

原始研究文章

開放取用



利用熱影像評估缺水環境中水稻植株的水分狀態

楊靜瑩^{1,2,3*}，張妍慈¹ 和侯雅玲⁴

摘要

背景 水稻是全球人口的主食。然而，極端天氣事件威脅著農業用水的穩定性，對糧食供應的穩定構成重大挑戰。利用科技評估水稻植株的水分狀態，可實現農業水資源的精準管理。**結果** 本研究結果顯示，乾旱較嚴重的稻米產區具有較高的離子滲漏率、較低的土壤植物分析發展 (SPAD) 儀器值，以及植株總葉綠素含量降低。雖然紅綠藍 (RGB) 影像未觀察到顯著差異，但在乾旱初期使用紅外線熱影像拍攝水稻植株時，其生理參數與冠層溫度與傳統耕作方式相比有顯著不同。由冠層溫度與大氣溫度計算所得的作物水分壓力指數 (CWSI)，顯示水稻植株的水分取得情況與其生理參數之間具有高度相關性。以CWSI與植株水分狀態進行迴歸分析，得出校正後的決定係數為0.86。**結論** 本研究證明紅外線熱影像能有效偵測水稻水分逆境的早期跡象，有助於農民進行灌溉規劃，並實現水資源的精準管理與最佳化利用。

關鍵詞 水稻, 乾旱, 熱影像, 作物水分壓力指數, 智慧農業

*通訊作者：楊靜瑩 emiyang@dragon.nchu.edu.tw¹中興大學農藝學系，臺中 402，臺灣²中興大學智慧永續新農業研究中心 (SMARTer)，臺中 402，臺灣³中興大學永續農業創新發展中心 (IDCSA)，臺中 402，臺灣⁴農業部農業試驗所作物生產組，臺中 413，臺灣

引言

必須大幅增加糧食生產，才能養活我們快速增長的全球人口。特別是到2050年，糧食產量必須比目前水平增加100–110%，以滿足需求 (Hussain等 2020)。水稻 (*Oryza sativa* L.) 是一種重要的糧食作物。高達90%的水稻種植集中在亞洲，當地人口以水稻為主要食物來源，平均提供約30%的每日熱量攝取 (Ullah等 2018；Schneider與Asch 2020；Sultana等 2022)。近年來，氣候變遷導致全球平均氣溫上升，造成乾旱和洪水等極端天氣事件頻繁發生

(Lesk 等人 2016)。稻米生產也面臨適合耕種的土壤耗盡所帶來的挑戰：熱帶地區的水稻產量到 2100 年可能減少 18–51% (Asibi 等人 2019)。

稻作在其生長與發育過程中會受到各種非生物逆境的影響，可能導致產量下降，例如高溫、洪水和乾旱 (Jung 等人 2010; Lamaoui 等人 2018)。即使在農業發達且產量高的地區，短暫的乾旱或長期降雨不足也可能造成嚴重的乾旱條件 (Barnabás 等人 2008; Kim 等人 2020b)。研究表明，水稻植株會透過捲曲葉片以減少水分流失來應對乾旱逆境。捲曲的水稻葉片可能引發發育異常，降低光合作用效率、減少氣孔導度並抑制蒸散作用，進而導致葉片溫度上升 (Melandri 等人 2020; Yang 等人 2022)。

為因應不斷變化的環境條件，農民可採用先進技術，並針對資源與土地有限的特定區域實施精準農業，以最少的資源生產糧食 (Khan 等人 2021)。多項研究已利用紅外線熱影像技術或數位影像分析來檢測植物的表型特徵與生理反應 (Khanal 等人 2017a; Kim 等人 2020a)。在栽培管理方面，熱影像可用於評估收穫前後的狀況、微生物感染分佈以及產品新鮮度 (Linke 等人 2000)。此外，透過測量冠層溫度的變化，可評估葉片氮含量，協助農民調整田間的氮肥施用量 (Guo 等人 2016)。研究顯示，熱影像能偵測到病原體感染與病斑分佈所引起的葉片溫度早期差異。此類早期偵測至關重要，因為冠層溫度升高與水分流失有關 (Mahlein 2016; Pipatsitee 等人 2018)。因此，紅外線熱影像對於研究植物與冠層溫度之間的關係，以及探討植物生理與生態具有重要作用 (Jones 2004)。

在戶外田間環境中，即時評估植物目前水分逆境程度會受到環境因素影響，且可能耗時費力。因此，學者利用熱影像遠端量測冠層溫度，以快速提供資訊並協助田間水分管理 (Elsayed 等人 2017)。此外，Jackson 等人 (1981) 提出以冠層溫度作為乾旱逆境指標的作物水分壓力指數 (CWSI)。此指數因設備需求低且適用於

日常田間管理，已廣泛應用於各類一年生或多年生作物的評估中 (Bellvert 等人 2016; Godson- Amamoo 等人 2022)。

利用無人機進行大規模田間成像可評估乾旱條件下的作物水分逆境程度；然而，無人機熱成像技術存在若干實際限制，包括高成本與技術需求。此外，無人機成像結果易受風速、光線變化和溫度波動等環境條件影響；例如強風可能導致不穩定，降低影像清晰度。無人機也受到環境因素與飛行高度限制的約束，可能影響成像品質與適用性。因此，本研究所探討的手持式熱成像感測器為小農場提供了一種具成本效益且易於操作的替代方案。該工具較不受風速與飛行距離等因素影響，在某些情況下成為更具彈性且經濟的選擇。本研究運用熱影像技術探討稻田水分管理，以水稻品種『臺南11號』（『TN11』）進行室外乾旱試驗，並評估植株的生理變化與環境氣象資訊，以建立其與冠層溫度的關聯性。稻農可運用本研究的發現來實踐進階的水分管理。

材料與方法

試驗場址與材料

試驗田地位於臺中市臺灣的國立中興大學農業試驗站（北緯24.08°，東經120.72°），為一獨立的農業研究設施。本研究以中晚熟的*japonica*水稻品種‘TN11’作為試驗材料。在臺灣，水稻栽培通常每年進行兩期作，一期生長期約為121天，另一期生長期約為110天。‘TN11’因其高產量、適應性強及優良風味，為臺灣普遍種植的品種。

試驗田區配置與管理

本試驗採用隨機設計，包含兩種水分管理方式：慣行栽培 (CP) 與乾旱處理。每種處理區面積約為110平方公尺，每種水分管理方式設有四個重複區。水稻種植之行距為30公分× 24公分。施用有機複合肥料 N-P2O5-K2O (16-8-12)，氮 (N) 施用量為每公頃 180公斤，在三個生育期平均施用：初期分蘖、中期分蘖及穗始期。水分管理

處理於水稻到達中期分蘗階段時開始實施。

CP 樣區作為對照組，除乾田準備期外，保持 1–5 公分的水深直至收穫。相比之下，乾旱處理組的水稻植株不進行灌溉，使其水分狀態降低至目標值後，再恢復常規灌溉直至收穫。

