

## 雲林地區水田入滲量之評估

### Evaluation on the Infiltration Rate of Paddy Field in Yun-Lin Area

國立台灣大學農業工程研究所  
教授

劉振宇

Chen-Wuing Liu

國立台灣大學農業工程研究所  
博士研究生

陳世楷

Shih-Kai Chen

國立台灣大學農業工程研究所  
碩士

周曉雯

Sheau-Wen Jou

#### 摘要

水田具有生產、生活與生態等多種公益功能。且因水田灌溉長期保持田面湛水狀態，為涵養地下水主要來源之一。本研究以水稻田土壤水流入滲理論模式SA-WAH、水利局推求灌溉需水量之滲漏公式來推估雲林地區水稻田之入滲量。針對水田具有之牛踏層特性，以麻園工作站上新小組之灌溉用水資料，選定牛踏層厚度為7.5公分，飽和水力傳導係數為0.03~0.055cm/day，作為推估之依據。結果顯示雲林水利會區域內，平均每年水稻田灌溉面積約為56031-58993公頃，以模式模擬水稻田年總進入牛踏層之通量為2.167-2.248億立方公尺；另以水利局入滲經驗公式所推求之水田滲漏量一年約為3.770-3.891億立方公尺，後者約為前者之1.73倍。因水利局公式考慮水稻生長所需之充足用水，故在推估入滲量時有寬估之虞。利用模式所得之推估結果配合地理資訊系統之應用可明瞭其地理區位與地下水入滲補注區位間之關係，提供地下水資源規劃決策及評估之依據。後續研究可就牛踏層之土壤物理特性詳細調查，並配合三維模式考慮側漏量，應可得較精確之結果。

**關鍵詞：**入滲，水田，地下水補注，牛踏層，水力傳導係數。

#### ABSTRACT

Flooded paddy field exhibits productive, ecological and environmental multi-functions. Since the paddy field has long term ponded with water, it becomes one of the major sources for groundwater recharge. A one-dimensional, Darcy-based soil/water balance model SAWAH and an empirical equation used by Taiwan Provincial Water Conservancy Bureau are adopted to estimate the quantity of infiltration from the paddy field in Yun-Lin. A 7.5cm thickness hard pan soil with 0.03~0.055cm/day hydraulic

conductivity is selected to analyze the irrigated data from Shan-Shin group , Mayan station in Yun-Lin .The simulated result from SAWAH model shows the flux infiltrating into hard pan ranges from 0.2167 to 0.2248 billion cubic meters annually. The infiltration estimated from empirical equation ranges from 0.337 to 0.3891 billion cubic meters per year is 1.73 times larger than the result from model simulation. The empirical equation is designed to estimate the amount of irrigation water for rice grow up in the paddy field and may be over-estimated. The simulated annual infiltration combine with the Geographical Information System can help to locate the potential recharge area in Yun-Lin. The results is useful to the government for planning and management of groundwater resources .To accurately evaluate the annual infiltration from irrigated paddy field, a three-dimensional model simulation with detailed hydraulic conductivity data of hard pan soil is suggested to carry out in the future.

**Keywords:** Infiltration, Paddy field, Groundwater recharge, Hard pan, Hydraulic conductivity.

## 一、前言

水田灌溉因長時間保持田面湛水狀態，其向下滲漏之水量為涵養地下水源之重要來源。水田之入滲研究包含非飽和層及飽和層土壤水之流動。灌溉上所謂之深部滲漏、渠道輸水損失等損失，對地下水而言，即為補注的來源；探討水田入滲補注功能時，除需考慮台灣地區特有之灌溉制度及氣候條件外，水田經過一段時間耕作後，易於距田面 20 至 40 公分處形成 5 至 10 公分厚之硬磐層（俗稱牛踏層），造成垂直入滲之高阻抗性；故水田之垂直入滲研究為一多層飽和非飽和土壤水流動問題。

本研究以有限差分數值模式，對水田垂直入滲做一維模擬，並配合雲林地區土壤分佈情形、氣候條件、灌溉管理方式及每年期作之灌溉面積等，就水田之本田時期，對多層土壤及飽和非飽和土壤水流況作進一步分析及量化的推估。並與水利局推求灌溉需水量所用之滲漏量公式及一般不考慮土地利用型態，以降雨量和蒸發量推求入滲量之公式及前人就雲林地區所作之入滲補注之研究做一比較。最後，利用地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)對具有空間分佈特性之入滲資料及入滲計算結果經由

處理、分析及整合，協助明瞭水田入滲之地理區位及深層地下水入滲補注區位間之關係，提供地下水資源規劃有效之決策與評估。

## 二、文獻回顧

入滲為水文循環中，地表水與地下水相互關聯之重要機制，水份經入滲後，其含量隨土層深度增加而遞減，經飽和、轉移、濕潤至乾燥，過程極為複雜。主要數學理論基礎為 Richard (1931)應用達西定律，並定義未飽和土層之總水頭為位置水頭及張力(負壓)之和，其水力傳導係數為含水量或張力水頭之函數，在結合一維垂直連續方程後，即求得描述未飽和土層水流之偏微分方程。除 Richard 方程式外，包括 Green-Ampt (1911)、Horton (1933)、Philip (1957)及 Huggins and Monke (1966)則多為描述入滲容量之經驗與半經驗公式，各有其適用環境及限制條件。

### 2.1 本省估算水田入滲量之研究

水利局設計規範之經驗公式為本省在推估灌溉需水量時估算水田入滲率之方法，此經驗公式如下所示：

$$P = \frac{240}{c * I} \dots\dots\dots(2.1)$$

式中： $P$  表入滲率(mm/day)

$c$  表粘粒百分比(%)

$I$  表係數

此法僅需利用粘粒百分比便可估算出入滲率，其準確性有待商榷，但其可做為設計之參考。

本省對於水田入滲量之研究較為完整者則應追溯到民國46年到53年由陳尙及李德滋(1964)于全省433處所做的田間試驗。該試驗于1960年前採用同心圓式雙圓筒法，自1961年起則採用定水頭馬利奧法(Mariott)來施測。依不同土類及母質將全省分成六種土壤，推導出：(1)質地與水分當量，(2)水分當量與水田垂直入滲率之經驗公式。僅需知道該區域之砂，粘、粉粒百分比便可利用質地與水分當量之經驗式求出水分當量，復利用水分當量與水田垂直入滲之經驗式求出所需要之水田垂直入滲率。

陳尙(1980)參考日本對水田灌溉公益效能之評價模式，就水田對地下水涵養之功用以減水深法估算出水田之田間滲漏量，第一期作為 $9000\text{ m}^3/\text{ha}$ ，第二期作為 $8700\text{ m}^3/\text{ha}$ ；將田間滲漏量視為補注地下水、伏流水、回歸水之水源涵養量，並假定滲透水中，有25%垂直向下補充至深層地下水，開台灣地區水田入滲量推估之先例。而後蔡明華(1993,1994)亦對水田灌溉公益效能進行相關研究，並指出自民國71年至81年，台灣地區水田對地下水補注涵養水量因水田面積減少而損失134.73億立方公尺。

在模式模擬方面，曹以松，林俊男等(1987)首先於集集共同引水計畫中探討人工補注技術之可行性，對水田超量灌溉進行水收支平衡試驗與相關之地下水補注模擬。丁澈士(1996)則是應用“土壤水分收支法”估計屏東平原的地下水補注量，以潛在蒸發率(potential evaporation rate)決定“需求”，土壤水分反應“供給”能力。該研究利用CROWPAT程式計算不同植物之灌溉需水量與蒸發散量，推估屏東平原水稻田於1988年之總補注量為1.34億噸。馮秋霞等(1997)另針對嘉南地區水稻田灌溉對地下水補注影響，以兩方面進行評估，其一為以水收支平

