

灌溉方式對新開發礫質田區玉米節水與產量之影響

EFFECTS OF IRRIGATION METHODS ON WATER-SAVING AND YIELD OF MAIZE IN A NEWLY DEVELOPED GRAVELLY FIELD

國立屏東科技大學
土木工程系
助理教授

陳智謀
Zhi-Mou Chen

國立屏東科技大學
研究總中心
講師級研究員

巫金松
Chin-Song Wu

國立屏東科技大學
農園生產系
助理教授

林資哲
Tzu-Che Lin

國立屏東科技大學
土木工程系
特聘教授

葉一隆*
Yi-Lung Yeh

摘要

玉米為臺灣重要的作物，玉米栽培所需水量依生育期不同而異，在生育初期須保持適當水分，開花期所需水量最多。在面對氣候變遷之灌溉供水壓力，探討節水灌溉為當前重要議題。

本文利用農業部農田水利署於台南市大內區新開發的灌溉試驗推廣教育中心之試驗場種植食用玉米，比較傳統畦溝灌溉與穿孔管灌溉方式之節水效益，並利用 CropWat 模式模擬灌溉時程與灌溉水量，再與試驗結果比較。因本試驗區之土壤質地含大量礫石，無法以機械化耕種，只能利用人工耕作，致使玉米的產值與產量受影響。由試驗結果顯示穿孔管灌溉水量只為畦溝灌溉的 57.6%，可節省 42.4% 的灌溉水量。由農藝性狀調查可知穿孔管灌區之株高與稈徑均高於畦溝灌溉區，兩種灌溉方式之玉米穗長、無皮穗重、百粒重有顯著性差異，而穿孔管灌溉區的平均百粒重約為畦溝灌溉區的 1.12 倍，但因穿孔管灌溉區之面積為畦溝灌溉區之 1.36 倍，換算成每公頃產量則穿孔管灌溉區為畦溝灌溉區之 99.1%，兩者無顯著性差異。由 CropWat 模式分析與試驗結果比較可知，穿孔管灌溉與畦溝灌溉之灌溉水量分別為模式計算結果之 -29.7% 與 1.7%，而灌溉時程則為 4 月中旬與下旬，現地試驗與模擬結果亦相當吻合。

關鍵詞：新開發田區、食用玉米、畦溝灌溉、穿孔管灌溉、氣候變遷。

* 通訊作者，國立屏東科技大學土木工程系特聘教授

91201 屏東縣內埔鄉學府路 1 號 · yalung@mail.npust.edu.tw

EFFECTS OF IRRIGATION METHODS ON WATER-SAVING AND YIELD OF MAIZE IN A NEWLY DEVELOPED GRAVELLY FIELD

Zhi-Mou Chen

National Pingtung University of
Science and Technology
Department of Civil Engineering

Chin-Song Wu

National Pingtung University of
Science and Technology
General Research Service Center

Tzu-Che Lin

National Pingtung University of
Science and Technology
Department of Plant Industry.

Yi-Lung Yeh*

National Pingtung University of
Science and Technology
Department of Civil Engineering

ABSTRACT

Maize is an important crop in Taiwan, with its water requirements varying across different growth stages. Adequate soil moisture is essential during the early vegetative stage, while the highest water demand occurs during the flowering stage. In light of increasing irrigation water stress due to climate change, exploring water-saving irrigation strategies has become a critical issue.

This study was conducted at the experimental site of the newly established Irrigation Experimental and Extension Education Center, developed by the Irrigation Agency of the Ministry of Agriculture in Danei District, Tainan City, to cultivate edible maize. The primary objective was to evaluate the water-saving performance of perforated pipe irrigation relative to conventional furrow irrigation. In addition, the CropWat model was employed to simulate irrigation schedules and water requirements, with model outputs subsequently compared against field observations. The experimental field was characterized by a high gravel content in the soil profile, which precluded mechanized cultivation and necessitated manual farming practices, thereby constraining both crop productivity and yield potential. Field measurements demonstrated that the volume of irrigation water applied under perforated pipe irrigation accounted for only 57.6% of that required for furrow irrigation, corresponding to a 42.4% reduction in water use. Agronomic trait investigations indicated that plant height and stem diameter in perforated pipe-irrigated plots exceeded those in furrow-irrigated plots. Significant differences were observed between the two irrigation methods with respect to ear length, husk-free ear weight, and hundred-grain weight. On average, the hundred-grain weight in perforated pipe-irrigated plots was approximately 1.12 times greater than that in furrow-irrigated plots. Nevertheless, given that the perforated pipe-irrigated area was 1.36 times larger than the furrow-irrigated area, the estimated grain yield per hectare under perforated pipe irrigation was 99.1% of that under furrow irrigation, with no statistically significant difference between the two treatments. Comparison between model simulations and experimental results revealed that irrigation

water applications under perforated pipe and furrow irrigation were -29.7% and $+1.7\%$ of the corresponding CropWat model estimates, respectively. Simulated irrigation schedules indicated applications in mid-April and late April, which were in close agreement with the field trial observations.

Keywords: Newly developed farmland, Edible maize, Furrow irrigation, Perforated pipe irrigation, Climate change.

一、前言

降雨是作物生長主要用水來源，有效雨量推估是灌溉用水調配的關鍵因子。受氣候變遷強化的效應，河川逕流與降雨均受影響，可能產生氣溫上升與降雨型態改變，造成水庫配水調配困難或以河川為主要灌溉水源之灌區面臨高頻率得缺水現象^[1]。因灌溉供水不足或高溫環境，對作物栽培之環境與農業水資源供應威脅，使糧食生產減量，甚至威脅國家安全。另外，在水資源不足時，農業用水常為調配之標的，使灌溉水量不足而停灌或減量供水，使農地休耕或分區減量輪灌，亦威脅作物生產量，並影響作物生產環境，甚至使土壤劣化，生態平衡受創等衝擊。

玉米為臺灣重要的作物，依用途可將玉米區分為食用玉米、硬質玉米和青割玉米，種植區域以臺南市、嘉義縣及雲林縣為主^[2]。玉米栽培所需水量依生育期不同而異，在生育初期須保持適當水分，開花期所需水量最多，在追肥及中耕培土作業前亦須灌溉，以濕潤土壤。在氣候變遷威脅下，農業水資源滿足供應風險增加^[3,4]。許家勝等^[5]指出氣候變遷會影響糧食作物生產，進一步對全球糧食供給造成衝擊。並由分析結果顯示乾旱指數和玉米、小麥產量為正向之關係，而濕度指數對兩者產量則有負面影響，氣溫對於兩者產量亦為負面影響。而提高用水效率是農業節水的有效方法，滴灌是常被採用的節水灌溉技術，覆膜滴灌可增加玉米產量與提高水分利用效率^[6]。不同種植制度的單位灌溉用水量的差異，可提供以優化種植制度來達到降低總灌溉用水量目的，而節水潛力很大程度受灌溉用水量和最低作物產量限制的影響^[7]。Gonçalves *et al.*^[8]以灌溉用水量與灌溉需水量之用水差異為量化主要指標，識別灌溉用水的時空行為，並與作物產量進行比較分析。Wu *et al.*^[9]說明不合理的節水灌溉與鹽分控制會導致土壤鹽鹼化嚴重，降低水資源利用效率。Teshome *et al.*^[10]評估完全灌溉及完全灌溉量之 75%、50%與 25%等 3 種缺水灌溉方式對綠豆與甜玉米的產量影響，結果顯示與完全灌溉相比，3 種缺水灌溉處理都沒有顯著影響兩種作物的產量和產量組成部分。Zhu *et al.*^[11]觀察噴灑灌溉的噴水穿過玉米冠層時水滴直徑的變化，並監測玉米植株的生物形態參數，以探討玉米冠層降低噴水器水滴的動能。Gao *et al.*^[12]評估玉米、棉花和水稻的季節性灌溉用水之關鍵驅動因素，並依此制定最佳灌溉計畫。Wang *et al.*^[13]評估玉米-扁豆間作的缺水灌溉對產量與提高水生產率的影響，分析結果顯示，早期適度缺水灌溉的飼料玉米