樣區的乾旱狀態是透過計算土壤中的水分狀態來確定。從各處理樣區中隨機採取 0 至 10 公分深度的土壤樣本 (W1)，重量約 200 克。然後將這些樣本於 80 °C 下烘乾以獲得乾重 (W2)，並計算土壤含水量。土壤水分狀態的計算公式如下：

$$\text{Relative water status of soil (\%)} = \text{Soil}_D / \text{Soil}_{CP} \times 100\%$$

其中 Soil_D 表示在乾旱條件下的土壤含水量， Soil_{CP} 表示在 CP 條件下的土壤含水量。

水稻植株水分狀態的測量

本研究中，測量水稻植株的水分狀態以評估植株受乾旱影響的程度，數值越低表示乾旱影響越嚴重。為評估水分狀態，將地上部的葉片樣本切成 5 公分長的片段，稱重以確定其鮮重 (FW)，浸泡於去離子水中 4 小時後再次稱重以確定其飽和重 (TW)。隨後將樣本於 80 °C 下烘乾至恆定乾重 (DW)。根據以下公式計算水稻植株在 CP 及乾旱條件下的相對含水量 (RWC)：

$$\text{RWC (\%)} = (\text{FW} - \text{DW}) / (\text{TW} - \text{DW}) \times 100\%$$

並使用以下公式計算植株的相對水分狀態：

$$\text{Relative water status of plant (\%)} = \text{RWC}_D / \text{RWC}_{CP} \times 100\%$$

其中 RWC_D 表示乾旱處理下水稻植株的相對水分狀態， RWC_{CP} 表示對照處理下水稻植株的相對水分狀態。

葉綠素含量與離子滲漏率的測定 水稻葉片的總葉綠素含量以非破壞性與破壞性兩種方法進行測量。非破壞性方法係使用葉綠素計 (土壤植物分析發展 [SPAD]-502，Spectrum Technologies，英國) 來測量葉綠素含量。在每個處理區中，隨機選取一株

水稻植株，並使用測量探頭隨機夾住 5–8 片葉片以取得 SPAD 值。在對照處理與乾旱條件的試驗區中，各隨機選取四株水稻植株進行測量。

在破壞性方法中，從每個處理區隨機選取一株水稻進行取樣。將地上部葉片剪下並均勻混合，稱取 1 克新鮮葉片樣品。然後將樣品放入 15 mL 離心管中，加入 15 mL 95% 乙醇進行萃取，持續 3 天。將萃取液稀釋十倍後，使用分光光度計 (SpectraMax ABS plus，Molecular Devices，美國) 測定波長為 665 nm (A665) 和 649 nm (A649) 處的吸光值 (Wintermans 與 De Mots 1965)。

電解質滲漏 (EL) 的測定方法參考 Sedaghat 等人 (2017) 的方法。從每個處理區採集一株水稻，將其地上部葉片切成 5 cm 的片段，鮮重 (FW) 為 1 g。將這些片段放入 50 mL 離心管中，並加入 50 mL 去離子水。此外，另設一個僅含去離子水而不含葉片片段的空白組。所有離心管隨後置於旋轉搖床 (YIHDER，台灣) 上，以 100 rpm 搖動 3 小時。搖動後，使用 EC-400 L 電導度計 (ISTEK，韓國) 測定樣品的電導度 (EC)。接著將樣品於 121 °C 高壓滅菌 20 分鐘，冷卻至室溫後再次測定 EC。EL 率根據 Jambunathan (2010) 推薦的公式計算，並修改如下：

$$\text{EL (\%)} = (\text{EC}_1 - \text{EC}_{\text{Blank1}}) / (\text{EC}_2 - \text{EC}_{\text{Blank2}}) \times 100\%$$

其中 EC_1 和 $\text{EC}_{\text{Blank1}}$ 分別代表樣品和空白組在搖晃後第一次測量的電導度， EC_2 和 $\text{EC}_{\text{Blank2}}$ 分別代表樣品和空白組在高溫處理後第二次測量的電導度。

冠層溫度分析與作物水分壓力指數計算

為取得水稻植株的冠層溫度，使用手持式熱像儀 Thermo GEAR G100EX (NEC Avio，日本) 進行熱影像拍攝。每種處理至少拍攝三張影像。將熱影像與可見光影像匯入 TAS 紅外線熱分析軟體中，並在受測的水稻植株上手動選取 30 個溫度點。這些點的平均值即為各影像中水稻植株的冠層溫度。

作物水分壓力指數係根據 Luan 等人 (2021) 所提出的公式計算：

$$CWSI = (T_c - T_{wet}) / (T_{dry} - T_{wet})$$

其中 T_c 代表乾旱條件下水稻植株的冠層溫度， T_{wet} 代表對照處理及充分供水條件下水稻植株冠層溫度的下限，而 T_{dry} 則代表氣孔關閉且無蒸散作用發生時冠層溫度的上限。

統計分析

統計分析使用 SAS v. 9.4 進行。首先以變異數分析評估各參數的相對重要性，隨後利用最小顯著差異法 (LSD) 檢定參數平均值之間的差異，以不同字母表示具有顯著差異 ($p < 0.05$)。不同處理間冠層溫度的差異則使用 Microsoft Excel 中的 Student t 檢定進行分析；星號 (*) 表示處理間具有顯著差異 ($p < 0.05$)。此外，亦進行迴歸分析以評估 CWSI 與植株水分狀態之間的關係，並使用 R v. 4.2.1 對水稻植株生理參數、冠層溫度與環境因子進行皮爾森相關分析。

結果

試驗田設置與降雨概況

本研究於臺灣臺中市霧峰區進行為期一年的水稻田間試驗。在試驗場址邊緣設置微氣象觀測站，以收集溫度與降雨量資料 (圖 1a, b)。於乾旱處理期間，在天氣條件良好的情況下，約每週拍攝一次水稻的熱影像。拍攝過程包括保持固定距離、角度與參數，並根據溫度與相對濕度校準手持式熱感應相機，以進行影像拍攝 (圖 1c, d)。

試驗場址的乾旱處理效果以相對土壤含水量表示。結果顯示，由於2022年第一期作乾旱處理中期降雨頻率減少，試驗場址的相對土壤含水量最低降至5.3% (圖 2a, c)。相比之下，在第二期作的乾旱處理期間，因降雨頻繁，試驗場址的相對土壤含水量最低僅降至42.2% (圖 2b, d)。因此，田間乾旱處理的效果受到影響。

『TN11』在不同水分管理條件下的生理變化

植物在逆境下會表現出可見的生理變化，例如葉片黃化和萎凋。為了探討不同乾旱條件下水稻植株的生理變化，本研究透過停止灌溉的方式在試驗場址實施乾旱處理。作者假設試驗場址中水稻植株的水分逆境程度將分別降低至其對照處理值的90%、80%及70%。此外，測量了水稻在乾旱逆境下的關鍵生理指標，如SPAD值、總葉綠素含量以及電解質滲漏率，以探討不同乾旱嚴重度所引起的生理變化。結果顯示，當水稻植株的水分逆境程度降低至對照處理值的90%、80%及70%時，其SPAD值與總葉綠素含量均顯著低於對照處理，且隨乾旱嚴重度增加而遞減 (圖 3a~d)。相比之下，電解質滲漏率則顯著高於對照處理，並隨著乾旱嚴重度加劇而上升 (圖 3e, f)。