方面進行評估，其一為以水收支平衡法計算田間滲漏水量及利用垂直二維地下水模式模擬並假設牛踏層滲透係數為其上下兩層土壤之 $1/2$ 與 $1/10$ ，分析垂直與水平滲漏比例，以估計實際入滲至地下水層之田間滲漏水量。

## 2.2 國外相關數學模式研究

歐美各國近年針對東亞地區水田特性發展出一系列土壤/水平衡模式。根據其引用之理論基礎，主要可區分為“微分(Differential)”與“積分(Integral)”兩類模式。前者又稱為“Darcy's type”模式，以Darcy定律及通量方程配合土壤水力特性作為入滲水流機制描述，此類模式著名的有SWATRE (Belmans et al., 1983)、RICEMOD (Mc Mennary and O'toole, 1983)，及SAWAH (Ten Berge, et al., 1992)等。後者以連續方程描述作物根系層之水收支平衡為主，將根系層土體視為一控制體積，並未考慮水份在土體內之傳輸變化，因此在使用上有較大之限制，此類模式以IRRIMOD (Angus and Zandstra, 1980)及PADDYWATER (Bolton and Zandstra, 1981)為代表。除此之外，Shan and Stephens (1992)依據Philip (1957, 1958)方法所提出一系列簡單數學理論計算均質土壤或雙層土壤層在特定邊界條件下之入滲率，可用來了解水田於定水頭下之入滲情形。然而其假設為均質土壤或雙層土壤層及定水頭之入滲，與台灣地區水稻田之多層土壤與輪灌制度下的滲漏環境不甚相符。

在以上介紹的數學模式中，荷蘭農業大學則發展出一維水流模式SAWAH (Simulation Algorithm for Water Flow in Aquic Habitats)描述多層土壤、飽和-非飽和土壤水流之流動情形，業經驗證並應用在亞洲稻米研究中心之稻田滲漏率研究 (Wopereis, M.C.S. et. al., 1994)。文中對水稻田之土壤/水力條件如耕犁泥濘層及牛踏層、氣象及灌溉方式等因子對土壤各層水分含量，土壤內水分收支平衡及各層入滲通量等之影響，均有較為詳盡之描述，對在推估稻田灌溉補注量方面具有相當之參考價值，為本研究所採用之數學模式。

### 三、研究方法

#### 3.1 入滲水流數學模式

土壤水流係由兩點間位能坡降 (Potential gradient) 產生之驅動力 (Driving force) 所致，其通量 (Flux) 與位能坡降成正比。在定義總位能時，有下述幾個假設：

- (1) 滲析梯度可忽略，不考慮土壤內水流之濃度差。
- (2) 沒有外在之靜電力場，土壤粒子間之靜電吸引力可忽略。
- (3) 土壤內水流不受溫度梯度之影響即溫度隨土壤深度之變化情形可忽略。
- (4) 土壤孔隙內之氣體壓力等於大氣壓力。
- (5) 壓力位能由土壤內之水重造成，土體本身重量並不影響壓力位能。
- (6) 土壤內水流方向為一維垂直流。
- (7) 因水田為一長期湛水之環境，遲滯效應可忽略。

在飽和土壤中，水流之驅動力係由正壓位能坡降產生，而在未飽和土壤中則由母體位能 (Matric potential) 所引起，其為一負壓位能。分別討論如後：

##### 3.1.1 飽和土壤中水流

###### (1) 通量方程式

就飽和系統之一維垂直水流(以垂直向下為正 Z 軸(L)方向)通量  $q(L/T)$  可以應用 Darcy equation 表示如下：

$$q = -k_s \frac{dH}{dz} = -k_s \frac{dh}{dz} + k_s \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

其中： $H$  為水力水頭(L)

$h$  為壓力水頭(L)

$k_s$  為飽和水力傳導係數(L/T)

###### (2) 質量守恆方程式

質量守恆方程式或連續方程式係以土壤含水量隨時間之變率為通量之散度(Divergence)來加以描述，其形式如下：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

在土壤呈飽和狀態時，上式可簡化為

$$\frac{dq}{dz} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

若將土壤分割成數個區間，並採用差分形式計算，其中一飽和段部份含有  $n$  個區間，已知  $k_i$  和  $z_i$  及飽和段之  $H_1$  及  $H_{n+1}$ ，則可將  $n$  個通量方程式寫成：

$$\begin{aligned} q_1 &= -k_1 \frac{H_2 - H_1}{z_2 - z_1} \\ q_2 &= -k_2 \frac{H_3 - H_2}{z_3 - z_2} \\ &\dots = \dots \\ q_n &= -k_n \frac{H_{n+1} - H_n}{z_{n+1} - z_n} \quad \dots\dots\dots(3.4) \end{aligned}$$

且各區間之上下邊界之總水頭差值之和為

$$(H_2 - H_1) + (H_3 - H_2) + \dots + (H_{n+1} - H_n) = H_{n+1} - H_1 \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

以上  $n+1$  個方程式可以矩陣形式表示如下：

$$\begin{bmatrix} \frac{-k_1}{\Delta z_1} & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & \frac{-k_2}{\Delta z_2} & \dots & 0 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{-k_n}{\Delta z_n} & -1 \\ +1 & +1 & \dots & +1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \dots \\ \Delta H_n \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ H_{n+1} - H_1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

求解矩陣即可得各區間之總水頭差及該飽和層之通量。

##### 3.1.2 非飽和土壤中水流

###### (1) 通量方程式

非飽和土壤一維垂直水流通量  $q$  亦可適用達西定律，然其水力傳導係數並非定值，為壓力水頭  $h$  之函數，表示如下：

$$q = -k(h) \frac{dH}{dz} = -k(h) \frac{dh}{dz} + k(h) \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

###### (2) 質量守恆方程式

當入滲通量在  $Z$  方向上隨著  $Z$  之增加而減少時，土壤含水量之時間變率表示與 3.2 式相同，即：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \qquad q = -\frac{d\phi}{dz} + k \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

(3)水力傳導係數函數  
非飽和土壤水力傳導係數為壓力水頭  $h$  之函數，目前已發展出多種關係式，一般常採用之指數函數關係式如下：

$$k(h) = k_s e^{\alpha h}, h \geq h_{max}$$

$$k(h) = a|h|^{-1.4}, h < h_{max} \quad \dots\dots (3.8)$$

其中  $\alpha (L^{-1})$ 、 $h_{max}(L)$  及  $a(L^{2.4}T^{-1})$  為經驗土壤特性係數。

(4)土壤含水量特性  
由 Driessen(1986)所提出之土壤含水量特性，因為除了飽和含水量之外，僅含一參數  $\gamma$  而廣受注目，由壓力水頭  $h$  為土壤含水量  $\theta$  之函數，方程式可描述如下：

$$h(\theta) = -\exp\left(\left(-\frac{1}{\gamma} \ln \frac{\theta}{\theta_s}\right)^2\right) \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

其中  $\gamma$  為與土壤質地有關之無因次參數。

### 3.1.3 母體通量位能 (Matric flux potential)

(1)參數之平均問題  
方程式(3.7)之線性化形式被不當應用時易導致計算上之誤差。此一誤差源於計算通量流經第  $i-1$  與第  $i$  個格網之  $i$  介面時，使用平均水力之傳導係數  $k_{av,i}$ ，而  $k_{av,i}$  是以相鄰近之格網中心之水力傳導係數加以平均求得。但是，由於  $k(\theta)$  或  $k(h)$  具有高度非線性特性，常使  $k_{i-1}$  與  $k_i$  呈現數個級數(order)之差異，也因此造成上述方式計算結果很大之誤差。

(2)母體通量位能 (Matric flux potential)  
母體通量位能觀念可解決參數平均問題。母體通量位能  $\phi$  定義如下(Klute 1952)：

$$\phi = -\int_h^0 k(h)dh \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

將上式代入 3.7 式中，可將通量方程式中之母體位能項置換成母體通量位能項：

上式中之重力項仍以  $k$  表之，假設介於兩相鄰格網  $i-1$  及  $i$  中心之通量，在每一時段中皆隨深度保持定值，則 3.7 式之積分形式可寫成：

$$q \times \Delta z = -\Delta\phi + \int_{z_{i-1}}^{z_i} k dz \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

