

計畫編號：ARDSWC-114-116

**水土保持防砂構造物碳匯調查暨樹種儲碳
資料庫優化計畫**
**Carbon Sequestration Optimization for
Soil Conservation Structures and Tree
Species Database**
成果報告書(定稿)

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：114 年 02 月 21 日至 114 年 12 月 10 日

計畫主持人：何昊哲 副教授

協同主持人：沈湯龍 教授

協同主持人：趙國容 教授

顧問：李鴻源 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 114 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)

計畫編號：ARDSWC-114-116

**水土保持防砂構造物碳匯調查暨樹種儲碳
資料庫優化計畫**
**Carbon Sequestration Optimization for
Soil Conservation Structures and Tree
Species Database**
成果報告書(定稿)

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：114 年 02 月 21 日至 114 年 12 月 10 日

計畫主持人：何昊哲 副教授

協同主持人：沈湯龍 教授

協同主持人：趙國容 教授

顧問：李鴻源 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 114 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)

摘要

本計畫旨在建構水土保持與防砂工程的碳匯評估體系，整合「防砂構造物土壤碳匯研究」、「樹種儲碳資料庫改善」及「碳匯係數建置」三大主軸，以科學化方法推動減碳與增匯工作。研究首先針對防砂壩土壤碳匯進行監測與分析，建立完整的調查流程與量測方法，包含乾燥燃燒法、濕式氧化法等技術，驗證防砂壩穩定土砂、促進沉積與植生復育對碳封存的正面效益。在今年度期程中針對三個集水區五個防砂壩樣區進行採樣及實驗室分析，結果顯示土層深度並非影響有機碳與全氮分布的主要因素，可能因不同沉積事件造成混合效應，另外防砂壩透過促進沉積與固定土砂，能提升上游區域的土壤碳儲存潛能，其防災與固碳效益具雙重價值。

在綠碳部分，計畫擴充胸高樹徑小於 5 公分之樹種生物量參數，完善樹種儲碳資料庫，並於九份二山示範區進行造林監測與減碳效益評估，建立可操作之植生工程固碳公式，提供造林維護與增匯指導原則。另於「水土保持工程碳匯係數蒐集建置」中，團隊彙整國內外文獻與案例，完成涵蓋土壤、植生及農塘之碳匯係數資料庫初稿，並進行應用可行性、經濟效益及環境影響的先期研究，奠定日後碳管理制度化基礎。

此外，計畫召開「水土保持碳匯指引編纂專家座談會」，彙整學者建議，研擬增匯作業指引及 MRV（監測、報告與驗證）架構，推動碳匯評估標準化。本計畫成功建立水土保持工程增匯與減碳整合之技術體系，完善碳匯資料庫架構，並提出具政策應用潛力的操作指引，預期能支援農村水保署於氣候變遷與淨零排放政策下的永續治理目標，強化台灣水土保持工程於生態保育與碳中和進度中的關鍵角色。

關鍵字: 防砂構造物、土壤碳封存、水保植生生長率推估、水保碳
匯係數資料庫

Abstract

This project, executed by National Taiwan University, aims to establish a carbon sequestration assessment framework for soil and water conservation and sabo engineering works. It integrates three main components: Research on Soil Carbon Sequestration in Sabo Structures, Improvement of the Tree Species Carbon Storage Database, and Development of Carbon Sequestration Coefficients. Through scientific and quantitative methods, the project advances both carbon reduction and carbon enhancement initiatives.

The study first conducted monitoring and analysis of soil carbon sequestration in sabo dams, establishing standardized survey and measurement procedures that include dry combustion and wet oxidation techniques. These analyses verified the positive effects of sabo dams on carbon sequestration through sediment stabilization, soil accumulation, and vegetation restoration. Field results demonstrated that the improvement project at the Jialuxi Sabo Dam could achieve an annual carbon fixation of up to 7,134 tons of CO₂, confirming the contribution of engineering measures to carbon sink enhancement.

For green carbon, the project expanded biomass parameters for tree species with a diameter at breast height (DBH) below 5 cm, thereby improving the existing tree species carbon storage database. In the Jiufen Ershan demonstration area, afforestation monitoring and carbon reduction benefit assessments were carried out to establish a practical formula for vegetation-based carbon sequestration, providing operational guidance for afforestation maintenance and enhancement. In the Carbon Sequestration Coefficient Compilation for Soil and Water Conservation Engineering component, the team compiled domestic and international literature and

case studies to complete a preliminary database covering soil, vegetation, and pond (blue carbon) sequestration coefficients. Feasibility, cost-effectiveness, and environmental impact analyses were also conducted to lay the groundwork for future institutionalized carbon management.

Furthermore, a Soil and Water Conservation Carbon Sequestration Guidelines Expert Workshop was convened to consolidate academic recommendations and develop operational guidelines and an MRV (Monitoring, Reporting, and Verification) framework, promoting standardization of carbon sequestration evaluation. Overall, the project successfully established an integrated technical system for carbon enhancement and reduction in soil and water conservation engineering, improved the structure of the carbon sequestration database, and proposed practical guidelines with strong policy applicability. These outcomes are expected to support the Soil and Water Conservation Agency's sustainable governance goals under climate change adaptation and net-zero emission policies, strengthening Taiwan's role in ecological conservation and carbon neutrality.

Keywords: *sabo structures, carbon sequestration coefficient, soil carbon storage, tree species carbon storage database, soil and water conservation engineering*

長摘要

一、前言

本計畫目的在於建立水土保持工程碳匯量化之基礎資料與作業體系，以支援農業部農村發展及水土保持署推動之「低碳水保工程」與「淨零排放」政策。過去，國內對於防砂構造物與造林碳匯潛能之研究多以定性分析為主，缺乏具可操作性的量化評估方法與係數資料庫，致使工程碳匯管理仍處起步階段。為此，本計畫聚焦於四大工項：

- (一) 防砂構造物土壤碳匯研究資料擴充；
- (二) 樹種儲碳資料庫改善及造林減碳效果評估；
- (三) 水土保持工程碳匯係數蒐集建置；
- (四) 水土保持碳匯指引編纂專家座談會議。

整體計畫目標為：建立防砂構造物土壤碳匯之量測與 MRV 系統，完善樹種儲碳資料庫，建立跨構造物與生態系統之碳匯係數資料庫，並透過專家會議凝聚技術共識與指引架構，最終形成水土保持工程碳匯管理制度化之基礎框架。

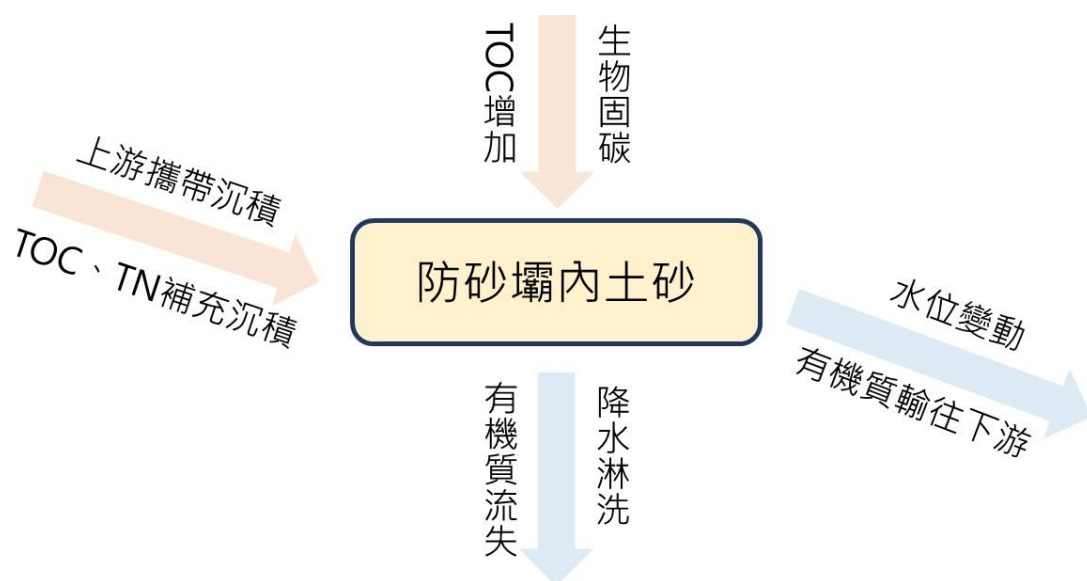
二、研究方法與材料

(一) 防砂構造物土壤碳匯研究資料擴充計畫

防砂壩在全球土壤碳循環中扮演重要的「碳匯工程」角色，其效益主要體現在攔截侵蝕物質、促進有機碳沉積、減緩碳釋放與穩定碳儲存等面向。研究顯示，土壤有機碳（SOC）是地球表層最大的活躍碳庫，而防砂壩正是將侵蝕碳「留在陸地」的關鍵機制。防砂壩透過

攔截集水區上游輸送的含碳沉積物，將原本可能流失或氧化的有機碳封存於壩後沉積楔中，形成穩定的非活體碳庫。

實證研究支持防砂壩的顯著固碳效益。例如，中國黃土高原逾五萬座防砂壩於 1970 至 2020 年間封存約 $21.6 \pm 9.9 \text{ Tg C}$ ，碳封存效率達 80%，其年平均碳封存速率為全球湖泊的十倍 (Fang et al., 2023)。其他地區如伊朗、衣索比亞及西班牙等亦證實防砂壩可有效固定有機碳與氮磷養分，減少下游水體污染，並提升土壤肥力 (Zahabi et al., 2022; Addisu et al., 2019; Mongil-Manso et al., 2019)。此外，防砂壩沉積區的碳穩定性受壩體年限、地形與土地利用影響，顯示其碳匯效益具時空變異性 (Liu et al., 2017)。



摘圖-1 防砂構造物增加土壤碳匯之物理機制

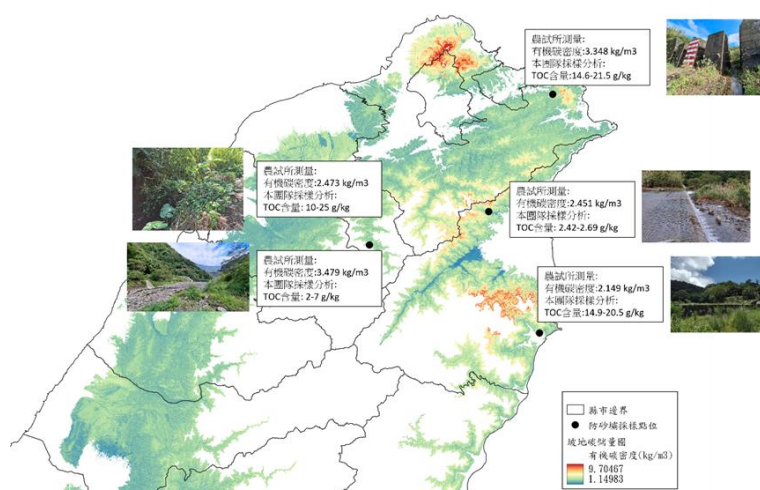
故本計畫主要針對防砂壩等水土保持構造物之碳匯功能進行資料擴充與量化分析，選定加鹿溪、石門水庫、蘭陽溪及大礁溪集水區等具代表性的地區，本計畫再另外補充現地防砂壩土壤採樣點位，涵蓋不同壩型（重力式、堆石式、鋼構式）與地質條件，評估防砂壩對於土砂穩固及增加土壤黃碳碳匯之效益。研究採用剖面採樣法，於壩前沉積區設置多條斷面，每條斷面分層採樣 0–10 cm 及 10–30 cm 不

同深度之土樣，並於壩後及未受擾動對照區同步採樣。樣品經自然風乾後過篩至 2 mm，使用 Elementar Vario EL III 進行乾式燃燒法測定全碳與全氮含量，另以 Walkley–Black 濕式氧化法交叉驗證有機碳含量，以確保分析準確性，並提出以下土壤碳匯評估方式來量化計算防砂壩在土砂事件前後對於土壤碳匯儲存之效益。

$$SOC_{area} = TOC \times BD \times \Delta SV \times SR$$

其中 SR 依壩型設定 0.02–0.05 間變化。此公式搭配 GIS 疊圖可空間化顯示集水區尺度的碳分佈。

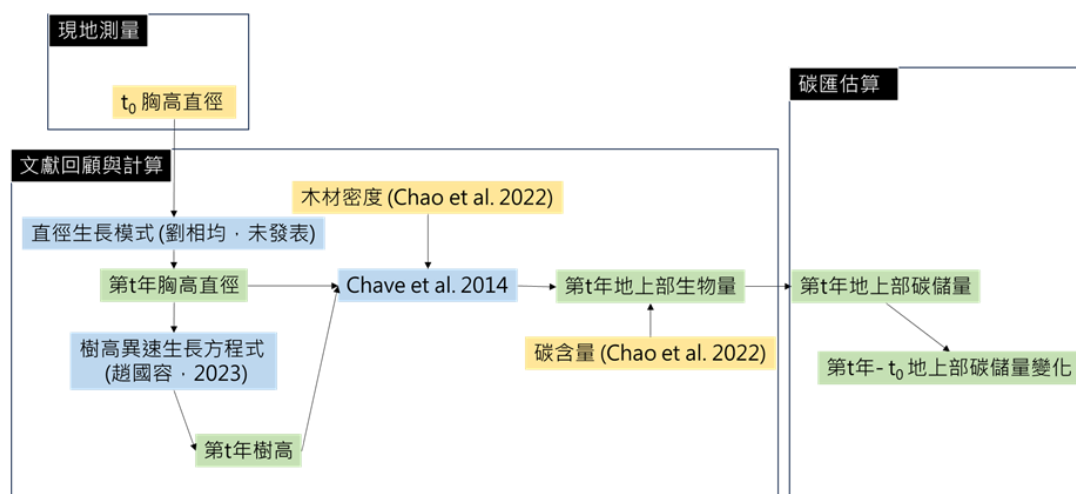
另歸納出影響防砂壩土壤碳匯效益的主要參數，並針對台灣北部與東部五個集水區進行採樣分析。若欲將方法推廣至全台，需長期大範圍監測，成本高昂。為提升效率，本計畫整合農業試驗所遙測推估之土壤有機碳密度（SOC_D, kg/m³）與本研究現地採樣分析所得之總有機碳含量（TOC, g/kg）。SOC_D 具空間覆蓋廣的優勢，但精度受地表特性與模型限制；TOC 則具高準確度，可作為校正依據。兩者比較需經由體積密度（bulk density）轉換以確保單位一致性。



摘圖-2 本計畫實際採樣點位與農試所全台坡地有機碳含量分析比較

(二) 樹種儲碳資料庫優化及造林減碳效果評估

針對現有水保用樹種碳儲量資料不足之問題，本工項擴充了樹徑小於 5 公分之樹種碳參數，修正既有資料庫的高估偏差。研究樣區包含九份二山示範區，調查對象涵蓋水土保持樹種喬木（相思樹、樟樹、光臘樹、楓香）、灌木（野牡丹、黃荊）及部分草本（鹹豐草、芒草）。在實測部分，透過胸高直徑（DBH）、樹高與冠幅三項指標推估單株生物量。樣本樹採全株乾重法測得乾物質後，以碳含量分析儀測得平均含碳率以建立回歸式。



摘圖- 3 現地測量與分析流程



摘圖- 4 分析現場照片(2025 年 7 月)

另外針對水土保持造林專案的基線碳儲量進行現地測量。調查區域包含位於九份二山石門景觀台旁的兩處區域：一為停車場範圍另一

為鄰近之低窪裸露地，面積為 0.3147 公頃，兩者之間由明顯斜坡區隔。於 2025 年 4 月間，研究團隊分別對區域 A 與區域 B 中所有胸高直徑大於 1 公分的喬木進行全面調查，量測項目包括胸高處（1.3 公尺）直徑（DBH）、樹高（H）及樹種鑑定等資料。為估算每株喬木之生物量與碳儲存量，研究採用 Chave et al. (2014) 所提出的泛熱帶通用生物量方程式，進行 AGB（地上部生物量）之計算，進而估算區域內既有碳匯基線值(摘圖-5)，作為後續造林成效與增匯潛力之評估依據。



摘圖-5 測量專案場域(本計畫製作)

(三) 水土保持工程碳匯係數蒐集建置

本項工作整合國內外水土保持構造物碳匯係數資料，建立一套具代表性的參數資料庫。蒐集對象包含水土保持範疇中不同自然碳匯，包括防砂壩、植生護坡及農塘等分類，同時增匯係數庫做為農村水保署後續減碳增匯之依據以及制訂增匯參考指引之基礎。將建立一套自上而下的碳匯係數蒐集與方法學架構，步驟如下：

1. 工程類型與碳源範疇劃分

先依水土保持常見工程分為防砂構造物、造林／植生坡面、農塘與滯洪溼地等類型，對應三大自然碳庫：森林與植生綠碳、壩後與坡地沉積黃碳、水體與濕地青碳，作為後續係數建置的分類基礎。

2. 量測與估算技術選用

各碳源採用與其機制相符的量測方法：

土壤／壩後沉積：分層直接取樣＋TOC、BD 量測，並導入深度（D）、面積（A）與過篩比例（SR）的修正，形成可套用之 SOC 公式： $SOC = TOC \times BD \times D \times A \times SR$ ，並進一步推導有無壩情境下之 ΔSOC 。

- (1) 植生綠碳：採胸徑（DBH）、樹高（H）、木材密度、含碳率與生長率等參數，套用異速方程與生物量擴展係數（BEF），區分喬木、灌木與草本，形成可表單化的估算模組。
- (2) 農塘／青碳：依水體—沉積—植生聯動模式，區分「碳儲存量」與「碳通量」，並在設備受限下以簡化係數法推估浮游藻、水生植物與沉積碳。

3. 係數資料庫建構

量測成果統一轉為面積或體積基礎之碳匯係數（ tCO_2e/ha 、 tCO_2e/m^3 ），並依「壩型—集水區特性—砂量—TOC」建構多維矩陣表，搭配農村水保署既有工程與 GIS 圖資，預留後續現地採樣自動校正機制，形成可更新的全國性水保碳匯係數庫。

4. 導入 MRV 與國際規範精神

參照 FAO 再固碳、IPCC、國內水利／水保減碳指引及 CDM 小規模濕地方法，將量測（M）、報告（R）、查驗（V）嵌入

碳匯估算流程，明訂專案邊界、採樣深度、資料留存、不確定度來源與第三方查證重點，確保後續可被政策與碳市場採認。

5. 情境化與在地化修正

考量台灣坡地粒徑不均、壩後沉積異質、農塘面積小且分散、造林多為混合樹種，故在公式中增設折減係數與區域參數，並允許以工程量、土地面積或生態基線三種途徑進行估算，以降低實務端門檻。

(四) 水土保持碳匯指引編纂專家座談會議

為確立研究成果的政策落實性，計畫團隊於 2024 年 8 月與 10 月召開兩場專家會議，邀集水保、林業、生態工程、碳管理與環境政策專家 18 人，採焦點團體討論的方式進行。

會議聚焦「工程增匯作業架構」與「碳匯係數應用標準化」，針對「MRV 制度化推動」與「技術可行性」討論。討論結果指出，未來水保工程碳管理應分為設計、施工與營運三階段：設計階段須進行碳預估；施工階段導入低碳工法；營運階段建立長期監測機制。

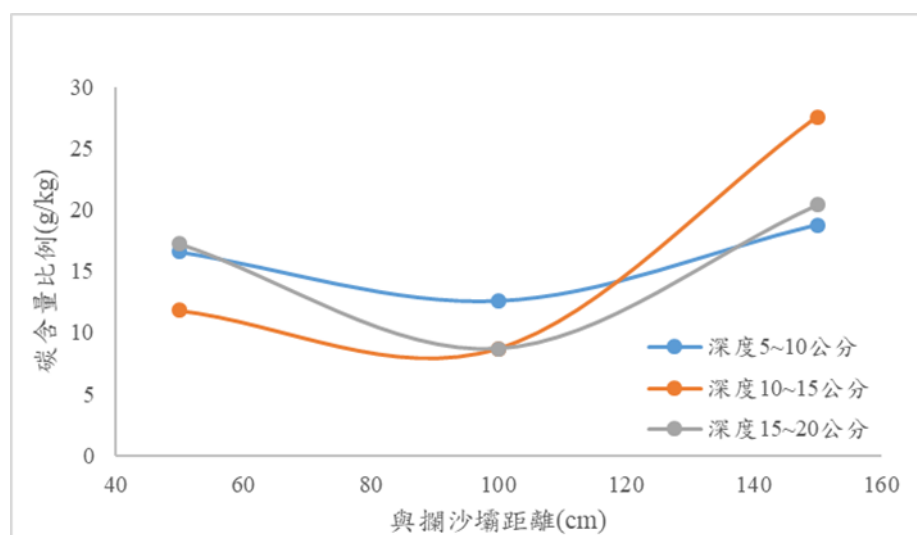
會議整合後，形成《水土保持碳匯指引草案》，內含碳盤查流程、評估範圍、資料來源與查證原則，並規劃建立全國性資料上傳平台與第三方查驗制度，以確保數據一致性與可追溯性。

三、研究結果與討論

(一) 防砂構造物土壤碳匯研究資料擴充

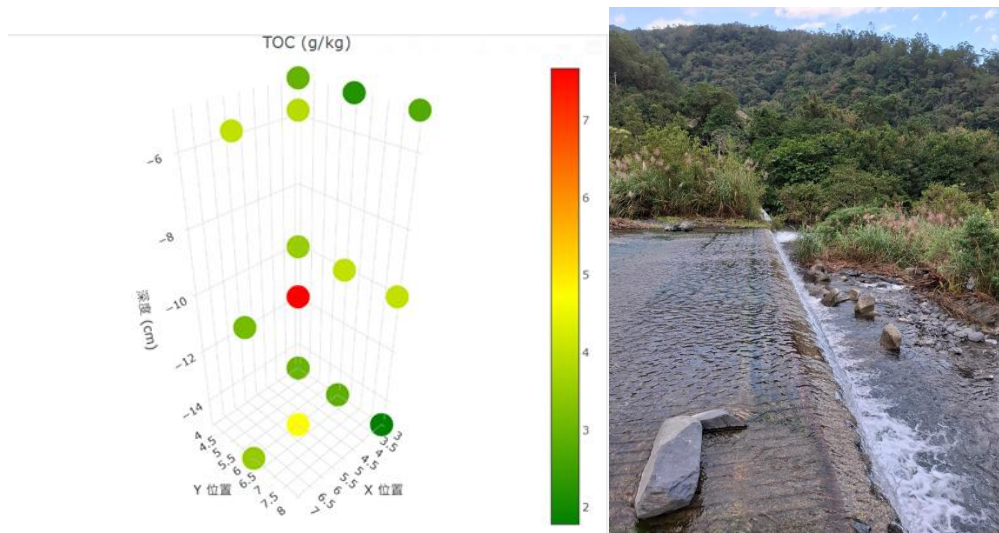
根據三個集水區五個採樣點位實地分析結果顯示，防砂構造物能顯著提升下游沉積區的有機碳含量。蘇樂溪壩壩前 TOC 平均值達 3.6%，較對照區提高 6%，C/N 比由 10.9 增至 13.3，顯示碳穩定化趨

勢明確。沉積碳量換算後平均每年可固定約 1,200–2,500 tCO₂e。另一方面，在碳氮比(C/N)的數據表現上，整體數據大致呈現介於 12:1 至 15:1 的區間範圍內，此結果顯示土壤中碳與氮之間存在高度的關聯性，同時亦間接驗證了防砂壩工程對於穩固土壤有機質應具有一定程度的正面助益。



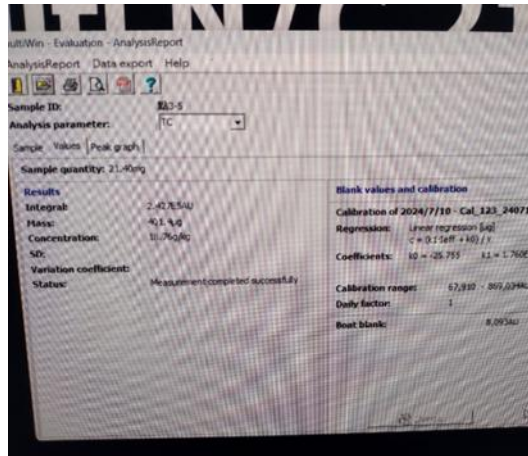
摘圖- 6 點位距離攔沙壩與各物理量之關係圖：碳含量比例

進一步比較不同壩型發現，堆石式壩在滲流環境下促進植生繁茂，其綠碳與黃碳交互效益最高；鋼構式壩因基礎裸露、覆植率低，碳匯貢獻相對有限。沉積厚度與 TOC 呈正相關 ($R^2=0.81$)，而土壤粒徑愈細、有機質累積速率愈高。



摘圖- 7 1231 採樣位置與檢測數據(a) TOC (b) 大礁溪防砂壩

除提出評估量化公式之外，研究提出「碳匯折減係數」概念，用以修正壩體控制外之自然沉積碳量，避免高估。並建議後續整合 DEM 與 Raster 資料庫，建構全臺防砂壩碳匯空間化估算模型。透過建立具可操作性的防砂構造物土壤碳匯 MRV (Monitoring, Reporting, Verification) 系統，以確保碳匯監測與評估具一致性、可追溯性與決策應用價值。首先，在監測 (Monitoring) 層面，本研究制訂標準化作業流程，以確保土壤總體密度 (BD) 及總有機碳 (TOC) 數據之準確性。其次，在分析與品質保證 (QA/QC) 層面，實驗室端統一採用高溫燃燒法進行 TOC 測定，透過標準品校正、重複量測及方法交叉比對，確保量測結果之重現性與一致性。



摘圖-8 乾燥燃燒法操作流程作業(資料來源：本計畫製作)

所得 TOC (g/kg) 結合現地 BD (g/cm^3)，轉換為體積碳密度 SOCD(kg/m^3)，並據此校正農業試驗所遙測之全台土壤碳密度圖資，以建構「小尺度高精度 × 大尺度高覆蓋」的雙基準模型。最後，在報告與查驗 (Reporting & Verification) 層面，MRV 系統納入採樣設計圖、儀器校正曲線、現地照片與空間座標，並以重採樣與不確定度分析確保資料可驗證性。綜上，該 MRV 系統實現防砂壩碳匯量化之制度化與科學化，使其具備「可量測、可比較、可查證」之操作基礎，為後續全國性土壤碳匯監測與管理提供一致化框架。

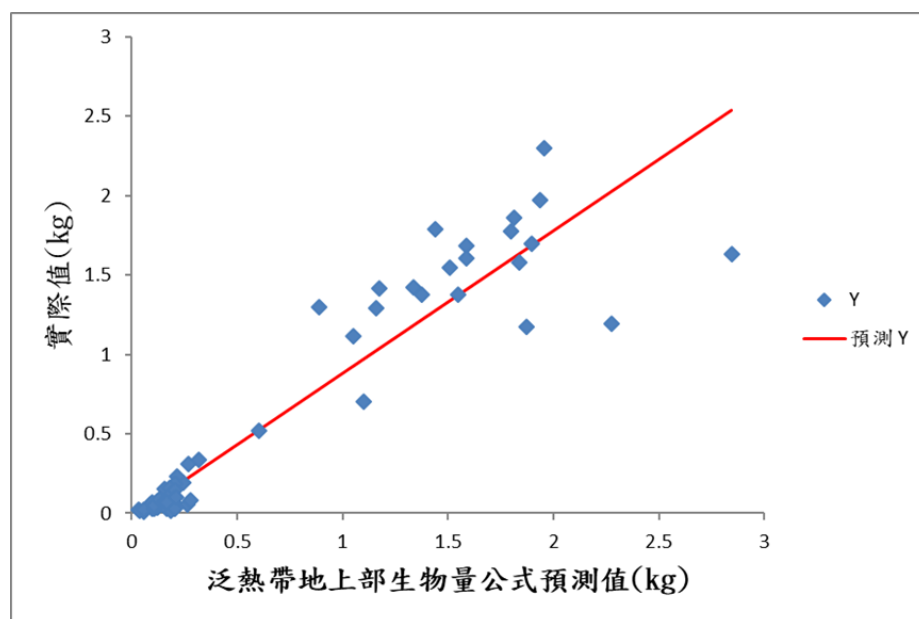
(二) 樹種儲碳資料庫優化及造林減碳效果評估

水保植生監測結果顯示，根據前述之每木測量，目前共收穫 61 棵苗木，胸徑介於 0.3 公分到 4.1 公分之間，包含了樟樹 4 株、苦楝

26 株、光臘樹 10 株以及台灣欖、相思樹、水黃皮、黃連木、台灣肖楠、無患子、青剛櫟等各 3 株。使用線性回歸分析的結果發現 Chave et al. (2014) 泛熱帶地上部生物量公式對於台灣胸徑 5 公分以下的苗木之估算只有稍許高估。線性回歸分析的結果顯示 R^2 為 0.885，而 P 值 < 0.001 ，線性回歸係數為 0.898 (摘表- 1)。因此未來在植生工程中估算胸徑小於 5 公分苗木個體的地上部生物量時，可使用泛熱帶地上部生物量公式再乘以 0.898 校正，即可求得苗木地上部生物量之估算量。

摘表- 1 泛熱帶地上部生物量公式估計值與實際值線性回歸之結果

	係數	標準誤	t 統計	P 值
截距	-0.016	0.042	-0.383	0.703
Chave et al, 2014 公式估計值	0.898	0.042	21.310	< 0.001



摘圖- 9 泛熱帶地上部生物量公式估計值與實際值之線性回歸

另針對新植苗木共 129 棵進行複查，調查其生長量，結果可發現此批苗木半年內之胸徑平均增加了 0.6 公分，而樹高平均增長了 0.42 公尺。將兩次調查所紀錄之數值相減後得到半年之生長量，乘以二換

算為年絕對生長率，並依照物種取平均值，結果可觀察到茄苳在當地生長得較為快速，其次是樟樹，再來是台灣欒（摘表-2）。在總量上，換算區域 B 在單位時間單位面積的碳生長量約為 0.191 公噸/年・公頃，對應之二氧化碳當量為每年每公頃 0.699 公噸。

摘表-2 九份二山樣區苗木各物種之絕對生長率

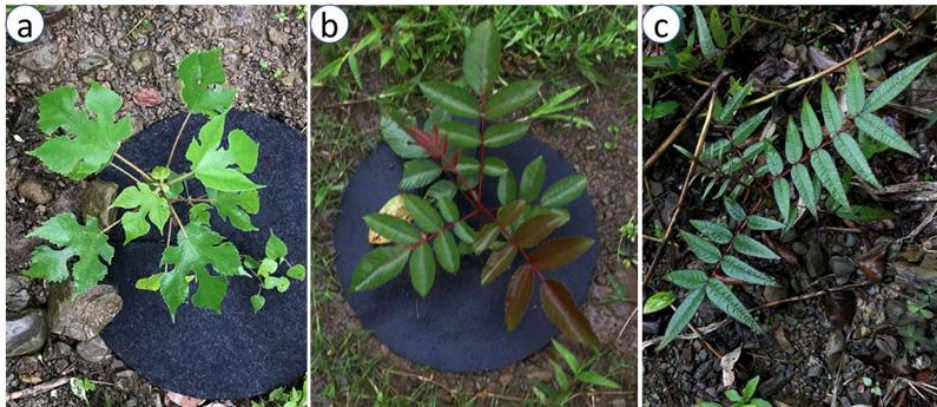
	年基徑生長率 (cm/yr)	年胸高直徑生長率 (cm/yr)	年樹高生長率 (m/yr)	年地上部生物量生長率 (kg/yr)
樟樹	1.325	1.396	0.606	1.011
台灣欒	0.819	0.540	0.402	0.411
茄苳	2.911	1.755	0.924	1.479

本計畫建立「樹木生長監測與森林經營指引」，以促進水土保持碳匯專案之永續性與成效。指引核心為「適地、適木、適人、適法、適時」，結合生態復育、社會參與與氣候調適三大面向，形成具生態、經濟與教育價值的永續植生模式。

在場址選擇與物種配置上，優先選擇具生長條件之裸露地或低窪地，以原生樹種為主（如珊瑚樹、鐵冬青、赤皮、山芙蓉等），輔以具教育與藥用價值的地方品種（如山鹽青、水冬瓜、臺灣香檬），以提升多重功能。植栽採「輔助天然更新」與「多目標植樹」並行，兼顧生物多樣性、景觀美感及氣候韌性，逐步以原生種取代外來種，並結合社區與學校參與，促進地方認同與環境教育。

在經營管理層面，植樹作業依氣候與雨季時序安排，搭配排水與防護設計以提高成活率。後續管理包括除草、施肥、病蟲害防治與間伐，以維持森林健康與結構穩定。依據 Society for Ecological Restoration (SER, 2019) 原則，本計畫建立復育指標（威脅、棲地、物種、結構、功能、交互作用），並納入權益關係人參與與跨領域知識整合，確保生態復育與社會效益並重。

在監測與碳匯評估部分，建立符合方法學的 MRV 架構，以胸高直徑（DBH）與樹高為主要生長指標，持續追蹤碳儲量變化，構建碳儲成長曲線與情境模擬模型。碳庫管理涵蓋地上部、枯木與減排三面向，透過促進天然更新、保留枯木棲地與降低經營過程碳排放，達成碳吸存與生物多樣性雙重目標。



摘圖- 10 現地原生樹苗(2025 年 6 月) (a) 構樹；(b) 羅氏鹽膚木；(c) 食茱萸

(三) 水土保持工程碳匯係數蒐集建置

水保工程具多源碳匯潛力且必須分範疇評估。實測與文獻比對結果顯示，水土保持工程不能用單一係數類推，綠碳、黃碳、青碳的生成機制與時空尺度差異大；防砂壩等沉積型工程的土壤碳往往是主要貢獻，壩後 SOC 可由「攔砂量 $\times$ 有機碳濃度 $\times$ 土壤密度」快速估算，且有壩情境與無壩情境之 Δ SOC 可直接量化工程的「增匯」效果，具良好政策解釋性。

此外，壩後黃碳可量化且需折減處理。以蘇樂壩案例為例，導入改良後 SOC 公式並加入實測 TOC、BD、沉積體積與過篩比例後，可得壩體實際多固存約 6 tC，推廣至集水區規模則可達數百 tCO₂e/年，證實防砂壩在水保體系下是一個常被低估的碳庫。但不同壩型、集水區與沉積控制程度差異甚大，若不納入折減係數，容易高估，故本研

究建議將「壩型—沉積受控度—事件後含碳變化」納入資料庫欄位，作為查驗時的敏感度來源，故本計畫透過不同集水區、防砂壩形式等因素製作係數庫表格，供後續防砂壩土壤碳評估。

摘要- 3 不同壩體評估碳匯參數參考

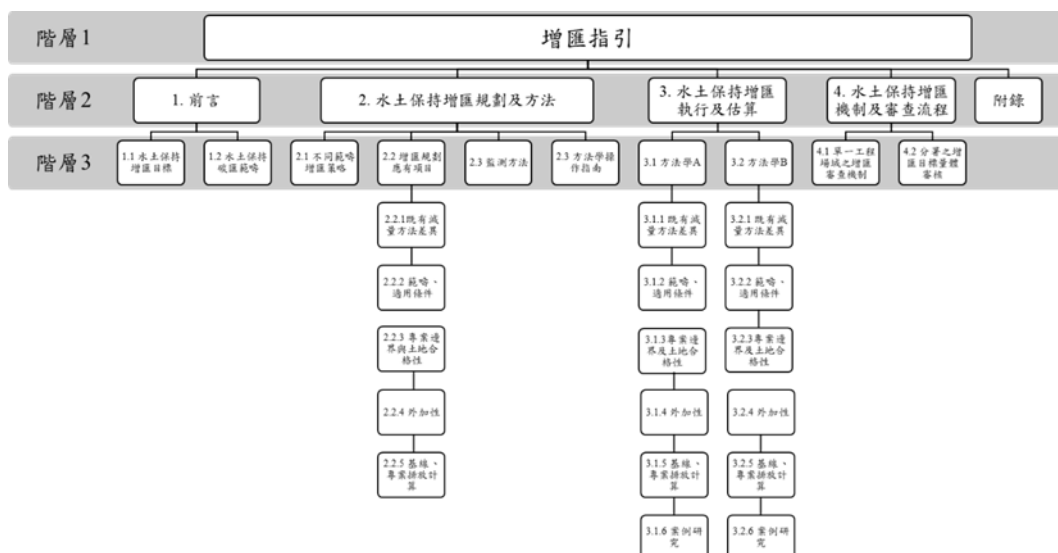
壩型	集水區特性	沉積砂量	TOC (g/kg)	TN (g/kg)	平均 C/N 比	沉積特徵與碳分布描述	預設 TOC 參數範圍 (未採樣時可套用)	預估儲碳潛勢
蘇樂壩	山區中小集水區、暴雨後穩定化系統	中	+6% (事件後提升)	-52% (事件後降低)	↑至 13.38 (約 +120%)	擾動後穩定化、碳氮比上升顯示固碳潛力	10-15 g/kg (事件後)	中等至高
JX01 封閉式壩	坡度大、集水面積小	小	2.31-2.97	0.366-0.538	約 6-8	沉積穩定、變異小、碳氮集中	2-3 g/kg	中等
NA01 封閉式壩 (草生平台)	坡緩、草生覆蓋良好	中	8.73-28.94	0.27-1.03	約 10-20	含碳高、垂直分層明顯、草生平台提供穩定碳源	10-25 g/kg	高
RF02 梳子壩 (開放式)	高坡度、沖蝕強、通水型	大	4.87-32.68	0.43-0.69	約 8-15	細粒外輸、表層碳高、變異大	5-20 g/kg	中等偏高
混凝土壩 (建議新增類別)	岩質基盤、沉積有限	小	預估 1-5	預估 0.2-0.5	約 5-8	表層薄層積碳為主、固碳潛力有限	1-5 g/kg	低
鋼構壩 (建議新增類別)	通水型、沉積鬆散	中	預估 3-10	預估 0.3-0.7	約 8-12	通氣良好但碳留存不穩	3-10 g/kg	中等
自然堆石壩 (建議新增類別)	自然坡地或崩塌區	中至大	預估 10-25	預估 0.4-1.0	約 10-15	細粒沉積集中於凹地、保水佳	10-25 g/kg	高

另外，植生綠碳可表單化、適合一線單位操作。以九份二山造林區試算顯示，只要現地能量到 DBH、樹高與棵數，再由資料庫帶入木材密度、生長率與含碳率，即可推估首年約 320 tCO₂e 的潛在碳儲量，20 年可提升至 450-500 tCO₂e，證明「公式拆解+Excel 模組」的作法能讓水保單位在沒有完整林業清查的情況下，仍可取得可審查的碳匯數字。

草種	栽植面積 m ²	覆蓋度 (無因次 I=100%)	高度 (cm)	地上部生物量 g/m ²	生長月數 (月)	根莖比	地下部生物量	總生物量	地上部碳含量	地下部碳含量	全株碳含量	儲碳量	地上部年生長率	地下部年生長率	全株年生長率	預估全生物量	預估地上部生物量	預估地下部生物量	預估地上部碳含量	預估地下部碳含量	預估碳含量 g C/m ²	預估固碳量 kg CO ₂
							地下部生物量 *根莖比	(g/m ²)				(g/m ²)	kg	(g/month m ²)		(g/month m ²)	(g/month m ²)	地上部生物量 *地上部年生長率	地下部生物量 *地下部年生長率	地上部+地下部 生物量		
滿地可糙草	192.5	0.7	30	101.72	240	0.535	54.42	156.14	40.3	12.8	33.95		20.1	10.9	15.35	3840.14	4824		2616	1944.07	334.85	2278.92
每年春-秋生長共8個月，計30年，共240個月																						
項目名稱	單位	數量	預估計入期(年)	初始DBH (cm)	初始H 樹高(m)	木材密度 g/cm ³	AGB 地上部生物量 (kg)	BEB 生物量擴展係數	R 根莖比	碳含量	全株儲碳量 (kg C)	年生長率 (tree/yr)	預估地上部生物量 (kg)	預估全株固碳量 (kg C)	預估總株碳量 (kg C)	固碳量 *株數	14181.614368205	14.18161437 tCO ₂ e				
灌木	株	2400	30	5	3	0.61	2.809	1		47.7	1.6615	0.0209	5.2246	3.0902	12573.08							
30年碳匯量預估																						

摘圖- 11 綠碳公式計算 Excel 過程

後續所建構之《水土保持增匯指引》已完成從理念到技術的全流程化設計，成功將「防砂壩黃碳、造林與植生綠碳、農塘青碳」三大碳匯範疇系統化，並轉譯為實務單位可直接操作的估算與查驗工具。指引不僅盤點國內既有水保工程型式，建立「工程類型—碳源類型—量測方法—係數資料庫—政策應用」的架構邏輯，也透過現地採樣、公式簡化與折減係數設計，將原本需長期觀測的自然碳匯過程，收斂為可套表、可計算、可被第三方驗證的量體。此外，指引已納入 MRV 精神，明訂採樣深度、資料留存、不確定度來源與外加性要求，得以與現行工程減碳指引及國際土壤再固碳作法接軌。整體成果顯示，本指引足以作為日後水土保持單位推動增匯專案、建立分署層級碳盤查、乃至申請自願減量案之技術依據，具備政策可用性與擴充性。



摘圖- 12 水土保持增匯指引初步擬定架構

(四) 水土保持碳匯指引編纂專家座談會議

透過專家學者的建議，確立本署於碳匯研究與應用推動的整體方向。會議邀集約十位與會者，包含四位學術專家及多位公部門與第三方查驗機構代表，共同針對增匯策略、碳匯係數建置與管理機制進行意見交流。

多位學者強調建立「綠碳、黃碳、青碳」三大範疇的統一碳匯係數資料庫，並以實測數據與標準化方法學為核心，確保各項估算具科學性與可追溯性。其次，專家指出需完善土壤碳 MRV 制度與外加性驗證機制，防止既有工程被誤算為新增碳匯，以維護資料真實性與核發公信力。第三，針對造林綠碳與農塘青碳專案，學者建議導入自然為本 (NbS) 策略，結合第三方查驗與地方治理模式，推動生態與減碳雙效益。最後，專家一致肯定本計畫對碳權分配與回饋機制的初步規劃，認為應持續媒合土地所有者與企業碳權需求，促進碳匯價值流通與地方參與。

專家學者的討論不僅形塑了水保領域增匯研究的長期藍圖，也為後續「水土保持增匯指引」之制度化提供了明確方向與技術支撐，使水保工程的碳管理工作邁向系統化與政策實踐化。

MRV 制度建議包括三層架構：

- (1) 監測層 — 定期採樣、資料上傳與品質審核；
- (2) 報告層 — 格式化報告模板與可追溯編碼；
- (3) 驗證層 — 第三方查驗機構審查及抽樣覆核。

四、結論

本計畫透過四大工項之整合，成功建立防砂構造物與造林碳匯評估之技術基礎，建構資料庫與指引草案，推動水保工程邁向碳中和實踐。結果證實防砂構造物在穩定沉積、促進植生及提升土壤有機碳含量方面具顯著效益；造林綠碳則可長期貢獻碳儲量；兩者結合形成具多層次的增匯系統。未來建議將 MRV 制度正式納入水保署管理體系，並結合工程碳盤查、第三方查證與碳交易機制，使水土保持工程成為我國淨零轉型的重要支柱。

Abstract

1. Introduction

The purpose of this project is to establish a quantitative framework and foundational database for carbon sequestration assessment in soil and water conservation engineering. This framework supports the “Low-Carbon Soil and Water Conservation Engineering” and “Net-Zero Emissions” policies promoted by the Soil and Water Conservation Bureau, Ministry of Agriculture.

In the past, domestic studies on the carbon sequestration potential of sabo structures and afforestation have primarily focused on qualitative analysis, lacking a systematic and operational quantitative methodology and coefficient database. As a result, carbon sink management for engineering projects in Taiwan remains at an early stage of development.

To address this issue, the project focuses on four main components:

- (1) Expansion of research data on soil carbon sequestration in sabo structures;
- (2) Improvement of the tree species carbon storage database and evaluation of afforestation carbon reduction benefits;
- (3) Establishment of a comprehensive database of carbon sequestration coefficients for soil and water conservation engineering; and
- (4) Organization of expert workshops for compiling guidelines on soil and water conservation carbon sequestration.

The overall goal of the project is to establish measurement and MRV (Monitoring, Reporting, and Verification) systems for soil carbon sequestration in sabo structures, refine the tree species carbon storage database, develop a cross-structural and ecosystem-based carbon coefficient database, and consolidate technical consensus through expert

consultation. Ultimately, these efforts aim to build the institutional foundation for standardized carbon sink management in soil and water conservation engineering.

2. Research Methods and Materials

(1) Expansion of the Sabo Structure Soil Carbon Sequestration Database

Sabo dams play a vital role as “carbon sink infrastructures” in the global soil carbon cycle. Their benefits are primarily reflected in four aspects: intercepting eroded materials, promoting organic carbon deposition, reducing carbon emissions, and stabilizing stored carbon. Studies have shown that soil organic carbon (SOC) is the largest active carbon pool in the Earth’s surface system, and sabo dams serve as a crucial mechanism that helps retain erosion-derived carbon “on land.” By trapping carbon-bearing sediments transported from upstream catchments, sabo dams sequester organic carbon that would otherwise be lost or oxidized, thereby forming a stable, non-living carbon reservoir within the sediment wedge behind the dam.

Empirical research has demonstrated the significant carbon sequestration benefits of sabo dams. For example, in China’s Loess Plateau, more than 50,000 sabo dams have sequestered approximately 21.6 ± 9.9 Tg C between 1970 and 2020, achieving a carbon retention efficiency of 80%, with an average annual carbon sequestration rate ten times higher than that of global lakes (Fang et al., 2023). Similar findings have been reported in Iran, Ethiopia, and Spain, where sabo dams effectively retain organic carbon and nutrients such as nitrogen and phosphorus, reduce downstream water pollution, and improve soil fertility (Zahabi et al., 2022; Addisu et al., 2019; Mongil-Manso et al., 2019). Moreover, the stability of

carbon in the sediment zones behind sabo dams is influenced by dam age, topography, and land use, indicating that the carbon sink effects exhibit spatiotemporal variability (Liu et al., 2017).

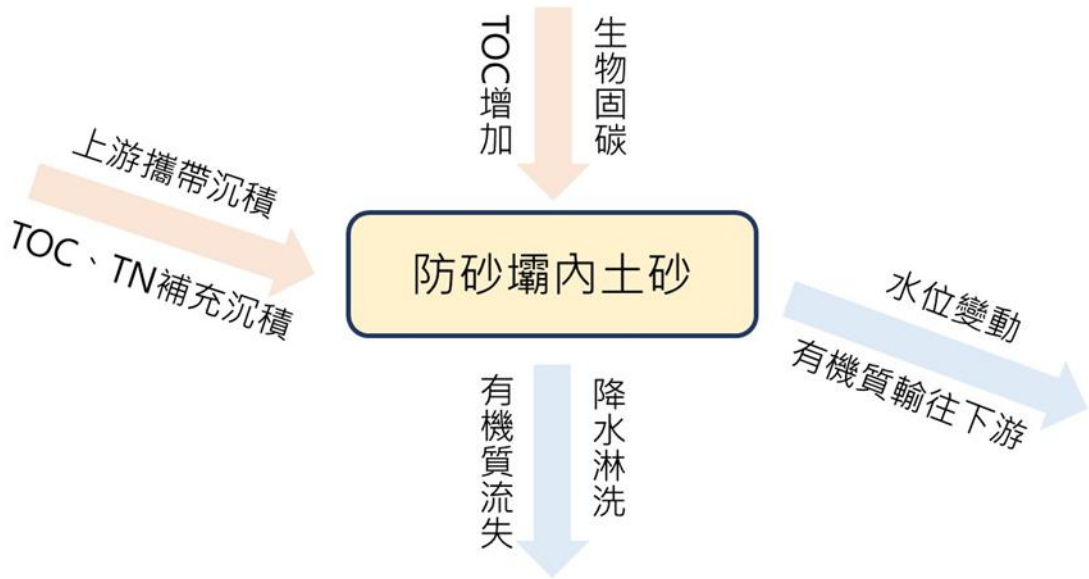


Figure. 1 Physical Mechanisms of Soil Carbon Sequestration Enhancement by Sabo Structures

Accordingly, this project focuses on expanding and quantifying the carbon sequestration functions of sabo dams and related soil and water conservation structures. Representative study areas were selected, including the Jialuxi, Shimen Reservoir, Lanyangxi, and Dajiaoxi catchments. Additional soil sampling sites were established at existing sabo dams, covering different dam types—gravity, rock-filled, and steel-structured—as well as diverse geological conditions. The study aims to evaluate the effectiveness of sabo dams in stabilizing sediments and enhancing soil yellow-carbon sequestration capacity.

Field sampling followed a profile-based design: multiple transects were established in the sediment accumulation zones upstream of each dam, with stratified samples collected at 0–10 cm and 10–30 cm depths. Parallel samples were also collected downstream and in undisturbed control sites. After natural air-drying, soil samples were sieved through a 2 mm mesh

and analyzed using an Elementar Vario EL III through the dry combustion method to determine total carbon and nitrogen contents. The Walkley–Black wet oxidation method was also applied for cross-validation of organic carbon concentration to ensure analytical accuracy.

A quantitative assessment method was developed to evaluate the pre- and post-sedimentation carbon sequestration effects of sabo dams using the following formula:

$$SOC_{area} = TOC \times BD \times \Delta SV \times SR$$

where SR (stabilization rate) varies between 0.02 and 0.05 depending on the dam type. This equation, when integrated with GIS overlay analysis, enables spatial visualization of carbon distribution at the catchment scale.

Furthermore, key parameters affecting sabo dam soil carbon sequestration efficiency were identified, and sampling analyses were conducted across five catchments in northern and eastern Taiwan. To extend the method nationwide, long-term and large-scale monitoring would be required, which entails high costs. To improve efficiency, this project integrates soil organic carbon density (SOCD, kg/m³) data estimated via remote sensing by the Taiwan Agricultural Research Institute with total organic carbon (TOC, g/kg) data obtained from this study's field sampling. SOCD provides broad spatial coverage but limited accuracy due to surface variability and model uncertainty, whereas TOC offers high analytical precision and serves as a calibration reference. To ensure unit consistency, comparative analyses between SOCD and TOC were performed through bulk density (BD) conversion.

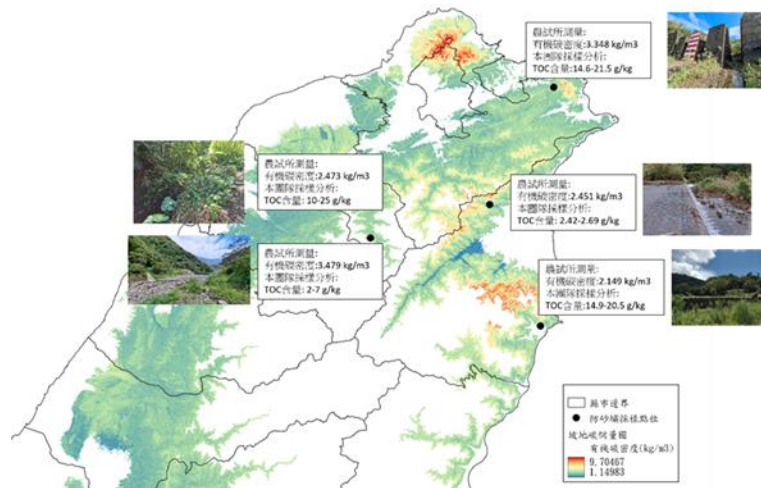


Figure. 2 Comparison Between the Project's Field Sampling Sites and the Taiwan Agricultural Research Institute's Nationwide Hillslope Soil Organic Carbon Analysis

(2) Optimization of the Tree Species Carbon Storage Database and Assessment of Afforestation Carbon Reduction Benefits

To address the insufficiency of existing carbon storage data for tree species used in soil and water conservation projects, this task expanded the database by adding carbon parameters for tree species with diameters at breast height (DBH) smaller than 5 cm, thereby correcting the overestimation bias present in previous datasets. The study area included the Jiufen Ershan Demonstration Site, where surveyed vegetation encompassed typical soil and water conservation species—arbor species such as *Acacia confusa*, *Cinnamomum camphora*, *Liquidambar formosana*, and *Machilus thunbergii*; shrubs such as *Melastoma candidum* and *Vitex negundo*; and herbaceous species such as *Bidens pilosa* and *Miscanthus floridulus*.

In the field measurements, biomass of individual trees was estimated using three key parameters: DBH, tree height, and crown width. Sample trees were subjected to whole-plant drying to determine dry matter, followed by analysis with a carbon content analyzer to obtain the average carbon concentration, which was then used to develop a regression

equation.

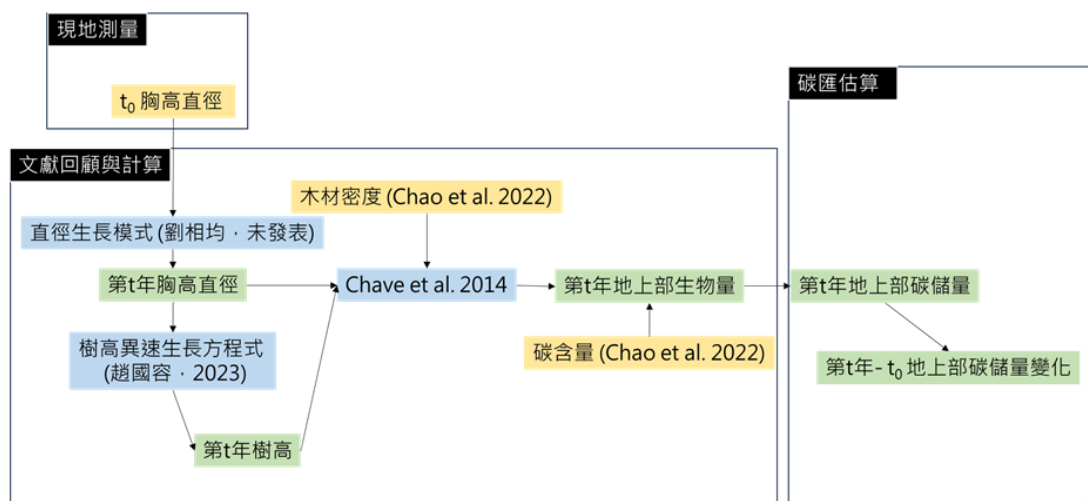


Figure. 3 On-site Measurement and Analysis Procedure

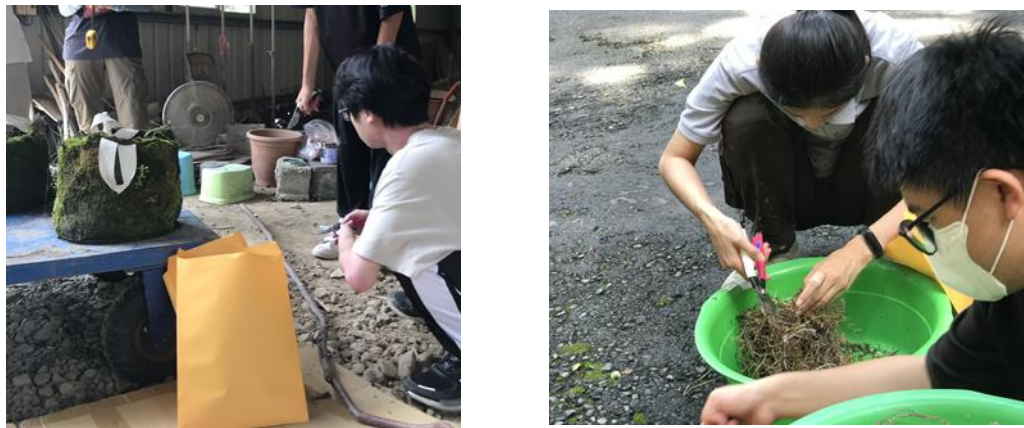


Figure. 4 Field Analysis Photos

Additionally, baseline carbon storage for soil and water conservation afforestation projects was determined through on-site measurement. The surveyed area included two adjacent regions near the Shimen Viewpoint of Jiufen Ershan—one being a parking lot and the other a low-lying, unvegetated area, with a total area of 0.3147 hectares, separated by a distinct slope. In April 2025, the research team conducted a comprehensive survey of all trees with DBH greater than 1 cm in both Area A and Area B. Measurement items included diameter at breast height (1.3 m), tree height (H), and species identification.

To estimate the biomass and carbon storage of each tree, the study adopted the pantropical allometric equation proposed by Chave et al. (2014) for calculating aboveground biomass (AGB). Using these data, the baseline carbon sink value of the area was assessed (Figure. 5), serving as a foundation for evaluating future afforestation performance and carbon enhancement potential.



Figure. 5 Survey Project Sites (Produced by This Project)

(3) Compilation of Carbon Sequestration Coefficients for Soil and Water Conservation Engineering

This task integrates both domestic and international datasets on carbon sequestration coefficients of soil and water conservation structures to establish a comprehensive and representative parameter database. The collected data encompass various natural carbon sinks within the domain of soil and water conservation, including sabo dams, vegetated slopes, and farm ponds. The resulting carbon enhancement coefficient database will serve as a key reference for the Soil and Water Conservation Agency's future carbon reduction and enhancement initiatives, and as a foundation for developing technical guidelines for carbon sequestration enhancement.

A top-down framework for coefficient collection and methodological

design was developed, consisting of the following steps:

1. Classification of Engineering Types and Carbon Source Categories

The project first categorized common soil and water conservation works into sabo structures, afforestation/vegetated slopes, and farm ponds or detention wetlands. These correspond respectively to the three major natural carbon pools:

Green carbon — forest and vegetation;

Yellow carbon — sediment accumulation behind dams and on hillslopes;

Blue carbon — water bodies and wetlands.

This classification forms the structural basis for subsequent coefficient development.

2. Selection of Measurement and Estimation Techniques

Different carbon sources were analyzed using measurement methods tailored to their mechanisms:

Soil / Sediment behind dams: Stratified sampling combined with TOC (Total Organic Carbon) and BD (Bulk Density) measurements. Corrections were made for depth (D), area (A), and sieving ratio (SR) to produce a standard SOC estimation formula:

$$SOC = TOC \times BD \times D \times A \times SR$$

The change in soil organic carbon (ΔSOC) between pre- and post-dam conditions was further derived.

Vegetation (Green carbon): Parameters including DBH (Diameter at Breast Height), tree height (H), wood density, carbon content ratio, and growth rate were applied in allometric equations and biomass expansion factors (BEF). Tree species were categorized as arbor, shrub, or herbaceous, and a spreadsheet-based estimation module was developed.

Farm ponds / Blue carbon: Based on a water–sediment–vegetation interaction model, carbon was divided into stored carbon and flux carbon. When instrumentation was limited, simplified coefficient methods were used to estimate contributions from phytoplankton, aquatic plants, and sediment carbon.

3. Construction of the Carbon Sequestration Coefficient Database

All measurements were standardized into area- or volume-based carbon coefficients ($\text{tCO}_2\text{e/ha}$ or $\text{tCO}_2\text{e/m}^3$). A multi-dimensional matrix was constructed according to dam type, catchment characteristics, sediment volume, and TOC content, and integrated with the Soil and Water Conservation Agency’s engineering and GIS datasets.

The framework also allows for automated field-sampling calibration, forming a dynamic, updatable national carbon sequestration coefficient database for soil and water conservation projects.

4. Integration of MRV Principles and International Standards

The methodology incorporates the Monitoring–Reporting–Verification (MRV) framework, referencing standards from FAO re-carbonization guidelines, IPCC, domestic hydraulic and soil conservation carbon reduction manuals, and CDM small-scale wetland methodologies.

The process defines project boundaries, sampling depths, data retention procedures, uncertainty sources, and third-party verification criteria to ensure policy and carbon market compatibility.

5. Contextual and Localized Adjustments

Considering Taiwan’s heterogeneous hill slope soils, variable dam sediment characteristics, small and dispersed farm ponds, and mixed-species afforestation, adjustment factors and regional

parameters were added to the formulas. The framework allows estimations based on engineering quantities, land area, or ecological baselines, thereby reducing practical implementation barriers while maintaining methodological consistency.

(4) Expert Workshops on the Compilation of Soil and Water Conservation Carbon Sequestration Guidelines

To ensure the policy applicability of the research outcomes, the project team convened two expert meetings in August and October 2024, inviting 18 experts specializing in soil and water conservation, forestry, ecological engineering, carbon management, and environmental policy. The meetings were conducted in the form of focus group discussions (FGD) to gather interdisciplinary perspectives and build consensus.

The discussions centered on the “Operational Framework for Carbon Enhancement in Engineering Projects” and the “Standardization of Carbon Sequestration Coefficient Applications,” with additional emphasis on the institutionalization of the MRV (Monitoring, Reporting, and Verification) system and the technical feasibility of implementation.

The experts concluded that future carbon management for soil and water conservation engineering should be structured across three stages:

Design Stage — Conduct carbon estimation and establish baseline assessments;

Construction Stage — Incorporate low-carbon construction methods and material selection;

Operation Stage — Implement long-term monitoring and verification mechanisms to track carbon performance.

