

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

The Effects of Irrigation Management Practice on Growth Period and Irrigation Water Use Efficiency in Paddy Rice

國立成功大學
資源工程學系
博士班研究生

林 羿 汝

Yi-Ju Lin

國立嘉義大學
土木與水資源工程學系
碩士

邱 儀 婷

Yi-Tin Chiou

國立嘉義大學
土木與水資源工程學系
副教授

陳 清 田*

Ching-Tien Chen

國立成功大學
資源工程學系
教授

李 振 誥

Cheng-Haw Lee

摘 要

本研究應用區域降雨及作物生長特性與輪流灌溉方式，以台灣主要糧食生產且缺水最為嚴重之嘉南平原為研究區域，探討 2015 年一期作水稻分別於計畫種植日期 1 月 16 日實施台灣農民慣行農法(Conventional practice, CP)、稻作強化體系(System of rice intensification, SRI)，與調整種植日期於 2 月 16 日且於抽穗開花期實施 7 日輪灌之節水灌溉法(Modification of water management practice, MWMP)等灌溉設計處理時，其對產量、生長期距、作物需水量、灌溉用水量及水資源生產力之影響，進而解析不同水稻田間灌溉管理操作其於缺水期之最適灌溉水量與灌溉用水效能，以因應氣候變遷或春季嚴重缺水問題。研究結果顯示，當一期作水稻種植日期由 1 月 16 日往後調整至 2 月 16 日，水稻生長期距與作物需水量及灌溉用水量皆有遞減趨勢；在節水成效及水資源生產力之綜合評估，一期作水稻種植日期由 1 月 16 日調整至 2 月 16 日並實施 SRI 單株灌溉操作時，相較於種植日期為 1 月 16 日之農民慣行操作管理方式之灌溉水量，計有 38.3%之節水成效，且其水資源生產力為 0.78 kg/m^3 亦高於慣行農法之 $0.46 \text{ kg/m}^3 \sim 0.5 \text{ kg/m}^3$ 及其他灌溉操作，此水田灌溉用水管理操作策略，可提升灌溉用水調配效能，有效因應氣候變遷及春季缺水問題之解決。

關鍵詞：水稻，灌溉用水效能，稻作強化體系，慣行農法。

*通訊作者，國立嘉義大學土木與水資源工程學系副教授，6004 嘉義市學府路 300 號，ctchen@mail.ncyu.edu.tw

ABSTRACT

The purpose of this research is to discover the relationship between the productivity of paddy rice and water efficiency of the irrigation water under different cultivation time, crop growth stage, and irrigation interval by field experiments at irrigation center in Chia-Nan Irrigation Association, the effect on paddy rice yield as the result of different saving irrigation on drought period paddy rice in different cultivation times and water management practice such as the conventional practice (CP) or the system of rice intensification (SRI). The second purpose is to analyze, with the prerequisite of paddy rice yield uninfluenced, the degree of drought tolerance, the minimum water requirement and the irrigation interval of paddy rice for reference to irrigation water management during drought period.

The result of this research shows that, with the variety cultivation intervals, the water shortage during the first-season paddy rice, the growth interval, evapotranspiration and field irrigation requirement were reduced (from January 16th 2015 to February 16th 2015). When the water saving and water resource productivity for irrigation are considered at the same time, it is recommended to adjust the cultivation time for the drought in spring; planting on February 16th with the system of rice intensification (SRI) is recommended for paddy rice, through which the amounts of water can be saved for about 38.3%, and the amounts of water resource productivity is about 0.78 kg/m³. The results can be applied to irrigation water management during drought period in spring and adaptive to climate change.

Keywords: Paddy rice, Water use efficiency, System of rice intensification, Conventional practice.

一、前 言

台灣在民國 70 年以前，產業以農業為主，農業用水彈性較大，其缺水容忍度較高，以往大多以四年一缺或供水可靠度 75%為水源開發規模之依據；70 年代後產業逐漸轉型為以工業為主，且由於生活水準提升，對缺水之容忍度大幅降低，故以十年一缺或供水可靠度 90%為水源開發規模之依據。台灣因受自然環境及降雨時空分布不均之影響，致水資源之利用極為匱乏，其中以 11 月至隔年 4 月之缺水最為嚴重，且其缺水之頻率與強度，已隨氣候變異影響而有增加之趨勢，其中嘉南地區更於 81 年至 85 年間更陸續發生春旱，2015 年更發生約百年一次之嚴重乾旱。因此，如何在缺水期間，應用水資源調配利用策

略，確保農業生產之永續經營，並降低乾旱對其它產業造成的衝擊，實為從事農業水資源規劃研究者之重要課題。

台灣省輪流灌溉推進委員會推行小組(1961)為因應乾旱事件之發生，邀集農業水利方面之專家學者共同研討，決定於台南縣中營、台中農林改良場、桃園、台北等地區分別設置實驗田，以定水量(一次灌溉水深皆為 45 mm)之灌溉方式，輔以 6 日、8 日、10 日與 15 日等不同灌溉期距之處理加以試驗，探討不同之節水灌溉方式，對水稻生產之影響，研究結果顯示在輪灌期距 8 天時，對產量影響不大，輪灌期距越長節水效率越佳，減產情形越為嚴重，惟此試驗研究對灌溉時期與灌溉水量對產量之影響，則未加以探討。Abou *et al.*, (2006)亦在埃及尼羅河三角洲，進行

輪灌期距為 3 日、6 日、9 日、12 日之水稻田間試驗，研究結果顯示埃及地區在輪灌期距 6 天時，對產量影響不大。許宗民與甘俊二(1983)於嘉南農田水利會虎頭埤灌區缺水期之灌溉研究資料顯示，其平均產量指數與稻作總用水量間，並非正比關係，稻作之用水量並非漫無限制。Moutonnet (2001)農作物生產在整個生長的季節主要取決於土壤水份，故在灌溉水量不足時應選擇農作物在對水分敏感較高的生長期間加以灌溉。Yesim and Yuksel (2003)亦指出，水分供應對產量的影響在不同的生長期有所不同，於灌溉的安排過程與生產計畫中，在需水高敏感期應優先提供作物生長所需之灌溉水量。陳清田等人(2014)亦於嘉南農田水利會試驗田，探討水稻於分蘗期(tiller stage)與開花期(blooming stage)之生育階段別，開始實施 100%與 80%之灌溉水量與 7、10、13 天輪灌期距之節水灌溉處理，建立水稻節水率與減產率之相關性，研究結果顯示，在減產率與節水率之綜合評估，一、二期水稻於開花期實施 100%之灌溉水量輔以 7 天輪灌期距之灌溉處理時，其對產量影響甚微，且有 14% ~ 7.4%之節水效能。

