

植物表型體學影像技術介紹

作物改良科 助理研究員 陳嘉雯 分機 240

前言

隨著氣候變遷加劇，不可預測的極端氣候事件發生頻繁，全球糧食安全正面臨前所未有的挑戰。在有限資源下，同時提升作物產量、品質與耐逆性，已成為農業科學的重要課題。傳統育種依賴有限的人工選拔與主觀的表型觀察，效率相對緩慢；相較之下，表型體學 (Phenomics) 透過高通量、非破壞性，並可跨越多時間尺度的數據蒐集與分析，能在更短時間內精確解析作物性狀，成為連結各體學領域的重要橋樑。本文將介紹表型體學的核心概念與背景、關鍵影像分析技術及其應用，最後探討未來可能面臨的挑戰與發展機會。

表型體學的核心概念

發展表型體學的目標是期望藉由現代影像技術，系統性蒐集不同時間及空間尺度下的作物性狀資訊 (表1)，並進一步揭示作物基因型、表型與環境之間的關係 (Houle *et al.*, 2010)。隨著感測技術、影像分析與自動化平台的進步，表型體學的數據蒐集效率與精度都有了大幅提升，

並逐漸應用於環控溫室與田間。

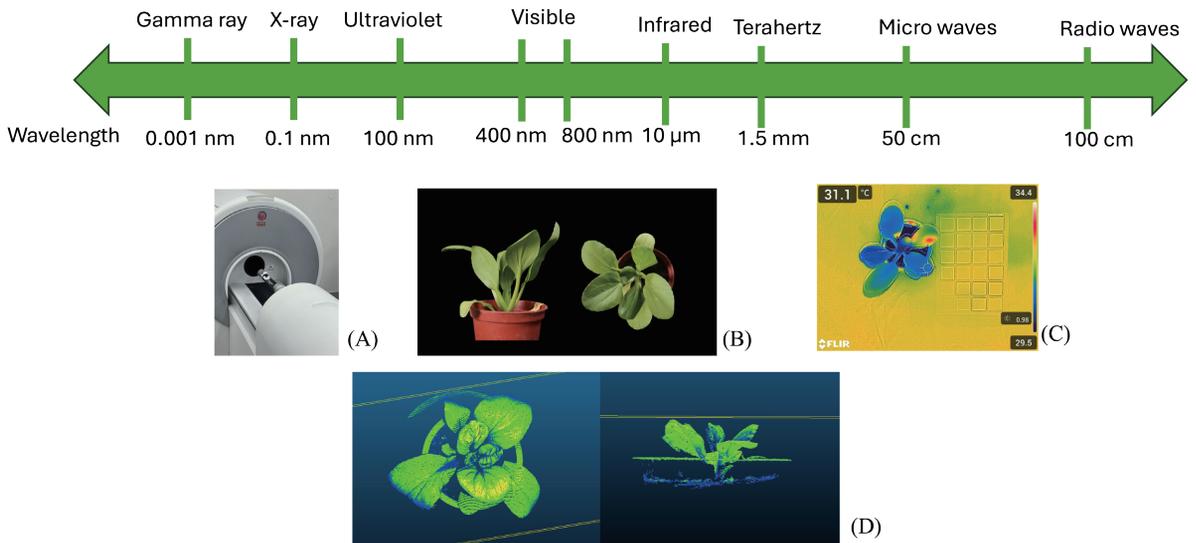
植物表型體學分析的關鍵影像技術

表型影像的獲取依據不同波長原理，衍生出多種感測器與影像擷取技術，使研究者能選用最合適的工具，精準記錄作物在不同層面的表型性狀 (圖1)：

1. RGB影像 (Red-green-blue Imagery)：利用紅、綠、藍三個波段取得影像，操作簡單、取得容易，可用於株高、葉面積測量及病斑檢測等。其優點是成本低、應用面廣，但因缺乏額外光譜波段，對須依賴精細波長或非可見光訊號 (如熱影像) 的特徵無法有效辨識，限制了部分生理與生化性狀的分析深度 (Jiang and Zhu, 2024)。
2. 熱影像 (Thermal Imaging)：透過紅外線偵測植物釋放的輻射量測葉面溫度，能間接反應植物的生理狀態，例如預估植物氣孔導度的動態變化或是葉片蒸散速率，可應用於熱逆境及水分逆境的研究 (Pineda *et al.*, 2020)。但其限制為解析度通常低於RGB影像且易受到環境條件干擾。

表 1. 作物性狀的 3 大類型

性狀類型	具體調查項目
形態性狀 (morphological traits)	株高、葉面積、根系結構等
生理性狀 (physiological traits)	光合效率、水分利用率、養分吸收能力等
生化性狀 (biochemical traits)	葉綠素含量、氮含量、次生代謝物組成等



▲圖 1. 依據不同波長原理衍生出多種感測器與影像擷取技術 (A) X-ray CT、(B) RGB 影像、(C) 熱影像及 (D) 高光譜影像 (修改自 Jiang and Zhu, 2024)。