乾旱逆境下水稻冠層溫度與熱影像

室外田間試驗易受氣候波動、病蟲害及設備故障影響，可能導致誤差或妨礙資料收集。本研究於2022年兩期栽培季節實施乾旱處理時，因中期乾旱期間降雨減少，第一期作水稻植株的相對水分狀態下降至CP值的70%左右 (圖 2c與4a)。相較之下，第二期作因降雨增加，相對水分狀態僅下降至CP值的90% (圖 2d與4b)。

智慧科技的應用對農業至關重要。至少有一項研究使用熱像儀來檢測葉片溫度，並探討其與植株水分狀態之間的關係 (Li 等人 2014)。在本研究中，當水稻植株的水分狀態達到 CP 值的 90%、80% 和 70% 時，使用手持式熱像儀 Thermo GEAR G100EX 拍攝熱影像。根據溫度點分析熱影像後，我們觀察到，在 2022 年兩個水稻耕作季節中，當水分狀態降至 90% 時，水稻植株的冠層溫度明顯高於對照處理水稻植株。這些熱影像顯示了熱像儀在偵測水稻植株早期乾旱逆境方面的價值 (圖 4c, d)。

本研究利用熱影像技術評估試驗場址中水稻植株的水分狀態。拍攝位置設定為與目標植株呈

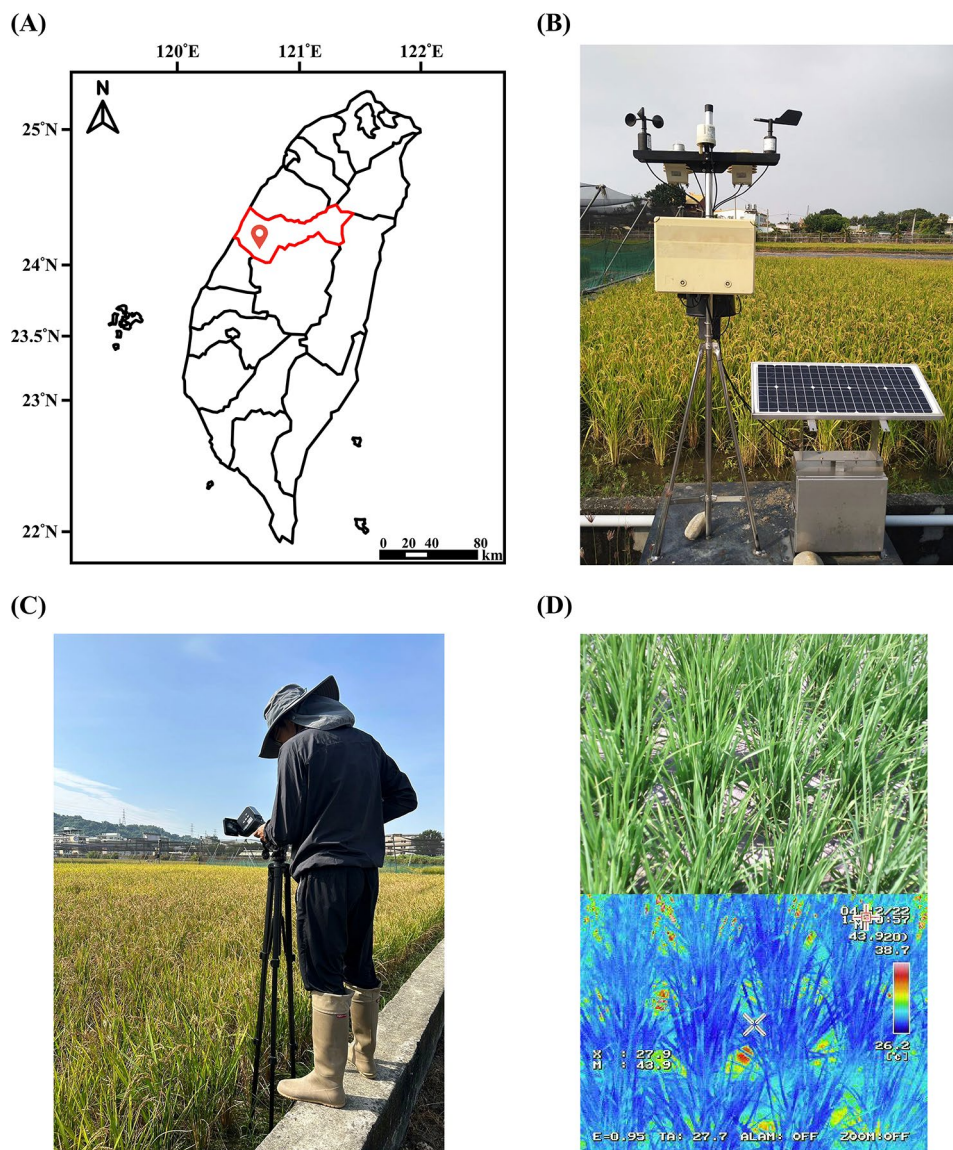


圖 1 實驗田位置、設施及熱影像擷取。(a) 實驗田位於臺灣臺中市霧峰區
 (b) 實驗田邊緣的微氣象觀測站。(c) 說明使用手持式紅外線熱像儀擷取熱影像過程的示意圖。(d) 實際擷取的熱影像，上方為紅綠藍 (RGB) 影像，下方為熱影像

45度角，距離介於1.5至2公尺之間。環境校正係根據大氣溫度和相對濕度進行。每次拍攝均同步獲取RGB影像與熱影像。由成像結果可觀察到，在相對水分狀態為CP的90%時，與CP條件下的水稻植株相比，在RGB影像中並不易區分。相反地，這些水分狀態下的植株在熱影像中則呈現明顯差異 (圖5)。

學者探討蒸散作用、冠層溫度與氣溫之間的關係，提出了整合這些因素的作物水分壓力指數 (CWSI) 概念。當土壤水分受限時，植物氣孔關閉

減少蒸散作用，導致葉片表面溫度上升，這是因為蒸發冷卻作用降低所致 (Idso 等人 1981)。在乾旱條件下，當葉片溫度測量值與空氣溫度測量值相對應時，隨著植株乾旱逆境加劇，作物水分壓力指數值趨近於1；相反地，當植株水分狀態改善時，作物水分壓力指數值則趨近於0。為了評估利用作物水分壓力指數評估水稻田乾旱逆境的可行性，針對2022年第一期與第二期作物週期，進行了作物水分壓力指數、冠層溫度、水分狀態、乾旱相關生理參數以及氣象資料之間的皮爾森相關係數分析。並使用作物水分壓力指數與水分狀態資料進行迴歸分析。結果顯示出作物水分壓力指數值與水分狀態、SPAD值及葉綠素含量之間存在正相關

