

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

已達穩定狀態之人工溼地系統處理污染河水操作設計參數之建立

計畫編號：NSC-90-2211-E-041-007

執行期限：90年08月01日至91年07月31日

主持人：荊樹人(jingsr@mail.chna.edu.tw)嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

共同主持人：林瑩峰、王姿文、李得元、錢紀銘

計畫參與人員：何茂賢、吳堅瑜

一、中文摘要

本研究以試驗規模之表面流動式 (free water surface, FWS) 人工溼地系統直接處理污染性河水(二仁溪), 探討人工溼地系統對懸浮固體及氮磷污染物之去除效能及動力學行為, 以求得溼地系統之污染物去除模式及參數。此溼地實驗系統設立於台南縣與高雄縣交界之二仁溪畔, 面積為 $3.92\text{ m} \times 1.94\text{ m}$, 以鋼板分隔成寬 97 cm , 總長 7.96 m 之U型水道, 水深控制於 0.25 m , 種植蘆葦。自2001年11月至2002年6月, 以固定水力負荷 0.05 m/d (水力停留時間 4 d), 連續入流操作, 相當於一柱塞流型反應器。由水質分析結果顯示, 進流水總懸浮固體、氨氮及磷酸鹽濃度分別為 $26\sim 217\text{ mg/l}$ 、 $1.86\sim 14.53\text{ mg N/l}$ 及 $0.45\sim 2.25\text{ mg P/l}$, 流經溼地後之出流水濃度分別下降至 $12\sim 83\text{ mg/l}$ 、 $0\sim 2.85\text{ mg N/l}$ 及 $0.3\sim 1.5\text{ mg P/l}$, 平均各削減了30、76及54%。溼地中氨氮及磷酸鹽濃度隨水流距離而逐漸下降之結果, 遵循一次動力學柱塞流反應模式 (first-order plug flow kinetic)。氨氮及磷酸鹽之去除速率常數值 (k_v) 並明顯隨著水溫的降低而下降, 亦符合阿瑞尼亞士修飾模式 (modified Arrhenius equation)。經估算表面流溼地系統 20°C 下之去除速率常數 ($k_{v,20}$) 為 0.198 d^{-1} (氨氮) 及 0.206 d^{-1} (磷酸鹽); 溫度校正係數 (θ) 為 1.104 (氨氮) 及 1.046 (磷酸鹽)。此動力學模式將可提供實場處理類似污染性水體之設計操作依據。

關鍵字：人工溼地系統、污染性河水、懸浮固體、藻類、營養鹽、去除速率常數、溫度係數

Abstract

This study was using a free water

surface (FWS) constructed wetland (CW) system directly treating polluted river water from Erh-Ren River. The main goal of this research is a study of the kinetic behavior of the CW in removing suspended solid (SS) and nutrient in order to obtain related treatment models and parameters. The CW is built at the bank of Erh-Ren River, having size of $L \times W \times h = 7.96\text{ m} \times 0.97\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ and planted with common reeds. Between November 2001 and June 2002, the hydraulic loading rate was retained at 0.05 m/d (hydraulic retention time = 4 d). The CW was operated as a plug-flow reactor with continuous inflow. According to the experimental data, SS, ammonia-N (AN), and ortho-phosphate (OP) ranged in $26\sim 217\text{ mg/l}$, $1.86\sim 14.53\text{ mg N/l}$, and $0.45\sim 2.25\text{ mg P/l}$, respectively; the concentrations reduced to $12\sim 83\text{ mg/l}$, $0\sim 2.85\text{ mg N/l}$, and $0.3\sim 1.5\text{ mg P/l}$, respectively, giving removal efficiencies of 30, 76, and 54%, respectively in average. The removals of AN and OP follows first-order plug flow kinetic and the reduction rate constants, k_v , were decreased with water temperature based on modified Arrhenius equation. At 20°C , k_v for AN and OP were 0.198 and 0.206 d^{-1} , respectively. The temperature coefficients (θ) for these two constituents were 1.104 and 1.046 , respectively. The kinetic model and the operational parameters can be used for designing CW system for treating similar wastewater.

