

水田對逕流系統之影響評估

Effects of Paddy Field Cultivation on Runoff System

國立中央大學土木工程研究所副教授

吳 瑞 賢
Ray-Shyan Wu

國立中央大學土木工程研究所碩士

張 嘉 軒
Jia-Shien Chang

摘 要

台灣地區由於水資源的需求日漸增加，目前已有不再增加農業用水總量的共識。復因政府推行「稻米生產及稻米轉作計畫」，使得稻作面積逐年減少，並且未來我國若加入世界貿易組織(GATT/WTO)後，水稻可能減產，因而造成水田的使用方式將有所改變。水田除了生產稻米之貢獻，尚有涵養水資源的功能，其中稻米的貢獻可由市場經濟反應出來，而涵養水資源的功能卻因無市場而難以表現其價值。本文擬以短期降雨逕流模式來評估水田的蓄留功能，結果發現田埂高度對於調節洪峰流量、延遲出流時間有相當大的影響。在長期推估方面，以水文水平衡的概念，來說明由於水稻田的存在所具有的價值，並就轉作旱田及休耕的狀況來作一比較，結果發現由於水田的存在使得深層滲漏量增加，逕流量減少。就嘉義地區而言，水田的逕流量在所有損失量(蒸發散量+深層滲漏量+逕流量)佔27%，旱田則高達55%左右。若水稻在休耕後仍保有原田埂高，也將具有減少逕流量之效果。

關鍵詞：水田，逕流系統，水平衡，牛踏層。

ABSTRACT

Recently, a consensus is reached that the increase of the demand of the water resources in Taiwan would limit the quantity of the agricultural water use in status, or even reduced. Furthermore, the join of the GATT/WTO would probably lead to a reduction of rice in Taiwan, which could change the cultivation pattern of paddy field. Paddy field is regarded as an important player in the conservancy of water resources. Besides rice production, the effect of paddy field on environment includes the increase of groundwater recharge and the remediation of floods. However, not like the rice production, the conservancy of the environment is not quantifiable. This study investigates the effects of paddy field on groundwater recharge and flood remediation. The results show a significant increase of runoff and a decrease of groundwater recharge when paddy field is converted into other uses.

Keywords : Paddy field, Runoff system, Water balance, Traffic pan.

一、前言

近幾年來，由於稻米生產過剩，農政單位所擬的產銷結構調整對策為國內稻米生產轉為「供需平衡」，並且我國加入 WTO 後，稻米開放進口將採取「日本模式」，國內稻作面積將面臨大量縮減。因此，為因應我國加入世界貿易組織，整個農業生態環境勢必將有所改變。針對稻米可能面臨的開放壓力，農政單位除了持續稻米轉作計畫至八十三年底外，八十四年起開始推動水旱田集團輪作，並將雙期作水田朝向一期作，減少稻米生產量；同時期望農業轉型成功，使得稻田得以永續利用。然而在轉型期間，稻田若是無限制轉作或休耕，極可能會導致生態環境惡化。本文擬以長期水平衡關係來探討水稻田對農業生態環境的影響，並考慮轉作旱作及休耕時的狀況，一併列入討論中。

水稻屬於好水性作物，需長時間處在湛水的狀態下。據調查資料顯示，水稻在淺水區湛水（約 30mm）時，有較好的收穫量。水稻田在經過一段時間耕作後，通常於距田面 20 至 40 公分深處形成一硬板層（hard pan），即一般俗稱之牛踏層（traffic pan 或 plow pan）。牛踏層具有抑制滲漏的效果，進而使水稻田保持田面湛水，同時牛踏層亦可使地下水位較低之高滲透性土壤保有充足之水分而成為親水性濕地。

由於水田有田埂蓄水之關係，高度越高其蓄水能力越大，因此有效雨量越高。但田埂過高，因蓄水太深，反而影響作物之生長，病蟲害亦易於滋生。據農業工程研究中心（1995）研究報告，台灣水田之田埂高自最低 7cm 至最高 30cm，通常約在 10cm 至 20cm 之間。

此外，蔡明華（1994）認為，水稻田除了一般生產性的機能外，尚具有生態性及生活性的機能。其中最主要包括涵養地下水源、安定河川流況、調蓄暴雨洪水、淨化水質、防止土壤沖蝕、調節微氣候、洗鹽等等。稻米生產性的機能可直接由市場價格反應出來，然而生活與生態性機能的發揮，卻無市場報酬可言。陳明健（1995）以數學規畫模型配合迴歸分析評估出水田涵養水資源的影子價格（shadow price），其價值大約是水稻生

產價值的 2 至 5 倍。因此，農業不宜單純以農產品價格及經濟觀點來看待；其具有提供糧食，維護環境等的基本性質在內，佔有無可替代的絕對地位。尤其在當今水稻田面臨改作或農地釋出之時刻，實有需要從其他角度來探討水稻田之各項機能與特性。

以往對於水稻田方面之研究，大都偏向於農業灌溉需水量的推求，如農業工程中心（1990）“台灣地區農業用水需求推估量之研究”。也有對於蒸發散、滲漏等個別因子的探討，但並未真正建立起一個水平衡關係模式。本文即在嘗試串連起水田各項入出流量因子，包括降雨、入滲、深層滲漏、蒸發散、逕流、田面水份的滯留，以及灌溉水的加入，並針對台灣的現狀（嘉義地區），以水平衡的理念來探討水田的整個概況。而長期推估的結果並不能針對某一場暴雨作分析，因此，我們以堰流公式建立起水田入出流量之關係，並探討水田不同蓄水高對洪峰流量之影響。

二、水田長期水平衡模式

一般而言，降水落於田間，因為水田具有田埂高度，所以雨水可被水田截留，而不致發生逕流。水稻田蓄水量一部份蒸發於大氣中，一部份會入滲於地下。水田所具有的入出水量關係可由圖 1 來表示。就長期水田對逕流系統的影響而言，本文首先以 Hamon 公式計算蒸發潛能，再根據作物係數計算蒸發散量。入滲方面，以 Horton 入滲公式為出發，並考慮土壤水分含量對入滲及深層滲漏的影響，再考量水田的湛水（ponding）現象，而建立水田水收支關係。本文選擇嘉義地區為研究區域，探討由於水田變遷，所造成的影響。