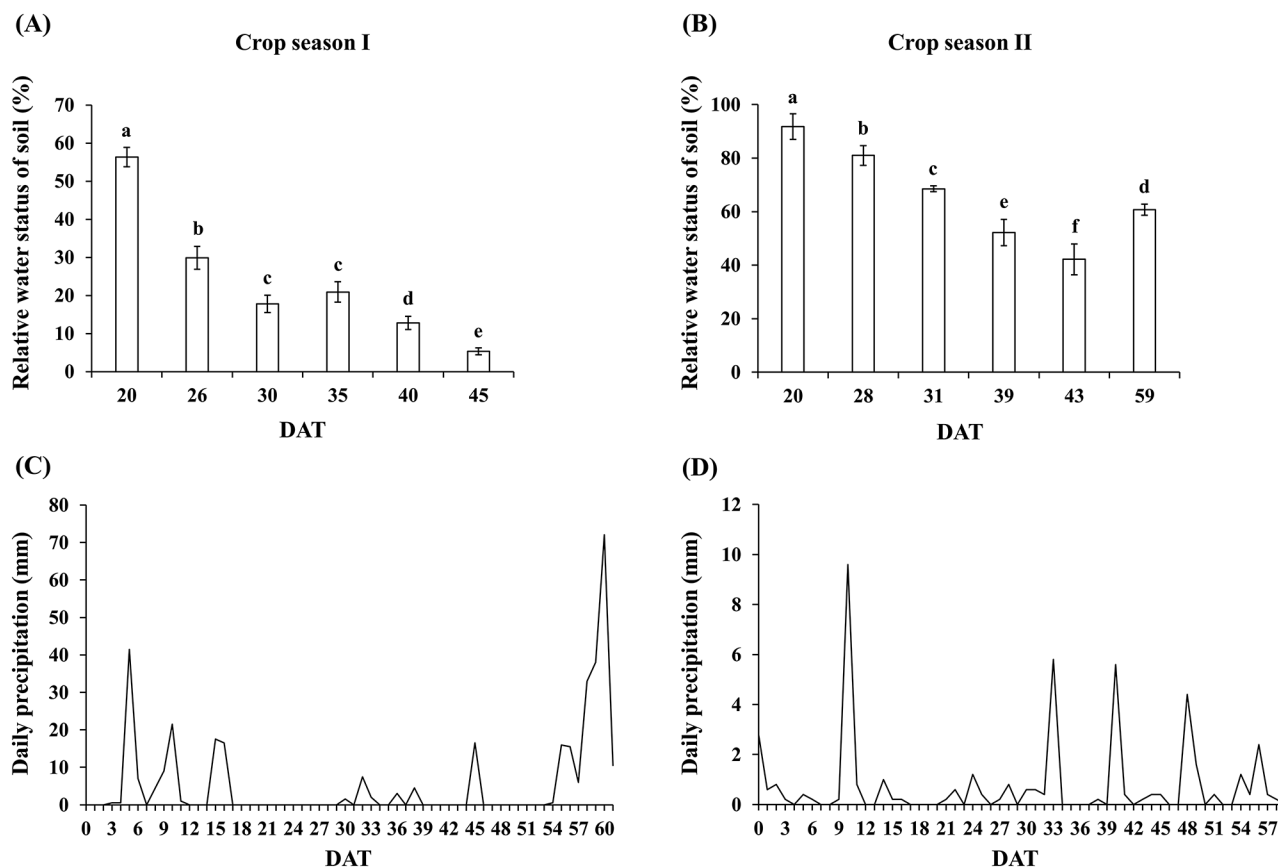


圖 2 第一期與第二期栽培季節中乾旱處理期間的土壤水分狀態及降雨量。(a) 2022 年第一期作栽培季節之乾旱處理期間土壤水分狀態。(b) 2022 年第二期作栽培季節之乾旱處理期間土壤水分狀態。(c) 2022 年第一期作栽培季節之乾旱處理期間每日累積降雨量。(d) 2022 年第二期作栽培季節之乾旱處理期間每日累積降雨量。本試驗獨立重複進行至少三次。誤差棒代表標準差 (SD)。字母表示根據 LSD 事後檢定 ($p < 0.05$) 樣本間的顯著差異。DAT：處理後天數

且與電解質滲漏率呈負相關。水分狀態與生理參數之間的相關性，與水分狀態和作物水分壓力指數值之間的相關性一致。此外，以作物水分壓力指數值與水分狀態建立的迴歸模型展現了良好的解釋能力，其決定係數 (R^2) 為 0.8551。因此，作物水分壓力指數可用於有效評估田間水稻水分狀態，並作為農業灌溉管理的參考指標。

討論

本研究利用手持式熱成像儀拍攝戶外水稻田，以實現對水稻植株水分狀態的即時評估。此外，由於熱影像與氣候條件之間具有密切關聯，因此在試驗區邊緣設置了一座微氣象站，用以監測大氣溫度和相對濕度等氣象因子 (圖 1b)。與其他作物相比，水稻通常

栽培時需要更多的灌溉用水。在缺水條件下，水稻的外觀、葉綠素含量、EL 以及水分狀態會受到不利影響

(Pandey 與 Shukla 2015; Khan 等人 2017a, 2017b)。葉綠素是影響水稻育種期間光合作用反應的關鍵因素，葉綠素含量常被用作光合效率的指標 (Hu 等人 2009)。在乾旱條件下，水稻葉綠素會被分解且光合作用受到抑制，導致使用 SPAD-502 等非破壞性葉綠素計測量時，葉綠素含量顯著下降 (Swapna 與 Shylaraj 2017)。當植物暴露於乾旱、鹽分、重金屬或高溫等逆境時，細胞膜會受損，進而導致離子滲漏。因此，離子滲漏率常被作為衡量植物耐受性之逆境指標 (Dasgupta 等人 2015)。研究顯示，當水稻在抽穗期或灌漿期遭受乾旱逆境時，其體內的離子滲漏率高於分蘗期，表明乾旱條件嚴重影響水稻生長