Following the integration of meeting results, a draft version of the “Soil and Water Conservation Carbon Sequestration Guidelines” was

developed. The draft includes the carbon inventory procedure, evaluation scope, data sources, and verification principles, while also proposing the establishment of a nationwide data submission platform and a third-party verification system to ensure data consistency, transparency, and traceability.

3. Results and Discussion

(1) Expansion of the Sabo Structure Soil Carbon Sequestration Database

Field analyses conducted at five sampling sites across three catchments revealed that sabo structures significantly enhance the organic carbon content in downstream sedimentation zones. At the Sule Creek dam, the average total organic carbon (TOC) concentration reached 3.6%, representing a 6% increase compared to the control area. The C/N ratio increased from 10.9 to 13.3, indicating a clear trend toward carbon stabilization. Based on carbon mass conversion, the annual carbon sequestration of the sediments was estimated to be approximately 1,200–2,500 tCO₂e. Furthermore, the overall C/N ratio ranged between 12:1 and 15:1, reflecting a strong correlation between soil carbon and nitrogen and indirectly verifying that sabo dam construction contributes positively to the stabilization of soil organic matter.

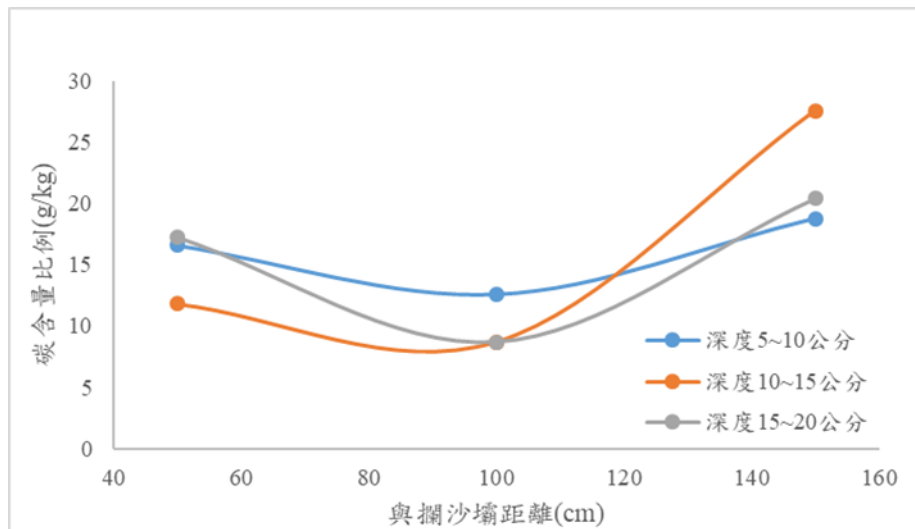


Figure. 6 Graph of the Relationship Between Sampling Distance from the Sabo Dam and Physical Parameters: (a) Carbon Content Ratio

A comparative analysis of different dam types showed that rock-filled dams, under conditions allowing seepage, promote vigorous vegetation growth and thus achieve the highest combined green and yellow carbon sequestration benefits. In contrast, steel-structured dams have lower carbon sequestration potential due to exposed foundations and sparse vegetation cover. A strong positive correlation ($R^2 = 0.81$) was observed between sediment thickness and TOC, and finer soil textures were found to correspond to higher organic matter accumulation rates.

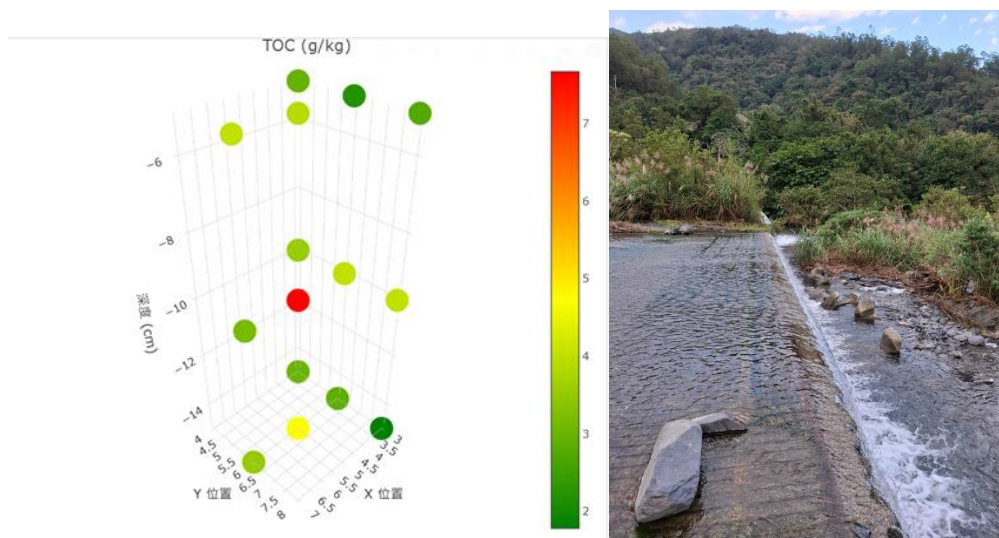


Figure. 7 1231 Sampling Locations and Analytical Data: (a) TOC (b)

Dajiaoxi Sabo Dam

In addition to proposing a quantitative evaluation formula, this study introduced the concept of a carbon reduction coefficient to adjust for natural sedimentary carbon not directly controlled by the dam, thereby preventing overestimation. The research also recommends integrating digital elevation models (DEM) and raster-based datasets to develop a nationwide spatial estimation model for sabo dam carbon sequestration.

To ensure the consistency, traceability, and policy relevance of carbon monitoring and assessment, the project established an operational MRV (Monitoring, Reporting, and Verification) system specifically for sabo structures:

Monitoring: A standardized workflow was developed to ensure the accuracy of bulk density (BD) and total organic carbon (TOC) measurements.

Quality Assurance (QA/QC): TOC analyses were conducted using the high-temperature combustion method, with calibration against certified standards, repeated measurements, and inter-method validation to ensure precision and reproducibility.

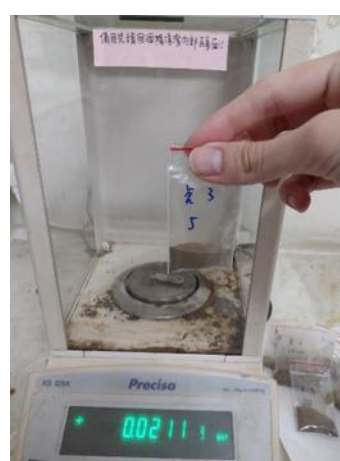
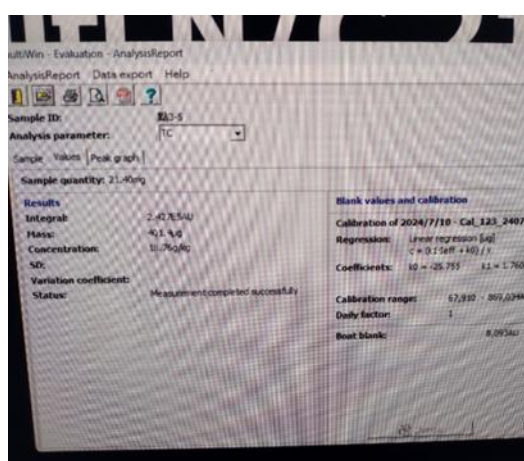




Figure. 8 Dry Combustion Method Operating Procedure (Source: Produced by This Project)

The obtained TOC (g/kg) values were combined with field-measured BD (g/cm^3) to calculate soil organic carbon density (SOCD, kg/m^3). These results were then used to calibrate the Taiwan Agricultural Research Institute's remote-sensing-based national soil carbon density map, forming a dual-benchmark framework that combines high-resolution accuracy at small scales with broad coverage at large scales.

Finally, under the Reporting & Verification components, the MRV system incorporated sampling design maps, instrument calibration curves, field photos, and geospatial coordinates. Resampling procedures and uncertainty analyses were applied to ensure data verifiability.

In conclusion, the MRV system established in this project institutionalizes and standardizes the quantification of sabo dam carbon sequestration, providing an operational foundation characterized by being measurable, comparable, and verifiable. This framework supports the future nationwide monitoring and management of soil carbon sinks, contributing to scientific governance and sustainable carbon accounting.

(2) Optimization of the Tree Species Carbon Storage Database and Afforestation Assessment

Monitoring results of vegetation in soil and water conservation areas showed that, based on the aforementioned individual tree measurements, a total of 61 saplings were recorded, with diameters at breast height (DBH) ranging from 0.3 cm to 4.1 cm. The sampled trees included 4 camphor trees (*Cinnamomum camphora*), 26 chinaberry trees (*Melia azedarach*), 10 white cheesewood trees (*Wrightia arborea*), and 3 individuals each of Taiwanese beech (*Fagus hayatae*), Formosan acacia (*Acacia confusa*), goldenrain tree (*Koelreuteria elegans*), pistache (*Pistacia chinensis*), Taiwan incense cedar (*Calocedrus formosana*), soapberry (*Sapindus mukorossi*), and Pasania (*Pasania harlandii*).

Using linear regression analysis, it was found that the pantropical aboveground biomass (AGB) equation proposed by Chave et al. (2014) slightly overestimated biomass for Taiwanese saplings with DBH less than 5 cm. The regression analysis yielded $R^2 = 0.885$, $P < 0.001$, and a regression coefficient of 0.898 (Table. 1). Therefore, in future vegetation engineering projects, when estimating aboveground biomass for trees with DBH below 5 cm, it is recommended to apply the Chave et al. (2014) equation multiplied by 0.898 as a correction factor to obtain more accurate AGB estimates.

Table. 1 Results of Linear Regression Between Estimated and Observed Values Using the Pantropical Aboveground Biomass Equation

	係數	標準誤	t 統計	P 值
截距	-0.016	0.042	-0.383	0.703
Chave et al, 2014 公式估計值	0.898	0.042	21.310	<0.001

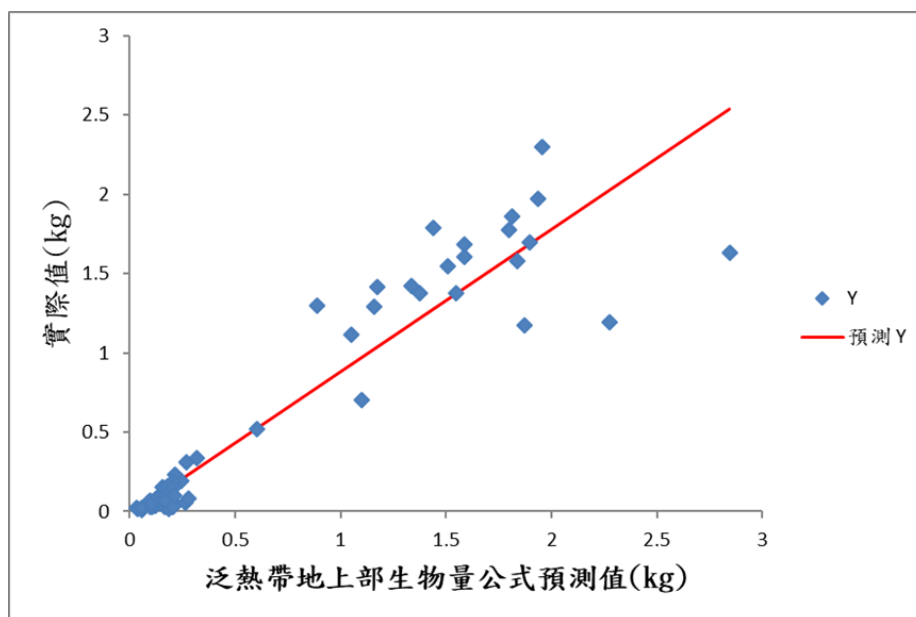


Figure. 9 Linear Regression Between Estimated and Observed Aboveground Biomass Values Using the Pantropical Equation

A total of 129 newly planted saplings were also re-measured to assess growth performance. Results indicated that within six months, the average DBH increased by 0.6 cm, and average tree height increased by 0.42 m. By subtracting the first and second survey values and multiplying by two, the annual absolute growth rate was calculated and averaged by species. The findings showed that *Bischofia javanica* (bishop wood) exhibited the fastest growth, followed by camphor trees, and then Taiwanese beech (Table. 2). Overall, the carbon accumulation rate in Area B was approximately 0.191 tons of carbon per hectare per year, equivalent to 0.699 tons of CO₂ per hectare per year.

Table. 2 Absolute Growth Rates of Different Tree Species in the Jiufen Ershan Sample Area

	年基徑生長率 (cm/yr)	年胸高直徑生長率 (cm/yr)	年樹高生長率 (m/yr)	年地上部生物量生長率 (kg/yr)
樟樹	1.325	1.396	0.606	1.011
台灣檫	0.819	0.540	0.402	0.411

茄 苳	2.911	1.755	0.924	1.479
-----	-------	-------	-------	-------

This project also developed the “Tree Growth Monitoring and Forest Management Guidelines” to promote the sustainability and effectiveness of carbon sink projects in soil and water conservation. The guidelines are based on the principles of “suitable site, suitable species, suitable people, suitable regulations, and suitable timing”, integrating ecological restoration, community participation, and climate adaptation into a sustainable vegetation model with ecological, economic, and educational value.

For site selection and species configuration, the project prioritizes bare or low-lying lands with favorable growth conditions, focusing on native species (e.g., *Mallotus japonicus*, *Ilex rotunda*, *Melastoma candidum*, *Hibiscus taiwanensis*) and supplemented by local species with educational or medicinal value (e.g., *Symplocos morrisonicola*, *Trichosanthes kirilowii*, *Citrus tachibana*). The planting strategy combines assisted natural regeneration with multi-purpose planting, ensuring biodiversity, landscape aesthetics, and climate resilience. Native species are gradually used to replace alien species, while community and school participation is encouraged to strengthen local identity and environmental education.

In terms of management, planting operations are scheduled according to seasonal rainfall patterns, with drainage and protection designs to improve survival rates. Follow-up management includes weeding, fertilization, pest control, and thinning to maintain forest health and structural stability. Following the principles of the Society for Ecological Restoration (SER, 2019), the project established restoration indicators covering threat, habitat, species, structure, function, and interaction dimensions, incorporating stakeholder participation and interdisciplinary

knowledge integration to ensure ecological and social benefits.

For monitoring and carbon sink assessment, an MRV framework was established, using DBH and tree height as key indicators to continuously track changes in carbon storage, construct carbon accumulation curves, and develop scenario-based simulation models. Carbon pool management encompasses aboveground biomass, deadwood, and emission reduction, achieving dual goals of carbon sequestration and biodiversity enhancement through natural regeneration, deadwood habitat conservation, and reduction of management-related emissions.

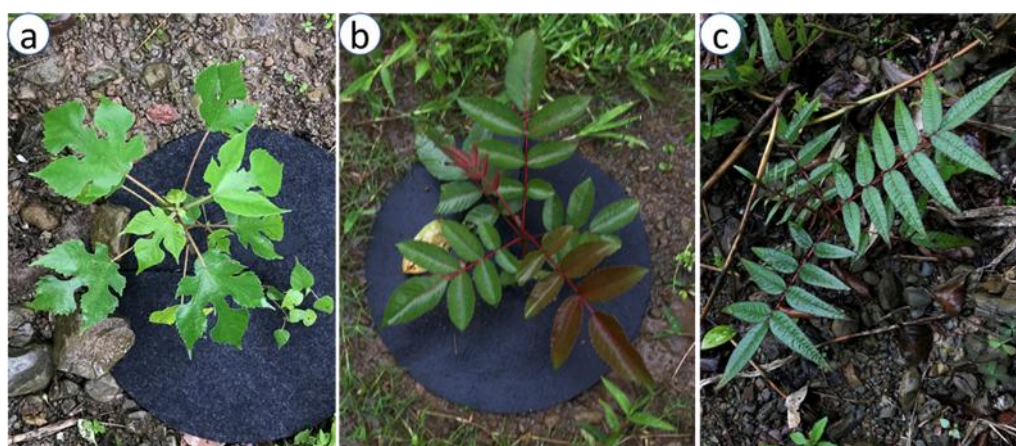


Figure. 10 Native Tree Seedlings in the Field: (a) *Broussonetia papyrifera* (Paper Mulberry) (b) *Rhus succedanea* (Wax Tree) (c) *Zanthoxylum ailanthoides* (Japanese Prickly Ash)

(3) Compilation of Carbon Sequestration Coefficients for Soil and Water Conservation Engineering

Soil and water conservation projects possess multi-source carbon sink potential that must be evaluated by category. Field observations and literature comparisons indicate that such projects cannot be represented by a single coefficient, as the mechanisms and spatiotemporal dynamics of green, yellow, and blue carbon differ significantly. In sediment-type projects such as sabo dams, soil carbon is typically the dominant contributor. The post-dam soil organic carbon (SOC) can be quickly

estimated using the formula:

Sediment Volume × Organic Carbon Concentration × Soil Bulk Density,

while the difference between with-dam and without-dam scenarios (ΔSOC) directly quantifies the project’s carbon enhancement effect, providing strong policy interpretability.

Moreover, yellow carbon behind dams is quantifiable but requires reduction adjustments. Taking the Sule Dam as an example, the modified SOC formula incorporating measured TOC, BD, sediment volume, and sieving ratio yielded an actual sequestration of about 6 tC per dam. When extrapolated to the catchment scale, this equates to hundreds of tCO₂e per year, confirming that sabo dams represent an often underestimated carbon pool within soil and water conservation systems.

However, substantial differences exist across dam types, catchments, and sediment control efficiencies. Without applying a reduction coefficient, results may be overestimated. Therefore, this study recommends including parameters such as “dam type – sediment control degree – post-event carbon variation” in the database as sensitivity indicators for verification. Consequently, this project compiled coefficient tables across various catchments and dam types to support subsequent sabo dam soil carbon assessments. Table 4-2. Reference Parameters for Carbon Sequestration Evaluation of Different Dam Types

Table. 3 Reference Parameters for Carbon Sequestration Evaluation of Different Dam Types								
壩型	集水區特性	沉積砂量	TOC (g/kg)	TN (g/kg)	平均 C/N 比	沉積特徵與碳分布描述	預設 TOC 參數範圍 (未採樣時可套用)	預估儲碳潛勢
蘇樂壩	山區中小集水區、暴雨後穩定化系統	中	+6% (事件後提升)	-52% (事件後降低)	↑至 13.38 (約 +120%)	擾動後穩定化、碳氮比上升顯示固碳潛力	10-15 g/kg (事件後)	中等至高

壩型	集水區特性	沉 積 砂 量	TOC (g/kg)	TN (g/kg)	平均 C/N 比	沉積特徵與碳 分布描述	預設 TOC 參數範圍 (未採樣時 可套用)	預估 儲碳 潛勢
JX01 封閉式壩	坡度大、集水面積小	小	2.31–2.97	0.366–0.538	約 6–8	沉積穩定、變異小、碳氮集中	2–3 g/kg	中等
NA01 封閉式壩 (草生平台)	坡緩、草生覆蓋良好	中	8.73–28.94	0.27–1.03	約 10–20	含碳高、垂直分層明顯、草生平台提供穩定碳源	10–25 g/kg	高
RF02 梳子壩 (開放式)	高坡度、沖蝕強、通水型	大	4.87–32.68	0.43–0.69	約 8–15	細粒外輸、表層碳高、變異大	5–20 g/kg	中等 偏高
混凝土壩 (建議新增類別)	岩質基盤、沉積有限	小	預估 1–5	預估 0.2–0.5	約 5–8	表層薄層積碳為主、固碳潛勢有限	1–5 g/kg	低
鋼構壩 (建議新增類別)	通水型、沉積鬆散	中	預估 3–10	預估 0.3–0.7	約 8–12	通氣良好但碳留存不穩	3–10 g/kg	中等
自然堆石壩 (建議新增類別)	自然坡地或崩塌區	中至大	預估 10–25	預估 0.4–1.0	約 10–15	細粒沉積集中於凹地、保水佳	10–25 g/kg	高

Additionally, green carbon from vegetation can be organized into tabular formats, making it practical for frontline implementation. A case simulation from the Jiufen Ershan afforestation site demonstrated that, once DBH, tree height, and tree count are recorded in the field and combined with database parameters (wood density, growth rate, carbon content), the potential first-year carbon stock can be estimated at approximately 320 tCO_{2e}, increasing to 450–500 tCO_{2e} over 20 years. This demonstrates that the “formula decomposition + Excel module” approach enables soil and water conservation units to generate verifiable carbon estimates even without full forestry inventories.

草種	栽植面積 m ²	覆蓋度 (無四次 I=100%)	高度 (cm)	地上 部生物量 g/m ²	生長 月數 (月)	根莖 比	地下 部生物量 (g/m ²)	總生物量 (g/m ²)	地上 部碳 含量 (%)	地下 部碳 含量 (%)	全株 碳含 量(%)	儲藏 量kg	地上 部年 生長 率 (g/month m ²)	地下 部年 生長 率 (g/month m ²)	全株年 生長 率 (g/month m ²)	預估 全生 物量 g/m ²	預估 地上 部生 物量	預估 地下 部生 物量	預估 地上 部碳 含量 g C/m ²	預估 地下 部碳 含量 g C/m ²	預估 總碳 含量 g C/m ²	預估固碳 量 kg CO ₂
滿地可種草	192.5	0.7	30	101.72	240	0.535	54.42	156.14	40.3	12.8	33.95		20.1	10.9	15.35	3840.14	4804	2616	1944.07	334.85	2278.92	1608.34
每年春-秋生長共8個月，計30年，共240個月																						
項目名稱	單位	數量	預估 計入 期(年)	初始 DBH (cm)	初始H 樹高 (m)	木材 密度 g/cm ³	AGB 地上 部生 物量 (kg)	BEP生 物量 係數	R根莖 比	碳含 量(%)	全株 儲藏 量(kg C)	年 生長 率 (tree/yr)	預估 地上 部生 物量 (kg)	預估 地下 部生 物量 (kg)	預估 全株 固碳 量(kg C)	預估 總 碳量 (kg C)	AGB* 係數	AGB* 係數	AGB* 係數	AGB* 係數	AGB* 係數	AGB* 係數
灌木	株	2400	30	5	3	0.61	2.809	1		47.7	1.6615	0.0209	5.2246	3.0902	12.573.08				14181.614368205			
30年碳匯量預估																						
																		14,181,614.37 tCO ₂ e				

Figure. 11 Excel Calculation Process for Green Carbon Formula

The subsequently developed “Soil and Water Conservation Carbon Enhancement Guidelines” have completed a comprehensive design process from conceptual framework to technical implementation. The guidelines successfully systematize the three major carbon sink domains:

- Yellow carbon (sabo dams),
- Green carbon (afforestation and vegetation), and
- Blue carbon (farm ponds).

These are translated into practical estimation and verification tools for operational agencies. The guidelines inventory existing soil and water conservation project types and establish a logical structure linking “engineering type – carbon source type – measurement method – coefficient database – policy application”.

Through field sampling, formula simplification, and reduction coefficient design, long-term natural carbon sequestration processes are streamlined into form-based, calculable, and third-party verifiable quantities.

Furthermore, the guidelines incorporate the MRV (Monitoring, Reporting, Verification) framework, specifying sampling depth, data retention, uncertainty sources, and additionality requirements, ensuring alignment with existing engineering carbon reduction standards and international soil re-carbonization practices.

Overall, the results indicate that these guidelines provide a policy-ready and scalable technical foundation for future soil and water conservation carbon enhancement projects, supporting branch-level carbon inventories and applications for voluntary emission reduction projects.

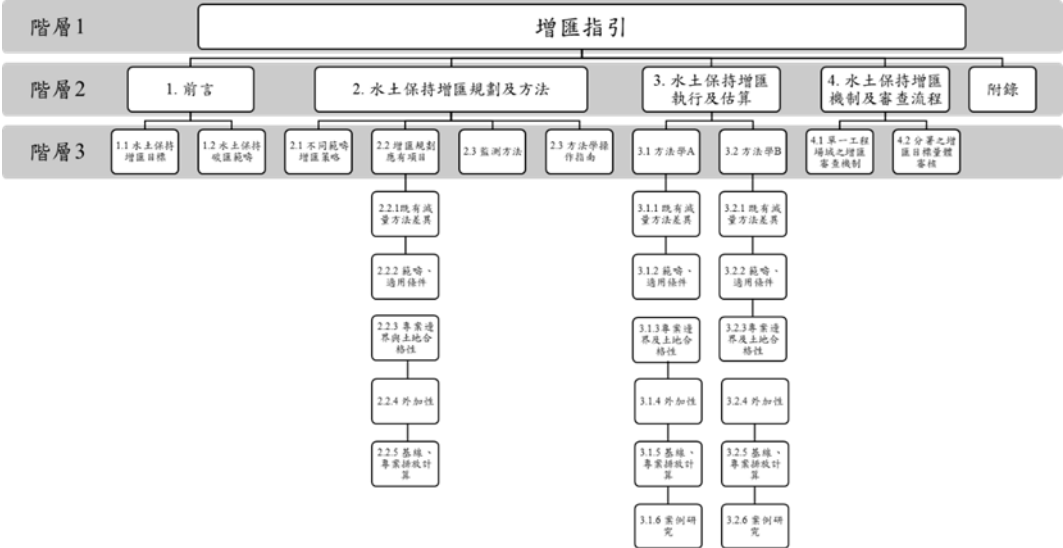


Figure. 12 Preliminary Framework of the Soil and Water Conservation Carbon Enhancement Guidelines

(4) Expert Workshops on the Compilation of Soil and Water Conservation Carbon Sequestration Guidelines

Through expert recommendations, the overall direction for promoting carbon sequestration research and applications within the agency was established. The meeting gathered around ten participants, including four academic experts and several representatives from government agencies and third-party verification organizations, to exchange views on carbon enhancement strategies, carbon coefficient development, and management mechanisms.

Several scholars emphasized the importance of establishing a unified carbon sequestration coefficient database encompassing the three major categories — green carbon, yellow carbon, and blue carbon — grounded in empirical data and standardized methodologies to ensure scientific

validity and traceability. Secondly, experts stressed the need to strengthen soil carbon MRV systems and additionality verification mechanisms, preventing existing engineering projects from being mistakenly counted as new carbon sinks, thereby maintaining data authenticity and the credibility of carbon credit issuance.

For afforestation (green carbon) and farm pond (blue carbon) projects, experts recommended incorporating Nature-based Solutions (NbS) strategies and integrating third-party verification with local governance models to achieve both ecological and carbon reduction co-benefits. Finally, experts endorsed the project's preliminary design for carbon credit allocation and benefit-sharing mechanisms, suggesting the continued matching of landowners with corporate carbon credit demands to promote carbon value circulation and local participation.

The experts' discussions not only shaped the long-term roadmap for carbon enhancement research in the soil and water conservation sector but also provided clear institutional and technical guidance for formalizing the "Soil and Water Conservation Carbon Enhancement Guidelines." This initiative advances the systematization and policy implementation of carbon management in soil and water conservation engineering.

The recommended MRV (Monitoring, Reporting, Verification) framework consists of three levels:

- Monitoring layer — Regular sampling, data uploading, and quality review.
- Reporting layer — Standardized report templates and traceable coding systems.
- Verification layer — Review and random re-evaluation by accredited third-party verification bodies.

4. Conclusion

Through the integration of four major work components, this project successfully established the technical foundation for evaluating carbon sequestration in sabo structures and afforestation projects, while developing both a database and a draft guideline to advance soil and water conservation engineering toward carbon neutrality.

Results confirmed that sabo structures provide significant benefits in stabilizing sediment, promoting vegetation growth, and enhancing soil organic carbon content. Meanwhile, afforestation (green carbon) contributes to long-term carbon storage. The combination of these two mechanisms forms a multi-layered carbon enhancement system.

For future development, it is recommended that the MRV (Monitoring, Reporting, Verification) framework be formally integrated into the Soil and Water Conservation Agency's management system, alongside engineering carbon inventories, third-party verification, and carbon trading mechanisms, thereby positioning soil and water conservation projects as a key pillar in Taiwan's net-zero transition.

目次

摘要	摘-I
Abstract	摘-III
長摘要	摘-V
Abstract	摘-XXII
目次	I
表次	IV
圖次	VI
第一章 緒論.....	1-1
第一節 計畫目的與需求	1-1
第二節 計畫工作項目	1-2
第三節 工作執行流程	1-4
第四節 預定工作進度	1-7
第五節 預期效益與關鍵課題	1-11
第六節 預定工作成果及查核內容	1-12
第二章 防砂構造物土壤碳匯研究資料擴充計畫	2-1
第一節 優化防砂構造物土壤碳匯調查方法	2-3
第二節 研擬防砂構造物增匯策略	2-51
第三節 建立防砂構造物土壤碳匯 MRV 系統	2-58
第三章 樹種儲碳資料庫優化及造林減碳效果評估	3-1
第一節 擴充樹種儲碳資料庫	3-2

第二節	定期監測並評估造林減碳效益	3-22
第四章	水土保持工程碳匯係數蒐集建置	4-1
第一節	碳匯係數蒐集與建置	4-1
第二節	建立碳匯係數資料庫架構	4-8
第三節	碳匯係數應用之先期研究	4-21
第四節	水土保持增匯指引架構	4-38
第五節	第三方查證機構角色與建議	4-45
第五章	水土保持碳匯指引編纂專家座談會議	5-1
第一節	會議內容	5-2
第二節	會議準備事項	5-4
第三節	會議紀錄與結論	5-6
第六章	結論與建議	6-1
第一節	結論	6-1
第二節	建議	6-3
參考文獻.....	參-1	
附錄一	來往公文紀錄	附錄 1-1
附錄二	114 年 4 月 23 日期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形. 附錄 2-1	
附錄三	114 年 8 月 20 日期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形. 附錄 3-1	
附錄四	114 年 11 月 26 日期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附錄 4-1	
附錄五	九份二山研究區域植生生物量基線測量結果	附錄 5-1
附錄六	九份二山區適合種植名錄	附錄 6-1
附錄七	專家學者座談會 會議企劃書	附錄 7-1

附錄八 九份二山溢洪道緩衝綠帶植林造林森林經營碳匯專案活動.附
錄 8-1

附錄九 農村水保署金質獎工程碳匯計算簡報 附錄 9-1

表次

表 1-1 本計畫預定進度	1-7
表 1-2 本計畫進度檢核表	1-9
表 2-1 92 至 113 年農村水保署防砂壩所署管轄分署統計	2-12
表 2-2 加鹿溪防砂壩改善工程 土砂布置區增匯手段.....	2-13
表 2-3 不同生態系統結合試驗整合而成之有機質列表	2-21
表 2-4 土壤有機碳密度與總有機碳含量差異與轉換	2-50
表 3-1 植物材料規格檢驗表(坡地植生工程暨植生調查手冊，本署， 2008).....	3-9
表 3-2 泛熱帶地上部生物量公式估計值與實際值線性回歸之結果..	3-17
表 3-3 九份二山樣區苗木各物種之絕對生長率	3-22
表 3-4 監測參數	3-32
表 3-5 抽樣方式	3-33
表 3-6 基線情境減量計算	3-37
表 3-7 專案情境減量計算	3-38
表 4-1 工程減碳與增匯執行目標比較表	4-14
表 4-2 不同範疇增匯策略及特性	4-15
表 4-3 不同壩體評估碳匯參數參考	4-25
表 4-4 不同水土保持樹種應用之實際生長率	4-27
表 4-5 木本植物碳匯計算表格	4-28
表 4-6 草本植物碳匯計算表格	4-29
表 4-7 木本植物碳匯計算範例	4-30
表 4-8 草本植物碳匯計算範例	4-30
表 4-9 九份二山造林區域植生碳匯估算結果	4-31

表 4- 10 平興村大埤滯洪農塘改善二期工程碳匯計算成果.....	4-34
表 5- 1 專家座談會預計邀請與會人員	5-3
表 5- 2 專家座談會議 議程時間	5-5

圖次

圖 1- 1 水土領域針對不同色碳匯實行之工作	1-2
圖 1- 2 計畫工作執行流程圖	1-6
圖 2- 1 防砂構造物增加土壤碳匯之物理機制	2-2
圖 2- 2 熱損失量簡便測定法操作過程	2-6
圖 2- 3 濕式氧化法滴定取樣過程	2-8
圖 2- 4 乾燥燃燒法示意圖	2-10
圖 2- 5 農村水保署近十年防砂壩分布圖	2-12
圖 2- 6 加鹿溪防砂壩改善工程 植生造林營造之綠碳及土壤碳	2-14
圖 2- 7 加鹿溪防砂壩改善工程 防砂壩因固土壤產生之碳匯	2-14
圖 2- 8 全球陸地碳儲存的變化量在活體與非活體碳庫間的分配情形， 顯示非活體碳庫的重要性	2-15
圖 2- 9 氣候變遷影響下土壤和防砂壩的人類活動對碳庫和防砂壩沉 積物礦化的影響的概念框架	2-17
圖 2- 10 防砂壩於集水區對於有機物之作用	2-18
圖 2- 11 防砂壩於河川集水區對於有機物之作用	2-19
圖 2- 12 衣索比亞進行土樣現場測量	2-20
圖 2- 13 點位距離攔沙壩與各物理量之關係圖:(a)碳含量比例; (b)氮含 量比例; (c)碳氮比	2-23
圖 2- 14 採樣深度與各物理量之關係圖:(a)碳含量比例;(b)氮含量比 例;(c)碳氮比	2-24
圖 2- 15 土砂採樣點位考量因素	2-25
圖 2- 16 實驗概念圖	2-26
圖 2- 17 蘇樂樣區壩體	2-27
圖 2- 18 蘇樂樣區採用的採樣點設計	2-28

圖 2- 19 1006 採樣位置與檢測數據 a TOC,b TN,c CN ratio	2-30
圖 2- 20 1231 採樣位置與檢測數據 a TOC,b TN,c CN ratio	2-32
圖 2- 21 研究區域範圍:大礁溪-01-A11-92 防砂壩 (JX01).....	2-33
圖 2- 22 大礁溪-01-A11-92 混凝土防砂壩	2-34
圖 2- 23 JX01 防砂壩 0~30cm 平均 TOC 濃度(g/kg).....	2-35
圖 2- 24 JX01 防砂壩 0~30cm 平均 TN 濃度(g/kg)	2-36
圖 2- 25 JX01 防砂壩 0~30cm 平均 TOC 儲存量(Mg).....	2-36
圖 2- 26 研究區域範圍: 南澳國小 D-01-A11-81 防砂壩 (NA01)...	2-38
圖 2- 27 南澳國小 D-01-A11-81 採樣點	2-38
圖 2- 28 南澳國小 D-01-A11-81 採樣區採用的採樣點設計	2-39
圖 2- 29 南澳國小 D-01-A11-81 採樣現場照片	2-39
圖 2- 30 NA01 防砂壩 0~30cm 平均 TOC 濃度(g/kg)	2-41
圖 2- 31 NA01 防砂壩 0~30cm 平均 TN 濃度(g/kg).....	2-41
圖 2- 32 NA01 防砂壩 0~30cm 平均 TOC 儲存量(Mg).....	2-42
圖 2- 33 研究區域範圍: 樹梅坪 D-21-A21-91 防砂壩 (RF02)	2-43
圖 2- 34 樹梅坪 D-21-A21-91 梳子壩本體	2-43
圖 2- 35 RF02 防砂壩 0~20cm 平均 TOC 濃度(g/kg)	2-45
圖 2- 36 RF02 防砂壩 0~20cm 平均 TN 濃度(g/kg).....	2-45
圖 2- 37 RF02 防砂壩 0~20cm 平均 TOC 儲存量(Mg).....	2-46
圖 2- 38 台灣土壤分布	2-47
圖 2- 39 本計畫實際採樣點位與農試所全台坡地有機碳含量分析比較	2-50
圖 2- 40 豆科綠肥作物在果園的栽培以及改良土壤利用(台南區農業 改良場).....	2-53
圖 2- 41 野溪整治緩衝綠帶及植生建議分布示意圖	2-54

圖 2-42 防砂壩穩定土壤提升碳匯說明圖(綠色為針對植生量的提升， 黃色為針對植生土壤的品質提升).....	2-58
圖 2-43 土壤採樣器材	2-60
圖 2-44 土壤採樣點位示意圖	2-61
圖 2-45 組裝過程	2-63
圖 2-46 採樣過程	2-63
圖 2-47 土壤採樣成品	2-63
圖 2-48 本計畫採用乾燥燃燒儀器照片	2-65
圖 2-49 乾燥燃燒法操作流程作業	2-67
圖 2-50 土壤樣品混合前處理	2-68
圖 2-51 土壤總有機碳分析步驟	2-70
圖 3-1 不同碳的存在方式 (a)碳循環 (b)碳匯儲存方式.....	3-2
圖 3-2 綠碳的碳匯計算流程	3-6
圖 3-3 喬灌木綠碳計算詳細流程	3-6
圖 3-4 草地地被與土壤地下層碳匯計算詳細流程	3-7
圖 3-5 現地測量與分析流程	3-15
圖 3-6 泛熱帶地上部生物量公式估計值與實際值之線性回歸.....	3-17
圖 3-7 測量現場照片	3-18
圖 3-8 測量專案場域	3-19
圖 3-9 分析現場照片	3-20
圖 3-10 九份二山植樹區域 2025 年 7 月現地狀況。(a)樣區內自然產 生的溝渠；(b)沖蝕造成部分樹苗損傷	3-21
圖 3-11 樣區內苗木生長不佳。(a)頂端枯萎的苦楝；(b)根部裸露的 樟樹	3-21
圖 3-12 測量專案場域植生分布圖(粉紅色點)	3-22

圖 3- 13 南投國姓九份二山淨零排放示範區場域.....	3-26
圖 3- 14 九份二山原生自然植物示範園告示說明牌.....	3-28
圖 3- 15 九份二山研究區域維護當地小苗.....	3-40
圖 3- 16 九份二山研究區域既有新植造林.....	3-40
圖 3- 17 現地原生樹苗 (a) 構樹；(b) 羅氏鹽膚木；(c) 食茱萸.....	3-44
圖 4- 1 喬灌木綠碳計算詳細流程.....	4-3
圖 4- 2 農業試驗所土壤資料供應查詢平台畫面.....	4-8
圖 4- 3 我國公共工程碳管理相關政策發展示意圖.....	4-9
圖 4- 4 我國水利工程及水土保持工程減碳參考指引.....	4-11
圖 4- 5 研究區域土砂碳匯量分析示意圖.....	4-23
圖 4- 6 綠碳公式計算 Excel 過程.....	4-31
圖 4- 7 平興村大埤滯洪農塘改善二期工程 各色碳匯分布.....	4-35
圖 4- 8 水土保持增匯指引初步擬定架構.....	4-38
圖 5- 1 專家與地方說明會預計討論議題.....	5-1
圖 5- 2 台大水工所 204 會議室.....	5-4

第一章 緒論

第一節 計畫目的與需求

此計畫的主要目的之一是針對樹種儲碳資料庫進行優化，進一步提升水土保持及防砂工程中的碳匯管理能力，計畫中將擴充胸高樹徑小於或等於 5 公分的生物量參數，以反映在植生工程中常用的樹齡與樹徑，並透過撰擬具體的種樹固碳公式，提升對植生工程儲碳潛力的精確性。同時定期監測與評估造林減量效益，以提供具體的指引和技術支持，透過分析監測數據，計畫將針對造林活動的減碳效果提出科學評估，幫助在推動植生與造林活動時更具精確性與實效性。針對防砂構造物，計畫將基於長期監測數據優化土壤碳匯調查方法，驗證其對碳匯增益的效果，並撰寫適用的減碳計算公式，這些研究成果將可成為未來減碳政策的重要依據，並提升水土保持及防砂工程的碳匯能力。

另一方面，計畫還著重於水土保持工程碳匯係數的蒐集與建置工作，這是一項對碳匯評估體系的全面提升。透過持續收集防砂構造物、樹種儲碳等相關數據，計畫將以國內外研究成果和現有水土保持工程案例為基礎，建立符合科學標準的碳匯係數資料庫架構(圖 1-1)。此資料庫不僅有助於未來工程設計與政策制定時的精確評估，還將進行碳匯係數應用於水土保持工程的技術可行性、經濟效益及環境影響的先期研究。該研究成果日後將研擬進一步編纂成為水土保持碳匯指引，並在相關座談會中深入討論與完善，最終推動在實務操作中運用碳匯係數，促進工程的減碳效果。



圖 1-1 水土領域針對不同色碳匯實行之工作(資料來源：本計畫)

第二節 計畫工作項目

本計畫旨在提升水土保持及造林相關工程的碳匯效能，並透過標準化的作業流程和認證系統，確保碳匯計算的科學性及準確性。首先，造林綠碳專案的監測工作將持續進行，經費將用於進行定期監測和維護，以確保樹木的健康成長和碳匯效益。同時，將根據現場數據進行造林自願減量效益的評估，並調整樹種選擇和種植方法，進一步提升碳匯效能。防砂壩及擋土牆構造物的土壤碳匯專案也須獲得資金支持，重點在於提升構造物對土壤碳匯的增益效果，並通過技術改良和長期監測驗證這些增匯措施的實效性。此項研究還將制定標準化的土壤碳匯 MRV 系統，並基於監測數據，建立適用於防砂壩及擋土牆構造物的碳匯減量公式。

另一項重點在於水土保持工程的增匯作業指引和碳匯係數研究。此部分經費將用於統整國內外的碳匯研究成果，並根據現有的水土保持工程案例，撰擬增匯作業指引架構以及執行標準化係數研究，提供一套可操作的框架。此外，將建立涵蓋植生、土壤及農塘碳匯係數的資料庫，為碳匯計算提供科學基礎。綜合來看，計畫中的每項工項及

經費分配，旨在系統化提升水土保持工程及防砂構造物的碳匯效益，推動台灣在氣候變遷應對中的減碳與增匯工作，為達成長期的碳中和目標奠定基礎。

一、防砂構造物土壤碳匯研究資料擴充計畫

(一)優化防砂構造物土壤碳匯調查方法：基於長期監測數據，進一步分析土壤碳匯的動態變化，並檢討和驗證防砂構造物對碳匯的增益效果，精進碳匯計算方式，撰寫適用於防砂構造物的減碳計算公式。

(二)研擬防砂構造物增匯策略：根據土壤碳匯測量研究及實驗數據，分析不同條件下的碳匯增益效果，並提出具有實際應用潛力的增匯策略，以推廣至實務應用。

(三)建立防砂構造物土壤碳匯 MRV 系統：制定標準化的監測作業流程，提升碳匯管理的科學性與一致性。

二、樹種儲碳資料庫優化及造林減碳效果評估

(一)擴充樹種儲碳資料庫：針對胸高樹徑 ≤ 5 公分的生物量參數進行擴充，以反映植生工程中實際使用的樹齡及樹徑，撰寫具體的植生工程固碳公式，提升計算的精確度。

(二)定期監測並評估造林減碳效益：選擇合適種樹場域，定期監測樹木種植後的生長情況，並根據監測數據進行分析，評估造林活動的減碳效果，提供分署維護指引及種樹增碳匯技術指導。

三、水土保持工程碳匯係數蒐集建置

- (一)碳匯係數蒐集與建置：持續蒐集防砂構造物固碳與樹種儲碳的相關數據，並以此為基礎，研擬水土保持工程的碳匯係數。
- (二)建立碳匯係數資料庫架構：依據國內外碳匯研究成果及現有水土保持工程案例，建置潛在碳匯資料庫，涵蓋水土保持構造物及植樹固碳等項目。
- (三)碳匯係數應用之先期研究：進行碳匯係數在水土保持工程中的技術可行性、經濟效益及環境影響評估，作為後續應用參考。

四、水土保持碳匯指引編纂專家座談會議

- (一)會議內容：針對增匯指引的架構、碳匯係數資料庫及認證先期研究進行深入討論，評估其可行性、科學性及實用性，並提出修改建議與改進方案。會後將總結討論成果，形成具體會議紀要，作為後續指引修訂的依據。會議將邀請相關專家學者及分署單位參與。
- (二)會議準備事項：包括會議資料準備、討論議題提綱、與會人員邀請、場地安排、會議形式及餐點準備等，預計邀請至少 3 位專家學者及相關單位人員參與。

第三節 工作執行流程

本計畫旨在提升水土保持及造林相關工程的碳匯效能，透過科學的計算方法與標準化作業流程，全面提升碳匯管理的準確性與實用性，相關工作流程如圖 1-2。計畫將優化防砂構造物土壤碳匯調查方法，基於長期監測數據驗證增匯效果，撰寫減碳計算公式，並研擬實用的

增匯策略，推廣至實務應用，同時制定標準化的碳匯監測、報告與驗證（MRV）系統，以提升碳匯管理的一致性與科學性。此部分將承接農村水保署前一階段計畫之土壤碳匯測量方法及成果持續操作，分析不同場域之碳匯量以及建立完整之測量方法，同時根據增匯效益制定策略。再來針對植生工程常用樹種，計畫將擴充胸高樹徑小於等於 5 公分的生物量參數，撰寫具體固碳公式以提升計算精度，並選擇適合的造林場域，定期監測樹木生長，進行減碳效果分析，提供具體的維護與技術指導，確保造林活動的長期效益。此外，計畫將蒐集防砂構造物與樹種相關數據，研擬水土保持工程碳匯係數，建立涵蓋植生、土壤及農塘碳匯的資料庫，並結合國內外研究成果進行技術可行性、經濟效益及環境影響的先期研究，為未來實際應用奠定基礎。再來透過文獻參考及專家座談深入討論增匯指引架構、碳匯係數資料庫及認證研究的實用性與可行性，形成具體修訂建議，並以會議紀要作為後續政策與技術指引的依據。各項工作將同步執行，定期檢視進度與成果，透過系統化的執行與管理，全面提升臺灣水土保持工程及防砂構造物的碳匯效益，助力實現氣候變遷應對與碳中和的長期目標。

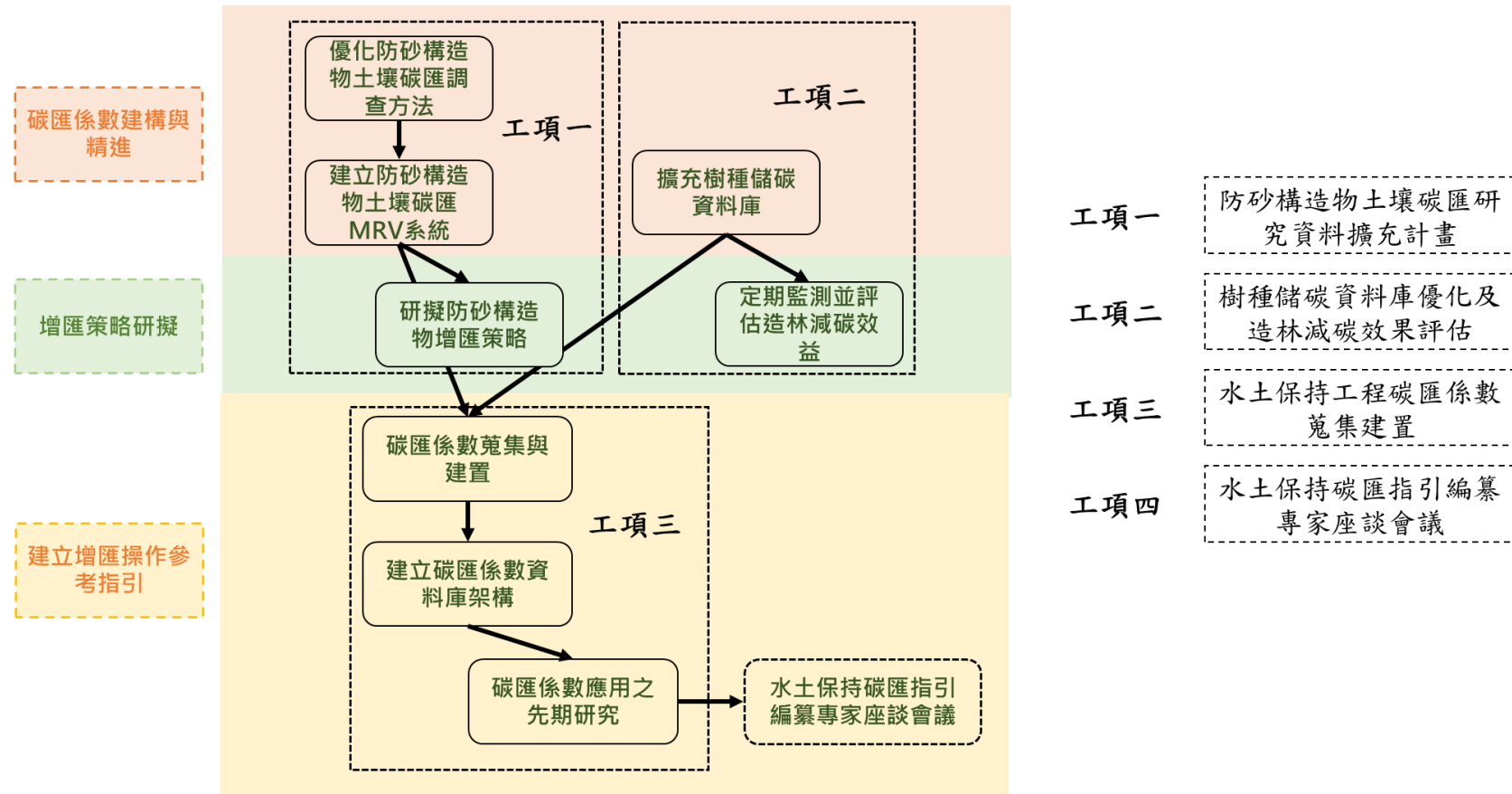


圖 1-2 計畫工作執行流程圖(資料來源：本計畫製作)

第四節 預定工作進度

本委託計畫自決標次日起至一百一十四年十二月十日止，本團隊已於工作期限內完成履約標的之供應。而履約效力自決標日次日起至計劃期限前完成提出成果報告書，經農村水保署驗收完成後且無待解決事項止，本計畫預定進度如表 1-1 所示，表中淺灰色為工作執行計畫書階段設定之預定進度，深灰色則代表實際進度，表 1-2 則呈現各工項之完成進度百分比。

表 1-1 本計畫預定進度

工作項目	114 年度												完成 進度
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
一、防砂構造物土壤碳匯研究資料擴充計畫													
1. 優化防砂構造物土壤碳匯調查方法													100%
2. 研擬防砂構造物增匯策略													100%
3. 建立防砂構造物土壤碳匯 MRV 系統													100%
二、樹種儲碳資料庫優化及造林減碳效果評估													
1. 擴充樹種儲碳資料庫													100%

2. 定期監測並評估造林減碳效益													100%
三、水土保持工程碳匯係數蒐集建置													
1. 碳匯係數蒐集與建置													100%
2. 建立碳匯係數資料庫架構													100%
3. 碳匯係數應用之先期研究													100%
四、水土保持碳匯指引編纂專家座談會議													
1. 會議內容													100%
2. 會議準備事項													100%
報告撰寫與成果審查	○		#				*					※	
符號註記	○:計畫投標籌備 #:工作執行計畫書 *:期中報告審查 ※:期末報告審查												

表 1-2 本計畫進度檢核表

工作內容	計畫目標	完成進度	百分比	對照頁碼
一、防砂構造物土壤碳匯研究資料擴充計畫				
優化防砂構造物土壤碳匯調查方法	基於長期監測數據，進一步分析土壤碳匯的動態變化，並檢討和驗證防砂構造物對碳匯的增益效果，精進碳匯計算方式，撰寫適用於防砂構造物的減碳計算公式。	本項工作已完成。團隊依據既有固定周期監測數據，針對防砂構造物周邊土壤進行碳匯變化趨勢分析，掌握其時序性變動與潛在碳匯潛能，完成碳匯增量之定量評估與驗證。期末階段已與最新土壤碳匯地圖成果進行比對。	100%	P.2-3~ P.2-49
研擬防砂構造物增匯策略	根據土壤碳匯測量研究及實驗數據，分析不同條件下的碳匯增益效果，並提出具有實際應用潛力的增匯策略，以推廣至實務應用。	本項工作已完成。團隊依據前期土壤碳匯測量與實驗數據成果，分析不同區位條件及土壤性質對碳匯增益的影響，評估防砂構造物施作後對碳匯潛能之提升效果。	100%	P.2-50~ P.2-57
建立防砂構造物土壤碳匯MRV系統	制定標準化的監測作業流程，提升碳匯管理的科學性與一致性。	團隊已彙整國內外土壤碳匯相關監測方法與案例，並依據防砂構造物特性，初步擬定適用於不同場域類型之碳匯監測架構。期末階段已完成標準化作業流程之研擬，包括樣區設置規範、採樣頻率與分析指標等內容，以提升日後碳匯管理作業之科學性與一致性。	100%	P.2-57~ P.2-72
二、樹種儲碳資料庫優化及造林減碳效果評估				
擴充樹種儲碳資料庫	針對胸高樹徑 ≤ 5 公分的生物量參數進行擴充，以反映植生工程中實際使用的樹齡及樹徑，撰寫具體的植生工程固碳公式，提升計算的精確度。	已完成針對胸高樹徑 ≤ 5 公分之小徑級苗木儲碳參數建置之作業流程撰寫，並依據常見植生工程樹種取得代表性苗木樣本。已依照標準程序進行測量與生物量參數數據蒐集，並彙整各樹種之乾重、生長量與碳含量等資訊。	100%	P.3-2~ P.3-22
定期監測並評估造林減碳效益	選擇合適種樹場域，定期監測樹木種植後的生長情況，並根據監測數據進行分析，評估造林活動的減碳效果，提供分署維護	造林專案撰寫已完成，並已選定合適造林場域完成樣區設置，建立相關監測指標與作業流程。目前進行第一期監測作業，包含苗木胸徑、生長高度及存活率等初始數據之紀錄。	100%	P.3-22~ P.3-46

	指引及種樹增碳匯技術指導。	後續將根據專案執行持續監測。		
三、水土保持工程碳匯係數蒐集建置				
碳匯係數蒐集與建置	持續蒐集防砂構造物固碳與樹種儲碳的相關數據，並以此為基礎，研擬水土保持工程的碳匯係數。	本項工作已順利完成。已全面蒐集並彙整國內外與防砂構造物固碳及常用植生工程樹種儲碳相關之實測與文獻數據，涵蓋不同地形條件、工程型式及植栽階段。	100%	P.4-1~ P.4-8
建立碳匯係數資料庫架構	依據國內外碳匯研究成果及現有水土保持工程案例，建置潛在碳匯資料庫，涵蓋水土保持構造物及植樹固碳等項目。	團隊已彙整國內外碳匯相關研究成果，並蒐集多筆具代表性之水土保持工程案例資料，涵蓋防砂壩、護坡工、集水設施等構造物類型，以及常見植生工程樹種之儲碳數據。期末階段已完成碳匯係數資料庫之欄位設計與分類架構，內容涵蓋地區類型、工程型式、土壤與植生碳匯係數、資料來源與應用條件等資訊。	100%	P.4-8~ P.4-21
碳匯係數應用之先期研究	進行碳匯係數在水土保持工程中的技術可行性、經濟效益及環境影響評估，作為後續應用參考。	本項工作已完成碳匯係數在水土保持工程中應用之可行性架構草擬，並重點聚焦於國內外相關應用案例與研究資料之彙整與比對，針對不同工程型式（如防砂壩、階梯工、植生護坡等）進行潛在碳匯貢獻的初步推估與技術適配性分析。	100%	P.4-21~ P.4-36
四、水土保持碳匯指引編纂專家座談會議				
會議內容	針對增匯指引的架構、碳匯係數資料庫及認證先期研究進行深入討論，評估其可行性、科學性及實用性，並提出修改建議與改進方案。會後將總結討論成果，形成具體會議紀要，作為後續指引修訂的依據。會議將邀請相關專家學者及分署單位參與。	已於10月14舉辦完成。	100%	P.5-2~ P.5-3
會議準備事項	包括會議資料準備、討論議題提綱、與會	已於10月14舉辦完成。	100%	P.5-3~ P.5-6

	人員邀請、場地安排、會議形式及餐點準備等，預計邀請至少3位專家學者及相關單位人員參與。			
--	---	--	--	--

第五節 預期效益與關鍵課題

一、專案森林覆蓋率增加及造林效益提升

通過延續造林綠碳專案，預期將進一步推動農村水保署的造林計畫，持續擴大造林面積。此計畫不僅將提高碳吸收能力，有效減少溫室氣體排放，還能促進生態系統的穩定性，提升區域內生物多樣性。此外，造林活動預計改善土壤水分保持和減少土壤侵蝕，為水土保持工程提供更多效益，實現環境和經濟雙重價值。

二、防砂壩土壤碳匯測量方法學建立與應用

計畫預期將針對防砂壩構造物的土壤碳匯進行深入研究，建立具體的測量方法學，能夠量化上游集水區土壤中的碳儲存量。此方法學將應用於不同防砂壩環境，以收集大量數據，為科研與實踐提供依據，並驗證防砂構造物在土壤碳匯增效方面的實際效果。預期此方法學的成功將促進土壤碳匯技術的廣泛應用，成為碳中和和防災減災的重要技術支持。

三、水土保持增匯作業指引編纂及碳匯係數資料庫建立

計畫將初步編纂水土保持工程增匯作業的參考指引，並建立涵蓋植生、土壤及農塘的碳匯係數資料庫。這些科學化的指引和資料庫將成為未來水土保持工程推動減碳增匯的操作依據，提供精確的碳匯計算方法和實際操作框架。預期此指引能夠有效提升水土保持工程的碳匯效能，支援台灣水土保持署在碳中和政策中的長期目標，並成為各地水土保持工程實踐的重要工具。

四、防砂構造物納入碳管理體系之推動效益與技術指引建構

配合當前「氣候變遷因應」與「淨零排放」政策趨勢，回應農村水土保持署近年推動之「低碳水保工程」政策，將防砂構造物從傳統以減少土砂災害、穩定坡地為主的工程角色，拓展至碳匯與減碳管理系統中的關鍵元素。本計畫聚焦於增匯與儲碳層面之科學依據與技術整合，透過建立碳匯評估方法、資料庫與操作流程，預期可逐步建構防砂構造物碳管理操作模式，並完成具體可行之技術指引手冊，作為後續推廣應用與制度化依據，強化水土保持工程對淨零目標之貢獻。

第六節 預定工作成果及查核內容

一、工作進度及期限

(一)期初簡報時需完成工作：

1. 工作計畫、方法及預定工作進度規劃。
2. 國內外防砂構造物相關土壤碳匯文獻及調查方法之初步蒐集與建置。

(二)期中簡報時需完成工作：

3. 樹種碳匯資料庫初步建置及造林減碳效果初步評估。
4. 水土保持工程碳匯係數資料蒐集。

(三)期末簡報時需完成所有工作。

(四)期末報告至契約完成期間，如委託機關發現問題仍需協助修正。

二、工作成果要求

(一)本項工作所完成之程式與相關資料，著作權歸委託機關所有，其原始程式碼，亦需同時提供。

(二)受託廠商於工作執行期間，須依雙方契約之規定提送各項報告(各項報告書格式請參考農村水保署委辦計畫報告書印製暨電子檔案製作範本製作)，並舉行簡報；另雙方得視實際需要，召開工作會報。

(三)提送本計畫成果如后：

採書面驗收份數如下：

1. 成果報告書：3 份

2. 儲存設備 5 份(至少 1TB)，每份儲存內容如下：

(1)摘要報告、工作執行計畫書、各期計畫書及成果報告文字檔：採用 Microsoft Office、或 ODF(Open Document Format)相容文件格式及*.pdf 或其他可攜式文件格式。

(2)各期簡報檔：採用 PowerPoint 格式及*.pdf 格式。

3. 其他：如協助各期會議記錄等事項。

成果報告、摘要報告及計畫成果(含圖資)電子檔應儲存至電子圖書管理中心，如單一檔案資料量大於 4GB，請連同詮釋資料繳送至農村水保署減災監測組。

三、驗收方法

報告部分

(一)採書面驗收份數如下

1. 成果報告書 3 份。

2. 儲存設備 5 份。

(二)成果報告、摘要報告及計畫成果(含圖資)電子檔應儲存至電子圖書管理中心，如單一檔案資料量大於 4GB，請連同詮釋資料繳送至農村水保署減災監測組。

第二章 防砂構造物土壤碳匯研究資料擴充計畫

根據聯合國糧食及農業組織 (FAO) 的觀點，土壤在全球碳封存過程中具有關鍵地位。眾多農業技術的改良中，土壤碳封存技術已日趨成熟。以台灣小農種碳專案為例，透過減少土壤翻耕、增加地表覆蓋、實行作物輪作與間作等措施，不僅能有效促進土壤碳固存，提升土壤有機碳含量，還可增加農作物產量，並實現顯著的減碳效果。與此同時，水土保持工程對於增強土壤碳匯潛能亦具有重大價值。儘管此研究領域近年來已成為學術界的焦點，現階段仍缺乏一套完整且可操作的量化評估方法，來系統性檢視水土保持工程對於土壤碳匯的具體效益。

