

出國報告(出國類別：研究)

研習農業長期生態數據分析及模式建置

服務機關：農業部農業試驗所

姓名職稱：張仁育 副研究員

派赴國家/地區：美國

出國期間：113年8月23日至113年9月11日

報告日期：113年11月10日

壹、摘要

本行程承蒙農業部國際科技政策與技術人才培育計畫支持，赴美國密西根州立大學(Michigan State University, MSU)，於 Kellogg Biological Station (KBS)推動長期生態研究(long-term ecological research, LTER)執行委員會的首席研究員 Bruno Basso 研究室，瞭解 LTER 發展、管理與應用，特別是資料管理與 SALUS 模型的使用。期間亦參與 KBS 農業生態系統長期研究(Long Term Agroecosystem Research, LTAR)第 2 次開放日，與現任 KBS LTAR 計畫主持人 Phil Robertson 教授、KBS LTER 計畫主持人 Nick Haddad 教授就我方 LTER 發展議題交流意見，來自 KBS 的經驗與建議未來也將有助於我國農業長期生態研究的發展與推廣。綜合本次經歷，雖然兩週的短期交流時間有限，但短期計畫提供良好的人際互動基礎；此行造訪研究室通過企業化管理與作業指導確保大量計畫穩定運作，其資料管理文化值得我方農業研究長期發展借鏡。

目錄

| | | |
|----|-----------|----|
| 壹、 | 摘要..... | 2 |
| 貳、 | 目的..... | 4 |
| 參、 | 概要行程..... | 5 |
| 肆、 | 過程..... | 7 |
| 伍、 | 心得建議..... | 21 |

貳、 目的

美國在 1970 年代末期，生態學家經充分討論就長期生態研究(long-term ecological research, LTER)議題形成共識，美國國家科學基金會(National Science Foundation, NSF)在 1980 年創立 LTER 並推動一系列計畫，以收集、比較不同區域的數據並評估其在科學、技術與管理上的議題(Mirtl et al., 2008)，這些議題核心包含：(1) 初級生產的模式與調控；(2) 代表營養結構的族群其時空分布；(3) 有機質在表層和層積物累積的模式與調控；(4) 土壤、地下水和地表水的無機輸入和營養移動模式；與(5) 站址干擾的和形式和頻率 (Franklin et al., 1990)。此後，長期生態研究在國際間受到矚目。目前在全世界有超過 1,000 個長期生態監測站，其中包含 115 個農業站(DEIMS-SDR, 2023)。

美國密西根州立大學(Michigan State University, MSU)的 Kellogg Biological Station (KBS) (位置：42°24'N, 85°23'W，海拔約 288 公尺)，於 1987 年納入美國 LTER，係該研究網絡中關注行栽作物(row-crops，如當地主要栽種的玉米、大豆、小麥與苜蓿等)的監測站。KBS 的核心假說為：基於生態知識的管理，可以在不犧牲人類所需產量下取代基於化學投入的管理(Robertson and Hamilton, 2015)。2011 年美國成立農業生態系統長期研究網絡(Long Term Agroecosystem Research Network, LTAR network) (Walbridge and Shafer, 2011)，KBS 為該網絡 18 個監測站之一，也是目前唯一一個同時執行 LTER 與 LTAR 的研究站。在該網絡中透過建立與分享作業指南(protocols)以應對跨尺度農業議題，提供社會農產品安全、環境永續、社會責任知識，促進農業永續發展。

臺灣在農業長期生態研究的發展可追溯至 2004 年，由國立臺灣大學農業化學系、農業試驗所、臺南區農業改良場、國立中興大學及林業試驗所共同組成考察團赴美國密西根州立大學(Michigan State University, MSU) Kellogg Biological Station (KBS)考察評估臺灣建立農業長期生態研究工作，在 2007 年由農業試驗所與臺南區農業改良場啟動亞熱帶農業長期生態研究計畫，探討耕作制度及投入對生物多樣性、作物生產力與環境的影響及其機制，農業試驗所並於 2007 至 2009 年薦送 6 位研究人員赴 KBS 交流，以支持國內農業長期生態研究發展及運作。本次行程係時隔 15 年，於農業部國際科技政策與技術人才培育計畫支持下派員赴 MSU 瞭解當地 LTER 與 LTAR 計畫進展，建立人際關係以持續雙方合作交流。

參、概要行程

| 日期 | 所在地 | 行程內容 | 備註 |
|-----------------------------|--------------|---|---------------|
| 8/23 (Fri) | Chicago | 華盛頓杜勒斯國際機場 → 芝加哥歐海爾國際機場 | 搭乘聯合航空 UA2497 |
| 8/24 (Sat) | East Lansing | 芝加哥 (經 大急流城) → 東蘭辛 | |
| 8/25 (Sun) | | MSU 校園勘查 | |
| 8/26 (Mon) to 8/30 (Fri) | | 實驗室介紹與安置 瞭解研究室組織、權限與研究 瞭解 MSU LTER 與 LTAR 研究架構 整理與分析長期生態研究資料 | |
| 8/31 (Sat) to 9/1 (Sun) | | 第一週訓練工作整理 | |
| 9/2 (Mon) | | 第二週訓練內容規劃 | 美國勞動節 |
| 9/3 (Tue) to 9/4 (Wed) | | SALUS 模式資料表 SALUS 模式總覽與應用 | |
| 9/5 (Thu) | | 參加 KBS LTAR Field Day 長期生態研究議題分析結果討論 | |
| 9/6 (Fri) | | Lab meeting 問題討論 - 與 Bruno Basso 教授 | |
| 9/7 (Sat) 9/8 (Sun) | | 第二週訓練工作整理 | |

| | | | |
|------------|--|---------------------|-------------------|
| 9/9 (Mon) | | 東蘭辛 (經 大急流域) → 芝加哥 | |
| 9/10 (Tue) | | 芝加哥歐海爾國際機場 → 桃園國際機場 | 搭乘長榮航空 BR55 班機 |
| 9/11 (Wed) | | 抵達桃園國際機場 | |