和扁豆間作為可行方式。Mari *et al.*^[14]建議在乾旱和半乾旱氣候下，玉米覆蓋黑色塑膠薄膜，可提高糧食產量和水分利用效率，同時減少乾生物量。面臨水資源開發不易及氣候變遷造成缺水問題的威脅，利用節水技術栽培玉米及評估對玉米生產影響為重要議題。

荒石灘地作為重要的後備耕地資源，其開發利用對於保障糧食安全具有重要意義。在荒石灘覆土對於覆土厚度與覆土容重 (Covering soil bulk density) 影響作物生長與灌溉用水量^[15]。李娟等^[16]探討石礫地不同覆土厚度作物耕作層之土壤理化性狀和春玉米產量影響，不同覆土厚度對春玉米株高與生物量影響顯著，覆土厚度不同，直接影響春玉米乾物質積累。Yang *et al.*^[17]探討裸岩礫石地覆土厚度對夏玉米的生理特性影響，由試驗結果顯示覆土厚度 50 cm 對作物的耕作較為適宜，且該處理下作物各項生長指標均優於其他厚度。而土壤質地直接影響灌溉水之使用效率，董起廣等^[18]探討石礫地整治過程中覆土容重對土壤水分入滲的影響，結果顯示覆土容重越大，初始入滲率、穩定入滲率及相同時間內的累積入滲量越小，穩定入滲率與覆土容重之間呈指數負相關關係，與累積入滲量呈線性負相關關係。

CropWat 模式是聯合國糧農組織土地和水利開發部 (Land and Water Development Division of FAO) 所發展之軟體，常用於計算作物各生育期需水量、有效降雨和灌溉計畫等。Surendran *et al.*^[19]使用 CropWat 模式計算不同農業生態區，主要作物的作物需水量、總灌溉需求和灌溉間隔，並與可用水資源量進行比較。王忠波等^[20]利用 Mann-Kendall 趨勢檢驗法分析水稻生育期內需水量變化規律，並利用 CropWat 模式計算水稻各生育期需水量、有效降雨和灌溉需水量，對不同典型年份水稻需水量和有效降雨作耦合度分析，制定水稻灌溉制度。Chung and Nkomozepi^[21]利用政府間氣候變遷專門委員會 (IPCC) 第四次評估報告，GCM 模擬對未來三種不同排放情境，使用 CropWat 模式分析水稻灌溉需水量變化所造成的不確定性。Kuo^[22]利用現地試驗與 CropWat 模式模擬二期作水稻之旬灌溉水量，由分析結果顯示模式模擬與田間試驗之淨灌溉需水量分別為 818 mm 和 848 mm，誤差為 3.54%。Abdul Karim *et al.*^[23]利用遙感和 CropWat 模式估算位於印度 Karnataka 的 Bhadra Command 區主要支渠的水稻作物需水量，而作物需水量的估算取決於氣象因素、土壤類型和作物係數。Bhadra *et al.*^[24]基於水稻根區土壤水量守恆原理，利用 C 和 Visual Basic (VB) 6.0 開發友善的水稻水平衡模式。Kumar *et al.*^[25]基於表面能量平衡演算法的遙感 EEFlux 模式推估大

空間尺度的實際蒸發散量 (Actual evapotranspiration, ETa)，並與 CropWat 模式推估結果比較。Sruthi and Surendran^[26]透過不同水稻種植方法和養分管理，對好氧水稻進行田間試驗，並使用 CropWat 模式比較需氧和厭氧水稻的需水量，結果顯示可節水 36.4%。Nie *et al.*^[27]採用水文頻率法計算豐水年、平水年、枯水年和特旱年之不同水文年，再利用 CropWat 模式計算不同水文年條件下的玉米灌溉制度。Ashine *et al.*^[28]探討在常規、固定和交替溝灌條件下，非充分灌溉對玉米的影響，並使用 CropWat 模式計算作物需水量。分析結果顯示不同非充分灌溉水量對玉米籽粒產量、穗位高度、鮮生物量、百粒重、莖粗和水分生產率均有顯著影響。Pattanaik *et al.*^[29]使用 CropWat 模式及 GIS 軟體計算不同地區的主要作物需水量、灌溉需水量和灌溉制度，研究結果可提供農業部門優化水資源管理策略。

本文利用農業部農田水利署位於台南市大內區之灌溉試驗推廣教育中心試驗田區進行玉米栽培，本場域為新開發之試驗區，對作物栽培條件及適宜性均須建立。因此，本研究首要重點在建立該場域之土壤及試驗環境之基本資料，再依場域之環境條件設置玉米栽培試驗區，進行玉米以穿孔管灌溉栽培之節水效率與產量關係評估，最後利用 CropWat 模式模擬玉米栽培之作物需水量，並與試驗結果比較。

二、研究方法

2.1 研究區域概述

本試驗地點為農業部農田水利署灌溉試驗推廣教育中心 (位置如圖 1 所示) 的試驗區，地址於臺南市大內區二重溪 201 之 50 號 (座標位置為 120.39798, 23.12454)，本中心設置 3 公頃的旱作試驗農場、雜糧

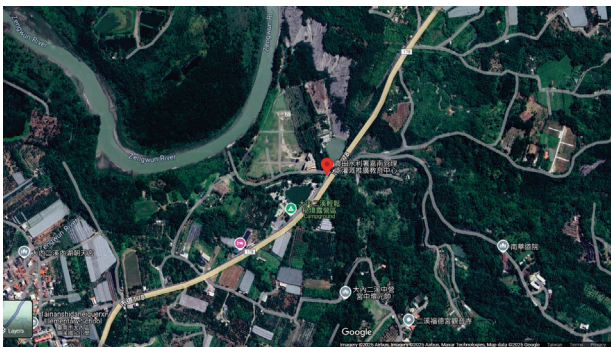


圖 1 農業部農田水利署灌溉試驗推廣教育中心位置圖

試驗田，另設置教導農友使用噴灌、滴灌等節水灌溉設施，以作為推廣節水灌溉之用，場域空拍如圖 2 所示。本文於旱作試驗農場擇一區規劃為玉米種植試驗區，並劃分為穿孔管灌溉區與畦溝灌溉區，試驗區長約為 25.0 m，寬分別約為 9.0 m 與 10.8 m，面積分別約為 225.0 m² 與 270.0 m²，兩區間設置約 2.0 m 間隔之緩衝區，避免灌溉水相互影響。

本試驗區尚未設置農業氣象站，氣象資料選用場域附近之中央氣象署所屬大內站 (C00860) 與環湖 (C10850) 自動站，農業氣象之玉井站 (C20930)，測站位置如圖 3 所示，但環湖站資料缺少甚多，因此不採用。大內站資料包括平均氣溫 (°C)、最高氣溫 (°C)、



圖 2 農業部農田水利署灌溉試驗推廣教育中心空拍圖



資料來源：農業氣象觀測網監測系統

圖 3 試驗區附近之氣象站位置分布

最低氣溫 (°C)、平均風速 (m/s)、降水量 (mm) 與平均相對溼度 (%)。玉井站資料包括平均氣溫 (°C)、最高氣溫 (°C)、最低氣溫 (°C)、平均風速 (m/s)、降水量 (mm)、平均相對溼度 (%) 與累積日射量 (MJ/m²)。大內站與玉井站分別距離本試驗區約 3.87 km 及 6.42 km，試驗區之平均氣溫 (°C)、最高氣溫 (°C)、最低氣溫 (°C)、平均風速 (m/s)、降水量 (mm) 與平均相對溼度 (%) 以大內站與玉井站的資料，利用反距離權重法 (Inverse distance weighting) 推求各站權重後，再計算試驗區之氣象參數值。反距離權重法計算如式 (1) 所示。

