

台灣鄉村住宅生活污水處理改善方式之研究 - 以「蘆葦床處理系統」為例 -

Improvement for Domestic Wastewater Treatment of the Country Houses in Taiwan — A Case Study of Reed Bed Treatment System—

台灣大學生物環境
系統工程學系
教授

韓選棠*

Siian-Tang Han

台灣大學生物環境
系統工程學系
教授

張尊國

Tsun-Kuo Chang

台灣大學生態工程
研究中心
研究助理

陳江河

Chiang-Ho Chen

摘 要

目前台灣鄉村住宅生活污水處理的問題，除了整體污水處理系統規劃不良，污水處理設備效能不佳與民眾缺乏維護觀念，亦是導致環境水質污染情況日益嚴重的原因。本研究嘗試以歐洲地區逐漸發展成熟，且應用日趨普遍的人工溼地技術—「蘆葦床處理系統」為對象，探討其對台灣鄉村生活污水處理的改善效益。蘆葦床處理系統為效能穩定、低成本、省能源且環境友善的自然處理技術，且在英國等歐洲國家經過長時期演變改良，於當地環境、氣候、植栽物種乃至於社會層面等條件上，均有相對的發展條件，故本研究除針對蘆葦床處理系統的原理與組成進行研析外，同時也以實際操作案例，來探討此一系統作為台灣鄉村住宅生活污水處理改善方式的適用性。

由水質分析結果可知，蘆葦床實做案例於初期運轉階段，懸浮固體物的平均去除率約為 84.65%、氨氮約為 65.68%、正磷酸鹽約為 54.11%、生化需氧量約為 69.82%，處理後之放流水可符合「放流水標準」及「灌溉用水水質標準」。整體建置成本方面，本系統用於一般 5-6 人之小型獨戶住宅的生活污水處理，建置費用約在新台幣 4-6.5 萬元之間，而施工操作及維護均容易掌握，且具有水資源再利用、野生動物庇護所，以及景觀休閒與生態教育等附加價值。

關鍵詞：蘆葦床處理系統，自然處理，鄉村生活污水。

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系教授，106 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，smarthouse@ntu.edu.tw

ABSTRACT

In Taiwan, small rural communities have special problems regarding solutions to their wastewater management problems. They are quite often limited in poor design and their ability to maintain necessary service to sustain the facilities operated adequately.

The reed bed treatment system has been successfully used for small communities in Europe for many years, giving stable and excellent pollutant removed. The reed beds offer a potentially low cost, low maintenance and environmental friendly biological method of wastewater treatment. In this study, a reed bed treatment system was employed at a rural house in Taiwan. The evaluations of the use and efficacy of this system to improve water quality are discussed.

During the preliminary stage of the study, operational data are reported, the average removed rate were observed for this system: SS, 84.65%; NH_3-N , 65.68%; PO_4^{3-} , 54.11%; and BOD_5 , 69.28%. The effluent of this system meets the requirement of both EPA's effluent standard and COA's irrigation water quality standard. The construction cost for a 5-6 persons unit is about 4,000~65,000 NT dollars. Besides the functions for water quality improvement, the benefits of water reuse, habitat for wildlife and educational values are also recognized.

Keywords: Reed bed treatment system, Natural treatment, Rural wastewater.

一、前言

依據環保署 2005 年版「環境白皮書」調查資料顯示，台灣地區 50 條重要河川水質檢測結果，計有 36% 的河段遭受到不同程度之污染。推論其原因乃台灣地區近年來工商經濟發展迅速、都市人口集中、畜牧業興盛、土地開發利用失當等因素，所產生的大量廢污水，在缺少嚴格且具執行力的法令規範下，加上民眾對於環境保護觀念普遍缺乏，隨意排放污廢水所致。水域污染源之污染排放量比例，以生活污水為最高，其次是工業廢水和畜牧廢水。各大都會區河川如淡水河、田寮河、中港溪及大甲溪等，生活污水佔各類污染源總污染量之比例更高達 50%~90%。

被視為解決污水問題最佳方法之污水下水管道系統建設，是現階段國家發展的重大建設項目，但污水下水管道之建設，多以人口集中之都市地區為優先，而常常忽視了人口數較少的鄉村地區。然而由於部份農產業逐漸轉型為休閒產業，每逢假日，一些熱門的農遊景點便會湧入大量遊客，生活污水量劇增，原有的污水處理系統更無

法負荷，使得部分污水在完全未經過適當處理之狀況下，即行排放至鄉間渠道或大小河川之中，惡化了環境污染，也對生態資源產生負面的影響。

台灣近年來持續推動「綠建築」政策，在綠建築評估指標中，「污水及垃圾改善」被視為具有環境保護與健康意義的一項指標。在內政部建築研究所編訂之「綠建築設計技術彙編」(林憲德等，2001)中，「生態溼地污水處理」是被推薦應用的一項污水處理技術。這項技術在國外已行之有年，並且已逐漸發展成熟。雖然在發展條件上受限於較大土地之需求，但在現今全球一片崇尚生態保育、永續利用與環境保護之趨勢下，以無污染、低耗能、低成本，以及環境友善為基礎的人工溼地自然處理系統，正逐漸被推廣應用於解決部分污水處理之問題。

另一方面，台灣加入 WTO 之後，傳統農業需求降低，農地大量釋出，加上近年來缺水問題嚴重，造成有相當大比例之農地處於廢耕或休耕狀態，並任其荒廢，或是依靠休耕補助措施而勉強種植一些綠肥植物，這無疑是土地利用方面的

一大損失。因此，若能加以善用此閒置土地，同時發展出一套可以兼顧污水處理、環境保護、水資源保育、生態教育等多重功能之人工溼地自然處理系統，或可為鄉村地區整體環境與風貌之改善帶來正面影響。

