

## 水田休耕人工濕地之土壤水分-肥料濃度變化模擬研究

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

## 摘要

本研究在於利用休耕水田之人工濕地中，以淨礦化速率及淨硝化速率，模擬長期的硝酸鹽氮(硝酸態氮、亞硝酸態氮)濃度和氨氮濃度變化差異，並模擬探討人工濕地在不同地下水層(0.5m、1m、1.5m、2m、2.5m)對於硝酸鹽氮濃度和氨氮濃度變化趨勢和差異。由模擬得知，當硝化係數為  $0.004(\text{h}^{-1})$ ，地下水層為 2.5m 時，硝酸鹽氮濃度約在 40hr 後，將會消耗殆盡，氨氮濃度約在 19hr 時，呈現最大值  $8.56(\text{mg/L})$ 。推估硝酸鹽氮濃度與地下水層呈現正比關係，氨氮濃度與地下水層呈現 2 次函數關係。

**關鍵詞：**FWS 人工濕地、水田休耕、地下水層、硝化速率。

## 一、研究動機目的

人工濕地土壤中有機氮先經微生物分解成無機態銨(氨氮)(礦化作用)，再經微生物的硝化作用將無機態銨轉變成硝酸態氮。然而，氨氮和硝酸鹽氮的轉換為人工濕地植物生長的重要限制條件。氨氮和硝酸鹽氮含量的遷移轉化變化過程顯著影響人工濕地土壤和人工濕地植生之生產力。

人工濕地土壤中的氨氮含量植生的生長發育節律(生物固氮吸附常數,  $K_{\text{bio}}$ )，隨著生長時期的變化而不斷變化。基於以上論點延伸出本研究主題，為探討水田休耕成人工濕地之氨氮和硝酸鹽氮轉換時，隨著不同時間和不同地下水層深度之模擬分析。

影響。因此，對於評估人工濕地生態系穩

## 二、材料及方法

有機態氮要轉變為植生所能利用的銨態氮及硝酸態氮時，需經過礦化作用及硝化作用而成為有效性的無機態氮，故此二種機制對於人工濕地生態系中養分維持和對外在環境衝擊來說很重要，因其影響有效性氮的移動(Hart et al., 1994)。氨氮的礦化作用、固定作用及硝化作用的不同會產生不同的結果，對植生會有相當程度之

定與否，可藉由植生利用的銨態氮及硝酸態氮在土壤中的含量變化作為重要指標。

2.1 人工濕地土壤氨氮、硝酸鹽氮轉換研究  
1. 礦化作用

礦化作用為有機態氮變成有效態氮  $\text{NH}_4^+$  過程，此過程可以銨基化合物 ( $\text{R}-\text{NH}_2$ ) 當成有機氮來源，礦化作用在土壤通氣良好情形下進行順利( Brady and

陳鈞華、宋建明、甘俊二《水田休耕人工濕地之土壤水分-肥料濃度變化模擬研究》

Weil, 2000)。上述兩種作用所需要的環境條件相同，往往為相互連續進行。銨態氮

環境中有 4 種不同的行進路徑：(1) 藉由微生物而被固定（被微生物所吸取）；(2) 藉植生吸收作用而被除去（被植生吸收利用）；(3)硝酸根離子（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>）可能藉由排水作用溶解而流失；(4)以氣態（如 N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NO<sub>x</sub>）逸失於大氣中。

### 2.銨態氮

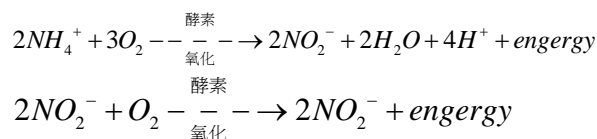
銨離子可藉陽離子交換作用被吸附在黏粒表面，當土壤為 2:1 型黏土礦物(如蒙特石與蛭石)時，銨離子會進入其層間，此謂銨固定作用被釋出使植生吸收氮素率變慢。在乾燥的高 pH 值環境下，銨離子會與氫氧根離子結合而變成氨氣散逸至大氣中影響空氣品質，為銨態氮揮發作用。