$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{d_i}} \dots\dots\dots(1)$$

其中 w 為氣象站參數之權重， d 為試驗區至氣象站距離 (km)。

而試驗區之累積日射量 (MJ/m²) 直接採用玉井站的資料，但大內站與玉井站均未觀測累積日照時數 (hr)，因此本文選用臺南農改場站 (72N100) 之累積日射量與玉井站之觀測值比值，再依此比值乘以臺南農改場站之累積日照時數，以推求試驗區之累積日照時數。

2.2 試驗田區環境基本資料建立與灌溉系統設置

本文玉米種植區域在灌溉試驗推廣教育中心試驗場之短期旱作栽培區 (位置如圖 2 所示)，該區域的土壤環境基本資料建立將於試驗區取樣進行土壤質地與土壤肥力分析，並於現地進行單環入滲試驗，量測土壤水分滲透係數。

田區灌溉系統分為畦溝灌溉及穿孔管灌溉兩種，於田區配置分割後，設置道路區及玉米種植區，再將玉米種植區分為畦溝灌溉區及穿孔管灌溉區，兩區間設置緩衝區，並於播種後配置灌溉管路系統及水表，而畦溝灌溉係玉米播種後，在兩行間開溝，穿孔管灌溉配置係於兩行玉米間鋪設穿孔管路，以進行灌溉及監測灌溉水量。

2.3 玉米栽種與管理

本試驗區自開發到玉米種植過程如圖 4 所示，圖 4(1) 為試驗區未開發前狀態，區域長滿雜草。圖 4(2) 為田區翻耕及礫石篩除作業，雖然利用機械篩除及人工撿拾礫石，但仍無法將田中礫石完全清除，致使農業機械無法下田作業。圖 4(3) 為田區播種路線及灌溉配線規劃，兩種灌溉方式間保留緩衝區，避免灌溉水交互影響。圖 4(4) 為利用播種機進行人工播種，因田區存在礫石，播種間距無法有效控制。圖 4(5) 為田區灌溉系統配置，包括穿孔管及利用人工開溝建立畦溝灌溉渠道。圖 4(6) 為玉米栽培生長情形。

玉米栽種之農藝性狀調查包括營養生長期、抽穗



圖 4 試驗田區開發與玉米栽種流程

期、吐絲期、灌漿期、成熟收穫期等時期之株高、莖稈徑、充實穗長、穗徑、果穗子粒行數、百粒重、產量等項目。而穿孔管灌溉節水效率評估則紀錄玉米期作之灌溉用水量後，比較畦溝灌與穿孔管灌溉之節水效率，並分析對產量之影響。

2.4 CropWat 模式介紹

本文利用 CropWat 8.0 模式推估玉米種植之作物需水量及制定灌溉計畫，CropWat 模式氣候模組 (Climate/ET₀) 的輸入參數包括最低氣溫 (°C)、最高氣溫 (°C)、平均相對溼度 (%)、平均風速 (m/s) 與累積日照時數 (hours) 等，用於計算累積日射量 (Solar radiation, MJ/m²/day) 與參考作物蒸發散量 (ET₀, mm/day)。模式之累積日射量計算如式 (2) 所示，參考作物蒸發散量採用 Penman-Monteith 方程式計算，公式如式 (3) 所列^[30]。

$$R_s = \left(a_s + b_s \left(\frac{n}{N} \right) \right) R_a \dots\dots\dots(2)$$

其中 R_s 為日射量 (MJ/m²/day)，a_s 與 b_s 為地區性的經驗係數，n 為當日實際日照時數 (hours)，N 為當日最長可能日照時數 (hours)，R_a 為大氣層頂外太陽輻射 (Extraterrestrial radiation, MJ/m²/day)。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots\dots\dots(3)$$

其中 ET₀ 為參考作物蒸發散量 (mm/day)，R_n 為作物表面淨輻射 (MJ/m²/day)，G 為土壤熱通量 (MJ/m²/day)，u₂ 為 2m 高處之日平均風速 (m/s)，e_s 為飽和水汽壓 (kPa)，e_a 為實際水汽壓 (kPa)，Δ 為飽和水汽壓與溫度曲線的斜率 (kPa/°C)，γ 為乾濕表常數 (kPa/°C)，T 為計算時段內的平均氣溫 (°C)。

降雨模組 (Rain) 輸入降水量 (mm) 來計算有效與量 (mm)，有效雨量計算方式包括固定百分比 (Fixed percentage)、可靠降雨 (Dependable rain)、經驗公式 (Empirical formula)、美國農業部土壤保持局 (USDA Soil Conservation Service, SCS method) 等 4 種^[30, 31]，本文利用美國農業部土壤保持局 SCS 法計算有效雨量，計算公式如式 (4) 所列。

$$ER(t) = \frac{R(t) \times (125 - 0.2 \times 3 \times R(t))}{125} \quad \text{當 } R \leq 250 / 3 \text{ mm}$$

$$ER(t) = 125 / 3 + 0.1 \times R(t) \quad \text{當 } R > 250 / 3 \text{ mm}$$

.....(4)

其中 ER 為有效雨量 (mm)，R 為降雨量 (mm)。

作物參數模組 (Crop) 輸入項目包括作物名稱 (Crop Name)、播種日期 (Planting date)、作物係數 (K_c Values)、作物生長階段天數 (Stage, days)、根系深度 (Rooting depth, m)、臨界耗竭率 (Critical depletion, fraction)、產量反應係數 (Yield response factor)。作物生育期的需水量 (ET_c) 利用參考作物蒸發散量與作物係數計算，即

$$ET_c = ET_0 \times K_c \dots\dots\dots(5)$$

根系深度用於計算作物可利用的總有效土壤水量 (Total available soil water, TAW)，即

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \dots\dots\dots(6)$$

其中 TAW 為根系區之總有效土壤水量 (mm)，θ_{FC} 為田間含水量 (m³/m³)，θ_{WP} 為永久萎凋點含水量 (m³/m³)，Z_r 為根系深度 (m)。臨界耗竭率為易利用水量 (Readily available water, mm) 與根系區之總有效土壤水量之比值，產量反應係數 (K_y) 用於表示缺水之作物產量損失，即

$$K_y = \frac{1 - \frac{Y_a}{Y_m}}{1 - \frac{ET_a}{ET_c}} \dots\dots\dots(7)$$

其中 Y_a 及 Y_m 分別表示實際作物產量與預期最大作物產量，ET_a 及 ET_c 分別表示實際作物蒸發散量與標準條件下之作物蒸發散量。

土壤參數 (Soil) 輸入項目包括土壤名稱 (Soil Name)、總可利用土壤水分 (Total available soil moisture, mm/m)、最大降雨入滲率 (Maximum rain infiltration rate, mm/day)、最大根系深度 (Maximum rooting depth, cm)、初始土壤耗水比例 (Initial soil moisture depletion, %)、初始可利用土壤水分 (Initial available soil moisture, mm/m)，模式利用土壤參數計算土壤水分平衡與灌溉需水量。

本文彙整試驗區所量測玉米種植數據，利用 CropWat 模式模擬玉米種植之灌溉時程與灌溉水量，再與試驗結果比較。

三、結果分析與討論

3.1 試驗田區土壤環境取樣分析

為建立試驗田區作物生長之土壤環境資料，於田

區的前、後段取兩點土壤樣本進行比重計量測分析，試驗結果得知土壤比重 (Specific weight of soil) 分別為 2.64 與 2.61，平均為 2.625。將此兩點之土壤篩除礫石後，進行土壤質地分析，根據美國農業部制粒徑分級的土壤質地分類三角圖可知，本試驗區之土壤質地為壤土 (loam)，如圖 5 中之標示點。

於田區進行雙環入滲試驗，試驗結果可得土壤水分入滲曲線如圖 6 所示，土壤水分入滲方程式為 $y=3.0437x^{-1.188}$ ，其中 x 表示時間 (min)， y 為入滲率 (mm/min)。

