

水收支平衡應用於水田灌溉用水消耗特性之評估

Estimation on Consumptive Characteristic of Irrigation Water for Paddy Fields Using Water Balance Theorem

國立臺灣大學生物環境系統工程學系

博士候選人

農業工程研究中心工程組

助理研究員

陳 豐 文

Feng-Wen Chen

國立臺灣大學生物環境系統工程學系

教授

劉 振 宇*

Chen-Wuing Liu

摘 要

本文以台中葫蘆墩圳灌區為研究區域，以 2001-2005 年各項水文及用水記錄為資料來源，應用水收支平衡原理推估水田長期灌溉條件下各項用水來源及耗水參數的變化及特性；結果顯示研究區域之兩期作水田的田間需水量分別為 1,593 (mm/期作·ha)及 1,381 (mm/期作·ha)；若考量輸水損失之引水量提高為 2,570 (mm/期作·ha)及 2,227 (mm/期作·ha)。統計灌溉歷程產生之明迴歸水及暗迴歸水比例為 1.85 : 1 (一期作)及 3.13 : 1 (二期作)；兩期作之有效雨量及其利用率分別為 293 mm (63%)及 242 mm (41%)，顯示雨量利用對於水田一期作補助灌溉之重要性。水收支平衡原理分析大區域水田灌區之水分消耗特性顯示長期灌溉歷程中，水田系統水量的消耗途徑，以補注地下水量為主，約 48.80%，其說明水田灌溉對於地下水資源涵養之重要貢獻，其次產生 20.45%迴歸水量，為水資源再利用之潛勢量，作物需水量為 19.92%，有效雨量僅 10.83%。

關鍵詞：水田灌溉，水平衡，迴歸水，有效雨量，作物需水量。

ABSTRACT

In the article, the water balance theorem was used for evaluating the consumptive characteristic of irrigation water on paddy fields, which in the condition of crop irrigated during the long-term period. The irrigation area of Huludum main canal was selected as an research region, and the each water records and hydrologic data in 2001-2005 was

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系教授，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，lcw@gwater.agec.ntu.edu.tw

used to analyze. The results show that water requirement (*WR*) of paddy fields in the first and second crop periods were 1,593 and 1,381 (mm/crop period·ha) respectively. With considering the conveyance loss, the irrigation water requirement was intake from rivers were raised to 2,570 and 2,227 (mm/crop period·ha) in the first and second crop periods.

The 5 years average of effective rainfall was conducted to analyzed as 293 and 242 mm in the first and second crop periods, and the usage ratio were respectively showed as 63% and 41%. The result reveal the significance that effective rainfall played a subsidiary for irrigation in the first crop period. The study used the water balance theorem was conducted to analyze evaluate the consumptive characteristic of irrigation water in a large scale paddy region, and the results show the main consumption of water is to recharge the groundwater in paddy field system, and the the ratio was 48.80%. Return flow, evapotranspiration and effective rainfall were the subsequent in order, and the contributions were respectively showed as 20.45%, 19.92%, and 10.83%. Return flow was consists of visible return flow and invisible return flow, and the ratio between them in the first crop period and second crop period were respectively 1.85:1, and 3.13:1.

Keywords: Irrigation on paddy field, Water balance, Return flow, Effective rainfall, Crop requirement.

一、前 言

農業為國家之基本產業，亦為國防產業，農業在臺灣經濟發展過程中，扮演重要角色，而水為農產生產所必須具備之重要要素。早期之農業用水即為農田灌溉用水，係以人工方法供應作物所需水分，以彌補天然降水之不足。臺灣由於天然降雨在時間及空間上分布不均，需有灌溉始有農作生產。回顧臺灣農業耕地面積及結構之演變，1946年的耕地統計為831,950 ha，發展至1976年為最高峰(919,680 ha)，隨產業及都市發展影響，全台耕地面積於2009年已遞減為815,462 ha，其中384,500 ha為水利會灌區；由水田率及旱田率簡易清楚顯示臺灣耕地作物栽種結構特性，1946年之水田率高達61%，2009年水田佔耕地比例雖遞減為51%，顯示臺灣耕地面積中仍有半數為水田用途之耕地，其為灌溉用水量佔各項標的用水之首的主因。

農業用水廣義的範圍包括灌溉用水、養殖用水、畜牧用水等三項，臺灣早期用水開發均以農業灌溉用水為主，農業用水一直為各標的總用水

量之首，圖1為臺灣各標的用水於1989-2008年(20年)期間之演變趨勢，1989年之農業用水量為149.74億噸/年，佔全台總用水量比例為80.02%，近年受人口膨脹，社會環境發生急遽變遷，工業與社區發展急速增加之影響，生活用水及工業用水對水資源之需求與日俱增，農業用水所佔比例逐年減少，至2008年統計資料顯示農業用水量為129.60億噸/年，比例為72.09%；整體而言，臺灣年用水總量增減趨勢主要受農業用水影響；以20年的平均值統計各項用水佔總用水量之比例分別為農業用水(73.53%)、生活用水(17.23%)、工業用水(9.24%)。圖2顯示灌溉用水(農田水利會系統)為農業用水結構之主體，比較1989年及2008年記錄顯示，歷經政府推動農業用水總量管制策略，灌溉用水量由119.41億噸略減為112.12億噸，灌溉用水量佔農業用水比例卻由79.74%略升為86.51%，其主因為養殖用水大幅縮減所致。

根據臺灣耕地結構及各標的用水結構顯示，以水稻栽培為主的水田仍為國內耕地主要利用型態，尤以兩期作水田為農業灌溉用水之主

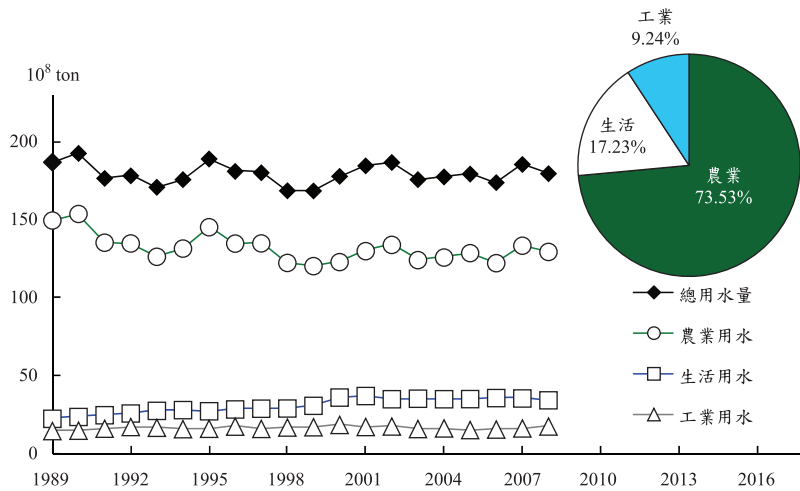


圖 1 臺灣各標的用水歷年趨勢變化

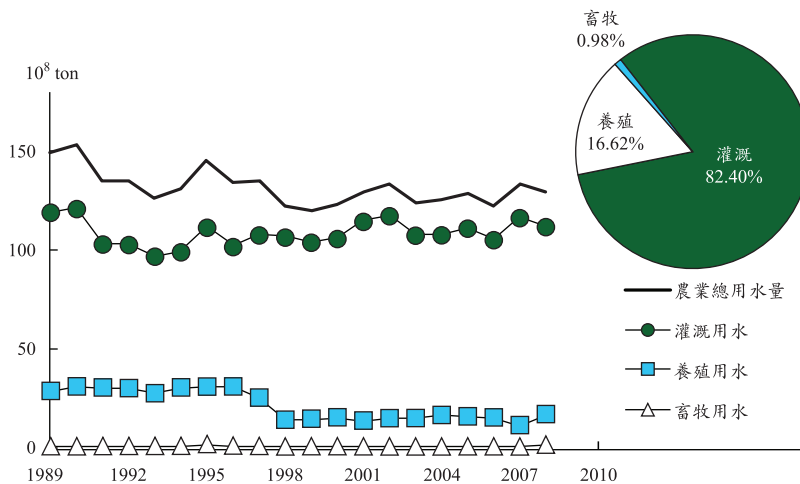


圖 2 臺灣農業用水結構歷年趨勢變化

體，國內 17 處農田水利會灌區雖均詳定灌溉計畫書以執行農田水利灌溉事業；檢視臺灣近年發生水文豐枯事件，呈現加劇趨勢，若無調整用水型態及相關節水措施，水資源不足現象恐呈常態，水田因具高用水特性，因此水田休耕及轉作已為調配區域不同標的用水的策略之一，水田休耕方式短期內可因應缺水問題，卻忽略長期實施造成國土及地下水涵養效益縮減問題。

水田存在的重要性為何？Guerra *et al.* (1998) 指出全球超過 75% 的稻米是由亞洲國家生產，約 7,900 萬公頃的耕地為水稻栽培用途；亞洲國家

的水資源分配，超過 50% 的用水量為水田灌溉用水；未來 2020 年時預估全球對於稻米的需求依賴將超過以 1995 年需求為基準的 35% 以上。顯見臺灣的水田用水與許多亞洲國家一樣均為水資源的主要的用水標的。針對臺灣的水田期作別的水量需求，農委會(1999)概略針對臺灣北部、中部、南部、東部提出一期作及二期作於續灌方式及輪灌方式下之水稻灌溉用水量基準，如表 1 所示；不同灌溉方式會影響期作單位面積用水量；其中以東部為最高、中南部次之、北部最低。不同灌溉方式亦有差異，其中輪灌較續灌方

表 1 臺灣各區水稻灌溉用水量基準

地區	第一期作(mm/期作)		第二期作(mm/期作)	
	輪灌	續灌	輪灌	續灌
北部	1,551	1,927	1,300	1,667
中部	1,750	2,209	1,466	1,911
南部	1,713	2,151	1,458	1,886
東部	2,715	3,828	2,275	3,303

資料來源：行政院農業委員會(1999)。

式可節水 19.51-29.08% (一期作)、22.02-31.12% (二期作)；若比較期作別，結果顯示無論採用輪灌或續灌方式，一期作之水稻用水量均高於二期作，其變化量應為不同月份之作物需水量反應所致。為進一步評估水田長期灌溉條件下，各項水文參數的變化；本文以大範圍水田區(台中葫蘆墩圳灌區)為研究對象，利用 2001-2005 年灌溉用水資料及氣象水文資料分析其長期灌溉條件下的兩期作灌溉用水量，並以水收平衡原理進行水田環境之水文循環分析，藉以評估水田灌溉期間，引灌水量、降雨、蒸發散量、輸水損失、地下水補注量、迴歸水量等參數之消耗關係，藉以初探水田於灌溉期間之各項水量移動途徑及比例。

