

環境部環境管理署

113 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

污染土地碳匯資料建置與應用

可行性研析

成果報告(定稿本)

主辦單位： 環境部環境管理署

專案執行單位：中國文化大學／土地資源學系

專案主持人：陳怡君 副教授

專案執行期間：113 年 11 月 1 日起至
114 年 11 月 30 日止

中華民國 114 年 12 月 印製

環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒構想書 ☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	■先導型 □研究型 □模場型
計畫類別	□調查 □整治 ■其他		主持人：陳怡君 NO：P5
計畫名稱	污染土地碳匯資料建置與應用可行性研析		
審查意見		執行單位回覆	
委員一			
1. 附件 1-10 中提到本研究擬篩選 3 處污染場址進行採樣，建議說明篩選條件以證明研究成果具代表性。		謝謝委員指教，篩選原則已補充於 P7-15，本研究依據 SoilGrids 平台資料庫、土基會列管場址資料庫、及國土規劃地理資訊資料庫等，針對場址面積大、有機碳儲存量高、國土功能分區位於農業區，其發展不易而造成閒置之場址...等原則作為篩選依據，共計 10 處作為本研究標的潛在場址(表 6)，本計畫再依據署內政策規劃與跨領域專家諮詢後，最終篩選 3 處污染場址評估其碳匯增量潛力與效益評估。	
2. 建議加強說明關於機器學習預測區域發展之相關內容。		謝謝委員指教，本計畫並無探討機器學習與區域發展議題。	
委員二			
1. 本計畫符合淨零潮流，對於汙染土地利用有其參考性。		謝謝委員肯定。	
委員三			
1. P.9-13，有關計畫提出使用多種模型和工具進行污染土地碳匯潛力評估，建議進一步詳細說明如何選擇適合的模型、參數校準方法，以及不同模型結果的整合策略，有助於確保研究結果的可靠性及實用性，並為未來相關研究提供有價值之參考。		謝謝委員指教，內容已補充於 P7-19，本計畫使用模型並不需整合，而是提出常見兩種土壤碳匯評估模式，包含 RothC 與 DNDC。兩者模型差異主要係考量氮循環影響是否納入評估，模型適用性必須取決於標的場址整治或土地管理策略中使否有相關參數資料而定。因此，為確認本計畫挑選 3 處場址建立污染場址下一階段土地碳匯模型評估參數之準確性、時效性、適用性及可操作性等考量，必須先制定碳匯參數	

2. P.6-8, 有關鑑於污染土地碳匯研究涉及土壤科學、環境工程、地理資訊系統等多個領域, 建議加強跨領域合作規劃, 可考量邀請相關領域專家參與, 組建跨學科研究團隊, 以確保研究方法的全面性及結果之可靠性, 有助於解決複雜之技術難題, 並提高研究成果的實際應用價值。 3. P.16-17, 有關計畫提出預期目標及可能成果, 但對於研究結果如何轉化為實際政策建議或土地管理措施之具體規劃, 建議增加與政策制定者、土地管理者的溝通機制, 制定成果轉化及應用的具體步驟, 有助於確保研究成果能夠切實推動污染土地之碳匯管理及永續利用。	指標與準則而後確認合適模型。 謝謝委員指教, 本計畫已徵詢國內相關學者同意, 籌組跨領域專家團隊, 專家清單列於表 5。 謝謝委員指教, 本計畫主目標在於建立一個專門針對污染土地碳匯潛力的資料庫, 並分析污染場址在應用於碳匯評估上的可行性。最終會以國內案例進行 CBP 評估, 此結果與評估方法有助於揭示其碳匯價值, 鼓勵企業和土地所有者支持或選擇投資適合碳交易的土地管理項目。研究成果亦可提供政府做後續污染土地永續管理參考。
委員四 1. 建議本計畫應先針對污染土地負碳技術可行性進行評估。	謝謝委員指教, 內容已補充於 P7-10, 基於團隊過去研究成果, 初步模擬顯示污染場址每個場址含地上物單位碳匯量數值可達 10.63 – 12.51 t C/ha/y, 增匯潛力已是 FAO 提出 3.81 t C/ha/y 潛力值高, 代表負碳效果佳。然而, 該成果因尚未取得場址土壤基本資料, 僅以透過模擬探討污染場址碳匯潛力, 場址在無其他管理策略或土壤健康改善情況下的增匯量, 模擬結果主要影響變動因子僅有氣候條件與場址土壤特性, 因此, 希冀透過此計畫採樣分析與資料庫建置, 提高污染土地碳匯評估的準確性和有效性。
委員五 1. 研究主題具新穎性且符合政策推動目標。 2. 整體研究架構明確且研究方法可行, 擬達成目標和成果具體合理。	謝謝委員肯定。 謝謝委員肯定。
委員六 1. 篩選擬建立碳匯資料之場址, 建議以可實施增加碳匯(植栽、添加微生物、養分)策略之污染場址為優先。	謝謝委員指教, 本計畫探討污染場址在不同污染土地管理方案(荒廢、部分面積人工種植植被、工程改善策略:外加碳源或微生物...等), 初步採用國際常見土壤碳礦化速率評估模式進行評估。因

	此，本計畫再依據署內政策規劃與跨領域專家諮詢後，最終篩選3處污染場址評估其碳匯增量潛力與效益評估。
委員七 1. 契合主題。	謝謝委員肯定。
委員八 1. 本計畫主要擬：""...建置污染土地碳匯潛力基礎資料庫，以及碳匯資料庫建置可在污染土地碳權申請時具有科學性依據與評估準則...""。	謝謝委員肯定。
2. 本計畫擬：""...整合現有的環境數據、污染源資料、土地利用狀況以及碳儲存潛力的數據，實現一個系統性且具預測能力的資料庫...""。	謝謝委員肯定。
3. 建議以國內的場址為案例說明本計畫的成果。	謝謝委員指教，本計畫依據署內政策規劃與跨領域專家諮詢後，最終篩選3處國內污染場址評估其碳匯增量潛力與效益評估。

環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

□構想書 ■申請計畫書 □期中報告
□修正計畫書 □成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	■先導型 □研究型 □模場型
計畫類別	□調查 □整治 ■其他	主持人：陳怡君	NO：P5
計畫名稱	污染土地碳匯資料建置與應用可行性研析		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 土地特性與使用狀況不同，選擇重金屬污染場址的意義？ 2. 國內未能清理的非法棄置事業廢棄物場址也可建立土地碳匯潛力基礎資料庫？		感謝委員的指教。本計畫並非僅考量重金屬污染場址，係以考量場址的公告時間、污染面積、單位面積有機碳儲存量、土壤容重、場址列管狀況、污染物類別、整治狀況、及國土計畫功能分區...等資訊，篩選 10 處潛在可執行場址清單(表 6)，並再與專家委員及環管署溝通後做為本計畫執行標的。 感謝委員的指教。由於國內非法棄置事業廢棄物場址的污染特徵複雜且分層污染濃度不均，因此在評估土壤碳匯條件時不確定性高。依據國際上在評估土壤碳匯方法準則，若每層土壤特性具有異質性分布，則皆須進行採樣調查，以確立碳基線值。此外，碳匯需歷經多年多次採樣驗證，若每次驗證皆以高密度的分層破壞採樣，過程會再次擾動已固碳之土壤；同時，耗費高成本之採樣分析費用。有鑑於此，建議先不考量複雜度高之非法棄置事業廢棄物場址，先以具有高土壤碳儲存潛力之污染場址作為標的較為適當。	
委員二 本計畫擬建置污染土地碳匯潛力基礎資料庫，以及建構在污染土地碳權申請時具有科學性依據的評估準則（即：建立污染土地碳匯資料庫，以利於制訂更科學的監測指標與評估方法）。污染土地碳匯資料的建置：建立一個系統化的污染土		感謝委員的指教與肯定。本計畫的主要研究目標在於建置污染土地碳匯資料庫並進行應用可行性評析。計畫將透過污染場址的碳匯基線數據採樣，系統化地建立具有空間屬性資料庫。	

地碳匯資料庫，資料庫將 GIS 和土壤碳模型，提供即時的空間化數據和未來預測能力。是否能以一個實際案例說明？	誠如計畫書所述，土壤礦化評估需要考量多項環境條件與影響因子，包括氣象數據、工程操作紀錄（如外加碳源或微生物、外力干擾）、植被種類（地上與地下的生物質資料）等。然而，目前國內尚未有針對碳匯進行的實際污染場址研究，且相關方法學與驗證程序仍不完整。 因此，本計畫的第一階段將以建立初步土壤碳匯資料庫為核心，為未來的評估奠定基礎。在資料庫逐步完善後，第二階段可進一步結合作物生長模型或土壤礦化模型，進行系統性評估與數據整合，並建置具空間視覺化功能的評估平台。最終，第三階段將藉由長期的碳匯驗證數據修正模型方法學，以提升其預測能力。 為避免計畫書文字說明造成誤解，本計畫已修正 P7-7 的相關文字描述，以更清晰表達研究目標與階段性成果。
委員三 跨域概念與團隊 成果具實務應用性	感謝委員肯定。
委員四 無	感謝委員肯定。
委員五 1.有關一、專案基本資料表，建議宜補充執行期程日期。 2.有關經費勞健保費用應屬人事費用，建議宜重新檢視。 3.有關具體研究成果部分，產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)之預期量化結果為 0，本技術是否評估未來可商轉。	感謝委員指教。專案基本資料庫、人事費用等資料已修正。 感謝委員指教，本計畫係以初探國內污染土地碳匯評估可行性為主軸，探尋國內污染土地再利用其他可行性之政策，並非以整治技術面進行。由於土壤碳匯的影響與場址特徵密切相關，不同場址條件會導致碳匯效益的差異，目前並未考量技術移轉可行性。在私有污染土地的利害關係人考量減碳效益與碳權交易模式的前提下，本計畫的研究成果將扮演智庫角色，

4.建議宜新增一章節，先行評估本計畫「預計可能遭遇之困難及解決途徑」。 5.污染土地之碳匯如何區別污染物高、低於及其周邊無污染土壤之差異。	提供科學數據佐證及評估報告。 近年來，透過數據協助企業有效治理的需求逐漸增加，因此本計畫所建置的數據與方法學，具有智慧財產權的潛力。在模型穩定並經過驗證後，可進一步移轉至專業數據模型公司，將碳匯評估成果商品化，提升相關數據評估的經濟價值與產業應用潛力。 感謝委員指教。已新增說明。 感謝委員指教，本研究於污染土地進行碳匯基現採樣分析，採樣原則係參考 Verra 準則，每個場址規劃 10 個點位與不同深度土壤樣品評估，採樣規劃涵蓋污染物高、低於及其周邊無污染土壤區位。
委員六 1. 本計畫目標在於建立一個專門針對污染土地碳匯潛力的資料庫，並分析其在應用上的可行性，係目前少見且有綜合其他環保面向之作法。 建議附件 7-22~7-25 圖片可輔助說明該系統資料庫運作方式，以利審查人員理解執行成果。 3.因土壤、地下水分布趨勢複雜，透過土地管理區域圖層未必可完整評估碳匯潛力，且劃定區域的面積範圍大小、週邊環境開發規劃亦會對結果產生影響，本資料庫如可長期開發並與政府部門合作，會相對完整。	感謝委員肯定。 感謝委員指教。該系統資料庫係以模擬土地利用條件改變對於土地碳匯成本效益影響，其後台為國外建置團隊長期累積研究經驗所建置資料庫與評估方式。本計畫書尚在計畫初始階段，P7-22~7-25 圖片僅以國內某場址進行示意分析，並非實質案例模擬。本計畫在執行過程中確立可執行標的場址後再與該國外團隊進行交流，確立場址碳匯 CBP 評估結果。 感謝委員指教，土壤礦化評估需要考量多項環境條件與影響因子，包括氣象數據、工程操作紀錄（如外加碳源或微生物、外力干擾）、植被種類（地上與地下的生物質資料）等。國內尚未有針對碳匯進行的實際污染場址研究，且相關方法學與驗證程序仍不完整，因此本計畫規劃分階段資料庫、模擬、驗證進行，並先行以標的場址依循國際碳匯評估準則進行示範，盡量限縮不確定性因素與專案無限擴張所產生影響。本計畫的第一階段將以建立初步土壤碳匯資料庫為核心，為未來的評估奠定基礎。在資料庫逐步完善後，第二

	階段可進一步結合作物生長模型或土壤礦化模型，進行系統性評估與數據整合，並建置具空間視覺化功能的評估平台。最終，第三階段將藉由長期的碳匯驗證數據修正模型方法學，以提升其預測能力。 國外已有學術單位長期整合與建置土壤碳匯評估模型與平台，科羅拉多州立大學與世界自然基金會(WWF)主導所建置 CBP 平台就是其中之一。土壤增加碳匯成效的影響因子眾多，多數專案不建議土地管理策略與過程變異性過高，這會造成評估不確定性增加。這也是本計畫考量以長期閒置且整治困難之場址作為評估標的的考量之一。CBP 平台建置精神也是如此，係以土地所有權人必須先確立專案執行過程的土地利用長期規劃型態，同一土地的利用型態是否在幾年內規畫變更，若須考量變更，專案報告則皆須提供規劃內容並提供參數再進入平台模擬碳匯影響，再完整提出整體碳匯報告。
委員七 1. 本計畫具有碳排盤查參考價值，符合當前趨勢。 2. 建議可以考慮，將土地開發再生能源，例如光電場域，做為比較之用。	感謝委員肯定。 感謝委員指教，目前國內尚未有針對碳匯進行的實際污染場址研究，且相關方法學與驗證程序仍不完整。由於再生能源設施其設置工法與設計皆會影響土壤與植被生長情形，進而也是造成土壤碳匯影響因子之一。本計畫從 10 處潛在場址篩選 3 處進行基本資料庫建置，若在徵求污染土地所有權人同意下，且符合本計畫篩選條件(場址面積大、有機碳儲存量高、國土功能分區位於農業區，其發展不易而造成閒置之場址)，可考量將其視為本計畫 3 處潛在執行廠址標的。
委員八 1. 請說明目標區域之資料取得與驗證方法？	感謝委員指教。場址資料取得規劃說明新增於 P7-18。由於涉及不同場址改善計畫引用技術差異性與保密協定，故本計畫先以爬梳國際上常見參數資料庫，如 2.1~2.5 所示，並擬召開與土地所有權人或利害相關者說明會議，告知土壤碳匯評估原則與所需參數資料，經徵詢其改善專案的利害相關者同意提供後，分析取得參數資料的品質，最終篩選 3 處可合適進入下一階碳匯模擬評估之

	潛在場址。此外，P7-17~P7-18 新增土壤碳匯驗證說明。
委員九 1.人事費：保險與退休金費用超過薪資總額 15% 限制，應為 29,850 元，請修正。 2.耗材費：報告印刷、文具應編列於行政管理費，請修正 3.其他：碳匯採樣分析費用可編列於耗材與主要費用。交通車資費用請再詳細補充說明。 4.請依補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書修正稿。 5.申請計畫書修正稿請檢附保密切結書、執行同意書、專案主持人聲明書、自我檢核表。	感謝委員指教，遵照辦理。

☐構想書 ☐申請計畫書 ☒進度報告
☐修正計畫書 ☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	☒ 先導型 ☐ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他	主持人：陳怡君 NO：P5	
計畫名稱	污染土地碳匯資料建置與應用可行性研析		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 書面報告中”頁碼”，請依書面報告書撰寫須知壹、報告撰寫格式三、報告內頁(三)之相關內容編列。報告撰寫內容亦請依撰寫須知相關規定辦理。		感謝委員指教。遵照辦理。	

☐構想書 ☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒成果報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	■先導型 ☐ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☐ 整治 ☒ 其他		主持人：陳怡君 NO：P5
計畫名稱	污染土地碳匯資料建置與應用可行性研析		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 本研發計畫「污染土地碳匯資料建置與應用可行性研析」，為符合國際趨勢及我國淨零政策需求之研發主題；本計畫已依預定進度應完成各研究項目，並提出期末報告，相關成果符合原規劃期程。 2. 本計畫期末報告所獲致之成果顯示「污染土地碳匯」不失為提供污染土地治理與活化之良好解決之道，建議主管機關參採本計畫相關意見與建議事項，在現有基礎上持續建立我國「污染土地碳匯資料庫」，以利後續政策、業務推展。 3. 建議本計畫研發團隊延續現有成果持續研提相關研發計畫，並可考慮邀請相關業者(如污染土地整治顧問機構或污染土地管理者)加入產學合作計畫模式，以加速我國推動污染土地碳匯資料建置與應用。		謝謝委員肯定。 謝謝委員肯定。 謝謝委員指教，本研究已建構污染土地碳匯評估準則與步驟，未來希冀能密切與利害相關者合作，依據不同污染場址特徵，建立本土化專一性資料庫，以利加速我國推動污染土地碳匯資料建置與應用。	
委員二 1. 成果宜依照 p20 之工作項目編寫，目前內容不易對應。 2. 生物活動於污染土地較一般土地更不活躍，因此強調與碳匯之連結應陳述長期之目的(例如受污染土地可能占優之碳匯種類)，以利評估相關工作推動之必要性。		謝謝委員指教，因計畫規模與場址調查經費限制，本計畫經專家委員建議與進度報告討論後，成果報告係以單一場址的碳匯調查評估來呈現，以做為污染土地碳匯評估方法建置參考。為讓讀者易於對應原定工作項目(甘特圖)，本計畫於甘特圖備註處新增說明頁碼，以及工項差異。 謝謝委員指教，污染土地碳匯影響機制國內尚未有完整評估，國際上也僅有少數單一性場址數據；因此，本計畫於報告 P16~17 也特別強調污染土地碳匯更應有長期調查必要性。	

3. 工作說明建置碳匯基本資料庫，但未見說明上述資料庫之目的(例如做為碳匯計算)，以及相關欄位內容，建議補充之。	謝謝委員指教，原計畫擬定3處場址建立碳匯資料庫;然而，因計畫規模與場址調查經費限制而改為單一場址調查，本計畫則於P20甘特圖說明工作內容變動，以利釐清。另外，本計畫以單一場址評估作為示範，該場址係以FAO建立EX-ACT工具進行評估，該工具是FAO開發用於評估AFOLU(農業、林地與其他用地)不同土地用途轉換對於碳平衡影響，評估方法係遵守IPCC評估原則，即是本報告公式(1)~公式(7)及表1參數，SOC_{REF}與C_{input}來自於本次調查結果，已在報告P37補充說明。
4. P37之廠址碳匯差異主要以林相進行計算，土壤部分未納入? 根據文獻，土壤部分之佔比或可了解之，若佔比較低，或逕以不同時間空照影像透過AI辨識與計算較為簡便?	謝謝委員指教，本計畫以FAO建立EX-ACT工具進行評估，該工具使用方法係遵守IPCC評估原則，故除考量林相固碳量外，土壤碳匯也有考量。由於，污染土地狀況差異甚大，僅有少數場址係屬有植林，以本次執行場址呈現林相茂密生長樣態的場址不多，多數污染場址特徵可能因閒置而僅有草地覆蓋，故本計畫仍同時評析土壤黃碳及林相綠碳的潛力。另一方面，國內僅有少數資料提供樹種在污染土地生長差異的微觀影響，而時間空照方法目前還無法清楚辨識微觀植物生長上差異，因此建議未來仍可逐步建立調查與影像辨識資料，藉由AI來提升評估量能。
委員三 1. 本計畫目標達成度大致可符合預期。 2. 推動污染土地碳匯制度立意甚佳，但需政策支持以及氣候署專案審查核可。 3. 根據本計畫統計管制面積超過1公頃且閒置5年以上的尚未解列的污染場址，18%為公有地，或可將污染土地碳匯觀念告知屬公部門之土地所有/管理人，作為各政府	謝謝委員肯定。 謝謝委員指教，污染土地推動碳匯專案已在國際上被認為是減緩氣候變化關鍵策略之一;然而，土壤碳儲存量損失與增量存在不確定性，多數碳匯評估專案建議須長達3年基線調查，以及每5年驗證1次土壤增匯量數據。國際上申請碳匯專案至少須長達10年以上資料評估，以確保專案碳匯潛力的持久性。尤其，不同污染場址的特徵差異極大，更需有長期監測與驗證資料才具有公信力，再由氣候署專案審查認可。未來若獲得署內政策持續支持，逐步建立污染場址資料庫，以示範性場址推動監測、驗證等程序，則可建立我國在污染土地碳匯評估方法學參考。 謝謝委員指教，本計畫已初步建立土地碳匯評估步驟與準則，未來可配合署內政策推動，提供相關資訊給有需求場址，讓土地利害相關者於思考污染土地活化策略下有更多不同路徑選擇。

機關碳中和績效之措施。	
委員四 1. 研究成果符合台灣 12 項國家自定貢獻 (NDC) 關鍵戰略中碳匯及負排放技術發展應用且明確提出建置污染土地碳匯評估程序、制定科學監測指標等具體建議。 2. 建議後續可建立更完善的跨污染場址數據比對機制並加強與國內政策制定部門的合作溝通。 3. 建議可持續蒐集國內其他污染場址數據，擴充資料庫完整性並評估將研究成果轉化為政府監測指標與評估準則之可行性。	謝謝委員肯定。 謝謝委員指教，未來若獲得署內政策持續支持，逐步建立污染場址資料庫，以示範性場址推動監測、驗證等程序，則可建立我國在污染土地碳匯評估方法學參考。 謝謝委員指教，未來若獲得署內政策持續支持，逐步建立污染場址資料庫，以示範性場址推動監測、驗證等程序，則可建立我國在污染土地碳匯評估方法學參考。
委員五 1. 研究成果已有論文發表(研討會與期刊)。 2. 研究成果量化的部分建議討論其合理性。	謝謝委員肯定。 謝謝委員指教，本計畫已在成果報告說明其研究範疇與限制(今年度建立基線資料庫與初步碳匯潛力評估)，建議未來若能獲得政策持續支持，可逐步透過歷年調查資料與模式修正污染土地的碳匯變化，並經由驗證程序來確保其數據合理性。