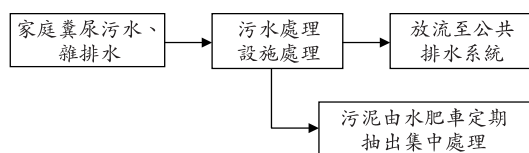
二、生活污水處理方式

2-1 傳統之生活污水處理系統

傳統之生活污水處理系統大致分為個別式污水處理系統(化糞池、污水處理設施)及集中式污水下水道系統等二大類。

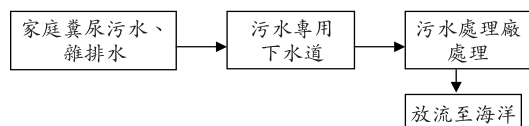
1. 個別式污水處理系統(化糞池、污水處理設施)

個別式污水處理系統依其廢水來源區分，可以分為單獨式化糞池及合併式污水處理設施等兩大類，二者最大之不同僅在於其處理之污水是否包含生活雜排水，而非在於其功能，個別式污水處理系統之處理流程如下所示。



2. 集中式污水下水道系統

集中式污水下水道系統係利用污水下水道來收集家庭中所產生的污水，包括廁所、浴室、廚房等使用後的髒水，經過一個密閉的管道，輸送到污水處理廠處理，處理後之水質達一定之標準後排放，其處理流程可如下所示。



2-2 自然處理系統

自然處理是利用環境介質本身自淨能力來淨化污水，當廢水進入環境介質後，其污染物會經由物理作用、生化分解反應以及自然的移轉等方式使污染物分解或移除，並使環境介質回復至原來的狀態，此一利用自然界各種反應過程處理

廢污水之工程技術，一般稱為自然處理系統(Natural Treatment Systems) (Metcalf & Eddy, 1991; 張尊國, 2003)。

自然處理系統大致可以分為土壤處理系統及水生處理系統等兩大類：

1. 土壤處理系統(Soil-based or Land-treatment system)

- (1) 慢速滲濾系統(Slow Rate Process): 將廢水施灌於具有植被的土壤上，所施灌的廢水經由植物吸收、入滲至地下水層、截留在土壤中或蒸散至大氣中。在廢水入滲的過程中，廢水中污染物質因土壤的過濾、吸附、生物分解及植物吸收等作用而去除。
- (2) 快速滲透系統(Rapid Infiltration): 將廢水施灌於高滲透性的土壤，如砂土或壤質砂土。廢水經施灌後絕大部份滲漏至地下水層，廢水中之有機物及懸浮固體物幾乎可以完全去除。
- (3) 地表漫流系統(Overland Flow): 將廢水施灌於有坡度且透水性低的土壤上，使其順著坡度流經有植被的地面，產生的地表逕流利用坡底明渠收集，而廢水在流動的過程中會形成一薄膜與土壤接觸，廢水中的有機物及懸浮固體物經由生物分解、沉降及過濾等機制去除。

2. 水生處理系統(Aquatic-based system)

- (1) 自然溼地處理系統(Natural Wetlands treatment system): 自然的溼地中，由植物提供微生物附著所需要的表面，有助於過濾及吸附廢水中的有機物，其機制包括物理性的沉澱、過濾作用，化學性的吸附、吸收、離子交換及氧化還原反應作用，以及生物性的代謝分解作用等。
- (2) 人工溼地處理系統(Constructed Wetlands treatment system): 一種以人工建造和管理的溼地處理系統，其性質及處理機制與自然溼地相似，內部填充濾料視廢水性質而定，一般為土壤、細沙或礫石。系統之型式分為自由水面系統(Free Water

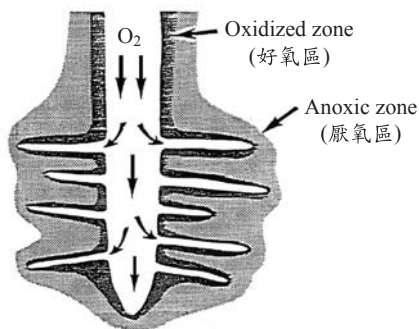


圖 1 溼地水生植物的根區效應(Brix, H., 1987)

Surface System, FWS)及地下流系統 (Subsurface Flow System, SSF)等二類。

- (3) 水生植物處理系統(Aquatic plant Wetlands treatment system): 此系統有漂浮性水生植物生長於水面上，水深一般約為 0.5~1.8m。

三、人工溼地污水處理技術

3-1 人工溼地的淨水原理與機制

1. 水生植物的根區效應

溼地具有淨化水質的功效，水生植物在此方面則扮演了很重要的角色，植物之所以能輔助去除污染物，是因為其具有「根區效應」(root zone effect) (如圖 1)，也就是植物可以將氧氣傳輸到根部，使附近土壤成為好氧區，而其他區域的土壤則為厭氧區，再由根部表面或其附近所附生的微生物，進行同化作用、異化作用、硝化、脫硝及磷的化學沉澱等作用，進而促使溼地中營養鹽物質的去除，而達到淨化水質的果效(Brix, H., 1987)。

一般水生植物都有將氧氣傳輸至根部的能力，並且根據不同植物種類之而有不同的輸氧效率，某些水生植物(如蘆葦 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.、香蒲 *Typha orientalis* Presl.)的地下莖相當發達，所以有較大的空間來傳導空氣，並將氧氣傳到根部形成一層圍繞根部的土壤好氧區，因此，若水生植物的地下根莖數目越多，對於水質淨化之幫助越大。

2. 各污染物在人工溼地中之去除機制

表 1 人工溼地中各污染物的去除機制

廢水組成	去除機制
生化需氧量 (BOD)	微生物分解(好氧與厭氧環境) 沉澱作用(有機物污泥和底泥的累積)
懸浮固體 (S.S.)	沉積作用/過濾作用
氮(N)	氨化作用後接續之硝化及脫硝作用 植物攝取 氮的揮發
磷(P)	土壤吸附(與土中的鋁、鐵、鈣及黏土的吸附-沉澱作用) 植物攝取
致病菌 (Pathogens)	沉積作用/過濾作用 自然死亡 溼地植物根部釋放之抗生素攻擊 無脊椎生物及其他微生物之捕食

資料來源：U.S.EPA, A Handbook of Constructed Wetlands, Vol.2.

