

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

以人工溼地法處理受污染河水以達到水資源再利用及生態保育之研究

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

計劃編號：NSC 88-2621-B-041-001

執行期限：87年8月1日至88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

本研究計劃為延續第一年度的工作，在溼地系統的建立後並達到穩定操作狀況下，對二仁溪水質持續的監測以及污染河水的處理成效探討。本年度的重點在於此人工溼地在處理污染河水的效能，受河水水質因隨季節變化的影響。由於冬季時二仁溪溼地系統中之水生植物多已休眠或死亡，所以在此期間的主要工作在於重新種植水生植物，使得本報告討論範圍內（87年8月至88年7月）缺少88年1與2月的資料。對於二仁溪水（亦即溼地系統之進流水）的主要監測項目為一般營養鹽、懸浮固體及物理性質。二仁溪進流水中的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1,000 mg/L以上。至於物理性物質，pH值維持在7至8之間。溶氧則介於0.2至8.0 mg/L之間。鹽度從十一月開始增加，最高可達2.3%，五月開始因河水流量的增加，鹽度則逐漸降為0。水溫介於攝氏21至34度之間，平均為27.6度左右。

整年度的平均去除效率：COD為22.6%、氨氮為60.7%、正磷酸鹽為46.1%與總懸浮固體為70.9%。相較對照組之17.3%、35.5%、19.2%與60.7%，種植水生植物的人工溼地系統具有較佳的淨化水質的功能。因為季節變化導致河水發生春秋翻騰現象以及枯水期時水中因海水漲潮導致的鹽度增加為影響此溼地生態最主要的因素。就淨化水質而言，選擇能適應此類環境變化之植物種類為首要工作。目前已選種一適合的水生植物，如果能持續一年以上，則可以繼續探討相關生態之變化與淨化水質有關的操作參數。

Abstract

The work of this year, an extending research from last year, is using a completely built constructed wetland (CW) system, which had been stably operated to persistently monitor the water quality of Er-Ren River and study the treating effect of polluted river water. The main goal of this year's work focused on the effects of river water quality followed

the seasonal changes and further understood the influence on the efficiencies of polluted water treatment by the CW system. During this research work (August 1998 to July 1999), most of the macrophytes were stopping growing or even died off during the winter. Hence, experimental data were missed for January and February 1998 due to replanting work. The monitored constituents in the water samples are general nutrients (COD, ammonia-N, orthophosphate, etc.) suspended solids, and some physical properties. In the influent from Erh-Ren River, COD concentration was ranged from 100 to 360 mg/L during spring and dropped to about 70 mg/L during summer. Ammonium concentration was maintained between 3 and 19 mg/L. Orthophosphate concentration was ranged from 2 to 8 mg/L and the concentration was dropped significantly when the flow rate increased in the summer. Suspended solids were changed from several mg/L to more than three hundred mg/L. During typhoon days, TSS could raise up to 1,000 mg/L due to the eroded soil from upstream. The physical properties: pH was ranged from 7 to 8; DO was ranged from 0.2 to 8.0 mg/L. The salinity started to increase from November and the highest level was about 2.3%. From May, the salinity gradually decreased to 0‰ when the flow rate of river increased in summer. Water temperature was ranged from 21 to 34 °C with an average of 27.6 °C.

The average removal efficiencies during the whole year operation are : COD 22.6%, ammonia-N 60.7%, orthophosphate 46.1% and total suspended solids 70.9% and the efficiencies of the control system are 17.3%, 35.5%, 19.2%, and 60.7%, respectively. The results of these two systems indicate that the CW system planted with macrophytes has the better ability in purifying polluted river water. Thermal stratification effect and increasing salinity in influent in low river flow rate period are the main factors affecting the wetland ecology. For water purification, selecting the species of macrophytes which can tolerate such environment is the most important work. To date, a species of reed had been found growing well through the environmental change. If it can maintain such

growing condition for over a year period, then further investigation work about operational strategies and relative ecological change will be continued.

