

嘉南地區加強灌溉管理實務探討

ENHANCE THE MANAGEMENT OF IRRIGATION IN CHIA-NAN AREA

國立中央大學
土木工程學系
特聘教授

吳瑞賢*
Ray-Shyan Wu

國立中央大學
土木工程學系
碩士

鄭安成
An-Cheng Jheng

國立中央大學
土木工程學系
博士班研究生及
財團法人農業工程研究中心
助理研究員

吳幸娟
Hsing-Chuan Wu

摘要

臺灣的農業用水為各項標的中最多，約占比 70%。面對水資源匱乏的情況下，如何有效的調配農業水資源，透過加強灌溉管理下合理水量運用，以達到節水之功效，為重要課題。本研究探討嘉南區域的農業水資源系統，以分析曾文-烏山頭水庫灌溉系統對嘉南地區施行既定灌溉制度以及在水庫水情不佳下施行加強灌溉用水管理實務下比較分析。以西鹿草小組為例，透過田間水文分析，建立合理灌溉水量調配模式以及田間水平衡方程式，評估水文因子變化量對灌溉管理之影響，並說明加強灌溉管理實務操作下之節水效益。結果顯示實施加強灌溉管理操作下，2014 年至 2018 年間一期稻作平均可減少灌溉水深 34%，有效雨量可提升 26%，入滲量減少 29%，以 2018 年一期作水稻為例，實際操作資料顯示灌溉水深與灌溉計畫相比減少 636.8 mm。進一步進行該次灌溉情況下，實施加強灌溉管理之合理水量與停灌面積之探討，結果顯示合理停灌面積為該次耕作面積之 20%，若於灌溉第 60 日起因灌溉水量不足，則建議停灌面積為耕作面積之 40%。

關鍵詞：灌溉管理、系統動力模式。

* 通訊作者，國立中央大學土木工程學系特聘教授
32001 桃園市中壢區中大路 300 號，raywux@gmail.com

ENHANCE THE MANAGEMENT OF IRRIGATION IN CHIA-NAN AREA

Ray-Shyan Wu*

National Central University
Department of Civil Engineering

An-Cheng Jheng

National Central University
Department of Civil Engineering

Hsing-Chuan Wu

National Central University
Department of Civil Engineering
Agricultural Engineering
Research Center

ABSTRACT

Taiwan's agricultural water accounts for about 70% of the total water consumption. In the face of water scarcity, enhancing management of irrigation can save substantial water resource. This study explores the agricultural water resources system in Chianan (Chiayi and Tainan) region. Taking into the discussion on Current Irrigation System and Strengthening Water Management methods, this study applies system dynamic model to establish irrigation water management model, combining rainfall and irrigated water. This study indicates in the case of enhancing management, reduce irrigation water depth by 33%, effective rainfall by 26%, and infiltration by 29%. The first rice crop period in 2018, the actual irrigation depth was 636.8 mm lower than the plan. The results show that the reasonable irrigation-free area should be 20% of the irrigation area. If the amount of irrigation water is insufficient on the 60th day of irrigation period, 40% of the area is suggested to be irrigation-free.

Keywords: Irrigation management, System dynamic model, Irrigation association.

一、前言

1.1 研究動機與目的

臺灣位於歐亞大陸與太平洋交界帶，全年溫暖且潮濕，屬海島型氣候，年降雨量相當豐沛，平均年降雨量可達 2,500 mm，然而臺灣受到季風及地形因素影響，其降雨時空分配不均，降雨集中在每年 5 月至 10 月的梅雨季節及颱風季節，且地形上坡陡流急，水資源不易保存。近年來受到全球氣候變遷影響，旱澇極端事件頻傳，依據中央氣象局觀測資料顯示，臺灣在過去一百多年來，全年平地溫度上升約 1.3 °C，顯見未來發生乾旱事件頻率漸增，且臺灣中南部區豐枯水期差異大，如何有效調配有限的水資源，分析現況困境擬定調適策略，提出改善方案，減輕枯水期的缺水旱象實為重要課題。

現行供水系統的調整為時下刻不容緩的議題，必須有效率的利用水資源，開源節流成為水資源管理運用上的主要任務。標的用水中農業用水占總用水之七成，是當前用水量最多的用水標的，而現行的政策在面臨缺水情況時，因農田灌溉耐旱容忍度較民生與工業用水高，經常調撥農業用水移作民生及工業用水，而造成農田停灌休耕，導致糧食危機及農業經濟損失等，水資源如何永續，為當今必須著手改善的問題。

本研究旨在探討嘉南地區農業水資源管理實務，藉由瞭解嘉南地區農業供需水情形，比較灌溉系統營運管理措施，建立灌溉用水模型，探討管理處執行加強灌溉管理之效益。

1.2 文獻回顧

本研究探討嘉南地區加強灌溉管理之灌溉方法與成效，主要探討一期作水稻在實施加強灌溉管理及調節灌溉用水情形下，使田間之灌溉水量滿足水稻生長需求，掌水工依據現地作物生長需求調配灌溉水量，以達到水資源分配有效利用。研究參考郭勝豐等 (2006) 所研究田間蒸發散量灌溉估算之水稻灌溉用水需求；亦參考陳清田等 (2014) 建立之乾旱用水營運模式，以嘉南管理處學甲灌溉技術推廣中心試驗田區，探討水稻生長期間輪灌齊聚之節水效益，結果顯示開花期實施 7 天輪灌期距時，其對產量影響甚微。嘉南地區之水稻生長研究，參考林羿汝等 (2017) 應用區域降雨、作物生長特性、輪流灌

溉方式，研究嘉南地區水稻種植日期，對產量、生長期距、作物需水量、灌溉用水量及水資源生產力之影響，結果顯示水稻生長期距與作物需水量及灌溉水量皆有遞減趨勢。本研究利用系統動力學模式建立模型，如吳瑞賢等 (2018) 利用系統動力模式，透過灌溉用水模式模擬不同水旱作面積比例情形下作物需水量變化，並探討灌溉用水情形，作為後續農業灌溉用水及地下水管理運用。本研究主要參考臺中農改場及現地耕作模式之水稻灌溉方式進行模式建立及模擬。

嘉南地區農業灌溉水源主要仰賴曾文-烏山頭水庫，由於氣候變遷影響，降雨不均導致估水期長，李建志 (2006) 以曾文-烏山頭水庫為例，提出農業用水移用之合理補償之研究。許勝雄等 (2013) 探討氣候變遷對嘉南地區灌溉用水調配之影響及因應，建立減水深法、輪距延長法及減少灌區面積法，並配合地下水及迴歸水之應用，以因應近年來氣候變遷影響灌溉水源。經濟部 (2013) 在水文環境變遷情境下嘉南地區水源調度運用方案研究指出，一期作第 8 ~ 14 旬較無法滿足基準配水量，二期作第 16 ~ 28 旬供水水量可以達到大於基準分配水量，建議調整水稻耕作期程，整體可減少約 300 萬 m³ 用水量。在本研究主要探討在未實施休耕的情況下，藉由加強灌溉管理，在掌水工實務操作下，以達可期節水灌溉之成效。

二、模式簡介及理論分析

2.1 系統動力模式

系統動力學 (System Dynamics) 由美國 MIT 史隆管理學院的 Jay W. Forrester 教授的著作「工業動力學」，早期主要運用於工業企業管理之問題，然隨著改良模式及社會發展，其應用範圍越來越廣大，廣泛運用於各領域系統，故稱為系統動力學；其結合了控制論 (Cybernetics)、系統論 (System Theory)、資訊理論 (Information Theory)、決策理論 (Decision Theory) 及電腦模擬 (Computer Simulation) 等理論的科學。國內亦有許多學者利用系統動力模式進行水資源管理之相關研究 (陳世偉, 2007; 蔡家民, 2008; 劉日順, 2018; 游雅筑, 2018)，因其可以良好的呈現隨時間改變之系統動態行為特性，顯示系統與時間之連動性，具有預測系統動態之功能。本研究所使用 VENSIM 軟體為系統動力學中數種應用軟體之一，

其主要有四個基本元件，元件間運用箭頭線段加以連結。

2.2 田間水平衡理論

本研究基礎理論為水收支平衡法 (Water Balance)，在控制系統內依據質量守恆定律，其系統入流量等於出流量，推估灌溉水量與出流量之間的變化，其中三維微觀孔隙介質方程式如下所示：

$$q_{in} - q_{out} = \frac{ds}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

式中 q_{in} 為系統入流量，包括降雨量、烏山頭水庫灌溉引水量； q_{out} 為系統出流量，包括作物蒸發散量、地表逕流、入滲量； ds 為田間儲蓄水量，包括田間湛水量與土壤水分含量之總和； t 為時間，則圖 1 為三維水田水文循環系統簡易模型。

本研究中將灌區視為一個控制容積並將田區系統內各項參數及機制進行分析，其考量參數包含如降雨、作物蒸發散量、灌溉水量、土壤水分含量等。研究區域耕地長年種植水稻，且灌區存在牛踏層之情況下，灌區內控制系統之如下：

$$S_i = S_{i-1} + P_i + Ch_i + GW_i - ET_i - DR_i - DF_i - R_{hi} \dots\dots\dots(2)$$

式中 S 為田間蓄水量； P 為降雨量； Ch 為田間引灌渠道水量； GW 為地下水抽取量； ET 為作物蒸發散量； DR 為田間溢流量； DF 為垂向滲漏量； R_h 側向滲漏量。

本研究灌區由田間水位決定高低作為基準，判斷水稻灌溉是否須進行引灌，決定之判斷式條件如下所示：

$$\text{If } S_{i-1} + P_i < B_{i,n}, \text{ then } IR_i > 0 \dots\dots\dots(3)$$

