

建立水旱作混植區之地表水與地下水聯合灌溉 管理模式

Developing an Irrigation Model Using Both Surface Water and Groundwater for a Mixed Paddy Rice and Upland Crops Field

國立中央大學
土木工程學系
教授

吳瑞賢*

Ray-Shyan Wu

國立中央大學
土木工程學系
博士候選人

劉日順

Jih-Shun Liu

國立中央大學
土木工程學系
碩士

張聖瑜

Shen-Yu Chang

國立中央大學
土木工程學系
碩士

蘇家陞

Chia-Sheng Su

國立中央大學
土木工程學系
碩士

陳佩瑩

Pei-Ying Chen

摘要

台灣在農業灌溉用水除了使用渠道灌溉供水外，農民會另以抽取地下水來補足渠道水不足之情形，然農業用水於作物生長階段較多，抽取量也隨之增加，因此本研究於台灣中部彰化蔴仔埤圳的三條圳幹線重劃區，利用紀錄表及訪談調查灌區取水情形，針對農民灌溉經驗方式及農田灌溉機制，以系統動力學模式建立一套可自動推估地下水抽水及估算灌溉用水量模式，此模式可依循作物生長階段之灌溉基準點及灌溉需水點，自動判斷抽水時間及抽取量，達目標水深後即停止，可減少農民個人操作習慣不同而衍生抽水不一之情形。本研究透過模式得到良好的農業用水模擬結果，探討灌區用水情形，進一步提升農業用水之水源分配效率。本研究利用 2016 年二期作水文條件，如降雨、蒸發量、作物生長時程等水文資料，透過灌溉用水模式進行不同水旱作面積比例情形下作物需水量變化模擬，探討灌溉用水情形，後續使農業灌溉用水及地下水方便管理，結果顯示作物種植比例及作物生長階段顯著影

*通訊作者，國立中央大學土木工程學系教授，32001 桃園縣中壢市中大路 300 號，raywu@ncu.edu.tw

響灌溉用水情形，當水稻面積增加，灌溉需水量增加，若水稻面積增加渠道供水量並無增加時，田間地下水抽水量相對提高。本研究採用渠道供水量優先模式之分析結果，若上游灌區水源得以經模型控制，部份由地下水提供，則可相對減少其對於渠道水源之取用量；換言之，以此模式可達成調配渠道水量予下游灌區使用，並以地下水為上游灌區進行補充灌溉，可使各個輪區渡過枯旱缺水時期。本研究延伸探討地下水抽水情形與地下水位之影響，由於 2015 年二期作降雨時空分布較一期作多且均勻，補注量亦較多，因此灌區 2015 年一、二期作地下水抽水情形與地下水位之影響，二期作之抽水情形尚在安全抽取範圍內。

關鍵詞：系統動力模式，水旱作混植，灌溉系統，地下水抽取。

ABSTRACT

Taiwan's agricultural water expected use irrigation channel to irrigate crops, farmers also choose pumped groundwater to fill a vacancy in the irrigation channel. A large amount of agricultural water will be used in crop growth stage. The study area is located in the midst of Taiwan Changhua Cizaipijun aqueduct. Taking into account the farmers' irrigation experience and in-field irrigation operating, this study applies system dynamic model to establish an irrigation water management model for mixed paddy rice and upland crops fields. This model can follow the crop growth stage of the irrigation basic point and irrigation demand point, automatically determine the pumping time and rate, reach the target water depth then stop. This model can automatically identify the groundwater pumping time and the rate. It can reduce the possible human errors of the farmers during the operation of pumping. Moreover, this study, through the model to simulate a good agricultural water results, was able to explore the irrigation water use situation and further to enhance the water distribution efficiency of agricultural water use. In this study, the hydrological data such as rainfall, evaporation, crop growth time and so on. Using the irrigation water management model to simulate the change of crop water demand with different area paddy rice and upland crops area ratio. To explore the situation of irrigation water, so that agricultural irrigation water and groundwater for easy to management. In general, the application of channel water and/or groundwater irrigation depends on the crop planting condition, such as crops planting ratio and the growth stage of crops. The results shown that the ratio of crops cultivation and the growing stage of crops significantly affect the irrigation water capacity. When the area of paddy rice cultivation increase, the need of irrigation water capacity will increase. However, if the water supply of canal do not increase but the area of paddy rice cultivation increase, the groundwater pumping in the paddy field will raise. According to the results of analysis in channel water supply priority model, if the upstream irrigation area can be modeled and partly provided by groundwater, it can reduce the amount of water supply taken from channel water. In other words, the allocation of canal water can be adjusted to the downstream area, and the upstream area water demand can obtain additional supplement from groundwater. To make each round block can pass through the drought period. This study discusses the influence of groundwater pumping and

groundwater level. In the second rice crop period has received frequent rainfall with spatial and temporal uniformity is directly proportional to the recharge of groundwater and pumping situation. Then, the groundwater recharge is also increased. By comparing the pumping rate and groundwater level for the first and the second rice crop period in 2015, the second rice crop period pumping is more reasonable than the first rice crop period

Keywords: System dynamic model; Mixed Crop; Irrigation system; Groundwater Pumping.

一、前言

近年來，水資源利用及分配議題在全球各地區皆備受關注，然在早期以農立國的台灣，也面臨水資源分配問題，每當水情條件不佳、用水告急，水資源調配以便民生用水及工業用水為優先，而農民在灌溉用水不足情況下，便抽取地下水進行灌溉，因此本研究擬發展一套考量地表水與地下水聯合運用之完善農業水管理系統，了解農業用水情形並提高用水效率，進一步使民生用水及工業用水調配空間更為完善。

由於農業灌溉之地下水抽取量大，且抽水井數量也最為繁雜，陳鶴文(2007)[1]將水資源系統分為地表水與地下水兩個子系統，以系統動態理論搭配動態模擬軟體建立系統模型，進而模擬抽排水行為所造成地下水水位的變化情形，以及水資源聯合運用後的動態影響。林喬莉(2010)[2]利用系統動力模式，模擬桃園大圳二支線之農業灌溉系統，本研究則進一步利用系統動力模式進行模式建立，並考慮降雨量、渠道供水與地下水灌溉水源，完成模式之建立；徐年盛(2012)[3]於地下水系統水平衡分析研究敘述地下水抽水源及補注源之估算方式，本研究針對灌區地下水取用情形進行模式改良，考慮地下水抽水情形進行模擬；張聖瑜(2015)[4]運用系統動力模式建立彰化三條圳幹線 1~5 輪區之農業灌溉用水系統，結合降雨及灌溉之水源，以豐水年 2013 年資料分別針對原灌溉計畫書配水量、以減供 30%、50%灌溉配水量進行模擬，分析原灌溉計畫水量之合理

性。本研究參考台南農業改良場蔣汝國等(2004)[5]及台中農業改良場賴文龍等(1979)[6]之水旱作種植灌溉方式及實驗地灌溉方式進行模式建立，利用系統動力模型建立試驗灌區之水旱混植區地表水與地下水聯合灌溉水管理模式，配合灌區水旱作種植面積比例與水旱田灌溉用水因子及農民灌溉方式，分析作物種植比例之需水量及評估試驗田區之用水來源及取水量，使水旱作混植區域達到精密灌溉以提升灌溉效率，本研究並延伸探討水資源分配及地下水取用管理方法，使地下水能更合理且有效運用。

二、模式簡介及理論分析

2.1 田間水平衡理論

本研究採用水收支平衡法(Water Balance)之理論，在質量守恆的條件下，於一控制系統內總流入量等於總流出量(水密度不變)的原理，來推估田間多餘水量，透過三維微觀孔隙介質流況方程式可表示為：

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

其中 q_{in} 為流入量，包括降雨量、灌溉引水量與地下水抽取量； q_{out} 為流出量，包括作物蒸發散量、地表逕流、入滲量及淺層地下水流出量； ds 為田間儲蓄水量，包括田間湛水量與土壤水份含量之總和； t 為時間；三維田間水文循環系統簡易模型詳如圖 1。

本研究將灌區視為一個控制容積，灌區內之水份可靜止、移動或自由流進及流出，並加以分

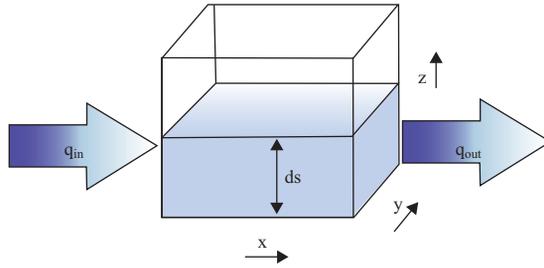


圖 1 三維微觀孔隙介質流況示意圖。

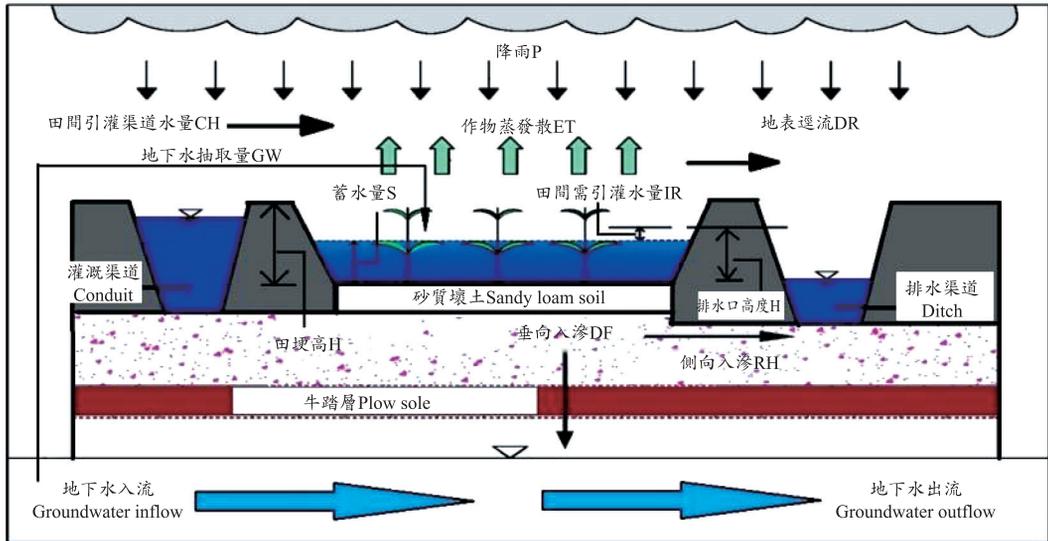


圖 2 田間水平衡示意圖。

析灌區內所需之各項參數及運作機制，其參數包含降雨、作物蒸發散量、灌溉水量、地下水抽水量，以及土壤水份含量等。假設水田處於正常耕作狀態，且灌區存在牛踏層之情況下，田間水平衡參數及水田運作機制示意如圖 2，灌區內控制系統之關係可由下式表示：

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

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 為側向滲漏量。

本研究灌區由田間水位是否低於水稻灌溉基準水深或旱作灌溉需水深，以決定是否進行引灌，決定之判斷式條件如下所示：

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

$$\text{If } S_{i-1} + P_i \geq B_{i,n}, \text{ then } IR_i = 0 \quad (4)$$

若需進行渠道引灌則利用判斷式決定引灌之水量，判斷條件如下：

$$\text{If } R_i \geq IR_i, \text{ then } Ch_i = IR_i \quad (5)$$

$$\text{If } R_i < IR_i, \text{ then } Ch_i = 0 \quad (6)$$

$$IR_i = St_i - (S_{i-1} + P_i + GW_i) + N_i \quad (7)$$

$$N_i = ET_i + DF_i + R_{ni} \dots\dots\dots(8)$$

式中， B 為水稻灌溉基準水深($n = 1$)與旱作灌溉需水深($n = 2$)； N 為田間損失量； 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 + 土壤飽和水深)； i 為時間。

其灌溉機制為當渠道剩餘水不足以供給田間需引灌水量時，則完全不引灌渠道水量。此因依現地實際狀況，若發生渠道剩餘水不足，則該灌區為非值輪灌期，渠道無水，致無法引入田間灌溉；或是上游區塊灌區引水後，渠道剩餘水不足以灌溉此田區，這些餘水通常留置渠道中，故設定 $Ch = 0$ ，如式(6)，該次灌溉以抽取地下水方式補足田間需引灌水量，如式(7)。

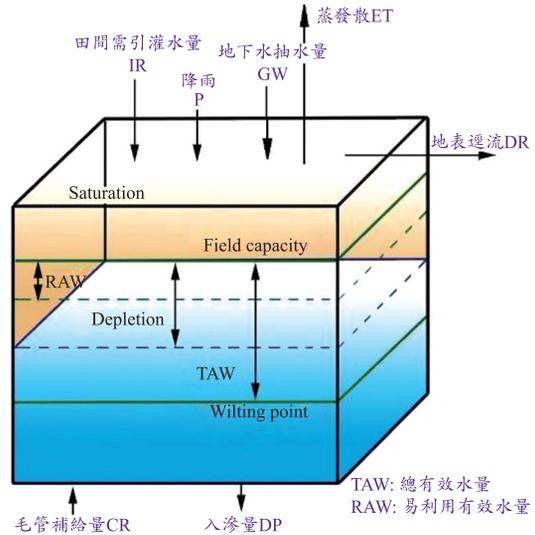


圖 3 土壤水平衡示意圖。

2.2 土壤水平衡理論

旱作物之田間含水量及灌溉需水量與水稻最大差異在於水稻有一定蓄水深，本研究灌區之旱作灌溉方式傾向畦溝灌溉法，於灌溉時，使畦溝水深達表土以上之蓄水深約土堤 1/3 至 1/2 水深後即停止灌溉並排水，因此本研究利用土壤水收支平衡法(Soil Water Balance)，估算旱作之土壤含水量，然因根系土層具有儲存水份之功能，只要作物還在根系可用土壤水份之前，即使水份未達飽和含水量之情形，不作連續性之水份補充也可以維持作物生長，根系土層水份控制方程式之關係可由下式表示：

$$SM_i = SM_{i-1} + P_i + IR_i + GW_i + CR_i - ET_i - DR_i - DP_i \dots\dots\dots(9)$$