為彌補此項研究空白，國內外研究機構近年來針對不同土地利用模式下的土壤，積極探討多種強化碳匯的方法，學術界亦著力於建立減碳效益與防災韌性之間的關聯。農村水保署在「水土保持碳匯量評估及永續發展指標研究計畫-成果報告書」中，已初步建立水土保持工程中植生綠碳與農塘碳匯的計算方法。然而，針對更為複雜的土壤碳匯部分，仍處於方法學發展與量化探討階段，顯示水土保持工程在碳匯計算的精確性與全面性上，仍有顯著的提升空間。防砂壩作為防止溝壑侵蝕而部署的水保工程設施，目的為降低流速和促進沉積物堆積於上游。透過促進沉積物使得防砂壩後方的土壤量體增加，土壤儲碳量隨著增加(圖 2-1)。研究表明，有防砂壩溝壑集水區的總碳固存比沒有防砂壩的集水區要高(Boix-Fayos et al., 2017)。若再進一步與固砂而形成的植生復育相結合，可使整體集水區碳庫存增加，且防砂壩可透過穩定砂土減輕洪水事件以及山洪土石流的衝擊，且穩定土壤功能能夠支持氣候相關的生態系服務(Nyssen et al., 2004)，使其在緩解與調適層面皆能夠對於氣候變遷風險降低有所助益。

前年度計畫已經針對北部大漢溪流域及東部蘭陽溪流域進行採樣，本年度計畫將會補充不同集水區及土壤樣區之採樣及實驗室分析，逐步建構出台灣不同區域之碳匯分布狀況。因此，本工作項目將以防砂壩工程為核心，深入研究土壤碳匯的評估方式，並針對現有工程措施，提出可有效提高土壤碳封存的技術方案。

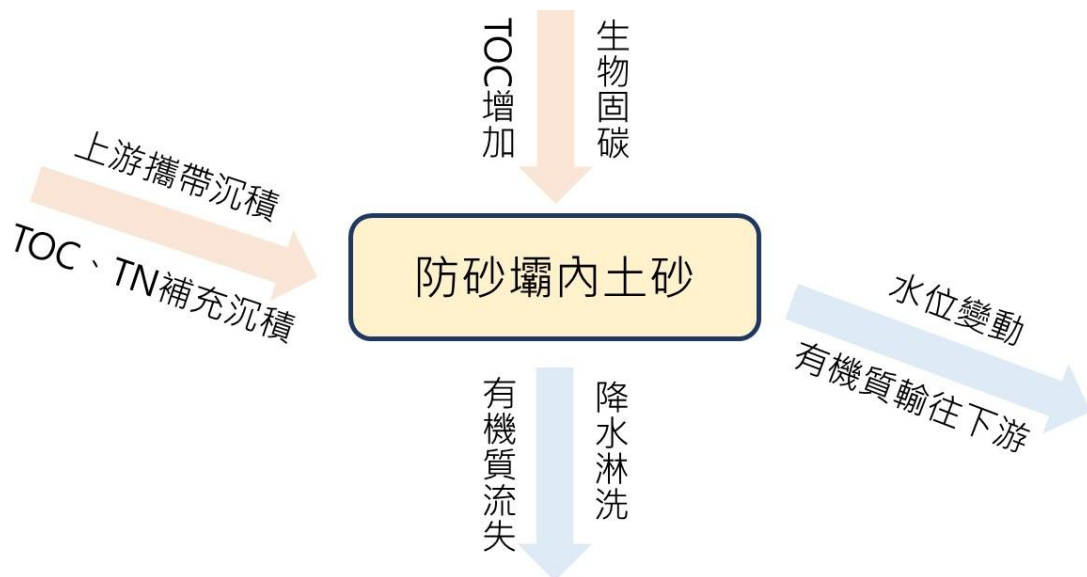


圖 2-1 防砂構造物增加土壤碳匯之物理機制(資料來源：本計畫製作)

本計畫將進一步評估碳匯技術的實際成效，對比不同技術方案的效益，旨在為農村水保署未來制定減碳與提升碳匯策略提供關鍵的學術支撐，並透過系統化的整理與應用，全面推動國內水土保持領域的永續發展。期初階段以蒐集國內外防砂構造物碳匯相關文獻、執行現地採樣、土壤碳匯調查方法及國內案例為主，期中階段將完成過去調查方法檢核與優化方案研擬，分析土壤有機碳變化並檢視防砂壩穩定土壤是否具增加碳匯之效益，建置土壤碳匯 MRV 系統，制度化納入第三個工項中碳匯係數計算內容中。

第一節 優化防砂構造物土壤碳匯調查方法

一、防砂構造物土壤碳測量方法

防砂壩工程作為農村水保署常用於穩定砂土、降低坡地災害的工程技術（聯合國糧食及農業組織，2021），在提升土壤碳匯方面亦扮演著重要的角色。防砂壩的主要功能在於穩定上游坡面的土砂，有效減少外力因素的擾動，進而降低土壤滑動及崩塌的不穩定性風險。與此同時，防砂壩的設置亦能促使部分土砂被有效地攔阻並保留於上游區域，增加土砂的總體積，這對於土壤中黃碳的累積與儲存具有積極的促進作用。此外，土砂量的增加亦有助於縮減坡地災害發生時的裸露地表面積，進而為植被的生長提供更為寬廣的空間與更有利的立地條件，最終達到提高綠碳儲存量的目標。

土壤碳相較於植生綠碳，長期以來缺乏普遍適用的量測技術（Vance, 1987），在碳匯量化評估上構成一定程度的挑戰。目前，針對土壤中黃碳含量的量測方法，主要可歸納為數種技術途徑，包括同位素測量技術、實驗室熏蒸法分析、乾燥燃燒法，以及光譜學法等。各種土壤碳量測技術的有效應用，將可為本計畫提供至關重要的技術支持，以精確評估不同碳匯提升措施，對於土壤有機碳庫所造成的具體影響程度，進而科學化地量化各項增匯措施的實際效益。

（一）同位素測量技術

根據中國科學院地理科學與資源研究所(2005)對於土壤碳循環的研究，加速器質譜儀(Accelerator Mass Spectrometry, AMS)的應用使得研究者得以監測土壤 CO₂ 通量的 ¹⁴C 特徵，以及採集土壤空氣 CO₂ 樣本用於碳同位素測量。土壤有機碳和土壤中的 ¹⁴C 含量可以推測在全球變化影響的尺度下碳含量的變化，而且土壤空氣中較高的 $\Delta^{14}\text{C}$ 值

表明有機質的分解作用。通過土壤 $\Delta^{14}\text{C}$ 含量分析，可以了解土壤有機碳的分解過程、週期以及長時間尺度的碳作用，該分析結果可以與其他碳盤查及碳通量觀測進行結合，用於推斷土壤有機碳不同成分的沉積時間。

假設目標分析土壤的有機碳庫為均質且處於平衡狀態，則可以估計土壤有機碳周轉週期(式 1):

$$R^{14}\text{C}(t) = kR^{14}\text{C}_{\text{atm}}(t) + R^{14}\text{C}(t-1)(1 - k - \lambda_{14\text{C}}) \quad (1)$$

$R = 14\text{C} / (\Delta^{14}\text{C} / 1000 + 1)$ 的分餾值

k 為分解作用速率常數

$\lambda_{14\text{C}}$ 為 ^{14}C 的放射性衰變常數

$^{14}\text{C}_{\text{atm}}(t)$ 是在 t 年土壤有機碳輸入的 ^{14}C 放射性活性 (假設與大氣 $\Delta^{14}\text{C}$ 的相同)。

(二)實驗室薰蒸法分析

氣仿薰蒸法，為用於測定土壤微生物生物量的方法(劉生浩，1994)。其步驟為將土壤樣品和氣仿裝入乾燥器中，通過真空抽氣使氣態氣仿在土壤孔隙中擴散，並在黑暗無光條件下進行培養，使氣仿與土壤充分接觸，從而破壞土壤微生物的細胞膜結構，促進微生物細胞活性的釋放。薰蒸後取出氣仿並通過反覆真空抽氣除去土壤中殘留的氣仿，其釋放的微生物細胞使土壤中可提取碳、氮、磷和硫等元素大幅增加，通過硫酸氫鉀提取，測定提取液中全碳和全氮含量，可以計算微生物生物碳和氮的含量。

該方法簡單、快速，且適用範圍廣，可以用於酸性、淹水和含有大量易分解有機物土壤的微生物生物量測定。

(三)有機質熱損失量簡便測定法

土壤碳有機質熱損失量的簡便測定法通常是通過傳統的蒸發法或燃燒法進行(圖 2-2)。以下是其中兩種簡便的測定方法：

1. 蒸發法：

- (1) 取土壤樣本，先經過空氣乾燥，確保水分被蒸發乾燥。
在事先稱好的重量容器中裝入乾燥的土壤樣本，並精確記錄容器的重量。
- (2) 把裝有土壤樣本的容器放入已經預熱的爐中，以高溫（通常約 450°C）加熱約 4 小時。
- (3) 取出容器，迅速密封，並讓其冷卻。
- (4) 冷卻後，再次精確測量容器的重量，這就是土壤碳有機質經過燃燒後的重量。

2. 燃燒法：

- (1) 取土壤樣本，經過空氣乾燥，確保水分被蒸發乾燥。
- (2) 將土壤樣本置於事先經過稱量的碟片中。
- (3) 使用固定的高溫爐對土壤樣本進行燃燒，燃燒時間通常在 4 小時左右。
- (4) 燃燒後，冷卻樣本，再次稱量碟片。

3. 計算方法：

$$\begin{aligned} & (\text{加熱前烘乾土壤重} + \text{坩堝重}) - (\text{加熱後土壤重} + \text{坩堝重}) \\ & = \text{加熱損失重} \div \text{有機質重} \\ & (\text{有機質重} / \text{烘乾土重}) * 100\% = \text{有機質}\% \end{aligned}$$



圖 2-2 熱損失量簡便測定法操作過程(資料來源：本計畫製作)

(四)濕式氧化法

濕式氧化法是使液體中懸浮或溶解狀有機物在有液相水存在的情況下進行高溫高壓氧化處理的方法，將有機污染物在水中、加壓的氧氣環境下進行氧化反應，將其轉化為二氧化碳、水和部分低分子有機酸(圖 2-3)，以下分別對於藥品使用、操作步驟以及計算方法進行說明：

1. 藥品使用

- (1) IN Potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$ 重鉻酸鉀):取重鉻酸鉀於 $105^{\circ}C$ 烘乾二小時後，秤取 49.09 克溶於蒸餾水中，再稀釋一升。
- (2) 指示劑 o-phenanthroline-ferrous: 秤 1.485 克 o-phenanthroline 及 0.973 克的 ferrous ammonium sulfate，溶於去離子水中，並稀釋至 100ml。
- (3) 0.5N ferrous ammonium sulfate(硫酸亞鐵銨): 秤取 196.079 克的硫酸亞鐵銨於去離子水中，再加入 15ml 的

濃硫酸，並稀釋至 1L。

2. 步驟

- (1) 秤取 0.25g 的土壤，至於 500ml 的三角瓶中。
- (2) 加入 10mL 重鉻酸鉀，充分搖盪，使溶液與土壤混合。
- (3) 隨即加入 20mL 濃硫酸，再充分搖盪後，靜置 30 分鐘，若溶液成綠色則重複 2-3 步驟。
- (4) 靜置後，加入 100mL 去離子水及 10mL 濃磷酸溶液。
- (5) 加入 3-4 滴 o-phenanthroline-ferrous 指示劑，並以配置之 ferrous ammonium sulfate 滴定，其顏色逐漸變暗，而後轉為亮綠色，此時再加入幾滴，則迅速變為暗綠色時，則為滴定終點。

3. 計算方式

- (1) 有機碳 $O.C\% = 10 \left[1 - \frac{\text{sample}}{\text{blank}} \right] \times 1.0 \times (12/4000) \div 0.77 \times (100/\text{土重})$
- (2) 有機物% = 有機碳% * 1.724 (土壤中有機物平均含碳為 58%，故乘以 1.724)

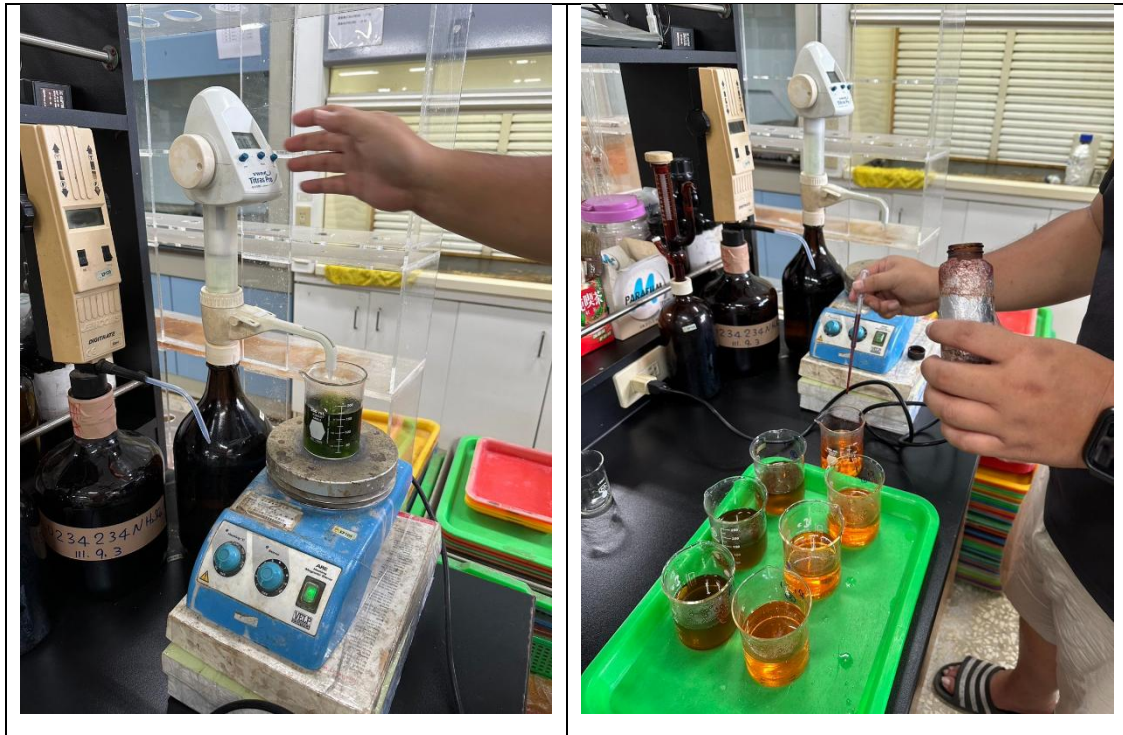


圖 2-3 濕式氧化法滴定取樣過程(資料來源：本計畫製作)

(五) 乾燥燃燒法

土壤總碳(TC)的分析和定量是估算土壤有機質含量的必要步驟，而這是評估自然系統生產力時的有效參數(聯合國，2019)。乾燥燃燒法是測量土壤全碳的方法，是將土壤在密閉高溫的條件下全部加熱轉換成二氧化碳，此時土壤中的有機碳及無機碳會全部轉換成二氧化碳，再進行測重、滴定、電導等方法進行二氧化碳定量量測，反推土壤的碳含量(圖 2-4)。但此種方法耗時且樣本小，並不適合大範圍的土壤監測(Santi，2006)。

如果通過乾燥燃燒法定量土壤總碳，在樣本準備過程中必須額外注意。使用的樣本非常小，需要樣本充分均勻混合(聯合國 FAO，2019)。其中進行碳匯測量時仍然面臨困難，其中最主要在於區分有機碳和無機碳的數值。通常是通過從樣本中去除其中一者，並測量處理後的材料來完成這一步驟(Andy Connelly，2017)。

$$\text{土壤總碳(TC)} = \text{土壤無機碳(TIC)} + \text{土壤有機碳(TOC)}$$

如何去除其中一項得到另一項以得到進階數據也成為值得討論的問題之一。如果想移除土壤有機碳的數據，可以使用以下方法(Andy Connelly, 2017)。

1. 燃失重法 (LOI)：

將樣本加熱至 350-440°C，將去除大多數有機物。然而，這種方法假定在這個溫度下的所有失重是由於有機碳，這可能並不準確。它還假設在這個溫度下將去除所有有機材料。

2. 化學處理：

使用過氧化氫 (30%或 50%) 處理，用於去除含有有機碳的相。然而，加入過氧化氫並不總是導致對有機相的完全氧化，氧化的程度因樣本而異。

而無機碳通常以碳酸鹽的形式存在，如碳酸鈣。去除這種形式的碳的最常見方法是使用一種化學處理，其與碳酸鹽優先反應，將有機碳相留在後面。若想去除土壤中的無機碳，可以參考以下方法

(1) 鹽酸：

1~2 摩爾的鹽酸 (通常為 10% (1.3M))。鹽酸對有機碳化合物的破壞性遠小於其他酸，如硝酸。然而，不能假設它對有機相沒有影響。使用這種酸的一個問題是樣本中殘留的氯可能對碳的測量造成問題。這意味著在分析之前可能需要對樣本進行徹底的清洗。

(2) 硫酸

硫酸通常與 FeSO_4 結合使用，以最小化 H_2SO_4 對有機物的氧化和脫羧。

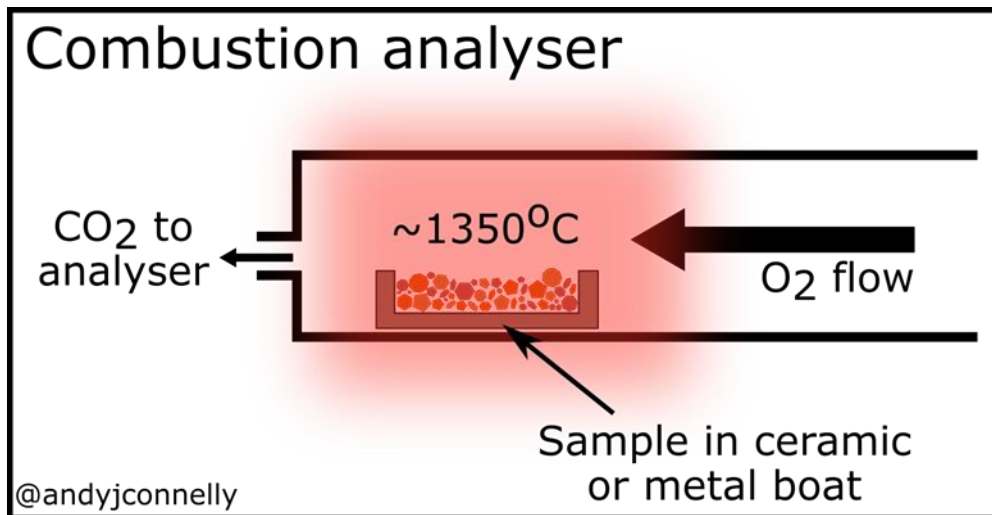


圖 2- 4 乾燥燃燒法示意圖(資料來源: Andy Connelly)

長期的土壤侵蝕作用會導致地表土壤完全暴露於大氣之中，進而釋放出大量的碳與氮元素，使得原本具有碳（氮）吸收能力的退化生態系統，轉變為碳（氮）的排放源。因此，在受侵蝕的農業土壤中，迫切需要採取措施以保存碳與氮，此舉不僅有助於減緩溫室氣體的排放，更能有效改善土壤質量，提升農業系統對於環境變遷的適應能力 (Yan Zhang et al., 2023)。

攔沙壩(農村水保署定義為防砂壩)作為一種常見的水土保持工程設施，其主要作用在於防止溝壑侵蝕，透過攔沙壩的設置，可有效降低水流速度，並促進沉積物於上游區域堆積。藉由沉積物的堆積，攔沙壩後方的土壤量體得以增加，進而提升土壤的碳儲存量。然而，值得注意的是，沉積物本身的碳含量通常較周圍土壤為低 (Addisu and Mekonnen, 2019)，且沉積物碳含量的持久性，目前仍缺乏足夠的文獻研究支持。儘管如此，現有研究指出，設置攔沙壩的溝壑集水區，其總碳固存量可能仍高於未設置攔沙壩的集水區 (Boix-Fayos et al., 2017)。

若能進一步結合因土砂穩固而形成的植生復育措施，則可更有效地增加整體集水區的碳庫存。此外，防砂壩亦可透過穩定砂土，有效減輕洪水事件以及山洪土石流所帶來的衝擊 (農村水保署)，且土壤的穩

定功能，亦有助於支持與氣候相關的各項生態系服務 (Nyssen et al., 2004)，使其在減緩氣候變遷與調適氣候變遷風險兩方面，皆能展現其正面效益。

二、國內外水土保持工程盤點

極端氣候事件頻發，使得自然災害更易引發大面積土壤崩塌與損害，此類災害將導致大量溫室氣體釋放至大氣及水體，不僅對集水區生態造成負面影響，且其復原過程亦相當漫長，研究顯示，即使歷經長達 150 年的時間，也僅能恢復約莫 60% 的碳儲存能力 (Jasmin Schomakers, 2017)。由此可見，有效減緩土砂崩落，將能直接降低碳排放量。另一方面，防砂壩工程作為農村水保署常用於穩定土砂、減緩坡地災害的工程手段 (聯合國糧食及農業組織，2021)，在碳匯效益方面亦展現其潛力。防砂壩主要功能在於穩固上游土砂，減少外力擾動，進而降低土壤滑動之不穩定性。此外，防砂壩亦可攔阻部分土砂，使其滯留於上游，增加土砂總量，進而對土壤碳儲存產生正面效益。更進一步而言，土砂量的提升亦有助於縮減坡地災害發生時的裸露地面積，為植被生長創造更多空間，最終達到提高綠碳儲存量的目標。

為驗證上述推論，本計畫將選定農村水保署已完成之防砂壩工程 (92 年至 113 年) 作為實地採樣分析的標的 (如圖 2-5 所示)，相關不同分署所轄防砂壩數量如表 2-1。透過分析土樣碳含量，並比對防砂壩負責區域內外之土砂，以釐清不同採樣點所蘊含之土壤碳匯差異。

表 2-1 92 至 113 年農村水保署防砂壩所署管轄分署統計(資料來源：
本計畫製作)

所轄單位	防砂壩數量(座)
南投分署	373
花蓮分署	21
臺中分署	84
臺南分署	281
臺北分署	39
臺東分署	11

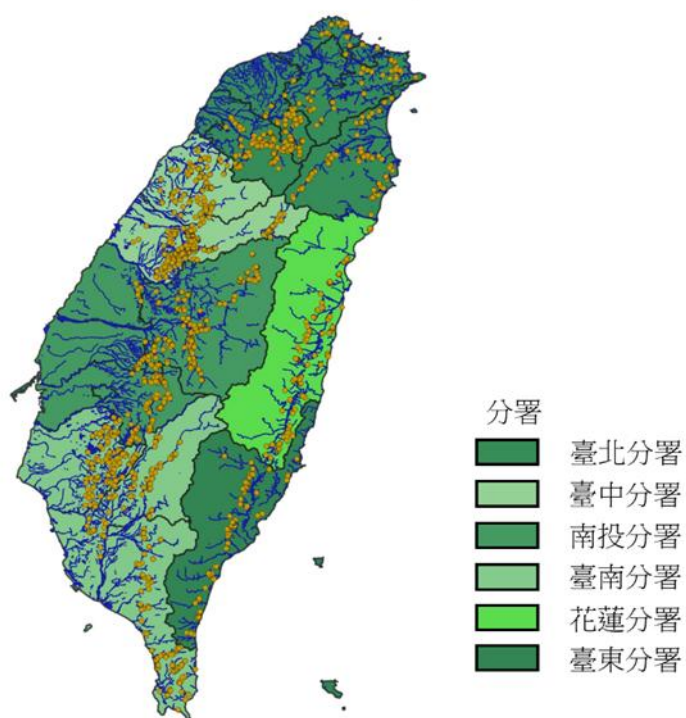


圖 2-5 農村水保署 92 至 113 年防砂壩分布圖(資料來源：本計畫製作)

(一)加鹿溪防砂壩改善工程

本案例工程主要以野溪防砂壩工作為核心，其碳匯組成以綠碳及土壤碳為主，其中喬木綠碳佔比約為 31%，土壤碳佔比則約為 69%。

工程所採取的增匯手段，主要包含於土砂佈置區種植喬木、進行防砂壩結構補強，以及施作砌石護岸等多種方法。其增匯機制主要透過增加砂源穩定性，並穩固土砂以減少侵蝕及崩塌，進而降低溫室氣體的釋放，達到提升碳匯的效果。此外，工程亦藉由擴大植生種植規模，大幅提高綠碳的儲存量。而砌石護岸的施作，則同時具備植生綠化功能，以及穩定河岸的實質效益，進而實現區域多功能利用的目標（參見表 2-2）。

在施工手段上，本工程力求就地取材，並盡可能採用現地改造等工法，以有效減少施工過程中產生的碳排放。本工程所收穫的效益不僅包含增加河流土砂穩定性、顯著提升碳匯量，更同時兼具環境綠化以及生態復育等多重正面功能(圖 2-6、2-7)。

在土砂防治成效方面，預估可達到 90,000 立方公尺的土砂防砂量，每年固碳量更可達到 7,134.48 噸二氧化碳，充分展現藍碳、綠碳與土壤碳的多元匯集效益。

表 2-2 加鹿溪防砂壩改善工程 土砂布置區增匯手段

增匯手段	碳匯範疇及額外功能	備註說明
土砂布置區種植大規模喬木	1. 綠化環境 2. 達到生態復育 3. 增加綠碳儲存量	既有增匯手段 植生與土壤固碳量總和： 334.52 公噸
防砂壩結構補強	1. 降低所需混凝土量 2. 降低對環境生態衝擊 3. 減緩河川坡度，增加砂源穩定增加土壤碳匯 4. 穩地土砂減少土石流發生風險	既有增匯手段
施作砌石護岸	1. 增加滲透及植生生長介質 2. 就地取材達到減碳 3. 綠碳青碳區域多重利用增加碳匯量	既有增匯手段

資料來源：本計畫製作



圖 2- 6 加鹿溪防砂壩改善工程 植生造林營造之綠碳及土壤碳(資料來源：本計畫製作)

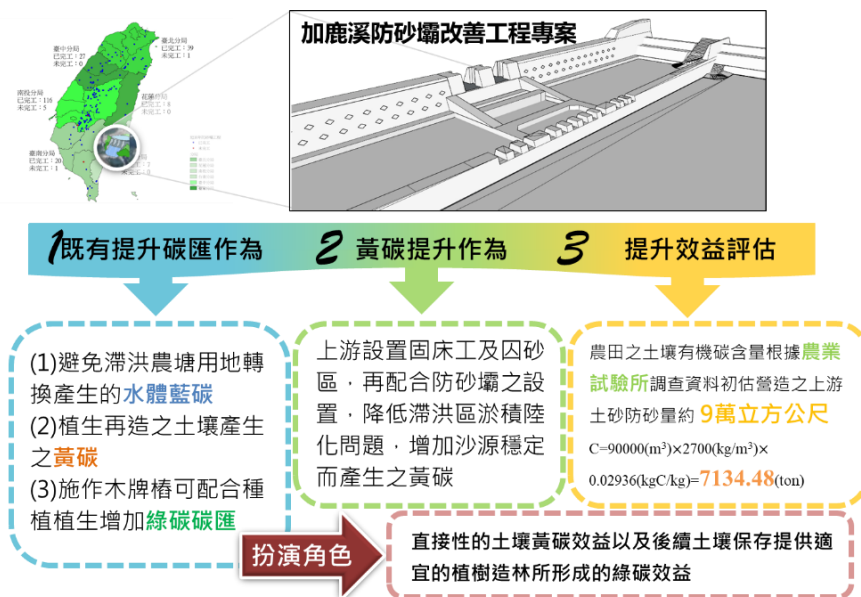


圖 2- 7 加鹿溪防砂壩改善工程 防砂壩囚固土壤產生之碳匯(資料來源：本計畫製作)

(二)國外案例

土壤有機碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 作為地球表層最大的活躍碳庫，其管理潛力受到廣泛關注。根據政府間氣候變化專門委員會 (IPCC) 最新估算，全球前 100 公分土層的 SOC 儲量達 1,417 Pg C，相當於大氣碳儲量的三倍、植物生物量的兩倍 (Sinitambirivoutin et al.,

2024)。聯合國糧食及農業組織 (FAO, 2021) 進一步指出，通過可持續土壤管理，全球農地每年可封存約 0.56 Pg C，約佔農業部門溫室氣體年排放量的 34%。這些數據表明，土壤不僅在全球碳循環中起到緩衝作用，更具備作為氣候調節機制的管理潛力。

非活體碳庫(nonliving carbon pools)的主導地位正在重塑對碳匯機制的理解。Bar-On et al. (2025) 通過全球尺度分析發現，1992 至 2019 年間，全球陸地碳庫增量 (35 ± 14 Pg C) 中，95%儲存在土壤有機碳、枯枝落葉、死木和河流沉積等非活體碳庫中(Bar-On et al., 2025)。這一結果挑戰了以往關於「CO₂施肥效應」主要驅動植被碳增長的假設，顯示穩定且緩慢循環的非生物碳匯在當前氣候條件下具有更大的儲存潛力，此發現進一步強調了沉積環境在全球碳循環中的重要性。

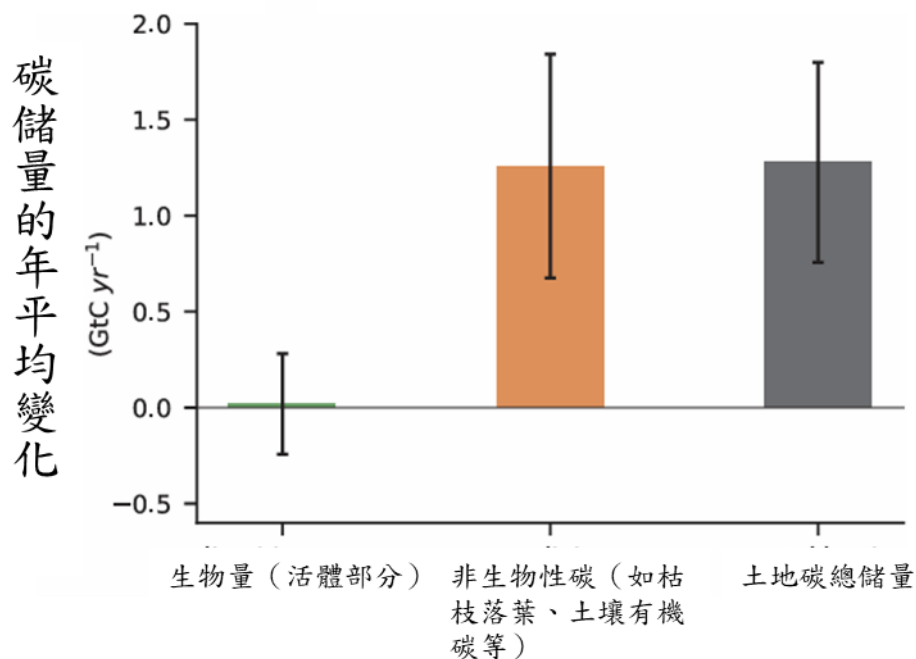


圖 2-8 全球陸地碳儲存的變化量在活體與非活體碳庫間的分配情形，顯示非活體碳庫的重要性(Bar-On et al., 2025)

防砂壩作為具有潛力的碳匯工程手段，越來越受到學術與政策層面的關注。這些廣泛分布於全球半乾旱與山地地區的結構，最初設計用

於減緩土壤侵蝕與防洪，但其截留沉積物的能力也意味著能夠捕獲與封存有機碳。Zahabi et al. (2022) 以伊朗 Nehzatabad 集水區為例，證明防砂壩可將部分侵蝕碳轉化為穩定的沉積碳匯，而非直接釋放至大氣。這表明，防砂壩等人為結構可能對全球碳通量產生重要的調節作用。

中國黃土高原的大規模防砂壩工程為土壤碳封存提供了重要的實證依據。Fang et al. (2023) 對 50,226 座活躍防砂壩進行廣泛的實地調查與遙測分析，發現 1970 至 2020 年間，這些結構共攔截約 10.2 ± 0.6 Pg 的侵蝕沉積物，其中有機碳封存量達 21.6 ± 9.9 Tg，碳封存效率約 80%，顯著高於全球湖泊與水庫的平均水準。研究估算，防砂壩的碳封存速率約為 468 ± 204 g C m⁻² yr⁻¹，約為全球湖泊平均值的十倍 (Fang et al., 2023)。防砂壩在陸域碳循環中的作用可能被低估，展現了其作為碳儲存結構的潛力。

Yao et al. (2022) 深入探討了防砂壩沉積物中碳元素的儲存、溯源、分布特性以及穩定程度。該研究闡述了土壤侵蝕對於碳循環所造成的影響，並解析了防砂壩在碳匯作用中所扮演的角色。研究中亦探討了防砂壩沉積物中的碳儲存狀況，包含碳庫規模的大小，以及氣候、土壤類型、地形地貌和土地利用方式等多重影響因子的作用機制。此外，該研究亦針對追蹤沉積物中碳來源的方法進行了闡述，例如穩定同位素分析、放射性同位素定年技術、元素組成分析等。透過比較分析防砂壩沉積物中碳與來源土壤中碳的組成比例，研究探討了影響土壤碳比例的各项因素。針對防砂壩沉積物中碳的礦化與固定潛力，以及影響碳穩定性的相關機制，該研究亦進行了深入的討論。此研究更統整回顧了各界針對防砂壩土壤碳所進行的相關研究，藉此綜論土壤碳在水土保持以及防災減災領域的實際可行性 (如圖 2-9 所示)。

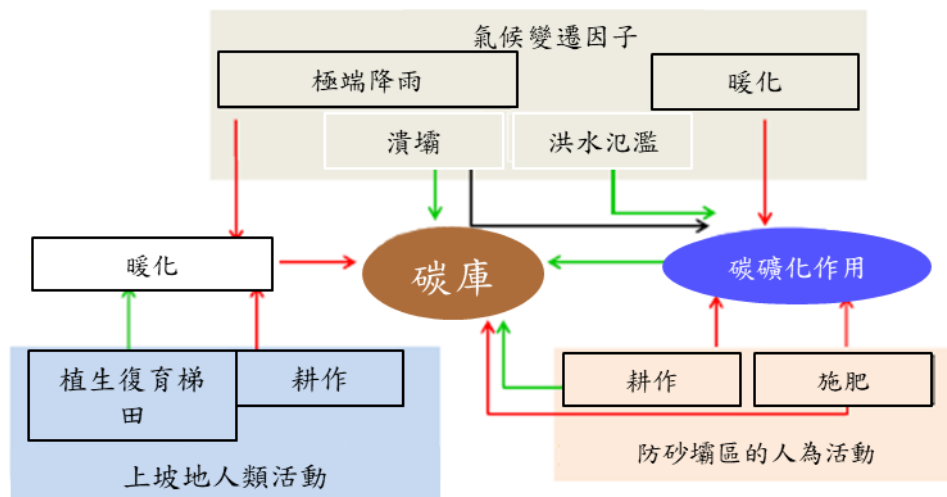


圖 2-9 氣候變遷影響下土壤和防砂壩的人類活動對碳庫和防砂壩沉積物礦化的影響的概念框架(Yao et al., 2022)

Mongil-Manso et al. (2019) 旨在量化位於西班牙中部阿維拉省阿維拉山脈，一項水文與森林修復工程中，防砂壩所有效攔截並儲存的土壤有機碳 (SOC)、土壤氮 (SN) 以及土壤磷 (SP)。該研究團隊自 30 座防砂壩的沉積楔中採集土壤樣本，並同時自 30 處天然土壤區採集對照樣本。研究人員針對所有土壤樣本，進行土壤質地、電導率、pH 值、碳含量、氮含量與磷含量的精密量測分析。研究中並運用斷面法，精確計算出防砂壩所滯留的沉積物體積，進而推估該區域的總沉積物產量，以及平均土壤有機碳、土壤氮與土壤磷的密度。研究結果明確顯示，防砂壩在土壤有機碳、土壤氮與土壤磷的滯留方面，確實發揮著至關重要的作用，能有效防止這些物質流失進入下游水體，對於土壤資源的保護具有顯著的正面意義(如圖 2-10 所示)。土壤與養分流失，是土壤侵蝕極為嚴重的後果之一，而防砂壩的沉積楔，則成為研究這些流失現象的重要資訊來源，尤其在貧瘠的花崗岩地質土壤區域，防砂壩更展現了積極的保護效益。

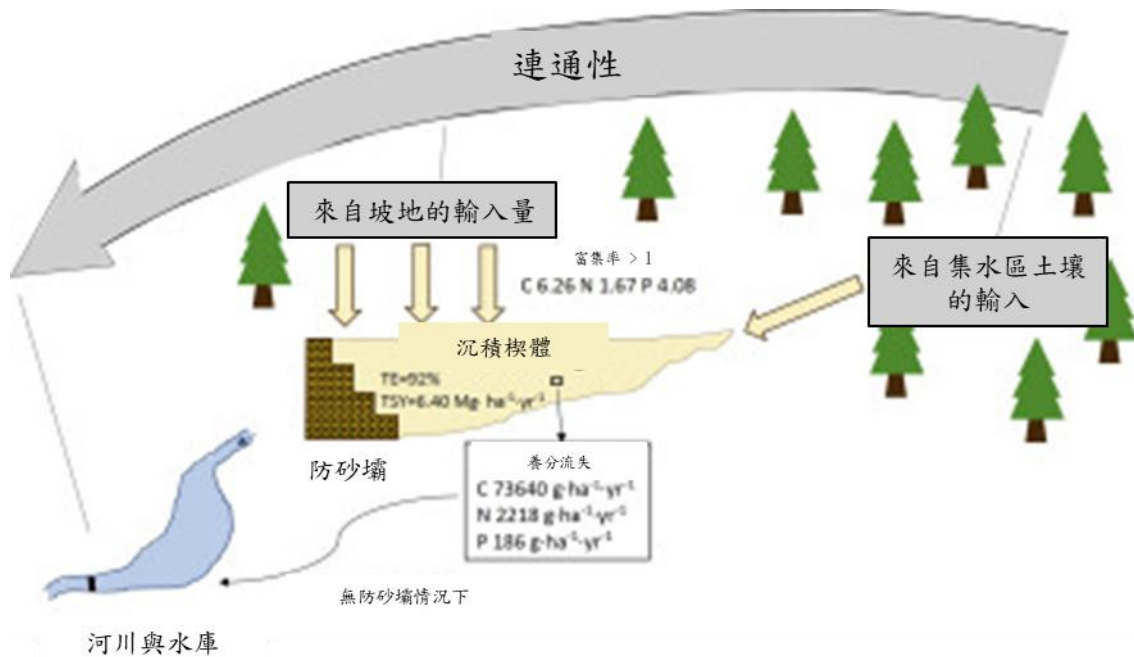


圖 2-10 防砂壩於集水區對於有機物之作用(Mongil-Manso et al., 2019)

防砂壩沉積區之碳儲效果並非一致。Liu et al. (2017) 於橋子溝流域調查多座壩體後發現，透過 1-2 公尺深層剖面分析，其土壤有機碳與總氮富集率 (enrichment ratio, ER) 平均僅為 0.56 與 0.65，顯示約 19% 有機碳與 10% 氮素已流失。研究指出，壩體使用年限、上游控制面積及土地利用型態等因子，對碳氮保存效率具有顯著影響，未來評估時應考量此類時空變異性。

Zhang et al. (2016) 針對防砂壩沉積物之地貌來源與物化性質進行追蹤研究，進一步驗證上述碳氮動態與壩體效能之耦合關係，強調應從侵蝕動力學角度理解碳儲存之變異性。

中國黃河流域自 1999 年起，正式啟動了有史以來規模最宏大的植被復育計畫，亦即廣為人知的「退耕還林工程」。為全面評估該工程在土壤保育方面所帶來的固碳效益，相關研究團隊基於詳盡的水文紀錄、有機碳數據以及初級生產力估算等資料，進行了深入分析與評估。評估結果顯示，透過積極推動土壤保育措施，每年得以有效控制約 20.6Tg(Teragram, 百萬噸) 的有機碳(OC)流失(如圖 2-11 所示)。與此同

時，因土壤侵蝕所導致的土壤有機碳分解量，亦呈現顯著下降趨勢，已從過往的每年 8TgC 降低至目前的 5.3TgC(Lishan Ran et al., 2018; Fang et al., 2023)。

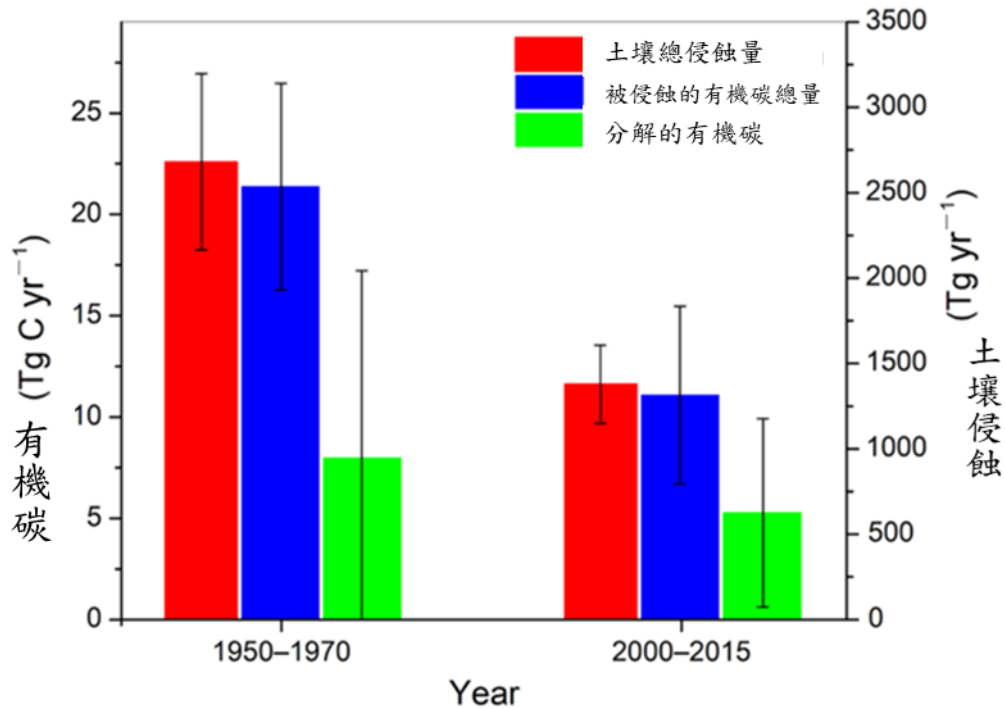


圖 2- 11 防砂壩於河川集水區對於有機物之作用(Fang et al., 2023)

Addisu et al. (2019) 針對衣索比亞西部地區的八座沉積物儲存壩 (SSDs) 進行了深入的實地研究，研究方法涵蓋現場直接量測、精細計算以及實驗室分析等多種途徑(如圖 2-12 所示)。研究結果顯示，這些沉積物儲存壩 (SSDs) 有效地固定了約 60.97×10^3 噸的沉積物，而這些沉積物中的有機碳含量介於 14 至 87gkg^{-1} 之間。與此同時，研究中亦分析了防砂壩 (CDs) 的固碳效能，結果顯示，防砂壩捕捉了約 7.81 噸的沉積物，其沉積物中的有機碳 (SOC) 含量則介於 20 至 290gkg^{-1} 之間，顯示防砂壩的固碳潛力較沉積物儲存壩更高。綜合而言，該研究結果顯示，在研究範圍內的沉積物儲存壩 (SSDs) 與防砂壩 (CDs) 總計固定了約 44.68×10^5 公斤的有機碳，以及約 68.8×10^6 公斤的沉積物。簡而言之，Addisu et al. (2019) 的研究明確指出，沉積物儲存壩與防砂

壩在促進有機碳固存方面，確實扮演著極為重要的角色，且其固碳效益與沉積物的有效固定現象密不可分。



圖 2- 12 衣索比亞進行土樣現場測量(Addisu et al., 2019)

三、前期計畫測量成果

前期研究計畫已針對採集之眾多土壤樣品，初步完成了石門水庫集水區樣區之樣品分析工作。在土壤樣品的檢測項目中，主要聚焦於總碳(TC)、總氮(TN)以及碳氮比(C/N)等關鍵物化特性。其中，總碳量指的是土壤中所有碳元素的總和，其構成包含有機碳，例如腐殖質，以及無機碳，如碳酸鹽等。土壤中的碳主要源自於植物殘體、動物遺骸，以及微生物的活動。總碳含量是評估土壤有機質豐寡與否及土壤健康狀況的重要指標，高含量的有機碳有助於提升土壤結構的穩定性、保水能力與養分供應效率。總氮量則是指土壤中所有氮元素的總和，包含有機氮與無機氮。氮是植物生長不可或缺的元素，因此土壤中的總氮含量對於作物產量及土壤肥力具有直接的影響。碳氮比(C/N)的數值通常會因多種因素而異，具體數值會受到土壤類型、有機質來源、管理措施以及生態環境等條件的影響而有所不同。一般而言，濕地土壤中的有機質碳氮比往往較高，此現象主要是因為濕地環境中的有機質分解速率相對較慢，進而使得累積的有機質中碳含量比例偏高。表 2-3 彙整了不同生

態系統在總碳、總氮、碳氮比等方面的文獻回顧數據，並結合試驗所整合分析之結果，以供參考。

表 2-3 不同生態系統結合試驗整合而成之有機質列表

生態系統	總碳(TC%)	總氮(TN%)	碳氮比(C/N)
濕地	5~30	0.5~2	10~20
水田	2~8	0.2~1	12~18
旱田	0.5~3	0.1~0.5	8~15
湖泊沉積	1~15	0.2~1.5	12~30
河川灘地	2~10	0.2~1.5	10~25
本研究	15.81%	1.20%	12.91

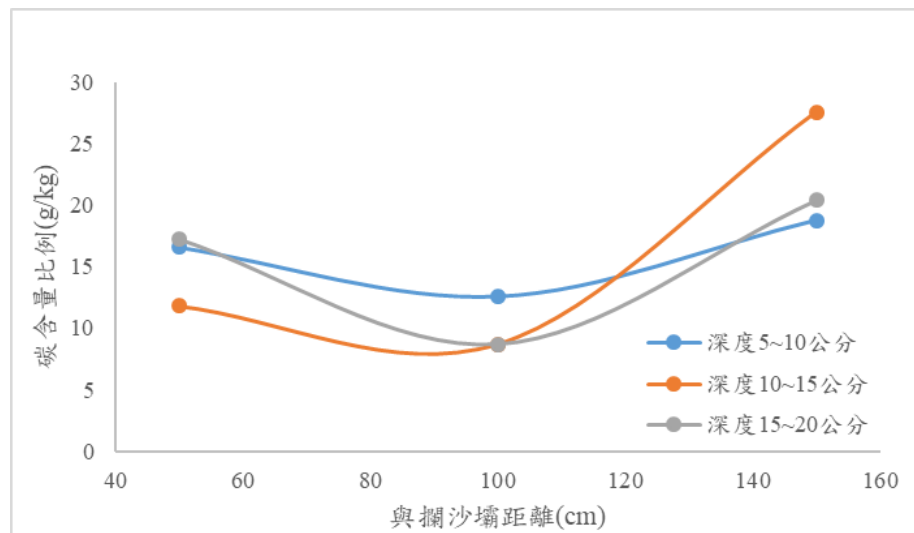
資料來源：本計畫製作

從數據上可以看出，所採集之土壤樣本的 TC、TN 以及 C/N 數據範圍與不同自然場域之數值相比較，與自然流動水體形成之湖泊及河川灘地較相似，而且比平均的 TOC 濃度來說本計畫的結果略高，從常理推斷而當合理，兩者皆是藉由河川搬運堆積，且相較河川灘地較無擾動，因此在數據結果上相近且合理。

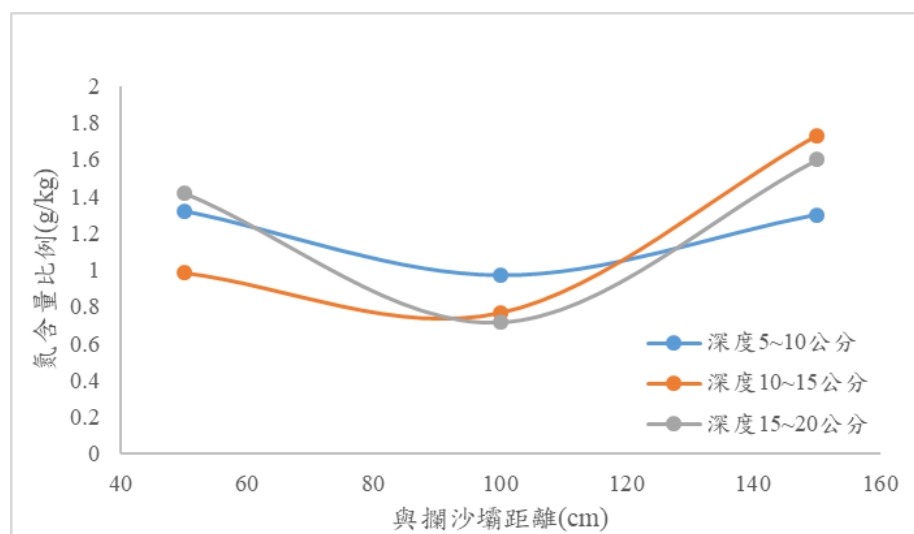
在採樣點深度分析結果中(如圖 2-13 所示)，深度因素似乎並非決定有機碳及有機氮沉積量的關鍵性因素。此現象的可能原因，推測是由於目前採樣的深度區間，相較於土壤自然分層的區間而言，可能劃分得過於寬泛，進而導致不同時期沉積事件所形成的土壤層產生相互混合的情形。此種混合作用可能使得數據在深度梯度上未能呈現出顯著的變化趨勢。因此，若未來能將土壤分層採樣的區間劃分得更為細

緻，或許有助於在檢驗數據上觀察到更為明確的數據趨勢。此項推論亦可從表層土壤檢驗結果相對穩定之現象獲得佐證。由於表層土壤受到近期事件的影響較小，干擾因素相對單純，因此其檢驗結果也較為一致而穩定。反之，較深層的土壤，由於沉積時間較為久遠，受到的干擾因素也相對增加，因此更容易受到採樣點周遭環境因子的影響而產生數據上的變異。基於以上分析，若欲取得更為精準的崩塌土壤陳積碳匯量數據，針對單次崩塌事件發生後立即進行採樣，應可作為未來值得採納的有效措施。

(a)



(b)



(c)

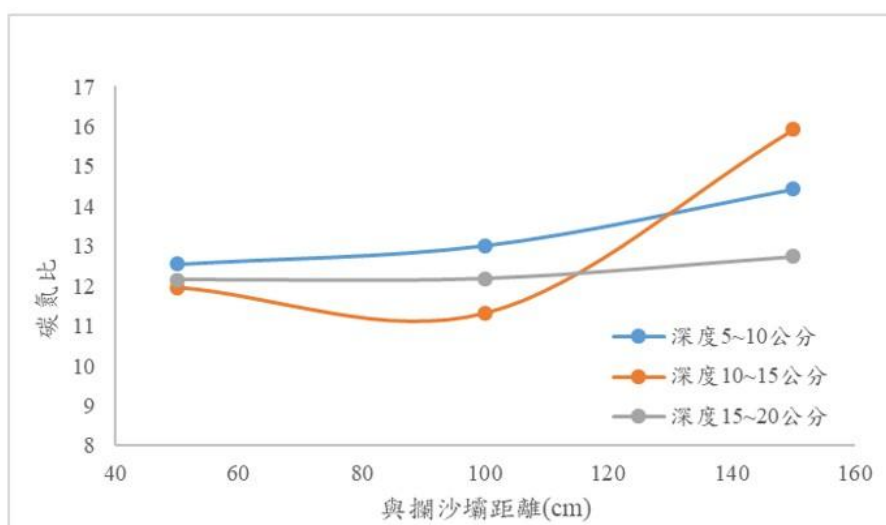
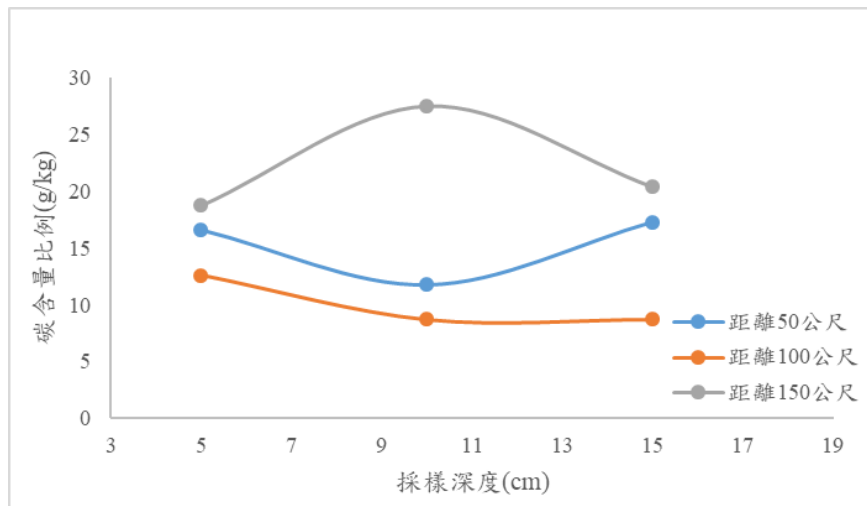


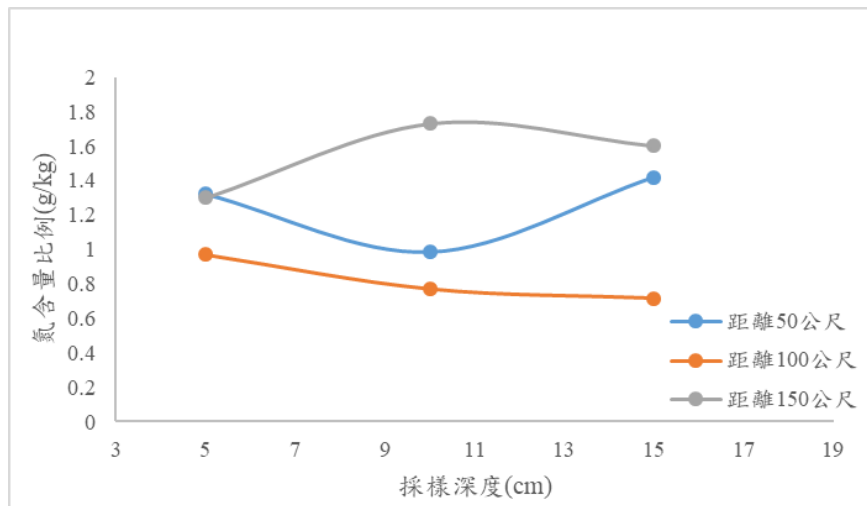
圖 2- 13 點位距離攔沙壩與各物理量之關係圖:(a)碳含量比例;(b)氮含量比例;(c)碳氮比(資料來源：本計畫製作)

自採樣點與防砂壩的距離分析數據中(如圖 2-14 所示)，可以發現第三採樣點(距離防砂壩 150 公尺)不論在總碳(TC)或總氮(TN)的數值表現上，普遍較前兩個採樣點為高。針對此一現象，可能的解釋是由於單一採樣點的數據偏差所導致，亦即推測第三採樣點可能受到較多的人為或環境干擾，進而使得該採樣點的數據呈現較高的數值。此項推測亦可從第三採樣點在深度 10 至 15 公分處的數據表現獲得佐證，該深度區間的數據異常，可能源於樣品在採集或處理過程中發生混合不均，又或是該採樣點受到局部點源污染所致。另一方面，在碳氮比(C/N)的數據表現上，整體數據大致呈現介於 12:1 至 15:1 的區間範圍內，此結果顯示土壤中碳與氮之間存在高度的關聯性，同時亦間接驗證了防砂壩工程對於穩固土壤有機質應具有一定程度的正面助益。

(a)



(b)



(c)

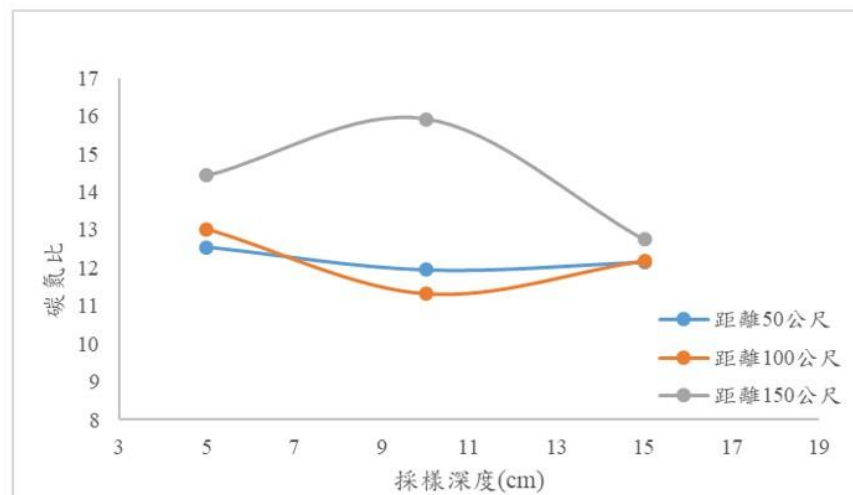


圖 2- 14 採樣深度與各物理量之關係圖:(a)碳含量比例;(b)氮含量比例;(c)碳氮比(資料來源：本計畫製作)

四、新增採樣測量結果

今年計畫目標為擴增野溪防砂結構物之採樣點位及成果。防砂壩作為防止溝壑侵蝕而部署的水保工程設施，目的為促進沉積物堆積降低和流速於上游，故固砂之碳匯邊界包括防砂壩之上游河道、邊坡及具有崩塌潛勢的山坡地。透過促進沉積物使得防砂壩後方的土壤量體增加，土壤儲碳量隨著增加。在進行防砂壩的土砂採集樣本需要考慮安全性、崩塌潛勢、溪流坡度、壩體土壤深度、易達性、是否有農業活動干擾等因素(圖 2-15)，在選擇地點時會將同時參考上述特徵。而針對防砂壩之目的性，選取了與前年度相近之石門水庫上游集水區蘇樂壩區、宜蘭地區武雲溪南澳國小 D-01-A11-81 斷面及員山鄉枕山村：大礁溪-01-A11-92 防砂壩、新北市瑞芳區弓橋里大粗坑溪樹梅坪 D-21-A21-91 防砂壩進行實地盤點訪查適合之樣區，包含了兩個不同集水區特性，進行採樣和計畫範例選址，整體採樣實驗分析概念如圖 2-16 所示。

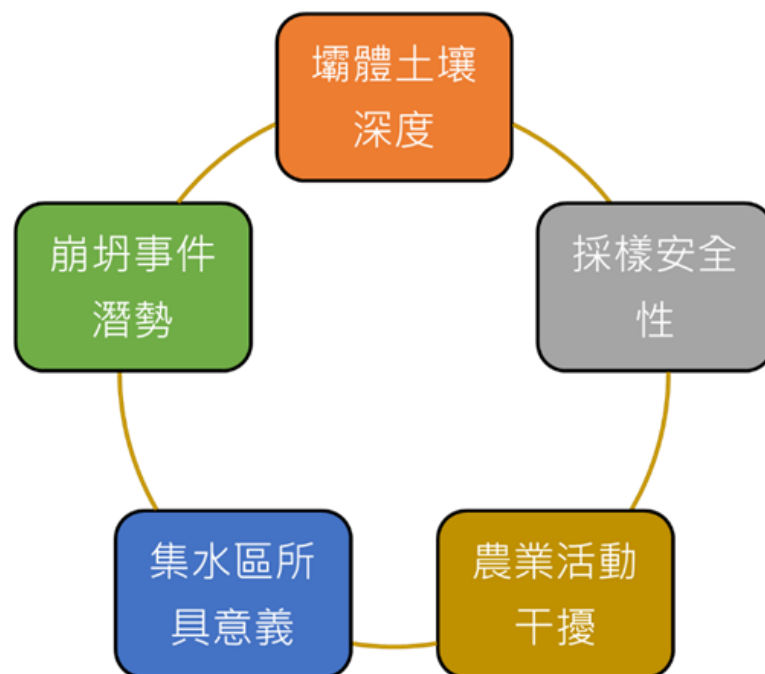


圖 2- 15 土砂採樣點位考量因素(資料來源：本計畫製作)

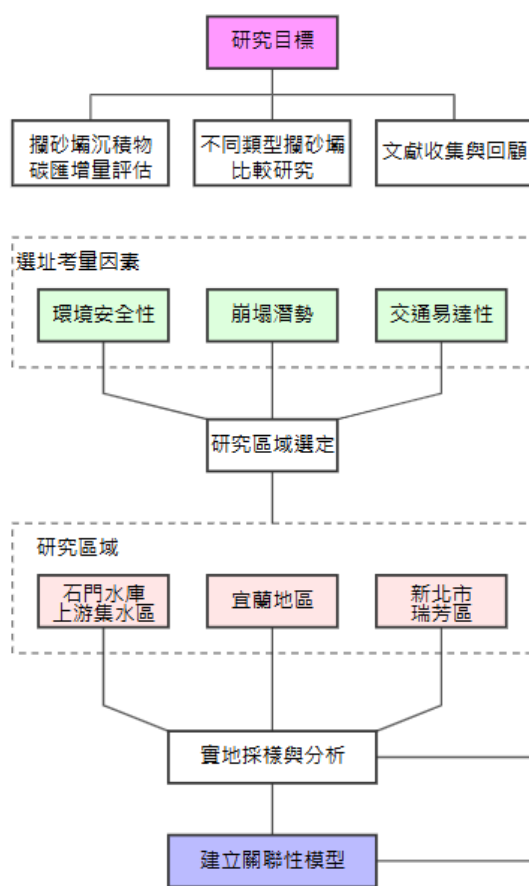


圖 2- 16 實驗概念圖(資料來源：本計畫製作)