式中 B 為水稻灌溉基準水深，加強灌溉管理執行時參考現地耕作習慣調整； IR 為田間需引灌水量； R_i 為渠道水量； St 為目標湛水深 (田間蓄水深+土壤

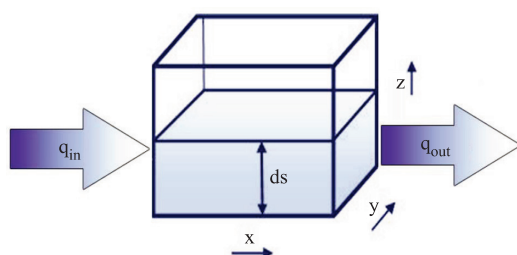


圖 1 三維微觀孔隙介質流示意圖

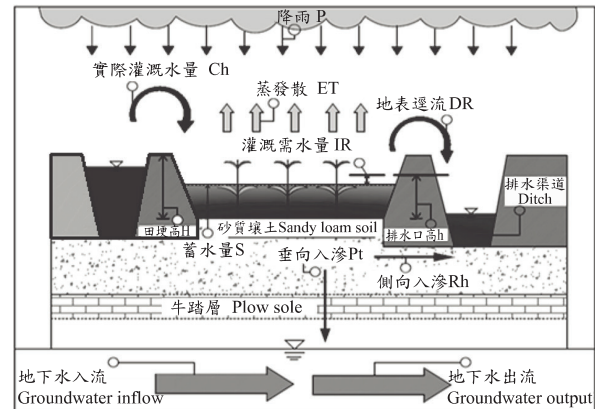


圖 2 田間水平衡示意圖

飽和水深)； i 為時間，圖 2 為田間水平衡參數及水田運作機制示意圖。

2.3 土壤水平衡理論

本研究利用土壤水收支平衡法 (Soil Water Balance)，估算土壤含水量，然因根系土層具有儲存水分之功能，只要作物還在根系可用土壤水分之前，即使水分未達飽和含水量之情形，不作連續性之水分補充也可以維持作物生長，根系土層水分控制方程式之關係可由下式表示：

$$SM_i = SM_{i-1} + P_i + IR_i + GW_i + CR_i - ET_i - DR_i - DP_i \dots\dots\dots(4)$$

式中 SM 為土壤含水量； P 為降雨量； IR 為田間需引灌水量； GW 為地下水抽取量； CR 為地下水毛管補給率； ET 為作物蒸發散量； DR 為田間溢流量； DP 為入滲量； i 為時間，圖 3 為土壤水平衡示意圖。

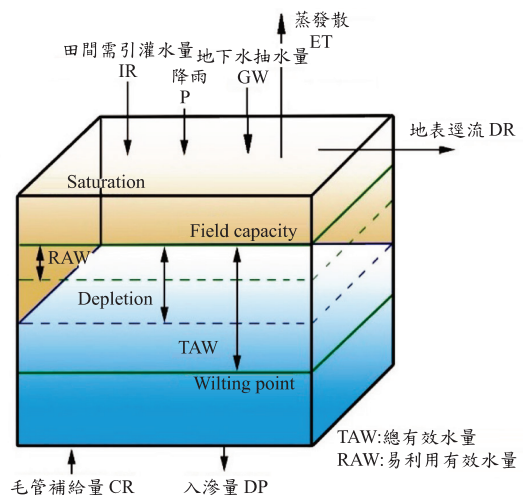


圖 3 土壤水平衡示意圖

2.4 作物蒸發散演算

作物蒸發散量 (Evapotranspiration) 係指田間之作物葉面蒸散量與田區自由水面或土壤面蒸發量之總和，亦被稱為作物需水量 (Consumptive Use of Crops)，以 ET_{crop} (mm/day) 表示。國際糧農組織 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 於 1977 年所建議使用之 Modified Penman Method 公式，估算作物蒸發散量 ET_0 (Reference Crop Evapotranspiration)，然陳清田等 (1997) 指出臺灣地區較適合使用之作物蒸發散公式，為國際灌排協會 (International Commission on Irrigation and Drainage, ICID) 於 1994 年所公佈之 Penman-Monteith 公式。本研究推求作物需水量係使用之 Pan Evaporation 法，利用蒸發皿蒸發量為氣象因子之綜合指標計算，且考量作物種植情形與其生長階段之作物係數，推求作物需水量較為簡便，可依據各地區域進行調整評估，推估作物蒸發散，計算公式如下所示：

$$ET_{crop} = K_c \times ET_0 \quad (5)$$

式中 K_c 為作物係數 (Crop Coefficient)，其隨著作物種植情形與其生長階段而有所不同，可為作物生長指標，本研究根據甘俊二 (1997) 研究水稻作物生長階段之作物係數。

本研究計算蒸發散之因子，除了根據作物型態及其生長階段來決定作物係數 K_c 值計算作物蒸發散，亦須先判斷是否有蒸發散情形發生，根據 FAO-56 定義當土壤水分低於土壤凋萎點 (Wilting Point) 時，此時蒸發散為零，其物理意義為植物根部無法再吸收水分時之含水量，即無蒸發散發生，因此，本研究於計算作物蒸發散前，進行蒸發散發生與否之判斷：

$$ET_i = \begin{cases} K_c \times ET_0 & \text{if } S_{i-1} > W_p \\ 0 & \text{if } S_{i-1} \leq W_p \end{cases} \quad (6)$$

$$W_p = Sd \times \theta_{wp} \quad (7)$$

式中 S 為田間蓄水深 (mm)； Sd 為土層厚度； W_p 為土壤凋萎點水深 (mm)； θ_{wp} 為土壤凋萎點含水率，土壤含水率低於此值時，作物產生不可回復之凋萎，本研究區域為砂質壤土，設定容積率為 6%； K_c 為作物係數； ET_0 為參考作物蒸發散量 (mm)； i 為時間。

2.5 灌溉需水量演算

灌溉需水量須考慮作物於灌溉期間之蒸發散損

失、有效降雨、滲漏、輸水損失，以及人為操作等因素下，為滿足作物生長之所需灌溉水量，其計算方式為：

$$GI_i = IR_i + CN_i \quad (8)$$

$$CN_i = \frac{GI_i}{(1 - CNr_i)} - GI_i \quad (9)$$

式中 GI 為灌溉需水量； IR 為田間需引灌水量； CN 為輸水損失； CNr 為輸配水損失率； i 為時間。

2.6 滲漏量演算

2.6.1 垂向滲漏量

依據陳世楷 (1999) 及 Sharma and De Datta (1985) 分別針對不同田區且不同灌溉條件下進行試驗，結果顯示位在根系土層下方之牛踏層有明顯減少入滲率及垂向入滲量之情形，因牛踏層之水力傳導係數遠小於根系土層之水力傳導係數，且在不同根系土壤質地，會有不同之滲漏量，因此，模式假設當水入滲經過牛踏層後，即成為地下水補注量。

本研究將田間分為湛水、土壤飽和及土壤水分消耗三個階段計算 (Bhadra *et. al*, 2013)，模式中田間容水量 (FC) 為判斷入滲與否基準，其判斷式為：

$$DF_i = \begin{cases} P_t & \text{if } S_{i-1} > FC \\ 0 & \text{if } S_{i-1} \leq FC \end{cases} \quad (10)$$

$$FC = Sd \times F \quad (11)$$

其中 P_t 為滲漏量 (mm/day)，由達西定律 (Bear, 1979) 計算如下：

$$P_t = k_p \times \frac{h_t + l_m}{l_p} \quad (12)$$

令 $C_p = k_p / l_p$ ，則 (12) 可改寫成下式：

$$P_t = C_p \times (h_t + l_m) \quad (13)$$

式中 P_t 為垂向入滲量 (mm/day)； Sd 為土壤厚度 (本研究設定為 30 cm)； F 為田間容水率 (%)； k_p 為牛踏層的水力傳導係數 (mm/day)； h_t 為前一天蓄水深 (mm)； l_p 為牛踏層厚度 (mm)，參考陳世楷 (1999) 設為 7.5cm； l_m 為泥濘層厚度 (mm)； C_p 為傳輸係數 (day^{-1})。

2.7 模式建立

本研究系統共分成三個輪灌區，主要種植作物為

水稻，灌區內由坎前分線制水閘取入共有 3 座手動取水門，分別為西鹿草小給一取水門、西鹿草小給一之六取水門及西鹿草中給線取水門，依據取水門順序依序給水，當田間達灌溉需水深度則停止供水或不供水。本研究依據田間水平衡原理與土壤水平衡理論，建立推估田間需水量及田間排水量之模式，並模擬水田間動態情形，且將各坵塊納入本系統計算模式。

本研究使用嘉南管理處灌溉流量資料與鹿草工作站實測雨量資料進行模擬，並參考當地農民經驗灌溉方式推估用水情形進行模擬。在本研究中設定執行加強灌溉管理情境時，仍須滿足作物最低生長需求灌溉水量，在供水設定上起始灌溉日起第 1 天至第 20 天為秧苗期，為插秧整田期，在此整田階段田間必須有適度湛水深度，以便利耕耘機進行插秧，同時亦減少雜草滋生，於第 20 天起則會開始進行供斷間隔，而此階段為稻作生長期，在本研究區採輪灌供水，每坵塊依序輪灌，當執行加強灌溉管理時，即在此階段進行水資源的有效調配運用，於第 55 天至第 65 天，此階段為分蘖期結束，稻作將進入幼穗生長期，在耕作上會進行曬田（又稱斷根），此階段的田間水量可以維持較低，於第 85 天起水稻進入孕穗期後，即將進入成熟期，對於灌溉區水量的需求會大幅度增加，在灌溉配水上要儘可能地維持土壤飽和之條件，可避免導致作物收成減少。在本研究中，觀察現地水稻生長情形，加強灌溉管理條件下，須滿足最低條件整理如表 1 所示。