二、材料與方法

2.1 水稻灌溉及用水組成

農業灌溉用水標準依作物種類及灌溉方法而有差異，分水田及旱田用水。水田用水即為水稻灌溉事業所需使用水量。臺灣水稻灌溉方式有續灌與輪灌之分。續灌採用越田灌溉方法，為粗放式用水方法；輪灌(輪流灌溉)為適時、適量、依序供水之科學管理灌溉法。臺灣自 1954 年推行輪灌後，各輪灌地區根據試驗結果，制定不同灌溉期距及水深，其用水量較續灌可節省 25% 以上。水對水稻生長雖然非常重要，但非長期需要浸在水中，其所需要之水量依各生長期而異；水田灌溉用水特性一般依水稻生育期之灌溉排水管理原則實施，包含成活期至分蘖期、分蘖始期至有效分蘖終期、有效分蘖終期至幼穗形成始期前、幼穗形成始期至終期、孕穗期、抽穗開花期、乳熟期至糊熟期、黃熟期至完熟期等。

為清楚表達水田灌溉過程各項用水量或需水量之意義內涵，本文茲將定義如下：

1. 作物需水量(Consumptive use) = 作物蒸發散量 (Evapotranspiration, ET)
2. 田間需水量(Water requirement, WR) = 作物需水量 + 田間滲漏量
3. 田間灌溉用水量(Field irrigation requirement, FIR) = 田間需水量 - 有效雨量。
4. 系統總灌溉用水量(Diversion requirement, DIR) = 田間灌溉用水量 + 輸水損失量(幹線、支線、分線)。

上述作物需水量為作物(本文係指水稻)維持生長所需生理水量，田間滲漏量為田區損失水量，非作物直接利用，因此以田間的觀點所需維持水量為作物需水量及田間滲漏量之和；因灌溉為補充雨量不足部分，因此田間灌溉用水量為田間需水量扣除有效降雨量之值；灌區用水量需考慮自河川或水庫引水點至田區之水量損耗，估算公式如(1)式。

$$DIR = \frac{FIR}{1 - L} \dots\dots\dots (1)$$

式中： DIR 為系統總灌溉用水量； FIR 為田間灌溉用水量； L 為系統輸水損失率(%)。

2.2 水田水收支平衡理論

水(收支)平衡理論一直廣泛應用於地球科學、農學、農業工程領域及不同水文量的推估研究；其應用範圍規模可以國家為範圍的水資源分析或以作物別為主的水收支分析；例如 Bastiaanssen and Chandrapala (2003)使用斯里蘭卡境內 103 條流域及降雨空間資料，分析不同水資源用途的使用比例。Xu *et al.* (1996)以瑞士 NOPEX 地區為例，探討該區域各項水文量流動比例，以降雨為系統輸入量，約產生 12% 的入滲、64% 的蒸發散量、地表逕流為 36% (由 24% 的地表直接逕流及經地下水層蓄存及移動之地下逕流量 12%)。Kerkides *et al.* (1996)探討流域的水收支平衡。

此外，水平衡理論亦廣泛應用於灌溉系統的

研究，分析灌溉系統中各項水量的變化分析；如 Odhiambo and Murty (1996a, 1996b)以水平衡原理模擬低窪地區水田的灌溉過程，探討不同田區布置條件及耕作方式條件的改變時，各用水單項的比例。Tsubo *et al.* (2007)應用水收支平衡原理探討柬埔寨 Mekong 地區水稻梯田橫向滲流的推估，其成果顯示梯田上游區域的橫向滲流主要由降雨產生(約 45%)、橫向滲流量愈往下游區域則愈高；Moret *et al.* (2007)則以西班牙半乾旱區 Aragon 為案例，說明傳統耕作、減量耕作、無耕作等 3 種不同耕作管理系統於休耕期間之土壤水分消耗，結果顯示無耕作方式的休耕期間，約 64%降雨轉化為蒸發量；減量耕作及傳統耕作等方式則分別為 56%、44%。

水平衡原理亦可縮小範圍至以作物為對象，如 Malek *et al.* (1992)評估紫苜蓿的蒸發散量、Palomo *et al.* (2002)評估橄欖園的水分消耗特性、Andreu *et al.* (1997); Franco *et al.* (2000); Abrisqueta *et al.* (2001)均以杏仁樹為對象，以水平衡原理分別估算 5 個月、2 年半、30 個月試驗期間的水分收支，評估滴灌下的土壤水分蓄存移動情形。對於評估作物與土壤水分移動關係，水平衡亦是廣泛應用的方法，相關研究包含 Arora and Gajri (1996)於半乾旱區域的玉米耕作期間，比較 SPAW 及 WBM 模式模擬的土壤水分移動現象、Alavi (2002)以水平衡原理配合 22 年雲杉樹的生長數據，認為土壤水分蓄存量多寡對於植物生長具有強烈的影響；Panigrahi and Panda (2003)則以 1998-1999 年的試驗數據，分析作物(芥菜)根系土層的水分變化。

一般而言，水文循環系統之水收支平衡可以(2)式表示之，其廣義的定義為進入系統之水量減去排出系統者等於貯蓄變化量的來表示(Kerkides *et al.*, 1996)；本文以水田灌溉系統為研究對象(圖 3)，水收支平衡基本方程式可修正如(3)式(Malek *et al.*, 1992; Huang *et al.*, 2003；陳豐文等，2005)，由於以水田系統為研究對象，由水收支平衡系統(圖 3)顯示降雨、取水灌溉等為水田系統的入流量；田區排水(明迴歸水，visible return

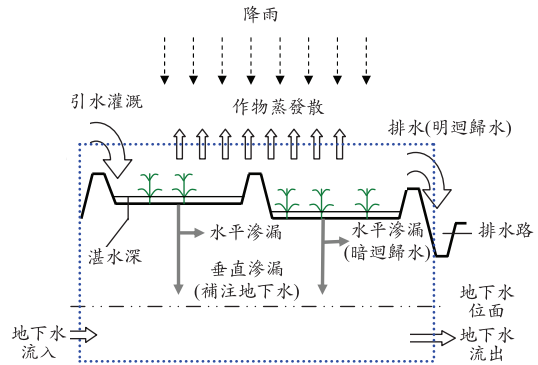


圖 3 水田灌溉系統水收支平衡示意圖

flow)、田區入滲及蒸發散等則為水田之出流量。

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：I 為進入系統之水量；O 為排出系統之水量；S 為系統儲蓄量；t 為時間。

若以坵塊進行探討微觀探討，田間貯蓄變化量包含水田湛水深變化量與土層水分變化量變化量分開陳述較具合理性；水田入滲量 P (infiltration)在水稻耕作過程，因田面維持一定湛水深的條件下，土壤條件可視為飽和狀態，因此入滲量等於滲漏量，依滲漏方向區分水平滲漏(seepage) P_h 及垂直滲漏(percolation) P_v ，Cabangon *et al.* (2002)研究顯示兩者不易區分，多直接合併為一項滲漏量，本文考量將滲漏區分為水平滲漏 P_h 及垂直滲漏 P_v 有助於釐清水田灌溉過程的迴歸水及地下水補注量，則(3)式可修改如(4)式；考量水田在水稻耕作期間常需處於浸水狀態，且臺灣地區兩期作水稻的生長期約 110~150 天，就期作別的時間觀點視之，水田湛水深 d 及土層水分變化量 ΔS_i 長期於飽和狀態下可假設為零，則(4)式可修改如(5)式；當水田長期處於浸水狀態，因此水稻灌溉期間，以整個研究區域視之，水田之地下水水位變化與流動狀況可視為穩定平衡狀態時，即 $G_i \cong G_o$ ，因此(5)式可修改如(6)式；其中引水量 I 於標準狀態下應予灌溉計畫書規範取水量 I_s 相同，灌溉計畫書規範取水量 I_s 為農田水利會以不同土壤別的灌溉率為基礎換算稻作需水深、並考量渠道損失量後訂定為標準灌溉取水

量，然灌溉率乃以作物及土壤為推估參數，並無考量作物需水量隨時間變化的特性，此外實際取水過程易受河川枯旱水文條件限制及人為操作管理方式不同產生實際取水量 I 與灌溉計畫書規範者不同，其差異量為 ΔI_a ，此為明迴歸水產生的主要成因之一，茲將各旬(或期作)實際取水量與灌溉計畫書規範標準取水量比較，即可獲得差異量為 ΔI_a ；其值以正負號表示超量灌溉或節水灌溉之形式($I = I_s \pm \Delta I_a$)，如(7)式。

$$TR + I + G_i = ET_{crop} + RF_v + G_o + P + \Delta S \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$TR + I + G_i = ET_{crop} + RF_v + G_o + P_v + P_h \pm d + \Delta S_1 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$TR + I + G_i = ET_{crop} + RF_v + G_o + P_v + P_h \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$TR + I = ET_{crop} + RF_v + P_v + P_h \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$TR + I_s \pm \Delta I_a = ET_{crop} + RF_v + P_v + P_h \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中： TR 為灌區內總降雨量(total rainfall)； I 為引灌水量(irrigation water)； G_i 為地下水流入量； ET_{crop} 為作物蒸發散量； RF_v 為灌區明迴歸水量； G_o 為地下水流出量； P 為水田入滲量(infiltration)； P_v 為垂直滲漏量(percolation)； P_h 為水平滲漏量(seepage)； ΔS 為田間水分貯蓄變化量； ΔS_1 為土壤水分變化量； d 為田間湛水深變化量； I_s 為標準灌溉水量； ΔI_a 為實際取水過程之差異量。

由於有效降雨乃由總降雨對於灌溉系統或作物有益者而言，因此單日降雨事件或連續降雨事件接受其臨前水文條件限制(如已灌溉深度)及田區條件(田埂高度)之限制，(8)式表示已灌溉水深、田埂高度限制及降雨量皆是有效雨量的函數，因此將各降雨事件區分為有效雨量及無效雨量；其中可應用於節省(替代)灌溉用水者視為有效雨量，因此雨量過小者(<5 mm)或量大於田埂高度或田埂缺口高度者因無法利用的因素而視為無效雨量 UR ，由於以單一坵塊視之，可藉由當日湛水深度、降雨量、實際蒸發散量等參數