2.1 作物蒸發散量

本文對於蒸發散之推估，擬由 Hamon(1961) 提出的公式來計算，其方程式為：

$$PE_t = \frac{0.021 H_t^2 e_t}{T_t + 273} \quad (1)$$

$$e_t = 33.8639 \left[(0.00738 T_t + 0.8070)^8 - 0.000019(1.8 T_t + 48) + 0.001316 \right], T_t \geq 0$$

式中， PE_t ：潛勢蒸發散（potential evapotranspiration）

H_t ：每天日照時數（hours），可由表查得。

e_t ：飽和水蒸氣壓（millibars）

T_l : 溫度($^{\circ}\text{C}$)

而水稻蒸發散量

$$ET_{crop} = PE_l \times K_c \quad (2)$$

水稻之 K_c 值按台灣實驗例列如表 1。

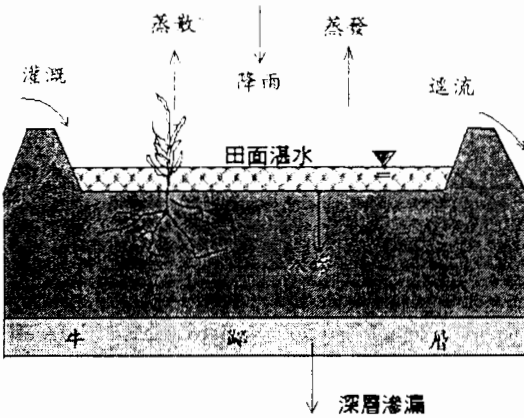


圖 1. 水田之各種入出流量圖

表 1. 水稻各生育階段別之作物係數 K_c 值

生育天數	生育階段	台灣實驗例所推出之 K_c 值	
		一期作	二期作
1 ~ 30	整地期	-	-
31 ~ 45	插秧期	0.6	1.0
46 ~ 60	分蘗初期	1.0	1.3
61 ~ 75	分蘗末期	1.3	1.6
76 ~ 90	開花初期	1.5	1.7
91 ~ 105	開花末期	1.5	1.6
106 ~ 120	成熟初期	1.4	1.4
121 ~ 135	成熟中期	1.1	1.0
136 ~ 150	成熟末期	0.8	0.5

2.2 入滲與深層滲漏

Horton(1933) 提出一個指數遞減的方程式如下：

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \exp(-kt) \quad (3)$$

式中, $f(t)$: 在任何時間的入滲率(L/T)

f_0 : 起始入滲率

f_c : 穩定入滲率

t : 入滲時間(T)

k : 指數遞減係數(1/T)

本研究即以 Horton 入滲公式為出發點, 來探討水田的實際入滲情況。使用 Horton 入滲公式時, 除了必須獲得精確可靠的三個參數值 f_0 、 f_c 、 k 外, 公式本身亦有缺失, 即是它表示入滲容量為時間的函數。事實上, 入滲也受到下層土壤深層滲漏的影響, 因此, Bauer(1974) 提出了一個土壤排水(soil drainage)的方程式如下：

$$d(t) = f_c [1 - \exp(-kt)] \quad (4)$$

式中, $d(t)$: 從上層土壤到下層土壤的排水速度。入滲和土壤深層排水的觀念如圖 2 所示。

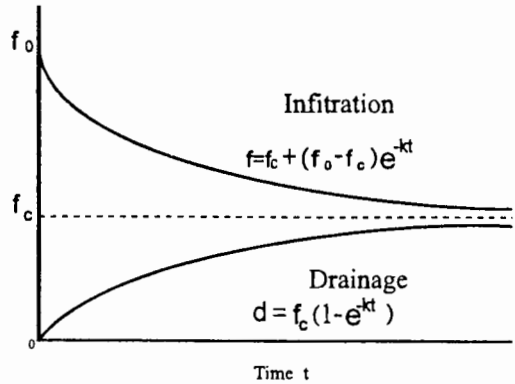


圖 2. Bauer's 入滲和排水觀念圖

如果開始以一個乾的土壤來看的話, 起初入滲率是 f_0 , 排水率是 0, 因為還沒有水分可以排水。之後, 隨著時間增加, 入滲率漸漸減緩, 排水率逐漸增加。等到土壤層接近飽和時, 入滲率和排水率同時向 f_c 接近。因此(3)式和(4)式將入滲和深層滲漏做了一個最好的區分。由水文連續方程式的觀念得到下式：

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= f(t) - d = f_c + (f_0 - f_c) \exp(-kt) - f_c [1 - \exp(-kt)] \\ &= f_0 \exp(-kt) \end{aligned} \quad (5)$$

因此, 在任何時間土壤水的貯存量是：

$$S(t) = \frac{f_0}{k} [1 - \exp(-kt)] \quad (6)$$

當時間趨近於無窮大時, 土壤變成飽和, 而

最大土壤蓄水容量 (maximum soil storage capacity) 為下式：

$$S_c = \frac{f_0}{k} \quad (7)$$

將(4)式和(6)式結合

$$d(t) = \frac{f_c}{f_0} k S(t) \quad (8)$$

再將(7)式 k 值代入(8)式

$$d(t) = \frac{f_c S(t)}{S_c} \quad (9)$$

因此，深層滲漏率可以以上式來表示。

在考慮入滲時，Horton 公式僅和時間有關，雖然 f_0 此參數是跟土壤水分有關，但若像是應用在長期推估時，不甚方便，對於土壤入滲率回復的預估難以推算，因此本研究將 Horton 公式的時間項去掉，加入土壤水份含量的因子，根據 Aron (1992) 採用公式如下：

$$f_p(t) = f_c + (f_0 - f_c) \left(\frac{S_s - S(t)}{S_s} \right) \quad (10)$$

式中， f_p ：潛勢入滲率 (mm/hr)

f_0 最大入滲率 (mm/hr)，與 Horton 參數相同。

f_c ：穩定入滲率 (mm/hr)，與 Horton 參數相同。

S_s ：飽和時土壤含水量 (mm)

