

出國報告（出國類別：考察）

長期有機田對於農業生態系統服務
價值以及碳匯之影響

服務機關：農業部高雄區農業改良場

姓名職稱：胡智傑 副研究員

侯秉賦 副研究員

派赴國家：德國

出國期間：2024 年 7 月 25 日至 8 月 6 日

報告日期：2024 年 11 月 4 日

壹、摘要

農業部高雄區農業改良場（以下簡稱高雄農改場）團隊於 2024 年 7 月 25 日至 8 月 6 日赴德國馬克斯普朗克生物地球化學研究所（Max Planck Institute for Biogeochemistry, MPI-BGC）考察。考察目的旨在了解該所重點研究方向，並借鏡其長期試驗經驗，為臺灣建立（亞熱帶或熱帶）長期有機生態試驗，作為推動農業生態系統服務的示範場域。農業生態系統服務價值是指人類從農業生態系統獲得的所有益處。高雄農改場自 1988 年建立的 37 年長期有機實驗田，是臺灣長期有機栽培及生態研究最重要的場域之一，先前研究結果顯示水旱輪作與有機處理更能促進土壤健康及產量。MPI-BGC 位於德國耶拿，致力於探討全球生物地球化學循環及其與氣候系統的長期相互作用。本次本團隊拜訪了 Biogeochemical integration 部門主管 Markus Reichstein 教授及 Eco-Meteorology 小組組長李松靜博士。李博士團隊的研究核心包括濕地和泥炭地恢復、量化復育策略（如再濕化）的氣候效益，證明能有效促進生態系統恢復碳吸收功能。結合渦流協變性(ED)測量與人工智慧，改進淨生態系統交換量（NEE）的劃分方法，提高碳預算評估的準確性。MPI-BGC 另有耶拿試驗田區自 2002 年建立，是一項大型草地生物多樣性長期實驗，探討植物多樣性對生態系統功能的影響。重要研究成果包括生物多樣性與功能：植物物種豐富度對約 45% 的生態系統指標有顯著正面影響；延遲的生物多樣性效應：許多地下過程（如土壤碳儲存量和根系生物量）的正向物種豐富度效應，需要數年時間才能顯著顯現；穩定性與韌性：多樣性增加了生態系統對氣候極端事件的抵抗力；碳循環：土壤碳儲存量隨植物物種豐富度增加而顯著增加，尤其在頂層土壤中。本次考察確認了高雄農改場長期有機試驗在當前淨零浪潮中的戰略價值，並從 MPI-BGC 獲得了高價值技術與理念啟發，應將高雄場長期有機田區定位為「氣候變遷下亞熱帶/熱帶農業生態系統多功能性與韌性」的研究與示範中心。應借鏡耶拿試驗，構思建立一套針對臺灣（亞熱帶/熱帶）農作物的多樣性-生態系統功能長期試驗，探討多樣性植物對養分循環及碳匯的影響，導入類似 MPI-BGC 的高頻率溫室氣體量測技術和根圈碳分配觀測技術，以精確量化亞熱帶農田的碳收支與生態響應。積極尋求與 MPI-BGC 建立正式合作研究機制，共同發表跨緯度、跨氣候區的長期生態試驗成果。這將有助於將臺灣農改場長期試驗提升至國際領先地位，為臺灣推動農業生態系統服務提供強有力的科學實證。

關鍵字：生態；碳匯；馬克斯普朗克生物地球化學研究

目錄

壹、摘要.....	1
貳、目的.....	3
一、問題分析.....	3
二、前人研究.....	4
三、擬解決問題.....	5
參、考察內容.....	6
一、行程.....	6
二、馬克斯·普朗克生物地理化學研究所考察.....	7
三、耶拿試驗考察.....	12
肆、心得與建議.....	17

貳、目的

一、問題分析

因氣候變遷對全世界威脅愈來愈大，已有 130 多國提出「2050 淨零排放」的宣示與行動。為呼應此一全球趨勢，蔡總統亦於 2021 年 4 月 22 日世界地球日宣示，2050 淨零轉型也是臺灣的目標。政府隨後於 2022 年 3 月及 12 月分別公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」及「12 項關鍵戰略行動計畫」，其中與農業較相關戰略為「自然碳匯」，以執行造林及相關經營工作，降低大氣二氧化碳濃度，並建構負碳農法及海洋棲地、動植物保育技術，保護生物多樣性，來達到減排的效果。

目前為了因應氣候變遷，各國無不戮力推動各項淨零排放政策，其中具最大助力的莫過於「淨零碳排的自然解方」，主要指的是「基於自然的解決方案」(Nature-based Solutions, 簡稱 NbS)，它是指保護、永續管理與復育天然或經改造的生態系統的行動，這些行動能有效地適應性地解決社會挑戰，同時提供人類福祉與生物多樣性效益。此概念包含利用森林碳匯 (Forest Carbon Sink)、土壤碳匯 (Soil Carbon Sink) 及海洋/藍碳碳匯 (Ocean/Blue Carbon Sink) 等自然生態系統固有的碳吸收、儲存與調節功能，來達成溫室氣體排放量與移除量相平衡的目標。

而淨零碳排的自然解方正是農業生態系統服務價值的一環，但各項生態系統服務的價值評估皆需要進行非常長時間的試驗才能看得出趨勢，高雄場具有 37 年全國最久的有機生態試驗田區，正適合在這淨零及生態永續的浪頭上，提供各項試驗結果供各領域專家研擬自然的淨零解方。

因此本計畫希望藉由考察德國馬克斯普朗克生物地球化學研究所重點研究方向，也將高雄場長期有機生態試驗結果與該所研究人員討論，並借重耶拿試驗的結果，構思建立如何建構臺灣(亞熱帶或熱帶)長期有機生態試驗，如多樣性植物對養分循環及碳匯影響，做為推動農業生態系統服務的示範場域。

