

我國自動化作物外表型分析平台的新里程碑

—農業試驗所國家植物表型體分析中心

農試所生技組 林大鈞 李承彬 林思妤 游舜期 杜元凱 楊佐琦

一、前言

預估至2100年間，全球人口可能增加至超過130億人。因此，「如何餵飽全世界」，已是目前農業相關科學領域所面臨的嚴峻挑戰。同時，因全球氣候變遷的影響，多數作物的生產，除了面臨著水及營養源的匱乏外，熱帶及亞熱帶區域的耕地面積，預估也將會減少至目前可耕地面積的21%。尤其是日益嚴重乾旱及耕地鹽化問題，可能導致可耕地區域損失高達50%的面積。此外，在現行淨零排放的全球新商業模式趨勢下，如何育成高氮素利用率及抗病、蟲害品種，以降低肥料、農藥及能源使用，進而降低溫室氣體排放，已是重要的育種課題之一。因此，如何加速新型氣候適應及淨零排放需要的作物品種育種，進而滿足糧食、生質能源、纖維或其它工業的需求，已是這一波新農業產業鏈綠色革命的重要議題。

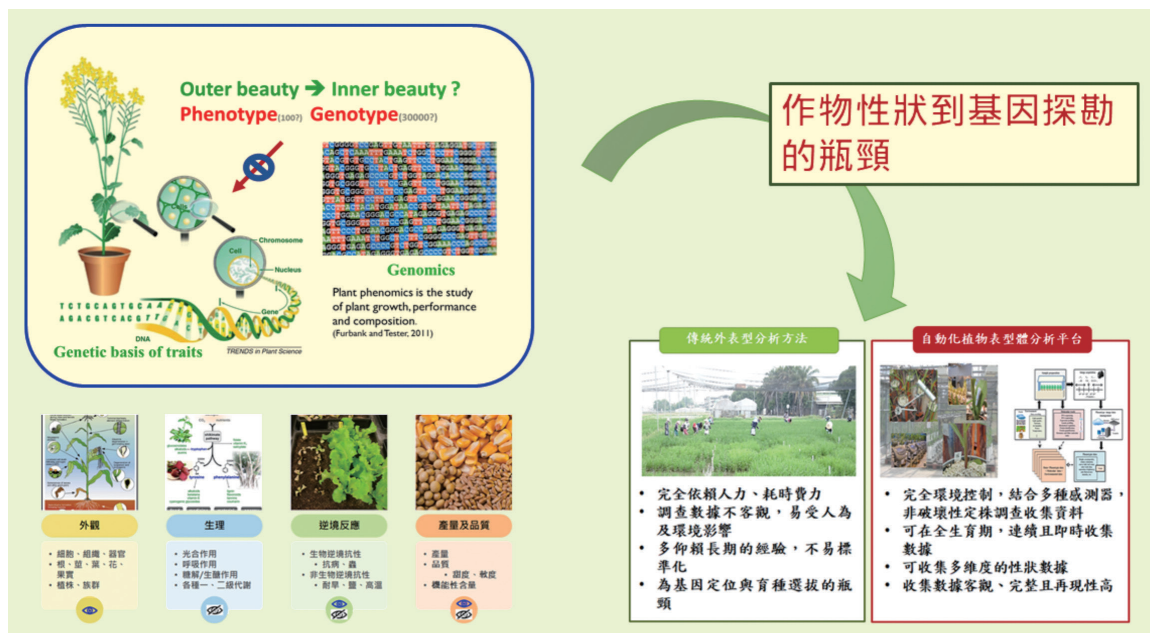
目前作物種原篩選或是育種過程中，所慣用的作物外表型分析方法，因需勞力密集調查、不客觀且常為破壞性之取樣，導致無法取得精準的分析結果。因此，如何改善取得精準、全面性且具再現性之作物外表型數據，已成為作物種原篩選、育種，甚至是植物學、功能性基因體等研究領域的主要課題。爰此，在作物外表型分析研究的發展過程，現已從早期只針對作物幾個重要目標性狀的外表型分析，發展至可系統性針對細胞、組織、器官，甚至到全株植物的外觀、生理、產量或品質等全面性的特性，取得外表型分析結果，即所謂的表型體學 (phenomics) (Soule, 1967)。然而，在特定農業系統，作物表型體是受基因體、環境及栽培管理等複雜交互作用下所表現的結果 (Houle et al., 2010)，更是作物種原篩選或育種成敗的決定因素。尤其，作物的重要性狀，如抗蟲、抗病、產量或品質等，多由數量遺傳所調控，其參與之相關基因群的