S ：土壤水分含量 (mm)

此飽和含水量 S_s 與土壤最大蓄水容量 S_c 基本上是相同的，但實際上受到土壤中存在空氣量的影響，因此飽和含水量 S_s 往往達不到最大蓄水容量 S_c 。

三、短期降雨逕流模式

關於水稻田調蓄洪水功能之研究，本文假設整個田區以堰流情況排水，假定田區為一蓄水庫，則降雨後田區之蓄水量可以下式表示：

$$S = A y n_1 \quad (11)$$

式中， S = 蓄水量

A ：所演算之田區面積

y ：蓄水深度

n_1 ：當水面坡度甚小時（水平） $n_1 = 1$

假定田區逕流之流出量為整面越過田埂的方

式流出，則田區出流量可以堰流公式以下式表示：

$$Q = C_w \cdot W \cdot h^{3/2} \quad (12)$$

式中， Q ：出流量

W ：有效堰寬，即田埂寬度

h ：堰上水頭

C_w ：常數 ($C_w = 1.838$)

若堰高程（可蓄水高）為 d ，則

$$Q = C_w \cdot W \cdot (y - d)^{3/2} \\ y = d + \left(\frac{Q}{C_w \cdot W} \right)^{2/3} \quad (13)$$

由(13)式代入(11)式

$$S = A \left[d + \left(\frac{Q}{C_w \cdot W} \right)^{2/3} \right] \\ = A d + A \left(\frac{1}{C_w \cdot W} \right)^{2/3} \cdot Q^{2/3}$$

再由水文連續方程式 (Hydrologic Equation) 得

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (15)$$

式中， I ：入流量

Q ：出流量

S ：蓄存量

將(14)式代入(15)式得

$$\frac{dQ}{dt} = K_w (I - Q) Q^{1/3} \quad (16)$$

式中， $K_w = 1.5 (C_w \cdot W)^{2/3} \cdot A^{-1}$

將(16)式化為差分方程式 (Difference Equation) 得

$$\frac{Q_{t+\Delta t} - Q_t}{\Delta t} = K_w \left(\frac{I_{t+\Delta t} + I_t}{2} - \frac{Q_{t+\Delta t} + Q_t}{2} \right) \left(\frac{Q_{t+\Delta t} + Q_t}{2} \right)^{1/3} \quad (17)$$

式中， $I = iA \times 0.001 / 3600 =$ 降雨時旱田區入流量 (cms)

i ：降雨強度 (mm/hr)

A ：演算田區之面積 (m^2)

即可從(17)式中，由已知的降雨資料，解出不同時段的出流流量。 Δt 為 1hour。

四、模式應用

4.1 水田長期水平衡模式之推估

4.1.1 研究地區概述

茲以嘉義地區作為模式應用區域，圖 3 及圖 4 為 1981-1990 年之月平均溫度、雨量資料。

其中雨量分佈相當不均勻，集中在夏季，乾

濕季相當分明。若以水稻田而言，第二期作比第一期作將可獲得更多有效雨量。

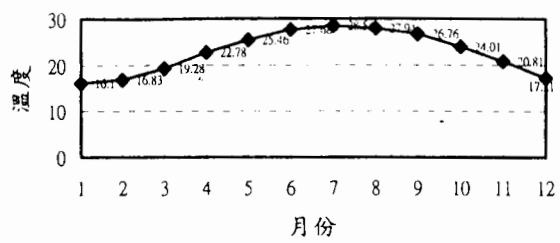


圖 3. 嘉義地區月平均氣溫 (1981-1990)

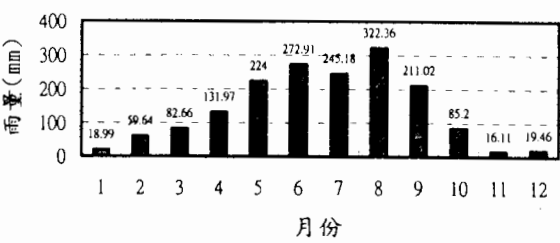


圖 4. 嘉義地區月平均雨量 (1981-1990)

4.1.2 參數檢定

關於土壤資料，由於缺乏田間實測資料，故以表 2 作為依據。

甘俊二 (1984) 指出，水稻根系受到牛踏層之影響，大約為 20cm。根據土壤性質 (表 2) 及根系這兩項可推求飽和容水量，田間容水量及凋萎點水量等等。而最適合水稻生長的土質為中性土 (黏壤土)，以此為例，則可推算出水田根層最大蓄水容量為 98mm，田間容水量約為 72.9mm，凋萎點含水量約為 35.1mm。

表 2. 各種土質土壤水分常數表

土質	孔隙率%	假比重 (gm/cm^3)	田間容水量%	凋萎點%
砂土	38	1.65	9	4
砂壤土	43	1.50	14	6
壤土	47	1.40	22	10
黏壤土	49	1.35	27	13
黏土	53	1.25	35	17

資料來源：灌溉排水原理

土壤水分含量之水深 $d=\frac{PW}{100} \cdot \frac{As}{r_w} \cdot D$

其中，PW 為有效水分含量百分 (重量比)，As 為假比重， r_w 為水之比重，通常為 $1gm/cm^3$ ，D 為根系深度。以黏壤土田間容水量為例，其土壤水份含量水深為

$d=\frac{27}{100} \cdot \frac{1.35}{1} \cdot 200=72.9(mm)$ 。

由於土壤中經常存有空氣，即使在水分灌滿整個土壤，也無法到達飽和的狀態，在此假設 5% 的空氣孔隙率殘留，即飽和容水量水深為最大蓄水含量之 95%，為 93.1mm。

而將(7)式改為

$S_s=\frac{f_0}{k}$ (18)