二、前人研究

根據來源資料，「自然解方」(Nature-based solutions, NbS)或更具體來說的「自然氣候解方」(Natural Climate Solutions, NCS)，是透過保育和管理生態系統，以減少溫室氣體(GHG)排放並利用其儲存碳的潛力，作為減緩氣候變遷的關鍵解方。主要碳匯和相關的減緩碳排方向有：1、森林及陸地生態系統管理(綠碳)：陸地生態系統是重要的溫室氣體來源，但同時也是主要的碳匯集地，透過管理陸地生態系統可以減少排放源並增加碳匯，主要措施有：(1) 保護完整生態系統；(2) 避免毀林與土地退化；(3) 造林或再造林；(4) 持續的森林管理。2、濕地與海岸生態系統(藍碳)：藍碳指被海洋和沿海生態系統，特別是有植被覆蓋的沿海生態系統所捕獲和儲存的有機碳，因此沿海和海洋生態系統也能增加碳匯，並提供重要的減排機會，主要可增加碳匯的生態系統有：海草床(Seagrass meadows)、潮汐沼澤(Tidal marshes) / 鹽沼(Saltmarshes)、紅樹林(Mangrove forests)、泥炭地(Peatlands)、珊瑚礁(Coral reefs)和海藻林(kelp forests)。3、農業及工作用地(黃碳)：改善農業和土地利用活動的管理，可以顯著減少溫室氣體排放並固存碳，主要措施有：(1) 農林業(Agroforestry)：在農地種植樹木，包括在農作物之間種植樹行，或作為牲畜庇護所；土壤碳固存(Soil Carbon Sequestration)：透過農業改良，增加農業土壤中的碳含量；永續土地管理(Sustainable Land Management)：包含農林業、生態農業、保育農業和有機農業等各種永續農業方法，旨在保護土壤健康(Seddon et al., 2020; Seddon et al., 2021)。

高雄區農業改良場旗南分場的有機田區，是臺灣最具代表性且連續時間最長的露地有機農業試驗示範區之一，其有機田區長期農耕法試驗已連續進行37年，是全國保持最久的有機示範田。Hou 等人(2018)於本試驗田區進行25年兩種輪作系統和三種施肥方式試驗，其中輪作系統為水旱輪作(R1：水稻-水稻-蔬菜)及連續旱作(R2：甜玉米-田菁-蔬菜)，施肥處理為有機肥(OF)、化學肥(CF)和整合肥(IF，有機與化學各半)，利用次世代定序技術，結合新穎的富集分析和共現分析方法，全面性地分析了土壤微生物組。結果顯示，輪作系統比施肥方式更能顯著地影響土壤微生物組的構成與多樣性，其中水旱輪作(R1)顯著提高了微生物多樣性，這與提高作物的抗病能力呈現正相關。因此，研究建議水旱輪作是保持土壤健康和實現永續農業的最佳選項，甚至可以在仍需使用化學肥料時，部分抵消其負面影響。另外，Hou 等人(2020)研究利用不同施肥方式(純化肥CF、綜合IF、純有機肥OF)對作物產量穩定性與區域氣候變異的長期影響。研究結果發現，在氣候變化的背景下，使用純化學肥料(CF)和綜合肥料(IF)的甜玉米可銷售產量顯著下降，而有機肥料(OF)的產量則略有增加，顯示出更高的產量韌性。關鍵的相關性分析和回歸樹模型首次證明，相對濕度增加是影響化學肥料處理下甜玉米產量下降的關鍵因素，並且研究推測土壤微生物可能在有機處理下幫助甜玉米抵抗環境脆弱性。

土壤碳封存來減緩氣候變遷的策略，其必要性源於自 1750 年工業革命以來，大氣中二氧化碳（CO₂）濃度因燃燒化石燃料和土地利用變化而顯著增加。作者 R. Lal 估計，全球農田土壤有潛力每年封存約 0.9±0.3 Pg C（約十億噸碳），這足以抵消每年大氣 CO₂ 增量的大約四分之一到三分之一。文章強調，透過採用推薦的管理措施（RMPs），例如保護性耕作、覆蓋作物、有機肥使用以及退化土地的復育，不僅能將碳重新儲存於土壤中，還有助於恢復退化土壤、提高生物量生產並改善水質，因此土壤碳封存是一種真正的雙贏策略(Lal, 2004)。Leifeld 和 Fuhrer (2010)分析 32 篇經過同儕審查的期刊文章中的 68 個數據集，比較了有機(ORG)與傳統(CON)耕作系統的土壤有機碳(SOC)含量，研究結果顯示，有機系統在轉換後，其 SOC 含量平均每年增加 2.2%，而傳統系統的 SOC 則沒有顯著變化(平均為-0.16%)；在 68 個數據集中，有 37 個有機系統施用的有機肥量高於其比較的傳統系統。當有機系統的有機肥施用量高於傳統系統時，SOC 顯著增加 2.91%，當有機系統和傳統系統的有機肥施用量相似時，有機系統的 SOC 變化則不顯著(0.40%±0.24)。因此，有機農業對於 SOC 的優勢，很大程度上取決於相較於傳統農業更高且往往不成比例的有機肥施用量。

三、擬解決問題

本計畫希望藉由考察德國馬克斯普朗克生物地球化學研究所重點研究方向，也將高雄場長期有機生態試驗結果與該所研究人員討論，並借重耶拿試驗的結果，構思建立如何建構臺灣(亞熱帶或熱帶)長期有機生態試驗，如多樣性植物對養分循環及碳匯影響，做為推動農業生態系統服務的示範場域。

