

# 出國報告（出國報告類別：研究）

## 澳洲植物表型體學應用與技術交流

服務機關：行政院農業委員會農業試驗所

姓名職稱：李承彬 助理研究員

派赴國家：澳大利亞

出國期間：中華民國 111 年 10 月 22 日至 11 月 07 日

報告日期：中華民國 111 年 12 月 9 日

## 摘要

為了解植物表型研究最新進展並與國際接軌，本計畫赴澳洲植物表型體中心 (Australian Plant Phenomics Facility, APPF) 之三大分支中心參訪交流，並參加熱帶農業國際研討會 (TropAg conference)。APPF 擁有先進的表型體設施，此次參訪深入了解表型體設施之研究與應用，並了解到每個機構的最新發展。此外，本次參訪向 APPF 學習與交流表型體資料分析經驗，其中 APPF 的統計專家 Brien 博士在表型體資料分析上具有豐富的經驗，並提出平滑性狀提取法 (Smoothing and extraction of traits, SET)，用於分析高時序性的表型體資料，臺方參訪人員則以此為基礎開發了 SET 方法的 GUI 界面，並於此次參訪中相互分享經驗，對此 Brien 博士也十分期待該 GUI 界面的發表。最後參加熱帶農業國際研討會 (TropAg conference)，並於該研討會之預測農業 (predictive agriculture) 主題上發表壁報論文 2 篇，介紹我國目前表型體之發展及核心種原基盤育種之成果。

# 目次

1. 目的.....	4
1.1. 前言.....	4
1.2. 參訪行程.....	6
2. 參訪內容.....	7
2.1. 澳洲表型體中心 (Australian Plant Phenomics Facility).....	7
2.1.1. 高解析植物表型體中心 (High Resolution Plant Phenomics Centre, HRPPC)	7
2.1.2. 澳洲國立大學.....	9
2.1.3. 植物加速中心 (The Plant Accelerator , TPA).....	10
2.2. 熱帶農業國際研討會 (TropAg conference).....	12
2.2.1. 植物冠層之表型掃描技術與應用.....	13
2.2.2. AI 與機器學習在農業上的應用.....	13
2.2.3. G×E×M 作物生產預測模式.....	13
3. 心得與建議.....	14
4. 附錄—參訪照片紀錄.....	16
4.1. 高解析植物表型體中心.....	16
4.2. 澳洲國立大學.....	19
4.3. 植物加速中心.....	21

# 1. 目的

## 1.1. 前言

外表型分析選拔是作物育種的基礎，作為育種方法的選拔指標已達成育種目標。外表型為遺傳、環境及其交感的最終綜合結果。面對氣候變遷下日益嚴苛的生長環境，作物的調適能力及育種上受到嚴峻的挑戰。

氣候變遷導致未來作物種植環境難以預測，可能導致育種計畫結果不如預期。當執行育種後期的多重環境試驗 (Multiple Environment Trials, MET) 時，某些環境的變動可能已超出原計畫範圍，以限縮育種結果能適用的期限及地域。

再者，作物的耐逆境特性多屬複雜性狀，生理調適機制相關的關鍵外表型特徵為受環境調控的數量性狀，此類多基因性狀之選拔難以藉由分子輔助選拔(MAS)達成，且在分析上的複雜性及成本皆高於較由少數基因所調控的質量性狀。此外，新品種的育成需考量到市場的需求、農民的接受度、抗病性等。因此，新品種還必須具有優於農民目前種植的品種，所有這些性狀需要嚴格的選拔方法，因此育種者必須承擔非常艱鉅且複雜的任務，以便最大化選拔效率。

對於耐逆境特性之複雜性狀，基因體選拔 (genomic selection) 提供新型態的選拔策略，藉由完成高品質的表型性狀調查與基因型建立模型，取代以往逐世代的表型調查，可最大限度地降低了與表型相關的成本，縮短育種週期，從而加速遺傳收益並確保了糧食和營養安全。對於未來環境的不確定性，現今育種趨勢為在育種中前期執行 G×E×M 策略。這些策略都有一個核心的議題，即「如何完成高品質的表型性狀調查？」

由於性狀調查耗時費力且易受環境因素干擾。因此過往無論在外表性狀特徵的種類、分析技術與量能的發展進展皆較遺傳研究緩慢。對此，基於高通量表型體 (high-throughput phenotyping, HTP) 分析，可提取高時序性、自動化、大量且客觀的資訊，並有助於反映作物生長期間及細部特徵之中間表型 (intermediate phenotypes)，並建構精準且高時序性狀，為育種決策提供更精準的資訊。

從基因型至外表型涉及了各式體學的資訊，如：基因體學、轉錄體學、蛋白質體學以及代謝體學等，這些體學間具有複雜的關係網絡，皆需由外表型 加以驗證。因此，中間表型應用於體學之潛力，在於提供更高的表型解析度，以優化目標性狀之基因篩選流程，更能透過了解中間表型所代表的生理意義，在功能導向上連結各個體學，建立高精準度的作物選育模型。

