

114 年度氣候變遷創意實作競賽

決賽作品說明書

隊伍編號+名稱	鎖住碳脈 018
作品中文名稱	碳積補手
作品英文名稱	Carbon Catcher

參賽學校：中興大學、逢甲大學

系所名稱：景觀與遊憩碩士學位學程、智慧城市碩士學位學程

團隊成員：李祥語、許又焄、林正昕

指導老師：吳銘順 副教授

摘要

團隊結合物聯網技術與MR/AR資料視覺化，提升土壤碳匯檢測效率，突破傳統方法無法即時監測碳存量變動的限制。並探索水庫淤泥再利用對土壤與植物碳量的影響，提供應對氣候變遷的自然解方，推動循環經濟與永續發展，助力實現碳中和與零排放願景。

Abstract

The team integrates IoT technology with MR/AR data visualization to enhance the efficiency of soil carbon sequestration detection, overcoming the limitations of traditional methods in real-time monitoring of carbon stock changes. Additionally, they explore the impact of reservoir sludge reuse on soil and plant carbon levels, offering natural solutions to climate change, promoting a circular economy and sustainable development, and contributing to the vision of achieving carbon neutrality and net-zero emissions.

總目錄

總目錄..... I

表目錄..... II

圖目錄..... III

第一章 設計構想及運作說明1

 1.1 構想來源.....1

 1.2 運作說明.....2

第二章 作品材料及說明3

 2.1 主體土壤砂箱與感測器配置.....3

 2.2 IoT 監測系統設備.....4

第三章 創作特點與創意說明7

 3.1 創意構想來源與背景.....7

 3.2 創意特點及說明.....9

第四章 作品應用範圍及發展潛能10

 4.1 作品應用可行性評估.....10

第五章 工作分配12

 5.1 工作分配.....12

第六章 其他補充說明及文件13

 6.1 實驗操作補充.....13

參考文獻..... 參-1

表目錄

表 4-1 作品商業模式可行性評估表 10

表 5-1 工作分配表 12

圖目錄

圖 2-1 作品說明示意圖.....	4
圖 2-2 作品說明視圖.....	4
圖 2-3 IoT設備說明示意圖.....	6
圖 3-1 植生碳循環圖.....	7
圖 3-2 監測儀器示意圖.....	8
圖 3-3 流域碳匯/儲存計算分析圖.....	8
圖 4-1 作品商業模式可行性評估關係圖.....	11
圖 6-1 實驗砂箱製作過程.....	13
圖 6-2 程式測試過程.....	14
圖 6-3 砂箱設置位置與養護過程.....	15
圖 6-4 砂箱設置位置與養護過程.....	15
圖 6-5 砂箱植物生長情形-1.....	16
圖 6-6 砂箱植物生長情形-2.....	16
圖 6-7 THINGSPEAK平台數據紀錄.....	17
圖 6-8 AR/MR建模.....	17

第一章 設計構想及運作說明

1.1 構想來源

一、氣候變遷與碳排放挑戰

氣候變遷與碳排放已成為全球迫切面對的挑戰。根據美國國家海洋和大氣管理局（NOAA）發布的《2024 北極年度報告》，北極地區的凍土帶已由碳儲存庫轉變為二氧化碳（CO₂）淨排放源，對氣候變遷帶來加速效應。報告同時指出，氣候暖化導致高緯度地區出現乾燥化與野火頻發，使過火面積擴大、火災強度上升，進一步加劇碳排放問題。全球約有 25% 的碳儲存在土壤中，顯示土壤在全球碳循環中扮演關鍵角色，尤其作為碳匯（Carbon Sink），對減緩氣候變遷具重要意義。

二、政策需求

面對氣候變遷挑戰，台灣於《氣候變遷因應法》中明確提出「2050 淨零排放」的目標，進一步凸顯土壤碳匯與碳儲存的重要性。然而，現階段土壤碳監測數據的缺乏，已成為政策推動與精準治理的主要障礙之一。傳統的土壤碳分析方法多為耗時、昂貴、具破壞性，且難以大範圍、即時取得資料，無法滿足現代氣候治理所需的數據支持。因此，本作品構想的核心，正是在於開發一套結合即時監測與智慧感測技術的創新裝置，透過非破壞性、低成本且可擴展的方法取得土壤碳相關資訊，彌補當前監測技術的不足，協助政策落實，並推動我國邁向淨零碳排放的長遠目標。

