

113年度氣候變遷創意競賽

決賽作品說明書

隊伍編號	018
隊伍名稱	碳索者一號，Carbon Player One
作品中文名稱	固碳農法——碳淨零寶石
作品英文名稱	Carbon Player

參賽學校：國立臺灣大學，地理環境資源學系

團隊成員：徐志宏、趙卓然、陳俊瑋

指導老師：黃誌川教授

目錄

壹、摘要	3
貳、作品研發	4
2.1 固碳農法	4
2.1.1 二氧化碳封存技術.....	5
2.1.2 抑制土壤酸化.....	5
2.1.3 增加作物產量.....	7
2.1.4 肥料與產量預估模型.....	7
2.2 聊天機器人.....	9
2.2.1 溫度分布圖.....	10
2.2.2 雷達回波圖.....	11
2.2.3 使用者位置即時天氣資訊.....	12
參、實驗結果	15
3.1 二氧化碳封存計算公式	16
3.2 土壤中金屬離子的含量和變化	17
3.2.1 土壤分析-王水消化法.....	17
3.2.2 土壤元素含量-Mg ²⁺	18
3.3 滲濾液樣本中離子濃度-Mg ²⁺	19
3.4 土壤中可被萃取的元素-Mg ²⁺	20
3.5 植物營養素-Mg ²⁺	21
3.6 植物乾重和長度	22
3.7 土壤酸化改善	23
3.8 二氧化碳封存量 and 風化速率	24
肆、效益評估	25
伍、作品應用範圍及發展潛能	27
5.1 作品應用範圍	27
5.2 發展潛能	27
5.2.1 碳排交易與農業.....	27
5.2.2 碳中和農業生態圈.....	28
5.2.3 固碳農法商業模式.....	29
5.2.4 會員服務增強農業持續性.....	30
5.2.5 技術進步降低矽酸鹽開採成本.....	30
陸、分工表	31
柒、參考資料	32

壹、摘要

面對氣候變遷及其連帶的環境衝擊，儼然是本世紀人類社群最急迫且最艱鉅的生存挑戰，因此，本組著眼於利用矽酸鹽礦物於自然風化過程中具有吸收二氧化碳之作用，盼能夠在這項世紀挑戰中提供以科學知識為底蘊的氣候變遷行動。

Abstract^{*}

Facing climate change and its associated environmental impacts is undoubtedly the most urgent and formidable challenge of survival for human communities in this century. Therefore, our group focuses on utilising silicate minerals, which absorb carbon dioxide during the natural weathering process, to contribute scientifically informed climate action to this century's challenge.

^{*}Note: Abstract is reviewed and modified with the assistance of ChatGPT

貳、作品研發

2.1 固碳農法

當前臺灣的化學肥料使用量超出國際1.6倍，約每年101萬公噸 (Yang, 2015)。進一步而論，長期使用氮肥和尿素來增加產量時，時常增加土壤酸化的風險；同時，於氮肥的分解過程所釋放出溫室氣體一氧化亞氮(N_2O)和一氧化氮(NO)—佔台灣農業總排放量中的40% (Yang, 2015)。

近年來，2050淨零排放的目標在世界各地皆獲得熱烈的響應，臺灣亦是國際社會中積極響應的一員。於2015年COP21巴黎氣候峰會上，主辦方—法國—於會議中提出「千分之四倡議(4 per 1000 initiative)」，主張每年將土壤碳素含量提高0.4%，以助緩和全球暖化，此倡議與臺灣2050淨零排放計劃中的「自然碳匯」戰略相互呼應。

對此，本計劃提出一項創新的**固碳農法**—借助矽酸鹽物質於風化過程中，具有吸收大氣中二氧化碳之特性，並透過增強風化技術，加速其風化進程，從而擴大自然碳匯。奠基於「碳捕捉利用及封存」技術，**固碳農法**不僅得以成為臺灣淨零排放的關鍵技術，其具備的商業價值亦具有龐大的潛力為農業帶來革命性的綠色轉型，進而調適出氣候變遷時代下的新型農業生產與消費關係。

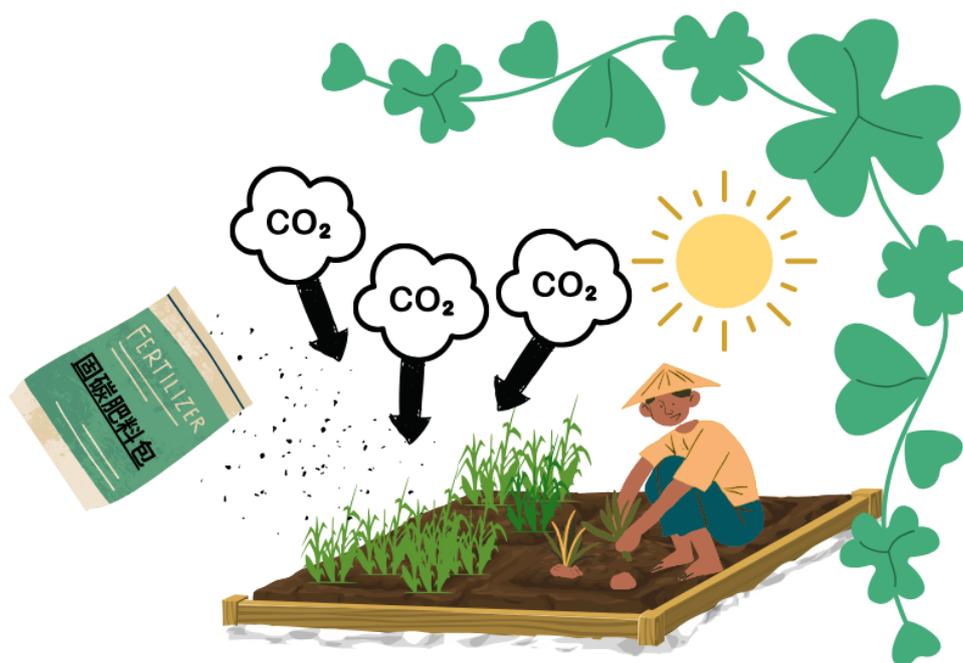
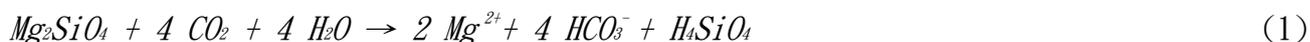


圖1. 固碳農法示意圖

2.1.1 二氧化碳封存技術

增強風化(EW)已是國際多方認可與採行的碳封存方式。EW的核心技術為散播經過細磨(約20~100 mesh)的矽酸鹽岩石(例如蛇紋岩、和橄欖石)於地球表面,加速自然風化過程,進而捕獲並儲存大氣中的二氧化碳(Manson, 2013)。針對矽酸鹽類的碳封存效果業經全球各地的專家學者,均能證實橄欖石在風化過程中轉化和吸收二氧化碳的能力(Köhler et al., 2010; Schuiling, 2011);此外,增強的矽酸岩類風化過程也被提議作為一種負排放技術,於風化過程中主動從大氣中捕獲二氧化碳(Meysman & Montserrat, 2017; Walker et al., 1981)。

化學風化依其礦物特性可進一步分為:矽酸岩風化與碳酸岩風化。其中,矽酸岩風化因為反應時間長,而被視為是大氣中二氧化碳濃度的主要控制因素(Raymo & Ruddiman, 1992);矽酸岩(例如:橄欖石)風化過程中釋放的陽離子與溶解的CO₂結合形成碳酸氫根(HCO₃⁻)和碳酸根離子(CO₃²⁻),如下式所示(式1、2):



於橄欖石的風化反應中,顯示1莫耳的矽酸岩類風化可消耗4莫耳的CO₂,吸碳的比例為1噸橄欖石可吸收1.25噸的二氧化碳,並以碳酸氫根的形式從大氣中轉移出來(Köhler et al., 2010)。二氧化碳(CO₂)轉化成碳酸氫根(HCO₃⁻),而碳酸氫根(HCO₃⁻)會根據其身處環境的酸鹼程度而變化,在酸性情況下是以碳酸(H₂CO₃)的型態存在。當碳酸氫根(HCO₃⁻)存在的環境愈趨鹼性便會解離為碳酸根離子(CO₃²⁻),之後再經過地下水體流進河流成為生物泵,最終在海洋中形成碳酸鈣沉澱,讓碳脫離碳循環從而進行封存(Beerling, 2018)。橄欖石屬於矽酸岩類礦物,在風化過程中不會釋出溫室氣體,並會於過程中吸收CO₂,目前已被建議用於地球工程的二氧化碳移除方法(Carbon Dioxide Remove, CDR)之中(Köhler et al., 2010; Schuiling, 2011)。

2.1.2 抑制土壤酸化

過度使用肥料會導致土壤酸化,從而降低土壤陽離子交換能力,增加鋁飽和度,最終影響土壤作物產量(Wallace, 1994; Goulding, 2016)。面對農業土壤酸化的挑戰,傳統上常見的改良土壤手段,是利用添加碳酸鈣(骨粉)到酸性土壤以中和土壤酸鹼值,但碳酸鈣在風化的過程中會導致溫室氣體排放,而過度使用氮肥和尿素經常提升土壤酸化的危機與機率(圖2)。圖2顯示:碳酸鈣確實能與土壤中的H⁺離子結合,從而改良土壤的酸鹼度恢復到適合耕作的水平,可是在碳酸鈣分解的過程中釋出CO₂,卻