另外，中間表型可反映植物對環境反應的細微表現，而生物相互作用、環境對於植物表型之連結為表型體研究的一大重點。2022 年成立的荷蘭植物生態表型分

析中心 (NPEC)，旨在利用高通量表型設施與技術，研究表型與生態環境之間的關係。該中心提出了生態表型 (eco-phenotyping) 一詞，並將其定義為生態相關條件下的植物表型，其生態條件主要包含生物（微生物相互作用、競爭、疾病）和非生物因素（光量、品質、養分、溫度、濕度、土壤 pH 值和大氣 CO<sub>2</sub> 濃度）。綜上，在未來育種技術上，除了需著重表型體與基因體的連結，亦需結合生態環境以達成多重育種策略。

為發展表型體分析技術並結合次世代生物技術，本所執行「因應氣候變遷之耐逆境育種設施建置中長程計畫（110—113 年）」，建立國家植物表型體分析中心，提升臺灣農業的研究量能與國際競爭力。該中心的規劃與建立，係經與澳方數次經驗交流而成型。農試所於 106 年派員赴澳洲植物表型體中心參訪，作為我國發展表型核心設施的重要經驗交流，並簽訂合作備忘錄。107 年杜元凱博士赴澳洲國立大學訪學並參加國際植物表型研討會。108 至 110 年農試所將經驗應用於籌備國家植物表型體分析中心，該中心於 111 年開工。

為了解植物表型研究最新進展並與國際接軌，本計畫再次赴澳洲與澳洲植物表型體中心三大分支參訪交流，受 APPF 執行長建議參加熱帶農業國際研討會 (TropAg conference)，並於該研討會之預測農業 (predictive agriculture) 主題上發表壁報論文 2 篇，介紹我國目前表型體之發展及核心種原基盤育種之成果。

## 1.2. 參訪行程

Date	Week	Event	
22/10	Sat	From Taiwan to Canberra	Filght: TPE→BNE
23/10	Sun		Filght: BNE→CBR
24/10	Mon	Visit HRPPC	CSIRO Phenomics Centre
25/10	Tue		
26/10	Wed	From Canberra to Adelaide	Filght: CBR→ADL
27/10	Thu	Visit PA	The University of Adelaide - Waite Campus
28/10	Fri	From Adelaide to Brisbane	Filght: ADL→BNE
29/10	Sat		
30/10	Sun		
31/10	Mon	TropAg Conference (Brisbane Convention and Exhibition Centre)	Poster presentation
01/11	Tue		Oct 31 12:30- 13:25
02/11	Wed		Theme 2: Predictive agriculture
03/11	Thu	Visit QU, Dr. Vivian Tsai & Dr. Hark	Queensland university
04/11	Fri	Visit QU, Mr. Chester Chao	Ecosciences Precinct Dutton Park
05/11	Sat		
06/11	Sun	From Brisbane to Taiwan	Filght: BNE→TPE
07/11	Mon		

## 2. 參訪內容

### 2.1. 澳洲植物表型體中心 (Australian Plant Phenomics Facility)

澳洲植物表型體中心 (Australian Plant Phenomics Facility, APPF) 於 2007 年由澳洲政府聯合學術單位所成立，並於 2009 年開始運作，旨在推動研究人員、政府及產業間的研究與合作，並提供實際成果。

該設施配置了先進的自動化表型體設施，並開發了基礎設施、專業知識和方法，以創新方法探索植物性狀與基因型×環境×管理 (G×E×M) 間的關係，以因應環境與逆境下(例如：乾旱、鹽度、高溫)，開發新的和改良的作物，並提供更健康及可持續性的農業。APPF 投資於開發、維護及加強先進技術，專業知識和數據資源，以促進植物表型組學的創新研究專案，其服務和資源涉及三個主要重點領域，分別為：植物表型組學、生物資訊學和生物統計學以及研究創新與合作。

其中 APPF 的參與機構包含澳洲政府、澳洲首都領地州政府及南澳州政府，並聯合澳洲三個知名的植物研究機構以設立三個分支中心 (nodes)，包含阿德雷德大學的植物加速中心 (The Plant Accelerator, PA, Adelaide)、聯邦科學與工業研究組織 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) 的高解析植物表型體中心黑山研究園區 (High Resolution Plant Phenomics Centre, HRPPC, Black Mountain Laboratories)，以及澳洲國立大學的植物表型體團隊。

#### 2.1.1. 高解析植物表型體中心 (High Resolution Plant Phenomics Centre, HRPPC)

HRPPC 位於 CSIRO 黑山園區的 [Synergy Building](#)，該單位為 APPF 分支中心。此外，也與 CSIRO Agriculture and Food 單位共同合作，研究主任為 Ben Trevaskis 博士。本次參訪 HRPPC，首先由 CSIRO 的 Aswin Singaram 先生接待並介紹地面型表型設施之深度表型(deep phenotyping)之發展與應用，其後由 APPF 分支中心 Wayne Thompson 博士接待並介紹環控溫室及表型體設施。

Aswin 先生為 CSIRO 研究員，主要負責作物機器學習模型的開發，並介紹田間小麥穗影像辨識計數模型。該專案使用 phenoMobile® Lite 地面型移動式表型體設備收集小麥田間的冠層影像資料，並利用機器學習對麥穗進行影像擷取、標註、擴增等前處理，最後建立田間小麥穗影像辨識計數模型。HRPPC 也積極研發田間無人機，不久後會將深度表型技術應用在無人機上。該技術並不侷限於高通量表