二、緣由與目的

河川為台灣水資源之主要來源之一，但是根據行政院環保署八十四年環境統計年報，台灣主要河川已有 40%的河段受到不同程度的污染。河川的污染不僅使得台灣本來有限的可用水資源更趨拮据，同時也逐步破壞了河川流域的生態環境。但是要淨化河川水質，除了有效管制其流域之放流水之外，不論其流量大小要直接淨化污染的河水，任何傳統之人工設計之系統在經濟效益上或是處理容量能力上均無法負荷。因此在管理低濃度之污染性河水，較適當的技術，可朝向創造或利用複雜的自然生態系統，且此系統應具有可將污染物同化 (assimilation) 或轉換的能力、不需能源輸入及不必經常維護便可自給自足。目前已有超過一千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。

在水資源的管理保育上，由於濕地系統能夠有效的淨化受污染水，且兼具生態保育之功效，乃為一良好的淨化污水系統。但因為天然濕地，如沼澤、草澤、瀉湖、淺灘等，若隨意將污染水引入，將造成自然生態失去平衡的嚴重後果，並不適合用來做為人類污染水的淨化場所。然利用人工濕地，則無此顧慮，人工濕地不僅具有天然濕地的淨水及生態保育的功能，且無須管制進流水之水質，此外，更有可針對不同污染物培育優勢的植物種類、根據實際所需而規劃出適當面積、可彈性選擇或直接利用現地已存在的水塘、養殖池等的一部分作為水質淨化之溼地系統、以及可依據是否會因進流污水而污染地下水層，而選擇是否以不透水層隔絕地下水等優點。若無污染地下水層之疑慮時，更可以溼地系統作為維持地下水位的緩衝水體。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[8,9]：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[10,11]，相當適合台灣本土之發展。

在上一年度的研究計劃中，bench scale 的人工

濕地系統已經完工，並且實際操作。由在上一年度的研究結果顯示[12]，人工濕地系統確實具有淨化水質的功能。本年度之研究計畫，則為延續上一年度的工作，繼續探討人工濕地對河水污染物之處理效果過程受環境因素之影響狀況。

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，有興趣者請以上列之 e-mail 與本研究小組聯絡]

二仁溪溪水水質

二仁溪溪水的水質隨季節、天候狀況而有所變動。其變化主要是受春秋翻騰現象 (thermal stratification) 所主導，此一現象為自然水體必然發生的狀況。就二仁溪的位置與台灣南部氣候而言，二仁溪發生春秋翻騰現象主要在十一月初以及四月初左右。其次的影響因素為溪水流量的變化，冬季為台灣南部枯水期。流量的減少會使得溪水中污染物的濃度升高。另有一偶發之影響因素為颱風或雨季，雨量大量的增加雖然會稀釋溪水中物質的濃度，但是上游被沖刷的土石隨著溪水流下造成溪水中懸浮固體濃度急劇上升而影響人工溼地系統的供水系統正常操作甚至因管路或幫浦受阻而被迫停止操作。

二仁溪溪水水質物理性質在此一年中之變化，pH維持在7至8之間，全年平均為7.6。除了在88年12月至3月初變動較為激烈之外，其餘時間，pH均維持在7.6上下。溶氧部分則變化較大，濃度分布於0.15至8.02 mg/L之間，全年平均為3.08 mg/L。自87年11月開始，溶氧逐漸下降直至88年5月初才開始升高，顯見二仁溪水中之溶氧受到春秋翻騰現象影響較為明顯。至於水溫部分，全年期間維持在21至34°C之間，平均為27.6°C。此一溫度範圍，十分適合人工溼地中水生植物之生長，因為水生植物較適合生長於溫濕的環境中。因此，除了87年11月至88年3月之間，部分水生植物會進入冬眠或死亡之外，其餘時間均能快速生長。在本計劃成果報告中，因為系統中重新種植水生植物而停止操作，因此缺少88年1月至2月的數據。同時，上述期間水生植物死亡的原因可能是季節變冷，亦或受到春秋翻騰現象自底泥中掀起大量之有毒物質 (如重金屬) 所致，目前尚未能定論。因此，在本年度計劃中以將水生植物的種類逐漸篩選，希望能找出較不受季節或水質影響的物種以維持人工溼地淨化水質的功能。由於二仁溪人工溼地系統位置距離出海口只有約8公里，因此在河水流量降低再加上海水漲潮時，溼地系統的進流會含有鹽分。