增加大氣中的CO₂含量 (Rietra et al., 2012)。

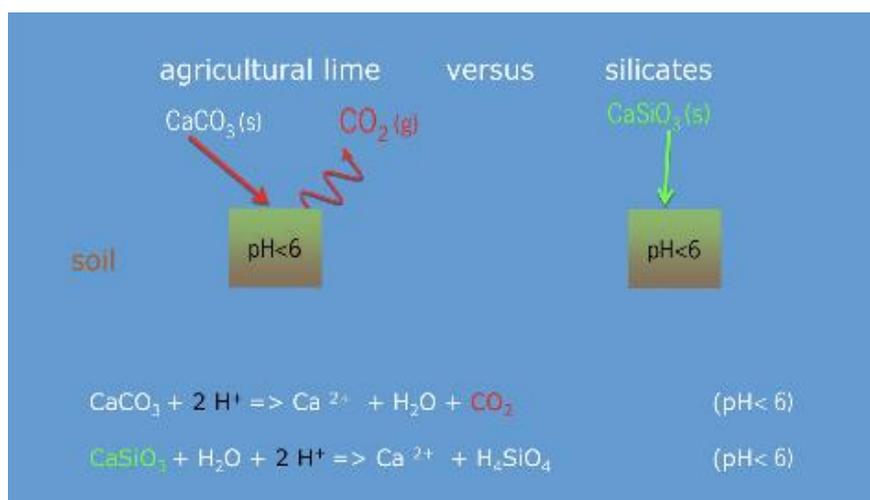


圖2. 在酸性土壤加入碳酸鈣改善土壤酸化 (Rietra et al., 2012)

相比之下，橄欖石在風化過程中不釋放溫室氣體，具有中和酸性土壤的潛力，可作為土壤改良劑。如(圖3)所示，在橄欖石與水風化過程中，產生的氫氧根離子(OH⁻)大氣中的CO₂反應，將其轉化為碳酸氫根離子(HCO₃⁻)此過程中，由於水解反應產生的氫氧根離子濃度較解離產生的氫離子(H⁺)高，使得所得溶液呈弱鹼性，此弱鹼性環境將有助於有效中和酸性土壤，改善土壤酸化情況(e.g., Rietra et al., 2012)

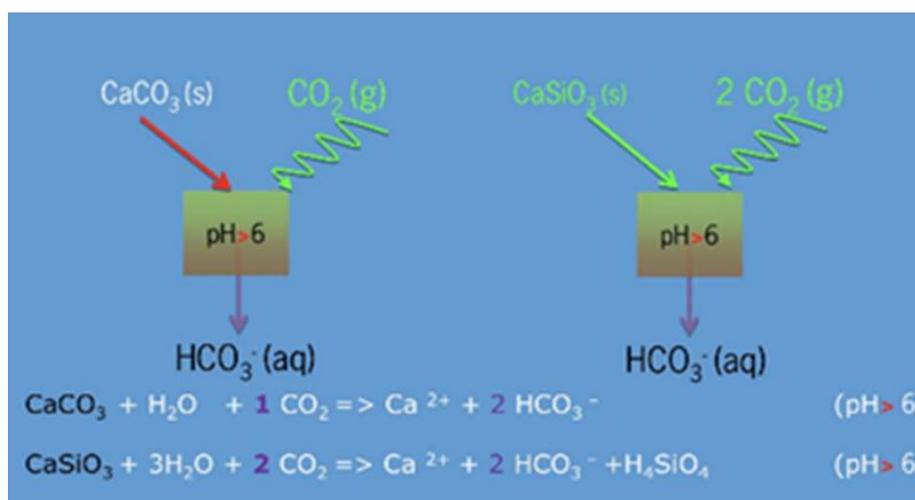


圖3. 在酸性土壤加入矽酸鹽改善土壤酸化 (Rietra et al., 2012)

2.1.3 增加作物產量

橄欖石因富含矽酸鎂，為農業生產應用中受矚目的焦點礦物之一。矽(Si^{4+})和鎂(Mg^{2+})是兩種對植物生長至關重要的元素，在橄欖石風化過程中，會釋放出可溶性矽酸(H_4SiO_4)，這種形態的矽可輕易的受植物吸收，此外，矽能有效加固植物細胞壁、提升植物的免疫系統，從而增強植物對各種疾病的抵抗力，得以顯著減少害蟲造成的損害、提升產量(Kim, 2002)。

橄欖石於農業生產中的應用，為農業部門帶來諸多商業助益。添加矽酸鹽於務農作業過程中，不僅可以增強作物的整體健康與生產力，同時，提高植物對病蟲害的抵抗力，減少對農藥的依賴，進而將低生產成本與提升農業的可持續性。Haque等人於2019年的研究，經由盆栽實驗指出橄欖石作為土壤改良劑，得以顯著提升豆類和玉米的生長指標：豆類的幹生物質增加了177%、玉米的株高及幹生物質分別增加59%和90%，揭示出橄欖石在提高土壤質量和作物產量方面的應用潛力。

2.1.4 肥料與產量預估模型

於這項創新的實驗中，我們致力於調配橄欖石(OLIV)和硝酸鉀(KNO_3)的比例，使得其對作物生長具有正向促進作用，從而提升農業產量。通過精確的數據分析，我們繪製一個詳細的曲面圖(圖4)，並基於這些數據發展出一個創新的動態方程式。這個方程式專門用於解析肥料和橄欖石添加量對作物生長速度和健康的影響，為農業生產提供了一個科學驗證的預測模型。這不僅加深我們對植物營養和土壤化學交互作用的理解，也為未來的農業應用提供實用的指導。

由農業的視角而論，農民可以根據施用的肥料和橄欖石數量來預測作物的生長量，並估計一次種植能吸收的二氧化碳量。有鑑於農作物的價格通常以質量來衡量，因此提升作物的質量不僅能增加產量，同時也能提高成本效益。搭配預估模型的計算與預測，使農民得以更精確地掌握成本與收益，優化農業生產的經濟效益。

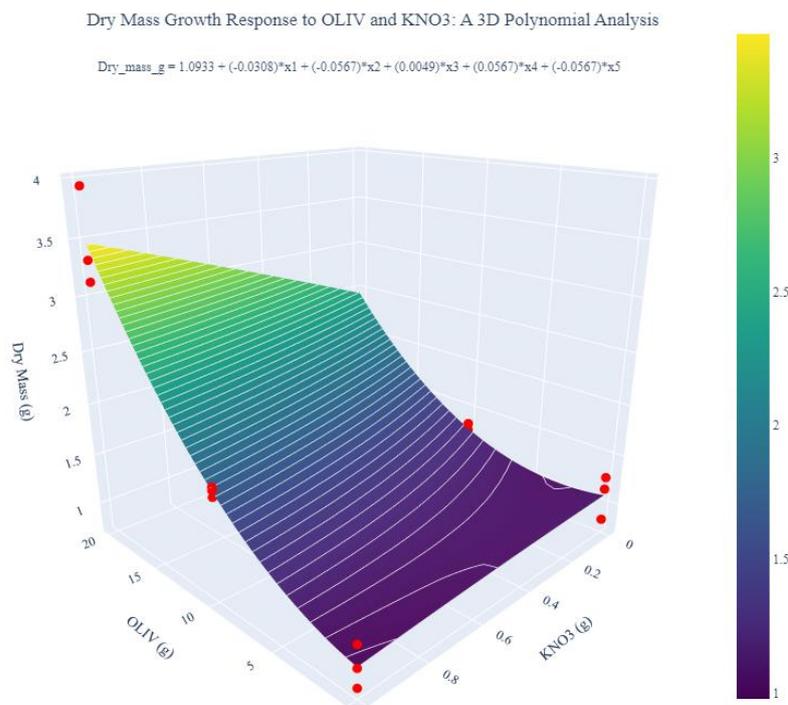


圖4. 肥料與產量預估模型

本實驗推導出的動態方程式，簡明扼要地展示橄欖石和硝酸鉀作為土壤改良劑對作物乾重增長的影響。透過這個方程式，使用者能夠精確地預測於不同肥料投入條件下可得之作物乾重量，這對農業生產具有重要的商業意義。方程式中的各項系數揭示土壤改良劑與作物生物量積累之間的複雜交互作用，其中正負系數指示了橄欖石和硝酸鉀添加量對作物生長的具體影響。

此外，方程式中的交互作用項和二次項揭示了橄欖石與硝酸鉀聯合施用時的協同效應，顯示出混合使用比單獨施用更能有效促進作物生長。透過(圖4)的視覺化呈現，農業生產者可以輕易識別出最佳的土壤改良劑組合，以最大化作物產量。

這個方程式不僅有益於農業生產者對作物生長模式的理解，而且還能夠為不同的施肥策略提供調整和優化的依據。這種預測能力讓農業生產者得以根據具體條件調整資源投入，優化作物產量和質量，從而提升市場競爭力和經濟效益。這種創新的農業技術有潛力革新傳統農業實踐，推動農業向更高效、可持續的方向發展。

2.2 聊天機器人

《智慧碳勘者》為本團隊佈署於通訊軟體(Line)之聊天機器人，其設置目標旨在兼顧技術服務的便利性、即時性以及應用等面向，且Line平台具備成熟的聊天機器人開發工具(Line Developer)，足以滿足開發、維護與使用者介面設計等需求(圖5)。



圖5. Line Developer介面

《智慧碳勘者》是一款基於固碳農法設計的應用程式，不僅提供使用者關於固碳農法和增強風化的相關科學知識與新聞，還整合了固碳農法的實作教學、成本效益分析以及氣象資訊等多功能服務。這款應用旨在提供使用者一站式的便捷服務，滿足他們實施固碳農法的各項需求(圖6)。透過這樣的整合資源，使用者可以更有效地學習和實踐固碳農法，從而提高農業生產的可持續性和經濟效益。

