

水田生態環境微觀系統分析

國立台灣大學生物環境系統工程學系
副教授 吳富春 研究助理 沈易徵

摘要

本研究主要探討水田休耕蓄水對淺層土壤植生環境之影響，由模擬結果顯示水田休耕對土壤氮之濃度影響較鉅，水田休耕當作蓄水池使用時，土壤氮濃度會漸漸被上層蓄水入滲稀釋，土壤肥沃度則會降低，並間接減低雜草及再生稻之生長。而非蓄水區之情況雖不利再生稻之生長，但容易滋生雜草，使入滲受到植生環境之影響，因此水田蓄水與否會直接或間接影響植生環境及地下水補助。

一、緒論

本研究重點在於水田生態環境微觀系統之建立，針對植生環境演算模式所需之資料進行量測及蒐集，以檢定田區植生環境演算模式，並藉由此一模式分析田區土壤溫度分佈及土壤總氮含量改變對植生情況之影響。

二、田間資料蒐集與模式驗證

2-1 田間資料收集

本研究於 87 年 8 月至 9 月間於雲林荊桐之休耕示範田區進行田間試驗，主要量測項目為土壤溫度分佈情況及土壤中氨氮及硝酸氮之含量。本研究將量測地點分為 A、B、C 三區，A 與 B 為非蓄水區，C 為蓄水區，本研究分別將量測儀器埋設於地表下 30cm、60cm 及 90cm 處。因儀器埋設之困難，故土壤氮含量於地表下 90cm 處無法量測，本研究改量測地表處 ($Z=0$) 之土壤氮含量。土壤溫度量測結果可看出 A 區與 B 區同樣屬於非蓄水區，在 30cm 與 60cm 之溫度差均較小，而 C 區則會隨著深度的增加，土壤溫度愈來愈低。土壤氮之量測結果並不易找出共同之趨勢，故本研究將土壤氮量測資料做為土壤氮模式之起始條件與邊界條件設定之參考，並未以此資料進行模擬。

2-2 模式驗證

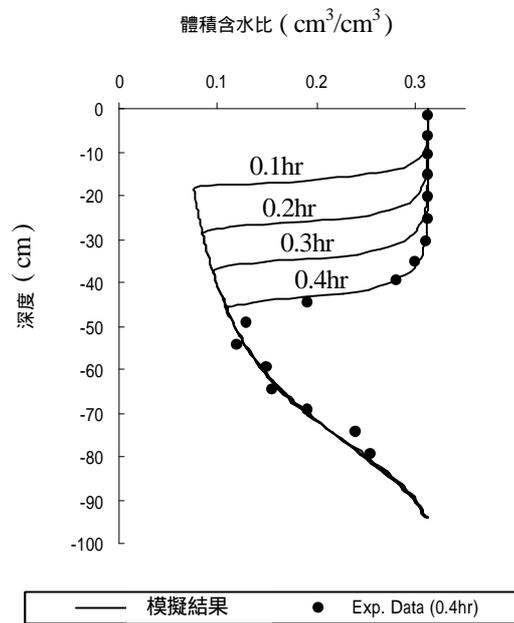
(1) 土壤水模式之驗證

本研究採用 Touma and Vauclin (1986) 的實驗資料驗證非飽和土壤水模式。本研究採用定水頭 2.3cm 之實驗數據進行驗證[7]。模擬結果如圖(1)所示，顯示本研究發展之