此時重力項可經由假設在介於兩相鄰格網  $i-1$  及  $i$  中心間， $h$  與深度呈線性關係，即：

$$\int_{z_{i-1}}^{z_i} k dz = (dz/dh) \int_{h_{i-1}}^{h_i} k dh \quad \dots\dots (3.13)$$

此時可將通量方程式改寫成：

$$q = \left(\frac{-1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta h}\right) \times \int_{h_{i-1}}^{h_i} k dh \quad \dots\dots (3.14)$$

將上式與 3.10 式結合，即可求得以母體通量位能表示之通量，如下式所示：

$$q = \left(\frac{-1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta h}\right) \times \Delta\phi \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

其中，右式第一項為通量之母體項，第二項為重力項。

(3)母體通量位能在層狀土壤之應用  
若逢二層不同形態土壤時，考慮二相鄰格網  $i-1$  及  $i$ ，設其壓力水頭為  $h_{i-1}$  與  $h_i$ ， $k$  值分別為  $k_1$  及  $k_2$ ，面對前述之平均問題，可分別假想二層皆為  $k_1$  土壤及  $k_2$  土壤，計算其  $\Delta\phi$  值，再予以幾何平均，即：

$$\int_{h_{i-1}}^{h_i} k dh = \left[ \int_{h_{i-1}}^{h_i} k_1 dh \times \int_{h_{i-1}}^{h_i} k_2 dh \right]^{1/2} \quad \dots\dots (3.16)$$

此一做法之優點為可以保留以  $h$  為權重之平均  $k$  值，將此式代入 3.14 式，即可求得此兩層土壤間之通量。

### 3.1.4 水收支平衡計算

計算各邊界之通量，其水收支平衡項包括降雨/灌溉( $p$ )、逕流( $r$ )、蒸發量( $e$ )、蒸散量( $t$ )、排水/毛管水上昇( $d$ )以及人為暗管排水( $ad$ )，水收支平衡方程可以寫成：

$$\int_{z=z_{lb}}^0 (\theta_i - \theta_i) dz + (z_p - z_{pi}) = \int_{t=t_i}^t (p + r + e + t + d + ad) dt \quad \dots (3.17)$$

其中:  $z_p$  為地表水層厚度, 下標  $i$  代表初始狀態  
 $z_{lb}$  為土層下邊界之深度  
 $\theta_i$  為土壤含水量, 下標  $i$  代表初始狀態

### 3.1.5 水田入滲數值模式

根據上述之差分形式數學架構, 荷蘭農業大學發展之一維土壤-水平衡模式 SAWAH (Simulation Algorithm for Water Flow in Aquic Habitats) (ten Berge, et. al., 1992), 由於具有模擬多層飽和及非飽和共存現象之地表水入滲情形, 可供具有湛水之水稻田或埤塘計算入滲水量。SAWAH 為一有限差分數值模式, 可藉由區隔土壤剖面成數個計算區間(compartment)分別計算不同深度之各個區間含水量與壓力水頭變化, 以及區間界面之垂直水流通量, 據此了解地表湛水深變化及真正進入地下水水位面之水量。模式具有以下數點特性:

- (1) 可模擬不同土層同時發生之飽和及非飽和流動。
- (2) 模式輸入資料包括:
  - a. 土壤水分保持曲線函數。
  - b. 水力傳導係數曲線( $k-\theta$ ,  $k-h$ )函數。
  - c. 外部邊界條件: 灌溉水量、降雨量、蒸發散及地下水位等。

模式在計算時, 會將所有飽和/非飽和交界面之壓力水頭設定為 0, 在每一時間段(time step)計算後均會重新計算此一交界面之位置。時間段之範圍為 0.0001 至 0.01 天。而為配合台灣特有之輪灌制度及以期作別來估算水稻田的入滲量, 故將程式略作修改, 以符合期望。

### 3.2 區域入滲量之推估

推估年本田入滲量可由模式所求出之入滲量以下公式計算:

$$\text{年本田入滲量}(m^3) = \sum q * (A_1 * f_1 + A_2 * f_2) * 10 \quad \dots (3.18)$$

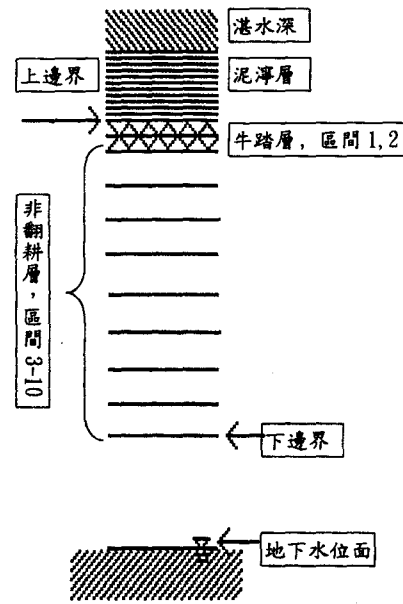


圖 3.1 水稻田入滲數值模擬示意圖

其中,  $\sum q$  為以模式所求出該輪區在每次灌溉期距內(依區域不同, 灌溉期距分為 4 天、5.5 天、6 天、7.5 天等)之累積滲漏量(mm/day);  $A_1$ 、 $A_2$  分別是該輪區當年一期作及二期作之灌溉面積, 為輪區實際面積扣除農舍、農路、灌溉排水設施等之面積, 在此取其為輪區面積之 0.8;  $f_1$ 、 $f_2$  分別為該輪區當年一期作及二期作本田之灌溉次數, 在水稻生長的過程中, 有效分蘗終期至幼穗形成始期前及完熟期時可停止灌溉, 故取  $f_1$ 、 $f_2$  分別為該輪區當年一期作及二期作本田天數扣除不需灌溉之天數(約 5-15 天)再除以灌溉期距。

水利局入滲經驗公式所求出之入滲量則以下公式計算:

$$\text{年本田入滲量}(m^3) = P * (A_1 * T_1 + A_2 * T_2) * 10 \quad \dots (3.19)$$

其中,  $P$  為以水利局入滲經驗公式所求該輪區之滲漏率(mm/day);  $T_1$ 、 $T_2$  分別為該輪區當年一期作及二期作本田之灌溉天數。

分別將由模式及水利局入滲經驗公式所求出之水利會轄區內各輪區之年本田入滲量累加，即得雲林水利會水稻田之年總滲漏量。

#### 四、進行步驟

##### 4.1 研究區域概述

雲林水利會事業區域，位於本省嘉南平原北部，東起中央山脈西麓，西臨台灣海峽，東西寬約 80 公里；南以興華溪為界，北至濁水溪，南北寬約 40 公里，區域跨雲林、嘉義、南投三縣三十二鄉鎮。氣候屬亞熱帶性，高溫多濕，夏季常遭颱風侵襲。年平均雨量為 1,500 公厘，五月至九月為雨季，降雨量占全年之 80%。區域東部之台灣山脈台地，灌溉地零散，西部平原沿海地帶每年十月至翌年二月，均有東北季風；此外亦有地層下陷、海水倒灌之問題。1997 年統計此會所轄區域之灌溉面積約為 66,384 公頃(參考表 4.1)。

##### 4.2 水田環境介紹

水田之入滲環境可就其土壤/水存在環境將其剖面由地表往下系統性區分為四層(Wopereis, et.al., 1994)(參考圖 4.1)：

- (1) 變水頭之灌溉或降雨水深(Ponded Water);
- (2) 對水流具低阻抗性之泥濘層(Muddy Layer);
- (3) 對水流具高阻抗性之牛踏層(或犁底層)(Plow Sole);
- (4) 非翻耕層(Non-puddled Subsoil)。