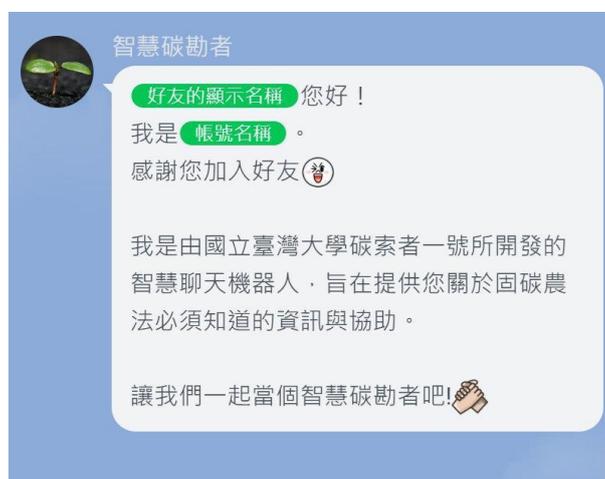


圖6. 智慧碳勘者介面

2.2.1 溫度分布圖

溫度對作物生長和碳酸鹽類進行風化的影響至關重要。為了提供使用者即時且有效的氣溫信息，當使用者在聊天室中輸入氣溫分布或請求氣溫分布圖時，聊天機器人會自動串接中央氣象署的數據，並回傳提供全台即時溫度分布圖(圖7,8)。這樣的功能可以幫助使用者根據當前氣溫做出適當的農業決策，以適應氣候變化對作物生產的影響，進一步提高農業的經濟效益和可持續性。

準確的氣溫預報可以使農民選擇最佳的播種和收穫時間，確保作物在最適宜的環境條件下生長，從而增加產量和提升作物品質。與此同時，透過預測未來氣象概況，農民可以更有效地管理水資源，如在預計有降雨的情況下減少灌溉，節省水資源並降低能源消耗。因此，對天氣條件的即時預判和應對，不僅提升農業生產的效率，亦增強農業對未來氣候變遷的適應能力，進一步推動農業向可持續發展方向前進。

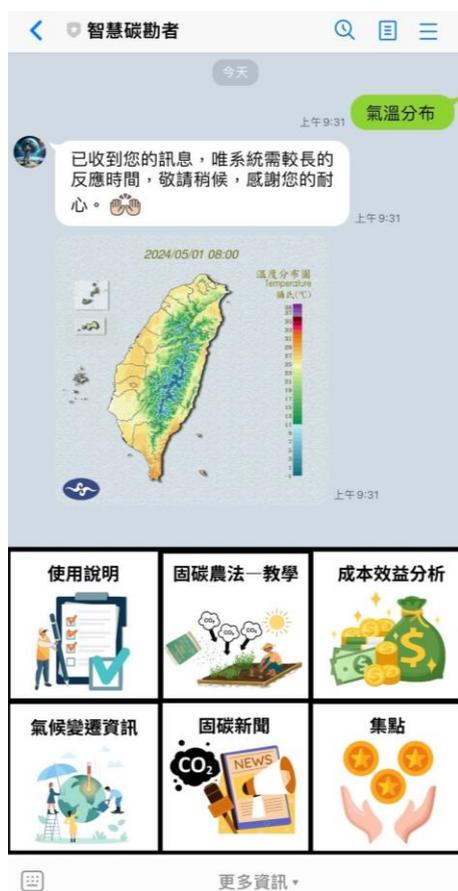


圖7. 《智慧碳勘者》溫度分布圖

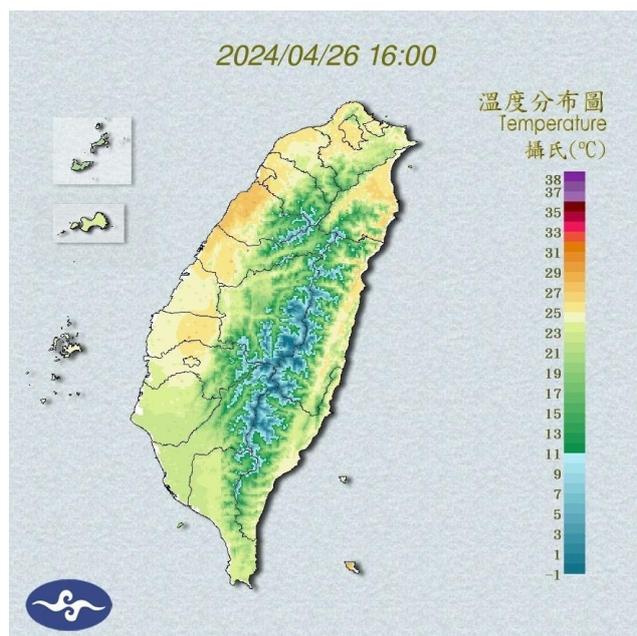


圖8. 溫度分布圖

2.2.2 雷達回波圖

雷達回波圖(圖9,10)是通過雷達發射電磁波並接收反射訊號來繪製的，這些訊號反映了大氣中的降水因子，如雨、雪和冰雹等的分布與強度。使用這種技術，雷達回波圖可以提供有關降雨強度和分布的重要信息，這對農業管理尤為重要。

當農業生產者使用雷達回波圖來觀察即時降水狀況時，他們可以更有效地進行事先預防和相關農業操作，如調整灌溉計劃或採取適當的作物保護措施，以應對預期的天氣變化。這種精準的氣象資訊幫助農業生產者優化作業流程和減少因天氣不確定性導致的潛在損失，進一步增強農業生產的穩定性和效率。

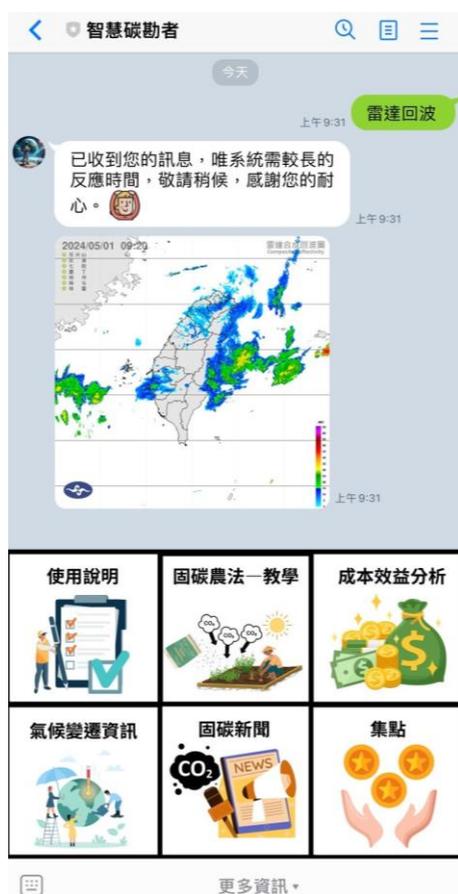


圖9. 《智慧碳勘者》雷達回波圖

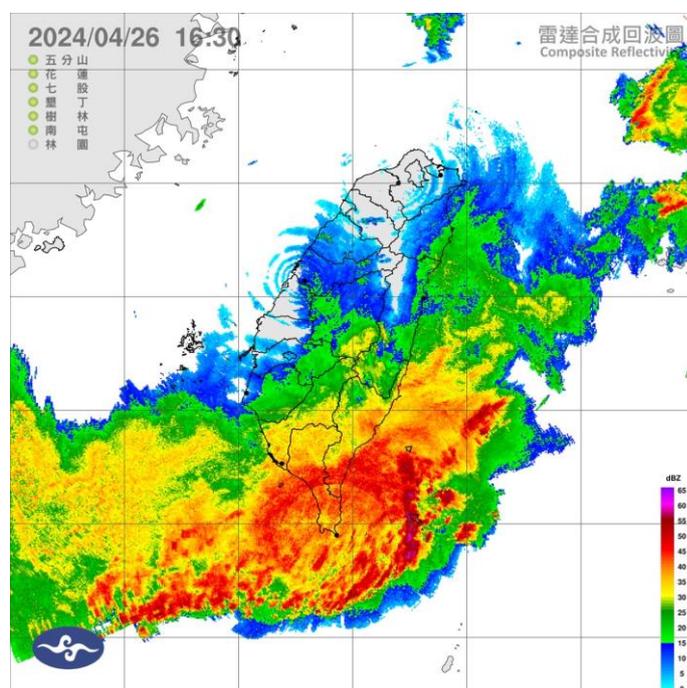


圖10. 雷達回波圖

2.2.3 使用者位置即時天氣資訊

除卻概況掌握全臺溫度分布概況與降雨機率、強度分布，《智慧碳勘者》更具備提供使用者所在位置的即時天氣資訊，該功能僅需使用者透過Line內建的位置資訊分享功能傳送所在位置，《智慧碳勘者》便能提供該位置的即時天氣資訊，令使用者能近一步的掌握所在地的氣溫、相對濕度、未來8小時天氣概況、未來8小時降雨機率及目前的天氣警報等(圖11)。



圖11. 《智慧碳勘者》使用者位置即時天氣資訊

2.2.4 未來1週天氣預報

未來1週的天氣預報能提供使用者理解未來預期的天氣狀況，如降雨機率、最高氣溫、平均氣溫與最低氣溫，自此得以提前因應不同的天氣變化。當使用者利用Line內建之位置資訊提供所在位置，聊天機器人將擷取使用者提供之位置，串接中央氣象署之未來1週天氣預報，接續經由程式碼分析、編譯，進而回傳未來1週最高溫、最低溫及降雨機率。

2.2.5 成本效益分析

《智慧碳勘者》深知，衡量固碳農法的益處與其相關成本，為使用者在抉擇是否採行固碳農法時所關注的核心考量之一。縱使，使用者得知採行固碳農法得以吸收大氣中的溫室氣體和增加植物重量，然這些都需要投注額外成本，對此，解決這一問題，我們開發了一項創新功能—**固碳農法成本效益分析**。此功能連結多個資訊來源並整合相關訊息，使會員能夠輕鬆對比採用與未採用固碳農法之間的預期收益差異。

考慮到成本效益分析屬於較為進階的功能，因此它僅對具有會員資格的使用者開放。這種策略旨在提供更專業的服務給那些更深入投入固碳農法的使用者。詳細的研發過程和這一功能的更多技術細節將在文獻的第四部分中進一步說明，以便使用者能夠全面了解這一工具的潛力與應用。

