

逕流再利用系統之回歸水試驗與模擬

Experimental and Modeling Studies on Return Flow in the Runoff Reuse System

農業工程研究中心
助理研究員

簡傳彬

Chuan-Pin Chien

中央大學土木工程研究所
教授兼所長

吳瑞賢

Ray-Shyan Wu

摘要

本研究之目的在建構一個結合最佳化模式並考慮灌溉水量、灌溉期距、水平滲流量及上游回歸水之水平衡模式。桃園農田水利會灌區為台灣地區中具有回歸水供給之一灌溉系統，因此本研究選擇桃園農田水利會 11-2 輪區為範例研究區域，以進行區域蒸發散量、深層滲漏量與回歸水量之推估，並與現地實測資料進行驗證。經由水平衡及最佳化模式，對桃園農田水利會 11-2 輪區以民國 89 年一期作之氣象資料進行運算。結果顯示：在 11-2 輪區原灌溉用水量 $250,990\text{m}^3$ 之條件下，回歸水量為入流量的 56%，地下回歸水量為有效入流量的 14%。經由回歸水再利用，由於第 4 及第 5 單區充分利用上游灌區之回歸水，減少第 4 及第 5 單區灌溉用水量達 54.1% 及 39.8%。使得 11-2 輪區灌溉用水量降低至 $197,644\text{m}^3$ ，即降低灌溉用水量達 21%，顯示經由本模式以估算及利用上游回歸水確可減少灌溉水量，增加水資源使用效益。

關鍵詞：回歸水，地下水補注，水平衡模式，逕流再利用系統。

ABSTRACT

The purpose of the study was to construct a water balance model with optimization scheme. Irrigation demand, intervals, horizontal seepage and upstream return flow are taken into account in the model. The study selected irrigation system operated by the 11-2 rotation block of Taoyuan Irrigation Association (TIA) in Northern Taiwan as an example. The model estimates regional evapotranspiration (ET), infiltration into groundwater aquifer, and return flow. The filed data were also compared with the results from the model for verification. With the climatologic data at TIA at the first

cultivation term in 2000, the water balance model with optimization scheme gives the following results. With original irrigation demand of $250,990\text{m}^3$, the return flow rates were 56% of inflow for the actual water supply; the subsurface return flow rate was 14% of effective consumption for the whole rotation block. The return flow reuse efficiency was 54.1% and 39.8% of irrigation application for rotation unit 4 and unit 5, respectively. The irrigation flow can be reduced to $197,644\text{m}^3$, which is 21% of the original. It is shown that this model can be applied to estimate return flow in designing irrigating schedule in rotation block to conserve water and to increase water consumption efficiency.

Keywords: Return flow, Groundwater recharge, Water balance model, Runoff reuse system.

一、前言

台灣地區近年來由於社會經濟環境的改變，工商業的發達以及人口的增加，造成工商業及公共給水等標的對淡水資源之需求大幅增加，加以環境保護及生態保育概念的興起，使得水資源各標的之利用比例將有所調整。台灣地區之農業用水自民國 75 年起雖已不再成長，且隨著休耕轉作面積之增加而逐年減少，農業年用水量已由 150 億立方公尺降低至 121 億立方公尺（林尉濤，2002），減少幅度達 19%，唯遇乾旱，民生及產業用水仍有供應不足之情形。由於水田灌區之降雨及灌溉用水量，在扣除蒸發散量及深層滲漏量後，其餘部分之水量可經由地表逕流或地下滲流回歸至渠道供給下游灌區使用，此部份回歸至渠道之可利用水量稱為回歸水（Wheeler，1987；Gronning Engineering Company，1989；Oad 等，1997）。此回歸水如能善加利用，將可提高用水效率，減少灌溉供水量。因此，如何充分掌握及運用回歸水以供灌溉及生態等用水為當前之要務。

根據相關文獻記載，回歸水利用最早約於西元 1292 年元朝利用懷、孟、泗、河之漏堰餘水和丹河之餘水以灌田二千餘頃（石朝雄，1982）。而回歸水之分析則起於 1885 年在美國之 Colorado 之 Cache La Poudre 河流域（駱安華，1960）；台灣自 1960 年亦開始進行區域回歸水

之分析（徐龍淵與徐恭也，1986；農業工程研究中心，1996）；相關研究依水資源利用之觀點，對於回歸水之探討標的可區分為已利用回歸水及可利用回歸水二類；二者之差異，在已利用回歸水之計算係以入流量為基礎，探討灌區灌溉入流量中所含之（已利用）回歸水量；而可利用回歸水之計算係以出流量為基礎，探討灌區水量經由地表逕流或地下滲流流出至特定區域或地點（如渠道或下游田區），可供下游灌區使用之水量。由於可利用回歸水量與下游實際取用之回歸水量，將因下游灌區之需水量與灌溉時程之配合情形而有所差異；亦即下游灌區必需有良好的配套措施（如灌溉操作時程與取水設施等）方能充分運用上游回歸水，以減少下游灌區之灌溉供水量。目前在台灣地區對於可利用回歸水之相關研究，均未將回歸水量分析與灌溉操作加以結合，因此本研究以可利用之回歸水為研究標的，將逕流再利用系統之水平衡分析與最佳化模式結合，以計算灌區可利用回歸水量並提供回歸水利用之最佳化灌溉操作時程及灌溉水量，供回歸水利用之參考。

有關模擬水田水流之各種數值模式中，荷蘭農業大學所發展之一維水流模式 SAWAH (Simulation Algorithm for Water flow in Aquatic Habitats) 可模擬多層土壤、飽和-未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 等，1994）。劉振

宇等(1999)即應用此模式於雲林地區水田入滲量之推估。美國賓州州立大學葉高次則發展出一套三維變密度地下水流及傳輸之有限元素法 FEMWATER (Lin 等, 1997)模式, 可以模擬飽和及未飽和層之地下水流, 劉振宇等(2000)及陳世楷與劉振宇(2000)將此模式應用於田中地區水田入滲及對地下水補注之影響。美國地質調查所(USGS)所發展之 MODFLOW 模式, 為一有限差分模式, 此一模式納入 GMS 地下水模擬系統中, 在輸入及輸出上十分便捷, 為分析水田入滲地下含水層之良好數值模擬工具, 吳瑞賢等(1999)及簡傳彬等(2002)應用此模式進行水田砂箱模型之入滲與回歸水模擬。簡傳彬等(2002)所發展之水平衡模式, 經與 MODFLOW 模式及砂箱模型試驗資料比對驗證結果, 證明該模式在計算水田之回歸水量及入滲量上, 具有良好之效果; 唯該模式並未考慮上游回歸水量等因素, 因此本研究以上述水平衡模式為基礎, 增加上游回歸水量並修正蒸發散量及田區水平滲流量之計算方式, 以更符合輪流灌溉及逕流再利用系統之特性。

二、研究方法

2.1 水平衡模式

一般水田水平衡分析之各項機制: 如降雨、作物蒸發散、灌溉引水等, 可由圖 1 表示。在本研究中, 對於整個作物生長期間之灌溉及降雨事件模擬前之起始條件, 係假設在浸整田之前, 田區並無湛水且已知田區耕犁層土壤含水量, 當灌溉或降雨發生後, 如果田區水深超過田埂高度或田埂缺口高度則將產生地表逕流, 其餘則先蓄積於田區內, 再逐漸轉移為作物蒸發散量、田區深層滲漏量及回歸水量。

在水稻田系統中的水文循環, 可以流入量減去流出量等於儲蓄變化量的方程式來表示, 一般水平衡方程式如下所示:

$$I - O = \frac{dS_f}{dt}; \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中 I 為流入量, 包括降雨量、地表水入流量與地下水入流量; O 為流出量, 包括蒸發散量、地