Uphoff (1999)在「環境與農業」的一系列調查中，認為 SRI (The System of Rice Intensification, 簡稱 SRI)是一種友善環境的作法(Environment Friendly)，透過 SRI 可以找到農業生產與環境保育的平衡點，因此開始積極推廣，目前各國亦積極投入相關研究。惟 McDonald *et al* (2006)從馬達加斯加、尼泊爾、中國、泰國、寮國、印度、斯里蘭卡、印尼、孟加拉及菲律賓收集了將近 40 筆的 SRI 資料，再與當地農民慣行用水管理的結果進行比較，並沒得到 SRI 的實施結果在產量上有明顯的優勢。根據 Moser 與 Barrett (2003)在未開發國家(如馬達加斯加)對 SRI 所作的調查，由於實施 SRI 需耗費相當的人力與耗費推廣作業來改變農民現有作業方式，因此並不建議採用 SRI。

1973 年至 1985 年期間澳大利亞水稻產量約在 6.0 t/ha，惟於 1986 年開始研發水稻標準化生

產技術，並推廣及應用於生產，此技術的推廣使澳大利亞水稻產量迅速提高，到 2000 年水稻平均產量已達 9.65 t/ha，此技術亦應用在印尼、巴西和委內瑞拉，水稻產量亦約可增加 23% ~ 30% 左右，由於該生產技術著重於設施研發，對灌溉用水操作未有深入探究(Clampett *et al.*, 2003)。Belder *et al.* (2004)在中國湖北省及菲律賓 Nueva Ecija 省，水稻試驗中一個主要的發現是，對於續灌跟間歇灌溉的建議灌溉方式，間歇灌溉可以讓土壤在沒有浸沒期間不會過於乾燥，且亦能維持一定之產量。張煜權等人(2013)，比較乾濕交替的間斷灌溉(AWD)、深水密植栽培(DMP)與台灣農民慣行農法(CP)在用水量、產量及各項生產力的差異，試驗結果顯示實施 AWD 可增加產量及有效降低田間消耗水量，未來若能在降雨量少或地下水抽用區推廣 SRI，則應能更顯示出 SRI 省水的效果。

陳清田、林益如(2013)在嘉南農田水利會灌溉技術推廣中心試驗站實施水稻田間試驗，探討一期作水稻分別不同種植日期灌溉處理時，對水稻產量與灌溉用水量之影響，研究結果顯示：當一期作水稻種植日期由 1 月 16 日往後調整，水稻生長期距與作物需水量皆有遞減趨勢，水稻種植日期由 1 月 16 日調整至 2 月 16 日，其對產量影響甚微，且約有 21%之節水效能。Yoo *et al.*, (2013)指出，氣候變化不僅影響農作物的用水需求，亦影響水稻耕種系統，包括耕地和作物生長季節等，研究結果顯示，由於溫度上升致插秧移植與抽穗期天數亦受到顯著影響，八個研究地區的灌溉供水量均有下降趨勢。其下降的主要原因乃受農作物蒸發散、滲透及縮短生長期之影響，故需研擬土地利用與作物生長調整之相關策略，以因應氣候變遷並有效降低缺水對農業生產之衝擊。

Amod Kumar Thakur 等(2014)，於印度進行水稻田間試驗，將水稻強化栽培體系(SRI)與傳統農法(CTS)，分別施以連續灌溉及田面無湛水深之 1 天、3 天、5 天、7 天實施不同輪灌期距灌溉處理，分析其水稻灌溉用水量及產量之影響。研究結果顯示，SRI 產量較高於 CTS 49%，用水減

表 1 一期作水稻種植起訖日期表

灌溉管理	慣行農法 (對照組, CP)	稻作強化體系 (SRI)	慣行農法 (CP)	慣行農法(於抽穗期 實施 7 天輪灌期 距, MWMP)	稻作強化體系 (SRI)
種植日期	1 月 16 日	1 月 16 日	2 月 16 日	2 月 16 日	2 月 16 日
收割日期	6 月 5 日	6 月 8 日	6 月 18 日	6 月 5 日	6 月 20 日
生長天數	141 天	143 天	123 天	123 天	125

少 14%，另 CTS 在輪灌期距 1 天的產量達到最高。

綜上所述，前人研究大都著重於輪灌期距、生長階段、灌溉水深及材料與設施研發改變，對水稻生育產量影響之探究，然因灌溉用水具有時間性之限制，當作物於正常生長需水時，未能適時適量灌溉，即生乾旱，是以，水田灌溉管理若能配合區域降雨時空分佈與作物生理觀點，研擬一配合降雨時空與作物生長特性之稻作灌溉管理策略，以因應氣候變遷對農業生產環境之衝擊，是有其必要性。

本研究之目的，乃應用區域降雨及作物生長特性，調整稻作種植日期結合作物生長階段用水需求實施輪灌與濕潤灌溉之田間試驗設計，以台灣糧食主要生產區且缺水最為嚴重之嘉南地區為研究區域，在嘉南農田水利會學甲灌溉技術推廣中心，以現地田間試驗設計，探討將 2015 年一期作水稻分別於計畫種植日期 1 月 16 日實施台灣農民慣行農法(CP)、濕潤灌溉(SRI)，與調整種植日期於 2 月 16 日且實施 7 日輪灌之節水灌溉法(MWMP)等灌溉設計處理時，評析其對產量、農藝性狀、作物需水量、田間灌溉用水量及水資源生產力之影響，期能更機動且有效調配灌溉用水，因應氣候變遷與春季嚴重缺水問題，提升缺水期水資源之有效調配與利用。

二、材料與研究方法

2.1 試驗環境概況

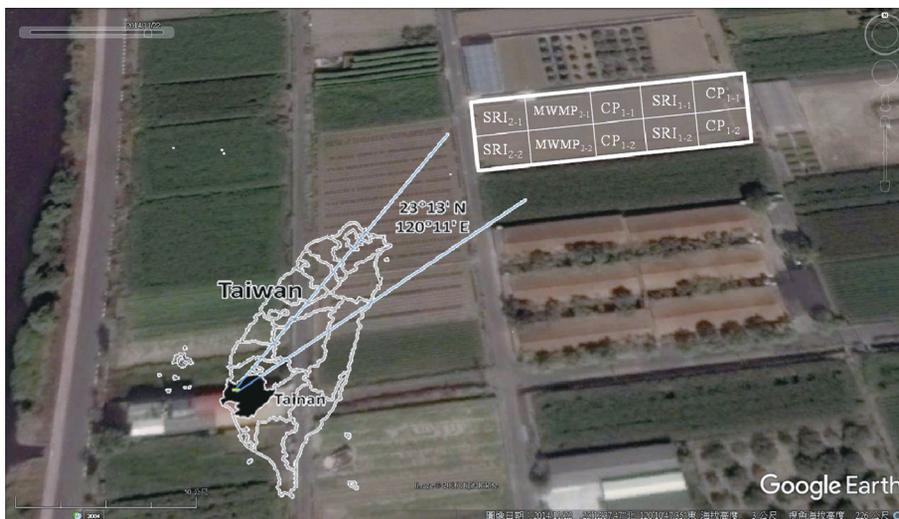
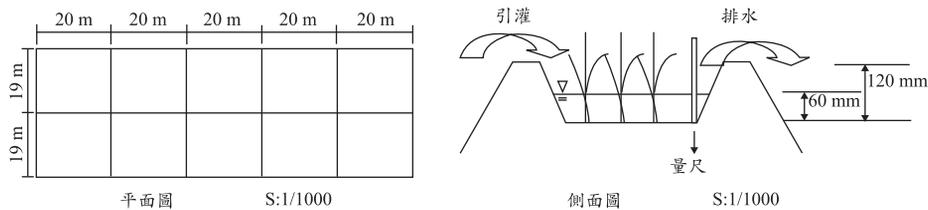
試驗地區位於嘉南水利會灌溉技術推廣中心學甲灌溉試驗站(23°13'N, 120°11'E)，旁鄰台南至學甲公路，前臨麻豆大排水溝，右側為灌溉渠道學甲分線，四周為農田，視野遼闊。海拔高度

