

使用 CROPWAT 模型優化柑橘灌溉管理

蔡正賢*、林鈺荏、張雅玲

農業部苗栗區農業改良場

摘要

柑橘類為乾旱中度敏感作物，為建立柑橘水資源供應對策，必須有效估算柑橘類的農業需水量並指導灌溉。本研究使用 CROPWAT 模型評估柑橘需水量與灌溉量，並與土壤水分張力監測法啟動灌溉之實際灌溉比較，以驗證並優化柑橘灌溉技術。果園地點位於苗栗縣卓蘭鎮內灣里，柑橘品種為桶柑。首先利用田間數據求得模型所需之氣候、土壤和作物參數，2023 年總降雨量為 1,398 mm，田區參考蒸發散量大致從 1 月平均 1.52 mm/day 開始逐漸增加，升高至 7 月之平均 3.04 mm/day，之後逐漸降低；根域範圍內土壤有效水分含量約 187 mm，桶柑作物係數由生育初期 0.59 逐漸升至 1.0，隨後於成熟期降至 0.40。桶柑灌溉適值設定為開花後土壤耗水 60 mm，轉色後土壤耗水 106 mm。使用 CROPWAT 模型評估 2023 年桶柑全年需水量約為 787 mm，全年有效降雨量為 735 mm，由於降雨分布不均，全年灌溉需求量合計 320 mm。依據桶柑物候期區分，灌溉需求量最高為春梢萌發與開花期之 1.34 mm/day，最低為結果期與生理落果期之 0.25 mm/day。CROPWAT 模型根據每日土壤平衡水量推薦灌溉的 3 個階段，農民亦根據土壤張力監測數據並配合作物反應啟動灌溉，顯示模型推薦灌溉的確可以反應田間實際水分需求。全年模型建議灌溉量為 210 mm，高於水分張力監測法之灌溉量 171.6 mm，若於降雨前 3 日停止灌溉，建議灌溉量可再減少約 15 mm，提高農業用水效率。優化其關鍵參數後，可於較大時間與空間尺度範圍內提供精準水資源調配，有利於柑橘產業發展。

關鍵詞：作物蒸發散量、CROPWAT 模型、灌溉、柑橘

*通訊作者電子郵件位址：tsaijh@mdares.gov.tw

前 言

乾旱逆境會限制柑橘的營養生長和產量，此外還會對果實質量產生不利影響，給柑橘產業帶來巨大的經濟損失 (Rodriguez-Gamir *et al.*, 2010)。農業部已將柑橘類列為乾旱中度敏感作物，為使柑橘產業之永續發展，有必要建立水資源供應對策。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 (Kuo *et al.*, 2001)，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, E_{To})，並由設定之作物係數 (Crop coefficient, K_c)，快速而方便地估算作物需水量 (Crop evapotranspiration, E_{Tc})，提供該區域內作物灌溉決策 (Allen *et al.*, 1998)。

K_c 值的變化與果樹冠層發育有關，例如葡萄的之 K_c 值在落葉期為零 (Feres *et al.*, 2012)，梨的 K_c 值與陽光擷取的多寡呈指數性相關 (Marsal *et al.*, 2012)。 K_c 值可通過田間實測的 E_{Tc} 除以 E_{To} 來確定 (Kuo *et al.*, 2006)，田間測定 E_{Tc} 技術可分為蒸發皿法、滲漏計法、土壤水分收支法或微氣象法等 (申庸，2002)。其中土壤水分收支法是通過計算土壤根域範圍內的所有流入和流出的水來完成，主要流入根域範圍的水分包括降雨、灌溉和深層土壤毛管水補充，流出根域範圍的水分包括蒸發散、徑流和深層滲漏 (Andales *et al.*, 2015)。

過度乾旱容易影響柑橘器官發育或養分運移，因此至少於旱季與重要生育時期有相當程度灌溉 (黃與陳，2019)，是否要進行灌溉以及灌溉量是否適當，可以設定灌溉適值，並利用土壤水分張力計來監測 (向與吳，2004；楊清富，2014)。柑橘灌溉適值在果實肥大期前以土壤張力值 30 kPa 為恰當 (向與唐，2021)，在果實成熟期，則應降低水分供應 (唐佳惠，2017)。評估土壤可提取水量的重要指標稱為土壤容易利用有效水分量 (Readily available moisture, RAM)，CROPWAT 模型以土壤耗水限值 (Critical depletion) 設定灌溉適值，以 RAM 之比值表示，且不大於 1。這些參數必須取得足夠田間數據，並進行田間驗證。