藉由觀測紀錄來逐日計算有效雨量；然而對於大面積的灌溉系統而言，無法以上述觀測方式紀錄每一坵塊實際發生值，因此需將有效雨量計算方式予以簡化，基於水田長期的續灌條件下，湛水深度於當日施灌當日消耗的情形下假設為零，有效雨量的計算以日為時間單位，應區分單日降雨事件或連續降雨事件進行計算並累加為旬計或月計之有效雨量值，其計算原則如 2-6 節所示。無效雨量超過田埂高度或田埂缺口高度後將產生溢流為明迴歸水，因此明迴歸水於非降雨時期主要由實際引水差異量 ΔI_a 組成，灌溉期間發生降雨事件時，則主要由無效雨量 UR 及實際引水差異量 ΔI_a 組成，若灌區實施斷水措施，則此期間之明迴歸水等同於無效雨量 UR ，如(9)式，(7)式則修正為(10)式；非降雨期間的明迴歸水可於灌區上游產生後，中下游的田區均可自渠道取水引灌再利用，而降雨期間由無效雨量造成的明迴歸水則因田區均無容納空間，降雨量已達雨量有效利用的上限，鄰近田區亦無自渠道攔蓄明迴歸水引灌之必要，但於灌區系統的中下游處，若有適當的蓄水設施(埤塘)，則可適時蓄存明迴歸水於埤塘，後續可再利用為灌溉用水。

水田灌溉期間之地下水補注量 G_r 即為垂直滲漏量(11)式；水平滲漏 P_h 則產生為暗迴歸水 RF_i ，因此水田系統灌溉期間之總迴歸水量可表示為(12)式，並經由總降雨量 TR 是否等於零，判別水田系統灌溉期間於無降雨事件發生時期及發生降雨事件期間之迴歸水量估算式，如(13)~(14)式。

茲將(11)~(14)式代入(10)式，可得(15)式，(15)式包含水田系統各項重要水量消耗參數，可藉由其他已知參數進行未知參數之估算或驗證。

$$ER = f(F_d, I, TR) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$TR = ER + UR \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$ER + UR + I_s \pm \Delta I_a = ET_{crop} + RF_v + P \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$P_v = G_r \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$RF_i = RF_v + RF_h \quad \dots\dots\dots(12)$$

表 2 水稻各生育階段之作物係數

生育天數	生育階段	FAO K _c 值*	施嘉昌等之 K _c 值**		姚銘輝等之 K _c 值***	
			一期作	二期作	一期作	二期作
1-30	整地期	--	--	--	--	--
31-45	插秧期	1.05	0.6	1.0	0.92	1.01
46-60	分蘗初期		1.0	1.3	1.00	1.11
61-75	分蘗末期		1.3	1.6		
76-90	開花初期	1.20	1.5	1.7	1.13	1.23
91-105	開花末期		1.5	1.6		
106-120	成熟初期	0.6~0.9	1.4	1.4	0.89	0.93
121-135	成熟中期		1.1	1.0		
135-150	成熟末期		0.8	0.5		

資料來源：* FAO：http://texaset.tamu.edu/cropcoe.php；**施嘉昌等(1996)；***姚銘輝等(2005)。

$$RF_i = \Delta I_a + P_h ; \text{When } TR = 0 \dots\dots\dots(13)$$

$$RF_i = \Delta I_a + UR + P_h ; \text{When } TR > 0 \dots\dots\dots(14)$$

$$ER + UR + I_s \pm \Delta I_a = ET_{crop} + RF_i + G_r \dots\dots(15)$$

式中：ER 為降雨事件的有效雨量；UR 為降雨事件的無效雨量；F_d 為田埂高度；G_r 為水田補注地下水量；RF_i 為水田系統總迴歸水量；RF_v 為水田系統明迴歸水量；RF_i 為水田系統暗迴歸水量。

2.3 作物需水量推估

作物需水量(Consumptive Use of Crops)亦稱為作物蒸發散量(Evapotranspiration)，係指作物生長各階段所需之水量。作物蒸發散量之影響因子甚為複雜，需視氣象環境條件、土壤物理性質、作物種類、耕種方法等因素而各有不同，作物蒸發散量主要受作物耗水特性與氣象因子兩大要素所支配，估算作物蒸發散量的方法大致可分為直接法與間接法兩種。根據國際糧農組織(FAO)與國際灌溉排水協會(ICID)所公佈的方法，間接推算作物蒸發散量(ET_{crop})首先推求參考作物需水量 ET_o 後，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，依(16)式推估作物蒸發散量 ET_{crop} (Kassam, et al., 2001)。

$$ET_{crop} = K_c \times ET_o \dots\dots\dots(16)$$

參考作物蒸發散量 ET_o 的估算方法，則可參考國際糧農組織(FAO)所推薦的四種常用方法 Doorenbos et al. (1973)：Blaney-Criddle Method、Radiation Method、Penman Method、Pan Evaporation Method。張本初(1990)、張煜權(1995)利用不同方法分別推估臺灣嘉義及全台地區之作物需水量，建議採用 Modified Penman 最佳；經濟部水利司(1995)對臺灣各地區 20 年來作物需水量的推估結果顯示以 Radiation Method 與 Penman Method 的結果較具一致性及穩定性、適用性較佳；甘俊二等(1996)進一步比較 Modified Penman、Modified Blaney-Criddle、Radiation、Pan Evaporation 及 Penman-Monteith 等 5 種經驗式，認為 Penman-Monteith 為適用於推估台灣的作物需水量。Penman-Monteith 公式後續被應用於推估臺灣不同區域的作物需水量，如陳清田(1998)之研究。

因此本文採用以 Penman Method 為基礎的 Penman Monteith Method 推算作物蒸發散量。Penman Monteith Method 乃 1944 年國際灌溉排水協會(ICID)所公布作為參考作物蒸發散量之方法，該方法與 1984 年 Modified Penman Method 之主要差異是，為計算方便特將各參數之單位由原本的 CGS 制更改為 SI 制。並以作物遮蔽阻力及空氣動力阻力二關係式，取代原先之風速函數值以提升估算準確度，其公式如(17)式 (Kassam, et al., 2001)；表 2 為比較 3 種不同文獻來源之 K_c

值後，本文採用姚銘輝等(2005)試驗臺灣本土水稻各階段生長期之 K_c 值。

$$ET_o = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - S) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times U_2 \times (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \times U_2)} \dots\dots\dots (17)$$

$$\Delta = \frac{2504 \times \exp\left[\frac{17.27 \times T}{(T + 237.3)}\right]}{(T + 237.3)^2}$$

式中： ET_o 為參考作物發散量值(mm/day)； R_n 為太陽輻射($MJ/m^2/day$)； γ 為濕度常數(Kpa/ $^{\circ}C$)； U_2 ：距地面 2 公尺高之風速(m/s)； T 為溫度($^{\circ}C$)； $e_a - e_d$ 為飽和蒸汽壓力差(Kpa)； S 為土壤熱通量($MJ/m^2/day$)； Δ 為飽和蒸汽壓力線斜率(Kpa/ $^{\circ}C$)。

2.4 水田滲漏量推估

水田具生產、生活、生態等三生功能，其中雖以生產為首要，生活機能及生態機能亦因國民生活環境改變及地下水源涵養而開始凸顯其重要性，其中灌溉過程的持續灌水特性，透過田區表層入滲後產生垂向及橫向滲流，垂向滲流產生區域性的地下水補注功能及橫向滲流於灌溉系統下游端產生暗迴歸水。為評估滲漏作用於水田灌溉過程之效益，劉振宇等(1996)依據入滲率及對地下水深淺層之補注等兩項因子評估水田對地下水補注之效益，針對國內 8 處農田水利會灌區進行水田補注地下水評估，結果顯示水田對於地下水補注效果顯著。農業工程研究中心等(1997)進一步應用 SAWAH 模式模擬輪區規模之地下水補注量，以全台 30 萬公頃水田計算年滲漏量約 15.483 億 m^3 ，其研究成果均證實水田具良好的地下水補注功能。

由於水田為長期浸水灌溉，水稻栽培期間，田間土壤幾乎持續呈飽和狀態，因此垂直入滲於灌溉期間將持續不斷發生，由於水田區包含水分飽和土層、不飽和土層同時存在的現象；Shan *et al.* (1992)曾依據 Philip (1957, 1958)推導的入滲理論描述飽和及非飽和土層共存下的入滲現象。對

表 3 各種土壤別與入滲率關係

土壤種類	黏土質含量 (%)	係數 (I)	滲漏量 (mm/day)
砂質礫土	1.6	1.0	150.00
礫質砂土	5.0	1.1	43.70
砂土(S)	8.0	1.2	25.00
壤質砂土(LS)	11.6	1.3	15.90
砂質壤土(SL)	14.9	1.4	11.50
壤土(L)	18.2	1.5	8.80
黏質壤土(CL)	21.9	1.6	6.85
壤質黏土(LC)	27.0	1.7	5.24
黏土(C)	33.0	1.8	4.04
中黏土	40.0	1.9	3.16
重黏土(HC)	49.0	2.0	2.45

資料來源：臺灣大學農業工程學系，1970。

於水田垂直入滲量的估算，Caro *et al.* (1981)利用水收支觀念，直接將降雨扣除逕流、截留與蒸發散後計算降雨入滲對地下水的補注量；張文亮(1993、1994)以質量不減定理配合達西公式推導非飽和土壤的深層滲漏速率，估算不同土層深度的深層滲漏量；陳焜耀等(1995)考量田區牛踏層存在條件下，利用達西定理估算垂直入滲量；Odhiambo and Murty (1996a)假設水田區的土層為均質及等向性的前提下，應用 Mercer and Faust (1980)推導適用於穩定孔隙介質流況的達西定律進行深層滲漏及橫向滲漏的分析。

考量影響田區入滲的主要因素為土壤類別，本文以灌區土壤質地屬性進行水田入滲率之估算。國內有關水田入滲率的大規模調查及資料建立始於 1957~1964 年期間全省進行 433 處試驗，並歸納水分當量與垂直入滲率之關係(陳尚等, 1964)；後續臺灣省水利局設計規範則以土壤之黏土粒含量計算垂向入滲率，如(18)式，(18)式乃臺灣省水利局過去於臺灣各地之田間實驗結果(詳表 3)；林俊男(1993)以統計迴歸方式推求土壤質地與 I 之關係式，如(19)式。除了上述國內經常採用入滲公式外，Saxton *et al.* (1986)亦利用不同土壤成份推估入滲量，Saxton 公式推估結果均遠高於其他方法推估者，以壤土為例，Saxton 公式推估入滲率為 314.4 mm/day，均遠高於陳尚等(1964)的 10.32 mm/day 與水利局

8.8 mm/day 的結果。因此本文採用水利局公式(18)~(19)式作為推估水田垂直入滲補注之依據。

$$P = 240/(C \times I) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$I = 0.932039 + 0.0362642C - 0.000296759C^2 \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中： P 為入滲率(mm/day)； C 為土壤黏粒百分比(%)； I 為係數(依黏粒百分比大小)。

(18)~(19)式應用於推估灌溉期間水田入滲量，本文假設垂直向滲漏量即為水田補注地下水量；橫向滲流則為暗迴歸水來源；因此水田灌溉補注地下水之推估方法採用水田總滲漏量與垂直向滲漏係數(比率)之乘積，如(20)式所示。

$$G_r = P_v = \alpha \times P \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中： G_r 為水田補注地下水量； α 為垂直向滲漏率(0~1)； P_v 為垂直滲漏。