型設備，未來可推及使用一般的相機或 UAV，以幫助農民預測作物產量。

### CSIRO 資料科學機構—Data61

CSIRO 在建立跨領域合作上付出許多努力，Aswin 先生亦提到 CSIRO 的另一組織 [data61](#)，為澳洲國家科學機構專門的資料和數位科學部門，其中 61 意含為澳洲的電話國碼。該組織於 2015 年成立，主要目標為推動澳洲人工智慧（AI）的發展和應用，將資料科學和技術做為澳洲科學的核心韌性技術。Data61 做為創新及跨領域的催化劑，服務領域廣泛，包含自然資源管理、數位農業、製造業、環境監測、國防或政府等領域。

### 全球型研究和創新科學園區—國家農業與環境科學園區

此外，CSIRO 和 ANU 與合作夥伴建立「國家農業與環境科學園區」（National Agricultural & Environmental Sciences Precinct），旨在坎培拉創建一個具有全球型研究和創新科學園區，並由澳大利亞科學研究院科學和工業捐贈基金（Science and Industry Endowment Fund, SIEF）贊助。其中第一項建構重點為 [基因組學、代謝組學和生物資訊學中心 \(The Centre for Genomics, Metabolomics and Bioinformatics, CGMB\)](#)，屬於 CSIRO 和 ANU 間的合作設施，旨在革新基因探勘，並應用在作物部署和環境管理。已進行整合現有基礎設施與新設施，為植物育種和資源管理的綜合方法提供「一站式服務」。此外，SIEF 專案成立了 [創業農業技術中心\(CEAT\)](#) 和 [生物數據科學研究所 \(BDSI\)](#)。兩者共同促進從數據到知識（主要為 BDSI）再到轉譯應用（主要為 CEAT）的發展。CEAT 已經顯示成功經驗，其創新中心是五家企業的所在地。BDSI 則擁有約 20 名員工，他們正在從事合作專案，例如利用機器學習獲取植物表型學數據。第二項建構重點為在 CSIRO 黑山科學與創新園區建造一座新的生命科學大樓，以確保 CSIRO 的實驗室，能提供先進的顯微技術和分析設施。該開發專案將成為外部合作夥伴的共同研發平台，進行廣泛基礎設施投資，並加強補充 ANU 研究設備，包括高通量設施溫室。

### 參訪表型體溫室

接著 Wayne Thompson 博士介紹自動化輸送帶表型體設施，為 PSI 系統，可容納 400 盆植株。設施主要分為溫室區與拍照室，兩者間具有兩個閘門分別做為出入口，植株由入口進入後，依序為暗室、葉綠素螢光拍照室、RGB 及高光譜拍照區、手動操作區，最後才回到溫室區。

暗室是為葉綠素螢光拍照所設計的，可依序試驗需求調整暗處理時間。在暗室與葉綠素螢光室間設有光柵，可簡易的量測植株高度，而葉綠素螢光室的補光系統及鏡頭系統皆於頂部，並可根據先前測量的株高調整高低。補光系統照射飽和光源後由葉綠素螢光鏡頭捕捉最高值，藉以光合作用效率。接著植株會進入 RGB 及高光譜拍照區，該區為相對開放的空間，頂部與側面皆有補光系統，RGB 及高



光譜鏡頭設於側面補光系統上，對面則為藍屏，植株會在旋轉臺上拍照，可根據試驗需求設定每次拍照所旋轉的角度。手動操作區緊接於 RGB 及高光譜拍照區後，可在此區簡易的處理或檢視材料，並可用筆電直接連上系統做控制。該溫室的空調管置於溫室上方兩側，並採用透明壓克力設計，溫室環控系統則使用 CONVIRON 的 ARGUS 系統。澆灌及秤重系統設置於溫室區，秤重系統則會有機構將植株頂起測重，並同步進行澆水作業，其澆灌可選擇使用養液或水份。輸送帶上的植株座為可移動式設計，靠著與輸送帶的摩擦力帶動，植株運行回原先的排時，各排的輸送帶上設有氣壓臂將其拉回。此外，植株座上有 RFID，各個測量區皆有 RFID 感測器以確保植株編碼，運行時可放置定量的塑膠植株以做為對照，以確保機具運行無誤。

Wayne Thompson 博士也介紹另一間環控溫室，該環控溫室具有 5 個環控小間及材料準備廊道，環控小間皆可控制日夜溫及補光程度，並設有 CO<sub>2</sub> 控制裝置。其中一間設有天車系統，為 CSIRO 整合研發，固定於頂部，具有 RGB、雷射及高光譜鏡頭，除了監控電腦外，也可使用平板控制。此外，植株可放置於生長架上，除了便於操作，待生長到適合時期時，可由小型堆高機搬運至天車溫室測量。

### 2.1.2. 澳洲國立大學

APPF 的 ANU 分支—植物表型體團隊，位於 ANU 的生物研究學院 (Research School of Biology)，因此具有豐富的生物研究資源，包括兩個卓越中心 (CoE)，[植物能量生物學中心 \(ARC Centre of Excellence in Plant Energy Biology, CoE PEB\)](#) 及 [轉譯光合作用學中心 \(the ARC Centre of Excellence for Translational Photosynthesis, CoETP\)](#)。此外，ANU 分支也與 ANU-CSIRO 生物多樣性分析中心、機器視覺和國家計算基礎設施 (NCI) 有相當的合作，在植物表型體學、生物資訊學、軟硬體開發及資料視覺化方面擁有相當專業知識。本次主要由 Richard Poiré 博士與 Ning Huang 博士負責接待與參觀，並由 APPF 的 ANU 分支主任兼 CEAT 主任的 Owen Atkin 教授主持學術交流。