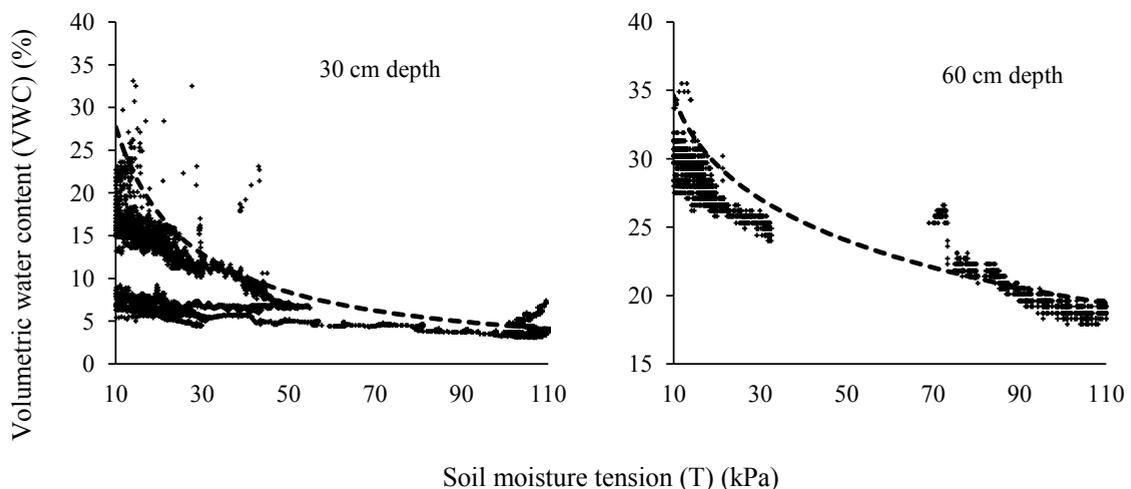
本研究的目的是為收集和分析卓蘭鎮果園田間數據，用田間數據求得 CROPWAT 模型所需之氣候、土壤和作物參數，並應用 CROPWAT 模型評估作物需水量與灌溉

量，並與農友利用田間土壤水分張力數據啟動灌溉之實際灌溉量比較，以驗證並優化柑橘灌溉技術。

材料與方法

本研究測試之果園為草生栽培，地點位於苗栗縣卓蘭鎮內灣里，緯度 24.3 °N，海拔 550 m。柑橘品種為桶柑，樹齡 20 年，樹高約 2.5 m，行距 5.4 m，株距 4.5 m，於田間設置氣象站，監測氣候資料 (最高與最低溫度、太陽輻射、濕度與風速等)，風速計高度為 3 m，氣候資料蒐集至 2023 年 12 月 31 日止，降雨量資料取自中央氣象局卓蘭測站，編號：C0E791，經度：120.8244，緯度：24.3126，海拔高度：366 m。調查田區土壤滲漏能力、總體密度、土壤有效水分含量等。

為追蹤果園土壤水分歷時變化，於土壤深度 30 與 60 cm 處理設 Watermark 土壤水分感應器，以監測土壤水分張力，量測單位為 kPa。於附近相同深度亦埋設電容式水分感測器，量測體積水分含量 (Volumetric water content, VWC)，單位為 %。各深度土壤的體積水分含量 (VWC) 與土壤水分張力 (T) 之關係，利用林等人 (2007) 之方式建立水分特性曲線 (圖一)，助於後續利用土壤水分張力估算水分含量變化，其中 30 cm 深度土壤水分特性曲線表示為： $VWC = 460 / (2 + (0.99 + T) 5)$ ，60 cm 深度土壤水分特性曲線表示為： $VWC = 500 / (13 + (T - 8) 0.55)$ 。



圖一、深度 30 cm 與 60 cm 之土壤水分特性曲線 (虛線所示)

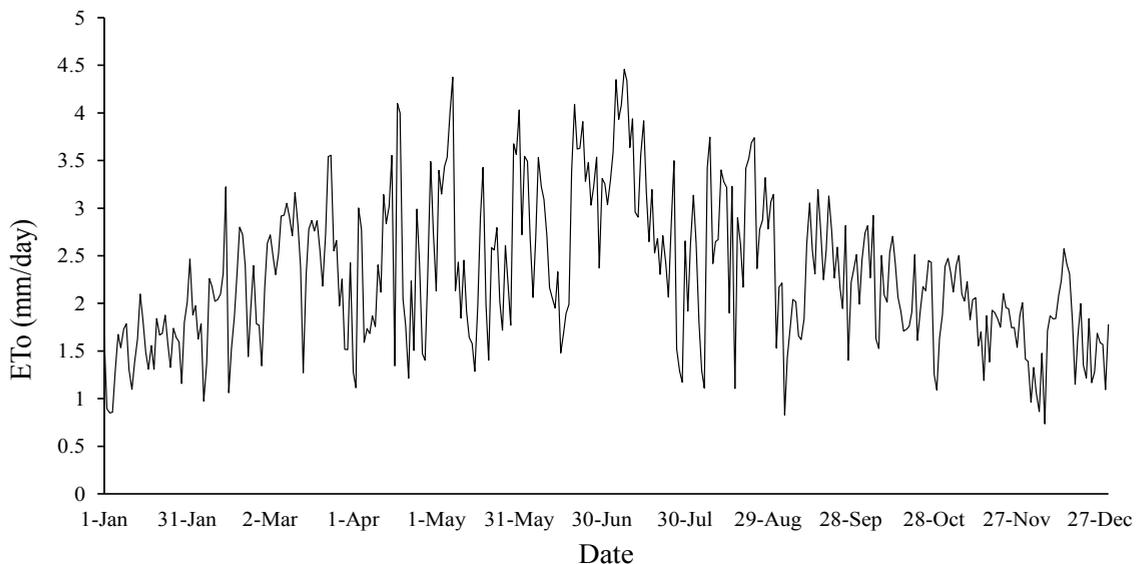
Fig. 1. The water characteristic curves (dotted line) at depths of 30 cm and 60 cm