即以飽和容水量水深 S_s 代替土壤最大蓄水容量 S_c 。

由於缺乏田間資料，所以我們以一般的狀況來作參數檢定。首先對於 f_0 之決定，根據 Mwendera and Feyen(1993) 在耕犁地 (ploughed) 所做的實驗，檢定 f_0 為 55.85(mm/h)，在本模式中採用 $f_0=60(mm/h)$ 。至於另一參數，穩定入滲率 f_c ，由於本省水稻田多具有牛踏層，因此實際上此穩定入滲率將因為牛踏層的緣故而有所減少。據甘俊二 (1991) 指出，嘉南地區現今大部份採用輪灌，為 7.5 天之輪距，一次灌水深 45mm。其中約前三天 (3.2 天) 為濕田，後面 4.5 天呈現乾田的狀態，土壤水分可能已降至田間容水量。前三天濕田的情況，蒸發散為潛勢，以此種情況代入模式推算出 f_c 大概為 1.1mm/day 時，則第四天開始不會有滲水現象。吳富春 (1995) 指出，一般較理想之水稻田滲漏率為 1mm/day (即 0.04583mm/hr)，此與本模式相去不遠。此外，林昭榮 (1992) 認為，滲水時的滲透速度跟孔隙半徑成正比關係 (即砂質土滲透較快)，又充分實施整田工程的水田，其土性與滲透量之關係如表 3。模式中穩定入滲率 1.1mm/day 大約是在黏壤土的範圍內。

表 3. 土性與垂直滲透

土性	滲透量(mm/day)
砂土	3-6
壤土	2-3
黏質壤土	1-2

資料來源：農田水利，第三十八期，1992

當田面沒有積水深時，蒸發散不再是一個潛勢的情況。根據徐玉標 (1974)，土壤表面蒸發時，土層中之含水量因不斷蒸發而降低，所以蒸發率便逐漸減少。因此在後 4.5 天乾田的狀況下，蒸發散量假設是一個完全由土壤水分控制的情況，假定為下式關係式：

$$E_t = ET_{crop} \times (S(t)/S_s)^k \quad (19)$$

把前面求出之 f_c 值代入模式，並假定在下一灌溉時土壤水分已下降到田間含水量。則得到 k 等於 2.2 時，第 7.5 天後土壤水分將達田間含水量。

4.1.3 模式運算

圖 5 即為整個模式運算的流程圖。受到土壤潛勢入滲率的影響，降雨強度連同水田的積水深所造成的有效入滲率 f_e (effective infiltration) 將受到潛勢入滲率的限制，即有效入滲率不能大於潛勢入滲率。而土壤深層的排水率可用先前 (9) 式來計算之。此時，將蒸發散量加入，若水田有灌水，則在任何時間土壤的水分含量， $S(t + \Delta t)$ ，可以下式計算：

$$S(t + \Delta t) = (f_e - d) \Delta t + S(t) \quad (20)$$

之後，計算殘留水深 $y(t + \Delta t)$ 如下式：

$$y(t + \Delta t) = y(t) + (i - f_e - ET_{crop}) \Delta t \quad (21)$$

若此時殘留水深 $y(t + \Delta t)$ 大於田埂高，則計算逕流量。若沒有灌水，蒸發散將以非潛勢消耗土壤含水量，則土壤水分含量變成下式計算：

$$S(t + \Delta t) = (f_e - d - E_t) \Delta t + S(t) \quad (22)$$

此時，將田間含水量設為一門檻值，若土壤含水量下降達田間含水量，則施以灌溉水。 Δt 在本模式為 1 hour。

4.1.4 基本假定條件

在模式假定三月至十月為稻作期，兩期稻作前皆有一整田用水量，其計算如下式：

$$d_2 = d_1 + \frac{(S_d - M_c)}{100} \times A_s \times D \quad (23)$$

式中， d_2 ：整地用水深 (mm)

d_1 ：冠水深 (mm)

S_d ：土壤飽和含水量百分比 (%)

M_c ：灌前土壤水分百分比 (%)

A_s ：假比重

D ：有效根層深度 (mm)

其中， d_1 考慮給定 30mm 的冠水深。如前所述，以田間含水量作為門檻值，當土壤水分低至田間含水量時，就施以灌溉 (45mm)。田埂高度考慮為 100mm。其此再考慮水田休耕和轉作旱作的狀況。在本模式中假定水田休耕仍保有原田埂高度，但不施以灌溉水。至於旱作部份，假設並無田埂之存在，水份入滲之後便產生逕流。並假定全年皆有旱作之種植。由於本省水旱田常輪作，因此牛蹄層仍存在， f_c 考慮不變。由於旱作灌溉田間含水量為其上限，凋萎點為其下限，因此模式

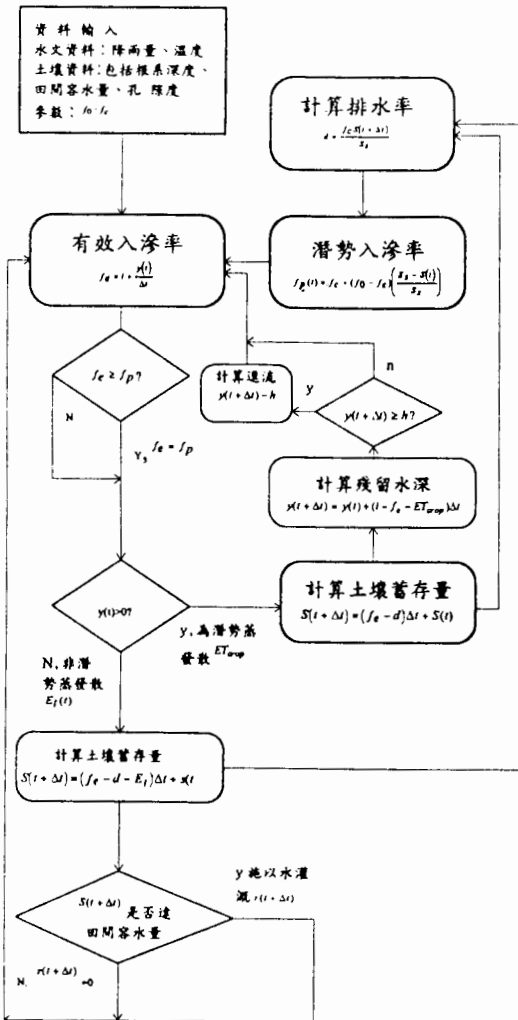


圖 5. 水田長期距水收支計算流程圖

中考慮低至凋萎點時，施以灌溉 80mm(參考灌溉排水原理，1993)。此外，旱田在模式中並沒有灌水(ponding)。表 4 即是各種不同土地利用型態在本模式中所考慮的各項性質。由於旱作種類繁多，且各個生長期不一，因此作物係數約略取一個全期平均值，大約是 0.5 左右。至於土壤水分起始量，水田及水田休耕皆假設 72.9mm(即田間容水量)，旱田為 70.2mm(凋萎點水量)。