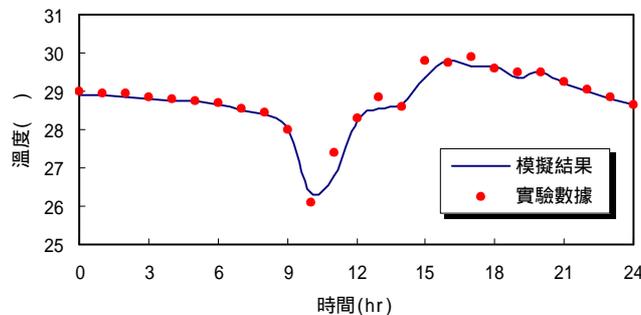
土壤水模式可有效模擬土壤水分移動情況。

(2) 土壤溫度及土壤氮模式之驗證

土壤溫度及土壤氮模式均採用二維傳輸方程式，因土壤氮模式之實驗資料不夠完整，無法進行驗證，故藉由 A 區之溫度實測資料，探討本研究對於二維傳輸模式之程式撰寫是否合理。本研究以地表溫度及地表下 90cm 之土壤溫度當成上下邊界條件，模擬 15 天之溫度變化，並求得一日之溫度平均變化，將模擬結果與實測資料之比較如圖(2)所示，由圖中可看出模擬結果與實測資料非常吻合。本研究認為，假如邊界與參數之假設合理時，土壤溫度及土壤氮模式可有效模擬實際情況。



圖(1) 數值模擬結果與 Touma and Vauclin(1986)實驗資料的比較
(邊界條件為 2.3cm 定水頭)