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(垂向滲漏量+側向滲漏量)； i 為時間，土壤水平衡示意圖如圖 3。

旱田之土壤水份一般介於田間容水量與永久凋萎點之間，部分區域因地下水毛管上升而補給根系土層水份，但由於地下水毛管補給與地下水位高低及毛管水移動有關，且其運動方式相當複雜，地下水毛管補給率在地下水位 2 公尺以內才會發生，一般研究假設地下水毛管補給率為零。

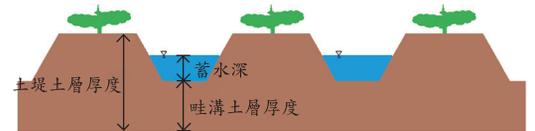


圖 4 土溝水深灌溉示意圖。

本研究旱作畦溝土層厚度設定為 30 公分，土堤厚度設定為 40 公分，本研究利用土堤厚度 40 公分之旱作灌溉需水深度為灌溉依據，旱作灌溉需水深度定義為旱作生長期間之根系取用土壤最佳灌溉水深，此為作物最佳生長狀態之取水深度，由 J. K., Kemble 等(2000)[7]所進行研究每種作物灌溉需水深度皆不同，因此當土壤水份達旱作灌溉需水深度，系統便自動取水至目標湛水，土溝灌溉水深示意如圖 4。

2.3 作物蒸發散量演算

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。本研究推求作物需水量係使用 Pan Evaporation 法，利用蒸

表 1 台灣水稻試驗各生育階段之作物係數

生育天數	生育階段	甘俊二(1979)[8]		姚銘輝(2005)[9]		施嘉昌等(1984)[10]	
		Kc 值		Kc 值		Kc 值	
		一期作	二期作	一期作	二期作	一期作	二期作
—	整地期	—	—	—	—	—	—
1~15	插秧期	0.5	0.9	0.92	1.01	0.6	1.0
16~30	分蘗初期	0.8	1.2	1.00	1.11	1.0	1.3
31~45	分蘗末期	1.2	1.5	1.00	1.11	1.3	1.6
46~60	開花初期	1.3	1.6	1.13	1.23	1.5	1.7
61~75	開花末期	1.3	1.5	1.13	1.23	1.5	1.6
76~90	成熟初期	1.2	1.3	0.89	0.93	1.4	1.4
91~105	成熟中期	1.0	1.0	0.89	0.93	1.1	1.0
106~120	成熟末期	0.7	0.6	0.89	0.93	0.8	0.5

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，作物蒸發散計算公式如下所示：

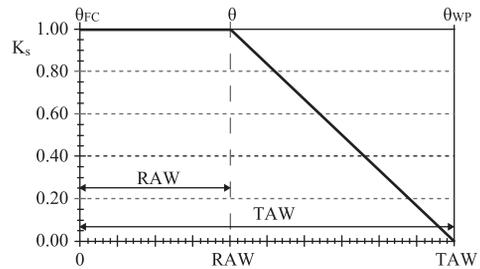
$$ET_{crop} = K_c \times ET_0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

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(1979)[8]、姚銘輝(2005)[9]、施嘉昌等(1984)[10]研究水稻作物生長階段之作物係數，並以甘俊二(1979)[8]計算蒸發散量(如表 1)。除了根據作物型態及其生長階段來決定作物係數 K_c 值外，亦須先判斷是否有蒸發散情形發生，根據 FAO-56 (2006)[11]定義，當土壤水份低於土壤凋萎點(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份時之含水量，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如下式：

$$ET_i = \begin{cases} K_c \times ET_0 & \text{if } S_{i-1} > W_p \\ 0 & \text{if } S_{i-1} \leq W_p \end{cases} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$W_p = Sd \times \theta_{wp} \quad \dots\dots\dots(12)$$

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} 為土壤凋萎點含水量； K_c 為作物係數； ET_0 為參考作物蒸發散量



資料來源：FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 (2006). [11]

圖 5 土壤水分校正係數隨土壤水分變化示意圖。

(mm)； i 為時間。

一般而言，水稻長期處於湛水狀態，且土壤含水量長時間處於飽和狀態，必有作物蒸發散情形發生；然旱作物非長時間處於湛水狀態，當土壤水份由飽和含水量開始消耗時，其作物蒸發散便受土壤含水量影響，越接近土壤凋萎點時，土壤中之水份越不易蒸發，因此在計算旱作物需水量時須依照土壤水份變化進行校正(如圖 5) (FAO-56 (2006)[11])，此校正係數稱為土壤水份校正係數 K_s (Water Stress Coefficient)，當進行一次灌溉或下完一場雨後，土壤水份充足， K_s 值為 1；於達土壤凋萎點時， K_s 等於 0。作物蒸發散計算式修改為公式如下：

$$ET_{crop} = K_c \times K_s \times ET_0 \quad \dots\dots\dots(13)$$

表 2 台灣主要旱作物之作物係數

作物	生長期				
	初始期	發展期	中 期	末 期	收穫期
甘蔗	0.4~0.5	0.7~1.0	1.0~1.3	0.75~0.85	0.5~0.6
馬鈴薯	0.4~0.5	0.7~0.8	1.05~1.2	0.85~0.95	0.7~0.75
落花生	0.4~0.5	0.7~0.8	0.95~1.1	0.75~0.85	0.55~0.6
玉米	0.4~0.5	0.7~0.85	1.05~1.2	0.8~0.95	0.55~0.6
高粱	0.3~0.4	0.7~0.8	1.0~1.15	0.7~0.8	0.4~0.5
大豆	0.3~0.4	0.7~0.8	1.0~1.15	0.7~0.8	0.4~0.5
甘藍菜	0.4~0.5	0.7~0.8	0.95~1.1	0.9~1.0	0.8~0.95
番茄	0.4~0.5	0.7~0.8	1.05~1.25	0.8~0.95	0.6~0.75

資料來源：FAO Irrigation and Drainage Paper No.56, Crop Evapotranspiration, (guidelines for computing crop water requirements), pp.104-114, 2006.[11]

土壤水份校正係數之計算式及判斷式如下：

$$K_s = \begin{cases} 1 & \text{if } D_{r,i} \leq RAW \\ \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} & \text{if } D_{r,i} > RAW \end{cases} \dots (14)$$

$$TAW = (\theta_{fc} - \theta_{wp}) \times Z_r \dots (15)$$

$$RAW = \bar{P} \times TAW \dots (16)$$

$$D_{r,i-1} = (\theta_{fc} - \theta_{i-1}) \times Z_r \dots (17)$$

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - O)_i - I_i - Gw_i + ET_i + DP_i \dots (18)$$

式中， K_s 為土壤水份校正係數； D_r 為根區消耗水量(mm)； TAW (Total available soil water in the root zone) 為根系總有效水量(mm)； RAW (Readily available soil water in the root zone) 為根系易利用有效水量(mm)； θ_{fc} 為土壤田間含水率； θ_{wp} 為土壤凋萎點含水率； θ 為根系層土壤含水率； Z_r 為根系深度(mm)； \bar{P} 為根區消耗的土壤水份占總有效土壤水的比例，本研究參考 FAO-56 (2006)[11] 之係數為 0.45，其他作物相關係數詳見表 2； P 為降雨量(mm)； O 為降雨徑流量(mm)； I 為淨灌溉水深(mm)； Gw 為地下水補給量(mm)； ET 為作物蒸發散量(mm)； DP 為深層滲漏損失水量(mm)； i 為時間。

2.4 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：

$$GI_i = IR_i + CN_i \dots (19)$$

$$CN_i = \frac{GI_i}{(1 - CNr_i)} - GI_i \dots (20)$$

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。

2.5 地下水抽取量演算

本研究地下水演算方法主要利用田區設置抽水機抽水記錄表，請農民記錄抽水機抽水時間，實際量測記錄表抽水量，推估地下水補給灌溉水量，此模式稱為地下水抽取量優先模式，主要灌溉機制為先決定地下水抽取量，再由渠道進行補給地下水不足目標湛水深之部分，然此模式與現實之灌溉機制有差異，因此本研究利用農民種植經驗及取水方式，針對地下水抽取量優先模式進行修改，並使地下水抽取量可自動演算，模式稱為渠道供水量優先模式，其灌溉機制為當渠道水量無法滿足灌溉需求時，會以抽取地下水方式補充渠道供水不足之情形，然本研究設定渠道供水邊界條件為定量，地下水邊界條件為無限取

用。詳述如下：

2.5.1 地下水抽取量優先

本研究延續蘇家陞(2016)[12]於試驗灌區相同地點設置四個抽水紀錄表，加以應用其於 2016 年進行抽水機抽水量試驗結果於模式中，該研究分別進行四次試驗，取平均抽水流量，試驗結果顯示試驗地 A 平均抽水流量為 0.023 cms；試驗地 B 平均抽水流量為 0.017 cms；試驗地 C 平均抽水流量為 0.016 cms；試驗地 D 平均抽水流量為 0.022 cms。本研究請抽水機所在田區之農民記錄作物種植情形、抽水時間，以及與農民訪談了解灌溉方式及習慣，並應用於研究模擬估算地下水抽取量。紀錄表中，水稻部分因試驗地 D 之抽水紀錄較為完善，本研究由該農民紀錄之抽水結果，考量試驗地 C 農民及其他農民灌溉經驗方式及習慣做為校正抽水紀錄之依據；旱作部分，本研究僅考慮包心白菜及高麗菜之作物係數，利用試驗地 A、C 及 D 抽水點之抽水紀錄，參考台南區農業改良場謝明憲等(2005)[13]甘藍新品種之灌溉及施肥管理方法進行地下水抽取校正；並依據台南農業改良場蔣汝國等(2004)[5]提及之水稻灌溉要點，田間保持非固定保持湛水，避免水稻生理活性被抑制甚至腐敗，因此研究設定田間蓄水深度達水稻灌溉基準點以下再進行灌溉。本研究將水稻灌溉基準點定義為水稻生長期間之田間最低蓄水深度，低於此蓄水深度必須進行灌溉，若未達水稻灌溉基準點則不需進行灌溉，故實際之水稻田間蓄水深度常呈現數天達目標湛水深一次之情形。本研究依據灌區農民之經驗評估水稻灌溉基準點水位，然水稻灌溉基準點因水稻生長期間之各個生長階段而有影響，除了抽穗期間需較高水稻灌溉基準點約為田間蓄水深 2~3 公分，其餘生長階段皆以田間蓄水深約為 1 公分為水稻灌溉基準點，達水稻灌溉基準點便進行灌溉。

2.5.2 渠道供水量優先

透過作物種植情形、現地灌溉情形、訪談及抽水紀錄結果，修改地下水抽取量優先模式之灌溉機制，建立自動推估地下水系統，其灌溉機制

為渠道供水有足夠水量供給田間需引灌水量時，則地下水抽取量為零，反之，當渠道剩餘水不足以供給田間需引灌水量時，則不取用渠道水，該次灌溉以地下水抽取方式補足田間需引灌水量，因取水情形為渠道水灌溉後不足部分再由地下水抽水補給，故渠道供水量優先模式較地下水抽取量優先模式更符合實際取水情形，本研究利用渠道供水量優先模擬灌區灌溉用水及地下水抽水之變化情形。然而，渠道供水量優先模式之抽水方式、抽水時間及抽水量係利用農民提供之經驗建立參數，當田間水深需進行抽水，農民會以約莫半小時作為抽水時間單位之間隔進行抽水，例如田間需引灌水量超過半小時之抽水量，但小於一小時之抽水量，則會使用抽取時間一小時之抽水量，又田間需引灌水量若超過一小時之抽水量，但小於一個半小時之抽水量，則使用抽取時間一個半小時之抽水量(其抽水量利用試驗地 D 之抽水機進行單位抽水量換算)，以此類推，其地下水抽取與否之判斷式為：

$$\text{If } R_i \geq IR_i, \text{ then } Gw_i = 0 \dots\dots\dots (21)$$

$$\text{If } R_i < IR_i, \text{ then } Gw_i = IG_{i,n} \dots\dots\dots (22)$$

式中 IR 為田間需引灌水量； R_i 為渠道水量； Gw 為地下水抽取量； IG 為地下水抽取量； i 為時間； $n = 1, 2, \dots$ 為地下水抽取情形， $n = 1$ 為半小時之抽水量、 $n = 2$ 為一小時之抽水量、 $n = 3$ 為一小時半之抽水量，餘此類推；抽水量取決於田間需引灌水量而定； $IG_{i,n}$ 為第 i 天取 n 小時之抽水量。

由於其灌溉機制為渠道有足夠水量供給田間需引灌水量時，則地下水抽取量(Gw)為零，如式(5)及式(21)；反之，當渠道剩餘水不足以供給田間需引灌水量時，則完全不引灌渠道水，如式(6)及式(22)。此因依現地實際狀況，若發生渠道剩餘水不足，則該灌區為非值輪灌期，渠道無水，致無法引入田間灌溉；或是上游區塊灌區引水後，渠道剩餘水不足以灌溉此田區，這些餘水通常留置渠道中，故設定 $Ch = 0$ (式(6))，該次灌溉以抽取地下水方式補足田間需引灌水量(式(22))，故以式(5)~(6)及式(21)~式(22)判斷田間需引灌水