約 4 m，距離海岸線約 10 km。因該地區是位於地勢平坦、氣候特性一致的嘉南平原內，該地區試驗站位屬熱帶區域。

試驗研究之一期作水稻種植日期為 2015 年 1 月 16 日 ~ 6 月 20 日，種植起訖日期分別如表 1 所示，田間試驗區面積約為 3800 平方公尺，試驗田區位及配置示意圖如圖 1。為瞭解試驗區之土壤物理性質是否具一致性，以作為試驗設計與處理之依據，由機械分析試驗結果得知試驗區土壤砂粒百分比為 47.72% ~ 52.72%、粉粒百分比為 20.0% ~ 24.64%、黏粒百分比為 24.28% ~ 27.00%，田間含水量(重量%)為 18.9% ~ 22.4%，試驗區之土壤質地皆為砂質黏壤土，顯示各試驗區土壤具一致性。試驗期間之平均溫度為 22.5°C (如圖 2)，平均日蒸發量為 4.4 mm/day，日平均降雨量為 2.9 mm/day 平均日射量為 17.7 MJ/m²/day(行政院農委會，2015)。

2.2 田間試驗設計與處理及種植品種、種植方式、田間管理

本研究以嘉南地區一期作水稻為主，田間試驗以農民慣行農法(CP)、稻作強化體系(SRI)，與調整種植日期於 2 月 16 日並實施 7 日輪灌之節水灌溉法(MWMP)等灌溉設計，為降低一年性田間試驗結果之變異性，本研究輔以逢機排列且為二重複之方式實施灌溉處理，以試驗平均值評析不同灌溉處理對水稻產量及節水效能之影響。田間試驗期間自 2015 年 1 月 16 日 ~ 6 月 18 日，田間試驗區面積約為 3,800 平方公尺，計有 10 小區試驗設計，小區面積為 19 m × 20 m = 380 m²，排列方式如表 2 所示，試驗品種以台灣地區推廣普及之台南 11 號為主。採取直播方式於 6 試驗



(衛星影像來源：Google Earth)

圖 1 水稻田間試驗區位及配置示意圖

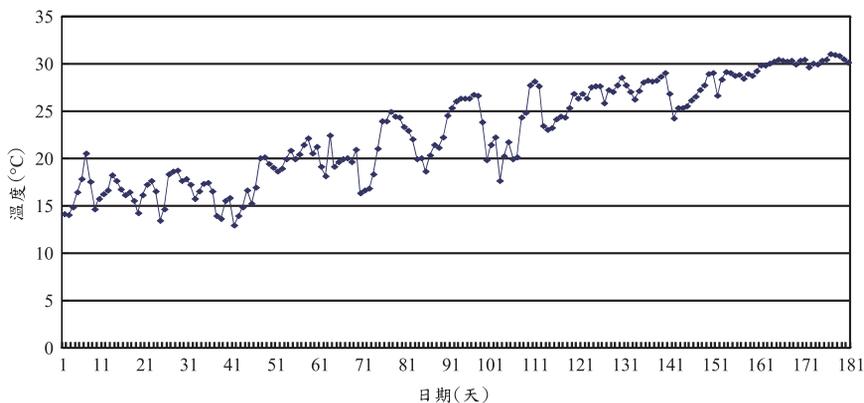


圖 2 嘉南學甲地區日平均溫度趨勢圖(2015 年 1 月 1 日至 6 月 30 日)

區種植稻株充分供應水分，行株距 30 cm × 20 cm，另 4 試驗區(SRI)行株距 30 cm × 25 cm 區，間苗後一星期，每區施硫酸銨作追肥，並於生長期中作適當之雜草及病蟲害防治，其餘管理方式

與農民相同，水稻生育情形如圖 3。

2.3 田間用水操作

適時適量的灌溉可使水稻營養生長健旺，幼

表 2 水稻田間試驗設計表

MWMP ₂₋₁	SRI ₂₋₁	CP ₂₋₁	SRI ₁₋₁	CP ₁₋₁
MWMP ₂₋₂	SRI ₂₋₂	CP ₂₋₂	SRI ₁₋₂	CP ₁₋₂
註：CP ₁₋₁ ：1月16日農民慣行栽培(一重複)		CP ₁₋₂ ：1月16日農民慣行栽培(二重複)		
CP ₂₋₁ ：2月16日農民慣行栽培(一重複)		CP ₂₋₂ ：2月16日農民慣行栽培(二重複)		
SRI ₂₋₁ ：2月16日SRI單株栽培(一重複)		SRI ₂₋₂ ：2月16日SRI單株栽培(二重複)		
SRI ₁₋₁ ：1月16日SRI單株栽培(一重複)		SRI ₁₋₂ ：1月16日SRI單株栽培(二重複)		
MWMP ₂₋₁ ：2月16日農民慣行栽培並於抽穗期實施7天輪灌期距(一重複)				
MWMP ₂₋₂ ：2月16日農民慣行栽培並於抽穗期實施7天輪灌期距(二重複)				