參、考察內容

一、行程

日期	地點	研習內容
7月25日~ 7月26日	本場-桃園-德國慕尼黑機場-耶拿(Jena)	交通移動
7月27日	耶拿	產業考察
7月28日~ 8月3日	馬克斯普朗克生物地球化學研究所	一、馬克斯·普朗克生物地理化學研究所考察 1. 溫室氣體分析技術考察 2. 氣候變遷對作物生長影響 3. 雙方溫室氣體量測及生態試驗交流 二、耶拿試驗考察
8月4日	耶拿-慕尼黑	交通移動
8月5日~ 8月6日	慕尼黑機場-桃園-本場	交通移動回程

二、馬克斯·普朗克生物地理化學研究所考察

馬克斯·普朗克生物地理化學研究所 (Max Planck Institute for Biogeochemistry, MPI-BGC) 位於德國耶拿，馬克斯·普朗克學會轄下 86 個研究所之一，聚焦全球物質循環及其與氣候的相互作用，MPI-BGC 的研究致力於探討全球生物地球化學循環及其與生物圈、大氣圈、岩石圈以及整個氣候系統的長期相互作用。該所的目標是更好地理解包括人類在內的生物體如何與其環境交換水、碳、氮和能量等基本資源，以及這如何影響全球氣候和生態系統。可大致區分為下列三方向：

1. 生物地球化學：生物地球化學是一門研究地球新陳代謝的科學。碳、氮、氧和磷等基本元素在地球岩石圈、水圈、生物圈和大氣層之間交換時，不斷發生生物、化學和物理轉化。生物地球化學循環定量地描述了地球系統這些組成部分之間元素的分佈和交換。

2. 生物地球化學循環：生物地球化學循環與地球氣候以複雜的方式相互作用。它們控制著大氣中溫室氣體（例如二氧化碳 (CO_2)、水蒸氣 (H_2O)、甲烷 (CH_4) 和一氧化二氮 (N_2O)) 濃度的波動，進而影響大氣的輻射平衡。陸地表面植被的大規模變化也會透過影響地表能量平衡來影響物理氣候。

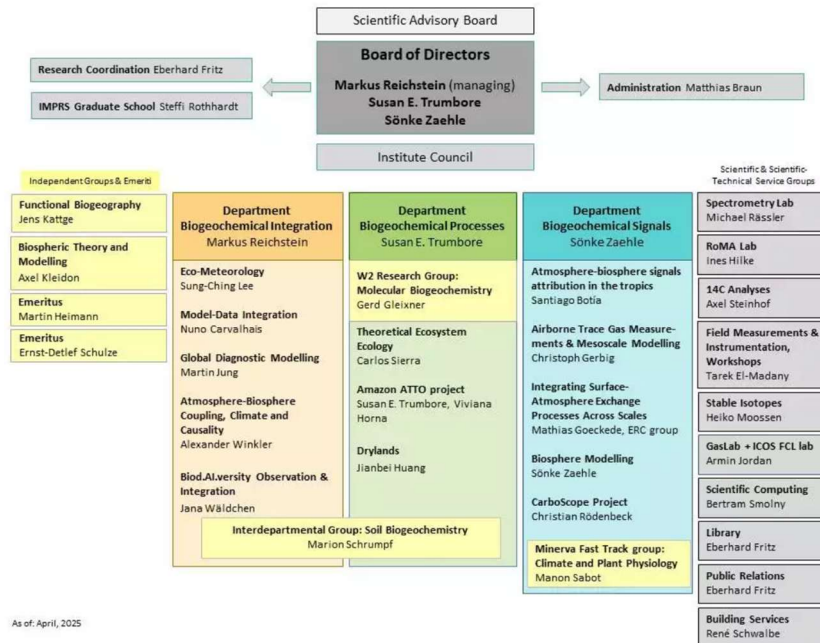
3. 碳循環：碳可以以二氧化碳和甲烷等氣體的形式存在於大氣中，也可以以有機分子的形式存在於生物體、土壤和沈積物中，也可以以溶解的無機和有機形式存在於地表水和海洋中。碳在有機形式和氣態之間交換的過程包括光合作用、呼吸作用和分解作用，而可溶解的無機形式可以與固體碳酸鹽礦物進行交換。大多數碳從一種形式轉化為另一種形式的過程是由生物體介導的，其轉化速率取決於環境條件。

MPI-BGC 為更好地了解陸地生態系統在全球生物地球化學循環中的作用。關注土壤，因為土壤是人類生活和獲取大部分資源的地方，土壤是全球生命最重要元素（碳、氮、磷和水）預算中最不確定的元素之一。人類對能源、水和食物日益增長的需求所帶來的活動從根本上改變了全球生物地球化學循環，導致大氣中溫室氣體迅速增加，進而導致地球氣候變遷。土地利用強度的提高正在影響地球生物的多樣性和地理分佈。了解這些變化對地球系統未來狀態的影響是一項重大的科學挑戰，鑑於未來生態系統對資源的需求，即維持不斷增長的人口和人類生活水平，這一挑戰尤為迫切。

MPI-BGC 為瞭解控制氣候、地表和生物地球化學之間相互作用的過程在空間尺度上跨越了多個數量級：從分子活動到太空中可見的植被變化。為了解決所有這些複雜的相互作用並實現規模上的大幅提升，依賴概念和計算模型，並使用機器學習進行數據分析。系統性的研究包括實驗室實驗和實地考察，其中許多研

究都以數十年長期尺度進行。而生態系統中運行的測量設施位於高度不一的塔樓上，最高可達 325 米，進行空中測量，並利用衛星數據，及使用生物標記物、穩定同位素和放射性碳測年法分析空氣、水和土壤樣本。

以下是 MPI-BGC 的組織架構，董事會下分為主要的三個部門，本次研習主要拜訪 Department Biogeochemical integration 主管 Professor Markus Reichstein 及 Eco-Meteorology 小組組長 Dr. Sung-Ching Lee。



