

FWS人工溼地氮遷移循環之情境模擬研究

陳鈞華⁽¹⁾、宋建明⁽²⁾、甘俊二⁽³⁾⁽¹⁾屏東科技大學土木工程系副教授、水利技師⁽²⁾屏東科技大學土木工程系博士生⁽³⁾七星農田水利基金會董事長、水利技師

摘要

本研究在於利用 FWS 人工濕地中，氮在 6 個環境子系統之間流動，建立氮環境循環平衡模式，模擬 10 週、20 週、0.5、1、1.5、2、2.5、3~10 年變化，推估濕地氮循環(nitrogen cycle)大致約 3.026 年為氮量由大變小變化最大的時候，評估其為此人工濕地氮循環穩定的臨界時間點。並模擬夏季時，挺水植物香蒲大量生長數量變為 5 倍時的前後比較，根據模擬結果可供人工濕地規劃設計者參考。

關鍵詞：FWS 人工濕地、氮循環、浮水植物。

一、研究動機目的

薛銘童於 2009 年指出指出大氣二氧化碳濃度增加僅是造成氣候變遷的其中一個原因。根據目前的科學研究顯示，造成全球環境變遷及氣候暖化等問題的來源有三：(一) 大氣二氧化碳濃度增加；(二) 氮的生物地質化學循環改變以及(三) 土地利用／土地覆蓋的改變。這當中，氮的生物地質化學循環改變是當前台灣政府及科學界較少重視的領域。基於國人近年來，已逐漸了解濕地在生態上的重要性，尤其對保護沿岸濕地為候鳥棲息地特別重視，然而濕地尚有淨化水質的特殊功能。若經二級以上處理過之廢污水，再經濕地處理淨化後，其放流水可考慮回收再利用之可行性，以達到水資源永續利用的目的。

濕地處理的技術開始於天然濕地被併為廢水處理系統的一部份。一般而言，有兩個淺水植物生態系統被用來淨水水質處理：自由表面系統和地下流系統。自由表

面濕地系統為模擬天然濕地之水文系統。在這些濕地中，水從進流口流經土壤表面再流至出流口，或者在極少數中，水會全部蒸散或滲透到濕地中。於全球的價值則在於在氮循環、硫循環及碳循環之中，濕地是一個很重要的因子，以維持大氣中氮氣、硫化物及二氧化碳的平衡。濕地的價值及功能有許多，而濕地的各項功能會彼此互相影響，包括涵養水量及飽和水層的深度會影響植物的生長情形，此外，pH 值、溫度及營養鹽的成分也幾乎天天發生變化，且深受到日照陽光的影響。在濕地的內部，因植物相的豐富，土壤中微生物的活躍，再加上擁有充足的水源，造成濕地兼具有淨化水質的功能。利用濕地本身的物理性作用（過濾、沉澱及吸附等作用）、化學性作用（氧化還原、化學沉澱、化學吸收、離子交換及錯合作用等反應過程）及生物性作用（微生物的生物分解、

陳鈞華、宋建明、甘俊二
《FWS 人工溼地氮遷移
循環之情境模擬研究》

同化作用及植物吸收同化等作用)。

二、材料及方法

氮是空氣中最重要的組成之一，佔 79 %。氮不能被生物直接利用，必須轉化成氨 (NH_3)、亞硝酸態及硝酸態才能為植物所吸收。從大氣中有三種方式將氮固定：(1) 自然界雷電作用成為硝酸態。(2) 工業在高溫、高壓下，將氮與氫合成為氨氣；(3) 生物固氮作用。許多豆科植物進行固氮作用，形成 NH_3 。由氨往相反的方向，經過硝化作用 (nitrification) 及脫氮作用 (denitrification) 可以產生氣態的 N_2 、 N_2O 及 NO 。其中硝化作用係自營性的硝化細菌將 NH_3 轉化成，再化為。可被植物吸收亦可能自土壤中淋溶，流入地下水中。在土壤中缺氧狀態下，細菌可將 $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ ，此過程是為脫氮作用。整個氮循環即由上述的氮固定、硝化作用及脫氮作用所組成。

2.1 氮循環—來源與分佈說明

陸域生態系 (terrestrial ecosystems) 中的氮主要存在土壤中的有機物 (生物與大氣中的氮不算。然而，土壤中的氮主要來自大氣。土壤平均有機物含量若以 5% 計，而腐植質與有機-粘粒複合物的又較難分解，因此推算土壤中的氮僅約 2-3% 是植物有效性的，且約 1-2% 是可溶或無機態的。

1. 氮循環：固定化與礦化作用

土壤中 >95% 的氮是有機態的，無法被植物所利用，當微生物分解有機物時氨基 (R-NH_2) 會被水解成銨離子，此過程為銨化作用 (ammonification)。此異營菌的反應受溫度與水分所影響微，銨化後的氮