專案基本資料表

專案性質		☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質		專案類別 (單選)	☒ 先導型 ☐ 研究型 ☐ 模場型	
研究主題		☐ 整治 ☐ 調查 ☒ 其他				
申請機構系所		中國文化大學土地資源學系				
機構地址		台北市士林區華岡路 55 號大功館 B110 室				
專案主持人		陳怡君		職等／職稱	副教授	
專案 名稱	中文	污染土地碳匯資料建置與應用可行性研析				
	英文	Establishment of carbon sequestration data for contaminated lands and feasibility for application				
	關鍵字	碳匯、資料庫、指標、模式				
執行期程		自民國 113 年 11 月 1 日起至民國 114 年 11 月 30 日止				
專案主持人		姓名：陳怡君 E-mail : cogiitri@gmail.com		專線： 手機：0987309935		
經費 分 析 總 表 (僅模場試驗專 案需填寫兩年 度金額)		專 案 預 估 總 經 費		第一年 申請經費	第二年 申請經費	編列說明
		1.	人事費用	227,867		計畫主持人、專任助理、及臨時工人事費用
		2.	設備使用含維護費			
		3.	耗材與主要費用	163,950		專家諮詢小組諮詢費、資料檢索費、土壤碳儲量背景調查檢測(總體密度、總有機碳含量、無機碳含量、pH 值、EC 值)、採樣費用
		4.	其它研究相關費用	8,183		場址調查與計畫執行差旅費用
		5.	行政管理費	60,000		水電費用、報告印刷、文具費用
		6.	自籌款			
		申請補助經費(1~5 項)		460,000		總金額：460,000
		計畫總經費(1~6 項)		460,000		總金額：460,000

專案主持人 (簽名及蓋章)：_____

日期：_____

113 年度專案成果績效自評表

填表日期：114 年 4 月 23 日

一、專案基本資料

專案性質	☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質	專案類別	☒ 先導型 ☐ 研究型 ☐ 模場型
研究主題	☐ 整治 ☐ 調查 ☒ 其他		
執行機構	中國文化大學土地資源學系	專案主持人	陳怡君
專案名稱	污染土地碳匯資料建置與應用可行性研析		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中(進度報告) ☒ 成果		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半 年達成率	備註 (說明未達成原因或學術產出發 表名稱)
A 學術產出及活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	1		0		研究成果已改為投稿國際研討會
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1		1		已投稿至國際期刊"SPRINGER NATURE"接受刊登
		(2)國際研討會論文發表		1	2		已投稿至2025 GREENIE Conference 與 2025 ACEER Conference
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半 年達成率	備註 (說明未達成原因或學術產出發 表名稱)
項目							
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術					
		(2)技術平台					
	7.技術獎項(項數)						
B 人 才 培 育	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	1		0		團隊培育 1 位大學生進 行場址碳匯 調查,學生畢 業後將申請 攻讀碩士
		(2)博士					
	9.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	1		1		文化大學與 屏東科技大 學合作建置 污染土地碳 匯調查工作
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中心					
		(4)形成實驗室					
	10.其他指標 (請自行命名)		(請自填)				

(二) 產業面

項目				目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申請中	發明						
			新型/設計						
			合計						
B 研發技術移	2.先期技術 成果移轉	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	3.技術移轉 (專利)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	4.技術移轉 (應用技術)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)							
		(2)品種/系(件數)							
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數							
		金額(仟元)							
	7.促成投資	件數							
		投資金額(仟元)							
	8.促成取得 業界科專	件數							
業界投資金額(仟元)									
9.其他指標 (請自行命名)			(請自填)						

(三) 政策面

項目		目標達成程度	申請預估數	期中達成數	成果達成數	結案後半年達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
A 服務 便民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)						
	5.整治成本降低(%)						
	6.提升能源效率(%)						
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、 請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。(200字為限)

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明) 1. 研究內容已投稿至”2025 GREENIE Conference”與”2025 ACEER Conference”口頭發表。 2. 已完成1篇期刊論文”Assessing the Potential of Soil Carbon Sequestration through Nature-Based Solutions on Contaminated Sites in Subtropical Taiwan”，投稿至”Springer Nature”並接受刊登。 2. 培育1名土地資源學系大學生進行土地碳匯評估研究。
產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明) 無
政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考) 1 建置污染土地碳匯評估程序，有助於政府制訂更科學的監測指標與評估方法，從而提高污染土地碳匯評估的準確性和有效性。 2 持續進行跨領域專家團隊諮詢工作，整合土壤科學、碳權專家、土壤微生物...等方面不同角度專家建議，討論國內污染土地進行碳匯專案可行性。

四、主要研究人力

請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任人員」、「兼任人員」及「臨時工」等類別之順序分別填寫

姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	執行期間
陳怡君	中國文化大學/土地資源學系	副教授	專案主持人: 計畫控管與監督、整體研究概念建置(資料庫架構、場址參數評析與指標建立、碳匯增強 CBP 模式評估)、跨領域協調溝通	113.11.01~114.11.30
林宗穎	中國文化大學/土地資源學系	兼任研究助理	協助場址碳匯資料蒐集、採樣與分析	114.01.01~114.01.31 114.03.01~114.03.31
林琦靜	中國文化大學/土地資源學系	兼任研究助理	協助場址碳匯資料蒐集、採樣與分析	114.03.01~114.04.30

五、產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

投入資源類別	數量	說明
1.自籌款	元	
2.人力	人月	
3.設備		
4.其他資源 (請自行增列)	(請自填)	

中文摘要

因應氣候變遷問題日益加深，台灣於 2023 年「氣候變遷因應法」正式通過後，12 項國家自定貢獻(NDC)關鍵戰略中與土地需求相關包含再生能源、碳匯及負排放技術發展應用等。近年來，污染場址解列面臨困境，雖然積極投入受污染土地設置太陽光電設施推動，然截至 2023 年止已辦理申設程序的農地面積為 26.74 公頃，多數為解列後再設置。台灣污染場址因財務、整治技術、場址環境限制下，仍有部分場址已超過 20 年以上仍無法進行整治與活化，其中污染土地推動土壤碳匯的潛力被認為是減緩氣候變化關鍵策略之一。台灣污染場址沒有長期場址背景調查資料，如土壤 pH 值、土壤組成、土壤導電度、土壤有機質含量等。因此，在推動污染土地碳匯策略時，在缺乏污染場址的土壤碳儲存量基線值、碳礦化速率評估、碳匯策略產生環境衝擊(如碳匯持久性、環境風險)與成本效益等資訊時，對於政策制定者與污染土地管理者無法精確確認推動污染土地碳匯的效益性。

台灣雖然參與 ISRIC 組織，然係以農地土壤基本資料提供 ISRIC 並進行評估，對於污染土地資料相當缺乏。污染土地的問題在全球範圍內廣泛存在，且其治理與活化需求迫切。國際上已有成熟評估模型用於評估土地利用變化對碳儲存的影響，例如生命週期評估(LCA)依賴依賴於既有的碳礦化模型（如 RothC、CENTURY），以及近年來學者常使用碳氮循環的生態系統模型（如 DNDC），以上模型皆須上述基本資料才可進行精準碳通量評估。

有鑑於此，本計畫旨在為建置污染土地碳匯潛力基礎資料庫，以及碳匯資料庫建置可在污染土地碳權申請時具有科學性依據與評估準則，資料庫除能以國際組織相互比對外，以污染土地推動碳匯專案為目的，進一步確認國內污染場址碳匯基本資料庫建置指標，以及從碳權觀點確認污染土地涵蓋資料的準確性、時效性、適用性及可操作性等方面評估指標，以及分析不同治理策略下的碳匯變化，這使得專案在技術層面具備較高的可行性。

本計畫以依據聯合國糧食及農業組織(FAO)與氣候變遷專家委員會(IPCC)常用土壤碳匯評估模式，針對本年度調查結果，污染土地調查後土地利用型態改變已有 40 年，場址經由植生復育的低密度人為維護方式，污染層(0 - 45 cm)土壤有機碳含量約計為 55.62 tC/ha，表土與裡土的平均值分別為 36.20 tC/ha 與 19.42 tC/ha，執行期間共計減緩 1,827 噸 CO₂e (Carbon Sink)潛力，估計碳匯潛力約 7.6 t CO₂e/ha/y(2.1 t C/ha/y)，未來建議專案歷年建立調查數據可更精確與更新土壤碳匯變化，以利申請碳匯數據更具有查證效力。

英文摘要

In response to the escalating issue of climate change, Taiwan has passed the 'Climate Change Response Act' in 2023. Among the 12 key strategies under the Nationally Determined Contributions (NDCs), those related to land demand include renewable energy, carbon sequestration, and the development and application of negative emission technologies. In recent years, delisting contaminated sites has faced significant challenges. Despite efforts to promote solar photovoltaic installations on contaminated lands, by 2023, only 26.74 hectares of agricultural land had gone through the application process, most of which were installed after delisting. Due to financial constraints, remediation technology limitations, and site environmental restrictions, some contaminated sites in Taiwan have remained unrestored and inactive for over 20 years. The potential of promoting soil carbon sequestration on polluted land is considered a key strategy to mitigate climate change.

However, Taiwan lacks long-term background data on contaminated sites, such as soil pH, soil properties, soil EC, and SOC. Thus, when promoting carbon sequestration strategies on contaminated land, policymakers and land managers face difficulties in accurately assessing the effectiveness due to the absence of baseline data on soil carbon storage, carbon mineralization rates, the environmental impacts of carbon sequestration strategies (e.g., carbon sequestration durability, environmental risks), and cost-benefit analyses.

Although Taiwan participates in the ISRIC organization, it primarily provides basic data on agricultural soils for ISRIC's assessments, and there is a significant lack of data on contaminated lands. The issue of contaminated sites is widespread globally, and there is an urgent need for their remediation and revitalization. Internationally, there are well-established models for assessing the impact of land use changes on carbon storage. For example, life cycle assessments (LCA) rely on existing carbon mineralization models such as RothC and CENTURY, while ecosystem models for carbon and nitrogen cycling, like DNDC, have become more common among scholars in recent years. These models require the basic data to accurately evaluate carbon flux.

Considering this, the project aims to establish a foundational database for the carbon sequestration potential of contaminated lands, providing scientific evidence and evaluation criteria for carbon credit applications. In addition to allowing for comparison with international organizations, this database will support carbon sequestration projects on contaminated sites, helping to identify key indicators for building a domestic database on

carbon sequestration in polluted areas. It will also evaluate the accuracy, timeliness, applicability, and operational feasibility of the data from a carbon credit perspective, and analyze carbon sequestration changes under different remediation strategies, enhancing the technical feasibility of the project.

This project is based on soil carbon sequestration assessment models commonly used by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). According to the results of this year's investigation, the land use of the polluted site has changed for over 40 years following remediation. The site has been managed with low-intensity human intervention through vegetation restoration. The soil organic carbon (SOC) content in the polluted layer (0–45 cm) is estimated at approximately 55.62 tC/ha, with the average values of 36.20 tC/ha in the topsoil and 19.42 tC/ha in the subsoil. During the implementation period, the site demonstrated a carbon sink potential equivalent to 1,827 tons of CO₂e, with an estimated annual sequestration rate of 7.6 t CO₂e/ha/y (2.1 t C/ha/y). It is recommended that continuous data collection and long-term monitoring be established in future projects to enhance the precision and verification credibility of soil carbon sequestration assessments.

圖目錄

圖 1、碳權專案的生命週期	3
圖 2、VCS 註冊各項自願性碳權認證項目趨勢預測	4
圖 3、高品質碳權預估註冊供給量	4
圖 4、2022~2024 年各項自願性碳權認證系統註銷量	4
圖 5、VM0042 註冊通過統計表	5
圖 6、VM0044 註冊通過統計表	5
圖 7、印度掩埋場 VCS 自願性減量專案報告	6
圖 8、立陶宛碳農業計畫	7
圖 9、越南清化省生物炭 VCS 自願性減量專案報告	8
圖 10、依照土地利用類別估算土壤中礦物質碳儲量變化流程圖	9
圖 11、依照土地利用類別估算土壤有機質碳儲量變化	10
圖 12、土壤有機碳循環與微生物間的關係	18
圖 13、污染土地碳匯專案範疇與監測建議	19
圖 14、污染土地碳匯專案採樣布點與分區圖	24
圖 15、污染土地碳匯採樣圖	24
圖 16、土壤微氣象站圖	25
圖 17、污染場址植物分布調查位置圖	27
圖 18、污染場址各點位 BD 差值克利金圖	30
圖 19、污染場址各點位土壤有機碳儲存量分布圖	32
圖 20、污染場址各點位土壤導電度差值分布圖	33
圖 21、污染場址各點位酸鹼值分布圖	35
圖 22、表土各項監測項目相關性分析圖	35
圖 23、裡土各項監測項目相關性分析圖	36
圖 24、土地管理專案執行前後土壤碳匯變化情境圖	38
圖 25、本場址執行 CBP 評估範圍圖	39
圖 26、CBP 初始情境多年生農業用地輸入資料	40
圖 27、CBP 初始情境林業用地輸入資料	41
圖 28、CBP 基本情境林業用地輸入資料	42
圖 29、CBP 專案情境林業用地輸入資料	43
圖 30、場址碳匯潛力評估結果	44
圖 31、場址碳匯潛力各項評估結果差異分析	44

表目錄

表 1、IPCC 評估參數定義	11
表 2、土地碳儲量變化 Tier2 評估參考資料來源	12
表 3、台灣污染場址的碳匯潛力資料表	12
表 4、污染土地碳匯變化排放源與參考專一性參數建議表	14
表 5、閒置污染場址碳匯基線資料表	21
表 6、潛在執行場址清單	22
表 7、土壤碳匯分析項目與方法	25
表 8、各區域林相物種清單	26
表 9、林相生物量固碳影響參數	28
表 10、各區域 BD 數值	30
表 11、各區域污染層有機碳儲存量平均值	31
表 12、各區域導電度差值	33
表 13、各區域綠碳、黃碳、AWCD 數值表	34
表 14、各區域 Ecoplate 碳源利用主成分	36
表 15、各區域 CBP 情境設計表	39

成果報告

壹、前言

因應氣候變遷問題日益加深，台灣於 2023 年「氣候變遷因應法」正式通過後，12 項國家自定貢獻(NDC)關鍵戰略中與土地需求相關包含再生能源、碳匯及負排放技術發展應用等。近年來，污染場址解列面臨困境，雖然積極投入受污染土地設置太陽光電設施推動，然截至 2023 年止已辦理申設程序的農地面積為 26.74 公頃，多數為解列後再設置。台灣污染場址因財務、整治技術、場址環境限制下，仍有部分場址已超過 20 年以上仍無法進行整治與活化。自 2014 年起，國際土壤參考與資訊中心(International Soil Reference and Information Centre, ISRIC)建立國際土壤資料庫規則與資料交換平台 SoilGrids™，該平台初步建置各國土壤基本資料(如土壤組成、總有機碳、土壤容重、pH、EC、水分、N 與 P 含量)。依據聯合國糧食及農業組織(FAO)研究顯示在亞熱帶濕潤氣候條件地區，污染土地若搭配土壤改良且種植草本植物可以增加額外土壤碳儲量為 3.81 (tC/ha/y)，台灣雖然參與 ISRIC 組織，然係以農地土壤基本資料提供 ISRIC 並進行評估，對於污染土地資料相當缺乏。污染土地的問題在全球範圍內廣泛存在，且其治理與活化需求迫切，伴隨國際上對碳匯議題逐漸受到重視，污染土地推動碳匯專案已在國際上被認為是減緩氣候變化關鍵策略之一。

本研究團隊曾基於國際 Verra 碳匯評估方法 (VM0042)，依據開放性資料庫的土壤特性與氣候條件資料，選擇國內 6 處閒置污染場址評估，篩選多年生草本植物、豆類、非豆類、草地等作物納入研究範圍，模擬豆科作物紫花苜蓿(Medicago sativa)生長於污染土地增匯潛力，數據顯示該物種耐旱且適應於土壤酸鹼值 5-9 之間，株高可至 1 米，根系強具有吸附土壤重金屬 Zn、Pb、Cu 能力，每個場址(含地上物)單位碳匯增量數值 10.63-12.51 tC/ha/y。該數據並非實際取得場址土壤特性資料與有機碳含量，僅以透過模擬探討污染場址碳匯潛力；因此，在推動污染土地碳匯策略時，在缺乏污染場址的土壤碳儲存量基線值、碳礦化速率評估、碳匯策略產生環境衝擊(如碳匯持久性、環境風險)與成本效益等資訊時，對於政策制定者與污染土地管理者無法精準確認推動污染土地碳匯的效益性。

貳、研究目的

由於國內尚未有針對碳匯進行的實際污染場址研究，且相關方法學與驗證程序仍不完整，為建立國內污染土地執行碳匯專案評估方法與程序，本計畫目標在於建立一個專門針對污染土地碳匯潛力的資料庫，並分析其在應用上的可行性。因此，本計畫之研究項目包括：(1). 污染土地碳匯資料的建置；(2). 國際常用土地碳匯模型評估參數與資料庫結合可行性；及(3). 污染土地碳匯增強策略評析。

為了避免污染土地碳匯專案遭受漂綠質疑，建議程序必須遵守國際認可的碳清除認證(Carbon Removal Certification, CRC)的高質量碳清除(High-Quality Carbon Removal)的標準，包含負碳技術之持久性(Permanence)、外加性(Additionality)、及可查驗性(Verification)等條

件。由於，各污染土地位於不同地區的基本條件(土壤與氣候)差異，以及場址管理(如整治)方式不同，各場址的土壤固碳或碳吸存能力不一，同時也存在碳通量(C fluxes)估計不確定性影響。依據 Verra 碳匯評估方法 (VM0042)，場址若無其他外力介入考量，至少須歷時 3 年監測與模擬；若考量土地利用變化或工程改善(如整治或人為活動)，碳匯評估則須涵蓋整個改善計畫期程並須再延長 3 年期間監測，以確保工程或人為外力影響所造成土壤碳通量的變化。

今年度本計畫申請先導型計畫，僅為 1 年執行期，故本計畫先以單一案例場址建置基線與資料庫為主，未來建議專案可分為三階段進行，第一階段將以建立初步土壤碳匯資料庫為核心，為未來的評估奠定基礎。在資料庫逐步完善後，第二階段可進一步結合作物生長模型或土壤礦化模型，進行系統性評估與數據整合，並建置具空間視覺化功能的評估平台。最終，第三階段將藉由長期的碳匯驗證數據修正模型方法學，以提升其預測能力。

參、文獻探討

一、國際自然為本(Nature-Based Solutions, NbS)碳匯市場

近年來，2025 年全球碳排量持續創新高，土壤有機碳 (SOC) 儲量與碳匯能力被視為重要的自然氣候解決方案。根據聯合國糧農組織 (FAO) 估算，全球土壤若每年增加 4 % 有機碳，可抵消約 30% 人為溫室氣體排放。土地碳匯潛力驅動國際碳權市場發展出多種以土地管理的方法學，特別是在自然為本解方 (Nature-Based Solutions, NbS) 的應用，如森林碳匯、農業碳管理與濕地恢復。NbS 類型的碳權不僅改善了土地健康，同時也提供土地所有者穩定的財務回報。然而，碳權市場儘管提供了潛在的收益，但高昂的參與成本和複雜的認證程序，使得許多小型土地所有者難以參與，例如在美國，許多小型森林所有者因技術和財務障礙，無法進入碳市場。另一方面，部分碳權申請的有效性和透明度受到質疑，這些問題削弱了這類型碳權市場的公信力，可能對土地永續管理產生負面影響。儘管如此，專家仍普遍看好未來 NbS 碳權市場的發展，因為各國與企業持續上調減排目標，碳權需求仍將有增無減。

市場上，領導企業正積極推動新一代碳權機制，最具代表性的推動方式便是「預發型碳權」(Pre-issuance Credits)，這類碳權允許企業在減排成效獲得最終驗證前即進行購買，專案發展過程包括三階段的生命週期(圖 1)，包含專案設計與開發階段(Design/Project Development Phase)、碳權發行階段(Issuance Phase)、及碳權註銷階段(Retirement Phase)，專案設計階段必須從專案與基線相比確認淨值，確認碳權申請量。此外專案必須記錄各項數據品質，一旦專案開發完畢，則由獨立驗證與查核機構進行驗證，由驗證機構向註冊中心確認該項目符合認證標準，碳權信用額度(Carbon Credit)會從開發商帳戶轉移至買家帳戶，直至碳信用額度由平台註銷後，才是計入買家的碳信用額度，確保信用額度永久退出市場流通機制，以避免二次列入計算，這樣過程提供企業更具前瞻性的投資機會，並提升市場信心[1]。

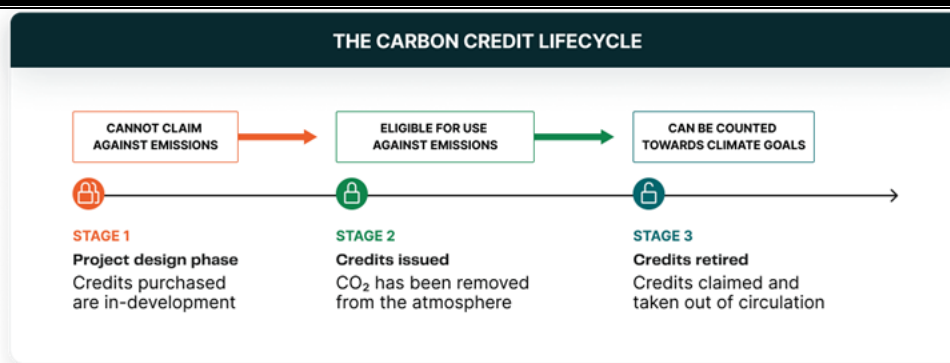


圖 1、碳權專案的生命週期[1]