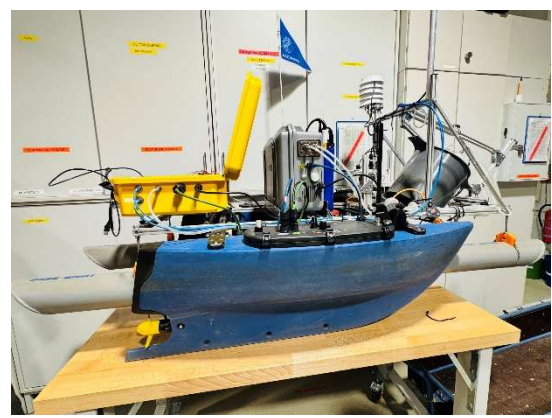
本次也拜訪 MPI-BGC Landscape ecologist 組長 Dr. Tarek-Sebastian El-Madany，Dr. Tarek 為 MPI-BGC Field Experiment & Instrumentation 部門負責人，截至目前為止發表 95 篇國際期刊論文，該部門主要負責田間試驗及溫室氣體量測。MPI-BGC 主要利用通量塔進行溫室氣體量測，測站遍布歐洲、巴西(亞瑪遜)、西班牙、俄羅斯。在溫室氣體量測方面較特別的研究，Dr. Tarek-Sebastian 自行研發溫室氣體搭載船，進行湖面溫室氣體量測，該船身搭載 LI-COR 7810 甲烷溫室氣體分析儀及 GPS 訊號接收器，以 Campbell CR1000 Measurement and Control Datalogger 進行運行位置計算、氣室開合控制。MPI-BGC 地球系統模型和全球網絡測量（例如 Fluxnet 網絡，用於測量生態系統與大氣之間的微量氣體交換）經常需要考慮水域，特別是濕地和水體作為甲烷等溫室氣體的來源。相關研究指出，湖泊是全球碳預算的重要組成部分，會排放大量的 CO₂ 和 CH₄。研究利用保守的區域暖化預測，估計熱帶和北方湖泊沉積物中的 CO₂ 和 CH₄ 產量將會增加。



拜訪 Department Biogeochemical integration 主管 Professor Markus Reichstein (中) 及 Eco-Meteorology 小組組長 Dr. Sung-Ching Lee(左二)



Dr. Tarek El-Madny 介紹其工作室

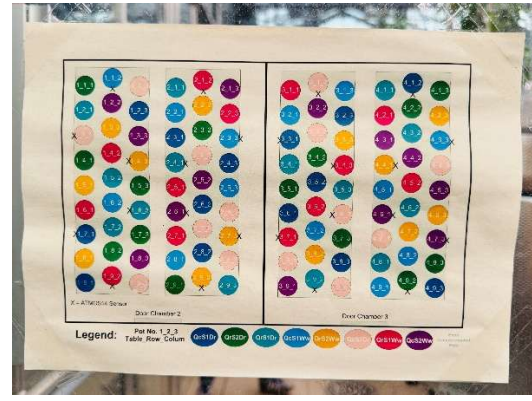


溫室氣體分析船

本團隊另外考察 MPI-BGC 內其中項重要試驗—不同乾旱程度、土壤質地對不同樹種生長的影响，該試驗採用樹液通量系統觀測蒸散速度，利用根圈攝影機觀測根生長情形，同時及時量測樹直徑，並收集土壤淋洗液進行分析。結果發現，乾旱會改變樹木內部的碳分配，減少對地下（根系和根際微生物群）的碳供應，進而影响樹木生長和健康。在乾旱解除後，樹木（如歐洲山毛櫸幼苗）的根系活動和碳需求會增加，優先將新的碳水化合物分配到地下，然後光合作用才會延遲調整。研究確定了土壤含水量的一個閾值(Relative Extractable Water(REW) 21.7%至 29.6%之間)，低於這個閾值，樹幹的水分儲備就無法補充，進而抑制樹幹徑向生長。這類研究通常會監測樹木的水分狀況(如樹幹缺水程度)、樹液流動(sap flow)和生長情況，以了解土壤乾旱如何影响道格拉斯杉(Douglas-fir)和挪威雲杉(Norway spruce)等樹種。有研究涉及蘇格蘭松(Scots pine)，顯示其根際代謝活動對土壤水分的細微增加(如小雨引起)能快速反應，並影响整棵樹的碳分配。他們也比較了不同樹種(如挪威雲杉和道格拉斯杉)對乾旱的抵抗力。



不同乾旱程度、土壤質地對不同樹種生長的影响試驗



溫室內不同乾旱程度、土壤質地對不同樹種試驗設計



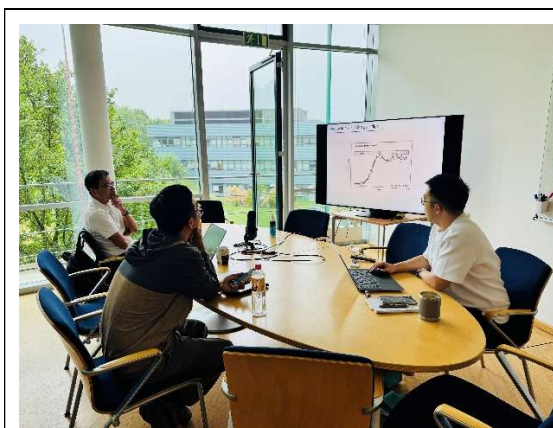
收集試驗土壤淋洗液



及時樹徑量測系統

本團隊於考察 MPI-BGC 期間，多次與李松靜博士 (Dr. Sung-Ching Lee) 團隊進行雙方研究討論，針對本場水稻溫室氣體量測結果、長期生態有機田區試驗結果、MPI-BGC 草原、沼澤溫室氣體量測結果進行交流。李松靜博士 (Dr. Sung-Ching Lee) 目前在 Max Planck 生物地球化學研究所 (MPI-BGC) 擔任生態氣候研究小組 (Eco-Meteorology Research Group) 的小組領導人 (Group Leader)。李博士的研究核心在於利用先進的微氣象學技術，深入理解生態系統與大氣之間碳和水通量的動態，以及這些通量如何在全球氣候變遷中發揮關鍵作用。主要研究貢獻集中在三個相互關聯的領域：濕地和泥炭地恢復、複雜碳收支劃分，以及氣候干擾下的生態系統響應。李博士在泥炭地生態系統的研究成果特別突出。泥炭地作為全球最大的陸地碳庫之一，對氣候變遷極為敏感。他探討了人類活動(如

