
114 年水土保持工程碳匯增益與永續治理策略 研發計畫

Research and Development Program on Carbon Sequestration Enhancement and Sustainable Governance Strategies in Soil and Water Conservation Engineering in 2025 成果報告

執行單位：逢甲大學

執行期間：114 年 02 月 07 日至 114 年 12 月 10 日

計畫主持人：嚴崇一 博士

共同主持人：林秉賢 助理教授

李維峰 博士

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)

114 年水土保持工程碳匯增益與永續治理策略研 發計畫

摘要

本報告核心目標在於透過多層次的研究與技術分析，擴充並提升水土保持工程的碳匯管理能力，並深入探索實現碳中和的可行性。

一、計畫核心工作與研究

1.坡面崩塌地處理土壤碳匯研究資料擴充：

選取具代表性的水保工程地點（如屏東恆春出火橋下游野溪整治工程），採集土壤樣本，調查植被覆蓋度、坡度等環境因素，以分析土壤碳匯的動態變化。並建立評估方法，分析不同類型水保工程的碳匯效果差異，並研擬適用於臺灣崩塌地水土保持工程的減量公式。

2.拓展固碳量調查點位並持續建置自然碳匯地圖：

持續在全臺新增坡地及水保工程設施的土壤有機碳量測點（計畫新增 8 處點位），以擴展自然碳匯資料庫。建立長期監測點，記錄土壤沖蝕量與碳匯變化數據，為建置自然碳匯地圖提供基礎。

3.水土保持工程實現碳中和關鍵技術分析評估：

評估現有減碳技術在崩塌地治理、野溪整治及集水區整治工程中的應用案例。深入研究減碳、固碳、增匯、循環及綠趨勢在水保工程施作中的應用可行性。提出水保工程實現碳中和的綜合性方案。

4.循環再生材料減碳效果評估：

分析循環再生材料（如高爐水泥、蚵殼粉/砂）在碳匯應用中的潛力，並評估再生材料與混凝土混合使用的減碳效益。規劃以臺南「關龍深楠坑農路改善工程」擋土牆作為示範區域，預計可減少 20.016 萬噸 CO₂e。

5.專業人才培育與制度建立：

辦理 ISO 14060 系列溫室氣體專業人員認證培訓（包括 ISO 14064-1、ISO 14067 及 ISO 14068-1:2023 碳中和主導查證員課程）。建立國有公用土地造林使用與減量額度申請制度，以及擬訂土地撥用管理制度，以促進碳中和與永續發展。

二、固碳增匯評估模型

本計畫提出的水土保持工程固碳增匯總量 (SWCCO₂e) 評估公式，將工程效益分為三個主要構面，並在同一尺度 (tC/ha) 下進行整合比較：

$$SWCCO_2e = CRCO_2e + SOCCO_2e + VCCO_2e$$

工程碳排放 (CRCO₂e / E，負值)：量化施工階段產生的一次性碳足跡。

土壤固碳量 (SOCCO₂e / Cyellow，黃碳，正值)：量化工程施作後所阻擋、保留下來的土壤碳量，兼具「當下阻擋」與「後續再碳化」的動態效益。

植生增匯量 (VCCO₂e / Cgreen，綠碳，正值)：量化工程完工後新生或恢復植被隨時間吸收的碳量，屬於「時間累積量」。

關鍵詞：碳中和、水土保持工程、碳匯增益、土壤固碳、循環再生材料

Research and Development Program on Carbon Sequestration Enhancement and Sustainable Governance Strategies in Soil and Water Conservation Engineering in 2025

Abstract

The core objective of this report is to expand and enhance the carbon-sequestration management capacity of soil and water conservation (SWC) engineering through multi-level research and technical analysis, and to further explore the feasibility of achieving carbon neutrality.

I. Core Tasks and Research Components

1. Expansion of Soil Carbon Sequestration Data in Slope-Failure Treatment Areas :

Representative SWC engineering sites (e.g., the Hengchun Chuhuo wild-stream rehabilitation project in Pingtung) will be selected to collect soil samples and investigate environmental factors such as vegetation coverage and slope gradient. These data will be used to analyze the dynamic changes in soil carbon sequestration. An evaluation methodology will be established to compare carbon-sequestration performance among various types of SWC engineering, and to develop reduction formulas applicable to landslide-prone conservation sites in Taiwan.

2. Expansion of Carbon-Sequestration Survey Sites and Continuous Development of a Natural Carbon-Sequestration Map :

Additional soil organic carbon (SOC) monitoring points will be installed in hillside areas and SWC engineering facilities

nationwide (a total of eight new sites). Long-term monitoring stations will be established to record soil erosion volumes and carbon-sequestration dynamics, forming the foundational database for constructing a natural carbon-sequestration map.

3. Technical Assessment of Key Approaches to Achieving Carbon Neutrality in SWC Engineering :

Existing carbon-reduction technologies will be evaluated for their applicability in landslide remediation, wild-stream restoration, and watershed conservation projects. The feasibility of integrating carbon reduction, carbon sequestration, carbon sink enhancement, circularity, and green engineering trends into SWC practices will be thoroughly examined. A comprehensive strategy to achieve carbon neutrality in SWC engineering will also be proposed.

4. Assessment of Carbon-Reduction Effects of Recycled Materials :

The potential of recycled materials (e.g., ground-granulated blast-furnace slag cement, oyster-shell powder/sand) in carbon-sequestration applications will be analyzed. The carbon-reduction benefits of mixing recycled materials with concrete will be evaluated. The “Guanlong–Shennan Pit Farm Road Improvement Project” in Tainan is planned as a demonstration site, with an expected reduction of 200,160 tonnes CO₂e.

5. Capacity Building and Institutional Development :

Training programs will be conducted for professional certification under the ISO 14060 series (including ISO 14064-1, ISO 14067, and ISO 14068-1:2023 Lead Verifier for Carbon Neutrality). Additionally, a system for managing afforestation on

national public lands and applying for carbon-reduction credits will be established, along with guidelines for land allocation and management, in order to promote carbon neutrality and sustainable development.

II. Carbon Sequestration and Carbon-Sink Evaluation Model

This project proposes an integrated evaluation model for total carbon sequestration and sink enhancement in SWC engineering (SWCCO_{2e}). Engineering outcomes are categorized into three major components, all represented on a unified scale (tC/ha): :

$$SWCCO_{2e} = CRCO_{2e} + SOCCO_{2e} + VCCO_{2e}$$

Engineering Carbon Emissions (CRCO_{2e} / E ,negative value) :

Quantifies the one-time carbon footprint generated during the construction phase.

Soil Carbon Sequestration (SOCCO_{2e} / Cyellow, positive value) :

Quantifies the amount of soil carbon retained or preserved following implementation of SWC measures, capturing both immediate retention and subsequent re-carbonization dynamics

Vegetation Carbon-Sink Increase (VCCO_{2e} / Cgreen, positive value) : Quantifies the time-accumulated carbon uptake by newly established or restored vegetation after project completion.

Keywords: Carbon Neutrality, Soil and Water Conservation Engineering, Carbon Sequestration Enhancement, Soil Carbon Sequestration, Recycled Materials

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	VII
表次.....	IX
圖次.....	XI
第一章 前言.....	1-1
第一節 計畫緣由.....	1-1
第二節 工作項目.....	1-2
第三節 計畫整體構想.....	1-4
第四節 計畫工作流程.....	1-6
第四節 預定執行進度.....	1-7
第五節 前期計畫成果摘錄.....	1-8
第六節 自主檢核.....	1-10
第二章 坡面崩塌地處理土壤碳匯研究資料擴充計畫	2-1
第一節 水保工程固碳增匯地點選擇與工作方法	2-1
第二節 水保工程固碳增匯結果分析與評估方法建立	2-10
第三節 研擬適用於臺灣崩塌地水土保持工程的減量公式 ...	2-28
第三章 拓展水土保持工程固碳量調查點位並持續建置自然碳匯地圖	3-1
第四章 水土保持工程實現碳中和關鍵技術分析評估	4-1
第一節 評估現有減碳技術在水保工程中的應用案例分析	4-2
第二節 研究減碳、固碳、增匯、循環及綠趨勢在水保工程施作中的應用可行性.....	4-16
第三節 提出水保工程實現碳中和的綜合性方案	4-23

第五章 循環再生材料在水土保持工程中的減碳效果評估	5-1
第一節 分析循環再生材料在碳匯應用中的潛力	5-2
第二節 評估再生材料混凝土應用的減碳效果	5-10
第三節 綜合評估水土保持工程中再生材料的減碳效益	5-11
第四節 低碳混凝土及再生材料等試驗分析說明	5-17
第六章 辦理 ISO 14060 系列溫室氣體專業人員認證培訓	6-1
第七章 取得減量額度相關制度之建立	7-1
第一節 國有公用土地造林選擇標準、管理與維護方式	7-1
第二節 減量額度申請流程.....	7-3
第三節 建立完善制度的參考要點	7-4
第八章 結論與建議	8-1
第一節 結論.....	8-1
第二節 建議.....	8-3
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、工作執行計畫書審查意見及處理情形	附錄-1
附錄二、期中報告書審查意見及處理情形	附錄-6
附錄三、期末報告書審查意見及處理情形	附錄-11
附錄四、採樣數據與試驗成果.....	附錄-16
附錄五、低碳混凝土簡介.....	附錄-137
附錄六、蚵殼粉檢驗報告.....	附錄-142
附錄七、低碳混凝土研討會簡報資料	附錄-145

表次

表 1-1	計畫預定執行進度表	1-7
表 1-2	計畫執行自主檢核表-期末階段.....	1-10
表 2-1	屏東恆春出火橋下游野溪整治工程採樣點工程種類分布	2-13
表 2-2	出火檢測土壤碳及空氣碳成果(春季)	2-17
表 2-3	出火檢測土壤碳及空氣碳成果(夏季)	2-17
表 2-4	出火檢測土壤碳及空氣碳成果(秋季)	2-18
表 2-5	出火檢測土壤碳及空氣碳成果(冬季)	2-18
表 2-6	不同水保工程設施碳排估算模式	2-31
表 2-7	工程碳排計算項目	2-32
表 2-8	採樣區土壤固碳計算成果	2-41
表 2-9	出火護岸-土砂保持固碳量(黃碳)數據.....	2-48
表 2-10	出火護岸-植生增匯量(綠碳)數據.....	2-50
表 2-11	出火護岸-工程排放量數據.....	2-51
表 2-12	出火護岸-水土保持工程固碳增匯效益(WCO ₂ e)數據.....	2-53
表 2-13	常見水土保持植生植物	2-54
表 2-14	常見水土保持植生植物比較	2-56
表 2-15	屏東恆春出火橋下游野溪整治工程採樣點植生分布(一)	2-60
表 2-16	屏東恆春出火橋下游野溪整治工程採樣點植生分布(二)	2-61
表 3-1	北中南東自然碳匯地圖採樣點	3-1
表 3-2	北中南東四區四期採樣區地質土壤特性	3-3
表 3-3	北中南東四區四期採樣有機碳含量及生態碳恢復率變化	3-11
表 3-4	北中南東舊四區採樣有機碳含量及生態碳恢復率變化....	3-13
表 5-1	高爐水泥之物理性質	5-6
表 5-2	高爐水泥工程實例表	5-9

表 5-3 蚵殼砂取代部份細粒料之水泥砂漿配比試驗表..... 5-19

表 5-4 蚵殼砂取代部份地質改良劑之水泥砂漿配比試驗表..... 5-20

圖次

圖 1-1	水保工程固碳增匯示意圖	1-5
圖 1-2	水土保持工程土壤碳匯架構圖	1-6
圖 1-3	工作流程圖	1-7
圖 2-1	出火橋下游野溪整治三期工程監測點位(一)	2-2
圖 2-2	出火橋下游野溪整治一期工程	2-2
圖 2-3	出火橋下游野溪整治二期工程圖	2-3
圖 2-4	出火橋下游野溪整治三期工程工程內容	2-3
圖 2-5	出火橋下游野溪整治四期工程工程設計	2-4
圖 2-6	出火橋下游野溪整治工程設計(一)	2-4
圖 2-7	出火橋下游野溪整治三期工程工程設計(二)	2-5
圖 2-8	出火橋下游野溪整治三期工程工程設計(三)	2-5
圖 2-9	出火橋下游野溪整治工程工程效益	2-6
圖 2-10	水保工程碳排監測儀器	2-7
圖 2-11	土壤採樣設備	2-7
圖 2-12	水保工程碳排監測程序	2-9
圖 2-13	水保工程碳排檢測成果與工作照片	2-11
圖 2-14	屏東縣恆春鎮出火橋下游工程區域圖	2-12
圖 2-15	屏東出火橋下游工程預鑄護岸生態碳恢復率不同季節成果	2-19
圖 2-16	屏東出火橋下游工程預鑄護岸生態碳恢復率不同期別成果	2-20
圖 2-17	屏東出火橋下游工程預鑄護岸土壤有機碳恢復率	2-21
圖 2-18	屏東出火橋下游工程預鑄護岸不同季節生態碳恢復率 ..	2-21
圖 2-19	屏東出火橋下游工程預鑄護岸不同期別生態碳恢復率 ..	2-22

圖 2-20	工區內 4 擾動範圍分析結果.....	2-25
圖 2-21	工區內 4 擾動採樣範圍.....	2-26
圖 2-22	工區內 12 擾動範圍分析結果.....	2-26
圖 2-23	工區內 12 擾動採樣範圍.....	2-26
圖 2-24	工區內 27 擾動範圍分析結果.....	2-27
圖 2-25	工區內 27 動採樣範圍.....	2-27
圖 2-26	工程類型之每萬元碳排放量.....	2-29
圖 2-27	不同高度護岸的碳排放量.....	2-30
圖 2-28	工程材料碳排放量估算原則.....	2-33
圖 2-29	機具操作碳排放量估算原則.....	2-34
圖 2-30	出火橋下游野溪整治工程.....	2-36
圖 2-31	出火橋下游野溪整治二期工程.....	2-37
圖 2-32	出火橋下游野溪整治三期工程.....	2-38
圖 2-33	出火橋下游及東門溪上游整治維護工程(四期工程).....	2-39
圖 2-34	出火護岸-土砂保持固碳量(黃碳).....	2-49
圖 2-35	出火護岸-植生增匯量(綠碳).....	2-50
圖 2-36	出火護岸-工程排放量(tC/ha).....	2-52
圖 2-37	出火護岸-水土保持工程固碳增匯效益(WCO _{2e}).....	2-53
圖 3-1	北部桃園復興高遠本生橋採樣點位置及空照圖.....	3-3
圖 3-2	中部南投水里益則坑採樣點位置及空照圖.....	3-4
圖 3-3	南部台南興化新化林場採樣點位置及空照圖.....	3-5
圖 3-4	東部花蓮玉里安通溫泉採樣點位置及空照圖.....	3-6
圖 3-5	北區四期採樣成果土壤有機碳及生態碳恢復率.....	3-7
圖 3-6	中區四期採樣成果土壤有機碳及生態碳恢復率.....	3-8
圖 3-7	南區四期採樣成果土壤有機碳及生態碳恢復率.....	3-9

圖 3-8	東區四期採樣成果土壤有機碳及生態碳恢復率.....	3-10
圖 3-9	北中南東區四期採樣成果土壤有機碳恢復率.....	3-16
圖 3-10	北中南東區四期採樣成果生態碳恢復率.....	3-16
圖 3-11	北中南東區四種地質採樣平均生態碳恢復率.....	3-17
圖 3-12	北中南東區四種地質採樣四季生態碳恢復率.....	3-18
圖 3-13	北中南東區四種地質採樣土壤有機碳恢復率統計盒鬚圖...	3-19
圖 3-14	北中南東區四種地質採樣各次生態碳恢復率統計盒鬚圖...	3-19
圖 3-15	北中南東區四次採樣各次土壤有機碳復率變化.....	3-20
圖 3-16	北中南東區四次採樣各次生態碳恢復率變化.....	3-20
圖 3-17	新增北部宜蘭三層坪採樣點及採樣成果分析.....	3-22
圖 3-18	新增中部苗栗獅潭大東勢溪採樣點及採樣成果分析.....	3-23
圖 3-19	新增南部屏東新開苗圃採樣點及採樣成果分析.....	3-24
圖 3-20	新增東部台東太平坑魯瓦南橋採樣點及採樣成果分析..	3-25
圖 3-21	新增北中南東採樣區有機碳及生態碳恢復率.....	3-26
圖 3-22	北中南東採樣區不同地質對有機碳 TOC 變化分布圖 ...	3-30
圖 3-23	北中南東採樣區不同土壤對有機碳 TOC 變化分布圖 ...	3-31
圖 3-24	北中南東採樣區不同 RM 條件對有機碳 TOC 變化分布圖	3-32
圖 3-25	北中南東採樣區不同 KM 條件對有機碳 TOC 變化分布圖	3-33
圖 3-26	北中南東採樣區不同地質對有機碳恢復率 SOC 變化分布圖	3-34
圖 3-27	北中南東採樣區不同土壤對有機碳恢復率 SOC 變化分布圖	3-35

圖 3-28 北中南東採樣區不同 RM 條件對有機碳恢復率 SOC 變化分布圖.....	3-36
圖 3-29 北中南東採樣區不同 KM 條件對有機碳恢復率 SOC 變化分布圖.....	3-37
圖 3-30 北中南東採樣區不同地質對生態碳恢復率 CRR 變化分布圖.....	3-38
圖 3-31 北中南東採樣區不同土壤對生態碳恢復率 CRR 變化分布圖.....	3-39
圖 3-32 北中南東採樣區不同 RM 條件對生態碳恢復率 CRR 變化分布圖.....	3-40
圖 3-33 北中南東採樣區不同 KM 條件對生態碳恢復率 CRR 變化分布圖.....	3-41
圖 3-34 114 年度新增北中南東八處採樣土壤碳恢復率及土壤碳匯量.....	3-42
圖 3-35 北部採樣區土壤黃碳.....	3-46
圖 3-36 北部採樣區植物增匯.....	3-46
圖 3-37 北部採樣區工程碳排.....	3-46
圖 3-38 北部採樣區工程碳匯.....	3-47
圖 3-39 北部採樣區碳匯比較.....	3-47
圖 3-40 中部採樣區土壤黃碳.....	3-49
圖 3-41 中部採樣區植物增匯.....	3-49
圖 3-42 中部採樣區工程碳排.....	3-50
圖 3-43 中部採樣區工程碳匯.....	3-50
圖 3-44 中部採樣區碳匯比較.....	3-51
圖 3-45 南部採樣區土壤黃碳.....	3-52

圖 3-46	南部採樣區植物增匯	3-52
圖 3-47	南部採樣區工程碳排	3-53
圖 3-48	南部採樣區工程碳匯	3-53
圖 3-49	南部採樣區碳匯比較	3-54
圖 3-50	東部採樣區土壤黃碳	3-55
圖 3-51	東部採樣區植物增匯	3-55
圖 3-52	東部採樣區工程碳排	3-56
圖 3-53	東部採樣區工程碳匯	3-56
圖 3-54	東部採樣區碳匯比較	3-56
圖 5-1	循環再生材料在水土保持工程中的減碳效果評估	5-1
圖 5-2	中聯資源相關產品碳足跡	5-8
圖 5-3	中聯資源相關產品減碳效益	5-8
圖 5-4	綠色材料產品認證圖	5-9
圖 5-5	關龍深楠坑農路改善工程示範區域位置圖	5-12
圖 5-6	關龍深楠坑農路改善工程現況照及設計圖	5-16
圖 5-7	低碳混凝土及再生材料試驗流程圖	5-17
圖 5-8	低碳混凝土研討會現況(拍攝時間:114.06.27)	5-27
圖 6-1	ISO14064-1:2018 及 ISO14067:2018 雙主導查證員課程現況照	6-2
圖 6-2	ISO14068-1:2023 碳中和主導查證員課程現況照	6-2
圖 6-3	ISO14064-1 及 ISO14067 雙主導查證員課程大綱	6-3
圖 6-4	ISO14068-1:2023 碳中和主導查證員課程大綱	6-3

第一章 前言

第一節 計畫緣由

本計畫的核心目標在於透過多層次的研究與技術分析，擴充與提升水土保持工程中的碳匯管理能力，並探索實現碳中和的可行性。針對臺灣崩塌地進行土壤碳匯資料的擴充，計畫將選擇合適水保工程地點，透過採集土壤樣本、分析植被覆蓋度、坡度等環境因素，研究其對土壤碳匯的影響。結合現有數據，計畫將建立評估方法，分析不同類型水保工程的碳匯效果差異，並研擬適用於臺灣的崩塌地減量公式與增匯策略，以提高實務應用的效益。其次，計畫將持續拓展水土保持工程的碳匯資料，通過在全臺新增坡地及水保工程設施的土壤有機碳量測點，擴展自然碳匯資料庫，為未來建立自然碳匯地圖提供基礎數據，並進行長期監測以利掌握土壤狀況，精確評估水保工程的長期碳匯潛力。

計畫另一主要目的將針對水土保持工程實現碳中和的技術進行深入分析，透過對國內外案例的研究，進行水土保持工程碳中和技術可行性與經濟效益的評估。研究將探討減碳、增匯、循環經濟與綠色趨勢在水保工程中的應用，提出具體實施路徑和綜合性方案。計畫也深入研究循環再生材料在水土保持工程中的減碳效果，分析材料應用的潛力，並評估再生材料與混凝土混合使用的減碳效益，幫助水保工程邁向碳中和目標，此外，計畫將辦理 ISO 140 系列溫室氣體專業認證培訓，以及建立取得減量額度相關制度，提升同仁在相關減量管理與盤查系統的專業能力，促進水土保持工程實現碳中和與永續發展。

第二節 工作項目

一、坡面崩塌地處理土壤碳匯研究資料擴充計畫

- (一)選擇具代表性的水保工程地點，採集土壤樣本並調查植被覆蓋度、坡度等可能影響土壤碳匯之環境因素，分析土壤碳匯的動態變化以做為評估水保工程增匯效益的基礎。
- (二)利用現有水保工程碳匯數據和現地調查結果建立評估方法，分析不同類型水保工程的碳匯效果差異，並評估長期增匯潛力。
- (三)研擬適用於臺灣崩塌地水土保持工程的減量公式，並提出針對擋土牆及邊坡護岸的具體增匯策略，以利工程實務推廣應用。

二、拓展水土保持工程固碳量調查點位並持續建置自然碳匯地圖

- (一)新增坡地及水保工程設施的土壤有機碳量測點位：在 8 處坡地及水保工程設施中增設土壤有機碳測量點，針對不同地區進行樣本分析，以補充自然碳匯資料的空白點。
- (二)建立長期監測點，記錄土壤沖蝕量與碳匯變化：在坡地水土保持工程設施中設置長期監測點，進行土壤沖蝕量的觀測，並同步記錄碳匯變化數據，作為未來自然碳匯地圖擴充的依據。

三、水土保持工程實現碳中和的關鍵技術分析評估

- (一)評估現有減碳技術在水保工程中的應用案例分析，對於國內外水土保持工程中的減碳技術應用案例進行分析，總結其技術成果與限制，並提出適用於臺灣水保工程的可行技術建議。
- (二)研究減碳、增匯、循環及綠趨勢在水保工程施作中的應用可行性，並進行技術與經濟效益的綜合評估，提供具體實施路徑。

- (三)提出水保工程實現碳中和的綜合性方案，評估水保工程實現碳中和的可行性、綜合效益及其長期監測驗證方法。

四、循環再生材料在水土保持工程中的減碳效果評估

- (一)分析循環再生材料在碳匯應用中的潛力，評估循環再生材料在水土保持工程中作為結構材料的碳匯應用潛力，並分析其減少碳排放的機制。
- (二)評估再生材料混凝土應用的減碳效果，針對循環再生材料與混凝土的混合使用進行實驗與分析，評估其在工程施作中的減碳效果，並提供具體數據支援。
- (三)綜合評估水土保持工程中再生材料的減碳效益，進行全面性評估，總結循環再生材料在水保工程中的減碳潛力及其綜合效益，提出應用建議以促進循環經濟和減碳目標的實現。

五、辦理ISO 140系列溫室氣體專業人員認證培訓

- (一)辦理本署及分署同仁 ISO 140 系列最新版國際標準之溫管從業人員專業訓練，透過辦理 2 場相關課程(每場人數及時間以開課單位規定為主)，並邀請具有 TAF 認證之驗證機構核發相關證照，課程內容以提升同仁溫室氣體減量管理或盤查系統或碳中和查證知識素養為目的，並協助同仁取得相關國際人才資格證明。
- (二) 訓練課程於交通便利設備齊全之會議室辦理，並進行課程資料準備、餐點準備、場地租借、開課過程記錄、人員統計、本署及分署同仁接駁或車證申請(如有需要)等相關事宜。

六、取得減量額度相關制度之建立

- (一)建立造林使用與減量額度申請制度，針對國有公用土地的造林，制定選擇標準、管理與維護方式，確保造林達成碳吸收

目標。造林完成後，建立申請減量額度的流程，包括資格審核、檔準備及審查程式，建立完善制度提供未來申請減量額度之參考。

(二)擬訂土地撥用管理制度，制定國有公用土地的撥用規範，需考量環境、社會及經濟影響，確保土地撥用後能有效執行減量計畫，並進行後續管理與監督，保障制度的持續性。

第三節 計畫整體構想

目前水土保持工程與土木工程對於永續減碳領域主要多是針對單一工法及材料減碳運用部份進行評估研究，尚未見水土保持工程系統性地對於整體環境的固碳增匯成效進行評估分析。因此，本計畫配合縱向及邊坡擋土水土保持工程的施作進行固碳增匯評估分析模式的開發研究，其目標是量化評估水土保持工程中透過增加覆土體積、回復植生、以及降低減少表土沖蝕等工程方法可以達到的固碳增匯效果，探討水土保持工程與固碳增匯的結合運用。

本計畫持續以屏東恆春出火橋下游野溪整治工程為案例，作為水土保持措施之固碳增匯效益系統化評估之參考依據，並透過不同工程種類，施作年期的水土保持工程點位元的土壤樣本、植被覆蓋度、坡度沖蝕等環境因素分析評估，研究其對土壤固碳增匯的影響。結合 113 年度觀測數據，加上本年度觀測成果，分析不同類型水保工程的碳匯效果差異，並研擬適用於臺灣的水土保持工程之減量公式與固碳增匯策略，以提高實務應用的效益。持續拓展水土保持工程的碳匯資料，通過在全臺新增崩塌地治理、野溪整治及集水區治理等水保工程點位元的土壤有機碳量測點，擴展工程自然碳匯資料庫，為後續建立水土保持工程不同土壤狀況增加自然碳匯地圖提供基礎數據做為未來長

期碳匯潛力。此外，協助農村水保署辦理 ISO 14060 系列溫室氣體專業認證培訓，提升農村水保署同仁在相關減量管理與盤查部份的專業能力，以及建立取得減量額度相關制度，促進水土保持工程實現碳中和與永續發展。

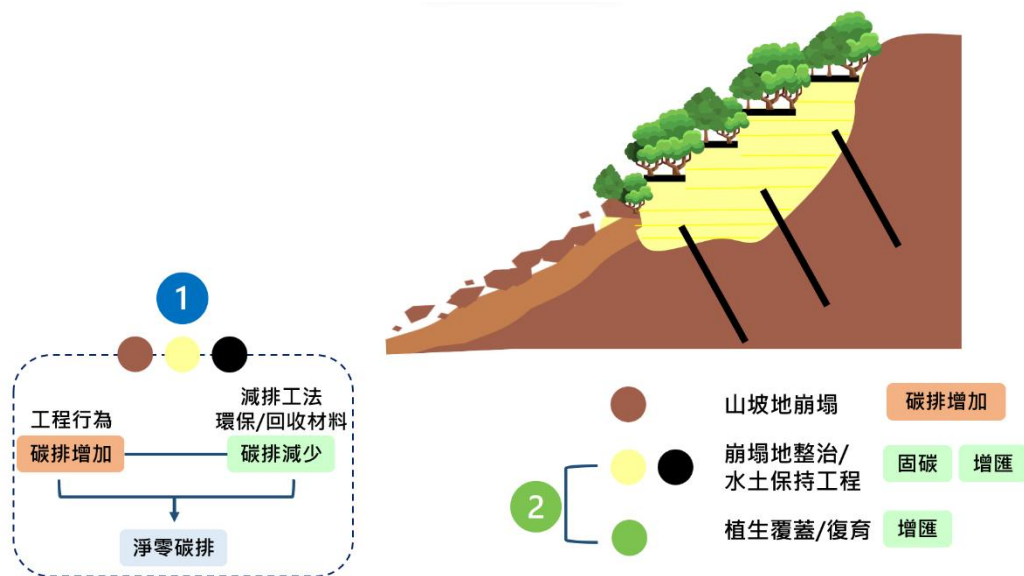


圖 1-1 水保工程固碳增匯示意圖

本計畫將探討水保工程中的循環再生材料在水土保持工程中的減碳效果，分析材料應用的潛力，並評估再生材料應用於混凝土配比調和的減碳效益，並提出具體實施路徑和綜合性方案，相關內容分述如後各章節。

本計畫擬延續 113 年相關土壤碳匯研究之資料蒐集，並將碳匯評估所需參數因數等進行匯整，包含提供生物量、死亡有機質及土壤碳庫變化量的通量計算皆納入。由於臺灣對於土壤碳匯之研究目前尚在起步當中，碳匯調查參考「林務局台灣本土植物資料庫」及「特有生物研究保育中心資料庫」，本計畫將碳匯分為三個部份來進行計算，分別為地上部、地下部及土壤碳匯，其架構圖如圖 1-2，地上部以計算作物及水保植材生物量為主、生長率及作物本體含碳比例低，地下

部包含作物地下部根莖比，土壤碳匯包含土壤層及枯枝落葉層。

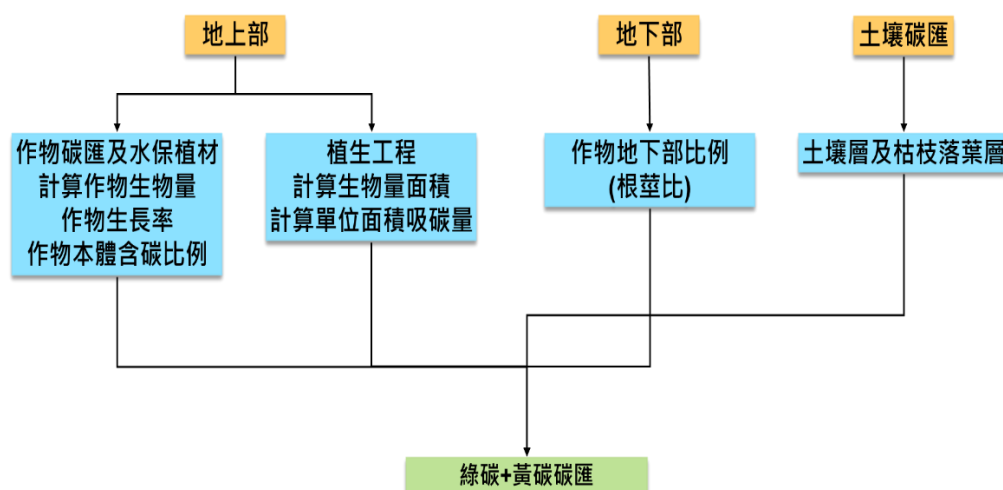


圖 1-2 水土保持工程土壤碳匯架構圖

在水土保持工程中，常見樹種需具備根系發達、抗逆性強、土壤適應性好等特性，以防止水土流失、穩定邊坡及促進生態恢復。其樹種選擇為關鍵考量，這些固碳增匯樹種在水土保持工程中的應用，能有效結合生態恢復與碳中和目標，實現水土資源的可持續管理。因此本計畫將選擇具代表性的水保工程地點，做為採集土壤樣本，其相關採樣原則及方法說明如下節：

第四節 計畫工作流程

針對計畫內容擬定執行流程，如圖 1-3 所示，原則上須依照所頒定之執行計畫項目及目標，以及計畫工項規定與農村發展及水土保持署業務需求進行辦理。

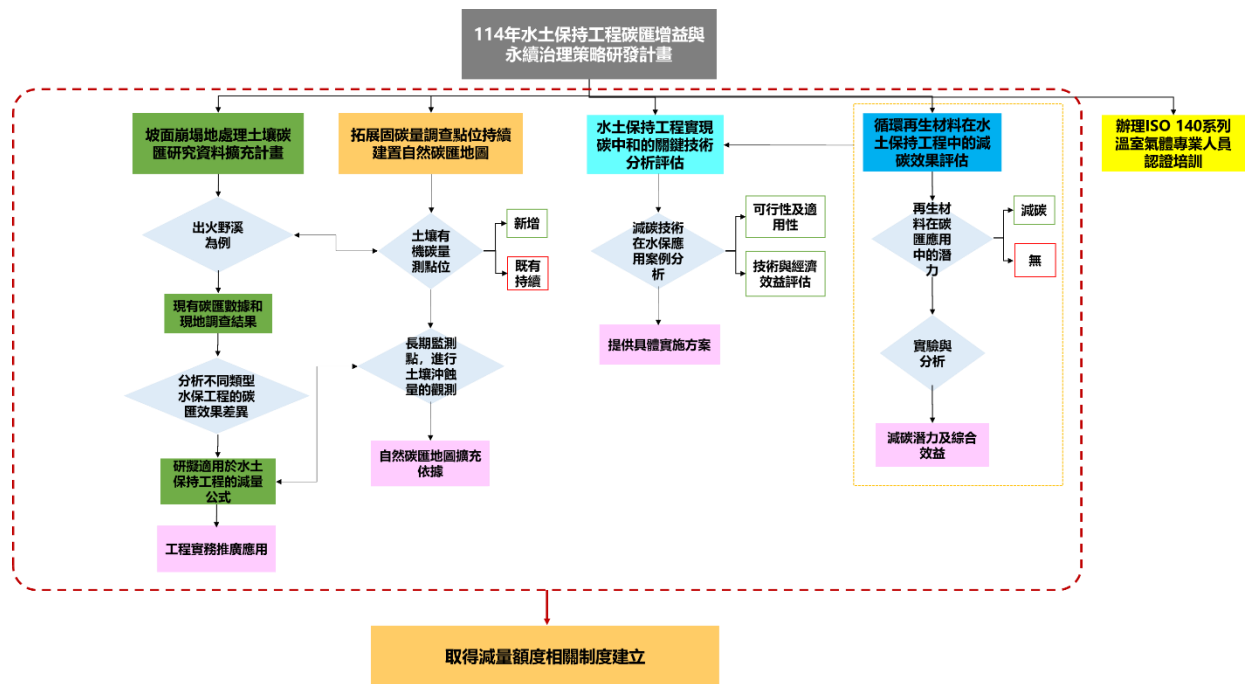


圖 1-3 工作流程圖

第四節 預定執行進度

本委託計畫自決標次日起至民國 114 年 12 月 10 日完成，各項工作預定執行進度如表 1-1 所示。

表 1-1 計畫預定執行進度表

工作項目		期程	114 年											
			1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
坡面崩塌地處理土壤碳匯研究資料擴充計畫	1. 選擇具代表性的水保工程地點，採集土壤樣本並調查 2. 利用現有水保工程碳匯數據和現地調查結果建立評估方法 3. 研擬適用於臺灣崩塌地水土保持工程的減量公式			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
拓展水土保持工程固碳量調查點位並持續建置自然碳匯地圖	1. 新增坡地及水保工程設施的土壤有機碳量測點位 2. 建立長期監測點，記錄土壤沖蝕量與碳匯變化			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
水土保持工程實現碳中和的關鍵技術分析評估	1. 評估現有減碳技術在水保工程中的應用案例分析 2. 研究減碳、增匯、循環及綠趨勢在水保工程施作中的應用可行性			■	■	■	■	■	■	■				

	3. 提出水保工程實現碳中和的綜合性方案												
循環再生材料在水土保持工程中的減碳效果評估	1. 分析循環再生材料在碳匯應用中的潛力 2. 評估再生材料混凝土應用的減碳效果 3. 綜合評估水土保持工程中再生材料的減碳效益				■	■	■	■	■	■	■	■	■
辦理 ISO 140 系列溫室氣體專業人員認證培訓			■	■				■	■				
取得減量額度相關制度之建立	1. 建立造林使用與減量額度申請制度 2. 擬訂土地撥用管理制度					■	■	■	■	■	■	■	■
查核點			期 初				期 中					期 末	成 果
預定進度累計百分比(%)		10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100

資料來源:本計畫繪製

第五節 前期計畫成果摘錄

近年來，台灣受到極端氣候影響，山坡地頻繁遭受颱風豪雨侵襲，導致大規模崩塌和土石流災害。這些災害不僅威脅居民生命財產安全，崩塌地更會釋放大量原本被土壤和植被固定的二氧化碳，加劇全球氣候變遷。為應對這一挑戰，本研究計畫致力於開發適用於崩塌地處理工程的減碳增匯模式，探索水土保持與碳匯發展的結合途徑。

前期計畫在碳中和分析方面取得了重要成果。以 209 公尺長的擋土牆工程為例，詳細分析顯示工程碳排放的構成中，材料生產占總排放的 84%，運輸環節占 14.9%，施工和維護分別占 1.1%和 0.05%。在自然碳匯方面，通過植被恢復可實現 196 噸 CO₂e 的碳匯，土壤碳儲存貢獻 27.98 噸 CO₂e，防災減災效益可避免 200 噸 CO₂e 的排放，最終實現 362.1 噸 CO₂e 的淨碳匯效益。這一結果顯示，水土保持工程除了具備防止崩塌、減少土石流等傳統防災功能外，還可通過穩定邊坡、保護植被等方式，有效避免額外的碳排放，是一項兼具防災與減碳效益的重要措施。

在崩塌地與集水區土壤碳含量研究方面，發現崩塌地的碳含量呈現明顯的深度變化特徵。表層 0-5 公尺處具有最豐富的有機碳含量，

平均維持在 1-1.5%，其中某些點位甚至出現高達 3.6%的異常高值。隨深度增加到 5-20 公尺的中層區域，碳含量趨於穩定，平均維持在 0.7%。特別的是，在到達 35-40 公尺的深層位置時，有機碳含量出現回升趨勢，平均值提升至 1-1.2%。

第六節 自主檢核

表 1-2 計畫執行自主檢核表-期末階段

合約工作項目		實際執行成果	應完成進度	實際完成進度	對應章節
坡面崩塌地處理土壤碳匯研究資料擴充計畫	選擇具代表性的水保工程地點，採集土壤樣本並調查	現地調查取樣、資料收集	100%	100%	2-1
	利用現有水保工程碳匯數據和現地調查結果建立評估方法	分析不同類型水保工程的碳匯效果差異	100%	100%	2-10
	研擬適用於臺灣崩塌地水土保持工程的減量公式	擬定適用於臺灣崩塌地水土保持工程的減量公式	100%	100%	2-27
拓展水土保持工程固碳量調查點位並持續建置自然碳匯地圖	新增坡地及水保工程設施的土壤有機碳量測點位	北、中、南、東等 8 處現地調查取樣	100%	100%	3-1
	建立長期監測點，記錄土壤沖蝕量與碳匯變化	根據上述區域進行季節性數據統計及分析	100%	100%	3-1
水土保持工程實現碳中和的關鍵技術分析評估	評估現有減碳技術在水保工程中的應用案例分析	應用案例分析說明	100%	100%	4-1
	研究減碳、增匯、循環及綠趨勢在水保工程施作中的應用可行性	研究減碳、增匯、循環及綠趨勢在水保工程施作中的應用可行性	100%	100%	4-16
	提出水保工程實現碳中和的綜合性方案	評估水保工程實現碳中和的可行性、綜合效益及其長期監測驗證方法	100%	100%	4-23
循環再生材料	分析循環再生材料在碳匯應用中的潛力	試驗說明及初步試驗結果	100%	100%	5-2

合約工作項目		實際執行成果	應完成進度	實際完成進度	對應章節
在水土保持工程中的減碳效果評估	評估再生材料混凝土應用的減碳效果	試驗說明及初步試驗結果	100%	100%	5-10
	綜合評估水土保持工程中再生材料的減碳效益	試驗說明及初步試驗結果	100%	100%	5-11
辦理 ISO 140 系列溫室氣體專業人員認證培訓		辦理完成 2 場 ISO1406 系列主導課程	100%	100%	6-1
取得減量額度相關制度之建立	建立造林使用與減量額度申請制度	完成減量計算公式建立	100%	100%	7-1
	擬訂土地撥用管理制度	完成管理制度之建立	100%	100%	7-1

第二章 坡面崩塌地處理土壤碳匯研究資料擴充計畫

第一節 水保工程固碳增匯地點選擇與工作方法

一、工區選擇

本計畫擬延續 113 年所提之屏東縣恆春鎮出火野溪整治專案為 114 年度持續研究之辦理地點。其治理工程除了主要的野溪整治外，其河道周邊崩塌地也是治理工項，該項目特別著重於輔助性生態工程和植被恢復工作，包含預鑄護岸，格框，打樁編柵，木排樁等，其措施不僅旨在穩定地質和改善水土保持，還可能對土壤碳累積產生重要影響。初步規劃增設至區內 28 點，區外 10 個點，並進行已完工 1 年至 12 年以上的工區，不同縱橫方向水保工程(固床工、護岸、坡面保護工等)在土壤固碳增匯成效的取得及分析。

位於屏東滿州出火野溪作為選擇對象，其涵蓋各類縱向與橫向工程治理者，主要針對點位分為不同工期、不同工法與不同植生作為挑選原則，原則如下：

- 1.不同工期:屏東滿州出火野溪整治分為四期，竣工年分別為 110 年至 113 年，針對不同工期中選擇。
- 2.不同工法:屏東滿州出火野溪整治涵蓋多種工程工法，如石籠保護工程、全預鑄塊工程、土包袋木柵工程等，針對不同工法中選擇。
- 3.不同植生: 將工程工法周邊植物分為耐旱植物、耐濕植物、深根植物、淺根植物，針對不同植生中選擇。



圖 2-1 出火橋下游野溪整治三期工程監測點位(一)

二、工區特色

本區工程分為三期工程，主要延續 104 年槽框式護岸的設計概念，利用預鑄護岸的方式，搭配固床及防砂措施，針對全區主支流及崩塌坡面進行分期工程治理。

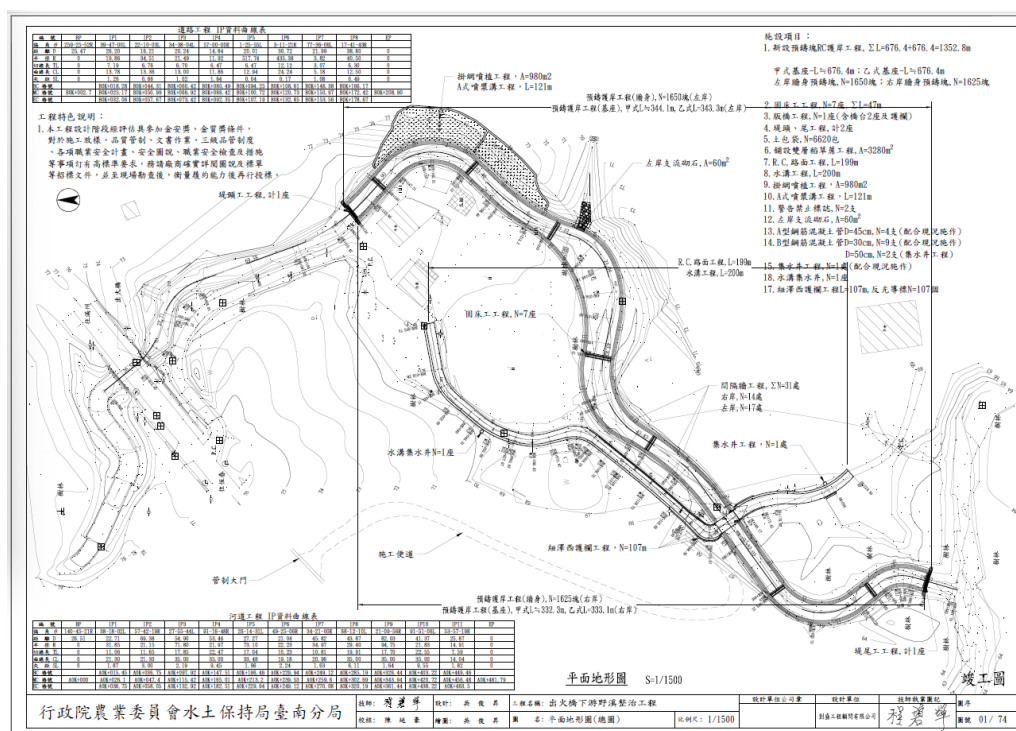


圖 2-2 出火橋下游野溪整治一期工程

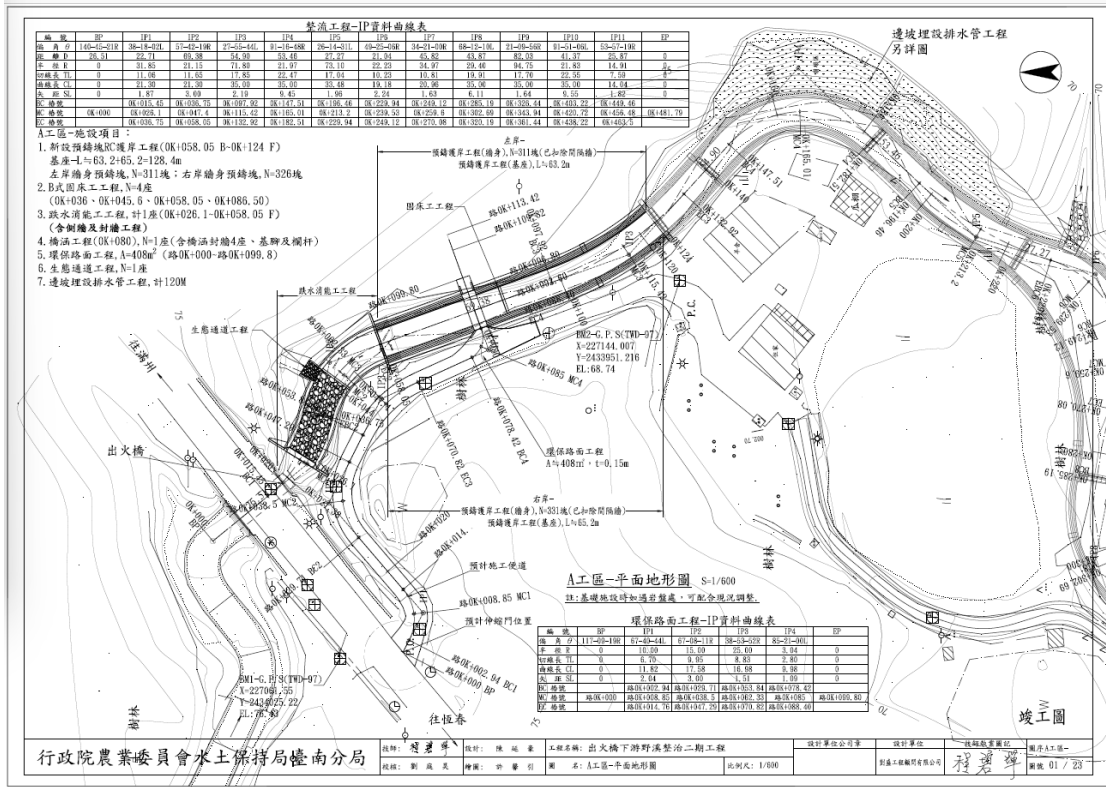


圖 2-3 出火橋下游野溪整治二期工程圖

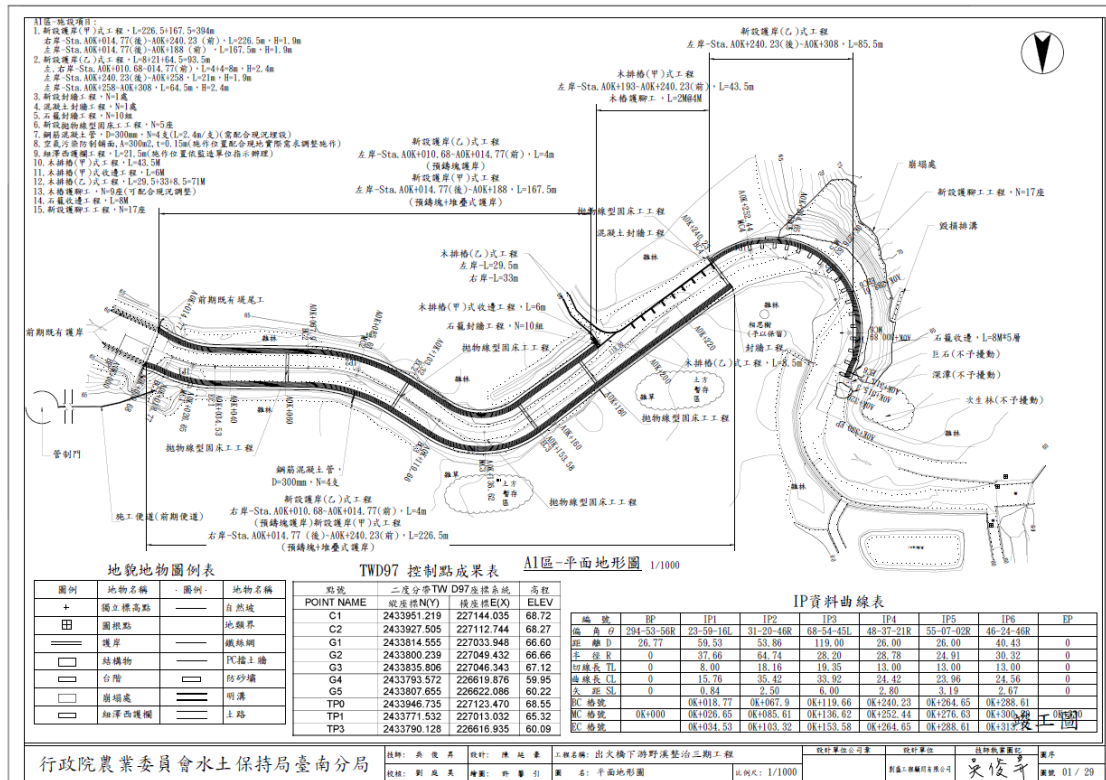


圖 2-4 出火橋下游野溪整治三期工程工程內容



圖 2-7 出火橋下游野溪整治三期工程工程設計(二)



圖 2-8 出火橋下游野溪整治三期工程工程設計(三)



圖 2-9 出火橋下游野溪整治工程工程效益

三、工作方法

(一)設備條件

1.空氣碳：AZ 衡欣實業 77597 高精度二氧化碳偵測計如圖 2-10。

設備特色：

- (1)產品皆為【CE 認可】並符合【ISO9001】之規範
- (2)可顯示一氧化碳/二氧化碳/溫度/濕度
- (3)全部採用日本/瑞典/瑞士高精度感測元件
- (4)可手動記錄 99 筆或自動記錄 32000 點
- (5)透氣式的背殼設計，提升準確性與量測速度
- (6)標準套件含電腦連接線組，方便資料即時記錄與分析

型號	77597
二氧化碳範圍	0~9999ppm (5001~9999ppm超出測量範圍)
一氧化碳範圍	0~1000ppm
溫度範圍	-20~60℃ (-5~140°F)
濕度範圍	0.1~99.9%RH
露點溫度	-20.0~59.9℃
濕球溫度	-5.0~59.9℃
解析度	二氧化碳: 1ppm 溫度: 0.1℃/°F 濕度: 0.1%RH
二氧化碳精度	讀值的±30ppm±5% (當讀值介於0~5000ppm) 其他範圍則為±10%
一氧化碳精度	<20ppm: 讀值±3ppm <100ppm: 讀值±5ppm 101~500ppm: 讀值的±10% >501ppm: 讀值的±20%
溫度誤差值	±0.6℃/±0.9°F
濕度誤差值	±3%RH (此指溫度為25℃, 相對濕度為10~90%時, 超出此範圍則準確度為±5%RH)



型號	77597
響應時間	約30秒
二氧化碳反應時間	<30秒
一氧化碳反應時間	<60秒
溫度反應時間	<2分
濕度反應時間	<10分
螢幕尺寸	44 x 26 mm
工作環境溫度	-20~50℃ (二氧化碳感測器) 0~50℃ (一氧化碳感測器) -20~60℃ (其餘參數)
工作環境濕度	0~95%RH
儲存環境	-20~60℃; 10~90%RH
產品尺寸	205 x 70 x 56 mm
產品重量	200g
供電	AA鹼性電池x 4或9V變壓器
防水防塵IP等級	IP40
EMC	EN 50270:2015
標準包裝盒	主機, 電池, 說明書, 電腦連接線組, 手提盒
可選購配備	校正鹽瓶組, 9V變壓器



監測工具



圖 2-10 水保工程碳排監測儀器

2.土壤碳：主要針對地表 30 公分下土壤得採取，採樣原則以一處工程隨機採樣 8-12 處為原則，但水保工程多為線狀工程，考量工程隊周邊影響程度，初步以類似等距網格，但是會考量周邊植被生長特性與採樣安全，土壤採樣設備如圖 2-11。



圖 2-11 土壤採樣設備

3.土壤含碳量檢測

(1)實驗方法：

實驗方法：土壤有機質測定方法—燃燒／紅外線測定法 TARI S201.1B (農試化字第 1122136705 號)檢測儀器：總有機碳分析儀 (廠牌型號：OIA_1030D TOC)

實驗流程：(再依實際情況修改)

(A)樣品前處理：為使土壤樣品均勻化、增加表面積及提高反應效率，乾燥並研磨樣品使通過 0.5 mm (35 mesh)孔目之篩網。

(B)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(R 值須達到 0.995 以上)。

(C)儀器操作：依儀器操作說明進行分析儀器之組裝、測試、校正及操作。儀器使用前需調整至最佳的燃燒溫度，並觀察溫度變化以確保溫度之穩定性；並以品管樣品及真實樣品進行操作條件之準確度與精密度驗證後，始得進行樣品之檢測。

註：總碳 (TC)= 總有機碳 (TOC)+總無機碳 (TIC)

總無機碳 (TIC)去除方法：取 50mg 土壤樣品加入 5% HCl (100~200 μ l)，進入高溫爐以特定溫度與時間反應 (75~250 $^{\circ}$ C，5~120 分鐘)。

(2)檢測儀器：

總有機碳分析儀 (廠牌型號：OIA_1030D TOC)

(3)實驗流程：

詳細實驗流程詳見附錄四，並再依實際情況修改

(4)檢測程序:如圖 2-12 所示

土壤測量： 取 10cm 深、150g 土樣，密封保存

草本層測量： 用 25cm 透明桶隔離測量區域

上方測量： 在地表上方 2m 處進行監測

監測程序

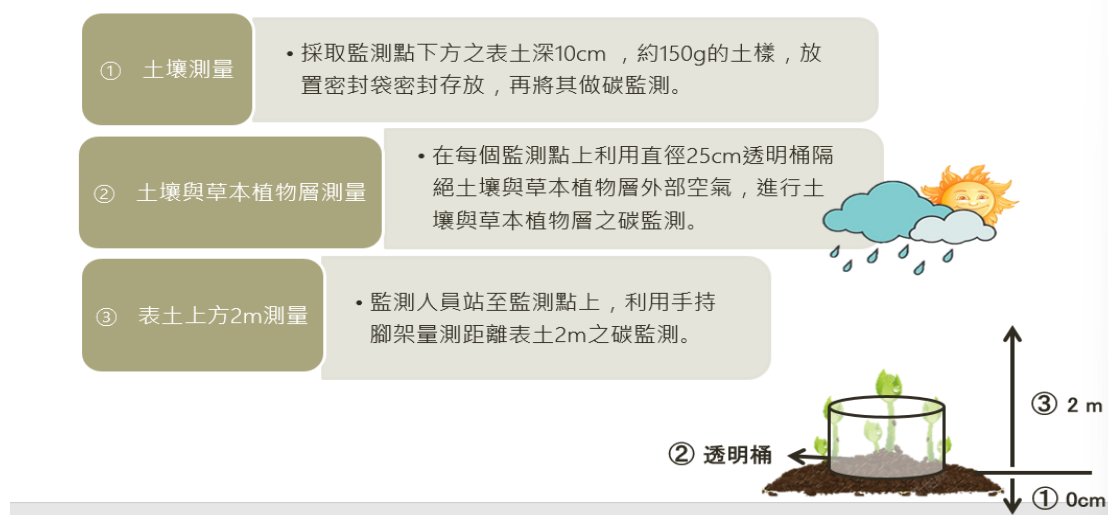


圖 2-12 水保工程碳排監測程序

(二)檢測方法:

- 1.針對選擇地點進行工程種類的區分，針對縱向工程(預鑄護岸、打樁編柵、縱向排水等)及橫向工程(固床工、防砂壩)進行單一構造周邊三處進行採樣與土壤種類、坡度，含水量、環境及土壤溫度及土地利用調查。
- 2.按照不同年期完成的工程進行現況採樣及調查
- 3.針對上述調查點，按照區域蒐集施工前中後及現況至少四

期之衛星影像(以 SPOT 為主)搭配前期 UAV 拍攝成果進行 NDVI 判釋，找出植生覆蓋度的差異比較。瞭解每一個工程植被覆蓋條件差異，邊界以構造物與回填土(一倍構造物高度)及構造物長度為限制。

4.植生調查參考水土保持技術規範第 41-45 條，進行定性與定量之方法的實施。

第二節 水保工程固碳增匯結果分析與評估方法建立

一、採樣檢測

針對計畫區考量本區歷經四期的工程整治，建置修復與植生補強，為此，針對計畫區域因應不同工程的條件以及周邊不同土地利用的成果，進行土壤採樣，以了解不同時間不同種類工程的改善對土壤固碳的成效監測，如圖 2-13 屏東縣恆春鎮出火橋下游採樣其詳細結果如附錄四。

屏東縣恆春鎮出火橋-採樣四(1/4) ²⁰													
114 年 2 月 26 日(白天)		內 1	內 2	內 3	內 4	內 5	內 6	內 7	內 8	內 9	內 10	內 11	內 12
距離地面 2m 處之空氣	CO ₂ (ppm)	442	438	436	430	428	429	435	438	444	440	441	440
	氣溫(°C)	27.4	26.4	22.3	21.0	21.5	18.3	15.9	20.1	23.3	24.4	20.7	25.6
土壤與草本植物層	CO ₂ (ppm)	445	440	437	433	430	438	440	441	453	449	454	448
	氣溫(°C)	33.1	35.6	27.4	25.7	26.1	23.1	20.8	25.7	29.2	28.0	25.1	34.8
土壤碳	總碳 TC(C%)	0.70	1.44	0.77	3.85	1.14	0.49	2.28	1.35	1.22	0.92	1.38	1.05
	總有機碳 TOC(C%)	0.43	0.90	0.41	2.19	0.60	0.27	1.52	0.79	0.59	0.45	0.89	0.67
	總碳 TC(ppm)	7000	14400	7700	38500	11400	4900	22800	13500	12200	9200	13800	10500
	總有機碳 TOC(ppm)	4300	9000	4100	21900	6000	2700	15200	7900	5900	4500	8900	6700