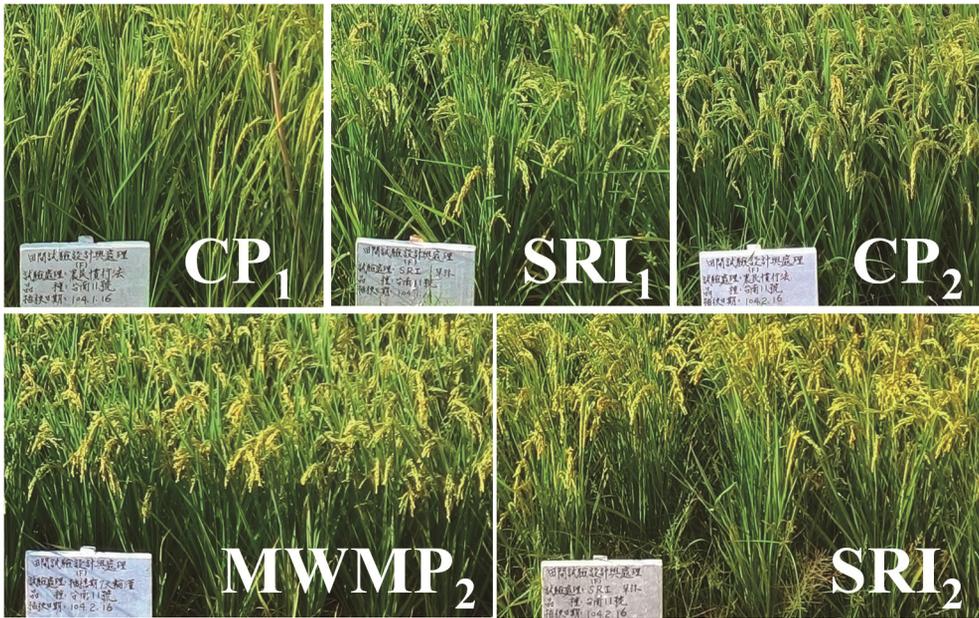


圖 3 試驗田水稻生長情形

穗形成期及開花結實等生長正常，而達到增產的目的，一般言之，水份之多寡及供給時機直接影響稻穀之產量。從水稻正常生育而言，在生長初期，須在浸水狀態下吸收大量水分供應稻株生長，至分蘖盛期以後則須略加乾旱，阻止無效分蘖之產生，而在孕穗時再度需要水分，尤其是抽穗期後之子實形成時期，養分之運輸與堆積惟水分是賴。迨及成熟前期則實施斷水乾旱，促進子實之飽滿與黃熟。因此，水稻對水之需要，雖然非常重要，但並非長期皆要浸在水中，其所需要之水量亦依各生長期不同來擬定節水灌溉計畫。為確實評估不同水田灌溉操作方式對水稻生長長期程、產量與灌溉用水效能之關係，本研究各

試驗設計之灌溉用水量皆以田間實測值為之，其主要田間灌溉用水操作方式分述如下：

慣行農法(CP)之用水管理：對照組田間試驗以農民慣行之灌溉管理方式為主，依水稻栽培灌溉排水原理操作(行政院農委會，1977)，在水稻成活至分蘖期時，第一期作在插秧後 15 天，均需維持 3 ~ 5 公分之水深，以利成活及殺草劑之使用；分蘖期至有效分蘖終期間，需維持水深 2 ~ 3 公分，惟水深不可超過 5 公分，否則造成水稻株軟弱，易遭病蟲害，而影響分蘖；有效分蘖終期至幼穗形成始期前，此時期為水稻生育期中最不需要灌溉時期之一，故應行排水，以利土壤通氣，促進根部伸長，限制養分吸收及發生

表 3 一期作水稻不同田間試驗設計與處理之農藝性狀調查表

灌溉操作	重複性	株高 (cm)	分蘗數 (no.)	穗長 (cm)	穗重 (g)	單株穎花數 (no.)	單株充實粒 (no.)	稔實率	千粒重 (g)	單株產量 (g)	每公頃產量 (kg/ha)
1/16 CP	I	80.23	32.67	17.22	1.88	2796	2390.33	0.85	25.74	61.52	7113
	II	80.96	40.67	18.21	1.74	2992	2714	0.91	26.12	70.88	6884
1/16 SRI	I	85.71	26.67	20.76	3.34	3532	3284.33	0.93	27.16	89.21	7630
	II	89.11	29.33	21.04	3.28	4065	3595.33	0.88	26.72	96.07	7809
2/16 CP	I	82.99	34.67	17.72	2.27	2937	2788.33	0.95	28.27	78.84	6919
	II	87.33	35.33	19.56	2.02	2935	2623	0.89	27.24	71.46	6928
2/16 MWMR	I	87.97	32.67	19.09	2.21	2833	2608.33	0.92	27.69	72.22	6801
	II	81.88	33.33	17.77	2.11	2674	2527.67	0.95	27.84	70.38	7151
2/16 SRI	I	96.16	30.33	20.91	3.22	4135	3758.67	0.91	26.00	97.74	7500
	II	91.99	28.67	21.93	2.97	3584	3207.33	0.89	26.51	85.03	7238

註：I：第一重複；II：第二重複。

無效分蘗等；幼穗形成始期至終期，此期間之日平均需水量及養分吸收率最高，光合作用亦最強，故應行 5~10 公分深水灌溉，本生育階段大約是 10~12 天之間；孕穗期為使氮肥供給量減少或中斷，抑制節間徒長，以使土壤通氣良好，促進根系發育，並使稻身組織強硬以防止倒伏，故應行排水，但亦不宜使土壤中水份過乾，故應酌行濕潤灌溉，以免影響穎花退化而引起減產；抽穗開花期水稻需水量又達到高峰，故需灌溉 5~10 公分之深水，以葉部貯積之碳水化合物，有充足的水分，始可將單糖轉移至稻穀，以澱粉狀態貯積，穀粒始能飽滿，灌溉期間自抽穗開始至齊穗為止；乳熟期至糊熟期水稻自齊穗後，應逐漸減少水深到 2~3 公分，入糊熟期後，則採用輪灌方法，俾利機械下田收割。黃熟期至完熟期，稻田如有一半以上谷粒呈黃金色，其餘尚為綠黃色時，則可停止輪灌。

調整種植日期為 2 月 16 日並於抽穗期實施 7 日輪灌(MWMP)之用水管理：其用水管理於抽穗開花期前與慣行農法(CP)相同，惟於抽穗開花期時開始實施一次灌溉水深 45 mm 與輪灌期距為 7 天之田間灌溉用水操作。

稻作強化體系(SRI)之用水管理：依據國際糧農組織(FAO)所建議，採用乾溼交替灌溉(Alternative Wet and Dry, AWD)，在間斷灌溉體系當中，為簡化合理灌溉操作上的複雜

性，因此會將生育期簡單分為孕穗前與孕穗後，開花末期(孕穗期)前水深不得高於 2 公分，不需另行排水；進入開花末期(孕穗期)之後水深不得高於 5 公分，不需另行排水。如遇不降雨日時，必須等到穿孔豎管內水位在地面下 15 公分以後方能執行灌溉，開花末期田面水深不超過 5 公分，實施間斷供水不需要改變施用氮肥的處理，惟在施用氮肥前仍須注意田面必須維持在乾田狀態(Belder *et al.*, 2004)。

2.4 農藝性狀調查與分析

本研究之田間試驗採隨機化完全區集設計(Randomized Complete Block Designs)變方分析，期以瞭解各灌溉處理效應之差異性，變異數分析是利用不同變異數估計值來達到比較多組平均數之差異。其中一個變異數的估計值為組內區集平方和(Block sum of squares)除上其對應之自由度，組內區集平方和是集合了各組內變異的情形。另一個變異數估計值為處理平方和(Treatment sum of squares)除上其對應之自由度，即各組平均與總平均之變異情形。最後一個為機差變異數估計值為機差平方和(Error sum of squares)除上其對應之自由度。在數理統計，已經證實當各組平均數沒有差異時(即沒有處理效應時)組內變異數與組間變異數相等，本研究變異數