排水和泥炭開採)如何將這些天然的「碳匯」轉變為「碳源」,釋放大量的二氧化碳和甲烷。他的研究清晰地量化了生態復育策略(特別是再濕化, re-wetting)的氣候效益。透過長期觀測,他證明了泥炭地的再濕化能夠有效地促進生態系統恢復其碳吸收功能,從而減輕其對氣候的負面影響,為氣候緩解提供了重要的土地管理實證基礎。創新的碳通量劃分方法學準確估算生態系統吸收(光合作用)與釋放(呼吸作用)的碳量,是理解全球碳循環的科學難題。李博士的工作致力於改進淨生態系統交換量(NEE)的劃分方法。他將高頻率的渦流協變性(Eddy Covariance, EC)測量數據,與人工智慧(如人工神經網絡)和統計物理學原理(如通量方差相似性)相結合。這種創新的混合方法提高碳通量數據的準確性和可靠性,特別是在處理複雜的氣象條件和數據缺失時,為全球科學社群提供了更精確的碳預算評估工具。李博士的研究涵蓋了多種生態系統,包括森林、濕地和半乾旱草原,特別關注它們對極端氣候事件和人類干擾的響應。他分析了歷史擾動(如森林火災、皆伐)如何影響森林生態系統(例如道格拉斯杉林)的碳和水交換過程,並量化了這些生態系統從干擾中恢復的能力和時間尺度。



與李松靜博士討論濕地和半乾旱草原溫室氣體排放



中興大學林政賢老師代表說明本場長期有機生態田區土壤碳匯情形



與 MPI-BGC 全所研究人員討論亞熱帶地區(臺灣)溫室氣體排放研究



三、耶拿試驗考察

耶拿試驗(Jena Experiment)於 2002 年在德國中部建立，是一項大型草地生物多樣性實驗。其主要目的旨在全面探討，植物多樣性對生態系統功能，特別是元素循環和營養級間相互作用的影響，採用多學科方法。因目前仍持續進行相關試驗，故特地至該所與研究人員交流討論，希望對開展有機農業及土壤碳匯試驗研究有所助益。

耶拿試驗主實驗 (Main Experiment)：設定了 1、2、4、8、16 個物種豐富度等級，以及 60 種物種的對照組。功能群豐富度 (1-4 個) 與物種豐富度盡可能正交組合。重複性：每個物種豐富度 × 功能群數量組合重複四次，除了 16 物種混合植物 (14 個地塊) 和單一植物 (增加了地塊數量以應對預期的較高變異性)。單一培養植物 (Monocultures)：為了計算「超產量」(overyielding) 並比較物種性能及其與其他生物的互動，所有 60 個物種均以單一培養方式種植在 3.5×3.5 米的小區中，每個物種兩個重複 (共 120 個小區)。優勢實驗 (Dominance Experiment)：另外設置 3.5 × 3.5 米小區 (後來縮小至 1 × 1 米)，旨在區分物種豐富度本身與特定優勢物種的影響。土壤取樣與區塊設計：由於土壤參數沿薩勒河(Saale River)存在梯度，實驗採用四個區塊(Blocks)設計。

耶拿試驗子實驗 (Sub-experiments)：主實驗的大區 (最初為 20 × 20 米，後縮減至 6 × 5.5 米) 允許設置多種子實驗，包括：入侵實驗 (Invasion experiments)：測試植物群落對入侵植物的抵抗力。植物遺傳多樣性操作 (Plant genetic diversity manipulations)：研究種內遺傳多樣性與植物物種豐富度的相互作用。動物操縱實驗 (Fauna manipulations)：通過殺蟲劑等方法控制無脊椎動物 (如軟體動物、地上昆蟲、地下昆蟲、蚯蚓、線蟲) 的密度，以研究它們對植物生產力和分解等生態系統變量的影響。管理實驗 (Management Experiment)：調整割草頻率 (每年 1、2 或 4 次) 和 NPK 施肥量 (0、100 或 200 kg N ha⁻¹ yr⁻¹)，以模擬不同管理強度對生物多樣性-生產力關係的影響。乾旱實驗 (Drought Experiment)：使用透明防雨罩模擬乾旱，研究植物群落對氣候變化的抵抗力和恢復力。基於性狀的實驗 (Trait-based Experiment, TBE)：於 2010 年啟動，根據植物性狀選擇群落，以理解功能多樣性與生態系統功能的關係。

試區建立與維護：在 2002 年 5 月 11 日至 16 日進行播種，目標幼苗密度為每平方米 1,000 株，混合栽培中物種比例相等。所有小區 (除了四個未除草的對照地塊) 每年除草兩次 (2012 年起為三次) 並割草兩次，以維持物種組成和模擬當地傳統乾草草地的管理。部分小區會選擇性使用除草劑，以控制有害雜草。技術設施：2002 年 6 月建立氣象站，連續測量 43 個標準氣象參數。主實驗所有地塊安裝土壤溫度、張力板和土壤水分傳感器。Jena Ecotron 實驗：於 2012 年進行，將耶拿實驗地塊中的大型土壤整體 (2 平方米，2 米深) 運輸到法國

Montpellier 的 CNRS European Ecotron 設施，進行碳、養分和水通量的連續高頻測量。

統計分析：主要使用 ANOVA Type I Sum of Squares 分析植物物種豐富度、功能群豐富度及其交互作用對生態系統變量的影響。也採用廣義線性模型（GLM）、樹模型和結構方程模型（SEM）等技術分析數據。

