

## 人工濕地之氮移除最佳化研究

陳鈞華<sup>(1)</sup>、宋建明<sup>(2)</sup>、李煜基<sup>(3)</sup>、徐貴新<sup>(4)</sup>、甘俊二<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup>屏東科技大學土木工程系副教授、水利技師

<sup>(2)</sup>屏東科技大學土木所博士班

<sup>(3)</sup>屏東科技大學土木所碩士班

<sup>(4)</sup>東南科技大學環境管理系副教授兼研發處處長、水利技師

<sup>(5)</sup>七星農田水利研究發展基金會董事長、水利技師

### 摘要

針對人工濕地長期穩定維持氮去除率為模擬目的，探討不同參數，流量 2、5、8、10CMD，入流水污染質硝酸鹽(Nitrate)濃度(10、40mg/L)、銨(ammonium)濃度(5、10mg/L)、有機氮(org Nitrogen)濃度(5、10、15、20mg/L)，利用水生植物(空心菜)於生長期過程中會吸收大量氮、磷作為營養物質，合成自身物質之能力，來達到大量吸收硝酸鹽類來降低出流水之氮濃度。研究中，以固定人工濕地之流量分別為 5、8CMD 和固定入流水有機氮濃度為 5(mg/L)和入流水銨濃度為 5(mg/L)。以第 1~80 天之循環週期來說，氮去除率大致相同。在模擬情況第 50 天時，氮之去除率會大幅度降低，氮去除率分別為 60.19%、62.41%。藉由模擬結果，推估本研究人工濕地最佳的控制條件為：水溫於攝氏 27 度，水生植物吸收率為(2mg/L/d)，流量為 8~10CMD 或以上，污染質入流濃度分別為硝酸鹽 10(mg/L)、銨 5~10(mg/L)不超過 10(mg/L)、有機氮 5~10(mg/L)不超過 10(mg/L)。根據模擬結果可提供後續研究者設計人工濕地長期穩定去除氮污染質之可數值化依據。

**關鍵詞：**人工濕地、氮去除率、流量

### 一、研究動機目的

台灣地區緯度隸屬於亞熱帶地區，受中緯度(冬季東北季風)和熱帶東南氣流(颱風及低氣壓)天氣系統雙重影響和中央山脈陡峻地形影響，形成降雨時空不均。雖於每年降雨量豐沛，但水資源分配不均，導致每年區域性暴雨和洪澇災害不

斷，枯水期間又面臨水資源不足之窘境。造成維持水田、人工濕地基本生態環境需水量不足<sup>[1][2][3]</sup>，長期而言導致水田、人工濕地水生植物大量死亡，導致水田、人工濕地水質持續惡化，進而影響水資源永續利用。

台灣地小人稠，過去為了增進地力，通常會大量使用化學肥料於水田灌溉區，其點源和非點源流入之氨氮、硝酸氮、正磷酸鹽等污染物，造成水田大量營養鹽累積，特別於春、秋期間降雨後，於人工濕地中容易產生類似春秋翻騰之現象，形成人為的優養化 (Artificial Eutrophication)<sup>[4]</sup> 效應。台灣又因 WTO 對農業之衝擊，產生許多休耕水田問題待需解決。

環顧近年環境保護意識抬頭，研究人工濕地淨化水質之文獻日益趨升，使得可引證之論點愈趨真實。1992 年聯合國 (United Nations, UN) 於聯合國環境與發展會議 (United Nations Conference on Environment and Development, UNCED) 提出 21 世紀議程 (Agenda 21) (1) 國家應秉持最適永續原則，以維持水資源的生態系統。(2) 國家應要求對影響水資源利用的開發行為，必須進行環境影響評估。(3) 國家應確定水資源保育為國家經濟發展政策規劃與執行的重要議程，以支持水資源環境之永續發展。(4) 國家應致力於水資源科技創新的研究發展，以回復受損害的水資源及其環境。基於水資源能永續利用之條件下，應提出更有利解決以上多重性環境和效益最大化問題之最佳經濟方案。

