
建立坡地農塘碳匯評估模式之研究
Creating a Model to Assess Carbon
Sink in Hillside Agricultural Ponds
成果報告

執行單位：國立中興大學

執行期間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：林昭遠 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)

摘要

自然碳匯是實現農業部門 2040 年淨零碳排的重要策略。濕地為其中重要土地類型，而農塘亦是濕地中備受關注之一，透過「植物行光合作用」及「集水區的土壤侵蝕和枯枝葉的運移」兩種主要途徑，累積土壤碳庫，是陸域中土壤碳密度最高的生態系統。儘管我國已有濕地的本土數據和估算公式，但基於 IPCC 方法學建立農塘因土壤中流失而累積碳的估算模型，仍在研究及實務應用上存在空白。

本研究通過瞭解集水區陸源物質遷移過程和土壤碳儲存量，估算因土壤流失累積之碳匯量。以濁水溪流域為樣區，應用風險概念結合環境指標建立泥砂產量評估之空分布模型。坡面泥砂產量指標(SY_{nSP})與實際輸砂量(S)之統計分析，兩者之間具有高度相關性($S = 9E+07 SY_{nSP}^{0.4744}$, $R^2 = 0.95$, $p < 0.01$)。為掌握現況坡地農塘範圍與圖資，本研究以南投竹山鎮作為主要分析範圍，透過 Pleiades 高解析度衛星影像建立萃取流程，以減輕人力調查作業的負擔。透過「泥砂產量推估模式」、「農塘集水區之土壤碳存量」及「農塘因砂率」，建立農塘土壤碳匯評估概念模式，用於評估每個坡地農塘年土壤碳匯量。

透過本研究建立之農塘土壤碳匯評估概念模式，估計農塘年土壤碳匯量(C-ton/ha/yr)，濁水溪流域高碳匯潛力之農塘土壤碳匯量介於 5.06 至 28.9 C-ton/ha/yr 之間，具體確立及量化農塘在碳循環中所扮演的關鍵角色及適用於台灣農塘之增匯減排操作原則。在未來的坡地永續農業發展管理中，強化土壤碳匯的重要性，並在農塘定期清淤策略中考量碳封存效益，以避免土壤中有機碳的重新釋放，為農業部門邁向淨零碳排放目標奠定基礎。

【關鍵詞】淨零碳排、陸源物質、自然碳匯、土壤流失量、土壤碳匯

Abstract

Natural carbon sinks are a key strategy for achieving net-zero carbon emissions in the agricultural sector by 2040. Wetlands are a significant land type for natural carbon sinks, and agricultural ponds, as a subtype of wetlands, are also gaining attention. Through two main pathways—“plant photosynthesis” and “the transport of eroded soil and organic debris from catchment areas”—wetlands accumulate soil carbon, making them terrestrial ecosystems with the highest soil carbon density. Although Taiwan has developed local data and estimation formulas for wetland carbon sinks, there remains a gap in research and practical application for establishing IPCC-compliant models to estimate carbon accumulation in agricultural ponds due to soil erosion.

This study estimates carbon sequestration potential from soil erosion accumulation by examining the transport processes of terrestrial materials and soil carbon storage within catchment areas. Using the Zhuoshui River watershed as the study area, we applied risk-based concepts combined with environmental indicators to develop a spatial distribution model for sediment yield evaluation. The statistical analysis of the slope sediment yield index (SY_{nSP}) and actual sediment load (S) revealed a high correlation between the two ($S = 9E+07 \cdot SY_{nSP}^{0.4744}$, $R^2 = 0.95$, $p < 0.01$). To acquire current data on sloped agricultural ponds, we focused on Nantou's Zhushan Township and utilized high-resolution Pleiades satellite imagery to develop an extraction workflow, significantly reducing manual survey efforts. Using the “sediment yield estimation model,” “soil carbon storage in pond catchments,” and “pond sediment retention rate,” we estimated the annual soil carbon sequestration of agricultural ponds (C-ton/ha/yr). The soil carbon sequestration potential of high-performing ponds in the Zhuoshui River watershed ranged from 5.06 to 28.9 C-

ton/ha/yr.

The conceptual model for agricultural pond soil carbon sequestration developed in this study can be used to evaluate the annual soil carbon sequestration for each sloped agricultural pond, concretely establishing and quantifying the critical role of agricultural ponds in the carbon cycle. This model provides best practices for increasing carbon sequestration and reducing emissions for agricultural ponds in Taiwan. In future sustainable management of sloped agricultural areas, it is essential to strengthen soil carbon sinks and consider carbon sequestration benefits in regular pond dredging strategies to prevent the re-release of organic carbon, laying the foundation for achieving net-zero carbon emissions in the agricultural sector.

Keywords: Net-zero carbon emissions, terrestrial materials, natural carbon sinks, soil erosion rate, soil carbon sink

目次

摘要	I
Abstract.....	III
目次	V
表次	VII
圖次	IX
第一章 緒論	1-1
第一節 前言	1-1
第二節 計畫工作項目及內容	1-3
第三節 計畫甘特圖	1-4
第二章 工作執行方法與流程	2-1
第三章 農塘土壤碳匯相關研究文獻蒐集與彙整	3-1
第一節 農塘碳匯定義	3-1
第二節 農塘在碳循環中扮演的角色和其生態功能	3-7
第三節 影響溼地土壤增匯管理方式	3-9
第四章 土壤碳存量估算與調查標準方法	4-1
第一節 IPCC 估算層級與基本估算方法	4-1
第二節 土壤碳存量調查標準方法	4-4
第三節 台灣土壤調查資料	4-8
第五章 應用多元衛星影像輔助判釋坡地農塘盤查與更新	5-1
第一節 坡地農塘萃取流程	5-1
第二節 坡地農塘萃取成果	5-13
第六章 坡地農塘土壤碳匯評估概念模式建置	6-1
第一節 農塘土壤碳匯評估概念	6-1
第二節 研究樣區	6-2

第七章 坡地農塘土壤碳匯評估概念模式	7-1
第一節 坡地農塘土壤碳匯評估模式	7-1
第二節 坡地農塘土壤碳匯評估成果	7-6
第八章 結論與建議	8-1
參考文獻.....	參 1
附錄	
附錄一、農塘現場勘查紀錄表	附-1
附錄二、初稿審查單暨回覆辦理情形	附-27
附錄三、期中審查單暨回覆辦理情形	附-29
附錄四、期末成效評核表之審查意見暨回覆辦理情形	附-33
附錄五、國內研討會發表成果	附-37

表次

表 1-1 工作進度時程表	1-4
表 1-2 計畫執行檢核表	1-5
表 3-1 IPCC 提供土地類型分類標準(IPCC, 2006)	3-2
表 3-2 全球濕地包含湖泊、池塘、水庫及河流等不同類型之溫室氣體 通量之調查結果	3-10
表 4-1 土壤有機碳庫參考值(單位: C-ton/ha, 表層至地下 30 公分深)	4-2
表 4-2 台灣土壤之研究調查相關的報告(彙整自林試所研究報告)	4-7
表 4-3 台灣森林土壤碳存量調查成果	4-15
表 4-4 以林地氣候生態分區及土地利用類別圖製成之土壤碳庫單元	4-16
表 6-1 濁水區流域內農塘點位(依農塘面積大小排序前 15 名).....	6-4
表 6-2 竹山氣象站之溫度與濕度資料 (2013~2022).....	6-6
表 6-3 氣候區與生態區分區標準(FAO, 2001).....	6-7
表 6-4 崩塌深度估計參考表(Khazai and Sitar, 2000).....	6-25
表 6-5 崩塌地面積及崩塌量體估算	6-28
表 6-6 不同時期對應各流量與輸砂狀況	6-30
表 6-7 各年實測泥砂產量與之結果	6-32
表 7-1 篩選農塘之農塘碳匯成果	7-9

圖次

圖 1-1 計畫成員組成	1-5
圖 2-1 研究流程	2-1
圖 3-1 「內政部」列管濕地與「農村水保署」調查之農塘	3-5
圖 3-2 苗栗平興村大埤滯洪農塘改善工程	3-12
圖 3-3 日本永久淤泥儲存庫操作示意圖	3-13
圖 4-1 美國土壤分類系統	4-8
圖 4-2 12 種土綱土壤化育程度與環境因子(Birkeland,1999)	4-12
圖 4-3 全球土壤土綱分類	4-13
圖 4-4 全台土壤分類(圖片來源:農試所(2003))	4-13
圖 4-5 濁水溪流域第四次森林資源調查林型結果	4-17
圖 4-6 森林土壤碳庫單元圖	4-17
圖 5-1 坡地農塘萃取流程	5-1
圖 5-2 農村水土保持署多元遙測影像申購模組	5-5
圖 5-3 衛星影像多光譜原理	5-6
圖 5-4 地真與 NDWI 分析值	5-8
圖 5-5 地真與影像分類成果	5-11
圖 5-6 窪蓄區位萃取	5-13
圖 5-7 農塘細部勘查紀錄表 1	5-15
圖 5-8 農塘細部勘查紀錄表 2	5-16
圖 5-9 竹山鎮農塘總判釋結果	5-17
圖 5-10 竹山鎮農塘範圍重繪判釋結果	5-18
圖 5-11 竹山鎮新增水體判釋結果	5-18
圖 5-12 類型一與類型二分析案例成果	5-20

圖 5-13 類型三分析案例成果	5-22
圖 5-14 類型四與類型五分析案例成果	5-24
圖 6-1 陸源物質有機碳之運移過程	6-1
圖 6-2 濁水河流域範圍	6-3
圖 6-3 濁水區流域內農塘點位	6-4
圖 6-4 竹山氣象站之月雨量及降雨日數(2013~2022)	6-6
圖 6-5 流域氣候及生態區劃分結果	6-8
圖 6-6 濁水溪集水區徐昇式多邊形控制面積	6-12
圖 6-7 TCCIP 產製全台網格化資料	6-13
圖 6-8 各年雨量成果	6-15
圖 6-9 NDVI 值域與地覆之對照圖	6-16
圖 6-10 各年 GDI 成果	6-19
圖 6-11 地形濕度指標概念	6-20
圖 6-12 nTWI 空間分布	6-21
圖 6-13 泥砂遞移率概念	6-22
圖 6-14 SDR 空間分布	6-23
圖 6-15 崩塌地量體推估示意圖	6-25
圖 6-16 崩塌體積相關分析(莊智瑋 2010)	6-26
圖 6-17 各年崩塌地成果	6-27
圖 6-18 河川輸砂率定曲線(彰雲橋 83 年至 111 年)	6-29
圖 6-19 坡面泥砂產量指標與實測懸移載輸砂量之統計關係	6-32
圖 6-20 坡面泥砂產量指標與實測坡面輸砂量之統計關係	6-33
圖 6-21 彰雲橋集水區年泥砂產量空間分布	6-34
圖 6-22 彰雲橋集水區年土壤流失深度空間分布	6-34
圖 7-1 集水區自動劃分之架構(林文賜等，2006)	7-2

圖 7-2 排序 1 農塘集水區萃取	7-3
圖 7-3 排序 2 農塘集水區萃取	7-4
圖 7-4 排序 3 農塘集水區萃取	7-5
圖 7-5 排序一 農塘蓄水範圍及集水面積	7-7
圖 7-6 排序一 農塘集水面積之泥砂產量分布	7-7
圖 7-7 排序一 農塘集水面積之土壤碳存量分布	7-8

第一章 緒論

第一節 前言

因應 2050 淨零碳排目標，各部會提出淨零排放與策略，農業部率先宣示 2040 年農業部門達成農業淨零排放的目標。該目標以「減量」、「增匯」、「循環」及「綠趨勢」四大主軸為基礎，明確列出 19 項策略和 59 項措施。其中，自然碳匯是用以抵銷碳排放、達到淨零碳排放的關鍵方法。

根據《聯合國氣候變化綱要公約》及《京都議定書》的相關規範，各會員國應按照 IPCC 國家溫室氣體清冊指南的統計方法，逐年更新並彙編「國家溫室氣體清冊報告」。自然碳匯是淨零碳排放中以自然解決方案（Nature-based Solutions, NbS）為重要策略之一，也是國家溫室氣體清冊組成的重要部分。了解土地利用與碳循環過程，並盤點其碳庫存與碳匯量，是實現碳中和的前提。

坡地農塘被歸類為 IPCC 六大土地類型中的「濕地」。濕地生態系統之溫室氣體排放與清除涉及生物地質化學循環(Biogeochemical Cycle)，在過程中將大氣中二氧化碳固定並將其移至不同的碳庫。陸域生態系統主要依賴植物的光合作用來吸存碳，轉換為生物量、分解為枯有機物和土壤有機碳。碳自源頭、路徑，最終在沉池中永久或暫時沉積，是集水區陸源物質運移的過程。濕地集水區因「土壤侵蝕或樹葉和樹木殘骸的移動」而累積的碳，對濕地的碳存量至關重要(Kusler and Christie, 2011)。

農塘不僅具穩定灌溉「藏水於農」之功能，同時也是孕藏豐富碳資源，可加以實現「藏碳於農」之概念。計算農塘的自然碳匯，對碳中和的貢獻量不容忽視，這同時為農村水保署提供更多元的淨零碳排目標與調適策略。農塘在低碳轉型中肩負著重要角色，並有助於實踐以自然為本的解決方案，推動淨零策略的實現。

本研究以濁水溪流域範圍內的坡地農塘作為研究區域，建立集水區土壤碳匯評估概念模型。透過多元衛星影像，應用影像萃取技術輔助判釋坡地地表水分布，並結合數值地形模型進行校正，萃取坡地農塘的空間分布。藉由了解集水區土壤流失過程與土壤碳存量，估算陸源物質在坡地農塘中累積的碳匯量。該模型為簡易碳匯計算提供基礎，用於評估坡地農塘區位的土壤碳匯量。

研究成果有助於確立坡地農塘在碳匯中的角色，並為制定淨零碳排放策略提供實務操作的參考。這不僅加強對碳匯貢獻的理解，也為農村水保署的低碳轉型和以自然為本的解決方案提供實務操作參考。

第二節 計畫工作項目及內容

一、農塘碳匯與土壤碳相關研究文獻蒐集與彙整

依據 IPCC 國家溫室氣體指南與國際學者的研究，針對農塘或濕地之自然碳匯相關估算方法、基本假說及常見「挖除淤泥」之維護管理方式及「不同類型」農塘，對於農塘碳匯之影響，進行文獻回顧與彙整。同時，蒐集台灣土壤調查圖資，包含土壤性質、有機質與碳含量等相關資料，建立本研究坡地農塘土壤碳匯評估概念模式的基礎參考。

二、應用多元衛星影像輔助判釋農塘盤查與更新

透過多元衛星影像，應用影像萃取技術以輔助判釋坡地地表水分布，並配合數值地形模型(Digital Elevation Model, DEM)輔助進行校正，以萃取坡地農塘空間分布。同時，結合農村發展及水土保持署(本報告以下簡稱為:農村水保署)既有的農塘調查資料和分布圖資進行驗證，定期更新坡地農塘的監測與管理，簡易評估潛在農塘之區位與可蓄水面積等資訊。

三、農塘土壤碳匯評估概念模式建置

本研究基於「碳循環(Carbon Cycle)」與「集水區陸源物質運移」之概念，透過對土壤運移過程之瞭解，建置坡地農塘土壤碳匯評估概念模式，用於估算坡地農塘因集水區之土壤侵蝕或有機質遷移而匯集之碳匯(C-ton/ha/yr)，並探討估計值之合理性與適用性。透過農塘泥砂產量推估模式，產出可評估清淤頻率與維護管理經費之量化數據。

四、農塘碳匯評估與淨零貢獻量

因應農村低碳轉型並實踐以自然解方之淨零策略，農塘不僅具「藏水於農」之功能，同時也是孕藏豐富碳資源，可實踐「藏碳於農」之概念。提供農村水保署簡易碳匯計算模式，量化農塘碳匯數據。

第三節 計畫甘特圖

本計畫之工作進度與時程如表 1-1 所示，自計畫核定日起至一百一十三年十二月三十一日止(星期日、國定假日或其他休息日均計入)完成。其中評核標準，如表 1-2 所示，本案研究進度依擬訂之研究進度進行，並已完成整年度研究項目。

本計畫由國立中興大學林昭遠教授為計畫主持人，負責管理專案執行、決策及溝通，並依工作內容分別為 3 個分組，分別為大數據蒐集組、模式研析組及實務規劃與現地勘查小組。本計畫農塘勘查，由具土木、水利專長近 30 年實務規劃經驗之集璟工程顧問有限公司作為協力廠商，對農塘型式、尺寸、現況使用情形及蓄水來源進行野外調查評估工作。

為確保本計畫各工作作業順遂及品質之管理，各組在分工合作之餘，尚隨時保持橫向聯繫與討論，計畫主持人及研究助理亦可視情況而機動賦予各組任務。工作團隊組織如圖 1-1 計畫成員組成圖 1-1 所示。

表 1-1 工作進度時程表

計畫內容 \ 時程	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
壹、農塘碳匯與土壤碳相關研究文獻蒐集與彙整														
貳、應用多元衛星影像輔助判釋農塘盤查與更新														
參、農塘土壤碳匯評估概念模式建置														
肆、農塘碳匯評估與淨零貢獻量														
報告撰寫														
期中考評														
期末考評														
成果報告														
預訂進度累計百分比(%)	10	15	25	35	40	60	70	80	90	95	100			

查核點	預定完成時間	查核點內容說明
計畫修正書	113/3	工作執行構想與內容修正。
期中報告	113/7	完成(參)工作項目1~3項，部份完成(參)工作項目4項。
成果報告	113/12	完成合約所有工作項目。

表 1-2 計畫執行檢核表

項次	工作項目	對應章節	總計畫進度
壹	農塘碳匯與土壤碳相關研究文獻蒐集與彙整	第三章、第四章	100%
貳	應用多元衛星影像輔助判釋農塘盤查與更新	第五章	100%
參	農塘土壤碳匯評估概念模式建置	第六章	1000%
肆	農塘碳匯評估與淨零貢獻量	第七章	100%



圖 1-1 計畫成員組成

第二章 工作執行方法與流程

本研究針對「影像判釋地表水」、「自然碳匯估算方法和基本假說」及「土壤碳匯調查」進行文獻回顧，並蒐集各機關產製之資料，包含農塘區位、土壤調查圖資(包含土壤性質、有機質和碳含量)，以及樣區基本資料等相關資訊，作為建立本研究坡地農塘土壤碳匯評估概念模式的基礎參考。

應用多元衛星影像及地形分析輔助判釋現況坡地農塘之空間分布，結合農村水保署既有的農塘分布圖資建立更新方式。基於碳循環和集水區陸源物質運移的概念，建立坡地農塘碳匯評估概念模式，用於估算坡地農塘因集水區的土壤侵蝕或有機質遷移而匯集的碳匯量(C-ton/ha/yr)。透過量化農塘對碳中和抵減之貢獻量，提供有利相關參考數據。本研究之研究流程如圖 2-1 所示。

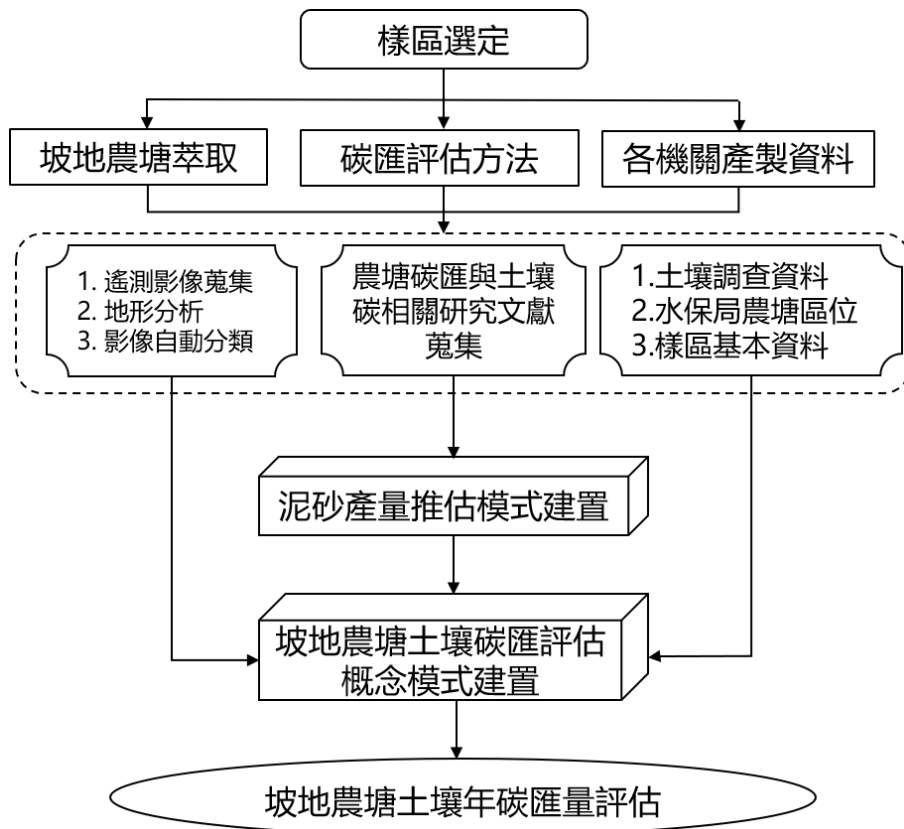


圖 2-1 研究流程

第三章 農塘土壤碳匯相關研究文獻蒐集與彙整

第一節 農塘碳匯定義

本節針對 IPCC 之國家溫室氣體清冊指南中，關於自然碳匯的定義與類型進行文獻回顧，並比較國內權責部會對於農塘之土地類型之功能定義、調查成果及面積掌握情況進行探討。

一、IPCC 自然碳匯定義與類型

依據《聯合國氣候變化綱要公約》等相關規範，由政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, 簡稱為 IPCC)編訂之《IPCC 國家溫室氣體清冊指南》，旨在具體了解各國溫室氣體排放及移除的統計情況與變化趨勢。指南經過逐年精進與修訂，並提供擴充估算方法和良好且一致的指導方針。

目前最新版本為 2019 年 IPCC 指南國家溫室氣體清冊 (2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)，該版本並未完全修訂 2006 年 IPCC 指南，而是進行更新與補充。2019 年指南的主要目的是在不改變 2006 年指南的基礎上，對新興技術方法和數據進行改進，以反映最新的科學知識和技術進展。

根據 2006 年 IPCC 國家溫室氣體清冊指南的統計方法(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories，以下簡稱 2006 IPCC 指南)，逐年更新彙編「中華民國國家溫室氣體清冊報告」，清冊共分為五大部門統計溫室氣體排放與移除，分別為「能源部門」、「工業製程及產品使用部門」、「農業部門」、「土地利用、土地利用變化及林業部門 (LULUCF)」及「廢棄物部門」。其中「土地利用、土地利用變化及林業部門 (LULUCF)」，主要屬於自然碳匯之範疇，依 IPCC 估算指南標準，將所有土地劃分為六大土地類型(表 3-1 所示)，

分別為「林地 F」、「農地 C」、「草地 G」、「濕地 W」、「聚居地 S」及「其他用地 O」，以避免重覆計算問題。

表 3-1 IPCC 提供土地類型分類標準(IPCC, 2006)

土地類型	範疇定義
林地 F	符合國家溫室氣體清冊林地門檻值及國家定義林地類型的基礎。(面積大於 0.5 公頃，樹高 5 公尺以上，樹冠覆蓋率 10%以上，或於原生育地之林木成熟後符合前述條件，但不包括主要為供農作與都市使用之土地)。
農地 C	農業用地，含稻田和植被結構低於林地門檻值的農林系統。
草地 G	不被視為農田的牧場和牧草地。門檻值低於林地基準值的木本植被和其他無草植被系統，如草本和灌木。所有由荒地改造成用於休閒的草地以及符合國家定義的農業和森林牧場系統。
濕地 W	泥炭採掘地區和全年或部分時間被水覆蓋或充滿水的土地，但不屬於林地、農田、草地或聚居地類別。作為有管理的水庫及未管理的天然河川及湖泊。
聚居地 S	所有已開發的土地，如交通基礎設施和任何規模的人類聚居地，除非他們已列入其他類型，需與國家定義一致。
其他用地 O	裸土、岩石、冰川和不屬於其他五個類別的土地。可以透過確定土地類型與國家總面積關係獲得。

備註：各國可依據自有的土地類型定義進行劃分。

根據指南，各國可以根據自身的土地類型定義進行劃分，並且在這六大類型下進行細分。例如，濕地可以細分為沼澤、泥炭地、河流和湖泊等不同亞類型。這樣的細分有助於更準確地估算各種土地類型的碳匯能力，但相對地要付出一定調查成本。

土地類型和管理方式會影響生態系統過程，進而對溫室氣體流量產生影響。六大土地類型係依其在三大碳庫(生物量、枯有機質與土壤)上之明顯差異作為分類依據。這些分類有助於理解和管理不同土

地類型對碳匯和溫室氣體排放的貢獻。

「林地 F」：是以生物量之碳庫為主之土地類型，林地的碳儲存主要集中在樹木的生物量中，樹木通過光合作用吸收大氣中的二氧化碳，並將其固定在樹幹、枝葉和根系中。林地的碳匯功能顯著，是自然碳匯中，碳儲存的重要來源。

「農地 C」：受到人為管理的影響較大，包括收穫、施肥和翻土等活動，會影響碳的流動和儲存。農地的管理方式決定其碳匯和排放特性，例如，集約管理可以提高生產力，但同時也可能增加排放。因此，農地的碳動態與管理方式密切相關。

「草地 G」：草地的生物量雖然遠小於林地，但草地植物每年迅速生長，並將其生物質轉化為枯有機質的碳庫。草地在地下也能儲存大量的碳。

「溼地 W」：定義為是全年或部分時間被水覆蓋或充滿水的地區。這些條件使其成為重要的碳匯地區。濕地包括沿海溼地、泥炭地、水產養殖區、水淹地及水庫與其他人工水體。濕地碳匯功能主要依賴於其獨特的水文和生態特性。

「聚居地 S」：居地是人類開發用地，通常缺少大量的生物量碳庫。建築基礎往往封存了土壤碳庫，限制了其碳儲存能力。然而，城市公園、等大型綠地和植被可以在一定程度上提供碳匯功能。

「其他用地 O」：包括裸土、岩石、冰川和其他不屬於上述五個類別的土地，通常是無人管理的土地，碳儲存能力較低或幾乎沒有碳儲存功能。

根據 IPCC 國家溫室氣體清單指南，濕地的子類型包括沿海溼地(Coastal Wetland)、泥炭地(Peatland)、沿海溼地水產養殖(Aquaculture in Coastal Wetlands)、水淹地(Flooded Land)及水庫與其他人工水體

(Reservoirs and Other Constructed Wetlands)。不同國家在土地類型分類上容許存在差異，但應當保持長期一致性。例如：在美國的溫室氣體清冊報告中，水稻田被歸類為濕地，因為其管理方式和水文特性與自然濕地類似。而在日本，集約式耕種的水稻田歸類為農地，因為其主要功能是農業生產，並且管理方式與其他農田相似。

土地類型和管理方式對碳匯和溫室氣體排放有著重要影響。依據2006 IPCC 指南進行的土地分類和碳匯估算，有助於各國準確評估和管理其土地資源的碳儲存和排放特性。不同國家可以根據自身的土地利用特點進行適當的分類調整，但需要保持分類標準的一致性，以便進行長期的數據比較和趨勢分析。

二、國內對於農塘之土地類型定義

在台灣，針對農塘的土地面積掌握與調查工作，主要由「內政部」和「農村水保署」兩個部會負責。內政部負責劃定具有生態多樣性功能的濕地，並制定相應的保育利用計畫。農村水保署則主要負責盤點和調查山坡地範圍內的地表水，並建立農塘資料庫平台。農村水保署則主要負責盤點和調查山坡地範圍內的地表水，並建立農塘資料庫平台。在某些範圍內，兩者的調查範圍可能會有所重疊。

圖 3-1 顯示桃園市三處農塘的位置及其相關屬性。內政部列管的桃園埤圳重要濕地：強調農塘的生態多樣性和保育價值。而農村水保署調查的農塘範圍：顯示農塘的具體位置和現況，作為農塘管理和活化的基礎資料。

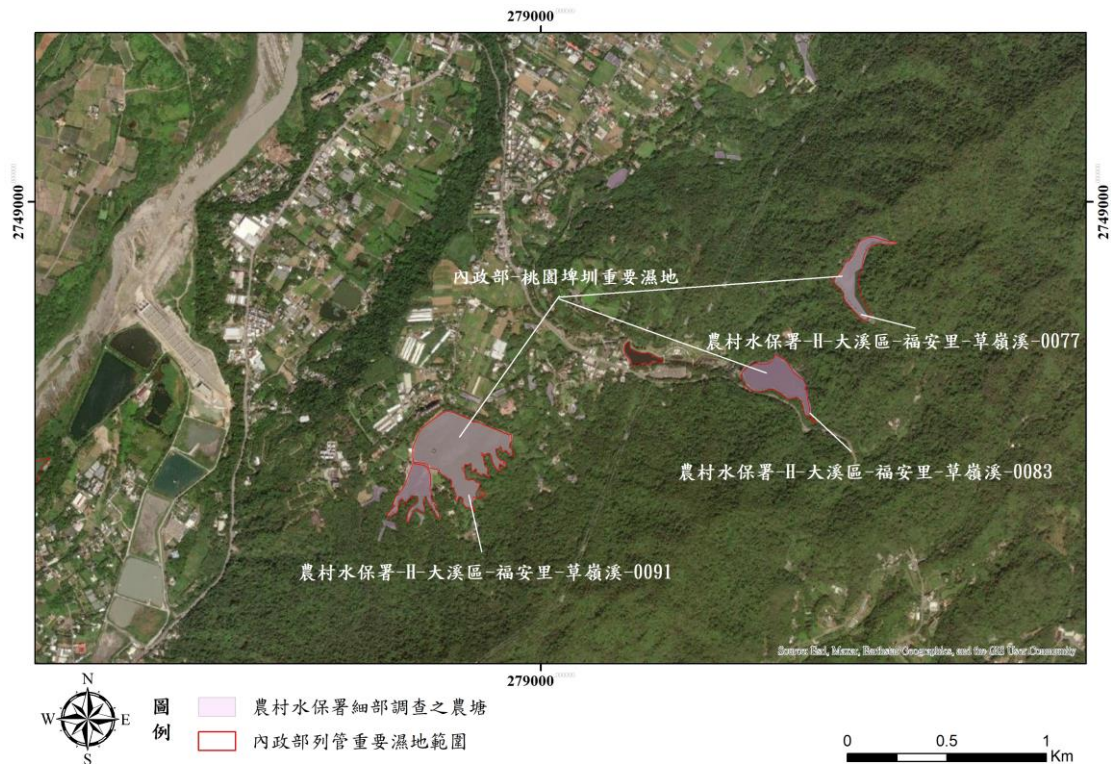


圖 3-1 「內政部」列管濕地與「農村水保署」調查之農塘

1. 農村水保署農塘調查成果

農村水保署依《水土保持技術規範》第 55 條規定，指在低窪地區或溪流適當地點，構築堤壩攔蓄逕流，以提供滯洪、農業等用水及改進生態環境並供休閒、遊憩之用。山坡地因地勢影響，引水灌溉不易，農塘常用以蓄水濟枯，作為早期坡地灌溉的重要水源。隨者環境時空變遷，農塘的功能從單一的灌溉用途逐步擴展，現在農塘不僅具備蓄水、灌溉的功能，更強調以下多功能生態系統服務價值：

1. 滯洪：農塘可以攔截和儲存暴雨時的洪水，減少下游洪水災害。
2. 防災：通過調控水量，減少山坡地區的洪水和土壤侵蝕風險。
3. 減少對水庫依賴：提供穩定的農業灌溉水源，減輕水庫供水壓力。

4. 淨化水源：過濾和吸收農業排水中的污染物，改善水質。
5. 泥砂調控：攔截上游泥砂，減少水體淤積。
6. 生態：提供野生動植物棲息地，促進生物多樣性。
7. 微氣候調節：通過水體蒸發和熱交換，調節局部氣候。
8. 自然碳匯：通過水生植物和有機物的分解，吸收和固定二氧化碳。
9. 活化農村景觀：作為農村地區的景觀元素，促進農業旅遊和休閒活動。

農村水保署針對「山坡地範圍」內的地表水進行盤點與調查，並建立農塘資料庫平台。依據農塘調查成果資料顯示，截至 2020 年 3 月為止，已完成約 3,405 座農塘之基本調查與紀錄(農塘資料庫平台，2020)，並分析全國農塘的現狀和存在的問題，將作為後續農塘新建和既有農塘改善活化的基礎資料。

2. 內政部農塘調查成果

內政部為確保濕地天然滯洪等功能，維護生物多樣性，促進濕地生態保育及明智利用，我國於民國 102 年特制定《濕地保育法》。辦理濕地之規劃、保育、復育、利用、經營管理相關事務。依重要濕地評定變更廢止及民眾參與實施辦法，劃定重要濕地保育利用計畫擬訂之綜合性及永續性計畫。依據「重要濕地評定變更廢止及民眾參與實施辦法第 3 條規定附表一之細分類」，坡地農塘屬於人為型濕地之子類型。目前內政部共列管 58 處重要濕地範圍，包含「海洋或海岸型濕地」、「內陸型濕地」及「人為型濕地」，總列管面積為 42,699 公頃。

3. 小節

坡地農塘在過去主要強調蓄水濟枯的功能，隨著環境保護意識的提高和對生態多功能性的重視，農塘逐漸被認為具備多樣化的生態系統服務價值。

根據 IPCC 溫室氣體排放指南，土地類型對於溫室氣體流量有直接影響。農塘不屬於林地、農田、草地或聚居地這些主要類別。相反地，作為有管理的人工水池，農塘被歸類於「溼地」類型的子類別。這類分類是基於農塘在碳循環中扮演的角色和其生態功能。

根據農村水保署的調查成果顯示，台灣坡地上分布著豐富的農塘資源。這些農塘不僅具有蓄水功能，還展現出顯著的自然碳匯潛力和價值。然而，這些價值目前尚未得到充分的量化和合理運用。這意味著，如果能有效量化其生態服務價值和管理坡地農塘，在因應氣候變遷和促進生態保育方面，可發揮更大的作用。

第二節 農塘在碳循環中扮演的角色和其生態功能

濕地是近年來受到關注的自然碳匯場域，通過「自身植物光合作用」和「因逕流累積的沉積物」兩種主要方式，從碳循環過程中吸存碳。濕地的碳庫包括植體生物量、枯有機質、泥炭、有機土壤和沉積物。部分沉積物能在土壤底層中累積數千年之久，使濕地成為所有陸域生態系統中土壤平均碳密度最高的區域，儲存豐富的碳庫。濕地生態系統的溫室氣體排放與清除涉及生物地質化學循環（Biogeochemical Cycle）的過程，並受到水浸透程度、氣候、生態分區及可獲得的有機質的控制（IPCC, 2006）。

浸透或排水影響濕地溫室氣體排放，陸域生態系統普遍存在好氧條件（氧氣充足），在好氧條件下，常透過分解作用釋放二氧化碳（CO₂）；甲烷（CH₄）排放主要在厭氧條件下發生（Moore and Knowles, 1989）。

在濕地浸透或蓄滿水的情況下，由於缺乏氧氣，好氧細菌和其他分解有機體的活動受到限制，濕地水底常處於缺氧條件，這有效防止了有機物質的分解，從而累積有機碳。相反地，在缺氧情況下，其他細菌如甲烷微生物及硫化生物等能分解部分有機物質，導致甲烷（ CH_4 ）的排放。在水體中甲烷（ CH_4 ）向上釋放的過程中，嗜甲烷菌會將部分甲烷（ CH_4 ）氧化成二氧化碳（ CO_2 ）。因此，濕地成為甲烷（ CH_4 ）的天然排放源(Watson et al, 2000)。

濕地碳儲存量取決於多種因素，包括濕地的類型和大小、植被、土壤深度、地下水和養分、pH 值及其他環境因素。濕地集水區內由於土壤侵蝕或樹葉和樹木殘骸的移動而累積的碳，也是濕地重要的碳存量來源（Kusler and Christie, 2011）。研究顯示，淡水濕地土壤每年固存約 1.38 – 2.26 ton-C/ha/yr，這一數值相較於森林的碳固存量高出 30 倍以上（Bernal and Mitsch, 2012；McCleod et al., 2011）。

影響濕地碳存量（ton-C/ha）和碳固存率（ton-C/ha/yr）的因素包括氣候區域（如溫度）、周遭土地利用情形、水位調節程度的差異、自身及外部有機質碳之供給（Carnell et al., 2018）。因素顯示，集水區面積與濕地碳供給之間存在高度相關性，集水區的特徵和管理方式對於濕地碳存量的影響尤為顯著。

濕地植被生物量的含碳量及碳匯量，除了 IPCC 溫室氣體估算提供的參考值之外，台灣學者針對重要濕地建立了本土調查資料及推估模式（林幸助，2018；趙國容，2019），並證實濕地的碳存量及其功能有別於其他土地類型。然而，濕地因「土壤侵蝕或樹葉和樹木殘骸的移動」累積在土壤中的碳存量（C-ton/ha）仍然存在研究空白，特別是基於 IPCC 指南中第三層級的本土推估模式建置。因此，本研究期望透過了解集水區土壤流失量與土壤碳存量之間的關係，估算

農塘因土壤碳累積而形成的碳匯量。

第三節 影響溼地土壤增匯管理方式

透過清除農塘底部的沉積物和其他物質的「挖除淤泥」維護管理方式，主要目的是維持農塘的正常功能並改善水質。從農塘中清除的沉積物（通常稱為“污泥”），一般會被運輸至其他地點。為了避免進一步的運輸成本及額外的處理費用，最常見的做法是將其堆放在鄰近的土地上，並有可能用作作物種植的營養物和有機物來源。在土壤科學中，濕沉積物的乾燥過程被稱為“成土作用”，透過脫水和曝氣，將濕沉積物轉化為土壤的過程（Vermeulen et al., 2003）。在此過程中，淤泥暴露在大氣中會促進有機質的礦化作用，進而導致大量溫室氣體排放，主要包括二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）和一氧化二氮（N₂O）（Paranaíba et al., 2023）。隨著淤泥與大氣接觸，表層逐漸乾燥並產生裂縫，導致下層淤泥與空氣接觸，使溫室氣體重新排放回大氣（Kosten et al., 2018）。

針對全球濕地，包括湖泊、池塘、水庫及河流等不同類型之乾燥土壤進行的溫室氣體通量調查結果如表 3-2 所示。調查結果顯示，不同濕地土地類型在土壤乾燥的情形下，碳排放量介於 3,098 – 9,041 mg/m²/day 之間，換算年碳排放量介於 11.3 – 32.9 ton-C/yr 之間。Paranaíba et al. (2023) 將約 20,000 立方公尺之溝渠淤泥（有機質含量平均 9%），挖至面積 1.1 公頃之農地進行堆置。在 6 個月的堆置期間，淤泥因礦化作用，共排放約 14 噸二氧化碳當量。這代表「挖除淤泥」管理方式，若沒有有效處理淤泥，將導致已儲存在濕地土壤的有機質碳重新分解，大量釋放回大氣中。根據 Paranaíba et al. (2023) 的調查發現，淤泥在乾燥的過程中，二氧化碳排放量與淤泥的含水量、

環境變數及有機質含量有關。含水量與與二氧化碳排放量呈負相關，而有機質含量及氣溫，與二氧化碳排放量呈正相關。

表 3-2 全球濕地包含湖泊、池塘、水庫及河流等不同類型之溫室氣體通量之調查結果

土地類型	地點	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	樣本數	出處
溝渠 淤泥 堆置	荷蘭	5078±8777	26.7±81	4.6 ±9.1	7	Paranaíba et al. (2023)
溝渠	全球	NA	177±30.4	NA	64	Peacock et al. (2021)
森林 溝渠	瑞典	5514±686	0.22±0.4	NA	58	Peacock et al. (2021b)
森林 溝渠	瑞典	6911±1106	72.3±32	NA	51	Peacock et al. (2021b)
溝渠	荷蘭	9041	NA	NA	3	Motelica-Wagenaar et al. (2020)
溝渠	芬蘭	3230	2.9	0.05	3	Hyvönen et al. (2013)
溝渠	荷蘭	3098±197	809 ±223	NA	14	Schrier-Uijl et al. (2011)
溝渠	美國	4767±733	622 ±104	8.2 ±2.8	5	Teh et al. (2011)
溝渠	芬蘭	NA	229 ±200	NA	2	Minkkinen et al. (1997)
水產 養殖 池塘	全球	NA	213 ±96	0.6±0.36	21	Yuan et al. (2019)

備註: 1.單位: mg/m²/day。

2. NA 為未調查。

透過「挖除淤泥」之管理方式，若沒有有效處理淤泥，將導致已儲存在濕地土壤的有機質碳重新分解，大量釋放回大氣中。根據前人的研究成果，我們綜合提出適用於台灣農塘的「挖除淤泥」處理原則，

具體如下：

1. 維持農塘面積及功能

農塘的淤泥會隨著時間逐漸積累，影響水質和生態系統的健康。因此，定期清除淤泥是維持農塘正常功能的重要工作。維持既有農塘面積、減少農塘面積退化以及採取適當的農業管理措施，減少農業活動對土壤和水體的負面影響。可以採取以下措施：

減少過度排水： 控制農塘的排水量，防止過度排水導致土壤乾燥和結構破壞。適當的水位管理有助於保持農塘的生態平衡，促進水生植物和動物的健康生長。

土壤覆蓋及敷蓋處理： 在常水位至滿水位範圍內，可通過覆蓋植物及敷蓋植物殘株來增強土壤保護，這有助於保持土壤的肥力、含水量和結構穩定，並有效減少土壤侵蝕。在滿水位範圍外，則可以通過植樹造林來建立穩定的植被覆蓋，進一步減少水土流失。

定期監測與評估： 定期監測流域內農塘之空間分布和生態系統健康狀況，並根據監測結果評估農業活動對農塘的影響。根據評估結果調整農業管理策略，有效管理及活化利用農塘資源。

2. 控制淤泥的含水量

控制淤泥之碳排的最好管理措施是「蓄水」及「植物覆蓋」(Carnell et al., 2018)，以減少已儲存碳的分解和重新釋放回大氣(Sigua et al., 2011)。然而，農塘周圍通常缺乏良好的儲存場域。如果能找到合適的場地，最佳的蓄水水位應保持在距離底土約 10 至 30 公分之間(Nadeau and Conway, 2015; Wang et al., 2017)，維持土壤在缺氧的環境下，減少碳損失(Villa and Bernal, 2018)。