肆、 過程

拜訪密西根州立大學

1855 年密西根州政府為推動農業與技術教育而創立了密西根州立農業學院 (Agricultural College of the State of Michigan)，該校是美國第一所提供農業與技術高等教育的學校。1862 年《莫里爾法案》(Morrill Act)通過後，美國聯邦政府開始向各州撥贈土地以資助建立捐地大學 (Land-Grant Universities)，普及應用科學教育，密西根州立農業學院成為美國第一所捐地大學。隨著學校擴張與學科多元化，1964 年後學校易名為密西根州立大學(Michigan State University)，迄今該校仍是全球農業領域享譽盛名的大學。

經本所農業化學組陳琦玲研究員引介，本次研習安排於密西根州立大學農業與自然科學學院，植物、土壤與微生物科學系 Bruno Basso 教授研究室見習(圖 1 - 2)，Bruno Basso 教授是 KBS LTER 執行委員會的首席研究員之一 (Principal Investigator of Executive Committee)，長年投入於農業氣候變遷適應及作物模型開發研究、發展農業生態系統永續管理，透過數據驅動的精準農業技術提升農業系統產量的同時，減少農業生產對環境的衝擊。

此次行程銜接「農業環境資訊網絡建立與國際交流之研究」計畫與美國農業部 (USDA-ARS)阿帕拉契果樹研究站(Appalachian Fruit Research Station)交流行程 (詳公務出國報告系統識別號：C11301553)，由芝加哥經大急流城(Grand Rapids)轉赴密西根州立大學所在的東蘭辛(East Lansing)。



圖 1. 筆者攝於密西根州立大學校園東北側入口



圖 2. 密西根州立大學農業與自然科學學院

Bruno Basso 教授研究室：

該研究室由 Bruno Basso 教授領導，成員眾多且文化背景多元。正式成員包含博士後、研究生、助理、工程師及技術人員共約 25 人，依執行計畫工作內容分屬各地。由於工作性質複雜且活動範圍廣（如跨州工作），研究室內部普遍以 Microsoft Teams 溝通以進行，群組內包含訪賓與其他人員，共超過 40 人。

入職(onboarding)時需向法院辦申請鑰匙，隨後詳讀並簽署研究室團隊準則（包含公共空間、農場及借用車輛）。研究室內部訊息則使用 Teams 分群或分別溝通，以及一般性資料的暫存，做法與筆者在業界經歷相似。除研究室會議(lab meeting)之外，成員每月繳交月工作更新資料，以追蹤計畫專案執行情形。Bruno 教授研究室將資料倉儲列為研究室標準操作程序(Standard Operating Procedure, SOP)的重點部分，並敘明不同目的及檔案類型應分別儲存於何處，包含 Teams、AgEco 與 High Performance Computing Cluster (HPCC)雲端空間、Git、Zotero 等。

資料的分類依據試驗類別

資料上傳指引(data submission guidelines)：在 KBS 研究站進行各項研究通常需承諾提交研究資料，包含詮釋資料(metadata)與原始數據等需及時提交資料管理辦公室並予以公開。這項作業係依據美國國科會(National Science Foundation, NSF)與 LTER 研究社群的期待而為，旨在保護研究投資所產生的結果以確保可長年使用，特別是生態研究與試驗往往不易重複，因此相關資料管理措施是必要。為此，KBS LTER 訂定資料上傳指引，重點節錄如下：

1. 所有資料均需以數位形式提交。
2. 詮釋資料與數據均需採用可支援格式。
3. 資料分成
 - a. 表格：應組織為行列矩陣，並包含有意義的列標籤、測量單位和定義。
 - b. 文字：應為簡單標準格式，文字避免使用底線和粗體。
 - c. 圖像：使用可網頁支援查看的格式，如 .jpg 和 .gif。
4. 範圍：通常僅限於詮釋資料與數據，除非直觀並且有助後續資料利用效益，應盡可能保持不設解釋性假設或分析影響的原始數據。
5. 詮釋資料內容。

值得注意的是在詮釋資料內容中敘及主題分類，包含：農藝、動物、生態系統過程、微生物、植物、研究內容、土壤特性和/或天氣等，可擇一以上標示。

KBS LTER 進行的研究與資料

KBS LTER 資料可在其官方網站取得(<https://lter.kbs.msu.edu/data/>)，包含資料集、研究指南(research protocols)、空照影像、衛星影像、GIS 資料（包含場址、界線、數值高程模型、土壤、水文、道路等）與精選資料(data nugget)。精選資料是在 LTER 中比較特別的部分，藉由真實數據集及其背後蘊含的科學訊息，作為教學材料、啟發學生科學研究與系統思維。在 KBS LTER 的案例如生質能源、氮肥與共生關係、暖化對春季植物開花提早影響等。

KBS 是美國唯一同時執行 LTER（長期生態研究）與 LTAR（長期農業系統研究）的場所，兩者在本質上有若干不同。LTER 的目的在於了解生態過程、促進農業生態系永續、了解農業與環境之間的互動與收集長期資料；而 LTAR 目標則是整合與實踐創新技術，提高農業生產力和獲利能力，如透過改善土壤健康、減緩氣候變遷和保護生物多樣性來增強環境永續性；同時支持實踐有利於農場和社區的農業，促進農村繁榮，確保長期經濟和環境健康。長期、透明與協作是 LTAR 的執行精神。

