

-行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

利用人工溼地法處理受污染河水以達到生態保育及水資源在利用可行性之探討
A Study of the Feasibility of Achieving Ecological Protection and Water Resources Reuse by
Using a Constructed Wetland to Treat Polluted River Water

計劃編號：NSC 87-2621-B-041-002

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：荊樹人 副教授 嘉南藥理學院環境工程衛生系

協同主持人：林瑩峰、李得元、王姿文 副教授 嘉南藥理學院環境工程衛生系

E-mail: mj123@chna.chna.edu.tw

一、中文摘要

本研究計劃在本年度中的重點在於溼地系統的建立、達到穩定操作、二仁溪水質的監測、以及污染河水的初步處理成效探討。在本研究計劃中建立了兩個人工溼地系統包括：一、小規模(bench scale)之人工溼地，探討不同本土型水生植物對COD、氨氮、正磷酸鹽、重金屬之去除能力；二、試驗規模(pilot scale)之溼地系統直接引進污染性河水，探討溼地對河水污染物之處理效果。目前上述系統中之各種水生植物均穩定生長。進流河水業已進入系統，並在系統的適當位置採取水樣以觀察污染水處理的情形。

對於二仁溪水的監測由今年三月起大致分為春季及夏季部分，主要監測項目為一般營養鹽、懸浮固體及物理性質。二仁溪系統之初期，FSF操作HRT約為1天，各污染物之平均去除效率分別為：COD 30%、氨氮 44.8%、磷酸鹽 52%、TSS 70%。此系統因溼地中植物生長尚未穩定，導致處理效能並不理想。至七月份後的操作HRT增加至4天結果顯示，各污染物之平均去除效率分別為：COD 82.1%、氨氮 100%、磷酸鹽 70.2%、TSS 97.5%。因為此時的水生植物均相當穩定而且快速的生長，因此去除效率有明顯的增加。不過，整個系統距離完全穩定尚有一段距離，因此下一年度的研究將為處理效能較為明顯的部分。

小型規模人工溼地屬於自由表面流動系統，溼地中分別種植六種不同的本土型水生植物，進流水平均濃度為COD 122 mg/l、氨氮 22.3 mg/l、正磷酸鹽 13.7 mg P/l、TSS 22 mg/l、Cu²⁺ 3.5 mg/l，在HRT 4天之條件下進行連續入流操作。研究結果顯示，溼地所種植之植物種類明顯影響到污染物之去除效果。經由比較各種污染物之處理效能，可歸納出空心菜、蘆葦及竹葉菜為適合應用在自由表面流動式人工溼地的本土型水生植物。

關鍵詞：人工溼地、生態保育、水資源在利用、污染溪水處理、大型水生植物

Abstract

The main goals of this year's work were setting up the constructed wetland (CW) system, achieving stable operation, monitoring the water quality of Er-Ren River, and studying the primary treating effect of polluted river water. Two types of CW systems were constructed. One is a bench scale system, which is used to study the removing ability in COD, ammonium, orthophosphate, and heavy metals by various domestic macrophytes. The other is a pilot scale system, which is directly receiving polluted river water to study the treatment efficiency on the water. All the selected plants are growing stable. The CW system is receiving river water, samples have been taken from proper locations in the whole processes to study the treating effects within the process.

The monitoring work on the river water was started from March, 1998. It covers two seasons: spring and summer. The monitored items are general nutrients, suspended solids, and some physical conditions. During the initial operation with one day of HRT, the removal rates of each nutrient were: COD 30%, ammonium 44.8%, orthophosphate 52%, and TSS 70%. The removing efficiencies were not satisfactory and probably due to the unstable growth of the macrophytes. After 3 months, the removal rates of each nutrient with 4 days of HRT were: COD 82.1%, ammonium 100%, orthophosphate 70.2%, and TSS 97.5%. The removals of each constituents were significantly increased. This is probably because that the macrophytes were grown well and fast. However, the system is not quite totally stable; hence, the treatment ability should be more obvious in the future.