為方便農民啟動灌溉，另於果園埋設 2 支 Watermark 土壤水分感應器，埋設深度為 30 cm，將土壤水分張力數值雲端上傳，協助農民即時了解實際土壤水分乾濕狀態。灌溉適值於開花後為 30 kPa，轉色後為 100 kPa，達灌溉適值後啟動灌溉。每次灌溉水量 5~10 mm，灌溉水量以流量計紀錄。

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，本研究以桶柑果樹田區每日 ETo 的數據輸入。每日 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。如圖二所示，田區 ETo 大致從 1 月平均 1.52 mm/day 開始逐漸增加，升高至 7 月之平均 3.04 mm/day，之後逐漸降低，至 12 月降至平均 1.44 mm/day。雨量方面，1 至 3 月降雨總計只有 8.6 mm，4 月起降雨強度大且集中，月降雨量最高為 8 月 (358 mm)，總降雨量為 1,398 mm。CROPWAT 模型提供 5 種有效降雨量計算方法，本研究選用 USDA Soil Conservation Service formula。



圖二、自 2023 年 1 月 1 日起每日蒸發散量 (ETo)

Fig. 2. The daily reference evapotranspiration (ETo) from January 1, 2023

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一，深度 0~60 cm 土壤有效水分含量約 187 mm，CROPWAT 模型設定 RAM 為土壤有效水分含量之 60%，約為 112 mm。田區土壤剖面及田區土壤滲漏能力等相關土壤特性分析之調查結果如表二，三個試體之總體密度介於 1.28~1.57 g/cm³，飽和導水度值介於 0.0062~0.0149 cm/sec，入滲率介於 10~233 mm/hr，顯示每次灌溉水流量或降雨量入滲率不超過 10 mm/hr。

表一、土壤有效水分含量

Table 1. Soil available moisture content

Soil depth (cm)	Gravimetric water content (%)			Volumetric water content (%)			土層厚度含水量 (mm)			Available moisture content (mm)
	0.1 bar	0.33 bar	15 bar	0.1 bar	0.33 bar	15 bar	0.1 bar	0.33 bar	15 bar	
0-15	30.5	26.6	10.97	39.1	34.2	1.24	59	51	2	57
15-30	20.9	18.7	12.90	32.8	29.3	20.20	49	44	30	19
30-60	30.9	26.3	12.59	40.5	34.5	3.39	121	103	10	111

表二、土壤飽和導水度與入滲率

Table 2. Soil saturated hydraulic conductivity and infiltration rate

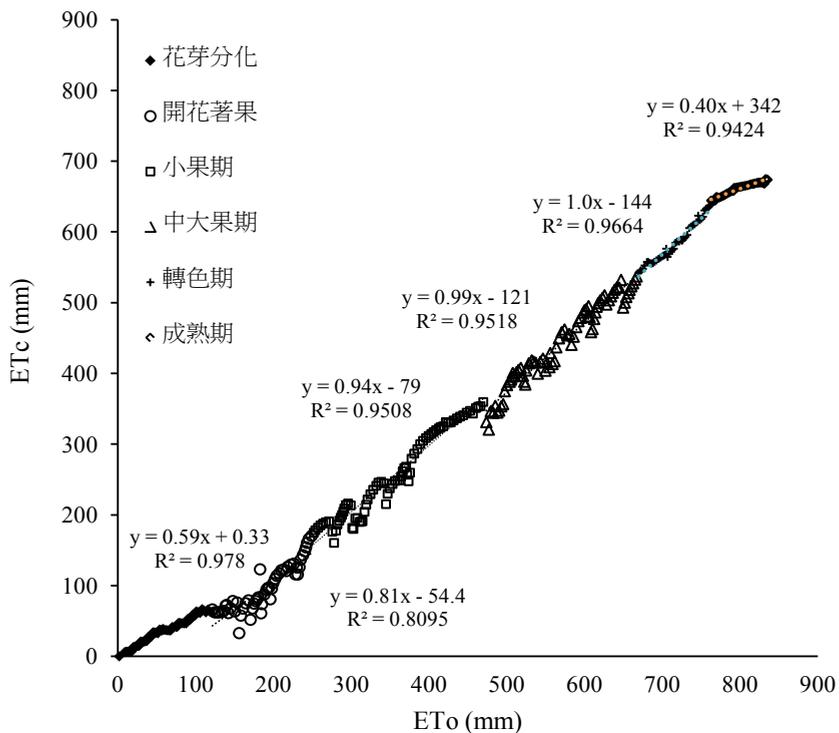
Soil depth (cm)	CEC (cmol/kg)	Soil texture			Texture	Saturated hydraulic conductivity		Bulk density (g/cm ³)	Infiltration rate	
		Sand	Silt	Clay		流量平均 (ml/min)	k (cm/s)		(ml/s)	(mm/h)
0-15	18.24	43.46	36.22	20.32	Loam	1.57	0.0130	1.28	0.65	75
15-30	13.57	41.70	32.88	25.42	Loam	0.90	0.0062	1.57	0.09	10
30-60	10.99	39.62	34.43	25.95	Loam	2.10	0.0149	1.31	2.03	233