目前 KBS LTER 執行由 Nick Haddad 教授統籌、Jennifer Lau、Bruno Basso、Sandra Marquart-Pyatt、和 Sarah Evans 等教授共同主持的國科會延續性計畫「農業生態系統中韌性的生態與社會機制研究(Ecological and Social Mechanisms of Resilience in Agroecosystems)」計畫，期程自 2022 年 12 月至 2028 年 11 月共計 6 年期，總資助金達 765 萬美元（攤提約新台幣 4,000 萬/年）。該計畫旨在研究資源、多樣性與適應性為農業生態系韌性的三項機制，並驗證韌性機制是否可在不同尺度具可預測性。該項研究包含跨領域投入，包含土壤、溫室氣體排放與碳儲存、水資源、微生物與節肢動物、社會科學研究等。

農業模型的發展可以追溯回 1950 年代(圖 3)，1970 年代以後相關發展與傳承漸漸形成若干迄今仍廣泛使用的模型；在 1990 年代後，跨領域整合、並且考量與農業系統合作的經濟觀點導入，促進模型發展的創新與多功能價值(Jones *et al.*, 2017)。密西根州立大學發展的 SALUS 模式（全名為「土地利用永續性的系統方法(Systems Approach to Land Use Sustainability)」），包含作物生長模組、土壤有機質(SOM)及養分循環模組、土壤與水平衡模組等 3 個模組(圖 4)，透過輸入天氣資料組（包含逐日日輻射量、逐日

最高溫、逐日最低溫、逐日降水量等必要資料)、土壤資料模組(10 - 20 cm 深土壤水分限制下限與田間含水量、作物根系深度、不透水層深度的水傳導參數)、作物管理模組(作物品種特性、種植太陽日與深度、種植密度、灌溉投入、肥料投入、作物殘體或廐肥投入)等,產出與經濟及環境相關指標的模擬結果。線上版本 SALUS (<https://salusmodel.ees.msu.edu/SALUSOnline>)提供簡單介面呈現整理後的模擬結果,該工具允許使用者在特定區域(限於伊利諾州、印第安那州、愛荷華州、密西根州、明尼蘇達州、密蘇里州、南達科他州或威斯康辛州),以選單填入方式使用 SALUS 模型模擬當地土壤、管理與天氣對玉米生長與營養反應的影響,也包含土壤有機碳累積、氮淋洗、二氧化碳排放等。