大部分會氧化成硝酸態氮，此一有機物質轉變成無機物質的過程稱為礦化作用 (mineralization)，這是植物吸收土壤氮的主要來源。反之，如果是自營菌吸收無機態氮而將氮轉變成蛋白質等有機物以合成細胞之過程稱為固定化作用 (immobilization)。

2. 銨態氮

銨離子可藉由陽離子交換作用而被吸附在粘粒表面，尤其當土壤有 2:1 型粘土礦物 (如蒙特石與蛭石) 時，銨離子會進入其層間，此謂之銨固定作用 (ammonium fixation)，被釋出而使植物吸收的速率非常慢。

在乾燥的高 pH 值環境下，銨離子會與氫氧根離子結合而變成氨氣以致散逸至大氣中而影響空氣品質，謂之氨揮發作用 (ammonia volatilization)。此一氨揮發現象特別在下列情況時較為嚴重：1) 粗質地土壤，2) 廐肥直接施撒在地表，and 3) 乾燥的高 pH 值土壤，4) 水稻田 (rice paddies)。

3. 硝化作用 (nitrification)

在溫度較高之中性適度通氣土壤，銨離子會被 *Nitrosomonas* 氧化成亞硝酸根 (nitrite (NO_2^-))。而 *Nitrobacter* 則接著將其再氧化為硝酸根 (nitrate (NO_3^-))。亞硝酸根有毒性，但通常會很快被轉變成硝酸根。此一過程謂之硝化作用，會釋出氫離子與能量 (by 自營性硝化菌，autotrophic nitrifying bacteria)，但會耗氧。硝酸根易被植物吸收，但也因淋洗作用

(leaching) 與反硝化(脫氮)作用(denitrification)而自土壤中流失。在 C/N 比高的土壤中則會被異營菌固定。

4.反硝化作用(脫氮作用)

土壤中的硝態氮因還原作用而變成氣態氮散逸到大氣謂之反硝化作用(denitrification)。在較高溫之厭氣環境中，若有機質豐富則異營菌會將硝酸還原成亞硝酸，O、NO₂及 N₂。其中氮氣無害，但其他兩種氣體會破壞大氣臭氧層吸收紫外光的能力。反硝化作用在濕地，水稻田與還原性土壤較易發生。

5.生物固氮作用(Biological Nitrogen Fixation)

某些細菌，放線菌與藍綠藻等會利用固氮酶(nitrogenase)將氮氣轉變成細胞中的含氮有機化合物，謂之 biological nitrogen fixation。此一過程需耗能，因此固氮菌常與高等植物共生，例如 Rhizobium or Bradyrhizobium bacteria 與根瘤植物(legume family plants)

2.2 FWS 溼地設計說明

FWS 人工溼地(free water surface flow system, FWS)設計為直型渠道，水道長 200m、寬 2m、水深 0.5m、土壤深 0.3m，其中水道種植香蒲(*Typha orientalis*)。由 FWS 溼地處理過後的污水，再引流至 SSF 溼地。

2.3 物質遷移交換速率多介質環境系統模型

首先假設人工濕地氮循環系統中，其傳輸物質在各小單元系統間互相移變化，並且符合一級動力微分方程式，表示如下：

$$\frac{dx_i}{dt} = z_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n f_{ij}(t) - \sum_{j=1}^n f_{ji}(t) - y_i(t), \dots(1)$$

(i = 1, 2, ...n)

氮循環輸入微分方程式系統，表示如下：

$$\frac{dx_i}{dt} = z_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n f_{ij}(t) - \sum_{j=1}^n f_{ji}(t), (i=1, 2, \dots n) \dots(2)$$

氮循環輸出微分方程式系統，表示如下：

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n f_{ij}(t) - \sum_{j=1}^n f_{ji}(t) - y_i(t), (i=1, 2, \dots n) \dots(3)$$

由(2),(3)組成微分方程式組，並以矩陣形式，表示如下：

$$\dot{x} = A^n x + z \dots\dots\dots(4)$$

$$\dot{x} = -A^n x - y \dots\dots\dots(5)$$

其中，

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix}, z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix},$$

$$A^n = \begin{bmatrix} a_{11}^n & a_{12}^n & \dots & a_{1n}^n \\ a_{21}^n & a_{22}^n & \dots & a_{2n}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1}^n & a_{n2}^n & \dots & a_{nn}^n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