三、作物係數

桶柑 Kc 值通過田間測量的 ETc 除以已知的 ETo 來確定，田間 ETc 採用土壤水分收支法，將 ETc 表達為 $\Delta S + P + I - F \pm Q$ (Martínez-Ferri *et al.*, 2013)，其中 ΔS 為當日與前一日之土壤水分含量差異，由水分特性曲線求得。P 為有效降雨量，計

算為日降雨量大於 5 mm 之和。I 為灌溉量，由流量計紀錄。F 為逕流量，由於土壤入滲率最低為 10 mm/h，故時雨量高於 10 mm 之降雨視為逕流量。Q 為深層土壤毛管水補充量或滲漏量，假設沒有降雨與灌溉時，Q 為正值，視為土壤毛管水補充量，粗略估計為 $\Delta S/10$ ，而降雨與灌溉時，Q 值估算方式為 $\Delta S - (P + I - F)$ ，出現負值視為滲漏量。

經由以上的方法計算 2023 年 1 月 1 日起累積之 ETc 為 673.8 mm，而累積之 ETo 為 835.5 mm(圖三)，桶柑 Kc 值平均為 0.81，略低於 FAO 的柑橘 Kc 值 0.85 (Andreas and Karen, 2002)。根據 E. Martínez-Ferri *et al.* (2013) 研究指出，隨著生長階段，柑橘 Kc 值由 0.4 升至 1.0。本研究桶柑 Kc 值變化如圖三之斜率所示，最初階段可能受果樹修剪影響，Kc 值最低為 0.59，並隨著開花、萌芽及抽梢 Kc 值逐漸增加，在轉色期仍維持在 1.0，此時田間萌生大量秋梢，可能使 Kc 值居高不下，隨後於成熟期降至 0.40。為方便模擬，將定植日設定為 1 月 1 日，各作物生長階段及日數使用的 Kc 值如表三。



圖三、自 2023 年 1 月 1 日起累積需水量 (ETc) 與累積參考蒸發散量 (ETo) 之關係

Fig. 3. The relationship between cumulative ETc and ETo from January 1, 2023

表三、桶柑各生長階段 Kc 值與耗水限值

Table 3. The Kc value and soil critical depletion at each stage of Citrus tankan

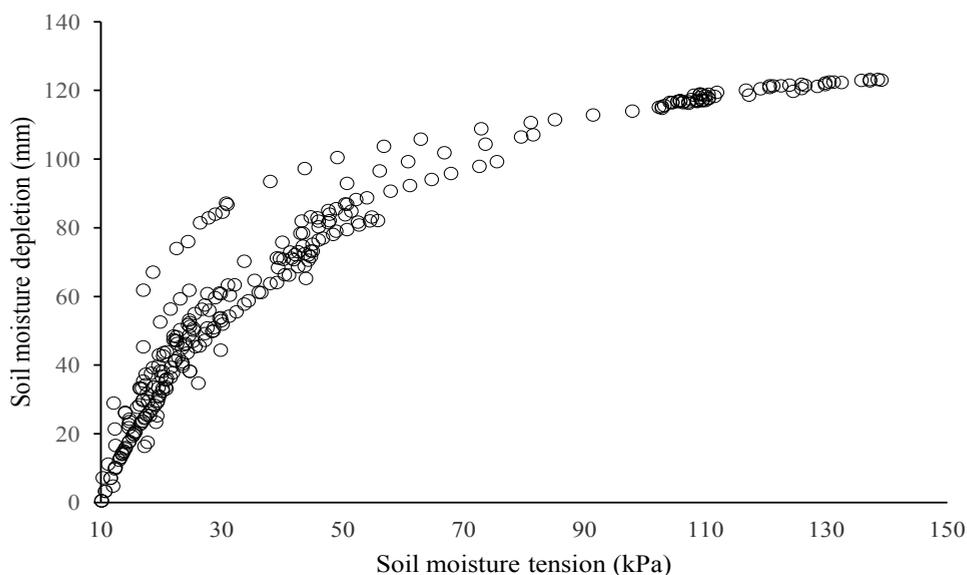
Stage	Days after planting	Kc	Critical depletion
Initial	60	0.6	0.95
Development	30	0.6-1.0	0.95-0.54
Mid-season	180	1.0	0.54
Late-season	95	1.0-0.40	0.54-0.95