1. 石門水庫上游集水區蘇樂壩區

本次採樣的樣品檢驗主要集中在石門水庫集水區的蘇樂樣區，該區域為土石流潛勢區域，地勢崎嶇，地形破碎，地表土層受水流與地形影響顯著，上游是大規模岩體滑動及崩落的易好發區，且該區歷史上發生許多大大小小不同規模的崩塌事件，而本防砂壩做為樣區相當合適(圖 2-17)，其一在於施工便道路基明確，使採樣的易達性大幅提升；其二在於壩體的沉積物對於降水事件反應敏感，可以很好的觀察防砂壩的土砂沉積量對碳匯累積的幫助；其三在於遵循生態友善的施工方法是否對碳匯的沉積量具有正向的幫助，是值得討論的，因此本署認為此處做為土砂防治構造物碳匯增量研究的選址相當適宜。



圖 2-17 蘇樂樣區壩體(資料來源：本計畫製作)

蘇樂樣區壩體長約 55 公尺，高約 6 公尺，地形開闊，流心明確，容易辨別蘇樂溪的常流狀態及大型降水事件的河道。兩側植生茂密，在採樣時須注意植被生長狀態避免干擾。蘇樂樣區與角板樣區最大的區別在於橫向的寬度，因此本樣區在設計實驗上多討論了橫向的沉積變化，用以估算防砂壩所能沉積之碳匯量。

本樣區採用 T 字形的採樣點設計，分別是橫 1、橫 2、中、縱 1 及縱 2，其中「中」及「縱」的採樣點緊貼流心，觀察縱向的沉積量變化，而兩側則是專注於降水事件的沉積。而此處雖部分地區採樣深度最深可以達到 30 公分，但由於大部分採樣區域的深度僅能達到 20 公分，因此為確保實驗的一致性及準確性，本研究依舊僅以 5~10 公分、10~15 公分以及 15~20 公分為標準進行分組(圖 2-18)。

- (1) 採樣設備:土壤採樣器、鏟子、捲尺、救生衣、夾鏈袋。
- (2) 針對五個採樣點進行採樣，使用土壤採樣器以及鏟子，在不擾動土壤的情況下採集土壤樣本，並區分不同深度之土壤樣本。
- (3) 土壤採集後在陰暗通風處進行風乾晾曬處理，以避免陽

光或是微生物影響土壤樣本，對研究結果產生誤差。



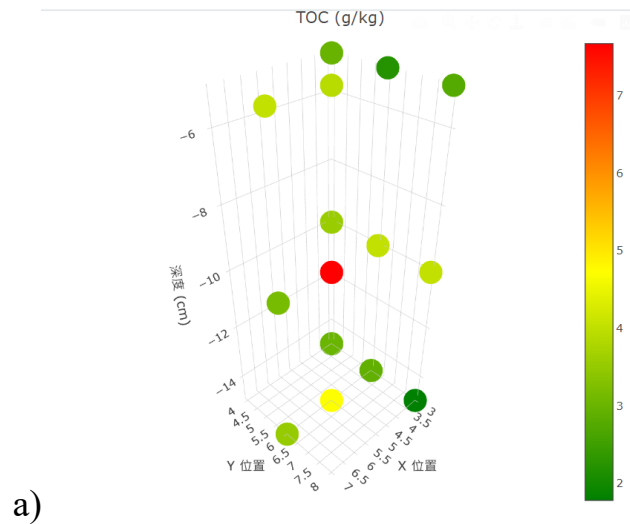
圖 2- 18 蘇樂樣區採用的採樣點設計(資料來源：本計畫製作)

為了確保數據的準確性與可比性，在檢驗前，本團隊對所有樣品進行了標準化的前處理，包括使用鹽酸去除 TIC（總無機碳），以排除無機碳對有機碳測定的影響。這一前處理步驟的目的是確保乾燥燃燒法所得出的數據為 TOC（總有機碳），進而能夠更有效且直觀地進行數據分析，特別是針對土壤碳儲存與環境變遷的關聯性。

採樣時間為 2024 年 10 月 5 日與 2024 年 12 月 31 日，為山陀兒颱風侵台，造成大規模崩塌的採樣，目的是紀錄從這次採樣的核心目標，是紀錄從大型擾動事件發生後，土壤碳儲存狀況的變化，進一步評估穩定的土砂環境對固碳效益的影響。本團隊期望透過數據驗證，當土砂環境趨於穩定時，有機碳的儲存能力將顯著提升，從而對整體碳循環產生正向影響。

10 月 6 號的採樣中(如圖 2-19)，TOC 的範圍大約落在 2~7(g/kg)，TN 大約為 0.4~1(g/kg)，CNratio 範圍大致落在 3~8，這些數據範圍大致與中國的河口土壤疊合(Dahai Liu,2020)，由此可見大規模崩塌的有機碳數值受流動水沖刷影響，檢測數值與長年沖蝕的河口地形相仿，因此減少常流水的流動對 TOC 的沉積具有正向影響。

此外，C/N 比的範圍亦提供了關於碳排放狀況的重要線索。根據文獻回顧，C/N 比可作為土壤碳排放與儲存的指標之一。本次分析結果顯示，在大規模崩塌後，土壤中的 C/N 比顯示出較低的趨勢(圖 2-19)，反映出該區域土壤中的有機碳可能較不穩定，甚至可能加速碳的釋放，導致該地區的土壤無法有效成為碳匯，反而可能轉變為碳源。因此，本計畫研究結果進一步印證了穩定土砂環境對於碳匯的重要性，當土壤穩定後，TOC 的儲存能力提升，碳排放的風險降低，進而對整體碳循環與環境永續發展產生正向影響。



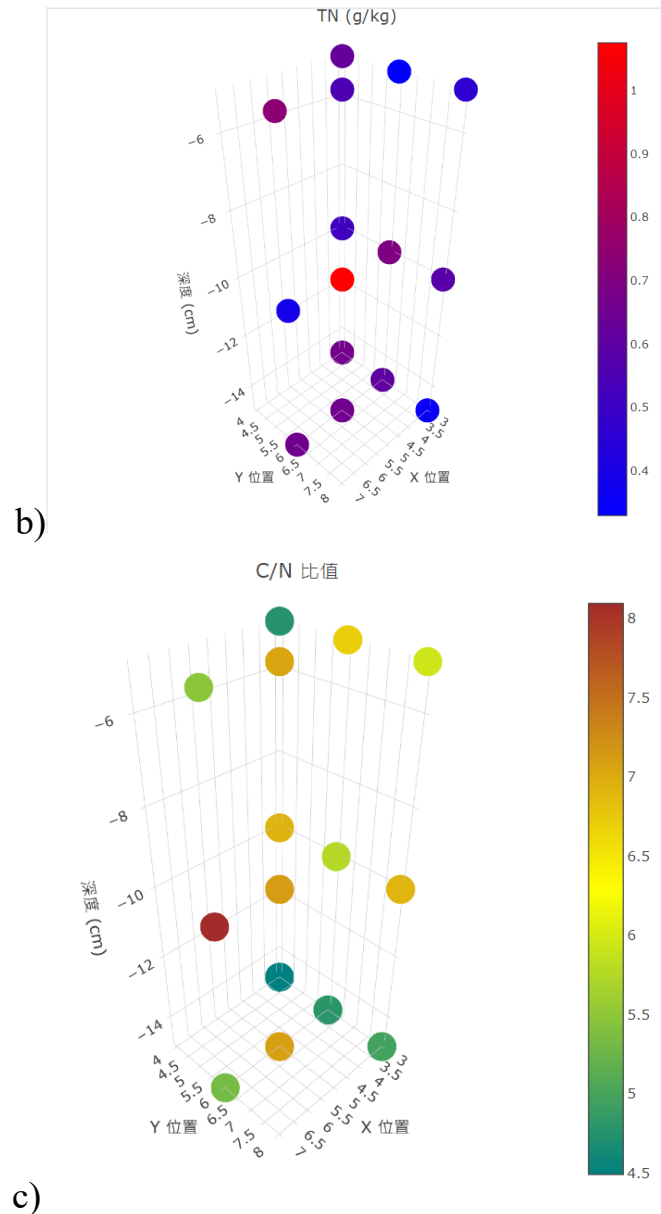


圖 2- 19 1006 採樣位置與檢測數據 a TOC,b TN,c CN ratio(資料來

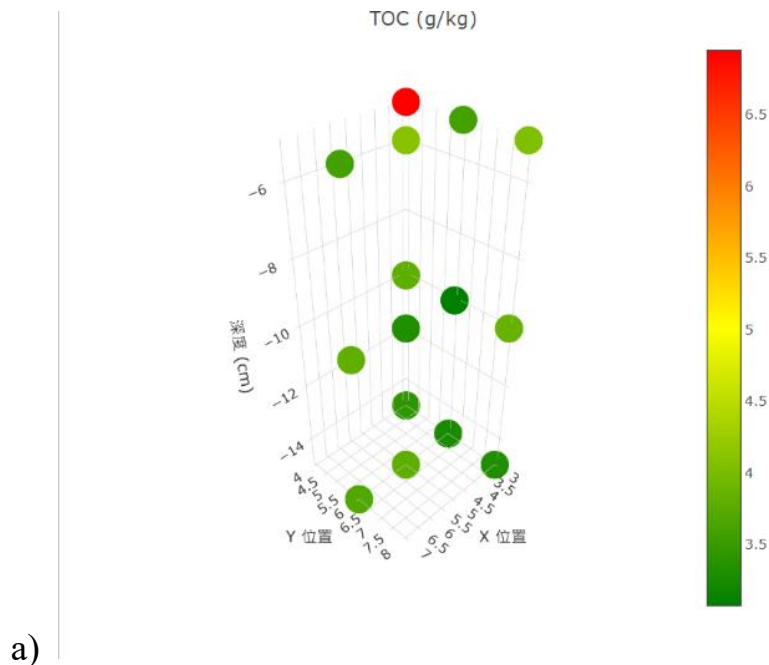
源：本計畫製作)

在 2024 年 12 月 31 日的樣品檢測中，數據顯示 TOC 的平均總量較前一次採樣成長約 6%，而 TN 數值則顯著下降約 52%，整體平均 C/N 比大幅上升 120%，達到 13.38。根據 Z Zhang (2017) 的研究，C/N 比介於 10~20 之間的土壤具有固碳潛力，這意味著穩定的土砂環境不僅能夠促進有機碳的沉積，也有助於提升土壤碳匯的功能(圖 2-20)。從這

一結果可以推論，長期穩定的坡地與水土保持工程對於陸域生態系統中有機碳的穩定具有決定性影響。

進一步對比兩次採樣結果，除了 TOC 與 C/N 比的上升顯示出固碳潛力的增強之外，亦觀察到各採樣點間的數據差異逐漸縮小，顯示該區域的環境具有一定的自然修復能力。這可能與土壤內部生物與非生物因素的動態交互作用有關，使得土壤中的有機物質趨於穩定，進一步增強土壤碳儲存的潛能。因此，本署未來亦將針對擾動較少的深層土壤進行進一步的分析，以探討更具固碳潛力的水土保持工程措施與設計方法，期望能夠為未來的水土保持與碳儲存管理提供更具體的科學依據。

本計劃結果強調了土砂穩定性對碳循環的影響，並提供了與極端氣候事件相關的土壤碳動態變化的科學依據。後續研究將進一步探討不同時間尺度下的碳儲存趨勢，以及不同土壤類型對於固碳效益的潛在影響，以期為氣候變遷適應與水土保持政策提供更具體的參考依據。



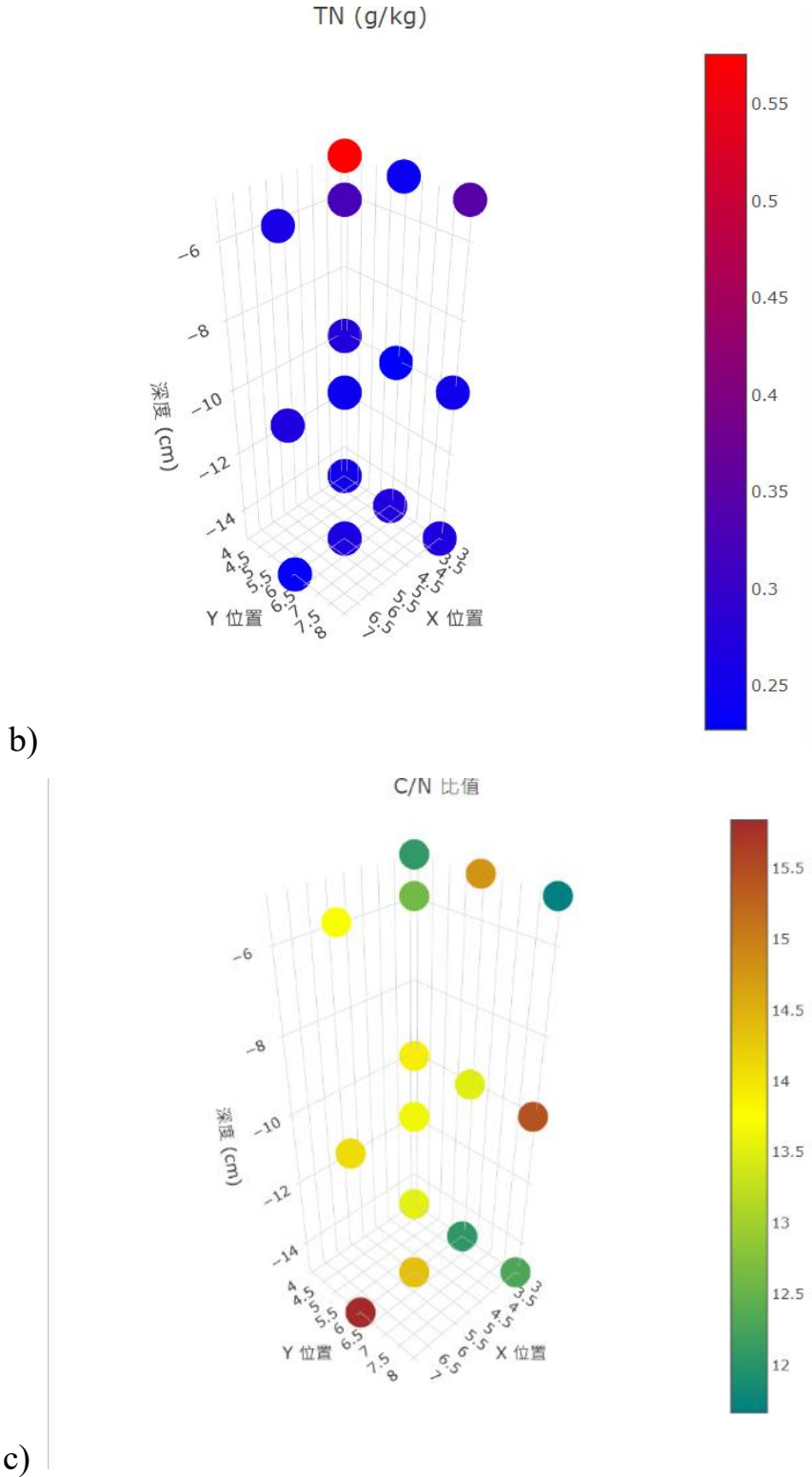


圖 2- 20 1231 採樣位置與檢測數據 a TOC,b TN,c CN ratio(資料來源：本計畫製作)

2. 員山鄉枕山村：大礁溪-01-A11-92 防砂壩

宜蘭縣員山鄉枕山村之防砂壩（代號：大礁溪-01-A11-92，以下簡稱 JX01 防砂壩）作為分析個案，位置如圖 2-21 所示。該壩體設置於雪山山脈東麓的大礁溪中上游支流，屬於典型山區型小型集水區。壩體為封閉式鋼筋混凝土結構（圖 2-22），設計目標主要為削減坡地崩塌所產生之土砂輸送，穩定周邊農地與聚落之安全。依據水農村保署（2020）資料，該防砂壩建於 2003 年前後，壩高約 5 公尺，壩長達 121.5 公尺，具明顯攔截效應，形成穩定之沉積區，壩上游坡度約為 2%。

地理位置方面，JX01 防砂壩座落於東經 121.67 度、北緯 24.78 度，行政區劃屬於宜蘭縣員山鄉，距離宜蘭市區約 20 分鐘車程，交通便利，利於後續之現地調查與樣區布設。集水區面積約為 7.8 平方公里，壩體上游因長年泥砂淤積，已形成地勢相對平坦之沉積平台，覆蓋草生植被與沙洲水道，鄰近地區亦可見果園，顯示具一定程度之人為利用跡象。

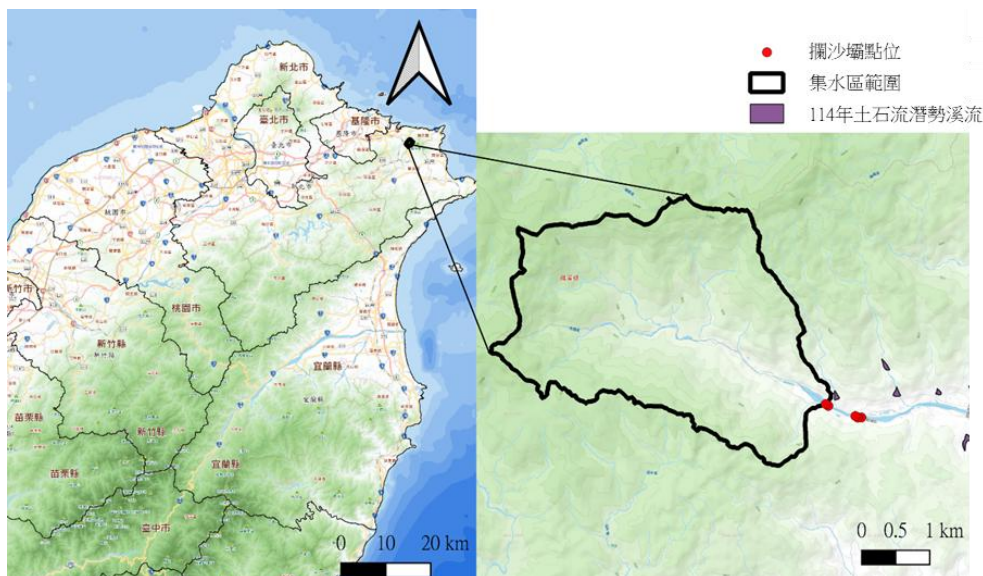


圖 2- 21 研究區域範圍:大礁溪-01-A11-92 防砂壩 (JX01)(資料來源：

本計畫製作)



圖 2- 22 大礁溪-01-A11-92 混凝土防砂壩(資料來源：本計畫製作)

地質方面，該地鄰近大礁溪斷層，屬雪山山脈區域，經輕微變質作用，主要岩性為硬砂岩與硬頁岩，抗蝕性較低，遇集中降雨易致邊坡崩塌與沖蝕，為主要土砂來源。河道沉積層屬全新世沖積層，組成以礫石砂與細粒泥質為主，周邊地層為漸新世乾溝層，主要由硬頁岩或板岩夾薄至厚層之泥質粉砂岩構成（地調所，2000）。

氣候條件方面，依據中央氣象署設於大礁溪之自動測站（站號：C0U870）於 2018 年至 2023 年間之統計資料顯示，當地屬全年有雨、雨量分布不均之型態，年總降雨量變動範圍介於 2,000 至 4,000 毫米之間。從長期月平均雨量分布觀之，秋冬季為主要降雨期，10 月為降雨高峰，反映東北季風挾帶水氣在山麓形成強降雨的特性。氣溫方面，年均溫約為 20°C，氣溫變化幅度小，屬典型副熱帶溫和氣候，有利於植物生產與土壤微生物活動，對於有機碳穩定與再累積提供良好環境條件。

JX01 防砂壩為一具代表性的單一封閉式攔砂構造，其封閉式壩體有利於泥砂之長期滯留與穩定沉積，壩體上游無其他構造物干擾，沉積環境穩定，具備作為碳滯留潛力評估個案之適切性。各層有機碳濃度分布如圖 2-23 至圖 2-25 所示，數值介於 2.42 至 2.69 g/kg 之間，總氮濃度則介於 0.41 至 0.47 g/kg，整體變異幅度不大，顯示該壩體沉積層之碳氮含量較為集中，屬於低至中等水準。

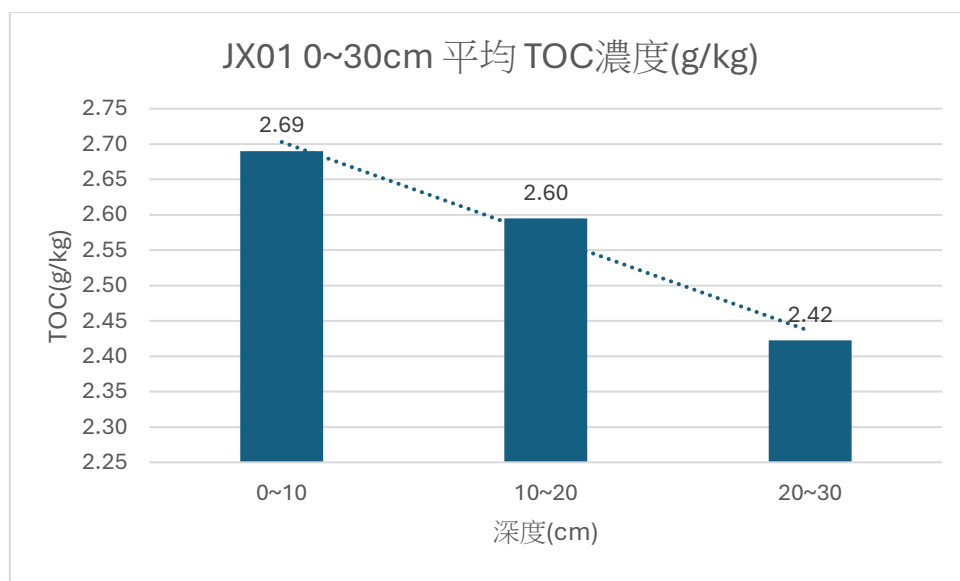


圖 2- 23 JX01 防砂壩 0~30cm 平均 TOC 濃度(g/kg) (資料來源：本計畫製作)

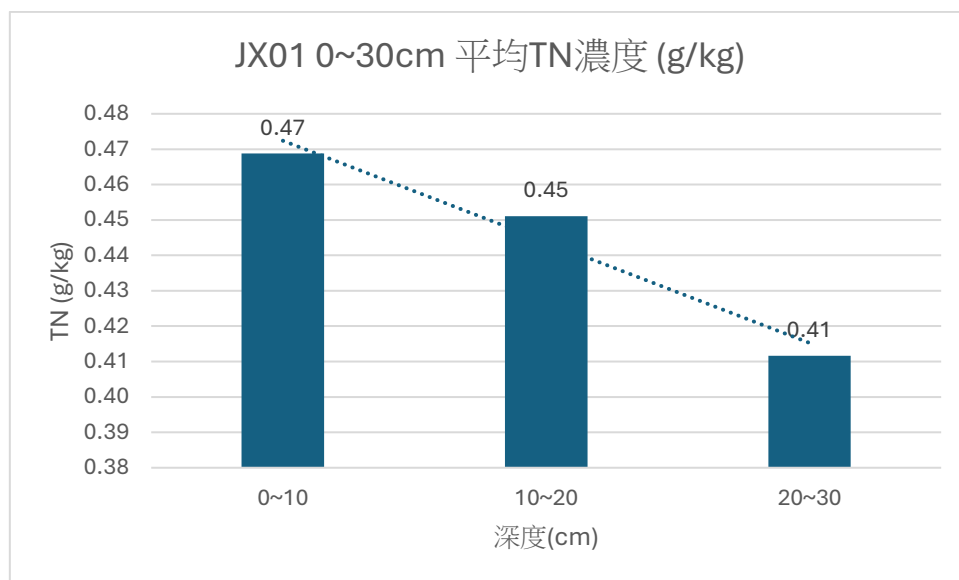


圖 2- 24 JX01 防砂壩 0~30cm 平均 TN 濃度(g/kg) (資料來源：本計畫製作)

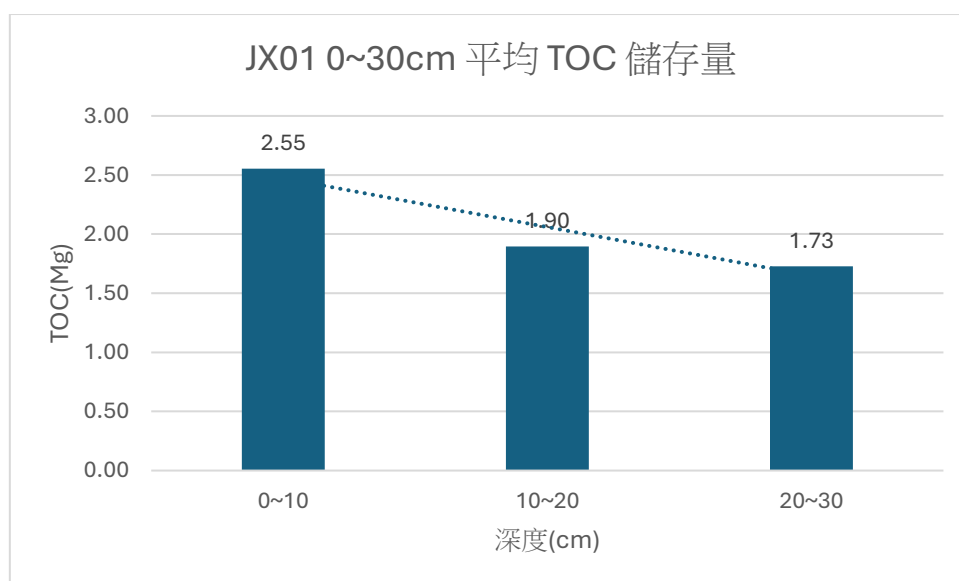


圖 2- 25 JX01 防砂壩 0~30cm 平均 TOC 儲存量(Mg) (資料來源：本計畫製作)

3. 宜蘭地區武雲溪南澳國小 D-01-A11-81 斷面

選定宜蘭縣南澳鄉武雲溪上游之防砂壩（代號：D-01-A11-81，以下簡稱 NA01 防砂壩）為代表性案例，位置如圖 2-26 所示。該壩體位於中央山脈東側南澳闊葉樹林自然保留區邊緣，屬於典型低

海拔山區之小型集水域。根據農村水保署（2020）資料，NA01 為封閉式鋼筋混凝土構造，壩長約 86.9 公尺、壩高約 5.8 公尺，設立於 1992 年前後，設計目的在於削減上游土砂輸移，防止崩積物流入主河道。壩體上游坡度約為 2.2%，下游坡度則為 4.1%，其坡度差異使得壩後沉積與下游沖刷行為具有可觀的比較價值。壩體沉積土砂範圍草本植物生長茂盛，可見其中土壤有機質含量豐富，但為使草本植物在土壤採樣時影響降低，因此本區在採樣時會去除最表層土壤所帶來的影響。採樣的有效深度最深僅可達到 35 公分，因此在採樣規畫上，以 35 公分為最深設計深度。在寬度上，本樣區地形較為開闊，在平行於防砂壩體的方向上採取橫向每五公尺設置一處採樣點，共設置二處，分別為 R 點與 L 點，如圖 2-27、2-28、2-29 所示。在溪流縱向方向上，保持每 50 公尺設置採樣點，共設置二處，分別是距壩體 50 公尺以及 100 公尺處。樣區整體呈現矩型，每個採樣點設計深度為 0~5 公分、5~10 公分、10~15 公分、15~20 公分、20~25 公分、25~30 公分共五種設計深度，總土壤樣本數 24 個。

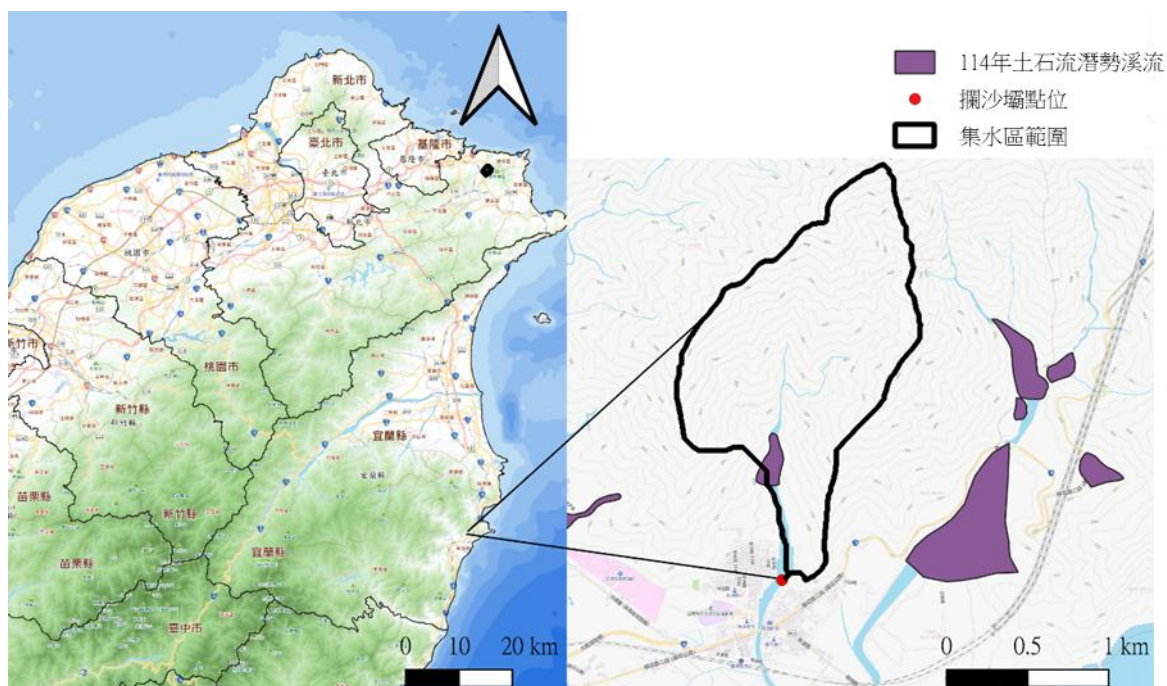


圖 2- 26 研究區域範圍：南澳國小 D-01-A11-81 防砂壩 (NA01) (資料來源：本計畫製作)



圖 2- 27 南澳國小 D-01-A11-81 採樣點(資料來源：本計畫製作)



圖 2- 28 南澳國小 D-01-A11-81 採樣區採用的採樣點設計(資料來源：
本計畫製作)



拍攝日期：2024/8/17

圖 2- 29 南澳國小 D-01-A11-81 採樣現場照片(資料來源：本計畫製作)

由於地勢較為開闊且交通路況良好，適合以機車或小型車進行現地調查與樣本採集。集水區土地利用型態多元，其中闊葉林為主要覆蓋類型，分布於集水區山坡地，維持當地水土保持與生態穩定。防砂壩上方因長期淤積與流路變遷，已形成寬廣的草生平台，地表植被以草叢為主，兼具洪水緩衝與棲地功能。該區亦包含旱田與零星聚落，呈現人為利用與自然地貌共存特徵。沿河道與集水區邊緣設有堤防等基礎設施，形成完整的聚落防災空間。地質方面，NA01 防砂壩集水區內地層多樣。河道區屬全新世沖積層，以礫石與砂為主；周邊地層包括二疊紀之武塔片岩（主要為石墨片岩與石英雲母片岩）及中生代南澳嶺片岩（石英片岩、副片麻岩），岩性相對脆弱，遇集中降雨時易發生崩塌與地表沖蝕，為防砂壩上游主要泥砂來源（地調所，1993）。

氣候方面，根據中央氣象署南澳測站（C0U770）自 2006 年至 2023 年資料顯示，年降雨量普遍介於 2,000 至 3,000 毫米之間，部分年份超過 3,500 毫米，顯示本區為高降雨區域。月雨量分布以 10 月為最高峰，與東北季風帶來之強降雨相關，其次為 8-9 月之颱風季。5-7 月雖為梅雨期，但降雨量相對平均，整體呈現秋季為主的降雨集中型態。年均溫約介於 22.5 至 24.2°C 之間，屬副熱帶濕潤氣候，變化穩定，有利植物與微生物生長，提供土壤有機碳穩定累積之良好條件。現地觀測發現，壩體前方已形成厚達數十至近百公分之淤積平台，沉積物分布完整且下游無其他過水障礙物干擾，形成典型「獨立封閉式壩體」環境。該場址具有顯著之沉積穩定性與代表性，適合作為碳滯留潛力評估樣區。

NA01 防砂壩兼具封閉構造特性、多樣土地利用背景與穩定沉積條件，可作為探討不同坡度與植被條件下封閉式防砂壩碳儲潛力之理想案例。範圍自 14.92 至 20.51 g/kg，總氮濃度則介於 0.63 至 0.92

g/kg。其碳氮含量整體高於 JX01，層間差異亦較為明顯，呈現出一定程度的垂直變化特徵(圖 2-30、2-31、2-32)。

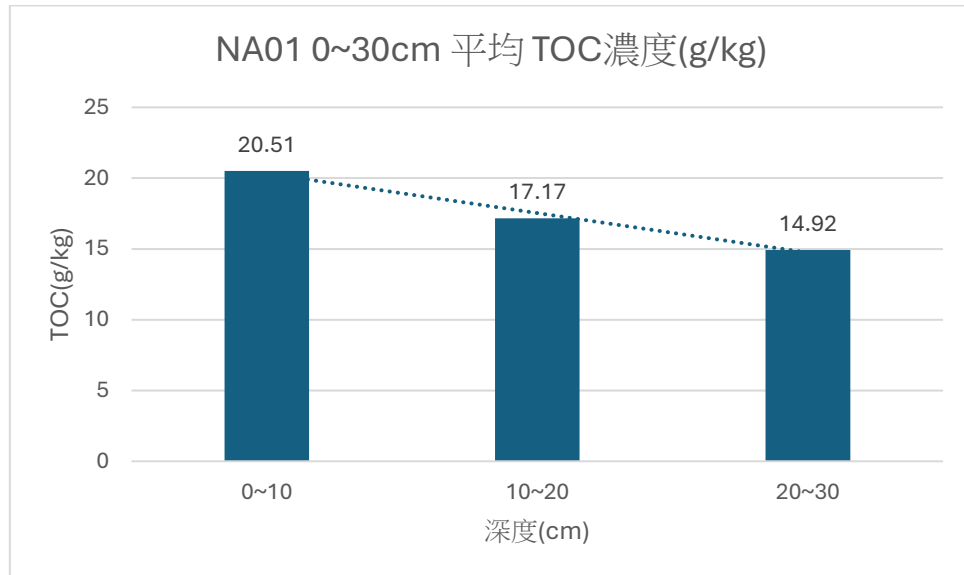


圖 2- 30 NA01 防砂壩 0~30cm 平均 TOC 濃度(g/kg) (資料來源：本計畫製作)

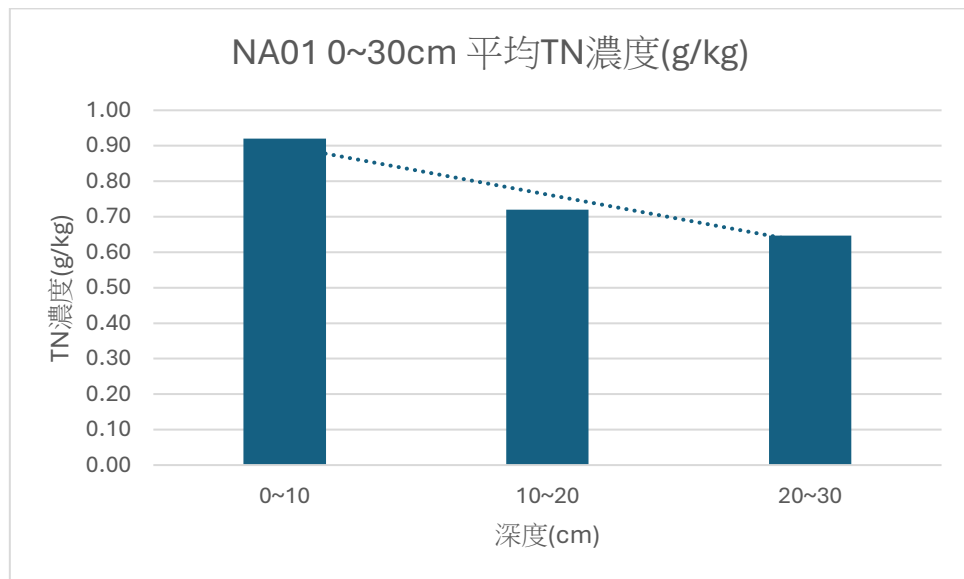


圖 2- 31 NA01 防砂壩 0~30cm 平均 TN 濃度(g/kg) (資料來源：本計畫製作)

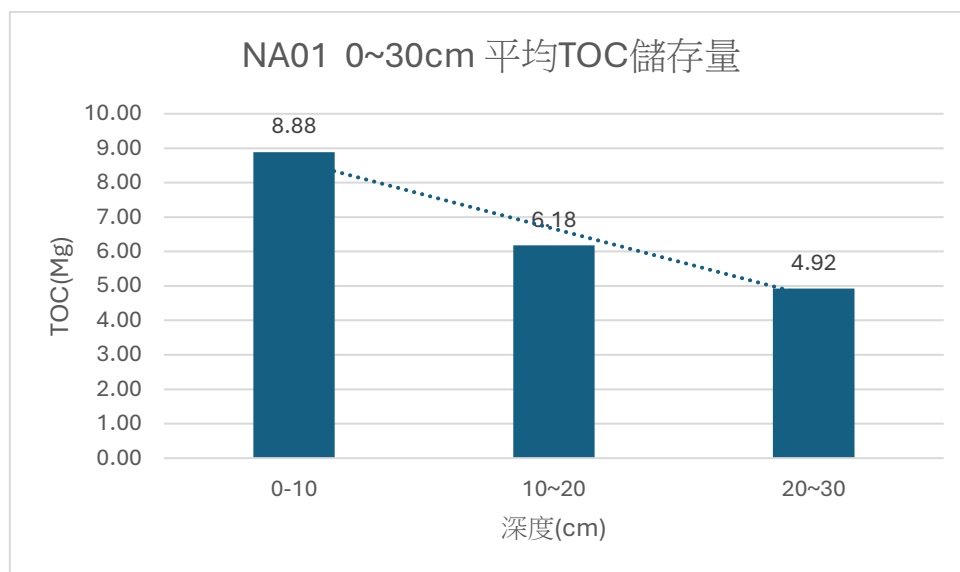


圖 2- 32 NA01 防砂壩 0~30cm 平均 TOC 儲存量(Mg) (資料來源：本計畫製作)

4. 新北市瑞芳區弓橋里大粗坑溪樹梅坪 D-21-A21-91 防砂壩

本計畫第四處選定場址為新北市瑞芳區弓橋里之防砂壩（代號：樹梅坪 D-21-A21-91，以下簡稱 RF02 防砂壩），壩體設置於大粗坑溪上游段，位置座標為北緯 25.09 度、東經 121.83 度（圖 2-33）。該壩體為開放式混凝土梳子壩（圖 2-34），壩長約 71 公尺、壩高約 15 公尺，設計目標在於減緩崩積物流動、攔截中大型土石，進而保護下游河道與交通設施之安全。集水區面積約為 168 公頃，主河道長度約 1.493 公里，壩體上游坡度約為 2.5%，下游則設有固床工與護岸，反映出區域歷來受強烈沖刷與侵蝕之影響（農村水保署，2023）。當地保全對象包含 1-4 戶住戶建物，以及九芎橋路、半嶺路與多座橋梁等重要基礎設施。

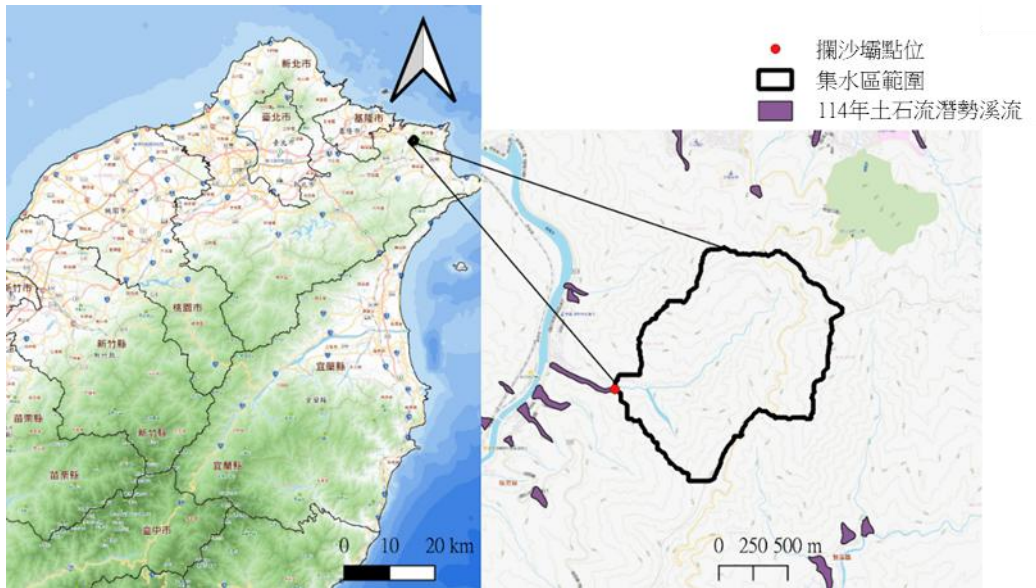


圖 2- 33 研究區域範圍：樹梅坪 D-21-A21-91 防砂壩 (RF02) (資料來源：本計畫製作)



圖 2- 34 樹梅坪 D-21-A21-91 梳子壩本體(資料來源：本計畫製作)

本區位於基隆河支流流域，具高度水文與地質敏感性。根據農村水保署與地方災害紀錄，於 2000 年象神颱風期間，大粗坑溪與基隆河水位迅速上漲，河口水位上升超過 5 公尺，導致九芎橋區域溢流、交通中斷及橋梁損毀，侯硐國小亦遭土石流衝擊而遷校（農委會水保局，

2013)。災後設立之大粗坑土石流觀測站即位於本壩體鄰近區域，顯示該場址在區域防災體系中具有關鍵地位。

土地利用方面，集水區內主要涵蓋闊葉林、草地、住宅與河道用地。闊葉林廣泛分布於兩側山坡與壩體上游，為主要自然覆蓋類型；河道沿線則以草地為主，推測為沖刷裸露地或自然草生地；住宅區集中於地勢較平坦處，與道路相連，並鄰近宗教設施。壩體位於草地與林地交界，呈現自然與人為利用之過渡樣貌。整體而言，該集水區土地利用形態展現出水文調節、生態涵養與人居使用多重功能交織之特性。

地質方面，集水區下游為中新世石底層，以塊狀白砂岩、砂岩及頁岩互層為主，並含煤層交錯；上游則為中新世南港層，主要組成為粉砂岩與頁岩，另夾有更新世石英安山岩。地形以狹長 V 型谷地為主，側坡陡峭、集水快速，易產生短時間高能量徑流，對壩體沉積環境造成強烈影響。氣候條件方面，根據中央氣象署瑞芳測站(C0A660)2001–2023 年氣象資料顯示，年降雨量普遍超過 3,000 毫米，極端年份如 2022 年甚至達 7,000 毫米以上，為典型高降雨區。月降雨分布集中於秋冬季節，10–12 月為全年雨量高峰期，反映東北季風主導氣候機制。夏季相對乾燥，7 月平均雨量僅約 125 毫米。年均溫則於 2010–2023 年間穩定介於 21.5°C 至 22.1°C，屬濕潤穩定之副熱帶氣候，有利於植生固碳與微生物活動，有助於碳滯留作用之長期維持。

RF02 為開放式梳子壩構造，允許水流與部分細粒物質通過，僅攔截較粗大顆粒崩積物，與封閉式壩體在沉積特性上明顯不同，提供本研究探討壩型與碳滯留效率之對比依據。現地調查顯示，壩前已形成一定厚度之碎石與夾細質沉積層。淤積層各深度有機碳濃度分布最低值為 14.62 g/kg，最高值為 21.49 g/kg，兩者皆出現在 0–5 cm 表層。總氮濃

度則分布於 1.72 至 2.48 g/kg，整體碳氮變異程度較大(圖 2-35、2-36、2-37)。

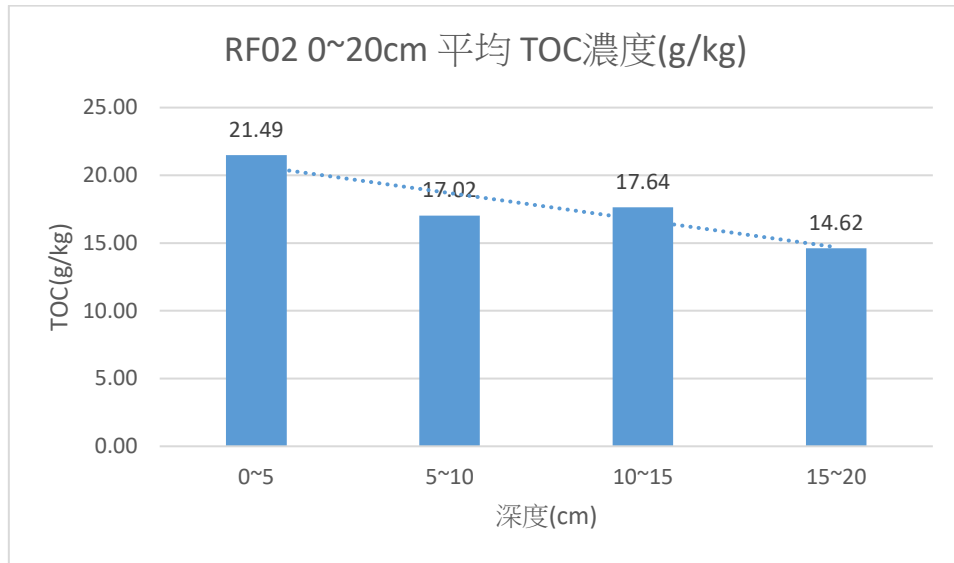


圖 2- 35 RF02 防砂壩 0~20cm 平均 TOC 濃度(g/kg) (資料來源：本計畫製作)

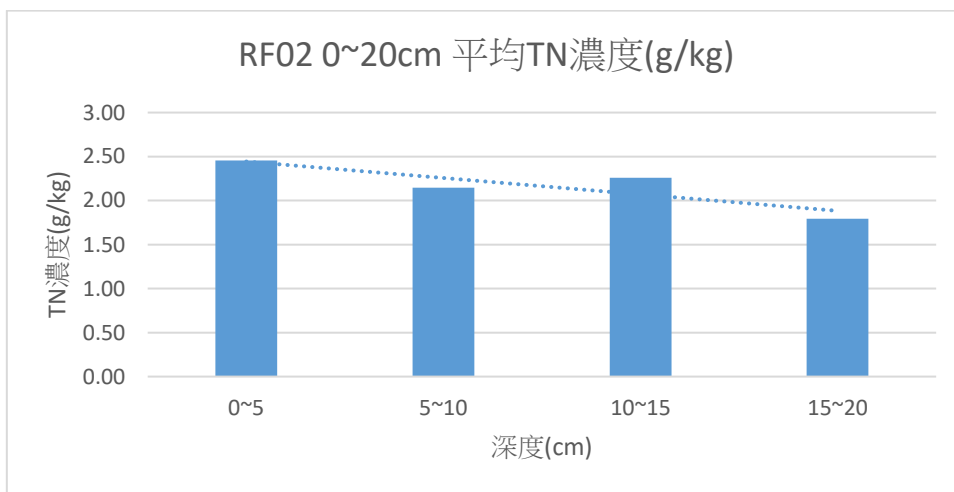


圖 2- 36 RF02 防砂壩 0~20cm 平均 TN 濃度(g/kg) (資料來源：本計畫製作)

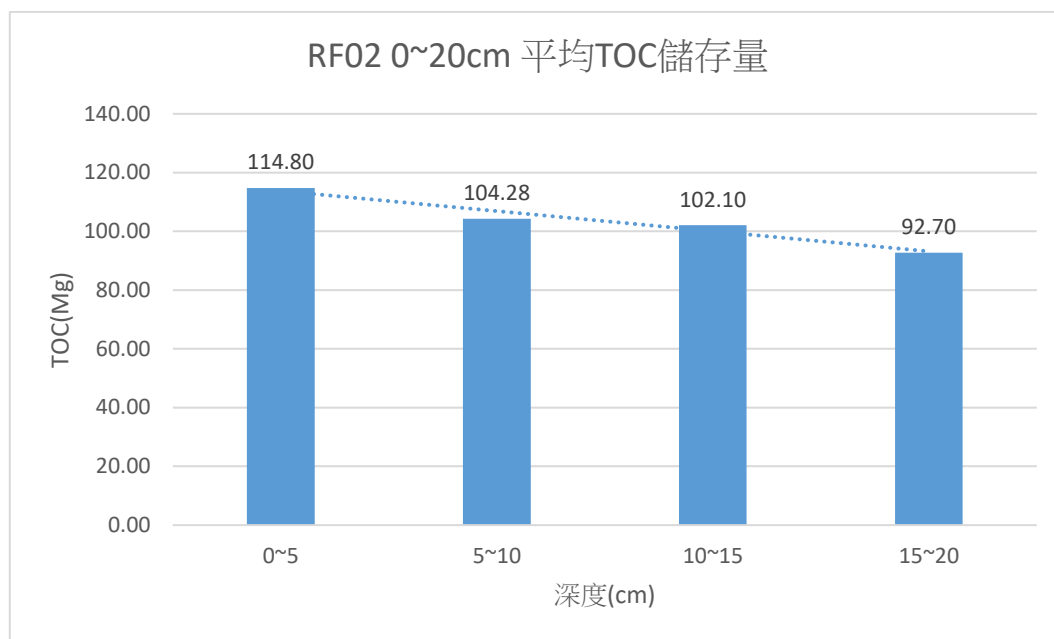


圖 2- 37 RF02 防砂壩 0~20cm 平均 TOC 儲存量(Mg) (資料來源：本計畫製作)

五、防砂構造物土壤碳係數優化

(一)研究目標

本計畫已針對台灣北部的大漢溪流域及東部蘭陽溪流域進行土壤採樣與分析，奠定了台灣碳匯研究的基礎。為擴大研究範疇，更全面性地掌握台灣不同區域之碳匯分布狀況，本年度計畫將延續前期的研究成果，增加分析樣本數並與最新農試所土壤碳匯研究成果進行比對，旨在達成以下目標：

1. 建構台灣不同區域之碳匯分布狀況圖譜：

透過系統性的採樣與實驗室分析，掌握台灣不同集水區、不同土壤樣區的碳匯儲存量，並繪製成碳匯分布圖譜，以利於了解台灣整體碳匯的地理分布特徵。

2. 分析影響台灣碳匯分布之關鍵因子：

探討不同土地利用形式、氣候型態、水土保持技術等因素(圖 2-38)，如何影響台灣地區土壤碳匯的蘊藏量，找出影

響碳匯分布的關鍵因子，為未來的碳匯提升策略提供科學基礎。

3. 評估水土保持技術之碳匯效益：

針對農村發展及水土保持署業務範圍內常見的水土保持技術，如防砂壩、植生復育、土壤改良等，進行碳匯效益評估，量化其在提升碳匯、減緩氣候變遷上的貢獻。

4. 研擬碳匯提升之水土保持技術策略：

基於研究成果，針對台灣不同區域特性與水土保持工程需求，研擬具體可行的碳匯提升技術策略，為未來的水土保持工程注入碳匯思維。

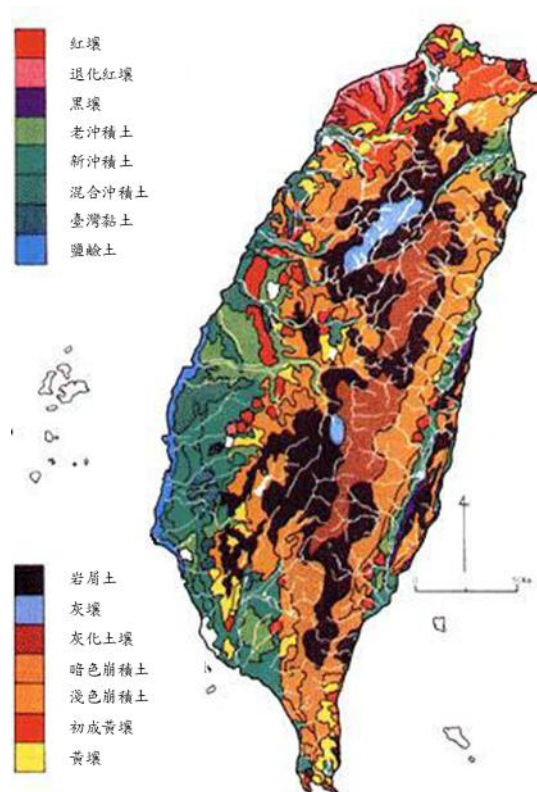


圖 2-38 台灣土壤分布（資料來源：台大農業化學系）

(二)預期成果與效益

1. 奠定台灣碳匯研究之基石，建立國家級碳匯分布基礎資料庫：

本計畫最直接且重要的成果，即是將建構出詳盡的碳匯

分布圖譜。透過系統性、大規模的採樣與分析，將能精確掌握台灣不同區域、不同生態系統之碳匯儲存量，並建立一個可視化的國家級碳匯分布基礎資料庫。此資料庫不僅能提供台灣碳匯空間分布的清晰圖像，更將成為未來相關研究、政策制定與國土規劃最為重要的基礎資訊平台。

2. 精準解析碳匯分布之關鍵驅動因子，提供精準調控之科學依據：

本研究將深入剖析影響台灣碳匯分布的多重環境因子，包含氣候型態、土地利用、土壤類型、地形地貌等。透過嚴謹的統計分析與模型建構，期望釐清各項因子對碳匯量之影響程度與作用機制，進而找出影響台灣碳匯分布的關鍵驅動因子。此項成果將能為未來針對不同區域特性，制定更為精準、更具效益的碳匯提升策略，提供最直接且重要的科學依據，引導資源投入於最關鍵的面向。

3. 量化水土保持工程之碳匯價值，提升工程效益之多元面向評估：

本研究計畫將首度以科學方法量化防砂壩、植生復育、土壤改良等農村水保署業務範疇內常見水土保持技術之碳匯效益。透過精確的數據分析，將能了解各項水土保持技術在提升碳吸存、減緩氣候變遷上的具體貢獻，將碳匯效益納入水土保持工程效益評估體系中，提升工程效益評估的面向，更能彰顯水土保持工程在環境永續上的多元價值，為未來的工程設計與決策提供更全面的評估指標。

4. 研擬客製化碳匯提升策略，具體落實於水土保持技術之應用：

基於本研究的成果，將針對台灣不同區域特性與水土保

持工程之實際需求，研擬一系列具體可行、操作性強的碳匯提升技術策略建議。這些策略建議將涵蓋植生綠碳、土壤碳及水體藍碳等多元面向，提供農村水保署未來在推動相關業務時，可直接採納與應用之參考依據，將研究成果有效轉化為實際行動方案，落實於國土保育與環境永續之實務操作中。

(三)結合大規模坡地土壤碳匯推廣儲碳資料庫

透過前面章節針對不同集水區點位進行採樣及分析，可大致歸納出不同參數影響防砂壩穩固土壤碳匯之效益。針對台灣北部及東部五個採樣點，後續若要將此方法擴及到全台灣需要長時間大範圍的監測，需耗費大量人力及時間成本。故本計畫蒐集農試所大範圍監測全台灣坡地的土壤有機碳含量所繪製的數據地圖，使用之土壤有機碳資料來源可分為兩類：一為農業試驗所透過遙測監測技術推估之土壤有機碳密度（Soil Organic Carbon Density, SOCD，單位： kg/m^3 ），另一為本計畫於防砂壩區域進行的現地採樣與實驗室分析所得之總有機碳含量（Total Organic Carbon, TOC，單位： g/kg ）。前者具有大範圍、連續化之空間覆蓋優勢，但由於屬於遙測反演結果，其估值精度受地表特性、影像解析度與模型假設影響而存在一定不確定性；後者則透過垂直與水平取樣並經實驗室精確量測，能夠反映實際地點之碳含量特性，雖空間覆蓋有限，但具有高準確度與可校正性。由於 TOC 為質量百分比而 SOCD 為體積碳密度(表 2-4)，兩者間須考量體積密度（bulk density）轉換關係，方能進行一致性比較。

表 2-4 土壤有機碳密度與總有機碳含量差異與轉換(資料來源：本計畫製作)

名稱	符號	單位
土壤有機碳密度 (SOC _D)	通常以 kg C/m ³ 或 Mg C/ha 表示	表示「單位體積或面積」土壤中實際儲存的有機碳總量。已經綜合考慮土壤密度與碳含量。
總有機碳含量 (TOC)	通常以 g C/kg soil 表示	表示「單位質量」土壤中碳的比例，也就是含碳百分比 (weight %)，不代表真實的體積或面積碳儲量。

若以適當的體積密度（約 1.3 g/cm³）進行換算，TOC 3.5 g/kg 對應約為 4.55 kg/m³ 的 SOC_D 值，顯示兩者具可比性並可作為交叉驗證基礎。因此，本計畫之現地 TOC 測值可作為高精度驗證資料，用以評估與修正農試所遙測資料之準確性。經由此一比對與校正程序，未來即可將局部實測成果推廣至全台尺度，建立一套兼具精度與效率的土壤碳儲量估算模式(圖 2-39)，以降低傳統大面積採樣所需之時間與人力成本，並提升自然碳匯量化之可信度。

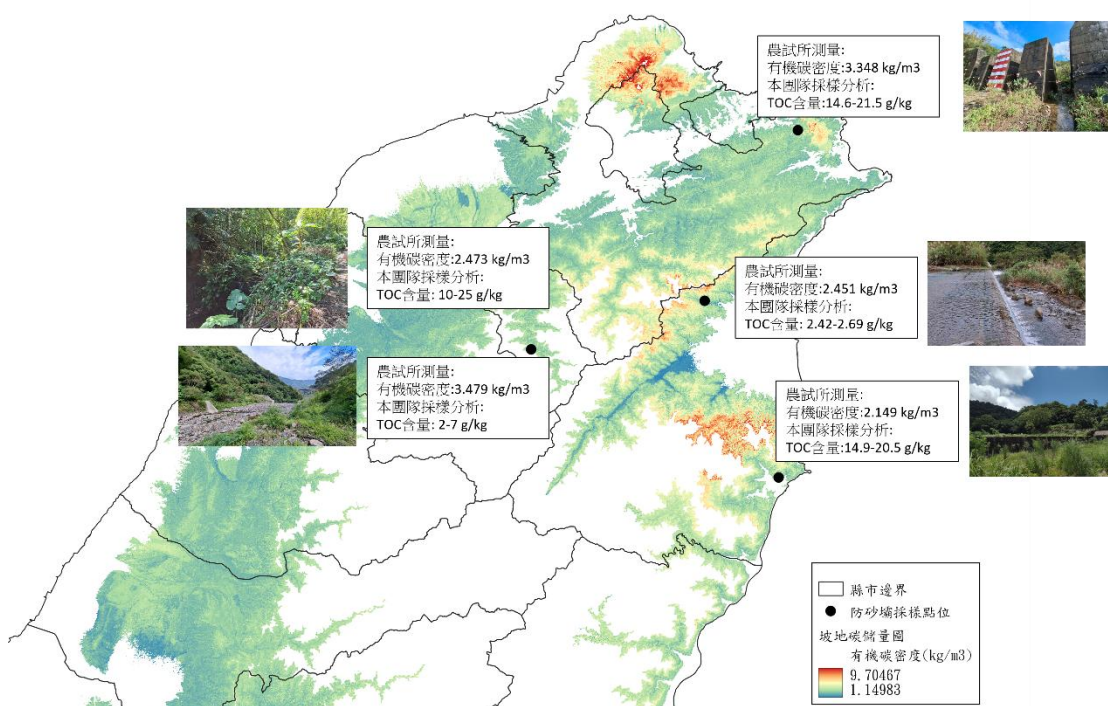


圖 2-39 本計畫實際採樣點位與農試所全台坡地有機碳含量分析比較 (資料來源：本計畫製作)

第二節 研擬防砂構造物增匯策略

一、土壤品質改善

依據聯合國糧農組織《全球土壤再固碳》手冊所述，多重因素共同影響著土壤碳的蘊藏量，其中包括不同的土地利用形式、多樣的氣候型態，以及各種水土保持技術的應用。提升植生品質能有效增加碳匯潛能，而土壤本身即為碳的重要儲存庫，其中有機質更是土壤碳的主要存在形式。土壤的健康程度及其分解速率，皆直接影響到土壤碳匯的產生量。在本署業務範圍內的林地土壤中，有機碳庫量估計介於每公頃 61 至 278 公噸之間，此數據顯示，相同面積的林地，其土壤碳儲存量往往高於台灣森林地區的綠碳碳匯量(林業及自然保育署，2005)。反之，當土地利用型態由原生林轉變為耕種農地時，將導致土壤有機碳的顯著流失，在熱帶地區，其減少量更可能達到 23%至 38%左右 (Pabst et al., 2016)。因此，單純從碳匯量體的角度來分析，維持森林的現存狀態，對於提升綠碳及土壤碳皆具有正面的效益。