在 Richard Poiré 博士帶領下參觀各實驗室與設備，分生實驗室部份，使用自動移液分注平台 (automated pipetting system)，可有效節省實驗操作所需時間，並最小化人為操作誤差。另外，在環控設備，ANU 擁有多台 CONVIRON 生長箱，每臺生長箱可獨立調節所需的生長參數，以滿足不同作物項的試驗，例如：十字花科作物與水稻。配合生長箱的試驗調查，還配有小型輸送帶系統—PlantScreen™ Compact System，用於針對中小型植物進行高精度的掃描，可容納數 10 株植株並進行葉綠素螢光等多功能掃描。此外，ANU 亦嘗試將 LED 植物生長燈 (如：heliospectra) 引入環控生長室，打造光譜環控氣候室 (SpectralPhenoClimatron, SPC)，

其中亦具備多種感測器，可用於探討作物 G×E×M 間的相互作用。

Richard Poiré 博士還展示了最新的生長設備—Growth Capsule(GC)，GC 是建構在貨櫃的植物生長室系統，並使用 LED 作為唯一的光源。GC 提供研究人員高度控制的生長環境，包含能調整光週期、溫度和濕度。高度可控的光譜和輻照度能為植物生理學研究提供良好的試驗環境，此外，由於 GC 以貨櫃為容器，具有良好的移動性和隔離性，可以在各種條件下種植各式植物或組織培養物。經由程式控制可模擬多種自然條件，例如：黎明、黃昏、多雲和晝夜週期等，所有數據都可以通過網路控制與下載。ANU 將 GC 結合 phenospex 的天車系統，打造高度環控的表型體測量環境。該設施正進行水稻表型體試驗，水稻生長參數包含：溫溼度、光照、光週期皆能控制在水稻適長條件。

接著由 Owen Atkin 教授主持學術交流，由農試所李承彬助理研究員代表報告介紹我國目前表型體之發展、核心種原基盤育種之成果及表型體資料視覺化工具。有關表型體資料視覺化工具，資料分析領域之技術長 Tim Brown 博士十分感興趣，並分享所使用的表型體資料分析工具，在表型體 3D 資料呈現、儲存及利用皆有詳細的見解。Germinate (<https://germinateplatform.github.io/get-germinate/#>) 為開源的植物資源平台，用於存儲實驗數據，提供基於網頁的植物種原、遺傳資源視覺化查詢平台。Phis (<http://www.phis.inra.fr/>) 為植物表型體學設計的體學資訊系統。Tim Brown 博士在 3D 構型議題有相當的熱忱，有鑑於未來表型體中心可能會需要處理 3D 資料的整合與視覺化，對此 Brown 博士展示並介紹 ANU 的整合方法，為 APPF 參與的合作案 [Australian Scalable Drone Cloud \(ASDC\)](#)，將不同時空尺度的植物表型體 3D 模型至於同一個框架中，展示網頁連結為 <http://asdc.cloud.edu.au/cesium/Apps/ASDC>。該網頁採用 Cesium (<https://cesium.com/>) 3D 地理空間平台，可用於儲存、疊圖檢視 3D 資料，可做為整合不同時空尺度下 3D 資料的平台，並可將地景規模下的城市模型、田間植物冠層、室內植株 3D 模型等，整合在同一個界面。此外，Brown 博士也分享了 3D 構型的應用工具，例如，Agisoft Metashape (<https://www.agisoft.com/>)，可利用數位照片生成 3D 空間數據，廣泛用於 GIS、文化古蹟視覺化建模，以及各種比例物體的間接測量。

### 2.1.3. 植物加速中心 (The Plant Accelerator, TPA)

The Plant Accelerator® (TPA)位於阿德萊德大學著名的韋特研究園區(Waite Research Precinct)，為南半球最大的農業研究、教育和商業化園區。成立於 1924 年，是 15 個組織和中心的共同合作夥伴，從事植物科學、農業、食品、葡萄酒和自然資源領域之研究。TPA 為澳洲第一個自動化高通量表型系統，該中心的規模和開放性吸引了澳洲和海外的研究人員，提供的大規模表型實驗的設計、管理、操作和分析方面的專業知識，從而產生了許多具有高影響力的出版物。除了高精

度的自動化輸送帶攝影系統，近年來引入了先進的表型設備，例如 DroughtSpotter 平台可提供精確的高溫和乾旱篩選，近期更引入 X-ray CT 設備，提供研究穀粒穗型的新方法，採用高通量及非破壞性的方式重構穀物和穗狀花序。

本次參訪由 TPA 中心主任 Bettina Berger 教授親自接待，由 Berger 教授及 Clarke 博士介紹各式表型體設施，接著與 APPF 的統計學專家 Chris Brien 博士及 Jewell 博士交流表型體分析方法。上午茶時間由 TPA 團隊成員交流與經驗分享，最後，與 Berger 教授團隊進行學術交流，介紹雙邊最新技術與研究進展。