圖 2-13 水保工程碳排檢測成果與工作照片

如圖 2-14 屏東縣恆春鎮出火橋下游工程區域圖所示，採樣編號：內 1(崩塌地一期)、內 2、內 3、內 4、內 5、內 6(崩塌地三期)、內 7、內 8、內 9、內 10、內 11、內 12、內 13(崩塌地一期)、內 14(崩塌地一期)、內 15(崩塌地一期)、內 16(崩塌地一期)、內 17、內 18、內 19、內 20、內 21、內 22、內 23(崩塌地三期)、內 24(崩塌地三期)、內 25(崩塌地三期)、內 26、內 27、內 28 及外 1、外 2、外 3、外 4、外 5、外 6、外 7、外 8、外 9、外 10、外 11、外 12，採樣點工程如表 2-1 顯示，圖 2-14 為下游樣區分布圖，其結果比較說明如下：



圖 2-14 屏東縣恆春鎮出火橋下游工程區域圖

表 2-1 屏東恆春出火橋下游野溪整治工程採樣點工程種類分布

位置		屏東縣恆春鎮出火橋下游																													
		更早期 (104 年)			第一期 (110 年)			第二期 (111 年)									第三期 (112 年)									第四期 (113 年)					
工程竣工年		完工約十年			完工約四年			完工約三年									完工約二年									完工約一年					
		內 7	內 27	內 28	內 1	內 2	內 17	內 3	內 4	內 8	內 11	內 12	內 13	內 14	內 15	內 16	內 19	內 5	內 6	內 20	內 21	內 22	內 23	內 24	內 25	內 26	內 9	內 10	內 18		
工程 種類	預鑄塊+堆疊式木柵(甲式護岸)								✓									✓													
	全預鑄塊(乙式護岸)	✓	✓		✓	✓		✓			✓		✓	✓	✓				✓					✓	✓						
	預鑄固床工			✓			✓				✓				✓																
	拋物線型固床工工程																			✓	✓										
	土包袋木柵工程									✓																					
	木排樁(甲)式工程																							✓							
	坡腳保護工																✓														
	護腳工工程																							✓			✓				
	石簕保護工程							✓																							
	石簕封牆工程																														
	掛網植生邊坡												✓	✓	✓																
	調節設施工程																														✓
	崩塌處																		✓						✓	✓					
河道內																											✓	✓			

二、採樣結果與分析

針對計畫區因先前災害及沖蝕所造成的土壤內二氧化碳的釋出採樣成果，周邊環境進行工程改善後，欲了解整體故探增匯成效，參考下表文獻，可以因此評估區域在土壤內包含土壤有機碳的分析，土壤與空氣交界面的成果，對應未改善之素地(工程未擾動地)進行如下討論：

恢復率類型	公式範例	適用情境	文獻出處與網址
碳恢復率 (CRR)	$CRR = SOC_restored / SOC_reference$	土壤碳儲量比較恢復情況	Zhang et al. (2017), Ecological Engineering https://link.springer.com/article/10.1007/s44246-024-00165-6
植生恢復率 (VRR)	$VRR = (NDVI_post - NDVI_pre) / (NDVI_ref - NDVI_pre)$	火後或退化後 NDVI 恢復分析	NDVI Recovery Studies https://www.nature.com/articles/s41598-024-63047-2
恢復百分比 NBR	$Recovery\% = (NBR_post - initial) / (pre-fire - initial) \times 100\%$	火後森林恢復進程追蹤	Fire Ecology, 2018 https://fireecology.springeropen.com/articles/10.1186/s42408-018-0021-9
生態模型恢復率	$Re(\lambda_dom)$	生態系統動態恢復與穩定性分析	李柏瑩 (2009) 碩士論文 <a 097nctu5507019"="" href="https://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gswweb.cgi?o=dnclcdr&s=id=">https://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gswweb.cgi?o=dnclcdr&s=id="097NCTU5507019"
物理碰撞恢復係數	$e = v_separation / v_approach$ 或 $e^2 = E_rebound / E_compression$	剛體或彈性體碰撞中恢復效率估算	LibreTexts / Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_restitution

(1) 土壤有機碳儲量計算公式

$$SOC_{CO_2e} = TOC\% / 100 \times BD \times Depth \times 10000 \quad (2-1)$$

其中 TOC%：土壤有機碳百分比 (%)

BD：土壤容重 (g/cm^3)

Depth：採樣深度 (cm)

10000：單位轉換因子，將結果換算為 g/m^2

單位換算後：SOC 單位為 gC/m^2

計算步驟

(A) $\text{BD} \times \text{Depth}$: $\text{g/cm}^3 \times \text{cm} = \text{g/cm}^2$ 表示每平方公分的土壤重量。

(B) 乘上 10,000 (單位換算) : $\text{g/cm}^2 \times 10,000 = \text{g/m}^2$ 因為 $1 \text{ m}^2 = 10,000 \text{ cm}^2$ ，可轉為每平方公尺單位。

(C) 乘上 $\text{TOC}\% / 100$ (換算有機碳比例) : $\text{g/m}^2 \times (\text{TOC}\% / 100) = \text{gC/m}^2$ 將總土壤量轉為其中的有機碳含量 (gC)。

(2) 草本層有機碳排放速率公式(本案之植生層)

$$F = (\Delta C \times P \times V) / (R \times T \times A \times \Delta t) \times (12.01 / 44.01) \quad (2-2)$$

其中 ΔC : CO_2 濃度變化 (ppm)

P : 大氣壓力 (Pa)

V : 箱體體積 (m^3)

R : 理想氣體常數 ($8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)

T : 氣溫 (K)

A : 箱底面積 (m^2)

Δt : 時間 (秒)

$12.01 / 44.01$: CO_2 分子中碳的質量比例 (C/CO_2)

單位為 $\text{gC/m}^2/\text{s}$ ，積分後單位為 gC/m^2

(3) 集水區生態碳恢復率公式

$$\text{CRR}_{\text{CO}_2\text{e}} = (\text{SOC}_{\text{CO}_2\text{e}} + \int F \, dt) / (\text{SOC}_{\text{CO}_2\text{e_ref}} + \int F_{\text{ref}} \, dt) \quad (2-3)$$

其中 $\text{SOC}_{\text{CO}_2\text{e}}$: 土壤有機碳儲量 (gC/m^2)，(土壤 30cm 下)

F : 土壤 CO_2 排放通量 ($\text{gC/m}^2/\text{hr}$)，(土壤與草本層)

$\int F dt$ ：代表觀測期間累積碳釋放量 (gC/m^2)。

(4)數據初步成果

根據附錄四及表 2-2-表 2-所式，針對 113 年採樣三次，114 年採兩次，合計採樣四季**預鑄護岸**分析資料如下：

A.春季成果:TOC 最大以完工超過十年以上最大達

1.62%，素地(未有工程施作地點)約有 1.83%十分接近，SOC 達 63.18，CRR 達 86.7%。

B.夏季成果:本年度降雨多，最大以完工超過十年以上最大達 2.41%，素地(未有工程施作地點)僅有 1.45%，遠超過素地表現，SOC 達 93.99，CRR 達 84.79.7%。其他年期工程因植生為算完備，CRR 僅有 46-47%

C.秋季成果:最大以完工超過十年以上最大達 1.13%，素地(未有工程施作地點)約有 1.00%十分接近，SOC 達 44.07，CRR 達 61.68%，其他期別十分低，僅有 17-25%。

D.冬季成果:最大以完工超過十年以上最大達 1.52%，素地(未有工程施作地點)約有 0.84%十分接近，SOC 達 59.28，CRR 達 57.38%，其他期別工程僅有 22-31%，不算高。

E.由上可知，觀察一整年四季成果，若要取得較好的固碳增匯成效，初步建議以春夏季節為佳，且生態恢復率以春季較高。

表 2-2 出火檢測土壤碳及空氣碳成果(春季)

季節	春季				
工期	第三期 (112年)	第二期 (111年)	第一期 (110年)	更早期 (104年)	素地
	完工二年	完工三年	完工四年	完工十年	
土壤總有機碳TOC(C%)	1.40%	1.33%	1.55%	1.62%	1.83%
空氣	405	410	407	413	401
草本層(ppm)	418	425	422	433	423.857
氣溫(°C)	43.6	35.35	41.5	38.9	35.81
SOC(gC/m^2)	54.6	51.87	60.45	63.18	71.53
F	0.102	0.121	0.118	0.159	0.184
$\int F dt$	896.71	1062.34	1041.58	1400.34	1616.40
SOC + $\int F dt$	951.319	1114.21	1102.03	1463.52	1687.93
生態碳恢復率CRR	56.36%	66.01%	65.29%	86.70%	100.00%

表 2-3 出火檢測土壤碳及空氣碳成果(夏季)

季節	夏季				
工期	第三期 (112年)	第二期 (111年)	第一期 (110年)	更早期 (104年)	素地
	完工二年	完工三年	完工四年	完工十年	
土壤總有機碳TOC(C%)	1.43%	1.43%	1.62%	2.41%	1.45%
空氣	401	404	408	429	415
草本層(ppm)	409	414	418	447	437
氣溫(°C)	44	37.1	33	34.3	34.39
SOC(gC/m^2)	55.77	55.77	62.985	93.99	56.60
F	0.062	0.080	0.081	0.146	0.178
$\int F dt$	551.13	704.23	713.66	1279.1	1562.9
SOC + $\int F dt$	606.90	760.00	776.65	1373.1	1619.5
生態碳恢復率CRR	37.47%	46.93%	47.95%	84.79%	100.00%

表 2-4 出火檢測土壤碳及空氣碳成果(秋季)

季節	秋季				
工期	第三期 (112年)	第二期 (111年)	第一期 (110年)	更早期 (104年)	素地
	完工二年	完工三年	完工四年	完工十年	
土壤總有機碳TOC(C%)	0.58%	0.52%	0.75%	1.13%	1.00%
空氣	395	404	407	408	406
草本層(ppm)	396	405	408.5	412	412.8571
氣溫(°C)	35.4	29.8	36.4	38.6	34.61
SOC(<u>gC/m²</u>)	22.62	20.085	29.25	44.07	39.11
F	0.008	0.008	0.012	0.032	0.055
$\int F dt$	70.811	72.120	105.87	280.33	486.81
SOC + $\int F dt$	93.43	92.20	135.12	324.40	525.92
生態碳恢復率CRR	17.77%	17.53%	25.69%	61.68%	100.00%

表 2-5 出火檢測土壤碳及空氣碳成果(冬季)

季節	冬季				
工期	第三期 (112年)	第二期 (111年)	第一期 (110年)	更早期 (104年)	素地
	完工二年	完工三年	完工四年	完工十年	
土壤總有機碳TOC(C%)	0.60%	0.60%	0.67%	1.52%	0.84%
空氣	428	437	440	435	435
草本層(ppm)	430	439	443	440	444.8571
氣溫(°C)	26.1	31.55	34.35	20.8	26.66
SOC(<u>gC/m²</u>)	23.4	23.4	25.935	59.28	32.70
F	0.016	0.016	0.024	0.042	0.082
$\int F dt$	146.02	143.41	213.16	371.64	718.34
SOC + $\int F dt$	169.42	166.81	239.09	430.92	751.05
生態碳恢復率CRR	22.56%	22.21%	31.83%	57.38%	100.00%

按照季節變化，整理不同完成工期土壤有機碳 TOC 成果，以及考量土壤交接面之碳釋出之生態碳恢復率，整理

如下：

A.完工越久，生態碳恢復率越高，尤其春夏兩季，因為植生開始，降雨較多，成效較好。

B.隨著季節變化，越到冬季生態恢復率隨之降至最低。

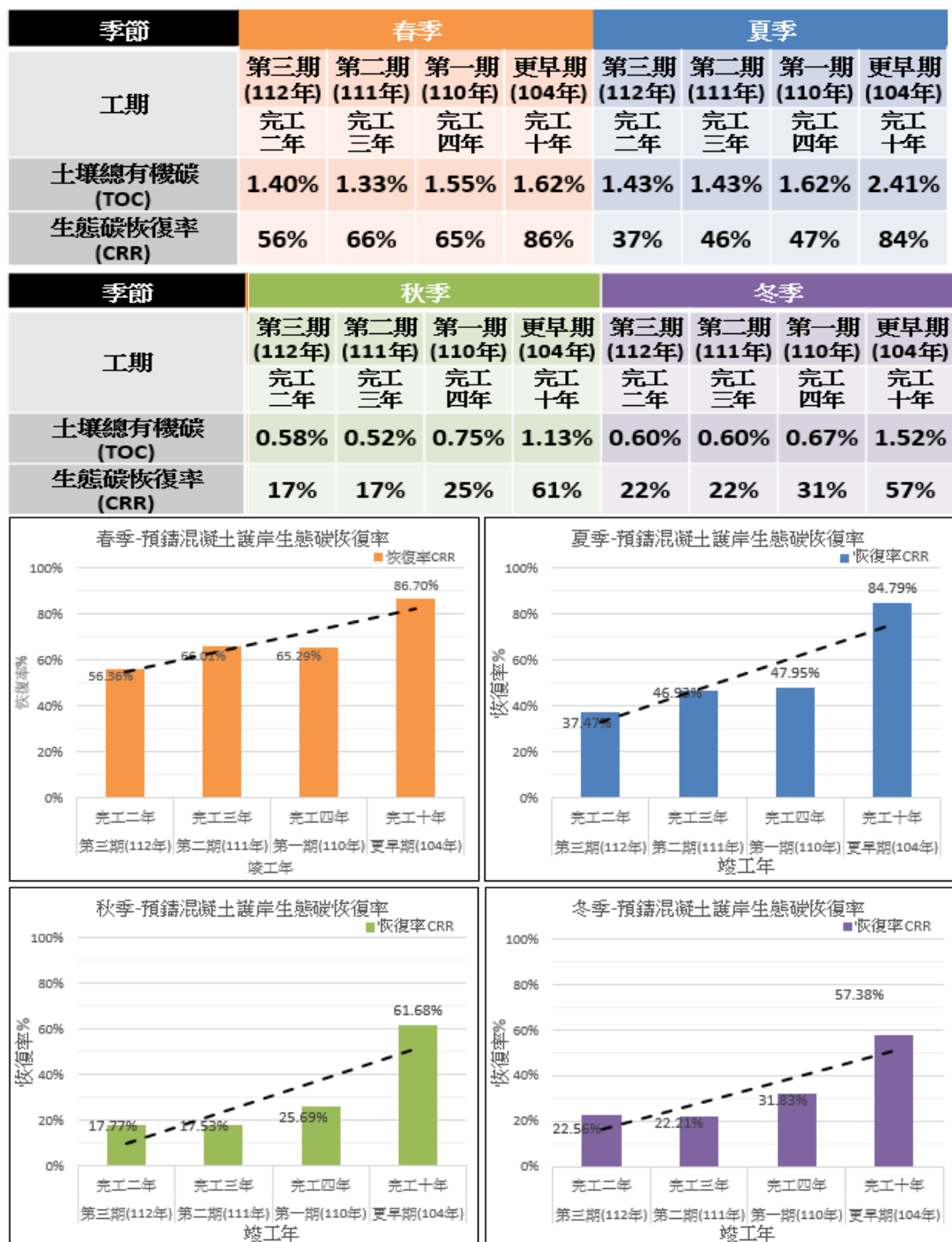


圖 2-15 屏東出火橋下游工程預鑄護岸生態碳恢復率不同季節成果

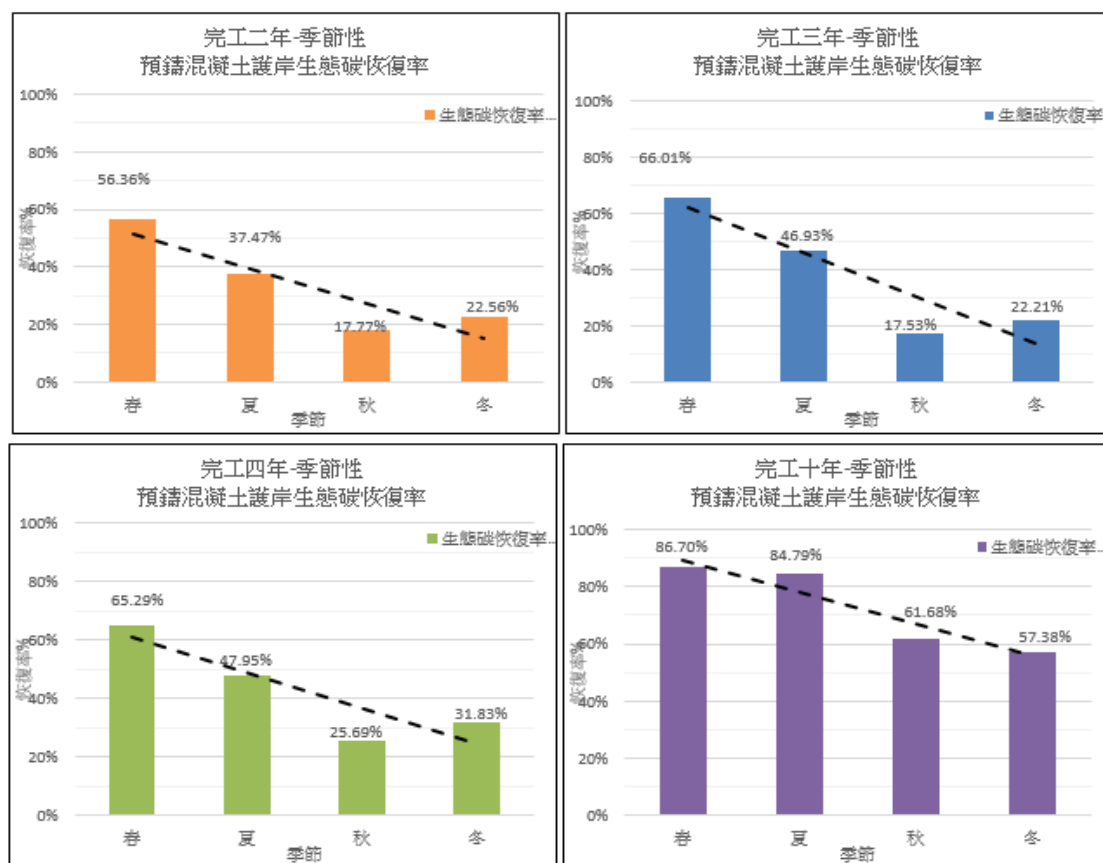
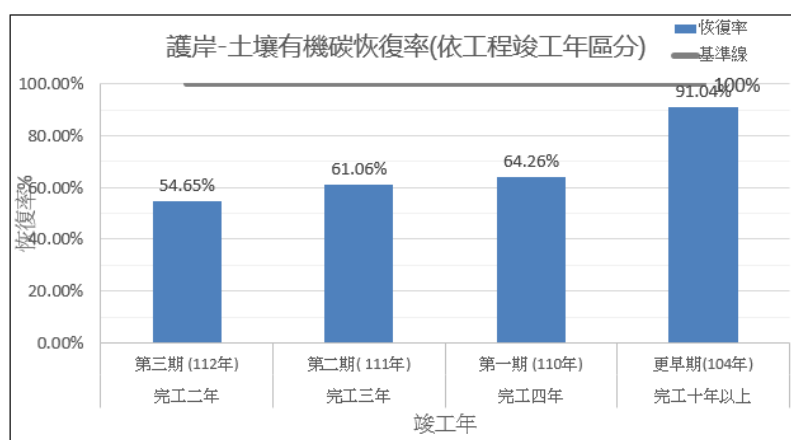


圖 2-16 屏東出火橋下游工程預鑄護岸生態碳恢復率不同期別成果

按照不同期別完成之工區，綜合季節的變化，可得以下結論

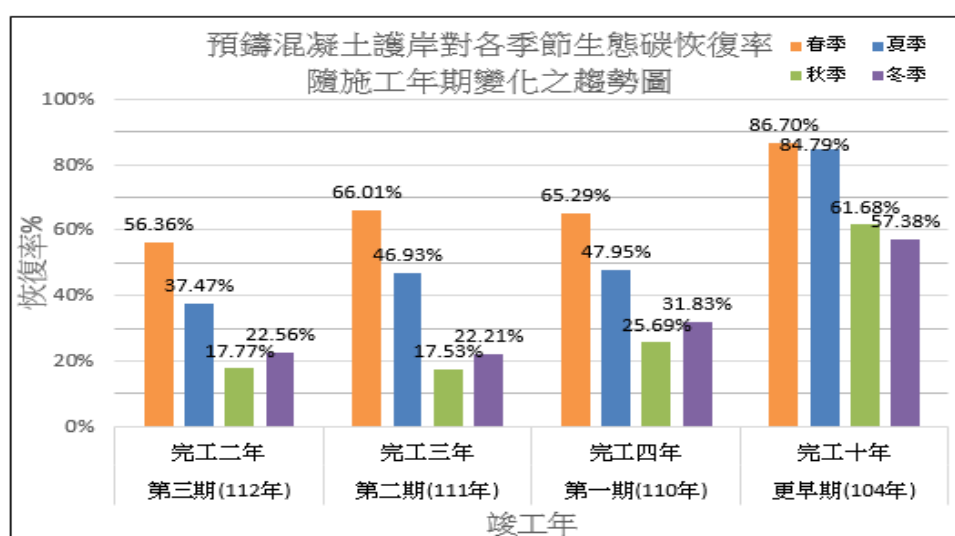
- A. 恢復期至少需 10 年 才能趨近完整恢復 (>90%)，與碳穩定機制相關。
- B. 前 3 年恢復速度較緩慢 (年增率僅 5 - 11%)，可能仍處於植生建立與碳累積前期。
- C. 10 年以上工程顯著高於其他期別，顯示隨著時間累積，生態與碳儲系統有顯著改善。
- D. 隨著施工年期的增加 (由竣工 2 年 → 竣工 10 年)，所有季節的碳恢復率 (CRR) 皆呈現穩定上升趨勢。
- E. 顯示出：碳恢復具有「時間累積效益」，植被生長、微

生物活動與土壤碳穩定性等均需多年才能達成顯著回復。



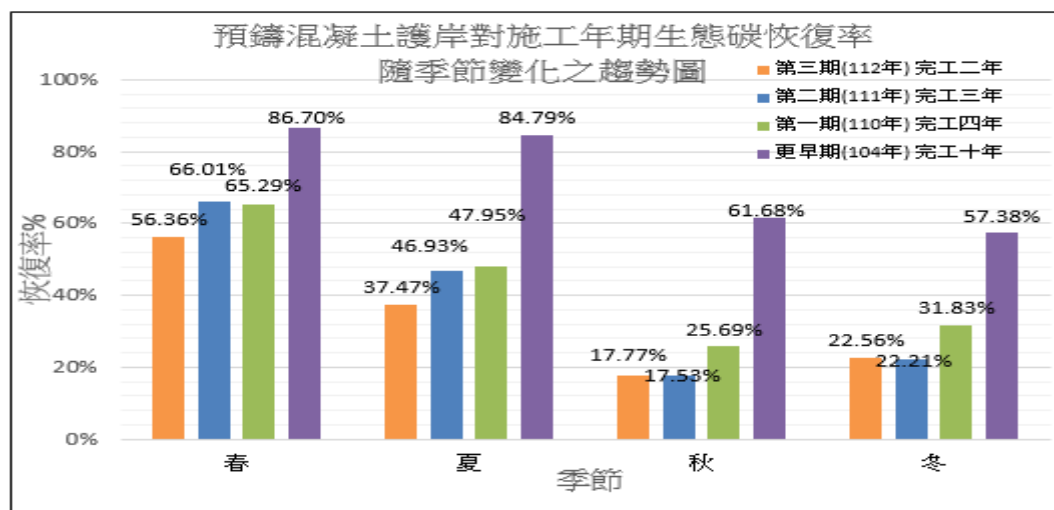
工程期別	土壤有機碳恢復率	前期差異	增加率（變化量）
完工二年（112年）	54.65%	—	—
完工三年（111年）	61.00%	+6.35%	+11.6%
完工四年（110年）	64.26%	+3.26%	+5.34%
完工十年（104年）	91.04%	+26.78%	+41.69%

圖 2-17 屏東出火橋下游工程預鑄護岸土壤有機碳恢復率



項目	初始恢復率(竣工 2 年)	最終恢復率(竣工 10 年)	增幅 (%)
春季	56.36%	86.70%	+30.34%
夏季	37.47%	84.79%	+47.32%
秋季	17.77%	61.68%	+43.91%
冬季	22.56%	57.38%	+34.82%

圖 2-18 屏東出火橋下游工程預鑄護岸不同季節生態碳恢復率



工程竣工年期	春→夏 變動	夏→秋 變動	秋→冬 變動	春→冬 總變化率
完工二年	- 8.89	- 19.70	+ 4.79	- 33.80%
完工三年	- 19.08	- 29.40	+ 4.68	- 43.80%
完工四年	- 17.34	- 22.26	+ 6.14	- 33.46%
完工十年	- 1.91	- 23.11	- 4.30	- 29.32%

圖 2-19 屏東出火橋下游工程預鑄護岸不同期別生態碳恢復率

三、擴大固碳增匯調查點位數量與範圍

(一)工作目的與研究重點

本階段工作主要著重於擴增調查點位的數量與竣工年期分布範圍，以建立跨時間尺度的水土保持工程固碳增匯資料。過去多數研究偏重於施工期或竣工初期之碳排放估算，而對於工程經長期演化後的碳恢復與植生吸碳效益之資料仍然不足，導致碳收支評估缺乏完整的時間連續性。

本階段針對竣工 2 年內的新工區、竣工 5 年以上的中期工區，以及竣工超過 10 年的成熟工區進行系統化調查，藉由長期追蹤與年期分層對比，掌握碳匯效益的恢復速率與累積趨勢，作為後續公式驗證與碳潛力分析的基礎。

1. 工區擾動範圍判定

水土保持工程在施工期間，會造成明確範圍內的地表擾動，包括鏟除原生土壤、替換回填材料、重機輾壓、土體裸露及植生破壞等。這些行為會直接改變土壤有機碳含量、孔隙度、團粒結構等，並造成局部碳流失（黃碳釋放）大幅提高；但此衝擊並非均勻於整個河谷或坡面，也就是說，越靠近工程本體，土壤碳異動越大，但隨距離增加，擾動效應逐漸減弱，最終回復到自然背景值。因此，本研究必須先界定「擾動有效範圍」，才能確定哪些 SOC 值是在工程干預下的變異範圍、哪些 SOC 值已屬自然背景基準。若未先明確判定擾動範圍，將導致所採樣的 SOC 值無法判斷是工程效應或自然變異；碳恢復率（CRR）的計算會混入不屬於工程影響範圍的背景值而被稀釋；時間序列比較將失去空間一致性基準，造成統計趨勢不可靠。

因此，透過先界定擾動範圍，才能將「工程造成立即碳排」與「隨時間恢復之固碳回補」兩股相反力量系統化拆解，並建立可比較、可複製、可跨工程類型使用的空間一致性基準，也才能真正做到不同工程年期、新工程、中期、成熟三階段的橫向比較，且能避免錯誤的過度推論。本研究後續 CRR 指標建置、WCO₂e 評估與固碳增匯公式驗證，皆以此空間分界為基礎。

2. 工區擾動範圍量測設計

本研究界定工程擾動效應的空間邊界，以工程體（護岸本體）外緣為 0 m 起點，沿與工程軸線垂直或平行的代表性方向，每 5 m 佈點量測至 40 m（0、5、10、15、20、25、

30、35、40 m 共 9 點)，並在 40 m 之外加設外部素地(未有工程施作地點)作為背景基準。此距離範圍是依現地觀測資料歸納：0–20 m 為擾動訊號最敏感帶，20–30 m 為過渡帶，至 40 m 左右多數回到素地(未有工程施作地點)水準；再往外主要受植生影響，不再具工程辨識意義。為釐清工程作業對土壤有機碳空間影響之擾動範圍，本研究以內 4、內 12 及內 27 工區為示範，並同步紀錄植生覆蓋、坡度、地表材料與影像佐證，以利判釋，為避免季節或微地形差造成誤判，剖面點位的相對位置與取樣深度嚴格一致，SOC 計算採 $SOC(tC/ha) = TOC(\%) \times BD(g\ cm^{-3}) \times Depth(cm)$ ，深度統一 30 cm；量測與分析遵循同一套前處理、乾燥、秤重與元素分析流程。

3. 工區擾動範圍分析結果

本研究針對出火橋預鑄混凝土護岸工區，進行 0–40 m 剖面式 SOC (tC/ha) 量測，以驗證水土保持工程完工後對周遭土壤碳庫的擾動半徑與恢復型態。結果顯示三個工區（內 4、內 12、內 27）雖同為同一河段同類型工法，仍因竣工年期差異而呈現不同之空間碳含量分布特徵，證實碳恢復與擾動效應具明顯的時間累積性。以中期工區「內 4」而言，0–40 m 之 SOC 多落在約 20–23 tC/ha 的窄幅穩定範圍，僅 20 m 點為峰值 (30.81 tC/ha)，呈現單一高點而後趨於平緩，如圖 2-20、圖 2-21 所示。

成熟工區「內 12」則呈現另一種型態，20 m 為顯著高值 (39.00 tC/ha)，40 m 再次略升至約 34–39 tC/ha，而位於工區外的素地(未有工程施作地點) (距內 12 約 130 m) 更達

37.05 tC/ha，數值已接近 20 – 35 m 區段的高值帶，代表此工區竣工超過 10 年後，其土壤碳庫已回升至接近自然背景碳含量，顯示碳庫恢復已接近完全，如圖 2-22、圖 2-23 所示。

相較之下，新工區「內 27」之 SOC 顯著波動，5 m 與 15 m 均出現高值（47.97 與 46.80 tC/ha），但 20 m 降至 34.32 tC/ha，30 m 再升至 42.90 tC/ha，40 m 再降至 34.71 tC/ha，且素地(未有工程施作地點)（外 5，距 30 m 處）達 79.17 tC/ha，呈現「高低交錯、多次起伏、未趨於水平」的型態，此即為典型的竣工兩年內之「擾動未收斂現象」，其 SOC 隨距離的起伏仍然強烈，顯示工程擾動信號仍殘存，尚未進入穩定累積期，如圖 2-24、圖 2-25 所示。

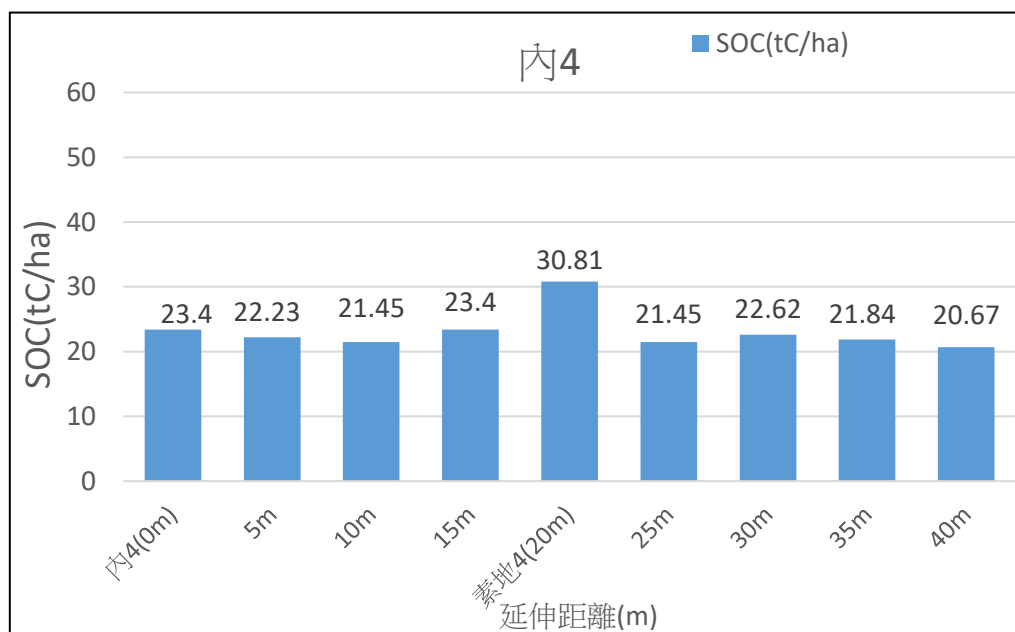


圖 2-20 工區內 4 擾動範圍分析結果



圖 2-21 工區內 4 擾動採樣範圍

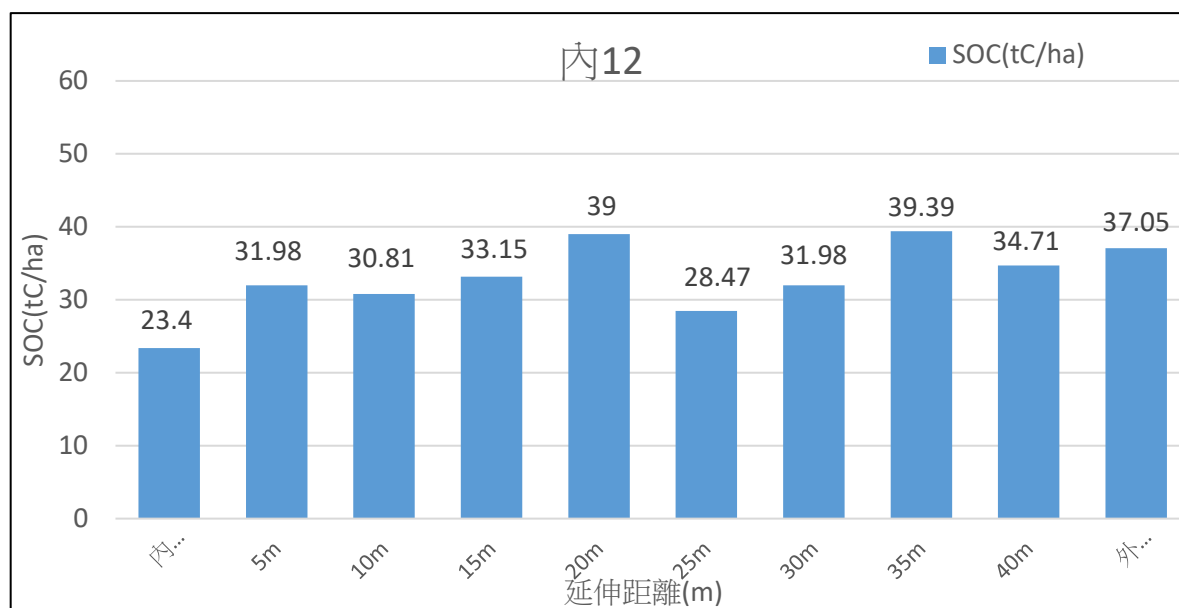


圖 2-22 工區內 12 擾動範圍分析結果



圖 2-23 工區內 12 擾動採樣範圍

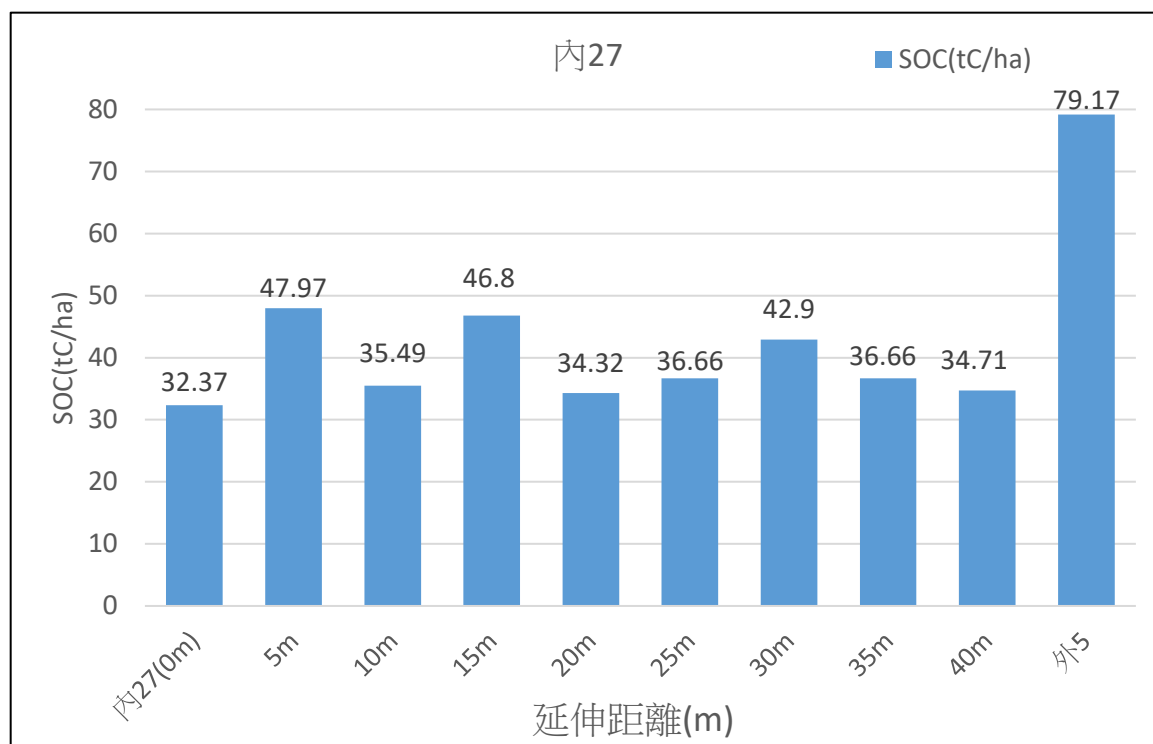


圖 2-24 工區內 27 擾動範圍分析結果

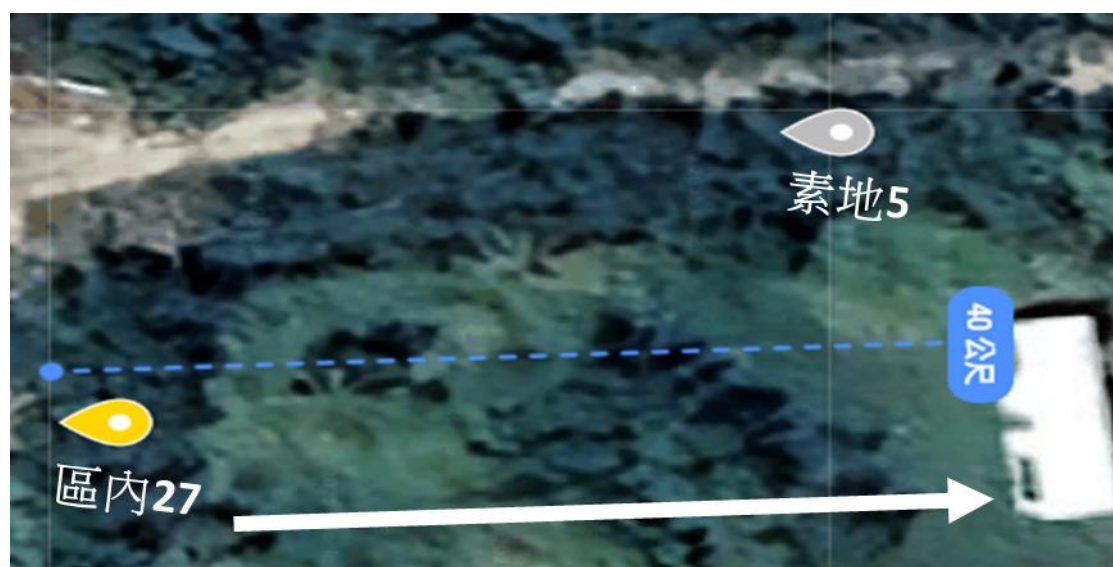


圖 2-25 工區內 27 動採樣範圍

第三節 研擬適用於臺灣崩塌地水土保持工程的減量公式

透過上述兩個章節，了解不同期別完成之預鑄護岸，在不同季節的固碳增匯能力有所差異，尤其秋冬與春夏差異甚大，對大可達 30-47%之多，但是完工越久，差距變化率越小，反之，越是年輕剛完工之工程，因周邊植生仍以草本為主，固碳增匯能力變化大。

為考量工區分四期完成，搭配 104 年已完成之護岸槽框護岸工程，這些雷同的縱向坡面保護措施，故針對施作內容，所產生的工程碳排，覆土固碳及植生增匯的成果建立以下水土保持工程區域固碳增匯評估公式：

$$SWC_{CO_2e} = CR_{CO_2e} + SOC_{CO_2e} + VC_{CO_2e} \quad (2-4)$$

其中 SWC_{CO_2e} 是水保工程固碳增匯總量(ton/ha/year)

CR_{CO_2e} 是工程碳排放量 (ton/ha/year)

SOC_{CO_2e} 是因水保工程施工覆土後土壤固碳量(ton/ha/year)

VC_{CO_2e} 是因水保工程施工後地表所產生水保植物固碳增匯量 (ton/ha/year)

各項計算方式初步規劃如下

一、 CR_{CO_2e} 工程碳排放量

本計畫水土保持工程碳排放量的估算，主要參考兩個資料來源：一是行政院農委會水保局制定的"水土保持工程減碳參考指引(規劃設計階段)"，二是盟鑫工業所做的相關整理。藉由這兩份文件的指導，可以更精準地評估水保工程在施工過程中的碳排放情形，作為未來減碳策略擬定的重要依據。

(一)計算方式(一)：精算法

工程碳排放量可透過詳細價目表的資料進行精算，將每

個工項及材料的數量(活動數據)乘以其對應的碳排放係數，再加總每一個工項及材料的碳排放量，即可獲得工程的總碳排放量(林等 2010)。此計算方式如式 1 所示：

$$\text{碳排放量(kgCO}_2\text{e)} = \text{活動數據} \times \text{排放係數} \quad (2-5)$$

詳細價目表涵蓋了材料費、運輸費、施工費、廢棄物清理、雜項等項目，兼具材料階段、施工和清理的資訊(張等人,2012、盟鑫工業,2024)。因此，透過精算法所獲得的碳排放資訊具有精細、準確及涵蓋面廣的特點(吳等人,2021)。然而，取得所有工項及材料的碳排放係數並不容易，可透過引用其他研究報告之碳排放係數來源或向材料供應商取得相關係數。

(二)計算方式(二)：經費估算法

根據農村水保署 2023 年溫室氣體盤察及管理報告書，針對常見的四種水土保持工程類型，包括野溪治理、崩塌地處理、農塘營造和農路改善等研究，利用前期研究所訂定之回歸統計分析，建立以經費預算推估工程碳排放量的方法，其相關係數如圖 2-20。

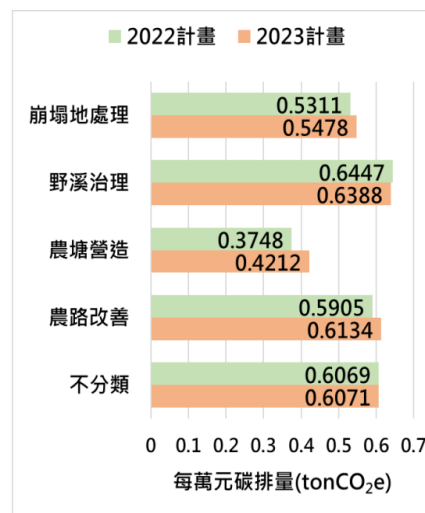


圖 2-26 工程類型之每萬元碳排放量

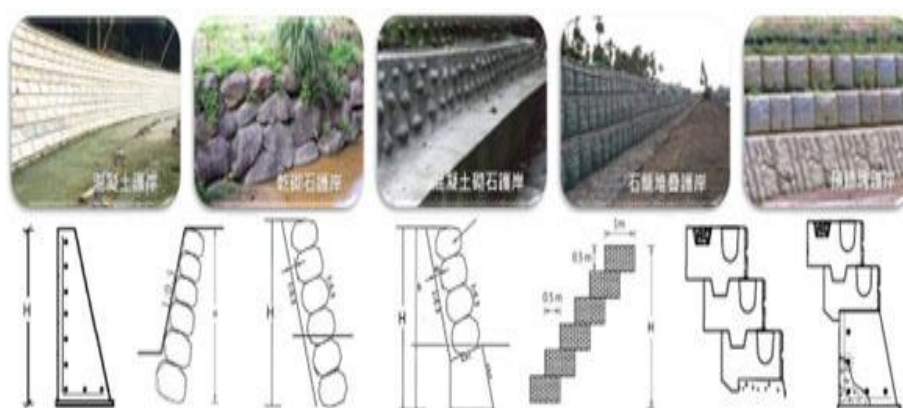
圖片來源：農村水保署 2023 年溫室氣體盤察及管理報告書

(三)計算方式(三)：工程量體估算法

本計畫依據「水土保持防砂設施減碳策略研擬計畫」之文獻資料蒐集了水土保持常見工程設施的資料，如護岸、固床工、跌水工、防砂壩等，建立了依據工程量體(高度、寬度、體積)與碳排放量之間的關係式，用以計算工程碳排放量。圖 2-21 展示了護岸高度與碳排放量的關係，表 2-6 則列出了其他工程設施的碳排放量計算公式。

除了農路以外，其他防砂設施的碳排放量計算僅包含材料階段的碳排放量，並未包含施工及運輸階段的碳排放量。

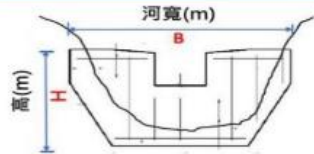
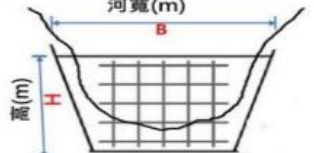
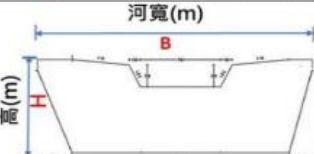
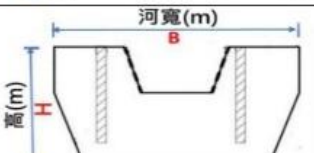
由於材料碳排放量約占工程總碳排放量的 80%，可藉此推算工程總碳排放量。回推得到的工程總排放量接近經費推算法所計算的碳排放量。護岸(以高度為參數)

護岸每進行米碳排量表(kg CO₂e)

高度 (m)	混凝土 護岸	乾砌石護岸		混凝土砌石護岸		混凝土砌石護岸 (有基座*)	石籠堆疊護岸	預鑄塊護岸	預鑄塊護岸
		塊石 (15~40cm)	大塊石 (40~80cm)	塊石 (15~40cm)	大塊石 (40~80cm)	大塊石 (40~80cm)	LxBxH(m) 1x1x1	LxBxH(m) 0.9x0.9x0.45	LxBxH(m) 0.9x0.9x0.45
1	293.85	1.22	8.86	52.42	111.26	293.85	15.54	262.91	293.85
2	587.70	2.44	17.72	104.84	222.52	405.11	31.08	528.77	556.76
3	881.55	3.66	26.58	157.26	333.78	516.37	46.62	794.63	822.62
4	1175.40	4.88	35.44	209.68	445.04	627.63	62.16	1060.49	1088.48
5	1469.55	6.10	44.30	262.10	556.30	738.89	77.70	1326.35	1354.34
平均	881.55	3.66	26.58	157.26	333.78	516.37	46.62	794.63	823.21
減碳 %	基準值	-99.85	-99.98	-82.16	-41.42	-41.42	-94.71	-9.86	-6.62

圖 2-27 不同高度護岸的碳排放量

表 2-6 不同水保工程設施碳排估算模式

形式	標準圖	關係式
A 型固床工 		碳排量 $y=195.76 \cdot B \cdot H$
B 型固床工 		碳排量 $y=248.38 \cdot B \cdot H$
跌水工 		碳排量 $y=297.41 \cdot B \cdot H$
防砂壩 		碳排量 $y=703.53 \cdot B \cdot H$
潛壩 		碳排量 $y=308.62 \cdot B \cdot H$

資料來源：水土保持工程減碳參考指引、盟鑫工業整理

碳排放量評估方式則採用排放係數法作為水土保持工程碳排放之計算方法。本計畫參考農村發展及水土保持署農村水保署 2023 年溫室氣體盤察及管理報告書，排放係數法係利用原物料、燃料、電力之使用量，或材料用量等會產生碳排放量的活動強度，乘以對應的溫室氣體排放係數，再乘上該溫室氣體的全球暖化趨勢值(GWP)，得到二氧化碳排放當量(CO₂e)。其中，全球暖化趨勢是指在一時期內單一溫室氣體值量單位產生之輻射衝擊，相對於相等單位的二氧化碳之倍數，故不同溫室氣體排放量以 GWP 換算後，可一致以二氧化碳當量表示與加總計算。然而目前可蒐集到的排放係數單位，幾乎已轉換為二氧化碳排放當量表示，故計算公式可簡化為：

$$\text{碳排放量(CO}_2\text{e)} = \text{活動數據} \times \text{排放係數} \quad (2-7)$$

以下分項說明利用「排放係數法」，進行原物料、材料及施工機具、運輸、能源消耗、廢棄物處理等碳排放量之計算方法與流程，表 2-6 詳列各種工項的碳排類型和公式，說明如下。

表 2-7 工程碳排計算項目

A、原物料的生產碳排
$\Sigma(\text{工程材料用量} \times \text{工料排放係數})$
B、材料及施工機具運輸排碳
$\Sigma(\text{燃料用量} \times \text{燃料排放係數})$
C、工程施作之能源消耗碳排
$\Sigma(\Sigma \text{機具操作時數} \times \text{機具單位時間能資源耗用量}) \times \text{能資源排放係數}$
D、工區範圍內的碳匯變化量
$\Sigma(\text{林木移除/增加量} \times \text{林木碳儲量係數})$
E、廢棄物的運輸與處置排碳
$\Sigma(\text{廢棄物量} \times \text{處理排放係數})$

資料來源：農村水保署 2023 年溫室氣體盤察及管理報告書

1. 原物料的生產碳排：

原物料的生產碳排計算方法為，工程材料用量乘以工料排放係數。其中，工程材料用量部分，若評估對象為施工中或規畫設計階段的工程，則可參考工程設計資料、施工計劃書及單價分析表取得推估之工料用量。若評估對象為已經竣工的工程，則可由水土保持工程管考系統之工程工單，或工程決算書取得施工階段使用的各項物料數量。求得各品項之單位碳排量，再依工程材料設計之數量進行碳排放量計算，其轉換程序與原則如圖 2-22 所示。

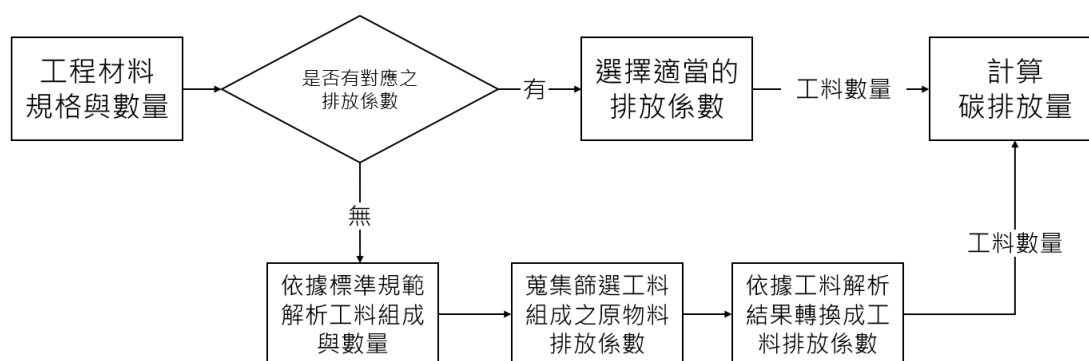


圖 2-28 工程材料碳排放量估算原則

資料來源：農村水保署 2023 年溫室氣體盤察及管理報告書

2. 材料及施工機具運輸碳排：

運輸行為造成碳排放主要源自於運具在運輸過程中的燃料耗用，因此，對於可取得運輸燃料耗用量的運輸活動，可直接以下列方式估算，求得其運輸排碳量。然而，不論過去或現今的工程工項，都沒有將運輸工項獨立計算，或是直接將運輸成本攤在材料費用或雜項工程上，因此若無陳列運輸資訊，則不納入碳排計算。

3. 工程施作之能源消耗碳排：

基於碳足跡計算邊界，此處應列入考量之能資源項目包括：施工機具設備或工區內工廠/廠耗用之燃料、電力、水、氣體等能資源。若評估對象已竣工，則可根據油單、電費單、水費單等單據，統計得到施工階段工區範圍內容各項能資源用量，並輔以對應的能資源排碳係數計算各項碳排放量。但若無能資源用量數據可供運算，則透過工程設計資料、施工計畫書或工程決算書的工程施作量進行估算，如圖 2-23 機具操作碳排放量估算原則所示。

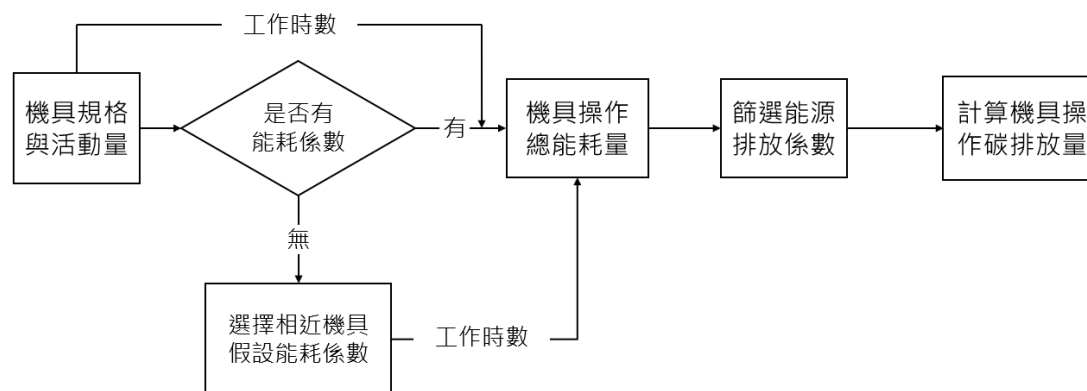


圖 2-29 機具操作碳排放量估算原則

資料來源：農村水保署 2023 年溫室氣體盤察及管理報告書

4.材料及施工機具運輸碳排：

碳匯變化量可簡化以地表植被面積的改變量為活動強度，若植被遭移除代表碳存量減少、植生復育則代表碳存量增加，輔以單位面積或單棵林木碳儲存量係數，進行碳儲存變化量計算。碳匯變化：工程單價分析表中，碳匯變化主要來自土方工程與植生工程。土方工程多會將原土補回或現地攤平，因此不納入盤察範圍；植生工程則多以株設計數量，來計算預計種植的植物數量。

5.廢棄物的運輸與處置排碳：

廢棄物運輸及處理碳排計算的活動強度為廢棄物產生量的後續處理，處理部分則需依據最終處置方式：焚化、掩埋或回收等，選擇適當的廢棄物處理係數進行碳排放量計算。廢棄工料及施工機具運輸排碳的計算方式，可透過直接取得運具油耗量，或藉由運具類別、時速、載運量及運輸距離進行碳排放量計算，但若無油耗記錄或單價可供參考，則不納入計算。

6.碳排係數的引用來源：

根據工程工單內容，蒐集國內外對應的原物料、工料及能資源排放係數，藉以估算工程的碳排量。所蒐集的碳排係數主要源自環保署的產品碳足跡資訊網，環保署的產品碳足跡資訊網提供多種產品的排放係數，例如：建材、能源、金屬製品、水泥製品等材料碳排係數。根據環境保護署 2010 年公告之「溫室氣體核算指引」所載，在量化碳排放量時，應採實務可行下最高準確等級之量化方法，以準確估算排放量。

7.工程碳排精算計算說明：

水土保持常見的施工工項之碳排係數彙整於「水土保持工程減碳參考指引」中，可供工程人員於規畫設計階段，根據工程之實際材料與施工內容計算實際碳排放量，根據項目填入碳排係數和解算碳排放量，工程人員可根據施工工項的項目及說明資訊，填入諮詢的碳排係數，再由數量與碳排係數的相乘值計算碳排放量，即使用「碳排係數法」，其中也包含碳排係數為 0，即不計碳排的工項。不計碳排的工項主要為檢驗、測量與職業環境安全等等，依據 ISO14067:2018 中對於不具實質性貢獻之排放源可不納入盤察範圍的原則，屬於不需要計入碳排的項目因此碳排為 0。部分工項因目前察無碳排係數可供計算(例如機械搬運)，或是無提供實際數量的工項(例如以一式概括)，本指引將之歸納為「未知碳排」，後續則使用未知碳排工項的加總經費透過經費推估法來推估該工項未知工程的碳排放量。

8.工程碳排計算成果：

(1)第二期工程碳排量 730 Ton(292/0.4)+ 第三期工程碳排量 628 Ton(377/0.6)

(2)第一期(出火橋下游野溪整治工程)跟第四期工程(出火橋下游及東門溪上游整治維護工程)因無進行優良農建及金質獎比賽，僅有金安獎，依據工程經費跟碳排關係，二期約為 730 Ton CO₂/3223 萬元=0.227(Ton CO₂/萬元)，三期約為 628 Ton CO₂/2802 萬元=0.224(Ton CO₂/萬元)，回推一期工程碳排 4180 萬元*0.227(Ton CO₂/萬元)=948.86 Ton CO₂，四期工程 992.7 萬元*0.227(Ton CO₂/萬元)=225.34 Ton CO₂

(3)四期總碳排放量估算 948.86+730+628+225.34=2532.2 Ton CO₂/年，若針對治理總區域面積約為 4.35 公頃，換算成果約為 582.12 Ton CO₂/ha/年碳排放量



圖 2-30 出火橋下游野溪整治工程



圖 2-31 出火橋下游野溪整治二期工程



圖 2-32 出火橋下游野溪整治三期工程

二、SOC_{CO2e} 土壤固碳量:

土壤固碳量主要探討因為災害或土砂預防所進行之工程改善所產生的土壤固碳增匯效益，其中 SOC_{CO2e} 在此定義為工程土壤固碳量(Construction Soil Organic Carbon)，主要取決採樣的有機碳百分比及採樣深度。

$$\text{SOC}_{\text{CO2e}} = \text{TOC}\% / 100 \times \text{BD} \times \text{Depth} \times 10000 \quad (2-8)$$

其中 TOC%：土壤有機碳百分比（%）

BD：土壤容重（g/cm³）

Depth：採樣深度（cm）

10000：單位轉換因子(g/cm²)，若將結果換算為 kg/m²，此時整體轉換因子為 10，若轉換因子為 Ton/ha 則為 10

依據上述成果，SOC_{CO2e} 在本區，如表 2-8，工區內採樣，平均 280.93Ton/ha/年，最小 187.2 Ton/ha/年，最大 479.7 Ton/ha/年，而區外素地(未有工程施作地點)平均 413.42 Ton/ha/年，最小 234 Ton/ha/年，最大 1002.3 Ton/ha/年，可見固碳量甚高。