表 1 現地執行加強灌溉管理水稻生長最低條件

開始灌溉日數	生長期	控制點	灌溉田面湛水深 (mm)	備註
1	成活期至分蘖期	保持存活	10-20	保留湛水深
21	成活期至分蘖期	保持存活	10-20	保留湛水深
30	成活期至分蘖期	以不低於田間容水量為原則 (執行加強灌溉管理灌溉用水減供)	10-20	開始執行輪流灌溉
35	分蘖始期		10-20	
53	有效分蘖終期		0	進行曬田可拉長間斷天數
57	幼穗分化期		0-30	
70	幼穗形成終期	以達到土壤飽和為原則	20-30	水量盡可能充足若灌溉水量不足恐影響收成效益
75	乳熟期		30-50	
80	黃熟期		30-50	
90	完熟期		30-50	

資料來源：嘉南管理處鹿草工作站。

表 2 2014 年至 2018 年各輪區灌溉面積

輪區別/年分	2014 (ha)	2015 (ha)	2016 (ha)	2017 (ha)	2018 (ha)
西鹿草 1 區	55.85	休耕	52.4	50.18	51.81
西鹿草 2 區	41.55	休耕	40.32	37.92	41.45
西鹿草 3 區	44.83	休耕	43.92	41.45	42.38

三、研究概述

本研究區域位於臺灣中部八掌溪支線坎前分線灌區內西鹿草水利小組，為嘉南管理處所屬灌溉區域，為二期作灌溉系統，灌溉水源來自於烏山頭水庫，實際水稻灌溉面積約 136 公頃，土壤性質為砂質壤土質地，2014 年至 2018 年各輪區灌溉面積如表 2 所示。

3.1 水文資料

本研究區域屬嘉南平原八掌溪流域位處臺灣中部地區，屬亞熱帶季風型氣候，冬季東北季風南下受中央山脈阻隔，夏季西南季風盛行，午後局部熱對流影響下，夏季午後易產生熱雷雨。本研究流域年平均降雨量 1,700 mm，雨量多集中於 5 月～9 月的豐水期如圖 4，年平均溫度約為 24 °C 左右。

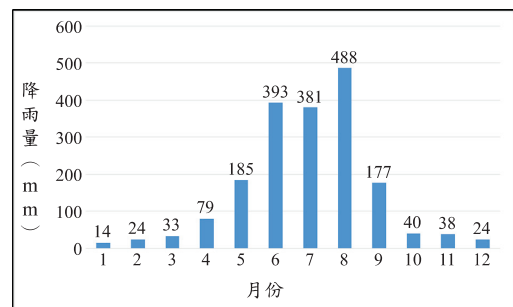


圖 4 2014 年至 2015 年嘉南地區之月平均雨量

3.2 灌區灌溉水源及灌溉制度

嘉南地區因氣候條件合宜，具有大片廣闊平原，適合從事農作生產，而臺灣南部日照時數長，地區降雨時空分布不均，且無大型蓄水設施，使得嘉南平原面積廣大，但無法提供穩定的生產量。烏山頭水庫為臺灣日治時代由日本水利工程師八田與一規劃設計興建，於 1930 年完工後，灌溉面積增加，農作物產量大幅提升，由於灌溉區域廣闊，水庫水量有限，因此設計 3 年一作輪灌制度，此灌溉模式雖然大幅改善灌

溉條件，而土地仍無法達到有效利用。有鑒於此，1967 年規劃興建曾文水庫，1974 年完工後，提供較多的水資源做為南部地區的水源調度使用，灌溉區域如圖 5，曾文水庫與烏山頭水庫串聯營運，水資源供給增加，但仍無法滿足全灌區作為雙期作田的需求水量，故將三年一作田，改善為三年二作田，增加水稻、甘蔗及雜作等作物灌溉，以提升嘉南地區農業生產力，1976 年頒布曾文-烏山頭水庫灌制度執行方法，如圖 6 所示。

嘉南地區的灌溉水源主要來自曾文-烏山頭水

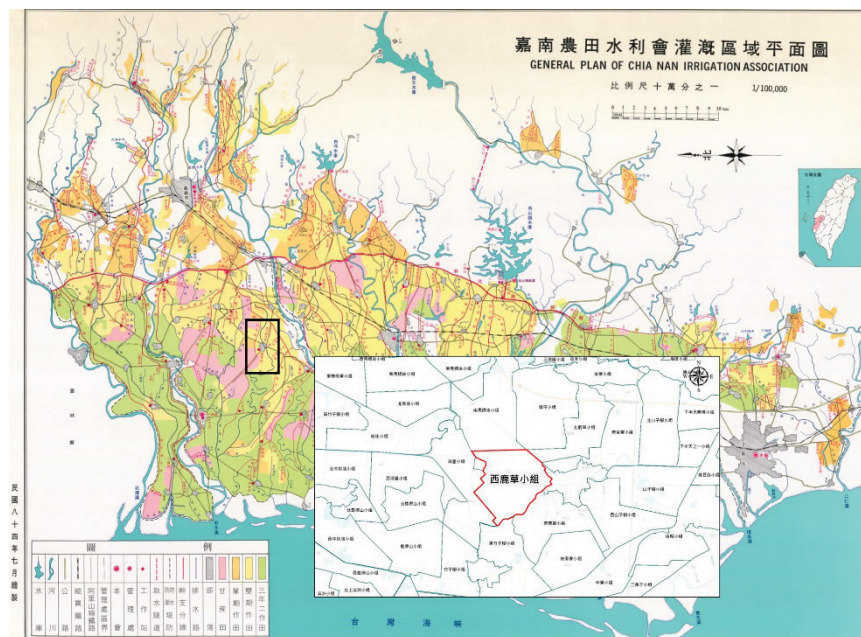
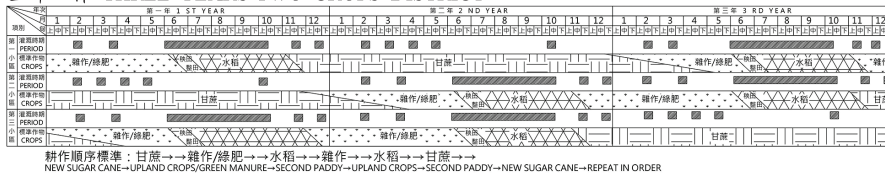


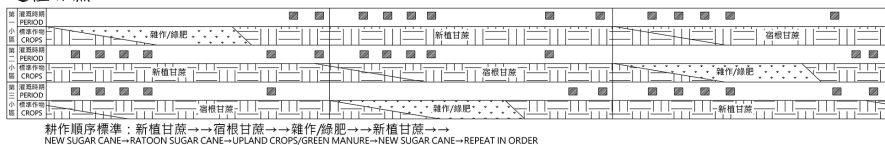
圖 5 嘉南管理處灌溉區平面圖

曾文—烏山頭水庫灌區耕作方式與灌溉制度標準圖 CROPPING PATTERN C.N.I.A.

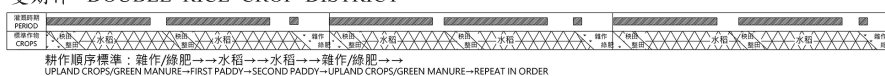
三年二作 THREE YEARS-TWO CROPS DISTRICT



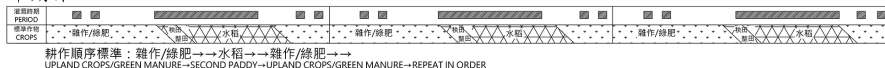
連植甘蔗 SUGAR CANE DISTRCT



雙期作 DOUBLE RICE CROP DISTRICT



單期作 SINGLE RICE CROP DISTRICT



☐ 水稻 (CROPS) ☐ 甘蔗 (SUGAR CANE) ☐ 雜作/綠肥 (UPLAND CROPS/GREEN MANURE)

圖 6 曾文-烏山頭水庫灌區耕作灌溉制度標準圖

庫，嘉南管理處屬水庫型管理處，發展出特有的掌水工制度，掌水工起源於 1930 年代時期，主要由當地農民所組成，或由水利小組兼任，由於嘉南地區灌溉面積涵蓋嘉義及臺南縣市，灌溉面積約 7 萬公頃，嘉南管理處承襲過往傳統，沿用掌水工制度，轄區內共有 1,260 名掌水工，每位掌水工責任區灌區範圍約 30 至 70 公頃不等，主要負責調配水源及田間灌溉管理，至現地將水源調配至中給及小給渠道中，並協助巡視水路與維修責任區域內的給水路，以確保灌溉地有足夠水源供灌，於缺水情況時，需協助日夜巡視圳路及調控轄區內水門，調配水源以滿足轄區內灌溉用水量。嘉南管理處輪灌設計書採用之灌溉期距為 7.5 日，灌溉期距滿足情況下調整灌溉天數與間斷天數，並由管理處配發給每灌溉地輪灌計畫時間表，表中記載該灌溉地所分配的灌溉時間與灌溉水量，由掌水工負責水門的調節與加強灌溉巡視，在掌水工實施加強灌溉管理下，可進一步節省灌溉用水量，於缺水情況時，可避免嘉南地區大範圍停灌休耕，可有效節省農業灌溉用水，亦可提供其他用水標的，如民生及工業用水使用。

3.3 灌溉管理模式

灌溉管理模式可分為一般灌溉管理與加強灌溉管理，一般情況下水庫水位位於規線上限，可滿足各項用水標的使用，核配水量較多，灌溉管理執行上較容易完成灌溉任務。一般灌溉管理依據輪灌計畫順序，發予灌輪給水計畫通知單並依序配水供灌，每塊灌地均分配水量，掌水工定時調整水門以輪流灌溉，每次輪灌期間可引灌一次以上，花費人力工資較少；加強灌溉管理為水庫水情不豐之情況下，灌溉供水量依據水庫水情斟酌減量，並由掌水工實施責任灌溉，每塊灌地無固定輪灌順序及時間表，灌溉情況以水稻為優先灌溉，掌水工必須隨時留意各渠道引水供灌之情況，引灌適量水深，每次供灌已完成一次引灌為目標，花費人力較多，灌溉管理方式比較如表 3。

