

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以人工溼地系統處理校園廢污水之探討(1)-穩定操作下人工溼地系統處理校園廢污水操作參數之建立

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-041-012-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

計畫主持人：李得元

計畫參與人員：荊樹人 林瑩峰 黃獻文 左惠文

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 28 日

以人工溼地系統處理校園廢污水之探討(I)-
穩定操作下人工溼地系統處理校園廢污水操作參數之建立

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC - 91 - 2211 - E - 041 - 012

執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：李得元

共同主持人： 荊樹人 林瑩峰

計畫參與人員： 黃獻文、左惠文

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及
下列情形者外，得立即公開查詢
涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：嘉南樂理科技大學環境工程與科學系

中 華 民 國 92 年 7 月 31 日

中文摘要

本研究為利用小型人工溼地系統處理校園廢污水，探討不同溫度對磷酸鹽與氨氮之去除效能的影響，文中並以一次動力學模式推算出經驗去除反應動力常數，以為人工溼地系統實際應用上之參考依據。

由實驗結果可以發現，進入表面自由流動式 (free water surface, FWS) 系統後對氨氮已有處理效果，約有 10% 的氨氮在此階段被去除，後續的去除效果開始趨於平緩，於離開 FWS 系統前，總去除率只有 15%；進入表面下流動式 (subsurface flow, SSF) 系統後，氨氮的去除效果急速上升，離開 SSF 系統時，總累計去除率約 47%。相較之下，SSF 系統對於氨氮的去除效果優於 FWS 系統。由氨氮進出濃度相對座標中，大部分的數據點均偏離等濃度直線的趨勢顯示，人工溼地對氨氮具有去除效果。

磷酸鹽在初進入 FWS 系統時，去除率不升反降，於系統後段才開始有明顯的去除效果，總計約 15% 的磷酸鹽在 FWS 系統中被去除；進入 SSF 系統後，去除效果明顯提高，最後約有 60% 的磷酸鹽被去除。

一次動力學模式推算氨氮之去除反應動力模式常數， K_{20} ，在 FWS 與 SSF 系統中分別為 0.022 (m/d) 與 0.048 (m/d)；磷酸鹽之去除反應動力模式常數， K_{20} ，在 FWS 與 SSF 系統中分別為 0.074 (m/d) 與 0.041 (m/d)。

關鍵詞：人工溼地、校園廢污水、營養鹽

Abstracts

The main goal of this project is to investigate the effect of temperature on the removal efficiencies of nutrients, $\text{NH}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$, using a pilot scale constructed wetland systems (CW) to treat campus wastewater. The calculation of the reaction dynamic constants is also present by the first dynamic model. The data can be used for the designing of full scale CW.

The experimental data show that the $\text{NH}_3\text{-N}$ has been removed about 10% when the wastewater enters the free water surface wetland (FWS), but the removal rate reduces as the water flows through residue part of FWS. The total removal ratio of $\text{NH}_3\text{-N}$ is just only 15% while the wastewater leaves the FWS. However, the removal rate of $\text{NH}_3\text{-N}$ increases obviously when the wastewater enters the subsurface wetland (SSF). The average removal ratio of $\text{NH}_3\text{-N}$ is 47% in two systems.

The $\text{PO}_4\text{-P}$ cannot be removed when the wastewater enters the FWS first, but the removal rate increases slowly by the channel. The total removal ratio of $\text{PO}_4\text{-P}$ is 15% while the wastewater leaves the FWS. However, the removal rate of $\text{PO}_4\text{-P}$ increases obviously when the wastewater enters the subsurface wetland (SSF). The final average removal rate of $\text{PO}_4\text{-P}$ is 60%.

The calculation of the reaction dynamic constants, K_{20} , for $\text{NH}_3\text{-N}$ removal rates are 0.022 m/d in FWS and 0.048 m/d in SSF, while 0.074 m/d in FWS and 0.041 m/d in SSF for $\text{PO}_4\text{-P}$.

Keywords : constructed wetland, campus wastewater, nutrition

前言

在國外已將人工濕地應用於處理都市污水、工業廢水、垃圾掩埋場或礦場滲出水，美國 EPA 也在近幾年整合其國內有關人工溼地的成果，陸續完成了有關於人工溼地設計準則與手冊[1、2]。同時也公佈了十七個自 1970 年代開始實際應用於污水防治的實例，這十七個實例均以處理社區污水為主要目標，除了較大土地的需求外，整個系統的建造與操作均十分經濟，而且系統經過了二十餘年後仍可持續操作，同時也為當地的自然生態建立了一個野生的棲息地。由此可見，人工溼地的確具有經濟、生態保育、淨化污染等多功能的系統。