2.2.6 氣候變遷資訊

氣候變遷已成為本世紀人類社會面臨的最嚴峻挑戰之一，其影響範圍極為廣泛，從全球暖化導致的四季如夏到極端天氣事件的頻繁發生，這些變化不僅影響商業活動和全球政治，還深刻影響著人類的生活方式和眾多生命的存亡。為了應對這一挑戰，我們的團隊在《智慧碳勘者》應用程序中新增了一個功能，專門提供最新的氣候變遷資訊。此功能旨在傳遞有關氣候變遷的最新進展和討論，以增強使用者對這一議題的認識和關注。我們相信，通過提供及時的氣候變遷信息，可以促進公眾意識的提升和更有效的應對策略，從而共同努力對抗氣候變遷帶來的挑戰。

2.2.7 固碳新聞

溫室氣體的排放是導致氣候變遷的主要原因之一。固碳農法，以其核心技術—吸取大氣中的溫室氣體為基礎，旨在減少這些排放。為了加深使用者對固碳技術的理解並提高其對該技術研發進程的關注，《智慧碳勘者》應用程序特別提供了與固碳技術相關的最新新聞和資訊。這不僅讓使用者能夠獲取最新的科技進展，還鼓勵他們從被動的技術使用者轉變為具有專業知識和積極主動性的行動者。

透過這種方式，我們希望不僅提升社群成員的技術知識水平，還能激發他們對推動和實施固碳技術的積極參與。這將有助於形成一個更加主動和知識豐富的社群，共同努力對抗氣候變遷的挑戰。

2.2.8 固碳農法教學

鑒於固碳農法是一種較新的農業技術，且目前全球流行的碳權認證機制多由國際機構提供，使得本地民眾難以直接接觸到相關資訊。為了解決這個問題，我們的團隊決定通過影片形式來介紹固碳農法。這些教學影片涵蓋從碳排放總量管制的基本概念到碳排放交易機制及其減量計畫的實施，進一步介紹當前主流的碳權認證機制及相關的專案和方法學(圖12)。

我們深知資訊的普及和教育是促進氣候變遷行動和推行可持續農業實踐的關鍵因素，故特以民眾熟悉的影片形式，盼能降低受眾在採用固碳農法時面臨的技術障礙和困難，不僅令使用者能夠更深入地理解固碳技術和碳交易的運作，更能有助於擴大固碳農法的接受度和實際應用。

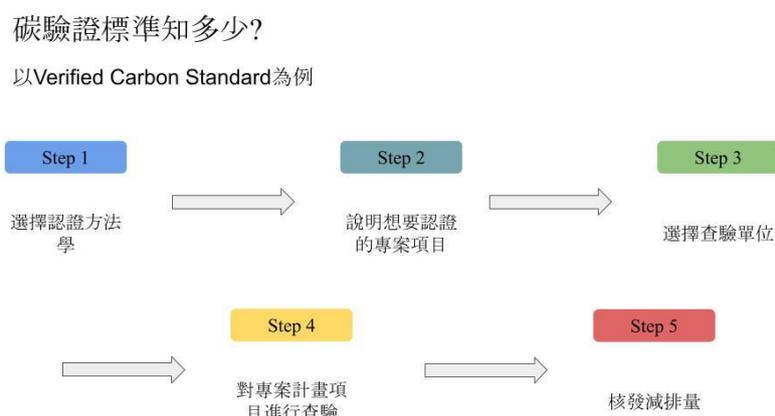


圖12. 固碳農法教學內容示意圖

2.2.9 集點功能

搭配我們提出的商業模式，特別增設獎勵計畫來鼓勵消費者購買由固碳農法生產的農產品。每當消費者購買這些產品時，他們將獲得一定數量的點數，當積累到六點時，消費者可以獲得一張購買農產品的消費折扣券。這種獎勵機制不僅旨在增加固碳農產品的銷售，更是致力於鼓勵消費者透過消費行為積極參與氣候變遷行動。

集點策略有助於形塑和維持在氣候變遷時代下的新型態消費與生產關係，透過實際行動支持可持續農業並推動社會對氣候友善產品的接受度。詳細的集點規則和使用方法將在文件的第五部分進一步說明，確保所有參與者都能清楚地了解如何有效地利用這些點數和折扣，從而最大化參與者對環境保護行動的貢獻。

參、實驗結果

這項實驗的四大研究目標涵蓋多個學術領域，並對農業生態系統的可持續性提出了深入探討。在實作示意圖中(圖13)，羅列出實驗所需量度的樣本，這使讀者能夠直觀地了解實驗的設計(圖14)和執行方式。

首先，我們評估肥料在增強二氧化碳吸收方面的效率，這涉及到氣候變遷和農業生產之間的關係，具有重要的學術價值和實踐意義。其次，我們深入分析土壤、植物和土壤中金屬離子含量及其變化，這不僅對土壤科學和植物生理學有所貢獻，還能夠提供環境科學領域的新見解。此外，我們專注於研究橄欖石的風化效果，特別是其對土壤pH值的影響，這涉及到土壤化學和土壤健康的相關研究，對於提高農作物產量具有重要意義。最後，針對施用橄欖石對作物產量的潛在益處進行評估，這項研究有助於優化農業生產方式，提高食物供應的穩定性和可持續性。這些綜合研究的目標將為我們提供對農業生態系統的深入理解，並為未來的研究和實踐提供重要的參考依據。

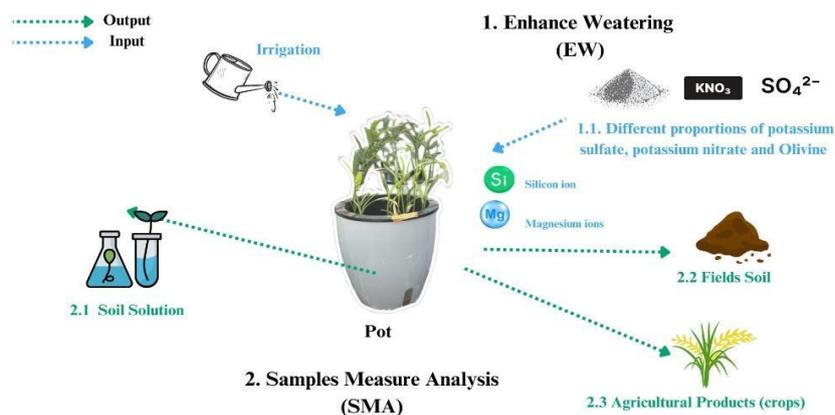


圖13. 實作示意圖



圖14. 種植實驗的過程圖

3.1 二氧化碳封存計算公式

檢定各樣本的碳封存量需要採集樣本的植體、土壤和土壤水進行光譜分析，利用風化的橄欖石的量對應風化後的存在於植體和土壤中的鎂離子作為主要的量測標準，從中估計橄欖石風化比率。反應式 (3) 如下：

$$F_{Weather, OLIV} = [(Mg_{bio, soil, leachate} + Mg_{plant})_{OLIV} - (Mg_{bio, soil, leachate} + Mg_{plant})_{CON}] / Mg_{app, OLIV} \quad (3)$$

Mg代表鎂離子， $Mg(\dots)_{OLIV}$ 和 $Mg(\dots)_{CON}$ 分別是實驗組(OLIV)和對照組(CON)的數據。風化的橄欖石量 ($F_{Weather}$) 對應於土壤中和土壤水積累的生物可利用Mg量 ($Mg_{bio, soil, leachate}$, $g\ pot^{-1}$) 和植物體中鎂離子含量 (Mg_{plant} , $g\ pot^{-1}$)，而符號 $Mg_{app, OLIV}$ 是指以橄欖石形式 ($g\ pot^{-1}$) 施加的Mg的量。公式 (3) 從Ten Berge et al. (2012)參考，但該研究指出公式缺乏土壤水作為因子，所以估算量會缺乏一部分。而本次實驗5個採水天中，將收集滲漏到集水盆中的土壤水，並對其進行光譜分析。在計算過程中加入土壤水中鎂離子數量，以力求準確的橄欖石風化比率。當中會分別利用到土壤分析-王水消化法、橄欖砂分析-氫氟酸消化法和光譜分析，用作金屬成份分析。公式(4)從Ten Berge et al. (2012)參考，用作估計種植實驗中碳總封存量，反應式 (4) 如下：

$$TCS (10^3\ kg\ CO_2\ km^{-2}) = F_{Weather} \times OQH (Kg/ha) \times 1.2 \quad (4)$$

公式(4)配合以下因子作計算，包括橄欖石風化比率 ($F_{Weather}$)，並估算每公頃添加橄欖石之當量 (Olivine Quantity per Hectare, OQH) 與一公斤之橄欖石可以吸收1.2公斤的 CO_2 的比例 (從公式 (2) 的莫耳比例推導)。最後，可得知橄欖石風化得到總封存量相當每平方公里有多少公斤的碳 (Total Carbon Sequestration, TCS)。

3.2 土壤中金屬離子的含量和變化

3.2.1 土壤分析-王水消化法

為深入了解橄欖石對土壤元的增長作用，特別關注金屬離子濃度。種植實驗經過28天後，利用土壤分析和光譜儀，測定實驗前後的土壤中金屬離子的含量。實驗將在第0天和實驗完結時採集30克土壤，以觀察28天土壤中的金屬元素變化。把土壤樣品過篩100mesh後加入鹽酸和硝酸(體積比3:1，王水)混合，在氣櫃中以微波消化爐進行加熱分解。消化液經定量和過濾後以光譜分析儀(ICP-OES)進行分析，測定土壤中的金屬離子(土壤重金屬測定方法-王水微波消化法 2013)。消化後樣品會根據美國國家標準局認證的標準土(NIST-2709a)對照其濃度情況，而進行適當的稀釋。因土壤樣本經過王水消化後，存在濃度過高會導致光譜分析機器不能承受。