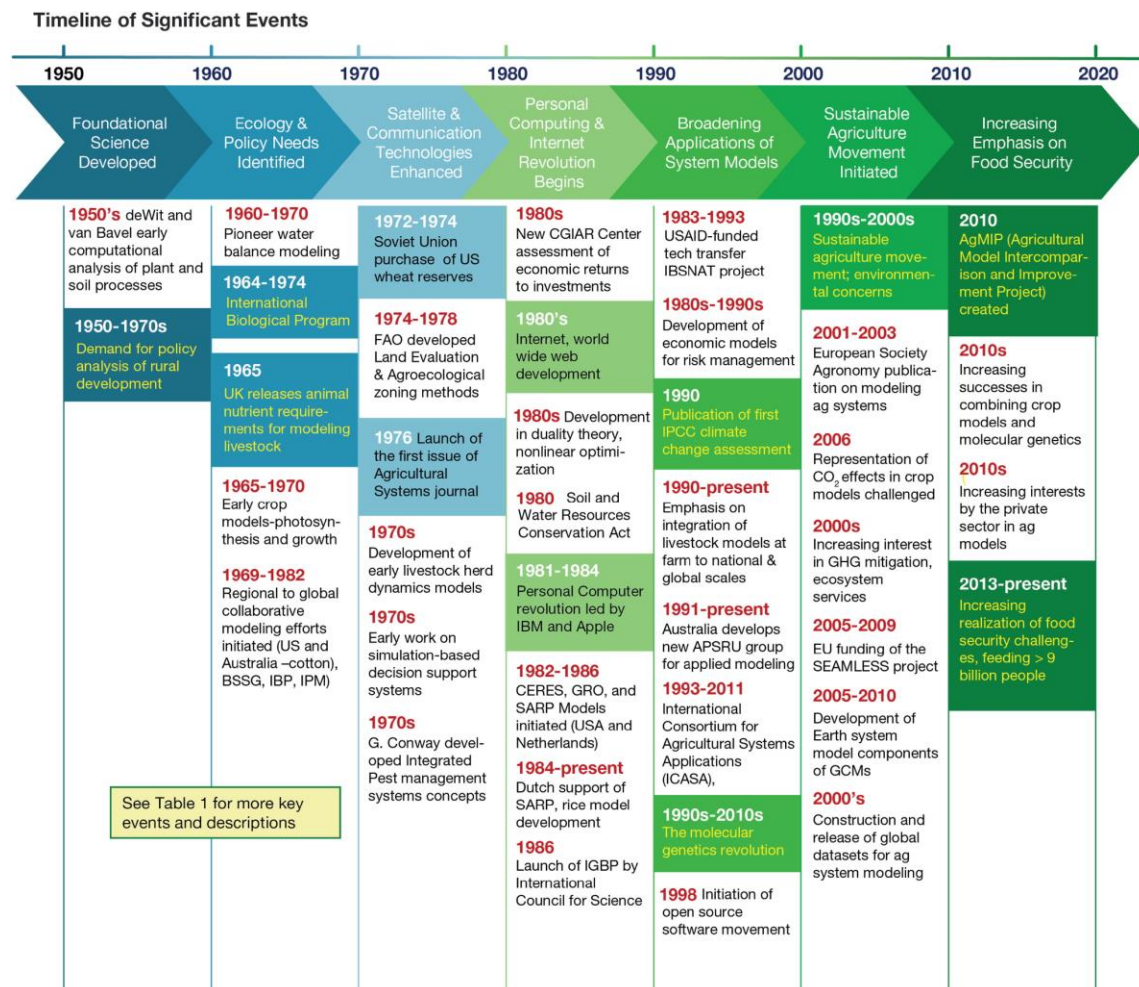


圖 3. 農業系統模型發展簡史(摘自 Jones et al., 2017)。

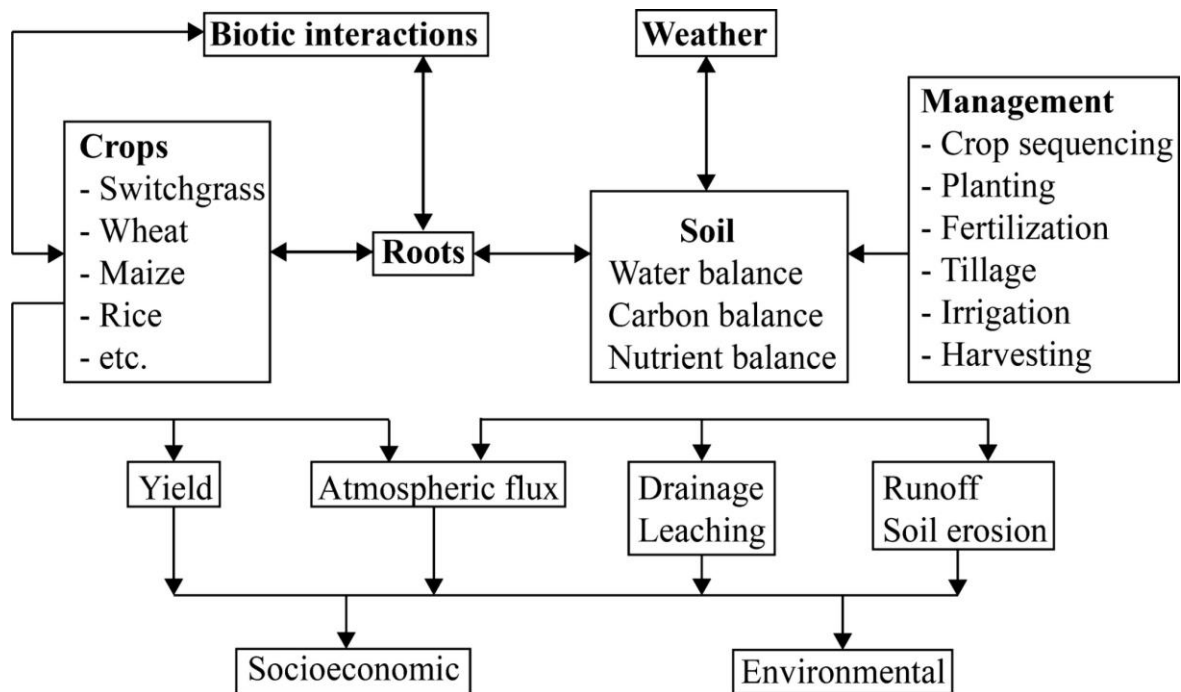


圖 4. SALUS 模型總覽 (摘自 [Basso et al., 2006](#); [Liu and Basso, 2016](#))

產量穩定度分區(yield stability zones, YSZ)提供研究人員更細緻地闡釋農業精準管理(圖 5)。數據係從收穫機下載不同年度高解析度網格產量監測資料作為半規則點形狀檔案，並使用 ArcGIS 的 python 模組 ArcPy 庫進行的普通克里金(ordinary kriging)法插值以計算取得產量穩定分區資料(如 Fowler *et al.*, 2024; <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51155-y>)。結合 SALUS 模型模擬、高程、測繪及遙測資料，歷史產量分區能有效地應用在精準肥料管理以增進收益及減少環境衝擊的最佳化管理與產量預估(Shuai *et al.*, 2024; <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10101-0>)。這樣的研究方法有別於過去在農地抽樣所作的產量預估，而能較為釜底抽薪地讓行動具體並且有效，也有利擴大尺度的應用。

以便於理解與溝通呈現 SALUS 模型成果有助於使用者對資料的詮釋或應用者決策，例如肥料投入對產量或淨回饋的影響(圖 6)，在該案例中將單一分佈圖轉換為關注指標對其累進機率值，便可將不同處理、效益併於單張圖示，如案例中每公頃施用 200 kg 氮肥與 250 kg 氮肥的模式模擬結果產量與淨回饋機率分佈幾無差異，顯示 200 kg/ha 氮肥投入將是推薦量。環境影響衝擊部分，由於密西根州位於五大湖區，水資源

豐沛通常用水無虞，而肥料與廢肥的使用造成氮淋洗進入水循環所致水污染，則是該州研究主要關注的議題之一。圖 7 案例中展示將 SALUS 模式預估不同氮肥投入的氮淋洗量與邊際淨回饋作圖，折線圖顯示為不同氮肥投入所模擬出的平均值（座標）與標準差（圓點大小），超過最佳氮肥投入量的氮肥施用非但無助於經濟層面的邊際效益提升，反而徒增氮淋洗。

另一個案例是 MSU KBS 在柳枝稷(Switchgrass)的研究，柳枝稷為多年生植物，具有高生物量、與適應力強、管理需求低等特性而被視為作為生物燃料的理想作物之一；此外，柳枝稷根系深，可促進碳固定、改善土壤品質與健康，研究結果顯示柳枝稷具備淨正向碳匯功能，約可為地下土壤有機碳(SOC)挹注 $0.87 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Martinez-Feria and Basso, 2020)。然而氣候變遷可能改變柳枝稷在碳匯功能的表現，透過 SALUS 模型可提供管理者了解在不同管理措施、不同氣候情境下對 SOC 的貢獻(圖 8)。