1.2 運作說明

一、碳循環與作品交互運作說明

在全球氣候變遷與追求淨零碳排的背景下，土壤作為關鍵的碳儲存庫，即所謂的「黃碳」，扮演著緩解氣候變遷的重要角色。全球約有 25% 的碳儲存在土壤中，顯示其在碳循環中的關鍵地位。植物透過光合作用從大氣中吸收二氧化碳，轉化為有機物質，部分這些有機質會隨著時間沈積於土壤，進而形成穩定的「腐植質」。這些腐植質主要分布在距地表約 10 至 20 公分深的土層中，因此這一範圍也成為土壤碳含量監測的重點區間。

本作品探討並量化土壤在植物生長過程中的碳儲存動態，直接與土壤碳循環的過程進行交互觀察與分析。選擇黃槿作為實驗植物，因其為本土樹種且在濱海環境具有高存活率，能有效進行植生碳吸存。透過使用水庫淤泥作為土壤介質，驗證其在土壤活化再利用的同時，對植物生長及碳儲存的潛在影響。考量到植物根系的發展及有機質主要累積層的活躍範圍，作品設計以 50 公分的土壤深度進行觀測，藉此模擬並觀測土壤碳的積累過程。我們的作品透過即時監測土壤中的二氧化碳濃度變化，反映土壤微生物活動、植物根系呼吸及有機質分解狀態，進而探討其與土壤碳儲存的關聯性。

二、IoT 設備與數據可視化運作說明

監測儀器包含 MCU (ESP32) 裝置、二氧化碳感測器 (NDIR) 和溫濕度感測器 (防水型 SHT30)。這些深入土壤 50 公分的感測器能透過透氣管埋設於土壤內部，監測土壤環境數據。

感測器數據由 NDIR 與 SHT30 收集，並透過具有連網功能的 ESP32 開發板使用 5G 傳輸至 ThingSpeak 平台。

ThingSpeak 平台用於接收感測數據，並進行可視化及監測歷史查詢。

程式碼的開發參考網路資源，與指導老師討論後自行編撰，包含感測器程式碼匯入、碳轉換參數設定與校驗，並持續優化。

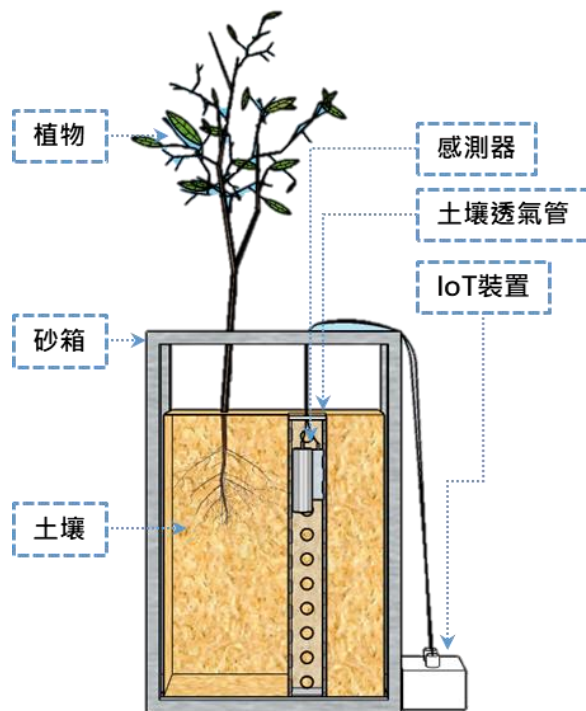
第二章 作品材料及說明

2.1 主體土壤砂箱與感測器配置

本作品設計之主體土壤砂箱結構以壓克力與鋁擠型組件為主要材料，透明壓克力箱體有助於觀察土壤內部植物根系的發展情形。箱體深度為 54.5 公分，對應植物根系在土壤中的有機質層 30 至 50 公分深度範圍中最為活躍的區域，以便於後續針對固碳潛力進行觀測與分析。而腐植質層通常可在森林中觀測到，表層最厚可堆積 20 公分的黑色鬆軟腐植質；在一般平地與低海拔森林中，腐植層能觀測的厚度有限，除落葉外難以見到明顯腐植層，而在土壤介質本組選用水庫淤泥，其不僅具備良好的保水保肥特性，也符合資源再利用的永續原則，並能模擬濱海地區的自然環境。植物部分則選擇本土濱海樹種黃槿，其具有九成以上的高存活率，且根系發展良好，與本研究聚焦於根系碳匯效益的主軸相呼應，以下為作品主體的詳細資訊：

- 砂箱尺寸為 54.5*16.5*39.5 公分。結構使用壓克力與鋁擠型組件。
- 土壤介質採用水庫淤泥，淤泥活化再利用，並具有保水保肥的特性。
- 種植的植物選擇黃槿，其在濱海植物中較高的存活率，且為本土樹種。