由於水田耕作於整田階段需進行耕犁翻土，過去使用獸力(牛隻)長年進行整田作業，容易於土層下 20-40 cm 處產生具保水效果的硬盤層(Hardpan)或稱犁底層(Plow sole)及牛踏層(劉振宇等，1999)；丁澈士等(1998)指出水稻田灌溉入滲補注最主要受制於翻犁層(Puddled layer)及硬盤層之土壤物理、化學性質及及澆水深度影響，過去國內外學者經由不同田區土壤及灌溉技術條件下的試驗，顯示數據雖存在差異性，但共同結論為牛踏層確實會減少入滲率或減少水分垂直入滲(Sharman and De Datta, 1985; Wopereis *et al.*, 1992, 1994; Bounman *et al.*, 1994; 劉振宇等，1999; 陳世楷，1999)；Sharma and De Datta (1985)；Tuong *et al.* (1994)探討經過耕犁的水田(Puddled rice field)灌溉用水之滲漏損失及其動態，顯示水田經過耕犁會降低土壤中之水力傳導係數(Hydraulic conductivity)，入滲率差異達 100-200 倍；Ferguson, (1970); Sanchez (1973); Wickham and Singh (1978)；陳世楷等(1998)；Kukul and Aggarwal (2002)均指出增加澆水深能提高水力梯度使入滲量增大；丁澈士等(2000)說明破壞牛踏層的方式亦有助於增加滲漏率，陳世楷(1999)試驗指出犁底層破壞後滲漏率增加為 3.68 倍；簡傳

彬(2003)於桃園試驗結果為 3.6 倍。

水田入滲發生後產生橫向滲流及垂直向滲漏牽涉暗迴歸水量及地下水補注量之比例，因此垂直向滲漏率 α 的假設基礎甚為重要。為此，本研究茲蒐集過去橫向滲流及垂直向滲漏的研究成果並探討如下，藉以客觀決定合理的垂直向滲漏率 α 。

Bouwer (1978)雖指出自然界地層存在橫向水力傳導係數大於垂直方向的現象；但一系列以水田灌溉為主的研究試驗均顯示水田灌溉過程，垂直向滲漏量高於橫向滲流量，相關研究如下：駱安華(1962)引用嘉南水利會 1955~1957 年試驗結果顯示坡度<1%時，水平滲漏僅為垂直入滲的 0.06 倍、坡度上升至 1~3%、3~8%、8~15%時，其比例僅分別上升為 0.08、0.1、0.12 等；農業工程研究中心等(1997)以 SAWAH 模式模擬雲林麻園工作站灌區超量灌溉條件下，垂直入滲比例為 71.2~77%，其餘 23~28.8 為土壤保水、逕流及田埂滲漏；林癸妙(1998)以水頭試驗推估垂直滲漏與側向滲漏比例為 5:1；洪毓謙(1999)模擬田區的泥濘層、硬盤層、非翻耕層之砂箱實驗，固定澆水深度於坡度條件 0%、2%、3.75%，獲得水平滲漏與垂直滲漏量比值為 1:9、1:6、1:4。丁澈士等(1999)以高雄大寮試驗田為例，發現距田面 20 cm 處發現產生水分移動的阻抗，產生側向滲流，但水份移動經一段時期後呈現穩定下滲的現象；橫向滲流會隨著田區寬度及澆水深增加而遞增(吳佩菁，1999)。陳世楷等(2000)經現地試驗發現區域性水田入滲以垂直運動為主，約為側滲量的 2-10 倍，側滲比例隨著乾濕邊界長度、水田澆水面積及初始土壤水分含量不同而改變。綜合上述文獻顯示，水田灌溉過程，入滲於土壤水分飽和條件下，入滲量可轉變為垂直向滲漏及橫向滲流，垂直向滲漏量會高於橫向滲流量，當田區有牛踏層存在時，則橫向滲流量會增加；本研究考量過去整田期間長期以獸力淺層翻耕、反覆夯實下產生的牛踏層已被現行的農機深耕翻土方式取代，因此採用洪毓謙(1999)的試驗成果，於不同坡度條件下推算不同的垂直向滲漏比例 α ，結果顯示以坡度 0%、2%、3.75%條件下之 α 值為 0.90、0.86、0.80；本文茲將洪毓謙(1999)試驗結果進行

迴歸分析，獲得坡度與垂向滲漏關係式，如(21)式(適用範圍為坡度條件為 0-3.75%)，本文可依據研究區域之坡度進行水田地下水補注之推估、(22)式為坡度與橫向滲漏關係式，本文用以推估暗迴歸水量。

$$\alpha = -0.003S^2 - 0.0154S + 0.9 \dots\dots\dots(21)$$

$$\beta = 1 - \alpha \dots\dots\dots(22)$$

式中： α 為垂向滲漏比例； β 為橫向滲漏比例； S 為灌區坡度(%)。

2.5 迴歸水推估

迴歸水對於灌溉系統而言，若水質條件符合灌溉標準，則迴歸水可視為輔助的灌溉水源，迴歸水在水資源匱乏時則益顯其重要性；Zulu *et al.* (1996)應用水收支原理及水筒模式評估日本 Kaliyada 地區灌溉系統的迴歸水比例；Jayatilaka *et al.* (2003)使用 Itakura (1995)以串聯式灌溉系統為基礎所發展的水平衡模式，進一步評估斯里蘭卡 Anuradhapura 地區的串聯灌溉系統(Thirappane Tank Cascade system, TCS)下的迴歸水及其他用水參數的組成。

本文所探討之水田迴歸水著重於灌溉用水產生者及具有再次利用特性者，因此將水田迴歸水定義為：灌溉期間，水田經引水灌溉後產生之迴歸水量，包括由灌溉排水路和田間的地表水流流至下游及地下滲流水流至下游溝渠而湧出者。

迴歸水來源：臺灣地區的灌溉用水主要以水田灌溉為主，水田灌溉過程常須保持一定湛水深，因此過多灌溉水源及灌溉期間降雨產生以地表逕流形式之明迴歸水、由水田湛水灌溉產生橫向滲漏，於土層中流動，由於田面長期浸水，以致土壤處於飽和狀態而產生滲漏，包括田埂、田埂缺口滲流等。

明迴歸水估算主要估算田區逕流量，計算其主要來源，包含灌溉取水超量部分及灌溉期間發生降雨事件之無效雨量等，如(13)~(14)式，暗迴歸水則假設橫向滲漏量均產生為暗迴歸水量，計算式如(23)式，最後依(12)式加總為灌溉系統產生

之總迴歸水量

$$RF_i = P_h = P - P_v = \beta \times P \dots\dots\dots(23)$$

式中： RF_i 為水田系統暗迴歸水量； P_h 為橫向滲漏量。

2.6 水田有效雨量

國內外對於水田有效雨量計算方法深甚多，諸如日本農林省農地局估計法、日本農業土木手冊估計法、印度灌溉部估計法、石門水庫計畫灌區之方法、桃園大圳第 1 及第 11 支線輪流灌溉實施計劃方法、大甲溪灌區估計法、曾文水庫規劃灌區估計法、臺灣省水利局常用方法、實驗計錄方法、嘉南大圳有效雨量估計法、維持水深法、恢復水深法、雨量頻率法等，以上方法為早期使用之推估法，部分方法仍沿用至今。朱榮彬(1988)提出雨量及田區消耗水量比較法，有效雨量為滿足作物需水量與田間滲漏量的最小值，當降雨量小於蒸發散量及滲漏量之和時，所有的降雨量都會是有效雨量；反之，若降雨量大於蒸發散量及滲漏量之和時，則只有滿足蒸發散量及滲漏量的部份為有效雨量，此外本法之有效雨量並不考慮當降雨量過小時，雨水被截留而無法降落至地面之情形，因此不論雨量是否低於 5 mm，只要落於田區且符合有效雨量之公式，皆視為有效雨量。

陳獻(1989)；Tsai *et al.* (2005)提出水門操作法則，乃基於農田水利會訂定灌溉計畫與田間管理者之實際操作一致之考慮，本法於擬定灌溉用水計畫時預先扣除有效雨量並於灌溉期間依實際降雨狀況予以減少供水或停水之措施，由於本法利用田間水門實際操作以配合灌區實際降雨狀況，此一考量較預扣法更能符合灌區實際有效雨量。水門操作法之原理如下：即一次降雨 TR (mm)，則停灌 Y 天，則該次降雨之有效雨量 ER 為停灌日數 Y 與每日灌溉水深 d_s 之乘積，其數學表示式如(24)式，操作原則如表 4：

$$ER = Y \times d_s \leq TR \dots\dots\dots(24)$$

式中： ER 為有效雨量、 TR 為降雨量、 d_s 為灌溉計畫之每日灌溉水深、 Y 為停灌日數。

表 4 水田有效雨量估算法則(水門操作法)

降雨事件	降雨量 TR (mm)	斷水時間 Y (day)	日有效雨量 ER (mm)
1 日	$TR \leq 5$	不斷水	0
	$5 < TR \leq 9$	1	6
	$9 < TR \leq 30$	$1 + (TR - 9)/6$	$(1 + (TR - 9)/6) \times d_s \leq TR$
	$30 < TR$	$1 + (30 - 9)/6$	$(1 + (30 - 9)/6) \times d_s \leq TR$
N 日	$\Sigma TR \leq 5$	不斷水	0
	$5 < \Sigma TR \leq 9$	1	6
	$9 < \Sigma TR \leq 30$	$1 + (\Sigma TR - 9)/6$	$[(1 + (\Sigma TR - 9)/6) \times d_s] / N \leq TR$
	$30 < \Sigma TR$	$1 + [(30 - 9)/6] + N$	$[(1 + [(30 - 9)/6] + N) \times d_s] / N \leq TR$

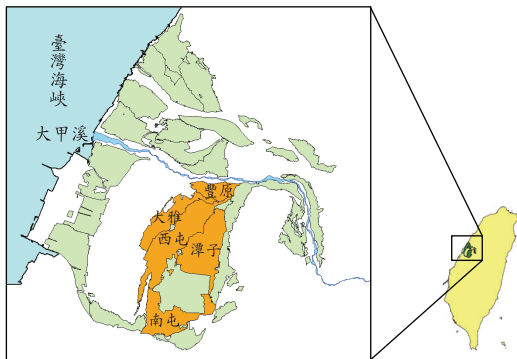


圖 4 研究區域-臺中葫蘆墩圳灌區

2.7 研究區域

本文以臺中葫蘆墩圳灌區為研究區域(圖 4)，該灌區為臺中農田水利會主要稻作區，灌區面積約 6,207.96 ha，葫蘆墩圳灌區涵蓋豐原、潭子、西屯、大雅、南屯等 5 處工作站，作物以兩期作水稻為主，水稻栽培方式與多數亞洲國家相同(De Datta, 1981; Pandey and Velasco, 1999)，均為移播方式，即水稻秧苗由育苗中心培植後移播至本田，灌溉水源主要取自大甲溪水系，為河川取水型灌區；灌溉用水來源乃由石岡壩管理中心配合灌溉計畫書之各月計畫灌溉水量進行調節配水；灌區土壤類別以 2006 年實測資料為基準，由壤土及砂壤土組成，分佈面積分別為 4,133.32 ha 及 2,074.64 ha，詳如表 5；系統輸水損失率 L 為 38%、灌區坡度約 0.6135%；一期作及二期作本田生長日數分別為 110 天及 95 天。