Berger 教授帶領下參訪了 TPA 的表型體設施，具有除了有多台 CONVIRON 生長箱，亦有 2 間環控室 (Environmental Rooms)，可以做為乾旱及熱逆境表型平台，可控制蒸氣壓差 (vapor pressure deficit, VPD)、光波長與光量、溫濕度控制 (5-50 °C, 40-80%)。環控室配有 Phenospex 公司的 DroughtSpotters，為全自動重量測量平臺，具有 1ml 灌溉精度，並可以根據試驗需求維持每盆植物的目標重量，並根據重量減輕程度計算植物蒸發速率。

APPF 具有 2 臺輸送帶系統及影像分析工作站 (LemnaTec Scanalyzer 3D)，分別提供外部研究計畫及內部試驗使用。每臺輸送帶系統能承載 2400 個植株，可提供大規模且自動化之表型體掃描平台，並具有葉綠素螢光、RGB、高光譜等感測器。此外，溫室採用 PSI (photon systems instruments) 公司的補光系統，該系統在地面不同小區設有光度感測器，可根據不同光度提供相應的光源。另外，TPA 具有 LED 生長燈之育種溫室，供小麥等作物加速育種使用。在田間表型體部份，APPF 自行開發 FieldExplorer 地面移動式表型體設備，具有 RGB、LiDAR、高光譜感測器。近期 TPA 引入了自動化 X-ray CT 掃描系統，由 [PhenoKey 公司](#) 客製化打造，具有小型輸送帶，可將植株或樣本自動運輸至拍照箱內。拍照箱有完整的鉛板隔絕，因此在外操作空間上並無輻射議題。在研究應用上，能以非破壞性的方式建構根系構型，近期在穀粒構型上有著卓越的突破。基於非破壞性 X-ray CT 拍照系統，TPA 團隊開發了一套[測量燕麥穀粒性狀和 3D 分析穗結構的方法](#)，該方法大幅縮短穀粒測量過程。由於不同基因型的燕麥在小穗 (spikelet) 結構上差異甚大，並可能受到 G×E 交感效應的影響，而燕麥穀粒品質與產量，會受到小穗的發育型態影響 (如單花、雙花、多花等)。該研究結合穀粒 3D 分析演算法，可提取每穗的穀粒數、穀粒重、體積、表面積、圓度等參數。

接著與 Chris Brien 博士進行交流，Brien 博士為試驗設計專家，包含多層試驗 (Multitiered experiments)、線性混合模式分析、縱向資料分析及統計套件開發。近年來 Brien 博士投入在表型體試驗設計與分析，提出輸送帶表型體系統之試驗設計方法，並針對高時序性的表型體資料開發分析方法—平滑性狀提取法 (Smoothing and extraction of traits, SET)，並針對 SET 分析開發了 R 軟體的

growthpheno 套件。SET 分析在表型體資料分析十分的受用，能夠去除高時序性所帶來的瞬時誤差，並能以合理的曲線解釋生長過程，更重要的是無須進行繁雜的建模，因此該法部份程度的減輕了表型體資料的繁重分析過程。SET 分析過程需進行編碼，為了將 SET 分析提供給一般使用者進行探索性分析，李承彬助理研究員以 R 軟體的 Shiny 等套件開發了 SET 的 GUI 界面，能夠即時呈現互動式的 SET 分析結果，初步成果已展示於 111 年台灣農藝學會。交流過程中 Brien 博士熱情的介紹 SET 分析方法，並提供了最新的套件更新資訊，李承彬助理研究員也分享了 SET 分析的 GUI 界面，對此 Brien 博士也十分期待該 GUI 界面的發表。

上午茶時間與 TPA 團隊成員交流過程中，提及台灣亦引進與 TPA 同款的輸送帶系統，Guntur Tanjung 博士分享了他的經驗。Tanjung 博士為 TPA 的機電工程師，主要負責輸送帶系統的維運心得，並建議台灣未來的表型體中心應具有專門的機電工程師，原因在於該設備為德國進口，若設備停擺至聯絡原廠進料修復的時間可能會很長。因此 TPA 會進口皮帶等消耗品，並依據經驗定期保養，並培養團隊成員能夠自行排除狀況，甚至更換皮帶等消耗品。擁有電機經驗對於狀況排除、與廠商溝通及設備整合上具有相當的效益，並將試驗停擺風險降至最低。

最後與 Berger 教授團隊進行交流，包含 Kenneth Clarke 博士、Huajian Liu 博士、Haoyu Lou 博士。由農試所李承彬助理研究員代表報告，包含台灣表型體中心的建置情形，番椒種原核心蒐集技術、複雜性狀基因體分析技術及未來台灣表型體中心的發展方向。對此，Berger 教授團隊也分享了最新的研究，包含利用輸送帶系統來分析小麥與雜草的交互作用、利用 X-ray CT 的穀粒構型自動化分析系統等。Berger 教授最後分享了建立表型體機構的經驗，APPF 為全球最早建立的植物表型體機構，由於當時是先驅者，當時有許多技術問題只能自行試誤學習，發展至今，團隊也非常樂意與台灣表型體團隊分享經驗，以減少前期的探索期。