量來自於渠道水量或來自於抽取地下水。其均屬土壤水平衡架構中的流入部份，其整體關係則表示如式(9)。

然水稻方面農民取用渠道水量亦會因渠道是否挾帶雜草種子、病蟲害或渠道水質等問題，例如渠道水懸浮不明油狀物等，而不取用渠道水，此取水方式需考慮取水當天渠道水質情形較為複雜，需針對現地水質監測及農民取用準則進行長時間之調查，然本研究依據彰化農田水利會水質調查結果皆為正常水質，因此，研究設定灌區農民若渠道有水則會取用渠道取水，排除農民因水質問題不取用渠道水之情形；旱作部份，則當達到旱作灌溉需水深時，模式由渠道水灌溉至土壤飽和量，若不足則由地下水提供。

此模擬利用農民建議之抽水時間及抽取量作為參數，帶入系統中使模式依循作物生長階段之水稻灌溉基準點及旱作灌溉需水點進行自動判斷抽水時間及抽取量，且達目標水深後即停止，可減少農民因紀錄缺失、錯誤或操作習慣不同所導致抽水情形不一之情形。

2.6 滲漏量演算

2.6.1 垂向滲漏量

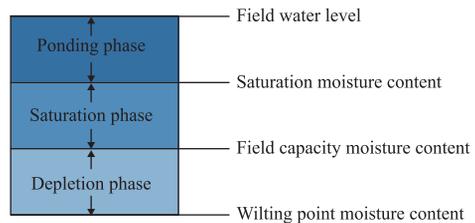
根據陳世楷(1999)[14]及 Sharma and De Datta (1985)[15]分別針對不同田區且不同灌溉條件下進行試驗，結果顯示位在根系土層下方之牛踏層有明顯減少入滲率及垂向入滲量之情形，因牛踏層之水力傳導係數遠小於根系土層之水力傳導係數，且在不同根系土壤質地，會有不同之滲漏量，因此，模式假設當水入滲經過牛踏層後，即成為地下水補注量。

本研究將田間分為澆水、土壤飽和及土壤水份消耗三個階段計算，如圖 6 (Bhadra 等(2013) [16])所示，模式中，田間容水量(FC)為判斷入滲與否基準，其判斷式為：

$$DF_i = \begin{cases} P_i & \text{if } S_{i-1} > FC \\ 0 & \text{if } S_{i-1} \leq FC \end{cases} \dots\dots\dots(23)$$

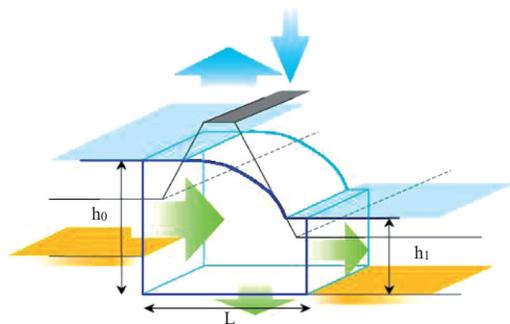
$$FC = Sd \times F \dots\dots\dots(24)$$

其中 P_i 為滲漏量(mm/day)，由達西定律計算如



資料來源：Bhadra et. al (2013)[16]。

圖 6 不同階段水平衡方程式計算示意圖。



資料來源：高振程(2003)[17]

圖 7 相鄰田埂之 Dupuit 公式示意圖。

下：

$$P_i = k_p \times \frac{h_i + l_m}{l_p} \dots\dots\dots(25)$$

令 $C_p = k_p/l_p$ ，則(3-23)可改寫成下式：

$$P_i = C_p \times (h_i + l_m) \dots\dots\dots(26)$$

式中 P_i 為垂向入滲量(mm/day)； S_d 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_i 為前一天蓄水深(mm)； l_p 為牛踏層厚度(mm)，參考陳世楷(1999)[14]設為 7.5cm； l_m 為泥濘層厚度(mm)； C_p 為傳輸係數(day⁻¹)。

2.6.2 側向滲漏

陳世楷(1999)[14]研究結果顯示，側向滲漏明顯發生於乾濕邊界區，其隨乾濕邊界長度、水田澆水面積及初始土壤含水量不同而改變，然側向滲漏需考慮田間土壤飽和及未飽和情形，因此本研究假設田區側向入滲至相鄰田區後，終將垂向入滲至地下含水層，田埂側向入滲如圖 7 所

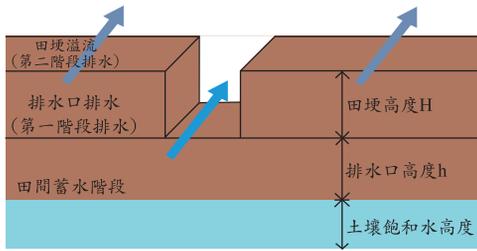


圖 8 各階段田間排水方式示意圖。

示，其傳輸機制由 Dupuit 方程式表示為：

$$L_t = \frac{l_g}{A} \times k_L \times \frac{(h_t^2 - h_0^2)}{2L} \dots\dots\dots(27)$$

式中， l_g 為相鄰灌排渠道之田埂長度(m)，本研究設定為坵塊之邊長； A 為水田面積(m^2)； k_L 為田埂之水力傳導係數(mm/day)，參考高振程(2003)[17]設為牛踏層水力傳導係數 k_p 之五倍； h_t 為蓄水深(mm)； h_0 為灌排水路之蓄水深(mm)，本研究假設田間蓄水狀態，渠道平時無蓄水為 0 cm； L 為田埂寬度(mm)，本研究設為 50 cm。

本研究透過田間容水量(FC)作為判斷側向滲漏發生與否，並由判斷式決定計算方式進行估算，其判斷式為：

$$R_{hi} = \begin{cases} L_t & \text{if } S_{i-1} > FC \\ 0 & \text{if } S_{i-1} \leq FC \end{cases} \dots\dots\dots(28)$$

式中， R_{hi} 為田埂側向滲漏量(mm/day)， L_t 為側向入滲量(mm/day)。

2.7 田間地表逕流量演算

田間地表逕流量係指田間所灌溉的水量(地下水及渠道水)或降雨量進入田區後，因田間蓄水深度高於田區排水口高度或田埂，而產生之溢流情形，如圖 8 所示。台灣水稻於不同生長階段，田埂及排水口高度會依據作物生長階段所需灌水深度或農民種植習慣做適時調整；然田區排水口高度指田埂的排水口高程與田間土壤表層之平均高程差，田埂高度則為田埂高程與田間土壤表層之平均高程差，而田區排水口高度為主要決定田間蓄水量多寡之因素，根據甘俊二(1979)[8]

針對台灣水稻栽培各生長階段之研究，所提出適當水深管理。其數學計算方式及判斷式為：

$$DR_i = S_{i-1} + P_i + Ch_i + GW_i - ET_i - DF_i - Rh_i - V_{\beta} \dots\dots(29)$$

$$\text{if } S_{i-1} + P_i + Ch_i + GW_i - ET_i - DF_i - Rh_i > V_{\beta}$$

$$DR_i = 0$$

$$\text{if } S_{i-1} + P_i + Ch_i - ET_i - DF_i - Rh_i \leq V_{\beta} \quad (30)$$

$$V_{\beta} = (h + Sd \times \varphi)$$

$$V_f = (h + Sd \times \varphi) \dots\dots\dots(31)$$

式中 DR 為田間逕流出流量(mm)； V_f 為田間最大可蓄水深(mm)，意指土壤飽和水高度與田區排水口高度之和； h 為排水口高度(mm)； φ 為土壤孔隙率(%)。

當暴雨延時長，排水不及導致田間蓄水量逐漸高於排水口所能排出之水量，且田間灌水高度仍持續逼近田埂高度時，為了不影響作物根系發育，則須計算田間排水口最大排水量，然排水量之決定一般按排水區面積、降雨量、分佈地表之狀態、計畫排除時間，以及作物允許浸水時間而定，本研究利用之田區平均排水量基本計算公式為(施嘉昌，1988)[18]：

$$Q_i = \frac{c \times R_D}{1000 \times d} \dots\dots\dots(32)$$

$$\text{if } P_i > Q_i + ET_i + DF_i + Rh_i \dots\dots\dots(33)$$

$$DR_i = S_{i-1} + P_i + Ch_i - ET_i - DF_i - Rh_i - V'_{\beta} \dots\dots(34)$$

$$\text{if } S_{i-1} + P_i + Ch_i - ET_i - DF_i - Rh_i > V'_{\beta} \dots\dots(35)$$

$$DR_i = \min[Q_i; S_{i-1} + P_i + Ch_i - ET_i - DF_i - Rh_i - V_{\beta}] \quad (36)$$

$$\text{if } S_{i-1} + P_i + Ch_i - ET_i - DF_i - Rh_i \leq V'_{\beta} \dots\dots(37)$$

$$V'_{\beta} = (H + Sd \times \varphi) \dots\dots\dots(38)$$

式中， Q 為單位面積排水量(mm)； d 為水稻耐浸日數(day)，本研究假設為 3 日； c 為逕流係數($C = 0.6$)； R_D 為 D 日間之連續雨量(mm)，參考蔡明華(2000)[19]採用 10 年發生一次頻率之雨量，試驗

表 3 溪州雨量站在不同迴歸週期下之日降雨量

迴歸週期 T(年)	P(mm/day)
5	245.9
10	294.5
20	341.0
50	401.3
100	446.5
200	491.5

資料來源：張聖瑜(2015)[4]

地所在之溪州雨量站不同迴歸期雨量如表 3 所示； V_f 為田間最大積水深(mm)，意指土壤飽和水高度與田埂高度之和； H 為田埂高度(mm)；本研究因考慮地下水抽取量，因此，需加入因抽取量所造成之田間逕流出流量進行估算。

2.8 系統動力模式

本研究採用系統動力模型進行模式建立，系統動力學(System Dynamics)源於美國 MIT 史隆管理學院的 Jay W. Forrester 教授的著作「工業動力學」，初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，其應用範圍遍及各類系統，故改稱為系統動力學；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，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，以表示元件間的相互關係，如圖 9 所示。

2.9 模式建立

本研究建立模式系統依灌區分為 5 個輪區，水田及旱田各 31 個坵塊，灌區內共有 4 座手動取水門及 1 座電動取水門，分別為三條圳幹線取

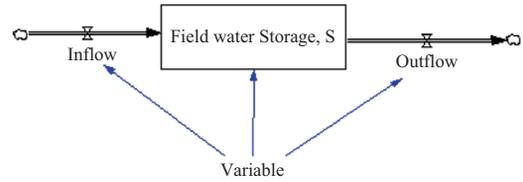


圖 9 系統動力模式元件示意圖。

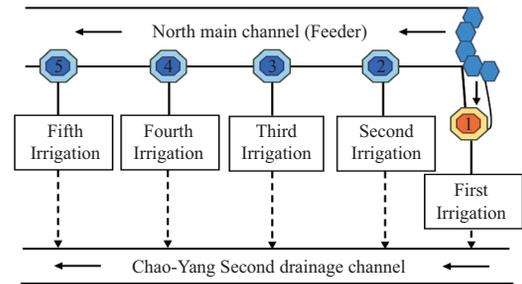


圖 10 灌區引水順序及排水方向。

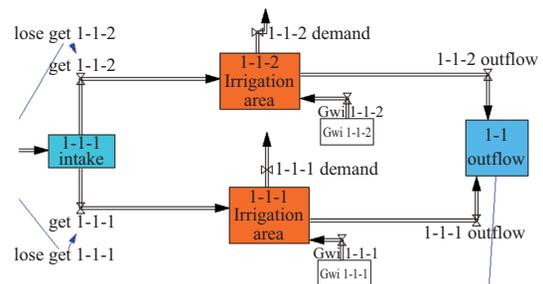


圖 11 田間需水量推估之系統架構圖。

水門、第 1~5 主給取水門，依據取水門順序依序給水，如圖 10 所示，當田間達灌溉需水深度則停止供水或不供水。本研究根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，並模擬水旱田混植之田間動態情形，且各坵塊於系統中計算模式，如圖 11 所示。

模式系統之水流流向，依照彰化農田水利會水流順序設置，根據重劃區之排水路判斷田間溢流方向，若田間降雨量未達田間排水口高，則無排水及無溢流發生；但當降雨延時長且田間積蓄

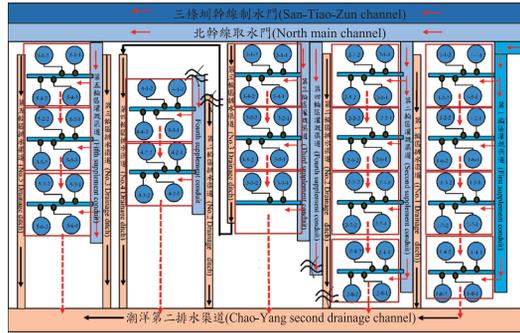


圖 12 試驗田區 1~5 輪區溢流方向示意圖。

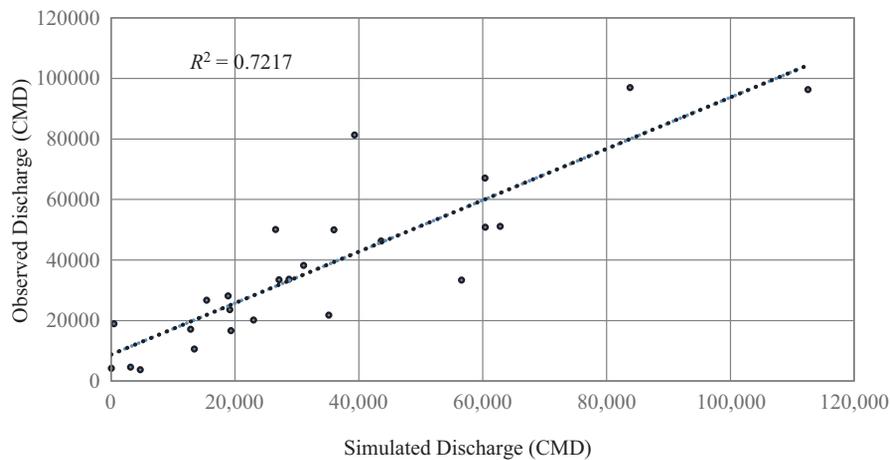


圖 13 地下水抽取量優先模式之觀測值與模擬值相關性比較

速度大於排水口排水速度，導致田間水位升高，直至田間水位溢過田埂有效高度，即產生溢流。灌區溢流至排水溝渠，再匯流至潮洋二排水往下游，因此，輪區內無法取用流至排水溝渠之水流，如圖 12。

