計畫編號：ARDSWC-113-065

以小波分析法、流態超越機率法及地景指標法評估生態基流量及潭瀨流棲地結構特性與品質

Evaluating ecological flow and fish habitat quality considering the evolution of pool-riffle-run sequences with combined approaches of wavelet analysis, flow exceedance probability, and river corridor indices

（成果報告）

執 行 單 位：國立臺灣大學

執 行 期 間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：施上粟 教授

行政院農業委員會水土保持局　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，僅供本局施政參考）


農業部農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

以小波分析法、流態超越機率法及地景指標法評估生態基流量及潭瀨流棲地結構特性與品質

摘要

本計畫為以兩年期計畫申請的研究案，主要目的在建立一套完整的水文、水理、流態、棲地分析以提出新穎的生態基流量計算模式，並發展潭、瀨、流棲地結構演化模式及評估集水區產砂、NbS 生態疏濬等影響以建立魚類等水生物之河溪廊道品質指標。本年度屬兩年期計畫第一年，部分研究工作延續研究團隊 2023 年執行之研究成果（防砂壩小水力發電潛能評估模組之開發與技術驗證，計畫編號：112 保發-5.1-保-01-06-001(15)），包括磺溪上游及其支流清水溪（陽明山國家公園集水區範圍的下緣）的現地監測及調查。本年度已完成原訂的第一年所有工作，部分工作超前執行第二年的研究內容。本計畫之重點成果說明如下：(1)完成水文模組進行集水區範圍內的水資源蘊藏量進行估算，由降雨量轉化成逕流量後，透過超越機率分析及小波分析，找出清水溪之流量特徵；(2)完成 SRH-2D 水動力模式模擬，掌握研究區域於現況及設計情境下之流場分布；(3)以棲地廊道模式完成棲地單元辨識及棲地品質計算，並透過景觀指數計算，了解棲地單元空間分佈特徵；(4)以邏輯式迴歸分析法找出不同棲地單元中，形成高品質棲地之關鍵景觀指標，提供執行工程、棲地營造等決策參考；(5)

預先進行第二年度之潛在研究區域調查及空照資料蒐集，並測試可能使用之 Nays2DH 等河道演變數值模式（針對河川型態由平直至蜿蜒變化過程）。

關鍵詞：生態水文、棲地廊道、流態分析、小波分析、邏輯式回歸法

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

Evaluating ecological flow and fish habitat quality considering the evolution of pool-riffle-run sequences with combined approaches of wavelet analysis, flow exceedance probability, and river corridor indices

Abstract

This research is a project proposed for under a two-year study. The primary aim is to develop a potential evaluation approach to evaluate ecological flow and river habitat corridor indices and to establish new ecohydrological indices. The technology considers the evolution of pool-riffle-run sequences, sediment transportation, eco-friendly dredging, and fish habitat quality. This year is the first year of the two-year plan. The study area is the upper reaches of the Sulfur Creek, located at the lower edge of the Yangmingshan National Park catchment area. This year, all the planned work for the first year has been completed, and some work has been carried out ahead of schedule for the second year's research. The main achievements can be found as follows:

1. The river flow characteristics were figured out using exceedance probability calculation and wavelet analysis, and water resources in the basin were evaluated via eco-hydrological models.
2. The SRH-2D model has been established for conducting hydrodynamic simulations to obtain the comprehensive flow field of current and designed situations.
3. Morphological units and habitat qualities were determined using habitat corridor models, while the spatial distribution of

morphological units was assessed using landscape indices.

4. The key landscape indices were selected depended on morphological units to establish the high habitats quality (HSI ≧ 0.4) according to logistic regression analysis.
5. A preliminary survey of potential research areas for the second year was conducted, along with the collection of aerial imagery. Various potential numerical models were constructed and tested for simulating river morphological evolution from straight to meandering types, such as Nays2DH and BSTEM models.
6. Data collection and on-site investigation include digital elevation model (DEM), aerial photos, basin rainfall records, river flow records, ecological data, river bathymetry, water depth, and flow velocity.

Keywords: eco-hydrological model, habitat structure, river corridor, wavelet analysis, logistic regression

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

目次

摘要 ..... **I**

Abstract ..... **III**

目次 ..... **V**

表次 ..... **VII**

圖次 ..... **VIII**

第一章　緒論 **1-1**

第一節 研究背景及目的 1-1

第二節 計畫目標及研究架構 1-4

第三節 工作項目與進度控管 1-6

第二章　研究地點 **2-1**

第一節 簡介 2-1

第二節 資料蒐集 2-17

第三節 現地調查 2-22

第三章　研究方法 **3-1**

第一節 生態水文模式 3-1

第二節 水動力模式 3-14

第三節 棲地廊道模式 3-17

第四章　清水溪之水文水理特徵 **4-1**

第一節 水文分析及流態分析 4-1

第二節 水動力模擬分析 4-21

第三節 棲地景觀分析 4-27

第四節 邏輯式迴歸分析 4-36

第五章　河川形貌與棲地結構演化初探 **5-1**

第一節 磺溪主流現地調查 5-1

第二節 Nays2DH 模式 5-7

第三節 HEC-RAS 耦合 BSTEM 模式 5-17
第六章 結論 6-1
參考文獻 1
附錄 1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形 1
附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 3
附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 6

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

表次

表 1-1 預定進度表 1-7
表 2-1 磺溪流域水域動物調查表 2-14
表 2-2 清水溪流速水深監測站說明 2-26
表 3-1 台灣土壤性質分類表 3-4
表 3-2 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 曲線值表（1/4） 3-5
表 3-3 SCS 曲線號碼表(AMC II) 3-9
表 3-4 棲地流況之主要類型分類說明 3-19
表 3-5 棲地品質分類表(ELKINS ET AL., 2007) 3-19
表 4-1 各氣象觀測站之座標與距離表 4-2
表 4-2 清水溪子集水區之 CN 值計算成果 4-10
表 4-3 設計情境之邊界條件 4-24
表 4-4 清水溪設計情境之塊區類指標計算成果 4-34
表 4-5 清水溪設計情境之邊緣類指標計算成果 4-34
表 4-6 清水溪設計情境之距離類指標計算成果 4-35
表 4-7 清水溪設計情境之形狀類指標計算成果 4-35
表 4-8 清水溪設計情境之多樣性類指標計算成果 4-35
表 5-1 堤防束縮蜿蜒河道之計算條件 5-11
表 5-2 蜿蜒河道計算條件 5-13

圖次

圖 1-1 本計畫應用、開發之模式及指標概念..... 1-3

圖 1-2 本計畫執行流程圖..... 1-4

圖 2-1 磺溪流域地理位置圖..... 2-1

圖 2-2 磺溪流域土壤分佈圖..... 2-4

圖 2-3 磺溪流域之歷年水質指標(2018-2023)分布圖..... 2-8

圖 2-4 研究區域地理位置圖..... 2-16

圖 2-5 清水溪現地調查照片..... 2-16

圖 2-6 磺溪流域之 20 公尺網格數值地形模型成果圖..... 2-18

圖 2-7 磺溪流域鄰近之中央氣象局氣象觀測站地理位置圖..... 2-19

圖 2-8 臺灣石鱝照片..... 2-21

圖 2-9 臺灣石鱝（左）流速適合度曲線；(右）水深適合度曲線 2-21

圖 2-10 本計畫已執行之現地勘查照片..... 2-23

圖 2-11 VBS-RTK 量測點位分布圖..... 2-25

圖 2-12 本計畫佈設清水溪流量監測之超越機率圖..... 2-26

圖 2-13 FLOW WATCH FW450 手持式流速儀量測流速與實際流速線性關係圖與迴歸公式..... 2-28

圖 2-14 斷面流量計算示意圖(CHOW ET AL., 1988)..... 2-28

圖 2-15 手持式流速儀量測河川斷面流速與水深量測現地照片 ... 2-28

圖 2-16 矩形堰幾何與堰流公式應用示意圖（左)；清水溪匯流口堰頂溢流現地狀況（右）..... 2-30

圖 2-17 水深流速計及水位計安裝位置圖..... 2-33

圖 2-18 水位計現地照片..... 2-33

圖 2-19 M1 水位計與 D1 水位計之水位資料迴歸分析..... 2-34

圖 2-20 水位調查成果圖..... 2-35

圖 2-21 水深調查成果圖 2-35
圖 3-1 磺溪流域之 WMS 水文模型建置成果圖 3-2
圖 3-2 磺溪流域之 HEC-HMS 水文模型建置成果圖 3-2
圖 3-3 清水溪之 SRH-2D 水理模式建置成果圖 3-16
圖 3-4 數值高程地形模型加密前後之比較 3-16
圖 3-5 以福祿數劃分河川水域之棲地單元(ENTWISTLE ET AL., 2019) 3-19
圖 3-6 邏輯式迴歸分析流程概念圖 3-24
圖 4-1 清水溪氣象觀測站地理位置 4-3
圖 4-2 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2019 年） 4-5
圖 4-3 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2020 年） 4-6
圖 4-4 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2021 年） 4-6
圖 4-5 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2022 年） 4-7
圖 4-6 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2023 年） 4-7
圖 4-7 清水溪氣象觀測站之 5 年平均月雨量成果圖 4-8
圖 4-8 清水溪子集水區之土地使用分區 4-10
圖 4-9 清水溪近五年之河川流量變化 4-12
圖 4-10 清水溪流量之超越機率分析圖 4-14
圖 4-11 清水溪流量分析之小波能量譜 4-16
圖 4-12 清水溪流量分析之全域小波能量譜 4-16
圖 4-13 各年度之全域小波能量譜 4-19
圖 4-14 各年度之全域小波能量譜ρ值 4-20
圖 4-15 以超越機率法推算清水溪平常時期之水深分佈圖 4-22
圖 4-16 以超越機率法推算清水溪平常時期之流速分佈圖 4-22
圖 4-17 清水溪水深分佈圖（情境一） 4-24

圖 4-18 清水溪流速分佈圖（情境一）..... 4-25
圖 4-19 清水溪水深分佈圖（情境二）..... 4-25
圖 4-20 清水溪流速分佈圖（情境二）..... 4-26
圖 4-21 清水溪棲地單元分佈（情境一）..... 4-28
圖 4-22 清水溪棲地單元分佈（情境二）..... 4-28
圖 4-23 清水溪棲地品質分佈（情境一）..... 4-30
圖 4-24 清水溪棲地品質分佈（情境二）..... 4-30
圖 4-25 淺流景觀指標係數值..... 4-40
圖 4-26 淺瀨景觀指標係數值..... 4-40
圖 4-27 深流景觀指標係數值..... 4-41
圖 4-28 低品質棲地(HSI＜0.4)之棲地單元分佈（情境一）..... 4-41
圖 4-29 低品質棲地(HSI＜0.4)之棲地單元分佈（情境二）..... 4-42
圖 4-30 高品質棲地(HSI ≧ 0.4)之棲地單元分佈（情境一）..... 4-42
圖 4-31 高品質棲地(HSI ≧ 0.4) 之棲地單元分佈（情境二）.... 4-43
圖 5-1 關鍵河段位置圖..... 5-4
圖 5-2 關鍵河段一..... 5-4
圖 5-3 關鍵河段二..... 5-5
圖 5-4 本計畫現地勘查照片..... 5-5
圖 5-5 關鍵河段一之歷年比較..... 5-5
圖 5-6 關鍵河段二之歷年比較..... 5-6
圖 5-7 關鍵河段二之河岸侵蝕現象..... 5-6
圖 5-8 NAYS2DH 模式界面..... 5-10
圖 5-9 堤防束縮之蜿蜒河道網格..... 5-12
圖 5-10 交互砂洲模擬成果..... 5-12
圖 5-11 蜿蜒河道格網設定..... 5-13

圖 5-12 河岸侵蝕與崩塌後之底床高程..... 5-14
圖 5-13 河岸侵蝕與崩塌後之底床高程差..... 5-14
圖 5-14 使用 NAYS2DH 模擬平直渠道蜿蜒化(ASAHI ET AL., 2013)... 5-16
圖 5-15 本計畫重現 ASAHI (2013)之結果..... 5-16
圖 5-16 一維斷面中的垂向沖淤與橫向侵蝕行為。1.河岸崩塌；2.坡腳侵蝕；3.垂向沖淤 5-18
圖 5-17 BSTEM 設定界面..... 5-19
圖 5-18 河岸土壤參數..... 5-20
圖 5-19 HEC-RAS 內建之河岸材料參數..... 5-20
圖 5-20 水庫沉積案例..... 5-21
圖 5-21 拆壩前縱向高程與水面高程變化..... 5-21
圖 5-22 拆壩後縱向高程與水面高程變化..... 5-22
圖 5-23 於河心(A)累距 14,000 公尺處、(B)累距 16,000 公尺處、(C)累距 18,000 公尺處之斷面觀察拆壩後壩前橫斷面側向侵蝕現象..... 5-22
圖 6-1 第一年研究整合之評估模組運作流程..... 6-2

第一章　緒論

第一節　研究背景及目的

本研究主要目的在建立一套完整的水文、水理、流態、棲地分析以提出新穎的生態基流量計算模式（第一年），並發展潭、瀨、流棲地結構演化模式及評估集水區產砂、NbS 生態疏濬等影響以建立魚類等水生物之河溪廊道品質指標（第二年），如圖 1-1 所示。

河川流態係指水流流量、流向、水深等水理特徵，其受到河川形貌（河寬、底床坡度與粒徑、高程起伏、邊坡坡腳與材質等）、集水區特性（土壤性質、自然產砂能力、植生分佈、地層因子等）、乾濕季期（乾季雨量較小，匯集至河川之流量較少；濕季雨量較大，匯集至河川支流量較大）、人類活動（固床工、攔河堰、水庫、跨河橋樑、丁壩、堤防）等影響，依河道內不同之水理特性（流量、流速、水深）及河道特性（形貌、坡度、底質等），形成多樣之棲地單元(morphological unit；MU)，如水流緩和、水深較大之深潭棲地(pool)；水流湍急、水深較淺之淺瀨棲地(riffle)；水流湍急、水深較大之深流棲地(run)。不同之棲地單元組成多樣之棲地結構，當相同的棲地單元彼此相連即形成棲地廊道，棲地廊道為一種特殊之棲地結構，其代表該種棲地分佈成帶狀且空間廣闊，魚類可順利於上、下游之間來回移動，若局部區域遭遇棲地結構改變（如土塊滑落、較大植生傾倒至河道內、人工結構物等）亦可往上、下游進行避難，幫助魚類更有效率的使用棲地環境。

棲地結構之維護須仰賴集水區提供之流量、泥砂，維持生物所須之基本流量稱之為生態基流量(environmental flow；e-flow)，於無人為

擾動之自然河川，河川流量主要受到乾濕季期之影響，隨全球氣候變遷，極端氣候發生頻繁且更加極端，當乾季時集水區提供之流量常少於生態基流量時，將對於河川生態造成強烈之衝擊。而河川泥砂則主導河道內之形貌變遷，亦會改變河川之棲地單元結構，如堆積作用旺盛之區域易形成淺瀨；侵蝕旺盛之區域則易形成深潭，該現象又以蜿蜒河道之彎道區域特別容易發生。當水流流經彎道時會因邊界層效應與離心力作用而形成二次流(secondary flow)，使得凹岸水位抬高，侵蝕作用旺盛；凸岸水位降低，堆積作用旺盛，導致凹岸容易形成深潭，凸岸則容易形成淺瀨。在此種作用下，蜿蜒河道之消能效果較平直河道更佳，除了表示蜿蜒河道可減少下游之泥砂含量外，其本身形成一種可自行維護之機制，較不需要借助外力即可保持其形貌與特性。綜觀臺灣多處河川多位處人居環境附近，因此常因河道整治而逐漸趨於平直，對於維持河溪生態環境生物多樣性有相當程度的傷害，故有必要導入生態友善工程及自然解方(Nature-based Solution；NbS)之概念，考量還地於河、生態疏濬等方式，使河道恢復為自然河川之樣貌，以提升其自我修復能力、營造多樣生態棲地，增加生態價值。

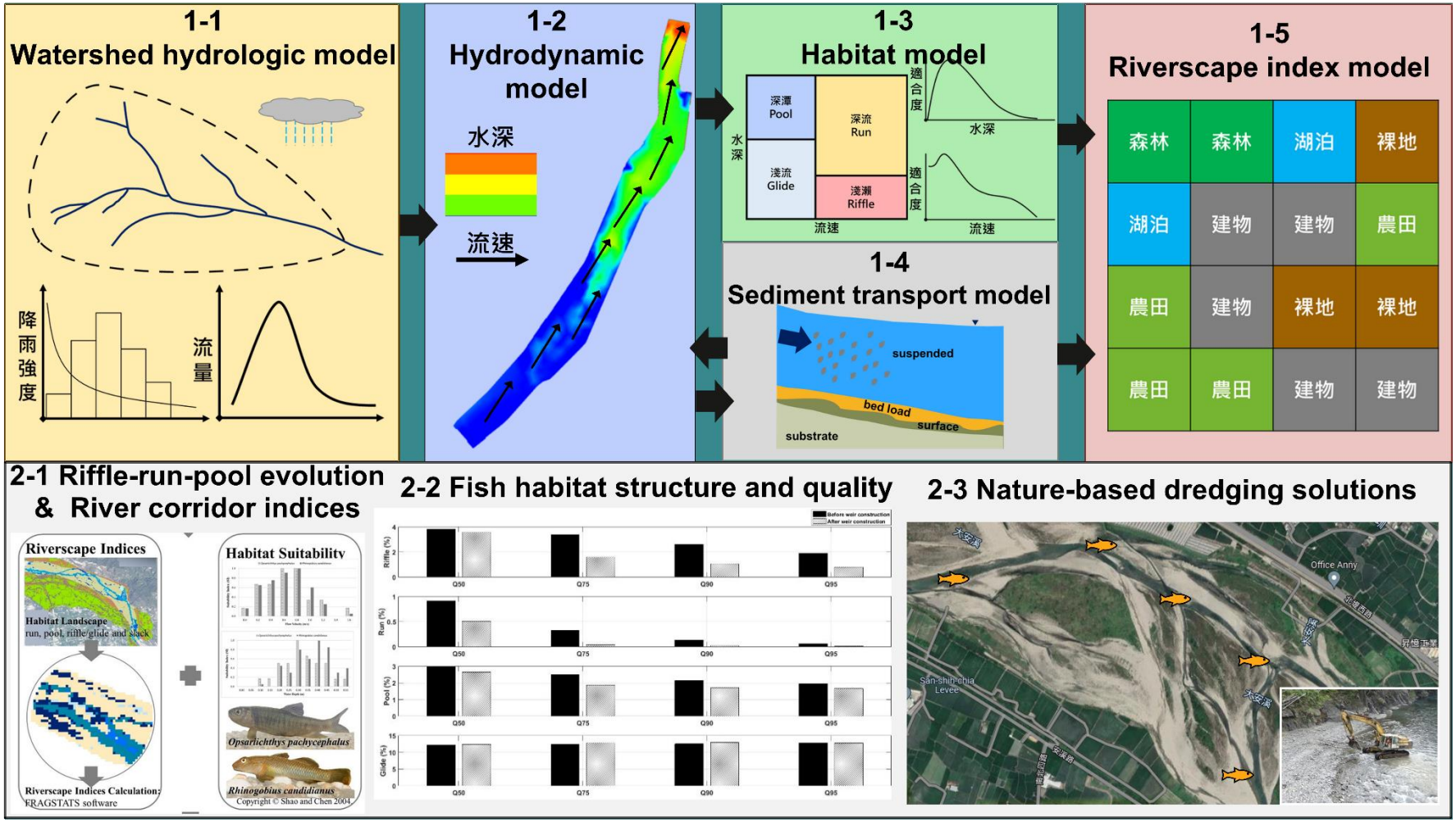


圖 1-1 本計畫應用、開發之模式及指標概念

第二節　計畫目標及研究架構

本計畫主要目標係發展一套「棲地廊道及潭瀨流棲地結構特性與品質評估模組」，由生態水文模式建立集水區模型，分析集水區特徵，提供水動力模式進行水理模擬，掌握流場資料，此流場資料可提供河川形貌模式進行泥砂運移計算與模擬，分析河川形貌變遷與棲地結構演化；也可提供棲地廊道模式分析棲地單元結構及棲地適合度，搭配景觀指數計算，探討棲地廊道之組成與空間分佈，整體研究流程如圖1-2。

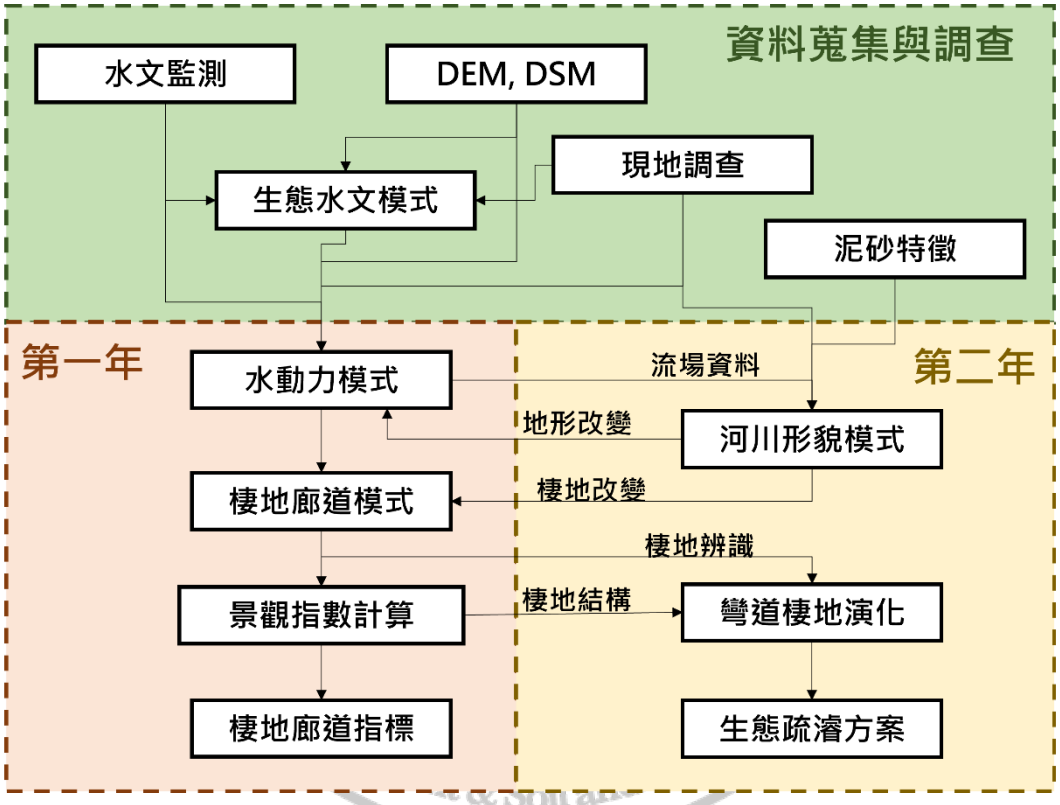


圖 1-2 本計畫執行流程圖

本計畫擬以兩年完成河川棲地廊道分析與河川彎道之棲地結構演化。第一年（本年度）延續研究團隊於新北市磺溪支流清水溪初步建立之研究成果「防砂壩小水力發電潛能評估模組之開發與技術驗證」（112 保發-5.1-保-01-06-001(15)），發展「棲地廊道及潭瀨流棲地結

構特性與品質評估模組」，包括：生態水文模式、水動力模式、棲地廊道模式，也將延續前期成果持續累積現地資料並深化研究深度及廣度，完整建立清水溪之水理特徵、生態特徵建立整體評估模組；第二年再應用此評估模組並加入河川形貌模式，針對蜿蜒河道之彎道區段進行二次流對於潭瀨流棲地結構演化之評估，深化棲地結構受特殊水理環境之影響與演化，且導入自然解方 NbS，探究由生態疏濬恢復自然河川對於河川生態系統之韌性提升效益

第三節　工作項目與進度控管

本年度（第一年）之計畫主要工作項目包括：「棲地廊道及潭瀨流棲地結構特性與品質評估模組」、「模組擴充及應用」、「執行成果報告」等三者為主，並另依此三大工作項目之工作內容、工作量比例、本計畫管考事項，分配作業日程及預定進度，以利管理本計畫之執行進度，詳見表 1-1。

「執行成果報告」依本計畫管考事項分期呈現：於 113 年 7 月 17 日前提送期中成果報告書；於 113 年 11 月 13 日前提送期末成果報告書；於 113 年 12 月 31 日前提送成果報告書、相關資料、結束會計報告。

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

表 1-1 預定進度表

重要工作項目	工作比重(%)	預定進度	112 年			
			1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月
棲地廊道及潭瀨流棲地結構特性與品質評估模組建立	60	工作量或內容	水動力模式	生態水文模式	景觀指標模式	-
		累計(%)	30	70	100	100
棲地廊道及潭瀨流棲地結構特性與品質評估模組訓練	30	工作量或內容	-	現地水文地文特徵模擬	應用模組進行分析	驗證及模組檢討
		累計(%)	-	20	80	100
執行成果報告	10	工作量或內容	計畫說明書 籌備期中報告書	期中報告書	籌備期末報告書及成果報告書	期末報告書 成果報告書
		累計(%)	25	50	75	100
累計總進度(%)			18	47	85	100

第二章　研究地點

第一節　簡介

一、流域概述

本計畫研究區域在新北市金山區的磺溪流域，磺溪屬中央管河川，隸屬於經濟部水利署第十河川分署轄管，其發源於大屯火山群七星山北麓，河道蜿蜒，經三和橋出山谷後河幅始漸開闊，進入金山沖積平原河幅較為寬廣，再經南勢、下六股，於社寮與來自西北向之支流清水溪與西勢溪會合後入東海。磺溪流域北臨淡水沿海河系流域，南與淡水河流域為鄰，東濱東海及基隆沿海河系流域。行政管轄分屬臺北市士林區、北投區及新北市金山區。流域內交通以公路為主，下游有省道台二線以南北橫越，由金山可北通石門、淡水，南抵野柳、基隆。磺溪流域地理位置如圖 2-1 所示。

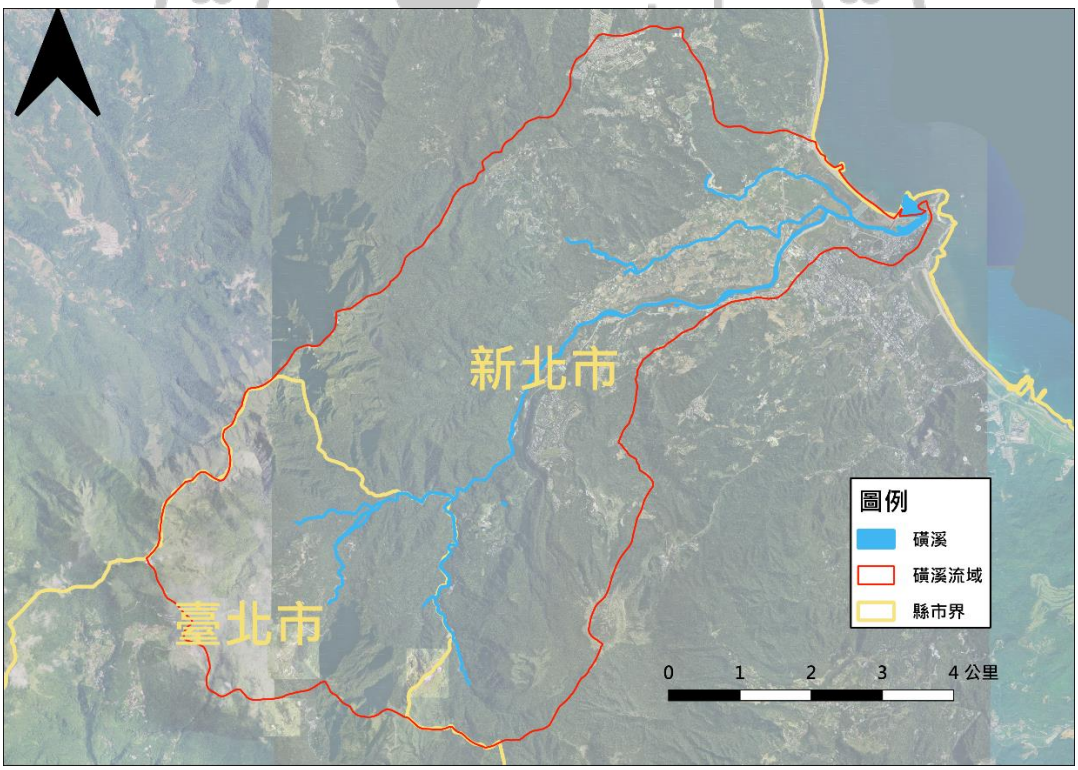


圖 2-1 磺溪流域地理位置圖

(一) 流域特性

磺溪水系因下游地勢較為平坦，且受人工開闢渠道等人為因素影響，水系類型大致呈平行狀，而上游因高山峻嶺，地處陽明山國家公園保護區，受自然山勢分水走向而呈樹枝狀，幹流長約13.75 公里，流域面積約 50 平方公里，平均坡降約 1/15。