嘉南地區曾文-烏山頭水庫三年輪灌區（合併用區）內，在輪灌設計上每一坵塊田的灌溉條件為每 7.5 日取水引灌一次，當水稻進入生長期階段，會視水稻生長情形進行調節性的供水數日與斷水數日以進行節水，常見的供斷日數為通水 10 日、斷水 5 日或通水 9 日、斷水 6 日。

然而 2018 年一期稻作期間水庫水情不佳，曾文-烏山頭水庫蓄水量快速減少，如圖 7，在加強灌溉管理期間，所採取的減少供水日數、增加斷水日數，以

表 3 一般灌溉管理與加強灌溉管理之比較表

一般灌溉管理	加強灌溉管理
水庫水情較豐	水庫水情較枯
依輪灌時間表進行配水灌溉	無固定輪灌時間表
每塊灌溉地分配水量	水稻優先灌溉
掌水工定時調整水門	掌水工責任灌溉
夜間餘水較多	不分日夜責任配水
每次供水可引灌一次以上	每次供水供灌一次為目標
工資少，人力省	工資多，人力增

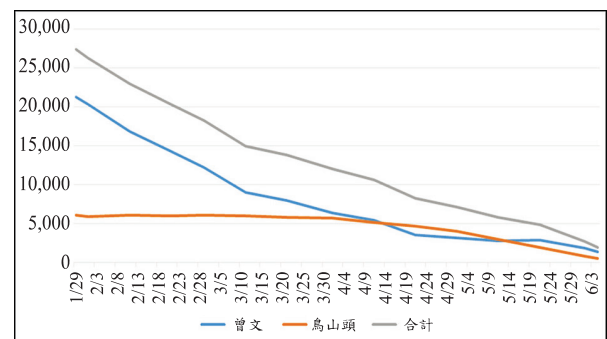


圖 7 2018 年一期稻作期間曾文-烏山頭水庫水量合計變化圖

減少灌溉水量損失，而供斷日數則必須視水庫水情與水稻生長特性作為考量依據，於水稻營養生長期期間可延長斷水日數，在一期稻作期間斷水 9 日，而不影響稻作生長；水稻生殖生長期期間，稻作需水量較多，則必須彈性調整灌溉水源的供斷天數，亦稱為滾動式水情決策。

四、結果與討論

4.1 系統演算

本研究系統模式之計算流程，研究區域給排水路分明，且灌區分為多個坵塊，建置輪區之灌溉系統，當坵塊因降雨或灌溉產生之田間餘水時，其溢流方向均往一旁的小排水路流動；模式依灌溉計畫調控灌溉用水及灌溉方法進行每日灌區供需用水的模擬，模擬作物需水量每日田間需水量。

4.1.1 計算流程

本研究系統模式之計算流程，為水稻灌溉計算，水稻栽培灌溉水深管理，其設定初始插秧後田間水深

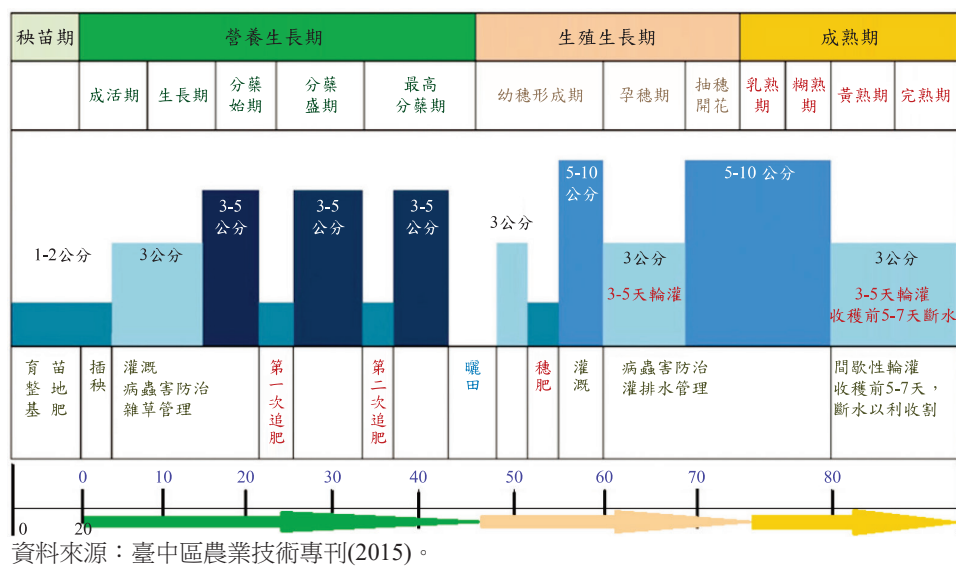


圖 8 水稻栽培各生育時期的灌排水管理

為 0 公分，之後隨生長期所需之水量設定田間水深，參考臺中區農改場之各生長階段所需目標湛水深及現地耕作習慣，如圖 8 水稻栽培各生育時期的灌排水管理。

模式參照作物灌溉時程及相關參數資料，對灌區田間蓄水變化、灌溉需水量、作物蒸發散量及排水量等水文因子進行計算，考慮田間降雨量扣除入滲量及作物蒸發散量之田間水深是否高過排水口高度，及考慮灌溉用水效益最大化，田間湛水深高於排水孔高度有則會產生排水出流量。

4.1.2 輸入資料

本研究模擬基本參數資料，為降雨量、蒸發散量及作物係數等水文因子等相關參數，並依據灌區之水稻耕作時程帶入模式中進行運算，詳述如下：

1. 降雨量：依據臺灣嘉南管理處鹿草工作站之實測日降雨資料，取 2014 年到 2018 年一期作期間之每日降雨資料，如表 4。
2. 作物蒸發散量：利用鄰近嘉南管理處灌溉技術推廣中心 A 型蒸發皿之日蒸發量資料，以作物係數及土壤校正係數進行田間蒸發散量運算。
3. 入流量：依據坎前分線地三號制水閘監控站每日記錄之水位紀錄，利用現地量測之率定曲線，換算每日入流量。
4. 田區初始容量：本研究水稻模擬期間為整田結束後，於插秧期開始模擬，因此土壤水分含量設定為飽和狀態，且有蓄水深 3 公分，模式設定耕犁層厚度等於土壤厚 30 公分，灌區土壤為砂質壤土。
5. 田區滲漏量：本研究模式計算滲漏量是以田間容

表 4 2014 年至 2018 年一期作各旬降雨資料 (mm)

旬/年度	2014	2015	2016	2017	2018
1 月上旬	0.0	0.0	64.5	0.0	46.5
1 月中旬	0.0	6.0	18.5	0.0	0.0
1 月下旬	0.0	0.0	47.0	0.0	6.0
2 月上旬	9.5	0.0	2.5	0.0	6.5
2 月中旬	4.0	51.0	2.5	0.0	0.0
2 月下旬	0.0	30.0	1.0	1.0	5.5
3 月上旬	0.0	0.0	30.5	7.0	1.0
3 月中旬	8.0	20.5	36.0	0.0	44.0
3 月下旬	40.5	5.5	24.0	9.0	0.0
4 月上旬	14.0	4.5	20.0	0.0	0.0
4 月中旬	3.0	36.5	154.5	74.5	6.5
4 月下旬	0.0	0.0	7.3	27.5	0.0
5 月上旬	69.5	0.0	1.5	0.0	56.0
5 月中旬	44.0	100.0	15.0	18.5	0.0
5 月下旬	63.5	408.0	33.5	37.5	0.0

資料來源：嘉南管理處鹿草工作站。

- 水量 (FC) 作為判斷門檻值，如田間貯蓄水量高於田間容水量即產生滲漏量，否則為無滲漏發生。
6. 灌區出水口高度：依據水稻不同生育階段之湛水深度訂定出水口高度，本研究參考現地農民耕作習慣所提供的適當灌溉用水管理作為目標湛水深及灌溉出水口高度，本研究田埂高度設定為 10 公分。
 7. 坵塊面積：依鹿草工作站統計灌區面積劃分種植水稻坵塊面積，且不包含灌區中建物或其他作物之面積。

表 5 2014 年至 2018 年各種灌溉管理模擬結果

年度	稻作	灌溉模式	累積灌溉水深 (mm)	累積有效雨量 (mm)	累積蒸發散量 (mm)	累積入滲深度 (mm)	節水比
2014	一期	一般灌溉管理	815.6	179.0	360.5	469.7	17.26%
		加強灌溉管理	674.8	192.5	331.4	401.3	
2015	一期	休耕	-	-	-	-	-
2016	一期	一般灌溉管理	1058.5	221.3	336.3	589.2	43.34%
		加強灌溉管理	599.7	336.1	332.1	478.0	
2017	一期	一般灌溉管理	1282.4	96.6	401.4	595.5	26.87%
		加強灌溉管理	937.8	122.5	378.1	449.8	
2018	一期	一般灌溉管理	1406.2	100.5	451.3	611.8	45.29%
		加強灌溉管理	769.4	125.5	402.2	400.1	
平均	一期	一般灌溉管理	1140.7	152.7	390.9	548.5	34.65
		加強灌溉管理	745.4	194.2	390.9	383.8	