## 2.2. 熱帶農業國際研討會 (TropAg conference)

熱帶農業國際研討會 (International Tropical Agriculture Conference, TropAg) 由昆士蘭大學主辦，主要議題為確保熱帶農業的糧食及營養安全，以面對人口快速增長及氣候變遷之影響。提供研究人員、種植者、投資者、政策制定者和農企業領導人一個重要的平台，共同交流對於糧食問題、減少碳足跡、農業經濟繁榮等議題之創新想法。本次為 TropAg 的第 4 屆研討會，舉辦於 Brisbane Convention & Exhibition Centre，共有六個主題，分別為，農業綜合企業、價值鏈和生物經濟 (Agribusiness, value chains, and the bioeconomy)；預測農業 (Predictive agriculture)；可持續農業糧食體系 (Sustainable agrifood systems)；健康農業和健康社區食品 (Healthy agriculture and food for healthy communities)；農業未來 (AgFutures)；Harlan 國際研討

會 (Harlan IV)。

本次參與「預測農業」主題，著重於預測技術應用於農業研究，以及做為農業生產者的決策支援工具。此外，面對日益增加的氣候變遷，預測動植物適應力對於農業生產力和可持續性至關重要。本主題主要分為，植物冠層之表型掃描技術與應用、AI 與機器學習在農業上的應用以及 G×E×M 農業預測模式。以下重點摘要各主題之技術進展。

### 2.2.1. 植物冠層之表型掃描技術與應用

Haefen 博士介紹如何利用 UAV 多光譜感測技術提高綠豆生產力，UAV 為高通量表型工具之一，可大規模且高時序的掃描田間資料。該研究使用 OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index) 指數，與綠豆的生物量及產量有高度相關，並用於掃描綠豆 NAM 族群各時期生長情形。此外，應用了高通量表型數據時空分析的兩階段方法，進行時空校正及縱向資料建模。最後，利用衰老相關性狀進行 GWAS，發展更快進入枯熟期之品種，以減少乾燥程序並落實永續農業。此外，世界蔬菜中心林亞平博士介紹了高通量表型體天車系統之應用，藉由高時序且非破壞性的表型體技術建立田間耐熱篩選平台。

### 2.2.2. AI 與機器學習在農業上的應用

地面載具影像結合機器學習已應用於小麥穗的計數模型，然而，該模型僅限於地面載具影像，應用於 UAV 影像並不理想，原因在於 UAV 的拍攝距離與解析度不同於地面載具，對此，Helen Huang 教授提出了應用最新 AI 建模技術做為解決方案。首先，對高解析度的地面載具影像標示出小麥穗，做為模型的訓練資料；接著，建立影像風格轉換模型，將地面載具影像轉換為 UAV 影像風格；再來用地面載具影像、UAV 風格影像及小麥穗標示資料建立預測模型，最終結果能成功將小麥穗計數模型應用於 UAV 系統上。

### 2.2.3. G×E×M 作物生產預測模式

面對多重變因及氣候變遷下的不確定性，「基因型的理想產量」與「實際變動環境下的產量」有很大的差異，並需考慮到基因型、環境及管理(G×E×M)交感效應，使得作物改良遭受挑戰。對此，作物生產預測方法可提供作物改良策略，彌補兩者間的差異。Mark Cooper 教授提出作物預測模式的 3 個發展方向，1.發展多性狀 G2P 模型。利用數理模式(如：圖論、拓譜學、AI 演算法等)，結合先驗知識，整合基因型網路至性狀網路間的關聯性。2.發展作物育種的預測方法。藉由統計方法達成基因組預測 (genomic prediction)，並導入先驗知識，例如 CGM-WGP 模型，其結合作物生長模式 (CGM) 及全基因組預測 (WGP)，可用於解釋並預測 G×E×M 之間的關聯性。3. 擬定 G×E×M 育種

計畫。由於未來的環境不確定性高，因此，在計畫中需考量到育種者方程式 (G)，農學家的管理策略 (M)，結合 G×M 策略，推及到各個環境 (E) 中，再根據環境表現的反饋重新修正 G×M 策略。Genevieve Durrington 博士則提出了高粱最佳化設計工具—CropGen，藉由輸入 G×M 組合的表現，找出 Pareto 最佳化的組合，並結合 APSIM 作物生長模式，以達到 G×E×M 最佳化策略。

### 3. 心得與建議

本次參訪主要係因台灣正發展表型體分析技術並結合次世代生物技術，以因應氣候變遷之作物育種挑戰。農試所國家植物表型體分析中心之規劃，係經與澳方數次經驗交流而成型。然而，隨著機器學習等大數據分析領域的迅速發展，表型體學技術亦隨之蓬勃更迭，澳洲在表型體設施發展成熟並投入大量資源。具備高解析度之表型體設備後，現階段正嘗試將表型體學結合深度學習、電腦視覺等技術的發展，需與生理表型、各個體學間交互驗證，反映作物生長期間或細部特徵中真正有意義的中間表型。本次參訪將獲致心得感想及借鏡之處整理如下。