此試驗使用了 60 種植物物種組成大型物種庫，以減少高植物物種豐富度混合物之間的相似性。這些物種根據 18 個功能性狀被分為四個功能群：禾草（grasses, 16 種）、小型草本（small herbs, 12 種）、高大草本（tall herbs, 20 種）和豆科植物（legumes, 12 種）。

耶拿試驗研究成果豐富，截至目前為止以本試驗為基礎總共發表國際期刊論文 370 篇，其中在 Nature 期刊上 5 篇、Science 期刊上 1 篇，Nature 或 Science 子期刊 40 篇，提供了生物多樣性對生態系統功能影響的深入見解：

(1)生物多樣性效應的普遍性與變異性：在主實驗中測量的 418 種不同類型指標的生態系統中，約 45% 顯著受到植物物種豐富度的影響，有力支持了生物多樣性是生態系統功能重要驅動因素的觀點。許多指標的反饋強度差異很大，尤其地下過程需要數年時間才能有所反應。地上生物對多樣性喪失的反應強於地下生物，且消費者的物種豐富度反應強於其豐度。碳循環相關變量受植物多樣性的影響強於養分循環相關變量（如微生物、土壤硝酸鹽、土壤磷），這表示碳氮循環的耦合程度可能不如一般想像的緊密。草食消費者豐度和物種豐富度普遍隨植物物種豐富度增加而增加。

(2)多樣性-穩定性關係：多項研究支持多樣性會增加生態系統穩定性，包括寄生膜翅目昆蟲豐度、抗入侵性、植被結構和生物量等。儘管群落中組成植物物種的種群變異係數可能不穩定，但相關物種（如蚯蚓）的種群可以穩定。在多樣性高的群落中，功能主導物種的周轉率顯著提高，這種功能周轉促進了高水平的生態系統功能持續存在。多樣性增加了生態系統對氣候極端事件的抵抗力。高多樣性植物群落在低壓力水平下能更好地利用資源，從而提高生產力，但在高壓力下生產力顯著降低，表明在極端干擾（如洪水）下，高多樣性群落可能不那麼穩定。此外，高多樣性群落對植物入侵的抵抗力更強。

(3)個體物種對生態系統變量的影響：即使存在強烈的個體物種效應，植物物種豐富度本身對生物量生產的積極影響仍然存在。燕麥草(禾草, *Arrhenatherum elatius*)是單一培養中生產力最高的物種，其相對產量隨多樣性梯度持續增加。

(4)延遲的生物多樣性效應：許多生物多樣性效應需要時間才能顯現，特別是在地下部分。土壤微生物生物量和根系生物量的正向物種豐富度效應在實驗開

始後 3-5 年才顯著。土壤碳儲存量在土地利用方式轉變後四年才被檢測到重新儲存，且土壤頂層（0-0.1 米）的碳儲存量隨植物物種豐富度增加而顯著增加。研究發現，生物多樣性效應的強度隨時間增加是一個普遍現象，這歸因於物種貧乏群落，導致功能的逐漸下降，而物種豐富群落，導致功能的逐漸提升。

(5)個體植物物種對植物物種豐富度增加的生理和形態反饋：植物在物種豐富度增加的群落中，為了更好地獲取光照，會形成更長的莖，增加生物量分配到支持組織，並減少分枝。在多樣性增加的群落中，物種的葉片比葉面積（SLA）更高，葉片同位素碳 isotopic composition ($\delta^{13}C$) 值更低。豆科植物從大氣中固氮的比例隨物種豐富度增加而增加。非豆科物種會根據物種豐富度和豆科植物的存在調整不同氮形態的吸收，表明多樣性群落中存在互補的資源利用。物種間性狀變異程度差異很大，例如，高大的驢食草(*Onobrychis viciifolia* Scop. (Fabaceae)) 形態變異小，而較矮的物種表現出更大的性狀變異。

(6)植物對植物物種豐富度增加的遺傳反應：物種豐富度誘導的選擇可能導致遺傳分化和遺傳多樣性隨時間變化。黑麥草(*Lolium perenne*) 在物種豐富度增加的情況下，其野外種群與最初播種種群的遺傳距離增加。

(7)對目標群落的入侵：增加植物物種豐富度會降低入侵植物的成功率。入侵者的存活和生長（例如植物質量、分支和葉片數量、相對生長率）以及適應性措施（例如花序長度、花頭數量）普遍隨物種豐富度增加而減少。隨著被入侵群落物種豐富度的增加，入侵物種的功能性狀組成會發生過濾，從早期演替性狀轉向中演替性狀。豆科植物和禾草的存在對植物群落的入侵性有顯著影響。資源競爭和生物相互作用共同影響入侵物種的成功。土壤動物也被發現對植物群落入侵性產生影響。

(8)其他營養級對植物生物多樣性的響應：絕大多數被調查的類群（如昆蟲、蜘蛛、土壤動物、微生物）的豐度和物種豐富度隨植物物種豐富度增加而增加。地上生物的反應平均強於地下生物。植物物種豐富度對蚜蟲負荷的影響呈飽和曲線，在中間豐富度水平達到最高。授粉昆蟲的豐度、物種豐富度和活動強度隨開花植物物種數量增加而增加。群落水平的草食性動物活動率隨植物物種豐富度增加而增加。植物物種豐富度會降低禾草類植物對銹病菌的感染率。土壤動物（如線蟲、彈尾蟲、蚯蚓）的豐度和多樣性隨植物物種豐富度增加而顯著增加。叢枝菌根真菌（AMF）的序列類型豐富度隨植物物種豐富度增加而增加。土壤微生物生物量表現出超產量效應，表明多樣性植物群落中植物互補效應對土壤微生物生物量的重要性。土壤微生物群落組成顯著變化，這可能由有機資源的可用性和質量驅動。土壤中生物防治細菌的豐度隨植物物種豐富度增加而增加，有助於植物群落抵抗病原體。