一般而言，淤泥需經過處理或自然轉化後才能作為有機肥料、培養土或土壤改良劑供植物生長使用。以自然轉化方式，土壤中溫室氣體大量排放至大氣，考慮到淤泥的清運和處理費用，小規模農塘的清淤通常將淤泥回填至鄰近的農地。因此，清淤作業或是農塘整治工程(圖 3-2)，應盡量在相對寒冷的季節中進行淤泥挖除作業，可減少因高溫導致微生物加速分解作用。此外，應配合種植綠肥作物或速生植物以促進地被植物的覆蓋生長。植被覆蓋可以暫時減少土壤溫室氣體第一章體的排放總量(Paranaíba et al., 2023)。



照片來源:禹安工程顧問股份有限公司(2022/04)

圖 3-2 苗栗平興村大埤滯洪農塘改善工程

3.永久淤泥儲存庫

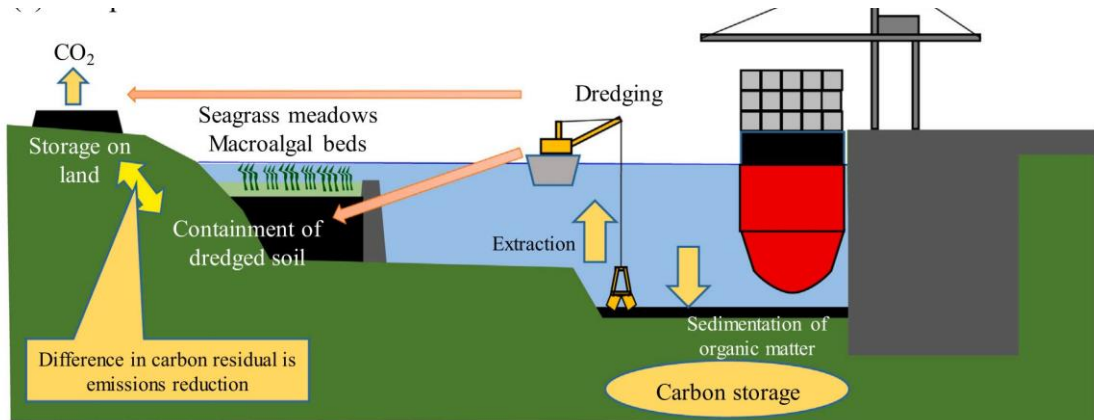
良好的永久淤泥儲存方法包括「回填土坑」和「水下永久淤泥儲存庫」，這些方法能有效減少淤泥與大氣的接觸，達到永久封存碳庫的功能。坡地上找到適合的回填取土坑之機遇相對較少，即便找到，也需考慮運輸所造成的碳排放。良好的回填土坑能提供穩定的碳封存環境，並降低淤泥的氧化和分解速率。

另一個的做法是參考日本每年進行河道清淤處理的永久儲存方法。淤泥的高有機質和水分含量可以作為青碳或藍碳棲息地的基礎材

料。這種做法可推動灘塗、紅樹林、鹽沼、海草草甸和大型藻床的建立或復育。紅樹林、鹽沼和海草床等藍碳生態系統在碳封存方面具有顯著的優勢，且在現今多受到高度保護，並限制其周遭之開發行為。通過植物的光合作用吸收大氣中的二氧化碳，並將其固定在土壤和沉積物中，形成穩定的碳庫。此外，這些生態系統還能通過減少水體流速、促進沉積物沉降，進一步增加碳的儲存量。

由圖 3-3 顯示日本通過將淤泥作為藍碳棲息地的基礎材料，不僅能有效管理淤泥，還能創造新的碳封存技術。

綜上所述，適用於台灣農塘淤泥的永久碳儲存方法，如回填土坑和利用淤泥建設藍碳(靠近沿海的農塘)或青碳棲息地(可配合主要河道之重要河岸灘地復育工程)，具有顯著的碳封存潛力和多重效益，是未來值得推廣和應用的重要管理策略。



照片來源:Sugimura et al. (2022)

圖 3-3 日本永久淤泥儲存庫操作示意圖

第四章 土壤碳存量估算與調查標準方法

本研究評估坡地農塘因集水區之土壤流失中的有機質碳而匯集之碳匯，針對集水區土壤碳存量的估算方法與層級定義，以及土壤調查標準方法進行文獻回顧與彙整。

第一節 IPCC 估算層級與基本估算方法

IPCC 為能提供全球通用的溫室氣體估算方法，依其所提供的溫室氣體估算係數預設值、估算模式及數據精細度等，將估算層級分為三級；估算層級越高，其所需數據之土地管理程度、分類精細度、估算準確度等越為複雜且深入程度也越高，相對反映在蒐集數據所需人力及物力成本也越高。以下為 IPCC 各估算層級說明：

「層級一」(IPCC Tier 1)：可直接使用 IPCC 指南所提供的基本方法、函數及係數預設值，如全球氣候生態圖、土地類型圖及生長率等，其數據較粗略，不確定性高；國家不需要投入數據蒐集成本即可簡易估算。

「層級二」(IPCC Tier 2)：可使用與層級一相同的估算方法，但所採用的估算係數為本國或區域調查的數據。另外，層級二所使用的數據亦較為精細，以便與該國的氣候區、土地利用調查圖資、土地管理程度及活動數據等配合。

「層級三」(IPCC Tier 3)：能以地理資訊系統為基礎，結合層級二細部調查資料之整合，包含植體生長年份、物種分類、耕作特性和土壤調查，整合數種適合國家情況的模式、調查系統與監測系統，以分析不同時間國家的土地利用與碳匯變化，層級三所需的品質管控、檢核及驗證更加嚴格，亟需要整合各部門相關調查數據。

依據 IPCC 國家溫室氣體清單指南，提供層級一之土壤有機碳庫 (SOC) 參考值(C-ton/ha)，如表 4-1 所示。依據不同氣候條件與土壤性質提供不同土壤有機碳庫之參考值，若缺乏國家本土細部調查數據，則以 IPCC 提供之層級一估算係數進行估計。

表 4-1 土壤有機碳庫參考值(單位: C-ton/ha，表層至地下 30 公分深)

氣候區域	高活性粘土 ¹	低活性粘土 ²	砂質土 ³	灰化土壤 ⁴	火山土壤 ⁵	濕地土壤 ⁶
北溫帶	68	NA	10#	117	20#	146
寒溫帶，乾	50	33	34	NA	20#	87
寒溫帶，濕潤	95	85	71	115	130	
暖溫帶，乾	38	24	19	NA	70#	88
暖溫帶，濕潤	88	63	34	NA	80	
熱帶，乾	38	35	31	NA	50#	86
熱帶，濕潤	65	47	39	NA	70#	
熱帶，濕	44	60	66	NA	130#	
熱帶山區	88*	63*	34*	NA	80*	

注：資料取自 Jobbagy 和 Jackson (2000 年) 及 Bernoux 等 (2002 年) 描述的土壤資料庫，為平均庫量。土壤氣候類型假定的名義誤差估計值為±90% (表示為 2X 標準方差，為均值的百分比)。NA 表示“不適用”，因為這些土壤在有些氣候帶通常不存在。

#表示無數據可用而保留《1996 年 IPCC 指南》的預設值。

*在熱帶山區氣候帶不存在直接估算這些土壤類型的參考碳庫，所以此地區的庫是基於暖溫帶，濕潤地區的估算值。熱帶山區和暖溫帶地區有著相似的年均溫度和年均降雨量。

1. 含有高活性粘土 (HAC) 礦物質的土壤是輕至中度風化的土壤，以 2:1 矽化粘土礦物質為主 (在世界土壤資源參考資料庫 (WRB) 分類中，這些包括薄層土 Leptosols、膨脹土 Vertisols、棕鈣土 Kastanozems、黑鈣土 Chernozems、灰鈣土 Phaeozems、高活性淋餘土 Luvisols、高活性聚鋁土 Alisols、漂白洗入土 Albeluvisols、鹼土 Solonetz、鈣質沖積土 Calcisols、石膏土 Gypsisols、Umbrisols、變育土 Cambisols、腐石土 Regosols; 在美國農業部分類中包括黑沃土 Mollisols、膨脹土 Vertisols、淋溶土 Alfisols、旱境土 Aridisols、新成土 Inceptisols)。

2. 含有低活性粘土 (LAC) 礦物質的土壤為高度風化的土壤，以 1:1 的粘土礦物質和非晶態氧化鐵和氧化鋁為主 (在 WRB 分類中包括聚鋁土 Acrisols、低活性淋溶土 Lixisols、強風化弱粘澱土 Nitisols、鐵鋁土 Ferralsols、Durisols; 在美國農業部分類中包括極育土 Ultisols、氧化土 Oxisols、淋溶土 Alfisols)。

3. 根據標準的質地分析包括含有 >70% 砂土和 <8% 粘土的所有土壤 (不論何種分類學分類) (在 WRB 分類中包括砂質土 Arenosols; 在美國農業部分類中包括砂新成土 Psamments)，。

4. 表現出強烈灰化作用 podzolization 的土壤 (在 WRB 分類中，包括灰壤 Podzols; 在美國農業部分類

中包括淋澱土 Spodosols)。

5.產生於帶有水鋁英石 allophanic 礦物的火山灰土壤(在 WRB 分類中包括暗色土 Andosols; 在美國農業部分類中包括火山灰土 Andisols)。

6.由於排水限制導致定期淹水和產生厭氧條件的土壤(在 WRB 分類中包括灰白土 Gleysols; 在美國農業部分類中包括飽水缺氧的亞綱 Aquic suborders)。

土壤碳存量之估計方式可分為等量及等積的基礎上。一般土壤調查建立在等積基礎上估計土壤調查之土壤碳儲量。等積基礎上的每單位面積土壤碳存量，則按以下公式計算(式 1)：

$$\text{土壤有機碳(SOC)} = \text{土壤容積密度(Bulk Density)} \times \text{深度(Depth)} \times \text{土壤有機碳含量 (SOC\%)} \quad (\text{式 1})$$

式中：土壤有機碳(SOC)：土壤中有機碳存量，碳存量單位:公噸/公頃 (ton/ha)。土壤容積密度(Bulk Density)：單位容積體積中的土壤重量，土壤密度單位:克/立方公分 (g/cm³)；深度(Depth)：土壤採樣深度或土壤厚度，單位:公分(cm)；土壤有機碳含量(SOC%)：土壤中含碳量百分比，單位:百分比(%)。最後將單位轉換碳存量單位:噸/公頃 ton/ha。

在 IPCC 溫室氣體指南中，估算層級 1 和 2 在計算礦質土壤的有機碳庫的預設調查深度為 30cm。如果能獲得本土調查資料，在層級 2 時，IPCC 建議至少需調查 30 公分調查資料或更深的土壤調查成果(1 公尺)。IPCC 所提供土壤碳庫層級 1 之估算係數，係基於 30cm 的深度而得。

IPCC 目前由於缺乏相關無機碳變化之科學資料，層級 1 和 2 並沒有提供估算土壤無機碳變化的方法，因而假設無機碳庫淨流量為零。另外，土壤碳庫成分中，90%以上為有機碳庫，如動、植物之殘骸或排泄物之分解、分解物質經過微生物性或化學性之降解所產生之產物，

剩餘 10%則為無機碳庫，包含母岩風化之礦石，以及岩層中之鈣及鎂元素與二氧化碳礦化所形成之礦石。

第二節 土壤碳存量調查標準方法

大面積的土壤有機碳庫資料建置確實具有一定的挑戰性。然而，通過有系統性的採樣方法，可以有效地進行土壤有機碳庫的估計。土壤樣本通常由「不同深度的金屬筒」或使用挖掘方法採集，盡可能在每個採樣點和每種深度上收集一種重複樣本，依據林業保育署土壤碳庫調查方法說明：

1. 土壤重複取樣點取樣分析方法

土壤剖面清理及取樣：至所設定重複取樣點，就原土壤剖面重新清理，按照原土壤描述分層取樣，注意取樣時須由下而上，避免污染。剖面描述後，依化育層次，每一化育層各採取 1Kg 之土壤樣本，帶回實驗室進行理化分析。

(1) 土罐法—土壤容積密度(bulk density)取樣及測定：

A. 依土壤剖面各化育層次，每一層以土罐法(core method)用直徑約 10cm×高 5cm 之圓筒取 2 個土壤樣本回實驗室，測定土壤容積密度。化育層厚度不足 5cm 者，可視剖面狀況，與上層或下層合併。

B. 土壤容積密度(bulk density)測定：將各化育層依土罐法取回之土壤樣本，放入烘箱絕乾(105°C)，絕乾後稱重紀錄下來，依圓筒體積及土樣重量計算出各化育層之土壤容積密度。

(2) 挖穴法—土壤容積密度(bulk density)取樣及測定：

A. 依土壤剖面各化育層次，於該化育層自上而下挖取 20×20cm 大

小，深度為該化育層深之土穴。

B. 作業時，避開大石塊先自挖好之剖面上方，以角鋼框列一 20x20cm 之正方形，向下挖取該剖面各化育層深度之土壤，挖掘時注意挖穴應維持與地面相同之坡度及四邊 20x20cm 之正方形。

C. 挖取上述土穴之土壤及石塊，現場以 5mm 之篩網篩出石塊及大根並稱重紀錄，稱重紀錄後全取帶回實驗室測容積比重；過篩後之土壤取 1/2 皆帶回實驗室。

D. 帶回實驗室之土壤陰乾後，以 2mm 之篩網過篩，將過篩後之土壤及未通過 2mm 篩網之石礫及細根分別放入烘箱絕乾(105°C)，絕乾後稱重紀錄下來。

E. 野外帶回之大石塊及大根樣本，測定體積紀錄後，放入烘箱絕乾(105°C)，絕乾後稱重紀錄與現場鮮重計算乾濕比。

F. 土壤容積密度(bulk density)計算：依上述資料扣除石塊及大根之重量及體積後，計算出土壤容積密度(bulk density)

2. 土壤分析(土壤有機碳)

(1) 土壤碳濃度分析

A.前處理：將採回之 100g 土壤倒至小塑膠盆中，以 30~35°C 乾燥至可粉碎過篩即可，將已乾燥的土壤徐徐倒入磨土機中粉碎過 2-mm 篩網，樣本收集在封口袋中，用油性筆寫上試區編號及分析流水號，置於乾燥陰涼處貯存備用。

B.磨粉：如前處理所述風乾後之樣本，混合均勻後，取出 10g 次樣品 2 份，經研磨粉碎機，充分混合均勻。

C.自每份次樣品中取元素分析儀所需之適當量，置於錫箔壓錠前

後，以分析天平精稱其重（至 0.01mg），以得知樣品重量。另取適量樣本根據樣本水分測定方法進行分析樣本水分含量測定，計算 AD/OD 的比值。

D.將壓錠後之標準品及樣品置入元素分析儀樣品槽。

E.以元素分析儀直接測定樣品之碳、氮百分組成。

F.另取風乾樣本測定水分含量，計算 AD/OD 比值，用於換算乾基百分比。

G.結果處理

分析儀器計算各類可燃物樣品之分別元素百分比組成，再合併計算樣品元素百分比組成。其計算轉換公式如式 2：

$$C(\%) = \frac{A}{W} \times f \times \frac{AD}{OD} \quad (\text{式 } 2)$$

其中式中：C(%)：樣本乾基之碳元素含量百分比；A：儀器測得之風乾樣本碳元素含量百分比；W：分析樣本重；f：分析當日之檢量線校正係數； $\frac{AD}{OD}$ ：風乾樣本/烘乾樣本的比值。

許多學者針對台灣土壤碳濃度進行研究調查，不同地區和不同深度的土壤有機碳濃度會有所不同，受植被類型、土地利用方式、氣候條件等多種因素影響。

根據過去學者對台灣土壤調查之碳濃度及採樣之土利用類型之調查報告彙整如表 4-2 所列。台灣土壤的碳濃度介於 0.27 至 37.2% 之間。

表 4-2 台灣土壤之研究調查相關的報告(彙整自林試所研究報告)

作者	年代	出處	地點	林型	深度	碳濃度(%)
林光清等	1996	台灣林業科學	福山	天然闊葉林	A 層	9.94-23.31
陳尊賢等	1997	國科會研究彙刊	全台	無特別限定	30/50/100	13.1-37.2
陳財輝等	1998	台灣林業科學	四湖	木麻黃	20	0.55-5.63
王明光	1998	國科會計畫報告	塔塔加	天然針葉林	O 層	0.27
陳佳慧	1999	碩士論文	關刀溪	天然林及人工林	20	7.73-24.57
陳尊賢	1999	國科會計畫報告	南仁山	天然闊葉林	0-5/5-15	1.49-2.96/1.16-2.40
譚鎮中	2000	國科會計畫報告	關刀溪	天然林	0-20	3.55-10.39
王巧萍	2002	農委會計畫報告	全台	天然闊葉林	20	3.47-10.28
蔡呈奇等	2002	研討會	全台	無特別限定	30/50/100	13.1-37.2
陳財輝等	2003	台灣林業科學	四湖及後龍	木麻黃	15	9.08-12.3/2.3-8.16
卓昕岑	2003	碩士論文	塔塔加福山	天然闊葉林	20	6.49-19.49
林國詮等	2004	台灣林業科學	六龜	人工針葉林	15	7.42-12.52
張朝婷等	2005	研討會	全台	天然闊葉針葉林	20	1.44-19.41
廖偉志	2005	碩士論文	福山	天然闊葉林	0-5/5-15	0.63-0.98/0.27-0.46
邱志郁	2005	國科會計畫報告	全台	天然闊葉針葉林	10	1.2-13.1
陳詠琮等	2005	農委會計畫報告	台灣中部	天然林及人工林	-	9.85-21.23 kg/m ²
向韻如	2006	碩士論文	台灣中部	天然林及人工林	15	1.24-30.07
柯淑惠	2006	碩士論文	台灣中部	人工闊葉林	15	1.85-4.06
胡庭恩	2006	碩士論文	台灣北部	人工闊葉針葉林	100	1.1-15.4

3. 土壤調查深度

獲得土壤總體密度及有機碳含量等數據後，再納入土壤深度等進行土壤碳儲存量估算。在大多數情況下，土壤有機碳的濃度在表層土壤是最高的，隨著深度的加深而指數遞減，因此，測量土壤碳庫的深度至少需要 30cm，來瞭解土壤有機碳濃度與土壤深度之間的變化關

係。如果土壤深度小於 30cm 時，則應測量和記錄收集的每個土壤樣本的深度。

第三節 台灣土壤調查資料

目前美國土壤分類系統是目前世界上最主要的土壤分類系統，被廣泛地應用在相關學術研究和農業技術上，此分類系統為一多綱目(Category)的階層系統，由最高級綱目按序降至最低級綱目，分別為土綱(Soil Order)、亞綱(Suborder)、大土類(Great group)、亞類(subgroup)、土族(Family)、土系(Series)。通常將土綱、亞綱和大土類視為高級綱目，與土壤之生成和化育作用有關，其餘的三個綱目為低級綱目，與土壤性質、肥力特性和作物生產較有關(圖 4-1)。

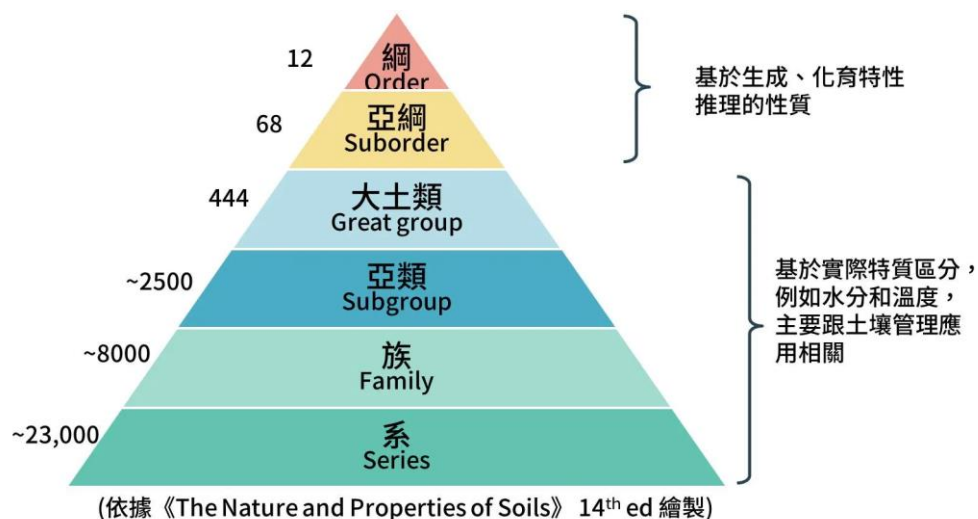


圖 4-1 美國土壤分類系統

土壤由 O、A、B 層等三層次之不同種類之排列與組合，就可分類成幾百種不同之土壤類型。目前為止，在已調查之農耕土壤具有 620 種土壤，在已調查之山坡地土壤具有 432 種土壤，而目前正在調查之高山森林土壤亦可能有 300 種土壤以上，預計台灣共有 1300 種土壤之土壤(台灣大學農業化學系，2024)。

台灣土壤調查資料過去由行政院農業部農業試驗所(以下簡稱:

農試所)及林業保育署建立，土壤調查資料常見之類型可以分為「土綱」、「土類」、「土系」及「土壤質地」等類型。考量分類之種類及類型與有機碳之間的相關性，一般土綱」與「土系」中針對土壤有機碳進行調查。

「土類」其名稱主要係由土壤母質來源或剖面的顏色及其特性來命名，亦是較老的命名方法，以往大家常聽到的名稱，如石質土、灰壤、灰化土、崩積土、黃壤、紅壤、黑色土、老沖積土、新沖積土、混合沖積土、鹽土、臺灣粘土等。此分類方式由民國 40 年被許多人沿用至今之稱呼，與原美國農部設立之系統不同，因此現在已大都不為學術界使用，但一般農民仍在使用的，主要原因是依據土壤的顏色及土壤之母質直接稱呼，易於了解與溝通。此分類方式與「土綱」相似。

臺灣地區土壤之種類，大多依美國農部 1949 年所設立之系統來加以歸類，再依臺灣地區特有之土壤特性及性質加以命名而成。主要以 "土系" (soil series) 為土壤分類基本單位，通常以地名加以稱呼，如平鎮土系、淡水土系、鹿港土系、林邊土系、瑞穗土系等。

「土壤質地」是指土壤中不同顆粒大小的礦物質（如砂、粉砂和黏土）的比例和組合。土壤質地是評估土壤性質和功能的基本特徵之一，對植物生長、土壤排水和水分保持能力等方面有重要影響。土壤質地一般可以通過以下三種主要成分來描述：

砂粒 (sand)：粒徑較大，通常為 0.05 到 2 毫米。砂粒提供較好的通氣性和排水性，但水分保持能力較差。

粉砂粒 (silt)：粒徑中等，通常為 0.002 到 0.05 毫米。粉砂粒有較好的保水性和養分保持能力，但排水性較差。

黏粒 (clay)：粒徑最小，小於 0.002 毫米。黏粒具有極高的水分

和養分保持能力，但通氣性和排水性較差，且容易板結。

美國農業部於新的土壤分類系統 (Soil Taxonomy)，此分類系統係由最頂層的分類單位，共有 12 個土綱。12 個土綱的化育程度與環境因子間的關係(圖 4-2)。台灣具有已下如 Alfisols(淋溶土)、Histosols(泥炭土/有機質土)、Inceptisols(弱育土)、Entisols(新成土)、Oxisols(氧化物土)、Spodosols(淋澱土)、Andisols(火山灰土)、Aridisols(乾燥土)、Ultisols(老成土/極育土)、Vertisols(膨脹土)、Mollisols(黑鈣土)，除了冰凍土(Gelisols)除外，以上十一種類型其特性簡述如下：

泥炭土/有機質土(Histosols)：在深度 10 公分以上有大於 20% 以上之有機物（或大於 12%以上之有機碳含量）之土壤。無淺層永凍現象的有機質土壤，多數時期處於飽和狀態，具有腐質化作用(humification)及礦化作用(mineralization)。台灣主要泥炭土分佈於高山湖泊中或其旁邊之土壤。

淋澱土(Spodosols)：由有機物與鐵、鋁結合之物質被水由上層土壤帶至下層所形成之淋澱化育層者，大都在砂質地之高山平坦地區，土壤底土層(B 層)有鐵、鋁氧化物和腐植質洗入現象。阿里山地區及水里的山區有此土壤。

火山灰土(Andisols)：含有火山灰特性之土壤（如土壤很輕，無定型性質很多，對磷吸附力很強等特性），主要生成於火山地形之陽明山國家公園內。

氧化物土(Oxisols)：土壤已經化育很老(幾十萬年以上)，土壤中僅剩餘氧化鐵、鋁等性質者，土壤肥力很低，B 層有一氧化物層生成者，大都在紅土臺地上。如桃園縣埔心、南投縣埔里、屏東縣老埤等臺地之紅壤。

膨轉土(Vertisols)：半乾燥草原帶的暗色土壤，含大量膨脹性礦物，土壤乾燥時收縮、濕潤時膨脹。在臺灣東部之石雨傘地區有此土壤。

乾燥土(Aridisols)：臺灣地區實際上沒有乾旱氣候條件，應無此土壤，但因此類土壤包含鹽土，故臺灣西南部沿海地區之鹽土仍可概略歸併為乾燥土。

極育土(Ultisols)：在高溫多雨情況下生成的土壤，在 B 層中有一粘粒洗入聚積的層次(黏聚層)，因此特別粘，由於強烈淋洗，故肥力低。臺灣地區之丘陵臺地上之紅色土壤大都屬此種土綱。

黑沃土(Mollisols)：顧名思義，此種土壤是又黑又肥沃，土層較淺，肥力高，多分布於草原環境。主要分佈在臺東縣的成功一帶。

淋溶土(Alfisols)：與極育土性質類似，比極育土的酸性低，底土層(B 層)有黏粒聚積現象，或是農民在極育土上施用大量之肥料而使土壤較肥沃，因此土壤肥力較極育土高，大都分佈於臺灣西部主要沖積平原耕地中，為臺灣地區農業生產之最大產地之一。

弱育土(Inceptisols)：初始化育土壤，有化育程度低的 B 層，為臺灣西部主要農耕沖積平原之土壤，或台灣丘陵地上之主要土壤，為臺灣地區農業生產之最大產地之一。

新成土(Entisols)：由母質化育生成之最年輕土壤，大都分佈於高山陡峭地、河流沖積三角洲河口、新沖積平原等地，具有明顯堆積作用，通常土層很淺或整層無變化。

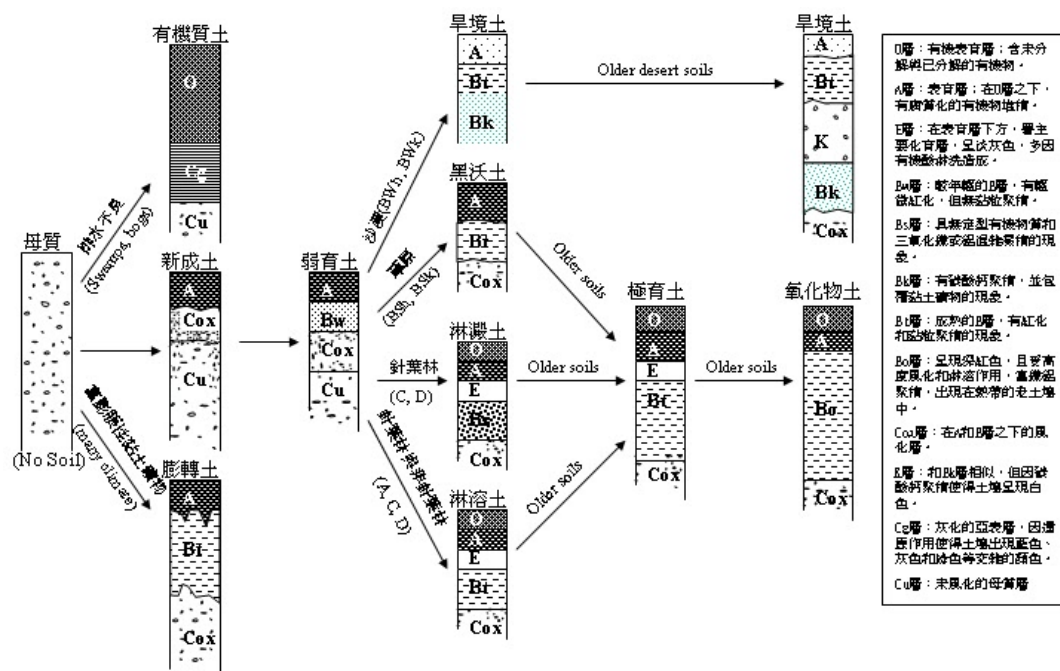


圖 4-2 12 種土綱土壤化育程度與環境因子(Birkeland,1999)

Strahler 和 Strahler(1987)認為土壤類型會受到氣候、植被等環境因子影響，而實際世界土綱土壤的分布狀況(圖 4-3)，多數土綱土壤的分布趨勢約略可和氣候、植物等環境因子相符(USDA, 2005)。然而，仍有部分土綱土壤的形成更強調母質、地形等要素，如新成土、弱育土等在各種環境下都可能形成。有機質土則與局部地形起伏變化有關，灰燼土則多與火山帶的分布一致。

在 12 種土綱土壤世界分布概況中，台灣的氣候及地形因素，土壤被列為極育土(Ultisols)。農試所針對土綱土壤進行調查成果顯示(圖 4-4)。台灣土壤可以被細分為十一種類型土綱土類。

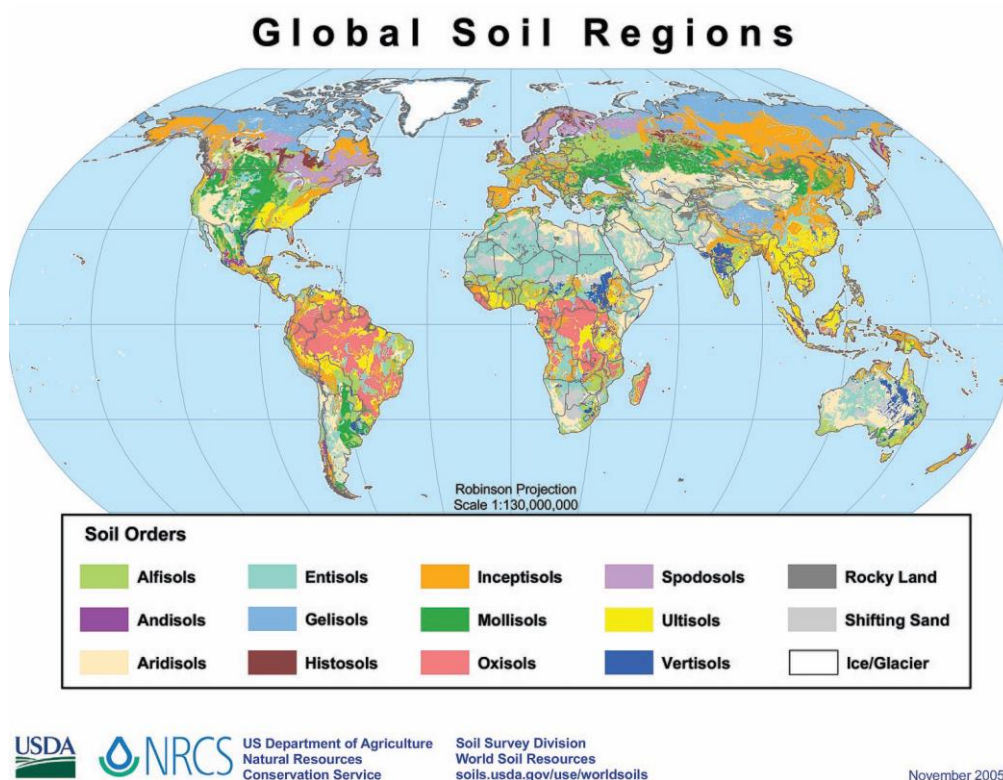


圖 4-3 全球土壤土綱分類

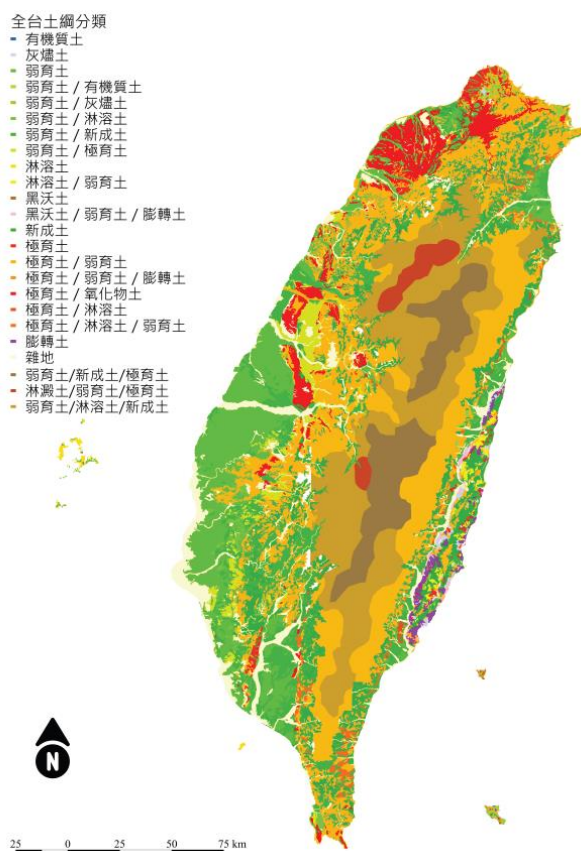


圖 4-4 全台土壤分類(圖片來源:農試所(2003))

依據林試所土壤碳量調查研究報告，依據 108 個土壤剖面之採樣，其中極育土(Ultisols)占 26 個、弱育土(Inceptisols) 占 50 個、新成土(Entisols) 占 32 個。利用土壤碳存量估算公式計算各土壤層 0-30cm、0-50cm、0-100cm 不同深度之土壤碳含量及枯枝落葉層之碳含量如下：

1.極育土：在 26 個採樣點中，0 - 30cm 之平均碳含量為 61.11 ± 25.44 ton/ha；0-50cm 之平均碳含量為 80.05 ± 31.51 ton/ha；0-100cm 之平均碳含量為 108.08 ± 40.34 ton/ha。枯枝落葉層之碳含量 3.04 ± 2.58 ton/ha。0 - 30cm 之土壤碳含量占 0-100cm 深度土壤碳含量 56.54%；而 0-50cm 之土壤碳含量占 0-100cm 深度土壤碳含量 78.63%。

2.弱育土：在 51 個採樣點中，0 - 30cm 之平均碳含量為 64.82 ± 47.25 ton/ha；0-50cm 之平均碳含量為 84.58 ± 55.68 ton/ha；0-100cm 之平均碳含量為 116.73 ± 70.55 ton/ha。枯枝落葉層之碳含量 4.76 ± 5.78 ton/ha。0 - 30cm 之土壤碳含量占 0-100cm 深度土壤碳含量 55.52%；而 0-50cm 之土壤碳含量占 0-100cm 深度土壤碳含量 72.45%。

3.新成土：在 31 個採樣點中，0 - 30cm 之平均碳含量為 51.86 ± 37.33 ton/ha；在 26 個採樣點 0-50cm 之平均碳含量為 68.91 ± 45.94 ton/ha；在 24 個採樣點 0-100cm 之平均碳含量為 94.20 ± 65.71 ton/ha。枯枝落葉層之碳含量 4.31 ± 2.52 ton/ha。0 - 30cm 之土壤碳含量占 0-100cm 深度土壤碳含量 55.05%；而 0-50cm 之土壤碳含量占 0-100cm 深度土壤碳含量 73.15%。

三種不同土綱林地之枯枝落葉層與不同土壤層碳含量調查(顯示台灣的新成土與弱育土在土壤碳存量上具有較大的變異性，也代表僅考慮土綱類型，無法反映土壤碳存量之關係。

表 4-3)，不同土綱之枯枝落葉層碳存量約在 3~5 ton/ha，透過樣本之變異係數(C.V %)分析，顯示枯枝落葉層之碳含量具有差異程度

較高。在森林土壤碳存量中，以 0 - 30 cm 為標準，含枯枝落葉層其每公頃含碳量分別為極育土：64.15 ton/ha、弱育土：69.58 ton/ha、新成土：56.17 ton/ha。以 0 - 100 cm 為標準，極育土：111.12 ton/ha、弱育土：121.47 ton/ha、新成土：98.55 ton/ha。透過樣本變異係數(C.V%)的分析，所有土綱的變異係數均在 37 以上，顯示台灣的新成土與弱育土在土壤碳存量上具有較大的變異性，也代表僅考慮土綱類型，無法反映土壤碳存量之關係。

表 4-3 台灣森林土壤碳存量調查成果

土綱	枯枝落葉層	0 - 30 cm 土壤層	0 - 50 cm 土壤層	0 - 100 cm 土壤層
極育土	3.04±2.58 (C.V % = 84.95)	61.11±25.44 (C.V % = 41.63)	80.05±31.51 (C.V % = 39.36)	108.08±40.34 (C.V % = 37.32)
弱育土	4.76±5.78 (C.V % = 121.36)	64.82±47.25 (C.V % = 72.89)	84.58±55.68 (C.V % = 65.83)	116.73±70.55 (C.V % = 60.44)
新成土	4.31±2.52 (C.V % = 58)	51.86±37.33 (C.V % = 72)	68.91±45.94 (C.V % = 67)	94.20±65.71 (C.V % = 70)

備註:碳存量單位: ton/ha。

台灣森林土壤碳存量可由不同土綱調查成果推得。然而，目前由林試所調查各不同土綱之土壤含碳量變異極大。林試所亦將林地土壤圖不列入套疊圖層，而僅以林地氣候生態分區及林地利用類別作為套疊圖層。目前，共有 18 種森林類型之土壤碳庫單元成果(表 4-4)。

本研究透過分析流域之氣候生態分區並結合林業署第四次森林資源調查之林型結果(圖 4-5)，製作山坡地範圍之土壤碳庫單元圖(圖 4-6)。山坡地土壤碳存量可提供後續估算土壤流失中的含碳量之依據。

表 4-4 以林地氣候生態分區及土地利用類別圖製成之土壤碳庫單元

土壤碳庫單元	0 - 30 cm 土壤層碳存量 (ton/ha)	樣點數
亞熱帶人針	40.77	183
亞熱帶人針闊	19.75	21
亞熱帶人闊	21.78	35
亞熱帶人竹針*	38.13*	—
亞熱帶人竹針闊*	32.68*	—
亞熱帶人竹闊*	28.64*	—
亞熱帶天針	61.41	17
亞熱帶天針闊	43.69	45
亞熱帶天闊	36.23	209
亞熱帶天竹針*	48.46*	—
亞熱帶天竹針闊*	44.38*	—
亞熱帶天竹闊*	35.87*	—
ML	24.25	2
亞熱帶竹林	35.50	35
亞熱帶非森林地	22.00	88
亞熱帶草生地	22.73	4
亞熱帶箭竹地	17.18	3
溫帶人針	13.44	7
溫帶天針	38.02	11
溫帶天針闊	5.73	2
溫帶非森林地	53.34	2
溫帶草生地*	53.34*	—
溫帶箭竹地	72.15	3
熱帶人闊	36.08	2
熱帶竹林	36.58	1

備註: 1.*缺少調查資料，由相近兩林型之平均值作為代表。

2. ML 為雜地之土地利用類型。

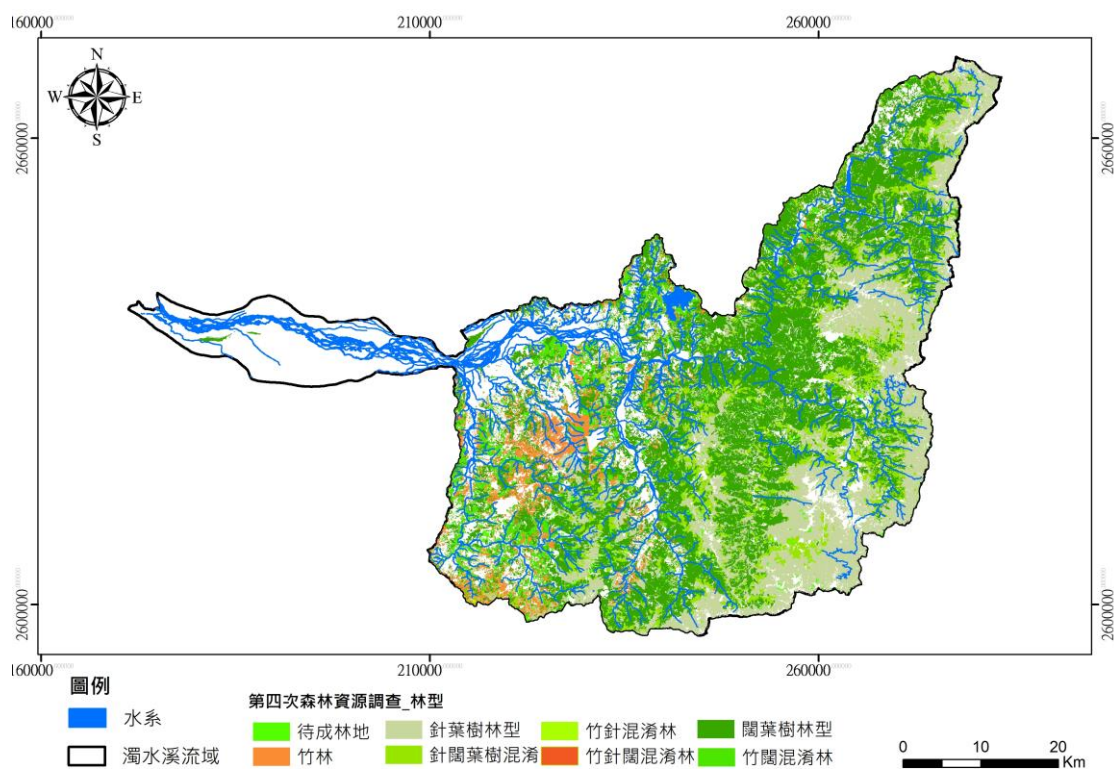


圖 4-5 濁水溪流域第四次森林資源調查林型結果

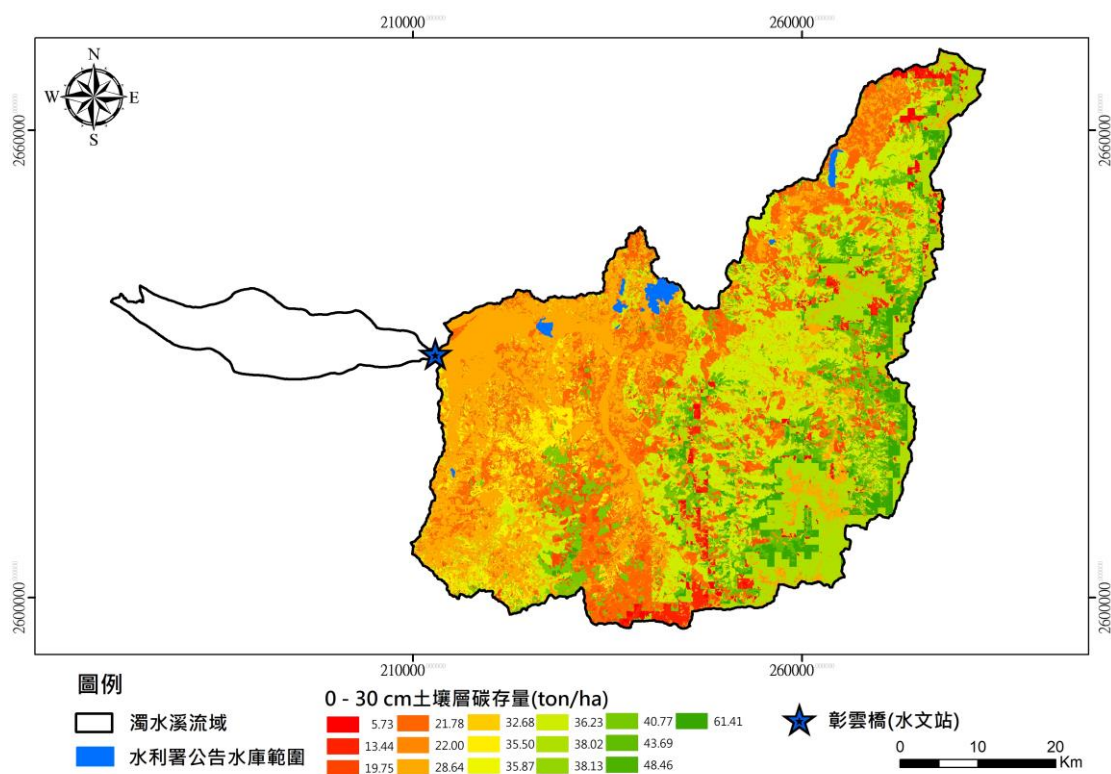


圖 4-6 森林土壤碳庫單元圖

第五章 應用多元衛星影像輔助判釋坡地農塘盤查與更新

第一節 坡地農塘萃取流程

針對坡地農塘的監測與管理，本研究應用現今多元衛星影像輔助判釋之技術，提供有效且科學的萃取流程，以減輕人力調查作業的負擔，提高農塘資料監測的效率。透過多元光學衛星影像以及數值地形資料作為輔助，建立坡地農塘的盤查與更新之流程與方法。坡地農塘萃取流程圖可參考圖 5-1 所示。

