臺東地區水稻農業灌溉用水調配評估

廖勁穎[1]

[1]農業部臺東區農業改良場作物改良科　助理研究員

摘　要

本研究針對臺東關山鎮水稻灌溉需求進行評估，運用CROPWAT模型計算作物的需水量，以應對全球氣候變遷所導致的降雨模式改變。選擇小尺度灌溉示範場，設置氣象站收集包括氣溫、濕度、風速等氣候數據，觀察水稻2023年1期與2期作不同插秧期的實際灌溉量，利用CROPWAT模型預測的灌溉需求量與實際用水量誤差在10%以內；插秧期至須少相隔20天以上，方具有調配灌溉效果。透過設置簡易氣象站收集數據，並優化模型參數，可在大範圍內精準調配水資源，有助於區域水稻產業的永續發展。

一、前言

水稻為臺東地區重要產業，稻穀及白米躉售價格及零售價格均為國內之冠，品質深受消費者肯定。而臺東地區並無水庫等水利設施，灌溉用水主要來自河川引水，尤其水稻採用湛水栽培，生長過程中需要維持田間水位，水資源充沛與否為產業永續的關鍵。依照中央氣象署資料分析臺灣東部全年累積雨量占降雨季的比率，豐枯期水量比為8：2，相較南部地區豐枯期水量為9：1，乾旱發生風險略低[(2)]。近年因全球氣候變遷，降雨模式逐漸改變，中央氣象署依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)發布最新第6次評估報告(AR6)進行分析[(10)]，在全球暖化程度GWL2°C及GWL4°C之情境下，未來年雨量為增加趨勢，但呈現「豐越豐，枯越枯」的變化，春季的雨量減少且降雨多集中於颱風季(7~9月)。面對未來降雨量的極端分布，水稻產業也需思考水資源短缺的問題。在水稻栽培過程中，並非隨時需要大量灌溉，用水的關鍵時期包括整地、

秧苗成活期、幼穗形成期至抽穗開花期較為關鍵。臺東地區依賴河川引水灌溉，若未來降雨模式改變和乾旱期延長，在水資源有限的情況下，如何有效分配水資源，在最適時間即時供水並合理分配用量[5]，讓水稻生育關鍵時期可充分灌溉，為尚待解決問題。由於田間複雜的「作物-土壤-氣候」關係，使用灌溉管理模型將有助於估算作物需水量和灌溉對策。聯合國糧食及農業組織(FAO)開發的CROPWAT模型可有效地估算不同種植模式的農業需水量[9]，該方法需要的參數包含氣候資料、作物係數、土壤水分特性等，優化其關鍵參數後，只要輸入氣候資料，便可計算參考蒸發散量(Reference evapotranspiration, ETo)，並由設定之作物係數(Crop coefficient, Kc)，快速而方便地估算作物需水量(Crop evapotranspiration, ETc)，提供該區域內作物灌溉決策[8]。

本研究的目的為收集和分析關山鎮水稻田間數據，以田間數據求得CROPWAT模型所需之氣候、土壤和作物參數，應用CROPWAT模型評估作物需水量與灌溉量，同時與農友實際灌溉量比較，進行驗證並優化灌溉技術，作為水稻灌溉用水調配評估。

二、材料與方法

(一)試驗地點：臺東縣關山鎮小尺度灌溉示範場域。

(二)研究方法：本研究之水稻田為有機栽培，地點位於臺東縣關山鎮德高里小尺度灌溉示範場域，共8區試驗田，N23°04'43"，E 121°10'17"，海拔260 m。於田間設置氣象站，監測氣候資料(最高與最低溫度、降雨量、濕度與風速等)[1]，風速計高度為3 m，氣候資料蒐集自2023年1月15日至2023年12月31日止。2023年第1期作水稻品種為臺東30號，分為4個插秧期(1月中旬、1月下旬、2月上旬、2月中旬)，2023年第2期作水稻品種為高雄139號，分為3個插秧期(7月上旬、7月中旬、7月下旬)；由農民自主決定灌溉時機，調查農民在自由灌溉下之用水量。灌溉水量以流量計紀錄[7]。

