

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

人工溼地淨化受污染河水以達水資源及生態保育之研究

A Study of the Protection of Water Resource and Ecosystem by Using A Constructed Wetland to Treat Polluted River Water

計劃編號：NSC 89-2313-B-041-011

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：荊樹人 副教授 嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

協同主持人：林瑩峰、李得元、王姿文 副教授 嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

E-mail: jingsr@mail.chna.edu.tw

一、中文摘要

本年度的計畫為探討利用人工溼地系統處理受污染河水，在不同之水力負荷下，對河水中污染物之去除效能。並以數學模式推算出經驗公式，以為人工溼地系統實際應用上之依據。同時，將過去所累積的實驗紀錄與分析結果，依據有機物的去除、氨氮的去除、磷酸鹽的去除、懸浮固體的去除、大腸桿菌的去除、污染物的宿命、水生植物生長與淨化功能的關係、蒸發散效應、人工溼地系統生態的變化等方面作一個初步歸納的整理。由於人工溼地為一生態系統而且影響因素很多，需要長期的數據才能有效的敘述其行為。截至目前，本研究小組僅有三年多的結果，因此只能提出初步歸納的結果，未來的實驗數據可能會改變目前的結論，我們將逐年修正。

關鍵詞：人工溼地、生態保育、水資源在利用、污染河水處理、動力模式

Abstract

The major goal of this year's plan was using a constructed wetland system to treat polluted river water under various hydraulic loading rates. In addition to study the removal efficiencies of different pollutants in the river water, some mathematical models were also revealed to describe the removal reactions as basic information for designing full-sized scale constructed wetland systems in the future. Meanwhile, the experimental data obtained from our laboratory in last three years were summarized and discussed in different topics, such as: removals of organics, ammonia nitrogen, orthophosphate, suspended solids, coliforms, and fates of pollutants, relationship between growth rates of macrophytes and water treatment, evapotranspiration in wetland, and the variation of wetland ecosystem. Because the ecosystem of a constructed wetland system is influenced by lots of factors, we need data

from long-term study to effectively describe its behavior. Up to date, we have only three-year information; hence, the summaries were preliminary results. The data obtained in the future research may change the results in this report; we will update our work every year.

Keywords: constructed wetlands, ecosystem reservation, water resource reuse, treatment of polluted river water, kinetic models

二、緣由與目的

台灣地區之河川因長期承受事業廢水及都市污水未適當處理（點源）、及下雨後的逕流水（非點源）所受之污染（根據行政院環保署八十七年環境統計年報⁽¹⁾，已有70%的水源水庫由普養轉為優養或持續優養，其中甲級七個中四個優養，乙級十一個中八個優養，丙級一個優養，丁級一個優養），而這些水庫的水源均來自收污染之河川。人工濕地系統（constructed wetland system）是將生態工程技術應用於水或廢水管理及處理上的一種自然淨化程序，具有省能源、低成本、無二次污染、不破壞生態等優點，頗能符合處理污染性河水的技術要求⁽²⁾。因此，以目前台灣的現況，除非強化法規的執行效率或業者的環保意識覺醒，水資源污染的問題似乎無法於短期幾年內獲得顯著的改善。而人工濕地法為一個值得探討其應用價值以經濟有效的自然處理方法來保育河川水資源。

自八十六年起，本研究小組即在嘉南藥理學院的補助下，初步的研究水生植物對於污染水中的營養鹽的去除效能。結果顯示，在選擇的數種水生植物於實驗室（bench scale）中人工濕地系統的操作下，對於水中之磷酸鹽、有機物、氮化合物等具有有效的去除能力⁽³⁻⁵⁾。八十七年度，在國科會的補助下（NSC 87-2621-B-041-002-），本研究小組於二仁溪畔建立了一個小型（pilot scale）的人工濕地系統，包含了自由水層（FWS）及表層下流動（SSF）系統。其中栽種了於本實驗室中研究過具有除污效能之浮水性及挺水性