(二) 地質特性

通過磺溪流域之主要斷層為金山斷層，其屬臺灣北部區域屬於存疑性活動斷層。金山斷層為一東北走向之逆斷層，東北延伸入海西南沿尖山（南莊層）中角溪至重和村穿過磺溪河谷至大屯火山群，更向西南經臺北盆地邊緣，金山斷層局部為臺北盆地的沖積層所掩覆，西南端可能連結臺北斷層。本流域上有一褶皺位於金山斷層北方，屬向斜構造，呈東北西南走向。本區域地層分布主要有上新世桂竹林層二鬮段、中新世紀晚期桂竹林層大埔段、南莊層及現代沖積等。

磺溪流域土壤屬黃壤、紅壤及石質土交雜分布；中下游多屬黃壤，尤以支流清水溪及西勢溪流域之中下游區域均為黃壤分布區，支流之上游區域具紅壤分布；磺溪下游沖積平原為礫石、砂及黏土等沖積土分布，社寮－金包里山及中角海岸為因季風形成之沙丘，另獅頭山海岬以石質土分布為主，分佈如圖 2-2。各種土壤特性茲分述如下：

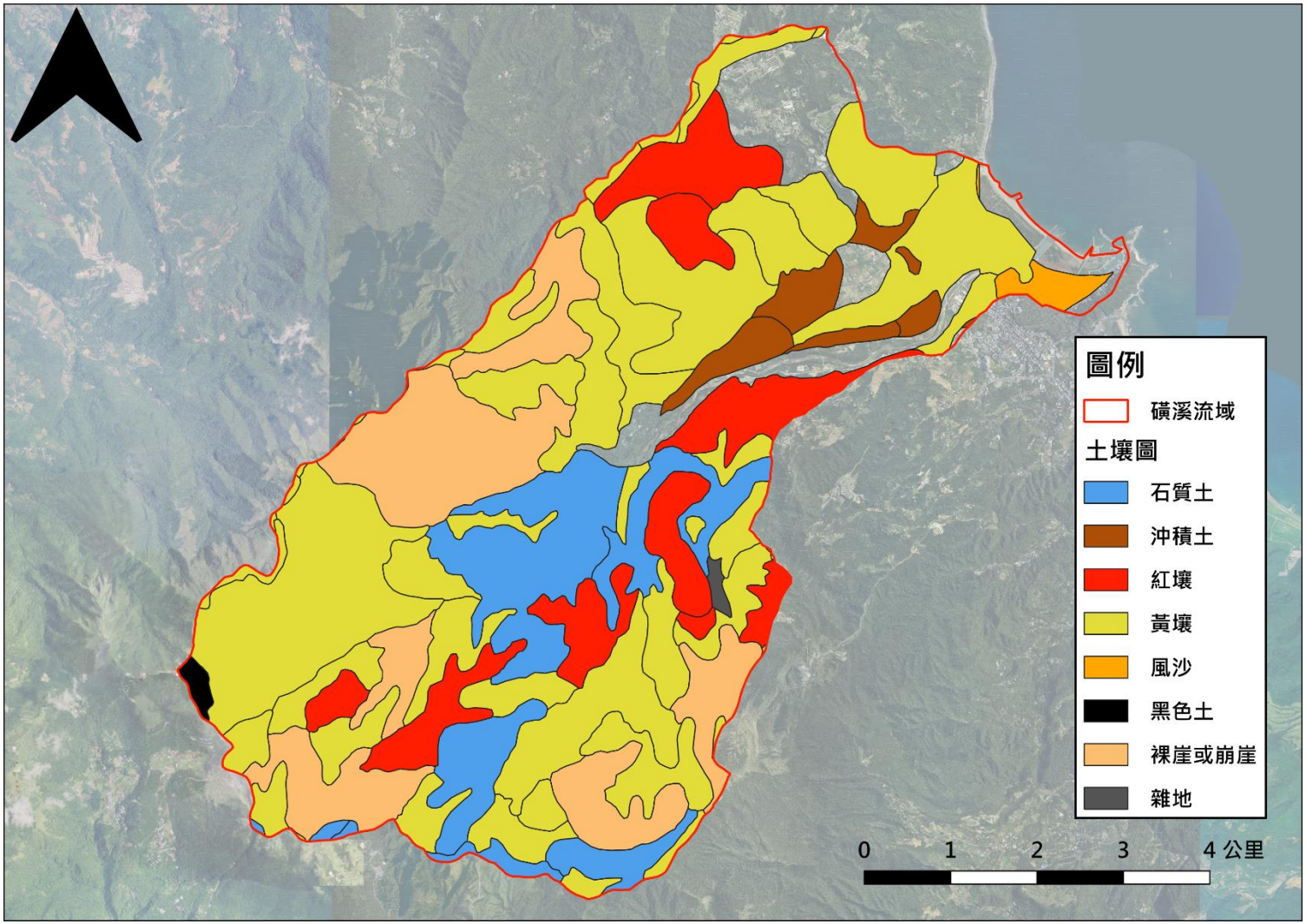
1. 黃壤：母岩質經弱度化育而生成之土壤，有時可因淋洗作用較強而使粘粒明顯往剖面下層移動，養分（鉀、鈉、鈣、鎂）有的已流失而呈黃、黃棕或紅棕色，多生成丘陵地上之相對地形較安定、坡度起伏較和緩之處。

2. 紅壤：紅壤生成於洪積母岩台地，土層較厚，質地細緻，肥力及物理性較差。又可分為紅棕色紅壤及黃紅色紅壤兩種。

3. 石質土：由母質經由簡單之物理、化學風化作用生成之土壤，含石量超過50%以上，排水、通風良好，通常分布於山坡地或森林地之陡峭區，地形不穩定，甚易崩坍，不宜農牧用途，只宜造林保育。

4. 沖積土：土壤物質經河流沖刷後，帶至下游而漸次淤積成固定土壤者，土層中之顏色因人為耕作漸有所改變成淡黃色，因此可以區分有新沖積土與老沖積土。

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA



資料來源：農業部農業試驗所(https://data.gov.tw/dataset/25539)；本計畫修改及繪製。

圖 2-2 磺溪流域土壤分佈圖

(三) 氣象特性

磺溪流域內現存之氣象觀測站僅餘三和氣象觀測站，隸屬於中央氣象局，鄰近流域範圍則另有金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站，亦皆隸屬中央氣象署，可幫助釐清該流域之氣象特性。

磺溪流域位於臺灣北部，每年十一月至翌年四月盛行東北季風，因地形的影響氣流往上抬升，造成流域雨量豐沛。每年五月至十月間則盛行西南風，西南氣流遭中央山脈阻隔，因而雨量較少；另夏季颱風多由臺灣東部及東北部登陸，因磺溪流域地處迎風面，且無地形阻隔，颱風之強風豪雨常直接侵襲本流域。就年雨量而言，各雨量站降雨量之差異主要為山區雨量較大、平原地區較小，由中央氣象局提供之統計降雨量資料(1991 年~2020 年)可觀察出，從沖積扇平原之 2,888.1 毫米（金山站）至高山區之 4,697.1 毫米（鞍部站），差距達 1,809 毫米，可判斷磺溪流域降雨量有明顯的空間差異。此外，降雨的時間分布亦不均，各月份降雨量差異顯著：以九月至隔年五月為雨季，山區部分尤以九至十一月降雨量更大，流域整體之平均年降雨量由下游河口向上游山區遞增。另在颱風暴雨時期，其雨量分布則受颱風規模、路徑、地形而有所不同之反應。

另外，由鄰近磺溪流域之中央氣象局主要氣象站月平均氣溫統計，磺溪流域最冷的時節為冬季十二月到隔年三月，山區氣溫較低，月平均氣溫約在 9.8~12.8 度，平地月平均氣溫約在 15.8~17.6 度；最熱的時間通常是每年六月至九月間，整體月平均

溫度約 21.9~29 度。

而相對濕度因地形、季節不同均有些許差異，北部山區相對濕度月平均約為 86~90%，平原濱海地區約為 80%；山區之相對濕度因季節變化較小，但冬季受東北季風因素影響，相對濕度較夏季高；而平原濱海地區之夏季相對濕度較低，均在 80%以下。

(四) 人文地理與社會經濟狀況

磺溪流域整體行政分區包含臺北市士林區、臺北市北投區、新北區金山區，因上游屬陽明山國家公園管轄之範圍，土地使用有一定的管制故居住人口較少，流域內人口主要分布於中下游，故人口以中下游之新北區金山區境內為統計對象，依 111 年新北市金山區公所統計，該區人口總數為 20,577 人，男性占 10,155 人、女性占 10,422 人，較男性多 267 人；人口密度每平方公里人數約為 418 人，共計 15 里、201 鄰、總戶數為 7,257，每戶人口數為 2.84 人，各里人口數最多者為金美里 5,566 人，占地面積為 0.4 平方公里，可謂地狹人稠，其次為美田里，人口數為 4,446 人，磺港里人口數為 1,859 人居第三位，再其次五湖里之人口數為 1,832 人，最少人口數為西湖里 174 人，而土地最廣為重和里之 24.5 平方公里，人口數 1,214 人，相對為地廣人稀（新北市金山區公所，2023）。

流域內之經濟型態多以農業、漁業為主，根據新北市金山區公所統計農耕土地面積及農戶人口數，耕地面積總計 843.84 公頃，其中水稻耕作面積約 28.93 公頃。除耕種水稻外，該區亦種植台農 66 號紅心甘藷、筊白筍、跳石芋頭與箭竹筍等經濟農作

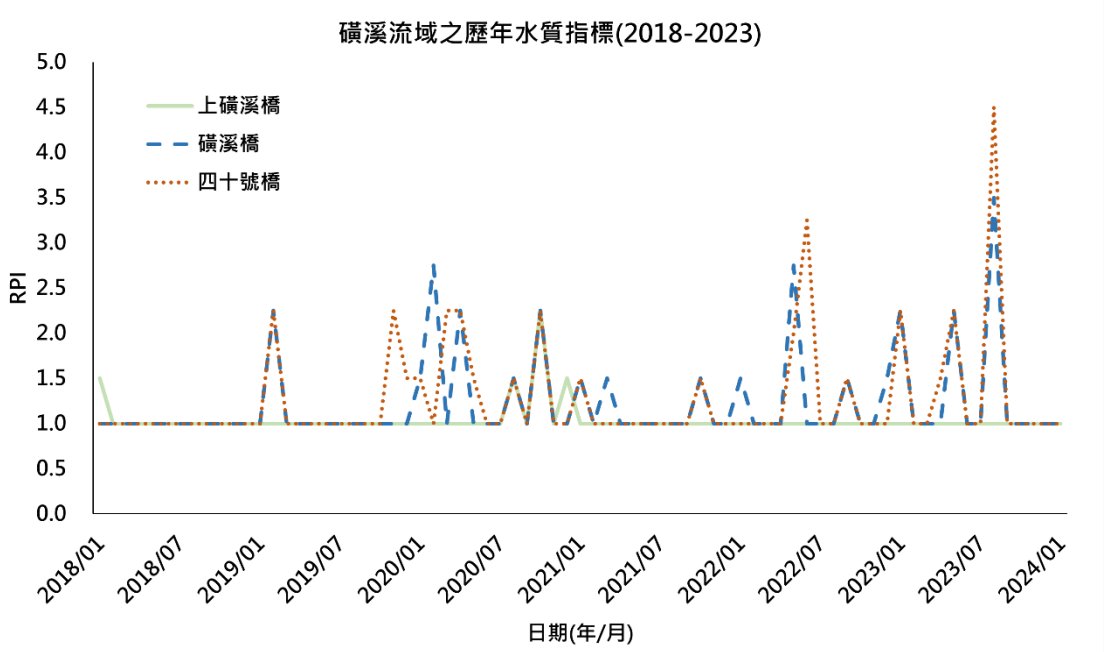
物，尤以紅心甘藷為金山區之名產，近年來金山區農會推動一年一度金山甘藷節，亦帶動本地區觀光農業之發展。

另，流域內磺港漁港為一中型漁港，也是金山最大的漁港，主要以延繩釣漁業為大宗，少數從事火誘網漁業，漁獲物以石斑、黑喉、嘉臘、赤鯊、馬頭、火口、白鯧、烏口、透抽、小卷、白口、花市、花枝等為主，漁產相當豐富。除此之外，更有其他漁港所沒有的溫泉資源，新北市政府及金山區公所等單位有鑑於目前漁業經營日益困難，傳統漁業朝觀光休閒轉型是必然的趨勢，使磺港漁港結合漁業、溫泉及周邊景點等條件，朝向漁業轉型及漁港多元利用，讓漁業得以永續經營方向而努力。

(五) 河川水質

行政院環境保護署於磺溪流域內設有三處水質監測站，分別為上磺溪橋測站、磺溪橋測站、四十號橋測站。上磺溪橋測站位於上游河段，磺溪橋測站及四十號橋測站則於下游河段。各測站依每月量測之溶氧量、生化需氧量、懸浮固體、氨氮之四項水質資料計算河川汙染程度指標(River Pollution Index, RPI)，該指標可分為四級：未受污染(<2.0)、輕度污染(2.0~3.0)、中度污染(3.1~6.0)、嚴重污染(>6.1)。本計畫整理此三測站由 2018 年至 2023 年之歷年水質變化見圖 2-3。由圖可見，磺溪橋測站及四十號橋測站之 RPI 指標變化相較於上游之上磺溪橋測站頻繁，常介於輕度汙染及中度汙染間，除水系特性之外，亦受到下游兩岸居民活動之影響。整體而言，磺溪流域多介於未受污染至中度污染之間，隨流量豐枯而呈週期性變化，因此與流量變化有關但整體水質尚稱良好。另磺溪流域上游發源或流經大屯火山群，其最後一期噴

發大約在 30 萬年前，之後火山活動雖然停止，然在火山地區地層仍有許多小斷層或裂隙，當雨水下滲成為地下水，與地下深處的熱源接觸，形成熱水或熱氣，並混合著岩漿所釋出的硫、氯等氣體，再沿斷層或裂隙上升至地表，形成溫泉或噴氣孔，故流經此區域之磺溪，礦物離子含量較高，屬 pH 值較低之酸性水質。



資料來源：行政院環境保護署；本計畫整理繪製。

圖 2-3 磺溪流域之歷年水質指標(2018-2023)分布圖

(六) 流域植物分布

磺溪流域自河口至上游陽明山國家公園區，境內野生植物涵括平原農田生態及次生林地等分布，參照 2017 年磺溪治理規劃檢討報告，茲以磺溪下游至磺溪上游分處敘述：

1. 磺溪出海口會合處（磺溪下游）

山丘上避風處日照強，木本植物以木麻黃，野桐為主；磺溪出海口舊河道有野莧薺、水毛花等水生植物。

2. 西勢溪與磺溪交會口

兩岸主要為水泥堤防護岸，近海處高木，如木麻黃、黃槿、林投、榕樹等、兩旁則有農業時期留下之竹林，令有次生植被如芒草、蘆竹、及大花咸豐草等；河床旁邊有水生植物如稗、水丁香、細葉水丁香、鴨舌草、斷節莎、墨菜、八字蓼；尚有沙崙生態植物如三葉五加、木麻黃、馬櫻丹、海桐、小葉桑、桔梗蘭、茵陳蒿、短葉水蜈蚣、白茅、馬鞍藤、草海桐、蔓荊、天人菊、文殊蘭、濱刺麥等。

3. 三界壇清水溪旁

農作物有荷花、筊白筍、水芋等。旱田中有水生植物如八字蓼、小花水丁香、滿江紅、粉綠狐尾藻、長梗滿天星、水竹葉、尖瓣花、水芙蓉、翼莖闊苞菊、水蕨、七星山穀精草、細葉碎米薺、中國水竹葉、白花霍香薊、鼠麴草等；另有苧麻、水竹葉，喬木下有伏石蕨、橢圓腺蕨、傅氏鳳尾蕨、鱗蓋鳳尾蕨、長葉腎蕨、密毛蕨等蕨類，並有芒草、李氏禾等多種禾本科植物。路旁的水

圳邊小水溝旁有杜虹花、細葉苧麻、水竹、魚腥草、糯米糰、扛板歸、漢氏山葡萄、雞屎藤、香蘭、禾本科幼苗、雀榕等植物分布。

4. 下六股農田

積水的田裡水生植物豐富，周圍有以杜鵑為主的園藝，其他如九留米、麻竹、過溝菜蕨、白花紫蘇、針藺、畦畔莎草、大井氏水莞、水芹菜、水蓑衣、野慈姑、茯苓菜、心葉母草、鴨舌草及八字寥等；旱田則有爵床、細葉蘭花參、王爺葵、長梗滿天星、扛板歸等為優勢種，溝渠中仍有水棉等植物分布。

5. 金山平原河灘地

該處農業墾殖，呈次生林相，常見的有食茱萸、相思樹、苧麻、小葉桑、青葙子、杜紅花、臺灣澤蘭、蛇莓、灰木、三葉五加、白茅、艾草、火炭母草、點地梅、雙面刺、狗尾草等。

6. 磺溪中橋（磺溪中游）

沖積扇河床有砂土、鵝卵石、壤土，溪邊緣有樹護堤，皆屬陽性樹種，中游河灘以上便是農業區，溪谷有堰壩，混合清水可半灌溉，溪流窄變開闊，水流緩和，有砂土堆積及小鵝卵石與紅土礫石層，磺溪流入平原，形成自由曲流，洪水期因淤塞，流域改道，堆積成開闊地，可長植物漸成植被，接近水邊轉快，河岸灘地，土壤豐厚，植被豐富，有禾本科植物、菊科植物（如大花咸豐草、含羞草、牽牛花、鼠尾粟），高灘地則有如烏

柏、水同木、苧麻、杜虹花、蓖麻、野棉花、蘆竹、牛筋草、裡白刺蔥、食茱萸、臺灣野桐、紫蘇、羊蹄、香楠、島榕、紅楠、香葉樹、變葉懸鉤子、腺葉懸鉤子、酸藤、日本山桂花、山桂花、長梗紫麻、山黃麻、紫花霍香薊、相思樹、海洲常山、青葙子、李氏禾、紅蓮蕉花、白匏子、青苧麻、小葉桑、五節芒、象草、杜鵑花、碎米莕、薄姜木、王瓜、紅果、牛乳榕、山柿、風藤、麻竹、海桐、紫花醡醬草、銳葉牽牛、槭葉牽牛、開卡蘆、白花紫蘇、白茅、翼莖闊苞菊、林投、南美朱槿及臺灣何首烏等。

7. 中游開闊地農田

有蛇莓、夏枯草、光風輪、狗尾草、青葙子、芭蕉、幹花榕、裡白蔥木、白匏子、血桐、杜虹花、江某、樹杞、臺灣澤蘭等。往上游處河床變窄水流急，石塊變大，三和橋下攔砂壩河岸以陽性植物為主，其中山黃麻最多；農田植物與中游相似，但兩岸較原始，再往上小平地有梯田，及園藝作物等。

8. 磺溪上游

山谷有闊葉林，有苧麻、江某、棕葉蘆，有苔蘚及草藻類生長，另有紅刺蔥、白匏子、筆筒樹、水桐木、山棕、楠木、月桃、芒草、東方狗脊蕨、申跋、原生的金毛杜鵑、水鴨腳秋海棠、冷清草、水冬瓜、蜜花苧麻、食茱萸、華八仙、五節芒、野桐、山黃麻、裡白刺蔥等。古河床之河階臺地之河床生長芒草，河岸兩旁有水鴨腳、

水冬瓜、龍船草、烏毛蕨、長梗紫麻、山芋等。磺溪頭面對東北季風,300 公尺就有雲層,上升氣流擋住山頂,山頂下雨帶來雨量,產生北降植物,東北季風下的植被都是迎風面,風壓大且溫度低,植物特徵為葉乾淨、圓形樹冠、低矮。其植物包含箭竹、粟蕨、金毛杜鵑、滿江紅、紅星杜鵑、中原氏杜鵑、華八仙、狹瓣八仙等。另調查有烏皮九芎、假赤楊等。森林主要的樹木為開闊地陽性樹種,如山黃麻、白匏子、野桐、幹花榕、牛乳榕、九丁榕、菲律賓榕、烏桕、食茱萸、裡白刺蔥等。沿溪有次生林地,主要林木有楓香、鵝掌柴、樹杞、細葉饅頭果、錫蘭饅頭果、樹梅、烏皮九芎、大葉楠等樹種。

(七) 流域動物分布

磺溪流域之動物物種亦相當豐富，主因為流域上游為陽明山國家公園，居住人口稀少，生物可利用之棲地較多，整體可以陸域動物、水域動物分述：

1. 陸域動物

磺溪上游穿梭在山林之間，從空中鳥瞰狀似一棵樹的枝幹。因地屬陽明山國家公園，人為干擾較少且植物茂密，森林生態系統豐富，森林密佈使野生動物容易繁衍。早年山羌、水鹿、山豬、臺灣獼猴數量多，後因盜獵者多獵殺山羌、水鹿、山豬，目前大型野生動物僅存山豬、臺灣獼猴；山羌、水鹿則已絕跡，穿山甲因國家公園保護，近年來常見於磺溪頭一帶。此區之蛇類物種相當多樣，常見的有赤尾青竹絲、眼鏡蛇、龜殼花、過山刀、青蛇、水蛇。而食物鏈下方的蛙類數量更多，常見的有澤蛙、貢德氏赤蛙、梭德氏赤蛙、福建大頭蛙、拉都希氏赤蛙、褐樹蛙、艾氏樹蛙、臺北樹蛙、面天樹蛙、中國樹蟾、小雨蛙、盤古蟾蜍、黑眶蟾蜍等 13 種。居於食物鏈上方的猛禽亦是本區的主角，如大冠鷲、松雀鷹等。

中游流域以平原為主，地景上多為水田，造就水田伴生動物，如食物鏈下游的負子蟲、松藻蟲、紅娘華、搖蚊、蟋蟀、螺貝及蝌蚪，供養了多種蜻蜓有白痣珈蟌、青紋細蟌、烏帶晏蜓、薄翅蜻蜓等。

下游河口常見灰瓣足鷸覓食，該水鳥來自西伯利亞，

常因市場魚肉販倒廚餘受食物吸引，常年聚集於此。海尾沙崙則形成天然屏障，成為北海岸最重要候鳥棲地，內側水田沼地常見雁鴨種、鷺鷥科、鷸科、鴴科、鷗科及鸕鷀成群聚集，本地留鳥如小白鷺、黑鳶等整年可見。

2. 水域動物

磺溪因上游大量的溫泉、氧化鐵等酸性物質流入磺溪，水棲動物多難以生存，直到下游美田段至出海口，溪水經大幅稀釋後才出現蝦蟹類、龜、鰻魚等，兩大支流的清水溪、西勢溪則有豐富的水棲動物，尤其以清水溪的族群數量最豐，如表 2-1。

表 2-1 磺溪流域水域動物調查表

生物族群	物種
魚類	臺灣鬚鱲、臺灣石鱝、臺灣鏟頷魚、粗首鱲、鯽魚、泥鰍、赤吻斑鰕虎、臺灣纓口鰍
蝦蟹類	澤蟹、蔡氏澤蟹、日本絨螯蟹、米蝦、臺灣沼蝦、日本沼蝦、大和沼蝦、粗糙沼蝦
螺貝類	捲螺、榔螺、圓田螺、石田螺、川卷、塔卷、瘤卷、網卷、河蚌、蛤蜊
水棲昆蟲	水蠆、水蜈蚣、負子蟲、龍蝨、水黽、鼓蟲、長鬚石蠶、石蠶蛾幼蟲、蜉蝣幼蟲、石蠅幼蟲

資料來源：經濟部水利署第十河川局，2017。

二、研究區域選定

本計畫研究區域為清水溪河段，屬縣（市）管河川，為磺溪主要支流之一，行政分區為新北市金山區，上游集水區主要為陽明山國家公園範圍，下游則匯流入磺溪，總長約 3.4 公里，該處屬陽明山國家公園管理處、行政院農業部農村發展及水土保持署、經濟部水利署第十河川局之三公部門轄管範圍交會處，其地理位置圖如圖 2-4。

研究區域河道總長約 142 公尺，地理位置鄰近天籟飯店，可由台 2 甲線（陽金公路）經金山市區後抵達，交通、資源補給相對便利，大幅減輕現地勘查之困難度。經現地調查發現，該河段存在多種棲地類型，包含淺流、淺瀨、深流等，非常適合執行本計畫目標中之重要工作項目，對於分析河川形貌變遷與棲地結構演化、生態水文模式分析棲地單元結構及棲地適合度、景觀指標計算分析棲地廊道之組成與空間分佈等探究十分適當，現地照片如圖 2-5 所示。本團隊於 2023 年執行「防砂壩小水力發電潛能評估模組之開發與技術驗證」（112 保發-5.1-保-01-06-001(15)）時已建立水位觀測站，並持續蒐集現地水位資料，可提供本計畫進行水文分析、水理模擬、棲地分類等。

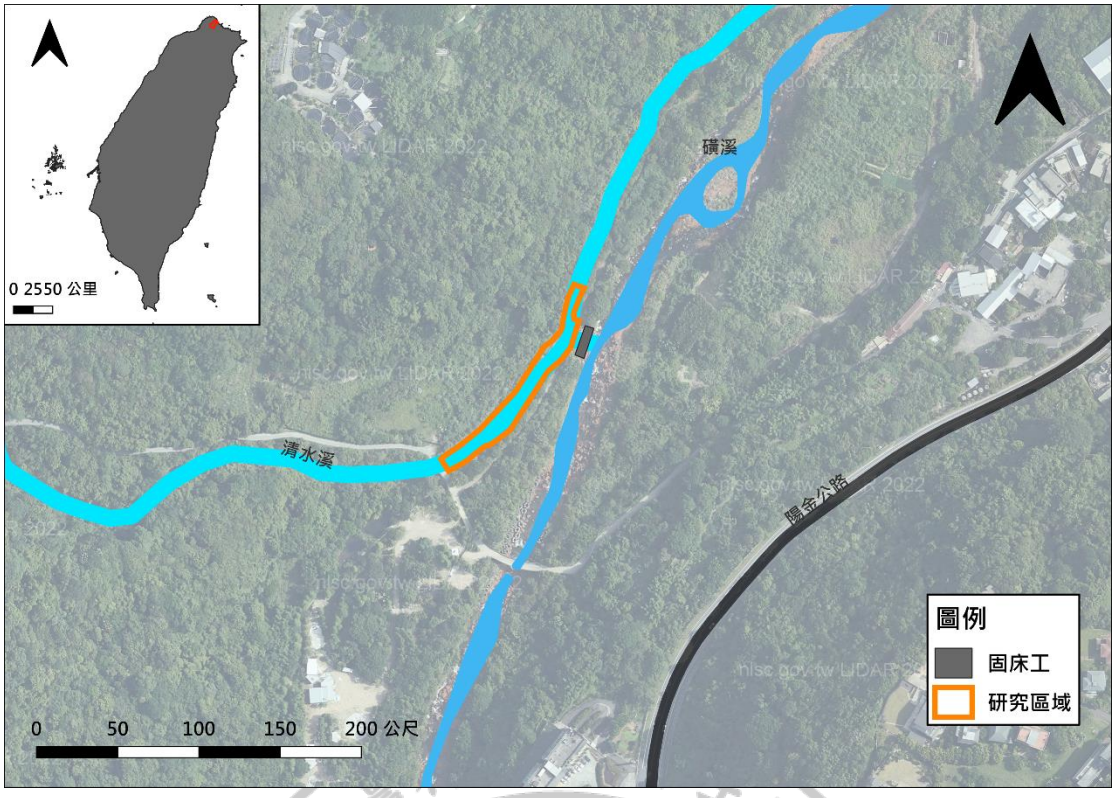


圖 2-4 研究區域地理位置圖



圖 2-5 清水溪現地調查照片

第二節　資料蒐集

一、集水區資料蒐集

本計畫研究區域屬磺溪流域之子集水區範圍內，除針對磺溪集水區之特性進行土地利用、土壤特性等資料蒐集外，其地勢起伏也為重要之地理資訊，故本計畫由內政部國土測繪中心之免費開放資料，蒐集臺北市、新北市之 20 公尺網格數值地形模型(Digital Elevation Model, DEM)資料，其可透過政府資料開放平臺(https://data.gov.tw/)直接下載使用，無須透過正式公文索取，其提供之網格地形資料可直接透過地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)檢視並擷取所關注區域之地形資料，減少對於電腦硬體之負擔，可有效提升建置水理數值模型之效率及成功率。磺溪流域之 20 公尺網格數值地形模型成果如圖 2-6 所示。