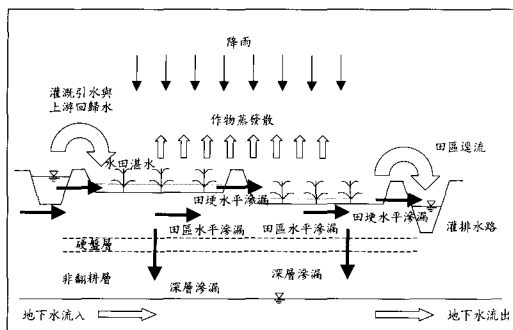


圖 1 水收支平衡示意圖

表水出流量與地下水出流量; S_f 為田間儲蓄水量, 包括田間湛水量與土壤水分含量; t 為時間。

上式之水平衡方程式涵蓋地面水及地下水系統。當以水稻田為控制體積(硬盤層以上部份)時, 則對某一特定時段之水平衡方程式如下所示:

$$P + IN + R^u + R_h^u + R_l^u - ET - DF - R - R_h - R_l = \Delta S_f; \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中 P 為降雨量; IN 為灌溉引水量; R^u 為上游田區逕流入流量; R_h^u 為上游田區水平滲流入流量, R_l^u 為上游田埂水平滲流入流量; ET 為作物蒸發散量; DF 為深層滲漏量; R 為田區逕流出流量; R_h 為田區水平滲流出流量; R_l 為田埂水平滲流出流量; ΔS_f 為田間儲蓄水變化量, 包括田間湛水變化量與耕犁層土壤水分變化量。

當上游田區逕流入流量、上游田區水平滲流入流量與上游田埂水平滲流入流量合稱為上游田區回歸水量; 田區逕流出流量、田區水平滲流出流量與田埂水平滲流出流量合稱為回歸水量時, 則此水平衡方程式如下所示:

$$P + IN + RT^u - ET - DF - RT = \Delta S_f; \quad \dots\dots(3)$$

式中 RT^u 為上游田區回歸水量; RT 為回歸水量。一般而言, 降雨量及灌溉引水量可由現場量測獲得, 因此以下針對作物蒸發散量、深層滲漏量及回歸水量加以探討。

2.1.1 作物蒸發散量(ET)

根據經濟部水利司(1995, 經濟部水利署之前身)對台灣各地區進行作物需水量推估, 結果

顯示以輻射法與 Penman 法之結果適用性較佳。陳清田(1991)以 Penman 等七種方法進行作物需水量之研究，其研究結果顯示 Penman 公式有較高之相關係數；唯因採用 Penman 公式時，需採用淨輻射量加以計算，而台灣地區之農業氣象站，目前多僅有日射量，因此在計算作物蒸發散量時，常需借助相關之理論公式將日射量轉換為淨輻射量，因此簡傳彬與方文村(2002)曾就 Penman 系列公式中之 Penman (Penman, 1963)、FAO Penman-Monteith (Smith, 1990)、FAO Penman-Monteith (Allen 等, 1998)等三種作物蒸發散量之計算方法進行日射量與淨輻射量關係之探討，經由相關係數、誤差平方和及均方根誤差等三個指標上顯示 FAO Penman-Monteith (1998)為最佳之推估方法；故本文對蒸發散量之計算，首先採用 FAO Penman-Monteith 公式(Allen 等, 1998)來計算參考蒸發散量，其方程式如下：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中： ET_0 為參考蒸發散量，mm/day； Δ 為飽和蒸汽壓力曲線斜率，KPa/°C； R_n 為淨輻射量，MJ m⁻²day⁻¹； G 為土壤熱通量，MJ m⁻²day⁻¹； γ 為溼度常數，KPa/°C； u_2 為離地面 2 公尺高之平均風速，m/sec； e_s 為平均氣溫之飽和蒸汽壓力，KPa； e_a 為平均溫度之實際蒸汽壓力，KPa； T 為離地面 2 公尺高之氣溫(°C)。

再由作物耕作型態、種植時間、作物生長階段及生長週期決定作物係數 K_c 值，並考慮 t 時刻之田區耕犁層土壤之水分含量 $V_w(t)$ 及田區湛水深 $D(t)$ ，則作物蒸發散量 ET 之計算式如下：

$$ET(t) = \min \left[K_c(t)ET_0(t) ; D(t) + V_w(t) \right] \quad \dots\dots\dots(5)$$

而田區蒸發散量 $ET_f(t)$ ，如以體積表示，則為作物蒸發散量乘以田區面積 A_r ，如下式

$$ET_f(t) = ET(t)A_r \quad \dots\dots\dots(6)$$

2.1.2 深層滲漏量(DF)

由於前一期作物收割前，田區均需排水並

使田區達一定之乾燥程度，以利收割機具之進行，亦即收割後之田區土壤為未飽和狀態。而當田區進行浸田、整田後，田區將呈湛水狀態，此時田區為飽和，而在整個期作中，為配合施肥等工作，田區又需排水，因此在水田排水後之乾田期間，其田區表層土壤含水量可能為未飽和狀態，因此深層滲漏量之推估，必需考慮田區表層土壤在飽和及未飽和之入滲情形。在土壤未飽和之情形下(此時無湛水深)，土壤潛勢入滲率可由起始入滲率 f_0 開始以指數遞減之表層土壤穩定入滲率 f_c 之入滲方程式，再考慮土壤含水量之情形下，以下式計算潛勢入滲率 f_p ，該方程式如下所示(Chow, 1988；Aron, 1992；Wu 等, 2001)：

$$f_p(t) = f_c + (f_0 - f_c) \frac{S_s - S(t)}{S_s} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中， S_s 為飽和土壤含水量， $S(t)$ 為 t 時刻之土壤含水量。

實際田區表層土壤入滲率 $f(t)$ ，將受限於扣除蒸發散量之田區湛水深及土壤潛勢入滲率，其計算式如下：

$$f(t) = \begin{cases} \min[f_p(t), D(t) - ET(t)] & \text{當 } D(t) \geq ET(t) \\ 0 & \text{當 } D(t) \leq ET(t) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(8)$$

穿過硬盤層之深層入滲率 $f_d(t)$ ，可採用下式加以計算(簡傳彬等, 2002)：

$$f_d(t) = f_c \frac{S(t) - S_w}{S_s - S_w} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中， S_w 為枯萎點；而深層滲漏量 DF 則為深層入滲率乘以田區面積 A_r ，如下式

$$DF(t) = f_d(t)A_r \quad \dots\dots\dots(10)$$

2.1.3 回歸水量(RT)

回歸水量包括田埂水平滲流出流量、田區水平滲流出流量及田區逕流出流量。分述如下：

(1) 田埂水平滲流出流量(R_1)

假設田埂具有水平之底部、並具有相同之田埂水力傳導係數 K_1 及水流為不可壓縮流之一維水平流動，依據達西定律及採用非拘限流之

Dupuit's assumption, 則整個田區之田埂水平滲流量可以下式表之 :

$$R_i(t) = \frac{K_1}{2L} (h_0(t)^2 - h_2(t)^2) L_e ; \dots\dots\dots(11)$$

式中, h_0 為田埂上游側之田區水頭高; h_2 為田埂下游側田區或渠道之水頭高; L 為田埂寬度; L_e 為有效田埂長度。

(2) 田區水平滲流出流量(R_h)

田區水平滲流出流量係指在硬盤層上方之耕犁層土壤水平滲流量, 假設地下水水面低於硬盤層且田區耕犁層水力傳導係數大於硬盤層水力傳導係數之條件下, 在田埂下方之總流量(q_t) 可以單層等值土層厚度(m)及等值土層水力傳導係數(K^*)加以計算, 其方程式如下(Kovacs, 1981) :

$$q_t = \frac{K^* (h_0 - h_2)}{\pi} \operatorname{arcsinh}(3.0 \frac{m}{L}) ; \dots\dots\dots(12)$$

式中等值土層厚度(m)為硬盤層厚度(m_1)與耕犁層厚度(m_2)之和, 而等值土層水力傳導係數(K^*)則以下式加以計算 :

$$K^* = K_2 \left[\frac{K_3}{K_2} + \left(1 - \frac{K_3}{K_2}\right) \frac{\operatorname{arcsinh}(3.0 \frac{m_1}{L})}{\operatorname{arcsinh}(3.0 \frac{m}{L})} \right] ; (13)$$

式中 K_2 為耕犁層水力傳導係數, K_3 為硬盤層水力傳導係數。

田區水平滲流出流量(即耕犁層之水平滲流量, R_h) 相對於總流量之比率可以下式表之 (Kovacs, 1981) :

$$R_h = q_t \frac{\operatorname{arcsinh} \left[1.2 \frac{m}{L} \left(\frac{m_1}{m} \right)^{\left(\frac{K_3}{K_2} \right)^{2/3}} \right]}{\operatorname{arcsinh} \left(1.2 \frac{m}{L} \right)} ; \dots\dots(14)$$