水質保護為世界性環保意識，根據美國環保署水質保護中心 (US EPA-Water Quality Protection Center) 與 NSF 國際組

織合作，致力於地下水和地表水之水質保護<sup>[5][6]</sup>。台灣具有獨天獨厚的亞熱帶氣候優勢，適合休耕水田、國家級濕地、研究型大型人工濕地中絕大部分水生植物的生長和發展生態多樣化 (Biodiversity)，隨生態濕地深度旅遊<sup>[7]</sup> 熱門而產生旅遊之附加價值。

針對解決休耕水田問題，改善成人工濕地來淨化水質和增進地力。本研究依既有之人工濕地相關動力學理論文獻，其中以氮循環動力系統最為重要，氮轉化過程模式包括硝化、反硝化、植物攝取(吸收)、分解、礦化及有機氮的累積。在於地下水平流式人工濕地系統，pH 值為中性時通常氮極少揮發，故不建立在模式內。動態模型中採用方法為動力學和由不同學者所提出之經驗、半經驗公式所組合而成 (Billore *et al.*, 1999; Martin and Reddy, 1997; Cooper *et al.*, 1996; Kadlec and Knight, 1996; Vymazal *et al.*, 1998)<sup>[11][21][22][23][24]</sup>。

鑑此以上多重性之生態環境問題，在不影響民生生活、農糧政策及符合環保署放流水標準前提下。本研究為模擬水田區地下水流式人工濕地去除氮源之氮循環動態模型並滿足水生植物環境最小需水之調配模式及永續性維護管理人工濕地之最佳化經濟之探討。

## 二、材料及方法

### 2.1 模式說明

本研究目標為建立一個水生植物、微生物、氮系統、截流伏流水控制人工濕地最佳水力負荷、植生販售收入與支出平衡之地下水平流式人工濕地生態經濟動態模型。

在水田區截流伏流水蓄積於池塘，混合氮源後流入在水田區中建構之地下水平流式人工濕地(Horizontal Subsurface Flow Constructed wetland ,HSSFCW)圖2.1、

2.2，用以脫氮方式處理附近住家排放之生活廢水。主要脫氮機制研究是植物吸收和反硝化作用。

### 2.2 人工濕地氮動態循環系統理論

狀態變量模型：有機氮、銨態氮、硝酸鹽氮和影響有機氮、銨態氮、硝酸鹽氮變量之參數，如表3.1所示。氮素轉換模型主要作用為氨化、硝化及反硝化作用。概述提出該濕地概念圖氮主路徑基本框架模型，如圖2.2所示。