本計畫研究區域之清水溪屬縣（市）管河川，其地形調查資料較少，僅可透過內政部國土測繪中心公開之 20 公尺網格數值地形模型資料（2024 年版本）大致了解其地形起伏，而相關地文資料則可透過「磺溪治理規劃檢討報告」（經濟部水利署第十河川局，2017）查找得知，對於本計畫進行水文模式建立及模擬分析幫助甚大。而於清水溪之河道水理模型之建立，本計畫重點關注之河段河寬約 5 公尺至 13 公尺，且位於河川之中上游區域，地勢起伏較大，河道內有許多大型石塊，以解析度為 20 公尺 ×20 公尺之數值地形尚屬精確度不足。為精準掌握河道內之地形輪廓，有必要蒐集更加細緻之數值地形模型資料，本計畫於 2023 年曾於清水溪進行多點之現地地形調查，主要目的為更加了解重點關注河段內之地勢起伏，細化其高差輪廓，加密地形變化較大之區域，以此輔助建立網格數值地形模型，冀求此兩者地

形資料蒐集建立較精準且完整之數值地形模型，以提升水理模式模擬分析之準確度。

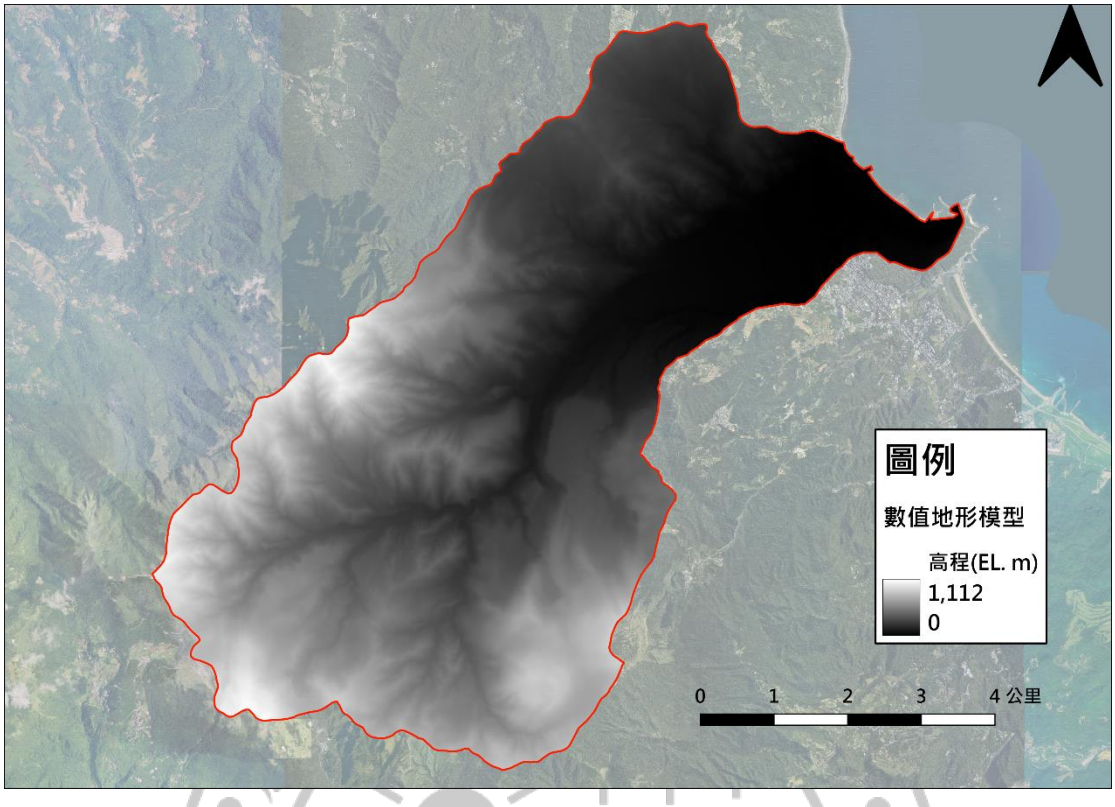


圖 2-6 磺溪流域之 20 公尺網格數值地形模型成果圖

Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

二、水文資料蒐集

磺溪流域內現存之氣象觀測站僅餘三和氣象觀測站，隸屬於中央氣象局，鄰近流域範圍則另有金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站，其地理位置如圖 2-7。可透過蒐集上述之氣象觀測站紀錄之氣象資料，如降雨量、蒸發量、氣溫等參數，以掌握研究區域之氣象特性。本計畫將蒐集之集水區資料建立降雨－逕流模式，並輸入降雨量資料模擬該集水區發生降雨事件時，其雨水於地表入滲後形成之地表逕流，匯集於磺溪主河道及其支流所能提供之河水流量多寡進行流態分析。

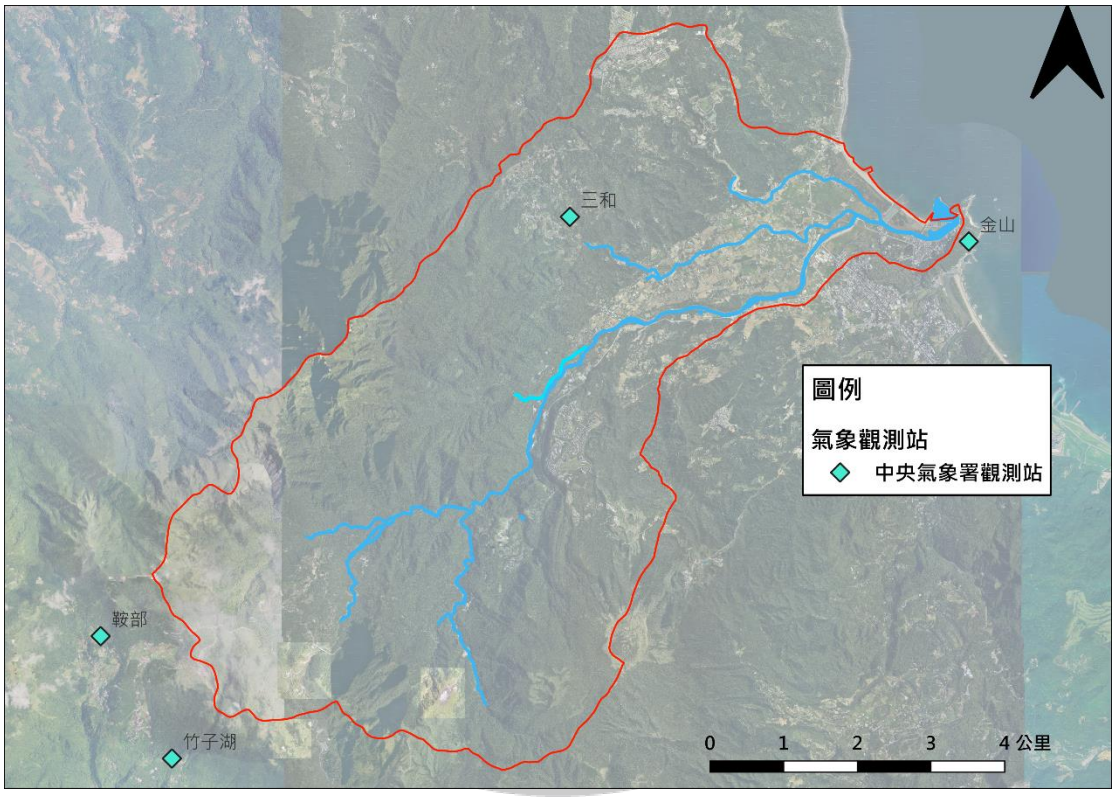


圖 2-7 磺溪流域鄰近之中央氣象局氣象觀測站地理位置圖

三、魚類適合度資料蒐集

本計畫之研究區域位於磺溪流域主要支流之清水溪。磺溪主流因受發源地流經大屯火山群，溫泉、氧化鐵等酸性物質沖入河水，使得水棲生物無法生存，而支流清水溪則蘊含豐富之水棲生物。本計畫透過蒐集主流及支流原生種魚類之相關適合度資料，進行魚類棲地品質分析，該分析將針對多種設計水理情境下，河川形貌發生變遷及演化後，對於環境生態所帶來之正面效益或負面效果。故本計畫導入棲地適合度指標(Habitat Suitability Index Model, HSI)以評估在不同設計情境下，指標物種對於棲地之適合度指標，藉此了解對於生態環境之效益或衝擊程度。棲地適合度指標通常以流速適合度曲線及水深適合度曲線計算而得，該兩者適合度曲線可依不同之流速、水深，計算某特定物種之流速適合度指數、水深適合度指數，其範圍皆介於 0 至 1 間，並屬無因次參數，再透過幾何平均計算出棲地適合度指標。

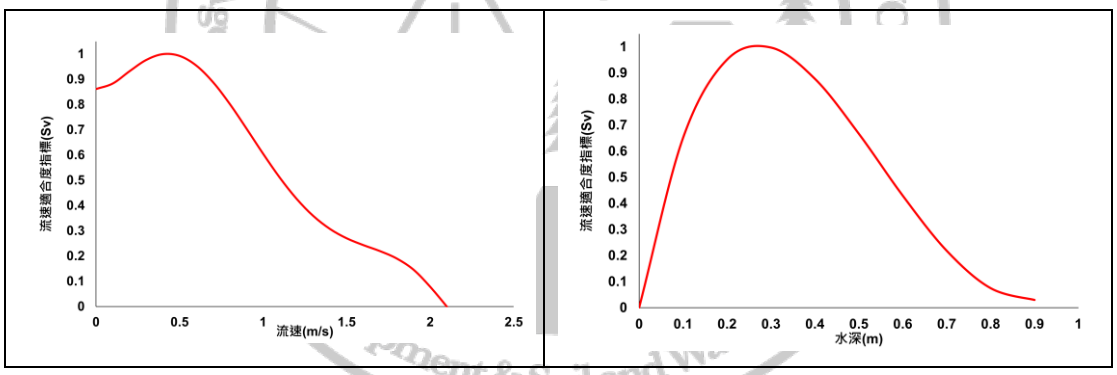
魚類是最常做為水域生物棲地、環境基流量及廊道品質的評估對象(Shih et al., 2008)，本計畫參考河川生物指標物種分析及其適合度曲線研究（經濟部水利署水利規劃試驗所，2010）所建立之各河川物種，選擇以臺灣石鱝(*Acrossocheilus paradoxus*)作為本計畫之指標物種（圖 2-8）。臺灣石鱝為臺灣特有種魚類，廣布臺灣北部、西部、南部、東部河川，為初級淡水魚類，多喜歡棲息於水流湍急、溶氧較高之溪流及較清澈之深潭下層，成魚白天較常躲藏於石縫之中，夜間才出來覓食，幼魚則終日在沿岸、石頭間或岩壁上穿梭覓食。雜食性，主要攝食石頭上的藻類及水生昆蟲，其流速適合度曲線與水深適合度曲線見圖 2-9。使用該二曲線計算適合度指標時，需注意流況是否超越其適用範圍，流速適合度曲線適用範圍為流速介於 0~2.08 公尺/秒；

水深適合度曲線適用範圍為水深介於 0~0.9 公尺。



資料來源：台灣魚類資料庫，https://fishdb.sinica.edu.tw/chi/home.php。

圖 2-8 臺灣石鱝照片



資料來源：經濟部水利署水利規劃試驗所，2010；本計畫繪製。

圖 2-9 臺灣石鱝（左）流速適合度曲線；（右）水深適合度曲線

第三節　現地調查

本計畫自 2023 年起已進行多次現地勘查，摘錄部分歷次勘查照片如圖 2-10，對於研究區域之地物景貌、水理條件、生物棲地已有一定程度之掌握。其中，為蒐集更加精準且詳細之現地資料，以提供水動力模式、生態水文模式模擬研究區域之水理情況與生物棲地結構，本計畫研擬調查研究區域之水域地形資料及流量、水位、流速等水文水理資料，於模式模擬時將可更加貼近真實情況。本計畫除規劃傳統即時測量外，另設置多處監測站，蒐集不同時間之連續性數據資料，並於現地調查時進行例行維護工作。



2023 年 5 月 9 日現地勘查






2023 年 7 月 4 日現地勘查






2024 年 1 月 30 日現地勘查

圖 2-10 本計畫已執行之現地勘查照片

一、地形調查

目前對於河道地形的量測方式，多數以量測多條河道斷面後進行河道方向內插，描述整體河道地形變化，因此本計畫規劃量測之斷面多選以河貌明顯變化處、河道彎曲及匯流處等對於水理狀況與地形內插結果影響較甚之區域。量測河道斷面方式有測深桿、測深錘、鉛魚或回聲測深儀等，然因本計畫關注河段之水深於空間上變化較大，較不適用傳統之量測方式。故本計畫利用虛擬基準站即時動態定位技術(Virtual Base Station Real-Time Kinematic, VBS-RTK)進行局部地形加密測量，其運作原理為：將衛星資料即時計算轉換為所量測點之三維坐標，扣除量測桿長即可得到河道斷面地形，其解算速度快且架設方便，並可獲得公分級精度定位，非常適合用於野溪地形調查。現地地形調查量測點如圖 2-11 所示，共規劃 181 處量測點，結合 20 公尺網格數值地形模型，即可建立更加精準之數值模型，細化河道內之高程輪廓，以供水理模擬分析、河川形貌變遷演化模擬、生物棲地辨識分布模擬之使用。



圖 2-11 VBS-RTK 量測點位分布圖

二、流量調查

本計畫於 2021 年 6 月 28 日在新北市金山區重和里清水溪匯入磺溪主流處之前預先佈設一處「輕量級感測器－流速水深計」（經緯度坐標：25.20835, 121.59337），藉以量測不同時間點的流量資料，詳細監測站說明可參考表 2-2。另外，「輕量級感測器」其具備快速安裝及拆除、方便攜帶、一體成型等優點。量測資料傳輸是以低功耗廣域網路(Low- Power Wide-Area Network, LPWAN)的 NB-IoT 傳遞至雲端主機儲存。此流量站迄今已收集了超過 16,000 筆資料（回傳頻率為 1 筆/小時）。流量分析時間自 2021 年 6 月 28 日起，2023 年 5 月 9 日迄，以所記錄之流量資料繪製成超越機率圖 (exceedance probability)，如圖 2-12，可以初步掌握監測期間之流況(Q_{50}=0.503m^3/s，Q_{90}=0.134m^3/s)，並有利於後續執行生態水文分析。

表 2-2 清水溪流速水深監測站說明

設立地點	208 新北市金山區重合里
設立日期	110 年 6 月 28 日
經緯度座標	(25.20835, 121.59337)
高程(EL. m)	92
地點描述	磺溪旁進天籟飯店之清水溪，屬於縣管河川，周邊屬私人土地，監測點位座落於清水溪無名橋上，可開車直達。
現地照片	

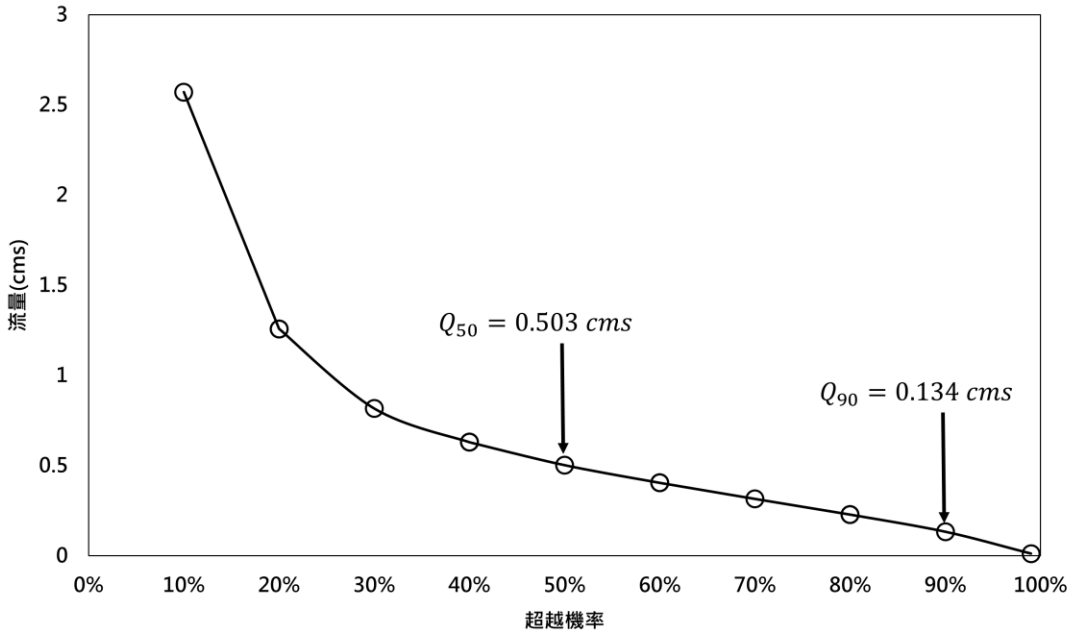


圖 2-12 本計畫佈設清水溪流量監測之超越機率圖

上游處可透過監測站得到流量資料，下游段則需要倚靠現地測量調查流量，因研究區域下游段之清水溪分成兩股水流，一股經固床工後匯入磺溪主流，另一股則流向下游之磺溪頭清水園區後才匯入主流，故有其必要掌握其分流後之各支流之流量。本計畫分別以流速計搭配水深量測，建立研究區域各斷面之流量外，同時於研究區域下游匯流口架設之水位計，搭配匯流口之幾何長度與流量量測成果，訂定匯流口斷面之堰流係數 C_d，並可於後續監測直接以堰流公式應用推估流量。

本計畫使用之流速儀屬手持式流速儀，型號為 GENERAL Flow Watch FW450。本流速儀底部可裝設螺旋槳探頭，其轉動速度將會於儀器內部換算後，直接於手持面板上顯示該時刻之流速，其可量測流速範圍介於 0.1 至 10 公尺/秒，解析度為 0.1 公尺/秒。此外，流速儀已於臺大水工所之室內水槽進行流速校正，用以推估實際流速，其校正結果如圖 2-13 及式 2-1。

研究區域共劃設 28 個斷面，各斷面橫向每 0.5 至 1 公尺（圖 2-14 中 Δw_i）以流速儀與皮尺分別量測各斷面之平均流速(average velocity)與平均水深。根據 Chow et al. (1988)，當水深小於 2 英尺（約 60.96 公分）時，流速量測位置位於約 0.6 倍水深（由底部算起）；水深大於 2 英尺時，則可量測 0.2 倍水深與 0.8 倍水深位置之流速後平均。此外，為以連續方程式推算斷面流量，本計畫將利用皮尺，於流速量測位置同時量測其水深。各斷面之流量之推估如圖 2-14 及式 2-2 之關係計算。利用手持式流速儀與皮尺量測河川斷面流速與水深之現地調查照片如圖 2-15。

$$V_t = 0.4699V_m + 0.700 \qquad \text{式 2-1}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n} V_i d_i w_i \qquad \text{式 2-2}$$

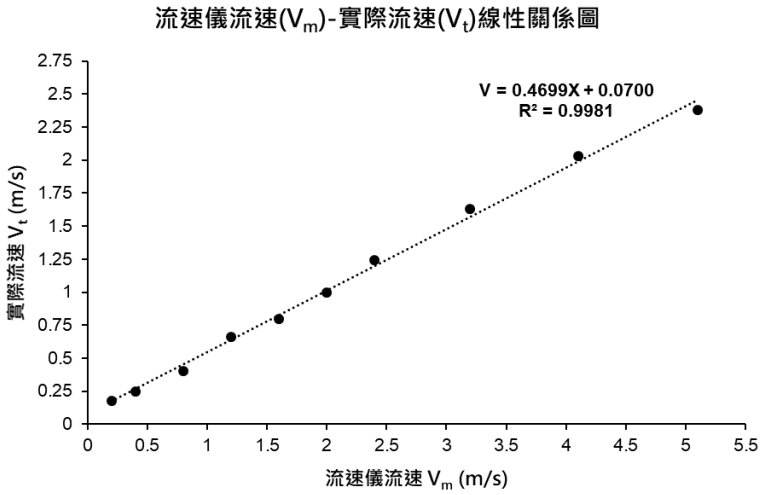


圖 2-13 Flow Watch FW450 手持式流速儀量測流速與實際流速線性關係圖與迴歸公式

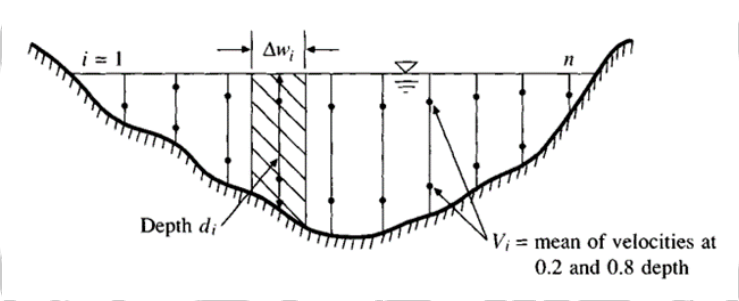


圖 2-14 斷面流量計算示意圖(Chow et al., 1988)

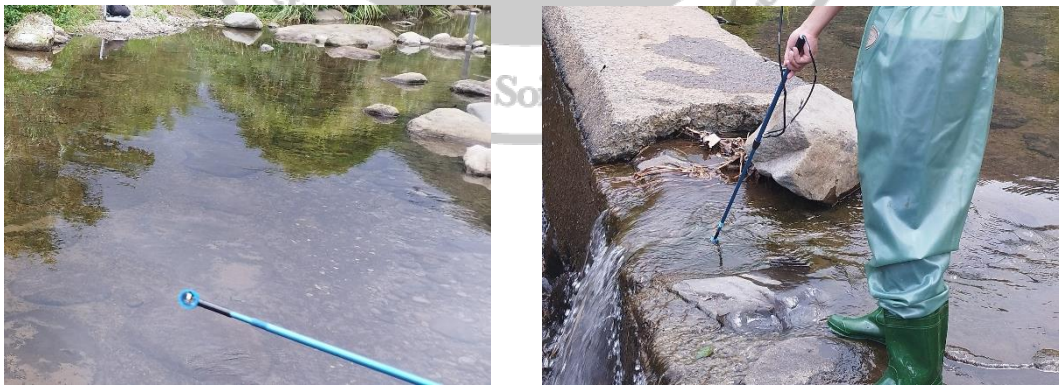


圖 2-15 手持式流速儀量測河川斷面流速與水深量測現地照片

上述之流速計與水深量測以推估流量之方法可推估量測時的流量，而河川流態會因豐枯期不同使流量發生變化，導致河川棲地類型改變，豐水期之中、高流量事件亦可能造成搬運、侵蝕、堆積等外營利作用，促成河道型貌變遷、演化。然而，定期量測斷面流速與水深將耗費大量時間、人力成本，經現地調查發現，於清水溪匯流入磺溪處存在一座固床工，其幾何形狀似明渠流之矩形堰(rectangular weir)，因此可藉由現地監測資料，搭配堰流公式，建立匯流口的流量與水位關係，進一步連續性監測流量隨時間與季節之變化。

考慮水流經過堰體之束縮之矩形堰公式如式 2-3 所示。堰流流量 Q(m^3/s)與堰底以上之水頭 H(m)呈 1.5 次方正比，同時因束縮產生了流量係數 C_d ($m^{-0.5}s^{-0.5}$)。B 為矩形堰寬度(m)，g 為重力加速度(m^2/s)。若理想化無束縮狀況，流量係數 C_d 則為 1。

$$Q = C_d \frac{2}{3} B\sqrt{2g}H^{1.5} \qquad \text{式 2-3}$$

根據式 2-3，為求得匯流口矩形堰之流量係數 C_d，須於量測堰寬 B 後，建立流量 Q 與堰上水頭高 H 之率定關係。流量 Q 部分，本計畫將利用先前所述之流速與水深量測方法，在不同水深時，於匯流口斷面量測該時對應之流量；此外，本計畫於匯流口堰體上游約 5 公尺處架設一水位計，其可監測流量量測時的對應水深 ；堰寬 B 則利用皮尺量測。藉由多組流量 Q 與堰上水頭高 H 之數對，利用式 2-3 之關係可推導匯流口之堰流流量係數 C_d。求得流量係數後，後續即可利用匯流口上游之水位計資料與式 2-3，長期且連續性監測匯流口的流量隨時間之變化，進而對於清水溪分析其流態特徵。

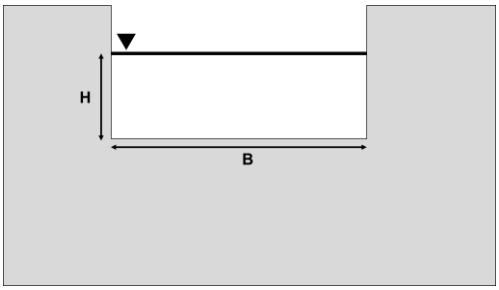




圖 2-16 矩形堰幾何與堰流公式應用示意圖（左）；清水溪匯流口堰頂溢流現地狀況（右）

三、水位調查

本計畫於研究區安裝一處自記式壓力計以進行常時之水位高程監測調查，分別於關注河段之中游、下游區段各安裝一支自記式壓力計，主要負責監測水中之壓力值，並於鄰近灘地安裝一支負責監測大氣壓力之自記式壓力計，藉此利用兩者之壓力差值推算水位高程，其計算公式如下。

$$H_{WL} = H_g + \frac{P_W - P_A}{\rho g} \quad \text{式 2-4}$$

其中：

H_{WL} =水位(m)
H_g =地表高程(m)
P_W =水中自記式壓力計壓力值(mba)
P_A =空氣中自記式壓力計壓力值(mba)
ρ =水密度(kg m^{-3})
g =重力加速度(9.8m s^{-2})

欲進行水位推算前，須得知自記式壓力計安裝位置之地表高程，故於安裝自記式壓力計同時透過 VBS-RTK 量測其地表高程，並可推算該點水位。

本計畫所使用之自計式壓力計型號為 Onset HOBO U20L，為長

筒形壓力計。外殼直徑 3.18 公分、長 15.24 公分，外殼材質為聚丙烯，可適用於淡水與鹽水環境，以確保長期使用無故障；內部以陶瓷壓力傳感器感應絕對壓力並記錄於水位計中。另可依照使用者需求設定資料紀錄的時間間隔，本計畫目前採用 1 筆/每 15 分鐘之記錄頻率。

本計畫使用直徑 4 英吋、總長 1 公尺之 PVC 管作為自記式壓力計之保護措施，安裝前須預先將其整管管壁鑽孔以利水流進入，於安裝點位下挖一定深度後，將 PVC 管部分管長埋入以固定，考量現地河道底質參雜許多較大之石塊（直徑大於 20 公分），人工能下挖之深度有限，經多次評估與選擇設置點位後，當向下挖深至觸及大石塊後，即埋設 PVC 管並回填土方，另取鄰近河床上之石頭堆疊於 PVC 管四周，以防止 PVC 管遇大流量而傾斜或傾倒。最後將自記壓力式壓力計用尼龍繩綁妥於 PVC 管內後，進行頂部封蓋，即完成水位計裝設作業。安裝位置分別選定於防砂壩分流前（M1 水位計）以及分流後（D1 水位計），如圖 2-17、圖 2-18 所示。

紀錄日期自 2023 年 7 月 4 日開始，每月定期進行資料蒐集及儀器維護，因自記式水位計安裝位置於河道中央，雖有以現地之天然石塊進行加固工程，然仍可能因上游之較大流量導致觀測站受損，故每月維護之重點為確認觀測站是否有偏移、傾斜、PVC 管受損、堆砌石塊減少等。本計畫於 2023 年 11 月 24 日進行例行維護工作時，發現 M1 水位計遺失，考量 M1 水位計安裝於清水溪河道中央，四周無大型地物（石塊、枝幹、結構物）遮蔽，需直接抵抗清水溪之流量，且於 10 月初有小犬颱風侵襲（10 月份之例行維護日因遇山區大雷雨而取消），推測可能為大流量事件破壞觀測站，導致 PVC 管、自記式壓力計被河水沖走。本計畫考量 M1 水位計周遭無其他適合安裝觀測

站之區域，若於原地重新安裝亦可能遭遇未來之洪流量沖毀，因此決定中止 M1 水位計之水位監測工作。而比較已蒐集之 M1 水位計及 D1 水位計資料，發現兩者之水位資料程高度線性相關，如圖 2-19，故後續將透過 D1 水位計之水位資料推估 M1 水位計之水位，使本計畫之水位調查更加完整，並補助建立、修正二維水理模式，推估公式如下：

$$y = 1.576x - 45.702 \qquad \text{式 2-5}$$

其中，x為 D1 水位計之水位資料；y為 M1 水位計之水位資料。

水位監測成果如圖 2-20、圖 2-21 所示，M1 水位計之水位變化多介於 81.74~82.35 公尺之間，水深多介於 0.19~0.80 公尺之間，D1 水位計之水位則介於 80.9~81.25 公尺之間，水深多介於 0.61~0.96 公尺之間，變化起伏較小。