於國內對於人工濕地的研究發展，仍在萌芽階段，研究大多著重在生態上的復育，即是將因污染而即將滅絕的濕地動、植物，以人工濕地混合受污染的天然濕地做復育工作；而其中大多數仍以植物，如紅樹林為主（如台南地區四草的水筆仔復育計畫），而水質的評估亦僅觀察是否影響濕地內動、植物之生存，並未有對於溼地週遭水質進行淨化的實際行動。近年來國內諸學者有鑑於污染防治的過程中，以物理及化學方式處理污染水常會造成二次污染，而欲吸取國外之經驗，利用人工濕地法淨化水質，進而改善水源環境及增進水源的再利用。

人工溼地（constructed wetlands, CW）是以人為方式操作及控制環境的溼地系統，利用其中的生態環境淨化水質的一種技術。不但具有自然溼地淨化水質的各種機制與特性，包括：過濾、吸附、沉澱、生物分解及吸收；擁有景觀環境及做為生物棲息場所；而且更具有省能源、低成本、操作簡單、不需添加任何化學藥劑及無二次污染的優點，在提供生態保育及自然景觀等功能上更是傳統污水廠所缺乏的[3-5]；且為不破壞生態的綠色環保技術，頗能符合處理污染性廢污水的技術要求[6]。

有鑑於國內對於人工溼地技術以及資訊的缺乏，自八十六年起，本研究團隊從初步的研究，水生植物對於污染水中的營養鹽的去除效能，至九十二年度，陸續於二仁溪畔、魚塢邊建立了不同規模的人工溼地系統，栽種浮水性及挺水性本土型的水生植物，實際針對各類人工配製的、二仁溪水、魚塢污水、生活污水廢污水作淨化的探討。結果顯示，人工溼地系統對於各類污染物均有淨化的功能[7、8]。

而有關於校園廢污水之探討，則缺乏；由於校園廢水的水質與水量均不穩定性（污染負荷低、寒暑假缺水），因而造成廢水處理場之操作困難，形成費用與能源上的浪費，且污水廠之設置費用偏高的影響下，各校設置廢水處理場廠的意願不高；為使校園廢污水之處理更為有效率，本研究團隊亦從九十年著手校園廢污水應用人工溼地之處理研究。本研究便在討論以 CW 系統替代傳統方式，處理校園廢污水中氨氮（Ammonia Nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$ ）及總磷（Total Phosphate, TP）隨溫度變化的去除效能改變。

文獻探討

開始有利用自然溼地作為接受污水水體之處理方式的想法，最初是在二十世紀初期，然而天然濕地通常與生態保護區並存，對所承受的進流水需以嚴格的水質標準來加以管制，不可任意將污水引入。因此到了 1950 年代，德國開始以人工方式建立濕地系統取代天然溼地，並應用於酚與乳製業廢水的相關研究，到了 1960 年代末期，美國也開始利用此一天然系統淨化社區污水、重金屬去除、營養鹽去除等各種廢污水相關研究。初步利用人工濕地系統是以 FWS 系統為主，因為此一型態之 CW 類似於天然溼地系統，除了具有淨化水質的功能之外，同時可提供野生動植物的棲息及美化景觀（esthetics）方面的優點。1960 至 1980 年代間，由德國發展出一種利用植物根系處理系統廢水之程序，稱為根系區間法（root-zone method, RZM）；1985 年後英國亦積極投入蘆葦床處理系統（reed bed treatment system, RBTS）之研究發展；隨後，此種 SSF 技術並推展至奧地利、丹麥、法國、瑞典、瑞士、北美、澳洲、非洲、亞洲（中國及印度）等國家。近十幾年間，各國學者參與人工溼地的計畫研究大多數是將人工濕地當作二級處理程序或高級處理程序，用以處理都市污水[9-13]、農工業廢水[14-18]及垃圾掩埋場滲出水[19-23]，分別針對廢污水中的各項污染物，如：懸浮固體[24]、有機物質[25]、氮磷營養物[18、19、26-31]、重金

屬[32、33]及微生物[34]，作探討而指出，均有良好的去除效能。

雖然環保法規中對氮、磷等營養物質的排放量並無明確的規定，然而，近年來由於密集農業的快數發展，肥料過量使用；加上養殖業及畜牧業污水未妥善處理而排放至水體中，造成氮、磷等化合物積存於自然環境中[35]，造成台灣的水庫中已有 70% 已有優養化現象；因此，排放水中所含氮磷營養鹽亦為重要的指標，此因素亦是影響進一步再利用放流水之因素。