本土型的水生植物，直接抽取二仁溪水作為淨化的目標物。此一年度的成果，已陸續在國內外發表⁽⁶⁻⁹⁾。八十八年度，繼續在國科會的補助下（NSC 88-2621-B-041-001），二仁溪之人工溼地系統持續操作。截至目前此人工溼地系統已正常操作將近二年，期間遭遇操作的問題主要為進流系統的穩定性與選擇之植物生長障礙。綜合過去所得到的結果顯示，溼地系統中水生植物的種類、生長狀況、受環境之影響等因素，可直接影響人工溼地對於污水的處理成效。本年度計畫為利用此操作中之人工濕地系統，針對不同的水力負荷（hydraulic loading rate）探討其對去除河川水中各項污染物處理效能之影響，同時記錄系統中的生態變化（例如：水棲生物、底棲生物的數量及種類等）及系統狀況（水溫、pH、DO等）與操作參數改變為方法。一個水體生態所涵蓋的物種相當繁多，因此將以出現在系統中之物種以其數量的增減，作為評估生態變化的依據。此一部份的工作為探討水生植物和其他相關生態物種受污染物的影響，以為生態保育以及評估溼地生態指標的參考。

三、結果與討論

本年度的計畫為探討利用人工溼地系統處理受污染河水，在不同之水力負荷下，對河水中污染物之去除效能。並以數學模式推算出經驗公式，以為人工溼地系統實際應用上之依據。同時，將過去所累積的實驗紀錄與分析結果，作一個分門別類的整理。

有機物的去除

就整個二仁溪人工溼地系統（CW）而言，化學需氧量去除率與操作的 HRT 並沒有一個明確的關係。除了 SSF 系統的去除率隨著 HRT 的增加而升高之外，FWS 系統在 HRT 增加到 9.57 天時反而減少。此一現象可能與在操作此 HRT 時，COD 的進流負荷明顯的降低有關。由於河水中污染物的含量變化範圍很廣，以致在整個實驗的期間進流負荷並不能維持在一個有限的範圍。因此溼地系統對於污染物的去除效率，除了水力負荷的因素之外，同時也受到進流負荷的影響。CW 系統對 COD 的去除率普遍較低，其原因為二仁溪河水中 COD/BOD₅ 的比值很高，二仁溪水中的比值平均約為 15.0（4.7-57.0），所以進流水中可為生物分解的有機物質便十分有限。經與對照組系統（CE）比較，人工溼地中水生植物的存在對於水中 COD 的去除確實有明顯的助益。

雖然 COD 的去除效率不是很高，但是實驗數據卻相當符合一次動力模式與 Modified Arrhenius equation（MAQ）。然而計算出 COD 的反應速率常數（ K_{20} ），

除了 SSF 系統較接近其他文獻的數值之外，FWS 系統則偏低⁽¹⁰⁻¹¹⁾。此一結果顯示，人工溼地系統在去除二仁溪水中 COD 的反應機制，FWS 系統受到水力負荷的影響較明顯。根據其他文獻所示，COD 在溼地系統中的去除反應不受溫度影響。而 COD 的去除反應速率隨著水溫的升高而有降低的現象，在 FWS 系統尤其明顯。數學模式對於二仁溪人工溼地系統中各個溼地之 COD 的去除反應均能有效的預測。人工溼地系統在去除污染河水中 COD 時，影響其去除機制的因素很多，如：HRT、進流負荷、水溫等，因此若要更有效的預估人工溼地系統 COD 去除的效能，需要在模式中增加其他有關的參數同時探討。