而表1展示了實驗後土壤中的金屬元素含量，並可以將樣本分為三個不同的組別：一組控制組未添加橄欖石，一組治療組標準添加10克橄欖石，另一組治療組則添加了20克橄欖石。

表 1. 王水消化後土壤元素含量

Treatment	Na ⁺ g/pot	Mg ²⁺ g/pot	K ⁺ g/pot	Ca ²⁺ g/pot	Fe ²⁺ g/pot
Blank	1.31 ± 0.11	0.79 ± 0.17	8.75 ± 4.50	0.32 ± 0.02	33.12 ± 1.22
KNO ₃	1.16 ± 0.30	0.82 ± 0.17	8.83 ± 2.54	0.32 ± 0.01	31.83 ± 2.54
K ₂ SO ₄	1.14 ± 0.10	1.00 ± 0.34	8.66 ± 0.80 *	0.31 ± 0.05	30.38 ± 4.73
OLIV	1.25 ± 0.23	1.30 ± 0.48	9.16 ± 2.05	0.33 ± 0.01	33.90 ± 1.33
OLIV_KNO ₃	0.98 ± 0.23	1.82 ± 0.65	8.33 ± 2.27	0.28 ± 0.02	33.74 ± 1.32
OLIV_K ₂ SO ₄	1.10 ± 0.23	1.48 ± 0.24	9.77 ± 2.12	0.36 ± 0.01	34.23 ± 0.68
OLIV_20g	1.18 ± 0.12	2.39 ± 0.35*	8.81 ± 1.25	0.37 ± 0.01	32.28 ± 3.42
OLIV_20g_KNO ₃	1.16 ± 0.45	1.95 ± 0.26 *	9.99 ± 3.82	0.32 ± 0.01	32.43 ± 0.56*
OLIV_20g_K ₂ SO ₄	0.96 ± 0.38	1.62 ± 0.51*	6.73 ± 2.77	0.36 ± 0.03	31.77 ± 0.63

¹Data analysis by Tukey HSD, Significance codes *, ** and *** refer to p-values in the ranges 0.01–0.05, 0.001–0.01 and 0–0.001 respectively.

3.2.2 土壤元素含量-Mg²⁺

表1顯示針對不同濃度的橄欖石(OLIV)對鎂離子(Mg²⁺)釋放的影響評估。實驗結果顯示，添加高劑量的橄欖石(OLIV_20g)能顯著提高土壤中的鎂濃度，達到每盆2.39克，相比之下，依循標準劑量所添加的橄欖石(OLIV_10g)其鎂濃度為每盆1.30克。由此可凸顯橄欖石蘊含高比例的鎂含量(26.56%)，並顯示橄欖石添加量與土壤中金屬活性之間的直接關聯。

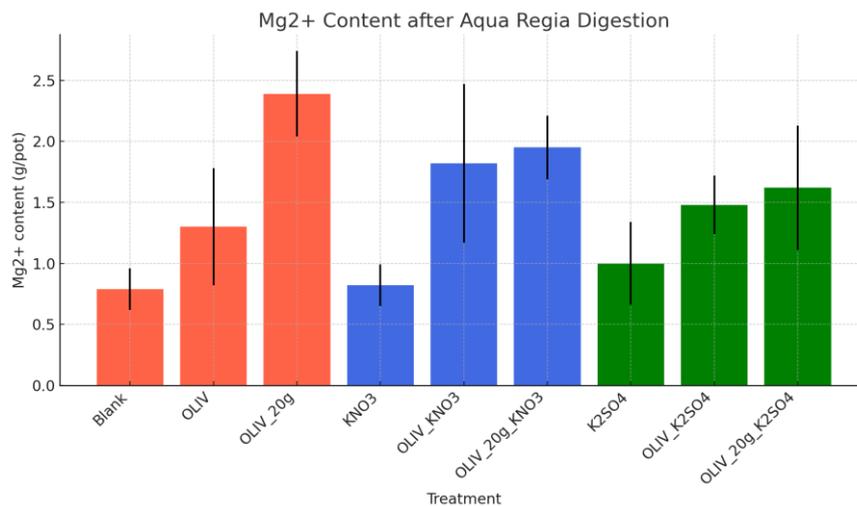


圖15. 土壤中的鎂含量

圖15透過色碼視覺化不同土壤樣本中的鎂離子含量。純橄欖石處理和空白對照組的樣本以紅色表示，顯示出鎂的基線水平，反之，添加硝酸鉀(KNO₃)的樣本以藍色呈現，而添加硫酸鉀(K₂SO₄)的樣本則以綠色表示，這有助於辨別不同添加劑對鎂濃度的影響。

總體而言，OLIV_20g的處理顯示了最高的鎂釋放能力，這不僅突出了橄欖石在提高鎂釋放方面的顯著效果，特別是在高濃度時，揭示出橄欖石和硝酸鉀的結合使用對土壤中鎂含量的潛在增益。這些發現對於優化土壤改良劑的使用策略具有重要意義，可為提高作物的營養吸收和整體生長提供科學依據。

3.3 滲濾液樣本中離子濃度-Mg²⁺

我們的研究詳細檢驗滲出液樣本中鎂離子(Mg²⁺)濃度和流量，在28天的實驗期間對不同處理進行了有系統的記錄和比較。分析水樣本中的金屬離子主要目的是評估單獨使用橄欖石(OLIV)或與硝酸鉀(KNO₃)或硫酸鉀(K₂SO₄)結合是否能增強鎂離子及其他金屬離子的釋放。表2顯示了滲出液樣本中鎂離子(Mg²⁺)的平均濃度。

表 2. 滲濾液樣本中總離子濃度的變異數分析

Treatment	Na ⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Si ⁴⁺ mg/l
Blank	15.86	1.51	2.86	3.87	8.44
KNO ₃	35.43 **	29.60 *	219.67 **	69.73 *	11.32 **
K ₂ SO ₄	35.22 ***	21.91 *	298.58	54.67 *	16.02
OLIV	15.06	2.40 **	2.10	3.78	10.92 **
OLIV_KNO ₃	38.01 ***	46.74 **	225.86 **	65.35 ***	14.59 ***
OLIV_K ₂ SO ₄	36.35 **	24.42 ***	172.28 **	36.51 ***	20.19 ***
OLIV_20g	15.35	3.54 *	1.61	4.45	12.04 **
OLIV_20g_KNO ₃	37.89 **	44.57 ***	178.72 *	56.65 **	14.34 **
OLIV_20g_K ₂ SO ₄	35.28 *	31.70 *	161.16 *	39.43 *	17.65 *

¹Data analysis by Tukey HSD, Significance codes *, ** and *** refer to p-values in the ranges 0.01–0.05, 0.001–0.01 and 0–0.001 respectively.

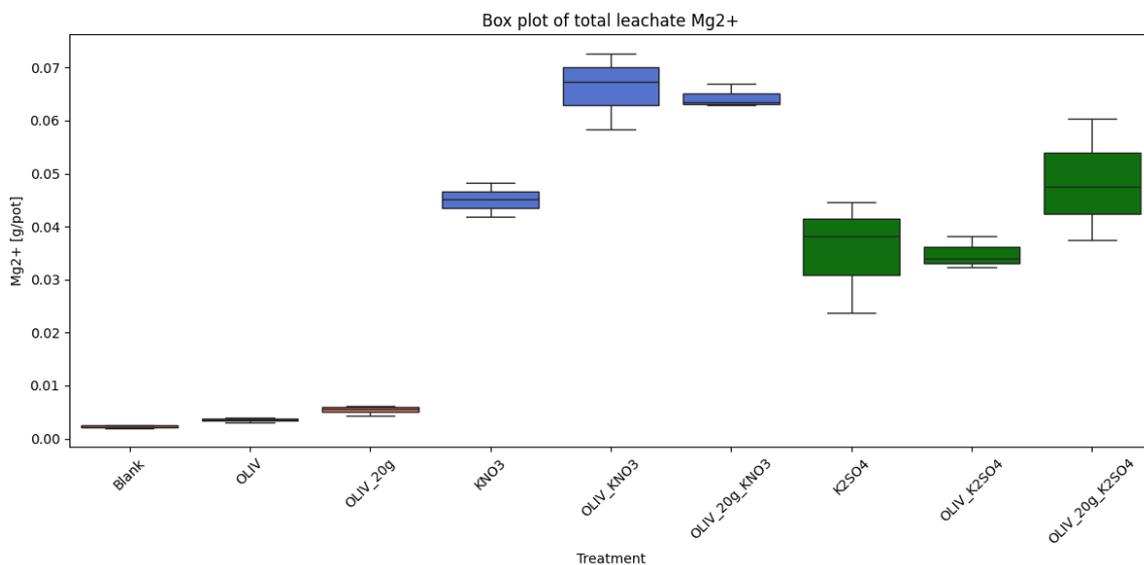


圖16. 土滲濾液樣本中鎂離子的含量

表2呈現平均Mg²⁺濃度，區分了對照組樣本與接受硝酸鉀(KNO₃)、硫酸鉀(K₂SO₄)、

和橄欖石(OLIV)不同組合和劑量處理的樣本。當中，可觀察出橄欖石(OLIV)、硝酸鉀(KNO₃)、和硫酸鉀(K₂SO₄)對提高土壤中鎂離子(Mg²⁺)濃度有顯著影響。特別是當這些物質與橄欖石結合使用時，對Mg²⁺的釋放效果更為顯著。隨著橄欖石用量的增加，特別是在20克的高劑量下，Mg²⁺的濃度和流量都有明顯的提升，表明橄欖石的劑量依賴性對其有效性有重要影響(圖16)。

在與KNO₃的組合中，橄欖石表現出強烈的協同效應，尤其在初期大幅提高Mg²⁺濃度，儘管隨著時間的推移這種影響有所減弱。與此相反，K₂SO₄的添加雖然也促進Mg²⁺的釋放，但其效果相比KNO₃來得較為溫和，且最終濃度趨近於對照組水平。