表 2-8 採樣區土壤固碳計算成果

採樣時間	地點	地質	土壤	海拔	RM	KM	採樣點位	工程種類	總有機碳 TOC(C%)	土壤有機碳儲量 SOC(Ton/ha)	生態碳恢復率 CRR	土地利用(現況植生)
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 1	全預鑄塊(乙式護岸)	0.63	245.7	0.188	瓜棚、苦楝
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 2	全預鑄塊(乙式護岸)	0.85	331.5	0.121	苦楝、茄苳
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 3	全預鑄塊(乙式護岸)、石籠保護工程	0.65	253.5	2.180	灌木、相思樹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 4	預鑄塊+堆疊式木柵(甲式護岸)	0.64	249.6	0.047	無花果
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 5	預鑄塊+堆疊式木柵(甲式護岸)	0.79	308.1	0.286	相思樹、七里香
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 6	崩塌處	0.64	249.6	0.289	相思樹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 7	全預鑄塊(乙式護岸)	1.23	479.7	0.130	林投、地毯草
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 8	土布袋木柵工程	0.79	308.1	0.897	相思樹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 9	河道內	0.59	230.1	0.046	相思樹、馬櫻丹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 10	河道內	0.58	226.2	0.116	林投
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 11(新增)	預鑄固床工	1.15	448.5	0.444	田菁、甜根子草
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 12(新增)	全預鑄塊(乙式護岸)	0.66	257.4	0.152	鬼針草、檸檬香茅
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 13(新增)	全預鑄塊(乙式護岸)、掛網植生邊坡	0.84	327.6	0.087	小花蔓澤蘭
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 14(新增)	全預鑄塊(乙式護岸)、掛網植生邊坡	0.63	245.7	0.463	樟樹、棱果榕
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 15(新增)	全預鑄塊(乙式護岸)、掛網植生邊坡	1.02	397.8	0.784	香澤蘭、黃荊
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 16(新增)	預鑄固床工	0.58	226.2	0.046	苦楝、銀合歡
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 17(新增)	預鑄固床工	0.83	323.7	0.121	銀合歡、芒草
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 18(新增)	調節設施工程	0.54	210.6	0.046	無
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 19(新增)	坡腳保護工	0.71	276.9	0.224	馬櫻丹、黃荊

114 年水土保持工程碳匯增益與永續治理策略研發計畫

採樣時間	地點	地質	土壤	海拔	RM	KM	採樣點位	工程種類	總有機碳 TOC(C%)	土壤有機碳儲量 SOC(Ton/ha)	生態碳恢復率 CRR	土地利用(現況植生)
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 20(新增)	拋物線型固床工工程	0.63	245.7	0.560	鬼針草
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 21(新增)	拋物線型固床工工程	0.53	206.7	0.220	無
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 22(新增)	木排樁(甲)式工程	0.57	222.3	0.222	芒草、銀合歡、林投
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 23(新增)	護腳工工程	0.54	210.6	0.222	銀合歡
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 24(新增)	全預鑄塊(乙式護岸)、崩塌處	0.55	214.5	0.081	相思樹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 25(新增)	全預鑄塊(乙式護岸)、崩塌處	0.48	187.2	0.146	相思樹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 26(新增)	護腳工工程	0.63	245.7	0.083	相思樹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 27(新增)	全預鑄塊(乙式護岸)	1.16	452.4	0.447	地毯草
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	內 28(新增)	預鑄固床工	0.73	284.7	0.157	芒草
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 1	素地-果園	2.57	1002.3		馬櫻丹、蓮霧
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 2	素地-林地	1.3	507		金絲竹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 3	素地-樹林	0.79	308.1		九里香
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 4	素地-草皮	0.67	261.3		鬼針草、芒草
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 5	素地-林地	0.97	378.3		相思樹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 6	素地-林地	0.78	304.2		林投
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 7	素地-林地	0.98	382.2		香澤蘭、南歐黃荊
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 8	素地-樹林	0.62	241.8		美洲闊苞菊、構樹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 9	素地-樹林	0.6	234		鬼針草、美洲闊苞菊、馬櫻丹、南歐黃荊
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 10	素地-樹林	0.77	300.3		杜虹花、黃槿
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 11	素地-樹林	1.33	518.7		黃槿、構樹
20250625	屏東縣恆春鎮出火橋		黏板岩新沖積土	約 80m	27597	0.0316	外 12	素地-樹林	1.34	522.6		金絲竹、夜香木

三、固碳增匯公式之驗證與實測比對

本計畫於 114 年度提出之固碳增匯公式，已具備初步架構與運算邏輯；然而，公式若要作為未來各類水土保持工程之評估工具，必須能在不同地質條件、不同工程工法與不同竣工年期下，仍維持穩定且可解釋的預測能力。因此，本階段最重要的任務即為「持續利用現地量測數據」反覆檢驗公式是否合理。換句話說，1.3「固碳增匯公式之驗證與實測比對」的核心目標不是再產生新的參數，而是透過更多案例資料（包含新工區、中期工區與成熟工區）以及多季節的土壤有機碳（SOC）監測成果，回饋到既有公式中，用以驗證其跨區域、跨工程類型與跨時間尺度的適用性，並依據偏差程度進行必要修正，使公式真正具備推廣使用的可靠性與政策決策價值。

為確保本研究提出之「水土保持工程固碳增匯計算公式」具備跨地區、跨工程型式與跨時間尺度之適用性，本節首先進行公式、單位及換算體系之統一化處理。由於工程碳排放資料多以 tonCO_2e 為單位，而土壤有機碳則以 tC/ha 表徵，兩者天然存在本質級別差異，因此本研究採 IPCC 標準 12/44 係數進行 $\text{tonCO}_2\text{e} \rightarrow \text{tonC}$ 轉換，並將所有工程類型排放量資料正規化至 tC/ha ，使其可與土壤碳量（SOC 質量）及植生淨吸碳量進行「同一尺度」之直接比較。同時，為使不同地質條件與不同竣工年期之碳量資料具備一致性，本計畫採三大構面（工程碳排放量＝負值；土砂保持固定量＝正值；植生綠碳＝正值）合併為 $W_Co2e(\text{total})$ 的觀測框架，作為後續交叉驗證的共同母體尺度。本節後續將依照此一共同尺度，對照現地採樣資料、季節別變化以及年期演變趨勢，逐項檢核公式輸出結果之合理性，並在必要時對其參數進

行修正，使公式更貼近臺灣真實的工程條件與自然碳循環行為。

(一)研究目的與驗證策略

為確保所建立之固碳增匯公式具備實務應用性與精度，本章針對「工程碳排放（黃碳）」、「土壤固碳（SOC）」與「植生增匯（綠碳）」三大構面進行公式驗證。透過出火橋等實測資料比對公式推算結果，進一步修正參數、確認模型穩定性，並建立誤差分析與評估指標。

(二)水土保持工程固碳增匯計算公式

1.土砂保持固碳量（黃碳）估算法

土砂保持固碳量（黃碳）之估算法，主要在量化「工程施作後所阻擋住、不再被侵蝕與搬運出去的土壤所含之碳量」。在沒有工程保護的情況下，斷面裸露、坡面裸土或沖蝕路徑會使土粒遭降雨沖蝕並排出系統，形成土壤碳的實質外移與釋放；而當水土保持工程介入，透過護岸、固床工、邊坡保護工等工法將土體重新固定於原位，等同於使原本會被損失的碳重新「固定（保留）」在本地，因此被保留下來的土壤碳量即為黃碳之核心概念。本研究遵循水保署期中成果之定義，以「現地土壤有機碳（SOC）」為直接量測基礎，將各監測點位之土樣換算為土壤碳存量（統一以 30 cm 標準深度、單位 tC/ha），再乘以工程實際涵蓋面積，即可得到該工程之土砂保持固碳總量（Ct）。本方法採用「實測含碳量 × 實際保護土體體積（面積×深度）」換算，確保每一數值均可追溯至實測來源。同時，本研究比較不同完工年期工程之 SOC 差異，觀察工程介入後的「恢復期」土壤碳緩升趨勢，顯示工程除立即阻止土砂流失外，土壤碳亦會隨時間逐步增加；

因此黃碳兼具「當下阻擋」與「後續再碳化」之動態效益。全法透過單位與深度之統一（tC/ha、30 cm），使不同地點、工法與工期之結果可比，並可與工程碳排與植生綠碳進行一致規格之統合評估。

計算式：

1. 點位土壤碳存量（標準深度 30 cm）

$$C_{\text{yellow}} (\text{tC/ha}) = \text{TOC}\% \times \text{BD} (\text{g/cm}^3) \times \text{Depth} (\text{cm}) \times A(\text{ha})$$

(2-9)

2. 植生增匯量（綠碳）估算法

植生增匯量（綠碳）之估法，旨在量化工程完工後「新生或恢復之植被」隨時間所吸存的碳量。本研究以現地氣體通量量測為主軸，直接量得草本層 CO₂ 交換通量，並以通量公式換算植生之年吸碳量(F)，再乘以實際草生覆蓋面積，即可得工程綠碳（單位 tC/ha）。其核心精神為：工程使土體穩定，有利植被重返，植生碳儲量遂逐年累積；綠碳因此屬於「時間累積量」，會隨年限增加而提升。本研究採用可查驗之物理參數(P 大氣壓、V 箱體體積、R 氣體常數、T 溫度、A 面積、Δt 觀測秒數)，使 CO₂ 通量推算具物理可追溯性；將年化之平均吸碳通量（tC/ha/yr）累計至指定年度，即得到綠碳累積量。此估法不以經驗覆蓋率或模型假設為主，而是以現地定點監測之「實測累積值」為依據；所有結果以 tC/ha 表達，與工程碳排與黃碳同尺度可加可比。

3. 年化通量公式：

$$F \text{ (tC/ha/yr)} = [(\Delta C) \times P \times V] / (R \times T \times A \times \Delta t) \\ \times 12.01 \times 36 \times 24 \times 365 \quad (2-10)$$

(F：土壤 CO₂ 排放通量(tC/ha/yr)；ΔC：CO₂ 濃度變化%；P：大氣壓力 (Pa)；V：箱體體積 (m³)；R：理想氣體常數 (8.314 J/mol·K)；T 氣溫 (K)；A 箱底面積 (m²)；Δt：時間 (秒)；12.01 為碳原子量；36、24、365 為單位換算因子，沿用本研究簡報設定。)

4. 工區綠碳 (完工第 Y 年)：

$$C_{\text{green}} \text{ (tC/ha)} = [F \text{ (tC/ha/yr)} \times Y] \quad (2-11)$$

5. 工程碳排 (負碳) 估算法

工程碳排量 (負碳) 估法係量化水土保持工程「施工階段」之碳足跡。本研究採用水保署既行方法，以「工程經費 × 工程類型排放係數」為估算主軸。排放係數為各工程類別每百萬元平均碳排量 (tCO₂e/百萬元)；再以 IPCC 係數 (12/44) 轉換為等碳量 (tC)，以確保所有碳量 (負碳、黃碳、綠碳) 統一於 tC/ha 尺度進行比較與加總。此法直接採主管機關核定之係數，乘以實際經費，即可得到工程「負碳」，具制度一致性、跨年度可連續比較、數據可追溯等優點。最終皆以「工程排放強度 (tC/ha)」呈現，使其能與黃碳、綠碳在同一面積尺度下比較貢獻與抵換，作為工程淨碳效益之基準面。

6. 工程 CO₂ 當量排放

$$E(tCO_2e) = \text{工程經費(百萬元)} \times \text{工程類型排放係數} \left(\frac{tCO_2e}{\text{百萬元}} \right)$$

$$E(tC/ha) = E_C(tC) \times (12/44) / A_-(ha) \quad (2-12)$$

7. 為確保可比性，全部結果一律以 tC/ha 表達，並以同一評估年度 Y 年為基準，計算水土保持工程之淨固碳增匯效益：

$$W_{co2e} \left(\frac{tC}{ha} \right) = C_{yellow} + C_{green} - E \quad (2-13)$$

其中，C_{yellow} 由平均 SOC 乘以保護面積所得；C_{green} 由年化吸碳通量乘以年數與植被覆蓋面積所得；E 由工程經費與排放係數換算之等碳量。依此，三者可在同一尺度整合，作為工程固碳增匯效益與政策扣抵之基礎。

水土保持工程固碳增匯分析結果

(1) 土砂保持固碳量（黃碳）分析結果

以出火護岸案例之年期序列為例，黃碳（tC/ha）在完工二年、三年、四年與十年之點估值分別為 47.19、45.83、54.02、73.81 tC/ha。時間軌跡呈現「初期微幅回落、其後穩定增長、長期顯著累積」之型態：二→三年減少 1.36 tC/ha（屬整地後土體再平衡與覆被尚未完全回復階段）；三→四年增加 8.19 tC/ha（排水導流與護岸效能穩定、細粒土與有機質留置回補）；四→十年再增加 19.79 tC/ha。從完工二年至十年整體淨增 26.62 tC/ha，對應之線性趨勢 $y = 3.5358x + 38.414$ ， $R^2 = 0.9695$ ，顯示以年期為自變

數之解釋力極高且平均年增速約 $+3.54 \text{ tC/ha/yr}$ ；若以端點差/年距估算之平均年增速 $+3.33 \text{ tC/ha/yr}$ ，與回歸斜率相近，彼此驗證。圖示誤差棒（標準差或信賴區間）於前期（完工二～三年）部分重疊，說明早期估值仍受擾動影響；惟至完工十年與四年相比差距已明顯擴大，支持「中後期累積具有統計顯著性」之判讀。就機制解釋採與觀測一致之最低假設：工程降低坡面剪應力與逕流能量，抑制沖蝕與細顆粒（承載 SOC 之主要介質）外移；同時植被恢復帶動凋落物輸入與團粒穩定度提升，使土壤有機碳逐年緩升。綜合而言，黃碳成效以時間累積為核心特徵，早期（ ≤ 3 年）變動度偏高、增益有限；中期（4～7 年）開始穩定轉正；長期（ ≥ 10 年）可形成顯著且可量化之固碳存量。此結果與回歸參數、年期差分及不確定度表徵互相吻合，可作為後續與工程碳排（負碳）與植生增匯（綠碳）抵換評估的黃碳基準，分析結果如表 2-9，圖 2-34 所示。

表 2-9 出火護岸-土砂保持固碳量(黃碳)數據

出火護岸-土砂保持固碳量(黃碳)										
竣工年	完工 一年	完工 二年	完工 三年	完工 四年	完工 五年	完工 六年	完工 七年	完工 八年	完工 九年	完工 十年
$C_{\text{yellow}}(\text{tC/ha})$		47.1	45.8	54.0						73.8

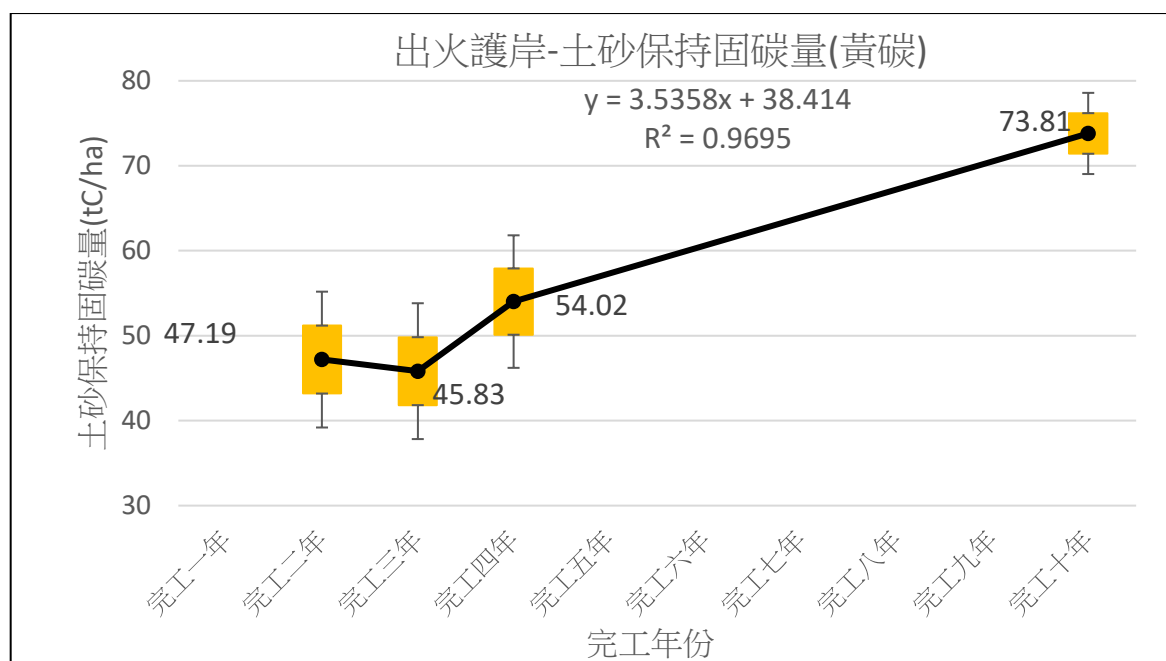


圖 2-34 出火護岸-土砂保持固碳量(黃碳)

2. 植生增匯量（綠碳）分析結果

出火護岸案例之綠碳（tC/ha）在完工二年、三年、四年及十年分別為 2.64、4.71、6.57、26.38 tC/ha，整體呈現高度時間累加型態，且增幅遠大於黃碳的前期變動幅度。由回歸式 $y = 3.0473x - 4.4005$ （ $R^2 = 0.9932$ ）可見，植生增匯之累積量與時間呈近線性正成長，且解釋力極高，幾乎所有變異可由「完工年期」解釋。本研究亦觀察到：完工 2~4 年之綠碳仍相對低，但至第 10 年綠碳已大幅抬升至 26.38 tC/ha，相較完工 2 年上升 +23.74 tC/ha。此數據意義清楚：工程介入後，護岸穩定 + 土體固定提供了植被回返的物理條件，而植被生長並非瞬間到位，而是隨著土壤涵養、表土再生成、有機質累積、根系增密等生態機制逐年推升，形成「遞增型」碳匯貢獻。特別是在 10 年期，誤差棒較長，代表現地植被量（與碳吸存）開始受地形微差、局部植被覆蓋差異、光照與土層深度差異所影響，此亦符合真實自然系統之空間異質

性。綜整而言，本研究之綠碳證據清楚顯示：「工程不是只阻止土流失，而是把系統從『裸土 → 穩定 → 植被重返』帶向一個可持續增加碳吸存的動態軌跡」，而且此軌跡是可量測、可查驗、具時間累積特性之「真實增匯」，是水土保持工程在生態系統層級上最具長期效益之固碳貢獻來源，分析結果如表 2-10，圖 2-35 所示。

表 2-10 出火護岸-植生增匯量(綠碳)數據

出火護岸-植生增匯量(綠碳)										
竣工年	完工一年	完工二年	完工三年	完工四年	完工五年	完工六年	完工七年	完工八年	完工九年	完工十年
Cgreen(tC/ha)		2.63	4.70	6.57						26.3

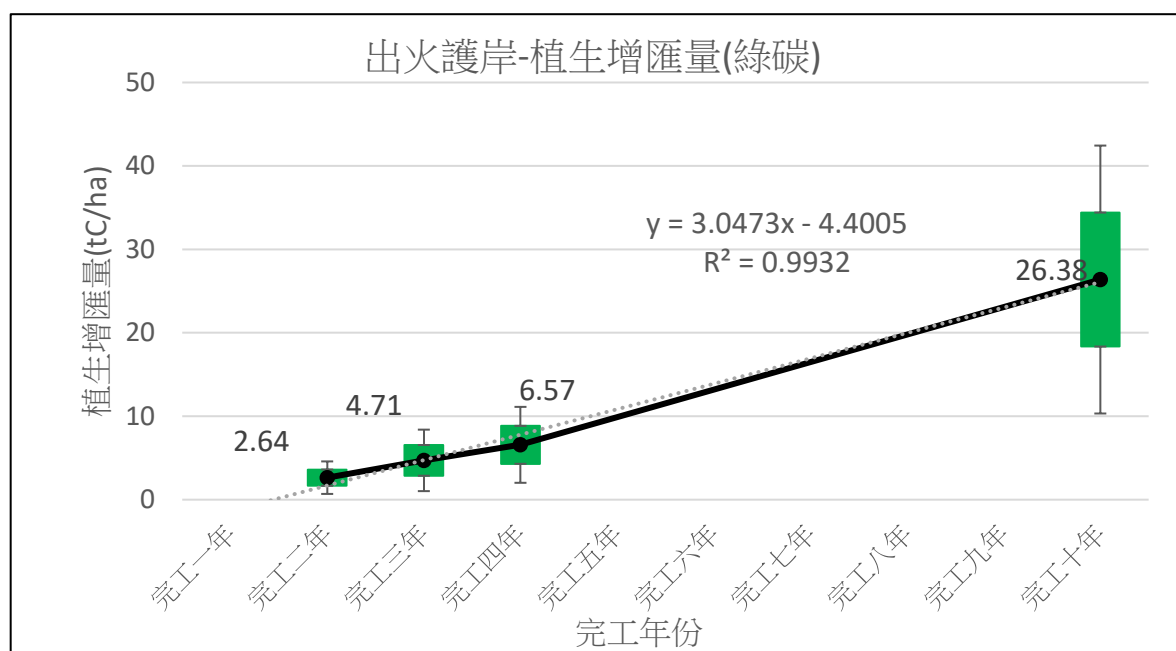


圖 2-35 出火護岸-植生增匯量(綠碳)

3. 工程碳排（負碳）分析結果

出火護岸工程之工程碳排（tC/ha）分別為完工一年 95.09、完工二年 110.27、完工四年 108.16、完工十年 104.51，可見不同年度工程施作之碳排放強度大致落在 95–110

tC/ha 之範圍內，整體變動幅度相對有限，顯示工程排放量主要受工程型態與工程經費規模所控制，並不會因後續時間推移而變動（即負碳為「一次性、施工階段立即產生」）。換言之，工程碳排是水土保持工程固碳增匯評估中的「初始負值」，是工程在開始時必須先承擔的碳成本。此特性與黃碳、綠碳完全相反：黃碳與綠碳是「隨時間逐年增加」的累積型效益，而工程碳排則是「瞬間支出、固定不再增加」的初始排放。

本研究採「工程經費 × 排放係數」推算工程 CO₂e，再使用 IPCC 12/44 將 CO₂e 轉換為等碳量 (tC)，最後以實際工程覆蓋面積換算為 tC/ha，因此工程負碳結果具備高度制度一致性與可比性。此一致化計算方式可確保不同年度、不同工程型態、不同區域案例之工程初始排放強度皆可直接比較，並能與後續之土砂保持固碳（黃碳）與植生增匯（綠碳）於同一尺度（tC/ha）下進行扣抵與評估，作為計算工程淨碳效益的基礎起點，分析結果如表 2-11，圖 2-36 所示。

表 2-11 出火護岸-工程排放量數據

出火護岸-工程排放量										
竣工年	完工一年	完工二年	完工三年	完工四年	完工五年	完工六年	完工七年	完工八年	完工九年	完工十年
E(tC/ha)		95.09	110.27	108.16						104.51

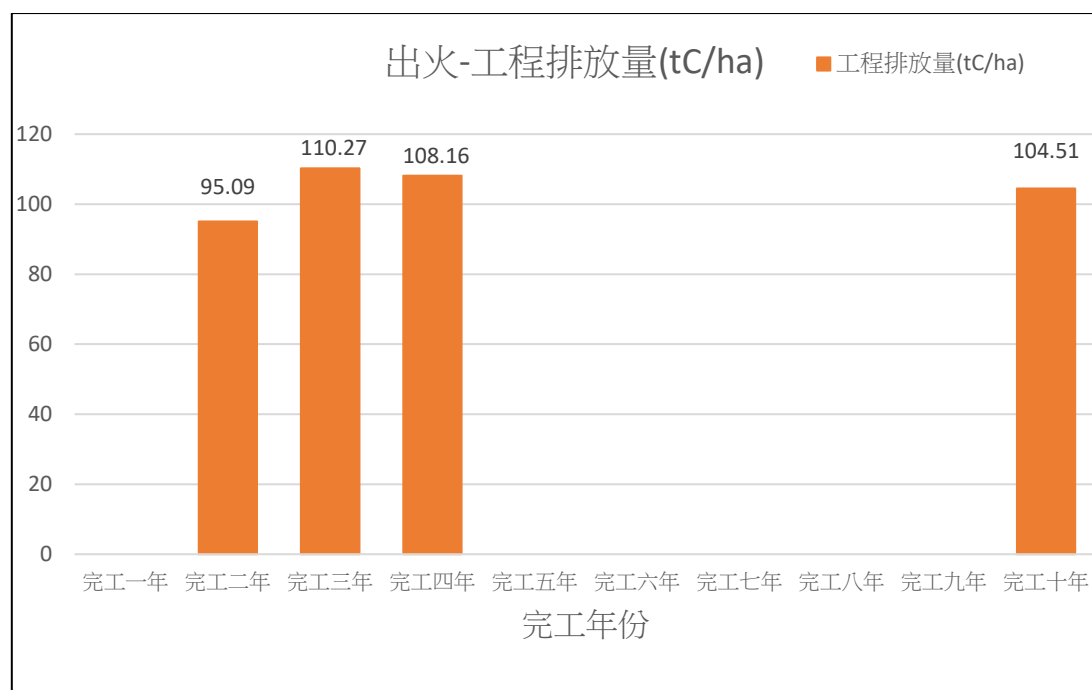


圖 2-36 出火護岸-工程排放量(tC/ha)

4. 水土保持工程固碳增匯效益(WCO_{2e}) 分析結果

本研究最終將「工程碳排（負碳）」、「土砂保持固碳（黃碳）」及「植生增匯（綠碳）」三者整合，進行工程完工後之淨碳效益 WCO_{2e} 評估。結果顯示，出火護岸工程在完工初期（完工一年、完工二年、完工四年）均呈現顯著負值（分別約 -45.26、-59.74、-47.58 tC/ha），代表當工程剛完工時，綠碳及黃碳效益尚未累積到足以抵銷施工時的碳排放，因此整體仍為「淨排放階段」。但隨時間推移，土體逐漸穩定（黃碳持續增加）以及植被逐年恢復（綠碳累積明顯上升），使得淨碳效益快速朝正向改善。到了完工十年時，WCO_{2e} 僅剩約 -4.32 tC/ha，幾乎完全接近「碳持平點」，顯示工程後期已具明顯抵換能力，幾乎可完全回補初始碳排。

回歸線 ($y = 6.2456x - 68.889$, $R^2 = 0.866$)，顯示 WCO_{2e} 每增加一年約可提升 6.25 tC/ha 的淨碳效益，此項趨勢意義重大，代表水土保持工程不是短期救災措施，而是具備「長

期碳補償能力」之環境投資。換言之，工程一開始雖有負碳，但只要工程品質穩定、維持植生恢復與土體穩固，10 年內即可實現逐步脫離負排放，並逼近碳中和狀態，顯示水土保持工程確實有能力成為「長期固碳補償型設施」，而非單純耗能排碳的傳統工程建設思維，分析結果如表 2-12，圖 2-37 所示。

表 2-12 出火護岸-水土保持工程固碳增匯效益(WCO₂e)數據

出火護岸-水土保持工程固碳增匯效益(WCO ₂ e)										
竣工年	完工一年	完工二年	完工三年	完工四年	完工五年	完工六年	完工七年	完工八年	完工九年	完工十年
Cyellow(tC/ha)		47.1	45.8	54.0						73.8
Cgreen(tC/ha)		2.63	4.70	6.57						26.3
E(tC/ha)		95.09	110.27	108.16						104.51
WCO ₂ e(tC/ha)		-45.25	-59.73	-47.57						-4.3170

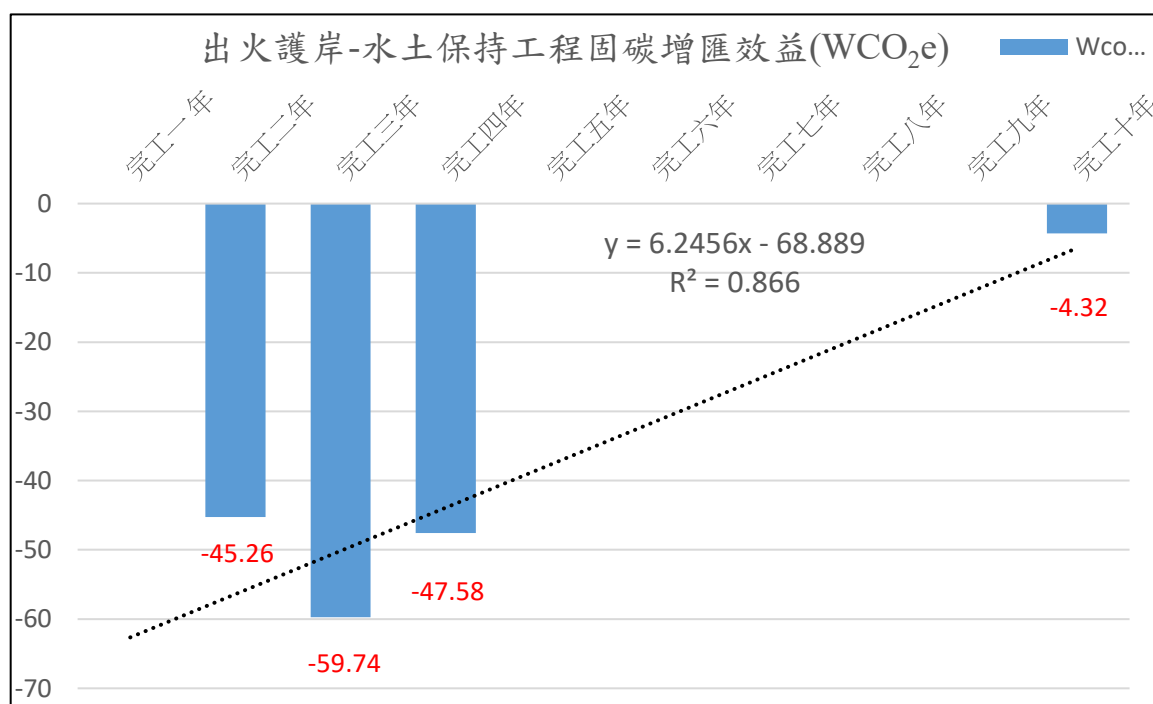


圖 2-37 出火護岸-水土保持工程固碳增匯效益(WCO₂e)

三、VC_{CO₂e} 植生增匯量：

依據水土保持工程常見木本灌木植物和草本植物植生進行比較，如表 2-13，說明了常見的灌木植物和草本植物在固土、防止水土流失方面的特性。再依據根系生長特性、根系生長長度、包覆土壤能力和土壤固碳能力做比較，詳細分析了各種常見植物的根系特點及其對土壤固碳的影響。

表 2-13 常見水土保持植生植物

木本植物：	草本植物
柳樹 (Salix spp.)	蓮華草 (Iris spp.)
水青岡 (Liquidambar spp.)	黃花九重葛 (Hemerocallis spp.)
山櫻花 (Prunus serrulata)	翅子草 (Stipa spp.)
刺楸 (Zanthoxylum simulans)	石竹 (Dianthus spp.)
紫薇 (Bauhinia spp.)	莎草 (Carex spp.)
大花梨 (Eriobotrya japonica)	狗尾草 (Pennisetum spp.)
茶樹 (Camellia sinensis)	菅 (Miscanthus spp.)
山桃 (Malus baccata)	鳶尾草 (Agropyron spp.)
紅榨樹 (Euonymus alatus)	水仙 (Narcissus spp.)
山楂 (Crataegus pinnatifida)	繡球花 (Hydrangea spp.)

A. 灌木植物

- (A) 相思樹 (Acacia confusa)：根系發達，可深入土壤深層，固土能力強。
- (B) 烏柏樹 (Ficus pumila)：根系發達，枝葉茂盛，可有效覆蓋土壤，防止水土流失。來
- (C) 月桂 (Cinnamomum cassia)：根系較淺，但枝葉茂盛，可有效攔截雨水，減少土壤沖刷。
- (D) 九重葛 (Euphorbia pulcherrima)：根系較淺，但枝葉茂盛，可有效覆蓋土壤，防止水土流失。
- (E) 扶桑花 (Hibiscus rosa-sinensis)：根系較淺，但枝葉茂盛，可有效覆蓋土壤，防止水土流失。

- (F)山芙蓉 (*Hibiscus mutabilis*): 根系較淺, 但枝葉茂盛, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。
- (G)杜鵑花 (*Rhododendron formosanum*): 根系發達, 可深入土壤深層, 固土能力強。
- (H)茶花 (*Camellia japonica*): 根系發達, 可深入土壤深層, 固土能力強。
- (I)梔子花 (*Gardenia jasminoides*): 根系較淺, 但枝葉茂盛, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。
- (J)桂花 (*Osmanthus fragrans*): 根系發達, 可深入土壤深層, 固土能力強。
- (K)金銀花 (*Lonicera japonica*): 根系發達, 枝葉茂盛, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。
- (L)炮仗花 (*Bougainvillea spectabilis*): 根系發達, 枝葉茂盛, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。
- (M)紫藤 (*Wisteria sinensis*): 根系發達, 枝葉茂盛, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。
- (N)牽牛花 (*Ipomoea purpurea*): 根系較淺, 但枝葉茂盛, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。
- (O)蔦蘿 (*Hedera helix*): 根系發達, 可深入土壤深層, 固土能力強。

B. 草本植物

- (A)高狐草 (*Setaria viridis*): 根系發達, 可深入土壤深層, 固土能力強。
- (B)黑麥草 (*Lolium perenne*): 根系發達, 耐寒性強, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。

(C)假儉草 (*Eragrostis curvula*): 根系發達, 耐旱性強, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。

(D)百喜草 (*Paspalum notatum*): 根系發達, 耐鹽性強, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。

(E)野莧菜 (*Amaranthus viridis*): 根系較淺, 但繁殖能力強, 可快速覆蓋土壤, 防止水土流失。

(F)馬齒莧 (*Portulaca oleracea*): 根系較淺, 但繁殖能力強, 可快速覆蓋土壤, 防止水土流失。

(G)白茅 (*Imperata cylindrica*): 根系發達, 耐旱性強, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。

(H)蘆葦 (*Phragmites australis*): 根系發達, 喜溼性, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。

(I)芒草 (*Miscanthus floridulus*): 根系發達, 耐旱性強, 可有效覆蓋土壤, 防止水土流失。

(J)劍竹 (*Phyllostachys pubescens*): 根系發達, 固土能力強, 可有效防止坡面滑動。

(K)桂竹 (*Bambusa multiplex*): 根系發達, 固土能力強, 可有效透過團力防止坡面滑動

另依據根系生長特性、根系生長長度、包覆土壤能力和土壤固碳能力做比較如表 2-14:

表 2-14 常見水土保持植生植物比較

植物	根系生長特性	根系生長長度	包覆土壤能力	土壤固碳能力
柳樹	深根系	深達數 m	強	中等
水青岡	淺根系	深度約 1-2m	強	中等
山櫻花	中等根系	深度約 1-2 m	中等	低
刺楸	淺根系	深度約 1-2 m	中等	低

植物	根系生長特性	根系生長長度	包覆土壤能力	土壤固碳能力
紫薇	淺根系	深度約 1-2 m	強	低
大花梨	淺根系	深度約 1-2 m	強	中等
茶樹	中等根系	深度約 1-2 m	中等	低
山桃	淺根系	深度約 1-2 m	強	中等
紅榨樹	中等根系	深度約 1-2 m	中等	中等
山楂	淺根系	深度約 1-2 m	強	中等
蓮華草	地下莖	深度約 1 m	強	低
黃花九重葛	攀緣性根系	深度約 1 m	強	低
翅子草	地下根莖	深度約 1 m	強	中等
石竹	淺根系	深度約 50-60cm	中等	中等
莎草	匍匐性根系	深度約 50-60 cm	強	中等
狗尾草	地下根莖	深度約 1m	強	低
菅	地下莖	深度約 1m	強	低
鳶尾草	淺根系	深度約 50-60 cm	中等	中等
水仙	淺根系	深度約 50-60 cm	弱	低
繡球花	淺根系	深度約 50-60 cm	強	中等

綜合以上，參考下表 2-11~表 2-12 為本區目前工程總類及周邊植物分布，並依據後續植生直徑及高度，代入水土保持樹種儲碳參數資料庫(<https://tech.ardswc.gov.tw/Education/PlantCarbon>)，可得

$$\text{單株碳含量(C)} = \text{體積(V)} \times \text{木材密度}(\rho) \times \text{植物碳含量(CF)}$$

$$\text{體積(V)} = f(\text{胸高直徑(DBH)} \times \text{樹高(H)})$$

$$\begin{aligned} C &= \text{AGB} \times \text{BEF} \times (1+R) \times \text{CF} \\ &= 0.0673 \times (\rho \times \text{DBH}^2 \times H)^{0.976} \\ &\quad \times \text{BEF} \times (1+R) \times \text{CF} \end{aligned} \quad (2-14)$$

- C：單儲碳量(kg)
- AGB：地上部生物量(kg)
- BEF：生物量擴展係數(本研究採計係數為 1)
- R：根莖比(本研究採計數為 0.24)
- CF：碳含量(%)

- DBH：胸高直徑(cm)(所有的直徑皆須 ≥ 5 cm(Chave et al.,2014))
- H：樹高(m)
- p：木材密度(g/cm³)

海拔	環境	樹種	DBH(cm)	樹高(m)								
低	農村		5	2	查詢	匯出CSV						
海拔	環境	樹種	科名	學名	標準	密度(g/cm³)	碳含量(%)	DBH(cm)	樹高(m)	生物量(kg)	儲碳量(kg)	
低	農村	山芙蓉	Malvaceae	Hibiscus taiwanensis	特青種	0.46	46.27	5	2	1.42	0.82	
低	坡地、崩塌地、農村、溪水、海岸	相思樹	Fabaceae	Acacia confusa	原生種	0.77	47.17	15	2	20.27	11.85	
低	農村、溪水、海岸	銀合歡	Fabaceae	Leucaena leucocephala	入侵種	0.68	48.44	15	2	18.04	10.83	

現地優勢植物：

(A)喬木→銀合歡、相思樹、山柚

(B)灌木→林投、馬纓丹、香澤蘭

(C)草本→象草、大黍、咸豐草

以目前這些區域內之總固碳量，每株植物約 0.52kg/年-11.85 kg/年，總結來看，根據現場工程植生以及原生植物初步調查，四期工程合計種植約 15800 株植物，依據每株最少 0.52 kg/年計算，最多 11.85 kg/年計算，植生綠碳增匯量約為 8216-187230 kg/年，約為 8.216 -187.23 Ton/年。

根據上述成果，四期工程碳排加上土壤固碳量以及植生增匯成果可以得以下出火集水區工程生命週期故碳增匯量：

1. CR_{CO₂e} 工程碳排放量：四期總碳排放量估算，為負值，
948.86+730+628+225.34=2532.2 Ton CO₂/年

2. SOC_{CO₂e} 土壤固碳量：平均 280.93Ton/ha/年，最小 187.2 Ton/ha/年，最大 479.7 Ton/ha/年，面積 4.3ha 最小 804.96 Ton/ha/年，最大 2062.71 Ton/ha/年

3. VC_{CO₂e} 植生增匯：8.216 -187.23 Ton/年

$$4. SWC_{CO_2e} = CR_{CO_2e} + SOC_{CO_2e} + VC_{CO_2e}$$

$$\text{最小} -2532.2 + 804.96 + 8.216 = -1719.024 \text{ Ton CO}_2/\text{年}$$

$$\text{最大} -2532.2 + 2062.71 + 187.23 = -282.27 \text{ Ton CO}_2/\text{年}$$

表 2-15 屏東恆春出火橋下游野溪整治工程採樣點植生分布(一)

位置		屏東縣恆春鎮出火橋下游																												
		更早期 (104 年)			第一期 (110 年)			第二期 (111 年)									第三期 (112 年)								第四期 (113 年)					
工程竣工年		完工約十年			完工約四年			完工約三年									完工約二年								完工約一年					
		內 7	內 27	內 28	內 1	內 2	內 17	內 3	內 4	內 8	內 11	內 12	內 13	內 14	內 15	內 16	內 19	內 5	內 6	內 20	內 21	內 22	內 23	內 24	內 25	內 26	內 9	內 10	內 18	
設計 植生	瓜棚				✓																									
	烏柏					✓																								
	苦楝				✓	✓																								
	無患子					✓																								
	茄苳					✓																								
	九芎					✓																								
	海欖果					✓		✓																						
	七里香	✓	✓						✓	✓									✓	✓					✓	✓				
	烏柑仔	✓	✓						✓	✓									✓	✓					✓	✓				
	朱槿	✓	✓						✓	✓									✓	✓					✓	✓				
	樹蘭	✓	✓						✓	✓									✓	✓					✓	✓				
	林投							✓																						
	黃槿							✓		✓	✓		✓	✓	✓		✓													
	山芙蓉							✓			✓		✓	✓	✓		✓													
	杜虹花							✓			✓		✓	✓	✓		✓													

表 2-16 屏東恆春出火橋下游野溪整治工程採樣點植生分布(二)

位置		屏東縣恆春鎮出火橋下游																											
工程竣工年	更早期 (104 年)			第一期 (110 年)			第二期 (111 年)									第三期 (112 年)									第四期 (113 年)				
	完工約十年			完工約四年			完工約三年									完工約二年									完工約一年				
	內 7	內 27	內 28	內 1	內 2	內 17	內 3	內 4	內 8	內 11	內 12	內 13	內 14	內 15	內 16	內 19	內 5	內 6	內 20	內 21	內 22	內 23	內 24	內 25	內 26	內 9	內 10	內 18	
	長穗木																												
	噴植草(薄層) 百慕達草、類地毯草、百喜 草、百日草、假儉草								✓																				
	雜林	✓	✓																			✓							
	稻草蓆及撒播草種						✓	✓									✓												
	無			✓							✓				✓				✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓
現況 植生	瓜棚				✓																								
	苦練				✓	✓																							
	無花果							✓																					
	林投	✓																											
	相思樹						✓		✓									✓					✓	✓	✓				
	草	✓	✓														✓												
	灌木(?)						✓																						
	無			✓							✓				✓				✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓

第三章 拓展水土保持工程固碳量調查點位並持續建置自然碳匯地圖

一、計畫區域選擇

本區之選擇主要考量不同地植，土壤種類及 RM、KM 數植，除了延續先前 113 年採樣之桃園復興、南投水里、台南及花蓮玉里等點位，本次參考過去優良農件及金質獎工程，且年份超過 3 年以上之工程點位，且與前述四者地質土壤條件不同者進行採樣。

表 3-1 北中南東自然碳匯地圖採樣點

位置	工程名稱	竣工年
北	高遶本生橋下游野溪治理二期工程	110 年(完工 4 年)
北部(新增)	三層坪農塘及周邊綠環境營造工程	110 年(完工 4 年)
中部	111 年度巒大區第 25、26 林班 坑溝整治工程	111 年(完工 3 年)
中部(新增)	獅潭鄉大東勢溪大東勢尾野溪整治工程	108 年(完工 6 年)
南部	虎園溪(新化林場段)整治二期工程	111 年(完工 3 年)
南部(新增)	潮州 17 林班坑溝土砂防治工程	110 年(完工 4 年)
東部	玉里鎮安通溫泉聚落崩塌地處理工程	110 年(完工 4 年)
東部(新增)	太平坑魯瓦南橋上游第二期治理	109 年(完工 5 年)

二、採樣方法

參考 2.1 結方式，包含地下 30cm 土壤固碳量，地表與土壤交界面以及空氣 2m 碳排放量，並依據不同地質、土壤及土壤沖蝕條件進行資料採樣與建構，逐漸完成全台不同樣區，工程碳排與顧碳增匯的成效展示。

三、採樣成果分析

由圖 3-1~圖 3-8 及表 3-1~表 3-2 分別為參考前期 113 年工程碳地圖所採樣三次樣本的區域持續完整建構一年四季的工程顧碳增匯的成效展示，可以獲得以下幾點說明：

- (一)由檢測結果北部地區雖然位處高程交高之野溪，相對溼度與蔭與條件較高，有機碳含量僅為 1.4 左右，但從各採樣點四次檢測成果，有機碳恢復率皆超過 100%，綜合地表碳排放成果，可以發現生態碳恢復率也相對提升不少，尤其 113 年底在內四之成效最大，達 600%以上，考量周邊植生豐富，緯度及高程高，整體環境適合植生生長，生態碳恢復率極高，木山層，主要為石英砂岩及頁岩組合之沉積岩區，尤其內四跟內五。
- (二)本區多半屬於白冷層，破碎之片岩區，由檢測結果，TOC 在春季較高，約為 1.8%，本區自 113 年至今年 114 年六月前，降雨較少，整體有機碳恢復率僅有內 1 跟內 5 有超過 100%，其餘僅有 70-85%，但整體=生態碳恢復率以內一跟內五有超過 140-230%。
- (三)本區為新化林場旁野溪護岸，採用乾砌石為主，為崎頂層，主要底部皆為泥岩，因此有機碳含量極低，周邊植生只要以草本人工栽植，生長狀況不是很理想，整體有機碳含量僅有 0.3-0.48%，有機碳恢復率表現 50-70%，生態碳恢復率起伏受空氣碳及溫度影響。
- (四)東部地區以屋海岸山脈八里灣層之安通泥岩區為採樣對象，整體有機碳含量在初期也有 1.5%以上，但後期受到泥岩特質影響，加上周邊施作縱向排水措施，坡面僅有草本植物，初步顧碳增匯成效有限，有機碳恢復率在去年底因為颱風豪雨影

響，雖有明顯一度提升超過 120-130%，但是很快凸顯泥岩特性，有機碳恢復率相較周邊未開發區域低僅有 40-50%。

表 3-2 北中南東四區四期採樣區地質土壤特性

位置	北部	中部	南部	東部
	桃園市 復興區 高遠本生橋	南投縣 水里鄉 益則坑	臺南市 興化區 新化林場	花蓮縣 玉里鎮 安通溫泉
地質	木山層	白冷層	崎頂層	八里灣層
土壤	黃灰色崩積 土新沖積土	頭社壤土	砂岩頁岩 非石灰性 新沖積土	無資料
海拔	約350m	約450m	約50m	約350m
RM	16028	29022	23528	15896
KM	0.04097	0.04067	0.05246	0.04371

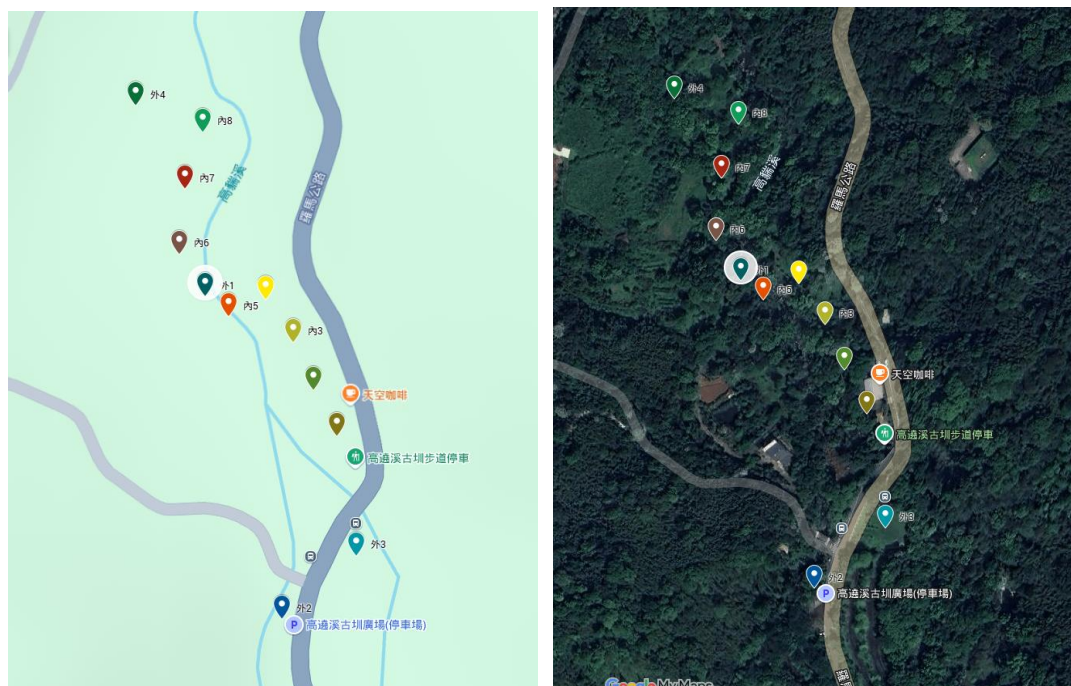


圖 3-1 北部桃園復興高遠本生橋採樣點位置及空照圖

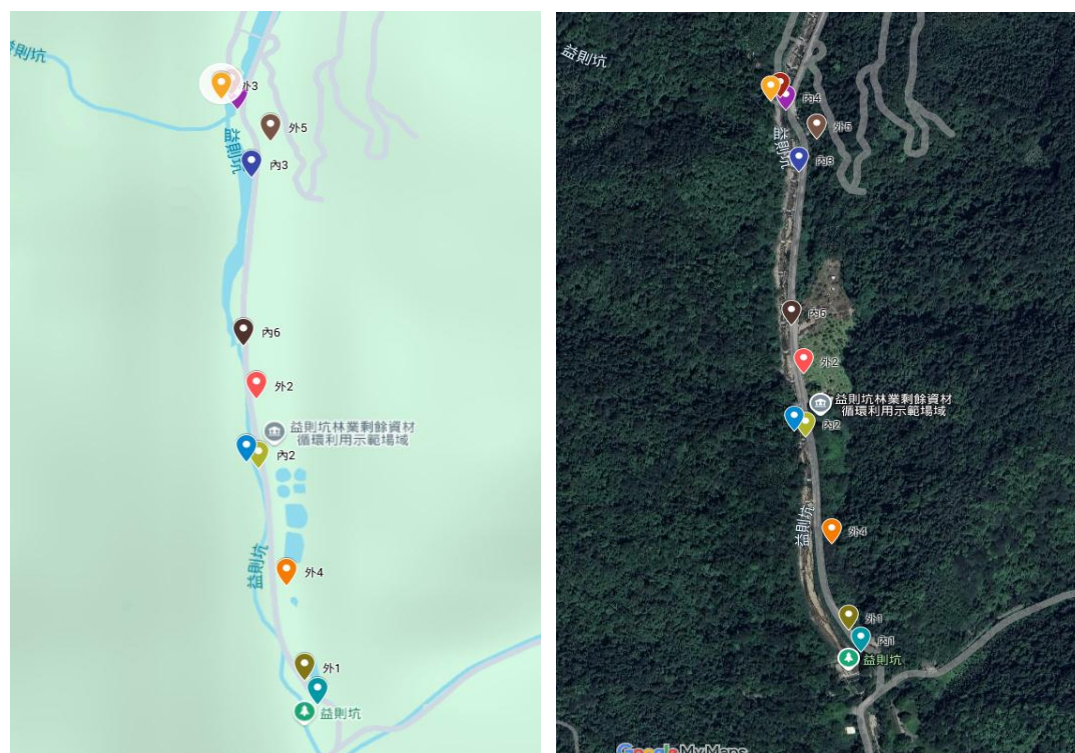


圖 3-2 中部南投水里益則坑採樣點位置及空照圖

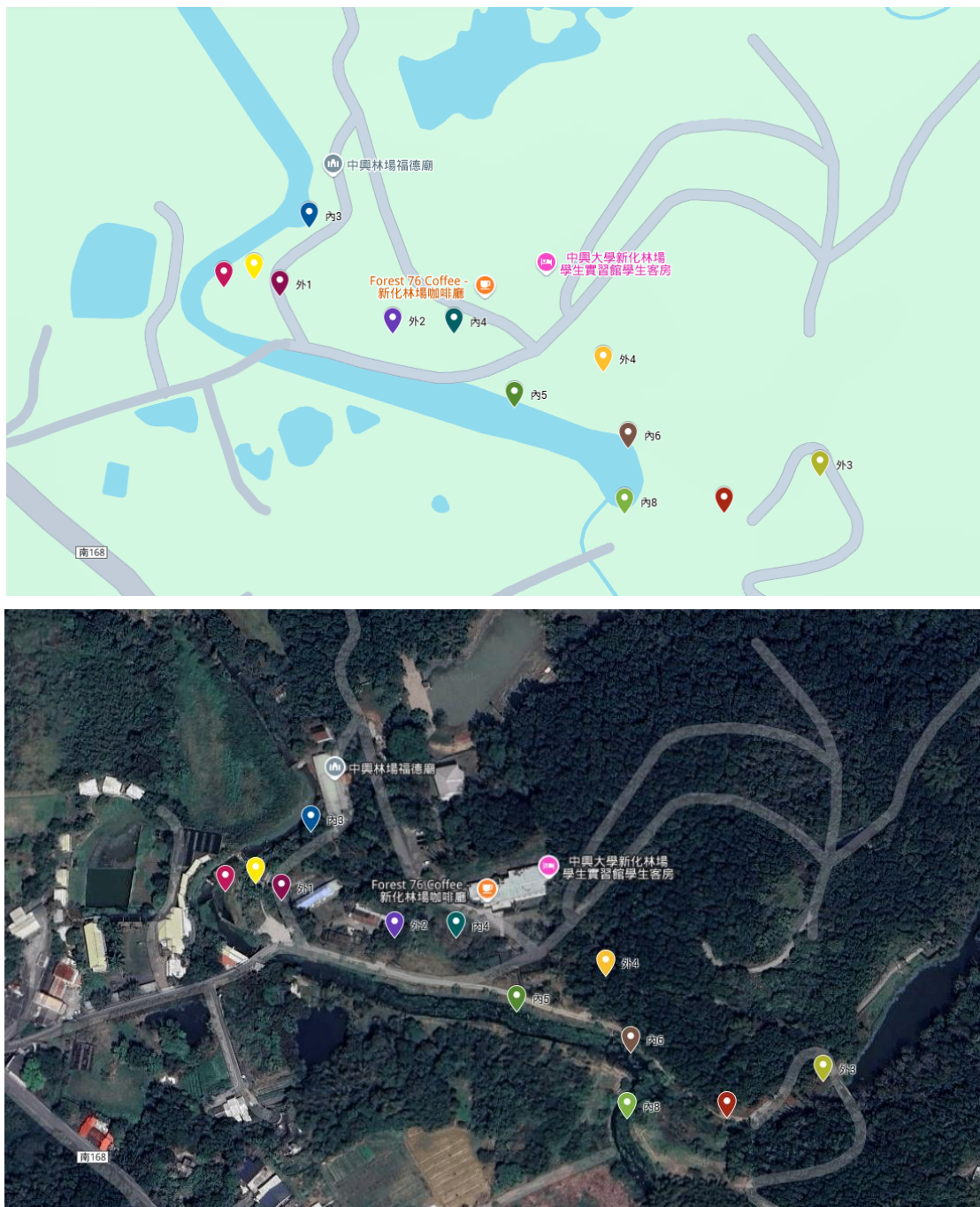


圖 3-3 南部台南興化新化林場採樣點位置及空照圖

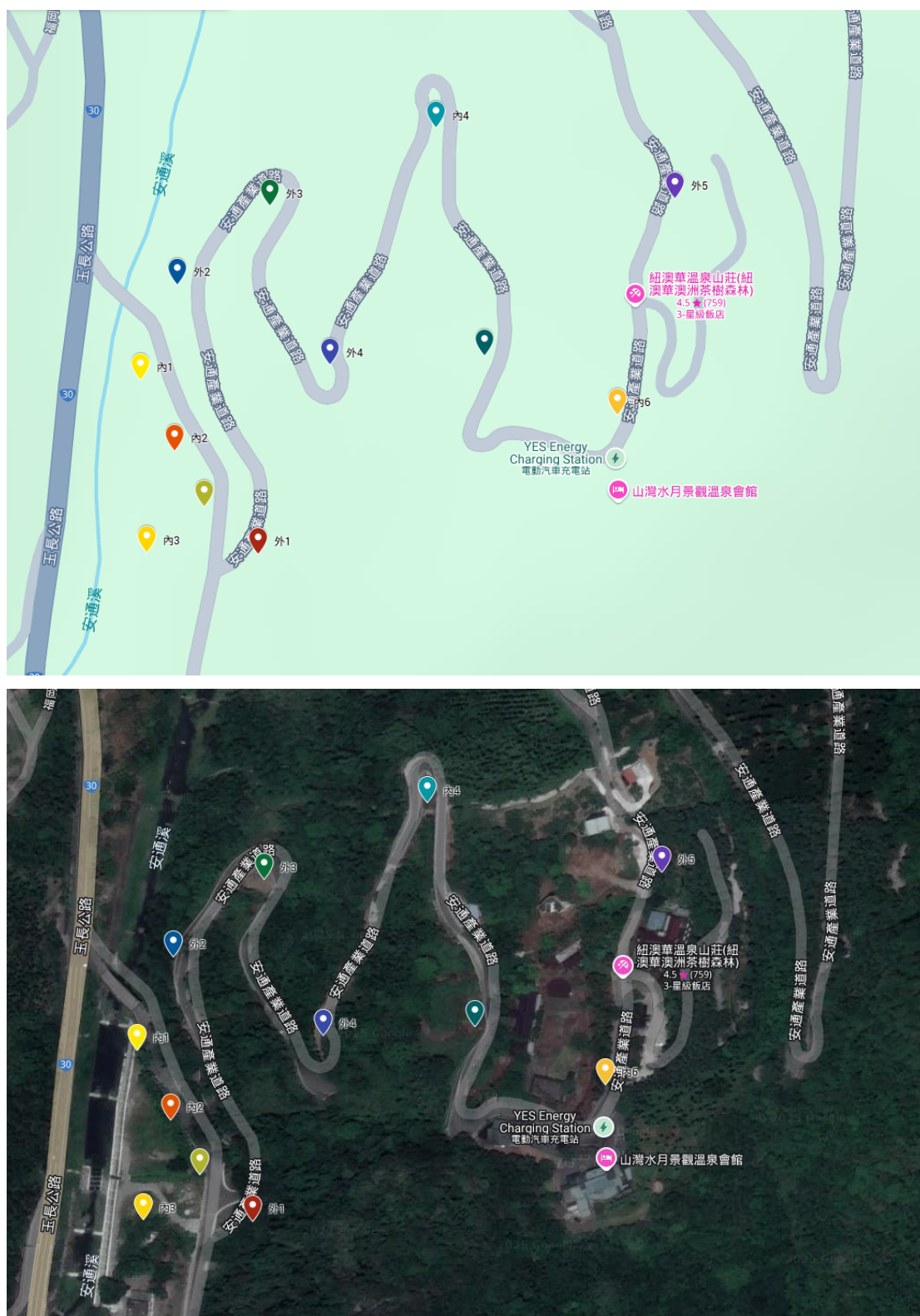
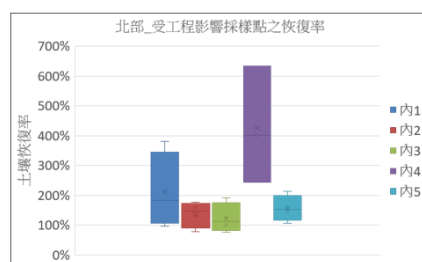
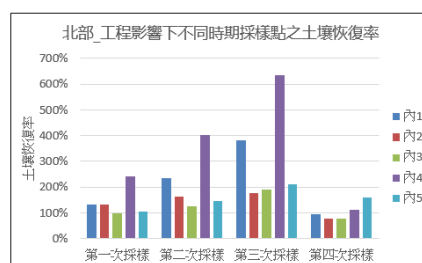