四、灌溉適值

埋設深度 30 cm 土壤張力與 0~60 cm 土壤耗水量之關係如圖四，本研究將開花後灌溉適值設定為土壤張力值 30 kPa，轉色後 100 kPa，其中 30 kPa 對應根域範圍之土壤耗水約在 44.5~86 mm 之間，以土壤水分特性曲線換算，相當於此時 30~60 cm 深度之土壤張力介於 10~60 kPa 之間，這也顯示利用埋設單一深度土壤張力設定灌溉適值，可能面臨土壤乾溼程度差異甚大之問題，導致灌溉時機與灌溉水量較難掌握，據此進行灌溉，仍須仰賴耕作經驗及作物知識。CROPWAT 模型以土壤耗水限值設定灌溉適值，當作物蒸發散量達土壤耗水限值時啟動灌溉，灌溉水量亦可依據土壤耗水量而控制，簡單且方便。CROPWAT 模型土壤耗水限值以 RAM (約 112 mm) 之比值表示，且不大於 1。本研究將土壤耗水限值設定為開花後 60 mm，轉色後 106 mm，RAM 比值分別為 0.54 及 0.95，各作物生長階段使用的土壤耗水限值以 RAM 比值整理如表三。

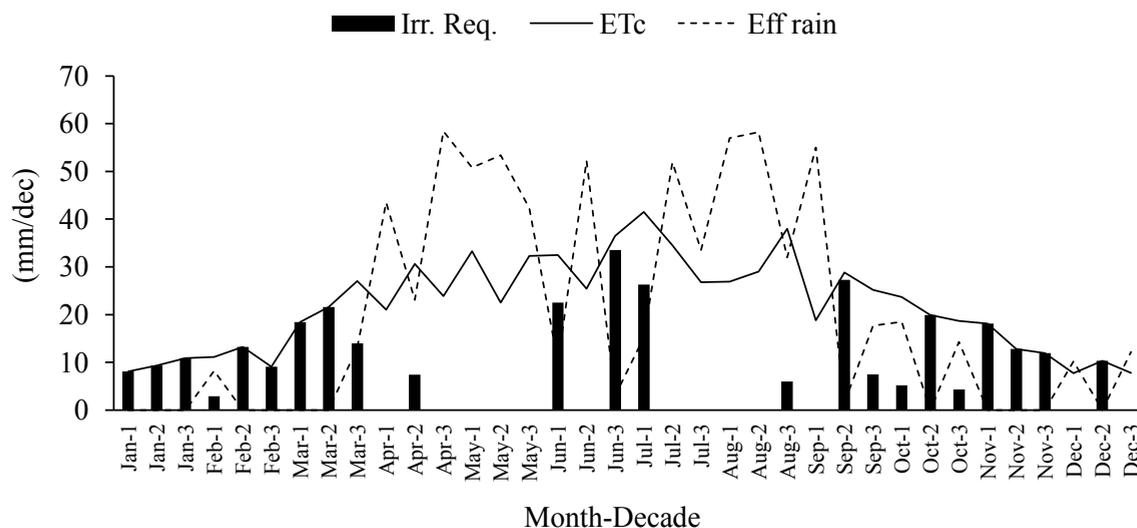
五、需水量評估

CROPWAT 模型評估卓蘭試驗點每月各旬需水量結果如圖五，2023 年桶柑全年需水量約為 787 mm，全年有效降雨量為 735 mm。由於降雨分布的不均勻，不能滿足桶柑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，在 3 月中旬前，由於有效降雨量甚少，灌溉需求量幾乎等於作物需水量，4 月上旬至 5 月下旬、7 月中旬至 9 月上旬，由於有效降雨量高於作物需水量，灌溉需求量幾乎為零。灌溉需求量最高為 6 月下旬之 33.5 mm，其次為 9 月中旬之 27.3 mm 與 7 月上旬之 26.3 mm，其餘月份每旬灌溉需求量介於 0~22.5 mm，全年灌溉需求量合計 320 mm，可作為灌溉系統容量設計參考。



圖四、埋設深度 30 cm 之土壤張力值與 0~60 cm 土壤耗水量之關係

Fig. 4. The relationship between 30 cm depth soil moisture tension and 0-60 cm soil moisture depletion.