主體土壤砂箱與感測器配置，示如圖 2-1 與圖 2-2 圖。砂箱尺寸：長*寬*高為 54.5*16.5*39.5(單位：公分)；感測器配置尺寸：長*寬*高為 16*16*9(單位：公分)。各構件功能說明，示如圖 2-2 (說明 1 與 2)。



說明 1：

1. 前視圖。
2. 砂箱裝置+IoT 裝置。
 - (1) 砂箱尺寸：
54.5*16.5*39.5(cm)
 - (2) IoT 尺寸：16*16*9(cm)
3. CO₂/碳檢測裝置設備。
4. 透過 5G 傳輸+MR 可視化。

說明 2：

1. 植物：防風樹種(高儲碳量)。
2. 砂箱：壓克力+鋁擠型組件。
3. 土壤：水庫淤泥再利用(保水保肥)。
4. 感測器：CO₂與溫濕度偵測。
5. 土壤透氣管：壓克力鑽洞處理。
6. IoT 裝置：MCU(微控制器)。

圖 2-1 作品說明示意圖

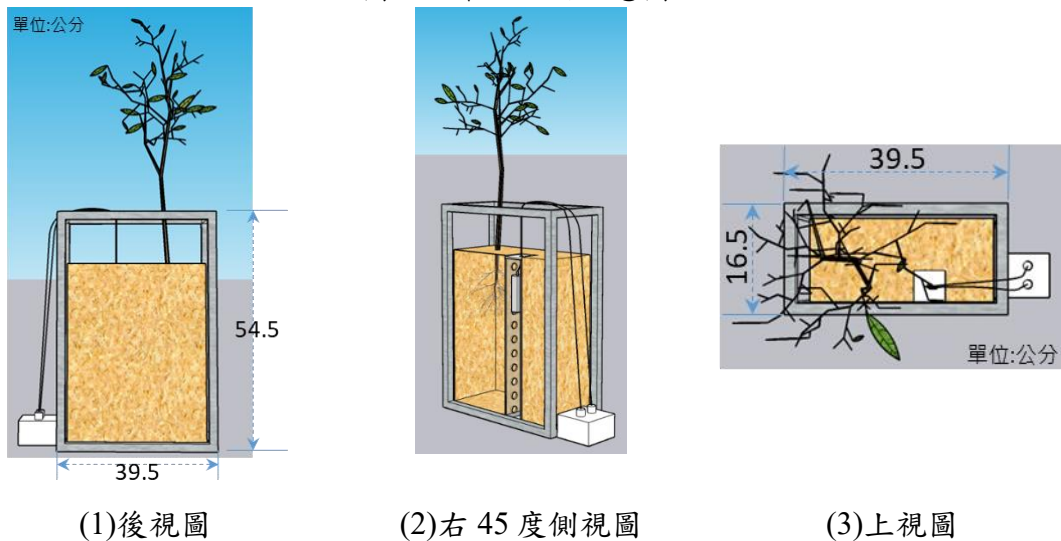


圖 2-2 作品說明視圖

2.2 IoT 監測系統設備

本系統以 ESP32 主機板作為數據收集與處理的核心，整合二氧化碳濃度、溫溼度感測與 API 串接互聯網，以實現土壤內碳濃度的智慧監測。其中，二氧化碳濃度監測採用 NDIR 紅外線式感測器，能準確感知土壤中二氧化碳的變化情形，作為植物根系呼吸與碳釋放的重要指標；溫濕度則透過防水型 SHT30 感測器進行監測，並以壓克力透氣管鑽孔設計將感測器穩定埋設於土壤內部，確保感測數據的準確性與耐久性。外掛的所有電子元件均安裝於防水箱中，以保護 IoT 裝置在戶外環境

中的穩定運作，並搭配電源供應與 5G-WIFI 分享器，提供系統所需電力與即時數據上傳能力，實現遠端監控與雲端整合的應用目標，以下是 IoT 監測系統設備的詳細資訊：

一、硬體開發與環境

MCU 開發板：系統使用 ESP32 作為數據收集與處理的核心裝置，能夠與 Arduino 相容的開發板。

感測器整合：硬體開發環境包含將各種感測器（如 NDIR 紅外線式二氧化碳感測器、防水型 SHT30 溫濕度感測器）與 MCU 進行組裝及接線。感測器透過經過鑽洞處理的壓克力透氣管埋設於土壤內部進行偵測。

保護與連接：IoT 電子元件被放置在防水箱內以提供保護。系統透過電源供應器及 5G-WIFI 分享器提供運行電力及網路連接，將數據傳輸至 ThingSpeak 平台。