氨氮的去除

整體而言，氨氮在 CW 中的去除率隨 HRT 提高而升高。而氨氮在溼地中的去除機制則幾乎完全為生物反應，如：硝化脫硝作用、生物吸收等。經與對照組系統（CE）比較，人工溼地中水生植物的存在對於水中氨氮的去除確實有明顯的助益。實驗數據相當符合一次動力模式與 MAQ，然而計算出氨氮的反應速率常數（ K_{20} ）均高出其他文獻的數值許多⁽¹⁰⁻¹²⁾。此一結果顯示，人工溼地系統在去除二仁溪水中氨氮的反應機制，受到水力負荷的影響很明顯。氨氮的去除反應速率應該隨著水溫的升高而有升高的現象，一般值約在 1.04 附近⁽¹⁰⁻¹¹⁾，而本研究的結果顯示氨氮的去除速率，隨水溫的升高而有降低的趨勢，尤其是 SSF 系統。此一現象應與河水中氨氮的含量變化很大有關。各系統的 K_{20} 較其他文獻⁽¹⁰⁾ 高出很多，也明顯的受操作 HRT 的影響。數學模式對於二仁溪人工溼地系統中氨氮的去除反應均能有效的預測。

磷酸鹽的去除

磷酸鹽的去除率沒有隨著 HRT 提高而升高的現象。相關性不明顯的原因可能是溼地系統中除磷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，而不同機制受到停留時間的影響有所差異。經與對照組系統（CE）比較，人工溼地中水生植物的存在對於水中磷酸鹽的去除確實有明顯的助益。

實驗數據相當符合一次動力模式與 MAQ，然而計算出磷酸鹽的 K_{20} 均高出其他文獻的數值許多⁽¹⁰⁻¹²⁾。顯示人工溼地系統在去除二仁溪水中氮磷的反應機制，受到水力負荷的影響很明顯。根據其他文獻⁽¹⁰⁾，磷酸鹽在溼地系統中的去除反應不受溫度影響。而本研究發現，磷酸鹽的去除反應速率隨著水溫的升高而有降低的

現象。同時水溫的影像在 FWS 系統中較 SSF 系統明顯。初步的判斷可能是因為河水中污染物的進流負荷變化太廣所致。各系統的 K_{20} 均比其他文獻⁽¹⁰⁻¹¹⁾ 高出很多，顯示人工溼地系統在處理二仁溪水時，磷酸鹽的去除效率受到操作 HRT 的影響很明顯。數學模式對於二仁溪人工溼地系統中磷酸鹽的去除反應誤差明顯，尤其是在 CE 系統。主要原因可能還是因為磷酸鹽的去除機制較複雜之故，若要更有效的預估人工溼地系統除磷的效能，需要在模式中增加其他有關的參數。污染物的去除行為若為單一機制者（如：生物反應），則其去除效率較易預測，同時對於水力負荷操作的控制結果亦較明確。一般而言，較長的 HRT 可達成較佳的去除效率，然而污染物在溼地系統中的去除效率有其極限值。因此，有效的推估及操作最佳的水力負荷，為經濟有效應用人工溼地的關鍵。季節變化造成水溫的改變，對於 FWS 系統的影響較 SSF 系統為明顯。

懸浮固體的去除

河水中大部份的 SS 為無機懸浮固體（如：泥沙等），藻類含量並不高。當河水一進入濕地系統中，流速變慢，對於 SS 可有效沉降去除。但是在 FWS 系統停留期間，藻類會因停留時間的增加而繁殖⁽⁸⁾。因此，僅以進出流的 SS 濃度計算去除效率只能表達整個系統的表象，因為進出流中的 SS 可能並非同一種固體。FWS 系統對於 SS 的去除隨著 HRT 的增加而增加，由於河水中的泥沙通常會在系統前端因為流速減緩以及植物體過濾而沉降完全⁽¹³⁾，因此其去除效率受放流水中藻類數量的影響。在此系統中，藻類的數量隨著 HRT 的增加而下降，因此 SS 的去除率上升。SSF 系統中，SS 的去除機制主要為過濾，因此其去除效率受 HRT 的影響較不明顯，而其對藻類的控制較有效。而以整個濕地系統 (CW) 來看，對於 SS 去除率均維持在 60-86% 之間，亦不受 HRT 變化的影響。CW 的處理效果較 CE 佳。所以水生植物（蘆葦）對於人工溼地系統去除 SS 具有正面的功能。SS 的沉降行為是一個物理現象，並非生物反應。因此，一次反應的動力模式與 MAQ 顯然無法準確的敘述 SS 的去除。