圖 3-4 東部花蓮玉里安通溫泉採樣點位置及空照圖

地點	北部-桃園市復興區高遠本生橋			
地質種類	木山層			
季節	113年春季	113年夏季	113年秋季	114年春季
土壤總有機碳TOC(C%)	1.76	1.41	1.44	1.38
空氣	640	417	394	454
草本層(ppm)	847	456.5	405	469
氣溫(°C)	23.6	29.3	29.45	24.7
SOC(gC/m ²)	6864	5499	5596.5	5382
F	1.744	0.325	0.094	0.125
∫F dt	15277.67	2853.47	830.34	1100.51
SOC + ∫F dt	22141.67	8352.47	6426.845	6482.516
生態碳恢復率CRR	161.65%	123.86%	119.91%	96.07%

土壤有機碳恢復率				
採樣	第一次	第二次	第三次	第四次
內1 砌石護岸、護坡右岸	132.16%	234.15%	381.69%	96.58%
內2 砌石護岸、護坡右岸	131.58%	161.79%	177.46%	76.92%
內3 砌石護岸(右岸)	100.00%	125.20%	191.55%	76.92%
內4 砌石護岸(右岸)	243.27%	400.81%	633.80%	111.97%
內5 砌石護岸(左岸)	105.85%	147.15%	212.68%	158.97%



生態碳恢復率				
採樣	第一次	第二次	第三次	第四次
內1 砌石護岸、護坡右岸	1.067	1.487	15.810	5.996
內2 砌石護岸、護坡右岸	2.034	0.369	7.249	4.999
內3 砌石護岸(右岸)	2.611	2.255	23.854	0.349
內4 砌石護岸(右岸)	0.567	0.256	11.978	11.193
內5 砌石護岸(左岸)	0.659	1.405	7.412	4.639

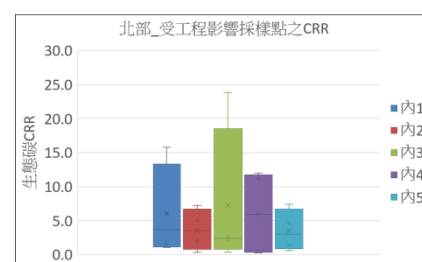
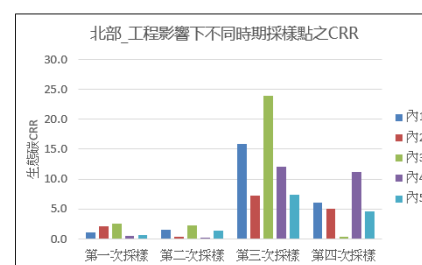
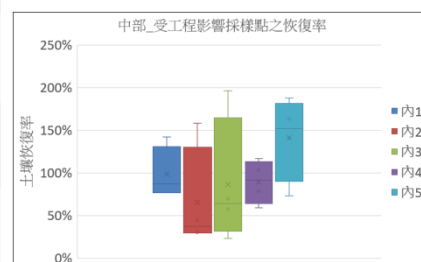
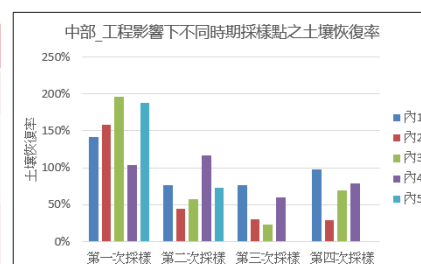


圖 3-5 北區四期採樣成果土壤有機碳及生態碳恢復率

地點	中部-南投縣水里鄉益則坑			
地質種類	白冷層			
季節	113年春季	113年夏季	113年秋季	114年春季
土壤總有機碳TOC(C%)	1.79	1.47	1.37	1.84
空氣	398	425	402	428
草本層(ppm)	401	440	412	432
氣溫(°C)	42.9	32.3	34.6	34.2
SOC(gC/m ²)	6981	5713.5	5343	7176
F	0.028	0.123	0.081	0.032
$\int F dt$	241.997	1073.129	710.0719	284.3985
SOC + $\int F dt$	7222.997	6786.629	6053.072	7460.398
生態碳恢復率CRR	109.75%	75.91%	85.69%	69.74%

土壤有機碳恢復率				
採樣	第一次	第二次	第三次	第四次
內1 高落差橫向構造 物補強(左岸)	142.22%	76.62%	76.42%	97.62%
內2 拱形塊石固床工 (左岸)	158.52%	44.16%	30.08%	29.17%
內3 拱形塊石固床工 (左岸)	196.30%	57.79%	22.76%	69.64%
內4 砌排石護坡、護 坡(左岸)	103.70%	116.88%	59.35%	78.57%
內5 砌排石護坡、護 坡(左岸)	188.15%	73.38%	163.41%	140.48%



生態碳恢復率				
採樣	第一次	第二次	第三次	第四次
內1 高落差橫向構造 物補強(左岸)	3.496	0.588	0.278	2.311
內2 拱形塊石固床工 (左岸)	2.042	0.221	0.022	0.054
內3 拱形塊石固床工 (左岸)	0.458	3.118	2.110	0.566
內4 砌排石護坡、護 坡(左岸)	0.562	3.190	0.376	0.158
內5 砌排石護坡、護 坡(左岸)	0.198	1.867	2.022	0.520

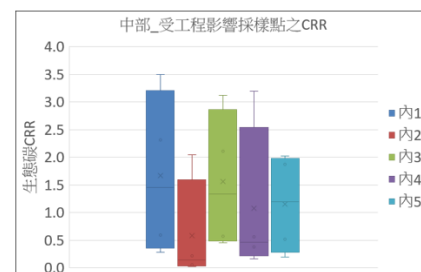
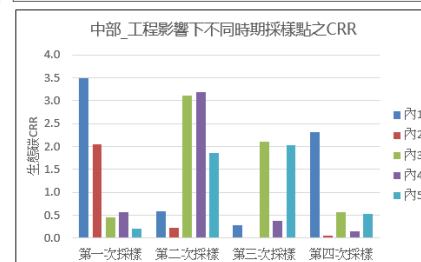
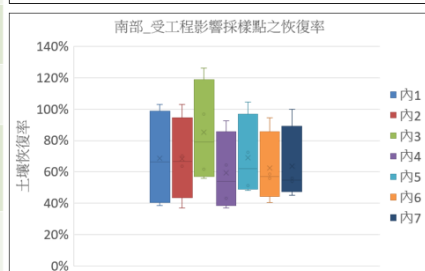
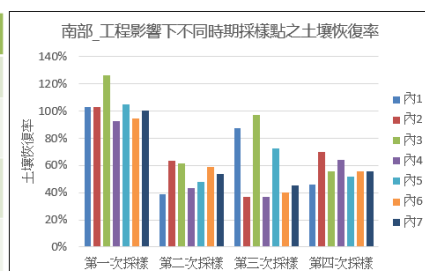


圖 3-6 中區四期採樣成果土壤有機碳及生態碳恢復率

地點	南部-臺南市興化區新化林場			
地質種類	崎頂層			
季節	113年春季	113年夏季	113年秋季	114年春季
土壤總有機碳TOC(C%)	1.06	0.48	0.34	0.405
空氣	417	417	487	450
草本層(ppm)	429	437	495	457
氣溫(°C)	33.9	36.1	31.5	48.2
SOC(gC/m ²)	4114.5	1852.5	1326	1579.5
F	0.101	0.157	0.065	0.0505
∫F dt	889.614	1377.7	573.745	442.013
SOC + ∫F dt	5004.114	3230.2	1899.745	2021.51
生態碳恢復率CRR	103.99%	50.98%	55.98%	50.12%

土壤有機碳恢復率				
採樣	第一次	第二次	第三次	第四次
內1 生物通道(右岸)	102.80%	38.46%	87.10%	45.71%
內2 砌石護岸(左岸)	102.80%	63.46%	37.10%	70.00%
內3 乾砌石護岸(左岸)	126.17%	61.54%	96.77%	55.71%
內4 生態槽護岸(右岸)	92.52%	43.27%	37.10%	64.29%
內5 生態槽護岸(右岸)	104.67%	48.08%	72.58%	51.43%
內6 生態槽護岸、生物通道(右岸)	94.39%	58.65%	40.32%	55.71%
內7 漿砌石水墊(右岸)	100.00%	53.85%	45.16%	55.71%



生態碳恢復率				
採樣	第一次	第二次	第三次	第四次
內1 生物通道(右岸)	1.542	2.608	0.300	0.255
內2 砌石護岸(左岸)	1.542	0.602	0.147	0.621
內3 乾砌石護岸(左岸)	0.862	1.102	0.441	0.385
內4 生態槽護岸(右岸)	1.990	3.932	0.915	0.375
內5 生態槽護岸(右岸)	4.134	5.501	0.228	1.186
內6 生態槽護岸、生物通道(右岸)	0.819	0.344	3.396	0.502
內7 漿砌石水墊(右岸)	2.948	0.337	1.633	0.505

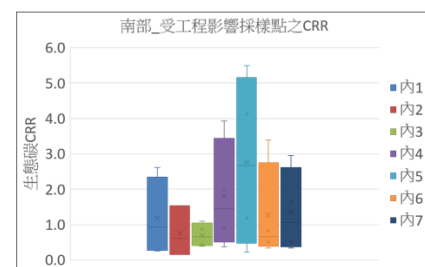
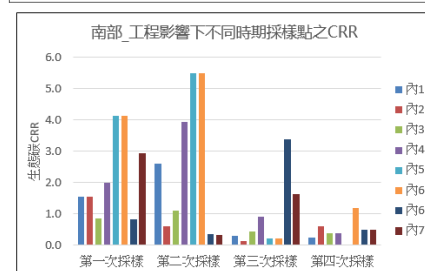
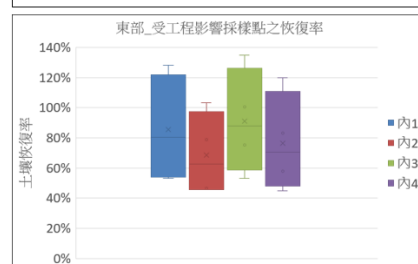
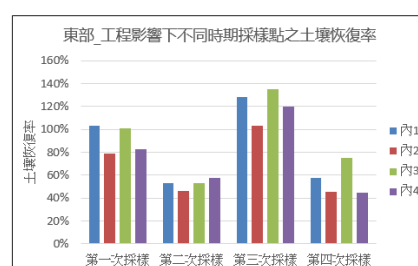


圖 3-7 南區四期採樣成果土壤有機碳及生態碳恢復率

地點	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉			
地質種類	八里灣層			
季節	113年春季	113年夏季	113年秋季	114年春季
土壤總有機碳TOC(C%)	1.56	0.96	0.70	0.65
空氣	411	428	400	478
草本層(ppm)	423	478	408	449
氣溫(°C)	40.40	32.35	28.90	35.15
SOC(gC/m²)	6064.5	3744	2710.5	2515.5
F	0.099	0.408	0.070	0.239
∫F dt	871.03	3575.927	614.851	2090.635
SOC + ∫F dt	6935.53	7319.927	3325.351	4606.135
生態碳恢復率CRR	75.70%	45.56%	61.44%	35.92%

土壤有機碳恢復率				
採樣	第一次	第二次	第三次	第四次
內1 護岸採格框補強 (右岸)	102.92%	53.04%	128.33%	57.60%
內2 護岸採格框補強 (右岸)	78.95%	46.41%	103.33%	45.60%
內3 護岸採格框補強 (右岸)	100.58%	53.04%	135.00%	75.20%
內4 縱向溝	83.04%	58.01%	120.00%	44.80%



生態碳恢復率				
採樣	第一次	第二次	第三次	第四次
內1 護岸採格框補強 (右岸)	0.927	1.499	0.114	0.407
內2 護岸採格框補強 (右岸)	1.580	1.303	0.476	1.549
內3 護岸採格框補強 (右岸)	0.464	1.885	0.584	0.237
內4 縱向溝	1.091	0.840	0.476	0.106

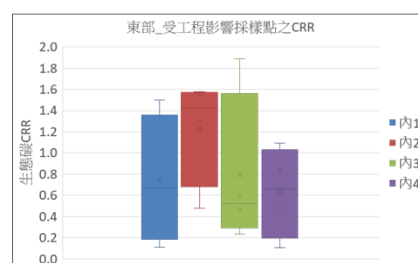
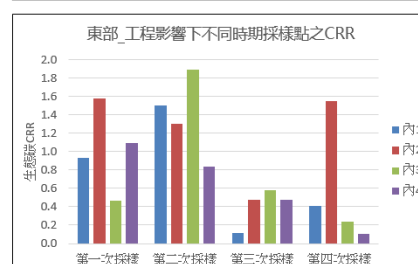


圖 3-8 東區四期採樣成果土壤有機碳及生態碳恢復率

表 3-3 北中南東四區四期採樣有機碳含量及生態碳恢復率變化

季節	工期	土壤總有機碳 (TOC)	生態碳恢復 (CRR)
北部	113年春季	1.76%	161%
	113年夏季	1.41%	123%
	113年秋季	1.44%	119%
	114年春季	1.38%	96%
中部	113年春季	1.79%	109%
	113年夏季	1.47%	75%
	113年秋季	1.37%	85%
	114年春季	1.84%	69%
南部	113年春季	1.06%	103%
	113年夏季	0.48%	50%
	113年秋季	0.34%	55%
	114年春季	0.41%	50%
東部	113年春季	1.56%	75%
	113年夏季	0.96%	45%
	113年秋季	0.70%	61%
	114年春季	0.65%	35%

- 1.從圖 3-9~圖 3-10 為北中南東區四期採樣成果土壤有機碳含量及其有機碳恢復率及生態碳恢復率，可以看出不同地質條件都有共同隨著服務年限的增加，呈現遞減趨勢，且泥岩地質特性之南部跟東部，皆低於 100%。
- 2.由圖 3-11-圖 3-13，隨著季節的變化無論有機碳恢復率及生態碳恢復率皆有落差 30-60%。但是考量地質條件再不同季節對土壤碳的影響，可以看出北部木山層相較白冷層固碳能力好，但是要靠季節增匯，起伏變化不大。
- 3.上述統計主要針對工區內護岸採樣結果之平均值與區外素

地(未有工程施作地點)進行恢復率的比較，但就不同工程如固床工、防砂壩、擋土牆等在季節採樣區位綜合結果，利用盒鬚圖進行落差統計，可以了解該工程對環境的影響的均一性或浮動性。圖 3-13 及圖 3-14 可以看出，北部木山層春季採樣較均勻，但是接近秋冬季，有機碳恢復率落差甚大，白冷層則是隨時間的增加而遞減但各採樣點落差較為集中。但就崎頂層及八里灣層之泥岩特性，四次採樣成果分布不均。

- 4.從圖 3-15-圖 3-16，土壤有機碳恢復率隨時間遞減，但仍受 113 年颱風影響，土壤含水豐沛，北部第三次採樣影響較大，但很快就恢復。

表 3-4 北中南東舊四區採樣有機碳含量及生態碳恢復率變化

採樣時間	地點	地質	土壤	海拔	RM	KM	採樣點位	工程種類	總有機碳 TOC(C%)	土壤有機碳儲量 SOC	生態碳恢復率 CRR	土地利用(現況植生)
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	內 1	砌石護岸、護坡右岸	1.13	44.07	0.196	小葉南洋杉
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	內 2	砌石護岸、護坡右岸	0.91	35.49	0.907	貓西番蓮、芒草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	內 3	砌石護岸 (右岸)	0.9	35.1	0.498	貓西番蓮
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	內 4	砌石護岸 (右岸)	1.31	51.09	1.614	密毛小毛蕨
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	內 5	砌石護岸 (左岸)	1.86	72.54	1.423	栗草、阿爾泰鐵角蕨
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	內 6(新增)	砌石護岸 (左岸)	0.72	28.08	0.547	栗草、鬼針草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	內 7(新增)	砌石護岸 (左岸)	0.66	25.74	0.230	栗草、鬼針草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	內 8(新增)	砌石護岸 (左岸)	0.91	35.49	0.341	栗草、鬼針草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	外 1	素地-樹林	1.23	47.97		假儉草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	外 2	素地-林地	1.45	56.55		地毯草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	外 3	素地-草地	1.13	44.07		百喜草、抱樹蕨
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	外 4(新增)	素地-林地	0.87	33.93		百喜草、香蕉
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	內 1	高落差橫向構造物補強 (左岸)	1.64	63.96	0.947	洋紫荊、鬼針草
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	內 2	拱形塊石固床工 (左岸)	0.49	19.11	0.185	大花咸豐草、含羞草
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	內 3	拱形塊石固床工 (左岸)	1.17	45.63	0.510	野薑花、芒草
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	內 4	砌排石護坡、護坡 (左岸)	2.18	85.02	0.461	大花咸豐草
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	內 5	砌排石護坡、護坡 (左岸)	1.4	54.6	0.934	大花咸豐草、魚腥草
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	內 6(新增)	護岸、固床工(左岸)	0.42	16.38	0.343	鬼針草

114 年水土保持工程碳匯增益與永續治理策略研發計畫

採樣時間	地點	地質	土壤	海拔	RM	KM	採樣點位	工程種類	總有機碳 TOC(C%)	土壤有機碳儲量 SOC	生態碳恢復率 CRR	土地利用(現況植生)
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	內 7(新增)	護岸、固床工(右岸)	0.45	17.55	0.191	金絲竹
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	外 1	素地-林地	1.31	51.09		銳葉牽牛、姑婆芋
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	外 2	素地-林地	1.06	41.34		鬼針草
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	外 3	素地-樹林	1.67	65.13		姑婆芋、大花咸豐草
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	外 4(新增)	素地-樹林	1.37	53.43		姑婆芋、柏拉木
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	外 5(新增)	素地-林地	1.39	54.21		鬼針草、姑婆芋
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	內 1	生物通道 (內 1)右岸	0.32	12.48	0.383	地毯草
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	內 2	砌石護岸 (左岸)	0.49	19.11	0.626	地毯草
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	內 3	乾砌石護岸(左岸)	0.39	15.21	0.480	地毯草
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	內 4	生態槽護岸 (右岸)	0.45	17.55	0.542	鰕籽草
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	內 5	生態槽護岸 (右岸)	0.36	14.04	0.578	九里香、鬼針草
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	內 6	生態槽護岸、生物通道 (右岸)	0.39	15.21	0.499	九里香
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	內 7	漿砌石水墊(右岸)	0.39	15.21	0.500	黃金葛
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	內 8(新增)	生態槽護岸、(右岸)	0.5	19.5	0.579	地毯草、鬼針草
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	外 1	素地-樹林	0.36	14.04		地毯草、文頭郎
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	外 2	素地-林地	0.98	38.22		茄苳
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	外 3	素地-樹林	0.57	22.23		苦楝
20250623	南部-臺南市興化區新化林場	崎頂層	砂岩頁岩非石灰性新沖積土	50m	23528	0.0525	外 4(新增)	素地-樹林	0.88	34.32		鬼針草
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	350m	15896	0.0437	內 1	護岸採格框補強(右岸)	0.72	28.08	0.285	芒草、銀合歡
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	350m	15896	0.0437	內 2	護岸採格框補強(右岸)	0.57	22.23	0.432	地毯草、茄冬

第三章 拓展水土保持工程固碳量調查點位並持續建置自然碳匯地圖

採樣時間	地點	地質	土壤	海拔	RM	KM	採樣點位	工程種類	總有機碳 TOC(C%)	土壤有機碳儲量 SOC	生態碳恢復率 CRR	土地利用(現況植生)
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	350m	15896	0.0437	內 3	護岸採格框補強(右岸)	0.94	36.66	0.322	地毯草
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	350m	15896	0.0437	內 4	縱向溝	0.56	21.84	0.186	地毯草
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	350m	15896	0.0437	內 5(新增)	護岸採格框補強(右岸)	0.5	19.5	0.267	毛花雀稗
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	350m	15896	0.0437	內 6(新增)	縱向溝	1.19	46.41	0.506	台灣欒樹
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	約 350m	15896	0.0437	內 7(新增)	縱向溝	1.46	56.94	0.610	鬼針草、南美蟛蜞菊
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	約 350m	15896	0.0437	外 1	素地-林地	2.78	108.42		芒草、銀合歡
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	約 350m	15896	0.0437	外 2	素地-草皮	0.59	23.01		加拿大蓬 南美蟛蜞菊
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	約 350m	15896	0.0437	外 3	素地-林地	0.57	22.23		土沉香、刺莓
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	約 350m	15896	0.0437	外 4	素地-林地	1	39		苦楝、茄冬、五節芒
20250618	東部-花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區	八里灣層	六鼻階紛質黏壤土	約 350m	15896	0.0437	外 5(新增)	素地-林地	1.29	50.31		南美蟛蜞菊、金絲竹

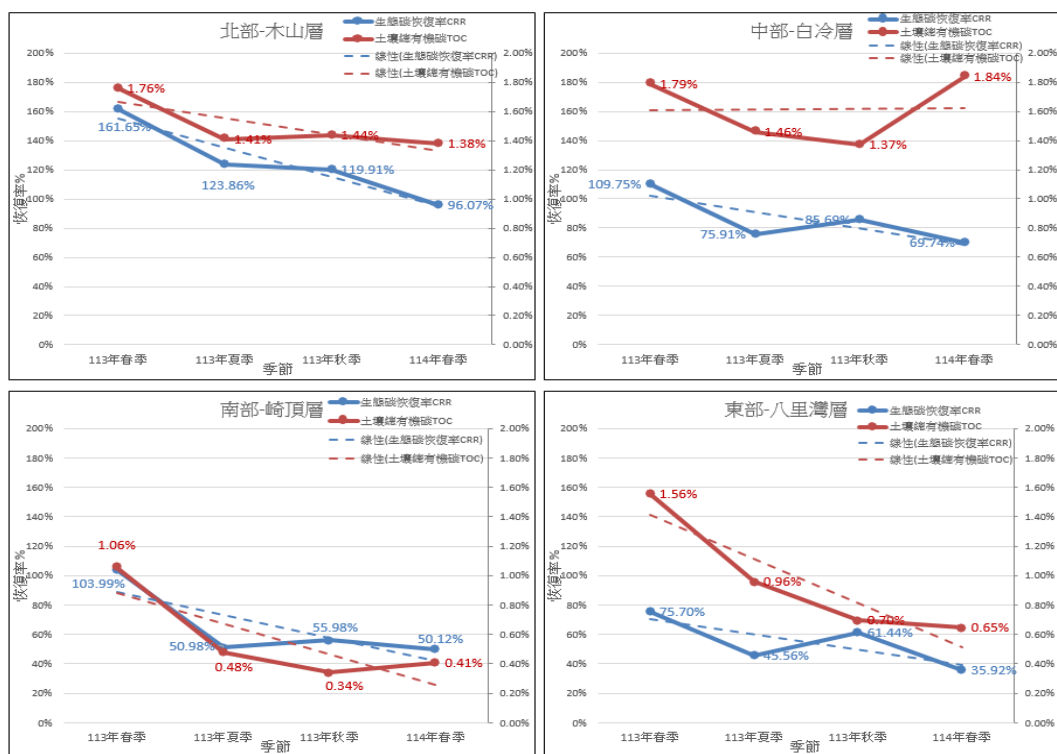


圖 3-9 北中南東區四期採樣成果土壤有機碳恢復率

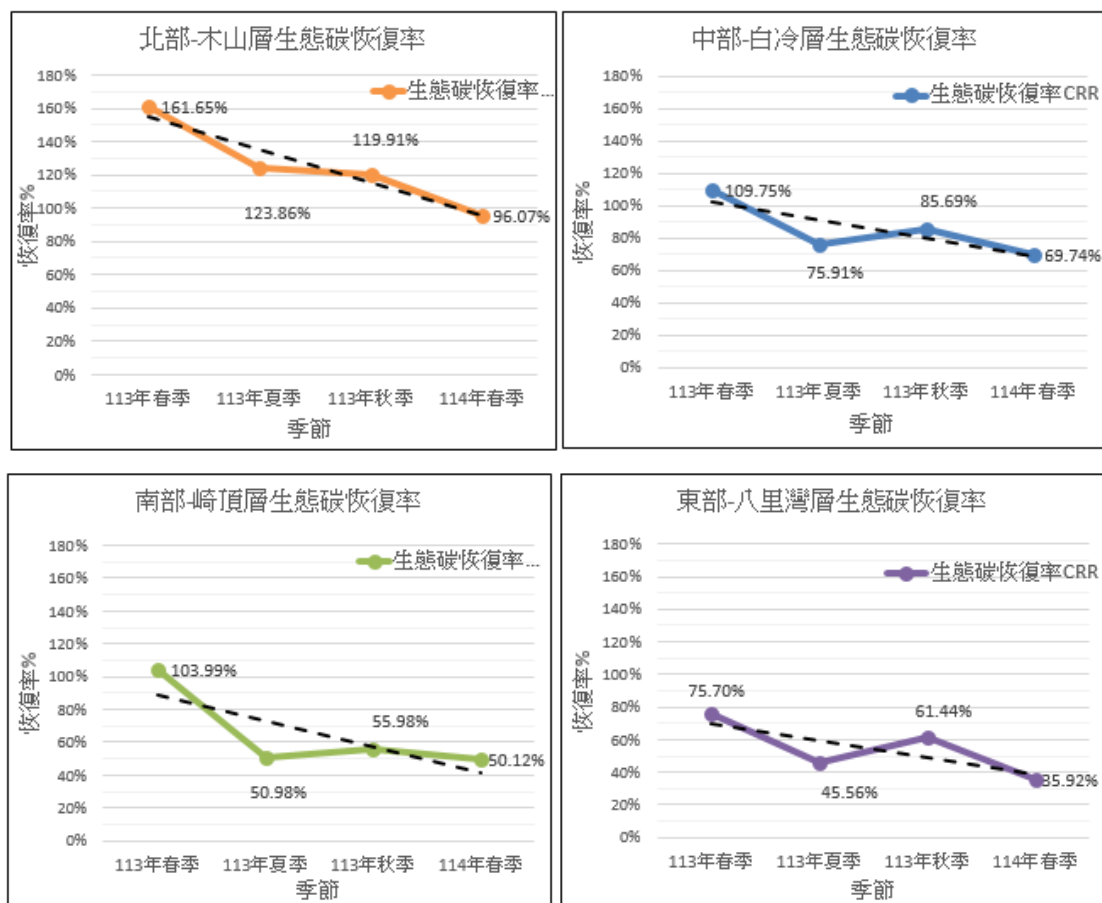


圖 3-10 北中南東區四期採樣成果生態碳恢復率

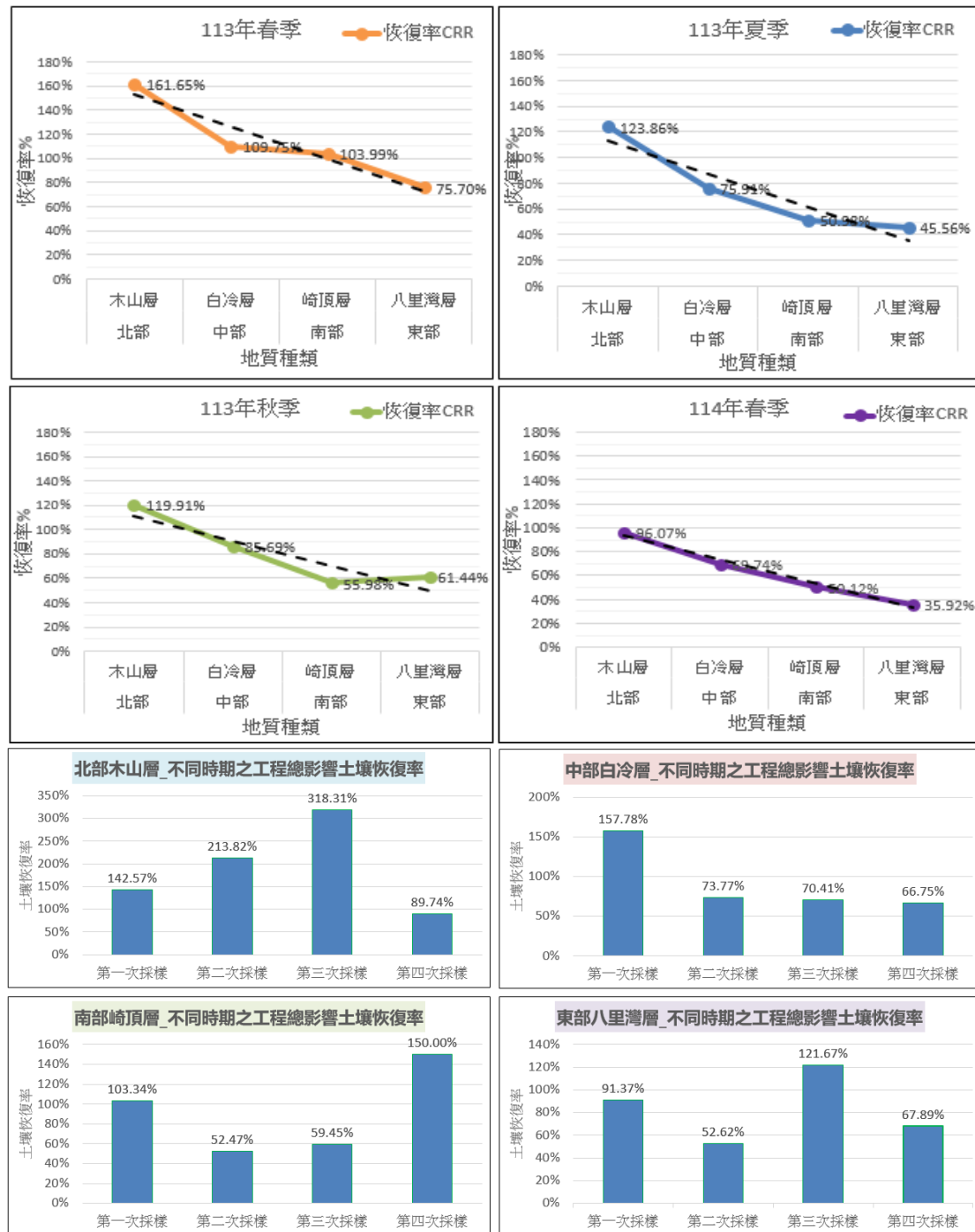


圖 3-11 北中南東區四種地質採樣平均生態碳恢復率

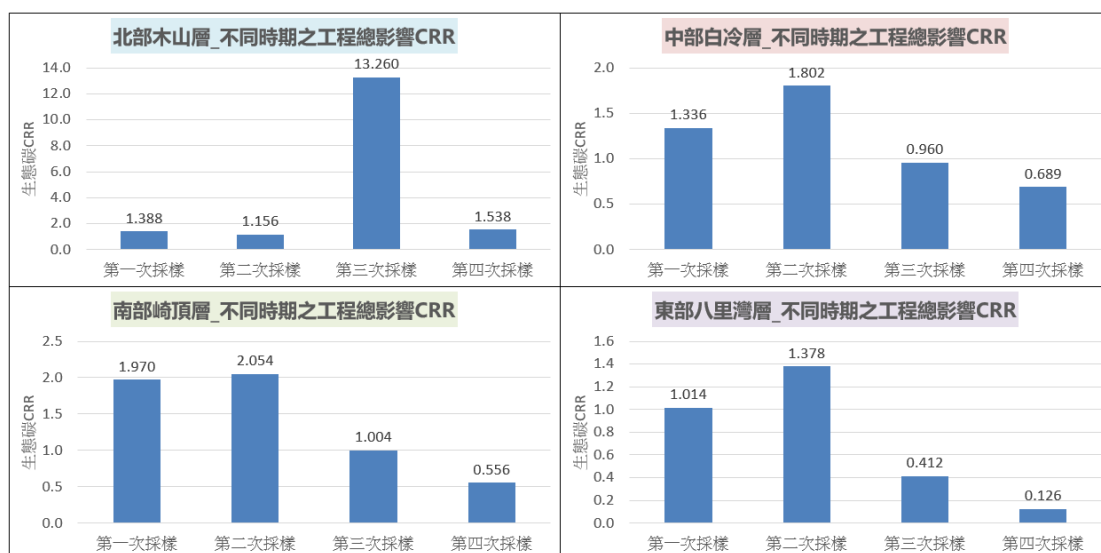
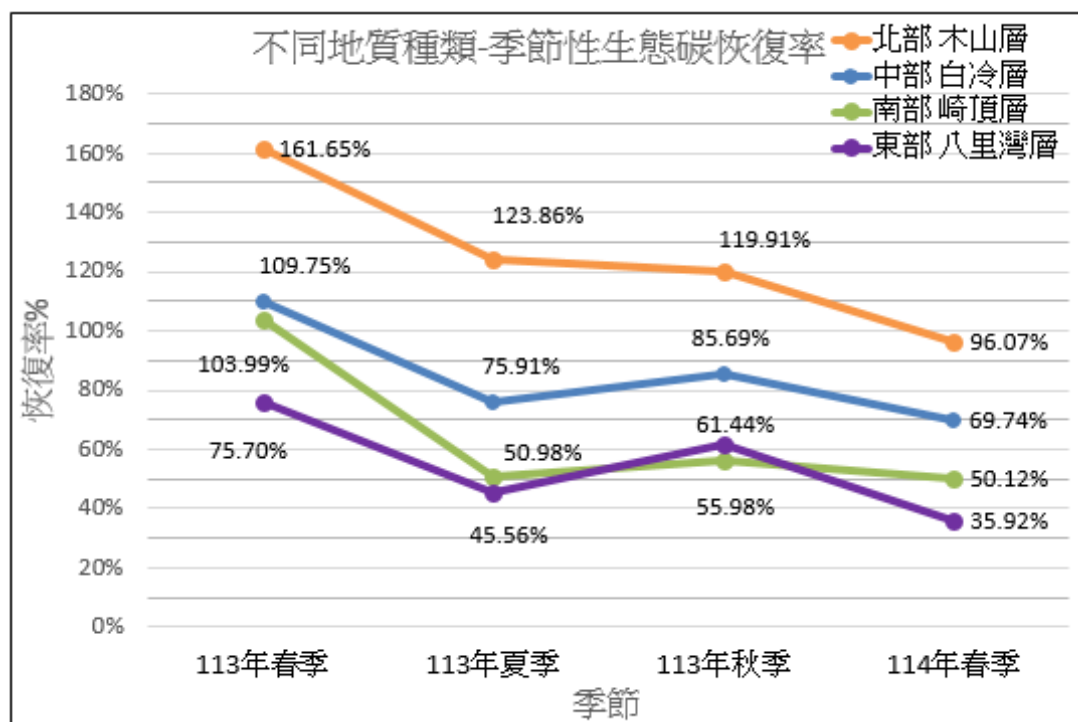


圖 3-12 北中南東區四種地質採樣四季生態碳恢復率

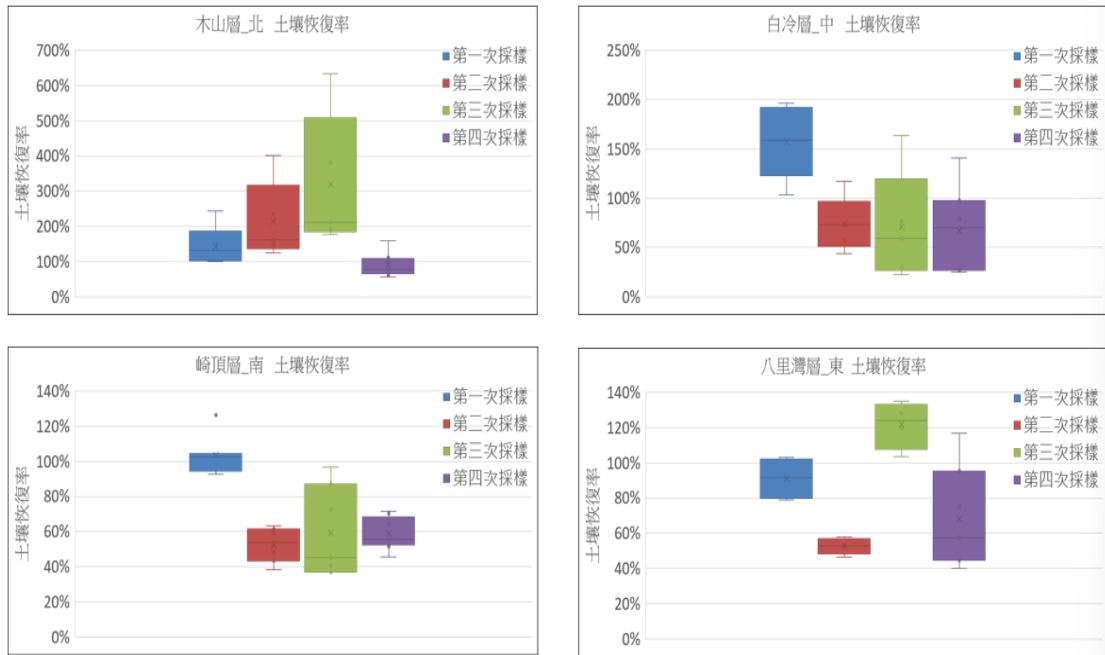


圖 3-13 北中南東區四種地質採樣土壤有機碳恢復率統計盒鬚圖

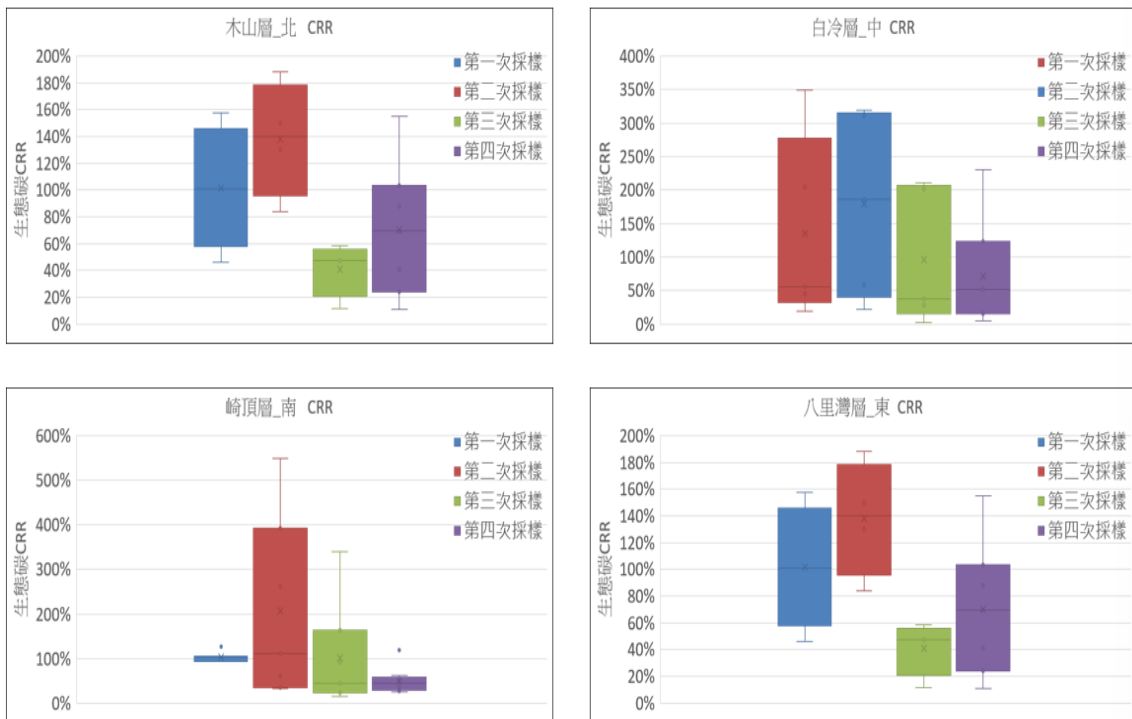


圖 3-14 北中南東區四種地質採樣各次生態碳恢復率統計盒鬚圖

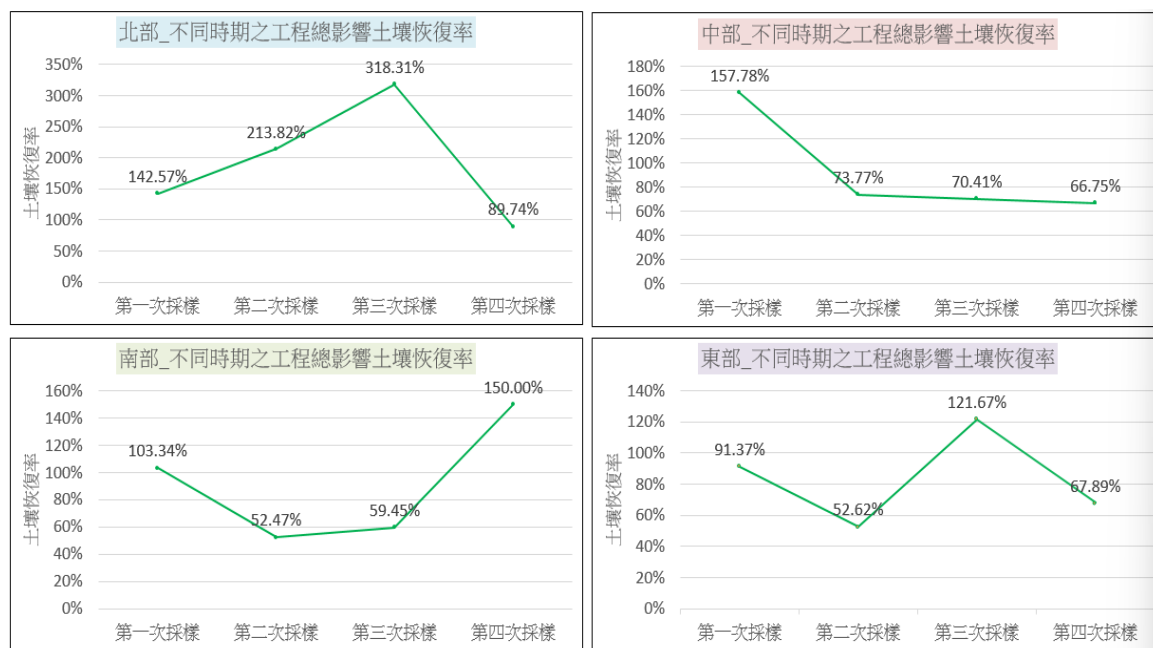


圖 3-15 北中南東區四次採樣各次土壤有機碳復率變化

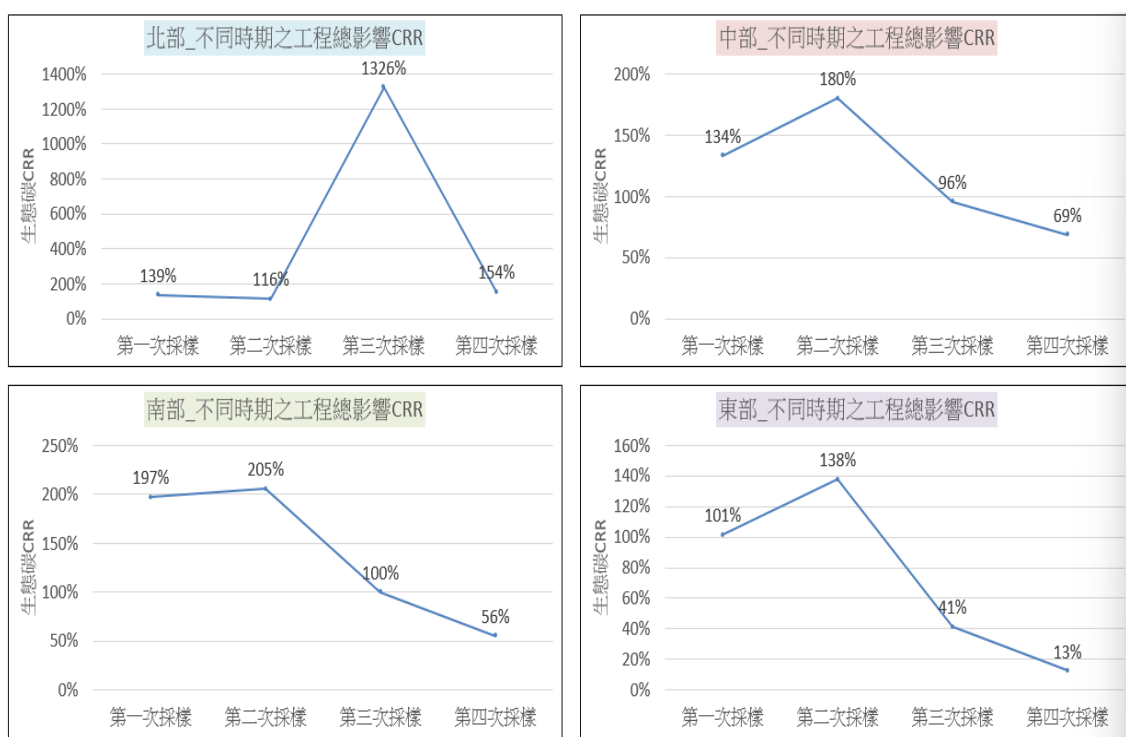


圖 3-16 北中南東區四次採樣各次生態碳恢復率變化

根據前期採樣三次成果加上本期一次採樣，完整四季檢測成果與分析，考量地質、土壤以及集水區環境受水利沖蝕指數 RM 及土壤沖蝕指數 KM 條件下，可能影響固碳成效，因此新增另外四處進行採樣，數據如表 3-5 所示，其分析說明如下

- 1.圖 3-17-圖 3-20 為 114 年度新增的採樣點位，北部的沖積層，中部的北寮層，南部的牡丹層以及東部的沖積層，其結果總有機碳含量以北部跟中部有超過 1%，有機碳恢復率僅有一兩處採樣點超過 100%，雖然這些工程為近 3 年完成之優良農件，但考量如南部及東部缺水，且周邊有都市住戶影響，有較低的生態碳恢復率。
- 2.如圖 3-21 八處檢測成果在不同地質條件，土壤有機碳恢復率以木山層白冷層八里灣層較高，但採樣點分布差異較大，土壤碳匯量最大可達 100 TON/ha。
- 3.針對八區及出火在不同地質、土壤、降雨沖蝕指數 RM 及土壤沖蝕指數 KM 條件下碳地圖分布如圖 3-22-圖 3-33 所示，但多數地質尚未進行採樣，且目前分布採以五等分進行顏色分布，越紅表示地方固碳效益較不佳，越綠越好。
- 4.如圖 3-34 則為本年度各區生態碳本次採樣的土壤碳匯量及有機碳恢復情況以了解工程改善後再這些地質條件下，尤其完工後 4 年，其固碳能力整區採樣結果，以沖積層變化最大，可達 100 Ton/ha，有機碳土壤恢復率北部木山層最好其次中部白冷層跟東部八里灣層較好，但偵測點落差也有 50-60%之多。



地點	北部新-宜蘭三層坪								
土質	沖積層								
工程竣工年	110年(完工4年)								
點位	工程總影響	內1	內2	內3	內4	內5	內6	內7	內8
總有機碳 TOC(C%)	1.10%	0.73%	0.81%	0.86%	1.44%	1.20%	0.60%	1.88%	1.28%
空氣	429	426	425	426	421	434	438	433	431
草本層(ppm)	430	443	413	433	443	415	443	432	415
氣溫(°C)	36.8	35.6	37.1	36.3	34.8	33.1	33.9	33.9	33.0
SOC(gC/m²)	42.9	28.47	31.59	33.54	56.16	46.8	23.4	73.32	49.92
F	0.008	0.137	0.096	0.056	0.178	0.155	0.041	0.008	0.130
∫F dt	70.49	1203.02	845.22	494.32	1561.14	1355.75	355.85	71.17	1142.05
SOC + ∫F dt	113.39	1231.49	876.81	527.86	1617.30	1402.55	379.25	144.49	1191.97
土壤恢復率	68.75%	45.63%	50.63%	53.75%	90.00%	75.00%	37.50%	117.50%	80.00%
CRR	20%	221%	158%	95%	291%	252%	68%	26%	214%

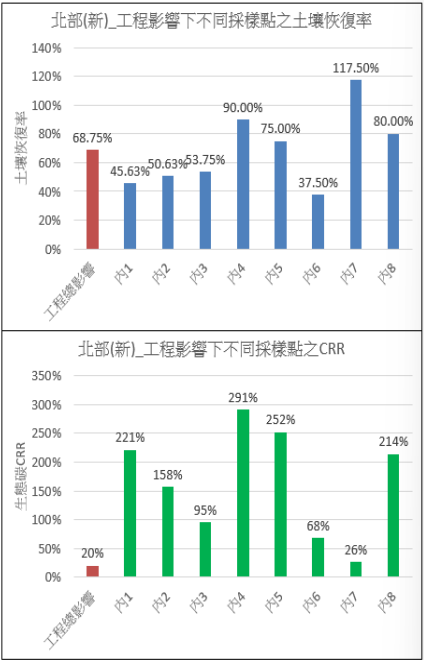


圖 3-17 新增北部宜蘭三層坪採樣點及採樣成果分析

第三章 拓展水土保持工程固碳量調查點位並持續建置自然碳匯地圖



地點	中部新-苗栗獅潭鄉大東勢溪								
地質	北寮層								
工程竣工年	108年(完工6年)								
點位	工程總影響	內1	內2	內3	內4	內5	內6	內7	內8
總有機碳(TOC(C%))	1.17%	1.38%	1.22%	0.95%	1.21%	0.39%	0.95%	0.88%	0.79%
空氣	403	393	419	403	391	395	403	413	406
草本層(ppm)	415	408	364	423	432	432	420	420	417
氣溫(°C)	35.4	43.9	44.5	38.2	34.0	31.3	30.6	31.0	30.0
SOC(gC/m ²)	45.63	53.82	47.58	37.05	47.19	15.21	37.05	34.32	30.81
F	0.097	0.118	0.432	0.160	0.333	0.303	0.140	0.057	0.091
fF dt	849.74	1033.70	3783.66	1403.50	2916.98	2655.75	1223.02	502.93	792.80
SOC + fF dt	895.37	1087.52	3831.24	1440.55	2964.17	2670.96	1260.07	537.25	823.61
土壤恢復率	61.26%	72.25%	63.87%	49.74%	63.35%	20.42%	49.74%	46.07%	41.36%
CRR	249%	303%	1067%	401%	826%	744%	351%	150%	229%

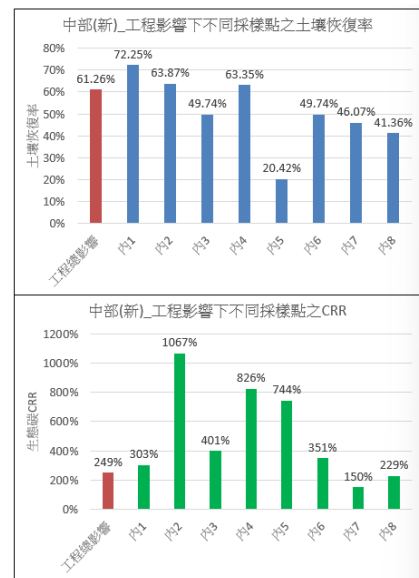


圖 3-18 新增中部苗栗獅潭大東勢溪採樣點及採樣成果分析



地點	南部(新)屏東潮州17林班地								
地質	牡丹層								
工程竣工年	110年(完工4年)								
土地利用	工程總影響	內1	內2	內3	內4	內5	內6	內7	內8
總有機碳(OC C%)	0.78%	1.71%	0.81%	0.60%	0.50%	0.47%	0.52%	0.51%	1.12%
空氣	414	409	403	413	408	423	405	423	428
草本層(ppm)	414.75	432	409	408	412	415	403	401	438
氣溫(°C)	35.2	35.6	32.1	32.9	33.9	36.7	36.6	38.4	35.8
SOC(gC/m ²)	30.42	66.69	31.59	23.4	19.5	18.33	20.28	19.89	43.68
F	0.006	0.186	0.049	0.041	0.032	0.064	0.016	0.176	0.081
∫F dt	53.14	1627.61	429.46	356.95	284.68	564.12	141.07	1542.85	707.31
SOC + ∫F dt	83.56	1694.30	461.05	380.35	304.18	582.45	161.35	1562.74	750.99
土壤恢復率	48.15%	105.56%	50.00%	37.04%	30.86%	29.01%	32.10%	31.48%	69.14%
CRR	32%	650%	177%	146%	117%	223%	62%	599%	288%