本計畫於今年度 10 月進行例行調查工作時發現 D1 水位站遭洪量沖毀，推測為山陀兒(KRATHON；強烈颱風)侵襲所導致，考量現地地貌已大幅變化，不利於繼續安裝水位計，故本計畫將不進行清水溪之水位監測工作，後續將以降雨量蒐集、流量模擬為主要之水文分析。



圖 2-17 水深流速計及水位計安裝位置圖

	
編號：M1	編號：D1

圖 2-18 水位計現地照片

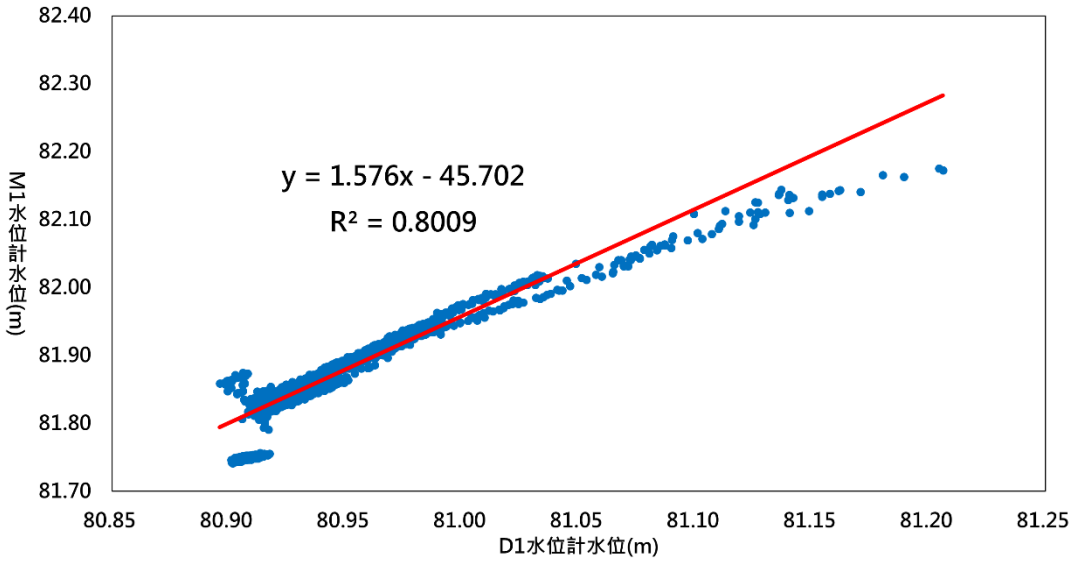


圖 2-19 M1 水位計與 D1 水位計之水位資料迴歸分析

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

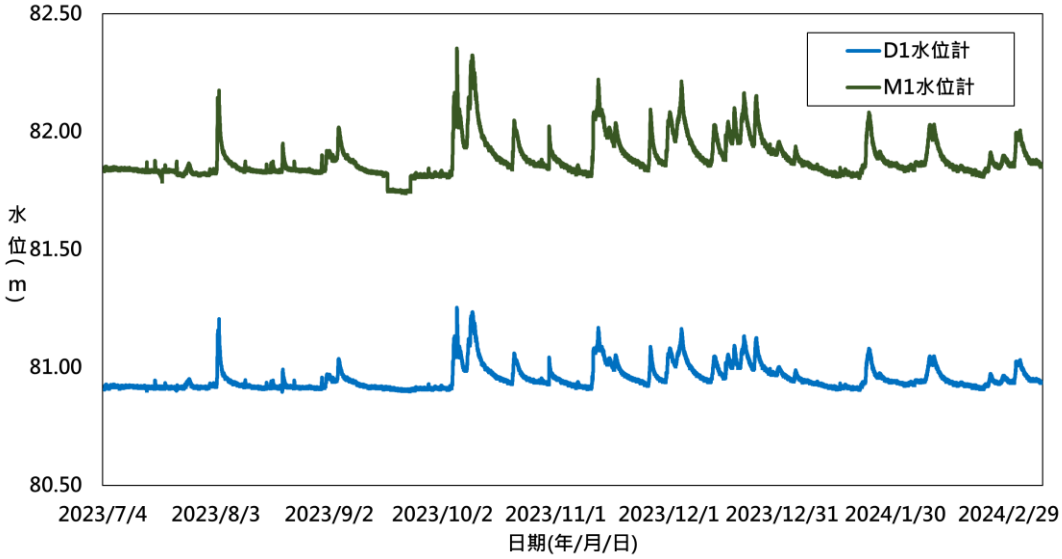


圖 2-20 水位調查成果圖

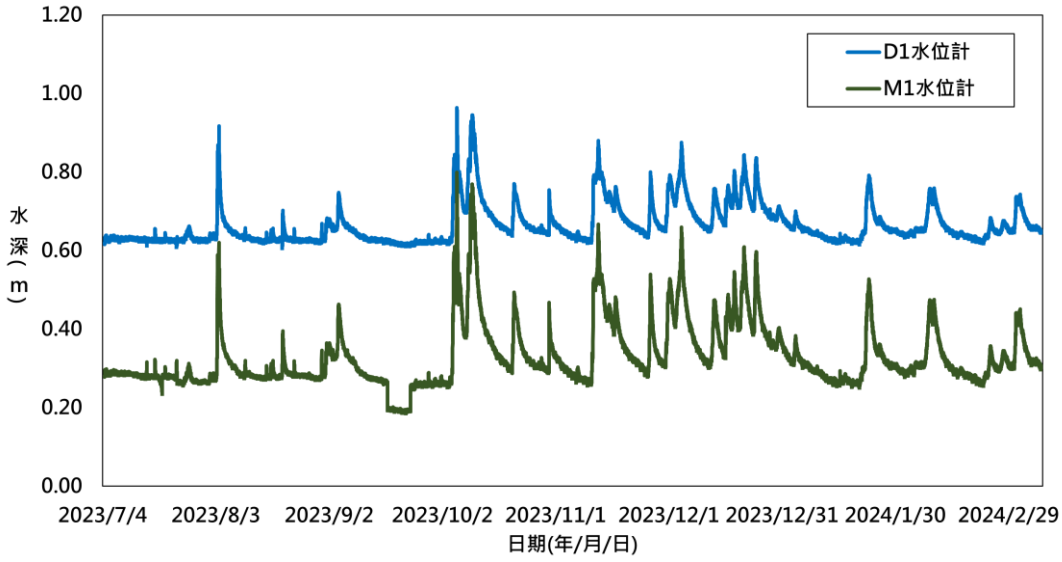


圖 2-21 水深調查成果圖

第三章　研究方法

第一節　生態水文模式

本計畫將建立一套流程，將雨量資料經由地表逕流模式轉換為流量資料，而後利用該流量資料進行流量與流態分析，將其設為邊界條件進行水理計算及水力發電潛能評估。首先利用地理資訊系統(geographic information system；GIS)軟體中的水文模組將集水區數值高程模型(Digital Elevation Model；DEM)資料進行資料處理、建構河川級序、集水區分割，並轉換成 HEC-HMS 集水區模型。接著於 HEC-HMS 中設定集水區水文條件，將降雨資料輸出逕流資料。

HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension)是一套由美國陸軍工兵團(U.S. Army Corps of Engineering Center)開發的工具集，主要用於地理空間的水文系統模擬計算。HMS(Hydrologic Modeling System)為美國陸軍工兵團開發的降雨-逕流模型，可用於計算大小型集水區的供水、洪水事件或逕流歷線。該模式由流域模組、氣象模組、控制模組、與時間序列模組等所組成。流域模組包含了集水區內子集水區、河道、水庫、節點等元件，藉由給定相關參數，並選擇適當的基流(baseflow)、損失(loss)、逕流轉換(transform)等方法，可模擬子集水區內的降雨-逕流轉換情形。其建模成果如圖 3-1、圖 3-2 所示，以此模型即可將此集水區之降雨量轉換為磺溪流量，提供水動力模式之邊界條件進行模擬。

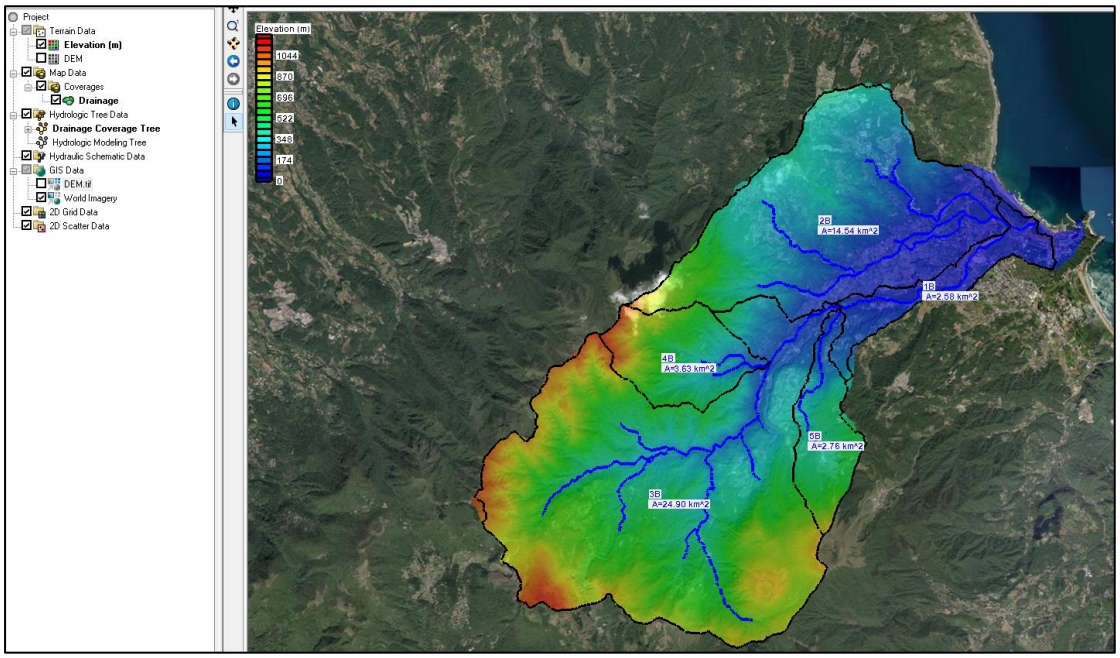


圖 3-1 磺溪流域之 WMS 水文模型建置成果圖

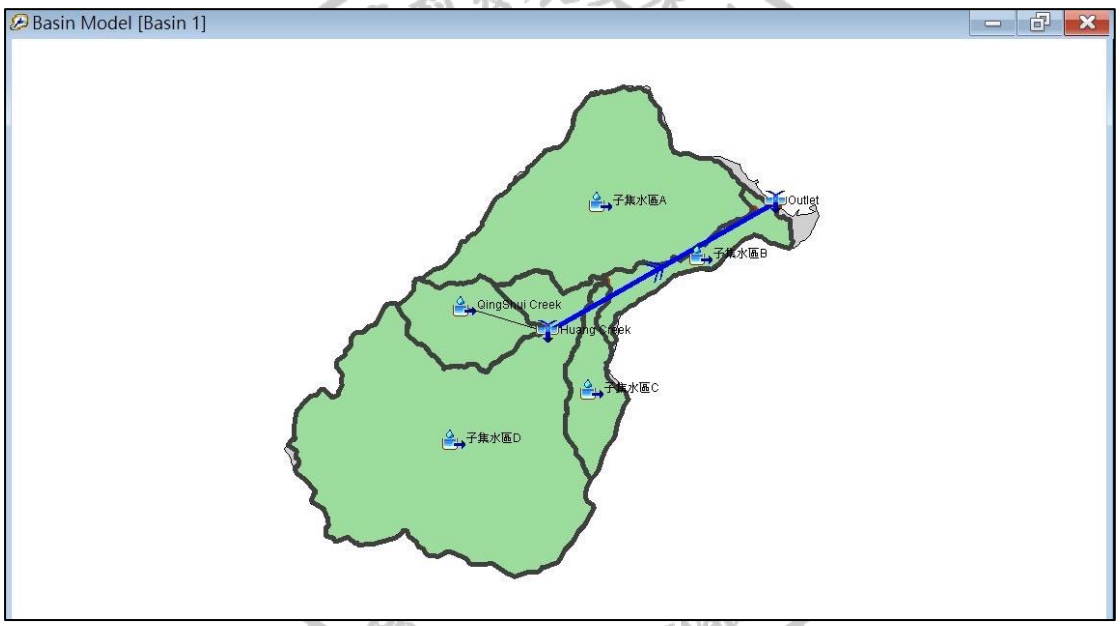


圖 3-2 磺溪流域之 HEC-HMS 水文模型建置成果圖

基流方法可選擇定值或是依照線性水庫等方法計算子集水區的逕流歷線的基流貢獻；而入滲損失方法則可藉由選擇不同的入滲公式，如荷頓入滲公式(Horton, 1939)、菲利普入滲公式(Philip, 1969)、格林-安普入滲公式(Heber Green & Ampt, 1911)進行計算，或採用美國水土保持局(Soil Conservation Service, SCS)方法，SCS 方法係在估算直接逕流量(direct runoff)之前先估算有效降雨(effective rainfall)，計算公式如下：

$$P_e = \frac{(\mathrm{P} - 0.2\mathrm{S})^2}{(\mathrm{P} + 0.8\mathrm{S})}$$

$$\mathrm{S} = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (\text{英制}) \qquad \text{式 3-1}$$

$$\mathrm{S} = 2.54(\frac{1000}{CN} - 10) \quad (\text{公制})$$

其中，P_e為有效降雨；S為集水區最大蓄水量；CN為曲線號碼(curve number)，又可稱 CN 值(curve number value)，其受土壤類別、水文臨前狀況、土地利用與水土保持工程措施等因素影響。美國水土保持局將土壤依排水特性分為 A、B、C、D 四類，A 類表示滲透性良好之土壤，不易產生直接逕流，由 A 類至 D 類，土壤之滲透性逐漸降低，因此 D 類表示滲透性最低之土壤，代表最容易產生直接逕流，表土土質所對應之 SCS 土壤分類可由表 3-1 查找，土地利用則可透過表 3-2 找出對應之 SCS 分類，最後以表 3-3 得到 CN 值。若於集水區內有多種表土土質、土地利用，則可先分割出具備相同表土土質及土地利用之區塊，並進行查表以取得 CN 值，再透過面積加權計算，獲得整塊集水區之 CN 值。

表 3-1 台灣土壤性質分類表

分類代碼	表土土質分類	SCS 土壤分類
0	粗砂土、砂土	A
1	細砂土、壤質砂土、壤質粗砂土	A
2	壤質系砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土	A
3	極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土	A
4	坋質壤土、坋土	B
5	壤土	B
6	砂質黏壤土	C
7	黏質壤土、坋質黏壤土	C
8	坋質黏土、砂質黏土	D
9	黏土	D

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

表 3-2 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 曲線值表（1/4）

第 I 類		第 II 類		第 III 類		SCS 分類
類別	代碼	類別	代碼	類別	代碼	
農業使用土地	01	農作	0101	稻作	010101	2
			0102	旱作	010102	1
			0103	果樹	010103	2
			0104	廢耕地	010104	1
		水產養殖	0102	水產養殖	010200	21
		畜牧	0103	畜禽舍	010301	9
				牧場	010302	4
		農業附帶設施	0104	溫室	010401	9
				倉儲設施	010402	9
				農產品展售場	010403	9
				其他設施	010404	9
森林使用土地	02	天然林	0201	天然針葉樹純林	020101	7
				天然闊葉樹純林	020102	7
				天然竹林	020103	7
				天然竹針闊葉混淆林	020104	7
		人工林	0202	人工針葉林純林	020201	7
				人工闊葉林純林	020202	7
				人工竹林	020203	7
				人工竹針闊葉混淆林	020204	7
		其他森林使用地	0203	伐木跡地	020301	6
				苗圃	020302	6
				防火線	020303	6
				土場	020304	6

資料來源：USACE, 2000

表 3-2 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 曲線值表（2/4）

第 I 類		第 II 類		第 III 類		SCS 分類
類別	代碼	類別	代碼	類別	代碼	
交通使用土地	03	機場	0301	機場	030100	17
		鐵路	0302	一般鐵路	030201	19
				高速鐵路	030202	19
				鐵路相關設施	030203	18
		道路	0303	國道	030301	18
				省道、快速道路	030302	18
				一般道路	030303	18
				道路相關設施	030304	18
		港口	0304	商港	030401	21
				漁港	030402	21
				專用港	030403	21
				其他港口相關設施	030404	21
水利使用土地	04	河道	0401	河川	040101	21
				減河	040102	21
				運河	040103	21
				堤防	040104	18
		溝渠	0402	溝渠	040200	18
		蓄水池	0403	水庫	040301	21
				湖泊	040302	21
				其他蓄水池	040303	21
				人工湖	040304	21
		水道沙洲灘地	0404	水道沙洲灘地	040400	21
		水利構造物	0405	水閘門	040501	17
				抽水站	040502	17
				水庫堰壩	040503	17
				地下抽水井	040504	17
				其他設施	040505	17
		防汛道路	0406	防汛道路	040600	18
		海面	0407	海面	040700	21

表 3-2 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 曲線值表（3/4）

建築使用土地	05	商業	0501	零售批發	050101	10
				服務業	050102	10
		住宅	0502	純住宅	050201	12
				兼工業使用住宅	050202	12
				兼商業使用住宅	050203	12
				兼其他使用住宅	050204	12
		工業	0503	製造業	050301	11
				倉儲	050302	11
		其他建築用地	0504	宗教	050401	9
				殯葬設施	050402	9
				興建中	050403	9
				其他	050404	9
公共設施使用土地	06	政府機關	0601	政府機關	060100	10
		學校	0602	幼稚園	060201	9
				小學	060202	9
				中學	060203	9
				大專院校	060204	9
				特種學校	060205	9
		醫療保健	0603	醫療保健	060300	9
		社會福利建設	0604	社會福利建設	060400	10
		公用設備	0605	氣象	060501	11
				電力	060502	11
				瓦斯	060503	11
				自來水	060504	11
				加油站	060505	11
		環保設施	0606	環保設施	060600	11

資料來源：USACE, 2000

表 3-2 國土利用現況對應土地利用型態 SCS 曲線值表（4/4）

第 I 類		第 II 類		第 III 類		SCS 分類
類別	代碼	類別	代碼	類別	代碼	
遊憩使用土地	07	文化設施	0701	法定文化資產	070101	9
				一般文化資產	070102	9
				其他文化設施	070103	9
		休閒設施	0702	公園綠地廣場	070201	8
				遊樂場所	070202	9
				體育場所	070203	9
礦鹽使用土地	08	礦業	0801	礦場	080101	9
				礦業相關設施	080102	9
		土石	0802	土石採取場	080201	19
				土石相關設施	080202	17
		鹽業	0803	鹽田	080301	9
				鹽業相關設施	080302	9
其他使用土地	09	軍事用地	0901	軍事用地	090100	9
		濕地	0902	濕地	090200	21
		草生地	0903	草生地	090300	5
		裸露地	0904	灘地	090401	1
				崩塌地	090402	1
				礁岩	090403	1
				裸露空地	090404	3
		灌木荒地	0905	灌木荒地	090500	4
		災害地	0906	災害地	090600	9
		營建剩餘土石方	0907	營建剩餘土石方	090700	9
		空置地	0908	未使用地	090801	9
				人工改變中土地	090802	9
				測量標	090803	17

資料來源：USACE, 2000

表 3-3 SCS 曲線號碼表(AMC II)

SCS 分類	土地利用情形	SCS 土壤分類			
		A	B	C	D
	耕地：				
1	無保護措施	72	81	88	91
2	有保護措施	62	78	78	81
	牧草地或放牧地：				
3	不良情況	68	79	86	89
4	良好情況	39	61	74	80
5	草地：良好情況	30	58	71	78
	森林：				
6	稀疏、覆蓋少、無覆蓋物	45	66	77	83
7	良好覆蓋	25	55	70	77
	空地、林間空地、公園、高爾夫球場、墓地等：				
8	良好情況：草地覆蓋面積超過 75%	39	61	74	80
9	稍好情況：草地覆蓋面積 50~75%	49	69	79	84
10	商業區(85%面積不透水)	89	92	94	95
11	工業區(72%面積不透水)	81	88	91	93
	住宅：				
12	<1/8 英畝(65%)	77	85	90	92
13	1/4 英畝(38%)	61	75	83	87
14	1/3 英畝(30%)	57	72	81	86
15	1/2 英畝(25%)	54	70	80	85
16	1 英畝(20%)	51	68	79	84
17	鋪石(混凝土或柏油)、停車場、屋頂、道路等	98	98	98	98
18	街道	98	98	98	98
19	鋪石(混凝土或柏油)道路及雨水下水道	76	85	89	91
20	碎石道路及泥土道路	72	82	87	89
21	水體	98	98	98	98

資料來源：USACE, 2000

逕流轉換可採用運動波(kinematic wave)、單位歷線(unit hydrograph)等方法（式 3-2），將扣除損失後的有效降雨轉為直接逕流。

$$\mathrm{Q}_n = \sum_{m=1}^{n \le M} P_m U_{n-m+1} \qquad \text{式 3-2}$$

其中，Q為直接逕流；P為有效降雨深度；U為單位歷線。

若各子集水區的直接逕流會經河道後匯流於節點，則可利用河道演算(routing)方法,推算實際之出流歷線。一般河道演算常用方法如馬斯金更法(Muskingum method)，其計算公式如下：

$$\mathrm{Q}_{j+1} = \mathrm{C}_0 I_{j+1} + C_1 I_j + C_2 Q_j \qquad \text{式 3-3}$$

其中，Q 為出流體積；I 為入流體積；C_0、C_1、C_2 為洪水波通過河段所需時間之函數，計算方式如：

$$\mathrm{C}_0 = \frac{-KX + 0.5\Delta\mathrm{t}}{K(1-X) + 0.5\Delta t}$$
$$\mathrm{C}_1 = \frac{KX + 0.5\Delta\mathrm{t}}{K(1-X) + 0.5\Delta t} \qquad \text{式 3-4}$$
$$\mathrm{C}_2 = \frac{K(1-X) - 0.5\Delta t}{K(1-X) + 0.5\Delta t}$$

其中，K為貯蓄常數(storage constant)，單位為時間，其值近似於水流流經該河段之波傳時間(wave travel time)；X為權重因子，其值約介於0.0~0.5 之間。

透過 HMS 之轉換可得到清水溪之流量時序列資料，用以執行流態分析。流態分析包括時變超越機率分析(time-varying exceedance probability, TVEP)及小波分析(wavelet analysis, WA)。超越機率的概念常被應用於水文的頻率分析中，待分析的通常有雨量、流量、水位等物理量，目的是為了找出大於這些物理量特定值的機率，藉以瞭解其發生的可能性大小，以便做工程上的規劃設計或者防災應變。Weibull (1939)提出之超越機率之公式如式 3-5。

$$P(X \geq x_m) = \frac{m}{N+1} \qquad \text{式 3-5}$$

其中，m為排名名次；N為總資料數。其計算方式為將物理量由大至小排序，並依序給予每一個數值排名，數值最大之物理量之排名為 1 (m=1)；數值最大之物理量之排名為 N (m=N)，接著以此計算每一個數值之超越機率。雖然透過超越機率的分析，能夠瞭解歷年各流量所占時間的總和百分比，然而將連續的時間序列打散後再依據流量大小進行排序，可能造成區間資料存在時間不連續的情形，無法看出流量出現時間或持續時間。而棲地類型一般多受到水深、流速而改變型態，水棲生物會選擇其偏好之棲地類型生存、覓食、休息、繁殖等，於長時間維持相近之棲地特徵便可提升生物利用之效率。此概念已被應用於陽明山國家公園夢幻湖之水生植物棲地模式中(Shih & Lee, 2023)，該研究將水深時序列資料進行超越機率分析，並根據不同之水生植物選定關鍵水深後，檢視時序列資料中出現大於或等於關鍵水深之最大持續時間、持續時間總和，以及小於關鍵水深之最大持續時間，進而計算棲地適合度指標。因此，為了在使用超越機率的同時加入時間的因素，本計畫評估不同超越機率流量區間在乾濕兩季的最大連續持續時間，並統計連續出現至少數小時的次數，以決定將此流量作為後續

研究評估的目標流量，計算公式如式 3-6，式 3-7 所示：

$$t_{m,max} = Max[T_i(X \geq x_m), T_{i+1}(X \geq x_m), \ldots, T_n(X \geq x_m)\ ] \quad \text{式 3-6}$$

$$C_{m,t_*} = Count[T(X \geq x_m) \geq t_*] \quad \text{式 3-7}$$

其中，$T(X \geq x_m)$函數表示連續發生大於或等於x_m事件之持續時間；n表示連續發生大於或等於x_m事件之次數；$t_{m,max}$表示連續發生大於或等於x_m事件之最大持續時間；t_*表示關鍵持續時間，為時間尺度之參數；C_{m,t_*}表示發生持續時間T大於關鍵延時t_*之次數，可藉由$Count(T \geq t_*)$函數進行運算。

小波分析法是針對一個綜合水文訊號(例如河川流量或降雨量)，利用有限長且快速衰減的某類型母小波，以平移(translation)與延展(dilation)的方式，進行各種頻率、訊號強度的多尺度分析，經常用於分析包含許多不同頻率能量的時間序列資料，近期也常被作為分析現地水文資料隨時間變化的工具(Daubechies, 1990; White et al., 2005)。在不同時間尺度(time scale)中的離散時間序列x_n（其中$n = 0,1,\ldots,N-1$，N為時間序列之長度）。其連續小波轉換可以被定義為x_n與小波函數Ψ的卷積(Torrence & Compo, 1998)，如式 3-8。

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \Psi^* \left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] \quad \text{式 3-8}$$

其中，δt為時間步長；s為小波尺度；Ψ*為Ψ之共軛複數；$\eta = (n'-n)\delta t / s$為時間之無因次項。

$W_n(s)$的振幅可表示為$|W_n(s)|$，用以量化連續小波轉換的小波能量。在週期模式中能量分佈被定義爲連續時間序列小波能量譜：

$$W_n(s) = |W_n(s)|^2 \qquad \text{式 3-9}$$

為觀測各不同時間尺度之小波能量，將同一尺度之小波能量譜(Wavelet Power Spectrum；WPS)進行加總並除以整體時間序列之長度，可得到計算小波頻譜的時間尺度平均，即全域小波能量譜(Global Wavelet Power Spectrum；GWPS)：

$$GWPS(s) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} WPS_n(s) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)|^2 \qquad \text{式 3-10}$$

GWPS 可根據研究目的使用年平均或季平均進行計算，以量化年度或季節變化趨勢。亦可利用全域小波能量譜比例ρ(s)值來比較前後時間之全域小波能量譜差異(Zolezzi et al., 2009)，方程式如下：

$$\rho(s) = \frac{GWPS_1(s)}{GWPS_2(s)} \qquad \text{式 3-11}$$

其中，分子和分母分別帶表前後時間之全域小波能量譜。ρ(s)之意義為顯示資料在不同時間區間內的流量振蕩情況（小波頻譜能量之強化或衰減），當ρ(s) > 1時，說明在尺度上前一時間段之全域小波能量($GWPS_1$)大於後一時間段($GWPS_2$)，即過往流態振蕩比較強，若結果為0 < ρ(s) < 1時則相反，表示後一時間段之小波頻譜之能量較強。

本計畫運用全域小波能量譜嘗試找出對於清水溪流態影響程度不同之事件週期，藉此了解清水溪之水理特徵可能出現大幅度變化之頻率。同時，由不同時間範圍所分析之全域小波能量譜計算比例ρ(s)，可以找出各週期之全域小波能量譜在時間序列上之變化，當ρ(s)值越接近 1 時，顯示該週期之全域小波能量譜較不隨時間變化，可推論其為相對穩定之流量事件。

第二節　水動力模式

本計畫採用 SRH-2D(Sedimentation and River Hydraulics - 2D)水理模式建立清水溪之數值模型。SRH-2D 模式為臺灣水利署與美國墾務局雙邊長期合作開發之模式，除了模式收斂上相對穩定可靠外，同時能與很多現有模式結合（如粒子追蹤模式、海洋模式等），且在台灣已累積不少應用案例。在二維水理的模擬上，模擬的網格一般分為結構(structured)網格與非結構(unstructured)網格，結構網格的格點之排列井然有序，非結構性網格的格點之排列則無脈絡可循，SRH-2D 可以自由選用或混用這兩種網格，模式使用者可以依據河段的筆直或是蜿蜒情形採用最適合的網格形式。SRH-2D 之水理控制方程式如下所示：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=\mathrm{e} \qquad \text{式 3-12}$$

$$\frac{\partial (hu)}{\partial t}+\frac{\partial (hu^2)}{\partial x}+\frac{\partial (huv)}{\partial y}=$$

$$\frac{\partial (hT_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial \left(hT_{xy}\right)}{\partial y}-gh\frac{\partial (z_b+h)}{\partial x}-\frac{\partial (\tau_{bx})}{\partial \rho}+\overline{D}_{xx}+\overline{D}_{xy} \qquad \text{式 3-13}$$

$$\frac{\partial (hv)}{\partial t}+\frac{\partial (huv)}{\partial x}+\frac{\partial (hv^2)}{\partial y}=$$

$$\frac{\partial \left(hT_{xy}\right)}{\partial x}+\frac{\partial \left(hT_{yy}\right)}{\partial y}-gh\frac{\partial (z_b+h)}{\partial y}-\frac{\partial \left(\tau_{by}\right)}{\partial \rho}+\overline{D}_{yx}+\overline{D}_{yy} \qquad \text{式 3-14}$$