首先，蒐集樣區之無雲霧影響的原始衛星影像，並經過幾何校正與影像整併後，分別產製環境指標圖(常態化差異含水量指標(Normalized Difference Water Index, NDWI))，以及透過人工圈繪方式進行原始影像之監督式分類，透過兩者分析山坡地範圍內之地表水之區域。

第二部分，在地形窪蓄區位萃取流程上，將以數值地形模型(DEM)以集水區自動劃分理論進行窪地區位萃取，並將窪地分為河道型與坡面型。最終將兩步驟之成果套疊，以坡面型之地表水之區域視為坡地農塘區位。

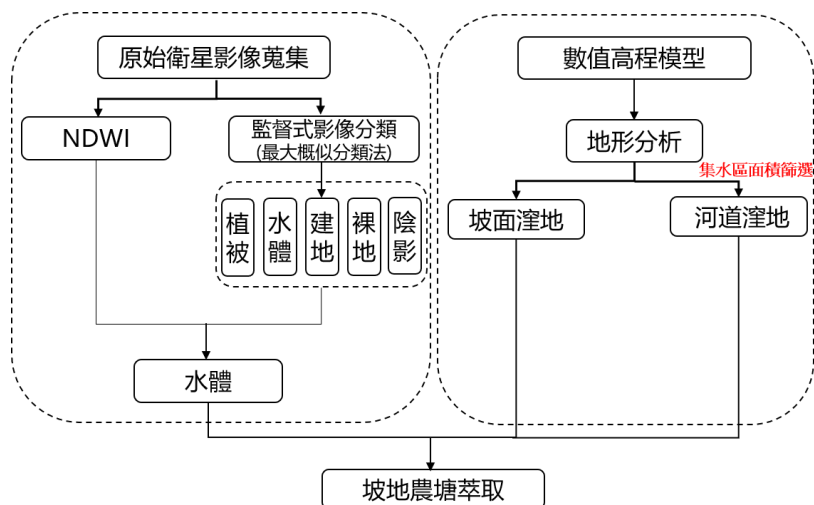


圖 5-1 坡地農塘萃取流程

一、多元影像輔助判釋地表水分布

根據《水土保持技術規範》第三章第五節，農塘的定義為：在低窪地區或溪流適當地點構築堤壩攔蓄逕流，以提供滯洪、農業用水及改善生態環境，並供休閒、遊憩之用。因此，坡地農塘是地表水的重要一環。地表水受到氣候與人類活動的影響，呈現時空分布的差異。地表水對於環境微氣候、生物多樣性及人類生活具有重要影響，對於水資源管理尤為重要。特別是在台灣山坡地，水資源蓄留及水源涵養不易，坡地農塘常被用來「蓄水濟枯」，作為坡地灌溉的重要水源。因此，前人研究嘗試以不同方式監控地表水的時空變化，並建立相關農塘資訊。

過去常見的方法除了以人力調查外，還包括透過拍攝航測影像並人工圈繪方式進行地表水判釋，以及透過衛星影像分析全球地表水分布圖 (Pekel et al., 2016)。相較於航測影像，衛星影像可解決影像覆蓋範圍大及頻繁更新的需求。攝航影像能提供高解析度之影像。

隨著衛星影像技術的發展，主動式合成孔徑雷達遙測系統已被廣泛應用於環境與災害監測。由於雷達波對水體會產生鏡像反射的特性，導致其背向散射係數較低，因此許多研究已嘗試透過雷達影像判釋地表水體的自動偵測技術 (Huang et al., 2018)。然而，由於 SAR 影像因衛星拍攝角度問題，地形起伏變化較大的區域容易產生陰影，即便經過地形校正 (Markert et al., 2020)，部分影像雜訊仍難以濾除，從而影響水體判釋。由於 SAR 提供低週期性影像且不受晝夜及雲霧的影響，在平地淹水區域的估測中，對於應變災情資訊的提供有相當助益 (邱俊穎等, 2019)。

雖然光學衛星影像易受天氣條件影響，但隨著高解析度衛星影像資訊的開放及自動影像判釋技術的發展，應用光學衛星影像進行坡地

農塘的盤查與更新，可避免地形校正影響影像品質，且坡地農塘判釋上尚無急迫性需求。因此，本研究以多元光學衛星影像為基圖，經影像幾何變形與大氣輻射校正等處理，針對校正影像分別進行影像自動判釋分類處理及依多光譜（multispectral）影像特性萃取水體指標，輔助判釋地表水分布。

二、高解析衛星影像選取及基本資料

高解析衛星影像系統能夠提供高精度的地球表面影像，廣泛應用於環境監測、城市規劃、農業、災害管理等領域。Landsat 系列衛星是過去最廣泛被應用的衛星影像，但由於其解析度僅 30 公尺，隨著研究精度的要求，目前高解析衛星影像係指解析度為 10 公尺以下，甚至是公分級之超高解析度衛星影像。《農村水土保持署之多元遙測影像申購模組》內之高解析衛星影像系統包含以下：

「Sentinel 系列」：Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 提供空間解析度為 10、20 和 60 米的影像。雖然解析度不高，但衛星具有覆蓋範圍廣的特點，適合長期環境監測和農業用途。Sentinel 衛星是歐洲太空總署哥白尼計畫中的一部分，專注於地球觀測。Sentinel-2 搭載多光譜影像儀，以每 5 天一次的頻率拍攝台灣。該衛星的軌道幅寬為 290 公里，能夠拍攝涵蓋 13 個波段的多光譜影像，這些波段包括可見光、近紅外線（NIR）和短波紅外線（SWIR）等波段。

「SPOT 系列」：衛星是由法國國家太空研究中心（CNES）發起的一系列地球觀測衛星。目前以 2012 年開始發射之 SPOT-6 和 SPOT-7 為主，提供 1.5 米的全色態影像和 6 米的多光譜影像。

「Formosat 系列」：是由台灣太空科技研究院（NSPO）所開發和運營的一系列地球觀測衛星。Formosat-2：於 2004 年發射，是台灣首顆高解析度光學衛星，具有 2 米的全色影像和 8 米的多光譜影像分

辨率。Formosat-5 是 2017 年發射的最新世代衛星，具有 2 米的全色態影像和 4 米的多光譜影像。

「Pleiades 系列」：衛星是由法國國家太空研究中心（CNES）主導的高解析度地球觀測衛星。Pleiades 於 2011 年 12 月 17 日發射，提供 0.5 米的全色態影像和 2 米的多光譜影像，適合高精度的地圖製作和細節豐富的地表觀測。

綜合以上常用高解析度衛星影像之特性，考量農塘多零星分布於坡地，且小面積農塘常受到水量多寡及人為開發影響，導致其面積變異大，在監測相對於較難，故本研究採用「Pleiades 系列」衛星影像進行輔助判釋地表水分布，具備最高解析度之多光譜影像，進行環境指標分析。

本研究以濁水溪流域之南投縣竹山鎮為例，建立多元衛星影像判釋坡地農塘的監測流程。基於署內提供的多元遙測影像申購模組之 Pleiades 影像，申購近 3 年的影像資料進行分析。考量申購模組既有影像數量及品質，圖 5-2 顯示近 3 年南投縣竹山鎮的 Pleiades 影像，儘管目前僅提供單一範圍一期的影像，本研究仍能以先期研究為導向，建立有效的坡地農塘更新方法，有助於減少人力調查工作量並提高效率。

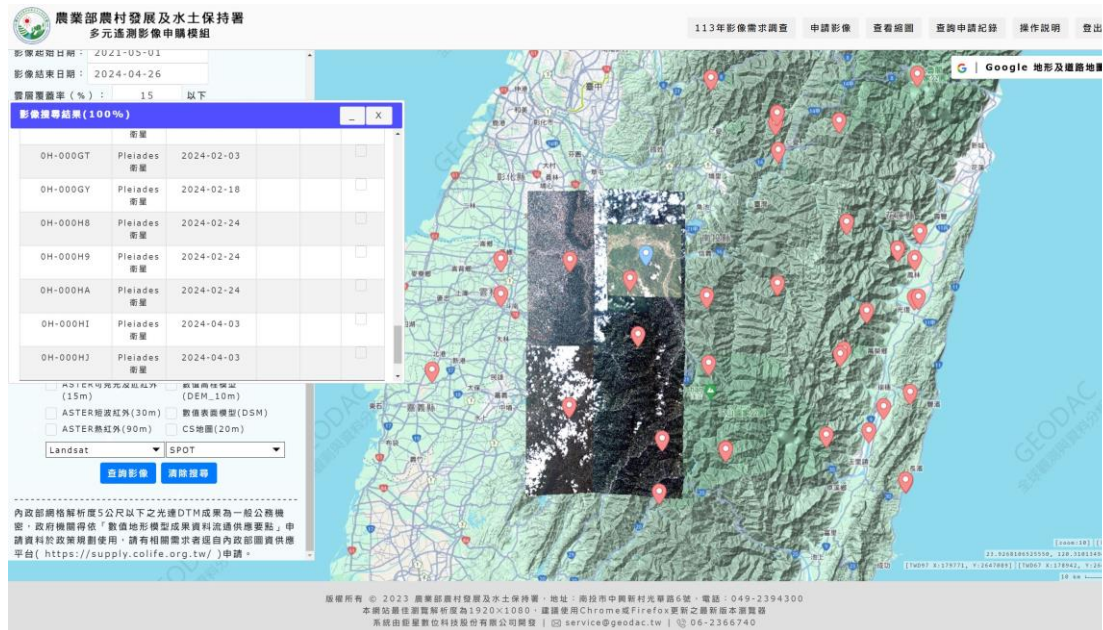


圖 5-2 農村水土保持署多元遙測影像申購模組

三、環境指標應用於遙測影像分類

遙測衛星是利用地面反射的電磁波進行取像(圖 5-3)，依據遙測感測儀所能接收的波長來分類，光學衛星系統的波長涵蓋範圍包括：0.2 到 0.4nm 的紫外光，0.4 到 0.7nm 的可見光，以及 0.7 到 2.5nm 的近紅外光 (NIR) 和短波紅外光 (SWIR)。

透過多光譜影像分析，在環境監測、農業、林業、水資源管理和地質研究等領域具有高度優勢。多光譜影像捕捉到多個波段的光譜數據，包括可見光、近紅外光和短波紅外光等光譜。不同波段的信息可以提供更多有關地物反射的詳細信息，有助於區分不同類型的地覆類型，並建立環境指標進行客觀量化分析。

環境指標是根據地物的物理特性和光譜特徵所建立的一種遙感分析方法。通常由一至三個波段的光譜差值運算所得，利用差值可以捕捉地物的特定特徵，從而提供更具體的地物分類信息。透過原始影像計算環境指標的方法有助於增強遙感影像的信息內容，尤其對於環境監測和地物分類非常有用。環境指標的選擇通常取決於要解決的特

定問題，例如植被健康、土地使用變化、水體污染等，以便更好地分辨地球表面的環境特徵。

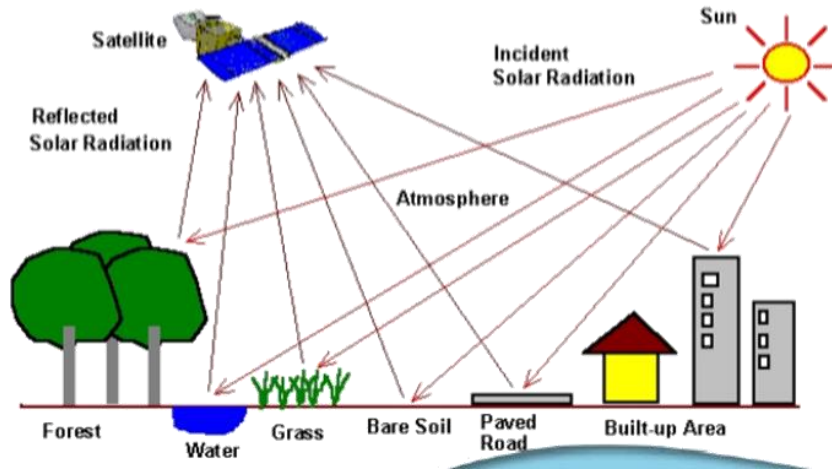


圖 5-3 衛星影像多光譜原理

針對地表水判釋之環境指標，最廣泛應用的是常態化差異含水量指標(Normalized Difference Water Index, NDWI)。NDWI 可分為兩種，用於偵測「植物水分含量」和「監測水體及水含量」，其主要差異在於所選擇的波段不同。

「植物水分含量」：此指標使用短波紅外光 (SWIR) 波段來監測葉子含水量的變化 (Gao, 1996)。SWIR 波段對水分含量敏感，當植物水分含量變化時，其反射率會發生明顯變化。

「水體及水含量」：此指標使用綠光 (Green) 波段來監測水體含水量的變化 (McFeeters, 1996)。水體能反射可見光中的大部分紅外光 (NIR) 波段，並吸收綠光波段。通過這兩個波段的反射率差異，可以突出顯示水體。「水體」NDWI 的計算公式如下(式 3)：

$$NDWI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green} \quad (\text{式 3})$$

式中：*NIR*：為紅外光波段，Pleiades 波段序為 band-4。*Green*：為

綠光波段，Pleiades 波段序為 band-2。NDWI 值域介於 -1 至 1 之間，其值越大代表水分含量越多。

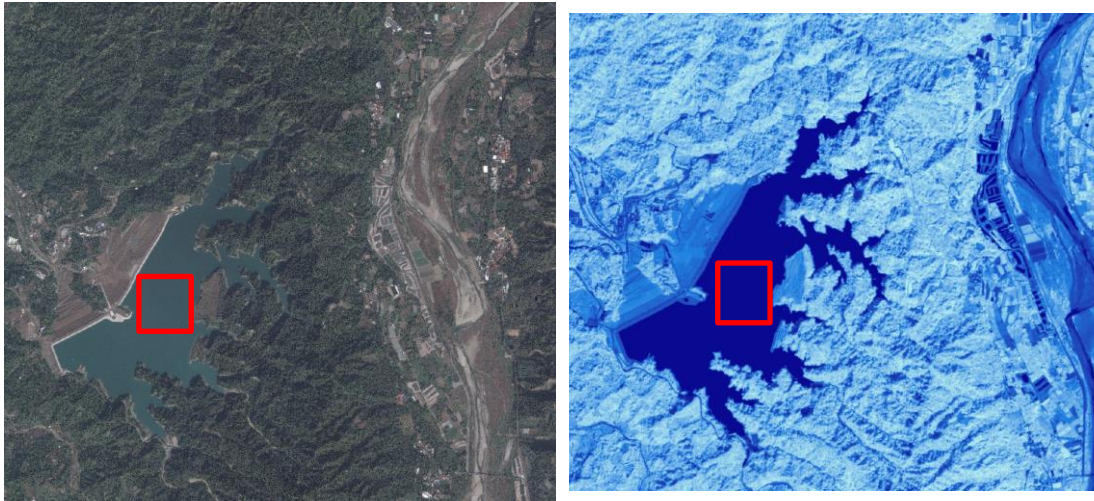
地表覆蓋類別通常可簡化為植被、水體、裸地或建地。根據地表覆蓋類別與 NDWI 分析值（圖 5-4），我們可以得到以下結論：

一般 NDWI 越接近 1 通常對應地覆類別為水體或是具有水分之特徵。植被區域通常對應於較小的值(NDWI value= -0.22)；水體區域通常對應於較高的值(NDWI value= 0.72)；建築面積或裸地面積，由於其屋頂材質的特性、建物陰影或土壤含水量的不同，其 NDWI 值會呈現低於水體但高於植被區域的情況(NDWI value= 0.49)，其 NDWI 值域介於 0 到 0.5 之間。

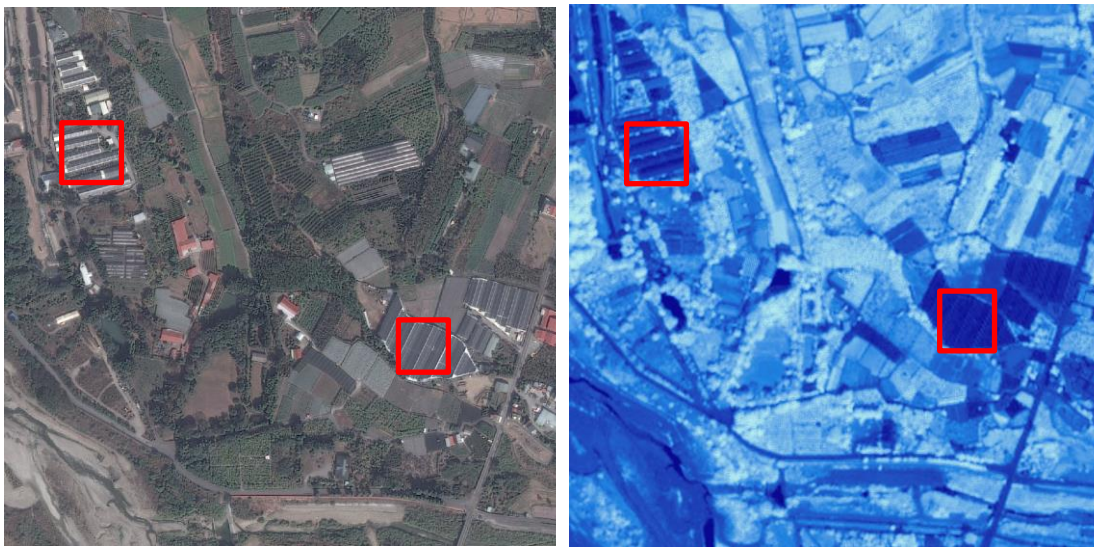


植被區域(NDWI value= -0.22)

左:衛照圖；右:NDWI 成果



水體(NDWI value= 0.72)
左:衛照圖；右:NDWI 成果



農業生產設施(NDWI value= 0.49)
左:衛照圖；右:NDWI 成果

圖 5-4 地真與 NDWI 分析值

四、影像監督式分類

本研究利用常態化差異水體指數 (NDWI) 可以有效區分植被區域和水體。然而，由於屋頂材質特性、建築物陰影或土壤含水量的不同，其 NDWI 值會低於水體但高於植被區域，代表僅採用單一環境指標無法有效進行判釋。為了克服這一挑戰，除了使用環境指標之外，應使用影像分類技術 (Image Classification)。影像分類技術依據衛星影像上所紀錄的地表光譜反射強度資訊，運用適當的數學和統計演算

法對影像進行地表類別的歸類，可以更精確地識別和區分地表覆蓋類別，從而提高地表水分布判釋的準確性和有效性。

本研究於衛星影像分類過程中主要以監督式分類法（Supervised Classification）中的最大概似分類法為主，監督式分類法需先指定訓練樣本區，訓練完成後，即以訓練樣區之光譜分佈性質，當作自動判讀之準則，將整幅影像進行分類，然而訓練區資料之分離性(同類相聚、異類分離)對成果有極大影響，故必須謹慎選擇。

應用監督式分類法於地覆類別分類，監督式分類為經由人工先選取訓練樣本，而電腦再依據此訓練樣本分類出光譜值相近之區塊（林政侑，2012）。本研究將地表覆蓋物分成植被區、水體、裸露地、建地及陰影區，共 5 大類（圖 5-5），透過最大概似分類法進行分類法，最大概似分類法的基本步驟如下所示：

- (1)決定地表覆蓋的種類。
- (2)選擇各類別具代表的像元為訓練樣本。
- (3)計算未知像元屬於每一種類別之機率。
- (4)未知像元依其發生機率最高的類別歸類之。

因此，首先可假設影像欲分類的類別數為：

$$\omega_i, i = 1, 2, \dots, n$$

其中 n 表示類別數。欲決定各像元 X 為何種類別或其於各種類會發生的機率，可以公式(式 4)表示之。

$$P(\omega_i|x), i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{式 4})$$

分類是根據公式(式 5)進行分析。

$$\text{if } P(\omega_i|x) > P(\omega_j|x), \text{ for all } j \neq i \quad (\text{式 5})$$

亦即，若 $P(\omega_i|x)$ ，發生機率最高，則像元屬於類別 ω_i 。

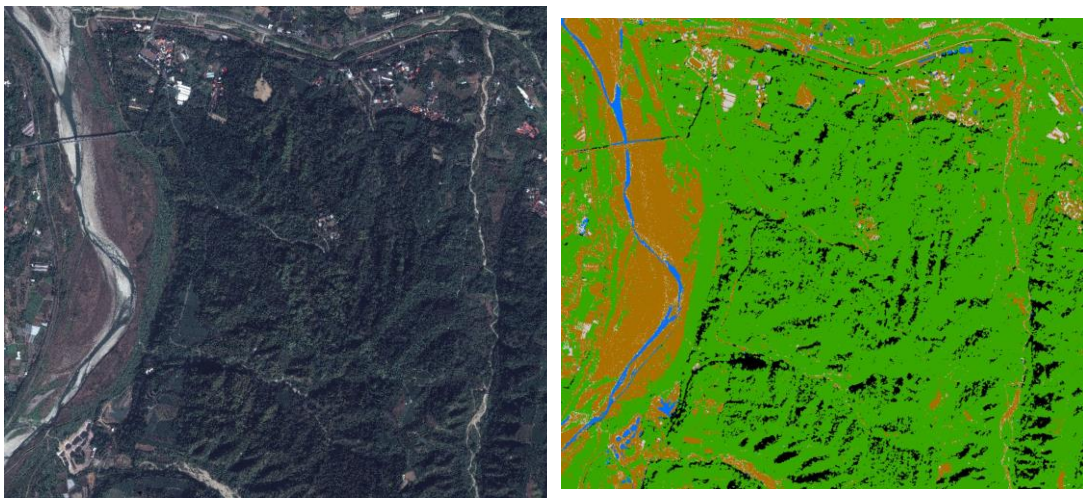
理論上由公式(式 5)可以得到像元的類別，但實際上 $P(\omega_i|x)$ 並無

法得到。因此，假設各種地表覆蓋為常態分佈，且能獲得充分的訓練資料，再利用這些訓練資料去估計各種土地覆蓋的分佈。

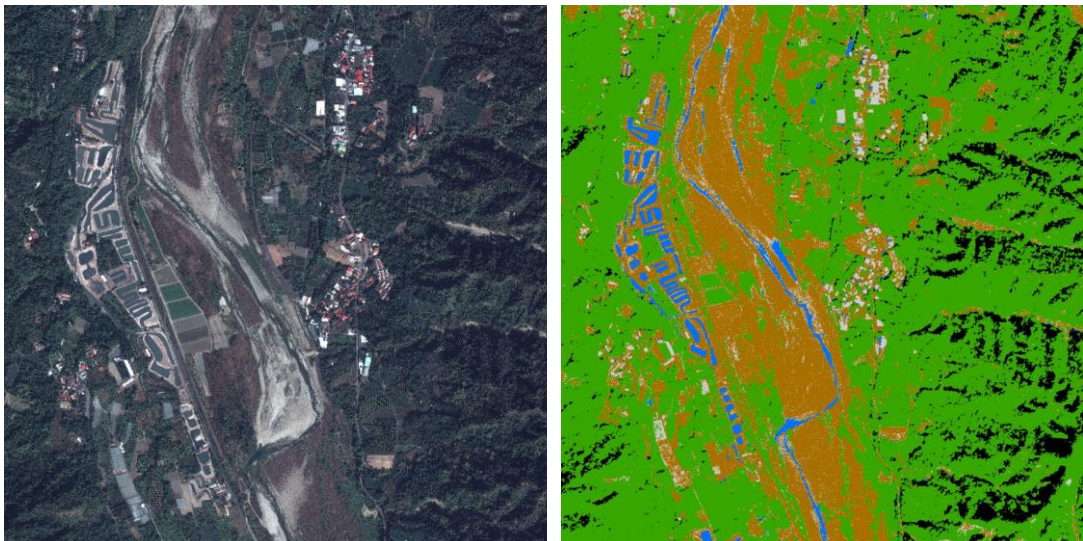
雖然 $P(\omega_i|x)$ 無法求得，但 $P(\omega_i|x)$ 可由訓練資料求出，而兩者之間有著關係式如公式(式 6)。

$$P(\omega_i|x) = P(x|\omega_i)P(\omega_i)/P(x) \quad (\text{式 } 6)$$

其中 $P(\omega_i|x)$ 為類別 ω_i 的出現機率。



植被區域(右圖:深綠色區域)
左圖:衛照圖；右圖:影像分類成果



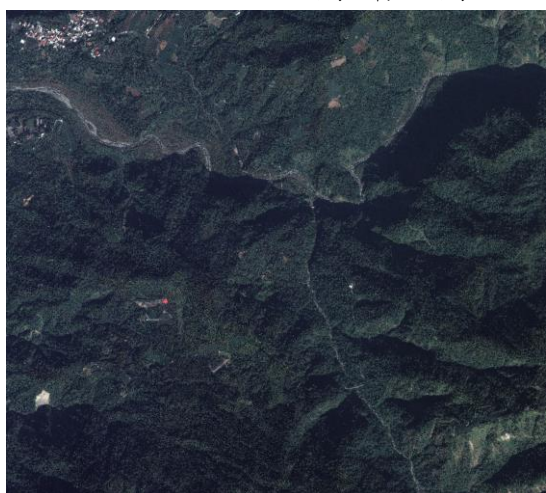
水體(右圖:深藍色區域)
左圖:衛照圖；右圖:影像分類成果



裸露地(右圖:咖啡色區域)
左圖:衛照圖；右圖:影像分類成果



建地(右圖:灰色區域)
左圖:衛照圖；右圖:影像分類成果



陰影區(右圖:黑色區域)
左圖:衛照圖；右圖:影像分類成果

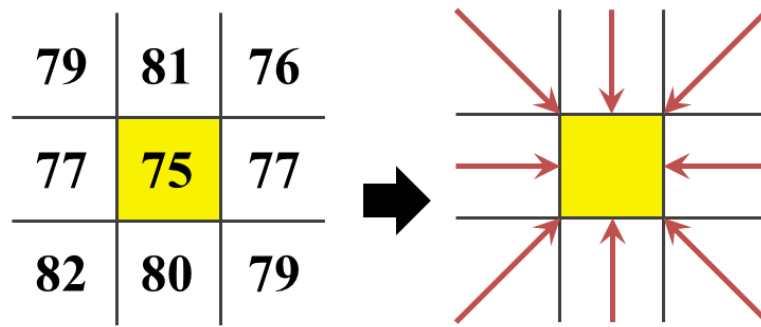
圖 5-5 地真與影像分類成果

五、坡面窪蓄區位分析

地表水體可區分為「河道型低窪地區」與「坡面上低窪地區」，一般而言，在河道上的窪地是良好設置防砂壩、水庫、攔河堰的等橫向水利或水保設施的區位，而在坡面則是良好的溼地、滯洪沉砂池、埤塘、人工湖等窪蓄，儲滲水設施的優選地點。坡地農塘大多數為後者。

為提供正確的坡地農塘區位資訊，需要加入地形資訊，不僅能進行坡面窪地區位的萃取，還可以透過水系分析，依其所在位置分為河道型和坡地型兩種。如果窪蓄區位於河道上，則歸為河道型窪蓄區。由於此類窪蓄區並非農塘的定義範圍，因此應以集水面積作為篩選因子，通常集水面積越大，越可能非屬於坡地農塘的類型。而位於「河道以外的窪蓄區」或「集水區集水面積較小的窪蓄區」，則可歸為坡面型窪蓄區。通過嚴謹的判釋分類流程，可以準確識別出適合設置坡地農塘的區位。

地形資訊以數值高程模型自動萃取為原則方式，本研究利用 Jenson and Domingue(1988)提出之高差法結合斜面法計算集水區之初始流向，輔以窪地集水區法結合 Promethee 理論計算建立集水區之無窪地流向，作為水系網之比較，以區分河道或是坡面之窪地區位。此法在過去研究成果中(Chou et al., 2004; Lin et al., 2008)，多次與傳統方法驗證比較(例如：高程平滑化法(Mark 1988)、窪地填高法(Jenson and Domingue 1988)、逐步填高法(Martz and Garbrecht 1998)、地形蝕刻法(Soille et al. 2003)，皆以本窪地集水區法所萃取之資訊最為精確，窪蓄區位萃取示意，如圖 5-12。



- 以門檻值或源頭追跡法萃取水系網
- 計算水系網中下游網格高程大於上游網格者視為窪蓄區位

圖 5-6 窪蓄區位萃取

第二節 坡地農塘萃取成果

透過坡地農塘萃取流程，本研究首先依據農村水保署提供的既有農塘圖資進行農塘範圍的監測與更新作業。在農塘分析流程中(圖 5-1)，本研究基於先期研究為導向，選用濁水溪流域中竹山鎮單一範圍一期的 Pleiades 影像，建立有效的坡地農塘更新方法。

本次農塘判釋總結果(如圖 5-9 所示)，可分為既有農塘的範圍重繪(如圖 5-10 所示)，以及新增水體的判釋(如圖 5-11 所示)等，具體分為以下五類：

類型一、農塘範圍重繪：當經過影像分析成果核查後，若發現既有農塘的範圍與現況存在顯著差異時(蓄水面積差異超過 50%)，需重新繪製農塘範圍。

類型二、維持既有農塘範圍：經過分析，若既有農塘的範圍與現況一致，且無明顯變化，則維持現有農塘範圍不變。

類型三、農塘已改變用途：在一些情況下，原有農塘可能已經改變用途，例如：被改建為其他農業設施、建築用地或其他非農

業用途。需要在圖資中更新，並註明農塘已移作他用，以便未來的監測和管理。

類型四、新增水體：通過影像判釋和地形分析，發現具有新闢水體之區域。需藉由現場調查方式，確認是否具有農塘使用，並記錄其位置、面積及其他資訊，以便進行有效的管理和利用。

類型五、無法判釋：由於受到地形陰影或是影像雲層遮蔽的影響，導致無法判斷其存在或位置。這些情況下，將標記為無法判釋，以利進行現場調查與確認。

本研究針對坡地農塘判釋的五種類型進行成果萃取，進行現場調查，以確認本案判釋成果之準確性。本次共調查 13 處農塘場址，包括面積排名前兩位的農塘，並詳細記錄現場勘查結果（詳見附錄一）。現場調查紀錄表範例如圖 5-7 及圖 5-8 所示。

經現場勘查驗證，分類類型一至類型三的判釋成果與現況相符；類型四和類型五的判釋成果與現況一致，但現況不作為農塘使用。代表新增水體的判釋成果需經現場調查確認其是否作為農塘用途。透過室內分析進行新增農塘位置標註，可顯著降低野外調查的工作量。

農村水保署農塘編號：

一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位		勘 查 時 間		勘 查 人 員		氣 候	☐ 晴； ☐ 陰； ☐ 雨
農塘現況		☐ 可進入調查 蓄水狀況： ☐ 滿水； ☐ 中度蓄水； ☐ 枯水 淤積狀況： ☐ 部分淤積； ☐ 顯著淤積； ☐ 淤滿； ☐ 無或輕微淤積 使用狀況： ☐ 正常使用； ☐ 荒廢； ☐ 移作他用； ☐ 其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)					所屬 分局	
行政區						
本計畫調 查目的						
農塘編號		定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y	
土地權屬	☐ 國有地； ☐ 公有地 <u>鄉鎮市</u> ； ☐ 私有地____； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他					
農塘型式	☐ 挖式； ☐ 築壩式； ☐ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__					
集水面積	公頃		可蓄水面積	公頃		
農塘容積	立方公尺		蓄洪體積	立方公尺		
平均可蓄 水深度	測量點 1：__公尺 測量點 2：__公尺 測量點 3：__公尺 測量點 4：__公尺 測量點 5：__公尺 平均：__公尺					

圖 5-7 農塘細部勘查紀錄表 1

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位		
	地理位置及水系圖	航拍圖
	農塘全景	周邊環境

圖 5-8 農塘細部勘查紀錄表 2

針對上述五類型之農塘或水體，以下將分別進行具體案例說明，
針對每一類進行詳細的流程與方法說明。

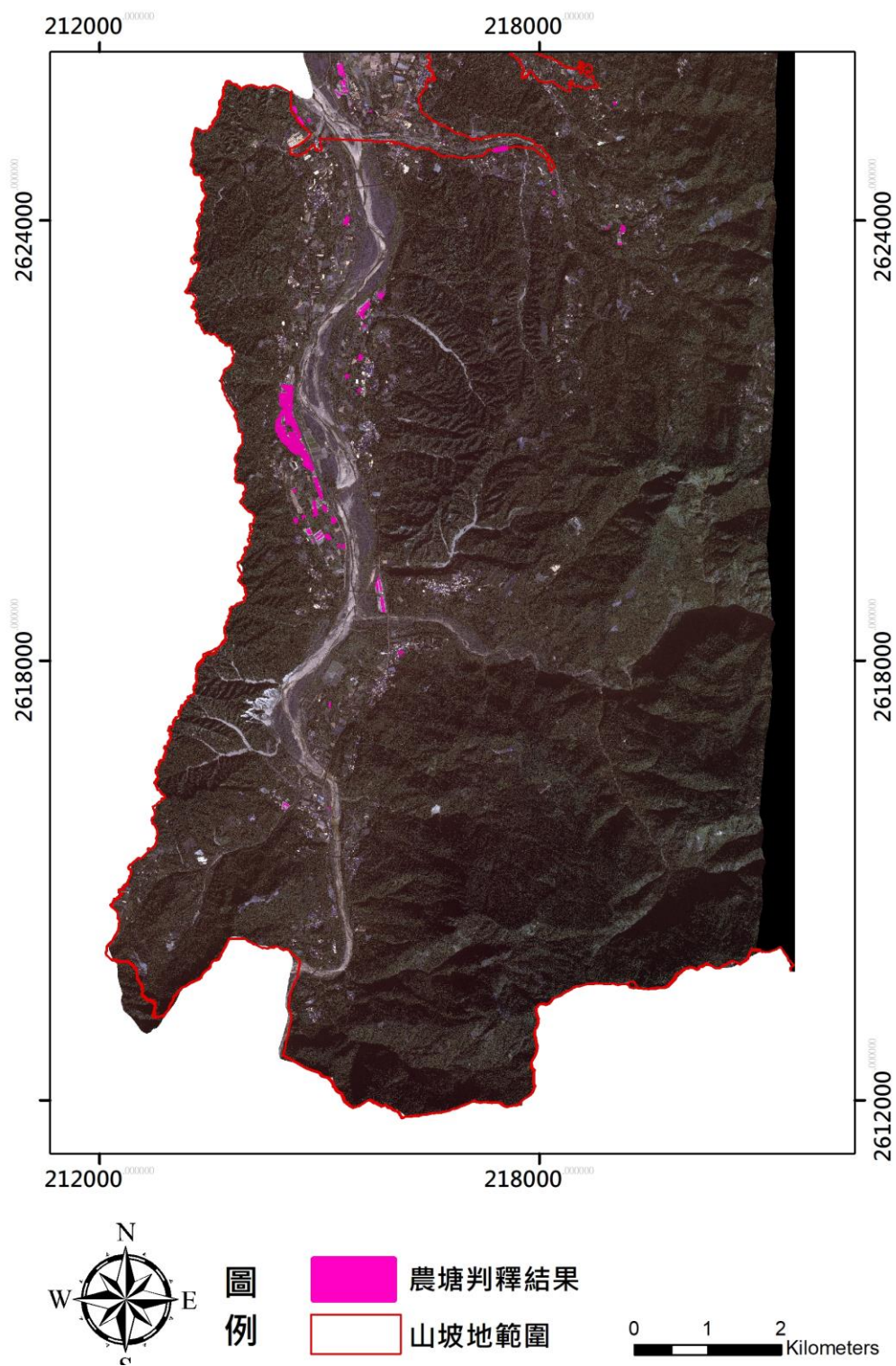


圖 5-9 竹山鎮農塘總判釋結果

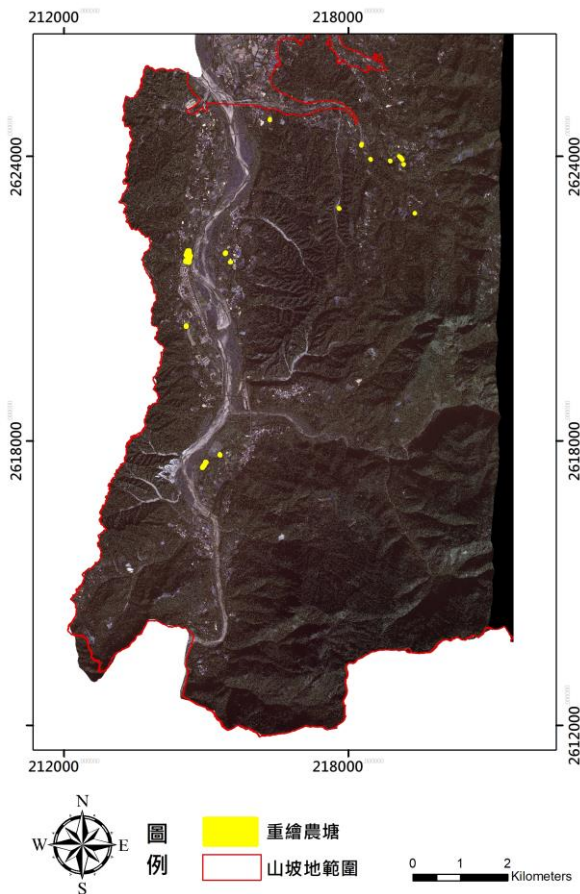


圖 5-10 竹山鎮農塘範圍重繪判釋結果

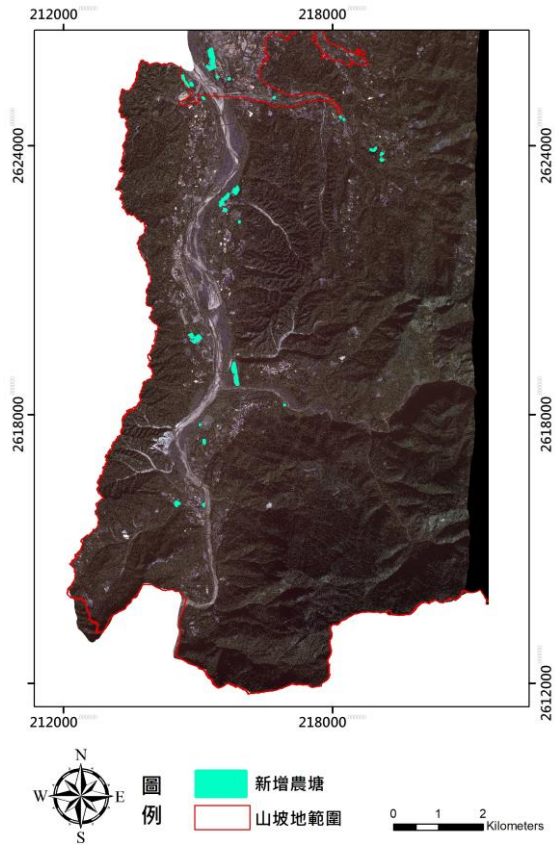


圖 5-11 竹山鎮新增水體判釋結果

一、類型一與類型二具體案例

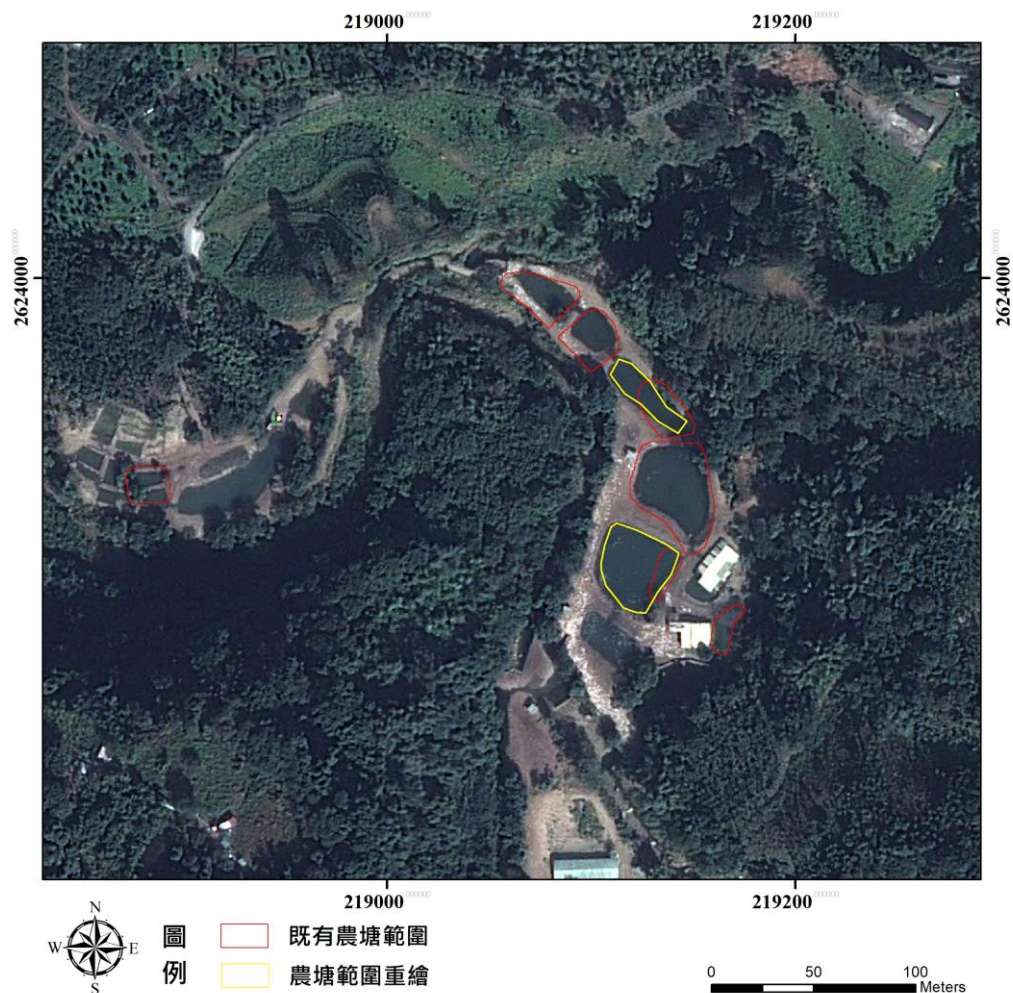
當經過影像分析成果核查後，若發現既有農塘的範圍與現況存在的蓄水面積差異超過 50% 時，則判定為具有顯著差異。此時，需進行農塘範圍重繪。維持既有農塘範圍：經過分析，若既有農塘的範圍與現況一致，且無明顯變化，則維持現有農塘範圍不變。具體方法如下：