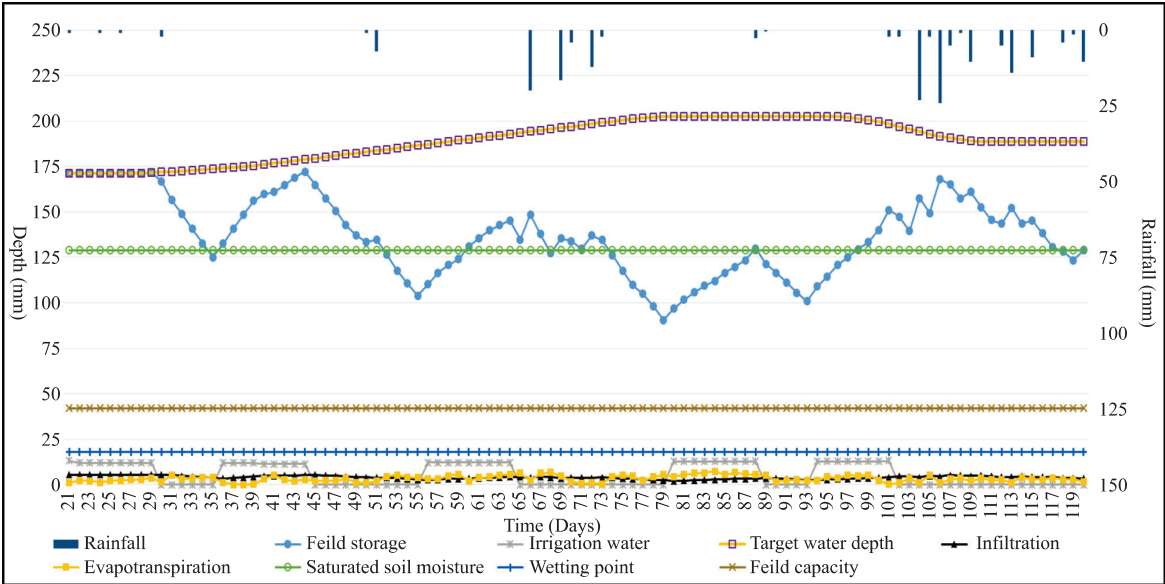


圖 9 2014 年一期稻作灌溉實際水文因子變化圖

4.2 模式模擬結果

本研究情境模擬時間為 2014 至 2018 年種植之水稻一期作期間，依照嘉南管理處灌溉計畫與烏山頭灌溉系統之實際灌溉日期，配合作物生長之相關係數進行模擬，模擬田間水位變化，並探討灌溉過程中田間用水之情形。

研究主要討論灌溉水深、有效雨量、蒸發散量及入滲量，其中有效雨量為降雨發生時，未有排水出流情況下，可貯存作為補充灌溉水源之水量，當加強灌溉管理情況下土壤含水量較低，相同降雨情況下發生出流之水量較少，有效雨量則較多。

4.2.1 一期稻作灌溉 (2014 ~ 2018 年) 模擬

1. 情境分析

本研究模擬 2014 年至 2018 年間西鹿草小組灌區一期作水稻種植，採用嘉南管理處鹿草工作站實際種植資料，2015 年一期稻作供灌期間，由於水庫水情不佳，本研究區域耕地因全面性休耕，故無相關灌溉資料。本文呈現耕作期間為灌溉開始日起第 21 天起至起始灌溉日第 120 天之模擬結果，如下所述。在本研究中定義節水比為加強灌溉管理情況下相對於一般灌溉管理情況下之減少灌溉水深比例。

2. 模擬結果

2014 年開始灌溉日期為 1 月 16 日，自第 1 天起至第 120 天灌溉實際累計水文因子如後所述，灌溉水深為 815.6 mm，有效雨量深度為 179.0 mm，蒸發散量為 360.5 mm，入滲量為 469.7 mm，如圖 9 所示。

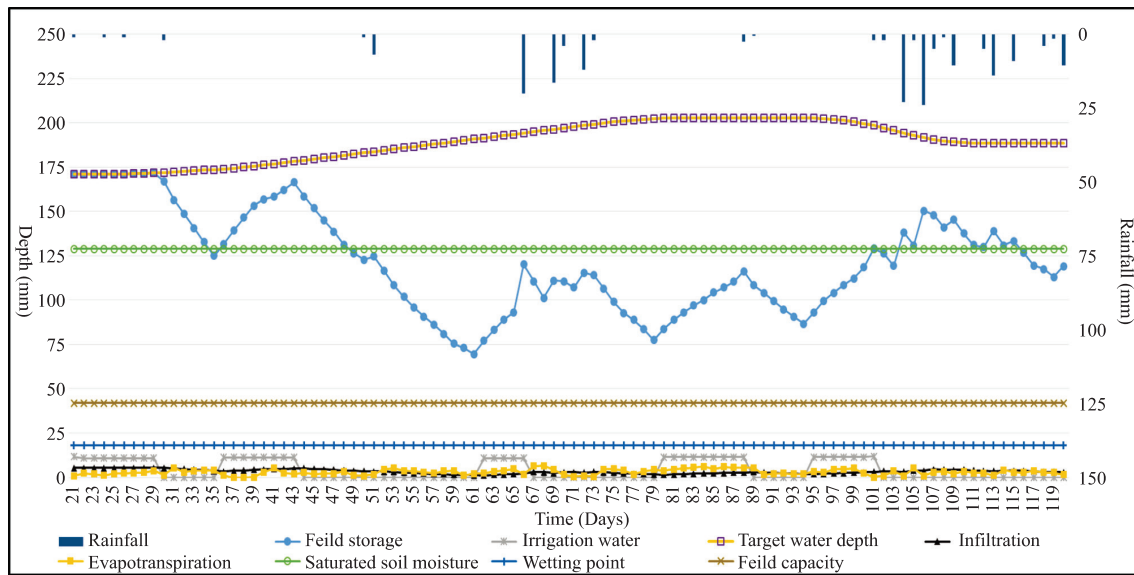


圖 10 2014 年一期稻作加強灌溉管理水文因子變化圖

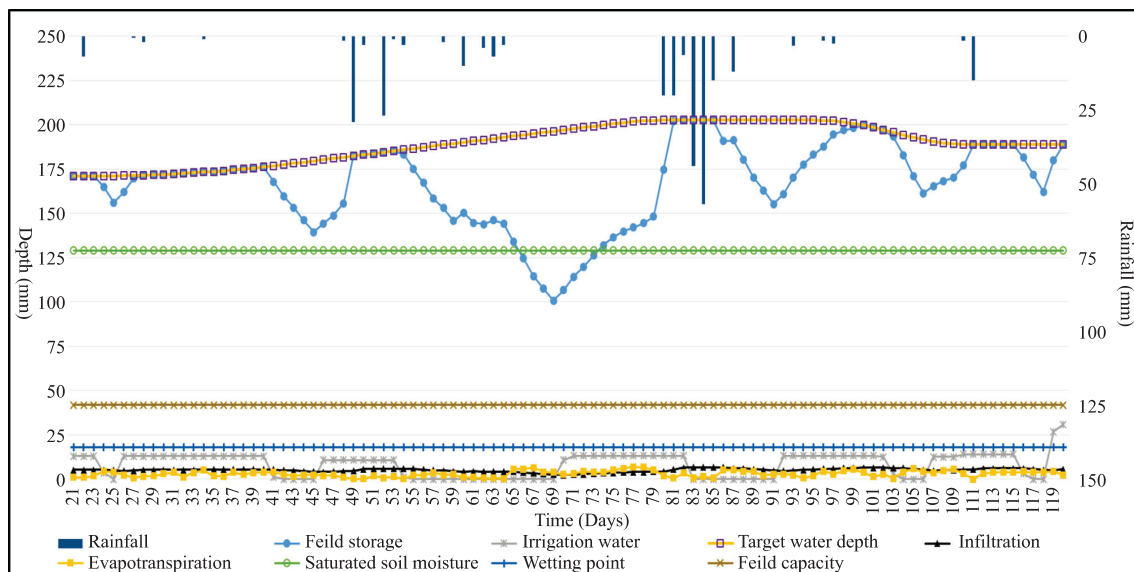


圖 11 2016 年一期稻作灌溉實際水文因子變化圖

若水情不豐情況下則實施加強灌溉管理，以盡可能減供能滿足作物生長為原則灌溉供水情況，灌溉水深為 674.8 mm，有效雨量深度為 192.5 mm，蒸發散量為 331.4 mm，入滲量為 401.3 mm，如圖 10 所示。因此在實施加強灌溉管理的情況下，可以減少 140.8 mm 灌溉水深。由於 2014 年初水庫水情不佳，灌溉初期實施加強灌溉管理，減少供灌水量，而於灌溉期間由於水庫集水區降雨，故解除加強灌溉管理恢復一般灌溉管理模式，整體節水效率約為 17.26%。

2016 年開始灌溉日期為 1 月 21 日，自第 1 天起至第 120 天灌溉實際累計水文因子如後所述，灌溉水深為 1058.5 mm，有效雨量深度為 221.3 mm，蒸發散

量為 338.5 mm，入滲量為 571.0 mm，如圖 11 所示。在水庫水情不豐之情況下實施加強灌溉管理，以盡可能減供能滿足作物生長為原則灌溉供水情況，灌溉水深為 599.7 mm，有效雨量深度為 336.1 mm，蒸發散量為 338.5 mm，累計入滲量為 445.0 mm。因此在實施加強灌溉管理的情況下，可以減少 458.8 mm 灌溉水深。該年一期稻作期間降雨日數分布較為均勻，因此在加強灌溉管理情況下，降雨可補助作為灌溉用水，相對於一般灌溉管理情況下可減少灌溉水深，整體節水效率約為 43.34%。