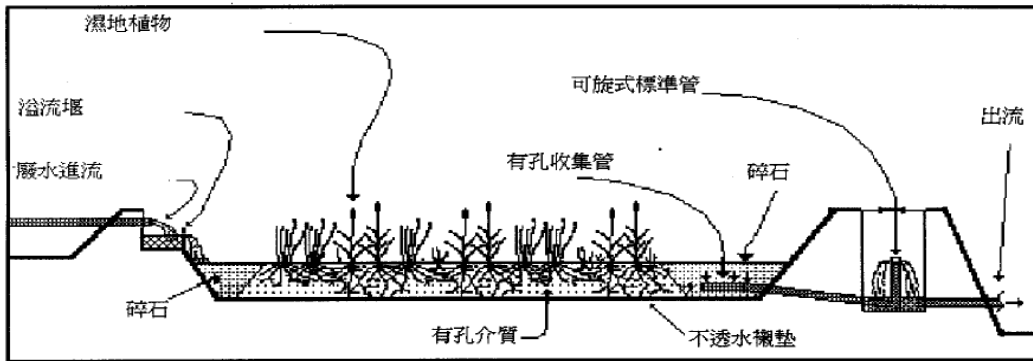


圖 2.1 地下流式水平流動型剖面圖

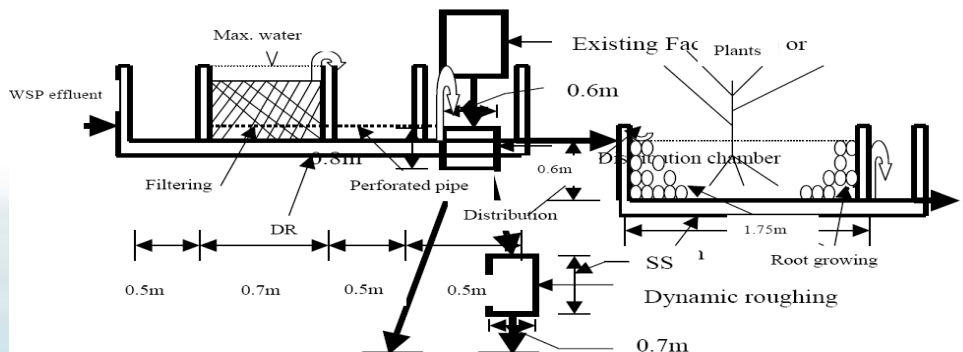


圖2.2地下水平流式人工濕地設計圖

表 2.1 微分方程之狀態變量模型 (Amm.=氨化; nitr.=硝化; denitr.=反硝化)

Organic-N(mg N)	$\frac{dN_{organic}}{dt} = inflow - amm.rate - outflow$
Ammonium-N(mg N)	$\frac{dN_{ammonium}}{dt} = inflow + amm.rate - nitr.rate - outflow$
Nitrate-N(mg N)	$\frac{dN_{nitrate}}{dt} = inflow + nitr.rate - denitr.rate - outflow$

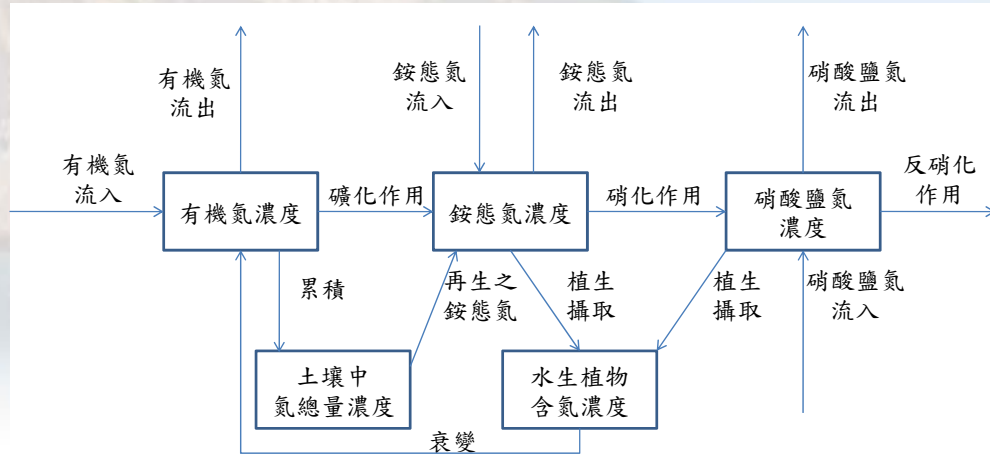


圖 2.2 氮循環概念圖模型

## 2.3 人工濕地模式建立

### 2.3.1 質量守恆

氮通過微生物硝化作用(nitrification)和植物攝取(plant uptake)的質量變化，如公式 1 所示：

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{\text{ammoni}} = Q_i + Q_{\text{min}} - Q_{\text{nitrif}} - Q_{\text{out}} - Q_{\text{upt}} \dots (1)$$

其中， $Q_i$ ， $Q_{\text{min}}$ ， $Q_{\text{nitrif}}$ ， $Q_{\text{out}}$ ， $Q_{\text{upt}}$  是流入率，礦化率，硝化率，流出率和吸收率 ( $\text{mg}/\text{m}^3/\text{day}$ )。

因部分的氮經過蒸發損失和溶於水中後被忽略，因此， $[\text{C}_{\text{NH}_3\text{-N}}]$ 的生化過程中的狀態變量可將公式 1 表示為公式 2，如下所示：

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_{\text{in}} - \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_{\text{out}} + \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_{\text{min}} - \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_{\text{nitrif}} - \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_{\text{upt}} - \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_{\text{vol}} \dots (2)$$