研究建立兩模式進行模擬，一為參考農民經驗灌溉方式推估抽水情形之模擬，稱為地下水抽取量優先模式，設定先取地下水再取用渠道水，當代入之地下水抽取量不足灌溉天之田間需引灌水量時，模式將以渠道取水方式補足灌溉所需水量；再者為參考農民紀錄表、整合訪談資料及配合旱作灌溉需水點供水，針對地下水演算方式進行修改而建置為可自動演算地下水抽取量之模式，稱為渠道供水量優先模式，當模式判斷渠

道水取水量不足供給坵塊灌溉所需之田間需引灌水量時，則不取用渠道取水，以地下水抽水方式補足田間需引灌水量；反之，若渠道水可滿足坵塊田間需引灌水量，則由渠道水提供水源，此模式可減少農民紀錄表登記錯誤或少數農民灌溉操作不一致之誤差。

2.10 模式驗證

本研究利用 2016 年 8 月 31 日至 2016 年 9 月 24 日實測出入流量、田間水位、蒸發散、降雨量、出流量及作物面積比例，分別驗證上述兩組模式，其驗證結果如下所述：

1. 地下水抽取量優先模式：模擬值與觀測值相關性計算，如圖 13 所示，統計指標評估結果顯

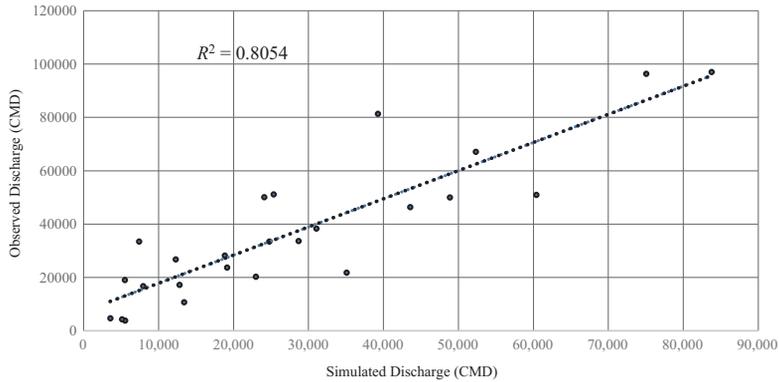


圖 14 渠道供水量優先模式之觀測值與模擬值相關性比較。

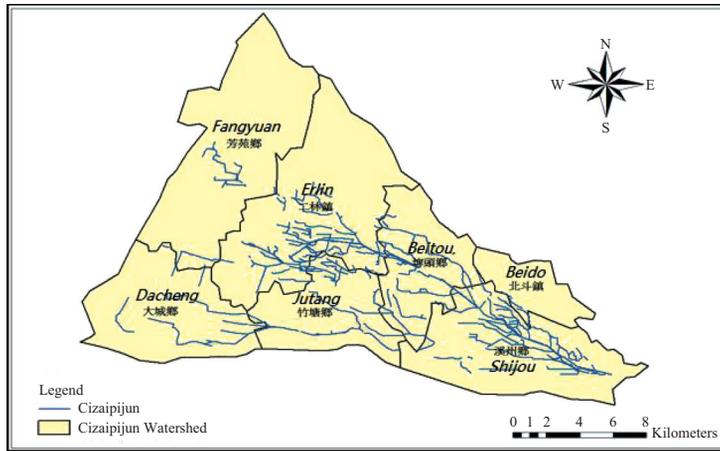


圖 15 荊仔埤圳流域範圍。

示，於 25 日之模擬流出量與實測流出量之 R^2 值為 0.7217，為預測行模式可接受範圍內，RMSE 值為 13755.62CMD，該模式可用來預測研究區域之灌溉系統供水動態模擬。

2. 渠道供水量優先模式：本研究統計 2015 年至 2017 年四個抽水紀錄點所紀錄之抽水情形及訪談農民抽水習慣，建立一套系統可自動判斷抽水與否之水旱作混植灌溉系統，進行模式驗證，模擬值與觀測值相關性計算，如圖 14 所示，統計指標評估結果顯示，於 25 日之模擬流出量與實測流出量之 R^2 值為 0.8054，在可接受範圍內，而 RMSE 值為 15119.77CMD，結果顯示該模式可合理反推地下水抽取情形

及調整灌區用水，且渠道供水量優先模式與實際之出流量之線性相關更為密切。

三、研究區域概述

本研究區域位於彰化荊仔埤圳新永基幹線灌區內，荊仔埤圳為彰化農田水利會所屬灌溉系統之一，且為該水利會中第二大灌溉系統，其水源由溪州鄉取自濁水溪水源灌溉整個彰化西南地區。荊仔埤圳幹線長 39 公里、支線 211 公里、分線 148 公里，水路由溪州流經埤頭、二林、芳苑、北斗、竹塘、大城地區，灌溉面積達 18,850 公頃，流域範圍如圖 15。研究灌區取荊仔埤圳新永基幹線為灌溉用水，其水源頭來自濁水溪，灌

表 4 輪區面積

輪區別	輪區總面積(ha)	建物面積(ha)	實際灌溉面積(ha)
三條圳重劃區北幹線第 1 輪區	51.03	3.98	47.05
三條圳重劃區北幹線第 2 輪區	37.20	0.50	36.70
三條圳重劃區北幹線第 3 輪區	39.95	0.03	39.92
三條圳重劃區北幹線第 4 輪區	43.76	0.77	42.99
三條圳重劃區北幹線第 5 輪區	42.72	0.58	42.14

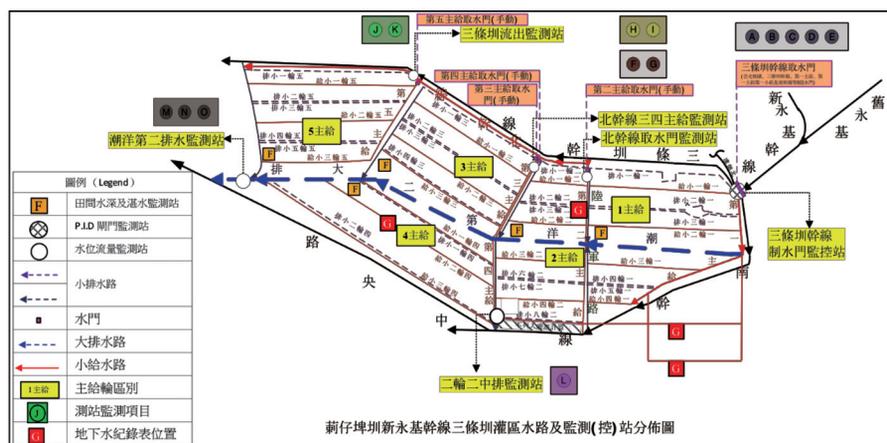


圖 16 研究區域三條圳灌區灌排水路系統圖。

區除了種植稻米外，亦種植多種旱作植物，如包心白菜及高麗菜。本研究區域位於新永基幹線北幹線之三條圳重劃區，屬砂質壤土質地，灌區總面積約 215 公頃，扣除建物面積約 6 公頃後，實際灌溉面積約 209 公頃，各輪區實際灌溉面積如表 4 所示。

3.1 水文資料

彰化蔴仔埤圳流域位處台灣中部地區，屬亞熱帶季風型氣候，冬季東北季風南下受中央山脈阻隔，導致降雨量減少，常有乾旱發生；夏季西南季風盛行，且因地形抬升及局部熱對流共同作用，常在夏季午後產生熱雷雨，此外，熱帶性低氣壓及颱風，亦為台灣夏季帶來豐沛雨量。本研究流域年平均降雨量 1,750 mm，雨量多集中於五月~九月(豐水期)，為台灣主要降雨季節，年平均溫度約為 23°C 左右。研究灌區內設有六座水位

流量監測站、五座田間水位監測系統、五座土壤水份張力監測系統及五座取水門，進行流量、水位、土壤含水量監測以及灌溉配水調整，相關位置如圖 16 所示。

3.2 灌區灌溉水源及灌溉制度

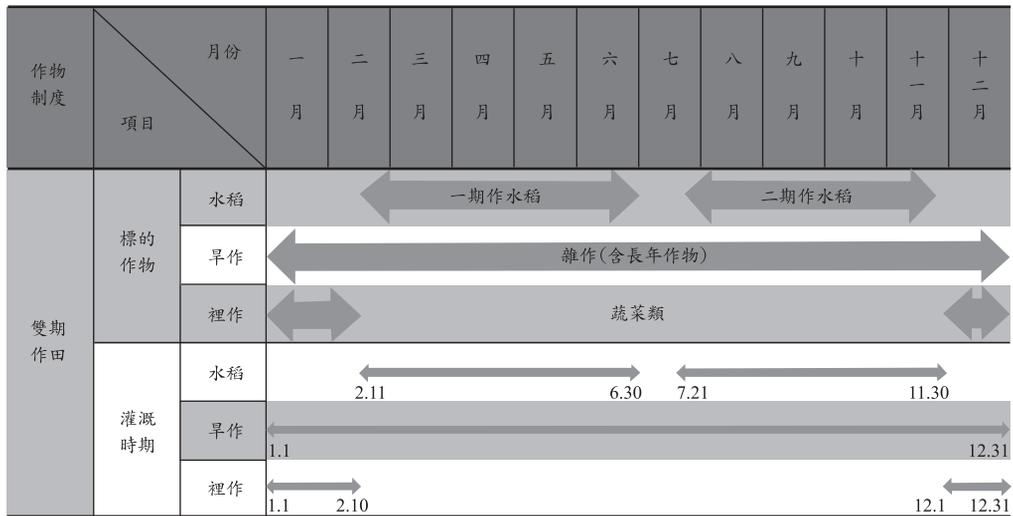
根據彰化農田水利會灌溉計畫表，新永基幹線灌區之主要耕種作物為一年兩期作之水稻，耕作時程可分為秧田、浸田、整田及本田四個時期，農作時程如表 5 所示。旱作部分由於農民栽種作物種類及時間差異，難有標準之農作時程，本研究與灌區農民配合統計，選定灌區內主要旱作之作物為包心白菜及高麗菜，紀錄從播種至收成之生育日數，作為預設之耕作時程。彰化農田水利會釐訂水稻、旱作之計畫灌溉量，除了衡量作物需水量外，仍參酌各埤圳水權登記，以及有效雨量利用等，其彰化地區灌溉制度如表 4 所示。

表 5 新永基幹線灌區之農作時程表

農作別	期作	第一期作		第二期作	
		日期	灌溉日數	日期	灌溉日數
秧田		1月11日~1月31日	21	7月1日~7月20日	20
浸田		1月11日~1月31日	21	7月1日~7月20日	20
整田		2月11日~2月20日	10	7月21日~8月10日	21
本田		2月21日~6月30日	130	8月10日~11月30日	112

資料來源：彰化農田水利會，本研究彙整。

表 6 彰化農田水利會灌溉制度



資料來源：彰化農田水利會，本研究彙整。

表 7 地下水文相關資料

井號	地下水測站名稱	井頂高程	井深	最小年平均水位	最大年平均水位
07260112	柑園新(1)	46.95		33.98 (2015)	35.82 (2013)
07260311	僑義	30.93	137	21.15 (2015)	23.34 (2008)

3.3 地下水文資料

灌區位於柑園新(1)及僑義地下水監測井之間，涵蓋受壓與自由含水層。表 7、圖 17 及圖 18 所示(水利署(2008~2015)[20])，柑園新(1)與僑義相鄰地下水監測井相關資料，其井頂高程指以基隆潮位站平均海水面為零公尺起算基準，高於零公尺之高度為正，低於零公尺之高度為負，地

下水位指地下水觀測井井管內水位面之高程，即為基隆潮位站平均海水面為零公尺起算基準之水位高程。

四、結果與討論

4.1 系統演算

本研究灌區之灌溉系統，灌排水路分明，且

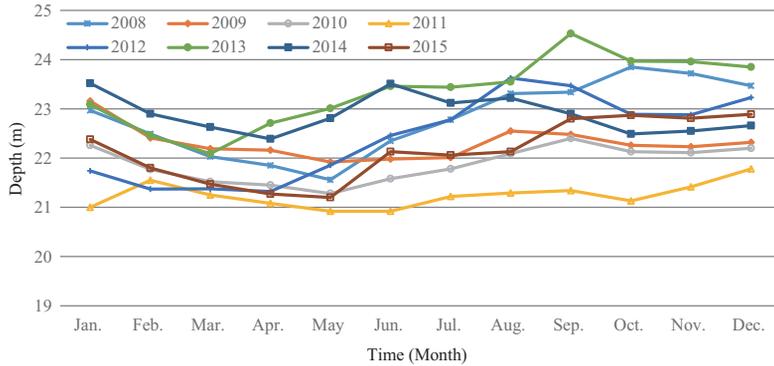
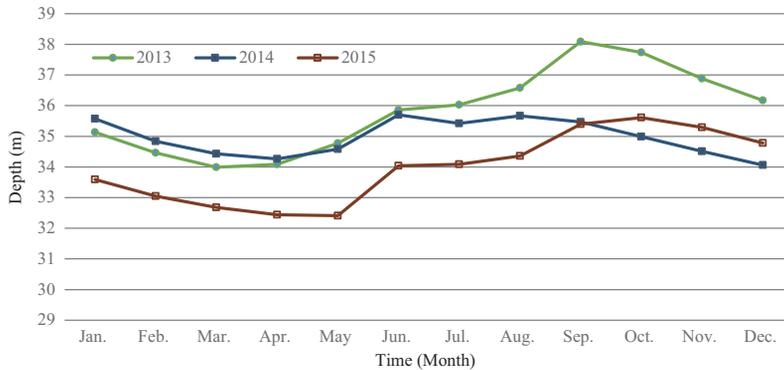