因此，對於水田或由水田轉作之旱地而言，將入滲環境假設為均質土壤剖面可能造成入

，將入滲環境假設為均質土壤剖面可能造成入滲量計算極大之誤差。對後者而言，第一項所造成之地表湛水深通常與水田長期保持湛水方式有所不同，而第三項之犁底層(即俗稱之硬磐層或牛踏層)在轉作後亦可能受到破壞使導水性增加。此外，非翻耕層所在之深層土壤亦可能因沈積環境改變導致土壤/水力條件不同，因此調查收集完整之底層土壤/水力特性將有助於上述數值模式執行模擬推估之精確性。

在灌溉制度方面，目前本省水田灌溉係以輪灌為主，以適量用水及依序灌溉為其基本精神，一次灌溉之水深，可供數日之作物需求、土壤滲漏、田面蒸發及稍微之乾田，此一經歷時間即為輪灌期距。一般而言，水田之灌溉用水大略可分為秧田時期、整田時期及本田時期三個階段，其中本田時期耗用最多之灌溉用水，自插秧起之生育期間之灌溉狀況大致由成活至分蘖期起至完熟期止共區分為八個分期，每一分期皆有其用水需求，其中之有效分蘖終期至幼穗形成始期前之時段較不需灌溉，完熟期亦需停止供水，其餘皆需以續灌或輪灌方式保持大部分時期之濕田狀態。

由於水田長期耕作後，易形成一難透水之牛踏層藉以保持長期湛水狀態，且表層土壤須呈泥濘狀態始能適應水稻生長，加上湛水深度非維持一定，下層土壤之非均質性等，在如此複雜之土壤/水力條件下，實有必要進行水田入滲機制之研究。因此，在模式之選擇上，應以具有模擬多層土壤、飽和及非飽和現象共存及變水頭等狀況之土壤/水平衡模式為主。

表 4.1 雲林農田水利會灌溉區域分配圖

總計	三年輪灌區				並用灌溉區			一般埤圳灌溉區			
	合計	三年二作田	三年一作田	合計	兩期作田	單期作田	合計	兩期作田	單期作田	輪作田	
66,384											
北港區	22,168	21,762	13,065	8,697	406	314	92	-	-	-	-
虎尾區	13,518	12,532	7,906	4,626	986	399	587	-	-	-	-
西螺區	14,163	6,110	2,881	3,229	655	655	-	7,398	7,104	232	62
斗六區	16,535	-	-	-	-	-	-	16,535	6,460	5,417	4,658

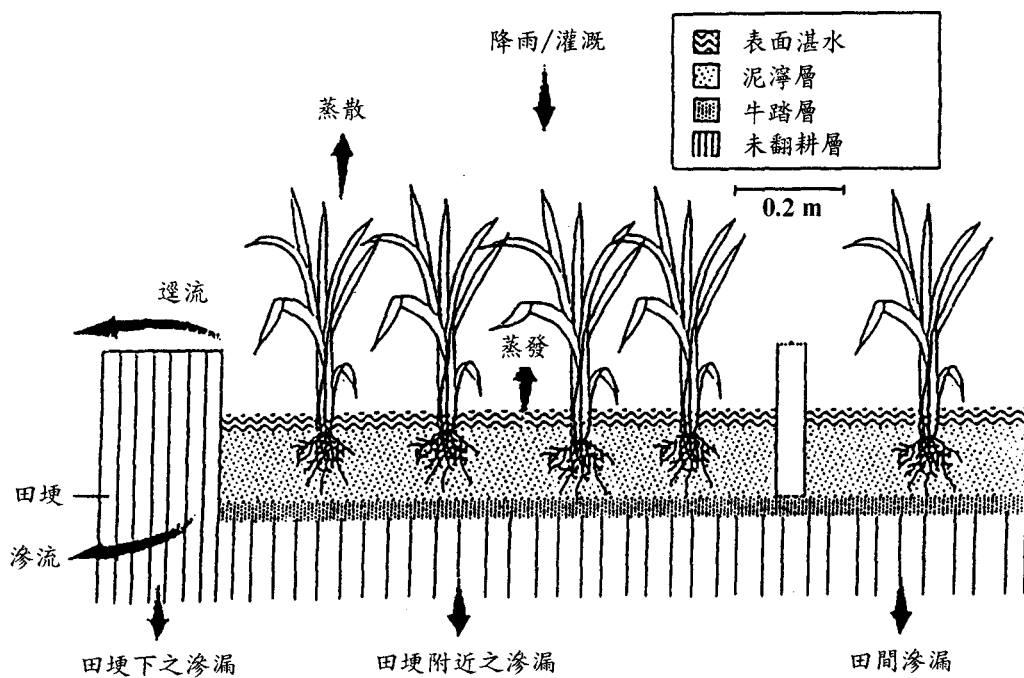


圖 4.1 水田垂直入滲環境示意圖

#### 4.3 土壤/水力參數之決定

水田大量引水施灌，始於整田時期，一般每一輪區(約 50 公頃)的整田日數在 15-20 天之間；其目的在於灌水耕犁、打碎表土、整平田面，以備插秧作業所需之用水量，此時並不考慮作物蒸散量。對本田時期而言，經過長期之地表入滲，土壤含水量在輪灌狀態下，應已達成一動態平衡，故以此原則，作為參數選取之依據。

##### 4.3.1 模式參數決定

###### (1) 土層組合及土壤特性

土層組合資料係引用農試所農化系所提供之淺層四層土壤(自地表起 0-30 公分、30-60 公分、60-90 公分及 90-150 公分)質地數值化圖幅，並套配雲林水利會輪灌區域範圍。有關土壤各項參數則引用第三章之公式(3.8)及(3.9)，其各項參數如表 4.2 所示(Driessen, 1986)。

在牛踏層之厚度及透水性方面，從水利局公式之觀點來看，水田入滲率之大小與其黏粒含量成正比關係，因此在以模式推估本區水田入滲

量時，自應將黏粒含量納入考量。若從牛踏層之形成原因係翻耕攪混與重力受壓之雙重作用來看，本區水田在民國 60 年代初開始進行機械化操作，其翻耕深度自以往 12 公分左右增至 20 公分以上，原有之牛踏層應已受到部分破壞，與泥濘層相接部分則重新此一牛踏層之再造過程，從以上兩個觀點來看，此區牛踏層之厚度變化應不至太大，其水力傳導係數亦是如此，此可由其實測入滲率在濁水溪沖積扇扇頂之田中與扇央之麻園之差異極微所看出(見第五章表 5.2)。

模式將以厚 5-10 公分及飽和水力傳導係數介於 0.03~0.055(cm/day)為先期模擬輸入值，此一範圍經由模擬台灣地區輪灌之減水深，以及田中實驗田區實測，證實在雲林地區為一合理範圍(劉振宇、陳世楷，1996；1998)。

就一般雲林地區之水田而言，因機耕深度為 20 公分左右，故取牛踏層大約位於地表下 20-30 公分之間，在模式分層計算時，除泥濘層為一過飽和之情況而視為壓力水頭外；將地表



表 4.2 土壤參數特性表

土壤參數 土壤種類	飽和水力傳導係數(Ks,cm/day)	土壤特性參數 $\alpha$ ( $cm^{-1}$ )	土壤特性參數 a ( $cm^{2.4}/day$ )	土壤特性參數 $h_{max}$ (cm)	土壤特性參數 $\gamma$ (dimension-less)	飽和含水量 (v/v%)
礫石	300.0	0.1385	0.63	90.0	0.045	36.50
砂土	110.0	0.0821	3.30	125.0	0.0366	35.00
細砂土	50.0	0.0500	10.90	175.0	0.0255	36.40
壤質細砂	26.5	0.0395	16.40	200.0	0.0299	43.90
砂質壤土	12.0	0.0240	26.50	300.0	0.0186	50.40
粉質壤土	6.50	0.0200	47.30	300.0	0.0165	50.90
壤土	5.00	0.0231	14.40	300.0	0.0164	50.30
砂質粘壤土	23.50	0.0353	33.60	200.0	0.0101	43.20
粉質粘壤土	1.50	0.0237	3.60	300.0	0.0108	47.50
粉質粘土	1.30	0.0480	28.20	50.0	0.0059	50.70
粘土	0.22	0.0380	4.86	80.0	0.0043	54.00