1. NDWI 計算：利用常態化差異含水量指標（NDWI）對影像進行處理，提取出水體的範圍。NDWI 能有效區分水體與非水體（本研究設定門檻值為 0.5），提供準確的水體邊界。
2. 監督式分類：對影像進行地表覆蓋類別的分類，確定水體的具體

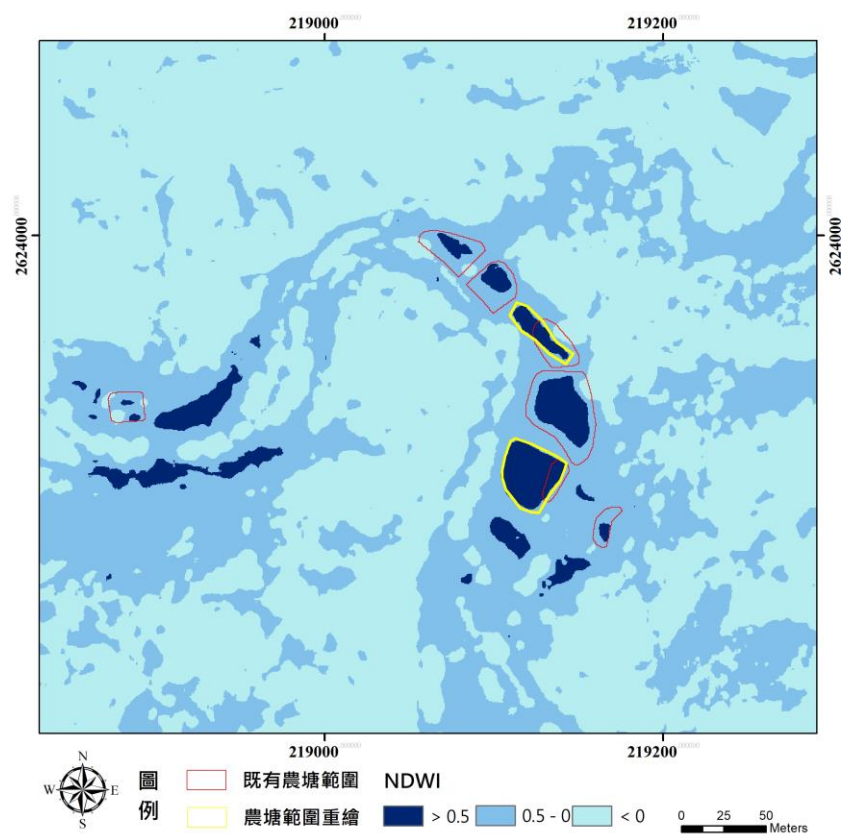
範圍。

3.結果整合:將 NDWI 結果、監督式分類與地型資訊成果進行整合，對重疊區域進行校正，確保範圍的準確性。

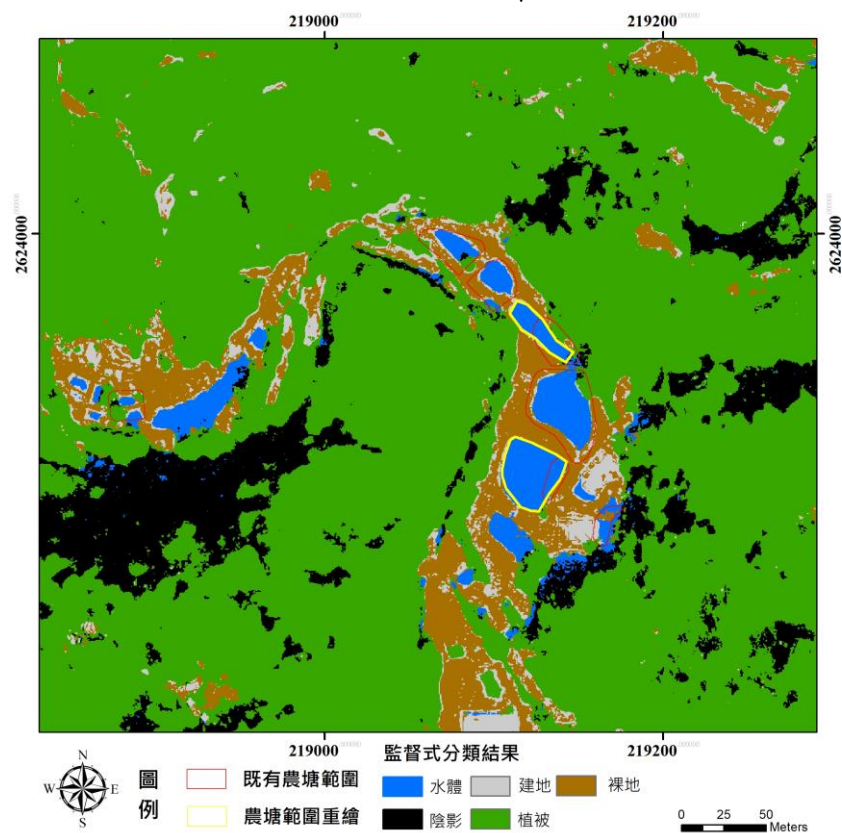
根據整合後的結果，重新繪製農塘的範圍。此重繪範圍可取代原有圖資中的農塘範圍，無明顯變化，則維持現有農塘範圍不變，並進行更新記錄。下圖（圖 5-12）展示具體過程及結果。通過此方法，可以有效地更新農塘範圍，確保圖資的準確性和可靠性。



1. 農塘及農塘範圍重繪



2. NDWI 結果

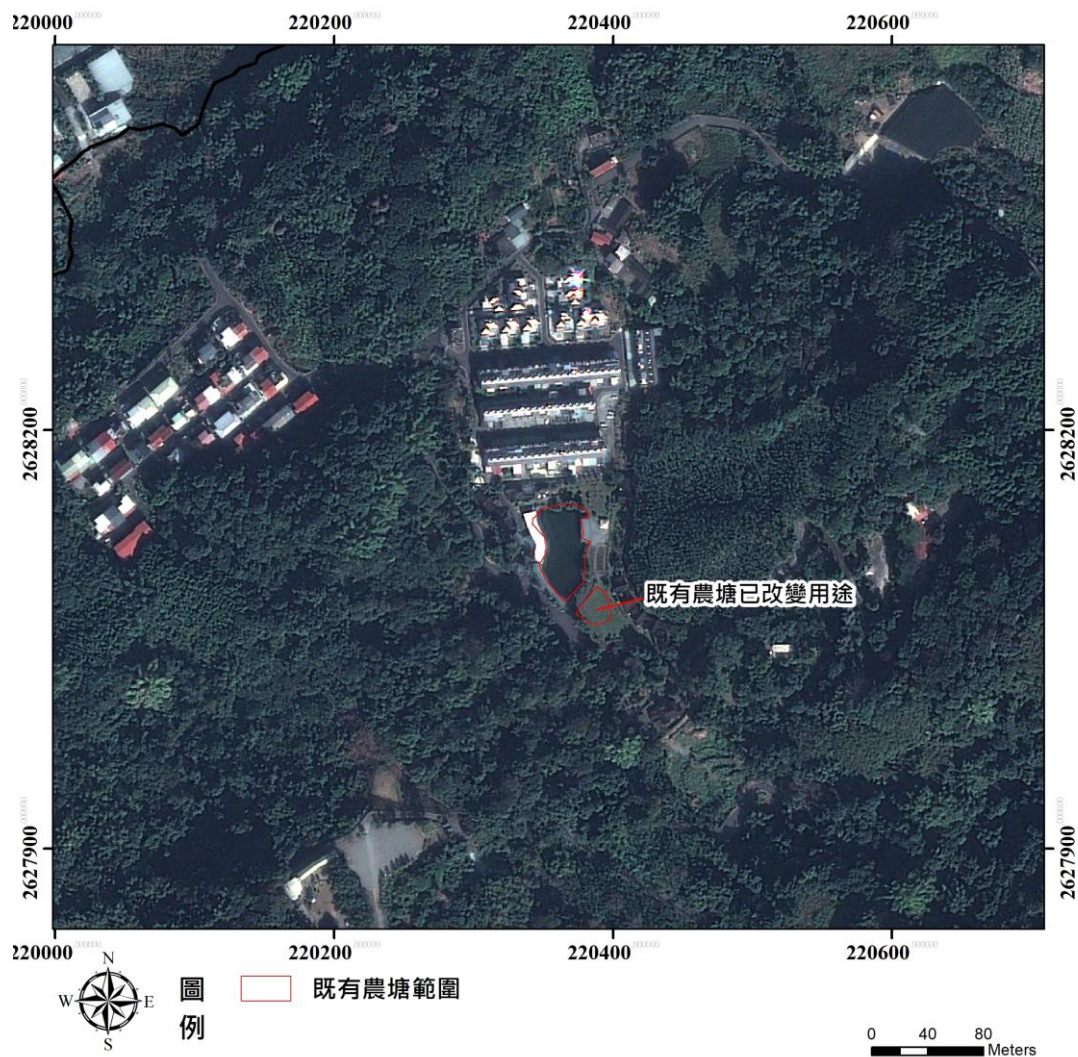


3. 監督式分類結果

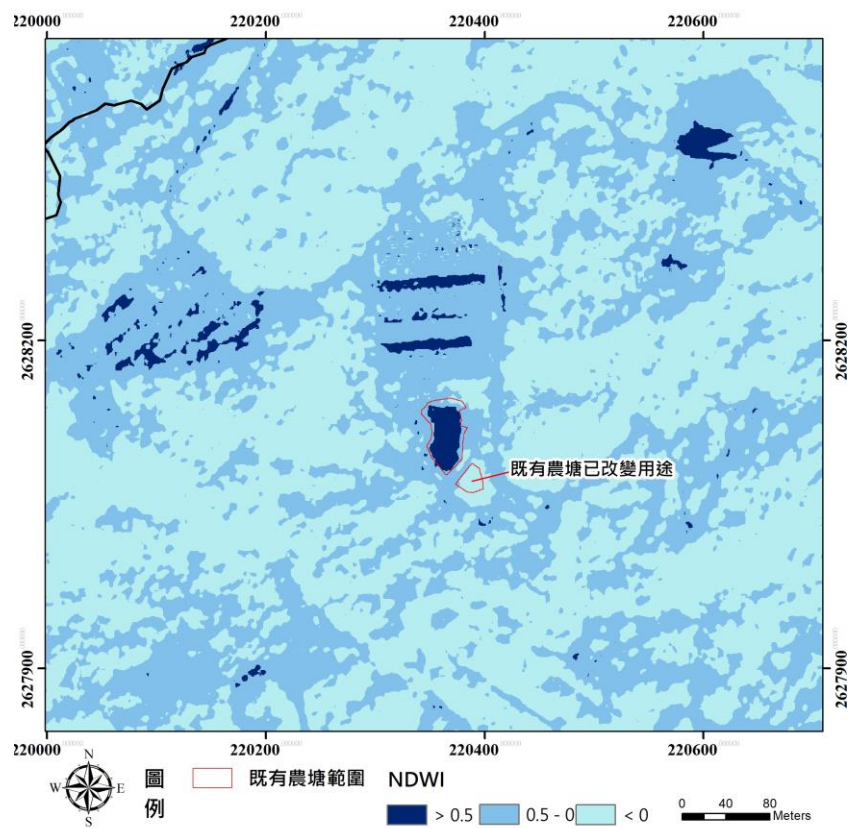
圖 5-12 類型一與類型二分析案例成果

二、類型三、農塘已改變用途

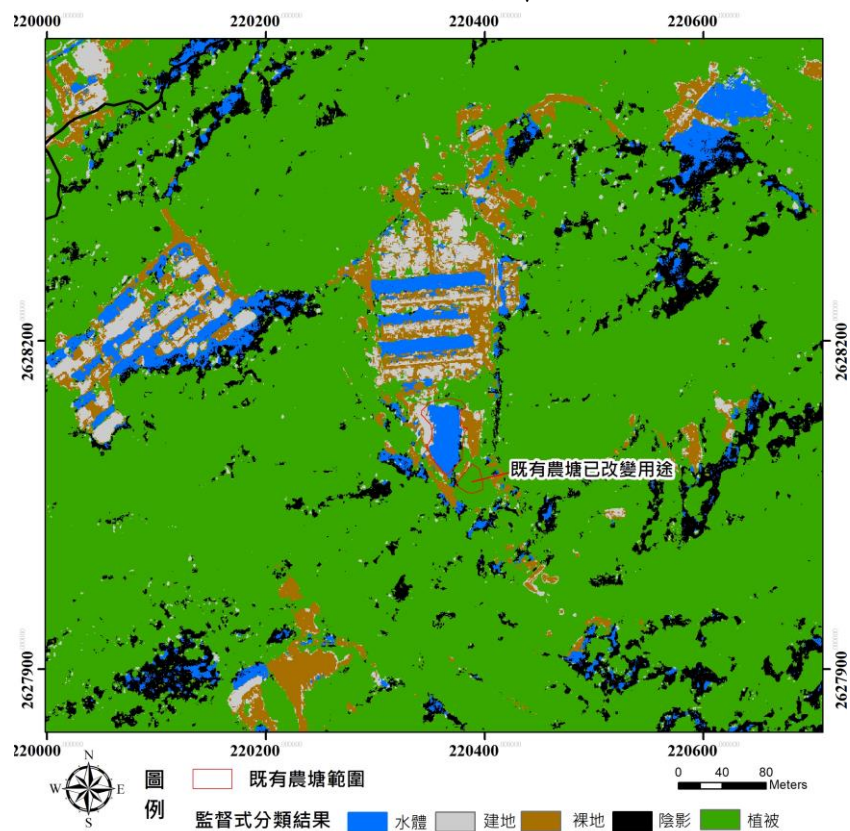
圖 5-13 展示兩個農村水保署劃定農塘範圍的情況，其中一個農塘的範圍保持不變，與現況一致，無需做任何修改。而另一個農塘則已經改變用途，根據監督式分類結果顯示，該區域現已被植被覆蓋，不再用作農塘用途。因此，圖資中需要對這個農塘進行更新，註明其已移作他用，現況為植被區域。



1. 既有農塘已改變用途



2. NDWI 結果



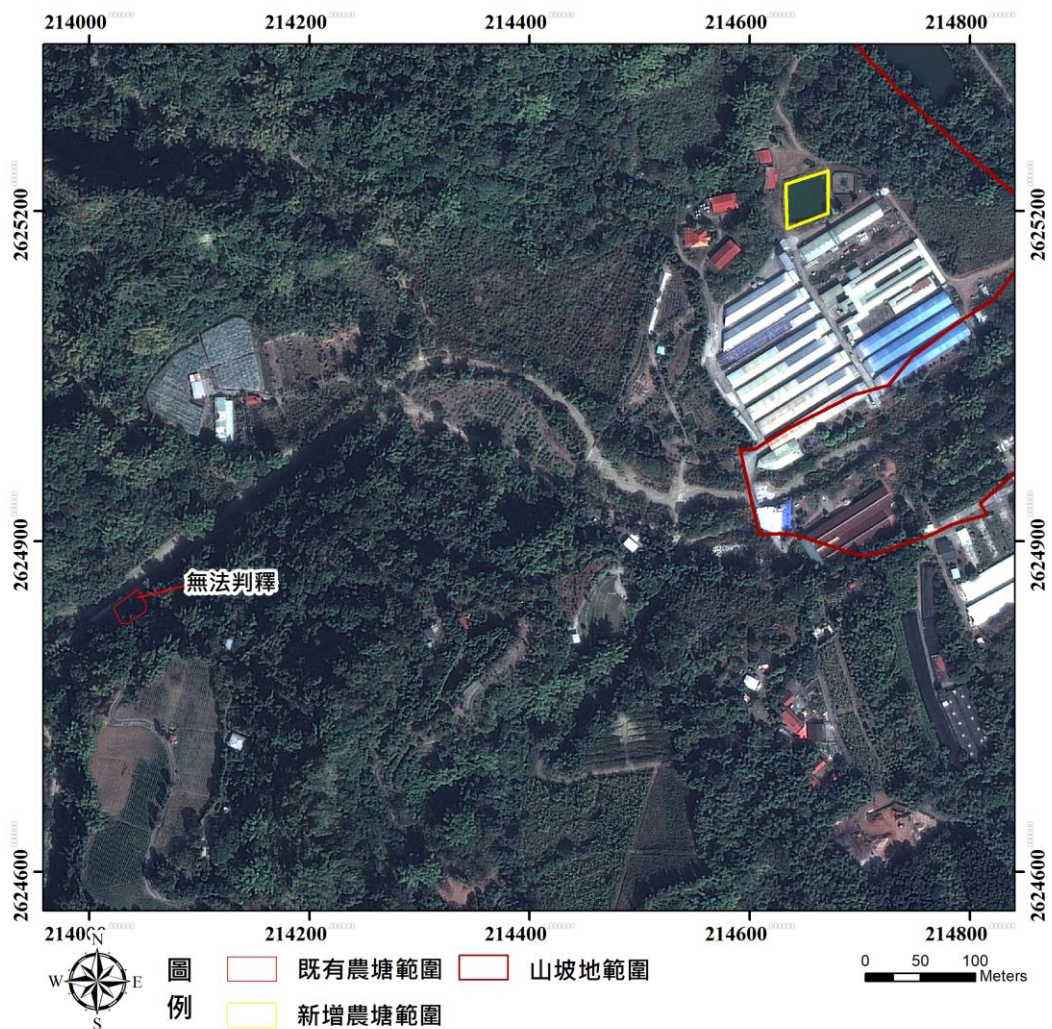
3. 監督式分類結果

圖 5-13 類型三分析案例成果

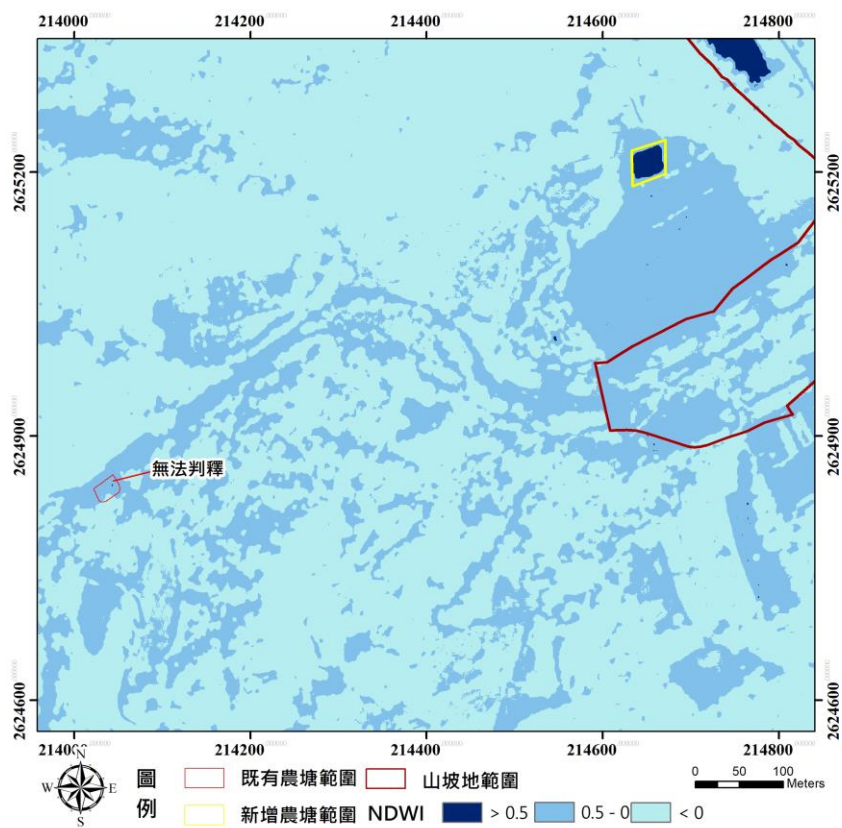
三、類型四與類型五具體案例

圖 5-14 展示通過影像判釋和地形分析，可發現新闢的水體區域。需在圖資中更新，並透過現場調查確定其使用類型，記錄其位置、面積及其他相關信息，以便進行有效的管理和利用。

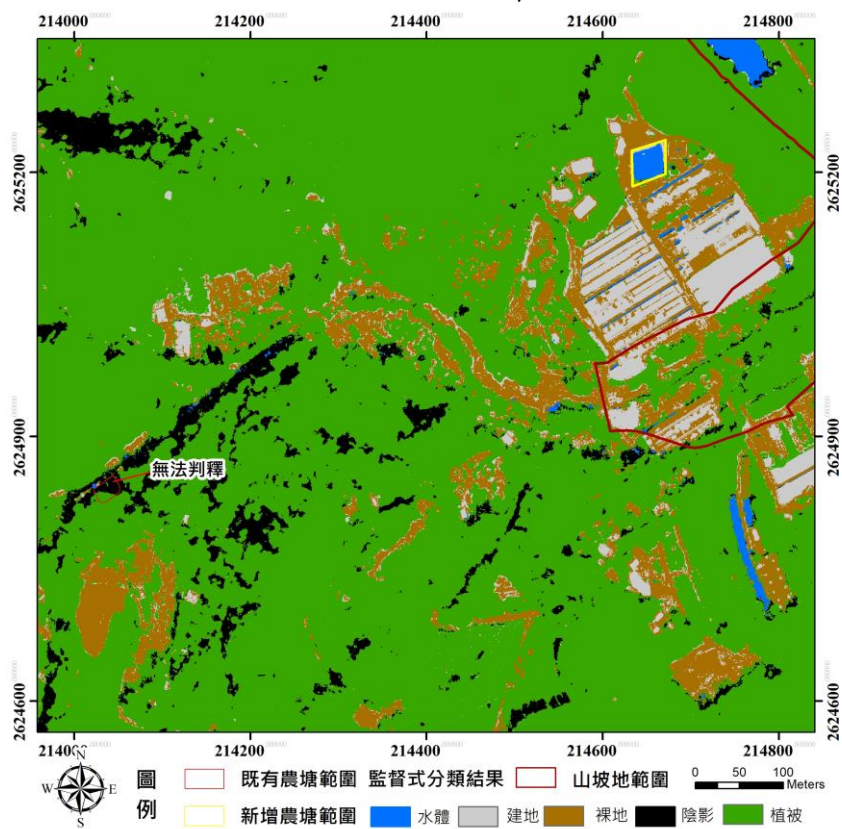
另外，部分山坡地農塘由於受到地形陰影的影響，導致無法判斷其存在或位置。這些情況下，將標記為無法判釋，已利現場實地調查與追蹤，補充影像分析的不足。



1. 類型四與類型五具體案例



2. NDWI 結果



3. 監督式分類結果

圖 5-14 類型四與類型五分析案例成果

第六章 坡地農塘土壤碳匯評估概念模式建置

第一節 農塘土壤碳匯評估概念

農塘的水資源常由溪流引水、地下湧水或部分抽取地下水源提供，水資源為農塘提供滯洪、農業用水、改進生態環境及休閒遊憩等多種用途。當農塘之水資源由溪流引水，其農塘集水區面積及地文水文條件，將控制其水量和水質。同時，集水區內的植被生物量、枯有機質、泥炭、有機土壤和其他有機碳物質，隨著逕流運移，最終在農塘中沉積。這一過程展示小集水區之陸源物質的運移過程，如圖 6-1 所示。陸域生態系統主要藉由植物的光合作用將碳吸存，並轉換至生物量和土壤中。有機碳經由陸源物質運移過程分為源頭（Source）、路徑（Pathway）及沉池（Sink）。集水區的碳循環涉及生物地質化學循環，將碳源轉換並移動至不同的碳庫。



圖 6-1 陸源物質有機碳之運移過程

農塘的碳匯量受多種因素影響，包括區位、氣象與水文情形、集水區大小、植被覆蓋情形和土壤有機碳存量等。集水區的土壤侵蝕或有機質遷移將有機碳匯集到農塘中，使農塘在碳循環和碳儲存中發揮重要作用。集水區提供豐富的有機碳，有機碳經運移，並再暫時或永久之沉池沉積，農塘亦是重要的碳儲存場域。

濕地碳儲存量取決於濕地的類型和大小、植被、濕地土壤深度、地下水和養分水平、pH 值以及其他因素。上述的重要參數可以透過實測調查獲得。在土地利用保持不變的情況下，我們更關心的是濕地每年對溫室氣體減量的淨變化量。濕地集水區由於土壤侵蝕或樹葉和樹木殘骸的移動，累積的碳亦是濕地重要的碳存量來源(Kusler and Christie, 2011)。本研究通過了解集水區土壤流失量與土壤碳存量之間的關係，進而估算農塘因土壤碳累積的碳匯量(C-ton/ha/yr)。

估算的碳匯量可以為制定農塘管理和保護策略提供依據，以科學方式量化農塘的生態系服務價值，期達到更有效的溫室氣體減排目標。

第二節 研究樣區

一、地理位置及概況

濁水溪以水質混濁得名，發源於合歡山主峰與東峰間佐久鞍部，主要支流有霧社溪、萬大溪、丹大溪、郡大溪、巒大溪、陳有蘭溪、水里溪、東埔蚋溪和清水溪等，流域面積 3157 平方公里，為全台流域面積第二大之河川。年逕流量約 61 億立方公尺，幹流長度 186.6 公里，為全省最長河川，流經南投縣、彰化縣和雲林縣，於彰化及雲林縣交界處入海(圖 6-2)。

流域有霧社水庫、奧萬大壩、武界壩、日月潭水庫、明湖水庫、明潭水庫、銃櫃調整池、頭社水庫、鹿谷堰及集集攔河堰等，為台灣水力蘊藏最豐富之河川，更有全台兩座抽蓄水力發電廠。本溪水資源利用上游以水力發電為主，中下游為農田灌溉，中下游水源調配以集集攔河堰為樞紐，由集集攔河堰引水濁水溪水源供應農業、工業及公共需求(經濟部水利署中區水資源分署，2023)。

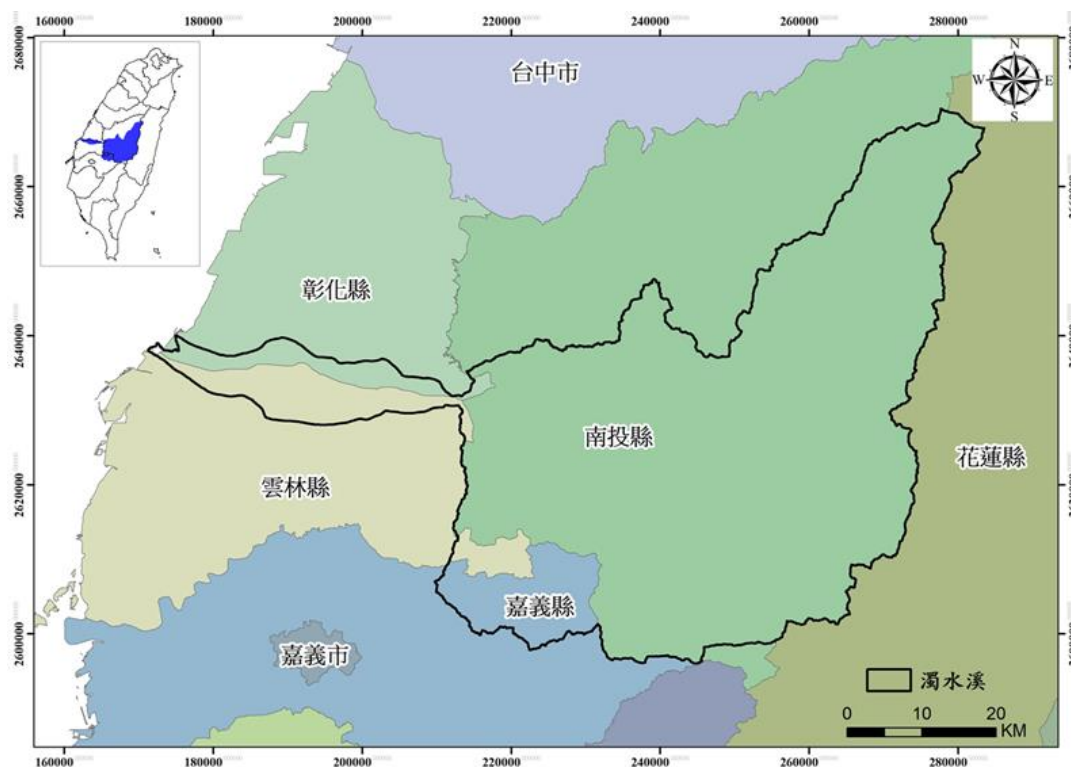


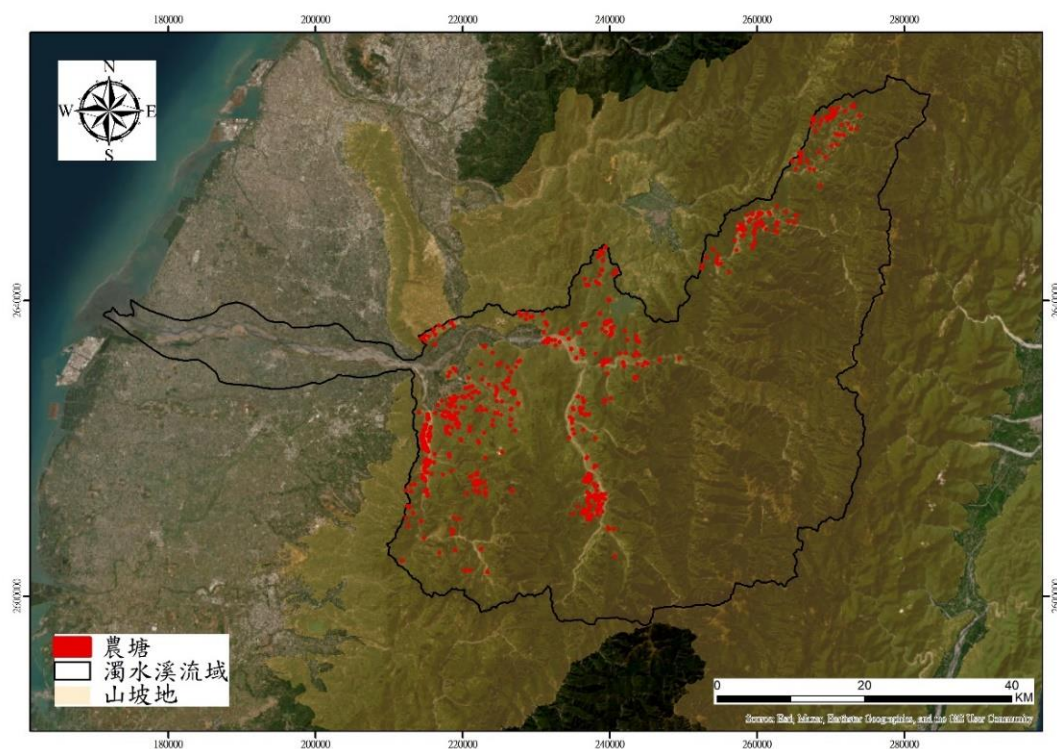
圖 6-2 濁水溪流域範圍

二、農塘之空間分布及篩選

根據農村水保署（2018 年）的調查，濁水溪流域共有 745 口農塘，其分布點位如圖 6-3 所示。本研究針對具有高度碳匯潛力的農塘，從而更有效地估算土壤碳匯量，並為未來的碳管理策略提供科學依據。

農塘蓄水面積越大，越具有涵容土壤碳庫之容積。因此，本研究優先針對蓄水面積較大的農塘，且實際使用情形為農塘的進行土壤碳匯評估。表 6-1 顯示各農塘的蓄水面積大小排序，並包含以下資訊：

1. 農塘區位座標（TWD_97X、TWD_97Y）
2. 農塘編號
3. 座落縣市及村里名稱
4. 農塘蓄水面積



資料來源：農村水保署(2018)

圖 6-3 濁水區流域內農塘點位

表 6-1 濁水區流域內農塘點位(依農塘面積大小排序前 15 名)

序列	農塘編號(新版編號)	地區	農塘蓄 水面積 (ha)	TWD97_X	TWD97_Y
1	M-鹿谷鄉-永隆村-南清水溝溪-0008	南投縣 鹿谷鄉 永隆村	8.6	226902	2627560
2	M-魚池鄉-頭社村-日月潭水庫-0015	南投縣 魚池鄉 頭社村	5.7	239479	2636938
3	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0078	南投縣 竹山鎮 鯉魚里	2.1	214523	2621202
4	M-竹山鎮-鯉魚里-桶頭-0051	南投縣 竹山鎮 鯉魚里	2.1	215012	2618345
5	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0071	南投縣 竹山鎮 鯉魚里	1.6	214636	2621901

6	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0077	南投縣 竹山鎮 鯉魚里	1.5	214569	2621017
7	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0076	南投縣 竹山鎮 鯉魚里	1.4	214584	2621327
8	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0081	南投縣 竹山鎮 鯉魚里	1.2	214516	2621567
9	M-名間鄉-中山村-外埔-0002	南投縣 名間鄉 中山村	1.1	218458	2637033
10	M-水里鄉-車埕村-水里-0004	南投縣 水里鄉 車埕村	1.1	236673	2636791
11	M-仁愛鄉-精英村-平靜-0049	南投縣 仁愛鄉 精英村	0.8	265896	2660038
12	M-竹山鎮-鯉魚里-桶頭-0054	南投縣 竹山鎮 鯉魚里	0.8	214898	2618106
13	M-水里鄉-車埕村-水里-0005	南投縣 水里鄉 車埕村	0.7	236361	2636724
14	M-竹山鎮-瑞竹里-桶頭-0032	南投縣 竹山鎮 瑞竹里	0.7	215272	2617849
15	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0075	南投縣 竹山鎮 鯉魚里	0.6	214587	2621704

資料來源：農村水保署（2018 年）調查結果。

三、水文與氣候生態區

將位於濁水溪流域中心區位之「竹山氣象站」2013 至 2022 年之資料進行整理，得知濁水溪概略之年均溫約為攝氏 23.6 度，最高溫出現在七月，最低溫在二月(表 6-2)，雨季主要從 5 月到 9 月(圖 6-4)，4 到 6 月梅雨季約佔全年雨量 40%，7 至 9 月颱風為好發季，帶來豐沛的降雨量，約佔全年雨量 49%，年降雨量約為 1,281 毫米至 3,214 毫米。山區可能受到海拔高度與地形影響導致與分析水文情形有所不

同，各區域仍依鄰近氣象站資料分析為主。

表 6-2 竹山氣象站之溫度與濕度資料 (2013~2022)

月份	平均溫度(°C)	最高均溫(°C)	最低均溫(°C)	相對溼度(%)
一月	17.2	28.0	7.2	83.2
二月	17.9	30.0	7.0	84.0
三月	20.5	32.0	10.6	84.1
四月	23.4	33.9	11.7	83.6
五月	26.4	35.2	16.3	84.9
六月	27.9	36.2	20.7	82.0
七月	28.2	36.4	22.4	83.0
八月	27.7	35.5	22.3	85.1
九月	27.5	34.9	19.2	81.2
十月	25.5	34.2	17.6	79.7
十一月	23.0	32.4	14.1	81.6
十二月	18.6	28.9	8.1	82.1
年平均	23.6	33.1	14.8	82.9

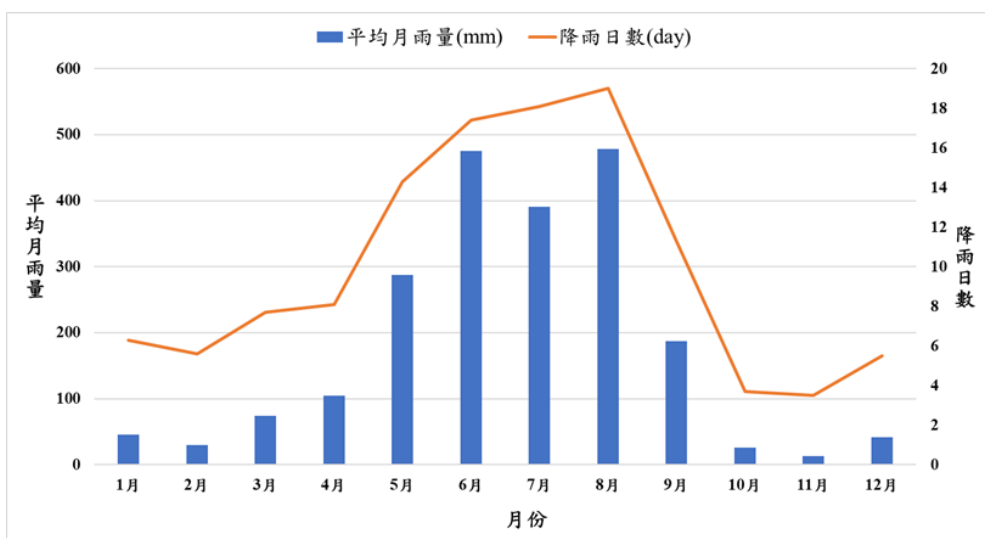


圖 6-4 竹山氣象站之月雨量及降雨日數(2013~2022)

在氣候生態分區劃分上，台灣位處亞熱帶島嶼國家，受到季風及地形因素影響，擁有多樣的生態類型。生態分區受到溫度、降雨及蒸發量之多寡而有所差異，形成不同的氣候帶及生態分區。依據 IPCC 的碳存量估算指南，氣候帶及生態分區由聯合國糧食及農業組織

(FAO) 的氣候帶與生態區標準進行分類。

氣候區與生態區的劃分標準如表 6-3 所示，首先以氣候帶劃分為主，依據月均溫度狀況進行區分。Köppen (1931) 將世界氣候劃分為五種主要的柯本氣候類型。生態區則進一步以各月均溫、乾濕季數(雨量、蒸發散)及海拔高度進行細分。細分方式有助於更準確地反映區域內的氣候和生態特性，從而提供更準確的碳存量估算。

依據 111 年度創新研究計畫「碳存量指標在農村再生社區營造效益評估之應用」報告分析成果，透過雨量站資訊應用克利金法並配合數值地形資料 (Digital Elevation Model, DEM) 進行輔助修正，考量「環境溫度遞減率」進行內插修正，計算與氣象站的環境溫度遞減率推估其遞減氣溫，再透過由克利金法計算的氣溫兩者平均得到推估氣溫。這些方法幫助我們更精確地估算氣溫和降雨量的空間分布，從而建構流域高解析度的氣候生態區劃分。

根據上述數據，製作氣候帶圖層與生態區圖 (如圖 6-5 所示)。
濁水溪流域的氣候生態區劃分如下：

1. 下游及中游區域：主要為亞熱帶濕潤森林及亞熱帶山地系統。
這些區域氣候溫暖濕潤，適合多樣的植物和動物群落生存。

2. 上游高山區域：涵蓋部分溫帶山地系統、寒帶山地系統及位於玉山主峰的寒原氣候。這些區域氣候寒冷，植被以耐寒植物為主，生態環境相對嚴峻。

表 6-3 氣候區與生態區分區標準(FAO, 2001)

氣候帶	生態區系	
	名稱	區分標準
Tropical 每個月均溫皆 大於 18°C	Tropical rain forest, TAR	冬季，乾季小於三個月
	Tropical moist deciduous forest, TAWa	冬季，乾季三到五個月
	Tropical dry forest, TAWb	冬季，乾季五到八個月
	Tropical shrubland, TBSh	半乾燥：蒸發量大於降雨量
	Tropical desert, TBWh	
	Tropical mountain systems, TM	每個月皆乾季