(三)CROPWAT模型：CROPWAT模型提供2種氣候ETo參數的輸入方式，本研究以小尺度灌溉示範場域每月ETo的數據輸入。每月ETo使

用FAO推薦的方法，使用Penman-Monteith方程，根據24小時間距尺度之溫度、濕度、風速以及日射量等氣候資料計算。

(四)調查項目：

1.有效雨量：以RSYL-2雨量計(國興資訊股份有限公司)測量。

2.土壤有效水分量(Readily available moisture, RAM)：測定方式為土層厚度(mm)×土壤含水量(容積%)，土壤有效水分含量為0.1 bar土層厚度含水量減15 bar土層厚度含水量。

3.土壤入滲率以雙環入滲試驗進行，外環及內環直徑分別為50 cm及30 cm，測定滲漏時間。

4.土壤總體密度：以金屬管採樣法採樣，總體積包括固體部分與土壤顆粒間孔隙部分之體積，乾土重為經過105°C烘乾直至土樣重量不在變化時之重量，土樣體積為現地採樣所得之體積。

5.作物係數：以CROPWAT 模型作物係數參數FAO推薦進行模擬。

三、結果與討論

(一)氣候參數

CROPWAT模型提供2種氣候ETo參數的輸入方式，本研究以小尺度灌溉示範場域每月ETo的數據輸入。每月ETo使用FAO推薦的方法，使用Penman-Monteith方程，根據24小時間距尺度之溫度、濕度、風速以及日射量等氣候資料計算。2023年度ETo如表1所示，田區ETo大致從1月平均2.22 mm/day 開始逐漸增加，升高至7月之平均5.13 mm/day，之後逐漸降低，至12月降至平均2.53 mm/day。雨量方面，CROPWAT模型提供5 種有效降雨量計算方法，本研究選用USDASoil Conservation Service formula；2023年降雨量如表2，1至6月降雨總計為323.5 mm，以6月起降雨強度大且集中，月降雨量最高為9月(347.2 mm)，總降雨量為1,035.7 mm。經CROPWAT模型計算後，有效雨量為663.0 m，有效雨量為灌溉時期之降雨，可供作物利用之水量，並可減少灌溉水量，單日雨量小於0.3mm，無法做為灌溉使用，單日雨量大於100 mm以上，過多降雨易於田埂流失，亦

無法作為灌溉使用[6]。

表 1. 2023 年每月蒸發散量 (ETo)
Table 1. The Monthly reference evapotranspiration (ETo) in 2023

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind km/day	Sun hours	Rad MJ/m^2/day	ETo mm/day
January	17.2	28.0	86	103	4.5	11.4	2.22
February	18.5	29.1	86	120	4.5	13.0	2.60
March	20.1	32.1	86	95	6.1	17.0	3.50
April	22.1	34.9	89	86	4.4	16.0	3.57
May	24.1	36.5	91	95	4.7	17.0	3.95
June	26.9	36.2	93	60	6.2	19.3	4.48
July	27.7	36.9	90	51	8.0	21.9	5.13
August	27.5	38.0	90	34	7.0	20.0	4.81
September	26.5	34.5	87	77	7.9	20.0	4.57
October	24.0	32.3	85	95	4.2	13.0	3.01
November	21.4	32.4	84	120	7.3	15.0	3.20
December	19.0	29.9	86	146	5.5	12.0	2.53
Average	22.9	33.4	88	90	5.9	16.3	3.63

表2. 2023年每月降雨量及有效雨量
Table 2. Monthly rain and effective rain in 2023

Month	Rain mm	effective rain mm
January	18.5	18.0
February	19.0	18.4
March	18.0	17.5
April	49.5	45.6
May	87.5	75.3
June	131.0	103.5
July	259.6	151.0
August	8.8	8.7
September	347.2	159.7
October	89.6	76.8
November	4.0	4.0
December	3.0	3.0
Total	1,035.7	681.3