二、程式碼開發與撰寫

程式語言：MCU 端的程式碼主要使用 Arduino C 語言進行撰寫。Python 與 Arduino C 邏輯有共通之處，易於學習與開發。

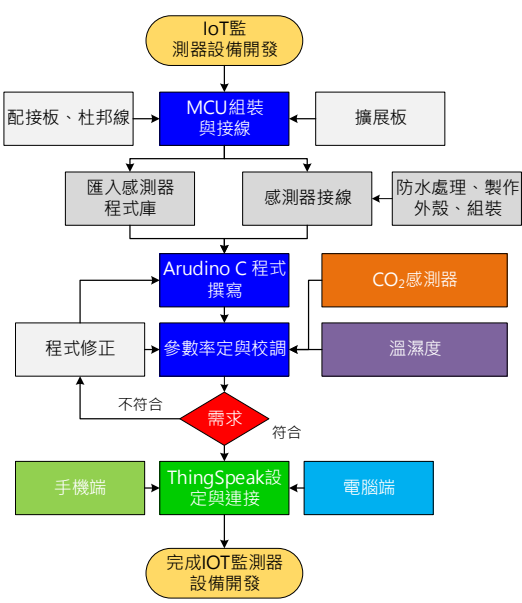
程式碼來源與撰寫：程式碼的開發是基於參考網路資源、與指導老師討論，並自行撰寫完成的。開發過程包含了匯入感測器程式庫以及進行感測器的參數設定與校驗。

穩定性優化：考量到系統需進行長期監測，程式碼中加入了**穩定性優化設計**。這包含偵測到 **WiFi 斷線時會自動重連**，以及當感測器讀取數據異常或遇到干擾時，會觸發 **MCU 自動重啟機制**，以確保數據記錄的連續性與系統運作的穩定性。程式結構包含多個循環 (loop) 以持續讀取各個感測器的數據。

IoT 裝置配置示如圖 2-3(1)，包含：MCU 裝置、CO₂ 與溫濕度感測器與防水箱。IoT 設備開發程序，示如圖 2-3(2)，包含主裝、接線、程式撰寫與修正、感測器率定與校驗、防水處理與上傳 ThingSpeak 資料庫，提供即時監測 CO₂ 碳量與溫濕度歷程記錄。



(1) IoT 設備構件圖



(2) IoT 設備開發程序圖

圖 2-3 IoT 設備說明示意圖

第三章 創作特點與創意說明

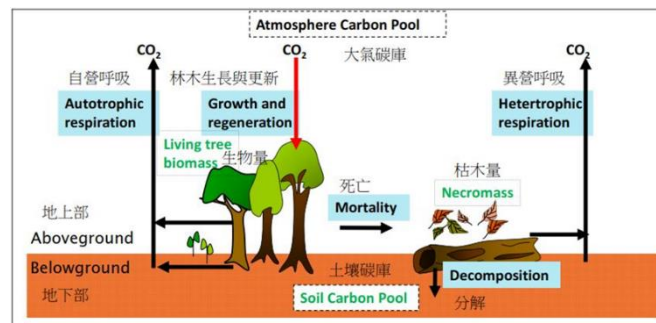
3.1 創意構想來源與背景

如前章節所述，本組為解決在現今快速發展的區域，土壤碳長期變化數據難以取得、傳統土壤含碳量檢測時間與快速發展的不合時宜、以及即時偵測擾動或未擾動土壤因破壞造成二氧化碳逸散量等問題，我們結合了以下資源與經驗：

一、碳相關文獻

InVEST 模式由斯坦福大學、明尼蘇達大學、稅務保護協會（TNC）與世界自然基金會（WWF）共同開發，是全球常用於碳匯和碳儲存評估的工具之一。已被多篇國際期刊採用，包含研究類型：土砂運移分析、紅樹林棲息地評估、水資源保育、水庫與湖泊碳匯與碳儲存分析、森林碳儲存等。包含物質質量與價值量變化，並評估氣候變遷對生態系服務的風險與機會。

「水土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置」研究旨在建立台灣地區水土保持與原生植物碳吸存能力的資料庫，支持植生工程的水土保育與碳減量效益評估，進而降低大氣 CO_2 濃度重要貢獻，示如圖 3-1。未來在評估植生工程效益時，該資料庫可應用於估算水土保持植物降低大氣中碳量之成果，呈現植生工程中水土與生態保育之雙重目標。



資料來源：水土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置，農業部農村發展及水土保持署，2019。

圖 3-1 植生碳循環圖

並蒐集以 InVEST 碳儲存模型評估碳匯/儲存量與土地利用之關聯等相關文獻，例如：劉與柳(2021)、Temesgen *et al.* (2021)、Fatemeh *et al.* (2023)、Raquel *et al.* (2017)、Abdulla-Al Kafy *et al.* (2023)。