2017 年開始灌溉日期為 1 月 21 日，自第 1 天起至第 120 天灌溉實際累計水文因子如後所述，灌溉水

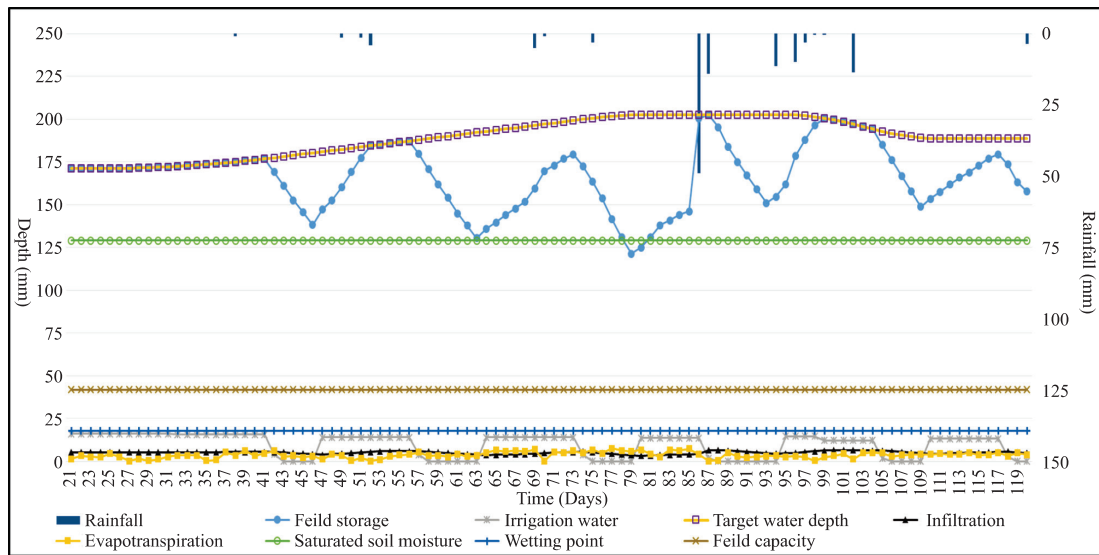


圖 12 2017 年一期稻作灌溉實際水文因子變化圖

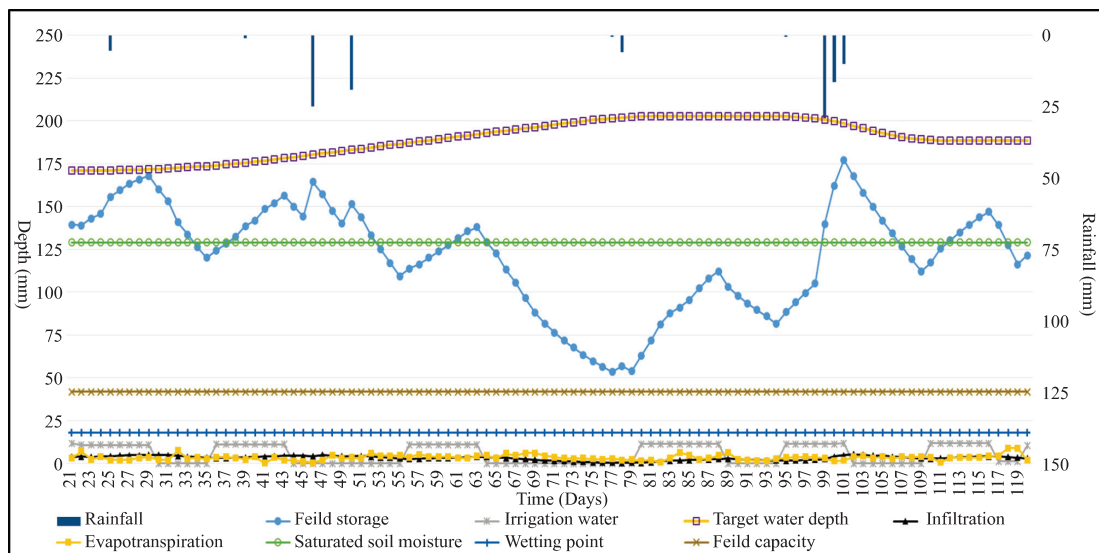


圖 13 2018 年一期稻作灌溉實際水文因子變化圖

深為 1,282.4 mm，有效雨量深度為 96.6 mm，蒸發散量為 401.4 mm，入滲量為 595.5 mm，如圖 12 所示。在水庫水情不豐情況下實施加強灌溉管理，以盡可能減供能滿足作物生長為原則灌溉供水情況，灌溉水深為 937.8 mm，有效雨量深度為 122.5 mm，蒸發散量為 378.1 mm，累計入滲量為 449.8 mm。因此在實施加強灌溉管理的情況下，可以減少 344.6 mm 灌溉水深，整體節水效率約為 26.87%。

2018 年一期稻作由於水庫水情不佳，因此延後灌溉起始日程，開始灌溉日期為 1 月 29 日，並於第 1 天起即實施加強灌溉管理，以減供查察水量 30% 為原則，自第 1 天起至第 120 天灌溉實際累計水文因子如後所述，灌溉水深為 769.4 mm，此為加強灌溉管理

實施下實際灌溉水量，有效雨量深度為 125.5 mm，蒸發散量為 402.2 mm，入滲量為 400.1 mm，如圖 13 所示。因此探討若水情豐沛情況下實施之灌溉管理方法比較供水情況，灌溉水深為 1,406.2 mm，有效雨量深度為 100.5 mm，蒸發散量為 451.3 mm，累計入滲量為 611.8 mm，如圖 14 所示。因此在本次實施加強灌溉管理的情況下，有效減少 636.8 mm 灌溉水深，整體節水效率約為 45.29%。於 2018 年一期稻作灌溉期間，由於水庫水情不佳，致使灌溉用水供水量減少，故由掌水工責任灌溉並執行間歇輪灌，然而在灌溉後期階段，水稻生長進入成熟階段，稻作之需水量較大，在本研究灌溉區域內少數農民因耕作習慣，自行抽取地下水作為灌溉補助水源，造成灌溉實際水深

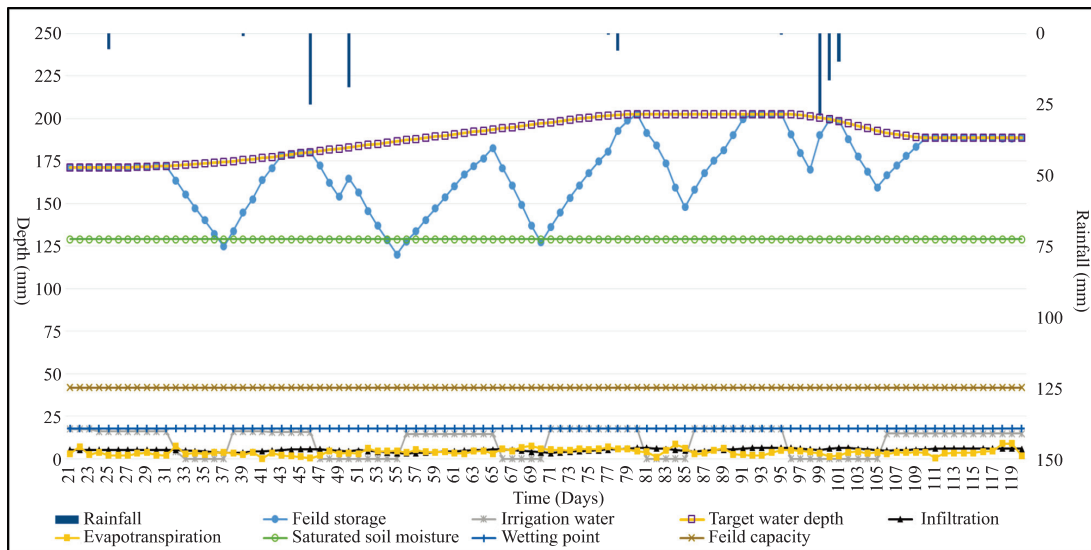


圖 14 模擬 2018 年一期稻作灌溉無加強灌溉管理水文因子變化圖

與計畫灌溉水深差異甚大。此係與計畫用水量相比，實際灌溉水量會依現地供灌情形進行調整。

一般條件下，輪灌之執行準則，會依照輪灌設計書，依設計配水成數及供給時間，掌水工僅負責維持渠道水門控制，加強灌溉管理之執行上，嚴格執行依現地耕作物配水情況，如有休耕或轉作之田地，由源頭減少水量配給，並在幹支分線上加強勸導取締盜水情況，現地供灌條件，由掌水工執行田間用水分配，掌水工多為實際耕作者，對於作物的實際生長需水情況較為了解，與耕作者間多維持良好之聯繫，其對於所負責之責任擔當區作物生長情況熟稔，依照作物各生長階段現地經驗所需水量，在秧苗營養生長期間，適度供灌水量，分蘖期間依現地條件，與工作站進行滾動檢討，視情況調整斷水天數，孕穗期至收成階段，藉由其耕作經驗，可依稻作成熟情況，可減少灌溉水量，藉由基層互動串聯，通知各田地引灌時間，各小區輪灌期間單一渠道供灌，減少渠道輸水損失，並及時與工作站用水調節人員保持聯繫，實施滾動式檢討策略，以達節水成效。

4.3 案例討論-以 2018 年一期稻作為例

研究分析 2018 年一期稻作灌溉實績，在加強灌溉管理實施情境下，分析現地執行灌溉任務之操作情形，從灌溉配水情況與掌水工實際執行方式，以及水稻生長進行綜合評估。

4.3.1 加強灌溉管理實務操作

1. 水庫水情

2018 年原訂灌溉計畫之開始灌溉日為 1 月 21 日，然而由於水庫水情不佳，故延後至 1 月 29 日開始灌溉，而原訂 3 月 1 日至 3 月 15 日為第一次春季甘蔗雜作供灌計畫，亦延至 3 月 1 日至 3 月 7 日，由於在三月上旬時水庫水量急遽減少，考量曾文-烏山頭水庫蓄水情況，實施間斷供灌制度，分成三階段滾動式水情管理，並依據現地稻作生長需求調整供斷日數，然於灌溉第 60 天時，曾文-烏山頭水庫合計水量僅剩一億兩千萬立方公尺，若無降雨發生之情況，極可能無法完成一期稻作供灌。

