植被栽種初期或修復階段) 每二週 1 次
檢視植被健康狀態	每年 2 次

表 20 草帶的維護項目

維護項目	需維護管理行為的情形	維護管理行為
一般情形	維護通道路線堵塞。	清理堵塞以便通行順暢。
	任何設施未能依預計之設計運作。	以預行認可設計運作需求作修補。
	垃圾與廢棄物累積於草帶。	清理設施的廢棄物與垃圾。
	於暴雨小於水質設計暴雨時，水流繞過設施。	調整來確保水流不會繞過設施。
	損害的結構部分。	補修或替換任何損害的結構部分。
	流動路線被沈積物與垃圾阻塞。	移除阻塞物，使入口沒任何阻塞。
	有毒或危險的植物在設施內或周圍生長，可能對維護人員與公眾構成危險。	使用非化學方法或是其他管理機關許可的方法從受影響區域移除有毒與危險的植物。修補並適當地再植栽任何受侵擾區域至原本狀況，甚至改進設計規格。
	有石油、汽油或其他污染物的跡象。	依標準慣例實行安全方式移除石油、汽油或其他污染物。必須時以適當並安全使用特定廢水處置方法處理。
前處理設施	水流流動不穩定或阻塞，導致水流通過整個草溝流動不均勻分佈。	調整水流擴散與清理，以便水流能穩定通過整個草溝。

維護項目	需維護管理行為的情形	維護管理行為
處理區域	任何部分的處理區域表面有達5cm高的沈澱物堆積。	移除草帶表面上的沈澱物。必須時以適當並安全使用特定廢水處置方法處理。完成時，草帶應從邊對邊調整並向出流處自由地排水。必要時應再植栽。
	因為溝渠水流或高速流導致侵蝕或沖刷面積。	若凹痕或裸露區域低於30cm寬，以填補壓碎的砂礫方式修補損壞區域。假若裸露地超過30cm寬，草帶需重新分類與再植栽。小型裸露地，當裸露為明顯時可超播種，與頂端斜坡植物做連結，並於草帶以20cm間格種植。
植栽	超過10%的裸露面積。	裸露地點應立即穩定並再植栽。假若許可，改以適合土壤的植物重新植栽。
	植物過度生長（超過25cm）；危險的植物開始侵入。	修剪高度至8cm左右並移除之，清理野草。
	因為缺乏光線或是落葉掩蓋，致使處理區域植物生長不易。	假若能夠，修剪植物過度突出懸橫部分，移除鄰近斜坡的灌木植物。
通道路徑	出現垃圾碎片可能危害運輸工具的輪胎（玻璃或金屬）。	移除會損傷輪胎的垃圾。
	沈陷、坑洞、土地鬆軟、凹痕或其他表面缺失呈現，阻礙維護通道。	回復路面為均勻平滑，沒有沈陷、坑洞、土地鬆軟、凹痕跡象。
	路面植栽高度超過15cm或阻礙維護通道。	清理或修減至8cm高並使維護通道順暢。
	存在阻礙物使通道寬度縮減低於365cm。	清理阻礙物使通道維持至少365cm寬。
	路面沈積物的增長。	移除沈積物使符合設計規範。
	30cm高的路基有超過20cm寬、15cm身的侵蝕。	穩定並修護路肩使道路免於侵蝕並與周圍道路相吻合。

## 六、案例討論

### (一)、加州新開發或重建區域之暴雨最佳化管理作業：植生緩衝帶

#### 1. 背景

草帶為一植生表面，設計作為相鄰區的層流處理。功能為減緩逕流速度，沈澱泥沙與污染物質，並提供下層土壤過濾帶。過濾帶初期為農業應用措施，近期才將之應用於都市化區域設施。若有良好的設計與維護，草帶污染物移除效果佳。甚且，民眾會認為其為景觀設施，而非暴雨滯洪處理設施。但是草帶設施仍是不准民眾使用。

計畫主要目標如下：

- 維護工作需求量低。(只需注意沖蝕防制與刈草)
- 如果有良好的設計、植生與操作，草帶可以提供良好的水質處理效果，並可符合美觀要求。

- 流量特性、植生類型與密度若能緊密的控制，可以達到高度的最佳化管理作業。
- 若坡度與長度符合草帶設置需求，道路邊緣亦可成為優良草帶區域。

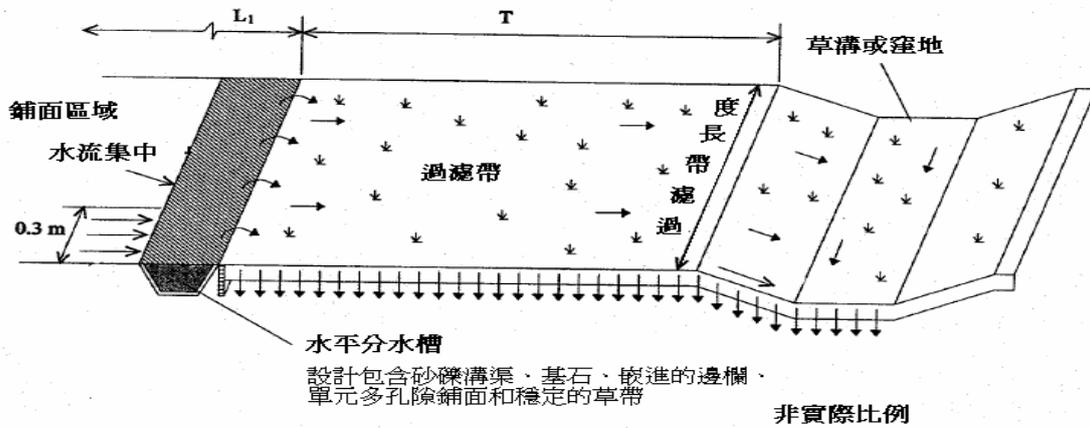


圖 18 草帶設計示意圖

## 2. 水文操作

逕流流速在經過草帶時，應控制在低於 1fps。永久性灌溉系統的設置，可以幫助水質處理效果有最佳的表現。

## 3. 維護

草帶的維護主要為植生管理；因此需要對維護工作人員進行訓練。基本的維護工作和頻率如下。

### (1) 植物管理

植生建設完成初期需有完整的照顧，包括適當的供水、施肥和防止過量的水進入，直到植生完全覆蓋整個區域為止。在一年之中無須灌溉的季節植草，可以成功的建造草帶。然而，有可能雨量不足，而需要暫時的灌溉系統。

植生面積應包含整個排水區域，過濾帶的上游邊界應和開發地區相鄰接。植草狹道、鋸齒水泥邊界和石砌溝等設施不建議施作，因維護和水資源永續潛力的考量。

### A. 植生種類

草帶必須混和地種植高密度的防沖蝕性植物物種，以有效地抓住土壤。應該種植原生的或是合適的草類、灌木和樹木；因相較於外來種，其需要較少的肥料，且較為耐旱。

若使用草磚，需注意彼此之間不可有縫隙，並且交錯排列，以防止渠流產生。需使用壓草機壓碾，以確保草皮與土壤之間無空氣貯存。若使用種子，需於雨後進行至少 75 天的沖蝕防制管理。

### B. 割草：

每年最好是在雨季結束時，對草帶進行至少 2 次的植物沖蝕與危害調查，以排定暑期維護時程；並且在秋季初次逕流前，確保設施已為冬季作

預備。每次大雨過後的勘查，是更為重要的。勘查重點為碎屑、廢棄物、漂浮物及底泥沈澱。

Colwell 等人於 2000 年對生物過濾沼澤進行研究，指出草類高度和刈草頻率對於污染物的移除具有影響。因此，刈草頻率通常為一年 1-2 次，以符合安全與美觀的要求；或是抑制雜草和木質植物的生長。但實驗結果更適合應用於草帶。

#### C. 季節性操作：

在寒冷季節，草帶可以提供雪的儲存和處理空間；如果是因此目的而建設之草帶，必須為高耐寒性植物；並且維護流程上必須包括坡道底部砂粒的移除。在乾旱或是半乾旱季節，設計者必須列出耐旱性植物，以減少灌溉需求。

#### (2) . 污泥清理

垃圾很容易在草帶堆積，尤其是沿著公路部分，因其需要定期的檢驗與清除。而雜草清除方式，採用去除比刈除佳。定期檢驗緩衝帶的滯留水池；若水池阻塞(如底泥沈積、入侵植物生長)，或是排水坡度無良好維護，則草帶會變成蚊子的滋生地(除非將水池設計為 48-72 小時排水一次)。

#### 4. 維護經費：

維護經費主要為植生管理(包括刈草、灌溉和雜草的清除)和垃圾清除。所以經費的估算根據是清除的頻率，和當地勞工價錢高低。

### (二)、布魯河流域緩衝草帶設置

#### 1. 背景

布魯河流域橫跨堪薩斯州和內布拉斯加州，為面積 7,200 平方哩(18,648 平方公里)之農業區。有內布拉斯加州境內的大布魯河和小布魯河；及內布拉斯加州(Kansas)境內的 Tuttle Creek 湖。

布魯河的污染問題為底泥沈澱、養分和除蟲劑的增加。沖蝕土壤會堵塞渠道、運輸水道和水庫，帶來代價很高的破壞性。磷使得水中藻類大量生長，減少水中氧氣，威脅魚類生長，減少生物多樣性。美國環境保護署自然資源局堪薩斯州和內布拉斯加州農業部等合作，尋找解決布魯河流域逕流中過多泥沙、養分和除蟲劑的問題。

設計目標如下所示：

##### ● 改善水質：

草帶藉由減緩逕流流速，達到改善水質的功能；因其於逕流流入溪中前捕捉泥沙。

##### ● 增加野生動物棲地：

因草帶能提供適當的遮蔭，而有較乾淨和低溫的水域，以提供野生動物築槽地點和遷徙廊道。若種植樹木、灌木和草類，可以增加流域棲地的生物多樣性。

- 保護土地：  
草帶阻擋水流、減少土壤被吹刮。又可以減少噪音和臭氣；加上可以保護家畜和野生動物度過嚴寒季節，和減少建築物被風侵蝕。
- 保護公共用水：  
草帶可在水流入下游地區前，減少污染層級，以減少污染處理花費。

## 2.植物管理

選擇溫帶草類作為緩衝區植物，需花費較長的時間，才能達到穩定的情況，一般大約需要 2-3 年或是更長。錯誤的植草常常會造成野草叢生；在春天野草發芽之前，就必須先植入，以避免物種之間過度競爭，而導致無法管理的情形。在 CRP 土地上，雜草必須藉由耕作、除草劑、作物競爭、火和刈除或是綜合方法去除。在種植的那一年嚴格禁止放牧或是修剪，除非是雜草緊急控制情況下。

例如灌木和樹木穩定邊坡的能力優於草類；而草類過濾底泥及養分的功能高於灌木和樹木；而灌木過濾除蟲劑和微生物的效果很好。草類和木本植物對於許多野生物種能提供獨特的微生物環境。複和式的種植，能增加景觀的多樣性和兼具永續的功能。

當設置樹木時，需考量樹葉掉落水中的因素，因為樹葉會潛在的改變水流；但是其可提供水中養分和水生生態系統棲地。若要排除此一因素，可以於接近水面處改種灌木，而樹木種植在離水面較遠處。這樣依然有穩定邊坡、改善水質、防制下游洪水、提供野生動物棲地的功能，但不致因落葉過多而堵塞水流。

## 3.污泥清理

當大片的層流流經時，草帶具有最大的效益。定期的清除草帶邊緣底泥，可以防止逕流渠流化。當和上游保護措施結合時，緩衝區需要較少的維護且可以發揮更大的功效。

### 3.1.6 人工浮島 (Artificial Floating Island, AFI)

人工浮島為利用各種組合基座，於上鋪設水生植物浮動於水體環境。建造成人工棲息地、改善水質、美化景觀與保護水岸線等。而人工浮島的操作與維護項目分類如下所示：

- 操作管理
  - ✓ 監測操作
  - ✓ 泥沙清除
  - ✓ 廢棄浮島處置
  - ✓ 特殊事件操作
- 維護管理
  - ✓ 構造物管理
  - ✓ 植物管理
  - ✓ 生物管理

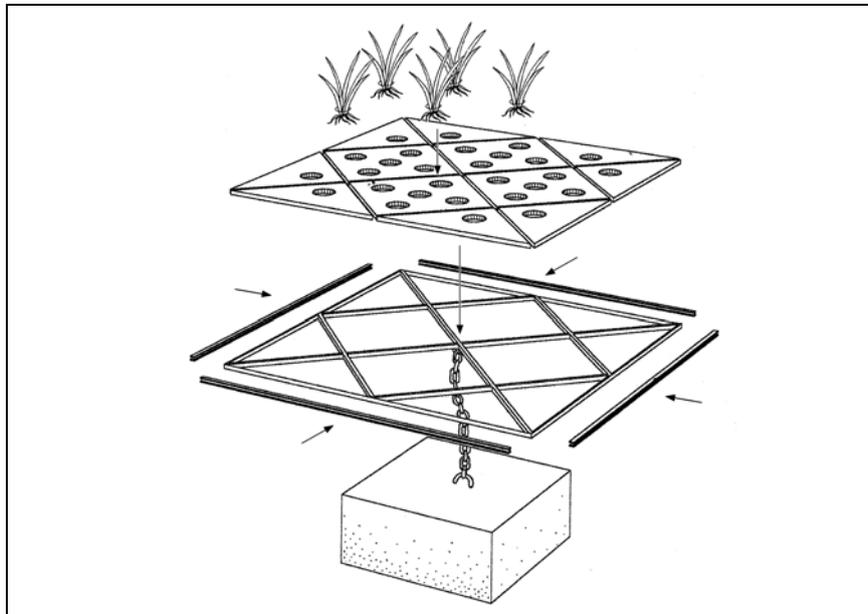


圖 19 人工浮島示意圖 (資料來源：李明達，2002)

#### 一、操作管理

##### (一)、監測操作

在設置完人工浮島後，需要實施 3-5 年的監測，以管理周遭環境的變化與評估人工浮島的影響。監測項目包括：

- 生物調查；
- 水質；
- 破浪影響等。

監測方式除利用人工定點量測，也可利用電子式監測儀器固定於浮島平台四周，但須注意人工浮島於水體之位置易受固定的方式影響，若水體為流動情形（河流等有水流移動情形），監測數據需考量流經浮島監測點的

流量與整體流量的比例等因素，才能得到將真實監測結果。而監測的資料數據可與植物生長收割後作比較，以瞭解植物攝取水體中滋養物的程度。

## (二)、泥沙清理

人工浮島經過日積月累可能會有泥沙沈澱，應利用沖洗等方式移除。若沈澱情形過於嚴重，可能需要重新植栽或甚至替換人工浮島。

## (三)、廢棄浮島的處理方法

人工浮島的設計使用年限為 10~20 年，一經過使用期限需檢視機能狀況是否正常，如無法再使用則呈現廢棄的狀態。如果在設計初期經費許可的條件下，使用自然環境可分解材質及可回收利用之材質為主，或是將人工浮島拖至適當場所當作人工魚礁利用。

## (四)、特殊事件處置

### 1. 暴雨、地震與其他特殊情況

在颱風時期與大雨過後，人工浮島容易受到暴雨與強風侵襲受損，浮島上的植栽也會受到折損，應該將人工浮島拖回進行詳細的檢查，確認維修補強浮島的結構安全與重新植栽植物等，而浮島的固定也需檢驗受強風與強浪拉扯下是否能持續正常。若有強震發生，雖浮島受水體緩衝保護不會有直接性的影響，但仍檢驗結構完整，並特別檢查浮島固定功能是否正常。

### 2. 其他偶發事件

其他偶發性的意外事件應做事前預防排除，如立警告牌或宣導告示牌等，也要隨時注意，例如：遊客進入或誤闖的船隻等。

## 二、維護管理

### (一)、構造物管理

#### 1. 基礎選擇

人工浮島具有多樣性的機能，操作單位必須於設計階段明確人工浮島設置目的，設計出適用的浮島類型與尺寸。人工浮島在構造分類上主要有乾式、有框濕式、無框半濕式及其他類型。而乾、濕式分類基礎在於水和植物接觸的有無。若以水質淨化的目的而言，濕式有框是比較適合的一種選擇（中村圭吾，2001），建構人工浮島的材料應對水環境無二次污染。

表 21 人工浮島的分類

乾式	濕式		
	有框	無框	其他
混泥土、發泡苯乙烯等	FRP、發泡苯乙烯、混泥土、木材等	椰子纖維等	竹子或塑膠管排列組合、廢輪胎作外框再加椰子纖維作植生等

(資料來源：中村圭吾，2001)

#### 2. 固定裝置維護

浮島的固定裝置是重要的結構，固定的方法一般分為重力式、錨定式及杭式等三種。杭式在視覺上較接近自然。錨定式若使用到混泥土或其他材料，儘量減少其表面可能對魚類等損害。浮島材質強度受到波浪強度、日照、施工品質、溫度及風力侵蝕等因素影響。一般使用年限大約為 15 年。

### 3. 定期檢視維修

為了解在不同單元、固定繩索、錨與植生基礎間的連結部分維持在良好狀態，以整修損壞的部分，構造物管理項目有定時監看與點檢、故障補修、其他突發事件的排除。在構造物的管理方面，定期的巡視與緊急時如颱風過後的檢點皆是維護浮島的基本工作，浮島外觀的完整性、固定浮島的組件功能以及植生基礎勘查等，皆是巡查的要點。一旦發現磨損、故障、破裂及流失等，必須在短時間內進行修復或更新，若無法在水體上完成修補維護，應拖曳回岸邊或修理場所，重新架構浮島維持功能發揮。

#### (二)、植物管理

濕式類型的人工浮島可直接接觸水，通常種植植物類型有挺水植物（如蘆葦、香蒲等）、水生植物與保水植物（如柳樹等）。而乾性類型人工浮島不直接接觸水體，植生基礎多為土壤等，可種植大型木本植物與園藝植物等或挺水植物（如蘆葦、香蒲），且可提供鳥類棲息功能。植物管理有以下幾項重點：

- 植栽
- 定期灌溉、施肥與收割
- 防範動物破壞

#### 1. 植栽

人工浮島建構完成放入水體運作，人工浮島上的植栽受環境因素影響，第一年的生長季節可能會多次的重新植栽或更新品種，若於一環境有其他浮島同時建置，可以從其他浮島宜植生長良好的物種。若人工浮島為乾式類型不直接接觸水體，則需經常性灌溉等。植物管理項目有灌水（乾式浮島）、施肥、植物秋收、其他異物檢除。在植物管理上，人工浮島設立後，1~3 年內種植的植物就會十分的茂盛，成熟的植物群落自然就會形成。若水體內無重金屬等致病物質，人工浮島上會設計種植水稻等經濟植物，定期灌溉與收割有經濟效益。

人工浮島選擇種植植物物種除有景觀與濾淨水質考量，盡量以水環境岸邊植物相類似為優先考量。本土人工浮島可種植過山龍、李式稻草、葶薺草湖瓜草等水生植物，其他有可種植於浮島的水生植物有水社水龍骨、台灣黃眼草、日月潭洋耳蒜、水社野牡丹等屬於台灣特有種。部分區域污染程度輕微可以種植水稻，行成浮田具經濟效益。綠色植物能提供湖岸單調色彩的綠化，且經過人為排列增加視覺景觀優。不過植物選擇與當地物種相類似較佳。

選擇生態適應性廣，具有一定耐污能力，對水質淨化能力強，繁殖、栽培容易的沈水與挺水植物，提高水生生態系統的環境容量和自淨能力，

以改善水生生態環境。另外，調查植物的生長情況有助於與植物對滋養物攝取情形作比較。

## 2. 定期灌溉、施肥與收割

同時，除了人工種植的植物生長以外，浮島上也會有外來入侵的植物物種。如果景觀修景是浮島的目的，清除雜亂的外來植物就是很重要的工作。為移除人工浮島中不受歡迎及侵入的物種，故在間隔中除草、灌溉和施肥，以保持可接受與設計良好的景觀。植物的生長過剩，常使重量超過浮島的負荷，尤其是外來的木本科植物，會造成浮島的沉沒或因重量不均造成翻覆，所以定期的採伐與收割，可以控制浮島的荷重、提高吸收營養鹽的效能、提供鳥類及昆蟲最佳的生存空間以及景觀的創造。

## 3. 防制動物破壞

水環境中有如河狸與水獺等動物是以植物為食物來源，若對人工浮島與浮島上植物有威脅，應防備於浮島上結巢生存並加以移除等。

### (三)、生物管理

#### 1. 鳥類與魚類保育

人工浮島提供魚、蝦良好生存環境。也因為浮遊植物群比例降低，水華（water bloom）現象也隨之降低，而附著性植物會增長，水棲動物隨之明顯增加，並且是一處躲避掠食者的避難場所，成為自然的漁場。穩定的水生植物浮島可為鳥類築巢。成為底棲生物、水生昆蟲與魚類鳥類的生活空間。乾式浮島有提供鳥類棲息地的功能，以及在景觀美化上的加成效果。應防範部分河鼠等動物有咬嚼人工浮島結構可能造成破壞。

鳥類需定期檢疫是否有帶有傳染病原，也應防範遊客捕獵或欺負，注意防範鳥類排泄物可能額外造成不利的影響。人工浮島置點應遠離部分特殊具地域性或其他特性的鳥類的產卵地點，而人工浮島建構與維修也應遠離這些鳥類的產卵季節。若浮島設置區域為魚類復育禁捕區，防範是否有捕獵情形發生；若否，則可適當與適量的開放釣魚等行為，使魚群數量與種類維持於一最適當平衡。

表 22 人工浮島的操作項目與週期

操作項目	週期
植物採伐與收割	定期
巡視與緊急時如颱風過後的檢點皆是維護浮島的基本工作，浮島外觀的完整性、固定浮島的組件功能以及植生基礎勘查等，皆是巡查的要點	定期
管理周遭環境的變化與評估人工浮島的影響	3-5 年

（資料來源：Hu, 2002）

### 三、案例討論

#### (一)、內華達州米德湖拉斯維加斯灣內人工浮島

##### 1. 背景

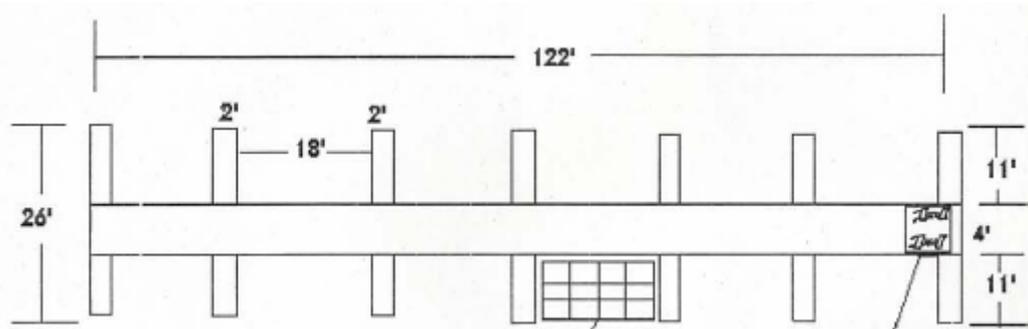
拉斯維加斯灣的水質受到處理過的污水入流與暴雨產生的污水影響。這些污水經過 Las Vegas Wash. Las Vegas Wash 面積為 1600 平方英里(4144 平方公里)，污水會流經 Las Vegas Wash 後在經由拉斯維加斯灣流入米德湖。

研究目標為：

- 研究浮島如何去除水中的營養物，並改善拉斯維加斯灣的水質。
- 發展出耐用的浮島平台或浮島
- 比較植物生長所能去除的營養物
- 估計不同植物體系與不同植物的處理技術

##### 2. 人工浮島結構設計

在實驗中，造了兩各浮島平台，每各浮島分成 12 各區域。利用聚乙烯管使浮島可以漂浮。浮島平台的寬度為 122 英尺長與 26 英尺寬，浮島平台的面積為 3172 平方英尺。主要通道為 122 英尺長與 4 英尺寬，並在平台尾端設置絞盤。主要通道將浮島平台分成兩部分，又細分為 12 各區域。次要通道寬度為 2 英尺寬與 11 英尺長。每各小間隔寬 18 英尺，長 11 英尺。每座浮島平台可以承受 6000 磅的負載。浮島平台共使用四各混凝土製的錨。每各錨重量約 1500 磅。使用於平台上的絞盤使用金屬線連接錨，可承受 4000 磅的力。



##### 3. 植物管理

24 個方格內的植物是由 Overton Wildlife Management Area 的米德湖修湖休息區中收集的。這地區是主要植物的所在地，收集種子與塊莖，有少部分的植物是由 Las Vegas Wash 收集到的。所收集到的植物有：香蒲、Hardstem Bulrush、Olney's Bulrush、Common Three-square Bulrush、River Bulrush、Saltmarsh Bulrush and Creeping Spikerush 等幾種植物。

##### 4. 水質分析

五月與六月所做的測試結果位置相同。在浮島的上下各兩不同處，採集水質樣本進行營養物分析與物理化學資料收集。下圖為概要圖，與各樣點位置。

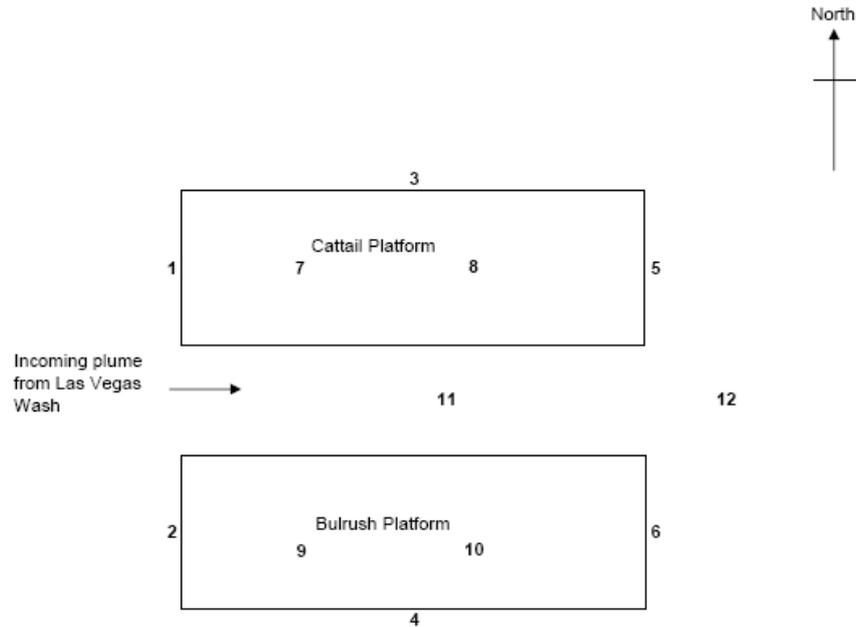


圖 20 人工浮島測量位置

使用 Hydrolab 的水質儀器進行量測(Hydrolab Crop., Austin, TX)，量測項目包括溶氧、pH、電導度、氧化還原電位、水溫與總溶解固體。利用 Hach 濁度計讀取濁度質，利用比色法估計水中的氮。

(1) .六月份營養物分析：

在六月份的研究，由香蒲組成的浮島營養物有立即的降低，氮由 7.62mg/l 降至 6.41mg/l，總懸浮固體由 135mg/l 降至 30mg/l。

Table 8. Nitrogen as NO<sub>3</sub>-N, June 2002

Station Code	Nitrogen as NO <sub>3</sub> -N (ppm)				Mean (ppm)	Direction of Flow
	05-June	07-June	09-June	11-June		
#1	9.33	9.21	6.49	5.47		
#1	9.22	9.39	9.51	5.96		
#2	6.04	7.66	7.35	4.72		
#2	6.23	7.86	7.29	5.14		
#3	6.22	6.57	7.01	4.11		
#3	8.20	10.27	9.77	7.66		
#4	5.67	7.36	7.32	4.16		
#4	6.38	7.62	7.27	4.11		
#5	6.29	8.83	6.98	3.55		
#5	10.14	11.24	7.74	5.83		
#5	7.16	7.82	7.68	4.07		
#5	8.08	8.86	7.92	4.92		
#7	6.57	7.62	6.61	3.16		
#7	9.86	10.14	9.89	4.19		
#8	6.17	8.55	6.90	3.19		
#8	10.09	9.69	8.09	6.05		
#8	6.77	7.91	9.33	7.33		
#9	6.77	7.91	9.33	7.33		
#9	7.03	8.20	9.86	7.87		
#10	6.73	7.79	9.88	8.96		
#10	7.00	8.25	9.86	9.33		
#11	6.16	8.60	7.24	4.90		
#11	8.08	8.67	8.25	9.24		
#12	na	na	na	na		
#12	na	na	na	na		

Surface Sample, Cattail Platform						
Station Code	NO <sub>3</sub> as N (ppm)				Mean (ppm)	Direction of Flow
	05-June	07-June	09-June	11-June		
#1	9.33	9.21	6.49	5.47	7.62	↓
#7	6.57	7.62	6.61	3.16	5.99	
#8	6.17	8.55	6.90	3.19	6.20	
#5	6.29	8.83	6.98	3.55	6.41	

1.5 Meter Sample, Cattail Platform						
Station Code	NO <sub>3</sub> as N (ppm)				Mean (ppm)	Direction of Flow
	05-June	07-June	09-June	11-June		
#1	9.22	9.39	9.51	5.96	8.52	↓
#7	9.86	10.14	9.89	4.19	8.52	
#8	10.09	9.69	8.09	6.05	8.48	
#5	10.14	11.24	7.74	5.83	8.74	

Surface Sample, Bulrush Platform						
Station Code	NO <sub>3</sub> as N (ppm)				Mean (ppm)	Direction of Flow
	05-June	07-June	09-June	11-June		
#2	6.04	7.66	7.35	4.72	6.44	↓
#9	6.77	7.91	9.33	7.33	7.83 enclosure	
#10	6.73	7.79	9.88	8.96	8.34 enclosure	
#6	7.16	7.82	7.68	4.07	6.68	

1.5 Meter Sample, Bulrush Platform						
Station Code	NO <sub>3</sub> as N (ppm)				Mean (ppm)	Direction of Flow
	05-June	07-June	09-June	11-June		
#2	6.23	7.66	7.29	5.14	6.63	↓
#9	7.03	8.20	9.86	7.87	8.24 enclosure	
#10	7.00	8.25	9.86	9.33	8.61 enclosure	
#6	8.08	8.66	7.92	4.92	7.44	

Table 9. Total Suspended Solids, June 2002

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June
	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)
#1	456	36	39	11
#1	419	39	12	70
#2	16	25	17	15
#2	22	25	15	68
#3	36	27	13	13
#3	170	41	58	126
#4	20	23	13	13
#4	28	23	17	9
#5	71	28	15	5
#5	429	99	26	40
#6	41	25	17	15
#6	68	36	27	57
#7	99	26	13	6
#7	459	68	66	25
#8	60	99	26	40
#8	502	70	27	68
#9	22	15	17	175
#9	20	17	25	117
#10	32	22	17	457
#10	30	15	27	na
#11	34	27	15	13
#11	68	35	27	126
#12	na	na	na	40
#12	na	na	na	457

Surface Sample, Cattail Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)		
#1	456	36	39	11	135.4	↓
#7	99	26	13	6	36.1	
#8	60	99	26	40	56.4	
#5	71	28	15	5	29.8	

1.5 Meter Sample, Cattail Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)		
#1	419	39	12	70	135.0	↓
#7	459	68	66	25	155.0	
#8	502	70	27	68	166.7	
#5	429	99	26	40	148.6	

Surface Sample, Bulrush Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)		
#2	16	25	17	15	18.4	↓
#9	22	15	17	175	57.3 enclosure	
#10	32	22	17	457	131.9 enclosure	
#6	41	25	17	15	24.5	

1.5 Meter Sample, Bulrush Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)	TSS (ppm)		
#2	22	25	15	68	32.4	↓
#9	20	17	26	117	44.7 enclosure	
#10	30	15	27	na	24.1 enclosure	
#6	68	36	27	57	47.0	

Table 10. Nitrogen as NH3-N, June 2002

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June
	NH <sub>3</sub> as N (ppm)			
#1	0.16	0.09	0.06	< 0.04
#1	0.14	0.11	0.13	0.08
#2	< 0.04	< 0.04	0.08	< 0.04
#2	0.04	< 0.04	0.08	< 0.04
#3	< 0.04	0.04	0.07	< 0.04
#3	0.07	0.14	0.16	0.09
#4	< 0.04	< 0.04	0.09	< 0.04
#4	< 0.04	< 0.04	0.09	< 0.04
#5	< 0.04	0.07	0.06	< 0.04
#5	0.20	0.20	0.09	< 0.04
#6	0.05	0.04	0.08	< 0.04
#6	0.06	0.08	0.10	< 0.04
#7	0.04	0.06	0.07	< 0.04
#7	0.16	0.05	0.15	< 0.04
#8	0.04	0.12	0.07	< 0.04
#8	0.16	0.12	0.10	0.05
#9	0.07	0.23	0.13	0.09
#9	0.09	0.19	0.15	0.10
#10	0.06	0.32	0.16	0.12
#10	0.08	0.26	0.15	0.12
#11	< 0.04	0.07	0.08	< 0.04
#11	0.08	0.04	0.10	0.14
#12	na	na	na	na
#12	na	na	na	na

Surface Sample, Cattail Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	NH <sub>3</sub> as N (ppm)					
#1	0.16	0.09	0.06	< 0.04	0.10	↓
#7	0.04	0.05	0.07	< 0.04	0.05	
#8	0.04	0.12	0.07	< 0.04	0.08	
#5	< 0.04	0.07	0.06	< 0.04	0.06	

1.5 Meter Sample, Cattail Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	NH <sub>3</sub> as N (ppm)					
#1	0.14	0.11	0.13	0.06	0.11	↓
#7	0.16	0.05	0.15	< 0.04	0.12	
#8	0.16	0.12	0.10	0.05	0.11	
#5	0.20	0.20	0.09	< 0.04	0.16	

Surface Sample, Bulrush Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	NH <sub>3</sub> as N (ppm)					
#2	< 0.04	< 0.04	0.08	< 0.04	0.08	↓
#9	0.07	0.23	0.13	0.09	0.13 enclosure	
#10	0.06	0.32	0.16	0.12	0.16 enclosure	
#6	0.05	0.04	0.08	< 0.04	0.06	

1.5 Meter Sample, Bulrush Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	NH <sub>3</sub> as N (ppm)					
#2	0.04	< 0.04	0.08	< 0.04	0.06	↓
#9	0.09	0.19	0.15	0.10	0.13 enclosure	
#10	0.08	0.26	0.15	0.12	0.15 enclosure	
#6	0.06	0.08	0.10	< 0.04	0.08	

Table 11. Potassium, June 2002

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June
	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)
#1	14.4	16.8	13.2	9.0
#1	19.1	17.5	17.0	13.2
#2	13.3	15.2	15.5	11.3
#2	13.6	15.3	15.5	11.9
#3	13.7	16.3	13.7	10.4
#3	16.8	19.2	18.0	15.0
#4	13.0	15.5	15.4	10.5
#4	14.0	15.6	15.4	10.4
#5	14.0	17.0	14.9	9.8
#5	20.7	20.1	15.9	12.9
#6	15.1	16.4	16.4	10.5
#6	16.5	17.6	16.0	11.7
#7	14.5	15.2	13.3	9.5
#7	20.1	18.8	18.3	10.7
#8	14.0	17.2	14.7	9.5
#8	20.5	19.1	15.8	13.2
#9	14.3	17.3	17.8	14.8
#9	14.3	17.3	17.8	14.8
#10	14.4	17.8	18.5	17.1
#10	15.1	17.8	18.4	17.5
#11	13.9	17.4	15.4	11.7
#11	16.4	17.6	16.4	17.4
#12	na	na	na	na
#12	na	na	na	na

Surface Sample, Cattail Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)		
#1	14.4	16.8	13.2	9.0	13.4	↓
#7	14.6	16.2	13.3	9.5	13.1	
#8	14.0	17.2	14.7	9.5	13.8	
#5	14.0	17.0	14.9	9.8	13.9	

1.5 Meter Sample, Cattail Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)		
#1	19.1	17.5	17.0	13.2	16.7	↓
#7	20.1	18.8	18.3	10.7	17.0	
#8	20.6	19.1	15.8	13.2	17.2	
#5	20.7	20.1	15.9	12.9	17.4	

Surface Sample, Bulrush Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)		
#2	13.3	15.2	15.5	11.3	13.8	↓
#9	14.3	17.3	17.8	14.8	16.1 enclosure	
#10	14.4	17.8	18.5	17.1	17.0 enclosure	
#6	15.1	16.4	16.4	10.5	14.61	

1.5 Meter Sample, Bulrush Platform

Station Code	05-June	07-June	09-June	11-June	Mean (ppm)	Direction of Flow
	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)	K (ppm)		
#2	13.8	15.3	15.5	11.9	14.1	↓
#9	14.3	17.3	17.8	14.8	16.1 enclosure	
#10	15.1	17.8	18.4	17.5	17.2 enclosure	
#6	16.5	17.6	16.0	11.7	15.5	

### 3. 討論

在浮島的結構設計上仍有許多挑戰。浮島的位置會因為水位的變動而改變。浮島用於消除水中的營養物，在本研究中有發現其效果。浮島的去除效果無法與溼地作比較，因為浮島會隨時間改變其位置。浮島提供提供許多棲息環境給野生動物，如魚類、鳥類與兩棲類。在本研究中，河狸與侵入性植物表現出了這個現象。

下面有一些建議與問題必須解釋：

- 發展出一些可用來可快速固定浮島的材料與降低更新頻率
- 較大的孔隙可以鑲嵌更多的植物，這樣可以幫溼地植物預防暴雨。
- 因破裂、沖刷或波動造成破裂的浮島需要移除。
- 河狸在 2001-2002 的冬季對浮島的破壞明顯。在浮島中有一對河狸，如果其繁殖或招引其他河狸，將會對浮島造成強烈的破壞。
- 必須控制蘆葦的數量，這可以保持浮島的物種多樣性。雖然蘆葦可有效去除營養物，但是蘆葦是具侵略性的物種，會取代浮島中特殊的野生物種。
- 使用柔軟的草墊效果比使用剛性構造結構得到的效果更佳。

### (二)、霞浦湖(Lake Kasumigaura)人工浮島的生態系統

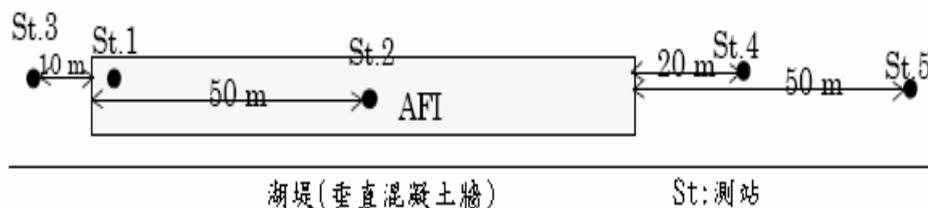
#### 1. 背景

在土浦(Tsuchiura)港的人工浮島(AFI)大約 91.5m 長，寬度約 9m，大約由 40 個部份所組成。每一部份的面積約 20.3 平方公尺(4.5m×4.5m)，為聚苯乙烯的鋼架結構，為了種植植物，將海棉分成許多 10cm 的切片裝置在框架上。人工浮島的目的是為了要創造出更好的景觀和棲地、淨化水質、保護海岸。然而將人工浮島量化評估幾乎尚未做到。這篇文獻的目的在研究人工浮島生態系統，根據 1994 年 10 月的調查和 1993 年 9 月由 Kasumigaura 工作室所做的植生調查。

#### 2. 監測方法

1994 年 10 月 6 日的調查水質和浮游生物，實施了 8 點(測站 1 到測站 8)，3 種水深(距表面 15cm、30cm 及距底部 20cm)在人工浮島上及周圍(如下圖)。

用 10-litter 的水洗滌根基後，在人工浮島(測站 3)底下的根基切除面積 900 平方公分(30cm×30cm)，裝上藻類和調查浮游動物。10 月 7 日也調查了在人工浮島周圍的魚和蝦。在人工浮島下使用圍網或分割漁網、抄網，但在控制測站只使用分割漁網。在這篇文獻“AFI”這個術語定義在測站 1 和測站 2，“Control”在測站 3、測站 4 測站 5。



### 3. 生物管理

#### (1) 魚蝦

在人工浮島下圍網面積  $4.5\text{m}\times 4.5\text{m}$ ，被抓到的魚有 6 種不同種類(共 267 隻)。值得注意的特徵為只有滿一歲的魚被抓到。在控制點只有捕獲大嘴鱸魚、大翻車魚、日本沼蝦被捕獲。在人工浮島的魚和蝦的生物量為  $4.5\text{ g-dry/m}^2$ ，在控制點的生物量為  $0.12\text{ g-dry/m}^2$ ，所以在人工浮島的生物量為控制點的 38 倍大。

#### (2) 浮游動物

在人工浮島和控制點的浮游動物(zoo-p)生物量並沒有多大不同，生物量預估分成幾個群組即原生動物類、輪蟲類、搖蟲類。在人工浮島的浮游動物生物量為  $3.2\text{g-dry/m}^2$  控制點的生物量為  $2.4\text{ g dry/m}^2$  附著在根系上的浮游動物量為  $2.2\text{ g-dry/m}^2$ 。在人工浮島主要觀察到根族綱原生動物。

### 4. 植物管理

#### (1) .植生

原本的常見的蘆葦、香蒲、白筍、銀柏草 and 黑三稜科植物被個別地種在人工浮島上。雖然已經獲得績效，至今常見的蘆葦仍是主要物種，因為有良好發展的地下根部，香蒲和白筍相等的穩固，然而銀柏草和黑三稜科植物並沒有餘留很多，因為從水生植物到陸生植物的接替，如高的菊科植物和大花咸豐草。大型海藻的在人工浮島的生物量大約  $2250\text{ g-dry/m}^2$ 。另一方面在霞浦湖(Lake Kasumigaura)常見的蘆葦生物量大約為  $776\text{g/m}^2$ - $3320\text{g/m}^2$  (Sakurai et al.1985)。在人工浮島上蘆葦的高度大約為 50%-80%的天然蘆葦高。

人工浮島和控制點的碳金字塔如圖，這張圖顯示出人工浮島的生物數量。特別是在人工浮島的大型藻類貯藏了很大的數量。雖然循環的營養鹽未知，水質淨化的效果沒有很顯著，在人工浮島的生物量除了藻類之外為 2.6 倍大相較於控制區域。最重要的是注意生物量在生態系統間的比例。附著的有機體如浮游植物和浮游動物佔據著很大的比例，在人工浮島周圍的魚和蝦比例也很高，這表示人工浮島對於掠食者是一個很好的棲地。

#### (2) .浮游植物(Phytoplankton)

在人工浮島和控制點的物種族群結構並不是很不同，浮游植物生物量預估根據 chl-a 值。

人工浮島生物量  $7.5\text{ g-dry/m}^2$ ，控制點生物量  $5.6\text{ g-dry/m}^2$ ，依附藻類的生物量為  $4.2\text{ g-dry/m}^2$ 。

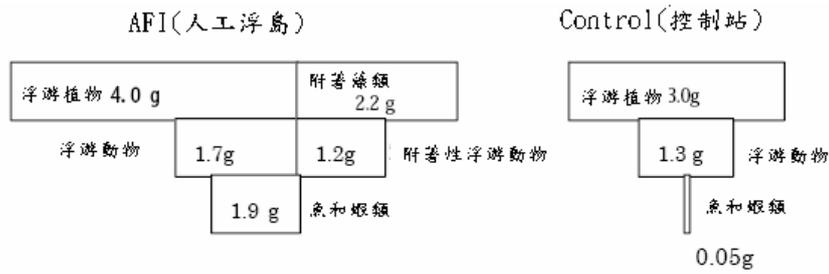


圖2:碳金字塔

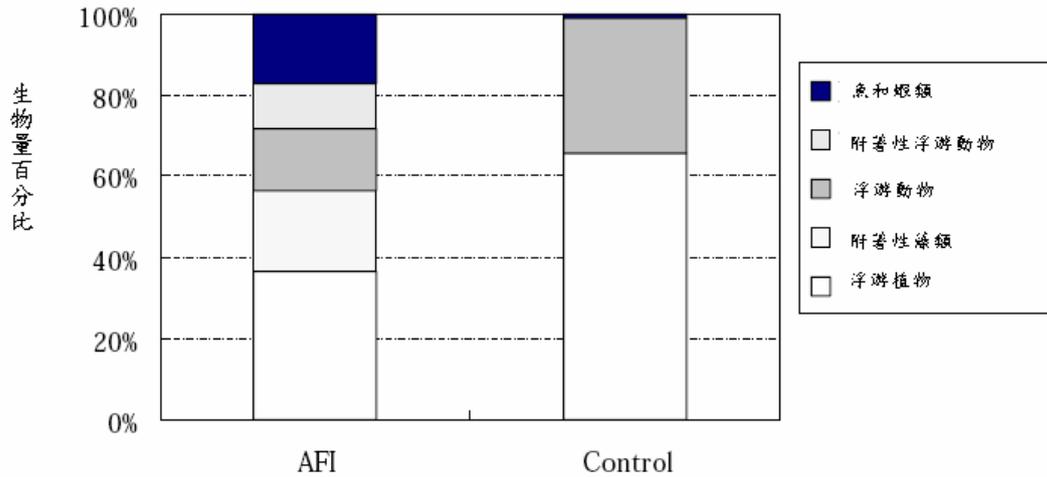


圖3:生物量比例

## 5. 討論

這個調查解釋清楚了一些人工浮島的功能如下:人工浮島很適合當作小魚小蝦類的棲地,增加了人工浮島下的生物多樣性,即人工浮島從水質的觀點來看,改變了生態結構形成良好的棲息條件。

## 3.2 土壤處理法 (Soil Treatment)

### 3.2.1 慢滲系統 (Slow Rate Systems, SR)

慢滲系統係施用至植生草地，經過蒸發散消耗、土壤滲漏與逕流再回收等改善水質。慢滲系統操作與維護分類陳述如下：

- 操作管理

- ✓ 週期與人員配置
- ✓ 操作技術
- ✓ 過程控管與監測
- ✓ 例行操作步驟
- ✓ 緊急操作程序

- 維護管理

- ✓ 植物管理
- ✓ 結構維護管理
- ✓ 場址管理

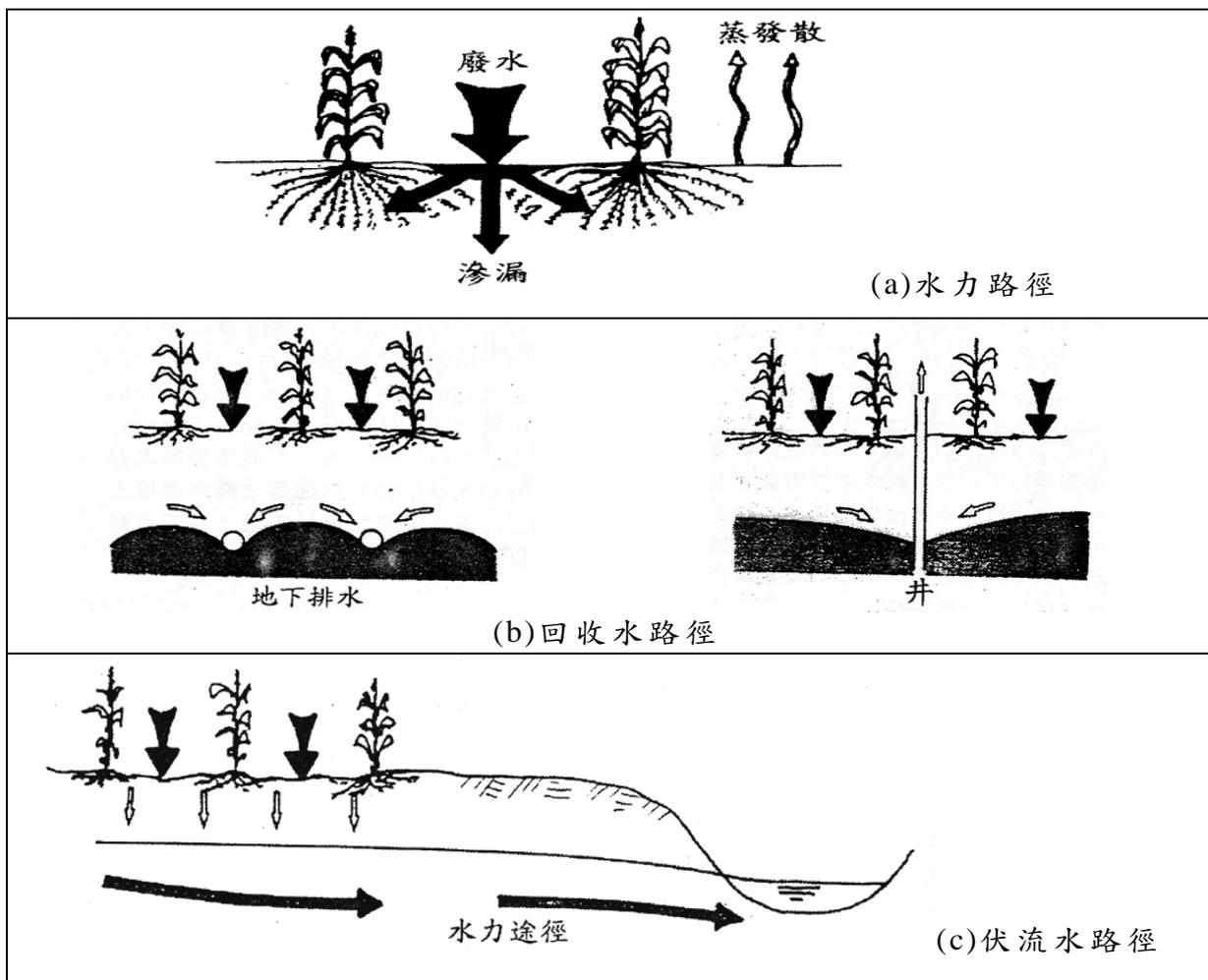


圖 21 慢速滲透系統的水力途徑(U.S.EPA, 1981)

## 一、操作管理

慢滲系統的操作管理包含操作週期、操作技術、監控、一般與緊急操作程序。分類如下所示，細節陳述如後：

- 週期與人員配置
  - ✓ 操作週期
  - ✓ 人員配置需求
- 操作技術
  - ✓ 一般技術
  - ✓ 特殊技術
- 過程控管與監測
  - ✓ 監督監測
  - ✓ 監測需求
  - ✓ 地下水監測
  - ✓ 蓄水池
  - ✓ 施灌場址監測
- 例行操作步驟
  - ✓ 施灌速率與進度表
  - ✓ 終年操作
  - ✓ 季節性流量操作
  - ✓ 終年流量季節性使用
- 緊急操作程序