在過去的研究發現，人工溼地確實能有效的處理水中之營養鹽[35-37]，溼地中去除營養鹽的機制有：化學沉澱（Chemical Precipitation）、吸附（Adsorption）、微生物與植物的攝取；化學沉澱為水或廢水中的水溶性離子形成難溶性固體沉澱物（precipitate）的化學程序。水及廢水中的正磷酸離子與鈣離子在中性至鹼性的條件，或正磷酸離子與鐵或鋁離子在酸性條件下，易形成磷酸鈣（ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ）、磷酸鐵（ FePO_4 ）及磷酸鋁（ AlPO_4 ）沉澱物，最後累積於底泥或土壤中，自然系統去除磷的重要機制之一。吸附是自然處理系統處理水及廢水中的磷酸鹽及金屬的重要機制。除非在酸性條件下，否則被吸附的磷及金屬很難再被淋溶至水中，因此這些物質最終還是累積於土壤、沙礫或底泥中。一般認為土壤或沙礫介質的吸附容量是有限的，在自然系統的最初操作中，吸附效率可能相當顯著，然而長期操作下來，當吸附容量達到飽和時，可能會發生廢污水中污染物質濃度逐漸升高之現象。此外，物質被吸附去除需要水與介質的接觸，因此水在土壤層上方流動的自然系統（如穩定塘、水生植物處理池、FWS 溼地等系統），由於廢水與介質的接觸貧乏，因而限制了磷酸鹽及金屬的吸附去除能力。自營性微生物利用二氧化碳或碳酸鹽作為碳源，以氧化無機鹽來獲取能量。水體生態中有不少的自營菌，較重要者為硝化菌、硫細菌及鐵細菌。這些來自異營性氧化作用，通常必須在較低的有機負荷下才能進行，否則無法與微生物的異營性有機物氧化反應競爭溶氧。硝化菌以兩步驟方式氧化氨氮，先形成亞硝酸氮中間產物，再進一步轉化成硝酸氮。因此氨氮本身也是一種需氧性污染物質，需加以重視。氨氮普遍來自於家庭污水與某些事業廢水。在溼地及氧化塘系統中，水生植物及藻類進行光合作用釋放出氧分子，提供微生物好氧分解及水生動物呼吸之氧來源的重要途徑。再者水生植物經光合作用攝取水中營養物質，再經由採收移除，為水生植物處理系統（如布袋連水塘）去除 N、P 的重要機制。此外，光合作用貢獻出生產力，提供食物鏈（food chain）之食物來源，為水生動物系統（如水產養殖）處理廢水的重要途徑[38、39]。

近幾年，已陸續有不少文獻報導均證實溼地可有效的去除水中的磷酸鹽、有機物、氮化合物。人工溼地在水及廢水處理技術中屬於自然處理程序，具有省能源、建造與操作維護成本低廉、不會造成二次污染等優點，並可以提供生態保育、遊憩、自然景觀等功能[3-5]。

一般社區污水中，主要的目標處理物以氮、磷、有機物及懸浮固體物為主，人工濕地系統在此方面的應用主要為完成二級及三級處理的部分。流量不穩定對人工濕地而言並不會造成人和能源上的浪費，相反的適當的流量落差反而可以增加人工濕地對營養鹽的處理效果[40]，雖然人工濕地系統需要較為廣大的面積，然而在佔地廣大的校園中，只要規劃得當，土地需求並不會是太大的問題，此外設立的人工濕地系統也可設計成可供學生休閒及參觀之校園景觀，不但可提供學校生態教學之教材，更對校園環境的美化有極大的幫助。

研究目的

由於校區廢水的穩定性不高（污染負荷低、寒暑假水量驟降），因而造成操作不易與費用、能源的浪費，且傳統廢水處理廠之設置費用高，使得各校設置廢水處理設施的意願並不高。

人工溼地（constructed wetlands, CW）則是以人為方式操作及控制溼地系統的環境，進而利用溼地生態系統淨化水質的一種技術。不但具有自然溼地淨化水質的各種機制與特性，包括：過濾、吸附、沉澱、生物分解及生物吸收等，並同時具有改善景觀及提供生物棲息場所的功能；其優點是省能源、低成本、操作簡單、不需添加任何化學藥劑及

無二次污染，此等均是傳統處理方式所欠缺的，在不破壞生態的綠色環保技術中，頗能符合處理污染性廢污水的技術要求。

然而，CW 系統仍有其操作的盲點，如受季節、氣候(溫度)等天然因素變化而影響去除效果。雖然近來，CW 在國外已有相當的研究成果，然而我國 CW 的技術卻仍處於起步階段，若要將此技術應用在國內，則必須從收集屬於本土環境自己的 CW 系統操作參數開始做起。

本研究在討論以人工濕地替代傳統方式處理校園廢污水，討論方式以生化需氧量 (biological oxygen demand, BOD) 及化學需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 隨季節變遷的去除效能為主。