其中， $Q_i$ ， $Q$  是流入量和流出量 [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]； $c$  是氮濃度 [ $\text{mg}/\text{L}$ ]； $V_t$  是人工濕地總體積 [ $\text{m}^3$ ]； $V_p$  是有效體積(污水所佔人工濕地總體積的部分) [ $\text{m}^3$ ]； $X_A$ ， $X_B$  是生物量(礦化和硝化細菌的增加或減少的量) [ $\text{mg}/\text{L}$ ]； $in$ ， $eff$  是流入、流出符號；

$min$ ， $nitrif$ ， $upt$ ， $oxd$  是有機物質礦化作用，硝化作用，吸收作用和氧化作用。

人工濕地中，死亡的有機質的礦化作用會受到溫度影響。

$$K_T = K_{\text{min}(20)} \theta^{(T-20)} \dots (3)$$

其中， $K_T$  是溫度場的氧化速度(oxidation rate at field temperature)， $K_{\text{min}(20)}$  是人工濕地中標準溫度的氧化速度(oxidation rate at standard temperature of the wetland,)， $\theta$  是溫度係數(temperature coefficient)。

### 2.3.2 人工濕地污染質負荷率

污染質負荷率為所有氮肥負荷率形式之計算基礎，如公式 4：

$$MLR_{\text{vol}} = \frac{C_o Q}{V} = \frac{C_o}{HRT} \dots (4)$$

其中， $MLR_{\text{vol}}$ ：容積基礎負荷率 ( $\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )， $C_o$ ：入流濃度 ( $\text{mg}/\text{L}$ )， $Q$ ：流量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ )， $V$ ：水體體積 ( $\text{m}^3$ ) 及  $HRT$ ：水力停留時間。

### 三、結果與討論

#### 3.1 模擬分析之結果

##### 3.1.1 控制流量分析結果

由模擬結果發現在第5天時的氮去除率是整個循環的最高峰，當流量分別為2、5、8、10CMD時，氮去除率分別為85.18%、88.45%、89.31%、89.61%，圖3.1。

本研究分別探討流量分別為2、5、8、10、CMD時之模擬情形，5~8CMD的氮去除率變化率約2.39；8~10CMD的氮去除率變化率約1.02，當流量在8CMD以上，氮去除率變化率變得較小，圖3.1。

3. 固定流量分別為 5CMD 和 8CMD 時，將入流人工濕地的硝酸鹽 (Nitrate) 由 40(mg/L) 降至 10(mg/L) 時。在第 50 天時，氮去除率分別為 21.4%、22.47%，圖 3.2。

##### 3.1.2 控制銨(ammonium)、有機氮(org Nitrogen)分析結果

固定流量分別為5CMD和8CMD時，將入流人工濕地的銨(ammonium)由10(mg/L)降至5(mg/L)時。在第50天時，氮去除率分別為60.19%、62.41%。圖3.3

固定流量分別為 5CMD 和 8CMD 時，將入流人工濕地的有機氮(org Nitrogen)由 10(mg/L) 降至 5(mg/L) 時。在第 50 天時，氮去除率仍然跟銨濃度變化一樣，分別為 60.19%、62.41%，圖 3.4。為探討有機氮(org Nitrogen)的變化為何，由 10(mg/L) 增加至 15 和 20(mg/L) 時。在第 50 天時，氮去除率分別為 44.87%、39.53%，可推估入流的有機氮濃度降低時，氮去除率會提高，圖 3.5。

##### 3.2 春夏、秋冬季之溫度探討

攝氏溫度分別為 17(秋冬季之溫度)、27、30(春夏紀之溫度)度時，氮去除率分別為 35.89%、51.68%、58.01%，氮去除率會因溫度升高而提高，圖 3.5。

##### 3.3 綜合分析結果

綜合以上幾點，可推估如要使得氮去除率能夠長期穩定在 60% 以上，依模擬結果可設置在水溫於攝氏 27 度，水生植物吸收率為(2mg/L/d)，流量為 8~10CMD 或以上，污染質入流濃度分別為硝酸鹽 10(mg/L)、銨 5~10(mg/L) 不超過 10(mg/L)、有機氮 5~10(mg/L) 不超過 10(mg/L)，圖 3.6。