### (一) 操作週期與人員配置

#### 1. 操作週期

適當的操作週期可使土壤有一段適當的乾燥期，避免土壤產生厭氧狀態及孔隙阻塞等問題。例如馬里蘭州要求慢速滲濾系統之操作週期為每操作 1 天休息 6 天。由於台灣地區地處亞熱帶，氣候較為炎熱，冬季時溫度也大都在 10°C 以上，故操作週期可參考夏季之情形，慢速滲濾系統之建議操作週期為每施灌 1 天休息 3 天。

#### 2. 人員配置需求

操作人員的數量與所需技術的等級將依系統類型和大小而定。圖 22 顯示出典型都市慢滲系統土地處理的人事需求預估。圖表呈現了小型系統每天大約的工時，以及大型系統所需的全職雇員數目。這些估計值是針對典型的系統；行栽作物(row crops)的農業操作需要較長時間執行操作與維護，造林地所需時間較少。

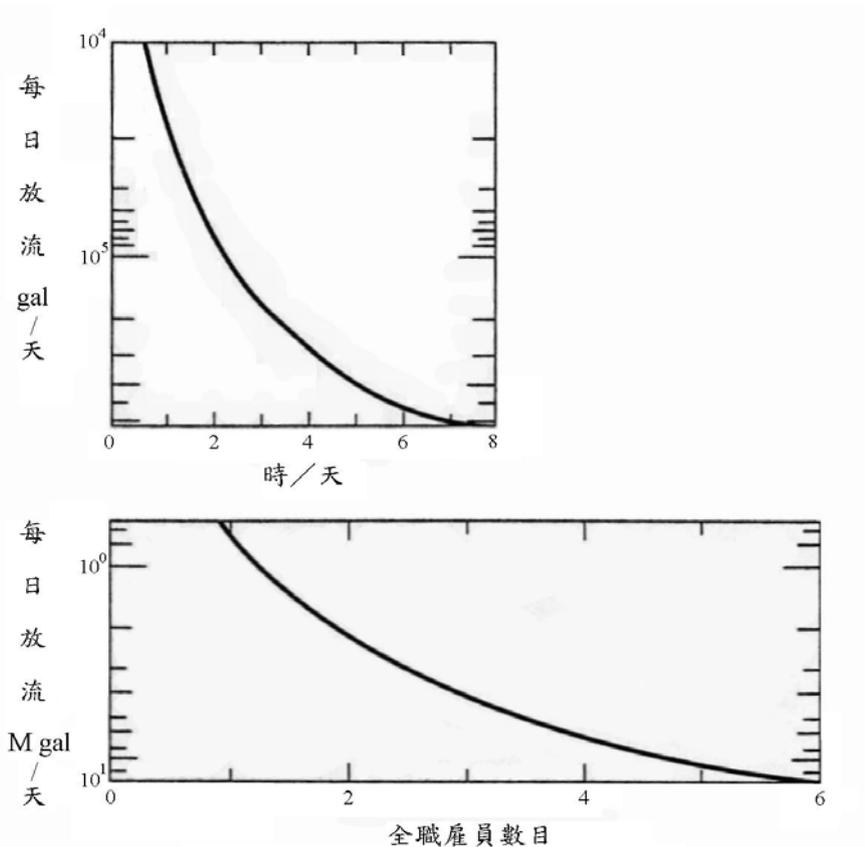


圖 22 慢滲系統中土地處理部分的人事需求 (資料來源：Crites 等, 2000)

## (二) 操作技術

### 1. 一般技術

所有類型的慢滲系統，其例行操作所需的一般技術在本質上與任何簡易污水處理系統的例行操作所需相同。慢滲土地處理的特殊要求，在於決定何時開關水源，或何時將之轉移至另一區塊，操作的基本計畫和進度在每個工程的最後設計階段即已訂定。不過，若放流量增加，某一年特別潮濕或乾燥，抑或系統內所用的植被改變，則操作者或許需要稍做調整。

### 2. 特殊技術

處理林地場址者有時會需要專家意見，以協助解決昆蟲侵擾、植物疾病或決定哪些樹該剔除、何時採取皆伐等問題。處理農地場址者，會需要一般運用於特定作物種類（牧草、乾草作物或行栽作物）所有農作技術。

休閒用地需要特別注意用水品質，以維持妥善的健康防護。此外，休閒用地的污水施灌進度規劃需要小心控管，以免干擾休閒活動，通常於夜晚或淡季動工。許多休閒用地會有精心維護的草坪植被。

操作人員需要隨時接受再植栽、雜草控制、補充施肥等經驗的相關方面建議。美國很多州對於廢水處理植栽等操作人員都有證照的測驗。雖然其中大部分的測驗偏向於機械方面的操作維護，不過對於廢水處理系統的操作人員有助益、且建議取得相關國家級廢水等相關證照測驗。另外職業

再訓練，有助於幫助操作人員重新瞭解廢水處理的健康與安全需求，如同機械操作組成在操作維護的重要性一般。

### (三)、過程控管與監測

系統操作所需的資料透過監測計畫取得。監測需求可分為兩種。合格性監測可以保證系統符合責任所屬機構的要求。例行處理(routine process)監測可確保系統所有內部因子依設計運作，此種監測在沒有要求規範時是必要的。然而，如果監測計畫周詳，通常是可能同時達到規範和操作兩方的需求。

#### 1. 監督監測(Compliance Monitoring)

各負責機關應對放流至地面水的排出物有規章控管。如同大部分漫地流系統，土地處理系統若以地下排水管(underdrains)和水井蒐集處理過的水，並將之放流至地面水中，則需申請許可。處理過的水若留在地底，或在某些偏遠地區才流入地面水，雖不需放流許可，但是管制機關應予關注。

土地處理系統處理費污水時，程序應符合國家廢水處理規範。目前台灣相關法令包括『水污染防治法』、『事業水污染防治措施管理辦法』、『事業廢(污)水排放地面水體許可辦法』、『放流水標準』等等。又依據事業水污染防治措施及排放廢(污)水管理辦法二十三條規定：在採用土壤處理系統時必須考慮：(1)土壤特性、地表坡度結構及地下水水位高度、(2)土壤處理場址面積、年水力負荷及年污染物負荷、(3)前處理、灑水及排水設施、植被或防止地表沖蝕設施、(4)貯留設施、(5)防止病媒滋生及減少惡臭設施、(6)與水源之距離等條件。雖然沒有針對偏遠地區存留地下或深層的廢水排出許可文件要求，但是這不能被管理的官方機構給忽略。尺度範圍包含擁有法律效力的特殊規則，與具有強烈建議的指導方針，指導方針比起規則講述較多彈性應用。同時也需一個別系統，依個別案例的場址狀況、操作計畫決定。

這些控制保護保護操作人員和一般大眾健康，如同環境保護措施。其中厲害關係超脫水質，包含作物成長類型、土壤狀態與空中漂浮顆粒的存在。因此，部分主管機關同意特別的標準規則。

#### 2. 監測需求

地下水的保護需要個案處理，而絕大部分取決於設施附近的地下水使用和蓄水層的分類。土地監測通常為製程管理/程序控制型態，以確保系統正常運作，或以警示未來可能阻礙場址供其他目的使用的長遠影響。作物也會因操作目的而受到監測。除了休閒業或靠近一般民眾施用的個案外，大部分的機關較不憂心空氣污染的可能性。

施用污水所需之監測頻率和典型範例已列於表 23。BOD、酸鹼值、氮和磷是多數系統會檢測的熟知水質參數。許多其他熟知參數(金屬元素等)並未列於表 23，這些參數抑或通常在典型生活都市污水中濃度不足，抑或對系統的正常運作無直接影響。

表 23 施用污水典型監測計畫表

參數	系統大小 (mgd)	
	0-1.0	>1.0
BOD、懸浮固體	Q	M
酸鹼值 pH、凱氏氮	Q	W
氨態氮	Q	M
硝酸鹽氮	A	M
磷、鉀、鈉、鈣、鎂	A	Q
氯化物、溶解性固體總數	A	M

Q=一年四次 A=每年一次 M=每月一次 W= 每週一次

(資料來源：Crites 等, 2000)

### 3. 地下水監測

當飲用水含水層品質列為因子之一時，地下水通常得在系統範圍內接受檢測。硝酸鹽氮 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 是極為重要的參數，但建議同時測量有機氮和氨氮，因為這兩者會隨硝酸鹽氮氧化。一般來說，可以移除工程地層中足夠氮量以符合飲水標準的慢滲法，也將移除典型生活污水中其他所有的重要內含物。因為地下水流動較緩，不會察覺到品質上的急速改變，所以無須作經常性的取樣，每年一次至兩次樣本抽取應該足夠。設計週期性運作的系統時，應考慮滲透到達工程地層估計的所需時間，並依此規劃取樣時間表。

儘管地下水和系統滲透很少產生垂直混合，監測井的取樣深度仍須在設計時仔細檢選。井若太深，可能無法獲取受土地處理操作影響樣本。監測井的地點和深度必須於設計時決定。然而，倘若操作條件改變或設計時地下水位訂定不甚恰當，則可能有必要增加新井。依土壤條件不同，系統操作者可以為 3-4.5m 典型淺監測井，更深的井一般會需要機械鑽井技術。

地下水監測井有時設置在施用場址和計畫邊界。這些井立即監測出施用場址下的運作情形，並測量施用場址內與地下水深度之距離。測量監測井中水深的一項較簡易技術。由於不常在這些監測井中抽取樣本，積聚在井管裡的水無法代表地下水實際的品質。在井裡取樣前，需要以貝勒管(掏泥筒)抽出或移除至少三井管量的水。監測井的地點位置，視系統設計時決定的地下水流向而定。周邊井管設置在水力梯度場址相較為低。此外，監測井應設在上坡，以在地下水流經場址前探測水質。

探測這些井的地下水位，可以進一步確定水流方向是否如同設計時所預期。系統動工後，在非預期地點發現湧泉或滲水通常是地下水流動情形的跡象，需在該處額外設立井管。

部分地區要求依個案場址土壤與植物監測。長期目的在於為危急的污染源積聚物提供文件。短期目的是程序控制監視，確保系統正常運作並處於最佳狀況。

### 4. 蓄水池

許多較新的慢滲系統結合了前處理和單池蓄水系統。監測需求包含經常測量蓄水池水位，以及土地施灌之前和期間的水質檢測。

- 監測方法
- 蓄水量超過的操作步驟
- 蓄水量不足的操作步驟
- 蓄水池水質
- 消毒

### (1) .監測方法

於操作期間，池中水位應該至少每週測量一次。觀測的方法可以從簡易標記板(marker board)或標竿儀(staff gauge)以目測法進行，甚至使用自動化，甚至可傳輸資料的水位紀錄器。即使裝設了自動化設備，仍建議由操作者直接觀測，以使操作者能同時觀察到溝渠和其他水池結構。

在任一年裡，由於污水水流的改變或降雨量出現極端值，蓄水池中的水量可能會多出或少於設計時的預估值，因此操作者必須據此修改施灌時間表，以確保場址內的植被獲得足夠的水，並且在最後達到特定的池水位。通常，汲水系統是設計來導引一定的水流量，而且無法更動。不過，操作者可以變更抽水機的使用時間、將施灌期提前、延長，或改變施予特定部分場址的水量。

### (2) .蓄水量超出的操作步驟

- 林地、牧地和乾草作物場址。需提前開始施灌(地面霜退即可進行)，並將操作期延長至秋末。如果土壤品質不同，藉由增加汲水時間，在粗質土壤上多加施灌；藉由增加汲水時間在整個場址施灌較多水量，但是勿造成污水蓄積或逕流。
- 農業耕作於作物收成後繼續施灌，延長施灌期。諮詢縣鎮的農業推廣員並於該年種植耐水性較高的作物。在生長的作物上增加施灌量到農業推廣局建議的最大值，並在場址的最劣等土壤上種植混合的麥草；在場址其他地區繼續一般畦作和施灌作業。在草皮上以最大速率施灌，翻鬆草皮下方並於隔年回復正常作業。
- 休閒場址部分，在不影響對外開放下，將施灌期延長到最長，並且／或者禁止開放某部分場址，以最大速率施灌該地，然後於休閒旺季結束後繼續施灌。

### (3) .蓄水量不足的操作步驟

- 林地、牧地和乾草作物場址。在乾燥氣候下，減少每週施灌用量，但持續施灌整個場址。在潮濕氣候區，停止部分場址的作業；於其他地方繼續以設計速率施灌。若停止作業地區的植物有枯萎現象，則施灌一些水。
- 農業耕作部分。在乾燥和潮濕氣候地區，計算有多少水可供施灌，並訂定作物栽種每英畝的需水量。僅耕種可用流量所能供應的英畝數。
- 休閒場址。減少每週施灌量，但持續施灌整個場址。在乾燥氣候下，如果猛然減少施灌量，隔年可能需要額外水量以濾除土壤根區鹽分。

#### (4) .蓄水池水質

污水可以在蓄水池更進一步被處理。在週期性的蓄水池長時間滯留是另外一種又意義的處理。依據水池狀態 BOD 和懸浮固體將會減少，細菌和過濾性病毒將會減少，氮濃度將會減低。假如地下水是可能的或是真實的飲用水源，土壤處理場址大小與應用比率依據廢水中氮的總數。水池流出物中比期望中更多或更少的氮，將會改變使用土地總數或廢水處理總量。氮對於場址植物成長的肥料需求也是很重要的。假如蓄水池流出物中氮比期望中少，則補充的肥料將需要。

#### (5) .消毒

消毒通常在休閒場址是需要的，農業的場址為人類食用的作物需求。沒有長期蓄水的系統將通常將無法移除細菌和濾過性病毒達到管理機關為休閒或作物產量要求的水準。消毒對其他類型的慢滲系統不是技術上需要，但可由官方管理機關要求。當需要消毒時，會再設計階段決定並在系統中包含適當的設備。消毒通常是加氯消毒，而會再操作指南和殘餘監視都會包含在操作維護手冊中的場址特性部分。而率的殘餘物對某些作物是有害的，因此需在乾燥狀下去氯作用。

長期處理的系統或蓄水於水池中（超過 30 天）應特別考慮。依消毒的性能而言，蓄水池不需連續性使用，視蓄水池流出物的細菌濃度指標使用。設計工程師需向管理機關要求許可，就每 100 毫升的細菌總數代替簡單的氯殘餘量。然後，操作期間，假如大腸桿菌或排泄物的大腸桿菌總數低於一明確的極限值，氯消毒作用將要求不得施用。建議在危急狀況時有一預備加氯消毒功能。包含為小型系統的瓶裝家庭式氯漂白劑，供應大型系統的次氯酸鹽粉末或液體。表 24 中的大腸菌監測頻率是假設總數維持在一特定的允許水準下。假如監測之數值升高，即需開始消毒直到數值降低至允許值。這種狀況下，小型系統需每週監測，大型系統則每天監測。當細菌總數降低至可接受值，消毒行為則可結束。

表 24 蓄水池流出物監測

參數	設計流量 (mgd)	
	0-0.015	>2.00
生物需氧量	施灌季節前一星期， 在施灌季節每三個月一次。	施灌季節前一星期， 施灌季節中每星期兩次。
懸浮固體、酸鹼值	同上	同上
凱氏氮	施灌季節前一星期， 施灌季節中一次採樣。	施灌季節前一星期， 施灌季節中每星期一次。
氨態氮、硝酸鹽氮、磷	同上	同上
氯化物	施灌季節前一星期。	施灌季節前一星期， 施灌季節後每月一次。
鈉、鈣、鎂、鉀	同上	同上
細菌 (大腸菌總量或殘量)	施灌季節前一週，施灌季節後 一月一次。	施灌季節前一週，施灌季節 中每星期兩次。

### 3. 施灌場址監測

施灌場址的監測對確保系統正常運作是必要的。監測作業涵蓋觀察噴水器、抽水機和其他機械裝置，並在農地場址測定土壤肥沃度和作物品質。這些要求通常適用所有場址，且本質上包含了例行的目測和紀錄。對於季節性運作系統，必須清楚土壤季節性變化，這些因素會影響設計規劃的施灌時間表，尤其是施灌期間的一場豪雨可能需要調整例行的每週進度。倘若一場暴雨或接連幾場暴風雨的降雨量等同於預計施灌的污水量，則必須將施灌作業延後幾天，以免產生逕流。操作者也須觀察低窪處可能造成積水的地方，這些淺水坑會導致臭味和昆蟲問題，必須清除。觀察噴灑狀態可看出阻塞的噴口或系統中其他器械上的問題。如果該場址設有地下排水道，水道出口應該定期檢查，以確保流動順暢。如果場址內設有監測井，井內水深應定期測量。一般而言，若地下水面距離地表有 1.5m，污水施灌應暫時減少或停止。

長期監測是為了確保土壤肥沃度和營造優良的作物品質，而這需要週期性的採樣與檢測。表 25 列出了建議場址使用的土壤監測方案。採樣數量將視該場址內不同土壤種類的數目和場址大小。但是，一般案例裡，都需有代表各主要土壤類型的混合土樣本。

表 25 農地場址的土壤監測

每年採樣與檢測	基準線 (baseline) 與五年一期
酸鹼值 pH (石灰和石膏需求量)	酸鹼值 pH (石灰和石膏需求量)
可取得的磷	氮
可替換/可提取	陽離子交換能力, %有機物質
鉀、鈉、鎂、鈣	可替換/可提取
	鉀、磷、銅、鋅、鎳、鎘

(資料來源: Crites 等, 2000)

混合土壤樣本通常是表土層與作物根部區域的土壤交相混合。重金屬比例的增長並不是從系統之作物的污染物。即使重金屬累積，並不可能影響系統的操作。但是在廢水處理系統操作停止後，如果有類似過量重金屬鎘的出現，會影響未來利用場址生產作物。因此土壤中的金屬含量需長期監測持續記錄。

基準線樣本應在設計的最後階段，或執行系統前，完成採取和檢測。需測定酸鹼值，以判斷是否需要石灰或石膏來中和土壤酸鹼值，讓作物得以生長，磷和鉀的檢測結果用來決定是否需要補充施肥。對於高收益作物，這些檢測需每年進行；而對乾草等類作物，三年一次最合宜。縣鎮農業推廣員可以幫忙解讀這些檢測結果，並告訴操作者如何解決各種問題。

表 26 是為農地場址進行植物監測所建議的參數和檢測頻率。如果系統是為了去除氮和磷而設計，則需要測量收成作物的氮與磷總濃度，並測定作物收穫產量。如此可以算出以收穫量為單位的去除效果，以確保系統按照設計運作。假如收成的是飼料草和青貯飼料 (silage)，並且用以餵養家畜，則草裡的高硝酸鹽含量可能會危及家畜的健康。使用高硝酸鹽含量

( > 30mg/L ) 的污水，且施灌期間異常濕冷的情況下，這份分析則格外重要。應諮詢縣鎮農業推廣員該年相關的檢測需求，且應檢測植物裡是否含表 26 所列的金屬元素，頻率與土壤檢測相同，以求出長期趨向。

**表 26 農業地區的植被監測**

組成	頻率
總氮與總磷	如果對於系統來說，氮及磷的移除是需要的，則每年採樣一次。
飼料草與青貯飼料的硝酸鹽 (NO <sub>3</sub> )	若為了保護牲畜，則於收穫期監測。
銅、鋅、鎳及鈣	第一年的收穫期與之後每五年建立長期趨勢。

( 資料來源：Crites 等, 2000 )

這些檢測所需的樣本數和採樣的植物部位，對結果的可信度具有關鍵性的影響。小規模田地上的乾草收割和青貯飼料採收 ( green chop )，可在收成後立即採樣，具代表性的合成樣本可從混合的草料裡獲得。大規模或散佈的田地和其他作物應以建議的採樣模式在田裡進行。比起果實，最好能取葉子為樣本，因為葉子通常會先顯示金屬含量的增加，藉此得到潛在問題的事前警示。表 27 推薦了一些植物採樣的方法。

**表 27 植物採樣—農地類型和植物部位**

作物	類型	植物部位
苜蓿	X 農田的對角線，50-100 叢 ( clumps )	在開花階段早期收割上莖部
玉米	X 對角線或沿畦面，至少 50 株	葉部三分之一中間，就在中心偏下方；結穗時節
小麥和穀物	X 對角線，200 葉以上	植物頂端前四片葉身
草和草皮 ( sod ) 大豆	X 對角線，從至少 5% 株中隨機選取葉片，50-100 葉	修割的部分或整個頂芽 ( whole tops )，新成熟葉，豆莢形成之後
果實	X 果園的對角線，東西南北邊的樹葉各一	成熟葉，肩高，開花後 8-12 週

( 資料來源：Crites 等, 2000 )

#### 4. 例行操作步驟

考慮因素包含：

- 施灌速率與進度表
- 終年操作
- 季節性流量操作
- 終年流量季節性使用

##### ( 1 ) . 施灌速率和進度表

用水控制在所有系統是常見的，同時也需要操作者做出以下決策：

- 動工和停工計畫表
- 每輪施灌的污水量
- 施灌頻率
- 使用田地或區域

這些決策的細節依氣候、降雨和作物種類而每年不同，但是最終結果必須是在施灌期間，施用所需的總污水量。特定計畫在設計時會公式化，而操作說明將附於操作與維護手冊中。儘管如此，操作者必須具備因應特殊情況而更動計畫表的知識與能力。

#### (2) .終年操作

在污水終年處理、貯量也通常不大的場址，操作員進行調整的彈性不大。土地處理的日施用量必須配合污水的日流量。多數情況下，操作員可決定用於哪個地區，於該地區持續運用多久。初期階段，操作員應利用設計工程師提供的時間表。然而，設計常根據場址的平均狀況而成。操作員應仔細觀察水是否快速入滲，積成水塘抑或流失。場址的一些部分或許可比設計值多取些水，有些可少取。接著操作員即可調整，在較好的土壤裡多放些水，較貧瘠的地區則少放些。另外，施灌場址 pH 值需維持於 6.5 至 8.5。

#### (3) .季節性流量操作

處理系統需將處理的時間維持於每年非暴雨季節、冰雪覆蓋的季節之外。季節性的污水流量系統並不罕見；這些系統可能包括露營區及季節性工業。冬季流量在寒冷的氣候下通常需要污水貯藏，以便於氣候溫暖的月份施用於土地上。操作員要知道水塘的大小、施用的季節長度、單季流入水塘的污水量，並預估該季的雨量及蒸發量。有了這些資訊，操作員便可計算每週的施用及時間表。

#### (4) .終年流量，季節性施用

基本程序與前述情況相似，唯獨終年的污水流量（貯藏量加每日產生的污水）必須用於施用季。此外，若場址是為成排的農作物而設計，則施用期通常會在種植後開始，在收成及耕作時終止。場址不得有任何侵蝕，但許多系統都可能在收成完畢後，重新施用於荒蕪區，並持續施用至結凍為止。

### 5. 緊急程序

緊急程序主要考量在於因為通常污水只有有限的貯量，因此可能會中斷施用污水的操作時間表。既然緊急狀況不可預料，為保險起見，操作員會讓一部分的可用貯量保持彈性。這可能在當季早期，便需要比平均時間表所需抽取的水量，稍微多抽些水。

#### (1) .電源問題

備用能源供應失效也會中斷操作。設計中應在抽水站提供具有備用動能的能力。使用有電動馬達的中央分配設備系統，也應有攜帶式的備用發電機，需要時便可直接與區域連接。

#### (2) .氣味問題

若處理及貯水塘是系統的一部分，大眾可以進入場址，或場址接近社區時，氣味可能會不時成為考量點。氣味在設計得當及操作合宜的土地處

理系統內，應該不成問題，但污水特性或水塘狀況突變時，便可能產生問題。操作員應有心裡準備，可立即應變這種狀況。

除非使用腐蝕性的廢料或容許臭水坑及污水塘，否則實際施用的場址地上，通常不會產生氣味。臭水坑及污水塘也會成為昆蟲問題的原因。操作員必須定期檢驗施用的場址，填上新土以減少這些低窪地。

## 二、維護管理

### (一)、植物管理

作物管理是農業場址的主要需求。通常設計時便選好特殊的作物，於第一年操作的早期種植。因此，也可能改變作物，以增進系統效能，或增加收成價值。

收割飼料草的收割管理種類，將視預期的除氮量而定。如果希望獲得最大的收穫量和最高的除氮效果，應更加頻繁地收割草料，並選對時間。初期收割應在植物生長的出穗早期，而在剩餘的生長季裡，應於每 4 至 5 週完成後續收割。隨著氣候不同，出穗初期的時間也會不同，不過通常介於盛春或春末。

- 如果需要較低的去氮量，則可減少收割次數，也可節省操作費用。應在植物生長的開花末期執行此目標的初期收割，並在接近生長期末時，額外執行一次收割；此收割方法可使大部分的氮在首次收穫時去除。
- 應該妥善照料草料，讓他們在場址內盡可能地生存下去。場址內受到妥善照顧的草料可以維持三年以上，他們通常會受到雜草入侵，而有些雜草是有益的。如果無助益的雜草佔多數，必須整修農地，以維護處理方式有效進行。重新播種時，使用標準工法進行農地整修以及理想飼料草類的培植。
- 就玉米來說，大多的氮在夏季 4 至 6 週的短期內即已移除，且通常在生長達膝蓋高度和結穗階段。
- 在玉米外加種另一種作物，可以增進去氮效果，並且可降低濾出的氮濃度。在間作法中，夏月種植玉米，而春季和秋季則種植穀類作物（如裸麥）或飼料草（如 reed canarygrass）。穀類或飼草在玉米吸收養分降緩期間，去除氮量，因此施用期間會拉長。此法的缺點是，由於其他草料帶來的競爭，使得玉米收穫量降低，而且需要更高等級的管理。
- 為了製造生草土（sod production）或養護在草地上的草坪草（turfgrasses），可以在整個植物生長期間去除氮量。若從製造生草土的播種開始，去氮效果會降低。生草土通常需 12 至 18 月後才能收割。在生長旺盛期，需要每週割草一次。

### (二)、結構維護

#### 1. 損壞維修

水塘的外溝與水道需定期維護。土製外溝必須定期檢驗是否有麝鼠及其他挖掘類動物。土壤水泥、塑膠膜、柏油線必須定期檢驗修理。因波浪而造成的損害是最常見的問題。

## 2.設備保養

使用灑水器的系統必須有定期的檢驗及清洗時間表。所有季節性操作的管線也應定期排放，以避免侵蝕。除了維護灑水器之外，操作季節一開始，較大型的中樞設備也需注意適時為輪胎和齒輪箱潤滑。

**表 28 慢滲的操作項目與週期**

操作項目	週期
施灌	1 天
休息	3 天
休閒用地的污水施灌	夜晚、淡季
地下水品質的監測	每年 1-2 次
操作期間測量池中水位	每週
調整施灌量	視氣候與季節
高收益作物（施肥）	每年
乾草（施肥）	三年 1 次
初期收割	植物出穗早期
完成後續收割	（生長季）4-5 週
巡視場址，提出摘採或收成及其他管理上的建議	3-4 年
土製外溝、土壤水泥、塑膠膜、柏油線、灑水系統 必須有定期的檢驗及清洗，應依據時間表定期排放	定期

### 3.2.2 漫地流 (Overland Flow Systems, OF)

依名所示，漫地流是廢水流過土地時，經過平緩的坡度，於坡面造成薄面流。於斜坡土壤上植草，用以化解氮與控制侵蝕。當廢水流動越過土壤表面，會受到不同的物理性、化學性與生物性機制作用改善水質。同時經由草地的蒸發作用與土壤過濾作用，廢水會有所消耗。剩餘的廢水會集納在斜坡尾端，並排放至一渠道。因此，大部分的漫地流系統必須滿足點源排放許可標準。操作與維護程序敘述如下：

- 操作程序
  - ✓ 初始階段
  - ✓ 過程控制與監測
  - ✓ 例行操作步驟
  - ✓ 緊急程序
- 維護管理
  - ✓ 植物管理
  - ✓ 地下水管制
  - ✓ 結構體維護管理

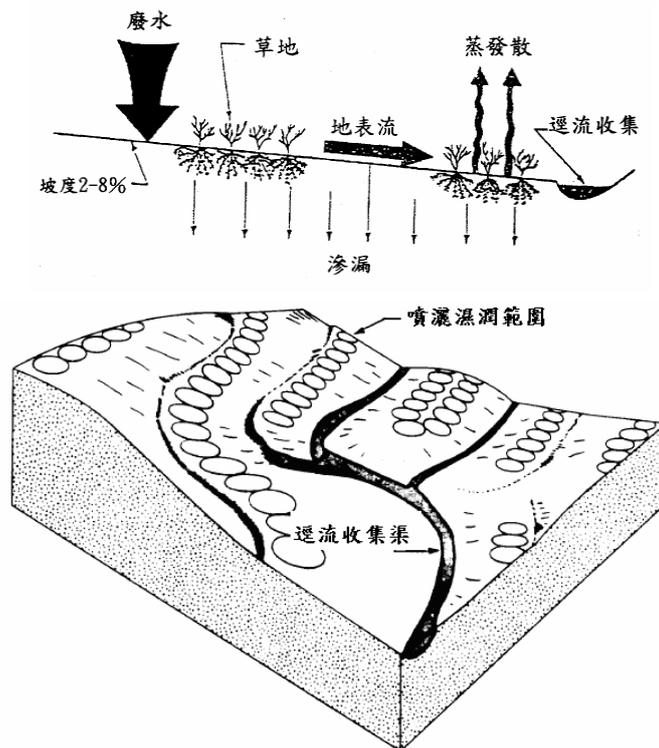


圖 23 漫地流系統示意圖(資料來源：U.S.EPA, 1981)

#### 一、操作程序

漫地流系統的主要設計目的，是使放流水符合現有的品質規範，因此完備的監測與定期操作的維護，是確保放流水品質的最佳方式。

- 初始階段
- 過程控制與監測

- ✓ 監督監測
- ✓ 前處理
- ✓ 流入物與流出物
- ✓ 地下水
- ✓ 蓄水池監測
- ✓ 消毒
- ✓ 施灌監測
- 例行操作步驟
  - ✓ 前處理操作
  - ✓ 入流水與出流水監測
  - ✓ 蓄水池監測
  - ✓ 施灌場址監測
- 緊急程序

### (一)、初始階段

廢水不能應用於草地尚未建立完全的斜坡。過早施灌廢水將導致土壤侵蝕與草地溝渠造成。一般而言，若草地尚未長成足夠至修剪一次，廢水不能運用。第一次收割的草物可以施放在斜坡，做為一層基本的草地。草地的修剪物必須夠短，能夠快速降落至土壤表層，因為過長的修剪物會保持在植物頂端與造成不易成長的傾向。初始階段後草地通常需要一段足夠的環境適應時期；於此時期，土壤表層的微生物細菌族群會增長並適應於廢水處理環境。初期的環境適應時期大約長達四個月，但 1-2 月時間是為主要的流出物。

### (二)、過程控制與監測

#### 1. 監督監測

大部分的漫地流系統有排放許可，並會具體指定溢流可的允許生物需氧量與懸浮固體的濃度。如果土壤具相對滲透性與場址位於受保護的地下含水層上，則另外要求地下水監測。監測參數與採樣頻率將具體指明於許可文件。在廢水施灌於場址前，從所有監測水井採集樣本資料，建立背景水質標準是非常重要的。

操作維護中，系統的監測是非常重要的，其監測項目包含：入水流與逕流水質、地下水水質與水位、地表水水質與土壤及植被狀態。在監測地下水時，除非當地土壤滲透性很高，或是地下水位很高，否則通常使用兩口監測井已經足夠。另外，地表水水質是否與當初系統所預設品質相符，也是監測時需特別注意的項目。而至於土壤與植被狀態的監測，可參考慢滲系統的操作維護方式來進行。

#### 2. 前處理：

操作維護手冊需包含為詳細的前處理過程的基本監測需求。

### 3.入流物與出流物：

依據發放排水許可的管理機關所要求，對入流物與出流作監測。明渠水流測量器（巴歇爾水槽等）裝有連續水流紀錄器，通常能滿足監視處理後流出物需求。大部分類型的固定式或攜帶式自動採樣器都能用於採樣。

### 4.地下水：

管理機關決定是否架設地下水觀測井。在某些狀況下，管理機關也會建立觀測井的數量與位置。但是通常會設置兩個較重要的觀測井。一個觀測井是位於場址地下水層上游處，做為地下水水質對照組；，一觀測井設置於場址地下水層下游處，與對照組作比較，計算場址對於地下水水質的影響。

### 5.蓄水池：

蓄水池的過程控制監測需求，漫地流與慢滲系統是相同的。

### 6.消毒：

在施灌之前，消毒是不需要預計在不太可能發生的情況。但是，假如在排放許可中有大腸桿菌限度要求，溢流可能必須採取消毒。此種狀況下，操作人員必須採用消毒裝備廠商建議的標準監測過程。

### 7.施灌監測：

掌控漫地流系統工作的主要方式，是調整系統的施灌速率。操作維護手冊需根據系統各種坡度，具體指明基本施灌速率。操作人員可透過控制施灌週期來控制施灌於斜坡的廢水體積。施灌週期大約是每次廢水施灌的時間長度。現行的漫地流系統，施灌週期範圍大約從每天持續操作 6-12 小時，每週 5-7 天。在此範圍的施灌週期的效用會產生均一的溢流水質。其他區塊於收割或是維護等情況，長時期的施灌週期可運用來臨時處理轉移過來的流量。不建議每日 24 小時的施灌週期，因為會造成斜坡變成厭氧狀態，產生難聞氣味。

#### (三)、例行操作過程

##### 1.前處理

在手冊的範圍內根據不同的前處理程序，提出所有的例行操作過程。為所使用的程序的過程要求，將描述於為每個系統的場址特定操作維護手冊中。

##### 2.入流水與放流水監測

入流水與放流水的品質，依規定需受管理當局審查與核可，因此必須進行監測與紀錄。在開放性渠道設施（如巴歇爾水槽、側流堰等）上裝設水流自動記錄裝置，將可增加監測的準確度與便利性；或是使用手持式或固定式自動取樣器，也可以省去採樣時的繁瑣步驟與時間。

### 3.蓄水池

漫地流系統的蓄水池基本操作過程與慢滲系統是相同的。蓄水池只能於特別冷冽的冬季時利用。一旦斜坡可以回復使用，蓄水池則棄之不用，且蓄水池的廢水應混合新的廢水施灌於場址。這過程將減低前處理費用，與縮減海藻在蓄水池生長。海藻很難利用漫地流移除，雖然移除是依賴出現於廢水的海藻種類。在海藻中優勢種類常隨季節改變，操作人員不易掌控。

### 4.施灌場址

#### (1).一年啟動階段：

處理系統需將處理的時間維持於每年非暴雨季節、冰雪覆蓋的季節之外。南美的漫地流系統通常全年操作，不過於最寒冷氣候時需要臨時停工約 1 或 2 週。但是在北美，停工時間可能拉長至要數月。漫長的冬季停工後，系統需有大約一個月的時間重新調整再適應。另外，對於處理區域土壤的 pH 值需維持於 6.0 至 7.5 之間。

假如系統整個冬季都停工，無論何時寒霜離開表土層，系統應當重新啟動。一般而言，大約是在 3 月或 4 月左右。系統不能太早重新啟動，草地與土壤的各項機制尚未恢復，容易產生粗劣的溢流水質。過去的經驗法則可於個別場址指明最好的啟動操作時間。

在廢水重新施灌於斜坡前，所有管線檢查是否有裂縫。斜坡頂端的管線分佈區域應再次調整分佈，確保廢水於斜坡流動均勻分佈，明顯的溝渠需填平並重新植草，商業用的草皮也可用於過深的溝渠上。不正常的溝渠與貧瘠的土地需重新種植混合種類的植物，包含像黑麥草此類可快速生長的種類。在草地高度達 5cm 之前，不能施灌廢水於整修的植草區域。過早的施灌會沖刷表土與位居下坡的植草。

延長停工後一個月內，施灌速率需比平常時間較為緩慢。否則，溢流水質將無法達到要求需可的標準。

早春時候，溢流可能因為海藻關係，呈現輕微綠色狀態。某些斜坡表面有時會有一層綠藻平面。不過，當植草生長夠高足以於表面產生陰影，綠藻會很快消逝。過密的植栽與雜草生長於沒有類似內襯的集水溝渠會產生問題，因為會造成阻礙溢流流動速率。由於使用除草劑清除草會造成土壤侵蝕，因此於溝渠加以內襯的會較好的選擇。

#### (2).日常操作：

所有的結構與機件組成（抽水機、閘門、噴水龍頭、地表配流管與流量計）需每日定時檢驗。有些水閘管線會有淤塞的傾向，造因於不均勻流動分佈。假若有幾個通道阻塞，通過其他的速率會增快，導致於斜坡上造成溝渠與流動短流（short-circuiting）。施灌速率和週期也需檢查並維持一致。當有豪暴雨時停止施灌廢水於斜坡上，因為連續的施灌將會使台地水壓超載與導致溝渠。即使水力停留時間將降低，施灌作業可於細雨中進行。漫地流斜坡上的降雨溢流，水質至少相等或更優於待處理廢水。

操作維護的程序包含調控漫地流設施的使用率、使用時間，並在適當的時機進行加入入流水或排出的放流水。漫地流系統的操作與維護計畫一定要確實地執行，特別是系統內的某些單元，如：泵浦、閘門、噴水龍頭、地表配流管、流量計等，這些都是需要每日進行檢查的。而漫地流的使用率與使用時間也需要仔細調控，以免超過其設計的負荷量。

### (3) .冬季停工程序：

一般而言，因為持續的低溫，漫地流系統需暫時停工，不論此時溢流水質是否符合排放條件。任何生物性程序，反應速率會隨溫度降低而趨緩。停工時間的長度隨氣候條件與溢流水質要求不同。一旦系統停工，直到春季系統才能重新啟動。此種原因下各分佈區域的管線需完全排出廢水。所有廢水需轉向至蓄水池，並且所有抽水機與閘門為冬季準備。

### (四)、緊急程序

漫地流系統可能考慮的緊急程序包括劇烈的暴雨、突發寒溫交替、大批出沒的昆蟲與有毒廢水衝擊負載。如果集水溝渠具有足夠的尺寸與結構穩定性，劇烈性暴雨將不會是問題。溝渠通常是以 25 年回歸週期來設計最小暴雨流量。通常令人滿意的方式是，在場址邊緣安裝排水溝渠，分流過量的溢流。某些漫地流系統因區域特性有害蟲的問題，如蚊子、蝗蟲等。假如場址無不流動的死水區域，蚊蟲並不會是大問題。蝗蟲等有害於植物的昆蟲，可以利用殺蟲劑來控制。殺蟲劑的劑量與種類需與當地農業機構部門請教。

## 二、維護管理

成功的漫地流系統工作的重點在於維持「薄面流」(sheet flow)，如每個斜坡寬度。假如溝渠是因為不良建設或水力過渡負載，於初始便利時期需填滿並重新植栽。另外維護考慮事項是斜坡上的植物健康度。健康並豐饒的植栽叢生是很重要的。貧瘠土地需盡早可能時間再播種。維護管理工作如下：

- 結構維護管理
- 地下水管理
- 植物管理
  - ✓ 品種選擇
  - ✓ 割草
  - ✓ 收割器械
  - ✓ 防制侵蝕
  - ✓ 裸露表土再植栽

### (一)、結構維護管理

漫地流的場址可以是一種或數種不同組合的斜坡。坡度均一漫地流場址，斜坡是不連接的區塊。每個斜坡被於頂端散佈的傳輸管所分隔開來，

溢流會集納在底端溝渠或邊緣的引水道。將場址劃分成不同區塊斜坡的理由是操作維護期間不同區塊可分別停止作用，進行收割等等維護動作。

經驗顯示如果表面分佈方法，例如閘門管路供應尚未處理的或主要的廢水至漫地流場址，土壤最終可於斜坡上堆積大約 10 英尺高。發生的原因是由於淺薄的流動，易使懸浮顆粒快速沈澱。若不顧堆積效應，則堆積土壤將悶死草地並變成缺氧。可利用建立攔沙閘道來消除土壤堆積於斜坡。

## (二)、地下水管理

漫地流溢流的水質，將視廢水被保持與土壤表層接觸的時間而定。一般而言，長滯留時間比短時間會有較好的溢流水質。操作人員利用調整施灌速率來控制停滯時間。因為漫地流系統取決於停滯時間，維護每個斜坡以致於水流穩定是重要的。如果斜坡有異常溝渠產生，會使水流變快並停滯時間減低。地下監測水井的設置與否，需視管理當局的審查意見，在某些案例中，有關當局會要求地下水監測井的數量與位置。但如果管理當局沒有特別的意見，那麼仍然至少需要兩口監測井，一座設置位於地下水上游處，作為背景數值的測量；另一座則設置於地下水下游之處，作為經過系統處理後的對照數值。

## (三)、植物管理

漫地流工法施行後，不能只是任其閒置荒廢，後續的操作維護是非常重要的。漫地流系統上的草地具有移除氮元素的效果，因此當氮移除率達到預計的狀態時，便是進行草地修整最好時機。一般而言，漫地流的草皮修整，一年至少要有兩到三次。植物維護管理項目如下：

- 品種選擇
- 割草
- 收割器械
- 防制侵蝕
- 裸露表土再植栽

持續性的去除成效量測可透過適當維護與操作達成。策略是設計來控制一定頻率強度的暴雨，當更大的暴雨發生時可能會發生損害。這樣的暴雨發生後一般預期都會進行修復，而設施也會定期檢查。要確保選擇的設施能夠量測以確保如當初設計安裝所要有的功能，有些操作功能及維護要包括設施的生命週期。

### 1. 品種控制

斜坡應種植具高濕氣限度、長期生長季節與高滋養物攝取的混合種類多年生植物，並能適應本地氣候與土壤狀況。這些混合種類植物能成長特性互相完美配合的物種，例如 sod formers 與 bunch grasses，並且成熟季節分別是早熟與晚熟型態。目前美國一種較成功的混合種類植物是蘆葦與金絲雀穀草、牛毛草、小糠草、達利雀草與黑麥草。雖然這種混合種類植物於多變的氣候是具有效益，但最好向官方農業中心請教混和種類的組合模式。另外，於植生的成效上，總氮、總磷去除率最高的大多為尼羅草及爬

拉草，原因可能是尼羅草、爬拉草與當地優勢種之爬拉草＋雜草的每立方公尺鮮草產量遠大於香蒲與培地茅，且植體成分中的營養量又不少於香蒲與培地茅，所以由植物體吸收之量，尼羅草與爬拉草會遠大於香蒲與培地茅，處理效果也會較其二者為佳。

## 2. 割草

當漫地流系統中斜坡上的植被已經生長、覆蓋成熟時，其實不太需要進行其他的保養工作，頂多只是定期除草而已。也有少數的系統是不需要進行除草的，不過如果真的等草長得太高，之後要進行割除時，除草機械可能就會因草長的太密，而無法進入。一般而言，通常漫地流系統每年約要進行二到三次的除草作業。如前所述，第一次除草可能會在斜坡上留下切口痕跡，但在那之後，除草的操作變得容易多了。

定期收割牧草是有些好處的，如：系統內的營養鹽被移除、視野變開闊、甚至收割的牧草還可以出售販賣。至於能夠販售多少錢，得視市場行情而定，一般而言至少都可以達到收支平衡。如果以青貯飼料採收（green-chop）的方式來取代原始的除草、翻草、打包的過程，那麼除草停工期間可以長達一星期或更久，不過這得視青貯飼料採收在該地區裡是否有市場性。

漫地流系統內的草應每年割除兩三次，並從坡道上移除。最好的修剪時機約是在播種之後。修剪工作將會產生大量的收割與高品質的草料。依照本地市場，乾草出售可以回收適當經濟來源。同時，定期收割有助於移除氮，與幫助操作人員檢視斜坡是否意外溝渠存在。任何時間點只能收割漫地流場址的部分區塊，才能使系統持續運作。

從坡道上移除主要是讓新草長出，避免在斜坡上產生腐爛的副作用。收成前，必須讓每個斜坡完全乾燥，設備在經過土壤表面時，才不會留下凹痕。凹痕可演進為溝渠，特別是凹痕向下時更為容易。刈草前所需的乾燥時間通常是一至二週，然而，這可視土壤及氣候狀況而有所區別。刈完後，草堆應先曬乾再耙鬆網綁。視天氣而定，這可能要再花一週左右。假如將乾草切碎代替收割、耙成堆與網綁，時間可削減一週左右。但是，本地市場可能無法接受切碎草料。

針對土壤與植物所建議的監測計畫，與漫地流及慢滲系統相同。若草用作飼料，每次收成可能會需要樣本，樣本也可能需要分析各種營養參數如蛋白質、纖維、可完全消化的營養物、磷、乾物。這些分析可由相關研究單位或政府機關來主導。

## 3. 收割機械

收割的標準機械建議是牽引機、耙土機與捆包機。帶樁桿平板車身的卡車同時也需要用於載運乾草至市場或儲藏區域。所有機器需調整輪胎部分減少凹痕。收割方向以橫過斜坡方式操作，減少有朝向下坡方向的凹痕。所有傳輸管線與集水渠道需清理乾淨避免淤塞。

#### 4. 外來植物管制

在漫地流系統斜坡上，原生草種與雜草出現是很正常的現象。他們的出現對於漫地流處理污水的能力並不會造成任何影響，所以也不要特別去消滅它們。不過，適時地向當地的專家學者請益，將有助於決定是否需要移除這些原生物種。適當的斜坡管理與使用計畫，也具有預防蚊蠅滋生的功效。至於其他昆蟲對於漫地流系統應該沒有很大的影響，除非是像某些少數的外來種（如紅火蟻）會對於植物造成破壞時，就可能需要定期使用殺蟲劑來維持植物健康。

#### 5. 防止侵蝕

在斜坡上進行除草時，需特別注意土壤是否足夠乾燥。因為除草器械在操作的過程中，可能在斜坡上留下坑洞或胎印，這會導致積水或水流改道的情形發生。土壤乾燥的時間由土壤質地與氣候條件所決定，通常需要幾天到幾個禮拜。

如果系統內的草地長度過高（高於 30 cm），就應該進行修剪以免影響其他植栽的生長。在進行斜坡上草地的修剪時，應在土壤完全乾燥的情況下進行，以避免除草機在土壤上留下坑洞與胎痕。至於土壤乾燥的時間，需視土壤質地與氣候條件，通常需要花上幾天到兩週的時間。斜坡上的雜草與當地原生草種在修整的過程中，也可能會一併被去除，除非它們是被刻意保留在系統之中的物種（如：某些生長期較長或是四季常青的原生物種）。在某些情況下，使用焚燒法或是平整法(disking)來去除雜草後是可行的，但處理完之後，則需要把植栽重新種植回去。

#### 6. 裸露表土再植栽

經過幾年的系統操作後，某些本土的草種將會在斜坡落地生長。在大部分案例，這些植物不但無助於處理廢水，且會降低收割面積區域。某些一年生草種需連根拔除，避免在斜坡中生長進居主要地位，例如稗草等。因為當秋季一年生植物死去，斜坡會有裸露土壤表層出現，並土壤易受沖蝕影響。除草劑可以用來控制這些一年生草種，並貧瘠區域需在植栽以多年生植物。而政府相關農業管理單位可以提供建議有關於除草劑的種類與用量。

表 29 漫地流的操作項目與週期

操作項目	週期
泵浦、閘門、噴水隆頭、地表配流管、流量計等，需要每日進行檢查	每日
除草	每年 2-3 次

### 三、設計案例討論

#### 1. 背景

C 社區為位於美國大西洋成中間的一個小型農村社區，它雖擁有一個已經三十年的污水處理系統，但卻無法符合其排放許可，這個計畫的目標是提供社區污水處理系統符合排放要求。

#### (1) 污水特性以及排放要求

未處理的污水特性列於下表，此外，由於微量元素符合市區污水範圍，雖然未列於下表中但仍須經由土地進行處理。本州政府規定當下列水質項目超過限制時，需額外負擔賦稅：BOD<sub>5</sub>, 20 mg/l，懸浮微粒, 20 mg/l，大腸桿菌, 200 MPN/100 mL。

Parameter	Value
BOD <sub>5</sub> , mg/L	200
Suspended solids, mg/L	200
Total nitrogen, as N, mg/L	40
Ammonia as N	25
Organic as N	15
Total phosphorus, as P, mg/L	10

#### (2) 場址特性

一個初步的場址調查計算出所需要的大小約為 35 公頃，其為場址圖如下所示，而 USGS 地圖顯示場址有一個平緩的坡度可供水自然的排入 Crooked Creek，而本場址有一大塊區域佈滿了林木，包括松樹、闊葉樹以及濃密的矮樹叢。

#### (3) 土地要求

最後的土地區域要求決定於所有 OF 系統的設備都已經確定場址中大小與位置後再進行決定。州政府建議當此區域鄰近住家時，應在其外圍設置一個 15 公尺緩衝帶，這個緩衝區保留樹林於其內且需要 2.3 公頃的土地。這個系統所有的土地要求列於下表，而雖然總土地需求為 29.3 公頃，但因為所有者不願意僅售出部分土地，故購買了整整 35 公頃的土地。

Item	Area	
	ha	acres
Field area with collection channels	15.8	39.0
Storage pond	5.4	13.3
Buffer zone	2.3	5.7
Miscellaneous		
Roads, collection waterways, monitoring station	1.1	2.7
Surplus land <sup>a</sup>	4.7	11.6
Total	29.3	72.3

a. Surplus land is that land which does not fit economically into the grading plan.