表 4 一期作水稻於不同灌溉管理操作方式各農藝性狀差異顯著性比較分析表

灌溉操作	株高 (cm)	分蘗數 (no.)	穗長 (cm)	穗重 (g)	單株穎花數 (no.)	單株充實粒 (no.)	稔實率	千粒重 (g)	單株產量 (g)	每公頃產量 (kg/ha)
1月16日 CP	80.60 ^b	36.67 ^a	17.72 ^c	1.81 ^c	2894.00 ^b	2552.17 ^b	0.88 ^a	25.93 ^b	66.20 ^b	6998 ^{bc}
1月16日 SRI	87.41 ^{ab}	28.00 ^b	20.90 ^{ab}	3.31 ^a	3798.17 ^a	3439.83 ^a	0.91 ^a	26.94 ^{ab}	92.64 ^a	7719 ^a
2月16日 CP	85.16 ^b	35.00 ^{ab}	18.64 ^{abc}	2.15 ^b	2936.17 ^b	2705.67 ^b	0.92 ^a	27.76 ^a	75.15 ^b	6923 ^c
2月16日 MWMR	84.93 ^b	33.00 ^{ab}	18.43 ^{bc}	2.16 ^b	2753.34 ^b	2568.00 ^b	0.93 ^a	27.77 ^a	71.30 ^b	6976 ^{bc}
2月16日 SRI	94.08 ^a	29.50 ^b	21.42 ^a	3.09 ^a	3859.34 ^a	3483.00 ^a	0.90 ^a	26.26 ^b	91.39 ^a	7369 ^{ab}

註：在 $\alpha = 5\%$ 的顯著水準下，同一欄內相同字母代表沒有顯著差異，不同字母代表有顯著差異。

表 5 學甲地區 2015 年 1 月至 6 月參考作物蒸發散量(ET₀)分析表

旬別	參考作物蒸發量(mm)	旬別	參考作物蒸發量(mm)
第 1 旬(1/1 - 1/10)	24.8	第 10 旬(4/1 - 4/10)	46.0
第 2 旬(1/11 - 1/20)	24.3	第 11 旬(4/11 - 4/20)	32.4
第 3 旬(1/21 - 1/31)	28.3	第 12 旬(4/21 - 4/30)	42.9
第 4 旬(2/1 - 2/10)	25.9	第 13 旬(5/1 - 5/10)	46.4
第 5 旬(2/11 - 2/20)	30.7	第 14 旬(5/11 - 5/20)	48.6
第 6 旬(2/21 - 2/28)	25.5	第 15 旬(5/21 - 5/31)	30.3
第 7 旬(3/1 - 3/10)	32.1	第 16 旬(6/1 - 6/10)	52.5
第 8 旬(3/11 - 3/20)	35.5	第 17 旬(6/11 - 6/20)	58.7
第 9 旬(3/21 - 3/31)	37.6	第 18 旬(6/21 - 6/30)	58.1

分析之虛無假設為調查之農藝性狀在不同灌溉處理下均無顯著差異，顯著水準以 $\alpha = 5\%$ 設計，水稻農藝性狀調查項目包括株高、分蘗數、穗長、穗重、單株穎花數、單株充實粒、稔實率、千粒重、單株產量、每公頃產量，共計 10 項，田間試驗調查結果如表 3，將這 10 項數據代入 SAS 統計軟體，進行最小顯著性差異試驗(Least significant difference test, LSD)，即可得不同灌溉處理對農藝性狀差異顯著性分析結果，如表 4。

任何灌溉計劃之擬定，均以供應並滿足作物正常生長所需之蒸發散量為目的，本研究為瞭解水稻灌溉管理操作對水稻需水量之影響，擬以推估最為準確之 Penman-Monteith 法(Monteith, 1994、陳清田, 1996)，計算參考作物需水量(ET₀)，其式如下所示：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - S) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \dots (1)$$

式中：

ET₀：參考作物之蒸發散量(mm/day)；

R_n：淨輻射量(MJ/m²/day)；

Δ：飽和蒸氣壓力線斜率(KPa/°C)；

2.5 不同田間灌溉管理操作對水稻需水量影響分析

1. 作物需水量(Consumptive Use of Crops)

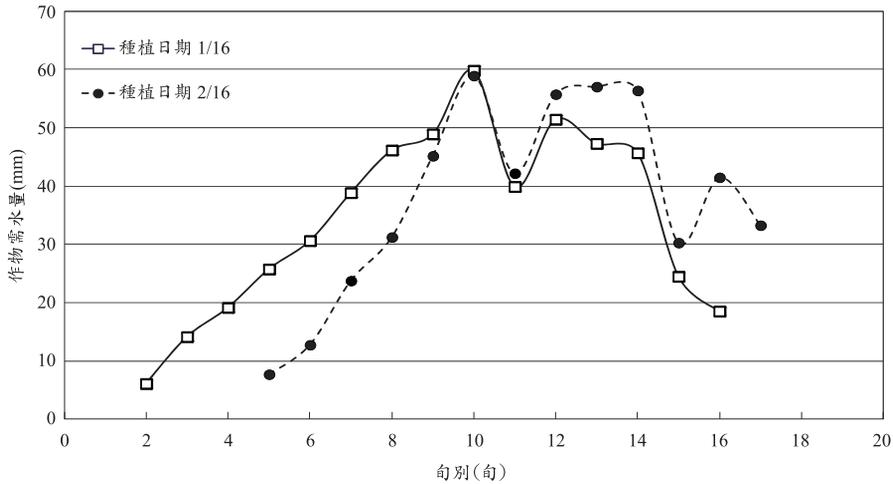


圖 4 一期作水稻於不同種植日期處理下其旬別作物需水量示意圖

γ : 濕度常數(KPa/°C) ;
 U_2 : 2 公尺高所量測之風速(m/s) ;
 T : 溫度(°C) ;
 $e_a - e_d$: 飽和蒸氣壓力差(Kpa) ;
 S : 土壤熱通量(MJ/m²/day) 。

根據式(1)即可推求出學甲地區之參考作物需水量 ET_0 (如表 5), 並配合水稻不同種植期距及作物係數, 即可推求出不同生長時期之水稻需水量(如圖 4)。

2.6 水稻不同灌溉管理操作對水稻灌溉用水效能分析

為評析缺水期水稻最適灌溉管理操作模式, 本研究以減產率、節水率及灌溉用水效能(水資源生產力)等因子綜合評估, 藉以建立客觀、適切之水稻灌溉操作模式, 以因應氣候變遷及春季缺水期之灌溉用水管理與調配利用, 茲將內容分述如下:

2.6.1 減產率分析

為了解水稻不同灌溉管理操作方式對產量之影響, 本研究即以減產率之觀點評析, 其公式如下所示:

$$R_d(\%) = \left(1 - \frac{Y_i}{Y_1}\right) \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

式中:
 R_d : 減產率(%);
 Y_1 : 種值日期為 1 月 16 日且實施慣行農法之產量(對照組)(Kg/ha) ;
 Y_i : 不同灌溉管理操作下之產量($i = 4$) (Kg/ha) 。