### 3.硝化作用

在溫度較高之中性適度通氣土壤，銨離子會被硝酸菌氧化成亞硝酸根。而硝酸菌則接著將其再氧化為硝酸根。亞硝酸根有毒性，但通常會很快被轉變成硝酸根。此過程為硝化作用，會釋出氫離子與能量，但會耗氧。硝酸根易被植生吸收，但也因淋洗作用與反硝化(脫氮)作用而自土壤中流失。在 C/N 比高的土壤中則會被異營菌固定。

### 4.土壤中硝化作用

硝化作用是產生有效態氮 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的過程，首先由硝酸菌或亞硝酸細菌將銨氧化成亞硝酸，再由硝酸菌或亞硝酸細菌將亞硝酸氧化成硝酸，硝酸根離子藉由同化作用得以進入生物體吸收利用，其可用下列反應式表示之：



氧化成亞硝酸後，會繼續氧化變成硝酸。硝化作用所產生的硝酸鹽，可能在氮素循

### 2.2 休耕水田之 FWS 人工溼地設計說明

FWS 人工溼地(free water surface flow system, FWS)設計為直型管道，水道長 200m、寬 10m、水深 0.3m、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 氨氮和硝酸鹽氮物質遷移交換速率多介質環境系統模型

首先假設人工濕地氨氮和硝酸鹽氮於人工濕地生態系統中，其硝化、反硝化、礦化、生物固氮、土壤有效孔隙率、揮發等互相之變化，並符合二級動力之微分方程式，表示如下：

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_1}{\partial x} + K_n C_2 - K_{bio} - K_{den} C_1 \quad (1)$$

初始條件：

$$C_1 = C_{10}(x); (0 \leq x \leq \infty, t = 0) \dots\dots\dots(2)$$

邊界條件：

$$D \frac{\partial C_{01}}{\partial x} + EC_{01} = 0; (0 = x, t \geq 0) \dots\dots\dots(3)$$

$$C_1 = C_{11}(t); (x \rightarrow \infty, t \geq 0) \dots\dots\dots(4)$$

$$(1 + \frac{\rho}{\theta} R) \frac{\partial C_2}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_2}{\partial x} + K_{min} - K_n C_2 - K_v \dots(5)$$

初始條件：

$$C_0 = C_{20}(x); (0 \leq x \leq \infty, t = 0) \dots\dots\dots(6)$$

邊界條件：

$$D \frac{\partial C_{02}}{\partial x} + EC_{02} = 0; (0 = x, t \geq 0) \dots\dots\dots(7)$$

$$C_2 = C_{12}(t); (x \rightarrow \infty, t \geq 0) \dots\dots\dots(8)$$

其中，C<sub>1</sub>：土壤中硝酸鹽氮濃度為 6 μg/(cm<sup>3</sup>·h)、D：擴散係數為 800 cm<sup>2</sup>/hr、v：多孔介質滲流速度為 0.4 cm/hr、K<sub>n</sub>：硝化作用一階動力常數

陳鈞華、宋建明、甘俊二《水分肥料濃度變化模擬研究》

為  $0.002\text{ hr}^{-1}$ 、 $K_{bio}$ ：生物固氮吸附常數為  $0.3\ \mu\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ 、 $K_{den}$ ：反硝化作用一階動力常數為  $0.001\ \text{hr}^{-1}$ 、 $E$ ：蒸發速率為  $0.2\ \text{cm}/\text{hr}$ 、 $C_2$ ：土壤中氨氮濃度為  $8\ \mu\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ 、 $\rho$ ：土壤密度為

$1.2\ \text{g}/\text{cm}^3$ 、 $\theta$ ：土壤有效孔隙率為  $0.53\ \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 、 $R$ ：氨氮在土壤溶液中固相分配係數為  $0.4\ \text{cm}^3/\text{g}$ 、 $K_{min}$ ：礦化作用常數為  $0.2\ \mu\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ 、 $K_v$ ：揮發作用動力常數為  $0.1\ \mu\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ 。

### 三、結果與討論

#### 3.1 模擬分析之結果

圖 1 至圖 10 分別為模擬地下水層 0.5m、1m、1.5m、2m、2.5m 模擬圖，由圖 1、圖 3、圖 5、圖 7、圖 10 所示，可知於人工濕地中以礦化速率為  $0.2\ \mu\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ ，硝化速率  $0.002\ (\text{h}^{-1})$  時為  $\mu\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ ，圖 1 中，可知在地下水層 0.5m 內，約在 4(hr)後，硝酸鹽氮的濃度大致上接近穩定值約  $5.7(\text{mg}/\text{L})$ ，此時圖 2 中，氨氮的濃度約為  $5.9(\text{mg}/\text{L})$ ，又可知在 30(hr)時  $8.755(\text{mg}/\text{L})$  為氨氮濃度最大的時候。圖