Keywords: constructed wetlands, polluted river water, suspended solids, algae, nutrient, removal rate constants, temperature coefficient

二、緣由與目的

河川為台灣之主要水資源之一，卻因

長期承受著未經適當處理之事業及社區廢污水等污染，而造成河川厭氧或水庫優氧化。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。

目前，所發展出來的人工濕地系統有兩種類型[1]。其一，稱為表面流動式 (free water surface, FWS)，此為模擬天然濕地的環境狀態，底部為不透水土壤層約 20~30 公分，並高密度地種植挺水性植物 (emergent plants；根生於水底，葉伸出水面，例如燈心草、蘆葦、香蒲等) 使其約佔 50% 的表面積；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；美國大多採用此種系統。另一種系統，稱為表面下流動式 (subsurface flow, SSF)，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間流動，以達到淨化作用；此種系統則是在歐洲、澳洲及南非較盛行。

本研究主要目的為利用試驗規模 (pilot-scale) 之 FWS 型人工溼地直接處理污染性河水，探討溼地對懸浮固體及氮磷污染物之去除效能及動力學行為，以求得溼地系統之污染物去除模式及參數，作為將來實場處理類似污染性水體之設計操作依據。

三、結果與討論

1. TSS 去除效果

圖 1 為距離分率與 TSS、Chl-a、NTU 的關係圖，距離分率 0、0.25、0.5、0.75、1 為採樣點 A0、A1、A2、A3、A4 (相當於 HRT=1、2、3、4 天)。進流水之 TSS 平均濃度為 69mg/l，流經人工溼地系統後之放流水平均濃度下降至 48mg/l，平均削減了 30%；Chl-a 由進流平均濃度 93mg/m³ 進入人工溼地系統，在採樣點 A2 處上升至平均 151 mg/m³，至放流為平均 72 mg/m³；Turbidity 則由進流平均濃度 31.6NTU 進入人工溼地系統，至放流為平均 4.6NTU。

2. VSS 與 Chl-a

TSS 與 VSS 的進流平均濃度分別為 69、41 mg/l，放流則為 48、30mg/l，而經人工溼地系統處理後，其平均比值 (VSS/TSS) 為 60%。

經 Turbidity 分析結果可知，在富含泥沙平均 31.6NTU 之進流至放流水水樣較澄清已達平均為 4.6NTU，故從圖 1 距離分率與 Turbidity 的關係圖顯示在進流 40% 的無機性懸浮固體中，不完全是泥沙。

VSS 中包含了多種類的有機質與藻類。VSS 與 Chl-a 的進流平均濃度分別為 41 mg/l、94mg/m³，放流則為 30mg/l、72mg/m³，而經人工溼地系統處理後，其平均比值 (Chl-a/VSS) 為 0.28%，顯示藻類在 HRT=2 天時生長的最快。

3. 氮氮處理效能

在為期 7 個月的連續操作中，溼地進流水氮濃度介於 1.86~14.53 mg N/l，出流水濃度顯著下降 ($P < 0.01$)，大致隨進流水濃度而變化介於 0~2.85 mg N/l。因此氮的濃度削減效率為 23~100 % (平均值 76%)，削減速率為 0.02~0.61 g N/m²/d (平均值 0.16 g N/m²/d)。

至於氮氧化物在溼地中之變化，進流水亞硝酸氮濃度 0.05± 0.1 mg N/l，出流水 0.21± 0.32 mg N/l；進流水硝酸氮濃度 0.12 ± 0.16 mg N/l，出流水 0.28± 0.50 mg N/l。出流水之氮氧化物濃度明顯高於進流水，說明溼地中硝化作用的進行。然而氮氧化物在溼地的累積濃度較之氮的減少濃度僅些微比率(11%)，此可歸於脫硝作用及植物攝取作用同時進行。整體而言，溼地系統對總無機氮(TIN)的平均去除效率達 56%，去除速率 0.141 g/m²/d。

4. 磷酸鹽處理效能

本研究期間，溼地進流水磷酸鹽濃度介於 0.45~2.25 mg P/l，出流水濃度顯著下降 ($P < 0.01$)，大致亦隨進流水濃度而變化介於 0.3~1.5 mg P/l。

溼地中磷的主要去除機制應包括：植物的攝取、化學沉澱及介質吸附作用[2]。Tanner et al[14]依據磷的質量平衡結果曾推論，植物的攝取量最高時 (生長季節時)，約佔總磷去除量的 11-29%。然而，土壤介質對磷酸鹽的吸附能力可能達飽

和，而且無進行植物採收下，溼地系統持續去除磷酸鹽之機制可能來自於化學沉澱作用及沉積於底泥中[2]。

1. 人工溼地系統之動力模式

由於本研究溼地系統屬長方形渠道，可假設為柱塞流反應器，另外人工溼地技術研究中一般常以簡單的一次動力學來描述溼地中物質的反應。因此，根據一次柱塞流型動力學模式 (first-order plug flow kinetic) 來模擬污染物濃度在溼地中之變化 [3]：

$$\ln \frac{C - C^*}{C_i - C^*} = -\frac{k}{q} \times y \quad (1)$$

C = 系統中污染物濃度 (mg/l)