碳權交易市場旨在為溫室氣體減量與碳移除創造經濟誘因，但 2024 年全球自願性碳權市場因誠信問題，導致交易量與價格雙雙下滑。根據來自於英國倫敦的 Quantum Commodity Intelligence(QCI)、美國金融服務公司 MSCI 與 Frost & Sullivan 商業諮詢市場研究公司指出，預估 2030 年節能技術型碳信用市場已飽和後，將以自然為本的碳信用市場為主軸，2030 年創造的價值將達到 40 億至 110 億美元而逐漸下滑[2,3]。QCI 更預測自願性碳權交易市場在 2026 年達到交易高峰(650M tCO₂e)之後逐漸趨緩[4]，碳交易市場對高品質碳信用的關注將更加集中(圖 2)，具有高品質(如土壤碳匯、生物炭等)將會超越藍碳與農業碳匯(圖 3)，2030 年預估土壤碳匯可達 6000 萬噸二氧化碳當量(60 MtCO₂e)。雖然土壤碳匯所產生的碳權價格較高，尤其結合生物炭的土壤改良的專案，在 VCS 的生物炭的碳市場交易價格(\$114 美元/offset)遠比太陽能再生能源(\$1.25 美元/offset)價格高，這樣高品質碳權在市場上受到企業青睞，例如 Microsoft 與 Google 等行業龍頭紛紛投入購買高品質碳權[5,6]。這類型專案的註冊與退除數據均為最高，顯示未來碳權市場係以 NbS 為交易核心。其中，Verra 標準的退除量遠高於其他標準，部分原因是註冊專案數量多(圖 4)。

從 2017 年起截至 2023 年底，申請 VM 0042 註冊將近 120 筆，多數專案位於中國大陸，專案年期為 20 年，部分專案也可採用 10 年信用期，可展延 3 次，共計可達 40 年(圖 5)，VM0044 註冊則是從 2023 年才開始，多數專案位於印度與越南，專案年期為 7 年(得展延 1~2 次)，共計可達 30 年，如圖 6 所示[7]。

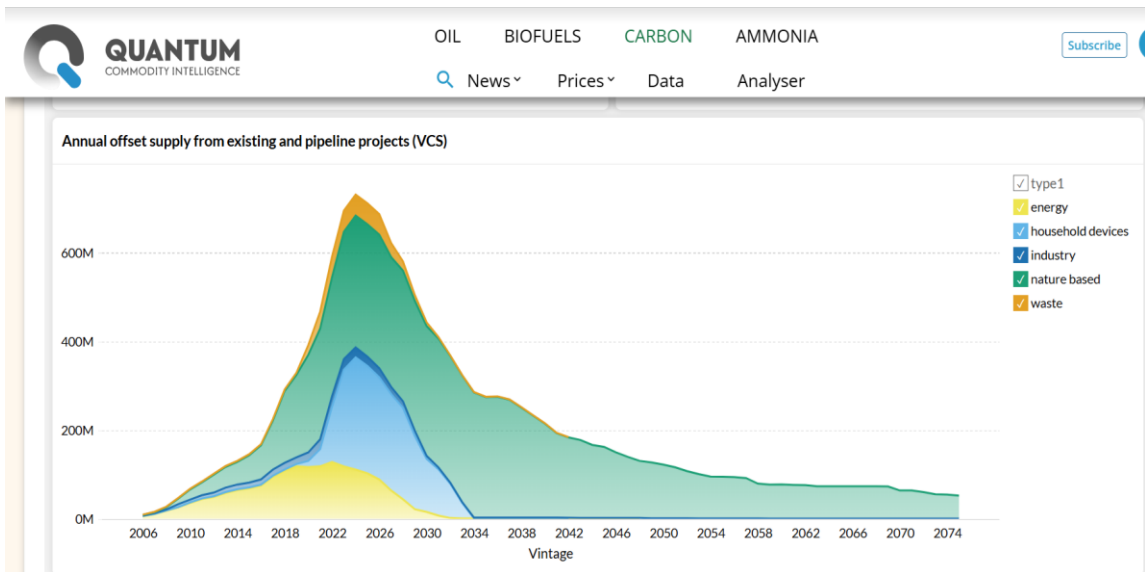


圖 2、VCS 註冊各項自願性碳權認證項目趨勢預測[4]

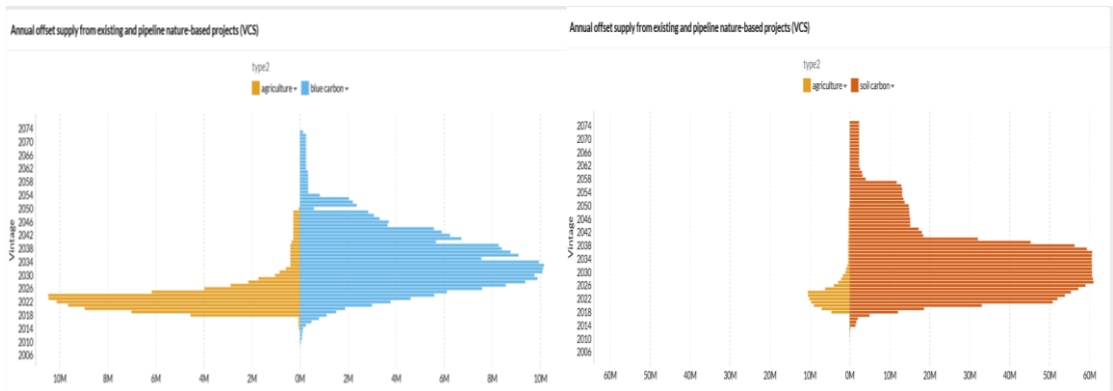


圖 3、高品質碳權預估註冊供給量[4]

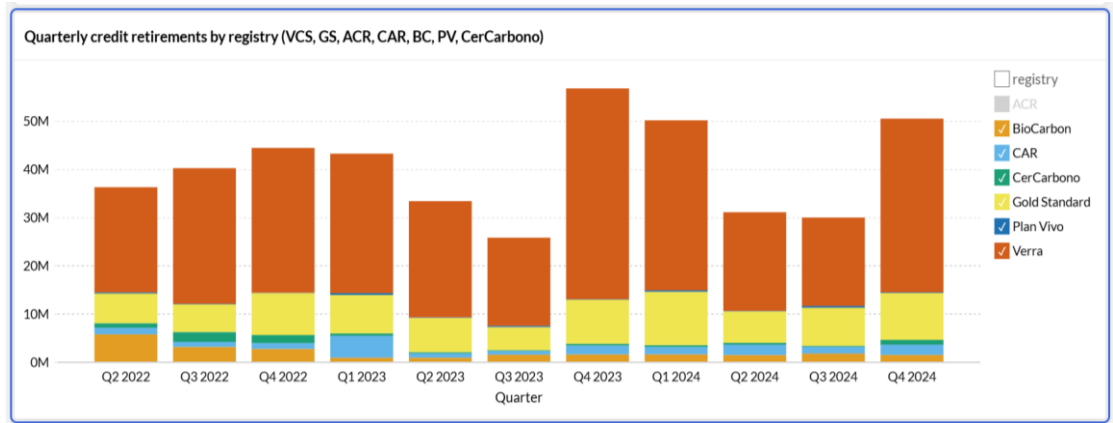


圖 4、2022~2024 年各項自願性碳權認證系統註銷量[4]

METHODOLOGY FOR IMPROVED AGRICULTURE LAND MANAGEMENT(VM0042)



註冊(截至2023年底)
120筆



區域
70筆亞洲(中國大陸)
最多



最早專案申請年
2017年



專案年限
20年為期

ID	Name	Proponent	Project Type	AFOLU Activities	Methodology	Status	Country /Area	Estimated	Region	Project Registration Date	Crediting Period Start Date	Crediting Period End Date
								Annual Emission Reductions				
4842	Carbon Smart Orch	Carbon Frien	Agricultur	ALM	VM0042	Under dev	United Sta	1900750	North America		2023-06-01	2043-05-31
4835	eAgronom sustaina	OU eAgrono	Agricultur	ALM	VM0042	Under val	Poland	743202	Europe		2021-07-01	2041-06-30
4789	Regenerative Agricu	C-Quest Cap	Agricultur	ALM	VM0042	Under dev	Malawi	400000	Africa		2022-10-01	2052-09-30
4777	NATURAL SILVO	Agropecuaria	Agricultur	ALM	VM0042	Under dev	Colombia	248916	Latin America		2021-01-01	2040-12-31
4767	PROMOTING REC	Grow Indigo	Agricultur	ALM	VM0042	Under dev	India	5326066	Asia		2020-10-15	2040-10-14
4768	REGENERATIVE	Grow Indigo	Agricultur	ALM	VM0042	Under dev	India	5048425	Asia		2020-10-15	2040-10-14

圖 5、VM0042 註冊通過統計表[7]

METHODOLOGY FOR BIOCHAR UTILIZATION IN SOIL AND NON-SOIL APPLICATION (VM0044)



註冊(截至2024年底)
8筆



區域
5筆印度最多



最早專案申請年
2023年



專案年限
7年為期，可再次申請
延長1次

Name	Proponent	Project Type	Methodology	Status	Country/Area	Estimated Annual Emission Reductions	Region	Crediting Period Start Date	Crediting Period End Date
The potential of plantation-based systems in generating carbon credit through biochar production and application in the West Coast region of India	National Bank for Agriculture and Rural Development	Waste handling and disposal	VM0044	Under development	India	1,061	Asia	2024/10/15	2031/10/14
Biochar Production Project-1 by WeAct in Madagascar	WeAct Pty Ltd.	Waste handling and disposal	VM0044	Under validation	Madagascar	21,326	Africa	2024/11/1	2031/10/31
Bamboo King Vina Biochar Project	Bamboo King Vina Joint Stock Company	Waste handling and disposal	VM0044	Under validation	Viet Nam	108,552	Asia	2024/6/1	2031/5/31
Silk Grass Biochar Project	Silk Grass Farms, Ltd	Waste handling and disposal	VM0044	Under validation	Belize	6,500	Latin America	2024/4/1	2031/3/31

圖 6、VM0044 註冊通過統計表[7]

土地管理有關的兩項方法介紹與國際應用案例，茲分述如下：

- 1. VM0042 Methodology for Improved Agricultural Land Management (改進農業土地管理方法):** Verra 於 2023 年為了釐清此方法的漂綠質疑，針對溫室氣體量化方法進行重大修訂，2024 年 9 月更進一步分別說明溫室氣體減量與移除碳信用方法更新公式與參數。VM0042 強調以管理措施，如減少耕犁(Reduced Tillage)、作物殘留管理(Biomass Residue Management)、水資源管理(Water Management)、及減少化肥(Improved

Fertilizer Application)···等方式提升土壤有機碳儲存量，並要求嚴格的基線設定與監測。專案需記錄農民活動、氣象、土壤類型、農業科學等數據。VM0042 方法學為目前應用最廣的農業土地碳匯方法，專案年限通常為 20 年，部分專案也可採用 10 年信用期，可展延 3 次，共計可達 40 年。

1.1 印度舊掩埋場區甲烷避免排放專案(編號:3355)

專案位於印度北方，舊型掩埋場因有機廢棄物的厭氧分解而持續釋放甲烷，該專案以「生物開採」(biomining) 技術，對這些舊掩埋場區進行清理和資源回收，從避免甲烷的產生與排放，掩埋場關閉後推動監測與氣體蒐集井設置、惰性有機成分堆肥、及植樹造林來增加土壤碳匯，並且遵循印度當地環境法案與廢棄物清理法，進行利害相關者溝通(碳權定義與適法性、污染物或廢棄物再釋放風險、是否創造就業機會、技術可行性)後，確保執行期間不會產生負面環境影響後成立此專案。

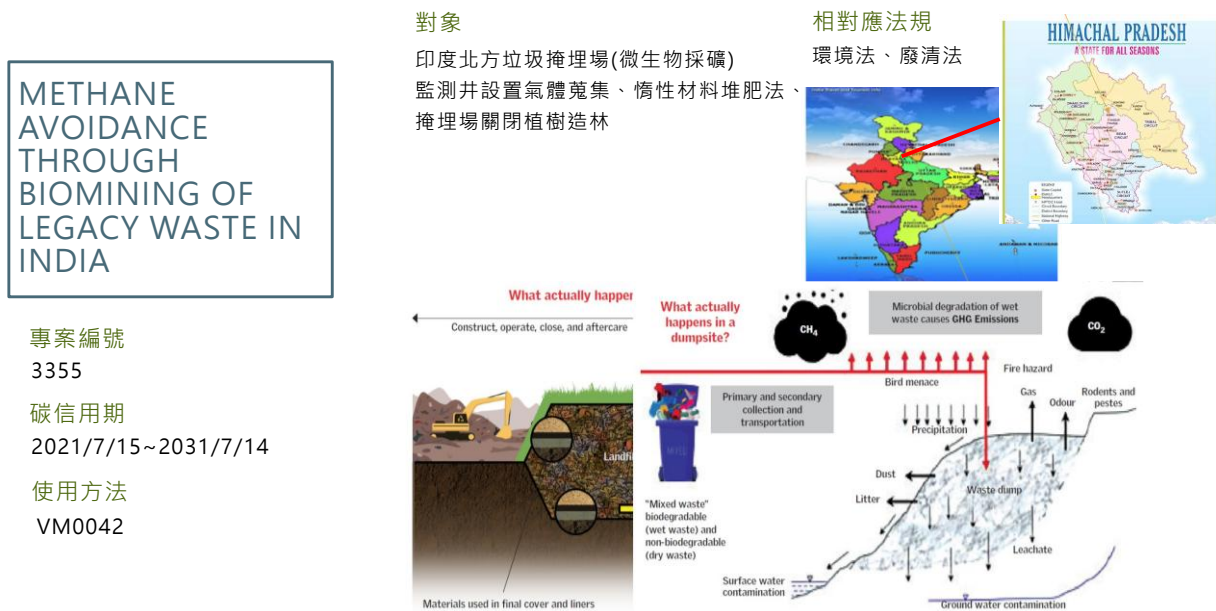


圖 7、印度掩埋場 VCS 自願性減量專案報告

1.2 立陶宛碳農業計畫(編號:4201)

專案是由金融科技公司 Heavy Finance 推動，旨在協助立陶宛農民透過採用再生農業實踐來減少溫室氣體排放，並增加土壤碳封存。該公司還與歐洲投資基金 (EIF) 合作，為農業中小企業提供資金支持，推動農業部門的脫碳進度，專案計入期最短為 20 年，最多可續期四次。專案核實的碳權單位(Verified Carbon Units, VCUs)，提供給農民有動力實現經濟、環境和社會方面的平衡，共 60 個土地單位 (約 15,000 公頃) 參與此計畫，預計年均碳清除量小於或等於 300,000 噸 CO₂e。

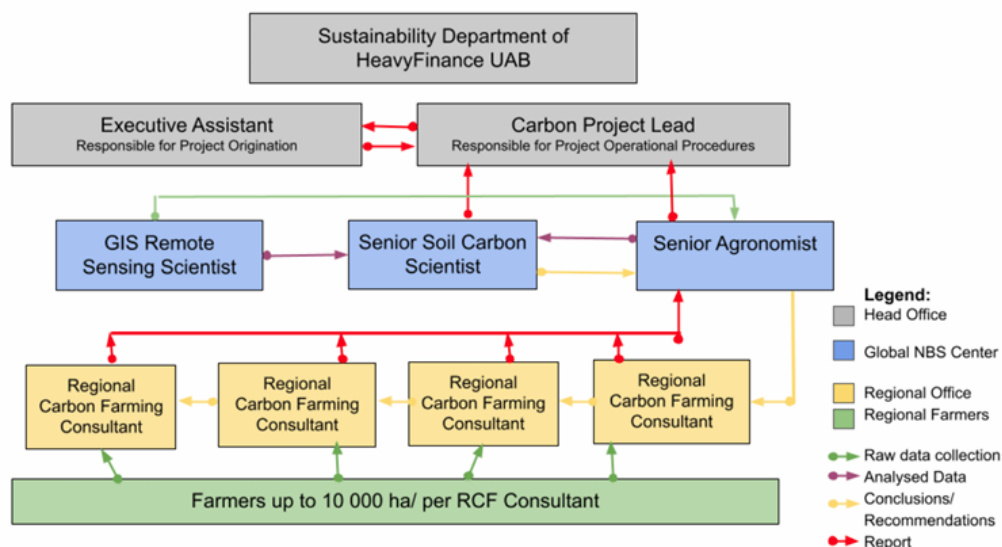


圖 8、立陶宛碳農業計畫

1.3 Anew Climate 北美再生農業碳信用計畫(編號:4236)

專案實施的農場位於美國，項目涵蓋約 132 萬英畝的美國農地，自 2023 年註冊後已有 31 萬英畝完成，2024 年啟動第三方驗證程序，2025 年完成首次碳信用發行。專案註冊氣候智慧型農業實踐，以提升土壤有機碳含量並減少溫室氣體排放，該項目在 2025 年可產生約 75,000 噸 CO₂e，未來 20 年(2022~2042)內每年可達目標 400,000 噸 CO₂e。Anew 與合作夥伴 Green Star Royalties 和 Locus AG 共同推動的 CarbonNOW 計畫，計畫已向美國農民支付約 450 萬美元的激勵金，農民可獲得每英畝的前期支付，以及使用生物製劑（如益生菌土壤添加劑）的補助，這些措施有助於提高土壤肥力和碳封存能力。這種模式降低了農民轉型的財務障礙，並使他們能夠從碳信用市場中獲益。

2.VM0044 Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications (生物炭在土壤與非土壤應用方法): VM0044 適用於將廢棄生物質（如農業廢料、食品加工殘渣、木材加工廢料等）轉化為生物炭，並將其應用於土壤，可用做農田改良劑，提升土壤健康、增加碳封存、改善土壤水分和養分保持能力;或者，生物炭應用於非土壤專案，例如摻混混凝土和建築材料，提升材料性能並實現碳封存。這個方法於 2022 年首次發布，並於 2023 年特別考量國際上對於生物炭持久性計算方法的討論而進行小幅修訂，對原料來源、土地應用類型、溫室氣體排放源等進行了澄清和修正。

2.1 越南竹木製品碳減排計畫(編號:5108)

專案位於越南清化省 Lang Chánh 的 Bãi Búi 工業區，專門從事竹木處理及其製

品的生產。該計畫以大量的竹木邊角料和廢棄物轉化為生物炭，此專案創下碳交易市場每公噸 210 美元價格，2024 年公告後開放公眾諮詢。專案以越南清化省區農業廢棄物(如竹子、銀合歡、苦楝、油松、肉桂樹等)燒製為生物炭，利用於土壤與非土壤專案的碳信用量，該專案也適用於混和動物飼料、污泥管理、厭氧消化與堆肥產品利用於土壤，因此這項專案必須符合當地環境法、土地法、廢清法、職安法、及環境監測標準等，以確保專案的適法性。

BAMBOO KING VINA BIOCHAR PROJECT

專案編號

5108

碳信用期

2024/6/1~2031/5/31

使用方法

VM0044

對象

越南農業廢棄物生物炭

銀合歡、苦楝、油松、松樹、肉桂樹、竹

相對應法規

環境法、土地法、廢清法、職安法、

監測報告

Type (methodology, tool or module)	Reference ID, if applicable	Title	Version
Methodology	VM0044	Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-soil application	1.1
Tool		International Biochar Initiative (IBI) Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That is Used in Soil	2.1
Tool		European Biochar Certificate (EBC) Guidelines for a Sustainable Production of Biochar	
Tool	CDM Tool 03	Tool to calculate project or leakage CO ₂ emissions from fossil fuel combustion	03.0
Tool	CDM Tool 05	Baseline, project and/or leakage emission from electricity consumption and monitoring of electricity generation	03.0
Tool	CDM Tool 09	Tool to determine the baseline efficiency of thermal or electric energy generation systems	03.0
Tool	CDM Tool 12	Project and leakage emissions from transportation of freight	1.1
Tool	CDM Tool 16	Project and leakage emissions from biomass	4.0



圖 9、越南清化省生物炭 VCS 自願性減量專案報告[8]

從國際案例推動經驗得知，自願減量專案不僅在方法學與技術可行性需先行評估，因執行合約期長，各項責任與義務歸屬及利害相關者風險溝通也是重要一環，專案報告提送時，專案基本資料(申請單位、參與單位與所有權、專案執行期、專案法規適用性、專案外加性、持久性、及永續性)、專案保證或保障措施(利害相關者協議、環境影響評估、公眾溝通)、方法學(專案範疇、評估方法、基準情境、外加性增匯評估、不確定性)、溫室氣體排放減量與移除評估數據、監測計畫(包含影響參數表與資料庫)等資訊皆須完整揭露，公告後進入公眾諮詢階段，諮詢結果無疑義後，且須經獨立驗證與查核機構進行驗證。

然而，國際上尚無建立以污染土地為主的自願性碳認證方法學;尤其，土壤有機碳轉化過程隨著土壤類別與氣候條件等自然條件的影響，土壤碳儲存量損失與增量存在不確定性，多數碳匯評估專案建議須長達 3 年基線調查，以及每 5 年驗證 1 次土壤增匯量數據，且國際上申請碳匯專案至少須長達 10 年以上，以確保專案持久性等問題[9]。

二、IPCC 農業(Agriculture)、林業(Forestry)、其他用地(Other Land Use)碳儲存估算準則

聯合國政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)於 2019 年重新提出對農業(Agriculture)、林業