(二)土壤參數

CROPWAT模型土壤參數包括土壤有效水分含量、入滲率及根深度等。土壤有效水分含量是設定土壤容易利用有效水分量(RAM)之關鍵參數，土壤有效水分含量調查結果如表3，分別測定0~60 cm土壤0.1 bar、0.33 bar、 15 bar土層厚度含水量，再計算土壤有效水分含量，結果顯示深度0~60 cm土壤有效水分含量約76 mm，CROPWAT模型設定土壤有效水分量 (Readily available moisture, RAM)為測定之土壤有效水分含量之60 %，約為45.6 mm。田區土壤剖面及田區土讓滲漏能力等相關土壤特性分析之調查結果如表4，三個試體之總體密度介於1.44-1.53 g/cm3，入滲率介於15-176 mm/h，顯示每次灌溉水流量或降雨量入滲率不超過15 mm/h。根深度參考林等(2012)[3]研究，設定為18公分。

表3. 土壤有效水分含量

Table3. Soil available moisture content

Soil depth (cm)	soil thickness moisture content (mm)			Available moisture content (mm)
	0.1 bar	0.33 bar	15 bar	
0-15	32	45	1	31
15-30	21	37	12	9
30-60	97	88	21	76

表4. 土壤特性與入滲率

Table4. Soil characteristics and infiltration rate

Soil depth (cm)	Soil texture			Texture	Bulk density	Infiltration rate
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)		(g/cm^3)	(mm/h)
0-15	14.1	67.5	18.4	Silty clay loam	1.53	42
15-30	17.8	64.8	17.4	Silty clay loam	1.44	15
30-60	16.8	67.0	16.2	Silty clay loam	1.51	176

(三)作物係數

水稻Kc值透過CROPWAT模型作物係數參數，以FAO推薦進行模擬，依照不同插秧期，將定植日分別設定為第1期作1月15日、1月25日、2月5日、2月15日；第2期作7月10日、7月20日、7月30日，各作物生長階段及日數使用的Kc值如圖1、2。

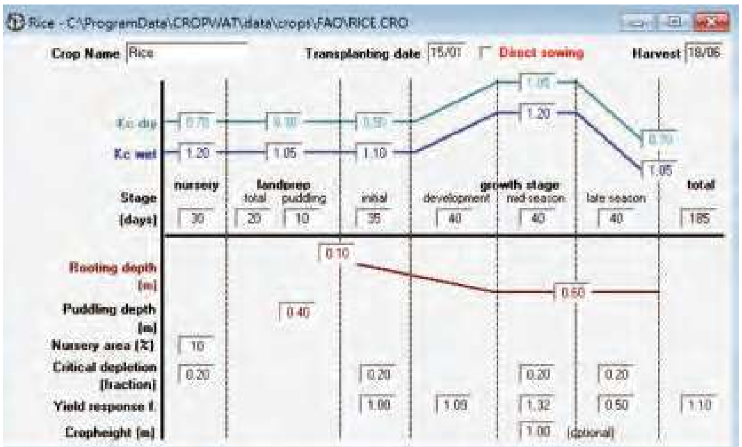

圖1. 使用CROPWAT模型評估2023年第1期作水稻Kc值及生育日數。

Fig. 1. Use the CROPWAT model to evaluate the Kc value and growth days of rice in the first period of 2023.

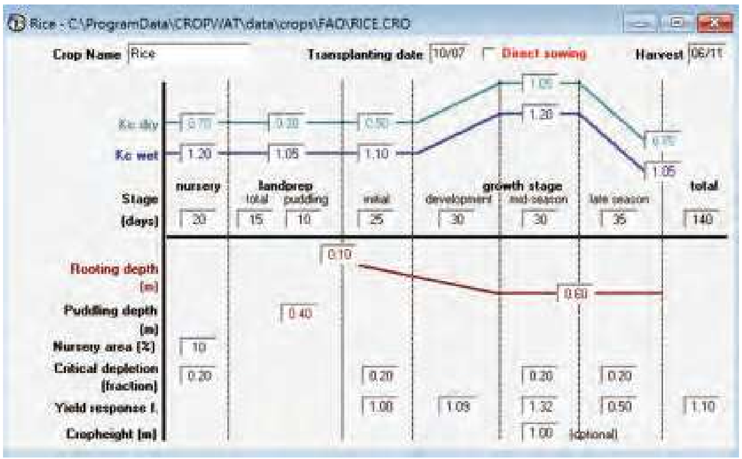

圖2. 使用CROPWAT模型評估2023年第2期作水稻Kc值及生育日數。
Fig. 2. Use the CROPWAT model to evaluate the Kc value and growth days of rice in the second period of 2023.