現今 SALUS 的模式主要以 Python 讀取輸入檔案執行，此次行程取得資料格式檔，在完成資料清洗後方可正式用於模式運算。

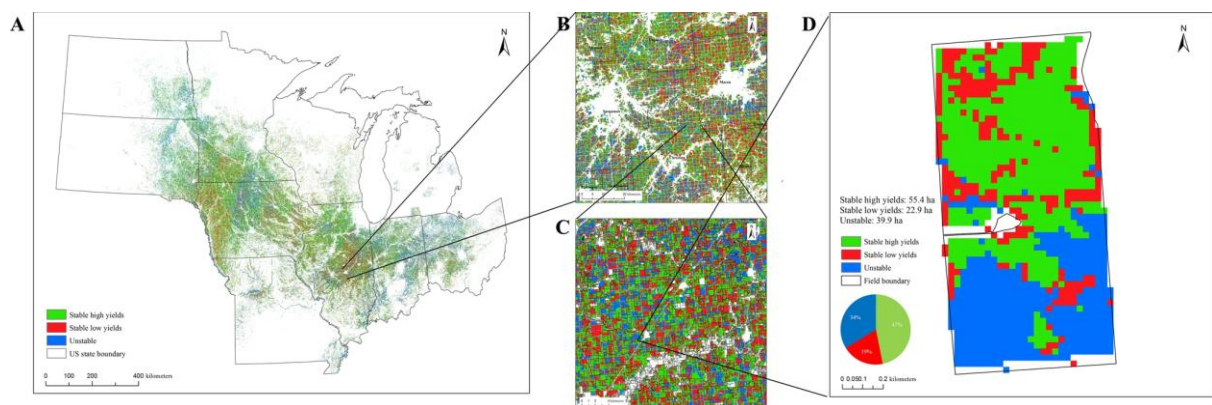


圖 5. 以 2010-2017 年間至少 3 年玉米或玉米-大豆作物系統繪製的作物產量地圖，綠色顯示為穩定高產、紅色顯示穩定低產、藍色則為產量不穩定區(Basso *et al.*, 2019)。

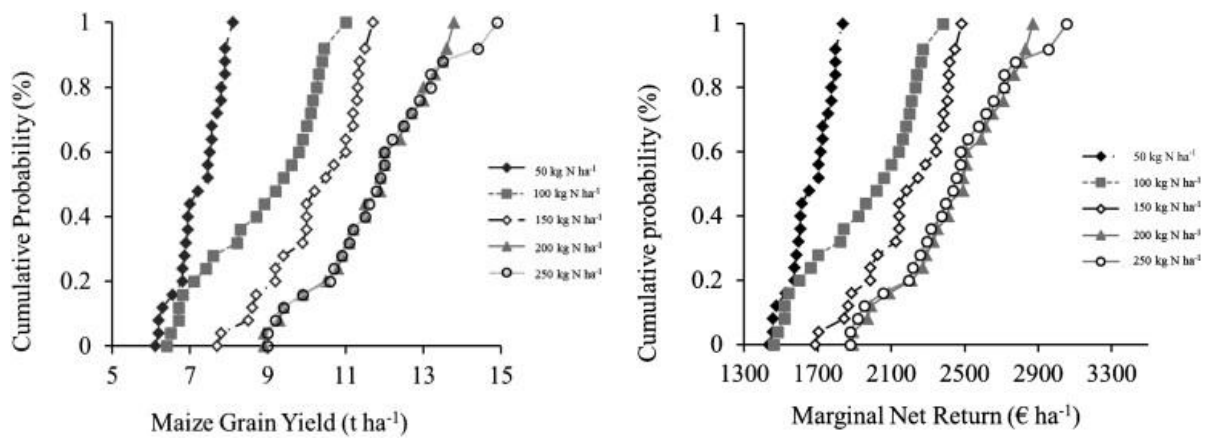


圖 6. SALUS 模式模擬每公頃不同氮肥濃度下玉米產量(左)與淨收益(右)影響(摘自 [Basso et al., 2012](#))

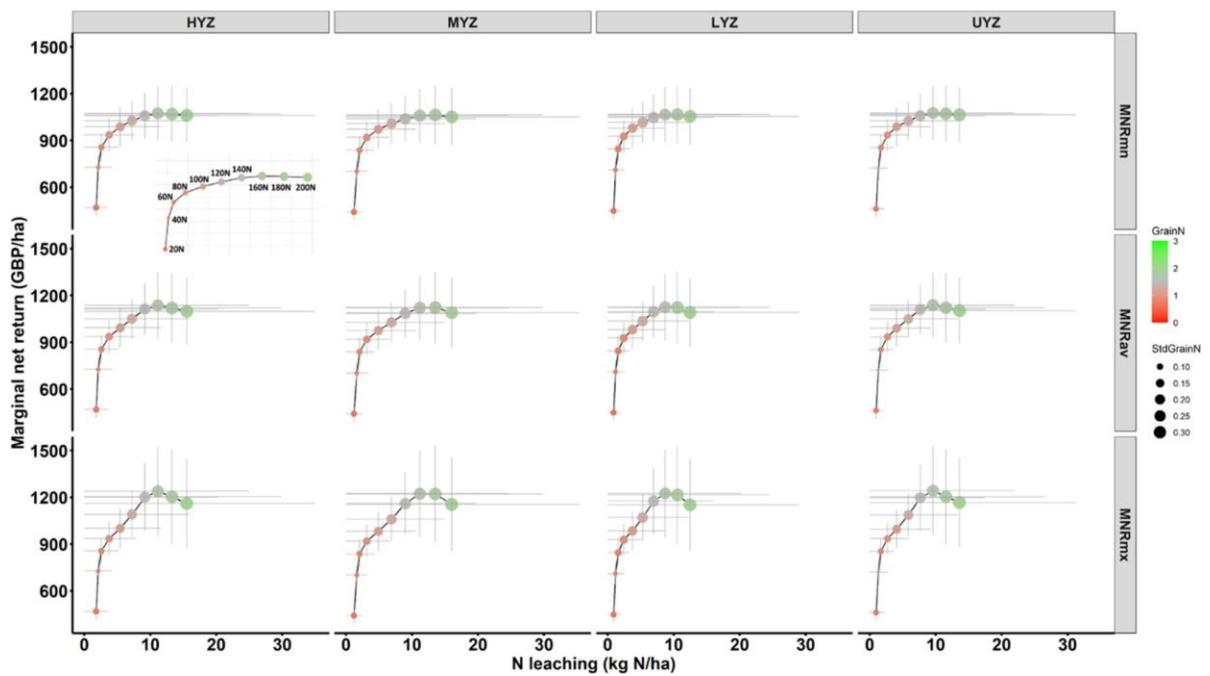


圖 7. 不同區域氮肥投入對土壤氮淋洗與邊際淨報酬關係(摘自 [Cammarano et al., 2021](#))