由於整個期作期間, 田間為配合施肥、晒田而進行排水, 因此田間之耕犁層土壤將有數次產生未飽和之情形, 因此在水平分析上, 須考慮未飽和之情形。未飽和土壤之水力傳導係數(K_u) 與耕犁層飽和水力傳導係數之關係, 可以表為土壤飽和度之函數(Todd, 1980) ; 即

$$\frac{K_u(t)}{K_2} = \left(\frac{S_D(t) - S_0}{1 - S_0} \right)^3 ; \dots\dots\dots(15)$$

將上式代入式 13, 再代入式 12 及式 14 中, 可得下式 :

$$R_h(t) = K_2 \left(\frac{S_D(t) - S_0}{1 - S_0} \right)^3 \left[\frac{K_3}{K_2 \left(\frac{S_D(t) - S_0}{1 - S_0} \right)^3} + \left(1 - \frac{K_3}{K_2 \left(\frac{S_D(t) - S_0}{1 - S_0} \right)^3} \right) \frac{\operatorname{arcsinh}(3.0 \frac{m_1}{L})}{\operatorname{arcsinh}(3.0 \frac{m}{L})} \right] \frac{\operatorname{arcsinh} \left[1.2 \frac{m}{L} \left(\frac{m_1}{m} \right)^{\left(\frac{K_3}{K_2} \right)^{2/3}} \right]}{\operatorname{arcsinh} \left(1.2 \frac{m}{L} \right)} \frac{(h_0(t) - h_2(t)) \operatorname{arcsinh}(3.0 \frac{m}{L})}{\pi} ; \dots\dots\dots(16)$$

式中 S_0 為起始飽和度(threshold saturation) ; $S_D(t)$ 為 t 時刻之土壤飽和度。

(3) 田區逕流出流量(R)

田區逕流出流量即地表回歸水量, 係指降雨及灌溉用水引入田區後, 由於田區水深超過田埂缺口高度或田埂高度, 產生溢流之水量。本研究對於田區逕流出流量, 以堰流公式加以計算。將水田視為一蓄水庫, 故可以水文系統儲蓄量改變之觀念, 再配合堰流公式, 而得到入出流量演算關係式, 以計算由於田區水深超過田埂缺口高度或田埂高度產生溢流的地表回歸水量; 當田區水深高於田埂缺口高度, 而未達田埂高度時, 田區逕流出流量為流經田埂缺口之溢流量, 則田區逕流出流量可以下式表示 :

$$R = C_w L_D H_c^{3/2} ; \dots\dots\dots(17)$$

式中 R 為田區逕流出流量; C_w 為無因次流量係數; L_D 為田埂缺口寬度; H_c 為田埂缺口水頭。

若田區水深繼續升高, 使得田區水深超過田埂高度, 田區逕流出流量為田埂缺口逕流量與田埂逕流量的總和, 其計算式如下 :

$$R(t) = C_{wb} L_{eb} H_b(t)^{3/2} + C_w L_D H_c(t)^{3/2} ; \dots\dots(18)$$

式中 C_{wb} 為無因次流量係數； L_{eb} 為扣除田埂缺口寬度之田區田埂有效長度； H_b 為田埂頂端上的水頭。

假定田區為一蓄水庫，則灌溉或降雨後由於田區湛水深增加之田區蓄水量改變量可以下式表示(Bedient and Huber, 1992)：

$$dV = A_r(H)dH ; \dots\dots\dots(19)$$

式中， V 為田區蓄水量； $A_r(H)$ 為高度 H 時之田區面積； H ：蓄水深度。

再由連續方程式

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(H) ; \dots\dots\dots(20)$$

式中 Q_{in} 為入流量； Q_{out} 為出流量； V 為蓄水量。將式 19 代入式 20，得

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_{in}(t) - Q_{out}(H)}{A_r(H)} . \dots\dots\dots(21)$$

採用二階 Runge-Kutta (R-K) method 進行求解，其計算方式如下(Bedient and Huber, 1992)：

$$\Delta H_1 = \frac{Q_{in}(t_n) - Q_{out}(H_n)}{A_r(H_n)} \Delta t ; \dots\dots\dots(22)$$

$$\Delta H_2 = \frac{Q_{in}(t_n + \Delta t) - Q_{out}(H_n + \Delta H_1)}{A_r(H_n + \Delta H_1)} \Delta t ; \dots\dots\dots(23)$$

$$\Delta H = \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{2} ; \dots\dots\dots(24)$$

$$H_{n+1} = H_n + \Delta H . \dots\dots\dots(25)$$

亦即式 11、16、17、及式 18 之 h_0 、 H_c 及 H_b 係依前述方式計算下一時刻之水頭高。

田區下一時刻之田間儲蓄水量（含田區湛水深與耕犁層土壤之水分含量） $S_f(t + \Delta t)$ ，其計算式如下：

$$S_f(t + \Delta t) = S_f(t) + (P(t) + IN(t) + RT^u(t) - ET_f(t) - DF(t) - R_h(t) - R(t))\Delta t ; \dots\dots\dots(26)$$

當由式 26 所計算得下一時刻之田間儲蓄水量大於耕犁層最大土壤水分含量（耕犁層土壤飽和時

之最大蓄水量）時，則下一時刻之耕犁層土壤水分含量 $V_w(t + \Delta t)$ 與田區湛水深 $D(t + \Delta t)$ ，其計算式如下：

$$V_w(t + \Delta t) = V_{w,max} \dots\dots\dots(27)$$

$$D(t + \Delta t) = S_f(t + \Delta t) - V_w(t + \Delta t) . \dots\dots\dots(28)$$

式中 $V_{w,max}$ 為耕犁層土壤飽和時之最大蓄水量。唯如由式 26 所計算得下一時刻之田間儲蓄水量小於耕犁層最大土壤水分含量（耕犁層土壤飽和時之最大蓄水量）時，則下一時刻之耕犁層土壤水分含量與田區湛水深，其計算式如下：

$$D(t + \Delta t) = 0 . \dots\dots\dots(29)$$

$$V_w(t + \Delta t) = S_f(t + \Delta t) . \dots\dots\dots(30)$$

而耕犁層下一時刻土壤含水量(%)可由耕犁層之土壤水分含量 $V_w(t + \Delta t)$ 與土壤孔隙體積 V_f 加以計算，如下式：

$$w(t + \Delta t) = \frac{V_w(t + \Delta t)e}{V_f \rho_s} ; \dots\dots\dots(31)$$

式中 ρ_s 為土壤顆粒比重； e 為土壤孔隙比。

2.2 最佳化模式

對於一個灌區而言，可以年總淨收入最大為目標，令單區 k 之毛收益為 I_k ，總費用為 TC_k ，而整個灌區之年總淨收益為各單區年淨收入之總和，則目標函數可為下式(Loucks, 1981)：

$$Max \sum_k (I_k - TC_k) . \dots\dots\dots(32)$$

在台灣地區中，單位面積之水稻稻穀產量可依據過去之水稻稻穀產量加以估算，若每公頃之稻穀產量以 y 表示，而單區中之水稻種植面積為 A_k ，則單區的毛收益 I_k ，就是單位產量乘以水稻種植面積再乘以稻穀單價 P_r ；對於單區 k 所需之計畫水量 Q_k ，為單位需水量 \bar{q}_k 乘以單區之水稻種植面積 A_k 。當供應水量為計畫需水量 Q_k 時，在不考慮其他之因素影響下，作物之產量可達預期之目標效益，唯當其配水量，較計畫用水量減少 D_k 或增加 E_k 之水量時，將產生收益之減少；其中配水量較計畫水量增加，將產生收益之減

少，係因增加之配水如能節省下來，將可供應民生及工業用水使用，因此就整體而言，將產生收益之減少。對於單區 k 之總費用，係所有投入資源之總和加上借用資本之費用。則對整個灌區，目標函數可以下式表之（簡傳彬與方文村，2000）：

$$\begin{aligned} \text{Max } NB = \sum_k \left[\frac{P_r y}{q_k} Q_k - L(D_k) - G(E_k) - TC_k^D - \right. \\ \left. TC_k^W - TC_k^F - TC_k^L - TC_k^E - TC_k^S - rM_k^B \right] \end{aligned} \quad (33)$$

其中 NB 為淨收益(Net Benefit)； P_r 為稻穀單價； y 為每公頃之稻穀產量； q_k 為單位需水量； Q_k 為單區 k 之計畫需水量； $L(D_k)$ 為配水量較計畫用水量減少 D_k 時之收益減少函數； $G(E_k)$ 為配水量較計畫用水量增加 E_k 時之收益減少函數； TC_k^D 、 TC_k^W 、 TC_k^F 、 TC_k^L 、 TC_k^E 、 TC_k^S 、 rM_k^B 分別為單區 k 全年所需土地、水、肥料及農藥、勞力、設備、秧苗、借用資金的費用。