另於穿孔管灌溉區及畦溝灌溉區的前後點位取樣進行土壤肥力分析，試驗結果如表 1 所列。穿孔管灌溉區的前取樣點之磷、鉀、鈉、鈣、鎂、錳、銅、鋅等

含量均高於另外 3 個取樣點量測結果，尤其是鈉含量

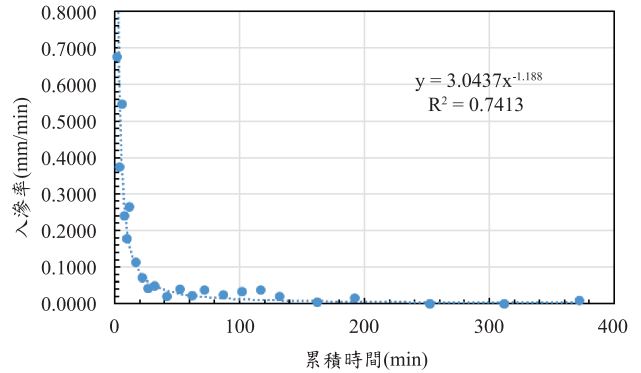


圖 6 試驗區雙環入滲試驗之土壤水分入滲曲線

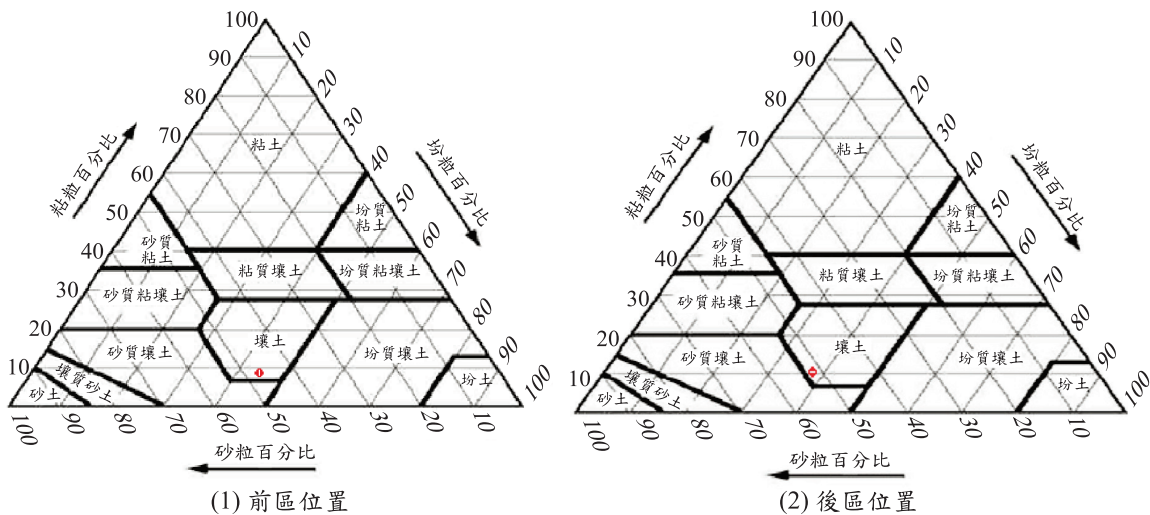


圖 5 試驗區之土壤質地三角圖

表 1 試驗田區肥力試驗分析結果

點位	pH	電導度	有機質	有機氮	磷	鉀	鈉
		(mS/cm)	(%)	(%)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
穿孔管灌溉區(前)	8.31	0.09	1.61	0.093	6.5	38	8.80
穿孔管灌溉區(後)	8.29	0.08	1.68	0.097	5.7	26	0.10
畦溝灌溉區(前)	8.34	0.07	1.47	0.085	6.1	29	0.71
畦溝灌溉區(後)	8.24	0.09	1.40	0.081	6.1	31	0.94
平均值	8.29	0.08	1.52	0.088	5.97	28.67	0.58
標準差	0.05	0.01	0.15	0.008	0.23	2.52	0.43
點位	鈣	鎂	鐵	錳	銅	鋅	
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	
穿孔管灌溉區(前)	3,343	253	409	122	1.3	2.5	
穿孔管灌溉區(後)	2,715	180	372	95	1.1	2.0	
溝灌區(前)	2,982	215	417	102	1.0	2.2	
溝灌區(後)	3,229	211	373	101	0.9	2.2	
平均值	2,975.33	202.00	387.33	99.33	1.00	2.13	
標準差	257.06	19.16	25.70	3.79	0.10	0.12	

差異最大。本試驗區原為整片未種植或整建而雜草叢生地，因此此取樣點位土樣分析結果之差異可視為奇異點，不列入整體分析樣本。由 3 個點位分析結果可知田區之 pH 值平均為 8.30，有機質含量為 1.54%，有機氮平均值為 0.088%，磷、鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、錳、銅、鋅等離子平均含量分別為 5.97 mg/kg、28.67 mg/kg、0.58 mg/kg、2,975.33 mg/kg、202.00 mg/kg、387.33 mg/kg、99.33 mg/kg、1.00 mg/kg、2.13 mg/kg。

3.2 玉米栽培與灌溉管理

本試驗種植之玉米品種為雪珍 (如圖 7 所示)，此品種耐熱、耐濕，耐葉斑病，生育強健。穗粒為白色，株高約 150 ~ 170 cm，播種到採收日數於夏作約 65 ~ 75 天，冬作約 75 ~ 105 天。

本試驗於 2025 年 2 月 28 日播種，於 5 月 28 日採收，共計生育期為 90 天。各生育期之灌溉水量如圖 8 所示，於營養生長期之穿孔管灌溉量大於畦溝灌溉量，但生殖生長期及成熟期則相反，穿孔管灌溉量均約為畦溝灌溉量之半。穿孔管與畦溝灌溉於整期作之灌溉用水量分別為 47.3 m³ 及 82.1 m³，穿孔管灌區總灌溉量為畦溝灌溉量之 57.6%，節省 42.4% 的灌溉水量。