二仁溪溪水中污染物濃度在此一年中之變化，以目前所檢測的項目作一探討。有機物 (COD) 方面，全年的變化介於14.2至897 mg/L之間，平均為167.6 mg/L。自87年11月開始COD的濃度即明顯的上升，至88年3月才降至100 mg/L以下。此一現象的原因，可能是由於春秋翻騰現象掀起底泥中之有機物以及河水流量降低所致。氮氮方面，全

年的變化介於0.7至26.4 mg N/L之間，平均為10.7 mg N/L。濃度變化則自87年11月開始上升後，一直維持於高濃度直到88年7月才逐漸降低。至於其他氮的氧化物（硝酸氮以及亞硝酸氮），則分別平均為0.485 mg N/L與0.093 mg N/L，濃度均相當低。磷酸鹽方面，全年的變化介於0.1至6.8 mg P/L之間，平均為2.63 mg P/L。濃度變化則自87年11月開始上升後，一直維持於高濃度直到88年5月才逐漸降低。懸浮固體(TSS)方面則變化十分劇烈，全年的變化介於trace至982 mg/L之間，平均為114 mg/L。

水質淨化功能

1. 有機物

溼地在去除有機物的效能隨著進流水濃度有同步變化的現象。此一結果表示溼地系統在分解有機物時，乃是依循一定的反應機制進行，此一機制主要是異營性微生物的同化作用（assimilation）。基本上，大型水生植物對於水中有機物的吸收非常有限，因為其所需的有機物絕大部分靠光合作用(photosynthesis)來合成。但是，比較二仁溪溼地系統與控制組系統放流水的結果，可以發現二仁溪溼地系統在去除有機物上較控制組為佳，尤其在水生植物生長快速的期間（6月至10月）。這個結果主要是因為溼地系統中的水生植物淹沒在水中之莖與根的部分可以增加微生物的生長空間，尤其是附著生長微生物（亦即生物膜）。同時，經由植物根部（rhizosphere）所釋放出的氧氣更可以加速好氧微生物對於有機物分解的速率。

至於不同溼地系統（FSF與SSF）在分解有機物效率的差異顯示FSF具有較高的去除效率，此現象的原因可能在於氧氣的供給量的差異。SSF溼地一般以種植蘆葦為主，其生長速率並不高（光合作用較慢），再加上水體表面受礫石的覆蓋。雖然礫石具有孔隙但是經由大氣溶於礫石中的氧氣卻十分有限。然而FSF溼地水深只有約15至30公分，水面受風的吹動而增加表面曝氣（surface reaeration）的作用，再加上FSF溼地中之水生植物多為生長快速的植物，使得水中氧氣的供給量因而增加。此外，SSF溼地中礫石表面的生物膜因新陳代謝後死亡的微生物，亦會因分解而消耗氧氣。整年COD的平均去除率，二仁溪溼地系統為22.6%（每月平均去除率介於88年4月的70.4%與87年8月的85.2%），其中FSF溼地為19.3%、SSF溼地為4.1%，而控制組為17.3%。而季節的變化因直接影響水生植物的生長狀態，進而影響系統中微生物的生態，因此在有機物的去除上亦有相當程度的影響。總體而言，6月至9月期間具有較高的去除效率。