然而影響人工溼地操作的因素十分繁複，在地點的選擇上需要考量氣候(溫度、陽光、降雨)、水力、地質以及環保法規等因素。在實地操作上需要考量進流水質、水生植物種類、微生物、底棲生物、溼地種類、環境狀況等因素[34]；而台灣地區的氣候、環境、生物物種等狀況，與美洲大陸有相當大的差異，國外在設計及操作上使用之參數，並不一定適用於國內之人工溼地系統的建立及操作，因此要將人工溼地應用於國內作為資源永續發展的工具之前，需要對其在本地的行為表現以及變化狀況做一完整的了解。再者，溼地為一自然生態系統，其中所包含的物種非常複雜，欲達到溼地系統的穩定狀態需經過長時間的操作，而且處理效能的統計資料需要經過各種環境影響因素以及季節變化數個週期，才能有效的降低統計數據的誤差，藉由長期的操作、紀錄，可以推算出屬於本土的操作或設計參數。

實驗方法

1. 實驗設施

本 CW 系統(圖 1)是以嘉南藥理科技大學，環工、幼保兩棟大樓的排放廢污水作為處理對象。本 CW 系統是由混凝土及不鏽鋼鋼板所組成，長、寬、高分別為 5 m、3 m 及 0.6 m 之長方體。如圖 1 所示，本系統是由一個表面自由流動式 (free water surface, FWS) 及一個表面下流動式 (subsurface flow, SSF)，兩種類型之人工溼地串聯而成，系統後方接一生態池，藉以觀察經系統處理後之水質變化。在 FWS 與 SSF 溼地中，分別以不鏽鋼板分隔成 50 cm 寬之水道，一方面減少短流現象 (short circuiting)，另一方面使得系統操作更接近於柱塞型 (plug flow) 反應槽，兩類型溼地之水道總長各約為 10 m。FWS 溼地底部有 20 cm 之泥土，水深 26 cm；而 SSF 溼地中放置礫石 (平均直徑為 2 cm，孔隙率為 50%)，水深 46 cm。系統後方的生態池，放植水芙蓉 (reed, *Phragmites australis* L.) 用以觀察處理後之水質變化，並不定期採收以觀察記錄各系統中植物之生長狀況。

2. 系統操作與採樣

本研究系統中共有 8 個採樣點，其中，採樣點 T1 至 T4 位於 FWS 系統，累計流經時間分別為 0、0.5、1.0、1.5 天；採樣點 T4 至 P3 位於 SSF 系統，累計流經時間分別為 1.7、1.9、2.2 天；採樣點 P4 位於生態池之排放口其累計流經時間為 6.1 天 (如圖 1 所示)。

3. 現場監測：

現場監測於每次採樣同時進行，在系統中之採樣點，量測各點距水面約 10-20 cm 深處之水溫 (Temperature)、pH 值 (pH value)、溶氧 (Dissolved Oxygen, DO)、氧化還原電位 (ORP)、導電度 (Electrical conductivity)、鹽度 (Sanility) 及濁度 (turbidity) 等。

4. 實驗室監測：

每次以 500 mL PVC 瓶採集水樣，於實驗室中進一步進行各項水質分析，採樣頻率為每星期一次，

其分析項目包含氨氮 (Ammonia Nitrogen , $\text{NH}_3\text{-N}$)、硝酸氮 (Nitrate , $\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亞硝酸氮 (Nitrite , $\text{NO}_2^-\text{-N}$)、總磷 (Total Phosphate , TP)、正磷酸鹽 (Orthophosphate , $\text{PO}_4\text{-P}$) 等，本文中僅以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 $\text{PO}_4\text{-P}$ 作討論。

5. 反應動力以及溫度校正計算

在人工溼地中物質去除反應常以一次柱塞流型動力模式 (the first-order plug flow kinetic model) 來計算其反應速率[2]：

$$K_T = -\frac{\ln\left(\frac{C_o}{C_i}\right)}{HRT} \quad (1)$$

其中，

C_o ：放流水中物質平均濃度 (mg/L)

C_i ：進流水中物質平均濃度 (mg/L)

K_T ：一次反應速率常數 (temperature-dependent first-order removal rate constant, 1/d)

而反應速率受溫度的影響程度則以 Modified Arrhenius equation 來決定：

$$K_T = K_{20} \times \theta^{(T-20)} \quad (2)$$

其中，

K_{20} ：在 20°C 下之一次反應速率常數 (1/d)

θ ：溫度係數

T：平均水溫 ()