有關水的費用 $\sum_k TC_k^W$ ，由於本系統具有降雨、灌溉供水（可包括池塘集水、攔河堰取水及水庫水源，唯 11-2 小組並無攔河堰取水）及上游回歸水等水源，故將式 33 中所有水源之費用，改為依各水源計算，而非分單區計算。各種水源之單位成本 C 各不同，以其上標 p 、 r 、 c 分別代表降雨、上游回歸水及灌溉供水等透過圳路供給水量之成本，則灌區之用水費用可以各水源之單位成本乘以水量之總和表示，即式 33 可修改成：

$$\begin{aligned} \text{Max } NB = \sum_k \left[\frac{Pr y}{q_k} Q_k - L(D_k) - G(E_k) - TC_k^D - TC_k^F \right. \\ \left. - TC_k^L - TC_k^E - TC_k^S - rM_k^B \right] - C^p P - C^r RT^u - C^c IN \end{aligned} \quad (34)$$

且令

$$b_k = \frac{Pr y}{q_k} - \frac{TC_k^D - TC_k^F - TC_k^L - TC_k^E - TC_k^S - rM_k^B}{Q_k} \quad (35)$$

則式 34 可簡寫為

$$\begin{aligned} \text{Max } NB = \sum_k [b_k Q_k - L(D_k) - G(E_k)] - C^p P - C^r RT^u - C^c IN \end{aligned} \quad (36)$$

式(36)就是將年總淨收入之最大化表示成各種水量之函數(各種水量包含： Q_k 、 D_k 、 E_k 、 P 、 RT^u 、 IN)，而其係數(如 b_k 、 C^p 、 C^r 、 C^c)則表現各水量與目標函數之比例關係。

本研究之最佳化模式的時間變化單位為日，並以一個期作之供應水量變化為研究主題，由於研究區域第一期作之灌溉日數為 120 天，為避免田區耕犁層土壤起始含水量之設定值可能引起之計算誤差，將模擬時間延長為 145 天，藉由插秧前之浸田及整田，將可使田區含水量與現地相符合，所以各供需水量皆會有 145 個變化值，並假設灌溉供水對每一單區之一次供水量為已知，亦即模式僅決定供不供水，以簡化此一最佳化模式。以下標 i 表示為 1 至 145 日之變化， k 表不同之單區，本研究最佳化模式之目標函數由式 36 可改寫為下式：

$$\begin{aligned} \text{Max } NB = \sum_{i=1}^{145} \left\{ \sum_k [b_k Q_{k,i} - L(D_{k,i}) - G(E_{k,i})] \right. \\ \left. - C^p P_i - C^r RT_i^u - C^c IN_i \right\} \end{aligned} \quad (37)$$

式 37 乃將 145 個日變化下各單區之毛收益扣除各水源之用水成本費用。限制方程組為求簡化符號，以某一單區之變化作說明：

(1) 田區之指定期初儲蓄水量：

$$S_{f_1} = Cpi \quad (38)$$

式中之 S_{f_1} 為該田區第 1 日之起始儲蓄水量； Cpi 為田區之期初已知儲蓄水量。

(2) 田區儲水及供水量變化：

$$\begin{aligned} S_{f_{i+1}} = S_{f_i} + P_i + IN_i + RT_i^u - ET_i - DF_i - RT_i \\ - FD_i \end{aligned} \quad (39)$$

式中之 FD_i 為該田區之不足水量。

(3) 田區之儲蓄水量限制：

$$S_{f_i} \leq S_{f_i} \text{ max} \quad (40)$$

$$S_{f_i} \geq S_{f_i} \text{ min} \quad (41)$$

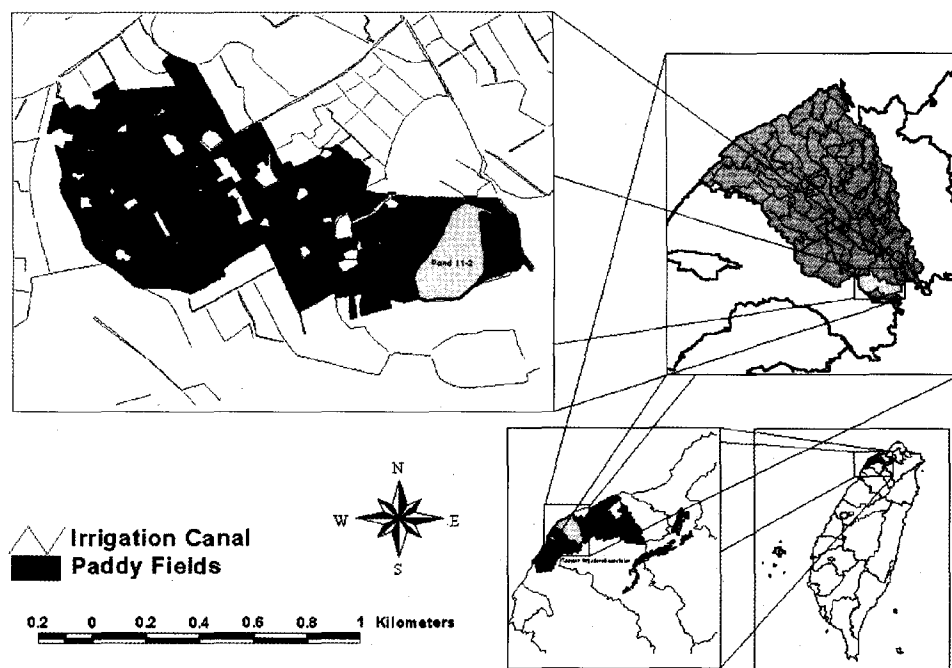


圖 2 桃園大圳 11-2 小組位置圖

式中之 $S_f \max$ 為該田區最大蓄水量，即田區之土壤飽和時之水分含量加上田區最大可蓄水深，其中田區最大可蓄水深將因生長期間之田埂缺口高度而改變。 $S_f \min$ 為田區最小蓄水量，即符合作物生長條件下之田區耕犁層最少土壤水分含量（除晒田與收割期間外，大部分的作物生長期間為維持水稻之生長，田區土壤至少應有 85% 以上之飽和度）或田區之土壤飽和含水量加上田區最少之蓄水深，此蓄水量將因生長期間而改變。

三、研究案例分析

3.1 研究區域概述

本研究選擇桃園農田水利會 11-2 輪區為範例研究區域，研究區域在灌溉管理上為桃園農田水利會觀音工作站第 11-2 小組，在灌溉水路系統上屬桃園大圳 11 支線，其位置如圖 2 所示。並於桃園大圳 11-2 小組之灌區($24^{\circ} 58.391' N$ 、 $121^{\circ} 06.960' E$) 進行試驗觀測。11-2 小組灌區除了第 7 單區為直灌區及第 6 單區過於零散外，本研究

於其餘 5 個單區中設置 9 個自計流量站及 40 個人工觀測站，其系統及觀測站設置位置如圖 3 所示；測站編號、種類與測站所在渠道位置如表 1 所示。由圖 3 中顯示灌區之主要水源為 11-2 號池，11-2 號池之原水來自石門水庫水源經由桃園大圳供給及池塘集水等，經蓄積於池塘中，配合灌溉計畫進行供水調度至田區供水灌溉；其餘尚有上游田區之回歸水經由 A33、A34 及 A35 等觀測站之渠道進入本灌區。此外，本研究繪製灌溉網路系統圖如圖 4 所示，圖中四方形代表單區，圓形為流量觀測站，以顯示各單區與流入、流出測站間之關係，例如第 2 單區之流入測站有 A21、A22 及 A23 等觀測站，流出測站有 A24、A25 與 A27 等觀測站，以作為水平衡及最佳化模式運算之參考。

經由現地採集土樣進行分析結果，田區土壤依據土壤三角形分類法為黏質壤土；表土之土壤分析結果，其組成為黏土 29%，粉土 46% 及砂土 25%。裏土之土壤分析結果，其組成為黏土 37%，粉土 39% 及砂土 24%。表土之飽和含水量