(Forestry)、其他用地(Other Land Use)碳儲存估算修正指南，該指南提出土地管理(如免耕、造林、綠肥)與掩埋生物炭(Biochar)皆是提供土壤增匯主要方法。土地碳儲存評估可分為 Tier 1、Tier 2、Tier 3 三個層級，Tier 1 係以 IPCC 預設值，假設土地 20 年以上的土壤有機碳變化已達穩定，土壤碳的變化量可從土地利用類別變化進行評估，此層次方法適用於粗略的全球/區域碳平衡研究，Tier 2 考量區域的土壤質地、降水量影響，評估土地管理對於土壤有機碳(Soil Organic Carbon, SOC)增匯變化，提高碳匯評估精細度，Tier 3 利用動態碳模型(如 RothC、Century、DNDC)，蒐集場址專一性活動數據，模擬短期與長期土壤碳匯變化，精確模擬土地利用與氣候變化對土壤碳匯影響，為了提高模擬結果的精準度，專案可整合高解析度測量數據(如整合土壤微氣象監測與渦流協方差監測)分析土壤活性碳庫池(Active SOC)、慢性碳庫池(Slow SOC)、惰性碳庫池(Passive SOC)變化。各層級性評估準則如圖 10~圖 11 所示，並建議每 3、5、10 年土壤監測數值驗證長期碳封存的結果[10]。

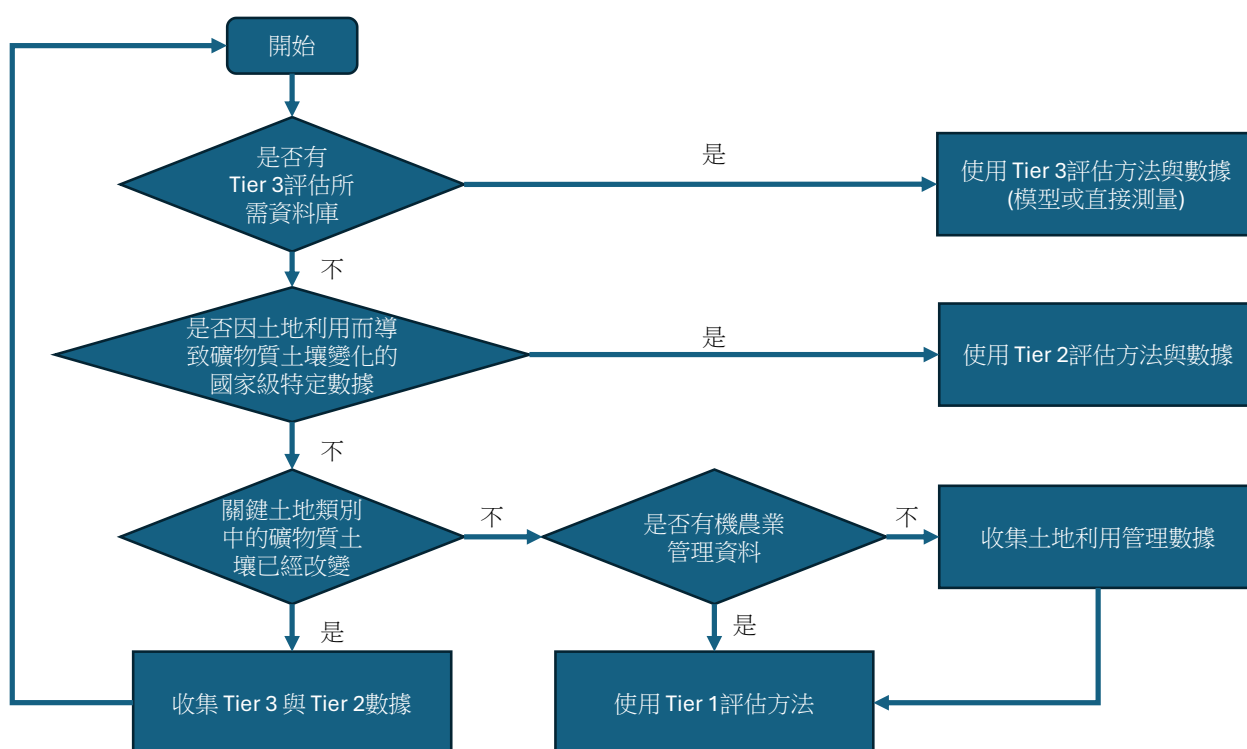


圖 10、依照土地利用類別估算土壤中礦物質碳儲量變化流程圖[10]

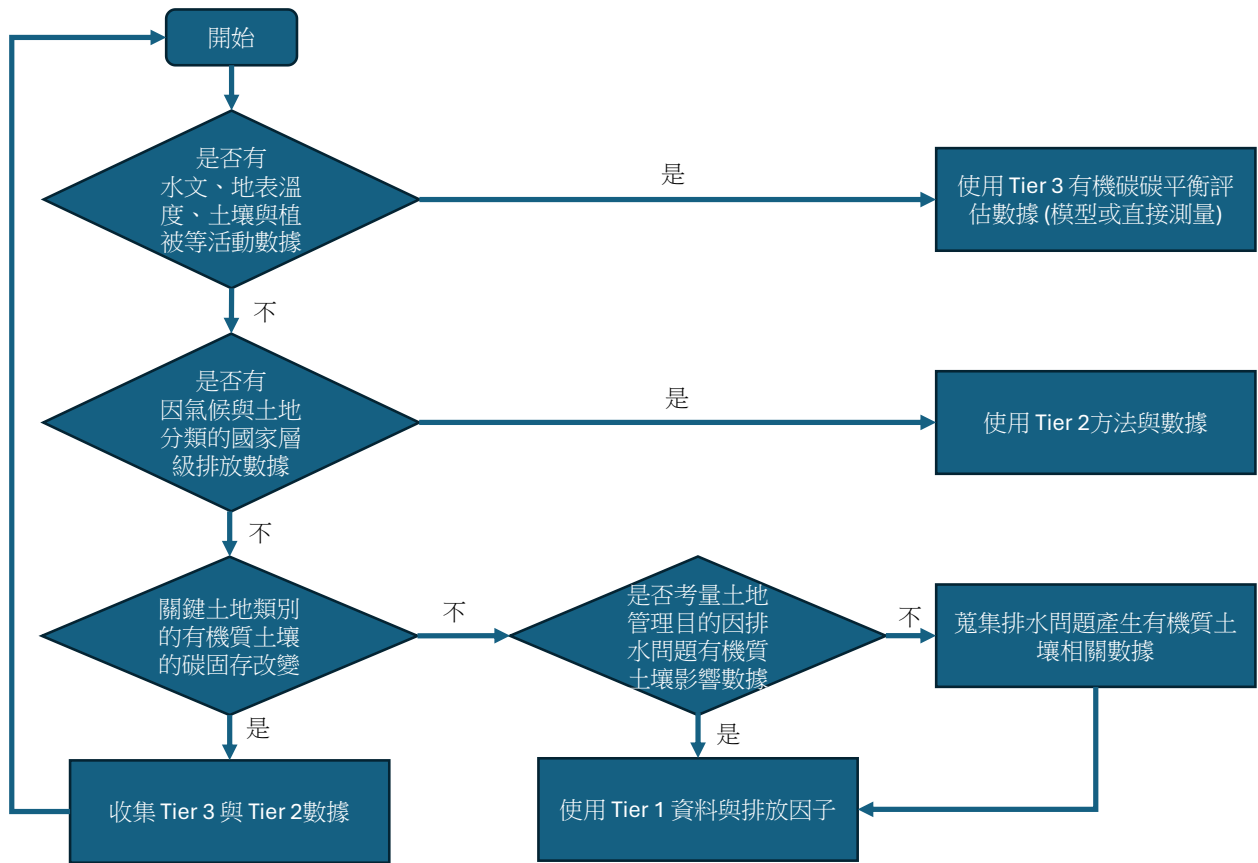


圖 11、依照土地利用類別估算土壤有機質碳儲量變化[10]

IPCC 對各池評估公式為公式(1)~公式(7)，及各參數定義(表 1)。

$$\Delta C_{soil} = \Delta C_{mineral} - L_{organic} + \Delta C_{inorganic} \quad (1)$$

$$L_{organic} = \sum_c (A * EF)_c \quad (2)$$

$$\Delta C_{mineral} = \sum_i (SOC_{REF} * F_{LU} * F_{MG} * F_I * A) + \sum_y \Delta SOC_{yi} \quad (3)$$

$$SOC_{yi} = Active_{yi} + Slow_{yi} + Passive_{yi} \quad (4)$$

$$Active_y = f(C_{input}, LC, NC, f_1, f_2, f_3, f_6, f_8, k_{fac}, w_{fac}, t_{fac}, till_{fac}) \quad (5)$$

$$Slow_y = f(Active_y, C_{input}, LC, f_3, f_4, k_{fac}, w_{fac}, t_{fac}, till_{fac}) \quad (6)$$

$$Passive_y = f(Active_y, Slow_y, f_5, f_6, k_{fac}, w_{fac}, t_{fac}, till_{fac}) \quad (7)$$

表 1、IPCC 評估參數定義[10]

Parameter	Definition
$\Delta C_{\text{mineral}}$	annual change in organic carbon stocks in mineral soils
L_{organic}	annual loss of carbon from drained organic soils
$\Delta C_{\text{inorganic}}$	annual change in inorganic carbon stocks from soils
A	land area of drained organic soils in climate type c
EF	emission factor for climate type c
SOC_{REF}	the soil organic C stock for mineral soils in the reference condition
F_{LU}	stock change factor for mineral soil organic C land-use systems or sub-systems for a particular land-use
F_{MG}	stock change factor for mineral soil organic C for management regime
F_I	stock change factor for mineral soil organic C for the input of organic amendments
$Active_y$	active sub-pool SOC stock in year y
$Slow_y$	slow sub-pool SOC stock in y
$Passive_y$	passive sub-pool SOC stock in year y
C_{input}	total carbon input
LC	lignin content of carbon input, proportion
NC	nitrogen fraction of the carbon input
f_1	fraction of metabolic dead organic matter decay products transferred to the active sub-pool
f_2	fraction of structural dead organic matter decay products transferred to the active sub-pool
f_3	fraction of structural dead organic matter decay products transferred to the slow sub-pool
f_4	fraction of active sub-pool decay products transferred to the slow sub-pool
f_5	fraction of active sub-pool decay products transferred to the passive sub-pool
f_6	fraction of slow sub-pool decay products transferred to the passive sub-pool
f_7	fraction of slow sub-pool decay products transferred to the active sub-pool
f_8	fraction of passive sub-pool decay products transferred to the active sub-pool
k_{faca}	decay rate constant under optimal conditions for decomposition of the active SOC sub-pool
k_{facs}	decay rate constant under optimal conditions for decomposition of the slow sub-pool
k_{facp}	decay rate constant under optimal conditions for decomposition of the passive sub-pool
t_{fac}	annual average air temperature effect on decomposition
w_{fac}	annual water effect on decomposition
$till_{\text{fac}}$	tillage disturbance modifier on decay rate for active and slow sub-pools

過去污染場址僅有污染調查資料，因此台灣污染土地碳匯評估於基線資料建立期，並無長期針對土壤基本資料，如土壤 pH 值、土壤組成、土壤導電度、土壤有機質含量等。在建立場址專一性碳匯評估潛力前，建議國內可依 IPCC Tier2 評估步驟為基礎，參考開放資料庫篩選資料(表 2)，先從土壤與氣候條件先初估場址坐落地理位置是否具有碳匯潛力，以及

遵守自然為本精神，從生物多樣性平台與農業部水土保持儲碳資料庫來確認場址鄰近合適本土植物與生物質的固碳能力外，亦同時符合國際上在生物多樣性公約倡議對碳匯所產出的共效益需求。因此，本團隊曾使用 SoilGrids™ 平台搜尋潛在污染場址碳匯基線值(表 3)，有機碳含量與碳匯基線值以東部宜蘭與花蓮為最高，其次則為新北市地區，先行確認污染場址是否坐落於具有土壤碳含量較高區域，使得專案可在原始土壤固碳量高地區執行，以降低土地管理增匯上壓力。

表 2、土地碳儲量變化 Tier2 評估參考資料來源(本計畫產出)

評估類別	評估項目	資料來源
土網	土壤基本性質、化育生成過程	農試所土壤資料供應查詢平台 https://tssurgo.tari.gov.tw/Tssurgo/Map
土壤性質	部分地區(苗栗、彰化、台南) -不同分層土壤性質 (有機質 SOC、陽離子交換能力 CEC、酸鹼度 pH)	農試所土壤資料供應查詢平台 https://tssurgo.tari.gov.tw/Tssurgo/Map
	250*250 公尺網格 -不同分層土壤性質 (有機質 SOC、陽離子交換能力 CEC、微生物)	全球數位土壤圖資 https://soilgrids.org/
適合植物	10*10 公尺網格物種分布熱點 (符合碳權考量生物多樣性公約規定，查詢場址可以自然為本(非人為種植)的植物物種)	台灣生物多樣性網絡 https://www.tbn.org.tw/topic/species_richness
植物固碳能力	植生復育(人為刻意種植) 植物固碳能力	農業部水土保持樹種儲碳參數資料庫 https://tech.ardswc.gov.tw/Education/PlantCarbon
氣候條件	場址鄰近氣象觀測資料 (氣溫、降雨量、淹水事件)	氣象署氣候觀測資料(CODiS) https://codis.cwa.gov.tw/StationData 氣象署與農業部農業氣象觀測網 https://agr.cwa.gov.tw/

表 3、台灣污染場址的碳匯潛力資料表(本計畫產出)

縣市別	污染場址 平均面積 (公頃/場)	土壤容重 範圍 ($\text{cg}/\text{cm}^3/\text{場}$)	基線值- 土壤有機碳範圍 ($\text{t}/\text{ha}/\text{場}$)	場址數
宜蘭縣	1.2	272 – 582	67 – 94	4
花蓮縣	4.9	291 – 435	60 – 78	4

新北市	25.3	297 – 402	55 – 75	5
桃園市	3.3	254 – 295	49 – 53	13
新竹市	3.7	265 – 269	46 – 50	2
苗栗縣	2.5	267 – 314	50 – 58	5
台中市	0.3	221 – 232	43 – 47	3
台南市	9.9	244 – 302	40 – 56	5
高雄市	16.8	243 – 306	41 – 52	12
屏東縣	19.3	270 – 282	41 – 52	2

三、土壤碳匯建議專案範疇、評估參數、及監測準則

除了 2019 年 IPCC 對農業(Agriculture)、林業(Forestry)、其他用地(Other Land Use)碳儲存估算提出修正指南外，國際上自願性碳權認證機構(如 GS 或 VCS 等)的標準方法中的專案策略及土壤有機碳變化，多數是採用 FAO 於 2020 年提出永續土壤管理措施(SSM)之監測、報告、及查證技術手冊評估方法[11]。該手冊係以農地管理為主，提供採用 SSM 管理措施農場準則，包含段(S1：適用性條件)、(S2：專案邊界)、(S3：基線與干預情境的劃定)、(S4：執行前外加性評估)、及(S5：監測)。近期，環境部氣候變遷署公告多項以自然為本的溫室氣體減量方法，如改進農業土地管理方法學、以草生栽培法提升有機友善茶園土壤碳匯，皆遵守此原則進行。

FAO 報告指出為避免對生物多樣性影響，除不建議於溼地與泥炭地、富含有機質土壤、原生林地進行外，專案皆可採用 SSM 干預管理措施，SSM 建議方式如下幾項：

- 有效水管理
- 審慎的施肥方法
- 有效利用有機改良劑，如：畜禽糞、植物殘體、堆肥、沼渣及生物炭
- 有效使用無機改良劑(如：石灰或熟石灰改良酸性土壤，以石膏改良鹼土)
- 使用生物性肥料(有益微生物)
- 植物殘體管理
- 使用覆蓋作物或綠肥和/或多年生植物進行輪作
- 減少耕犁
- 在防止和/或減輕土壤壓實
- 放牧管理增加土壤植被覆蓋面積
- 地景管理改善
- 在退化或荒廢的農田上種植適應當地生態條件的原生物種(例如，固氮豆科植物)

採用 SSM 之前，合理的基準期時間範圍標準化為五年。其中可用於舊有管理措施情境的活動數據對於大多數的專案而言是有效、可信以及更新的。舊有管理措施情境的定義，是基於為評估干預區所提供的五年歷史活動數據。包含覆蓋作物(含殘體回田)採收期、產量與生質量、放牧管理紀錄(畜禽數量與種類)、耕犁方法、及機械化管理(次數)和化石燃料的消耗：耕犁、種植、蟲害控制、肥料/有機和無機改良劑/糞肥施用和分配、採收、割草、乾草打捆、內部運輸及其他機械化操作、肥料和無機改良劑的使用(產品、施用方法、施用時機、每年肥料和養分施用劑量，以 kg/ha 為單位)、有機改良劑施用(種類、施用型態、施用方法、時間及每年施用頻率)、灌溉管理(類型、水源、水質參數，包括電導度和鈉吸附比、灌溉週期、週期/頻率、年灌溉量)、混農林業：樹木數量和種類、樹木胸徑的估計或實際直徑等。這些考量與 IPCC Tier3 評估排放源的建議專一性參數及活動數據相同。因此，本計畫建議污染土地可依表 4 蒐集場址專一性資料，如土壤有機碳(SOC)、地上生物質量、地下生物質量、死亡生物質...等。

表 4、污染土地碳匯變化排放源與參考專一性參數建議表(本計畫產出)

排放源	溫室氣體	估算選擇性	納入理由	適合情境	建議專一性參數
土壤有機碳(SOC)	CO ₂	是	評估土地在無人為干擾或整治狀況下，量化自然條件(氣候與土壤性質)之土壤碳庫存量變化 若評估微生物代謝影響，則須微生物生物量碳(MBC)佔土壤總有機碳比例，再以專案監測微生物代謝公式進行評估	情境 A 情境 B 情境 C	ΔC_{soil} :土壤碳庫每年改變量 $\Delta C_{mineral}$:礦化土壤有機質碳庫每年改變量 $L_{organic}$:土壤每年有機質流失量 $\Delta C_{inorganic}$:土壤無機碳庫改變量 C_{input} :輸入至土壤外來碳含量(如生物炭、草本植物生物質量) t_{fac} :碳分解溫度影響值 w_{fac} :碳分解水影響值 LC:輸入碳木質素比例含量 NC:輸入碳氮比例含量 C_{mic} :土壤微生物碳含量
化石燃料使用	CO ₂	可選	專案內場址維護(如砍伐	情境 A 情境 B	P_{EDF} :場內化石燃料燃燒碳排放

			或除草堆肥) 所消耗燃料 排放	情境 C	
植生復育地上木 本生物量	CO ₂	可選	評估植生復 育物種的固 碳量(僅考量 植物生長 20 年內影響)	情境 C	G_w :地上物生物質生長量 CF:樹種碳含量 R:生物質地下部與地上部 比值
死亡生物質(木本)	CO ₂	可選	評估因死木 或落葉增加 至土壤有機 碳含量，若 短暫不會發 生重大變 化，則可整 合至土壤碳 庫存量變化 一併估計	情境 C	G_w :地上物生物質生長量 m:地上物生物質死亡率 H:每年疏伐量 BCEF:生物量轉換與擴展 係數
種植固氮植物或 草本植物吸附污 染物	CO ₂	可選	評估土地整 治期間之多 年生草本植 物固碳量， 長期農業廢 棄物堆肥累 計土壤碳變 化量。若短 暫不會發生 重大變化， 則可整合至 土壤碳庫存 量變化一併 估計	情境 B	F_{CR} :農業廢棄物至土壤氮 含量 F_{som} :每年礦化土壤流失 氮含量 EF_1 :氮輸入量造成 N ₂ O 排放 EF_{ifr} :土地淹水造成 N ₂ O 排放 AGR_T :每年地上物殘留總 量 C_{AGT} : 地上物殘留碳含量 BGR_T :每年地下物殘留總 量 CBG_T :地下物殘留碳含量 N_{AGT} :地上物殘留氮含量 N_{BGT} :地下物殘留氮含量 R:生物質地下部與地上部 比值 CN_{ooNT} :輸入有機肥料(或 農業廢棄物)碳氮比 $CFOA_i$:農業廢棄物因土地 淹水甲烷排放調整係數 ROA_i :農業廢棄物施用率 SF_w, SF_p, SF_o :土地因淹水
	CH ₄	可選	評估掩埋農 業廢棄物， 因土地淹水 所造成甲烷 洩漏量	情境 B	
	N ₂ O	可選	評估農廢殘 體碳氮含量 進入土壤 後，經由土 壤淋洗流失	情境 B	

			之平均 N_2O 排放量。若變化情況微小則併入土壤碳庫存量估計		甲烷排放係數與調整係數
生物炭應用	CO_2	可選	評估掩埋生物炭整治後，生物炭礦化對土壤惰性碳增量影響	情境 C	BC_{TOTp} : 掩埋 p 類型生物炭量 F_{cp} : p 類型生物炭有機碳含量 F_{permp} : p 類型生物炭於土壤中 100 年後存在惰性碳比例
	N_2O	可選	評估掩埋生物炭整治後，生物炭輸入土壤的氮含量流失變化	情境 C	F_{som} : 每年礦化土壤流失氮含量 EF_1 : 氮輸入量造成 N_2O 排放 EF_{ifr} : 土地淹水造成 N_2O 排放 CN_{bp} : p 類型生物炭碳氮比