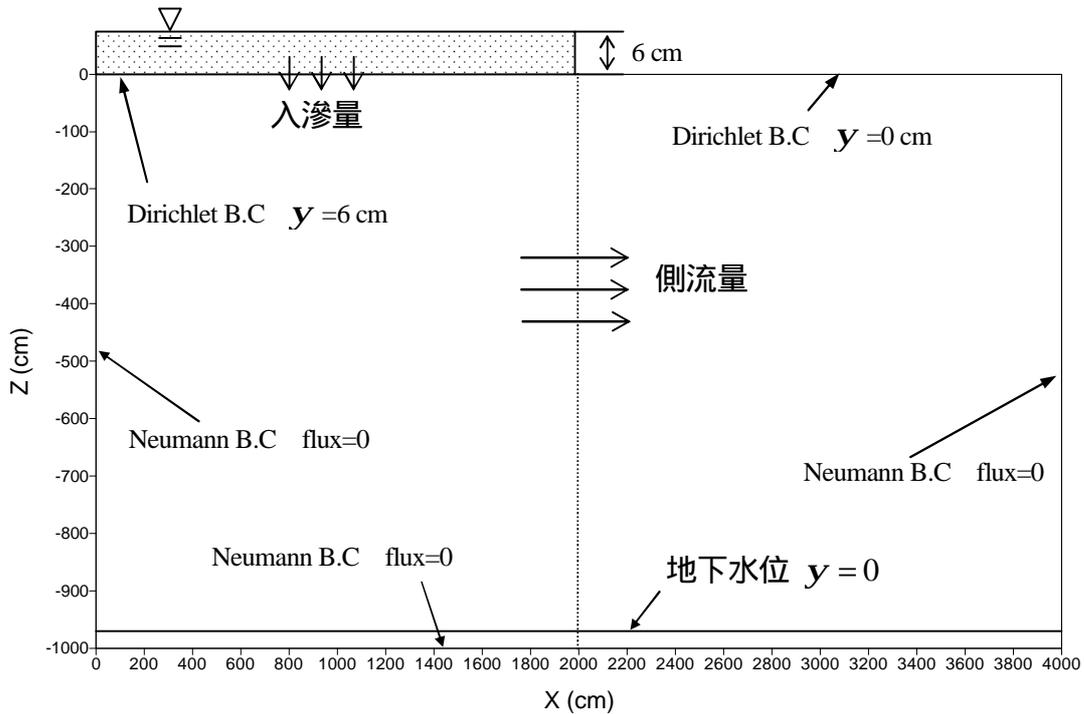
圖(2) 土壤溫度模擬結果與實驗資料之比較

三、水田休耕對植生環境之影響

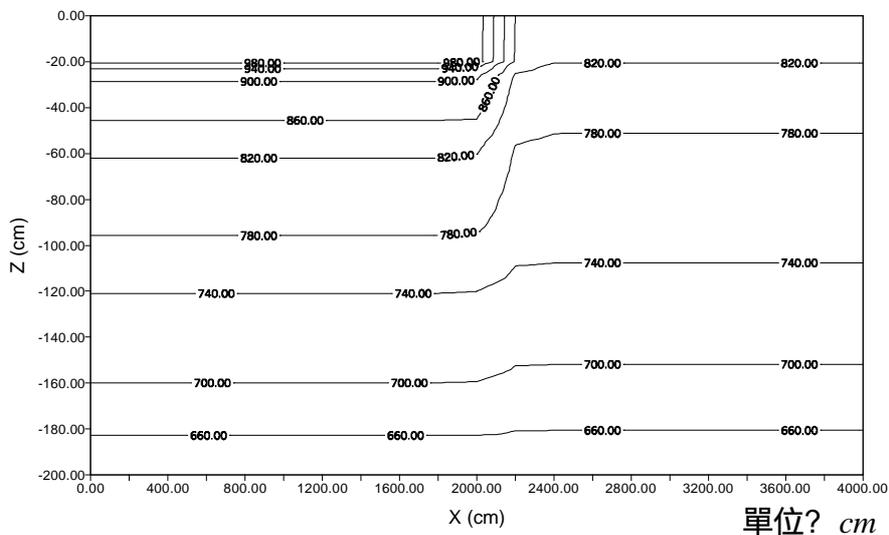
本研究分別針對土壤含水量、土壤溫度及土壤氮含量進行探討，探討休耕後蓄水與未蓄水時，對土壤生態環境所造成之影響，並以模擬結果探討休耕對植生環境之衝擊。

3-1 水田休耕對土壤含水量之影響

本研究在土壤含水量之探討部分，利用彰化農田水利會田中試驗田區土壤特性實測資料進行模擬[9]，並依據現場量測結果，將地下水位設於地表下 9.8cm 處($z=-980\text{cm}$)，模擬範圍及邊界設定如圖(3)所示。起始水壓設定為-120cm，以定水頭 6cm 進行探討。



圖(3) 模擬範圍示意圖



圖(4) 總水頭 h 分布圖(模擬時間 5 天)

本案例在 5 天模擬時間之後，土壤水分入滲仍未到達深層土壤之部分，故本案例以 $Z = 0$ 至 -200cm 作為探討範圍，模擬結果如圖(4)所示。

模擬結果顯示，水分入滲因牛踏層之阻流效果，使水分在牛踏層下方均以非飽和型態往下入滲，但在牛踏層及牛踏層上方之土壤則為飽和之狀態，而非蓄水區之淺層土壤部分，在模擬時間 5 天後之土壤含水量會因重力排水而稍微降低，但與蓄水區之含水量差異僅 0.01%，此現象可能是水田區之土壤保水性較佳，並不易快速流失。模式中輸出之平均入滲率為 5.63 cm/day，本研究將藉此入滲率作為土壤溫度模式及土壤氮模式之參考。

所以由上述結果可看出，因水田在耕作期間亦有蓄水，故淺層土壤之含水量長期維持飽和狀態，休耕後蓄水並未對土壤含水量造成影響，而休耕後未蓄水對土壤含水量造成之影響亦有限，僅會因為長期之重力排水，造成土壤含水量之降低。

3-2 水田休耕對土壤溫度變化之影響

因植物生長之影響範圍僅在淺層土壤，故未以實際土壤分層狀況進行模擬。由土壤溫度模式之控制方程式來看，影響土壤溫度變化之主要因子為土壤介質之熱導係數與比熱容積，以及土壤水分之入滲率，而土壤介質之熱導係數與比熱容積主要由土壤之含水量控制，故本研究利用不同含水量及不同入滲率探討土壤溫度之變化。