表 1 測站編號、種類與測站所在渠道位置

測站編號	測站種類	測站所在渠道位置	測站編號	測站種類	測站所在渠道位置
A01	自計流量站	11-2 號 1 號主給	A29	人工觀測站	11-1 號 1 號主給 3 號給水
A02	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 1 號給水	A31	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 10 號給水
A03	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 2 號給水	A32	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 11 號給水
A11	自計流量站	11-2 號 1 號主給 2 號給水	A33	人工觀測站	11-3 號 1 號主給 25 號給水
A12	人工觀測站	11-2 號 1 號主給	A34	人工觀測站	11-3 號 1 號主給 30 號給水
A13	自計流量站	11-2 號 1 號主給 3 號給水	A35	人工觀測站	11-3 號 1 號主給 30 號給水
A14	自計流量站	11-2 號 1 號主給	A36	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 13 號給水
A15	自計流量站	11-2 號 1 號主給	A37	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 13 號給水
A16	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 4 號給水	A38	人工觀測站	11-3 號 1 號主給 1 號給水
A17	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 5 號給水	A39	人工觀測站	11-2 號 1 號主給
A18	自計流量站	11-2 號 1 號主給 6 號給水	A310	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 12 號給水
A19	自計流量站	11-2 號 1 號主給 2 號給水	A311	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 11 號給水
A110	自計流量站	11-2 號 1 號主給 2 號給水	A312	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 10 號給水
A111	自計流量站	11-2 號 1 號主給 6 號給水	A41	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 8 號給水
A112	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 3 號給水	A42	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 27 號給水
A113	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 6 號給水	A43	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 29 號給水
A114	人工觀測站	側壁排水	A44	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 11 號給水
A21	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 7 號給水	A45	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 30 號給水
A22	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 8 號給水	A46	人工觀測站	11-1 號 1 號主給 8 號給水
A23	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 9 號給水	A47	人工觀測站	大排
A24	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 9 號給水	A51	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 14 號給水
A25	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 8 號給水	A52	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 19 號給水
A26	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 2 號給水	A53	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 14 號給水
A27	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 7 號給水	A54	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 19 號給水
A28	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 2 號給水	A61	人工觀測站	11-2 號 1 號主給 15 號給水

為 37.5%，凋萎點為 12.5%。此外，本研究於第三單區設置 8 個湛水深觀測點，以量測田區湛水深之變化，提供水平衡模式驗證之用。

3.2 分析流程

水平衡及最佳化分析之流程如圖 5 所示。其步驟分述如下：

(1) 田區基本資料輸入

基本資料包括田區長度、田區寬度、田埂高度、田埂寬度、田區土壤特性等。

(2) 氣象資料輸入

本研究採用桃園區農業改良場之農業氣象資料，包括氣溫、降雨量、風速、日射量、露點溫度等資料。

(3) 灌溉水量輸入

包括灌溉水量與上游回歸水量；本部份資料可為原計畫（未考慮回歸水再利用）之灌溉水量或經由最佳化模式計算所得之灌溉水量及灌溉時程。

(4) 水平衡模式計算

依據前述之水平衡模式（式 4 至式 31），以計算田區深層滲漏量、蒸發散量、回歸水量與田區耕犁層土壤含水量；計算流程如圖 6 所示。

(5) 最佳化模式分析

依據前述輸入資料之計算，可獲得輸入條件之田區回歸水量、蒸發散量與深層滲漏量等輸出資料，此輸出資料可作為最佳化模式之輸入資料以進行最佳化灌溉水量與灌溉時程分析。以 11-2

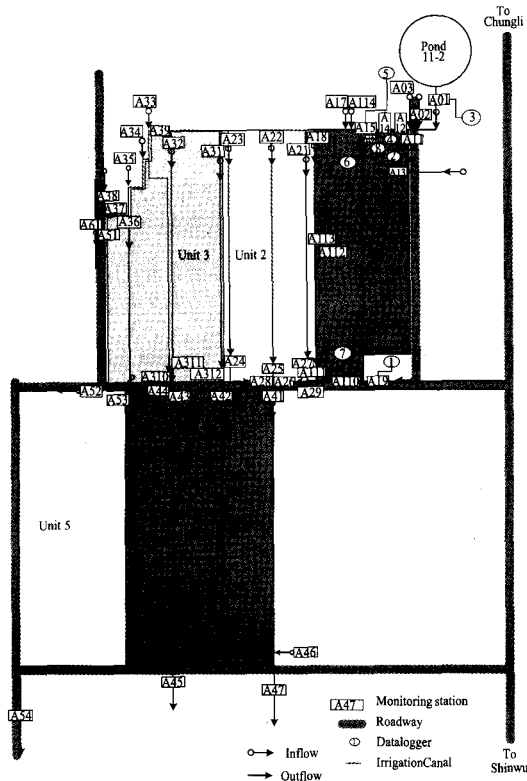


圖 3 桃園大圳 11-2 小組灌溉系統示意圖

輪區為例，在原計畫灌溉水量條件下，經由水平衡模式可獲得各單區之回歸水出流量；由於第 3 單區之流出點如 A311、A312 等連接第 4 單區之 A42、A37 連接第 5 單區之 A51 等流入測站，因此第 4 及第 5 單區將可利用第 3 單區經由 A311、A312 及 A37 流出之回歸水量。因此本研究將第 3 單區流出之回歸水量代入最佳化模式中，以計算第 4 及第 5 單區最佳化之灌溉水量與灌溉時程。

3.3 目標函數之參數說明

本研究以民國 89 年之氣象資料進行水平衡與最佳化模式之演算，因此目標函數之相關參數，採取當年或較近年份之數據以求得較為真實之模擬。根據經濟部水資源局（1998）之資料，北部地區農業用水之用水量為每公頃 20,984 立方公尺。又依據行政院農業委員會之台灣地區稻穀生產成本調查報告（民國九十年第一期，

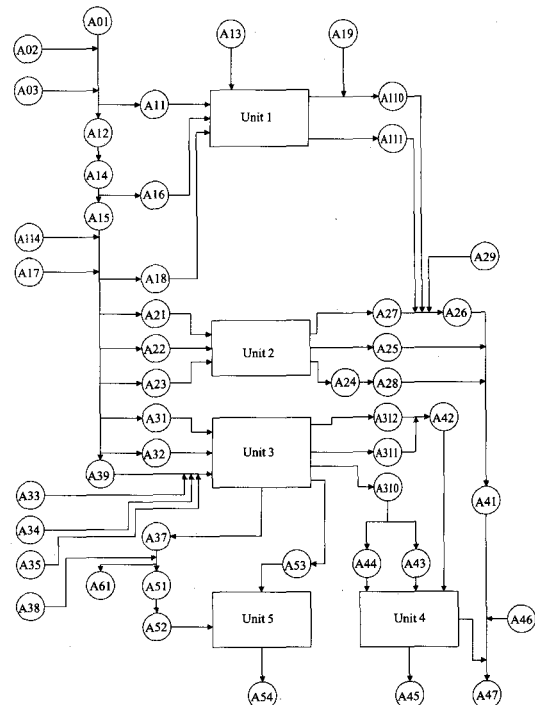


圖 4 桃園大圳 11-2 小組灌溉網路系統圖

2002)，於 89 年一期作之收入為每公頃 113,598 元，其支出費用包括肥料費用每公頃 6,364 元，農藥費用每公頃 5,035 元，種苗籽費用每公頃 7,394 元，除草劑費用每公頃 1,436 元，勞力費用每公頃 63,501 元，材料費用每公頃 277 元，抽水費用 1,276 元，間接費用(含農舍、農具、水利會費、設算地租及資金利息)17,692 元，共計 102,975 元。89 年度二期作之收入為 96,267 元，其支出費用包括肥料、農藥、種苗籽、除草劑及材料費共計每公頃 20,458 元，勞力費用每公頃 60,707 元，抽水費用 869 元，間接費用(含農舍、農具、設算地租及資金利息，本期作之水利會費停徵，未來如再徵收水利會費，則可在此間接費用中計入) 14,003 元，共計 96,037 元。故每立方公尺用水之收益為 0.5 元。假設不考慮自工工資(一期作為 25,192 元，二期作為 25,189 元)、設算地租及資金利息等費用，則每公立方公尺之收益為 4.4 元。於本研究中考慮 67%之自工工資(即不考慮 33%自工工資、設算地租及設算利息等費用)下，假設每立方公尺用水之收益為 2.8 元。