另一方面，FAO 報告指出，碳匯監測必須從初始基線情境(第 0 年碳儲量)的土壤有機碳濃度和儲量變化建立，藉以說明採用永續土壤管理措施可增加或保持土壤有機碳儲量。土壤有機碳的穩定化需要一段很長時間，因此 SSM 執行後土壤有機碳的變化可能需要五至六年以上時間，尤其土壤有機碳循環與土壤微生物間具有緊密關係[12]，當場址內植物行光合作用，將大氣中的 CO_2 轉換為植物體形成綠碳；而植物的落葉及植物體殘渣在土壤中被分解成複雜的有機聚合物(多醣類)，或植物根部分泌簡單的有機聚合物(寡醣類或單醣類)，使得原本固定的碳以生物可用形式進入微生物的代謝過程中，其中也包含自營性微生物從大氣中直接使用 CO_2 ，而部分的碳會透過微生物呼吸作用排放回大氣中；另一部分則作為碳源形成穩定碳庫。因此，FAO 報告建議土壤有機碳模擬模型，應針對基線情境及干預情境的 0-30 公分土壤有機碳儲量(tC/ha) 至少 20 年的時期預測。基線須涵蓋(0-10 公分、10-30 公分深度；亦可適當的區分不同土層，自願性的採樣至 1 公尺土壤深度)；土壤總體密度(與測定土壤有機碳相同土層)以及估算土壤有機碳儲量(0-30 公分或不同深度的土壤有機碳儲量總和)。強制性以每 4 年監測頻率，每 2 年基線與專案(干預區)進行 0-30 公分進行模擬，模擬必須使用廠址專一性數據據(例如月溫度/降雨量/蒸發散量、基線/初始測定的土壤有機碳儲量和估算的碳輸入量)進行[13]。

若以 Verra 準則則建議專案必須長達 3 年基線調查與每 5 年驗證 1 次土壤增匯量數據，專案必須長達 10 年以上執行，以避免因土壤 SOC 遭土地變更後造成碳洩漏或無法確認專

案持久性等問題，本專案模型因會受氣象條件、植物體生長情形、土壤碳堆積密度(容重)速率差異，因此校準和驗證指南必須遵循 VMD0053 不確定性評估，基線資料可考量原始土壤資料確認是否有質地差異，然而在污染土地的剖面土壤分層特徵與鄰近土壤特徵不同，因此在執行污染土地基線調查則格外重要，基線調查確認碳儲量變化小於 5%以下；若變化量大於 5%，此專案則不適用[9]。

除上述 IPCC、FAO、Verra、GS 等國際上考量場址有機碳變化與溫室氣體排放(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)所需參數外，污染場址從未建立過土地碳匯評估方法與參數資料，僅有研究證實場址種植不同植物進行植生復育從植生萃取 (Phytoextraction)、植生穩定(Phytostabilization/Phytoimmobilization)、根圈過濾 (Rhizofiltration)、植物蒸散/揮發(Phytovolatilization)、植生降解 (Phytodegradation)、根區降解 (Rhizodegradation) 及植生脫鹽 (Phytodesalination)等機制可將場址污染物去除，在污染物降解與移除過程中，土壤有機碳也可能來自植物衍生的有機物質（例如根系分泌物、凋落物）、微生物的代謝產物（例如胞外聚合物）、以及死亡的微生物生物質殘體。這些碳源經過微生物的分解、轉化與合成作用，最終以較穩定的有機碳形式儲存於土壤中[12]。綜整土壤有機碳固碳及植生復育機制可知，植物根際的微生物群落於兩項機制間皆扮演關鍵的角色，根區降解是植生復育中一類重要的微生物驅動的污染物去除機制。在此過程中，植物根系藉由分泌有機酸等物質，提高土壤中污染物的溶解度或生物可利用性，從而促進根際微生物對污染物的分解作用。因此，本計畫建議除了表 4 評估專案場址所需參數外，專案可建立與微生物相關的參數資料庫，如不同植物-污染物-土壤組合下的根際微生物群落結構、關鍵微生物類群的有機物分解速率、生長速率、以及相關的微生物代謝途徑，以確立土壤碳儲存量是否隨微生物群落變化。由於土壤碳礦化機制係需長時間才達到穩定與平衡，在閒置較久污染土地則相當適合進行長期監測調查，以釐清這些機制長期影響相互關係。

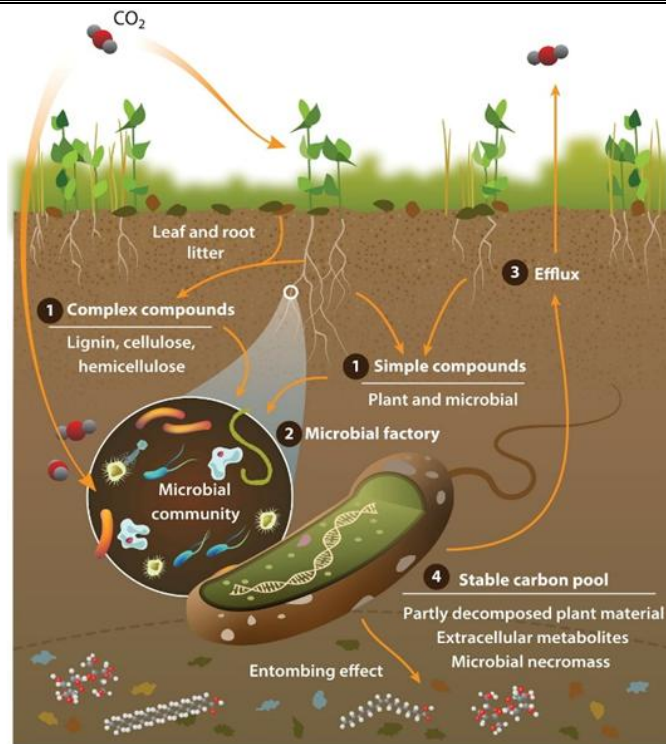


圖 12、土壤有機碳循環與微生物間的關係[12]

除此之外，國際上已有許多研究證實改良生物炭材質可提供自營性微生物對 CO₂ 固定與釋放機制，提升微生物固碳潛力[13]。有鑑於此，國內在推動污染場址土壤碳匯專案前，必須考量碳匯評估場址專一性資料缺乏問題，以及各項整治技術是否具有土壤增碳匯外加性，這些條件皆會對評估帶來不確定性且難以追溯土壤碳匯的變化。台灣污染場址整治方式多數以物理、化學、生物整治方式，常見現地(In-Situ)整治技術如化學氧化、酸淋洗、氣體抽除處理、生物整治法等，這些方法係以降解污染物為目標，整治過程使得土壤微生物代謝產生碳通量，或因整治工程機具使用產生溫室氣體排放，因此對於土壤碳匯皆無助益，建議可由綠色整治評估專案碳減量而不須考慮土壤碳匯效果。綜整本計畫搜尋與評析上述國際文獻的結果，污染土地碳匯評估方法建立，可以分為三種情境(圖 13)，情境 A:減少土地人為干擾(如種植作物、整治、翻土...等)，僅有自然生長本土植物與自然條件污染物衰減之土地，專案面積必須至少 1 公頃以上，以評估土壤有機質增加碳匯量、情境 B:種植草本植物，促進土壤健康與自然復育(如選擇固碳或固氮植物及其殘體作為土地覆蓋載體)，草本植物僅考量作為農業廢棄物覆蓋土地堆肥對土壤碳匯變化影響，專案面積必須至少 0.5 公頃以上。若專案推動種植木本與灌木樹種，可結合情境 C 綜合評估，樹種必須為 20 年以內，或考量專案起始年以樹種開始種植之地上木本植物 20 年內之地上生物質量、情境 C:輕度整治(如植生復育、添加生物炭作為土壤改良劑)，專案面積必須至少 0.5 公頃以上，評估木本植物 20 年內之地上生物固碳量、及生物炭對土壤碳匯增量。

▶ 情境A:	▶ 情境B:	▶ 情境C:
閒置無人為干擾	種植木本植物或植物殘體覆蓋	輕度整治(如生物炭)
 適用土地 面積 1 公頃以上的土地	適用土地 面積 0.5 公頃以上的土地	適用土地 面積 0.5 公頃以上的土地
 監測項目 1年生植物生長情況和覆蓋率 土壤有機碳含量與碳通量變化	監測項目 20年內植物的生長的固碳量 土壤有機碳含量與碳通量變化 土壤微生物菌群變化	監測項目 20年內植物的生長的固碳量 土壤有機碳含量與碳通量變化 土壤微生物菌群變化

圖 13、污染土地碳匯專案範疇與監測建議(本計畫產出)

肆、研究方法

本研究基於上述評析國內外土地碳匯評估原則，計畫目標在於建立一個專門針對污染土地碳匯潛力的資料庫，並分析其在應用上的可行性。因此，本計畫之研究項目包括：(1). 污染土地碳匯資料的建置；(2). 國際常用土地碳匯模型評估參數與資料庫結合可行性；及(3). 污染土地碳匯增強策略評析。然而，國內尚未有針對碳匯進行的實際污染場址研究，且相關方法學與驗證程序仍不完整，且土壤碳匯影響因子複雜，所需參數資料眾多，尤其污染土地碳匯影響因子比起其他土地利用型態更為複雜。國際上對於土壤碳匯評估工具與平台建立已是歷經多年且大量研究經費挹注，本計畫在有限經費規模下，建議分階段進行逐步擴充國內評估量能，第一年度以建立示範場址碳匯基本資料庫與方法學為主，並與國際研究平台與國內外專家學者交流，逐步釐清合適方法學與資料參數，為未來的評估奠定基礎。在資料庫逐步完善後，第二階段可進一步建立資料庫倉儲系統，以可以雲端結合外部作物生長模型或土壤礦化模型，進行系統性評估與數據整合，並建置具空間視覺化功能的評估平台。最終，第三階段將藉由長期的碳匯驗證數據修正模型方法學，以提升其預測能力。

本計畫執行進度與工作項目(甘特圖)如下所示。

年月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
工作項目													
1.污染場址碳匯基本資料庫建置													
1.1 場址篩選與既有資料評估													內容說明於 P20~P22
1.2 場址土壤碳庫背景資料建置與比對													內容說明於 P22、P31
1.3 污染場址碳匯參數採樣與分析													內容說明於 P22~P25、P29~P34
1.4 資料應用指標建立與可行性評估準則													因計畫規模與經費限制而改為單一場址調查，故無多處場址資料應用可行性分析
2. 評析不同碳匯模型參數與公式													
2.1 研析國際碳匯評估模式													內容說明於 P8~P17
2.2 場址碳匯模式使用參數適用性評估													內容說明於 P29~P36
2.3 場址案例情境初步評估													內容說明於 P14、P18
3. 場址碳匯增強策略評析													
3.1 CBP 模式評估與場址成本效益參數資料蒐集													內容說明於 P37~P44
3.2 場址碳匯策略評估與建議													內容說明於 P14、P18、P45
工作進度百分比(累積數)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	95%	100%	
預定查核點	期中			● 完成場址碳匯參數建置與評估準則初探 ● 完成國際碳匯模型評估初探 ● 場址成本效益參數蒐集									
	成果			● 完成場址碳匯模式與情境評估 ● 完成場址碳匯增強策略評析									

本計畫以航照圖判斷 SGM 登錄的場址資料中，場址無建築物且面積涵蓋 1 公頃以上、土地已閒置 5 年以上、以及列為控制或整治場址之對象，共計有 55 處。本計畫針對 55 處場址位置資訊，依據 SoilGrids™ 平台資訊篩選 55 處場址土壤有機碳庫基線值範圍(表 5);然而，SoilGrids™ 平台資料庫係基於網路全球土壤資訊(Web-based Global Soil Information Facilities, GSIF)協議，此協議藉由地理資訊一致化制定規則，蒐集各國土壤組成、總有機碳、土壤容重、pH、EC、水分、N 與 P 含量…等基本資料，進一步藉由量化隨機森林方法(Quantile Random Forest) 以 250 公尺網格分析各地區土壤碳儲量基本資料，因此數據為模擬值而非實際調查數據。另一方面，本計畫由 55 處場址的公告時間、污染面積、單位面積有機碳儲存量、土壤容重、場址列管狀況、污染物類別、整治狀況、及國土計畫功能分區…等資訊，針對場址面積大、有機碳儲存量高、國土功能分區位於農業區，其發展不易而造成閒置之場址…等原則作為篩選依據，共計 10 處作為本研究標的場址(表 6)。原計畫擬篩選 3 處場址進行土壤碳匯調查，並希望從不同場址結果確認資料應用可行性，但因計畫規模與經費限制下，專家團隊討論後，於進度報告說明本計畫先以建置污染土地碳匯評估程序為主，篩選面積大標的性場址(桃園蘆竹污染場址)，進行完整性的碳匯資料建置。因此，本計畫也無不同場址管理的情境差異的碳匯評估結果，而是從國際上對土地碳匯評估方法程序，以表 4 表示不同情境場址管理方式所考量評估項目差異，以提供署內參考。

表 5、閒置污染場址碳匯基線資料表(本計畫產出)

縣市別	污染場址 平均面積 (公頃/場)	土壤容重範圍 (dg/kg/場)	碳庫基線值範圍 (t/ha/場)	場址數
宜蘭縣	1.2	272 – 582	67 – 94	4
花蓮縣	4.9	291 – 435	60 – 78	4
新北市	25.3	297 – 402	55 – 75	5
桃園市	3.3	254 – 295	49 – 53	13
新竹市	3.7	265 – 269	46 – 50	2
苗栗縣	2.5	267 – 314	50 – 58	5
台中市	0.3	221 – 232	43 – 47	3
台南市	9.9	244 – 302	40 – 56	5
高雄市	16.8	243 – 306	41 – 52	12
屏東縣	19.3	270 – 282	41 – 52	2

因此，本計畫篩選以桃園市蘆竹區德林段 744 地號及 759 地號之土壤污染控制場址為本次碳匯場址示範點，該場址於民國 93 年 5 月 12 日公告後，歷經不同階段改善計畫後，地方環保局於 111 年驗證作業僅有部分坵塊解列，該區域公告面積達 4 公頃以上，場址多年來種植不同植生復育之木本與草本植物，歷年來土地管理者僅以輕度土地維護(如固定疏伐與植物殘體自然覆蓋)，符合碳匯評估場址特性，如少量人為干擾且推動自然復育計畫，故

本計畫擬變更為此為標的場址，總計調查 30 土壤樣點。

表 6、潛在執行場址清單(本計畫產出)

縣市別	場址名稱	場址種類	場址面積(ha)	公告年份	土壤污染物	地下水污染物	國土計畫功能分區	有機碳儲量(t/ha)	BD(hg/m3)	整治狀況
新北市	台灣金屬鑛業	工廠	29	2010	砷、銅、鉛、鋅、汞、鎳	-	城鄉發展區	75	361	
新北市	禮樂煉銅廠	工廠	78	2013	砷、鎘、銅、鋅、汞	-	農業發展區	75	361	
臺南市	臺南市永康區鹽行段	其他	4	2005	-	順-1,2-二氯乙烯、氯乙 烯、1,1-二氯 乙烯、四氯 乙烯、三氯 乙烯、1,2-二 氯乙烯	-	56	302	是
臺南市	臺南市中石化草叢區	工廠	37	2002	汞、戴奧辛	-	城鄉發展區、 國土保育區	54	276	
桃園市	桃園市蘆竹區福興段	農地	2	2004	鎘	-	-	53	295	
桃園市	桃園市蘆竹區德林段	農地	2	2004	鎘	-	-	53	295	
苗栗縣	苗栗縣竹南鎮公館子段	其他	1	2005	-	氯乙烯	農業發展區	50	267	
桃園市	新屋鄉台15線	其他	2	2013	苯、TPH	苯、柴油總 碳氫化合物	農業發展區	50	254	是
臺中市	台中供油中心	應變	3	2018	TPH		-	47	221	是

在土壤碳匯採樣方法方面，國際研究建議場址若在土壤採樣設計密度不高的情況下，必須考量專案範疇內的土壤不均質影響，採樣設計必須以場址中心採輻射狀進行 8 點基線資料建立，並以半徑 2 公尺範圍逐步建立場址完整土壤布點規劃。國內針對農地碳匯採樣布點設計，可分為跨區混樣的簡單隨機採樣與每區混樣的分區直接採樣兩種方式，執行區域應被劃分成一個或若干個干預區，每一個干預區區域可以是任何大小的面積，每個干預區建

議必須涵蓋至少 3 個「區」，且應劃定足夠的「區」對干預區進行充分採樣，同時建議每個干預區必須至少 5-10 混和樣品以具代表性[14]。

考量本專案場址為污染場址，本場址曾因污染特性分布以網格方式進行污染調查與輕度整治，因此這些污染調查網格區與輕度整治區可視為干預區，有鑑於此，為了本次污染土地的碳匯評估採樣設計可與污染分布(干預區)進行比較，在專家討論後修正土壤採樣方式，採樣原則以符合原定污染特性分布，係以 30 m*30 m 為一網格，並以該網格為中心點採樣，由該中心點選擇鄰近 2 m 重複採樣並混樣，調查 30 土壤樣點，該場址污染深度達 45 cm，本計畫分別採取 0-15 cm、15-30 cm、30 以下至污染深度，最後兩種深度進行混樣，共計 60 個土壤樣品(圖 14)。土壤碳匯布點原則除參考污染調查網格布點區域外，本專案依據場址林相、人為干預(植生復育整治)、及人為活動範圍分為 5 區，每區約計涵蓋 5-10 個網格布點，每一網格皆有兩點混樣，故符合國內農地碳匯調查混樣代表性要求，各區特徵茲分述如下：

- 綠色區域:人工植林且茂密、污染濃度低、低度人為干擾且無經過整治
- 藍色區域:高度人為活動 (曾有鹿舍)、林相密度不均、污染濃度低
- 黃色區域:人工植林且密度均勻、污染濃度高、曾進行植生復育
- 棕色區域:中度人為活動、林相密度低、污染濃度高、曾進行植生復育
- 紫色區域:人工植林但種類差異大、污染濃度高、低度人為干擾且無經過整治

依據國際針對土壤碳匯準則進行分層採樣，本計畫為避免採樣時因採樣機具影響土壤有機碳與土壤容重變化，係以手持式採樣器蒐集分層樣品(圖 15)，國際上對於碳匯前瞻採樣技術也建議以手持式採樣器結合近端感測技術 (例如 Vis-NIR)，藉由土壤光譜評估不同分層有機碳變化，可以降低實驗室分析成本[15]，各分層土壤樣品委託屏東科技大學循環材料研究中心進行土壤總體密度(BD)、酸鹼值(pH)、導電度(EC)、總有機碳(TOC)、總無機碳(TIC)分析，分析方法如表 7 所示。除進行土壤有機碳含量基線調查外，本計畫參考 IPCC 建議，專案必須考量氣候條件與土壤條件對土壤有機碳礦化速率影響，因此必須蒐集土壤微氣象參數資料，包含土壤溫度、濕度、導電度變化，故本專案在曾進行植生復育的棕色與黃色兩個干預區架設土壤微氣象站(HOBO-RX3004)，土壤微氣象站是一款結合無線數據傳輸的環境監測設備，可連接多種感測器用於監測土壤溫濕度、氣象條件及碳循環相關參數，透過內建的 4G/LTE 或 Wi-Fi 模組，數據可即時或定時上傳至 HOBOLink 雲端 (最短可達 1 分鐘一次，最長可設為數小時甚至一天)，本計畫在兩區設置土壤微氣象站(圖 16)，可即時了解土壤微氣象變化，並在基線調查後評估土壤有機碳因氣候與降雨條件產生影響。



圖 14、污染土地碳匯專案採樣布點與分區圖(本計畫產出)



圖 15、污染土地碳匯採樣圖

表 7、土壤碳匯分析項目與方法(本計畫產出)

分析項目	方法概要	單位
土壤反應 (pH 值)	複合電極法 (s:w = 1:1)，土重與水重 1:1，間或混合 1 小時後以複合電極進行測量。參考環境部「土壤酸鹼值 (pH 值) 測定方法－電極法」(NIEA S410.62C)	對數值
電導度 (EC)	土壤配製飽和土糊，以抽氣機、布氏漏斗進行飽和土糊溶液之抽出，配合電導度計測量。參考農業試驗所「土壤電導度測定方法」(TARI S101.1B)	dS/m 或 μS/cm
有機碳	將風乾土樣混勻，取約 5 g 土樣，以瑪瑙研鉢細磨並全部通過 30 mesh 篩網。混勻後取 0.05–0.1 g 子樣品，以 1 N HCl 進行酸化後，進總有機碳分析儀 (OI Analytical Aurora 1030s) 於 900°C 測定碳含量。參考農業試驗所「土壤有機質測定方法－燃燒／紅外線測定法」(TARI S201.1B)	% (乾重為基)
無機碳	分析步驟同有機碳，不進行酸化，以酸化樣品示差	% (乾重為基)
總體密度	非破壞性土芯樣品，初步破碎混勻後紀錄鮮重，取一定鮮重之子樣品，以 105°C 烘乾至衡重，以烘乾重回推總土芯之烘乾重，除以土芯體積得總體密度。參考環境部「土壤採樣方法」(NIEA S102.64B)	g/cm ³ (t/m ³)
含石率	土芯初步破碎、風乾過程混勻，風乾後過 10 mesh 篩，大於 2 mm 的石礫經烘乾稱重，除以整個土芯之烘乾重	% (乾重為基)



圖 16、土壤微氣象站圖

除了評估土壤有機碳(黃碳)變化外，本場址碳匯來源還來自於場址內林相生長所產生固碳量，自污染發現公告前，本場址土地管理者即在不同區域以園藝與人工植林方式種植不同樹種，以低干預方式讓其場址內林相自然演替，且場址公告後，於黃色與棕色區域分別種植

可移除重金屬污染的不同植物進行復育(點位編號#16、#17、#28、#29、#30)。本計畫為了確認場址內種植植物固碳量與維護操作活動數據碳排放量影響，以 30 樣點逐步建立種植物種清單(表 8)，建立 110 筆植物物種清單之固碳影響參數資料，場址調查植被位置分布如圖 17。