## 2. 一般操作

### (1) 前處理

現存處理廠的連續操作因為需要進行污泥處理使其花費無法達到效益，一個新的系統包含推薦處理的最低程度，亦即需進行兩個階段的篩選，一個經濟學上的分析指出利用最少的土地（較高的水力負荷率）以減少花費並不能補償事前處理的花費。

兩個階段的篩選系統包含一個較粗的篩(bar rack)以及一個細的篩，當灑水器選擇以分配法進行操作，細的篩就必須有能力阻隔微粒避免塞住噴嘴，而篩網建議大小為 1.5 公釐。

### (2) 施灌週期與頻率

本系統選擇之應用週期為 8h/d，但亦可於降低儲存及收穫季節水位時增加至 12h/d，而其操作頻率則為 7d/wk。

### (3) 配水系統

地下灌溉系統有一個 7.1 公釐直徑的噴嘴，將廢水以  $41.4 \text{ N/cm}^2$  進行操作，而為使每個區域皆澆灌到水，故在整個 42.7 公尺直徑內，灑水器以 24 公尺作為間隔進行裝置。

## 3. 植物管理

根據 OF 系統中不同草種的經驗，最後選擇利用混合的植物，包括淡黃色蘆葦、高牛毛草、小糠草、dallisgrass 以及黑麥草。當地的農業代理商也贊成並且建議在這些草類生長茂盛時混合加入種植 orchardgrass。

## 4. 監測與蒐集系統

監測站包含了一個測量連續流動水儀器的引水槽以及複合的取樣器，這個引水槽設計用以 25 年暴雨。此外上裝置一個被用的加氯消毒系統以及三個地下水監測井以確保水質符合州政府管理要求。

### 3.2.3 快滲 ( Rapid Infiltration Systems, RI)

快滲系統廢水處理是將帶處理廢水利用水淹沒單元或是噴灑方式適度地澆灌於可滲透性的土壤（例如沙與碎石）等。待處理廢水於流經土壤基質時被處理淨化，過後會自然地滲濾排放至表面水流或是向下滲濾至地下水。快滲的目標為廢水處理。處理後水源的利用包含：

- 地下水再補充。
- 修復再利用與排水的水井與陰溝。
- 攔截地下水來補充表面流。
- 臨時在含水層儲蓄地下水。

快滲系統是由一組的滲濾單元組成，以淹灌模式處理廢水並允許於下次淹灌前乾燥單元。乾燥期間允許有機物質聚集與腐爛於表土，並允許土壤再曝氣。水力負載率端視土壤的種類、地下水深度、與施灌廢水的水質、處理的急迫性等決定。快滲系統的操作與維護程序如下：

- 操作維護
  - ✓ 程序需求
  - ✓ 操作週期與配置、監測需求、場址施作
  - ✓ 破壞後的土地使用有機污泥
  - ✓ 操作方法、週期性操作、緊急程序
- 維護管理
  - ✓ 回復單元
  - ✓ 防範冬季單元阻塞
  - ✓ 機械設備維護

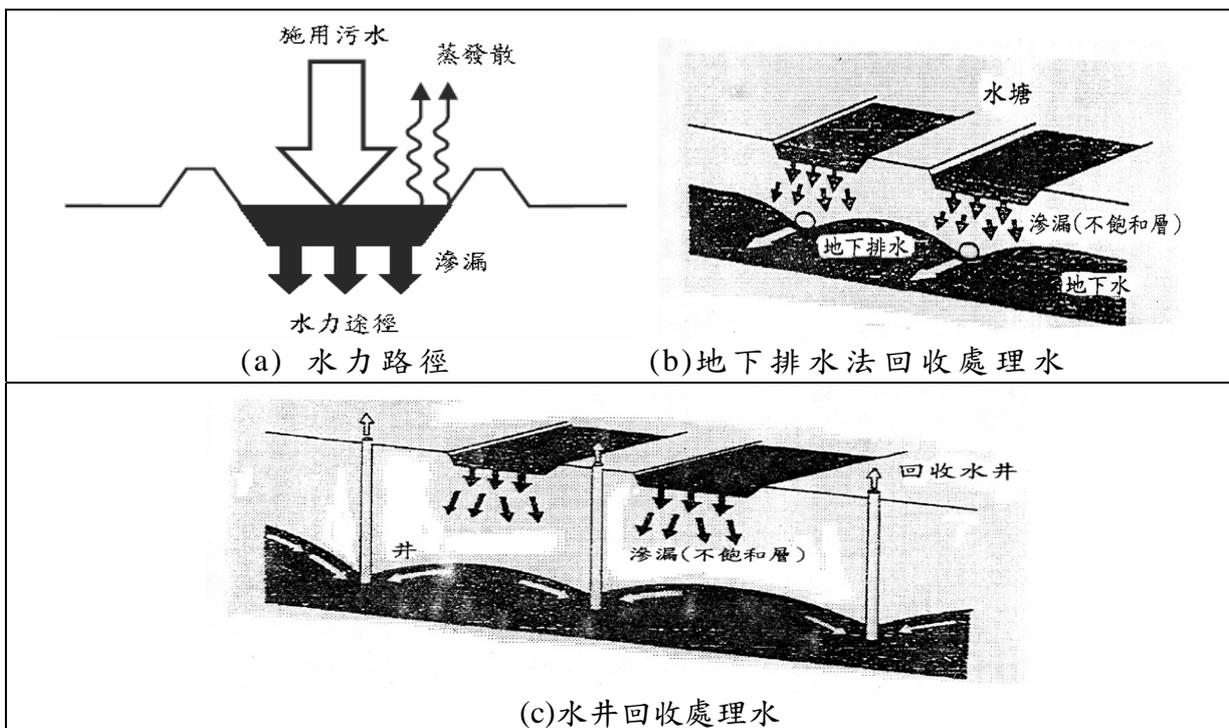


圖 24 快滲系統示意圖(資料來源：U.S. EPA, 1981)

## 一、操作維護

系統通常由操作人員決定整個系統於不同程序步驟進行的程度，確保程序步驟能適當地運作，並協助操作人員於改變操作，確保系統能夠持續圓滿地操作。

- 程序需求
- 操作週期與配置
  - ✓ 操作週期
  - ✓ 操作人員配置
- 監測操作
  - ✓ 適應性監測
  - ✓ 程序控制監測
- 農業場址施作
- 破壞後的土地使用有機污泥
- 操作方法
  - ✓ 液態有機污泥施用於表層；
  - ✓ 液態有機污泥施用於表層下；
  - ✓ 脫水的有機污泥。
- 週期性操作
  - ✓ 施灌前處理
  - ✓ 蓄水池
  - ✓ 施灌場址
- 緊急程序

### (一)、程序需求

美國大多數的快滲系統在施灌於快滲單元之前，各自有套慣例性的廢水處理程序來先行處理廢水。特定程序的操作維護需求需特別載明於此特定場址的操作維護手冊。

### (二)、操作週期與人員配置

#### 1.操作週期

適當的操作週期可使土壤有一段適當的乾燥期，避免土壤產生厭氧狀態及孔隙阻塞等問題。馬里蘭州要求之操作週期：快速滲濾系統為每操作1-2天，休息1-14天。

快滲系統的一般操作與維護需求與任一土壤處理水池所用的系統類似。快滲系統的特殊需求是「設計入滲容量」的維護。

#### 2.操作人員配置

操作維護快滲系統的個人需求的數量與技術程度依賴於兩項因數：系統的大小與前施灌處理程序的類型。快滲系統單元的人力需求是慢滲系統人力值的一半。

為盡量減少水池的各種問題，操作員必須日行檢驗，在日誌表上記錄各水池的污水深度及排放所需的時間。如此便可計算污水滲透速率，也可

辨認出哪些水池的滲透速率，已降低到需沖洗恢復的程度。操作員需時常檢驗入滲水池的邊緣坡道，諸如樹苗及矮樹叢等植被都應移除。操作員也應注意坡道邊緣的侵蝕跡象，檢驗運用於水池污水的水力系統，決定該系統是否運行得當。污水匯聚成池的地區應當填滿。

將水池恢復為可以接受的入滲容量，通常伴隨著用圓盤犁耕或劃開乾燥的土壤表面，破壞發展成形的有機層。另一種方法是將最頂層的土壤完全移除，代之以合適的土壤。這種方法比用圓盤犁耕用到更多勞力和設備，也需要大型的移土設備。必須注意限制底層的交通工具數量，減少壓緊土壤層的數量。

在較冷的氣候下，操作員應在每年夏末秋季時，約割開水池內乾燥的土壤一次，如此應可預防水池在冬季阻塞。

### (三)、監測操作

表 30 列出要將有機污泥用於農業時典型的監測需求。其主要關切的範圍有：(1) pH 值維持在 6.5，以降低潛藏的金屬移動；(2) 磷壤與鉀壤，若作物的最大產量為計畫目標。地下水中的硝酸鹽，通常只有在施用有機污泥超過作物所需的氮時，才會成為問題。監測操作分類如下所示：

- 適應性監測
- 程序控制監測
  - ✓ 施灌前處理
  - ✓ 蓄水池
  - ✓ 施灌場址

表 30 以農業速率或低於農藝速率施用有機污泥的典型場址監測需求

土壤 pH 值	磷與鉀的土壤測試†	地下水中的硝酸鹽	作物中的鎘
有 (2) ‡	有 (2)	無	無

\*括弧內的數字表示分析頻率；2 = 每兩年 †適當時，也可以為現有的氮進行土壤測試。

‡頻率視施用的氮量、地下水深度、垃圾滲水量而定。控管單位會制定頻率。

(資料來源：Crites 等, 2000)

#### 1. 適應性監測 (compliance monitoring)

本地管理機關需要求適應性監測，以證明系統按照需求與設計來運作。對快滲系統而言，通常將要有水井下方與場址周圍的週期性的樣本與地下水分析。硝酸鹽氮是進入可飲用水的含水層的地下水中影響最大的。可以參考慢滲系統的地下水監測細節施行。

#### 2. 程序控制監測

##### (1) 前施灌處理

系統通常由操作人員決定整個系統於不同程序步驟進行的程度，確保程序步驟能適當地運作，並協助操作人員於改變操作，確保系統能夠持續圓滿地操作。

## (2).蓄水池

大部分的快滲系統操作時程是全年度運作處理廢水；因此，通常並不是需要蓄水池來交替利用。但可利用小容量蓄水池作為調節流量均一，或是機械損壞時作為緊急蓄水功能。這些情況下，需利用蓄水池作為緊急操作用途，操作人員有計畫地淨空水池直到緊急狀況解除。而儲存於蓄水池的廢水需與日常待處理廢水混合後，才能施灌於單元裡。有關蓄水池的監測方式與計畫細節可以參考慢滲系統的蓄水池監測細節。

## (3).施灌場址

為了減少單元操作維護的問題，操作人員應對系統單元每日加以巡視檢驗。操作人員應將不同單元的滯水深度與排水所需時間記載於操作維護日誌中。根據此記錄能正確地推估出廢水的入滲率；並判別出哪些單元的入滲率已降至過低的程度，需重新恢復提高表土層入滲水準。操作人員應經常性的檢視入滲單元的溝渠。如發現樹種幼苗與灌木等植物應立即移除。操作人員也因注意渠道是否有遭受侵蝕的跡象。操作人員也應檢查施灌廢水於單元的水利系統是否維持正常運作。低窩處會使廢水聚集成池應加以填平，以免廢水聚集影響入滲率等。冬季操作人員於檢查整個系統時，應加注更多心力於冰凍的問題與冰霜形成，兩者問題都會影響廢水施灌與入滲率等。

## (四)、農業場址施作

處理系統需將處理的時間維持於每年非暴雨季節、冰雪覆蓋的季節之外。施用有機污泥的時間點必須配合農場運作，同時也受作物、氣候、土質影響。有機污泥不可在嚴酷的氣候期施用。土壤的濕度為主要考量，會影響施用有機污泥的時間點。在降雨量大的季節期間或緊接在後的濕壤上有交通工具移動，會導致土壤壓縮，減少作物產量。泥濘的土壤也會使工具難以操作。斜坡若大於 3%，在冰凍或覆雪的地面上施用，可能導致過多有機污泥溢流入鄰近溪流。此外，施用有機污泥的時間安排必須在耕作期、種植及收成培養的作物期附近。施灌場址土壤 pH 需維持於 6.5 至 8.5 之間。

## (五)、破壞後的土地使用有機污泥

這個概念牽涉到將有機污泥當成有機土壤的改良品來使用，以修復如開採殆盡區上遭到破壞的土地。典型的手法是施用單一大型有機污泥，數量由限制設計參數決定，通常是完全合格的鏟。簡短施用期間的操作通常牽涉到大卡車和移土設備，用以分散合成有機污泥。

在施用有機污泥前，必須使表面粗糙或鬆開，以抵銷推平場址或築平路面時造成的壓縮。此舉將有助於改良表面水滲透及穿透，減緩任何表面溢流或侵蝕運動。重型的礦採圓盤或鑿型犁是典型使表面粗糙所必備的工具。沿著輪廓線將表面耙鬆較為可取。

施用有機污泥的時間點視氣候、土質、生長季而定。有機污泥不應施用於降雨量大的季節，因為會大量增加表面溢流的機會。有機污泥可施用

於特別長的極熱或極乾狀況，若能快速結合，才不至於在作物有機會成長時，便失去相當的氮量。

有機污泥施用必須配合選取植物種類的生長季。施用有機污泥時，若土質太濕，土壤的結構便可能由濕壤上沈重的交通工具造成，體積密度增加，入滲減少而遭到損害。如此可能增加土壤侵蝕和表面溢流的可能性。

#### (六)、操作方法

最適當的工法取決於有機污泥的種類（液態或半固態），以及施用於表層或表層下。施作方法如下：

- 液態有機污泥施用於表層（表 31）；
- 液態有機污泥施用於表層下（表 32）；
- 脫水的有機污泥（表 33）。

**表 31 液態有機污泥的表層施用法及設備**

方法	特性	地質與季節限制
槽車	容量 500 到 2000 加侖，有漂浮輪胎(floatation tires)較合意，有暫時的灌溉設備可用，以抽水機放流，可達單一的施用率	可耕種土地，不適合一再用於成排作物或非常濕的地面
圓櫃貨車	容量 500 到 3000 加侖，有漂浮輪胎的貨車較合意，有暫時的灌溉設備可用，以抽水機放流，可達單一的施用速率	可耕種土地，不適合一再用於成排作物或非常濕的地面

（資料來源：Crites 等, 2000）

**表 32 液態有機污泥的表層下施用法、施用特性及限制**

方法	特性	地質與季節限制
犁頂或圓盤頂的彎曲式灌溉水管	與水管或配有壓力放流的槽車並用；水管與犁或圓盤的歧管放流連接。	可耕種土地，不可用於非常濕或結凍的地面
犁頂或圓盤頂槽車	具有 500 加侖的商業設備；犁或圓盤固定在四輪傳動卡車後，有機污泥放流於犁或圓盤前的犁溝內。	可耕種土地，不可用於非常濕或結凍的地面
犁頂或圓盤頂圓櫃貨車	犁固定在水車上，有機污泥放流至犁前的犁溝內；或將有機污泥灑佈在地表面的狹窄地帶，且立即犁耕。	可耕種土地，不可用於非常濕或結凍的地面
表層下注射	鑿子固定在槽車或工具列上，將有機污泥放流至鑿開的溝渠內；運輸工具不得連日經過施用區。	可耕種土地，不可用於非常濕或結凍的地面

（資料來源：Crites 等, 2000）

**表 33 脫水有機污泥的施用法與設備**

方法	特性
灑佈	固定於卡車或由牽引機推動的（市售）盒式灑佈機；有機污泥均勻灑佈於地面；施用速率由地面速度控制；可與圓盤犁耕及一般犁耕合併。
打樁（piles）	一般由垃圾車拖運；由所需的推土機或平地機灑佈或夷平，進行單一施用。

（資料來源：Crites 等, 2000）

## (七)、週期操作過程

### 1.施灌前處理

週期性前施灌處理的操作程序需載明於操作維護手冊的場址章節說明內。

### 2.蓄水池

蓄水池通常只為緊急情形準備，緊急情況包含機電設備與水利設施損壞等；於其他時候應保持淨空，以利於緊急事件發生作為臨時廢水蓄水用。同時，於緊急情形解除後，操作人員應立即清除蓄水池的廢水，將池中廢水與後來的待處理廢水混合後施灌於單元，應避免廢水長期儲存於蓄水池，恐會有衛生與蚊蟲滋生等問題。

### 3.施灌場址

操作人員應保持於持續記錄正確的不同單元廢水深度日常紀錄。操作人員可利用這些資訊去比較實際入滲率與設計入滲率異同。根據這些資料比對更動系統的佈置與排程操作。

快滲系統中的每個單元都會被使用與操作，因此最重要的是於重新施灌以前，單元需要一段適當的乾燥時間。乾燥期間是非常重要的地是使於泥土表面的固質腐爛，與泥土等能夠再曝氣。乾燥時間由操作人員根據氣候狀況、環境因素與單元使用急迫性等決定。

操作人員需測量與紀錄場址內觀測水井的地下水深度。此資訊有助於鑑定場址下的地下水土丘範圍。土丘是於入滲單元下之地下水面上昇超過正常水平。假若幾英尺內的表土地下水面上升，將對系統有不利的影響，會降低廢水入滲土壤的速率與降低處理程度。若快滲系統場址有回收水井與暗渠排水，土丘會因水井與暗渠的抽水率而降低。假若系統內無專門的回收水井與暗渠排水，則土丘將會變成系統一重大問題，則系統操作人員應向地下水水文專家求助，尋求解決的辦法。

因為區域性氣候不同，冬季的入滲單元操作程序需依區域特性，要求精確的預防措施編入操作維護手冊。預防嚴冬時傳播管路內水流結凍，系統操作執行率降低等，立即按照預防措施預防與解決問題，並將將這類型問題納入日常巡視排程中。

### 4.冬季操作

冬季月份因為硝化作用、除氮速率與乾燥速率減弱，有必要延長停留循環時間，增加作用效果。延長的施灌週期有助於此時除氮，因此應隨氮移除減弱而遞減施灌速率同樣的，隨硝化作用與乾燥速率減弱而延長場址作用與停工時間。若冬季過冷水面結冰，則可利用蓄水池儲蓄廢水待回溫後在施灌。

## (八)、緊急程序

快慎系統可能會發生最嚴重的問題之一是電力故障問題，會影響馬達與電動閥門啟動，危及系統操作與廢水操作。操作人員應具備專業機電設備維修相關訓練與執照，能儘速解決此類型緊急狀況。緊急發電機的預備是無可避免的，必要時可利用緊急蓄水池儲蓄待處理廢水，但不能為長期

使用應迅速恢復電力系統正常運作。操作人員需考量到單元可能會有阻塞的緊急狀況，對此操作人員需立即採取行動。

表 34 快滲的操作項目與週期

操作項目	週期
操作	1-2 天
休息	1-14 天
操作員必須日行檢驗，在日誌表上記錄各水池的污水深度及排放所需的時間	每日
約鬆開水池內乾燥的土壤一次，可預防水池在冬季阻塞	(寒冷氣候) 夏末秋季
施用有機污泥	視農場運作、作物、氣候與土壤

## 二、維護管理

維護土壤入滲容量應是快滲系統操作人員重要的課題。於事前指定，操作人員應正確地定期記錄單元土壤的入滲率，用以決定地面何時需要休養生息。維護管理項目如下：

- 回復單元
- 防範冬季單元阻塞
- 機械設備維護

### 1. 回復單元

使其恢復系統設計可接受的入滲容量範圍，通常會對乾燥表土以平漿 (discing) 與翻鬆 (scarifying) 使已變成有機無光表面鬆散。另外一種方法是完全地將最頂層表土移除，以適合的土壤替代。這個方法比起整地需要較多的勞力與設備，同時他也要求大量土壤移除設備。假若利用此方法，應對交通運輸工具加以限制，減少因為運輸工具移動破壞表土層。

### 2. 防範冬季單元阻塞

較冷冬季操作人員應於每年晚夏與秋季做一次單元乾燥表土的平漿。將免除單元於冬季時阻塞。另一項冬季的建議是每年秋季耕犁單元表土並犁成尖豁狀。當單元中的水位降低，而大片的浮動乾冰會停留在田壟而剩餘的水會入滲於田豁中。於下一次施灌廢水，初時廢水會填滿田豁並水位上升，將浮動停留於田壟的冰塊。漂浮的冰塊有助於隔絕單元中的廢水。同時，冬季的單元會有野草叢生，應該於秋季割除。避免冰塊凍傷靠近土壤表面的植栽。於下次施灌廢水循環前促使冰塊沈澱並防制入滲。滯水將會結凍而單元無法運作。

### 3. 機械設備維護

機械設備 (如抽水機、閘與水流計)，應由機電操作人員定期維護，保持設備符合原廠指示標準。

### 3.2.4 地下滲濾 ( Subsurface Wastewater Infiltration System, SWIS )

地下滲濾系統僅需要少數人操作。表 35 列出應執行的一般操作、維修和監控的工作要務。然而，更複雜的前處理、更大且更易變的流量，和高風險裝置會增加維修和監控的需要。

- 建立操作與維護系統的指導或許可計畫
- 發展操作與維護的通訊系統
- 發行操作與維護的資訊及注意事項給系統擁有者
- 發展操作與維護監督與標準審核計畫
- 建立執照/檢定程序給服務提供者
- 若需要，安排訓練機會
- 適當時機，建立後續 ( follow-up ) 通知或行動的程序
- 建立監測系統放流的通訊與提醒系統
- 建立剩餘物 ( septage ) 管理需求、證明系統及處理/使用報告

一般地下滲濾系統的操作與維護，著重於確保系統運作能符合設計需求、系統結構正常養護與清理污質與防止污水外洩污染環境。簡述地下滲濾操作、維護與監視項目如下：

- 操作項目
  - ✓ 操作維護計畫擬定
  - ✓ 例行操作
  - ✓ 緊急程序
- 維護項目
  - ✓ 結構管理
  - ✓ 操作人員管理
- 監測

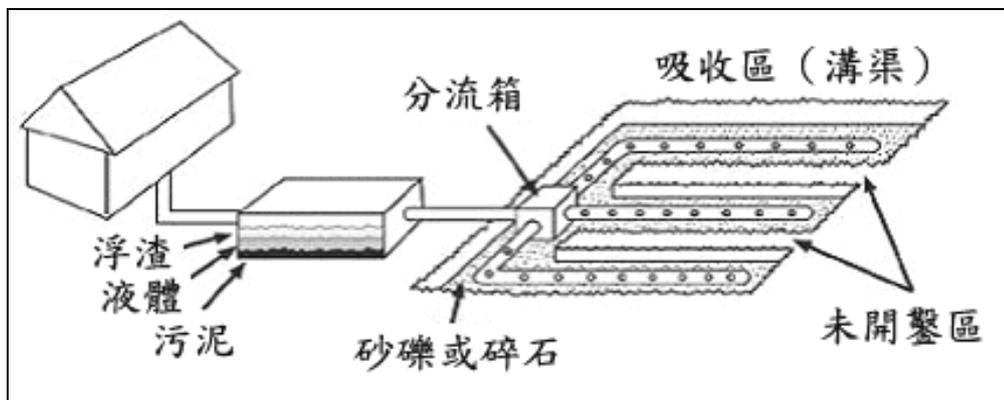


圖 25 地下滲濾(SWIS)示意圖 (資料來源：U.S.EPA，2002)

## 一、操作項目

- 操作維護計畫擬定
- 例行操作
  - ✓ 出入流控制
  - ✓ 處理單元輪替操作
  - ✓ 系統污泥、垃圾清除與除草
  - ✓ 滴濾系統阻塞控制
- 緊急程序
  - ✓ 地震事件
  - ✓ 暴雨事件
  - ✓ 其他事件

### (一)、操作維護計畫擬定

若要使地下滲濾系統能執行超過預計使用年限，必須於建造初期針對當地環境狀況與預計成效目標，設計與執行適當的操作維護計畫，並對此計畫因時與不同狀況作調整。重點必須包含：

- 必須維護工作項目；
- 定期維護的頻率；
- 定期維護的處理時間與具備技術；
- 具備專門技術的相關機關；
- 系統設備的服務廠商與替代物件。

### (二)、例行操作

#### 1. 出入流控制

操作人員應每日檢查進流污水設施與出流水設施流通順暢，進出閘門、抽水機組、啟動設備運作正常。進流與放流量應維持設計流量，其他水流狀況應確保無阻礙物影響，而穩定流量流動。若進出水口、閘門與通道有污泥、落葉樹枝與垃圾等阻礙流動，立即清理確保處理廢水流動良好。放流水量的排放應依國家污水排放標準與系統設計排放標準，放流水排放量應依系統根據場址環境設計排放。出入水質與水量與進水機組的使用時間都需加記錄，與計畫設計量作比較，檢驗是否又異常狀況發生，並加以解決。

#### 2. 處理單元輪替操作

地下滲濾系統的處理單元應是多重處理單元，並且採取輪替方式操作。為避免每個處理單元處理污水容限超過預期負荷，應該根據每個單元處理污水量排定輪替行程表，若有某單元處理污水量超過限制量，應立即轉換至其他單元處理。若是為單一處理單元應限制日常污水處理量，並設計定期停工維修。最後能另外建造替代處理單元。

### 3.系統污泥、垃圾清除與除草

截流設施、厭氧槽與化糞槽於引進污水後，都容易累積堆疊污泥、垃圾等，因此需定時依流程清理沈澱物。若無法由操作人員清理，與清除業者建立契約定期清理沈澱物，避免影響系統處理污水等。而系統場址區域類的垃圾與草樹為求美觀、不影響系統運作，應定期每週進行清理與除草動作。

### 4.滴濾系統阻塞控制

為避免系統阻塞，適當的工程控制是必須要的。這些包含廢水的前置過濾、定期滴濾管線沖洗。而流出物通過粒狀濾床或機械濾床的前置過濾是必須的。這些濾床有能力移除所有可能阻塞孔洞的污質顆粒。而能自我清潔的濾床通常被設計能移除污質顆粒多達 100-150 微米。定期清理濾床能維持系統運作如常。使用於逆沖洗的水應回收至系統處理。滴濾管線應社訂定期排程被沖洗，確保為顆粒物質被清除。可以利用打開迴轉歧管的閘門沖洗與增進抽水馬達速率來達到清理速度完成沖洗過程。通常廠商會建議一定標準的施作速度與流程。沖洗速度與容積需包含在沖洗事件中通過管路的排水。沖洗過程又可分為連續沖洗與定期沖洗。但是沖洗過程明顯會增加系統的水力負載，應於設計階段中即載明清楚。假如是定期式沖洗，沖洗程序保至少一月一次。

#### (三)、緊急程序

應於平時將各項可能發生的緊急事件處理程序編寫手冊，操作人員於平時熟悉操作程序與內容。各項需要的工具或備用零件也應備妥，靜待急需。

#### 1.地震事件

地震如突如其來發生時，應緊急停止系統運作。檢查各項設施結構是否有裂縫、扭曲與污水外流；電氣設備外觀完整與是否有電線等外露等狀況發生，並簡單測試各項電氣設備運作正常與否。並立即抽驗地下水水質與土壤，檢驗是否有管線破裂、污水外露等情況，並立即聯絡廠商緊急搶修。污水外流玷污區域以大量淨水沖洗，避免污染地下水源、土壤等。維修過後，應重新導入少量污水運作，測試安全性在恢復正常運作。

#### 2.暴雨事件

若氣象機關發佈颱風與暴雨特報，操作人員確認系統的設備完整運作、機電設備運作正常。若暴雨、風吹過大超過系統承载力，或操作人員人力不足眷顧下，應考慮停止系統運作，並將污水存放在蓄水池內。暴雨過後，檢查系統受否遭逢損壞，加以維修。各設施的淤泥與落葉等垃圾也加以清除。抽驗地下水與土壤檢驗是否有污水外露等。

### 3.其他事件

其他事件包括外力破壞、電力故障與設備故障，或是操作人員操作失敗等。於此些事件發生，應立即停止系統運作，依造緊急程序請相關人員、單位、廠商進行維修，在依正長程序重新啟動系統。

表 35 地下滲濾的操作項目及週期

操作項目		週期
水務抄錶	建議大型、商業性系統	每天
劑量槽控制	檢查幫浦、開關與壓力劑量系統定時器的功能	每月
幫浦口徑測定	檢查幫浦頻率與調整劑量定時器，	每年
入流單元循環	導引廢水進入備用單元，讓使用中單元休息	每年(理想是在春季)
入流表面蓄水	紀錄廢水蓄水超過入滲表面的深度，並且當蓄水持續超過一個月時，替換使用備用單元	每月
檢查 SWIS 表面和周長	實地走過 SWIS 範圍去觀測表面蓄水或其他重要或損害徵兆	每月
槽內固體分級與意外事故評估	檢查污泥和溶渣累積量，隔板狀況，進流與放流附帶物，以及潛在洩漏量	根據槽的尺寸和管理方式而有所變動

(資料來源：USEPA, 2002)

## 二、維護管理

- 結構管理
  - ✓ 截流設施
  - ✓ 厭氧槽
  - ✓ 土壤濾床
- 操作人員管理

### (一)、結構管理

各項設施結構應定期檢驗與維修保養，保持運作狀況良好。為避免遭逢外力侵入破壞，裝設保護措施並種植植物增加外觀美化。操作人員應遵守操作與維護手冊規範，正確操作維修各項系統設施。

#### 1.截流設施

截流設施需收集點污染物與過濾入流與出流水之污泥，因此需每 1~2 週定期檢視、清除沈澱物等，確保後續系統設施運作正常。截流設施水量也需依系統設計量操作機電設備排放污水。

## 2.厭氧槽

厭氧槽提共入流污水沈澱並與厭氧菌作用等。長停留時間會產生  $\text{CH}_4$ ，污染周遭空氣；可於厭氧槽上鋪設礫石或通氣土壤，吸附  $\text{CH}_4$  並交換空氣，達到降低空氣污染標準。而厭氧槽因為污水沈澱會產生大量污泥，因此需一年抽取一次厭氧槽中的污泥。若於其上種植植物，也定期清理與割草維持美觀。

## 3.土壤濾床

污水經由截流設施污水擷取與厭氧槽厭氧作用沈澱，進入土壤濾床進行滲濾改進水質。於此階段並不需要清除累積於濾床的污泥。但在操作土壤濾床有兩項重點需注意：

- 穩定分次引導污水進入
- 土壤濾床需定期輪流休息恢復滲濾能力

如此能夠維持植栽濾床長久與穩定的處理污水能力，防止土壤濾床阻塞與厭氧等情況發生。處理污水滲濾的時間與出入水質也需加以記錄，檢查是否有異狀發生。

若污水無法透過毛細現象或虹吸現象滲濾土壤濾床，發生土壤濾床阻塞現象，需立即關閉該濾床進水，開啟通風機組，等待兩個月，靜待土壤濾床自行恢復通氣與滲濾功能。

## 4.電氣設備

電氣設備於平時應加以保養，清除髒污、鏽蝕與補漆維護。檢查機件、線路連接與運作正常，金屬物件沒有變色與變形。如有損壞部分應立即維修與更新，或請維修廠商處理。每季或每年應請廠商作整體系統測試、維護與保養，與過期損壞零件更替等。電氣設備應設有保護措施，避免外人破壞與偷竊、地震與暴雨破壞等。另外，為避免緊急停電或其他狀況發生，系統最好能設有緊急備用電力機組。

### (二)、操作人員管理

地下滲濾系統並不需要很多操作人員，依照系統大小編制操作人員數。但系統有關於污水處理、電氣修繕等等技術屬於複雜且專門技術，操作人員需是領國家證照的專門技術人員。能於平時根據系統操作維護計畫採取標準程序使系統正常運作，而系統若有緊急狀況發生能做適當應變處理。另外，某些系統操作項目非經常性操作，如厭氧槽抽取污泥等，可以委託特殊的廠商定期到址處理與維護，減少操作人員日常操作負擔。應將各種可能發生的緊急事件處理應編練手冊，平時應熟知、操練各項緊急操作程序，可提供協力的廠商建立聯絡管道。操作人員除領國家證照外，應定期參加技能再訓練，獲取新知與能力提升。

## 三、監測

地下滲濾的監測提供幾項目的，主要目的是確保系統的操作維護有依照運作需求。同時可提供有用的資料，可以參考做出正確的決策與計算因

為土地利用與廢水計畫的區域性環境影響。對於個別的或整體地下滲濾系統的監測包含以下：

- 系統運作監督；
- 運作範圍的水質採樣；
- 飲用水水井監測；
- 周遭表面水污染濃度問題評估。

通常，系統運作監督在於尋求確保系統是滿足運作需求，例如保護公共健康與水質。評估水源對從系統的潛在污染負載之敏感性，有助於發展運作需求與利用監測方法、採樣地點。水質採樣包含 SS、BOD、病原體、氮、磷、有毒有機物、重金屬與溶解的無機物。為瞭解系統管線是否有污水外洩影響地下水源，應於場址周圍建立地下水井觀測；地下水井數至少為兩座，一坐在於地下水層上游做為對照組，一座建立於地下水層場址下游，與對照組作比較檢驗是否有污水外洩。

任何監測程序需謹慎發展，去確保構成要素有考慮到公眾健康、水質課題、管理機關管理與操作能力、地方政策、經濟趨勢。監視程序的要素條件包含以下：

- 被監測參數的清楚定義與監測結果將要比較的測量標準；
- 嚴謹地擬定指明監測施作於何時、何地與方法，結果將如何分析，結果將以如何格式呈現，資料將如何儲存；
- 依循的水質保證與水質控制基準確保可信的數據

### 3.3 接觸氧化法 (Contact Oxidation Treatment)

接觸曝氣法(contact aeration)係於曝氣槽內裝置濾料，經過充氣的污水以一定速度流經濾料，使生物膜附著於濾料表面，在生物膜微生物的作用下，污水得以淨化。此法藉由曝氣供給生物膜所需要的氧氣，若必要時可迴流處理水以增加污水與生物膜的接觸時間。操作管理與維護管理主要工作就在於曝氣槽的操作、生物膜的監控等工作，操作與維護項目簡略陳述如下：

- 操作管理
  - ✓ 除濾與除磷
  - ✓ 處理水之循環操作
  - ✓ 微生物生物膜之監測
  - ✓ 溶氧操作
  - ✓ 其他操作
- 維護管理
  - ✓ 構造物管理
  - ✓ 氣味控制
  - ✓ 污蚊蠅控制

#### 一、操作管理

接觸曝氣法是將接觸材料浸於曝氣槽內之水中，並在槽內給予充分的曝氣，使入流水能與接觸材料徹底的接觸，經一段時間後，接觸材料表面開始生長附著性生物污泥（微生物）而形成生物膜，利用該生物膜在好氧狀態下吸附、氧化水中有機物質的處理方法。操作管理工作如下：

- 除氯與除磷
  - ✓ 操作及控制
  - ✓ 異常現象處理
- 處理水之循環操作
- 微生物生物膜之監測
  - ✓ 負荷高的生物膜
  - ✓ 負荷適當的生物膜
  - ✓ 負荷低的生物膜
  - ✓ 更新快速的生物膜
  - ✓ 後生動物異常增殖的生物膜
  - ✓ 產生惡臭的生物膜
- 溶氧操作
- 其他操作

#### (一) 除氯與除磷

##### 1. 操作及控制

在生物去氮除磷的操作及控制參數如表 36，其注意事項中。最重要的項目包括：

- 厭氧槽；
- 脫氮槽；
- 好氧槽；
- MLSS；
- 循環水量；
- 最終沈澱及迴流污泥；
- 而入水量；
- 污泥處理。

茲分述如下：

(1) 厭氧槽

- A. 機械攪拌設備以能維持 ORP 在 -200mv 以下為宜。
- B. 為達到磷的充分釋出，以能使釋出之溶解磷的濃度達 10mg/l 以上的水力停留時間設定之。

(2) 脫氮槽

- A. 以能達到脫氮所需的 C/N 比操作之。
- B. 脫氮槽之攪拌以能防止短流為宜。

(3) 好氧槽

- A. 以能達到充分硝化及去除磷之停留時間設定之。
- B. 氧消耗速率大的活性污泥，其磷的釋出速度較快，故為減少最終沈澱池之磷的再釋出，應於氧消耗速度較低時流出為宜。
- C. 為防止於最終沈澱池再釋出磷，出口端之 DO 以高者為宜。但若 DO 太高，則會影響循環水至脫氮槽無法充分脫氮，故操作時應掌握其適當值。

(4) MLSS

以維持 BOD-SS 負荷 0.15~0.2kg BOD/kg MLSS · D 之下，考慮下面項目設定之：

- A. 確保可達到充分硝化之 SRT。
- B. 防止於最終沉澱池活性污泥釋出磷或脫氮而污泥上浮之條件下，適當維持污泥堆積狀態。
- C. 同時考慮流入水之水質與水溫。

(5) 循環水量

- A. A<sub>2</sub>O 法循環水量以流入量 150% 為範圍，愈高脫硝愈高，含迴流污泥約 200% 為適當。
- B. TNCU 程序之分流 Q<sub>1</sub>：Q<sub>2</sub>：Q<sub>3</sub> 以 0.7：0.2：0.1 或 0.8：0.1：0.1 為宜。

(6) 最終沉澱與迴流污泥

- A. 含高濃度磷的活性污泥，應防止其以 SS 流出。

- B. 應防止污泥在最終沉澱池長時間的堆積而以迴流污泥連續迴流之。
- C. 迴流污泥量，以不超過的硝酸、亞硝酸氮引至厭氧槽，造成阻礙磷的釋出之條件下，以多量為宜。

(7) 流入水量

- A. 為防止厭氧槽內高濃度磷之短流，流入水量較穩定為宜。
- B. 為使厭氧槽能處於厭氧條件，流入水之 DO 以不高為宜，若置有調勻池，則以低溶氧攪拌或機械調勻為宜。
- C. 流量變化大會影響最終沉澱池之沉澱，而造成流出水 SS 提高，相對的磷濃度亦高。

(8) 污泥處理

本處理方法之磷的去除，藉排除蓄積磷的污泥以去除之，但若剩餘污泥成厭氧，則磷會在釋出，故污泥之處理，必須藉下列改善之。

- A. 剩餘污泥不可再投入最出沉澱池，否則會造成磷的再釋出，增加流入水磷的濃度，至無法充分去除磷。
- B. 剩餘污泥應在最短時間內壓縮脫水之，以離心濃縮禍浮除濃縮為宜。
- C. 當污泥處理過程釋出高濃度磷於水中時，可藉石灰或鐵鹽以凝聚沉澱去除之，以防止多量的磷迴流至水處理系統中。
- D. 若以間歇性進行脫水，則污泥不宜抽出，以防厭氧，而宜於水處理系統中迴流避免之。

表 36 去氮除磷生物處理操作參數

設計參數	單位	處理程序			
		A <sub>2</sub> O	Modified Bardenpho 法	Modified UCT 法	TNCU
食微比	kgBOD/kg MLSS.d	0.15-0.25	0.1-0.2	0.1-0.2	0.1-0.2
固體停留時間	天	4-27	10-40	5-10	5-15
MLSS	Mg/l	3000-5000	2000-4000	1500-3000	2000-4000
水力停留時間	厭氧區	0.5-1.5	1-2	1-2	1.0-1.5 厭氧-1
	無氧區-1	0.5-1.0	2-4	2-4	3.0-3.5 好氧-1
	好氧區-1	3.5-6.0	4-12	2.5-4	1.5-2.0 缺氧-1
	無氧區-2		2-4		1.5-2.0 好氧-2
	好氧區-2		0.5-1		1.5-2.0 缺氧-2 0.5-1.0 好氧-2
迴流污泥	%	20-50	50-100	50-100	25-50
內循環水	%	100-300	400	200-400	0

(資料來源：歐陽嶠暉，2004)

2. 異常現象處理

茲將生物除氮除磷單元操作時容易發生之異常現象包含以下三項：

- 生物除氮除磷單元異常現象
- 磷去除不良之原因與對策

● 氮去除不良之原因與對策

而生物除氮除磷單元操作異常現象之處理對策整理如表 37~39 所示。

表 37 生物除氮除磷單元異常現象與處理對策

異常現象	處理對策
處理水中溶氧量偏低	調整鼓風機開度，使曝氣槽水中溶氧量介於 1.5~2mg/l。
pH 值過低，處理效果不佳	加入 NaOH 調整，使 pH 值維持在 7~7.5 之間。
MLSS 濃度異常	每日分析槽中 MLSS 濃度，當濃度低於控制值時，則增加迴流污泥量，若濃度高於控制值時，則降低迴流污泥量。
氧化還原電位(ORP)異常	檢視 BOD、DO、pH、MLSS 等控制項目並以前述方式修正之。

(資料來源：歐陽嶠暉，2004)

表 38 磷去除不良之原因與對策

現象	原因		對策
	本質	程序	
厭氧槽中磷未析出	厭氧槽未保持厭氧狀態	流入水中之 DO 或硝酸性氮濃度偏高	防止雨水或地下水大量流入
		流入水的跌降，攪拌或循環水 DO 過高	降低攪拌強度，避免流入水或污泥自由跌降。隔壁的開口面積減小，水面開口都封閉
		迴流污泥中 DO 及硝酸性氮的流入	維持迴流污泥 SS 濃度在 9000mg/l 以下
厭氧槽中的磷雖有析出，但好氧槽末端的 $PO_4^{3-}P$ 濃度偏高	好氧槽中磷的吸附效果不良	好氧槽中 HRT 不足	增大好氧槽容積
		MLSS 濃度偏低	減少排泥量，提高 MLSS 濃度
		厭氧槽中磷析出量過多，磷濃度過高	減小厭氧槽容量，增大好氧槽容量
	生物反應槽流入水磷濃度偏高	迴流水磷負荷過大	防止汙泥處理程序之磷再析出，以減少磷的負荷
		迴流水短時間流入，造成尖峰濃度	同上，設置迴流水儲存槽，以均勻化迴流之負荷
		DO 濃度偏低	增大送風量，提升 DO 濃度
好氧槽末端的 $PO_4^{3-}P$ 濃度偏低，處理水 $PO_4^{3-}P$ 濃度仍高	最終沉澱池的汙泥再析出磷所造成的影響	最終沉澱池污泥積厚，儲留過久	增加排泥，降低污泥界面高度
		基質之去除不充分，磷容易從污泥中再析出	增大好氧槽之容量，提高好氧槽 DO 之濃度

(資料來源：歐陽嶠暉，2004)

表 39 氮去除不良之原因與對策

現象	原因		對策
	本質	程序	
好氧槽末端 NH <sub>4</sub> -N 及 NO <sub>2</sub> -N 仍高	未充分硝化	曝氣槽進流水，BOD 偏高	降低 BOD-SS 負荷
		好氧槽 DO 偏低	調節 DO 至 2.0mg/l，但不宜太高，以防循環水影響脫硝
		水溫偏低	宜維持 20~35°C
		硝化作用消耗鹼度致 pH 偏低	調節 pH 維持 8.0 左右
	MSLL 濃度偏低，至 BOD-MLSS 負荷過高	宜調節 BOD-SS 負荷在 0.2kg BOD/MLSS 以下，減少廢棄污泥	
反應時間不足	流量變化大，致反應時間不足	調整流量，均勻反應槽之反應時間和負荷	
脫硝槽出口端 NO <sub>x</sub> -N 濃度偏高	未充分脫硝	進流量變化量大	調整進流量
		脫硝槽短流，未充分硝化	脫硝槽以隔板分隔，防止循環水短流
		碳氮比不足，影響脫硝之碳源	以生活污水注入，維持 COD/T-N 比在 4.5 以上
	脫硝槽未處於缺氧狀態，DO 偏高	硝化液循環量偏高	控制循環量在 1.5Q 左右
		循環硝化液之 DO 濃度偏高	控制曝氣槽之 DO，以達可充分硝化，但不影響脫硝槽之 DO 偏高

(資料來源：歐陽嶠暉，2004)

## (二)、處理水之循環操作

處理水循環目的包括：

- 維持下水流量之一定，以免時間及日變化太大。
- 減少流入下水之濃度，以降低生物膜之厚度。
- 提高流入下水之新鮮度，減少臭氣。
- 供給生物於流入下水。
- 減少濾池之污水蠅。

因此循環時，有下列優點：

- 流入下水之流量、溫度、有毒物質之影響得以減少。
- 防止污水蠅之發生和飛散。
- 減少發生惡臭。
- 散水機得以自動運轉。

### (三)、微生物生物膜之監測

滴濾池操作時重要注意事項為觀測生物膜厚度，及其生長情形。生物膜量通常是以 BOD 負荷來決定的，一般在  $1\sim 5\text{mg}/\text{cm}^2$  的程度。在接觸曝氣法的生物膜量最好是  $2,000\sim 5,000\text{mg}/\text{l}$ ，若在  $4,000\sim 6,000\text{mg}/\text{l}$  或更高，就會產生接觸材料的阻塞，一旦發生阻塞現象，就必須進行逆洗。還有，在旋轉生物圓盤法中也有以加壓水將生物膜強行剝離的設計例子，這種生物膜量的測定及適當的控制處理是必要的。

在控制生物膜量的同時，也必須進行顯微鏡觀察，並配合生物膜の色澤、臭味鑑定，以判斷微生物相正常與否。BOD 負荷越高，生物膜越厚，使好氧性與厭氧性二種微生物皆能生存的緣故所致。在低負荷時，由於生物膜薄，因此膜的表面與深處的微生物相沒有太大差別，因此可以認定在生物膜內層出現的微生物種類與 BOD 負荷有很大的關係。在此主要是以與負荷的關係為重點，就生物膜處理功能診斷的指標微生物加以敘述。

- 負荷高的生物膜
- 負荷適當的生物膜
- 負荷低的生物膜
- 更新快速的生物膜
- 後生動物異常增殖的生物膜
- 產生惡臭的生物膜

#### 1. 負荷高的生物膜

以白硫絲菌(*Beggiatoa alba*)及膠團桿菌(*Zoogloea ramigera*)佔優勢，而毛口目草履蟲(*Paramecium caudatum*)、膜口目豆形蟲(*Colpidium*)、毛口目腎形蟲(*Colpoda* 屬)、動物性鞭毛蟲波豆蟲(*Bode* 屬)及氣球屋滴蟲(*Oicomonas* 屬)等則大量地出現。生物膜色澤呈黑色、灰色，在以上這些微生物佔優勢的時候，接觸曝氣槽或滴濾池內的溶氧量都在  $1\text{mg}/\text{l}$  以下。

#### 2. 負荷適當的生物膜

以緣毛目累枝蟲 (*Epistylis* 屬)、溝鐘蟲 (*Vorticella convallaria*)、小口鐘蟲(*Vorticella microstoma*)、蓋蟲(*Opercularia* 屬)、輪蟲類旋輪蟲(*Philodina* 屬)、轉輪蟲(*Rotaria* 屬)等微生物佔優勢，線蟲類、寡毛類也出現相當多。還有絲狀細菌，菌類等的出現。生物膜の色澤是灰褐色的。

#### 3. 負荷低的生物膜

以有殼變形蟲鱗殼蟲 (*Euglypha* 屬)、葦頂蟲 (*Arcellavulgaris*)、變形蟲(*Amoeba* 屬)、有殼變形蟲(*Centropyxis* 屬)等佔優勢，而纖毛蟲類量減少，生物膜の色澤是褐色的。在低負荷的生物膜內會生存著大量的硝化細菌，進行硝化作用，採用多段處理槽操作的時候，一般最後段的生物膜是處於在溶氧量  $5\text{mg}/\text{l}$  或更高的情況。

#### 4.更新快速的生物膜

更新快速生物膜常出現輪蟲類旋輪蟲、轉輪蟲、線蟲類雙胃線蟲(Diplogaster 屬)、原始寡毛目紅斑類體蟲(*Aeolosoma hemprichi*)、原始寡毛目(Chaetogaster 屬)、原始寡毛目吻盲蟲(Pristina 屬)、原始寡毛目剛毛蟲(NaIS 屬)等的微小動物。由於它們的活動使生物膜快速更新，其同時，也因而提高生物膜內部傳氧效率，生物膜中最好有這些生物大量地存在。

#### 5.後生動物異常增殖的生物膜

如果球水蚤(Moina 屬)、劍水蚤(Cyclops 屬)、圓水蚤(Alona 屬)等的甲殼類，紅斑類體蟲(*Aeolosoma hemprichi*)等的原始寡毛類大量出現時，由於他們的攝食活動。使生物膜在水中分散，而增加處理水中的 SS。在嚴重的時候，有時生物膜幾乎消失殆盡，完全被甲殼類與寡毛類佔據了，寡毛類異常增殖時，生物膜的表面會逐漸變成為紅色。

#### 6.產生惡臭的生物膜

當白硫絲菌(*Beggiatoa alba*)、異毛目水母蟲 (Caenomorpha 屬)、異毛目扭頭蟲(Metopus 屬)、毛口目草履蟲(Paramecium 屬)微生物大量出現時，生物膜是處於溶氧濃度低的環境中，且產生惡臭。

#### (四)、溶氧操作

接觸曝氣槽內應給予充分曝氣，平均溶氧控制約為 1~2mg/l，應至少維持 1.0mg/l。

#### (五)、其他操作

- (1) 原水中的有機、無機固體物應先予篩除，尤其是纖維狀固體物容易造成接觸材料之阻塞。更應注意。
- (2) 維持 N、P 的平衡，不足時應予添加，尤其工業污水原水水質之變化大時，應加以注意。
- (3) 經常觀察曝氣槽內的狀態，包括：色澤、生物膜生長狀況及曝氣狀況等，如有所異常時應採取對策(如反沖洗)。
- (4) 送風量勿突然增大，以避免生物膜的剝離。
- (5) 污泥儲存物過量，浮渣應經常清除。避免腐敗污泥溢流之現象產生。

## 二、維護管理

- 構造物管理
  - ✓ 滴濾池
  - ✓ 接觸材料
  - ✓ 曝氣池
- 氣味控制
- 污蚊蠅控制

## (一)、構造物管理

### 1. 滴濾池

#### (1) 生物膜厚度觀測

滴濾池操作時重要注意事項為觀測生物膜厚度，及其生長情形。一般在旋轉生物圓盤法中容易觀測出生物膜的數量，但在其他的生物膜法，如接觸曝氣法與滴濾法進行生物膜的定量測定就比較困難。所有的生物膜法其曝氣槽內所能維持之污泥量(生物膜量)通常都比活性污泥法高，然而生物膜量越多並不表示處理水質越好；相反的，生物膜量如果太多，反而容易成為阻塞與產生厭氣惡臭的原因。以旋轉生物圓盤法而言。生物膜如果在  $5\sim 10\text{mg}/\text{cm}^2$ ，或更高，就會引起架橋(生物膜變得太厚。使圓盤間閉塞現象)，於是產生惡臭。

#### (2) 異常處理

茲將滴濾池操作時容易發生之異常現象及處理對策整理如表 40。

表 40 滴濾池異常現象及處理對策

異常現象	處理對策
生物膜堆積過厚，造成阻塞及臭味。	降低進流水 BOD 負荷； 進行濾材反沖洗，剝離過厚之生物膜； 提高處理水中溶氧量。
絲狀菌大量繁殖，造成生物膜鬆化與惡臭。	提高處理水中溶氧量； 進行菌種馴養，培養較佳生物膜處理菌種。

(資料來源：歐陽嶠暉，2004)

### 2. 接觸濾材

#### (1) 材料分類

接觸曝氣法在操作時應考慮接觸濾材特性、生物膜之附著性及水理特性等數種因素。接觸濾材之選擇，應依處理目的、操作條件，以選擇適合之材料，目前所使用之各種接觸材料之分類，可分類為：