本研究以入滲率探討土壤溫度之變化，模擬不同入滲率之情況，結果顯示土壤溫度受到入滲率之影響非常小。然而因為比熱容積之差異，含水量越大溫度變化較為緩和，但整體差異並不大，顯示土壤溫度受到含水量之影響並不大。由此可知，水田休耕後，土壤溫度分布受到之影響並不大。故本研究認為，植物生長之影響範圍約在淺層土壤部分，故受到空氣中氣溫之影響較為劇烈，而休耕對於植物生長之環境並未造成太大之衝擊。

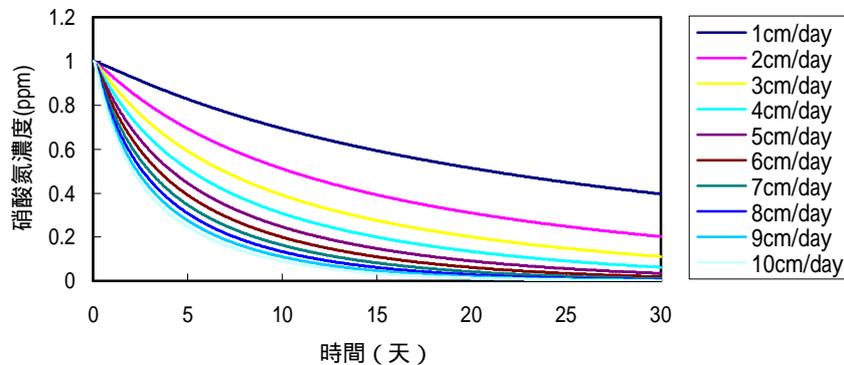
3-3 水田休耕對土壤氮含量之影響

本研究利用所發展之土壤氮模式探討土壤水中硝酸氮濃度之變化情形，由模式之控制方程式及輸入條件來看，休耕可能會對田區硝酸氮濃度造成影響之因子有(1)入滲率：蓄水高度與操作方式所造成之改變 (2)起始條件與邊界條件：休耕後田區之總氮濃度。以下將針對兩項因子進行討論。

(1) 入滲率對土壤氮含量之影響

休耕後假如將田區當成蓄水池，所引進之水並未施加氮肥，故可將邊界條件之硝酸氮濃度視為 0，並因蓄水之緣故，土壤含水量均接近飽和，並以實測資料之硝酸氮濃度為參考，將起始濃度設為 1ppm。於此案例，本研究將土壤氮之化學反應忽略計算，僅探討入滲率之影響，以 1cm/day 為入滲率改變之間距，探討入滲率 1cm/day 至 10cm/day 間土壤氮濃度之變化。

因植物吸收之氮僅限於淺層土壤，故本研究以 $Z=0-30\text{cm}$ 間之平均氮濃度進行探討，模擬結果如圖(5)所示，由圖中可看出入滲率愈大，土壤中硝酸氮濃度受到上層蓄水稀釋之速度愈快。



圖(5) 不同入滲率下硝酸氮濃度變化之模擬結果($Z=0-30\text{cm}$)

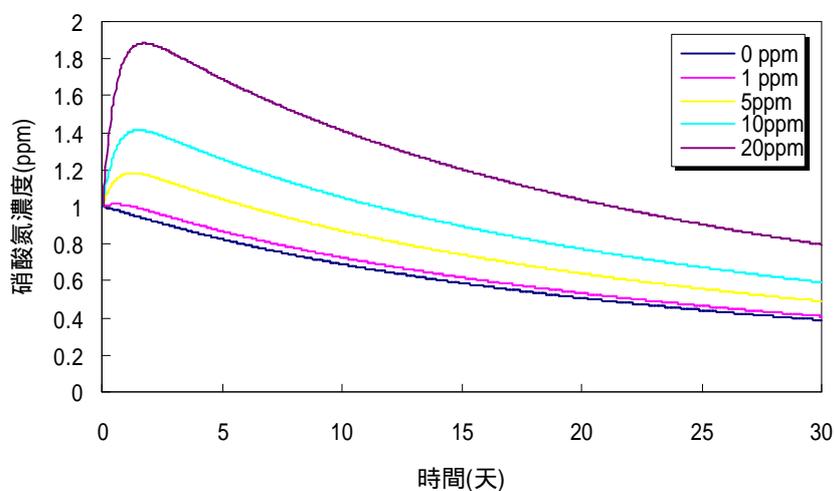
由上述模擬結果顯示，入滲率對土壤硝酸氮濃度之影響頗大，以休耕後蓄水之操作方式來看，假如田區有牛踏層之入滲率為 1cm/day ，而去除牛踏層後之入滲率為 10cm/day ，則土壤硝酸氮濃度被帶走之速率則會隨之增加。