大腸桿菌的去除

根據 1999 年 6 月至 2000 年 7 月的檢測數據顯示，二仁溪水中大腸桿菌的數量在冬季較高。可能原因在於台灣南部地區冬季為枯水期，河水流量降低而導致河水中物質濃度升高所致。FWS 溼地對於大腸桿菌具有有效的去除效能，在 1999 年 8 月至 2000 年 7 月之間，其月平均去除效率均能高於 80%。在經過 SSF 溼地之後，放流水中大腸桿菌的數量均低於 100

cfu/mL，甚至有些月份在放流水中已無法培養出大腸桿菌。整個二仁溪人工溼地系統對大腸桿菌極具去除效率（94% 以上）。對照組（CE）系統對於大腸桿菌的去除效率則較低且不穩定。顯示溼地中水生植物有助於大腸桿菌的去除。在溫度較高、水生植物生長速率較高的季節，去除效率也有增加的趨勢。然而對於自然生態中已存在的野生種的大腸菌類，人工溼地系統很可能成為其孳生繁殖的場所。異營性微生物對於有機物的競爭力，可能是人工溼地系統中去除大腸桿菌的主要原因之一。

污染物的宿命

截至目前只有磷酸鹽的宿命完成初步的計算。依據 1999/12/1 至 2000/8/13 的 257 天數據，包括進出流水中磷酸鹽的負荷差、植物體（蘆葦）各部位的磷含量、以及採收速率等因素。FWS 與 SSF 系統，蘆葦對磷的吸收分別佔系統的除磷量 4.47% 與 7.56%。其他部分的除磷行為，包括採收間植物的生長吸收（並未列入平衡計算中）、藻類以及微生物的生長吸收、老死植物體（debris）殘留在系統中的部分等。底泥樣本含磷量分別為 0.21% 與 0.13%，比較原始土壤含磷量 0.19%，可看出人工溼地中底泥對磷的吸附已達飽和，並且可能有釋放出磷酸鹽的現象。因此質量平衡計算中不包括底泥吸附的部分。SSF 系統中植物平均的含磷量的變化量較大，顯示其受季節影響較大。比較總 HRT=1.60 天與 12.57 天，系統操作在較長的 HRT 時（正值夏季），植物生長速率快因而採收頻率高，因此經由植物對磷吸收的機制佔總除磷量的比重隨之增加。因此植物生長快速加上採收是增進人工溼地除磷的主要方法。

水生植物生長與淨化功能的關係

本研究數值顯示，植物生長位置並未與生長速率有明顯的相關性，主要原因可能是兩個系統的長度不夠因而無法顯示其差異。而季節的影響則較為明顯，兩個系統中的蘆葦的生長速率自 3 月起逐漸增加，至 9 月則有減緩的趨勢。此一部份的變化，需要至少一年的數據才能明確的顯示出季節的影響程度。由於生長速率的數據不夠完全，因此尚無法明確的歸納出其與污染物去除效率的相關性。

蒸發散效應

截至目前的有效數據，發現蒸發散量與水溫並沒有相關性。一般而言，蒸發散量應該隨著水溫上升而增加，但是台灣南部夏季適逢雨季，因此反而有放流量高於進流水量的情況發生。2 至 5 月期間，雨量很少導致蒸發散量佔進流量 4 至 61% 的情況發生。至於二仁溪人工溼地系

統之流量是否需要依據蒸發散量作校正，需要長期（至少二年以上）的平均數值來估計。

人工溼地系統生態的變化

二仁溪溼地系統包括 SSF 及 FWS 系統，所種植的水生植物均為蘆葦。系統中的動物主要為昆蟲，包括蚱蟲、蜘蛛與瓢蟲。蚱蟲於 11 月初至 1 月中旬均附著在蘆葦葉片背面，1 月下旬後隨即消失。蜘蛛則一直存在系統中，溫度較高的春夏秋季數量均較高。顯示蜘蛛已成為系統中之長存物種。瓢蟲則為四處遷移的昆蟲，系統中於 11 月中旬至 12 月上旬出現，3 月至 5 月亦有零星出現，顯示瓢蟲可以於溼地中獲得暫時棲息或飲水、食物的來源。