- A. 粒狀不定形(形狀不均勻)：礫石、碎石、坑火石、焦煤、貝殼、煤碳渣、木片、塑膠片等。
- B. 成型粒狀(形狀均勻)：管片、變形管片、悍環。
- C. 棒狀、繩狀體：木棒、枝篠、多環繩等。
- D. 有孔管體：蜂巢管、多孔性圓筒。
- E. 平板、波浪板：石綿板、木板、塑膠網、塑膠浪板。

#### (1) 濾材選定特性

一般形成粒狀之接觸材料對於懸浮物之攔截力較強，且其貯留空間也較多。因此攔截之能量亦多，反之對於水流之阻力大，容易導致濾池的阻塞。尤其是不定型者其粒徑、形狀皆不均勻，且空隙率亦較小，此乃粒狀接觸材料之缺點。至於平板、波浪板、網等其間隔較適當，較無阻塞之問題。但對於懸浮物之攔截力較弱，對於維持生物膜量之能力較差。下列為接觸濾材選定應具備之特性：

- 可適當附著生物膜。

- 比表面積大。
- 空隙率大。
- 水流之阻力小。
- 化學、生物特性安定，不變質。機械強度大，不變形、破壞及磨損，可長期使用。
- 對於懸浮物之捕捉性高。
- 不會溶出有害物質。
- 與水的比重接近。不會對槽底造成太大的負載。
- 粒徑或間隔相同。可於槽內呈均勻之流速。
- 維護搬運及清理容易。

生物附着性良好的接觸材料，常因生物膜之適度附着造成阻塞。因此必須考慮其是否容易清洗。影響生物膜附着之因素，包括濾材形狀。以及表面構造、表面之電位、親水性等。一般而言接觸濾材之填充率約為 50—60% 為宜。

接觸材料之水理特性有關因素包括孔隙率、比表面積、形狀、尺寸、填充率等。孔隙率與實際停留時間、生物膜保有容量之關係密切。孔隙率愈大，通水之阻力愈小。且材料使用較少。故較經濟，惟材料之機械性強度及比表面積小。比表面積為支配濾材單位容積形成生物膜的因素，比表面積愈大，接觸材料具更高的性能。

### 3. 曝氣槽

#### (1) 容積負荷

接觸曝氣槽的容積負荷，依流入水濃度、接觸材的形狀等決定之。依經驗生物需氧量容積負荷超過  $1\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  就有阻塞之虞，為維持長時間操作，其接觸材生物需氧量負荷以  $0.4\sim 0.5\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  左右為宜。依實際操作，污水流入水生物需氧，其接觸材附着生物污泥(含水率 96%) 約  $100\text{kg}/\text{m}^3$ ，相當於附着 ML 懸浮固體  $4.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。則若曝氣槽容量  $100\text{m}^3$  接觸材填充率為 55%，則曝氣槽 ML 懸浮固體濃度為  $4.0 (\text{kg}/\text{m}^3) \times 55(\text{m}^3)/100(\text{m}^3) \times 10^3 = 2,200\text{mg}$  ML 懸浮固體相當於標準活性污泥法 ML 懸浮固體濃度。接觸材的間隔與原水濃度之關係，為防止阻塞，依經驗，一般如表 41 所示。

表 41 原水濃度與接觸材間隔

生物需氧量(mg/l)	間隔(m/m)
500 以上	100
250~500	80
100~250	50
100 以下	30

(資料來源：歐陽嶠暉，2004)

接觸曝氣法因不像活性污泥法需操作控制曝氣槽中的 ML 懸浮固體濃度，因此操作較簡單，但相對的較不能控制，放在設計更應特別注意。

生物需氧量負荷包括有曝氣槽容積之生物需氧量容積負荷、接觸材料容積之生物需氧量負荷及接觸材面積之生物需氧量面積負荷。由於接觸材

料之形狀並不一定，因此一般設計都以單位曝氣槽容積生物需氧量負荷設計之。惟接觸曝氣法乃附著於接觸材料表面之微生物來處理基質，因此其評估仍以單位接觸材料容積之生物需氧量容積負荷及單位面積之生物需氧量面積負荷較為適當。

各種接觸材料之設計負荷，依其比表面積、接觸材料內之循環水流速、供氧量及曝氣槽形狀、填充接觸材料等條件之不同，其生物需氧量負荷與去除率也異，因此應依據模廠實驗操作後決定之為宜。一般在操作管理上應特別注意生物需氧量表面積負荷操作參數值約為  $5\sim 17\text{g}/\text{m}^2\text{-天}$ 。

## (2) 濾池之通風

污水滴濾處理，乃藉生物膜之好氧性細菌淨化之。為維持生物膜之活性，以達到安定的處理，故應使流入下水中含適當的溶氧量，以供給生物膜內之生物所需的氧。普通氧之供給為藉池內外溫度差達到空氣的流連。

自然通氣在夏天之通氣方向為下向流，冬天大為上向流。但夏季期間溫度變化達  $5\sim 10^\circ\text{C}$  者，當濾池內外之溫度發生逆轉時，空氣也發生逆轉。若兩者無溫度差。則停止通氣。滴濾池內之氧利用率約 5% 以下，故僅自然通氣就夠所需之氧量。

## (3) 溫度的影響

滴濾池之處理效果，一般受溫度的影響較小。濾池內之溫度，受流入水水溫、通過濾池之空氣溫度及生物膜微生物行新陳代謝之有機物量所左右。

## (4) 濾池阻塞積水

濾料過小或大小不均，導致濾料間之孔隙太小，當流入下水中存有大量懸浮物或濾料破裂或水量負荷上有機負荷過高時，濾料及剝落的微生物膜阻塞濾料間的空隙，使濾池表面上發生積水現象。若輕度或部份積水時，可自濾池表面移開濾料用壓力水自濾池表面洗淨之。或將散水機停於積水處連續散水，使阻塞於濾池上之生物膜流出之。

又為防止積水，每間隔一星期數次每次  $5\sim 6$  小時於下水中注入  $5\text{mg}/\text{l}$  左右之氯散水之，但若常發生積水時，仍須將濾料清洗交換之。

## (5) 反沖洗

接觸曝氣槽為防止阻塞，可設置反沖洗設備以因應之，一般反沖洗方法皆以空氣行之。反沖洗通氣管皆設於接觸材料下部  $10\text{cm}$  處設置之，並以接觸材固定架台固定，管間隔約為  $150\sim 300\text{mm}$ ，空氣噴出口直徑約為  $3\sim 5\text{mm}$  (負荷高時可大些)。且能均勻散出最為重要。送氣管之分支管的距離不宜太長。反沖洗時為使氣泡均勻，以利用封閉型散氣管，並以送風機以手動控制操作，其頻率視生物膜附著狀況而定，一般而言定期反沖洗每次至少  $15\sim 30$  分鐘，以免造成生物膜過厚形成阻塞，進而產生短流影響處理水質。

傳統接觸曝氣法最大的操作問題為濾材阻塞。因此反沖洗為首要異常對策。反沖洗為在必要時機之前，將槽體進行適度的逆向沖洗，以免處理效率降低。茲將接觸曝氣法操作時常見之異常現象與對策，整理如表 42。

表 42 接觸曝氣法異常原因及對策

問 題	原 因	對 策
曝氣槽內懸浮固體之濃度增加	生物膜老化堆積過厚	進行反沖洗
曝氣槽內接觸濾材水位上升	生物膜過厚，使接觸濾材阻塞	進行反沖洗
氣槽內呈現氣泡	曝氣槽產生厭氧	加強曝氣提高 DO 值，或進行反沖洗
處理水透視度下降	入流水質異常	加強曝氣提高 DO 值

(資料來源：歐陽嶠暉，2004)

### (二)、氣味控制

污泥、死亡生物膜生成物之厭氧分解，會散發臭氣。防止散發臭氣之方法，為將下水連續數小時加氯處理散水之。同時應避免沉澱池、管渠等發生腐敗並防止污泥、濾膜生成物之蓄積以改善之。

### (三)、污水蠅控制

污水蠅稱為 Psychoda，通常發生於濾池表面下 30cm 處，呈灰色，大小約 2.5-4.5mm，成蟲可飛 100m，也曾隨著風向飛至遠處，給附近居民造成困擾。自幼蟲至死亡之生存期間約 1~3 星期左右。

為消滅污水蠅幼蟲，應每隔 1~2 星期，使濾池連續 24 小時積水，並散水含氯量 1mg/l 之下水可有效防止之。又為防止發生污水蠅，應盡可能連續散水，濾池內壁之清掃及過剩之生物膜應用壓力水洗淨之。

表 43 接觸氧化操作項目與週期

操作項目	週期
生物需氧量	每天 5-17g/m <sup>2</sup>
防止堵塞積水，加 5mg/l 之氯	每星期數次，每次 5-6 小時
消滅污水蠅幼蟲，使濾池 24 小時積水，並加入含氯量 1mg/l 之水	每 1~2 星期

(資料來源：歐陽嶠暉，2004)

## 三、案例討論

### (一)、大堀川礫間接觸氧化淨化設施

#### 1. 背景

大堀川為手賀沼主要流入河川之一，貫穿千葉縣的柏市(人口：約 32 萬人)，流長 8.7km，流域面積 31.8 平方公里，是利根川水系的一級河川。此設施位於手賀沼的大堀河口逆流而上約 5km 處的柏市高田地所架設的志恩橋的正下流處，於昭和 60 年開工，平成元年 7 月完工，總事業費約 6 億元。同年 10 月至平成 8 年，當初計畫的諸因素緣故運轉，平成 9—10 年經過修復工程，平成 11 年 5 月起新計畫的諸因素開此運轉。

## 2. 生物管理

設施底下流域中從手賀沼溯流而上的鯉魚，特別是 *Pseudorasbora parva* 為最多(鯉魚科的魚類，分布在關東地方(被稱為 *kochiboso*)，新瀉縣北部為東邊界限的本州、四國、九州，生活於池、湖、細流的泥底)，同時以之為餌的白鹿也群擁飛來。

成魚 8-10cm。手賀沼中，作為甜亨海味材料的重要捕獲對象魚，年約九萬噸卸貨量(營業額一億日圓左右)。

雖說水壩阻止了魚類的溯上及溯游，甚至也容易變成威脅生態系的恢復及安定化的構築物，但這樣的水質改善，卻使生物能夠生存下去。今後，水壩的理想狀態及構造相關事宜，更需要謹密的考量。

## 3. 結構管理

首先，基於當初計畫而建設的設施的特徵是對於河床及河川用地的地下有效利用。換句話說，填充礫石的接觸氧化槽(容量：8,200 立方公尺)在河床底下構築，而直列的曝氣槽則在河川用地的底下構築。

接著，為了極力抑止河川水中的懸濁物質等流入設施內，於是建造了取水壩(塑膠布製起伏水壩)，上游側的河道 300m 處使之作為自然沉沙池的機能。(容量：12,000 立方公尺)。此外，取水壩晴天時能將全部河川水導入設施內，水壩越流水深因降雨超過 24cm 的話，會自動變成顛倒的構造以防成為治水機能的障礙。

最後，設施的修復，礫間接觸氧化槽當初計畫為 1 槽，經整修後分割為 3 槽。各個槽前端皆設置了將河川水均等流入的入流分配槽，以及為了使因石礫(濾材)逆洗所剝離剩餘的附著生物膜沉澱、集積的污泥沉澱槽。

## 4. 討論

基於花費龐大費用及長年累月時間建設當初計畫，設施問題有以下：

- 伴隨著設施的啟用不可避免地堆積的污泥的清出及設施的清掃是不可能的構造，污泥的堆積達到計畫容量的階段恐怕變為無用的廢物。
- 曝氣槽的通氣孔產生的大量泡泡(河川水中含有許多洗劑因曝氣而發泡)在景觀上不合乎理想。
- 雖然不是常例，但特別是在夏季，集積在取水壩，關於水面上浮游多量的污泥所發生的惡臭，附近居民抱怨連連。
- 礫間接觸氧化槽由於曝氣不足，放流水發生惡臭。
- 設施放流口前面堆積大量的污泥。

### (二)、高根川接觸氧化淨化設施

#### 1. 背景

本設施設置於高根川，其為貫穿千葉縣西北部的船橋市(人口：約 57 萬人)的二級河川海老川(流長：7.1km，流域面積：26.7 平方公里)的支流。過

去主要被使用在農業用水方面，昭和 36 年開始，隨著上游地區大規模開發住宅區而水質漸漸惡化，使得疏通水路變得越來越困難。

船橋市根據水質污濁防止法，接受政府指定為生活排水對策重點地區。於平成 4 年度製定船橋市生活排水對策推進計畫，其中，高根川淨化設施建設開始事業經營化，於平成 4 年 10 月動工，平成 6 年 2 月完工，同年 4 月真正啟用。還有接觸濾材中，被使用的 PVDC 纖維繩狀物。

## 2. 維護管理

### (1) 電費

設施運轉基本的取水馬達，流量調整槽的計量馬達，曝氣裝置等電費共計約 447 萬日圓，而各自的電器設備檢查委託費約 17 萬日圓。

### (2) 處理槽清理

污泥處理槽、沉砂槽、沉澱槽所堆積的污泥的清除及搬運，約以 210 萬日圓委託處理，但處理丟棄是由市府當局管理的下水處理場獨自處理。每月每月的污泥量，加上透過填充接觸濾材的曝氣槽內的清掃次數看到的標準偏差，估計一年約 800-1000 噸。

### (3) 機械維護與垃圾清理

維護管理還包括每週一次的機械維護、集積在河川取水口濾網的垃圾類的回收、夏季的除草、水質檢查(每月 2 次)，全部委託費約 535 萬日圓。特別是每週進行一次濾網集積垃圾回收，暫時置放於設施內用地，每月一次以可裝載兩噸的垃圾車將垃圾運往垃圾焚化廠進行處理。

## 3. 討論

淨化設施的維護管理中花費最多的是，即便設施不管用何種方式及方法，也不能避免的污泥處理・清運、處理及丟棄若不能定期實行，就不能得到高度的處理水，這是眾所周知的事實。高根川淨化設施中的污泥的處理清運，原本就與其他維持管理一樣執行的十分完善，故可得到相當良好的除去率。

設施的管理負責人說：不管設施位於何處皆是同一句口頭禪淨化設施的維持管理中污泥的處理、丟棄，無論如何是花費最高的一環。這的確是事實，也是重大問題及課題。

由於市政當局自行處理、丟棄污泥，因此高根川淨化設施的維持管理費比起其他設施，相較之下較為低廉。假設是委託民間業者處理(除去平均 4 立方公尺的搬運費，費用標準約 6 萬日圓)，維護管理費肯定是數倍躍升。

無論如何，只要啟用淨化設施，污泥堆積便不可避免。若不能將污泥定期處理、清運，倒不如不要設置淨化設施。若不徹底進行維護管理的淨化設施，是違背社會、刻意污濁產生來源的裝置，是不被社會所接受的。

## 第四篇 水質自然淨化工法操作維護之原理

河川水質淨化工程在建造完工驗收後，需要進行維護與管理，方使人工濕地水質淨化的果效可以持續，也因此對於人工濕地內的水生植物何時需要採收、水路流通管道淤塞何時需要疏浚、放流污水負荷量多寡等都必須掌握，使得人工濕地在持續變化的自然環境中，經暴雨、颱風、乾旱等氣候變遷的考驗，仍然能得以修補與復育。也因此，完工後的河川水質淨化工程更應著重於維護管理問題以及水質持續監測(邱文彥，2004)，才能確保其淨化水質的目標。

### 定期性的監測

為此，河川水質淨化工程的管理，需要定期在現場監測入流與出流的水質、水位或水深、水量與流速、植物生長狀況與覆蓋面積、引水馬達的功能，與周遭生態、生物因子(如蚊子)是否滋生。更需要在暴雨、颱風後前往，判斷淹水深度、淹水延時，檢測工程是否受損。

管理所需要的監測，不僅需要經驗，而且需要有經費配合，每年的監測費用約為建造經費的 0.7~1.4% (Kadlec and Knight, 1996)，這並不包括施工維護的費用。施工管理的費用，是依工程破壞的程度來訂定，依場址是否容易受到環境衝擊，是否容易淤積，是否容易控制引水，是否容易排放水流，以及場址是否接近人口密集區等而定。

### 維護項目的優先順序

水質自然淨化工法，過去最引人詬病的是在工程完工後，經常缺乏管理與維護，以致工程很快廢棄，歐美也有這種案例。造成這現象的原因包括未訂定管理性的合約、缺乏管理回饋的機制、未要求定期監測與回報、缺乏場址的考評，與維護技術的不足；此外，這些工程大都是開放式，沒有警訊紅燈或危機按鈕，無法立即由指示信號呈現。因此維護水質自然淨化工程，需要設立固定的考核位置與考核的參數。

此外，有些人會誤以為野鳥前來、或水生植物茂密，就代表達到完工後的理想狀況，而忽略了如果水量不夠、水質劣化或是水流沖刷，水質自然淨化工法所建立的生態多樣化，或是對野生生物的吸引，或是景觀的美化，只是短暫的，一個持久產生自然水質淨化的工程，應該建立在生態食物鏈的穩定供應，這包括足夠的水量與水中的營養份 (Lopez and Fennessy, 2001)。因此，維護水質淨化工程的主要項目，應該包括水質處理成效，水量是否符合標準，底土是否具有保水性，水流是否有阻塞，與水生植物是否生長得太差或過度茂盛。若是這些水—土—植物的因素合宜，其他的水生植物群落或野鳥自然會前來。這是生態系統的原則，大自然不會留下空白，不給生物棲息。

為此水質自然淨化工程的維護管理，需要基本的原則與評估。

## 4.1 水質自然淨化工程維護管理原則

### 4.1.1 第一個原則—水文的調整

在維護與管理上，水質自然淨化工程與傳統的污水處理工程最大的不同在於：將大自然的水文變動納入工程的維護管理。因為只有持續地接受大自然的變動，工程所建立生態系統的生物相，才會逐漸演替成相依的關係，生物之間的相依，是日後發揮自然淨化系統低維護的關鍵，這是水質自然淨化工程維護管理最大的特色。

因此，自然淨化工程維護與管理的第一個原則，是持續的讓自然界的變動（perturbation），尤其是水文的變動進入生態系統（Hammer, 1997）。因此自然淨化工程的維護管理，必須在一年四季中，有水量、水深與淹水面積的變動，目的在讓完工後的初始生態系統，能朝自我維護（self-maintenance）的方向邁進（Kangas, 2004）。

#### 自然淨化工程就是要引入自然的變動系統

生態淨化系統會隨著時間演替，洪水與乾旱正是促進自然淨化的助力，洪水能將優勢的生物族群帶走，所以每次的洪水沖刷，都是再一次讓生物族群重新分配。乾旱能讓水位降低，讓氧氣再一次進入系統，有利營養份的礦化作用與好氧性微生物對有機物的分解（Bayley, 1991）。因此，若有人以為水質自然淨化工程，是經不起颱風或洪水沖刷的工程，而忘了水質淨化工程本來就需要洪水、乾旱，來提醒工程結構需要穩定。對土木、水利工程而言，洪水是無情的考驗；對水質淨化工程而言，洪水是敵人也是朋友，就端看管理是否妥當，方能化敵為友。

#### 依循大自然的水文變動

洪水是負面的詞彙，卻是大自然祝福的法則，經過變動反而使生態系統更具彈性（resilience）（Holling, 1973），能夠經得起之後的變動。為此，最符合大自然法則的水質淨化工程管理，就是引入水文的變動。

如何引入水文的變動，進入工程？如何配合台灣的環境來進行？春天是水生植物發芽的時候，又逢台灣的枯水期，在管理上，可以讓場址蓄水有較淺的水深，以促進種子的發芽，與增加場址底泥的再曝氣。因此水深的管理，主要是依照水生植物的生長來訂定。不過這有一個前提：水生植物是依著水域內底部表土之地形等高線在栽植。如果沒有這一個前提，日後就不易管理。

在春天，於挺水性植物區維持約 2~3cm 的水深，約持續 6~7 日，以增進發芽率，並且抑制陸域植物種子的發芽。

#### 水深配合植物高度的管理法

夏天溫度增高，是水質自然淨化最旺盛的時期，這也是挺水性植物生長最旺盛的時期，管理者可以調整水深，淹到挺水性水生植物底部 30~50cm 以上的高度。如果水質中營養份不足，或挺水性水生植物生長過茂，植株會呈現黃化或白化，這時可以進行第一次水生植物的部份植株的砍除或移除，一方面減低營養性的負荷，另一方面促進水生植物生長，再吸收水中的營養份。

秋天時期，水生植物的生長密度趨於穩定，夏秋之間是台灣颱風、暴雨最頻繁的期間，繼續保持水淹挺水性水生植物的水深，不僅可以讓附生在植株上的微生物有更多的表面積與水接觸，發揮淨化污水的果效，而且能夠在颱風與暴雨來臨時減少水流對於底泥植物根系的沖刷。

所以，挺水性水生植物不只在水質淨化上具有補助的功能，也是大自然的標尺，讓參與大自然的管理者知道，水要淹到多高，要淹多久，這是水質自然淨化場址的水力負荷量與水流停滯時間，在維護管理上的指標。由水生植物生長的過密或稀疏，就可以判斷出場址維護管理的優劣，進而判斷水質處理的狀況。

#### 4.1.2 第二個原則—工程結構的穩定

工程的執行就是為了解決問題，而且發揮長期性的功效。水質自然淨化工程在工程的結構上必須穩定，包括引水、導水、排水、制水的水利工程結構體必須耐沖刷，底床的土壤必須具高保水性與低滲透性，電力供應馬達抽水必須持續，周邊坡地必須安定，不能有地基沉陷等。若這些基本的工程結構不穩定，日後就不容易維護管理。

洪水期考驗場址結構是否穩定，枯水期考驗底床的保水能力。因此，水質自然淨化工程能否耐洪水沖刷，底床的保水能力，是決定工程能否長期維護管理的兩大要素。

#### 進行場址維護管理前的兩個必要試驗

為此，水質自然淨化工程在維護管理前，應該進行二個試驗，一是場址最大水量的排放試驗，以滿載的水力負荷量，最快速的入流，作一次工程的穩定度分析，以作洪水期的安全度評估；二是底床水份滲漏量的現地實驗，以作枯水期保水能力的評估。

#### 環境的風險評估

若沒有事先預期可預料的風險，就無法知道不可預料的風險，更無法提出工程維護管理的合理經費，因此透過工程維護的執行，能預測所將面臨的自然變動，而且知道工程所能承負的限度。

#### 4.1.3 第三個原則—生物的管理

場址的公共衛生，是管理與維護上必要的考量，否則水質淨化效率再高，處理水量再大，再耐洪水沖刷，只要有蚊子滋生，水中發出惡臭，水面過多泡沫，福壽螺水底四處爬行，紅蟲在水中到處蠕動，死魚在水面浮現，要說服周遭的居民，這是多麼具有生態原則的污水淨化，都很困難。

在管理上，不是一直派人巡視，以避免這些現象被人看見。在大自然要讓一個水域，完全沒有蚊子，沒有紅蟲，沒有一點腐臭味道，沒有任何的魚類死亡，是不可能的，尤其是在污水進入的水域中，這些現象更易自然發生。避免這些現象，也非大量使用殺蟲劑、殺草劑、殺螺劑或投放耐污水的吳郭魚，若用這些不符生態的措施，是違反了促進水域自然淨化作用的目的。

## 維護管理的生物性指標

這些問題，相互影響，例如有蚊蟲滋生的地方，經常也伴隨有惡臭，漂浮性水生植物如布袋蓮、浮萍、大萍、槐葉蘋等生長過密，或藍綠藻的菌絲在水面聚集成團。所以在維護管理場址的水質自然淨化，蚊蟲是生物性的指標。

有趣的是，蚊蟲滋生對於燕子與水鴨是一種吸引力 (Payne, 1992)。蚊蟲滋生的水域表面，經常吸引許多燕子，甚至雁鴨、候鳥前來，雖然能增加水禽的觀賞性，卻是水質自然淨化工程場址有待維護的警訊。

## 防止蚊蟲的管理方法

在水質自然淨化場址，防止蚊蟲滋生的方法，是保持水流的流動。減低水生植物生長的濕重密度不要超過  $0.7\text{kg/m}^2$  (Reed et al., 1995)，水中 BOD 的負荷量不要超過  $110\text{ kg/ha day}$  (Droste, 1997)。

由於蚊子喜好在沈滯水中產卵，並以水中的有機物作營養份，因此管理者的首要措施是保持水流動與水中 BOD 的流入不能太高，尤其近代禽流感的威脅，已經提升到全球性的警訊，禽流感的病毒透過勤鳥的糞便排放進入水體，在溫水中能迅速繁殖，成為人畜共染的致命疾病，因此水質自然淨化工程，不只需要考慮水質淨化與生態的功能，也要符合公共衛生的需求 (Rowe and Abdel-Magid, 1995)。

### 4.1.4 第四個原則—水流的管理

水質自然淨化功能的發揮，需要污水在場址內經過充分的混合，流入的污水不只能與場址內的水充分混合，而且能與場址內的淨化組成份土壤—植物—水體有充分接觸的機會。在一個逐漸淤積或是陸域化的場址，進入的污水不易在場址內均勻流動，而是在局部區域快速通過，這稱為「短流」，是水質自然淨化工程需要避免的狀況 (Kadlec and Knight, 1996)。

定期的曝氣、浚深與移除淤積，是解決的措施。有效率的曝氣是在枯水期間，如每年 12~1 月，與植物生長最旺盛的 7~8 月，放低場址內的水約 5~7 日，讓空氣能夠進入底泥，增加好氧性。

改變排放口的位置與高度，是有效管理淤積的方法，只要用水流的沖刷，由另一個排放口排出，可以讓淤積的問題獲得改善。如果想要避免淤積物再度流入承受水體，則可以用機械挖除，曬乾後作堆肥處理。

### 4.1.5 第五個原則—持續監測與現地資料的整合分析

場址完工，只是建立自然淨化系統的起點，這個剛建立的生態系統，所能發揮淨化果效，還是不穩定，為了使自然演替的發展朝向工程預期的目標，所以需要監測與整合資料，作為操作維護與管理的根據。

大自然的影響因子很多，監測的項目與頻率需要具有代表性，否則不只是經費的問題，也難以將監測的資料轉換成維護管理上有用的資訊。因此，監測的目的在掌握場址的生態發展、確定污水處理的成效，以及判別場址問題徵兆。每年監測費用約為工程建造費用的  $0.5\% \sim 1\%$  (Kadlec and Knight, 1996)，因此，若能發展影像自動監測系統，將更為理想、便宜。

表 44 監測的項目與頻率

目標	項目	監測位置	監測的頻率 (次/時間)
場址生態 發展	水文：氣象資料 (降雨量、氣溫、相對濕度)	鄰進場址區域	每天自動監測
	水文：流量與水深	進流口與出流口	每週一次
	不同植物覆蓋面積、 其他生物	靠進流口、場址中央、 靠出流口	每月一次
污水處理 成效	水質：水溫、溶氧、酸鹼值、 導電度	進流口與出流口	每週一次
	水質：BOD, TSS, NH <sub>4</sub> , TP, Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , TKN,	進流口與出流口	每月一次
	水質：重金屬、有機物	進流口與出流口	每季一次
場址問題 徵兆	水利結構有否遭受破壞	整個場址	每月一次
	場址內道路	整個場址	每半年一次

(資料來源：Kadlec and Knight, 1996、林瑩峰等人，2004)

#### 4.1.6 第五個原則—生態景觀教育與人文的呈現

水質自然淨化工程主要的目的是以生態的法則，促進水質的淨化。當一個場址的水質得以淨化，生態系統的功能得以發揮，自然成為具有生態、景觀與人文教育的呈現所在。反之，如果水質處理成效不彰，惡臭伴隨，蚊蟲滋生，即使周邊再用紅花綠葉點綴、路邊有砌石、水面上有小橋、迴廊，小橋下的水流卻停滯不通或乾燥見底，這種美化將流於膚淺，完全不符合生態的原則。

既然水質自然淨化就能發揮生態與景觀性，為何還需要有人文教育呈現的考量呢？因為要妥善維護一個場址，維護者必須兼具系統管理的知識、自然淨化的技術與服務眾人的熱忱。而人文教育的呈現，正反應出管理者服務眾人的熱忱。

這種熱忱可以使水質自然淨化的效益，超出水質淨化的範圍之外，使這種「公共工程」真的能造福鄰里。世界上有不少著名的水質自然淨化場址，其著名的原因，不只是水質處理的效果佳，並且生態教育多元豐富，這包括水—土—生物的長期資料，研究的追蹤，以及與周遭的居民與社區教育結合。

## 4.2 人工濕地的專家評估系統

### 4.2.1 水域生態評估的起源

水域生態評估(aquatic ecology assessment)是整合水域與其周邊的物理、化學與生物因子，以評估其在水資源、管理、棲地保育、環境評估與特殊場址對於水域生態系統之影響。最早整合水域不同因子的人，是美國伊利諾大學生物學系的教授弗比(Forbes, S. A.)，他整合資料，以伊利諾河的水文的變化與浮游藻類、魚類的變遷，來評估該河的生態特性。他後來被稱為「溪流水域生態學之父」。

伊利諾河是密西西比河西北方的一條主要支流，十九世紀末期，鋼鐵工業在伊利諾州的匹茲堡城興起，同時吸引了許多人口，工廠與都市污水就直接排入伊利諾河，影響了整個密西西比河流域的水質，而密西西比河是美國東部與南部各州水資源的命脈。一八七六年，弗比教授在伊利諾河上游的哈瓦納(Havana)鎮，設立一個實驗室，帶著學生研究天然水域與人為排放水對於水域藻類與魚類的影響。他寫道：「維持水的經濟價值、養殖功用與教育功效，最主要的關鍵在避免溪流與其周邊的湖泊遭受污染，而污染的影響評估是基於水中生命系統(system of life existing in the water)的科學知識。」傑出的物理學家希勒德(L. Szilard, 1898-1964)曾說道：「一流的科學家像是蜜蜂，在不同的科學領域之間傳花授粉，其思索來自邏輯，其創造力來自下意識。」，以後二十年，這個實驗室培養出許多國際上一流的溪流生態學者。

### 4.2.2 腐生系統計分法

1908年德國柏林大學生物學家高勒惠司(Kolkwitz, R. W.)與馬森(Marsson, M.)提出評估水域生態受到污染的方法——「腐生系統」(Saprobic System)。腐生是有機污染的程度。這兩個學者提出由生物在污染水中出現的頻率可以判斷不同生物耐污染的程度，這稱為腐生值(Saprobic value, 以s表示)，根據該種生物在污染出現的頻率，若以常態分佈表示，可以分為十級(1-10)，級數愈高代表該生物是愈耐污染的物種。

評估水域，可以調查指標物種與其出現的數目，或稱為物種出現頻率(以h表之)，分為三級：稀有、經常與非常豐富。用這兩個因子計算腐生指標(Saprobic Index, 以S示之)

$$S = \frac{\sum(s \cdot h)}{\sum h}$$

S一般在0-8之間，其代表的水域特性如下：

表 45 腐生系統評估水域生態系統

腐生指數(S)	範圍	水域特性名稱
0	0-0.5	異腐水性(Xenosaprobic)
1	0.51-1.5	貧腐水性(Oligosaprobic)
2	1.51-2.5	$\beta$ -中腐水性( $\beta$ -mesosaprobic)
3	2.51-3.5	$\alpha$ -中腐水性( $\alpha$ -mesosaprobic)
4	3.51-4.5	多腐水性(polysaprobic)
5	4.51-5.5	同腐水性(Isosaprobic)
6	5.51-6.5	複腐水性(Metasaprobic)
7	6.51-7.5	超腐水性(Hypersaprobic)
8	7.51-8.5	極腐水性(Oltrasaprobic)

#### 4.2.3 考慮當地特色的生態評估計分法

這個由德國發展出的分類評估法，又稱為「德國標準法」(German Standard Method)。自此以後，許多科學家發表研究報告，討論這些德國的生物物種，怎麼可以用在他們的國家？他們國家的代表性物種是哪些？有的在討論只有 0-8 範圍太窄了，應該分為 0-20 級才夠？有的在討論每級都用 1 來區分不夠凸顯，應用 4 來區分，如 0, 4, 8, 12, 16 等。有的在討論只用浮游藻類來表示是否就可以？有人認為可以，因為藻類中的葉綠素易定量；有人認為不可以，因為藻類的種類比葉綠素更重要。有的在討論腐生系統只針對有機質過多，水中缺氧在判斷，如果是酸雨的影響要怎麼判斷？回顧這些研究文獻，不要以為這些科學研究是小題大作，徒然增加研究期刊的篇幅厚度，與浪費國家支出。其實這是生態研究的特性。將生態的通則，落實在本土的環境特色。

例如英國生物學家伍立威斯(Woodiwiss, F. S.)在一九六四年，以在英格蘭中部特倫特河(Trent river)的研究結果，提出「特倫特生物指數」(Trent Biotic Index)。其評估的原則是分類到生物的種，區分種對污染逆境的適應程度，適應力愈強，分數(score)愈低。比利時的研究者改變若干物種提出「比利時生物指數」(Belgian Biotic Index)。法國的科學家又選出適合其本地的物種，給予不同權重，稱之為「法國生物指標」(French Indice Biotique)。

#### 4.2.4 考慮以敏感生物作為指標—BMWP 計分法

1970 年代，學者認為指標物種如果只是耐污染的物種，就無法評估自然未受污染的水域，也無法比較水域劣化的程度，或是溪流的下游與上游的比較，因此放入對於污染敏感的物種，這樣的思索產生生物監測 BMWP 計分系統。

這是位於英國南方沿海的一個民間保育團體，自稱為生物監測工作團(Biological

Monitoring Working Party)簡稱 BMWP，這工作團至少有 60 名全職的工作人員，整治位於英倫海峽邊的奧西河(Ouse River)與其各支流，目標是使鱒魚能夠自海上溯到溪流的各支流。

這英國的溪流保育團體，在奧西河流域定下溪流保育的方針，首先是減少廢污水排入，排放水的水質準則是溶氧濃度需大於 3 mg/l，磷酸根( $\text{PO}_4\text{-P}$ )濃度需小於 8 mg/l，氨氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ )濃度需小於 0.4 mg/l。他們認為這是奧西河所能承受，而不會對水中生物產生逆境的濃度，而後他們遊說地方政府，在三十八個鄉鎮城市設置污水處理廠，以減少污水排放。他們同時在支流溪邊以栽種水生植物取代混凝土內面工，以伸入水中的水制，增加枯水期的流速與抬高水位，取代完全阻斷水流斷面、產生垂直急劇落差的攔水堰。又在溪流擺設邊岸多孔隙的礫石、植物、彎曲度，以增加水生物的棲息空間。並且提出增加溪流棲地的淵(riffle)及潭(pool)，不僅讓溪流有機徹底分解，且增加魚類上溯的機會，因為鱒魚產卵都在礫石區，所以在溪流底較多淤泥的地方，搬除淤泥，換上礫石。

BMWP 計分系統不只是研究學者的理論分析，或是政府的行政裁量，更具有河川整治的執行力。

#### 4.2.5 水流連續概念

1980 年代，愈來愈多的生態學者認為評估水域是否理想，不應該侷限於水生物對於水中有機質或溶氧的適應性，或是敏感度來作判斷，而應該將格局放大到整個「生態系統」(ecological system)。尤其是凡諾第(Vannote, R. L.)等學者提出的「水流連續概念」，幾乎徹頭徹尾地改變了傳統水域生態評估的思維。

水流連續概念是將溪流、河川視為一個連續變化體，而其變化包括由源頭、上游、中游、下游，至出海，每一階段水域的結構，例如溪床坡度、寬度、水深、水底粗糙度、流速、底床顆粒粒徑、水中懸浮顆粒、溪流微觀的澗與潭在水生態上都有其功能，對於水中食物鏈的變化都具有顯著的影響，進而改變水中生物族群的消長。

水域水生動物根據覓食的特性可分為五種。第一種是以撕裂型作為攝食的方式，如石蠶(caddisfly)、石蠅(stonefly)等水生昆蟲，主要攝食水中較大體積的有機質(coarse particulate organic matter, 簡稱 CPOM)。第二種是以過濾型作為攝食的方式，如蠅蚋(blackflies)，主要攝食水中較小有機質(fine particulate organic matter)。第三種是以刮磨的方式攝食，如 waterpenny 是以水中石頭上的藻類為食物。第四種是以鑽入植物的方式攝食，如甲蟲。第五種是攝食其他的水生昆蟲、螺類為食物。這種生物的攝食法，使得水中的有機質能徹底地分解。

在溪流的源頭與上游，陽光較不易穿透溪流邊的植物林冠，藻類較少，水中光合作用不旺盛，因此食物的主要來源為水邊的枯枝落葉，主要是撕裂型攝食的水生物。溪流的中游，河寬、水緩、陽光充足，藻類生長旺盛，過濾型與刮磨型的攝食佔優勢。到了

下游，顆粒沉積使得藻類在水底不易生存，在岸邊，水底鑽孔式生物較佔優勢。

水流連續概念，闡述溪流裡的生物各盡其職，能巧妙地分解食物，間接維持水質的淨化與水中酸鹼值的穩定。例如溪流的微觀結構，在急流水淺的澗處，空氣能有更多氧氣溶解進入水中，是生產有機物最多的地方。在水緩的潭，沉積的有機物在此分解，所釋放出二氧化碳，溶入水中，增加水中的鹼度，以維持水中酸鹼值的平衡。所以溪流中有澗、有潭，是理想的棲地。

#### 4.2.6 生物綜合指標計分法

美國華盛頓大學卡爾(Karr, J. R.)在此時提出另一種評估，稱為「生物綜合型指標」(Index of Biotic Integrity, 簡稱 IBI)。不同於以往生物指標是對污染忍受或敏感來作計分，而是以不同棲地的生物，具有撕裂型、過濾性、刮磨型、鑽孔型等攝食方式來計分。他以北美 232 個水域的水生物調查作為生態資料庫，編列優、良、尚可、劣等積分的分級。這在當時被認為是最客觀的生態評估法。

但是這套生物綜合型指標有賴於長期生物監測，各國溪流中的生物各有特色，選擇計分物種仍然存在主觀性。而且缺乏生物監測的水域，就無法提出評估。

水域生態評估研究報告愈多，愈揭露出問題的存在與嚴重。例如卡爾教授提出美國西北部 602 條河川中，56% 呈現劣化，顯示政府雖然擁有一些法律條文管理污染，但是管理效能不彰。這些報憂不報喜的報告，使美國環保署在 1987 年的淨水法案(Clean Water Act)中加入：「國家的水必須進行化學、物理與生物整合評估，以判斷水的狀況與需要進行復育與保育的所在。」

立法帶動生態評估迫切性，在 1990 年代，產生更具效率與執行性評估系統，這是美國環保署在 1999 年提出「棲地評估現地資料表」(Habitat Assessment Field Data Sheet)。

#### 4.2.7 棲地評估現地資料表

「棲地評估現地資料表」偏重物理因子，因此不需要長期的生物監測資料，或是在現場進行生物採樣，或是化學分析，完全是由專家在溪流以目測觀察記錄評分。目測有十個重點，均與棲地的特性有關。

這十個重點為：溪流底床生物附著狀況、底床顆粒粒徑級配、流速與水深分區、沉積狀況、溪流斷面水流狀況、溪流淤積、溪岸規則化、淵澗的機率、溪岸邊坡穩定度、植物邊坡覆蓋率、溪邊林帶寬。每個目測重點分為 20 級分，0-5 分「劣」，10 分「差」，11-15 分「次佳」，120 分「佳」。最後將分數總和除以 10 之後，即為該觀測點棲地等級。

雖然沒有生物測定，但是這些物理因子的積分能呈現出水中生物的多樣性與豐富度。所以這方法的假設是，專家對於棲地評估的結果將與卡爾所提出的 IBI 具有顯著的相關性。而且棲地評估只要現場觀測完畢，結果就可以出來，不需要較費時間的生物採

樣與化學分析，並且專家觀察的位置可以選在固定位置或路線上，而不需要較為昂貴、且較為危險的溪流逢機採樣。進行觀測也不用攜帶許多器材，只需攜捲尺量測溪邊林帶寬度與用流速計測定流速，其計分表格如下。

表 46 特倫特生物指數計分系統

Extended Biotic Index			Total number of groups present									
			0—1	2—5	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	31—35	36—40	41—45
Trent Biotic Index			Total number of groups present									
			0—1	2—5	6—10	11—15	16+					
Organisms in order of tendency to disappear as degree of pollution increases			Biotic indices									
Clean	Plecoptera	More than one species	—	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	nymphs present	One species only	—	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Ephemeroptera		—	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	nymphs present	More than one species										
	(excluding	One species only	—	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	<i>Baetis rhodani</i> )											
	Trichoptera	More than one species	—	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	larvae or <i>Baetis</i>	One species only	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	<i>rhodani</i> present											
	<i>Gammarus</i>	All above species	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	present	absent										
	<i>Asellus</i> present	All above species	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		absent										
	Tubificid											
	worms and/or	All above species	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	red chironomid	absent										
	larvae present											
Polluted	Some organisms such as											
	All above species	<i>Eristalis tenax</i> not	0	1	2	—	—	—	—	—	—	—
	absent	requiring dissolved										
		oxygen may be present										

## 4.2.8 非專家評估系統

生態是一個複雜的系統，人為的評估是將這個系統濃縮成一個「數字」，去呈現生態系統的特徵。濃縮的方法，無論是用統計的理論，是科學的量化，是生物物種長期的監測，是物種的測量佐證，是根據國際公訂的化學實驗法，都有不同背景的專家客觀無私的參與。但是仍有一個基本的吊詭存在於整個生態評估的思維裡，人類真的可以量化生態系統嗎？也許這是人類理性的極限，人如果可以以一個計分評估去量化複雜的生態系統，那麼是否照此方法也可以去量化一個人，然後用一個數字去代表他，數字大到某個門檻稱為「佳」，某一個門檻稱為「可」，低於某一個門檻稱為「劣」。這是一件可怕的事，因為被評者完全沒有參與評估的過程，也不知道評估的考慮因素。專家評估生態系統時，生態系統不會發出聲音抗議，鳥不會提出意見，蟲不會抱怨，魚不會表達，但是土地的擁有者與關心地方的民間組織，基於土地的使用或關心的生態議題，會提出自己的看法。

因此水域生態評估，不只是專家的評估，也必須包括下列的要素：

- 1.除了專家，也需要呈現地主、民間團體或居民的意見。
- 2.評估的項目，權重應以公開的文件呈現。
- 3.評估的程序，也需要以公開與透明的方式進行。
- 4.評估的指標需予以整合。
- 5.評估的最終目的，是要讓生態環境與多數人都得到益處。
- 6.如果評估的水域環境已有長期監測的數據，需儘量採用這些數據作為資訊。
- 7.所有評估方法都有不確定的部分，因此評估的結果仍需要有不同的詮釋的空間。
- 8.評估不只是對現況的了解，也能略具長期影響的推測。
- 9.評估應具某種程度的彈性，針對不同的觀點有不同的權重，使裁決者有不同選擇的空間。

## 4.3 水生植物在人工濕地水質淨化功效之評估及管理

### 4.3.1 植栽表土層的厚度

人工濕地的操作維護，水生植物的生長是關鍵性的因子，水生植物的生長不良與過度旺盛都將降低水質淨化的成效，影響水生植物，尤其是挺水性水生植物的生長是植栽表土的指標，因為這是水生植物生長的根區，為水生植物生長最敏感的地方。所以管理人工濕地的植物生長狀況，表土是最重要的部分。

水域底床的表土特性決定水生植物的蒸發散量，水份在表土的傳遞將影響水生植物的吸水率：

$$\frac{dq}{dz} = -\lambda \quad (1)$$

$q$  為人工濕地表土層水份的流通量(cm/day)， $z$  為表土層深度(cm)， $\lambda$  為水生植物根部的吸水率(l/day)，由於吸水的方向與土壤水份的垂直通量方向相反，故用負號表示。

根據達西公式(Darcy's law)，土壤的水份通量是水份能量的梯度，故

$$q = -k \frac{dH_T}{dz} \quad (2)$$

$k$  為土壤水份導水係數(hydraulic conductivity)，單位為 cm/day， $H_T$  為水份總水頭(total water head)，單位為 cm。由於人工濕地底床表土長期處於水份飽和狀態，故(2)式可改寫為：

$$q = -k_s \frac{d(H_p + z)}{dz} \quad (3)$$

$k_s$  為土壤水份飽和係數(saturated hydraulic conductivity)， $H_p$  為土壤水份壓力水頭(pressure water head)，在飽和水份的情況， $H_p$  幾乎為 0，故(3)式可改寫為

$$q = -k_s \quad (4)$$

植物的吸水率，根據 Gerwitz and Page(1974)可以表示為

$$\lambda = \frac{T}{\delta} e^{-z/\delta} \quad (5)$$

$T$  為植物蒸散率(transpiration rate)，單位 cm/day， $\delta$  為植物根系特徵長度，代表離地面愈遠，吸水率愈低，單位為 cm，積分(1)式

$$\int_{q_0}^{q_z} dq = -\int_0^z \lambda dz \quad (6)$$

$$q_z - q_0 = -\int_0^z \frac{T}{\delta} e^{-z/\delta} dz \quad (7)$$

(7)式可改寫為

$$z = \delta \ln \left( 1 + \frac{q_0 - q_z}{T} \right) \quad (8)$$

由於  $q_0 \gg q_z$  ,

$$\text{故 } z = \delta \ln \left( 1 + \frac{q_0}{T} \right) \quad (9)$$

由(9)式可知，當  $q_0$  愈大於  $T$ ，或濕地的表土質地愈粗，其  $z$  值將愈大，或表土的深度將愈深。反之，表土質地愈細， $q_0$  愈小， $z$  值將愈小，即濕地的表土層將愈淺，即可以滿足水生植物的生長所需。

人工濕地最具代表性挺水性植物之一為香蒲(*Typha angustifolia* L.)，其在台灣大學安康農場大型水桶水耕試驗在生長約 90 天後，將根取出測量，不同根長所佔機率如下表：

表 47 香蒲在水耕液中根長的分佈機率

根長(cm)	機率(%)
1	2.79
5	13.36
10	25.36
15	23.17
20	17.73
25	11.17
30	6.42

$$\begin{aligned} \delta &= 1 \times 0.0279 + 5 \times 0.1336 + 10 \times 0.2536 + 15 \times 0.2317 \\ &\quad + 20 \times 0.1773 + 25 \times 0.1117 + 30 \times 0.0642 \\ &= 14.9719 \text{cm} \end{aligned}$$

根據在台北縣新海橋人工濕地以盆栽量測香蒲的蒸發散量(ET)比較發現，A 級蒸發皿的蒸發量(E)在栽種初期(株高 55 公分)  $ET/E=1.01$ ，生長旺期(株高 179 公分)  $ET/E=1.40$ 。以最高蒸發散量時期為考慮，香蒲用水量為  $1.40-1=0.40$  倍的蒸發量，以平均日蒸發散量  $6\text{mm/day}$  水深計算，香蒲日用水深為  $6\text{mm/day} \times 0.4 = 2.4\text{mm/day}$ 。

在人工濕地表層土壤的導水率，以常用的土壤飽和導水係數為  $5\text{mm/day}$ ，故人工濕地的表土層深度應為

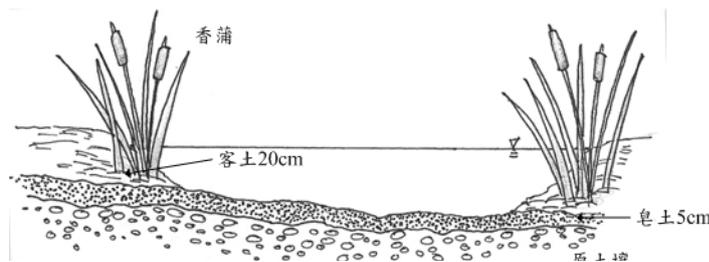
$$\begin{aligned} z &= 14.9719 \ln \left( 1 + \frac{2.4}{5} \right) \\ &= 16.86 \text{cm} \end{aligned}$$

所以在人工濕地植栽表土層只要在 16.86cm 深，其水份即可滿足香蒲生長的最大蒸散所需。依據 2004 年~2005 年在台北縣新海橋人工濕地的盆栽實驗，也發現 20cm 的土

深，維持在近土壤飽和含水量，即可維持香蒲一年生長所需的水量。這演算與實驗的結果與美國 Kadlec and Knight(1996)《Treatment Wetlands》書中建議的「人工濕地的表土深度至少需 30cm」不同，台灣是 20cm 即滿足生長所需最大蒸發量。這種差異是台灣的緯度較歐美低，植物生長旺盛，不需較深的表土去隔絕低溫逆境。

由於人工生態池的水深在 30~80cm，再加上 20cm 的表土層，因此開挖人工濕地只需維持 50~100cm 深度即可。表土的厚度增加，將增加日後人工濕地的淤積，為了便於以後的維護管理，甚至可用表土層深度來作指標，以免水生植物因著底土較厚，而能長到水深之處，造成人工濕地容易淤積的困擾。

過去台灣表面流人工濕地的建造，底土層經常鋪 20~30cm 的厚度，以促進挺水性水生植物的生長，但是根據研究調查顯示，只需 20cm 的表土層厚度即足供水生植物生長所需，建議表面流人工濕地底土層厚度 20cm 即可，多出的 10cm 深度供給水域進行自然淨化作用，而且 20cm 的表土，也只需邊坡鋪設即可。其他水域不用鋪設表土，以防水生植物過度滋生。



#### 4.3.2 水生植物生長密度

人工濕地的管理最需要注意的是淤積，否則將造成人工濕地陸域化，水的流況不均勻，水生植物過度滋生，與水呈混濁、惡臭。造成這現象的原因有三個：將人工濕地的功能與污水塘(lagoon)功能混淆；對水生植物偏好，以為水生植物長的愈多愈好，而不知真正達到水質淨化功效的是水中的微生物，而非水生植物；在人工濕地的處理單元，為了營造厭氧分解，以致種了過多水生植物，加速淤積。

在台灣，不少人工濕地不過是較淺的污水塘而已，如此錯誤的認識，使台灣初期所建的人工濕地效果不彰，引人詬病。人工濕地不是污水塘，而且設計理念完全不同，污水塘是水進入水深超過 1.5m 的池中，水力停滯時間在 10 日以上，水停留的愈久，愈能發揮去除污染的果效。人工濕地是在 0.3~0.8m 的水深，水力停滯時間在 5~6 日之間，而非像污水塘是長期處於滯水狀態來去除污染，所以人工濕地的水流一直處於緩慢的流動狀態，水一邊流，一邊去除污染。