有鑑於本署 111 年度「水土保持碳匯量評估及永續發展指標研究計畫」已針對綠碳及藍碳提出完善的計算方法與增匯策略，故本篇文章將聚焦於土壤碳，深入探討對應的增匯手段。水土保持技術不僅能有效控制土壤侵蝕，並提供邊坡穩定防治功能，更可進一步透過改善土壤品質，提升土壤安定性，進而達到增加碳匯的效益。另一方面，防砂壩工程作為本署過去常用於穩固砂土，以降低坡地災害的工程手段之一(聯合國糧農組織, 2021)，其功能在於使上游土砂趨於穩定，減少外力干擾，以降低土壤滑動的不穩定性，並能促使部分土砂留存於上游區域，增加土砂總量，這些作用皆有助於土壤碳儲存量的提升。

(一) 土壤改良

依據農村水保署所頒布之《水土保持手冊》內容所示，土壤改良與地形改造為水土保持方法中至為關鍵的兩大面向。其核心理念在於巧妙地結合自然材料的特性，並輔以適切的人為技術，進而研發出多樣化且具備實用性的水土保持方法。在眾多土壤改良手段中，主要可歸納出綠肥種植、堆肥廢棄物回收利用，以及土壤改良劑之施用等三大類別。後續章節將針對上述土壤改良方法，逐一進行詳細的說明與解析，以期更深入瞭解各種方法之特性與應用範疇。

1. 綠肥種植

綠肥種植作為一種有效的土壤改良策略，其原理為在土地休耕期間或作物生長初期，種植特定的綠肥植物，藉此提升土壤有機質含量。綠肥植物通常選用多年生草本或雜草，此類植物普遍具備生長快速且植株密度高的特性，能在相對短暫的生長週期內，產生豐沛的有機物質，進而改善土壤的多項屬性。透過綠肥的種植，得以藉由其固氮作用、促進土壤微生物活性，以及增加有機質輸入等多重機制，有效提高土壤中的有機質含量，進而全面改良土壤的生物、物理及化學性質(如圖 2-40 所示)。綠肥的種植方式，可單獨實施，亦可與其他耕作技術或輪作模式相互結合，進而形成更為綜合且高效的土壤改良措施。長期而言，綠肥種植有助於提升土壤品質，增加土壤有機質，進而提高農作物的產量與品質，同時亦能兼顧環境保護，強化生態系統的穩穩定性。在減碳的效益中，綠肥植物因為具有生長快速及高密度生長的特質，在生長階段中可吸收大量二氧化碳，並將其轉化為有機質。當它們死亡並分解時，會將這些有機質添加到土壤中，增加土壤的有機質含量。



圖 2- 40 豆科綠肥作物在果園的栽培以及改良土壤利用(台南區農業改良場)(資料來源：本計畫製作)

2. 土壤改良劑

土壤改良劑，泛指各式可透過提升土壤品質，進而增加土壤有機碳含量的添加物，其主要目標在於有效預防水土流失，維持土壤肥沃度，減緩土壤侵蝕作用，並同時促進植物生長。常見的土壤改良劑種類繁多，其中包括生物炭、沉積物以及有機肥料等多種類型。土壤改良劑在水土保持工程領域中應用廣泛，尤其適用於坡地侵蝕控制(農村水保署，2022)。

(二)綠色植生緩衝帶

緩衝帶與樹籬作為河道及野溪周邊常見的植被帶形式，在生態環境維護上扮演著多重角色，其功能範疇廣泛，包括水質保護、生物棲地改善、透過防止河岸侵蝕以提升邊坡安全，以及促進碳固存等多項效益(如圖 2-41 所示)。緩衝帶植生可藉由其攔截及過濾功能，有效增加土壤有機碳的原地保留量，並透過延長地表逕流的匯流時間，進而提高雨水滲入土壤的比例，同時亦能增進土壤微生物的活性，多方面提升土壤有機碳的總儲量(Bentrup,2008; Borin et al., 2010)。於更廣闊

的區域尺度而言，連續性的樹籬與木本植物緩衝區，可透過其地上植物生物量以及土壤中的碳捕獲能力，有效減緩氣候變遷所帶來的負面衝擊，發揮其環境保護之價值。

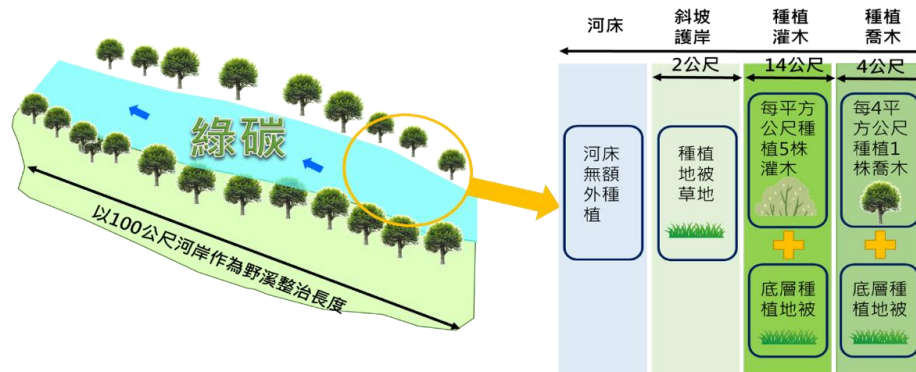


圖 2- 41 野溪整治緩衝綠帶及植生建議分布示意圖(資料來源：本計畫製作)

(三)種植樹木避免過度翻土

根據 Costantini et al. (2018)提出的調查數據顯示，土壤有機碳庫存主要集中於地表下 0 至 60 公分的土壤深度範圍內。而水土保持措施的有效性，亦可影響地表以下 1 公尺深度的土壤有機碳含量(FAO, 2021)，此數據顯示，農業耕作行為中若過度進行土壤翻耕，將可能擾亂深層原始土壤結構，並剷除富含有機物質的表層土壤，進而導致富含有機物質的土壤層面遭受破壞與流失(Ramos et al., 2007)。過度翻耕亦將改變土壤結構以及土壤生物活性。若長期且過度地進行土壤翻耕，恐將導致土壤碳貯存量逐漸減少，進而降低土壤的肥沃程度與水分保持能力。因此，土壤翻耕的正確程序與合適工具之選擇，應依據具體的土壤類型以及目標作物的生長需求來審慎決定，方能兼顧生產效益與環境永續。

透過比較分析剝蝕土壤與未剝蝕土壤的相關特性，研究證實兩者在植物生根速度、有效含水量、總氮含量、陽離子交換能力、土壤容積密度以及碳酸鹽濃度等多項指標上，皆存在顯著的差異性(Costantini et al., 2018)。較為適宜的土壤翻耕方法，或可在利用程度較低的土地上，

採取自然翻土法，透過自然腐爛過程形成有機物質，從而增加土壤肥力與水分保持能力，並同時促進土壤碳的有效貯存。若在土地利用程度較高，或是以農業生產為主要目的之區域，則可考慮採用深翻與表層翻交替的耕作方法，逐年將不同深度的土壤翻入表層，以維持土壤的生產力。

綜合上述研究可知，避免過度土壤翻耕，確實有助於累積土壤碳匯，並減緩氣候變遷的負面影響。此外，未受剝蝕土壤所展現的更優良土壤品質，對於緩解氣候變遷亦具有正面的貢獻 (Shi et al., 2009)。

二、土砂穩固增加碳匯

依據農村水保署於 2022 年完成之「水土保持碳匯量評估及永續發展指標研究計畫」，該計畫基於署內業務範疇中具備潛力的碳匯項目，研擬了相關估算公式，並針對近年度的工程金質獎項，進行碳匯量之估算與效益評估。遵循農業部所提出之 2040 年碳中和目標制定規劃藍圖，將有助於本計畫研擬更為精進之碳匯提升水土保持技術。

(一)水土保持防砂壩

防砂壩是一種廣泛採用的土地保育工程措施，其主要功能在於有效防止土砂流失，進而減輕水土流失對環境所造成的負面影響。作為一種專門為防治溝壑侵蝕而設置的水土保持設施，防砂壩的主要目的為降低水流速度，並促進沉積物於上游區域堆積。透過沉積作用的強化，防砂壩後方的土壤體積得以增加，土壤碳儲存量亦隨之提升，同時也增強了環境的整體穩定性。

儘管防砂壩本身並不能直接影響二氧化碳(CO₂)的排放量，且其所攔截沉積物的碳含量，通常較周圍未受攔截的土壤為低(Addisu and Mekonnen, 2019)，然而，防砂壩在減緩土壤侵蝕與沖刷方面，確實發揮著關鍵作用。相關研究指出，設置防砂壩的溝壑集水區，其總體碳固存

量可能高於未設置防砂壩的集水區(Boix-Fayos et al., 2017)。若能更進一步將防砂壩工程與因土砂穩固而形成的植生復育以及生態系統恢復措施相結合，其在保護河道與河岸穩定性的同時，亦將有助於保護河岸及坡地的植被，進而促進更為顯著的固碳過程，提升整體集水區的碳庫存量(如圖 2-42 所示)。

從防災減災的角度來看，防砂壩可透過穩定砂土，有效減輕洪水事件以及山洪土石流所造成的衝擊。且穩定的土壤環境，亦能支持與氣候相關的各項生態系服務(Nyssen et al., 2004)，使其在氣候變遷的緩解以及氣候變遷風險的調適層面，皆能展現其積極的助益。

針對防砂壩對土壤碳匯的效益而言，主要可歸納出數項潛在的正面影響：

土壤碳固定：防砂壩可有效減緩水流速度及土壤沖刷作用，此作用機制有助於土壤有機質的積累，並促進碳元素的長期固存，進而提升土壤碳匯的效益。強調透過有效抑制土壤侵蝕與崩塌，有助於減少土壤有機碳的逸散與損失，進而間接避免碳儲存在地景系統中的損耗，具備碳匯維持與穩定之功能。換言之，若坡地因強降雨導致侵蝕或崩塌，不僅造成地表土壤有機碳流失，隨之釋放至大氣或水體中，亦削弱原本具儲碳功能之土壤結構。反之，透過防砂構造物與植生穩定工程，能有效減少此類擾動風險，達到維持既有碳匯、避免非預期碳損耗之作用。透過本計畫前述各防砂壩樣區之分析結果，防砂壩上游形成的沉積平台，經年累積土砂後發展出草生地或次生植被覆蓋，不僅穩定地形，亦提供潛在的碳匯熱點。此類沉積區塊的穩定化，有助於提升土壤有機碳(TOC)之滯留與累積，並降低因再侵蝕或沖刷而釋出碳的風險，展現其在碳動態循環中扮演之積碳與儲碳角色。研究亦透過分析不同植生類型與坡度條件下之有機碳濃度分布，進一步建立碳匯潛勢空間模式，佐證防砂

壩不僅具備治山防災功能，亦能兼具生態碳匯效益，為低碳水保工程實踐提供實證依據與操作參考。

植被保護：防砂壩亦能有效減少水土流失現象，降低土壤侵蝕對植被造成的損害。植被受到妥善保護後，可進一步促進生物活動的蓬勃發展，以及有機物質的累積，間接促進土壤碳匯的形成。

促進水文循環：防砂壩具有調節降雨逕流的功能，可減少洪澇災害的發生頻率，並維護區域水文循環的穩定性。健全的水文循環系統，有助於提升土壤水分含量，並加速有機物分解速率，從而更有效地促進土壤碳匯的累積。

在土壤沖蝕問題極為嚴峻的黃土高原地區，大規模建設的水土保持工程措施主要可區分為溝道水土保持工程以及坡面水土保持工程兩大類別。

針對溝道所實施的水土保持工程措施，主要以淤地壩(防砂壩)為代表，近年來亦發展出治溝造地、固溝保塬等多元工程措施。根據學者楊磊(2020)針對黃土高原水土保持措施對生態系統之影響所進行的調查研究顯示，黃土高原地區大規模水土保持工程之建設，使得該區域進入黃河之泥沙量得以快速銳減。其中，防砂壩可有效地攔截來自上游坡面與溝道之侵蝕土壤，促使大量土砂於壩體內沉積，直接減少匯流區域進入河流之泥沙總量，同時亦能有效攔截地表逕流，減輕逕流對於溝谷的沖刷力道。據相關估算指出，黃土高原地區防砂壩之固碳量已達到驚人的 9.52 億公斤。坡面土壤因長期受侵蝕作用影響，其表層土壤之碳含量通常較高，且侵蝕作用本身所具備的選擇性，亦將導致土壤中富含碳成分之黏粒及粉粒優先被搬運與遷移，因此，在防砂壩、水平溝、以及隔坡梯田等工程措施所形成的沉積物中，經常可觀察到碳富集現象。此外，由於淤地壩區域內之土壤受到壓實作用影響，導致空氣流通性較差，

進而抑制了土壤微生物之活性，降低了土壤有機碳的礦化分解速率，有效提升了淤地壩作為陸地生態系統碳匯的潛力。

此外，防砂壩在中國大陸或部分乾燥區域，亦能發揮防止沙漠化擴散之效用，進而保護既有之森林生態系統，使其樹木健康程度得以提升，並增加其綠碳儲存潛力。透過更進一步的妥善管理，更可積極恢復沙漠化區域的生態系統，有效提高植物覆蓋率，最終達到提升整體區域碳匯潛力之目標。



圖 2- 42 防砂壩穩定土壤提升碳匯說明圖(綠色為針對植生量的提升，黃色為針對植生土壤的品質提升)(資料來源：本計畫製作)

第三節 建立防砂構造物土壤碳匯 MRV 系統

一、標準化監測作業流程建立

(一)採樣方法-手動式土壤採樣器

1. 範圍

本方法適用於場址未受汙染之土壤樣品中總體密度及總有機碳含量之測定，故依據前小節統整出之採樣樣點劃定實際採樣範圍。

2. 土樣干擾

- (1) 採集土壤有機碳監測之樣品時，應避免使用旋鑽式器具，以防止土壤團粒因旋轉而受到擾動重組，進而影響土壤總體密度之測定。
- (2) 採樣時，應注意現場環境之干擾及採集工具之交互污染。任何有機物的接觸可能都會污染樣品，應避免容器、樣品杯及儀器管路的污染。

3. 儀器設備與材料準備

- (1) 土壤有機碳之採樣組(敲擊十字把手、30 公分劈管採樣管(直徑 6.25 公分)、採樣管管帽、採樣鑽頭、延伸桿)：如圖 2-43 之 1~5，以不鏽鋼製或其他金屬製採樣管，用敲擊槌(如圖 2-43 之 6)以敲擊方式迫使土壤移入採樣管中，則可得較不擾動之土壤樣品，可使用雪克錘採樣(如圖 2-43 之 7)。
- (2) 採樣襯管及橡膠管帽：
如圖 2-43 之 8，亦可作為樣品容器，適用於檢測無機項目(如重金屬)之採樣。若使用塑膠襯管採集有機項目分析之土樣時，則不可作為保存容器，必須將土壤保存於玻璃容器中。
- (3) 拔管器套件(底座、支撐架、取樣環及力臂)：
如圖 2-43 之 9，拔管器是以槓桿原理為設計原理，以較省力且不擾動到土壤之方法，將採樣管從土壤中取出之工具。



圖 2-43 土壤採樣器材(資料來源：本計畫製作)

(二)採樣步驟

1. 採樣設計

聯合國糧食及農業組織於 2020 年發行的「全球土壤有機碳儲量監測、報告、及查證技術手冊」中，曾建議初步干預區域之劃分原則。然而，考量到防砂壩之囚砂範圍面積通常不足 0.25 至 0.3 公頃，若逕行採用該手冊之建議，可能在實際操作上有所限制。因此，本研究調整採樣策略，轉為參考文獻中針對防砂壩所提出的採樣方法，亦即在平行於壩體方向上，每隔 0.5 至 1 公尺間距，分別於深度 0.3 公尺、0.6 公尺以及 0.9 公尺處進行現地土壤採樣，詳細採樣說明可參照圖 2-44 所示(J. Mongil-Manso et al., 2019)。其中防砂構造物土壤碳係數優化之採樣點分布建構，本計畫之設計邏輯係依據防砂壩上游沉積地形的演變機制與可能之碳累積異質性分布，綜合

坡度變化、植生覆蓋類型與淤積厚度差異，採取垂直與水平分層之格點式採樣配置。具體而言，樣點依壩體上游沉積平台劃分為上、中、下游（橫向）及高程、中程、低程（縱向）三區段，形成具有空間連續性的碳傳輸樣區網絡，藉以推估碳滯留與累積之空間變異趨勢，作為碳動態模式建構之基礎。在碳傳輸系統觀點下，本計畫將防砂構造物視為坡面至河道之間的碳沉積節點，透過沉積作用與地表覆蓋減緩有機碳逸散，樣點配置亦同步考量沉積過程中可能出現的碳濃度梯度變化與物理擾動條件，期能從空間與深度雙重維度重建區域碳累積與傳輸之路徑與邏輯。

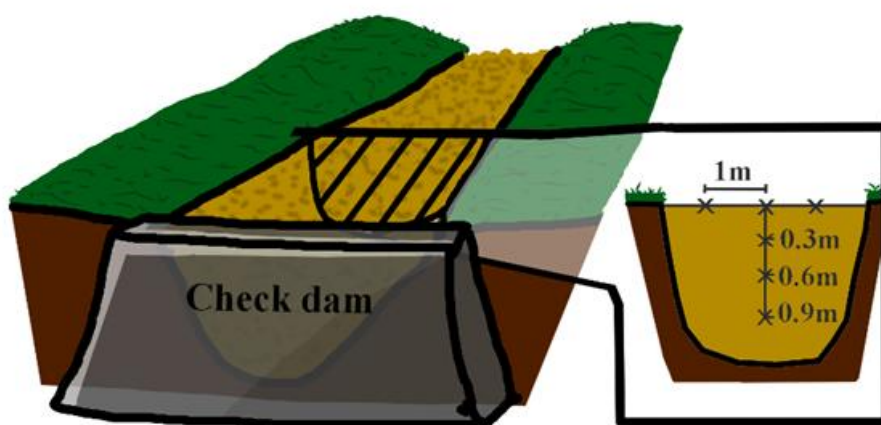


圖 2- 44 土壤採樣點位示意圖(資料來源：本計畫製作)

2. 氣動式土壤採樣

- (1) 將 30 公分採樣管、採樣管帽、採樣鑽頭與採樣延伸桿的輪牙部分塗上黃油並組裝。
- (2) 將採樣襯管裝入 30 公分採樣管中後，旋上敲擊十字把手。
- (3) 以採樣鏟移除地表覆蓋物(如石礫、植被)，再挖取表土；或在已用機具挖開之土層剖面一定深度處直接以採樣

器取土。

- (4) 垂直於土面以壓力配合手動式土壤採樣器套組使土壤移入土壤採樣器中，則可得較不擾動之土壤樣品。
- (5) 採至目標深度的土壤。
- (6) 將拔管器的取樣環、力臂組裝於底座。
- (7) 將已組裝完畢之拔管器套入採樣延伸桿(圖 2-45)。
- (8) 適當在取樣環與採樣管中塞入土屑，幫助更易將採樣管從地底取出(圖 2-46)。
- (9) 取出採樣管，於採樣視管上標註採樣管註明採樣者、採樣編號、採樣地點、採樣時間及採樣深度，並蓋上橡膠管帽。
- (10) 若採樣後無法立即將其乾燥，應將土壤樣品保持在 4°C 的陰暗環境以降低微生物活性，且保存時間最好不超過 28 天，因為在 4°C 時微生物分解並不會完全停止，這可能會導致有機質的損失，但也不建議冷凍。當樣品中存在大量根或大型動物(例如蚯蚓)時，應在 1 週內對其進行處理，以確保土壤有機碳濃度不會因這些成分的分解而改變。
- (11) 採樣完畢後，應將現場挖出之棄土回填並夯實。
- (12) 使用清潔刷將採樣管上多餘土屑刷除清潔得到採樣成品(圖 2-47)。



圖 2- 45 組裝過程(資料來源：本計畫製作)



圖 2- 46 採樣過程(資料來源：本計畫製作)



圖 2- 47 土壤採樣成品(資料來源：本計畫製作)

(三)分析方法

土壤有機碳儲備量的量測方法相當多元，現階段較為普遍採用的方法包括同位素測量技術、實驗室熏蒸法分析、乾燥燃燒法，以及光譜學法等多種途徑。不同的量測方法，在不同的應用情境、預算考量，以及精準度要求下，皆有其各自的適用性。若欲深入瞭解個別方法的詳細

介紹，可參閱本研究之「4-3 碳匯係數應用之先期研究」章節，以獲得更為詳盡的資訊。

(四)分析步驟

綜合考量操作性、實驗精密度，以及方法之容錯程度等因素，本計畫最終選用高溫燃燒法，作為主要之土壤碳含量檢測方法。高溫燃燒法的基本原理，是將土壤樣品置於高溫環境下進行燃燒，使土壤中的碳元素充分氧化，並以二氧化碳(CO₂)的形式釋放出來。隨後，透過精密的儀器設備，針對燃燒後所析出之二氧化碳氣體，進行濃度含量的精確分析。藉由量測所得之二氧化碳濃度數據，即可進一步換算推估出原始土壤樣品中所蘊含之有機碳含量，以下將針對高溫燃燒法的詳細操作步驟進行更深入的說明。

1. 簡介

- (1) 將經適當保存的較不擾動土壤樣品前處理後，進行總體密度、土壤有總有機碳分析。
- (2) 使用總有機碳分析儀以高溫裂解/燃燒樣品，產生二氧化碳，使用檢測器(NDIR,非分散式紅外線)檢測二氧化碳含量。
- (3) 以總有機碳分析儀所測得之總有機碳含量乘以轉換係數 1.723 計算得有機質含量。

2. 儀器介紹

本次研究計畫在土壤樣品之總碳(TC)、總有機碳(TOC)以及總氮(TN)含量檢測分析作業上，主要採用 AnalytikJena 公司的 multiwinN/C2100S 型號儀器(如圖 2-48 所示)。

此款儀器廣泛應用於環境監測、水質分析以及工業製程等領域之樣品檢測，以其高靈敏度、精確度與可靠性而著稱，尤其適用於處理多種類型之水質樣品，包括地表水、地下水、飲用水乃至於廢水等。

Analytik Jena multiwin N/C 2100S 儀器之運作原理，是採用燃燒-紅外線測定法進行二氧化碳(CO₂)檢測，進而反向推算出土壤樣品中所含有的總碳(TC)含量。在儀器運作過程中，樣品會在高溫燃燒催化氧化，或是過硫酸鹽氧化的條件下進行處理，使樣品中所包含的有機碳(OC)以及無機碳(IC)成分完全氧化，最終形成二氧化碳，再進行精確檢測。

此儀器在燃燒程序中，最高溫度可達到攝氏 950 度，每個樣品的量測時間約為 3 至 5 分鐘，單次可量測之樣品體積上限為 500 微升(μL)。由於單次量測之樣品體積極小，因此在進行土壤樣品預處理時，務必進行充分且均勻的混合，以確保分析結果之代表性與準確性。



圖 2- 48 本計畫採用乾燥燃燒儀器照片(資料來源：本計畫製作)

3. 儀器操作(圖 2-49)

- (1) 開機預熱 15 分鐘，使儀器內部達到足以使土樣完全氧化脂溫度。
- (2) 將空的樣船(樣品容器，BOAT)進行高溫燃燒，使其去除沾染於樣船上的背景污染物(灰塵等)，以避免樣船上之污染物與土壤樣品產生交叉污染。
- (3) N(氮元素)標準品配置，使用 KNO_3 (分子量:101.1)1.8035 克， $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (分子量:132.4)1.1798 克，與水溶解後定量至 1000ml。
- (4) 碳元素標準品配置，KHP($\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH})(\text{COOK})$)2.1254 克，藥品加入燒杯並以 N 標準品溶液稀釋定量致 100ml。
- (5) 繪製檢量線，本步驟目的在於利用已知濃度的標準樣品對儀器進行校準，使分析結果符合真實情況。本步驟所繪製出的減量線僅作為該次檢測時所使用之標準檢量線。
- (6) 盛裝土壤樣品 20~25 μg ，放入儀器進行分析，並得出結果。
- (7) 注意事項:
 - 樣船在承裝土壤樣品前須先進行高溫燃燒。
 - 樣船在放置時須用乾淨的鑷子夾取，以避免污染。
 - 土壤樣品前處理在過篩 2mm 篩後仍須進行研磨至 0.5mm。
 - 放入樣船後務必上鎖，以避免氣體及溫度洩漏。

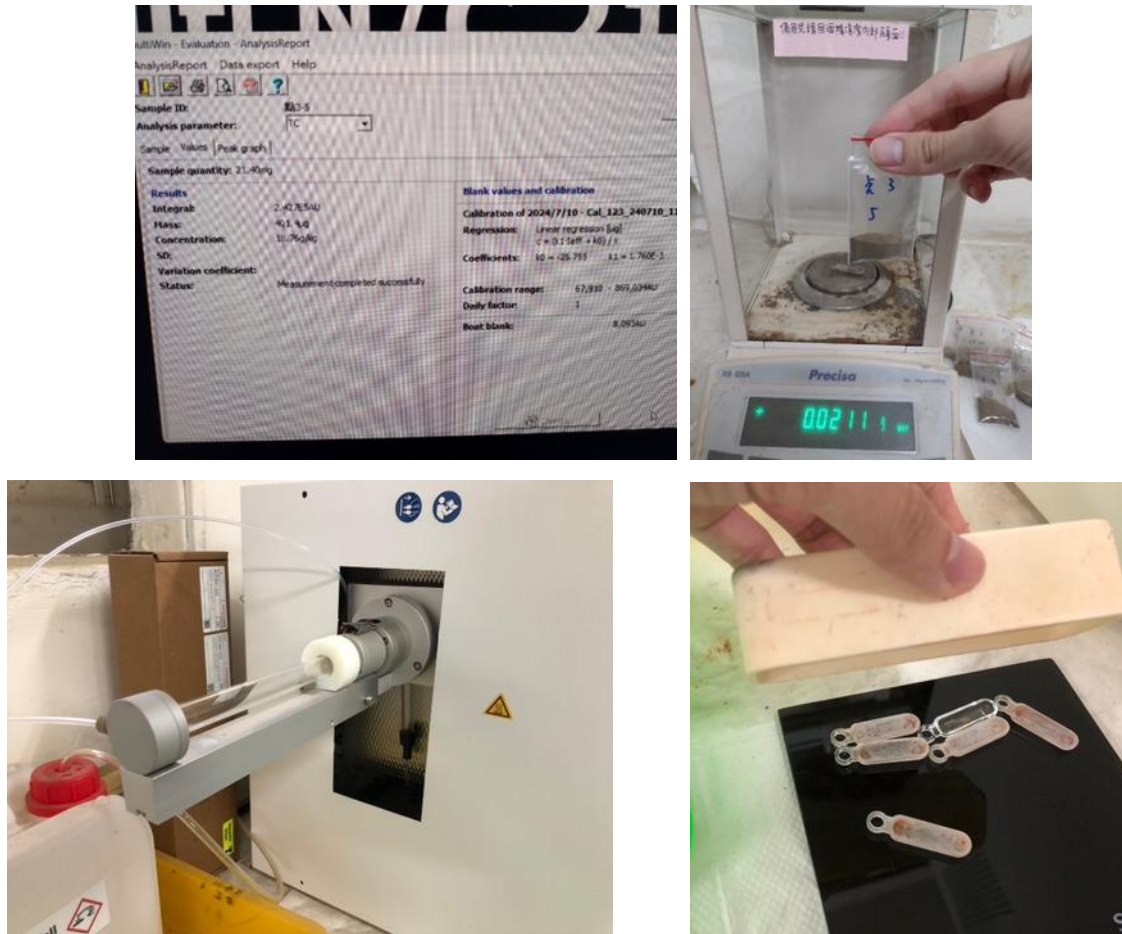


圖 2- 49 乾燥燃燒法操作流程作業(資料來源：本計畫製作)

4. 土壤樣品干擾

- (1) 在處理樣品的過程中，須注意防止樣品受到污染，污染源可能來自於不潔的盛裝容器、磨碎工具或多塵的風乾室等，防止措施當係使用乾淨的工具、容器等。
- (2) 秤量過程中最好以鑷子夾取樣品杯，以避免手上的粉塵影響秤重值，進而影響總有機碳測定含量。
- (3) 高溫燃燒法總有機碳分析儀的主要限制是會產生較高且易變動的空白值，因此儀器製造商發展新式催化劑及分析流程，可降低空白值及獲得較佳的偵測極限。

5. 有機碳分離

在使用高溫燃燒法（1350°C）進行土壤總有機碳分析時，為精確區分無機碳（如碳酸鹽）與元素碳，必須執行特定的預處理流程（Nguyen,2021）。首先，需以鹽酸（HCl）對土壤樣品進行初步處理，其目的在於有效去除土壤中的碳酸鹽成分，並使無機碳以二氧化碳（CO₂）的形式釋放，處理後之樣品則會保留有機碳以及元素碳。接續，再透過逐步升溫燃燒法，或是化學分離技術等手段，進一步區分元素碳（例如炭黑）與有機碳。最終，藉由量化分析燃燒過程中釋放出的二氧化碳總量，即可精確測定土壤樣品中有機碳以及其他碳類型的含量，完成碳類型之區分與定量分析。

6. 操作步驟

(1) 土壤前處理：

經適當保存之土壤樣品從採樣不鏽鋼土還中取出，置於不吸水分的乾淨表面(如已知空重之塑膠盤)，加以混合(圖 2-50)。撿出採樣觀管中濕潤土壤中石塊及植物殘體，秤得採樣觀管中所有濕潤土壤重量(mBD wet soil)並紀錄之。



圖 2- 50 土壤樣品混合前處理(資料來源：本計畫製作)

(2) 土壤總體密度分析：

- A. 取乾淨附蓋秤量瓶置於烘箱內，以 $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 乾燥，然後蓋上蓋子移至乾燥器內冷卻至少 45 分鐘，測定稱量瓶的重量(m_0)，精秤至 0.1mg。
- B. 將 30 至 40g 濕潤土壤置入秤量瓶中，加蓋精秤稱量瓶及土壤重(m_1)精秤至 0.1mg。
- C. 將土壤、秤量瓶及瓶蓋放入 105°C 烘箱，直至恆重註 3。
- D. 秤量瓶加蓋於乾燥器中冷卻至少 45 分鐘。
- E. 取出加蓋秤量瓶，隨即精秤乾燥後土壤及秤量瓶重量(m_2)精秤至 0.1mg。
- F. 使用游標尺量測採樣襯管內徑(R)、高度(h)、，依下列式 2、3、4 分別計算土壤體積、樣品水分校正係數及總體密度。

$$\text{土壤體積(V): 土壤體積 } V(\text{cm}^3) = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \times \pi \times h \quad (2)$$

$$\text{水分校正係數 } W_{\text{H}_2\text{O}}(\%(\text{m/m})) = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{總體密度 } \text{BD}(\text{g/cm}^3) = \frac{W_{\text{H}_2\text{O}} \times m_{\text{BD wet soil}}}{V} \quad (4)$$

(五) 土壤總有機碳分析

1. 土壤樣品在實驗室分析前，需先經過嚴謹的前處理程序，以確保分析結果之準確性與代表性。首先，將採集回來的土壤樣品進行充分的混合，接著，採用四分法進行對角取樣，反覆操作此步驟，直到取得足夠分析所需的樣品量為止。取出約 50 克的樣品平鋪於塑膠盤中，盤內土壤厚度應盡量控制

在 2 公分以內，並適時進行壓碎與翻動，使其能更均勻地風乾。乾燥過程之環境溫度宜控制在攝氏 30 度左右。待土壤乾燥後，使用木桿仔細碾碎土壤團塊，並使用孔徑 2mm 的標準篩網進行篩分，篩分後殘留在篩網面上的土壤樣品，需再次進行碾磨作業。如此反覆操作多次，直到所有土壤樣品皆能順利通過篩網為止，過程中不得拋棄或遺漏任何部分，僅有篩分不過的石塊等粗礫物質才可捨棄。最後，將所有通過 2mm 篩網的土壤樣品充分混合均勻，裝入貼有樣品標籤的夾鏈袋中，並儲存於乾燥通風且避免陽光直射之環境(如圖 2-51 所示)。



圖 2- 51 土壤總有機碳分析步驟(資料來源：本計畫製作)

2. 為使土壤樣品均勻化、增加表面積及提高反應效率，應風乾並使用瑪瑙研鉢研磨樣品使通過 0.5mm 孔目之篩網。
3. 檢量線建立依儀器使用手冊建議之檢量線製作方法，秤取不同量之標準品若干個，進行總有機碳分析，並記錄分析所得訊號高度或面積，而繪製濃度-校正尖峰高度或面積之檢量線。檢量線的 R 值均須達到 0.995 以上才可使用。
4. 樣品分析：檢量線建立完成後，依樣品有機碳含量秤取 0.1000 克土壤樣品置於石英樣品杯內，並依序輸入樣品名稱及樣品重量，進行樣品分析。

儀器所獲得之 TOC(%)乘以水份校正係數再乘以該土壤樣品之總體密度，求得土壤有機碳儲量。

二、土壤碳匯結果驗證與係數採用

為驗證土壤碳匯採樣與分析結果之正確性，土壤分析驗證以「可重現、可比對、可追溯」為核心，建立跨現地—實驗室—指標換算的 QA/QC 架構，並以少量必要的場域分類（如「沉積面形態」與「覆蓋狀態」兩類）作為抽樣分層依據以降低異質性干擾。

(一)現地層級：重複與偏差控制

1. 重複採樣（Field duplicates）：每一小分層 $\geq 10\%$ 樣點進行鄰近重複採樣，TOC、BD 差異之相對百分比差（RPD） $\leq 15\%$ 為可接受；超標即現地復測。
2. 定位與擾動控制：採樣點以 UTM 座標與照片記錄；擾動地段（新近開挖/淤積脊線）以排除或分層方式處理，避免混樣造成偏差。

(二)實驗室層級：方法交叉與量測穩健性

1. 方法交叉比對：以乾式燃燒（TOC 主法）為準，抽查 10–20% 樣本以 LOI/濕式氧化為副線比對；以 Bland–Altman 或配對 t 檢定確認方法一致性（平均差異接近 0、95% 一致限度落在可接受區）。
2. 標準物與校正：每日量測標準物（CRMs）與儀器校正曲線（ $R^2 \geq 0.999$ ），漂移 $> \pm 5\%$ 時全批次重測。
3. 重複分析（Lab replicates）：每批樣品 $\geq 10\%$ 做重複量測， $RSD \leq 5\%$ （TOC）、 $\leq 3\%$ （BD）。
4. TIC 去除與黑碳控制：酸洗去碳酸鹽流程標準化；黑碳含

量可疑樣（如野火跡地）加註並以熱/化學分劃附註不確定度。

(三)指標換算與邏輯檢核：由質量%到體積量

1. 單位一致性與敏感度：明確採用 $\text{SOC D} = \text{TOC}(\text{g/kg}) \times \text{BD}(\text{g/cm}^3) \times 10^{-3} \times 10^6$ （轉為 kg/m^3 ）；進行敏感度分析顯示結果對 BD、TOC 的彈性係數，作為不確定度來源分解。
2. 化學計量合理性：C/N 合理範圍多介於 10–20；若超界，檢視氮損失或有機質來源改變，必要時複測。
3. 質量守恆/事件一致性：BACI 設計下，汛前—汛後在 Impact 區之 SOC D 應呈系統性變化且 Control 區相對穩定；若發現反常，回溯採樣與實驗流程。

除既有之標準化土壤監測流程外，已導入「情境化、可驗證」的差異化設計，確保在不同壩型、地形與擾動歷程下，土壤碳匯量化具可比性與決策價值。首先，建立壩上游沉積環境之類型化決策樹（封閉式壩體／梳子壩；峽谷型／展寬型；草生平台／幼齡林覆蓋），據以配置「橫向×縱向×深度」的分層—分區採樣網格，並搭配 BACI（Before–After–Control–Impact）設計：壩上游沉積區為 Impact，鄰近未受構造控制之同質地段為 Control，於汛前/後與極端事件後進行事件觸發式重採，以擷取碳動態訊號；例如蘇樂壩在 2024/10/06 與 12/31 兩次採樣顯示 TOC 平均+6%、TN–52%、C/N↑至 13.38（10–20 為具固碳潛勢區間），提供「穩定化→增匯」之證據鏈。其次，為銜接「質量百分比」與「體積儲量」兩套指標，本計畫以現地總體密度（BD）與酸洗去 TIC 之 TOC 作為核心量測，並以 $\text{TOC}(\text{g/kg}) \times \text{BD}(\text{g/cm}^3) \rightarrow \text{SOC D}(\text{kg/m}^3)$ 之轉換關係校正農試所遙測 SOC D 圖資，形成「小尺度高精度 × 大尺度

高覆蓋」的雙基準；如以 $BD \approx 1.3 \text{ g/cm}^3$, $TOC 3.5 \text{ g/kg}$ 對應 $SOCD \approx 4.55 \text{ kg/m}^3$ ，據此進行情境化交叉驗證與偏差修正。再者，針對壩型與時空異質性，提出三層級不確定度預算：① 取樣與前處理（分層厚度、擾動控制、復測比例 $\geq 10\%$ ）；② 實驗室方法（乾燥燃燒為主、LOI/濕式氧化為副線交叉比對，年內至少一次實驗間比對；TIC 酸洗與元素碳分離流程標準化）；③ 指標換算與外推（BD—TOC 敏感度、SOCD 面積加權外推的蒙地卡羅區間）。最後，以 MRV 架構將流程制度化：M（監測）含事件觸發重採與季節性基準；R（報告）納入採樣設計圖、方法版本、校正曲線與不確定度區間；V（查驗）提供原始數據、儀器校正、現地照片與坐標，並設定「績效判定門檻」（如 C/N 介於 10–20 且 SOCD 年變化顯著為正，方認定具增匯成效）。

第三章 樹種儲碳資料庫優化及造林減碳效果評估

依據《Live Science》科學新聞專刊及《Sustainability》期刊對碳匯的論述，碳匯可區分為綠碳與藍碳(見圖 3-1)。其中，綠碳指綠色植物透過光合作用將二氧化碳固定於植物體及土壤中，涵蓋森林、草地與農田等陸域生態系。根據 Greenpeace 綠色和平報導(2021)及 IPCC AR6 氣候變遷緩解報告(2022)指出，森林生態系佔全球陸域年淨初生產量約 72%，其植物與土壤的碳吸存量對大氣中溫室氣體濃度具有直接影響，因而成為綠碳中不可忽視的要素。

本署主要業務涉及山坡地治理、野溪水土保持、永續農村建設及土石流防治，與綠碳來源息息相關，具備豐富的綠碳潛能。為評估水土保持設施的綠碳碳匯量，計畫中將依據本署已建立的植物樹種固碳能力資料庫，統整出一套適用於水保領域的碳匯計算方法(圖 3-1)。此外，為提升碳匯估算的精確度，計畫將新增對水土保持植物的生長率監測，藉此優化現有植生碳匯係數資料庫，確保數據具備時效性與準確性。

隨著生態碳匯概念的拓展，碳匯不再局限於傳統的植樹造林或植被恢復，還包括其他能吸存大氣二氧化碳的生態系。除草地與農田外，本署業務範圍內的農塘、濕地及滯洪池等水域生態系，因其高基礎生產量、厭氧性底層環境及有機物分解速率低，能有效吸收並儲存二氧化碳，形成藍碳(林幸助，2018)。

此工項將彙整台灣常用水保樹種之碳匯參數、蒐集樹徑生長曲線、胸高直徑資料為主，將進行小樹徑($\leq 5\text{cm}$)實測補強資料庫，同步選定代表場域進行造林成效監測，分析成長狀況與固碳潛力，逐步完成資料庫優化。同時將針對研究場域九份二山提出水土保持樹種之維護與建議指引，並提出森林經營碳匯專案做示範場域實踐。

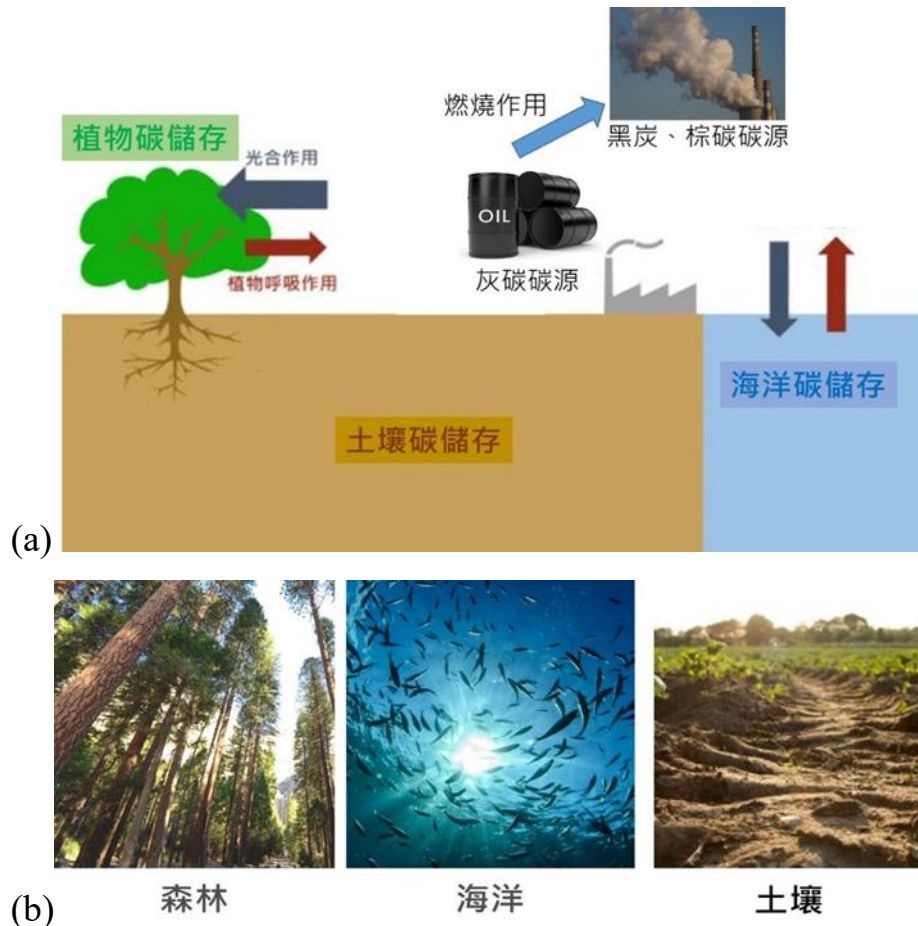


圖 3-1 不同碳的存在方式 (a)碳循環 (b)碳匯儲存方式(資料來源：
本計畫製作)

第一節 擴充樹種儲碳資料庫

一、農村水保署既有建立之計算方法及資料庫

依據農業部提出的 2040 年碳中和目標，以及近年國際間積極推動之永續發展趨勢，本計畫將定期對造林專案之碳匯效益進行監測與評估，確保樹種選擇與造林技術的最適化。依據本署於 2022 年完成的「水土保持碳匯量評估及永續發展指標研究計畫」，本計畫將系統性選擇合適的造林場域，定期進行樹木生長情況的監測，蒐集詳細的胸高直徑、生物量及碳儲存數據，以評估植樹專案在不同生態環境條件下之實際減碳效果。

透過持續的數據監測與分析，本計畫期望能為未來的造林活動提供明確的維護管理指引，以及提升碳匯效益的技術建議，協助臺灣實現 2040 年碳中和目標，並在氣候變遷應對的實務層面發揮積極的貢獻。

(一) 綠碳及土壤碳匯

綠碳碳匯的主要潛力區位為新生林地與草地，尤其是新生林地，其幼年植生的快速生長期可提供顯著的固碳效益。相較之下，草地雖然生物量相對較低，但其持續性的生長循環亦可穩定貢獻一定程度的碳儲存。此外，林地具有明顯的碳匯優勢，原因在於其植生地下根系與土壤之間形成有效的交互作用，根系能穩固土壤結構、提升土壤的有機質含量，進而增加整體的碳儲存量。

具體而言，綠碳的碳匯評估主要集中於水土保持植生本體，包括植生地上與地下部分、以及落葉枯枝等有機殘體，各自具有特定的計算模式與參數設定。在評估地上植生的碳匯量時，森林林地的計算參數包括植生生長率、生物量（以株數為單位進行推估）以及植生含碳比例，採用署內固碳資料庫提供之推薦係數，透過式(5)的公式進行計算，結合署內固碳資料庫推薦的計算係數，得到不同植生的碳匯儲存量式(6)。此外，為便於後續數據的比較與標準化整合，需將計算得出的碳儲存量轉換為二氧化碳當量，從而提高計算結果之通用性與可應用性。

$$\text{式 (5): 生物量(kg)} = 0.0673 \times (\text{密度(gcm}^{-3}) \times \text{直徑} \\ (\text{cm})^2 \times \text{樹高(m)})^{0.976} \quad (5)$$

$$\text{式 (6): 碳儲量(kg)} = 1.24 \times \text{生物量(kg)} \times \text{含碳量(\%)} \times \frac{44}{12} \quad (6)$$

在林地植生中，喬木與灌木的計算方式有所不同。喬木因為較為高大，植株數量通常會在工程圖或預算書中明確標示；相對地，灌木由於多為小型木本植物，較難標註植株數量及種類，因此以三層坪農塘及周邊綠化工程為參考，假設每平方公尺可種植 9 株灌木，用來估算灌木碳匯含量。草地的碳匯計算則基於單位面積吸收二氧化碳量（每年）與種植面積計算的生物量，兩者相乘後的總和即為碳匯量（式 6）。

在進行水土保持相關工程的碳匯評估時，植栽的種類、數量與密度都是決定整體碳匯量的重要因素。其中，喬木通常由於具有明顯的樹幹、枝條且植株體型較大，因此容易具體標示出其種植的數量與位置，便於進行精準的碳匯計算。然而，相較之下，灌木通常為小型的木本植物，植栽密度較高且形態較為繁雜，實務上難以明確標示其精確的數量及種類，這導致在碳匯估算時可能會產生一定程度的誤差，進而影響整體評估的準確性。針對這個問題，前年度計畫特別參考了三層坪農塘及周邊綠化工程的植栽模式，根據該工程的實務經驗及相關文獻建議，設定了每平方公尺種植 9 株灌木的標準作為基準。透過這樣的設定，不僅能夠系統化地簡化灌木碳匯量的推估作業，也有利於未來不同場域間進行標準化的比較與分析。此外，考量灌木在實際造林及植生復育工程中普遍採用的種植密度，這一數據亦具備了一定的代表性和實務參考價值。此外，本計畫亦參考三層坪農塘之實際案例，以及其周邊進行綠化改善工程所累積的數據，確認此設定能夠貼近實際應用場域，並具有良好的推廣性與適用性。

另一方面，為了進一步提升碳匯估算方法的科學性及實用性，本計畫在估算草本植物及灌木所構成的草本層或草本層碳匯量時，則引用前述案例的生長特性及生物量數據，透過分析不同場域環境條件下

植生的生物量資料，確立較合理的碳匯係數。而針對草本植物，由於其生長狀態更具動態性且季節性變化明顯，因此本計畫選定一套適合的固碳估算公式式(7)，以提升推估準確度，並考量植栽密度與植生健康狀態等條件的影響，最終確立合適的草本碳匯估算參數及公式。

$$\text{式 (7) : 碳匯潛在吸存量}(kgCO_2) = \text{單位面積吸碳量} \\ \left(\frac{kgCO_2}{m_2}\right) \times \text{草地面積}(m_2) \quad (7)$$

土壤碳的儲存量可主要分為土壤本體以及土壤落葉層兩個部分，其中土壤本體的碳儲存量是透過直接採樣與分析進行量測獲得；而土壤落葉層的碳儲存量則較為特殊，因其主要是植生體生長過程中持續掉落而形成的植物殘體所構成，因此在實務上通常不會透過直接量測的方式取得，而是透過推估植物本體碳儲存量，再乘以特定的相對比例進行計算（如式 8 所示）。此相對比例則依據不同植物種類、現場環境條件、氣候因子、及現地管理措施的差異，而存在一定的變動範圍，為了提高估算的準確性，本計畫蒐集並分析了大量實地調查數據與文獻資料，確認相對比例的合理性與代表性，以確保推估的土壤落葉層碳儲存量符合實務需求與科學標準。

此外，本計畫為了提高各項碳匯估算作業的標準化及一致性，特別制定了詳細且明確的計算流程，詳見圖 3-2 所示之流程圖。該圖呈現了完整的計算步驟與過程，包括相對比例推算之詳細步驟，能有效確保在不同工作團隊及採樣情境下，都能依照一致且標準的程序進行碳匯推估，以降低數據變異性，提高結果的穩定性與可比較性。此外，圖 3-3 和圖 3-4 分別針對不同的植物種類提供了計算流程說明，以協助研究人員快速掌握每一步驟所需執行的動作與程序。

$$\text{式 (8) : 地下土壤固碳量}(kgCO_2) \\ = \text{地面上植生固碳量佔土壤固碳之比例} \left(\frac{31}{69}\right) \quad (8)$$

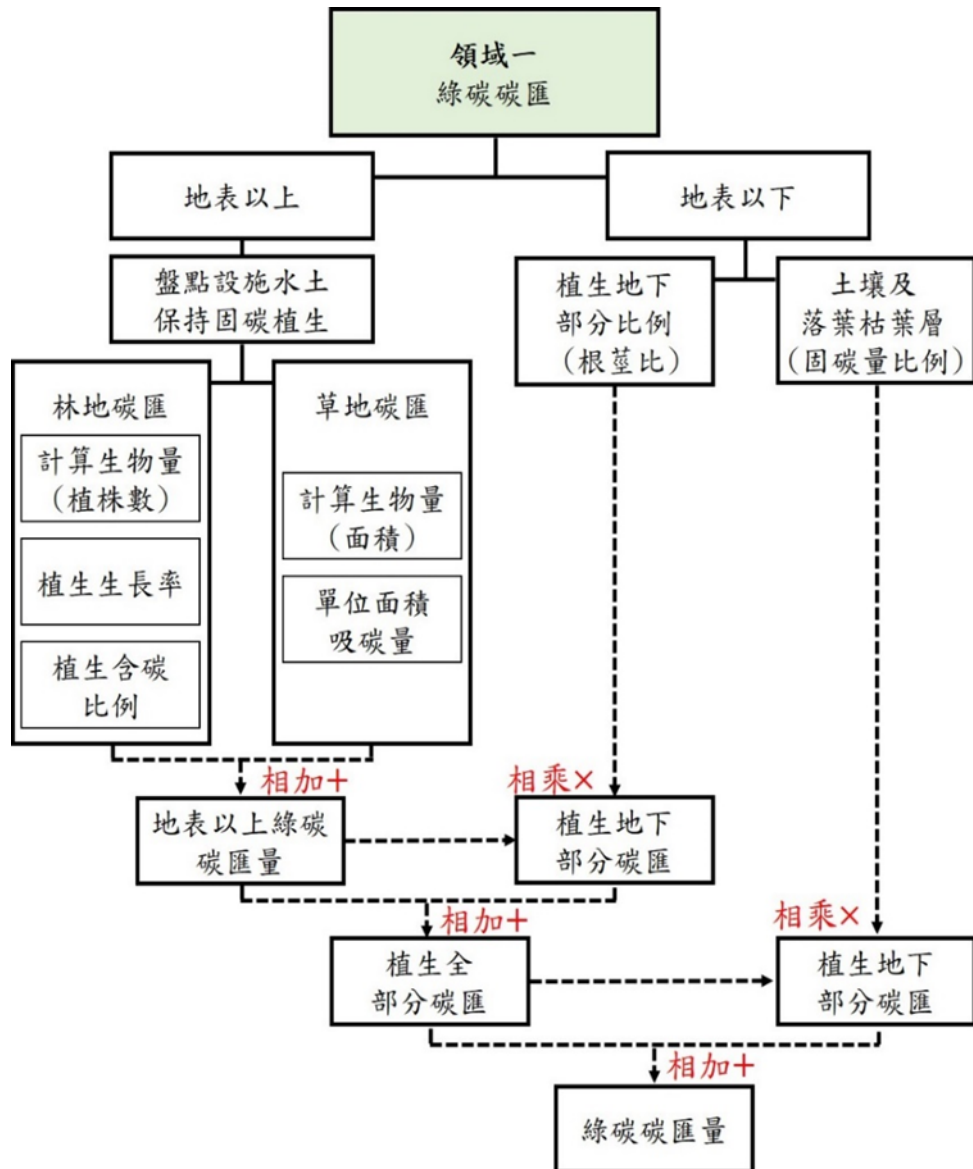


圖 3-2 綠碳的碳匯計算流程(資料來源：本計畫製作)

植生綠碳估算



圖 3-3 喬灌木綠碳計算詳細流程(資料來源：本計畫製作)

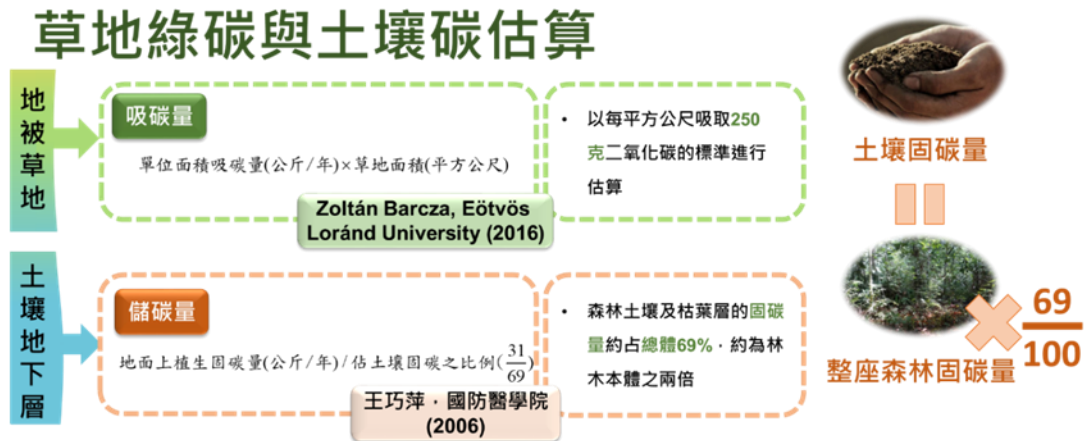


圖 3-4 草地地被與土壤地下層碳匯計算詳細流程(資料來源：本計畫製作)

二、植生工程監測方法

植生工程監測是確保綠化工程品質、提升植生存活率及長期生態穩定性的關鍵環節。透過系統性的監測方法，可以有效評估植生工程的成效，並及時進行補救措施，以確保植栽順利成長，達到水土保持及生態復育的目標。以下將針對植生工程監測的方法進行詳細闡述，包括栽植法植生成果調查、苗木材料檢驗、植栽工程驗收、養護期間監測及天然災害應變措施等方面。

(一)栽植法植生成果調查

植生工程的成功與否，首先取決於栽植法的適當性及栽植後的存活率。因此，在栽植法植生成果調查中，應考量以下原則：

1. 植株成活判定：植株須符合設計規格，生長正常且無病蟲害或枯萎現象，確保其存活率符合工程標準。
2. 苗木視為工程材料：為確保工程按時完工，應將苗木視為「工程材料」，並考量市場供應情況，特別是容器苗（袋植苗）的培育時間，以確保根系發展健全並適應種植環境。
3. 種植前檢查：苗木運輸至工地後，應進行最終檢驗，重點

包括主幹、枝條是否受損、根系是否健全、是否有病蟲害等問題，以確保種植成功率。

苗木檢驗方面，應特別注意：

1. 根系發育狀況：避免根纏結或根系發育不全的苗木進場。
2. 栽植時機與數量：應配合工程進度及不同樹種的適合栽植期。
3. 施水方式：避免因灌水不足或過量導致根系受損。
4. 搬運與存放：苗木應在搬運過程中避免受損，存放時保持通風及適當濕度。

(二)苗木材料檢驗

苗木品質的優劣直接影響植生工程的成效，因此在植栽前必須進行詳細的苗木檢驗。標準苗木檢驗包括植株高度、樹冠幅、幹徑、根球、枝下高等關鍵指標，確保苗木符合工程規範(表 3-1)。

1. 植株高度 (H)：確保符合設計規格，允許誤差不得超過 10%。
2. 樹冠幅 (W)：應符合設計標準，若小於標準規格 10% 以上則不可使用。
3. 米徑 (D)：1 米高處的樹幹直徑需符合設計規格。
4. 根球 (Br)：確保根系與土壤密接，且無嚴重損傷。
5. 枝下高 (BH)：確認植株分枝位置，避免過低或過高影響生長。

除了基本規格檢驗外，還應檢查植株的病蟲害情況，樹皮是否完整，葉色是否正常，以及運輸過程中是否有受損情形。

表 3-1 植物材料規格檢驗表(坡地植生工程暨植生調查手冊，本署，2008)

檢驗項目	細目	內容	檢驗基準
樹木地上部	喬木	植株高	植株高矮之差距，不得超過設計規格高度之 10%。
		樹冠幅	較標準規格小者，其差距不得小於設計規格之 10%，但大於標準規格者，經同意後准予代用。
		米徑	植株 1 米高之直徑值，不得超過設計規格直徑之 10%。
		枝下高	枝下高之差距，不得超過設計規格高度之 10%。
	灌木	植株高	植株高矮之差距，不得超過設計規格高度 10%
		樹冠幅	較設計規格小者，其差距不得小於設計規格之 10%，但大於設計規格者，經同意後准予代用。
	樹種	樹種、品種、變種	符合所指定之樹種，若須以其他品種或變種替代，應徵求甲方及原設計規劃監造同意。
	樹形	樹枝分佈	符合樹木原來的的基本樹形，樹枝分佈均衡而無殘缺不全情形
		樹幹直立性	樹幹通直無歪斜情形
枝葉	葉色	葉色	葉色為原有之第色，無病蟲害或營養不良情形
		修剪痕	修枝切口癒合良好，無腐朽情形
		樹皮	樹皮無折傷情形
	病蟲害	病蟲害的發生	無下列病徵：變色、壞疽、凋萎、矮化、萎縮、肥大、簇葉、黑穗、潰瘍、捲葉、流膠、僵果、腐敗及蟲體或害蟲所造成的傷口
	移植及運搬	枝幹保護	按指定材料將樹幹及主枝包捲
		葉	葉無嚴重受損情形
		枝幹	枝幹無裂傷受損及歪斜情形
		運搬狀況	苗木運搬時，對根群、枝葉及樹皮均能妥善保護，且無損傷情形

資料來源：坡地植生工程暨植生調查手冊，農村水保署，2008

(三)植栽工程驗收

植栽工程的驗收標準不僅包括樹種株數與栽植位置，還需確保栽植深度符合原有根際線，根株直立扶正，回填土壤均勻且穩固。植栽工程的驗收應根據施工規範進行，並確保以下幾點：

1. 栽植深度：應符合原有根際線，避免過深或過淺影響根系發展。
2. 植株直立性：確保植株未傾倒，根系穩固。

3. 存活率要求：

(1) 一般坡面或緩衝帶的存活率應達 90%以上。

(2) 景觀樹種存活率應達 100%，或依契約規範進行驗收。

承包商應按規定期限提出驗收申請，所有苗木數量應符合設計標準，並預留一定數量作為補植需求。若發現苗木規格不符、部分枯萎或生長狀況不佳，則應予以淘汰或補植。

(四)養護期間監測

植生工程的長期成功取決於適當的養護與監測機制。養護期間的檢查應定期進行，包括施肥、澆水、除草、病蟲害防治等關鍵措施。植生工程不僅包含植栽的執行，更重要的是後續的養護管理。養護期間應定期進行以下工作：

1. 澆水管理：

(1) 定植後首次澆水需均勻濕透，使土壤與根球緊密接觸。

(2) 夏季炎熱時，應選擇早晨或傍晚澆水，避免高溫蒸發過快。

(3) 應根據天候與植物需求調整澆水頻率，避免過多或過少影響生長。

2. 施肥與除草：

(1) 定植後 1~2 個月開始施肥，之後每 2 個月施肥一次，休眠期停止施肥。

(2) 除草應選用合適的方式，若使用除草劑需經過核可，避免對植株造成傷害。

3. 病蟲害防治：

(1) 若發現病蟲害，應使用經核可的藥劑進行防治，並確保施藥時間及範圍適當，避免影響周邊環境。

(2) 施藥後應標示警告資訊，確保周圍人員安全。

4. 存活率檢查與補植：

(1) 養護期間若發現植株死亡或生長不良，應立即進行補植。

(2) 若存活率未達標，承包商需自行負擔補植費用，並確保補植植栽品質符合原始規範。

(五) 天然災害及人為意外應變措施

養護期間的監測亦包括天然災害與人為破壞的應變機制。例如，若遇強風、豪雨等自然災害導致苗木傾倒或折損，承包商應於 48 小時內完成植株扶正或補植，並提交相關照片與報告。此外，災害後應迅速進行現場清理，確保植栽區的整潔與安全。因此需訂定相應的應變措施：

1. 喬木處理：

若樹木發生傾倒或折斷，應在 48 小時內進行扶正或補植。若折斷植株的剩餘高度低於原植株高度的一半，應進行補植。

2. 灌木處理：

若因天然災害損壞，應在 48 小時內補植或扶正。確保補植後的存活率符合標準。

3. 災害後監測與報告：

發生災害後，應在 24 小時內報告相關單位，並進行現場拍照存證。依據損害程度決定是否進行補植或修復作業。

(六) 養護期滿後

當養護期滿時，承包商應申請驗收，並附上養護工程竣工圖與查驗資料，以確認植栽存活率與生長狀況符合標準。檢驗標準包括：

1. 植栽成長良好，無病蟲害與枯萎現象。
2. 坡面或緩衝帶的存活率需達 90%以上。
3. 景觀樹種存活率應達 100%（或依契約規定）。
4. 所有補植植栽應經檢驗覈準，並符合原始設計規範。

若植栽存活率未達標準，則養護期可延長兩個月，若仍未達標準，則依規定扣除承包商款項。此外，應確保植栽區未受破壞，並移除所有施工殘留物，如碎片、木樁及剪下的枝葉。

植生工程的監測方法涵蓋從苗木檢驗、植栽工程驗收、養護監測，到養護期滿檢驗的完整流程。透過嚴格的標準與科學化的監測機制，可確保植生工程的品質與生態效益。在實施過程中，應特別注意植栽材料的選擇、適當的養護管理、以及災害應變機制，以提高植栽的成活率與工程的長期穩定性。

三、精進估算植生工法之碳吸存量

(一)既有之相關文獻與技術報告回顧

在《精進估算植生工法之碳吸存量—台灣中低海拔樹種樹高異速方程式與不耐陰木本和草本植物的生長速率》這項研究中，透過系統性蒐集、整理並分析來自臺灣各地區中低海拔森林動態樣區之長期監測資料，詳細記錄並彙整了各種樹種的樹高、胸高直徑等重要生長參數。該研究的主要目的在於精進並提升臺灣中低海拔林地植生工法碳吸存量推估方法的準確性與實務應用性，以利於未來林業管理、植生造林及水土保持相關規劃的應用。

該研究透過廣泛的文獻蒐集及實地調查，系統性地彙整並分析了臺灣地區中低海拔森林動態樣區內大量樹種的相關生長數據，包括樹高與胸高直徑的調查資料庫，累積了豐富且具代表性的植生資訊。此

外，研究團隊亦針對不同森林發展階段之次生演替森林進行深入調查，特別是非耐陰木本植物個體的生長情況，以充分反映台灣中低海拔地區常見次生林木本植物的生態特性及其生長動態變化。透過系統性的現地調查、長期監測以及綜合數據分析，本研究最終彙整了臺灣地區中低海拔森林動態樣區總計高達 18,000 筆以上的實測數據，總共涵蓋不同生長環境與區域內約數十種以上常見樹種，整體研究資料庫的建置規模達到了計 18,593 筆資料，共計涵蓋 178 種樹木，進一步涵蓋了臺灣地區樹種多樣性及各種環境條件下的生長特性，提供後續異速方程式建立的堅實數據基礎。

在樹種的資料分析過程中，研究亦將這些資料區分為不同的耐陰性等級，以更細緻地掌握不同耐陰特性的樹種，其樹高與胸高直徑之間的差異性，進而針對這些樹種建立相應的異速方程式，有效提高後續碳匯推估作業的精準性與代表性。另一方面，為了更全面性地呈現植生在不同演替階段的動態特性，研究亦計算出不同物種的木本植物相對生長速率，藉由此類數據，更清楚了解不同樹種在不同生長階段與環境條件下的固碳潛力。此外，本研究亦考量到森林地表層草本植物對整體碳吸收與生態恢復的重要貢獻，進一步針對草本植物建立了生物量與覆蓋度、高度之間的回歸關係式，以協助快速推算草本植物的生物量，並精確分析與推估其在不同季節、生長階段的平均生長速率，以提供更全面性的碳吸收能力資訊。

研究結果建立了不同耐陰等級的樹高異速方程式，並得出非耐陰性物種及草本植物的生長速率，分別為 $0.1021 \text{ tree yr}^{-1}$ 與 $20.1 \pm 14.15 \text{ g m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ 。這些成果可提高推估植生工程碳吸存效益與碳儲存量的準確度。

該研究可為未來的研究提供以下幫助：

1. 更準確地評估植生工程的碳吸存效益：

透過更精確的樹高異速方程式和生長速率數據，可以更準確地評估植生工程的碳吸存效益，有助於選擇更有效的植生工法。

2. 更深入地了解臺灣森林生態系：

本研究蒐集了豐富的臺灣森林資料，有助於更深入地了解臺灣森林生態系的結構和功能。

(二)植物生長率現地測量

本計畫延續此研究方法，陸續針對水土保持常見樹種進行生長率的測量，以利後續進行碳匯量之估算。生長率的測量基礎為植生生物量，是指生產者在某一時刻單位面積生物體質的乾重量，能反映生態系統在時間區間的生產力，是碳循環中重要的儲存庫之一。生物量(Biomass) 是指生產者在某一時刻單位面積生物體質的乾重量，能反映生態系統在時間區間的生產力，是碳循環中重要的儲存庫之一。生物量的動態變化取決於系統的生產及其分解過程。對於單木而言，包含主幹 (bole)、枝條 (branch)、葉 (foliage) 等器官之地上部生物量 (aboveground biomass; AGB) 與根(root) 等器官之地下部生物量 (belowground biomass; BGB)。調查並持續的監測生物量之變化可讓相關單位更理解場域現況，現有生物量之估算公式如 Chave et al. (2014) 之泛熱帶通用生物量式，多建議運用在估算胸高直徑 5 公分以上樹木個體之生物量，小於 5 公分個體之生物量估算方式較為缺乏，部分植樹場域及植生工程使用上由於多種植小徑級苗木，在未驗證公式的適用性之前，不宜直接使用上述公式，此外樹木的生物量生長表現也會因環境而異。本計畫預計建立的公式以估算直徑 <5 cm 樹木地上部生物量為主，並提供專案監測的初步結果，整體流程如圖 3-5 所示，

植生碳匯推估流程可分為三個主要階段，分別為「現地測量」、「文獻回顧與計算」以及「碳匯估算」。

為求反映水土保持植生工程中常用的植株直徑大小，並估算苗木之碳儲量及生長量，本計畫主要執行項目為 1.擴充樹種儲碳資料庫，建立估算直徑小於 5 公分樹木個體地上部生物量的校正公式，反映植生工程中實際使用之樹種、樹齡及樹徑，以提高計算精準度。2.針對九份二山場域新植之苗木，定期監測樹木種植後的生長量及儲碳量，評估實際的造林減碳效果，3.建立九份二山場域定期維護管理建議。

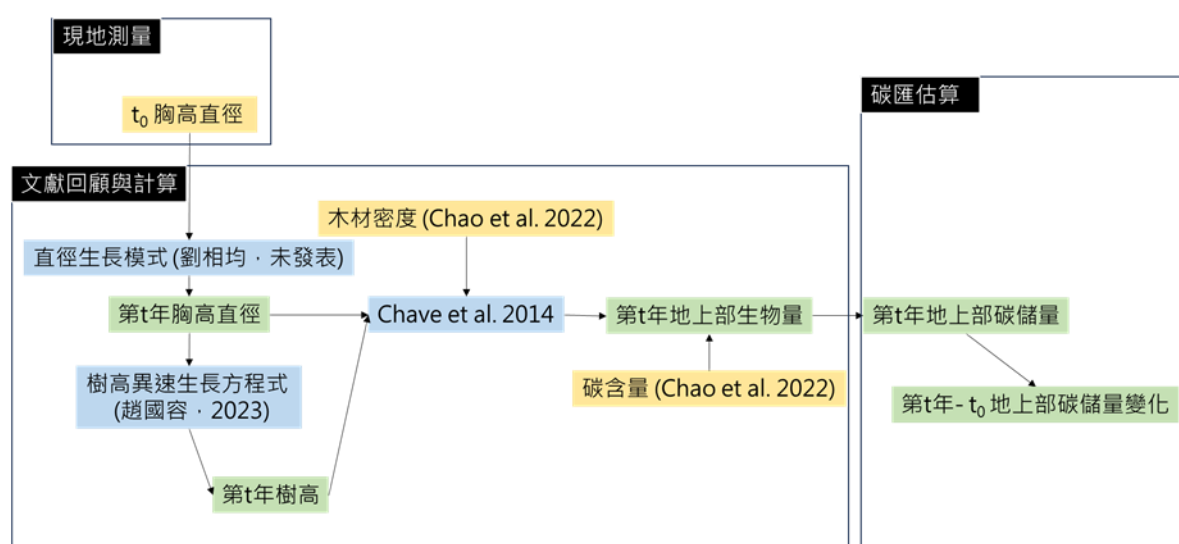


圖 3-5 現地測量與分析流程(資料來源：本計畫製作)

量測水保常用 12 種樹種 (相思樹、水黃皮、青剛櫟、台灣櫟、光臘樹、榔榆、無患子、黃連木、台灣欒樹、羅氏鹽膚木、台灣肖楠、樟樹) 中 10 種樹種胸徑 5 cm 以下之樹苗。測量每一個體之基部 (高度 0.1 m 處)、胸徑 (高度 1.3 m 處)、頂端的直徑以及全株樹長。並將地上部樣本放入 70 °C 至 80 °C 的烘箱內烘至重量不再有變化後，以電子天秤測量其乾重，得出地上部生物量。將各植株之地上部生物量與其直徑、樹長等數據進行生物量估算模式建立。

本研究之資料整理與統計分析係使用 Microsoft Excel 軟體 (Microsoft Corporation, 2021) 進行，利用線性回歸檢視泛熱帶地上部生物量公式預估值與實際值之差異及適配度。為建立適用於小徑級植栽的地上部生物量估算模型，本研究針對胸徑約為 2 公分的苦楝與光臘樹各選取 10 株個體進行樣本收集與分析。每株樣本皆量測其於樹高 0.1 公尺、1.0 公尺與 1.3 公尺處之直徑，並紀錄全株樹高。採收之地上部樣本經由 70°C 至 80°C 烘箱乾燥至重量穩定後，以電子天秤精確測量其乾重，作為實測地上部生物量值。接續將以測得之直徑與樹高等變數建構回歸模型，並以 Chave et al. (2014) 所提出之泛熱帶地上部生物量公式作為基礎。惟該模型僅適用於胸高直徑 (DBH) 大於或等於 5 公分之樹木，為強化其在 DBH 小於 5 公分族群之預測能力，並提升其在台灣十二種水土保持常用樹種上的適用性與準確性，故本研究另引入一修正係數 R ，作為模型調整與本土化建構之依據。

本研究將使用 R version 4.4.3 (Posit team, 2024) 進行建模，校正係數 R 使用了 $\text{nls}()$ 進行估計。此外，tidyverse 套件 (Wickham et al., 2019) 使用於資料整理。由於 Chave et al. (2014) 模型——泛熱帶地上部生物量公式僅適用於胸高直徑 (DBH) ≥ 5 cm 的樹木，為了評估該模型在直徑 < 5 cm 樹木上的適用性，以及估算台灣常用水土保持樹種的地上部生物量，本研究比較實際地上部生物量測量值和模型預測生物量估計值之差異，以求得校正係數 R ，如式 9 所示。

$$AGB = R \times (0.0673 \times (\rho dbh^2 h)^{0.976}) \quad (9)$$

根據前述之每木測量，目前共收穫 61 棵苗木，胸徑介於 0.3 公分到 4.1 公分之間，包含了樟樹 4 株、苦楝 26 株、光臘樹 10 株以及台灣欖、相思樹、水黃皮、黃連木、台灣肖楠、無患子、青剛櫟等各

3 株。使用線性回歸分析的結果發現 Chave et al. (2014) 泛熱帶地上部生物量公式對於台灣胸徑 5 公分以下的苗木之估算只有稍許高估(表 3-2、圖 3-6)。線性回歸分析的結果顯示 R^2 為 0.885，而 P 值 < 0.001 ，線性回歸係數為 0.898 (圖 3-6)。因此未來在植生工程中估算胸徑小於 5 公分苗木個體的地上部生物量時，可使用泛熱帶地上部生物量公式再乘以 0.898 校正，即可求得苗木地上部生物量之估算量。

表 3-2 泛熱帶地上部生物量公式估計值與實際值線性回歸之結果

	係數	標準誤	t 統計	P 值
截距	-0.016	0.042	-0.383	0.703
Chave et al, 2014 公式估計值	0.898	0.042	21.310	< 0.001

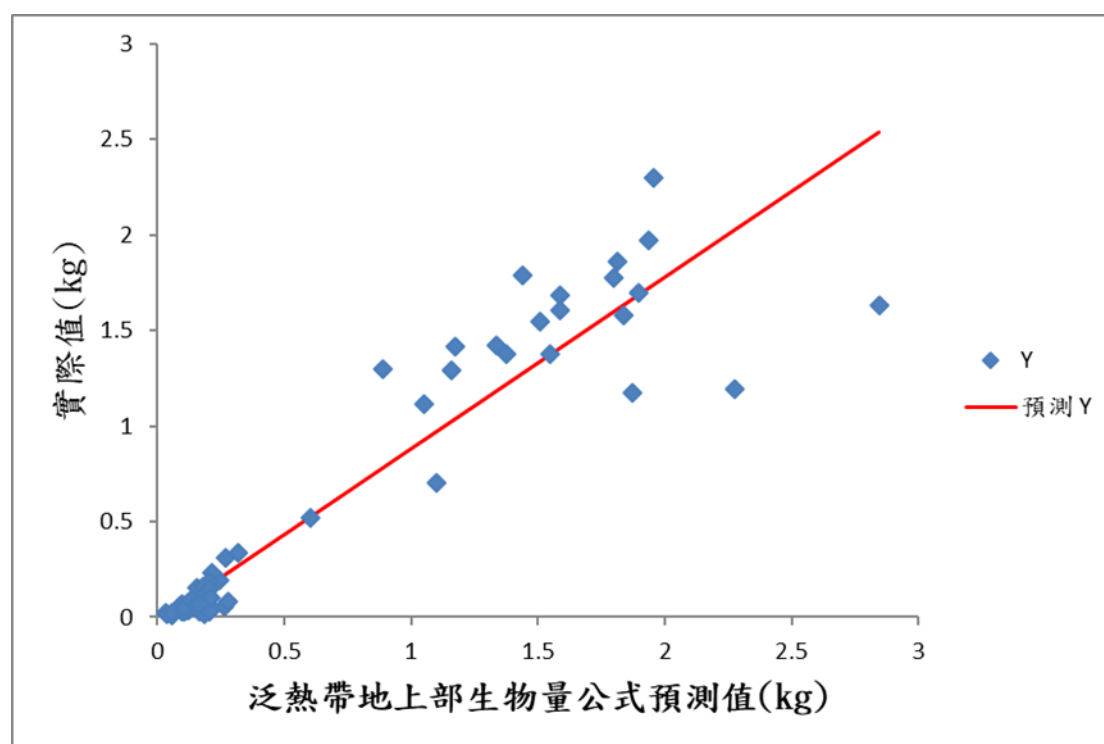


圖 3-6 泛熱帶地上部生物量公式估計值與實際值之線性回歸(資料來源：本計畫製作)

在本研究的材料與方法中，針對水土保持造林專案的基線碳儲量進行現地測量。調查區域包含位於九份二山石門景觀台旁的兩處區域：一為停車場範圍（區域 A），面積為 0.6049 公頃；另一為鄰近之低

窪裸露地（區域 B），面積為 0.3147 公頃，兩者之間由明顯斜坡區隔。於 2025 年 4 月間，研究團隊分別對區域 A 與區域 B 中所有胸高直徑大於 1 公分的喬木進行全面調查(圖 3-7)，量測項目包括胸高處（1.3 公尺）直徑（DBH）、樹高（H）及樹種鑑定等資料。為估算每株喬木之生物量與碳儲存量，研究採用 Chave et al. (2014) 所提出的泛熱帶通用生物量方程式，進行 AGB（地上部生物量）之計算，進而估算區域內既有碳匯基線值(圖 3-8)，作為後續造林成效與增匯潛力之評估依據。



圖 3- 7 測量現場照片(2025 年 5 月)



圖 3- 8 測量專案場域(本計畫製作)(資料來源：本計畫製作)

$$AGB = 0.0673 \times (\rho dbh^2 h)^{0.976} \quad (9)$$

公式中， AGB 為地上部生物量，單位為 kg ； ρ 為木材密度，單位為 g/cm^3 ； dbh 為胸高直徑，單位為 cm ； h 為樹高，單位為 m 。

木材密度與木材碳含量部分，採用趙國容等 (2022) 建立的資料庫資料庫。計算生物量後，將乘以碳含量 (%) 以求出地上部生物量庫索儲存的碳含量。最後在以二氧化碳和碳之分子量比 (44/12) 換算成二氧化碳當量。



圖 3-9 分析現場照片(2025 年 7 月)(資料來源：本計畫製作)

區域 A 共調查 118 株喬木，主要樹種包括陰香、風鈴木與茄苳等。根據推估，區域 A 目前具有約 10.307 公噸碳儲存量，相當於 37.795 公噸 CO₂ 當量。其單位面積碳蓄積量約為 17.041 公噸/公頃，對應之二氧化碳當量為 62.482 公噸/公頃。

區域 B 則種植了 177 株幼樹，主要樹種為陰香、苦楝、樟樹、台灣檫、茄苳等，並包含當地原有的 22 株喬木，樹種如九芎與無患子等。區域 B 新植樹種目前累積約 0.084 公噸碳儲存量，相當於 0.282 公噸 CO₂ 當量，而區域 B 原有喬木則約為 1.029 公噸的碳儲存量，相當於 3.773 公噸 CO₂ 當量。因此，區域 B 單位面積總碳蓄積量為 3.537 公噸/公頃，對應之二氧化碳當量為 12.968 公噸/公頃。

於 2025 年 7 月前往樣區時，觀察到場域因本年度春夏季豐沛雨量使得地貌有所變化 (圖 3- 10)，樣區內部分樟樹苗遭沖蝕而根部裸露 (圖 3- 11b)。而樣區低窪處積水嚴重，造成部分樹種 (苦楝) 生長不良 (圖 3- 11a)。因此，本研究於 2025 年 8 月針對 B 區的新植苗木進行整理，移除具有擴散風險之外來樹種 (陰香)，也移除不適地之樹種 (福木)，同時整理生長不佳的苦楝及樟樹數棵。

本計畫於 2025 年 9 月對 B 區留存的新植苗木共 129 棵進行複查，調查其生長量，結果可發現此批苗木半年內之胸徑平均增加了 0.6 公分，而樹高平均增長了 0.42 公尺。將兩次調查所紀錄之數值相減後得到半年之生長量，乘以二換算為年絕對生長率，並依照物種取平均值，結果可觀察到茄苳在當地生長得較為快速，其次是樟樹，再來是台灣欖（表 3-3）。在總量上，換算區域 B 在單位時間單位面積的碳生長量約為 0.191 公噸/年·公頃，對應之二氧化碳當量為每年每公頃 0.699 公噸。



圖 3-10 九份二山植樹區域現地狀況。(2025 年 7 月)(a)樣區內自然產生的溝渠；(b)沖蝕造成部分樹苗損傷(資料來源：本計畫製作)



圖 3-11 樣區內苗木生長不佳。(2025 年 7 月) (a)頂端枯萎的苦楝；
(b)根部裸露的樟樹(資料來源：本計畫製作)

表 3-3 九份二山樣區苗木各物種之絕對生長率(資料來源：本計畫製作)

	年基徑生長率 (cm/yr)	年胸高直徑生長率 (cm/yr)	年樹高生長率 (m/yr)	年地上部生物量生長率 (kg/yr)
樟樹	1.325	1.396	0.606	1.011
台灣櫟	0.819	0.540	0.402	0.411
茄苳	2.911	1.755	0.924	1.479



圖 3-12 測量專案場域植生分布圖(粉紅色點)(資料來源：本計畫製作)

第二節 定期監測並評估造林減碳效益

一、擇優選定綠碳專案執行場域

隨著全球氣候變遷日趨嚴峻，各國紛紛提出碳減排承諾及具體行動方案，國際間的碳權交易機制也逐漸成為因應氣候問題的重要手段之一。在台灣，隨著政府逐步強化應對氣候變遷的政策力度，亦開始建立屬於國內的碳權交易管理與法規制度，並將相關的溫室氣體減排成果明確定義為「自願減量額度」。此定義不僅與國際碳權交易市場

中的概念接軌，也為台灣未來進一步參與國際碳交易提供重要基礎。此外，自願減量額度的推動，也鼓勵國內企業積極自主投入碳減排活動，企業可透過自主或合作推動造林、植生復育、再生能源利用及節能措施等，取得可供交易的碳權額度，進而形成國內綠色經濟發展的重要推動力道。透過這樣的機制，台灣在達成減碳目標的同時，也能創造新的經濟價值並促進綠色經濟的蓬勃發展。

在此背景下，本計畫所採用之造林與植生工程碳匯計算方法，特別參照目前由國際間普遍採納且經驗豐富的碳匯估算方法，並充分整合國際上通用且科學驗證充分的標準作業流程進行在地化調整與優化。此方法不僅能更準確地反映台灣本地生態系統的固碳特性及實際狀況，更可確保台灣在碳匯量化及碳權驗證程序上能與國際標準保持一致，以利於未來與國際碳市場接軌。

此外，為提供實務操作指引與規範，本計畫特別以林業保育署所提出、並獲得主管單位正式認可的造林與碳匯標準化作業流程為藍本，透過與農村水保署業務範疇及實務需求的整合，建構出更具實用性與代表性的水土保持碳匯評估標準作業流程。透過此標準作業流程，農村水保署與相關權益關係人可以更加系統化且高效率地完成碳匯量的推算與記錄，並據此精準地進行後續碳權驗證申請程序，從而降低碳權申請時所可能面臨的技術性誤差與審核障礙。

此舉不僅有助於減少溫室氣體的釋放，達成減碳目標，同時也為農村水保署各項業務的目標設定與應對策略提供了碳匯估算依據。農村水保署在「112 年提升水土保持領域碳匯技術研擬與效益評估成果報告」中，詳細闡述了碳權的申請機制，並以本年度計畫選定的九份二山北山坑集水區範圍為例進行說明。

(一)南投縣九份二山造林碳匯潛力

九二一大地震後的九份二山災害事件為台灣典型的「大規模崩塌」案例，當時此地區因強震作用，造成大規模的坡地失穩與地質災害，尤以順向坡滑動現象最為嚴重，滑動崩塌深度普遍達 30 至 50 公尺，影響範圍之廣，受損規模之巨大，成為國內坡地災害防治研究與治理上的重要警示。隨後，相關研究紛紛指出，「大規模崩塌」已成為台灣山坡地最為嚴峻且難以忽視的環境安全課題之一，不僅因為台灣地質條件脆弱、地震頻繁、降雨集中且強度高，氣候變遷之下的降雨強度及頻率增加，更進一步加劇了崩塌事件發生的風險，形成難以預測且難以控制的地質環境挑戰。

在九份二山的復育過程中，農村水保署明確地遵循「減量、增匯、循環、綠趨勢」四項永續原則，有系統地推動與建置淨零碳排示範場域。所謂「減量」，即是從源頭減少各項環境衝擊，包括減少碳排放源、降低能源消耗、減少水土資源流失與植生破壞；「增匯」則指透過積極的植生造林、植被恢復與土地管理，提升該場域內自然生態系統的固碳能力，以增加碳儲存量；而「循環」則透過生態循環系統的建立，促進水、土壤、有機物質與養分等資源的循環再利用，從而降低環境負荷並提高資源利用效率；至於「綠趨勢」，則是強調以生態友善的方式推動整體復育作業，促進環境永續並形成可複製、可推廣的綠色發展模式。

考量到水土保持相關工程的造林區域往往面積相對較小，且多數區域受到法規中造林面積須達 0.5 公頃以上的最低申請門檻所限制，九份二山的復育計畫特別以建立具示範性、可複製性的標準作業流程為目標，以有效提升未來類似場域之造林申請與減量額度抵換的可行

性，並期望透過此典範作法，成為未來農村水保署推動造林碳匯專案申請與管理的重要基礎參考。

為達到最佳示範效益與永續經營目標，九份二山復育計畫在規劃造林示範場域之初，便納入一系列嚴謹且周全的考量因素，包括場域之土壤質地特性，因為不同土壤條件將直接影響植生的成長效率、生物量累積速率及固碳能力。此外，亦需評估造林區域內實際可進行植生種植之範圍大小，以確認所選定的區域具備足夠的面積，能有效達成最低造林面積門檻，並同時具備顯著的碳匯潛力，以提升場域的整體碳吸存效益。

同時，造林計畫的規劃亦需納入後續植生維護管理作業的難易程度評估，以確保在造林完成後能順利且有效率地進行相關維護工作，降低因後續管理困難或不易落實，而造成植生成長受阻或碳匯效果降低的風險。此外，在進行樹種選擇時，應優先考量並挑選當地適合種植的本土樹種或經驗證具優良水土保持效益的樹種，以提高植生的適應性、生存率及生長速率，確保能夠發揮預期的生態、水保與碳匯。

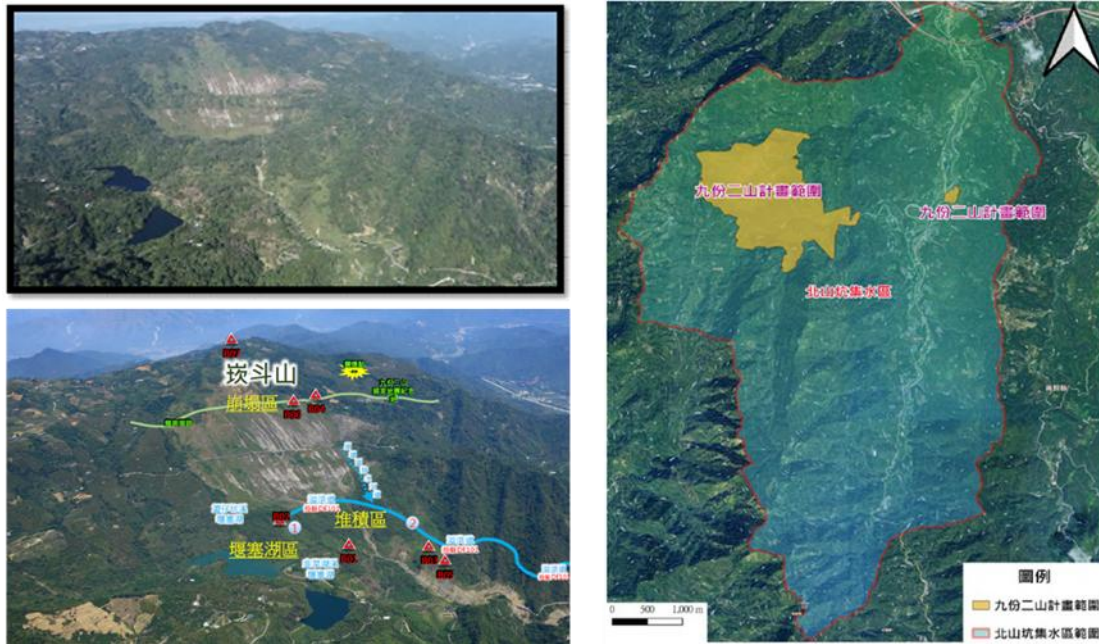


圖 3-13 南投國姓九份二山淨零排放示範區場域(資料來源：南投分署轄區環境保育國際化暨淨零排放推動計畫，農村水保署南投分署，2023。)

(二)綠碳專案活動

為因應氣候變遷所帶來的挑戰，並實現國土保安與森林碳匯潛能之雙重目標，農村水保署於南投縣國姓鄉九份二山推動「溢洪道緩衝綠帶植林造林森林經營碳匯專案活動」。本專案區域曾於 921 地震期間遭受嚴重崩塌與地滑災害，歷經多年整治與復育，如今已展現豐富的生物多樣性與森林恢復潛力，成為兼具示範性與永續價值之自然復育地點。透過植樹造林與輔助天然更新手段，結合生態友善的撫育與外來種汰換策略，本專案不僅可提升森林碳吸存效能，更能強化生態系服務功能與區域韌性，促進碳匯量化管理與永續發展目標的實踐。專案範圍內規劃以植樹造林取代裸露地，改善景觀與棲地環境，並建立科學化的監測機制，量測碳儲變化與森林健康，進一步為台灣山坡地造林碳匯專案提供實證依據與政策參考。本計畫也藉此專案發展相關植樹造林指引與森林經營方案。

1. 專案活動名稱：南投縣國姓鄉九份二山溢洪道緩衝綠帶植林造林森林經營碳匯專案活動

2. 專案活動目的：

九份二山區域曾於 921 地震時遭受嚴重崩塌與地滑災害，此事件導致該地區被劃定為崩塌災害潛勢區域。然而，災後經由農村水保署長期致力於管理與造林工作，林地復育已取得顯著成效。因此，農村水保署在此區域設立了水鹿自然復育區以及原生自然植物示範園（圖 3-14），並透過持續造林，將此地營造成為具備碳匯效益的專案示範區域。森林本身即具備卓越的碳匯功能。透過科學化的森林經營管理措施，包含保護與復育現有森林植被、促進森林健康生長，以及提升森林吸收與固定二氧化碳之能力，可有效達到增匯減排之目標。此類森林經營活動，亦能發揮重要的試驗與示範作用，進而有利於減緩全球氣候變遷的負面影響。然而，九份二山部分區域仍存在裸露地問題。經盤點評估，該區域整體約有 20 公頃土地具備植樹造林的潛力。因此，本計畫規劃透過在裸露地進行植樹造林，期能不僅強化國土保安功能、顯著增加森林碳匯、改善環境景觀，更能提供野生動物更為友善的棲息地，進而提升區域生物多樣性，並有效提升潛勢區域的整體抗災韌性。透過適當的除草、除蔓等撫育措施，以輔助天然更新 (Assisted Natural Regeneration) 的形式加強森林經營，並調整森林物種組成以提升碳匯效益與附加價值。透過除草、除蔓等撫育措施，並以抑草蓆標記天然更新之原生木本植物小苗，促進森林演替方向，使森林具當地環境韌性，並

達到適地適木等經營原則。此外，為了達成生態系穩定與預防為先原則，補植原生物種汰換當地已栽植之具擴散風險外來種(如陰香與風鈴木等)，避免生態過程受到影響。藉由本專案執行，不僅提升森林生態系服務功能，更增進碳匯潛能，強化氣候變遷韌性，未來更可結合地方生態資源推動環境教育與社區連結。



圖 3-14 九份二山原生自然植物示範園告示說明牌(資料來源：本計畫製作)

3. 專案執行目標

專案活動主要有三大目標，結合上述所提及維管建議及增匯指引，第一為促進天然更新，第二為降低外來種擴散風險，第三為適地適木、促進生物多樣性，以達到增匯減碳、降低土石流風險和永續陸域生態系之多重效益。第一目的的經營管理方式主要為輔助天然更新 (Assisted Natural Regeneration) 的形式，包含適當的除草和除蔓等撫育方式，加強森林經營，進而改善森林物種組成、提升碳

匯效益與附加的生物多樣性生態系服務價值。使用抑草蓆增進天然更新原生木本植物小苗之存活率，促進森林演替，達到適地適木之經營原則。第二目的的經營管理方式主要為移除外來物種，尤其是具有擴散風險之外來種（例如陰香與風鈴木等），以達成生態系穩定，降低鄰近自然生態系生態過程受人為影響之程度。第三目的為藉由本專案的執行，提升原生物種生物多樣性與生態系服務功能，促進天然更新以增進碳匯潛能，適地適木強化氣候變遷韌性與增進水土保持，未來更可結合地方生態資源以推動永續在地環境教育與社區發展。

4. 專案活動地點及環境描述：

本專案活動的地點位於南投市國姓鄉九份二山地區，範圍內土地歸屬單位皆屬農村水保署所有。為加速震災後植被演替，農村水保署投入了大量的整治復建工作，對於該區的生物多樣性回復確有實質的幫助。目前土地利用主要以山坡地林地、農牧用地、草荒地以及裸露地組成，詳細位置為九份二山三塊 10*10 公尺的採樣區，環境條件：

(1) 氣候及水文條件

九份二山位於台灣中部南投縣國姓鄉的高海拔地區，其氣候主要呈現副熱帶及溫帶氣候特性。夏季相對涼爽，而冬季則較冷，該地區的降雨量尤其豐富，特別是在夏季的梅雨季節和颱風季節，這有助於維護當地豐富的自然植被和森林生態。九份二山的濕度較高，對於當地的農業活動、森林保護以及生態旅遊都有著重要的影響。

(2) 林地狀況

2016~2017 年本計畫共記錄到野生動物 678 種，其中包含瀕臨絕種保育類物種 2 種、珍貴稀有保育類物種 14 種、其他應予保育類物種 17 種，特有種 98 種，特有亞種 118 種，計 46,595 隻次。植物相方面則記錄有 745 種，包含瀕危種 2 種、易受害 8 種、接近威脅種 7 種。

5. 專案活動規劃：

本專案以九份二山溢洪道綠帶之既有空間作為專案場域，規劃範圍依地形與森林類型分為兩個主要區塊，分別為觀景台旁之停車場周邊區域（區域 A）與石門景觀台旁之低窪裸露地（區域 B）。主要技術以改善森林物種組成以及改進森林結構，以提升碳匯效益與附加價值。專案規劃以 15 年期為單位，內容包含將原先人為栽植之少數樹種與外來樹種，撫育為多樣性高且以原生物種為主之森林，並加強林分單位面積密度，有效促進整體森林碳儲存。

區域 A 當地已有 70 株陰香、38 株風鈴木，已於現場觀察到許多陰香根蘗小苗、風鈴木天然下種小苗，為達生態系穩定與預防為先之原則，規劃於專案第 1 至 3 年種植耐陰原生物種於陰香林下，待耐陰樹種長成後，於第 10 至 15 年間將上木外來種逐步移除。而第 1 至 3 年亦在專案之空曠地，新植非耐陰原生樹種，以增加森林碳匯功能。估計前 3 年欲新植苗木數量為 800 株，以行株距 3 m 方式進行栽植，並以水土保持樹種篩選為原則，樹苗種類包括相思樹、水黃皮、青剛櫟、台灣欒、榔榆、無患子、黃連

木、台灣欒樹、羅氏鹽膚木、魚木、山黃梔、楊梅。

區域 B 當地已有 177 株 2024 年 9 月新植之苗木，以及當地既有的喬木。由於森林尚未鬱閉，並且當地每一平方公尺約有 1 株原生木本小苗（山芙蓉、九芎、構樹、小葉桑、山鹽青等），將以輔助天然更新方式進行維管。首先，將區域 B 全區原生樹種小苗以抑草蓆標記與保護，增加原生小苗的存活率，降低當地草本植物的競爭，並且避免人為除草時被誤除。於專案實施前 3 年預計會可有 3,000 株小苗天然更新，於專案後期預計可存活約 600 株。天然下種更新之苗木可以用來補充人為栽植、自然淘汰的死亡個體，並達到適地適木原則，提升物種多樣性與碳匯潛力。當地既有的喬木，包含構樹、白雞油、黃連木、無患子、九芎、楓香、相思樹等，預計保留原狀。

專案執行期間整體的工作規畫為：第 1-3 年，於區域 A 進行陰香林下之增豐補植以及空曠地之苗木新植；於區域 B 進行輔助天然更新，將原生樹種小苗進行標記、保護。前期區域 A、區域 B 每年依階段實施除草作業：第 1 至 3 年每年 3 次，第 4 至 5 年每年 2 次，第 6 至 7 年每年 1 次，考量林地年均約 10% 的苗木枯損與死亡率，專案每年初將進行全區巡查與補植作業，移除枯損苗木後進行補植。第 10 至 15 年間，逐步將陰香、風鈴木上木移除，釋放空間供專案初期於林下種植之耐陰樹種空間與資源，以期第 15 年後生長迅速，並彌補被移除外來種的生態系服務功能。

6. 預期減量成果：

預期於專案計入期內的年平均淨移除量為 23.5008 公噸二氧化碳當量，總碳淨移除量為 705.024 公噸二氧化碳當量。

7. 監測計畫

確定用於評估監測目標的具體指標和標準，這些指標應該是量化的，以便進行有效的監測，在調查方法方面包括定點觀測、空拍圖像解析以及現地調查。

(1) 監測參數

表 3-4 監測參數(資料來源：本計畫製作)

數據/參數	$A_{i,j}$	DBH	H	$N_{TREE,i}$
數據單位	ha	cm	m	株數(ha) ⁻¹
描述	第 i 碳層樹種 j 的總面積	胸高直徑	樹高	林分密度，即第 i 碳層樹種 j 的每公頃株數
使用數據來源	GIS 測量	實測資料	實測資料	實測資料
用於計算預估排放減量/移除量之數據數值	農村水保署栽植樹種與面積之記錄資料			
將被採用的量測方法和步驟之描述	專案活動開始進行時利用 GIS 進行分層面積量測，申請減量額度查證時核對原始數據，若面積改變則進行修正，並請查驗機構於查證時確認。	抵換專案註冊前及申請減量額度查證前進行監測。	抵換專案註冊前及申請減量額度查證前進行監測。	抵換專案註冊前及申請減量額度查證前進行監測。
將被應用的 QA/QC 步驟	收集的相關數據應保存至計入期結束後兩年	收集的相關數據應保存至計入期結束後兩年	收集的相關數據應保存至計入期結束後兩年	收集的相關數據應保存至計入期結束後兩年

(2) 抽樣方式

表 3-5 抽樣方式(資料來源：本計畫製作)

參數	定義	單位
n	估算專案邊界內生物量所需之樣區數	無單位
N	專案邊界內可能之總樣區數(即取樣空間或母體)	無單位
t_{VAL}	在所需信賴區間，自由度無限大的雙尾 t 值	無單位
W_i	分層 i 的面積權重(即分層 i 面積除以專案面積)	無單位
S_i	分層 i 生物量的標準差預估值	t dm 或 t dm/ha
E	專案邊界內估算生物量的容許誤差範圍(即信賴區間的一半)	t dm 或 t dm/ha
i	1,2,3,...專案邊界內預估生物量的分層	

樣區設置採用 20 公尺×20 公尺之方形樣區。分層方式則依據造林年度與各樹種估算材積式，共分為 17 個分層。各分層之標準差參考自林業試驗所(2012)「綠色造林試驗監測計畫」計畫之期末報告，各樹種之標準差如下表所示，若為文獻中沒有調查的樹種以各樹種平均帶入：

8. 監測計畫其他要素

(1) 品質控制和品質保證(QA/QC)：

如 IPCC 土地利用、土地利用變化與林業良好做法指導所述，監測要求通過品質保證/品質控制計畫實施品質保證(QA)和品質控制(QC)安排。這種計畫應成為專案檔的一部分，涵蓋以下所述各項程式：

A. 收集可靠的實際測量結果

B. 核驗用於收集實地資料的方法

C. 核驗資料登錄和分析技術

D. 資料保持和存檔。這一點特別重要，對於專案活動也是如此，因為專案活動的時間尺度也比電子資料存檔的技術改進所涉時間尺度長得多。這幾點對於專案活動十分重要。

(2) 確保可靠實地測量結果的程序：

通過實地測量收集可靠資料是品質保證計畫中的重要一步。負責測量工作的人應接受實地資料收集和分析工作的全面培訓。良好的做法是為實地測量的每一步驟制訂標準操作程式(SOP)，這種操作程式應貫徹始終。

(3) 核查實地資料的收集情況的程序：

為了核實證據設置的地塊和進行了測量，良好的做法是以每 10 個地塊為一組獨立地進行重新測量，並比較測量結果。與最初測量結果相比，重新測量應達到下列品質指標：(a)漏算或多算的數目：樣區內無誤差；(b)樹木種屬：無誤差；(c)DBH： $<\pm 0.1\text{cm}$ 或 1%，取其中數值較大者；(d)高： $<\pm 5\%$ ；(e)圓形地塊直徑/方形地塊邊長： $<\pm 1\%$ 水準方向(角度調整)。

在實地工作結束時，應獨立核對 10-20%的樣區。這個階段收集的實地資料應與原始資料比較。發現誤差，應予糾正和記錄。所有發現的誤差均應與複驗的所有樣樣區的百分比表示，以估計測量誤差。

(三)營造綠碳效益

1. 減量計算描述

森林經營專案之實際溫室氣體淨移除量 (ΔCAT_t)，為專案邊界內所選碳庫的碳儲存變化量。根據加強森林經營碳匯方法學，本專案活動情境下，主要考量林木生物量 ($\Delta CFR_{P,t}$)，不考慮灌木、枯死木、枯落物及土壤有機質之碳儲存變化量，並減去專案活動引起的運輸 ($ECO2_{P,t}$) 及非二氧化碳溫室氣體排放量 ($GHGE_t$)。計算公式為：

$$\Delta CAT_t = \Delta CFR_{P,t} + C_{HWP_{P,t}} - E_{CO2_{P,t}} - GHGE_t$$

由於本專案活動不考慮灌木、枯死木、枯落物及土壤有機質之碳儲存變化量；且根據方法學適用條件，專案邊界內於活動實施前須已是森林，不會引起專案前既有活動的轉移，因此專案活動不存在潛在洩漏。另由於無法預測專案邊界內火災發生情況，暫不考慮森林火災造成的專案邊界內非二氧化碳溫室氣體排放，即 $GHGE_t$ 可忽略不計。

2. 專案林分生物量碳儲存變化量

本專案林分碳儲存變化量參酌基線情境設定及計算成果，並套用模式推估更新再造林之各樹種未來生物量變化。由於此專案採取每木調查的方式，故不須額外進行分層，僅設置動態基線樣區作為參照。

本減量方法為主要內容為改變森林物種組成以及新增個體數量。藉由輔助天然更新存活的個體或新植的個體，來增加碳匯。基於保守性原則，生長模式，依然參考基線情境，設定為原始林非耐陰物種之直徑生長模式，僅依物種不同，設置不同木材密度、碳含量計算生物量。

3. 專案邊界內年度實際溫室氣體淨移除量之結果

本專案之實際溫室氣體淨移除量 (ΔCAT_t) 即等於林木生物量及收穫林產品碳儲存變化量之總和，再減去專案排放量。將所有條目計

算得出之各項碳儲存變化量總和，即為專案之溫室氣體淨移除量，計算結果概要如下：

本專案於區域 A 實施原生樹種之新植造林作業，同時於區域 B 進行原生小苗之維護與撫育管理，基線排放如下表 3-6 所示。依據碳匯量化推估，本專案在 30 年計入期內可實現總計 705.024 公噸二氧化碳當量之排放減量與碳吸存，換算年平均碳匯效益約為 23.5008 公噸 CO₂e，專案排放如下表 3-7 所示。展現本專案在生態復育與氣候變遷調適上之具體貢獻。

表 3-6 基線情境減量計算(資料來源：本計畫製作)

單年期間	基線地上部碳生長量(Kg)	基線年排放減量/移除量估計值(單位:公噸 CO ₂ 當量)	年碳排放量估計值(單位:公噸 CO ₂ 當量)
114 年	140.096	0.637	0
115 年	141.469	0.643	0
116 年	142.846	0.649	0
117 年	144.225	0.656	0
118 年	145.608	0.662	0
119 年	146.993	0.668	0
120 年	148.380	0.675	0
121 年	149.770	0.681	0
122 年	151.162	0.687	0
123 年	152.556	0.694	0
124 年	153.952	0.700	0
125 年	155.349	0.706	0
126 年	156.748	0.713	0
127 年	158.149	0.719	0
128 年	159.551	0.725	0
129 年	160.954	0.732	0
130 年	162.358	0.738	0
131 年	163.763	0.745	0
132 年	165.169	0.751	0
133 年	166.576	0.757	0
134 年	167.984	0.764	0
135 年	169.393	0.770	0
136 年	170.802	0.777	0
137 年	172.211	0.783	0
138 年	173.621	0.789	0
139 年	175.031	0.796	0
140 年	176.442	0.802	0
141 年	177.853	0.809	0
142 年	179.264	0.815	0
143 年	179.264	0.815	0

基線情境總排放減量/移除量估計值(公噸 CO ₂ 當量)	21.858
計入期總年數	30
基線情境計入期年平均排放減量/移除量估計值(公噸 CO ₂ 當量)	0.728

表 3-7 專案情境減量計算(資料來源：本計畫製作)

單年期間	專案地上部碳生長量 (Kg)	基線年排放減量/移 除量估計值(單位:公 噸 CO ₂ 當量)	年排放減量/移除量估 計值(單位:公噸 CO ₂ 當 量)	年碳排放量估計值 (單位:公噸 CO ₂ 當量)
114 年	49.409	0.637	0.069	0
115 年	56.594	0.643	0.079	0
116 年	63.947	0.649	0.090	0
117 年	71.450	0.656	0.100	0
118 年	79.094	0.662	0.111	0
119 年	86.865	0.668	0.122	0
120 年	94.755	0.675	0.133	0
121 年	102.756	0.681	0.144	0
122 年	110.860	0.687	0.155	0
123 年	119.060	0.694	0.167	0.618
124 年	127.351	0.700	0.178	0.618
125 年	135.727	0.706	0.190	0.618
126 年	144.184	0.713	0.202	0.618
127 年	152.716	0.719	0.214	0.618
128 年	161.319	0.725	0.226	0.618
129 年	169.991	0.732	0.238	0
130 年	178.726	0.738	0.250	0
131 年	187.523	0.745	0.263	0
132 年	196.377	0.751	0.275	0
133 年	205.286	0.757	0.287	0
134 年	214.248	0.764	0.300	0
135 年	223.260	0.770	0.313	0
136 年	232.319	0.777	0.325	0
137 年	241.423	0.783	0.338	0
138 年	250.570	0.789	0.351	0
139 年	259.758	0.796	0.364	0
140 年	268.986	0.802	0.377	0
141 年	278.251	0.809	0.390	0
142 年	287.552	0.815	0.403	0
143 年	296.887	0.815	0.416	0

(六)

專案情境總排放減量/移除量估計值(公 噸 CO ₂ 當量)	25.22
計入期總年數	30
專案情境計入期年平均排放減量/移除 量估計值 (公噸 CO ₂ 當量)	0.841
專案活動實施期間人為溫室氣體淨移除 量(公噸 CO ₂ 當量)	3.362

二、監測樹木生長狀況及提供指引

為促進水土保持碳匯專案之永續發展與具體成效，本計畫提出「樹木生長指引與森林經營方案」，結合適地、適木、適人、適法、適時等原則，構建兼具生態、氣候、社會與經濟價值之森林經營架構。首先，植樹前須進行環境分析，辨識適合之場域類型，例如停車場周邊空間、低窪裸露地或草生地，以確保選定場域具備充足生長條件與減少土地擾動風險。在物種選擇方面，應以原生植物為主，避免外來種擴散風險，並搭配當地名錄與氣候因子，選擇具景觀、生態與教育價值之原生樹種，如珊瑚樹、鐵冬青、赤皮、山芙蓉與石斑木等，同時輔以具有藥用或食農教育潛力之品種，如山鹽青、水冬瓜、山黃梔與臺灣香檬，進一步提升空間之多重功能性，相關建議植樹種類由於數量繁多，詳見於附錄四。

在森林經營與管理策略上，強調「輔助天然更新」與「多目標植樹」兩大核心策略(圖 3-15、3-16)。輔助天然更新可減少人為介入，依靠自然演替機制與母樹繁衍，培育基因多樣且具有抗逆性的樹木個體，降低育苗、栽植與養護成本，並減少對土壤與水文環境的破壞，符合 Nature-based Solutions (NbS) 倡議所強調的永續性原則。而多目標植樹策略則著眼於兼顧氣候韌性、景觀美感與生態教育價值，透過原生種逐步取代陰香、風鈴木等具擴散風險的外來種，同時結合當地社區、學校與環境教育活動，促進參與式森林經營與地方認同。



圖 3- 15 九份二山研究區域維護當地小苗(2025 年 7 月)(資料來源：
本計畫製作)



圖 3- 16 九份二山研究區域既有新植造林(2025 年 5 月)(資料來源：
本計畫製作)

在技術操作層面，植樹與維護時機之選擇亦須謹慎，建議配合當地降雨季節與氣候條件，於雨季前後進行種植與補植作業，並設計適當排水與防護措施，提升苗木成活率與初期生長速率。此外，維護管理亦需依據不同階段之生長狀況調整策略，包括除草、施肥、病蟲害防治與間伐作業等，以維持健康的森林結構與適度的競爭機制。

為確保植生綠碳成效之可量測、可驗證與可追蹤，本計畫同步建立符合方法學之監測機制，涵蓋環境生物、維護管理、材料設計、社會經濟與文化教育等面向。並以碳匯變化量作為核心指標，透過胸高直徑與樹高等生長參數持續追蹤，進一步建立碳儲成長曲線與情境模擬工具。預期本專案將能有效提升森林碳吸存能力與生態系服務功能，創造生態、經濟與文化等多重價值，為台灣山坡地碳匯治理與氣候調適開創實踐典範。以下分別針對指引不同層面內容進行說明

1. 生態復育維護管理原則

根據 Society for Ecological Restoration (SER) 於 2019 年提出的生態復育原則，主要內容包含，1.權益關係人參與、2.跨領域知識整合、3.參考當地原生生態系與現今環境變遷、4.復育生態營力(ecological processes)、5.明確訂定計畫主旨與目標、6.追求最高可復育之階段、7.與其他生態系統連結、與 8.生態復育仰賴連串的恢復行動等(Gann et al., 2019)。在生態層面，復育成效的六大指標為外在威脅程度、生育地環境、物種組成、結構多樣性、生態功能、與聯外交互作用等。對九份二山而言，因其過往的崩塌歷史，首先需要訂定生態復育目標。建議可以九份二山植物名錄為基準，輔以鄰近的蓮華池研究中心的原生植被為參考，做為場域植被復育的選種名單。此外，根據現地觀察，九份二山周圍仍有豐富的植物相，可以以輔助天然更新及水土資源保持為主要維護管理目標。以下，分述各項維護管理建議。

2. 權益關係人參與

建議加強場域權益關係人參與場域之經營維護，建立

與人文社會之連結。參與內容可以包含決策、目標與願景規劃(參考以下第五點)、維護管理方針、與環境教育等。目前場域權益關係人參與方，主要包含政府部門(例如農村水保署及南投分署)、民間機構(例如明基文教基金會)、地方居民(例如國姓鄉南港村)、學術研究單位(例如國立臺灣大學與國立中興大學)等。建議可以進一步設計讓當地居民、學童、遊客與其他相關團體了解場域之活動，以及參與維護管理決策與執行之機會。具體行動可從辦理說明會、設置解說牌和辦理環境教育解說活動等，提升權益關係人的參與機會與面向。

3. 跨領域知識整合

目前本場域計畫已有政府部門、民間機構和大專學校等之參與，專業領域包含水土保持、植生工程和森林生態領域等。特有生物研究中心(今生物多樣性研究所)亦已於2018年完成九份二山地區植物資源調查(何東輯、吳禹姍、呂明倫，2018)。未來可進一步跨領域整合當代科學研究(水土資源保育、植生工程、森林生態調查)與在地生態知識和傳統(例如動植物採獵、民俗植物應用)等，建立崩塌地生態復育、促進植生演替與傳承地方傳統文化之模式。

4. 參考當地原生生態系與現今環境變遷

根據2018年《九份二山生物資源解說圖鑑—植物篇》附錄之植物名錄，可做為場域潛在自然植生植物物種組成之參考。然而，未來要達成長久的碳庫儲存以及其他生態系服務功能，仍須參考鄰近受九二一地震干擾較少且演替較為後期的原生生態系，例如鄰近的蓮華池森林動態樣區

之研究，做為營造現地植生演替之參考 (Chang et al., 2010)。目前計畫場域除了植樹計畫同期栽植之樹苗，亦有早期栽植之九芎、和當地自生之陽性樹種苗木等。但是於 2025 年的調查中，現地年齡結構、物種組成仍然較為單一。因此，鄰近原生生態系可做為復育之參考目標。此外，現今極端氣候事件如強降雨等，亦可能影響場域的生態系建立，必須確立復育基線、持續加以監測生態復育過程與根據環境變遷滾動式修正場域之經營管理策略，以期達成生態復育之目標。

5. 復育生態營力

在本場域復育生態營力之建議方向為輔助場域森林建立自我調節及增進對外在干擾的抗性與韌性。實際策略建議可包含：輔助現地自生苗木生長 (圖 3-17)，增補現地適栽原生物種、促進天然更新、以及移除外來入侵風險物種等面向。輔助現地栽植苗木生長，可藉由移除高度高於栽植苗木之非目標物種，以利栽植苗木穩定生長。增補現地適栽物種，可以根據當地之生態氣候圖，配合地形、水文等資料，以當地植物名錄為基礎，鄰近蓮華池森林動態樣區植被結構為目標，進行增補物種之篩選與種植，增加場域物種的多樣性。促進天然更新，建議保留當地自生之天然更新木本小苗，此為場域生態營力的重要基礎。移除外來入侵風險物種，降低外來物種對當地生態之干擾。建議移除外來木本植物名單為陰香、風鈴木等；地被草本植物名單為大花咸豐草、美洲含羞草等。移除外來物種之木質枯木若無萌蘖之虞者(例如風鈴木等)可留置原地，營造

枯倒木環境，增加棲地空間多樣性。若有萌蘖著根之虞者(例如陰香、大花咸豐草、小花蔓澤蘭等)則必須曬乾分解。以上措施可增加場域的物種多樣性、結構多樣性與棲地多樣性等生態價值，並促進生態營力之建立。未來可持續監測場域植物物候變化，並監測動物對場域的利用情形等。

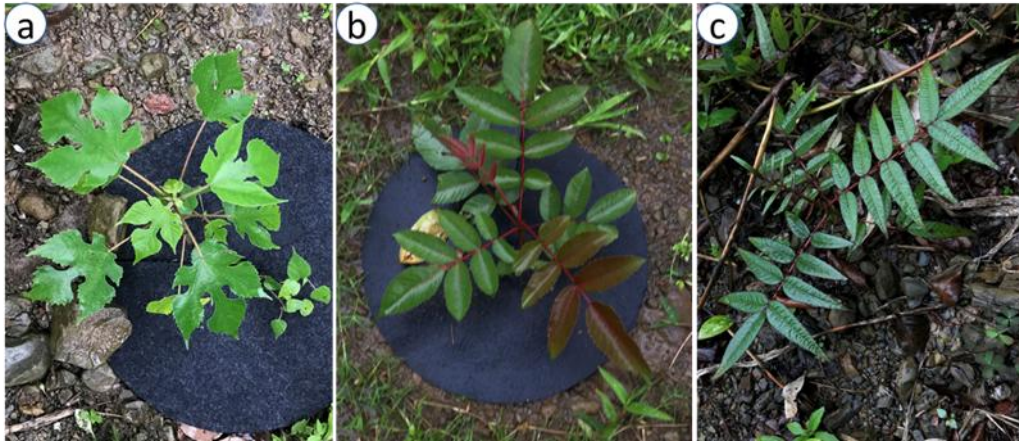


圖 3-17 現地原生樹苗(2025 年 6 月) (a) 構樹；(b) 羅氏鹽膚木；(c) 食茱萸(資料來源：本計畫製作)

6. 明確訂定計畫主旨與目標

本場域可和權益關係人共同訂定重要的場域經營管理主旨、目標與指標，建議考慮包含社區福祉、永續經濟效益、恢復自然資本、融合傳統智慧與現代智識、擴展受益範圍等。本場域建議可優先朝向藉由生態復育增加森林碳匯，並作為植生工程碳匯效益與生態系服務功能之環境教育示範區。短程階段性目標建議為輔助天然更新，中程目標為移除外來物種，長程目標建議為長期營造演替後期複層森林。短程指標建議為植被覆蓋度，中程指標建議為生物多樣性與森林層次，長程指標為碳吸存成效等。確定主旨與目標後，需在場域持續調查監測植生演替階段並滾動式修正經營撫育方向，以確保達成長程目標，並可作為

生態復育之自然環境教育場域。

7. 追求最高可復育之階段

場域的生態復育原則上應朝向符合自然生態演替過程、避免過度人為干預、減少不必要的管理成本等。建議本場域以輔助天然更新的方式，並追求最高可復育之生態系營力 (ecosystem processes) 與生態系服務 (ecosystem services) 功能。最終目標是營造健全的森林生態系統，包含具有生物碳儲功能、生物多樣性功能、並提供多樣的生態系服務價值，例如作為社會環境教育及水土保持示範場域等。

8. 與其他生態系統連結

逐步建立場域的生態環境與營力之後，亦須加入地景、集水區與區域尺度之考量，擴大場域與鄰近生態系之連結。從地景尺度開始，增進場域生態系的營養鹽物質、能量和物種與其他生態系統之交互作用。例如，建立生態廊道促進鄰近原生植物與動物自然傳播或遷入，以確保在此建立的生態系在地景尺度具有穩定的關聯族群 (metapopulation)。

9. 生態復育仰賴連串的恢復行動

為達成生態復育的目標，不同的場域會有各自的人文社會、自然環境和資金資源條件。運用可獲得的機會與挑戰現場的限制，從逐步減少人類干擾、改善生態系經營、恢復生態性功能、促進天然恢復力、直至復育完整的生態系需要有長期且持續的監測修正，才能真正達到復育的長程目標。在復育過程中，監測與評估與復育方向，適時調整經營管理策略，在本場域中建議包含前期的輔助更新、

中期的外來種移除與棲地維護，以及長期且持續的監測與檢討等。藉由連串且持續的復育作為，支持目標物種生長、降低入侵種影響，並逐步復原生態系功能、結構與組成等。

10. 場域維護管理

(1) 刈草、除蔓

初期工作主要以刈草、除蔓為主，避免目標苗木無法競爭過其他非目標物種。其中刈草需注意牛筋繩或刀片不應該傷及目標苗木，目標苗木周圍建議可主要以人力清除，於一定範圍外，再以除草機處理草本植物。另外，針對小苗或小樹，建議可以使用抑草蓆或適當保護樹幹等，以避免維管過程造成目標苗木之傷害。

(2) 輔助天然更新

針對天然下種更新之原生樹種，建議可使用抑草蓆標記自生苗木，避免於除草時傷及小苗，增加小苗存活率。

(3) 修剪

本場域建議以生態復育為主要目標，於加強森林經營時，減少非必要的修剪，盡量保持森林自我疏伐的過程。此外，傳統林業認為之不良木，亦是自然森林生態系中重要的結構多樣性來源，可做為其他個體營養分來源，且有利支持多樣的物種利用不良木作為棲地。

11. 增匯

(1) 地上部碳庫

地上部碳庫主要藉由個體新增以及生長來累積碳儲存量，並由死亡移除。因此，在本場域，應長期監測

林木新增、生長、死亡等狀態。新增個體部分，主要以輔助天然更新來增加小苗的存活率，進而提升碳匯潛力；生長部分，持續加強監測，並建立生長模式等；死亡部分，主動移除之外來物種之生物體將留置林地，加以長期觀測枯木分解速率等碳排放速率。

(2) 枯木碳庫

本場域之中的枯木可納入為經營管理與利用的目標之一，因為枯木亦為生態復育環節中的一部分，並也為許多物種的棲地，可以增加生物多樣性。

(3) 減少碳排放

在經營過程中，會需要人力、運輸等各方面的碳排，都需要納入碳排放的考量。在經營管理的過程中，盡量減少不必要的碳排放量，清點各碳庫與工程作業等碳排放，有助於計畫了解場域的碳吸存平衡。

第四章 水土保持工程碳匯係數蒐集建置

為因應氣候變遷與推動淨零轉型，水土保持領域逐漸重視其潛在的碳匯效益。增匯指引即在此脈絡下擬定，透過系統化架構與技術導引，協助水土保持單位有效規劃與執行增匯專案。期初階段優先針對既有工程類型（防砂壩、造林坡面等）進行係數盤點與資料整理，期中階段將彙整前述現地採樣成果，提出水保工程初步碳匯係數估算值，期末階段已完成建置係數資料庫架構以及使不同碳匯範疇評估可操作化，提供後續政策推動參考。

第一節 碳匯係數蒐集與建置

整體設計以「工程類型分類—碳源類型界定—量測方法應用—資料彙整建庫—政策銜接應用」為五大主軸，形塑完整之架構邏輯。首先，計畫針對不同類型的工程（如造林坡面、防砂構造物、農塘等）進行分類，分別識別其潛在碳來源，如植生綠碳、土壤黃碳與水體藍碳。依據各類碳源特性，導入相對應之量測技術，例如地上部植生碳以植生體生物量與含碳率推估，土壤碳則依據不同深度分層採樣與容重、有機碳含量計算；滯洪池與農塘碳匯則需考量碳沉積與甲烷逸散等特性。量測方法以直接取樣法為主，搭配既有研究之土壤含碳量資料與全國性土壤資料庫進行校正。量測成果將轉化為以單位面積或體積為基礎之碳匯係數（ $\text{tCO}_2\text{e/ha}$ 或 $\text{tCO}_2\text{e/m}^3$ ），並彙整建構係數資料庫，作為後續增匯計畫規劃、第三方查驗與政策制定之依據。該係數資料庫架構也將納入農村水保署歷年工程資料與地理資訊平台，進一步提高在地適用性與實務可操作性，實現水土保持碳匯推動之系統化與制度化。