4 月 18 日於兩個田區灌溉後，沿玉米莖附近以帶狀方式施灑 40 kg 硫酸銨，其中穿孔管與畦溝灌區分別施灑約 18 kg 及 22 kg。



圖 7 本試驗種植之玉米品種

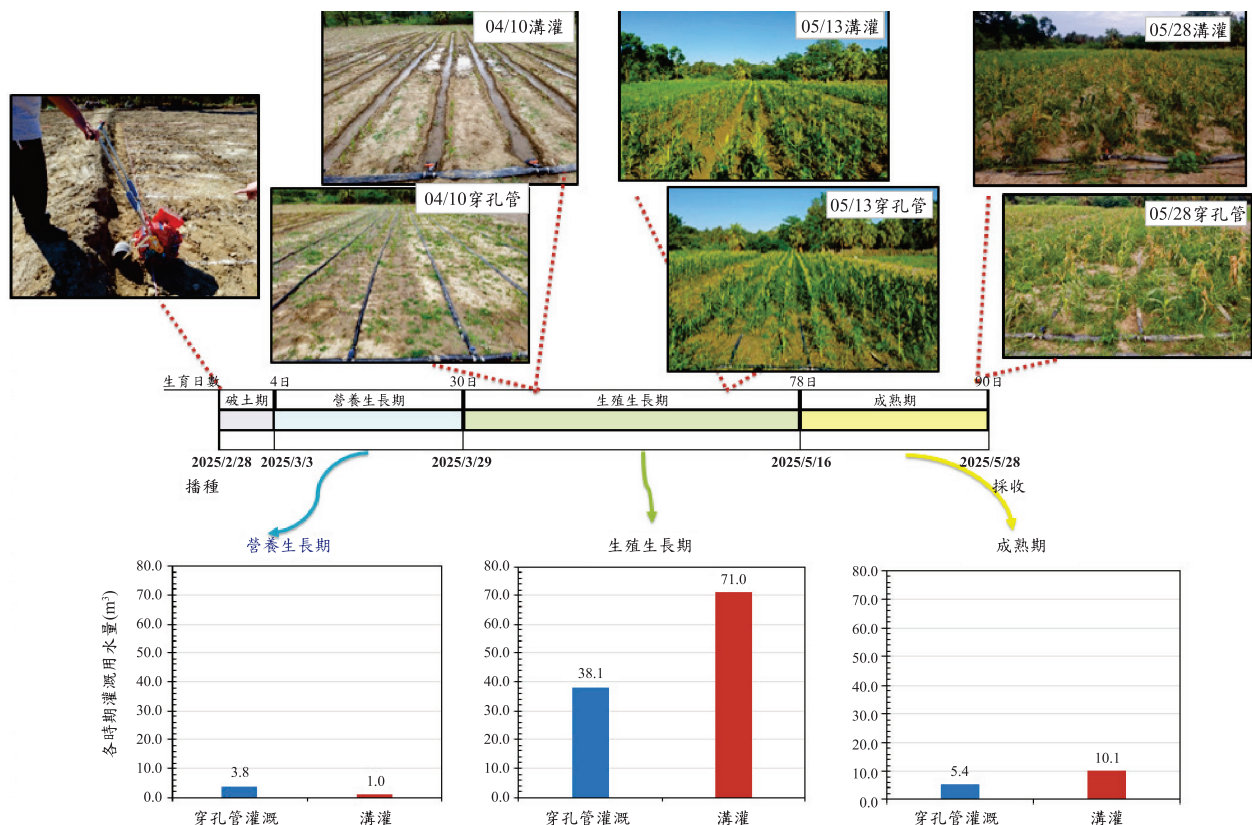


圖 8 玉米栽培各生育期灌溉用水量

3.3 農藝性狀調查與收成分析

試驗區玉米之農藝性狀調查，將試驗區分成 4 個取樣區，每區取樣 25 株玉米為樣本，取樣區域之植株分布如圖 9 及圖 10 所示，其中穿孔管灌區每區面積為 5.0000 m²，畦溝灌區為 3.6875 m²。

於玉米各生育期進行株高與稈徑調查，調查結果如圖 11 及圖 12 所示，調查時期包括營養生長期、抽穗期、吐絲期、穀粒充實期及成熟期。由圖可知穿孔管灌區之株高與稈徑均高於畦溝灌區。

於 5 月 28 日成熟採收期取樣進行農藝性狀調查，調查項目包括穗重 (含有皮及無皮)、穗長、穗徑、果穗籽粒行數及百粒重，再將有皮穗重轉換成每公頃產

量重，計算公式如式 (8) 所列。

$$W = \{[wl/1,000]/area\} \times 10,000 \dots\dots\dots(8)$$

其中 W 為每公頃之玉米產量重 (kg/ha)，wl 為平均有皮穗重 (g)，area 為取樣區面積 (m²)。

取樣調查結果如表 2 所列，由此表可知穿孔管灌溉區之取樣平均穗重 (含有皮及無皮)、果穗籽粒行數及百粒重均大於畦溝灌溉區域，而穗長與穗徑則相反。穿孔管灌溉與穿孔管灌溉每公頃產量分別約 4,591.2 kg 與 4,550.0 kg。與春作不整地及慣行畦溝式栽培食用玉米所得平均果穗鮮重為 5,000~6,500 kg/ha^[32]比較，本試驗之產量較少。

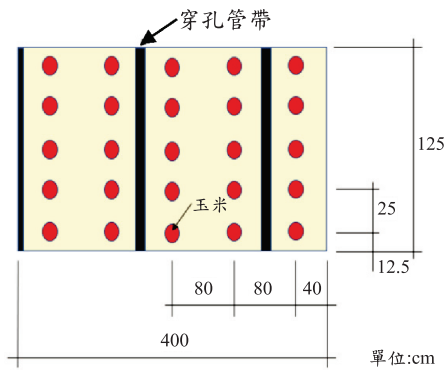


圖 9 穿孔管灌區取樣區配置圖

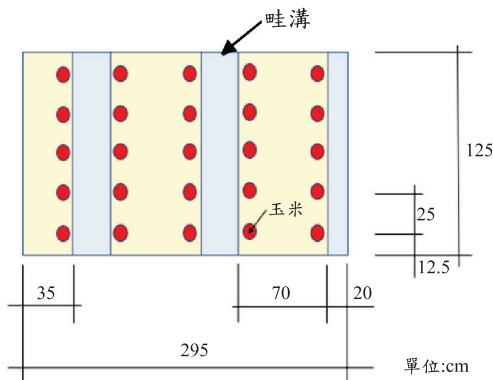


圖 10 畦溝灌區取樣區配置圖

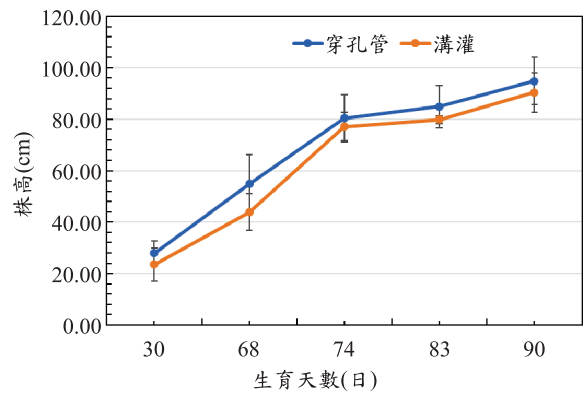


圖 11 本試驗玉米平均株高比較圖

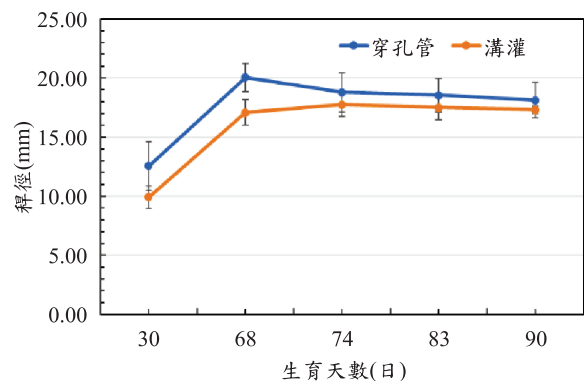


圖 12 本試驗玉米平均稈徑比較圖

表 2 玉米栽培之農藝性狀調查結果與檢定分析

灌溉方式	穗重(有皮) (g)	穗重(無皮) (g)	穗長 (cm)	穗徑 (mm)	果穗籽粒行數 (粒)	百粒重 (g)	每公頃產量 (kg)
畦溝灌溉	95.38±35.01	67.89±29.88	12.38±2.13	37.80±3.64	9.94±1.22	29.00±6.07	4,591.2±947.6
穿孔管灌溉	105.81±35.22	83.09±31.02	11.54±2.31	37.62±4.18	10.02±1.21	32.35±7.40	4,550.0±1181.2
t 檢定之 p 值	0.0658	0.0022	0.0200	0.7738	0.6827	0.0026	0.8516

利用配對 t 檢定分析畦溝灌溉與穿孔管灌溉之差異性，假設兩者無顯著差異，顯著水準 $\alpha=0.05$ ，由檢定結果顯示畦溝灌溉與穿孔管灌溉之穗重（無皮）、穗長、百粒重有顯著性差異，而推估之每公頃產量則無顯著性差異。

3.4 CropWat 模式模擬結果

3.4.1 氣象資料分析

本研究收集中央氣象署大內站與玉井站自 2025 年 2 月 1 日至 5 月 31 日之平均氣溫 (°C)、最高氣溫 (°C)、最低氣溫 (°C)、平均風速 (m/s)、降水量 (mm) 與平均相對溼度 (%) 資料，利用式 (1) 之反距離權重法 (Inverse distance weighting) 推求各站權重後，計算試驗區之氣象參數值。3 個測站之平均氣溫、最高氣溫與最低氣溫如圖 13 所示，平均風速、降水量與平均相對溼度分別如圖 14 至圖 16 所示。由圖 13(1) 與