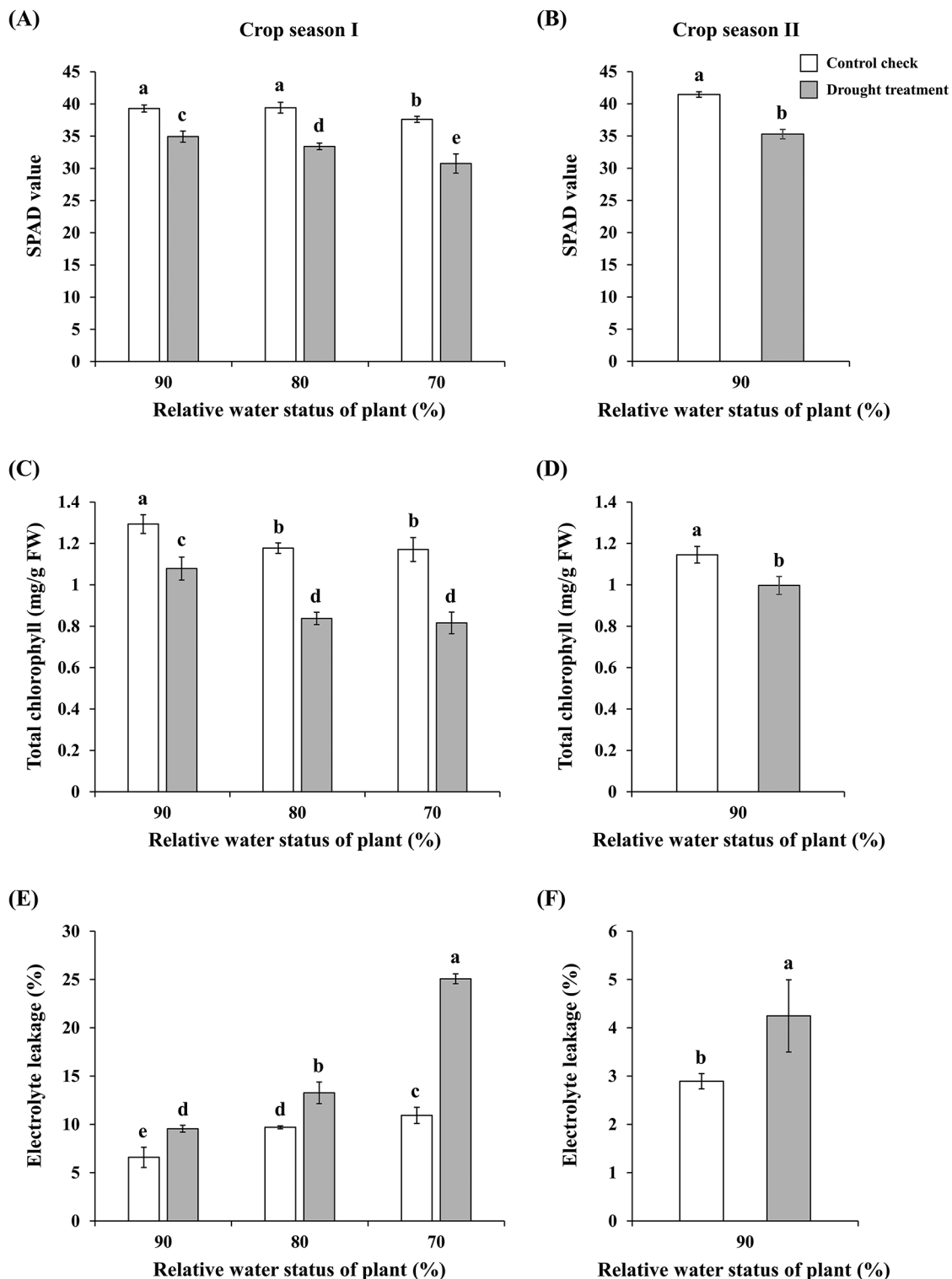


圖 3 “TN11” 在不同水分狀態下的生理參數。(a) 與 (b) 分別為 2022 年第一期作與第二期作期間水稻植株的 SPAD 值。(c) 與 (d) 分別為 2022 年第一期作與第二期作期間水稻植株的總葉綠素含量。(e) 與 (f) 分別為 2022 年第一期作與第二期作期間水稻植株的電解質滲漏率。本試驗至少獨立進行三次。誤差棒代表標準偏差。字母表示根據 LSD 事後檢定所判斷之水分狀態間的顯著差異 ($p < 0.05$)

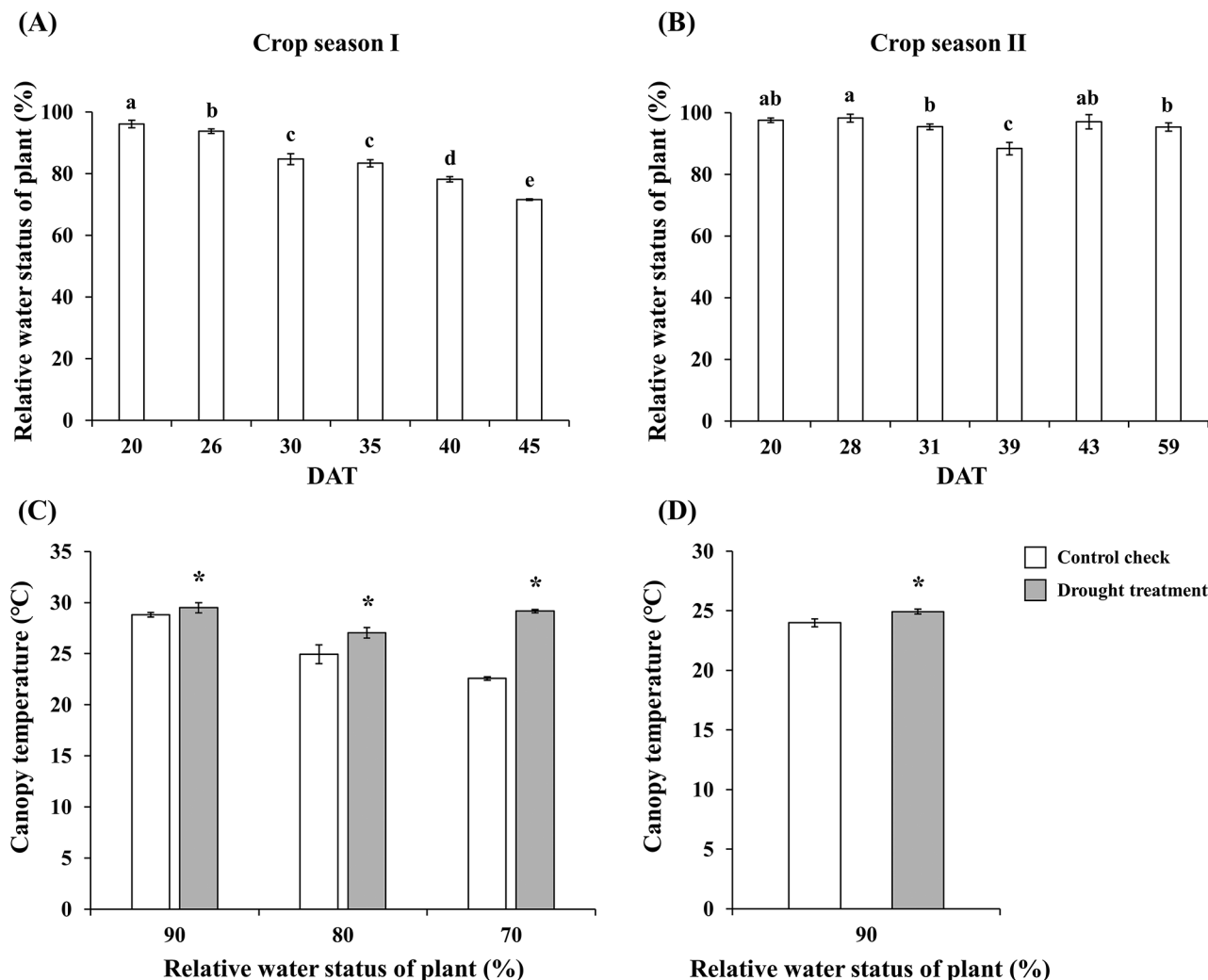


圖 4 2022 年第一期作與第二期作中『TN11』於乾旱處理下的相對含水量及冠層溫度。(a) 第一期作與第二期作中的相對水分狀態。(b) 第一期作與第二期作中的冠層溫度。本試驗獨立進行至少三次。誤差棒代表標準偏差。星號 (*) 表示不同水分狀態之間的顯著差異 (Student t 檢定, $p < 0.05$)。字母表示樣本間的顯著差異 (LSD 事後檢定, $p < 0.05$)。DAT: 處理後天數