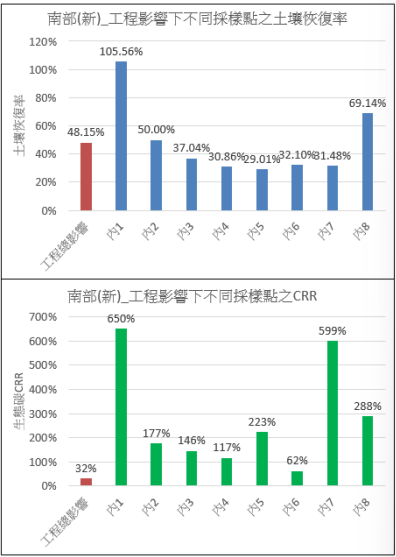


圖 3-19 新增南部屏東新開苗圃採樣點及採樣成果分析

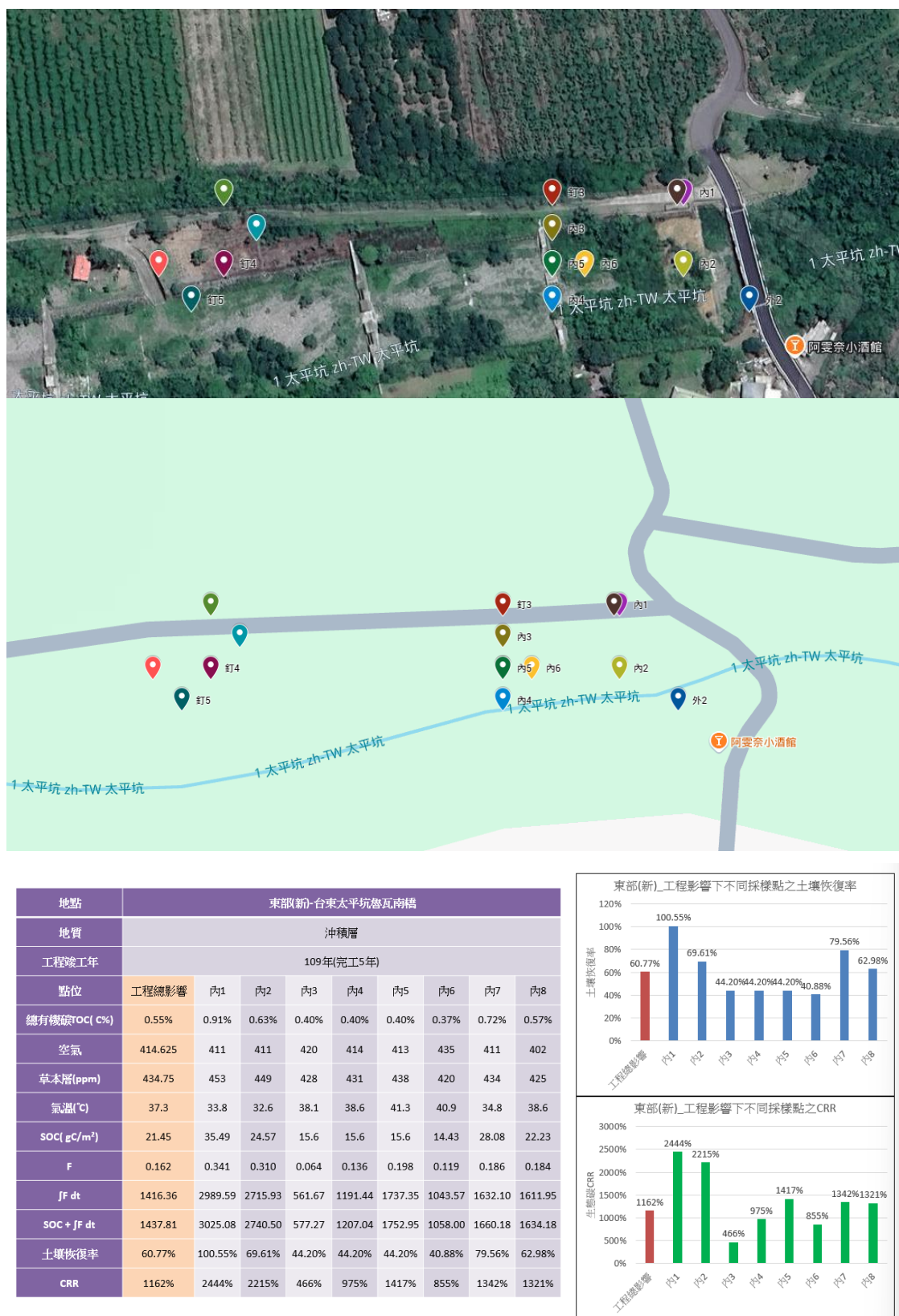


圖 3-20 新增東部台東太平坑魯瓦南橋採樣點及採樣成果分析

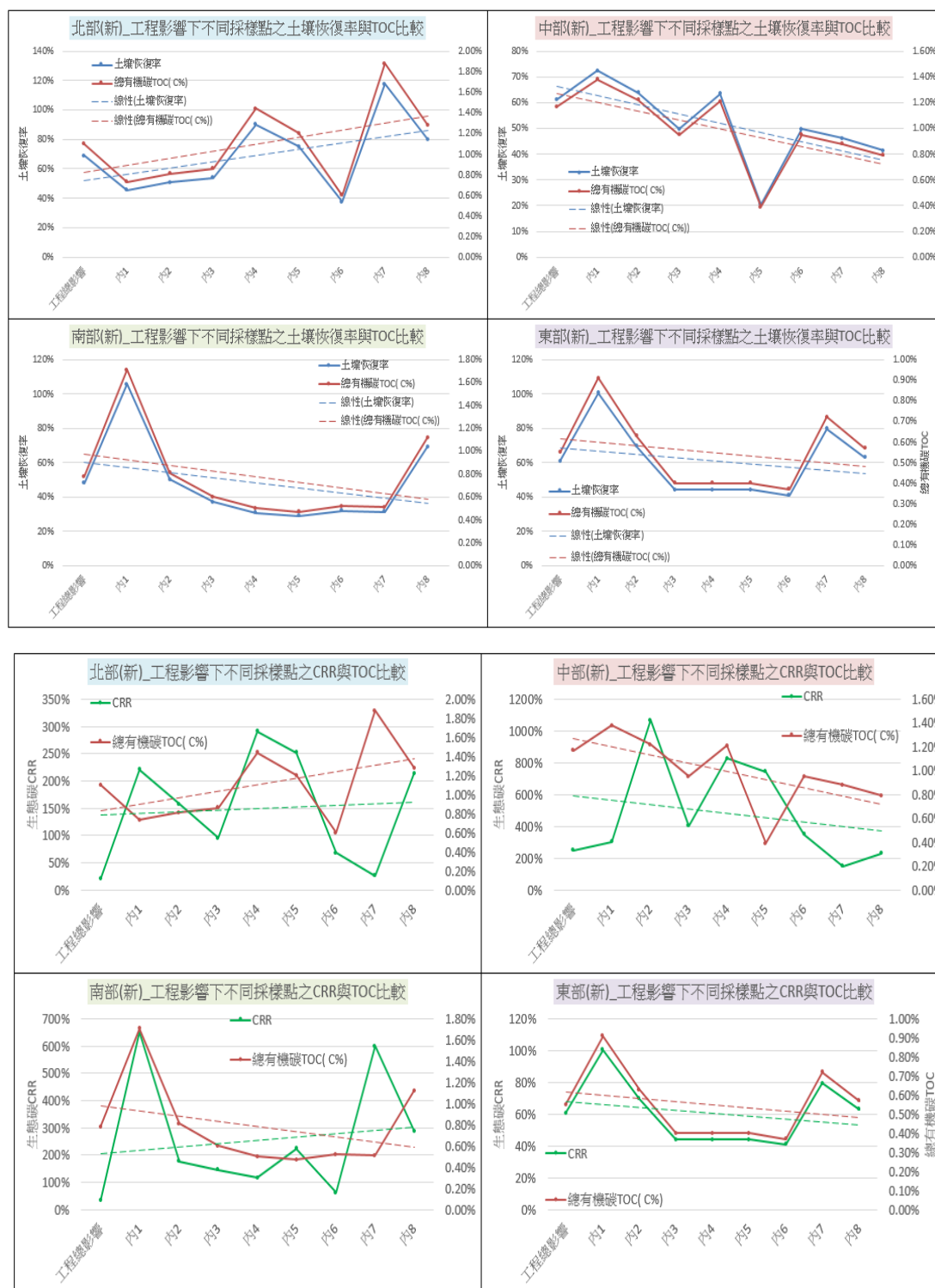


圖 3-21 新增北中南東採樣區有機碳及生態碳恢復率

表 3-5 新增北中南東四區採樣有機碳含量及生態碳恢復率變化

採樣時間	地點	地質	土壤	海拔	RM	KM	採樣點位	工程種類	總有機碳 TOC(C%)	土壤有機碳儲量 SOC	生態碳恢復率 CRR	土地利用(現況植生)
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	內 1	農塘前樹地	0.73	28.47	2.212	香附子、鬼針草
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	內 2	階梯式農塘最底層	0.81	31.59	1.575	朱槿
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	內 3	農塘旁樹地	0.86	33.54	0.948	落羽松
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	內 4	階梯式農塘旁樹地	1.44	56.16	2.905	冷青草、地毯草
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	內 5	串聯水道	1.2	46.8	2.520	落羽松、楓樹
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	內 6	串聯水道	0.6	23.4	0.681	地毯草
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	內 7	引水農塘	1.88	73.32	0.260	落羽松、地毯草
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	內 8	沉砂農塘	1.28	49.92	2.141	地毯草、落羽松
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	外 1	素地-草地	0.68	26.52		秀貴甘蔗
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	外 2	素地-樹林	2.1	81.9		輪傘草、楓樹
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	外 3	素地-果園	3.04	118.56		番石榴、鬼針草
20250611	北部(新)-宜蘭三層坪	沖積層	粘板岩淡色沖積土	140m	21,687	0.0310	外 4	素地-草地	0.58	22.62		鬼針草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土新沖積土	350m	16028	0.0410	內 1	砌石護岸、護坡右岸	1.13	44.07	0.196	小葉南洋杉
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土新沖積土	350m	16028	0.0410	內 2	砌石護岸、護坡右岸	0.91	35.49	0.907	貓西番蓮、芒草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土新沖積土	350m	16028	0.0410	內 3	砌石護岸 (右岸)	0.9	35.1	0.498	貓西番蓮
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土新沖積土	350m	16028	0.0410	內 4	砌石護岸 (右岸)	1.31	51.09	1.614	密毛小毛蕨
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土新沖積土	350m	16028	0.0410	內 5	砌石護岸 (左岸)	1.86	72.54	1.423	栗草、阿爾泰鐵角蕨
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土新沖積土	350m	16028	0.0410	內 6(新增)	砌石護岸 (左岸)	0.72	28.08	0.547	栗草、鬼針草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土新沖積土	350m	16028	0.0410	內 7(新增)	砌石護岸 (左岸)	0.66	25.74	0.230	栗草、鬼針草
20250612	北部-桃園市復興區高遶本生橋	木山層	黃灰色崩積土新沖積土	350m	16028	0.0410	內 8(新增)	砌石護岸 (左岸)	0.91	35.49	0.341	栗草、鬼針草

採樣時間	地點	地質	土壤	海拔	RM	KM	採樣點位	工程種類	總有機碳 TOC(C%)	土壤有機碳儲量 SOC	生態碳恢復率 CRR	土地利用(現況植生)
20250612	北部-桃園市復興區高逸本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	外 1	素地-樹林	1.23	47.97		假儉草
20250612	北部-桃園市復興區高逸本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	外 2	素地-林地	1.45	56.55		地毯草
20250612	北部-桃園市復興區高逸本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	外 3	素地-草地	1.13	44.07		百喜草、抱樹蕨
20250612	北部-桃園市復興區高逸本生橋	木山層	黃灰色崩積土 新沖積土	350m	16028	0.0410	外 4(新增)	素地-林地	0.87	33.93		百喜草、香蕉
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	內 1	預鑄槽框護岸	1.38	53.82	3.030	橘子、水稻
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	內 2	預鑄槽框護岸	1.22	47.58	10.674	橘子、水稻
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	內 3	砌石護岸	0.95	37.05	4.013	秀貴甘蔗
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	內 4	預鑄槽框護岸	1.21	47.19	8.258	熊耳草、秀貴甘蔗
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	內 5	素地工程下游	0.39	15.21	7.441	風藤、穿鞘花
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	內 6	固床工、魚道	0.95	37.05	3.511	姑婆芋、全緣捲柏、歐洲赤松
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	內 7	預鑄槽框護岸	0.88	34.32	1.497	姑婆芋、全緣捲柏、歐洲赤松
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	內 8	預鑄槽框護岸	0.79	30.81	2.295	姑婆芋、全緣捲柏、歐洲赤松
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	外 1	素地-果園	1.79	69.81		橘子、水稻、秀貴甘蔗
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	外 2	素地-草地	0.81	31.59		秀貴甘蔗
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	外 3	素地-草地	0.69	26.91		蒲葦、腎蕨
20250616	中部(新)-苗栗獅潭鄉大東勢溪	北寮層	下南片沙質壤土	400m	22,556	0.0495	外 4	素地-樹林	1.52	59.28		姑婆芋、全緣捲柏、歐洲赤松
20250623	中部-南投縣水里鄉益則坑	白冷層	頭社壤土	450m	29022	0.0407	內 1	高落差橫向構造物補強 (左岸)	1.64	63.96	0.947	洋紫荊、鬼針草
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積土	60m	29,700	0.0282	內 1	護岸	1.71	66.69	6.498	大黍、山黃麻
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積土	60m	29,700	0.0282	內 2	動物通道	0.81	31.59	1.768	小花蔓澤蘭
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積土	60m	29,700	0.0282	內 3	漿砌石護岸	0.6	23.4	1.459	白飯樹、求米草
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積土	60m	29,700	0.0282	內 4	固床工、護岸	0.5	19.5	1.167	土牛膝、血桐

第三章 拓展水土保持工程固碳量調查點位並持續建置自然碳匯地圖

採樣時間	地點	地質	土壤	海拔	RM	KM	採樣點位	工程種類	總有機碳 TOC(C%)	土壤有機碳儲量 SOC	生態碳恢復率 CRR	土地利用(現況植生)
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積 土	60m	29,700	0.0282	內 5	固床工、護岸	0.47	18.33	2.234	山柚、香澤蘭
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積 土	60m	29,700	0.0282	內 6	版橋	0.52	20.28	0.619	白樹仔、多子漿果
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積 土	60m	29,700	0.0282	內 7	格框護岸	0.51	19.89	5.994	鬼針草、青箱、銀合歡
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積 土	60m	29,700	0.0282	內 8	格框護岸	1.12	43.68	2.880	血桐、白飯樹
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積 土	60m	29,700	0.0282	外 1	素地-樹林	1.24	48.36		金絲竹、翅蘋婆
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積 土	60m	29,700	0.0282	外 2	素地-樹林	1.36	53.04		大黍、銀合歡、光臘樹、土密樹
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積 土	60m	29,700	0.0282	外 3	素地-樹林	1.06	41.34		銀膠菊、天竺草、鵲腎樹
20250624	南部(新)-屏東潮州 17 林班地	牡丹層	粘板岩新沖積 土	60m	29,700	0.0282	外 4	素地-樹林	1.14	44.46		鬼針草、銀合歡、光臘樹
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	內 1	混凝土砌石護岸	0.91	35.49	24.445	銀合歡、紅毛草
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	內 2	潛壩	0.63	24.57	22.145	鬼針草、芒草
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	內 3	透過性壩	0.4	15.6	4.665	秀貴甘蔗
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	內 4	透過性壩	0.4	15.6	9.754	鬼針草、銀合歡
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	內 5	透過性壩	0.4	15.6	14.165	芒草、秀貴甘蔗
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	內 6	透過性壩	0.37	14.43	8.549	揚波、光臘樹
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	內 7	混凝土砌石護岸	0.72	28.08	13.415	台灣欒樹、鬼針草
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	內 8	清淤坡道	0.57	22.23	13.205	秀貴甘蔗、鬼針草
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	外 1	素地-草地	0.61	23.79		大飛揚草
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	外 2	素地-草地	1.04	40.56		大黍
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	外 3	素地-果園	1.06	41.34		小返魂、釋迦
20250617	東部(新)-臺東太平坑 魯瓦南橋	沖積層	瑞穗玢質壤土	100m	20,425	0.0405	外 4	素地-草地	0.91	35.49		單穗水蜈蚣、鬼針草、水稻

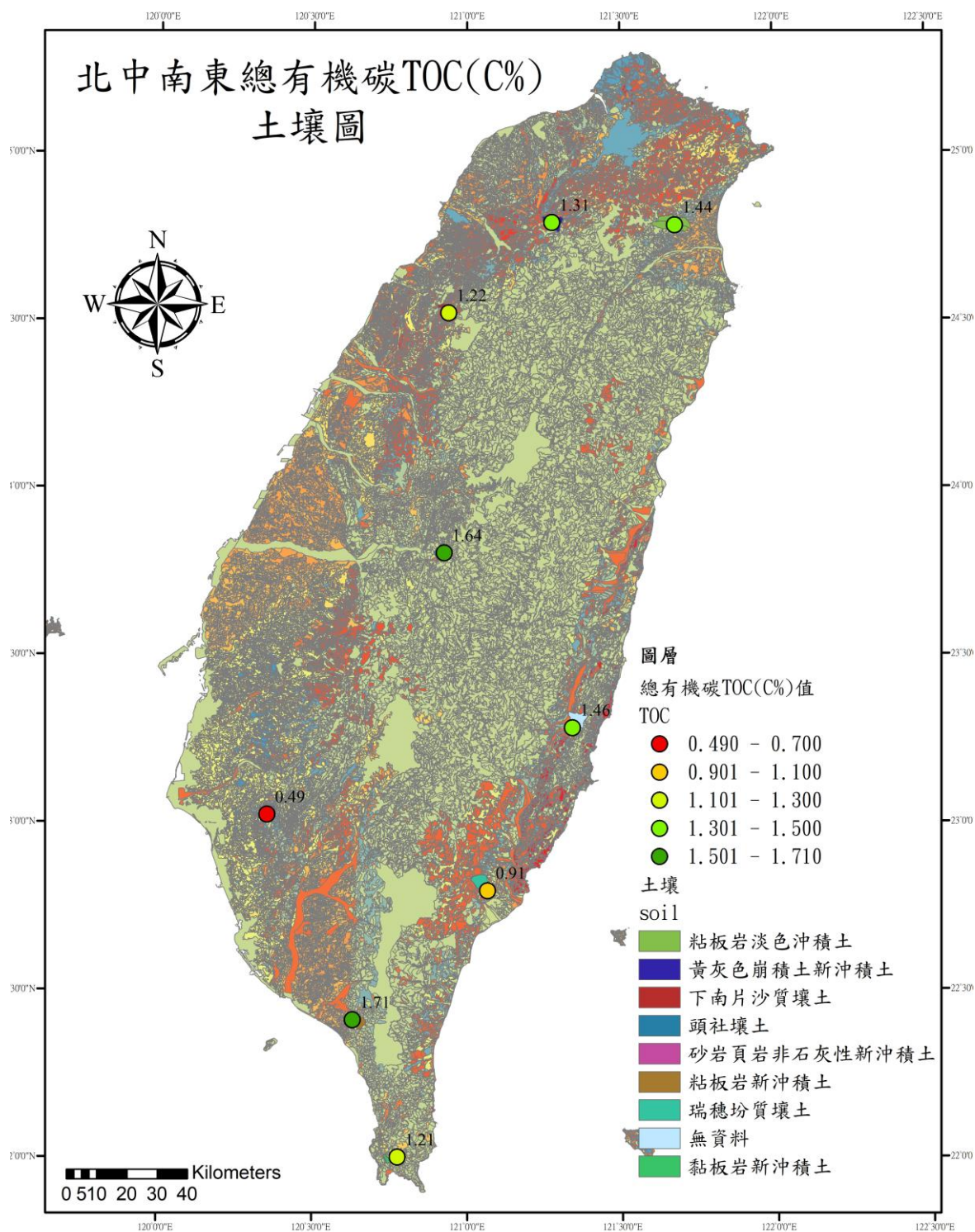


圖 3-22 北中南東採樣區不同地質對有機碳 TOC 變化分布圖

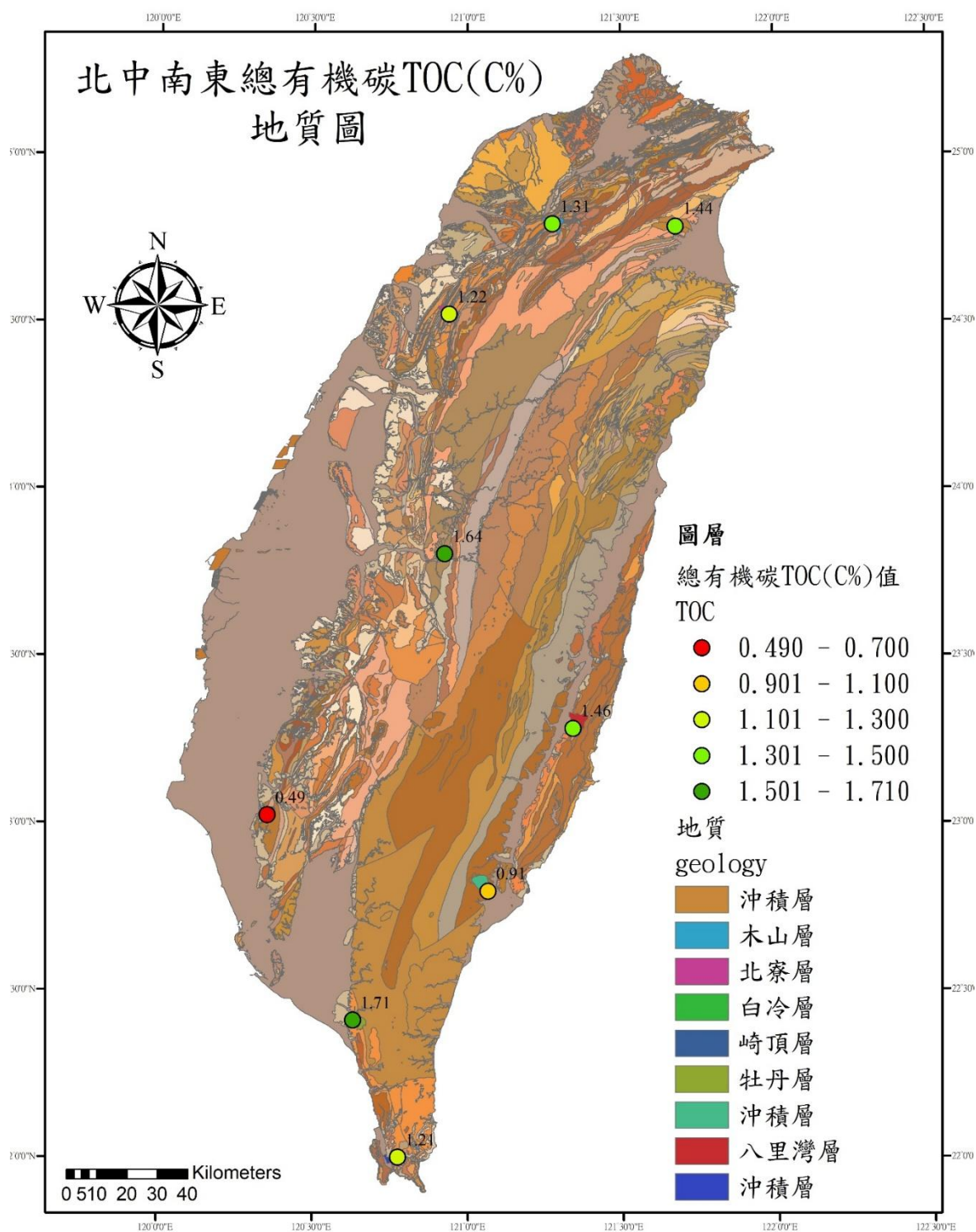


圖 3-23 北中南東採樣區不同土壤對有機碳 TOC 變化分布圖

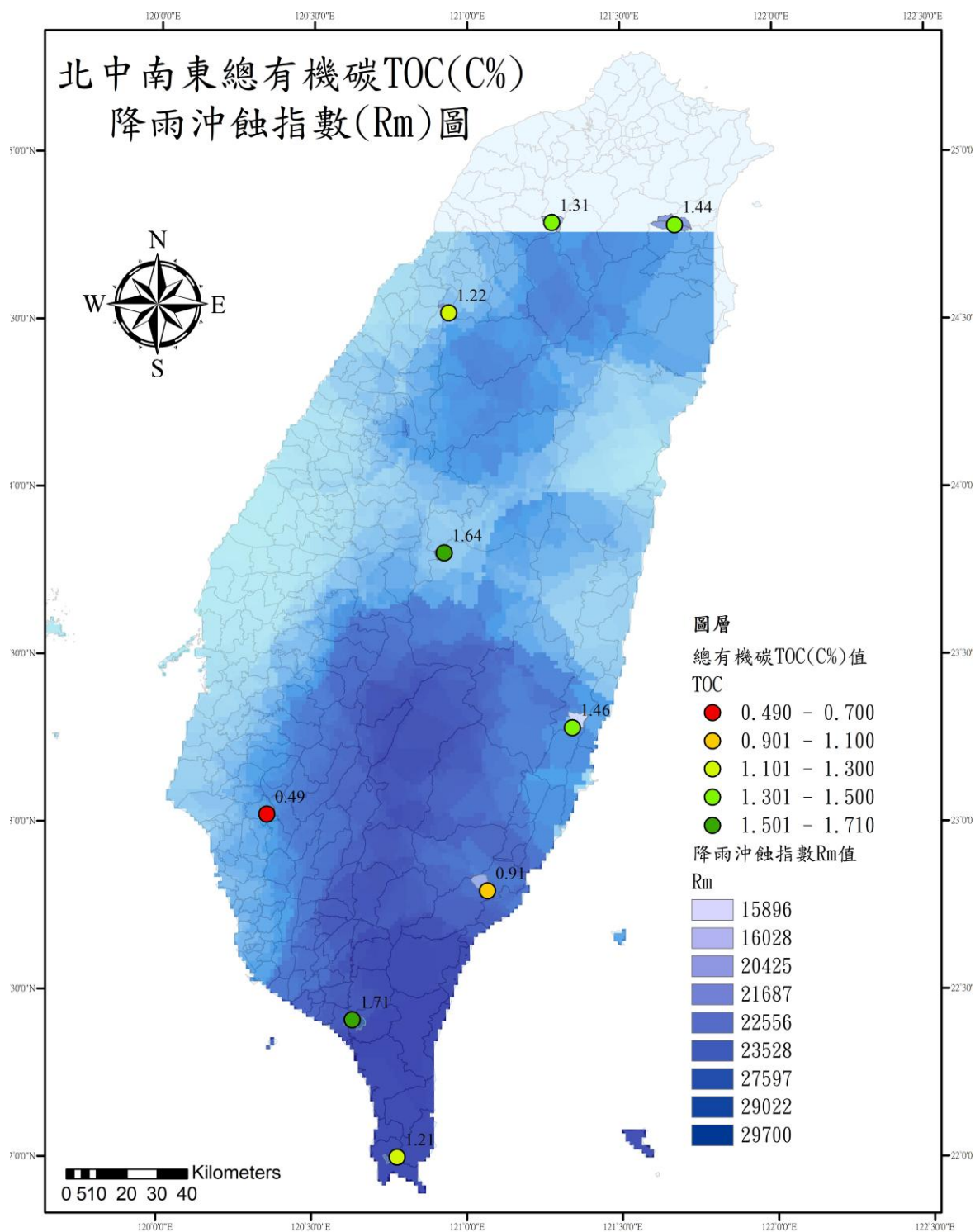


圖 3-24 北中南東採樣區不同 RM 條件對有機碳 TOC 變化分布圖

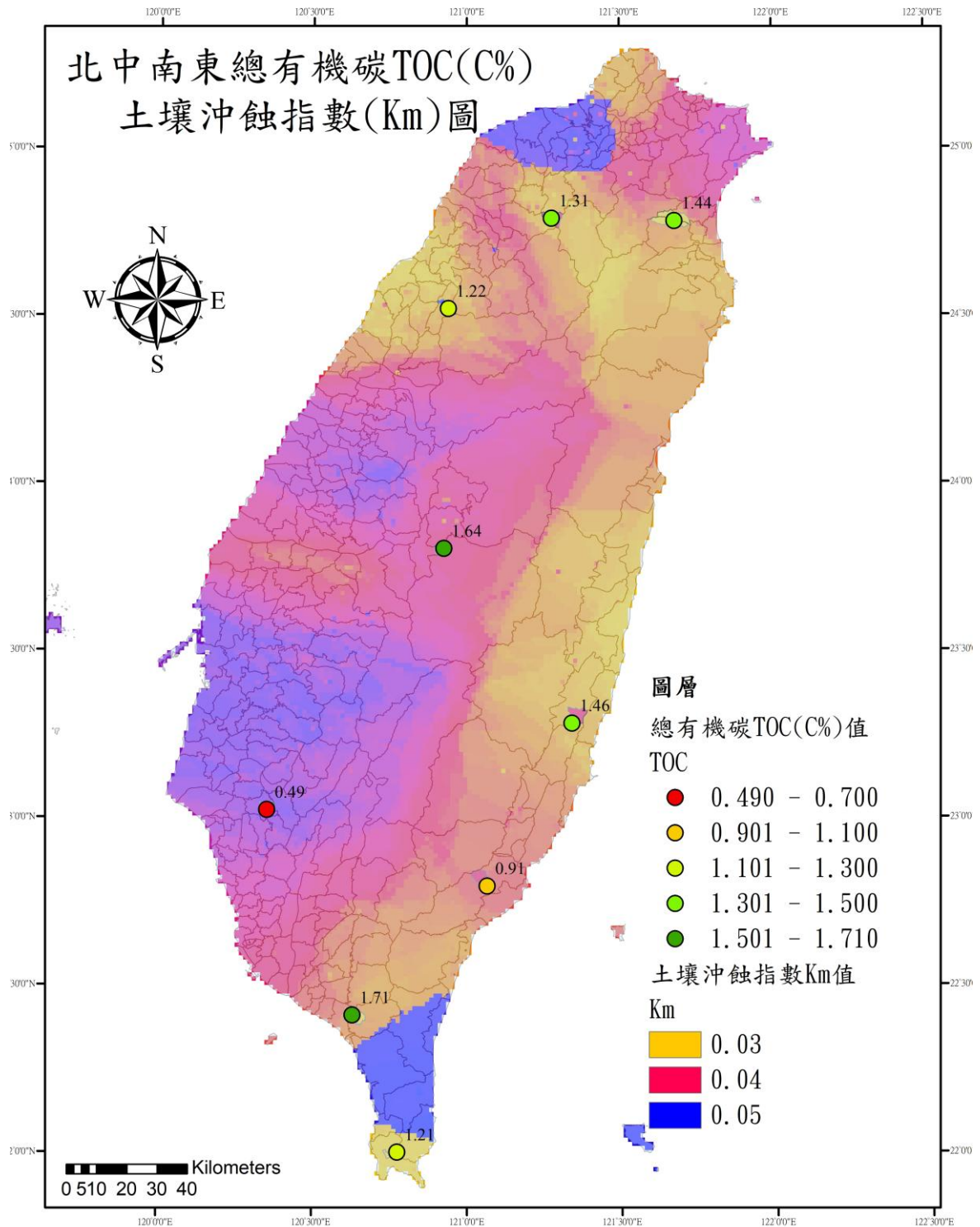


圖 3-25 北中南東採樣區不同 KM 條件對有機碳 TOC 變化分布圖

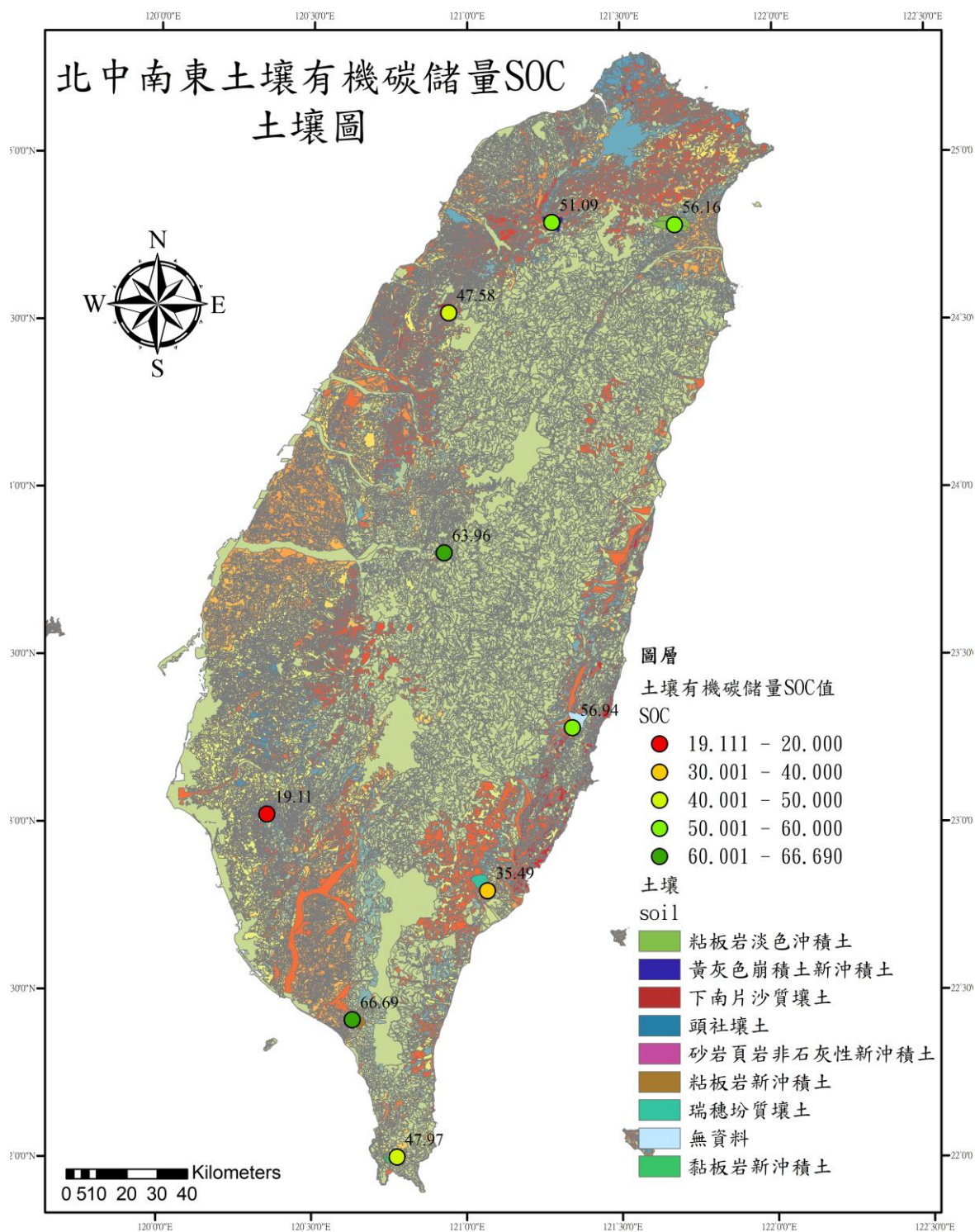


圖 3-26 北中南東採樣區不同地質對有機碳恢復率 SOC 變化分布圖

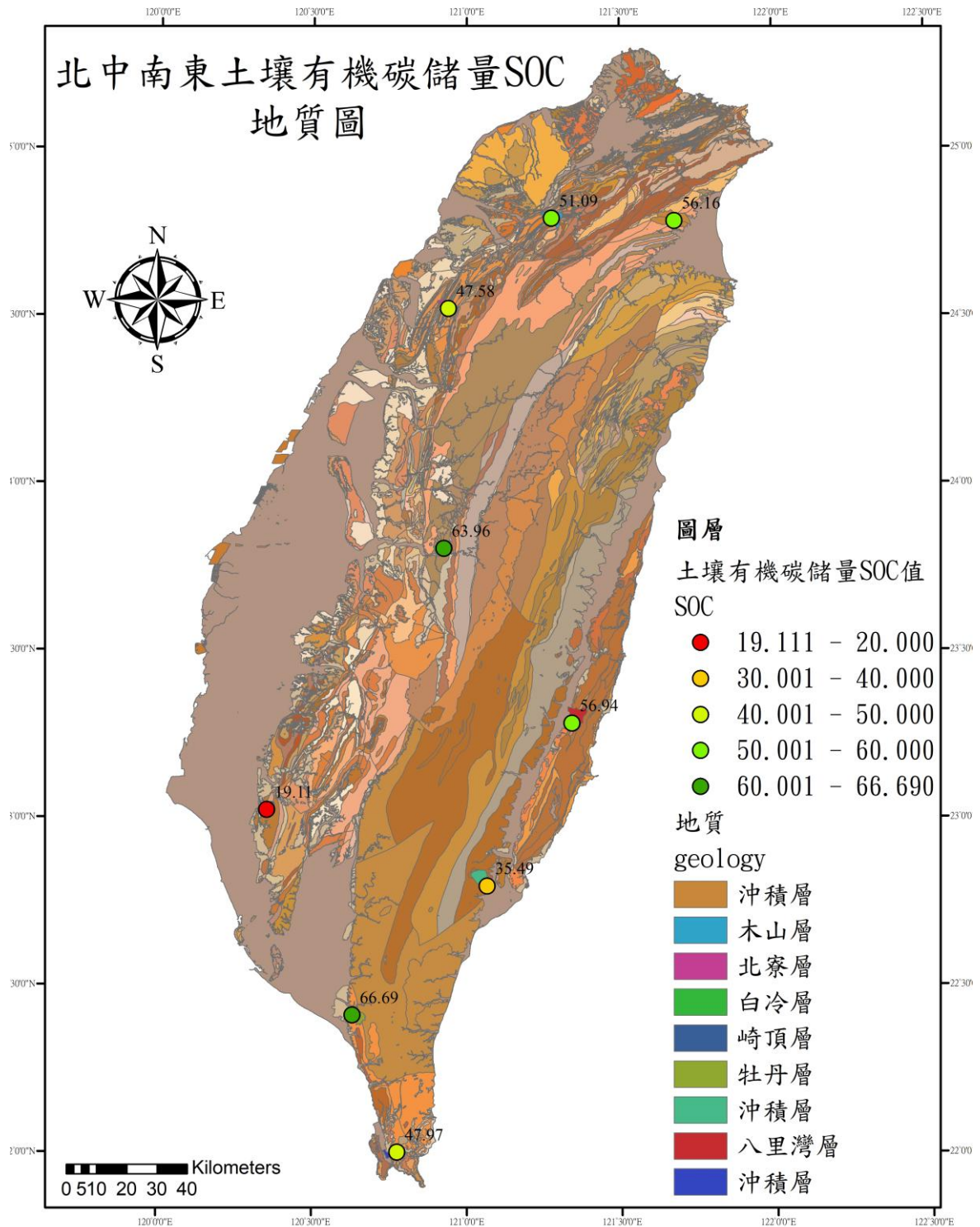


圖 3-27 北中南東採樣區不同土壤對有機碳恢復率 SOC 變化分布圖

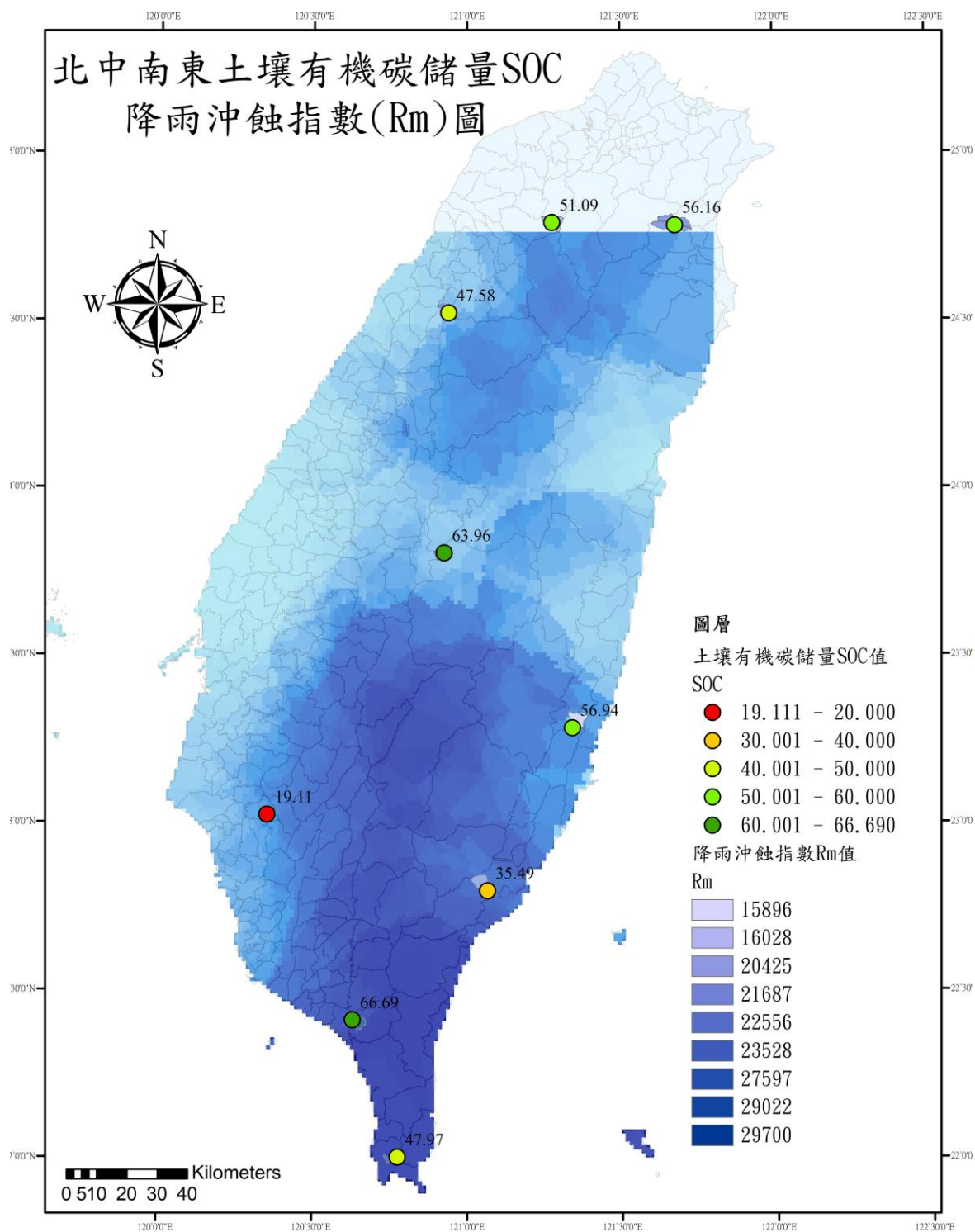


圖 3-28 北中南東採樣區不同 RM 條件對有機碳恢復率 SOC 變化
分布圖

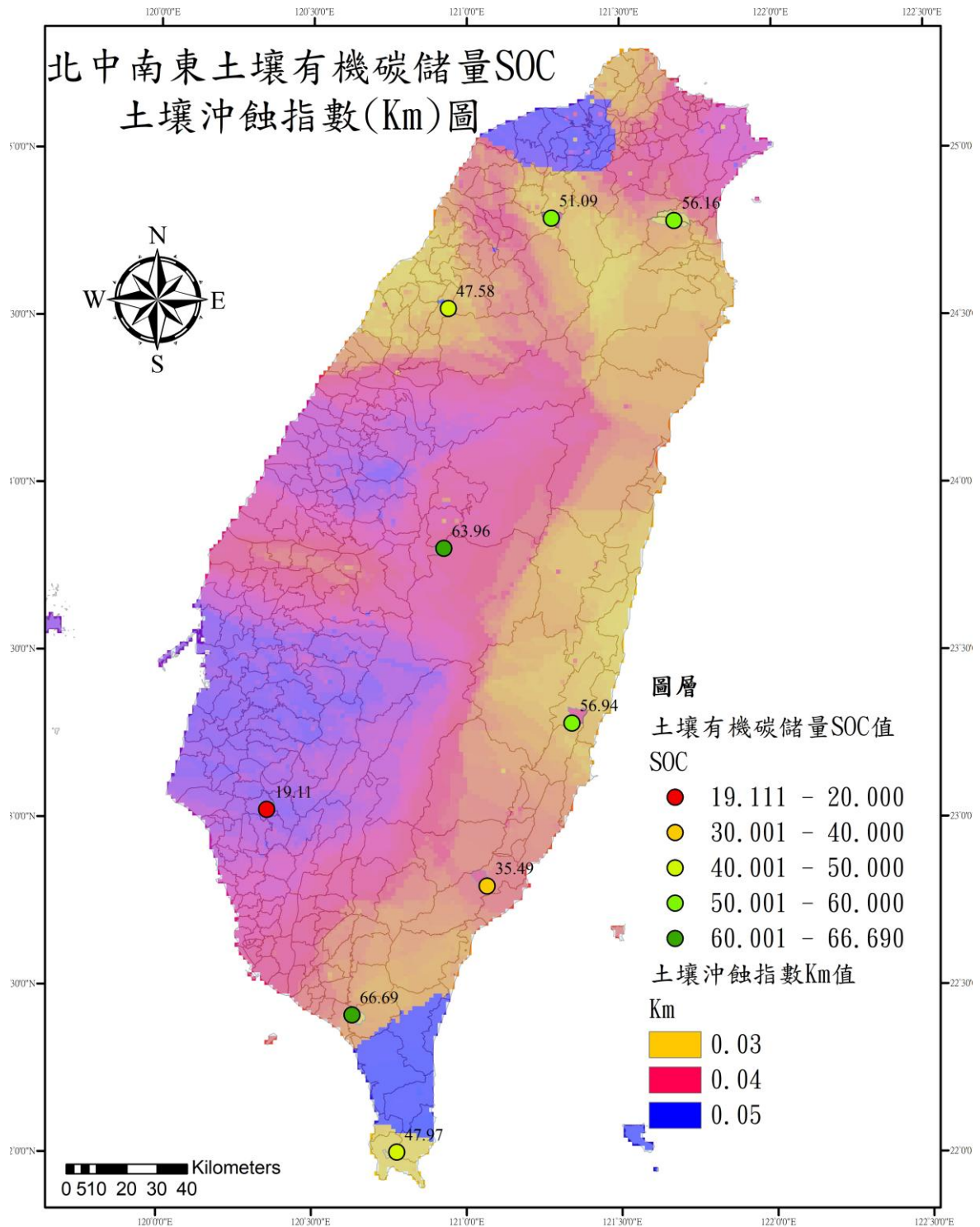


圖 3-29 北中南東採樣區不同 KM 條件對有機碳恢復率 SOC 變化
分布圖

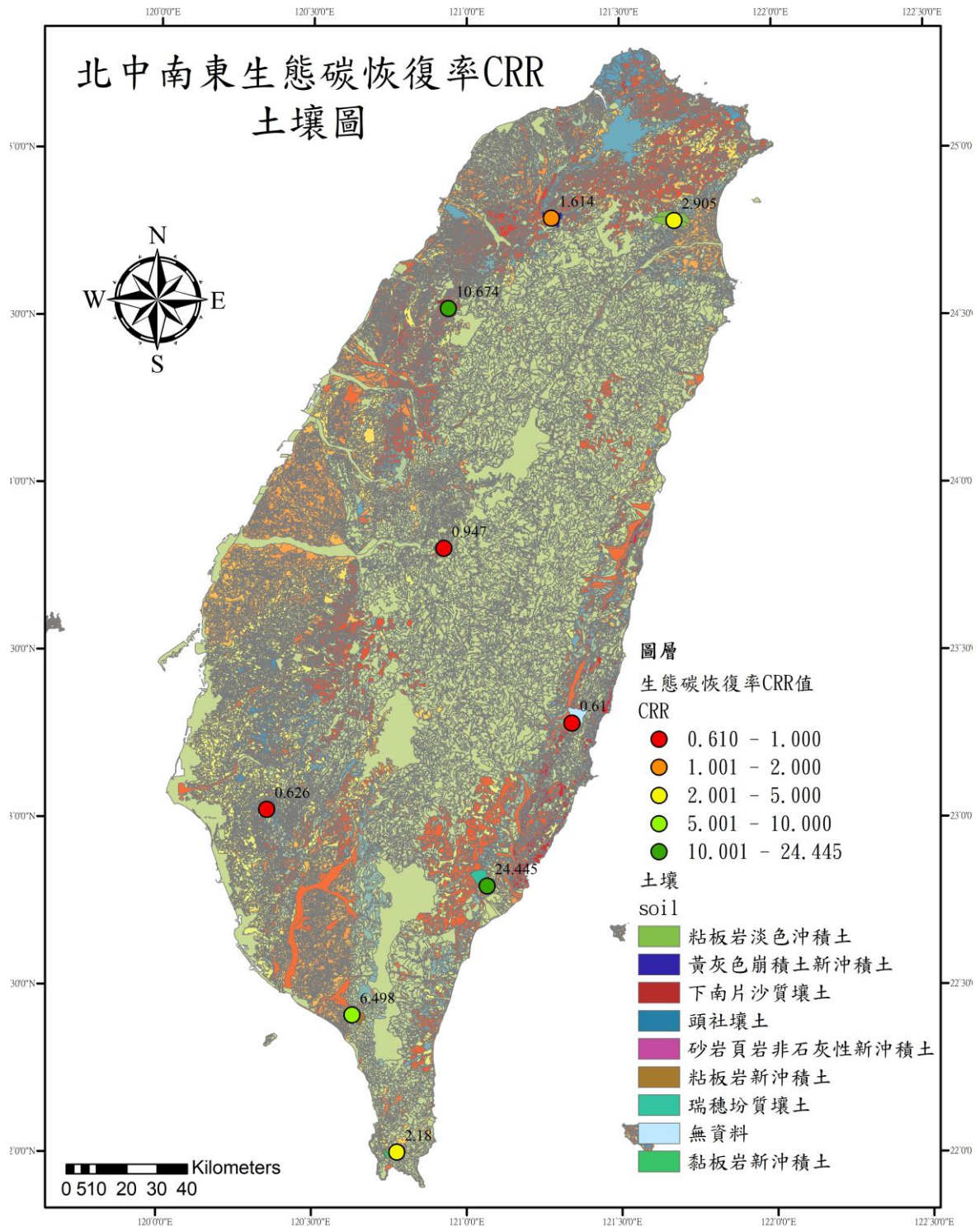


圖 3-30 北中南東採樣區不同地質對生態碳恢復率 CRR 變化分布
圖

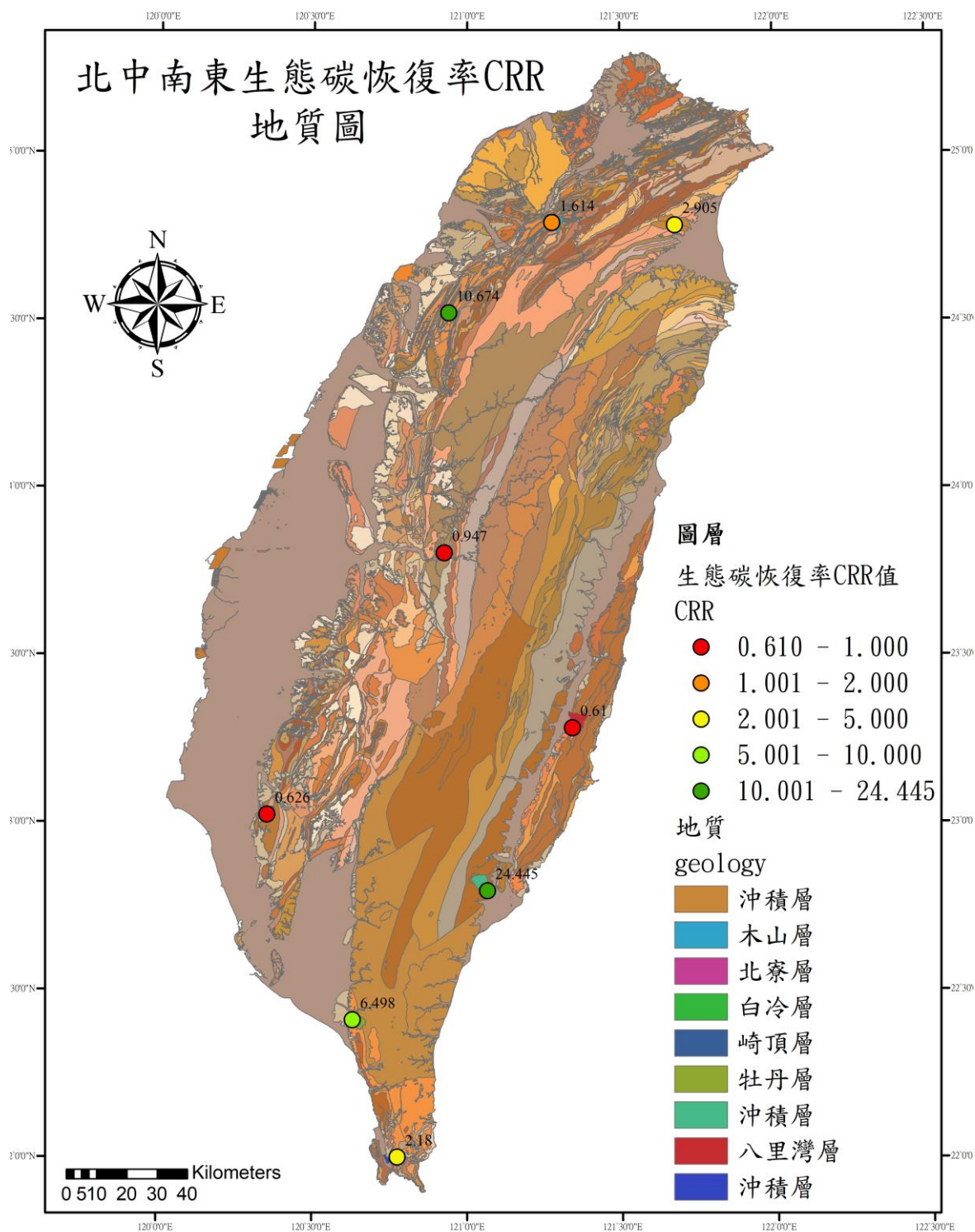


圖 3-31 北中南東採樣區不同土壤對生態碳恢復率 CRR 變化分布
圖

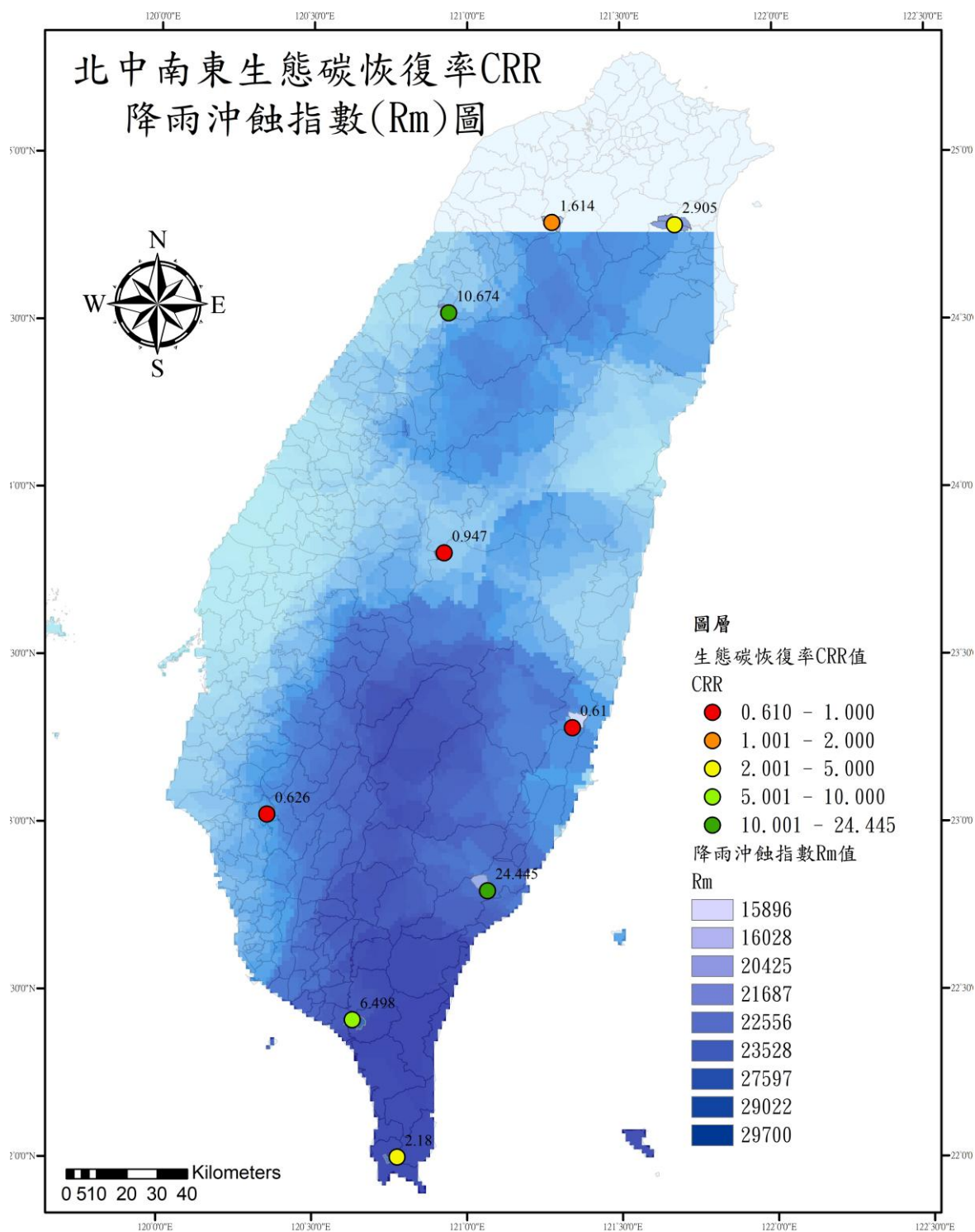


圖 3-32 北中南東採樣區不同 RM 條件對生態碳恢復率 CRR 變化
分布圖

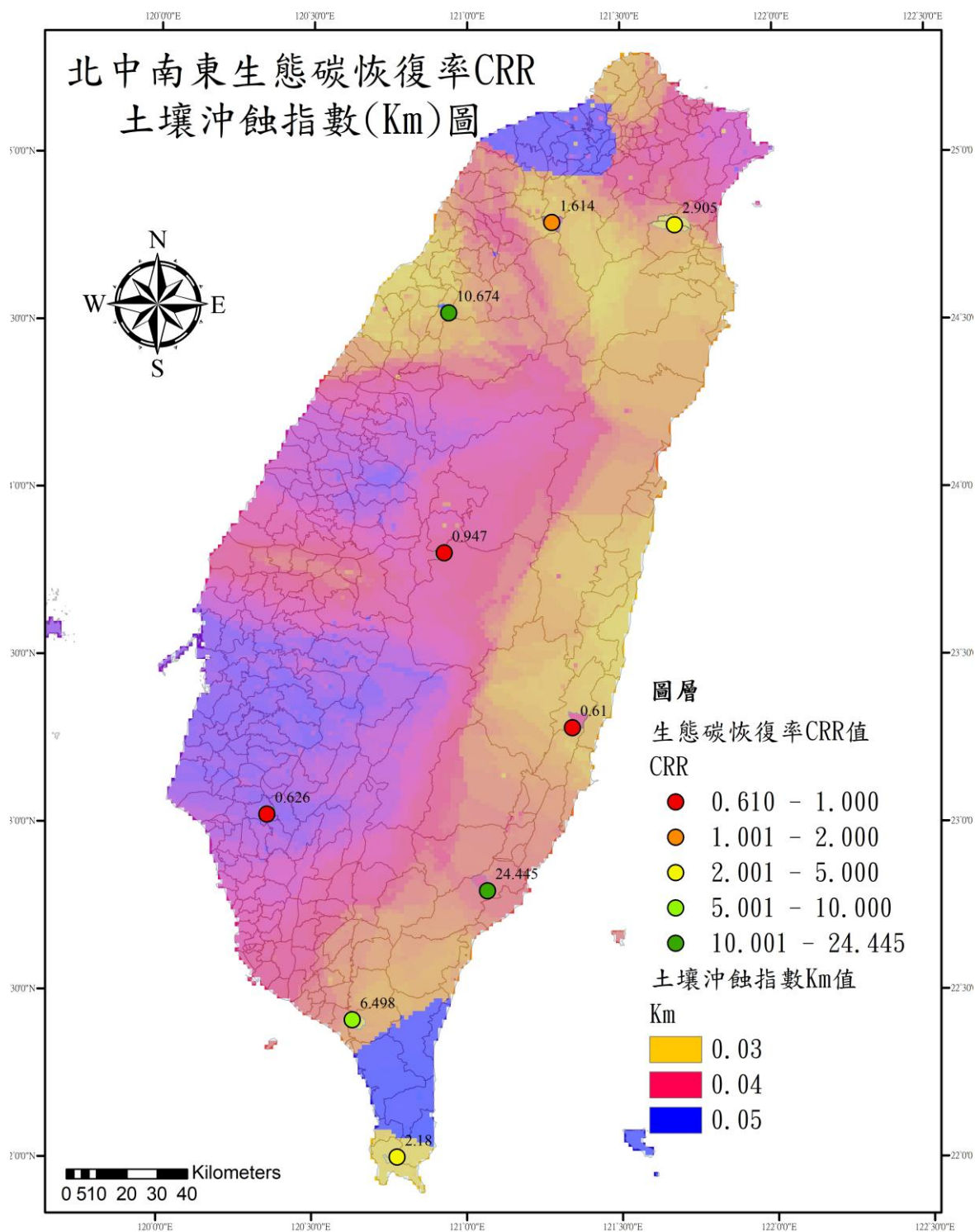


圖 3-33 北中南東採樣區不同 KM 挑件對生態碳恢復率 CRR 變化
分布圖

地質	沖積層_北 (新)	木山層_北	北寮層_中 (新)	白冷層_中	牡丹層_南 (新)	崎頂層_南	沖積層_東 (新)	八里灣層_東
土壤恢復率								
內1	45.63%	96.58%	72.25%	97.62%	105.56%	45.71%	100.55%	57.60%
內2	50.63%	77.78%	63.87%	29.17%	50.00%	70.00%	69.61%	45.60%
內3	53.75%	76.92%	49.74%	69.64%	37.04%	55.71%	44.20%	75.20%
內4	90.00%	111.97%	63.35%	78.57%	30.86%	64.29%	44.20%	44.80%
內5	75.00%	158.97%	20.42%	140.48%	29.01%	51.43%	44.20%	40.00%
內6	37.50%	61.54%	49.74%	25.00%	32.10%	55.71%	40.88%	95.20%
內7	117.50%	56.41%	46.07%	26.79%	31.48%	55.71%	79.56%	116.80%
內8	80.00%	77.78%	41.36%		69.14%	71.43%	62.98%	
土壤碳匯量								
內1	49.14	44.07	53.82	63.96	66.69	12.48	35.49	28.08
內2	42.51	35.49	47.58	19.11	31.59	19.11	24.57	22.23
內3	35.49	35.1	37.05	45.63	23.4	15.21	15.6	36.66
內4	104.52	51.09	47.19	85.02	19.5	17.55	15.6	21.84
內5	99.06	72.54	15.21	54.6	18.33	14.04	15.6	19.5
內6	32.37	28.08	37.05	16.38	20.28	15.21	14.43	46.41
內7	124.02	25.74	34.32	17.55	19.89	15.21	28.08	56.94
內8	85.02	35.49	30.81		43.68	19.5	22.23	