進入人工濕地中的污水透過物理性的沉降、過濾、吸附與揮發作用，化學性的吸附、吸收、離子交換作用與氧化還原反應，以及生物性的代謝分解與攝食作用等，而將污染物自污水中移除(如表 1 及圖 2)，人工溼地中對於各污染物的去除機制十分複雜，以下簡述之(李志源，1997)。

- (1) 有機物之去除：進入溼地中之有機物包括可沉降固體及溶解性膠體物兩大類，可沉降固體有機物靠沉澱去除，而溶解性膠體物主要靠微生物之新陳代謝作用而去除，若在好氧環境下，有機物可被氧化成 CO_2 而釋出。
- (2) 懸浮固體物之去除：由於溼地內的流速緩慢，因此大部分的懸浮固體物可藉由沉澱作用去除，而當溼地介質或溼地植物之根部長滿大量之生物而形成一層厚的生物膜時，亦具有過濾性的機制而將懸浮固體物去除。
- (3) 氮之去除：氮在水體中的型態頗為複雜，一般可以分成有機氮及無機氮兩種型態，有機氮經過生物作用，可形成底泥中之腐植質，部分則水解成氨基酸，更進一步分解成無機氮。無機氮則藉由吸附、揮

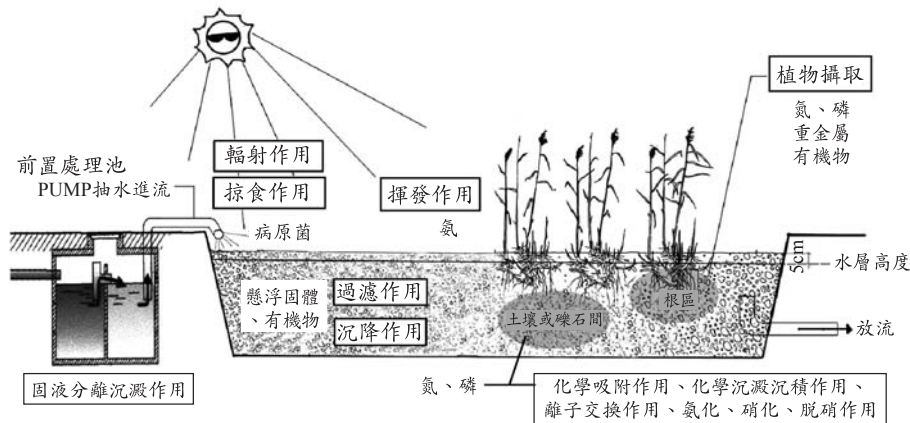


圖 2 人工溼地淨水機制概念圖

發、硝化與脫硝及植物吸收作用而自水中去除。

- (4) 磷之去除：溼地中磷之去除機制主要靠植物吸收、溼地介質的化學吸附、沉澱與錯合等作用，以及生物反應而將磷轉換成不溶性物質沉澱於底泥中，欲將磷從溼地中移除，必須透過收割植物、清除底泥等方式去除。
- (5) 致病菌之去除：溼地中所含之致病菌主要經由物理、化學及生物等作用而去除，但去除之程度與可靠度並不穩定，因此若欲將處理後之放流水做為與身體接觸性之用途，則需利用加氯消毒法以有效去除致病菌。

3-2 蘆葦床處理系統特性與組成

1. 蘆葦(*Phragmites*)的特性

蘆葦植物屬於禾本科、蘆葦屬(*Phragmites*)，為多年生草本植物。植株由地下綿延的根莖長出，一枝一枝地露出地表，莖粗而高大，中空且具節，桿高 2~5m，直徑為 0.5~2cm。蘆葦多生於灌溉溝渠、河堤沼澤地等，並具有發達之地下根莖(如圖 3)，到冬季時，大部分地上部會枯死，但仍存著枯黃的木質莖，而春季時由地下根莖萌發之新芽將取代枯黃之地上部。蘆葦花期為 11~12 月，能產生大量的種子，並藉由風和水力四處傳播，因此在河岸水域或田間水塘中，常可

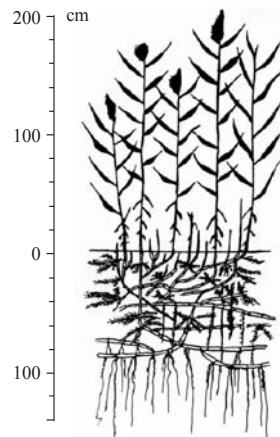


圖 3 蘆葦的地下莖及根部之垂直分佈狀況(Brix, H., 1987)

見其大面積的生長。

蘆葦中空的莖部構造，能夠將上部的空氣大量輸送至根部，可同時在根部形成好氧區及厭氧區，即使在冬季植株上部枯死時，其木質化的中空莖部仍有其輸送空氣的功能，而經由根區周圍的細菌及微生物的作用，亦即所謂的「根區效應」，能夠有效的分解水中的有機物質。除此之外，蘆葦本身生長需吸收養分，污水中經分解的氮、磷等物質提供了這一方面的需求，在一些針對蘆葦於污水中生長狀況的實驗中可以得知，蘆葦的枝條成長狀態參數及生長密度與污水的浸潤情況，有顯著的關係(Monika Hardej, 2001)，因此，藉由蘆葦植物的收割，可以將氮、磷等物質