圖 17 僑義地下水位監測井 2008 年至 2015 年監測水位資料。



資料來源：水利署地下水年報[20]，本研究統計。

圖 18 柑園新(1)地下水位監測井 2013 年至 2015 年監測水位資料。

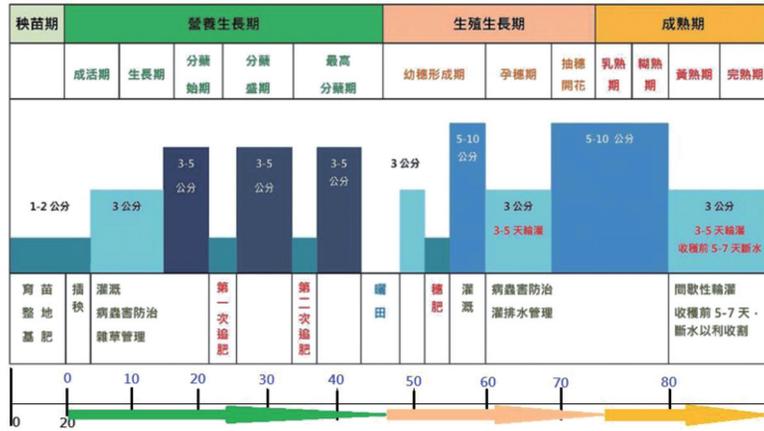
灌區分為多個坵塊，以系統動力軟體 VENSIM 建置輪區之灌溉系統，當坵塊因降雨或灌溉產生之田間餘水時，其溢流方向均往該坵塊所屬小排流動，再匯流至位於灌區中間位置之潮洋第二排水支線，模式依其灌溉用水調控操作方式及灌溉方法進行每日灌區需水量及田區地下水抽取量變化之模擬。

4.1.1 計算流程

本研究系統模式之計算流程，包含水稻及旱作兩部分進行灌溉計算，水稻之栽培淺水深於初始插秧後設定為 3 公分，爾後隨水稻生長期所需之田間水深不一，本研究參考台中區農改場(2015)之各生育時期灌溉排水管理訂定目標湛水深，如圖 19 所示。農民實際灌溉情形並無

依照建議之目標湛水深每天進行灌溉，一般而言，以低於水稻灌溉基準點再給予灌溉即可；旱作部分依照現地農民灌溉習慣及方式，設定種苗後土溝灌溉至 1/3~1/2 土堤高度，並參考台南區農改場甘藍菜灌溉方式，灌溉後隔天即排水；然待土壤水份損失至旱作灌溉需水點後再進行灌溉，其旱作灌溉需水點隨作物種類及土壤性質而異，然渠道供水量優先模式之旱作部分以旱作灌溉需水點為灌溉標準，且灌溉至土溝之飽和含水量深度，若未達旱作灌溉需水點則不需進行灌溉。

模式依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後，依照坵塊順序依序供水，並由模式所計算之各坵塊所需水量給



資料來源：台中區農業技術專刊(2015)[6]

圖 19 水稻栽培各生育時期的灌溉排水管理。

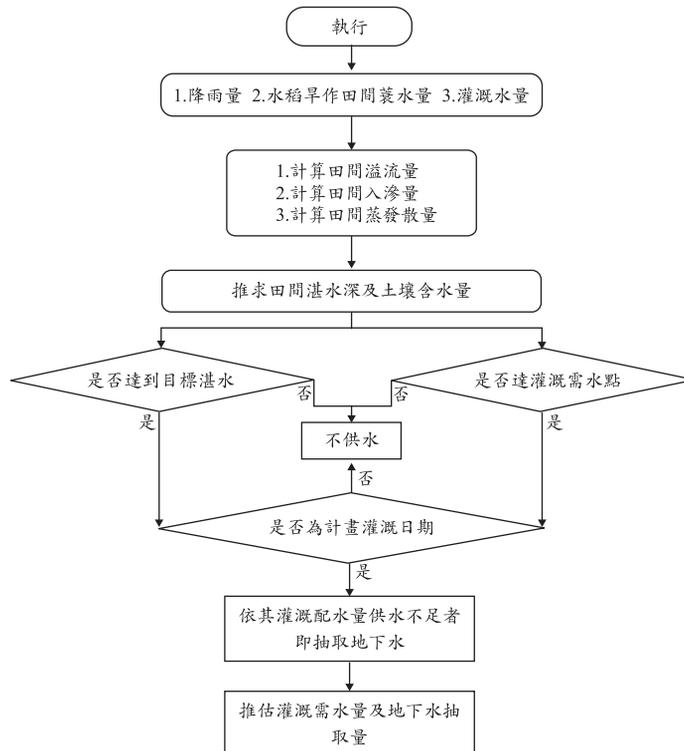


圖 20 模式演算流程圖。

予適當配水，然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或田埂高度，若有即產生田間逕流量，亦稱田間溢

流量，此時，系統則不提供灌溉配水，其判別灌溉供水與否及系統灌溉用水之演算流程如圖 20 所示。

4.1.2 輸入資料

本研究模式執行之基本參數資料，包含降雨量及作物係數等水文因子及相關作物參數，並依據灌區之水稻及早作耕作時程帶入模式運算，詳述如下：

1. 降雨量：依據中央氣象局溪州雨量站之實測日降雨資料。
2. 作物蒸發散量：利用鄰近台中農改場 A 型蒸發皿之日蒸發量資料，進行作物係數及土壤校正係數進行田間蒸發散量運算。
3. 三條圳幹線入流量：依據三條圳幹線制水門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. 抽水機抽水量：由試驗地農民所記錄之抽水頻率，與該試驗地之抽水機抽水流量進行流量換算，並與現地農民提供之操作進行校正作為研究之抽水量值。
5. 田區初始容量：本研究水稻部分模擬期間為浸田及整田結束後，於插秧期開始模擬，因此土壤水份含量設定為飽和狀態，且有蓄水深 3 公分，旱田部分則設定栽種日第一天灌溉至 1/3~1/2 土堤高度後立即排水至飽和含水量深度，模式設定耕層厚度等於土壤厚度為 30 公分(行政院農委會(2002)[21])。
6. 田區滲漏量：本研究模式計算滲漏量是以田間容水量(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，否則無滲漏發生。
7. 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，本研究參考台中區農業改良場[6]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，設定田埂高度為 10 公分。
8. 輸水損失量：本研究參考「灌溉排水原理」施嘉昌(1984)[10]之研究，依水路長度每公里輸水損失率約 10%計算。
9. 坵塊面積：依實際試驗灌區面積劃分各坵塊面積，且已扣除灌區中建物面積。

4.2 模式模擬結果

本研究利用兩種模式進行模擬田間水位變化，探討田間用水情形，由於第二項渠道供水量優先模式較地下水抽取量優先模式更有一致性之灌溉機制，且更符合實際灌溉情形，可減少人為不確定性之變數，亦提高地下水抽取量之推估準確性，因此本研究利用渠道供水量優先模式推估 2015 年一、二期作及 2016 年二期作灌區地下水抽取量及出流量，並探討地下水位之變化。

4.2.1 2016 年二期作灌區水旱作混植之田間用水變化模擬

1. 情境分析

此情境針對灌區中水旱作混植之各坵塊種植面積比例皆不相同情形，探討此情境之灌區用水量變化之差異，針對坵塊水稻旱作種植面積比例，本研究利用 Google earth 之衛星航照圖(2016 年 10 月 30 日拍攝)進行灌區水旱田面積比例概略判斷；此模擬利用兩模式進行模擬，探討兩模式之相關性，並應用渠道供水量優先系統推估灌區灌溉情形，本文呈現耕作期間 2016 年 9 月 6 日(水稻本田第 31 天)至 2016 年 11 月 15 日(水稻本田第 100 天)之模擬結果。

2. 模擬結果

(1)地下水抽取量優先模式之結果分析：(模擬一)

本模擬之地下水抽取量主要由試驗地農民記錄及經驗習慣進行校正，然試驗地 D 位於研究地區相對上游之第一輪區及第二輪區之間，此位置相對後方輪區有先取用渠道水之優勢，因此相較於第二、三、四及五輪區之抽水次數勢必較少，且隨水稻田面積增加，渠道水供應不足時，各輪區之抽水次數隨之增加；此呈現第一輪區及第五輪區水稻之模擬結果如圖 21 及圖 22 所示，結果顯示於第 51 天及 52 天大於目標湛水深，主要原因為此兩天為颱風侵襲期間，降雨過多、排水不及，導致田間蓄水深急速上升且溢過排水口及田埂高度。

整體而言，田間達旱作需水點農民即進行灌溉，且若帶入之地下水抽水量不足以供應田間需引灌水量，則以渠道抽水補足至目標湛水深度，然

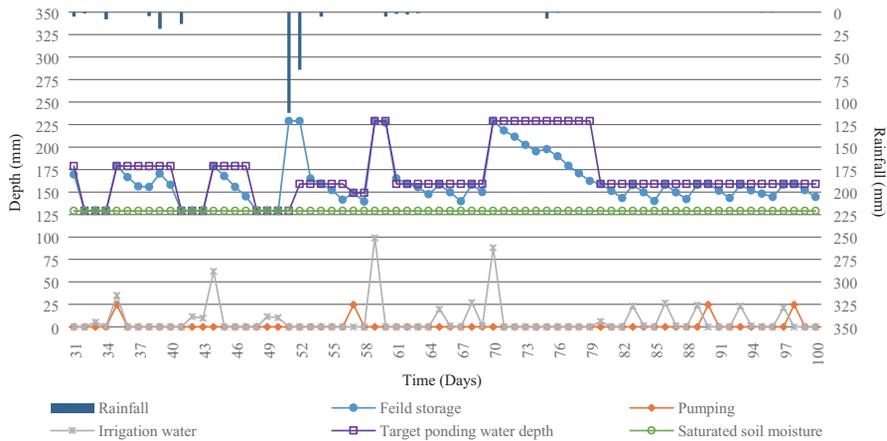


圖 21 (模擬一)第一輪區田間蓄水深及水文因子變化圖。

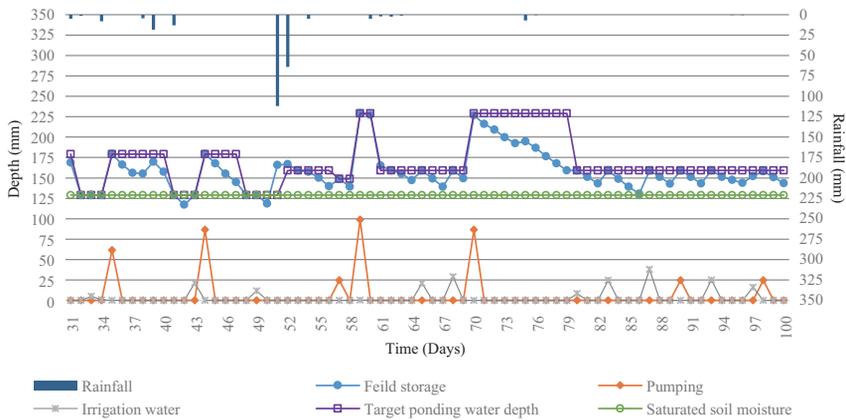


圖 22 (模擬一)第五輪區田間蓄水深及水文因子變化圖。

實際抽水情形則為愈往輪區下游位置，抽取次數增加且抽取量亦越大，渠道水量主要於上游第一、二輪區取用頻繁，導致後方輪區可用渠道水量減少，因此利用地下抽水補足田間需引灌水量，若該地水源由地下水提供越多，流往下個灌區之渠道水量則越多。

2016年二期作水稻田第59及70天為進入孕穗期前期及抽穗期之生長階段，需保持較高目標湛水深，因此其有較大取水量，又第59及70天渠道供水僅足夠供給至第二輪區，導致第三輪區及後方輪區抽水頻繁之情形。然地下水之平均單位抽水並非全部坵塊皆抽取相同抽水量之結果，

係由各個坵塊田間引灌水量差異，而使抽水量抽取有不同進行平均之結果。

旱作部分包含試驗地 A 於 2016 年 8 月 27 日所種植之包心白菜(種植期第 10 天)至試驗地 C 於 2016 年 10 月 13 日種植之包心白菜(種植期第 32 天)，兩農民灌溉方式之差異。試驗地 C 農民較試驗地 A 農民抽水頻繁，試驗地 C 農民約 6-10 天灌溉一次，然旱作灌溉可達旱作灌溉需水點時，再進行灌溉，如試驗地 A 農民灌溉方式。第一至五輪區於第 50 天土壤水份皆已達旱作灌溉需水點，但渠道水僅足夠供給至第二輪區，因此第三至五輪區於第 50 天皆達旱作灌溉需水點以