根據 2005 年調查，台灣污水處理型人工濕地的平均流量為  $4300\text{ m}^3/\text{day}$ ，平均入流

的懸浮顆粒濃度為  $96.3 \text{ mg/L}$ ，所以平均的入流懸浮顆粒量為

$$\begin{aligned} & 4300 \text{ m}^3 / \text{day} \times 96.3 \text{ mg/L} \times 10^3 \text{ L/m}^3 \\ &= 410490 \times 10^3 \text{ mg/day} \\ &= 410490 \text{ g/day} \end{aligned}$$

一般懸浮顆粒的比重為  $2.65 \text{ g/cm}^3$ ，故

$$410490 \text{ g/day} \div 2.65 \text{ g/cm}^3 = 154902 \text{ cm}^3 / \text{day}$$

台灣人工濕地的平均面積為  $4.06 \text{ ha}$ ，因此人工濕地每年的淤積速率為

$$\begin{aligned} & \frac{154902 \text{ cm}^3 / \text{day} \times 365 \text{ day/year}}{\phi \times 4.06 \times 10^8 \text{ cm}^2} \\ &= \frac{0.343}{\phi} \text{ cm/year} \end{aligned}$$

$\phi$  為人工濕地自由水面的孔隙率，如果人工濕地完全沒有水生植物， $\phi=1$ ，則台灣表面流人工濕地淤積率為  $0.343 \text{ cm/year}$ ，對一平均水深  $40 \text{ cm}$  的人工濕地

$$\frac{(40-30) \text{ cm}}{0.343 \text{ cm/year}} = 29.15 \text{ year}$$

若平均水深降為  $30 \text{ cm}$ ，則需清淤，這顯示出表面流人工濕地最大的優點是不易被水中懸浮性顆粒阻塞，尤其在台灣，地質多軟弱，岩石易風化，懸浮性顆粒濃度較歐、美、日為高，又受暴雨強度高的影響，容易淹水，表面容易在短時間內進入大量的砂土，這對地下流式的濕地或是礫間處理，容易造成阻塞與淤積，但是對於表面流人工濕地的影響較小，因此在平坦、土地面積較大，或大於  $1 \text{ ha}$  的河床地上，淨化河川水質，表面流人工濕地是最有效、造價低、風險低且維護低的水質自然淨化工法。

表面流人工濕地為了促進水質淨化作用，種植水生植物。但是，水生植物生長過多，反而造成人工濕地不易維護。在水生植物旺盛的水域，自由水面的孔隙率會降至  $0.1$ ，平均  $40 \text{ cm}$  水深的表面流人工濕地淤塞的時間為

$$\frac{(40-30) \text{ cm}}{\frac{0.343 \text{ cm/year}}{0.1}} = 2.92 \text{ year}$$

因此三年不到，就必須清淤維護。這是過去台灣發展人工濕地的瓶頸，用「高密度植生群落，以增強濕地過濾、穩定化、除氮及抑制藻類生長的功能」(台南市竹溪流域建立人工濕地計畫期末報告，2005 年)。這高密度的植生群落，初期能快速產生水質淨化果效，但是後來反成為維護上的困擾。

在表面流人工濕地多少的自由水面孔隙率才是維護的指標呢？美國環保署(2000)認

為  $\phi$  是 0.875~0.95，以免造成水生植物生長過密。台灣的溫度高，水生植物的生長速度比美國快，因此  $\phi$  值在台灣的選定應該是 0.95，即水生植物只需維持佔人工濕地 5% 的表面積。

水生植物在較低密度的生長，對於人工濕地水質淨化是否仍具果效，根據台大安康農場溫室內的試驗結果，如表 48 所示。由試驗結果顯示，栽種水生植物，即使是在高孔隙率自由水面的情況下，對於水質淨化作用的促進在氮增加 16.2~39.4%，在磷增加 21.9~39.8%，但是水生植物的氮吸收量佔 5.1~25.7%，微生物的分解佔 74.3~94.9%；水生植物的磷吸收佔 7.6~22.6%，微生物的分解佔 77.4~92.4%，因此水生植物對水質的淨化只佔一小部分，大部分都是微生物促進的分解。

表 48 水生植物低孔隙率栽種對水中氮磷的淨化

植物	初期自 由水面 孔隙率 (%)	採收自 由水面 孔隙率 (%)	吸收 氮量 (mg/桶)	吸收 磷量 (mg/桶)	植株吸 收氮量 (mg/桶)	植株吸 收磷量 (mg/桶)	植株吸 收氮比 率(%)	植株吸 收磷比 率(%)	微生物 的分解 吸收氮 比率(%)	微生物 的分解 吸收磷 比率(%)	水生植 物促進 氮自然 淨化率 (%)	水生植 物促進 磷自然 淨化率 (%)
香蒲	99.5	98.4	6169.5	443.0	1083.6	58.0	17.5	13.1	82.5	86.9	29.9	22.3
燈心草	86.4	61.2	6618.7	505.9	1698.8	114.0	25.7	22.6	74.3	77.4	39.4	39.8
過長沙	95.3	90.5	5519.3	441.4	280.8	33.6	5.1	7.6	94.9	92.4	16.2	21.9
對照組	100	100	4747.8	362.0	0	0	0	0	100	0	0	0

註：1.試驗桶體積 600L，水深 63.7cm

2.試驗採四重覆

3.試驗栽種 85 天，水溫 15.1~25.6°C

4.採收時期植株香蒲高度 131.8cm、燈心草 98.8cm

5.採收時期水中溶氧對照組 5.4mg/l、香蒲組 5.7 mg/l、燈心草組 5.8 mg/l、過長沙組 5.6 mg/l

### 4.3.3 水生植物的選種與對環境變動之適應

台灣在發展人工濕地初期，引進國外的案例，採用歐美的工程圖樣作範本，以歐美的參數作設計。人工濕地與在地的環境息息相關，尤其台灣環境的變動較大，對於幾乎完全向自然開放的人工濕地建造，是一個很大的考驗，過去缺乏本土性的資料，所以初期應屬試作階段，但是人工濕地未來的發展，仍然需要回應變動環境中，人工濕地的因應維護之道。

變動環境對於人工濕地最具影響性的是洪水的沖刷，這將造成引水結構的破壞，排水與底床淤積與水生植物的流失。洪水之後，引水與排水的土木水利結構可以短期內施工復原，底床淤積也容易清除，但是水生植物的補植與生長等是工程師最不易掌握的因子，因此在維護上選取對台灣環境變動有高度適應性的物種，是一個重要考量。

人工濕地水生植物對於變動環境有高度適應性，包括不易被沖走，或根部容易再發芽。以 logistic equation 來計算水生植物的生長模式可表示為

$$\frac{dN}{dt} = rN \left( \frac{K - N}{K} \right)$$

N 為水生植物的生長量，t 為時間，r 為生長率，K 為水生植物最大的生長量。

$$\int_{N_0}^N \frac{1}{N \left( \frac{K - N}{K} \right)} dN = \int_0^t r dt$$

$$\log \frac{N}{1 - \frac{1}{K} N} - \log \frac{N_0}{1 - \frac{1}{K} N_0} = rt$$

因為  $N_0 \ll K$

$$1 - \frac{1}{K} N_0 \cong 1$$

$$\log \frac{N}{1 - \frac{1}{K} N} - \log N_0 = rt$$

$$\frac{N}{1 - \frac{N}{K}} = e^{rt}$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{rt} - \frac{1}{K} N e^{rt}$$

$$\frac{N}{N_0} + \frac{1}{K} N e^{rt} = e^{rt}$$

$$N = \frac{e^{rt}}{\frac{1}{N_0} + \frac{1}{K} e^{rt}}$$

$$= \frac{K}{1 + \frac{K}{N_0} e^{-rt}}$$

因為  $K > N_0$ ，故  $\frac{K}{N_0} > 1$ ，在野外調查植物族群生長，不易測得  $N_0$ ，

故令  $\frac{K}{N_0} = e^a$ ， $a$  為一正值，故  $N = \frac{K}{1 + e^{a-t}}$

在變動環境下，水生植物的族群雖然到達生長最大量，或是巔盛時期，但是受到環境的變動，水生植物會再由巔盛時期再演替到達另一個新的次巔盛時期，兩個巔盛時期生長量的比值：

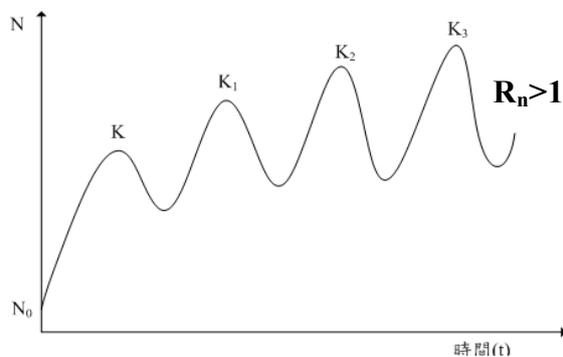
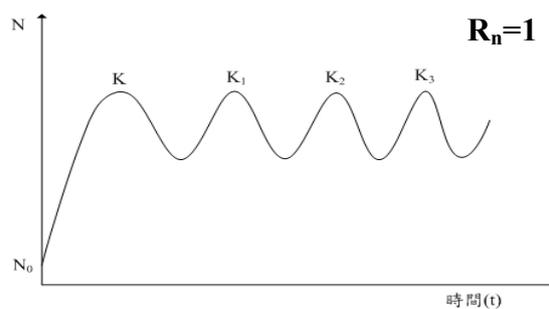
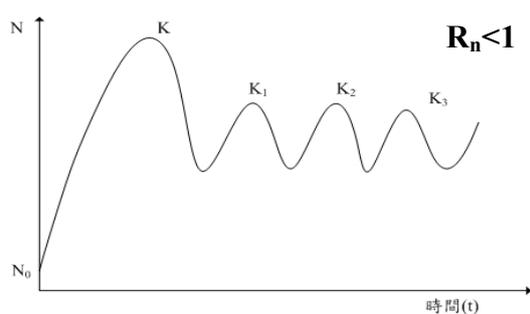
$$R_1 = \frac{K_1}{K}$$

$K_1$  為次巔盛時期水生植物的生長量。由於環境變動的間歇發生

$$R_n = \frac{K_n}{K}$$

$K_n$  為  $n$  次巔盛時期水生植物的生長量， $R_n$  為  $n$  次巔盛時期水生植物的生長比值。

環境變動對於水生植物生長量的影響，有三種狀況，



人工濕地水生植物的管理與維護，需要知道所管理的水生植物是屬於這三種趨勢

的哪一種，若屬於  $R_n < 1$  的型態，表示自然環境對於水生植物生長是逆境(stress)，水生植物在變動後雖然調整到新的顛盛期，但已不復以前之旺盛。

若是屬於  $R_n = 1$  的型態，代表水生植物有高度穩定性(resistance stability)與復原性(resilience stability)。前者代表環境變動後，水生植物的生長量能夠恢復到原來顛盛量，後者代表恢復的時間短。這是生態管理維護人工濕地所要優先考慮的物種。

若是屬於  $R_n > 1$  的型態，表示環境變動愈大，該種水生植物長的愈好，愈能獲得生長的空間，這種水生植物稱為人工濕地生態系統內的「超級物種」(super-organism)，是最具競爭力的物種，一下子就會佔滿所有生長的空間。因為洪水、暴雨都帶不走，人工濕地若有這種物種則需定期清除，以人為介入去輔助大自然無法用環境的變動去減低其族群佔滿的空間，這種人為輔助的生態管理稱為「輔助逆境梯度」(subsidy-stress gradient)。在管理人工濕地水生植物最重要的參考依據是水生植物在自然變動或擾動的變動圖，與其參數  $r$ 、 $K$ 、 $R_n$ ，若缺這些資料，人工濕地的管理較易流於主觀，無法用生態系統概念來管理人工濕地。

根據 2005 年在新海橋人工濕地以一整年在現場持續調查十四種最常長在人工濕地水生植物，並且讓其曝露在 5-6 月的暴雨時期，包括在 5 月 9-15 日，有 415.9mm 的降雨量，與 6 月 13-16 日有 139.3mm 的降雨量，與 7-9 月四次颱風淹水時期，包括 7 月 16-20 日的強烈颱風海棠，最大風速 55 m/sec，日累積雨量 207.5mm；8 月 3-6 日的中度颱風馬莎，最大風速 40m/sec，日累積降雨量 242.5mm；8 月 11-13 日輕度颱風珊瑚，最大風速 25m/sec，日累積降雨量 15.2mm；8 月 30 日-9 月 1 日，強烈颱風泰利，最大風速 53m/sec，日累積降雨量 147.8mm。持續調查其生長的變化，結果以下表示。

表 49 台北縣新海橋人工濕地水生植物對自然變動環境之適應

植物名稱	生長速率 $r$ (1/day)	初期巔盛密度 (株/m <sup>2</sup> )	暴雨期次 巔盛密度 (株/m <sup>2</sup> )	$R_1$	颱風期次 巔盛密度 (株/m <sup>2</sup> )	$R_2$
水龍	1.67	802	156	0.20	115	0.14
覆瓦狀莎草	1.15	831	344	0.41	42	0.05
高野黍	0.60	810	458	0.57	42	0.05
葶薺	0.32	825	1688	2.05	146	0.18
大安水蓑衣	1.10	128	438	3.42	83	0.65
馬藻	1.54	310	21	0.07	0	0.00
斷節莎	0.77	550	229	0.41	0	0.00
過長沙	0.79	896	406	0.45	0	0.00
田字草	1.14	323	188	0.58	208	0.64
水毛花	1.35	1741	1406	0.81	229	0.13
蘆葦	0.74	382	302	0.79	52	0.14
異花莎草	0.84	906	0	0.00	0	0.00
水丁香	1.31	191	313	1.64	0	0.00
香蒲	0.73	168	125	0.74	52	0.31

註 1：R1 為水生植物經過 5~6 月的暴雨期，與 4 月初巔盛時期的植物數量比

2：R2 為水生植物經過 7~9 月的颱風，與 4 月初巔盛時期的植物數量比

3：2005 年新海橋人工濕地年降雨量 3027.8mm

由表 49 可知，台灣人工濕地中常見的水生植物，分株生長最快的是能在水面匍匐前進的水龍，其次是沉水性的馬藻，而後是親水性的挺水植物水毛花、水丁香、大安水蓴衣，這些水生植物在濕地採 r- 選擇(r-selective)的策略快速的生長。相反的，香蒲、蘆葦、荸薺是採 k-選擇(k-selective)生長策略，初期生長較為緩慢，但是充分使用資源才到達顛盛時期。

在暴雨時，水生植物穩定性最高的，依次為大安水蓴衣、荸薺、水丁香、水毛花、蘆葦與香蒲；而初期生長快速的水龍與馬藻，幾乎經不起暴雨對於支莖的物理力打擊。

在颱風洪水更大的擾動下，水生植物的穩定性依次為大安水蓴衣、過長沙、香蒲、荸薺與蘆葦，由此可知這五種水生植物是台灣人工濕地最值得推薦栽種的物種。

#### 4.3.4 水生植物的混種與品種多樣性的管理

人工濕地的管理與維護最困難的部分並非工程的部分，工程結構是屬物質的，容易控制、維修與更換；不易掌握的是生物部分，尤其是植物相，因為植物是人工濕地內食物鏈的基礎與能量的固著，動物相是跟上來的，只要植物相出了問題一如植物過度茂盛，動物相一定會有問題一如蚊蟲的滋生。

植物混種(mixtural cultivation)是人工濕地管理的吊詭，因為根據生態的 Lotka 法則，系統內食物與能量傳遞愈是複雜，外界進入的物質與能量就能有最小的輸出，因此在人工濕地的建造，經常栽種幾十種的水生植物，這種多樣性的植物觀幾乎為普世生態管理所接受。但是，幾十種的植物混生在自然界的濕地，是經過多年演替的結果，並不是一開始就多種同時出現的；開始出現的，是少數的先驅性物種(pioneer species)。

水質淨化型的人工濕地，會輸入高濃度的有機質與營養源，這種狀況對大多數的植物是種逆境，因此只有少數的植物種類能夠生存下來，所以初期栽種的植物會逐漸死亡，只留下少數的優勢物種，如布袋蓮壟斷所能使用的空間。在這個階段往往因為失去景觀，失去多樣性，失去人對水域的使用價值，而被詬病為「雜草叢生」。

所以在一個只能存在少數優勢水生植物的人工濕地，要維持多種的水生植物，去進行水質自然淨化的功能，是人工濕地管理與維護上相當不易的部分。這必須用隔柵方式去限制各種優勢水生植物的生長空間，以保持不同的水深、流況、水質、底床質地，去組成人工濕地內不同的微棲地(micro-habitat)特性，才能達成不同物理因子的區間(zonation)與不同區間的生態漸變區(ecotone)，生態漸變區因為具有生態分區重疊的果效，最易達成水生植物的混合生長，這可以利用不同水生植物的交感(interaction)而達到各種族群的平衡，達到整個人工濕地生物群落的穩定性。

分析不同生物交感作用，最常用的理論是 Lotka-Volterra 公式：

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left( \frac{K_1 - N_1 - \alpha N_2}{K_1} \right)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \left( \frac{K_2 - N_2 - \beta N_1}{K_2} \right)$$

$N_1$ 、 $N_2$  為二物種的生長量， $r_1$ 、 $r_2$  為二物種的生長率， $K_1$ 、 $K_2$  為二物種的巔盛生長量， $\alpha$ 、 $\beta$  為二物種交感係數。 $\alpha$ 、 $\beta$  若為正值代表物種之間競爭(competition)，若為負值表示物種偏利(commensalism)，若為 0(或接近 0)代表物種不具交感，呈中性關係(neutralism)。要聯立解上式，是採 Runge-Kutta 常微分方程數值近似解，給予初始值與時間範圍，求取模擬值與實驗值最小的相差平方和。

在 2006 年，於台灣大學安康農場溫室內進行香蒲、燈心草與過長沙的混種試驗，並分析比較混植生長與單一植物生長對水質淨化的影響，其結果以下表示之。

表 50 水生植物混植與單一種類在水中磷之吸收

混植植物	交感係數	單種磷吸收量 (mg/桶)	混種植物 磷吸收量 (mg/桶)	混種 單種 磷吸收比	單種水中 磷減少量 (mg/桶)	混種水中 磷減少量 (mg/桶)	混種 單種 水中磷減少 比
香蒲	-0.84	14.5			443.0		
燈心草	0.32	28.5	38.0	1.77	505.9	514.8	1.36
香蒲	-0.32	14.5			443.0		
過長沙	-0.07	8.4	21.8	1.90	441.4	507.3	1.81
燈心草	-1.01	28.5			505.9		
過長沙	0.00	8.4	30.0	1.63	441.4	516.2	1.38

註：對照組水中磷的減少量為 362mg/桶

表 51 水生植物混植與單一種類在水中氮之吸收

混植植物	交感係數	單種氮吸收量 (mg/桶)	混種植物 氮吸收量 (mg/桶)	混種 單種 氮吸收比	單種水中 氮減少量 (mg/桶)	混種水中 氮減少量 (mg/桶)	混種 單種 水中氮減少 比
香蒲	-0.84	270.9			6196.5		
燈心草	0.32	424.7	512.9	1.48	6618.7	7238.7	1.50
香蒲	-0.32	270.9			6196.5		
過長沙	-0.07	70.2	338.9	1.99	5519.3	6451.2	1.53
燈心草	-1.01	424.7			6618.7		
過長沙	0.00	70.2	438.6	1.77	5519.3	6732.4	1.50

註：對照組水中氮的減少量為 4747.8mg/桶

由這試驗結果可知

1. 植物混種可以增加植株對磷的吸收率 63~90%，氮的吸收率 48~99%，並且可以促進微生物的活動，進而增加水中磷的分解率 36~81%，水中氮的分解率 50~53%，混種對水質淨化效果顯著。
2. 最好混種的方式是挺水性(如香蒲)與水面匍匐性(如過長沙)。
3. 混種時不同水生植物族群有競爭、偏利或中性，但都能促進水中氮、磷的淨化作用。

#### 4.3.5 水中鹽份濃度的管理與水生植物生長維護的關係

人工濕地內水生植物生長過度茂盛是管理上的問題，需要定期每年清除數次，但是水生植物生長太差，以致人工濕地呈現植株枯死、葉面泛黃、葉尖黑焦、葉緣捲燒等現象，不只有礙觀瞻，也對水質淨化有負面的影響。

人工濕地影響水生植物不易生長的原因有許多，如水流太快或太慢；底質顆粒太粗或太細；底質含水量變化太大；底質有硫化氫生成的毒害；水中還原態硫與鐵產生沈澱，水生植物葉部產生缺鐵症；水中氮/磷 (N/P) 平衡或是碳/氮 (C/N) 平衡失調，以致水生植物呈現缺氮的現象，這大都發生在厭氧作用旺盛的人工濕地中；植物病蟲害；與水中鹽份濃度過高，水生植物滲透壓失去平衡等現象。

這些抑制水生植物生長的外在因子，最常見的現象是鹽份濃度的影響。原因是台灣的河川短促，潮汐上潮的距離遠，建在河濱的人工濕地若是在中、下游段，就容易受到潮汐鹽份的影響，進而鹽化人工濕地，對水生植物造成鹽害。台灣人工濕地中會受到潮汐鹽份影響的場址，如淡水河新海橋人工濕地，淡水河五股表面流人工濕地，台南市灣裡社區人工濕地，台南縣麻豆鎮港尾人工濕地等。為了避免鹽害，使得水生植物的選種與管理更困難。

鹽害對植物生育的影響，最常用的理論是 Mass-Hoffman (1977) 的理論式，Mass-Hoffman 理論是植物對鹽害的反應有一臨界值，過了該臨界值水生植物的相對產量 (relative yield) 等比率降低，其關係式如下：

$$RY = 100 - B (EC - EC_C)$$

RY 為相對產量 (%)， $EC_C$ ：臨界電導度值，B 為減產斜率。 $EC_C$  對挺水性水生植物是飽合土壤水份抽出液的電導度值，根據黃耿亮、張文亮 (1999) 在台灣大學的滲漏計試驗禾本科水稻的  $EC_C$  為 2804  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，B 為 18.55%/1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，即每增加 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，受到鹽害減產 18.55%。

對於浮水性水生植物如布袋蓮 (*Eichhornia crassipes*)，其  $EC_C$  為水中電導度值，根據張文亮 (1979) 在台大的試驗，布袋蓮對水中電導度的反應： $EC_C$  為 2250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，B 為 26.7%/1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，一直到  $EC_C$  為 6000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  布袋蓮死亡。

在台灣，由於相關的研究非常的少，布袋蓮為中度耐鹽的水生植物，在一般的污水中可以生長良好，因此其受到鹽害逆境的限值  $EC_C$  2250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  可作一管理上的限

值。水中電導度若超過 2250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，應考慮人工濕地水生植物栽種與管理鹽害的問題，或栽種較耐鹽份的水生植物，如香蒲與蘆葦。

#### 4.3.6 水生植物輸氧通量的考量

污水處理型人工濕地栽種挺水性水生植物，在減少生化需氧量與化學需氧量項目，最主要的功效來自水生植物，尤其是蘆葦與香蒲，能夠將空氣傳輸到植物的根部，進而藉著擴散作用，氧化周遭的底泥與水域，這將能夠提高水中的溶氧量，促進水域的好氧性，因此挺水性水生植物增加水中的溶氧量以下式表示

$$C \cdot V = mg$$

$C$ ：為水中的溶氧濃度（單位  $\text{mg}/\text{l}$ ）

$V$ ：為水的體積（單位  $\text{m}^3$ ）

$mg$ ：為水的溶氧量（單位  $\text{g}$ ）

由於水生植物釋放溶氧是藉由擴散作用進行，故

$$\frac{dmg}{dt} = \pm DA \frac{dC}{dx}$$

$D$  為氧氣擴散係數（單位  $\text{cm}^2/\text{sec}$ ）。 $A$  為斷面積（單位  $\text{m}^2$ ）， $x$  為平均植物根系長度到土壤表面的距離（單位  $\text{cm}$ ）。若為負號代表溶氧由水生植物擴散到水中，正號代表水中溶氧擴散到根系中，供呼吸作用所需。

上式改寫為

$$\frac{dCV}{dt} = \pm DA \frac{dC}{dx}$$

試驗設計是在新海橋人工濕地中進行，以試驗桶的水體積為定值，故

$$\begin{aligned} \frac{VdC}{dt} &= \pm DA \frac{dC}{dx} \\ &= \pm DA \frac{C - C_0}{L} \end{aligned}$$

$C_0$  為原來水生植物根系中的溶氧，上式可改寫並積分為

$$\int_{C_i}^C \frac{dC}{C - C_0} = \pm \frac{DA}{VL} \int_0^t dt \quad C_i : \text{水中溶氧}$$

$$\ln \frac{C - C_0}{C_i - C_0} = \pm \frac{DA}{VL} t$$

一般植物根系細胞內與細胞間隙的溶氧，主要是來自土壤中氧氣的輸入，但是挺水性水生植物的  $C_0$  值，主要是來自空氣中溶氧到葉氣孔中的細胞質液中，再擴散到植物根部，因此  $C_0$  值近似於飽和溶氧量，由於挺水性水生植物藉著蒸散作用，葉面溫度不因外界環境有太大的變動，以  $20^\circ\text{C}$  為葉面溫度，飽和溶氧為  $9.2 \text{ mg}/\text{l}$ 。

根據 2005 年在台北縣大漢溪新海橋人工濕地的試驗，有種植蘆葦試驗桶的水中溶氧為 C，置於旁邊的空白試驗桶的水中溶氧為 C<sub>i</sub>，C<sub>o</sub> 為 9.2 mg/l，在蘆葦生長期間，現場檢測水中溶氧如下表：

表 52 新海橋人工濕地蘆葦之溶氧傳輸

日期	2/7	2/14	2/21	3/7	3/11	3/21	3/25	3/28	4/7	4/11	5/25
蘆葦株高(cm)	77	83	85	95	100	102	108	114	117	125	188
C <sub>i</sub> (mg/l)	8.9	10.5	10.8	10.3	8.0	8.9	8.9	8.5	4.6	3.0	3.1
C (mg/l)	8.8	7.5	8.7	8.9	6.3	11.3	11.3	10.9	7.6	4.6	5.3
D (cm <sup>2</sup> /day)	0.20	0.01	0.04	0.04	0.08	-0.05	-0.05	-0.04	-0.08	-0.11	-0.10

註：蘆葦種植的初始日期為 1/26

試驗桶面積(A)為 0.14m<sup>2</sup>，水體積(V)為 38 公升，L 為試驗桶平均深度 20cm  
擴散的時間以 1 日計之

由表 52 可知，蘆葦在栽種初期並沒有增加人工濕地的溶氧量，反而是水中的溶氧擴散到蘆葦的根區，以供蘆葦栽種初期根系發育生長呼吸作用所需，而要栽種 54 日（1/26~3/21）後，蘆葦根系生長趨於穩定，方能提供溶氧到水中。

這個試驗提供一個重要的本土性人工濕地管理的資料，即挺水性水生植物如蘆葦要在栽種 54 日後才能發揮促進水質淨化的果效，因此建議驗收人工濕地建造的水質淨化成效，應該在水生植物栽種後至少 54 日後才辦理，不能在水生植物種植之後，即驗證水質淨化的成效。

由於試驗的期間有限，蘆葦對水中的氧氣傳輸是隨著植株愈高，其傳輸的氧氣量愈大，以試驗的最大溶氧差在 4 月 7 日，其擴散的溶氧速率為

$$\frac{(7.6-4.6)\text{mg}/\ell \times 38\ell \times 10^{-3}\text{g}/\text{mg}}{0.14\text{m}^2\text{day}} = 0.81\text{g}/\text{m}^2\text{day}$$

0.81 g/m<sup>2</sup>-day 比較國外的研究 (Brix, 1990) 2.08 g/m<sup>2</sup>-day 是略低些，主要的原因是 Brix 的研究是在 4 月~11 月間的丹麥實驗結果，但是新海橋的試驗是在 2~5 月間的資料，5 月後現場多次暴雨與颱風，影響蘆葦的生長狀況，因而未繼續進行試驗。

因此種植蘆葦每日能增加人工濕地的溶氧量為 0.81 g/m<sup>2</sup>day×104 m<sup>2</sup>/ha×1day= 8.1×10<sup>3</sup> g/ha。根據現場調查，4 月 7 日的蘆葦植株密度為 260 株/m<sup>2</sup>，而新海橋人工濕地的面積為 5.12 公頃，水深 0.26m，入流量 2000 m<sup>3</sup>/day，入流溶氧 1mg/l，若要增加溶氧到 5mg/l，則：

$$\begin{aligned} & (5-1)\text{mg}/\ell \times 10^3\ell/\text{m}^3 \times 2000\text{m}^3/\text{day} \\ & = 8000 \times 10^3\text{mg}/\text{day} = 8000\text{g}/\text{day} \end{aligned}$$

而 5.12 公頃，以 260 株/m<sup>2</sup>的栽種密度所增加的溶氧量為

$$\frac{8.1 \times 10^3 \text{ g/ha} \times 5.12 \text{ ha}}{1 \text{ day}} = 41.472 \times 10^3 \text{ g/day}$$

$$\text{其所種植的開放水域孔隙度為 } 1 - \left( \frac{8000}{41472} \right) = 0.81$$

$$\text{整個人工濕地理想的蘆葦植栽密度為 } 260 \text{ 株/m}^2 \times \left( \frac{8000}{41472} \right) = 50 \text{ 株/m}^2$$

或新海橋人工濕地每公頃有 500,000 株的蘆葦是促進水中溶氧由 1mg/l 到 5mg/l 的最佳數目，這是管理所要維持的蘆葦數目。因此一個人工濕地所需維持水生植物的數目，是依所種水生植物種類、入流量、面積、引水溶氧與處理後所要達到的溶氧量算出來。不過，這並不代表一開始就種 500,000 株/ha，而是以間距 1m 去種蘆葦，或 10,000 株/ha，在三、四個月後，即可達到這數目。

### 4.3.7 水生植物的選取

#### 4.3.7.1 依耐污染而分類

由於人工濕地水生植物栽種，主要是依建造目的來選擇植物的品種，因此在水質淨化型的人工濕地，選種的水生植物需要耐污染，這包括較高濃度的有機質，使水中或底泥呈還原狀態，水中有較高的濃度有遮光的效應，還原狀態經常產生硫化氫的毒害，水中氮/磷 (N/P) 或碳/氮 (C/N) 不均衡導致水生植物呈現缺氮或缺磷的現象等。

在自然界裡，大多數的水生植物能適應乾淨的水域，能適應污染環境的植物不多，如果不明白這一個原理，人工濕地栽種許多種水生植物，仍將因植物不適應水質環境，最後只剩少數幾種耐污染的水生植物存留。這不只是一種經濟上的損失，也是未經仔細評估，即冒然行事的癥候，容易令人詬病。因此在歐美水質淨化人工濕地內水生植物的栽種的種類不多，常是一、二種，其他零星分佈是由周遭進入。

在美國工兵署建造的水質淨化人工濕地所栽種的水生植物種類，主要根據 Kadlec and Wentz (1974) 所建議：

表 53 美國工兵署推薦人工濕地水生植物物種

型態	名稱	性態	註明
挺水性水生植物	花蘭 <i>Butomus umbellatus</i>	多年生	台灣少見 台灣多見，多長在水田、濕地
	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	一年生	台灣多見，能耐旱田與濕地的水份變化
	早苗蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>	一年生	
	狹葉香蒲 <i>Typha latifolia</i>	多年生	台灣少見
	香蒲 <i>Typha angustifolia</i>	多年生	台灣多見
	賓州蓼 <i>Polygonum pensylvanicum</i>	一年生	台灣少見
	黑三稜科 <i>Sparganium eurycarpum</i>	多年生	台灣少見，台灣常見的近似種為東亞黑三稜 ( <i>Sparganium fallax</i> Graebner)
	戟蘭 <i>Sagittaria latifolia</i>	多年生	台灣少見
	美國慈姑 <i>Sagittaria sagittifolia</i>	多年生	台灣少見，台灣常見近似種為中國慈姑 ( <i>Sagittaria sinensis</i> ) 與日本慈姑 ( <i>Sagittaria flore-pleno</i> )

型態	名稱	性態	註明
浮水性水生植物	浮萍 <i>Lemna minor</i>	一年生	台灣常見，也是重要水禽類雁鴨食物
	大萍 <i>Spirodela polyrhiza</i>	一年生	台灣過去常見，目前在水田罕見
沉水性水生植物	瀉澤科 <i>Alisma plantage-aquatica</i>	多年生	台灣少見，台灣常見的近似種為澤瀉 ( <i>Alisma canaliculatum</i> A. Braun & Bouche)
	金魚藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>	多年生	台灣過去常見，現在野外少見野生族群
	水草類 <i>Elodea</i> spp.	多年生	多種完全沉水性植物，台灣常見在優養水域
	異蕊花屬 <i>Heteranthera dubia</i>	—	屬兩久花科(Pontederiaceae)，台灣少有
	狐尾藻 <i>Myriophyllum exalbescens</i>	多年生	台灣少見，常見的類似種類為粉綠狐尾藻
	狐尾藻 <i>Myriophyllum verticillatum</i>	多年生	( <i>Myriophyllum aquaticum</i> )等五種，優養水域常見
	小茨藻 <i>Najas minor</i>	一年生	台灣常見，多生長在水田、溝渠
	萍蓬草 <i>Nuphar lutea</i>	多年生	台灣少見，另有台灣萍蓬草( <i>Nuphar shimaddai</i> Hayata)
	馬藻 <i>Potamogeton crispus</i>	多年生	台灣常見，生長在略有水流水域，許多水生昆蟲，魚類在其密生莖葉中
	龍鬚草 <i>Potamogeton pectinatus</i>	多年生	台灣常見，生長在灌溉水道中
	鹿角苔 <i>Riccia fluitans</i>	—	台灣少見
	鹿角苔 <i>Riccicarpus natans</i>	—	台灣少見
	狸藻 <i>Utricularia vulgaris</i>	—	台灣常見，具食蟲性
水驚 <i>Vallisneria americana</i>	多年生	台灣常見，在優養水中具優勢性	
角果藻 <i>Zannichellia palustris</i>	—	台灣常見，具耐鹽性	

資料來源：Kadlec, J.A., and W.A. Wentz. 1974. State-of-the-art survey and evaluation of marsh plant establishment techniques: induced and nature. Vol. 1: Report of research. U.S. Army Corps Eng. Rep. D-74-9. U.S.A.

由表 53 的資料可知，即使是美國工兵署所推薦的物種，在台灣，仍不合適，許多在美國優勢性的物種，在台灣並不存在，或是不具優勢，這是地理、氣候因素影響水生植物的分佈所致。而且該資料是在美國的現地調查，在人工濕地較常出現的水生植物，對於在不同處理 BOD 或氮、磷，或增加溶氧等不同的重點項目，其合適性仍屬籠統，在台灣採用上，需本土性的試驗作驗證。

不過表七資料，仍有幾個重要的方向，可供台灣在水生植物的選擇上參考：

- (1).選擇水生植物的性態以挺水性水生植物與沉水性水生植物為主，浮水性水生植物只有浮萍與大萍，將可避免浮水性水生植物過度蔓延，日後不易管理。
- (2).挺水性與沉水性水生植物，互相搭配栽種。
- (3).藉由強烈地下莖繁殖的物種，如香蒲等。

有趣的是，美國工兵署所建議的水生植物，有些也在台灣人工濕地栽種，如慈姑、大萍、紅辣蓼、粉綠狐尾藻、香蒲等。

#### 4.3.7.2 依曝氣性與生化需氧量的去除而分類

水生植物對於污水的適應力是選種的要件，另一需要考慮的是水生植物對於水質淨化—尤其 BOD 項，更是水生植物在人工濕地空間分佈上考慮的依據，尤其污水進入人工濕地後，水流的方向是污染質變化的梯度。因此，哪些植物要種在人工濕地的

水流入口處？哪些植物要種在高 BOD 的地方，以增加 BOD 的去除效率？哪些植物要種在能產生低溶氧的環境，以增加脫氮作用的果效？大都依照水生植物種植者的經驗所決定。

這些民間種植者的經驗，在調查台灣各人工濕地時經常可以看到，是重覆出現在某些水質特定區，其分佈如下表所示：

表 54 台灣人工濕地不同水質特定區域經常出現的水生植物

人工濕地元件	功能	水生植物
沈澱池	增加入流顆粒的沈降	布袋蓮、大萍、長梗滿天星、水竹葉、野薑花、綠羽毛藻、箭葉慈姑、稗、野空心菜、光冠水菊
厭氧池 (淺水)	脫氮作用	布袋蓮、埃及莎草、紅辣蓼、單葉鹼草、水毛茛、巴拉草、長梗滿天星、野芋、異莖闊包菊
好氧池 (深水)	促進生化需氧量的分解	香蒲、艾克草、茭白筍、粉綠狐尾藻、水生黍、蘆葦、輪傘草、菖蒲
好氧池 (淺水)	促進生化需氧量的分解	水丁香、石龍芮、無翅莎草、稗、燈心草
觀賞池	增加放流前水域觀賞性	燈心草、菱角、野菱、荷花、萍蓬草、莞草

#### 4.3.7.3 人工濕地水生植物的栽種—台灣民間的種植經驗

台灣水生植物種類眾多(約三百多種)、生長旺盛，長期以來水生植物的栽種一直受到民間的重視，公園、學校景觀都常種水生植物，家庭、公司的景觀也偶用水生植物陪襯。1980 年代開始河溪的綠美化增加水生植物的市場空間，1990 年代開始稀有水生植物保育，更開拓栽種者跨入生態保育的通道，在 2000 年代初期，台灣開始發展人工濕地工程的建造，最先進入這個領域的，果然是水生植物與景觀的營建者。

這些民間水生植物的保育與栽培者，大多是草根性強，耐曬、能吃苦的自修養成者，這些人可能不懂 BOD<sub>5</sub>、DO、生物分解率、污染負荷度等名詞，但是在不同水域或水質環境，種什麼水生植物自有一套理論，這些經驗式的理論，值得思考與學習。

在民間水生植物專家的經驗裡，有些是符合近代科學的理論，這些民間的水生植物種植經驗如下：

- (1).要淨化水中的氮肥(氮氮)，要種蓼科的水生植物。因此台灣的人工濕地經常出絨毛蓼、紅辣蓼。中國早期就將葉含辛辣味的水生植物稱為「蓼」，這種辛辣味常是含硫的蛋白質，蛋白質內多含氮、硫。所以蓼科植物可能促進脫氮作用。
- (2).要減少水中藻類的滋長，要種浮水性與水面匍匐性的水生植物。因此台灣的人工濕地常出現浮水性的布袋蓮、大萍、青萍與水面匍匐性的過長沙、黃花水龍、空心菜、

長梗滿天星、水竹葉等。這些水生植物在與藻類的競爭上，理論上由於浮水或在水面上匍匐，能先在陽光的攫取上佔優勢，是能減少藻類的過度繁殖，與有礙觀瞻，也能減低水中溶氧的劇變。

#### 4.3.8 現場探勘—台灣人工濕地常見水生植物的生態特性與淨水能力

在人工濕地工程的發展上，植物的選擇與栽種，種植的位置、水深或土壤濕度的配合，種植的時期、方式、間距與密度、施肥、蟲害的管理等是一個專門的學問。而人工濕地的建造是否屬於生態營造，所發揮的功能是否讓自然機制參與，所使用的材料是否讓天然取代混凝土，主要的關鍵之一在於植物與工程的搭配，這種學問稱為「綠色土木工程學」(green civil engineering)。

以人工濕地為探討的對象，不同的功能選取不同的植物：滯洪型或暴雨型人工濕地、景觀型人工濕地、污水淨化型人工濕地、生態保育型人工濕地、生態池教育型人工濕地、邊坡防沖刷型人工濕地、感潮型人工濕地，所種的植物都不一樣。

在天然狀態不同條件下，產生不同功能的地域性，其植物也不相同，不同水深、底質、鹽份、流速、日照、營養份等所長的植物當然不同。這是生態學的法則，不同的植物有其自然適應的棲地環境，如果人為栽種不得其所，濕地的建造反而成為加速植物死亡的地方，這不只是工程經費的損失，也有違生態工程師維護大自然的基本倫理。

不同型態的人工濕地選種適合植物的觀念，需要有植物生態學、植物生理學、營養學、植物環境力學、植物環境工程等理論為基礎，也需要有現場實種的經驗，與長期野外或場址探勘的觀察，否則學術研究永遠趕不上工程的速度，更難以符合社會需求的迫切。為此，需要有經驗的專家，選出推薦性的植物物種，以供人工濕地營造綠色土木工程的參考依據。

近年由於多次在水質淨化型人工濕地的探勘，也參與台大安康農場人工濕地、台北水磨坑溪人工濕地、坪林北勢溪人工濕地、貴子坑溪礫間接觸等實作，並在台北新海橋人工濕地進行盆栽試驗，與荒野水生植物栽種的專家數次野外探勘，將這些經驗與研究，比照國外的研究文獻對照，編寫「台灣水質淨化人工濕地常見水生植物的生態特性與處理功效」，以供參考。

#### 4.3.9 台灣水質淨化人工濕地常見水生植物的生態特性與處理功效

##### 4.3.9.1 菖蒲

菖蒲 (*Acorus calamus*) 是多年生水生植物，其根莖生長旺盛，經常在底泥表面橫生，行無性繁殖。菖蒲是國外人工濕地推薦的物種，尤其在都市污水淨化型人工濕地，暴雨滯洪池，甚至是都市污泥淨化池都可種植，其生命力非常的強。

菖蒲經常與香蒲一起生長，在陽光強的地方長香蒲，在陽光較弱的地方長菖蒲，

所以菖蒲也被視為耐蔭性的水生植物。

非常奇怪的是，許多人認為，食用在底泥快速生長的根莖可以促進性能力，不僅不少日本人有如此看法，北美洲的印第安人也如此。早期印第安人部落遷移時，常在水邊種菖蒲，幾年後，他們可以看菖蒲生長地方，邊走邊吃菖蒲的根，又可以回到家鄉。如果水生植物有這種特效，將不用擔心種了以後，會有生長過密，乏人採收問題。



照片 1、菖蒲（照片攝於台北水磨坑人工濕地，水深約 0.7m）

#### 4.3.9.2 芋頭

芋頭 (*Colocasia calamus*) 是水生植物中含蛋白質最高的水生植物，因此長期以來被視為能去除氮、磷的水生植物，尤其是磷，很少水生植物具有此主要功能。芋頭的葉子在水生植物中較大，具觀賞性，增加人工濕地的景觀果效。在台灣的人工濕地，常種芋頭與蓮花，前者給愛觀賞葉的人看，後者給愛看花的人看。

芋頭需要長在「微酸性有機土」中，而且水深很少超過 0.3m，必須生長在潮濕、陽光較少的環境，不過陽光充足也可生長。其長在淺水處另一功效在抑制藻類過多的生長。芋頭的莖葉上所附著的生物膜 (biofilm) 很容易用肉眼看出，因此常被視為人工濕地處理成效的生物指標。芋頭也耐厭氧的環境。

芋頭的莖可吃，葉可供為置放水果保水防熱的鋪底，人工濕地種芋頭，可以促進人採收的欲望。



照片 2、芋頭（攝於台北水磨坑溪人工濕地，水深較淺處，當地底泥為坩質壤土）

#### 4.3.9.3 異花莎草

異花莎草 (*Cyperus difformis*) 也是水質淨化型人工濕地維護與管理的指標性物種。其生態特性剛好與覆瓦狀莎草相反，覆瓦狀莎草生長在水域多變動的狀況，異花莎草卻只能生長在水域穩定的狀況。如果人工濕地水位常變動，或有暴雨，或有淹水，異花莎草就不見了，無法生存在有水沖過的地方。因此，在人工濕地的選址上，若現場有異花莎草，代表環境穩定，是容易營建人工濕地的所在。長有異花莎草的人工濕地，代表維護狀況穩定。所以勘查水生植物，可以知道人工濕地的許多水文條件。



照片 3、異花莎草(攝於台北新海橋人工濕地)

#### 4.3.9.4 覆瓦狀莎草

覆瓦狀莎草 (*Cyperus imbricatus*) 是普世性人工濕地維護管理的指標性物種，地下莖粗，因此可耐暴雨；種子多，常吸引水禽前來覓食與作巢；莖部呈三角形，能耐風吹水淹；所以人工濕地在正常狀態下，幾乎都會長覆瓦狀莎草。覆瓦狀莎草若消逝，表示該人工濕地已長期乾涸。在選定場址時，有覆瓦狀莎草生長的地方，代表未來建造人工濕地其土壤保水性良好，水文風險較低，而且日後易成為野生動物前來的棲地。



照片 4、覆瓦狀莎草  
(攝於台北新海橋人工濕地)

#### 2.3.9.5 碎米莎草

沒有一種水生植物會無緣無故的長在人工濕地裡，每一株水生植物都有生長在人工濕地的緣由，認識這些緣由是營建與維護人工濕地的線索。碎米莎草 (*Cyperus iria*) 是一種生物指標，表示是由早期的水稻田、農田改建為人工濕地的遺跡，雖然昔日的農田已經改建為人工濕地，碎米莎草仍然經常長出，宣告這是它們一度生長的地方，所以碎米莎草是農業區與濕地之間的分界者。碎米莎草的根能與真菌共生，互成根部真菌共生 (myconrhiza)，促進對營養份的吸收。種子多，經常混在水稻中一起發芽生長，是農田改建人工濕地邊緣常見一年生的挺水性水生植物。



照片 5、碎米莎草 (攝於台北關渡人工濕地)

#### 4.3.9.6 毛軸莎草

毛軸莎草 (*Cyperus pilosus*) 是台灣河溪邊常見的多年生水生植物，分佈由高山溪流至河口，低維護，而且能耐水位變動。



照片 6、毛軸莎草 (攝於台北新海橋人工濕地)

#### 4.3.9.7 假香附子

假香附子 (*Cyperus tuberosus*) 適應潮濕、肥沃的土壤，因此非常適合生長在水質淨化型的人工濕地。其莖桿細，地下莖粗，所以在變動的環境中，極易復生，幾乎栽種後每年都會生長，容易維護。



照片 7、假香附子  
(攝於台北新海橋人工濕地)

#### 4.3.9.8 稗

稗 (*Echinochloa crus-galli*) 是人工濕地水緣邊與近岸常見的水生植物。由於稗沒有旺盛的根莖，所以主要靠水流來傳播種子，種子適合在潮濕肥沃的土壤發芽生長，因此適合環境常變動的溪濱人工濕地。其種子的發芽率高，即使未發芽的，在底泥中十年以上仍有發芽的機會，因此其復生性高。稗的種子多，常吸引野鳥(陸鳥與水鳥)前來覓食，因此有助人工濕地的生態營造。稗能與其他水生植物混生，因此很少形成惟一強勢性的物種。一般適合生長在濕地水緣 0~10cm 深的水域，超過 10cm 的水深，日照不足，將抑制種子發芽的機會。禾本科植物與莎草科植物是人工濕地常見的挺水性水生植物。



照片 8、稗 (攝於台大安康人工濕地)

#### 4.3.9.9 鱧腸

鱧腸 (*Eclipta prostrata*) 為一年生的水生植物，一般是人工濕地建造後，底泥逐漸黏質化、透水性低，才會出現。在人工濕地剛建造時，底部粗質性時，喜愛生長在排水性差、有機質高的鱧腸是不太會出現。

鱧腸可以長在濕地周邊的旱地與水緣處，由於一年四季都開花，是人工濕地生態

性營建的物種。長期以來，無論國內外，對於水生植物的生態特性研究不多，知識也不多。民間業者知道水質淨化型人工濕地適合種鱧腸，是因為常看到這種植物生長於污染、緩流的水域中。



照片 9、鱧腸（攝於台北關渡人工濕地）

#### 4.3.9.10 布袋蓮

布袋蓮 (*Eichhornia crassipes*) 是世界上最著名的水生植物之一，用在水質淨化型的人工濕地一直頗具爭議。支持的一方，認為布袋蓮能迅速的在污水中生長，其生長速率一年約可由 1 棵增加到 60,000 棵，其根系上附生許多藻類與細菌，能夠淨化水中的 BOD，根系上的纖毛能夠吸附水中的 SS，且減緩水面流速、增加 SS 沉降；其生長快速能夠迅速吸收水中的氮，甚至是重金屬。只要每年冬天，趁布袋蓮生長受抑制時，移除布袋蓮，幾乎就相當於移除水中的 BOD、SS 與 N。

反對的一方，認為布袋蓮會迅速佔滿水面，成為人工濕地惟一優勢的族群，不利多樣生物增加食物鏈的能量與營養份的傳遞，以去除污染。布袋蓮生長過密，將造成水呈厭氧，其蒸發散量超過自由水面蒸發量，若在供水不足的狀況，反而造成污染的濃縮。洪水時將布袋蓮沖走，可能增加周遭水域的問題，而且布袋蓮植株 95% 以上都是水，撈取不易。

正反兩方的共識是：在使用布袋蓮時必須控制其蔓延，因此人工濕地需用數個單元的水池，使布袋蓮不會佔滿整個水域。而且不同單元有平行處理系統 (Parallel Treatment Systems)，即可定期放乾一個單元，進行布袋蓮植株移除，另一單位繼續處理污水。此外，也需定期監測蚊蟲、臭味，以免布袋蓮生長過密，影響環境衛生。若無人工濕地的操作與維護，不要輕易引進布袋蓮，否則「引進容易移除難」。



照片 10、布袋蓮  
(攝於新竹頭前溪人工濕地)

#### 4.3.9.11 水驚

水驚 (*Hydrocharis dubia*) 曾是台灣瀕危的水生植物，但是如今在人工濕地卻處處可見。因此水生植物瀕危是原來棲地的破壞，而在新建的人工濕地找到新的生長區域。在歐美的人工濕地建造經常栽種水驚為除氮的物種，主要的原因是水驚的根系茂密，而且有許多藻類附生，吸引水生昆蟲前往覓食，秧雞類水禽也前往攝食昆蟲與藻類，水驚的根區，自成一個小型的水域系統，有個完整的食物鏈，進行水中營養份與有機質的分解。惟水驚背後浮囊，在溪濱風大的地方，易在水面漂浮，需有固定生長架框，否則日後不易管理。



照片 11、水驚 (攝於台大生態池)