2. 氨氮

在相較二仁溪溼地系統與控制組系統放流水的結果可以發現，二仁溪溼地系統放流水中氨氮的濃度明顯的低於控制組系統。從去除率的角度，

除了88年4月二仁溪溼地系統的月平均去除率低於控制組之外，其餘月份均高於控制組。在7月至11月期間，二仁溪溼地系統在氨氮的去除率均高於90%。此一現象很明確的說明，水生植物在溼地系統中對於氨氮的去除佔有很重要的角色。自87年12月開始，氨氮在二仁溪溼地系統或控制組的去除效率即逐漸下降。由現場的操作以及二仁溪進流水水質分析的結果顯示，在冬季時溼地中水生植物的生長逐漸趨緩甚至死亡。

平均而言FSF溼地比SSF溼地具有較佳的氨氮去除效果。在SSF溼地中，蘆葦的生長速率較慢加上供給硝化菌的氧氣效率較差，因而對於氨氮的去除效果較低。88年5月至7月，因為SSF溼地中植物重新種植尚在成長之中，因此對於氨氮的需求不高。然而在FSF溼地中，因為水生植物生長速率較快、氧氣供給充足、藻類的生長、甚至自水面氣提等因素，使得此一溼地具有較佳的氨氮去除率。整年的氨氮平均去除率，二仁溪溼地系統為60.7%（每月平均去除率介於88年5月的23.6%與87年8月的100%），其中FSF溼地為56.1%、SSF溼地為10.6%，而控制組為35.5%。而季節的變化因直接影響水生植物的生長狀態，因此在氨氮的去除上亦有相當程度的影響。總體而言，6月至11月期間具有較高的去除效率。

3. 正磷酸鹽

除了88年4月之外，種植水生植物的二仁溪溼地系統在去除磷酸鹽上始終優於控制組。88年3月至4月正當水生植物重新種植的初期階段，所以二仁溪溼地系統與控制組具有相仿的除磷效能。從季節變化的角度而言，二仁溪溼地系統的除磷效能自87年11月開始即逐漸下降，自88年5月開始才回升。此一現象表示水生植物生長的速率直接影響了溼地除磷的功能。由此可見，維持溼地中水生植物的正常生長是其除磷的必要條件。

平均而言SSF溼地比FSF溼地具有較佳的除磷效果。此現象的原因可能是FSF溼地在整個年度操作當中選種了數種不同的水生植物，並且過程當中有許多植物體無法完全從系統中移除，而導致磷酸鹽再度釋放回系統中。然而SSF溼地中的蘆葦雖然生長速率不高，但是卻始終穩定生長。整年的磷酸鹽平均去除率，二仁溪溼地系統為46.1%（每月平均去除率介於88年3月的19.6%與87年10月的85.1%），其中FSF溼地為23.1%、SSF溼地為30.0%，而控制組為19.2%。而季節的變化因直接影響水生植物的生長狀態，因此在磷酸鹽的去除上亦有相當程度的影響。總體而言，6月至10月期間具有較高的去除效率。

4. 懸浮固體

二仁溪水中的懸浮固體（SS）至少有三種：泥沙、來自底泥之固體以及藻類[13]。而影響這些固體在河水中濃度的因素包括水溫、河水流量、營養鹽含量等。當二仁溪發生春秋翻騰現象時，河水中的底泥含量會大量增加。當雨季或颱風發生

時，河水中的泥沙會因上游的沖刷現象而大量出現。夏季時因水溫升高、日光照射充分、河水流量不大時，加上河水中營養鹽的配合，則會使藻類在河水中大量繁殖。因此在探討二仁溪溼地系統中SS的變化，也需從不同的SS來分析討論。