實驗數據在線性迴歸後得到的常數以及相關係數 (R^2)。

結果與討論

1. $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果：

圖 2 是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均進出流濃度的相對比較；圖 3 為 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在各系統中的去除率比較。圖 2 顯示，雖然少部分之處理效果不佳，但整體而言人工溼地對 $\text{NH}_3\text{-N}$ 仍具有去除效果。由圖 3 則可發現在進入系統後的前 0.3 天，FWS 系統對 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的處理效果最好，在此階段之前， $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效率約已達到 10%，在接下來的 1 天，去除效果開始趨於平緩，進入 SSF 系統前總去除率約只有 15%；進入 SSF 系統後， $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果明顯上升，在廢污水離開 SSF 系統時約有 47% 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果，相較之下，SSF 系統對於 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果優於 FWS 系統。Jos T.A. Verhoeven 等提到，CW 對 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果最低通常只有 10-15%，且若經過植物的採收或利用最高水位與最低水位的落差等其他方法，可以將處理效果提升到 30%-40% 的去除效果，而根據 NADB 統計的資料顯示 FWS 系統處理 $\text{NH}_3\text{-N}$ 效能約為 54%，SSF 系統約為 25%。本系統不論在 FWS 系統或 SSF 系統的實驗值均可高於最低值，其原因可能與本系統會不定時採收植物有關。而本實驗中 SSF 系統的處理效能卻高於 FWS 系統，造成這樣的結果可能有下列原因：(1) 植物體死亡後，殘骸掉入 FWS 系統中，並釋放出營養鹽，使得 FWS 系統中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度升高，而 SSF 系統由於有礫石層的阻隔，因此植物殘骸並不會落入系統之中；(2) 文獻中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的最佳處理 HRT 為 4-5 天，而本實驗的 HRT 只有 2.2-3.1 天。

2. $\text{PO}_4\text{-P}$ 去除效果：

圖 4 為 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的平均進出流濃度相對比較；圖 5 為各種溼地型態對 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的去除率做比較。圖 4 中顯示 CW 系統對 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的去除效果並不明顯，推測應與 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的進流濃度均不高 (約在 3 mg/L 以下)

有關；由圖 5 中可發現 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在初進入 FWS 系統時，去除率反而有呈現負值的現象，約在 0.8 天後，FWS 系統才開始對 $\text{PO}_4\text{-P}$ 有明顯的去除效果，但離開 FWS 系統時，也才約只有 7% 的去除率；進入 SSF 系統後去除效果變得更好，約在進入 SSF 系統 0.3 天後去除率又有稍微的下降，約在 0.6 天後去除率又開始上升，至最後的出口總去除率約為 58%。且 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在整個 CW 系統中的去除效果，與 HRT 的正相關性較不明顯，分別在進入 FWS 及 SSF 系統初期都有去除率上升再下降的現象，而 CW 系統中除 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的機制除了生物吸收（異營性微生物、藻類、水生植物等）之外，還牽涉介質（底泥、礫石等）的吸附作用，因此可能的解釋如下：(1) 在進入 FWS 系統的前 0.3 天恰為本 CW 系統的第一水道，而這個區段的水生植物（香蒲）因為植物本身的爭光效應，而有部分枯死的現象，原先被植物體所吸收的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 隨著植物體的死亡而釋回到水體。(2) 在 SSF 系統中期， $\text{PO}_4\text{-P}$ 去除效果有些微下降的情形，此一現象的原因可能為有機固體（如藻類）被 SSF 系統中之礫石過濾下來後，在其間分解而釋放出營養鹽，然而此等結果並無其他文獻有類似的情形，因此詳細情形則需做進一步的觀察與研究。

$\text{PO}_4\text{-P}$ 去除率的文獻值約 10-15%，經過植物的採收或利用最高水位與最低水位的落差等其他方法，亦可以將處理效果提升到 30% 40% 的去除效果，在本系統中， $\text{PO}_4\text{-P}$ 在 FWS 系統的去除效果約只有 7%，其原因可能如先前所提，植物體死亡後，釋出先前吸收的 $\text{PO}_4\text{-P}$ ，而使得去除率下降。在 SSF 系統中，去除率約為 50%，比文獻值來得高，這可能與本系統不定時收割系統植物有關。

3. 一次動力學模式

在人工溼地中物質去除反應常以一次柱塞流型動力模式 (the first-order plug flow kinetic model) 來計算其反應速率，經推算氨氮之去除反應動力模式常數， K_{20} ，在 FWS 與 SSF 系統中分別為 0.022 (m/d) 與 0.048 (m/d)；磷酸鹽之去除反應動力模式常數， K_{20} ，在 FWS 與 SSF 系統中分別為 0.074 (m/d) 與 0.041 (m/d)。

結論與建議

1. 整體而言 CW 系統對 $\text{NH}_3\text{-N}$ 仍具有去除效果，在經過 CW 系統的處理後，約有 47% 的去除效果。在溫度校正方面， $\text{NH}_3\text{-N}$ 不論在何種類型溼地中去除反應速率均與溫度呈正相關的現象 (>1)。
2. 試程中最低溫 17.8 與最高溫的 32.1 相差不過 14.3，因此 CW 系統受溫度影響的幅度並不大。
3. 實驗結果顯示 CW 系統對 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的去除效果並不明顯，推測應與 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的進流濃度均不高（約在 3 mg/L 以下）有關； $\text{PO}_4\text{-P}$ 在整個 CW 系統中總去除率約為 58%。且與 HRT 的正相關性較不明顯。在溫度校正方面， $\text{PO}_4\text{-P}$ 在 CW 系統中的 FWS 及 SSF 溼地，均有明顯隨著溫度上升而有去除反應速率下降的現象（小於且略偏離 1）。