二、指導老師計畫

指導老師吳老師，與本創意競賽相關研究為經濟部水利署「應用物聯網與回收紙再利用於河川揚塵區種植之研究」、「擴增實境應用於河川揚塵防治與地方創

生之研究」與「水庫沈積物於濱海沙灘植生減碳之應用」，可提供 IoT 監測開發、擴增實境、泥砂特性、種植、Arduino、ThingSpeak 與 Blynk 等開發經驗。

「應用物聯網與回收紙再利用於河川揚塵區種植之研究」，進行 IoT 監測開發，以物聯網(Internet of Things, IoT)配合微控制器 MCU(Micro Control Unit)蓬勃發展，透過 IoT 技術發展應用於河川揚塵區種植研究與濱海地區監測，示如圖 3-2。再將資料傳送至 IoT 開發平台，省去資料庫開發與伺服器架設(節能減碳)，同樣達到行動裝置與電腦裝置即時獲得監測資料，利於維護管理開發與優化。



資料來源：應用物聯網與回收紙再利用於河川揚塵區種植之研究，經濟部水利署，2022。

圖 3-2 監測儀器示意圖

三、課程報告

學校課程學習使用 InVEST 模型進行區域或集水區碳匯/儲存計算，透過土地使用/覆蓋(LULC)與四大碳庫資料取得，建立 InVEST 所需資料後，進行碳匯/儲存計算。再將結果透過 ArcGIS Pro 進行分據分析與展示，示如圖 3-3。

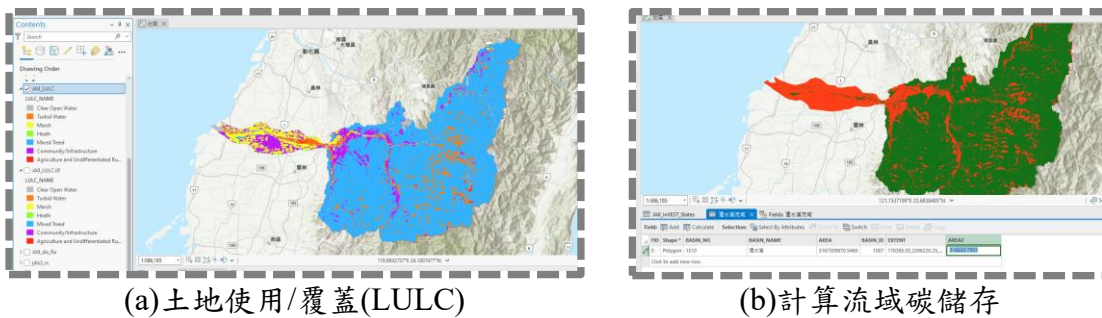


圖 3-3 流域碳匯/儲存計算分析圖

3.2 創意特點及說明

一、創意特點

透過學校課程的啟發，與老師經驗的教授，提出解決「黃碳」快速檢測技術的可行性。有以下 4 點特色：

1. 技術創新：利用IoT結合感測器方式，開發微型監測裝置，實現土壤碳的長期監測，避免破壞土壤結構。
2. 物聯網應用：實現資料的即時傳輸與視覺化，為監測過程提供便利性與洞察性。
3. 模擬實驗環境：以透明砂箱進行小型實驗模擬，驗證技術可行性。
4. 高效率與可擴展性：硬體設計簡單、成本低廉，具備推廣至大範圍應用的潛力。

二、創意亮點

藉由新興科技技術(IoT、5G 與 AI 等)支援與應用性，提出 3 點創意亮點，說明如下：

1. 長期監測：系統可支援全年監測，追蹤土壤碳變化趨勢。
2. 可應用性：可依應用需求擴展至不同的環境，如城市綠化區域、濕地等。
3. 應用價值：支持農業與森林管理中的土壤碳監測，配合水庫淤泥(保水保肥)應用，協助推動自然解方（Nature-based Solutions, NbS）落地應用。
4. 可視化監測：透過 AR/MR(Augmented Reality/Mixed Reality)穿戴裝置，展示監測數據變化。

第四章 作品應用範圍及發展潛能

4.1 作品應用可行性評估

1. 技術面：所需感測器與物聯網開發板易取得，易於推廣。
2. 成本面：實驗裝置成本可控，單站設置成本在 5000 元內。
3. 環境教育面：可作為學校及氣候行動提供應用工具，利於推動科學教育與環保行動結合。
4. 操作時間面：設計、實驗、監測數據分析與撰寫成果預計需要 1 個月。
5. 可行性評估面：依商業模式進行關鍵伙伴等 9 項進行評估，示如表 4-1 與圖 4-1。評估運作邏輯、收入來源、成本結構以及與客戶、關鍵夥伴的互動方式有其價值性。