3 中，可知在地下水層 1m 內，約在 18(hr)後，硝酸鹽氮的濃度大致上接近穩定值約  $4.48(\text{mg}/\text{L})$ ，圖 4 中，氨氮的濃度約為  $6.16(\text{mg}/\text{L})$ ，隨著時間的增長，濃度也是逐漸緩慢下降，為與圖 1、2 做比較可由圖 3、4 得知約在 4(hr)後，硝酸鹽氮的濃度大致上接近穩定值約  $7.4(\text{mg}/\text{L})$ ，氨氮的濃度約為  $7.55(\text{mg}/\text{L})$ ，又可由硝酸鹽氮和氨氮的濃度變化率來看，可知分別平均為 0.3、0.28，硝酸鹽氮的變化率比氨氮為高，表示本研究人工濕地利用硝酸鹽氮濃度利用良好。

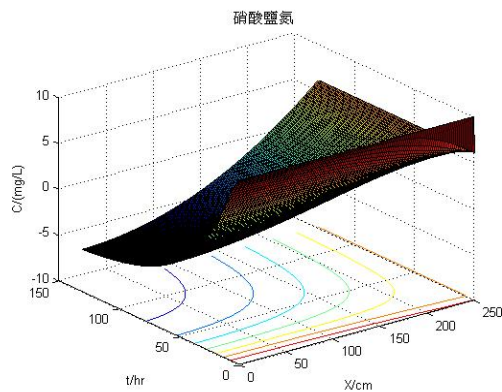


圖1 地下水層0.5m之硝酸鹽氮模擬圖

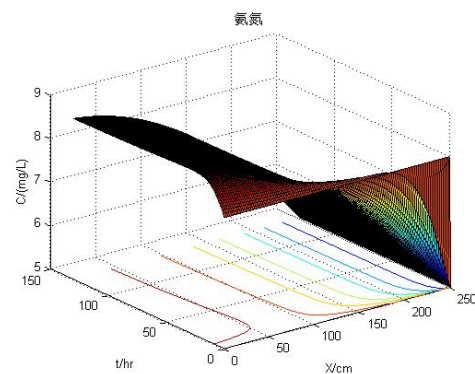


圖2 地下水層0.5m之氨氮模擬圖

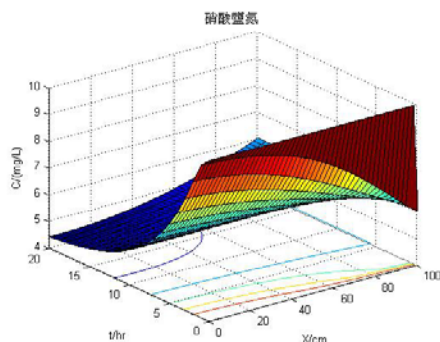


圖3 地下水層 1m 之硝酸鹽氮模擬圖

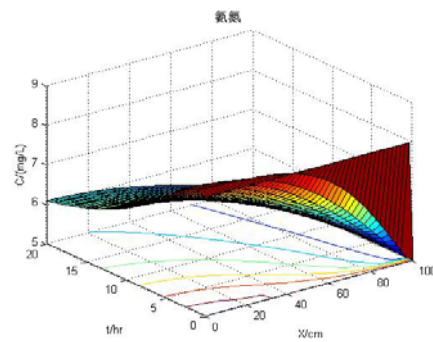


圖4 地下水層 1m 之氨氮模擬圖

陳鈞華、宋建明、甘俊二《水田休率人工濕地之土壤水分、肥料濃度變化模擬研究》

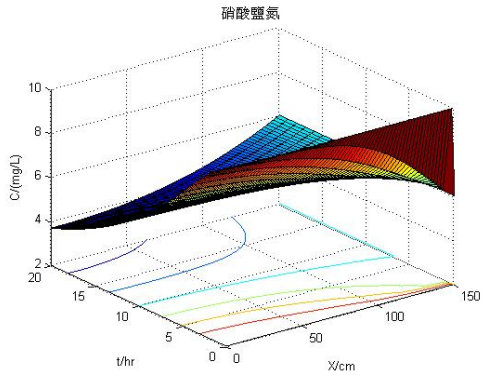


圖5 地下水層1.5m之硝酸鹽氮模擬圖

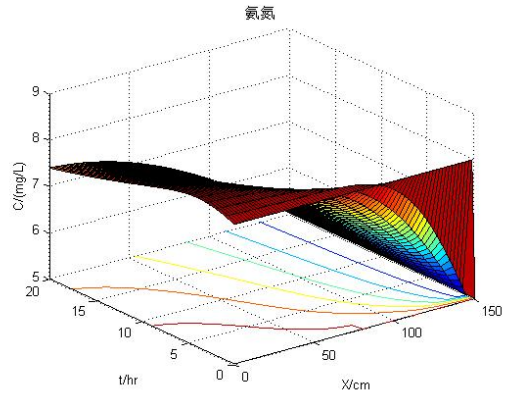


圖6 地下水層1.5m之氨氮模擬圖

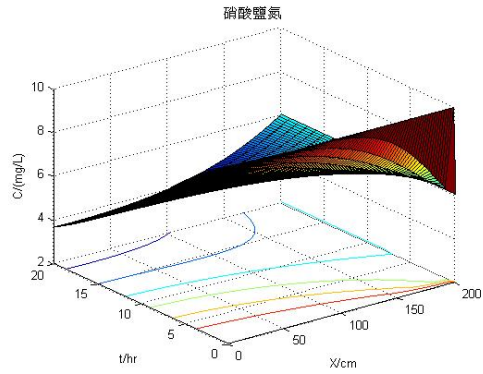


圖7 地下水層2m之硝酸鹽氮模擬圖

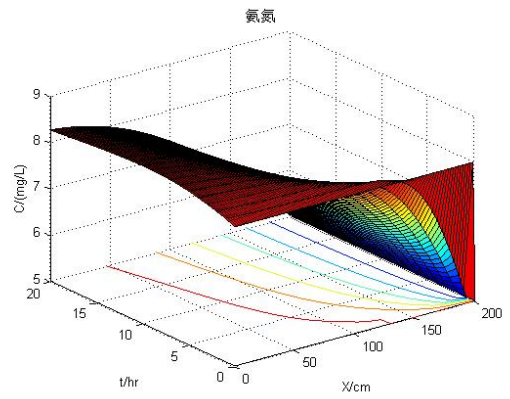


圖8 地下水層2m之氨氮模擬圖

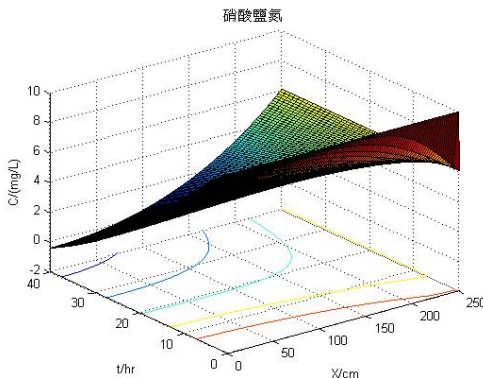


圖9 40hr-地下水層 2.5m 之硝酸鹽氮模擬圖