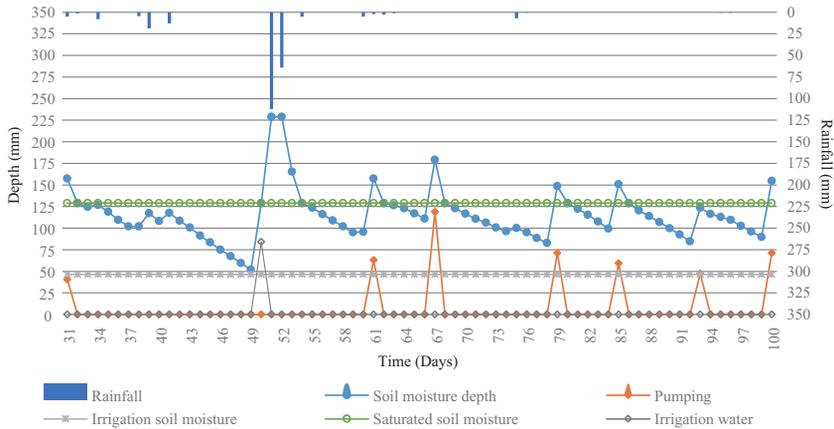


圖 23 (模擬一)第一輪區旱作蓄水深及水文因子變化圖。

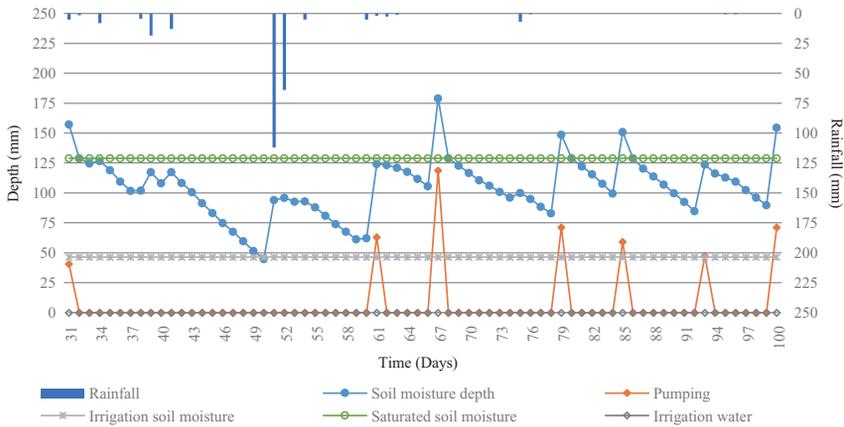


圖 24 (模擬一)第五輪區旱作蓄水深及水文因子變化圖。

下，然第 51 天因颱風來襲，土壤水份及田間水深上升，第一及二輪區更因排水不及使田間出現水位升高之現象；然當颱風來襲，一般農民會視天氣預報進行灌溉與否判斷，但由於模式設定於土壤水份到達旱作灌溉需水點時即需灌溉，且若今日渠道供水不足又無地下水補給以供應田間需引灌水量，則田間需引灌水量由後一天渠水或抽水補給，然模式無考慮天氣預報及僅考慮灌溉天之降雨情形，結果顯示第一及第二輪區旱作田間有取水情形發生，又第三至第五輪區因無渠道水可用，且無地下抽水，待後一天補給灌溉用水不足情形，因此第三至五輪區颱風天並無積水情

形發生，第一輪區及第五輪區模擬結果如圖 23 及圖 24。

模擬之作物需水量如圖 25 所示，第 39 天及第 52 天之作物需水量為零主要因降雨而使蒸發量測值為零所致，若蒸發散越旺盛則田間蒸發散量越多，作物需水量亦越多，反之，蒸發量越少則田間蒸發散及作物需水量越少；然作物需水量不僅受蒸發散所影響，亦受作物生長係數、面積比例及土壤校正係數所影響，若水稻田面積較多，則灌區作物需水量相對較多，因水稻一般保持固定水深或維持在根系易取用水份之狀態，本研究系維持在水稻灌溉基準點之水深，便無土壤

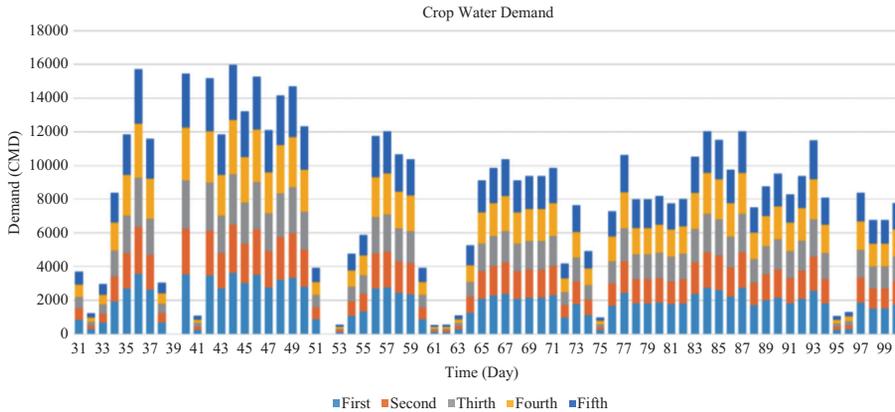


圖 25 (模擬一)第一至五輪區作物需水量變化圖。

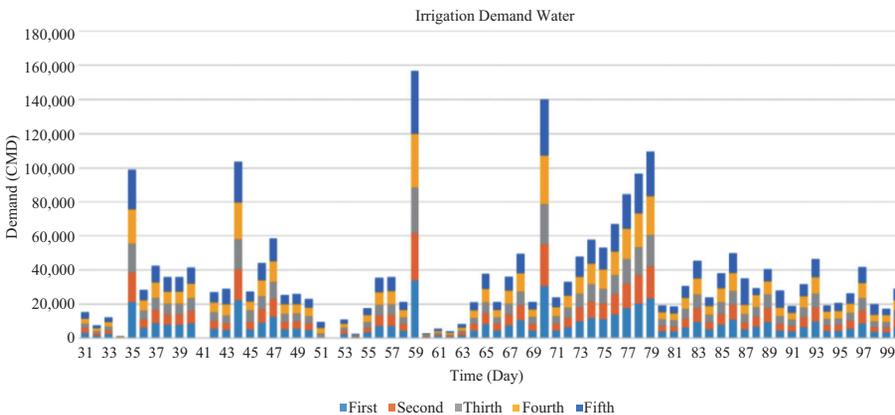


圖 26 (模擬一)第一至五輪區灌溉需水量變化圖。

校正係數之影響，因此水稻之田間蒸發散量與作物需水量成正比；但旱作之種植可延至旱作灌溉需水點再行灌溉，若旱作灌溉需水點低於根系不易取用之灌溉區域時，旱作之田間蒸發散量受土壤校正係數所影響，需進行校正，當土壤水份低於根系不易取用之灌溉區域時，係數則由 1 漸漸遞減至 0，當係數為 0，田間蒸發散行為即停止，於係數 1 至 0 之情況變化下，田間蒸發散量與作物需水量成反比，蒸發散越少其作物需水量越多，但一般旱作灌溉需水點不會低於根系不易取用之灌溉區域，因此當只考慮作物生長係數及面積比例時，灌區之水田為主要影響作物需水量趨

勢。灌溉需水量之變化主要受田間需水量、地下水抽取量及降雨量等田間損失或農民操作習慣所影響，不同之作物面積比例亦會影響田間用水需求，尤其當水田部分增加，田間需引灌水量隨之增加，旱作部分則依其需灌溉天數而使總灌溉需水量增加，水稻顯著影響灌溉需水量變化，由圖 26 所示灌溉需水量為零的天數有第 49 及 51 天，因田間蓄水深皆大於目標灌水深或大於旱作灌溉需水點，田間則不需額外灌溉用水，田間用水需求為零。

(2)渠道供水量優先模式之結果分析：(模擬二)

利用 2016 年二期作相同水文因子，模擬灌

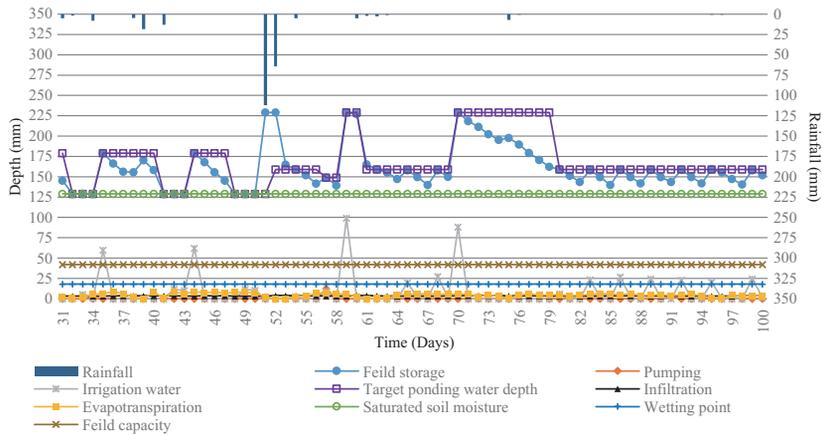


圖 27 (模擬二)第一輪區田間蓄水深及水文因子變化圖。

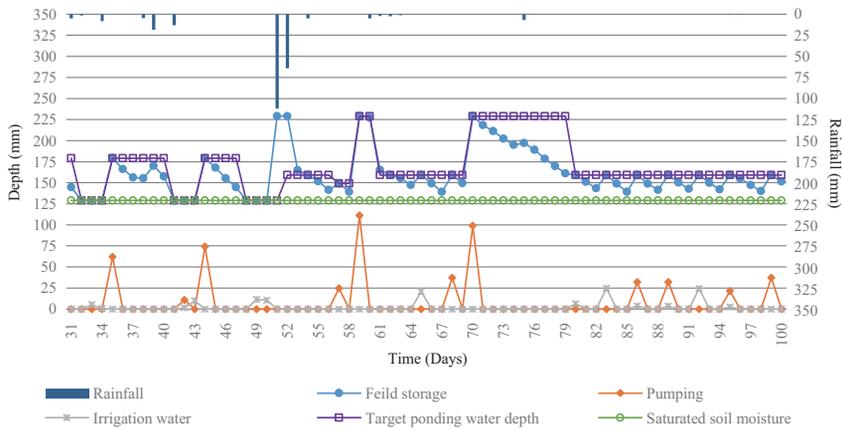


圖 28 (模擬二)第五輪區田間蓄水深及水文因子變化圖。

區第一輪區至第五輪區水稻之模擬結果如圖 27 及圖 28 所示，結果顯示於第 51 天及 52 天因颱風緣故，降雨過多排水不及，田間蓄水溢過排水口及田埂高度。模擬地下水抽取結果由各坵塊進行判斷抽水量後，再由輪區面積進行平均，由模式判斷達水稻灌溉基準點即灌溉，模擬二與模擬一較大差異為因後方輪區渠道水供應不足，造成兩輪區田間蓄水結果與地下水抽水情形之誤差。渠道水不足供應灌溉用水，則以地下水抽水補足，且抽水結果於第一及二輪區相較模擬一之地下水抽水次數少，第三輪區結果與模擬一之結果較為一致，第四及五輪區則有相較於模擬一較多之抽水

次數，若排除紀錄表農民種植經驗不足之情形(如第 90 天之抽水)，整體而言，抽水趨勢與模擬一相似，愈往下游輪區位置(即第四及五輪區)，抽取次數增加且抽取量越大，渠道水量主要於上游第一、二輪區所取用，後方輪區以地下水抽水補足田間需引灌水量情形普遍，因此，建議以此模式進行調配，將渠道水量調整予下游灌區使用，並與地下水源互為搭配，為上游灌區行補充灌溉，以使各個輪區均能渡過枯旱缺水時期。

渠道供水量優先模式之早作部分以早作灌溉需水點為灌溉標準，若未達早作灌溉需水點則不需進行灌溉，其第一、五輪區模擬結果如

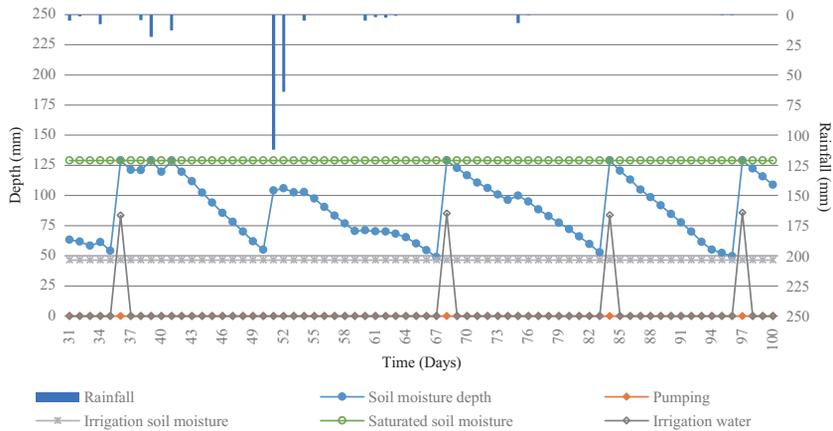


圖 29 (模擬二)第一輪區旱作蓄水深及水文因子變化圖。

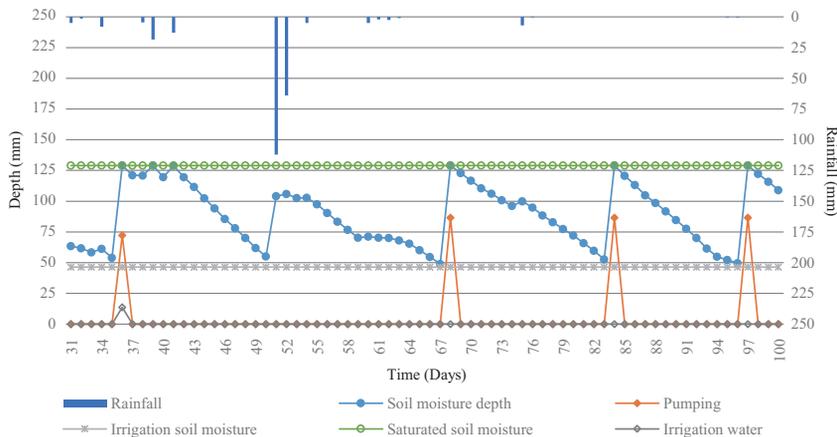


圖 30 (模擬二)第五輪區旱作蓄水深及水文因子變化圖。

圖 29 及圖 30 所示，五個輪區之灌溉天數皆為第 36、68、84 及 97 天，約 11 至 14 天灌溉一次，且每次灌溉皆達土壤飽和即停止灌溉，然旱作灌溉期間第一至五輪區於第 50 天土壤水份皆已達旱作灌溉需水點，且因第 51 及 52 天灌溉天考慮颱風大量降雨情形，使土壤水份增加且高於旱作灌溉需水深，因此模式未供給渠道或抽水之灌溉。旱作灌溉方式如圖所示第一及第二輪區可由渠道取水方式取得灌溉用水，又因模式判斷若渠道水量不足坵塊水量，則不取用渠道取水，第三及第五輪區部分坵塊取用渠道水，部分坵塊僅能