其中，t 為時間；h 為水深；u 為 x 方向之水深平均流速分量；v 為 y 方向之水深平均流速分量；e 為過量降雨率；g 為重力加速度；T_{xx}、T_{xy}、T_{yy} 為水深平均紊流應力；$\overline{D}_{xx}$、$\overline{D}_{xy}$、$\overline{D}_{yx}$、$\overline{D}_{yy}$ 為水深平均延散項；z_b 為底床高程；ρ 為密度；τ_{bx}、τ_{by} 為底床剪應力。

SRH-2D 模式之平常時期水理模擬，主要目的在評估清水溪河道水理的變化情況，主要關注其水深及流速之變化，再透過生態水文模式分析其生物棲地結構。模擬範圍之地形將結合內政部國土測繪中心之 20 公尺網格數值地形模型為主，輔以現地地形調查之局部加密測量點位成果，建立整合之二維平面地形。並以此地形成果為模式基礎建立網格(mesh)，網格解析度原則上採 1 公尺 ×1 公尺，並根據地形、地景變化較顯著之區域與重點關注之區域適當加密網格，以取得較詳細的水理成果。比較使用現地地形調查之局部加密測量點位細化數值地形模型後之成果，可發現出河道輪廓較為細致，中游河段之高程分布明顯差異較大，深潭之實際位置較偏下游，兩岸之高程實際也較高，此現象由中游河段延伸至下游皆可觀察出。

現況水理邊界將採用由流態分析所得之成果設定上游邊界條件，下游因有二股出流，一股由固床工溢流後匯入磺溪主流，另一股則沿清水溪分流至其下游處。本計畫於固床工上進行現地之流速與水深量測，可推測其溢流流量，作為其中一股出流流量設定，並假設河道底床及邊壁之滲流量微小可忽略，另一股出流量即可透過質量守恆方程式推算，以作為水理模擬之邊界條件設定。模式建置如圖 3-3 所示。

本計畫之清水溪研究區域屬中上游河段，其底床質粗糙，多以礫石（粒徑大於 2 毫米）為主且參雜許多大型石塊，本計畫將參照過往文獻（如 Chow (1959)等）建議之曼寧 n 值範圍，初步嘗試做為模式中的曼寧 n 值，後續則根據模式成果進行率定及驗證，調整 n 值至最貼近現地狀況。

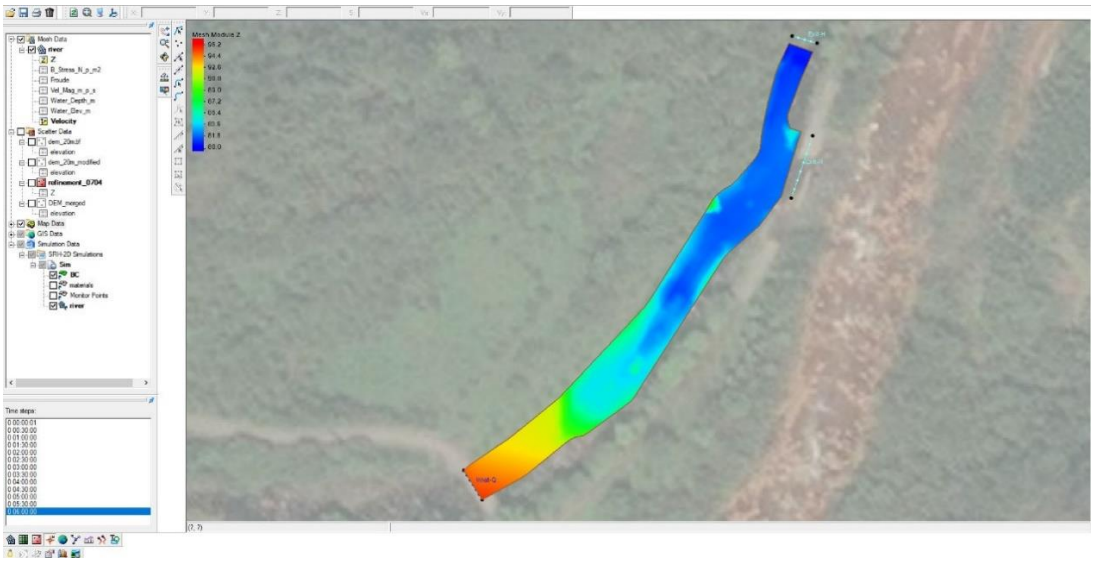


圖 3-3 清水溪之 SRH-2D 水理模式建置成果圖

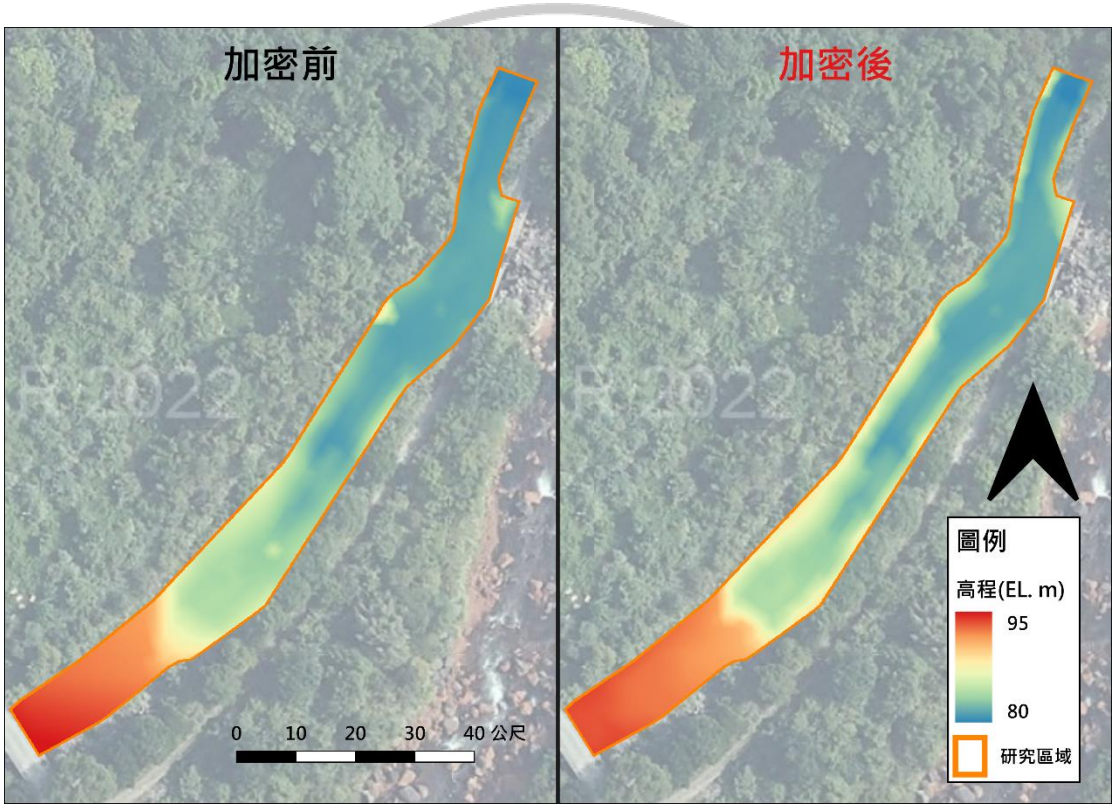


圖 3-4 數值高程地形模型加密前後之比較

第三節　棲地廊道模式

一、棲地單元及棲地適合度

棲地單元(morphological unit，MU)為依照河川的流量、流速、水深等水理特性以及河道特性（坡度、深度、底質等）所區分，河川之多樣流態及形貌亦造就多種水域形態之棲地單元(Hassan et al., 2021; MacVicar & Thompson, 2023)。棲地單元的劃分主要分為兩種，第一種以不同福祿數(Fr)劃分，如 Entwistle et al. (2019)，可將棲地單元分成淺瀨(riffle)、深流(run)、深潭(pool)、淺流(glide)及急流(cascade)等 5 種，如圖 3-5。第二種則是以水深、流速劃分棲地單元，共可劃分為淺瀨(riffle)、深流(run)、深潭(pool)、淺流(glide)四種(Matthews, 1986)如表 3-4 所示。

自 20 世紀末以來，基於物理因素及其與目標物種關係的棲地模型已被用於評估棲地適合度(Bovee, 1982; Services, 1981)，這些模型已成為河流管理的重要工具(Clarke et al., 2010; Mouton et al., 2007)。因人為活動進入自然區域，可能干擾到自然河流系統，或破壞棲地的原生狀態。因此，恢復和改善棲地質量需針對原始生態系統中的特定物種，例如魚類、底棲大型無脊椎生物等。以臺灣中部地區之烏溪流域兩種特有魚類：粗首馬口鱲(*Opsariichthys pachycephalus*)和明潭吻鰕虎(*Rhinogobius candidianus*)，來說明指標物種不同的棲息地偏好，粗首馬口鱲是一種遷移受限的魚類，喜好棲息於河川的中、下游及溝渠中水流較緩的潭區或淺灘。幼魚為雜食性，以藻類、水生昆蟲及有機碎屑為食，而明潭吻鰕虎是棲地受限的魚類，分布於溪流上、中游之水流較急之溪流河段。以水生小型脊椎與無脊椎動物為食。

棲地適合度指標(Habitat Suitability Index; HSI)是根據棲地特徵和棲地對指標物種的影響計算得出(U.S. Fish and Wildlife Service, 1981)。Elkins et al. (2007)提出以全域棲地適合度指標(Global Habitat Suitability Index, GHSI)以表示河川的棲地品質，該指標可以由流速適合度指標和水深適合度指標之幾何平均值計算而得，由最不適合棲地（0 分）分至最佳棲地（1 分），用於估計棲地適合度之流速和水深的臨界棲地特徵可透過水理模擬獲得，並參考河川生物指標物種分析及其適合度曲線研究（經濟部水利署水利規劃試驗所，2010）開發的棲息地適宜性曲線來確定適宜性指數之分數，如式 3-15 所示。Elkins et al. (2007)又將 GHSI 劃分為 5 種棲地品質(Habitat Quality; HQ)，等級 5 為高品質棲地(High-quality habitat)，表示此種流場狀態下為該指標物種最偏好且最適宜之生存環境；等級 1 為最不適棲地(Non-habitat)，表示此種流場狀態下該指標物種幾乎無法生存，分類如表 3-5。棲地品質包括週邊環境營造的生物廊道，可反應微棲地健全狀況與河川健康與否，透過現地調查及數化方式可進一步瞭解其時間、空間變異情形。

$$\mathrm{HSI} = \sqrt{S_v \times S_d} \qquad \text{式 3-15}$$

上式中 S_v 和 S_d 分別為流速適合度指標、水深適合度指標，可透過流速及水深計算而得。

綜合上述，本計畫除辨識河川水域之棲地單元外，另將選擇清水溪之指標物種（臺灣石鱉），計算其棲地適合度指標，藉此評估在不同設計情境下，該指標物種對於棲地之適合及喜好程度。

表 3-4 棲地流況之主要類型分類說明

棲地類型	流況說明
深流(run)	水深大於 0.7 公尺、流速大於 0.6 公尺/秒的水域
深潭(pool)	水深大於 1.4 公尺、流速小於 0.6 公尺/秒的水域
淺瀨(riffle)	水深小於 0.7 公尺、流速大於 0.6 公尺/秒的水域
淺流(glide)	水深小於 1.4 公尺、流速小於 0.6 公尺/秒的水域

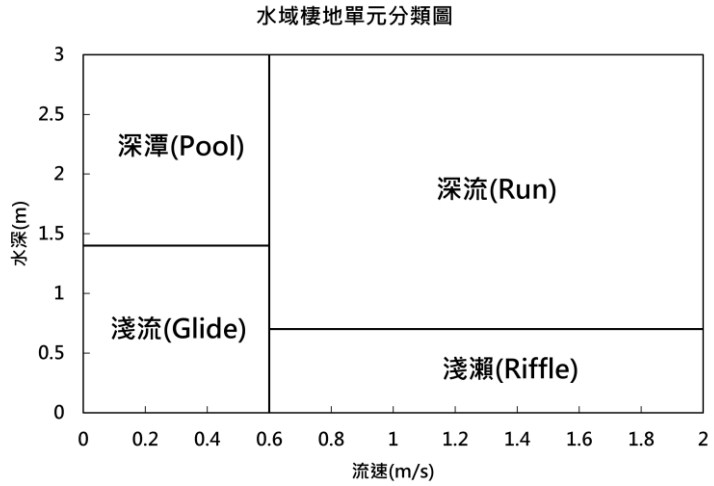


表 3-5 棲地品質分類表(Elkins et al., 2007)

GHSI	Habitat Quality	Class
0	Non-habitat	1
0-0.1	Pool-habitat	2
0.1-0.4	Low-quality habitat	3
0.4-0.7	Medium-quality habitat	4
0.7-1.0	High-quality habitat	5

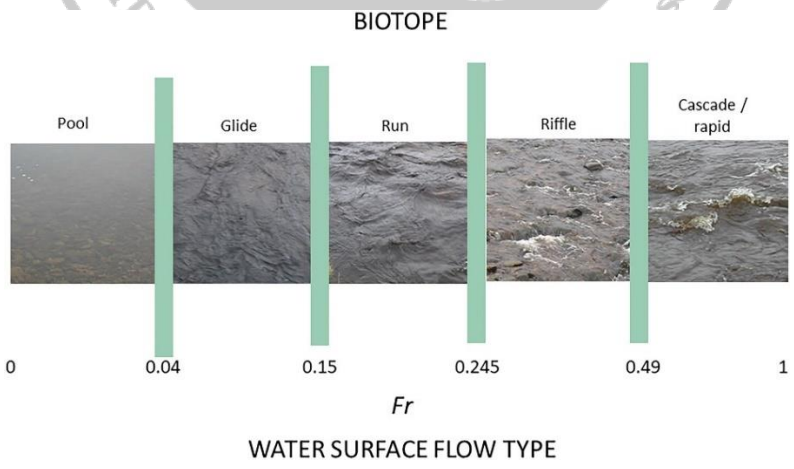


圖 3-5 以福祿數劃分河川水域之棲地單元(Entwistle et al., 2019)

二、景觀指數計算模式

為了評估棲地景觀特徵的空間現象，本計畫應用美國農業部(USDA) (McGarigal et al., 2012)所開發的景觀指數計算軟體FRAGSTATS，其可分析棲地區塊(habitat patches)的組合(描述了與區塊類型的多樣性和豐富度相關的特徵)和配置(說明了區塊的空間特徵和排列、位置或方向)，可以了解生態系統的結構與功能等，包含急流、水潭、淺灘和岸邊緩流等(McGarigal, 2015)。棲地景觀的型態(pattern)、面積、區塊(patch)、邊緣、形狀、最鄰近(nearest-neighbor)、傳染(contagion)和散佈(interspersion)等方面可通過以下 11 個指標計算：景觀比例(proportion of landscape, PLAND)、區塊數量(number of patches, NP)；平均區塊大小(mean patch size, MPS)、總邊(total edge, TE)、邊緣密度(edge density, ED)、平均形狀指數(mean shape index, MSI)、面積加權平均形狀指數(area-weighted mean shape index, AWMSI)、平均區塊分形維數(mean patch fractal dimension, MPFD)、面積加權平均區塊分形維數(area-weighted mean patch fractal dimension, AWMPFD)、平均最鄰近距離(mean nearest-neighbor distance, MNN)、散佈並列指數(interspersion and juxtaposition Index, IJI)。其中，NP 和 MPS 的指標與區塊大小和變異性有關；TE 和 ED 指數與邊緣密度有關；MSI、AWMSI、MPFD、AWMPFD 的指標與區塊形狀的複雜程度有關。區塊大小、區塊變異性、邊緣密度、區塊形狀的複雜性、平均最鄰近距離和散佈並列指數代表了可能影響人口傳播、生態穩定性、生存機會等生態過程的景觀配置與遷移(McGarigal & Marks, 1994)。

本計畫主要關注目標為棲地單元與棲地品質，其係由水動力模式

成果所提供之水理特徵進行計算與分類，得到每一塊區（網格）之棲地單元分類數及棲地品質分數，於景觀指標之尺度上將重點關注各類別之數量占比、形狀特徵及空間分布等。故於 FRAGSTATS 之指標計算選擇上主要以類別指標(class metrics)進行，其中選以 NP、PLAND、TE、ED、MNN、MSI、AWMSI 分析整體棲地結構，NP、PLAND 可用以分析棲地單元於河道中所佔之面積、百分比；TE、ED 可用以分析魚類進入不同棲地單元之難易度，亦可分析不同棲地單元之交互作用；MNN 可用以分析相同棲地單元相隔之距離，以了解魚類於棲地單元之間所需移動之距離；MSI、AWMS 可用已分析棲地單元之形狀，透過算術平均及面積加權平均之方式分別計算，當 MSI、AWMS 數值越小則代表該棲地單元之形狀越趨於單一且規則。另為由宏觀角度分析設計情境下之整體河道棲地，故以景觀指標(landscape metrics)中之 Shannon 多樣性指數(Shannon's Diversity Index；SHDI)、Simpson 多樣性指數(Simpson's Diversity Index；SIDI)分析整體河道中之棲地多樣性，其二指標在表示景觀多樣性之數值有部分相似及相異之處：二指標皆無負值，SHDI 之範圍為 0 至正無窮大，SIDI 之範圍則為 0 至 1 間，當 SHDI、SIDI 為 0 時表示景觀之僅有一種棲地類型，當景觀中之棲地種類越多樣，SHDI 則越高；SIDI 則越接近 1。

三、邏輯式迴歸分析法

本計畫透過棲地單元辨識、棲地適合度指標將生態棲地、魚類因子資料進行數化處理，並透過景觀指數計算掌握棲地單元於空間上之分布特徵，而由於景觀指數所包含之指標眾多，且尺度上可由單一塊區擴大至整體棲地廊道，為深入了解棲地單元與魚類棲地適合度彼此之關聯性，本計畫導入邏輯式迴歸(Logistic regression)分析法，量化不同景觀指標與棲地適合度指標之關係，藉此篩選出重要影響棲地適合度指標之景觀指標。

邏輯式迴歸分析特色為可設定不同閥值，迴歸後找出景觀指數之權重，用以估算棲地適合度指標達到不同門檻的機率。在操作邏輯式迴歸分析前，需先對於二元化之反應變數 Y、解釋變數 X 進行定義，並計算條機率$\pi(x) = P(Y = 1|X = x)$，其代表涵義為當$X = x$時，$Y = 1$之機率，並假設π與x之關係為 S 型曲線；接著計算π之勝算值(Odd)，所謂勝算值代表某事件出現（成功）之機率$(\pi_i(x))$與不出現（失敗）機率$(1 - \pi_i(x))$之比值，接著再進行自然對數轉換，得出以下線性方程式（式 3-16），邏輯式迴歸之流程如圖 3-6 所示。

$$ln(Odd_i) = ln\left(\frac{\pi_i(x)}{1 - \pi_i(x)}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_m x_{im} \quad \text{式 3-16}$$

其中x_{i1}、x_{i2} … x_{im}表示第 i 個樣本之第 m 個解釋變數，並定義景觀指數為解釋變數，棲地適合度指標為反應變數。

邏輯式迴歸分析可以計算解釋變數 X 之係數值(β)，當係數值為正值時，說明該景觀指標與反應變數 Y 呈正相關；反之則為負相關。當係數值為正且值越大時，即說明該景觀指標之影響力更高，達到某事件成功或失敗之機率有更顯著貢獻。本計畫將由邏輯式迴歸分析了

解從較低品質棲地轉為高品質棲地時主要影響之景觀指標，有助於執行工程時，以迴避、縮小、減輕、補償為生態棲地保育原則，使工程對棲地之擾動最小化；同時也可以棲地營造為目標，調整主要影響之景觀指標，藉此增加高品質棲地之比例，提升生物利用、生態保育之價值。

邏輯式迴歸分析可透過數值軟體進行，本計畫預計採用統計套裝軟體 SPSS(Statistical Program for Social Sciences)計算，SPSS 是一套統計分析系統套裝程式，最早於 1968 年由 SPSS 公司開發，現為 IBM 旗下產品，並更名為 IBM SPSS Statistics。它廣泛應用於社會科學、醫學、教育、商業等多個領域，主要用於數據管理、統計分析、報表生成及視覺化呈現。SPSS 功能豐富、操作簡便，允許使用者進行資料輸入、數據管理、統計分析、圖表製作等，界面操作容易，使得非技術用戶能夠輕鬆上手進行數據分析。

SPSS 提供多種統計分析方法，包括描述性統計、t 檢驗、ANOVA（變異數分析）、迴歸分析、因子分析、集群分析等。通過菜單式操作界面，使用者可以輕鬆選擇分析方法而無需撰寫程式碼，也能進行高度自訂的分析。對於進階使用者，SPSS 支持 Python 和 R 語言之自定義擴充，使其擁有更高的靈活性和擴展性，適合進行更複雜的數據處理和模型構建。此外，SPSS 還提供強大數據視覺化功能，能生成各類圖表，如條形圖、餅圖、散點圖等。這些圖表和分析結果可以直接導出至 Excel、Word、PDF 等格式，方便報告撰寫和數據分享。

邏輯式迴歸分析已被應用於分析景觀指標與棲地品質、生物多樣性之關聯性，Kuo et al. (2021)針對台灣烏溪進行棲地單元與景觀指標之邏輯式迴歸分析，透過設定低、中、高流量三種情境，探討棲地單

元與景觀指標之間之關係。研究結果發現，高品質棲地主要位在深潭與淺瀨，且形成高品質棲地之推動力、阻力皆有不同：在深潭棲地中，平均區塊大小(MPS)為主要推動力，面積權重平均碎形維度(AWMPFD)則為阻力；在淺瀨棲地中，面積權重平均碎形維度(AWMPFD)為主要推動力，平均碎形維度(MPFD)則為阻力。由此，該研究建議需降低深潭與淺瀨之形狀複雜度(shape complexity)，並增加深潭之 MPS，以擴大高品質棲地。Fang et al. (2016)以桃園臺地為研究場域，探討對象為鳥類多樣性(avian diversity)與農地、埤塘景觀指標之關係，分析在整體景觀尺度、農地與埤塘尺度下，影響鳥類多樣性主要推動力與阻力。

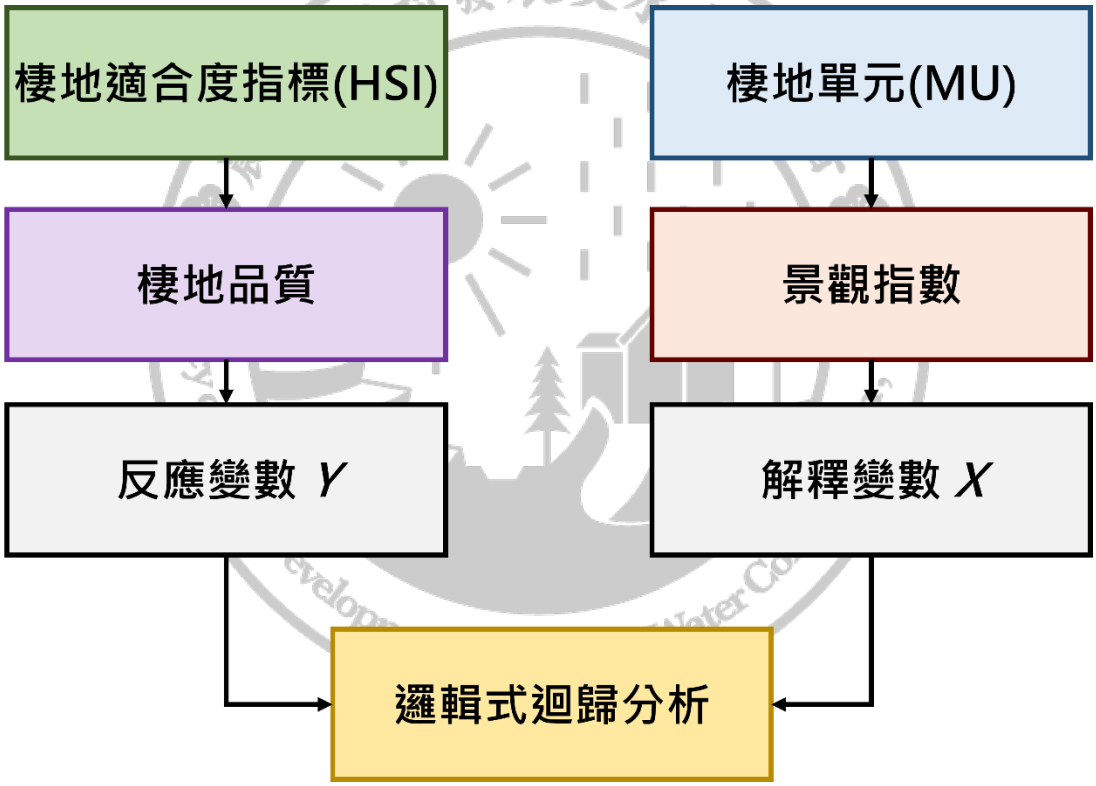


圖 3-6 邏輯式迴歸分析流程概念圖

第四章　清水溪之水文水理特徵

第一節　水文分析及流態分析

一、清水溪氣象觀測站建立

本計畫研究區域為磺溪之主要支流清水溪，經廣泛蒐集清水溪之相關背景資料，發現其子水集區中並無任何既存之氣象觀測站，僅可透過鄰近之氣象觀測站，如三和氣象觀測站、金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站，大致掌握清水溪流域之氣溫、降雨量、蒸發量、風速風向等氣象。為進行清水溪之流態分析，以掌握不同季節之流量變化與特徵，故於清水溪子集水區中建立一座虛擬氣象測站，並命名為「清水溪氣象觀測站」，透過已有長時間累積氣象資料之三和氣象觀測站、金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站，對於清水溪氣象觀測站進行空間內插處理。本計畫重點關注之氣象特徵為降雨量，降雨量一般會受到空間分佈影響，越鄰近之地區，其降雨型態、降雨量應越接近，因此本計畫採用四象限法(four quadrants method)進行清水溪氣象觀測站之降雨量資料建立，該方法係為應用於降雨紀錄補遺，其假設紀錄遺失之雨量值與已紀錄之測站距離平方成反比，可藉由多處已紀錄之測站對於紀錄遺失之雨量值進行補遺，其公式如下：

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\frac{P_i}{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2})}{\sum_{i=1}^{N}(\frac{1}{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2})} \qquad \text{式 4-1}$$

其中，P_A為補遺之降雨量；P_i為已紀錄之測站降雨量；X_i、Y_i為遺失紀錄之測站與已紀錄之測站間之水平、垂直座標距離；N為已紀錄之測站站數。本計畫建立之清水溪氣象觀測站與其他既存氣象觀測站地理位置如圖 4-1，該觀測站大致以清水溪子集水區之型心位置設定，透過 Quantum GIS(QGIS)之距離測量工具，可快速量測既存氣象觀測站與清水溪氣象觀測間之距離，如表 4-1。

表 4-1 各氣象觀測站之座標與距離表

測站名稱	座標(TWD 97)		與清水溪站之距離 (m)
	X	Y	
清水溪	308175	2789236	-
三和	310178	2791470	3000.46
竹子湖	304774	2784119	6144.14
金山	315595	2791135	7659.15
鞍部	303807	2785780	5569.86