Bench scale CW systems are all FSF type. There were six different macrophytes planted in each system. The average concentrations of constituents were: COD 122 mg/l, ammonium 22 mg/l, orthophosphate 13.7 mg/l, TSS 22 mg/l,

Cu²⁺ 3.5 mg/l. When operated the system with 4 days HRT and continuous influent, all the macrophytes were having significant removing efficiencies. In a summary, *Lpomoea reptans*, *reed*, and *Commelina communis* L. are feasible domestic macrophytes using in FSF CW system. Keywords: constructed wetlands, ecosystem reservation, water resource reuse, treatment of polluted river water, macrophytes

二、緣由與目的

濕地是天然生態系統中重要的一環，具有生態保育及水質淨化的功能。將其應用在水污染防治及水資源保育上，則是近一、二十年才逐漸發展之課題，並受到國際間環保學者的重視，至目前已有超過 1000 個濕地系統被實際使用，其中以人工濕地系統 (constructed wetland system) 佔絕大多數，其研究與應用目的，大多是將人工濕地當作二級處理或高級處理-程序，處理都市污水⁽¹⁻³⁾、工業廢水^(4,5)及垃圾掩埋場或礦場滲出水^(6,7)，從文獻報告之結果中可知，對於廢(污)水中的主要或微量污染物，例如懸浮固體、有機物質、氮磷營養物、微生物、甚至重金屬，人工濕地均可提供良好的去除效能。

目前，所發展出來的人工濕地系統有兩種類型⁽⁸⁾。其一，稱為自由表面流動系統 (FSF, free surface flow system)，此為模擬天然濕地環境狀態所構築之窪地，底部為不透水土壤層約 20~30 公分厚，並高密度地種植挺水性植物 (emergent plants；根生於土壤層，葉伸出水面，例如燈心草、蘆葦、蘆葦、香蒲等) 使其約佔 50% 的表面積；土壤層上為流動水層，水深約 20~30 公分，進流水則在濕地表層開放性地流動，當水流經植物的莖及根部可行淨化作用。另一種系統，稱為表面下流動系統 (SSF, subsurface flow system)，為一窪地槽體，充填約 40~60 公分厚的可透水性砂土或碎石作為介質，以此支持挺水性植物的生長，進流水被迫在表層下的砂土及植物根系間流動，可達到淨化結果。

污染物在人工濕地系統之「生態反應器」(ecosystem reactor) 中，被去除的機制較為多樣複雜且可同時發生，但速率較慢。可能的去除機制包括^(9,10)：物理性的沉降、過濾作用，在底泥或砂土層中所進行的吸附、離子交換、沉澱沉積、氧化還原等物化作用，附著於植物根莖或砂土介質表面上的微生物所進行之生物分解、轉換及同化作用，植物的攝取作用，太陽照射的射線作用等。因此，人工濕地應用在廢水管理及處理上屬於一種自然淨化程序，不僅可將污染物去除，且不需能源輸入及不必經常維護。因此為一種省能源、

低成本、無二次污染、操作維護簡單、不破壞生態的綠色環保技術^(11,12)，相當適合台灣本土之發展。但是至目前為止國內對於人工濕地處理技術的認識及應用均相當闕如，對於人工濕地相關領域的基礎研究及技術應用均有待建立。

本研究計畫之主要目的包括：一、利用小規模(bench scale)之人工濕地，探討不同本土型水生植物對 COD、氨氮、磷酸鹽、重金屬之去除能力；其二、利用試驗規模(pilot scale)之濕地系統直接引進污染性河水，探討濕地對河水污染物之處理效果。

三、結果與討論

[限於篇幅本報告未列出圖表，詳細數據列於完整報告中，有興趣者請與本小組聯絡]

二仁溪溪水水質

對於二仁溪水的監測由今年三月起大致分為春季及夏季部分，主要監測項目為一般營養鹽、懸浮固體及物理性質。COD在春季期間大約在100 mg/l上下有時高至360 mg/l，夏季計時則降低至70 mg/l左右。氨氮則維持在3至19 mg/l之間。磷酸鹽的濃度主要介於2至8 mg/l之間，流量大時則明顯的下降。TSS的分布則十分廣，由數mg/l至三百多mg/l。尤其是颱風期間，由於上游的沖刷，TSS可上升至400 mg/l以上。至於二仁溪水的物理性物質，pH值維持在6至7之間。溶氧則介於2至6 mg/l之間。鹽度在春季約為0.1%，但到了夏季因河水流量的增加，鹽度則降為0。水溫在春季介於攝氏25至30度之間，夏季則維持在33度左右。

水質淨化功能

1. 宿命系統：

COD

本研究合成廢水中之有機質成分主要係C₆H₁₂O₆，屬於易生物分解之有機物。進流水COD之平均濃度約為122 mg/l，各植物水槽之COD去除率均可達60%以上，其中又以空心菜及竹葉菜的去除率較佳，分別為83.9及80.5%。而巴拉草系統明顯最差，僅約60%去除率。由於濕地水體環境通常維持在好氧狀態，因此又以好氧分解佔最優勢；而負責分解之微生物主要來自水中植物體及土壤表面所形成之生物膜。由本研究結果顯示，空心菜及竹葉菜的COD去除率較佳，可能是由於該類植物浸在水中之植物體要比浮水性植物(水芙蓉)及挺水性植物(狼尾草、巴拉草、蘆葦)來得廣泛，提供較多表面積供生物膜之形成，因而提高生物分解之效能。唯對照組中亦有近70%之去除效率。對照組槽中無植物生長，但水中混濁且呈綠