三、結果與討論

3.1 期作別用水實態分析

本文以葫蘆墩圳灌區於 2001~2005 年期間之灌溉用水記錄為主，進行水稻田兩期作栽培之單位面積用水量估算，並據以分析水田環境於灌溉期間之各項水文循環項目之消耗水量及比例分析。依葫蘆墩圳灌溉計畫用水量及實際取水記錄換算每日單位面積(ha)用水量如圖 5 及表 6 所示，結果顯示二期作單位面積之灌溉計畫水量為 20.44 mm/day，略高於一期作，一期作之實際取水量則低於灌溉計畫水量，顯示枯水期間水資源貧乏的現象，二期作期間適逢降雨豐水期，因此每日單位面積用水量 20.70 mm/day 略高於灌溉計畫值 20.44 mm/day；表 7 為統計本區域兩期作單位面積水田於本田灌溉期間之期作總用水量，結果顯示 5 年統計期間之一期作總用水量範圍為 2,041~2,314 (mm/期作·ha)，平均值為 2,145 (mm/期作·ha)，均高於二期作 1,864~2,036 (mm/期作·ha)，平均值為 1,942 (mm/期作·ha)，生長日數差異值 15 日應為主因。將表 7 結果與農委會(1999)統計水稻灌溉用水量基準(表 1)比較，顯示葫蘆墩圳水田灌溉用水基準相似於續灌條件下之用水基準。

3.2 各項水田需水及耗水參數推估

3.2.1 作物需水量

經濟部水利署(2008)推估臺灣 20 處氣象站之作物需水量，本文採用中央氣象局臺中氣象站

表 5 葫蘆墩圳灌區面積及土壤分佈資料

工作站	圳路	土壤比例(%)			土壤別	灌溉面積(ha)
		砂粒	粉粒	黏粒		
豐原	葫蘆墩圳幹線	50.52	37.12	12.36	壤土	87.00
	下溪洲支線	48.03	43.31	8.66	壤土	595.00
大雅	下埤幹線	60.63	33.47	5.90	砂壤土	164.86
	浮圳支線	55.93	37.62	6.45	砂壤土	377.08
	橫山支線	52.64	38.95	8.41	壤土	316.17
	中央支線	54.72	37.71	7.57	壤土	353.91
	大社支線	56.28	33.19	10.53	砂壤土	138.15
潭子	四張犁支線	49.99	42.98	7.03	壤土	648.33
	北屯支線	59.02	37.34	3.64	砂壤土	259.45
	東汴幹線	50.38	44.21	5.41	壤土	312.61
西屯	南門支線	54.05	37.97	7.98	砂壤土	557.00
	下埤分線	52.25	43.36	4.39	砂壤土	165.00
	草湳等三分線	60.53	34.27	5.20	砂壤土	29.00
	葫蘆墩圳西屯區	50.76	42.73	6.51	壤土	346.00
	廟前分線	56.06	41.75	2.19	砂壤土	78.00
	東門支線	45.01	47.72	7.27	壤土	611.00
	西汴幹線	50.21	40.85	8.94	壤土	542.00
南屯	南屯泉水區	51.53	41.58	6.89	壤土	297.30
	烏日泉水區	55.38	40.68	3.94	砂壤土	97.50
	頂橋子頭泉水區	48.03	41.60	10.37	壤土	24.00
	旱溪泉水區	55.97	39.97	4.06	砂壤土	208.60

表 6 葫蘆墩圳灌區兩期作別每日單位面積用水量(2001-2005 年)

期作別		年份					
		2001	2002	2003	2004	2005	5 年平均值
一期作	灌溉計畫	18.56	19.34	19.34	19.25	21.03	19.50
	實際取水	23.38	16.92	16.70	15.52	20.55	18.61
二期作	灌溉計畫	19.62	20.88	20.10	20.17	21.43	20.44
	實際取水	23.45	22.00	19.67	17.48	20.93	20.70

註：水田灌溉用水日數一期作為 110 天；二期作為 95 天。單位為 mm/期作·ha。

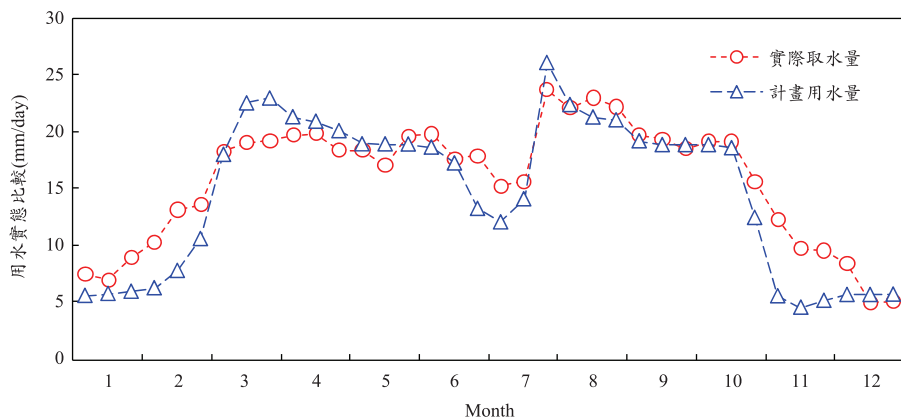


圖 5 葫蘆墩圳灌區單位面積之各旬用水實態比較(mm/day)

表 7 葫蘆墩圳灌區兩期作別單位面積用水量統計結果(2001-2005 年)

期作別		年份					
		2001	2002	2003	2004	2005	5 年平均
一期作	灌溉計畫	2,041	2,127	2,127	2,118	2,314	2,145
	實際取水	2,572	1,861	1,837	1,707	2,260	2,047
二期作	灌溉計畫	1,864	1,984	1,910	1,916	2,036	1,942
	實際取水	2,227	2,090	1,868	1,660	1,989	1,967

註：水田灌溉用水日數一期作為 110 天；二期作為 95 天。單位為 mm/期作·ha。

表 8 葫蘆墩圳灌區滲漏量推估

工作站	圳路	水田入滲 P (mm/day)	垂向入滲 P_v (mm/day)	垂向入滲 P_h (mm/day)
豐原	葫蘆墩圳幹線	8.80	7.83	0.97
	下溪洲支線	8.80	7.83	0.97
大雅	下埤幹線	11.50	10.23	1.27
	浮圳支線	11.50	10.23	1.27
	橫山支線	8.80	7.83	0.97
	中央支線	8.80	7.83	0.97
	大社支線	11.50	10.23	1.27
潭子	四張犁支線	8.80	7.83	0.97
	北屯支線	11.50	10.23	1.27
	東汴幹線	8.80	7.83	0.97
西屯	南門支線	11.50	10.23	1.27
	下埤分線	11.50	10.23	1.27
	草湳等三分線	11.50	10.23	1.27
	葫蘆墩圳西屯區	8.80	7.83	0.97
	廟前分線	11.50	10.23	1.27
	東門支線	8.80	7.83	0.97
	西汴幹線	8.80	7.83	0.97
南屯	南屯泉水區	8.80	7.83	0.97
	烏日泉水區	11.50	10.23	1.27
	頂橋子頭泉水區	8.80	7.83	0.97
	旱溪泉水區	11.50	10.23	1.27

(測站編號 467490)於 1999-2003 年期間之測站溫度、日最高溫度、日最低溫度、風速、2 公尺高之大氣壓等氣象參數資料，依(16)式~(17)式及表 2 推估 1~12 月份之參考作物需水量 ET_o 分別為 3.26、3.67、4.33、4.60、4.83、5.08、4.95、4.52、4.20、3.84、3.76、3.42 mm/day；1~12 月份的作物蒸發散量 ET_{crop} 計算結果分別為 3.03、3.38、4.33、4.60、5.46、5.74、5.00、5.02、4.66、4.72、4.63、3.18 mm/day；一期作及二期作之 ET_{crop} 分別為 526 (mm/期作·ha)及 459 (mm/期作·ha)。

3.2.2 水田入滲量

葫蘆墩圳灌區之水田滲漏量估算，本文將

表 5 各圳灌區之土壤粘粒比例值依(18)~(19)式、表 3 進行水田入滲量推估，結果顯示灌區平均水田入滲率為 9.70 mm/day；進一步將灌區坡度 $S = 0.6135\%$ 配合(21)、(22)式估算，分別獲得垂向滲漏比例 $\alpha = 0.8894$ 、橫向滲漏比例 $\beta = 0.1106$ ；研究灌區平均垂向滲漏 $P_v = 8.63$ mm/day、 $P_h = 1.07$ mm/day，兩期作之水田滲漏量分別為 1,067 (mm/期作·ha)及 922 (mm/期作·ha)，研究區內各圳灌區詳細結果如表 8 所示。

3.2.3 田間需水量

本研究區域各支線別水稻田之田間需水量 WR 依各月 ET_{crop} 及表 8 之水田入滲 P 值加總，

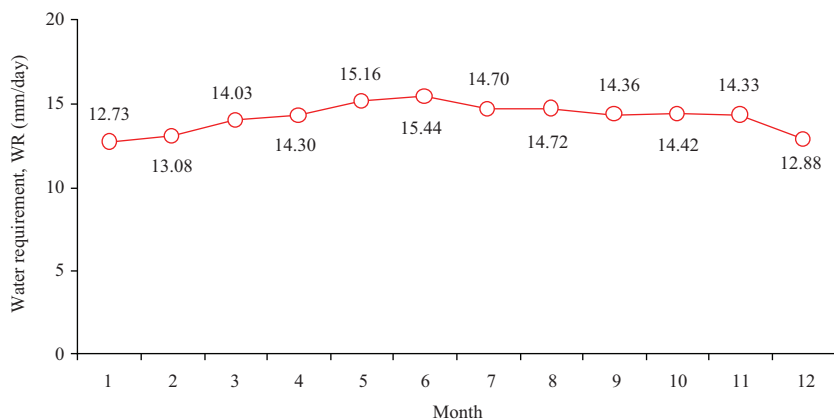


圖 6 葫蘆墩圳灌區田間需水量 WR 趨勢變化

並依各圳面積權重以加權方式計算全灌區田間需水量 WR 平均值如圖 6， WR 最大及最小值，分別發生於 6 月及 1 月， $WR_{max} = 15.44$ mm/day、 $WR_{min} = 12.73$ mm/day。本文依葫蘆墩圳一期作及二期作之本田生長日數計算各期作之 WR ，一期作及二期作分別為 1,593 (mm/期作·ha)及 1,381 (mm/期作·ha)，上述結果代表期作之田間耗水量，而非取水量；系統總灌溉用水量 DIR 以本區域之系統輸水損失 $L = 38\%$ 與兩期作之 WR 依 (1)式進行估算，結果顯示一期作及二期作之 DIR 分別為 2,570 (mm/期作·ha)及 2,227 (mm/期作·ha)，兩期作均高於表 1 及表 7，其潛在意義為系統輸水損失設定值有偏高現象。