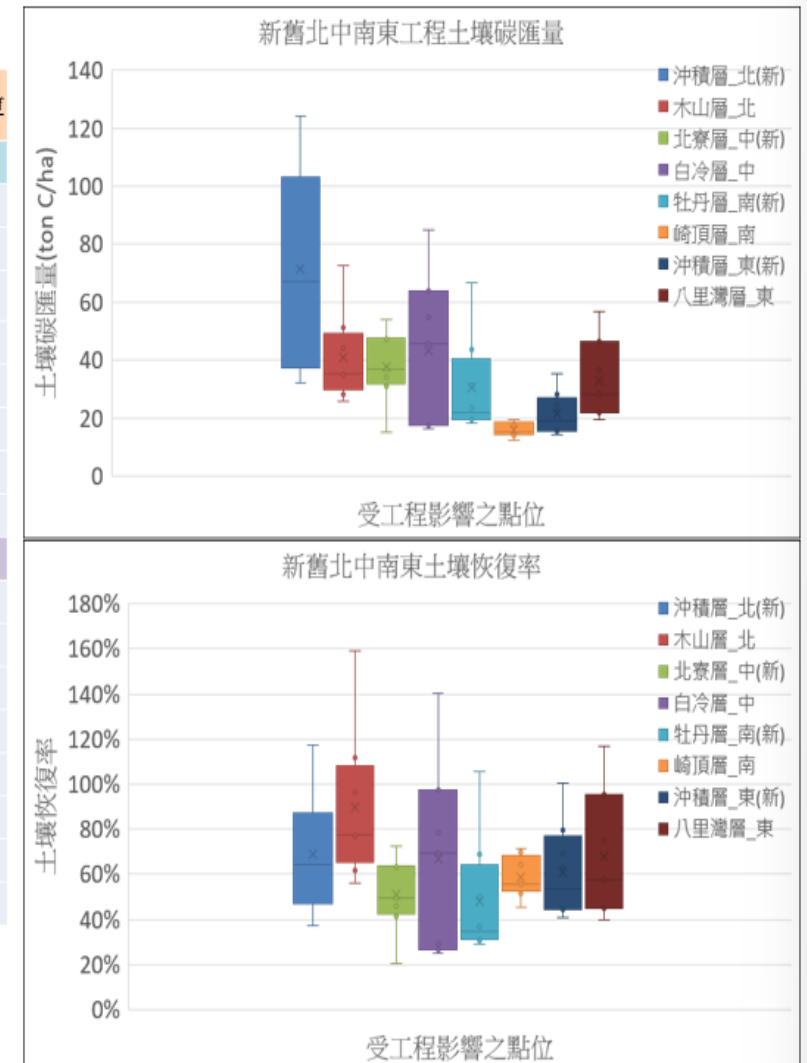


圖 3-34 114 年度新增北中南東八處採樣土壤碳恢復率及土壤碳匯量

四、碳增匯效益公式

水土保持工程固碳增匯效益(WCO_2e) 的評估，旨在量化工程在整個生命週期內對環境產生的淨碳效益。該效益是透過工程碳排放（負碳）、土砂保持固碳（黃碳）及植生增匯（綠碳）三大構面整合評估而成。

$$WCO_2e = C_yellow + C_green - E$$

(3-1)

WCO_2e ：水保工程固碳增匯總效益 (tC/ha)；

C_yellow ：土砂保持固碳量，即黃碳（正值，代表阻止土壤碳流失或恢復的碳量）；

C_green ：植生增匯量，即綠碳（淨正值，代表植被生長所吸收的碳量）；

E ：工程碳排放量（負值，代表施工過程的碳成本）

(一)工程碳排量(E ，負值)

工程碳排量估算主要量化水土保持工程在施工階段產生的碳足跡，這是一個一次性、立即產生的初始負值，不會隨時間推移而變動。

工程碳排計算使用經費估算法(根據水土保持工程減碳參考指引)，工程經費是由工程決標金額或結算金額當作依據，(12/44)是將二氧化碳當量（ CO_2e ）轉換為等碳量 (tC) 的係數：

工程碳排量(tC)=工程經費×工程類型×(12/44)

工程類型如下表：

工程類型平均每萬元碳排放量(tonCO ₂ e)	
崩塌地處理	0.5317
野溪治理	0.6447
農塘營造	0.3748
農路改善	0.5905

資料來源：水土保持工程減碳參考指引

(一)土砂保持固碳量(C_{yellow} ，黃碳，正值)

黃碳估算旨在量化工程施作後所阻擋住、不再被侵蝕與搬運出去的土壤所含之碳量，以及土壤碳隨時間逐步再碳化的動態效益。

現場量測的土壤含碳量 $\times$ 保護面積=估算增加的固碳量

$$C_t = \sum \bar{C}_i \times A_i$$

C_t ：現地整體固碳量； C ：監測點位； A ：坡地面積(單位公頃)

將各監測點位之平均值與對應坡地區塊面積相乘後加總，估算現地整體固碳量。

點位土壤碳含量計算公式如下：

$$SOC\left(\frac{tC}{ha}\right) = TOC(\%) \times BD \times D \quad (3-2)$$

TOC ：土壤有機碳含量(%)；

BD ：土壤容重(g/cm^3)；

D ：採樣深度(m)

現場採樣過程：選定點位，土壤下挖 30cm(0.3m)深度，裝袋此深度之部分土壤，使用燃燒/紅外線測定法得到土壤的總有機碳(TOC)。

(二)植生增匯量(C_{green} ，綠碳，淨正值)

綠碳旨在量化工程完工後新生或恢復之植被隨時間所吸存的碳量，屬於時間累積量，會隨年限增加而提升。

草本層現場測量過程：在每個監測點上利用直徑 25cm 透明桶隔絕土壤與草本植物層外部空氣，進行碳監測。

表土上方 2m 空氣碳測量：監測人員站在監測點位，在地表上 2m 處進行監測。

(三)臺灣北中南東水土保持工程固碳增匯效益

北中南東的黃碳與綠碳皆使用工程總影響計算。工程總影響是指該工程所有受工程影響之採樣點位加總平均值。工程面積是依照該工程的工程簡報為依據，使用地圖測繪模式估算工程面積。

1.桃園復興高遠本生橋下游(北部)

完工年	109 年
工程類型	野溪治理
工程經費	445 萬元
工程面積	1.7 公頃
地質	木山層（主要為石英砂岩及頁岩組合之沉積岩區）

採樣時間	完工年期	工程總碳排(tC)	黃碳(tC)	綠碳(tC)	WCO ₂ e(tC)
113 年 6 月 7 日(春末夏初)	4 年	-78.24	161.64	2062.37	2145.77
113 年 8 月 15 日(夏季)	4 年	-78.24	174.37	242.12	338.25
113 年 10 月 22 日(秋季)	4 年	-78.24	149.84	89.30	160.89
114 年 6 月 12 日(夏季)	5 年	-78.24	69.62	147.74	139.11

圖 3-35~圖 3-37 依序為黃碳、綠碳、工程碳排以及 WCO₂e，皆以 4 次不同採樣時間比較如圖 3-38。

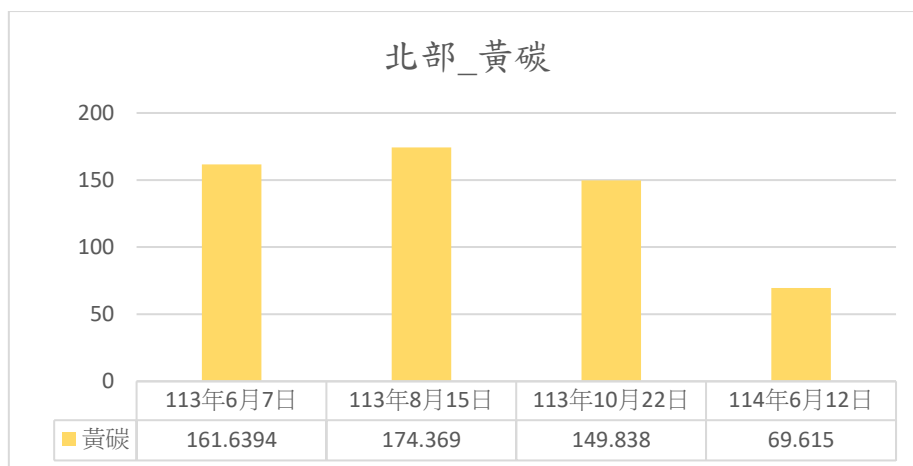


圖 3-35 北部採樣區土壤黃碳

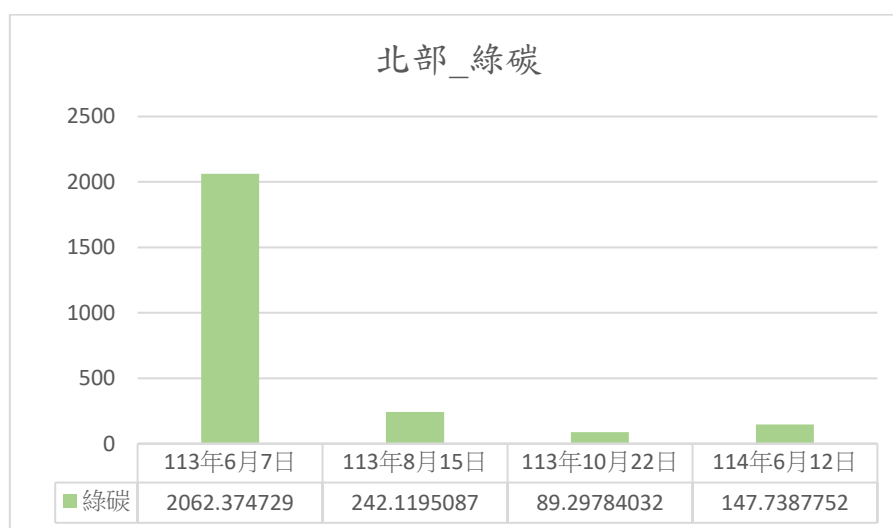


圖 3-36 北部採樣區植物增匯

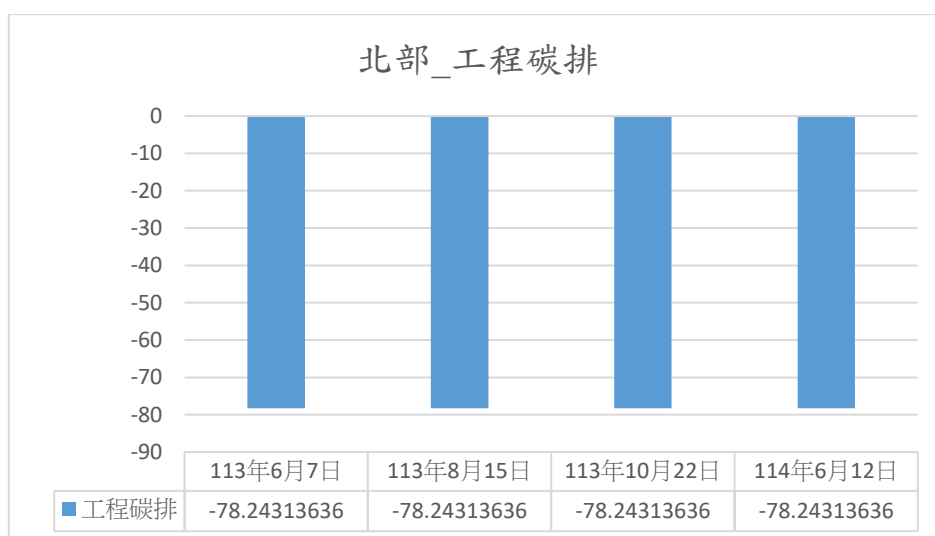


圖 3-37 北部採樣區工程碳排

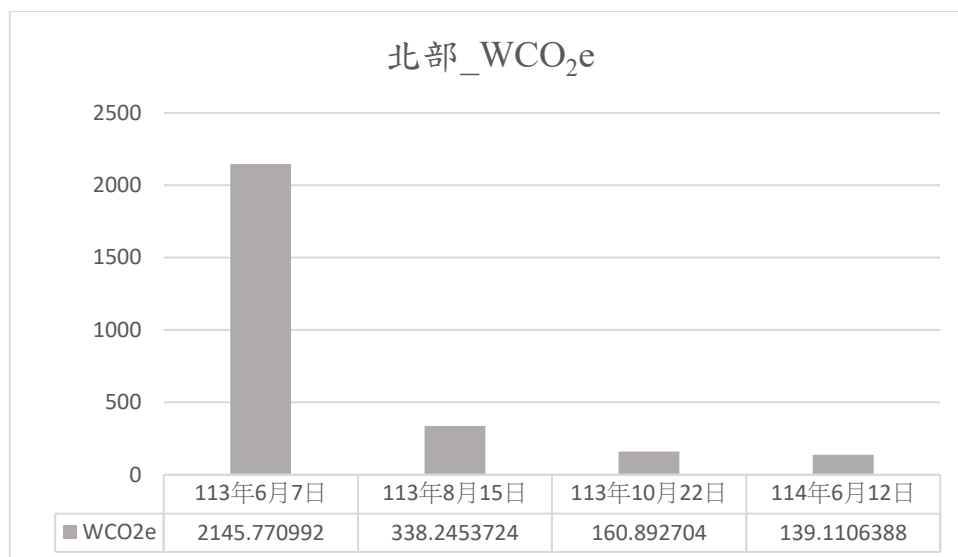


圖 3-38 北部採樣區工程碳匯

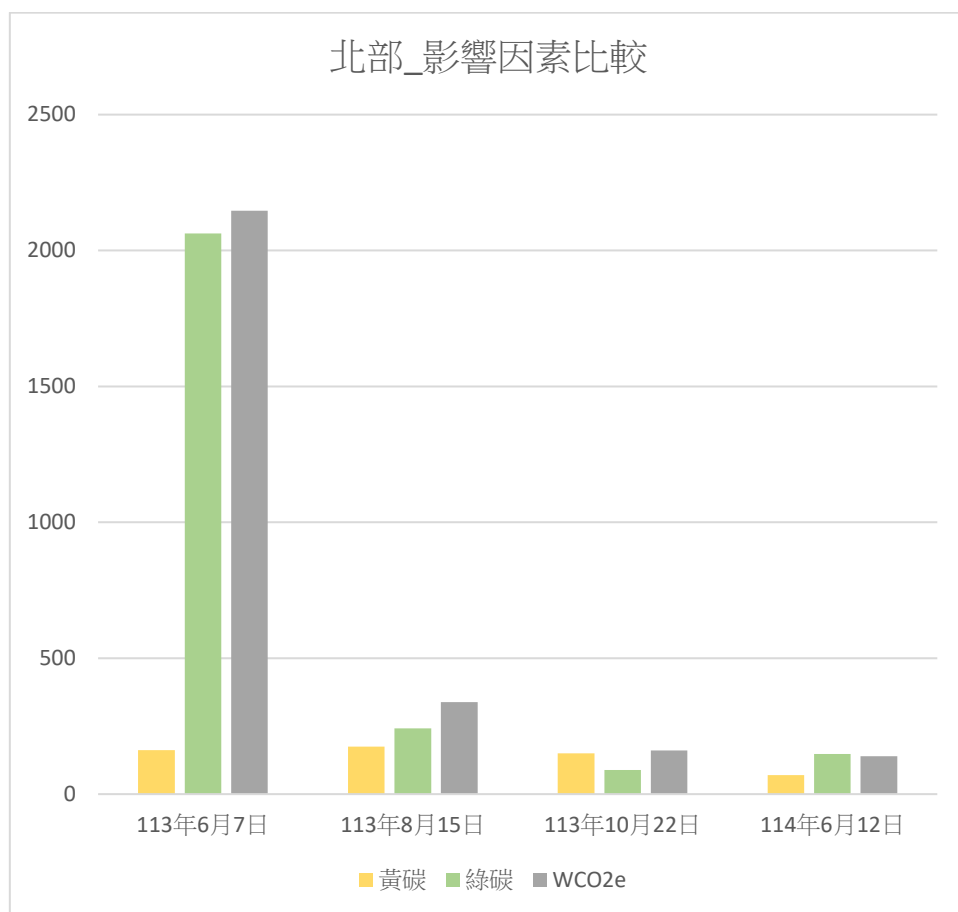


圖 3-39 北部採樣區碳匯比較

根據圖 3-39 顯示，影響北部地區WCO₂e的主要因素在綠碳。特別是在 113 年 6 月 7 日（春末夏初）的採樣

時間，綠碳數值顯著突出，這與此時植物生長茂盛的季節特性高度相關，而北部地區由於緯度、高程較高且整體環境適合植生生長。同時，綠碳效益會隨著季節變化而有顯著起伏，顯示出季節對植生固碳能力的影響。

2.、南投水里鄉益則坑(中部)

完工年	109 年
工程類型	野溪治理
工程經費	445 萬元
工程面積	1.7 公頃
地質	木山層（主要為石英砂岩及頁岩組合之沉積岩區）

採樣時間	完工年期	工程總碳排(tC)	黃碳(tC)	綠碳(tC)	WCO ₂ e(tC)
113 年 5 月 24 日(春末)	2 年	-121.68	121.68	64.36	49.01
113 年 8 月 9 日(夏季)	2 年	-121.68	56.71	47.53	-17.44
113 年 10 月 23 日(秋季)	2 年	-121.68	43.23	33.7	-44.75
114 年 6 月 23 日(夏季)	3 年	-121.68	55.98	88.76	23.06

圖 3-40~圖 3-43 依序為黃碳、綠碳、工程碳排以及 WCO₂e，皆以 4 次不同採樣時間比較如圖 3-44。

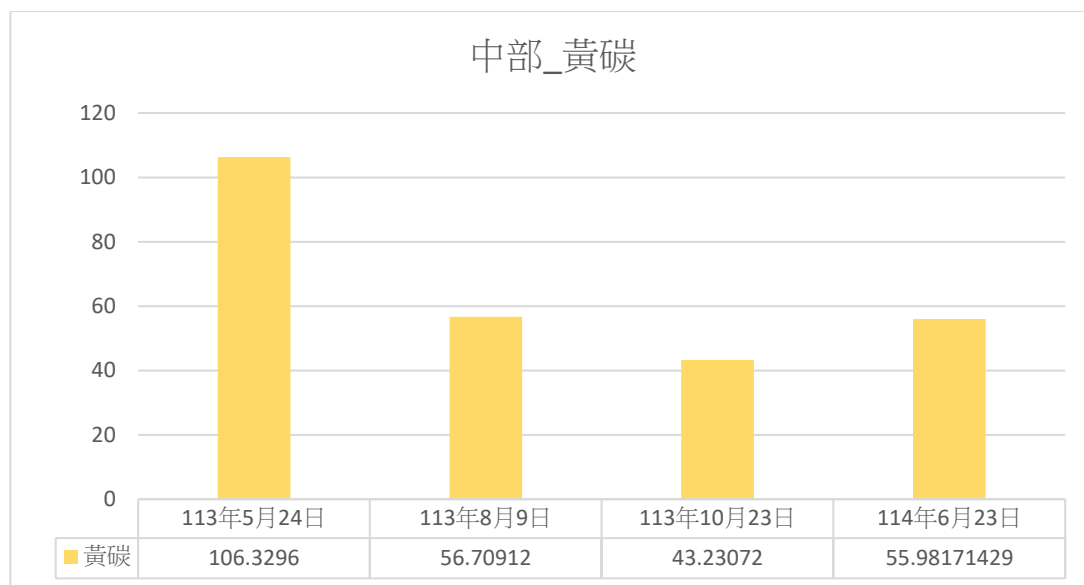


圖 3-40 中部採樣區土壤黃碳

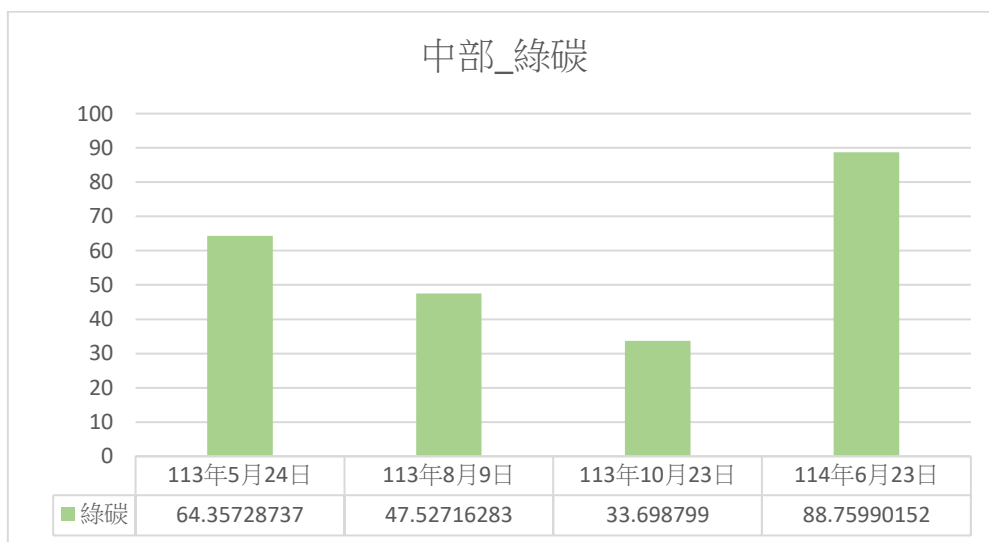


圖 3-41 中部採樣區植物增匯

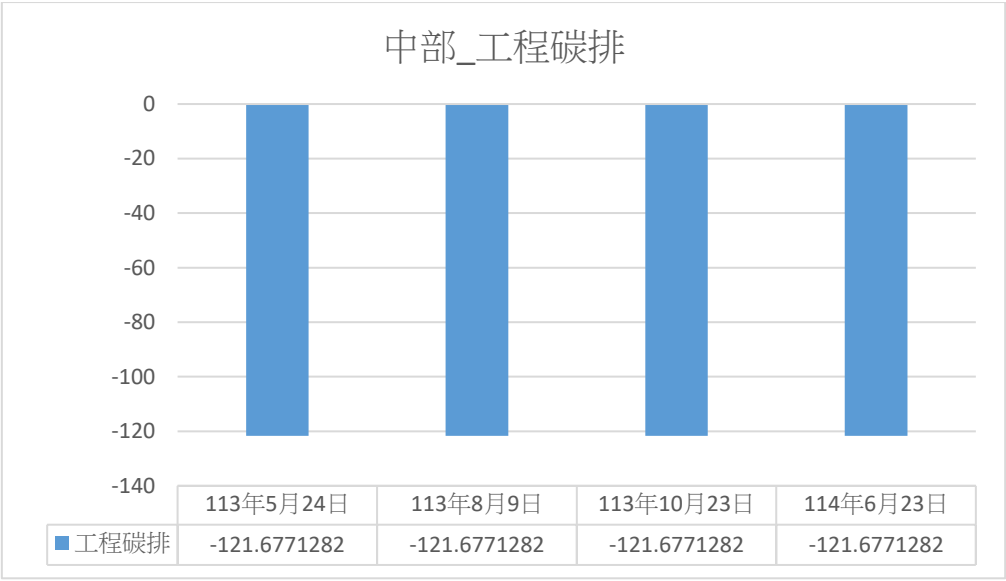


圖 3-42 中部採樣區工程碳排

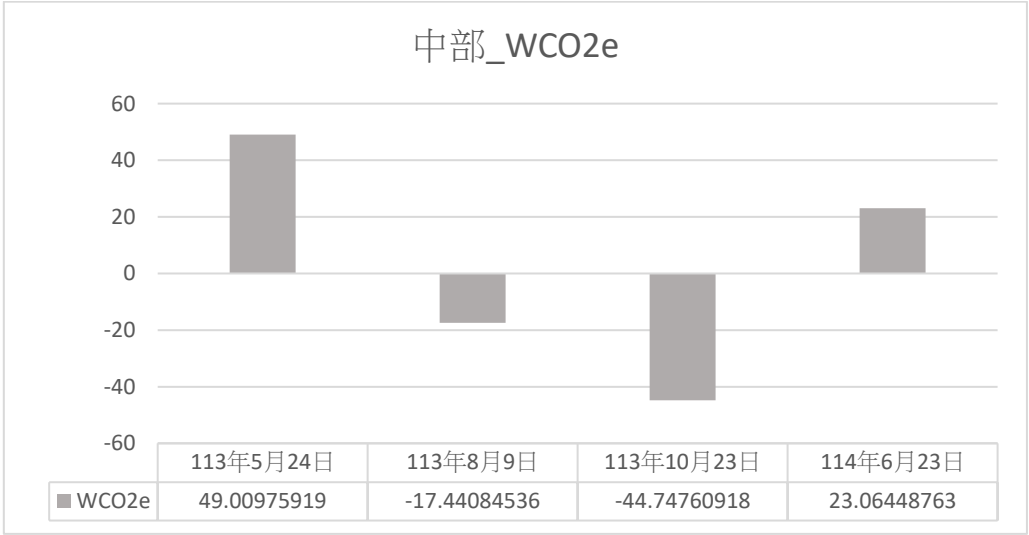


圖 3-43 中部採樣區工程碳匯

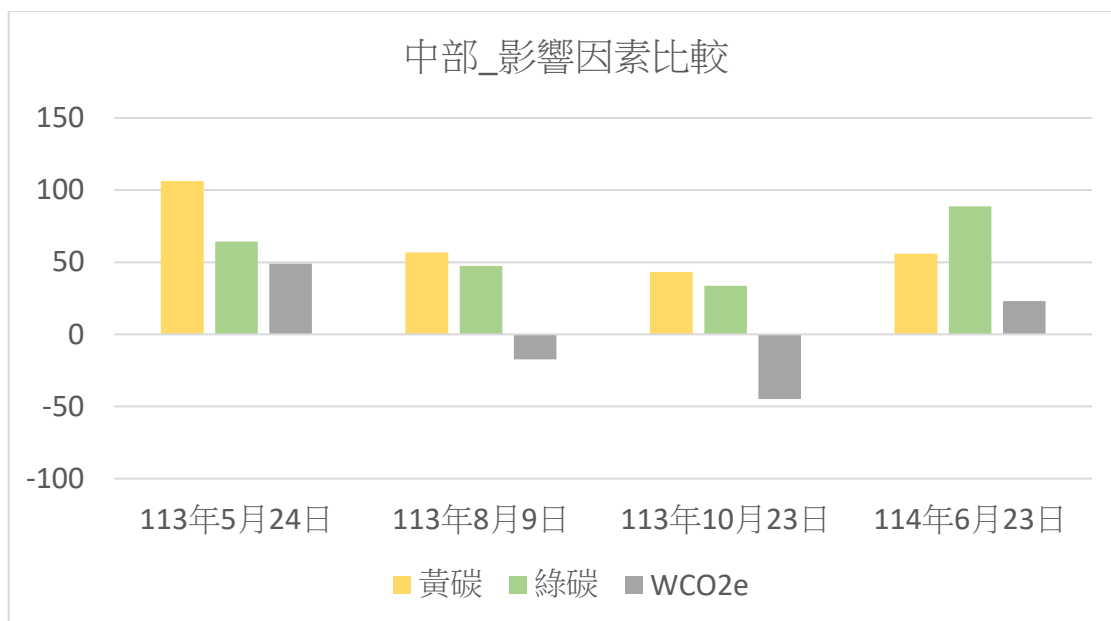


圖 3-44 中部採樣區碳匯比較

從圖 3-44 可看出中部水保工程的 WCO_2e 受土砂保持固碳量（黃碳）和植生增匯量（綠碳）兩者共同影響。其中，黃碳數值（見圖 3-42）可能受到地質條件（白冷層）和降雨量的動態影響，。而綠碳（見圖 3-43）則顯示出明顯的季節性變化，尤其在夏季表現較為突出，反映了植生在多雨季節的生長優勢。

3.台南市興化區新化林場(南部)

完工年	111 年
工程類型	野溪治理
工程經費	1491.7 萬元
工程面積	2.03 公頃
地質	崎頂層（主要底部皆為泥岩）

採樣時間	完工年期	工程總碳排(tC)	黃碳(tC)	綠碳(tC)	WCO ₂ e(tC)
113 年 5 月 31 日(春末夏)	2 年	-262.28	87.54	31.45	-143.29

初)					
113 年 7 月 30 日(夏季)	2 年	-262.28	43.20	28.76	-190.41
113 年 10 月 23 日(秋季)	2 年	-262.28	29.18	64.67	-168.44
114 年 6 月 23 日(夏季)	3 年	-262.28	83.13	22.05	-157.16

圖 3-45~圖 3-48 依序為黃碳、綠碳、工程碳排以及 WCO_2e ，皆以 4 次不同採樣時間比較如圖 3-49

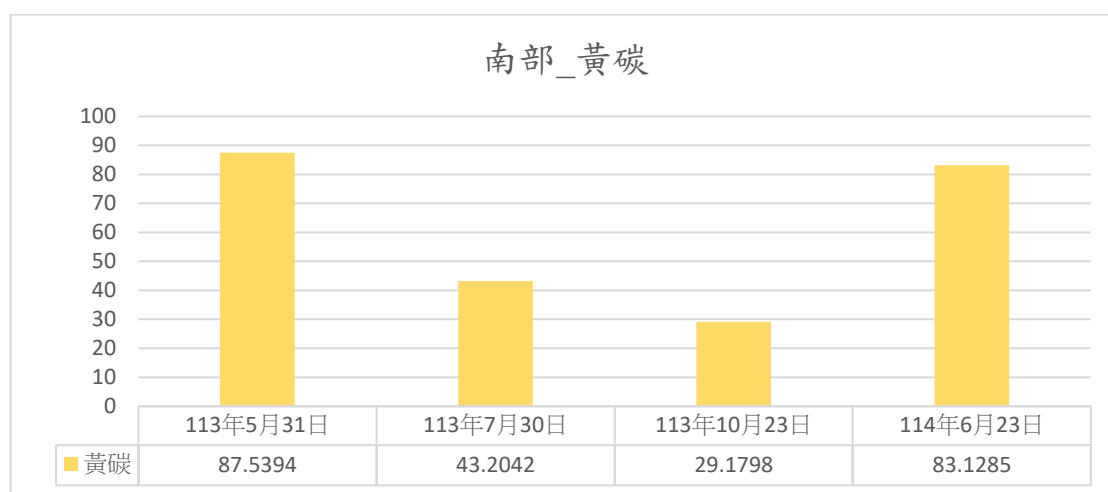


圖 3-45 南部採樣區土壤黃碳

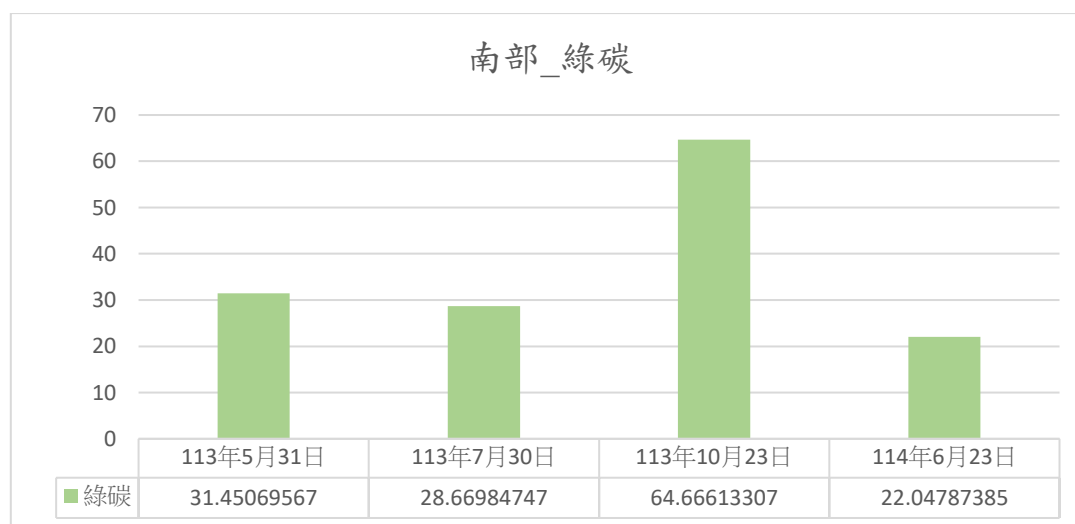


圖 3-46 南部採樣區植物增匯

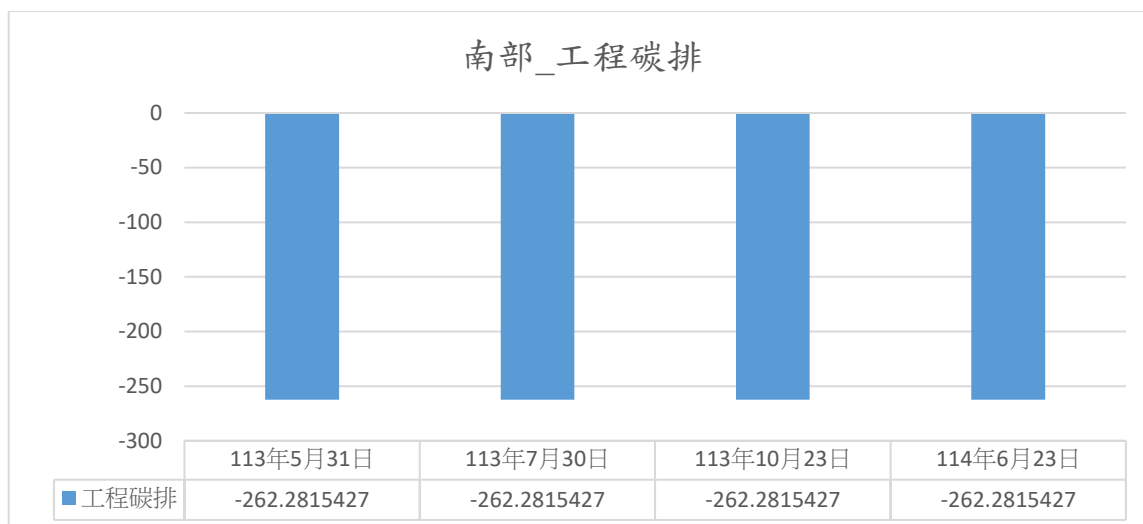


圖 3-47 南部採樣區工程碳排

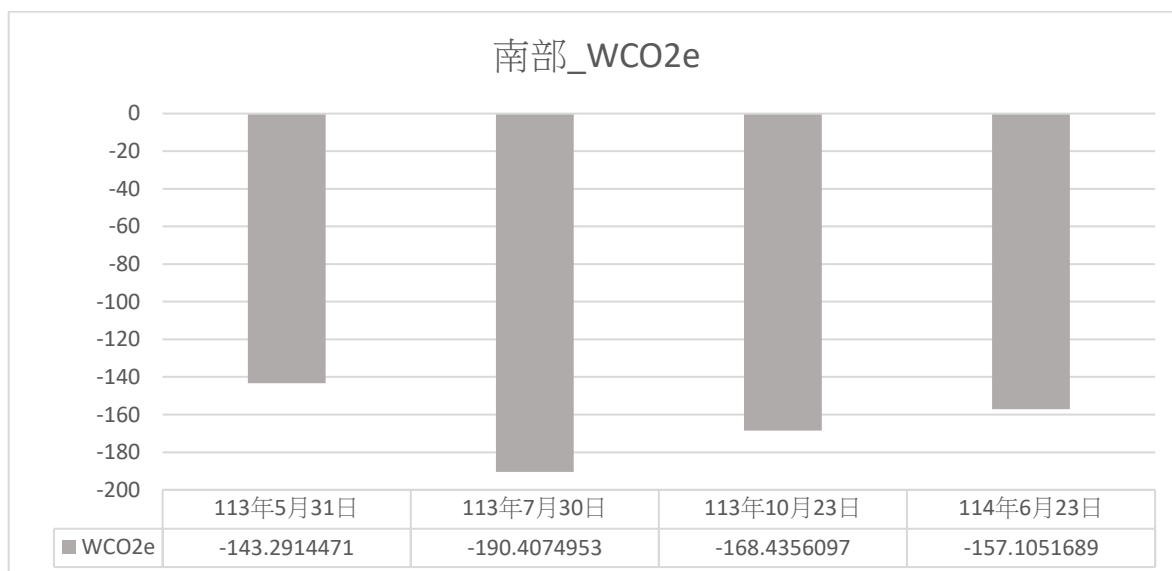


圖 3-48 南部採樣區工程碳匯

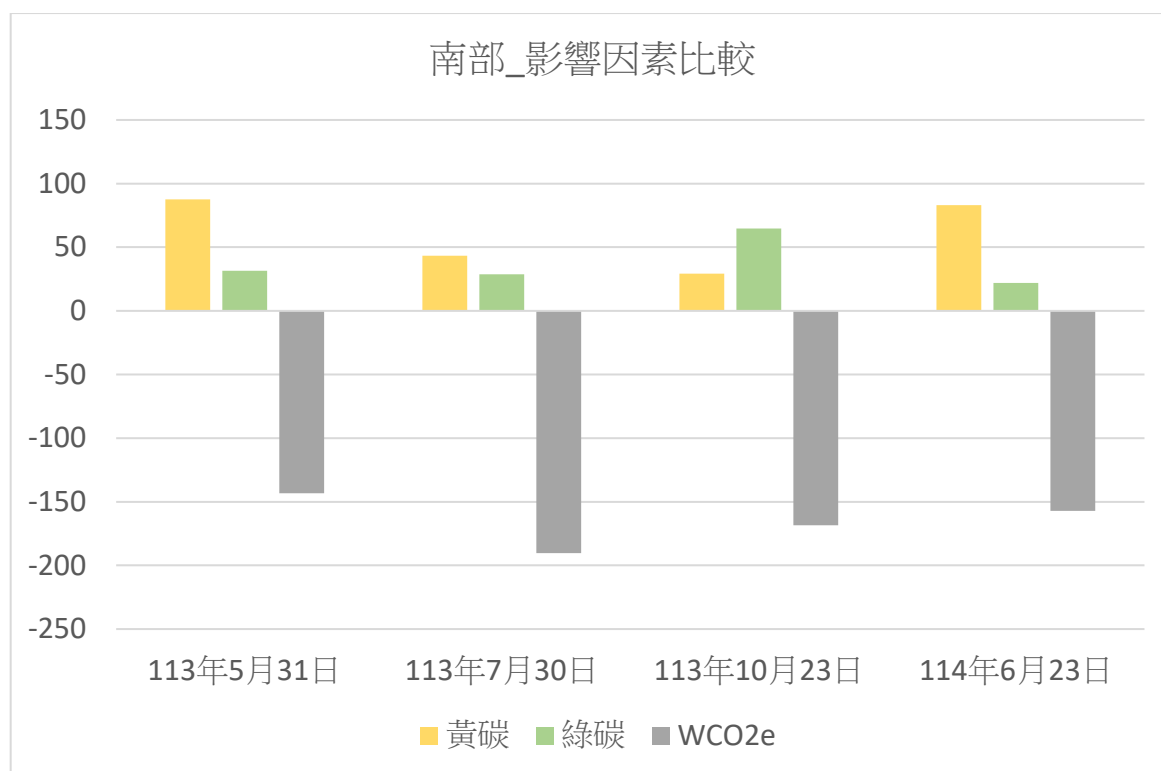


圖 3-49 南部採樣區碳匯比較

由圖 3-49 的影響因素比較可觀察到，南部地區的黃碳和綠碳在固碳增匯效果上相對較不顯著，這可能與該地區崎頂層的泥岩地質特性有密切關係。周邊植生主要以草本人工栽植為主，生長狀況不甚理想。值得注意的是，圖 3-46 顯示綠碳數值在秋季（113 年 10 月 23 日）因植生狀況而有較高的表現。

4.花蓮縣玉里鎮安通溫泉觀光區(東部)

完工年	110 年
工程類型	崩塌地處理
工程經費	834 萬 5,942 元
工程面積	0.746 公頃
地質	八里灣層（安通泥岩區）

採樣時間	完工年期	工程總碳排(tC)	黃碳(tC)	綠碳(tC)	WCO ₂ e(tC)
113 年 5 月 29 日(春末夏初)	3 年	-121.02	45.46	52.75	-22.82
113 年 9 月 3 日(夏末秋初)	3 年	-121.02	27.71	271.93	178.62
113 年 10 月 9 日(秋季)	4 年	-121.02	21.24	116.76	16.98
114 年 6 月 18 日(夏季)	4 年	-121.02	24.69	24.35	-71.99

圖 3-50~圖 3-53 依序為黃碳、綠碳、工程碳排以及 WCO₂e，皆以 4 次不同採樣時間比較如圖 3-54。

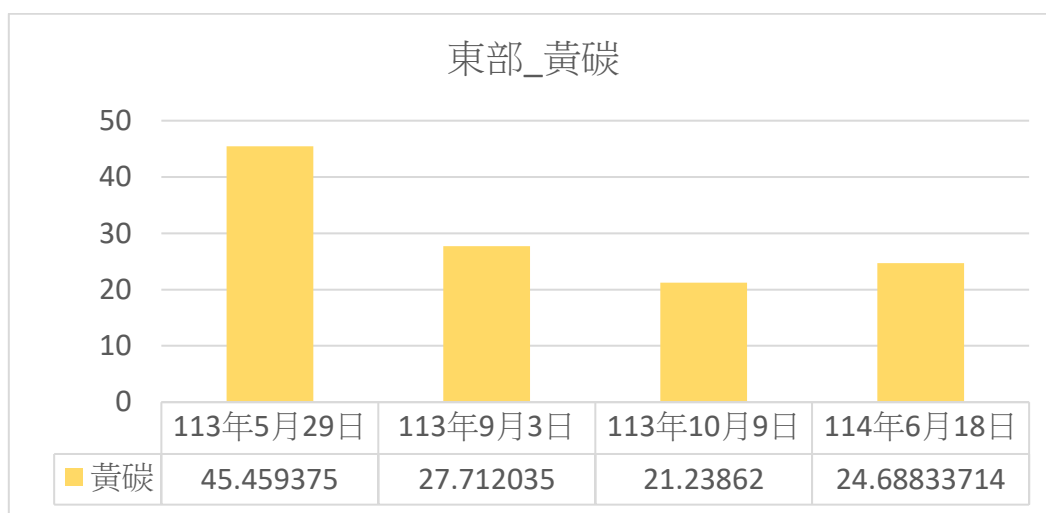


圖 3-50 東部採樣區土壤黃碳

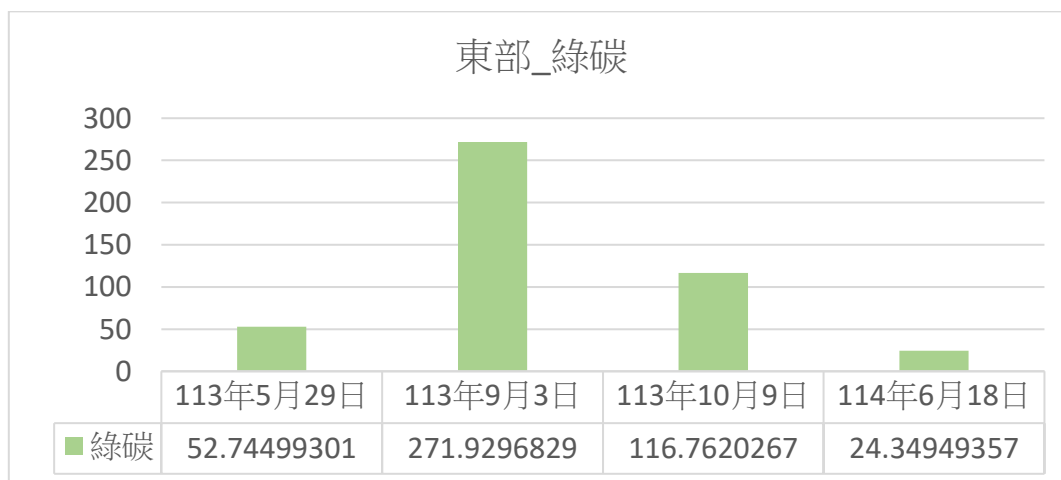


圖 3-51 東部採樣區植物增匯

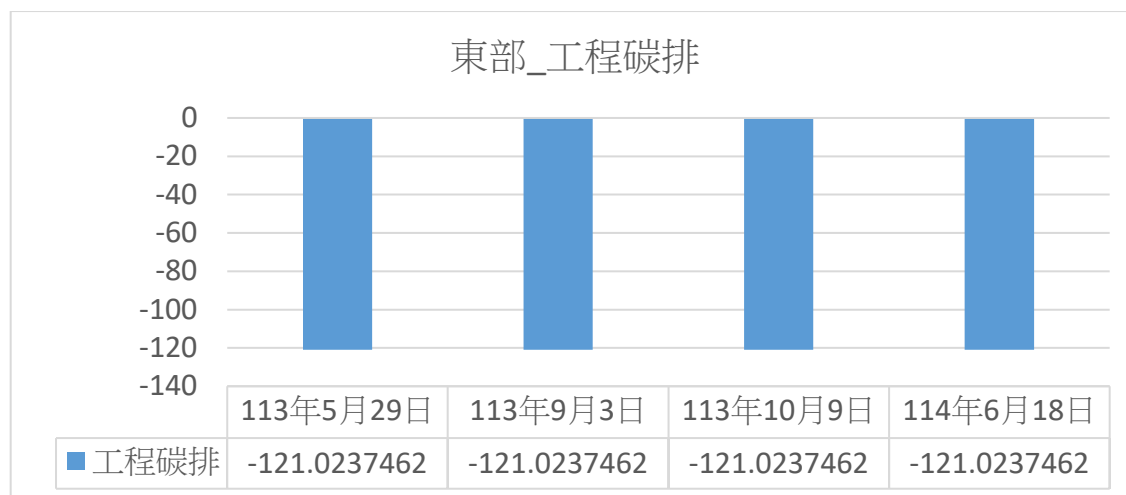


圖 3-52 東部採樣區工程碳排

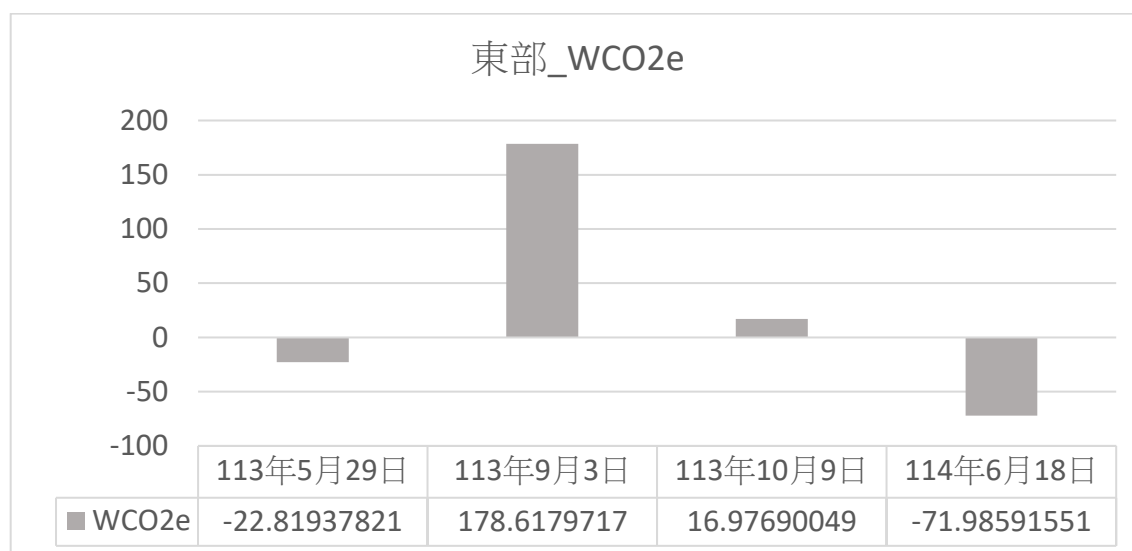


圖 3-53 東部採樣區工程碳匯

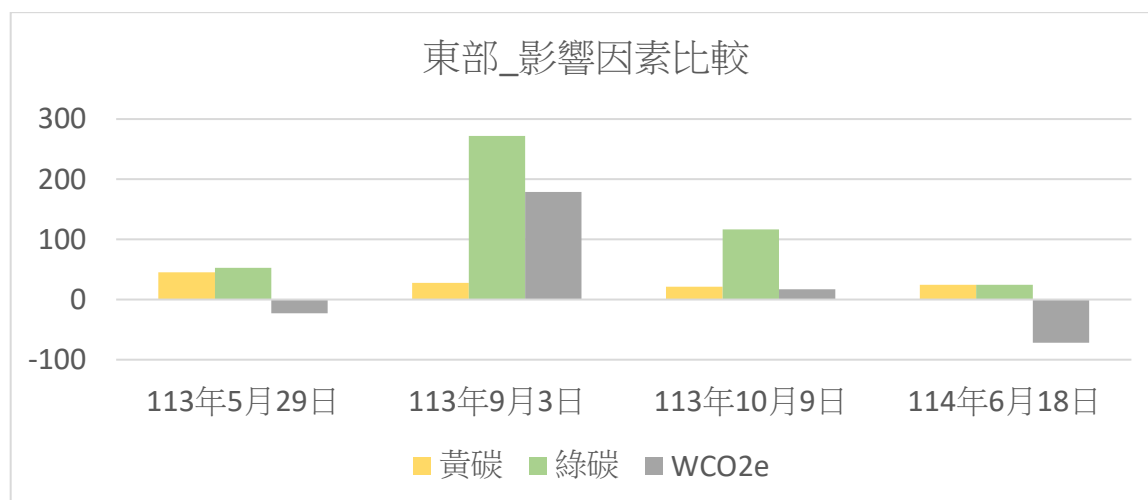


圖 3-54 東部採樣區碳匯比較

圖 3-54 分析結果顯示，東部地區的 WCO_2e 受植生增匯量（綠碳）的影響最為顯著。綠碳數值的變化（見圖 3-51）與季節和植生狀況高度相關。由於該區為八里灣層泥岩特性，且坡面僅有草本植物，導致固碳增匯成效相對有限。但在 113 年 9 月 3 日的夏末秋初，綠碳數值尤為突出，這可能與降雨影響後植生迅速生長有關。

藉由上述成果進行北中南東固碳成效比對，針對工程施作年份與 soc 總有機碳檢測成果， $y=3.5358x+38.414$ 進行以下討論，因為季節變化，SOC 北部會在乾季被高估 40-60%，中部則是低估 70-90%，南部甚至初期低估近乎 160%，但是後續接近，而東部設低估 180-230%，表示土壤的溼度以及地表植物影響甚大。

	M	YEAR	RM	KM	SOC	實際 SOC	ERR%
北 1	6	3	16028	0.041	49.1214	45.46	-7.45
北 2	8	3	16028	0.041	49.1214	27.71	-43.59
北 3	10	4	16028	0.041	52.6572	21.24	-59.66
北 4	6	4	16028	0.041	52.6572	24.69	-53.11
中 1	6	2	29022	0.0407	45.5856	87.54	92.03
中 2	8	2	29022	0.0407	45.5856	43.20	-5.23
中 3	10	2	29022	0.0407	45.5856	29.18	-35.99
中 4	6	3	29022	0.0407	49.1214	83.13	69.23
南 1	6	2	23528	0.0525	45.5856	121.68	166.93
南 2	8	2	23528	0.0525	45.5856	56.71	24.40
南 3	10	2	23528	0.0525	45.5856	43.23	-5.17
南 4	6	3	23528	0.0525	49.1214	55.98	13.96
東 1	6	4	15896	0.0437	52.6572	161.64	206.97
東 2	8	4	15896	0.0437	52.6572	174.37	231.14
東 3	10	4	15896	0.0437	52.6572	149.84	184.56
東 4	6	5	15896	0.0437	56.193	69.62	23.89

第四章 水土保持工程實現碳中和關鍵技術分析評估

本工作項目將透過文獻回顧及案例分析等研究方法，深入評估減碳技術在水土保持工程的應用現況。蒐集農業部農村發展及水土保持署、農業部林業及自然保育署、經濟部水利署等相關單位元相關工程實績資料外，也將彙整日本、中國、歐美等先進國家的水保工程減碳技術發展經驗。特別著重在崩塌地治理、野溪整治、集水區整治工程等不同類型水保設施的減碳技術應用案例。

本研究採用三階段方法進行水土保持工程減碳技術之評估與分析

- 第一階段主要進行案例分類，將蒐集到的國內外水土保持工程實例依照工程性質分為三大類：崩塌地治理、野溪整治及集水區整治工程。透過文獻回顧及實地調查，系統性地整理各類工程的特性、施工方式及目前採用的減碳措施。作為後續分析的基礎。
- 第二階段針對不同工程類型，歸納其可採用的減碳工法，主要分為四大類：綠色工法（如生態工程、植生工程等）、低碳材料（如透水性混凝土、再生材料等）、能源替代方案（如太陽能、微水力發電系統等）及智慧化管理措施。本階段將分析各類工法的技術特點、適用條件及實施效果，建立工法分類架構。本研究針對工程的防災功能、結構安全性、耐久性等方面向進行全面性評估，確保減碳技術與能源替代方案的應用不會影響工程效能，並能實質提升設施的永續性。為確保研究成果的實用性，本計畫擬邀請產官學研各界專家進行深度訪談，瞭解減碳技術在實務應用上可能遭遇的困難與限制。透過現地查核及調查，蒐集第一手的施工與維護管理資訊，

並進行詳細的成本效益分析，評估技術應用的經濟可行性。特別注重台灣特殊的地理環境條件、氣候及工程需求對技術應用的影響及評估工程固碳及增匯效益，確保研究建議能切合本土實務需求。

- 第三階段則是根據工程效益、技術成熟度、經濟可行性及施工難易度等面向，對各項減碳工法進行重要性評估，技術效益評估方面，本計畫進行相關評估包含碳減量效益、工程功能性、經濟可行性、維護管理便利性等面向。通過案例比較分析，歸納不同減碳技術在各類型水保工程的適用條件與限制因素。同時，也將評估現行法規制度、工程預算編列方式對減碳技術應用的影響，提出相應的政策建議。

在此前提之下如何在確保工程結構安全性與防災功能，探討水土保持工程實現碳中和的技術路徑，具有重要的理論價值。本計畫擬系統性分析各類型水土保持設施（包括護岸、固床工、擋土牆、防砂設施、邊坡處理等）在規劃設計、施工及營運維護等階段的碳排放，並著重探討替換能源、生態工法、低碳材料替代（如透水性混凝土、再生材料）、現地植生工程、智慧化施工管理等減碳關鍵技術的可行性與效益，在維持工程效能的同時，推動防災減災領域的碳中和之路徑。

第一節 評估現有減碳技術在水保工程中的應用案例分析

本計畫將整合案例分析，針對台灣各類型水保工程提出具體可行的減碳技術建議，包含技術選擇準則、施工方法優化建議、維護管理策略等。同時也將研擬技術導入指引，協助工程單位逐步落實減碳技術的應用。

本計畫參考國內外相關資料，水土保持工程主要以安全、生態、

經濟與景觀這三主軸發展，而安全往往是居民最為重視之項目，因此安全指標所強調的是工程之安全性、舒適性。此指標所衍生之評估

根據行政院農業委員會水土保持局（現為農業部農村發展及水土保持署）的相關規範與手冊，以下將國內外水土保持工程實例，依其性質分為三大類進行整理，並探討其特性、施工方式及減碳措施。

一、崩塌地治理工程

崩塌地治理工程的主要目的是穩定坡面，防止土壤和岩石繼續滑動或崩落，以保護下方的人員和設施安全。

(一)工程特性

- 1.現地環境多樣：由於崩塌地的成因、規模、地質條件差異大，因此治理方案需因地制宜。
- 2.工程風險高：施工地點通常位於不穩定的陡坡上，增加了施工人員的風險。
- 3.注重生態復育：除了穩定邊坡，也越來越重視植生工法，以恢復當地的生態系統。

(二)施工方式

1.坡面穩定工法

- (1)排樁、格框植生：在坡面設置預鑄或現地的混凝土格框，內部回填客土並栽植草類或灌木，以穩定淺層土壤。
- (2)地錨、噴凝土：針對較深層的崩塌，透過鑽孔方式植入地錨，再以噴凝土覆蓋坡面，提供更強的支撐力。

2.排水工法

- (1)地下排水管：在坡面下埋設集水管，將地下水導引至安全處，減少坡面含水量。

(2)截水溝：在坡頂設置截水溝，防止地表逕流流入崩塌區。

3.減碳措施

(1)減少水泥用量：優先採用地錨、土釘等工法，並減少大面積噴凝土的使用。

(2)現地材料利用：盡可能使用當地的土石材料進行回填或修築，減少運輸里程。

(3)植生復育：大規模植生不僅能穩定坡面，植物生長過程也能吸收二氧化碳。

I. 崩塌地治理：以「減排低碳」與「高效率植生增匯」為核心

崩塌地治理的目標是穩定坡面、減少土砂災害，同時需要處理大量的工程量。

實踐建議與案例：

面向	實務可執行技術/建議	國外/類似經驗參考
結構減碳 (減排)	複合式低碳擋土/護坡工法：優先採用石籠或植生格框(而非大規模RC牆)。若非得使用混凝土，則必須使用高替代率的低碳混凝土(如高爐石水泥替代率達50%以上)，並結合輕量化設計。	日本山區復育：廣泛使用木製土留工、竹樁、石籠與植生袋等近自然資材進行邊坡穩定，大幅減少水泥使用。
植生增匯 (增匯)	深根植生復育：崩塌地復育時，除了噴植草種，應種植深根性、固土能力強的本土喬木或灌木，增加長期生物碳匯。可搭配生物炭混入客土或植生袋，加速植生定著並長久固碳。	歐洲高山復育：運用生物工程技术，將在地植生種源與有機改良物(包括生物炭或堆肥)結合，進行邊坡快速復育，使植生快速形成保護層並開始固碳。
材料循環 (減排)	在地疏伐材利用：崩塌地周邊的林地疏伐或清理出的木材，應直接作為木樁、固床或截排水設施的材料，減少外購材料及運輸碳排。	北美伐木區復育：許多林地復育計畫將清理出的木材(原為廢棄物)用於修建步道、水土保持設施，或製成木屑覆蓋物(Mulch)用於坡面植生，實現資源循環。

二、野溪整治工程

野溪整治的目標是調節溪流，降低洪水災害風險，同時維護河川的自然生態功能。

(一)工程特性

- 1.兼顧防洪與生態：傳統工程以防洪為主，但現代工程更強調河川的生物多樣性與水域環境。
- 2.河川流路變動性：野溪常因洪水而改變流路，因此工程設計需考量其動態變化。
- 3.景觀與休憩功能：部分野溪整治會融入親水空間設計，提供休憩功能。

(二)施工方式

1.河道整坡與保護：

- (1)護岸工：使用混凝土、石籠或木樁等材料修築，保護河岸不受洪水沖刷。
- (2)固床工：在河床上設置跌水工或堰塞，以穩定河床坡度，減緩水流侵蝕。

2.生態工法：

- (1)石籠護岸：將現地石材裝入鐵籠中，形成透水性佳的護岸，並可提供生物棲息空間。
- (2)砌石護岸：利用堆疊石塊的方式取代混凝土，減少碳足跡。
- (3)近自然河川工法：透過不規則的護岸設計，創造多樣化