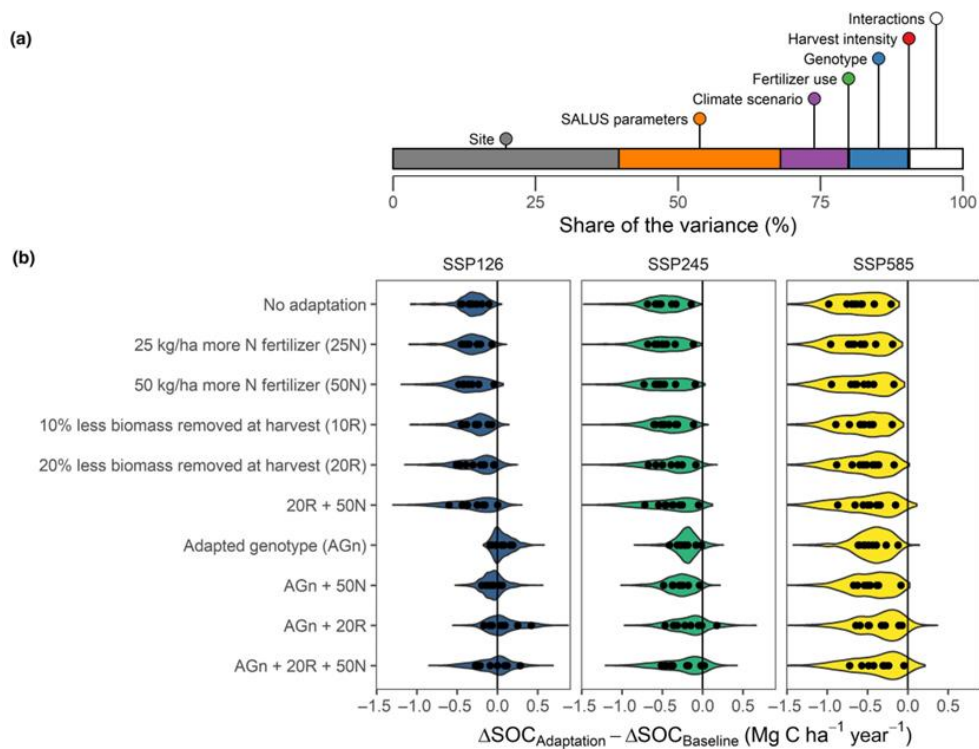


圖 8. 氣候變遷和調適情境中不同處理造成的土壤有機碳(SOC)變化的變異數貢獻(上)；以 SALUS 模型模擬不同調適措施組合對土壤有機碳變化影響(下)。(摘自 [Martinez-Feria and Basso, 2020](#))

第二屆 LTAR 開放日

9月5日 KBS 舉辦第二屆 LTAR 的年度開放日活動，以「未來的永續作物系統 (Sustainable Cropping Systems for the Future)」為主題，主辦單位統計是日共有約 80 多名研究人員、農民及業界專家參與開放日活動。在 KBS LTAR 的田區分成 2 類型：BAU (business as usual system，即慣行系統)與 ASP (Aspirational system，即願景系統)，活動在 KBS LTAR 計畫主持人 Dr. Phil Robertson 開場後，就「生物多樣性」、「土壤健康」與「社會科學」三大議題主軸由參與計畫教授與研究人員於田區介紹在 BAU 系統中的農業技術在相關議題所提供的科學資訊。

LTAR 中採用的 BAU 和 ASP 系統說明如下：

- BAU：以玉米、大豆兩種作物混作，自 2022 年起於 2 個處理組開始作業系統的試驗，以玉米為始者為 BAU1、大豆為始者為 BAU2。
- ASP：以玉米（種植絳三葉、矮生油菜、蘿蔔、黑麥等作為覆蓋作物）、大豆、小麥（種植蘇丹草、珍珠粟、太陽麻等作為覆蓋作物）、芥花(canola)、芻料（紫花苜蓿、紅花苜蓿、菊苣、一年生黑麥等）等 5 個作業系統輪作，2022 年起共 5 個處理組依序以前述作業系統開始試驗，如以玉米為始者試驗區即為 ASP1、大豆為始者即 ASP2。在這 5 處理組的每個試驗區內劃有一小區(5 × 10 m)不使用堆肥而改以化合肥料投入。除前述，另設有 ASP6 自 2022 年起復育為草原試驗區(restored prairie)。