水稻生長條件 (Demidchik 等人, 2014)。在本研究中, 『TN11』於中期分蘗期停止灌溉後, 其水分狀態逐漸下降。結果顯示, 當『TN11』的植物水分狀態降至僅90%時, SPAD 值與葉綠素含量顯著降低, 同時伴隨著離子滲漏率的顯著上升。此外, 隨著乾旱嚴重度增加, 乾旱對生理參數的影響也更加明顯 (圖 3)。

葉片含水量是評估植物耐受逆境的重要生理參數。在正常情況下, 植物藉由蒸散作用產生的張力來促進水分運輸。面對缺水時, 植物會調節葉片氣孔關閉以防止水分流失 (Korres 等人, 2017; Ding 等人, 2018)。然而, 氣孔關閉會減少透過水分蒸散所耗散的熱能, 導致葉片溫度上升

溫度 (Jones 2004)。研究已證實葉片溫度與葉片和大氣之間的溫差具有相關性 (Zhang 等人 2019)。本研究結果顯示, 在乾旱逆境下水稻冠層溫度明顯高於對照處理, 且早在植株水分狀態 (RWC) 達到對照處理值的90%時, 即可觀察到顯著差異。在此階段, 從RGB影像中尚難以區分維持在對照處理與乾旱條件下的植株差異, 但可透過熱影像與溫度數據檢測出來 (圖 4 與 5)。葉片溫度容易受到其他植株遮蔭或周圍環境條件的影響。為揭示周遭環境所導致的葉片溫度變化, 已有研究結合熱影像所得之冠層溫度測量與環境條件, 建立

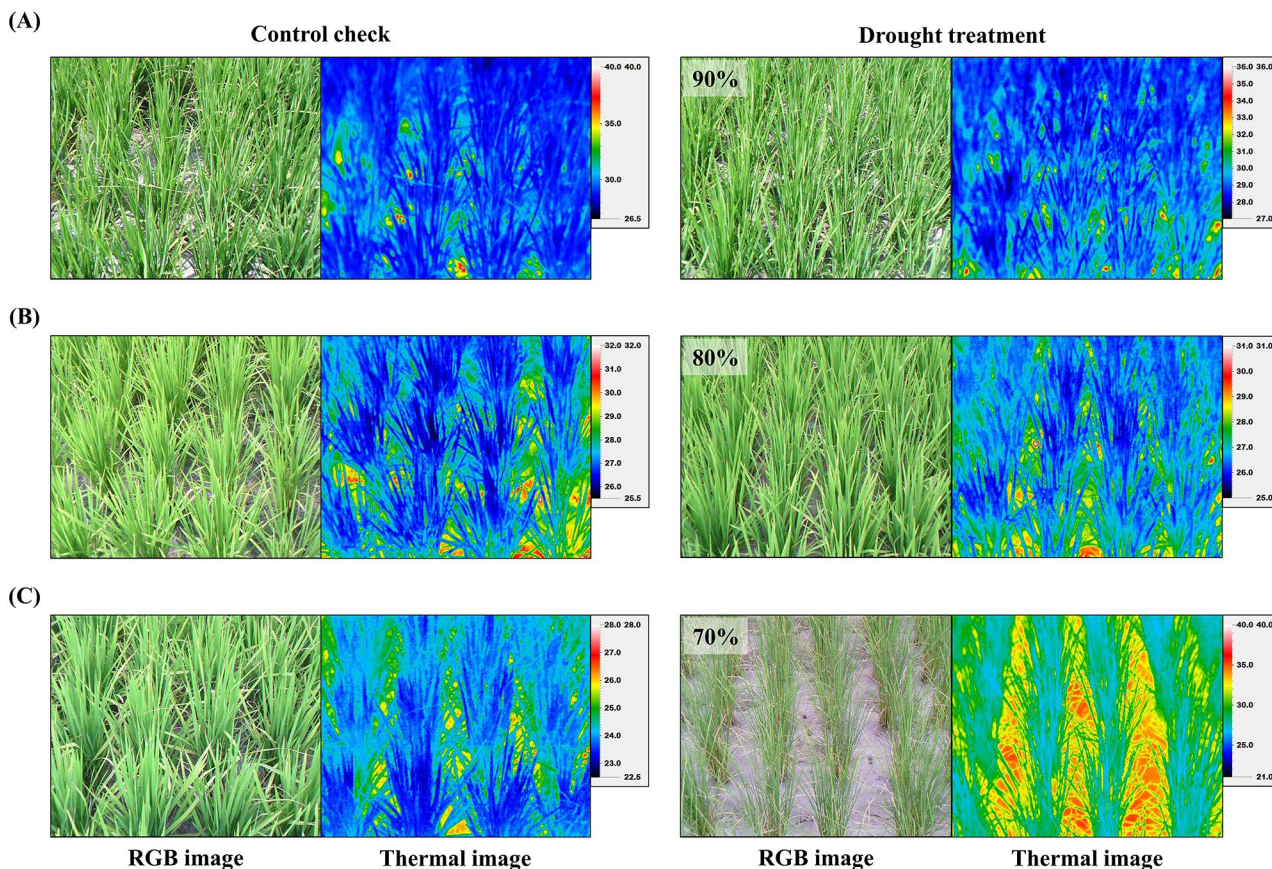


圖 5 水稻品種『臺南11號』在乾旱處理後不同水分狀態下的RGB與熱影像。(a) 水分狀態為對照處理CP值90%之植株與對照處理CP組之間的RGB與熱影像差異。(b) 水分狀態為對照處理CP值80%之植株與對照處理CP組之間的RGB與熱影像差異。(c) 水分狀態為對照處理CP值70%之植株與對照處理CP組之間的RGB與熱影像差異

逆境指數作為植株水分狀態的指標，例如作物水分壓力指數 (CWSI) (Jones 2004 ; Guilioni 等人 2008) 。這些研究揭示了乾旱條件下水稻水分狀態與CWSI值之間存在負相關關係，且CWSI值與氣孔導度高度相關 (Elsherbiny 等人 2021) 。本研究的皮爾森相關係數分析發現，植株水分狀態、CWSI值與乾旱相關生理參數之間具有高度相關性。此外，植株水分狀態與CWSI的迴歸分析結果亦顯示良好的配適度 (圖 6) 。本研究結果凸顯了利用熱影像與CWSI監測水稻乾旱環境的重要性，並有助於發展智慧灌溉系統，以優化用水效率，提升在氣候變遷與水資源短缺挑戰下水稻栽培的永續性。