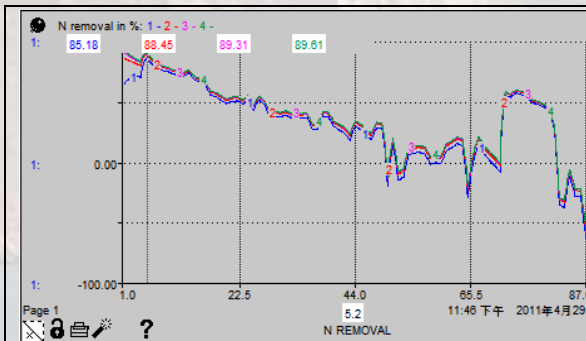


圖3.1 氮去除率模擬圖-流量2、5、8、10CMD, #1、#2、#3、#4

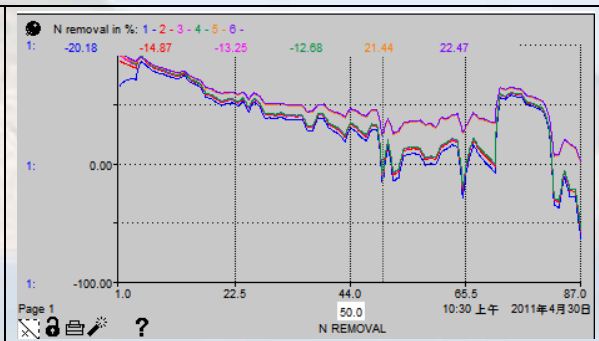


圖3.2 氮去除率模擬圖-流量5、8CMD, 硝酸鹽10(mg/L), #5、#6

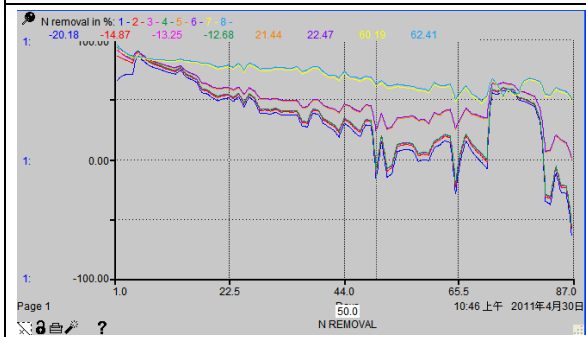


圖3.3 氮去除率模擬圖-流量5、8CMD, 氨5(mg/L), #7、#8

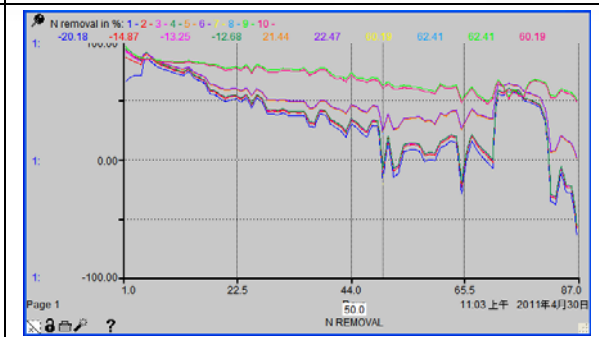


圖3.4 氮去除率模擬圖-流量5、8CMD, 有機氮5(mg/L), #10、#9

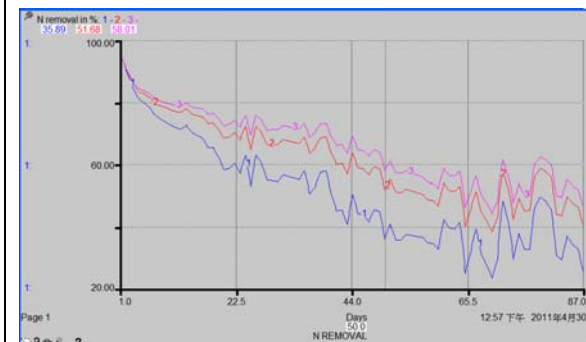


圖3.5 氮去除率模擬圖-流量8CMD, 攝氏溫度17、27、30度, #1、#2、#3

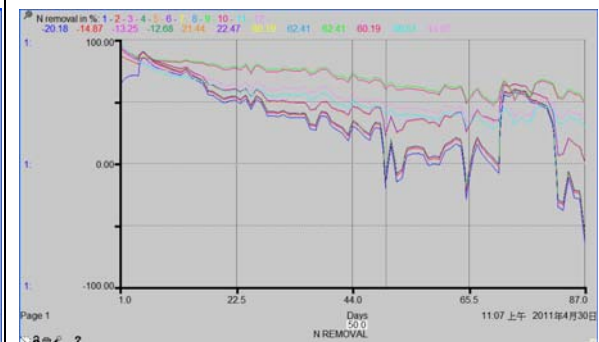


圖3.6 氮去除率模擬圖-流量8CMD, 有機氮15、20(mg/L), #12、#11

#### 四、結果與建議

1. 本研究針對氮移除作為模擬探討，參數設定為攝氏溫度、流量、硝酸鹽濃度、銨根離子濃度、有機氮濃度、空心菜吸收氮比率。模擬最佳參數配置為，水溫：攝氏27度，水生植物吸收率：2(mg/L/d)，流量：8~10CMD或以上。污染質入流

濃度分別為硝酸鹽：10(mg/L)、銨根離子：5~10(mg/L)不超過10(mg/L)、有機氮：5~10(mg/L)不超過10(mg/L)。

2. 如能以本研究人工濕地之設計配置，監控更細部之資料，如BOD<sub>5</sub>、TCOD等，及更長期之現場監測資料，將蒐集資料

加以校正與分析，可針對對模型設計更 地。  
多動態參數使得可愈近乎自然人工濕

### 參考文獻

1. Billore, S. K., N. Singh, J.K. Sharma, P. Dass and R.M. Nelson. 1999). Horizontal sub-surface flow gravel bed constructed wetland with Phragmites Karka in Central India. *Water Science and Technology*, 40, 163-171.
2. Cooper, P.F., G.D. Job, M.B. Green and R.B.E. Shutes. (1996). *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. WRC Publications, Medmenhem, Marlow, United Kingdom.
3. Cornelia Hesse, Valentina Krysanova, Jens Pazolt, Fred F. Hattermann, 2008, Eco-hydrological modelling in a highly regulated lowland, ecological modeling, Vol218, 135–148.
4. <http://www.epa.gov/etv/center-wqp.html>