除上述試驗區(plots)之外，KBS 中亦有田區(field)尺度的試驗田（單一田區面積 5 公頃以上）作為擴大規模的研究區(圖 9)。

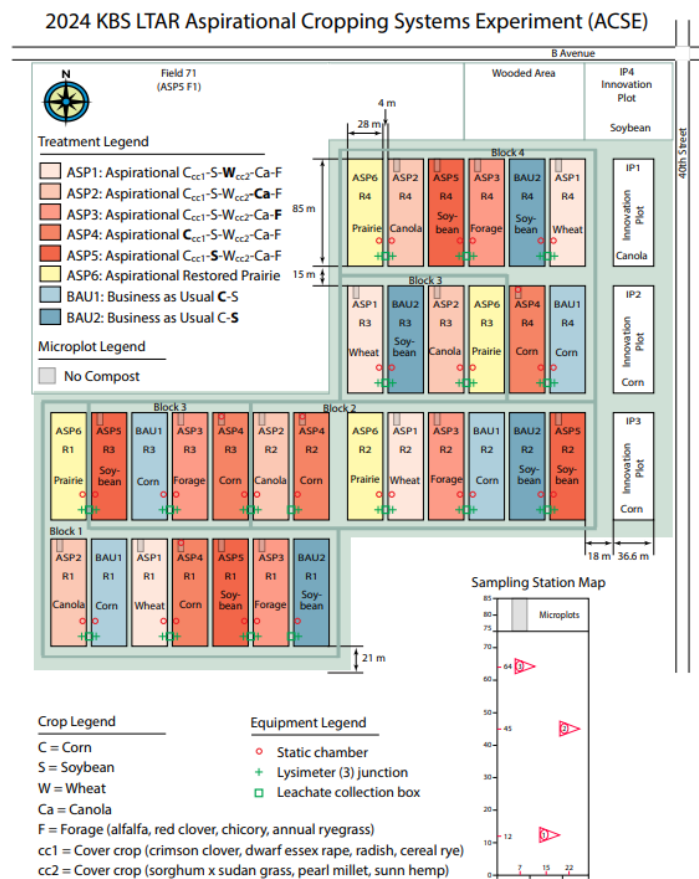


圖 9. 2024 年 MSU KBS LTAR 試驗田配置圖(摘自 [KBS LTAR, 2024](#))

生物多樣性

研究人員介紹以粗目(corase)及細目(fine)網研究覆蓋作物凋落物的分解速度在 BAU 與 ASP 田區中的差異，結果顯示在 ASP 系統中，大部分的凋落物會在前 20 天中快速分解，該作用主要取決自微型節肢動物(microarthropod)的活動；相較之下，在 BAU 系統中凋落物分解較顯緩慢，尤其是在細網中的分解速率顯低於粗網，可能指出在 BAU 系統中大型節肢動物是貢獻分解功能來源。除此之外，研究團隊也進行包含害蟲族群及其所致危害的研究，以及授粉昆蟲，尤其授粉昆蟲減少是當代備受關切的議題之一。草生帶(prairie strips)的存在增加了包含蝶類與蜂類等授粉者的多樣性及豐富度，授粉者在草生帶被掠食性節肢動物獵殺的損失也較其他環境少(圖 10)。



圖 10. 現任 KBS LTER 計畫主持人 Dr. Nick Haddad 講述在 LTAR 中授粉昆蟲研究議題

土壤健康

當地土壤健康研究分成三類指標，包含生物、物理、化學等。在生物類指標中，除微生物之外，KBS LTAR 中關注線蟲，並認為線蟲是土壤健康的早期指標，因為線蟲是在 ASP 不同作物覆蓋下一年後顯見變化的生物類群。土壤的線蟲依食性共被分為 5 類並可自外觀鑑別，分別是捕食細菌(bacterivore)、捕食真菌(fungivore)、植物寄生性(plant parasitic)、掠食性-捕食線蟲(predator)與雜食性(omnivore)，值得注意的是在多年生芻料栽作下，植物寄生性線蟲的比例較其他作物類型低，其次則是芥花栽作。

在土壤理化相關研究中，研究人員闡述土壤結構、土壤滲漏、溫室氣體排放與土壤有機碳等。參觀點恰為 BAU1 與 ASP4 中間，本年度為試驗第 3 年兩區作物皆輪為玉米。在 ASP 系統中土壤樣本的土壤結構較佳、而在 BAU 中則有壓實與土壤鬆散情形(圖 11)；而面臨降雨，ASP 系統的土壤也較 BAU 系統不易流失。在碳的議題上，除了溫室氣體（如甲烷、二氧化碳）與土壤有機碳之外，石化燃料的使用也妥善紀錄以確保系統內碳帳完整計算。



圖 11. 現場展示 BAU 和 ASP 系統對土壤質地的影響

社會科學

Sandra Marquart-Pyatt 教授說明自 2017 年開始進行的 Panel Farmer Survey (MSU-PFS)，該項調查針對來自密西根州、伊利諾州、印第安納州與俄亥俄州約 2,000 名、管理至少 100 英畝土地的農民進行，追蹤農民在作物輪作、耕作方式和覆蓋作物作法的實踐。所有參與者均管理至少 100 英畝土地。調查為自我報告形式，內容涵蓋農場與田間管理、對氣候變遷觀點、風險評估、決策行為、土壤健康、覆蓋作物的使用，以及農民的知識來源。Dr. Tayler 則表示在密西根州，免耕(no-till)與覆蓋作物(cover crops)是當地農民應用於管理土壤健康的措施，建立能更快速反映並與結果相關的指標以及當地土壤健康基準，能幫助農民針對不同土壤類型需求制定實際的管理策略(圖 12)。另一方面，經濟的收益比較必然是生產者關注的課題，根據 2023 年的資料，ASP 系統每公畝(Are, A)收益為 209 美元，低於 BAU 系統(\$ 315/A)，主要是芻料收入為淨損。然

而系統間的經濟比較尚須累計數年結果，在 2024 年已收獲得數據顯示 ASP 系統在經濟的潛力審慎樂觀，本年度小麥與芥花籽產量分別較 2023 年提升 47.2 % 與 32.6 %。