3.2.4 水田有效雨量

本文以豐原工作站之雨量記錄進行有效雨量推估，其結果代表本灌區之有效雨量，雨量資料分析期間亦為 2001~2005 年期間，依據表 4 判別各降雨事件之降雨量為有效雨量 ER 或無效雨量 UR ，以計算日有效雨量為基礎，並累計為各旬或各月之累計值，成果如表 9，5 年平均年雨量為 1,785 mm/yr，年有效雨量為 791 mm/yr，其中以 10 月~4 月枯水期有效雨量利用率較高，約 76~92%，豐水期(5 月~9 月)較低，僅 42~68%。兩期作之有效雨量計算如表 10，結果顯示一期作總雨量 TR 為 463 (mm/期作·ha)，低於二期作 593 (mm/期作·ha)，但一期作之有效雨量 293 (mm/期作·ha)高於二期作的 242 (mm/

期作·ha)，其原因為一期作適逢梅雨季節，降雨日多、日降雨量相對較低但符合有效雨量定義者多，反觀二期作雖發生於豐水期，但降雨日數相對較低，雖部分高降雨量的暴雨事件構成總累計雨量高的現象，但無效雨量比例偏高，因此兩期作之有效雨量利用率分別為 63%及 41%，檢視影響上述現象之原因為二期作降雨事件包含短延時高降雨量的特性，暴雨事件的雨量超過水田可利用者(無效雨量)，溢流至灌排渠道，以逕流方式轉為明迴歸水。

3.2.5 渠道輸水損失量

渠道輸水損失為引水灌溉的損失量，灌溉期間之渠道輸水損失途徑為渠道水面蒸發及由渠道內面工滲漏至地表下；本研究區之輸水損失 $L = 38\%$ 為訂定灌溉計畫階段之參考值，實際渠道輸水損失則可透過現地觀測獲得，本文以實際取水量扣除田間需水量 WR 作為研究期間之輸水損失量。輸水損失量於輸水過程則轉化為水面蒸發量、垂向及橫向滲漏量，水面蒸發量以 ET_0 代表之，估算 ET_0 與總滲漏之比例分別為 0.3037 及 0.6927，滲漏部分之垂向滲漏 P_v 與橫向滲漏 P_h 分別為 0.6234 及 0.0693。兩期作輸水損失量估算如表 11，兩期作輸水損失量分別為 454 (mm/期作·ha)及 586 (mm/期作·ha)。

3.2.6 水田補注地下水量

水田補注地下水量主要由水田灌溉之垂向滲漏及渠道輸水損失垂向滲漏組成，葫蘆墩圳灌

表 9 葫蘆墩圳灌區有效雨量計算結果(2001-2005 年)

年份	雨量別	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年計
2001	TR	87	5	51	236	221	181	612	257	565	10	2	8	2,233
	ER	60	4	49	162	144	119	167	53	140	10	2	5	914
	ER/TR	69	80	96	69	65	66	27	21	25	100	100	63	65
2002	TR	11	2	18	7	161	86	336	136	109	20	5	47	936
	ER	9	2	11	8	110	74	195	115	84	20	2	45	673
	ER/TR	81	100	61	121	68	85	58	84	77	100	44	96	81
2003	TR	19	18	41	149	113	244	93	179	16	1	0	0	871
	ER	15	18	39	114	73	129	79	119	15	0	0	0	600
	ER/TR	81	100	95	77	65	53	85	66	97	0	N	N	72
2004	TR	14	77	83	94	177	69	1005	448	74	21	0	48	2,107
	ER	14	72	85	77	95	48	171	152	74	21	0	42	849
	ER/TR	96	94	103	82	54	70	17	34	100	100	N	88	76
2005	TR	13	189	258	38	375	870	476	399	108	13	12	29	2,778
	ER	10	107	152	43	75	168	99	173	44	13	10	29	922
	ER/TR	80	56	59	113	20	19	21	43	40	100	83	100	61
平均	TR	28	58	90	105	209	290	504	284	174	13	4	26	1,785
	ER	21	40	67	81	99	108	142	122	71	13	3	24	791
	ER/TR	82	86	83	92	54	59	42	50	68	80	76	87	71

註 1：一期作水田灌溉計畫用水日數為 110 天；二期作水田灌溉計畫用水日數為 95 天。

註 2：TR 為總雨量；ER 為有效雨量；單位為 mm/期作·ha。

註 3：ER/TR 為有效雨量利用率，單位為%。

表 10 葫蘆墩圳灌區兩期作別單位面積有效雨量統計結果(2001-2005 年)

期作別		年份	2001	2002	2003	2004	2005	5年平均
一期作	TR		538	205	357	353	861	463
	ER		384	164	304	257	359	293
	UR		155	41	54	97	502	169
	ER/TR		71	80	85	73	42	63
二期作	TR		1231	311	227	642	556	593
	ER		266	257	165	295	228	242
	UR		965	53	62	347	328	351
	ER/TR		22	83	73	46	41	41

註 1：一期作水田灌溉計畫用水日數為 110 天；二期作水田灌溉計畫用水日數為 95 天。

註 2：TR 為總雨量；ER 為有效雨量；UR 為無效雨量；單位為 mm/期作·ha。

註 3：ER/TR 為有效雨量利用率，單位為%。

區平均水田入滲率為 9.70 mm/day，垂向滲漏比例 $\alpha = 0.8894$ ；研究灌區平均垂向滲漏 $P_v = 8.63$ mm/day，兩期作之水田補注地下水由 $P_v = 8.63$ mm/day 與灌溉日數(一期作為 110 天，二期作為 95 天)之乘積可獲得如表 12 所示，一期作及二期作之水田補注地下水水量分別為 949 (mm/期作·ha)

及 820 (mm/期作·ha)；渠道輸水損失垂向滲漏分別為 278 (mm/期作·ha)及 365 (mm/期作·ha)；平均兩期作之補注地下水水量為 1,227 (mm/期作·ha) 及 1,185 (mm/期作·ha)。如何能提高水田的地下水補注量？Xu and Mermoud (2003)以玉米田為例，採用傳統耕種、無耕作、深耕等 3 種方式的

表 11 葫蘆墩圳灌區輸水損失計算結果(2001-2005 年)

年份		2001	2002	2003	2004	2005	5 年平均	
一期作	ET_o	313	86	78	37	213	145	
	P	P_v	599	164	149	70	408	278
		P_h	67	18	17	8	45	31
		小計	665	182	166	78	453	309
	L	978	268	243	114	667	454	
二期作	ET_o	260	218	150	86	187	180	
	P	P_v	528	442	304	174	379	365
		P_h	59	49	34	19	42	41
		小計	586	491	338	194	421	406
	L	847	709	487	280	608	586	

註： ET_o 為參考作物蒸發散量； L 為輸水損失量；單位為 mm/期作·ha。

表 12 葫蘆墩圳灌區兩期作別單位面積水田補注地下水量結果(2001-2005 年)

年份		2001	2002	2003	2004	2005	5 年平均
一期作	水田 P_v	949	949	949	949	949	949
	渠道 P_v	599	164	149	70	408	278
	小計	1,548	1,113	1,098	1,019	1,357	1,227
二期作	水田 P_v	820	820	820	820	820	820
	渠道 P_v	528	442	304	174	379	365
	小計	1,348	1,262	1,124	994	1,199	1,185

註：單位為 mm/期作·ha。

表 13 葫蘆墩圳灌區兩期作別單位面積明迴歸水推估結果(2001-2005 年)

年份		2001	2002	2003	2004	2005	5 年平均
一期作	ΔI_a	530	0	0	0	0	106
	UR	155	41	54	97	502	169
	小計	685	41	54	97	502	276
二期作	ΔI_a	363	106	0	0	0	94
	UR	965	53	62	347	328	351
	小計	1328	159	62	347	328	445

註： UR 為無效雨量； ΔI_a 為超量引灌部分；單位為 mm/期作·ha。

試驗，其研究結果顯示不同的耕作方式會引起土層入滲量的改變，間接影響土層的水分蓄存及移動、蒸發散量等水文參數的變化量，其原因為土壤層的水力傳導係數改變所致；其中傳統耕種及無耕作等措施的影響均屬微量，深層翻土耕作的方式則大幅改變水力傳導係數，有助於提高深層滲漏量，補注地下水；因此水田耕作於整田期間施以大型農機協助深層翻土工作，破壞牛踏層及長期湛水灌溉導致硬化的土層，應有助於提高地

下水的補注量。

3.2.7 水田迴歸水量

水田迴歸水量之估算，本文將明迴歸水及暗迴歸水分開計算；明迴歸水主要地表逕流形式排出灌區，包括超量引灌 ΔI_a (實際取水記錄扣除灌溉計畫水量)及降雨事件之無效雨量 UR 等兩部分；暗迴歸水包含灌溉期間水田橫向滲漏量及輸水過程之輸水損失量轉化為橫向滲漏量部分。表 13 及表 14 為明迴歸水及暗迴歸水估算成果，明

表 14 葫蘆墩圳灌區兩期作別單位面積暗迴歸水推估結果

期作別 \ 年份		2001	2002	2003	2004	2005	5 年平均值
一期作	水田 P_h	118	118	118	118	118	118
	渠道 P_h	67	18	17	8	45	31
	小計	184	136	134	125	163	149
二期作	水田 P_h	102	102	102	102	102	102
	渠道 P_h	59	49	34	19	42	41
	小計	160	151	135	121	144	142

註：單位為 mm/期作·ha。

表 15 葫蘆墩圳灌區兩期作別單位面積總迴歸水推估結果

期作別 \ 年份		2001	2002	2003	2004	2005	5 年平均值
一期作	明迴歸水	685	41	54	97	502	276
	暗迴歸水	184	136	134	125	163	149
	總迴歸水	869	177	188	222	665	424
二期作	明迴歸水	1,328	159	62	347	328	445
	暗迴歸水	160	151	135	121	144	142
	總迴歸水	1,489	310	197	468	472	587