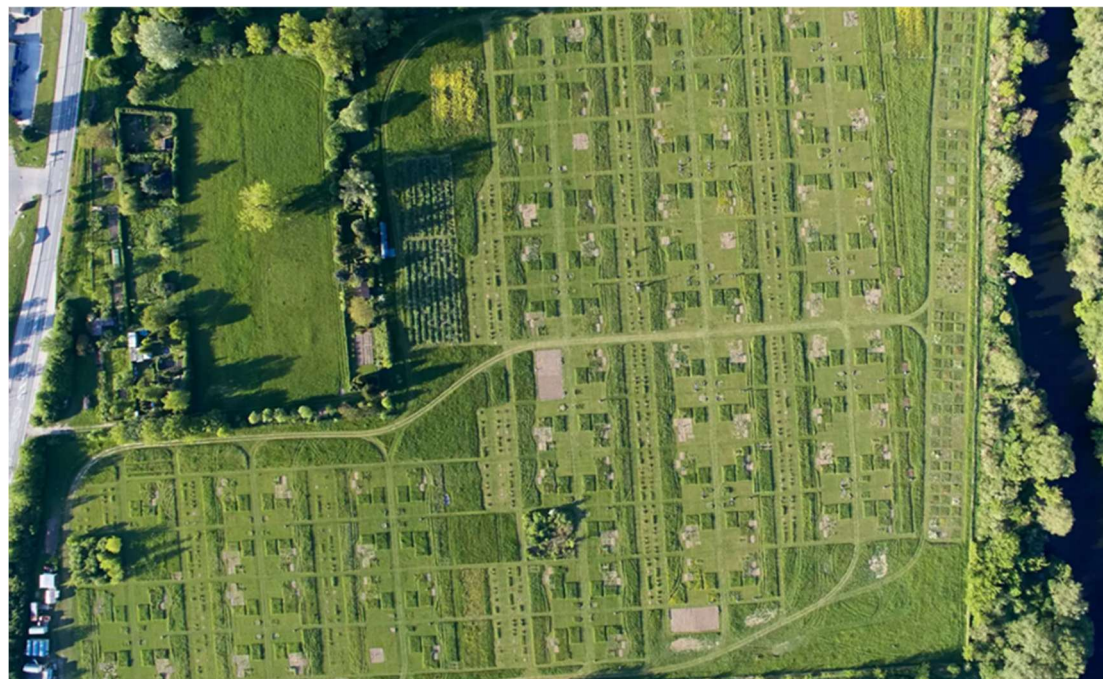
(9)植物群落生物量對植物物種豐富度的影響：地上植物生物量隨物種豐富度顯著增加，無論地塊大小、物種庫、多樣性梯度長度、資源可用性和干擾程度。互補效應隨時間增加而增強。地下生物量（根系生物量）的生物多樣性效應在實驗後期才顯著顯現。植物物種豐富度對根系生物量的影響在四年前沒有觀察到，但四年後，16 種物種混合物的根系生物量比單一培養高 44%。

(10)多樣性對生物地球化學循環的影響：水循環：增加植物物種豐富度會影響土壤水分含量、水通量和土壤水力特性。在 Jena Ecotron 實驗中，高多樣性混合物中的水分利用效率（WUE）更高；氮循環：豆科植物對大氣固氮量的貢獻隨物種豐富度增加而增加。地上植物生物量中的氮儲存量隨物種豐富度增加而增加。植物物種豐富度減少了土壤中硝酸鹽的濃度，特別是在實驗早期。植物物種豐富度正向影響潛在反硝化作用，而負向影響潛在硝化作用。溶解性有機氮（DON）和總溶解性氮（TDN）從土壤中淋溶的量隨物種豐富度增加而顯著減少。頂層土壤中的氮儲存量隨物種豐富度增加而增加；磷循環：地上生物量中的磷儲存量隨物種豐富度增加而增加。植物物種豐富度與磷酸酶（phosphatases）的活性呈正相關；碳循環：土壤碳儲存量隨植物物種豐富度增加而顯著增加，尤其是在頂層土壤中。微生物活動的增加是植物物種豐富度-土壤碳儲存關係的直接原因。土壤甲烷（CH₄）吸收量隨植物物種豐富度增加而減少。

(11)動物介入的生態系統過程：地上草食性動物：群落水平的草食性動物活動率隨植物物種豐富度增加而增加。植物物種豐富度通過改變植物性狀和草食性動物群落影響草食性動物活動。地下動物對植物生產力和入侵的影響：蚯蚓顯著增加了總植物群落生產力，特別是豆科植物的地上生物量。線蟲的存在會降低植物群落生物量。土壤動物會影響植物群落的入侵性。

(12)草地管理、生產力和生物能源生產：生物多樣性對生產力的影響與農業集約化（施肥和頻繁割草）的影響規模相當。即使在集約化管理下，植物物種豐富度-生產力之間的正相關關係依然存在。植物物種豐富度增加了生物能源的潛力，因為總生物量隨物種豐富度增加而增加。整合固體燃料和沼氣生產（IFBB）的概念證明可通過水熱處理和機械脫水提高生物能源質量。

(13)除草問題與單一培養性能：單一培養的生產力低於從混合物中預期的水平，且這種效應隨時間發展而增強。單一培養性能不佳的生物學機制包括病原體積累導致的「土壤疲勞」效應。除草對目標物種的早期建立沒有影響，也沒有系統性地減少單一培養中植物的招募。除草時間隨著植物物種豐富度的增加而減少。分析顯示，大部分植物物種豐富度效應並非由地塊間除草力度的差異驅動。



耶拿試驗空拍圖(圖片取自耶拿實驗官網，符合無商業用途使用權)



