

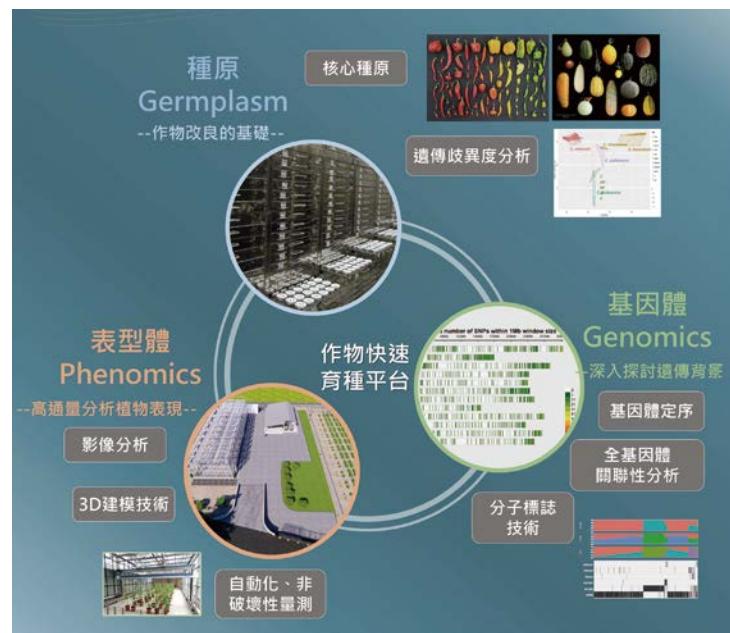
育種 × 數據 × AI： 高通量表型體技術開啟臺灣 作物高效育種新模式

撰文 | 農業試驗所 林思妤、李承彬、陳靜、林大鈞、王怡雯、陳述

前言

育種，是人類農業發展的根基，從早期農夫根據經驗挑選優良植株並留下種子，到現代透過科學方法改良各種作物性狀，育種始終在默默支撐著糧食安全與農業進步。然而，隨著氣候變遷，農業面臨的挑戰日益嚴峻，傳統育種在應對速度與規模上顯得力有未逮，亟需導入創新科技以提升育種

效能。為突破這樣的困境，數位育種（Digital Breeding）的概念應運而生。數位育種的核心是以大數據驅動的現代化育種策略，透過整合基因體、表型體及環境資訊等多元數據，並運用演算法與人工智能等進行深入分析，預測作物



鏈結種原、基因體、表型體的作物快速育種平台。

的潛在表現，達到提高育種選拔效率的目標。

在育種流程中，「基因體」與「表型體」一直扮演著關鍵角色。近年來基因體技術發展迅速，一次即可解析上萬筆基因資訊，但作物的表型分析卻仍多

仰賴人工觀察與手動紀錄，不僅耗時費力，還容易受人為主觀判斷之影響，成為育種流程無法加速的主要瓶頸。所幸隨著感測科技、自動化設備與影像處理技術的快速進步，植物表型分析逐漸邁入高通量與數位化的時代，這項進展成功為數位育種補上關鍵的一塊拼圖。為此，本文將簡介高通量植物表型體技術的核心概念與實務應用，並探討其在數位育種體系中扮演的角色。