表 4. 模式中使用各種不同土地利用型態之性質

	水田	水田休耕	水田轉作旱田
根系深度	20cm	20cm	40cm
土壤性質	黏壤土	黏壤土	黏壤土
土壤最大蓄水容量	98mm	98mm	196mm
飽和容水量	93.1mm	93.1mm	186.2mm
田間容水量	72.9mm	72.9mm	145.8mm
凋萎點	35.1mm	35.1mm	70.2mm
一次灌溉深度	45mm	無	80mm
輸水損失	10%	無	10%
田埂高度	10cm	10cm	無
整田用水量	有	無	無
土壤水分起始量	72.9mm	72.9mm	70.2mm

4.2 水田短期降雨逕流模式之推估

短期暴雨部份，假想田區為 1 公頃。以 1981 年 9 月 2 日之暴雨代入模式之中。該次降雨延時 15 小時，共降雨 372.9mm。模式之中，考慮不同堰寬及不同蓄水高度的影響。

五、結果與討論

5.1 長期推估之分析

關於長期部份之各項因子計算結果(十年平均)列於表 5、表 6 及表 7，分別代表水田、水田休耕及轉作旱田的情況。並將結果繪於圖 6。其中十月至一月水田逕流量皆是零，顯示嘉南地區冬季是相當乾燥的季節。至於在夏季，由於水田田埂高度的蓄留作用，使得逕流量的產生僅僅是約為旱田逕流量的 1/2 左右。蒸發散部份，水田在 5

表 5. 正常水稻田(有灌溉水源)逕流系統之水量分析(1981-1990 十年平均) 單位: mm

月份	雨量	蒸發散	入滲量	深層滲漏	逕流量
1 月	18.99	12.2	18.89	16.56	0
2 月	59.64	13.85	74.87	15.48	4.27
3 月	82.66	54.84	41.37	33.52	19.82
4 月	131.97	121.2	66.46	31.83	38.99
5 月	224	164.61	75.59	33.06	44.8
6 月	272.91	127.72	41.56	32.69	127.45
7 月	252.47	156.1	52.38	33.59	96.12
8 月	322.36	200.99	63.4	33.54	120.47
9 月	211.02	154.66	50.95	32.37	97.86
10 月	8.52	73.88	54.35	32.38	0
11 月	16.11	30.56	15.53	22.72	0
12 月	19.46	9.38	19.46	15.43	0
平均	135.01	93.33	47.90	27.76	45.82

表 6. 水稻田休耕(仍保有田埂高度)逕流系統(1981-1990 十年平均)之水量分析 單位: mm

月份	雨量	蒸發散	入滲量	深層滲漏	逕流量
1 月	18.99	10.68	18.99	15.41	0
2 月	59.64	12.84	35.11	14.63	4.1
3 月	82.66	30.55	51.9	21.23	18.62
4 月	131.97	57.42	59.6	25.21	34.84
5 月	224	89.85	70.74	28.69	36.26
6 月	272.91	128.52	44.01	31.8	128.7
7 月	252.47	130.32	55.82	31.85	94.42
8 月	322.36	124.32	48.29	32.82	137.15
9 月	211.02	103.44	30.89	32.18	122.4
10 月	8.52	53.36	16.97	25.74	0
11 月	16.11	13.69	16.11	15.63	0
12 月	19.46	6.21	19.46	12.55	0
平均	135.01	63.43	38.99	23.98	48.04

表 7. 水田轉作旱田逕流系統之水量分析(1981-1990 十年平均) 單位: mm

月份	雨量	蒸發散	入滲量	深層滲漏	逕流量
1 月	18.99	27.04	47.21	19.69	0.58
2 月	59.64	24.87	60.45	18.14	20.79
3 月	82.66	35.15	58.97	21.42	38.09
4 月	131.97	46.56	71.38	21.92	82.19
5 月	224	61.06	102.37	22.74	136.03
6 月	272.91	69.05	83.08	24.05	189.83
7 月	252.47	74.23	95.28	22.65	157.19
8 月	322.36	66.8	103.3	24.3	226.26
9 月	211.02	54.09	51.63	23.09	159.39
10 月	8.52	43.98	51.54	19.16	0.18
11 月	16.11	31.86	44.72	19.4	0.19
12 月	19.46	24.35	48.26	18.56	0
平均	135.01	46.59	68.18	21.26	84.23

月和8月會有兩個高峰期，剛好是水稻第一期作和第二期作用水尖峰期。水田休耕情況，因為6、7、8月平均降雨量最多，蓄存於田埂內的水量也多，所以以這三月蒸發散最大，但全年皆小於水田的蒸發散。深層滲漏部份，水田長期處在一個湛水的情況下，土壤水常常是飽和的，故滲漏量比旱田及水田休耕時還多。

如果我們以深層滲漏代表涵養地下水源，逕流量代表調蓄洪水能力，蒸發散代表調節氣候能力，結果發現，水田在三方面皆具有良好之效果，其影響力皆為優，水田休耕仍保有田埂高度時的逕流產生量有時甚至比原水田還少(見圖6)。旱田在三方面效果皆不顯著。關於三種不同土地利用型態的三項損失因子(蒸發散量、深層滲漏量、逕流量)百分比於圖7中。其中水田之逕流只佔三種損失子27%，旱田則高達55%。

5.2.1 敏感度分析

灌溉門檻值分析

在本研究水田的模式中，有一門檻值－田間容水量(約為72.9mm)。若我們將門檻值提高到飽和容水量(約為93.1mm)就灌溉一次，使得水田完全處在湛水的情況下，而灌溉量不變，田埂高度等其他因子也不變，其蒸發散量及深層滲漏量雖