色,判斷為分散性細菌及光合性微生物(藍綠細菌及藻類)繁殖所致。因此該水槽應具有氧化塘之功能,可去除有機污染物但是效率不高,大抵上仍低於水生植物之處理系統。

氨氮

試驗期間,進流水之氨氮平均濃度為22.58 mg/l,各植物水槽皆有非常好的氨氮去除效率,其中又以水芙蓉、空心菜、蘆葦及竹葉菜之去除效果較佳,尤其在試驗後期幾乎可達99%以上。觀察植物生長狀況,亦可發現此四種植物生長快速且植株茂密。另外,由硝酸鹽及亞硝酸鹽的分析結果顯示,植物水槽中少有氮氧化物之累積($\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} < 0.2 \text{ mg/l}$),由此可知本研究之濕地系統對氮化合物之去除相當完全。微生物之硝化及脫硝作用則可能是在土壤或植物根莖表面之生物膜微環境中(micro-environment)進行。對照組之氨氮去除效率亦達98%,此可能因該水槽具有氧化塘作用所致。

正磷酸鹽

宿命系統進流水之磷酸鹽濃度介於11~15 mg P/l。空心菜、蘆葦、竹葉菜及對照組的去除效率都很高,可達85%以上;反觀,水芙蓉、狼尾草、巴拉草的去除效率都較低,只有60~75%左右。濕地中磷酸鹽的去除主要為植物生長細胞合成之所需,因此去除效果與植物生長速度有直接的關係。微生物的除磷則與系統排除微生物的量成正比,濕地之底泥一般無法排出,所以濕地中微生物除磷的能力十分有限。對照組的去除率很高,可能為光合性微生物大量繁殖所造成的,綠藻則隨放流水排出系統,故除磷能力得以持續。

TSS

宿命系統進流水之TSS濃度變化很大,而平均濃度約為22 mg/l。此懸浮固體主要為廢水存放過久而變質所衍生之微生物菌體及少量的難溶性有機物。放流水TSS濃度最低者依次為竹葉菜、蘆葦及空心菜。濕地中懸浮固體被去除的可能程序包括有:重力沉降、在植物體間流動之過濾作用、土壤顆粒間之表面。此外,發生於濕地中之重力沉降、吸附及生物掠食(predation)等作用亦可去除細菌等微生物,有助於水質澄清。控制組的放流水TSS濃度相當高,且呈綠色混濁狀,此原因如前所述可能為分散性細菌及光合性微生物(藍綠細菌及藻類)繁殖所致。

Cu

宿命系統進流水之銅離子平均濃度約3.5 mg/l,但是在廢水之存放過程中有連續下降之趨勢,可能是在貯水槽中形成鹽類沉澱物。Cu在FSF溼地系統中具有相當好的去除效率,可達97%以上。濕地中之金屬離子可能經由幾個途徑去除:土壤或砂礫之吸附作用、沉澱反應形成不溶物、

植物攝取等。

大腸菌

宿命系統進流水之大腸菌為人工加入(spike),每一批次的濃度不近相同,以觀察系統去除微生物的能力。根據目前所得之數據顯示,濕地對於水中大腸菌具有去除之功能,由竹葉菜之83.9%至狼尾草之100%去除效率可知。其中對照組亦有87.8%之去除率,顯示綠藻在系統中之優勢可抑制其他菌種之繁殖。

2. 二仁溪溼地系統:

COD

二仁溪系統中,河水的COD濃度隨季節、天候狀況而有所變動。整個濕地系統在初期操作時對COD之去除效率僅達30%,甚至蘆葦床(SSF)之去除效能並不明顯。COD去除效率不佳之結果,可能是因為二仁溪水體中所含的有機物屬於生物難分解性之比例頗高(此推論應由分析河水BOD/COD比值進一步證實),以及植物生長未達穩定狀態或密度不夠有關。在培植水生植物三個月後,COD之去除效率增加至82.1%,未來的觀察可提供更明確的結果。