表 4-1 作品商業模式可行性評估表

關鍵夥伴	關鍵活動	價值主張	顧客關係	目標客層
■ 研究機構(合作開發與測試) ■ 政府部門(政策支持與推廣) ■ 農業與林業相關企業(應用與測試)	■ 感測技術與物聯網技術研發 ■ 碳存量動態分析模型建構 ■ 教育與推廣活動(如學術發表、技術培訓)	■ 實現即時監測土壤碳變化的低成本技術方案 ■ 支援碳存量動態分析與 AR/MR 可視化，提升科學研究和實際應用效率 ■ 支持農業與森林管理中的土壤碳監測，推動自然解決方案落地應用	■ 提供技術支持與教育培訓 ■ 建立用戶社群分享實驗數據與應用經驗 ■ 提供持續數據更新和遠程技術維護	■ 農業、林業管理者 ■ 環境教育、科學研究機構 ■ 政府氣候政策制定者
關鍵資源 ■ IoT 技術專家與硬體工程師 ■ 感測器與數據分析平臺 ■ 政府資金支持或研究補助		分銷管道 ■ 透過政府與教育機構推廣應用 ■ 利用技術工作坊和學術會議展示產品與技術 ■ 提供數據服務平臺訂閱方式		
成本結構 ■ 感測器與硬體開發成本 ■ 數據平臺運行與維護成本 ■ 推廣與教育活動成本		收入來源 ■ 硬體設備銷售(感測器和 IoT 設備模組) ■ 數據服務平臺訂閱收入 ■ 技術培訓與顧問服務		



圖 4-1 作品商業模式可行性評估關係圖

第五章 工作分配

5.1 工作分配

本節將詳細說明團隊成員在本次專案中的工作分配與職責。考量到本專案涵蓋植物、土壤與碳儲存、IoT 監測系統、AR/MR 展示等不同領域，我們依此劃分主要負責區域，並明確各成員的主要任務，詳列如下表。

表 5-1 工作分配表

團隊成員 (Team Member)	負責領域 / 主要任務 (Area of Responsibility / Main Tasks)
李祥語	負責領域：水庫淤泥利用、土壤累積層概念 主要任務：說明書整體架構與彙整、實作成品照片拍攝與編排
許又焄	負責領域：植物選擇、根系發展觀察 主要任務：海報與簡報製作、美編設計、設備說明圖、示意圖
林正昕	負責領域：土壤碳監測數據分析、程式撰寫與優化 主要任務：IoT 硬體的組裝、接線與配置、感測器校正、數據平台的設定與維護、數據傳輸與可視化、影片製作

第六章 其他補充說明及文件

6.1 實驗操作補充

一、實驗砂箱製作

實驗砂箱完成框體建置，採用透明壓克力與金屬框架。土壤填充部分依試驗需求混合水庫淤泥，並植入黃槿作為實驗植物。CO₂ 感測器與溫濕度探針已安裝，進行數據監測與校正，準備進入正式試驗。



圖 6-1 實驗砂箱製作過程

二、儀器操作測試

儀器測試已同步展開，針對 CO₂感測器、溫濕度探針及土壤含水率感測器進行校正與數據穩定性檢測。初步測試包含感測器靈敏度、數據傳輸驗證及環境變因影響評估，確保即時監測碳逸散與土壤條件變化。目前測試數據穩定，將進一步優化感測器配置，以提升測量精度。