計畫成果自評

本研究於計畫執行期間，共計發表 5 篇研討會論文，並訓練一研究生發表「人工溼地處理校園廢污水之效能機制探討」碩士論文，研討會論文作者與篇名如下：

1. 李得元，荊樹人，林瑩峰，黃獻文，王姿惠，2002，校園污水經人工溼地處理後再利用及適用性，第七屆水水再生及再利用研討會，台北。
2. 黃獻文，李得元，荊樹人，林瑩峰，王姿慧，黃倩雯，2002，人工溼地系統處理校園污水中有機物之季節變化，第二十七屆廢水處理技術研討會，台北。
3. 李得元，荊樹人，林瑩峰，黃倩雯，黃政哲，陳俊宏，王宣羽，許欣潔，2003，人工溼地處理校園

污水之水力負荷對懸浮固體物去除效能之探討，第二十八屆廢水處理技術研討會，台中。

4. 黃獻文，李得元，荊樹人，林瑩峰，黃倩雯，黃政哲，施俊宏，2003，人工溼地處理校園污水之溫度變化對氮磷去除的影響，第二十八屆廢水處理技術研討會，台中。
5. 左惠文，李得元，荊樹人，林瑩峰，莊庭禎，2003，人工溼地處理校園廢污水中溫度變化對大腸菌去除之影響，第二十八屆廢水處理技術研討會，台中。

參考文獻

1. USEPA, 1999. "A Handbook of Constructed Wetlands – General Considerations", Volume 1.
2. Gearheart, R.A., B.A. Finney, M. Lang, and J. Anderson., 1999. "Free-surface wetland technology assessment", 6th National Wastewater Treatment technology Transfer Wrokshop, USEPA, Kansas City, Kansas.
3. Brix, H., 1997. "Do Macrophytes Play a Role in Constructed treatment Wetlands?", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp11-17.
4. Knight, R.L., 1997. "Wildlife Habitat and Public Use Benefits of Treatment Wetlands", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp35-43.
5. Worall, P., Peberdy, K.J. and Millett, M.C., 1997. "Constructed Wetlands and Natural Conservation", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp205-213.
6. Bavor, H.J., Roser, D.J. and Adcock, P.W., 1995. "Challenges for the development of advanced wetlands technology", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 32, No. 3, pp13-20.
7. 荊樹人，林瑩峰，李得元，王姿文，沈家丞，沈道剛，蔡凱元，林業偉，1998，「人工溼地系統淨化污染河水的功效探討」，第二十三屆廢水處理技術研討會。計畫編號：NSC-87-2621-B-041-002。
8. 王姿文，林瑩峰，荊樹人，李得元，宋玉齡，陳欽昭，陳香瑩，簡嘉佑，1998，「種植不同本土型水生植物之小型人工溼地淨化污水之效能比較」，第二十三屆廢水處理技術研討會。計畫編號：NSC-87-2621-B-041-002。
9. Metcalf, and Eddy, 1991. "Chap 13 of Natural treatment system", In *Wastewater Engineering (Third Edition)*, Mcgraw-Hill, Inc. New York., pp927-1016.
10. Thomas, P.R., Glover, P. and Kalaroopan, T., 1995. "An evaluation of pollutant removal from secondary treated sewage effluent using a constructed wetland", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 32, No. 3, pp87-93.
11. Juwarkar, S., Oke, B., Juwarkar, A. and Patnaik, S. M., 1995. "Domestic wastewater treatment through constructed wetland in India", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 32, No. 3, pp291-294.
12. Hiley, P.D., 1995. "The reality of sewage treatment using wetlands", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 32, No.3, pp339-348.
13. Schonborn, A., Zust, B. and Underwood, E., 1997. "Long Term Performance of the Sand-Plant-Filter Schattweid (Switzerland)", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp307-314.
14. Vrhovsek, D., Kukanja, V. and Bulk, T., 1996. "Constructed wetland for industrial waste water treatment", *Wat Res.* Vol. 30, No. 10, pp2287-2292.
15. Yin, H. and Shen, W., 1995. "Using reed beds for witer operation of wetland treatment system for wastewater" *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 32, No. 3, pp111-118.
16. Mander, U. and Mairing, T., 1997. "Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Estonia", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp323-330.
17. Comin, F.A., Romero, J.A., Astorga, V. and Garcia, C., 1997. "Nitrogen Removal and Cycling in Restored Wetlands Used as Filters of Nutrients for Agricultural Runoff", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp255-261.
18. Kadlec, R. H., Burgoon, P.S. and Henderson, M.E., 1997. "Integrated Natural Systems for Treating Potato Processing Wastewater", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp263-270.
19. Mehlum, T., 1995. "Treatment of landfill leachate in on-site loogon and constructed wetland", *Wat. Sci.*