Subtropical 月均溫大於 10°C 有八個月 以上	Subtropical humid forest, SCf Subtropical dry forest, SCs Subtropical steppe, SBSH Subtropical desert, SBWh Subtropical mountain systems, SM	海拔大於 1000 公尺 無乾季 冬雨夏乾：季節乾旱 半乾旱：蒸發量大於降 雨量 每個月皆乾季
Temperate 月均溫大於 10°C 有四到八 個月	Temperate oceanic forest, TeDo Temperate continental forest, TeDc Temperate steppe, TeBSk Temperate desert, TeBWk Temperate mountain systems, TeM	海拔大於 800 公尺 最冷月均溫大於 10°C 最冷月均溫小於 10°C 半乾燥：蒸發量大於降 雨量 每個月皆乾季
Boreal 月均溫大於 10°C 小於三個 月	Boreal coniferous forest, Ba Boreal tundra woodland, Bb Boreal mountain systems, BM	針葉樹密林 稀疏樹林 海拔大於 600 公尺
Polar 每月均溫皆小 於 10°C	Polar, P	每月均溫皆小於 10°C

氣候域：以月均溫度狀況作為依據，同 Köppen-Trewartha 氣候組別(Köppen, 1931)。
乾旱月份：總降水量(mm) $\leq 2 \times$ 月均溫度(°C)。

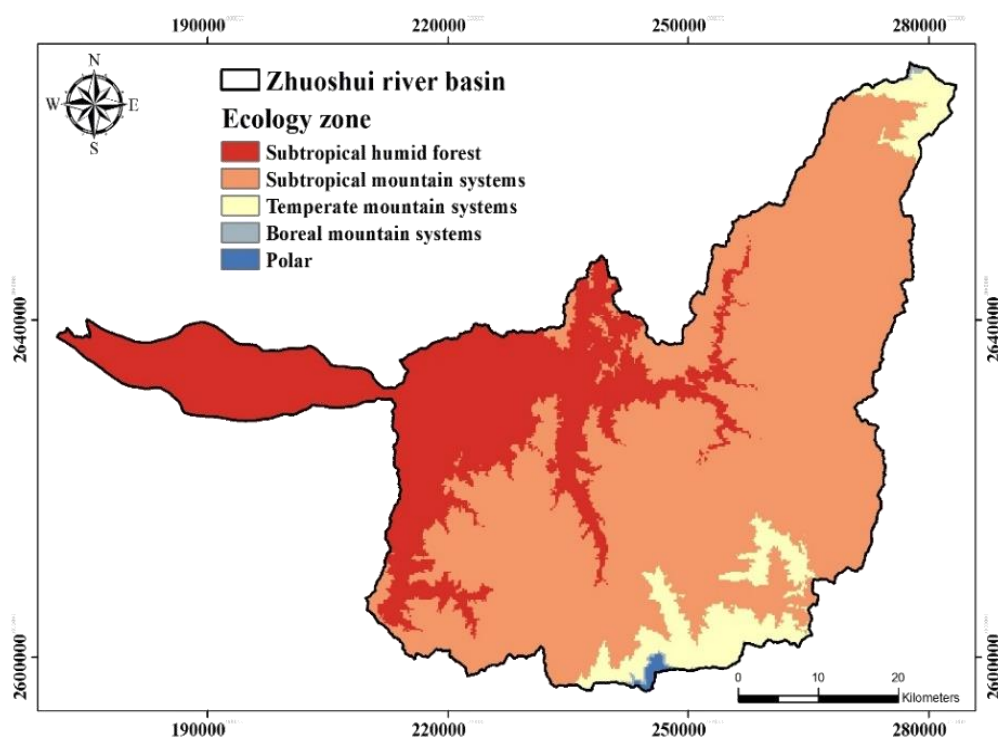


圖 6-5 流域氣候及生態區劃分結果

(圖片來源: 111 年度創新研究計畫「碳存量指標在農村再生社區營造效益評估之應用」報告)

四、泥砂產量推估模式建置

集水區土壤流失量的估算是水土保持工作中至關重要的一環。傳統上，我們多使用美國農業部（United States Department of Agriculture, USDA）在 1965 年提出的通用土壤流失公式（Universal Soil Loss Equation, USLE）進行估算。然而，USLE 主要是根據田間標準樣區的建構，將其應用於整個集水區存在著一定的限制和困難。例如，USLE 中的降雨沖蝕指數(R)需要大量的雨量站數據進行建立更新，而土壤沖蝕指數(K)則需要繁重的田間土壤調查分析。此外，地形因素中的坡長因子(L)與坡度因子(S)相互關聯密切，在集水區尺度下很難確定合理的坡長。覆蓋管理因子(C)與水土保持因子(P)之間存在著參數相依性問題，並且其合理值的設定也相當困難。USLE 作為全球使用最廣泛且誤用最多的模式，其及其修正模式在使用降雨沖蝕指數時缺乏對逕流的考慮，導致缺乏對事件沖蝕能力的預測。許多研究指出 USLE 模式存在著估算準確度問題。

在實務應用上，通常使用水土保持技術規範中的表格，並以主觀方式選參數進行估算。然而，這種傳統的估算方法在氣候變遷的環境下，無法及時反映土壤流失的現況或滿足規劃設計的需求。

為解決上述問題，本研究擬應用風險概念結合環境指標，建立集水區尺度的泥砂產量推估模式。該模式可以快速推估坡面對於特定集水區出口或庫區的泥砂產量貢獻量，並掌握集水區泥砂產量的空間分布情況。

本研究基於 IPCC 第五次評估報告（2014）提出的災害風險評估概念，詳細分析各種環境指標對土壤流失量的影響，並建立集水區泥砂產量的推估模式。災害風險被定義為危害度（Hazard）、脆弱度（Vulnerability）和暴露度（Exposure）的乘積，用於評估事件發生的

機率。危害度通常描述外力導致事件發生的程度，而脆弱度則指代地區本身對外力的抵抗能力。暴露度則是一種調整因子(Wu et al., 2022)。模式中，危害度以年降雨量指標 (Annual precipitation, P) 來表示，脆弱度則以綠劣指標 (Greenery Deterioration Index, GDI) 來評估植被覆蓋對土壤流失的承受能力。暴露度則以地形濕度指數 (Topographic Wetness Index, TWI) 來修正土壤化育深度因子。應用三個因子作為土壤流失量的潛在評估模式。

此外，透過泥砂遞移率 (Sediment Delivery Ratio, SDR) 來估算泥砂的貢獻量。綜合考慮以上評估因子，評估各網格的泥砂貢獻量指標。最終，將集水區內各網格的泥砂貢獻量指標值相加，即得到集水區的年總泥砂產量指標。

由於泥砂產量包括坡面流失量和崩塌地流失量，因此，在計算時加入年度崩塌地泥砂的貢獻量。透過推估崩塌地之坡度與深度之間關係，加以估計崩塌量，再乘以 SDR 以獲得各網格的崩塌量之泥砂貢獻量。該泥砂產量推估模式的公式如下(式 7)：

$$\begin{aligned} SY_{SP} &= \sum(P * GDI * nTWI * SDR) \\ SY_{LS} &= \sum(LS * SDR_{LS}) \end{aligned} \quad (\text{式 7})$$

式中： SY_{SP} 為集水區年坡面總泥砂產量指標；P 為年雨量；GDI 為植生綠劣指標；nTWI 為正規化地形濕度指數；SDR 為泥砂遞移率。 SY_{LS} 集水區年崩塌地總泥砂產量(ton)；LS 為崩塌量； SDR_{LS} 為崩塌地泥砂遞移率。

為求不同指標對於泥砂產量潛勢之影響，針對 GDI 及 TWI 指標進行正規化處理，以平衡各個指標於計算中之權重。正規化公式如下(式 8)：

$$\text{正規化} = \frac{(X - \text{最小值})}{(\text{最大值} - \text{最小值})} \quad (\text{式 } 8)$$

本研究基於網格的概念模式，採用 USLE 架構，旨在利用集水區中各個網格的环境變數來推估年泥砂生產指標。該模式將根據每個網格的环境條件，包括降雨量、植被覆蓋、地形濕度等因素，進行泥砂產量指標的估算。透過比較推估值(指標值)與實測值(本研究以濁水溪流流域之彰雲橋水文站之懸浮載資料作為泥砂產量)之間的相關性決定係數 (R^2)，可以量化模式的解釋能力，並透過轉換式，估計每個網格之實際輸砂貢獻量。

藉由環境因子之特性，能夠有效地反映集水區泥砂產量之空間分布特性，有助於解決模式參數和系統反映的不確定性、推估和觀測數據的時空分辨率不一致、以及主觀認定的問題。有效提供集水區網格土砂沖蝕情形，並識別土砂來源的熱區及量體概估。

五、模式建置之環境指標

(1) 年降雨量(Annual precipitation, P)

透過集水區之鄰近氣象站，利用徐昇式多邊形法(Thiessen's Polygon Method)劃定雨量量測範圍以進行篩選，共計 48 處氣象站(圖 6-6)，可推估集水區各樣區之降雨量與雨量站控制面積。為減輕資料處理工作，本研究採用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫(TCCIP)，整合公私部門歷史觀測資料，臺灣地區過去氣候變遷及臺灣地區未來推估，建立長期而穩定的氣候資料庫，提供臺灣氣候變遷科學與技術研究服務資訊。以 TCCIP 提供臺灣地區為 1 公里× 1 公里網格化觀測資料(圖 6-7)，觀測資料氣象變數包含降雨量、平均溫、最高溫及最低溫。時間尺度自 1960 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日

共 60 年長期氣象觀測資料，共 60 筆 21,915 個時間點。

觀測資料使用中央氣象局(以下簡稱:氣象局)、經濟部水利署(以下簡稱:水利署)、交通部民用航空局(以下簡稱:民航局)、行政院農業部林業試驗所(以下簡稱:林試所)及農試所等多個單位所提供之測站資料。

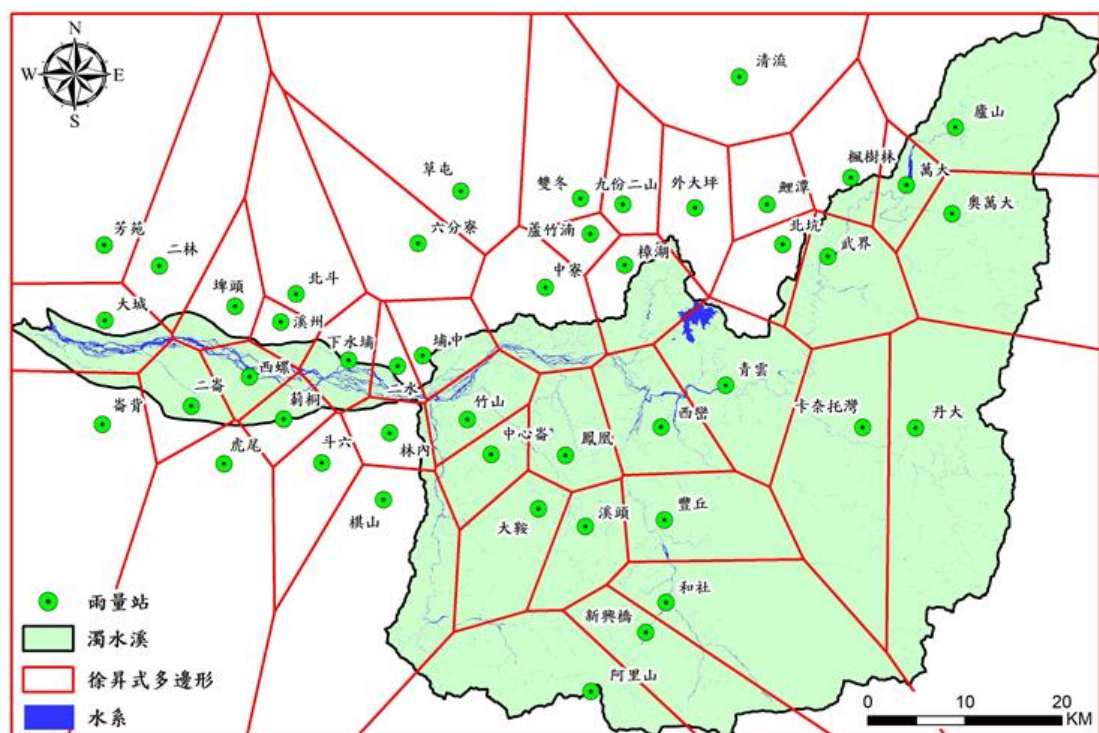


圖 6-6 濁水溪集水區徐昇式多邊形控制面積

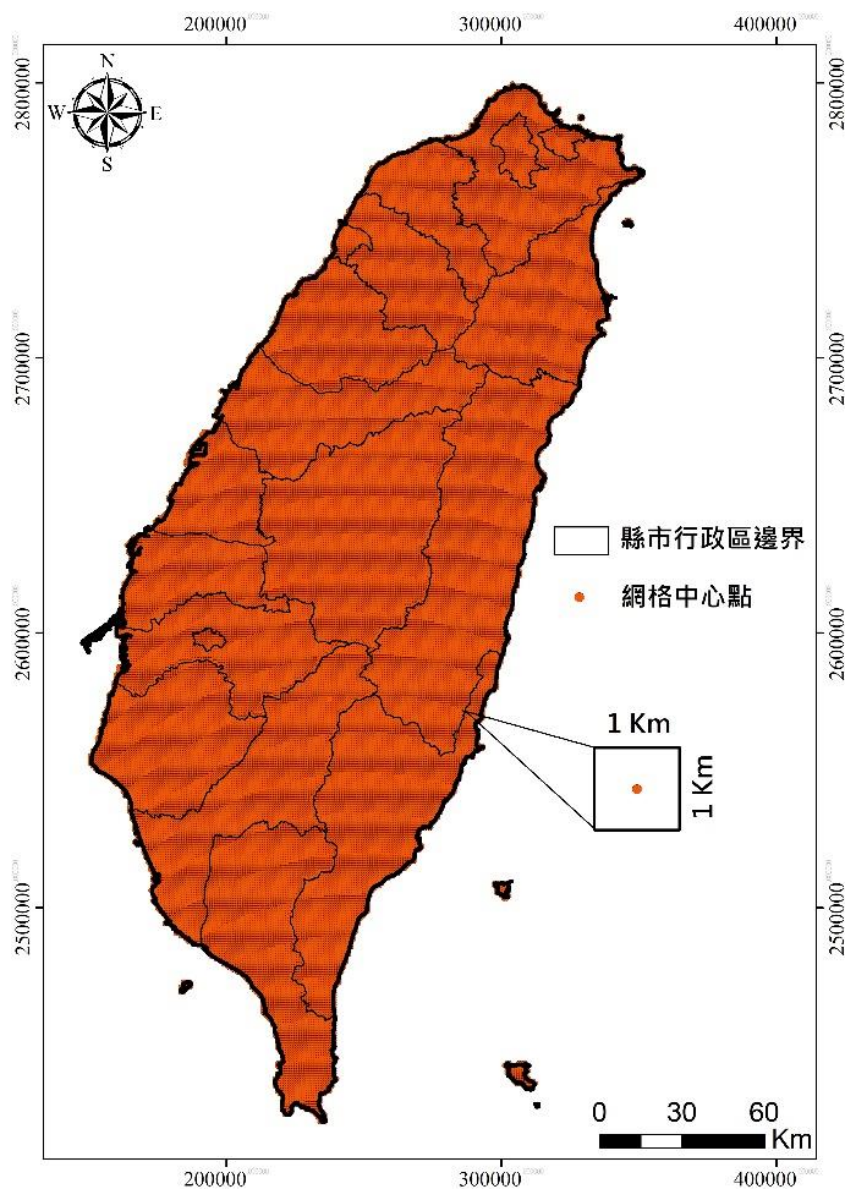
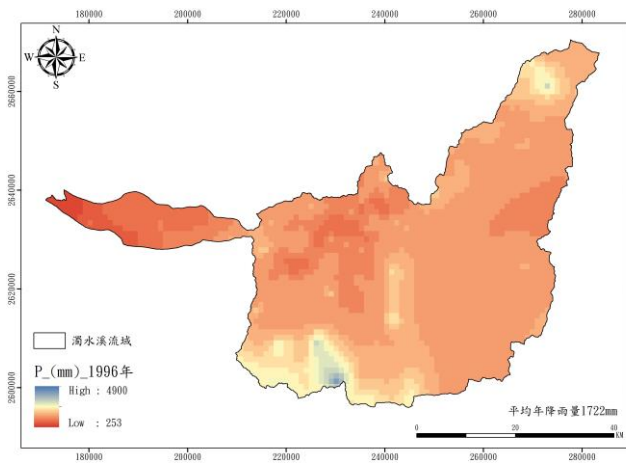
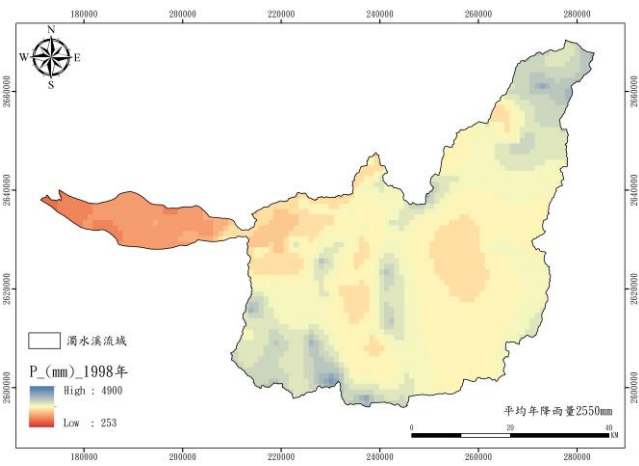


圖 6-7 TCCIP 產製全台網格化資料

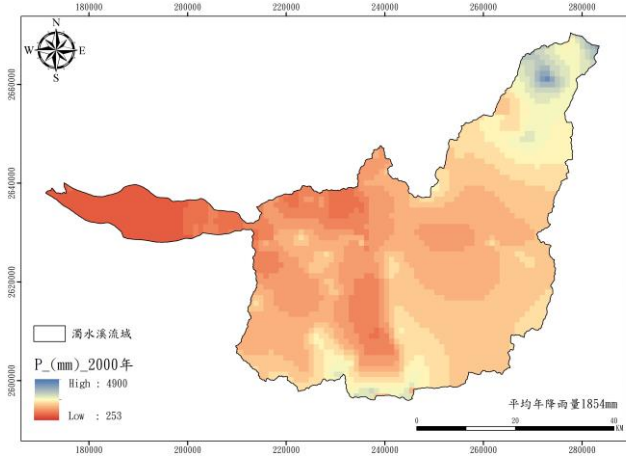
利用 TCCIP 網格化觀測資料可推得濁水溪流域之各年降雨量(P)。配合流域之完整衛星影像取得，本研究採用 1996 年、1998 年、2000 年、2003 年、2004 年、2007 年、2009 年、2013 年、2018 年、2019 年、2020 及 2021 年共十二期之年降雨量，各年年降雨之空間分布如圖 6-8 所示。濁水溪流域年降雨量之空間分布中，西半部平地雨量相對低，年降雨量最低達 253mm；支流清水溪、陳有蘭溪及濁水溪源頭受到地形影響，雨量相對高，年降雨量最高達 4,909mm。



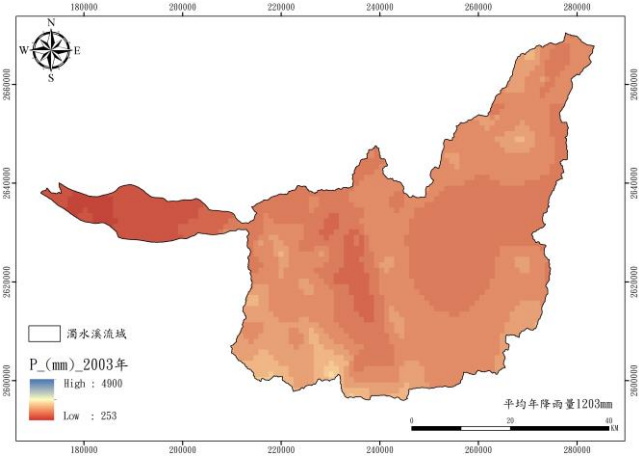
(a) 1996 年雨量(P)



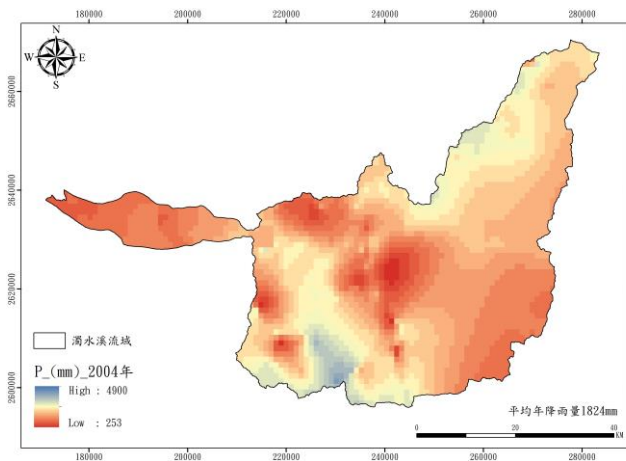
(b) 1998 年雨量(P)



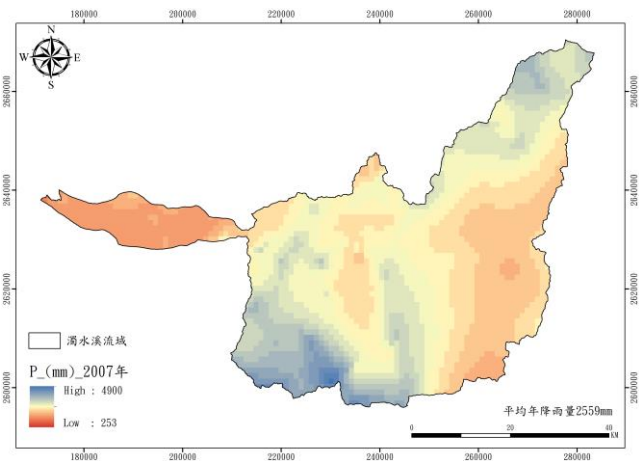
(c) 2000 年雨量(P)



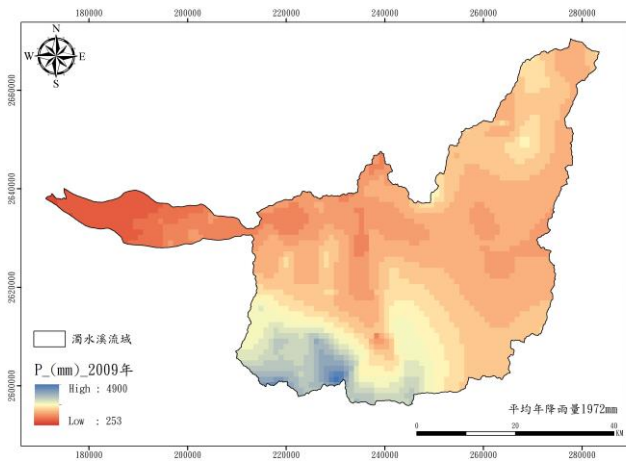
(d) 2003 年雨量(P)



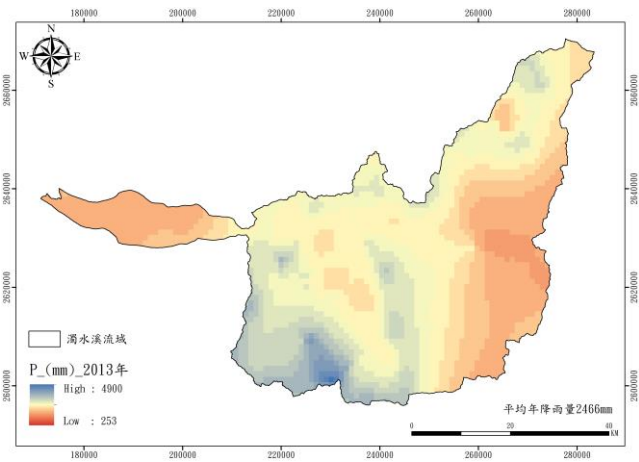
(e) 2004 年雨量(P)



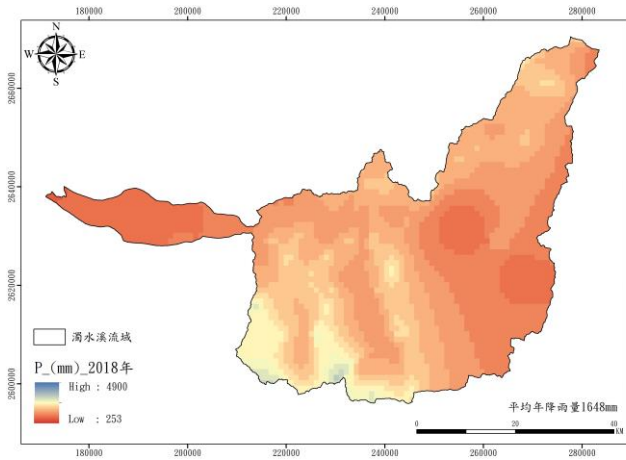
(f) 2007 年雨量(P)



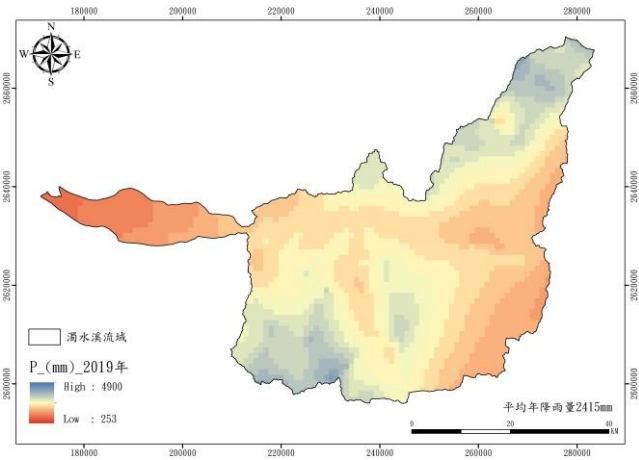
(g) 2009 年雨量(P)



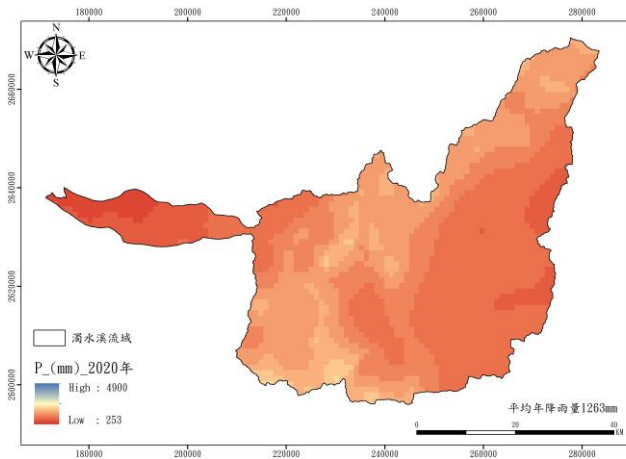
(h) 2013 年雨量(P)



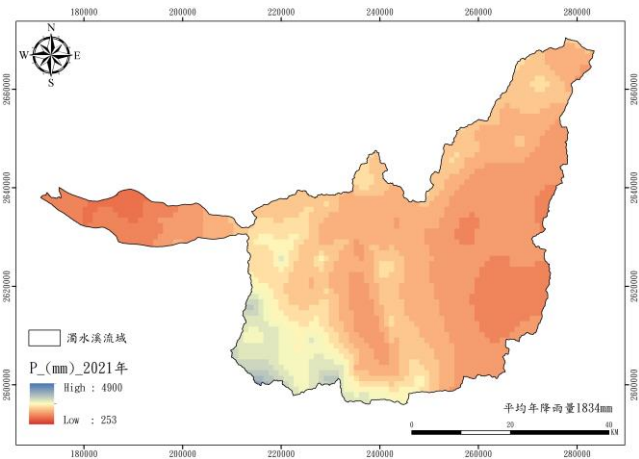
(i) 2018 年雨量(P)



(j) 2019 年雨量(P)



(k) 2020 年雨量(P)



(l) 2021 年雨量(P)

圖 6-8 各年雨量成果

(2) 植生綠劣指標(Greenery Deterioration Index, GDI)

常態化差值植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index ; NDVI) 概念最早由 Rouse et al.(1974)所提出，因植生有反射紅外光(NIR)，吸收紅光(R)之特性，故可透過計算近紅外光波段及紅光波段之差值除兩者之和，即為 NDVI。

植生對於邊坡具有固土、降低沖蝕量之功能，利用 NDVI 可以判斷地表受植生覆蓋程度，其值為-1 至 1 之間，植生覆蓋較好，光合作用較強，其值越高，反之如果此地為裸露地，植被覆蓋較少之地方，其值越低，其公式如下(式 9)：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (\text{式 9})$$

式中：NIR 為近紅外光波段，R 為紅光波段。Cai et al.(2014)提到 NDVI 介於 0.6~0.8 表示為覆蓋良好的的植被，如原始森林、人工及都市林等；介於 0.2~0.6 則代表灌木和草原；趨近零表示裸露地區或城市地區，而負值主要對應於雲、水和雪(圖 6-9)。

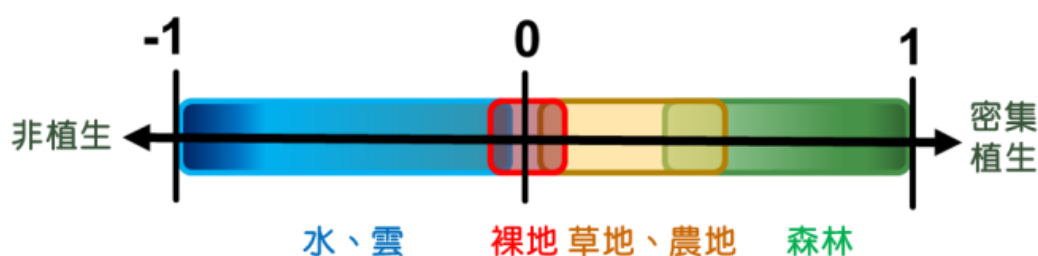


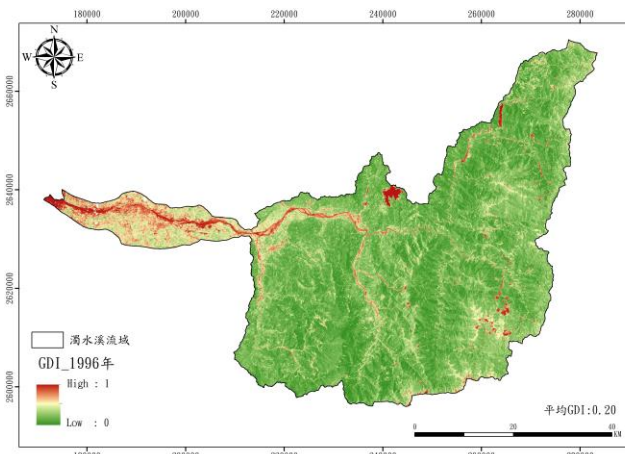
圖 6-9 NDVI 值域與地覆之對照圖

植生綠劣指標(Greenery Deterioration Index, GDI)以 NDVI 經線性反轉配置為 GDI，其合理值域為 0 到 1，即當植生覆蓋愈差，所對應之 GDI 值愈大(林文賜, 2002)，其公式如下(式 10)：

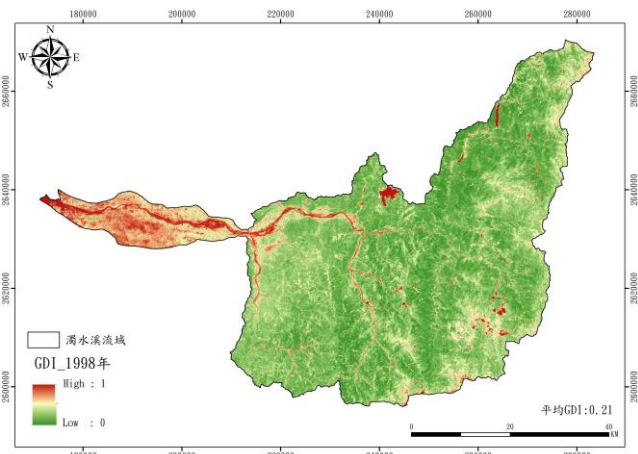
$$GDI = \frac{1 - NDVI}{2} \quad (\text{式 } 10)$$

其值介於 0 到 1 之間，其值越高越接近 1，代表植生覆蓋較少，可能遭受破壞或為崩塌地、裸露地，缺少植被保護之區域；其值越低越接近 0，代表植生覆蓋較多，發育較良好，具有良好植被覆蓋。

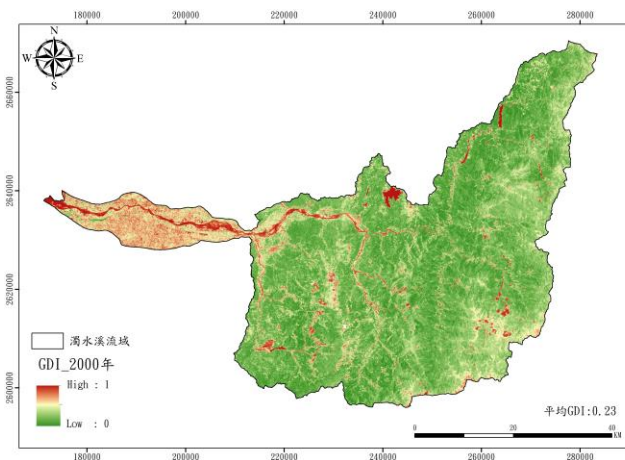
各年之 GDI 成果如圖 6-10 所示，各年之流域之 GDI 平均值介於 0.14 至 0.32 之間，植生覆蓋率最好為 2021 年，最差的為 2009 年 GDI 平均值為 0.32，主要受到莫拉克風災事件影響；其次為 2007 年 GDI 平均值為 0.30，主要受到柯羅莎、韋帕及聖帕颱風事件影響。



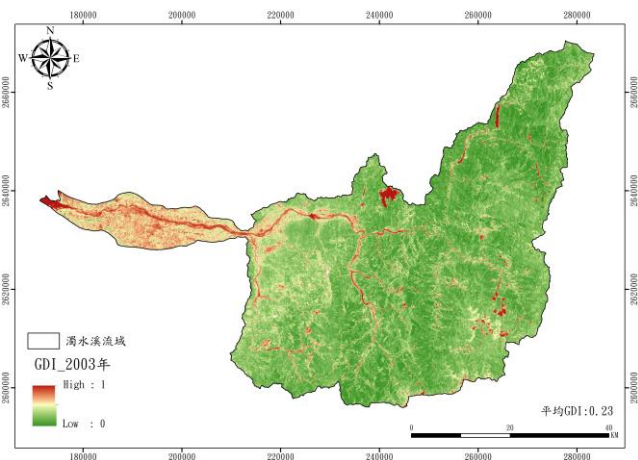
(a) 1996 年 GDI



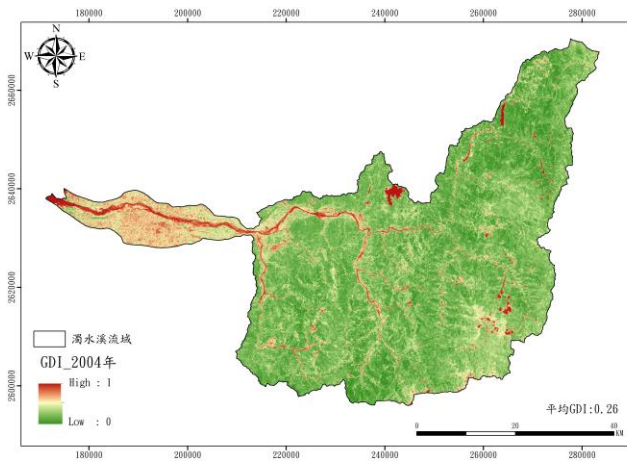
(b) 1998 年 GDI



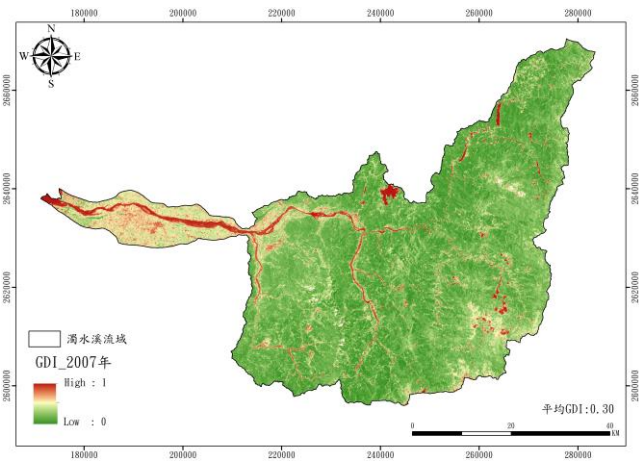
(c) 2000 年 GDI



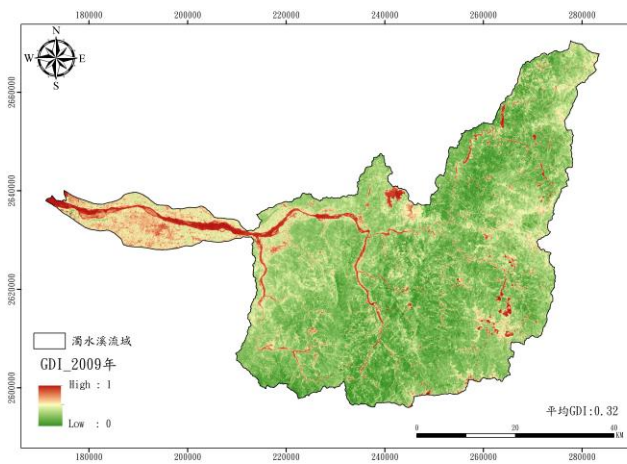
(d) 2003 年 GDI



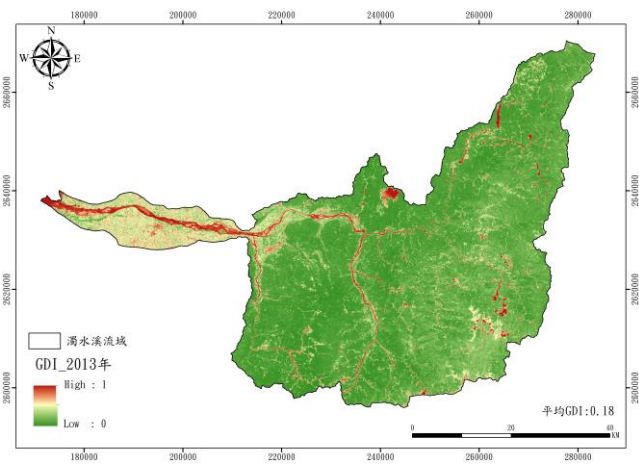
(e) 2004 年 GDI



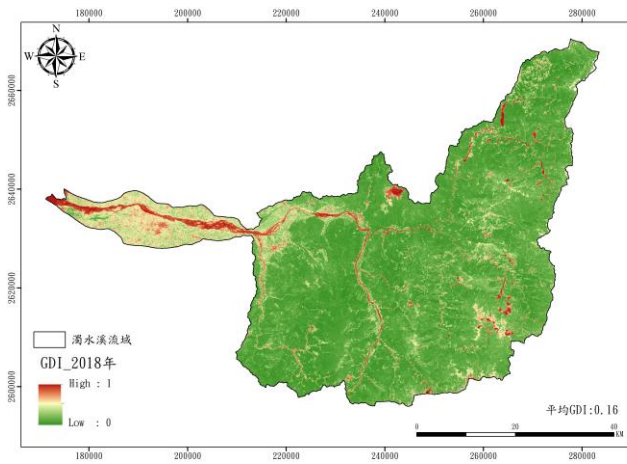
(f) 2007 年 GDI



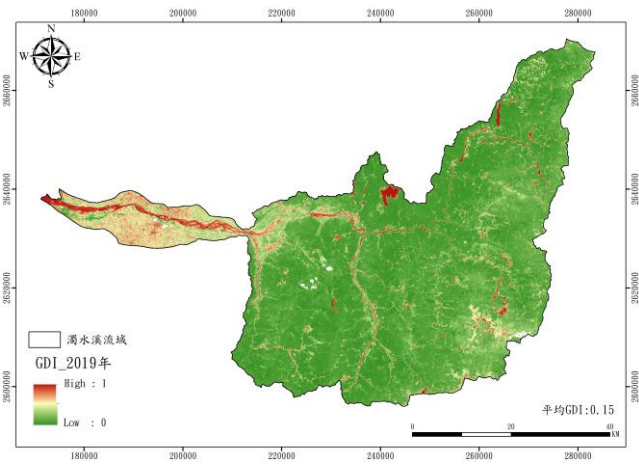
(g) 2009 年 GDI



(h) 2013 年 GDI



(i) 2018 年 GDI



(j) 2019 年 GDI

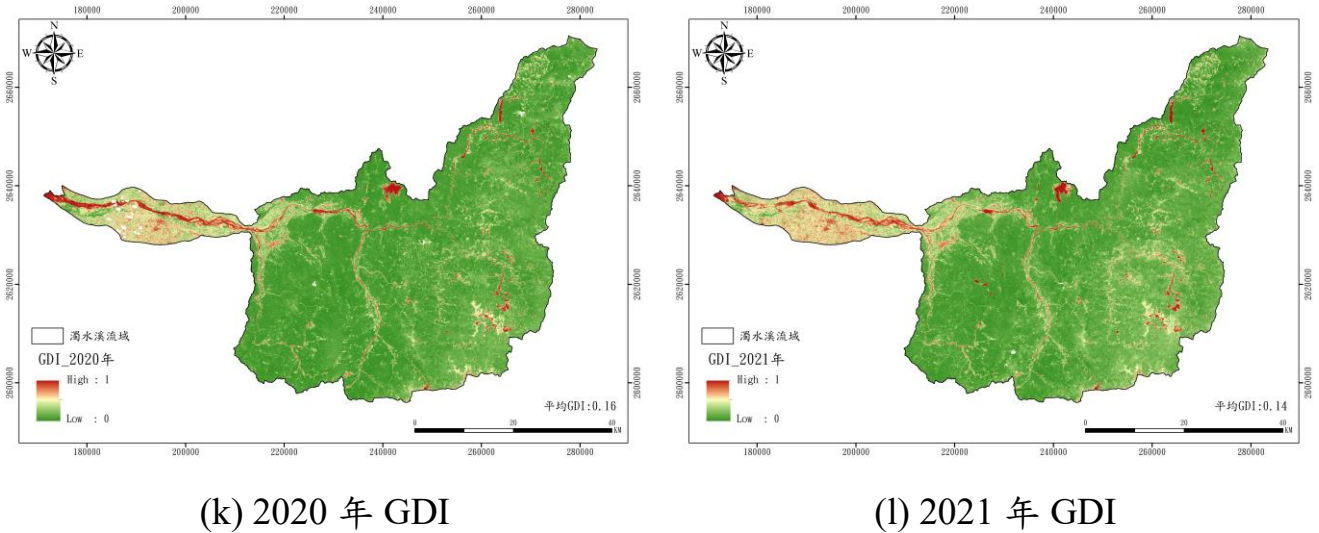


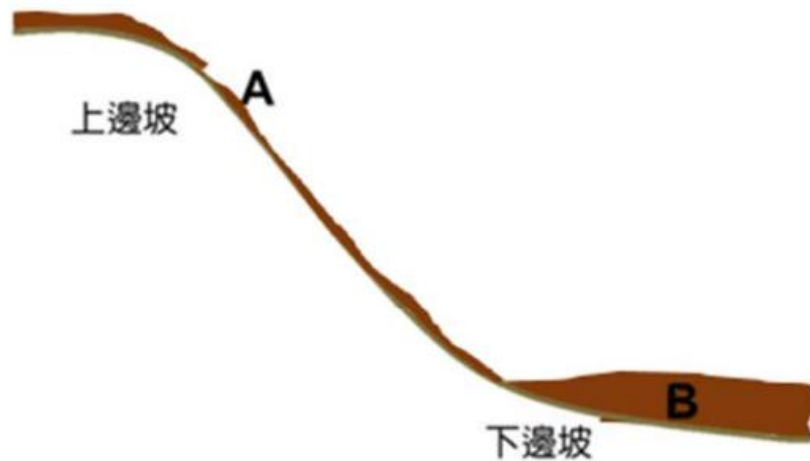
圖 6-10 各年 GDI 成果

(3) 地形濕度指標(Topographic Wetness Index, TWI)