自污水中有效移除。

2. 「蘆葦床處理系統」的發展與應用

以蘆葦做為污水自然處理之應用，最早的研究是由德國的 Seidel 及 Kickuth 於 1960 年代所提出，而真正積極發展「蘆葦床處理系統」(Reed Bed Treatment Systems, RBTS)是在 1980 年代開始於歐洲幾個國家。一般而言，從這些年的發展經驗可以得知，此系統對於 BOD 的去除率約在 80~90%，這是以一個典型的 BOD 出流濃度 20mg/L 為標準；總氮的去除率是 20~30%，而總磷的去除率是在 30~40% (Cooper, P.F., 1993)。除了有不錯的淨水效能外，「蘆葦床處理系統」還具有建造成本低、操作成本低、無副產品（噪音或臭氣）及環境安全等優點，因此目前在歐洲地區如英國等地，被公認可以適當地解決鄉村地區污水處理之問題，並且已逐漸普遍被設置運用 (Cooper, P.F., 1995)。

「蘆葦床處理系統」在國外的應用案例多採用污水、污泥分散式處理方式，家庭中所產生之生活污水先導入一個具有「固液分離」功能的前置處理池或化糞池，污水的部分藉由抽水馬達抽出，導入家用型蘆葦床處理系統中進行淨化，而污泥的部分則是累積至一定的量，再透過水肥車抽取運送至社區型的「污泥處理廠」集中處理。而「污泥處理廠」同樣也是透過蘆葦床處理系統的程序來進行污泥的分解與淨化工作。

3. 「蘆葦床處理系統」的組成

「蘆葦床處理系統」之基本組成構造可以分為前置處理設施、蘆葦床及出流設施等三部份，各部分之組成分析如下。

(1) 前置處理設施

為避免蘆葦床系統之堵塞，而減低其處理效能，通常污水在進入蘆葦床之前，會先進入一個做為前置處理的進流集水設施，此設施可以是一個簡單的沉澱集水槽或是化糞池。

(2) 蘆葦床

- a. 蘆葦床的基本形式：可分為「水平流程蘆葦床」(Horizontal flow reed-beds)及「垂直流程蘆葦床」(Vertical flow reed-beds)

等兩種。「水平流程蘆葦床」是目前在歐洲地區較廣被使用的型式，其構造上之特性為污水自進流入口入流後，以水平方向往出流端流動，介質為粒徑均一之土壤或礫石，系統較為單純，造價也較為經濟。「垂直流程蘆葦床」的應用歷史較短，目前仍處於發展階段，其構造上之特點為污水自床體表面上方進入，垂直滲透入床體中，介質為數層粒徑漸次變化之礫石所構成，底層則設有穿孔管收集處理後之放流水。「水平流程蘆葦床」在 BOD 及 SS 的去除能力上具有不錯的表現，但對於氨氮的去除能力較差；「垂直流程蘆葦床」在 BOD 及氨氮的去除能力上表現甚佳，優於「水平流程蘆葦床」，惟構造上較為複雜，成本亦較高 (Cooper, P.F., 1993)。

- b. 介質：系統之介質包含土壤及礫石兩大類，其中土壤的部分可再分成有機質土及礦質土，這兩種土壤的差異性極大，其化學性質對於溼地去除營養鹽效能的影響亦大，而不同粒徑的礫石會影響水流在溼地中之流速。另依據國內的研究報告(張惠婷, 1998)指出，以土壤做為系統介質在化學作用方面具有不錯的效果，而礫石則是在生物作用上較為明顯，但土壤的化學作用能力卻會隨著時間及使用強度而逐漸減弱，影響淨化之效能，因此必須經常更換土壤介質。
- c. 蘆葦床深度：一般建議平均深度約在 0.6m 左右，而在入流口處之深度應不小於 0.3m (Cooper, P.F., 1993)。其考量為蘆葦主要根區分佈多在 50~60cm 深度之間，因此，床的深度太深或過淺均會影響植物的作用。
- d. 床底防水：若是基地原始土壤的滲透係數 k_f 在 10^{-8} m/s 以下，表示有很高的黏土含量，同時可以將其加水打成泥漿狀，做為床底部之防水層，但如果滲透係數超過這個值，那就要考慮以塑膠布或其他的防水材料覆底，以防止水分滲漏 (Cooper, P.F.,

1993)。

- e. 蘆葦：在歐洲地區實際之應用案例中，已有針對不同的污水特性而採用不同品種的蘆葦，甚至運用高科技的生化技術培育新品種的蘆葦，以提高污水處理的效能。而依台灣水生植物圖誌(楊遠波等,2001)所述，台灣現有的蘆葦屬植物計有蘆葦(*Phragmites australis* (Cavan.) Trin.ex Steud.)及開卡蘆(*Phragmites karka* (Retz.) Trin.ex Steud.)等兩種，其型態特徵極為相似，但蘆葦通常生長於河堤沼澤及沿海溼地，而開卡蘆則生長在山區的溪畔或溼地上，對於乾燥或水生環境之適應力均良好。蘆葦的種植方式有利用地下莖的切塊繁殖、利用整株的蘆葦移植及利用溫室中培養的蘆葦幼苗栽植等三種，其中以幼苗栽植的方式最為有效，並且可以在較短(約4個月)的時間內成長到足以穩定處理污水的標準。

(3) 出流設施及儲水槽

出流設施包含連接蘆葦床的出流水收集管路，以及一組可以調整水位高度的裝置，這個裝置通常是以一個可以轉動角度的套環，或是數段可以調整高低的套管來連通控制蘆葦床的水位，此處同時也做為水質監測採樣之處。儲水槽的作用在於做為處理過之放流水暫時儲存的場所，以便水資源的再利用，並可配合做為生態水池之用，若水量過多時，可以透過溢流口排出。