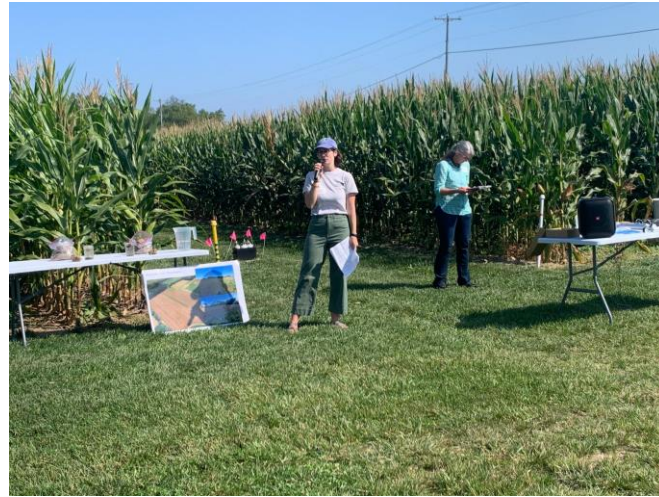


圖 12. 本次 LTAR Field Day 主辦人 Dr. Tayler 說明 MSU KBS LTAR 在社會面相的研究

問題與討論

在 LTAR Field Day，筆者向 Phil Robertson 教授詢問有關我方 LTER 資料分析的後續建議。Dr. Phil Robertson 曾任 KBS LTER 計畫主持人，亦是當年協助我方建立 LTER 計畫與培育農業試驗所研究人才的重要推手，對於我方在 LTER 量測是否能反映不同農業系統管理投入所致生態系功能表現的差異，Robertson 教授建議應該全面考量與投入有關的生態系功能以能提供更完整的論述。例如，肥料投入差異是臺灣農業 LTER 關心的因子之一，那麼便須考量其對溫室氣體排放的影響、對收支損益的影響等。在此一議題，Basso 教授也建議道，政府的角色會是公正客觀的將完整的狀態呈獻予大眾知悉，並與權益關係人從中謀求解決方案的共識。

另一方面，有關如何量化節肢動物生態價值以彰顯其對人的效益而非從研究數據描述生物多樣性。Nick Haddad 教授提供該校 Douglas Landis 教授及其學生發展的生物控制服務指數(biocontrol service index, BSI; Gardiner *et al.*, 2009)，該方法起初用以描述地景多樣性對害蟲控制的生態系服務效果，提供管理與決策者更好了解不同的生態因子對害蟲控制的貢獻，可應用在生態農業或 LTER 等長期計畫生態系服務評估使用；

授粉的部分則可洽致力於發展授粉生態系服務模式化的 Emory University 的 Eric Lonsdorf 教授，或是援引 InVEST 的授粉模型。

行程結束前與 Basso 教授詢問有關 SALUS 模型應用與未來工作重點(圖 13)，教授表示 SALUS 模型模擬不同氮肥投入情境下的作物產量表現及相關生態效應。SALUS 模型具有強大的模擬能力，不僅能夠處理歷史數據以分析過去的作物產量變化，還可根據需求進行未來預測。模型輸入需要包含土壤、氣候、作物及管理數據，且適用於全球各地，包括臺灣。若模擬結果與實際觀察不符，可透過調整模型中的作物參數進行校準，但此過程需具備相關專業知識。此外，若欲擴展模型應用範圍至更廣泛的預測，可考慮結合遙感影像技術進行模型尺度上的擴增。

研究的後續工作將聚焦於數據清理及模型表格的填補，並與團隊成員合作完成模型運行。未來合作方向包括產量穩定區域劃分、無人機(UAV)相關數據的應用等技術交流。此外，研究團隊建議保持密切聯繫，持續共享數據、發表論文、提出新的研究計畫、與設計創新試驗，以推動未來農業生態系統的永續發展。



圖 13. 與 Bruno Basso 教授於其辦公室合影

伍、心得建議

感謝 Bruno Basso 研究室的 Lab Manager Mr. Richard Price、行政助理 Ms. Katie Hepfinger、博士後研究員 Dr. Susana Albarenque 以及阿根廷國家農業技術研究所 (National Agricultural Technology Institute) 的訪問學者 Dr. Leonardo Novelli 在本次為期約兩週的行程中給予的支持和協助。心得建議概述如下 3 點

1. 學習交流與延續：2 週的交流與學習非常短暫，同期在該研究室的阿根廷研究人員 Dr. Novelli 表示，該國計畫提供他為期 3 個月的交流機會，可更充裕地將研究數據投入分析—在數據清洗至符合 SALUS 可運算的資料格式便歷時近 2 週。因此，作為短期人才培育計畫，在提供與研究室團隊奠定人際交流的基礎，如何延續其衍生價值：如計畫中所談到，彼此保持一致目標地推動後續資料分析、模式應用與發表，仍待持續努力。
2. 研究室管理：Bruno Basso 研究室規模龐大並有相對細緻的團隊分工，使其如同一家小公司般運作、管理。在 Lab meeting 會議中教授指出目前研究室承接 25 個計畫，這樣的計畫量是遠超在過去臺灣官方農業研究人員所負擔的工作量，也意味著成員需積極自主以確保工作進展；即便是有相對較多的研究室成員，包含作業指南(protocols)、資料格式、資料倉儲、版本控制等都是支持研究室穩定運作的基礎，而這恰也是臺灣在農業研究普遍缺乏關注的重點。
3. 資料管理文化：資料管理的文化真切地反映在 KBS LTER，如同 Bruno Basso 教授所說，「你可以在 LTER 的網站中找到一切」。這點亦與我國執行現況有落差：按照國內農業科技計畫現行制度（計畫經費分散於各不同試驗改良場所），長期計畫知識傳遞、執行品質良窳、資料是否如計畫約定倉儲管理，以及成果發表等，均有相當大的進步空間。KBS 無論在 LTER 或 LTAR 的發展軌跡可依循或參考的借鏡，未來我們也將持續充實資料庫的內容予發表，以傳遞長期其生態研究的價值。