地形濕度指標最早由 Beven and Kirkby(1979)所提出，為水文模式(Topography based hydrological Model)主要概念模式之一，其中考慮兩個原因，為坡度與上游集水面積(圖 6-11)。

TWI 代表地形及集水區逕流量，對土壤累積的控制，坡度較陡時，導致逕流流速較快，入滲量較低，土壤含水量較低，土壤堆積能力較差，亦代表流失量越大。反之，坡度較緩時，逕流流速較慢，入滲量較多，土壤含水量較高，土壤較容易堆積，可能產生較厚之土層，亦代表流失量越小。故可透過 TWI 反映區位的土壤流失之因子，其公式如下(式 11)：

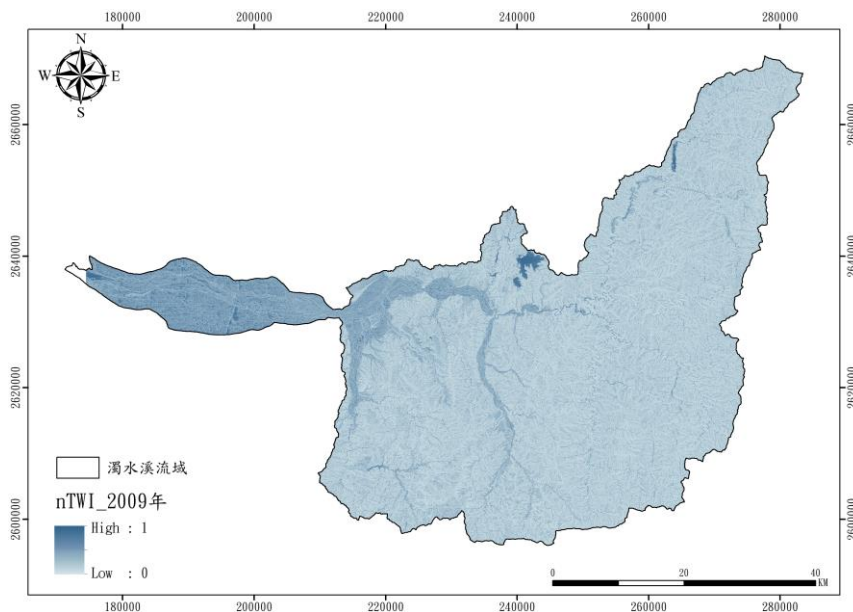
$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \theta}\right) \quad (\text{式 } 11)$$



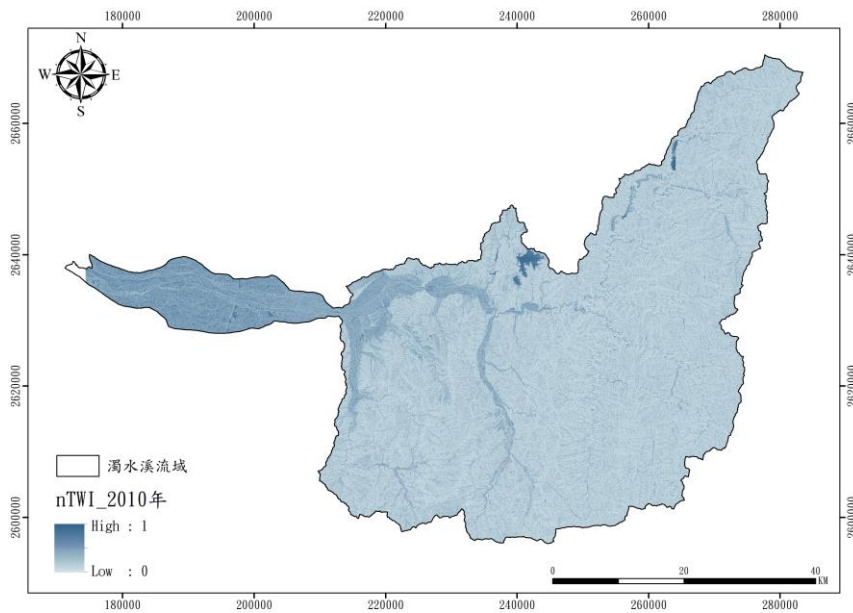
參考來源：吳炤緯(2020)

圖 6-11 地形濕度指標概念

TWI 可由 DEM 計算各網格的坡度及上游集水區面積而得。DEM 資料之主管單位為內政部地政司衛星測量中心。考量集水區重大土砂事件，本研究選用莫拉克風災前後產製的 DEM 資料，時間區間約為 2009 年前及 2010 年後(如圖 6-12)。依據分析年份，選用相應的 TWI 進行建模。



(a) 2009 年前 nTWI 空間分布



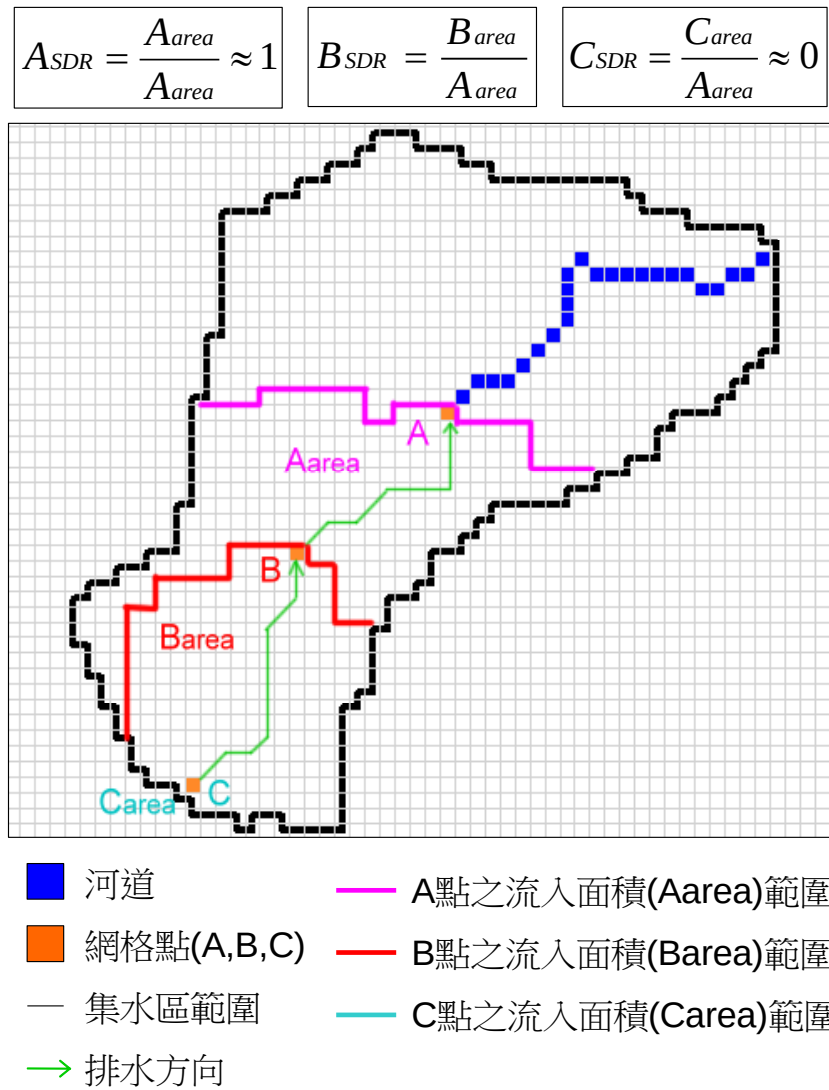
(b) 2010 年後 nTWI 空間分布

圖 6-12 nTWI 空間分布

(4) 泥砂遞移率(Sediment Delivery Ratio, SDR)

泥砂遞移率由 Lin et al. (2002)所建構之理論基礎，假設坡面泥砂主要係由坡面地表水所帶動，運移至渠道(常流水)而流失。依此一假設及泥砂遞移率之定義，泥砂遞移率可視為某網格對最接近渠道網格之泥砂貢獻量，若將泥砂貢獻量用網格上游流入面積表示，則網格上游流入面積愈大，其產生的逕流量亦愈大，愈能將泥砂帶至河道。

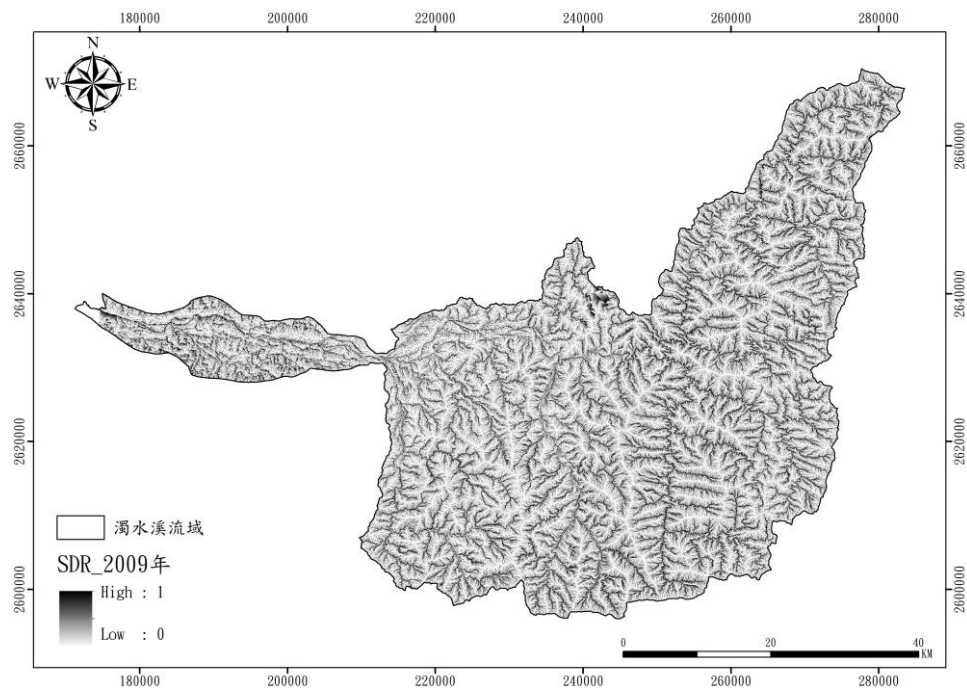
因此，集水區坡面上任一網格之泥砂遞移率，可視為該格點(A)上游流入面積(grid)與該網格(A)流至最接近渠道之上游流入面積(total)之比值，如圖 6-13。意即濱水區愈靠近渠道之網格，其坡面沖蝕之泥砂愈容易進入渠道，而增加河道之泥砂產量，故泥砂遞移率愈高。泥砂遞移率越大之區位，有越大的機率造成泥砂產量，同樣影響集水區泥砂產量之大小，故將其視為模式之暴露度(調整因子)。



參考來源：Lin et al., 2002

圖 6-13 泥砂遞移率概念

SDR 係由 DEM 計算各網格之地文資訊而得。本研究選用莫拉克風災前後之 DEM 產製的 SDR 資料，時間區間約為 2009 年前及 2010 年後(如圖 6-14)。依據分析年份，選用相應年份之 SDR 進行建模。



(a) 2009 年前 SDR 空間分布



(b) 2010 年後 SDR 空間分布

圖 6-14 SDR 空間分布

六、集水區泥砂產量推估

1. 集水區崩塌地泥砂產量推估

考量集水區土砂來源主要來自崩塌及坡面土壤流失，將坡面土壤流失之泥砂產量模式加入崩塌區位進行修正，可得推估集水區泥砂產量之概念模式。崩塌面積的萃取可由各單位已建置的崩塌地圖資及衛星影像資料輔助，萃取集水區內的崩塌區位，並進行新增崩塌區位的萃取。林業署自 2004 年至 2017 年期間已建置每年全島的崩塌地圖資 (<https://data.gov.tw/dataset/155534>)；2018 年之後的崩塌地資訊由農村水保署接手進行全臺崩塌地圖層建置 (<https://data.gov.tw/dataset/168660>)。在崩塌地判釋成果上，最小判釋面積為 0.1 公頃。

在「新增崩塌地」的萃取部分，利用前後兩時期的崩塌地圖層進行相對套疊，萃取新增崩塌地範圍。為避免崩塌區及堆積區的裸地造成崩塌量體重複估算，參考前人研究台灣地區崩塌地的坡度均位於 15 度至 40 度之間；土石流發生地點的坡度大約在 15 度至 30 度之間，而堆積地點的坡度以 3 度至 6 度之間為多。本計畫將崩塌區分為滑落區及堆積區，保守設定坡度門檻值為 15 度，用於對崩塌滑落區進行分區。坡度在 15 度以下的區域，若初步被判釋為裸露地則予以剔除，將最終修正的成果視為新增崩塌地。

在「崩塌量推估」萃取部分，為能有效進行大區域及大量資料之計算與比對，故採用地理資訊系統 ArcGIS 10.3 之 Raster Calculator 模組計算推估崩塌量體(圖 6-15)，崩塌量體係以崩塌面積乘上崩塌代表深度作為崩塌體積，而崩塌代表深度則以下列所述崩塌地代表坡度(亦可以 DEM 於 ArcGIS 10.3 之 Slope 模組計算獲得)方式進行推估。根據水土保持手冊之崩塌量體估算公式，Khazai and Sitar (2000)針對

集水區內崩塌地進行現場調查時，依照不同的坡度範圍給定代表性的崩塌深度(表 6-4)，以供作為崩塌深度推估之參考。

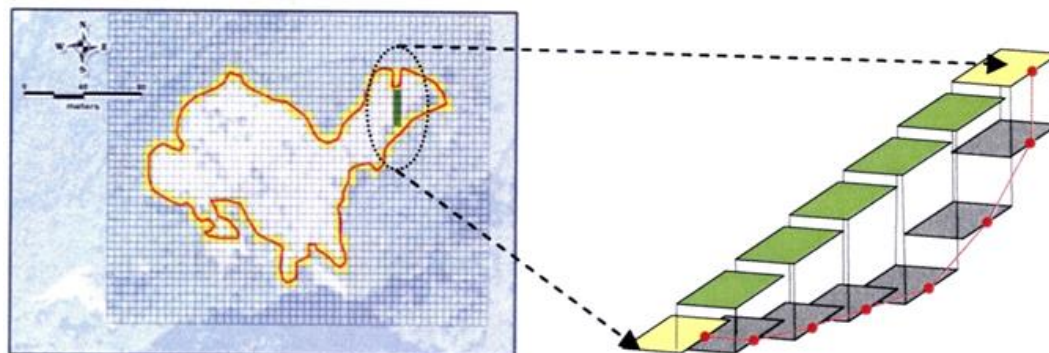


圖 6-15 崩塌地量體推估示意圖

表 6-4 崩塌深度估計參考表(Khazai and Sitar, 2000)

坡面坡度(°)	推估深度 (公尺)
<30	2
30~40	1.5
40~60	1
>60	0.5

莊智瑋(2010)以 Khazai & Sitar 法來推估崩塌土砂量發現，因 Khazai & Sitar 法為現地調查面積，而應用衛星影像劃定崩塌地面積為投影面積，兩方法之差別在於崩塌面積劃定不同，依上述方法所推估之崩塌量仍有低估現象，為修正崩塌土方量，莊智瑋(2010)針對台灣九份二山、九九峰、大甲溪集水區及白石等實際發生崩塌地，前後之崩塌地現況進行分析，其相關修正公式為 $Y=5.792x-45366$ ($R^2=0.8709$)。因此，採用 Khazai and Sitar 方法於崩塌土方量推估時，

可利用上述算式進行修正，其中 x 為 Khazai and Sitar 方法所推估之崩塌土方量，其值介於 9,500~1,200,000 立方公尺(圖 6-16)。

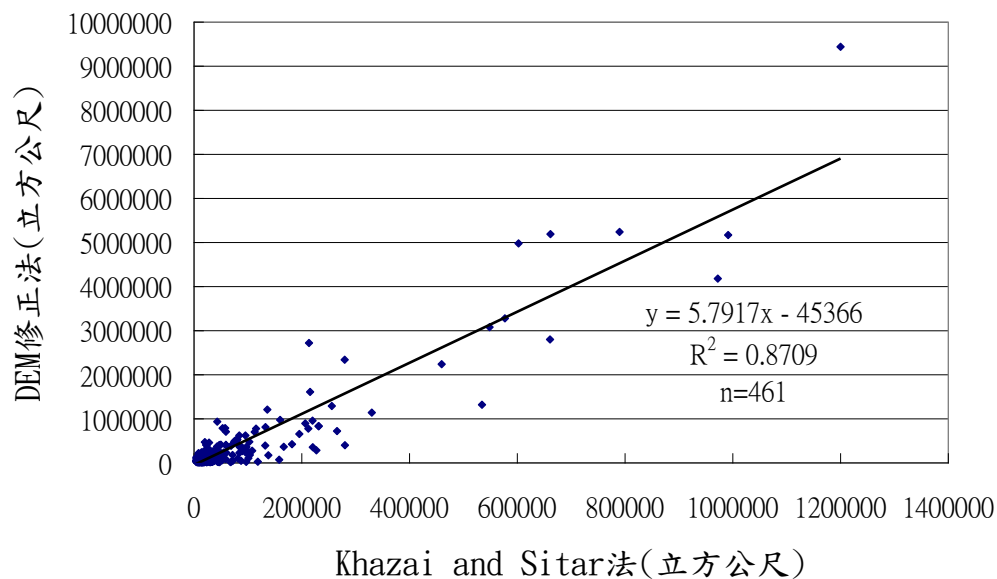
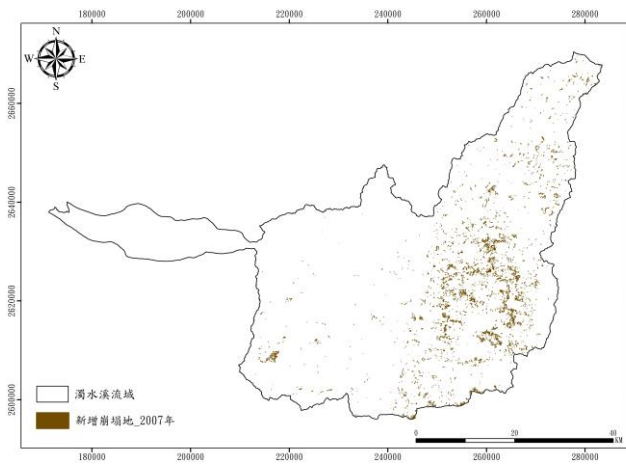


圖 6-16 崩塌體積相關分析(莊智瑋 2010)

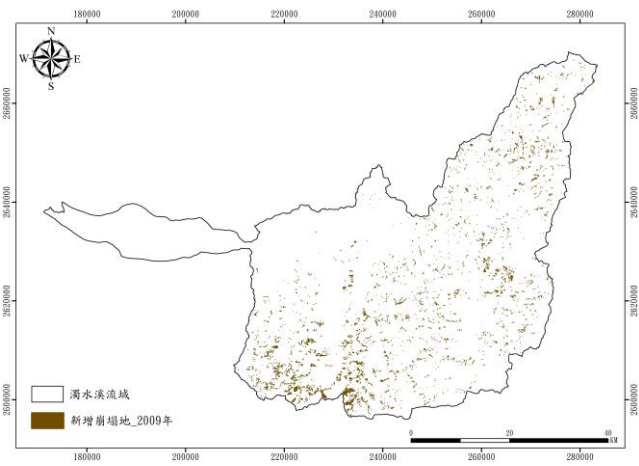
2. 集水區崩塌地泥砂產量推估成果

透過萃取新增崩塌地面積，應用 Khazai & Sitar 法配合崩塌土方量修正公式，推估修正崩塌量。由於新增崩塌地的地文及水文特性反映不同的遞移情形，透過計算每一崩塌地之 SDR，則可概估該年新增崩塌地的泥砂產量。本研究依據既有崩塌遞移資料，共萃取 5 期的新增崩塌地進行評估。

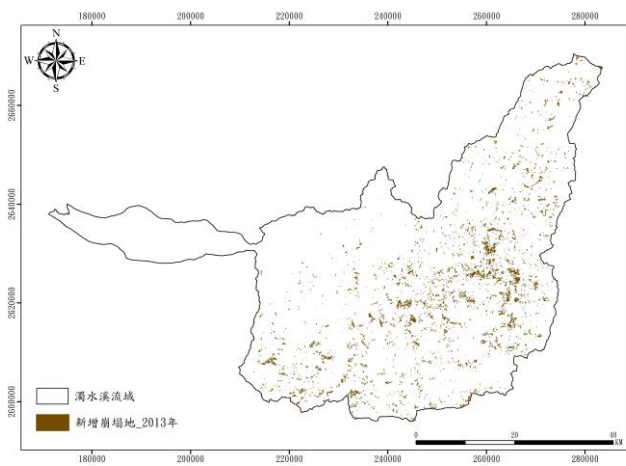
各年新增崩塌地的萃取空間分布如圖 6-17 所示，各年崩塌地面積及崩塌量體估算如表 6-5 所示。由崩塌地的空間分布趨勢及量體可見，2009 年受到莫拉克風災影響，導致支流陳有蘭溪具有大面積崩塌地，其餘年份之新增崩塌地主要分布於丹大溪集水區。



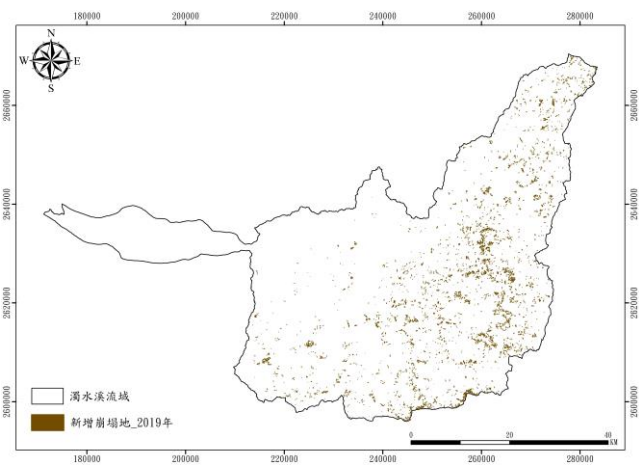
(a) 2007 年崩塌地



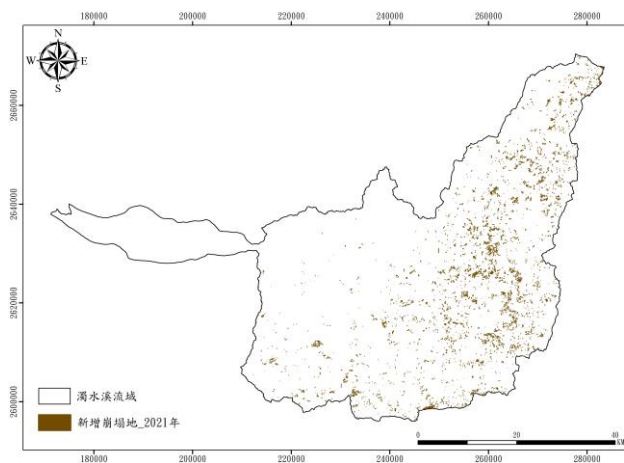
(b) 2009 年崩塌地



(c) 2013 年崩塌地



(d) 2019 年崩塌地



(e) 2021 年崩塌地

圖 6-17 各年崩塌地成果

表 6-5 崩塌地面積及崩塌量體估算

年份	崩塌地面積(公頃)	修正崩塌量(萬噸)	崩塌地泥砂遞移量(萬噸)
2007 年	1,120	5,037	1,994
2009 年	2,584	20,489	8,191
2013 年	1,523	7,119	2,745
2019 年	995	4,114	1,461
2021 年	1,000	3,960	1,277

3. 坡面泥砂產量推估

本研究假設集水區的泥砂產量進入水系後，會全數經由逕流水運移至集水區出口，因此可以通過相關單位的水文監測站測量的流量和懸浮濃度，推估懸浮載輸砂量（單位：公噸/日）。

水文觀測站中的懸移載主要指的是在水流中以懸浮方式運輸的泥沙和顆粒物質。它主要包括因坡面土壤沖蝕而產生的泥沙，但並不限於此。在某些情況下，懸移載也可能包含來自崩塌地的泥砂，但這些泥砂在被運輸過程中是以懸浮形式存在的，而不是推移載。本研究假設崩塌地的泥砂係由懸移載運輸，水文觀測站中的懸移載為崩塌地泥砂產量及坡面泥砂產量之加總。

本研究推估整體集水區之泥砂產量，扣除崩塌地泥砂產量後，則為坡面泥砂產量。

濁水溪流域的彰雲橋水文站涵蓋濁水溪流域的山坡地範圍。彰雲橋測站位於清水溪與濁水溪匯流口之下游，集水區面積為 2,906.32 平方公里。測站自民國 83 年設立至今，共計超過 30 年懸浮載及流量監測資料。集水區受到地震、颱風等干擾影響，在不同時空背景下，反

映不同輸砂量特性。宋承恩等（2019）及吳炤緯（2020）針對台灣集水區之重大土砂災害事件進行研究，區分不同時期的河川輸砂狀況，更能反映不同時期之河川輸沙特性。

本研究參考 Lin et al.(2021)的分析，分析濁水溪流域歷年的災害事件，包括地震、土石流、強降雨事件及重大土砂災害事件，以作區分，分析在不同時空背景下河川輸砂量的特性。

本研究蒐集彰雲橋 83 年至 111 年之間測站資料，以平均日流量為橫軸（單位為 cms），懸浮載輸砂量為縱軸（單位：公噸/日），再將兩者建立乘冪回歸式可得不同時期輸砂量率定曲線（圖 6-18），由 R^2 值確認其相關性。結果顯示，各輸砂量率定曲線之解釋率可達 85% 以上，將每日之平均實測流量分別帶入率定式後，可得當日之輸砂量，將每日輸砂量加總則可以得到該年度總輸砂量，視為實際輸砂量值。

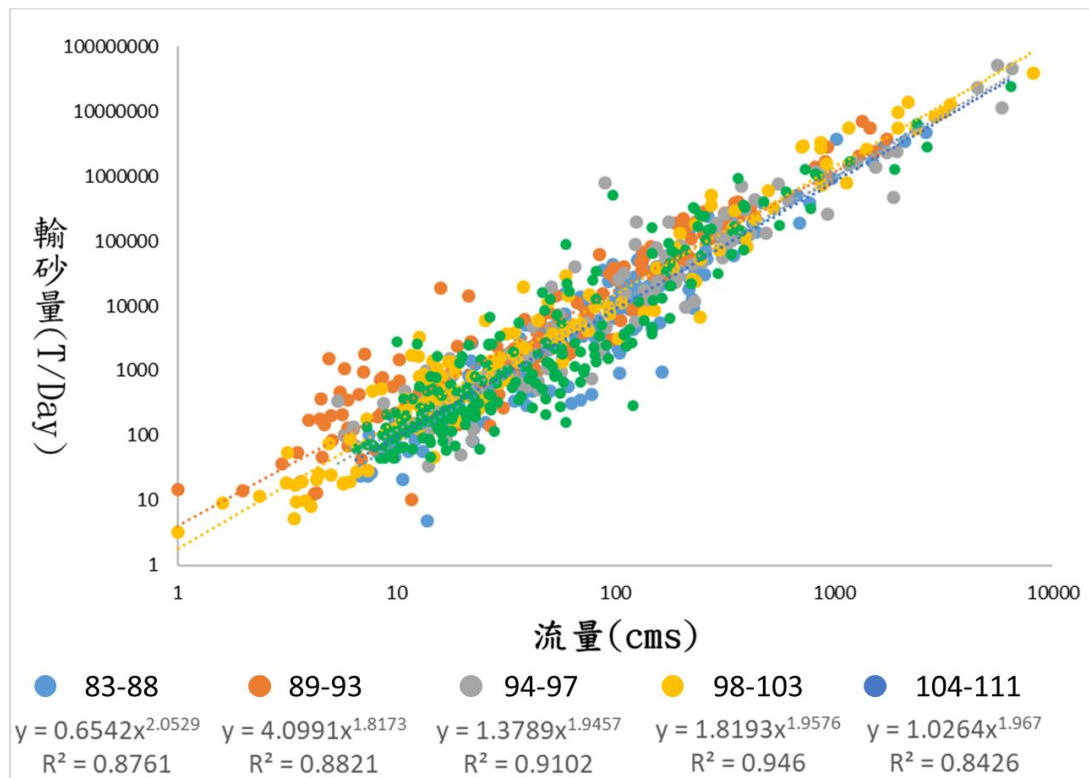


圖 6-18 河川輸砂率定曲線(彰雲橋 83 年至 111 年)

透過建立不同時期的河川輸砂率定曲線，對應不同流量情境下的輸砂量狀況。由表 6-6 的結果顯示，濁水溪山坡地集水區的輸砂狀況自民國 83 年至 111 年之間，共可區分為五個輸砂類型。

83-88 年、94-97 年及 104-111 年屬於低輸砂量特性。83-88 年及 98-103 年屬於高輸砂量特性。89-93 年為集集大地震後，邊坡土石鬆動及土層安定係數降低；98-103 年為莫拉克颱風影響，造成許多崩塌及不安定土砂。在低流量情境下（10cms、100cms），89-93 年相較於 98-103 年，具有較高的輸砂量特性，而在高流量情境下（1000cms）則 98-103 年具有較高的輸砂量特性，這與其造成土體不穩定的機制有關。透過不同時期的河川輸砂率定曲線，更能夠掌握集水區不同時期的實際輸砂量。

透過本研究建立的泥砂產量模式估算的指標值與實測輸砂量(扣除崩塌地泥砂產量)進行相關性分析，可以得出兩者之間的相關性，從而建立泥砂產量指標的轉換式（轉換為實際值）。

表 6-6 不同時期對應各流量與輸砂狀況

日平均流量	1cms	10cms	100cms	1000cms
83-88 年	0.7	8	8,347	942,780
89-93 年	4.1	269	17,672	1,160,349
94-97 年	1.4	122	10,738	947,617
98-103 年	2	165	14,966	1,357,389
104-111 年	1	95	8,817	817,178

輸砂量單位：公噸。

七、坡地農塘土壤碳匯評估成果

將各年之年雨量(P)、植生綠劣指標(GDI)、地形濕度指數(nTWI)及泥砂遞移率(SDR)套疊後，並以彰雲橋集水區為樣區，可得各年之總坡面泥砂產量指標(SY_{SP})。各年泥砂產量指標(SY_{SP})及輸砂量之結果如表 6-7 所示。根據水文站的實測懸移載輸砂量數據，2009 年莫拉克風災造成的最大實測懸移載輸砂量達到 15,420 萬噸。坡面泥砂產量指標加總(SY_{SP})的推估值顯示，2007 年的指標加總為最大，達到 10,876 萬，並經過正規化後，其值為 1。

在不考慮扣除崩塌地輸砂量的情況下，將各期坡面泥砂產量指標加總正規化(SY_{nSP})與實測懸移載輸砂量(S_{all})之間建立乘冪迴歸模型。圖 6-19 的統計結果顯示，兩者具有中高度相關性($S_{all} = 1E+08 SY_{nSP}^{0.9758}$, $R^2 = 0.73$, $p < 0.01$)。在考慮扣除崩塌地輸砂量的情況下，將實測總輸砂量(S_{all})扣除實測崩塌地輸砂量(S_{LS})後，與坡面泥砂產量指標加總正規化 (SY_{nSP})建立另一個乘冪迴歸模型。圖 6-20 的統計結果顯示，兩者之間的相關性更高($S = 9E+07 SY_{nSP}^{0.4744}$, $R^2 = 0.95$, $p < 0.01$)，且模型解釋能力顯著提升。

在輸砂過程中，懸移載可能包含來自崩塌地的泥砂。這些泥砂在運輸過程中，部分是以懸移載的形式存在，而不是推移載的形式。因此，將崩塌地輸砂量扣除後，能夠更準確地反映坡面泥砂產量的預估能力。透過建立的推估式，在應用上可計算每年之年降雨量等環境指標，計算坡面泥砂產量指標(SY_{SP})，透過推估式，估計實測坡面輸砂量(S)。依據泥砂產量指標值作為權重分配至各網格，推估各網格之泥砂產量及推估土壤沖蝕深度。

表 6-7 各年實測泥砂產量與之結果

年份	實測懸移載輸 砂量(S_{all}) (萬噸)	實測崩塌地輸 砂量(S_{LS}) (萬噸)	坡面泥砂產量指 標加總(SY_{SP}) (萬)	坡面泥砂產量指 標值加總正規化 (SY_{nSP})
1996 年	10,133	-	4,560	0.25
1998 年	2,721	-	7,122	0.55
2000 年	4,412	-	5,584	0.37
2003 年	530	-	3,903	0.17
2004 年	5,068	-	6,478	0.48
2007 年	10,668	8,674	10,876	1.00
2009 年	15,420	7,228	8,869	0.76
2013 年	9,813	7,067	5,931	0.41
2018 年	822	-	3,410	0.11
2019 年	4,247	2,786	4,416	0.23
2020 年	129	-	2,476	0.01
2021 年	2,309	1,031	3,123	0.08

備註: - 為無分析資料。

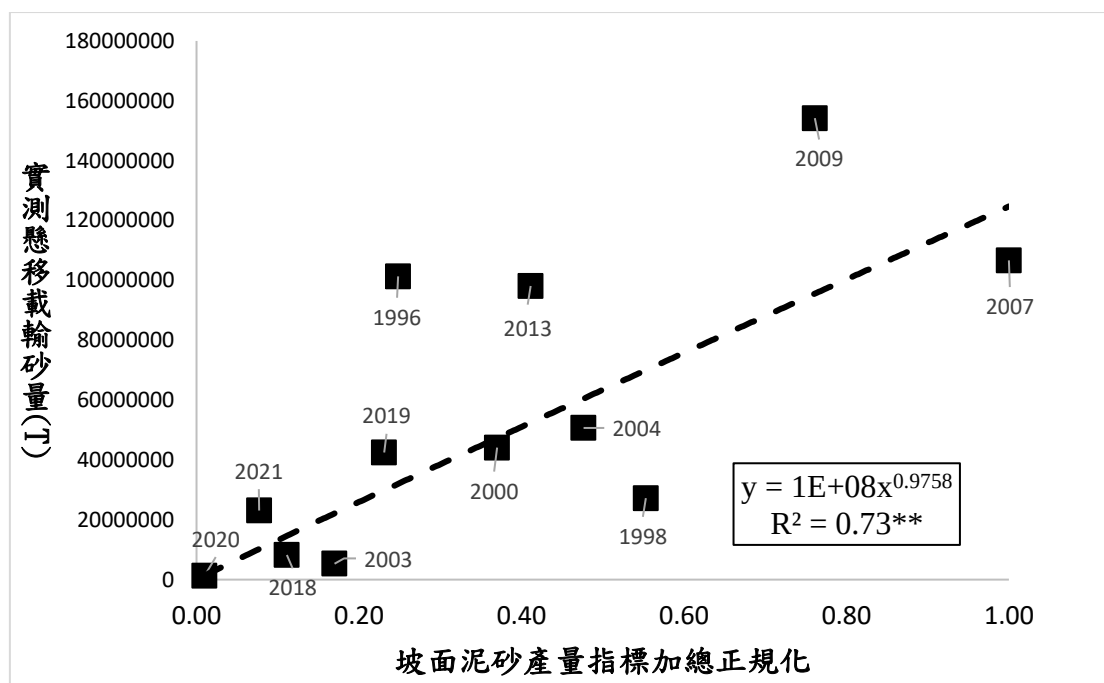


圖 6-19 坡面泥砂產量指標與實測懸移載輸砂量之統計關係

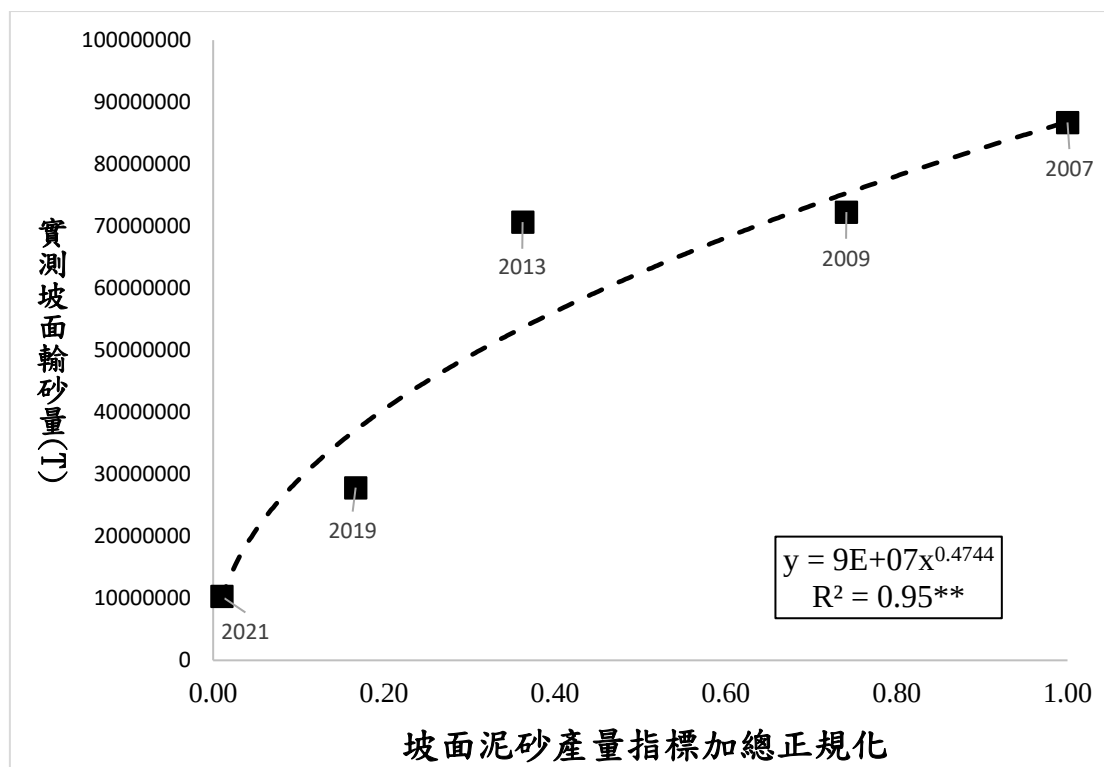


圖 6-20 坡面泥砂產量指標與實測坡面輸砂量之統計關係

以 2021 年為例，透過坡面泥砂產量指標(SY_{SP})分配至各個網格，可推估各網格之泥砂產量(圖 6-21)，集水區年平均泥砂產量為 2.9mm，多位於植生覆蓋良好之集水區源頭區位；泥砂產量最深達 264mm，主要分布在河道高灘地，具有高度沖蝕情形。

泥砂產量除以泥砂遞移率可求得到各網格之土壤沖蝕深度(圖 6-22)，年平均土壤沖蝕深度為 6.2mm，年沖蝕最深達 264mm。透過本研究建立的泥砂產量推估模式建置，亦有效且簡易的掌握集水區沖蝕量之空間分布。