(四)需水量評估

CROPWAT模型評估水稻不同插秧期每月各旬需水量結果如圖3，2023年第1期作1月15日、1月25日、2月5日、2月15日需水量分別為643.9 mm、667.9 mm、698.6 mm、727.5 mm，生育期間有效降雨量分別為234.7 mm、271.7 mm、321.9 mm、374.7 mm；第2期作7月10日、7月20日、7月30日需水量分別為640.3 mm、623.2 mm、602.2 mm，生育期間有效降雨量分別為441.1 mm、404 mm、354.2 mm。由於降雨分布的不均勻，不能滿足水稻全部生育期水分需求，必須灌溉以補天然降雨之不足。在不考慮土壤水分含量下，灌溉需求量可簡單表示為作物需水量-有效降雨量。2023年第1期作降雨較為平均，僅6月降雨較多，唯該時期接近水稻收穫期，作物不能有效利用，因此在灌溉上，除整地及插秧成活期為需水量最大時期，隨降雨及作物生長，並無特別需水量較多時期。2023年第2期以7月及9月最高，但未能符合水稻生育期需水敏感時期，故CROPWAT建立之灌溉模型第2期作灌溉需求遠甚第1期作，3個插秧期分別需要灌溉1,207.3 mm、1,241 mm、1,272.7 mm，模擬之數值可作為未來灌溉系統容量設計參考[(4)]。

圖3.使用CROPWAT模型評估不同插秧期每月各旬需水量結果。紅色長條(ETc)為作物需水量， 綠色長條(Eff rain)為有效降雨量，藍線為灌溉需求量(Irr. Req.)。

Fig. 3. Results of CROPWAT modelling water requirements of each month-decade.

(五)推薦灌溉與實際灌溉分析

以上單純利用作物需水量與有效降雨量評估灌溉需求量仍顯不充分，例如曬田期間正逢降雨，水稻本需要短時間乾旱逆境以抑制無效分蘗，降雨並未能達成作物生長管理所需；或在插秧時須以灌水控制雜草，造成作物非急迫用水期間持續灌水，仍為正常管理灌溉所需。實際於田間管理時，農友會依不同需求進行灌溉量、灌溉次數和時間調節。在實際調查不同插秧期農民自主性灌溉用水量與CROPWAT模型建立之推薦灌溉量進行比較，2023年第1期作4個插秧期調查結果如表5，灌溉總量以插秧期1月15日及2月5日實際灌溉量(1,155.0 mm/dec、1,202.7 mm/dec)低於推薦灌溉量(1,306.8 mm/dec、1,284.4 mm/dec)；插秧期1月25日及2月15日實際灌溉量(1,367.0 mm/dec、1,399.4 mm/dec)高於推薦灌溉量(1,294.5 mm/dec、1,268.1 mm/dec)。2023年第2期作3個插秧期調查結果如表6，無論插秧期為7月10日、7月20日、7月30日，灌溉總量均以實際灌溉量(1,192.3 mm/dec、1,048.9 mm/dec、1,128.3 mm/dec)低於推薦灌溉量(1,207.3 mm/dec、1,241.1 mm/dec、1,272.8 mm/dec)。2個期作調查結果，實際灌溉量與推薦灌溉量多寡差異在10%以內，顯示在小尺度灌溉示範場域，農友自主性灌溉用水量已相當接近CROPWAT模型之推薦用量。2個期作7個插秧期，依不同灌溉旬別進行分析，實際灌溉量於整地時整體用量均低於推薦灌溉量，顯示在整地期間，CROPWAT模型推薦灌溉用水量遠高於農民實際需求，可能在於整地設備或技術差異造成，若未來進行灌溉用水分配評估時，可做為調整參考；去除整地及秧苗成活期，在水稻生育期間進行灌溉，實際灌溉量高於推薦灌溉量，顯示農友於生育期間湛水灌溉時偏好提高用量，可能為追求灌溉管理效率造成。依據2023年試驗結果，本研究CROPWAT模型設定之參數可以反應田間實際水分需求，所預估灌溉用水量與實際灌溉量相當接近，可以作為灌溉用水量判斷參考。