4. 蘆葦床的尺寸

由於「垂直流程蘆葦床」的發展較晚，且構造及組成上較為複雜，相關設計方式及處理效能之資料尚不多見，因此在實際應用上，主要還是以「水平流程蘆葦床」較為被廣泛使用，而「水平流程蘆葦床」表面積之計算方式，目前在歐洲地區多採用由“Kickuth”所提出的方程式，一般稱之為「Kickuth Equation」(Cooper, P.; Green, B., 1995)。

$$Ah = \frac{Qd(\ln Co - \ln Ct)}{K_{BOD}} \dots\dots\dots (1)$$

式中

Ah = 床的表面積(m²)

Qd = 每日平均污水流量(m³/d)

Co = 每日平均 BOD 進流濃度(mg/L)

Ct = 每日平均 BOD 出流需求濃度(mg/L)

K_{BOD} = 反應速率常數(m/d)

在英國或一些西歐國家之 K_{BOD} 值通常取 0.1，此為針對一個普通強度之 BOD₅ 為 150~300 mg/L 的污水所訂。

上述之「Kickuth Equation」主要源自下列之一階反應式，

$$\frac{Ct}{Co} = \exp(-k_v \times HRT) \dots\dots\dots (2)$$

或是

$$HRT = \frac{\ln(Ct / CO)}{-k_v} \dots\dots\dots (3)$$

式中

k_v = 水溫度為 T°C時之一級次反應速率常數(d⁻¹)

HRT = 水力停留時間(d)

水力停留時間(HRT)與水質淨化程度有密切的關係，其定義如下：

$$HRT = \frac{\text{反應池體積}}{\text{進流量}} = \frac{nLWd}{Q} \dots\dots\dots (4)$$

式中

n = 系統介質孔隙率(%)

L = 池之長度(m)

W = 池之寬度(m)

d = 池之深度(m)

Q = 入流量(m³/d)

所以反應池之面積亦可以表示如下：

$$A_h = LW = \frac{Q \times HRT}{nd} = \frac{Q[\ln(Co / Ct)]}{k_v nd} \dots\dots\dots (5)$$

由(1)與(5)可得

$$K_{BOD} = K_v nd \dots\dots\dots (6)$$

四、蘆葦床處理系統實例操作研究

4-1 大屯自然教育農莊蘆葦床處理系統建置背景

本實作案例位於台北縣淡水鎮中和里之「大屯自然教育農莊」，鄰近大屯溪中游，該農莊以推廣自然農法與生態教育為經營理念。農莊基地範圍包含農莊主體建築、階梯狀耕作區與其下方平坦之溪濱台地耕作區，主要種植作物有水稻、玉米及其他根莖類作物。農莊建築主體為一幢舊式單層傳統農舍，建築面積約為 40 坪(≈130m²)，含客廳、臥室、廚房、衛浴及活動教室等。每日約有 3 名人員在此活動，主要從事一般耕作及園藝栽培等工作，晚上多不留宿。假日則不定期舉辦農村體驗與生態教學等活動，對象多為鄰近學校學童或社教團體，並有午餐供應。

廁所排出的污水經過老舊的簡易化糞池處理後，放流滲入附近竹林土壤中；廚房及其他雜排水則未經處理即排放至附近排水溝，最後流入灌溉渠道或溪中。這種處理方式是目前在鄉村地區相當普遍常見的現象，但隨著鄉村地區農業轉型與觀光休閒產業的發展，假日前往鄉村地區活動的人潮有逐漸增加的趨勢，污水量也相對的增加，進而加重環境之污染負荷。本案即針對此類效能不佳之污水處理方式（不含污泥），進行實際改善作業。

4-2 系統構成

1. 面積需求

農莊污水量估計約為每日 1.3 立方米，此量亦約相當於 5~6 人居住之小型住宅每日之污水產生量。系統型式採「水平流程蘆葦床」系統設計，其面積需求依計算公式 - 「Kickuth Equation」：

$$A_h = \frac{Q_d (\ln Co - \ln Ct)}{K_{BOD}}$$

每日之平均污水量 Q_d 取 1.3 m³/d；

污水進流之 BOD 濃度 Co 依「建築物污水處理設施設計技術規範」（內政部營建署編輯委員會，2001）採 160mg/L；

污水出流之 BOD 濃度 Ct 依「放流水質標準

標準」採 30mg/L；反應速率常數 K_{BOD} 依前述歐洲地區之經驗值取 0.1；

因此反應池之面積

$$A_h = \frac{1.3(\ln 160 - \ln 30)}{0.1} = 21.76 \dots\dots \text{取 } 22\text{m}^2$$

水力停留時間

$$HRT = \frac{\text{反應池體積}}{\text{進流量}} = \frac{nAd}{Q}$$

本案設計以 2.5~5.0 cm 粒徑之礫石為介質，介質孔隙率 $n = 0.4$ 。

反應池之深度 d 設計為 0.6m

故水力停留時間 $HRT = 0.4 \times 22 \times 0.6 / 1.3 = 4.06$ 日

2. 各處理單元設計

本案蘆葦床處理系統主要由一座油脂截留兼進流集水槽、二座蘆葦床及一座放流水儲槽兼生態水池等單元串連而成(如圖 4~圖 7)，各單元作法敘述如下：

- (1) 油脂截留兼進流集水槽面積為 2m²，深度為 1m，為避免廚房油脂及菜渣等雜質進入蘆葦床中而影響處理效能，此處加設一組油脂截留裝置。其總容量依前述農莊中一日平均污水量(1.3 立方米)設計之。
- (2) 二座蘆葦床之大小皆為 2m*5.5m，深度為 60cm，底層防水採 1mm 厚 PVC 防水布，上覆粒徑 2.5~5.0cm 之卵礫石，並種植開卡蘆，初植密度為 4 枝/m²。蘆葦床間以 4"管徑之 PVC 管連接，開口處並包覆濾網防止堵塞。
- (3) 放流水儲槽兼生態水池面積約為 2m²，深度為 60cm，當儲水池之蓄水量達到一定之水位高度，可以透過溢流口溢出。池中並種植大萍、滿江紅、水蘩等漂浮型水生植物，防止藻類滋生造成水質優養化。
- (4) 系統周邊種植萱草等植物，除具有景觀綠美化之功能外，亦可創造多樣性生物棲