2.6.2 節水率分析

一般而言, 灌溉用水量與有效雨量是成反比關係的, 當有效雨量高的時候, 則灌溉需水量將會降低, 且由上所述當一期作水稻種植期距於豐水期間, 則期降雨機率將隨之增加, 換言之, 灌溉需水量將隨之降低, 故本研究即藉由不同水稻灌溉處理評析其節水率, 作為未來缺水期灌溉用水營運管理之參考應用, 其式如下:

$$S_i = \frac{FIR_1 - FIR_i}{FIR_1} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

式中:
 S_i : 水稻不同灌溉管理操作方式下之節水率(%);
 FIR_1 : 種值日期為 1 月 16 日且實施慣行農法之田間灌溉用水量(對照組) (mm) ;
 FIR_i : 不同灌溉管理操作下之田間灌溉用水量($i = 4$)(mm) 。

由式(3)即可推求嘉南地區不同水稻灌溉管理操作方式下之灌溉用水趨勢。學甲試驗區 2015

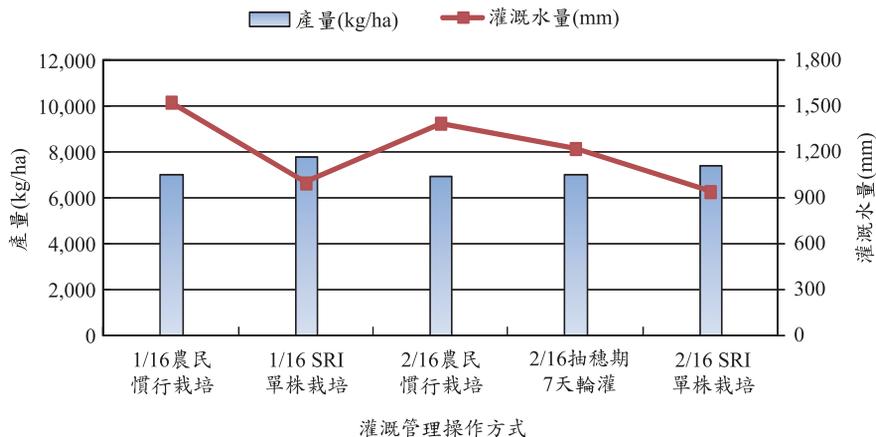


圖 5 一期作水稻於不同灌溉管理操作方式下灌溉水量及單位面積產量趨勢圖

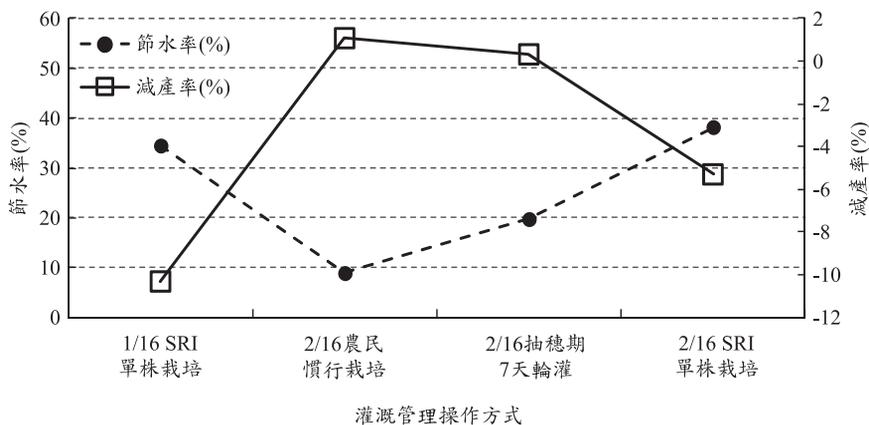


圖 6 一期作水稻於不同灌溉管理操作方式下節水率及減產率趨勢圖

年一期作水稻田間試驗於不同灌溉管理操作方式之灌溉水量、單位面積產量、節水率及減產率如圖 5 及圖 6 所示。

2.6.3 灌溉用水效能分析

本研究以水資源生產力指標，藉以評估水稻不同灌溉管理操作方式於灌溉用水調配之成效，當水資源生產力愈高時，則代表水資源之利用效能愈佳，其公式如下所示：

$$WB_i = \frac{Y_i}{FIR_i} \dots\dots\dots(4)$$

式中：

WB_i ：水稻不同灌溉處理下之水資源生產力 (kg/m^3)；

Y_i ：水稻不同灌溉處理下之產量(kg/ha)；

FIR_i ：水稻不同灌溉處理下之灌溉用水量(m^3/ha)。

由式(4)得知水資源生產力愈高，顯示其單位灌溉用水量之水稻產量愈佳。有關不同灌溉處理對水資源生產力之影響如圖 7 所示。

三、結果與討論

3.1 灌溉管理操作對水稻農藝性狀與生長日數之影響分析

由表 4 差異性顯著分析得知，分蘗數則以 1

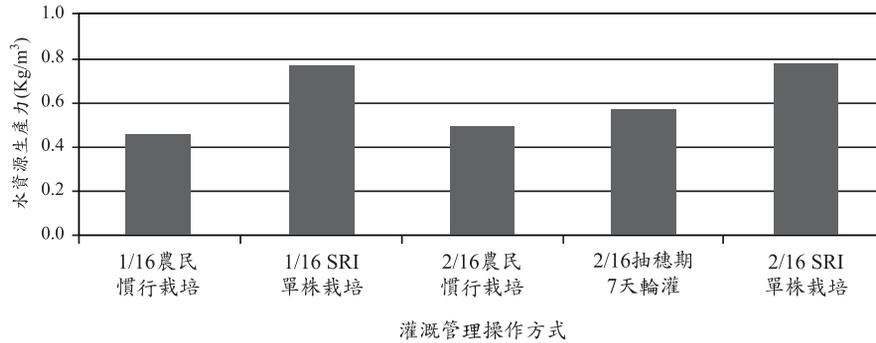


圖 7 一期作水稻於不同灌溉管理操作方式下水資源生產力趨勢圖

月 16 日之 CP 處理之 36.67 支為最多，其次為 2 月 16 日之 CP 處理之 35.00 支及 2 月 16 日之 MWMR 處理之 33.00 支，惟三者間無顯著差異；稔實率則在 5 種灌溉處理下皆無顯著差異；千粒重則以 2 月 16 日之 MWMR 處理之 27.77 g 為最重，其次為 2 月 16 日之 CP 處理之 27.76 g，再其次為 1 月 16 日之 SRI 處理之 26.94 g，此三者間無顯著差異；在株高、穗長、穗重、單穗穎花數、單株充實粒、單株產量和每公頃產量皆以 1 月 16 日 SRI 和 2 月 16 日 SRI 兩種灌溉處理下表現最好，且與其它處理達顯著性差異。1 月 16 日 SRI 和 2 月 16 日 SRI 產量表現較好是由於穗上的粒數較多。由表 1 所示，2015 年一期作水稻種植日期為 1 月 16 日時，其於慣行農法(CP)之生長期距為 1 月 16 日 ~ 6 月 5 日計 141 天，而於 1 月 16 日 SRI 法之生長期距為 1 月 16 日~6 月 8 日計 143 天，種植日期為 2 月 16 日時，其於 CP 及 MWMP 法之生長期距為 2 月 16 日 ~ 6 月 18 日計 123 天，而於 2 月 16 日 SRI 法之生長期距為 2 月 16 日 ~ 6 月 20 日計 125 天，由此結果得知，在相同為種植日期為 1 月 16 日或 2 月 16 日，其水稻生長期距未有明顯差異，但若種植日期往後調整時，一期作水稻生長天數將隨種植日期往後調整皆有減少之趨勢，平均約縮短 18 天，此乃因種植日期往後調整時，其水稻生長環境之溫度越高(如圖 2 所示)，致縮短其生長天數。此成果可供灌溉用水管理與農機收穫設施整備支應用。