2023年1期作試驗區總用水量5,124.1 mm/dec，以不同插秧期進行灌溉時，生育期間單旬最大用水量為1月下旬937.8 mm，若以相同

插秧時間進行模擬，最大用水量則可能出現在1月上旬，達1,256.2 mm(圖4)；第2期作，試驗區總用水量3,369.5 mm/dec，以不同插秧期進行灌溉時，生育期間單旬最大用水量為9月下旬442.1 mm，若以相同插秧時間進行模擬，最大用水量則可能出現在7月上旬，達689.0 mm(圖5)，兩期作用水高峰均出現在整地期，東部地區依賴河川灌溉，進水流量有限，若同時整地插秧面積過大時，可能造成灌溉水供應不足，發生假性斷流的現象。依2023年試驗結果，錯鋒時間需在20天以上才能有較好效果，尤其第1期作中後期及第2期作中期溫度較高，水稻生育時間縮短，若插秧時間太過接近，易因氣候使生育期重疊，失去調節灌溉水效果[4、5]。

表5. 2023年第1期作實際灌溉水量與使用CROPWAT模擬法比較

Table 5. Comparison between the CROPWAT simulation method and the actual irrigation water volume in the first period of 2023

transplantday		15-Jan		25-Jan		5-Feb		15-Feb		
Month	Decade	actual irrigation (mm/dec)	Irr.Req. (mm/dec)	actual irrigation (mm/dec)	Irr.Req. (mm/dec)	actual irrigation (mm/dec)	Irr.Req. (mm/dec)	actual irrigation (mm/dec)	Irr.Req. (mm/dec)	Effrain (mm)
Dec	2	-	1.4	-	-	-	-	-	-	0.1
Dec	3	-	193.4	-	0.7	-	-	-	-	2.2
Jan	1	270.0	635.7	-	189.9	-	-	-	-	4.8
Jan	2	205.0	127.4	252.0	632.2	220.0	185.1	-	-	6.6
Jan	3	70.0	21.9	153.5	132.0	200.1	636.8	514.2	188.6	6.5
Feb	1	32.1	21.1	67.1	21.1	65.0	131.7	90.4	636.7	6.1
Feb	2	35.4	22.4	76.2	22.4	64.2	22.4	93.4	133.4	6.2
Feb	3	32.5	19.7	73.1	19.4	68.4	19.4	104.4	19.4	6.1
Mar	1	36.3	30.9	75.7	30.4	70.5	30.1	86.7	30.1	5
Mar	2	40.9	35.4	73.9	34.8	65.4	34.2	97.8	34.0	4.5
Mar	3	45.2	36.8	87.7	36.2	76.1	35.5	88.6	34.8	8
Apr	1	54.6	29.2	93.1	29.0	77.1	28.4	82.3	27.7	12
Apr	2	-	26.4	26.8	26.4	18.3	26.1	22.5	25.4	15.1
Apr	3	88.9	24.6	83.2	24.6	63.2	24.6	64.0	24.0	18.5
May	1	78.3	22.7	96.1	22.7	65.7	22.7	55.1	22.3	21.8
May	2	76.1	19.8	75.4	20.8	55.4	20.8	40.1	20.5	25.1
May	3	68.2	21.3	68.0	23.1	42.8	24.5	24.5	24.1	28.3
Jun	1	21.5	14.2	35.2	15.9	23.4	17.9	35.4	18.8	30.8
Jun	2	-	2.5	30.0	12.9	27.1	14.8	-	16.6	33.7
Jun	3	-	-	-	-	-	9.4	-	11.4	39.2
Jul	1	-	-	-	-	-	-	-	0.3	51.1
Jul	2	-	-	-	-	-	-	-	-	53.4
total		1,155.0	1,306.8	1,367.0	1,294.5	1,202.7	1,284.4	1,399.4	1,268.1	385.1