評估水稻水分狀態或遵循傳統灌溉管理做法而對作物過度灌溉。本研究採用手持式熱成像儀擷取水稻田的RGB與熱影像，並分析冠層溫度、植株水分狀態、生理參數與氣象因子之間的關係，以建立利用作物水分壓力指數評估水稻田水分狀況的模型。本研究結果為田間灌溉決策提供關鍵資訊，並促進基於熱影像技術的智慧型水資源管理系統發展，進而實現水稻栽培中水資源的有效利用與管理。

結論

由於氣候變遷導致降雨量分布不均，水稻灌溉管理至關重要。此外，農民傳統上依賴經驗來

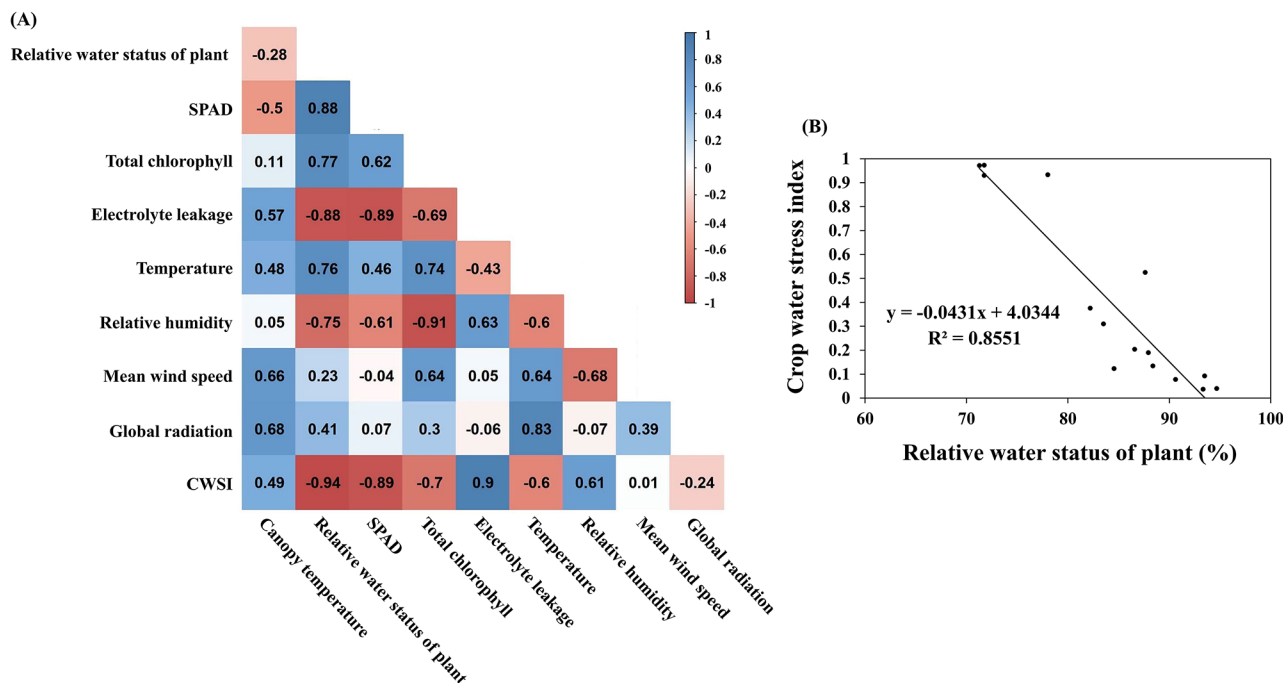


圖 6 CWSI 值與水分狀態之皮爾森相關係數分析及迴歸分析。(a)，顯示冠層溫度、生理參數、氣象因子與乾旱壓力指標在『臺南11號』2022 年第一期及第二期作物之間的皮爾森相關性。(b)，呈現 CWSI 與植株水分狀態 (RWC) 之間的迴歸分析。決定係數 (R²) 亦包含於迴歸分析中，作為衡量相關性強度的指標。

補充資訊

線上版本包含可在以下網址取得的補充資料：<https://doi.org/10.1186/s40529-025-00452-4>。

補充材料 1

致謝

作者感謝智慧永續新農業研究中心 (SMARTer)、創新發展中心及農業部農業試驗所提供的財務支持。我們也感謝李政安及607實驗室其他成員在水田管理方面的協助。

作者貢獻

CYY：撰寫審查與編輯、監督、經費取得及專案管理。YCZ：方法論、資料整理及原始草稿撰寫。YLH：經費取得及專案管理。所有作者均已閱讀並核准最終稿本。

經費

本研究部分由 NSTC 112-2634-F-005-002- 計畫「智慧永續新農業研究中心」(SMARTer) 支持，部分由教育部「高等教育深耕計畫」架構下的「特色領域研究中心計畫」之「永續農業創新發展中心」提供財務支持

(MOE) 在臺灣及農業試驗所、農業部農業部。

資料可用性

由於本研究未產生或分析任何資料集，因此不適用資料共享。

聲明

倫理批准與參與同意 不適用。

出版同意 不適用。

競爭利益

作者們聲明他們沒有任何競爭利益。

收到日期：2024 年 9 月 9 日 / 接受日期：2025 年 1 月 10 日

Published online: 26 January 2025

參考資料

Asibi AE, Chai Q, Coulter JA (2019) Rice blast: a disease with implications for global food security. *Agronomy* 9:451

Barnabás B, Jäger K, Fehér A (2008) The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ* 31:11–38

Bellvert J, Marsal J, Girona J, Gonzalez-Dugo V, Fereres E, Ustin SL, Zarco-Tejada PJ (2016) Airborne thermal imagery to detect the seasonal evolution of crop water status in peach, nectarine and Saturn peach orchards. *Remote Sens* 8:39

Dasgupta P, Das BS, Sen SK (2015) Soil water potential and recoverable water stress in drought tolerant and susceptible rice varieties. *Agric Water Manage* 152:110–118

Demidchik V, Straltsova D, Medvedev SS, Pozhvanov GA, Sokolik A, Yurin V (2014) Stress-induced electrolyte leakage: the role of K⁺-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. *J Exp Bot* 65:1259–1270

Ding L, Li Y, Gao L, Lu Z, Wang M, Ling N, Shen Q, Guo S (2018) Aquaporin expression and water transport pathways inside leaves are affected by nitrogen supply through transpiration in rice plants. *Int J Mol Sci* 19:256

Elsayed S, Elhoweity M, Ibrahim HH, Dewir YH, Migdadi HM, Schmidhalter U (2017) Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water