表 8、各區域林相物種清單(本計畫產出)

布點編號	樹種(數量-株、叢)
1	小葉欖仁 10、朴樹 1、竹林 7、流蘇 3、苦楝 3、茄冬 5
2	羊蹄甲 25、流蘇 55、楓香 47
3	血桐 2、茄冬 3、桑樹 30、陰香 30
4	小葉欖仁 130、蚊母樹 1、陰香 40、福木 10
5	小葉欖仁 240、福木 4、樟樹 1、龍眼 6
6	小葉欖仁 2、台灣欖樹 1、竹柏 6、茄冬 2、陰香 2、洋玉蘭 1、櫻花 3
7	楓香 119
8	楓香 45
9	陰香 65、黑板樹 130、落羽松 20、樟樹 1
10	月橘 40、茄冬 3、福木 24、樟樹 1、龍眼 7
11	竹林 19、苦楝 1、楓香 50
12	朴樹 4、竹林 6、流蘇 6
13	流蘇 50、楓香 15
14	白千層 14、陰香 25、黑板樹 30
15	山欖 9、楓香 110、榕樹 2
16	山欖 51、白千層 16、落羽松 8、蒲葵
17	小葉南洋杉 6、陰香 11、楓香 6、落羽松 10、榕樹 2、蒲葵、欖樹 2
18	紅楠 2、榕樹 35
19	黑板樹 120
20	流蘇 6、椰子 5、榕樹 2、蒲葵 12
21	榕樹 42
22	芒果 1、青楓 3、流蘇 55、茄冬 1、馬拉巴栗 3、福木 400
23	桑樹 11、榕樹 13、福木 400
24	福木 300
25	朴樹 2、竹柏 4、茄冬 2、食茱萸 1、桑樹 6、榕樹 15、福木 150
26	小葉欖仁 7、茄冬 7、榕樹 13
27	椰子 44、第倫桃 84
28	山欖 6、流蘇 23、福木 100
29	山欖 1、流蘇 41、陰香 8、福木 100
30	流蘇 67、茄冬 1、福木 110

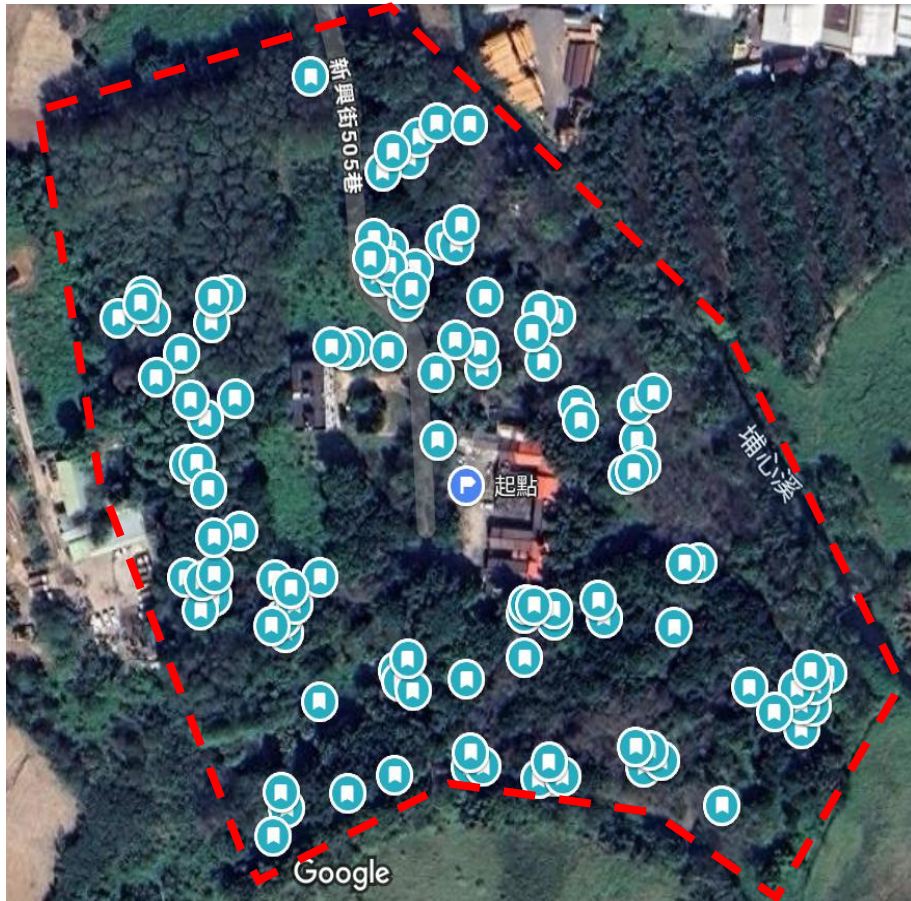


圖 17、污染場址植物分布調查位置圖(本計畫產出)

國內對林相碳匯方法學相對於土壤碳匯方法較為成熟，環境部氣變署已陸續公告「小規模減量方法低蓄積林增匯」、「竹林經營碳匯」、及「森林經營碳匯方法」等[16]，這些評估方法皆參照國際標準 AR-TMS0007、VCSVM0045，另參考 ACRVM0005、VCSVM005、VM0012、VMD0005、VMD0026，並建立可依循評估專案場址內地上物生物質量數據 $G_w \equiv G_{FR_BSL,i,j,t}$ ， G_w 為表 1 的 IPCC 對林相的固碳評估數值，此數值評估方法與林相碳匯方法學基線評估相似，代表第 t 年第 i 分層 j 樹種每公頃林木株數量 $N_{BSL,i,j,t}$ 與平均單株地上部生物量 $G_{SFR_BSL,i,j,t}$ 來估算生物量 $G_{FR_BSL,i,j,t}$ ，林相評估碳庫計算範圍可分為地上部與地下部，延伸到地下部可乘以 $(1+R)$ ， R =根莖比，整體評估公式影響參數包含胸高直徑、樹高、木材密度、碳含量，評估公式(8)與公式(9)所示。除了上述公告評估方法外，農業部水土保持署技術研究發展計畫，也完整建置國內水土保持樹種儲碳參數資料庫[17]。表 9 為本計畫彙整影響參數表，本計畫林相調查依據此表建立各區碳匯數值資料。

$$G_{FR_BSL,i,j,t} = G_{SFR_BSL,i,j,t} \times N_{BSL,i,j,t} \times (1 + R_j) \quad (8)$$

$$G_{SFR_BSL,i,j,t} = 0.0673 \times (p \times DBH^2 \times H)^{0.976} \times BEF \times (1 + R) \times CF \quad (9)$$

表 9、林相生物量固碳影響參數(本計畫產出)

參數	定義	單位	備註
p	木材密度	g/cm^3	依物種而不同
DBH	胸高直徑	cm	需實際測量
H	樹高	m	需實際測量
CF	碳含量	%	依物種而不同
BEF	生物擴展係數		研究設定 1
R	根莖比		研究設定 0.24

污染土地的土壤有機質變化，除了來自於污染物對於地上物生物質生長狀況影響導致於 $GS_{FR_BSL_{i,j,t}}$ 差異外；另一方面，土壤中微生物亦因來自於污染物導致土壤性質改變而影響，進而影響土壤微生物在有機質礦化速率的相關因子中水解、植物殘體分解速率上差異；然而，國際上很少針對污染土地微生物群落組成變化與土壤有機碳礦化速率研究，多數研究係以分析土壤微生物碳量(MBC)代表土壤黃碳其中一項，MBC 可以透過氣仿熏蒸-抽提法(fumigation-extraction) 測得，反映「活微生物群體的碳庫大小」，但這只能代表當下(基線值)碳庫狀態，並無法得知不同污染程度是否持續影響土壤微生物活性。若微生物活性越高通常伴隨 MBC 增加，因為群落活性提升促進微生物群落增長，來自 Biolog EcoPlate™ 試驗所獲得 AWCD (Average Well Color Development, 平均孔顏色發展值)，此數值可代表微生物對多種碳源的利用能力和活性，AWCD 值越高，表示群落代謝活性越強，碳源利用潛力越高。另一方面，若微生物碳利用 CUE (Carbon Use Efficiency) 效率高，代表微生物代謝有高比例碳合成生物量，並且有更多碳被固定在土壤。由此可知，在專案場址沒有建立每年的 MBC 數值資料庫前，必須了解污染特徵是否對於微生物於不同碳基質利用潛力產生差異，這可以從 AWCD 數值分析可以得知，當確立不同區域差異後，同時分析土壤碳通量數值，才可以確認最終微生物碳利用效率(CUE)，以進一步確認污染場址特徵經由微生物生長狀況所增加土壤碳含量。因此，本計畫與東吳大學微生物系張怡塘特聘教授合作，進行土壤微生物對於不同碳源基質鑑定，共計分析 16 個點位於兩個深度的 AWCD 數值，共計 32 樣品，以確認不同區域微生物群落、土壤性質、土壤有機碳含量、及植被固碳分布關係，以作為下一階段污染特徵對於微生物固碳影響分析。Biolog 生化代謝微孔盤來自於樣品槽底部塗布氯化四唑氧化還原反應，並對 31 種不同碳源利用情形評估其吸光值(OD)，OD₅₉₅ 代表微生物碳源利用之吸光值，吸光可設定於 450~650 之間，最終計算得出 AWCD，公式(10)。

$$AWCD = [\sum(C_i - R)]/31 \quad (10)$$

伍、結果與討論

依據聯合國糧食及農業組織(FAO)研究顯示在亞熱帶濕潤氣候條件地區，污染土地若搭配土壤改良且種植草本植物可以增加額外土壤碳儲量為 3.81 (tC/ha/y)[17]。本計畫秉持建立污染土地碳匯模型評估參數之準確性、時效性、適用性及可操作性等考量，建立研究方法執程序，依據土壤碳礦化過程評估常見模型(如 RothC)逐步建立所需各項參數，另一方面，本計畫也參考 ISRIC 提供專案評估不同執行策略的碳效益評估工具，簡稱為(Carbon Benefits Project, CBP)。此工具由科羅拉多州立大學與世界自然基金會(WWF)主導，由 ISRIC 執行並輔導多個國家建立土地管理碳匯評估方法，該工具可分為簡易評估(Simple Assessment, SA)、精細評估(Detailed Assessment, DA)、社會經濟工具(Socio-economic Tools, ST)，可讓使用者依據需求(若有地方精細監測數據可使用 DA)，甚至可以依據專案碳管理所蒐集專一場址性參數，本計畫於蘆竹德林段污染場址為示範，今年度先建立各項參數基線，來自於不同深度 D (cm) 的土壤有機質含量 OC(%)與土壤容重 BD(g/cm³)等土壤屬性參數的影響，估算土壤有機碳儲存量(SOC stock)基線值。

本計畫以場址污染特徵、活動型態、及植被覆蓋率等因素，共計分成 5 個區域(圖 14)，從各區域的土壤容重 BD 數值差異(BD_{裡土}-BD_{表土})了解場域在過去幾年間是否有遭受嚴重人為干擾，此數值同時也可以初步評估各區域土壤有機碳變化，有機碳儲存量(SOC stock)是否為天然土壤有機質變動或是來自於人為干擾可能性而影響未來專案推估準確度。一般土地利用 BD 數值可隨著深度而增加，若表面土壤來自人為干擾，其表土的 BD 數值低於裡土，土壤隨著日積月累形成土壤團粒穩定後，裡土 BD 數值而增加，若表土因過度人為干擾(如翻土)，其差值至少大於 0.6 以上，本場址各區域 BD 差異約落在 0.14~0.31(g/cm³)，通常自然演替差值約在 0.2~0.4 之間，有農耕翻土則會在 0.3~0.6 之間，機械壓實或有填土則會在 0~0.2 之間，其中綠色區、黃色區、紫色區差值較小，代表這些區域雖然沒有翻土情況，但也有可能土壤表面經過機器壓實的人為干擾情況，尤其點位#2、#5、#9、#14、#19、#22、#29 差值皆小，如圖 18 所示呈現淺黃色區域，表 10 彙整各區 BD 數值，代表場址分布圖(圖 14)的淺綠黃色可能有人工機具壓實，其餘區域可視為自然演替場址發展。

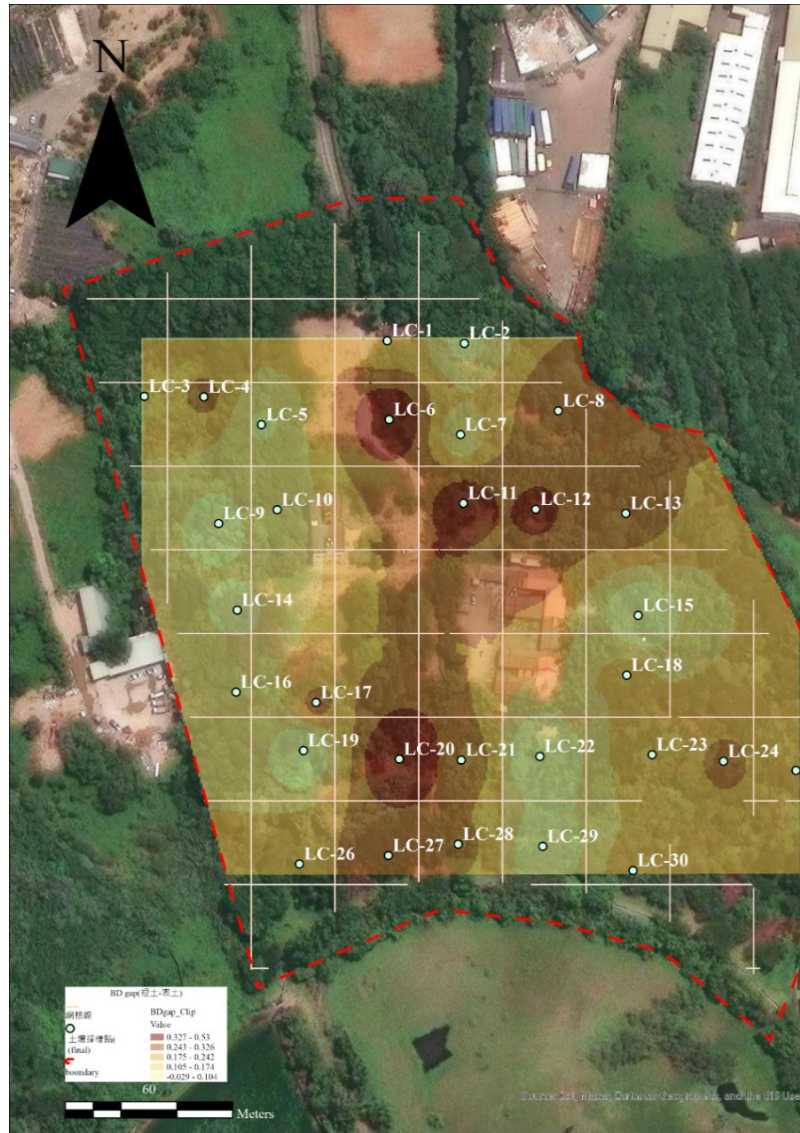


圖 18、污染場址各點位 BD 差值克利金圖(本計畫產出)

表 10、各區域 BD 數值(本計畫產出)

區域	BD 表土(g/cm ³)	BD 裡土(g/cm ³)	差值(g/cm ³)
藍色區	1.34	1.59	0.24
綠色區	1.36	1.50	0.14
棕色區	1.25	1.56	0.31
黃色區	1.35	1.53	0.18
紫色區	1.34	1.51	0.17

各區域有機碳儲存量(SOC stock)基線值以公式(11)估算，可得知本場址污染層(0 - 45 cm)平均值為 55.62 tC/ha，表土與裡土的平均值分別為 36.20 tC/ha 與 19.42 tC/ha，這數值略高於國際 SoilGrid 在桃園市所評估數據(表 3)，代表此場址在過去幾年管理維護上對於土壤碳儲存量略高於該區域平均值，各點位污染層的SOC stock 等濃度圖如表 11 與圖 19 所示。其

中#7、#20、#21、#23 點位的土壤有機質儲存量為最高(藍色區、棕色區、黃色區)，在調查階段訪查該區域地主得知種植牧草，並且這些區域都因人工施肥而導致有機碳數值高於其他點位。另一方面，本計畫執行土壤採樣階段遇到梅雨季，綠色區與紫色區鄰近採樣點的採樣時間可差異到 2~3 個月數據，並且這兩個區域的有機碳儲存量分別具有高與低數值上差異；因此，本計畫則依據 FAO 提出最小可偵測差異數值(MDD)估算公式(12)，以 95%信心水準 $t=2.045$ 評估下，初步分析綠色區與紫色區的 MDD 值分別為 0.96%與 0.83%，一般碳權市場的 MRV 要求 $MDD=0.05\sim0.2\%$ ，學術研究可設定為 0.3~0.5%，由此可知，代表本場址各點位的有機碳數值差異仍大，為了避免採樣點數過少而造成各區域評估有機碳儲存量的誤差，建議第二年度調查仍維持 30*30 網格調查。

除了#7 點位外，其餘都是在棕色區與黃色區曾經推動植生復育，因此人為活動(施肥)是否造成土壤特徵因子變動與有機碳儲存量影響，建議在下階段(第二年調查)必須注意之處。此外，綠色區為人工植林茂密區域，但該區域土壤有機碳含量並未地上生物質生長茂密情況而在污染層有機碳含量有顯著性影響。

$$SOC \text{ stock } \left(\frac{tC}{ha} \right) = OC(\%) \times BD \left(\frac{g}{cm^3} \right) \times D(cm) \times (1 - \text{含石率}) \quad (11)$$

$$MDD \geq \frac{s}{\sqrt{n}} \times (t_{\alpha,v} + t_{\beta,v}) \quad (12)$$

表 11、各區域污染層有機碳儲存量平均值(本計畫產出)

區域	SOC _{表土} (tC/ha)	SOC _{裡土} (tC/ha)	總值(tC/ha)
藍色區	37.27	20.72	57.99
綠色區	32.65	12.81	45.46
棕色區	27.20	17.46	44.65
黃色區	40.20	22.21	62.41
紫色區	37.04	22.33	59.37

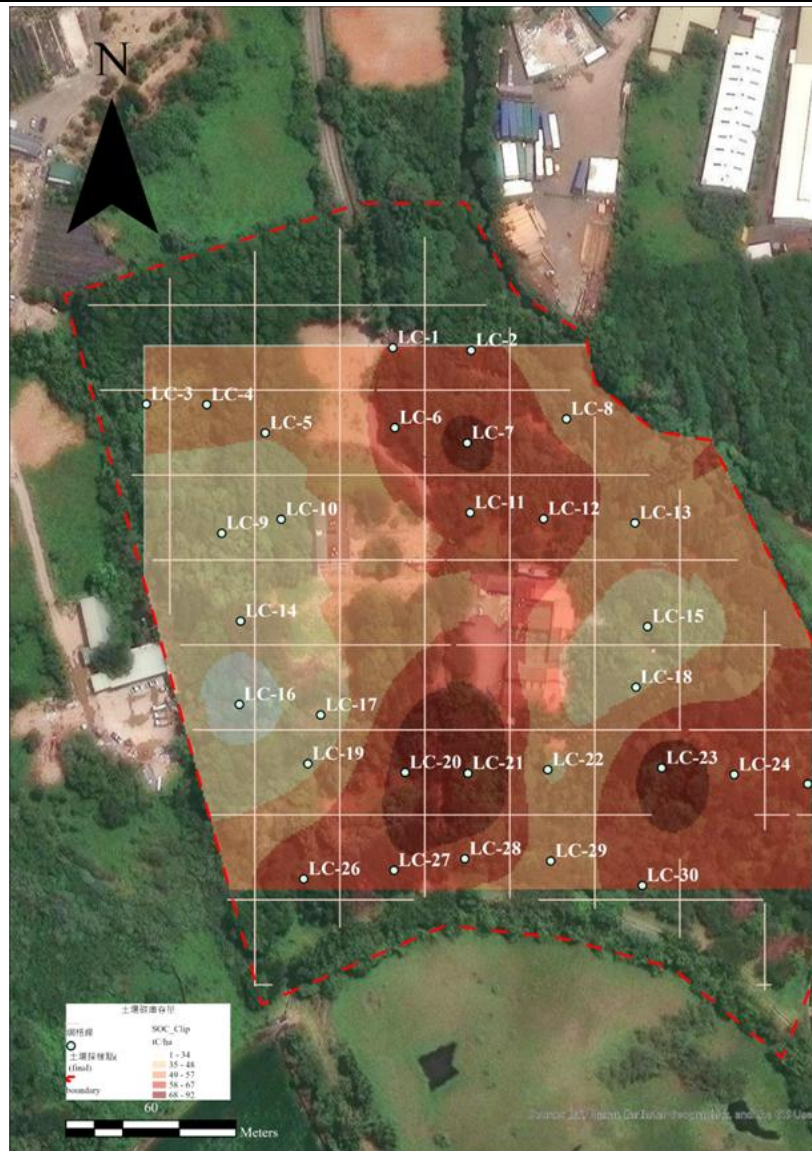


圖 19、污染場址各點位土壤有機碳儲存量分布圖(本計畫產出)

由於場址人為施肥因素，施肥除了會影響植被生長速度差異而造成碳匯(植被綠碳)變化外，施肥導致土壤導電度變化也可能造成重金屬移動影響，進而土壤根圈微生物活性也產生變化，因此，本計畫也針對場址 30 個採樣點進行導電度分析，導電度若在正常環境條件下，隨著氣候條件與土壤淋洗作用，導電度會隨著深度增加，裡土導電度會高於表土導電度，其差值應呈現正值，若差值呈現為負值則代表氮、鉀肥份可能停留於表土，本計畫各點位差值約-0.02~0.10 dS/m，此數值並未差異太大，代表可能來自於分析上誤差，代表場址內的土壤淋洗作用並不明顯，這也代表土壤有機碳流失情況可能不會太嚴重，各區域導電度差值如圖 20 與表 12 所示。