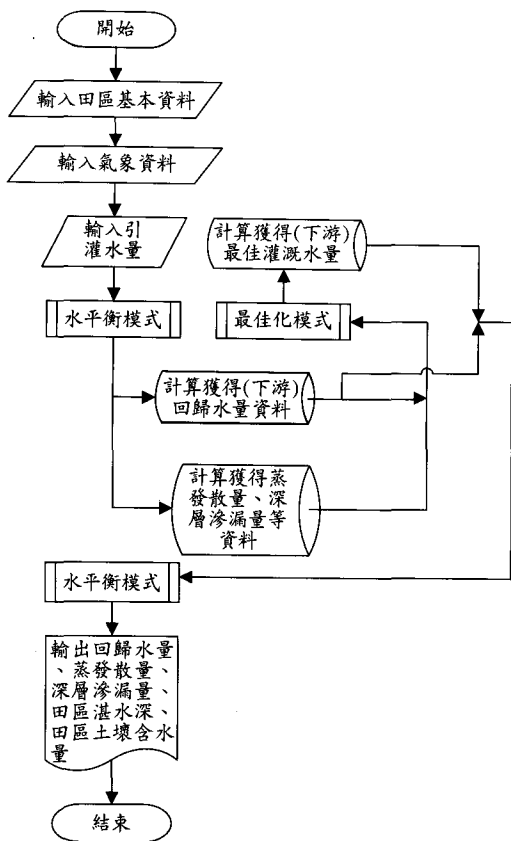


圖 5 水平衡及最佳化模式運算流程圖

溢流水如能節省下來供應民生及工業用水使用，依據經濟部水資源統一規劃委員會(1995)之資料，自來水公司移用桃園農田水利會之用水，移用水單價為 1.55 元(民國 82 年)，考慮 82 年一期作當時之稻穀收購價格為每公斤 19 元，於 89 年一期作為 21 元，因此移用水單價依收購價格比例調整為 1.7 元，假設溢流之損失為移用水之單價，即為每立方公尺 1.7 元。此外，在乾旱時期水量不足時，常移轉農業用水供民生用水及工業用水使用，除原有移用水時所增加之加強灌溉管理費用 1.7 元之外，同時亦增加農民之損失約 0.3 元，故假設不足水量之損失為每立方公尺 2.0 元。又依據自來水公司移用桃園農田水利會之用水中之水庫調配單價為 0.85 元(民國 82 年)，本研究亦依據收購價格比例修正為 0.9 元。至於回歸水假設渠道之使用費為 0.018

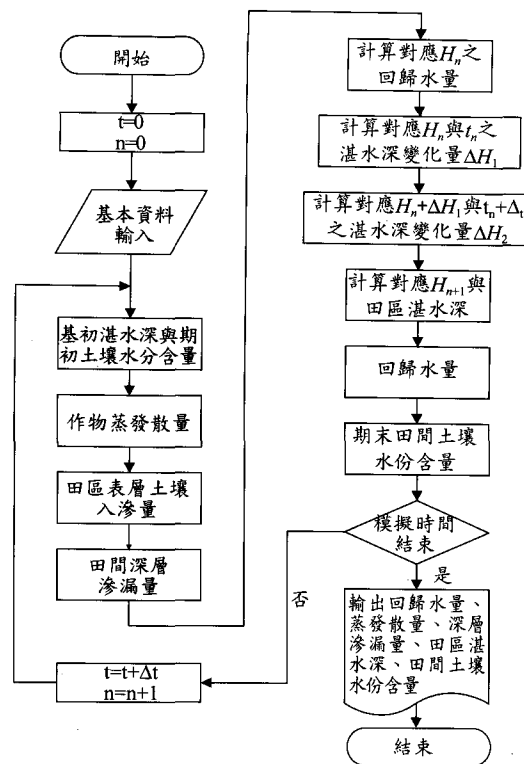


圖 6 水平衡模式運算流程圖

公斤之稻穀，即每立方公尺 0.4 元，而降雨，假設為回歸水用水單價之半，即每立方公尺 0.2 元。灌溉系統最佳化模式的目標函數，在所述之限制式下，尋求最大之收益。因之，根據上面之成本單價分析，式 37 可寫成如下：

$$\begin{aligned}
 \text{Max } NB = \sum_{i=1}^{145} \left\{ \sum_k [2.8Q_{k,i} - 2.0D_{k,i} - 1.7E_{k,i}] \right. \\
 \left. - 0.2P_i - 0.4RT_i^u - 0.9IN_i \right\} \dots\dots\dots(42)
 \end{aligned}$$

四、結果與討論

本研究於民國 90 年 5 月 25 日至 6 月 20 日，在第三單區依據水平衡模式之計算流程(詳如圖 6)進行田間水量計算，最後由式 28 或式 29 計算得模擬湛水深如圖 7 所示，經與第三單區之田間湛水深實際觀測結果比較；模擬結果與觀測結果相當接近，且趨勢相當吻合；顯示本模式適合於輪灌系統下之田間模擬。

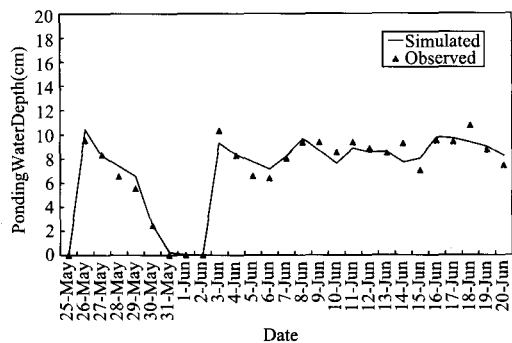


圖 7 第三單區之試驗量測與模擬之田間濕水深

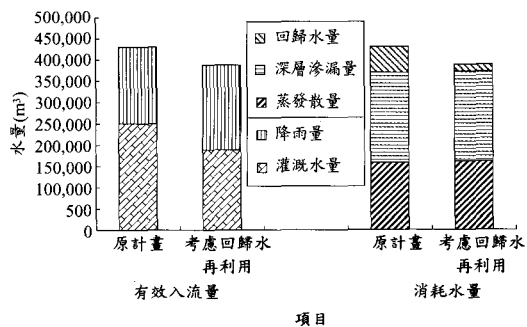


圖 9 民國八十九年一期作原計畫與考慮回歸水再利用之有效入流量與消耗水量比較

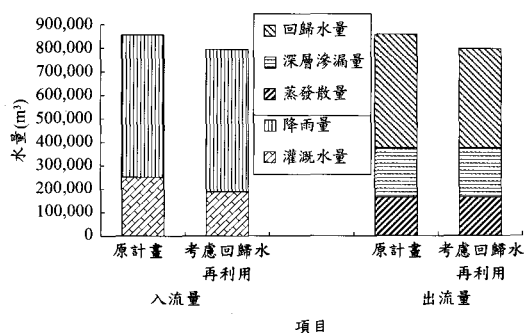


圖 8 民國八十九年一期作原計畫與考慮回歸水再利用之入流量與出流量比較

依據桃園縣新屋地區民國 89 年第一期作之之氣象資料 (包括氣溫、露點溫度、相對溼度、降雨量、風速、蒸發量、日照時數、日射量等)、灌溉水量、田區土壤特性及圖 5 及圖 6 之流程圖，進行水平衡及最佳化模式之模擬。模擬之情況區分為二種：情況一為未考慮回歸水再利用，其灌溉水量係配合農田水利會灌溉計畫及降雨量所擬定之 (原計畫) 灌溉供水量。情況二為考慮回歸水再利用，其灌溉水量係先由情況一計算得各單區之回歸水量，計算所獲得之結果中，由於第 1、2 及 3 單區之回歸水出流量可供第 4 及第 5 單區使用，因此將所獲得之回歸水量代入最佳化模式中，以計算出最佳之第 4 及第 5 單區灌溉水量及灌溉時程；再將最佳之第 4 及第 5 單區灌溉水量及灌溉時程代入水平衡模式中以計算整個輪區 (含各單區) 之回歸水量、深層滲漏量與蒸發散量，二種情況之結果與討論分述如下：

