

農業新知

暨氣候智能農業研究趨勢交流 赴美參與ASA-CSSA-SSSA年會

文圖／李誠紘、吳以健、鄧執庸

一、前言

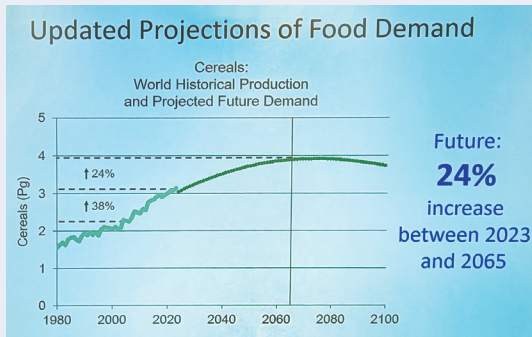
農業生產穩定性與氣候條件密切相關，政府間氣候變化專門委員會 (IPCC) 第六次評估報告 (AR6) 指出，人為造成的氣候變遷，已對全球農業系統造成實質衝擊。極端強降雨、高溫及乾旱，不僅導致主要作物產量下降，更使品質面臨劣化威脅；同時，病蟲害分布擴張，引發多重逆境等複合性風險，大幅增加農業管理的難度。在此背景下，農業研究面臨雙重任務，包括須提升作物對逆境的適應能力，維持糧食與農產品穩定供應，另一方面，農業部門也需回應全球淨零轉型趨勢，降低生產過程中的溫室氣體排放，並提升土壤碳匯與資源利用效率。全球已有逾 130 個國家宣布推動淨零排放目標，臺灣亦已將 2050 年溫室氣體淨零排放納入法定長期減量目標。因此如何運用數位科技，加速育成新抗逆境品種及開發栽培管理技術等，以達成永續生產、氣候韌性、淨零減碳三者目標，成為亟需導入跨領域技術的農業研究議題。為此，114 年前往美國出席於猶他州鹽湖城舉辦之農藝、作物與土壤科學學會聯合年會 (ASA-CSSA-SSSA International Annual Meeting)，期透過為期四天的研討會深度研習與學術交流，汲取美國在高通量表型鑑定與氣候智能農業等領域之最新研究量能，作為國內未來擬定創新農業研究戰略之參考依據。

二、下一次的綠色革命藍圖

1950 年 代 綠 色 革 命 (Green Revolution)，藉高產抗病的半矮性糧食作物品種，導入化肥、農藥及機械，形成高產穩定的農業生產系統，成功解決了全球人口快速增長所帶來的糧食危機，卻也使農業體系陷入依賴化學資材的困境，更導致土壤流失、生物多樣性喪失及溫室氣體排放等長期環境代價。面對此一長期累積的歷史，明尼蘇達大學 Mitch Hunter 博士，發表「多元化促進再生：未來 40 年永遠的綠色革命」(Diversification for Regeneration: A Forever Green Revolution for the Next 40 Years) 的主題演講，提出跨越現有農業框架的下一波轉型藍圖。

Hunter 指出，聯合國預測全球人口將在 2065 年趨近 88 億人的增長高峰後進入平原期，屆時全球糧食需求較現今將僅增加約 24%，遠低於過去預測的 60-110%，顯示未來農業轉型的重點，不宜再單純延續以增產為核心的綠色革命模式，而應在確保糧食穩定供應的基礎上，回頭面對現行農業體系長期累積的環境代價。Hunter 提出「連續活體覆蓋」(Continuous Living Cover) 架構，以活體植物全年覆蓋農田，填補傳統農業生產的休耕空窗期，緩解作物收穫後數月地表裸露造成的碳排放、土壤侵蝕與硝酸鹽淋溶。在作物選擇上，Hunter 提出三種新

興作物，包括第一種冬季油料作物如薺藍 (Camelina; *Camelina sativa*) 與 荊 蓼 (Pennycress; *Thlaspi arvense*)，此兩者均含高脂肪及高蛋白質，薺藍脂肪富含亞麻酸 (omega-3)，荊蓼脂肪可供生質燃料或永續航空燃料，兩種作物的油粕更可作為飼料原料；第二種是將多年生木本作物搭配其他作物以混林農業模式生產，若要推廣此模式，尚缺產量穩定且可經濟栽培的品種，但相較於一年生作物，木本作物育種週期很長 (如榛果 17 年以上)，需要導入新技術加速育成；第三種作物是多年生糧食作物，Hunter 目前以多年生牧草 - 中間偃麥草 (*Thinopyrum intermedium*；商品名 Kernza®) 作為代表案例，透過馴化與選拔，將原本主要作為牧草利用的多年生作物，改良穀粒產量、大小與落粒性，成為具經濟栽培潛力的品種。此作物品種根系可深達地下 3 公尺，有助於長期固碳、穩定土壤並攔截硝酸鹽淋溶。不過，目前 Kernza® 的產量仍偏低，每公頃約 200-450 公斤，僅約水稻的 7.5%，且連作後第二年產量會顯著下降。為突破產業化初期的生產與市場限制，Hunter 團隊透過政策誘因引入商業力量，例如通用磨坊 (General Mills) 已在早餐穀物產品中添加 1% Kernza® 原料，作為市場導入的初步嘗試。同時，該團隊也整合遺傳、育種、栽培、土壤及食品等領域專家，透過跨領域合作推動此作物的研究發展。