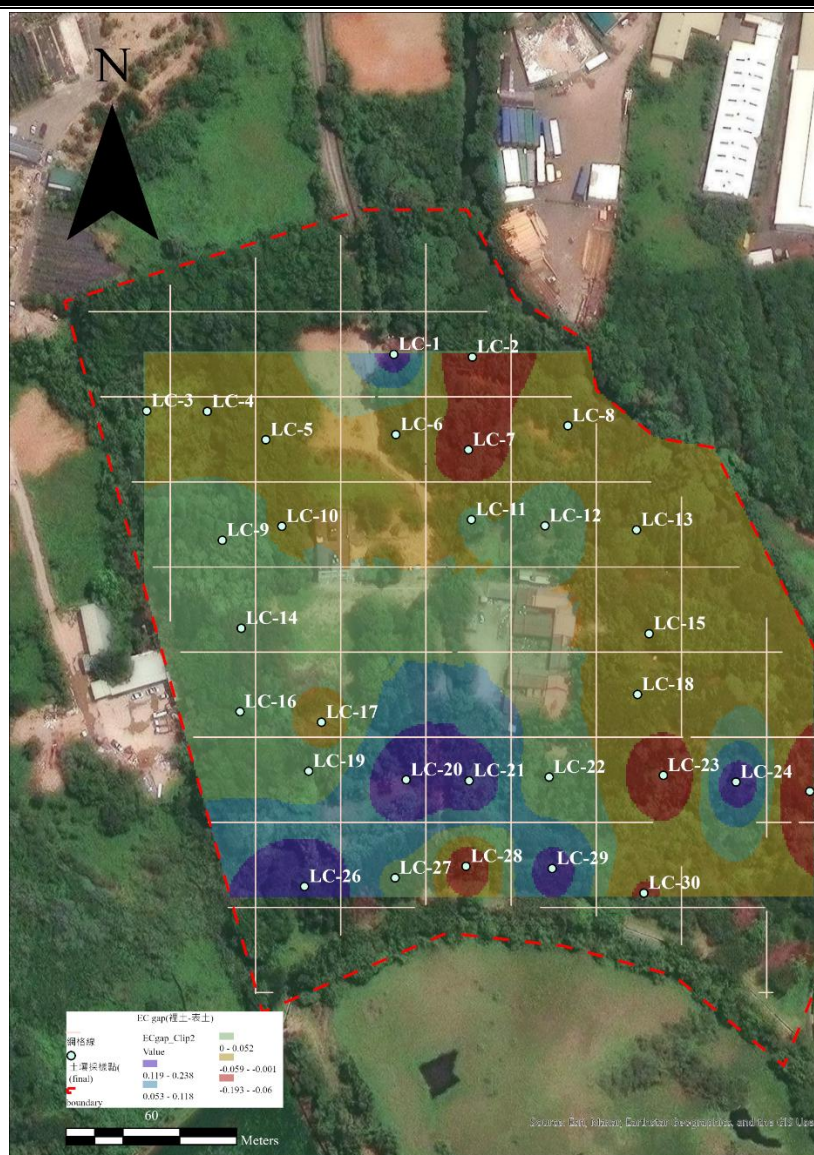


圖 20、污染場址各點位土壤導電度差值分布圖(本計畫產出)

表 12、各區域導電度差值(本計畫產出)

區域	EC 表土(dS/m)	EC 裡土(dS/m)	差值(dS/m)
藍色區	0.35	0.33	-0.02
綠色區	0.40	0.40	0.00
棕色區	0.22	0.29	0.06
黃色區	0.24	0.23	-0.01
紫色區	0.20	0.31	0.10

另一方面，本計畫針對場址內各區域植被調查，綠碳基線值如表 13 所示，顯示植被覆蓋率及綠碳含量與土壤黃碳含量沒有呈現正相關，代表場址的植被雖維持至少 20 年以上自然演替，地上生物質死亡殘體覆蓋與地下生物質殘體並非主導此場址黃碳主要來源。本計畫為了解不同區域植被生長、污染特徵、及根圈土壤微生物相互影響情形；因此，分別各區進行 AWCD 分析；然而，依據本次調查結果顯示各區域綠碳、黃碳、AWCD 值並非有顯著相關性，且僅有一年度植被綠碳基線調查無法確認歷年變化，建議未來可依據歷年航照影像判識與 NDVI 值來進一步估算綠碳變化量。本計畫今年度除調查植被生長狀況外，同時向土地所有人訪談，得知藍色區與黃色區原本為農田，自污染後將土地利用由農業用地轉為林業用地。因此，若係以污染公告起始估算土壤碳匯潛力，本場址則須考量土地利用轉變(植被變化)所產生綠碳變化。

表 13、各區域綠碳、黃碳、AWCD 數值表(本計畫產出)

區域	綠碳(tC)	黃碳(tC/ha)	AWCD (n:樣品量)
藍色區	34.15	57.99	0.3524 (10)
綠色區	122.63	45.46	0.3442 (4)
棕色區	221.54	44.65	0.3472 (6)
黃色區	33.64	62.41	0.6087 (8)
紫色區	255.88	59.37	0.8337 (2)

本場址的土壤長期受鎘污染，並且土壤 pH 值偏中性環境(圖 21)，有利於降低重金屬鎘污染移動，這可以強化官能基(COOH, -OH, -NH)與鎘吸附反應，研究顯示易於鎘污染環境土壤微生物包含 *Nitrospirae* (硝化螺旋菌)、*Firmicutes* (芽孢桿菌)、及 *Verrucomicrobia* (疣微菌)，芽孢桿菌適合於植物殘留物與根系菌群進行碳水化合物分解，例如 *Bacillus sp.* 6-6 則被研究出於鎘污染環境重要土壤微生物[18, 19]，雖然本計畫對污染場址沒進行微生物菌群定序，但從各項土壤基本資料與 AWCD 數值相關性分析(圖 22~圖 23)，結果顯示本場址 AWCD 數值與土壤 pH 表土與裡土皆呈現正相關。各區域微生物對不同種碳源利用活性的 Ecoplate 的 PCA 分析結果如表 14 所示，代表本場址污染程度較高區域之微生物碳源利用以碳水化合物為主，初步推測來自於芽孢桿菌作用所導致。另一方面，呈現 AWCD 與 OC(%) 負相關，AWCD 值較高區域則土壤有機質(OC%)降低，建議未來可以進一步針對 AWCD 值較高區域進行碳通量監測，以確認在此場址的土壤污染情況抑制微生物活性或促使微生物活性，並進一步影響土壤中有機碳礦化速率。



圖 21、污染場址各點位酸鹼值分布圖(本計畫產出)

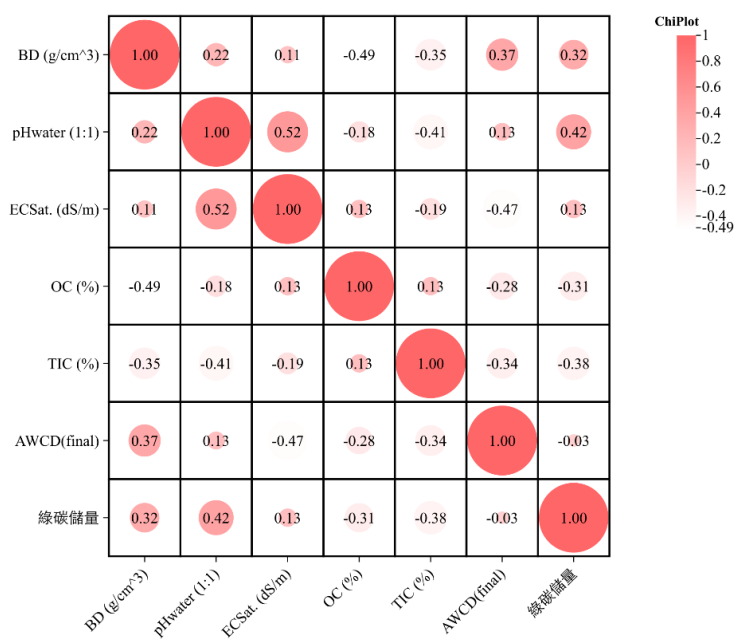


圖 22、表土各項監測項目相關性分析圖(本計畫產出)

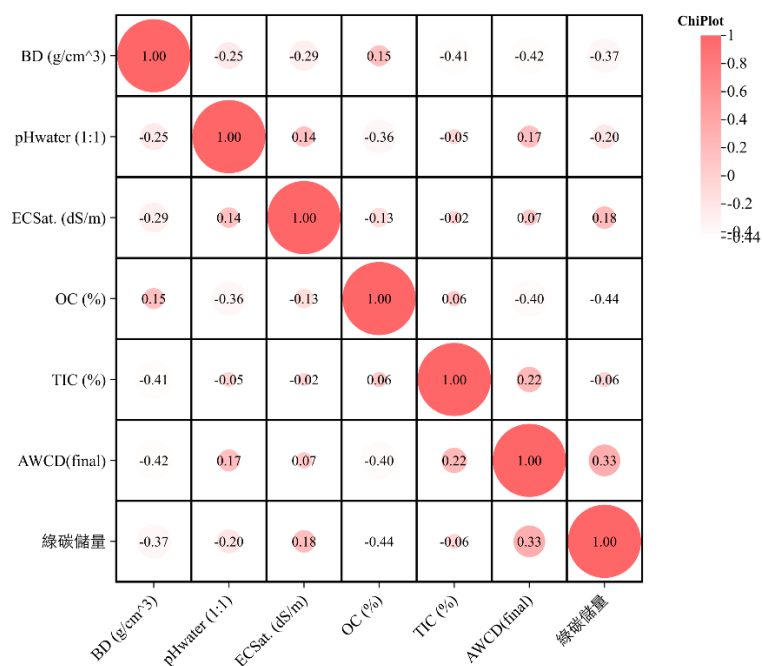


圖 23、裡土各項監測項目相關性分析圖(本計畫產出)

表 14、各區域 Ecoplate 碳源利用主成分(本計畫產出)

區域	AWCD (n:樣品量)	碳源利用-主成分
藍色區	0.3524 (10)	γ -胺基丁酸 (γ -Hydroxy butyric acid) 丙酮酸甲酯 (Pyruvic acid methyl ester)
綠色區	0.3442 (4)	N-乙醯-D-葡萄糖胺 (N-Acetyl-D-glucosamine)
棕色區	0.3472 (6)	
黃色區	0.6087 (8)	D-半乳糖醛酸 (D-Galacturonic acid)
紫色區	0.8337 (2)	丙酮酸甲酯 (Pyruvic acid methyl ester)

		D-半乳糖醛酸 (D-Galacturonic acid)
--	--	----------------------------------

今年度本計畫以調查結果與活動數據輸入 CBP 平台進行碳匯潛力評估，CBP 可在專案設定涵蓋土地用途(林地、草地、居住地、農地、濕地、畜牧地、其他用地…等) 基線與執行過程之土地面積變化，進而依據不同土地管理用途之專案參數資料，該平台引用 IPCC 排放因子資料庫，依據本計畫調查所提供活動數據(土地利用變化、植被生長調查、土壤有機碳含量、肥料管理…等)，即可以產出土地碳匯變化量評估結果。土壤有機碳模型中，目前各模型評估能力仍以土地植被覆蓋變化、土地肥力、及地上物生物量對土壤碳平衡的預測最為穩健與準確，該平台也結合 Century 模型模擬不同土壤-植被的 C、N、P 與 S 的長期動態變化，由於該平台今年度進行資料更新與維護，重新更新平台內地上生物質累積與損失評估方法，並且平台內所建置樹木種類係以過去執行全球環境基金(Global Environment Fund-GEF)所共同支持計畫所建置[20]，因此，本計畫場址內所種植樹種並未完全涵蓋於 CBP 內，計畫執行期間曾以信件相互溝通，請科羅拉多大學維護 CBP 平台的專家(Dr. Eleanor)協助，初步先以簡易分析(SA)進行初探，並以 FAO 建立 EX-ACT 工具輔助分析[21]，該工具是 FAO 開發用於評估 AFOLU(農業、林地與其他用地)不同土地用途轉換對於碳平衡影響，評估方法係遵守 IPCC 評估原則，即是本報告公式(1)~公式(7)及表 1 參數， SOC_{REF} 則是本次土壤有機碳評估結果， C_{input} 來自於本次林相碳儲存調查及場址活動數據(如砍伐頻率、是否有林木燃燒等)評估結果，EX-ACT 工具探討土地利用變化則有包含人為森林砍伐/造林、農業耕作、草原與畜牧業管理、土地退化(土壤流失)、濱海溼地、人為肥料投入與能源消費、水產養殖…等，因此 EX-ACT 的評估概念與 CBP 的 SA 評估原則一致，僅止於其評估後台資料庫無法套疊國際研究 ISRIC 土壤的空間基本資訊(如 SoilGrid)。然而，本計畫已有前述場址專一性調查資料，可依 IPCC 建議評估準則所需參數(表 1)，將調查資料輸入至 EX-ACT 工具即可評估。並依據情境假設(圖 24)進行專案執行前後的土地有機碳變化預測分析。

X0 代表本計畫區內土地利用和管理的初始狀況(例如本場址在污染發現前土地利用型態)，本場址為民國 73 年啟動農地調查發現中福鍋污染時，土地利用型態係以農田為主。直至民國 95 公告後禁止農業使用變為荒地，可視為本計畫擬定專案介入時間(t_1)，視為場址因污染調查確立後改變土地管理方式(X1)，但卻無相關整治情境(如植生復育)，待民國 102 年進行「桃園農地控制場址調查暨後續管理方式評估計畫」[22]，提出種植約 30,000 株福木吸收重金屬鎘，該時期土地管理者也將土地利用改為人工植林與草地(X2)，直至本計畫 2025 年評估時，場址內仍持續進行低人為干擾增加種植樹種或自然演替的茂密土地利用型態，僅是部分福木在此次調查已減少許多改為陰香與流蘇；另一方面，EX-ACT 與 CBP 皆已考量樹種>20 年與≤20 年生長速度的固碳量作為詳細評估參考資料而轉換為 C_{input} 值，以及參考公式(1)~公式(7)輸入土壤有機碳 SOC_{REF} ，進一步評估土壤碳匯變化。由於本計畫所調查林相

樹種眾多(表 7)，並且藉由本次調查顯示於 X1 至 X2 情境時本場址植物種植有部分人工砍伐與移出，以及污染特徵是否在此階段造成不同樹種生長狀況影響，這些影響因子仍有待下一階段進行地主訪談與盤點，以利修正工具評估時準確性。因此，基於本次調查數據限制，本計畫先初估地上生物質數據以 IPCC Tier1 與 Tier2 的評估原則輸入 CBP 與 EX-ACT 進行碳平衡估算。

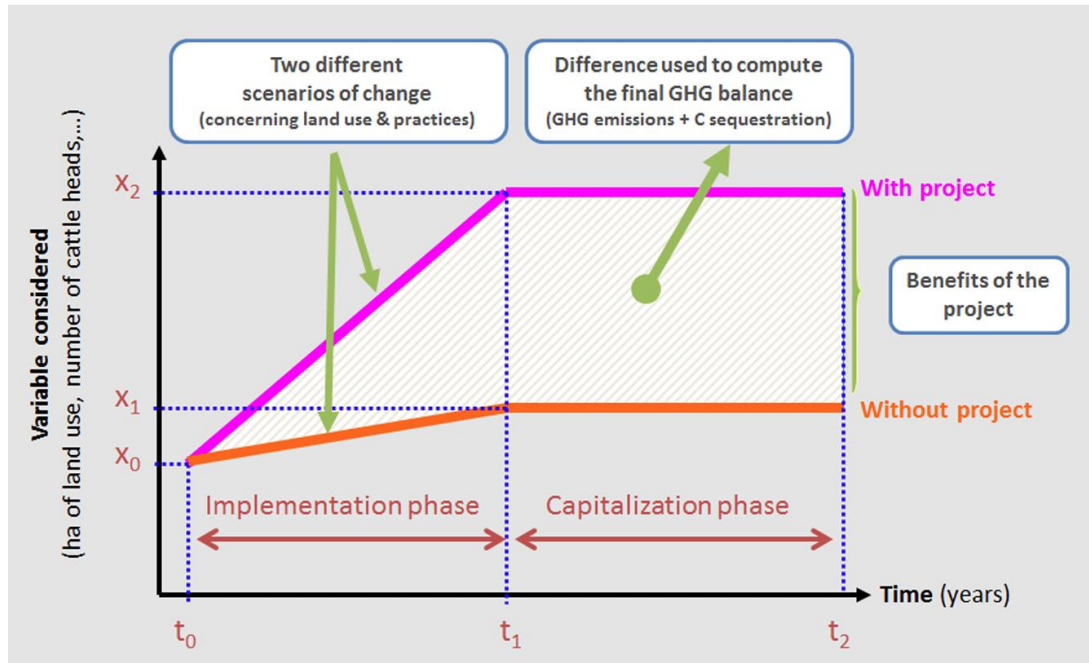


圖 24、土地管理專案執行前後土壤碳匯變化情境圖

首先建立專案範圍，本場址雖然依據人類活動與整治方案，調查先分為 5 區，但 CBP 平台評估面積最小單位須達 1 公頃，故本計畫先將棕色區與紫色區歸屬為同一範圍，因此共計 4 個評估專案範疇(圖 25)，各區分配面積為左上角綠色區約 1 公頃、右上角藍色區約 2 公頃、右下角黃色區約 2 公頃、及左下角棕紫色區域約 1 公頃。依照上述 X0 至 X2 情境共計 40 年，設定每一區土地利用改變情境設定(表 15)，以及初始 X0 的每一區土地利用型態，以藍色區域的原始用地為例，假設原始土地用途為種植水稻(圖 26)，以及確認施肥活動數據與休耕時農業廢棄物處理方式。此外，若種植林木則必須提供農林使用狀況是否有自然演替的情境(如地上物生物質枯萎或損失比例約 2%/yr)、每一年砍伐樹木比例、以及地上物生物質的損失去向是否作為額外生物質燃料使用等(圖 27)。在 CBP 平台可提供多種樹木生長參數資料評估地上生物質量;因此，若初始情境可包含各種土地用途(如林業用地、草地、濕地、畜牧用地)，使用者必須依據各區的不同活動數據輸入，例如本計畫曾在藍色區域有畜牧活動，則必須將畜產養殖種類與頭數輸入並評估產生糞便是否作為額外施肥的土地管理。

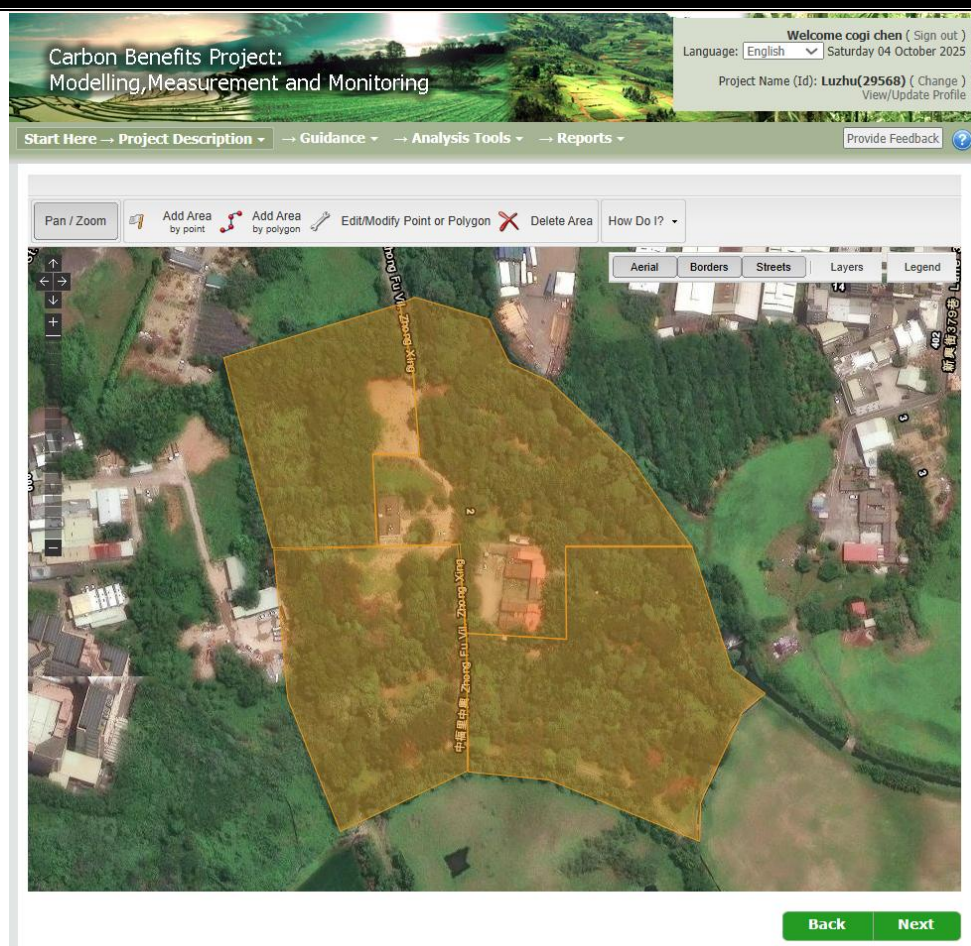


圖 25、本場址執行 CBP 評估範圍圖(本計畫產出)

表 15、各區域 CBP 情境設計表(本計畫產出)

區域	X0 土地利用型態(公頃)	X1 土地利用型態(公頃)	X2 土地利用型態(公頃)
綠色區	農林區(0)	農林區(1)	農林區(1)
藍色區	多年生農地(2)、30 頭鹿	農林區(2)	農林區(2)
黃色區	多年生農地(2)	農林區(2)	農林區(2)
棕紫色區	農林區(1)	農林區(1)	農林區(1)

Start Here → Project Description → Guidance → Analysis Tools → Reports

Provide Feedback ?