1. 未考慮回歸水再利用之情況下，水平衡分析結果如圖 8 及圖 9 所示，圖 8 顯示桃園農田水利會 11-2 輪區第 1 至第 5 單區，民國 89 年一期作之灌溉面積為 46.5485 公頃，灌溉用水量約為 250,990 m³，降雨量約為 604,898 m³；而回歸水量約為 480,810 m³ 佔入流量之 56%；深層滲漏量為 210,715 m³ 佔入流量之 25%；而由圖 9 顯示扣除無效降雨產生之地表逕流量，有效入流量約為 430,344 m³，而地下回歸水量為 60,942 m³，佔有效入流量 (不含地表逕流量) 的 14%。
2. 在考慮回歸水再利用之最佳化模擬情況下，水平衡分析結果如圖 8 及圖 9 所示，圖 8 顯示桃園農田水利會 11-2 輪區民國 89 年一期作之灌溉用水量為 197,644 m³，較原計畫 (未考慮回歸水再利用) 灌溉水量減少約 53,346 m³；此水量之差額係由回歸水再利用量加以補充；在整個系統中，回歸水再利用量係在系統中運作，因此在入流量與出流量中並不存在。而對出流量而言，考慮回歸水再利用後，由於部分回歸水量之再利用，將使回歸水量由原計畫 (未考慮回歸水再利用) 之 480,810 m³ 降低至 428,929 m³，減少約 51,881 m³；此值 (51,881 m³) 與灌溉水量之減少量 (53,346 m³) 的差額，係由於灌溉水量之改變亦造成深層滲漏量之減少，唯其量甚微，僅 1,465 m³ 佔原深層滲漏量之 0.7%。顯示灌溉水量之減少，係由於系統中之下游

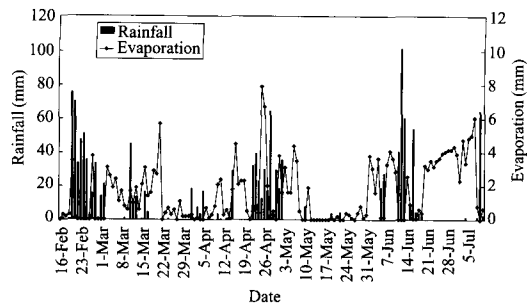


圖 10 民國八十九年一期作期間之降雨量與蒸發量
(16/Feb./2000-10/Jul./2000)

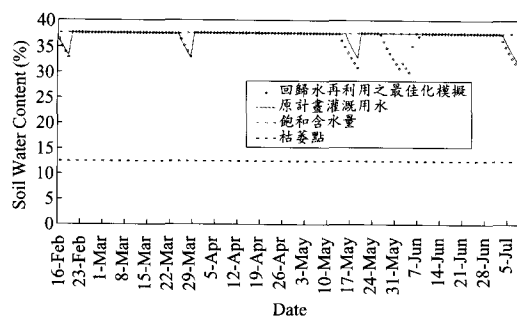


圖 12 民國八十九年一期作期間第四單區之模擬田間含水量

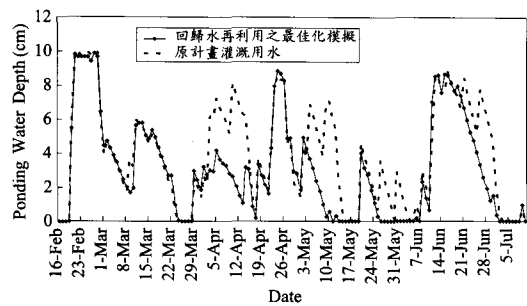


圖 11 民國八十九年一期作期間第四單區之模擬田間湛水深

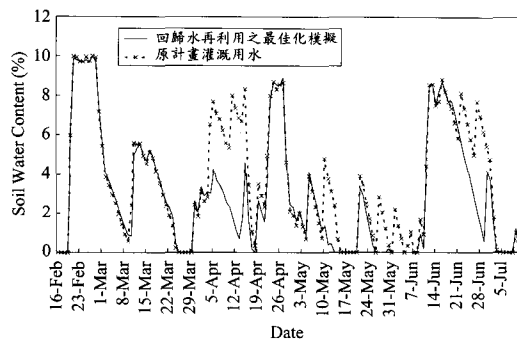


圖 13 民國八十九年一期作期間第五單區之模擬田間湛水深

第 4、5 單區使用上游灌區（第 3 單區等）之回歸水量，而降低灌溉用水量達 21%。

- 圖 10 為民國八十九年第一期作期間之降雨量與蒸發量圖，圖中顯示降雨量集中於 2 月 19 日至 3 月 2 日（降雨量達 401.0mm）、4 月 22 日至 5 月 2 日（降雨量達 307.5mm）與 6 月 11 日至 6 月 19 日（降雨量達 276.0mm）等三個時段，此外於收割期間之降雨量亦達 70.0mm；前述四個時段之降雨量約佔整個期作降雨量 1299.5mm 之 81%。由於降雨量過於集中，將使得大部分之降雨量由田埂溢流至渠道中，無法供該田區之作物使用，且收割期間之降雨量亦對作物之生長沒有幫助。
- 圖 11 為第 4 單區原計畫（未考慮回歸水再利用）灌溉用水下之模擬湛水深與考慮回歸水再利用之最佳化灌溉用水下之模擬湛水深比較圖，而圖 12 為第 4 單區原計畫灌溉用水下之模擬田間含水量與考慮回歸水再利用之最

佳化灌溉用水下之模擬田間含水量比較圖。第 4 單區於民國 89 年第一期作之原計畫灌溉用水量為 539.2mm（田間需水量為 1,016mm），而最佳化模式計算所得之灌溉用水量為 247.6mm，僅為原計畫（未考慮回歸水再利用）灌溉水量之 45.9%（即減少 54.1% 之灌溉供水量）；其原因為適時的使用上游之回歸水量，使得灌溉用水量大幅的減少。而由湛水深比較圖顯示，僅 5 月 30 日至 6 月 10 日間有所差異，其中 6 月 5 日至 6 月 7 日為田區排水期，亦即除排水晒田之期間外，田區土壤均維持適度之湛水深，可滿足作物生長之所需。顯示在維持作物生長所需水量之條件下，經由充分利用上游回歸水，確可減少灌溉水量。

- 圖 13 為第 5 單區原計畫灌溉用水下之模擬湛水深與考慮回歸水再利用之最佳化灌溉用水

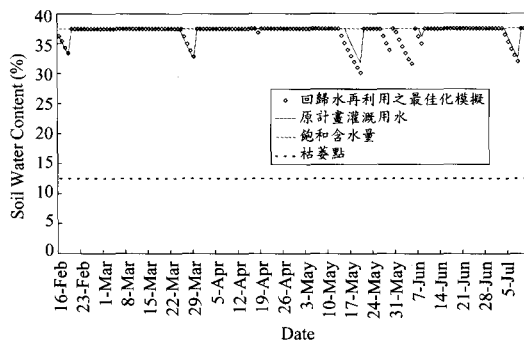


圖 14 民國八十九年一期作期間第五單區之模擬田間含水量

下之模擬湛水深之比較圖，而圖 14 為第 5 單區原計畫灌溉用水下之模擬田間含水量與考慮回歸水再利用之最佳化灌溉用水下之模擬田間含水量比較圖。第 5 單區於民國 89 年第一期作之計畫灌溉用水量為 539.2mm（田間需水量為 1,016mm），而最佳化模式計算所得之灌溉用水量為 324.4mm；約為原計畫（未考慮回歸水再利用）灌溉水量之 60.2%（即減少 39.8%之灌溉供水量）；而由湛水深比較圖顯示，僅 5 月 13 日至 6 月 6 日間有所差異，其中 5 月 15 日至 5 月 20 日為田區排水期，亦即除排水晒田之期間外，田區土壤均維持適度之湛水深，可滿足作物生長之所需。再度顯示在維持作物生長所需水量之條件下，經由充分利用上游回歸水，確可減少灌溉水量。

6. 圖 15 為原計畫（未考慮回歸水再利用）灌溉水量與考慮回歸水再利用之最佳化模擬灌溉水量比較圖，由圖中顯示，第 1、2 及第 3 單區由於並無額外之上游回歸水量可供再利用，因此原計畫（未考慮回歸水再利用）與最佳化模擬之灌溉水量相同；而第 4 及第 5 單區由於有來自第 3 單區之回歸水量，因此第 4 單區由原計畫（未考慮回歸水再利用）灌溉水量（539.2mm）降為 247.6mm；第 5 單區由原計畫（未考慮回歸水再利用）灌溉水量（539.2mm）降為 324.4mm。
7. 由於第 4 單區之上游回歸水量較第 5 單區為