- 明尼蘇達大學 Mitch Hunter 博士指出，2065 年的糧食作物需求較 2020 年增加，增幅 24%

Forever Green

Advancing over 15 new crops



Perennial Crops
Kernza®
Perennial wheat
Perennial oats
Perennial cereal rye
Perennial flax
Siphun/silflower
Perennial sunflower
Alfalfa
Kura clover
Native polyculture
grassland mixtures

Winter Annuals
Winter canelina
Pennycress
Winter barley
Winter & spring field pea
Winter hybrid rye
Winter durum
Hairy vetch

Native Woody Crops
Hazelnuts
Elderberry
Shrub willow
Agroforestry

- Dr. Hunter 指出新型的作物可做為溫帶國家未來綠色革命的架構，包含多年生作物 Kernza®、蜜源作物芥莫及木本作物榛果

三、數位工具重塑育種選拔策略：利用人工智慧及非破壞性檢驗

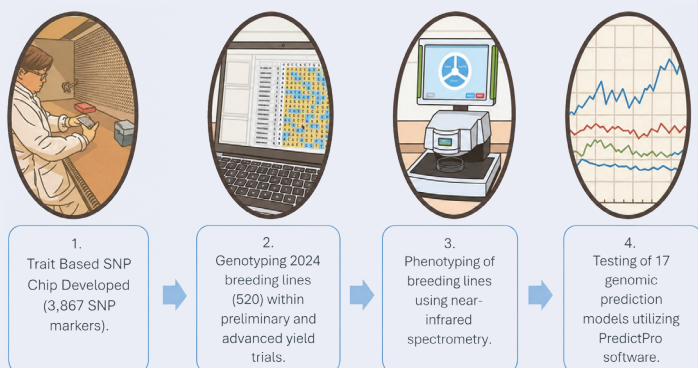
面對新興作物育種期程漫長及基因體資源匱乏的挑戰，導入數位工具並建立表型資料驅動的精準選拔模型，已成為提升育種效率的有效方案。聖路易大學 (Saint Louis University) 針對缺少遺傳資訊的新興作物，以低成本的手持式近紅外光感測器，蒐集大量種子 (>20,000 粒)

的光譜數據，利用影像分析軟體 PlantCV 萃取 HSV 色彩空間 (色相 Hue、飽和度 Saturation、明度 Value) 特徵數值，搭配田間外表型數據，建立預測模型，結果模型將光譜數據預測發芽率及田間性狀，相關係數達 0.33，為在缺少遺傳資訊情境下，低成本非破壞性工具應用於輔助育種選拔的方法。在複雜數量性狀的選拔上，北達科他州大學 Carly George 等人以菜豆 (*Phaseolus vulgaris* L.) 提出了一套結合基因體預測 (Genomic Prediction) 與機器學習的輔助選拔策略，使用 3.9K AgriSeq SNP 晶片取得 3,867 個 SNPs 基因型，以近紅外光譜儀量測蛋白質含量。透過整合極端梯度提升 (XGBoost)、隨機森林 (Random Forest) 與支持向量機 (SVM) 等演算法，建立了決定係數約 55% 的模型，使育種人員能在早期世代淘汰 33% 低蛋白質的品系，克服產量與品質性狀 (蛋白質含量) 間的負相關性。

Measuring reflectance on seedlings with handheld spectrometers



- Matt Rubin 利用低成本手持式近紅外光分析儀蒐集種子表型數據。臺灣廠商生產 NIR-G1 手持式近紅外光分析儀 (左 1)



- 利用晶片進行低成本基因型分析，再利用 NIR 進行外表型預測，建立預測蛋白質含量模型

四、水稻耐候品種開發

氣候變遷對水稻生產的衝擊，過去多以日間高溫及乾旱為主要研究焦點；然而，長期氣象資料顯示，夜間增溫對稻作生產的影響同樣不可忽視，甚至可能更為顯著。國際水稻研究所 (IRRI) 長達 24 年的田間資料 (1979-2003 年) 顯示，亞洲稻作區每日最高溫僅上升約 0.35°C ，夜間最低溫卻上升達 1.13°C ；夜溫每上升 1°C ，水稻產量平均下降約 10%。夜間高溫將加速植株呼吸速率，消耗白天光合作用累積的同化產物，造成產量下降。利用增溫設備，將夜間溫度提升至 30°C ，結果熱敏感品種 Antonio 與耐熱性較佳的 Colorado 均出現顯著產量下降，確認夜間高溫對產量的抑制效應，具有跨品種的普遍性；相對地，日間高溫的危害主要集中於開花授粉期，德州農工大學 Mohammed Munkaila 以紅外線加熱器直