#### 研究主軸明確

澳洲為植物表型學最早發展的國家之一，主要目的為輔助生理育種以在氣候變遷下穩定並有效的提昇遺傳增益。至今，澳洲的各大植物科研機構仍不斷的為氣候變遷下嚴苛的環境挑戰付出努力，並投入大量且持續的資源。在 TropAg 研討會中深入探討生理其相關育種技術，其概念值得深入學習與引進。生理育種可基於學理將目標性狀模式化，其優勢在於，藉由解構為數個相對獨立的構成要素或指標，可更有效率且穩健提昇各項要素。例如，乾旱逆境的產量要素可解構為：光保護機制、蒸散效率、資源分配機制及水分吸收效率，因此可結合互補的性狀進行更具效益的育種。其中著名的 APSIM 作物模式即為澳洲研究團隊提出，並持續的更新與發展，而執行生理育種需要大量的參數，對此高通量表型體 (HTP) 平台有助於進行大規模且精準的測量，以獲得一系列具有氣候適應力的形態和生理特徵。某些目標性狀難以使用常規手段測量，往往具有不準確、昂貴或耗時的缺點，此時使用 HTP 技術將更具效益。透過 HTP 技術可找出適合的高遺傳力之指標，再藉由間接選拔 (indirect selection) 或指數選拔 (index selection) 執行更準確、客觀、且更具經濟效益的選拔。澳洲已實際將 HTP 的間接選拔應用於育種，例如，使用近紅外 (NIR) 的光譜指數選拔小麥的穀物產量，基於冠層高光譜數據量化小麥中黑斑病的強度。因此，即使間接選拔的性狀的遺傳力不高於目標性狀，HTP 實現的改進選拔強度也可以加速遺傳增益。

## 資源整合能力佳

過往無論在外表性狀特徵的種類、分析技術進展皆較遺傳研究緩慢，這些問題為目前現代育種所面臨的「外表型瓶頸」。澳方在表型體學已發展趨於成熟，並引入許多的先進設備，收集大量的數據。然而，同時也代表著分析的複雜性正在增加，資訊管理、資料降維技術能力將變得越來越重要。影像分析中的 AI 和機器學習 (ML) 正快速發展，基於電腦視覺之植物外表型分析需具大量的數據分析能力，包含資料取得與轉換、前處理、圖像分割、特徵提取及機器學習演算法等程序。所以要能成功應用並整合 HTP 技術，需與電腦科學、統計學和數學領域進行大量合作。因此，現今的表型分析瓶頸已從數據收集轉移到如何從中獲得有意義的資訊，其技術困難點由外表型瓶頸，轉移至「解釋瓶頸」。

在參訪 APPF 的 HRPPC 分支時，Aswin 先生亦提到 CSIRO 的另一組織 Data61，為澳洲國家科學機構專門的資料和數位科學部門，其中 61 意含為澳洲的電話國碼。該組織於 2015 年成立，主要目標為推動澳洲人工智慧 (AI) 的發展和應用，將資料科學和技術做為澳洲科學的核心韌性技術。Data61 的成立足見澳洲在資料科學跨領域合作上付出許多努力。

另外，澳洲大型科研機構間的合作風氣十分良好，所參訪的 CSIRO 黑山分支中心比鄰於澳洲國立大學，CSIRO 和 ANU 兩者建立「國家農業與環境科學園區」，旨在坎培拉創建一個具有全球型研究和創新科學園區。該項目中建立了基因組學、代謝組學和生物資訊學中心，投入大量資源於基礎設施中，為植物育種和資源管理的綜合方法提供「一站式服務」。並創立了創業農業技術中心 (CEAT) 和生物數據科學研究所 (BDSI)，兩者共同促進從數據到知識 (主要為 BDSI)，再到企業的轉譯應用 (主要為 CEAT) 的發展。本次在昆士蘭參訪的生態科學園區 (Ecosciences precinct Dutton Park)，同樣為大型科研機構間的合作成果。生態科學園區為昆士蘭政府整合昆士蘭大學、CSIRO 等大型科研機構所成立，是一個高度協作的工作環境，包括研究和教育實驗室、昆蟲室、環控室、溫室、辦公室等，提供科研人員最先進的研究環境與資源。本次參訪不僅深入了解澳洲之先進表型體設施，更了解到且澳方持續大量投入於大型科研機構間的資源整合利用，並輸出應用於企業。另外，現階段正嘗試將表型體學結合深度學習、電腦視覺等技術的發展，以從大量數據中探索真正有意義的中間表型。





## 組織架構與分工明確

在參訪 APPF 的 3 個分支中心時，3 者的共同點在於明確且高度的組織分工。由於表型體學奠基於植物生理學、遺傳學、作物栽培、育種學、農業機械、環控專家、統計學家、生物資訊學、大數據分析技術等領域。此外，合作計畫的組織維運、商品化等另有營運團隊負責。

以阿得雷德的 TPA 為例，單一植物加速中心就具備 19 位正式職員，涵蓋植物生理、機械工程、生物資訊、機電技術等領域。就數據分析而言，具有 1 位軟體工程師、2 位統計學家、2 位影像與數據科學家。另外，該機構近期為發展 X-ray CT 技術，亦聘請專項人員從事該研究。由於所接觸到的設備及研究領域高度專一，故此種模式之優勢在於經驗得以長期累積。以輸送帶影像系統為例，TPA 為最早引進輸送帶影像系統的機構之一，該設備為德國進口且高度客製化，若設備停擺至聯絡原廠進料修復的時間可能會很長。身為 TPA 機電工程師的 Tanjung 博士分享他的經驗，擁有電機經驗的他對於狀況排除、與廠商溝通及設備整合上具有相當的效益。此外，亦會根據經驗進口皮帶等消耗品、定期保養，以將試驗停擺風險降至最低，並建議台灣未來的表型體中心應具有專門的機電工程師。因此，未來臺灣的國家植物表型體分析中心成立時，對於組織的成型、分工，以及如何募集相關領域研究人才，為現階段需考量的重要課題。