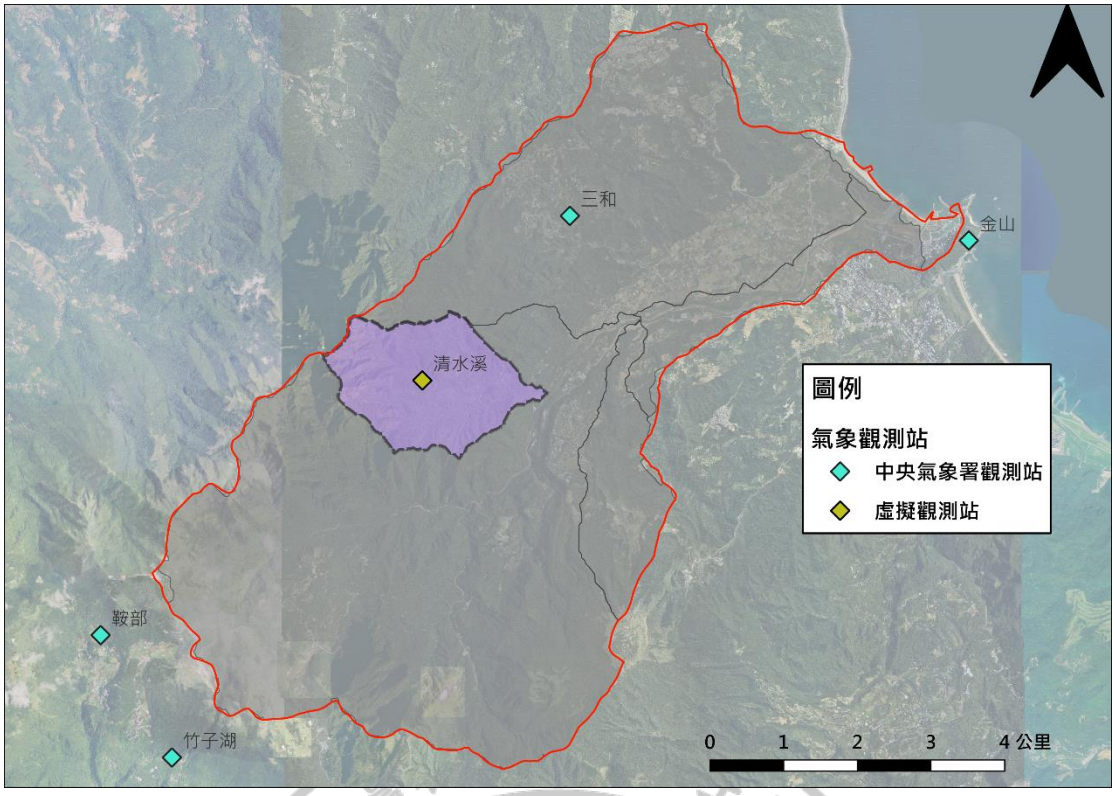


圖 4-1 清水溪氣象觀測站地理位置

二、降雨量分析及流量模擬

為建立清水溪氣象觀測站之氣象資料，本計畫透過中央氣象署之氣候觀測資料查詢服務平台(Climate Observation Data Inquire Service；CODiS)蒐集三和氣象觀測站、金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站所記錄之氣象資料，其平台可快速查詢各氣象觀測站之歷史紀錄資料，包含氣壓、氣溫、風速風向、相對溼度、蒸發量、降雨量等，並提供免費下載。故本計畫蒐集三和氣象觀測站、金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站之近 5 年（由 2019 年至 2023 年）之每日降雨量，透過前節所述之四象限法進行清水溪氣象觀測站之降雨量時序列資料建立，其成果以月雨量之方式呈現如

圖 4-2 至圖 4-6。比較三和氣象觀測站、金山氣象觀測站、鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站近 5 年之降雨量，整體降雨量多集中於冬季，推測應受東北季風所帶來之雨量影響，而夏季則因颱風來襲，故可觀察到某些月份之降雨量突增，又以鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站最為顯著。三和氣象觀測站於 5 年總共之降雨量最大，可達 27,333.0 毫米，統計並觀察其 12 月之月雨量，5 年累積可達 5,087.0 毫米，每年平均值則為 1,017.4 毫米，其中於 2020 年、2022 年之月雨量皆超過 1,000 毫米，分別為 1,380.5 毫米、1,604.5 毫米；金山氣象觀測站於 5 年總共之降雨量最小，僅 15,768.毫米，統計並觀察其 12 月之月雨量，5 年累積僅 2,084.0 毫米，每年平均值則為 416.8 毫米。鞍部氣象觀測站、竹子湖氣象觀測站之 5 年總共之降雨量分別為 2,4365.6 毫米、2,2824.8 毫米，觀察期近 5 年月雨量分佈，可發現於 2022 年之 10 月，兩觀測站之月雨量分別高達 2,180.0 毫米、2,426.0 毫米，推測應為尼莎(NESAT)颱風挾帶大量水氣而導致。

本計畫透過收集模擬 5 年之流量資料分析清水溪之流態特徵。為先了解其降雨特性，本計畫由前述方式已獲得 5 年之日雨量資料，以算術平均計算 5 年平均之月雨量，其成果如圖 4-7。由圖上可發現，清水溪氣象觀測站之降雨量集中於冬季，由 9 月開始便可觀察出降雨量逐漸提升，降雨趨勢與和三和氣象觀測站之降雨趨勢最為接近，主

要原因為其距離清水溪氣象觀測站之距離最短，故其權重較大；而竹子湖氣象觀測站及鞍部氣象觀測站於 2019 年、2022 年皆於夏季有觀測到較極端之降雨事件，但因於該現象並非於每年皆有觀測到，加上其二測站距清水溪氣象觀測站較遠，所佔之權重較小，於每年統計成果資料雖可觀察出較大之降雨量，而於進行 5 年平均之降雨量資料則較難以反映。

清水溪氣象觀測站之平均總年雨量達 5025.3 毫米，其中以 12 月之月雨量最高，可達 845.0 毫米，而 5 月、10 月、11 月之月雨量皆超過 500.0 毫米，分別為 521.7 毫米、661.9 毫米、506.8 毫米；7 月及 8 月之月雨量則最小，分別僅有 188.0 毫米、247.3 毫米。

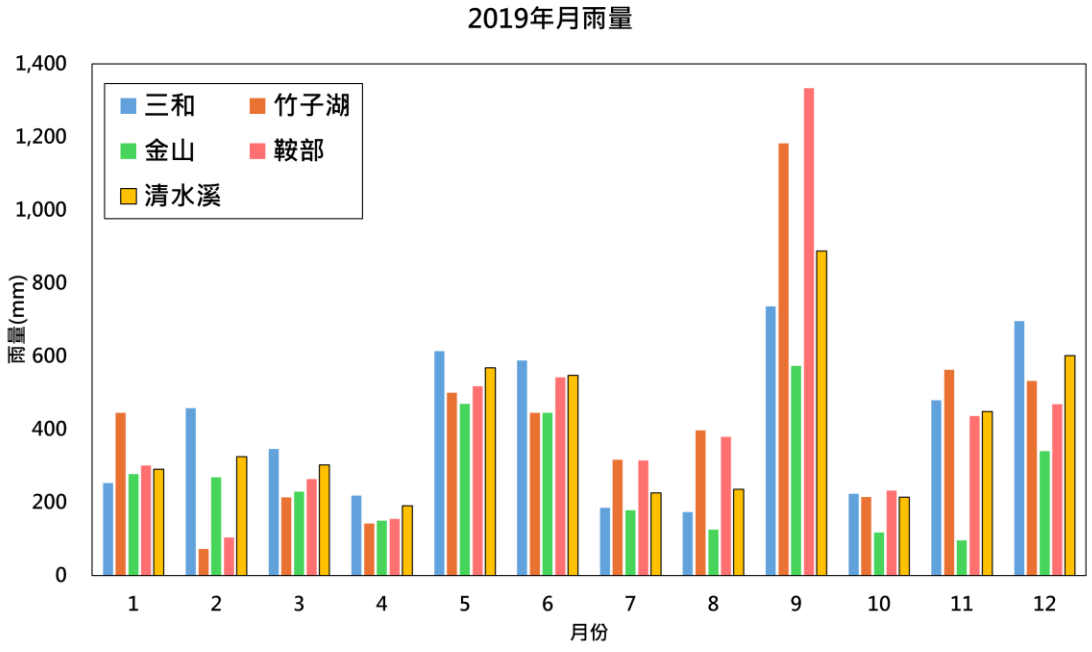


圖 4-2 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2019 年）

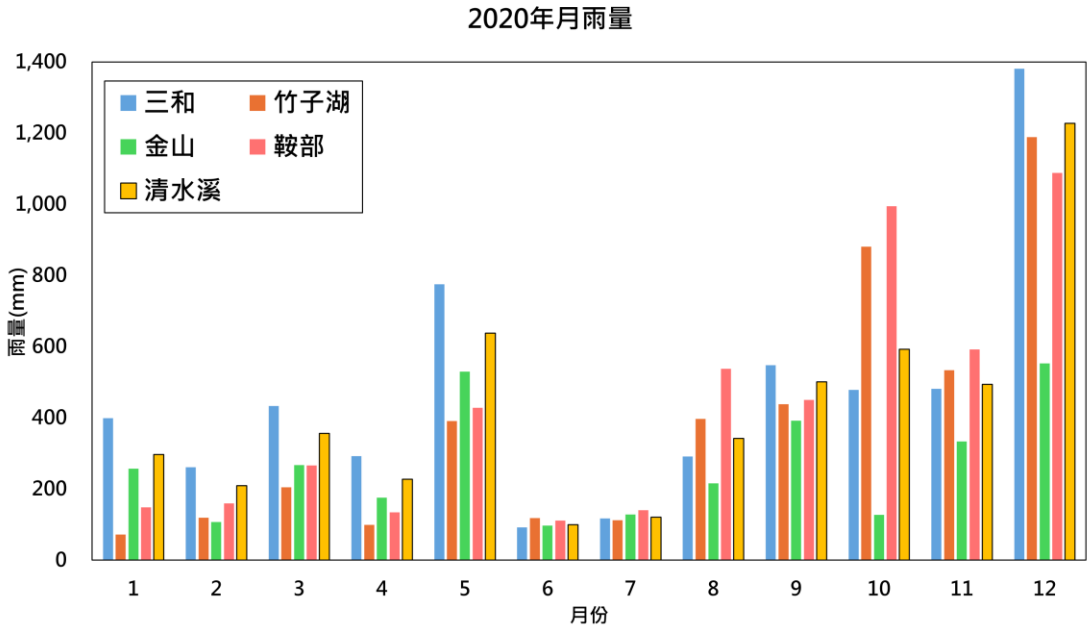


圖 4-3 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2020 年）

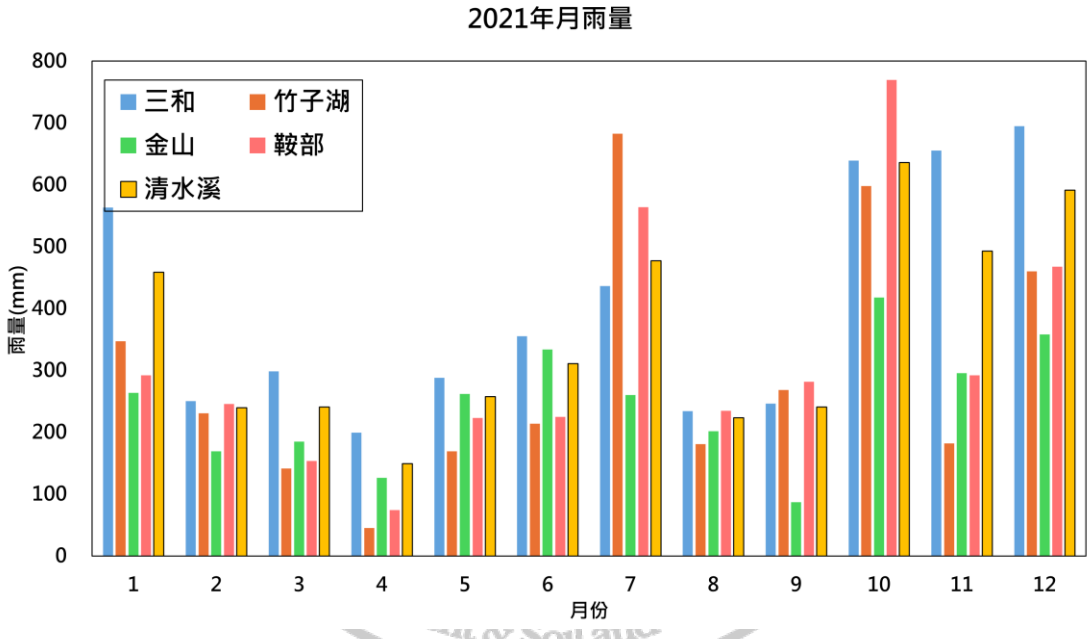


圖 4-4 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2021 年）

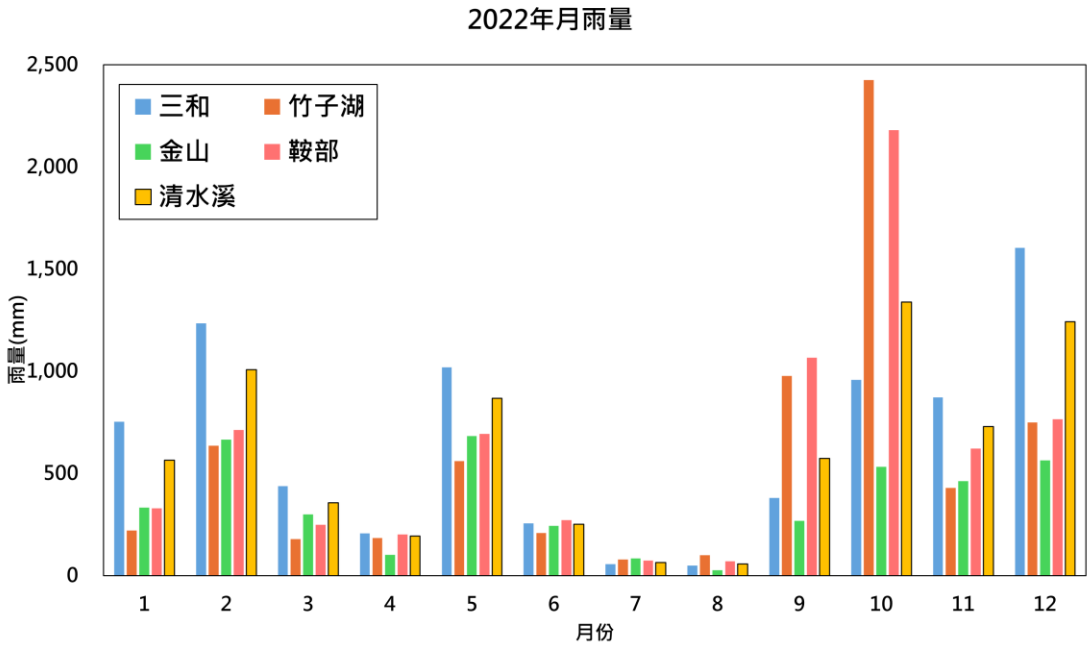


圖 4-5 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2022 年）

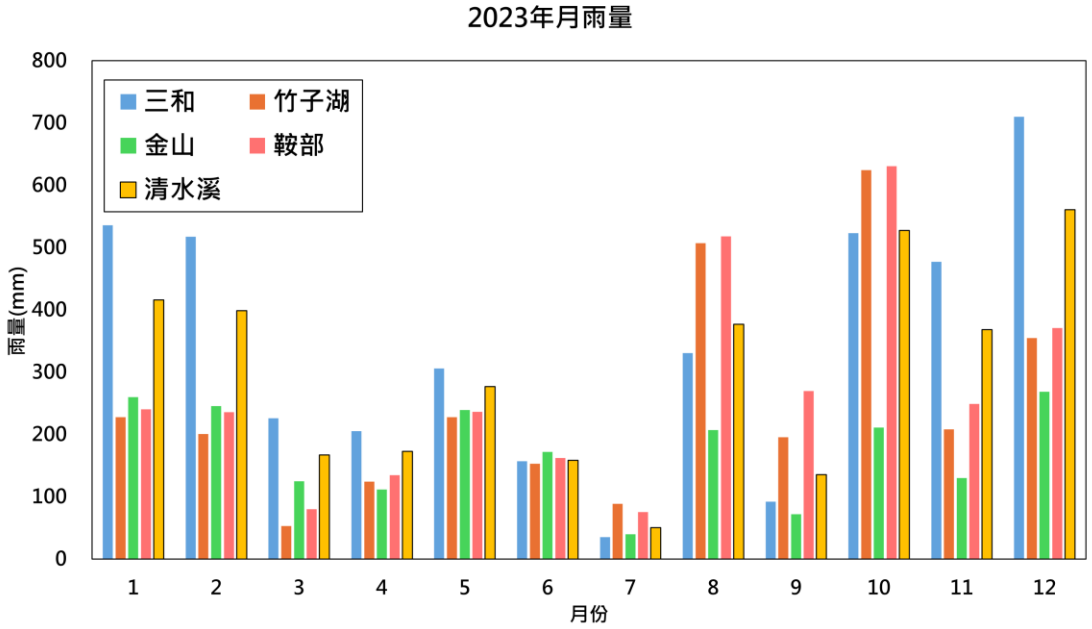


圖 4-6 各氣象觀測站之月雨量統計成果（2023 年）

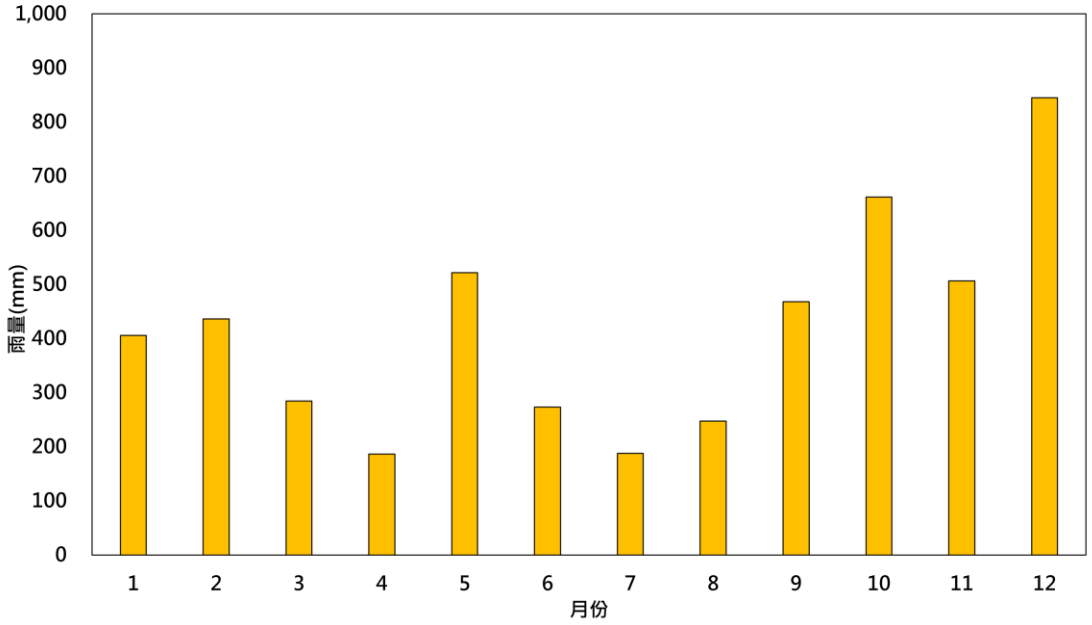


圖 4-7 清水溪氣象觀測站之 5 年平均月雨量成果圖

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

完成降雨量資料建立後，接著使用 HEC-HMS 進行流量模擬，將已獲得之 5 年日雨量轉換為地表逕流量，而在進行逕流轉換之前，需先於 HEC-HMS 中之降雨損失、入滲方法進行參數設定。本計畫採用 SCS 方法進行入滲量之計算，因此有必要先對於清水溪子集水區之地文因子進行調查，了解其土壤特性、地表景物等特徵。本計畫透過「磺溪流域治理規劃報告」（經濟部水利署第十河川局，2017）之磺溪流域土壤分佈圖，發現清水溪子集水區內之土壤以石質土(Lithosols)為主，以美國新土壤分類系統(1997)屬於新成土(Entisols)之一種，由母質經由簡單之物理、化學風化作用生成，通常很淺且含石量超過 50% 以上，一般而言其排水、通氣良好，大都分佈於山坡地或森林地之陡峭區。衣索比亞道路管理局(Ethiopian Road Authority；ERA) 曾透過實驗及調查將多種土質依美國水土保持局之分類方式進行區分，其中石質土被劃分為 D 類土壤，表示為滲透性較差之土質(ERA, 2013)。

除了土壤特質外，本計畫透過內政部國土管理署城鄉發展分署提供之「國土規劃地理資訊圖台」調查清水溪子集水區之土地使用分區，如圖 4-8 所示，可得知其子集水區內之土地利用分佈情形並估算其所佔之面積比例，再對照表 3-2、表 3-3，以所佔面積為權重，計算出清水溪子集水區之 CN 值約為 77.8，計算過程如表 4-2。

表 4-2 清水溪子集水區之 CN 值計算成果

項次	類別	代碼	SCS 分類	面積佔比 (%)	CN 值	小計
2	天然闊葉樹純林	020102	7	70	77	53.9
3	河川	040101	21	2	98	1.96
4	兼商業使用住宅	050203	12	0.5	92	0.46
5	興建中建築用地	050403	9	0.5	84	0.42
6	草生地	090300	5	27	78	21.06
					總計	**77.8**

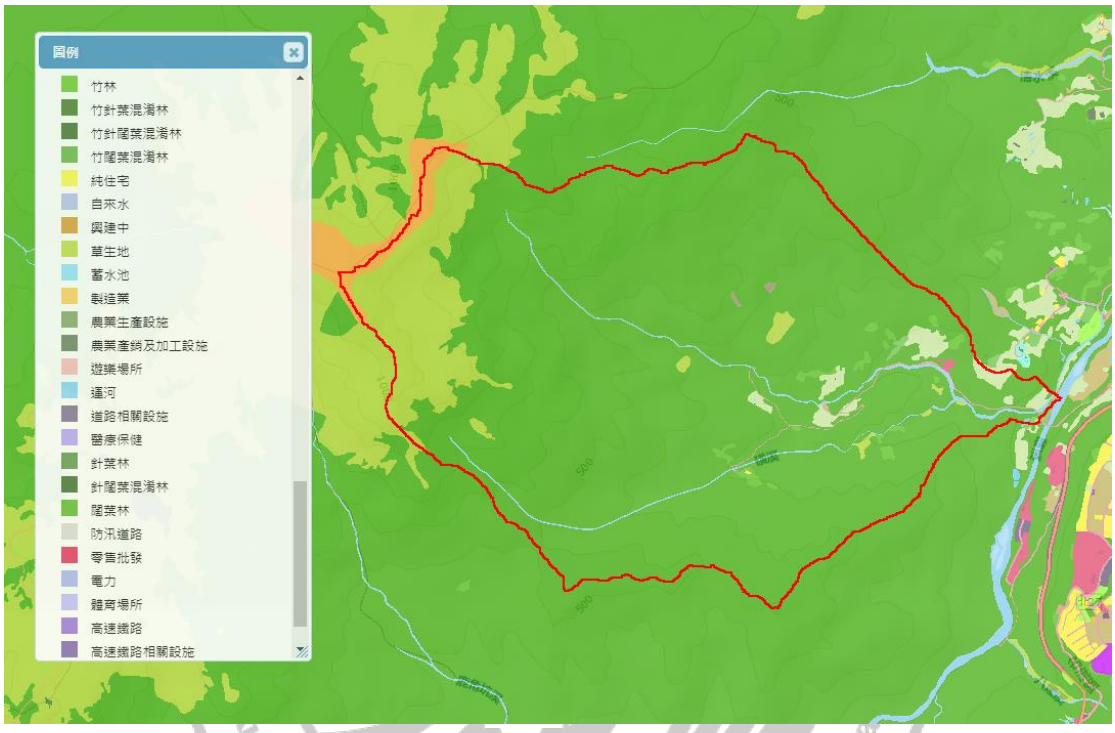


圖 4-8 清水溪子集水區之土地使用分區

完成入滲方式之參數設定後，便可由降雨量資料進行流量轉換，轉換方法採用單位歷線法(Unit Hydrograph)，搭配河川基流量，即可得到清水溪之總逕流量。河川基流量一般係指於枯水季時能維持河川正常機能運作之最低流量，其來源可能為地下水及中間流(interflow)提供，本計畫採用由流速水深觀測站所蒐集之流量資料，進行超越機率分析後所得之 Q_{90}(0.134 立方公尺/秒)做為清水溪河川基流量之設定。經 HEC-HMS 運算後所得之清水溪河川總逕流量成果如圖 4-9，觀察流量歷圖成果可發現，整體流量於冬季時多介於 1 立方公尺/秒至 3 立方公尺/秒間，夏季則多不及 1 立方公尺/秒，偶有較大之流量事件發生，而最大流量發生於 2022 年 10 月，流量可達 9.2 立方公尺/秒。

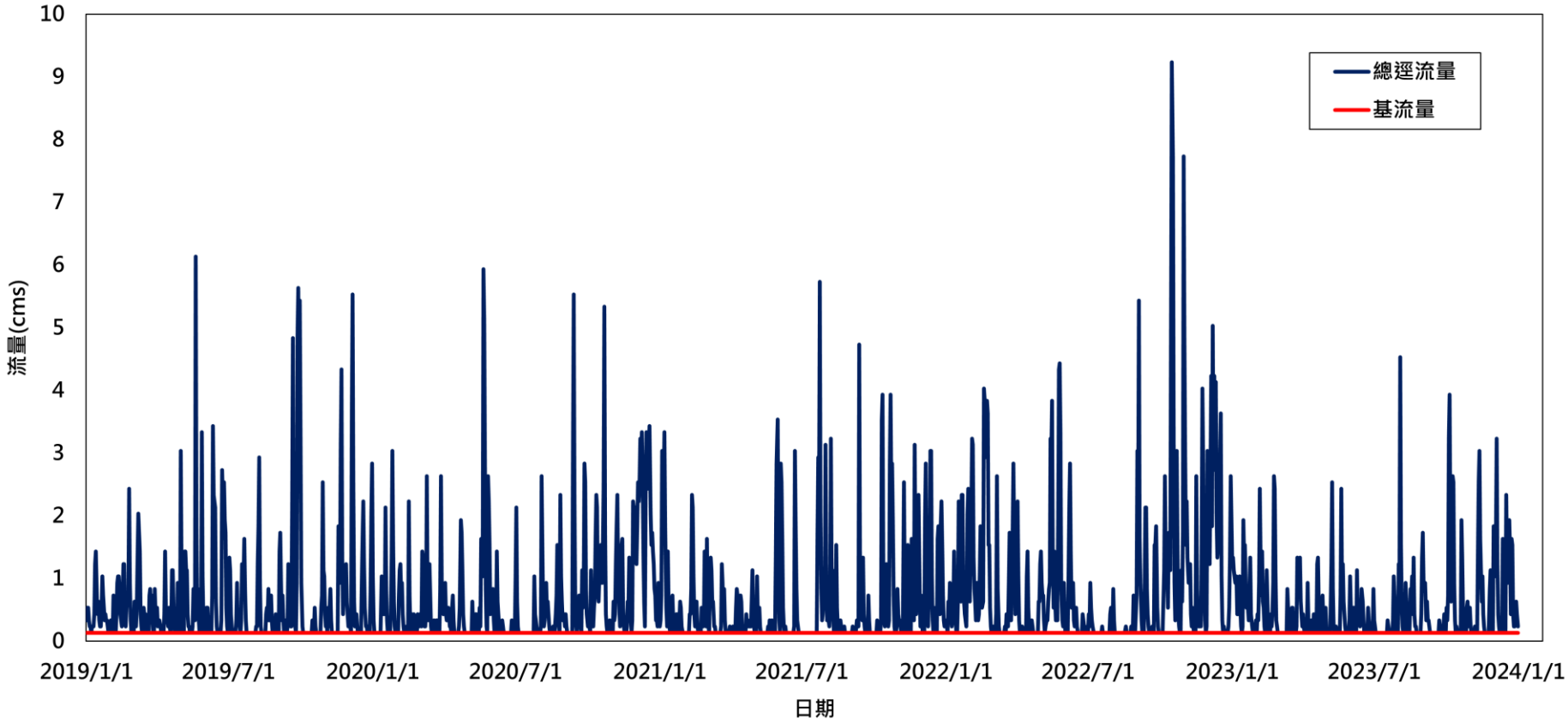


圖 4-9 清水溪近五年之河川流量變化

三、超越機率分析

由 HEC-HMS 將雨量轉換為流量後，本計畫採用超越機率分析法進行清水溪之流態分析，統計流量資料筆數共 1,826 筆，成果如圖 4-10。由圖上可觀察到 Q_{50} 為 0.234 立方公尺/秒、Q_{90} 為 0.134 立方公尺/秒，代表清水溪大部分時期之流量高於基流量（0.134 立方公尺/秒）。另外發現，流量大於 1 立方公尺/秒之超越機率約為 20%，顯示清水溪發生 1 立方公尺/秒以上之流量事件之機率僅有 20%，整體顯示清水溪屬於常時流量偏低之河川，大流量事件多發生於好發颱風時期，因此整年發生機率小，後續將針對其常時之流態進行棲地單元之辨識與棲地結構分析，以及魚類棲地品質之計算與評估分析。