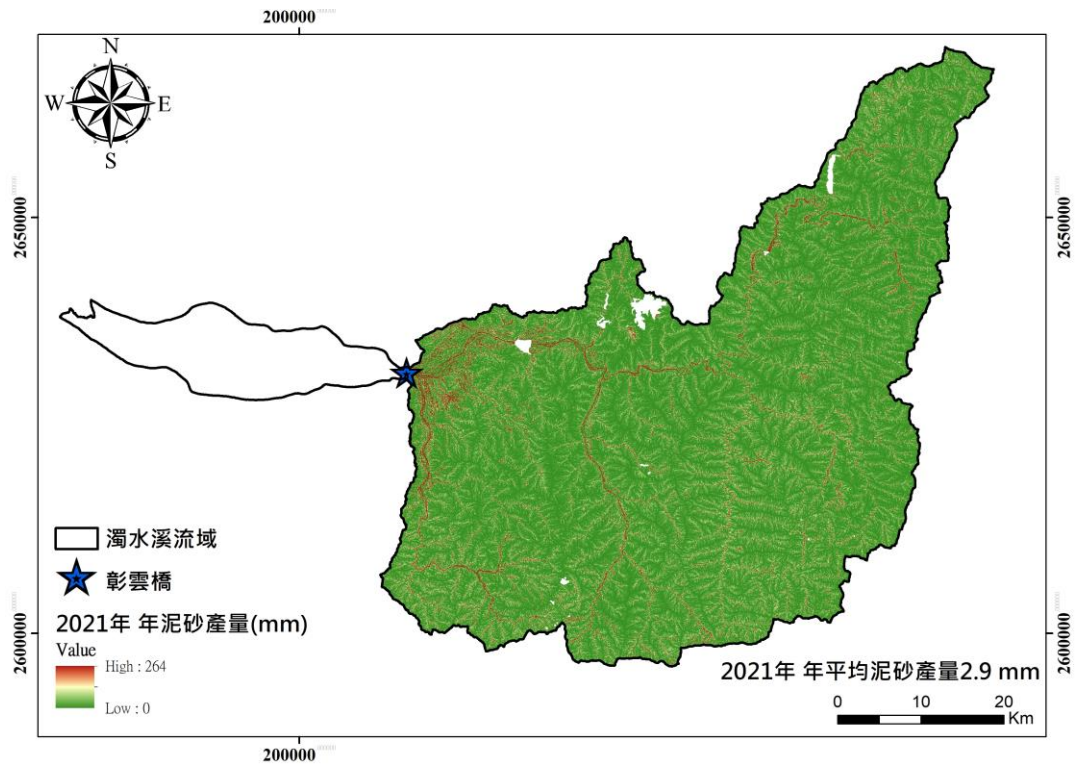


圖 6-21 彰雲橋集水區年泥砂產量空間分布

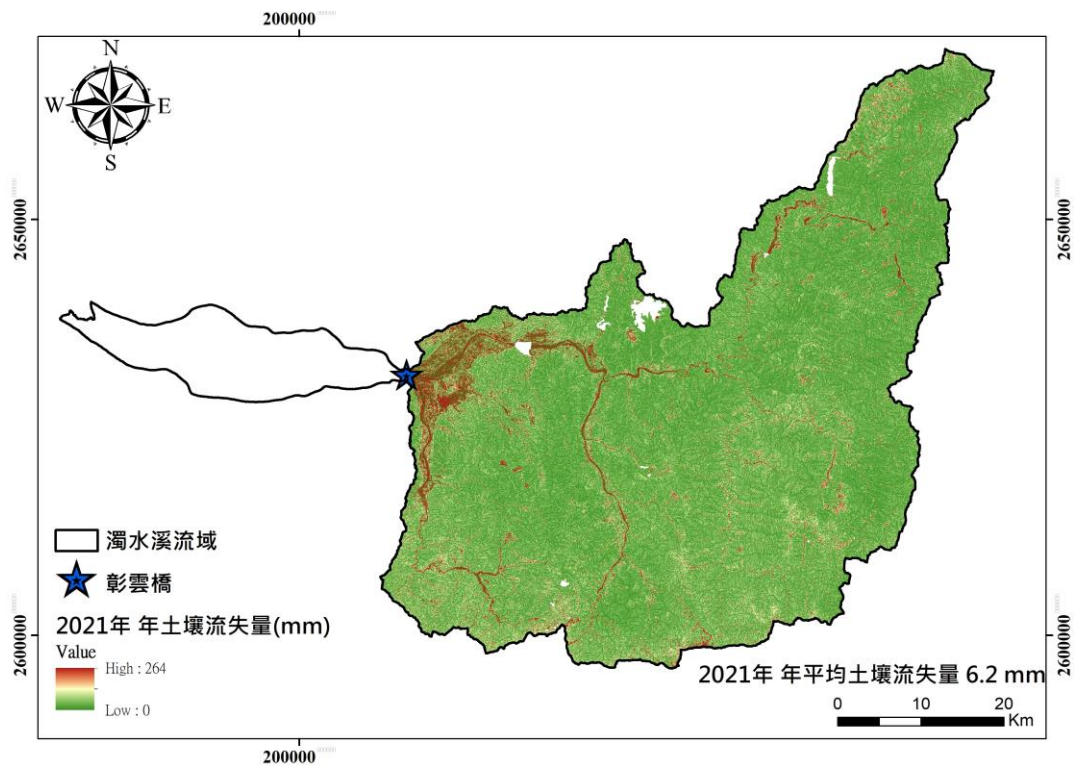


圖 6-22 彰雲橋集水區年土壤流失深度空間分布

第七章 坡地農塘土壤碳匯評估概念模式

第一節 坡地農塘土壤碳匯評估模式

本研究透過「泥砂產量推估模式」結合「集水區之土壤碳存量」，及「農塘囚砂率」，並假設集水區土壤碳在運移過程中無損失，建置坡地農塘土壤碳匯評估模式。

首先，劃定「農塘集水區」，並應用「泥砂產量推估模式」計算之集水區年泥砂產量，並透過集水區土壤碳存量圖(圖 4-6)，估計年流失之土壤碳匯量(C-ton/ha/yr)，則代表農塘集水區每年進入農塘之總土壤碳量(ton-C)。第二部分，考量農塘受到自然與人工調節，因此，在土壤有機碳在農塘沉積同時，亦會受到囚砂率影響。綜合考量後，本研究定義之農塘土壤碳匯評估概念模式，可由下列公式計算(式 12)：

$C_{Soil} = \sum (Sy * C_i * TE)$	(式 12)
-----------------------------------	--------

式中： C_{Soil} 為各網格對沉池之年總土壤碳匯量(C-ton/yr)； Sy 為本研究建置之泥砂產量推估式所估算之網格泥砂產量深度(mm/yr)； C_i 為表層之土壤碳存量(C-ton/ha/mm)； TE 為農塘囚砂率(%)。

(1) 農塘集水區劃定

農塘水資源常由溪流引水，受其集水區面積之地文水文條件而控制。坡地農塘土壤碳匯評估模式係建立在評估各網格下游農塘之土壤碳匯貢獻，因此，瞭解農塘集水區之面積，加以估計農塘沉積土壤碳匯量。目前集水區自動劃分理論大都運用 Jenson and Domingue 方法(1988)建立無窪地流向，再以 O' Callaghan and Mark 法(1984)建立各網格之累積流量；網格之累積流量為上游流入該網格之累積數量，而累積流量差值係計算網格與其下游網格累積流量之差。若網格之累積流量差值大於或等於使用者給定門檻值，則指定該網格為集水區出口，使用者可依水系門檻值及選定水系出口點兩種方式，向上游進行追蹤可得集水區範圍，流程圖如圖 7-1 所示(林文賜等，2006)。

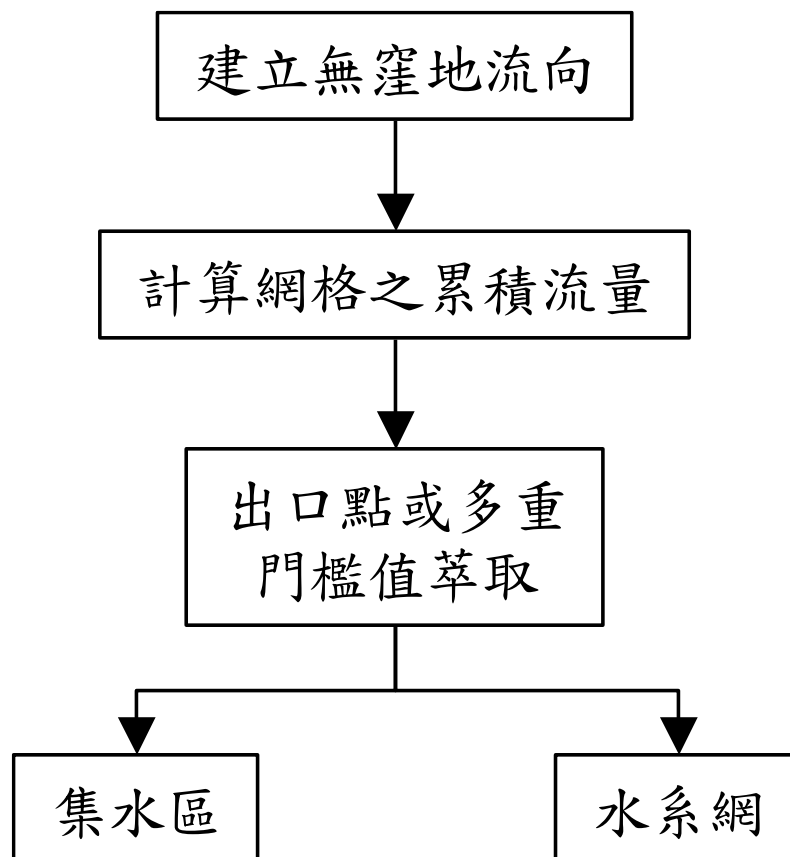


圖 7-1 集水區自動劃分之架構(林文賜等，2006)

本研究優先針對蓄水面積較大的農塘，且實際使用情形為農塘的進行土壤碳匯評估。表 6-1 顯示各農塘的蓄水面積大小排序。

排序 1 農塘之新版編號為 M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0077，位於南投縣鹿谷鄉永隆村，農塘蓄水面積為 8.6 公頃，當地稱此農塘為鹿谷麒麟潭，有效蓄水量約 38.7 萬立方公尺(平均深度約 4.5 公尺)。

經本研究分析農塘集水區面積為 46.7 公頃，集水區年降雨量為 1,993mm。圖 7-2 為排序 1 農塘集水區範圍及水系分布。



圖 7-2 排序 1 農塘集水區萃取

排序 2 農塘之新版編號為 M-魚池鄉-頭社村-日月潭水庫-0015，位於南投縣魚池鄉頭社村，農塘蓄水面積為 5.7 公頃，為南投農田水利會所轄之灌溉標的頭社水庫，匯集大舌滿溪溪水及日月潭水庫滲流水而成，有效庫容約 23 萬立方公尺(農業部，2024)。

經本研究分析農塘集水區面積為 53 公頃，集水區年降雨量為 1,783mm。圖 7-3 為排序 2 農塘集水區範圍及水系分布。

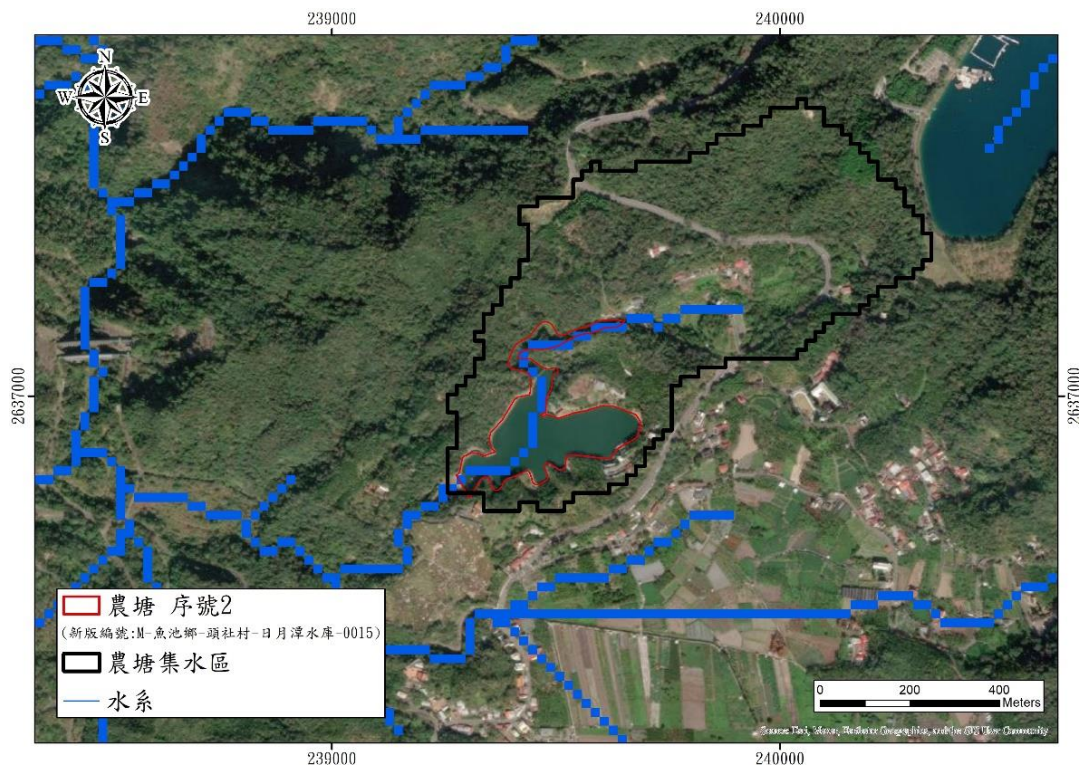


圖 7-3 排序 2 農塘集水區萃取

排序 3 農塘之新版編號為 M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0078，位於南投縣竹山鎮鯉魚里，農塘蓄水面積為 2.1 公頃，經 Google 街景影像查詢，現況為畜牧使用，並與排序 5、6、7、8 農塘串連，總蓄水面積總計 7.8 公頃，有效蓄水量約 3.9 萬立方公尺(平均深度約 0.5 公尺)。主要水資源自清水溪支流野溪匯集而成。

經本研究分析農塘集水區面積為 177.6 公頃，集水區年降雨量為 2,504mm。圖 7-3 為排序 3 農塘集水區範圍及水系分布。

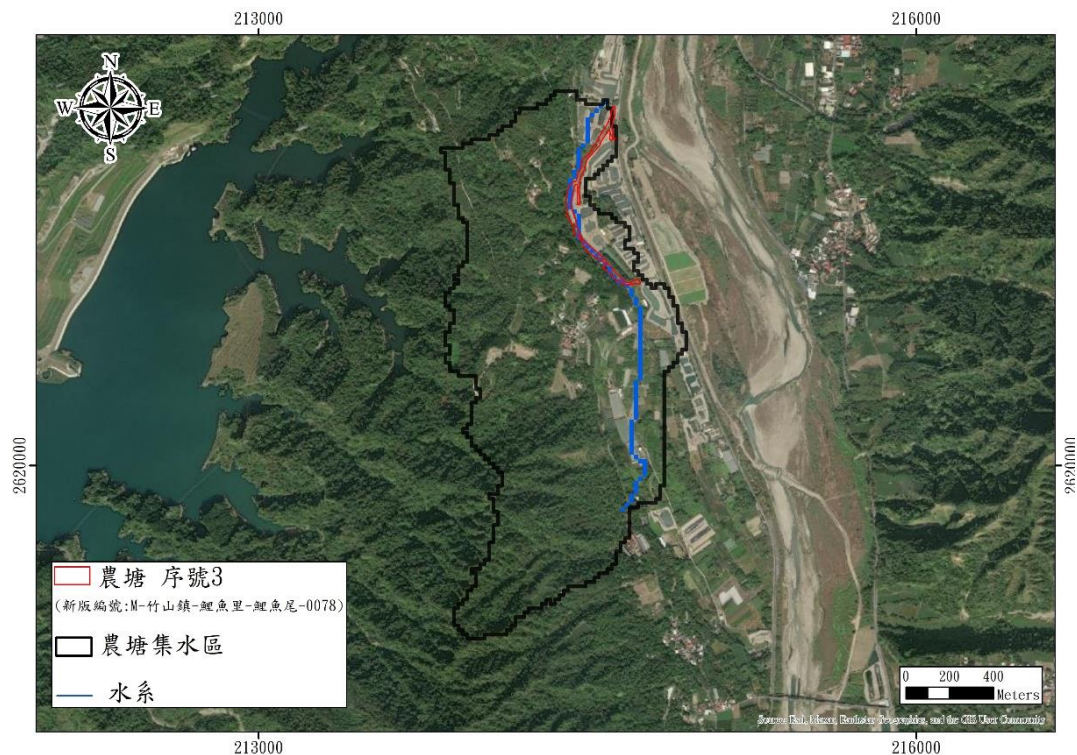


圖 7-4 排序 3 農塘集水區萃取

(2) 農塘囚砂量估算

農塘受到自然與人工調節，因此，集水區匯集之土壤有機碳在農塘沉積，會受到囚砂率影響。水庫、攔河堰囚砂率一般參考 Brune (1953) 提出的布崙包絡曲線，利用「容量逕流比」(CIR, Capacity-Inflow Ratio) 推估農塘囚砂率，推估公式如下式(式 13)：

$$TE = 100 \left[1 - \frac{1}{1 + 75CIR} \right] \quad (\text{式 13})$$

式中：其中 TE 為囚砂率，CIR 為容量逕流比，即農塘容量(C)除以年逕流量(I)之比值，年逕流量(I)可由年降雨量乘以農塘集水區面積估算之。

第二節 坡地農塘土壤碳匯評估成果

本研究針對濁水溪流域內的農塘進行土壤碳匯評估。首先依據農塘的蓄水面積進行排序，選取排序前三名的農塘，並以 2021 年推估之年泥砂產量進行評估。表 7-1 列出估算土壤碳匯所需的參數。

以集水區自動劃分理論劃定農塘集水區，並扣除農塘蓄水面積，得到「集水區面積」。接著估計「泥砂產量」和「土壤平均碳存量」。其中，「農塘囚砂率」係透過農塘容量與年逕流量（逕流量為集水區面積與年降雨量之乘積）估算而得。將以上所需參數相乘，則可得到農塘的年土壤碳匯量（C-ton/yr）。詳細之操作具體步驟如下：

a.集水區劃定(ha)：使用集水區自動劃分理論來劃定每個農塘的集水區，並扣除農塘的蓄水面積，得到集水區面積。由圖 7-5 為排序一農塘蓄水範圍及集水面積。

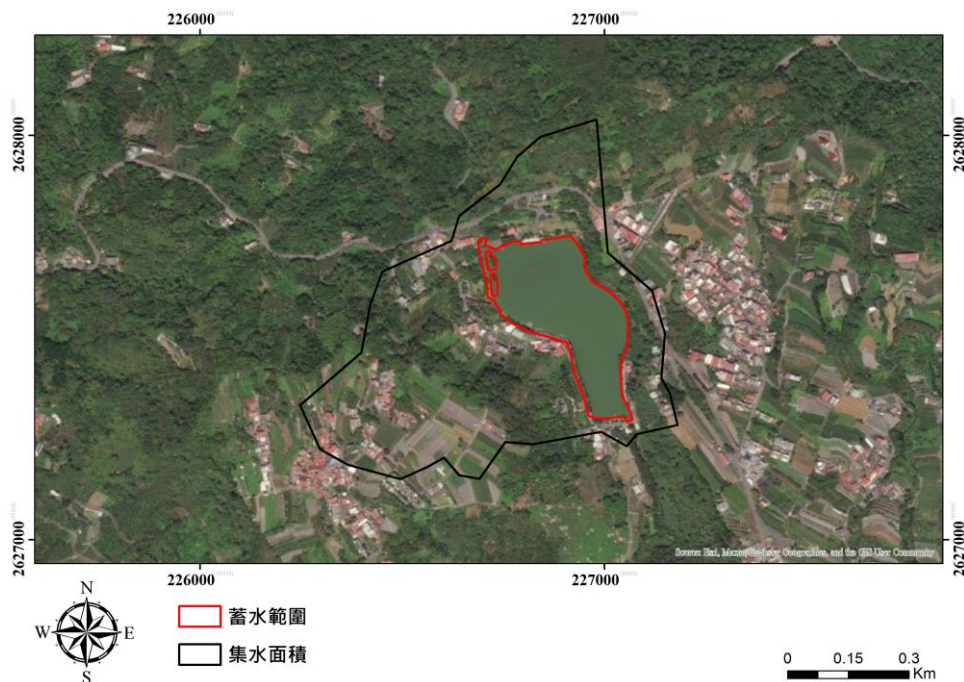


圖 7-5 排序一 農塘蓄水範圍及集水面積

b.估計泥砂產量(mm/ha):根據本研究建置之泥砂產量推估模式，估計集水區的年泥砂產量。由圖 7-6 為農塘集水面積之泥砂產量分布。

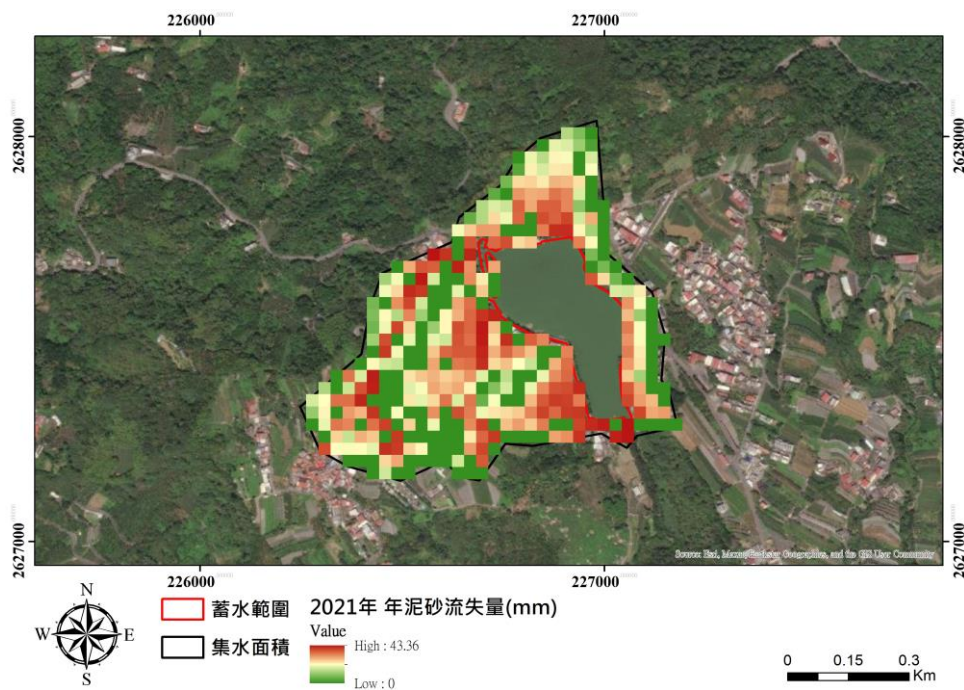


圖 7-6 排序一 農塘集水面積之泥砂產量分布

計算土壤平均碳存量(ton-C/ha)：根據土壤調查數據，計算集水區內土壤的平均碳存量。由圖 7-7 為排序一農塘集水面積之土壤碳存量分布。

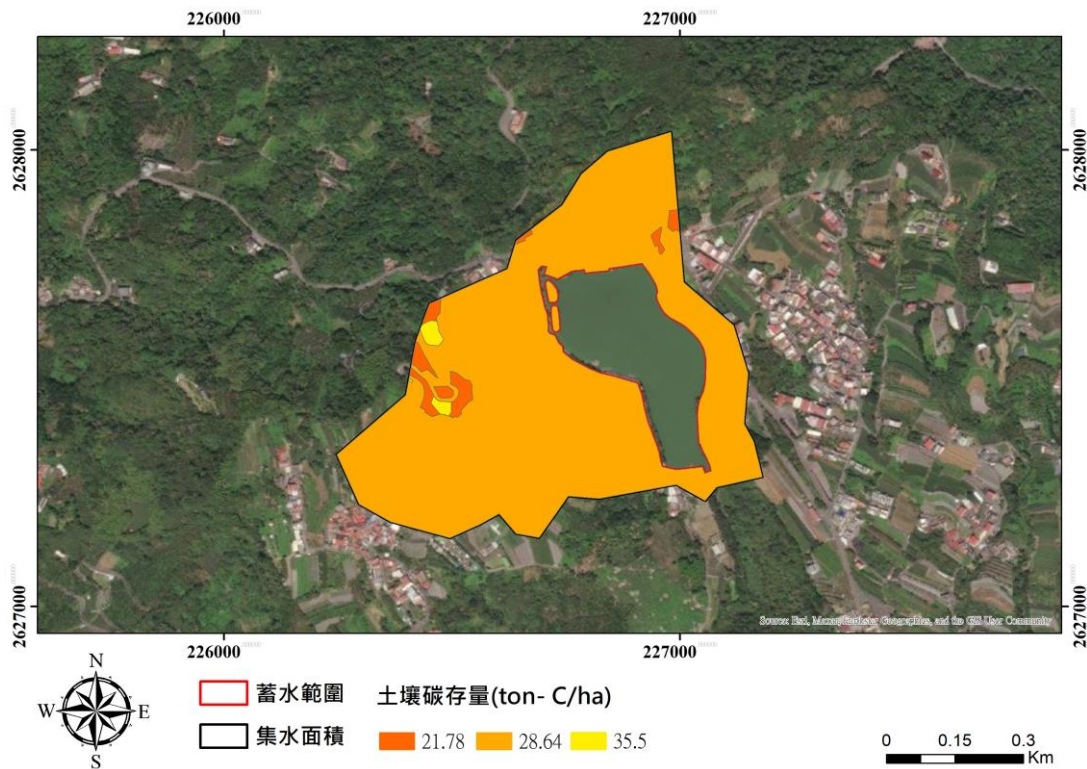


圖 7-7 排序一農塘集水面積之土壤碳存量分布

估算農塘囚砂率(%)：根據農塘的容量和集水區年逕流量（集水區面積與年降雨量之乘積），估算農塘的囚砂率。

計算土壤碳匯量(C-ton/yr)：將集水區面積、泥砂產量、土壤平均碳存量和農塘囚砂率相乘，得到農塘的年土壤碳匯量（C-ton/yr）。

通過以上步驟和分析，我們能夠提供集水區內不同碳庫運移過程的基礎資料，並對每年因土壤流失而在農塘中淤積的土壤碳匯量進行科學化評估。透過合理的量化數據，不僅凸顯農塘在碳循環中所扮演的關鍵角色，在未來的農塘管理中，應強化土壤碳匯的重要性，並在定期清淤策略中考量碳封存效益，以有效避免土壤中有機碳的快速釋放，為農業部門邁向淨零碳排放目標奠定基礎。

此外，本研究結果將為未來農塘碳管理策略提供科學依據，在永續農業發展中減少坡地農塘的資源退化，最大化增加碳匯功能，並成為實現農業部門淨零碳排放目標的重要一環。

表 7-1 篩選農塘之農塘碳匯成果

農塘	集水面積(ha)	泥砂產量 (mm/yr)	平均碳存量(C- ton /ha/mm)	農塘囚砂率 (%)	碳匯量 (C-ton/yr)
排序一	38.1	2.19	0.078	77.6	5.06
排序二	47.4	1.13	0.086	64.6	2.98
排序三	172	4.38	0.097	39.7	28.90

備註: 1.表層 1mm 的平均碳存量(C-ton)。

2.集水面積為扣除蓄水面積後之面積。

第八章 結論與建議

一、結論

本研究針對「農塘土壤碳匯相關研究」、「超高解析度影像判釋地表水」、「自然碳匯估算方法和基本假設」及「森林土壤碳匯調查標準方法及本土調查數據」進行文獻回顧及整合，並蒐集各機關產製之大數據，包含農塘區位、土壤調查圖資(包含土壤性質、有機質和碳含量)高解析度網格氣象資料，以及樣區基本資料，為建立坡地農塘土壤碳匯評估概念模式提供基礎理論支持。

以濁水溪流域為樣區，本研究建立坡面泥砂產量指標(SY_{nSP})與實際輸砂量(S)之間具有高度相關性($S = 9E+07 \cdot SY_{nSP}^{0.4744}$, $R^2 = 0.95$, $p < 0.01$)，可透過轉換式及空間分布模型之特性，估計每年進入農塘之土壤流失量。本研究為掌握現況坡地農塘範圍，南投縣竹山鎮為主要分析範圍，利用 Pleiades 高解析度衛星影像建立農塘萃取流程，並完成 11 處農塘的調查，分類為五種判釋結果類型，成果顯著，大幅減輕人力調查負擔，利於坡地農塘定期更新及坡地水資源區位掌握之創新方法。

透過「泥砂產量推估模式」、「農塘集水區之土壤碳存量」及「農塘因砂率」之概念，估計農塘年土壤碳匯量(C-ton/ha/yr)。高碳匯潛力之農塘土壤碳匯量介於 5.06 至 28.9 C-ton/ha/yr 之間。建立的農塘土壤碳匯評估概念模式可應用於每個坡地農塘的年土壤碳匯量評估，具體量化農塘在碳循環中的重要角色。未來在農塘管理中，應強化土壤碳匯的重要性，並在定期清淤策略中考量碳封存效益，以避免有機碳的快速釋放，為農業部門實現淨零碳排放目標奠定基礎。

二、建議

1.農塘碳匯持續監測與資源整合：為掌握坡地農塘的水資源，本研究建議利用高解析度衛星影像，定期進行農塘範圍的判釋追蹤，以掌握坡地水資源及碳匯資源動態變化，並建立「空間化資源調查成果」，以利資源整合及增值應用，為管理提供即時的空間資訊支持。

2.農塘碳匯量簡易計算模式與應用推廣：本研究後續建議建立適用於實務應用之碳匯簡易計算模式，提供在淨零碳排檢算時的依據，並作為未來減碳政策中農塘碳匯管理的參考指標，強化農塘在「藏碳於農」概念中的貢獻，以量化坡地農塘的自然碳匯對於淨零碳排目標的具體貢獻。

3.農塘清淤管理與碳匯效益延續研究：本案農塘土壤碳匯評估之技術面已經達成，未來研究建議聚焦實務面及管理面，例如：農塘淤泥的清淤管理方式其再利用的碳匯效益，並將本年度成果延續為明年度研究的核心方向，持續擴展本研究的價值，期望在未來農村水土保持相關業務中，為碳匯應用提供具體策略基礎，增強農塘在永續管理與碳匯效益方面的貢獻。

參考文獻

1. 水土保持局 (2021)，碳存量指標在農村再生社區營造效益評估之應用，112 年度創新研究補助計畫。
2. 台灣大學農業化學系 (2024)
http://teacher.ac.ntu.edu.tw/zh_tw/Zhengyi/SoilSurveyClassification/Taiwansoilclassification
3. 吳炤緯 (2020)，應用概念模式探討六龜試驗林土壤可容許流失量之研究，國立中興大學水土保持學系碩士學位論文。
4. 宋承恩、王素芬、陳毅青、林紘立、曾俊偉 (2019)，莫拉克颱風崩塌對濁口溪集水區土砂收支之影響，2019 森林集水區經營研討會，35-40。
5. 林文賜 (2002)，集水區空間資訊萃取及坡面泥砂產量推估之研究，國立中興大學水土保持學系碩士學位論文。
6. 林文賜、林昭遠、黃碧慧、周文杰 (2006)，集水區自動劃分模式建立之研究，中華水土保持學報，37(4)：337-354。
7. 林政侑(2012)，應用環境指標劃定集水區地覆類別及熱點區位監測之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
8. 邱俊穎、謝嘉聲、黃宗仁、葉堃生、管立豪、胡植慶 (2019)，合成孔徑雷達影像於颱風豪雨後淹水之偵測。航測及遙測學刊，24(4) 211-222。
9. 莊智瑋 (2010)，環境指標應用於崩塌地植生復育之研究，國立中興大學水土保持學系博士論文。
10. 陳柏宏(2014)，淡水河紅樹林及草澤植物的碳儲存量與碳收支，國立中興大學生命科學系碩士學位論文。

11. 陳錦麟 (2018) , 利用 Sentinel-1 & 2 遙測影像推估土壤含水量空間分佈—以桃園石門灌區為例, 國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學系碩士論文。
12. 經濟部水利署中區水資源分署 (2023), 濁水溪流域(全台最長河川), <https://www.wra04.gov.tw/cp.aspx?n=10967>
13. Bernal, B., & Mitsch, W. J., (2012). Comparing carbon sequestration in temperate freshwater wetland communities. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3156-3162. <https://doi.org/10.1021/es2044179>
14. Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal*, 24(1), 43-69.
15. Brune, G.M. (1953) Trap Efficiency of Reservoirs. *Transactions, American Geophysical Union*, 34, 407-418.
16. Cai, D., Fraedrich, K., Sielmann, F., Guan, Y., Guo, S., Zhang, L., & Zhu, X. (2014). Climate and Vegetation: An ERA-Interim and GIMMS NDVI Analysis. *Journal of Climate*, 27(13), 5111-5118
17. Carnell, P. E., Macreadie, P. I., Baldock, J. A., & Lavery, P. S., (2018). Carbon stocks, sequestration, and emissions of wetlands in south eastern Australia. *Global Change Biology*, 24(7), 3410-3424. <https://doi.org/10.1111/gcb.14094>
18. Chou, T.Y., Lin, W.T., Lin, C.Y., Chou, W.C., Huang, P.H., (2004). Application of the PROMETHEE technique to determine depression outlet location and flow direction in DEM. *Journal of Hydrology* 287, 49-61.
19. European Space Agency (ESA), (2017). SENTINEL-1 Mission Overview. 4th Advanced Course on Radar Polarimetry. 2 February

- 2017, ESA – ESRIN
20. European Space Agency (ESA), (2023).
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>
21. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). Global Forest Resources Assessment 2020, Global Forest Resources Assessment 2020. FAO, Rome, Italy.
<https://doi.org/10.4060/CA9825EN>
22. Gao, B.C., (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58 (3): 257–266.
23. <http://dx.doi.org/10.1029/TR034i003p00407>
24. Huang, W., DeVries, B., Huang, C., Lang, M.W., Jones, J.W., Creed, I. F., & Carroll, M.L. (2018). Automated extraction of surface water extent from Sentinel-1 data. Remote Sensing, 10(5), 797.
25. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006). “IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories”, IPCC/IGES. Hayama. Japan.
26. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. Fifth Assessment Report (AR5). <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>.
27. Jenson, S.K., Domingue, J.O., (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographical Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(11), 1593- 1600.
28. Jobbagy, R., Jackson, R. B., (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Application. 10:423-436.
29. Khazai, B., & Sitar, N., (2000). Evaluation of factors controlling

- earthquake slope stability. *Engineering Geology*, 58(3-4), 193-207.
[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00036-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00036-7)
30. Köppen, W. (1931). *Grundriss der Klimakunde*. Walter deGruyter Co., Berlin, Germany.
31. Kusler, J. and J. Christie. 2011. *Wetlands and Carbon Storage and Carbon Sequestration*. White Paper: Reducing Climate Change Impacts and Promoting Fish and Wildlife: Findings and Recommendations for Biological Carbon Storage and Sequestering. Association of Fish and Wildlife Agencies and the Association of State Wetland Managers.
32. Lin, C. Y., Chou, W. C., Lin, W. T. (2002). "Modeling the width and placement of riparian vegetated buffer strips: a case study on the Chi-Jia-Wang stream, Taiwan," *Journal of Environmental Management*, 66: 269-280.
33. Lin, C.Y. Wu, J.P., Wu,S.W., Lin, J.Y. Chen. T.Y., (2023). Watershed landslide evolution combined with topographic factors to delineate the spatio-temporal distribution of sediment sources in central Taiwan. *CATENA*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105978>
34. Lin, W.T., Chou, W.C., Lin, C.Y., Huang, P.H., Tsai, J.S., (2008). WinBasin: Using Improved Algorithms and the GIS Technique for Automated Watershed Modeling Analysis from Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information*, 22(1), 47 – 69.
35. Lin,C.Y., Wu, J.P., Wu, S.W., Lin, J.Y., Chen, T.Y. (2022). Watershed landslide evolution combined with topographic factors to delineate the spatio-temporal distribution of sediment sources in central Taiwan. *CATENA*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105978>
36. Markert, K. N., Markert, A. M., Mayer, T., Nauman, C., Haag, A.,

- Poortinga, A., & Saah, D. (2020). Comparing sentinel-1 surface water mapping algorithms and radiometric terrain correction processing in southeast asia utilizing google earth engine. *Remote Sensing*, 12(15), 2469.
37. Martz, L.W. and J. Garbrecht (1998), “The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models”, *Hydrological Processes*, 12: 843-855.
38. Matheron, G. (1971). The theory of regionalised variables and its applications. *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique*, 5, 212.
39. Mcfeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17:7, 1425-1432.
40. McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B. R., (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552-560. <https://doi.org/10.1890/110004>
41. Minkinen, K., Laine, J., Nykanen, H., Martikainen, P.J., (1997). Importance of drainage ditches in emissions of methane from mires drained for forestry. *Can. J. For. Res.* 27, 949–952. <https://doi.org/10.1139/x97-016>
42. Moore, T.R. and Knowles, R. (1989). The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Canadian Journal of Soil Science* 69 (1): p. 33-38
43. Motelica-Wagenaar, A.M., Pelsma, T.A.H.M., Moria, L., Kosten, S., (2020). The potential impact of measures taken by water authorities on

- greenhouse gas emissions. *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.* 382, 635–642.
<https://doi.org/10.5194/piahs-382-635-2020>.
44. O'Callaghan, J. F., D. M. Mark (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Graphics and Image Processing*, 28: 323-344.
45. Paranaíba, J.R., Struik, Q., Erdociain, M., van Dijk, G., Smolders, A.J.P., van der Knaap, J., Veraart, A.J., Kosten, S., (2023). CO₂, CH₄, and N₂O emissions from dredged material exposed to drying and zeolite addition under field and laboratory conditions. *Environ. Pollut.* 337, 122627 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122627>.
46. Peacock, M., Audet, J., Bastviken, D., Futter, M.N., Gauci, V., Grinham, A., Harrison, J. A., Kent, M.S., Kosten, S., Lovelock, C.E., Veraart, A.J., Evans, C.D., (2021a). Global importance of methane emissions from drainage ditches and canals. *Environ. Res. Lett.* 16, 044010 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abeb36>.
47. Peacock, M., Granath, G., Wallin, M.B., Hogbom, " L., Futter, M.N., (2021b). Significant emissions from forest drainage ditches—an unaccounted term in Anthropogenic greenhouse gas inventories? *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 126, 1–14.
<https://doi.org/10.1029/2021JG006478>.
48. Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422.
49. Richards, P. and Brenner, A. (2004) Delineating Source Areas for Runoff in Depression Landscapes: Implications for Hydrologic Modeling. *Journal of Great Lakes Research*, 30, 9-21.
50. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA

- Spec. Publ, 351(1), 309.
51. Schrier-Uijl, A.P., Veraart, A.J., Leffelaar, P.A., Berendse, F., Veenendaal, E.M., (2011). Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry* 102, 265–279. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9440-7>.
 52. Teh, Y.A., Silver, W.L., Sonnentag, O., Detto, M., Kelly, M., Baldocchi, D.D., (2011). Large greenhouse gas emissions from a temperate peatland pasture. *Ecosystems* 14, 311–325. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9411-4>.
 53. Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo D.J. and Dokken D.J. (Eds.) (2000). Special Report of the IPCC on Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Cambridge University Press, UK. pp375.
 54. Wu, S.W., Lin, C.Y. Sun, M.Y. Lu, S.Y. (2022). Estimation of soil depth in the Liukuei Experimental Forest by using conceptual model. *CATENA*, 209(2) <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105839>
 55. Yuan, J., Xiang, J., Liu, D., Kang, H., He, T., Kim, S., Lin, Y., Freeman, C., Ding, W., (2019). Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture. *Nat. Clim. Change* 9, 318–322. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0425-9>.