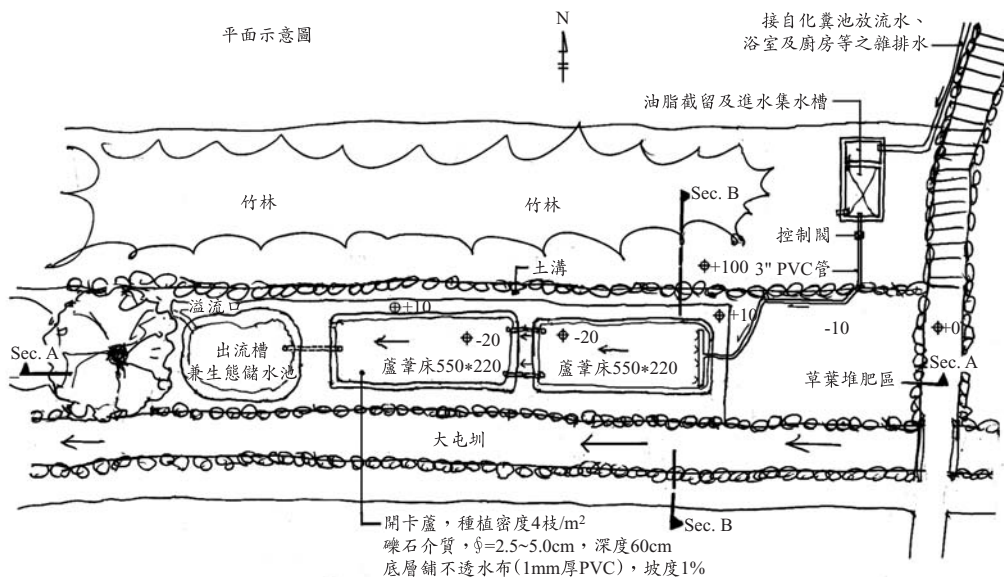


圖 4 大屯自然教育農莊「蘆葦床處理系統」平面配置示意圖

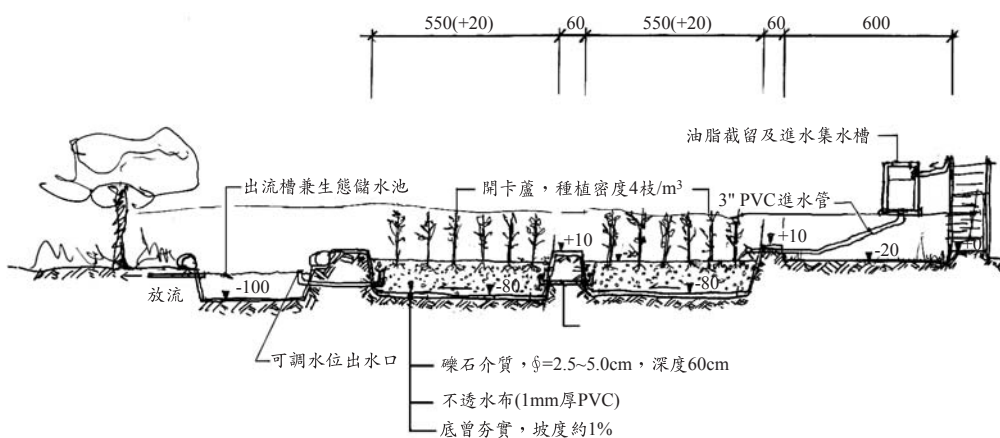


圖 5 大屯自然教育農莊「蘆葦床處理系統」長向剖面示意圖

地。又為發揮生態教育與推廣示範之功能，於一旁空地設置解說牌，內容包含系統之淨化原理、處理流程與預期可達成效果等。

3. 操作管理計畫

- (1) 系統操作：每日約 1.3 立方米之進水量，並控制以流量約 900ml/min 連續流的方式進水，其控制方式係利用控制閥調整管路開口大小以控制流量。而蘆葦床內水位高

度之控制方式，乃利用位於放流口之 PVC 活動套管調整高度，藉由連通管原理以控制水位高度。

- (2) 系統管理維護為增進系統之淨水效益，每年進行 1~2 次修剪蘆葦之工作，剪下之蘆葦可以做為草葉堆肥或成為編織、造紙、棚架覆蓋等材料。此外為確保系統正常運轉，需由經營者經常加以維護保養，並適時排除障礙。



圖 6 蘆葦床礫石介質填充施做過程



圖 7 系統完成後全區景象

五、實例操作結果與討論

5-1 水質監測結果

本研究之水質監測期間自 2004 年 4 月 23 日至 2004 年 5 月 27 日，共進行八次水質採樣分析，分析項目與實驗方法如表 2。水質分析結果與「放流水標準」及「灌溉用水水質標準」之比較如表 3 所示，其中去除率為進流濃度減去流出濃度再除以進流濃度後的百分比。整體而言，本案在初期運轉階段，經過蘆葦床處理系統處理後之放流水質，可以達到上述二項水質標準之要求，且懸浮固體物的平均去除率約為 84.65%，氨氮約為 65.68%，正磷酸鹽約為 54.11%，生化需氧量約為 69.82%。