作者：林大鈞 聘用副研究員
 連絡電話：04-23317353

表現，常受各種環境因子所影響。近年來，由於次世代定序技術的發展，大幅加速功能性基因體研究的進展，促使許多重要作物性狀的基因被探勘發現。然而，現有傳統外表型分析方法仍具有下列缺點：(1) 完全依賴人力、耗時費力；(2) 調查數據不客觀，易受人為及環境影響；(3) 環境因子難以控制；(4) 多仰賴長期的經驗，不易標準化，導致重要的育種計畫容易遭遇斷層而停頓；(5) 為基因定位與育種選拔的瓶頸（圖一）。儘管學界已投入了大量的研究工作，但在縮小基因體資訊與複雜性狀外表型間的知識缺口上，作物外表型分析的精準性，仍是關鍵的挑戰。舉例而言，學界在作物耐旱育種的努力，儘管已在全球進行了20年的研究，但上述的知識差距，仍尚未得到有效的解決。

二、國家植物表型體分析中心建置緣由及規劃

為了有效取得高通量、精準的植物外表型分析結果，許多國際植物學家開始廣泛應用自動化非侵入式、破壞性的外表型分析方法。近來國際研究社群已發展出各種表型體分析平台，其中以瑞典 (Crop Design, LemnaTech)、澳洲 (Australian Plant Phenomics Facility, APPF-CSIRO, Australian National University 及 University of Adelaide)、英國 (UK Plant Phenomics)、法國 (PHENOARCH, INRA)，及跨國農業生技公司，如 Syngenta 公司，所建置的平台最為進步。這些自動化非侵入式、破壞性的植物表型體分析平台，具備以下特性：(1) 完全環境控制，結合多種感測器，非破壞性定株調查收集資料；(2) 可在全生育期，



圖一、現行作物育種及基因體學相關研究所遭遇之重要瓶頸。

連續且即時收集數據；(3) 可收集多維度的性狀數據，涵蓋生理至外觀；(4) 收集數據客觀、完整且再現性高。此外，國際目前所建立的自動化植物表型體分析設施，依規模可概括區分為：實驗室、溫室及田間三個層級，而建置內容則包含：(1)智慧環境控制或紀錄的場域：意即可控制環境的生長箱或溫室，抑或在具備記錄環境條件下的空間、溫室或是田間；(2)自動化載具：現有的系統包含輸送帶、天車、自走式機器人(robotic vector)、無人機 (UAV) 或衛星等載具；(3) 多維度感測器系統：現行最常被應用的感測器有RGB影像、多光譜或高光譜、熱影像、螢光、雷射及斷層掃描等影像技術，皆具有高解析影像偵測及分析的潛力，進而得以建立多維度非侵入

性外表型分析方法(Li et al., 2014)；(4) 植物影像分析軟體：影像分析完整流程包含偵測器、前處理、分割過程、特徵萃取及機器學習演算法等步驟(圖二)。

農業試驗所在行政院的支持下，為因應氣候變遷的育種需求，於110-113年建置首座整合型的植物表型體分析中心，將包含智慧環控溫室及田間等級的表型體影像掃描設施，涵蓋目前最先進的影像分析軟硬體，供農業研究學群、農業生技或種苗產業業者可進行精準表型體研究的典範場域。此中心也將進一步結合次世代基因型技術，進一步打造智慧快速精準耐候栽培及育種平台。

此中心預計建置一座智慧、節能、穩定的環控溫室，內含自動化輸送帶式(conveyor vector) 表型體分析系統，可將



圖二、自動化植物表型體分析平台。

植物自動輸送至光學、雷射等影像分析室，進行生物量等高通量的作物表型體分析研究，同時具備自動化澆水滴灌系統，可標準化作物的栽培管理。後續規劃再增建近遠紅外光、螢光及高光譜偵測器，以應用於植物生理表型體研究。另一方面，同時於前述溫室的鄰近田區，引進自動化天車式 (gantry vector) 表型體分析系統，搭載四色雷射光感測器 (PlantEye) 系統，可自動收集田間作物10種以上的生理參數。另於相關田區設置微型氣象站，可自動記錄作物栽培期間的氣象資料，供後續相關表型體分析研究的配合應用 (圖三)。

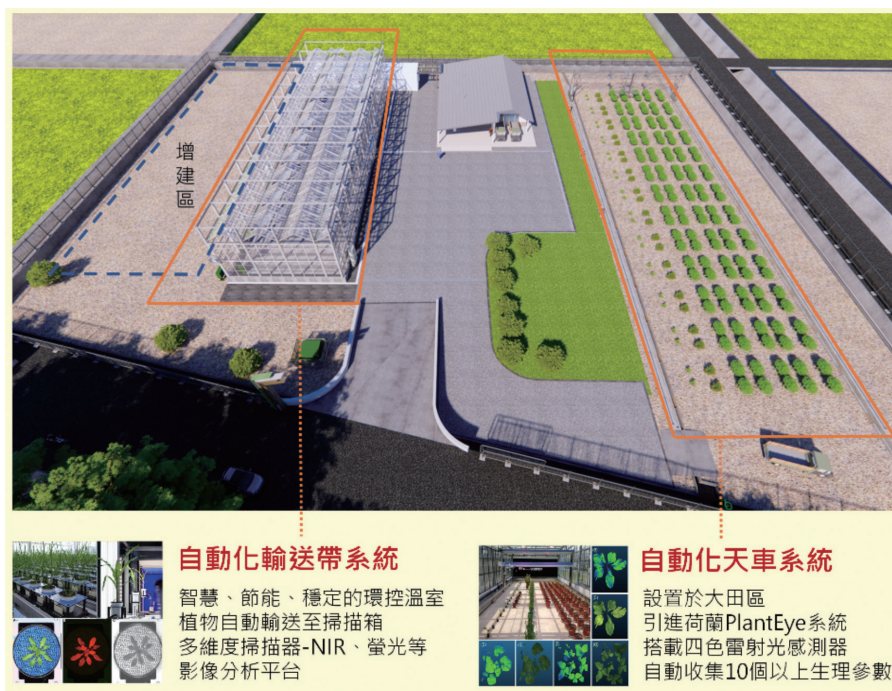
該中心未來希望能夠提供大型先進的表型體設施場域，供進行：(1) 植物表型體分析與技術平台的開發；(2) 植