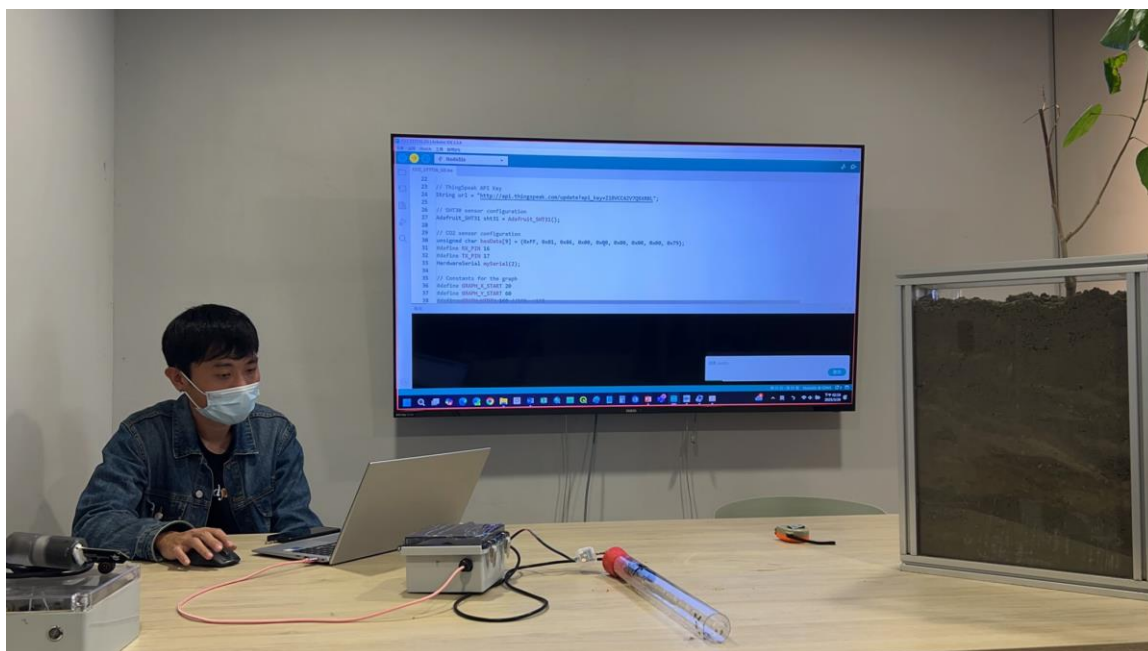


圖 6-2 程式測試過程

三、後續砂箱設置位置與養護

實驗砂箱完成建置後，進行後續的紀錄以及砂箱及植物的照顧。砂箱試驗經驗需持續時間長達2~3年，試驗砂箱形成腐質層(約10公分)，比較草海桐與黃槿生長，以黃槿適應較佳，成長約至1.5公尺高，示如圖6-3～圖6-6。植栽選用適應性強的物種(黃槿)，並依試驗需求進行澆灌與養護，以維持穩定生長狀態。此外，監測設備同步運行，確保環境條件適宜，並記錄植物生長與土壤變化數據，以供後續分析。



圖 6-3 砂箱設置位置與養護過程



圖 6-4 砂箱設置位置與養護過程

四、植物生長情形



圖 6-5 砂箱植物生長情形-1



圖 6-6 砂箱植物生長情形-2

四、數據收集及可視化

感測器所收集的資料將監測到的二氧化碳濃度轉換為土壤含碳量，並串接 ThingSpeak 平台。在實驗中，我們觀察到的土壤中二氧化碳濃度約維持在 150 ppm 左右，且數據記錄顯示數值相對穩定。