表6. 2023年第2期作使用 CROPWAT 模擬法與實際灌溉水量比較

Table 6. Comparison between the CROPWAT simulation method and the actual irrigation water volume in the second period of 2023

transplantday		10-Jul		20-Jul		30-Jul		
Month	Decade	actual irrigation (mm/dec)	Irr.Req. (mm/dec)	actual irrigation (mm/dec)	Irr.Req. (mm/dec)	actual irrigation (mm/dec)	Irr.Req. (mm/dec)	Effrain (mm)
Jun	2	-	0.5	-	-	-	-	3.4
Jun	3	205.0	389.3	-	0.6	251.0	-	39.2
Jul	1	138.2	590.8	233.0	389.2	1.8	0.6	51.1
Jul	2	71.2	-	111.7	591.0	160.7	389.2	59.3
Jul	3	83.5	21.1	44.5	21.1	77.4	609.3	40.5
Aug	1	99.1	49.9	95.4	49.8	108.5	49.8	4.3
Aug	2	5.6	53.2	5.1	53.0	12.2	52.9	-
Aug	3	69.0	53.3	179.5	53.1	191.8	52.8	4.5
Sep	1	-	8.8	-	8.7	-	8.5	43.9
Sep	2	74.8	-	6.7	-	2.8	-	64.3
Sep	3	262.5	-	112.4	-	47.8	-	51.4
Oct	1	130.5	3.0	94.5	3.6	217.1	3.7	34.5
Oct	2	52.8	4.8	98.6	6.0	7.4	6.5	25.1
Oct	3	0.1	15.9	67.5	17.4	42.6	18.7	17.2
Nov	1	-	16.7	-	28.4	7.2	29.7	3.9
Nov	2	-	-	-	19.2	-	33.2	-
Nov	3	-	-	-	-	-	17.9	0.1
total		1,192.3	1,207.3	1,048.9	1,241.1	1,128.3	1,272.8	442.7

圖 4. 2023 年第 1 期作分期插秧及同時插秧實際灌溉水量差異

Fig. 4. Difference in actual irrigation water volume between staged rice transplanting and simultaneous rice transplanting in the first period of 2023.