3.4 土壤中可被萃取的元素-Mg²⁺

實驗分析聚焦於在不同程度的橄欖石(OLIV)處理後，以及其與硝酸鉀(KNO₃)和硫酸鉀(K₂SO₄)的互動對土壤中可以被植物利用金屬元素的提取。

表 3. 土壤金屬萃取 (Na⁺, Mg²⁺, K⁺, Ca²⁺, Si⁴⁺)

Treatment	Na ⁺ g/pot	Mg ²⁺ g/pot	K ⁺ g/pot	Ca ²⁺ g/pot	Si ⁴⁺ g/pot
Blank	32.11 ± 0.46	0.06 ± 0.00	0.11 ± 0.16	0.18 ± 0.01	0.06 ± 0.01
KNO ₃	32.00 ± 0.11	0.05 ± 0.20	0.23 ± 0.20	0.16 ± 0.01	0.05 ± 0.01
K ₂ SO ₄	31.58 ± 0.38	0.08 ± 0.08	0.10 ± 0.08	0.17 ± 0.01	0.05 ± 0.00
OLIV	31.71 ± 0.07	0.15 ± 0.00 **	0.09 ± 0.00	0.17 ± 0.01	0.08 ± 0.02
OLIV_KNO ₃	31.78 ± 0.13	0.15 ± 0.03 ***	0.20 ± 0.03	0.16 ± 0.02	0.08 ± 0.00 *
OLIV_K ₂ SO ₄	31.67 ± 0.09	0.16 ± 0.01 ***	0.18 ± 0.01	0.18 ± 0.00	0.06 ± 0.01
OLIV_20g	31.46 ± 0.19	0.17 ± 0.00 ***	0.09 ± 0.00	0.17 ± 0.01	0.08 ± 0.01
OLIV_20g_KNO ₃	31.49 ± 0.12	0.17 ± 0.03 ***	0.22 ± 0.03	0.17 ± 0.02	0.08 ± 0.00 **
OLIV_20g_K ₂ SO ₄	21.10 ± 0.16	0.10 ± 0.01 **	0.17 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.06 ± 0.01

表3顯示添加橄欖石增強土壤中鎂(Mg²⁺)離子的可提取性，其中較高劑量的橄欖石(20克)對鎂離子水平的提升尤為明顯。這種增強效果可能歸因於橄欖石固有的元素組成，該組成富含這些離子，從而在處理後增加它們在土壤中的可用性。

從此項研究中，可揭示出高劑量的橄欖石特別是與含鉀添加劑，如KNO₃和K₂SO₄結合使用時，可以顯著增加土壤中某些金屬離子的可提取性。這表明橄欖石可以有效地用於提高土壤的營養剖面，特別是對於改善鎂(Mg²⁺)的可用性，這對植物的生長和發育至關重要。

3.5 植物營養素-Mg²⁺

探討植物營養素、乾重和長度，有助於更深入了解增強風化作用對植物營養吸收和產量提升的影響。風化作用通常指的是礦物質在自然條件下經歷化學分解和物理破碎的過程，這一過程能釋放出對植物生長至關重要的營養元素。當考慮到植物的營養吸收能力，我們必須分析植物體內的主要營養元素如氮、鉀、鈣和鎂等的濃度，這些元素對植物的健康生長至關重要。

表 4. 實驗後植物乾燥質量、長度及植物養分

Treatment	Length cm	Weight g	Fe ²⁺ g/pot	Mg ²⁺ g/pot
Blank	23.83 ± 1.04	1.09 ± 0.23	0.07 ± 0.01	0.20 ± 0.04
KNO ₃	25.50 ± 2.18	0.98 ± 0.19	0.08 ± 0.00	0.16
K ₂ SO ₄	26.33 ± 2.08	1.12 ± 0.23	0.08 ± 0.03	0.14 ± 0.07
OLIV	27.00 ± 2.00	1.28 ± 0.05	0.10 ± 0.04	0.34 ± 0.01
OLIV_KNO ₃	28.33 ± 0.58	1.73 ± 0.05	0.17 ± 0.08	0.42 ± 0.03
OLIV_K ₂ SO ₄	29.00 ± 6.00	1.68 ± 0.55	0.36 ± 0.46	0.34 ± 0.23
OLIV_20g	29.33 ± 4.16	1.51 ± 0.09	0.16 ± 0.05	0.43 ± 0.03
OLIV_20g_KNO ₃	33.67 ± 1.15 *	3.46 ± 0.42 ***	0.83 ± 0.64 *	0.76 ± 0.10 ***
OLIV_20g_K ₂ SO ₄	27.00 ± 4.58	1.47 ± 0.28	0.11 ± 0.01	0.28 ± 0.01

這項研究主要探討了不同劑量的橄欖石(OLIV)對植物鎂離子(Mg²⁺)吸收的影響，發現隨著橄欖石劑量的增加，植物對Mg²⁺的吸收量亦明顯提升。特別是當橄欖石與硝酸鉀(KNO₃)結合使用時，Mg²⁺的吸收效率達到最高，這表明橄欖石和硝酸鉀之間存在顯著的協同作用，能夠顯著提高植物的鎂離子吸收能力。相比之下，橄欖石與硫酸鉀(K₂SO₄)的結合也能增強Mg²⁺的吸收，但效果相對較弱。這些發現突顯了橄欖石及其與不同鉀鹽結合時在促進植物營養吸收方面的潛力，對於提高土壤肥力和植物營養管理具有重要意義。

3.6 植物乾重和長度

本研究詳細分析植物乾重、高度和營養含量在實驗處理後的變化，揭示出明顯的趨勢。橄欖石(OLIV)處理組的植物通常顯示出較高的鎂離子(Mg^{2+})吸收量，且相比對照組，具有更高的生長高度和重量。這表明橄欖石在增強土壤中鎂的可用性方面的有效性，而這對植物的生長和發展至關重要。

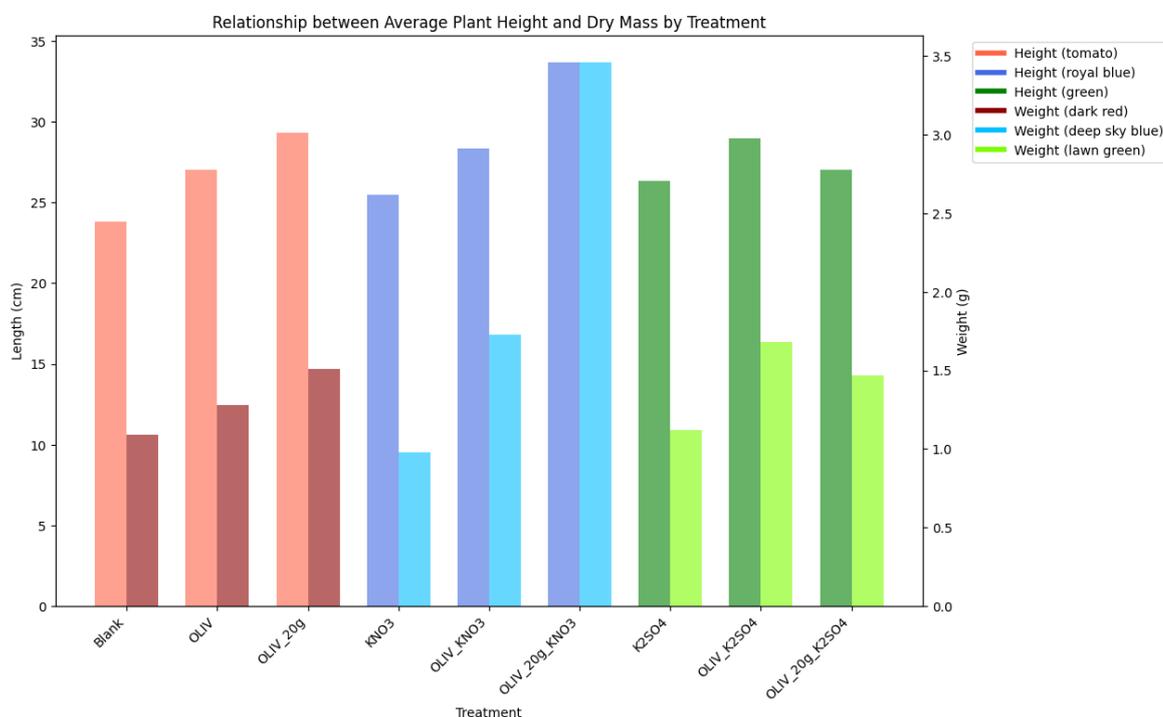


圖17. 植物乾重和長度之間的關係

初始評估顯示，橄欖石OLIV及其增加劑量(OLIV_20g)的處理對植物生長有益。數據顯示，橄欖石的應用使植物的平均高度達到27.00厘米（與空白對照相比增加13.29%），重量達到1.28克（增加16.77%）（表11）。將橄欖石劑量增加到20克(OLIV_20g)後，這些指標提升至平均高度29.33厘米（增加23.08%）和重量1.51克（增加38.41%）。這種增量增長凸顯了橄欖石對植物發展的積極貢獻，尤其在更高劑量下其效果更為明顯。

進一步的分析探討了橄欖石與硝酸鉀(KNO_3)結合使用(OLIV_ KNO_3 和OLIV_20g_ KNO_3)的效果。OLIV_ KNO_3 處理方案達到的平均植物高度為28.33厘米（增加18.88%），重量為1.73克（增加58.23%），而OLIV_20g_ KNO_3 處理則顯著提升，達到平均高度33.67厘米（增加41.26%）和重量3.46克（增加216.77%）（表11）。這些結果突出了橄欖石和 KNO_3 在促進植物生長方面的協同效應，特別是在使用較高濃度的橄欖石時。在各種處理中，揭示橄欖石在提升植物鎂離子吸收、增加植物高度和乾重方面的有效性。

3.7 土壤酸化改善

本研究針對不同處理在28天內對土壤pH的平均變化進行了調查，顯示橄欖石(OLIV)及其與硝酸鉀(KNO₃)和硫酸鉀(K₂SO₄)互動在改善土壤酸化方面的顯著效果。研究重點在於評估OLIV提升土壤pH的能力，以及探討加入KNO₃或K₂SO₄是否能進一步增強OLIV在提高土壤鹼性方面的功效。這一發現對於理解各種土壤處理方法對改善土壤環境的具體影響提供了重要的科學依據。

表 5. 實驗組 28 天內土壤 pH 值的平均變化.

Treatment	Experimental	Experimental Soil
	Soil pH before	pH after
Blank	4.10	4.40 ± 0.26
KNO ₃	4.10	4.20 ± 0.10
K ₂ SO ₄	4.10	4.23 ± 0.15
OLIV	4.10	4.50 ± 0.10
OLIV_KNO ₃	4.10	4.47 ± 0.06
OLIV_K ₂ SO ₄	4.10	4.33 ± 0.12
OLIV_20g	4.10	4.57 ± 0.06
OLIV_20g_KNO ₃	4.10	4.50 ± 0.10
OLIV_20g_K ₂ SO ₄	4.10	4.60 ± 0.00

結果顯示，OLIV處理明顯提高土壤pH值，特別是在更高劑量時（例如20克OLIV），pH提升更加顯著。這些變化由數據表和圖表詳細展示，突出了OLIV與其他化學添加劑的協同作用以及它們對土壤pH的長期改善潛力。對照組土壤的pH輕微上升，而硝酸鉀和硫酸鉀單獨使用時對pH的改變有限。然而，OLIV結合硝酸鉀或硫酸鉀顯示出更大的協同效應，尤其是OLIV_20g_K₂SO₄處理組，pH提升達到+0.50，足以佐證橄欖石於提升土壤鹼性和對抗酸化方面的關鍵角色。

3.8 二氧化碳封存量和風化速率

二氧化碳封存量分析的目的是量化樣本的二氧化碳吸收能力，範圍從600至1974公斤/公頃。這一範圍是通過計算得出的，包括樣本的風化速率(F_{weather})、鎂離子含量，以及每公斤風化橄欖石封存1.2公斤二氧化碳的總封存因子，依據的是Ten Berge等人(2012)提出的方法方程1、3和4。

表 6. 不同處理對樣品中鎂的施用、生物可利用的 Mg^{2+} 、風化速率和 CO_2 捕獲的影響

Treatment	Mg^{2+} applied kg ha ⁻¹	CO_2 capture in leachate Kg ha ⁻¹	CO_2 capture in soil Kg ha ⁻¹	CO_2 capture in plant Kg ha ⁻¹	$^2F_{\text{weath}}$ %	CO_2 capture Kg ha ⁻¹
Blank	0	0	0	0	0	0
OLIV	1475.44	0	424.72	175.16	8.83	599.88
OLIV_KNO ₃	1475.44	57.20	130.73	343.18	15.51	1054.04
OLIV_K ₂ SO ₄	1475.44	43.13	215.67	488.85	11.00	747.66
OLIV_20g	2950.88	15.03	255.51	646.28	6.75	916.82
OLIV_20g_KNO ₃	2950.88	83.40	222.41	1056.48	14.53	1973.89
OLIV_20g_K ₂ SO ₄	2950.88	70.77	226.46	396.30	5.10	693.52

表6顯示於研究中儲存在滲出液、土壤及植物樣本的碳封存比率。研究表明，增加橄欖石(OLIV)的施用量能顯著提高二氧化碳的吸收量。特別是當OLIV與硝酸鉀(KNO₃)結合使用時，二氧化碳捕獲量更是達到了顯著的增加。例如，使用增加劑量的OLIV_20g_KNO₃處理，二氧化碳捕獲量達到了1973.89公斤/公頃，這主要得益於植物樣本內的顯著碳封存。相比之下，橄欖石與硫酸鉀(K₂SO₄)的結合雖也有效，但其碳封存提升的幅度較小，顯示硝酸鉀在促進橄欖石風化和二氧化碳吸收方面的效果更佳顯著。根據上述結果，可得知添加較多的橄欖石和結合使用硝酸鉀，對於提高二氧化碳吸收的重要性，同時，亦顯示出與硝酸鉀相比，硫酸鉀在這一過程中的作用較薄弱。

肆、效益評估

成本效益必定是農民最關心的議題之一，以下將進行詳細說明。由於並非每種農產品每年都會有新的報表，因此在成本效益分析中僅能參考該農產品的最新報表。

首先是成本部分，由於各種類型的農作物成本各有不同，本團隊主要參考農業部農糧署提供的農產品生產成本報表。然而，其中並未將所有成本項目納入考量，僅考慮了第一類生產成本，即種子費用、肥料費用、人工費用、機械費用以及農藥費用。由於不同農民使用的肥料量各有差異，因此智慧碳勘者允許農民自行輸入其使用的肥料量，以計算總肥料費用。在本次的分析中，每種農產品僅假設考慮使用單一肥料。例如，空心菜選用39號基肥，這是根據農業部建議空心菜使用的肥料。除了報表上列出的費用，農民還需考慮橄欖砂的成本。根據實驗，每噸橄欖砂的成本約為20000新臺幣，因此農民需要自行輸入其所需用量以進行計算。將上述成本加總後，即為最終成本效益分析中的總成本。

另外，效益分析計畫將分成兩個部分：農產品價格和碳權價格。首先為計算農民銷售農產品的收入，其公式為當週農產品價格（每公斤）乘以收成量（公斤）。透過爬蟲技術獲取「當季好蔬菜」網站上各種農產品當週的平均批發價格。收成量的計算方式則使用多項式回歸建立預測模型進行推算。根據實驗結果顯示，使用橄欖砂種植可使植物的乾重量增加200%。由於不同農民會使用不同量的肥料，因此，根據實驗結果建立了針對各種農產品的預測模型，以估算農民應施用的肥料和橄欖砂量，以達到預期的產量。因本團隊在是次實驗僅種植了空心菜，因此其他農產品的模型假設了在使用橄欖砂的情況下，乾重量也會增加200%。

第二部分是計算碳權的收益。碳權價格為每公噸碳的價格乘以橄欖砂的吸碳量。其做法是使用爬蟲技術獲取國外EUA上每公噸碳的價格。橄欖砂的吸碳量則根據實驗計算而得。爬取國外資訊的原因是，國內的碳交易尚未開始，因此選擇國外較流行的碳價格作為爬蟲的主要對象。最後，農民自行輸入橄欖砂的用量，即可得到預期的碳權價格。

在成本效益分析中，我們沒有納入認證費用。這是因為認證並不是一個頻繁發生的事件。只有在農田吸收了足夠多的碳並符合認證標準時，才會進行認證，以實現最大的收益。因此，並不是每次種植都需要支付這筆費用。我們提供的VCS認證費用僅供參考(圖18)。

是否出具 認證報告	計畫 年限	帳號開通 費用	註冊費用	專家諮詢 費用	計畫驗證費
有	小於 一年	500美元	到期前減排量*0.1美元，上 限10,000美元	375美元/ 計畫	2,500美元/ 計畫/年
有	超過 一年	500美元	預期年度減排量*0.1美元， 上限10,000美元	375美元/ 計畫	2,500美元/ 計畫/年
無	-	500美元	預期年度減排量*0.1美元， 上限10,000美元	375美元/ 計畫	2,500美元/ 計畫/年

圖18. Verified Carbon Standard (VCS) 之費用

在本團隊的成本效益分析中(圖19)，我們發現添加橄欖砂種植的平均收益高於未添加橄欖砂的情況。以空心菜為例，當1800公斤的肥料(建議使用量)和5000公斤的橄欖砂作為混合肥料種植時，其收益是沒有添加橄欖砂的1.46倍。這主要是因為添加橄欖砂後，農產品的重量增加，進而提高了售價。

然而，在成本效益分析中，碳權僅為2500新臺幣，而在實際生活中，碳權價格可能更高。這是因為實驗僅進行了28天，因此吸碳效果僅限於此時間範圍內。然而，橄欖砂的吸碳效果可持續時間遠遠超過28天，某些研究顯示甚至在32週後仍未達到飽和。因此，從長遠來看，實際收益可能遠遠超出計算的結果。

綜合上述，本團隊根據農產品的最新報價、實驗結果和預測模型的結果來推斷計算效益，並將兩者相減以得出農民的預期收益。

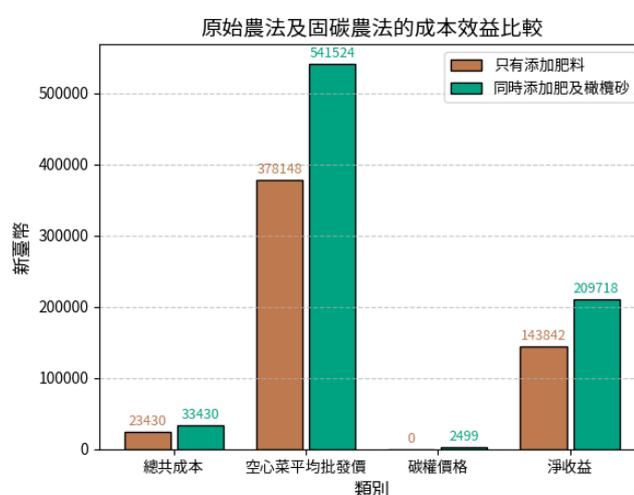


圖19. 原始農法及固碳農法的成本效益比較

伍、作品應用範圍及發展潛能

5.1 作品應用範圍

固碳農法能有效提升植物的產量，並且在種植過程中吸收二氧化碳。在矽酸鹽風化過程中，碳封存是一個長期且持續的過程。最後，透過聊天機器人「智慧碳勘探者」可以估算農民透過這些農業方法所獲得的利潤。