FWS 人工濕地氮循環參數個案情境模擬說明，如表 1 所示。

陳鈞華、宋建明、甘俊二《FWS 人工溼地氮遷移循環之情境模擬研究》

表 1 氮循環參數說明表

項目	參數	氮值
葉*	x1	16.2
死亡落葉*	x2	13.1
根部*	x3	3.3
底層土壤*	x4	1184
莖*	x5	102.5
溶於水之氮*	z1	7.5
固定葉上之大氣氮**	z2	0
根部微生物固氮**	z3	13.5
反硝化微生物釋放游離氮***	y1	8.5
根部反硝化作用***	y2	0
土壤逕流***	y3	29.5

註：*氮貯存量(g/m²)， **氮輸入量(g/a*m²)， ***氮輸出量(g/(a*m²))

三、結果與討論

3.1 模擬分析之結果

由圖1所示，可知於FWS人工濕地氮循環大致平均約為3.026年為氮量由大變小變化最大的時候，推估其為此人工濕地氮循環系統穩定之時間。

由圖 2 得知最早根部氮貯存量(g/m²)會開始減少的是時間在第 0.5 年，其次為葉的氮貯存量約在第 1 年，死亡落氮貯存量會在最後減少約在第 1.5 年的時候。

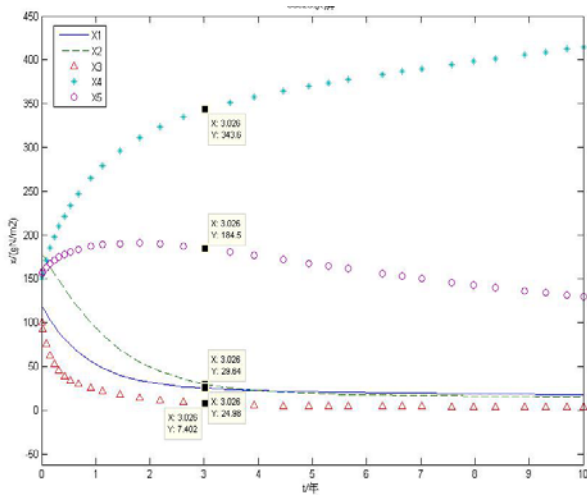


圖1 香蒲數量固定之氮循環模擬圖

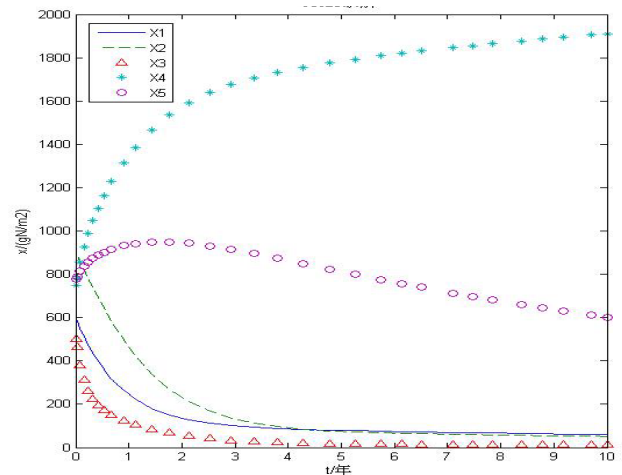


圖 2 香蒲數量增為原本 5 倍之氮循環模擬圖

四、結果與建議

- 1.本研究在於探討 FWS 人工濕地之氮循環穩定週期時間，以氮貯存、輸出量變化率來看，平均約在 3.026 年時出現快速收斂情況，故推估此為穩定的時間點。
- 2.模式中底層土壤隨著時間氮的貯存量一直增加，因為所有的人工濕地物質（氮貯存量）終究會歸於底層土壤，故此為合理之模擬現象。
- 3.本研究探討於夏天時為人工濕地去除污染質最快速的時候，此時增加原本 5 倍的香蒲數量，並模擬可能的變化，得知根部氮貯存量(g/m^2)於 0.5 年時會最早開始減少，推估為主要 3 種因素分別是經由植生大量吸收營養質、底層土壤吸收、土壤表面逕流帶走等。
- 4.模擬各 FWS 人工濕地之氮循環模式時，為假設植生生長情形良好，無嚴重病蟲害，也無探討人為行為和自然因素干擾因素等，但這些因素都有可能發生，如此類問題，建議於後續研究中將微分方程式乘上相關係數和加上或減掉參數，以取代各種干擾因素，並以實驗加以校證其參數係數。

參考文獻

- 1.薛銘童、許博行、劉瓊霏(2009)，台灣不容缺席的研究議題—氣候變遷下氮的生物地質化學循環，台灣林業，Vol.35 No.6, p14~19。
- 2.謝育祥、江漢全、林育安、簡伊敏(2009)，三段式人工濕地除氮效益評估，資源與環境學術研討會，P167~176。
- 3.Hammer, D. A. (1997), Creating Fresh water Wetlands. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- 4.Hammer, D. A. (1992). Designing constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint