應用土壤水力特性與 HYDRUS-1D 優化農業用水管理及作物灌溉策略

Applying Soil Hydraulic Properties and HYDRUS-1D to Optimize Agricultural Water Management and Crop Irrigation Strategies

經濟部水利署
水利規劃試驗所
助理研究員
唐 上 恩
Shang-En Tang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士後研究員
蔡 義 誌*
Yi-Zhih Tsai

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
副教授
許 少 瑜
Shao-Yiu Hsu

行政院農業委員會
農業試驗所農業化學組
副研究員
許 健 輝
Chien-Hui Syu

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士生
王 永 立
Yung-Li Wang

摘 要

強化灌溉策略精準度能有效利用及永續管理臺灣農業水資源並確保糧食生產。然而，過去鮮少對於灌溉強度、時間及期距並搭配土壤質地的系統性的研究進行討論。因此，為了探討不同土壤質地適合的灌溉強度與對應策略，並幫助未來訂定高精準灌溉策略。本研究首先整合臺灣的土壤資料，並且分析土壤的水力特性，比較不同的田間含水量量化方式。接著，使用 HYDRUS-1D 模式，推估田間含水量和有效水分含量，同時考慮土壤和作物 (如柑橘類果樹) 等參數，進行了灌溉和排水的模擬。透過分析，我們得出了不同灌溉強度對應的田間灌溉效率，並以此為基礎，迴歸出了不同土壤質地所適合的灌溉強度、時間和期距，制定了合適的灌溉策略公式。此外，我們也補充探討了不同灌溉強度下 CN 值 (curve number) 的變化，提供未來作物模式參考。

關鍵詞：HYDRUS-1D、灌溉策略、田間含水量、土壤排水。

* 國立臺灣大學生物環境系統工程學系博士後研究員
10617 台北市羅斯福路四段 1 號，tsaiyz@ntu.edu.tw

Applying Soil Hydraulic Properties and HYDRUS-1D to Optimize Agricultural Water Management and Crop Irrigation Strategies

Shang-En Tang
Water Resources Agency
Ministry of Economic Affairs
Water Resources Planning
Institut

Yi-Zhih Tsai*
National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Shao-Yiu Hsu
National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Chien-Hui Syu
Council of Agriculture Taiwan Agricultural
Research Institute

Yung-Li Wang
National Taiwan University Department of
Bioenvironmental Systems Engineering

ABSTRACT

Strengthening the precision of irrigation strategies can effectively utilize and sustainably manage Taiwan's agricultural water resources and ensure food production. However, few previous studies have systematically discussed the irrigation intensity, time and interval in combination with soil texture. Therefore, the purpose of this study is to explore the appropriate irrigation intensity and corresponding strategies for different soil textures, and to help formulate high-precision irrigation strategies in the future. This study first compiled soil data in Taiwan, analyzed soil hydraulic properties, and compared different methods of quantifying field capacity. The HYDRUS-1D model was further used to estimate the field capacity and effective water content, and the irrigation and drainage simulations were carried out with parameters such as soil and crops (citrus fruit trees). Through analysis, different irrigation intensities and their corresponding field irrigation efficiencies were obtained, and then the appropriate irrigation intensity, time and interval of different soil textures were regressed, and the appropriate irrigation strategy formula was formulated. In addition, this study also explores the changes in CN value of different irrigation intensities, so as to provide a reference for future crop models.

Keywords: HYDRUS-1D, Irrigation strategy, Field capacity, Soil drainage.

Tang, S.E., Tsai, Y.Z.*, Hsu, S.Y., Syu, C.H., & Wang, Y.L. (2023). “Applying Soil Hydraulic Properties and HYDRUS-1D to Optimize Agricultural Water Management and Crop Irrigation Strategies.” *Journal of Taiwan Agricultural Engineering,* 69(3), 16-29. https://doi.org/10.29974/JTAE.202309_69(3).0002

一、前言

水資源有效利用是臺灣長期面臨之挑戰。農業用水為臺灣總用水量的大宗，有效利用農業水資源是確保臺灣水資源永續管理與糧食生產的關鍵議題。為了有效利用農業水資源，精準的灌溉策略刻不容緩，灌溉量可以由田間含水量及作物土壤水容許損耗百分比 (soil water depletion or allowable depletion, SWD or AD) 等參數決定 (Lena *et al*., 2022)，使灌溉量盡接近作物需水量。灌溉頻率方面，Zheng *et al*. (2017) 發現相同灌溉總量下，分成較多次來灌溉可以讓作物更有效吸收灌溉用水、增加作物蒸散量及產量，也有效減少滲漏量。

雖目前已有灌溉量及頻率的研究 (Lena *et al*., 2022; Zheng *et al*., 2017)，但都未將噴灌灌溉強度、時間及期距做高解析度的探討，因而本研究進一步探討適合且精準的對應灌溉策略，以提供農民完善的灌溉建議。決定灌溉強度須考慮水分動態運移、逕流及蒸發等過程，需要土壤水流模式的協助。HYDRUS-1D 是目前以 Richards equation 為基礎廣泛使用的一維土壤水流模式，其中 Zheng *et al*. (2017) 利用 HYDRUS-1D 模擬了玉米田的灌溉、Lena *et al*. (2022) 模擬了排水過程找出田間含水量。

在制定灌溉策略時，田間含水量為關鍵參數之一，直接影響灌溉量的推估，間接影響灌溉時間及期距的長度。雖然田間含水量定性定義為土壤重力水排除後之剩餘土壤含水量 (de Oliveira *et al*., 2015)，但是實際應用上，決定田間含水量的定量方法卻尚未有統一定論。Richards and Weaver (1944) 發現細顆粒土壤的田間張力 (達田間含水量時之張力) 約為-33 kPa，此法簡易但精準度不足，因後續許多研究發現不同土壤的田間張力可能變化範圍為-5 ~ -50 kPa (Brito *et al*., 2011; Jabro *et al*., 2009; Romano *et al*., 2002)，不同土壤之田間張力應會有些微變化。Lena *et al*. (2022) 發現細顆粒土壤於作物根系底部之排水率降低至 0.01 cm/day 時，土壤含水量接近田間含水量，此法符合不同土壤之田間張力非定值，也考慮到排水率的降低，與考量到作物根系區域為灌溉主要關注範圍，但需先進行土壤排水模擬，較為不便。因此有必要進一步釐清並重新檢視田間含水量的決定方法或適用條件，藉由精確的田間含水量有助於訂定出符合現地且精準合適的灌溉策略。

基於上述，本文將探討不同土壤質地適合的噴灌灌溉強度與對應策略，並重新檢視田間含水量的量化方式。其研究成果將可避免農業用水使用浪費或灌溉不足，作物也可以適時獲得水分，降低收成不佳的機率，達成精準灌溉的目標。

二、研究方法及流程

2.1 研究架構

本研究為尋找合適的灌溉策略，選定柑橘類果樹作為範例，以 HYDRUS-1D 進行灌溉模擬，並探討合適的灌溉策略。進行模擬前，首先以行政院農業委員會農業試驗所 (簡稱農試所) 提供之現有臺灣土壤資料，計算彙整出土壤水分特性曲線參數及飽和水力傳導度，並將這些土壤參數輸入 HYDRUS-1D 模式進行排水模擬。本研究參考 Lena *et al*. (2022) 研究成果，設定根系底部排水率降低至 0.01 cm/day 時，得出田間含水量；接著加入作物，增加輸入蒸發率、作物參數 (柑橘類果樹) 等進行作物吸水模擬，得出容許損耗含水量。

以田間含水量及容許損耗含水量計算出容許損耗量，也即為後續灌溉模擬之灌溉量。再設計一灌溉強度，搭配灌溉量計算得出灌溉時間。並將土壤參數、蒸發率、作物參數作為控制變因，將設計灌溉強度、灌溉時間作為操作變因，輸入至 HYDRUS-1D 模式進行灌溉模擬，並使之可循環進行 (定義此為循環灌溉)。模擬後會輸出逕流量、入滲量、排水量、蒸發量及作物吸水量，再以這些輸出參數進行產量及田間灌溉效率的計算及評估，找出該土壤質地合適的灌溉強度、時間及期距。最後將各土壤質地的模擬結果進行分類統計，訂定出柑橘類果樹種植於不同土壤質地適合且可進行循環灌溉的灌溉策略。

2.2 土壤資料處理

本研究採用農試所提供之民國 105 年及 99 年土壤調查數據，土壤調查地點如圖 1。數據內容包含地點座標、粒徑分析、砂粒、坋粒及黏粒含量百分比、水分特性曲線張力對應含水量實驗數據、飽和水力傳導度等。

本研究以種植柑橘類果樹 (簡稱作物) 為範例進行灌溉模擬，針對 6 類適合種植柑橘果樹之土壤質地的土壤進行模擬及統計 (圖 2)。農試所提供的土壤調查數據共有 18 個地點為壤土質地 (loam) 土壤 (表 1)，每個地點皆有 1 或 2 或 3 層的土壤調查

圖 1 農試所民國 105 年 (黃點) 及 99 年 (紅點) 土壤調查地點

數據，其中每一層為 20 cm 厚度的土壤。具有 3 層調查數據的土樣 (例如編號 05GE25062)，每一層都有不同的土壤性質；只具有 1 或 2 層調查數據的土樣會將已有調查數據的土層進行延伸。例如只具有 1 層調查數據的土樣，會將第 1 層的土壤性質延伸至

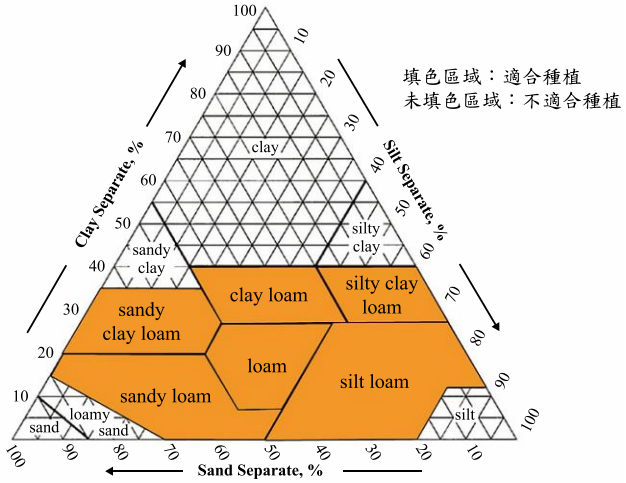

圖 2 適合種植柑橘類果樹之土壤質地三角圖

表 1 18 個地點每層土壤顆粒粗細性質及質地

土樣編號	TWD97 X 座標	TWD97 Y 座標	調查地點	層數	砂粒(%)	坋粒(%)	黏粒(%)	土壤質地
05GE25062	211056	2508223	屏東縣	1	14.44	52.39	33.17	坋質黏壤土
			內埔鄉	2	14.74	52.03	33.23	
				3	13.68	52.24	34.08	
05GE25072	211465	2508315	屏東縣	1	16.11	50.85	33.05	坋質黏壤土
			內埔鄉	2	15.18	51.3	33.52	
				3	17.01	50.07	32.92	
05GE25092	211035	2508737	屏東縣	1	15.53	51.83	32.65	坋質黏壤土
			內埔鄉	2	14.83	52.07	33.1	
				3	13.84	51.19	34.96	
05GE35062	209756	2506591	屏東縣	1	13.34	52.41	34.24	坋質黏壤土
			內埔鄉	2	13.99	51.65	34.36	
				3	11.46	52.87	35.67	
05GE35092	210601	2507783	屏東縣	1	16.37	51.04	32.58	坋質黏壤土
			內埔鄉	2	15.99	51.16	32.85	
				3	14.36	51.75	33.89	
05GE35132	210726	2506063	屏東縣	1	15.18	51.61	33.21	坋質黏壤土
			內埔鄉	2	15.09	51.71	33.2	
				3	11.85	52.27	35.88	
05GE35142	210196	2506279	屏東縣	1	12.91	52.92	34.17	坋質黏壤土
			內埔鄉	2	10.8	53.21	35.98	
				3	12.85	52.66	34.49	
99KM10012	324357	2737649	宜蘭縣	1	8.67	55.44	35.89	坋質黏壤土
			員山鄉	2	1.38	63.39	35.23	
				3	0.94	64.99	34.07	
99KM39142	323723	2727191	宜蘭縣	1	22.96	50.84	26.19	坋質壤土

土樣編號	TWD97 X 座標	TWD97 Y 座標	調查地點	層數	砂粒(%)	坋粒(%)	黏粒(%)	土壤質地
			冬山鄉	2*	22.96	50.84	26.19	
				3*	22.96	50.84	26.19	
05GE35112	211598	2507243	屏東縣	1	21.38	48.89	29.74	黏質壤土
			內埔鄉	2	26.97	44.25	28.78	
				3*	26.97	44.25	28.78	
99KM40042	325141	2727416	宜蘭縣	1	37.68	34.16	28.16	黏質壤土
			冬山鄉	2*	37.68	34.16	28.16	
				3*	37.68	34.16	28.16	
99LN92012	331491	2740673	宜蘭縣	1	34.72	43.51	21.77	壤土
			壯圍鄉	2	27.09	49.27	23.64	
				3	35.51	44.28	20.21	
99IN64142	259404	2746758	新竹縣	1	30.6	45.03	24.38	壤土
			新埔鎮	2	41.91	35.43	22.67	
				3*	41.91	35.43	22.67	
99KM19082	322511	2735317	宜蘭縣	1	40.74	36.49	22.77	壤土
			員山鄉	2	39.41	39.42	21.17	
				3*	39.41	39.42	21.17	
99IN62023	255311	2748583	新竹縣	1	72.65	2.11	25.23	砂質黏壤土
			新埔鎮	2*	72.65	2.11	25.23	
				3*	72.65	2.11	25.23	
99JM24062	284870	2731142	桃園市	1	78.83	0.39	20.78	砂質黏壤土
			復興區	2*	78.83	0.39	20.78	
				3*	78.83	0.39	20.78	
99IM04042	260895	2736566	新竹縣	1	55.14	32.14	12.72	砂質壤土
			芎林鄉	2*	55.14	32.14	12.72	
				3*	55.14	32.14	12.72	
99IN82042	255187	2742931	新竹縣	1	53.8	27.65	18.55	砂質壤土
			竹北市	2*	53.8	27.65	18.55	
				3*	53.8	27.65	18.55	

註：*符號代表該層土壤為上一層土壤之延伸，土壤性質與上一層土壤相同

第 2 及 3 層土壤，因此第 1~3 層皆為相同土壤，只具有 2 層調查數據的土樣也以相同方式延伸。

飽和水力傳導度 (Ks) 雖已有實驗室數據，但數據都有稍大的現象，實驗 Ks 稍大的原因，可能有以下兩點：第一為野外採土樣所使用的土環，會導致土與土環之間產生縫隙，讓實驗室量測之 Ks 增大；第二為野外試驗無法達到真正的飽和，而室內實驗採向上飽和之方式緩慢達到完全飽和狀態，因此室內實驗 Ks 普遍大於相同地區之野外 Ks (林俐玲等人，2008)。為修正 Ks，採用過去學者提出之土壤轉換方程式 (Pedotransfer function, PTF)，由土壤性質轉換為 Ks。Abdelbaki *et al*. (2009) 為過去提出的 PTF 做綜合整理，最後再將農試所各土壤之砂粒、坋粒、黏粒百分比代入上述得出適合臺灣土壤 PTF，即可修正得出符合臺灣當地的 Ks。

2.3 HYDRUS-1D 模式

HYDRUS-1D 模式由 Simunek *et al*. (2008) 開發，為一維土壤水流模式，可以模擬非飽和土壤水、熱和多種溶質傳輸。該模式採用垂向 Richards 方程式 (Richards, 1931) 如式 (1) 模擬水於土壤中的傳輸，若增加作物產生根系吸水後則變為式 (2)。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K_Z(h)\left(\frac{\partial hp}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad \text{.....(1)}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K_Z(h)\left(\frac{\partial hp}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad \text{.....(2)}$$

其中 θ 為體積含水量 [L^3L^{-3}]、t 為時間 [T]、z 為套用座標系統 z 軸上的土壤位置 [L]、K_Z 為垂向不飽和水力傳導度 [LT^{-1}]、hp 為壓力水頭 [L]、S 為根系吸水[T^{-1}]。垂向 Richards 方程式為假設土壤與

水為不可壓縮 (Incompressible)，並結合達西定律與連續方程式 (Continuity equation) 而推導出的均質非飽和土層水流方程式。

水分特性曲線參數採用 van Genuchten (1980) 模式；未飽和水力傳導度 (K) [LT^{-1}] 採用 van Genuchten (1980) 透過 Mualem (1976) 先前研究而推導之方程式如下：

$$K(\theta) = K_s S_e^{\,l}\left[1-(1-S_e^{1/m})^m\right]^2 \quad \text{.....(3)}$$

$$S_e = \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} \quad \text{.....(4)}$$

其中 θ_s 為飽和含水量 [L^3L^{-3}]、θ_r 為殘餘含水量 [L^3L^{-3}]、K_s 為飽和水力傳導度[LT^{-1}]、S_e 為飽和度[-]、m、*l* 為經驗參數[-]，*l*設定為 0.5 (Mualem (1976) 建議值)。

上邊界設定為大氣邊界，且若有逕流會迅速流走，無湛水深；下邊界因考量到臺灣之地下水位至少有數公尺深，而本研究設定之土壤剖面深度僅為 60 cm，因此設定為自由排水，即地下水位位置深，距離模擬範圍遠。

由於柑橘類果樹為淺根系作物，根系大多分布於地表下 60 cm 內，其中吸收養分及水分的細根區，主要分布於地表下 0 ~ 30 cm 處 (劉東憲等人，2018)，因此設定模擬深度為地表下 0 ~ 30 cm。而作物根系吸水採用 Feddes 模式 (Feddes *et al.*, 1978)，吸水公式如下：

$$S = \alpha(h)\frac{Tp}{z_r} \quad \text{.....(5)}$$

其中 S 為實際根系吸水[T^{-1}]、α 為 stress response function [-]、h 為土壤張力[L]、Tp 為潛能蒸散率[L/T]、z_r 為根系深度[L]。作物吸水過程中，α 會隨土壤張力變化而改變，因此參考 Mallants *et al.* (2019)之統整，數值依序如後：-15、-30、-500、-800、-8000 cm。

土壤潛能蒸發率及作物潛能蒸散率採用 HYDRUS-1D 內建的模式，公式如下：

$$E_P = ET_P \times e^{-k\,LAI} \quad \text{.....(6)}$$

$$T_P = ET_P \times (1-e^{-k\,LAI}) \quad \text{.....(7)}$$

其中 E_p 為土壤潛能蒸發率[LT^{-1}]，ET_p 為潛能蒸發散率[LT^{-1}]，k 為消光係數[-]，LAI 為葉面積指數 [L^2L^{-2}]，T_p 為作物潛能蒸散率[LT^{-1}]。

實際土壤蒸發率會由 HYDRUS-1D 依據潛能蒸發率及土壤含水量自動計算。實際蒸散率於 HYDRUS-1D 模擬中被設定等於 Feddes 根系吸水模式之實際作物吸水率，因作物根系吸水幾乎都會用來產生蒸散，僅約 1 %吸水量用於生長 (Zheng *et al.*, 2017)。

本研究 ET_P 值設定參考葉信富等人 (2008) 應用 Penman-Monteith 法及氣象測站之蒸發皿資料，評估臺灣南部地區的參考蒸發散量，研究結果顯示其值介於 0.165 至 0.422 cm/day。由於，ET_p 會隨著時間地點作物而改變，本研究的核心在於探討灌溉策略、灌溉時間或周期等，因此設定 ET_p 值為 0.3 cm/day (平均值) 進行模擬，以利各種策略之間的比較。LAI 及 k 參考 Raj *et al.* (2019) 之研究，他們使用 LAI 樹冠分析儀 (Licor's LAI-2200C canopy analyser) 實際量測柑橘園之 LAI 為 3.7 ~ 0.6，因此本研究 LAI 採用 2.0。他們也使用無人機採集樹冠頂部 RGB 圖像，通過圖像處理及以下公式得出估算之 LAI：

$$LAI = -\ln\left(Gapfraction\right)/k \quad \text{.....(8)}$$

其中 *Gapfraction* 為樹冠可見天空的間隙比例 [L^2L^{-2}]。將估算 LAI 與樹冠分析儀實際量測 LAI 比較後，發現 k 於估算公式代入 0.5 效果較好，因此本研究 k 採用 0.5。

2.4 灌溉策略

為達成精準灌溉，需使灌溉量滿足作物需水量，而作物需水量及灌溉量可由以下方式得出 (Lena *et al.*, 2022)：在田間含水量下，土壤水分會逐漸蒸發及被作物吸收。當土壤水分降低至容許損耗含水量 (θ^i_{SWD}) [L^3L^{-3}]時作物會開始感受到缺水壓力，此時作物土壤水容許損耗百分比(soil water depletion or allowable depletion, SWD or AD)也會增加至一定百分比，公式如下：

$$SWD = \frac{\theta^i_{fc}-\theta^i_{SWD}}{\theta^i_{fc}-\theta^i_{pwp}} \quad \text{.....(9)}$$

其中 *i* 為土壤位置、θ^i_{fc} 為田間含水量[L^3L^{-3}]、θ^i_{pwp} 為凋萎點[L^3L^{-3}]。而田間含水量 (θ^i_{fc}) 至容許損耗含水量 (θ^i_{SWD}) 之間的水量，即稱為作物需水量 (也可稱為容許損耗量)。灌溉量 (I_{SWD}) [L]又需滿足作物需水量，因此灌溉量可由下式計算：

$$I_{SWD} = \sum_{i=1}^{j}(\theta_{fc}^{i} - \theta_{SWD}^{i})Z_i \quad \text{.....(10)}$$

其中 Z_i 為土壤厚度[L]。

本研究制定灌溉策略的核心概念為：當作物感受缺水壓力時，首先制訂灌溉強度及灌溉時間開始進行灌溉，灌溉完成後再經過一段時間 (灌溉期距) 作物又會感受缺水壓力，完成一次循環。本研究定義前述這樣的循環為「循環灌溉」(圖 3)。

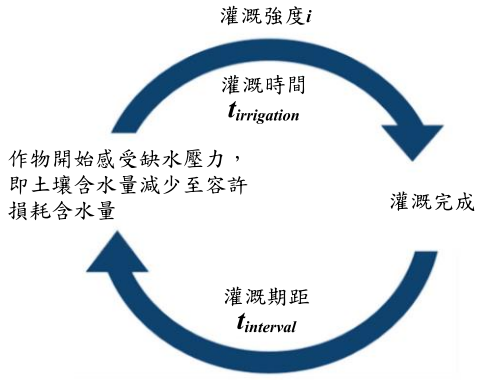

圖 3　循環灌溉示意圖

進入循環灌溉模擬前，需先模擬出田間含水量以利後續計算出容許損耗量作為灌溉量，也需設定出作物感受缺水壓力的情境作為循環灌溉模擬的初始條件。因此最一開始會先進行排水及作物吸水模擬，才會進行循環灌溉模擬 (圖 4)。

初始土壤張力條件設定為-10 cm，排水模擬流程不加入土壤蒸發及作物蒸散，僅藉重力排水得出田間含水量。當作物根系底部 (土壤深度 30 cm 處) 排水率降低至 0.01 cm/day 時，即得出田間含水量。

作物吸水模擬加入土壤蒸發及作物吸水蒸散的設定，而初始條件則接續前面排水模擬，設定為田間含水量。模擬中作物吸水過程土壤水分會逐漸減少，當土壤達到容許損耗含水量 (θ_{SWD}^{j}) [L^3L^{-3}]時作物會開始感受缺水壓力時，此時作物根系區域內 (土壤深度 0~30 cm) 的平均作物土壤水容許損耗百分比 ($\overline{SWD_{0\sim30cm}}$) 會增加至一定百分比，$\overline{SWD_{0\sim30cm}}$ [-] 計算公式如下：

$$\overline{SWD_{0\sim30cm}} = \frac{\sum_{j=1}^{k}(\theta_{fc}^{j} - \theta_{SWD}^{j})}{\sum_{j=1}^{k}(\theta_{fc}^{j} - \theta_{pwp}^{j})} \times 100\% \quad \text{.....(11)}$$

其中 j、k 代表土壤深度，k 至 30 cm 深、θ_{fc}^{j} 為田間含水量[L^3L^{-3}]、θ_{pwp}^{j} 為凋萎點 [L^3L^{-3}]。本研究訂 $\overline{SWD_{0\sim30cm}}$ 為 40 %時作物會開始感受缺水壓力，此百分比參考 Malan *et al.* (2020)整理柑橘類果樹生長階段的 SWD 範圍為 30 ~ 50 %，本研究取中間值 40 %。

最後進入循環灌溉模擬，初始條件與吸水模擬相同，設定土壤的 $\overline{SWD_{0\sim30cm}}$ 為 40 %。並加入灌溉強度 (i) 及灌溉時間 ($t_{irrigation}$) 的設定進行灌溉操作，而灌溉時間的計算方式

先以田間含水量及容許損耗含水量計算出容許損耗量作為灌溉量，再將灌溉量除以灌溉強度即可得灌溉時間。

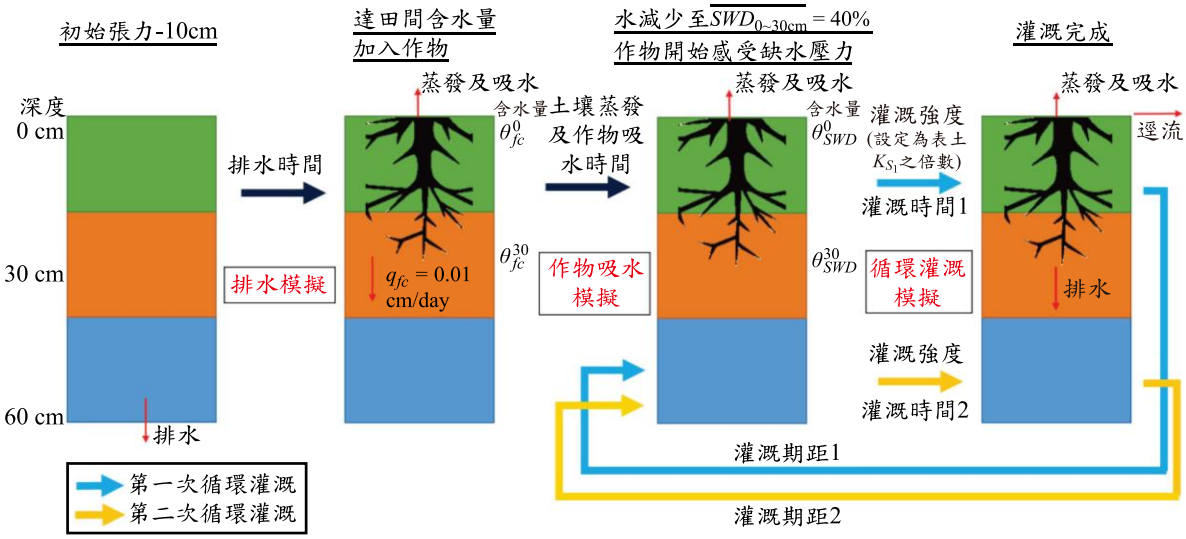

圖 4　灌溉模擬流程示意圖

循環灌溉中，灌溉操作結束至作物又感受到缺水壓力的時間稱為灌溉期距 ($t_{interval}$)，而一次循環的

時間稱為循環灌溉總時間。研究中採用第二次的循環灌溉模擬結果做後續分析，目的為減少初始條件對模擬之影響，因第三次之後的模擬結果皆會與第二次相近，不再進行第三次模擬。

本研究首輪循環灌溉模擬之灌溉強度設定 i/Ks_1 為 100。當首輪完成後，接著改變灌溉強度 (i/Ks_1 為 50、10、5、1、0.5、0.1、0.05、0.01) 及時間再以相同方式進行下一輪的模擬，雖然前述這些灌溉強度有一部分強或弱過於實務上的應用，但其目的為以極端情況產生顯著趨勢，以利後續探討合適灌溉策略。另外若設定的灌溉強度太小，灌溉時間會太長，容易發生灌溉尚未操作結束作物就感受到缺水壓力。若不間斷並持續灌溉下去，累積灌溉量始終無法滿足作物需水量，作物會越來越缺水，無法進行循環灌溉 (圖 5)。

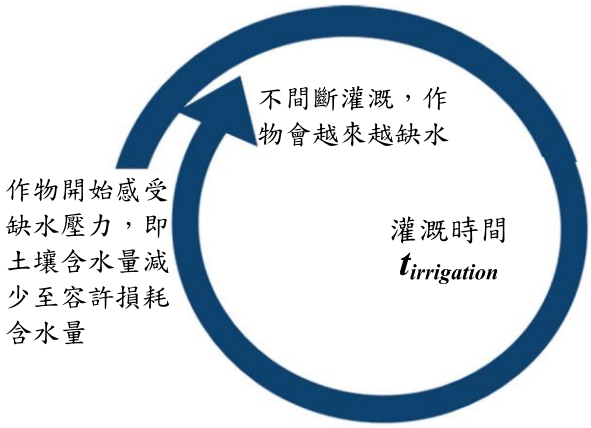

圖 5　灌溉強度太小以致無法進行循環灌溉

由模擬結果估算出產量及田間灌溉效率 (Irrigation Efficiency, IE) 二個評估因子，來評估挑選合適的灌溉強度及對應策略。聯合國糧食及農業組織 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 所開發之作物模式 AquaCrop，設定作物產量與累積蒸散量呈現正相關，採用下式計算產量 (Raes, 2016)：

$$Y = WP \times \sum \mathrm{T} \times HI \quad \text{.....(12)}$$

其中 Y 為產量[ML^{-2}]、WP 為 water productivity (可收穫產量與消耗水量之比值，消耗水量即為作物的根系吸水量)[ML^{-3}]、T 為蒸散量[L]、HI 為收穫指數 (可收穫產量與生物量之比值)[-]。

由上述可知作物蒸散量的多寡可用於推估作物產量，而作物蒸散量幾乎都來自根系吸水量，極少部分 (約 1 %) 的根系吸水量會用於作物生長 (Zheng *et al.*, 2017)，因此作物吸水量的多寡也可用於推估作物產量。為了比較不同灌溉策略每日的產量，本研究採用每日作物吸水量間接得出每日的產量，每日作物吸水量的計算方式為一次循環灌溉的作物總吸水量除以循環灌溉總時間。

而另一個評估因子為灌溉效率，本研究定義灌溉效率為作物吸收水量佔灌溉用水量的比例，其計算方式為作物總吸水量除以總灌溉量。灌溉效率數值越大，越適合作為農業灌溉強度之參考，即是在使用最少灌溉用水下，使作物吸收最大量的水。以產量和灌溉效率評估後，可以分類統計出六類壤土質地土壤合適的灌溉強度、灌溉時間及灌溉期距，制定出合適之灌溉策。

本研究還進一步利用不同噴灌灌溉強度模擬的結果 (灌溉量及逕流量) 計算出 CN 值 (curve number)，比較不同噴灌灌溉強度對應之 CN 值變化，提供 AquaCrop、DSSAT 等作物模式模擬噴灌時參考。CN 值計算方法 (SCS Curve Number method) 為美國農業部 (USDA) 自然資源保護局研發 (Cronshey, 1986)，用於以降雨量預測產生之逕流量，而 CN 值也可以套用於本研究之灌溉模擬，用於以灌溉量預測產生之逕流量。CN 值[-]、灌溉量及逕流量關係式及計算方程式如下：

$$R = \begin{cases} 0 & for\ I_{SWD} \le I_a \\ \dfrac{(I_{SWD} - I_a)^2}{I_{SWD} - I_a + S} & for\ I_{SWD} > I_a \end{cases} \quad \text{.....(13)}$$

$$S = \frac{2540}{CN} - 25.4 \quad \text{.....(14)}$$

其中 R 為逕流量[L] (單位為 cm)、I_{SWD} 為灌溉量[L] (單位為 cm)、I_a 為初期灌溉損失 (initial abstraction)[L]，一般常用為 0.2S、S 為潛在最大土壤容量[L] (單位為 cm)。本研究使用 HYDRUS-1D 模擬入滲過程，從設定各種灌溉強度及土壤水力參數獲得入滲量及逕流量，配合式 (13) 及式(14) 逆推算出 CN 值。在循環灌溉的模擬中，先設定缺水壓力 (初始值)，再輸入灌溉強度及灌溉時間，開始進行灌溉模擬，當首輪完成後，接著改變灌溉強度 (i/Ks1 為 50、10、5、1、0.5、0.1、0.05、0.01) 及時間再以相同方式進行下一輪的模擬。

三、結果與討論

3.1 灌溉模擬結果及水平衡分析

本研究模擬分析的農試所土樣數量較多，因此以農試所編號 05GE25062 的土樣為例進行說明，接續會將各個土樣進行分類統計並制定出各土壤質地合適之灌溉策略。

編號 05GE25062 的土樣在自由排水情境下，作物根系區域的平均田間張力為-587.03 cm，第二次循環灌溉各灌溉強度之灌溉參數模擬結果列於表 2。另也以作物根系區域 (土壤深度 0 ~ 30 cm) 為一系統，進行灌溉循環總時間內的水平衡分析。由作物與土壤水平衡分析示意圖 (圖 6) 可以知道進出系統的水量，而流進流出系統的水量關係式為水平衡方程式 $(In - Out = \Delta S)$，其中 ΔS 為系統水分變化量[L]。第二次循環灌溉各灌溉強度的水平衡分析結果列於表 3，表中進出水量誤差的計算公式為 $In - Out - \Delta S$。

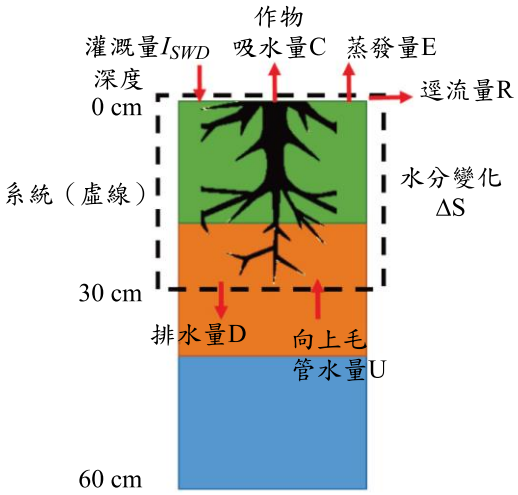

圖 6　作物與土壤水平衡示意圖

表 2　第二次循環灌溉各灌溉強度之灌溉參數模擬結果

i/Ks_1	灌溉強度 (cm/day)	灌溉量(cm)	灌溉時間(hr)	灌溉期距(hr)	循環灌溉總時間(hr)
100	448.66	1.78	0.09	89.93	90.02
50	224.33	1.78	0.19	115.27	115.46
10	44.87	1.78	0.95	143.77	144.72
5	22.43	1.78	1.90	140.37	142.27
1	4.49	1.78	9.51	133.41	142.92
0.5	2.24	1.78	19.02	124.67	143.69
0.1	0.45	1.77	94.75	54.45	149.20
***0.05**	0.22	1.78	190.73	0.00	190.73
***0.01**	0.04	1.78	953.69	0.00	953.69

註：*符號代表無法循環灌溉之灌溉強度，僅進行一次灌溉模擬，模擬至灌溉時間結束。

表 3　第二次循環灌溉各灌溉強度之水平衡分析

i/Ks_1	In		Out				ΔS	進出水量誤差 (cm)
	灌溉量 (cm)	根系底部向上毛管水量(cm)	逕流量 (cm)	根系底部排水量(cm)	蒸發量 (cm)	作物吸水量 (cm)	土壤水分變化量(cm)	
100	1.78	0.10	0.77	0.07	0.41	0.69	0.00	-0.07
50	1.78	0.16	0.40	0.16	0.53	0.89	0.00	-0.04
10	1.78	0.26	0.00	0.27	0.67	1.12	0.00	-0.02
5	1.78	0.25	0.00	0.27	0.65	1.10	0.00	0.00
1	1.78	0.24	0.00	0.26	0.66	1.10	0.00	0.00
0.5	1.78	0.23	0.00	0.24	0.66	1.11	0.00	0.00
0.1	1.77	0.13	0.00	0.06	0.69	1.15	0.00	0.00
*0.05	1.78	0.47	0.00	0.00	0.88	1.43	-0.03	-0.03
*0.01	1.78	1.77	0.00	0.00	2.10	3.40	-1.90	-0.04

註：*符號代表無法循環灌溉之灌溉強度，僅進行一次灌溉模擬，模擬至灌溉時間結束。

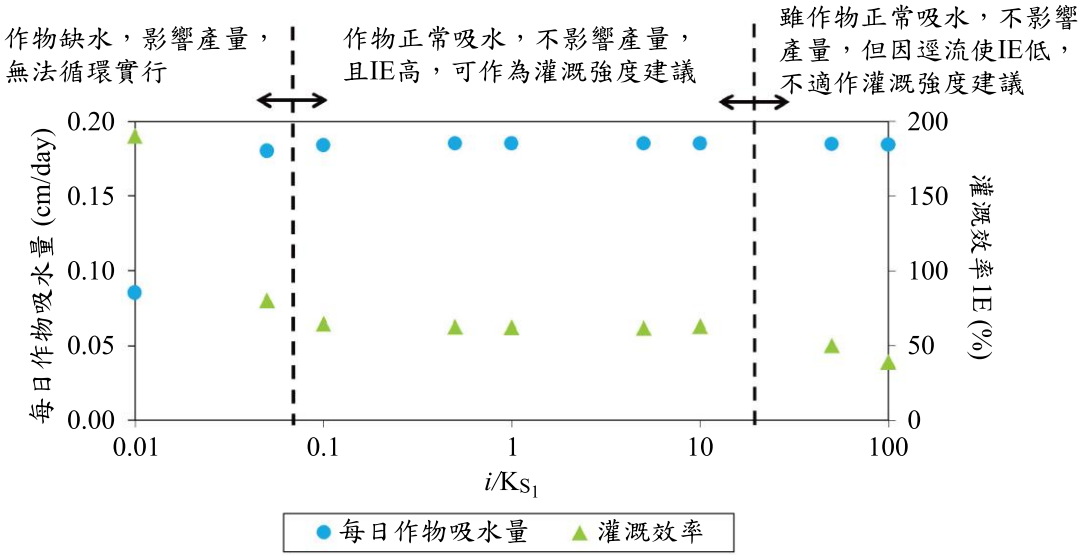

圖 7 每日作物吸水量 (反映產量) 及灌溉效率評估灌溉強度之適用性

由表 2、表 3 的結果可知，i/Ks_1 為 100 ~ 0.1 時 (灌溉強度為 448.66 ~ 0.45 cm/day)，仍可進行循環灌溉，土壤含水量近無變化，因此 ΔS 為 0。i/Ks_1 為 0.05 ~ 0.01 時 (灌溉強度為 0.22 ~ 0.04 cm/day)，灌溉期距為 0，代表該灌溉強度太小，已如圖 5 無法循環灌溉，而 ΔS 也呈現負值，代表土壤水分在灌溉後更加缺水了。綜整各灌溉強度的水平衡分析，進出水量誤差皆甚小，代表系統的水量有達成進出平衡，而產生進出水量誤差的原因，可能為 ΔS 的計算採土壤深度 0、10、20、30 cm 平均含水量，該平均方式對 ΔS 的計算上產生了些微誤差。

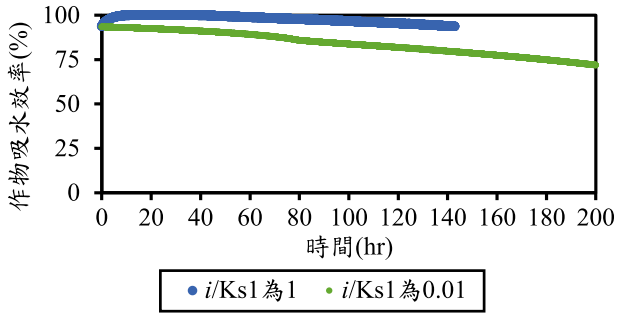

圖 8 比較不同灌溉強度一次循環灌溉過程中的作物吸水效率時序變化

3.2 以模擬結果評估出合適灌溉策略

接續以上述的模擬結果估算出產量及田間灌溉效率來評估挑選合適的灌溉強度及對應策略。首先從產量著手評估，因產量可由每日作物吸水量間接得出，因此繪出不同灌溉強度 (i/Ks_1) 及每日作物吸水量的關係 (圖 7 藍點) 來做分析。可以發現當 i/Ks_1 為 0.01 ~ 0.05 時，每日作物吸水量明顯下降，代表這些灌溉強度下，作物產量減少許多；另也因這些灌溉強度太小而無法進行循環灌溉。當 i/Ks_1 為 0.1 ~ 100 時，每日作物吸水量近乎相同 (約 0.184 ~ 0.185 cm/day)，代表這些灌溉強度下，作物可以正常吸水，不影響產量；另也因這些灌溉強度較大而可以進行循環灌溉。

此外圖 8 為檢視充足及不足的灌溉強度下，一次循環灌溉過程中的作物吸水效率時序變化，i/Ks_1 為 1 (藍點) 的灌溉過程，第 0 小時作物感受缺水壓力開始灌溉，第 9.5 小時灌溉結束，第 143 小時再次感受缺水壓力；而 i/Ks_1 為 0.01 (綠點) 的灌溉過程，第 0 小時作物感受缺水壓力開始灌溉，第 1.2 小時作物很快再次感受缺水壓力灌溉，而因灌溉強度太小至 200 小時仍未灌溉結束。由圖可以發現充足的灌溉強度下，作物吸水效率高且穩定，代表土壤水分充足，可供作物穩定吸水；而不足的灌溉強度會使灌溉過程中作物吸水效率逐漸下降，代表土壤缺水，作物承受很大的缺水壓力。

接著由灌溉效率進行評估，不同灌溉強度 (i/Ks_1) 及灌溉效率關係同繪於圖 7 (綠三角)。由圖可以發現當 i/Ks_1 為 0.01 ~ 0.05 時，因灌溉強度小，灌溉及作物吸水時間長，導致作物吸水量較大，灌溉效率較其他灌溉強度高。灌溉效率甚至會有高於 100 %情況，原因為作物不只吸收灌溉的水，也吸收原始留於土

壤內的水，更表示作物吸水速度已經大於灌溉強度，作物會越來越缺水。如同圖 8 之 i/Ks_1 為 0.01 情境顯示灌溉強度太小時作物會承受很大的缺水壓力。

當 i/Ks_1 為 0.1 ~ 100 時，依灌溉效率高低可以分為兩部分，一為 i/Ks_1 為 50 ~ 100，該灌溉強度範圍之灌溉效率偏低，且灌溉強度越大，灌溉效率越低；二為 i/Ks_1 為 0.1 ~ 10，該灌溉強度範圍之灌溉效率較高且近乎一致，大多在 61 ~ 62 %之間，其中 i/Ks_1 為 0.1 時，灌溉效率有微幅增加，約 64 %。上述結果之原因可以從灌溉效率計算方式及水平衡分析來看，因各灌溉強度一次循環灌溉的總灌溉量皆相同，因此一次循環灌溉的作物總吸水量成為關鍵因素。前述的作物總吸水量與土壤水的進出平衡有關，無法供予作物吸收之水淨損失量愈多，作物總吸水量愈少，會導致灌溉效率愈低，其中無法供予作物吸收之水淨損失量為逕流量 (R)、根系底部水流通量 (D-U) 及蒸發量 (E) 加總。

本研究更進一步做出不同灌溉強度下，系統 (作物根系區域) 的逕流量、根系底部水流通量及蒸發量進出分析 (圖 9)，為了找出 i/Ks_1 為 0.1 ~ 100 範圍內，不同灌溉強度造成灌溉效率偏高偏低之主要因素為何。由圖 9 可以發現，當 i/Ks_1 為 50 ~ 100 時，因產生逕流使得水淨損失量較多，因此作物總吸水量會較少，進而導致灌溉效率偏低；當 i/Ks_1 為 0.1 ~ 10 時，因無產生逕流使得水淨損失較少，因此作物總吸水量會較多，進而導致灌溉效率偏高。另外也發現 i/Ks_1 為 0.1 ~ 10 因水淨損失量相近而使灌溉效率近乎一致 (大多 61 ~ 62 %)，其中 i/Ks_1 為 0.1 時，因灌溉強度稍小，根系底部排水量少於向上毛管水量，水淨損失會少一些，導致灌溉效率稍高一些 (64 %)。

綜合來說，灌溉強度太大，雖然不影響產量，但因土壤會產生逕流使水淨損失量增加，導致灌溉效率偏低，且還有可能因土壤在大量的水中浸泡，造成作物根系缺氧。灌溉強度太小，無法執行循環灌溉，

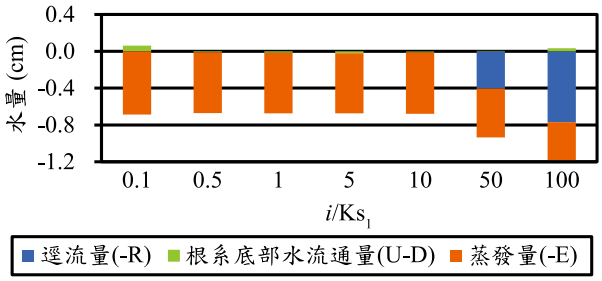

圖 9　不同灌溉強度下，系統 (作物根系區域) 的逕流量、根系底部水流通量及蒸發量進出分析 (流入系統為正，流出系統為負)

且灌溉過程中會造成作物缺水使產量減少，雖然灌溉強度小有很高的灌溉效率，但不納入灌溉強度及策略之建議。因此僅有居中之灌溉強度合適進行循環灌溉，不影響產量又可以有較高的灌溉效率。

3.3 各土壤質地合適之灌溉策略制定結果

六類壤土質地土壤的統計地點數量、平均 Ks_1 及根系區域平均田間張力列於表 4，居中且合適之灌溉強度、時間及期距列於表 5。表 5 中的灌溉強度、時間及期距皆可供農民作灌溉柑橘類果樹之參考，可以發現大多數的壤土質地土壤，合適灌溉強度之上限約 i/Ks_1 為 5，下限約 i/Ks_1 為 0.05，但該上下限仍會隨不同土壤質地有些許變化。

接著將表 5 之灌溉強度、時間及期距進行迴歸，得出六類壤土質地土壤合適之灌溉強度、時間及期距迴歸公式 (表 6)，各公式經統計之判定係數 (Coefficient of determination，記為 R^2) 皆接近 1。若農民在壤土質地土壤灌溉，而噴灌灑水器強度也在合適灌溉強度範圍內 (i/Ks_1 約為 5 至 0.05)，可依據土壤質地及噴灌灑水器的強度，代入表 6 的公式得出灌溉時間及期距，得出合適灌溉策略。

表 4　六類壤土質地土壤的統計地點數量、平均 Ks_1 及根系區域平均田間張力

土壤質地	統計地點數量	平均 Ks_1 (cm/day)	根系區域 平均田間張力(cm)
坋質黏壤土	8	4.46	-627.51
坋質壤土	1	6.82	-887.15
黏質壤土	2	10.18	-781.35
壤土	3	12.79	-690.32
砂質黏壤土	2	92.06	-777.85
砂質壤土	2	32.04	-990.75

表 5　六類壤土質地土壤合適之灌溉強度、時間及期距

i/Ks_1	灌溉參數	坋質黏壤土	坋質壤土	黏質壤土	壤土	砂質黏壤土	砂質壤土
	灌溉強度 (cm/day)	-	-	-	-	-	1602.19
50	灌溉時間 (hr)	-	-	-	-	-	0.01
	灌溉期距 (hr)	-	-	-	-	-	75.82
	灌溉強度 (cm/day)	-	68.17	-	-	-	320.44
10	灌溉時間 (hr)	-	0.92	-	-	-	0.06
	灌溉期距 (hr)	-	221.01	-	-	-	69.33
	灌溉強度 (cm/day)	22.31	34.09	50.88	63.97	460.28	160.22
5	灌溉時間 (hr)	1.88	1.83	0.98	0.68	0.05	0.13
	灌溉期距 (hr)	140.52	220.17	163.50	143.13	76.07	75.13
	灌溉強度 (cm/day)	4.46	6.82	10.18	12.79	92.06	32.04
1	灌溉時間 (hr)	9.40	9.17	4.91	3.42	0.24	0.63
	灌溉期距 (hr)	132.79	214.44	159.21	139.26	75.04	71.33
	灌溉強度 (cm/day)	2.23	3.41	5.09	6.40	46.03	16.02
0.5	灌溉時間 (hr)	18.79	18.32	9.81	6.84	0.48	1.25
	灌溉期距 (hr)	123.80	206.51	155.00	135.96	75.54	71.12
	灌溉強度 (cm/day)	0.45	0.68	1.02	1.28	9.21	3.20
0.1	灌溉時間 (hr)	93.33	91.20	48.94	34.08	2.40	6.26
	灌溉期距 (hr)	57.87	142.61	120.59	112.59	72.48	66.28
	灌溉強度 (cm/day)	-	0.34	0.51	0.64	4.60	1.60
0.05	灌溉時間 (hr)	-	180.98	97.40	67.58	4.81	12.50
	灌溉期距 (hr)	-	64.37	78.53	88.41	70.17	60.89
	灌溉強度 (cm/day)	-	-	-	-	0.92	0.32
0.01	灌溉時間 (hr)	-	-	-	-	23.92	61.80
	灌溉期距 (hr)	-	-	-	-	54.00	17.04
	灌溉強度 (cm/day)	-	-	-	-	0.46	-
0.005	灌溉時間 (hr)	-	-	-	-	47.55	-
	灌溉期距 (hr)	-	-	-	-	33.69	-

表 6 六類壤土質地土壤合適之灌溉強度、時間及期距的迴歸公式

土壤質地	灌溉參數迴歸公式，單位：灌溉強度(i) (cm/day)、灌溉時間($t_{irrigation}$)(hr)、灌溉期距($t_{interval}$)(hr)
坋質黏壤土	$t_{irrigation} = 41.79 / i$ $t_{interval} = -0.9 t_{irrigation} + 141.41$
坋質壤土	$t_{irrigation} = 62.1 / i$ $t_{interval} = -0.87 t_{irrigation} + 222.1$
黏質壤土	$t_{irrigation} = 49.72 / i$. $t_{interval} = -0.88 t_{irrigation} + 163.79$
壤土	$t_{irrigation} = 43.46 / i$ $t_{interval} = -0.81 t_{irrigation} + 142.1$
砂質黏壤土	$t_{irrigation} = 22 / i$ $t_{interval} = -0.88 t_{irrigation} + 75.26$
砂質壤土	$t_{irrigation} = 19.96 / i$ $t_{interval} = -0.9 t_{irrigation} + 72.7$

3.4 不同灌溉強度下 CN 值變化之結果與討論

本研究以編號 05GE25062 的土樣為例，以 HYDRUS-1D 設定不同灌溉強度進行灌溉模擬後，

利用逕流量及灌溉量得出 CN 值，進而得出灌溉強度與 CN 值之關係 (圖 10)。圖 10 中 CN 值會隨著灌溉強度增加而增加，CN 值的變化範圍為 75 ~ 95 間。因不同灌溉強度的灌溉量皆相近，因此產生 CN 值隨灌溉強度變化的主因為灌溉強度，灌溉強度越強，產生逕流量也會越多，導致 CN 值越大。

接著將前述得出的 CN 值，與美國農業部 (United States Department of Agriculture, USDA) 常用之查表 CN 值 (Cronshey, 1986) 做比較，查表得出的 CN 值為 82，發與本研究的模擬結果相符。但查表的 CN 值僅以土壤質地及土地利用得出，並未考量到灌溉強度之影響，因此可能會導致 CN 值產生誤差。若作物模式使用這些有誤差之 CN 值作為灌溉量與逕流量之推估，進而進行實際灌溉操作時會造成農業用水使用浪費或灌溉不足的問題，因此建議未來可以針對不同土壤質地的灌溉強度與 CN 值關係進行深入探討。

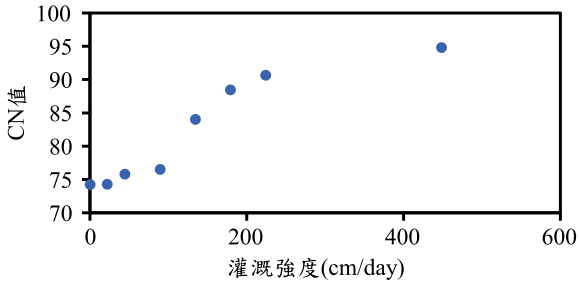

圖 10　灌溉強度-CN 值變化圖

四、結論

本研究利用 HYDRUS-1D 模式搭配農試所提供之現有臺灣土壤調查數據，得出每一個土壤調查數據地點種植柑橘類果樹合適的灌溉強度、時間及期距，並迴歸出六類壤土質地土壤合適之灌溉強度、時間及期距的迴歸公式，初步制定出合適之灌溉策略。在模擬過程中，發現壤土質地土壤若灌溉強度太大 (i/Ks_1 約超過 5)，會產生逕流損失降低田間灌溉效率；灌溉強度太小 (i/Ks_1 約低於 0.05)，則會造成作物缺水使產量減少。更從模擬發現灌溉強度越強，產生逕流量也會越多，導致 CN 值越大，因此若直接使用美國農業部常用之查表 CN 值 (由土壤質地及土地利用查出) 會有誤差，且又若作物模式使用這些有誤差之 CN 值作為灌溉量與逕流量之推估，進而進行實際灌溉操作時會造成農業用水使用浪費或灌溉不足的問題。

參考文獻

1. Abdelbaki, A. M., Youssef, M. A., Naguib, E. M., Kiwan, M. E., & El-giddawy, E. I. (2009). Evaluation of Pedotransfer Functions for Predicting Saturated Hydraulic Conductivity for US Soils. Paper Presented at the 2009 Reno, Nevada, June 21-June 24, 2009.
2. Brito, A. d. S., Libardi, P. L., Mota, J. C. A., & Moraes, S. O. (2011). Field Capacity Estimation Based on Retention Curve and Soil Water Flux Density. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *35*(6), 1939-1948.
3. Cronshey, R. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds. Retrieved from de Oliveira, R. A., Ramos, M. M., & de Aquino, L. A. (2015). Irrigation Management. In *Sugarcane* (pp. 161-183): Elsevier.
4. Feddes, R., Kowalik, P., & Zaradny, H. (1978). Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, 9-30.
5. Horton, R. E. (1939). Analysis of Runoff-plat Experiments with Varying Infiltration-capacity. Eos, Transactions American Geophysical Union, 20(4), 693-711.
6. Jabro, J., Evans, R., Kim, Y., & Iversen, W. (2009). Estimating in Situ Soil-water Retention and Field Water Capacity in Two Contrasting Soil Textures. *Irrigation Science*, *27*(3), 223-229.
7. Lena, B. P., Bondesan, L., Pinheiro, E. A. R., Ortiz, B. V., Morata, G. T., & Kumar, H. (2022). Determination of Irrigation Scheduling Thresholds Based on HYDRUS-1D Simulations of Field Capacity for Multilayered Agronomic Soils in Alabama, USA. *Agricultural Water Management*, *259*, 107234.
8. Mallants, D., Phogat, V., Oliver, D., Ouzman, J., Beiraghdar, Y., & Cox, J. (2019). Sustainable Expansion of Irrigated Agriculture and Horticulture in Northern Adelaide Corridor: Task 2-Modelling Nutrient and Chemical Fate to Support the Long-term Sustainability of the Use of Recycled Water. Goyder Institute for Water Research Technical Report Series (19/15).
9. Mualem, Y. (1976). A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media.

Water Resources Research, 12(3), 513-522. doi:10.1029/WR012i003p00513.

10. Raes, D. (2016). Introducing AquaCrop. Retrieved July 15, 2022 from https://www.fao.org/documents/card/en/c/ba35b63c-596a-467d-95fe-dfcfca6da2a9/.
11. Raj, R., Suradhaniwar, S., Nandan, R., Jagarlapudi, A., & Walker, J. (2019). Drone-based Sensing for Leaf Area Index Estimation of Citrus Canopy. Paper Presented at the International Conference on Unmanned Aerial System in Geomatics.
12. Richards, L. (1931). Soil-water Conduction of Liquids in Porous Mediums. *Physics*, 1, 318-333.
13. Richards, L., & Weaver, L. (1944). Moisture Retention by Some Irrigated Soils as Related to Soil Moisture Tension. *J. agric. Res, 69*(6), 215-235.
14. Romano, N., Santini, A., Dane, J., & Topp, G. (2002). Water Retention and Storage: Field. *Methods of soil analysis, Part, 4*, 721-738.
15. Simunek, J., van Genuchten, M. T., & Sejna, M. (2008). Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 587-600.
16. Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
17. Zheng, C., Lu, Y., Guo, X., Li, H., Sai, J., & Liu, X. (2017). Application of HYDRUS-1D Model for Research on Irrigation Infiltration Characteristics in Arid Oasis of Northwest China. *Environmental Earth Sciences, 76*(23), 1-10.
18. 林俐玲、蘇煒哲、蔡義誌 (2008)。「不同土地利用下土壤飽和水力傳導度與粗孔隙之探討」，水土保持學報 40 (2)：195-204 (2008)。
19. 葉信富、李振誥、陳忠偉、張格綸 (2008)。「評估蒸發皿係數以推估台灣南部地區蒸發散量之研究」，農業工程學報，54(3)，27-35。
20. 劉東憲、蔡正賢 (2018)。「活用施肥及灌溉方式可強化柑橘根系生長」，行政院農業委員會農業知識庫。取自：https://kmweb.coa.gov.tw/knowledgebase.php?id=380387.