3.2 灌溉管理操作對水稻需水量與灌溉用水量及產量之影響分析

由表 5 得知學甲地區參考作物需水量(ET_0)之變化趨勢，由表中可窺出 5 月至 6 月期間之 ET_0 為高，其中以 6 月中旬之旬參考作物需水量 58.7 mm 為最大，此結果可供一期作水稻作物需水量推估之參考應用。又由表 5 之結果並配合水稻不同種植日期與水稻作物係數，即可得圖 4，由圖 4 可知，2015 年一期作水稻分別於 1 月 16 日 ~ 6 月 5 日及 2 月 16 日 ~ 6 月 18 日之不同種植日期下，其累積作物需水量分別為 517 mm 及 496 mm，由此結果可窺出一期作作物需水量皆隨著種植日期往後之調整有減少之趨勢。

由圖 5 得知，就水稻灌溉水量而言，種植日期 1 月 16 日慣行農法(對照組)之灌溉水量為 1,532 mm (15,320 m³/ha)，種植日期 1 月 16 日 SRI 單株栽培之灌溉水量為 1,002 mm (10,020 m³/ha)，種植日期 2 月 16 日慣行農法之灌溉水量為 1,394 mm (13,940 m³/ha)，種植日期 2 月 16 日慣行農法且於抽穗期實施 7 天之輪灌期距其灌溉水量為 1,228 mm (12,280 m³/ha)，而種植日期 2 月 16 日以 SRI 單株栽培灌溉水量為 946 mm (9,460 m³/ha)，期中以種植日期 1 月 16 日實施台灣農民慣行農法(CP)之灌溉水量 1,532 mm (15,320 m³/ha)為最高；種植日期 2 月 16 日實施乾濕交替灌溉(SRI)之灌溉水量 946 mm (9,460 m³/ha)為最低，由此結果得知，田間灌溉用水量隨著種植日期往後之調整有遞減之趨勢，究其因

乃受有效雨量增加及作物生長環境特性所致。

由圖 5 亦得知，就水稻產量而言，種植日期 1 月 16 日慣行農法(對照組)之產量為 6,998 Kg/ha，種植日期 1 月 16 日 SRI 單株栽培之產量為 7,719 Kg/ha，種植日期 2 月 16 日慣行農法之產量為 6,923 Kg/ha，種植日期 2 月 16 日慣行農法且於抽穗期實施 7 天之輪灌期距其產量為 6,976 Kg/ha，而種植日期 2 月 16 日以 SRI 單株栽培產量為 7,369 Kg/ha，其中以種植日期 1 月 16 日實施乾濕交替灌溉(SRI)之產量 7,719 kg/ha 為最多；而種植日期 2 月 16 日實施台灣農民慣行農法(MCP)之產量 6,923 kg/ha 為最少。SRI 栽培產量高究其原因為其乳苗以單株移植可充分利用分蘖優勢；且透過乾濕交替用水管理挖掘根系生長潛力及疏植插秧以發揮大穗優勢，又插秧時因拉開苗的間距及全生育期不澆水，可增加土壤通氣性，故 SRI 可以使植株壯大、穗粒數增加與飽滿結穗，致其收穫產量較灌行農法為佳。

3.3 灌溉管理操作對水稻灌溉用水效能之影響分析

3.3.1 灌溉管理操作對水稻減產率與節水效能之影響分析

由圖 6 得知，在慣行農法之田間灌溉操作下，將水稻種植日期由 1 月 16 日(CP)調整至 2 月 16 日時，一期作水稻產量隨著種植日期往後調整，其減產率僅為 1.1%之不顯著影響，然確有 9.0%的灌溉節水成效。又水稻種植日期調整於 2 月 16 日且於抽穗期實施 7 日輪灌之灌溉操作(MWMP)，相較於種植日期由 1 月 16 日之對照組(CP)，其減產率亦僅為 0.3%，然節水率則高達 19.8%(節水量為 304 mm)，相當每公頃可節餘 3,040 m³之灌溉水量，在不改變農民現行插秧移植操作習性下，此成果可供缺水期水稻種植灌溉用水管理之應用。由圖 6 亦可得知，若於種植日期由 1 月 16 日及 2 月 16 日實施 SRI 單株栽培，其減產率分別為-10.3%~-5.3%，而節水率更高達 34.6%~38.3%(節水量為 530~586 mm)，相當每公頃可節餘 5,300 m³~5,860 m³之灌溉水量，此灌溉管理操作方式較 MWMP 之灌溉操作，具有

更佳之節水效能，此成果可供於缺水嚴重且正擬種植水稻時之灌溉用水管理應用，惟農民田間操作習性及農機設施需加以調整及研發。

3.3.2 灌溉管理操作對灌溉用水效能之影響分析

本研究以水資源生產力，評估不同灌溉管理操作下其灌溉用水效能之差異，由圖 7 水資源生產力趨勢圖中得知，於 2 月 16 日種植且以 SRI 單株栽培為最佳方式，其水資源生產力為 0.78 kg/m³，其次為 1 月 16 日種植且以 SRI 單株栽培之水資源生產力為 0.77 kg/m³，而水稻種植日期由 1 月 16 日調整至 2 月 16 日並於抽穗期實施 7 天輪灌期距之灌溉處理時，其水資源生產力亦達 0.57 kg/m³皆優於台灣農民慣行農法 0.46 kg/m³~0.50 kg/m³，其中種植期距往後調整為 2 月 16 日之 SRI 單株栽培及慣行農法之水資源生產力皆較 1 月 16 日之 SRI 單株栽培及慣行農法為佳，此乃受灌溉用水量影響所致。綜上結果所示，當水稻種植前已有嚴重乾旱趨勢，建議可將水稻種植日期由 1 月 16 日調整至 2 月 16 日，並實施 SRI 單株栽培灌溉操作方式，其灌溉用水效能為最佳，惟農民水稻栽培方式、灌溉用水管理及農機設施應予以調整及研發。然若以不改變農民現行插秧移植操作習性為前提，建議將種植日期調整至 2 月 16 日並於抽穗期實施 7 天輪灌期距之灌溉處理，既有節水成效亦能維持產量且容易操作，本研究所建立之灌溉管理操作方式可供缺水期水田灌溉用水調配與管理之參考應用，有助灌溉用水效能之提升。