接在水田模擬高溫環境，發現當氣溫超過 35°C 時，花藥絨氈層功能受損，花粉活力下降、花粉管伸長受阻，熱敏感品種 Antonio 的稔實率在日高溫處理下降幅達 54%。由此可見，日間高溫危害主要在花粉期，而夜間高溫的損害則在穀粒充實期，兩者的育種策略因此有所不同。針對日間高溫

對開花授粉的衝擊，研究者提出以「早晨開花」(Early Morning Flowering, EMF) 調整開花時機的策略，使授粉在日間高溫來臨前完成，以篩選到品系開花時間提前 1.5-2 小時，在高溫下稔實率 45-90%。另在夜間高溫耐受性方面，較高的光合碳同化效率，可在白天積累更多同化產物，一定程度補償夜間呼吸消耗，相關基因座位已獲初步定位，但功能性基因尚未完成精細定位與驗證。

Effect of High Night Temperature on Rice Reproductive Development and Pollen Function

Mohammed Munkaila

Suman Lamichhane, Lee Tarpley

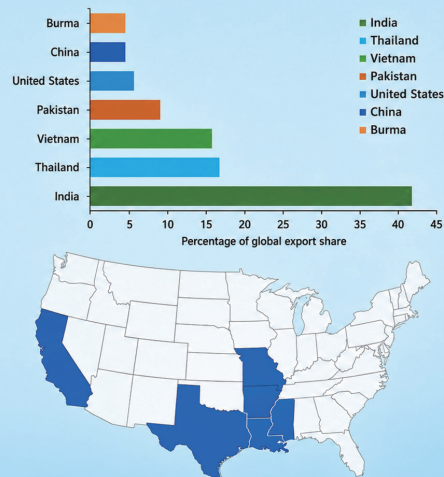


TEXAS A&M UNIVERSITY

- Texas A&M University 由 Mohammed Munkaila 發表夜間高溫對水稻生殖生長階段的具體影響，針對花粉功能的生理機制探討

Background

- “Rice is life”
- US produced 11.3M metric tons in 2024 (USDA-NASS, 2025)
- US is a major exporter (USDA-ERS, 2025)
- Contributes \$34 billion to the US economy (USARice, 2018)
- Four regions produce almost all US rice (USDA-ERS)
 - Arkansas Grand Prairie
 - Mississippi Delta
 - Sacramento Valley (California)
 - Gulf Coast (Texas, Louisiana, Mississippi)



- 引用美國農部統計數據，美國 2024 年水稻產量達 1,130 萬公噸，經濟貢獻值約 340 億美元，仍是世界第五大稻米出口國，水稻生產集中於阿肯色大草原、密西西比三角洲、加州沙加緬度谷地、墨西哥灣沿岸

五、結論與建議

此次赴美參與 ASA-CSSA-SSSA 聯合年會，可見國際農藝研究已由單純追求作物增產，逐步轉向兼顧糧食穩定供應、氣候韌性、資源效率與減碳效益的整合型研究。年會中所提出之連續活體覆蓋、多年生作物開發、低成本高通量表型鑑定、機器學習輔助選拔及水稻高溫逆境生理研究，均顯示未來農業研究須結合育種、栽培、土壤、感測技術、資料科學，跨域以求產業應用，以因應氣候變遷下產量與品質不穩定的風險。針對臺灣農業後續研究方向，建議如下：第一，可參考 Dr. Hunter 提出之農田全年覆蓋概念，於休耕期、轉作田區或水旱輪作系統中，評估

導入具經濟價值與土壤保育效益之覆蓋作物，綜合評估作物的農藝性狀、土壤及病蟲草等。第二，面對高溫、乾旱及複合逆境加劇，抗逆境品種育成須縮短選拔週期，建議於現行育種流程中逐步導入手持式近紅外光譜、影像分析與機器學習模型，用於早期世代大量材料之非破壞性篩選。第三，水稻耐高溫研究應區分日間高溫與夜間高溫的危害機制，分別針對開花授粉期、稔實率、穀粒充實、白堊質及產量組成等性狀建立選拔標準。未來若能將田間試驗、環境資料、表型資料與品種選育系統整合，將有助於提升國內稻作面對氣候變遷之調適能力。