然是增加的，但同樣地，在逕流量方面也是增加的(如圖8所示)。原因是維持湛水灌溉使得田面有水分的時間比輪灌還要長，使得在蒸發散、深層滲漏甚至逕流量方面皆是增加的。

田埂高度分析

假設在水稻田必須休耕的情況下，試著加高

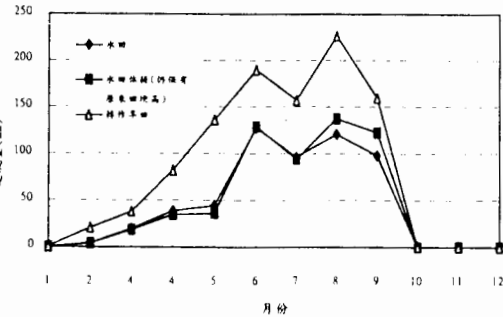
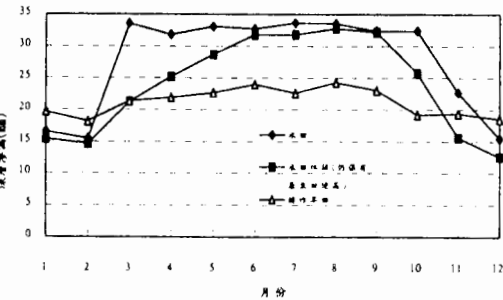
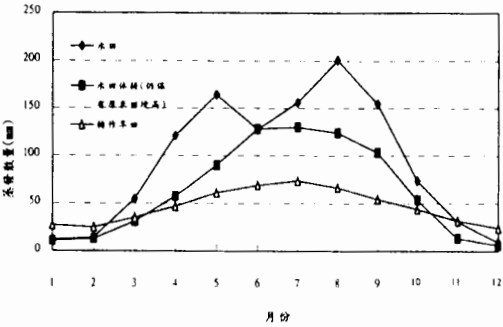
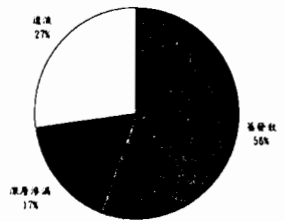


圖 6. 三種土地利用型態之各種損失量

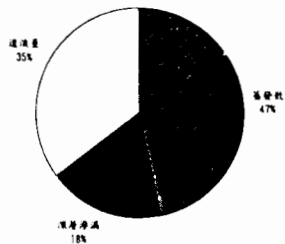
田埂高度至 20cm 與原本 10cm 之田埂高作比較。在蒸發散及深層滲漏變化不大，但在逕流量方面，顯然 20cm 有較好的蓄留效果 (如圖 9 所示)。

穩定入滲率 f_c 分析

同樣地，以水田休耕的狀態，比較 5 倍 f_c ($f_c=5.5mm/day$) 的穩定入滲率和 1 倍 f_c ($f_c=1.1mm/day$) 來作比較。結果發現，由於穩定入滲率 f_c 的提高使得蒸發散和逕流量也減少。同時，平均深層滲漏量也增加到原來的 3 倍多 (如圖 10 所示)。



正常水田



水田休耕

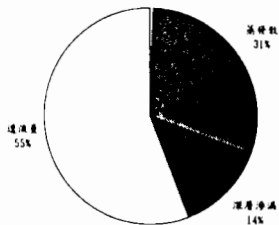


圖 7. 蒸發散、逕流及深層滲漏在不同土地利用狀況下所佔之百分比

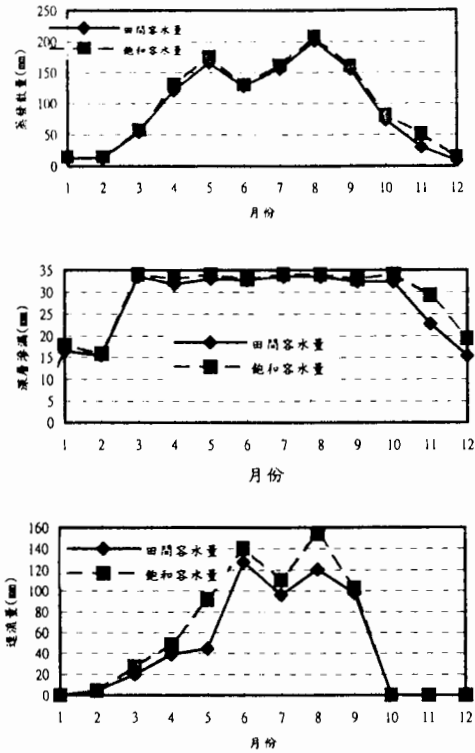
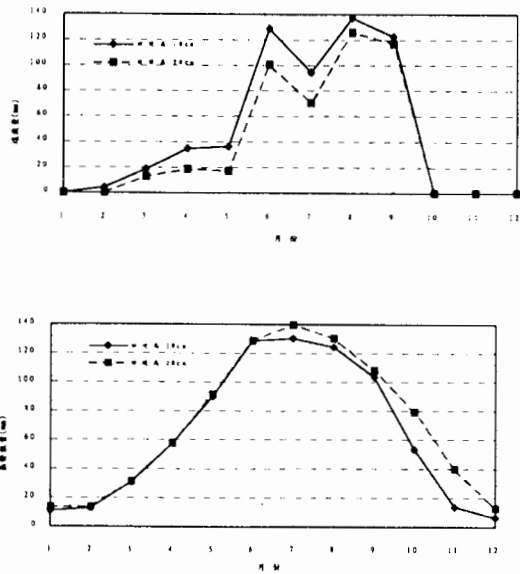