系統中水中微生物種類相當繁多，主要來自二仁溪河水進入溼地後棲留下來，一共觀察到二十五種的各種藻類與原生動物。於 10 月中至 12 月中旬有顫藻、球藻、小球藻、團藻、矽藻、鼓藻等種類，隨後開始減少，而較冷的 12 月下旬至 2 月中旬則以新月藻、鞭毛藻、眼蟲、裸藻等較多，顯示於不同季節（溫度）會有不同的微生物種類較適合於此人工溼地中生長繁殖。

二仁溪系統的條件較為嚴苛，但涵蓋範圍較廣，故為微生物種類繁多，尤其進入具有淨化作用的溼地系統中，生存機會更加更穩定，故觀察到有 25 種微生物；植物（蘆葦）則經過約三個月的適應馴化期後生長良好，因而吸引許多昆蟲，尤其蜘蛛更是將溼地作為永久的棲息所。

四、計劃成果自評

本年度的計畫完成了人工溼地於不同水力停留時間操作下對於淨化污染河水效能的影響。根據水力停留時間對於污染物去除效率的影響，以動力模式加以敘述並計算出反應速率常數。再依據各階段溫度的變化，進一步了解水溫對於反應速率的影響。由這些數據提出了有效敘述人工溼地系統對於不同污染物去除反應的初步數學模式。這些模式即為未來應用於實場人工溼地系統的設計依據。由於影響人工溼地的因素很多，因此數學模式將會在未來因為各種參數的加入更趨於精確。

在本報告中並將過去三年的實驗數據以及生態變化紀錄，作一整理。由於部份數據不完整，因此目前尚無法作一整體的比較與對照，這將是未來工作的目標。由於篇幅所限，無法在此四頁報告中提出所有的數據，詳細數據請參考「第二十五屆廢水處理技術研討會論文集」或與本研究小組連絡。

五、參考文獻

1. 行政院環保署，中華民國台灣地區環境保護水質統計年報，民國八十七年。
2. 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, pp.13-20.
3. 荊樹人，林瑩峰，李得元，郭富雯，楊勝傑，黃再模 (1997a) "水生植物對於污水中磷酸鹽去除效果的探討"，*嘉南學報*，Vol. 23, pp.1-12.
4. 荊樹人，林瑩峰，李得元，王姿文，郭富雯，楊勝傑，黃再模 (1997b) "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。
5. 郭富雯，荊樹人指導 (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。
6. Jing, S.R., Y.F. Lin, D.Y. Lee, and T.W. Wang (2000a) "Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands". *Bioresource Technology*, 76(2), pp. 131-135. 計畫編號：NSC 87-2621-B-041-002。
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. Jing, S.R., Y.F. Lin, D.Y. Lee, and T.W. Wang (2000b) "Use CW Systems to Remove Solids from Highly Polluted River Water", *IAWQ Conference on Particle Removal from Dams and Reservoirs*, 16-18 February, 2000, Durban, South Africa, in press. 計畫編號：NSC 87-2621-B-041-002。
9. 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。
10. Kadlec, R.H. and R.L. Knight (1996) "Treatment Wetlands", CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
11. Reed, S.C., R.W. Crites, and Middlebrooks, E.J. (1995) "Natural systems for waste management and treatment", 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., New York.
12. Huang, J., R.B. Reneau Jr., and C. Hagedorn (2000) "Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater", *Wat. Res.*, 34(9), pp. 2582-2588.
13. IWA Special Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, 2000. Constructed wetlands for pollution control. Scientific and Technical Report No.8, IWA Publishing, London, England.