C_i = 系統進流水中污染物濃度 (mg/l)

C^* = 系統中污染物之背景濃度 (mg/l)

q = 水力負荷 (m/day)

y = 水流經系統之距離分率

k = areal removal rate constant (m/d)

另外，亦有文獻[3]使用 k_v (volumetric removal rate constant) 作為人工溼地系統動力學研究之去除速率常數：

$$k = k_v \times V \times h \quad (2)$$

k = areal removal rate constant (m/d)

k_v = volumetric removal rate constant (d⁻¹)

ε = 溼地之有效體積比率 (0.8)

h = 水深 (m)

然而，去除速率常數 (k 或 k_v) 受溫度的影響可利用阿瑞尼亞亞士修飾模式 (modified Arrhenius equation) 來描述：

$$k_{VT} = k_{V20} e^{\theta(T-20)} \quad (3)$$

其中：

k_{V20} = 20°C 時之一次動力學反應速率常數 (d⁻¹)

k_{VT} = T°C 時之一次動力學反應速率常數 (d⁻¹)

θ = 溫度校正係數

1. 總懸浮固體

圖 2 為人工溼地系統中污染物濃度減掉其污染物之背景濃度取 Log 後與距離分佈之關係圖，可得平均 slope = -0.4177、R = -0.5240。所得之 slope 與 R 值經由公式 2 可得 k_v (d⁻¹) 及 k (m/y) (表 1)。故由圖 3 及表 1 的數據顯示出人工溼地系統中懸浮固

體濃度隨水流距離的分佈，符合一次動力學柱塞流反應模式 (first-order plug flow kinetic)。

2. 氮氮及磷酸鹽

由溼地中各採樣點之物質濃度分布變化顯示，氮氮及磷酸鹽濃度經常性地隨著溼地水流距離而逐漸下降，頗符合(1)式所描述之濃度隨距離的下降趨勢。因此依(1)式關係進行線性回歸的 k 值，並依照(1)式關係求得對應的 k_v 值。一般而言，去除速率常數 (k 或 k_v) 值愈大，表示污染物在溼地中之衰減速率愈快。

利用(3)式進行線性回歸(圖 3)求得氮氮及磷酸鹽之 k_{V20} 及 θ ，示於表 2。其中 θ 值愈大表示污染物去除效能受溫度的影響程度較大，溼地之污染物去除機制中與生物行為有關者受溫度的影響較為顯著，相反地與物理行為有關者受溫度之影響較不顯著[4]。本研究中，氮氮的 θ 值 (1.104) 明顯高於磷酸鹽 (1.046)，此結果亦說明氮氮去除之主要機制 (植物的攝取、硝化-脫硝作用) 均屬生物性行為機制，相較於磷之去除機制 (植物的攝取、化學沉澱及介質吸附作用) 中具有物理性行為，氮氮去除相較下受溫度之影響程度較大。

四、計畫成果自評

本計畫完成以人工溼地系統處理自然受污染河水中之營養鹽時，能夠利用於實場設計的模式以及相關的設計參數的初步估算。同時也評估出季節變化時，應該校正的係數。這些係數與參數的數值，可作為人工溼地設計的初步依據，然而細部設計依據，將視各場址的其他因素個別評估。

五、參考文獻

1. Metcalf & Eddy, "Chap 13 of Natural treatment system," In Wastewater Engineering (Third Edition), McGraw-Hill, Inc. New York. pp.927 (1991).
2. International Water Association, "Constructed Wetlands for Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation," IWA Publishing, London (2000).
3. International Water Association, "Constructed Wetlands for Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation," IWA Publishing, London (2000).

- Kadlec, R.H., Reddy, K.R., "Temperature Effects in Treatment Wetlands," Water Environ. Res. 73(5), pp. 543(2001).
- Tanner, C.C., Clayton, J.S., Upsdell, M.P., "Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands – II. removal of nitrogen and phosphorus," Water. Res. 29, pp. 27(1995).