5-2 成本與技術面探討

1. 建置及操作成本

本案之建造費用約為六萬五千元左右，若不含油脂截留及進流集水槽部分，則約僅需四萬元。另本案因配合地形坡降，故抽水電力需求為零，而一般用以抽水進入處理池之馬達電力耗費約在每月 100 元以內。

本案與一般獨棟住宅建築常用之六人份「分離接觸曝氣法預鑄式污水處理設施」在建造及操作成本上之比較可如表 4 所示，其建置成本與傳統污水處理設施差異不大，但在操作成本上則每年約可省下 5,000 元左右之曝氣設施電力消耗。

表 2 本研究水質監測項目與方法

分析項目	分析方法	備註
1.水溫	(NIEA W217.51A0)	現場測定
2.導電度	導電度計法 (NIEA W203.51B)	現場測定
3.pH 值	電極法 (NIEA W424.50A)	現場測定
4.濁度 (NTU)	濁度計法 (NIEA W219.51C)	實驗室分析
5.懸浮固體物 (SS)	103°C~105°C乾燥 (NIEA W210.56A)	實驗室分析
6.氨氮 (NH_4^+-N)	納氏比色法 (NIEA W416.50A)	實驗室分析
7.正磷酸鹽 (PO_4^{3-})	分光光度計/維生素丙法 (NIEA W427.52B)	實驗室分析
8.硝酸態氮 (NO_3-N)	馬錢子鹼比色法 (NIEA W417.50A)	實驗室分析
9.溶氧 (DO)	疊氮化物修正法 (NIEA W421.54C)	實驗室分析
10.生化需氧量 (BOD)	(NIEA W510.54B)	實驗室分析

2. 建置技術

本案與一般獨棟住宅建築常用之六人份「分離接觸曝氣法預鑄式污水處理設施」在建造及操作技術上之比較可如表 5 所示，本系統之建置無須特殊之專業技術，一般素質較佳之土木、水電包工人員即可承做，但系統之規劃設計及施工過程督導，仍應由專業人員協助。

表 3 「大屯自然教育農莊」蘆葦床處理系統水質監測結果

項目	水溫 ℃	pH 值	導電度 (μ S/cm)	溶氧量 (mg/L)	濁度 (NTU)	懸浮固體物 (mg/L)	氨氮 (mg/L)	硝酸態氮 (mg/L)	正磷酸鹽 (mg/L)	生化需氧量 (mg/L)
5/2~5/22 進流平均	23.8	6.9	326	0.9	47.6	35.8	3.84	0.05	1.34	42.3
5/2~5/22 出流平均	24.5	8.0	478	5.6	12.8	5.5	1.32	0.17	0.61	12.8
去除率	-	-	-	-	73.02%	84.65%	65.68%	-243.00%	54.11%	69.82%
92 年放流 水標準(建 築物污水 處理設施)	35	-	-	-	-	30	10	50	4.0	30
灌溉用水 水質標準	35	6.0~ 9.0	750	3 以上	-	100	-	-	-	-

表 4 本案與一般污水處理設施成本之比較

	一般獨棟住宅建築常用之六人份 「分離接觸曝氣法預鑄式污水處理設施」	本案之「蘆葦床處理系統」
建造成本	6~7 萬	約 4~6.5 萬
操作成本	曝氣幫浦電力費用每月約 400~500 元， 一年約需五、六千元	需進流抽水馬達電力費用每月約為 100 元以 內，若利用地形坡降則可免此費用。

表 5 本案與一般污水處理設施技術之比較

	一般獨棟住宅建築常用之六人份 「分離接觸曝氣法預鑄式污水處理設施」	本案之「蘆葦床處理系統」
建造技術	需專業廠商技術人員施做	可由一般包工承做
操作技術	一般無須用戶操作，但維護及檢修作業 需由專業人員操作。	無特殊操作技術，僅需注意流速及流量大小， 並定期收割蘆葦及環境清潔維護。

5-3 附加價值探討

1. 水回收再使用

進入本系統之污水量平約為 1.3 立方米，扣除床體表面及植物體之蒸發散量(4~6mm/day)，每日處理過之放流量約可達 1.2 立方米，由於此放流水之平均水質已符合「放流水標準」及「灌溉用水水質標準」，故可作進一步之回收使用，目前本案處理後之放流水，除做為生態池的補助用水外，並提供做為鄰近田區及周邊植栽澆灌之用。

2. 野生動物之棲地或庇護所

本系統具有與一般天然溼地相似的生態環境條件，同時由於在規畫及施工階段皆儘量以對基地干擾最低之方式進行，加上系統周邊搭配多層次之植栽，企圖營造多樣性之棲地空間，因此

目前在本系統中已陸續發現多種蛙類(蟾蜍、貢德氏赤蛙...)以及蜻蛉目之昆蟲於其中活動，顯示本系統已逐漸與原始生態環境相融合，提供了野生動物另一個棲地選擇。另一方面，相對於生態環境較不理想之基地，此系統之建置則可提供某些野生動植物一處庇護之地。

3. 景觀休閒及生態教育之場所

本系統所在之自然教育農莊常有民眾前往探訪及舉辦活動，因此在系統本身與周圍環境都儘量以較自然且具有景觀休閒功能之方式營造，而對於此一標榜生態、省能、環保及無污染之「蘆葦床處理系統」，自然引起許多民眾的好奇與詢問，透過解說牌或導引人員的說明，可以令民眾對於環境問題及生態保育之重要性有更多的了解。