一、集水區森林碳匯

(一)森林碳匯潛力

近年來，森林碳匯成為了學術界和實務界廣泛研究的熱點領域，其中無論是土壤碳匯或是植被碳匯，皆受到了高度的關注。相關研究指出，有助於減緩氣候變遷的碳儲存措施，也可能同時為促進生物多樣性或生態系統復育的政策帶來額外的效益(資料來源：Dybala et. al，2019；Dybala et.al，2019；Matzek et. al，2018)。事實上，植被生物量堪稱河岸生態系統中最大的碳儲存庫之一(資料來源：Sutfin et. al，2016)。而台灣的森林覆蓋面積廣闊，佔據了全台灣土地面積的 58.53% (資料來源：農業部，1985)，且其中絕大部分森林都集中分布在河川的上游集水區域。因此，如何有效保護並積極復育這些集水區的森林資源，無疑是當前至關重要的議題。

然而，台灣山坡地長期以來超限利用的問題，已造成了嚴重的土壤侵蝕和崩塌等環境問題。據相關坡地利用調查顯示，中橫沿線部分地區存在明顯超限使用現象，初步推估在特定高風險地段，其超限利用面積可能占區域總面積之顯著比例，對山坡地穩定與水土保持構成潛在風險。儘管農村水保署、林業署等相關部門已制定了包括《山坡地保育利用條例》、《水土保持法》、《森林法》等多項法規進行管理，但受到人力資源不足等多重因素的制約，相關法規的有效執行始終面臨挑戰。有鑑於此，將碳匯、碳抵換等概念納入現有的管理執行手段之中，或許能成為有效改善山坡地超限利用問題的策略選項之一，為山坡地保育與永續利用開闢新的途徑。

(二)造林碳匯評估

在眾多的生態系統類型中，新生林地與草地被視為具有主要綠碳碳匯潛能的區域。特別是林地，由於植被不僅在地表上生長，更藉由深

入地下的根系與土壤緊密結合，共同創造了卓越的碳儲存能力。若進一步細分，林地的碳匯可歸納為水土保持植生體本身（包含地上部與地下根系）、土壤層，以及地表的落葉枯枝層等幾個主要構成部分，而針對這些不同的組成，也存在著相對應的碳匯量計算方法。

在評估地上植生部分的碳匯量時，針對森林林地，通常會整合植生的生長速率、植生體的含碳比例，以及基於植株數量所計算出的生物量等參數(如圖 4-1 所示)。接著，再依據農村水保署內部固碳資料庫所建議的計算係數值，便能推估出不同植生的碳匯儲存量(參見農村水保署，2022)。林地植生又可細分為喬木與灌木兩大類。在喬木方面，由於樹種通常較為高大，因此其數量在工程設計圖或預算書中都會明確標示。相較之下，灌木由於多為小型木本植物，在數量及種類的精確標記上相對困難。因此，針對灌木的碳匯量評估，通常會改以單一造林面積可種植的植株數量進行推算，進而估計不同工區的碳匯含量。至於土壤碳的部分，則可進一步區分為土壤本體層以及土壤表面的落葉層所蘊含的碳儲存量。針對土壤落葉層的固碳量，則可透過植物整體碳匯量乘以一個相對應的比例係數來加以估算(參見農村水保署，2023)。

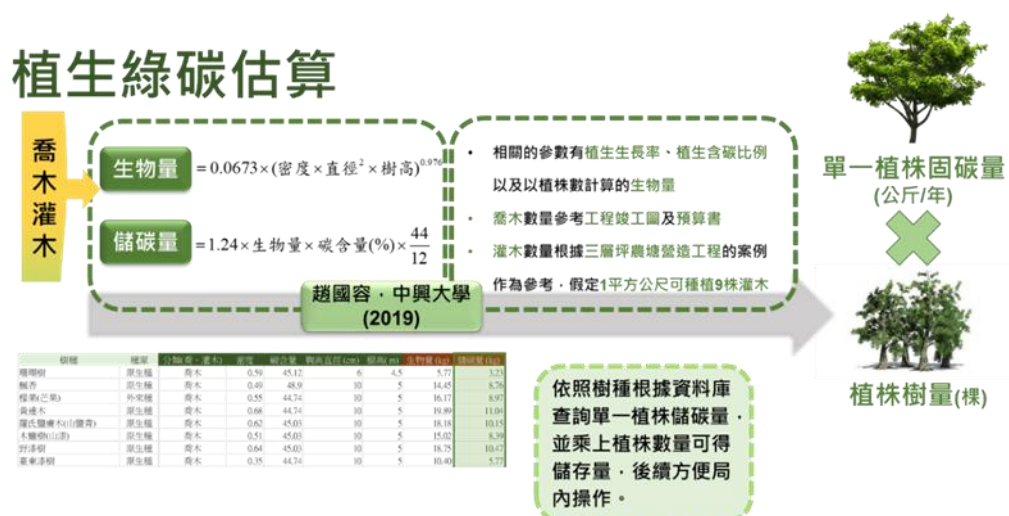


圖 4-1 喬灌木綠碳計算詳細流程(資料來源：本計畫製作)

二、滯洪農塘碳匯

(一)生物滯留系統固碳

聯合國在 2015 年所發布的永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs) 中，明確地將建立具備韌性的基礎工程設施列為重要的一環。與此同時，台灣的內政部營建署亦於 2021 年發布了「水環境低衝擊開發設施操作手冊」，該手冊以逕流分擔與出流管制為兩大核心主軸，旨在透過更有效率的水資源調節措施，從容應對極端氣候所帶來的日益嚴峻的氣候變遷挑戰。

在眾多水土保持領域的重要設計單元中，農塘與滯洪池設施扮演著尤其關鍵的角色。如何在有效調節地表逕流，並同時增加農業灌溉水源供應的基礎上，進一步發掘滯洪單位的額外固碳效益，已成為當前滯洪設施發展的重要方向，也為其未來應用開闢了更為廣闊的前景。透過結合水資源管理與碳匯提升的雙重目標，農塘與滯洪池將在未來的永續發展進程中，扮演更為積極且多元的角色。

(二)農塘固碳

生態滲透基地，作為一種卓越且植被豐富的雨水基礎設施，能夠提供多樣化的生態系統服務。儘管有機物質在提升生態滲透基地的效能方面扮演著至關重要的角色，然而，目前對於其碳積累特性的深入了解仍然相對有限。

透過一項針對澳洲 25 個亞熱帶生態滲透基地所進行的詳盡調查研究，研究結果顯示，碳元素主要在土壤的頂部 5 公分處快速積累，而在較深層的土壤中，碳的積累速率則呈現相對緩慢的趨勢(資料來源：Emad Kavehei, 2019)。

基於生態滲透系統所展現的碳固定潛力，在未來設計滯洪溼地時，可以將此因素納入考量，並針對生態滲透系統的設計進行相應的調整

與優化。研究建議，在生態滲透基地的結構設計中，可以考慮增設碳源層，以便更有效地管理碳元素的有效性與利用效率，進一步提升滯洪溼地的整體碳固存效益。

(三) 農塘碳匯評估

在淡水生態系統中，農業池塘單位面積的甲烷排放量可謂相當顯著。以美國為例，境內遍布約 256 萬個農業池塘，總覆蓋面積高達 420.9 萬公頃，每年總計排放約 95.8 千噸的甲烷氣體。同樣的情況也發生在澳大利亞，該國境內約 176 萬個農業池塘，總面積達 291.2 萬公頃，每年甲烷排放量亦達到約 75.1 千噸(資料來源：Malerba, 2022)。

有鑑於農業池塘在全球甲烷排放中所佔據的重要性日益提升，政府間氣候變化專門委員會(IPCC)近期已對其排放指南進行修訂，並鼓勵各國將農業池塘歸類為「其他人造水體」，進而將其納入國家溫室氣體排放清單之中，進行更全面的監測與管理。然而，目前全球大多數地區在農業池塘的分布範圍和數量統計方面，仍舊缺乏足夠且具體的數據資料，這也使得將農業池塘納入國家溫室氣體清單的工作，依舊面臨著不少實際操作上的困難。

正因如此，積極制定有效降低農業池塘碳排放的措施與手段，將成為未來解決農業領域碳排放問題的重要途徑之一。透過技術創新與政策引導，降低農業池塘的甲烷排放，將有助於整體農業體系的綠色轉型，並為全球的減碳目標做出貢獻。

三、防砂構造物土壤碳匯

相較於植物綠碳，土壤碳因缺乏通用的量測技術(Vance, 1987)，在量測上更具挑戰性。土壤碳量測可根據其儲存狀態區分為碳通量與碳儲存量兩大類。針對土壤碳儲存量，常用的量測方法包括直接取樣法、核磁共振法、以及紅外線光譜法等，其中又以直接取樣法最為普遍。

直接取樣法在實際操作時，需先挖掘至特定深度以取得土壤樣本，再透過碳分析儀等精密儀器，量測樣本中的碳含量，進而推算出土壤碳儲存量。土壤碳排放量，其量測方法則包括靜態箱法、流通箱法、通氣室法、以及氣相色譜法等多種途徑，其中靜態箱法是目前最廣泛採用的技術。土壤碳量測技術的有效應用，將能為本計畫提供重要的科學依據，以評估各種提升碳匯措施對於土壤有機碳庫所造成的具體影響程度。關於土壤碳量測技術已經在本計畫書第二章第一節進行說明，以下將針對土壤碳儲存量與碳排放量的主要估算技術，分別進行更詳細的說明，以利後續統整為簡易計算公式納入增匯指引中。

為更深入地掌握各工程區的土壤特性與質地，可有效運用農村水保署歷年調查所累積之全國性工程土壤調查資料。藉由前一小節所闡述之土壤有機碳測量方法，得以進一步分析土壤分層的碳匯含量。透過參照陳尊賢(1998)所提出的土壤量體有機質計算方式，便能有效估算出特定土壤樣體的碳儲存量，並進一步瞭解實施碳匯提升技術前後，土壤有機質含量的具體變化情形。此分析方法將有助於評估增匯技術的實際成效，並為後續的碳匯效益監測提供重要的基礎數據。

假設一個標準土樣共有 K 層土體，在某一深度之總有機碳之計算可用下式 10 表示：

$$Td = \sum_{i=1}^k \rho_i p_i D_i \quad (10)$$

其中，

Td 為土體樣體某一深度內每一單位體積(m^2)之總有機碳量(Mg)

ρ_i 為某一土層 i 之容積比重(Mg/m^3)

p_i 為某一土層 i 之有機碳含量($Gc/g \text{ soil}$)

D_i 為某一土層 i 之厚度(m)

土壤有機質含量並非均質不變，而是會受到多重因素的交互影響，呈現顯著的地區性與質地差異。其中，土地利用方式、氣候條件等，皆為左右土壤有機質含量的關鍵因子。根據聯合國糧食及農業組織(FAO)的相關說明，地表以下一公尺的土壤層，蘊藏著豐富的有機碳，此深度範圍內的土壤有機碳含量，通常被用作評估土壤碳儲存能力的重要指標。因此，在未來水土保持工程中，評估土壤碳匯時，可將此深度範圍的土壤有機碳含量納入計算依據。

為了更深入了解台灣地區土壤有機質含量的現況，並據此擬定更為精確的有機資材施用策略，可參考郭鴻裕等人於 1995 年所進行的台灣地區土壤有機質含量地理分布研究。該研究調查結果顯示，中海拔森林土壤之有機碳含量可高達每立方公尺 67 公斤，相較之下，一般農田土壤之有機碳含量平均值則約為每立方公尺 10 公斤。

若僅依據此研究數據進行碳匯量估算，可能會有過度偏重特定土地利用形式，以及忽略不同土壤深度含碳量差異的疑慮。因此，更為周全的做法是，同時參考林映儒等人(2000)在不同土地利用型態、台灣不同區域採樣點，以及不同土壤質地條件下所調查分析的土壤含碳量數據。關於不同土壤質地的詳細資訊，可進一步查閱農業試驗所土壤資料供應查詢平台(如圖 4-2 所示)。本計畫在初期階段，亦將初步採用林映儒等人的研究數據，作為計算土砂量所固存土壤碳量體的基礎，以期獲得更符合台灣在地現況的評估結果。

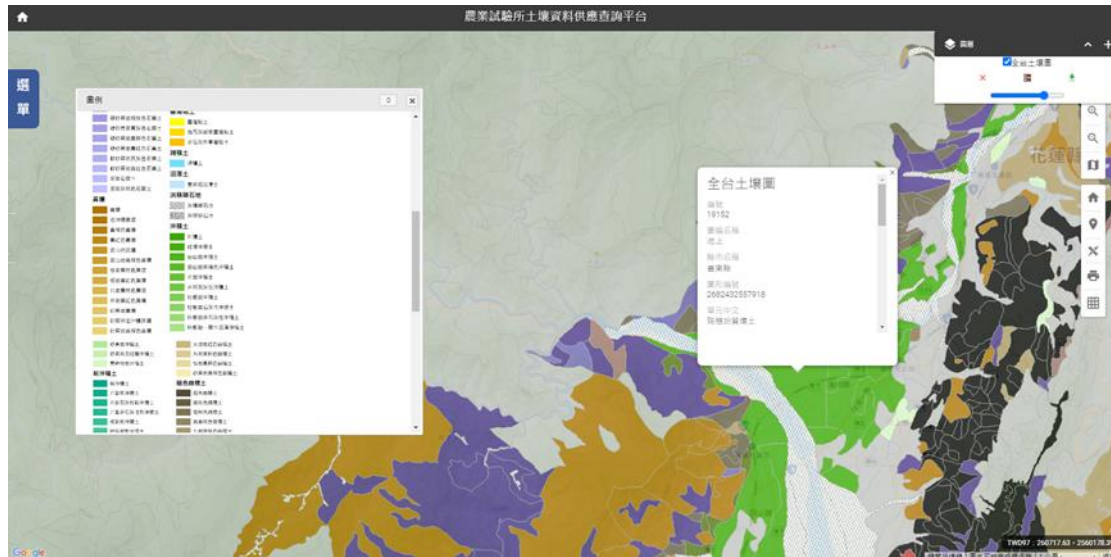


圖 4-2 農業試驗所土壤資料供應查詢平台畫面(資料來源: 農業試驗所土壤資料供應查詢平台)

第二節 建立碳匯係數資料庫架構

一、國內工程減碳指引回顧

隨著全球氣候變遷所帶來的挑戰日益嚴峻，台灣政府正積極推動各項應對措施，其中包含對《氣候變遷因應法》的修訂，並確立了在 2050 年達成溫室氣體淨零排放的長遠目標。在此背景之下，公共工程的管理策略顯得格外重要，尤其是那些涉及水土保持以及水利防災等領域的工程項目，更因其大量使用鋼筋、混凝土等高碳排材料，而對整體碳排放量產生顯著的影響。因此，如何有效地推動工程減碳指引，並建構完善的相關管理策略，已成為當前水土保持工程領域不容忽視的核心議題。

目前，台灣國內工程管理策略的重點，主要聚焦於將節能減碳的原則全面融入工程的每一個生命週期階段，從最初的規劃設計、材料的選用、到施工的具體實施，以及後續的營運維護等環節，皆需充分考量減碳因素。透過明確制定減碳目標，並精確掌握工程碳排放的具體來源，台灣的工程管理正逐步朝向更系統化與更精細化的方向發展。

以行政院公共工程委員會於 2011 年所提出的《永續公共工程政策白皮書》為例，該文件即特別強調工程全生命週期節能減碳策略的重要性，並明確規劃了短期、中期與長期的減碳路徑。在短期策略方面，主要倡導採用低碳工法，以及優先選用近距離運輸的建材；中期策略則側重於透過數據分析來優化工程的整體效能；而長期策略則著眼於發展本土化的低碳技術與低碳建材。

在具體的實施層面，公共工程的可行性評估堪稱策略執行的首要步驟。透過嚴謹的成本效益分析，以及對不同替代方案的深入比較，方能審慎地評估工程推動的必要性，從源頭避免不必要的資源浪費(如圖 4-3 所示)。與此同時，工程的需求性與效能評估，亦可藉由導入資料庫自動化工具來提升作業效率，不僅能更有效地預警潛在的工程問題，更有助於降低工程對環境可能造成的負面影響，實現環境友善的永續工程目標。



圖 4-3 我國公共工程碳管理相關政策發展示意圖(資料來源：本計畫製作)

(一)既有公共工程減碳參考指引說明

為呼應國內日益高漲的減碳呼聲，並引導相關工程領域邁向更為綠色的發展道路，台灣已正式推出水利工程及水土保持工程減碳參考指引(如圖 4-4 所示)。其中，針對水利工程減碳指引，更進一步地依據工程生命週期的不同階段，細分為規劃設計、施工及營運管理等三篇，由此可見國內工程管理策略的持續深化與精進。

該減碳指引不僅汲取了國際間推動減碳的寶貴經驗，更充分考量了台灣本土的實務操作現況，力求為水土保持工程領域提供一套具體可行的減碳規劃與實施方法。指引涵蓋了工程全生命週期的六個關鍵階段，分別為：可行性評估、規劃設計、材料選擇、施工實施、營運維護，以及最終的廢棄處理。

在可行性評估階段，指引特別強調，在短期內應優先選用低碳材料以及低碳施工工法，以有效降低材料生產製造與運輸過程中所產生的碳排放量。同時，指引也著重強調工程需求性評估與替代方案分析的重要性，鼓勵盡可能地利用現有的設施資源，避免不必要的新增工程建設，從源頭減少對環境造成的負擔。

ARDSWC-112-212



圖 4-4 我國水利工程及水土保持工程減碳參考指引(資料來源：經濟部水利署、農業部農村發展及水土保持署)

進入規劃設計階段，指引建議工程團隊善用「5W1H」分析法，將焦點精準地鎖定在減碳目標與減碳策略的制定上。這包括了優化工程材料的選擇與用量、設計更為低碳的施工方法、以及妥善規劃碳匯區域與綠色電力設備的安裝配置等面向。此外，針對工程施工階段，指引特別推薦採用預鑄混凝土構件以及其他成熟的低碳技術，以期縮短整體施工週期，並最大程度地降低施工過程對周遭環境所造成的影響。

材料的選用，無疑是整體減碳工作鏈條中的關鍵環節。減碳指引詳細列舉了包括高爐水泥混凝土、無機聚合綠色水泥、再生混凝土等多種綠色材料的特性與適用場景，為工程單位提供了具體可行的低碳材料替代方案。與此同時，指引也強調需針對工程材料的碳排放量進行詳盡的量化計算，以確保在工程設計階段，即能充分考量碳排放的影響，並將低碳目標具體落實。

在施工與營運維護階段，指引則著重於施工過程中的各項節能減碳措施，例如提升施工機具的使用效能、加強施工現場的廢棄物減量與妥善管理、以及優化物料運輸路徑規劃等。在設施的營運維護方面，指引則倡導應積極結合當地的社區人力資源，定期對設施進行維護保養，並盡可能延長設施的使用壽命，多管齊下，方能有效實現整體的減碳目標。

該減碳指引還整合了碳排放盤查以及碳管理兩種核心方法，不僅提供了針對單一工程項目的碳排放管理機制，更進一步建構了適用於整體工程系統的碳排管理架構，並精心設計了碳排檢核表，以協助各工程單位在實務操作中，更有效地落實各項減碳措施。透過深入的案例分析，該指引也具體展示了減碳策略的實施成效，為未來工程領域制定更為完善的減碳策略，提供了極具價值的參考依據。

二、國際增匯指引回顧

根據文獻回顧，國內外並沒有既有明確完成之增匯指引，推估原因為增匯指引與減碳指引雖然都是希望提供一個指引手冊，供相關業務單位針對不同增匯策略進行碳匯計算、效益評估及總量管制，但在減碳策略主要依照行為、材料及工法上的改進進行分類，對於計算公式的擬定較單純。然而碳匯牽涉到的往往是自然工法或技術，例如土壤管理、植生復育、水文調整等，這些方法需長期觀測方能確認其碳固定效益。除了做事前評估，還必須在操作過程中制定嚴謹的 MRV(Measurement, Reporting and Verification，量測、報告與驗證) 監測機制，故在架構擬定尚存在差異。

而在國際上目前較具增匯指引雛形者，為聯合國糧農組織(FAO)於 2023 年發表之《全球土壤再固碳》計畫。此指引以土壤健康與氣候

調適為核心目標，透過永續土地管理（SLM）策略實現碳匯潛力，並強調科學基礎、在地適用性與利害關係人參與。該指引涵蓋以下幾項重點：

五大原則（Five Pillars）：包括碳潛力辨識、管理實踐設計、在地參與與能力建構、持續監測與資料管理，以及制度支援與政策整合，提供了一個系統性的增匯策略規劃架構。

（一）土地管理實踐（Land Management Practices）：針對不同土地利用型態提出具體作法，如農地的覆蓋作物、減少翻耕、堆肥施用；牧草地的放牧管理與植生強化；森林的混農林業及自然再生等，皆可作為土壤碳匯的潛在來源。

（二）碳匯潛力與情境分析（Potential and Scenario Analysis）：透過地理資訊與模擬工具，針對各地土壤碳儲量與變化潛力進行評估，作為策略擬定與政策推動依據。

（三）MRV 制度設計（Monitoring, Reporting, Verification）：強調從農場到國家層級的多尺度監測資料整合，並鼓勵採用結合遙測、地面調查及模型的混合方法，確保數據一致性與科學性。

（四）多方參與與能力培力：鼓勵政府、農民、學術界與國際組織共同合作，建立可持續的制度與技術支持系統，以提升執行效能與在地接受度。

《全球土壤再固碳》提供了土壤碳匯工作的系統性參考架構，儘管其未明確針對水土保持工程進行分類，但其中所提出的原則與方法，仍具有高度參照價值，尤其在強調「可操作性」與「監測機制」兩方面，對於我國未來擬定水土保持增匯指引時，具高度借鏡意義。未來可考慮結合我國地區性地形、土壤與土地利用條件，進一步將上述國際原則在地化，建構兼具科學性與可行性的水土保持碳匯操作模式。

三、增匯係數研擬原則

要推動水土保持領域的碳管理過程中，建立具科學依據的碳匯係數體系是發展碳匯方法學的核心基礎。在既有的工程減碳作業指引中，包括水利工程減碳指引、水土保持工程減碳參考指引，多採「碳排係數×活動數據」的線性模式，能以簡化方式快速估算總排放量(表 4- 1)。例如混凝土生產階段的碳排放量可設定為每立方米約 434 kg CO₂e，工程單位得以依據材料用量直接計算總排放，而當策略性變更使用為低碳或高爐混凝土，減碳效益可以直接採用線性公式評估。然而，碳匯的本質不同於碳排，其具有空間異質性、時間延遲性及生態動態性，難以僅用單一係數就完成估算。不同領域碳匯計算存在案例之間的自然條件及情境差異，碳匯計算應納入多情境比較，計算量的準確性為指引工具成效的關鍵，故在此章節針對不同領域的碳匯透過監測以及數據分析進一步細化與統整出可操作之評估模式。

表 4- 1 工程減碳與增匯執行目標比較表(資料來源：本計畫製作)

項目	減碳作業指引	增匯作業指引
主要目標	降低工程本身碳排放量	提升工程附帶之碳吸存量
著重階段	規劃、設計、施工流程	規劃、設計、維護管理
技術面向	材料選擇、工法改善、運輸減碳	植生復育、土壤管理、水體養護
作用定位	減少源頭排放	彌補工程無法避免之排放
評估模式	以單一碳排係數估算	需考量空間異質性、時間延遲性及生態動態性

本計畫所建構之碳匯資料庫針對水土保持相關工程的三大自然碳匯——植生綠碳、土壤黃碳與農塘青碳進行系統性文獻蒐集與參數整理。整體結果顯示，碳匯估算需建立在「個體物件化」的基礎上，而非僅依材料或工項計量得出固定值，這與傳統減碳係數表的概念存在根本性差異(表 4- 2)。以下分別針對三種碳匯範疇敘述其評估流程及建立估算公式。

表 4-2 不同範疇增匯策略及特性(資料來源：本計畫製作)

範疇	主要措施	增匯機制	附加效益
森林坡地（綠碳）	造林、植生復育	增加植被生物量與土壤有機碳	減少侵蝕、涵養水源
土壤環境（黃碳）	防砂壩沉積物管理、擋土牆固碳	固定沉積物、增加SOC含量	穩定坡地、延長工程壽命
農塘與濕地（青碳）	農塘管理、濕地營造	水體沉積與光合作用吸碳	提升水質、促進生態多樣性

（一）綠碳（植生固碳）

綠碳的來源包括喬木、灌木及草本植物。現行評估多參考林業造林碳匯方法學，以樹高、胸徑（DBH）、木材密度與含碳率為主要變數，透過經驗公式估算單株或群落的生物量，在單位時間內之生物量差異以換算植生固儲量。喬木層碳匯潛能最高，灌木次之，草本植物雖碳密度低，但在坡面穩定與土壤有機碳累積上具有間接貢獻。喬木灌木碳吸存量公式內容相對複雜，須考慮樹木胸徑（DBH）、高度、生長率、木材密度與含碳率等多項變數。草本植物則需另行設定係數，以反映其較低的生物量碳累積。這些參數皆因物種差異、立地條件與經營方式而顯著不同，難以壓縮為單一固定值。

其中碳匯計算所需參數包括植物初始種植之規格、年生長率、碳含量等數據，依據「精進估算植生工法之碳吸存量—台灣中低海拔樹種樹高異速方程式與不耐陰木本和草本植物的生長速率」計畫(趙國容，112年)，彙整台灣重要森林樣區樹高資料庫、野外調查次生林植物的樹高與生長資料、野外調查非耐陰草本植物的生物量與生長量，精進木本植物以及草本植物於的碳儲量之估算，參考其提出之樹高異速生長方程式得知不同植生之年生長率。另外採用植物生長量推估公式(Chave et al., 2014)及植物碳含量推估成果(Chao et al., 2022) 推算不同年份之生物量及含碳量，推算喬木 20 年生長周期下之固碳量，其中生長率以及

不同植物之生長週期隨著署內之最新研究成果未來會再精進改善及滾動修正。

以下根據木本植物(喬木植物及灌木植物)固碳量評估(式 11)及草本植物(草皮)固碳量評估(式 12)，推估不同植生之生物量及生長週期固碳量。

$$C_{estimate_total_green} = \frac{\left(\frac{0.0673 \times ((DBH)^2 \times H \times D)^{0.976} \times e^{R_y \times T_y} \times BEF \times 1.24 \times C}{100} - \frac{0.0673 \times ((DBH)^2 \times H \times D)^{0.976} \times 1.24 \times C}{100} \right) \times 44}{12} \quad (11)$$

Cestimate_total_green：預估總綠碳量(kg CO₂)

DBH：初始樹徑

H：初始樹高

D：木材密度

C：碳含量

Ry：年生長率

Ty：預估計入期(年)

BEF：生物量擴展係數

$$C_{estimate} = \frac{\left((R_{above} \times T_m) \times \left(\frac{C_{above}}{100} \right) + (R_{under} \times T_m) \times \left(\frac{C_{under}}{100} \right) \right) \times A \times 44}{1000} \quad (12)$$

Cestimate：預估固碳量

Rabove：地上部年生長率

Runder：地下部年生長率

Cabove：地上部碳含量

Cunder：地下部碳含量

Tm：生長月數(月)

A：栽植面積

然而，植生碳匯的變異性極高，受植栽密度、土壤肥力、降雨及人

為維護等因素影響。若以單一係數概括所有造林或植生工程，將導致高估或低估的誤差。因此，碳匯資料庫的蒐集需記錄每個樣區的主要環境變數，並以樣區為單元建立碳匯參數群組，以支撐日後的模型化運算。

(二)黃碳（土壤固碳）

土壤碳是水土保持工程中最具潛力、但同時最難量化的碳匯來源。其形成機制主要來自上游土壤侵蝕後的泥砂在壩體後方沉積，富含有機質的表層土於缺氧環境下穩定保存，逐漸形成碳庫。以加鹿溪防砂壩實測為例，壩體淤積區土壤碳含量顯著高於對照坡地，壩後土壤碳佔整體碳匯量約 69%，植生碳則佔 31%。此結果印證防砂壩攔砂作用對碳固定的顯著貢獻。目前本計畫提出防砂壩黃碳儲碳評估的估算以「土壤有機碳含量 × 攔截砂量 × 土壤密度」為核心計算式，並根據壩型、地質、降雨及植生覆蓋狀況修正。不同集水區條件差異極大，如岩盤基質區與崩塌坡地區的碳含量可相差數倍，故難以建構統一係數。農村水保署自 2021 年起持續進行不同壩型樣區的土壤採樣分析，累積數據可逐步形成分區性「土壤碳匯參考值表」，作為未來資料庫的重要資料來源。

(三)青碳（農塘水體碳匯）

農塘、滯洪池與濕地屬於典型的「青碳」來源，其碳匯機制包括水體藻類光合作用吸收 CO_2 、沉積物中有機質的碳固定、以及周邊植生與土壤的間接貢獻。2023 年平興村滯洪農塘案例顯示，工程整治後總碳匯量約 219.24 tCO_2e ，其中水體青碳佔 77%，土壤碳佔 15.8%，植生碳佔 7%。此結果突顯小型水體在區域碳循環中的關鍵角色。

但青碳計算仍面臨藻類與微生物碳難以穩定量測的挑戰。農村水保署的方法學已將難監測的藻類碳排除，改採水體—沉積物界面碳通量的方式估算，確保方法的可操作性與一致性。未來若能結合自動感測

與遙測監測技術，將有助於建立更全面的青碳估算模型。而農塘青碳之固碳機制分別透過浮游藻生物之儲碳及碳通量達成，以下分別對其機制進行說明。

1. 碳儲存量

水體生態系的碳儲存量由水體中的草澤植物、浮游藻生物本身生物體所可以儲存的碳之外，水底的土壤也有儲存碳的能力。而植物體的碳儲存量測量可以分為浮游藻、附生藻以及濱岸植物，以下分別進行說明。

(1) 浮游藻生物量

由於浮游藻為漂浮於農塘以及濕地的水面上，故須採集各現地水樣 1 L，每一點位測站重複3次測量。測量完畢低溫攜回實驗室以玻璃纖維濾紙進行過濾，過程中並加入少許 1%碳酸鎂溶液。過濾後濾紙放入玻璃螺旋試管中並添加 10 mL 90%丙酮溶液充分混合，置於 4°C 冰箱 16 hr 進行葉綠素 a 萃取。萃取後以冷凍離心機設定轉速 3500 rpm 離心 10 min，離心完成後取上清液，再使用分光光度計分別測量 630、647、664、750 nm 吸光值，計算葉綠素 a 濃度。

計算公式如下式(13)

$$[chl\ a](mg\ L^{-1}) = 11.85 \times (Abs_{664} - Abs_{750}) - 1.54 \times (Abs_{647} - Abs_{750}) - 0.08 \times (Abs_{630} - Abs_{750}) \quad (13)$$

再以所獲得之葉綠素a濃度數值回推浮游藻葉綠素a含量，計算公式如下：

$$\text{浮游藻葉綠素a含量}(mg\ m^{-3}) = [chl\ a] \times v / V$$

其中v表示為丙酮體積(mL)，V 表示為水樣體積(L)。當葉綠素a萃取濃度過低時，即分光光度計四個量測波長值皆小於 0.01 時，則

改用螢光光度計進行測量，所測得葉綠素a濃度之單位為 RFU，為使其測量結果能與分光光度計之量測結果進行比較，以下式(14)進行轉換：

$$[chl\ a](\mu g\ L^{-1}) = 0.1295 \times [chl\ a](RFU) - 0.0391 \quad (14)$$

(2) 附生藻生物量

主要考量石附生藻類生物量，故採集現地20cm大小相近之溪底石頭樣本，每一點位測站重複3次測量。依據石頭面積大小刮取定面積石頭表面的藻類，以 100 mL 定量水量沖洗刮取的藻類進入褐色瓶中，低溫保存攜回實驗室分析。低溫攜回實驗室以玻璃纖維濾紙進行過濾，過程中並加入少許 1%碳酸鎂溶液。過濾後濾紙放入玻璃螺旋試管中並添加 10 mL 90%丙酮溶液充分混合，置於 4°C 冰箱16 hr進行葉綠素a萃取。萃取後以冷凍離心機設定轉速 3500rpm 離心10 min，離心完成後取上清液使用分光光度計，分別測量 630、647、664、750nm 吸光值，以上式計算葉綠素a濃度。再由下式(15)求得石附生藻類的單位面積生物量：

$$mg[chl\ a]m^{-2} = \frac{[chl\ a] \times V}{A} \quad (15)$$

其中V為丙酮體積(mL)，A為石附生藻刮取面積(m²)。

(3) 濱岸植物生物量

農塘與溼地周邊主要植生為草澤植物，生物量估算方法為採集濱岸2-3種最優勢的物種進行估算，採用30cm的方形樣框進行植生地上部的蒐集(Wiegert and Evans, 1964; 陳柏宏，2014)以及利用圓鋤做地下部的收集，再帶回實驗室。將地上部與地下部分開，並分為凋亡及存活部分，放入定溫75度烘箱烘乾，4 天後秤重分析(曾祥霖，2011)。

根據林幸助(2018)調查台灣濕地以及溪流生態系特性推求主要碳儲存量估算經驗公式以及係數，再透過計算池塘中之植生生物量來進行估算，植生種類包括浮游藻類、草澤植物本體、草澤植物枯物量，相關計算公式如式(16)所示。

$$\text{碳儲存量} = \text{浮游藻生物量} \times 0.67 + \text{土壤含碳量} \times 0.33 + (\text{草澤植物地上地下生物量} + \text{枯物量}) \times 0.33 \times 0.5 \quad (16)$$

2. 碳通量

由於碳通量在林幸助(2018)的溼地量測中是利用碳通量相關測量儀器進行計算，利用密閉罩蓋法量測濱岸土壤之二以化碳及甲烷，利用浮體罩蓋法量測水域之二氧化碳及甲烷，以下分別說明。

(1) 以密閉罩蓋法量測濱岸土壤之二氧化碳與甲烷氣體通量

實驗進行前將密閉培養器鋼圈部分壓入底土10 cm，並蓋上半圓形透明壓克力罩蓋或再加上全黑塑膠布，使光度區分為全暗及全亮，再用強力夾夾緊使罩內密閉，接著利用幫浦及塑膠管將密閉培養罩蓋內氣體引進分析儀中。每次測量密閉罩蓋住時間約 20 分鐘，同一罩蓋時期至少量測 2 次，每一點位測站重複3次測量。藉由量測CO₂及CH₄濃度變化，同時考量光照量、底質與季節等因素，估計溫室氣體通量及調控環境因素。

(2) 以浮體罩蓋法量測水域之二氧化碳與甲烷氣體通量

浮體罩蓋法是將用於測量濱岸陸域灘地的密閉式罩蓋進行改良，參照(Copeland and Duffer, 1964, Cole et al., 1998)等人所做的研究，使其能夠運用在湖泊及溪流型濕地水面上之溫室氣體測量。利用現有半圓形透明壓克力罩蓋進行改良，裁切合適的保麗龍片大小，套於罩蓋周圍，使其能順利浮於水面，並於保麗龍上鑿洞，穿繩綁上鉛塊，使罩蓋於測量中不因飄移而有失氣體偵測之準確性。

有鑑於獲得儀器之困難，本方法學同時採取黃大肯(2014)提出關於植株葉片與單株植物碳吸存量之回歸關係，藉由此回歸關係，搭配所建立之水土保持植生名冊進行對比，再利用面積以及植生面積推求碳的吸收量。

林幸助 (2012)針對打鳥埤各年度之碳通量進行計算，發現一個濕地或池塘等水體在完成後的第一年通常呈現碳源的型態(碳通量釋放現象)，在趨於穩定之後就會以虧轉盈，呈現碳匯的型態(碳吸收量上升)。在此方法學制定中也會利用此測量之結果作為率定驗證的參考依據，來尋求建立合理正確的碳通量推估方式。

第三節 碳匯係數應用之先期研究

一、防砂構造物碳匯方法學計算式簡化及可操作化

(一)計算式可操作化

依據先前針對提升碳匯技術所研擬的各項策略，本計畫將選取第一工項中所盤點之防砂壩所在位置，作為推動土壤碳增匯示範措施的實施地點。為精確評估碳匯技術的實際成效，並比較不同技術間的效益差異，將針對各示範工區的特性，審慎選定最為適宜的碳匯提升技術進行試驗。同時根據前期計畫因為評估防砂壩對於土壤碳匯增量的評估成果，統整為單一可操作估算之計算式。

土壤有機碳存量(SOC)是衡量土壤固碳能力的重要指標，其中計算方法如方程式

$$SOC_{area} = TOC \times BD \times D \times A \quad (17)$$

這是包括(Martins et al., 2020)在內的許多研究中所使用的一般方程式，其中

SOC = 土壤有機碳存量(Soil Organic Carbon Stock) (g)

TOC = 總有機碳(Total Organic Carbon) (g/kg)

BD = 土體密度(Bulk Density) (kg/m³)

D = 土壤深度(Soil Depth) (m)

A = 面積(Area)(m²)

其中，TOC 可透過採樣至實驗室分析取得數據；BD 則可透過現地總體密度採樣法進行測定；D 與 A 則可透過模式模擬進行演算分析。

然而，在集水區的水土保持工程中，土壤的粒徑分布與一般研究區域有所不同，傳統採樣方法所得樣區的粒徑幾乎皆小於 200 號篩（0.075mm），但在水土保持工程中的土壤組成更為複雜，部分樣區內具有固碳潛力的細粒土壤甚至僅佔總重量的 1%。

因此，針對集水區的水土保持工程進行修正，提出改良公式如下：

$$SOC_{area} = TOC \times BD \times D \times A \times SR \quad (18)$$

其中，SR (Sieving Rate) 為過篩比例 (%)，代表細顆粒土壤的佔比。在上游集水區，由於土砂粒徑差距甚大，且粒徑分布不均，因此 SR 的測定需透過較大型的篩分析試驗才能獲得準確數據，以確保 SOC 計算的適用性與準確性。

而為比較水土保持工程興建對土砂之固碳效益，方程式可修正為

$$\Delta SOC_{area} = TOC \times BD \times \Delta SV \times SR \quad (19)$$

ΔSOC_{area} 代表在模擬中設置水土保持構造物前後的土壤有機碳變化量， ΔSV 則代表設置水土保持構造物前後的土體體積變化量，此參

數亦可通過模式模擬或是參考最初防砂壩設計標準取得。此修正公式考慮了水土保持工程對土體體積變化的影響，使得計算結果能夠更準確地反映實際情境下的碳儲存變化，並進一步提供水土保持工程對固碳效益的量化評估依據(圖 4-5)。未來可進一步整合不同地形條件與施工方式，以更細緻地解析水土保持措施對土壤有機碳變動的影響。

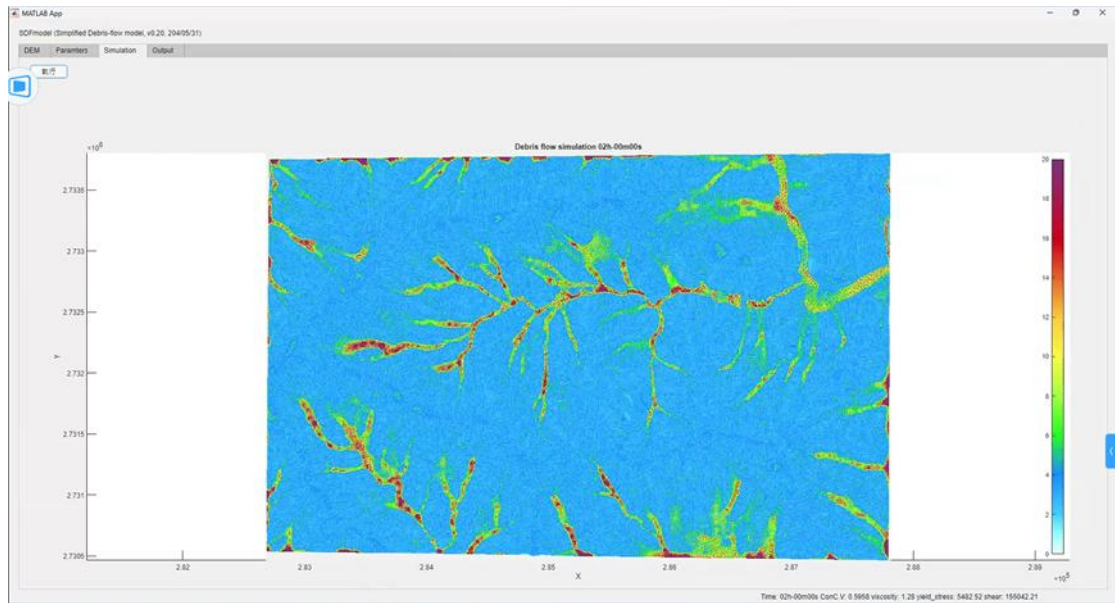


圖 4-5 研究區域土砂碳匯量分析示意圖(資料來源：本計畫製作)

針對土壤黃碳儲碳量評估參數，在前一章節得知與壩體形式、與壩的距離、儲砂量等參數有關，故建議以「壩型—集水區特性—砂量—有機碳濃度」為主軸，建立多維矩陣式資料表(表 4-3)。各壩型（如混凝土壩、鋼構壩、自然堆石壩）可依不同地質條件設定預設參數範圍，也提供後續本署之持續發展方向。此架構可配合土壤碳含量 Raster 圖進行空間化分析，並可輸入未來的現地採樣結果以自動校正。未來於防砂壩碳匯量化評估中，只需依壩型與集水區類別帶入預設 TOC 參數範圍，即可初步估算壩體儲碳量；待後續現地採樣完成後，再由系統自動進行校正（以更新平均 C/N 值與碳密度分布）。此方法可大幅提升不同壩型增匯潛勢的可比性與資料一致性。

同時，資料庫應納入「折減係數」模組，考量碳匯高估風險。折減因素包括：壩後砂量是否完全受控、自然狀態下之沉積比例、以及壩體穩定性與年限等。透過此設計，可確保不同專案的估算結果在空間尺度與時間尺度上具有可比性。藉由這些條件設定折減比例，可讓估算值更為保守合理。未來可結合「全台土壤含碳量 Raster 圖」，建立跨集水區的空間化估算模型，讓資料庫不僅服務單一工程，也能推廣至區域尺度。在一般估算中，若將防砂壩攔截的泥砂量全數視為碳匯來源，容易造成高估，因此本計畫建議引入折減係數（SR, Shrinkage Ratio）以反映實際受壩體控制之沉積比例。此折減係數 SR（Sediment Reduction Coefficient），旨在反映各類防砂構造物於實際情境下對沉積物攔阻效率的差異，避免僅以理論最大滯砂量推估而造成估算偏高，本計畫已在框架中納入以下考量：

1. 以構造物型式為主體之係數設定

SR 的基礎定義係依據構造物形式（如固床工、沉砂池、攔砂壩）常見之攔截行為特性建立，其目的在於提供「初步」的量化折減參考，使不同類型構造物的沉積控制效果具有可比較性。

2. 納入地質、土砂特性與環境條件之調整因子

由於地層鬆密度、粒徑組成、坡度、流況等均可能影響實際攔砂效率，本計畫建議在應用時可依據場址之地質調查資料、樣區粒徑分析、坡度分布、沖淤監測資料等進行在地化修正。後續將於操作指引中加入示例說明（如不同粒徑組成對 SR 的建議調整幅度）。

3. 以「監測資料」作為 SR 在地化修正之核心依據

本計畫建議 SR 並非固定值，而是可依後續之年際沖淤量、構造物後方堆積高度變化、UAV 航照地形、LiDAR DEM 差異分析等資料進行逐年校正，使折減係數更符合實際沉積控制比例。

4. 適用性之定位：提供具彈性的半經驗法

SR 的定位並非單一情境的「通用值」，而是提供各構造物類型在估算初期之基準折減因子，再透過「地質差異、粒徑特性、結構物尺寸、流況、監測資料」逐步調整，使其具備跨場址可用性與在地化彈性。

表 4-3 不同壩體評估碳匯參數參考(資料來源：本計畫製作)

壩型	集水區特性	沉積砂量	TOC (g/kg)	TN (g/kg)	平均 C/N 比	沉積特徵與碳分布描述	預設 TOC 參數範圍 (未採樣時可套用)	預估儲碳潛勢
蘇樂壩	山區中小集水區、暴雨後穩定化系統	中	+6% (事件後提升)	-52% (事件後降低)	↑至 13.38 (約 +120%)	擾動後穩定化、碳氮比上升顯示固碳潛力	10-15 g/kg (事件後)	中等至高
JX01 封閉式壩	坡度大、集水面積小	小	2.31-2.97	0.366-0.538	約 6-8	沉積穩定、變異小、碳氮集中	2-3 g/kg	中等
NA01 封閉式壩 (草生平台)	坡緩、草生覆蓋良好	中	8.73-28.94	0.27-1.03	約 10-20	含碳高、垂直分層明顯、草生平台提供穩定碳源	10-25 g/kg	高
RF02 梳子壩 (開放式)	高坡度、沖蝕強、通水型	大	4.87-32.68	0.43-0.69	約 8-15	細粒外輸、表層碳高、變異大	5-20 g/kg	中等偏高
混凝土壩 (建議新增類別)	岩質基盤、沉積有限	小	預估 1-5	預估 0.2-0.5	約 5-8	表層薄層積碳為主、固碳潛勢有限	1-5 g/kg	低
鋼構壩 (建議新增類別)	通水型、沉積鬆散	中	預估 3-10	預估 0.3-0.7	約 8-12	通氣良好但碳留存不穩	3-10 g/kg	中等
自然堆石壩 (建議新增類別)	自然坡地或崩塌區	中至大	預估 10-25	預估 1.0	約 10-15	細粒沉積集中於凹地、保水佳	10-25 g/kg	高

(二) 示範案例

本章以石門水庫集水區蘇樂壩為示範案例，蘇樂壩位於石門水庫中上游支流，屬山區型防砂壩體，壩後沉積物來源多為上游崩塌土砂及細粒有機質。現地採樣分析顯示：

- 土壤有機碳含量（TOC）介於 3.4–3.8 g/kg，平均 3.615 g/kg；
- 壩後沉積物顆粒以粉砂與細砂為主（粒徑 <0.075 mm 約佔 2%）；
- 含水率 15–22%，pH 值約 6.5，屬弱酸性環境，有利有機碳穩定保存。

透過前章所建立之土壤有機碳（SOC）估算公式與現地採樣數據，展示如何運用碳匯係數資料庫計算防砂壩增匯效益。

基礎估算公式如下：

在集水區的水土保持工程中，土壤的粒徑分布與一般研究區域有所不同，傳統採樣方法所得樣區的粒徑幾乎皆小於 200 號篩（0.075mm），但在水土保持工程中的土壤組成更為複雜，部分樣區內具有固碳潛力的細粒土壤甚至僅佔總重量的 1%。

石門水庫 蘇樂防砂壩 SOC 計算表格	
TOC(g/kg)	3.615
土體密度(kg/m ³)	1795.75
過篩比例	2%

代入公式計算：

$$\Delta SOC_{area} = TOC \times BD \times \Delta SV \times SR$$

$$SOC_{有蓋壩} = 3.615_{(TOC)} \times 1795.75_{(BD)} \times 22496185.94_{(SV有蓋壩)} \times 0.02_{(SR)}$$

$$SOC_{沒蓋壩} = 3.615_{(TOC)} \times 1795.75_{(BD)} \times 22449276.56_{(SV沒蓋壩)} \times 0.02_{(SR)}$$

$$\Delta SOC_{area} = SOC_{有蓋壩} - SOC_{沒蓋壩} = 6.0904$$

經計算，蘇樂壩土壤碳匯量以有壩情境比無壩情境多固定 6.09 tC，

顯示壩體在阻攔土砂與有機碳留存方面具顯著貢獻。若將此結果推廣至整個石門水庫集水區，以平均每座防砂壩攔砂體積 $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、碳密度近似條件估算，全區防砂壩群之潛在黃碳儲存量可達 400–600 tCO₂e/年。此結果與文獻（Martins et al., 2020；趙國容，2023）所提出的坡地壩後沉積碳固存比例相近，證明本計畫公式具合理性與可比性。

二、植生綠碳方法學計算式簡化及可操作化

（一）計算式可操作化

本章以「計算式簡化及可操作化」為核心目標，針對木本與草本植物，分別提出標準化、模組化的碳匯估算流程，並透過色彩區分欄位（藍色為基本量測資料、橘色為進階參數、綠色為計算結果）與公式解構設計，協助工程單位快速掌握各植栽碳匯構成與推估步驟。資料庫中針對植生綠碳部分，建議依植物類別（喬木、灌木、草本）設立分層表格，並收錄主要變數：生長率、木材密度、含碳率、生物量轉換係數與區域性氣候調整係數。不同植物可依照耐陰性等標準做區分，初步建議值可採喬木平均生長率 0.1021 tC/ha/yr 以及灌木平均生長率 0.0209 tC/ha/yr 作為基礎參考，未來再根據各地造林監測結果更新。其餘參數包括生長時間考量到大型喬木植物雖然生長週期可到達長則 50 年，但在 20 年後的生長週期幾乎放緩，為了計算保守值吸碳量，以 20 年作為計算週期。木材密度介於 0.55-0.61(g/cm³)，碳含量數值介於 46.5 及 47.7%，由以上預估值帶入可使植生碳匯評估越趨可操作化。

表 4-4 不同水土保持樹種應用之實際生長率(資料來源：本計畫製作)

	年基徑生長率 (cm/yr)	年胸高直徑生長率 (cm/yr)	年樹高生長率 (m/yr)	年地上部生物量生長率 (kg/yr)
樟樹	1.325	1.396	0.606	1.011
台灣檫	0.819	0.540	0.402	0.411

	年基徑生長率 (cm/yr)	年胸高直徑生長率 (cm/yr)	年樹高生長率 (m/yr)	年地上部生物量生長率 (kg/yr)
茄苳	2.911	1.755	0.924	1.479

以木本植物為例，碳匯估算主要依據 DBH（胸徑）、H（高度）與木材密度等基本生長參數，代入 AGB（地上部生物量）計算式，進一步推估其全株儲碳量與預估增長碳匯；草本植物則考量地上與地下生物量、根莖比與不同部位碳含量進行分層推估，並以面積作為擴展基礎，計算其碳匯總量(表 4-5)。最終所得之預估固碳量將轉換為 CO₂當量，提供工程設計與成效評估依據。透過本章所建構之公式與範例表格(如七里香與蠅翼草之碳匯計算)，不僅提升實務操作的可行性與準確度，亦可作為後續碳匯係數(不同增匯之量化方法公式)資料庫建置與增匯成果報告之技術依據，促進水土保持工程與碳權機制的接軌與落實。

表 4-5 木本植物碳匯計算表格(資料來源：本計畫製作)

樹種	株數	預估計入期 (年)	初始 DBH (cm)	初始H 樹高 (m)	木材 密度 g/cm ³	AGB地 上部 生物 量 (kg)	BEF生 物量 擴展 係數	R根莖 比	碳含 量(%)	全株 儲碳 量(kg C)	年生 長率 (tree /yr)	預估 地上 部生 物量 (kg)	預估 全株 固碳 量(kg C)	預估 總綠 碳量 (kg CO ₂)

其中白色欄位(樹種、AGB 地上部生物量、全株儲碳量、預估地上部生物量、預估全株固碳量)除樹種外，皆可由公式計算，公式如下：

$$\text{AGB 地上部生物量(kg)} = 0.0673 * (\text{密度} * \text{DBH} * \text{DBH} * \text{H})^{0.976} \quad (14)$$

$$\text{全株儲碳量(kg C)} = \text{AGB} * \text{擴展係數} * 1.24 * \text{碳含量} \quad (15)$$

$$\text{預估地上部生物量(kg)} = \text{AGB} * (1 + \text{年生長率})^{\text{年}} \quad (16)$$

$$\text{預估全株固碳量(kg C)} = \text{預估 AGB} * \text{擴展係數} * 1.24 * \text{碳含量} \quad (17)$$

藍色欄位為該植株之基本資料，需透過現地量測或取具可信度之平均值來取得。橘色欄位為該植株之進階數據，需要透過查閱相關文獻和進行研究並經過大量現地調查統計數據取得。綠色欄位為預估碳匯計算結果，計算結果為最佳狀況下之推估上限值，公式如下：

$$\text{預估總綠碳量(kg CO}_2\text{)}=\text{固碳量}*\text{株數}*44/12 \quad (18)$$

表 4-6 草本植物碳匯計算表格(資料來源：本計畫製作)

草種	栽植面積 m ²	覆蓋度 (無因次)	高度 (cm)	地上部生物量 g/m ²	生長月數 (月)	根莖比	地下部生物量 g/m ²	總生物量 (g/m ²)	地上部碳含量 (%)	地下部碳含量 (%)	全株碳含量 (%)	儲碳量 kg	地上部年生長率 (g/mont h m ²)	地下部年生長率 (g/mont h m ²)	全株年生長率 (g/mont h m ²)	預估全生物量 g/m ²	預估地上部生物量	預估地下部生物量	預估地上部碳含量	預估地下部碳含量	預估碳含量 g C/m ²	預估固碳量 kg CO ₂

其中白色欄位(草種、地下部生物量、總生物量、儲碳量、預估全生物量、預估地上部生物量、預估地下部生物量、預估地上部碳含量、預估地下部碳含量、預估碳含量)除草種外，皆可由公式計算，公式如下：

$$\text{地下部生物量(g/m}^2\text{)}=\text{地上生物量}*\text{根莖比} \quad (19)$$

$$\text{總生物量(g/m}^2\text{)}=\text{地上}+\text{地下生物量} \quad (20)$$

$$\text{儲碳量(kg)}=\text{總生物量}*\text{全株碳含量} \quad (21)$$

$$\text{預估全生物量(g/m}^2\text{)}=\text{全生物量}+\text{全生長率}*\text{生長月數} \quad (22)$$

$$\text{預估地上部生物量}=\text{地上生長率}*\text{生長月數} \quad (23)$$

$$\text{預估地下部生物量}=\text{地下生長率}*\text{生長月數} \quad (24)$$

$$\text{預估地上部碳含量}=\text{地上生物量}*\text{地上碳含量} \quad (25)$$

$$\text{預估地下部碳含量}=\text{地下生物量}*\text{地下碳含量} \quad (26)$$

$$\text{預估碳含量(g C/m}^2\text{)}=\text{地上}+\text{地下碳含量} \quad (27)$$

藍色欄位為該植株之基本資料，需透過現地量測或取具可信度之平均值來取得。橘色欄位為該植株之進階數據，需要透過查閱相關文獻

和進行研究並經過大量現地調查統計數據取得。綠色欄位為預估碳匯計算結果，計算結果為最佳狀況下之推估上限值，公式如下：

預估固碳量(kg CO₂)=碳含量*栽植面積*44/12

以下為木本以七里香，草本以蠅翼草為計算範例，藍色欄位基本資料部分已假設數值：

表 4-7 木本植物碳匯計算範例(資料來源：本計畫製作)

樹種	株數	預估計入期(年)	初始DBH(cm)	初始H樹高(m)	木材密度g/cm ³	AGB地上部生物量(kg)	BEF生物量擴展係數	R根莖比	碳含量(%)	全株儲碳量(kg C)	年生長率(tree/yr)	預估地上部生物量(kg)	預估全株固碳量(kg C)	預估總綠碳量(kg CO ₂)
七里香	800	30	5	3	0.61	2.809	1	0.2	47.7	1.661	0.021	5.225	3.09	4191.03

表 4-8 草本植物碳匯計算範例(資料來源：本計畫製作)

草種	栽植面積m ²	覆蓋度(無因次1=100%)	高度(cm)	地上部生物量g/m ²	生長月數(月)	根莖比	地下部生物量g/m ² =地上部生物量*根莖比	總生物量(g/m ²)	地上部碳含量(%)	地下部碳含量(%)	全株碳含量(%)	儲碳量=總生物量*全株碳含量	地上部年生長率(g/month m ²)	地下部年生長率(g/month m ²)	全株年生長率(g/month m ²)	預估全生物量g/m ²	預估地上部生物量	預估地下部生物量	預估地上部碳含量	預估地下部碳含量	預估碳含量g C/m ²	預估固碳量kg CO ₂
蠅翼草	17.6	0.1	5	21	240	0.54	11.2	32.2	40.3	12.8	34		20.1	10.9	15.4	3716	4824	2616	1944	335	2279	147.07

(二)示範案例

在植生綠碳部分以「九份二山造林區域」為示範案例，展示綠碳計算在實務操作中的流程與成果。本案例選定於南投縣縣國姓鄉九份二山造林區，為典型之坡地混合造林工程，於 2024 年 9 月完成種植，總計新植喬木及灌木混合樹種 458 株。區域坡度中等，土壤屬砂質壤土，降雨充沛且日照良好，具良好的生長條件。依據現場調查與造林紀錄，各主要樹種之數量與預估儲碳量如表 4-9 所示。

針對造林專案，可將複雜公式拆解成 Excel 表單，輸入胸徑、樹高等數據，即可自動計算單株或整地的碳匯量。這樣的工具能降低一線人員的操作門檻，並提高估算一致性。圖 4-6 為本計畫開發之「綠碳公

式計算 Excel 介面示意圖」，呈現自動化估算的主要操作步驟與計算邏輯。

計算流程如下：

- 1. 輸入基本植生參數： 含胸徑、樹高、樹種類別及栽植密度。
- 2. 自動帶入資料庫參數： 包括木材密度（平均 0.55–0.61 g/cm³）與碳含量（約 46.5–47.7%）。
- 3. 依照生長年限套用生長率（Ry）與生物量擴展係數（BEF）： 預設 20 年為計算期，以反映植栽成熟期的穩定吸碳潛勢。
- 4. 自動輸出碳儲存量(kgCO₂e)： 依物種別及棵數合併生成總碳匯量。

草種	栽植面積 m ²	覆蓋度 (無田次 l=100%)	高度 (cm)	地上部 生物量 g/m ²	生長 月數 (月)	根莖 比	地下 部生 物量 g/m ²	總生 物量 (g/m ²)	地上 部碳 含量 (%)	地下 部碳 含量 (%)	全株 碳含 量(%)	儲碳 量kg =地上部生 物量*地上 部碳含量	地上 部年 生長 率 (g/month m ²)	地下 部年 生長 率 (g/month m ²)	全株年 生長 率 (g/month m ²)	預估 全生 物量 g/m ² =地上部 生物量* 地上部 生長月數	預估 地上 部生 物量 g/m ² =地上部 生物量* 地上部 生長月數	預估 地下 部生 物量 g/m ² =地下部 生物量* 地下部 生長月數	預估 地上 部碳 含量 g C/m ² =地上部 生物量* 地上部 碳含量	預估 地下 部碳 含量 g C/m ² =地下部 生物量* 地下部 碳含量	預估固碳 量 kg CO ₂ e =碳含量*栽植 面積*44/12	
							地下 部生 物量 g/m ² =地上+ 地下生 物量	總生 物量 (g/m ²)	地上 部碳 含量 (%)	地下 部碳 含量 (%)	全株 碳含 量(%)	儲碳 量kg =地上部生 物量*地上 部碳含量	地上 部年 生長 率 (g/month m ²)	地下 部年 生長 率 (g/month m ²)	全株年 生長 率 (g/month m ²)	預估 全生 物量 g/m ² =地上部 生物量* 地上部 生長月數	預估 地上 部生 物量 g/m ² =地上部 生物量* 地上部 生長月數	預估 地下 部生 物量 g/m ² =地下部 生物量* 地下部 生長月數	預估 地上 部碳 含量 g C/m ² =地上部 生物量* 地上部 碳含量	預估 地下 部碳 含量 g C/m ² =地下部 生物量* 地下部 碳含量	預估固碳 量 kg CO ₂ e =碳含量*栽植 面積*44/12	
							地下 部生 物量 g/m ² =地上+ 地下生 物量	總生 物量 (g/m ²)	地上 部碳 含量 (%)	地下 部碳 含量 (%)	全株 碳含 量(%)	儲碳 量kg =地上部生 物量*地上 部碳含量	地上 部年 生長 率 (g/month m ²)	地下 部年 生長 率 (g/month m ²)	全株年 生長 率 (g/month m ²)	預估 全生 物量 g/m ² =地上部 生物量* 地上部 生長月數	預估 地上 部生 物量 g/m ² =地上部 生物量* 地上部 生長月數	預估 地下 部生 物量 g/m ² =地下部 生物量* 地下部 生長月數	預估 地上 部碳 含量 g C/m ² =地上部 生物量* 地上部 碳含量	預估 地下 部碳 含量 g C/m ² =地下部 生物量* 地下部 碳含量	預估固碳 量 kg CO ₂ e =碳含量*栽植 面積*44/12	
滿草野植草	192.5	0.7	30	101.72	240	0.535	54.42	156.14	40.3	12.8	33.95		20.1	10.9	15.35	3840.14	4824	2616	1944.07	334.85	2278.92	1608.54
每年春-秋生長共8個月，計30年，共240個月																						
項目名稱	單位	數量	預估計入期(年)	初始DBH (cm)	初始H 樹高 (m)	木材 密度 g/cm ³	AGB 地上 部生 物量 (kg)	BEF 生物 量擴 展係 數	R 根莖 比	碳含 量(%)	全株 儲碳 量(kg C)	年 生 長 率 (tree/yr)	預 估 地 上 部 生 物 量 (kg)	全 株 固 碳 量 (kg C)	預 估 總 綠 碳 量 (kg C)							
							=0.0673*(密度*DBH*H)*0.976				=AGB*擴展係數*1.24*碳含量		=AGB*(1+年生長率)*年	=預估AGB*擴展係數*1.24*碳含量	=固碳量*株數*44/12							
灌木	株	2400	30	5	3	0.61	2.809	1		47.7	1.6615	0.0209	5.2246	3.0902	12573.08							
30年碳匯量預估																14181.614368205						
																14.18161437 tCO ₂ e						