的水域環境。

3.減碳措施

(1)減少混凝土用量：優先採用石籠、砌石或植生工法取代混凝土。

(2)低碳材料應用：使用再生混凝土、爐石粉等工業副產品取代部分水泥，減少碳排放。

(3)現地土石利用：利用河床開挖的土石進行回填或整坡，減少外購材料的運輸。

野溪治理強調水流穩定、降低沖刷力，同時需要兼顧生態多樣性。

實踐建議與案例：

面向	實務可執行技術/建議	國外/類似經驗參考
工 法 減 碳 (減排)	生態固床工與護岸： 優先採用石籠固床工、木樁護岸或拋石工法。僅在關鍵結構（如壩基）使用低碳混凝土，並盡量減少鋪設底部混凝土，讓河床保持自然透水狀態。	德國 Nidda 河整治： 採用近自然河川復育，將原先人工化、筆直的河道改為蜿蜒（增加水流路徑），並拆除不必要的堤防，使用大量的卵石、木材及河岸植生進行穩定，達到生態、防災、減碳多重效益。
植 生 碳 匯 (增匯)	河岸緩衝林帶： 於野溪兩側預留足夠空間，栽植高大喬木形成緩衝林帶，不僅能提供陰蔽、改善棲地，其生物量累積是高效率的碳匯。	美國鱒魚河治理計畫： 結合河道重塑，大量進行河濱植被復育，栽種喬木與灌木，成功穩定邊坡，提升綠覆率，並降低了傳統工法的成本。
減 少 擾 動 (減排)	最小化施工區： 嚴格控制施工便道的範圍與數量，減少對原有土壤與植被的擾動和開挖，降低因擾動引起的土壤有機碳釋出。	奧地利水土保持經驗： 強調在工程設計階段就將景觀與生態融入，使用設計過的播種與植栽方法，減少大規模土方工程，使整體工程更協調、低碳。

三、集水區整治工程

集水區整治是涵蓋範圍最廣的水土保持工程，目標是從源頭管理，全面性地改善集水區內的土地利用與水土資源。

1.工程特性

- (1)系統性與整合性：集水區整治不是單一工程，而是多個工程的整合，包含上游的保育、中游的防砂、下游的防洪。
- (2)公眾參與：由於影響範圍廣，通常需要結合居民、社區團體與政府單位的共同參與。
- (3)長期性規劃：集水區整治需要進行長期監測與管理，以確保效益的持續性。

2.施工方式

(1)保育工程：

- A.山坡地造林：在集水區上游進行植樹造林，增加地表植被覆蓋率，減少地表逕流。
- B.農地水土保持：在山坡地農田設置等高線溝或擋土牆，防止土壤流失。

(2)防砂工程：

- A.防砂壩：在溪流上游興建，攔截泥沙，減少下游河道淤積。
- B.沉砂池：在溪流出口設置，讓泥沙在進入下游河道前沉澱，定期清除。

3.減碳措施

- (1)植生工法優先：大規模的植樹造林是集水區整治最有

效的減碳措施，植物光合作用可直接吸收二氧化碳。

(2)小型、分散式設施：避免興建大型的攔砂壩，改以多個小型、分散的設施，減少單一工程的碳足跡。

(3)智慧監測系統：利用物聯網技術監測集水區的水文、地文資料，能更精準地規劃工程，避免不必要的施工。

綜合以上所述，現代水土保持工程在規劃與執行上，已不再僅限於傳統的「剛性」工程，而是結合了「柔性」的生態工法與低碳思維。這不僅能更有效地達到水土保持目的，同時也能減少對環境的衝擊，朝向更永續的發展。

土壤沖蝕控制主要在坡地農地，目標是保土、保水、提升地力，並實現碳匯增加。實踐建議與案例：

面向	實務可執行技術/建議	國外/類似經驗參考
農作增匯 (增匯)	免耕/少耕與覆蓋：鼓勵坡地農民實施減少翻耕的耕作方式，並利用農作物殘株、綠肥或覆蓋作物來維持地表覆蓋，大幅減少土壤碳的流失與二氧化碳排放。	全球再生農業（Regenerative Agriculture）：以美國、澳洲等地為代表，鼓勵農民透過少耕、覆蓋作物、輪作等措施，將大氣中的碳轉化並封存於農田土壤中，形成可交易的土壤碳權。
材料應用 (增匯/ 減排)	生物炭施用：將生物炭混合於農地土壤或梯田邊坡的客土中，用於長期、穩定的土壤碳封存，同時改善水土保持成效，特別適用於坡地地力復育。	芬蘭與瑞典試點計畫：針對坡地或有機碳含量低的農田，進行大規模生物炭田間試驗，驗證其在不同氣候條件下增加土壤碳匯和減少逕流沖蝕的綜合效益。
構造保土 (減排)	等高蓄水設施：興建石礫壟、植生堤或農塘等微型水土保持設施。這些構造主要使用在地資材，碳排量低，能有效攔截逕流，促進水分入滲，同時減少沖蝕造成的有機碳流失。	南美洲安地斯山區：傳統的梯田與農塘系統就是高效的保土保水與微氣候調適設施，現代則結合地理資訊系統優化設計，以最低工程量實現最大保水效益。

集水區（Watershed）治理是水土保持工程的關鍵環節，旨在達到防洪、防淤、保育水土資源的綜合效益。在「碳中和」的框架下，集水區治理必須將傳統的工程目標與**減排（降低工程碳足跡）及增匯（提高生態系統固碳能力）**結合起來。

以下針對集水區治理的四個方面，提供實現碳中和的具體實施方法與目標：

1.工程特性 (Engineering Characteristics)

集水區工程的特性是分層次、多樣化且生態敏感。碳中和目標要求工程設計具有低擾動性和高生態韌性。

碳中和下的特性要求	具體目標
分散式、多功能化	避免大規模、單一化的混凝土壩體。採用系列性、多孔隙的攔砂壩、固床工和沉砂池，以減少單一工程的碳排量，並增加生態棲地。
高度模組化與標準化	預鑄（Precast）或模組化的低碳結構體，減少現地濕式施工（水泥澆築）帶來的碳排與環境擾動，並能提高施工效率。
水土資源綜合利用	具備滯洪、滲透、淨化等多重功能。例如，在工程中設計雨水花園、滲透帶或農塘，將治理與水資源涵養、水質淨化結合。
在地化適應性	設計應完全適應當地的地質、水文和植生條件，減少外來材料或不適宜工法的使用。

2.施工方式 (Construction Methods)

集水區工程的施工碳中和著重於能源效率、資源循環和減少土壤擾動。

碳中和下的施工方式	實施方法
現地土石平	嚴格執行土方平衡，最大化利用工程開挖土石作為回填或

碳中和下的 施工方式	實施方法
衡與利用	結構材料，消除土方外運和外購的碳排。
低排放機具 與優化管理	優先使用電動化或符合高標準排放規定的施工機具。導入智慧化管理，精確安排工序、減少機具空轉時間，降低燃料消耗。
最小化環境 擾動	採用精準定位與定向鑽孔等技術，減少施工便道的開闢和大規模地表開挖，最大程度保護施工區外的植生與表土，減少土壤有機碳的釋放。
分區、分期 施工	對於大規模治理，實施分區或分期施工，讓已完成的區域能儘早復育植生並開始固碳，減輕總體的碳排壓力。

3.減碳措施 (Carbon Reduction Measures)

減碳措施是直接減少工程生命週期溫室氣體排放的行動。

減碳措施	具體內容
低碳材料的深度應用	低碳混凝土：在擋土牆、固床工等必要結構中，使用高比例（如 $\geq 50\%$ ）摻加爐石粉、飛灰或地質聚合物的混凝土。
非水泥固結技術	崩塌地回填土或邊坡穩定的客土，優先使用石灰、生物炭或天然膠結劑進行改良和固化，取代部分水泥，達到穩定目的。
在地資源的高效循環	系統性地將工程產生的疏伐材、清理出的石材等，轉化為格框、護岸、景觀設施的結構材料，減少新材料的生產碳排。
設計優化與輕量化	透過結構分析，優化鋼筋使用量、減少混凝土截面尺寸，實現結構輕量化，並達到相同的安全係數。

4.固碳增匯方式 (Carbon Sequestration & Enhancement)

固碳增匯是利用集水區的生態系統特性，主動吸收和封存大氣中的二氧化碳。

固碳增匯方式	具體內容
高固碳植生復育策略	原生、深根性喬灌木：優先使用本土且生長快速、生物量高的喬木和深根灌木進行復育，確保長期且穩定的碳封存。
土壤碳匯改良技術	生物炭應用：將生物炭混入集水區復育區的表土或緩衝帶，實現長期、惰性碳的穩定封存，同時改善水土保持成效。
農林複合與緩衝帶管理	在集水區坡地農田，推廣農林複合經營（Agroforestry），在農地邊緣設置高固碳的植生緩衝帶，既能攔截泥沙與污染物，又能增加碳匯。
濕地與水域碳匯保護	保護和恢復集水區內的天然濕地、溪流氾濫平原。這些水域生態系統是重要的藍碳/綠碳匯，能以泥炭、水生植物等形式有效封存碳。

四、水土保持手冊工程篇減碳方法

工程篇的減碳方法主要著重於減少水泥、鋼材等高碳排建材的使用，並優化施工流程。

1.生態格框植生工法：

說明：利用預鑄或現地的格框，內部回填土石並進行植生。相較於大面積噴凝土，可大幅減少水泥用量，並透過植物固碳。

2.石籠工法：

說明：使用現地或鄰近地區的塊石填入鐵籠中，作為護坡或固床。透水性佳，減少混凝土用量，且能提供生物棲息空間。

3.木樁編柵工法：

說明：以木樁編織成柵欄，用於坡面保護或集水。減少水泥與鋼筋，且木材本身為生物碳。

4.砌石工法：

說明：利用天然石塊堆砌成擋土牆或護岸。相較於混凝土結構，能大幅減少碳排放，並融入自然景觀。

5.現地土石利用：

說明：在工程施作過程中，盡量利用開挖出來的土石進行回填或整坡，減少外購材料的運輸里程與碳排放。

6.生態溪流工法：

說明：透過不規則的護岸設計與河床高低變化，創造多樣化的水域環境，避免大規模直線化混凝土化，減少碳足跡。

7.透水性鋪面工法：

說明：在步道或停車場等設施，採用透水性鋪面材料，讓雨水能滲入地下，減少徑流，並避免混凝土硬鋪面。

8.地錨工法：

說明：針對深層崩塌，以鑽孔方式植入地錨，僅在坡面小範圍施作噴凝土，取代大面積混凝土擋土牆。

9.固床工改以植生或石塊疊砌：

說明：在溪流固床時，避免全面以混凝土施作，改以植生或疊砌石塊的方式，達到穩定河床的目的。

10.太陽能或風力發電應用：

說明：在集水區內設置監測站或照明設施時，優先採用太陽能或風力發電，減少對市電的依賴與碳排放。

五、水土保持手冊農藝篇減碳方法

農藝篇的減碳方法主要透過植生、土壤管理與農作方式，來達到固碳與減少徑流的效果。

1.山坡地造林：

說明：大規模的植樹造林是集水區最有效的減碳方法，樹木透過光合作用直接吸收大氣中的二氧化碳。

2.草類植生：

說明：在裸露坡地或工程完成後，種植草類，可以快速覆蓋地表，減少水土流失，其根系也能固碳。

3.等高線種植與溝：

說明：在坡地農田沿著等高線種植，並設置等高線溝，可以有效攔截地表徑流，減少土壤流失，並保持土壤有機質。

4.草生栽培：

說明：在果園或農地，除了主要作物，也在行間種植草類。此方法可增加土壤有機質，減少雜草，並透過草類固碳。

5.植生護坡：

說明：利用適合當地的喬木、灌木與草類，進行多層次的植生配置，達到穩定邊坡的效果，取代工程設施。

6.綠肥作物栽種：

說明：栽種綠肥作物，收成後翻入土壤中，可增加土壤有機質與固碳量，改善土壤結構。

7.植被帶設置：

說明：在農田或集水區邊緣設置植被帶，可以過濾地表逕流中的泥沙，同時提供野生動物棲息地。

8.土壤改良與有機質回填：

說明：利用堆肥或有機資材改良土壤，可增加土壤的固碳能力，並減少化學肥料的使用。

9.生物炭應用：

說明：將農業廢棄物（如稻殼、木屑）製成生物炭，施入土壤中，能長期穩定地固碳，並改善土壤肥力。

10.生態滯洪池或沈砂池植生：

說明：在滯洪池或沈砂池周邊進行植生，不僅能美化環境，植物根系也能穩定池岸，並增加固碳量。

六、國內外創新減碳技術

除了傳統的工法改良，國內外也發展出許多創新的減碳技術，應用於集水區整治。

(一)國內創新技術

- 1.再生粒料混凝土：利用營建廢棄物破碎後，取代部分天然骨材製成混凝土。此技術可減少天然砂石開採，並降低混凝土的碳足跡。台灣已有多個工程案例採用此技術。
- 2.智慧型氣候調適監測系統：利用物聯網（IoT）技術，即時監測集水區的水文、地文、氣象資料。透過數據分析，能更精準地預測災害風險，避免不必要的工程施作，或將工程規模最佳化，減少碳排放。

(二)國外創新技術

- 1.混凝土取代材料（Cement-Free Concrete）：在傳統混凝土中，以爐石粉、飛灰等工業副產品，完全取代波特蘭水泥，達到零水泥的目標。此技術可大幅減少碳排放，並已在英國、澳洲等地應用於非承重結構。
- 2.生物混凝土（Bio-Concrete）：在混凝土中加入特定的微生物或細菌孢子。當混凝土出現裂縫時，微生物會被活化，

分泌出碳酸鈣沉澱物，自我修復裂縫。此技術可延長混凝土結構壽命，減少維護與重建的碳排放。

3.現地木材工程（Local Timber Engineering）：利用集水區內疏伐的木材，以樁接、疊排等方式取代混凝土，用於固床工、護岸等設施。此技術不僅能利用現地材料，減少運輸碳排，也能創造更自然的景觀。

透過上述，本計畫初步可將水土保持工程可減碳項目分別為：「迴避工程敏感區位」、「考量施工安全」、「使用者安全導向之設計」、「減少周邊交通干擾與鄰損」、「落實零事故目標」、「訂定臨時防減災措施」、「建立完備可行的營運管理機制確保使用者安全」；由於施作水土保持工程通常為河流之中上游區域，需審慎評估工程興建之必要性與成本效益，並活化既有設施之使用率與效能，避免過度浪費與造成環境負荷，並以最小營建規模為規劃設計之原則。在節能方面需考量之處，如提高施工與使用階段能源使用效率，包含施工階段機電設備採用節能措施，使用階段行為進行節能設計，以提高能源使用效率等；或多採用再生能源（綠能源、廢能回收），降低工程之碳排放量。其評估項目為「選用節能機電設備」、「選用低耗能材料與工法之設計」、「優先使用當地材料」、「採用節能之施工工法」、「採用節能之施工機具與設備」、「落實設施與設備之定期保養維護，確保節能功效」、「盡量使用替代能源之施工工法與機具設備」、「定期保養維護替代能源設備」；在生態部份，水土保持工程容易破壞原有的生態系統及環境，近幾年起積極推動生態工法，重視原地綠化固碳、大地保水循環功能，以達到生物多樣性環境與棲地保育之目標，並強調綠美化與滲透涵水能力，以「迴避、減輕、補償」等方式尊重既有生態。

為推動水保工程邁向碳中和，提供具體可行的實施方案。本計畫

特別關注新興減碳技術的發展趨勢，如數位化工程管理、智慧監測系統等創新應用，評估其在水保工程的應用潛力，為未來技術發展提供前瞻性建議。透過完整的執行方法，確保研究成果能夠實質促進水保工程的低碳轉型，並建立可持續推動的技術發展機制。

第二節 研究減碳、固碳、增匯、循環及綠趨勢在水保工程施作中的應用可行性

本計畫評估永續技術在水土保持工程的應用潛力。首先透過文獻回顧與案例蒐集，全面掌握國內外水保工程在減碳、碳匯、循環經濟及綠色工程的發展現況。研究範疇涵蓋崩塌地治理、野溪整治、集水區整治等各類型水保工程，並納入工程生命週期的碳排放盤查。

根據相關文獻資料顯示，碳匯可分為海洋碳匯和陸地碳匯兩大類。海洋碳匯包括沿海生態碳匯、海水生態碳匯和人工海洋碳匯。其中，沿海生態碳匯主要由海岸植被固碳效應和沿海沉積物負載形成，海水生態碳匯主要由海洋碳泵效應形成，這兩種碳匯與季風洋流條件、陸源有機物輸入、海岸地理條件和人為活動直接相關，人工海洋碳匯的可行性需要綜合考慮對海洋生態的影響。陸地碳匯包括陸地植被碳匯、自然地質碳匯和人工地質碳匯。其中，陸地植被碳匯是通過森林植被、草地植被以及濕地植被等植物的光合作用實現，受氣溫與降水、大氣成分、土地利用變化以及自然干擾等因素的影響。自然地質碳匯主要由土壤碳匯和岩石風化碳匯組成，土壤碳匯受區域植被條件、氣候條件和土壤利用等因素影響，而碳酸鹽岩和矽酸鹽岩風化作用吸收大氣CO₂的岩石風化碳匯主要受氣溫、降水、岩石類型、水文條件以及人類活動的影響。人工地質碳匯是將捕集後的CO₂注入地下指定區域進行長期封存形成，其封存能力受地質構造、儲蓋條件、地熱、地層水

動力、油氣潛力和盆地勘探開發程度等因素的影響。從氣候環境、自然資源和社會經濟等多種措施有機結合實現固碳增匯，是未來實現碳中和的有效途徑。綜述了全球和區域森林生態系統碳儲量現狀及固碳能力變化狀況，以期明確全球和區域森林生態系統固碳特徵分佈狀況及其在緩解大氣 CO₂ 濃度增加中的作用。

為確保評估結果的客觀性，本計畫建立完整的技術效益評估框架，包含減碳效益量化、增匯潛力估算、資源循環效率、生態效益評估等指標。同時進行經濟效益分析，評估各項技術的建置成本、營運維護費用、環境效益價值，並考量政府獎勵機制對技術應用的影響。同時也將評估相關法規制度的調適需求，提出配套政策建議，建立長期推動的支持機制。在水土保持工程施作中的應用可行性進行系統性分析。

一、減碳（Carbon Reduction）

（一）可行性：極高

減碳在水保工程中是指從源頭減少碳排放，這部分的可行性最高且已在逐步實施中。

1. 應用方式：

- (1) 低碳建材應用：以石籠、砌石、木樁等在地且低碳的材料取代傳統高碳排放的混凝土與鋼筋。
- (2) 運輸減碳：盡可能利用現地開挖的土石進行回填，大幅減少外購材料的運輸里程。
- (3) 施工機具電動化：在條件允許下，使用電動挖土機、電動推土機等機具，取代傳統柴油機具，減少燃油排放。
- (4) 設計優化：透過智慧監測系統精準分析，避免不必要的

冗餘設計，讓工程規模最佳化。

二、固碳 (Carbon Sequestration)

(一)可行性：高

固碳是指將二氧化碳從大氣中捕集並儲存，這在水保工程中主要透過植生工法實現。

1.應用方式：

- (1)植生復育：在工程結束後，大規模種植喬木、灌木與草類，植物在光合作用過程中會吸收大氣中的二氧化碳並儲存在生物體內。
- (2)土壤固碳：透過草生栽培、綠肥作物栽種，並將枯枝落葉回歸土壤，能增加土壤有機質，將碳長期儲存在土壤中。
- (3)生物炭應用：將集水區內的農林廢棄物製成生物炭，埋入土壤中，能穩定且長期地儲存碳。崩塌地治理的核心挑戰在於穩定邊坡土體和迅速建立植生保護層。生物炭的獨特物理和化學特性，使其在這兩個方面都能發揮顯著作用。崩塌地經過整治後，常需回填或覆蓋客土。這些客土往往缺乏結構性。生物炭能夠有效改善土體的工程特性：

機制： 生物炭具有高孔隙度、輕質且帶有稜角的特性。
將其混合於回填客土中（作為土壤改良劑）：

增加剪應力強度： 混合生物炭的土體可以增加土粒間的摩擦力和黏結力，從而提高土壤的剪應力強度（Shear Strength），使邊坡更難滑動。

減輕土體重量：生物炭的密度遠低於土壤礦物質。將其混入土壤可降低土體的容重 (Bulk Density)，從而減輕坡體本身的壓力，這是穩定邊坡的重要因素。

崩塌地常見的問題是逕流沖刷嚴重且雨水入滲不足。

機制：生物炭的極高孔隙結構使其具有強大的吸水和保水能力：

增加入滲、減少逕流：生物炭像海綿一樣，能將雨水快速吸收並保留在土體內，有效提高雨水入滲率，大大減少地表逕流，從根本上降低雨水對坡面的沖刷力（片狀或細溝沖蝕）。

預防土體過度飽和：在持續降雨時，生物炭能幫助調節土壤水分，防止土體達到過度飽和狀態。過度飽和是許多淺層滑動的誘因，生物炭能幫助降低孔隙水壓力。

崩塌地的復育需要植生覆蓋，而植生覆蓋的成效直接影響邊坡的長期穩定性和碳匯能力。

機制：生物炭是優良的土壤改良劑，可以解決崩塌地復育面臨的「貧瘠土」問題：

作為養分倉庫：生物炭表面帶有大量的負電荷，使其具有極高的陽離子交換能力 (CEC)。這使得土壤中的氮、磷、鉀等養分不易被雨水淋洗流失，而是被吸附儲存，穩定地供應給植物，加速植生生長。

提供微生物棲地：生物炭的多孔結構為微生物提供理想的棲息環境，促進土壤生態系的恢復和健康，進一步支持植物生長。

高效率碳增匯：崩塌地復育通常需要快速建立喬木、灌木或深根草本。植生越快、越茂盛，固碳量越高。更重要的是，生物炭本身是一種高度穩定的碳物質（碳半衰期可達數百年至數千年），施用後可視為永久的碳封存，直接實現增匯目標。

三、增匯（Carbon Sink Enhancement）

（一）可行性：中

增匯是指增加自然界吸收二氧化碳的能力。水保工程雖然無法直接創造新的碳匯，但能強化現有碳匯的功能。

1. 應用方式：

（1）提高植生面積與生物多樣性：在崩塌地與野溪周邊進行生態復育，恢復當地的森林與植被系統，這不僅能固碳，也能增加整個集水區的碳匯總量。

（2）保護濕地與土壤：水保工程透過坡面穩定與防砂工法，能有效保護集水區內的土壤與濕地，避免因侵蝕而導致儲存在其中的碳被釋放出來。因此，水保工程間接保護了既有的碳匯。

四、循環（Circular Economy）

（一）可行性：中

循環經濟是指將廢棄物視為資源，重新投入生產與利用。這在水保工程中也開始有許多應用。

1. 應用方式：

（1）廢棄物再生利用：使用再生粒料混凝土、再生瀝青混凝土等，將營建廢棄物重新製成建材。

(2)現地材料循環：將工程開挖的土石，經過篩選後直接用於回填、整坡或砌石。

(3)木材循環利用：在工程中，將疏伐的木材用於木樁、編柵或景觀設施，減少對新木材的依賴。

五、綠趨勢（Green Trend）

（一）可行性：極高

綠趨勢是上述所有概念的總結，它代表了生態、永續與環境友善的整體思維轉變。

1.應用方式：

(1)生態工法優先：在設計階段，優先考量生態工法，將工程對環境的干擾降到最低。例如，使用生態格框、石籠取代剛性護岸。

(2)景觀與生態融合：將水保工程設計成能提供生物棲息、兼具美學與親水性的多功能設施，例如近自然河川工法。

(3)公眾參與：透過社區參與，讓居民認同並共同維護生態水保成果，形成永續的管理模式。

增加與控制土壤/植生碳匯的關鍵技術（增匯）達成碳中和目標中「增匯」的重要手段，特別是結合水土保持與農業需求：

1.永續性植生與土壤管理技術：

選用高效固碳植種：優先採用本土、深根性、生長快速、耐逆境且具有高生物量（能吸收較多二氧化碳）的植生，應用於坡地復育、防護林帶及農地緩衝綠帶。

農業水土保持措施增匯：實施減少翻耕（或免耕、少耕）

的農作方式，並配合施用綠肥、有機肥或生物炭，以增加土壤有機碳含量。

複合式農林系統 (Agroforestry)：在農地間或周圍結合喬木與灌木，形成多層次植被，大幅提高碳吸存能力並增加農產品多樣性。

2. 生物炭 (Biochar) 應用技術：

應用於工程復育與農地：將農業廢棄物或疏伐材透過熱裂解製成生物炭，施用於水土保持工程的植生復育區或坡地農田，能有效且長期地將碳封存於土壤中，同時改善土質、提高保水保肥能力。

蓄含水資源與減少土壤流失的保土關鍵技術：

3. 近自然工法與生態工程技術：

減少水泥使用：大量採用石籠、木樁、植生袋、土石或疏伐材等自然或低碳材料，取代傳統高碳排的水泥與鋼筋結構，用於護岸、固床工、排水設施等。

緩衝綠帶與生態緩衝區：在農地邊緣、河岸或易沖蝕區域設置植生緩衝帶，以過濾逕流、沉降泥沙，極大地減少土壤流失。

保水型坡地治理：設計具有攔蓄功能的等高耕作、梯田、農塘或微地形改造，增加雨水入滲時間，減少地表逕流和沖蝕。

減少工程碳排的關鍵技術與策略（減排）直接手段：

4. 綠色/低碳工程材料應用：

低碳混凝土：採用卜作嵐材料、爐石粉等高比例替代水泥的混凝土，或使用地聚合物混凝土等無水泥材料，大幅降

低材料生產階段的碳排放。

再生材料利用：優先使用營建剩餘土石方、再生粒料或疏伐後的剩餘林產物（如疏伐材、枝條）作為工程材料。

在地化取材：儘可能選用當地可取得的材料（如石材、土方），減少運輸距離帶來的碳排放。

5.工程生命週期碳盤查與優化設計：

建立碳排評估標準：從規劃、設計、材料、施工到維護廢棄的全生命週期，建立水土保持工程的碳排放量化標準。

低碳工法設計優化：在確保工程安全與功能的前提下，透過結構輕量化、標準化（如預鑄模塊）、減少開挖與回填等方式，選擇碳排量最低的設計方案。

6.綠色施工與機具電動化：

在可行範圍內，逐步推動施工機具採用電動化或低排放燃油，並優化施工流程，減少閒置時間和能源消耗。

綜合管理與評估策略

7.碳匯效益評估與監測技術：

開發精準的監測技術（如遙測、無人機、地表感測器），長期追蹤水土保持措施實施前後的土壤碳匯變化、植生生長量、土壤流失量及蓄水效益，確保增匯成效。

第三節 提出水保工程實現碳中和的綜合性方案

本研究將以系統性方法建立水保工程碳中和推動架構，蒐集國內外案例，全面掌握減碳技術、增匯方案、循環經濟及能源替代等永續技術的應用現況。彙整相關文獻可透過下述層面進行。

通過以上綜合措施，可以有效提高水土保持對碳中和的貢獻，實

現經濟社會可持續發展；循環經濟策略包含工程剩餘土石方再利用、建材循環使用、就地取材等；能源替代則評估太陽能、微水力發電等再生能源設施的整合應用潛力。特別注重各項技術方案的協同效益，確保在實現永續目標的同時，維持工程的防災功能與結構安全性。

綜合「減碳、固碳、增匯、循環及綠趨勢」五大面向，以下為水土保持工程實現碳中和的十種綜合性方案。

1.全生命週期低碳設計與評估

(1)實施方法：在工程規劃初期，即導入「全生命週期評估（LCA）」概念。從材料生產、運輸、施工、營運到廢棄物處理，全面盤點並量化碳排放量，並將碳排放納入設計優化與工法選擇的關鍵指標。

(2)目標：確保設計方案在各環節都能達到最低碳足跡，而非僅在單一環節減碳。

2.在地低碳材料優先與循環利用

- (1)實施方法：優先採用石籠、砌石、現地土石、疏伐木材等在地材料，並將營建廢棄物製成再生粒料。同時，建立完善的在地材料供應鏈與管理系統。
- (2)目標：大幅減少高碳排建材（如水泥、鋼筋）的使用，並降低材料運輸的碳排放。

3.生態工法與植生固碳最大化

- (1)實施方法：將植生工法作為崩塌地、野溪整治的核心策略，並與工程結構體緊密結合。例如，在格框內進行多樣化植生、在砌石護岸縫隙中植入藤蔓植物、在滯洪池周邊廣植樹木。
- (2)目標：透過植物的光合作用，將碳封存在生物體和土壤中，實現工程區域的淨零排放。

4.施工過程電動化與智慧化

- (1)實施方法：推動工程機具電動化，並搭配可再生能源充電。同時，利用無人機、物聯網（IoT）等技術進行精準測量與施工管理，減少重複施工與資源浪費。
- (2)目標：減少化石燃料的使用，並提高施工效率，降低施工階段的碳排放。

5.生物炭與土壤碳封存技術

- (1)實施方法：將集水區內的林地疏伐、農業廢棄物製成生物炭，並將其施用於工程回填土或復育土壤中。
- (2)目標：利用生物炭的穩定特性，將碳長期且穩固地封存

在土壤中，同時改善土壤肥力。

6.綠色採購與碳足跡標示

(1)實施方法：建立水保工程的「綠色採購」機制，優先採購具有「碳足跡標示」的建材與設備。要求廠商提供碳盤查報告，將低碳供應商納入評選加分項目。

(2)目標：透過市場機制，引導產業鏈朝向低碳化發展。

7.生態系統碳匯監測與管理

(1)實施方法：在集水區內建立長期碳匯監測站，定期測量森林、土壤與濕地的固碳量。透過數據化管理，評估工程的增匯效益，並作為未來規劃的參考。

(2)目標：科學化地評估水保工程的碳中和成效，並作為碳權交易的潛在依據。

8.近自然工法與景觀生態融合

(1)實施方法：捨棄直線、單一的工程設計，採用不規則、多樣化的近自然工法，創造多樣化的棲地。例如，設置微彎的護岸、跌水工、緩坡式沈砂池。

(2)目標：減少對環境的衝擊，並透過提升生物多樣性來強化生態系統的整體碳匯功能。

9.公民參與與社區共榮模式

(1)實施方法：在工程規劃與執行階段，納入在地居民、社區團體的意見，並鼓勵他們參與植生、巡護等工作。

(2)目標：讓居民成為碳中和的共同推動者，並透過社區力量，形成永續的管理與維護模式，避免工程因缺乏維護

而失效。

10.碳權交易與綠色金融結合

(1)實施方法：將水保工程所產生的「增匯」效益，例如造林、植生復育所吸收的碳，申請為「碳權」。透過碳權交易，為水保工程引入綠色資金，形成良性循環。

(2)目標：將水保工程的環境效益「貨幣化」，為其永續發展提供經濟誘因。

11.地質固碳與穩定化新材料開發（高風險區的減排與增匯）

實施方法：地質聚合物（Geopolymer）替代：研發以地質聚合物（如礦渣、飛灰等廢棄物）為基礎的固結材料，取代傳統的波特蘭水泥，用於深層土壤固化或灌漿，將材料碳排降低 50% 以上。低碳土釘與地錨：採用再生鋼材或複合纖維材料製作土釘與地錨，並使用低碳灌漿料，減少高碳排材料的使用，同時確保大規模崩塌體的穩定性。

目標：專為高邊坡、土層深厚的崩塌地設計，在確保結構穩定的前提下，最大程度減少水泥使用。

12.疏伐材碳封存於工程結構（大規模的在地資源循環與增匯）

實施方法：

耐久木工法：大規模使用經過碳化或防腐處理的疏伐材製作大型土留壩、固床工、護岸或排水設施。這些木材中的碳被「鎖」在工程結構中，視為長期工程碳匯。

木結構設計優化：結合工程力學，開發承重性高、使用壽命長的大型木構造（取代部分 RC 結構），並計算其在全生命週期內的負碳效益。

目標：將治理區域或周邊林地因疏伐、清運產生的木材，作為工程耐久結構件，實現長期碳封存。

13. 工程碳匯與災害風險綜合評估（精確的決策工具）

實施方法：

碳-風險效益分析：開發專門的決策支持系統（DSS），在數種可行的崩塌或野溪治理方案中，除了比較工程費用和減災效益，還需比較總碳足跡（排放）與淨碳匯效益（吸收），選擇最高淨效益的方案。

情境模擬：模擬不同材料選擇（如 RC vs. 石籠）和植生復育策略（如原生林 vs. 速生林）對崩塌地和野溪的長期穩定性、碳匯累積和維護成本的影響。

目標：在設計初期，將工程碳匯效益納入風險評估模型，指導設計決策。

14. 智慧遙測與高頻率碳匯監測（驗證與優化）

實施方法：

LiDAR 與無人機遙測：定期利用光達（LiDAR）和高解析度無人機獲取崩塌地復育後的植被高度、生物量和地形變化數據，從而精確計算植生固碳量的增長。

IoT 感測器網絡：在治理區部署物聯網（IoT）土壤感測器，高頻率監測土壤含水量、溫度和二氧化碳通量（土

壤呼吸)，用於估算土壤碳匯的穩定性與變化趨勢。

目標： 針對廣泛的治理區域，使用高科技手段精確量化植生與土壤碳匯的變化，以驗證碳中和成效。

15.跨流域/區域碳匯整合與補償機制（規模化影響）

實施方法：

流域尺度碳匯會計： 將野溪上游的治理工程（增匯）與下游地區（如都市、工業區）的碳排放需求相結合，設計流域內部的碳抵換或補償機制。

與林業碳匯整合： 由於大規模崩塌地治理常涉及山區林地，可將水土保持工程的植生復育計畫與國家林業碳匯計畫整合，共同設計、共同認證，實現效益的最大化與規模化。

目標： 將治理範圍內的碳匯效益，與整個流域的土地利用規劃結合，尋找碳補償機會。

可行性評估將從技術、經濟及環境三個層面進行分析。技術可行性重點評估各項方案在台灣的可適用性；經濟可行性透過完整的成本效益分析，評估技術應用的投資成本、維護費用與環境效益；環境可行性則著重評估對生態系統的影響，確保技術應用能促進環境永續發展。

第五章 循環再生材料在水土保持工程中的減碳效果評估

由於循環經濟是近年政府 5+2 創新產業政策之一，為推動煉鋼過程產生的爐碴使用於公共工程，行政院公共工程委員會、環境保護署、經濟部、交通部及內政部於 106 年 7 月 13 日共同成立「再生粒料運用於公共工程跨部會推動小組」進行跨部會整合及協調，由經濟部、環保署分別督導再生粒料產出單位之粒料品質並落實流向管理，再由各工程主辦機關依據粒料特性運用於較無環保爭議的工程項目。由於各種再生粒料的特性不同，公共工程委員會參照先進國家作法、以往實際使用成果及目的事業主管機關所編訂之手冊，鼓勵各工程主辦機關優先運用於較無環保爭議的工程項目；正確使用再生材料，以疏導代替圍堵，可協助產業發展，兼顧環保、經濟及工程品質，達成愛護地球、妥善利用資源的目標。

因此，本計畫針對相關循環再生材料與混凝土的混合使用，進行實驗與分析，並評估在水保工程施作中的減碳效果效益，進行全面性評估，總結循環再生材料在水保工程中的減碳潛力及其綜合效益。

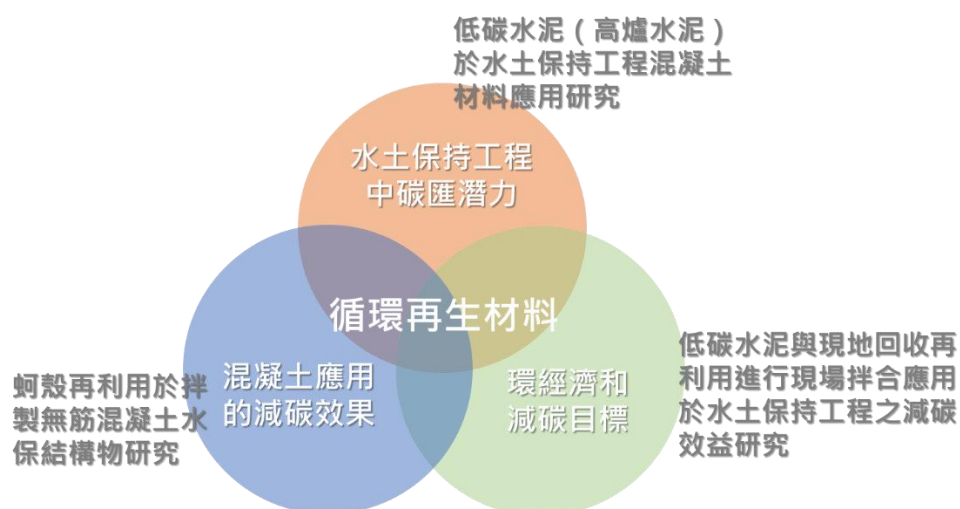


圖 5-1 循環再生材料在水土保持工程中的減碳效果評估

第一節 分析循環再生材料在碳匯應用中的潛力

在許多所應用工業副產品之高爐爐石、飛灰合理使用，以取代部分的水泥，如此不但可以「減廢」，且由於混凝土後期強度的提升、耐久性增加、降低混凝土材料之成本造價，還可以相應的「節能」，故合理適當的葛作嵐材料使用，將是未來「綠色」混凝土的一項基調主軸。

由於水土保持工程點位相對偏遠，常需將混凝土從混凝土廠內拌製好後，再運送到水保工程之工地。因此，在運輸過程中就會產生很大的碳排放量。而目前水土保持工程所使用的材料中，大部都使用一般混凝土。與被認為是減碳或低碳水泥的高爐水泥相比，其兩者之間的碳排放量有差異性。因此，本計畫將選擇一偏遠之工程點位，且將設置混凝土構造物，希望透過三個減碳措施來達成減碳目標。其概述如下：

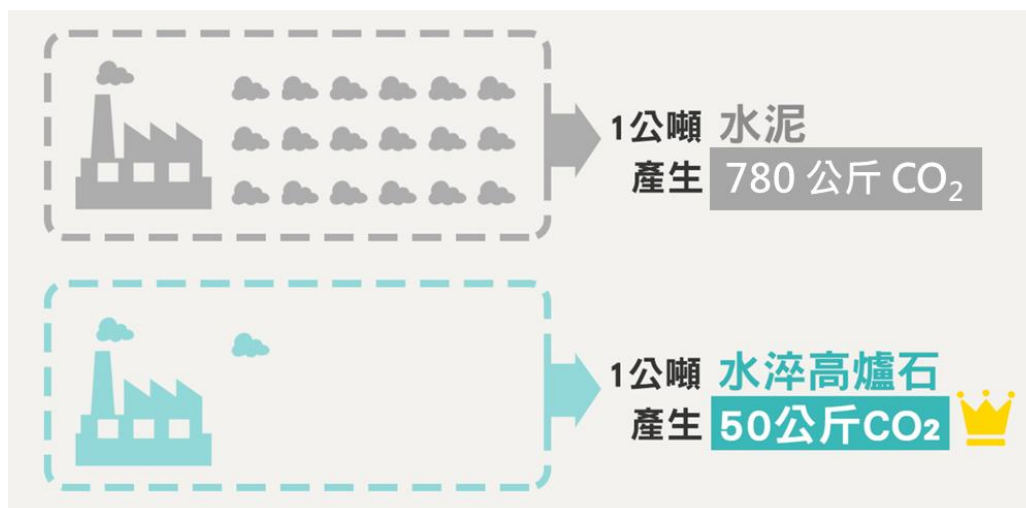
- 1.第一個減碳措施：將一般混凝土改為高爐水泥，這樣混凝土材料的用量可減少到約一半。
- 2.第二個減碳措施是：不使用新鮮骨材，而是利用現地既有的土石方篩出骨材，或可以將廢棄方破碎成骨材再利用。
- 3.第三個減碳措施：使用上述材料於現地拌合並施做。

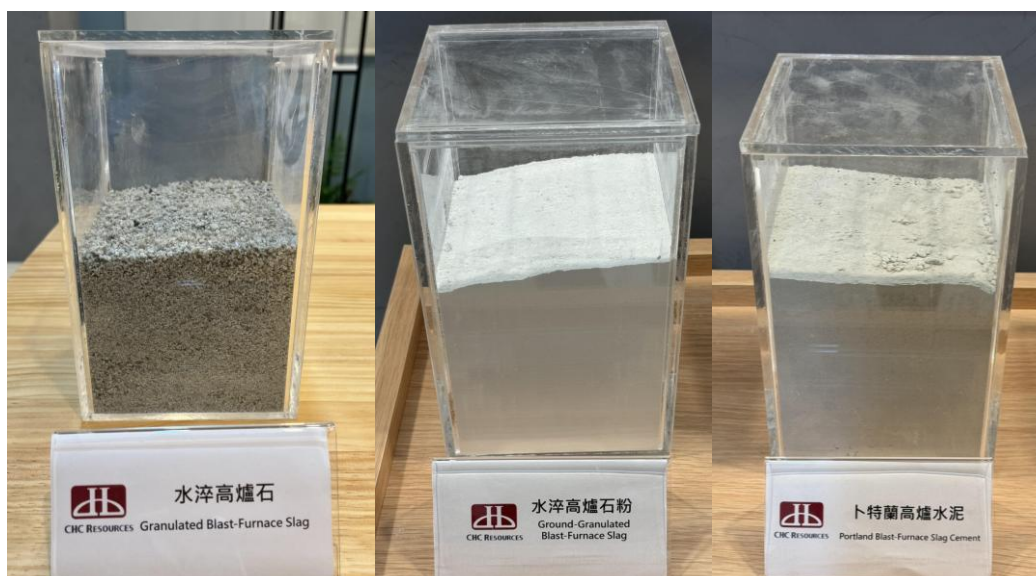
根據上述三個減碳措施，可節省混凝土運輸上所帶來的碳排放量外，並可作為計算這兩者的碳排放量差異性。除了可作為結構材料的碳匯應用潛力外，並分析其減少碳排放的機制；本計畫在執行期間，與中聯資源配合，針對高爐水泥進行全面性評估，總結循環再生材料在水保工程中的減碳潛力及其綜合效益，提出應用建議以促進循環經濟和減碳目標。

一、高爐水泥介紹

目前台灣所使用的高爐石粉，其高爐石須符合我國標準 CNS 12223[水淬高爐爐渣]之規定，若以高爐水泥方式使用高爐石粉，則其高爐水泥須符合 CNS 3654[高爐水泥]之規定。高爐石粉之成分與品質受水淬程序之影響甚鉅，故使用高爐石粉時，應先確認高爐石粉之品質。

「高爐爐石」簡稱高爐石，為一貫作業煉鋼廠在煉鐵過程所生產之副產物，國家標準(CNS)稱為「高爐爐渣」，屬一種卜作嵐材料。高爐石若以水淬方式冷卻，可具有潛在之水硬性，研磨成細粉添加於混凝土中會產生卜作嵐反應，而增加混凝土之晚期強度，並使混凝土更加緻密，增進其耐久性，故可適當地配合使用於水泥混凝土；將水淬高爐石研磨所成之細粉稱謂「高爐石粉」，若將高爐石粉添加於水泥則成為「高爐水泥」。在許多重要工程先進國家已普遍使用高爐石粉於混凝土上。尤其日本，鑑於高爐水泥具有優異的強度及抗海水、抗硫酸鹽侵蝕的能力，所以在水壩、橋樑、隧道及海堤工程上，其地方政府常指定產業界優先使用高爐水泥。我國高爐石粉之應用雖然起步較晚，但發展速度極快，若能加以輔導正確使用，可獲得相當之效益。

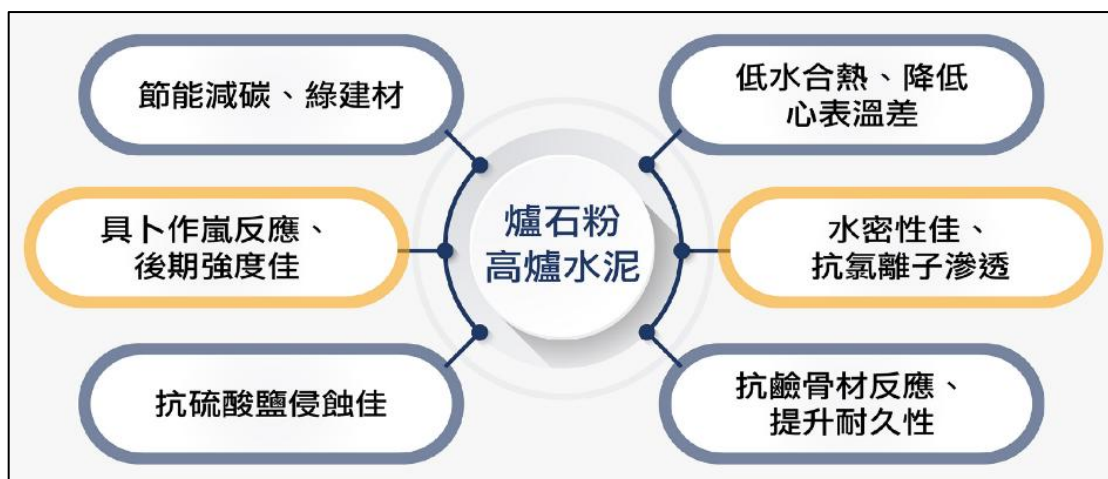




高爐石混凝土之高爐石粉使用方式可能有三種，一為採用卜特蘭水泥，而高爐石粉於拌和混凝土時另外添加；二為採用高爐水泥，所需高爐石粉成分完全包含於高爐水泥；三為採用高爐水泥，提供部份高爐石粉，不足部份再另外添加。目前國內預拌混凝土業者大多採用第一種方式，但為確保高爐石粉之品質及用量之精確，而公共工程委員會所出版之「公共工程高爐石混凝土使用手冊」，建議盡量採用第二或第三種方式進行。

(一)爐石粉

「爐石粉」係指一貫作業煉鋼廠水淬高爐石(水渣)經研磨成之細粉，由於含高量玻璃質而具有潛在膠結能力，與水泥混合使用則產生類似水泥熟料之水化物 C-S-H 膠體，故能取代部份水泥添加於混凝土；另外顆粒微細之高爐石粉，若做為填充料摻用於混凝土，則可減少水泥漿中之孔隙，增加混凝土之緻密性，而增進混凝土之耐久性，亦可提升混凝土之品質。



(二)高爐水泥與 CNS 定義

水硬性混合水泥，若由爐石粉與卜特蘭水泥均勻混拌而成即稱為卜特蘭高爐水泥(簡稱高爐水泥)，依據 CNS15286 的規定，高爐水泥因性能不同分為許多種類，標示型號亦不相同。例如:卜特蘭高爐爐渣水泥[IS(<70)]型於水化後，其所含成份會行卜作嵐反應，促進混凝土晚期強度成長，提升混凝土強度與工程品質。



高爐水泥之物理性質應符合 CNS 3654 之規定，如表 5-1 所示；高爐石粉所佔之質量應在 25%至 65%之間。而骨材及

拌合水等部分，皆須符合相關 CNS 之規定。

表 5-1 高爐水泥之物理性質

水 泥 種 類		IS	IS-A	IS(MS)	IS-A(MS)
細度：試驗篩 0.045mm CNS 386 (試驗篩) 濕法篩餘量， 最大值，%		18.0	18.0	18.0	18.0
比表面積(氣透儀法)， cm ² /g (最小值)(註 1)	平均值	2800	2800	2800	2800
	任一試樣之	2600	2600	2600	2600
健度(最大值)	熱壓膨脹(%)	0.80	0.80	0.80	0.80
	熱壓收縮(%)	0.20	0.20	0.20	0.20
凝結時間(費開氏試驗)	初凝不少於 (分鐘)	45	45	45	45
	終凝不多於 (小時)	7	7	7	7
壩料之空氣含量[依 CNS 787 製備及試驗] (vol.%)		最大 12	19 3	最大 12	19 3
抗壓強度 MPa(kgf/cm ²) 最小值 (註 2)：	3 天	8.2(84)	6.2(63)	6.9(70)	5.2(53)
	7 天	14.5(148)	10.3(105)	12.5(127)	9.6(98)
	28 天	25.0(255)	20.0(204)	25.0(255)	20.0(204)
水合熱最大值, kJ/kg(cal/g)(註 3)	7 天	290(70)	290(70)	290(70)	290(70)
	28 天	330(80)	330(80)	330(80)	330(80)

註 1：此類水泥之視比重較卜特蘭水泥為低，故在使用氣透儀時，試樣之質量應依照 CNS 2924[卜特蘭水泥細度檢驗法(氣透儀)]之方法決定之，而細度必須用實測比重代入 CNS 2924 中之適當公式計算之。又該平均值(最小值)及任一試驗之最小值僅於購方特別要求情形下提供之。

註 2：[壩料為水泥 1 份及級配標準砂 2.75 份(依重量計)，依照 CNS 1010 製備及試驗。

註 3：本規定適用於中度水合熱(MH)時，其抗壓強度應以表內數值之 80%為準。

(三)高爐水泥優點

本計畫針對高爐水泥其優點列舉如下：

- 1.無法隨意逕自調整膠結料的混合比例。
- 2.膠結料的拌合均勻性佳。
- 3.從原料進廠、生產到出貨，均由水泥廠分別取樣檢驗，品質穩定性較佳。
- 4.生產過程的嚴格品管及拌合均勻性的提升，對色澤及工作性有正面的助益。

5.生產過程有降溫效果，水泥到場溫度較低。

6.對於鹼質反應性及抗硫酸鹽侵蝕性能，CNS 標準均有量化的要求。

(四)高爐水泥-綠色材料

目前若根據政府採購法第 96 條，機關得於招標文件中，規定優先採購取得政府認可之環境保護標章使用許可，而其效能相同或相似之產品，並得允許百分之十以下之價差。產品或其原料之製造、使用過程及廢棄物處理，符合再生材質、可回收、低污染或省能源者，亦同。其他增加社會利益或減少社會成本，而效能相同或相似之產品，準用前項之規定。前二項產品之種類、範圍及實施辦法，由主管機關會同行政院環境保護署及相關目的事業主管機關定之。

此外，依據建築技術規則第十七章「綠建築基準」第六節規定，建築物應使用綠建材。綠建材設計技術規範第 10 點，認可之綠建材應為取得「第一類環保標章建材」、「綠建材標章建材」或「其他經中央主管建築機關認定具有同等性能者」。

目前高爐石產品被列為綠色材料，並取得環保標章及綠建材標章，其相關產品認證如圖 5-4 所示。近年，各單位皆努力推動綠色材料，因此中聯資源也將鋼鐵爐石產品進行產品碳足跡認證，其碳足跡產品也包含了高爐水泥等，其相關碳足跡產品如圖 5-2，各項產品也具有相當的減碳效益，因此，目前國內已使用高爐水泥之工程實例如表 5-2 所示。

建立碳足跡產品包含

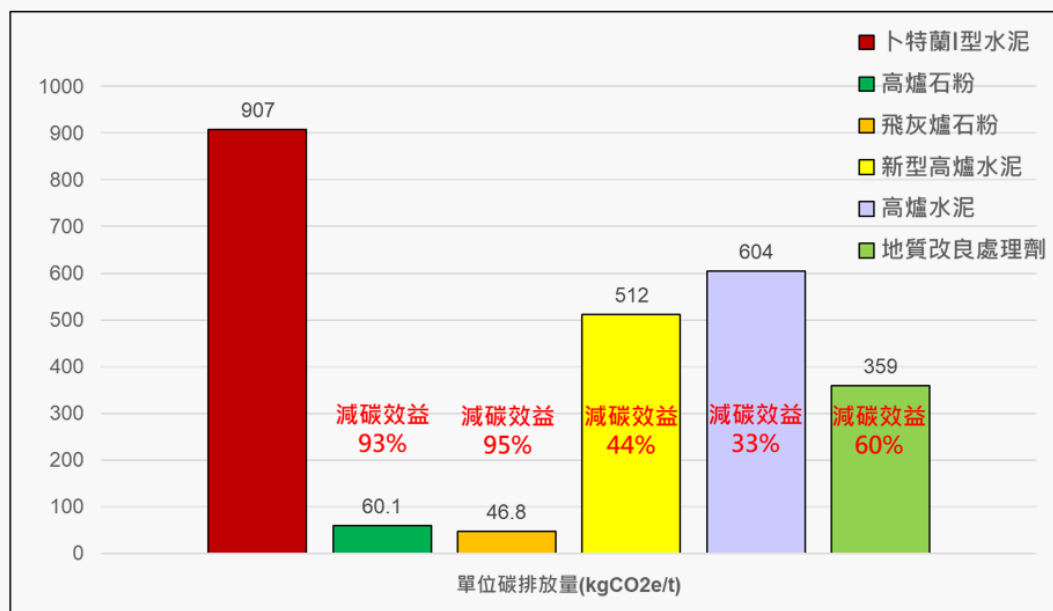
1. 卜特蘭高爐水泥
2. 地質改良處理劑
3. 高爐石粉
4. 飛灰爐石粉
5. 新型高爐水泥 (H2F)



台灣碳足跡標示

圖 5-2 中聯資源相關產品碳足跡

產品減碳效益



數據來源：環保署產品碳足跡服務平台公告數據

圖 5-3 中聯資源相關產品減碳效益



圖 5-4 綠色材料產品認證圖

表 5-2 高爐水泥工程實例表

工程名稱	施工年份	設計強度* (kgf/cm ²)	坍度 (cm)	含氣量 (%)	水膠比 (W/B)	膠結材 (kg/m ³)	用水量 (kg/m ³)	砂石比 S/A (%)	爐石粉		卜特蘭 水泥 類型	化學添加 劑類型	混凝土 數量 (m ³)	備註
									細度 (cm ² /g)	替代率 (%)				
高屏溪攔河堰	1996~1999	140 (28 天)	7.5	—	0.73	222	162	37	—	40	II	G	150,000	高爐水泥 IS 型
南星消波塊 計畫胸牆堤面	1995~2000	210 175 (28 天)	10.0	—	0.65 0.69	311 285	202 196	45 44	—	40	II	—	470,000	高爐水泥 IS 型
東帝士 85 層大樓	1993~1997	560 (56 天)	26.0	—	0.34	501	157	47	—	5.2	I	G	10,000	高性能混凝土
車輛檢測中心 彰濱工作站	1999~2000	210 (28 天)	25.0	1.1	0.36	397	143	48	—	25	I	G	23,000	

高爐石粉之應用不但可提升混凝土之品質，充分有效利用廢料資源，節省水泥之耗費，並可避免往昔未妥善利用高爐石粉時，亂加棄置所造成之環境污染問題。目前國內已相當重視「高爐石粉」之應用，據統計年用量至少達 400 萬噸，但深入探究其動機，大都集中應用於替代混凝土中之水泥，甚至可能有超過合理用量，影響品質之虞；而以高爐石粉用作混凝土的礦物摻料，有降低混凝土水合熱、提高混凝土晚期抗壓強度與耐久性、節省混凝土成本等優點，同時亦有避免高爐石粉棄置所可能造成的環境污染問題等優點。不過，使用過程若缺乏正確的方法，則反將影響混凝土與工程之品質。基於高爐石粉正確地使用於混凝土工程，有助於提升與確保混凝土之品質，故應可應用於公共工程之混凝土上。

因此，行政院公共工程委員會為宣導高爐石粉之正確使用，以確保，以確保達至上述「高爐石粉」使用之效益，避免高爐石粉之濫用影響混凝土工程之品質，委由國立台灣科技大學召集國內混凝土相關之產官學界，研擬本「公共工程高爐石混凝土使用手冊」，手冊編訂之目的主要在於提供工程界並宣導高爐石粉在混凝土工程之正確使用方法，以確保公共工程品質，更期能達到上述「高爐石粉」使用之效益。使原為廢料之資源能再有效利用則為另一期望。

第二節 評估再生材料混凝土應用的減碳效果

應用再生材料於混凝土中時，若欲達成與天然粒料相同的混凝土品質，則須於「再生粒料」材料的選擇與配比設計的研製同時進行慎選，水泥材料的使用比例或許需較一般使用天然粒料的普通混凝土為高，如此相較之下，產製成本是否有達至「經濟」的要求，是需要再行精算討論。而若使用「再生粒料」於混凝土中，配比設計未有對應之調整時，雖然產製成本較為「經濟」，然最終之混凝土品質是否符合需求卻是仍待商榷。

牡蠣在臺灣產量甚大，而產出的蚵殼也甚大，蚵殼內含鎂磷和錫等離子。這些離子其實都有它們的吸附效果。以前人做過將蚵殼碾碎或當作粗骨材，但沒有人將它進一步磨成粉後，添加到水泥裡面去做粗骨材。因此，本計畫將利用蚵殼磨成粉之後，以一定的比例加入一般混凝土及高爐水泥中，進行配比試驗與分析。而本計畫將以標準試體進行之，看蚵殼粉是否可以增加水泥製品的吸碳量以及其吸碳效果。由於蚵殼被認定為一個循環再生材料，若能得到相關成果，預估未來將可以有效再利用。