(2)水田休耕後田區之總氮濃度對硝酸氮濃度之影響

水田休耕後，田區中有機氮及氨氮之濃度大小均與硝酸氮濃度有著直接之關係，有機氮及氨氮經由淨礦化作用（包含硝化作用）後會產生硝酸氮，故土壤中氨氮及有機氮之濃度亦不可忽略，在土壤氮模式中，本研究將兩者之濃度和視為可礦化之有機氮濃度，故本研究探討有機氮濃度之起始條件為 0ppm 、 1ppm 、 5ppm 、 10ppm 及 20ppm 之情況進行模擬，並設定有機氮濃度並無任何補助之來源，故會隨著淨礦化作用發生而減少。本案例模擬時以入滲率 1cm/day 進行探討。

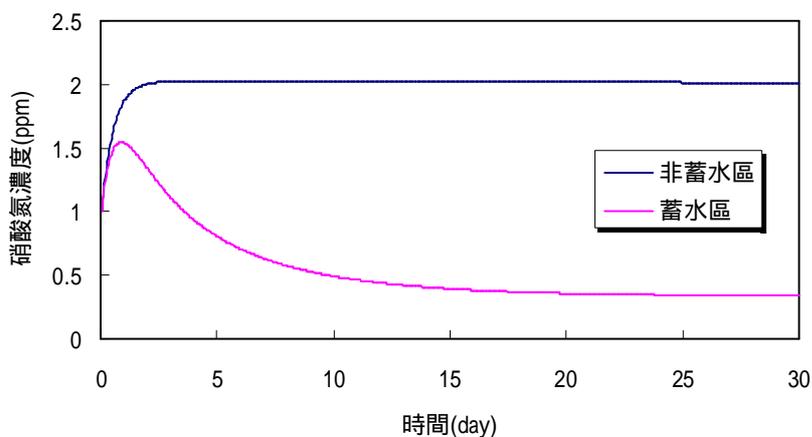
5 種不同情況之模擬結果繪於圖(6)中，當土壤有機氮起始濃度愈大時，硝酸氮濃度會有增加之趨勢，但隨著休耕時間之增加，土壤有機氮濃度漸漸減少，漸漸被上層蓄水之稀釋作用抵銷，故模擬多天後，土壤中硝酸氮濃度仍會被上層蓄水所稀釋。此現象可用來解釋休耕後之情況，因休耕後水田並未施加氮肥，故田區並無有機氮之補助，僅會因休耕前土壤之肥沃度造成些許之影響，但在土壤肥沃度漸漸降低的時候，上層蓄水之硝酸氮濃度則會漸漸取代土壤中水溶液之硝酸氮濃度，由此可看出，當休耕後，蓄水確實會造成土壤肥沃度之降低，而假如並未蓄水，則土壤肥沃度則可持續較久，但由模擬結果中亦可看出，土壤氮濃度受到上層蓄水影響之程度非常大，故在休耕結束後，仍可添加適量之氮肥加以補助，並不會對下一季之農作物種植造成太大