- Tech., Vol. 32, No. 3, pp129-136.
20. Tarutis, W. J., and Unz R. F., 1995. "Ion and manganese release in coal mine drainage wetland microcosms", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 32, No. 3, pp187-192.
 21. De Maeseneer, J.L., 1997. "Constructed Werlands for Sludge Dewatering", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp279-285.
 22. Bulc, T., Vrhovsek, D. and Kukanja, V., 1997. "The Use of Constructed Werland for Landfill Leachate Treatment", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp301-306.
 23. Green, M.B., Griffin, P., Seabridge, J.K. and Dhobie, D., 1997. "Removal of Bacteria in Subsurface Flow Wetlands", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp109-116.
 24. Laber, J., Perfler, R. and Haberl, R., 1997. "Two Strategies for Advanced Nitrogen Elimination in Vertical Flow Constructed Wetlands", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp71-77.
 25. Von Felde, K. and Kunst, S., 1997. "N- and COD-Removal in Vertical-Flow Systems", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp79-85.
 26. Drizo, A., Frost, C.A., Smith, K.A., and Grace, J., 1997. "Phosphate and Ammonium Removal by Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface Flow, Using Shale as a Substrate", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp95-102.
 27. Geller, G., 1997. "Horizontal Subsurface Flow Systems in the German Speaking Countries: Summary of Long-term Scientific and Practical Experience; Recommendations", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp157-166.
 28. Schonercklee, M., Koch, F., Perfler, R., Haberl, R. and Laber, J., 1997. "Tertiary Treatment in a Vertical Flow Reed Bed System - a Full Scale pilot Plant for 200-600 P.E.", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp223-230.
 29. Kadlec, R. H., 1997. "Deterministic and Stochastic Aspects of Constructed Wwetlands Performance and Design", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp149-156.
 30. Rivera, F., Warren, A., Curds, C.R., Robles, E., Gutierrez, A., Gallegos, E. and Calderon, A., 1997. "The Application of the Root Zone Methods for the Treatment and Reuse of High-Strength Abattoir Waste in Maxico", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp271-278.
 31. 荊樹人, 林瑩峰, 李得元, 郭富雯, 楊勝傑, 黃再模, 1997, 「水生植物對於污水中磷酸鹽去除效果的探討」, *Chia-Nan Annual Bulletin*, Vol. 23, pp1-12.
 32. Mungur, A.S., Shutes, R.B.E., Revitt, D.M. and House, M.A., 1997. "An Assessment of Metal Removal by a Laboratory Scale Wetlands", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp125-133.
 33. Lakatos, G., Kiss, M.K., Kiss, M. and Juhasz P., 1997. "Application of Constructed Werlands for Wastewater Treatment in Hungary", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp331-336.
 34. Ottova, V., Balcarova, J. and Vymazal, J., 1997. "Microbial Characteristics of Constructed Wetlands", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp117-123.
 35. 荊樹人, 林瑩峰, 李得元, 王姿文, 郭富雯, 楊勝傑, 黃再模, 1997, 「水生植物對於污水中磷酸鹽去除效果的探討」, 第二十二屆廢水處理技術研討會。NSC 87-2815-C-041-005-B。
 36. 郭富雯, 荊樹人, 1998, 「人工濕地中水生植物的培養與處理污水能力之研究」, 國科會八十七年度大專學生參與專題研究計畫報告書。
 37. 王姿文, 荊樹人, 林瑩峰, 李得元, 沈家丞, 沈道剛, 蔡凱元, 1999, 「不同水生植物在人工溼地中生長情形之探討」, *Chia-Nan Annual Bulletin*, Vol. 25, pp95-103.
 38. Metcalf, and Eddy, Inc., 1991. Chapter 3 Wastewater Characteristics. In *Wastewater Engineering: Treatment, Disposd, Reuse*. 3rd., McGraw-Hill, New York.
 39. Kadlec, H.K. and Knight, R.L., 1996. *Treatment Wetlands*, CRC Press, Lewis Publishers.
 40. Meuleman, A.F.M., 1994. "Waterzuivering door moeras-systemen: onderzoek naar de water- en stofbalansen van het rietinfiltratieveld Lauwersoog". *RIZA Nota 94.011*, pp1-134.