圖 8. 不同灌溉門檻值之各種損失量



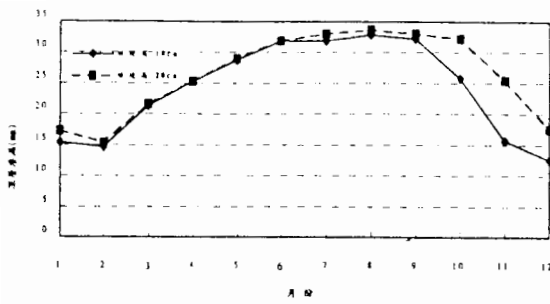


圖 9. 不同山堤高之各種損失量

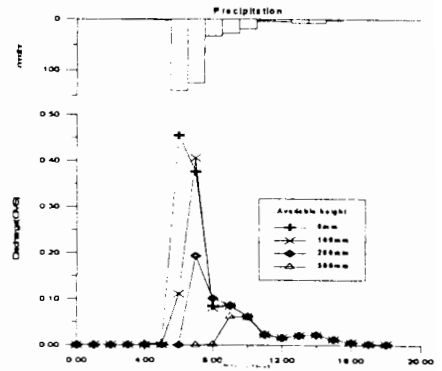


圖 11. 不同蓄水高度之出流歷線
(有效堰寬 $w = 100\text{m}$)

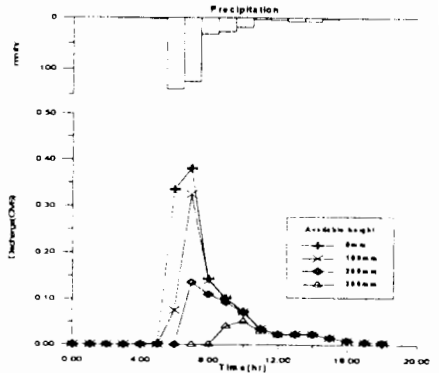


圖 12. 不同蓄水高度之出流歷線
(有效堰寬 $w = 50\text{m}$)

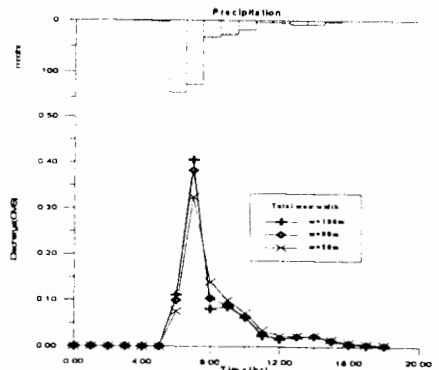


圖 13. 不同有效堰寬之出流歷線
(可蓄水高 $h = 100\text{mm}$)

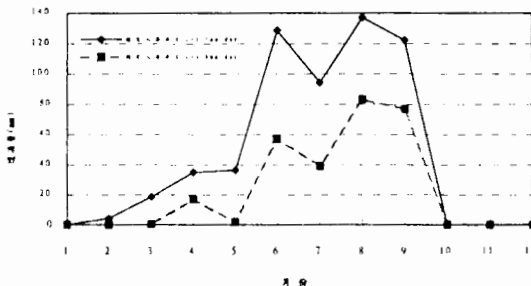
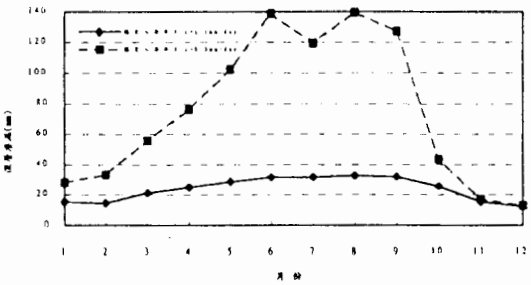
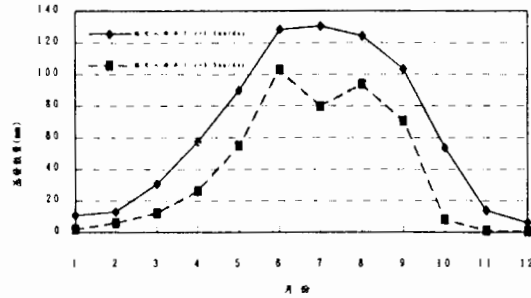


圖 10. 不同穩定入滲率 f_s 之各種損失量

5.2 短期暴雨逕流之分析

短期暴雨逕流部份，圖 11、圖 12 分別為有效堰寬 100m、50m 時，不同蓄水高的出流量比較。圖 13、圖 14 為蓄水高 100mm 及 50mm 時，不同有效堰寬的出流量比較，可發現蓄水高越高，洪峰

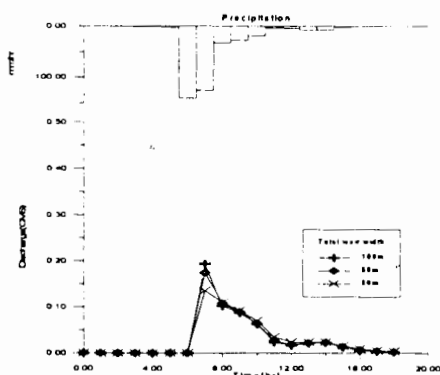


圖 14. 不同有效堰寬之出流歷線
(可蓄水高 $h = 200\text{mm}$)

逕流量會減小，洪峰發生時間也會延後，但不是線性關係。而有效堰寬越大，洪峰流量越大，到後期退水也比較快。因此，有效堰寬較小時，流量的變化比較平緩。

六、結論與建議

(1)如果我們以深層滲漏代表涵養地下水源，逕流量代表調蓄洪水能力，蒸發散代表調節氣候能力。由本研究結果發現，水田在三方面皆具良好之效果，水田休耕仍保有田埂高度時的逕流產生量有時比原水田還少。旱田在三方面效果皆不顯著。其中，水田的逕流量在三項損失因子(蒸發散量、深層滲漏量、逕流量)所佔比例最少，約 27%，而旱田高達 55%。

(2)在敏感度分析方面，若提高灌溉門檻值，由於灌溉量增多，使得田面有積水的時間較長，造成深層滲漏及蒸發散增加，同時也造成逕流量增加。加高田埂高度時。在蒸發散及深層滲漏雖有增加，但變化並不大。在逕流量方面，顯然加高田埂高有較好的蓄留效果。尤其在夏季暴雨發生時，更可凸顯此項功能。此外，若水稻需減產而休耕時，若能打破此牛踏層，如同本模式之穩定入滲率 f_c 增加 5 倍時，則將可增加地下水之補注量 3 倍多。