氨氮

二仁溪系統中,進流水之 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度大抵上介於10~18 mg N/l。由實驗結果顯示,整個濕地系統之氨氮平均去除效率僅達44.8%,大多是在FSF濕地中被去除,而狼尾草水道之去除效率略高於空心菜水道,蘆葦床(SSF)之去除效能亦不明顯。此結果之原因,可能是本研究試驗期間植物及微生物生態尚未穩定形成,導致 $\text{NH}_3\text{-N}$ 處理效果不佳。在培植水生植物三個月後, $\text{NH}_3\text{-N}$ 之去除效率增加至100%。此有效的除氮功能主要來自水生植物抑或底泥中之微生物,尚需進一步研究。氨氮之檢測方法原本採用納氏比色法(標準法417.D),但由於二仁溪系統之水樣含有鹽分,將導致此方法檢測時產生沈澱,所以後來採用酚鹽(phenate)檢測法(標準法418.D)。

正磷酸鹽

二仁溪系統,進流水之磷酸鹽濃度變化大約介於2~5 mg P/l之間,整個濕地系統之磷酸鹽去除率可達52%。磷酸鹽大多是在FSF濕地中被去除,而空心菜水道之去除效率略高於狼尾草水道,蘆葦床(SSF)之去除效能亦不明顯,此結果與前述COD及氨氮之去除現象相同。可能由於植物生長尚不穩定,所以導致磷酸鹽去除效率偏低。在培植水生植物三個月後,磷酸鹽之去除效率增加至70.2%。若比較宿命系統及二仁溪系統之濕地處理效能及植物生長狀態,可知濕地之淨化作用中植物所扮演之角色極為關鍵。

TSS

二仁溪系統進流水的TSS濃度變化很大，由數mg/l到300 mg/l以上。而整個濕地系統的平均去除效率可達70 %以上，且空心菜水道之去除效率明顯高於狼尾草水道。在培植水生植物三個月後，TSS之去除效率增加至97.5%。原因為浮水性植物系統因有效阻隔陽光照射，可抑制光合性微生物之生長。因此，在降低TSS上較挺水性植物系統為有效。

四、計劃成果自評

本研究利用小型規模人工濕地處理合成廢水及試驗規模人工濕地處理二仁溪嚴重污染河段溪水，探討此自然處理程序對於各種主要污染物(如有機物、氨氮、磷酸鹽、懸浮固體及金屬子)的處理效能。經由比較小型規模人工濕地系統處理合成廢水中各種污染物之處理效能，可歸納出空心菜、蘆葦及竹葉菜為適合應用在自由表面流動式人工濕地的本土型水生植物。試驗規模人工濕地系統在初期水生植物剛種植時，對於各污染物之平均去除效率分別為：COD 30%、氨氮 44.8%、磷酸鹽 52%、TSS 70 %。此系統因濕地中植物生長尚未穩定，導致處理效能並不理想。而在培植水生植物三個月後，各污染物之平均去除效率分別增為：COD 82.1%、氨氮 100%、磷酸鹽 70.2%、TSS 97.5 %。本年度研究結果顯示，人工濕地確定具有淨化水質之功能。然此能力是否已達穩定，尚受何種因素之影響。將在本研究之未來工作項目之中持續進行，進一步探討各種操作控制參數（如水力停留時間及污染物負荷）對人工濕地處理效能之影響，以期建立濕地處理程序的相關工程技術及在生態保育功能之資料，作為未來大規模場設計及操作的參考。

五、參考文獻

1. 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, pp.87-93.
2. 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, pp.291-294.
3. Hiley, P.D. (1995) The reality of sewage treatment using wetlands. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 32, No.3, pp.339-348.
4. Vrhovsek, D., Kukanja, V. and Bulk, T. (1996) Constructed wetland for industrial waste water treatment. *Wat Res.* Vol. 30, No. 10, pp2287-2292.
5. 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, pp.111-118.
6. Mehllum, T. (1995) Treatment of landfill leachate in on-site loogon and constructed wetland. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 32, No. 3, pp.129-136.
7. Tarutis, W. J., and Unz R. F. (1995) Ion and manganeserelease in coal mine drainage wetland microcosms. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 32, No. 3, pp.187-192.
8. Metcalf & Eddy (1991) Chap 13 Natural treatment system. In *Wastewater Engineering (Third Edition)*. pp.927-1016. Mcgraw-Hill, Inc. New York.
9. Kadlec, R. H. (1995) Overview: surface flow constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 32, No. 3, pp.1-12.
10. Reddy, K. R. and D'Angelo, E. M. (1997) Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal in constructed wetland. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35, No. 5, pp.1-10.
11. 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.
12. Andrew Wood (1995) Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 32, No. 3, pp.21-29.
13. APHA (1985) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16th ed. American Public Health Association, Washington, D. C.