5. <http://www.nsf.org/>
6. Jon Kusler, 2006, WETLANDS AND ECOTOURISM, Association of State Wetland Managers, Inc., The International Institute for Wetland Science and Public Policy.
7. Kadlec, R.H. and R.L. Knight. (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, New York.
8. Martin, J.F. and K.R. Reddy. (1997). Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen processes. *Ecological Modelling*, 105, 1-21.
9. Vymazal, J., H. Brix, P.F. Cooper, R. Haberl, R. Perfler and J. Laber. (1998). Removal mechanisms and type of constructed wetlands. In: Vymazal, J, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green and R. Haberl (eds.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. Backhuys, Leiden, The Netherlands.
10. W. T. EDMONDSON, G. C. ANDERSON AND DONALD R. PETERSON, 1956, Artificial Eutrophication of Lake Washington, EDMONDSON, ANDERSON AND PETERSON, Vol 1, Issue 1, Pg 47.
11. Wang Fang, Liang Lili, Zhang Yinsun, Gao Runhong, 2009, Eco-hydrological model and critical conditions of hydrology of the wetland of Erdos Larus Relictus Nature Reserve, *Acta Ecologica Sinica*, Vol29 307–313.
12. Xiaoling Wang, Yuefeng Sun, Lingguang Song, Chuanshu Mei, 2009, An eco-environmental water demand based model for optimising water resources using hybrid genetic simulated annealing algorithms. Part II. Model application and results, *Journal of Environmental Management*, Vol90 p2612–2619.

收稿：100年5月4日
修改：100年5月7日
接受：100年5月11日