以地下水抽水方式取得水源，因此有抽水亦有渠水灌溉之結果，第四輪區因坵塊田間需引灌水量皆大於渠道水量，因而皆使用地下水抽水方式灌溉。

模擬之作物需水量如圖 31 所示，其結果與模擬一之結果相似，第 39 天及第 52 天之作物需水量為零主要因蒸發散為零所致，於此模擬中水稻顯著影響灌溉需水量變化。灌溉需水量之變化如圖 32 所示，第 41、51 及 52 天灌溉需水量皆為零，因田間蓄水深大於目標湛水深或大於旱作灌溉需水點，田間則不需額外灌溉用水，與模擬

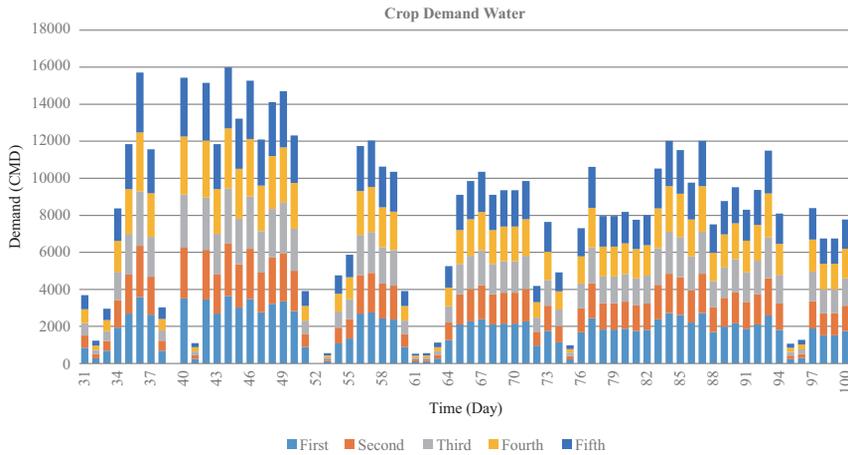


圖 31 (模擬二)第一至五輪區作物需水量之變化圖。

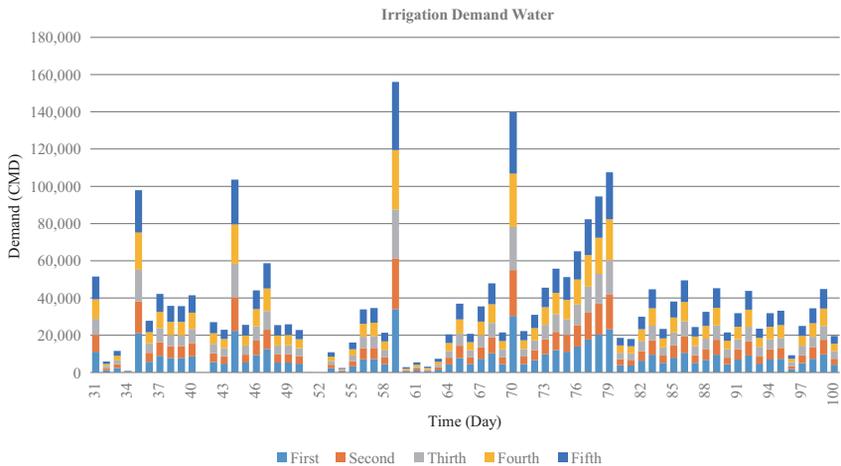


圖 32 (模擬二)第一至五輪區灌溉需水量之變化圖。

一之主要差異於第 87 天灌溉情形不相同，使灌溉需水量不同。

排除不確定抽水因素，兩模擬之灌溉情形與需水情形相似，因此，本研究評估兩模式之迴歸相關性，將渠道供水優先模式系統應用於灌區灌溉情形之推估，達到控制出流量使灌區成為一控制水量產出之區域，且利用抽水情形與控制出流量之抽水情形探討地下水位之影響，其分析如圖 33，相關係數為 0.8779，兩模式具有相關性，排除農民抽水不確定性之因素，本研究認為渠道

供水量優先模式為可預測之模式，可合理應用渠道供水量優先模式系統進行灌區田間變化及地下抽水預測模擬。

4.2.2 作物種植比例與作物需水量及取水方式之影響

1. 情境分析

灌區取水方式因作物種植比例不同，導致作物需水量及灌溉需水量有差異，本研究利用 2016 年實際量測參數，分別進行水旱作面積比 0.5 比 0.5 及水旱作面積比 0.9 比 0.1 之兩情境模擬。

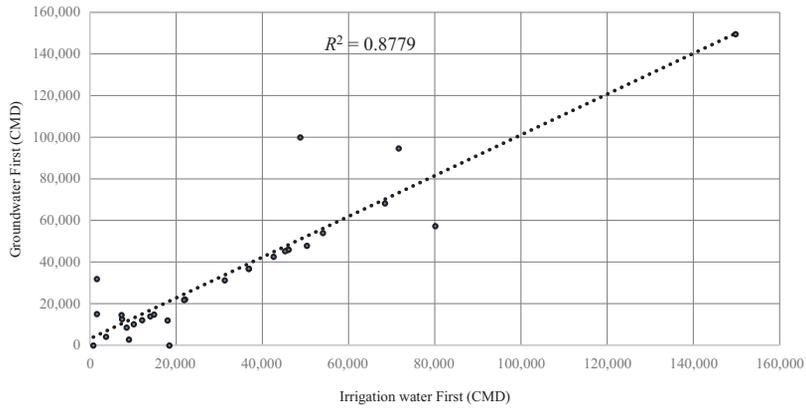


圖 33 地下水抽取量優先模式與渠道供水量優先模式之相關性比較。

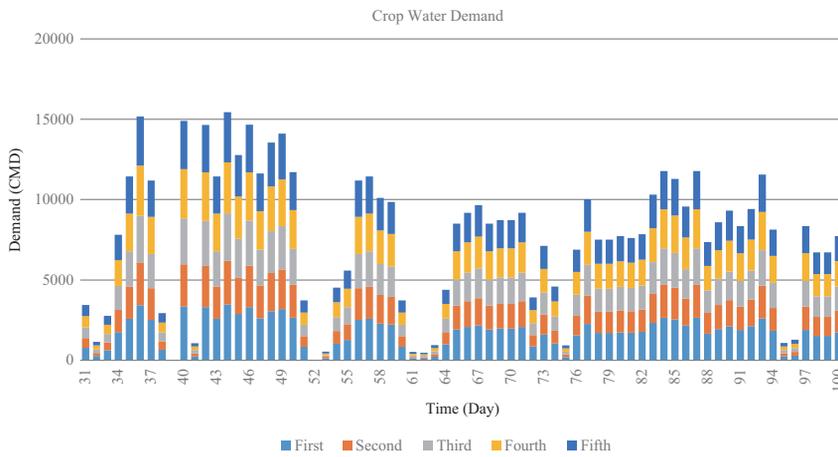


圖 34 水旱作面積比例 0.5 比 0.5 作物需水量。

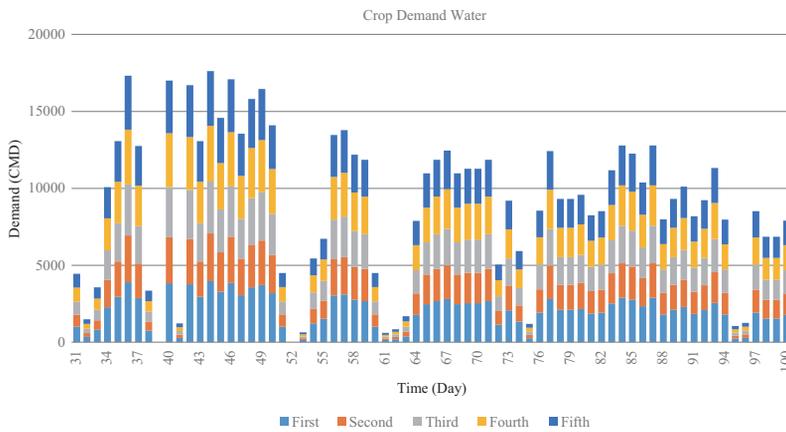


圖 35 水旱作面積比例 0.9 比 0.1 作物需水量。

表 8 2015 年一期作田間水平衡估算表

單位：mm/day

	容積流入量			容積流出量		容積變化量
	降雨	渠道取水	地下水	蒸發散與滲漏	逕流	
第一輪區	4.845	3.779	2.755	6.677	4.024	0.679
第二輪區	4.845	2.796	3.783	6.719	3.982	0.723
第三輪區	4.845	2.663	3.912	6.780	4.115	0.525
第四輪區	4.845	1.357	5.235	6.727	4.102	0.608
第五輪區	4.845	1.255	5.245	6.685	4.025	0.634
平均	4.845	2.370	4.186	6.718	4.050	0.633

2. 模擬結果

水旱作種植面積比例影響作物需水量如圖 34 及圖 35 所示，水稻種植面積越多，作物需水量越多，如面積比例 0.5 比 0.5 之最大作物需水量為第 44 天約為 15,500CMD，面積比 0.9 比 0.1 之最大作物需水量約為 17,500CMD，模擬二之作物需水量介於兩面積比之間約 16,000CMD，且當渠道水量不足時，水稻比例較多者為滿足灌溉需水量其地下水補足之用水量較多，水旱作比例 0.5 比 0.5 之作物抽水次數與比例 0.9 比 0.1 之作物抽水次數相近，但抽水量相對較少，比例 0.5 比 0.5 灌區最高平均單位抽水量發生於第 68 天第五輪區約為 6 公分(約抽水時間 2.5 小時)，因該天為水稻及早作共同灌溉之時間，且主要由旱作抽水所致，因旱作可達近土壤凋萎點時再行灌溉，因此，當旱作進行灌溉時，須大量灌溉用水以達目標湛水深，以致渠道供水不足供應至第三輪區至第五輪區而需進行大量抽水；水旱作比例 0.9 比 0.1 最高平均單位抽水量發生於第 59 天第五輪區約為 10 公分(約抽水時間 4 小時)，因灌區水稻田面積增加，渠道水供應量不變情形下，渠道水於第一輪區以取用殆盡，因此後方輪區相對大量抽水，又加上第 59 天為進入孕穗期需保持 10 公分之田間目標湛水深，因而有大量取水情形發生。渠道用水不足則抽水增加之結果，於水旱作面積比 0.5 比 0.5 之情境其模擬之作物生長期間總抽水量與總渠道取水量之比例為 46%比 54%，於水旱作面積比 0.9 比 0.1 之情境其模擬之

作物生長期間總抽水量與總渠道取水量之比例為 51%比 49%，因此水旱作比例明顯影響灌區抽水情形。

4.2.3 模擬灌區地下水抽取量與地下水位變化影響

1. 情境分析

本研究利用灌區 2015 年一、二期作模擬之地下水抽水情形比較 2015 年地下水位之關係，利用渠道供水量優先模式，由 2015 年一期作(2015 年 3 月 1 日至 2015 年 6 月 18 日，共 110 天)及 2015 年二期作(2015 年 8 月 10 日至 2015 年 11 月 30 日，共 112 天)灌區水文資料進行模擬，推估地下水抽取量及灌區出流量，並針對 2015 年一二期作地下水位進行初步分析抽水情形，討論灌區地下水位變化。

2. 模擬結果

本研究利用田間水平衡方程式及土壤水份方程式進行田間水平衡計算，並將田間視為控制容積，利用水文因子作為容積之流入及流出量，如降雨、渠道渠水及地下水抽取量為容積之流入量，作物蒸發散、滲漏量、地表逕流為容積之流出量，如表 8 及表 9 所示之 2015 年一、二期作田間水文因子之水平衡估算表；表中明顯表現出農業灌溉用水考慮地下水抽水情形之重要性，若不考慮地下水抽水結果，當渠道供水不足時，農業用水水源便造成嚴重用水缺口，嚴重可能導致作物產量劇減及枯萎等，又近年地下水抽水議題興盛，因此本研究延伸探討灌區地下水抽取量與地下

表 9 2015 年二期作田間水平衡估算表

單位：mm/day

	容積流入量			容積流出量		容積變化量
	降雨	渠道取水	地下水	蒸發散與滲漏	逕流	
第一輪區	3.482	5.319	1.480	7.092	2.310	0.880
第二輪區	3.482	4.412	2.540	7.125	2.399	0.910
第三輪區	3.482	3.125	3.779	7.233	2.586	0.566
第四輪區	3.482	1.525	5.333	7.154	2.586	0.601
第五輪區	3.482	1.514	5.246	7.095	2.484	0.663
平均	3.482	3.179	3.676	7.140	2.473	0.724