本計畫為進行低碳混凝土與蚵殼粉試驗，於 114 年 6 月至彰化王

功之農漁物生產合作社購置其蚵殼粗粒料、蚵殼砂及蚵殼粉等，進行相關混凝土配比及地工材料之配比試驗，其試驗說明如後續小節。蚵殼廠所提供之檢測資料如附錄六。

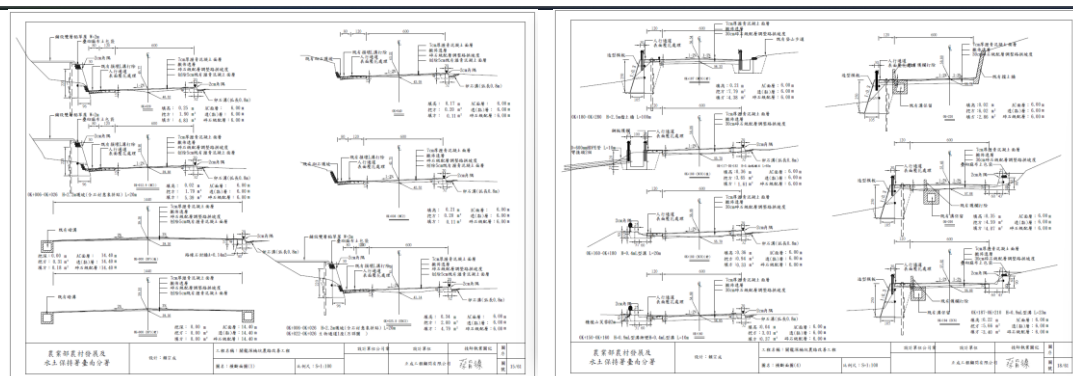
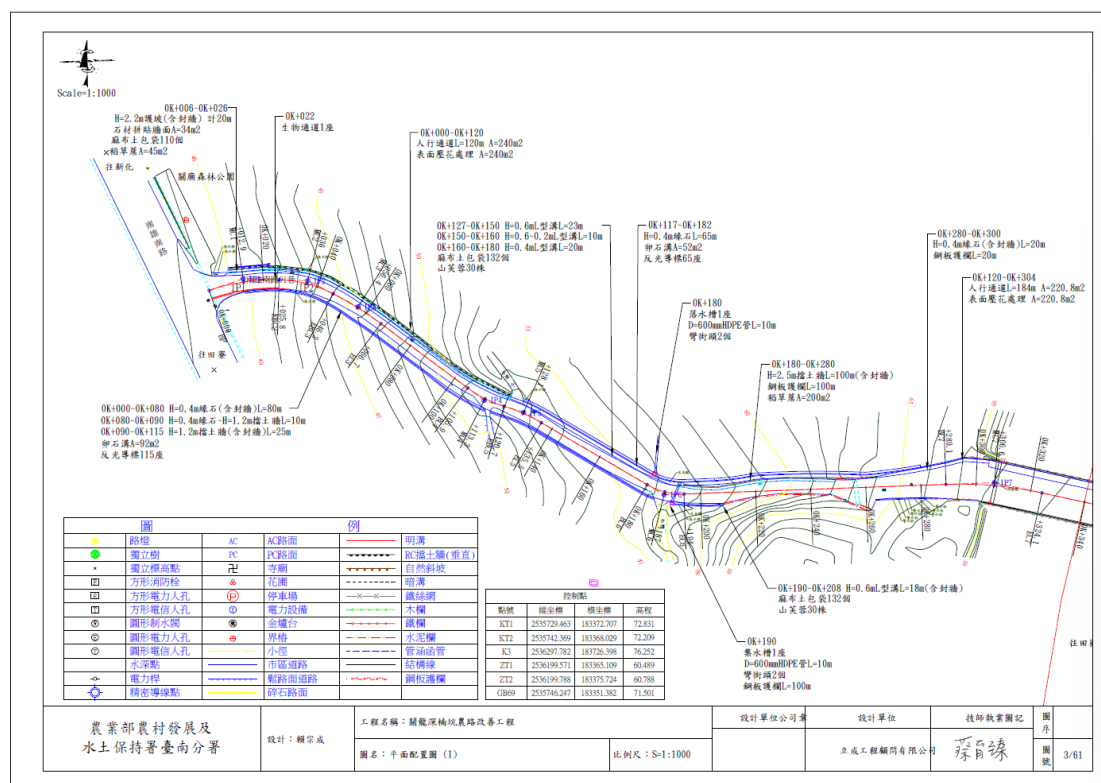


第三節 綜合評估水土保持工程中再生材料的減碳效益

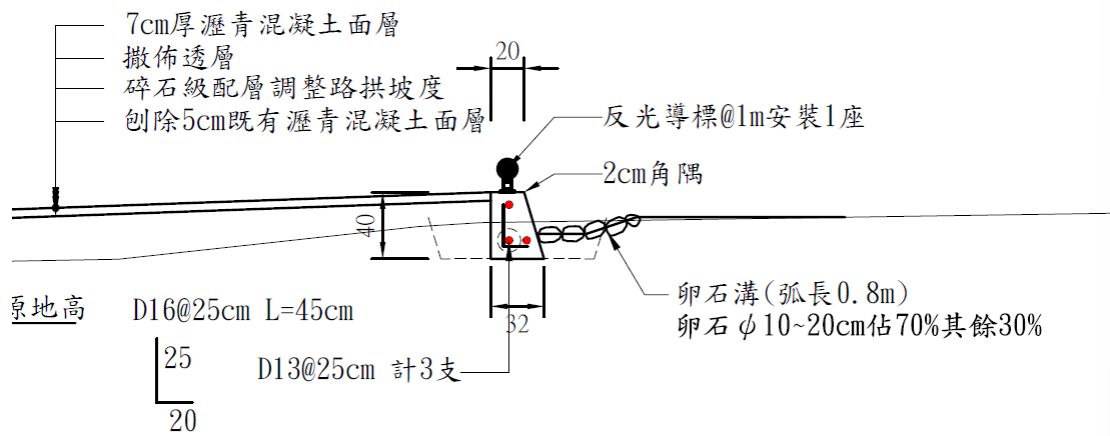
經濟性是混凝土的一項綜合性指標，在滿足前三者的前提下，設計時應考慮與混凝土有關的各項經濟指標，除了考慮材料本身價格，還應一併考慮到施工的附加成本及潛在的經濟因素（如對環境的影響等），如此精算後方能取決混凝土的使用材料與配比設計，若未通盤考量，而僅欲達某一目標卻忽略了其他的產出成本，未必符合「綠色」混凝土之內涵。

施工階段既是規劃、設計的實現過程，又是大規模改變自然生態環境、消耗自然能源的過程，因此對這一過程進行控制和管理，倡導以節約能源、降低消耗、減少污染的產生量和排放量為基本宗旨，對於推行水保工程的可持續發展策略，推廣綠色施工有著不可忽視的作

第五章 循環再生材料在水土保持工程中的減碳效果評估





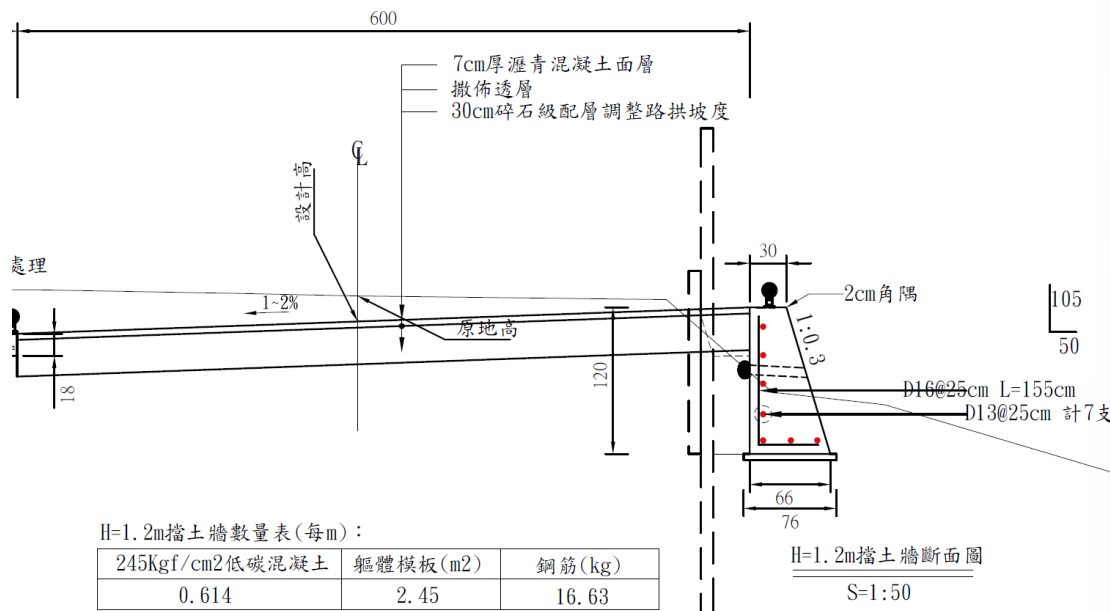


H=0.4m緣石斷面圖

S=1:50

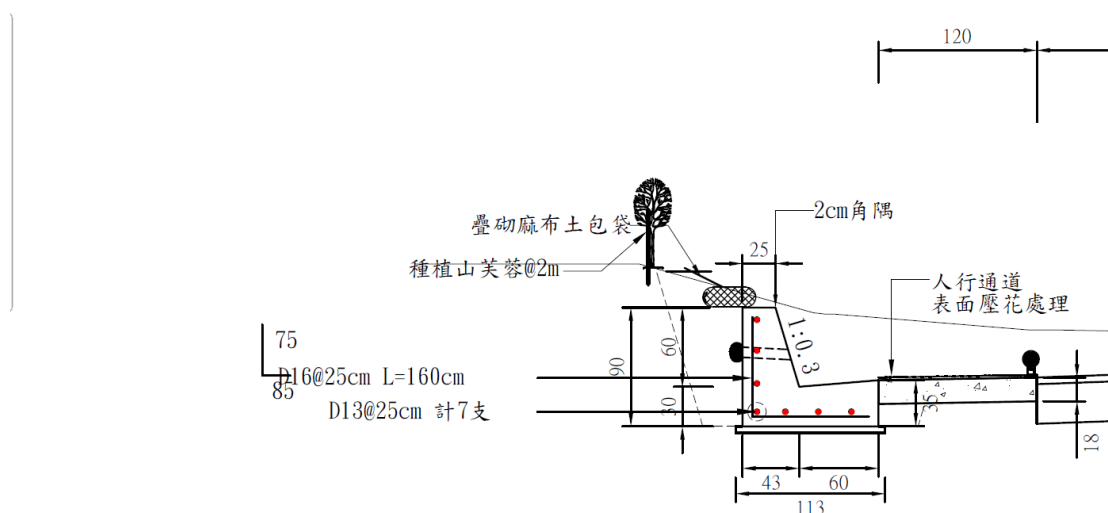
H=0.4m緣石數量表(每m):

g)	245Kgf/cm ² 低碳混凝土	軀體模板(m ²)	鋼筋(kg)
l	0.104	0.82	5.79



H=1.2m擋土牆數量表(每m):

245Kgf/cm ² 低碳混凝土	軀體模板(m ²)	鋼筋(kg)
0.614	2.45	16.63



H=0.6mL型溝數量表(每m):

245Kgf/cm ² 低碳混凝土	軀體模板(m ²)	鋼筋(kg)
0.585	1.88	16.94

H=0.6mL型溝斷面圖

S=1:50

圖 5-6 關龍深楠坑農路改善工程現況照及設計圖

農業部農村發展及水土保持署臺南分署						
詳細價目表[預算]						
工程名稱	關龍深楠坑農路改善工程			會計科目		
施工地點	臺南市關廟區			工程編號	114-FR-41-4-031	
項次	項目及說明	單位	數量	單價	複價	編碼(備註)
壹	發包工程費	式	1.00	29,264,048	29,264,048	
一	施工費(工作費+材料費)	式	1.00	25,309,622	25,309,622	
1	構造物開挖，挖普通土，機械	M3	4,075.00	35	142,625	
2	構造物開挖，軟岩，機械挖	M3	1,019.00	170	173,230	
3	構造物回填，回填土(二次挖填及運費)	M3	4,123.00	80	329,840	
4	餘土現地回填	M3	971.00	210	203,910	*
5	原AC路面刨除(厚度平均約5cm)	M2	10,420.00	37	385,540	*
6	結構用低碳混凝土，預拌，210kgf/cm ²	M3	1,668.00	3,600	6,004,800	
7	80kgf/cm ² 混凝土含運費	M3	314.00	2,800	879,200	
8	結構用混凝土，澆置費	M3	1,982.00	150	297,300	
9	場鑄結構混凝土用模板，清水模板，軀體	M2	3,538.00	490	1,733,620	
10	產品，造型模板	M2	1,091.00	500	545,500	
11	鋼模、鐵模	M2	574.20	520	298,584	
12	鋼筋材料費	T	45.22	26,000	1,175,720	
13	鋼筋加工及組立(鋼筋另計)	T	45.22	10,000	452,200	
14	再生瀝青混凝土鋪面(t=5cm)(含鋪築及滾壓)	M2	10,420.00	280	2,917,600	#
15	瀝青透層	M2	7,294.00	14	102,116	*
16	瀝青黏層	M2	2,910.00	13	37,830	

第四節 低碳混凝土及再生材料等試驗分析說明

根據上述各節說明，本計畫針對低碳混凝土、地質改良劑、蚵殼砂(粉)等材料進行試驗，透過試驗來探討相關材料之減碳成效。本計畫規劃之試驗流程如圖 5-7 所示。

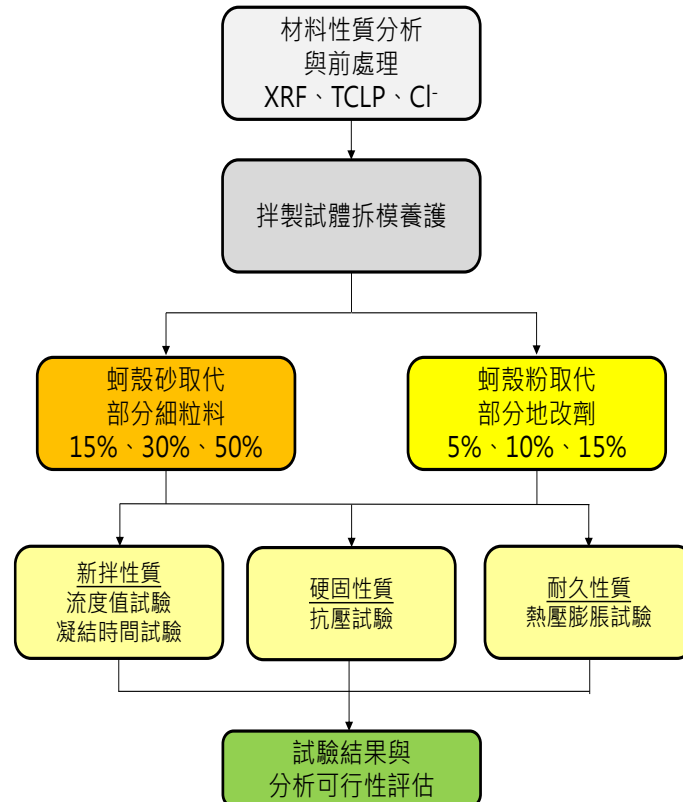


圖 5-7 低碳混凝土及再生材料試驗流程圖

一、試驗材料

本計畫所使用之材料為高爐水泥、地質改良劑、蚵殼砂(粉)、拌合水、標準砂等，就其各別性質分述如下：

1. 高爐水泥

本計畫使用之高爐水泥產製於中聯資源公司，係一種以爐石粉為主要原料的水硬性混合水泥，通常是將爐石粉與普通水泥依據 CNS15286 規範要求均勻混製而成。它具有強度

高、抗海水和硫酸鹽侵蝕能力強等優點，常用於地下結構、港灣、橋樑等工程。

2.地質改良劑

本計畫使用之地質改良劑產製於中聯資源公司，係針對地盤改良用途所開發之水泥系處理劑，製程添加高細度礦物摻料及減水劑，產品具優異抗硫酸鹽性能，適用於固結軟弱土壤、地盤灌漿及產製 CLSM。

3.蚵殼砂(粉)

本計畫使用之蚵殼為沿海貝類養殖漁業副產物，剝殼取出蚵肉後所產生之廢棄物。該蚵殼砂(粉)係由彰化縣王功農漁牧生產合作社所提供，取自彰化縣芳苑鄉王功村區域沿海養殖戶之廢棄蚵殼加工粉碎分類後之產品，其物理性質與化學成份，符合 CNS1240【細粒料級配】規範規定。

4.拌合水

本計畫取用中聯資源小港廠實驗室，來自大高雄無雜質之自來水為拌合水，符合 CNS1237【混凝土拌合用水】PH 值不得小於 5.0 或者大於 8.0，且不得含過量之油脂、酸、鹼、鹽類有機物等有害於混凝土或鋼筋之物質。無筋混凝土拌合用水，其氯含量不得超過 2,000ppm，硫酸鹽不得超過 1,500ppm。

5.標準砂(細粒料)

本計畫使用之標準砂符合 ASTM C109 之規定。

二、試驗設備

本計畫除了探討蚵殼砂性質外，另拌製水泥砂漿試體，以其新拌、硬固及耐久性質等試驗，瞭解蚵殼砂取代部分細粒料與蚵

殼粉取代部分地質改良劑對水泥漿砂工程性質之影響。主要使用的試驗儀器設備為拌合機、材料試驗機、烘箱、電子秤、恆溫水槽、電動搖篩機及相關強度試驗金屬試體模等。

三、試驗變數與配比

本計畫試驗之配比係參考 CNS1010 與 ASTM C109 規範之標準水泥砂漿配比設計，以標準水灰比($W/C=0.480$)為固定配比，各材料的重量比分別為，水泥：細骨材：水=1：2.75：0.485，以固定膠結料的用量，利用高爐水泥並以蚵殼砂取代部分細粒料，或以蚵殼粉取代部分地質改良劑，變數規劃為二部份：

第一部份：依據 CNS1240、CNS486 細粒料級配規範規定，以通過標準篩號調配符合規定之蚵殼砂，取代部份細粒料用量，分別為控制組(0%)和實驗組(蚵殼砂 15%、30%、50%)相互比較，水泥砂漿配比表如表 5-3 所示。

表 5-3 蚵殼砂取代部份細粒料之水泥砂漿配比試驗表

水灰比	配比編號	膠結材料(g)	粒料(g)		拌合水(g)
		I 型水泥	細粒料	蚵殼砂	
0.480	對照組	750	2,062	0	360
0.533	OYS15	750	1,752	309	400
0.587	OYS30	750	1,444	618	440
0.660	OYS50	750	1,031	1,031	495
1.040	OYS100	750	0	2,062	780

第二部份：將蚵殼砂研磨成蚵殼粉後取代部份地質改良劑，分別為控制組(0%)和實驗組(蚵殼粉 5%、10%、15%)相互比較，水泥砂漿配比表如表 5-4。

表 5-4 蚵殼砂取代部份地質改良劑之水泥砂漿配比試驗表

水灰比	配比編號	膠結材料(g)		粒料(g)	拌合水(g)
		地質改良劑	蚵殼粉	細粒料	
0.480	對照組	750	0	2,062	360
0.487	OYP5	713	37	2,062	365
0.487	OYP10	675	75	2,062	365
0.489	OYP15	638	112	2,062	367

四、試驗進度

本計畫分別以蚵殼砂取代部份細粒料、蚵殼粉取代部分地質改良劑拌製水泥砂漿探討對新拌性質、硬固性質及耐久性質的影響。

(一)材料基本分析

1. 化學成分分析(XRF)

樣品 名稱	XRF 化學分析 (%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
蚵殼	2.46	0.76	51.10	0.76	0.38

換算 CaCO₃：91.3%。

2. TCLP 與氯離子含量

樣品 名稱	TCLP(ppm)								濕式 (%)
	As	Hg	Cd	Cr	Cu	Ba	Pb	Se	Cl ⁻
蚵殼	ND	ND	ND	ND	ND	<0.5	ND	ND	0.53

經反覆浸泡、換水等水洗作業達 144hrs，氯離子含量測得 0.01%。

CNS1240 混凝土粒料規範細骨材氯離子含量需<0.012%。

3. 細粒料標準篩分析

樣品 名稱	細粒料篩分析通過率(%)						
	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
蚵殼	100	99.9	99.7	45.6	15.2	4.7	0.7

細粒料細度模數 FM=2.3。

CNS1240 混凝土粒料規範細骨材細度模數介於 2.3~3.2。

(二)新拌性質分析法

1.流度試驗

依據 CNS 1012、ASTM C230-97「水泥砂漿流度試驗法」之標準規定進行。

(1)蚵殼砂替代(部分)細粒料

編號	試 驗 規 劃				新 拌 性 質	
	膠 結 材		細 粒 料			
	高爐水泥 (H1)	蚵 殼 粉	蚵 殼 砂	標 準 砂	水灰比	流 度 (110±5%)
對照組	100%	-	0%	100%	0.480	112.0
OYS15	100%	-	15%	85%	0.533	108.0
OYS30	100%	-	30%	70%	0.587	107.0
OYS50	100%	-	50%	50%	0.660	108.0
OYS100	100%	-	100%	0%	1.040	113.0

(2)蚵殼粉替代部分膠結材

編號	試 驗 規 劃				新 拌 性 質	
	膠 結 材		細 粒 料			
	地質改良劑 (HSC301)	蚵 殼 粉	蚵 殼 砂	標 準 砂	水灰比	流 度 (110±5%)
對照組	100%	0%	-	100%	0.480	105.0
OYP5	95%	5%	-	100%	0.487	108.0
OYP10	90%	10%	-	100%	0.487	115.0
OYP15	85%	15%	-	100%	0.489	110.0

2.凝結時間

依據 CNS14220、ASTM C403 標準規定進行試驗。

(1)蚵殼砂替代(部分)細粒料

依據 CNS14220，凝結時間係針對膠結材進行測試，
上表因對照組與 OYS15 至 OYS100 之膠結材含量
皆相同，僅測試對照組。

編號	試驗規劃				新拌性質	
	膠結材		細粒料			
	高爐水泥 (H1)	蚵殼粉	蚵殼砂	標準砂	水灰比	凝結時間 (初/終凝)
對照組	100%	-	0%	100%	0.480	210/375
OYS15	100%	-	15%	85%	0.533	-
OYS30	100%	-	30%	70%	0.587	-
OYS50	100%	-	50%	50%	0.660	-
OYS100	100%	-	100%	0%	1.040	-

(2)蚵殼粉替代部分膠結材

依據 CNS14220，凝結時間係針對膠結材進行測試，
發現隨蚵殼粉用量越高，初、終凝時間較對照組減少(僅以
此次試驗結果論述)。

編號	試驗規劃				新拌性質	
	膠結材		細粒料			
	高爐水泥 (H1)	蚵殼粉	蚵殼砂	標準砂	水灰比	凝結時間 (初/終凝)
對照組	100%	0%	-	100%	0.480	275/460
OYP5	95%	5%	-	100%	0.487	220/415
OYP10	90%	10%	-	100%	0.487	215/400
OYP15	85%	15%	-	100%	0.489	195/385

(三)硬固性質分析法

1.抗壓試驗

本試驗係參照 CNS 1010、ASTM C109 標準規定進行。

2.試驗結果

(1)蚵殼砂替代(部分)細粒料

蚵殼砂替代部分細粒料(標準砂)經實驗室測試過程發現隨蚵殼使用量提升、用水量隨之提高；故 3 天、7 天與 28 天抗壓強度的表現也隨上述現象產生衰退。

編號	試 驗 規 劃				新拌性質		硬固性質		
	膠 結 材		細 粒 料						
	高爐水泥 (H1)	蚵殼粉	蚵殼砂	標準砂	水灰比	流度值 (110±5%)	抗壓強度		
	3 天	7 天	28 天						
對照組	100%	-	0%	100%	0.480	112.0	16.2	21.8	38.0
OYS15	100%	-	15%	85%	0.533	108.0	14.7	20.7	27.5
OYS30	100%	-	30%	70%	0.587	107.0	12.9	18.6	25.0
OYS50	100%	-	50%	50%	0.660	108.0	11.1	15.9	21.3
OYS100	100%	-	100%	0%	1.040	113.0	4.5	7.6	10.5

(2)蚵殼粉替代部分膠結材

蚵殼粉替代部分膠結材(地改劑)經實驗室測試過程發現隨蚵殼使用量提升，對 3 天與 28 天抗壓強度表現影響不大且微量添加還有正效益，其正效益添加量約為 5%~10% (僅以此次分析結果論述)。

編號	試 驗 規 劃				新拌性質		硬固性質		
	膠 結 材		細 粒 料						
	地質改良劑 (HSC301)	蚵 殼 粉	蚵 殼 砂	標 準 砂	水灰比	流度值 (110±5%)	抗壓強度		
	3 天	7 天	28 天						
對照組	100%	0%	-	100%	0.480	105.0	17.7	23.6	32.7
OYP5	95%	5%	-	100%	0.487	108.0	18.2	25.3	35.9

OYP10	90%	10%	-	100%	0.487	115.0	16.7	24.7	32.7
OYP15	85%	15%	-	100%	0.489	110.0	15.0	23.4	31.6

(四)耐久性質分析法

1.熱壓膨脹試驗

本試驗係依據 ASTM C827 與 CNS14603「硬固水泥砂漿及混凝土變化試驗法」標準規定方法進行，試樣為長(285mm)×寬(25mm)×高(25mm)之砂漿棒乾縮試體，試體製作完成後即置於溫度 23℃，相對濕度 100%的回環境中養護 24 小時以避免水分散失，且於隔日拆模後量測試體兩端之控制點，並以長度校對器量測試體長度，量測後置於控制環境中至所需之齡期到達時，利用長度校對器量測長度變化值。每次量測前，需以標桿校正。

$$\text{長度變化率 (\%)} = (\Delta L / L) \times 100\%$$

式中：

$$\Delta L = L - L_0 \quad (5-1)$$

式中：L₀ 為試體拆模時量測之基準值(mm) L 為各齡期之量測值(mm)

ΔL 為正表示試體膨脹，ΔL 為負表示試體收縮

2.熱壓膨脹試驗結果

本試驗係參照 CNS 14603、ASTM C827 標準規定進行。

(1)蚵殼砂替代(部分)細粒料

蚵殼砂替代部分細粒料(標準砂)經實驗室測試熱壓膨脹(收縮)試驗，其耐久性皆符合規範要求。

編號	試驗規劃				新拌性質		耐久性質
	膠結材		細粒料				
	高爐水泥 (H1)	蚵殼粉	蚵殼砂	標準砂	水灰比	流度值 (110±5%)	熱壓膨脹 ≤0.8% 熱壓收縮 ≤-0.2%
對照組	100%	-	0%	100%	0.480	112.0	-0.092
OYS15	100%	-	15%	85%	0.533	108.0	-0.010
OYS30	100%	-	30%	70%	0.587	107.0	0.030
OYS50	100%	-	50%	50%	0.660	108.0	0.041
OYS100	100%	-	100%	0%	1.040	113.0	0.095

(2) 蚵殼粉替代部分膠結材

蚵殼粉替代部分膠結材(地改劑)經實驗室測試熱壓膨脹(收縮)試驗，其耐久性皆符合規範要求。

編號	試驗規劃				新拌性質		耐久性質
	膠結材		細粒料				
	地質改良劑 (HSC301)	蚵殼粉	蚵殼砂	標準砂	水灰比	流度值 (110±5%)	熱壓膨脹 ≤0.8% 熱壓收縮 ≤-0.2%
對照組	100%	0%	-	100%	0.480	105.0	0.009
OYP5	95%	5%	-	100%	0.487	108.0	0.013
OYP10	90%	10%	-	100%	0.487	115.0	0.015
OYP15	85%	15%	-	100%	0.489	110.0	0.016

3. 抗硫酸鹽試驗

本試驗依據 CNS1167 之標準規定進行。

(1) 蚵殼砂替代(部分)細粒料

蚵殼砂替代部分細粒料(標準砂)經實驗室測試抗硫酸鹽試驗，耐久性測試至第 4 個月，OYS50(即蚵殼砂取代 50%細粒料)與 OYS100 組(即蚵殼砂全部取代細粒料)之抗硫酸鹽已超出規範要求，其餘各組尚符合。從目前試驗得

知，使用蚵殼砂取代細粒料之百分比越高，其抗硫酸鹽的效果越差。

編號	水灰比	抗硫酸鹽 $\leq 0.1\%$								
		1 週	2 週	3 週	4 週	8 週	13 週	15 週	4 個月	6 個月
對照組	0.480	0.001	-0.009	-0.001	-0.001	0.007	0.014	0.018	0.059	待補充
OYS15	0.533	-0.004	-0.002	0.007	0.004	0.011	0.019	0.018	0.026	待補充
OYS30	0.587	0.008	0.006	0.015	0.026	0.026	0.041	0.021	0.087	待補充
OYS50	0.660	0.030	0.008	0.018	0.018	0.039	0.073	0.104	0.165	待補充
OYS100	1.040	0.051	0.025	0.040	0.049	0.074	0.127	0.155	0.201	待補充

(2) 蚵殼粉替代部分膠結材

蚵殼粉替代部分膠結材(地改劑)經實驗室測試抗硫酸鹽試驗，耐久性測試至第 4 個月，各組表現仍符合抗硫酸鹽規範 $\leq 0.1\%$ 要求。

編號	水灰比	抗硫酸鹽 $\leq 0.1\%$								
		1 週	2 週	3 週	4 週	8 週	13 週	15 週	4 個月	6 個月
對照組	0.480	0.000	-0.002	0.008	0.004	0.003	0.005	-0.001	0.004	待補充
OYP5	0.487	0.003	0.009	-0.012	-0.016	-0.015	-0.014	-0.023	-0.022	待補充
OYP10	0.487	0.002	0.002	0.032	0.006	0.008	0.008	0.004	0.004	待補充
OYP15	0.489	0.002	-0.001	0.004	0.001	0.003	0.001	0.001	0.003	待補充

此外，本計畫於 114.06.27 辦理一場低碳混凝土研討會，其目的協助署內推廣低碳水泥與減碳水泥等綠色水泥材料應用於水土保持工程，包括相關設計、施工、驗收規範與應用範圍與限制說明。其主題以高爐(低碳)水泥簡介與規範說明、政府減碳政策及低碳水泥 HSC301 處理劑介紹及綠色水泥應用研究與示範案例解說等，研討會簡報資料詳如附錄七，與會參與情況熱絡(如圖 5-3)。



圖 5-8 低碳混凝土研討會現況(拍攝時間:114.06.27)

第六章 辦理 ISO 14060 系列溫室氣體專業人員認證培訓

本計畫協助農村水保署及分署同仁辦理 ISO 140 系列之室氣體從業人員專業訓練，透過辦理 2 場相關課程(每場人數及時間以開課單位規定為主)，邀請具有 TAF 認證之驗證機構核發相關證照，課程內容以提升同仁溫室氣體減量管理或盤查系統或碳中和查證知識素養為目的，並協助同仁取得相關國際人才資格證明。本計畫於契約訂定後，與承辦科室進行相關工作討論，先規劃安排 ISO14064-1:2018 溫室氣體暨 14067:2018 碳足跡雙主導查證員課程為主要初步專業人員認證。待相關同仁取得專業人員認證後，再針對已有初階證照的同仁進行進階之 14068-1:2023 碳中和主導查證員培訓作業。

本計畫將訓練課程將分為兩階段，第一階段課程已於 114.03.25~03.27 及 114.04.08~04.09 進行 ISO14064-1:2018 溫室氣體暨 14067:2018 碳足跡雙主導查證員課程，上課情況如圖 6-1 所示。此階段參與之 25 位學員全數取得雙主導課程之證書，其相關證書已於 114.07.14 提供給承辦單位。





圖 6-1 ISO14064-1:2018 及 ISO14067:2018 雙主導查證員課程現況照

第二階段 ISO14068-1：2023 碳中和主導查證員課程已於 114.09.09~09.11 辦理，學員人數經署內承辦課室提供，此階段上課學員 25 位，目前已順利完成課程及測驗，此階段參與之 25 位學員全數取得 ISO14068-1：2023 碳中和主導課程之證書，後續待機構發放證書，相關課程內容如圖 6-4。



圖 6-2 ISO14068-1:2023 碳中和主導查證員課程現況照

 課程大綱

時間	課程大綱
第一日	- 溫室氣體議題及國際趨勢 - ISO 14060 系列標準的認知、相互關係與應用 - ISO 14064-1 條文解析 - 範圍、用語與定義、原則、溫室氣體盤查邊界 - 課堂討論與試題演練
第二日	- ISO 14064-1 條文解析 - 排放與移除之量化、基準年溫室氣體盤查清單、減緩活動、溫室氣體資訊管理、溫室氣體報告 - 案例研討與試題演練
第三日	- 碳足跡國際趨勢說明、基本概念與名詞解釋 - ISO 14067 條文解析 - 碳足跡盤查方法 - 量化方法、系統界限與截斷準則、數據與數據品質 - ISO 14026 足跡溝通 - ISO 14071 關鍵性審查方法說明、敏感度分析
第四日	- ISO 14064-3 查證及確證組織要求、應用、適用語、定義及原則 - 查證及確證適用之要求及風險分析實踐 - 案例演練
第五日	- 查證作業執行 - 分組演練 - 查證計畫 (ISO 14064-1 & 14067) - 查證及確證工作人員能力及資質 - 學習評量測驗

圖 6-3 ISO14064-1 及 ISO14067 雙主導查證員課程大綱

 課程大綱

時間	課程大綱
第一日	- 碳中和國際趨勢 - 溫室氣體盤查標準簡介、淨零碳排與碳中和的差異、碳中和導入效益 - ISO 14068-1：2023 範圍、用語與定義與原則 - 碳中和承諾、主體與邊界的選擇
第二日	- 溫室氣體排放與溫室氣體排放量化 - 碳中和管理計畫 - 減少溫室氣體排放和提高溫室氣體去除能力、抵換 - 碳中和報告、聲明 - 供應鏈碳中和、內部碳定價 - ISO 14064-3 適用範圍、引用標準、用語與定義、原則 - 查證 / 確證適用之要求說明
第三日	- 確證作業執行 - 查證及確證工作人員能力及資質 (ISO 14066) - 模擬試題 - 正式學習評量測驗

圖 6-4 ISO14068-1:2023 碳中和主導查證員課程大綱

第七章 取得減量額度相關制度之建立

第一節 國有公用土地造林選擇標準、管理與維護方式

針對國有公用土地造林以達成碳吸收目標，應制定以下標準與方式：

一、地選擇標準

1. 土地適格性：

- (1) 非森林地認定：須符合「溫室氣體自願減量專案推動管理辦法」及環境部「造林與植林碳匯專案活動」等相關減量方法學（例如 AR-TMS0001），證明土地在專案活動開始前的一定時間內（如至少 50 年，需依方法學規定）處於非森林地狀態，以確保外加性（Additionality）
- (2) 閒置或低度利用：優先選擇國有公用機關經管之閒置、低度利用、或屬農林漁牧/國土保安用地等適合造林的土地。
- (3) 面積要求：須符合減量方法學對專案規模的最低面積要求（例如國產署的標租新制規劃是集合超過 0.5 公頃的土地）。
- (4) 地質與土壤要求：針對目前北中南東案例，持續蒐集改善後植生增匯成效較佳之區域地質與土壤環境進行應先選擇。

2. 環境條件評估：

考慮土壤條件、氣候類型、水源供應等，確保適合所

選樹種生長，最大化碳吸收效益。

二、造林與樹種選擇

- 1.本土/適地適種： 優先選擇本土樹種或經評估適合當地氣候、能快速生長且有高碳吸收潛力的樹種。
- 2.多樣性與永續性： 鼓勵種植具生物多樣性效益的混和林，而非單一純林，以增強森林韌性。
- 3.經營模式： 採行符合減量方法學規範的森林經營模式，如不採行焚燒等會產生溫室氣體排放的行為。

三、管理與維護方式

- 1.專案實施計畫（PFP）： 造林者（可以是原經管機關、合作企業或團體）須依環境部規定撰寫專案實施計畫，詳述造林技術、物種、密度、預計碳吸收量等。
- 2.長期承諾： 專案活動必須承諾長期的維護與管理（例如依國產署標租新制，租期最長可達 40 年），以確保碳匯的永久性。
- 3.監測與記錄： 需定期進行碳匯量測與監測，記錄地上部及地下部生物量變化，並將苗木運輸、植穴、刈草等活動產生的溫室氣體排放納入計算。
- 4.權責劃分： 明確國有公用土地的管理機關與**造林執行者（申請減量額度者）**在維護、監測及違約責任上的權責。

第二節 減量額度申請流程

造林專案完成後，減量額度的申請流程應依循環境部「溫室氣體自願減量專案推動管理辦法」及相關林業減量方法學：

一、資格審核與文件準備

步驟	內容	關鍵文件/要求
專案設計	依環境部核定之減量方法學（如 AR-TMS0001）設計造林專案。	專案實施計畫（PFP）：包含基線情境、外加性證明、邊界劃定、監測計畫等。
土地合格性	證明土地在特定時間點前處於非森林地狀態。	證明文件：航空照片、衛星影像圖、土地清冊、所有權人登記等。
合作協議	國有土地經管機關與造林執行者（申請人）須簽訂契約，約定減量額度分配比例。	契約/標租文件：載明權利金、租金、減量額度回饋比例（如國產署規定保留 10% 給政府）。
提報申請	經管機關或造林者向環境部提報專案，申請註冊。	申請書、PFP、土地證明文件、其他相關許可。

二、專案審查程序（環境部/查驗機構）

- 1.初步審查：環境部對文件完整性及專案基本資格進行審核。
- 2.查驗：專案執行者應委託經環境部認可的查驗機構，依據核定的方法學，對 PFP 及實際執行情況進行查證與查驗。
查證：確認 PFP 符合方法學要求。查驗：確認實際減量成果與監測數據的準確性。
- 3.環境部核定：查驗通過後，環境部進行最終審核並核定專案註冊。

三、減量額度核發與管理

- 1.監測報告：專案執行者定期（如每年或特定期間）提交監測報告。

- 2.減量額度申請與查驗： 再次委託查驗機構對報告期間的實際碳匯量進行查驗。
- 3.額度核發： 查驗通過後，由環境部核發溫室氣體減量額度至指定帳戶。
- 4.額度分配與運用： 依據與國有土地經管機關的契約約定，分配減量額度，可供企業抵減自身碳排放或於碳交易平臺進行交易。

第三節 建立完善制度的參考要點

為確保制度的長期運作和公信力，建議：

- 1.法規明確性： 國有財產法規（如《國有非公用不動產出租管理辦法》）與氣候法規（《氣候變遷因應法》相關子法）應整合與銜接，明確界定國有土地碳權的權屬、分配與管理機制。
- 2.標準化文件： 建立國有地造林碳匯專案的標準契約範本、PFP 範本及監測報告格式，加速申請流程。
- 3.技術指引： 針對不同地區和地質條件，發布適地適種的技術手冊和碳匯量化指引，協助執行者最大化碳吸收效益。
- 4.資訊公開： 建立國有地造林減量專案資訊平臺，公開土地資訊、專案進度、核發額度等，增加透明度與社會參與。

建立針對國有公用土地的造林使用與減量額度申請制度，需要從政策、技術、流程和管理等層面進行綜合規劃。以下是具體的建議步驟：

一、制定選擇標準

選擇造林區域應該依據以下標準進行：

- 1.土地適宜性分析：選擇土壤肥沃、氣候適宜且生態環境能夠支持森林生長的區域。可以依據地理資訊系統(GIS)進行區域篩選，分析土地的碳吸收潛力。
- 2.碳吸收效益評估：針對不同區域的碳吸收潛力進行初步評估，包括土地的碳儲存容量及未來增長潛力，選擇碳吸收量大且可持續發展的土地。
- 3.生態保護需求：應考慮與當地生態保護需求相符合，避免選擇可能對生物多樣性或水資源造成負面影響的區域。

二、管理與維護方式

為了確保造林後達成預期的碳吸收目標，管理與維護至關重要：

- 1.選擇適合的樹種：根據當地氣候條件選擇適合的樹種，確保樹木在生長過程中能夠吸收大量的二氧化碳並且具有高存活率。
- 2.生態監測與管理：實行定期的森林健康監測，監控造林區的樹木成長、病蟲害情況以及生態變遷。必要時應進行除草、灌溉等維護工作。
- 3.森林經營規範：設立年度或季節性管理計劃，包括間伐、補植、灌溉等措施，確保造林區域的可持續發展和碳儲存效益。

三、確保達成碳吸收目標

- 1.定期碳儲存量測量：通過科學方法測量樹木的生長狀況，評估碳吸收量的實際達成情況。此類數據可用於驗證造林效益，並用於後續的減量額度申請。

- 2.外部驗證機構：引入第三方認證機構進行碳儲存的驗證和審核，確保造林項目符合國際碳交易標準，如 VCS（Verified Carbon Standard）等。

四、減量額度申請流程

建議建立以下系統化的減量額度申請流程：

1.申請資格審核

- (1)資格認定：對造林項目進行初步資格審查，確保項目符合國家碳減排標準和要求。需提供項目的造林計畫、選擇的土地資料、預期的碳吸收量等資料。
- (2)碳吸收量預測：根據現有的碳吸收預測模型，估算造林完成後的碳減排量。

2.準備減量額度檔案

- (1)資料收集：包括地圖資料、項目規劃、種植計畫、管理措施等。
- (2)碳儲存評估報告：提交由專業機構或合作的科研單位撰寫的碳儲存潛力評估報告，確保數據的準確性。
- (3)生態影響報告：詳細列出造林區域可能對當地生態環境的影響，確保項目不會對生物多樣性造成重大威脅。

3.審查程序

- (1)資料審核：對提交的所有材料進行詳細審核，確保申請的減量額度符合技術規範和法律要求。審查過程可包括現場檢查、專家審查等。
- (2)碳吸收量核准：根據審查結果確定可核准的減量額度，

並對相應的碳吸收量進行核定。

4.減量額度發放與監測

(1)額度發放：經審查合格後，根據碳減排的實際情況發放減量額度，並進行注冊。

(2)長期監測：建立長期監測機制，定期更新碳吸收數據，並根據實際情況調整減量額度，確保制度的透明性和公正性。

5.建立完善的制度

(1)法律和政策保障：明確相關法律法規，提供制度性保障，如國家層面的碳減排法律和公用土地的造林法規。

(2)監管與執行：設立專門的機構負責對造林項目進行監管，並定期對申請減量額度的項目進行審查和調查。

(3)鼓勵機制：對符合標準的成功造林項目提供政策支持、財政補助或減免相關稅收，促進更多企業或社會力量參與造林行動。

這樣的系統化流程不僅能夠達到環境目標，還能有效促進碳市場的發展，為未來的碳減排額度交易提供參考和數據支持。

五、建立水土保持工程減碳增匯申請制度

在水土保持工程中，針對減碳增匯的措施可以從多個階段入手，包括規劃、設計、施工和完工服務階段的植生固碳和土壤有機碳的管理。這些措施可以納入一份指引手冊中，以幫助確保工程在整個生命週期內最大化其減碳增匯效益。

1.規劃階段：

(1)碳排放評估與目標設定：評估工程對碳排放的影響，設定減碳目標。

(2)選址與土地利用：選擇適合的地點和土地利用方式，以最大程度減少生態系統破壞。

2.設計階段：

(1)植生設計：選擇適當的植被種類和配置，促進生態恢復和碳固定。

(2)水土保持結構設計：設計可持續的水土保持結構，減少能耗和資源消耗。

(3)水土保持固碳材料設計：除了施工開挖回填材料的選擇以及再生材料應用比例與強度規範

3.施工階段：

(1)施工管理：控制施工過程中的碳排放，例如選用低碳材料、減少機械化作業的使用及材料就地取材回收再利用等。

(2)植被保護：保護施工區域內的現有植被，減少碳排放和生態破壞。

4.完工服務階段：

(1)植被管理：建立定期管理計劃，包括修剪、除草和灌溉，促進植被健康和碳吸收。

(2)土壤管理：實施有效的土壤保護措施，如有機肥料的使用和適當的灌溉管理，增加土壤有機碳儲存。

六、建立指引手冊的步驟：

- 1.收集北中南東實績：從相似的專案中收集減碳增匯的最佳實踐和案例，並進行案例工法的固碳成效探討與改善增匯的方案，並透過各種工法在不同土壤地質與降雨沖蝕環境的影響迴歸公式進行滾動檢討並透過建立工程碳地圖的建置，依據工程所在位置，工程種類，了解該地質、土壤、水文沖蝕特性以及植生固碳增匯的能力，建立各生命週期應有的碳效益。
- 2.建立制度：考量土壤沖蝕(USLE、RUSLE、MUSLE 土壤沖蝕模式)對應工程改善前後與集水區土砂收支的影響，進而影響泥砂遞移率(Sediment Delivery Ratio, SDR 係指在一定時段內通過溪流某一已知新面的實測輸砂量(產砂量)與該斷面以上集水區總崩蝕量(含溪床沖刷量)之比值)對固碳增匯的評估與計算，
- 3.編制指引：將收集到的信息整理成具體的指南和操作手冊，涵蓋每個階段的具體固碳增匯建議和步驟，包含。
 - (1)工程碳排計算
 - (2)植生碳匯計算
 - (3)土壤固碳檢核
 - (4)工程碳匯計算
 - (5)工程固碳增匯評估與改善建議
 - (6)集水區固碳增匯評估與改善建議
- 4.培訓與實施：提供 ISO 培訓以確保工程團隊和相關利益者

能夠有效實施這些固碳增匯措施。

- 5.監督和調整：設置監督機制，定期透過培訓碳盤查檢查和評估工程的固碳增匯效果，並根據需要進行工程調整和維護管理改進。

七、建立造林使用與減量額度申請制度

本計畫將參考國內相關造林與植林碳匯專案，針對國有公用土地的造林，制定選擇標準、管理與維護方式，確保造林達成碳吸收目標。造林完成後，建立申請減量額度的流程，包括資格審核、文件準備及審查程序，建立完善制度提供未來申請減量額度之參考。

八、土地撥用減碳增匯管理制度

本計畫擬結合造林與土地利用經營管理制度，提出水土保持工程固碳增匯系統性評估方法與公式，來分析區域性水土保持工程固碳增匯效益分布與趨勢，推廣水土保持工程固碳增匯效益。

九、國有公用土地撥用管理制度擬訂框架

(一)撥用規範的修訂與整合

撥用制度的核心應是目的性審查，確保撥用行為與國家整體政策，特別是淨零減量目標相符。

規範項目	建議納入的減量與永續要求
土地用途合法性	撥用計畫用途應優先與氣候變遷因應法、國土計畫及淨零排放路徑圖高度連結（例如：用於設置再生能源設施、建置環保型公共建設、發展自然碳匯等）。
環境影響評估	撥用審核應納入「撥用環境永續檢核表」，評估撥用後對生態、碳匯、水土保持的影響。若涉及變更土地使用類別，應強化其淨零效益證明。
撥用面積與規模	審核應考量減量計畫所需的合理最小面積，避免過度撥用。對於大規模撥用案，應要求更高標準的永續回饋計畫。

優先順序	針對閒置或低度利用的國有公用土地，若其減量計畫效益高，應優先審核撥用或同意其進行改良利用。
------	---

(二)撥用審核機制：環境、社會、經濟（ESG）影響評估

在現行撥用審核流程中，增設「永續影響評估」環節，由申請撥用機關（需求機關）提供以下文件，供國產主管機關（財政部國有財產署）及相關目的事業主管機關審查：

1. 環境（E）影響評估與減量計畫

(1)淨零效益分析：

減量/增匯目標：明確說明撥用土地上將執行的減量計畫（如太陽光電、造林碳匯、生態復育）及其預計每年或專案期間的溫室氣體減量/吸收噸數。

技術可行性：證明計畫所採用的技術符合當前最佳可行技術（BAT）。

生態保育：評估對生物多樣性的影響，提出生態補償或復育措施。

(2)撥用後環境管理承諾：承諾將依計畫內容執行，且不得擅自變更用途，並納入環境保護要求。

2. 社會（S）影響評估

(1)公共利益最大化：證明撥用後計畫產生的公共效益（如提供綠色基礎設施、促進地方就業、改善空氣品質）顯著高於土地維持現狀的效益。

(2)利害關係人溝通：說明與鄰近社區、原住民部落等利害關係人的溝通紀錄及共識，確保計畫的社會接受度。

(3)資訊透明度：承諾定期公開減量計畫的執行進度及環

境監測數據。

3.經濟（G）影響評估

(1)資源效率： 評估土地與資金投入的效率，證明計畫是達成減量目標的成本有效方案。

(2)財務永續性： 說明減量計畫的長期資金來源與營運模式，確保其能持續運作，而非短期項目。

(3)替代方案分析： 提出至少一項不撥用國有土地的替代方案，並解釋為何國有地撥用是最佳選項。

(三)後續管理與監督機制

為保障制度的持續性與減量目標的達成，應建立回報、查核與退場機制。

階段	管理內容	執行方式與責任機關
執行期間	減量計畫定期回報	申請撥用機關每年向國產主管機關與目的事業主管機關提報年度執行報告，內容包含減量數據、營運狀況及環境監測結果。
監督與稽核	減量績效查核	國產主管機關應會同目的事業主管機關，定期（如每 3-5 年）實地查核，比對實際執行與撥用時承諾的減量計畫。
責任與罰則	用途違規與績效不彰處置	若擅自變更撥用用途、或經查核確認未依計畫執行減量，且無正當理由，應依《國有財產法》啟動撤銷撥用程序。
制度持續性	資訊系統與滾動修正	建立國有公用土地永續利用資料庫，追蹤所有撥用土地的減量績效。定期（如每 5 年）依據國家淨零目標檢討並修正撥用規範。

(四)制度保障與參考依據

1.法源依據： 在《國有財產法》相關施行細則或行政規則中，增列「撥用案件應配合國家淨零目標及永續發展要求」的條文。

2.指導文件： 國產主管機關應發布《國有公用土地撥用審核

配合永續發展指導原則》，作為各機關申請撥用時的依循標準。

3.土地撥用規範的制定

(1)法律與政策框架

A.法規明確化：制定具體的法律條文來規範國有土地的撥用，包括土地使用目的、時間期限、使用者責任等。政策應明確規定哪些用途可撥用、哪些用途需要環境影響評估。

B.政策連接碳減排目標：撥用規範需與國家的碳減排政策緊密結合，要求撥用土地用於符合碳中和或減量計畫的項目，如造林、綠能設施建設等。

(2)環境影響評估

A.環境影響評估（EIA）：每一筆土地撥用需進行環境影響評估，評估項目是否會對當地生態、空氣質量、水資源等造成負面影響。該評估需包括土地使用變更對碳吸收、碳排放的潛在影響。

B.可持續發展指標：確保撥用土地的使用不僅符合當前需求，還能對生態環境保持可持續性。土地使用項目應包括環境恢復、碳吸收增量等指標。

(3)社會影響評估

A.社會影響分析：除了環境影響，還需評估土地撥用對當地社會的影響，特別是對當地居民的生活、就業機會、文化傳承等的影響。社會影響應該在規範中設立

透明公開的民眾意見徵集和公聽會機制。

B.社會公平性保障：在土地撥用過程中，應考慮公平性，避免貧困群體或弱勢社群遭受不當影響。

(4)經濟可行性分析

A.經濟效益評估：對撥用土地後的經濟效益進行分析，考慮到項目能否帶來持續的經濟回報，如農業增產、綠能發展等。

B.投資回報保障：針對每一個項目，設立明確的經濟效益指標，確保土地撥用後能夠達到預期的經濟回報，並支持後續的監管與管理。

4.減量計畫的執行與後續管理

(1)撥用後的減量計畫執行

A.減量計畫納入土地使用合同：在土地撥用合同中，應將減量計畫作為強制性條款，要求土地使用者必須按照合同規定進行減排、碳吸收或其他環保項目。

B 具體的減量目標與時間表：制定具體可操作的減量目標（例如：每年減排多少二氧化碳），並要求每個項目有清晰的時間表來實現這些目標。

(2)環境監測與報告

A.長期監測計劃：設立持續的環境監測機制，監測土地撥用後的減量計劃執行情況，涵蓋土地質量、碳儲存量、生物多樣性等方面。

B.定期報告：土地使用者需定期向監管機構提交執行進

度報告，報告內容包括碳減排進展、環境改善效果以及任何異常情況。

(3)定期審查與評估

A.項目評估：設立專門的評估機構對減量計畫的執行效果進行定期審查，並根據評估結果提出必要的改進措施或懲罰。

B.修正機制：若發現減量計畫未達預期，應設立應急修正機制，要求土地使用者進行必要的調整與改善。

5.後續管理與監督

(1)統一監管機構

A.專責監管機構：建立統一的監管機構，負責監督所有國有土地撥用及減量計畫的執行，並確保各項措施落實到位。該機構應有足夠的資源來進行現場檢查、數據驗證等工作。

B.協作與合作：監管機構需與環保、社會發展、經濟等相關部門合作，確保土地撥用後的管理工作多方位進行。

(2)資料公開與透明

A.數據公開：所有土地撥用及減量計畫的相關數據應公開，定期向社會公眾報告執行成果，包括土地使用狀況、碳減排量、社會影響等。這樣能夠提高政策透明度，並讓公眾參與監督。

B.民眾參與：鼓勵社會大眾、學術機構等對撥用土地和

減量計畫進行監督與建議，提升制度的透明度與公平性。

(3)法律責任與追溯機制

A.違約責任：對於未能達成減量目標或未履行合同條款的土地使用者，應設立明確的違約責任，包括罰款、恢復土地使用權等措施。

B 追溯機制：如有嚴重違規行為，應設立追溯機制，對於過去的土地使用者進行責任追究，並回收或重新安排土地用途。

6.制度持續性保障

A.持續的法律支持：政策應隨著碳排放與環境管理需求的變化進行調整，確保撥用管理制度能夠應對未來的挑戰與需求。

B.定期修訂與完善：根據監測結果、技術發展以及社會需求的變化，定期對土地撥用管理制度進行修訂與完善，並更新相關法規和技術標準。

第八章 結論與建議

第一節 結論

根據報告各章節的實測數據與分析，可以得出以下幾項重要結論：

一、固碳效益的「時間累積性」與「季節性」

- 1.長期效益顯著：水土保持工程的碳恢復具有「時間累積效益」。以出火護岸案例為例，完工 10 年以上的工程顯著高於其他期別。生態碳恢復率（CRR）在恢復期至少需要 10 年才能趨近完整恢復（>90%），顯示碳儲系統需要多年才能達成顯著回復。
- 2.淨碳效益轉正趨勢：工程完工初期（1 至 4 年）整體淨碳效益（WCO_{2e}）呈顯著負值（淨排放階段），因為綠碳與黃碳效益尚未累積到足以抵銷施工的初始排放。然而，隨著時間推移，淨碳效益快速改善，至完工 10 年時已幾乎逼近「碳持平點」。這證明水保工程具備長期碳補償能力。
- 3.植生增匯的關鍵作用：植生增匯量（C_{green}）的累積量與時間呈近線性正成長（ $R^2 = 0.9932$ ），是水保工程在生態系統層級上最具長期效益的固碳貢獻來源。
- 4.季節與地質影響：固碳增匯成效初步建議以春夏季節為佳。不同地質條件的有機碳恢復率也有差異，泥岩地質（如南部崎頂層、東部八里灣層）的有機碳恢復率普遍低於 100%，且受季節影響起伏大。

二、減碳與循環材料應用潛力

- 1.工程碳排集中在材料與運輸： 前期計畫成果顯示，工程碳排放主要構成中，材料生產佔總排放的 84%，運輸佔 14.9%。這突顯了低碳材料替代和在地取材的重要性。
- 2.低碳材料技術可行性高： 報告提出在水保工程中應用低碳混凝土、石籠工法、砌石工法等，以減少水泥用量，具有極高的可行性。
- 3.再生材料應用初步結果： 針對蚵殼粉替代地質改良劑的試驗結果顯示，微量添加(5%~10%)對 3 天和 28 天抗壓強度表現影響不大且微量添加還有正效益，且耐久性符合規範要求。然而，蚵殼砂取代細粒料的比例越高，則抗壓強度和抗硫酸鹽效果衰退越明顯。
- 4.生物炭的增匯潛力： 生物炭應用技術被確認為一種重要的固碳增匯方式。將其施用於崩塌地客土，不僅能提供長期穩定的碳封存，還能改善土體工程特性、增加剪應力強度、減輕土體重量，並透過高孔隙度結構提高入滲率、減少逕流，對穩定邊坡極為有效。

三、制度與技術整合

- 1.碳中和綜合方案： 實現碳中和需要系統性地整合「迴避工程敏感區位」、「節能設計」、「原地綠化固碳」等指標，並以最小營建規模為規劃設計原則。
- 2.國有地碳權管理： 針對國有公用土地的造林，須制定標準以確保「外加性」和「永久性」。減量額度的申請流程必須依循環境部規範，並與國有土地經管機關簽訂契約，約定減量額度分配比例。

- 3.專業能力提升：透過 ISO 專業培訓，同仁已取得溫室氣體及碳中和的國際人才資格證明，有利於推動後續的減量管理與盤查系統。

第二節 建議

- 1.目前蒐集的樣本數針對不同土壤與地質環境不足，建議針對不同區位、高程以及土地利用型態進行比對
- 2.目前蒐集的工程年分僅針對 3-5 年之成果，建議針對已完工超過 10 年以上之工程進行土壤環境檢測。
- 3.針對低碳混凝土的研究成果不錯，但是對於實際生命週期尤其後面服務階段固碳增匯的成效應長期追蹤。
- 4.針對署內人員的培訓應該長期且定時滾動培訓，並針對實際水土保持工程與農村再生工程進行定期檢測與監測，可於設計、施工與完工服務階段定期檢測。

參考文獻

1. 行政院農業委員會，(2022)，臺灣 2050 淨零轉型自然碳匯關鍵戰略社會溝通會議會議簡報
2. 蔡錦銘，(2022)，111 年水土保持植材與坡地經濟作物之碳匯模式開發評估，行政院農業委員會水土保持局
3. 蔡錦銘，(2023)，112 年水土保持植材與坡地經濟作物之碳匯模型建立，農業部農村發展及水土保持署
4. 李鎮洋，(2017)，水土保持手冊，農業部農村發展及水土保持署
5. 王珮兮、吳嘉俊、武德玲、張清晏、林國財、柯燦堂，(2023)。臺東縣延平鄉紅葉村崩塌地特性及變遷研究。中華水土保持學報，54(4)，250-263
6. 陳志豪、鄭旭涵、彭心燕、林信輝，(2010)。崩塌地植生復育適用評估因數之分析研究。中華水土保持學報，41(4)，296-307
7. 林信輝，(2011)，崩塌地植生方法
8. 邱心柔，(2023)，濁水溪流域崩塌碳儲量變化之探討，國立中興大學水土保持學系碩士學位論文
9. 陳映妊、陳天健、林紘立、謝杉舟，(2023)。臺灣地區植生工程可應用之水土保持植物資料庫。中華水土保持學報，54(2)，150-163
10. 趙國容、李侑儒、宋國彰、趙偉村、張楊家豪、江智民，水土保持樹種碳存量估算參數之資料庫，中華水土保持學報，53(2)，100-110(2023)
11. 姚字徽、蘇紫婕、黃宏斌、水土保持工程永續指標評估系統之研究，中華水土保持學報，45(1) :515-538，(2013)
12. 林信輝，(2016)，坡地植生工程

13. 環境部，(2021)，溫室氣體減量與抵換管理機制。
14. 農業部農村發展及水土保持署，(2023)，水土保持工程減碳參考指引
15. 行政院農業委員會，(2023)，水土保持技術規範
16. 農業部農村發展及水土保持署臺南分署，(2022)，出火橋下游野溪整治三期工程
17. 農業部農村發展及水土保持署，(2024)，2023 年溫室氣體盤查及管理報告書
18. 劉魏魏、王效科、遼非、歐陽志雲，全球森林生態系統碳儲量、固碳能力估算及其區域特徵，(2015)，應用生態學報 9 月第 26 卷第 9 期
19. 行政院公共工程委員會，公共工程高爐石混凝土使用手冊，(2001)