2. 節水措施與操作方法

2018 年一期水稻灌溉即採取加強灌溉節水措施，為一種臨時的灌溉方法，當灌溉水源枯竭至灌溉需水量 40% 以下時，既不能全面積灌溉供水，亦無法按輪區單區順序依時供水時，為有效分配水資源，故採用此方法作為因應。本方法由掌水工依供灌制度核配水量進行引灌，採滾動式水情檢討供灌成效，並以水稻種植為優先灌溉，減少灌溉水深與延長灌溉輪距。本次灌溉管理措施視現地作物生育階段，在不影響作物生長之原則下，維持原一次灌溉水深，並延長輪距實施配水。本次執行期間可分成三階段，第一階段為 3 月 7 日起考量稻作生長特性採通水 8 日、斷水 8 日之措施，第二階段為 4 月 20 日起考量稻作生長特性採通水 7 日、斷水 8 日之措施，第三階段為 5 月 18 日起為考量稻作生長進入乳熟期，採通水 7 日、斷水 4 日之灌溉措施，以節省灌溉水量。

一期作通水灌溉期間，由於供灌核配水量減少，為提升灌溉效率，於灌溉期間加強渠道巡視作業，採取支、分線水路巡防級戒備作業，並向灌區內農民宣

導依輪灌次序取水措施，適量引灌水源，配合掌水工現地供灌調配水量，並移除跨入渠道內之塑膠軟管，加強糾察盜水，避免灌溉用水浪費，期使灌溉水量依據計畫水量送達灌溉區域。

3.執行結果與改進建議

2018 年一期作水稻灌溉期間，灌溉管理以減少供灌日數、拉長斷水日數原則辦理，且供水量以查定水量減少 30% 供應，並配合現地水稻作物生長期及需水情形，滾動式水情檢討，在減少供水情況下達到完成灌溉最大效益，以西鹿草小組為例，比較灌溉水量與計畫用水量約減少 40% 之灌溉水量。

灌溉期間執行日夜巡視之灌區分線，加強取締支分線盜水事件及管理調配用水，透過向民眾宣導與夜間巡視提高辨識度，經查加強用水管理結果，初期疑似盜水之塑膠軟管橫跨渠道情況多，後期現地農民多能遵守相關規範落實供灌規範，以保持水位之穩定，確保達成每個輪區之作物需用水量。

工作站人員對於事件處理掌控上須有效協調動員水利小組基層幹部進行溝通，讓現地上農民能夠多加利用民井抽取地下水作為補助水源，部份農民亦自行抽取排水作為回歸水灌溉使用，透過工作站、小組長、掌水工及現地農民等合作，適時適切處理及完成灌溉，使作物在減少水量下完成高效率，作物皆能如期生長。

近年來氣候變遷影響下極端氣候發生頻率越為頻繁，在進行水情評估，須考慮更高風險之極端情境，如極端乾旱之情況下，對作物生長、水文循環、水資源分配及人力調度等問題，以期兼顧滿足糧食及農業經濟。

在本次灌溉期間之灌溉法為加強灌溉，即水庫水情不佳時，需執行明確配水供灌制度及配水順序，使現地實務操作上可以更加標準化，部份農民抽取地下水補注灌溉用水使用，本研究在水庫減量供給情況下，與民井配合抽取地下水補注灌溉水源下，滿足作物之生長需求，以有效率的完成灌溉任務。

4.3.2 極端條件下執行加強灌溉管理

2018 年一期稻作期間，由於曾文-烏山頭水庫水情不佳，而灌溉期間降雨量較歷年一期作減少，灌溉期間為 120 天，有效雨量天數僅 5 天，相較於近十年，屬於降雨極少之條件。為能如期完成灌溉任務，於 2018 年起，盡可能減少農業灌溉水量，雖如期完成灌溉，但調配水源工作執行較為困難，所消耗資源與人力甚多，在不考慮農民自行抽取地下水做為補助水源的情況下，探討以合理水量灌溉達成加強灌溉管理之效益。

1. 現地執行合宜水量

2018 年一期稻作灌溉期間，因供水量大幅減少，實施加強灌溉管理上，田間水深一度接近作物凋萎點，然此情況下部分作物會因田間水量過低而導致作物收成減少，故需考量作物生長需求水量，對供灌制度進行調整，因此增加每日灌溉水深增加 12%，並縮短通水日數，縮短至通水 6 日。執行結果顯示，自第 1 天起至第 120 天灌溉實際累計水文因子如後所述，灌溉水深為 798.7 mm，有效降雨深度為 125.5 mm，蒸發散量為 451.9 mm，入滲量為 343.2 mm，比較灌溉實績，需增加灌溉水深為 29.3 mm，如圖 15 所示。