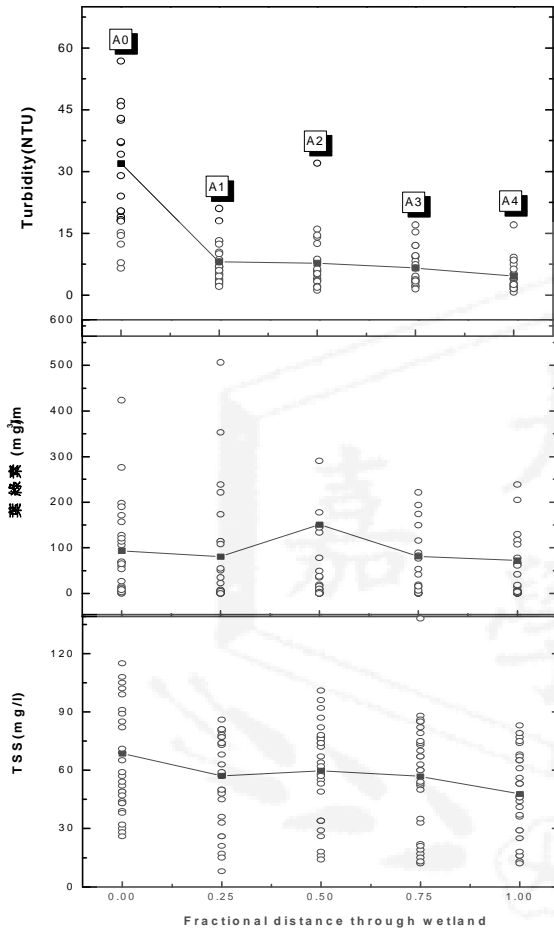


圖 1 距離分率與 TSS、Chl-a、NTU 的分佈關係圖

表 1 總懸浮固體一次動力模式之相關參數

C*	12mg/l
slope	-0.4177
R	-0.5240
R ²	0.3982
k(m/d)	0.0481
k(m/y)	17.5546
kv(d-1)	0.2405

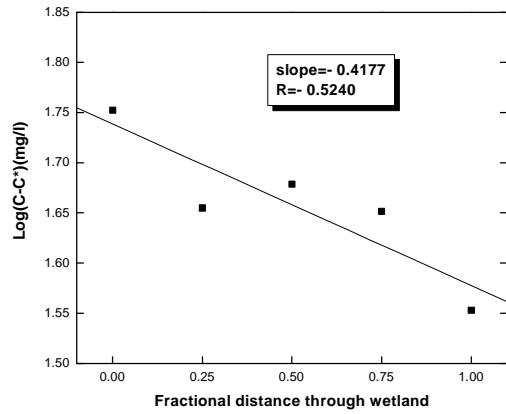


圖 2 人工溼地系統中總懸浮固體之一次動力模式關係圖

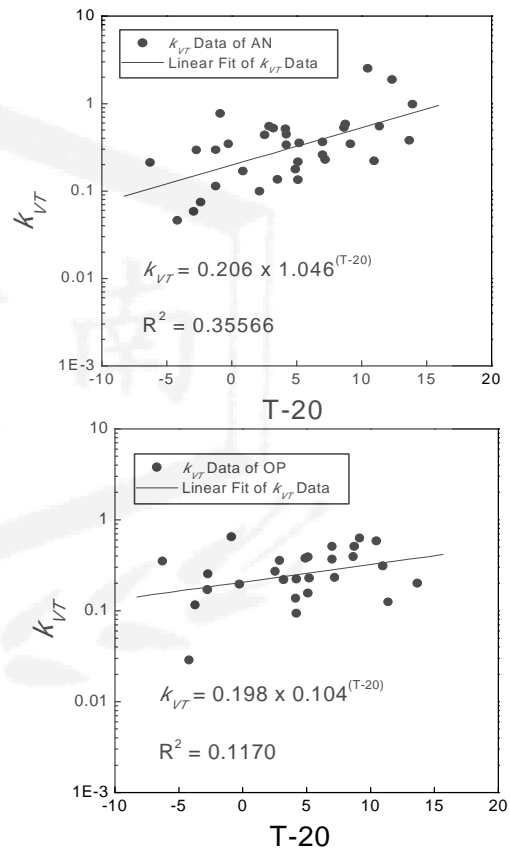


圖 3 氮氮與磷酸鹽之動力常數與溫度關係圖

表 2 溼地系統中 AN 與 OP 之反應動力模式各項參數值

參數	AN	OP
k_{v20}	0.198 day ⁻¹	0.206 day ⁻¹
k	14.4 m/yr	15.0 m/yr
e	1.104	1.046
C*	0mg/L	0.3mg/L
R ²	0.356	0.117