註：單位為 mm/期作·ha。

迴歸水兩期作分別為 276 (mm/期作·ha)及 445 (mm/期作·ha)；暗迴歸水兩期作分別為 142 (mm/期作·ha)及 142 (mm/期作·ha)，本研究區案例顯示迴歸水明顯以明迴歸水形式為主，尤以二期作差異最大，明迴歸水產生量約為暗迴歸水之 3 倍，表 15 顯示兩期總迴歸水量分別為 424 (mm/期作·ha)及 587(mm/期作·ha)。

3.3 水田水收支平衡分析

本文將研究區域於 2001-2005 年期間之水田灌溉各項水循環參數分析如表 16，水收支平衡的估算乃將大型水田灌區視為一系統，其中進流量包含總降雨 TR 及實際引水量 $I_s \pm \Delta I_a$ 等兩項參數；歷經整期作之灌溉過程，系統出流量包含作物蒸發散量 ET_{crop} 、地下水補注量 G_r 、有效雨量 ER 、迴歸水量 RF 等 4 項參數；葫蘆墩圳水田系統一期作之進流量及出流量經分析後分別為 2,510 (mm/期作·ha)及 2,470 (mm/期作·ha)，經由水收支平衡原理估算後仍無法收斂的誤差量為

40 (mm/期作·ha)，比例約 4.67%，此部分水量為應用水收支平衡原理評估水田長期灌溉過程中各項水文循環參數計算的不確定部分，來源可能包含土層蓄存變化量及滲水深變化量被長期觀測條件下假設為平衡所致。二期作結果與一期作呈現高度相似現象，進流量及出流量經分析後分別為 2,560 (mm/期作·ha)及 2,473 (mm/期作·ha)，無法收斂的誤差量為 87 (mm/期作·ha)，比例約 5.18%。為評估水田系統的年用水量，本文茲將兩期作用水加總分析如表 17，進流量及出流量經分析後分別為 5,070 (mm/年·ha)及 4,944 (mm/年·ha)，無法收斂的誤差量為 126 (mm/年·ha)，比例約 4.91%。

本文進一步分析研究區域內之水田環境各項水文參數的比例，以說明水田長期灌溉歷程中，各種水量的消耗途徑及其比例，結果如表 18 所示，其中水田環境灌溉過程，以補注地下水為主要消耗途徑，約 48.80%，其比例與 Ji *et al.* (2007)於中國黑河流域灌區的研究成果相似，該

表 16 葫蘆墩圳灌區兩期作別水收支平衡分析結果

期作別	水收支項目		2001	2002	2003	2004	2005	平均值	
一期作	進流量	TR	ER	384	164	304	257	359	293
			UR	155	41	54	97	502	169
		$I_s \pm \Delta I_a$		2,572	1,861	1,837	1,707	2,260	2,047
		進流量 I		3,110	2,066	2,194	2,060	3,121	2,510
	出流量	ET_{crop}		526	526	526	526	526	526
		G_r		1,548	1,113	1,098	1,019	1,357	1,227
		ER		384	164	304	257	359	293
		RF_i		869	177	188	222	665	424
		出流量 O		3,326	1,980	2,115	2,023	2,907	2,470
	誤差	I-O		(217)	86	78	37	214	40
I-O %		6.97	4.17	3.57	1.79	6.85	4.67		
二期作	進流量	TR	ER	266	257	165	295	228	242
			UR	965	53	62	347	328	351
		$I_s \pm \Delta I_a$		2,227	2,090	1,868	1,660	1,989	1,967
		進流量 I		3,458	2,400	2,095	2,302	2,544	2,560
	出流量	ET_{crop}		459	459	459	459	459	459
		G_r		1,348	1,262	1,124	994	1,199	1,185
		ER		266	257	165	295	228	242
		RF_i		1,489	310	197	468	472	587
		出流量 O		3,561	2,288	1,945	2,216	2,357	2,473
	誤差	I-O		(103)	112	150	86	187	87
I-O %		2.98	4.67	7.17	3.74	7.36	5.18		

註：單位為 mm/期作·ha。

表 17 葫蘆墩圳灌區年度別水收支平衡分析結果

水收支項目		2001	2002	2003	2004	2005	5 年平均値	
水田系統進流量	TR	ER	650	421	469	551	586	535
		UR	1,120	94	115	444	830	520
	$I_s \pm \Delta I_a$		4,799	3,951	3,705	3,368	4,249	4,014
	進流量 I		6,568	4,466	4,288	4,362	5,665	5,070
水田系統出流量	ET_{crop}		985	985	985	985	985	985
	G_r		2,896	2,375	2,222	2,013	2,556	2,412
	ER		650	421	469	551	586	535
	RF_i		2,358	487	385	690	1,137	1,011
	出流量 O		6,888	4,268	4,060	4,239	5,264	4,944
I-O		(320)	198	228	123	401	126	
I-O %		4.87	4.44	5.32	2.82	7.08	4.91	

註：單位為 mm/期作·ha。

研究以 2004 年種植春麥的田間試驗為例，灌溉水源及降雨約會產生 43% (840 mm) 的深層滲漏量，此結果說明水田灌溉對於地下水資源涵養之重要貢獻。其次產生為迴歸水量，約 20.45%，作

物蒸發散量為 19.92%，有效雨量比例最低，僅 10.83%。比較上述參數於兩期作之變化，發現僅迴歸水量是二期作高於一期作之現象，其餘參數均是一期作比例高於二期作的現象。

表 18 水田環境各項耗水參數比例分析結果

水收支項目	一期作	二期作	年計
ET_{crop}	21.29	18.56	19.92
G_r	49.67	47.92	48.80
ER	11.87	9.79	10.83
RF_r	17.17	23.74	20.45

四、結 論

1. 水田單位面積灌溉水量受灌溉方式、田區土壤質地、水田氣候因子等影響而有差異，本文以台中葫蘆墩圳灌區為例，分析該區於壤土及砂壤土條件下，兩期作的田間需水量分別為 1,593 (mm/期作·ha) 及 1,381 (mm/期作·ha)；若考量輸水損失之引水量為 2,570 (mm/期作·ha) 及 2,227 (mm/期作·ha)。
2. 水田迴歸水量之分析顯示兩期作之明迴歸水及暗迴歸水比例為 1.85:1 及 3.13:1；有效雨量之利用，一期作之有效雨量(293 mm)及利用率(63%)高於二期作的 242 mm (41%)，顯示雨量利用對於水田一期作補助灌溉之重要性。
3. 水文應用水收支平衡原理分析大區域水田灌區之水分消耗特性，結果顯示長期灌溉歷程中，水田系統水量的消耗途徑及其比例，以補注地下水為主，約 48.80%，其強烈說明水田灌溉對於地下水資源涵養之重要貢獻，其次產生 20.45%迴歸水量，為水資源再利用之潛勢量，由作物消耗無法再利用者 19.92%，有效雨量比例最低，僅 10.83%。

參考文獻

1. Alavi, G., "The Impact of Soil Moisture on Stem Growth of Spruce Forest During a 22-year Period," *Forest Ecology and Management*, Vol. 166, pp. 17-33, 2002.
2. Abrisqueta, J. M., Ruiz, A., and Franco, J. A., "Water Balance of Apricot Trees (*Prunus armeniaca* L. cv. *Búlida*) Under Drip Irrigation," *Agricultural Water Management*, Vol. 50, pp. 211-227, 2001.
3. Andreu, L., Hopmans, J. W., and Schwankl, L. J., "Spatial and Temporal Distribution of Soil Water Balance for a Drip-Irrigated Almond Tree," *Agricultural Water Management*, Vol. 35, pp. 123-146, 1997.
4. Arora, V. K. and Gajri, P. R., "Performance of Simplified Water Balance Models Under Maize in a Semiarid Subtropical Environment," *Agricultural Water Management*, Vol. 31, pp. 51-61, 1996.
5. Bastiaanssen, W. G. M. and Chandrapala, L., "Water Balance Variability Across Sri Lanka for Assessing Agricultural and Environmental Water Use," *Agricultural Water Management*, Vol. 58, pp. 171-192, 2003.
6. Bouman, B. A. M., Wopereis, M. C. S., Kropff, M. J., ten Berge, H. F. M., and Tuong, T. P. "Water Use Efficiency of Flooded Rice Fields II. Percolation and Seepage Losses," *Agricultural Water Management*, Vol. 26, pp. 291-304, 1994.
7. Bouwer, H., *Groundwater Hydrology*, New York: McGraw-Hill, 1978.
8. Caro, R. and Eagleson, P. S., "Estimating Aquifer Recharge Due to Rainfall," *Journal of Hydrology*, Vol. 53, pp. 185-211, 1981.
9. Cabangon, R. J., Tuong, T. P., and Abdullah, N. B., "Comparing Water Input and Water Productivity of Transplanted and Direct-seeded Rice Production Systems," *Agricultural Water Management*, Vol. 57, pp. 11-31, 2002.
10. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., "Guidelines for Predicting Crop Water Requirements," *FAO Irrigation and Drainage Paper 24*, Rome, Italy, 1973.
11. De Datta, S. K., "Principles and Practices of Rice Production," John Wiley, New York, 1981.
12. FAO : <http://texaset.tamu.edu/cropcoe.php>
13. Ferguson, J. A., "Effect of Flooding Depth on Rice Yield and Water Balance". *Arkansas Farm Research*, Vol. 19, No. 3, p. 4, 1970.
14. Franco, J. A., Abrisqueta, J. M., Hernansáez, A.,