#### 4.3.9.12 大安水蓴衣

大安水蓴衣 (*Hygrophila pogonocalyx*) 是台灣非常強勢性、耐污染的人工濕地水生植物，由於莖質木質化，因此能耐暴雨與洪水沖刷，其在變動環境中的穩定性高，因此幾乎所有人工濕地都有大安水蓴衣，而且多年生，不具休眠期，二、三年後，常成為濕地內的優勢族群。其生長茂密的地方，容易產生顆粒沈降。

大安水蓴衣一度是台灣瀕危性水生植物，只生長在台中少數水域中，後來四處被人移植，尤其在人工濕地，本來具有生物保育的功能，結果大安水蓴衣生長旺盛，反

而成為許多人工濕地的強勢物種。



照片 12、大安水蓼  
(攝於台北關渡人工濕地)

#### 4.3.9.13 空心菜

空心菜 (*Ipomoea aquatica*) 為多年生水生植物，早期生長在水邊，花朵同「牽牛花」，而有「沼澤牽牛花」(*swamp morning glory*) 之稱，後來種植在農地成為有名的蔬菜，但是原本是耐濕地的物種。空心菜一般長在水溫  $>24^{\circ}\text{C}$  的水中，在氮、磷肥沃的土壤中生長快速，一天生長速度可達 10 cm，一直長到 270 cm 長。其生長的族群簇密，在含黏土較高的地方，其形成的族群可以抑制水面的藻類，甚至能夠取代水龍等物種。在台灣的人工濕地常見空心菜旺盛生長，且有附近民眾採收，但是空心菜有高度累積 Hg、Cd、Pb 的能力，在重金屬的污水中，不宜取食其中的空心菜。



照片 13、空心菜 (攝於台南灣裡人工濕地)

#### 4.3.9.14 燈心草

燈心草 (*Juncus effusus*) 原本是普世溫帶地區，與山區沼澤地常見的水生植物，為多年生，經常分枝密集生長。由於燈心草的根系上，常與真菌共生，真菌附著在根系，增加與土壤接觸的表面積，促進對磷的吸收。因此，燈心草長期被引用為山區非點源污染—磷的截留者，燈心草生長的草道經常引用在土石流區或森林復育區。燈心

草也是人工濕地水質淨化的推薦物種，而且在磷的吸收與移除上，具有競爭性，不易被其他的物種所取代。



照片 14、燈心草（攝於台大安康試驗農場）

#### 4.3.9.15 李氏禾

李氏禾 (*Leersia hexandra*) 最具特色的地方，是普世性浮島 (floating island) 構成的主要物種，因此能成為許多小魚的孵育所，增加人工濕地食物鏈的長度，有利營養源的去處。其生長起初是在人工濕地的邊緣，而後藉著走莖，伸出水面，繼續延伸繁殖，甚至交錯生長，形成在水面高度浮力的浮島。浮島的植莖、根系吸引許多藻類附生，有助水質淨化。

李氏禾耐污力強，特別能吸收水與底泥中的 Cd，累積在根區。而且能耐變動之環境，其種子多，能吸引水鳥覓食。不過李氏禾生長過多，造成人工濕地陸域化，尤其在夏季生長旺盛，這是四、五月人工濕地需要進行除草管理的主要原因。



照片 15、李氏禾（攝於台北水磨坑溪人工濕地）

#### 4.3.9.16 青萍

青萍 (*Lemna aequinoctialis*) 為浮萍科的植物，故一般又稱為浮萍，是多年生浮水性植物。在 1980 年代，廣泛用在人工濕地，以幫助水中 BOD、N 與 SS 的移除，而且非常有效地抑制水中藻類過多的繁殖，間接減低水中 DO、pH 與鹼度在日夜之間劇

烈的變化，所以浮萍不僅可以幫助淨化水質，而且可以穩定 pH。這對於人工濕地的食物鏈有很大的幫助，免得魚類在 DO 與 pH 的劇變中死亡。因此，國外在水質淨化的人工濕地，於 1980 年以前多採布袋蓮，在 1980 年以後多採用浮萍。

台灣目前仍多用布袋蓮，主要的原因是浮萍在合適的環境中，一年可以繁殖 10-20 代，繁殖速率快到每 4-5 日就可以覆滿水面，所以需要每星期進行打撈，增加人工的維護費用，不過有風的地方，容易將浮萍吹到岸邊堆疊，便於打撈。

浮萍比布袋蓮耐低溫，一般在 7°C 以上，浮萍仍有代謝生長功能，所以在台灣的冬天，仍可發揮淨水功能。浮萍可供魚類、水鳥與螺類直接食用，比布袋蓮更有用途。



照片 16、青萍（攝於台北新海橋人工濕地）

#### 4.3.9.17 水丁香

水丁香 (*Ludwigia octovalvis*) 為台灣人工濕地最常見的水生植物。由於種子發芽快速。只要是潮濕的土壤就能生長，所以在歐美是人工濕地建造初期經常推薦的撒種子的種類，能夠保護施工時期表土的裸露。

水丁香經常長在濕地的邊緣與旱地的緩衝帶，被稱為「水緣草類」(marginal herbs)，能夠在人工濕地與周邊旱地之間，形成一個半乾半濕的區域，成為水域與旱地之間的生態通道，因此在人工濕地的建造上具有正面的果效。

在人工濕地有水丁香生長的地方，代表有水淹過，或是在水緣之地。水丁香非常耐暴雨，幾乎能在大雨期中持續增長。由於種子能靠水流傳播，只要水丁香生長的地方，附近就會長出水丁香。



照片 17、水丁香（攝於台北新海橋人工濕地）

#### 4.3.9.18 台灣水龍

台灣水龍 (*Ludwigia taiwanensis*) 為台灣水質淨化人工濕地最常見的水生植物之一，為多年生，莖部具有浮水囊，使莖部具有浮水能力，能夠在水面上匍匐，延伸長度達 5 公尺。其植株茂密，所以經常被栽種為水面的遮光，以防藻類滋生。台灣水龍的浮水囊，是呼吸根，因此促進附生性微生物的吸附，間接淨化水質。台灣水龍只能長在穩定環境中，在河濱濕地很容易被水流沖走。

台灣水龍是少數能在冬末春初快速生長的水生植物，夏天受到其他水生植物的競爭與蟲害，生長分佈反而減少。



照片 18、台灣水龍（攝於台北新海橋人工濕地）

#### 4.3.9.19 田字草

田字草 (*Marsilea minuta*) 是蕨類，以孢子來繁殖，由於能夠生長淡水與鹽份水中，底土無論是砂質、黏質均能生長，因此在台灣人工濕地建造初期常被栽種。其莖、根較弱，不適用於水位變動的人工濕地，因此在第二年就被其他物種所取代。田字草的莖

雖然柔細，但是在人工濕地處於颱風的影響下，其族群的復生性高。在黏質土的人工濕地，田字草的生長較具優勢，因此在人工濕地建造初期，底質土壤仍較粗質時不宜栽種田字草。



照片 19、田字草（攝於台北新海橋人工濕地）

#### 4.3.9.20 水竹葉

水竹葉 (*Murdannia beisak*) 是鴨跖草科一年生的水生植物，其葉窄細，其莖橫長，狀似橫長的竹葉故得名水竹葉。水竹葉經常長在略有流速的水邊，其根莖以垂流流速的方向，長向水面，由於根莖具有彈性，所以有穩定水流的功效。在台灣的人工濕地，水竹葉經常長在入流口，或是不同處理單元的連通水管排出口，能夠減少水流的沖刷，但是生長太密，反而會造成淤塞。

值得特別注意的是，水竹葉能快速的長在礫間處理的石頭表面上，以橫生的方式，快速地搶佔空間。因此礫間處理的石床表面即使不種植，水竹葉依然生長，證明「大自然不留白」，不會讓一個有水，有肥份的地方，空下不長植物。水竹葉的這種生長方式，顯示過去人為在礫間處理表面種植許多水生植物，是可以不用如此種植，省下許多的費用。



照片 20、水竹葉（照片攝於台北關渡貴仔坑溪人工濕地，在建造後一年半水竹葉生長茂盛於礫石床上，人工清除後，水竹葉還是賴著不走）

#### 4.3.9.21 粉綠狐尾藻

粉綠狐尾藻 (*Myriophyllum aquaticum*) 原產於巴西亞瑪遜河，二十世紀初期傳播到世界各淡水域中，尤其適應優氧化、高溫、日照充足的環境，為多年生沉水性植物，但挺水葉可伸出水面，沈水葉較為稀疏，對於水流的阻礙性小，挺水葉簇密，提供水生昆蟲的棲息，是人工濕地栽種最深（可到 100cm）的水生植物，在比 100cm 更深之處，就不適合種其他的水生植物。不過依現場的觀察，粉綠狐尾藻是向水淺之處生長，並非長向深處，所以開始應在水深之處種植。

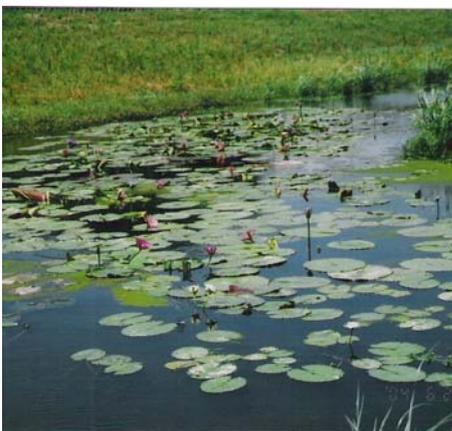


照片 21、粉綠狐尾藻  
(攝於台北新海橋人工濕地)

#### 4.3.9.22 蓮花

蓮花 (*Nelumbo nucifesa*)，或稱荷花，是所有水生植物中花朵種類最豐的，為了增加人工濕地的景觀性，蓮花是最常種的物種，蓮花的根系只適合壤土或黏質土，因此在粗質地的人工濕地不容易一開始就有蓮花生長，常為了以蓮花製造景觀果效，而在水中放置盆子栽種蓮花。

蓮花原產於埃及尼羅河，後來才分佈各處，其花朵顏色有白、粉紅、黃等，非常美麗。蓮花適合生長在開放的水域，有充足的陽光，沒有其他挺水性植物遮蔭之處，而且水深在 30cm~250cm 都可以長，為多年生植物。以根莖繁殖，種子（蓮子）吸引水鳥，是容易管理的水生植物，蓮花的需肥量高，約為一般水稻生長氮量的 5~7 倍，這種需求反而適合生長在人工濕地。



照片 22、蓮花 (攝於彰化南勢社區人工濕地)

#### 4.3.9.23 荇菜

浮葉型的荇菜 (*Nymphoides coreana* (Lev.) Hara)，莖葉上的附生性藻類成為水質淨化的地方。



照片 23、浮葉型的荇菜  
(攝於台北新海橋人工濕地)

#### 4.3.9.24 圓葉節節菜

圓葉節節菜 (*Rotala rotundifolia*) 為人工濕地營建水質指標式的挺水性水生植物，其葉子的顏色受水中的濁度影響：在日照強、水中濁度低的水域，葉子的顏色轉紅；日照不足，水中濁度高，或生長密集的地方，葉子的顏色轉綠。若水中濁度更高，葉子的顏色轉黑。

由於花為美麗、鮮紅的穗狀花序，種植圓葉節節菜可以增加人工濕地的景觀性，其在水中匍匐傳播，因此能夠生長在略有水流的地方，種在人工濕地出水口或不同處理單元水路連接處為宜。要顯示人工濕地兼具污水淨化與景觀之美，可種圓葉節節菜。



照片 24、圓葉節節菜  
(攝於台北縣新海橋人工濕地)

#### 4.3.9.25 田蔥

田蔥 (*Philydrum lanuginosum*) 是台灣稀有性水生植物，也是世界性的水生植物

保育種。很少能看到野生的田蔥，但是在水質淨化型的人工濕地有時會看到這種稀有性植物。田蔥必須生長在豐富有機土中，而且不同季節要乾有時、濕有時，周圍還不能有強勢性的香蒲、蘆葦。因此，人工濕地要種植保育性物種，需要更仔細的維護與管理。



照片 25、田蔥（攝於台北關渡人工濕地）

#### 4.3.9.26 蘆葦

蘆葦 (*Phragmites australis*) 是普世性人工濕地最常種的多年生水生植物，其生長非常旺盛，是水域最高初級生產的物種之一，主要藉由地下根莖行無性繁殖，其生長密度可達 200 株/m<sup>2</sup> 以上，是在變動的環境中極為穩定的族群，其根莖深達 3m 以上，耐洪水沖刷，其莖部木質化，可以耐暴雨，其葉莖部可以輸氧，可以增加底泥曝氣性，這是蘆葦可以減低水中 BOD 主要的原因。

蘆葦的生命力旺盛，可以耐鹽、耐鹼、耐酸、耐厭氧、耐高氮量，對於底土砂質土、坩質土或黏質土都可以生長。而且能夠吸引野生動物前往棲息，部份鳥類覓食與鼠類作巢，因此廣被人工濕地所栽種。

但是蘆葦無法適應超過 50cm 的水深，所以人工濕地部份水域深度需高於 50cm 以上，以免整個水域被蘆葦所佔，增加維護的問題。建於砂灘上的人工濕地，由於擔心滲量大，而鋪防漏層；若栽種蘆葦，很容易穿透防漏層，造成引水量的增加，因此砂質地的人工濕地種淺根的香蒲比蘆葦更好，惟黏質性高的人工濕地，方適合種植蘆葦。

蘆葦過度密集，易產生水質厭氧，使 Fe(III) 還原成 Fe(II)，釋放所結合的磷，因此人工濕地蘆葦生長過密，會產生排水中磷增加的現象。值得注意的是，台灣一般民眾對於蘆葦的印象不佳，不認為具有景觀性，所以人工濕地若需種植較多蘆葦淨化水質，最好場址遠離民眾一些（至少 400m 之外）。



照片 26、蘆葦（攝於台北關渡濕地）

#### 4.3.9.27 翼莖闊苞菊

翼莖闊苞菊 (*pluchea sagittalis*) 為非常獨特的濕地水生植物，本來是南美土著的藥草，抗發炎用。後來散佈到世界，為多年生植物，能耐高鹽份的水域環境，而且莖部具木質化，在變動的環境中能夠生長，繁殖力強，所以只要有種子散佈到，就能長期在該處生長，需要充足的陽光才具有競爭的優勢性。



照片 27、翼莖闊苞菊  
（攝於台北水磨坑人工濕地，正值 5 月開花期）

#### 4.3.9.28 紅蓼

紅蓼 (*Polygonum orientale*) 為台灣人工濕地常見的水生植物，大都長在濕地水域的邊緣，為一年生水生植物，能夠忍受水域環境的變動與各種水質。紅蓼被視為「聰明的草種」(smart weed)，因為其根系會分泌化學物質，抑制其他水生植物的種子發芽，所以在人工濕地能擔任抑制他種水生植物生長過密的功能，值得特別推薦。



照片 28、紅蓼  
(攝於台北新海橋人工濕地)

#### 4.3.9.29 水毛花

台灣人工濕地強勢性物種水毛花 (*Schoenoplectus mucronatus* subsp. *Robustus*)，能夠忍受淹水以及潮濕與乾燥的變動，因此大都生長在人工濕地的周邊，在水位變動下，皆能生長，但是根系較淺，不耐洪水，因此適合緩流水域，不適合快流擾動灘地栽種。



照片 29、水毛花  
(攝於台大安康人工濕地)

#### 4.3.9.30 莞草

莞草 (*schoenoplectus validus*) 為莎草科，在人工濕地具有其他水生植物較不具備的一種功能，使莞草成為水質淨化人工濕地的生物指標。莞草只能長在好氧的底泥中，因此水質厭氧化致使底泥厭氧，將使莞草無法生長，所以在人工濕地看到莞草生長的水域或處理單元，代表該水域好氧，是 BOD 分解較為旺盛的所在。

此外莞草適生長在粗質底泥中，因此是建造人工濕地時的先驅物種，以後受到懸

浮顆粒淤積的影響，底泥質地變細，後期就不適合莞草。莞草適合生長在淺水域、靜水，其種子能吸引鳥類前來覓食。



照片 30、莞草  
(攝於台北新海橋人工濕地最後排放池，該地溶氧 8~9mg/l)

#### 4.3.9.31 香蒲

香蒲 (*Typha orientalis*) 是普世性水質淨化人工濕地最常推薦的水生植物，因為香蒲是世界上單位面積有最快與最高產量的植物之一，能夠自空氣傳輸氧氣到水與底泥中，能夠耐鹽份、耐酸、耐鹼，能夠生長在各種質地的土壤中，能夠吸引野生動物前來棲息，為台灣人工濕地常見的挺水性水生植物，能夠生長在緩流的水域中，其繁殖可藉種子，或在底土匍匐，分別進行有性與無性繁殖。香蒲也具抗蟲、抗病性，是世界上生命力最強的生物之一。但是很特別的是，台灣許多人不喜歡這種生命力強、長相卻平凡的植物，有人稱其是「像是長在墳場上的雜草」，這種偏見成為營建人工濕地的困擾。香蒲大部份是長在淹水 5~10cm 的水中，很少能長到水深 50cm 的地方，這成為營建人工濕地水深在 30~80cm 的關鍵，可以控制香蒲不會佔滿整個水域。



照片 31、香蒲  
(攝於台北關渡人工濕地)

#### 4.4 人工濕地的維護與管理—人畜共染的病毒與病媒蚊

人畜共染的病毒與病媒蚊:台灣與濕地有關的傳染性疾病主要有七種,分別是鼠型斑疹傷寒(*Epidemic Louseborne typhus*)、漢他病毒(*Hantaan virus*)、恙蟲病(*Tsutsugamushi disease*)、瘧疾(*Malaria*)、黃熱病(*Yellow fever*)、登革熱(*dengue*)與禽流感(*Avian influenza*)。

- (1).鼠型斑疹傷寒病毒:這是屬於「鼠—蚤—人」共同傳染的疾病,受到感染的人大多是接近鼠類生長較為密集的地方,被鼠類身上的跳蚤所咬,染上傳播性的斑疹傷寒立克次體(*Rickettsia typhi*),這種病毒多散佈在熱帶與亞熱帶,因此人工濕地控制鼠類數目,不得生長過多,是非常重要的管理措施。
- (2).漢他病毒:這是一種急性致命的病毒,其自然宿主為齧齒動物,尤其是鼠類,其傳染的途徑為人經過鼠類生長較多的地方,呼吸到空氣中鼠尿、鼠毛、鼠糞、鼠皮膚屑等微粒,或是手足碰觸到帶病毒鼠類所喝過的水,這是人工濕地並不能讓外人接觸水,而且走過人工濕地「必須」洗手的主要原因。由於漢他病毒是寄生在鼠類的表皮,表皮細胞的部位,對於鼠類沒有感染性,但是進入人體會在短期(11-12天)產生急性腎衰竭、急性呼吸窘迫症,50%以上的死亡率。台灣的鼠類、鬼鼠、溝鼠、屋頂鼠、黃胸鼠、月鼠、小黃腹鼠與錢鼠等都曾發現漢他病毒的寄生,而且寄生比例很高,約佔十分之一,而這些鼠類在高溫、潮濕、密生植物中大量繁殖,1991-1992年,美國受到氣候變遷的影響,氣溫升高,野地鼠類增加竟達10倍。1993年就在中西部四個州發生漢他病毒的死亡病例,因此,人工濕地的建造,尤其是表面流人工濕地,不祇需要定期抓鼠,而且要遠離人口稠密的地方。
- (3).恙蟲病:這也是「鼠—蚤—人」共同傳染的疾病,主要是寄生在鼠類身上的恙蟎,帶有由立克次體的病毒傳染至人體,感染將會產生猝發性四肢紅色斑狀疹,嚴重者併發肺炎,目前仍然沒有疫苗。恙蟲病在台灣發生的病例,逐年增加,在1994年有295個病例,在1999年有1355個病例,大都發生在5-10月間,大都在南投、台東、花蓮、金門、澎湖等地方。
- (4).瘧疾:瘧疾是最著名的蚊蟲傳染病,台灣的病媒蚊是矮小瘧蚊(*Anopheles minimus*),在叮人的過程中將間日瘧疾原蟲(*Plasmodium vivax*)或熱帶瘧原蟲(*P. falciparum*)傳入人體。台灣在1965年獲得世界衛生組織認定為瘧疾根除疫區,但是出國旅遊,與外國人帶入台灣,每年平均仍約有40病例,不過台灣瘧疫病媒蚊較嗜乾淨的水,所以不會在污水處理型人工濕地寄生。
- (5).黃熱病:主要藉由埃及斑蚊(*Aedes aegypti*)將黃熱病毒(*flaviviruses*)傳至人體,曾是亞洲高致命性的傳染病,在1950年代之後,由於控制得宜,世界上已少發生。
- (6).登革熱:埃及斑蚊與白線斑蚊(*A. albopictus*)傳播的疾病,主要傳播黃病毒屬所引發高熱、肌肉、關節酸痛症。嚴重者休克,甚至死亡,患者大都是3-10歲的兒童。

由於埃及斑蚊與白線斑蚊的繁殖與積水有關，因此在台南、高雄、屏東地區所建置的人工濕地需要持續監測病媒蚊數目，並且在管理人工濕地上，防範水生植物過度茂密與水流不通等問題。在國外許多濕地有用捕蟲紙掛在場址捕捉蚊蟲，並定期公佈數字，蚊蟲太多還立牌警告遊客。台南、高雄地區的人工濕地在管理上應注重防蚊措施。

- (7). 禽流感：禽流感是一種 RNA 病毒，主要有高病原性(high pathogenic A1) H5N1 與低病原性(low pathogenic A1)H5N2 兩大型式，這些 RNA 病毒主要感染鳥禽類的呼吸道，引發全身敗血，對鳥禽的死亡率很高。病毒會隨鳥禽而傳播，所以吸引鳥禽的人工濕地需要特別注意，H5N1 型病毒會感染人類，而水鳥是攜帶 H5N1 最多的動物。其傳染給人的途徑，是人呼吸到鳥糞散佈到空氣中的病毒，或接觸到水鳥棲息的污染水。目前人類遭 H5N1 感染的死亡率是 100%，而 H5N2 的死亡率甚低，台灣目前的禽流感病毒皆為 H5N2。不過禽流感病毒變種多，台灣附近的越南、泰國、香港、大陸都有 H5N1 的發現，未來在禽流感警戒期中，人工濕地應該禁止外人進入。禽流感也凸顯一個很重要的事實，人工濕地營建水鳥的棲地，仍需隨時注意水鳥所將攜來的禽流感。因此，若缺乏管理，人工濕地將可能淪為「傳染窩」。

## 4.5 人工濕地的維護與管理——蚊子

濕地的建造與維護最引發爭議的焦點，常是蚊子滋生的問題。過去台灣人工濕地引起地方民眾反對的案例，主要的原因也是因為人工濕地內蚊子滋生。研究人工濕地的學者，或是熱衷濕地的人最常強調的是濕地生態系統：水生植物—微生物—水—土—陽光，只要操作得當，就能發揮自然淨化水質的作用，能吸引野生動物前來棲息，能具生態景觀，成為自然教育的場所。但是推動人工濕地的熱心者很少提及蚊子滋生的問題，只看到人工濕地的光明面，而忽略衍生的蚊子問題，可能抹煞了上述所有優點。

### 蚊子對濕地的負面果效

人工濕地的建造，一直有學者 (Batzer and Reeh, 1992; Russell, 1999) 質疑人工濕地的建造若沒有處理蚊子的管理對策，人工濕地處理污水不過是增加周遭居民公共衛生的困擾。

蚊子一直是主要傳染病的媒介，如瘧蚊傳染的瘧疾、埃及斑蚊傳染的黃熱病、白線斑蚊與埃及斑蚊傳染的登革熱等，在 1998 年仍然造成 300 萬人，約佔普世死亡人數的 1/17 (Spielman and D'Antonio, 2002)。而過去人類將低地之水排走，除為土地開墾之外，也為減少蚊子繁殖的所在。現今要將低地重新引水，即使是以人工濕地之名，仍然不免引人擔心，是否將生態置於人命安危的優先之上？因此在人工濕地的規劃、設計、施工到維護管理都需要注意這一個問題。

世界上的蚊子約有 3000 種 (連日清, 2004 年)，但是只有少數幾種對於人類、鳥類、哺乳類有危害。所以，在濕地管理與維護上，並不是去掉所有蚊子，而是將蚊子的數目降到最低，否則，水庫、湖泊、學校公園池塘等，也不能存在，因為皆是可能生長蚊子的地方。

### 蚊子在生態的功能

蚊子並非對於環境無正面作用，例如有些蚊子能幫助沼澤的蘭花 (*Habernaria obtusata*) 傳花授粉 (Dexter, 1913)。能夠大量攝食水中的原生動物。不只促進食物鏈的機制，增加水生植物分解的速率，且能減少水中的濁度 (Maguire et al, 1968)，所以蚊子幼蟲較多的水中，濁度較低。

蚊子幼蟲的生長有四個階段，在四蟲齡 (*fourth-instar larvae*) 階段對於原生動物的攝食率比一蟲齡 (*first-instar larvae*) 階段高 (Senior-White, 1928)，蚊子幼蟲就是大量的原生動物，才會成為原生動物與人畜之間疾病的媒介 (Garber, 1987)。

### 化學藥劑對蚊子幼蟲的防除

儘管蚊子的幼蟲有淨化水質、減少濁度的功能，但是蚊子仍被視為影響人體健康的負面對象。因此維護濕地，減少蚊子的孳生，施用生物性藥劑，如屬真菌類的蘇力

菌(*Bacillus thuringiensis israelensis*, BTI)或昆蟲性荷爾蒙等(Hershey et al., 1998)。

此外，尚有在水面上噴施煤油，覆蓋水面，讓蚊子幼蟲吸管在水下無法吸得氧氣而死，或是使用介面活性劑改變水面張力，讓蚊子幼蟲無法停留在水面下。不過，這也對其他水生昆蟲造成負面的影響。

在標榜生態復育、促進水質自然淨化作用的人工濕地使用化學藥劑，似乎是反其道而行。若以生態管理的方式，來減少蚊子滋生的問題，則需要了解蚊子的生態，與濕地的水文—水質—植物的關連性，方能以生態的法則去管理生態的問題。所以濕地會有滋生蚊子的問題，不代表濕地不可行，而是以蚊子成為濕地生物性指標，以作管理與維護的依據 (Thullen et al., 2002)。

### 水質對蚊子幼蟲的影響

蚊子與環境的關係非常複雜，不同種類的蚊子在不同的季節、不同的水質狀況，其在水域附近活動與出現的頻率都不相同(李學進，1991)。例如 *Theobaldia morsitans* 蚊子大都在低有機氮、高溶氧的水中產卵，而產蚊屬的 *Anopheles maculipennis* 大都在高有機氮，低溶氧、高碳酸的水中產卵 (Beattie, 1930)，證明水質因子是雌蚊在水域產卵的影響因子。

### 水生植物的影響

水生植物也能影響蚊子產卵的偏好，特別是浮水型水生植物如水芙蓉 (*Pistia stratiotes*) 能減緩流速，讓雌蚊容易產卵。其葉子的排列—新葉子向上長，老的葉子貼在水面，這種貼水面的老葉，能吸引雌蚊在上面產卵，而其幼蟲孵化後經常在老葉浮水面的背面垂懸，以獲得水生植物提供額外的氧氣 (Taylor, 1934)。

水中藻類或苔蘚類生長過多形成密集的團聚，也能增加蚊子幼蟲的前往棲息，尤其是斑蚊屬 (*Aedes*) 的幼蟲，在藻類與苔蘚下群聚，藻類與苔蘚在白天—夜晚光合作用，使水中溶氧產生較大的變動，也適合斑蚊的幼蟲，藻類與苔蘚團聚之後死亡沉入水中，更能吸引斑蚊幼蟲的聚集，以菌絲為食物 (Irwin, 1942)。這也顯示蚊子的幼蟲在水域的空間與垂直分佈不均勻，因此蚊子幼蟲數的調查需要有較多的樣本，才能較準確的估計。

### 水流速度的影響

水中的流速是所有蚊子幼蟲的限制因子，蚊子幼蟲的移動是靠身體的左右蠕動，讓水流經過口部，口部的刷毛 (mouth brush) 移動讓水中的有機物或原生動物進入口裡，所以蚊子的幼蟲只能在靜水或緩流速中生存。

所以洪水的沖刷，是河溪減少蚊子幼蟲的重要機制。人工渠道的引水口，或是跌水處，或是斷面改變處等都不易生長蚊子的幼蟲 (Abell, 1959)。

## 水中有機碎屑的影響

有機物是蚊子幼蟲的主要食物，但是受到口器大小的影響，所能攝食的可機物需  $< 50\mu\text{m}$ ，屬於微有機物碎屑，包括細菌、藻類與原生動物 (Fish and Carpenter, 1982)。因此，水生植物的根、莖、葉愈容易腐爛的種類，其在水域愈能增加蚊子幼蟲的數目。

反之，木本植物內所含的木質素較多，較不易被微生物分解，比起水生植物較不易滋生蚊子。

## 水中掠食者的影響

蚊子幼蟲的天敵是抑制蚊子幼蟲數目的主要的因子，因此瞭解蚊子幼蟲的天敵是濕地生物性防治的主要方式之一，蚊子幼蟲的天敵，是天然掠食者。如背冰蟲 (*Natonecta glauca*) 是非常著名的攝食蚊子幼蟲的昆蟲，能夠在水面上攝食蚊子幼蟲，也能帶著氣泡沈入水中，甚至到水底攝食家蚊屬 (*Culex*) 的幼蟲，並能在水域溶氧過飽和的情況下 ( $\text{DO} > 12.8 \text{ mg/l}$ ) 繼續攝食懸垂在水面的蚊子幼蟲 (Cockrell, 1984)，因此特別適合在過飽和溶氧的人工濕地中來抑制蚊子滋生。

除了背冰蟲之外，蜻蜓的幼蟲、一些肉食性的淡水魚也能攝食蚊子的幼蟲。

### 4.5.1 人工濕地避免蚊子滋生的管理

根據蚊子的生態特性，可以規劃人工濕地的管理。

#### 1. 人工濕地需要在郊外通風處

這是在人工濕地選址時就需要考慮的，濕地有再多的維護，各樣的防蚊措施，都無法免除濕地的蚊子去叮咬附近居民，因此一開始最好選擇周遭少人居住的場址。

蚊子一般不會逆風飛翔，斑蚊會飛到下風帶 10 公里，家蚊可飛到 12 公里的地方 (Russell, 1999)，因此人工濕地周遭最好乏人居住。地下流式的人工濕地理論上是能夠減少蚊子幼蟲生長，但是根據現場調查，雌蚊能夠產卵在礫床表面的石頭藻類、蘚苔，甚至植物的殘株上，而且過去常在地下流礫床上栽種挺水性水生植物，更增加濕地性蚊類的產卵機會。所以在台灣，無論是表面流或是地下流人工濕地，都有蚊子滋生的風險。這不等於建造人工濕地就是危害人畜衛生，而是需要事先防範與事後管理。

#### 2. 減少蚊子滋生的人工濕地建造

(1) 在人工濕地的入水口放置垃圾攔截網，或是細柵攔阻較大的垃圾進入人工濕地，避免阻塞水流，避免減緩流速，以減少蚊子滋生的機會。

(2) 在濕地的周邊，若改為石砌，一者可以減緩邊岸的沖蝕，增加濕地周邊的完整性，二者可以減少蚊子下卵。愈是接近人口密集的住宅區，人工濕地的周邊宜為石砌，甚至泥漿石砌，以減少雌蚊下卵的機會。

(3) 濕地的水深最好維持在 60 cm 以上，增加天敵的攝食，水深盡量不要淺於 30cm，以免天敵難以接近蚊子的幼蟲 (Batzer and Resh, 1992)。這是人工濕地

水深不要淺於 30 cm 的重要依據。

(4)愈多自由水面的人工濕地，愈少滋生蚊子 (Russell, 1999)。

(5)愈大的人工濕地，愈需要間歇性的水位變化，較少滋生蚊子，因此人工濕地的面積最好 > 0.2 ha。

(6)人工濕地的形狀愈單純愈易管理。

(7)人工濕地排水不良，或是水流停滯，易造成蚊子滋生 (Russell, 1999)。

(8)用噴灑、噴灌的方式引水進入，會減少蚊子幼蟲的生存機會。

近代國外雖然對於人工濕地的蚊子幼蟲有相當的研究，但是在國內少有相關的調查。為了人工濕地本土性管理的推動與落實，本研究以新海橋人工濕地為例，調查水質、水文、植栽對於蚊子幼蟲生長之影響，以作日後管理人工濕地的參考。

#### 4.5.2 試驗與方法

位於台北縣大漢河流域感潮河段內的新海橋人工濕地(TM 二度分帶座標為：295178,2769630)，是在民國 94 年 1 月建置完工，其基地總土地面積為 8ha，而水質淨化設施的用地面積則為 5.12ha。

引水來源主要是抽取新海抽水站之排水渠—公館溝之生活污水，並以重力引水方式，先經過滯留池，再排放至人工濕地內所設置以水生經濟作物處理為主的密植(I)區(淨化處理面積為 0.9ha，其設計水深為 25cm)、以埤塘濕地生態處理之開放水域(淨化處理面積為 1.61ha，設計水深為 45cm)、以挺水水生植物處理之密植(II)區(淨化處理面積為 1.81ha，設計水深為 25cm)，至最後生態池(淨化處理面積為 0.8ha，設計水深為 25cm)，而後再排放至大漢溪。

本研究分別在 95 年度四月份、六月份及九月份(即 04/18、06/26 及 09/01)進行三次對於新海橋人工濕地水域孑子生物調查工作。每次採樣點的分佈如下圖 26-28 所示。

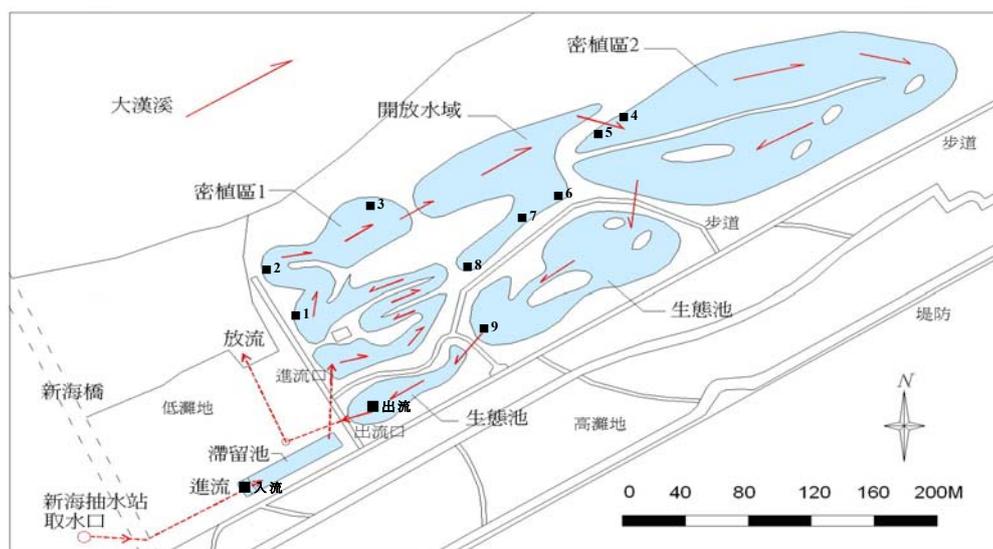


圖 26 95 年度新海橋人工濕地四月份孑子生物調查採樣點分佈

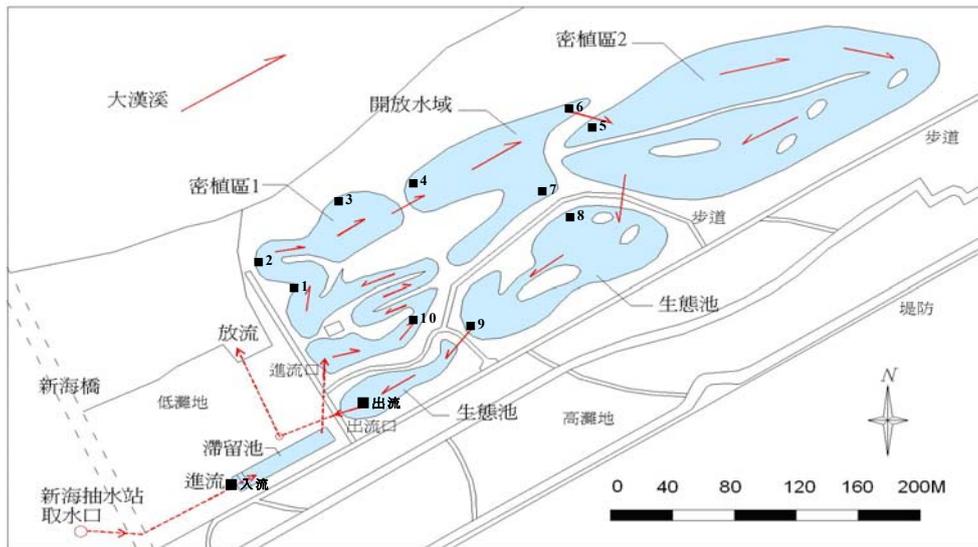


圖 27 95 年度新海橋人工濕地六月份孑孓生物調查採樣點分佈

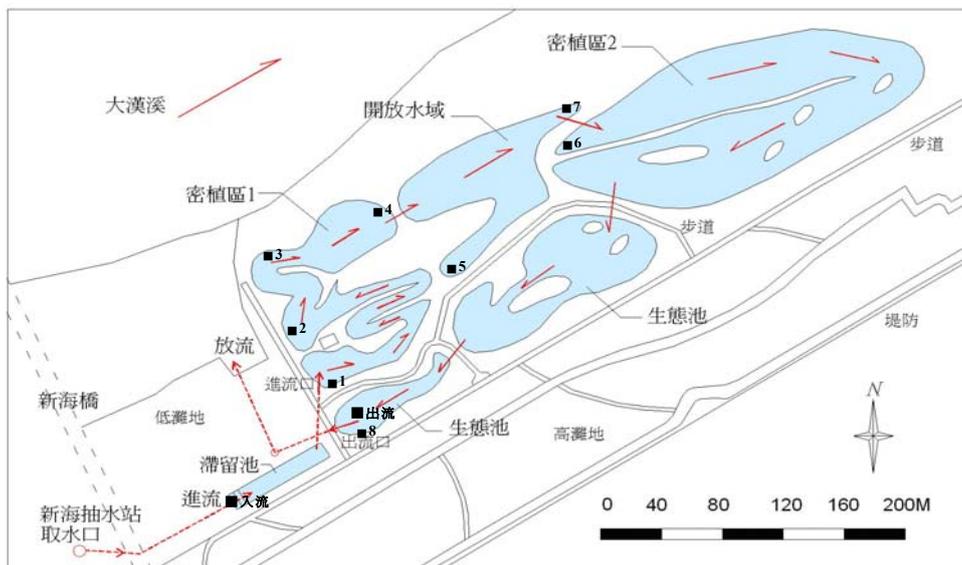


圖 28 95 年度新海橋人工濕地九月份孑孓生物調查採樣點分佈

孑孓生物採樣方法，係利用浸水式採樣杓工具 dipper，於人工濕地之水域表面進行孑孓數量調查(Sorvice, 1993)。每次調查樣本數為 10 個點數，並分別分佈在不同處理方式的水域上，以 10m<sup>2</sup> 面積區域為各點採樣範圍，並每一點施作 10 次(每次採樣距離間隔為 50cm)撈取表面之水體方式，利用濾網過濾其水體，記錄與計算停留在濾網上孑孓數量和其水體體積容量，同時也量測其水深。

對於所採樣的各點水質分析，分別在現場利用攜帶式檢測儀檢驗水中溫度(°C)，水中電導度 (electrical conductivity, EC) 以電導度測定儀 (WTW LF320 型)、酸鹼值(pH)以酸鹼值測定儀(WTW pH330 型)、溶氧(DO)以溶氧測定儀 (WTW Oxi315i 型)。並將其水樣攜回實驗室，依據環境保護署公告水質標準檢測方法進行分析。

### 4.5.3 結果與討論

蚊子幼蟲調查在新海橋人工濕地有三次，其進入與排出水量與水質，以表 55 示之。

表 55 新海橋人工濕地的入、出流水量與水質

月份	流入水量 (m <sup>3</sup> /day)	流出水量 (m <sup>3</sup> /day)	流入 BOD (mg/l)	流出 BOD (mg/l)	流入 SS (mg/l)	流出 SS (mg/l)
4	1737.2	944.6	30.0	12.6	27.2	4.6
6	1086.4	-	73.8	17.0	12.0	123.3
9	11219.0	6.7	142.0	30.7	17.8	56.5

由表 55 可知，新海橋人工濕地的水質與水量變化很大，在 6 月份雖然有水流入，但是最後排放口採不到水量，而採排放口附近，最後一個處理單元的水樣代表之。到了 9 月份，雖然入水量大，但是排出水量約只佔 0.06%，現場在第二處理與第三處理單元之間，由於連通管的淤塞，造成污水溢流到路面形成滯水，以致最後的放流水無法與前池連通。這也顯示人工濕地如果缺乏管理維護，在水的流動上就會產生淤滯的現象，在開放系統下，水量不易量測到代表性的水量，若用整個人工濕地的水力停滯時間與 BOD、SS 的負荷量來評估蚊子幼蟲的生長狀況，可由表 56 示之。

表 56 新海橋人工濕地水文、水質因子與蚊子幼蟲密度之關係

月份	平均水溫 (°C)	平均水深 (cm)	水力停滯時間(日)	BOD 負荷量 (kg/day)	SS 負荷量 (kg/day)	平均蚊子幼蟲密度(隻/l)
4	24.3	38.1	23.5	52.03	47.25	1.53
6	30.9	85.9	18.7	80.20	73.04	1.39
9	31.6	33.1	-	1593.10	199.14	2.01

註：9 月份由於流入與流出的水量差異太大，無法用流入的水量計算水力停滯時間。

#### 4.5.3.1 BOD 對於蚊子幼蟲生長密度之影響

水中溶氧對於蚊子幼蟲生長密度之影響，以圖 29 示之。

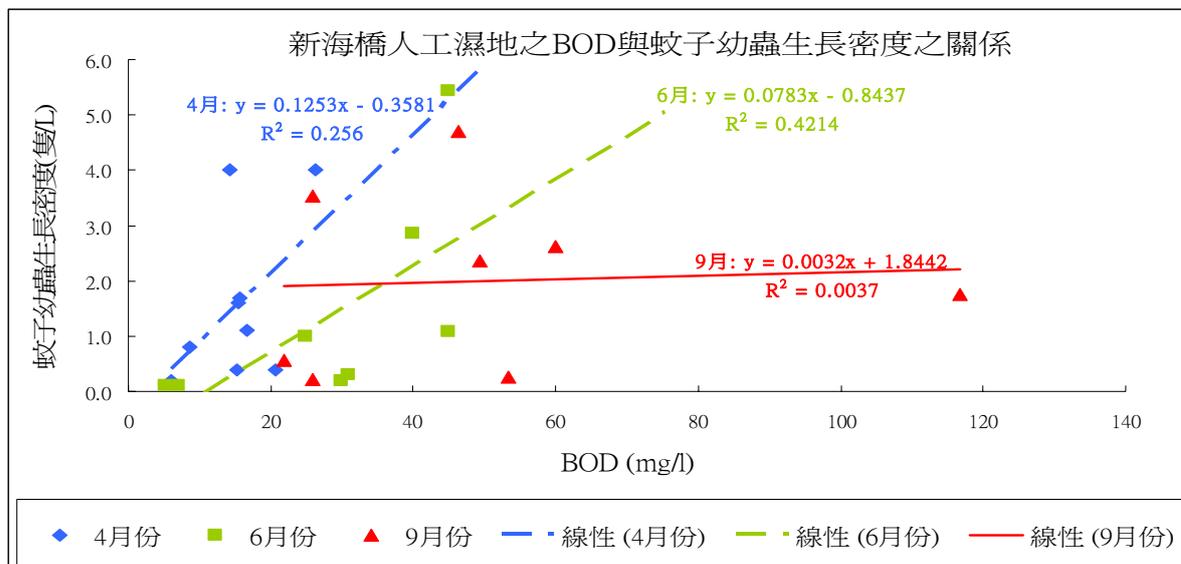


圖 29 水中 BOD 與蚊子幼蟲生長密度之關係

4 月份的平均 BOD 濃度為 13.9 mg/l，濃度範圍為 6.1-26.3 mg/l，六月份的平均 BOD 濃度為 28.5 mg/l，濃度範圍為 6.7-44.9 mg/l，九月份的平均 BOD 濃度為 49.9 mg/l，濃度範圍為 21.9-116.8 mg/l。而由圖 28 可知，蚊子幼蟲生長的密度是隨 BOD 濃度增加而增加，但是當平均 BOD 濃度較高時，蚊子幼蟲生長密度增加的速率較低。

生物的族群密度有一最大量，蚊子幼蟲的生長密度不可能隨 BOD 增加而無窮增加，應該會趨於一個最大量，這是人工濕地對蚊子幼蟲生長密度的承載量（carrying capacity），由圖 28 可以評估這個量約在 BOD 2.0 mg/l-2.5 mg/l 之間。

由圖 28 可知，在四月份之 BOD 為 2.9 mg/l 時，這個相當於乾淨的水，即可讓蚊子幼蟲的生長密度等於 0。

#### 4.5.3.2 溶氧對於蚊子幼蟲生長密度之影響

蚊子幼蟲生長的密度與水中溶氧的關係以圖 30 示之。

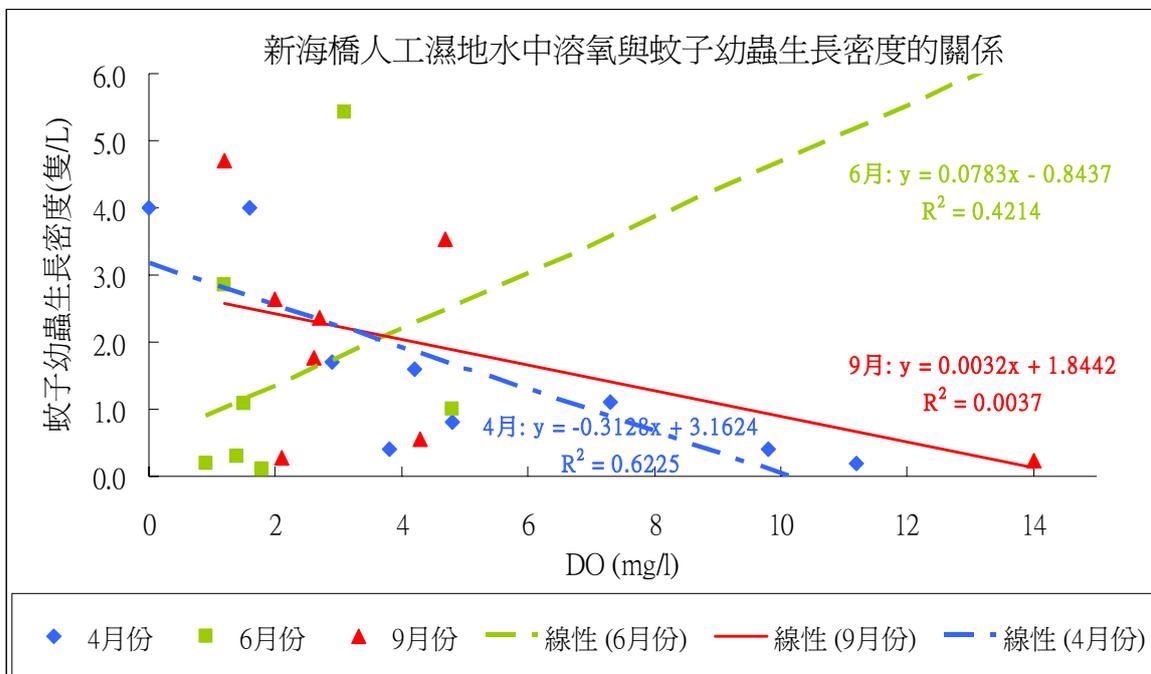


圖 30 水中溶氧與蚊子幼蟲生長密度之關係

顯示人工濕地水中蚊子幼蟲的密度與溶氧的關係，在四月份，由於某些測點呈現過飽和的現象，蚊子幼蟲的密度與溶氧呈顯著負相關。在六月份，溶氧在 0.1-4.8 mg/l，平均溶氧 2.1 mg/l 水中蚊子幼蟲與溶氧反而不呈顯著的相關性。九月份，溶氧在 1.2-14.0 mg/l，平均溶氧 4.2 mg/l，蚊子幼蟲密度又與水中溶氧呈負相關。

由於九月在調查蚊子幼蟲，不同於以往，種類比較多，不過水中溶氧愈高，蚊子幼蟲的數目愈少，尤其溶氧在過飽和時，蚊子幼蟲的數目顯著減少，可能是溶氧過飽和時能抑制蚊子幼蟲的呼吸，也可能是水中藻類在白天行光合作用，藻類生長過度旺盛，抑制蚊子幼蟲的活動。在現場溶氧過飽和的水中，進行魚類捕捉，除了三星攀鱸

(*Trichogaster trichopterus*) 之外，其他魚種少見。三星攀鱸大多長在溶氧過飽和，且草密的地方，水深約 5-30 cm，證明這種魚類能在台灣人工濕地中生長良好，且能有效抑制蚊子幼蟲的生長密度。