1. 提升農作物產量

固碳農法可讓植物更有效吸收營養元素，使其產量大幅提升



2. 二氧化碳封存技術

橄欖石風化作用，在種植期中可封存二氧化碳，轉化為農民的碳權。

3. 成本效益估算

透過Chatbot 計算農民使用固碳農法後，可獲得多少利潤，其中包括碳權收益和植物產量提升

圖20. 固碳農法的效益

5.2 發展潛能

5.2.1 碳排交易與農業

隨著全球對氣候變化的關注加劇，130多個國家承諾達到「2050年淨零排放」目標。歐盟碳交易系統的更新規定要求溫室氣體排放量必須較2005年削減62%，這導致碳配額價格上升。台灣尚未實施碳抵換額度制度，但隨著碳交易所的建立和碳淨零政策的推行，預計碳交易市場將逐步興起。農業領域的固碳農法因其減排潛力及市場需求，被視為盈利途徑，並將對達成淨零排放目標起到關鍵作用。

5.2.2 碳中和農業生態圈

目前農業商業模式主要涉及農民種植並銷售農作物，而市民在市場購買。碳淨零農業生態圈(圖21)的背後含意是，透過固碳農法邁向碳淨零的同時，改變現有的農業商業模式，提升產量並透過碳權交易增加農民收入。農民採用此法需要市民支持，因為市民的購買行為對農民接受新農法至關重要。為此，市民購買這些農產品可獲得積分，積分可以在未來購買時用於獲得折扣，從而激勵市民支持並推動農民使用固碳農法。這種模式不僅促進農民收入增加，還有助於減少大氣中的二氧化碳，推動永續農業發展，讓市民間接參與固碳活動，共同為地球環保出力。

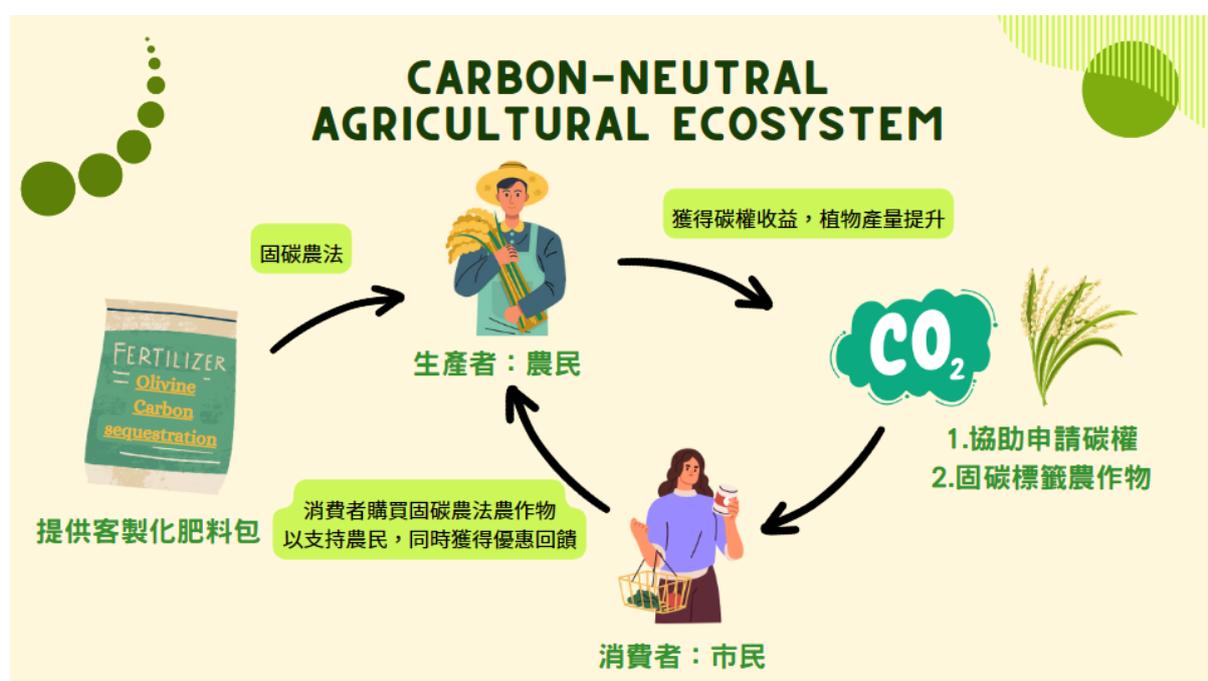


圖21. 碳中和農業生態圈

5.2.3 固碳農法商業模式

圖22中所描述的固碳農法商業模式主要是以農民為核心客群，透過智慧碳勘者平台推廣持續性農業和固碳實踐。這種方法不僅有助於提高農作物產量和碳收益，還能夠吸引普通市民參與，進一步擴大其影響力。商業模式的核心在於透過會員費用和橄欖石的銷售來創造收益，同時依靠技術支持和合作夥伴維持運作。



圖22. 固碳農法商業模式

1. **目標客群：**主要為農民，普通市民亦可使用智慧碳勘者平台。
2. **價值主張：**固碳農法推動可持續農業，開創新收益途徑，提高作物產量及碳收益，鼓勵參與全球環境永續運動。
3. **通路：**智慧碳勘者平台作為與客戶溝通的主要平台，透過此宣揚固碳農法的好處，維持農民執行固碳農法的意願。
4. **顧客關係：**會員服務提供支援協助農民申請碳權，推進農民持續實行固碳農法，邁向碳淨零目標。
5. **收益來源：**主要來自會員費用及橄欖石銷售。
6. **關鍵資源：**維持平台正常運作需大量技術支持，且需技術對固碳農法的固碳量進行認證。同時，橄欖石的開採也需要成本。

7. **關鍵活動**：激集點活動勵市民購買固碳農法產品，核心於整個生態圈的成功。
8. **合作關係**：：建立與LINE及專責機構的長期合作，以識別採用固碳農法的產品。此外，與礦業公司合作獲取高質量橄欖石，並與實踐固碳農法的農民建立夥伴關係。
9. **成本與資金需求**：台數據維護和實作材料需要相應的資金投入。

5.2.4 會員服務增強農業持續性

推出的會員服務以獲得額外收益，主要包括協助農民申請碳權認證，讓他們可以專注於農作，無需擔心碳權相關事務。此外，我們提供專人線上服務，解答農民對固碳農法的任何疑問。還會進行土壤品質檢查，以確保農民能根據土壤狀況合理使用橄欖砂，增加土壤固碳效率。

5.2.5 技術進步降低矽酸鹽開採成本

在台灣，矽酸鹽類岩石的開採和研磨並不常見，導致相關成本極高。以我們團隊的實驗為例，每公噸橄欖砂的成本達到新台幣20,000元。相比之下，根據Köhler等人於2010年的研究，同樣數量的橄欖砂在成本上僅需約400元。這表明當地的技術成熟與普及可以顯著降低成本。如果開採和應用技術得到進一步發展，不僅可以大幅降低成本，還能提升農民對固碳農法的接受度，從而更好地推廣這套生態圈。

陸、分工表

隊員	主要工作
徐志宏	實驗執行、影片製作
趙卓然	海報製作，程式碼建構
陳俊瑋	資料庫建置，作品說明書

柒、參考資料

1. 農產品生產成本調查系統，農業部農糧處，<https://agrcost.afa.gov.tw/pagepub/AppendContentPage.aspx?itemNo=C01121>
2. 柳婉郁，碳權怎麼申請？VCS認證5步驟上手 森林碳匯變碳權，綠學院，（2023）<https://ubrand.udn.com/ubrand/story/12116/7665436>
3. 環境檢驗所 - 環保署（2008），土壤酸鹼值（pH值）測定方法－電極法，NIEA S410.62C
4. 黃鎮海，郭福成（2001）。作物施肥手冊，行政院農業委員會，農業試驗所，中華永續農業協會。
5. 林經偉（2016），空心菜栽培合理化施肥技術之研究，臺南區農業改良場研究彙報 67，38- 48。
6. Beerling, D. J., Leake, J. R., Long, S. P., Scholes, J. D., Ton, J., Nelson, P. N., ... & Hansen, J. (2018). Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nature plants*, 4 (3), 138-147.
7. Köhler, P., Hartmann, J., & Wolf-Gladrow, D. A. (2010). Geoengineering potential of artificially enhanced silicate weathering of olivine. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(47), 20228-20233.
8. Lasaga, A. C., Soler, J. M., Ganor, J., Burch, T. E., & Nagy, K. L. (1994). Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(10), 2361-2386.
9. Meysman, F. J. R., & Montserrat, F. (2017). Negative CO₂ emissions via enhanced silicate weathering in coastal environments. *Biology Letters*, 13(4), 20160905.
10. Raymo, M. E., & Ruddiman, W. F. (1992). Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359(6391), 117-122.
11. Rietra, R., Alterra, Bergsma Huig, (2012). Decreasing CO₂ emission in agriculture by using rock flour, alternative for agricultural lime and potassium fertilisers. WUR. 1-27
12. Schuiling, R. D., de Boer, P. L., (2011). Rolling stones fast weathering of olivine in shallow seas for cost-effective CO₂ capture and mitigation of global warming and ocean acidification. *ESDD*. 2, 551- 568
13. Smith, P. ,(2006). Soils as carbon sinks: the global context, *Soil Use and Management* Volume 20, Issue 2 p. 212-218
14. Ten Berge, H. F., Van der Meer, H. G., Steenhuizen, J. W., Goedhart, P. W., Knops, P., & Verhagen, J. (2012). Olivine weathering in soil, and its effects on growth and nutrient uptake in ryegrass (*Lolium perenne* L.): a pot experiment.
15. Walker, J. C. G., Hays, P. B., & Kasting, J. F. (1981). A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C10), 9776-9782.

16. Yang, M. H, Han I, (2015). Subsidy Policy Evolution to Chemical Fertilizers and Management Information System Processing in Taiwan, FFTC Agricultural Policy Platform