耶拿試驗對生物多樣性試驗告示



耶拿試驗區環境因子監測儀器



耶拿試驗土壤淋系液收集系統



與耶拿試驗人員及中興大學林政賢教授討論土壤淋系液收集系統

肆、心得與建議

本次考察德國馬克斯·普朗克生物地球化學研究所（Max Planck Institute for Biogeochemistry, MPI-BGC）及其長期生態試驗—耶拿試驗（Jena Experiment），收穫極為豐碩。不僅深入了解國際頂尖研究機構在氣候變遷與生態系統服務領域的重點研究方向、技術方法，更將本場長期有機試驗的成果與國際學者進行交流，為未來臺灣建立具備國際視野的長期有機生態示範場域，奠定了合作與構思的基礎。

一、考察心得：接軌國際研究前沿與釐清長期試驗價值

1. 長期生態試驗的全球性戰略價值：高雄農改場旗南分場的有機田區已連續進行 37 年試驗，是臺灣最長久的有機生態試驗場域。這次考察認識到，無論是 MPI-BGC 長達 23 年的耶拿試驗，或是其進行的數十年長期尺度試驗，都強調了長時間尺度數據對於釐清複雜生態系統過程（如土壤碳匯、生物多樣性與穩定性）的不可替代性。這驗證了高雄場 37 年試驗資料在當前全球追求「自然碳匯」和「淨零排放」的浪潮中，具備極高的國際戰略價值。
2. 生物地球化學循環與氣候變遷緩解的核心地位：MPI-BGC 的研究聚焦於全球物質循環，特別是碳循環、氮循環、水循環與氣候的複雜相互作用。這與臺灣「2050 淨零轉型」策略中，將自然碳匯視為關鍵戰略高度契合。李松靜博士團隊在濕地泥炭地、草原等複雜生態系統的碳通量劃分研究，以及 Dr. Tarek-Sebastian El-Madany 團隊利用溫室氣體搭載船進行水域甲烷量測的創新技術，都為臺灣農田生態系統（特別是有機水稻田）的精確碳預算評估提供了重要的技術啟示。
3. 耶拿試驗的啟發：多樣性是生態系統功能與韌性的基石，耶拿試驗的核心成果明確指出，植物物種豐富度對生態系統功能（如生物量、養分循環、水利用效率）有顯著的正面影響。特別是土壤碳儲存量隨植物物種豐富度增加而顯著增加，且這種效應需在實驗開始後數年才能顯現。多樣性增加了生態系統對氣候極端事件的抵抗力，且能增強對入侵植物的抵抗力。地下生物量（根系）和土壤微生物生物量的正面效應同樣具有延遲性，需數年才會顯著。這對於高雄農改場構思在臺灣（亞熱帶/熱帶）建立長期有機生態試驗，提供了「以增加生物多樣性來提升農業生態系統服務和氣候韌性」的明確方向。
4. 高雄農改場試驗成果的國際價值：考察中，本團隊與李松靜博士等進行深度討論，並由中興大學林政賢老師代表說明了高雄農改場長期有機田區土壤碳匯情形。這不僅讓國際學者了解亞熱帶/熱帶地區長期有機水稻田的獨特生態系統，同時也確認了高雄場試驗成果，尤其是在輪作系統對土壤微生物組構成和多样性

影響的研究（水旱輪作 R1 顯著提高微生物多樣性），以及有機肥處理在氣候變遷背景下對作物產量韌性的貢獻，都具有與國際頂尖研究機構合作的潛力。

二、具體建議：建構臺灣長期有機生態示範場域，基於本次考察所得，為推動農業生態系統服務提出以下建議：

1. 策略定位：確立「亞熱帶/熱帶生物多樣性-生態系統功能」研究中心，將高雄場長期有機田區定位為「氣候變遷下亞熱帶/熱帶農業生態系統多功能性與韌性」的研究與示範中心。

2. 實驗設計：借鏡耶拿，建構多樣性試驗：建立「臺灣版耶拿試驗」：借鏡耶拿試驗的設計邏輯，構思建立一套針對臺灣（亞熱帶/熱帶）農作物的多樣性-生態系統功能長期試驗。納入功能群多樣性，試驗應包含不同作物物種豐富度和功能群豐富度（如豆科、禾本科、不同根系深度的作物）的組合，以探討其對養分循環和碳匯的影響。強調多目標效益下，新試驗應同時監測生物多樣性（土壤微生物、昆蟲、地上生物）、氣候變遷緩解（碳匯、溫室氣體排放）、水文循環（水分利用效率）等多重指標，以量化農業生態系統服務的整體價值。

3. 技術升級：導入先進監測與模型化技術，學習 MPI-BGC 的通量塔、連續監測等技術經驗，加強高雄場在水稻田、旱田等不同農作系統的 CO₂、CH₄ 等溫室氣體高頻率、連續性量測。導入類似 MPI-BGC 在樹木試驗中的樹液通量系統和根圈攝影機，用於觀測不同農作物在輪作或間作系統下的根系生長、水分利用以及地下碳分配。模型與 AI 整合，借重 MPI-BGC 在計算模型和機器學習進行數據分析的經驗，與李松靜博士團隊合作，共同改進亞熱帶農業生態系統的碳通量劃分方法和氣候變遷模型。

4. 國際合作：啟動跨國長期數據對比研究：尋求與 MPI-BGC 建立正式的合作研究協議，利用高雄場長期累積的 37 年數據，與耶拿試驗及 MPI-BGC 的其他長期試驗數據進行跨緯度、跨氣候區的對比分析，共同發表研究成果。這將能提供全球農業在不同氣候區對抗氣候變遷的策略。

本次考察為臺灣農業生態研究指明長期、多樣性、高技術監測、國際合作是實現「淨零碳排自然解方」和提升「農業生態系統服務價值」的必經之路。高雄場已具備最珍貴的「長期」數據優勢，下一步需藉由國際合作，補足「多樣性試驗設計」與「先進監測技術」的缺口，將臺灣農改場推向世界級的生態研究示範場域。