圖 4- 6 綠碳公式計算 Excel 過程(資料來源：本計畫製作)

表 4- 9 九份二山造林區域植生碳匯估算結果(資料來源：本計畫製作)

類別	數量	儲存量(kgCO ₂ e)
九芎喬木	81 株	24815
茄冬喬木	50 株	68727
風鈴木喬木	40 株	67103
陰香喬木	91 株	113107
苦楝喬木	20 株	1854
樟樹喬木	54 株	17533

櫟木喬木	50 株	1081
其他喬木	67 株	29576

綜合計算結果顯示，九份二山造林區於造林後首年估算之潛在碳儲量約 323.8 tCO₂e，隨著植株逐年成長，預期在 20 年期滿時，累積碳匯量可提升至約 450–500 tCO₂e。此值僅為估算參考，實際吸碳量仍需視土壤肥力、降雨條件及維護管理狀況而定。

三、農塘青碳方法學計算式簡化及可操作化

在全球面臨氣候變遷壓力、碳中和成為發展共識的當下，農塘場域中潛藏的碳匯潛力逐漸受到重視。傳統碳匯計算多聚焦於森林生態系統，然而農塘這一種具有複合水陸交界特性的小型人工或半人工濕地，因其擁有獨特的植被、水體與土壤三重碳儲存空間，其綜合碳吸存能力不容忽視。為回應此類場域的需求，本計畫提出一套簡化且具操作性的青碳計算方法學，試圖建構一種既符合聯合國清潔發展機制（CDM）技術規範，又能貼合台灣在地工程與農塘管理實務的碳匯評估系統。

（一）農塘青碳方法學概述

創新之處在於，其計算物件不僅限於傳統的地上部植生與土壤有機碳，還包括浮游植物、濱水植物、進出水體有機碳濃度變化、異營性呼吸造成的氣體釋放，以及甲烷等非二氧化碳溫室氣體，形成一套完整的水域—植生—土壤聯動碳品質流向模型。整體碳匯分為三個主要儲存面向：其一是浮游植物與濱水植物所代表的「綠碳」，其二是水體本身經由有機質輸入與沉積所形成的「青碳」，其三則是土壤有機質積累所構成的「黃碳」。計算上涵蓋五大核心通量參數，包括光合成生物的固定碳量（FNPP）、濕地進流水帶入的總有機碳（FInf）、出流水的有機碳輸出量、異營性呼吸所釋出的二氧化碳氣體（FHR），以及濕地或

農塘所產生的甲烷氣體(FME)。這些元素共同構築出農塘作為生態碳匯場域的複合機制，也為碳量化帶來更立體且動態的評估模型。

技術設計採用國際 CDM 小規模濕地造林方法 (AR-AMS0003) 作為架構基礎，並結合台灣《106-107 年度重要濕地碳匯調查計畫》及 VMD0050 等國際案例經驗進行在地調整。針對台灣農塘分佈零碎、面積小且多數為人為營造的現況，特別放寬了土壤擾動面積的限制、免除對植林範圍 0.5 公頃的最小面積要求，並允許碳儲量較低的植被層在計算中進行剔除，以簡化估算流程並降低基層單位執行門檻。此外，在碳匯計算方法上，大型木本植物採用生物量擴充係數法 (BCEF) 估算其地上與地下部碳儲存；而浮游藻類則依據單位面積碳吸收係數計算綠碳量；土壤部分則透過取樣分析有機碳含量與土壤體積換算碳儲；水體部分則藉由流量與 TOC 濃度進行有機碳變化評估。這些設計讓整體方法學更具可行性與操作效率，便於未來實務申報與查證。

為強化監測制度的實用性，提出完整的監測原則，包括專案邊界界定、資料留存年限、不確定性評估、年度與週期性測量頻率，以及不同碳庫的標準監測技術。生物量監測方面，大型植生由地面量測胸高直徑與高度進行估算；水體與土壤部分則需每年或每兩至三年採樣分析，並配合密閉氣體罩進行 CH₄與 N₂O 等氣體排放監測。整體監測方式採取與國際溫室氣體清冊指引（如 IPCC 2019）一致的標準化架構，確保碳匯計量具備國際承認與技術一致性。

在專案設計上，充分強調「外加性」(additionality) 的原則，指出只有在農塘增設植生、活化水體流動、施行非義務性措施等超出現行法規或政策要求之行動，方能納入碳匯專案申報。舉例而言，若農村水保署於崩塌地整治過程中原本僅須完成邊坡植草工程，惟另行增加濱水植物與浮游藻類營造，並施行流域內進出水口調控，以提升水體交換與

有機碳沉積功能，則此額外行動可具備碳匯申報的正當性。同樣地，農塘若因生產需求導入流動水管理與水質監測設施，也可視為具外加性的積極介入，並可提升碳儲效益。

在設計理念上，成功融合國際規範與台灣水保與農塘管理體系的特性，不僅在理論架構上具備高度完整性，並於執行面上大幅簡化申報流程與監測成本，提升農塘作為碳匯場域之實質應用潛力。未來隨著碳交易市場制度的成熟，此方法學可望提供政策端、實務端與碳交易參與者一套具備操作性、量化性與合規性的農塘碳匯管理方案，進一步拓展農業與水保工程部門在氣候治理下的角色與貢獻。

(二) 農塘青碳方法學案例

農塘青碳將以苗栗縣平興農塘工程案例進行示範估算，此工程包含大範圍的滯洪池農塘水體，水體面積達到 12000 平方公尺，將依照此方法學進行農塘造林碳匯的計算，如下表所示。在水體的碳匯估算分別區分成儲碳量及吸碳量，碳儲量係數可簡化為 3.82(公斤/年/平方公尺)，碳吸量則可簡化為 0.06(公斤/年/平方公尺)。

表 4-10 平興村大埤滯洪農塘改善二期工程碳匯計算成果(資料來源：
本計畫製作)

農塘、濕地等水體-農塘造林碳匯	
水體碳通量(CO ₂)	
單位面積吸碳量(公斤/年)×水體面積(平方公尺)=碳匯潛在吸存量(公斤/年) (林幸助，2018)	
農塘面積(平方公尺)	12000
單位面積碳匯潛在吸存量 (公斤/年)	0.06
水體碳通量(公斤/年)	720

水體碳儲存量(CO ₂)	
單位面積固碳量(公斤/年)×水體面積(平方公尺)=碳匯潛在儲存量(公斤/年) (林幸助，2018)	
農塘面積(平方公尺)	12000
單位面積碳匯潛在儲存量 (公斤/年)	3.82
水體碳儲存量(公斤/年)	$45840 \times (44/12) = 168080$
固碳量(公斤/年)	$720 + 168080 = 168800$

本案總碳匯量 219241kgCO₂e，滯洪農塘所產生之農塘造林碳匯為 168800 kgCO₂e，佔整體碳匯 77%；植生再造之土壤所產生之黃碳為 34680.42 kgCO₂e，佔整體碳匯 15.82%，二者合計 92.8%，剩下的為植生再造之植株地上部與地下部之碳儲存量，整體以水體碳匯為主要組成。

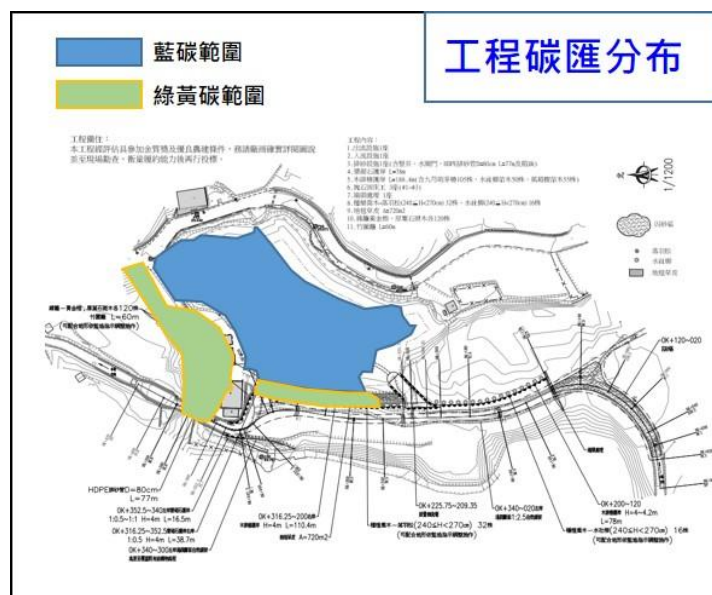


圖 4-7 平興村大埤滯洪農塘改善二期工程 各色碳匯分布(資料來源：
本計畫製作)

(三) 農塘青碳方法學申請自願減量案例

以下案例可為地方政府或水保機構未來申請青碳專案提供參照模式，亦可進一步納入區域型農塘碳管理規劃，提升整體農業與水土保持部門的減碳貢獻力。

1. 案例一：農塘邊坡造林與濱水植生增匯模式

(1) 適用條件：

農塘邊坡經整治後符合非森林地定義，植生營造選擇濱水挺水植物及浮游植物。

(2) 執行措施：

灌木與水生植物植栽覆蓋面積達到>0.5 公頃，且採政府獎勵造林政策。

(3) 計算方式：

- 地上部生物量依樹種、生長面積與含碳率計算。
- 浮游植物碳儲存採固定係數乘以覆蓋面積。
- 土壤碳儲存變化以有機碳含量與土層厚度結合體積換算。

(4) 成效估計：

年均碳匯達 300 tCO₂-e，符合年減碳額度小於 16,000 tCO₂-e 的規範。

2. 案例二：農塘水體活化與流動性維護

(1) 適用條件：

位於內陸農業區，過去以靜態水體為主，現導入進出水管制。

(2) 執行措施：

水體引流與排放調控，避免水體優養化，提升浮游植物生產力並促進有機碳沉積。

(3) 監測方法：

水體 TOC 值以進出水流與濃度推估淨碳輸出/輸入值。

(4) 計算方式：

- 水體碳儲存變化 = $F_{Inf} - F_{Eff}$ ，乘以 CO_2 轉換因子。
- FME（甲烷）與 FHR（二氧化碳）則由氣罩法實測推估年排放量。

(5) 成效估計：

以每公頃水面每年固定 300–500 kg C 計，碳匯可觀。

3. 案例三：複合型農塘造林與水土維護工程結合

(1) 適用條件：

兼具坡地穩定與農塘截留功能之水保工程地。

(2) 執行措施：

在農塘周邊小規模進行混合林造林（灌木+草澤植物），搭配泥沙沉澱池及植生帶。

(3) 外加性說明：

透過自籌經費進行非規定內的植生撫育與水體維護，非屬水保法規義務。

(4) 成效估計：

預估整體年增匯量在 500–800 tCO₂-e 之間，具申報價值與可核發減量憑證潛力。

第四節 水土保持增匯指引架構

指引第一章說明背景、目標與適用範圍，明確界定水土保持增匯涵蓋森林、土壤與水體等三大碳匯類型，並以「補足工程減碳不足量體，提升碳吸存總效益」為核心策略。第二章則進一步針對不同環境場域，如山坡地、農塘與集水區，分別提出對應之增匯策略與規劃方法，強調依據場地條件選擇適當技術並建立可監測、可追蹤的執行流程，建立國內水土保持增匯規劃之標準化基礎。為確保水土保持增匯專案之可信度與可操作性，第三章著重於增匯量的估算方法與技術說明，依據實務應用分為植生造林、農塘管理、防砂壩穩定土壤、擋土牆碳匯化與綠帶營造等多元策略，並提出工程經費法、土地面積法、生態基線法三種估算方式以供選擇。第四章進一步提出審查與認證機制，分別規範單一場域的碳匯驗證流程與分署層級的目標核算制度，建構具信賴度之管理流程。透過案例試算、監測方法彙整與附錄增匯係數表等輔助資料，該指引旨在提供水保單位明確、科學與可操作之作業模式，作為後續全國碳匯策略的重要實踐工具(圖 4-8)。

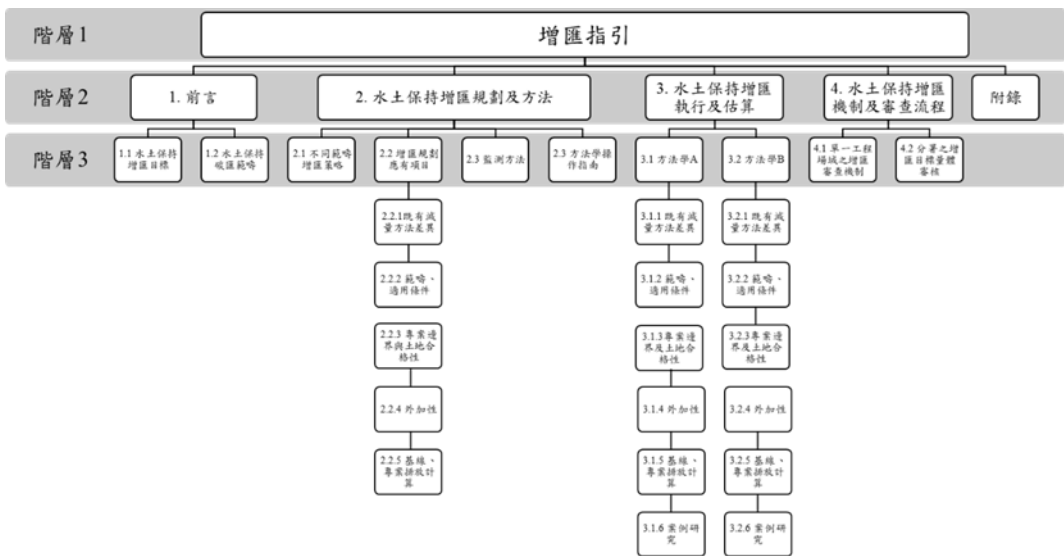


圖 4-8 水土保持增匯指引初步擬定架構(資料來源：本計畫製作)

一、前言

在氣候變遷與碳中和目標的驅動下，水土保持領域的增匯潛力受到關注。本指引旨在提供水土保持工程中增匯措施的技術框架，幫助決策者、研究人員及執行單位建立科學可行的碳匯增強策略。

(一) 水保領域不同碳匯範疇（藍碳、黃碳、綠碳）

水土保持領域的碳匯可分為藍碳（水體與濕地碳匯）、黃碳（土壤與植生碳匯）及綠碳（森林與草地生態系碳匯）。本指引針對農塘、土壤、植生與森林四大範疇，建立碳匯係數與增匯方法，確保碳匯量化的準確性。

(二) 專有名詞說明(以農塘青碳增匯方法做舉例)

1. 碳匯：指透過森林、水體、土壤等過程，活動及機制吸收大氣中的二氧化碳 (CO₂) 以減少溫室氣體的作用。
2. 光合成生物的固碳量 (FNPP)：指光合成生物通過光合作用固定的二氧化碳量或淨生產量。
3. 濕地進流水 (influent) 總有機碳 (FInf)：指流入濕地的水中所帶入的總有機碳量。
4. 濕地出流水 (effluent) 總有機碳：指從濕地流出的水中所帶出的總有機碳量。
5. 異營性呼吸作用 (FHR)：指異營性生物在分解有機物過程中釋放的二氧化碳氣體。
6. 土壤儲存有機碳變化：指土壤中有機碳儲存量的變化。
7. 甲烷氣體釋放 (FME)：指濕地或農塘中釋放的甲烷氣體量。
8. 暫時認可減排量 (tCER)：指在某年核發的暫時認可減排量，反映了該年內的溫室氣體人為淨清除量。
9. 長期認可減排量 (lCER)：指在某年核發的長期認可減排量，

反映了持續多年的溫室氣體人為淨清除量。

10. 專案邊界：指碳匯專案活動的空間範圍，包括濕地和農塘等地區。

11. 碳庫 (carbon pool)：指碳儲存的不同形式和位置，如地上部生物量、地下部生物量、土壤有機質等。

(三)水土保持增匯範疇與適用對象

涵蓋森林山坡地、土壤、農塘、集水區等不同水土保持環境，透過植生復育、土壤固碳及水體碳儲存提高碳匯效益。評估適用於水土保持相關單位、工程規劃單位及執行機構。

二、水土保持增匯規劃及方法

(一)不同增匯策略

1. 植生增匯：透過造林、草地復育與綠地工程，提高生態系固碳能力。
2. 土壤增匯：調整農法、減少土壤擾動與提高有機質含量，並聚焦於土砂構造物穩定土壤所增加土壤碳之效益，提升土壤碳儲存。
3. 農塘增匯：透過水體管理與沉積物控制，提高水體碳儲存能力。
4. 森林增匯（綠碳）：保護與恢復森林，透過提高樹木生長率與降低砍伐，提高碳吸存能力。

(二)增匯方法學關鍵項目

1. 既有測量方法差異

不同區域碳匯測量方法不一，須考量其適用條件，如氣候變數、土地利用類型等。現行測量方法可分為地面採樣法、遙測技術及模型模擬法，每種方法的適用性取決於研究區域

與工程特性。

2. 精確度、適用條件

碳匯計算應基於高精度測量技術，如地面測量、遙測與模型模擬，確保結果可比較性。特別是在土壤碳儲存與森林生物量監測方面，應使用標準採樣深度（如 30 cm 或 1 m）及生物量轉換係數，提高測量一致性。

三、水土保持增匯量估算方法

說明不同增匯策略根據工程預算書中的執行步驟、碳匯計算方式及應用場景，以確保增匯策略的可行性。

(一)增匯策略-植生造林增匯方案

針對特定生態系設計的增匯方法，如森林造林或土壤固碳，提升碳儲存能力。

(二)增匯策略-農塘管理增匯方案

針對農塘、水體等環境的碳匯技術，透過生態工程提高碳吸收與儲存效率。

(三)增匯策略-防砂壩穩定土壤增匯方案

依不同環境條件調整策略，最大化碳匯潛力。

(四)後續新增之增匯方法學內容將依序列於此章節

(五)水土保持碳匯盤查作業流程

確定專案範圍、增匯基線、增匯量計算方法與監測方案。

(六)增匯量估算方法

工程經費法：依工程預算估算增匯量（類似減碳指引的「經費之碳排估算」）。

土地面積法：依造林、土壤改良、水體面積計算碳儲存量（類似「工程量體之碳排估算」）。

生態基線法：依環境基線數據推算增匯潛力（類似「價目表之碳排精算」）。

(七) 案例計算說明

提供不同增匯方法的計算示範，如造林增匯量計算、農塘碳封存測試等。

四、水土保持增匯機制及審查流程

制定增匯專案審查標準，確保數據可信度，並建立量體審核與認證機制，並提供增匯進度給予後續分署依循。

五、增匯指引第三方查證重點

(一) 增匯專案的碳匯量化與數據驗證

1. 數據準確性與標準一致性

(1) 第三方查驗機構應依據 IPCC 指南、ISO 14064-2 標準及國內水土保持碳匯量化規範，審查碳匯計算方法的合理性與一致性。

(2) 針對農塘、土壤、植生與森林的碳儲存變化，確保所採用的測量方法（地面採樣、遙測技術、模型模擬）符合國際標準，並具備可重複性與比較性。

(3) 查驗是否明確界定專案邊界（水體、濱水區域、植生區域）並合理納入相應碳匯類別（藍碳、黃碳、綠碳）。

2. 外加性（Additionality）驗證

(1) 驗證增匯措施是否超越既有法規要求與現行水土保持標準，確保增匯量來自額外措施，而非既有工程或自然

變異。

- (2) 透過 歷史土地利用變遷數據、水土保持工程規範，確認專案未涉及 法定義務性措施，如坡地崩塌修復規範內的植被復育等。
- (3) 查驗是否有 投資外加性證據（例如專案額外編列植生種植與撫育經費）以支持其額外碳匯效益。

3. 基線與專案排放計算

- (1) 檢查基線設定是否合理，確保計算方式 符合 A/R CDM 方法學，並排除錯誤假設或數據操控可能。
- (2) 查核農塘、濕地與森林等不同範疇的 基線排放量（Baseline Removal, BSLt）與專案實施後的碳移除量（PROJt）計算方法，確認其一致性與科學性。
- (3) 確保碳匯數據來源透明，包含：
 - A. 林木與草地生質碳儲存量變化
 - B. 土壤有機碳變化
 - C. 浮游藻類與濱水植物的碳固定能力
 - D. 農塘進出水口的有機碳變化

(二) 增匯監測機制與長期可信度

1. 監測技術與方法適用性

- (1) 驗證監測技術是否符合專案特性，包括：
 - A. 水體碳匯：水體有機碳濃度測量、水生植物碳固定能力監測技術。
 - B. 森林與草地碳匯：樹木生長環測量、冠層密度監測、土壤碳分析。
 - C. 農塘與濕地：浮體罩蓋法、沉積物碳儲存測量。

(2) 查驗是否有 標準採樣深度規範（如 30 cm 或 1m 土壤碳測量），確保數據一致性。

2. 專案持續性與土地信賴性

(1) 查驗土地所有權與專案活動的 長期可執行性，確保土地信賴性（Legal Right to Carbon Ownership）。

(2) 確保農塘碳匯專案不會因土地使用變更而影響碳匯量，例如農塘轉作農業或都市開發用途。

3. 查驗報告與第三方公信力

(1) 確認 碳匯數據與報告公開透明，並接受政府或國際認證機構審查（如 ISO、VCS、CDM 機制）。

(2) 查驗機構應提供 獨立審查報告，並建立可追溯的數據存證機制，確保減碳成效不被誇大或錯估。

(三)增匯專案對環境與政策適應性

1. 對水土保持與生態系統的影響

(1) 查核增匯措施是否同步提升 水土保持效益，如減少土壤流失、改善水質、降低優養化風險。

(2) 驗證農塘與濕地增匯措施是否 促進生物多樣性，如濱水植物種植是否符合原生物種保護原則。

2. 政策適應性與法規符合性

(1) 確認增匯專案是否符合 台灣環保署溫室氣體減量管理辦法 及 農業部門碳盤查規範。

(2) 查驗是否與 TCFD 氣候風險揭露框架、SDGs 永續發展目標 對應，提升政策合規性與國際認受度。

第五節 第三方查證機構角色與建議

- 一、確保碳匯計算符合 ISO 14064-2、IPCC 指南、CDM 方法學，並提供獨立認證報告。
- 二、針對外加性、監測方法、土地信賴性進行嚴格審查，確保增匯措施真實有效。
- 三、檢查農塘、森林、土壤碳匯是否有可靠的數據監測機制，避免誇大碳匯量或缺乏追蹤機制。
- 四、強化專案長期可行性評估，確保增匯措施不因土地變更或管理變動而失效。

本計畫經過專業性評估與實務操作經驗之綜合考量，審慎選擇具備國際認證能力與豐富查證經驗之第三方單位——台灣檢驗科技股份有限公司（SGS）擔任本計畫之查證機構。SGS 不僅具備完整之 ISO 標準與碳查證相關專業資格，亦曾與本團隊於多項碳盤查與環境評估專案中合作，展現高度之準確性與執行效率，爰此選擇其作為本案查證夥伴，以確保成果之公正性與專業性。

第五章 水土保持碳匯指引編纂專家座談會議

為了針對本次計畫統整水土保持領域增匯係數及盤點增匯策略以利後續研擬增匯參考指引進行更深入的研討與交流，本工作項目特別規劃舉辦專家學者座談會議，同時亦邀請公民團體代表一同參與，期盼能藉由多元觀點的碰撞與激盪，提升討論的深度與廣度。本次座談會議將借鑒本團隊先前在碳匯相關計畫中所累積的豐富座談會辦理經驗，由團隊成員引導與會專家學者，以及各方利害關係人，透過開放且對等的溝通平台，充分表達各自的專業見解與立場，以期達成對於水土保持領域碳匯提升技術與後續增匯指引之架構研擬，以及不同色碳匯未來發展進程的共識(如圖 5-1 所示)，座談會議企畫書初稿如附錄五所示。



圖 5-1 專家與地方說明會預計討論議題(資料來源：本計畫製作)

為確保會議的順利進行並達成預期目標，本次座談會的籌備工作將涵蓋以下幾個主要面向：包含會議相關資料的完善準備、與會重要人士及代表的誠摯邀請、會議合適地點的審慎選定(場地租借費用考量)、會議進行方式與系統設備的妥善安排、與會人員餐點的精緻準備(餐飲費用預算)，以及會議過程的詳實紀錄等細節。在專家學者的邀請方面，

為確保討論的專業性與權威性，預計將邀請至少三位以上的專家學者(包含出席費用及交通補助)。

第一節 會議內容

一、與會人員

為確保本次計畫的專家學者座談會能有效聚焦核心議題，並促進學術界與實務界的深度對話，在與會人員的邀請規劃上，除了廣邀在水土保持碳匯應用領域具有專精知識的學者專家之外，亦將特別邀請第三方查驗機構的專業人員參與。考量到本次座談會的議題範疇主要以水土保持領域之增匯指引的架構及估算方法，涵蓋了土砂構造物所形成之土壤碳匯、農塘水體碳匯及植生綠碳的學術應用層面，因此本次座談會的與會專家學者及專業人士，將涵蓋多元領域，以期從不同專業視角，共同為計畫的推動提供寶貴建言(如表 5-1 所示)。

具體而言，本次座談會的學術面焦點，將著重於研擬更為精進的水土保持領域碳匯提升技術；而在實務操作層面，則將聚焦於如何建立後續供分署操作之增匯指引。所有與會專家學者的討論，皆會以農村水保署所高度重視的碳中和目標為核心宗旨，務求使本次座談會的研討成果，能充分回應並支持署內相關政策目標的達成。

因此，本次座談會的主要邀請對象，除了與會專家學者及代表，還包括第三方查驗機構人士、學術及公部門參與既有減碳指引研擬之專家學者及在水土保持碳匯領域專業學者，以及曾參與歷屆方法學審查之委員會委員等重要人士。

表 5-1 專家座談會邀請與會人員(資料來源：本計畫製作)

專家姓名	服務機關	專長領域
李鴻源 教授	國立臺灣大學 土木工程學系	輸砂理論(河川水力學) 流體力學 擴散理論(環境流體力學) 生態水利學
沈湯龍 教授	國立臺灣大學 植物病理與微生物學系	細胞生物學 細胞訊息傳遞 癌症細胞生物學
林昭遠 教授	國立中興大學 水土保持學系	水土保持 坡地保育與棲地復育 航遙測與地理資訊系統 環境調查與監測 集水區經營
黃宏斌 教授	國立臺灣大學 生物環境系統工程學系	水土保持工程 生態工程 土石流防治工程 都市淹水 環境影響評估 滯洪規劃設計
簡士濠 教授	國立中興大學 土壤環境科學系	土壤物理 地理統計學 土壤調查與分類 土壤永續管理與保育技術
趙國容 教授	國立中興大學 國際農學碩士學位學程	植物生態 森林動態 植物與森林保育
呂冠霖 經理	台灣檢驗科技股份有限公司	ISO 14067: 2018 碳足跡查證 ESG 企業管理 ISO 50001 能源管理系統
吳志宏 總經理	禾輝碳管理顧問股份有限公司	溫室氣體盤查 產品工程碳足跡 碳權評估 節能減排規劃 第三方內部查證

第二節 會議準備事項

一、座談會地點

本次專家學者座談會議，會議地點定於台灣大學水工試驗所 210 會議室(如圖 5-2 所示)。



圖 5-2 台大水工所 210 會議室(資料來源：本計畫製作)

二、座談會日期

本次專家學者座談會議，已於計畫執行年度 114 年的 10 月 14 日舉辦。之所以選定此日期，主要是考量到屆時本計畫的各項重要工作皆已取得階段性進展，碳匯係數通過統整各計畫團隊之成果建構可操作之公式以及完整之架構。在這樣的時程安排下，本次座談會將能提供與會專家學者一個適當的時機，得以全面檢視計畫的相關成果，並針對防砂壩所能產生的碳匯效益，進行更深入的交流與研商。

三、座談會流程安排

表 5-2 專家座談會議 議程時間(資料來源：本計畫製作)

時間	議程
14:00-14:10	主辦機關致詞
14:10-14:30	議題說明：何昊哲 副教授（計畫主持人）
14:30-15:20	主題報告一：水保構造物土壤碳匯潛能監測成效、水土保持植物成長率對於碳匯之效益評估
15:20-15:30	中場休息
15:30-16:00	主題報告二：增匯指引草案與操作性架構說明

四、座談會討論主題與事項

(一)水保構造物土壤碳匯潛能監測成效

1. 不同類型水土保持構造物對於土壤穩定與碳儲貢獻之實證潛力
2. 土壤碳匯監測指標、時空尺度設定與採樣策略可行性
3. 大雨事件前後防砂壩區儲碳量之變化
4. 防砂壩集水區儲碳量縱向橫向空間分布

(二)水土保持植物擴充生物量參數對於碳匯之效益評估

1. 針對胸高樹徑 ≤ 5 公分的生物量參數進行擴充，以反映植生工程中實際使用的樹齡及樹徑，撰寫具體的植生工程固碳公式
2. 南投九份二山森林經營碳匯專案
3. 水土保持植生維護操作指引

(三)增匯指引草案與操作性架構說明

1. 增匯技術指引實施策略與應用潛能
2. 指引內增匯量評估之可操作性

3. 指引內容對於工程單位與地方推動者的實務可行性評估
4. 如何將此指引轉化為署內標準作業程序與後續政策工具

五、座談會宣傳海報

水土保持防砂構造物碳匯調查暨樹種儲碳資料庫優化計畫
水土保持碳匯指引編纂專家座談會議

國立臺灣大學
水工所二樓
210會議室
10/14 (二)
14:00 - 16:00

時間	議程內容
13:45-14:00	與會人員報到/現場報名
14:00-14:10	主辦機關致詞
14:10-14:30	計畫主持人議題說明：何昊哲 副教授（計畫主持人）
14:30-15:20	[議題一] 水保構造物土壤碳匯潛能監測成效 1. 不同類型水土保持構造物對於土壤穩定與碳匯貢獻之實證潛力。 2. 土壤碳匯監測指標、網空尺度設定與採樣策略可行性。 3. 碳匯計算模式是否可依不同地貌與氣候條件調整。 4. 大雨事件前後防砂壩區碳匯量之變化。 5. 防砂壩集水區碳匯量縱向橫向空間分布。 [議題二] 水土保持植物成長率對於碳匯之效益評估 1. 水土保持12種植物生長率及其對應之碳匯效益。 2. 南投九份二山森林經營碳匯專案。 3. 水土保持植生維護操作指引。
15:20-15:30	中場休息
15:30-16:00	[議題三] 增匯指引草案與操作性架構說明 1. 增匯技術指引實施策略與應用潛能。 2. 指引內涵碳匯評估之可操作性。 3. 指引內容對於工程單位與地方推動者的實務可行性評估。 4. 如何將此指引轉化為署內標準作業程序與後續政策工具。

主辦單位：農業部農村發展及水土保持署 協辦單位：國立臺灣大學

水土保持防砂構造物碳匯調查暨樹種儲碳資料庫優化計畫
水土保持碳匯指引編纂專家座談會議

國立臺灣大學
水工所二樓
210會議室
10/14 (二)
14:00 - 16:00

本會議將邀集碳權制度、林業碳匯、土壤碳通量監測與水保工程領域之專家學者，釐清增匯指引之架構方向、不同工程類型對碳匯效益之貢獻潛能，以及現階段土壤碳匯研究成果。

主辦單位：農業部農村發展及水土保持署 協辦單位：國立臺灣大學

圖 5-3 專家座談會議宣傳海報(左:行程版，右:宣傳版)(資料來源：本計畫製作)

第三節 會議紀錄與結論

一、會議結論統整(根據發言順序排列)

(一)禾輝顧問吳志宏博士

1. 研究涵蓋兩年四期稻作試驗，田間量測顯示不同肥料施用方式對產量與土壤性質有明顯差異。
2. 肥料使用計算應區分一般灌溉基線情境與專業管理專案情境，專業情境下施肥量較基線可降低，顯示管理方式對施肥效率影響重大。
3. 在專業管理情境下，肥料施用可減少約每年每公頃 0.05 公

噸碳排放；綜合肥料減量與碳吸存效應後，推估每年每公頃碳增量約 660 公斤。

4. 計算方法採用最新通過之農業碳管理評估規範，並整合土壤碳儲存模組與作物生長模擬模組，考量土壤深度、肥料濃度、管理密度、材料特性及攝入參數等多項參數。
5. 碳效益計算須納入三項因素：肥料減量效應、專案增量效應及研究端的減量效應，並考慮能源與運輸因素以避免高投入造成反向碳排。
6. 後續計畫成果將與地方政府及經濟部相關方案進行比較，以評估整體效益與一致性。目前地方與中央多數計畫仍聚焦於碳減量面向，未全面納入肥料效率與碳吸存效益之比較

(二)SGS 呂冠霖博士

1. 指引已具初步架構，但需加強目的與使用情境說明，並在手冊中明確標示工具參數來源、適用條件及使用限制以提升透明度與信任度。
2. 計算量之準確性為工具成效關鍵，建議進一步細化與驗證係數來源與統計依據，並在手冊中明確描述係數來源與推導方式以避免爭議。
3. 可考慮增加國家層級及企業層級的相關參數收集方式，提升資料完整度與應用廣度。
4. 建議設計範例或工作表單協助使用者快速上手，強化應用推廣與操作便利性；為提升接受度，應補充說明與案例並強化說服力與穩定性。
5. 建議持續追蹤並校正不同能源(如碳、氫等)上之係數差異，並在手冊中增列工具參數來源、適用條件與限制的說明。

(三)中興大學趙國容教授

1. 植物生長數據測量條件明確，但在不同環境或工具間應用時，準確性與一致性有限，且同一套數據不可跨區直接使用。
2. 指引應清楚註記數據的測量情境與場域條件、使用限制及可能的高估或低估風險，以避免誤用與過度延伸解讀。
3. 應更精確區分土壤「固碳」與「除碳」用詞，並以碳吸收量扣除碳排放量後的淨值定義「碳匯」，使碳吸收、碳排放與碳匯概念達成一致且精確的學術定義。

(四)中興大學簡士濠教授

1. 植物與土壤在「固碳」概念上的觀點不同，植物的固碳可使用 fixation 或 assimilation 表示。土壤中的碳累積則可使用 accumulation 或 sequestration 等字詞描述，屬於碳的累積過程。目前中文使用「固碳」一詞涵蓋植物與土壤兩種不同機制，可能造成混淆，建議未來可依對象區分用語。
2. 土壤碳的質量與累積極限需納入考量，當土壤碳量達飽和時，固碳效果將趨於穩定；木炭為長期碳儲存的重要形式。
3. 碳匯表達應以「碳儲量」或「碳水量」為指標，並探討植物與土壤碳關聯以建立一致且精確的用語體系；建議未來深入探討兩者關聯以形成一致定義。
4. 碳層具累積與變動特性，僅測表層可能低估實際碳含量，應納入深層土壤資料並擴大測量深度（攔沙壩目前僅 5–30 公分，建議延伸至更深層如 60 公分或依需求明示深度範圍）。
5. 建議增加示範樣區數量與採樣頻次以提升代表性與統計可靠度，並以統一國際標準單位（每公斤或每噸每公頃）表示碳儲量，報告中明示測量深度範圍。

6. 方法學應朝標準化、制度化方向發展，建立方法學化的碳評估，使評估具一致性、可追溯性與政策應用價值，並與環境部現有專案尺度報告結合，推廣至各工程單位採用。

(五)中興大學林昭遠教授

1. 建議台灣土地利用與氣候生態規劃接軌國際標準，先明確參考國際分級模式（如 T1、T2、T3）以利國際對應與比較。
2. 土地利用規劃應納入氣象、氣候及生態分區考量，由內政部及相關單位統籌，充分利用既有資料與規劃成果，避免重複建置與資源浪費，並簡化規劃流程以利收斂式整合。
3. 建議將台灣土地類別簡化為六大分類作為基本分析單位，並採用「藍碳、綠碳、棕碳」三分類架構以利統計與比較分析。
4. 土地利用分析應排除暫時性或非永久性地貌，並建立標準化環境資料架構以利跨部門、跨研究的橫向比對與長期監測，並依年度更新以確保可追溯性與時效性。
5. 各單位研究應採用共同國際分類體系，建立國際標準化環境治理架構以提升台灣在全球永續議題上的競爭力。

(六)台灣大學沈湯龍教授

1. 微生物在環境生態中關鍵，能將無機物轉化為有機物，決定生態系碳循環與能量流動，是維持系統健康與穩定的重要介面。
2. 河川與土壤環境類比為「生態腸胃道」，微生物多樣性與活性影響系統恢復力與穩定度，事件後微生物活性變化可解釋有機碳濃度波動。
3. 建議發展微生物生物指標（bio-indicator）與酵素檢測，作為水土保持與環境監測的重要指標，並可在防災與生態復育場

域導入特定微生物以促進碳循環與有機質穩定化，加速生態系恢復。

4. 建議持續推動基礎研究成果與實務指引結合，利用微生物變化指標預測碳儲存與碳釋放，提升環境管理精確度。

(七)台灣大學李鴻源教授

1. 攔沙壩研究目前採用的經驗公式誤差可能高達 200%–300%，需明確界定方法適用範圍與精度限制，並說明樣本數量、採樣位置及條件以確保資料可追溯與可比性。
2. 因攔沙壩地質結構複雜與土壤質地差異大，單一樣區難具代表性，建議增加樣點與樣區數量並區分微觀與宏觀尺度的研究目的與應用範疇。
3. 建議測量深度從目前 30 公分延伸至 60 公分，並在可能情況下進行不同季節採樣以評估季節性變化；在資源有限時可先以代表性樣區進行長期監測累積動態資料。
4. 應將攔沙壩延緩泥沙淤積、延長水庫壽命等宏觀效益納入碳減量效益評估，整合微觀碳儲量變化與宏觀效益，提供具政策參考價值的分析結果，作為水土保持與碳管理決策依據。

二、會議照片紀錄



整體座談會現場

第六章 結論與建議

第一節 結論

一、防砂壩採樣分析驗證其提升土壤碳儲存之效益與碳管理潛能

針對防砂壩的土壤碳匯研究，透過現地採樣與文獻比對，建構出具代表性的碳儲存評估方法。採樣設計上，本計畫選取石門水庫上游、宜蘭武雲溪、大礁溪及瑞芳粗坑溪等五處場址，沿防砂壩橫斷及縱斷方向依文獻建議距離與深度進行取樣，並以乾燥燃燒法與有機碳比例公式進行分析。結果顯示，土層深度並非影響有機碳與全氮分布的主要因素，可能因不同沉積事件造成混合效應；而距離壩體較近之樣點的數據變異較小，顯示防砂壩穩定上游土砂後，能有效減少碳氮流失。碳氮比的穩定亦證明壩體對維持土壤有機質具有正向影響，部分樣點偏差則與單一污染源或樣品混合不均有關。綜合分析顯示，防砂壩透過促進沉積與固定土砂，能提升上游區域的土壤碳儲存潛能，其防災與固碳效益具雙重價值。根據本期結果估算，防砂壩每年約可貢獻 7,134.48 公噸碳匯量，顯示其在減少土壤流失與提升黃碳儲量上具顯著貢獻。未來建議持續擴大樣區規模與集水區別，建立全國性土壤碳匯資料庫，以支援水保工程碳中和策略與增匯管理體系。

二、以在地化生長率與自然為本造林策略推動水保植生綠碳增匯

第一項結論：以在地量測建立水保樹種生長率作為綠碳推估依據

本章透過實地監測九份二山等水保樹種的生長率，建立在地化的植生碳匯參數。研究團隊彙整 18,000 筆以上之生物量與碳吸存資料，並進行現地比對，確立喬木與灌木的平均生長率（分別約 0.1021 與 0.0209 tC/ha/yr）。此成果不僅反映台灣坡地環境條件下樹種的實際生長

特性，也使得植生碳匯估算更具在地代表性與準確性，未來可作為造林及坡地復育工程推估綠碳潛能的基準，支援農村水保署之碳中和策略與 MRV 系統建置。

第二項結論：以生態為本的 NbS 造林策略促進綠碳增匯

計畫同時強調以自然為本解決方案 (NbS) 推動水土保持造林專案的重要性。以九份二山為示範區，結合喬木與灌木混合造林，透過多層次植栽設計提升土壤穩定性與植被覆蓋率，達到固碳與防災雙重效益。此類 NbS 導向的造林不僅能提升在地生態系的碳儲存量，也能增進坡地系統的氣候韌性，為未來在水土保持領域推動綠碳專案提供可行的操作模式與政策參考。

三、建立多範疇碳匯係數資料庫與估算方法可操作化的整合成果

整合不同碳匯範疇（綠碳、黃碳、青碳）之係數庫建立與估算方法的制度化。本章首先針對防砂壩、坡地造林與農塘管理等工程類型，系統化彙整既有文獻與現地採樣成果，提出初步碳匯係數估算值，並建立碳匯係數資料庫的結構與分類原則。該資料庫以工程類型為主軸，區分地上部、枯木層與土壤層三類碳庫，納入各自的儲碳潛勢、衰減速率與環境調整係數，並輔以實測與統計建模結果，以支援日後增匯計算與第三方查驗。

此外，本章亦完成「碳匯估算方法可操作化」的具體化設計，將原本複雜的增匯估算轉化為工程單位可直接使用的流程化工具。透過標準化計算步驟、參數化變數及可追溯 SOP，明確區分輸入資料（如生長率、含碳率、密度）與計算結果欄位，使不同場域的增匯潛能可用統一架構快速推估。最終成果建立起跨綠碳、黃碳、青碳三類範疇的碳匯係數基礎資料庫，並將估算流程模組化與可操作化，成為日後制定水土

保持增匯指引與審查制度的重要技術支撐。

四、專家學者座談結論—整合多元觀點以確立水保碳匯推動方向

透過專家學者的建議，確立本署於碳匯研究與應用推動的整體方向。會議邀集約十位與會者，包含四位學術專家及多位公部門與第三方查驗機構代表，共同針對增匯策略、碳匯係數建置與管理機制進行意見交流。

多位學者強調建立「綠碳、黃碳、青碳」三大範疇的統一碳匯係數資料庫，並以實測數據與標準化方法學為核心，確保各項估算具科學性與可追溯性。其次，專家指出需完善土壤碳 MRV 制度與外加性驗證機制，防止既有工程被誤算為新增碳匯，以維護資料真實性與核發公信力。第三，針對造林綠碳與農塘青碳專案，學者建議導入自然為本（NbS）策略，結合第三方查驗與地方治理模式，推動生態與減碳雙效益。最後，專家一致肯定本計畫對碳權分配與回饋機制的初步規劃，認為應持續媒合土地所有者與企業碳權需求，促進碳匯價值流通與地方參與。

整體而言，專家學者的討論不僅形塑了水保領域增匯研究的長期藍圖，也為後續「水土保持增匯指引」之制度化提供了明確方向與技術支撐，使水保工程的碳管理工作邁向系統化與政策實踐化。

第二節 建議

一、透過微生物菌相重新定義防砂壩影響有機碳範圍

透過微生物菌相重新定義防砂壩影響有機碳範圍，可視為揭露土壤生物地球化學循環的重要突破。根據宜蘭地區大礁溪與武雲溪集水區防砂壩採樣結果，研究團隊以縱橫網格採樣法取得表層土壤分析結果。這些樣本將進行微生物菌相組成與有機碳含量的交叉分析，以釐清壩體上下游土壤中碳分布的微觀機制。傳統上，防砂壩的碳匯評估多聚

焦於物理性沉積與植被固碳，然而最新微生物定序與代謝途徑研究顯示，壩前壩後不同水文條件下的細菌群落（如放線菌、假單胞菌等）在有機質分解與再固碳過程中扮演關鍵角色。透過比較微生物多樣性指數與有機碳濃度的空間梯度，可重新界定防砂壩影響的生態範圍，從「結構型碳匯」擴展至「生物驅動碳循環」層面，為水土保持工程的碳匯量化提供更精細的生態學基礎。

二、完善增匯係數資料庫並建立區域化增匯指引

隨著不同領域碳匯之間測技術與研究成果的成熟，建議在現有增匯係數的基礎上，進一步完善碳匯數據資料庫，並針對不同地區的生態特性、土壤類型及植生狀況進行區域化分析，以建立適應性更強的區域化增匯指引。此資料庫可整合各地的碳匯量測數據及增匯案例，並針對不同環境條件提出最佳增匯措施，從而提升碳匯專案在各地的實施效果和精準性，支援全國性的水土保持碳管理。根據本報告第四章所建構之「水土保持增匯指引架構」，未來工作可進一步依循該指引的分層與分域邏輯，強化全國碳匯資料庫的整合與區域化應用。隨著各領域（綠碳、黃碳、青碳）測量技術與研究成果的成熟，建議在現有增匯係數庫的基礎上，進行多尺度碳匯資料的整併與更新，建立兼具統一性與在地適應性的動態資料系統。

此資料庫應與「增匯指引」中的三大模組——（1）增匯潛勢評估、（2）碳匯係數應用、（3）碳管理驗證機制——相銜接，整合現地量測數據、模擬推估結果與案例實績，形成可追溯、可比較的決策支援工具。並針對不同地區之氣候、生態與地質條件進行區域化分析，提出具有差異化的增匯策略。例如在北部山區可聚焦於防砂壩與坡地造林，在南部沿海地區則強化農塘與濕地青碳治理。

最終目標是建立一套具區域適應性與決策導向的水土保持增匯資料平台，使碳匯量化、監測與管理能與政策工具（如 MRV 制度、碳權回饋機制）有效銜接，進而提升碳匯專案的精準性、實效性與全國推動能量，成為支撐臺灣水土保持領域邁向淨零轉型的核心基礎。

三、建立各自然領域資料庫，使研究量能不重複

未來應推動臺灣各自然領域碳匯資料庫之縱深整合（vertical and cross-domain integration），建立涵蓋森林綠碳、土壤黃碳、水域青碳及農業生態系碳匯的全國性碳匯整合平台。目前各部會及研究機構已分別建置多項資料庫，如農業部之水土保持與造林碳匯資料、環境部之碳盤查與減量登錄系統、林業及自然保育署之森林碳儲量監測資料。

四、加強樣本代表性、完善長期監測機制，以及提升指引的實務可操作性

未來應著重提升樣本的代表性，以涵蓋不同地形、土壤性質與植生環境下的樣區，避免因樣本分布集中或環境異質性不足而導致估算偏誤。其次，應建立並維持長期監測機制，透過固定樣點或樣區進行週期性採樣與觀測，以掌握土壤碳儲量隨時間的變動趨勢並驗證碳匯穩定性。最後，需將操作流程與監測指引設計得更具實務可操作性——包括明確的採樣深度、樣本代表性標準、採樣頻率與資料紀錄格式，以利後續研究或管理單位依標準化流程重複執行，確保資料品質與可比性。

五、建立兼具精度與效率之全臺尺度土壤碳庫估算模式

未來若欲推廣至全臺尺度，可考慮建立一套兼具精度與效率的估算模式，以降低採樣所需之時間與人力成本，從而促進後續碳匯調查工作與研究發展。首先，可依據不同地形、土壤條件、土地利用類型，採用分區抽樣(zoning + stratified sampling)或環境變項分群 (environment-

covariate clustering)的方式，確保全域樣本具代表性。進一步地，將實地採樣所得土壤有機碳 (SOC) 資料結合遙測資料 (如地形、氣候、覆蓋類型) 與地理資料 (GIS covariates)，發展統計模型或機器學習模型，以預測全區域的土壤碳庫分佈。如此便可大幅降低實地採樣覆蓋面積、節省人力與時間。最後，建立標準化的流程與 SOP (包括抽樣深度、樣本處理、資料格式、模型驗證／交叉驗證程序等)，並做好不確定性 (uncertainty) 與精度 (accuracy) 評估機制，以確保模型推估結果具科學可信度與可比性。

參考文獻

1. 劉生浩，(1994)，薰蒸直接提取法測定生物量碳的研究，土壤，26(4). 220-222。
2. 于貴瑞、王紹強、陳泮勤、李慶康，(2005)，碳同位素技術在土壤碳循環研究中的應用，地球科學進展，20(5)，568-577。
3. 農業部農村發展及水土保持署，(2005)，森林資源碳吸存資料庫建置初步成果。
4. 王巧萍，(2006)，森林土壤碳庫與大氣二氧化碳之互動，林業試驗所福山研究中心。
5. 姜燁秀，(2009)，水土保持設施節能減碳效益分析，國立中興大學。
6. 林幸助，(2010)，高美濕地生態系統碳通量，行政院國家科學委員會。
7. 城鄉發展分署，(2011)，國家重要濕地碳匯功能調查計畫。
8. 行政院公共工程委員會，(2011)，永續公共工程－節能減碳政策白皮書。
9. 經濟部水利署。水利工程減碳作業參考指引規劃設計篇。
10. 農業部農村發展及水土保持署。水土保持工程減碳參考指引(規劃設計階段)。
11. 陳思瑋，(2012)，不同程度的擾動環境下森林生態系樹形與林冠特徵之分化，碩士論文，東海大學。
12. 農業部農村發展及水土保持署，(2019)，水土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置。

13. 農業部農村發展及水土保持署，(2023)，精進估算植生工法之碳吸存量—台灣中低海拔樹種樹高異速方程式與不耐陰木本和草本植物的生長速率。
14. 黃大肯、張文亮，(2014)，新海人工溼地水生植物碳吸存量之評估:Estimation of Carbon Fixation of Aquatic Plants in Sinhai Artificial Wetlands，農業工程學報 60:3 2014.09 頁 55-67。
15. 農業部農村發展及水土保持署，(2016)，105 年集水區環境監測與變遷分析。
16. 林幸助，(2018)，「106-107 年度重要濕地碳匯調查計畫」案成果報告書，內政部營建署城鄉發展分署。
17. 聯合國糧食及農業組織(FAO)及政府間土壤技術委員會(ITPS)，2021。《全球土壤再固碳-推薦管理措施之技術手冊》。
18. 農業部農村發展及水土保持署保育治理組，(2017)，永續發展行動計畫量化目標說明。
19. 趙國容(2019)，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。
20. 農業部農村發展及水土保持署，(2017)，氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫-第一期(106 至 109 年度)。
21. 環境部，(2018)，溫室氣體自願減量專案管理辦法。
22. 農業部農村發展及水土保持署，(2020)，氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫-第二期(110 至 115 年度)。
23. 農業部農村發展及水土保持署，(2021)，應用永續發展指標於水土保持領域之評估。

24. 環境部，(2021)，溫室氣體減量與抵換管理機制。
25. 農業部農村發展及水土保持署，(2022)，水土保持碳匯量評估及永續發展指標研究計畫。
26. 農業部農村發展及水土保持署，(2023)，112 年提升水土保持領域碳匯技術研擬與效益評估成果報告書。
27. 鐘苡甄，(2019)，碳排放權交易制度下之登錄處立法研究——以歐盟登錄處及其碳市場犯罪為例。
28. 農業部農村發展及水土保持署，(2004)，水庫集水區保育綱要。
29. Addisu, S., & Mekonnen, M. (2019). Check dams and storages beyond trapping sediment, carbon sequestration for climate change mitigation, Northwest Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 1-8.
30. Alcamo, J., Fernandez, N., Leonard, S. A., Peduzzi, P., Singh, A., & Harding Rohr Reis, R. (2012). 21 issues for the 21st Century: results of the UNEP Foresight Process on Emerging Environmental issues.
31. Andy Connelly. (2017). TIC/TOC – measuring carbon
32. Artem Zontikov. (2023). Precise method for measuring soil carbon.
33. Azamat Suleymanov, Dominique Arrouays, Igor Savin. (2023.) Digital soil mapping in the Russian Federation: A review.
34. Bo Wu, Luhong Zhou, Shangshi Liu, Feifei Liu, Muhammad Saleem Xingguo Han, Longfei Shu, Xiaoli Yu, Ruiwen Hu a, Zhili He, Cheng Wang. (2022). Biogeography of soil protistan consumer and parasite is contrasting and linked to microbial nutrient mineralization in forest soils at a wide-scale.
35. Bar-On, Y. M., Li, X., O'sullivan, M., Wigneron, J. P., Sitch, S., Ciais, P., ... & Fischer, W. W. (2025). Recent gains in global terrestrial carbon

- stocks are mostly stored in nonliving pools. *Science*, 387(6740), 1291-1295.
36. Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Cutillas, P. P., de Vente, J., Barberá, G. G., Mosch, W., Cano, J. A. N., Gaspar, L., & Navas, A. (2017). Carbon redistribution by erosion processes in an intensively disturbed catchment. *Catena*, 149, 799-809.
 37. Carolina Santi, Giacomo Certini, Luigi Paolo D'Acqui. (2006). Direct Determination of Organic Carbon by Dry Combustion in Soils with Carbonates.
 38. Chao-Yuan Lin, Li-Sheng Kuo, Ting-Yu Chen, Shao-Wei Wu, Chun-Wei Tseng. (2022). Estimation and application of spatial distribution of carbon storage in Wushe reservoir watershed based on environmental indicators in Taiwan.
 39. Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., & Goodman, R. C. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
 40. Choudhary, B. K., Majumdar, K., & Datta, B. (2016). Effects of land use on the soil organic carbon storage potentiality and soil edaphic factors in Tripura, Northeast India. *American Journal of Climate Change*, 5(3), 417-429.
 41. Costantini, E. A., Castaldini, M., Diago, M. P., Giffard, B., Lagomarsino, A., Schroers, H.-J., Priori, S., Valboa, G., Agnelli, A. E., & Akça, E. (2018). Effects of soil erosion on agro-ecosystem services and soil functions: A multidisciplinary study in nineteen organically farmed European and Turkish vineyards. *Journal of environmental management*, 223, 614-624.

42. Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). Intergovernmental panel on climate change guidelines for national greenhouse gas inventories, intergovernmental panel on climate change. Paris: IPCC Secretariat.
43. Emad Kavehei , G.A. Jenkins , C. Lemckert , M.F. Adame. (2019). Carbon stocks and sequestration of stormwater bioretention/biofiltration basins.
44. Ghibaudo, G., Roux, O., Nguyen-Duc, C., Balestra, F., & Brini, J. (1991). Improved analysis of low frequency noise in field-effect MOS transistors. *physica status solidi (a)*, 124(2), 571-581.
45. Jasmin Schomakers, Shih-Hao Jien, Tsung-Yu Lee, Jr-Chuan Huang, Zeng-Yei Hseu, Zan Liang Lin, Li-Chin Lee, Thomas Hein, Axel Mentler, Franz Zehetner. (2019). Soil and biomass carbon re-accumulation after landslide disturbances.
46. Jobbágy, Jackson. (2000). The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation
47. Kaipainen, T., Liski, J., Pussinen, A., & Karjalainen, T. (2004). Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science & Policy*, 7(3), 205-219.
48. Kan, T., Strezov, V., Evans, T., Kumar, R., He, J., Zhou, X., Ren, J., & Lu, Q. (2021). Catalytic pyrolysis of biomass impregnated with elements from steelmaking slag leaching and simultaneous fabrication of phosphorus adsorbent. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129490.
49. KARJALAINEN, T., & ASIKAINEN, A. (1996). Greenhouse gas emissions from the use of primary energy in forest operations and long-distance transportation of timber in Finland. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 69(3), 215-228.

50. Keesstra, S., Mol, G., De Leeuw, J., Okx, J., Molenaar, C., De Cleen, M., & Visser, S. (2018). Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land*, 7(4), 133.
51. Kristen E. Dybala, Kristin Steger, Robert G. Walsh, David R. Smart, Thomas Gardali, Nathaniel E. Seavy. (2019). Optimizing carbon storage and biodiversity co-benefits in reforested riparian zones.
52. Kristen E. Dybala, Virginia Matzek, Thomas Gardali, Nathaniel E. Seavy. (2019). Carbon sequestration in riparian forests: A global synthesis and meta-analysis.
53. Lefebvre, D., Williams, A., Meersmans, J., Kirk, G. J., Sohi, S., Goglio, P., & Smith, P. (2020). Modelling the potential for soil carbon sequestration using biochar from sugarcane residues in Brazil. *Scientific reports*, 10(1), 1-11.
54. Liu, C., Li, Z., Dong, Y., Nie, X., Liu, L., Xiao, H., & Zeng, G. (2017). Do land use change and check-dam construction affect a real estimate of soil carbon and nitrogen stocks on the Loess Plateau of China?. *Ecological Engineering*, 101, 220-226.
55. Lin, S.-Y., & El-Tawil, S. (2020). Time-dependent resilience assessment of seismic damage and restoration of interdependent lifeline systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(1).
56. Lishan Ran, Xixi Lu, Nufang Fang & Xiankun Yang.(2018). Effective soil erosion control represents a significant net carbon sequestration
57. Lucas Thompson & Leticia Miranda. (2021). What are carbon credit? How fighting climate change become a billion-dollar industry.
58. Martino E Malerb , Nicholas Wright, Peter I Macreadie. (2022). Australian farm dams are becoming less reliable water sources under

climate change.

59. Mongil-Manso, J., Díaz-Gutiérrez, V., Navarro-Hevia, J., Espina, M., & San Segundo, L. (2019). The role of check dams in retaining organic carbon and nutrients. A study case in the Sierra de Ávila mountain range (Central Spain). *Science of the Total Environment*, 657, 1030-1040.
60. Nicholas A. Sutfin, Ellen E. Wohl, Kathleen A. Dwire. (2015). Banking carbon: a review of organic carbon storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian ecosystems.
61. Nufang Fang, Yi Zeng, Lishan Ran, Zhen Wang, Xixi Lu, Zhengang Wang, Xiankun Yang, Jinshi Jian, Qiang Yu, Lingshan Ni, Chun Liu, Chao Yue & Zhihua Shi.(2023). Substantial role of check dams in sediment trapping and carbon sequestration on the Chinese Loess Plateau
62. Putz, F. E., & Pinard, M. A. (1993). Reduced-impact logging as a carbon-offset method. *Conservation Biology*, 7(4), 755-757.
63. Ramos, M. C., Cots-Folch, R., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2007). Effects of land terracing on soil properties in the Priorat region in Northeastern Spain: A multivariate analysis. *Geoderma*, 142(3-4), 251-261.
64. Rumpel, C., Janik, L. J., Skjemstad, J., & Kögel-Knabner, I. (2001). Quantification of carbon derived from lignite in soils using mid-infrared spectroscopy and partial least squares. *Organic Geochemistry*, 32(6), 831-839.
65. Shi, X., Wang, H., Yu, D., Weindorf, D. C., Cheng, X., Pan, X., Sun, W., & Chen, J. (2009). Potential for soil carbon sequestration of eroded areas in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 105(2), 322-327.
66. Sinitambirivoutin, M., Milne, E., Schiettecatte, L. S., Tzamtzis, I.,

- Dionisio, D., Henry, M., ... & Bernoux, M. (2024). An updated IPCC major soil types map derived from the harmonized world soil database v2. 0. *Catena*, 244, 108258.
67. Solomon Addisu and Mulatie Mekonnen. (2019). Check dams and storages beyond trapping sediment, carbon sequestration for climate change mitigation, Northwest Ethiopia
68. Standardization, I. O. f. (2018). Greenhouse Gases: Carbon Footprint of Products: Requirements and Guidelines for Quantification. International Organization for Standardization.
69. Sundquist, Visser Ackerman. (2013). The Geologic History of the Carbon Cycle.
70. Usó i Domènech, J. L., Nescolarde-Selva, J. A., Lloret-Climent, M., & González-Franco, L. (2016). An ecological model for predicting behaviour of mediterranean shrublands.
71. Vaccari, F., Maienza, A., Miglietta, F., Baronti, S., Di Lonardo, S., Giagnoni, L., Lagomarsino, A., Pozzi, A., Pusceddu, E., & Ranieri, R. (2015). Biochar stimulates plant growth but not fruit yield of processing tomato in a fertile soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 207, 163-170.
72. Virginia Matzek, John Stella, Pearce Ropion. (2018) Development of a carbon calculator tool for riparian forest restoration.
73. Yao, H., Dong, Z., Li, D., Ni, X., Chen, T., Chen, M., ... & Huang, X. (2022). Long-term optimal reservoir operation with tuning on large-scale multi-objective optimization: Case study of cascade reservoirs in the Upper Yellow River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, 101000.
74. Zahabi, S. R., Sheikhzadeh, M., Akbarzadeh, S., Bahi, A., & Ko, F.

- (2022). Study on microstructure and tribological properties of hierarchical 3D braid applicable in heavy operating tribology conditions. *Polymer Composites*, 43(5), 3290-3312.
75. Zhang, H., Liu, S., Yuan, W., Dong, W., Xia, J., Cao, Y., & Jia, Y. (2016). Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(6), 1449-1455.