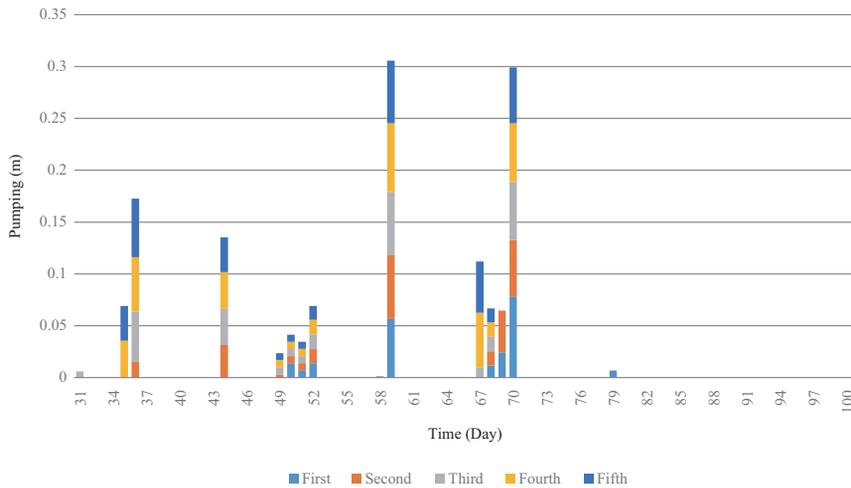


圖 36 2015 年一期作五輪區抽水深度統計圖。

水位之關係，分析灌區抽水情形之重要性與合理性。

比較僑義及柑園新(1)地下水位監測井之地下水位趨勢圖，如圖 20 及圖 21 所示，2015 年地下水位觀測結果顯示於 2015 年 1 至 4 月降雨頻率及降雨量較少，地下水位呈現下降趨勢，5 月至 10 月水位呈上升趨勢，主要因 5 月中旬後降雨較為頻繁，地下水位隨降雨頻率及降雨量而上升，且降雨頻繁相對抽水情形減少。由於 2015 年一期作渠道供給量較二期作少，且降雨過於集中於五月中旬後，造成一期作種植第 80 天前地下水抽水量較二期作種植期間多，且主要以地下水為灌溉水源，地下水位直至六月水稻進入黃

熟期後地下水位才明顯上升，如圖 36 及圖 37。然模擬結果顯示 2015 年一期作最高抽水結果為第 70 天第一輪區平均單位抽水量約為 8 公分，其模擬結果較第五輪區抽水結果多約 1.5 公分，主要因第一輪區水稻面積較第五輪區多且渠道水量不足供應田間需引灌水量，須利用地下水抽水方式取得水源，又灌區雨量集中在五月中旬(約水稻種植第 80 天起)，因此五月中旬後抽水情形減少，加上降雨補給，地下水位變化較為平緩；然一期作種植期間五輪區總單位抽水量約 230 公分，且主要集中於種植第 80 天之前，渠道總取水量約為 130 公分，其總抽水量與總渠道取水量之比例為 64%比 36%，總抽水量及總渠道取水量

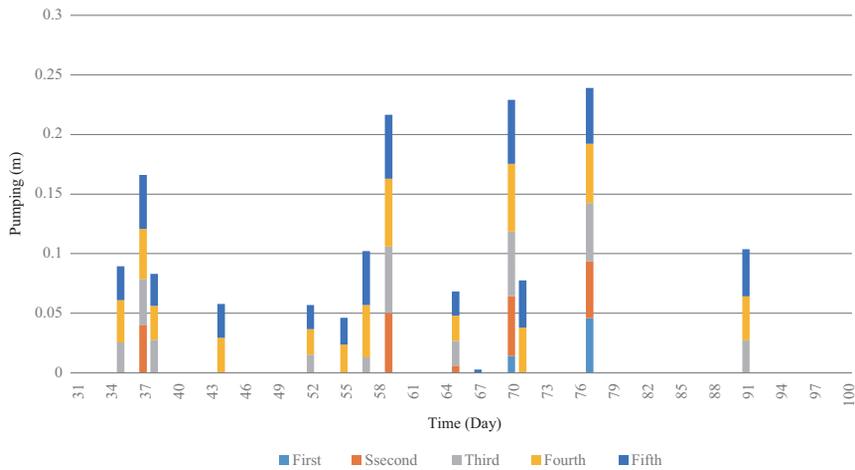


圖 37 2015 年二期作五輪區抽水深度統計圖。

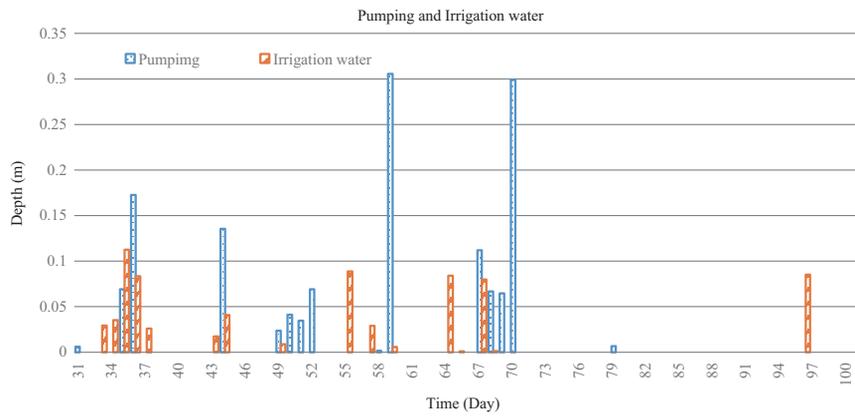


圖 38 2015 年一期作總抽水及總渠道取水量。

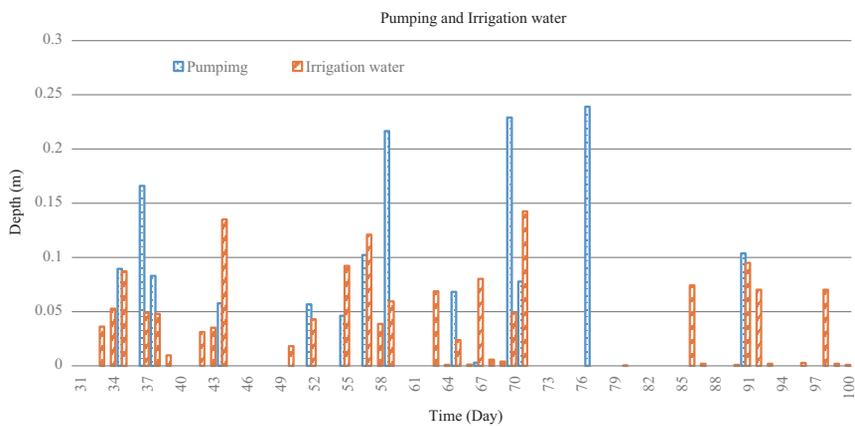


圖 39 2015 年二期作總抽水及總渠道取水量。

表 10 2015 年灌區地下水補注量與抽取量之估算

期作別	水量	總入滲補注量(m)	地下水總抽取量(m)
一期作		2.371	2.302
二期作		2.355	1.932

如圖 38 及圖 39。2015 年二期作因渠道供水較為充足，且降雨時空分布較均勻，地下水位無明顯下降或上升，最高抽水結果為第 70 天第五輪區平均單位抽水量約為 6 公分；然二期作五輪區總單位抽水量約 200 公分，渠道總取水量約為 178 公分，其總抽水量與總渠道取水量之比例為 54% 比 46%。

本研究利用模式演算田間入滲補注量與地下抽水量，比較兩者與地下水位之變化關係，如表 10 所示，2015 年一期作之總補注量約為 2.371m，其總抽水量約為 2.302m；二期作總補注量約為 2.355m，其總抽水量約為 1.932m。兩期作皆為補注量較抽水量多，但一期作種植期間(2 月至 6 月)，於 2 月至 4 月因降雨及渠道供水不足，導致大量抽水，抽水量大於補注量，因此地下水位整體呈現下降趨勢；然 5 月及 6 月因梅雨季降雨集中且於一期作耕作後期，抽水情形明顯下降，5 月地下水位無明顯變化，但 6 月則呈現上升趨勢，5 月及 6 月抽水減少且降雨增加，為造成耕作結束後，整體總抽水量小於總補注量之主因，若由一期作耕作前後之地下水位比較(1 月及 6 月)，地下水位整體呈現些微上升之趨勢。

二期作之降雨時空分布較為平均且適時，耕作期 7 月及 8 月之抽水量與補注量均大且相當，地下水位無明顯變化趨勢；9 月及 10 月因颱風季節降雨增加，使得抽水情形更為下降且補注量持續，地下水位則呈現明顯上升趨勢，11 月因降雨減少且於耕作後期，抽水情形相較耕作前期減少，因此地下水位無明顯變化，然二期作因降雨補助田間用水較多，地下抽水情形減少，整體總抽水量明顯小於總補注量，且若比較二期作耕作前後地下水位比較(6 月及 11 月)，地下水位整體呈現明顯上升之趨勢。

然兩期作之水旱作面積比例相同，但由於降雨、蒸發散及田間滲漏等情形影響作物需水量，使得田間取水情形之差異，根據地下水位變化結果，二期作因降雨補注及渠道供水較多而適時補給地下水，因此由研究數據顯示，二期作之地下水抽水量尚在安全出水範圍內。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 本研究渠道供水量優先模式，於 25 天之模擬流出量結果顯示， R^2 值為 0.8054，而 RMSE 值為 15119.77CMD，因此模式適用於推估新永基幹線北幹線 1~5 輪區之流出量，並完成模擬輪區灌溉內部灌溉情形及抽水趨勢。
2. 本研究利用目標湛水深進行灌溉，並考量實際灌溉情形約 1 至 2 天或田間蓄水深達水稻灌溉基準點再進行灌溉至目標湛水深，為一符合灌溉原則之標準操作方式，在水情拮据之時，可再調整供水基準點，使抗旱用水調配更符合現況需求。
3. 水田面積影響灌溉需水量變化，於水旱作面積比 0.5 比 0.5 之情境下，其模擬之作物生長期間總抽水量與總渠道取水量之比例為 46% 比 54%，於水旱作面積比 0.9 比 0.1 之情境其模擬之作物生長期間總抽水量與總渠道取水量之比例為 51% 比 49%，因此水旱作比例明顯影響灌區抽水情形，水稻面積越多地下取水相對增加。
4. 灌區若因用水短缺，渠道水不足以供給至後方輪區，抽水情形由第一輪區往第五輪區遞增，2015 年一期作其總抽水量與總渠道取水量之比例為 64% 比 36%，2015 年二期作其總抽水量與總渠道取水量之比例為 54% 比 46%，兩期

作抽水水量比例主要受降雨量所影響，降雨越多抽水情形相對減少。

5. 承上，依本研究所採渠道供水量優先模式之分析結果，若以模式控制上游灌區水源，部份由地下水提供，則可相對控制其對於渠道水源之取用量；換言之，以此模式可達成調配渠道水量予下游灌區使用，並以地下水源為上游灌區進行補充灌溉，可使各個輪區渡過枯旱缺水時期。
6. 比較灌區 2015 年一二期作地下水抽水情形比較地下水位之關係，二期作降雨時空分布較一期作多且均勻，其補給量亦較一期作平均且多，因此，二期作之抽水情形尚在合理抽取範圍。

5.2 建議

1. 未來宜深入調查田區坵塊差異，更完整取得灌區資訊，且考慮溫度、氣象預測資料與灌溉方式之影響，提升模式模擬實際灌溉機制之效能。
2. 增設更多抽水紀錄點以掌握更精確之地下水抽水及地表水供灌情形，且更深入了解農民種植經驗與方式，統整農田灌溉機制，更精準掌握灌區灌溉情形，探討灌區地下水抽水量及補注量與灌區地下水位之關係，延伸評估灌區成為區域水資源補給區之可能。
3. 為達精進灌溉節水之目標，建議將渠道供水量優先模式系統化，並建置灌區渠道取水門及抽水機自動控制系統，於適當灌區進行全區自動化灌溉之地表水與地下水聯合管理系統。

誌 謝

本研究承蒙科技部補助專題研究計畫 MOST 105-2625-M-008-006 補助，並感謝彰化農田水利會提供資料，特此致謝。

參考文獻

1. 陳鶴文，「地下水與地表水聯合運用模式之建立-空間系統動力學之發展與應用」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，2007。
2. 林喬莉，「以系統動力模式評估水田埤塘灌溉系統」，中央大學土木工程研究所，碩士論文，2010。
3. 徐年盛，「地下水系統水平衡分析與補注源水量推估之研究」，中國土木水利工程學刊，第二十三卷，第四期，2012。
4. 張聖瑜，「田間精密灌溉用水模式及管理機制之建立」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2015。
5. 蔣汝國、黃小珍，「直播及節水栽培對水稻用水量及產量之影響」，台南區農業專訊第 50 期，2004 年 12 月。
6. 賴文龍、郭雅紋，「水稻栽培管理技術手冊」，台中區農業技術專刊，2015 年 5 月。
7. J.K., Kemble and D.C., Sanders, "Basics of Vegetable Crop Irrigation", Alabama A&M and Auburn Universities, 2000.
8. 甘俊二，「灌溉系統配水技術之分析與研究」，國立台灣大學農業工程學系，1979。
9. 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參數」，水稻田農業多樣性機能研討會，第 227-240 頁，2005。
10. 施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二，「灌溉排水原理」，國立編譯館主編，1984。
11. FAO, Irrigation and Drainage Paper No.56, Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements), 2006.
12. 蘇家陞，「水稻旱作混植輪區精密灌溉用水模式建立」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2016。
13. 謝明憲、林棟樑、黃山內、王仕賢，甘藍新品種「台南 1 號-夏初秋」，台南區農業專訊第 54 期，2005 年 12 月。
14. 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。
15. 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.

16. Bhadra, A., Bandyopadhyay, A., Singh, R.,
“Development of a user friendly water balance
model for paddy”, Paddy Water Environ,
Vol.31, pp.331-441, 2013.
17. 高振程，「水田坵塊系統之迴歸水量推估」，
國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，
2003。
18. 施嘉昌，「排水工程」，國立編譯館，1988。
19. 蔡明華，「灌溉與排水」，中國土木水利工
程學會，2000。
20. 行政院經濟部水利署，「地下水文年報」，
2008~2015。
21. 行政院農業委員會，「種水田增加滲漏效率
之技術性探討」，2002。

收稿日期：民國 106 年 8 月 21 日

修正日期：民國 106 年 9 月 19 日

接受日期：民國 106 年 9 月 25 日