溼地系統中（尤其是FSF溼地）的SS經常高出進流水中的含量。此現象表示有固體在溼地系統中產生，由水樣及現場觀察發現水中有藻類的產生。根據各採樣點水樣中葉綠素a與TSS之間的關係，可以看出FSF溼地的TSS確實含有高比例的藻類。挺水性植物槽中的藻類比例比浮水性植物槽為高，顯示浮水性植物的遮光性較佳因而較有效的抑制藻類生長。SSF溼地與控制組的放流水中藻類含量很低，主要原因是礫石有效的過濾藻類同時抑制其再生。二仁溪溼地系統在87年8月至10月以及88年6月至7月期間對於SS的控制優於對照組。此二時段為水生植物生長的旺季，因此水生植物的順利生長有助於SS的去除。可能原因是在水生植物快速的生長，需要吸收大量的營養鹽因而減少了藻類取得營養鹽的機會，進而降低藻類的繁殖速率。整年的SS平均去除率，二仁溪溼地系統為70.9%（每月平均去除率介於88年4月的70.4%與87年9月的90.5%），其中FSF溼地為16.6%、SSF溼地為65.1%，而控制組為60.7%。水生植物的生長狀態在去除SS上有相當程度的影響。總體而言，6月至10月期間具有較高的去除效率。

四、計劃成果自評

本年度研究結果顯示，人工濕地確定具有淨化水質之功能。然此能力的高低受到溼地系統當中水生植物生長的狀況而定。而水生植物的生長受到季節改變、河水水質因春秋翻騰現象的影響、生長環境（如水溫、鹽分等）等因素左右。由於自然界的循環無法以人工的方式改變，因此在多次嘗試與失敗之後，本研究小組終於選植了一種能夠忍受低溫以及高鹽度的水生植物。如果此種水生植物能夠維持一年以上的穩定生長，則此人工溼地就可以進入下一個階段，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., P. Glover, and T. Kalaroopan, "An Evaluation of Pollutant Removal from Secondary Treated Sewage Effluent Using A Constructed Wetland", *Water Science & Technology*, Vol. 32, No. 3, pp.87-93 (1995).
2. Juwarkar, S., B. Oke, A. Juwarkar, and S. M. Patnaik, " Domestic Wastewater Treatment Through Constructed Wetland in India ", *Water Science & Technology*, Vol. 32, No. 3, pp.291-294 (1995).
3. Hiley, P.D., " The Reality of Sewage Treatment

- Using Wetlands ", *Water Science & Technology*, Vol. 32, No. 3, pp.339-348 (1995).
4. Vrhovsek, D., V. Kukanja, and T. Bulk, " Constructed Wetland for Industrial Wastewater Treatment ", *Water Science & Technology*, Vol. 30, No. 10, pp.2287-2292 (1996).
5. Yin, H. and W. Shen, " Using Reed Beds for Witer Operation of Wetland Treatment System for Wastewater ", *Water Science & Technology*, Vol.32, No. 3, pp.111-118 (1995).
6. Mehlum, T., " Treatment of Landfill Leachate in On-Site Lagoon and Constructed Wetland ", *Water Science & Technology*, Vol. 32, No. 3, pp.129-136 (1995).
7. Tarutis, W. J. and R. F. Unz, " Ion and Manganese Release in Coal Mine Drainage Wetland Microcosms ", *Water Science & Technology*, Vol. 32, No. 3, pp.187-192 (1995).
8. Kadlec, R. H., " Overview: Surface Flow Constructed Wetlands ", *Water Science & Technology*, Vol. 32, No. 3, pp.1-12 (1995).
9. Reddy, K. R. and E. M. D'Angelo, " Biogeochemical Indicators to Evaluate Pollutant Removal in Constructed Wetland ", *Water Science & Technology*, Vol. 35, No. 5, pp.1-10 (1997).
10. Bavor, H. J., D. J. Roser and P. W Adcock, " Challenges for The Development of Advanced Wetlands Technology ", *Water Science & Technology*, Vol. 32, No. 3, pp.13-20 (1995).
11. Andrew Wood, " Constructed Wetlands in Water Pollution Control: Fundamentals to Their Understanding ", *Water Science & Technology*, Vol. 32, No. 3, pp.21-29 (1995).
12. 荊樹人, "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再利用可行性之探討", 行政院國家科學委員會專題研究計劃年度成果報告 (1998).
13. Jing, S.R., Y.F. Lin, D.Y. Lee, and T.W Wang, "Use of 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 (2000).