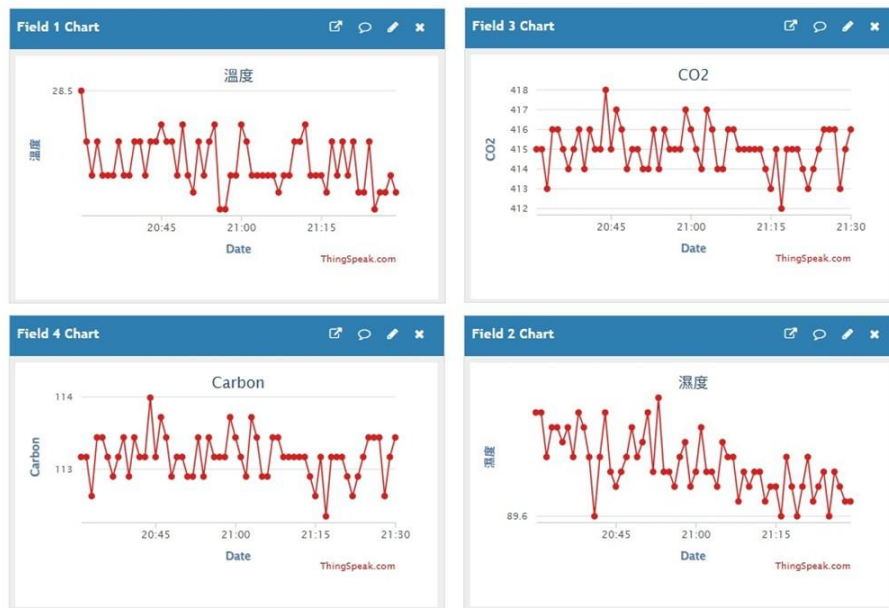


圖 6-7 ThingSpeak 平台數據紀錄

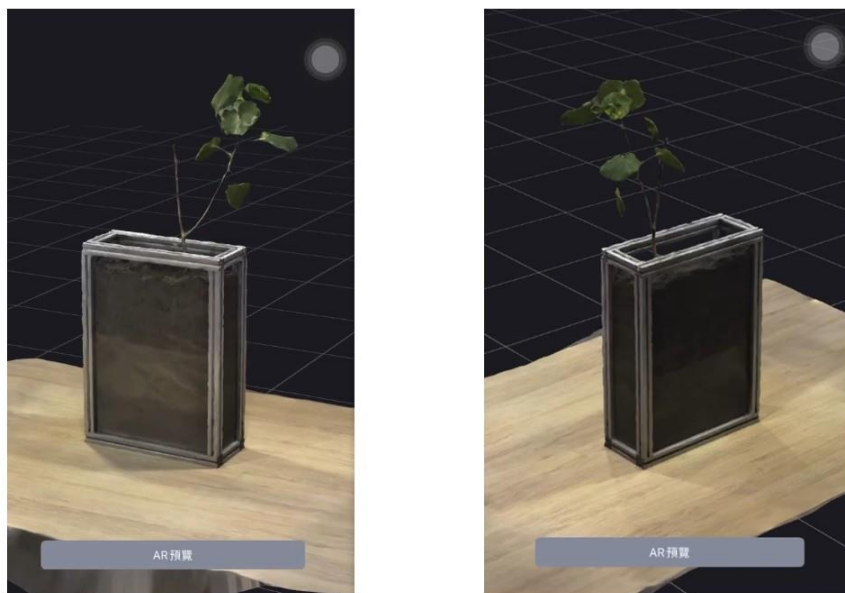


圖 6-8 AR/MR 建模

參考文獻

- (1) 「水庫沈積物於濱海沙灘植生減碳之應用」，經濟部水利署南區水資源原分署，2023。
- (2) 「水土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置」，農業部農村發展及水土保持署，2019。「應用水庫淤泥改善砂丘地植生之試驗研究」，經濟部水利署水利規劃分署，2011。
- (3) 吳銘順、阮應店、余柏錚，「利用濱海沙丘地去化水庫淤泥之分析研究」，2022 工程永續與土木防災研討會(P509-518)，2022。
- (4) 「利用濱海沙丘地去化水庫淤泥之分析研究」，經濟部水利署南區水資源分署，2022。
- (5) 劉芝麟、柳婉郁，「InVEST 碳儲存模型與土地利用關聯之研究-以福智教育園區為例」，林業研究季刊 43(4)：177-194，2021。
- (6) 「應用物聯網與回收紙再利用於河川揚塵區種植之研究」，經濟部水利署，2022。
- (7) 「擴增實境應用於河川揚塵防治與地方創生之研究」，經濟部水利署，2023。
- (8) 柯佑霖、黃文政，「以 InVEST 模式評估水庫集水區農業非點源污染之防治效益」，水土保持學報 48(2)：1733-1748，2016。
- (9) Abdulla - Al Kafy, Milan Saha, Md. Abdul Fattah, Muhammad Tauhidur Rahman, Bushra Monowar Dutti, Zullyadini A. Rahaman, Arpita Bakshi, S. Kalaivani, Sk Nafiz Rahaman, Golam Shabbir Sattar, Integrating forest cover change and carbon storage dynamics: Leveraging Google Earth Engine and InVEST model to inform conservation in hilly regions, 2023.
- (10) Fatemeh Dashtbozorgi, Amir Hedayatiaghmashhadi, Ameneh Dashtbozorgi, Cesar Augusto Ruiz-Agudelo, Christine Furst ,Giuseppe T. Cirella, Morteza Naderi, Ecosystem services valuation using InVEST modeling: Case from southern Iranian mangrove forests, 2023.
- (11) InVEST User Guides, Natural Capital Project, 2024.
- (12) Yunfei Wang, Aizhong Ye, Dingzhi Peng, Chiyuan Miao, Zhenghua Di, Spatiotemporal variations in water conservation function of the Tibetan Plateau under climate change based on InVEST model, 2022.
- (13) Temesgen Gashaw, Amare Bantider, Gete Zeleke, Tena Alamirew, Walle Jemberu, Abeyou W. Worqlul, Yihun T. Dile, Woldeamlak Bewket, Derege T. Meshesha, Anwar A. Adem, Solomon Addisu, Evaluating InVEST model for estimating soil loss and sediment export in data scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin: Implications for land managers, 2021.
- (14) Raquel Mendonça, Roger A. Müller, David Clow, Charles Verpoorter, Peter Raymond, Lars J. Tranvik & Sebastian Sobek, Organic carbon burial in global lakes and reservoirs, 2017.