六、結 論

1. 「蘆葦床處理系統」實做案例之具體成效

- (1) 淨水能力佳：由水質分析結果可知，案例於初期運轉階段，懸浮固體物的平均去除率約為 84.65%，氨氮約為 65.68%，正磷酸鹽約為 54.11%，生化需氧量約為 69.82%，處理後之水質符合「放流水標準」及「灌溉用水水質標準」。又本系統為「就地污水處理系統」(On-site wastewater treatment systems)，亦即家庭所產生之生活污水在自家環境中即處理完成，也就是達到零污水外排之情況，可以有效降低河川水質污染之負荷。
- (2) 技術性不高：施工操作及維護均容易掌握，所需之技術性不高，國內施工技術足以克服，便於普及推廣。
- (3) 經濟與省能：同等規模之系統建造成本約 4~6.5 萬元之間，操作上可以不用電力消耗或僅需抽水馬達電力費用。

2. 「蘆葦床處理系統」在台灣鄉村地區之發展優勢

除了上述之具體成效外，「蘆葦床處理系統」在台灣鄉村地區尚具有以下之發展優勢：

- (1) 水資源再利用，淨化後之放流水可做為灌溉用水、養殖用水、生態景觀池用水等。
- (2) 鄉村地區蘆葦植物取得容易，且生長條件良好。
- (3) 鄉村地區閒置土地多，可利用廢耕之農地或埤塘建置本系統。
- (4) 可提供成為野生動物之棲息地，具有生態保育之功能。
- (5) 可配合周邊景觀設施及其他濱水性植物做整體之規畫，並搭配發展休閒產業及做為生態教育與學術研究之場所。

3. 「蘆葦床處理系統」在台灣鄉村地區之可能發展限制與配合條件

- (1) 環境條件因子之考量：系統之設置應考量

基地環境條件，包含土地面積、地形、日照等物理條件，加以適當之規畫設計，以發揮系統最佳之效能。

- (2) 相關專業知識及技術之配合：該系統之工程技術層面雖不難克服，然而在系統規劃、設計參數計算等方面仍應尋求相關專業人員協助，以確保系統達成預定之目標。
- (2) 法令規定之限制：目前台灣對於人工濕地污水處理系統尚無具體之相關法令規定，因此新建之建築物尚不能直接以本系統替代法定應設置之污水處理設施，僅能做為輔助設施。
- (4) 廢污水成分之管控：浴廁及廚房應儘量減少使用化學洗劑，而改用對環境負荷較低之天然植物皂質，如無患子皂乳、茶摺粉、苦茶渣等，並應避免將強酸、鹼之溶液倒入連接系統之洗槽中，以控制廢污水成分，而能使蘆葦植物健康生長，發揮系統之正常效能。
- (5) 管理維護操作手冊之編纂：本系統雖然是一種效能可靠、操作容易且維護方便的自然處理系統，但在實際使用操作上仍需經營者細心維護，因此操作手冊之編纂，是一件相當重要之工作，手冊內容應述明系統正確之管理維護方式，對於系統基本原理、系統組成、水質監測方式等亦須加以說明。

參考文獻

1. 李志源，1997，「利用人工溼地三級處理生活污水-設計報告」，金門縣自來水廠，p.3~9。
2. 張惠婷，1998，「以土壤及礫石床人工溼地處理生活污水之研究」，國立中山大學海洋環境研究所碩士論文，p.85。
3. 韓選棠，2001，「21 世紀污水處理典範 - 蘆葦淨化池」，鄉間小路，9、10、11 月，抽印本。
4. 楊遠波等，2001，「臺灣水生植物圖誌」，行政院農業委員會，p.144。
5. 內政部營建署編輯委員會，2001，「建築物

- 污水處理設施設計技術規範」，營建雜誌社，p.1~10。
6. 林憲德等，2001，「綠建築設計技術彙編」，內政部建築研究所，p.177。
 7. 林瑩峰、荊樹人、李得元、王姿文，2002，「人工溼地 - 水污染防治之生態工法」，造園季刊，第 42 期，p.17-24。
 8. 張尊國，2003，「生態工程污染整治方法 - 自然處理系統」，台灣大學生工系，「生態工程」課程講義，p.4~23。
 9. 張文亮，2004，「溼地生態與工程」課程講義，台灣大學生工系。
 10. 陳江河，2004，「台灣鄉村住宅建築生活污水處理改善方式之研究 - 以蘆葦床處理系統為例」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
 11. 行政院環保署綜合計畫處，2006，「九十五年版環境白皮書」，p.72~73。
 12. Brix, H., 1987, "Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetlands plants - the root-zone method", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 19, pp. 107-118.
 13. Brix, H., 1993, "Macrophyte-Mediated Oxygen Transfer in Wetlands: Transport Mechanisms and Rate", *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, Gerald A. Moshiri., pp. 391-398.
 14. Chaudhari P.R., and Rekha Sarkar, "Threatened wetlands and their restoration", *Damaged Ecosystems and Restoration*, B C Rana, pp. 103-131.
 15. Cooper, P.F., 1993, "The Use of Reed Bed Systems to Treat Domestic Sewage: The European Design and Operations Guidelines for Reed Bed Treatment Systems", *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, Gerald A. Moshiri., pp. 203-217.
 16. Cooper, P., Green, B., 1995, "Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom - the first 10 years' experience", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 32, No. 3, pp. 317-327.
 17. Kadlec, Robert H., Knight, R.L., 1996, *Treatment Wetlands*, Boca Raton: Lewis Publishers, pp. 49-61.
 18. Metcalf & Eddy, 1991, "Chapter 13 Natural Treatment Systems", *In Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw-Hill, New York, pp. 927-952.
 19. U.S. EPA, 2000, *Manual-Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*.
 20. U.S. EPA, 1988, *Design Manual-Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*.
 21. U.S. EPA, 1994, *A Handbook of Constructed Wetlands*, Vol. 2, p. 22.
 22. Wood A., 1995, "Constructed wetlands in water pollution control: Fundamentals to their understanding". *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 32, No. 3, pp. 21-29.

收稿日期：民國 96 年 1 月 8 日

修正日期：民國 96 年 5 月 31 日

接受日期：民國 96 年 6 月 12 日