之影響。故本研究認為，休耕後蓄水可使土壤肥沃度暫時降低，間接減低雜草及再生稻之生長。



圖(6) 不同總氮起始濃度對硝酸氮濃度之影響(Z=0-30cm)

3-4 水田休耕對植物生長之衝擊



圖(7) 蓄水區及非蓄水區之硝酸氮濃度變化圖

本研究探討蓄水與未蓄水之狀況，並利用植物生長公式進行分析。由實測之硝酸氮濃度來看，濃度約在 1ppm 左右，故本研究將模擬之起始硝酸氮濃度設為 1ppm，而本研究根據文獻(4)之有機質濃度及碳氮比，以及實測資料中之氮氮濃度，假設水稻種植後之有機氮濃度為 20ppm。本案例探討之條件如下所示

- (a) 休耕蓄水之情況：入滲率 5.65 cm/day、飽和含水量 50%，土壤於模擬開始之有機氮濃度為 20ppm，假設並無任何氮源補充，而土壤之起始硝酸氮濃度為 1ppm。
- (b) 休耕未蓄水之狀況：入滲率 0.00cm/day、殘餘含水量 0%，土壤於模擬開始之有機氮濃

度為 20ppm，假設並無任何氮源補充，而土壤之起始硝酸氮濃度為 1ppm。

硝酸氮濃度之模擬結果如圖(7)所示，分別為蓄水與未蓄水之情況下硝酸氮之模擬結果，由模擬結果可看出蓄水會降低土壤氮之濃度，而非蓄水區之硝酸氮濃度會在休耕後開始增加，此乃由於休耕後之有機氮礦化所影響，但假如沒有任何氮源補充，休耕時間較久後，硝酸氮濃度即不再改變，會因為剛開始休耕時，有機氮之淨礦化作用較盛所影響，大約增至 2ppm 後，有機氮濃度已減低至一定程度，硝酸氮之濃度即不再增加。

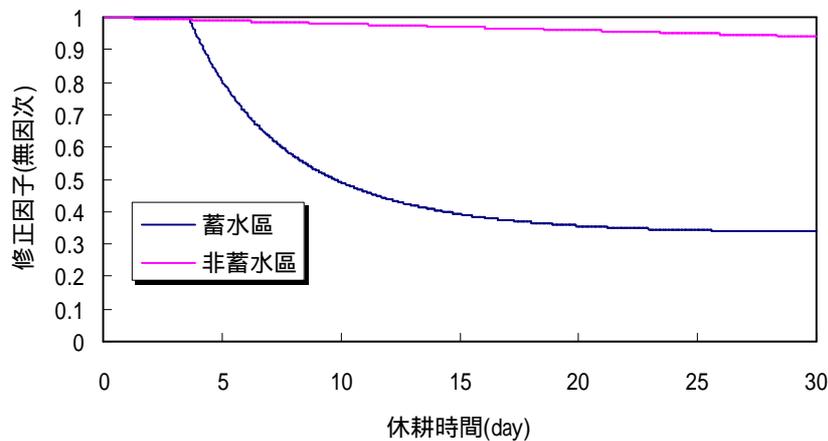
本研究利用植物生長之修正因子判斷植生之衝擊，修正因子如下所示：

$$\frac{F_g'}{F_g} = \frac{E_{a,c}}{E_{p,c}} \cdot \frac{N_c - N_c^0}{N_c^a - N_c^o} \quad (1)$$

式中 $\frac{F_g'}{F_g}$ ：光合作用修正值， $E_{a,c}$ 與 $E_{p,c}$ 分別為作物實際吸水量及勢能需水量 (mm/day)，

N_c 、 N_c^o 、 N_c^a 分別為實際氮供給最小氮供給充足氮供給下之植物氮濃度($kg \cdot N / m^2$)