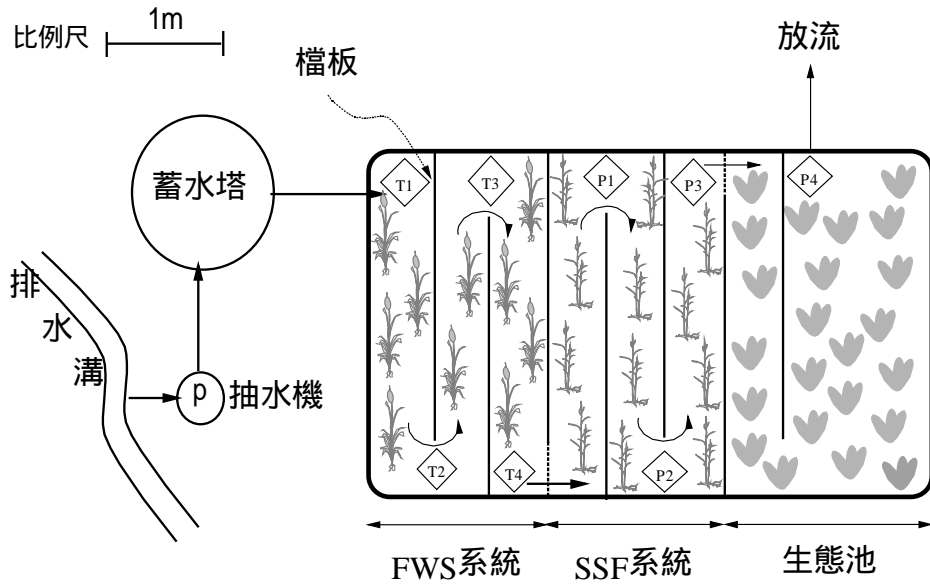


圖 1 嘉南藥理科技大學試驗型人工濕地系統圖

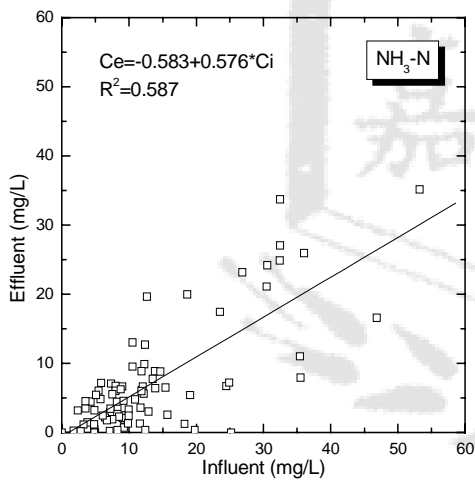


圖 2 NH₃-N 進出流濃度相對比較

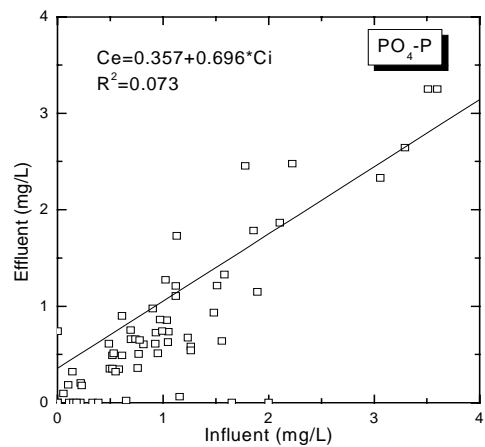


圖 4 PO₄-P 進出流濃度相對比較

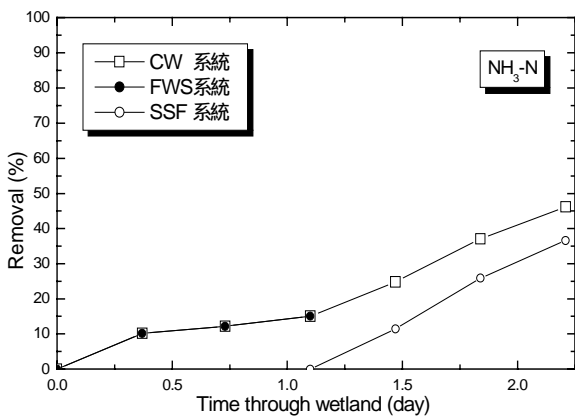


圖 3 NH₃-N 在各系統中的去除率比較

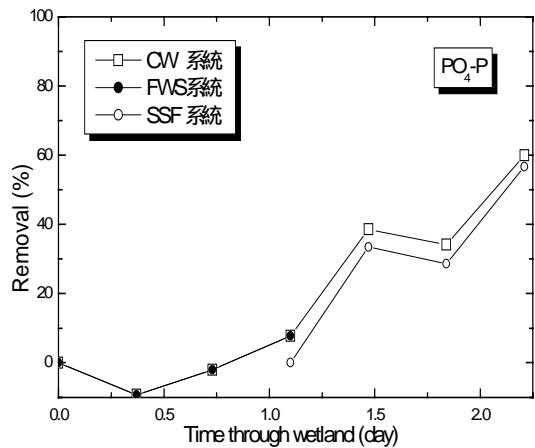


圖 5 PO₄-P 在各系統中的去除率比較