#### 4. 附錄—參訪照片紀錄

##### 4.1. 高解析植物表型體中心

	
<p>HRPPC 的表型體溫室</p>	<p>PSI 公司的輸送帶系統</p>
	
<p>輸送帶系統拍照區</p>	<p>葉綠素螢光室的補光系統及鏡頭</p>





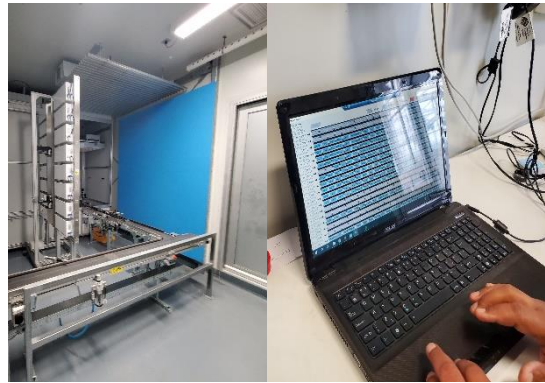
RGB 及高光譜拍照區



RGB 及高光譜鏡頭及補光系統



拍照系統的旋轉臺



以筆電控制輸送帶系統運行



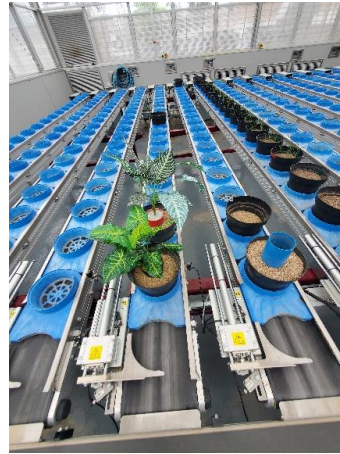
表型體溫室的透明壓克力空調管



澆灌及秤重系統



各排的輸送帶上設有氣壓臂



定量品做為對照



植株座上有 RFID



RFID 感測器



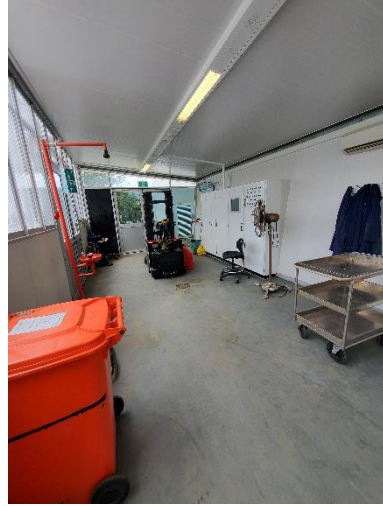
設有天車系統的環控溫室



室內天車系統



環控溫室植株置於移動式生長架



環控溫室操作空間及小型堆高機

#### 4.2. 澳洲國立大學



ANU 的生物研究學院



自動移液分注平台



CONVIRON 生長箱



CONVIRON 生長箱



小型輸送帶系統-具多種感測器



小型輸送帶系統-可容納數 10 株植株



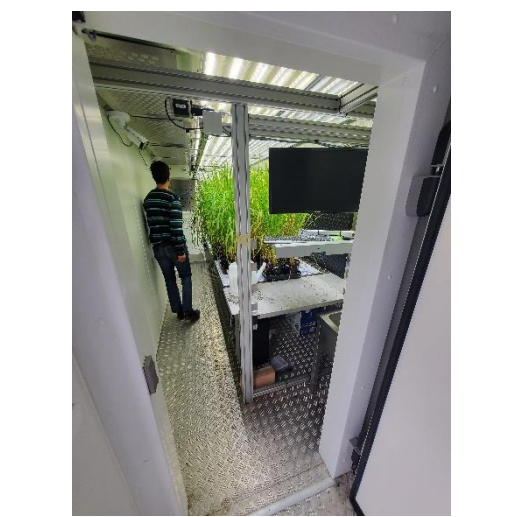
光譜環控氣候室



ANU 引入多套 Growth Capsule 系統



Growth Capsule 設備完全於貨櫃內

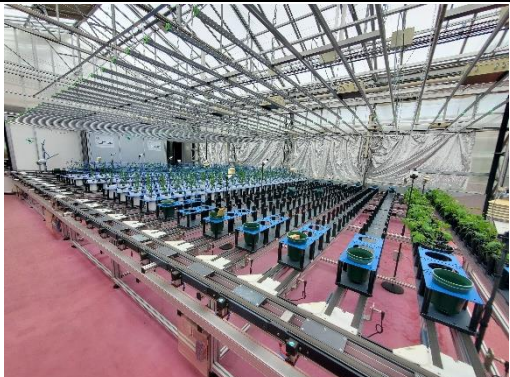









Growth Capsule 內部



### 4.3. 植物加速中心



Lemna tec 公司的輸送帶系統	輸送帶系統拍照區
	
輸送帶系統可承載 2400 個植株	PSI 公司的補光系統
	
加速育種溫室	自動化 X-ray CT 掃描系統
	
X-ray CT 系統可掃描穗結構	X-ray CT 系統掃描根系之成果
	
X-ray CT 系統掃描穗之成果	FieldExplorer 地面型表型體設備