由上式可看出植物生長之修正因子乃是實際情況與最佳情況之比值，故本研究在資料缺乏之情況下，假設當水田休耕開始時，因水稻剛種植結束，土壤之氮含量較高，並且因為收割後之稻草殘餘物，造成土壤有機氮含量亦頗高，故本研究以模式之起始條件當成水稻生長之最佳狀況，可得到休耕蓄水及非蓄水時再生稻生長之減低因子，如圖(8)所示。



圖(8) 蓄水區及非蓄水區植物生長之修正因子變化圖

以含水量來看，蓄水區之含水量同樣維持飽和含水量，並未對植物生長造成影響。而非蓄水區，則會因為休耕日期之長短造成不同之影響，但由本研究模擬結果顯示，因水田區以黏土性質之土壤較多，土壤之保水能力則較佳，短期之休耕並不會對植物生長造成影響，故在土壤養分不易流失之條件下，再生稻之生長仍屬旺盛，模擬一個月後，修正因子僅降低了 0.06，但在長期休耕後，淺層土壤長期受到蒸發及重力排水之影響，含水量會漸

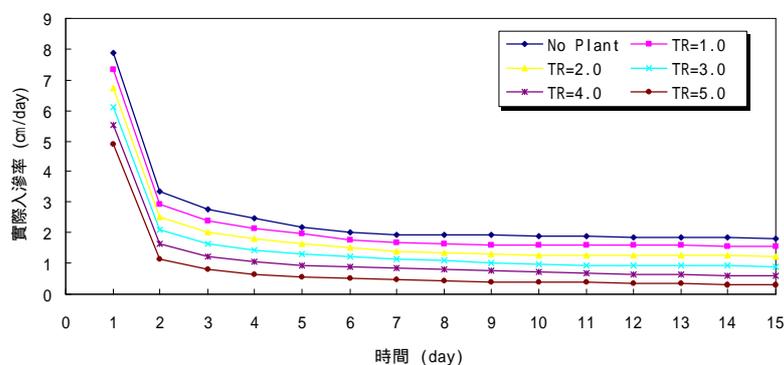
漸趨近於 0%，故常可在未蓄水之田區，看到田區因為長期休耕而呈現龜裂之狀況，再生稻之生長修正因子約降至 0，已不適合再生稻之生長，故此時一些耐乾旱之雜草則成為田區內之優勢族群。

而以土壤含氮量來看，蓄水區之氮含量會受到蓄水之影響，以本案例蓄水 30 天後之土壤硝酸氮濃度來比較，硝酸氮濃度約為原來的 40%，再生稻所受到之衝擊則是生長速率降低了 60%。此結果說明了休耕蓄水可減低田區內再生稻之生長率，可能會使地表水入滲較不受植生之影響，更能有效補注地下水。而非蓄水區之氮濃度反而會增加，所以由硝酸氮濃度來看，非蓄水區之植生並未受到土壤養分之影響，生長因子仍可維持於 90% 以上，如圖(8)所示。

四、田區植生之葉面蒸散及根部吸水對地下水入滲之影響

根據 Rubin(1993)之建議[10][11]，植物吸水率受到蒸散量(TR)與植物根長(d)影響較大，植物蒸散率之大小則由氣象因子及植生密度決定，植物根長則與植生種類息息相關，因此本研究針對蒸散量之影響進行探討，希望得到對地下水補注之影響。採用彰化農田水利會田中試驗田區土壤特性實測資料中之紅壤土進行模擬[7]，並將土壤起始負壓設為 -5 m ，起始含水量為 $0.328\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，而蓄水高則設為 10 cm 。

本研究認為蒸散量與植生密度息息相關，蒸散量越大，可說是植生越茂盛，故本研究在缺乏實測資料之情況下，以蒸散量之增加代替植生密度之成長，藉此探討雜草或再生稻之強勢生長，是否對地下水補注造成影響。本研究於此案例將植物根系之平均根長設為 30 cm ，探討蒸散量 0 cm/day 、 1 cm/day 、 2 cm/day 、 3 cm/day 、 4 cm/day 及 5 cm/day 等情況，模擬結果如圖 9 所示。