四、結論與建議

2015 年一期作水稻以不同灌溉操作處理，其農藝性狀株高、穗長、穗重、單穗穎花數、單株充實粒、千粒重、單株產量和每公頃產量皆受到極顯著的影響。2015 年一期作水稻於 1 月 16 日~6 月 5 日及 2 月 16 日~6 月 18 日之不同種植日期，生長天數分別為 141 天及 123 天其累積作物需水量分別為 517 mm 及 496 mm，由此結果可窺出水稻作物需水量隨著種植日期往後之調整有減少之趨勢。

在產量與灌溉節水成效之綜合考量下，實施

SRI 灌溉操作相較於種植日期為 1 月 16 日之農民慣行操作管理方式之灌溉水量，合計約有 34.6% ~ 38.3% (530 ~ 586 mm) 之節水成效，且其產量亦較慣行農法高約 5.3% ~ 10.3%。而若將一期作水稻種植日期由 1 月 16 日調整至 2 月 16 日，並於抽穗期實施 7 天之輪灌期距時，相較於種植日期為 1 月 16 日之農民慣行操作管理方式之灌溉水量，合計約有 19.8% (303.5 mm) 之節水成效，且其對產量影響甚微。就水資源生產力而言，以種植日期 2 月 16 日且為 SRI 單株栽培之灌溉操作，其水資源生產力為 0.78 kg/m³ 為最高，農民慣行農法 0.46 kg/m³ ~ 0.50 kg/m³ 為最低。

綜上所示，在產量、節水成效與水資源生產力之考量下實施 SRI 單株栽培之灌溉操作，可提升灌溉用水效能，有效解決乾旱期之缺水問題，惟農民水稻栽培方式、灌溉用水操作及農機設施應予以調整及研發。惟若在不改變農民現行插秧移植操作習慣，亦即在產量、節水成效、水資源生產力及農民操作習性之綜合考量下，建議可將水稻種植日期調整至 2 月 16 日並於抽穗期實施 7 天之輪灌期距，此灌溉操作方式，除有不錯之節水成效亦能維持產量且容易推行，上述研究成果可供氣候變遷及春季缺水問題水稻灌溉用水管理操作策略擬定之應用，有效提升缺水期水資源之調配利用效能。

本研究雖由 2015 年水稻田間試驗研究，建立水稻種植日期、生長期、灌溉管理操作方式與田間灌溉需水量及產量對春季缺水期用水調配之相關性，惟為能全面應用推廣於各水利會灌區，建議未來宜以大面積示範區方式持續探討不同灌溉操作除對產量及節水效能外，同時評估其對水利會系統配水操作、用水計畫、回歸水、地下水補注及土壤環境等之影響，俾以建立缺水期最適化及可推廣應用之水稻灌溉用水管理操作策略。

節水灌溉為缺水期不得已之節水措施，今為使農田得以永續利用且使農業灌溉用水更能發揮生活、生態、生產之公益機能特性，故一般時期之水田灌溉仍需維持應有之灌溉水量，俾以彰顯灌溉用水具有「三生」效益，以維農業生產及

農田之永續利用。

謝 誌

本研究承蒙行政院農業委員會與嘉南農田水利會之經費補助，復蒙國立嘉義大學農藝系劉景平教授之協助與建議，始得以完成，特此誌謝。

參考文獻

1. Abou El Hassan, W., Kitamura, Y., Inosako, K., Shimizu, K. & Nishiyama, S., 2006. Effect of watermanagement and tillage practices on rice yield, wateruse efficiency and physical properties of paddy soil in the Nile Delta," *Transactions of the Japanese Society of Irrigation Drainage and Rural Engineering*, Vol. 74, 441-449.
2. Amod, K. T., Rajeeb, K. M., Dhiraj, U.P., Ashwani K., 2014. Impact of water management on yield and water productivity with system of rice intensification (SRI) and conventional transplanting system in rice. *Paddy Water Environment*, 12, 413-424.
3. Belder, P., Boumana, B. A. M., Cabangon, R., Guoan, Lu, Quilang, E. J. P., Yuanhua, Li., Spiertz, J. H. J, Tuong, T. P. 2004. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia, *Agricultural Water Management* 65: 193-210.
4. Clampett, W. S., Tran D. V., Nguyen V. N., 2002. The development and use of integrated crop management for rice production, *Proceedings of the 20th Session of the International Rice Commission*. Bangkok, Thailand. FAO.
5. McDonald AL, Hobbs PR, Riha SJ., 2006. Does the system of rice intensification outperform conventional best management? A synopsis of the empirical record. *Agric. Syst.* 96: 31-36.
6. Monteith, J., 1994. Proposed Calculation

- Procedures for ETo Combination Formula, *Bulletin of International Commission on Irrigation and Drainage*, Vol. 43, 39-82, 1994.
7. Moser CM, Baret CB., 2003. The disappointing adoption dynamics of a yield-increasing, low external-input technology: the case of SRI in Madagascar. *Agric. Syst.* 76: 1085-1100.
 8. Moutonnet, P., 2001. Yield response factors of field crops to deficit irrigation International Atomic Energy Agency, Joint FAO/IAEA Division, Vienna, Austria.
 9. Uphoff, N., 1999. Agroecological implications of the System of Rice Intensification (SRI) in Madagascar, *Environment, Development and Sustainability*, 1(3/4), 29-31.
 10. Yesim, E., Nedim, Y. 2003. Yield response of watermelon to irrigation shortage. *Science Horticulture* 98: 365-383.
 11. Yoo S. H., Choi J. Y., Lee S. H., Oh Y. G., and Yun, D. K., 2013. Climate change impacts on water storage requirement of an agricultural reservoir considering change in land use and rice growing season Korea," *Agricultural Water Management*, Vol. 117, 43-54.
 12. 台灣省輪流灌溉推進委員會推行小組，「台灣省推行輪流灌溉工作報告」，1961。
 13. 行政院農業農委會，水稻栽培灌溉排水原理，1977。
 14. 行政院農業委員會，2015，缺水期稻作灌溉管理操作對產量及節水效能影響之研究。
 15. 甘俊二、許宗民，1983，水稻耐旱性及節水灌溉對策之調查研究，*台灣水利*，32(1)，pp. 4-33。
 16. 張煜權、陳清田、謝儒震，2013，稻作強化體系應用於台灣之可行性研究，*台灣水利* 61(2): 90-100。
 17. 陳清田，1996，臺灣地區旱作物需水量之推估研究，國立臺灣大學農業工程學研究所碩士論文。
 18. 陳清田、林益如，2013，台灣稻作種植日期調整對產量及灌溉用水效能影響之研究，*台灣水利季刊*，第 61 卷，第 3 期，pp. 98-107。
 19. 陳清田、張煜權、洪振東，2014，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，pp. 81-90。

收稿日期：民國 105 年 10 月 5 日

修正日期：民國 105 年 11 月 21 日

接受日期：民國 105 年 11 月 24 日