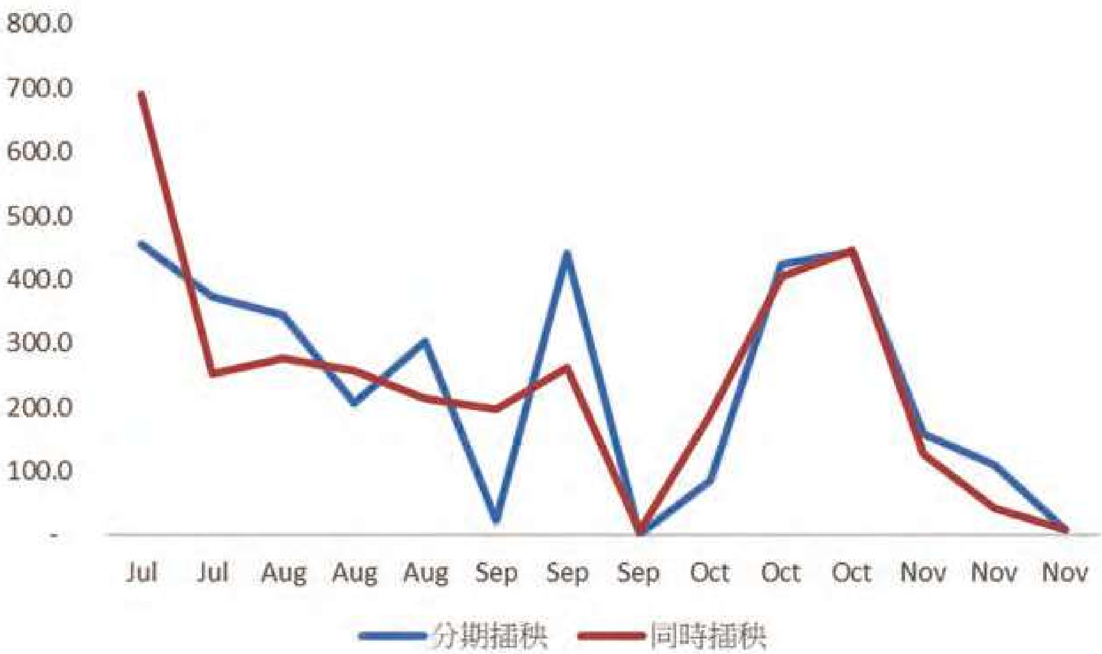

圖 5. 2023 年第 2 期作分期插秧及同時插秧實際灌溉水量差異

Fig. 5. Difference in actual irrigation water volume between staged rice transplanting and simultaneous rice transplanting in the second period of 2023.

四、結論

本研究利用CROPWAT模型評估臺東地區2023 年不同插秧期水稻灌溉用量，與實際灌溉量差異在10%以內，可作為水稻灌溉系統水量分配設計參考。在不同插秧期實際灌溉量調查顯示，錯開插秧期，可將場區水稻栽培期間用水尖峰期分散，避免短時間大量灌溉水需求。若需錯開第1、2期作孕穗、抽穗至開花期用水需求，插秧期至少需相隔20日以上，較能顯現效果。CROPWAT模型推薦灌溉可以反應田間實際水分需求，需要的參數包含氣候資料、作物係數、土壤水分特性及灌溉適值等，優化其關鍵參數後，只要設置簡易氣象站，便可於較大時間與空間尺度範圍內提供精準水資源調配，有利於區域水稻產業發展。

參考文獻

1. 吳郁嫻、許奕婷、陳忠澤、吳佩真、吳東鴻, 賴明信、楊靜瑩。2019。透過田間智能水位感測管理水稻灌溉用水量及稻株生理性狀與產量變化探討。作物環境與生物資訊16(2): 87-97。
2. 卓盈旻、盧孟明。2021。臺灣梅雨季雨型變化與亞洲及西北太平洋夏季風的關係。大氣科學49(1): 79-110。
3. 林柏君、羅正宗、陳榮坤、劉啟東。2012。利用根箱探討水稻根系生長之變化。嘉大農林學報9(1): 17-42。
4. 張煜權、甘俊二。2022。對應改變-嘉南平原的農田水利組織與輪流灌溉制度。農業工程學報68(1): 3-18。
5. 陳日靜。2023。多元水源灌溉之最佳配水模擬分析-以桃園大圳灌區為例。 碩士論文。屏東：國立屏東科技大學土木工程系研究所。
6. 陳豐文。2013。評估氣候變遷下有效雨量對農業用水管理之衝擊。博士論文。臺北：國立臺灣大學生物環境系統工程學系研究所。
7. 謝心怡、潘麒帆、蘇明道、林美君。2014。需求導向之灌溉用水量動態模擬系統評估。農業工程學報 60(3): 82-91。
8. Allen, R. G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome, Italy.
9. Kuo, S. F., B. J. Lin, and H. J. Shieh. 2001. CROPWAT model to evaluate crop water requirements in Taiwan. International Commission on Irrigation and Drainage, 2001.
10. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). 2021. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Assessment of Irrigation Water Allocation for Rice Paddy in The Eastern Taiwan

Ching-Ying Liao[1]

[1]Assistant Researcher of Crop Improvement Section of Taitung DARES, MOA.

Abstract

This study evaluates the irrigation needs for rice cultivation in Guanshan Township, Taitung, using the CROPWAT model to calculate crop water requirements in response to rainfall pattern changes driven by global climate change. A small-scale irrigation demonstration field was selected, where a weather station was set up to collect climate data, including temperature, humidity, and wind speed. The study observed the actual irrigation amounts during the first and second rice planting seasons in 2023, with staggered planting dates. The irrigation demand predicted by the CROPWAT model showed a deviation of less than 10% compared to actual water usage. Additionally, planting periods for the first and second seasons should be spaced at least 20 days apart to allow effective irrigation management. By setting up a simplified weather station for data collection and optimizing model parameters, the study enables precise water resource management across broader areas, contributing to the sustainable development of the regional rice industry.