下自牛踏層表面至地表下 150cm 以內之土層區分為 10 個區間，第一、二區間為牛踏層，第三至第十區間則為牛踏層下方至地表下 150cm，並將初始水分含量設定為田間含水量。

(2)外部邊界條件

在氣候條件方面，降雨量是選擇由雲林水利局所設之雨量站，由 1990 年至 1994 年月雨量記錄，蒸發量乃採台糖公司於雲林地區所設之氣象站所記錄之月蒸發量資料，再乘上台灣地區水稻生長期間不同時期之作物係數(水利局，1979)即得蒸發散量。

在地下水位方面，引用賈儀平等(1996)於雲林地區地下水觀測網井站附近所鑽鑿 5 公尺深之孔洞記錄之地下水位。在灌溉水量部份，在變水頭模擬中，忽略泥濘層土層在過飽和狀態，土體膨脹之影響。以牛踏層上端為上部邊界。因雲林地區取水多為河川引水，初期湛水深乃根據由雲林農田水利會各管理處之計畫用水量扣除輸水損失在加上由歷年降雨資料估算之各月有效雨量而定。加上泥濘層厚度(在此取厚度為 20 公分)為其上部壓力水頭，此乃由於泥濘層中，土粒所佔體積約佔 20-30%，雖然土粒質量密度高於純水，但因所佔體積較低，因此在 Wopereis, et al. (1994)中建議忽略此種差異造成之影響。

五、模式驗證與區域入滲量推估

區域入滲量之推估需要龐大及完整之各項資料，包括各管理處工作站水利小組內輪灌小區之土壤質地、粘粒百分比、期作別、灌溉天數及灌溉面積等資料。本研究利用濁水溪沖積扇頂區之田中實驗田及扇央區之麻園實驗田進行相關驗證工作。並以此結果配合現有資料進行區域入滲量之推估。

5.1 入滲模式與經驗公式測試

為求驗證數學模式 SAWAH 在推估水田入滲之適用性，本研究利用田中實驗水田區之各項土壤/水力參數進行入滲模擬，並以實測之土層含水量進行驗證。該實驗田淺層地質狀況由現地實驗得知其泥濘層厚約 20cm，其下之牛踏層厚 7.5cm，水力傳導係數 k 值為 0.055cm/day，飽和含水量(v/v%)為 47.18；粉土層 32.5cm，其 k 值 1.1cm/day，飽和含水量(v/v%)為 48.33。其餘各項參數如土壤分層之水力傳導係數、含水量與負壓水頭之關係及邊界條件，詳見劉振宇等 (1998)。模擬之土層自泥濘層以下每 2.5cm 為一格網，共劃分成 10 個垂直格網。模擬結果如圖 5.1 所示，其垂向水分含量變化趨勢與實測值

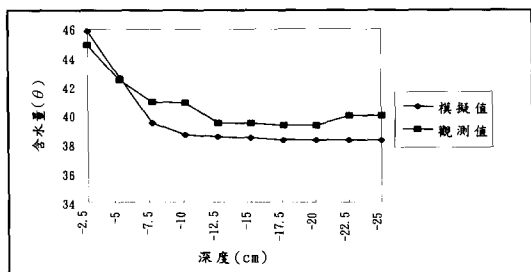


圖 5.1 田中地區土層水分含量觀測與模式模擬結果

幾近一致，且在第三格網之後變化趨緩，逐漸發展成為重力流。顯示模式可充分模擬水田入滲之非飽和流況，而模擬之基本入滲率與實測平均入滲率極為接近，亦顯示模式在推估水田入滲之適用性。

本研究另以雲林水利會麻園工作站上新小組自民國 81-83 年記錄之完整三年灌溉及降雨、蒸發散等資料，作為數學模式推估水稻生長期間完整之入滲量測試。此區土壤組合主要為地表下 0-30 公分為坵質壤土，30-150 公分為石礫；牛踏層假設位於地表下 20-27.5cm 處，即泥濘層為 20cm，牛踏層之水力傳導性取 0.05cm/day。淺層地下水深約為 15-20 公尺左右，灌溉期距則在 6-8 天之間。

以該區民國 81-83 年第一期作灌排資料做推估，表 5.1 及圖 5.2 即為模式以三年平均之各項灌排資料模擬該區旬入滲量之變化狀況。由圖

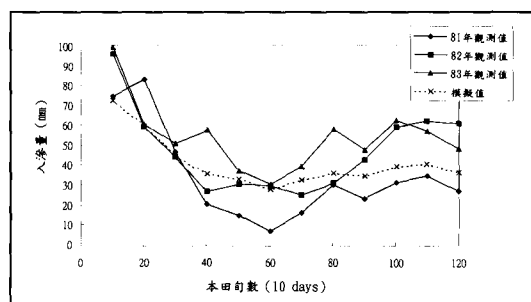


圖 5.2 麻園地區水收支平衡觀測與模式模擬水田第一期作入滲情形

表 5.1 麻園地區水收支平衡觀測與模式模擬水田第一期作入滲情形

旬別	81年 觀測值	82年 觀測值	83年 觀測值	模擬值
1	74.295	95.602	99.083	65.821
2	82.865	58.663	59.886	59.424
3	45.873	43.648	50.183	44.342
4	19.963	26.368	56.793	33.578
5	14.333	30.146	36.663	30.221
6	6.175	29.166	29.783	28.545
7	15.793	24.371	38.653	28.866
8	29.743	30.333	57.403	29.324
9	22.781	42.183	47.207	31.556
10	30.635	58.653	62.083	45.211
11	34.095	61.393	56.456	46.269
12	26.373	60.303	47.843	48.557
總和	402.921	560.829	642.035	491.714

中可看出模式模擬入滲量相當符合三年觀測資料之變化趨勢，證實模式對該區水田入滲量能作有效之推估。其所對應進入牛踏層之通量除整田灌溉初期因土壤含水量較低(因假設起始土壤含水量為凋萎點與田間含水量之平均值)，通量較大，可達 7.0mm/day 以上外，一般在本田灌溉期距間，進入牛踏層之通量約為 2.75~4.20 mm/day。模擬之總入滲量 491.7mm 雖略低於三年觀測平均值 535.2mm，此與水田存在部份側向滲漏有關，故此現象亦屬合理。

在經驗公式驗證方面，麻園地區表土及淺層土壤以細砂為主，含砂量佔 80%，黏粒約為 8%，以水利局公式推算，滲漏量約為 25 公釐，本區土壤黏粒為 5%，推算之滲漏量約為 43.7 公釐，若以陳尙及李德茲公式由質地推求水分當量再推求入滲量，則麻園地區對乾土重量比水分當量為 9.42%，本區為 21.4%，推算之滲漏量分別為 30.84 公釐及 8.25 公釐，若以入滲筒實測結果比較，很明顯由表 5.2 可看出經驗公式在此二處實驗田均產生了高估情形，與現行雲林水利會每 6~8 天供給約 6cm 灌溉水之現實狀況產生極大謬

表 5.2 入滲經驗公式計算基本入滲量與入滲筒實測結果比較

方法 實驗 地區	水利局公式		陳李公式		入滲筒實測
	黏粒百分比%	入滲率 (mm/day)	水分當量%	入滲率 (mm/day)	入滲率範圍 (mm/day)
麻園	8.0	25.0	9.42	30.8	0.53~5.15
田中	5.0	43.7	21.4	8.3	1.9~5.15