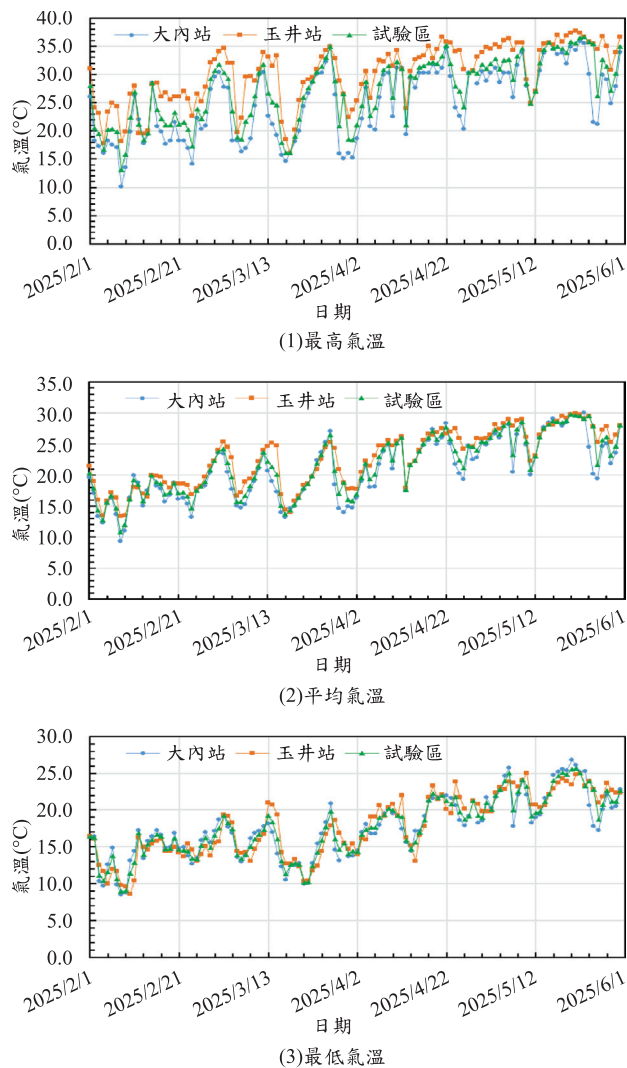


圖 13 試驗區與大內站、玉井站之氣溫趨勢圖

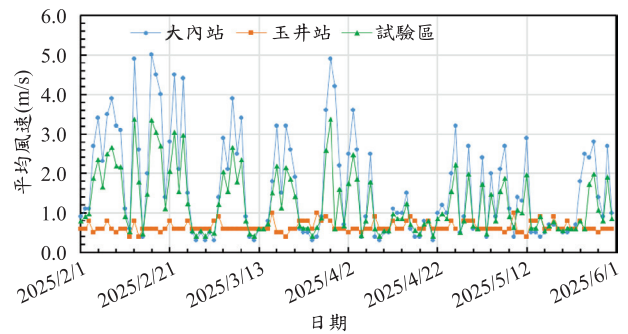


圖 14 試驗區與大內站、玉井站之平均風速圖

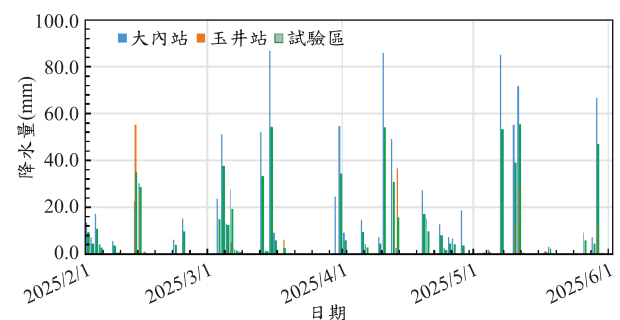


圖 15 試驗區與大內站、玉井站之降水量圖

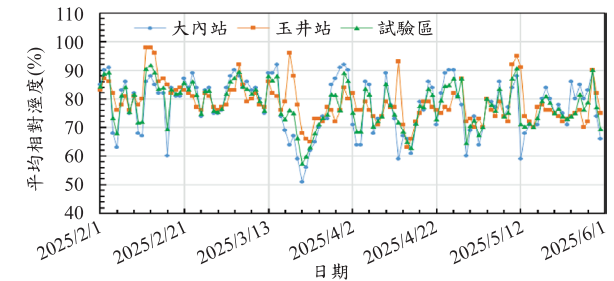


圖 16 試驗區與大內站、玉井站之平均相對溼度圖

圖 13(2) 可知玉井站的最高氣溫與平均氣溫具比大內站高之趨勢，由圖 13(3) 可知玉井站與大內站之最低氣溫則無一致性變化趨勢。由圖 14 顯示玉井站之平均風速小於大內站，由圖 15 之降水量顯示大內站大於玉井站，而圖 16 之平均相對溼度於兩站無一致性變化趨勢。因大內站無累積日射量資料，因此試驗區之累積日射量採用玉井站之觀測資料，觀測數據如圖 17 所示。累積日照時數在大內站與玉井站均無觀測資料，利用距離試驗區最近之臺南區農業改良場測站與玉井站所觀測累積日射量比值作為修正參數，再以臺南區農業改良場測站所觀測之累積日照時數修正作為試驗區之累積日照時數，如圖 18 所示。利用所觀測資料以 CropWat 模式之 Climate/ET₀ 模組所得之累積日射量與參考作物蒸發散量如圖 19 及圖 20 所示，Rain