什麼是高通量植物表型分析技術？—植物也能「自動健檢」

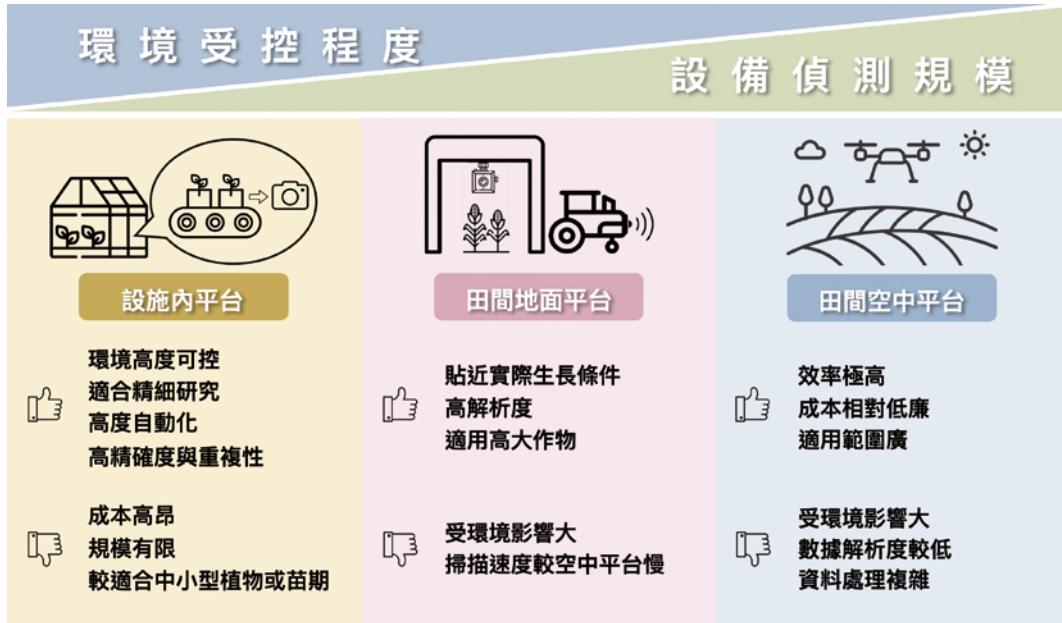
植物的「表型」是指在特定基因型與環境交互作用下所表現出來的所有特性。簡單來說，就是植物表現出來的特徵，例如株高、葉面積、花期、果實大小、顏色變化，甚至是抗病與耐逆境能力等，都是構成表型的一部分，而這些「表型」也正是育種者在進行品種改良時的重要依據。過去植物的表型須靠人工一株株測量與紀錄，不僅費時費力，而且會因每個人主觀不同，出現資料誤差。隨著科技進步，現在我們可以利用感測器、攝影機、影像分析系統與自動化設備，快速且準確地大量蒐集植物表型資料，進而加以分析，這就是「高通量植物表型分析技術」。就像醫院的健檢中心可以在短時間內替很多人做體檢，高通量表型分析技術也能在一天內為上百株、甚至上千株植物「健檢」，而且是標準化、自動化的程序，不易產

生人為誤差。舉例來說，利用輸送帶系統將植株依序通過裝有感測器的拍攝區，便能蒐集到不同角度的影像，更能進一步分析葉面積、植株高度、光合作用能力，甚至病害發生的情形。這項技術不只能省去大量人力，也能讓收集資料的過程更客觀、更精確，為品種評估與選拔提供更為完整的數據。

高通量表型分析設備介紹—自動化與數位化的育種利器

高通量植物表型分析的平台種類繁多，依據使用環境可大致分為設施內平台與田間平台，甚至包括專為特定性狀（如地下根系）觀察所設計的特殊設備。設施內平台多設置於實驗室、溫室或植物工廠中，已確保在穩定且可控的環境下進行量測，具備高精度與高重現性的優勢；不過，這類平台通常造價高昂，建置與維護成本較高。相較之下，田間平台則強調實地應用，透過自走式機器或無人機等機動載具，搭載各式感測器，進行大範圍、多時點的數據蒐集。其優點是靈活、可大規模應用，能即時呈現作物在自然環境中的真實狀態，但資料精確度會受到氣候與場地變異所影響。

除了平台本身之差異，平台中所搭載的感測器技術也是關鍵。就像人們進行健康檢查時，會根據不同檢查項目選擇對應的儀器，植物的表型分析同



高通量植物表型體分析平台之種類及優缺點分析。

樣仰賴多種感測器，如最常見的RGB影像感測器可快速取得植株外觀影像，應用於植株高度、葉面積、顏色變化與生長速率等性狀之量測；多光譜與高光譜感測器因能捕捉人眼無法辨識的光譜波段，可偵測作物的營養狀態、生長壓力或病害徵兆；熱影像感測器能偵測植物表面之溫度變化，可藉此評估其耐熱與抗旱能力；雷射掃描儀則能建立高解析度的三維模型，精確量測植株結構、生物量與葉片分布。

此外，像X光斷層掃描（CT）與核磁共振（MRI）等感測技術，則能在不破壞植株的情況下觀察地下根系，取得過去難以獲得的資訊。透過這些感測技術的協同應用，研究人員能從更多角

度、以更高解析度掌握植物的生長狀態，進而強化育種選拔的判斷基礎，加速理想品種的選拔。

國家植物表型體分析系統— 打造臺灣數位育種的基地

有鑑於高通量植物表型體分析技術的重要性，農業部責成農業試驗所建置「國家植物表型體分析中心」，於民國113年驗收完成並啟用。「國家植物表型體分析中心」園區占地0.78公頃，是國內首座同時擁有全環控與自然田間環境的大型自動化高通量表型體分析設施。設施主要分為兩區，其一為智慧環控溫室，其內建置德國LemnaTec PhenoAIxpert HT輸送帶及影