誤。表中所列定水頭入滲筒量測結果亦顯示前節之數學模擬具有與實測結果甚佳之吻合性。

### 5.2 雲林地區水稻田入滲量之推估

雲林農田水利會事業區之水稻栽培分為：兩期作、單期作、三年兩作、三年一作及兩年一作等耕作型態，在三年的期間內，水稻田灌溉面積分配如表 5.3 所示。利用地理資訊系統，將雲林水利會輪灌區圖及雲林地區之地面下 0-150 公分之淺層四層土壤圖作套疊分析，得在單一輪區之中，可能有數種土壤之組合；所以，首先將單一輪區內，模式所求出在不同土壤質地組合與灌溉方式下之灌溉期距內之入滲量依不同土壤組合之面積做一加權平均，代表該輪區之入滲量，再將得到之灌溉期距內之入滲量代入 3.18 式，求出年本田入滲量。以水利局入滲公式所求出之各輪區之平均日入滲量代入 3.19 式中，求出雲林水利會事業區域中各輪灌區之年本田入滲量。分別將由模式及水利局入滲經驗公式所求出各輪區之年本田入滲量，將雲林水利會該年有灌溉之輪區年本田入滲量累加，即得出雲林水利會水稻田之年本田入滲量。

表 5.3 雲林水利會年灌溉面積

單位：公頃

	一期作灌溉面積	二期作灌溉面積
第一年	19,314	37,519
第二年	19,603	39,390
第三年	18,915	37,116

在進行入滲量推估時，本研究另參照雲林水利會所提供之坵塊黏粒資料將牛踏層飽和水力傳導係數  $k$  依黏粒含量區分為四級，黏粒少於 5% 者， $k$  訂為 0.055cm/day，黏粒介於 5% 至 10% 者，訂為 0.05cm/day，10% 至 20% 為 0.04cm/day，20% 以上為 0.03cm/day。

經由以上之參數組合，模式計算雲林水利會水稻田基本入滲率（因水稻田為長期湛水，在此指一穩定入滲率）為 3.6mm/day（土壤組合：0-30 公分為坵質粘土，30-150 公分為坵質粘壤土）至 5.1mm/day（土壤組合：0-30 公分為細砂土，30-150 公分為礫石）；將各輪區之入滲率與輪區面積加權平均後，得雲林水利會之平均入滲率為 4.37mm/day。以輪區為單位，考慮該輪區中土壤之質地與組合與灌溉方式、降雨量、蒸發散量、淺層地下水位深等狀況進行推估雲林水利會水稻田入滲補注量，其年本田入滲量依不同之期作別，為 0 mm/年（無耕作）-1000 mm/年（一年兩作）之間；而雲林水利會水稻田之年本田總入滲量為 2.167 至 2.248 億立方公尺之間，每公頃一期作之入滲量約為 4300 立方公尺，二期作約為 3700 立方公尺。

由水利局公式應用粘粒百分比所求出該區入滲率介於 1.99mm/day(粘粒百分比為 59.1%)至 94.03mm/day(粘粒百分比為 2.5%)；而平均入滲率為 10.19mm/day。各輪區之年入滲量為 0 mm/年(無耕作)-200000 mm/年(入滲率為 94.03 mm/day，且為一年兩作)。雲林水利會水稻田各輪區之年本田總滲漏量約為 3.77-3.897 億立方公尺之間。

### 5.3 雲林水利會水稻田入滲量評估

由模式推估雲林水利會水稻田進入牛踏層之通量主要受牛踏層水力傳導性之影響，因此，在假設該區牛踏層水力傳導性為 0.03~0.055 cm/day 之條件下，進入牛踏層之通量變異不大。參考台灣省水利局(1996)所擬定之分級標準(見表 5.4)，該區之入滲率一般分佈在第五級，即 3.16-5.24mm/day 之間（見圖 5.3）。為進一步評估地下水補注功能，本研究另以灌溉區域及管理

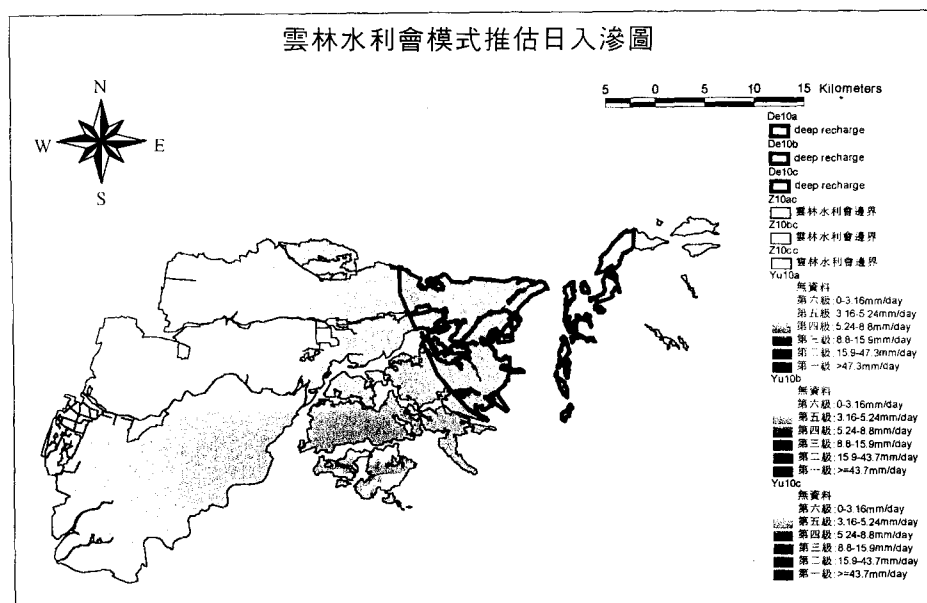


圖 5.3 雲林水利會模式推估日入滲圖

方式結合後，擬定表 5.5 之年入滲量分級標準，根據此一標準，本區之年入滲量介於 C 級 (500-1000mm/年，一年兩作之情形下)及 D 級 (0-500mm/年，一期作或二期作之情形下)之間。由雲林水利會三年灌溉管理資料所推估之三年年本田滲漏量分佈如圖 5.4-5.6 所示。以上結果利用地理資訊系統展示，並與深層補注區圖套疊，可藉以瞭解地表入滲及深層補注區之位相關係，其中扇頂深層補注區之水稻田多為一年兩作之耕作方式，其年本田入滲量之分級多為 C 級，為最佳之地下水補注區。

表 5.4 平均入滲率分級標準

級別	平均入滲率(mm/day)
第一級	$\geq 43.7$
第二級	15.9-43.7
第三級	8.8-15.9
第四級	5.24-8.8
第五級	3.16-5.24
第六級	0-3.16

表 5.5 年入滲量分級標準

級別	年入滲量(mm/年)
A 級	0-500mm/年
B 級	500-1000mm/年
C 級	1000-2000mm/年
D 級	$>2000$ mm/年

#### 5.4 討論

模式推估之雲林水利會水稻田進入牛踏層之通量為 3.6-5.1 mm/day，而模式所推估之雲林水利會水稻田年本田滲漏量為 2.167~2.248 億立方公尺，此一推估數值與中興工程顧問(1995 年)之估算值 1.85 億立方公尺及姜麗安與歐陽湘(1996 年)估算之值 2.01 億立方公尺，頗為相近。而水利局入滲公式推估雲林水利會水稻田之年本田滲漏量為 3.77-3.897 億立方公尺，為由模式所推估該區水稻田年本田進入牛踏層通量之 1.91 倍。該經驗公式為近百年前於田間所作之時驗所得之經驗公式，但水稻田之壽命不同，其牛踏層之透水性亦不同，故此公式在當時實驗時所

用之田可能為一新生田，經過了近百年之耕種，水稻田亦步入中生田，甚至為老年田。此外，該公式單就粘粒百分比來推算入滲量，其準確性有待商榷。但在推估灌溉用水量時，該公式不失為一簡便的方法。