- status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. *Agric Water Manage* 189:98–110
- Elsherbiny O, Zhou L, Feng L, Qiu Z (2021) Integration of visible and thermal imagery with an artificial neural network approach for robust forecasting of canopy water content in rice. *Remote Sens* 13:1785
- Godson-Amamoo S, Kato T, Katsura K (2022) Empirical setting of the water stressed baseline increases the uncertainty of the crop water stress index in a humid temperate climate in different water regimes. *Water* 14:1833
- Guilioni L, Jones HG, Leinonen I, Lhomme JP (2008) On the relationships between stomatal resistance and leaf temperatures in thermography. *Agric Meteorol* 148:1908–1912
- Guo J, Tian G, Zhou Y, Wang M, Ling N, Shen Q, Guo S (2016) Evaluation of the grain yield and nitrogen nutrient status of wheat (*Triticum aestivum* L.) using thermal imaging. *Field Crops Res* 196:463–472
- Hu SP, Zhou Y, Zhang L, Zhu XD, Li L, Luo LJ, Liu GL, Zhou QM (2009) Correlation and quantitative trait loci analyses of total chlorophyll content and photosynthetic rate of rice (*Oryza sativa*) under water stress and well-watered conditions. *J Integr Plant Biol* 51:879–888
- Hussain S, Huang J, Huang J, Ahmad S, Nanda S, Anwar S, Shakoar A, Zhu C, Zhu L, Cao X, Jin Q, Zhang J (2020) Rice production under climate change: adaptations and mitigating strategies. In: Fahad S, Hasanuzzaman M, Alam M, Ullah H, Saeed M, Khan IA, Adnan M (eds) *Environment, climate, plant and vegetation growth*. Springer, Berlin, pp 659–686
- Idso SB, Jackson RD, Pinter PJ Jr, Reginato RJ, Hatfield JL (1981) Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *J Agric Meteorol* 24:45–55
- Jackson RD, Idso SB, Reginato RJ, Pinter PJ Jr (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour Res* 17:1133–1138
- Jambunathan N (2010) Determination and detection of reactive oxygen species (ROS), lipid peroxidation, and electrolyte leakage in plants. In: Sunkar R (ed) *Plant stress tolerance: methods and protocols*. Humana, Totowa, pp 291–297
- Jones HG (2004) Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Adv Bot Res* 41:107–163
- Jung KH, Seo YS, Walia H, Cao P, Fukao T, Canlas PE, Amonpant F, Bailey-Serres J, Ronald PC (2010) The submergence tolerance regulator *Sub1A* mediates stress-responsive expression of *AP2/ERF* transcription factors. *Plant Physiol* 152:1674–1692
- Khan F, Upreti P, Singh R, Shukla PK, Shirke PA (2017a) Physiological performance of two contrasting rice varieties under water stress. *Physiol Mol Biol Plants* 23:85–97
- Khan N, Ray RL, Sargani GR, Ihtisham M, Khayyam M, Ismail S (2021) Current progress and future prospects of agricultural technology: gateway to sustainable agriculture. *Sustainability* 13:4883
- Khanal S, Fulton J, Shearer S (2017a) An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Comput Electron Agric* 139:22–32
- Kim SL, Kim N, Lee H, Lee E, Cheon KS, Kim M, Baek J, Choi I, Ji H, Yoon IS, Jung KH (2020a) High-throughput phenotyping platform for analyzing drought tolerance in rice. *Planta* 252:38
- Kim Y, Chung YS, Lee E, Tripathi P, Heo S, Kim KH (2020b) Root response to drought stress in rice (*Oryza sativa* L.). *Int J Mol Sci* 21:1513
- Korres NE, Norsworthy JK, Burgos NR, Oosterhuis DM (2017) Temperature and drought impacts on rice production: an agronomic perspective regarding short-and long-term adaptation measures. *Water Resour Rural Dev* 9:12–27
- Lamaoui M, Jemo M, Datla R, Bekkaoui F (2018) Heat and drought stresses in crops and approaches for their mitigation. *Front Chem* 6:26
- Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N (2016) Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature* 529:84–87
- Li L, Zhang Q, Huang D (2014) A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors* 14:20078–20111
- Linke M, Beuche H, Geyer M, Hellebrand HJ (2000) Possibilities and limits of the use of thermography for the examination of horticultural products. *Agrartech Forsch* 6:110–114
- Luan Y, Xu J, Lv Y, Liu X, Wang H, Liu S (2021) Improving the performance in crop water deficit diagnosis with canopy temperature spatial distribution information measured by thermal imaging. *Agric Water Manage* 246:106699
- Mahlein AK (2016) Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Dis* 100:241–1251
- Melandri G, Prashar A, McCouch SR, Van Der Linden G, Jones HG, Kadam N, Jagadish K, Bouwmeester H, Ruyter-Spira C (2020) Association mapping and genetic dissection of drought-induced canopy temperature differences in rice. *J Exp Bot* 71:1614–1627
- Pandey V, Shukla A (2015) Acclimation and tolerance strategies of rice under drought stress. *Rice Sci* 22:147–161
- Pipatsitee P, Eiumnroh A, Praseartkul P, Taota K, Kongpugdee S, Sakulleerungroj K, Cha-um S (2018) Application of infrared thermography to assess cassava physiology under water deficit condition. *Plant Prod Sci* 21:398–406
- Schneider P, Asch F (2020) Rice production and food security in Asian mega deltas—A review on characteristics, vulnerabilities and agricultural adaptation options to cope with climate change. *J Agron Crop Sci* 206:491–503
- Sedaghat M, Tahmasebi-Sarvestani Z, Emam Y, Mokhtassi-Bidgoli A (2017) Physiological and antioxidant responses of winter wheat cultivars to strigolactone and salicylic acid in drought. *Plant Physiol Biochem* 119:59–69
- Sultana S, Faruque M, Islam MR (2022) Rice grain quality parameters and determination tools: a review on the current developments and future prospects. *Int J Food Prop* 25:1063–1078
- Swapna S, Shylaraj KS (2017) Screening for osmotic stress responses in rice varieties under drought condition. *Rice Sci* 24:253–263
- Ullah H, Mohammadi A, Datta A (2018) Growth, yield and water productivity of selected lowland Thai rice varieties under different cultivation methods and alternate wetting and drying irrigation. *Ann Appl Biol* 173:302–312
- Wintermans J, De Mots A (1965) Spectrophotometric characteristics of chlorophylls a and b and their phenophytins in ethanol. *Biochim Biophys Acta-Biophys Incl Photosynth* 109:448–453
- Yang Y, Yu J, Qian Q, Shang L (2022) Enhancement of heat and drought stress tolerance in rice by genetic manipulation: a systematic review. *Rice* 15:67
- Zhang R, Zhou Y, Yue Z, Chen X, Cao X, Ai X, Jiang B, Xing Y (2019) The leaf-air temperature difference reflects the variation in water status and photosynthesis of sorghum under waterlogged conditions. *PLoS ONE* 14:e0219209

出版商註記

Springer Nature 對已發表地圖中的管轄權聲明以及機構隸屬關係保持中立。