(3)短期暴雨逕流部份，可發現蓄水高越高，

洪峰逕流量會減小，洪峰發生時間也會延後，但不是線性關係。而有效堰寬越大，洪峰流量越大，到後期退水也比較快。因此，有效堰寬較小時，流量的變化比較平緩。

(4)水田因周邊田埂高度的蓄水效應，在暴雨來時可成為天然的滯洪池，具有調蓄洪水，減低洪峰流量及延緩出流時間的功能，在此面臨入關的壓力下，水田的轉變實在對整個農業環境具有舉足輕重的影響。當水稻因外在或是內在壓力而需調整減少生產面積時，就如同蔡明華(1994)指出，應以減少水稻栽培面積而不作減少水田面積為處理原則。就像休耕時，也維持水田田埂高度，甚至加高田埂出水口高度，以便增大儲蓄豪雨的容量，並可補注地下水源。

(5)短期暴雨逕流之模式最主要應用水文方程式及堰流公式，蠻符合低平農田地表逕流的特性，但其缺點為將整個田區視為一個堰流流出，因為水稻田是逐塊連接的。若能將整個田區以逐塊連接匯集的計算方式，可能會比較妥當。而堰流係數也需精密地由實測來檢定。此外，本模式僅僅假設排水狀況是整面越流過田埂，與實際田埂有缺口寬的情況稍有出入，但缺口寬度若不大，應不至於有太大影響。

(6)在本文只對田埂排水至渠道的情況作分析，並未考慮到渠道流演算，若要考慮到對下游尖峰流量的影響性，則必須將此部份加入。

(7)牛踏層的現象，是今後我們需注意的方向。一般認為，在多年耕作以後，表土之下會逐漸形成較緊密的不透水層，乃水稻田的硬盤，其形成的原因是因為田區經多年使用以後，土壤的部份黏粒由灌溉水沈降至水田中的某一深度而聚集，形成一厚度不同的黏土層，即是牛踏層，此乃熟田的重要特徵。因為此牛踏層的存在，使得滲漏量可減至沒有牛踏層的 1/3 到 1/5。因此現行一些經驗推估之滲漏量實有重新考慮之必要。此外，若水稻需減產而休耕時，若能打破此牛踏層，如同本模式之穩定入滲率 f_c 增加 5 倍時，則將可增加地下水之補注量 3 倍多。

(8)對於旱作的考量，由於水分處在田間容水量至凋萎點之間，在一般灌溉或是配水模式的推

求皆不計算滲漏量，在本模式仍有考慮此滲漏損失。由於旱田土壤水分比水田土壤水份少，故滲漏量比水田少。

(9)本文僅對一般的狀況加以分析，作了一些條件上的假設，實際上在模式中的參數使用具有地域性，隨著土壤質地而改變，因此仍須取得實地的田間資料，或是由實驗的方法來獲得較理想的輸入參數加以模擬，然後再與實際發生狀況，如暴雨颱風來臨時的測得資料，或是農田長期的排水或逕流量，加以驗證。

(10)本研究在長期推估方面，所依據之資料太少(僅十年氣象資料)，其代表性稍嫌不足，僅能代表一個個案。因此，有必要以較完整之資料建立起氣候推估模式，以作為對未來模擬之用。

七、參考文獻

- 1.甘俊二，「台灣之稻作灌溉用水量推估方法之研究」，農田水利，第三十八卷，第六期，第26—34頁，1991。
- 2.甘俊二、許宗民，「水稻耐旱性及節水灌溉對策之調查研究」，台灣水利，第三十二卷，第一期，第4—37頁，1984。
- 3.甘俊二、尤瑤川，「水田渠道系統容量及配水調查及分析研究」，台灣水利，第二十九卷，第二期，第42—66頁，1981。
- 4.台灣省水利局，「水稻田對調蓄洪水功能評估分級(一)」，期中綜合報告，1995。
- 5.吳富春、許銘熙，「水稻田之生態與環境」，農業工程學報，第四十一卷，第四期，第13—19頁，1995。
- 6.吳銘塘，「水田田面逕流之電腦分析研究」，農業工程學報，第二十七卷，第二期，第15—38頁，1981。
- 7.林昭榮，「水田土壤滲透性的改良問題」，農田水利，第三十八卷，第九期，第29—32頁，1992。
- 8.施嘉昌，「水稻田區規劃與灌溉關係之研究」，台灣水利，第二十五卷第二期，第16—39頁，1977。
- 9.施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二，灌溉排水

原理，國立編譯館出版，中央圖書出版社，台北市，1993。

- 10.徐玉標，「農田土壤水分之動態(續)」，農業工程學報，第二十卷，第二期，第1—18頁，1974。
- 11.陳明健，「水田涵養水資源的非市場利益」，台灣土地金融季刊，第三十二卷，第三期，第91—106頁，1995。
- 12.農業工程研究中心，「石門水庫灌區最合理灌溉需水量研究(I)」，1995。
- 13.農業工程中心，「台灣地區農業用水需求量推估之研究」，1990。
- 14.蔡明華、林永德，「因應加入GATT之農業對策研究—水稻田生態環境保護對策」，水資源經營管理研討會(一)論文集，台北，第123—137頁，1994。
15. Aron, G., "Adaption of Horton And SCS Infiltration Equation To Complex Storms", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 118, NO.2, pp.275-284, March/April, 1992.
16. Bauer, S. W., "A modified Horton equation during intermittent rainfall." Hydrol. Sci. Bull., 19(2/6), 219-229, 1974.
17. Hamon, W. R., "Estimating potential evapotranspiration", Proceeding of the American Society of Civil Engineering Journal of the Hydraulics Division, 87 (HY3):107-120, 1961.
18. Mein, R. G., C. L. Larson, "Modeling infiltration during a steady rain", Water Resour. Res., Vol.9, No.2, pp.384-394., 1973.
19. Mwendera, E. J., J. Feyen, "predicting Tillage Effects On Infiltration", Soil Science, Vol.155, No.3, pp.229-235, March, 1993.
20. Mwendera, E. J., J. Feyen, "Tillage And Rainfall Effects on Infiltration And Predictive Applicability of Infiltration Equations", Soil Science, Vol. 156, No.1, pp. 20-27, July, 1993.

收稿日期：民國85年7月24日

接受日期：民國85年9月4日