#### 4.5.3.3 水深對於蚊子幼蟲生長密度之影響

水深是人工濕地的管理因子，能夠影響水生植物的生長範圍、種類與飼食蚊子幼蟲的魚類活動，新海橋人工濕地水深與蚊子幼蟲生長密度的關係以圖 31 示之。

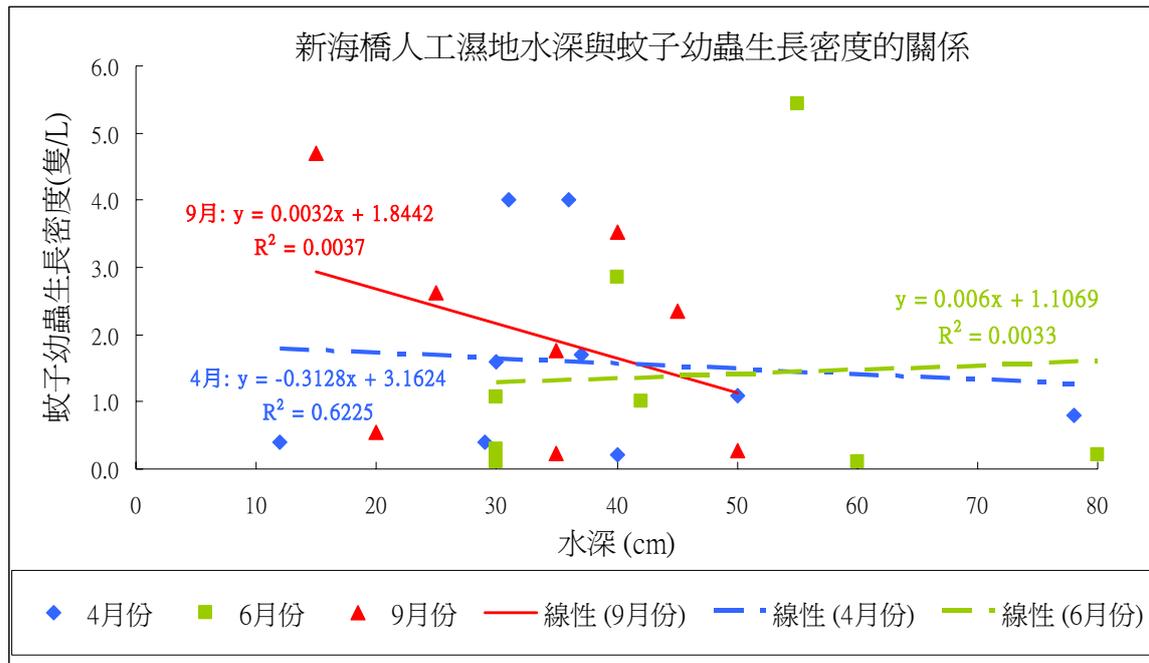


圖 31 水深與蚊子幼蟲生長密度之關係

由於人工濕地受到周遭水文—氣候的持續變動影響，所以四、六、九月三次的調查水深的範圍在 12-78 cm，30-80 cm，15-45 cm，其平均水深分別為 38.1 cm、45.9 cm 與 33.1 cm。結果顯示蚊子幼蟲的生長密度在平均水深 38.1 cm 與 45.9 cm 時，對於水深不呈顯著的相關，但是在平均水深 33.1 cm 的九月份，蚊子幼蟲的生長密度因水深的增加而顯著地減少。可見大部份的蚊子幼蟲是在淺水處活動，或是在人工濕地的邊緣，水陸域的交界生長。

因此，為了減少蚊子幼蟲過多的繁殖，台灣的人工濕地平均水深最好超過 33 cm，而且周邊的水陸域交界愈少愈好，或是造型愈單純愈好。過多複雜變化的人工濕地造型，將增加淺水與水陸交接的地方，水流易停滯，蚊子幼蟲較易滋生。

#### 4.5.3.4 水生植物生長與演替對於蚊子幼蟲生長密度之影響

濕地水生植物非常不易準確地量化，在不同的調查期間，不僅生長的植株密度、高度在改變，由於植物演替作用，不同的期間，其優勢性種類也有更換，新海橋人工濕地優勢種水生植物，生長高度與密度，以表 57 示之。

表 57、人工濕地優勢種水生植物生育與對應水域蚊子幼蟲生長密度調查

優勢植物	生長高度 (cm)	生長密度 (株/m <sup>2</sup> )	蚊子幼蟲密度 (隻/l)
四月			
荸薺	70	1600	0.4
斷節莎草	110	2250	1.7
台灣雀稗	25	-	4.0
青萍	-	2500	1.1
台灣水龍	26	900	0.8
李氏禾	30	4800	0.4
雙葉雀稗	25	3600	1.6
蘆葦	220	400	0.2
六月			
台灣水龍	-	400	5.4
李氏禾	-	1600	0.1
大萍	-	400	0.2
九月			
台灣水龍	6	400	2.4
李氏禾	30	2500	2.6
大安水蓴衣	60	144	3.5
白苦柱	110	200	1.8
空心菜	30	400	4.7
類地黍	30	516	0.2
紅蓼	35	36	0.6

備註：本調查假設無蚊子之天敵之條件下

表 57 顯示人工濕地水生植物的種類，比水生植物生長的密度，對於蚊子幼蟲的生長有更顯著的影響，例如挺水性的李氏禾、荸薺其生長密度分別已經高達 4800 株/m<sup>2</sup> 與 1600 株/m<sup>2</sup>。但是植株邊生長蚊子幼蟲的密度反而低於台灣水龍 400 株/m<sup>2</sup> 與大安水蓴衣 144 株/m<sup>2</sup>，尤其是在水面匍匐生長的空心菜，能吸引許多蚊子幼蟲在其植株底下密集生長。這是因為在水面上匍匐生長的水生植物很容易具有空間上的優勢，但是很容易又被其他優勢的水生植物所取代。例如台灣水龍在六月之前是優勢種，但是在九月時就被空心菜所取代，這時失去生長優勢的台灣水龍逐漸死亡，就成為蚊子幼蟲生長所需的營養份。挺水性的水生植物如荸薺是多年生的物種，植株分解較緩，蚊子幼蟲聚集生長較不顯著。挺水性的蘆葦在其密集生長邊的水域溶氧很高，蚊子幼蟲的生長密度很低。其他禾本科的植物如類地黍，雙葉雀稗容易成為不易被他種植物取代的優勢族群，其水域蚊子幼蟲生長的密度較低。

漂浮性的大萍與青萍，植株生長密度 400 株/m<sup>2</sup> 與 2500 株/m<sup>2</sup>，密集生長植株下蚊子幼蟲的密度為 0.2 隻/m<sup>2</sup> 與 1.1 隻/m<sup>2</sup>，較水面匍匐性的水生植物下生長的蚊子幼蟲密度低。依現場的觀察，漂浮性水生植物下活動的魚較多，漂浮性的群落特性較易讓魚類接近其水下沈葉與莖部，這將便於魚類對於蚊子幼蟲的攝食。

表 58 19 處台灣人工濕地截至 2006 年止其操作運轉過程對水質自然淨化

場址	2006 平均污染移除率(%)				平均入流負荷量(kg/day)				每單位面積之平均入流負荷量(kg/day-ha)				平均入流量 CMD	平均出流量 CMD	HRT (day)	水域面積(ha)
	BOD	SS	TP	NH <sub>4</sub> -N	BOD	SS	TP	NH <sub>4</sub> -N	BOD	SS	TP	NH <sub>4</sub> -N				
台北縣新海橋人工濕地	74.4	-212.4	55.2	65.5	373.7	79.2	7.4	68.4	62.3	13.2	1.2	11.4	3820.8	692.7	12	6
台北縣雙溪中學人工濕地	96.9	94.7	97.1	94.6	15.6	12.3	0.4	4.2	107.6	84.8	2.8	29.0	92.6	92.8	—	0.145
台北縣渡南橋人工濕地	71.7	20.1	15.5	52.6	0.9	1.2	0.02	0.05	3.0	4.0	0.1	0.2	224	13.3	29	0.3
台北市水磨坑溪人工濕地	42.6	25.7	84.4	97.6	9.4	95.6	0.9	7.8	2.4	23.9	0.2	2.0	2000	1798	14.6	4
桃園縣南崁溪上游右岸人工濕地	-15.3	-15.2	14.2	-4.9	109.9	1106	19.2	148.3	339.2	3413.6	59.3	457.7	4834.7	698.7	0.5	0.324
新竹縣頭前溪竹林人工濕地	56.1	76.2	27.3	9.4	651.4	1113.9	24.5	388	296.1	506.3	11.1	176.4	25902.6	1767.7	2.7	2.2
彰化縣南勢社區人工濕地	80	35.8	56	95.9	14.7	5.7	0.7	5.2	35.0	13.6	1.7	12.4	455	92	8.8	0.42
嘉義縣介壽橋人工濕地	30.1	92.7	75.6	35.4	21.8	570	2.8	21.1	36.3	950.0	4.7	35.2	319.4	50	1.9	0.6
嘉義縣中洋子人工濕地	52.4	84.2	-15	34.8	21.1	435.3	4.6	13.5	32.0	659.5	7.0	20.5	1614.5	1458.7	2.6	0.66
嘉義縣荷包嶼人工濕地	68.1	74.4	76.1	78.5	64.5	860	9	18.5	40.6	540.9	5.7	11.6	5246	4250	3.5	1.59
台南市灣裡社區人工濕地	52.9	-19.1	57.1	72.6	7.6	14.1	0.2	1	5.8	10.8	0.2	0.8	—	1099.3	29.4	1.3
台南市安順排水人工濕地	46	75.7	30.4	24.9	0.5	4.7	0.2	0.1	4.5	42.7	1.8	0.9	70	67	14.2	0.11
台南縣港尾社區人工濕地	35.7	-239	29.8	64.8	0.6	3.4	0.1	0.6	1.3	7.6	0.2	1.3	33.8	—	18	0.45
高雄縣舊鐵橋人工濕地	78	-27.4	66.7	37.9	859.8	914.9	12.2	94.8	10.7	11.4	0.2	1.2	23644.1	3770.2	13.4	80
屏東縣武洛溪人工濕地	65	-9	41.4	29	1377	3131	56.5	203.3	153.0	347.9	6.3	22.6	18915.8	14675.1	8.2	9
花蓮縣鯉魚潭人工濕地	35	-120.5	47	44.6	2.8	0.6	0.05	0.5	21.5	4.6	0.4	3.8	164.2	81.3	11	0.13
台東縣關山人工濕地	5.4	70.8	43.2	62.9	185.6	113.3	2.2	13.9	156.0	95.2	1.8	11.7	1421.3	449.3	8.6	1.19
澎湖縣火燒坪人工濕地	32.2	2.5	21.6	35.8	11.1	2.3	0.4	3.3	10.8	2.2	0.4	3.2	249.2	73.1	1.8	1.03
澎湖縣觀音亭人工濕地	66.1	51.6	3.6	24	18.2	2.5	0.1	0.8	1820.0	250.0	10.0	80.0	100.4	—	98	0.01

#### 4.5.4 結論

台灣的人工濕地由於處理有機污水，在自然淨化的過程中，有機營養源將導致蚊子的幼蟲滋生，對於人工濕地周遭的公共衛生將造成負面的影響。在人工濕地中，蚊子幼蟲分解有機物之細菌，擔任原生動物的分解者，是有其自然淨化有機質的角色與功能，因此不可能要求其水域內完全沒有蚊子幼蟲存在。而是藉由管理的方式讓蚊子幼蟲的數目減少，因此蚊子幼蟲的生長密度是人工濕地管理的良好指標。

在國外人工濕地減少蚊子幼蟲生長的指標是：每一次採樣杓的採樣，蚊子幼蟲的平均數目不超過 0.5 隻 (Tennessen, 1993)，這也是人工濕地環境影響評估的建議指標。在這標準下，新海橋人工濕地採樣杓為 0.751，新海橋四、六、九月三次的調查，其平均每杓蚊子幼蟲密度為 2.2 隻，是需要進行管理。

其管理的方式：

1. BOD 的負荷量愈大，蚊子幼蟲生長的密度將愈高，在污水處理廠 BOD 負荷只要超過 110 kg/ha-day，就易滋生蚊子幼蟲 (Droste, 1997)。由表 58 可發現在 19 處人工濕地裡，以觀音亭人工濕地有高達 1820 kg/ha-day 之 BOD 入流負荷量，其次為桃園縣南坎溪上游右岸人工濕地有 339.2 kg/ha-day BOD 入流負荷量以及新竹頭前溪竹林人工濕地有 296.1 kg/ha-day BOD 入流負荷量，顯示這些場址極有可能會有滋生蚊子幼蟲的機會，這必需進一步至現場施作蚊幼蟲採樣調查確認之，而透過新海橋人工濕地的試驗，由於調查時間仍短，無法提出足夠的數據來訂定人工濕地的限值。不過水力停留時間在 18.7 day，蚊子幼蟲生長密度就超過 0.5 隻/杓，所以水力停留時間應短於 18.7day。
2. 在水生植物的管理上，應該在一年至少有二次的移除，以免水生植物快速演替，增加弱勢族群的死亡。而且植株的選擇宜多採挺水性如蘆葦、荇薺，少用水面匍匐性台灣水龍、大安水蓑衣，更不要用沉水性植物，沉水性植物在人工濕地存活率極低。
3. 人工濕地的水深需在 33 cm 以上，以免蚊子幼蟲滋生。
4. 放養三星攀鱸以攝食蚊子幼蟲。

## 4.6 人工濕地的維護與管理——老鼠

用人工濕地來去除污染，發揮水質自然淨化的果效，在國外的發展已有五十多年的歷史，但是在台灣只有七、八年的發展，而且政府推動人工濕地的建造，只有三、四年，因此仍屬於發展初期。水質自然淨化作用與在地的生態環境非常有關，在實施水質自然淨化之際，不只國外重要的設計參數不能直接用在台灣，國外操作的條件也不能直接在台灣套用，連許多維護管理的措施，在台灣也需要重新調整才能落實。

國外在這生態工程的領域，雖然已有一段發展的期間，仍有許多研究在進行，雖然已有上千個案例、場址，且已證明有水質淨化的果效，但是仍有許多不同意見的探討，因此面對一個仍在不斷發展的工程領域，引進台灣之後，仍需要不斷地有調查研究與現場經驗去支持、評估，無法一開始就已近完美。

台灣的人工濕地在推展的過程中，維護管理是很重要的部份，缺乏維護管理的人工濕地，是無法繼續發揮水質淨化的功能，而且會滋生有害性生物 (pest)，影響周遭的公共衛生，容易引發民怨。

世界上大多數的生物，是因著人為的活動，破壞其棲地，而數目減少；但是有些生物卻是因為與人接觸的機會增加，獲得額外食物的機會增加，反而數目大增。這些生物身上所帶的細菌、原生動物，或其他的生物，因著與人接觸機會增加，可能成為傳染病的媒介，所以稱為有害生物，而鼠類是最著名有害生物，其所造成的「黑死病」是過去導致百萬人死亡的著名傳染病，此外尚有鼠型斑疹傷寒、漢他病毒、恙蟲病，與近來眾所矚目的人畜共通的疾病。

此外，鼠類是雜食類，可以在田間吃作物、雜糧，在渠道水路邊挖掘，改變水流方向，產生積水或漏水，侵入人的居處或住宅區飼食食物、家俱。鼠類的天敵很多，如蛇類、貓頭鷹、或鷹類，但是人為的活動經常消滅鼠類天敵，使鼠類反得繁殖機會。

因此，在人工濕地內，植物茂繁生長，土壤水份高，水路分佈縱橫，水中有機營養份高，其所滋生的昆蟲、蚯蚓、蝸牛、福壽螺與草類植株都可成為親水性鼠類的食物 (Landry, 1970)。如果人工濕地沒有妥善的維護與管理，結果不止無法發揮水質淨化的果效，還成為鼠類繁殖的所在，沒有發揮生物多樣性的功能，反而成為鼠類棲息的地方。

每一種鼠類都有其合適的棲地條件，除非能夠提供足夠的食物，否則鼠類不會維持其高繁殖率與高密度的族群 (Choquenot and Ruscoe, 2000)。但是人工濕地的條件，經常合適鼠類棲息。因此，在人工濕地的管理上，必須防除鼠類 (Tanner and Kloosterman, 1977)。

全世界的鼠類約有三千多種，台灣約有十三種，有些鼠類屬高山性鼠類，有些屬平地性鼠類，有些屬住宅附近活動的鼠類 (王博優)。高山性的鼠類主要是以山上林木、草類為食物，如巢鼠 (*Micromys minutus*)、台灣森鼠 (*Apodemus semotus*)、刺鼠 (*Rattus*

coxinga)、天鵝絨鼠 (*Eothenomys melanogaster*)、菊池田鼠 (*Microtus kikuchii*)、高山白腹鼠 (*Rattus culturatus*) 等，平地性的鼠類以在平原上的草類為主要的食物，如鬼鼠 (*Bandicota indica*)、小黃腹鼠 (*Rattus losea*)、赤背條鼠 (*Apodemus agrarius*)、田鼯鼠 (*Mus formosanus*)、溝鼠 (*Rattus norvegicus*) 等與經常在住家活動的月鼠 (*Microtus musculus*)、屋頂鼠 (*Rattus rattus*)、錢鼠 (*Suncus murinus*) 等。鼠類的活動也與生長受的影響有植物的生長 (Schwartz and Whitson)，植物的覆蓋密度 (Birney et al., 1976)，降雨量的多寡 (Brown and Singleton, 1999)，土地面積所能提供的活動範圍 (Haugen, 1941) 等。

過去提倡濕地的生態工程師，比較強調其正面的功效，較少提到其負面的因子 (Cook et al., 1996)。這造成日後在人工濕地的管理，缺乏要注意的要項，與要防除鼠類的環境管理。

本研究的目的是以新海橋人工濕地為例。調查鼠類與其空間分佈，並與環境之相關，以作為日後管理人工濕地的準則參考。

#### 4.6.1 理論與方法

鼠類在空間上的分佈，或其在棲地上出現的頻率受許多因素的影響，不過其在空間上的分佈，一般認為有三種型態，群聚分佈 (aggregated distribution)、逢機分佈 (random distribution) 與均勻分佈 (uniform distribution) (Odum and Barrett, 2005)。

群聚分佈是生物在空間上只集中在某些地方，代表該地方是該種生物活動頻繁的空間，或生物活動範圍 (range)，也代表該種調查的生物物種有彼此的相關性，或社會行為。生物在空間上呈現的群聚性，代表空間的特性並不均勻，所以生物會選擇一些特別的地方活動。

逢機分佈是生物個體在空間上幾乎不群聚，而呈逢機四處分佈，生物在空間上未呈現有群聚的行為，這代表調查區域對於生物的影響是一致，因此生物對於空間沒有特殊的選擇性。

均勻分佈是生物在空間上的分佈，幾乎都保持一定的距離，這表示生物在調查區域的可用資源非常的少，個體之間存在競爭性，所以活動範圍很少重疊，出現位置在空間上幾乎互相等距。

判斷生物在空間上的分佈一般是用  $\chi^2$  檢定 (chi-squared test)，若屬於均勻分佈，則生物出現的變異量小於平均值，若屬於群聚分佈，則變異量與平均值之比將大於 1.0，其間則為逢機分佈，所以令生物在空間的分佈為檢定分散因子 (Index of Dispersion Test, I)。

$$I = \frac{S^2}{\bar{x}}$$

其中， $S^2$  為變異值， $\bar{x}$  為平均值 (Krebs, 1999)。

因此，I 值檢定生物是屬於何種分佈為  $\chi^2$  檢定。

$$\chi^2 = I(n-1)$$

其中，n 為調查的點數。

在空間上生物分佈的機率分佈，最常用為 Poisson distribution 其生物出現機率為：

$$P_x = e^{-u} \left( \frac{u^x}{X!} \right)$$

$P_x$  為生物隻數出現頻率

U 為 Poisson distribution 的平均值

X 生物出現數目

假設生物調查具代表性

$$\bar{X} = \mu$$

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$$

由  $P_1, P_2, \dots, P_n$  等，可以計算出不同生物隻數出現的頻率。

#### 4.6.2 材料與試驗

在田間調查鼠類的方法很多，有捕鼠法、夾夜法、粉跡法與食法。捕鼠法為直接用籠捕捉，由於鼠類不易逃逸，可以捕到較具在地鼠類族群的代表性（徐爾烈等，2002）。但是捕鼠籠所用的飼物不同，如用肉類食物，或是雜穀類食物，如糙米、玉米、大麥片、小麥與甘藷等飼物，也會影響捕捉的種類與隻數（王博優與王瑞圖，1997，1998）。夾夜法、粉跡法與盜食法是用鼠類覓食的足跡與在食物上所留下的齒痕作判斷，但是其種類與隻數判斷較為不易，所以捕鼠法仍為最常用的調查方式。

2006 年 9 月在台北縣新海橋人工濕地，佈放 27 個鐵製捕鼠籠，內置肉片，每三個捕鼠籠在相近的位置，相距約 1m，捕鼠籠皆放在人工濕地的水邊 0-2m 之內，三個捕鼠籠各朝不同的方位，放置後加以仔細保持植生狀況恢復原狀。

佈放的位置有九處，八處在人工濕地內，一處在人工濕地一百公尺外的堤防邊，作為對照組，其採樣位置以圖 32 示之。佈放後記錄放置點的植株種類、生長高度、植生密度，並且採水樣測完水中 BOD 與水深。

#### 4.6.3 結果與討論

新海橋人工濕地鼠類調查的結果以表 59 示之。

表 59 新海橋人工濕地鼠類、植生與水文之關係

採樣	優勢植物	植株平均高度 (m)	植株密度 (株/m <sup>2</sup> )	BOD (mg/l)	SS (mg/l)	DO (mg/l)	EC (μS/cm)	pH	水溫 (°C)	水深 (cm)	捕捉鼠類 (隻/籠)	平均鼠長 (cm)
1	大安水蓴衣	1.46	144	25.9	37.5	4.7	448	7.09	32.1	40	0	—
2	蘆葦	1.18	200	116.8	22.3	2.6	546	7.14	31.7	35	0	—
3	空心菜	0.75	400	46.3	12.0	1.2	505	7.18	30.8	15	0	—
4	黃花水龍	0.48	400	49.3	122.0	2.7	506	7.18	31.2	45	1(公)	—
5	類地黍	0.64	576	25.9	19.4	1.4	436	7.94	31.1	35	0	—
6	黃花水龍	0.87	600	53.3	40.9	2.1	502	7.34	30.9	50	1(公)	23.3
7	李氏禾	0.45	2500	59.9	816.5	2.0	509	7.04	32.5	25	0	—
8	紅蓼	0.69	36	21.9	463.5	4.3	371	7.31	32.3	20	3 (1公2母)	28.7

根據統計分析，平均隻數為 0.625 隻，沒有出現鼠類的機率為 53.5%，出現 1 隻的機率為 33.4%，出現 2 隻的機率為 10.5%，出現 3 隻的機率為 2.2% 等。分散因子為 1.80， $\chi^2$  為 12.6，由於分散因子 71.0，所以鼠類在新海橋人工濕地的出現，在空間上是屬於群聚分佈，亦即鼠類等於人工濕地具有選擇性，在某些地方出現的頻率較高。

捕捉到的鼠類為鬼鼠，這是一件很特別的事，因為在大漢溪附近農地長期監測鼠類族群活動，很少捕捉到鬼鼠（林雨德，2006 個人聯絡），大部份為溝鼠與黃腹鼠、赤背條鼠，但是在大漢溪流域的新海橋人工濕地所捕捉皆是鬼鼠，而且鬼鼠在新海橋人工濕地出現呈現群聚分佈，因此人工濕地可能有局部地區條件，特別適合鬼鼠棲息。

有關鬼鼠生態活動範圍的研究非常少，不過鬼鼠具親水性，喜歡在植株生長密度較高的區域活動，因此為了管理，水生植物生長的密度不能過密，在放置點 4 與 6 植株生長密度超過 400 株/ m<sup>2</sup> 處，捕獲鬼鼠，與國外的研究相較，由於鼠類常在較密集的植株中活動，並且以草種為食物，因此學者建議水生植物密度需小於 400g/m<sup>2</sup>，以防制鼠類繁殖過多（Birney et al., 1976）。

而鬼鼠活動的地方，植株的平均高度在 0.48-0.87m，這不是較高的挺水性植物高度，在大安水蓴衣與蘆葦生長旺盛的地方，反而沒有鬼鼠前來。所以人工濕地的生態經營，為了吸引水鳥前來，用較密較短的水生植物來營造，可能會導致鼠類的滋生，也許用較疏較高的水生植物，或是只有局部區域密集生長水生植物，其他大部份的區域維持自由水面來營造，可以避開鼠類生長繁殖過多的困擾。

根據表 59 可知水質與鬼鼠的出現，有相關的是水中的懸浮性顆粒濃度。當水中懸浮顆粒濃度在 40.9-463.5mg/l 時，是鬼鼠出現處。依現場觀察，鬼鼠能夠游泳，攝食水中的植物性殘株作為食物；不過鬼鼠與其他的因子如 BOD、DO、pH、EC、水深較不具相關性。由於新海橋人工濕地最後生態池的水中懸浮顆粒濃度最高，鬼鼠被捕捉的頻率也最高，這顯示出人工濕地管理的重點。由於鬼鼠嗜食水生植物或喜濕性陸生植物的種子與植株，所以不只需要控制植物的生長密度，水中懸浮顆粒濃度最好低於 40mg/l。

由於鬼鼠不只能夠游泳，而且能夠在水邊作穴，試驗所抓到的鬼鼠平均身長在23.3-28.7cm，在密植水生植物區捕捉到的為公鼠，在最終生態池捕捉到的有2隻母鼠，該區域並非水生植物密植區，但是位於人工濕地水緣的緩坡上，其排水性較佳，鬼鼠類有鑽洞築穴的行為，容易提供鬼鼠作巢穴之用。人工濕地若缺乏對於鼠類的管理，水的流動很容易由鼠穴而改變，根據場址的觀察，管理中斷後9個月，不同處理單元之間的水流已受鼠穴干擾，水流反而由第一個密植區，不經後面的開放區與第二密植區，直接流入最後的生態池，造成生態池水中懸浮顆粒濃度增高。因此，在人工濕地定期捕鼠，是必要的管理措施。

#### 4.6.4 結論與建議

人工濕地在管理中斷後9個月，大型的親水性鼠類鬼鼠數目大增，其在現場的空間分佈，顯著性的群聚，故特別合適植株密度 $400\text{株}/\text{m}^2$ ，與水中懸浮顆粒濃度超過 $40\text{mg}/\text{l}$ 的區域。由於鬼鼠是人畜共染病毒（如漢他病毒）的共同寄生，而國外漢他病毒的死亡病例，也多發生在雨多、溫度高、草多導致鼠類生長旺盛的地方，為此必須成為人工濕地管理的因子。而本人工濕地已捕捉到母鼠，若不再定期捕捉，將導致鼠類繁殖過多的問題，為了防止鼠類在人工濕地滋生，建議：

- (1)水生植物生長密度超過 $400\text{株}/\text{m}^2$ 的地方需進行除草。
- (2)水中懸浮顆粒濃度超過 $40\text{mg}/\text{l}$ 需進行清淤。
- (3)濕地緩坡邊坡需適加石頭護岸，以防鼠類穿洞，改變流道。
- (4)定期捕捉鼠類。

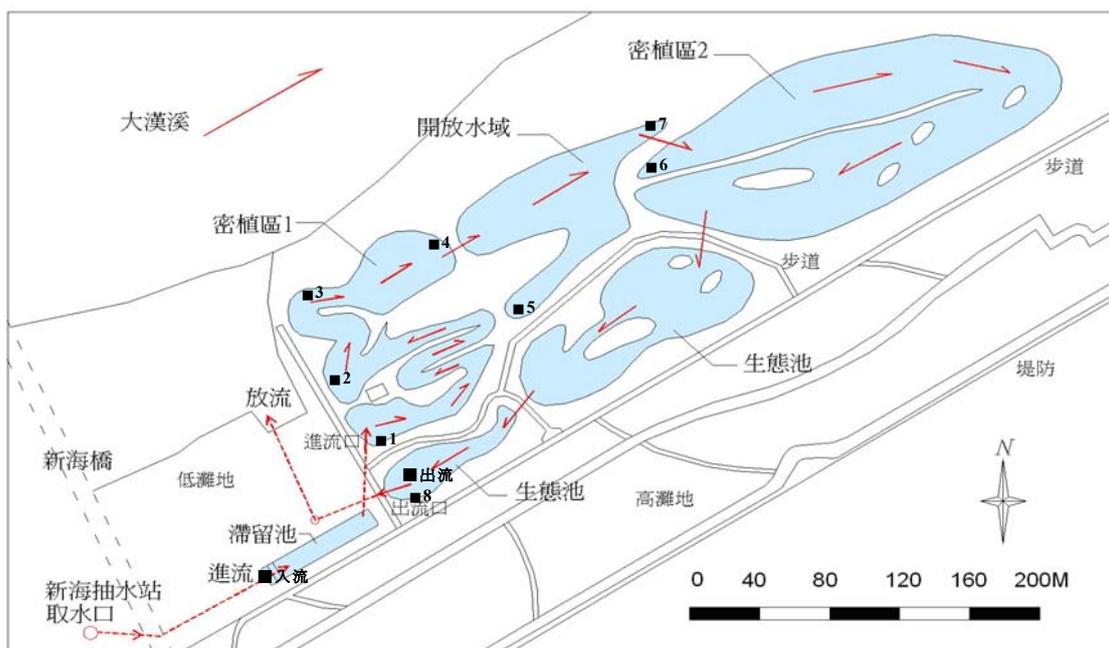


圖 32 95 年度新海橋人工濕地鼠類調查採樣點分佈

## 4.7 人工濕地的維護與管理——福壽螺

福壽螺 (*potamocorbula asinaria*) 是世界上體積最大的淡水螺類，最大可達直徑 15 公分以上，大部份是在水流較緩、水深較淺的池塘、水田、渠道。其殼的顏色有很多種：棕色、黃色、紅棕、藍黑色等，主要以水生植物為食物，吃不同的水生植物，其殼的顏色就不一樣。福壽螺生長迅速，一年約有二世代。一次產卵約 151-773 粒 (林金樹，1986)。

福壽螺長期生存在熱帶與亞熱帶的水域中，所以熱帶與亞熱帶環境的變動，福壽螺幾乎都能適應。例如福壽螺能夠耐炎熱，耐高溫的水，耐日曬；福壽螺也能耐乾燥，當水域乾涸時，福壽螺縮入殼裡，以殼螺蓋關閉螺孔，渡過乾涸；在下一降雨期，又開始活動生長，因此特別適合雨季分散或熱帶雨型的區域。

福壽螺與其他的淡水無脊椎動物不同，需要進行異體受精 (gonochoristic)，在產卵時會爬上水生植物的莖桿上產卵，如此可以避開魚類的攝食。福壽螺也會沈於底泥或石礫之間，以避免被其他動物攝食 (Jonney and Beissinger, 1993)。福壽螺主要以水生植物為食物，但也攝食其他的螺類，食物缺乏的時候，在夜間會離開水面移至他處，所以影響福壽螺的因子很多，不過環境變動愈多，福壽螺的數目減少、體積也都較小 (Beissinger, 1995)。

福壽螺原產於南美洲亞瑪遜河，在 1979 年引入台灣飼養，飼養的方法是在水池中投入稻桿作為福壽螺的食物。本來是要進口歐洲，但是不久台灣生產的福壽螺被發現含有寄生蟲，遭致進口國的抵制。民間開始棄養福壽螺，將福壽螺放入飼養池外的水體，結果而後在十年間，福壽螺由台灣傳遍日本、中國與東南亞 (楊平世、陳郁惠，2003)，由於亞瑪遜河有許多大型的魚類，是福壽螺的天敵，但是亞洲的水域少有大型魚類，福壽螺成為亞洲著名外來種入侵的例子，光是台灣，年損失的經濟付出約 51 億元 (陳威庭，2004)。

福壽螺的防治有物理、化學與生物的防治三種。物理性的防治為，將福壽螺卵浸泡在水中 9 天，則卵無法孵化成螺 (林金樹，1986)，由於雌螺是在 1-11 月皆可產卵，所以抬高水位是一個管理福壽螺的措施，或是砍去卵吸附的水生植物的莖部，使卵沈入水中 (李彥錚，1997)，或是在水流入口設置隔絕網或濾石帶，或是平鋪 30 公分長的塑膠浪板定期用人工拾取。

化學性的防除，早期用三苯醋錫，由於對人有劇毒禁用，有用 5ppm 己烯雌酚 (Diethylstilbestrol)，或 5ppm 辛基石碳酸 (Octylphenol) 24 小時可以將螺 100% 殺死 (廖君達、林金樹，2001)，70% 耐可螺可濕粉劑可殺 97.39%，80% 聚乙醛可濕粉劑可殺 94.00%，苦茶粕可殺 94.61% (陳威庭，1994)，但這些化學物質也導致水中其他生物死亡。

生物性的防除，最常用的是青魚 (*Mylopharyngodon piceus*)，為亞洲地區體型大，

且以中、下水層的生物如螺、蚌、水生昆蟲等為主要食物的來源，(廖君達、林金樹，2000)。惟太小的青魚，口器太小，仍然無法攝食福壽螺，需要魚體重量在 2.1kg 以上，才具攝食福壽螺的能力。此外，重量 1.8kg 以上的泰國鯰魚 (*Clarias batrachus*) 也具攝食福壽螺的能力。(廖君達、林金樹，2001)

但是依據在現場的觀察，這三種方法施用在人工濕地仍需要相當斟酌，台灣的人工濕地由於相當缺乏維護與管理的相關知識，而歐美的人工濕地大都位處溫帶，沒有福壽螺在人工濕地滋生的問題，而人工濕地在台灣，由於水淺、流速緩、水位穩定、水中營養份高、水生植物生長旺盛，正是適合福壽螺生長的水域環境；而且人工濕地水深，BOD 濃度高、溶氧低，不適合飼食福壽螺的魚類如青魚或泰國鯰魚生存。

目前台灣人工濕地對福壽螺的防除，採用的方法有四種，(1)在水磨坑人工濕地的入水口設兩道阻隔的塑膠濾網；並在入口放礫石層，讓水可以流過，阻隔福壽螺，半年後效果依然有限，理由是夜間福壽螺爬上土堤、草叢而進入人工濕地。(2)在新海橋人工濕地採取人工撈撿的方式，但是一隻福壽螺一次平均產卵 250 顆，一年兩個世代，亦即一隻福壽螺一年約可繁殖 62,500 隻，這不是人工撈取所能應付，所以一年後仍長出多福壽螺。(3)在嘉義荷苞嶼人工濕地與貴仔坑溪礫間接觸，由於入水是採噴灑式，多了機械式破壞，可以減少福壽螺的進入機會。惟前者剛完工不久，仍有待長期之評估，後者因為採地下流，所以福壽螺無法生長。(4)嘉義朴子溪人工濕地，由於水力停滯時間較短，水流較快，福壽螺生長較少。

用化學藥劑防除福壽螺，在台大安康人工濕地施用苦茶粕，需要先將所有魚蝦移走，再施放；而且隔了數月，福壽螺又再出現。使用化學藥劑也不符人工濕地生態效益的原則。而福壽螺是人工濕地水生植物的攝食者，並促進其被微生物分解，自有其生態食物鏈的角色。人工濕地長的植物那麼多，又要刻意找不到福壽螺的蹤跡，是不可能的事。因此本研究在提出新的管理福壽螺途徑，利用其在水生植物產卵的習性，進行福壽螺的生態防除，不在完全消滅，而在減少其數目。

#### 4.7.1 試驗與調查

於 2005 年 6 月與 8 月在台北水磨坑溪人工濕地的測量，對於有福壽螺卵附著的水生植物，量測其附著高度、卵體長寬與厚度、所附著水生植物種類、植物株高與水深。

表 60 2005 年 6 月水磨坑溪人工濕地福壽螺卵與植物、水深之關係

植物名稱	植物高度 (cm)	平均株高 (cm)	調查株數	平均水深 (cm)	卵距水面平均高度 (cm)	卵在植株高度平均百分比(%)	卵的平均數目 (顆)
紅 辣 蓼	29~83	59	10	8.8	18.0	50.7	206.4
單葉咸草	16~122	83	12	8.4	19.4	37.1	247.3
水 毛 花	46~88	71	10	3.3	22.3	37.9	302.8
水 芋	29~57	46	8	6.2	19.8	57.6	347.2
空 心 菜	22~62	22	7	8.7	13.6	57.2	252.2

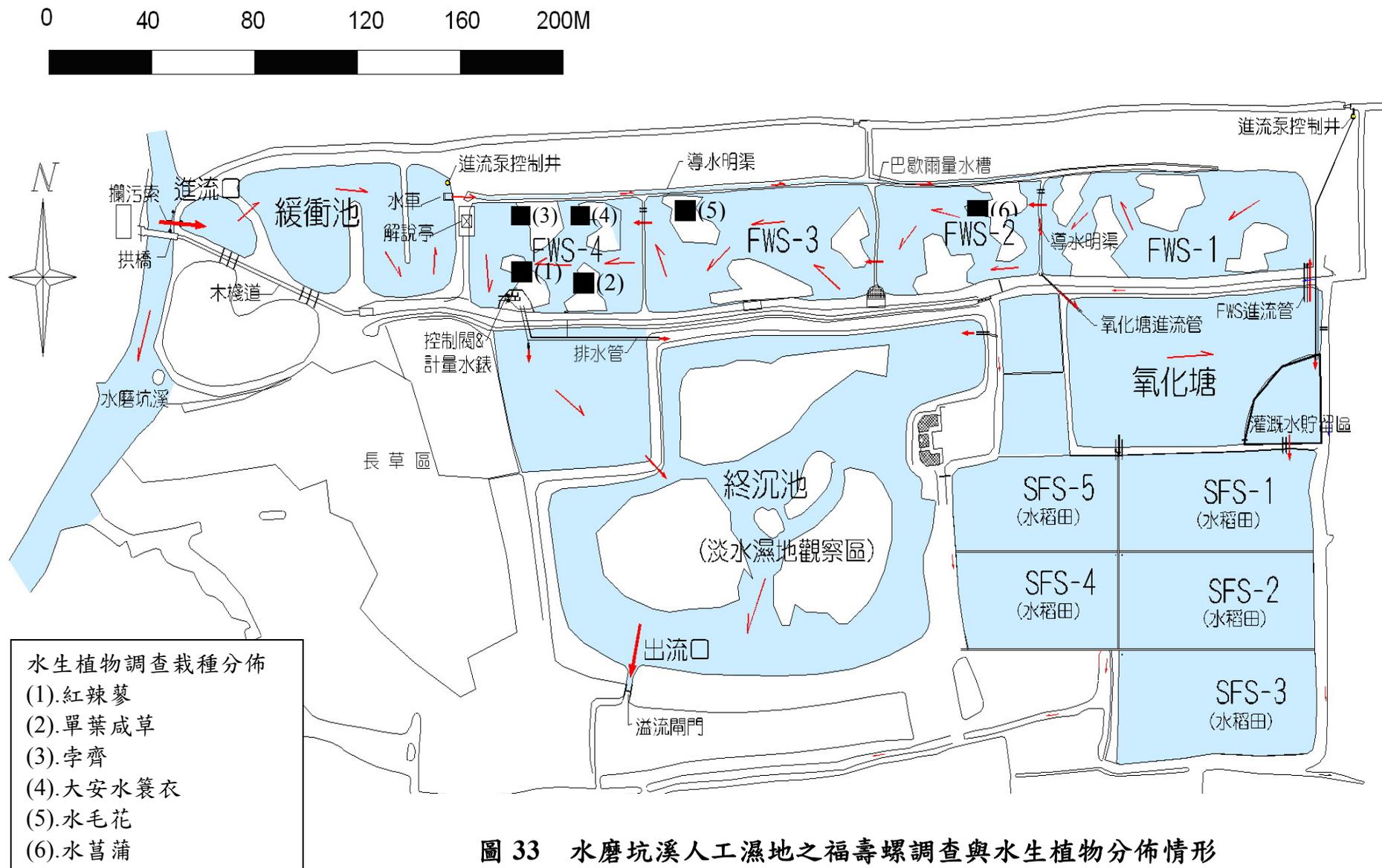
表 61 2005 年 8 月水磨坑溪人工濕地福壽螺卵與植物、水深之關係

植物名稱	植物高度 (cm)	平均株高 (cm)	調查株數	平均水深 (cm)	卵距水面平均 高度 (cm)	卵在植株高度 平均百分比(%)	卵的平均數目 (顆)
紅 辣 蓼	74~103	88	9	29.2	29.2	55.1	99.5
單葉咸草	73~83	77	9	17.4	17.4	45.8	130.6
大安水蓼衣	38~56	47	2	16.5	30.5	86.3	117.8
葶 薺	57~137	97	18	21.0	22.3	45.9	156.2
水 毛 花	41~100	76	32	13.2	24.1	50.0	94.2
菖蒲	35~55	49	5	3.0	21.0	68.6	198.0

調查的結果顯示福壽螺對產卵的植物具有選擇性，主要以挺水性植物為主，偶爾也在水面匍匐性的植物如空心菜的植株上產卵，這顯示雌福壽螺在產卵時選擇植株較粗糙，挺出水面的植株。雌福壽螺產卵時會移到較淺的深度。例如在 6 月移到較淺的 3.3-8.8cm 水深爬上草莖產卵。在 8 月於 3.0-29.2cm 的水深，爬上草莖產卵，在較淺的水深，產卵距水面的距離在 13.6-22.3cm 的高度；而在較深的水，產卵位置距水面的距離在 17.4-30.5cm。而在 6 月份產卵的平均數目，在不同的水生植物為 206.4-347.2 顆，多於 8 月份的 94.2-156.2 顆，這代表為了減少福壽螺滋生繁殖在 6 月份砍伐挺水性水生植物，比在 8 月份更有效，而且砍伐到植株距水面約 10 公分，很少福壽螺會在水面 10 公分之上產卵。

#### 4.7.2 結論與建議

目前的人工濕地都有福壽螺出現，但是人工濕地水位有變動，福壽螺的密度較低，讓人工濕地有間歇性的放乾，福壽螺的體積將較小，不過福壽螺是濕地內水生植物的攝食者，所以水生植物生長愈多，福壽螺生長的機會就愈多。目前對福壽螺有效的生物防除，無法用於人工濕地。以福壽螺產卵與水生植物、水深關係的機制，最好是在 6 月將人工濕地邊挺水性水生植物砍到距離水面 10cm 以下，將減少福壽螺產卵的選擇，進而減少其數目。



## 4.8 人工濕地的維護與管理——水分的管理

持續提供濕地足夠的水，這是管理與維護人工濕地的第一要件，如果人工濕地沒有水，那就不是濕地；在自然的狀態下大部分的人工濕地難以滯留水量，因此必須用人工的方式：抽水馬達、引水明渠或暗管來供水。甚至再加上底部襯砌，以防漏水。

但是人工濕地也非無限制的給過多的水，濕地裡給多少水才合宜，必須符合水分的質量平衡與對污染淨化能力的上限。因為要有理論基礎與數學的演算，方不至淪為個人的主觀與隨意。人工濕地要在台灣有根有基的發展，必須要有物理、化學、生物的基礎理論為底子，並依據現場的條件來進行數學性的計算，以求得客觀、科學性的結果。非常的可惜，在過去諸多的人工濕地設計或規劃報告裡，很少看到「計算」，因此報告裡所寫的、所畫的、所拍的、所種的、所估計的都不是「計算」的結果。如果要提升人工濕地工程的層次，工程師必須知道如何計算。

人工濕地的水分供給，可以依水分質量平衡來做計算，其基本式為：

$$Q_i - Q_o = Q_p + Q_{ET} + Q_R \quad \dots\dots\dots (1)$$

$Q_i$  為濕地入流的水量

$Q_o$  為濕地出流的水量

$Q_p$  滲漏的水量

$Q_{ET}$  濕地蒸發散量

$Q_R$  為濕地之降雨量減去徑流量，又稱為有效雨量

天然濕地與人工濕地最大的差別在天然濕地的  $Q_i$  是重力流入， $Q_p$  的水量很小， $Q_R$  是重要的輔助水量來源，但是人工濕地  $Q_i$  需要特別用工程的方式取得， $Q_R \ll Q_i$ ，故忽略不計，所以(1)可改寫為

$$Q_i = Q_o + Q_p + Q_{ET} \quad \dots\dots\dots (2)$$

因此滿足人工濕地的蒸發散量、滲漏量，與排水量是人工濕地最低之供水水量。

$Q_{ET}$  是水文學的估算或量測，著名的方法有

### (1).Penman Method

是以大氣的特性來計算蒸發散，

$$ET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 15.36 W_f (e_a - e_d) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\Delta$  為蒸氣與溫度關係曲線的斜率

$\gamma$  為溫度常數 (psychrometer constant)，代表單位大氣壓下蒸發所需的潛熱(latent

heat)

$R_n$  為日照淨輻射 (net radiation) 量

$G$  為熱量到水面與植物表面的熱傳導量，或稱為顯熱 (sensible heat)

$W_f$  為風運動對熱傳導的影響因子，又稱為風函數 (wind function)

$e_a$  為平均溫度下的飽和蒸氣壓

$e_d$  為平均溫度下的實際蒸氣壓

由(3)式呈現 Penman Method 是由輻射熱與風對熱質量流(mass flow)的影響來計算蒸發散量。在風小的地區，輻射熱超過風對蒸發散的影響；反之，在風大的地方，風的影響將比輻射熱顯著。Penman Method 所需的量測項目為淨輻射、與風速氣溫與相對溫度，目前已有整套的氣象測量儀可以監測這些因子，並且可以連線即時顯示監測數值，國外大型濕地多有些氣象裝置，配合水門，用此計算濕地的供水量，這是台灣可以發展的目標。

## (2).Modified Penman Method:

由於 Penman 在 1948 年所推導的理論，雖然有熱傳導與空氣動力學 (aerodynamic) 為基礎，但是監測項目較多，簡化為

$$ET = C(WR_n + (1 - \omega)f(u)(e_a - e_d)) \dots\dots\dots (4)$$

$C$  為調整因子 (adjustment factor)

$\omega$  為溫度影響權重 (temperature-related weighting factor)

(4)式為聯合國世界糧食組織認定的蒸發散量計算式而廣被採用

## (3) Jensen-Haise Method

Jensen-Haise Method 是在 1963 年提出，主要是由太陽輻射量(solar radiation)直接用來計算蒸發散量，故又稱為太陽輻射法(solar radiation method)，其計算方法為

$$ET = C_T (T - T_x) R_x \dots\dots\dots (5)$$

$$G = \frac{1}{(38 - 2E/305) + 7.3 \frac{50mb}{e_2 - e_1}} \dots\dots\dots (6)$$

$$T_x = -2.5 - 0.14(e_2 - e_1) - E/550 \dots\dots\dots (7)$$

Jensen-Haise Method 沒有 Penman method 準確，但是在 5~30 day 的平均 ET 值計算具可靠性。

## (4).Blaney-Criddle method

Blaney-Criddle method 是在 1945 年提出，主要認為 ET 值是與日常光照時間 (daylength) 與日平均長度成正比，故又稱為強度法

$$ET = a_4 + b_4 P \delta 0.46T + 87 \dots\dots\dots(8)$$

C 是日照時數比率

T 是月平均溫度

$a_4$  與  $b_4$  為 ET 與直線關係的截距與斜率，其計算所得為月平均蒸發量。

**(5) 蒸發皿法**

蒸發皿法(pan method)式實地測量水面的蒸發散量，一般用美國 A 級蒸發皿(U. S. clean A pan)，其直徑 121 cm，深度 25.5 cm，以耐酸性的蒙耐合金(Monnel metal)所製，放於地上 15 cm 的木架框上，其水深保持在 5.0 ~ 7.5 cm 的筒緣下，以勾尺量測之，每日量測的水位變化差即為該日之蒸發散量( $E_p$ )

$$ET = K_c K_p E_p \dots\dots\dots(9)$$

$K_c$  為水生植物蒸散係數

$K_p$  為蒸發皿的因子，在退潮的環境，一般在平均風速小於 2.0 m/sec 的地方， $K_p = 0.85$ ；風速 2.0~4.9 m/sec 的地方， $K_p = 0.60$ ；風速大於 8.1 m/sec 的地方  $K_p = 0.50$ 。

根據 2005 年在台北新海橋人工濕地於 2~4 月測定水生植物之  $K_c$  值，以表示之

**表 62 台北新海橋人工濕地水生植物蒸散係數**

植物名稱	2 月	3 月	4 月
水龍	0.8	1.9	2.5
覆瓦龍莎草	2.8	7.0	6.0
高野黍	0.7	1.1	2.8
葶薺	1.2	1.7	1.8
大安水蓼水	1.4	3.0	1.8
馬藻	0.8	1.0	1.7
斷節莎	1.2	1.0	2.0
過長沙	1.0	1.0	1.3
田字草	0.6	0.5	0.6
水毛花	1.0	2.0	2.9
蘆葦	0.9	1.1	1.8
異花莎草	1.0	1.0	2.4
水丁香	1.0	1.0	1.7
青萍	0.6	0.1	1.3
香蒲	1.1	5.0	2.1

註：1. 2 月、3 月、4 月最高溫度分別為 29°C、31°C、32°C；  
2. 水生植物在 1 月 1 日開始移苗種植

由表 62 知，人工濕地強勢水生植物的平均蒸發散量在 2 月份為自由水面的 1.1 倍，3 月份為 1.9 倍，4 月份為 2.2 倍，顯然水生植物增加耗水損失，根據 Little (1970) 的研

究，在夏天蒸發散量可以增加到自由水面的 4-5 倍，張文亮(1979)也提出布袋蓮蒸發散量在 9 月份約為自由水面蒸發散量的 2.8 倍。

優勢性的水生植物蒸發散量必高於自由水面，主要是水葉面積指數 (leaf area index)較高，葉面積指數是單位水域面積  $A_w$  上的葉面積  $A_l$  簡稱為 LAI

$$LAI = \frac{A_l}{A_w} \dots\dots\dots(10)$$

一般  $A_l$  是以測積儀來測定。水生植物的 LAI 越大，其蒸發散也越大，如布袋蓮在生長旺盛時，LAI 高達 14.8，其蒸發散比自由水面可高達 8.0 (張文亮 1979)。

由長期累積的水文資料顯示，台灣年降雨量約為  $900 \times 10^8$  m，相當於年降雨量的 29.2%，台灣的地理面積為 36,000 km<sup>2</sup>，所以平均日蒸發散量若以水深表之為

$$\frac{263 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{year}}{360 \times 10^8 \text{ m}^2} = 0.73 \text{ m}/\text{year} = 2.00 \text{ mm}/\text{day}$$

$2.00 \text{ mm}/\text{day}$  是台灣土地蒸發散的平均值。以水稻田為例，每年以 2000 mm 來說，其中水稻用水：水面蒸發：土壤滲漏 = 2：1：5 (金城 1950)，但是一期水稻生產以 120 日計算，因此二期作其用水日期共 240 日，佔一年的 2/3，因此台灣長期的水稻田用

水值，來比擬類似水田的人工濕地，一年用水量，因此需乘以  $(1 + (1 - \frac{2}{3})) = \frac{4}{3}$

	$2000 \text{ mm} \times \frac{1}{8} \times \frac{4}{3} = 333 \text{ mm}$
自由水面蒸發散量	
	$2000 \text{ mm} \times \frac{2}{8} \times \frac{4}{3} = 667 \text{ mm}$
水生植物蒸發散量	
	$2000 \text{ mm} \times \frac{5}{8} \times \frac{4}{3} = 1667 \text{ mm}$
水田滲漏量	