附錄

附錄一、農塘現場勘查紀錄表

編號：M-鹿谷鄉-永隆村-南清水溝溪-0008

一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興 大學及集 璟工程顧 問有限公 司	勘 查 時 間	113/09/26 11:00	勘 查 人 員	劉○諺 吳○緯 羅○淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☒ 可進入調查 蓄水狀況：□滿水；■中度蓄水；□枯水 淤積狀況：□部分淤積；□顯著淤積；□淤滿；■無或輕微淤積 使用狀況：■正常使用；□荒廢；□移作他用；□其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	南清水溝溪 1510046		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣鹿谷鄉永隆村				
本計畫調 查目的	優選排序 1 農塘				
農塘編號	M-鹿谷鄉-永隆村-南清水 溝溪-0008	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2145 69	2621 017
土地權屬	☐ 國有地；■公有地 <u>鄉鎮市</u> ；□私有地____； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定；□其他				
農塘型式	☐ 挖式；□築壩式；■築堤式；□挖式與築堤式混合；□其他__				
集水面積	46.7 公頃	可蓄水面積	8.6 公頃		
農塘容積	38.7 立方公尺	蓄洪體積	43000 立方公尺		

平均可蓄水深度	測量點 1：4.7 公尺	測量點 2：5 公尺
	測量點 3：3.9 公尺	測量點 4：4.4 公尺
	測量點 5：__公尺	
	平均：4.5 公尺	

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位		
		
地理位置及水系圖		航拍圖
		
農塘全景		周邊環境

編號：M-魚池鄉-頭社村-日月潭水庫-0015

一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 10:00	勘 查 人 員	劉 ☐ 諺 吳 ☐ 緯 羅 ☐ 淳	氣 候	☒ 晴； ☐ 陰； ☐ 雨
農塘現況		☐ 可進入調查 蓄水狀況： ☐ 滿水； ☐ 中度蓄水； ☐ 枯水 淤積狀況： ☐ 部分淤積； ☐ 顯著淤積； ☐ 淤滿； ☐ 無或輕微淤積 使用狀況： ☐ 正常使用； ☐ 荒廢； ☐ 移作他用； ☐ 其他 ()					
		☒ 無法進入調查： 原因簡述：進入勘查的步道因施工而封閉					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	日月潭水庫 1510025		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣魚池鄉頭社村				
本計畫調 查目的	優選排序 2 農塘				
農塘編號	M-魚池鄉-頭社村-日月潭 水庫-0015	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2394 79	2636 938
土地權屬	☒ 國有地； ☐ 公有地____； ☐ 私有地____； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	☐ 挖式； ☒ 築壩式； ☐ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	53 公頃	可蓄水面積	5.7 公頃		
農塘容積	28 萬立方公尺 (農業部提供資料)	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	☒ 無法進入調查：				

編號：M-竹山鎮-福興里-大坑-0088

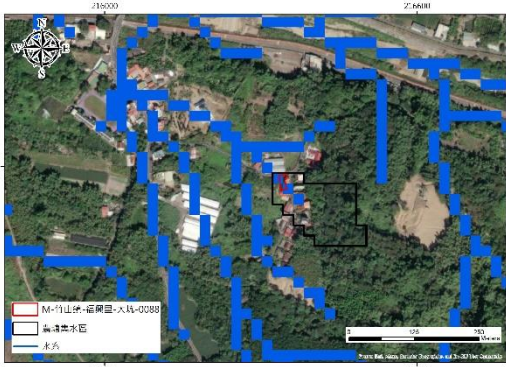
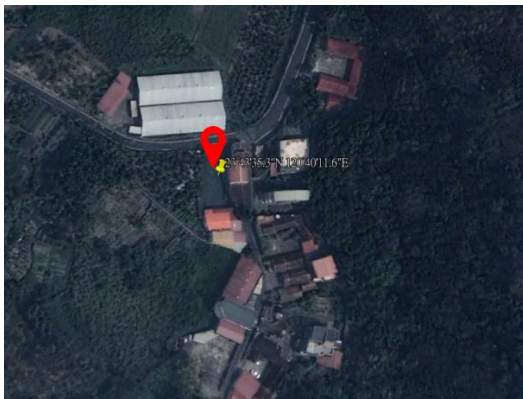
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 13:45	勘 查 人 員	劉 ○ 諺 吳 ○ 緯 羅 ○ 淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☒ 可進入調查 蓄水狀況：□滿水；■中度蓄水；□枯水 淤積狀況：□部分淤積；□顯著淤積；□淤滿；■無或輕微淤積 使用狀況：■正常使用；□荒廢；□移作他用；□其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	大坑 1510050		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮福興里				
本計畫調 查目的	類型一-範圍重繪 (判釋結果與現況相符)				
農塘編號	M-竹山鎮-福興里-大坑- 0088	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2163 42	2624 771
土地權屬	☒ 國有地；□公有地____；□私有地____； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定；□其他				
農塘型式	■挖式；□築壩式；□築堤式；□挖式與築堤式混合；□其他__				
集水面積	1.72 公頃	可蓄水面積	0.03 公頃		
農塘容積	120 立方公尺	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	測量點 1：0.4 公尺 測量點 2：0.4 公尺 測量點 3：0.4 公尺 測量點 4：__公尺 測量點 5：__公尺 平均：0.4 公尺				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0074

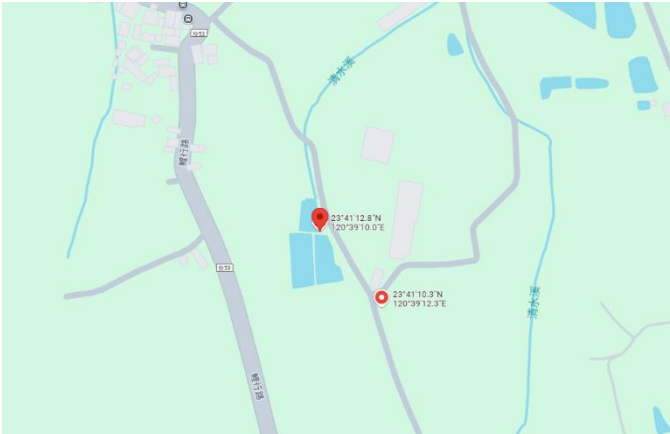
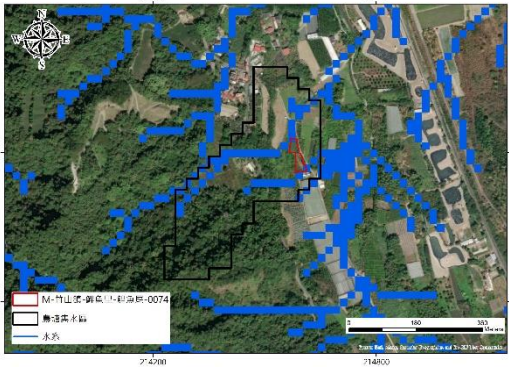
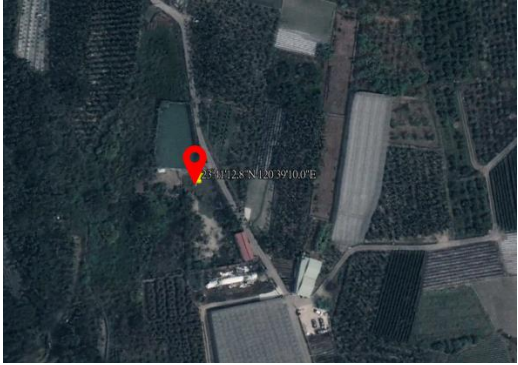
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 14:30	勘 查 人 員	劉○諺 吳○緯 羅○淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☐ 可進入調查 蓄水狀況： ☐ 滿水； ☐ 中度蓄水； ☐ 枯水 淤積狀況： ☐ 部分淤積； ☐ 顯著淤積； ☐ 淤滿； ☐ 無或輕微淤積 使用狀況： ☐ 正常使用； ☐ 荒廢； ☐ 移作他用； ☐ 其他 ()					
		☒ 無法進入調查： 原因簡述：私有地有圍牆無法進入					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	鯉魚尾 1510054		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮鯉魚里				
本計畫調 查目的	類型一-範圍重繪 (判釋結果與現況相符)				
農塘編號	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾 -0074	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2145 88	2620 390
土地權屬	☐ 國有地； ☐ 公有地____； ☒ 私有地農牧用地； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	☐ 挖式； ☐ 築壩式； ☒ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	11.88 公頃	可蓄水面積	0.05 公頃		
農塘容積	---立方公尺	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	測量點 1：__公尺 測量點 2：__公尺 測量點 3：__公尺 測量點 4：__公尺 測量點 5：__公尺 平均：__公尺				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：M-竹山鎮-延正里-木屐寮-0003

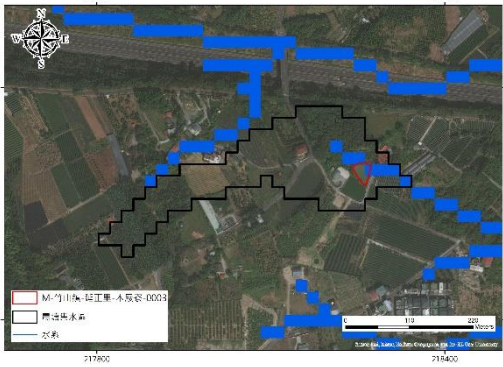
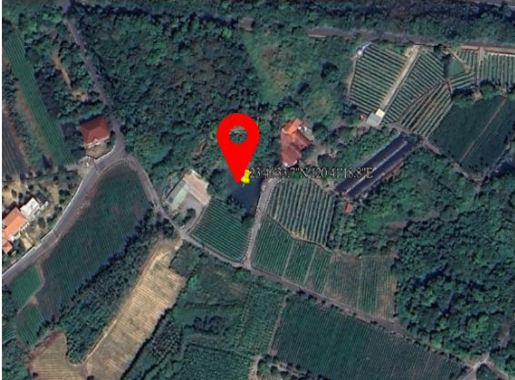
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 13:00	勘 查 人 員	劉○諺 吳○緯 羅○淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☒ 可進入調查 蓄水狀況：□滿水； ☒ 中度蓄水；□枯水 淤積狀況：□部分淤積；□顯著淤積；□淤滿； ☒ 無或輕微淤積 使用狀況： ☒ 正常使用；□荒廢；□移作他用；□其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	木屐寮 1510051		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮延正里				
本計畫調 查目的	類型二-維持既有農塘範圍 (判釋結果與現況相符)				
農塘編號	M-竹山鎮-延正里-木屐寮 -0003	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2182 58	2630 254
土地權屬	☐ 國有地； ☐ 公有地____； ☒ 私有地 農牧用地； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	☐ 挖式； ☐ 築壩式； ☐ 築堤式； ☒ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	5 公頃	可蓄水面積	0.07 公頃		
農塘容積	1190 立方公尺	蓄洪體積	210 立方公尺		
平均可蓄 水深度	測量點 1：1.3 公尺 測量點 2：1.4 公尺 測量點 3：1.5 公尺 測量點 4：__公尺 測量點 5：__公尺 平均：1.4 公尺				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：M-竹山鎮-田子里-大坑-0018

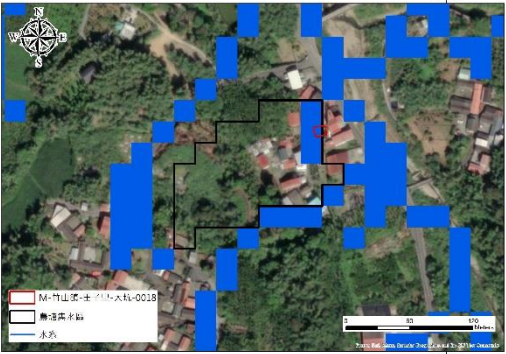
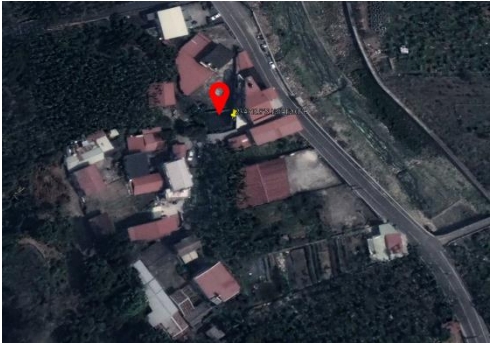
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 13:30	勘 查 人 員	劉 ○ 諺 吳 ○ 緯 羅 ○ 淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☒ 可進入調查 蓄水狀況：□滿水；■中度蓄水；□枯水 淤積狀況：□部分淤積；□顯著淤積；□淤滿；■無或輕微淤積 使用狀況：■正常使用；□荒廢；□移作他用；□其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	大坑 1510050		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮田子里				
本計畫調 查目的	類型二-維持既有農塘範圍 (判釋結果與現況相符)				
農塘編號	M-竹山鎮-田子里-大坑- 0018	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2182 81	2624 259
土地權屬	☐ 國有地； ☐ 公有地____； ☒ 私有地 農牧用地； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	☒ 挖式； ☐ 築壩式； ☐ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	1.36 公頃	可蓄水面積	0.01 公頃		
農塘容積	40 立方公尺	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	測量點 1：0.4 公尺 測量點 2：0.4 公尺 測量點 3：0.4 公尺 測量點 4：__公尺 測量點 5：__公尺 平均：0.4 公尺				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：M-竹山鎮-田子里-大坑-0019

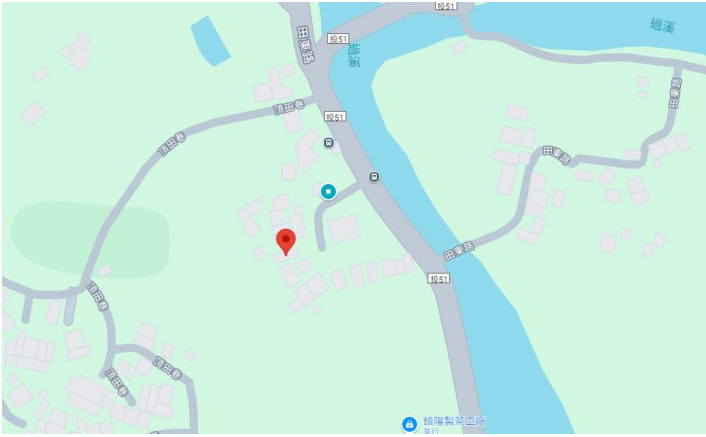
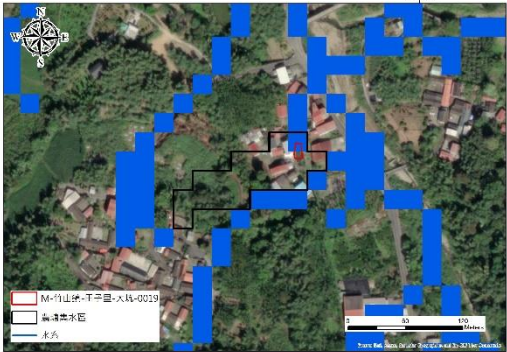
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 13:40	勘 查 人 員	劉○諺 吳○緯 羅○淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☒ 可進入調查 蓄水狀況：□滿水；■中度蓄水；□枯水 淤積狀況：□部分淤積；□顯著淤積；□淤滿；■無或輕微淤積 使用狀況：■正常使用；□荒廢；□移作他用；□其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	大坑 1510050		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮田子里				
本計畫調 查目的	類型二-維持既有農塘範圍 (判釋結果與現況相符)				
農塘編號	M-竹山鎮-田子里-大坑- 0019	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2182 73	2624 228
土地權屬	☐ 國有地； ☐ 公有地____； ☒ 私有地農牧用地； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	■挖式； ☐ 築壩式； ☐ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	0.72 公頃	可蓄水面積	0.01 公頃		
農塘容積	40 立方公尺	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	測量點 1：_0.4_ 公尺 測量點 2：_0.4_ 公尺 測量點 3：_0.4_ 公尺 測量點 4：__公尺 測量點 5：__公尺 平均：_0.4_ 公尺				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0018

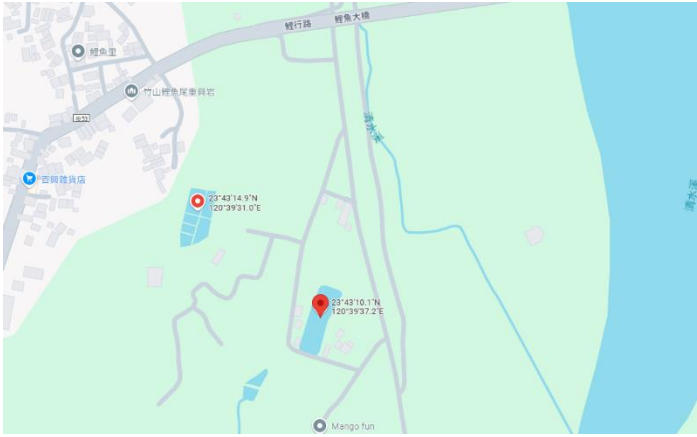
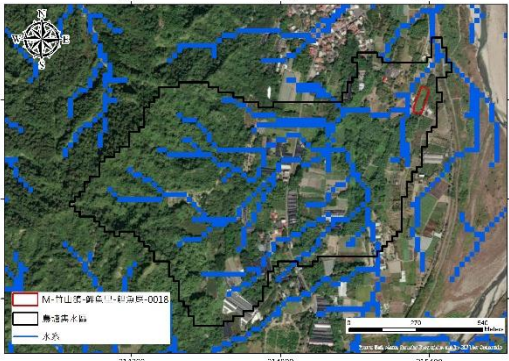
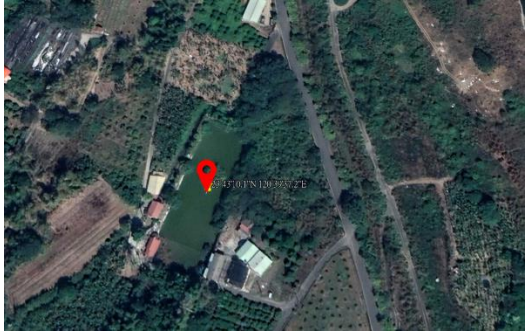
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 14:05	勘 查 人 員	劉 ☐ 諺 吳 ☐ 緯 羅 ☐ 淳	氣 候	☒ 晴； ☐ 陰； ☐ 雨
農塘現況		☒ 可進入調查 蓄水狀況： ☐ 滿水； ☒ 中度蓄水； ☐ 枯水 淤積狀況： ☐ 部分淤積； ☐ 顯著淤積； ☐ 淤滿； ☒ 無或輕微淤積 使用狀況： ☒ 正常使用； ☐ 荒廢； ☐ 移作他用； ☐ 其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	鯉魚尾 1510054		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮鯉魚里				
本計畫調 查目的	類型二-維持既有農塘範圍 (判釋結果與現況相符)				
農塘編號	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾 -0018	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2153 67	2623 996
土地權屬	☒ 國有地； ☐ 公有地____； ☐ 私有地____； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	☐ 挖式； ☐ 築壩式； ☒ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	93.08 公頃		可蓄水面積	0.37 公頃	
農塘容積	4440 立方公尺		蓄洪體積	1480 立方公尺	
平均可蓄 水深度	測量點 1： <u>0.8</u> 公尺 測量點 2：__ 公尺 測量點 3：__ 公尺 測量點 4：__ 公尺 測量點 5：__ 公尺 平均： <u>0.8</u> 公尺				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0058

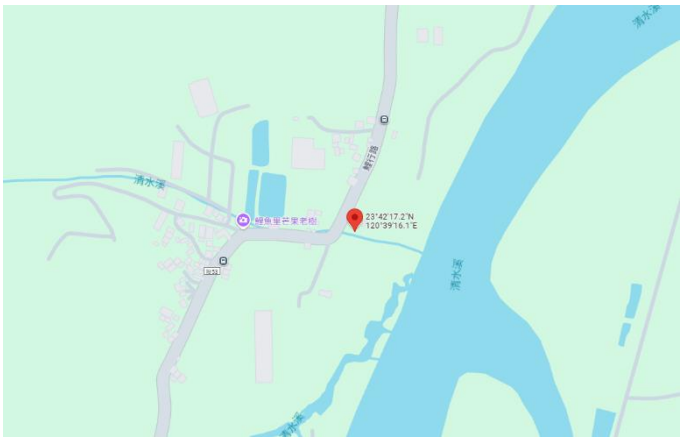
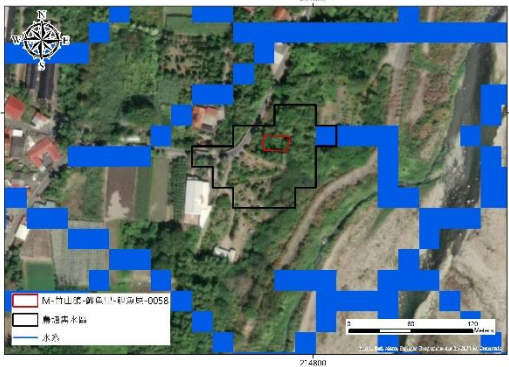
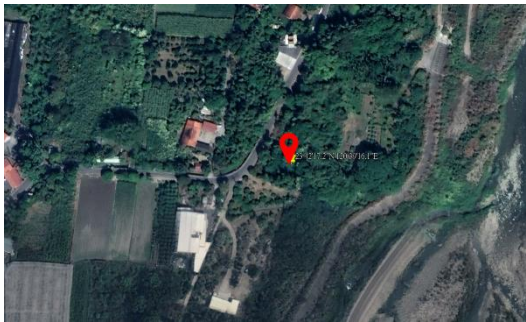
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 14:20	勘 查 人 員	劉 ○ 諺 吳 ○ 緯 羅 ○ 淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☒ 可進入調查 蓄水狀況：□滿水；□中度蓄水；□枯水 淤積狀況：□部分淤積；□顯著淤積；□淤滿；□無或輕微淤積 使用狀況：□正常使用；□荒廢；■移作他用；□其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	鯉魚尾 1510054		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮鯉魚里				
本計畫調 查目的	類型三-農塘已改變用途 (判釋結果與現況相符)				
農塘編號	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾 -0058	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2147 64	2622 371
土地權屬	☐ 國有地； ☐ 公有地____； ☒ 私有地農牧用地； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	☐ 挖式； ☐ 築壩式； ☐ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	0.84 公頃	可蓄水面積	---公頃		
農塘容積	---立方公尺	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	移作他用				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾-0070

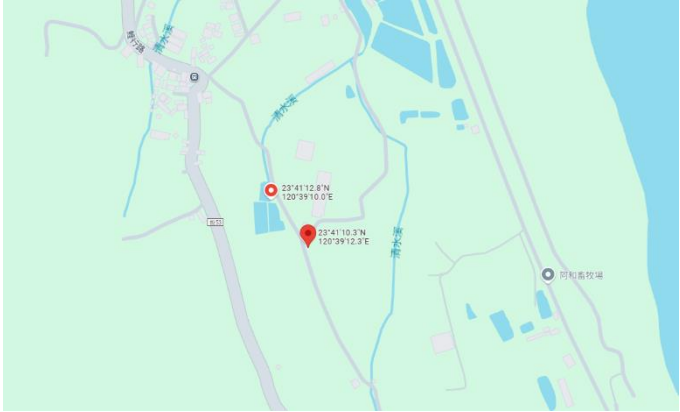
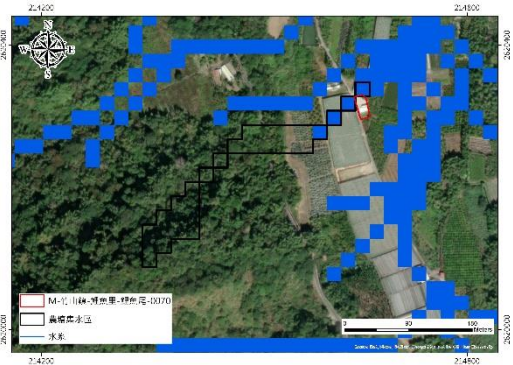
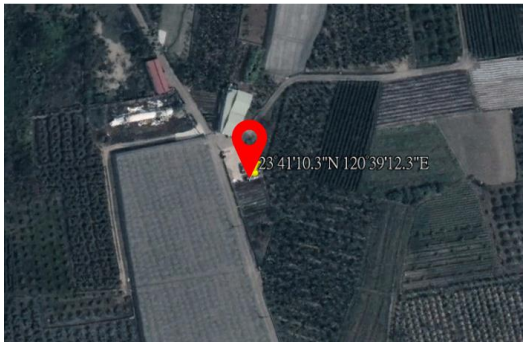
四、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 14:30	勘 查 人 員	劉○諺 吳○緯 羅○淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☒ 可進入調查 蓄水狀況：□滿水；□中度蓄水；□枯水 淤積狀況：□部分淤積；□顯著淤積；□淤滿；□無或輕微淤積 使用狀況：□正常使用；□荒廢；■移作他用；□其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

五、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	鯉魚尾 1510054		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮鯉魚里				
本計畫調 查目的	類型三-農塘已改變用途 (判釋結果與現況相符)				
農塘編號	M-竹山鎮-鯉魚里-鯉魚尾 -0070	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2146 52	2620 313
土地權屬	☒ 國有地； ☐ 公有地____； ☐ 私有地____； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	☐ 挖式； ☐ 築壩式； ☐ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	1.2 公頃	可蓄水面積	---公頃		
農塘容積	---立方公尺	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	移作他用				

六、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：新增水體 6

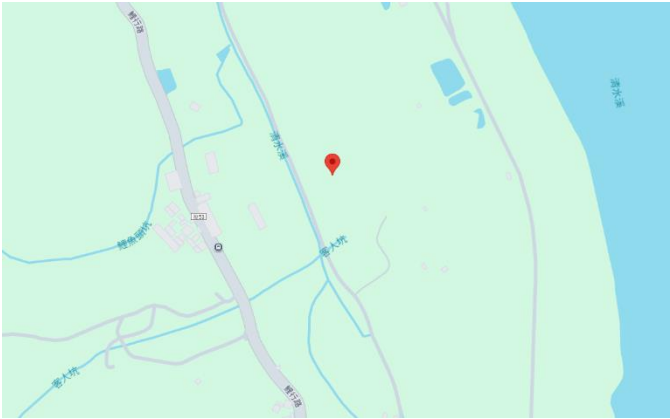
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 14:35	勘 查 人 員	劉○諺 吳○緯 羅○淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☐ 可進入調查 蓄水狀況： ☐ 滿水； ☐ 中度蓄水； ☐ 枯水 淤積狀況： ☐ 部分淤積； ☐ 顯著淤積； ☐ 淤滿； ☐ 無或輕微淤積 使用狀況： ☐ 正常使用； ☐ 荒廢； ☐ 移作他用； ☐ 其他 ()					
		■無法進入調查： 原因簡述：私人養殖場有圍牆無法進入					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	鯉魚尾 1510054		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮鯉魚里				
類型四、新 增水體	類型四-新增水體 (僅能判釋新增水體，無法判釋是否為農塘利用)				
農塘編號	新增水體 6	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2150 23	2619 691
土地權屬	☐ 國有地； ☐ 公有地____； ☒ 私有地 <u>農牧用地</u> ； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	■挖式； ☐ 築壩式； ☐ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	2.56 公頃	可蓄水面積	0.2 公頃		
農塘容積	---立方公尺	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	無法進入調查				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：M-竹山鎮-坪頂里-鯉魚尾-0001

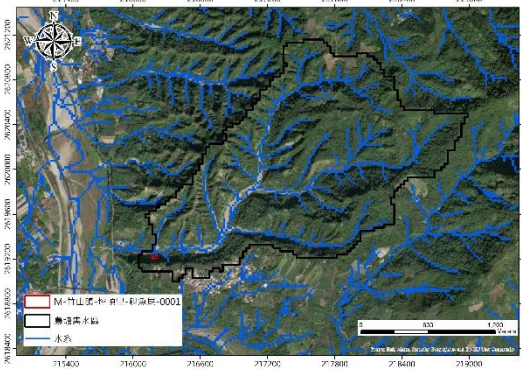
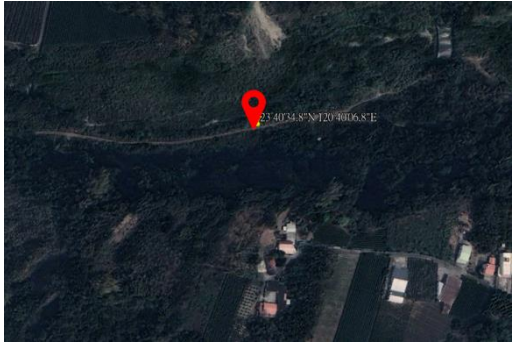
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 14:50	勘 查 人 員	劉○諺 吳○緯 羅○淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☒ 可進入調查 蓄水狀況：□滿水；□中度蓄水；□枯水 淤積狀況：□部分淤積；□顯著淤積；□淤滿；□無或輕微淤積 使用狀況：□正常使用；□荒廢；■移作他用；□其他 ()					
		☐ 無法進入調查： 原因簡述：					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	鯉魚尾 1510054		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮坪頂里				
本計畫調 查目的	類型五-無法判釋(陰影影響・初步判釋無農塘)				
農塘編號	M-竹山鎮-坪頂里-鯉魚尾 -0001	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2161 95	2619 217
土地權屬	☐ 國有地； ☐ 公有地____； ☐ 私有地____； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☒ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	☐ 挖式； ☐ 築壩式； ☐ 築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	331.74 公頃	可蓄水面積	---公頃		
農塘容積	---立方公尺	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	移作他用				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

編號：M-竹山鎮-福興里-鯉魚尾-0004

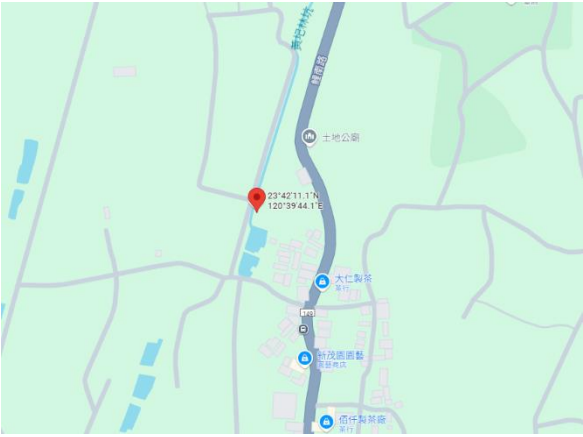
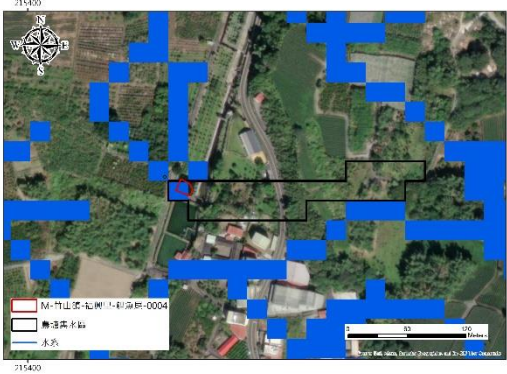
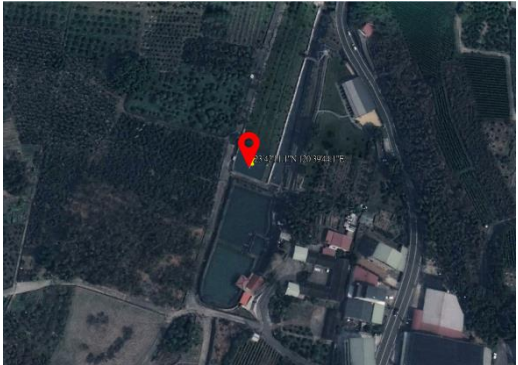
一、農塘細部勘查紀錄表 - 現況

勘 查 單 位	國立中興大 學及集環工 程顧問有限 公司	勘 查 時 間	113/09/26 15:10	勘 查 人 員	劉 ○ 諺 吳 ○ 緯 羅 ○ 淳	氣 候	■晴；□陰；□雨
農塘現況		☐ 可進入調查 蓄水狀況： ☐ 滿水； ☐ 中度蓄水； ☐ 枯水 淤積狀況： ☐ 部分淤積； ☐ 顯著淤積； ☐ 淤滿； ☐ 無或輕微淤積 使用狀況： ☐ 正常使用； ☐ 荒廢； ☐ 移作他用； ☐ 其他 ()					
		■無法進入調查： 原因簡述：私有地有圍牆無法進入					

二、農塘細部勘查紀錄表 - 基本資料

集水區 (編號)	鯉魚尾 1510054		所屬 分局	南投分署	
行政區	南投縣竹山鎮福興里				
本計畫調 查目的	類型五-無法判釋 (初步判釋為養殖使用)				
農塘編號	M-竹山鎮-福興里-鯉魚尾 -0004	定位座標 (TWD97)	定位 點	X	Y
				2155 59	2622 181
土地權屬	■國有地； ☐ 公有地____； ☐ 私有地____； ☐ 公(國)私有地混雜(公(國)有土地與私有地比例：____)； ☐ 未編定； ☐ 其他				
農塘型式	☐ 挖式； ☐ 築壩式；■築堤式； ☐ 挖式與築堤式混合； ☐ 其他__				
集水面積	0.88 公頃	可蓄水面積	0.02 公頃		
農塘容積	---立方公尺	蓄洪體積	---立方公尺		
平均可蓄 水深度	無法進入調查				

三、農塘細部勘查紀錄表 - 地理區位及現況照片

農塘地理區位	
	
地理位置及水系圖	航拍圖
	
農塘全景	周邊環境

附錄二、初稿審查單暨回覆辦理情形

編號	審查意見	意見回覆
1	為配合本署業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分： 坡地農塘常用以「蓄水濟枯」，做為坡地灌溉的重要水源。但常因疏於維護，淤積陸化嚴重，多以挖除淤泥方式，恢復既有維持蓄水功能，此種維修方式對於農塘碳匯之影響應同時研究評估，以獲得雙贏效益。	本研究針對農塘常見之「挖除淤泥」維護管理方式，透過蒐集國際上或我國相關研究成果，以文獻分析法之結果，提出有效的農塘管理方式和指導，以增加農塘的碳匯能力。相關說明已補充於工作項目與內容。
2	於泥沙產量推估模式、農塘因砂量估算時，請評估農塘淤積陸化速率，以供評估清淤之頻率、經費。	納入農塘泥砂產量推估模式章節中，產出評估清淤之頻率、經費之量化數據。相關說明已補充於工作項目與內容。
3	請透過多元衛星影像及地形模型，建立坡地農塘萃取流程時，一併建立潛在新設農塘區位、容量等評估模式。	納入農塘盤查與更新中一併建立。相關說明已補充於工作項目與內容。
4	本研究基於「碳循環(Carbon Cycle)」與「集水區陸源物質運移」之概念，透過對土壤運移過程之瞭解，建置坡地農塘土壤碳匯評估概念模式，用於評估每個坡地農塘因上游集水區之土壤侵蝕或有機質遷移而匯集之年碳匯(C-ton/ha)，並探討估計值之合理性與適用性，方法可行。	謝謝評論。
5	主持人研究表現極為優秀，對於泥砂產量、遞移、因砂量的估算，學有專精，足以勝任本計畫。	謝謝評論。

6	國際上對於濕地的碳匯功能多與肯定，唯對於農塘的碳匯功能尚有不同的見解，例如下列參考文獻：Malyan, S.K.; Singh, O.; Kumar, A.; Anand, G.; Singh, R.; Singh, S.; Yu, Z.; Kumar, J.; Fagodiya, R.K.; Kumar, A. Greenhouse Gases Trade-Off from Ponds: An Overview of Emission Process and Their Driving Factors. Water 2022, 14, 970. [Google Scholar] [CrossRef]	Malyan et al.(2022) 指出人工池塘或農塘是排放大量甲烷的碳源之一。由「集水區陸源物質運移」之觀點而言，農塘被視為集水區所有陸源物質暫時的沉池，並且具備自淨功能。通過分解來自外部的有機物供應，將甲烷和二氧化碳排放到大氣中，或者通過植物吸收轉化為生物量進行固定。 由此可知，濕地透過再吸收方式，增加本身碳匯的能力。若無考量農塘營養供給與輸出，僅評估水體對於溫室氣體排放之影響，導致對於農塘的碳匯功能尚有不同的見解。 本研究將針對此部分之相關研究進行蒐集、彙整及補充說明。相關說明已補充於工作項目與內容。
7	建議能夠針對農塘的碳匯功能是正面亦或負面進行補充討論，尤其是像排序3的竹山鎮的鯉魚里農塘，現況為畜牧使用。	針對不同類型之農塘，將蒐集有關農塘對於碳匯功能是正面亦或負面之影響，於第一章相關研究文獻之章節補充說明。 相關說明已補充於工作項目與內容。

附錄三、期中審查單暨回覆辦理情形

編號	審查意見	意見回覆
1	摘要除列出計畫目的、工作項目外，需列出至期中完成項目、獲致之初步成果、具體建議及解決對策。	已修正。
2	請探討農塘維護管理常見[清淤]方式，其淤泥再生利用之碳匯效益。	感謝委員的建議，本報告重點著重於農塘碳匯量的技術性評估，旨在提供符合IPCC方法學的估算模型，聚焦於農塘的碳匯功能分析。本研究已蒐集並探討未經處理淤泥對環境碳循環的潛在影響，特別是在其曝露於大氣後可能釋放碳的風險，詳見第三章第三節。後續研究將深入探索最佳的農塘清淤管理方式及淤泥再生利用的碳匯效益，並將本年度成果延續為明年度提案的核心方向之一。透過持續擴展本研究的價值，期望在未來農村水土保持相關業務中，為碳匯應用提供具體策略基礎，增強農塘在永續管理與碳匯效益方面的貢獻。
3	請檢視報告之完整性及可讀性，例如 P3-9 整段與前段為複製貼上。	已修正。
4	P4-5 土壤碳濃度分析，以 30-35 度 C 乾燥農塘淤泥，由於農塘淤泥長期處於缺氧環境所以有固碳功能，烘乾時是否會造成部分碳損失，以致結果低估含碳量。且本方法量測碳、氮含量，而甲烷易消散，是否導致結果低估含碳量？	低溫乾燥通常被認為是最有利於保留有機碳的方法，因為此過程中的碳損失較小，一般控制在 5% 以內，具體數值取決於土壤中的有機質含量和性質。在測量土壤和淤泥的總有機碳（Total Organic Carbon, TOC）時，甲烷（CH ₄ ）

		不會被計入。由於甲烷是氣態且容易逸散，無法在標準的固體分析方法中進行測定，因此不包含在 TOC 的測量結果中。
5	P3-12、13 提及土壤覆蓋及敷蓋，例如植樹造林，處理位置是農塘、農塘周邊，或是農塘內淤泥來源上游處？若為淤泥挖除後之農塘內，進行植樹造林是否合適？	目標是維持農塘功能，是透過滿水位以上之範圍可進行植樹造林。在常水位至滿水位範圍內，可透過覆蓋及敷蓋減少表土裸露，同時降低表土流失，建立穩定農塘生態系統。相關修正，請參考 P3-11 頁。
6	而文中建議淤泥挖除後之農塘栽植綠肥作物或速生植物，但此類植物含氮量較高，農塘復水後易產生氧化亞氮，如此增加之碳當量與栽植綠肥所減少之土壤碳排之碳當量相比，其效益如何？	感謝委員建議，在未來研究中，探討農塘淤泥挖除後栽植高含氮綠肥作物或速生植物可能產生的氧化亞氮（ N_2O ）排放問題，並評估其對碳封存效益的影響。由於復水後的 N_2O 排放具有較高的全球暖化潛勢（GWP），我們將進行碳當量平衡分析，以了解該排放是否會抵消綠肥栽植帶來的土壤碳封存效益。此外，研究將考慮含氮量較低的覆蓋作物作為替代方案，以期在減少 N_2O 排放的同時，保持或增強土壤的碳封存效果。
7	農塘淤泥之取樣方式易受水干擾，其取樣體積是否具有有效性？	感謝委員建議，考量淤泥取樣的準確性及有效性，本案係了解土壤碳循環之主要過程，係以概念模式進行評估，推估農塘之年土壤碳匯量。後續研究針對農塘淤泥調查方式進行文獻回顧與匯整，並透過實際調查資料，進一步提升農塘生態系統碳匯效能評估的科學性和精確性。

8	P3-9 該段前 8 行與 P3-8 最後一段重複，請修正。	已修正。
9	P4-4 第二節 1. 土壤取樣分析方法內文第二行『注意取樣時必面由下而上』是否有錯字。	已修正。

附錄四、113 年度創新研究計畫期末成效評核表之審查意

見暨回覆辦理情形

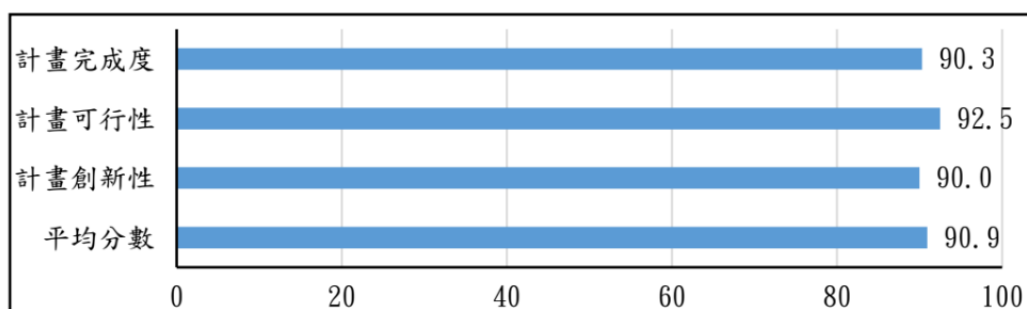
一、計畫編號：113 保發-5.1-保-01-06-001 (5)

二、計畫名稱：建立坡地農塘碳匯評估模式之研究

三、計畫執行機關：中興大學

四、計畫主持人：林昭遠教授

五、期末聯合審查評核問卷統計



六、審查意見：

1. 如果進行人工清淤，對於農塘影響為何？其碳匯效益如何評估？是否會減少碳匯？
2. 關於農塘之碳匯，是否有季節或日夜間的固碳、排碳速率之差異。
3. 建議後續研擬農塘淤泥去化方案。
4. 建議農塘碳匯可朝向量化效益方向評估研究。

七、計畫主辦單位期末評核結果

請勾選	☒ 通過，相關建議如上項說明
	☐ 修正後通過，修正事項如上項建議 說明：_____
	☐ 不予通過，辦理 ☐ 複審或 ☐ 計畫終止 說明：_____

評核日期：113 年 12 月 13 日

編號	審查意見	意見回覆
1	如果進行人工清淤,對於農塘影響為何?其碳匯效益如何評估?是否會減少碳匯?	農塘清淤主要以機械方式進行,透過挖除淤泥來減少沉積於農塘中高有機質土壤的碳存量(C-ton)。若清淤後能妥善處理,未來可推廣為碳減量專案的管理模式。 傳統清淤措施常未納入碳匯效益考量,且高有機質土壤在乾燥過程中易因礦化作用釋放碳至大氣。本研究參考國外文獻指出,高有機質土壤在乾燥期間的碳排放量介於 3,098 - 9,041 mg/m²/day, 年排放量相當於 11.3 - 32.9 ton-C/yr (詳見報告書第 3-9 頁、第 3-10 頁)。 為掌握台灣農塘清淤過程中的碳排放特性,明年度計畫將延續進行試驗,選取具代表性的農塘以獲取本地化碳排放係數,為後續清淤管理提供科學依據。
2	關於農塘之碳匯,是否有季節或日夜間的固碳、排碳速率之差異。	影響農塘中土壤碳匯作用受到多種環境因素的影響,其中季節性變化、水位變化及植被生長是關鍵因子。 其中水位控制對土壤碳存量的影響尤為重要。最佳蓄水水位應保持在距離底土約 10 至 30 公分之間 (Nadeau and Conway, 2015; Wang et al., 2017), 可有效維持土壤處於缺氧環境,從而減少碳損失 (Villa and Bernal, 2018)。有關更詳細的分析內容,請參見報告書第 3-12 頁。

3	建議後續研擬農塘淤泥去化方案。	感謝委員的寶貴建議與肯定，後續研究將著重於深入探討農塘淤泥最佳去化方式及其再生利用的碳匯效益。同時，本年度研究成果也將作為明年度提案的核心方向之一，進一步完善相關研究策略，為推動永續農塘管理及碳減量專案提供更具體的科學基礎。
4	建議農塘碳匯可朝向量化效益方向評估研究。	感謝委員的寶貴建議與肯定，明年度的後續研究將聚焦於建立簡易實用的碳匯及效益估算方法，並結合實測數據的收集與分析，逐步完善相關模型與工具。 研究目標是將成果應用於實務，作為推廣為碳減量專案的管理模式的參數提供，進一步助力農塘永續管理與碳匯效益的提升。

附錄五、國內研討會發表成果

本研究結果於已投稿農業部林業試驗所舉辦國內研討會「2024 森林集水區經營及環境監測研討會」，以下為成果說明：

資料一：林試所-研討會論文集摘要

坡地農塘碳匯量推估之研究

吳炤緯^{1*}、涂富鈞²、曾俊偉³、林昭遠^{1*}

¹ 國立中國立中興大學水土保持學系，402 台中市南區興大路 145 號。

² 林業試驗所森林生態組，100051 臺北市中正區南海路 53 號。

³ 林業試驗所福山研究中心，264013 宜蘭縣員山鄉湖西村雙埤路福山 1 號。

* 通訊作者，yuanlin@dragon.nchu.edu.tw

摘要

自然碳匯是實現淨零碳排放的關鍵策略，特別是在農業領域上。當局正積極致力於實現碳中和的目標，透過減少碳源排放和增加碳匯量，以實現農業部門在 2040 年實現淨零碳排放的藍圖。根據政府間氣候變化專門委員會 (IPCC) 的溫室氣體排放指南，自然碳匯包括森林、農地、草原、濕地、聚居地以及其他土地類型，共六大土地類型。通過了解土地利用特性和碳循環過程，並盤點碳庫存和碳固存量，制定開發與保育的對策，對發揮自然碳匯功能對於農業領域邁向淨零至關重要。

近年來，濕地作為自然碳匯的關注焦點之一，農塘作為 IPCC 六大土地類型之一也備受關注。濕地透過自身植物的光合作用和土壤中的微生物，在碳循環過程中固存碳，是所有陸域生態系統中平均土壤碳密度最高的土地之一。集水區的土壤侵蝕和枯枝葉及林木殘骸的運移，是濕地土壤碳庫的重要來源。儘管濕地植被之碳匯量已建立相關本土調查數據及估算模型，但基於 IPCC 第三層級方式建立評估農塘土壤中因土壤流失而累積的碳匯量估算模型，仍然存在研究空白。

本研究通過瞭解集水區土壤流失過程和土地土壤碳儲存量，來估算基於陸源物質遷移過程中，在坡地農塘中累積的碳匯量。本研究建立坡地農塘土壤碳匯評估概念模式，可用於評估每個坡地農塘因集水區的土壤侵蝕或有機質遷移而匯集的年土壤碳匯量，並討論模型的合理性及未來實務應用上邁向淨零的可行性。