另就水田補注地下水功能來看，雲林地區(涵蓋面積約為 1200 平方公里)地下水年邊界補注量前人推估分別為工研院能資所推估之 4.89 億噸、劉聰桂量測之 4.55 億噸及張誠信推估之 4.88 億噸。而雲林水利會水稻田由模式推估之年本田入滲量佔雲林地區之地下水邊界補注量之 45%左右，故水稻田入滲對於本區地下水之補注量有相當之助益。未來政府相關單位欲從事濁水溪沖積扇水田休耕期之地下水涵養工作，在水田翻耕澆水後全區入滲率相差不大之情況下，應以扇頂區深層補注區為優先考慮實施區域，俾獲得最大補注效果。

## 六、結論與建議

### 6.1 結論

(1)以麻園工作站上新小組灌排資料進行模式

測試時，模式模擬入滲量相當符合三年觀測資料之變化趨勢，證實模式對該區水田入滲量能作有效推估。模擬之總入滲量雖略低於三年觀測之平均值，此與水田存在部份側向滲漏有關，故此現象亦屬合理。

(2)本區水田垂直入滲主要受牛踏層主導，假設本區牛踏層水力傳導性為 0.03~0.055 cm/day 之情形下，水田進入牛踏層之通量受到土層組合影響不大，入滲量差異在 1.5mm/day 以內。

(3)水田在地表入滲分佈差異不大時，則深層補注量主要受水稻輪作方式與深層補注區位所在位置影響。因此雲林水利會補注效益較佳之處在本區東部之深層補注區範圍內之水田部分。

(4)雲林水利會水田耕作面積約 570 平方公里，佔雲林地區面積(約 1200 平方公里) 47%，其水田垂向之年本田入滲量為 2.20 億噸立方公尺，佔該區總補注量(4.88 億立方公尺)之 45%左右，補注效果明顯。

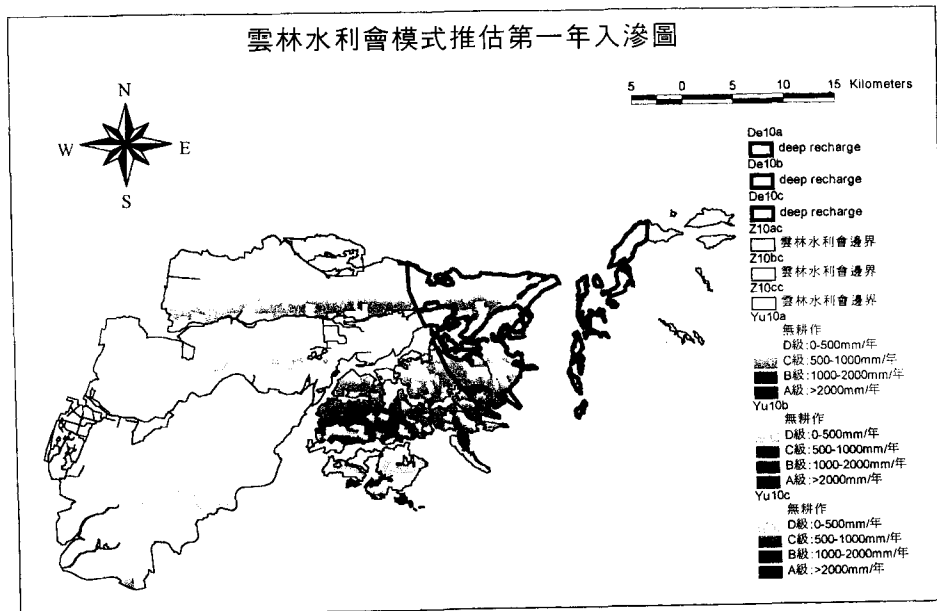


圖 5.4 雲林水利會模式推估第一年入滲圖

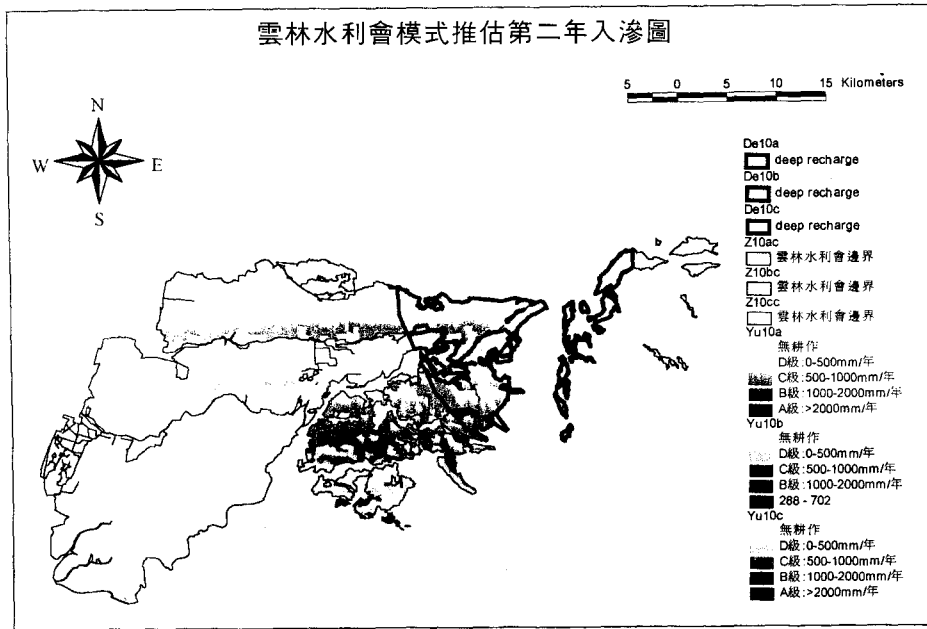


圖 5.5 雲林水利會模式推估第二年入滲圖

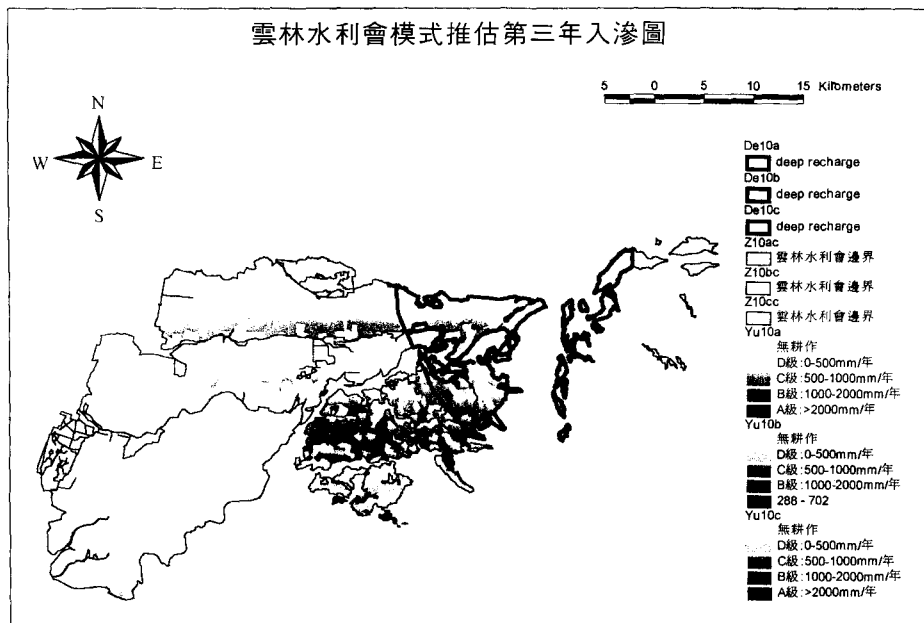


圖 5.6 雲林水利會模式推估第三年入滲圖

(5)水田灌溉計畫用水量係根據其土壤滲漏量、該區之有效降雨量、蒸發散量等因素來進行用水計畫。故在模式模擬時，考慮輪區灌溉用水量及不同地區蒸發散量後，得其對水田入滲量推估影響不大；而水田入滲主要仍受難透水層土壤特性之主導。