由超越機率分析成果可初步掌握清水溪之流量區間分佈，以及各流量區間發生之機率，目前尚未納入時間因子進行分析，故還無法得知不同流量之持續發生時間。預期於期末階段將選定數個關鍵超越機率流量區間進行時變超越機率分析，並透過其成果進行多組水動力模擬及棲地廊道模式分析，計算在不同流量區間下，棲地單元及棲地品質之變化與差異。本計畫也將選定多組關鍵持續時間，配合關鍵超越機率流量區間，計算特定水文事件出現之次數，幫助了解特定水文事件所形成之棲地單元及棲地品質出現之次數與持續時間，並於後續嘗試找出河段中生物利用效率最高之區域，更加細化河道之內不同地區

之生態價值，輔助棲地廊道指標之建立。

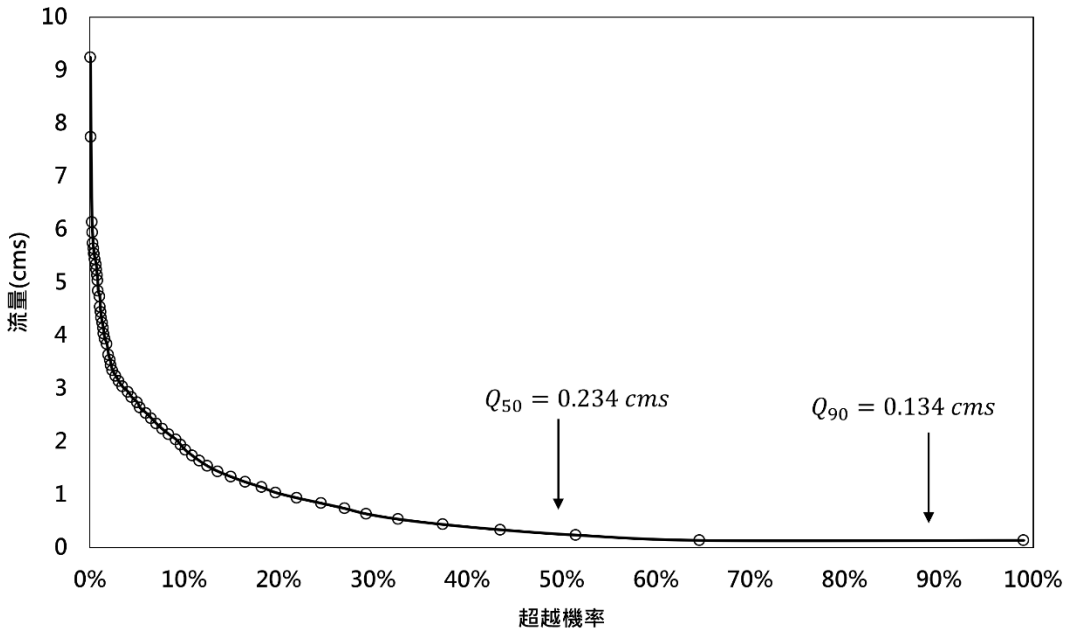


圖 4-10 清水溪流量之超越機率分析圖

四、小波分析

除了以超越機率法分析清水溪之流態，本計畫導入小波分析法，嘗試找出清水溪流量在不同時間週期尺度下之變化。由圖 4-11 觀察小波能量譜，其中底部藍色線段為日流量變化，左側座標軸表示小波分析之各時間尺度，右側座標軸表示日流量大小，圖上顏色代表能量大小，當顏色越趨近紅色表示能量越高，表示該時間尺度週期的波形較其他週期更具影響力。由小波能量譜可發現越小週期尺度之能量大小，與原始資料之直接相關性越高，可觀察出於 2 日之時間尺度下，其整體能量都較小，主要原因為短週期、高頻率發生之低流量事件造成。當出現高流量之較極端事件時，小波能量譜中會出現深紅色錐狀圖形，如圖上 2022 年 9 月所發生之事件，表示該事件對於前後之時間序列會產生不同時間尺度上之影響。

另將小波能量譜中之能量依不同之週期尺度進行加總，可獲得相同時間週期下之時間序列能量分布之總和，即全域小波能量譜(GWPS)，如圖 4-12，全域小波能量譜可幫助了解各種時間週期尺度對於整體流態之影響力差異，由圖上可發現峰值出現在週期尺度為一年之處，表示清水溪流域之流量是以一年為主要的流態週期，推測原因為幾乎每年皆有發生大流量之洪水事件，且該類事件之流量對於清水溪流態影響之時間接近一年，使得年尺度之全域小波能量遠高於其

他時間週期尺度。另於 6 個月至 9 個月間也發現其全域小波能量有出現一小峰值，推測為豐水季與枯水季之交替週期，此現象亦可於清水溪之流量時序列分布中觀察到。

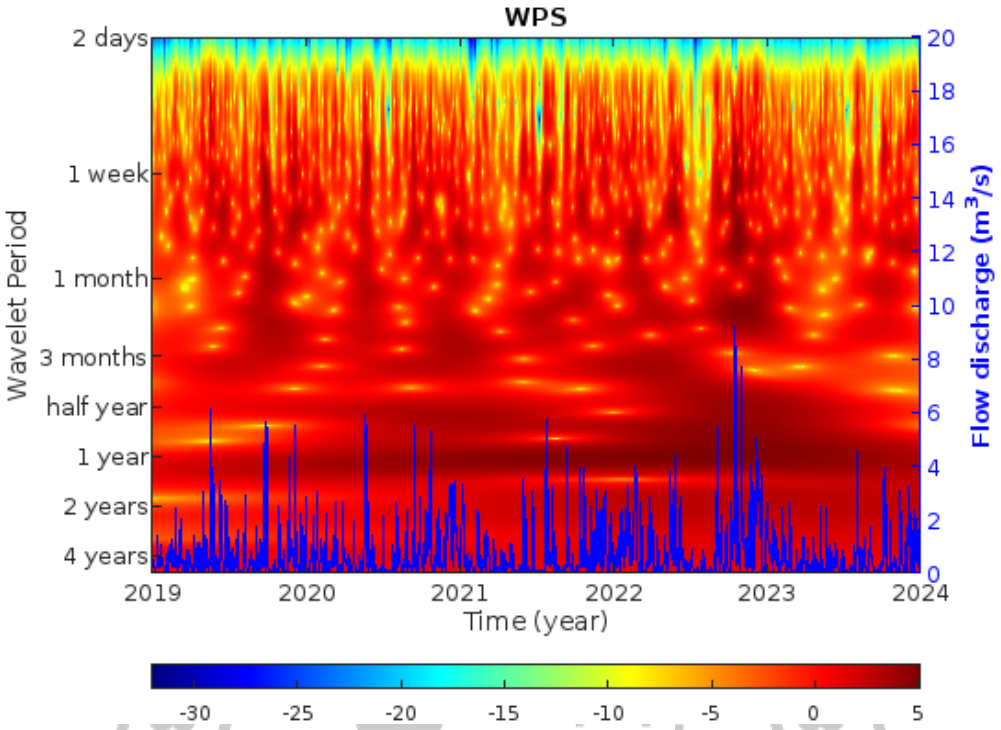


圖 4-11 清水溪流量分析之小波能量譜

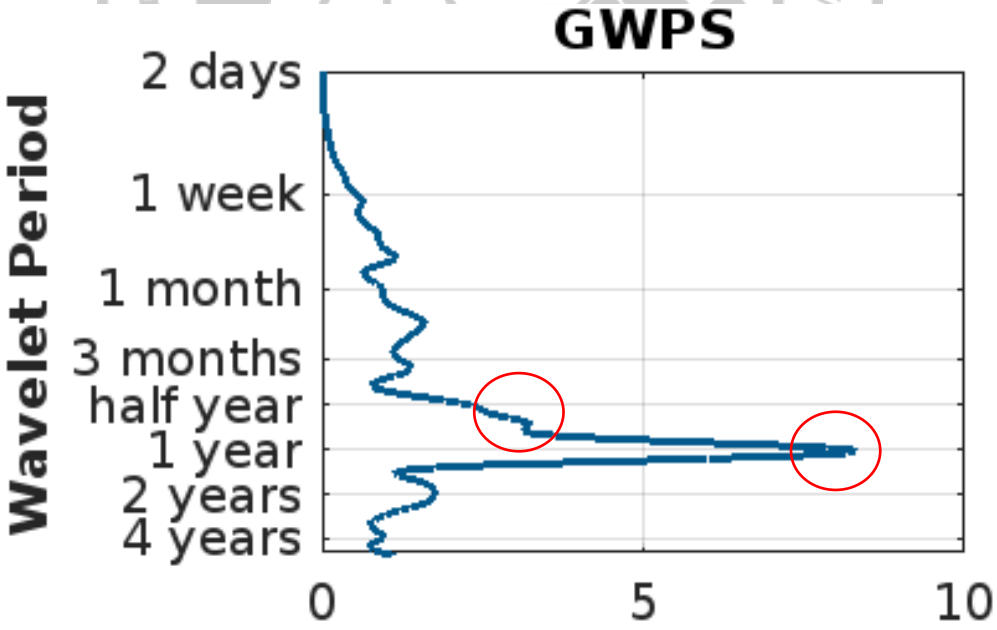


圖 4-12 清水溪流量分析之全域小波能量譜

由全域小波能量譜可找出不同重現期距之流量事件對於清水溪流態之影響程度，本計畫進一步以每年流量資料計算全域小波能量譜（圖 4-13），同時以相鄰兩年份之全域小波能量譜計算其比例ρ值，ρ值意義為此流域前後時間之小波能量變化情形，當ρ值越接近 1，即代表能量改變和震盪都不大之時間尺度流量，也代表著此流量相對其他尺度流量更加穩定。除此之外，長時間維持相似之生活環境更能使魚類有效利用水域棲地，提升其生存與繁衍能力，故本計畫鎖定時間尺度較小之流量，表示其流量事件發生之頻率較高，代表長時間之水域棲地及魚群生存環境多由此種流量所形成。由此角度進行延伸，全域小波能量譜可分析流量起伏震盪，同時涵蓋重現期之概念，故首先找出最接近 1 之ρ值所對應之時間週期，並從中找出最小之時間尺度作為重現期推算該重現期流量，此流量包含之意義為其小波能量在時間中更為穩定，且出現次數較為頻繁，可做為評估棲地單元及魚類棲地適合度之目標流量之一。

本計畫分別以 2019 年至 2024 年日流量資料分析之全域小波能量譜進行ρ值計算，一次僅選以相鄰之兩年度，並以年份較新者為分子；年份較舊者為分母，如圖 4-14 所示，計算而得之ρ值以藍色曲線表示，紅色垂直線段則表示ρ值為 1 之處。以兩線段相交並對應之時間週期為最小處以紅色圓圈註記，共可得到 4 筆常流量之重現期，分

別為 6.08 天($\rho_1 = GWPS_{2020}/GWPS_{2019}$)、4.50 天($\rho_2 = GWPS_{2021}/GWPS_{2020}$)、3.80 天($\rho_3 = GWPS_{2022}/GWPS_{2021}$)、4.26 天($\rho_4 = GWPS_{2023}/GWPS_{2022}$)，可觀察出重現期皆小於 7 天，並包含於 3.80 天至 6.08 天間，可推測清水溪常時流量之重現期多於此區間中變動，本計畫便以此區間找出對應之重現期流量。由前節之超越機率分析已可得知各流量之出現機率，而出現機率即為重現期之倒數，故可推知常時流量之出現機率多介於 16.45%~26.32%，對應圖 4-10 可得知其流量區間約為 1.234 立方公尺/秒($Q_{16.45}$)~0.763 立方公尺/秒($Q_{26.32}$)，故可由此流量進行水動力模擬，分析棲地單元與棲地適合度。

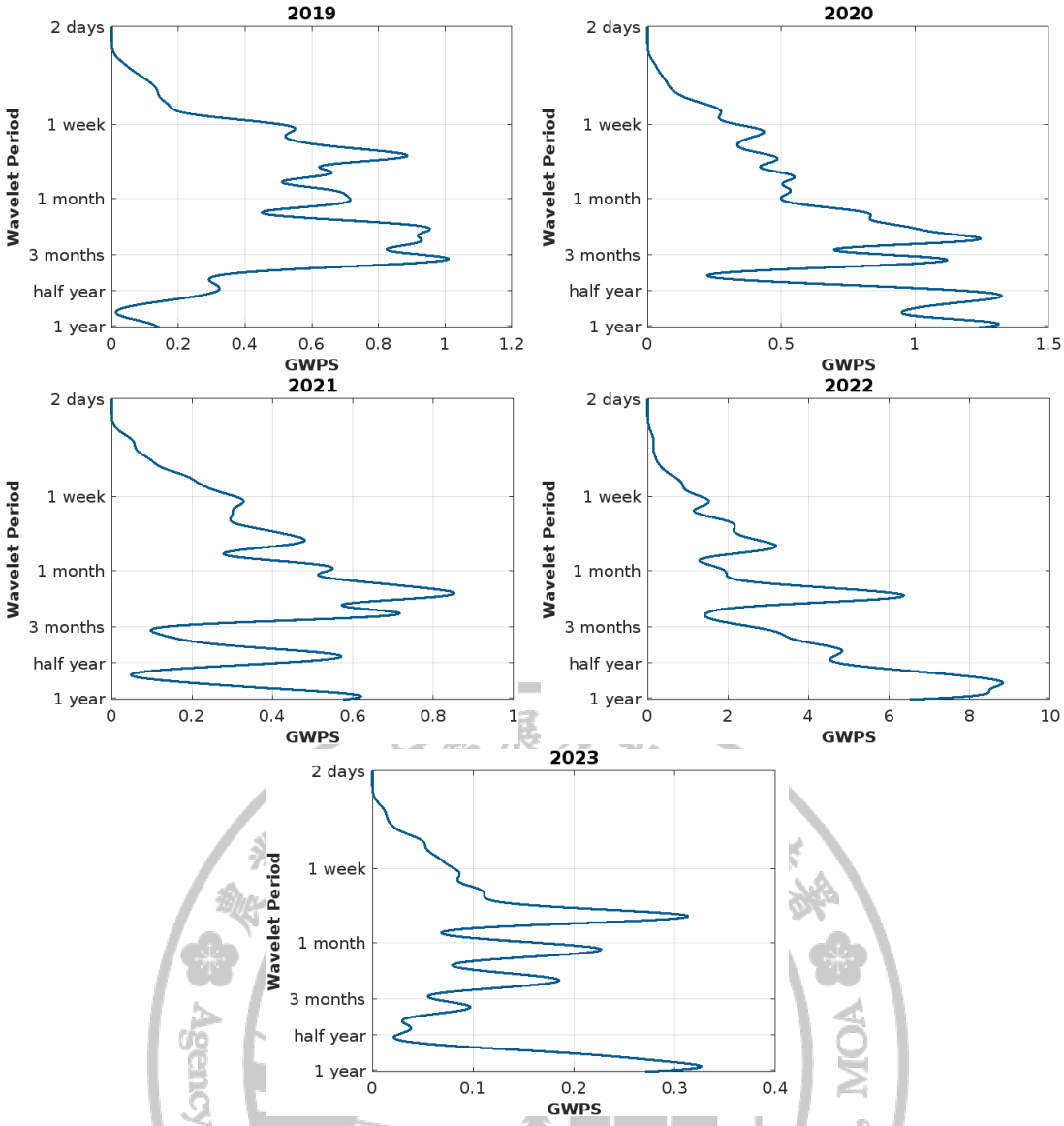


圖 4-13 各年度之全域小波能量譜

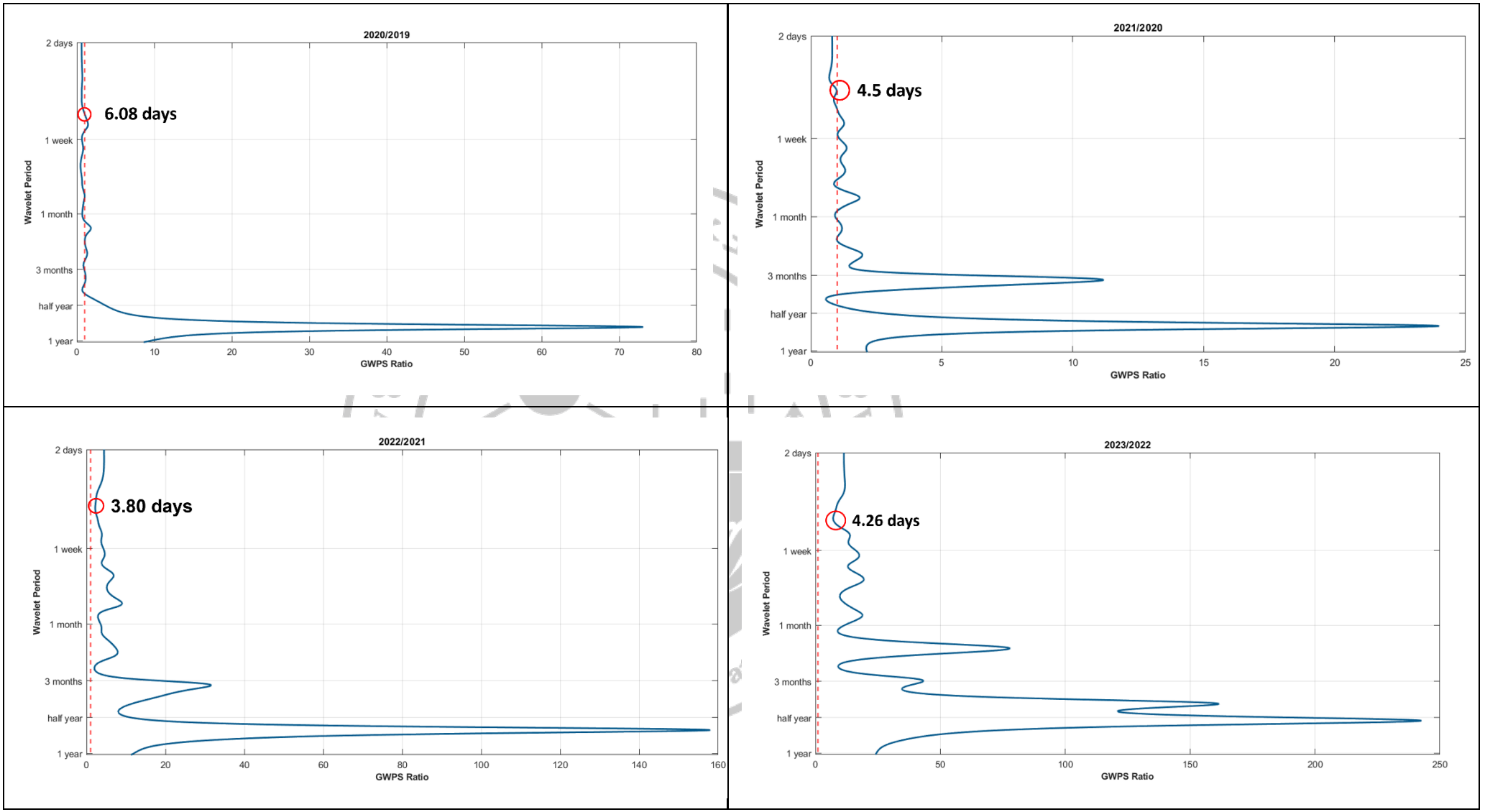


圖 4-14 各年度之全域小波能量譜ρ值

第二節　水動力模擬分析

過前節之流態分析成果，本計畫已大致掌握清水溪之流態特徵，為了解清水溪於平常時期之流場分布，以利後續進行棲地單元辨識、棲地結構分析與魚類棲地適合度分析，本計畫使用 SRH-2D 水理模式進行二維水動力模擬。

由超越機率分析成果所得之 Q_{50} 作為入流邊界條件(Q_{in})，配合於現地以斷面流速之方式推算之流量作為固床工溢流之流量邊界(Q_w)，並假設河道邊壁、底床之入滲量十分微小且可忽略，由質量守恆之觀點推求下游分流之流量(Q_{out})作為邊界條件，模擬清水溪現況之流場，模擬之水深、流速場如圖 4-15、圖 4-16 所示。水深值多小於 0.3 公尺，於研究區域中間處有觀察到水深陡增之現象，係因於河段中間處之地形突然下降，形成類似深潭之結構，使溪水匯集於此處，與流速分佈圖比對，可發現該處之流速亦有陡降之現象，顯示此處因地形變化，使得水流速度趨緩，溪水累積造成水深增加。流速整體介於 0.5 公尺/秒至 1 公尺/秒間，於靠近上游處有部分區域出現 2 公尺/秒左右之高流速，推測原因為上游處地勢較陡，且河段中多大型石塊造成地勢落差突變而導致。

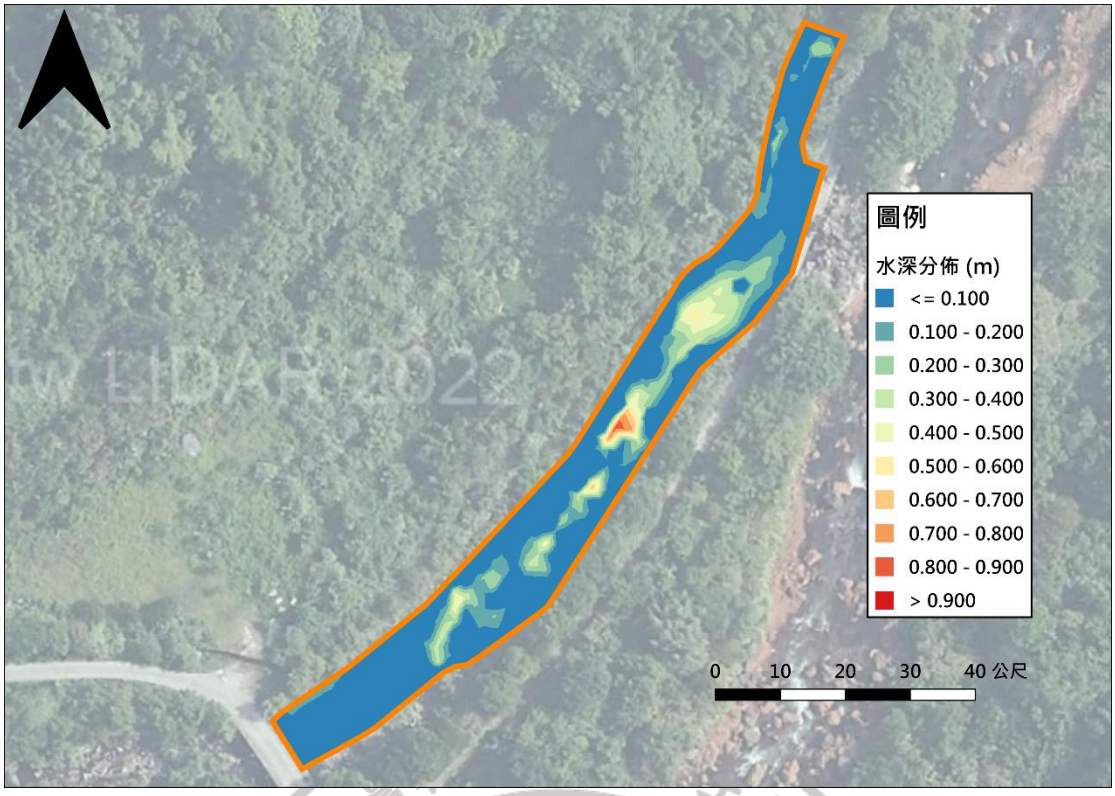


圖 4-15 以超越機率法推算清水溪平常時期之水深分佈圖

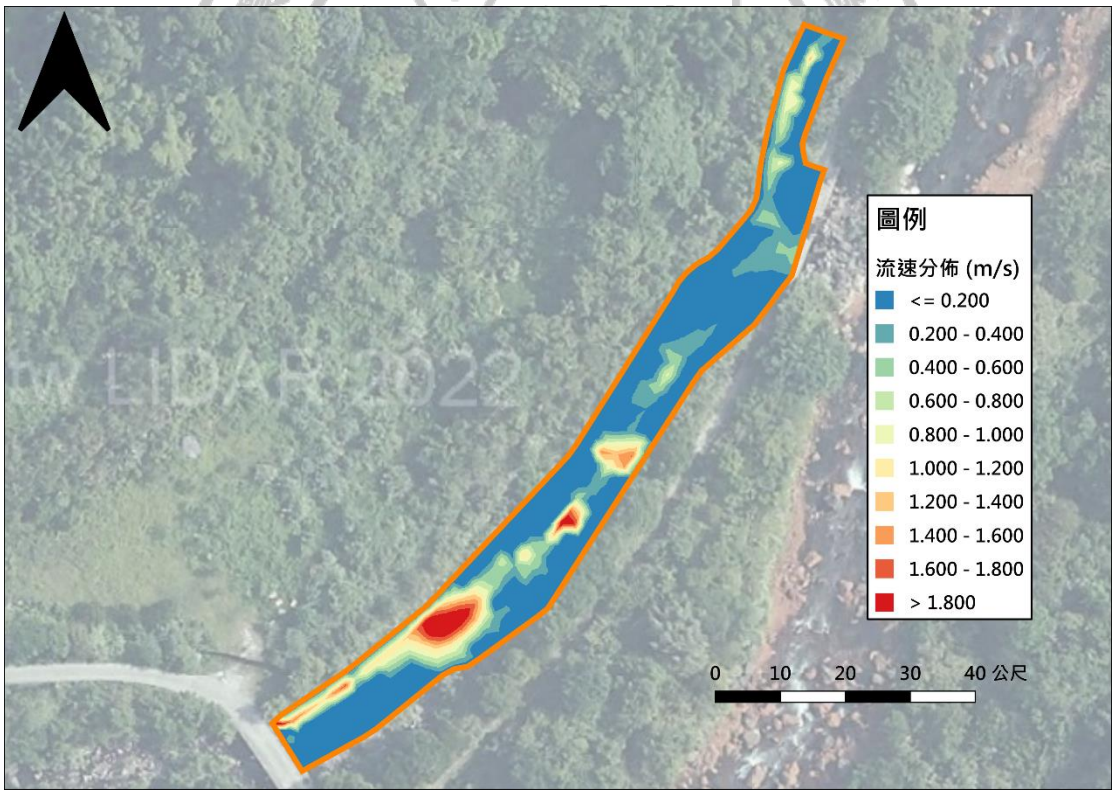


圖 4-16 以超越機率法推算清水溪平常時期之流速分佈圖

由超越機率分析法可大致了解河川流量之出現機率，因自然河川流量受降雨量、蒸發量、地下水、中間流(interflow)等多種因素影響，其牽涉之層面較廣且許多水文特徵監測難度較高，導致難以量化其中不確定性，一般多認定以 Q_{50} 作為平常時期之流量。而本計畫導入之小波分析法推算流量之全域小波能量譜，比較前後年之全域小波能量比值，鎖定比值最接近 1 之最小時間尺度視為重現期，結合超越機率分析回推其重現期流量，對於常時流量更具有代表性。故本計畫以流量區間作為 SRH-2D 水理模式之模擬邊界，設計兩情境進行水動力模擬，其參數如表 4-3，選以流量區間中最大及最小之流量分析其流場特性，其成果如圖 4-17~圖 4-20。

兩情境之主流水深分佈相近，皆介於 0~1 公尺間，多處可達 0.4~0.5 公尺，河道中游因地勢陡降，使得水流於此處累積，水深可超過 0.9 公尺，為河段中觀察到之最大水深；情境一之主流流速分佈以上游處最高，多可達 2 公尺/秒以上，最高可超過 2.7 公尺/秒，中游處流速趨緩，多介於 0.9~1.5 公尺/秒，下游處流速又提升至接近 2.1 公尺/秒；情境二之主流流速分佈可明顯發現較情境一緩慢，但仍可於上游處觀察到超過 2.7 公尺/秒之流速，中游流速降至 0.6~0.9 公尺/秒，下游處則以 1.5~1.8 公尺/秒居多。後續將以此二情境進行棲地單元辨識、棲地結構分析與魚類棲地適合度分析。