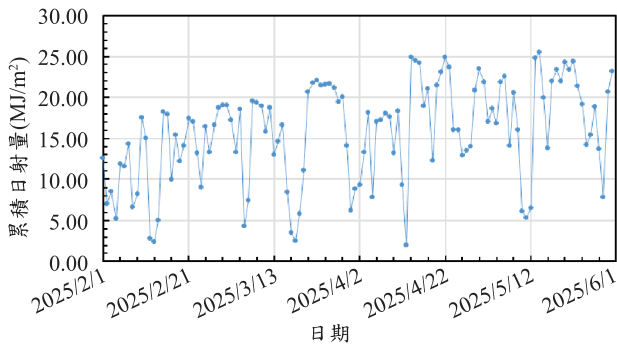


圖 17 試驗區所採用之累積日射量

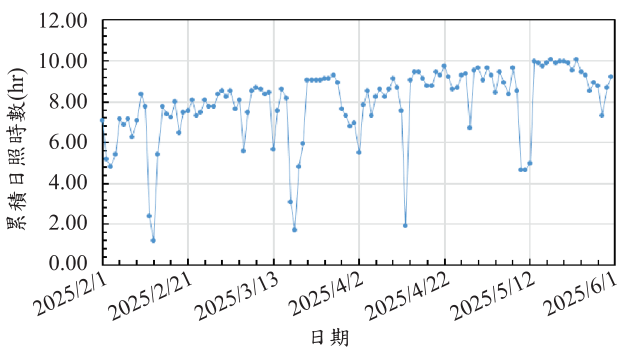


圖 18 試驗區所採用之累積日照時數

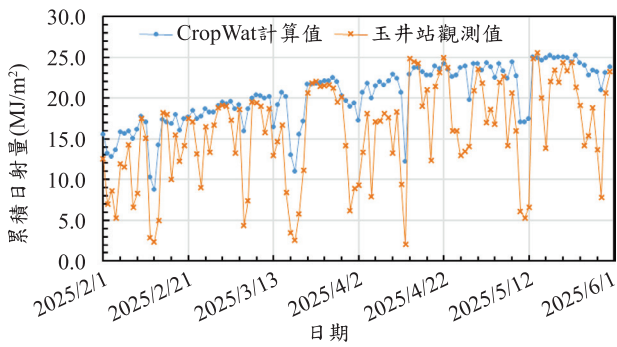


圖 19 試驗區所採用之玉井站與 CropWat 模式計算之累積日射量

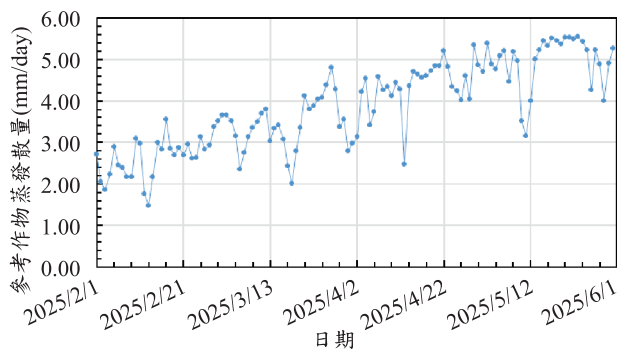


圖 20 CropWat 模式計算之參考作物蒸發散量

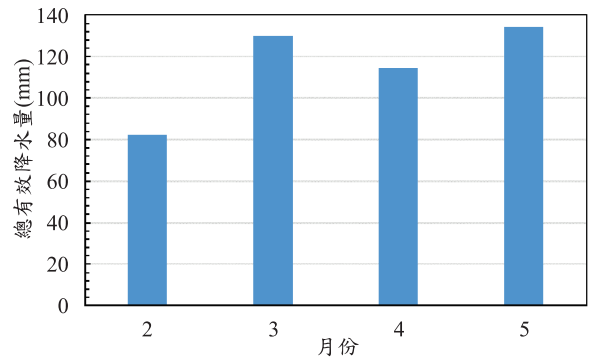


圖 21 CropWat 模式計算各月總有效降水量

模組計算之各月總有效雨量如圖 21 所示。由圖 19 可知 CropWat 模式計算之累積日射量比玉井站之觀測值大，而且變異性亦較小。圖 20 之參考作物蒸發散量顯示隨氣溫增高而具增大趨勢，圖 21 之月總有效降水量以 5 月份最大。

3.4.2 作物參數

本試驗之食用玉米作物係數參考農業部農業試驗所研究成果於生育前期為 0.63，生育中期為 0.91，生育後期為 0.89^[33]。平均根系長於畦溝與穿孔管灌溉區取樣量測分別為 11.5 cm 及 10.8 cm，根細長比一般田區耕種時短，可能原因為本試驗區長期未經擾動，利用怪手翻耕以濾除大塊礫石的深度有限，致使玉米根系無法向更深處生長。臨界耗竭率採用 FAO-56^[30]的甜玉米建議值，並考慮本試驗區為含礫石之壤土質地，保水性能較差，水分容易自根系區流失，因此採用範圍為 0.45~0.5。產量反應係數採用 FAO-33^[34]建議值範圍 0.4~1.25，全生育期建議為 1.25。

3.4.3 土壤水分參數

模式所需土壤參數之總可利用土壤水分為根系層之田間容水量與永久凋萎點間的土壤含水量差值，考慮本試驗區為新開發之含礫石土壤，採用範圍為 80~100 mm/m。最大降雨入滲率依現地雙環入滲試驗結果可得基本入滲率為 231.7 mm/day，最大根系深度依現地土壤質地設為 60 cm、初始土壤耗水比例為 0.0%，初始可利用土壤水分由模式計算。

3.4.4 灌溉時程與灌溉量

利用試驗觀測資料與參考文獻數據，利用 CropWat 模式計算結果可得知作物各旬需水量如表 3 所列，由此表統計可得期作間之作物需水量為 309.6 mm，有效降水量為 368.7 mm，總灌溉需水深為 29.9 mm。

表 3 CropWat 模式計算各旬作物需水量結果

月份	旬別	生育階段	Kc 值	ETc (mm/dec)	有效降水量 (mm/dec)	灌溉需水深 (mm/dec)
2	3	生育前期	0.63	2.1	1.5	2.1
3	1	生長期	0.65	21.3	50.2	0.0
3	2	生長期	0.74	22.7	51.2	0.0
3	3	生育中期	0.82	35.4	28.5	7.0
4	1	生育中期	0.85	33.4	48.1	0.0
4	2	生育中期	0.85	37.1	47.1	0.0
4	3	生育中期	0.85	39.4	19.2	20.2
5	1	生育中期	0.85	40.9	50.9	0.0
5	2	生育後期	0.85	42.4	41.9	0.6
5	3	生育後期	0.84	34.9	30.1	0.0

現地試驗結果顯示穿孔管灌溉之用水量為 47.3 m³，面積為 225.0 m²，灌溉水深為 21.0 mm。而畦溝灌溉之用水量為 82.1 m³，面積為 270.0 m²，灌溉水深為 30.4 mm。由模式模擬結果與現地試驗比較可知，畦溝灌溉水深比模式模擬結果多 0.51 mm，而穿孔管灌溉水深則少 8.88 mm。由圖 8 可知本期作玉米主要灌溉時程為 4 月中旬與下旬，而模式模擬結果之主要灌溉時間為 4 月下旬，依玉米生育之灌溉需求亦相當吻合灌溉時機。

四、結論與建議

4.1 結論

由現地試驗與 CropWat 模式模擬結果可得知，新開發礫質壤土田區種植玉米時，受限於翻耕深度與耕作無法機械化，玉米根系長較一般田區短，產量亦較少。比較穿孔管灌溉與畦溝灌溉之灌溉水量，穿孔管灌溉水量約為畦溝灌溉之 57.6%。與 CropWat 模式分析結果比較，穿孔管灌溉之灌溉水量約少 29.7%，畦溝灌溉則多 1.7%，顯示 CropWat 模式可用於畦溝灌溉之玉米栽培灌溉用水量推估，而穿孔管灌溉方式可達到節水效果。

4.2 建議

本試驗於種植前先利用怪手扒鬆土壤並篩除礫石，並輔以人工撿拾，但田區仍然無法完全清除礫石。因此，本次試驗完全依賴人工進行整田、開溝、播種、收割等作業，田區操作無法機械化，建議利用客土以

改善作物種植之土壤環境。另本試驗區未設置農業氣象站，為進行本試驗區試驗成果與氣象資料關聯分析。建議於本試驗區設置農業氣象站。

誌謝

本研究蒙農業部農田水利署提供經費支持與專業指導（計畫名稱：推動智慧灌溉技術與提升防災韌性之研究；計畫執行期間：民國 114 年 1 月 1 日至 114 年 12 月 31 日），農業部農田水利署嘉南管理處與農業工程研究中心協助試驗場域管理與行政支援，曾柏丞先生與黃暉達先生協助計畫執行，使本文得以順利完成，深表謝忱。

參考文獻

1. Chen, F.W. and C.W. Liu, "Assessing the Impact and Adaptation of Climate Change on Effective Rainfall for Agricultural Water Management," *Taiwan Water Conservancy*, 70(2), 1-29, 2022.
2. 游添榮、謝禮臣：「玉米」，臺南區農業改良場技術專刊-農作物防減災與生產調適，第 174 期，頁 11-14，2021。
3. Tian, X., J.Z. Dong, S.Y. Jin, H. He, H. Yin and X. Chen, "Climate Change Impacts on Regional Agricultural Irrigation Water Use in Semi-arid Environments," *Agricultural Water Management*, 281, 108239, 2023.
4. Zhu, H.Y., B.Y. Zheng, W.B. Nie, L.J. Fei, Y.Y. Shan, G. Li and F. Liang, "Optimization of Maize Irrigation