## 6.2 建議

- (1)水稻田之入滲環境為一多層土壤組合，有時土層結構不同對滲漏量影響更大；入滲經驗公式並未考慮此一性質，在推估入滲補注量時，其準確性有待商榷。但入滲經驗公式一般用於推算灌溉需水量，故在推估水田入滲補注量時，可能略有寬估之虞。
- (2)模式中牛踏層之土壤水力參數僅為在合理之狀況下推定，對於模式準確性造成之影響，應在日後就牛踏層之土壤性質，加以調查。
- (3)本研究主要探討水田垂直入滲量。但水稻田滲漏中，除垂向入滲外，亦有側向滲漏而成伏流水等。未來可搜集各取水口之取水量及輸水損失等資料，並配合三維模式，估計水稻田側漏量，以掌握本區可利用迴歸水水量。
- (4)雲林水利會轄區內深層補注區域之水田在雨量或水源豐沛之時可進行超量灌溉，以達補注地下水之功效；在枯水時期，深層補注區域內水田則優先考慮休耕，以期達到最大灌溉收穫之效益。

## 謝 誌

本研究能順利完成，除感謝農委會、水利處之經費支援外，研究進行期間，承蒙農委會蔡明華科長及林柏璋技正在研究方向及台大農工所林俊男教授、甘俊二教授、蘇明道教授、郭勝豐博士與湯松義技正在實驗及學理上之指導，在此一併致謝。

## 參考文獻

1. 陳尙、李德滋，1964，“以土壤水分當量推算水稻灌溉需水量之研究”，農工學報第 10 卷第 4 期，pp15-40。
2. 陳尙，1980，“水稻田在水土資源保育上之功用與影響問題之研究”，農業用水內部水量調整問題之研究，p1101-1178，農業工程研究中心。
3. 林建元，1991，“地理資訊系統 ARC/INFO 入門”，松崗電腦圖書資料股份有限公司。
4. 蔡明華，1993，“水田灌溉公益效能剖析研究”，農委會，pp1-62。
5. 蔡明華、林永德，1994，“因應加入 GATT 之能業對策研究—水稻田生態環境保護對策”，水資源經營管理研討會，台北市，pp.123-137。
6. 中央氣象局，氣象年報，1990-1994。
7. 曹以松，林俊男等，1987，財團法人農業工程研究中心研究報告“集集共同引水計畫-人工補注技術即可行性實施計畫”，pp.52-99。
8. 丁澈士，1996，“土壤水分收支法應用於地下水補注推估-屏東平原個案研究”，第八屆水利工成研討會論文集，pp.665-672。
9. 馮秋霞、許榮庭、李振誥，1997，“嘉南地區水田灌溉對地下水補注影響之評估”，第二屆地下水資源及水質保護研討會論文集，pp.473-484。
10. 周曉雯，1997，“雲林地區水稻田入滲量之評估”，國立台灣大學農業工程學系碩士論文，pp.11-29。
11. 劉振宇，1996；1997，水稻田生態環境保護規劃及示範(第一年)、(第二年)“水稻田對地下水補注功能評估分級”，行政院農業委員會。
12. 劉振宇，陳世楷，1996，1997，“臺西至麥寮地區地下水天然補注量之研究(I)、(II)”，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
13. 劉振宇等，1998，“增加水田地下水涵養補注

- 方之評及非灌區地下水補注功能分級之初探”，台灣省水利處。
14. 台灣省彰化農田水利會，水田及旱作灌溉用水計畫與實際取水量記錄表，1993-1997。
  15. 中國農業工程學會，1990，“中國農業工程手冊—農業水利之部：灌溉、墾殖、管理”。
  16. 水利局、台大農工系，1979，“灌溉系統配水技術之分析與研究”。
  17. 林俊男，1993，“地理資訊系統應用於乾旱期安排停灌順序之研究”，農委會。
  18. 台灣省雲林農田水利會，1993，“興水利農源流長”。
  19. 賈儀平、盧詩丁、王原賢，1996，“濁水溪沖積扇南翼之水文地質架構”，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，pp.113-125。
  20. 姜儷安、歐陽湘，1996，“雲林地區地下水與水平衡初步分析”，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，pp.181-206。
  21. 張誠信，1996，“雲林地區地下水流之三維數值模擬”，國立台灣大學農業工程學系碩士論文，pp6-17。
  22. 工研院能資所，1996，“雲林地區地下水與水平衡初步分析”，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，pp.181-206。
  23. 劉聰桂等，1996，“濁水溪沖積扇之地下水資源-碳十四與氬定年/示蹤研究”，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，pp.145-164。
  24. Angus, J.F., and H.G. Zandstra, (1980). "Climatic factors and the modelung of rice growth and yield", pp189-190 in Priceedings of the WMO-IRRI symposium on Agrometeorology of the rice crop, Los Banos, Philippines.
  25. Belmans, C., J.G. Wesseling and R.A. Feddes, (1983). "Simulation Model of the Water Balance of A Cropped Soil: SWATRE.", Journal of Hydrology 63: pp.271-286.
  26. Bolton, F.R. and H.G. Zandstra, (1981). "A soil moisture based yield model of wetland rainfed rice.", IRRI Research Paper 62. IRRI, Los Banos, Philippines.
  27. Driessen, P.M., (1986). "The Water Balance of the Soil." In: H. van Keulen and J. Wolf Eds., Modeling of Agricultural Production: weather, soil and crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, pp.76-116.
  28. Green, W.H. and G. A. Ampt, (1911). "Studies on soil physics, 1. The flow of Air and Water Through Soils." J. Agric. Sci. 4, 11-24.
  29. Horton, R.E., (1935). "Surface Runoff Phenomena: Part I, Analysis of the Hydrograph.", Horton Hydrol. Lab. Pub. 101. Ann Arbor, Mi: Edwards Bros.
  30. Huggins, L.F. and E.J. Monke, (1966). "The Mathematical Simulation of the Hydrology of Small Watersheds.", Tech. Rept. 1, Purdue University Water Resource Center, Lafayette, IN, Aug.
  31. Klute, A., (1952). "A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials." Soil Sci. 73: pp.105-117.
  32. Mc Mennamy, J.A., and J.C. O'Toole, (1983). "RICEMOD: a physiologically based rice growth and yeild model." IRRI Research Paper 87. IRRI, Los Banos, Philippines.
  33. Philip, J.R. (1957). "The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution." Soil Science, 83: pp.345-357.
  34. Philip, J.R. (1958). "The theory of infiltration: 6. Effect of water depth over soil." Soil Science, 85: pp.278-286.
  35. Richards, L.A. (1931). "Capillary conduction of liquids through porous mediums." Physics, 1: pp.318-333.
  36. Shan, C. and D.B. Stephens. (1992). "A generalized solution to ponded infiltration." Lawrence Berkeley National Lab., Berkeley, CA.
  37. Ten Berge, H.F.M., D.M. Jansen, K. Rappoldt and W. stol. (1992). "The soil water balance module SAWAH : description and users guide,



- Simulation Reports CABO-TT nr. 22 P.O. box 14,6700 AA Wageningen Netherlands .
38. Ten Berge, H.F. M., K. Metselaar, M.J.W. Hansen, and E.M. de San Agustin. (1995). "The SAWAH riceland hydrology model." *Water Resource Research*, 31(11): pp.2721-2732.
39. Wopereis, M.C.S. et al. (1992). "Hydraulic resistance in puddled rice soils: measurement and effects on water movement." *Soil Tillage Res.*, 24: pp.199-209.
40. Wopereis, M.C.S. et al. (1994). "Water use efficiency of flooded rice fields. (I) Validation of the soil-water balance model SAWAH." *Agricultural Water Management*, 26: pp.277-289.
41. Wopereis, M.C.S. et al. (1994). "Water use efficiency of flooded rice fields. (II) Percolation and seepage losses." *Agricultural Water Management*, 26: pp.291-304.

收稿日期：民國 87 年 10 月 15 日

修正日期：民國 87 年 11 月 23 日

接受日期：民國 87 年 12 月 7 日