物結構與功能研究；(3) 作物模式 (crop model) 的研究；(4) 植物、病原菌、益生菌或害蟲間交互作用的探討；(5) 植物逆境生理反應及其可能分子機制的分析探討；(6) 種原篩選及品種選育；(7) 建立快速精準栽培及育種平台；(8) 開發作物的調適栽培技術。

三、自動化植物表型分析平台的發展及精準育種的應用

自動化植物表型體分析平台的成功建立，將可提供植物學家或育種家得以更詳細地了解基因體、環境及栽培管理之間的相互作用外，這種跨學科的表型體分析平台，更可開闢育種者全新的視角，透過永續農業「設計育種」 (breeding by design) 策略，以更有效率、精準的篩選過程，育成更適應未來氣候

變遷、特定土壤情況，或具備更佳雜草、病害、昆蟲的抗性，並能夠被改進水份、營養或太陽能利用的能力。此外，這些平台亦可應用在精準農業 (precision agriculture)，並促使植物



圖三、國家植物表型體分析中心表型體分析設施之規畫。

學家、育種者與農民間建立更密切的結合與互動，進而發展新品種的優化利用。這些分析平台設施與表型體分析技術的發展，確可促進農業的第二次綠色革命，以迎接21世紀的農業挑戰，進而滿足全球未來的糧食需求。

如同前述，各國農業研究單位乃至於大型國際種子公司，現已紛紛投入分析表型體之各種軟硬體設施的建置。雖然，國內已有投入許多生理性狀偵測器的開發廠商，亦有影像擷取、儲存及分析系統的研究者與開發商。但整體而言，仍缺乏整合且大型的分析系統平台。究其原因，農業作物表型體分析平台所需投入的資源極多、規模龐大，有別於一般學術性研究。在臺灣要發展這種投入資金龐大、高階人才需求眾多的新興科技，只能以國家級計畫方式，整合不同的領域團隊，方有可能達成。

四、結論

農業試驗所於行政院氣候變遷中長程公共建設計畫，已著手建構國家植物表型體分析中心。未來將串聯國內重要表型體研究團隊，如中央研究院、台灣大學、農業科學研究院、中興大學、世界蔬菜中心等，形成重要研究策略聯盟，於各單位場域建置各自特色的表型體分析核心設施，進而得以彼此共享表型體分析技術開發經驗、設施，後續可共同建立擴大、穩定及可信的表型體分析平台。最終，希望能與國際表型體研究中心形成跨國表型體研究策略聯盟，

得以共享重要作物於不同區域的表型體資料庫。同時，冀能進一步整合國內學研單位已建立的重要作物之基因體、轉錄體、蛋白質體、代謝體或表觀遺傳學等資料庫，快速探勘氣候變遷、淨零等相關的性狀參與基因，進而建立作物設計基礎之快速精準育種平台，加速國內種苗產業於耐候、淨零等相關議題的育種速度及廣度，進而強化未來產業在因應氣候變遷的調適能力。

五、參考文獻

- S., Huang, Y.S., Vilhjalmsson, B.J., Willems, G., Horton, M., Li, Y., Meng, D., Platt, A., Tarone, A.M., Hu, T.T., et al. (2010). Genomewide association study of 107 phenotypes in *Arabidopsis thaliana* inbred lines. *Nature* 465, 627-631.
- Houle, D., Govindaraju, D.R., and Omholt, S. (2010). Phenomics: the next challenge. *Nature reviews. Genetics* 11, 855-866. 10.1038/nrg2897.
- Soule, M. (1967). Phenetics of Natural Populations I. Phenetic Relationships of Insular Populations of the Side-Blotched Lizard. *Evolution; international journal of organic evolution* 21, 584-591. 10.1111/j.1558-5646.1967.tb03413.x.
- Tuberosa, R., Turner, N.C., and Cakir, M. (2014). Two decades of InterDrought conferences: are we bridging the genotype-to-phenotype gap? *Journal of Experimental Botany* 65, 6137-6139.