---

總共 2667 mm

相當於每日用水  $\frac{2667 \text{ mm}}{365 \text{ day}} = 3.71 \text{ mm}/\text{day}$

這是人工濕地給水的最低水深。因為一般水田是黏質土，在水田約以  $4.6 \text{ mm}/\text{day}$  來計算，這是長期灌溉下所形成最低滲漏量，這種土地稱為熟田，台灣的最低水田滲漏量為  $2.69 \text{ mm}/\text{day}$ ，但是在黏質壤土可提高到  $6.31 \text{ mm}/\text{day}$ ，砂質壤土更高到  $16.91 \text{ mm}/\text{day}$ ，砂質土更可超過  $100 \text{ mm}/\text{day}$  (金城，1950)，而台灣人工濕地大部份是重新挖填，屬於「新地」，而非「熟田」，新地滲漏量可達熟田滲漏量的 1~2 倍，甚至 2 倍以上 (金城，1950)。台灣濕地的用水可以下表示之。

表 63 台灣人工濕地的水量平衡

場址地點	踏勘日期	入流量 (m <sup>3</sup> /day)	出流量 (m <sup>3</sup> /day)	面積 (ha)	底土土壤	底土處理	給水方式	給水量 (mm/day)	耗水量 (mm/day)	單位面積用水率 (l/ha sec)
1.台北縣新海橋人工濕地	每月監測	2377	1050	6.00	砂土	黏土晶化	抽水機	46.4	25.9	4.58
2.台北縣雙溪中學人工濕地	95/05/09	6.4	6.2	0.15	砂質壤土	皂土毯	抽水機重力	4.3	0.1	0.49
3.台北縣渡南橋人工濕地	每月監測	130	57	0.3	礫土	皂土毯	抽水機重力			5.01
4.台北市水磨坑溪人工濕地	每月監測	913	84	6.7	坩質粘土	無	抽水機			1.58
5.新竹縣頭前溪竹林人工濕地	95/05/02	3039	494	4.38	砂質壤土	黏土晶化	重力(有水門)	69.4	58.1	8.03
6.彰化縣洋子厝溪南勢社區人工濕地	95/05/09	723	40	0.42	砂質土		重力(有水門)			19.92
7.嘉義縣朴子溪介壽橋人工濕地	95/07/18	3387	50	0.6	壤土	皂土毯	抽水機	564.5	556.1	65.34
8.嘉義縣朴子溪中洋子人工濕地	95/07/18	785	700	0.58	砂質土			135.3	14.7	15.67
9.嘉義縣荷包嶼人工濕地	95/07/18	4992	4992	1.59	坩質土					36.34
10.台南縣安順排水人工濕地	95/06/05	2184	2346	0.25	砂質壤土					101.11
11.台南縣港尾社區人工濕地	95/06/05	120	120	0.45	坩質壤土					3.09
12.台南市灣裡社區人工濕地	95/06/05	1099	1099	0.15	砂質壤土					84.8
13.高雄縣舊鐵橋人工濕地	95/06/06	25782	966	36.18	砂質黏壤土	皂土布	重力	17.2	68.6	8.25
14.屏東縣武洛溪人工濕地	95/06/06	10163	2476	9.00	砂礫土	黏土(20cm)	抽水機	112.9	85.4	13.07
15.花蓮縣鯉魚潭人工濕地	95/07/10	1744	130	0.14	砂土	防水布	重力	150.7	57.9	17.44
16.台東縣關山人工濕地	95/07/10	1731	1731	0.95	礫石	皂土布	重力	149.6	149.2	17.31
17.澎湖縣觀音亭人工濕地	95/07/19	51	51	0.05	砂質壤土	皂土布	抽水機	102.0	102.0	11.80
18.澎湖縣火燒坪人工濕地	95/07/19	1000	13.1	1.5	砂土			66.7	65.8	7.71
19.台北市舊貴子坑溪關渡自然公園礫間接觸氧化示範模場	95/05/26	90.1	5.6	0.04	黏質壤土	黏土	抽水機	66.7	65.8	
20.桃園縣河底橋地下礫間接觸場	95/05/02	18547	12312	0.20	砂土					
21.澎湖縣通訊營礫間接觸場	95/07/19	6.8	15.0	0.02						
22.台北縣岳崙營區地下滲濾處理	95/05/02	687	10	0.74	坩土	水泥槽	重力	92.8	91.5	
23.澎湖縣同心湖非點源 BMP 工法	95/07/19	38	544	0.10	砂土		重力	38.0	-506 (逆水流)	

## 4.9 人工濕地的維護與管理——水量量測與控制

台灣人工濕地在管理上最需要輔導之處，是普遍性地缺乏「水量量測的裝置」，這是由規劃階段就存在的問題，而後延伸到設計、施工階段。由於缺乏水量量測，即使在設計初期有設計水量，施工、驗收也很少針對水量去驗收。因此，即使有污染濃度去除百分率，或是排放水質需要低於某個限值的要求，只要讓污水在人工濕地停留夠久，讓自然淨化作用充份進行，很容易滿足這兩項要求，但是這不是人工濕地建造的目的，人工濕地要去除污染，不只有水質的要求，也有水量的要求。但是在工程驗收時期沒有水量的驗證，將來也不易有水量的管理，所以在人工濕地的入口水建造量水裝置是必須的。台灣目前具量水設施的人工濕地是水磨坑溪人工濕地（採巴歇爾水槽），翡翠水庫渡南橋人工濕地（採三角堰），貴子坑溪礫間接觸（採水錶），而水錶在低流量時，量測常有偏差，因此三角堰與巴歇爾水槽是人工濕地量測水量最容易裝置。

### 4.9.1 巴歇爾水槽(Parshall Flume)

巴歇爾水槽為在開放渠道中用以測量水量的簡單構造物，在一般濕地設計規劃中，常被使用。台北市水磨坑溪人工濕地中，就利用此結構物作為測量水流流量的工具(如圖 34)。

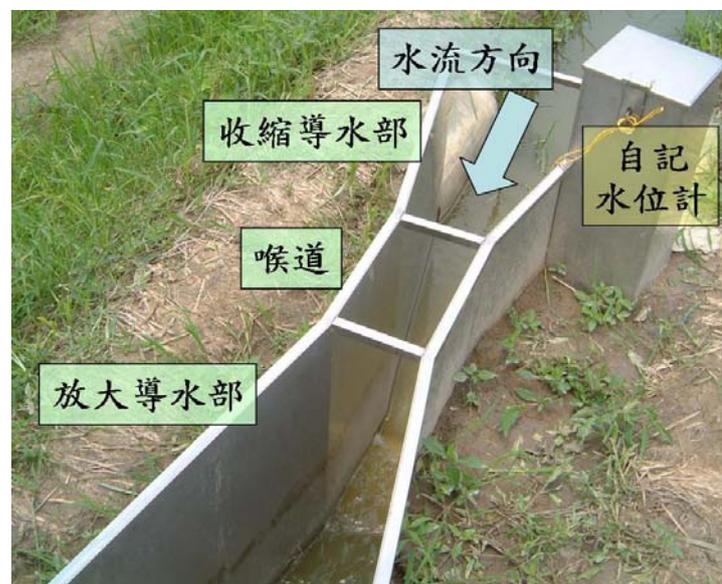


圖 34 台北市水磨坑溪人工濕地巴歇爾水槽

巴歇爾水槽之結構如圖 35 所示，具有三個部份：收縮導水部(Converging Section)、喉道(Throat)、放大導水部(Diverging Section)。藉由渠道中渠寬的縮減，強制水流形成超臨界流(supercritical flow)，而後再藉由渠寬增加，使超臨界流經過水躍(hydraulic jump)，而到亞臨界流區(subcritical flow)。藉由量測流通過結構物時，水位高低的變化，進而求得流量。

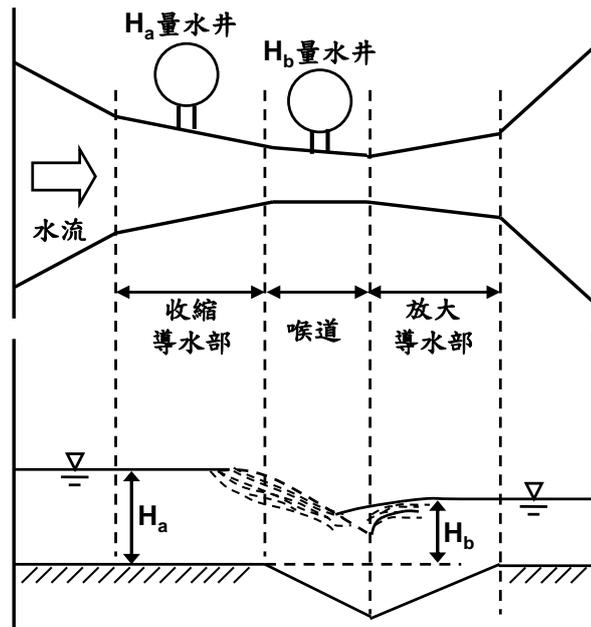


圖 35 巴歌爾水槽構造圖

由於利用巴歌爾水槽量測流量主要藉由渠寬縮減以達成目的，若就單純因渠道收縮而不考慮坡度變化時，對水位變化所產生的影響可由簡單的計算得知：

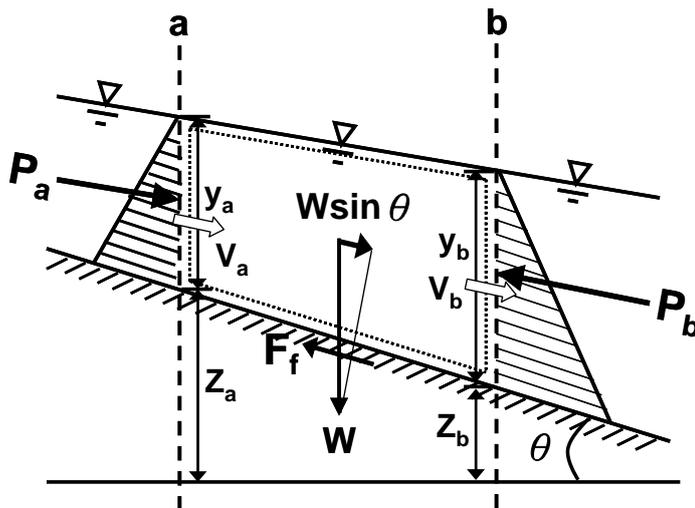


圖 36 水流剖面圖

Momentum equation:

$$P_a A_a - P_b A_b + W \sin \theta - F_f = \rho Q (\beta_b V_b - \beta_a V_a) \quad \dots \dots \dots (1)$$

(其中 a 為收縮部斷面、b 為喉道斷面)

若假設為水平、光滑、無摩擦力之渠道：

$$\begin{aligned} \text{則} \quad \theta &= 0 \\ \beta_a &= \beta_b = 1 \\ F_f &= 0 \end{aligned}$$

又 a.b.斷面均為矩形斷面

$$\text{則由上述(1)式} \quad \Rightarrow P_a H_a B_a - P_b H_b B_b = \rho Q (V_b - V_a)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{1}{2} \gamma H_a^2 B_a - \frac{1}{2} \gamma H_b^2 B_b &= \rho Q \left( \frac{Q}{b_b H_b} - \frac{Q}{b_a H_a} \right) \\ \Rightarrow \frac{1}{2} g (H_a^2 B_a - H_b^2 B_b) &= Q^2 \left( \frac{1}{B_b H_b} - \frac{1}{B_a H_a} \right) \\ \Rightarrow Q^2 &= \frac{g (H_a^2 B_a - H_b^2 B_b)}{2 \left( \frac{1}{B_b H_b} - \frac{1}{B_a H_a} \right)} = f(H_a, H_b, B_a, B_b) \end{aligned}$$

如同上述式子所示，流量 Q 計算取決於  $f(H_a, H_b, B_a, B_b)$ ，由此可知，由於  $B_a, B_b$  取決於原使結構設計為已知，只要分別量測兩斷面的水位高  $H_a, H_b$  即可得知流量 Q。

實際應用巴歇爾水槽做為測量工具時，由於喉部及放大導水部均有坡度，如此將使計算更為複雜，但由於制式巴歇爾水槽的各部結構均有一定規格，因此在測量流量時，只要套入經驗公式，並在經過經驗值的修正，即可得到流量。

由於尾水端的水位不同，依照通過水槽時水位變化的高低差，情況可分為兩種：若尾水端的水位較低，則為自由流，發生一般水躍；若尾水端的水位較高，高於水躍後之水位，則會形成潛流，即發生浸沒水躍。在實際使用時，必須先藉由所測得  $H_a, H_b$  的比例，以表 64 判斷是否產生潛流。

表 64 不同規格之巴歇爾水槽流況類型

喉道寬度	$H_b/H_a$	流況
3 吋、6 吋、9 吋	$\leq 0.6$	自由流
	$> 0.6$	潛流
1~8 呎	$\leq 0.7$	自由流
	$> 0.7$	潛流
$>10$ 呎	$\leq 0.8$	自由流
	$> 0.8$	潛流

一般說來，若情況為發生單純的一般水躍，其經驗式均為

$$Q = JH_a^n$$

其中 J 為水槽大小關係因數，n 為指數，依據水槽規格的不同而變化，如表 65 所示。Q 為流量，單位：c.f.s.。 $H_a$  為上游收縮部斷面水頭，單位為 ft。

表 65 不同規格之巴歇爾水槽自由流公式相關係數[1]

喉道寬度 規格	J	n	喉道寬度 規格	J	n
3 吋	0.992	1.547	1~8 呎	4W	$1.52W \cdot 0.026$
6 吋	2.06	1.58	10~50 呎	$3.687W+2.5$	1.6
9 吋	3.07	1.53	(喉道寬 W：呎)		

若發生潛流，則所得的結果須再利用  $H_a, H_b$  的比例，依照圖 37，並配合喉道寬度，以表 66 之校正係數校正，以調整流量。

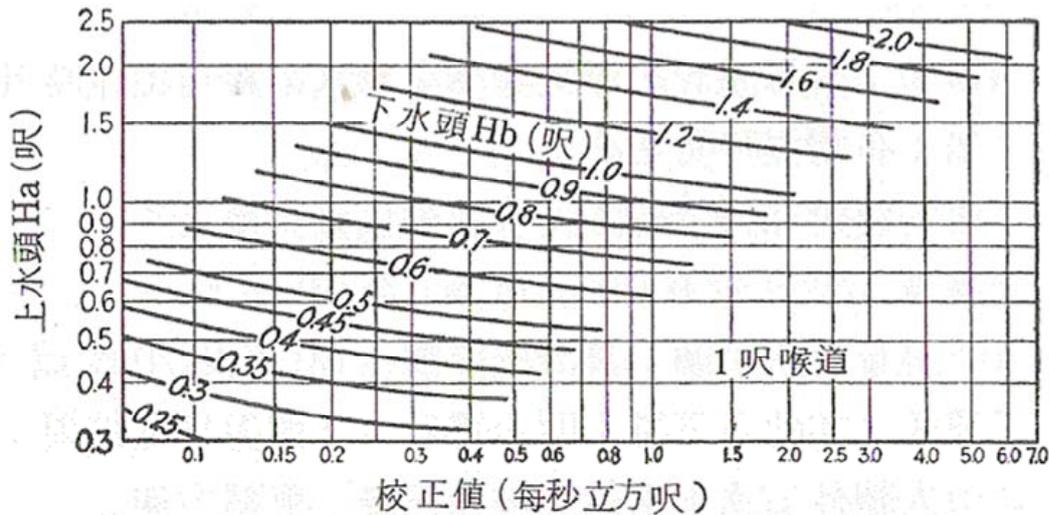


圖 37 喉道寬為 1 呎之巴歇爾水槽潛流流量校正圖[1]

表 66 巴歇爾水槽喉道大於 1 呎潛流流量校正係數[1]

喉道寬 (W 呎)	係數 (M)	喉道寬 (W 呎)	係數 (M)	喉道寬 (W 呎)	係數 (M)
1	1.0	6	4.3	20	2.0
1.5	1.4	7	4.9	25	2.5
2	1.8	8	5.4	30	3.0
3	2.4	10	1.0	40	4.0
4	3.1	12	1.2	50	5.0
5	3.7	15	1.5		

[例]：使用喉道寬 3 呎之巴歇爾水槽，若測得  $H_a$  為 1.3 呎， $H_b$  試計算 0.7 呎，試計算通過流量。

[答]：  $0.7/1.3 = 0.538 < 0.7$  ( $\therefore$  自由流)

由表二，喉寬為 3 呎時， $J=4 \times W=12$ ， $n=1.547$

$$\therefore \text{公式為 } Q = 0.992 y_1^{1.547} = 12 \cdot (1.3)^{1.547} = 18.0074 \text{ c.f.s.}$$

(即為所得流量)

[例]：使用喉道寬 3 呎之巴歇爾水槽，若測得  $H_a$  為 1.3 呎， $H_b$  試計算 1.1 呎，試計算通過流量。

[答]：  $1.1/1.3 = 0.846 > 0.7$  ( $\therefore$  潛流發生)

由  $H_a = 1.3, H_b = 1.1$ ，校正值約為 1.0 c.f.s.

由於喉寬為 3 呎，校正係數為 2.4

$$\therefore \text{校正流量} = 1.0 \times 2.4 = 2.4 \text{ c.f.s.}$$

喉寬為 3 呎時， $J=4 \times W=12$ ， $n=1.547$

$$\therefore \text{公式為 } Q = 0.992 y_1^{1.547} = 12 \cdot (1.3)^{1.547} = 18.0074 \text{ c.f.s.}$$

→ 實得潛流流量 =  $18.0 - 2.4 = 15.6$  c.f.s.

### 4.9.2 三角堰(Triangular weir)

在一般明渠中，常以三角堰用以作為測量流量的工具。因其結構簡單，設備單純，在台灣許多濕地設計上，相當常見(如圖 38)。其簡單計算如下：

若假設在不考慮束縮情形下，如圖 38 所示，可在流線上選擇適當兩點 from Bernoulli equation:

$$h + 0 + 0 = (h - y) + \frac{v^2}{2g} + 0 \Rightarrow v = \sqrt{2gy}$$

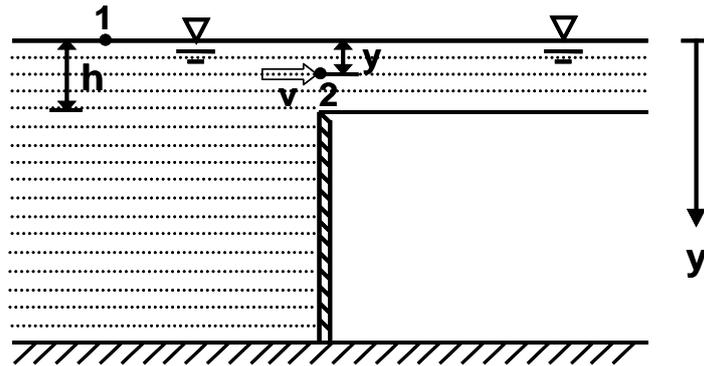


圖 38 理想化無束縮之堰流情形

又由圖 38 所示，

$$B = 2(H - y) \tan \frac{\theta}{2}$$

流量 Q 為截面流速積分

$$\begin{aligned} Q &= \int v dA = \int_0^H \sqrt{2gy} 2(H - y) \tan \frac{\theta}{2} dy \\ &= 2\sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} \int_0^H (Hy^{1/2} - y^{3/2}) dy = 2\sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} \left( \frac{2}{3} Hy^{3/2} - \frac{2}{5} y^{5/2} \right) \Big|_0^H \\ &= 2\sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} \left( \frac{2}{3} - \frac{2}{5} \right) H^{5/2} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} H^{5/2} \end{aligned}$$

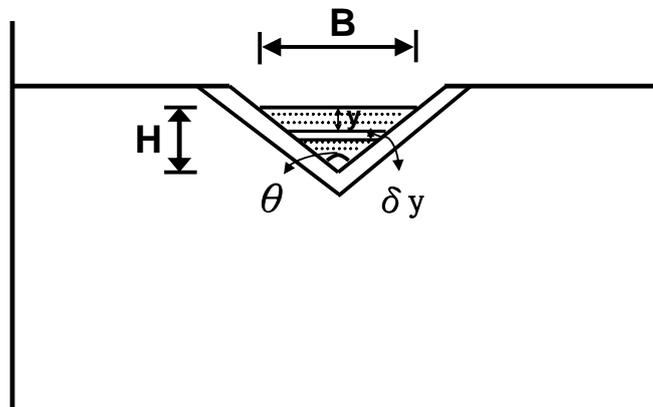


圖 39 三角堰之截面圖形

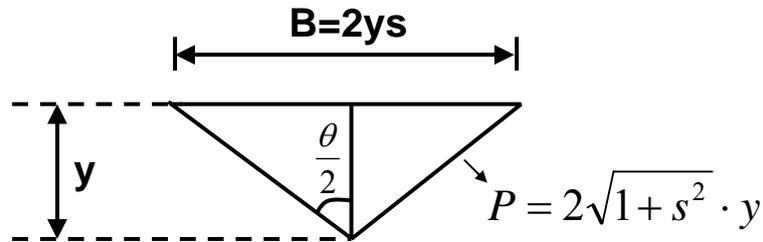
故由三角堰求取流量公式即為：

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} H^{\frac{5}{2}} = f(\theta, H)$$

其中  $\theta$  為三角堰本身結構，故為已知，再經由測量得到水位高度  $H$ ，則可求出流量。

[例]：若所使用之三角堰須符合最佳水力斷面，則如上圖 39 中之  $\theta$  值應為多少？

[答]：



如上圖所示，若假設水深為  $y$ ，斜面斜率為  $s$ ，

則 渠寬  $B = 2ys$

斷面積  $A = y^2 s$

潤周  $P = 2\sqrt{1+s^2} y$

依照最佳水力斷面定義：

即在相同的斷面積  $A$  下， $P$  為最小值

$$A = y^2 s \Rightarrow y = \sqrt{\frac{A}{s}}$$

由

$$\therefore P = 2\sqrt{\frac{A(1+s^2)}{s}}$$

$$\frac{\partial P}{\partial s} = 2\sqrt{A} \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{1+s^2}{s} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{2s(s) - (1+s^2)}{s^2} \right)$$

$$= 2\sqrt{A} \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{1+s^2}{s} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{s^2 - 1}{s^2} \right)$$

$$= \sqrt{A} \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{s}{1+s^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{s^2 - 1}{s^2} \right)$$

$$\text{令 } \frac{\partial P}{\partial s} = 0$$

$$\rightarrow s=1 \text{ or } -1$$

$$\therefore \frac{\theta}{2} = 45^\circ \Rightarrow \theta = 90^\circ$$

[例]：以台北縣坪林渡南橋人工濕地所使用之三角堰為例，符合最佳水力斷面，即

$\theta=90^\circ$ 。以 95 年 9 月 14 日所測得的水位高度為 13 cm，試求其流量？



照片 32 台北縣渡南橋人工濕地三角堰

[答] :  $\tan \frac{\theta}{2} = \tan 45^\circ = 1$

$$\therefore Q \approx \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81} \cdot 1 \cdot (0.13)^{5/2} = 0.0144 \text{ m}^3/\text{sec} \quad (\text{未考慮束縮係數})$$

[例]：以台北縣大漢溪新海橋人工濕地所使用之三角堰為例，符合最佳水力斷面，即  $\theta=90^\circ$ 。以所測當日的水位高度為 2 cm，試求其流量？



照片 33 台北縣大漢溪新海橋人工濕地三角堰

[答] :  $\tan \frac{\theta}{2} = \tan 45^\circ = 1$

$$\therefore Q \approx \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81} \cdot 1 \cdot (0.02)^{5/2} = 0.0001 \text{ m}^3/\text{sec} \quad (\text{未考慮束縮係數})$$

## 參考文獻

### 第三篇 水質自然淨化工法操作維護之管理

#### 3.1 植生處理法 (Plant Treatment)

##### 3.1.1 表面流式人工濕地(Free Water Surface,FWS)

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. 嘉南藥理科技大學環境科技發展中心，2003，台南市灣裡社區人工濕地操作維護及管理方法標準作業手冊，台南市環保局。
3. Ann-Karin Thoren, Catherine Legrand, Karin S. Tonderski, 2004, Temporal Export of Nitrogen from a Constructed Wetland: Influence of Hydrology and Senescing Submerged Plants, *Ecological Engineering* 23 (2004) 233-249
4. Boca Raton, FL.
5. Crites, Ronald W., Reed, Sherwood C., Middlebrooks, E. Joe, Robert K., 1995, *Natural System for Waste Management and Treatment*, New York : McGraw-Hill
6. EPA, Office of Wetlands, Oceans and Watersheds Washington, DC, 200, *Guiding Principles for Constructed Treatment Wetlands: Providing for Water Quality and Wildlife Habitat*, EPA 843-B-00-003
7. Hans B. Wittgern, Trond Mahlum, 1997, Wastewater treatment wetlands in cold climates, *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35 NO. 5, pp. 45-53
8. Hanna Obarska-Pempkowiak, Katarzyna Klimkowska, 1999, Distribution of Nutrients and Heavy Metals in a Constructed Wetland System, *Chemosphere.* Vol. 39, No. 2, pp. 303-312
9. J. B. Nyakang'o and J. J. A. van Bruggen, 1999, Combination of a Well Functioning Constructed Wetland with a Pleasing Landscape Design in Nairobi, Kenya, *War. Sci. Tech.*, Vol. 40, No. 3, pp. 249-256
10. Joan S. Thullen, James J. Staroris, S. Mark Nelson, 2005, Managing Vegetation in Surface-flow Wastewater-treatment Wetlands for Optimal Treatment Performance, *Ecological Engineering* 25 (2005) 583-593
11. Julie K. Cronk, 1996, Constructed Wetlands to Treat Wastewater from Dairy and Swine Operations: a Review, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 58 (1996) 97-114
12. Kadlec, R.H. and R.L. Knight, 1996, *Treatment Wetlands*. CRC Press LLC.
13. L. Piest, 1981. "Evaluation of Waterfowl Habitat Improvements on the Apache/Sitgreaves National Forests, Arizona." USDA/Forest Service. 119pp.

14. Margaret Greenway and John S. Simpson, 1996, Artificial Wetlands for Wastewater Treatment, Water Reuse and Wildlife in Queensland, Australia, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 33, No. 10-11, pp. 221-229
15. Michal Green, Iris Safray & Moshe Agami, 1996, Constructed Wetlands for River Reclamation: Experimental Design, Start-up and Preliminary Results, *Bioresource Technology* 55 (1996) 157-162
16. R.B.E. Shutes, D.M. Revitt, I.M. Lagerberg, V.C.E. Barraud, 1999, The Design of vegetative constructed wetlands for the treatment of highway runoff, *The Science of the Total Environment* 235(1999)189-197
17. Richard C. Russell, 1999, Constructed wetlands and mosquitoes: Health Hazards and management Options- An Australian perspective, *Ecological Engineering* 12(1999) 107-124
18. Robert L. Knight, 1997, Wildlife Habitat and Public Use Benefits of Treatment Wetlands, *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35 NO.5, pp. 35-43
19. T.Gschlobl, C. Steinmann, P. Schleypen, A. Melzer, 1998, Constructed Wetlands for Effluent Polishing of Lagoons, *Wat.Res.* Vol.32, NO.9, pp.2639-2645.
20. U.S. EPA, A Hand Book of Constructed Wetlands, Volume 1: General Consideration.
21. U.S. EPA, 2000, Constructed wetlands treatment of municipal wastewater.
22. U.S. EPA, 1993, Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat 17 Case Studies, EPA832-R-93-005

### **3.1.2 地下流式人工濕地(Subsurface Flow System, SFS)與植栽濾床人工濕地(Vegetated Submerged Beds, VSB)**

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. Ann-Karin Thoren, Catherine Legrand, Karin S. Tonderski, 2004, Temporal Export of Nitrogen from a Constructed Wetland: Influence of Hydrology and Senescing Submerged Plants, *Ecological Engineering* 23 (2004) 233-249
3. Avelino Nunez Delgado, Eugenio Lopez Periago & Francisco Diaz-Fierros Viqueira, 1995, Vegetated Filter Strips for Wastewater Purification: a Review, *Bioresource Technology* 51 (1995) 13-22
4. Crites, Ronald W., Reed, Sherwood C., Middlebrooks, E. Joe, Robert K., 1995, *Natural System for Waste Management and Treatment*, New York : McGraw-Hill
5. EPA, Office of Wetlands, Oceans and Watersheds Washington, DC, 200, *Guiding Principles for Constructed Treatment Wetlands: Providing for Water Quality and Wildlife Habitat*, EPA 843-B-00-003

6. J. B. Nyakang'o and J. J. A. van Bruggen, 1999, Combination of a Well Functioning Constructed Wetland with a Pleasing Landscape Design in Nairobi, Kenya, *War. Sci. Tech.*, Vol. 40, No. 3, pp. 249-256
7. Joan S. Thullen, James J. Staroris, S. Mark Nelson, 2005, Managing Vegetation in Surface-flow Wastewater-treatment Wetlands for Optimal Treatment Performance, *Ecological Engineering* 25 (2005) 583-593
8. Julie K. Cronk, 1996, Constructed Wetlands to Treat Wastewater from Dairy and Swine Operations: a Review, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 58 (1996) 97-114
9. Kimberley Cameron, Chandra Madramootoo, Anna Crolla, Christopher Kinsley, 2003, Pollutant Removal from municipal Sewage Lagoon Effluents with a Free-Surface Wetland, *Water Research* 37 (2003) 2803-2812
10. Hans B. Wittgern, Trond Mahlum, 1997, Wastewater treatment wetlands in cold climates, *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35 NO.5, pp. 45-53
11. Hanna Obarska-Pempkowiak, Katarzyna Klimkowska, 1999, Distribution of Margaret Greenway and John S. Simpson, 1996, *Artificial Wetlands for Wastewater Treatment, Water Reuse and Wildlife in Queensland, Australia*, *War. Sci. Tech.*, Vol. 33, No. 10-11, pp. 221-229
12. Michal Green, Iris Safray & Moshe Agami, 1996, Constructed Wetlands for River Reclamation: Experimental Design, Start-up and Preliminary Results, *Bioresource Technology* 55 (1996) 157-162
13. Nutrients and Heavy Metals in a Constructed Wetland System, *Chemosphere*. Vol. 39, No. 2, pp. 303-312
14. R.B.E. Shutes, D.M. Revitt, I.M. Lagerberg, V.C.E. Barraud, 1999, The Design of vegetative constructed wetlands for the treatment of highway runoff, *The Science of the Total Environment* 235(1999)189-197
15. Richard C. Russell, 1999, Constructed wetlands and mosquitoes: Health Hazards and management Options- An Australian perspective, *Ecological Engineering* 12(1999) 107-124
16. Robert L. Knight, 1997, Wildlife Habitat and Public Use Benefits of Treatment Wetlands, *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35 NO.5, pp. 35-43
17. T. Gschlobl, C. Steinmann, P. Schleypen, A. Melzer, 1998, Constructed Wetlands for Effluent Polishing of Lagoons, *Wat. Res.* Vol. 32, NO. 9, pp. 2639-2645.
18. U.S. EPA, *A Hand Book of Constructed Wetlands, Volume 1: General Consideration.*
19. U.S. EPA, 2000, *Constructed wetlands treatment of municipal wastewater.*
20. U.S. EPA, 1993, *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat 17 Case Studies*, EPA832-R-93-005

### **3.1.3 水生植物系統 (Aquatic Plant System,APS)**

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. Crites, Ronald W., Reed, Sherwood C., Middlebrooks, E. Joe, Robert K., 1995, Natural System for Waste Management and Treatment, New York : McGraw-Hill
3. Metcalf & Eddy, 1991, Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. McGraw-Hill international editions.
4. T.Gschobl, C. Steinmann, P. Schleypen, A. Melzer,1998, Constructed Wetlands for Effluent Polishing of Lagoons, Wat.Res.Vol.32,NO.9, pp.2639-2645.
5. U.S.EPA, 1988, Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment
6. U.S. EPA,1993,Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat 17 Case Studies, EPA832-R-93-005

### **3.1.4 草溝 (Grassed Waterway)**

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. 環保署，1999，非點源污染調查及最佳管理作業之功能研究（五）子計畫（二）-農業用地非點源污染調查及最佳管理作業功能規範之研究：第二部分-技術規範
3. Barr Engineering Company, 2001, Urban Small Sites Best Management Practice Manual - Stormwater BMPS for Cold Climates, Minnesota Council Environmental Services
4. Natural Resources Conservation Service, 2003, Conservation Practice Standard, CODE 412
5. Virginia Department of Conservation and Recreation Division of Soil and Water Conservation, 1999, Virginia Stormwater Management Handbook, First Edition, VOLUME I

### **3.1.5 草帶 (Vegetated Filter Strip)**

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. Barr Engineering Company, 2001, Urban Small Sites Best Management Practice Manual - Stormwater BMPS for Cold Climates, Minnesota Council Environmental Services
3. City of Chula Vista, 2000, Development and Redevelopment Projects Storm Water Management Standards Requirements Manual.

4. New Jersey Department of Environmental Protection, Division of Watershed Management, 2003, New Jersey Stormwater Best Management Practice Manual

### **3.1.6 人工浮島 (Artificial Floating Island, AFI)**

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. 李明達，2002，以生態工法整治污染湖泊之規劃研究，碩士論文，國立中山大學海洋環境研究所
3. Gloyna, E. F. (1968): Basis for waste stabilization pond designs, Advances in water quality improvement,
4. edited by Gloyna, E. F. and Eckenfelder, W. W. Jr., 397-408, Univ. of Texas.
5. Hu, Xiao Zhen, 2002, Ecological Engineering Techniques For Lake Restoration In Japan, River Environment Group, Public Works Research Institute, Tsukuba International Center, JICA
6. Hougetsu, K (1974) : Aquatic ecosystem, Ecology lecture 3, 94, Kyoritsu publ. (in Japanese)
7. Sakurai, Y et al. (1985) : Growth speed and production of emerged plants at Lake Biwa, Lake Kasumigaura, and Chikuma river, Report of Japan limnology in Koushinetsu area, 10, 20. (in Japanese)
8. Tsuno, H et al. (1977) : The characteristics of water quality at Takahamairi bay in Lake Kasumigaura in summer, The 11th symposium on water pollution study, Japan water pollution society pp.13~18. (in Japanese)

## **3.2 土壤處理法 (Soil Treatment)**

### **3.2.1 慢滲系統 (Slow Rate Systems, SR)**

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. Crites, Ronald W., Reed, Sherwood C., Bastian, Robert K., 2000, Land treatment systems for municipal and industrial wastes, New York : McGraw-Hill
3. Crites, Ronald W., Reed, Sherwood C., Middlebrooks, E. Joe, Robert K., 1995, Natural System for Waste Management and Treatment, New York : McGraw-Hill
4. CANADA, Government of Yukon, 2005, Land Treatment Facilities (Guidelines for Construction, Operation and Decommissioning)
5. State of Georgia Department of Natural Resources Environmental Protection Division Watershed Protection Branch, 2006, Guidelines for Slow-Rate Land Treatment of Wastewater

6. U.S. State of Michigan, Department of Environment Quality ,2006, guidance for the development of a discharge management plan
7. U.S. Environmental Protection Agency, 1977, Operation Manual—Stabilization Ponds, EPA 430/9-77-012, U.S. Environmental Protection Agency, OWPO, Washington, D.C.
8. U.S. Environmental Protection Agency, 1978, Field Manual—Performance, Evaluating and Troubleshooting of Municipal Wastewater Treatment Facilities, EPA 430/9-78-001, U.S. Environmental Protection Agency, OWPO, Washington, D.C.
9. U.S. Environmental Protection Agency, 1981, Process Design Manual for Land Application of Wastewater, EPA 623/1-81-013, U.S. EPA CERL, Cincinnati, Ohio.
10. U.S. Army Corps of Engineers, 1982, Engineering and Design - Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater, EM 1110-1-501, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
11. U.S. Army Corps of Engineers, 1983, Engineer Manual—Land Treatment Systems Operation and Maintenance, EM1110-2-504, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
12. U.S. Environmental Protection Agency, 1995, Process Design Manual—Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage, EPA 625/R-95-001, U.S. Environmental Protection Agency CERL, Cincinnati, Ohio.
13. Weston, Roy F., Inc., 1982, “Evaluation of Operation and Maintenance Practices and Design Considerations of Land Application Systems,” EPA 600/2-82-039, U.S. Environmental Protection Agency, MERL, Cincinnati, Ohio.

### **3.2.2 漫地流 (Overland Flow Systems, OF)**

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. Antti Huttunen, Kaisa Heikkinen, Raimo Ihme, 1996, Nutrient Retention in The Vegetation of an Overland Flow Treatment System in Northern Finland, Aquatic Botany 55 (1996) 61-73
3. Crites, Ronald W., Reed, Sherwood C., Bastian, Robert K., 2000, Land treatment systems for municipal and industrial wastes, New York : McGraw-Hill
4. Crites, Ronald W., Reed, Sherwood C., Middlebrooks, E. Joe, Robert K., 1995, Natural System for Waste Management and Treatment, New York : McGraw-Hill
5. CANADA, Government of Yukon, 2005, LAND TREATMENT FACILITIES (Guidelines for Construction, Operation and Decommissioning)

6. U.S. State of Michigan, Department of Environment Quality ,2006, guidance for the development of a discharge management plan
7. U.S. Environmental Protection Agency, 1977, Operation Manual—Stabilization Ponds, EPA 430/9-77-012, U.S. Environmental Protection Agency, OWPO, Washington, D.C.
8. U.S. Environmental Protection Agency, 1978, Field Manual—Performance, Evaluating and Troubleshooting of Municipal Wastewater Treatment Facilities, EPA 430/9-78-001, U.S. Environmental Protection Agency, OWPO, Washington, D.C.
9. U.S. Environmental Protection Agency, 1981, Process Design Manual for Land Application of Wastewater, EPA 623/1-81-013, U.S. EPA CERL, Cincinnati, Ohio.
10. U.S. Army Corps of Engineers, 1982, Engineering and Design - Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater, EM 1110-1-501, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
11. U.S. Army Corps of Engineers, 1983, Engineer Manual—Land Treatment Systems Operation and Maintenance, EM1110-2-504, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
12. U.S. Environmental Protection Agency, 1995, Process Design Manual—Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage, EPA 625/R-95-001, U.S. Environmental Protection Agency CERL, Cincinnati, Ohio.
13. Weston, Roy F., Inc., 1982, “Evaluation of Operation and Maintenance Practices and Design Considerations of Land Application Systems,” EPA 600/2-82-039, U.S. Environmental Protection Agency, MERL, Cincinnati, Ohio.

### **3.2.3 快滲 ( Rapid Infiltration Systems, RI )**

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. Crites, Ronald W., Reed, Sherwood C., Bastian, Robert K., 2000, Land treatment systems for municipal and industrial wastes, New York : McGraw-Hill
3. Crites, Ronald W., Reed, Sherwood C., Middlebrooks, E. Joe, Robert K., 1995, Natural System for Waste Management and Treatment, New York : McGraw-Hill
4. CANADA, Government of Yukon, 2005, LAND TREATMENT FACILITIES (Guidelines for Construction, Operation and Decommissioning)
5. U.S. State of Michigan, Department of Environment Quality ,2006, guidance for the development of a discharge management plan

6. U.S. Environmental Protection Agency, 1977, *Operation Manual—Stabilization Ponds*, EPA 430/9-77-012, U.S. Environmental Protection Agency, OWPO, Washington, D.C.
7. U.S. Environmental Protection Agency, 1978, *Field Manual—Performance, Evaluating and Troubleshooting of Municipal Wastewater Treatment Facilities*, EPA 430/9-78-001, U.S. Environmental Protection Agency, OWPO, Washington, D.C.
8. U.S. Environmental Protection Agency, 1981, *Process Design Manual for Land Application of Wastewater*, EPA 623/1-81-013, U.S. EPA CERI, Cincinnati, Ohio.
9. U.S. Army Corps of Engineers, 1982, *Engineering and Design - Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater*, EM 1110-1-501, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
10. U.S. Army Corps of Engineers, 1983, *Engineer Manual—Land Treatment Systems Operation and Maintenance*, EM1110-2-504, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
11. U.S. Environmental Protection Agency, 1995, *Process Design Manual—Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage*, EPA 625/R-95-001, U.S. Environmental Protection Agency CERI, Cincinnati, Ohio.
12. Weston, Roy F., Inc., 1982, "Evaluation of Operation and Maintenance Practices and Design Considerations of Land Application Systems," EPA 600/2-82-039, U.S. Environmental Protection Agency, MERL, Cincinnati, Ohio.

### 3.2.4 地下滲濾 (Subsurface Wastewater Infiltration System, SWIS)

1. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
2. 台北縣政府環境保護局，2003，瑪鍊河流域鄉村污水削減細部規劃計畫-期末報告
3. U.S. EPA, 2002, *Onsite wastewater treatment systems manual*.

### 3.3 接觸氧化法 (Contact Oxidation Treatment)

1. 大野善一郎，1990，土壤トレンチによる生活排水の個別処理と窒素除去についての2,3の問題点，水処理技術，31(2)，101-107
2. 行政院環境保護署，水質自然淨化工法彙編，93年，計畫編號 EPA-93-G107-02-203。
3. 矢野洋一郎，1982，自淨作用を応用した河川の浄化，用水と廃水，24(1)，13-24
4. 本橋敬之助，1997，水質汚濁と湖沼利用における経済的損失—漁業を中心にして—，水処理技術，38(9)，445-450

5. 歐陽嶠暉，2004，污水處理廠操作與維護，詹氏書局。

## 第四篇 水質自然淨化工法操作維護之原理

### 4.2 人工濕地的專家評估系統

1. Lanouette, W., 1994. Genius in the shadows- The Biography of Leo Szilard. University of Chicago Press.
2. Metcalfe-Smith, J. L., 1996. Biological water-quality assessment of rivers: use of macroinvertebrate communities. Chapter 3. River Restoration. p.17-43.
3. Vannote, R. L., G. W. Minshall, and K.W. Cummis et al. 1980. The river continuum concept. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science. Vol.37. p.130-137.
4. Karr, J. R. 1991. Biological integrity: A long-neglected aspect of water resource management. Ecological Application. Vol.1. p.684. Metcalfe-Smith, J. L., 1996. Biological water-quality assessment of rivers: use of macroinvertebrate communities. Chapter 3. River Restoration. p.17-43.
5. US EPA. 1990. Biological Criteria: National Program Guidance for Surface Water. United States Environmental Protection Agency. EPA-440/5-90-004.

### 4.5 人工濕地的維護與管理——蚊子

1. 連日清，2004年，台灣蚊種檢索，藝軒圖書出版社。
2. 李學進，1991，影響蚊子產卵之重要因子，中華昆蟲特刊第6號，23-35頁。
3. Batzer, D.P., and V.H. Resh. 1992. Macroinvertebrates of a California seasonal wetland and responses to experimental habitat manipulation. Wetlands. Vol. 12, p. 1-7.
4. Batzer, D.P., and V.H. Resh. 1992. Wetland management strategies that enhance waterfowl habitats can also control mosquitos. Journal American Mosquitos Control Association. Vol. 8, p. 117-125.
5. Beattie, M.VF., 1930. Physico-chemical factors in relation to mosquito prevalence in ponds. Journal of Ecology. Vol. 18. p.67-80.
6. Cockrell, B.J. 1984. Effects of temperature and oxygenation on predator-prey overlap and prey choice of *Notonecta Glanca*. Journal of Animal Ecology. Vol. 53. p.519-532.
7. Dexter, J.S., 1913. Mosquitoes pollination orchids Science. Vol. 37, p. 867.
8. Fish, D., S.R. Carpenter. 1982. Leaf litter and larval mosquito dynamics in tree-hole ecosystems. Ecology. Vol. 63, p. 283-288.
9. Garber, S.D. 1987. The Urban Naturalist. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A.
10. Hershey, A.E., A.R. Lima, G.J. Niemi, and R.R. Regal. 1998. Effects of *Bacillus Thuringiensis Israelensis* (BTI) and methoprene on nontarget macroinvertebrates in Minnesota wetlands. Ecological Applications. Vol. 8. p. 41-60.
11. Irwin, W.H., 1942. The role of certain northern Michigan bog mats in mosquito production. Ecology. Vol. 23, p. 466-477.
12. Maguire, B., Jr. D. Belk, and G. Wells. 1968. Control of community structure by

- mosquito larvae. Ecology. Vol. 49, p. 207-210.
13. Russell, R.C. 1999. Constructed wetlands and mosquitos: Health hazards and management options – An Australian perspective. Ecological Engineering. Vol. 12, p. 107-124.
  14. Senior-White, R. 1928. Algae and the food of anopheline larvae. Indian Journal Medical Research. Vol. 15. p. 969-988.
  15. Sorvice, M.W. 1993. Mosquito Ecology-Field Sampling Methods. Elsevier Applied Science. U.S.A.
  16. Spielman, A., and M. Dantonis. 2002. Mosquito. Faber and Faber Limited. England.
  17. Taylor, W.P., 1934. The need for natural areas. Ecology. Vol. 15, p.328-329.
  18. Tennessen, K.J. 1993. Production and suppression of mosquitos in constructed wetlands. In: Moshiri, G.A. (Ed.), Constructed Wetlands for Water Quality Improvement p. 591-601. Lewis Publishers. U.S.A.
  19. Thullen, J.S., J.J. Sartoris, and W.E. Walton. 2002. Effects of vegetation management in constructed wetland treatment cells on water quality and mosquito production. Ecological Engineering. Vol. 18, p. 441-457.
  20. Droste, R.L., Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment, 1997, J. Wiley & Sons.

#### 4.6 人工濕地的維護與管理——老鼠

1. 王博優，鼠類之生態與防除。(中華環境有害生物協會網站：<http://www.cpc.org.tw/publish/17> 鼠類之生態與防除 lee.doc)
2. 王博優，王瑞圖。1997。鼠類對穀類食物之喜食程度，台灣糖業研究所研究彙報，158卷，31-44頁。
3. 王博優，王瑞圖。1999。飼料品質對鼠類喜食性之影響，台灣糖業研究所研究彙報，164卷，31-39頁。
4. 王博優。1998。野鼠室內繁殖(1)-鬼鼠的生育狀況，台灣糖業研究所研究彙報，159卷，31-42頁。
5. 劉炯錫，1990，陽明山國家公園菜公坑山區嚙齒類動物與植物社會關係之研究，國立台灣大學森林學研究所碩士論文。
6. 陳彥君。1987。嘉義地區農地野鼠之族群動態研究。東海大學生物學研究所碩士論文。
7. 徐爾烈、吳尹文、楊鈞任、王敦濤、方尚仁。2002。金門及馬祖地區鼠形動物之種類、分佈及密度調查。植物保護學會會刊，44(2): 67-74.
8. Baker, S. J., and C. N. Clarke, 1988. Cage trapping coypus (*Myocastor coypus*) on baited rafts. Journal of Applied Ecology. Vol. 25, p.41-48.
9. Birney, E. C., W. E. Grant, and D. D. Baird. 1976. Important of vegetable cover to cycles of *Microtus* population. Ecology, Vol. 57, p. 1043-1051.
10. Brown, P. R. and G. R. Singleton. 1999. Rate of increase as function of rainfall for house mouse *Mus domesticus* population in a cereal-growing region in Southern

Australia. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 36, p.483-493.

11. Cauron, A. D., 2000. Effect of land-cover changes on mammals in a neotrophic region: a modeling approach. *Conservation Ecology*. Vol. 14, p.1676-1692.
12. Choquenot, D., and D. A. Ruscoe. 2000. Mouse population eruptions in New Zealand forests: The role of population and seedfall. *Journal of Animal Ecology*. Vol. 69, p.1058-1070.
13. Cook, G. D., S. A. Setterfield, and J. P. Maddison. 1996. Shrub invasion of a tropical wetland: implications for weed management. *Ecological Applications*, Vol. 6, p.531-537.
14. Gosling, L. M., S. J. Baker, and C. N. Clarke. 1988. An attempt to remove coypus (*Myocastor coypus*) from a wetland habitat in East Anglia. *Journal of Applied Ecology*, Vol. 25, p.49-62.
15. Haugen, A. O., 1941, Home range of the cottontail rabbit. *Ecology*. Vol. 23, p.355-386.
16. Krebs, C.J., 1999. *Ecological Methodology*. Addison Wesley Longman, Inc. U.S.A.
17. Landry, Jr. S. O. 1970. The rodentia as omnivores. *The Quarterly Review of Biology*. Vol.45, p.351-372.
18. Odum, E.P, and G.W. Barrett. 2005. *Fundamentals of Ecology*. Thomson Learning, Inc. U.S.A.
19. Schwartz, O. A., and P. D. Whiston. A 12-year study of vegetation and mammal succession on a reconstructed tallgrass prairie in Iowa. *American Midland Naturalist*. Vol. 117, p.240-249.
20. Tanner, C. C., and V. C. Kloosterman. 1997. *Guidelines for Constructed Wetland Treatment of Farm Dairy Wastewaters in New Zealand*. NIWA Science and Technology, Series No.48, New Zealand.

#### 4.7 人工濕地的維護與管理——福壽螺

1. Jonnay, T J., and S. R. Beissinger, 1993. Apple snail (*Pomacea doliodes*) and fresh-water crab (*Ditocarcinus dentatus*) population fluctuations in the Lianos of Venezuela. *Biotropica*. Vol. 25, p.206-214.
2. Beissinger, S. R., 1995, Modeling extinction in periodic environments : everglades water levels and snail bite population viability. *Ecological Applications*. Vol. 5, p.618-631.
3. 楊平世、陳郁蕙，2003，福壽螺入侵對台灣農業和生態影響之經濟評估，92 農科—1.8.1—檢—BB147。
4. 陳威庭，2004，有害生物對台灣農業生態環境之經濟分析——以福壽螺、果蠅為例，國立台灣大學農業經濟學研究所碩士論文。
5. 林金樹，1986，福壽螺之生態觀察，台中區農業改良場研究彙報，13 卷：59-66 頁。
6. 李彥錚，1997，福壽螺 *Pomacea canaliculatea* (Lamarck, 1819) 在台灣之擴散及族群分析，國立台灣大學動物學研究所碩士論文。
7. 廖君達、林金樹，2000，青魚防治福壽螺之效果評估，植保會刊，42 卷，260-261 頁。

8. 廖君達、林金樹，2001，福壽螺生態及綜合管理技術之研究，台中區農情月刊 17:3 頁。

#### **4.9 人工濕地的維護與管理——水量量測與控制**

1. 施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二，灌溉排水原理，中央圖書出版社，1982，pp.314-319

圖書統一標號  
EPA-034950278

本報告係受受託單位或計畫主持人個人之意見，僅供行政院環境保護署施政之參考

本報告之著作財產權屬行政院環境保護署所有，非經行政院環境保護署同意，任何人均不得重製、仿製或為其他之侵害