圖五、使用 CROPWAT 模型評估卓蘭試驗點每月各旬需水量結果。實線 (ETc) 為作物需水量，虛線 (Eff rain) 為有效降雨量，直條圖 (Irr. Req.) 為灌溉需求量

Fig. 5. Results of CROPWAT modelling water requirements of each month-decade

將上述資料依據桶柑物候期區分，各生育期需水量結果如表四，春梢萌發與開花期雖然作物需水量不高，但是正逢旱季，有效降雨量最低，因此灌溉需求量最高 (1.34 mm/day)；結果期與生理落果期，氣溫逐漸升高，作物需水量也高，但是由於有效降雨量甚高，灌溉需求量反而最低 (0.25 mm/day)；果實發育肥大期是作物需水量最高的階段，雖然有效降雨量也高，但降雨分布不均勻，灌溉需求量仍高 (0.87 mm/day)；果實轉色期與春梢萌發與開花期類似，因此灌溉需求量也高 (1.18 mm/day)；果實成熟與採收期作物需水量最低，但有效降雨量也低，仍有相當之灌溉需求量 (0.63 mm/day)。

表四、使用 CROPWAT 評估桶柑果樹田區各生育期需水量結果 (mm/day)

Table 4. Results of CROPWAT modelling crop water requirement of citrus field

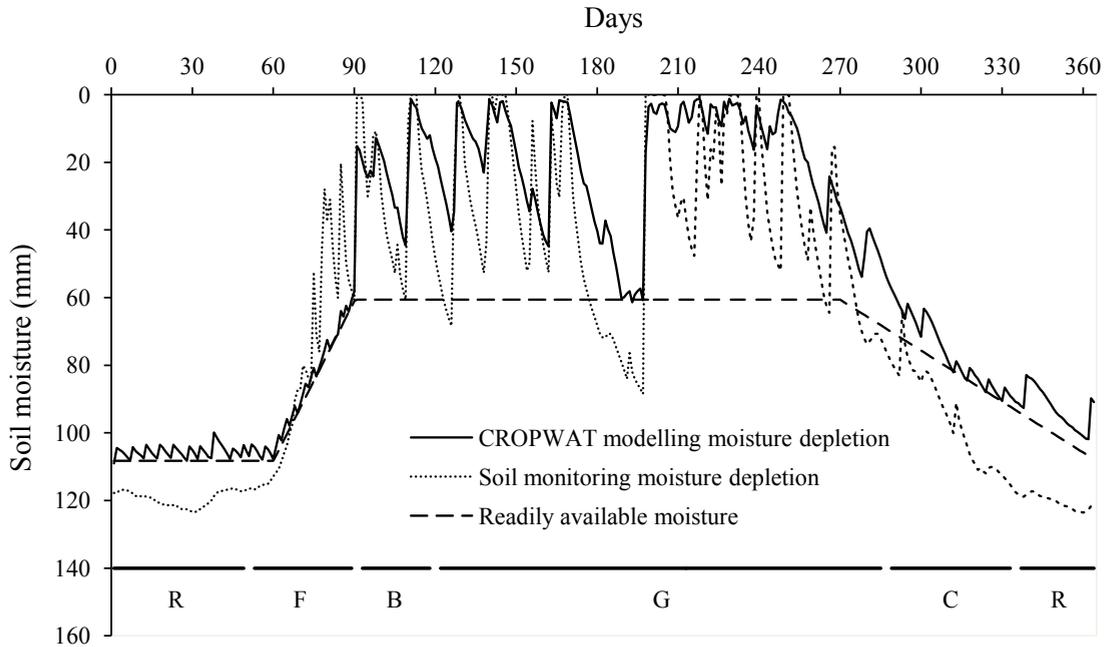
Growth period	Crop water requirement	Effective rainfall	Irrigation requirement
Sprouting and flowering stage	1.70	0.36	1.34
Fruit physiological dropping stage	2.52	4.17	0.25
Fruit expanding stage	2.92	3.25	0.87
Fruit color transition stage	1.54	0.36	1.18
Fruit ripening and harvesting stage	0.89	0.37	0.63

六、推薦灌溉與田間驗證

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，例如果實發育肥大期正逢雨季，土壤可吸收降雨並供應作物利用，除非長期乾旱，否則灌溉需求甚少；而果實成熟期的需水量也可以由土壤供應，且土壤乾燥才能促進果實品質，不宜進行灌溉。正確推薦灌溉量、灌溉次數和時間，需根據桶柑需水特性、生育階段、氣候及土壤而定。

CROPWAT 模型提供多種灌溉排程選擇，本研究選擇灌溉時機為土壤達耗水限值 (開花後 60 mm，轉色後 106 mm)，每次灌溉量固定為 5 mm。作物每日土壤平衡水量結果如圖六，模型法推薦灌溉下，土壤耗水 (實線) 不會超過可利用有效水分 (長虛線)，與水分張力監測法之實際田間土壤耗水 (短虛線) 比較，在第 0~89 日內 (春梢萌發與開花期之前)、第 189~196 日間 (果實發育肥大期中期) 及第 288 日

後(果實轉色期之後)明顯低於可利用有效水分,這3個階段 CROPWAT 模型皆有推薦灌溉,而農民亦根據土壤張力監測數據並配合作物反應啟動灌溉,顯示本研究 CROPWAT 模型設定之參數的確可以反應田間實際水分需求。