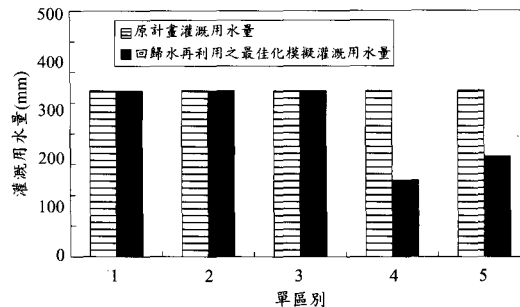


圖 15 原計畫與考慮回歸水再利用最佳化模擬之灌溉用水量比較

多，且灌溉面積亦低於第 5 單區（第 4 單區之灌溉面積為 7.5324 公頃，第 5 單區為 14.6093 公頃），因此第 4 單區可減少較多之灌溉用水量。

8. 傳統上，灌溉用水給予外界的印象有浪費之嫌，其浪費的原因歸咎於田區長期保持湛水及將灌溉餘水經由渠道排入大海之中。經由本研究發現：水稻田區之降雨及灌溉用水量，在扣除蒸發散量及深層滲漏量後，其餘部分之水量可經由地表逕流或地下滲流回歸至渠道，此部份回歸至渠道之水量稱為回歸水，可供給下游灌區使用；由於蒸發散量為作物生長之必要水量，深層滲漏量可補注地下水，而回歸水又能提供下游灌區再利用，以減少下游灌溉水量；因此以大範圍而言，唯一浪費之灌溉水量為未經再利用而流入海中之水量。

五、結 論

本研究之目的在配合水稻田生長期間之灌溉特性，並考慮灌溉水深、晒田排水及水平滲流量之情形下，建立逕流再利用系統之水平衡與最佳化模式；所建立之模式可對逕流再利用系統之水田區域進行模擬演算，以估計上游田區可利用之回歸水量，供下游田區回歸再利用，進而減少下游田區之灌溉用水量。

水稻田區由於長期湛水，且常將灌溉餘水或田區逕流量經由渠道排入大海之中，造成灌溉用水給予外界有浪費的印象，經由本研究發現：水

田灌區之降雨及灌溉用水量，在扣除蒸發散量及深層滲漏量後，其餘部分之水量可經由地表逕流或地下滲流回歸至渠道或下游田區供給下游灌區使用，此部份回歸至渠道或下游田區之水量稱為回歸水；由於蒸發散量為作物生長之必要水量，深層滲漏量可補注地下水，而回歸水如能於下游灌區充分再利用，將可減少下游灌溉用水量；亦即以大範圍而言，唯一浪費之灌溉水量為未經再利用而流入海中之水量。

本研究所建立之水平衡與最佳化模式，可計算整個期作期間之水田蒸發散量、深層滲漏量及可利用之回歸水量。經由第三單區中所進行之田間湛水深觀測與水平衡模式模擬結果之湛水深比較，結果顯示模擬值與觀測值相當接近，且趨勢相當吻合；因此驗證本模式適合於農田灌區之使用。

在本研究中，選擇桃園農田水利會 11-2 輪區為範例研究區域。經由水平衡模式，對桃園農田水利會 11-2 輪區以民國 89 年一期作之氣象資料進行運算，結果顯示：由於第 4 及第 5 單區有來自第 3 單區等上游灌區之回歸水量，經最佳化模式演算結果，顯示第 4 單區可由原計畫（未考慮回歸水再利用）灌溉水量（539.2mm）降為 247.6mm；第 5 單區可由原計畫（未考慮回歸水再利用）灌溉水量（539.2mm）降為 324.4mm；其原因為適時的使用上游可利用之回歸水量，使得灌溉用水量大幅的減少。亦即整個輪區經於第 4、5 單區使用上游灌區（如第 3 單區等）可利用之回歸水量，將降低輪區灌溉用水量達 21%。

本模式除可應用於一般逕流再利用系統中，尤其適合於實施輪流灌溉之輪流灌溉系統中，以估計上游田區可利用之回歸水量，供下游田區回歸再利用，進而減少灌溉用水量。

參考文獻

1. 石朝雄，中國的水利發展，中央文物供應社，台北，1982。
2. 行政院農業委員會，台灣地區稻穀生產成本調查報告(民國九十年第一期)，台北，2002。
3. 林尉濤，「農業水資源調配及乾旱因應措

施」，九十一年度農業工程研討會論文集，第 39-48 頁，2002。

4. 吳瑞賢、林癸妙、李俊福，「水田回歸水之研究」，農業工程學報，第 45 卷，第 1 期，第 72-82 頁，1999。
5. 徐龍淵、徐恭也，「迴歸水利用現況及加強方法」，農田水利，第 34 卷，第 8 期，第 10-12 頁，1986。
6. 陳世楷、劉振宇，「水田滲漏 / 側滲之數值模擬」，農業工程學報，第 46 卷，第 2 期，第 1-23 頁，2000。
7. 陳清田，「嘉義地區作物需水量之研究」，農業工程學報，第 37 卷，第 1 期，第 82-109 頁，1991。
8. 經濟部水利司，研擬合理農業灌溉用水標準 (I)，台北，1995。
9. 經濟部水資源局，「地層下陷區水土資源規劃決策支援系統」，台北，1998。
10. 經濟部水資源統一規劃委員會，台灣地區之水資源，台北，1995。
11. 農業工程研究中心，石岡壩南幹渠道可再利用迴歸水源調查，農業工程研究中心研究報告，桃園，1996。
12. 駱安華，「迴歸水之計算和運用」，台灣水利，第 8 卷，第 2 期，第 47-56 頁，1960。
13. 劉振宇、陳世楷、周曉雯，「雲林地區水田入滲量之評估」，農業工程學報，第 45 卷，第 1 期，第 38-54 頁，1999。
14. 劉振宇、陳世楷、黃偉哲，「水田開裂及田埂特性對入滲之探討」，台灣水利，第 48 卷，第 2 期，第 25-38 頁，2000。
15. 簡傳彬、方文村，「線性規劃在池塘灌溉系統聯合營運之應用」，農業工程學報，第 46 卷，第 3 期，第 69-82 頁，2000。
16. 簡傳彬、方文村，「桃園地區農地日射量與淨輻射之關係」，2002 農業工程研討會論文集，第 414-421 頁，2002。
17. 簡傳彬、吳瑞賢、方文村，「台灣續灌水田灌溉系統之水平衡模式」，農業工程學報，第 48 卷，第 1 期，第 24-38 頁，2002。

18. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, Crop Evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1998.
19. Aron, G., "Adoption of Horton and SCS Infiltration Equation to Complex Storms," ASCE, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 118(2): pp. 275-284, 1992.
20. Bedient, P.B., and W.C. Huber, "Hydrology and Floodplain Analysis," Addison-Wesley Publishing Company, New York, USA, 1992.
21. Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.
22. Gronning Engineering Company, Ground-water development, Augmentation and Exchange Plans for the City of Colorado Springs. Rep., Denver, Colo., 1989.
23. Kovacs, G., Seepage Hydraulics, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1981.
24. Lin, H.-C.J., D.R. Richards, C.A. Talbot, C.-T. Yeh, J.-R. Cheng, H.-P. Cheng, and N.L. Jones, FEMWATER: A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media, WES Coastal and Hydraulics Laboratory, 1997.
25. Loucks, D. P., J. R. Stedinger and D. A. Haith, Water resource system planning and analysis, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1981.
26. Oad, R., K. Lusk and T. Podmore, "Consumptive use and return flows in urban lawn water use," ASCE, Journal of irrigation and drainage Engineering, Vol.123, No. 1, pp. 62-69, 1997.
27. Penman, H.L., "Vegetation and Hydrology," Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England, 1963.
28. Smith M., "Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements," Land and Water Development Division, FAO, Rome, Italy, 1990.
29. Todd, D. V., Groundwater Hydrology, John Wiley & Sons Ltd, New York, 1980.
30. Wheeler, W. W., and Associates, Lysimeter Study, Rep., Englewood, Colo., 1987.
31. Wopereis, M.C.S., B.A.M. Bouman, M.J. Kropff, and A.R. Maligaya, "Water Use Efficiency of Flood Rice Fields (1): Validation of the Soil-Water Balance Model," Agric. Water Management, 26, pp. 277-289, 1994.
32. Wu, R. S., W. R. Sue, C. B. Chien, C. H. Chen, J. S. Chang, and K. M. Lin, "A simulation model for investigating the effects of rice paddy fields on the runoff system," Mathematical and Computer Modelling, 33: pp. 649-658, 2001.

收稿日期：民國 92 年 5 月 19 日

修正日期：民國 92 年 7 月 7 日

接受日期：民國 92 年 7 月 14 日