- Strategy in Xinjiang, China by AquaCrop Based on a Four-year Study,” *Agricultural Water Management*, 297, 108816, 2024.
5. 許家勝、何耀廷、陳吉仲：「氣候條件對全球糧食作物生產影響—縱橫資料模型的應用」，*農業經濟叢刊*，第 22 卷第 1 期，頁 1-41，2016。
 6. Zhang, W.Q., A.H. Dong, F.L. Liu, W.Q. Niu and K.H.M. Siddique, “Effect of Film Mulching on Crop Yield and Water Use Efficiency in Drip Irrigation Systems: A Meta-analysis,” *Soil & Tillage Research*, 221, 105392, 2022.
 7. Yin, L.C., F.L. Tao, Y. Chen and Y.C. Wang, “Reducing Agriculture Irrigation Water Consumption through Reshaping Cropping Systems Across China,” *Agricultural and Forest Meteorology*, 312, 108707, 2022.
 8. Gonçalves, I.Z., M.M. Mekonnen, C.M.U. Neale, I. Campos and M.R. Neale, “Temporal and Spatial Variations of Irrigation Water Use for Commercial Corn Fields in Central Nebraska,” *Agricultural Water Management*, 228, 105924, 2020.
 9. Wu, Z.S., Y. Li, R. Wang, X. Xu, D.Y. Ren, Q.Z. Huang, Y.W. Xiong and G.H. Huang, “Evaluation of Irrigation Water Saving and Salinity Control Practices of Maize and Sunflower in the Upper Yellow River Basin with an Agro-hydrological Model Based Method,” *Agricultural Water Management*, 278, 108157, 2023.
 10. Teshome, F.T., H.K. Bayabil, B. Schaffer, Y. Ampatzidis, G. Hoogenboom and A. Singh, “Exploring Deficit Irrigation as a Water Conservation Strategy: Insights from Field Experiments and Model Simulation,” *Agricultural Water Management*, 289, 108490, 2023.
 11. Zhu, Z.G., J.S. Li and D.L. Zhu, “Influence of Biotic and Abiotic Factors and Water Partitioning on the Kinetic Energy of Sprinkler Irrigation on a Maize Canopy,” *Agricultural Water Management*, 293, 108700, 2024.
 12. Gao, Z.T., D.L. Guo, D. Ryu and A.W. Western, “Exploring Key Factors Driving Farm-level Seasonal Irrigation Water Usage with Bayesian Hierarchical Modelling,” *Agricultural Water Management*, 294, 108715, 2024.
 13. Wang, M.J., W. Shi, M. Kamran, S.H. Chang, Q.M. Jia and F.J. Hou, “Effects of Intercropping and Regulated Deficit Irrigation on the Yield, Water and Land Resource Utilization, and Economic Benefits of Forage Maize in Arid Region of Northwest China,” *Agricultural Water Management*, 298, 108876, 2024.
 14. Mari, J.A., R.K. Soothar, M. Thidar, M.A. Mangrio, M.U. Mirjat and I. Katohar, “Effect of Plastic Film Mulch and Irrigation Water Regimes on Soil Temperature Pattern, Plant Growth and Water Productivity of Maize,” *Ecological Frontiers*, 44, 752-759, 2024.
 15. 申江龍、黎雅楠、孫語彤：「不同覆土厚度/容重對裸岩石礫地土壤理化性質的影響」，*水土保持*，第 9 卷第 4 期，頁 65-72，2021。
 16. 李娟、張揚、韓霽昌、李曉明：「不同覆土厚度對裸岩石礫地土壤化學性狀和春玉米產量的影響」，*安徽農業科學*，第 41 卷第 5 期，頁 2037-2039，2013。
 17. Yang, Z., Z.B. Li, J.C. Han, P. Li and J. Li, “Effect of Covering-soil Thickness on Crop Growth on Bare Rock and Gravel Land in an Ecological Restoration Project,” *Journal of Resources and Ecology*, 9(5), pp.484-492, 2018.
 18. 董起廣、張揚、陳田慶、韓霽昌：「石礫地覆土容重對土壤水分入滲的影響」，*台灣水利*，第 67 卷第 2 期，頁 40-45，2019。
 19. Surendran, U., C.M. Sushanth, G. Mammen and E.J. Joseph, “Modelling the crop water requirement using FAO-CROPWAT and assessment of water resources for sustainable water resource management: A case study in Palakkad district of humid tropical Kerala, India,” *Aquatic Procedia*, 4, pp.1211-1219, 2015.
 20. 王忠波、王欣亮、聶堂哲：「基於 CROPWAT 模型水稻需水量及灌溉制度研究」，*東北農業大學學報*，第 50 卷第 7 期，頁 87-96，2019。
 21. Chung, S.O. and T. Nkomozepi, “Uncertainty of paddy irrigation requirement estimated from climate change projections in the Geumho river basin, Korea,” *Paddy and Water Environment*, 10, pp.175-185, 2012.
 22. Kuo, S.F., “Evaluation of irrigation water requirements and crop yields with different irrigation schedules for paddy fields in ChiaNan irrigated area, Taiwan,” *Paddy and Water Environment*, 12, pp.71-78, 2014.
 23. Abdul Karim, S.N.A., S.A. Ahmed, V. Nischitha, Surabhi Bhatt, S. Kiran Raj and K.N. Chandrashekarappa, “FAO 56 Model and Remote Sensing for the Estimation of Crop-Water Requirement in Main Branch Canal of the Bhadra Command Area,” Karnataka State, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(4), pp.883-894, 2013.

24. Bhadra, A., A. Bandyopadhyay, R. Singh and N.S. Raghuvanshi, "Development of a user Friendly Water Balance Model for Paddy," *Paddy and Water Environment*, 11, pp.331-341, 2013.
25. Kumar, A., A.K. Mishra, D.K. Singh, L. Kumar, D. Chakraborty, P. Singh, A. Kumar, A. Sarangi and S.K. Sarkar, "Estimating Actual Evapotranspiration using EEFlux in Eastern Sone High Level Command, India," *Arabian Journal of Geosciences*, 16, 665, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11771-w>.
26. Sruthi, P. and U. Surendran, "Evaluation of Nutrient Management and Method of Planting on Crop Productivity of Aerobic Rice and Estimating the Water Saving in Aerobic using FAO-CROPWAT Model," *Paddy and Water Environment*, 21, pp.467-477, 2023.
27. Nie, T.Z., Z.P. Gong, Z.X. Zhang, T.Y. Wang, N. Sun, Y. Tang, P. Chen, T.C. Li, S. Yin, M.M. Zhang and S.W. Jiang, "Irrigation Scheduling for Maize Under Different Hydrological Years in Heilongjiang Province, China," *Plants*, 12, 1676, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12081676>.
28. Ashine, E.T., M.T. Bedane, M.K. Chota and R. Admassu, "Effect of Deficit Irrigation on Maize (*Zea Mays* L.) Crop Under Conventional, Fixed, and Alternate Furrow Irrigation for Effective Irrigation Water Management," *Air, Soil and Water Research*, 17, pp.1-15, 2024.
29. Pattanaik, S., P.P. Jena, J.C. Paul and D.M. Das, "Mapping Irrigation Requirements of Major Crops in the Coastal Agro-climatic Zone of Odisha using CROPWAT 8.0 and Geospatial Techniques," *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 95(1), pp.84-89, 2025.
30. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith, *Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.
31. Dastane, N.G., *Effective Rainfall in Irrigated Agriculture*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 25, 1978.
32. 江志峯：「因應氣候變化下西南沿海農業區的耕作模式設計」，臺中區農業改良場特刊，第 151 號，頁 142-160，2023。
33. 李欣叡：「食用玉米需水量研究」，農業部農業試驗所 111 年年報，頁 88-90，2023。
34. Doorenbos, J. and A.H. Hassam, *Yield Response to Water*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33, 1979.

收稿日期：民國 114 年 09 月 07 日
修改日期：民國 114 年 12 月 04 日
接受日期：民國 114 年 12 月 12 日