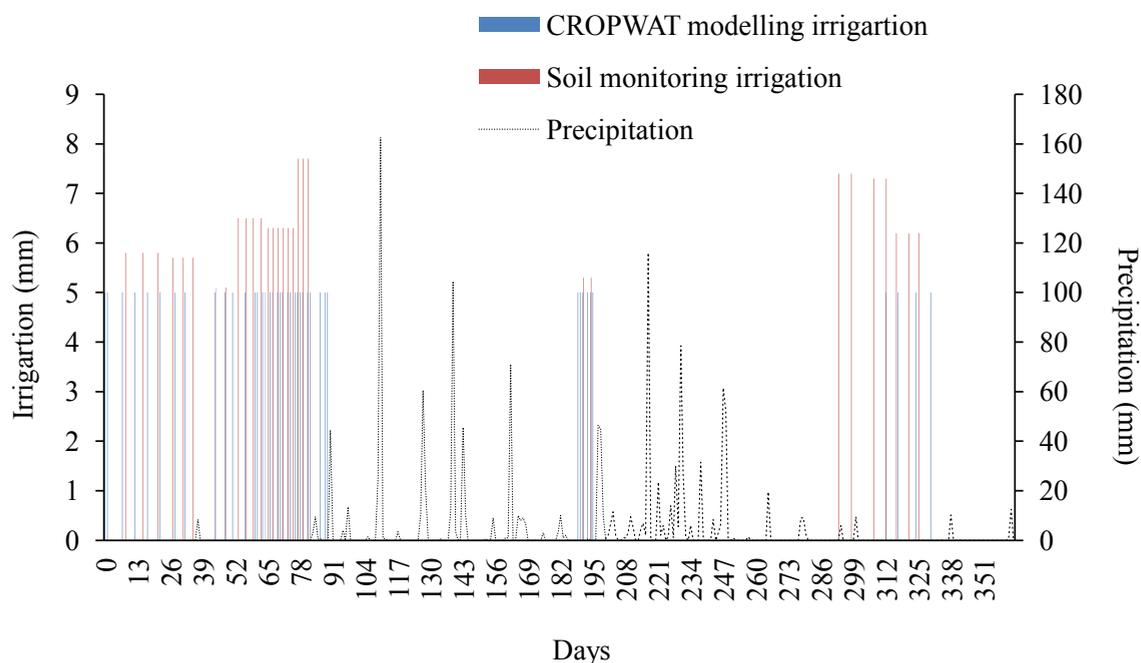


圖六、使用 CROPWAT 模擬法與水分張力監測法每日土壤平衡水量比較。各生育階段標示為 F (春梢萌發與開花期)、B (結果與生理落果期)、G (果實發育肥大期)、C (果實轉色期)、R (果實成熟與採收期)

Fig. 6. Comparison of daily moisture depletion between CROPWAT modelling and soil monitoring

CROPWAT 模型推薦灌溉量結果如圖七,模型法推薦灌溉量合計為 210 mm,大於水分張力監測法灌溉量 171.6 mm。在第 0~89 日內(萌芽、開花),推薦灌溉量為 160 mm,水分張力監測法灌溉量為 131.6 mm,第 189~196 日間(中大果期),推薦灌溉量為 30 mm,水分張力監測法灌溉量為 10.6 mm,此階段灌溉量差異較大,可能農民預判下雨,因而減少灌溉量,例如第 90 日、第 197 日及 198 日等單日降雨皆高於 45 mm,若至少於前 3 日便停止灌溉,建議灌溉量可再減少約 15 mm,提高農業用水效率。第 288 日後降雨減少,模型法推薦灌溉量為 20 mm,水分張力監測法灌溉量為 29.4 mm,此階段為果實開始轉色階段,模型法推薦灌溉量較少,但

由於土壤已相當乾燥，農民仍啟動灌溉。第 331 日以後，此時為果實成熟階段，兩者皆未灌溉。



圖七、使用 CROPWAT 模擬法與水分張力監測法灌溉量比較 (直條圖)，虛線為降雨量

Fig. 7. Comparison of CROPWAT modelling irrigation and soil monitoring irrigation

結 論

本研究利用 CROPWAT 模型評估卓蘭桶柑果園 2023 年需水量約為 787 mm，有效降雨量為 735 mm，灌溉需求量合計 320 mm，可作為果園灌溉系統容量設計參考。桶柑灌溉需求量最高為春梢萌發與開花期之 1.34 mm/day，最低為結果期與生理落果期之 0.25 mm/day。CROPWAT 模型根據每日土壤平衡水量推薦灌溉，田間驗證顯示，模型推薦灌溉的 3 個階段，農民亦根據土壤張力監測數據並配合作物反應啟動灌溉，顯示模型推薦灌溉的確可以反應田間實際水分需求。模型建議灌溉量為 210 mm，高於水分張力監測法灌溉量 171.6 mm，由於模型法於降雨前 1 日仍推薦灌溉，若能於前 3 日預知降雨並停止灌溉，建議灌溉量可再減少約 15 mm，更可提高農業