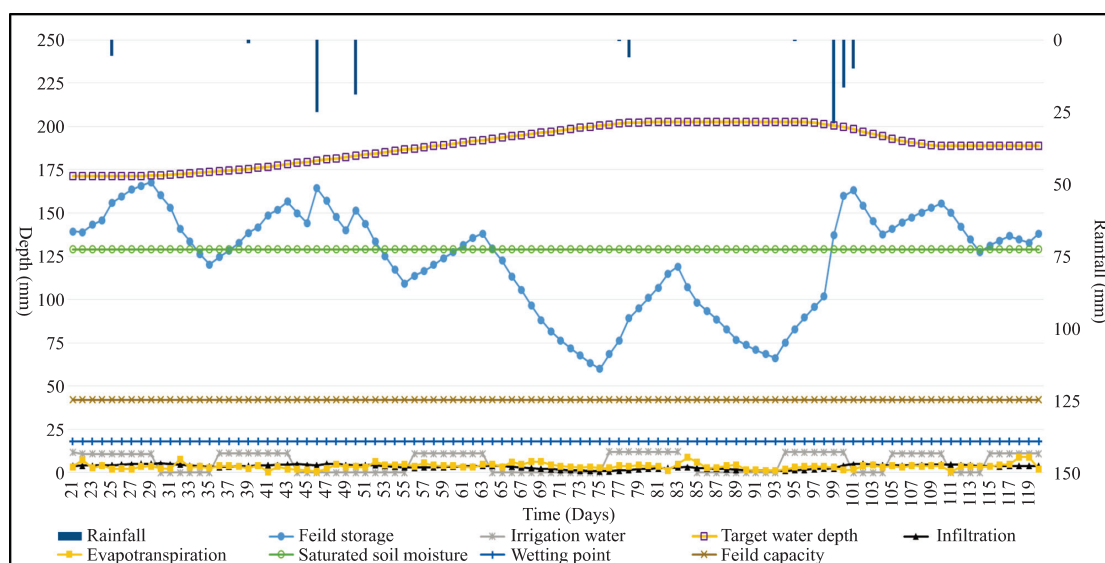


圖 15 模擬 2018 年一期稻作加強灌溉管理水文因子變化圖

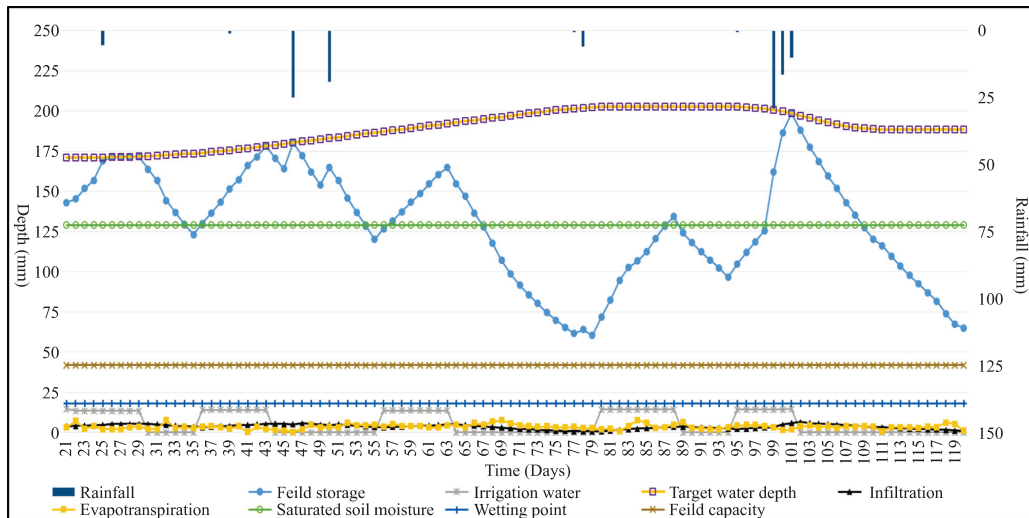


圖 16 模擬 2018 年一期稻作減耕 20%水文因子變化圖

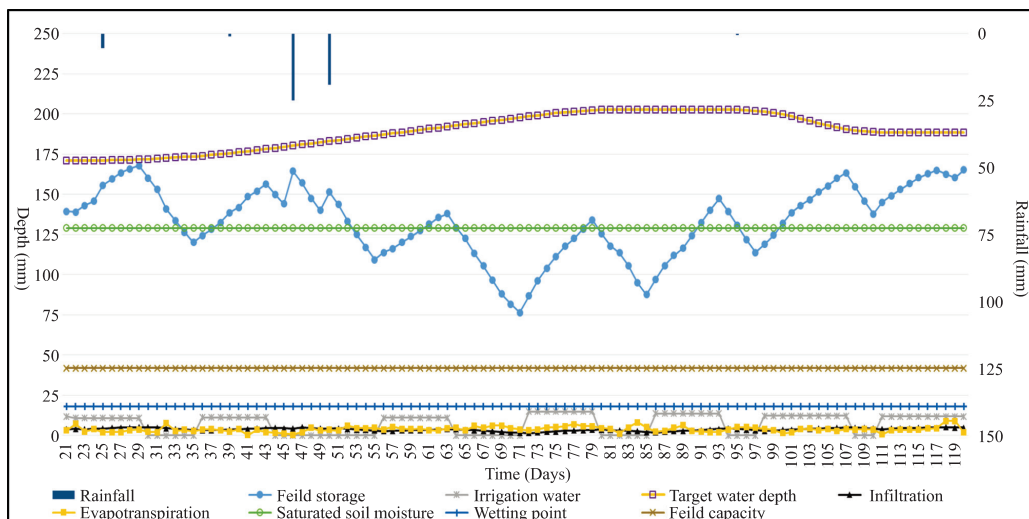


圖 17 模擬 2018 年一期稻作極端條件下 (無降雨並減耕 40%) 水文因子變化圖

2.減少灌溉面積

2018 年一期稻作灌溉期間，供水量大幅減少，討論在相同水量供給情況下，考量作物生長需求與執行上的可行性，假設部分休耕的情況下，結果顯示若減少灌溉面積 20%時，相對加強灌溉管理下，可以完成灌溉任務，結果顯示，自第 1 天起至第 120 天灌溉實際累計水文因子如後所述，灌溉水深為 840.5 mm，有效雨量深度為 125.5 mm，蒸發散量為 451.9 mm，入滲量為 410.4 mm，如圖 16 所示。

3.極端條件下減供方案

2018 年一期作灌溉期間，灌溉日數第 60 天時，曾文水庫有效蓄水量為 3,303 萬立方公尺，有效庫容比為 7.28%，烏山頭水庫有效蓄水量為 4,082 萬立方公尺，有效庫容比為 52.15%，合計有效水量為 7,385 萬立方公尺，而每日民生、工業與農業合計每日需

250 萬立方公尺之用水量，在水資源調配上面臨極為嚴峻之挑戰。本研究探討若於五月份未發生降雨情況，水庫之蓄水量可執行多少灌溉面積，即須減供多少灌溉面積，才能順利完成部分灌溉任務，並非全面性的休耕減產。

減供區域之農田有較多民用地下水井，可抽取地下水做為補助灌溉用水，以每小組之小區為基本單位，滿足整個灌溉系統為原則，因此在執行供水調配情況下，灌溉用水可調配至無補助水源之灌溉區域，以減少農作物經濟損失。

而 2018 年若於灌溉日數第 60 天起至灌溉結束日，皆未有降雨發生之極端條件下，在水資源有限的情況下，必須減供部分灌溉面積，以避免農作物全面性欠收，在本模式中預計減少灌溉面積 40%，如圖 17，在加強灌溉管理情況下，能完成部分灌溉。

嘉南地區灌溉情況，以整田時期分配水量最多，洽為一月下旬至二月上旬期間，對於曾文-烏山頭水庫而言，適逢枯水期，因此需視水庫容量決定一期稻作是否進行供灌，若實施一期稻作灌溉期間，無梅雨情況發生，需確保水庫蓄水量足以供應至一期稻作完成灌溉之蓄水量。本研究中採用 2018 年實際灌溉情況進行模擬，2018 年一期稻作灌溉期間，因梅雨降雨不如預期，水庫運轉使用上面臨嚴峻考驗，在當時決策時，停灌選項亦列入討論，本研究討論，當期供灌水量執行灌溉，實際水量為計畫水量 60%，需減少供灌之面積 40%，藉由加強灌溉管理實務操作順利完成該期灌溉任務。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 研究顯示加強灌溉管理能有效減少灌溉水深約 30%，其中主要由掌水工嚴格執行水量分配，並透過減少渠道輸水損失強化水路修補，在作物生長條件許可的情況下，盡可能減少灌溉水深，縮短通水天數，以達到加強灌溉管理之節水效益。
2. 本研究顯示灌溉管理中，降雨與否影響田間含水量十分顯著，而田間含水量亦會影響有效雨量深度，加強灌溉管理情況下土壤含水量較低，相較於一般條件下有效雨量提升約 26% 的使用量，在灌溉管理上更能達到有效節水之成效。
3. 在加強灌溉管理的執行成效上，以 2018 年一期作為例有效節水比例達到 45%，依其灌溉供水情況下進行模擬計算，第 75 天起田間水分含量一度低於田間容水量，在此情況下部分稻作可能因此而受損，因此需增加灌溉水量，在本研究模擬下合理有效節水比例約 40%，因此調配灌溉用水下一需考量作物生長特性，並非僅參考田間水分含量。
4. 在休耕停灌決策中，本研究顯示以 2018 年一期作為例，若在耕作前決定，停灌面積約 20%，相比在灌溉第 60 天，才因為水庫水量不足需進行部分停灌面積約為 40%，相對應配套措施及應變方法影響層面較廣泛。

5.2 建議

1. 本研究模式無考慮地下水供給使用的情況，完全依渠道水源作為供水依據，然 2018 年水庫水情不

佳，在現地的使用情況，部分農民會抽取地下水做為補助灌溉水源不足，可以探討地下水補注對農業灌溉下，地下水位的變化。

2. 建議調查回歸水補注引用作為灌溉水源下，於極端條件下是否影響水源，一般灌溉條件下系統出流量較多，然而部分地區採用排水回歸水利用作為補助水源使用，而加強灌溉管理情況下出流量大幅度減少，是否影響該地區水源，可做為未來討論之方向。

參考文獻

1. Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. McGraw-Hill, New York.
2. Bhadra, A., Bandyopadhyay, A., Singh, R., & Raghuwanshi, N. S. (2013). Development of a user friendly water balance model for paddy. *Paddy and Water Environment*, 11(1-4), 331-341.
3. FAO, Irrigation and Drainage Paper No.24, Food and Agriculture Organization (guidelines for predicting crop water requirements), 1977.
4. Kuo, S. F., Ho, S. S., & Liu, C. W. (2006). Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. *Agricultural water management*, 82(3), 433-451.
5. Sharma, P. K., & De Datta, S. K. (1985). Effects of puddling on soil physical properties and processes. *Soil physics and rice*, 217-234.
6. 甘俊二，「灌溉系統配水技術之分析與研究」，臺灣大學農業工程系研究報告 334 號，1979。
7. 甘俊二，「灌溉排水營運管理」，行政院農業委員會，2001。
8. 李建志，「移用曾文-烏山頭水庫系統灌溉用水之補償標準探討」，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2006。
9. 吳瑞賢、劉日順、張聖瑜、蘇家陞、陳佩瑩，「建立水旱作混植區之地表水與地下水聯合灌溉管理模式」，農業工程學報，第 64 卷第 1 期，60-90，2018。
10. 吳瑞賢、謝仲霖、馬家齊、劉日順，「桃園地區農業埤塘灌溉系統調蓄能力分析」，農業工程學報，第 65 卷第 4 期，12-25，2019。
11. 吳瑞賢、劉宜軒、劉日順，「以水旱混作灌溉用水模

- 式探討地下水合理應用之研究-以彰化溪州為例」，農業工程學報，第 65 卷第 4 期，62-80，2019。
12. 林羿汝、邱儀婷、陳清田、李振誥，「灌溉管理操作對水稻生長期距及灌溉用水效能影響之研究」，農業工程學報，第 63 卷第 2 期，35-48，2017。
13. 許勝雄、李建志，「氣候變遷對嘉南灌區灌溉用水調配之影響」，水資源管理會刊，第 15 卷，第 1 期，2013。
14. 陳世楷，「水稻田入滲試驗與數值模擬」，國立臺灣大學農業工程研究所，博士論文，1999。
15. 陳世偉，「區域多元化水資源調配之研究」，國立中央大學土木工程研究所，博士論文，2007。
16. 陳清田、甘俊二，「臺灣地域性作物需水量之推估研究」，農業工程學報，第 43 卷，第 4 期，1997。
17. 陳清田、張煜權、洪振東，「灌溉管理操作對水稻產量與節水效能影響之研究」，農業工程學報，第 60 卷第 1 期，81-90，2014。
18. 郭勝豐、程澄元、劉振宇，「倒傳遞神經網路應用於嘉南灌區作物蒸發散量之推估」，農業工程學報，第 52 卷第 1 期，24-34，2006。
19. 游雅筑，「探討大漢河流域供水及發電之氣候變遷衝擊與調適」，國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所，碩士論文，2018。
20. 經濟部，「水文環境變遷情境下嘉南地區水源調度運用方案研究」，2013。
21. 蔡家民，「應用系統動力模式模擬多目標水庫各標的權屬水量之分配管理」，國立成功大學水利及海洋工程研究所，碩士論文，2008。
22. 劉日順，「農田水利田間灌溉用水管理績效提之研究」，國立中央大學土木工程研究所，博士論文，2018。
23. 賴文龍、郭雅紋，「水稻栽培管理技術手冊」，臺中區農業技術專刊，第 193 期，2015。
24. 臺灣省曾文水庫建設委員會，「曾文水庫建設誌」，臺灣省曾文水庫建設委員會，1974。
25. 臺灣嘉南農田水利會，「103 年度灌溉計畫書」，2014。
26. 臺灣嘉南農田水利會，「105 年度灌溉計畫書」，2016。
27. 臺灣嘉南農田水利會，「106 年度灌溉計畫書」，2017。
28. 臺灣嘉南農田水利會，「107 年度灌溉計畫書」，2018。
- 收稿日期：民國 109 年 11 月 09 日
修改日期：民國 110 年 03 月 08 日
接受日期：民國 110 年 11 月 29 日