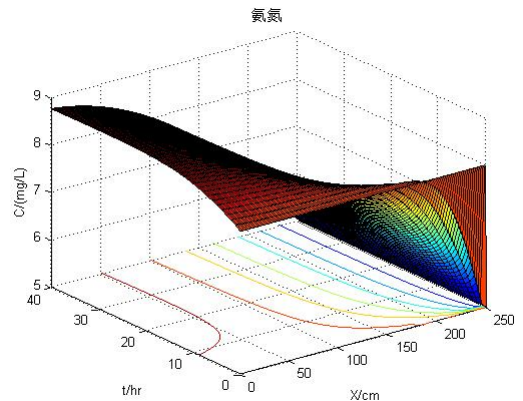


圖10 40hr-地下水層 2.5m 之氨氮模擬圖

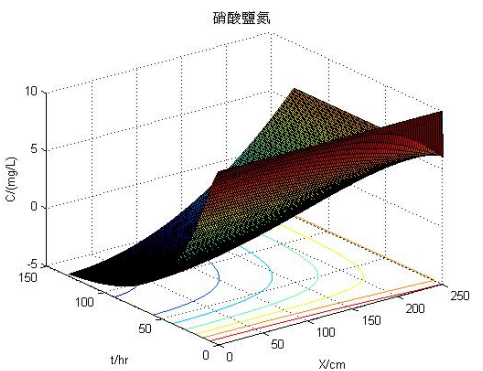


圖10 150hr-硝化速率變為  $0.004 (h^{-1})$  地下水層 2.5m 之硝酸鹽氮模擬圖

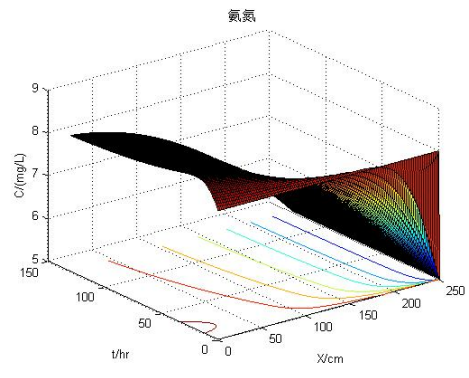


圖11 150hr-硝化速率變為  $0.004 (h^{-1})$  地下水層 2.5m 之氨氮模擬圖

陳鈞華、宋建明、甘俊二《水田休率人工濕地之土壤水分-肥料濃度變化模擬研究》

由圖 9、10 中可知 37(hr)後硝酸鹽氮的濃度會接近 0.05(mg/L)，在氨氮濃度方面在 23(hr)後，氨氮濃度會穩定在 8.75(mg/L)左右。人工濕地中礦化效率

0.002  $\mu\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$  不變，當硝化速率變為 0.004 ( $\text{h}^{-1}$ ) 時，由圖 11 中，可得知 40(hr)後時降為 0.006(mg/L)，由圖 12 得知，氨氮濃度於 19(hr)為最大值 8.56(mg/L)。

#### 四、結果與建議

- 1.本研究在於探討水田休耕之人工濕地之氨氮轉變成硝酸鹽氮(地下水層為 0.5m、1m、2.5m)之穩定時間為 4(hr)時硝酸鹽氮約為 5.7(mg/L);18(hr)後，硝酸鹽氮的濃度約 4.48 (mg/L);37(hr)後硝酸鹽氮的濃度會接近 0.05(mg/L)。
- 2.以氨氮濃度的變化量於地下水層 2.5m 時，硝化速率 0.004 ( $\text{h}^{-1}$ ) 時 19(hr)為最大值 8.56(mg/L)，故推估此氨氮穩定的分解時，其 19(hr)為臨界時間點。
- 3.由圖 1、3、5、7、9 可歸納出當地下水

層越深時硝酸鹽氮濃度會越大，可推論當地下水層與硝酸鹽氮成正比關係；當地下水層越深時與氨氮濃度值成 2 次函數的關係，當斜率為 0 時，可分別得到氨氮濃度的最大值。

- 4.由質量守恆方程式推導出濃度變化方程式，模擬硝酸鹽氮和氨氮濃度，在礦化、硝化速率值為定值時，模擬超過 37hr 後，將會出現負值，此現象不可能在真實情形發生，所以在解釋時為硝酸鹽氮物質或氨氮物質全部消耗殆盡。

#### 參考文獻

- 1.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。
- 2.Lafolie F.M,1991, modeling water flow,nitrogen transport and root uptake including physical non-equilibrium and optimization of the root water potential Fertilizer Research.27:215-231
- 3.Mitsch W J ,Gosselin J G. ,2000, Wetlands[M] . New York :Van Nostrand Reinhold Company Inc. 892125.
- 4.Jones C A,Red it K J.CERES-M aize. ,1986,A Simulation model of maize growth and development TEXAS and M University press.College station.151-159
- 5.Ramos C,Carbonell A.,1991,Nitrate leaching and soil moisture prediction with the LEACHM model. Fertilizer Research.27:171-180
- 6.Willigen P de., 1991,Nitrogen turnover in the soil-crop system:Comparison of fourteen simulation models. Fertilizer Research. 27:141-149