用水效率。模型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，有利於柑橘產業發展。

誌 謝

本研究承蒙農業部農業科技計畫「柑橘類果樹優化灌溉技術 (112 農科 -11.1.2-苗 -M1)」經費支持，本場作物環境科技工賴學基先生及黃秀梅小姐，約僱技術員劉怡娟小姐，臨時人員賴玉井小姐、黃裕珠小姐、盧碧連小姐及施彥同先生協助調查，特此致謝。

引用文獻

- 申雍。2002。田間蒸發散量之估測與應用。農業氣象及農業水資源之應用與管理研討會專刊。85-96。
- 向為民、吳宗諺。2004。農田土壤水分管理。花蓮區土壤特性及合理化施肥研討會專刊。64-68。
- 向為民、唐佳惠。2021。柑橘節水灌溉。110 年「乾旱對農業生產影響因應」節水技術與措施柑橘場次講習。
- 林俐玲、杜怡德、蔡義誌、涂展臺。2007。茶園不同水土保持處理下土壤水分特性曲線之研究。水土保持學報 39:73-85。
- 楊清富。2014。土壤水分感測技術及應用。臺南區農業專訊 87 期。18-21。
- 唐佳惠。2017。採收前水分管理對椪柑果實貯藏中品質變化之影響。臺灣農業研究。66(2):126-133。
- 黃維廷、陳柱中。2019。中部縣市土壤性質與柑桔施肥推薦參考資訊。作物土壤管理與施肥技術推廣專書 - 果樹與茶作篇。17-51。
- 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.

- Andales, A. A., J. L. Chavez, and T.A. Bauder. 2015. Irrigation scheduling: the water balance approach. Colorado State University Extension. Fact Sheet No. 4.707.
- Andreas, P. S. and F. Karen. 2002. Crop water requirements and irrigation scheduling. Irrigation manual Module 4. Water Resources Development and Management Officers. FAO Sub-Regional Office for East and Southern Africa.
- Fereres, E., D. A. Goldhamer, and V. O. Sadras. 2012. Yield response to water of fruit trees and vines: guidelines. In: Crop yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper 66, Rome, Italy.
- 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.
- Kuo, S. F., S. S. Ho, and C. W. Liu. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. *Agricultural Water Management* 82:433-451.
- Marsal, L., J. Girona, and A. Naor. 2012. Pear. In: Crop yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper 66, Rome, Italy.
- Martínez-Ferri, E., J. L. Muriel-Fernández, and J. A. Rodríguez Díaz. 2013. Soil water balance modelling using SWAP: An application for irrigation water management and climate change adaptation in citrus. *Agriculture*. 42(2) 93-102.
- Rodríguez-Gamir, J., E. Primo-Millo, J. B. Forner, M. A. Forner-Giner. 2010. Citrus rootstock responses to water stress. *Sci. Hort.* 126, 95-102.

Applying CROPWAT model to optimize irrigation management in citrus

Jeng-Hsien Tsai*, Yu-Ren Lin, Ya-Ling Chang

Miaoli District Agricultural Research and Extension Station, Ministry of Agriculture

ABSTRACT

Citrus is a moderately drought-sensitive crop. It is necessary to estimate the agricultural water use of citrus and irrigation guide. In this study, CROPWAT model was used to evaluate the Citrus tankan water requirement and irrigation compared with the soil moisture tension methods. The climate, soil and crop parameters required by the model were derived from field data. The total rainfall during the experiment was 1,398 mm, and the reference evapotranspiration in the field increased from an average of 1.52 mm/day in January to an average of 3.04 mm/day in July. The soil available moisture in the root zone was about 187 mm. The crop coefficient (Kc) of Citrus tankan increased from 0.59 at the initial stage to 1.0 at the mid-season, and then decreased to 0.40 at fruit ripening stage. The model irrigate at 60 mm of soil water depletion at the initial stage, and at 106 mm of soil water depletion after fruit ripening. The annual water requirement of Citrus tankan in 2023 was about 787 mm, the annual effective rainfall was 735 mm, and the annual irrigation requirement was 735 mm. The highest irrigation requirement was 1.34 mm/day at sprouting and flowering stage. The lowest irrigation requirement was 0.25 mm/day at fruit physiological dropping stage. CROPWAT model recommends the irrigation consistent with the methods of field soil moisture tension monitoring. The model recommends annual irrigation 210 mm, higher than the 171.6 mm of soil moisture tension monitoring irrigation. If the irrigation was stopped at least 3 days before the rainfall, the recommended irrigation can be reduced by about 15 mm to improve the agricultural water use more efficient.

Keywords: crop evapotranspiration, CROPWAT model, irrigation, citrus

* Corresponding author email: tsaijh@mdares.gov.tw