- and Moreno, F., "Water Balance in a Young Almond Orchard Under Drip Irrigation With Water of Low Quality, Agricultural Water Management, Vol. 43, pp. 75-98, 2000.
15. Guerra, L. C., Bhuiyan, S. I., Tuong, T. P., and Barker, R., "Producing More Rice with Less Water from Irrigated Systems," SWIM Paper 5. IWMI/IRRI, Colombo, Sri Lanka, pp. 24, 1998.
 16. Huang, H. C., Liu, C. W., Chen, S. K., and Chen, J. S., "Analysis of Percolation and Seepage Through Paddy Bunds," Journal of Hydrology, Vol. 284, pp. 13-25, 2003.
 17. Itakura, J., "Water Balance Model for Planning Rehabilitation of a Tank Cascade Irrigation System in Sri Lanka," IIMI Working Paper No. 3, International Irrigation Management Institute, Sri Lanka, ISBN: 92-9090-320-1, 1995.
 18. Jayatilaka, C. J., Sakthivadivel, R., Shinogi, Y., Makin, I. W., and Witharana, P., "A Simple Water Balance Modelling Approach for Determining Water Availability in an Irrigation Tank Cascade System," Journal of Hydrology, Vol. 273, pp. 81-102, 2003.
 19. Ji, X. B., Kang, E. S., Chen, R. S., Zhao, W. Z., Zhang, Z. H., and Jin, B. W., "A Mathematical Model for Simulating Water Balances in Cropped Sandy Soil With Conventional Flood Irrigation Applied," Agricultural Water Management, Vol. 87, pp. 337-346, 2007.
 20. Kassam, A., and Smith, M., "FAO Methodologies on Crop Water Use and Crop Water Productivity," Expert meeting on crop water productivity. Paper No. CWP-M07, Rome, Italy, 2001.
 21. Kerkides, P., Michalopoulou, H., Papaioannou, G., and Pollatou, R., "Water Balance Estimates Over Greece," Agricultural Water Management, Vol. 32, pp. 85-104, 1996.
 22. Kukal, S. S. and Aggarwal, G. C., "Percolation Losses of Water in Relation to Puddling Intensity and Depth in a Sandy Loam Rice (*Oryza sativa*) Field," Agricultural Water Management, Vol. 57, pp. 49-59, 2002.
 23. Malek, E., Bingham, G. E., McCurdy, G. D., and Hanks, R. J., "Determination of Evapotranspiration From an Alfalfa Crop Irrigated With Saline Waste Water From an Electrical Power Plant," Irrigation Science, Vol. 13, pp. 73-80, 1992.
 24. Mercer, J. W. and Faust, C. R., "Ground Water Modeling: Mathematical Models," Ground Water, Vol. 18, No. 3, pp. 212-227, 1980.
 25. Moret, D., Braud, I., and Arrúe, J. L., "Water Balance Simulation of a Hryland Soil During Fallow Under Conventional and Conservation Tillage in Semiarid Aragon, Northeast Spain," Soil & Tillage Research, Vol. 92, pp. 251-263, 2007.
 26. Odhiambo, L. O. and Murty, V. V. N., "Modeling Water Balance Components in Relation to Field Layout in Lowland Paddy Fields. I. Model Development," Agricultural Water Management, Vol. 30, pp. 185-199, 1996(a).
 27. Odhiambo, L. O. and Murty, V. V. N., "Modeling Water Balance Components in Relation to Field Layout in Lowland Paddy Fields. II. Model Application," Agricultural Water Management, Vol. 30, pp. 201-216, 1996(b).
 28. Palomo, M. J., Moreno, F., Fernández, J. E., Díaz-Espejo, A. and Girón, I. F., "Determining Water Consumption in Olive Orchards Using the Water Balance Approach," Agricultural Water Management, Vol. 55, pp. 15-35, 2002.
 29. Pandey, S. and Velasco, L., "Economics of Direct Seeding in Asia: Patterns of Adoption and Research Priorities," International Rice Research Notes, Vol. 24, No. 2, pp. 6-11, 1999.
 30. Panigrahi, B. and Panda, S. N., "Field Test of a Soil Water Balance Simulation Model," Agricultural Water Management, Vol. 58, pp. 223-240, 2003.
 31. Philip, J. R., "The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations,"

- Soil Science, Vol. 84, pp. 257-264, 1957.
32. Philip, J. R., "The Theory of Infiltration: 7," Soil Science, Vol. 85, pp. 333-337, 1958.
 33. Sanchez., P. A., "Puddling Tropical Rice Soils: 2. Effects of Water Losses," Soil Science, Vol. 115, No. 4, pp. 303-308, 1973.
 34. Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J. S., and Papendick, R. I., "Estimating Generalized Soil- water Characteristics from Texture," Soil Science Society of America Journal, Vol. 50, No. 4, pp.1031-1036, 1986.
 35. Sharma, P. K. and De Datta, S. K. "Effects of Puddling on Soil Physical Properties and Processes," Soil Physics and Rice, pp. 217-234, IRRI, Philippines, 1985.
 36. Shan, C. and Stephens, D. B., A Generalized Solution to Poned Infiltration, Lawrence Berkeley National Lab, CA, 1992.
 37. Tsai, S. M., Chen, S. and Wang, H. Y., "A Study on the Practical Model of Planned Effective Rainfall for Paddy Fields in Taiwan," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 13, No. 2, pp. 73-82, 2005.
 38. Tsubo, M., Fukai, S., Tuong, T. P. and Ouk, M., "A Water Balance Model for Rainfed Lowland Rice Fields Emphasising Lateral Water Movement Within a Toposequenc," Ecological Modelling, Vol. 204, pp. 503-515, 2007.
 39. Tuong, T. P., Wopereis, M. C. S., Marquez, J. A., and Kropff, M. J., "Mechanisms and Control of Percolation Losses in Irrigated Puddled Rice Fields," Soil Science Society of America Journal-SSSAJ , Vol. 58, No. 6, pp. 1794-1803, 1994.
 40. Wickham, T. H. and Singh, V. P., "Water Movement Through Wet Soil." In: Soils and Rice. IRRI, Los Banos, Philippines, pp.337-357, 1978.
 41. Wopereis, M. C. S., Wosten, J.H.M., Bouma, J., and Woodhead, T., "Hydraulic Resistance in Puddled Rice Soils: Measurement and effects on water movement," Soil Tillage Res. 24, pp. 199-209, 1992.
 42. Wopereis, M. C. S., Bouman, B. A. M., Kropff, M. J., and Maligaya, A. R. "Water Use Efficiency of Flooded Rice Fields I. Validation of the Soil-Water Balance Model SAWAH," Agricultural Water Management, Vol. 26, pp. 277-289, 1994.
 43. Xu, C. Y., Seibert, J., and Halldin, S., "Regional Water Balance Modelling in the NOPEX Area: Development and Application of Monthly Water Balance Models," Journal of Hydrology, Vol. 180, pp. 211-236, 1996.
 44. Xu, D. and Mermoud, A., "Modeling the Soil Water Balance Based on Time-dependent Hydraulic Conductivity Under Different Tillage Practices," Agricultural Water Management, Vol. 63, pp. 139-151, 2003.
 45. Zulu, G., Toyota, M., and Misawa, S-i., "Characteristics of Water Reuse and Its Effects on Paddy Irrigation System Water Balance and the Riceland Ecosystem," Agricultural Water Management, Vol. 31, pp. 269-283, 1996.
 46. 丁澈士、廖秋榮、林龍海，「農業灌溉用水對地下水補注影響之調查評估：水稻灌溉部分研究(I)」，財團法人曹公農業水利研究發展基金會研究報告，1998。
 47. 丁澈士、廖秋榮、林龍海，「農業灌溉用水對地下水補注影響之調查評估：水稻灌溉部分研究(II)」，財團法人曹公農業水利研究發展基金會研究報告，1999。
 48. 丁澈士、鄒禕，「農業灌溉用水對地下水補注影響之調查評估：水稻灌溉部分研究(III)」，財團法人曹公農業水利研究發展基金會研究報告，2000。
 49. 甘俊二、陳清田、陳焜耀，「臺灣地區作物需水量推估模式之合適性研究」，農業工程學報，第42卷，第2期，8-19頁，1996。
 50. 行政院農業委員會，「農田水利業務簡介」，24-26頁，1999。
 51. 朱榮彬，「農田高度利用與有效排水系統設置之研究」，台灣水利，第36卷，第1期，

- 23-48 頁，1988。
52. 林俊男，「地理資訊系統應用於乾早期安排停灌順序之研究」，農委會研究報告，1993。
53. 林癸妙，「水田回歸水量之研究」，碩士論文，中央大學土木工程學系，1998。
54. 施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二，「灌溉排水原理」，277 頁，1996。
55. 洪毓謙，「以砂箱實驗探討現地複合土層之滲流機制」，碩士論文，中央大學土木系，1999。
56. 吳珮菁，「水田迴歸水之模式及驗證」，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，1999。
57. 姚銘輝、陳守泓，「利用渦流相關系統量測水稻田蒸發散量及作物係數」，2005 水稻田農業多樣性機能研討會，227-239 頁，2005。
58. 張文亮，「由土壤水深層滲漏估計地面水對地下水的補助量」，臺灣農業工程學會，82 年度農業工程研討會論文集，67-70 頁，1993。
59. 張文亮，「雲林田洋地區土壤水分滲漏之估計」，農業工程學報，第 40 卷，第 2 期，44-48 頁，1994。
60. 張本初，「作物需水量最佳模式之探討」，碩士論文，臺灣大學農業工程研究所，1990。
61. 張煜權，「臺灣之地域性水田灌溉用水量之推估研究」，碩士論文，臺灣大學農業工程研究所，1995。
62. 陳尙、李德茲，「以水分當量推算水稻灌溉需水量之研究」，農業工程學報，第 10 卷，第 4 期，15-40 頁，1964。
63. 陳清田，「以 Penman-Monteith 法估算區域性參考作物需水量之研究」，嘉義技術學院學報，第 58 期，53-62 頁，1998。
64. 陳焜耀、沈克毅，「水田滲漏對環境污染之研究」，臺灣省農田水利會聯合會，1995 中日農業水利研討會，56-70 頁，1995。
65. 陳豐文、陳獻、黃勝頂，「台灣地區農地迴歸水之潛勢分析」，台灣水利，第 53 卷，第 3 期，74-89 頁，2005。
66. 陳獻，「台灣桃園地域における水管理と有効雨量に関する研究」，博士論文，日本北海道大学，北海道，1989。
67. 陳世楷，「水稻田入滲試驗與數值模擬」，國立台灣大學農業工程研究所，博士論文，1999。
68. 陳世楷、劉振宇、黃偉哲，「水田入滲水力特性之試驗研究」，台灣水利，第 46 卷，第 4 期，52-64 頁，1998。
69. 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，1-23 頁，2000。
70. 農業工程研究中心、臺灣大學，「水稻田生態環境保護規劃及示範」，農委會成果報告，1997。
71. 劉振宇、施嘉昌、林俊男、張斐章、蘇明道、鄭克聲，「水稻田生態環境保護規劃及示範-子題：水稻田對地下水補注功能評估分級」，農業工程研究中心研究報告，1996。
72. 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，38-54 頁，1999。
73. 經濟部水利署，「農業灌溉用水合理用水量範圍之檢討與修訂」，2008。
74. 經濟部水利司，「研擬合理農業用水標準 (I)」，台北市七星農田水利研究發展基金會，1995。
75. 臺灣大學農業工程學系，「臺灣之水稻灌溉」，中國農村復興聯合委員會水利工程組印行，1970。
76. 駱安華，「水稻灌溉水量之研究」，台灣水利，第 10 卷，第 3 期，155-167 頁，1962。
77. 簡傳彬，「水稻田入滲及回歸水之試驗及模擬」，國立中央大學土木工程研究所，博士論文，1999。

收稿日期：民國 101 年 4 月 12 日
修正日期：民國 101 年 7 月 2 日
接受日期：民國 101 年 7 月 24 日