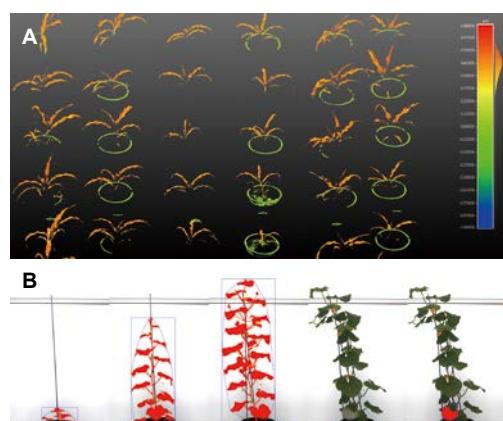


國家植物表型體分析中心溫室內之 (A) 德國 LemnaTec PhenoAlxpert HT 輸送帶系統、(B) 影像分析系統，以及 (C) 荷蘭 Phenospex FieldScan 軌道式系統、(D) 多光譜掃描儀。

像分析設備 (如上圖A、B)，配置光學、雷射及高光譜感測器，能涵蓋作物全生育期、多模態數據收集。另一區位於鄰近田區，建置可分析5,000株作物之荷蘭 Phenospex FieldScan軌道式系統 (如上圖C、D)，其上搭載雙PlantEye F600雷射多光譜掃描器，可以快速取得植物外觀數據及植生指標。此外，中心亦建置瑞士Wingtra公司之田間無人機，搭載植物光學、多光譜及光達感測設備。

經由前述各種感測器取得影像後，後續的數據分析亦是決勝關鍵。「國家植物表型體分析中心」同步建置影像分析、植物參數轉換等標準化分析流程，

可顯著提升性狀分析效率與選拔精度，例如在硬質玉米與毛豆數位育種工作中，藉由整合影像資料與表型體資料，



國家植物表型體分析中心建置之標準化影像分析流程。(A) 玉米生長期 NDVI 渲染圖；(B) 甜瓜全生育期影像分析。

建立對應「高氮效率」與「紅冠腐病抗性」之關聯性表型體參數；設施內則以甜瓜為模式作物，完成甜瓜全生育期多種影像(RGB、雷射、高光譜)之取得，並建立標準化影像分析流程，已成功取得15項重要植物參數。

這座國內整合型大型表型體分析設施，是臺灣數位育種的重要核心場域，未來更期望藉此平台促進科研單位與育種機構的跨領域合作，共同面對氣候與環境日益嚴峻的挑戰。

實際應用案例— 高通量表型技術落實於作物育種

高通量表型體技術已廣泛應用於育種流程中的關鍵環節，例如種原篩選與品種選拔，茲舉例如下：

案例一

Rane等人(2021)以24個綠豆種原為材料進行缺水逆境試驗，試驗中使用高通量輸送帶表型體平台搭載RGB、近紅外與紅外光相機，記錄並提取植株外觀、含水量及表面溫度等時序性性狀，同時結合機器學習精準預測綠豆生物量，最終篩選出2個具耐旱潛力的綠豆種原。此案例凸顯高通量表型體技術在掌握作物生長動態與分析關鍵性狀方面的優勢，可應用於種原篩選。

案例二

國際稻米研究所研究團隊運用24

公尺長的拖拉機搭載多光譜感測器及超聲波測距儀，每小時可快速掃描約3,000個試驗小區，連續追蹤上千個水稻品系的株高、綠色植被指數與冠層溫度等多項重要性狀，最終找到影響高產水稻品種IR64產量降低相關的4個等位基因，提供育種者移除不利基因並篩選高產新品種的重要依據(Tanger et al. 2017)。此案例顯示高通量表型技術可大幅提升表型分析之數據量，使育種選拔更加精準。

結語— 跨域協作，推進數位育種的未來

數位育種的推展，有賴於多元資料的整合與應用。隨著感測技術與AI演算法的進步，如何將作物表型體、基因體與環境資訊等大量且多樣的數據，有效轉化為具備育種選拔意義的資訊，逐漸成為研究與實務的重要課題。高通量植物表型體技術的導入，為育種提供高效率且高精度的數據支撐，使選拔決策建立在更堅實的科學基礎上。

數位育種之真正落實所仰賴的不僅是個別技術進展，更需要育種、生物資訊、感測影像與人工智慧等不同領域的密切協作。從數據取得、性狀分析到模型預測，每一環節皆需專業整合與協同運作，藉由跨領域的資源與專業整合，為育種決策注入更多元視角與技術支持，也開啟臺灣作物育種從經驗導向邁向數據驅動、高效精準的新模式。