3. 螢光影像 (Fluorescent Imaging)：偵測葉綠素螢光訊號變化，用於評估光合作用效率及植物生理狀態，適合非破壞性與長期監測，並能於逆境（如乾旱、養分缺乏、病害）早期進行診斷。其限制為激發光與螢光的穿透深度有限，且受光照條件差異影響 (Jiang and Zhu, 2024)。
4. 多光譜影像 (Multispectral Imaging)：在可見光之外額外擷取數個特定波段影像，可用於計算植被指數（如NDVI）以評估養分狀態、監測水分及病害早期徵兆。其限制為波段數量有限、靈活性低，對須精細光譜資訊的性狀解析能力不足 (Jiang and Zhu, 2024)。
5. 高光譜影像 (Hyperspectral Imaging)：連續獲取數百至上千個窄波段影像，具高光譜解析度，能識別肉眼不可見的水分、養分及病害訊號，廣

泛應用於精準農業與育種。然而，其數據量龐大、運算需求高，且資料解讀需專業光譜分析與建模，處理耗時。

6. 三維影像 (3D Imaging)：可用於重建植株結構，用於精確計算體積、葉角度與冠層結構。
7. X-ray CT、MRI、PET影像：可應用於高解析度的根系觀測與組織層級的生理追蹤。

表型體學在農業上的實際應用

1. 精準與數位育種：傳統育種多依賴收穫期的有限性狀進行選拔，而現代表型體學可在作物生長過程中，即時獲取多種性狀資訊，包括形態（如葉片數、葉角度）、生理（如光合效率、氮利用效率）與生化特徵。這使育種人員能夠在不同環境條件下，同時評估多個目標性狀，並結合基因體分析進行基因體選拔 (Genomic Selection) 與理想株型設計

(Ideotype Design) 。

實際案例有Shi et al. (2019) 將2種水稻品種的表型數據結合作物模型分析，發現幼苗期的葉面積指數及灌漿期的葉綠素含量是提高產量的關鍵指標，可作為選拔目標。另筆者於2024年10月至12月赴亞蔬-世界蔬菜中心以「發展芸薹屬表型體資料庫以促進複雜性狀篩選」為題進行短期研究，研究中使用高通量表型體掃描工具進行田間表型資料搜集 (圖2) 。同時，為了確認青梗白菜熱逆境篩選指標，則以6種青梗白菜

品種進行試驗，經初步分析結果顯示植物衰老反射指數 (Plant Senescence Reflectance Index, PSRI) 具有成為熱逆境篩選指標之潛力。

2. 田間管理優化：表型體學可結合作物模型與即時監測資料，精準制定播種密度、灌溉與施肥策略，以提升資源利用效率。
3. 環境精準控制：表型體學結合作物模型與環境感測，可即時調整光照、溫度、濕度與CO₂濃度，以最佳化作物生長與能源使用效率。



▲ 圖 2、亞蔬 - 世界蔬菜中心於 2024 年 10-12 月田間高通量表型偵測系統運作。

4. 氣候變遷應對：遙感技術結合表型體學，可在生態系尺度上監測作物及植被的光合特性、物候變化與氣候變遷影響。

結論及未來展望

表型體學透過高通量、多尺度及非破壞性的資料收集與分析，提供許多的數據支持。然而，其大規模應用仍面臨多重挑戰，包括感測器在田間的適用性、生理性狀高通量量測能力不足、與育種實務的需求無法對應，以及資料標準化與共享機制不健全。

特別是在資料管理方面，當前缺乏統一的數據格式、共享協議與跨平台互通機制，限制了跨研究比較與數據再利用。未來在表型數據管理與共享上，應遵循可查找 (Findable)、可利用 (Accessible)、可識別 (Interoperable)、可重複使用 (Reusable) 的FAIR原則 (Jiang and Zhu, 2024)，並配合國際化的表型數據標準與平台，促進科研社群、育種端及產業界的協同合作。

隨著感測器技術、資料科學與農業智慧化的不斷進步，表型體學有望在全球糧

食安全與可持續農業發展中發揮更關鍵的作用，成為連結基礎研究與實際應用的重要橋樑。

參考文獻

1. Houle, D., D. R. Govindaraju and S. Omholt. 2010. Phenomics: the next challenge. *Nat. Rev. Genet.* 11 (12) :855-866.
2. Jiang, N. and X. G. Zhu. 2024. Modern phenomics to empower holistic crop science, agronomy, and breeding research. *J. Genet. Genomics.* 51 (8) :790-800.
3. Pineda, M., M. Barón and M. L. Pérez-Bueno. 2020. Thermal imaging for plant stress detection and phenotyping. *Remote Sens.* 13(1):68.
4. Shi, Z., T. G. Chang, G. Chen, Q. Song, Y. Wang, Z. Zhou, M. Wang, M. Qu, B. Wang, and X. G. Zhu. 2019. Dissection of mechanisms for high yield in two elite rice cultivars. *Field Crops Res.* 241:107563.