圖(9) 不同蒸散率下，實際入滲率之模擬結果(總入滲率 - 蒸散率)

由圖中發現，當蒸散量愈大，實際入滲量就愈小，而實際入滲率可反應地下水補注量，故當植物生長愈茂盛時，蒸散量會隨之增加，地下水補注量則會受到愈大之阻礙，所以雜

草及再生稻之根吸水反應，對地下水補注會造成影響，其影響之幅度隨蒸散率而異，以蒸散率為 2cm/day 來說，影響幅度約為 32%，而蒸散率為 5cm/day 時，影響幅度可達 83%。

五、結論與建議

- 1、本研究主要探討水田休耕蓄水對淺層土壤植生環境之影響，由模擬結果可知，休耕對淺層土壤溫度分佈所造成改變不大，而土壤含水量則會因為蓄水與否而有改變，蓄水區淺層土壤之含水量均為飽和，而非蓄水區之土壤含水量則會漸漸降至殘存含水量。
- 2、本研究結果顯示水田休耕對土壤氮之濃度影響較鉅，水田休耕當作蓄水池使用時，土壤氮濃度會漸漸被上層蓄水入滲稀釋，土壤肥沃度則會降低。由模擬結果得知，田區內之氮濃度受到蓄水之氮濃度影響速率非常快，約一個月內就可全部被上層蓄水之氮濃度取代，故水田休耕蓄水僅對休耕期間之土壤肥沃度造成影響。水田休耕蓄水使土壤肥沃度暫時降低，並間接減低雜草及再生稻之生長。
- 3、模擬結果顯示，水田休耕蓄水可降低田區內養分之濃度，造成植物生長之不利因素，使得地下水補注不致受到植生之影響。而非蓄水區之情況雖不利再生稻之生長，但容易滋生雜草，使入滲受到植生環境之影響。本研究建議休耕田區要當作蓄洪池使用時，最好蓄少許水，否則未蓄水時容易造成雜草之生長。
- 4、當植物生長愈茂盛時，蒸散量會隨之增加，地下水補注量則會受到愈大之阻礙，所以雜草及再生稻之根吸水反應，對地下水補注會造成影響，其影響之幅度隨蒸散率增加而加大。

六、參考文獻

- [1] De Vries DA, Thermal properties of soils. In Van Wijk WR (ed) Physics of Plant Environment. Northholland Publishing Co., Amsterdam, 1963.
- [2] Freeze, R. Allan. Three-Dimensional Transient, Saturated-Unsaturated Flow in a Groundwater Basin. *Water Resour. Res.*, 7(2), 347-366, 1971.
- [3] Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen & H. Svendsen. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. *Fertilizer Research* 27:245-259,1991.
- [4] Kersebaum K. C. Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling* 81,145-156, 1995.
- [5] Raats, P. A. C., Steady flows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots, *Soil Sci.*

Soc. Am. Proc., 38, 717-722, 1974.

- [6] Rubin, Y., and D. Or, Stochastic modeling of unsaturated flow in heterogeneous soils with water uptake by plant roots: The parallel columns model, *Water Resour. Res.*, 29, 619-631, 1993.
- [7] Touma, J., and Vauclin, M., "Experimental and numerical analysis of two phase infiltration in a partially saturated soil", *Transport in Porous Media*, 1, 28-55. 1986.
- [8] Van Genuchten, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- [9] 劉振宇等，推廣水田生態環境保護及地下水涵養補注計劃(第一年)“(8-2)增加水田地下水涵養補注方法之評估”期末報告，行政院農業委員會，1998。
- [10] 王俊文，”不同氮肥對玉米及水稻生長與氮組成的影響”，國立台灣大學農業化學研究所碩士論文，1997。
- [11] 簡士傑，”灌溉水中氮素濃度對水稻生育之影響”，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文，1990。