1 Initial Land Use ✓ 2 Baseline Scenario ✓ 3 Project Scenario ✓

Agroforestry Stage 2 of 4: Annual Crops

Forestland ✓
Grassland ✓
Settlements ✓
Wetlands ✓
Annual Crops ✓
Perennial Crops ✓
Agroforestry ✓
 Agroforestry Systems ✓
 ▶ Annual Crops ✓
 Tree Age Ranges ✓
 Natural Losses and Wood Removal ✓
Livestock ✓

1 Select Project Activity Area/Group

Project Activity Area Group 2 [2 ha] ✓
[Show Project Activity Areas](#)
(opens in new window)

2 Select an Agroforestry System

cropland

3 Select a cropping system that best describes the crops in your agroforestry system.

Continuous wheat/barley/oats/upland rice Add to table below

4 Describe Selected Annual Cropping Systems

Delete

Annual Crop Name	Improved?	Tillage System*	Amount of N Fertilizer (kg/ha)*	% of nitrogen (N) in fertilizer*	Residue Management*
Continuous wetland rice	☐	Full	130	40	Burned

Save

Back

Next

圖 26、CBP 初始情境多年生農業用地輸入資料(本計畫產出)

Carbon Benefits Project:
Modelling, Measurement and Monitoring

Language: English Saturday 04 October 2025
Project Name (Id): Luzhu(29568) (Change)
View/Update Profile

Start Here → Project Description → Guidance → Analysis Tools → Reports → Provide Feedback

1 Initial Land Use ✓ 2 Baseline Scenario ✓ 3 Project Scenario ✓

Agroforestry Stage 4 of 4: Natural Losses and Wood Removal

Forestland ✓
Grassland ✓
Settlements ✓
Wetlands ✓
Annual Crops ✓
Perennial Crops ✓
Agroforestry ✓
Livestock ✓

Agroforestry Systems ✓
Annual Crops ✓
Tree Age Ranges ✓
► Natural Losses and Wood Removal ✓

1 Select Project Activity Area/Group

Project Activity Area Group 2 [2 ha] ✓ [Show Project Activity Areas](#) (opens in new window)

2 Enter Percent of Aboveground Biomass lost due to Natural Losses Each Year

Agroforestry Systems	Tree Type	Tree Age Range	Number of Trees	Fires (%/yr)	Wind (%/yr)	Pest/Disease (%/yr)	Other Losses (%/yr)
cropland	Leucaena leucocephala	<= 5 years	5	0	0	2	2

3 Enter volume of wood removed by timber harvest, fuel wood gathering, pruning or any other manmade process.

Agroforestry Systems	Tree Type	Tree Age Range	Number of Trees	Timber Harvest (m³/yr)	Fuelwood Gathering (m³/yr)
cropland	Leucaena leucocephala	<= 5 years	5	0	0

4 Enter annual clearing and/or establishment rate if applicable.

New! The CBP team has recently improved how biomass accumulations and losses are modeled in this step. Please click [here](#) for an explanation of those improvements.

Agroforestry Systems	Tree Type	Tree Age Range	Number of Trees	Total Number of Trees Cleared	Total Number of Trees Established/Planted
cropland	Leucaena leucocephala	<= 5 years	5	0	0

圖 27、CBP 初始情境林業用地輸入資料(本計畫產出)

專案無執行情境(X1)與有執行情境(X2)，則依照上述活動數據變化來分別評估場址內的碳匯與碳排放數值，最終產出碳平衡報告。例如藍色區域，本場址於 X1 整治初期至 X2(本計畫調查)種植樹種與數量沒有差異，但因土地與林業管理(人為砍伐)、污染狀況....等因素，可依據樹種損失量輸入參數差異(圖 28 與圖 29)，評估這兩者期間產生固碳量影響;另一方面，本計畫藍色區域從農業水稻種植用地(X0)改為人工植林用地(X1)，這兩者土地用途轉換所造成土壤有機碳變化，也會依據農業用地所輸入施肥類別、耕種類別、及灌溉方式變化，評估整體專案碳平衡影響。

1 Initial Land Use ✓
2 Baseline Scenario ✓
3 Project Scenario ✓

Agroforestry Stage 4 of 4: Natural Losses and Wood Removal

Forestland ✓ +

Grassland ✓ +

Settlements ✓ +

Wetlands ✓ +

Annual Crops ✓ +

Perennial Crops ✓ +

Agroforestry ✓ -

Agroforestry Systems ✓
 Annual Crops ✓
 Tree Age Ranges ✓
► Natural Losses and Wood Removal ✓

Livestock ✓ +

1 Select Project Activity Area/Group

Project Activity Area Group 2 [2 ha] ✓
Show Project Activity Areas
(opens in new window)

2 Enter Percent of Aboveground Biomass lost due to Natural Losses Each Year

Agroforestry Systems	Tree Type	Tree Age Range*	Number of Trees	Fires (%/yr)	Wind (%/yr)	Pest/Disease (%/yr)	Other Losses (%/yr)
artificial planting	Terminalia ivorensis	> 5 and <= 8 years	50	0	0	2	2
artificial planting	Bamboo bamboo	> 5 and <= 8 years	10	0	0	0	0
artificial planting	Leucaena leucocephala	> 5 and <= 8 years	300	0	0	10	10

3 Enter volume of wood removed by timber harvest, fuel wood gathering, pruning or any other manmade process.

Agroforestry Systems	Tree Type	Tree Age Range*	Number of Trees	Timber Harvest (m³/yr)	Fuelwood Gathering (m³/yr)
artificial planting	Terminalia ivorensis	> 5 and <= 8 years	50	0	0
artificial planting	Bamboo bamboo	> 5 and <= 8 years	10	0	0
artificial planting	Leucaena leucocephala	> 5 and <= 8 years	300	0	0

4 Enter annual clearing and/or establishment rate if applicable.

New! The CBP team has recently improved how biomass accumulations and losses are modeled in this step. Please click [here](#) for an explanation of those improvements.

Agroforestry Systems	Tree Type	Tree Age Range*	Number of Trees	Total Number of Trees Cleared	Total Number of Trees Established/Planted
artificial planting	Terminalia ivorensis	> 5 and <= 8 years	50	2	2
artificial planting	Bamboo bamboo	> 5 and <= 8 years	10	0	0
artificial planting	Leucaena leucocephala	> 5 and <= 8 years	300	0	0

Save
Back
Finished

圖 28、CBP 基本情境林業用地輸入資料(本計畫產出)

1 Initial Land Use ✓

2 Baseline Scenario ✓

3 Project Scenario ✓

Agroforestry Stage 4 of 4: Natural Losses and Wood Removal

Forestland ✓

Grassland ✓

Settlements ✓

Wetlands ✓

Annual Crops ✓

Perennial Crops ✓

Agroforestry ✓

Agroforestry Systems ✓

Annual Crops ✓

Tree Age Ranges ✓

► Natural Losses and Wood Removal ✓

Livestock ✓

1 Select Project Activity Area/Group

Project Activity Area Group 2 [2 ha] ✓

[Show Project Activity Areas](#)
(opens in new window)

2 Enter Percent of Aboveground Biomass lost due to Natural Losses Each Year

Agroforestry Systems	Tree Type	Tree Age Range*	Number of Trees	Fires (%/yr)	Wind (%/yr)	Pest/Disease (%/yr)	Other Losses (%/yr)
artificial planting	Terminalia ivorensis	> 8 and <= 30 years	50	0	0	0	0
artificial planting	Bamboo bamboo	> 8 and <= 30 years	10	0	0	0	0
artificial planting	Leucaena leucocephala	> 8 and <= 30 years	300	0	0	2	2

3 Enter volume of wood removed by timber harvest, fuel wood gathering, pruning or any other manmade process.

Agroforestry Systems	Tree Type	Tree Age Range*	Number of Trees	Timber Harvest (m³/yr)	Fuelwood Gathering (m³/yr)
artificial planting	Terminalia ivorensis	> 8 and <= 30 years	50	0	0
artificial planting	Bamboo bamboo	> 8 and <= 30 years	10	0	0
artificial planting	Leucaena leucocephala	> 8 and <= 30 years	300	0	0

4 Enter annual clearing and/or establishment rate if applicable.

New! The CBP team has recently improved how biomass accumulations and losses are modeled in this step. Please click [here](#) for an explanation of those improvements.

Agroforestry Systems	Tree Type	Tree Age Range*	Number of Trees	Total Number of Trees Cleared	Total Number of Trees Established/Planted
artificial planting	Terminalia ivorensis	> 8 and <= 30 years	50	0	0
artificial planting	Bamboo bamboo	> 8 and <= 30 years	10	0	0
artificial planting	Leucaena leucocephala	> 8 and <= 30 years	300	0	0

Save

Back

Finished

圖 29、CBP 專案情境林業用地輸入資料(本計畫產出)

計畫執行期間因 BP 平台內部資料庫更新而無法產出報告;因此，本計畫先以 EX-ACT 評估呈現結果，污染土地公告後土地利用型態改變，且經由植生復育的低密度人為維護，顯示 40 年期間可以減緩 1,827 噸 CO₂e (Carbon Sink)潛力(圖 30)，從圖 31 評估報告顯示，可知土地利用變化產生碳減緩貢獻最為顯著，尤其來自於多年生林相的地上生物質固碳潛力(1,681 t CO₂e)，及農轉林與畜牧所減少甲烷排放量(383t CO₂e)，土地因長時間專案管理造成部分土壤有機碳流失，但整體而言透過土地利用改變形成場址具有負碳的環境型態，有助於土壤碳匯增加，估計 7.6 t CO₂e/ha/y(約為 2.1 t C/ha/y)，未來建議可更精確調查與活動數據更新，以利碳匯數據具有查證效力。

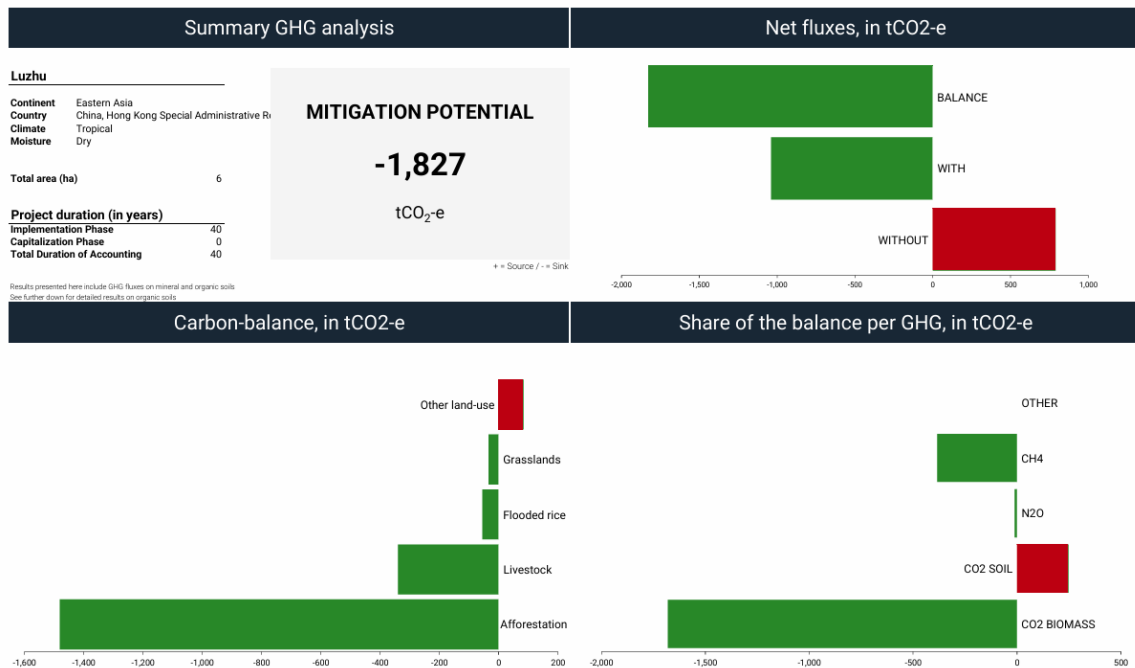


圖 30、場址碳匯潛力評估結果(本計畫產出)

DETAILED RESULTS									
Project name Luzhu		Project duration (in years)		Total area (ha)		Global warming potential			
Continent Eastern Asia		Implementation Phase 40		Mineral soil 6		CO ₂	1		
Country China, Hong Kong Special Administrative Region		Capitalization Phase 0		Organic soil 0		CH ₄	28		
Climate Tropical		Total Duration of Accounting 40		Waterbodies 0		N ₂ O	265		
Moisture Dry									
GROSS FLUXES					SHARE PER GHG OF THE BALANCE				AVERAGE ANNUAL EMISSIONS
In tCO ₂ -e over the whole period analysis					In tCO ₂ -e over the whole period analysis				In tCO ₂ -e/yr
PROJECT COMPONENTS	WITHOUT	WITH	BALANCE		CO₂ BIOMASS	CO₂ SOIL	N₂O	CH₄	ALL NON-AFOLU EMISSIONS*
Land use changes	0	0	0		0	0	0	0	0
Deforestation	0	-1,481	-1,481		-1,683	202	0	0	-37
Afforestation	0	83	83		2	81	0	0	2
Other land-use	0	0	0		0	0	0	0	0
Cropland	0	0	0		0	0	0	0	0
Perennial	0	0	0		0	0	0	0	0
Flooded rice	110	55	-55		0	0	-11	-44	-1
Grasslands	0	-34	-34		0	-34	0	0	-1
Livestock	679	340	-340		0	0	0	-340	-8
Forest mngt.	0	0	0		0	0	0	0	0
Inland wetlands	0	0	0		0	0	0	0	0
Coastal wetlands	0	0	0		0	0	0	0	0
Fisheries and aquaculture	0	0	0		0	0	0	0	0
Inputs & Invest.	0	0	0		0	0	0	0	0
Total emissions, tCO₂-e	789	-1,038	-1,827		-1,681	248	-11	-383	0
Total emissions, tCO₂-e/ha	131.5	-173.0	-304.5		-280.1	41.3	-1.8	-63.9	0.0
Total emissions, tCO₂-e/ha/yr	3.3	-4.3	-7.6		-7.0	1.0	0.0	-1.6	0.0
Results presented here include GHG fluxes on mineral and organic soils. See further down for detailed results on organic soils.					Tier 2 Specific GHG fluxes				Tier 2 Annual emissions
* Includes fisheries, aquaculture and inputs & investments that are not included in the AFOLU definition.					In tCO ₂ -e/yr				
					WITHOUT	WITH	BALANCE		
					20	-26	-46		
					Uncertainty level	IC02-e/yr	Percent		
					WITHOUT	20	32%		
					WITH	-26	26%		
					BALANCE	-46	26%		

圖 31、場址碳匯潛力各項評估結果差異分析(本計畫產出)

台灣在積極推動污染土地整治下，至 2024 年底雖已累計解除 8556 筆場址管制，但場址因土地整合、經濟誘因及污染責任等因素，仍有許多污染土地未解列。過去，土地整治主要以成本與價值為核心，並未考量土地的永續功能或友善活化策略，導致部分無價值或整治成本過高的土地被遺棄或未妥善整治。根據本計畫統計管制面積超過 1 公頃且閒置 5 年以上的尚未解列的污染場址，發現 77% 為私有地，18% 為公有地，大部分污染土地多面臨產權複雜，開發困難等問題。台灣在實施《國土計畫法》後，閒置污染土地有 45% 位於城鄉發展地區、40% 位於農業發展地區、15% 尚未歸類，這些土地一旦劃定後，短期無法變更土地用途。尤其農業發展區的污染土地，適合以自然為本的農作物來推動活化，如碳匯種植。儘管自然植生復育技術已推行多年，學術研究仍缺乏植生復育對碳儲存影響因子的數據，在碳匯參數的資料庫建置不足情況下，影響長期土壤有機質（SOCs）的變化評估。基於上述國內外碳匯專案發展研析，本計畫提出以下建議：

1. **建構污染土地碳匯分層評估程序：**根據污染土地區位(國土功能分區)、土壤特性及污染類型，建立分層碳匯評估方法與程序，並推動自然為本的污染土地活化試驗區。
2. **建立監測機制與透明風險管理平台：**整合土地管理機關、研究單位與地方政府的資料，根據評估方法學探討不同植物與自然整治方法對碳匯影響的因子及風險，建立記錄 SOC 變化與風險數據的平台，提升風險管理的可信度與接受度，以及降低土壤碳釋放風險。
3. **土地治理政策鬆綁與法規整合：**結合國土計畫規範，針對低活化誘因的污染土地，制定更彈性的土地活化規則，例如土地取得與整合、碳權抵換、土地稅金減免或整治基金繳納調整等機制。
4. **建立創新「碳匯合作治理模式」：**設計具誘因的碳匯合作平台，如發展污染土地-碳匯合作社模式，通過收益共享機制，整合地主、整治單位與當地居民參與碳市場，減少土地產權複雜性對專案推動的限制。
5. **跨域合作與創新評估工具：**整合土地治理、環境科學、碳管理及農業技術領域的專家，利用地理資訊系統（GIS）與大數據分析，開發碳匯效益評估工具，提升地主及利害關係人參與碳市場的可行性。

陸、參考文獻

- [1] Sides, T. (2024, June 28). The carbon credit lifecycle explained. Carbon Direct.
<https://www.carbon-direct.com/insights/the-carbon-credit-lifecycle-explained>.
- [2] Saunders, J., Akhouri, U., Turner, G., & Lambert, J. (2025, January 6). Frozen carbon credit market may thaw as 2030 gets closer. MSCI. <https://www.msci.com/research-and-insights/blog-post/frozen-carbon-credit-market-may-thaw-as-2030-gets-closer>
- [3] Frost & Sullivan. (n.d.). Carbon markets: Trends and growth opportunities. Frost & Sullivan. Retrieved from <https://store.frost.com/carbon-markets-trends-and-growth-opportunities.html>
- [4] Quantum Commodity Intelligence, Carbon price assessment.
- [5] Reccessary. (2024, February 6). Microsoft buys soil carbon storage credits from nature-based startup. <https://www.reccessary.com/en/news/world-environment/microsoft-buys-soil-carbon-storage-credits-nature-based-startup>
- [6] Reuters. (2025, January 16). Google signs deal to buy carbon removal credits from Indian farms. <https://www.reuters.com/technology/google-signs-deal-buy-carbon-removal-credits-indian-farms-2025-01-16/>
- [7] Verra. (2025). Verra Registry – Verified Carbon Standard (VCS). Verra.
<https://registry.verra.org/app/search/VCS>
- [8] Verra. (2024). Bamboo King Vina Biochar Project (Project ID 5108). Verra Registry.
<https://registry.verra.org/app/projectDetail/VCS/5108>
- [9] VCS, (2023). Methodology for Improved Agricultural Land Management.
<https://verra.org/methodologies/vm0042-methodology-for-improved-agricultural-land-management-v2-0/>
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 5: Cropland. IPCC.
- [11] Peralta, G., Di Paolo, L., Luotto, I., Omuto, C., Mainka, M., Viatkin, K., & Yigini, Y. (2022). Global soil organic carbon sequestration potential map (GSOCseq v1.1) – Technical manual. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
<https://doi.org/10.4060/cb2642en>
- [12] Naylor, D., Sadler, N., Bhattacharjee, A., Graham, E. B., Anderton, C. R., McClure, R., Lipton, M., Hofmockel, K. S. and Jansson, J. K. (2020). Soil microbiomes under climate change and implications for carbon cycling. Annual Review of Environment and Resources,

45, 29–59.

- [13] Zhao, X., Liu, Y., Xie, L., Fu, X., Wang, L., Gao, M.-T., & Hu, J. (2024). Biochar promotes microbial CO₂ fixation by regulating feedback inhibition of metabolites. *Bioresource Technology*, 406, 130990.
- [14] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb0509en>
- [15] Gyawali, A. J., Wiseman, M., Ackerson, J. P., Coffman, S., Meissner, K., & Morgan, C. L. (2025). Measuring in situ soil carbon stocks: A study using a novel handheld VisNIR probe. *Geoderma*, 453, Article 117152. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117152>
- [16] 環境部。溫室氣體自願減量暨抵換資訊平台。
- [17] 行政院農業委員會水土保持局。(2022)。水土保持物種固碳量評估方法與公式。行政院農業委員會水土保持局。
- [18] Yan, Z.-X., Li, Y., Peng, S.-Y., Wei, L., Zhang, B., Deng, X.-Y., Zhong, M., & Cheng, X. (2024). Cadmium biosorption and mechanism investigation using two cadmium-tolerant microorganisms isolated from rhizosphere soil of rice. *Journal of Hazardous Materials*, 470, Article 134134. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134134>
- [19] Ma, B., Song, W., Zhang, X., Chen, M., Li, J., Yang, X., & Zhang, L. (2023). Potential application of novel cadmium-tolerant bacteria in bioremediation of Cd-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 255, 114766. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114766>
- [20] Global Environment Facility. (n.d.). Who we are. Retrieved from <https://www.thegef.org/who-we-are>
- [21] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Suite of tools — Economic and Policy Analysis of Climate Change: EX-ACT tool. Retrieved from <https://www.fao.org/in-action/epic/ex-act-tool/en/>
- [22] 桃園縣政府環境保護局。(2013)。桃園縣農地土壤污染控制場址現況調查暨後續管理方式評估計畫：期末報告。傑美環境工程顧問股份有限公司。