表 4-3 設計情境之邊界條件

邊界條件(m^3/s)	情境一	情境二
Q_{in}	1.234	0.763
Q_w	0.139	0.139
Q_{out}	1.095	0.624

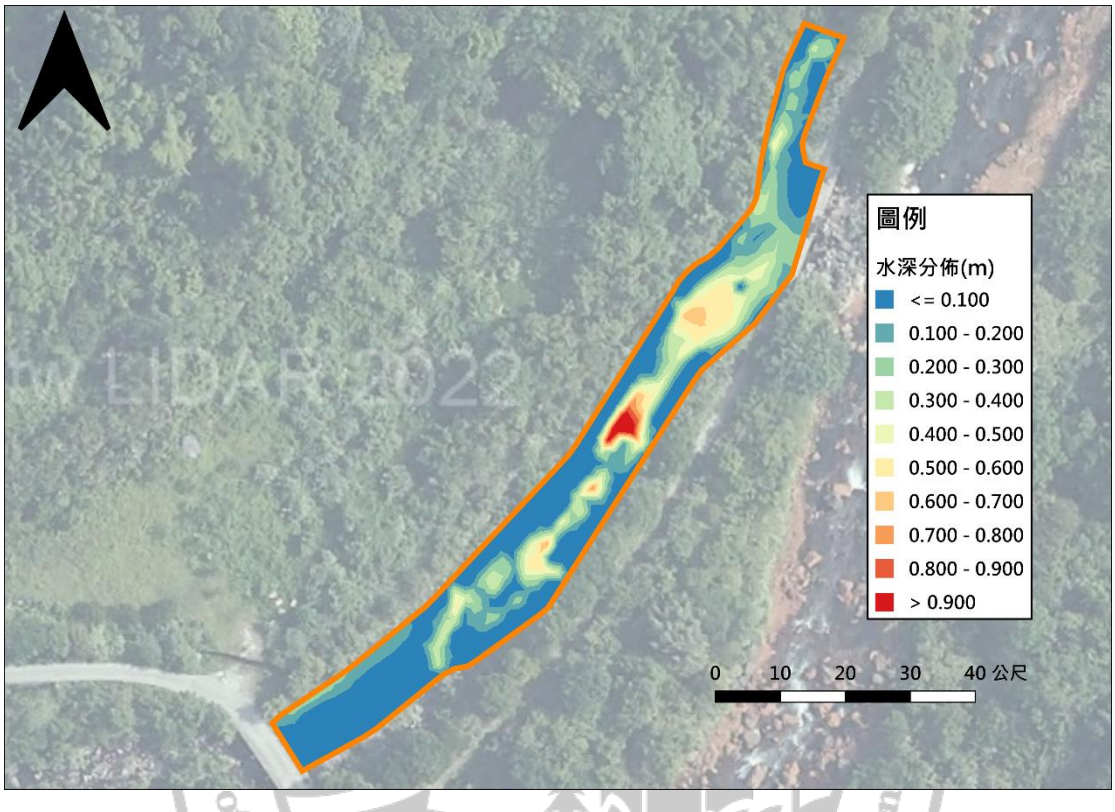


圖 4-17 清水溪水深分佈圖（情境一）

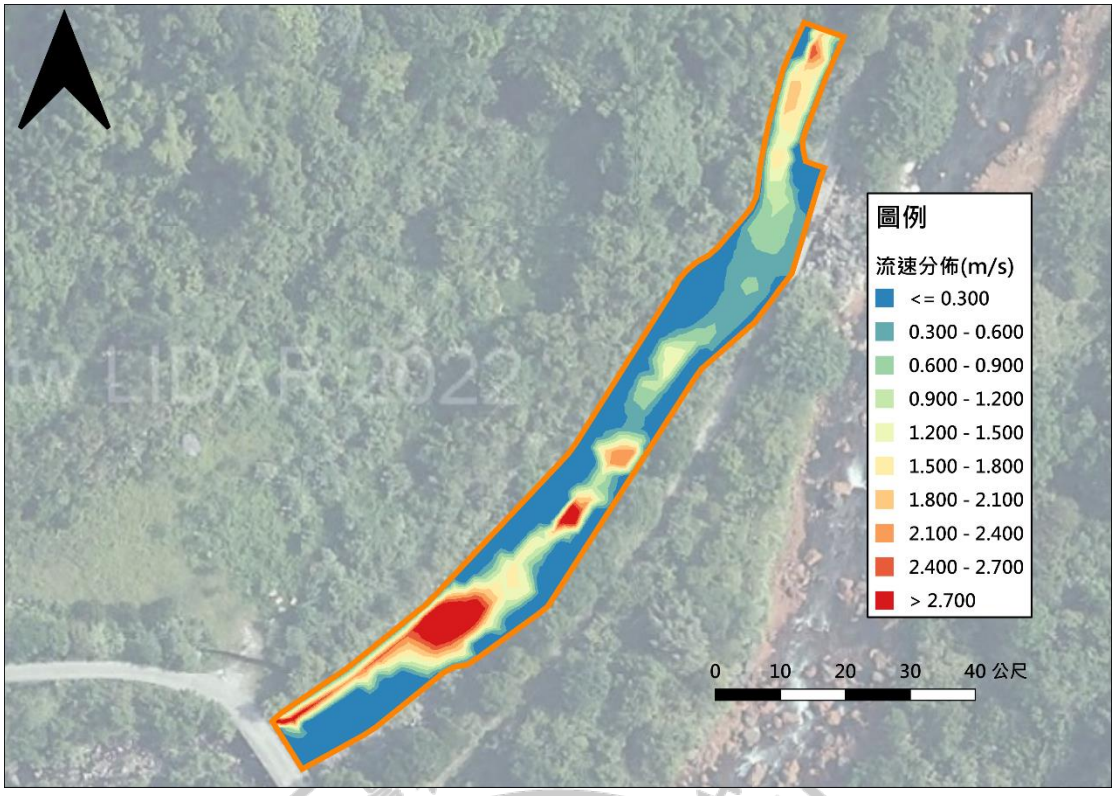


圖 4-18 清水溪流速分佈圖（情境一）

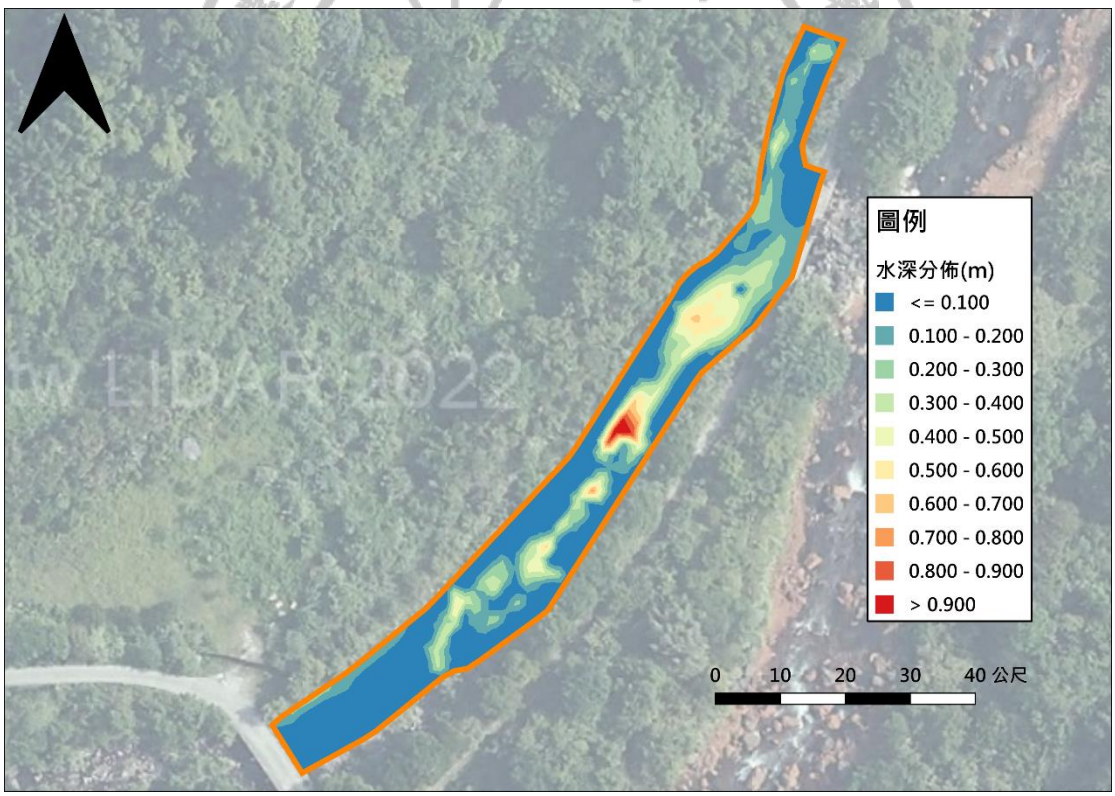


圖 4-19 清水溪水深分佈圖（情境二）

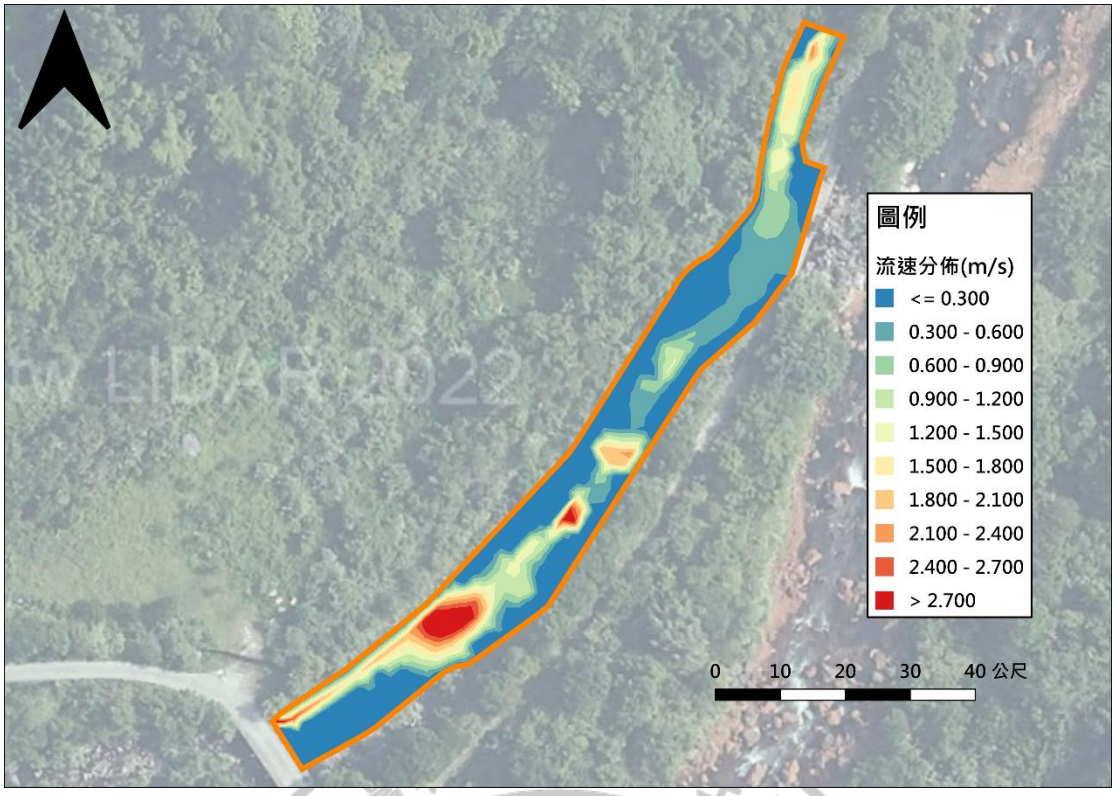


圖 4-20 清水溪流速分佈圖（情境二）

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

第三節　棲地景觀分析

一、棲地單元

棲地單元辨識以二設計情境之流場進行，共可依照其水深、流速分類出淺瀨(riffle)、深流(run)、深潭(pool)、淺流(glide)四種水域棲地，並將無水之區域定義為砂洲(bar)，其成果如圖 4-21、圖 4-22。

由圖上可觀察出，二情境之棲地單元分佈相近，整體棲地單元以淺瀨（紅色）為主，淺瀨之特性為高流速、低水深（流速大於 0.6 公尺/秒、水深小於 0.6 公尺），可能因上游之流量較大而形成此種特殊棲地環境；其次多數之棲地單元為淺流，與淺瀨相比，淺流之流速較不湍急（小於 0.6 公尺/秒），水深則較高（小於 1.4 公尺），其分佈多位於河段中游處，顯示水流進入中游後逐漸趨於緩慢，水深可有充裕之時間累積，使棲地單元發生轉變，此現象推測為地形高程分佈於中游處較為平直，且部分區域地勢陡降所導致。而深流則僅於上游與中游之交會處有少部分出現，深潭則沒有於河道中觀察到，其原因為深潭之特性為流速小於 0.6 公尺/秒、水深達 1.4 公尺以上，而此二情境之水深則幾乎無超過 1 公尺，未達深潭之形成條件。另發現於上游及下游處之淺瀨棲地多可互相連結，沿主流方向形成類似帶狀之棲地廊道，此現象於二情境皆可觀察到，情境一之上游棲地廊道略長於情境二，相同之棲地單元連結對於生物利用效率提升應有莫大幫助。

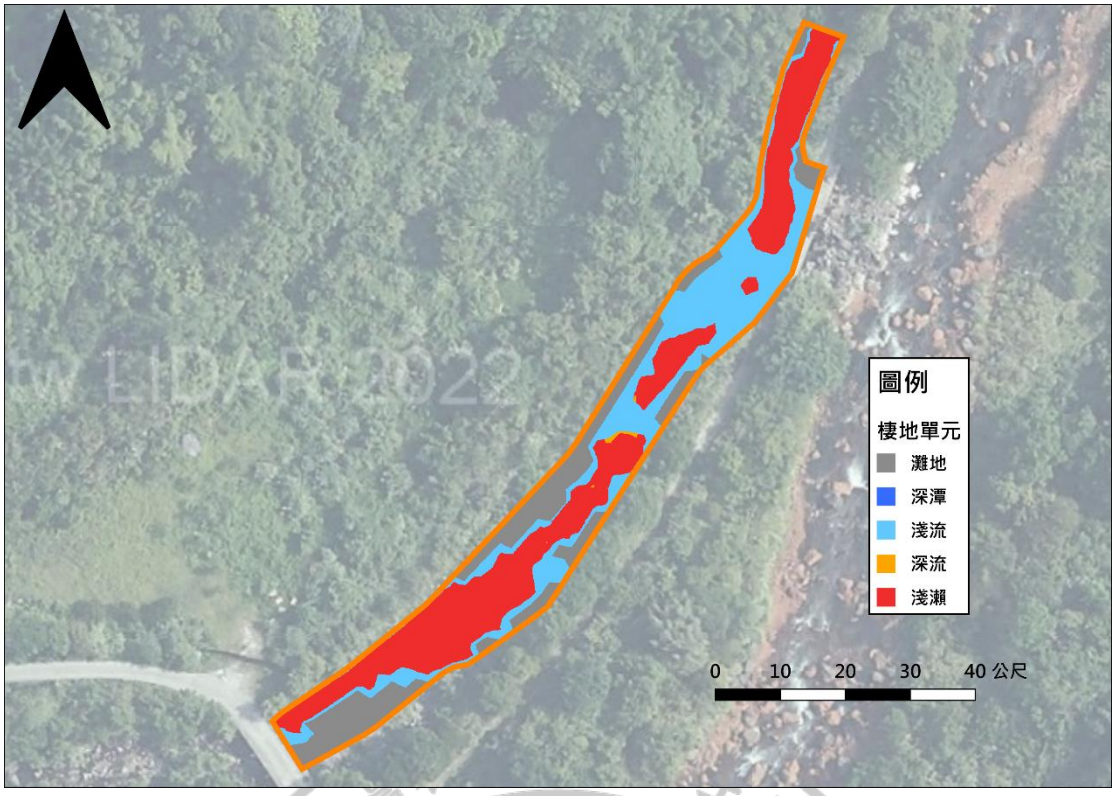


圖 4-21 清水溪棲地單元分佈（情境一）

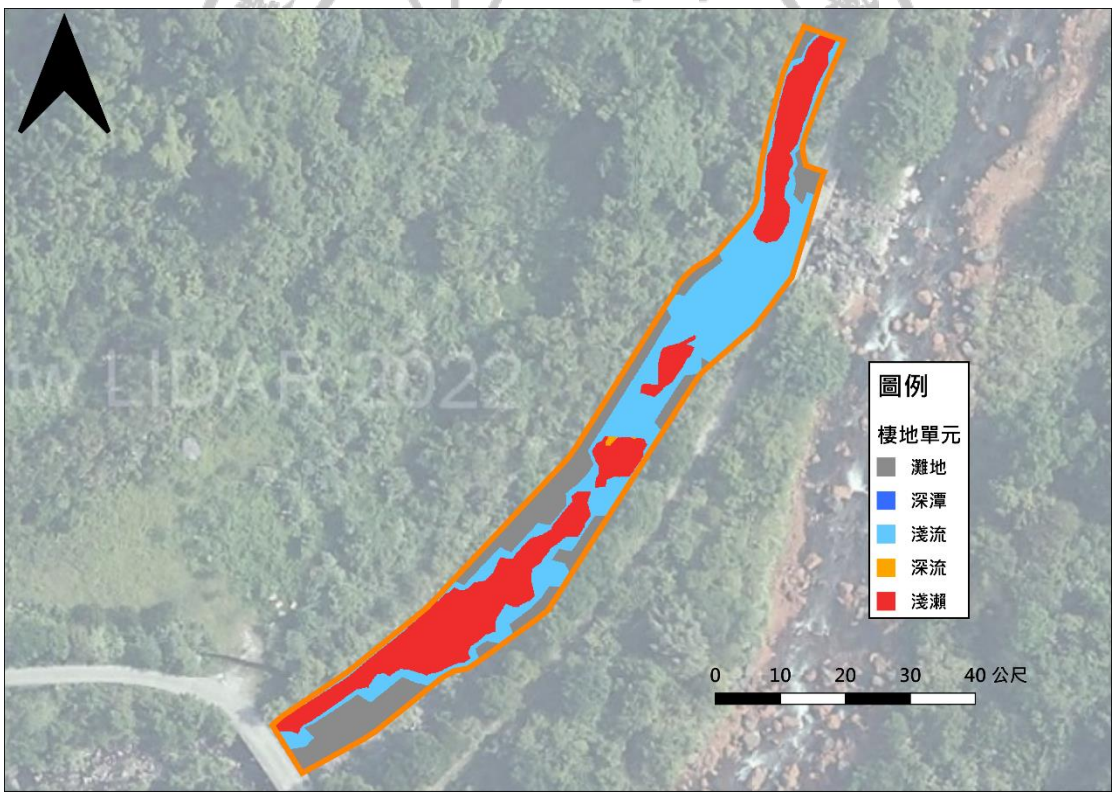


圖 4-22 清水溪棲地單元分佈（情境二）

二、棲地品質

棲地品質係由指標物種之棲地適合度計算成果加以分類而得，可更直觀了解指標物種對於不同河段棲地之喜好程度。棲地品質等級由1至5分，等級1為最不適棲地，代表此類棲地最不適合指標物種生存；等級5為最適棲地，代表此類棲地為指標物種最喜好之區域。

本計畫選擇之指標物種為臺灣特有種魚類之臺灣石鱝，以經濟部水利署水利規劃試驗所對臺灣石鱝進行魚隻數量及水理環境因子調查成果，所建立之適合度曲線計算棲地適合度，水理參數則由設計情境之水動力模擬成果提供，並以該適合度進行棲地品質分類，如圖4-23、圖 4-24。整體觀察二情境之棲地品質分佈，可觀察出中游河段以品質等級5之棲地為居多，且於縱向、橫向皆可相連，形成面狀之棲地分佈；下游處則以品質等級4之棲地為主；愈往上游可發現棲地品質逐漸下降，開始出現等級4、等級3、等級1之類型，結構分佈相對比較破碎，但仍可發現不同等級之棲地品質多有相連處，推測原因為上游多為流速塊、水深淺之淺瀨棲地單元，其環境較不適合生存臺灣石鱝，而導致其棲地適合度降低，進而影響棲地品質分類結果。另可觀察到棲地品質為逐步降低，較少出現由等級5突降至等級1之現象，推測除了能增加不同等級棲地之間交互作用，魚群也可順利由低品質之棲地移動至高品質棲地。

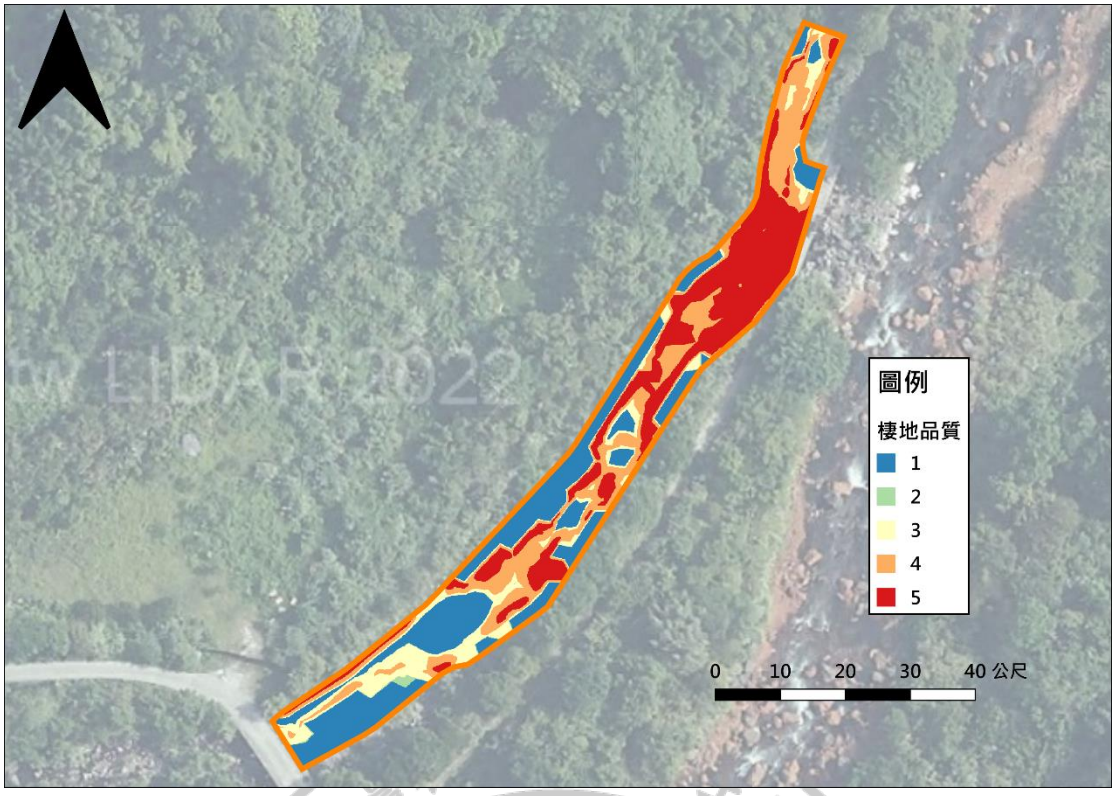


圖 4-23 清水溪棲地品質分佈（情境一）

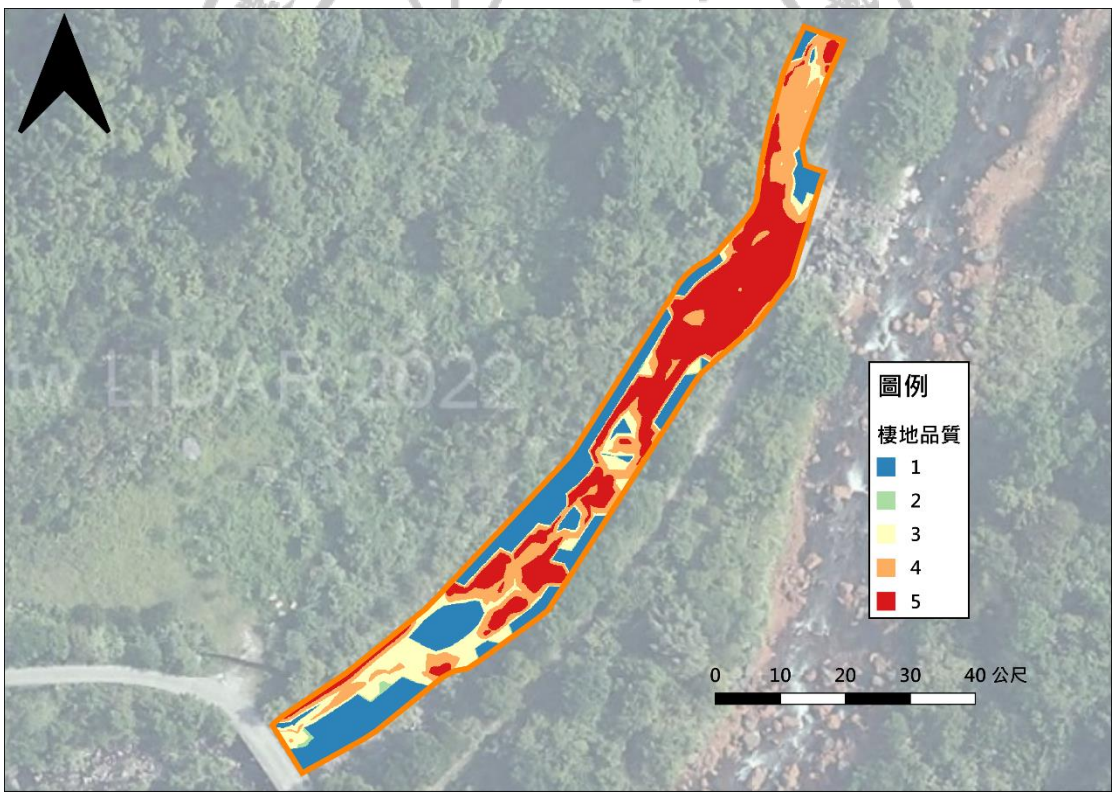


圖 4-24 清水溪棲地品質分佈（情境二）

三、景觀指數

景觀指數計算係透用美國農業部開發之 FRAGSTATS 軟體進行，其由已完成棲地單元分類之向量圖層資料進行運算，使用者可於軟體中選擇欲計算之多種指標，並將結果出輸為表格進行比較與分析。本計畫選擇之指標包含塊區類：區塊數量(NP)、景觀比例(PLAND)；邊緣類：總邊(TE)、邊緣密度(ED)；形狀類：平均形狀指標(MSI)、面積加權平均形狀指標(AWMSI)；多樣性類：Shannon 多樣性指標(SHDI)、Simpson 多樣性指標(SIDI)，計算成果如表 4-4 表 4-8，又於棲地單元辨識成果中可大致觀察出二情境皆以淺瀨、淺流為主要棲地，其他水域棲地所佔之面積較少，灘地雖佔有一定數量，但其非魚類可利用之棲地，故於景觀指數計算中也將以淺瀨、淺流為重點分析對象。

由塊區類指標（表 4-4）中可發現二情境之 NP 以灘地最多，水域棲地則皆僅為 2~3，其原因為 NP 係計算棲地之塊區數，當相同類型棲地相連時則只會被計算為 1 區，若被其他類型棲地分隔則才會被計算為 2 區，故可推知當棲地分佈越分散、破碎則 NP 可能較大，反之，當棲地大多相連成一大區域時 NP 則可能較小，因此亦可從表 4-4 中推知水域棲地因其 NP 皆較小，可能大多皆彼此相連。而 PLAND 代表棲地在整體景觀中所佔之面積比例，情境一以淺瀨最高(41.91%)，面積為 606 平方公尺，其次為淺流(34.01%)，面積為 491 平方公尺；

情境二則以淺流最高(40.77%)，面積為 588 平方公尺，其次為淺瀨(34.35%)，面積為 496 平方公尺，可見皆以此二種棲地單元為主要組成。

由邊緣類指標（表 4-5）中可發現二情境之淺流之 TE 最長，分別達 580 公尺、604.6 公尺，相比淺瀨之 TE 則僅分別達 347.2 公尺、380.9 公尺，可見淺流與其他棲地單元接觸之邊界較多，可能會有更多之交互作用。另觀察 ED 之計算成果，二情境皆以淺流最高，分別為 4018.74 公尺/公頃、4189.19 公尺/公頃，而淺瀨之 ED 則分別為 2405.70 公尺/公頃、2639.20 公尺/公頃。ED 是由 TE 除以該棲地之總面積所得，於塊區指標比較中可得之二情境在淺流、淺瀨之面積相差不大，顯示其 ED 之差距應為 TE 所造成，檢視二情境之棲地單元分佈（圖 4-21、圖 4-22），可觀察出淺瀨多集中於河道中央處，其外圍則多由淺流所包圍，導致其形狀可能較為不規則，使淺流除了與淺瀨接觸，同時也和其他水流更緩慢或無水之灘地接觸，可作為淺瀨與其他棲地交互作用之橋梁。

由距離類指標（表 4-6）之二情境之平均最鄰近距離 ENN 計算成果可發現，淺瀨之 ENN 皆高於淺流之 ENN，情境一之淺瀨、淺流 ENN 分別為 6.59 公尺、1.92 公尺；情境二之淺瀨、淺流 ENN 分別為 3.93 公尺、1.60 公尺。ENN 越小則表示該棲地之分佈較為集中，反

之則表示該棲地之分佈較為分散，使其彼此相距較遠，故可推知淺流之分佈相對較為分散；淺瀨則較為集中，其原因為淺流以河道中游處為居多，並分別向上、下游延伸包圍淺瀨，使淺瀨幾乎被分隔於上、下游處，導致距離較遠而增加 ENN，此現象也可推測出，若於上游淺瀨中生活之魚類向下游遷移時必須先經過其他棲地，如淺流，而因水理條件不同，淺流可能成為魚類遷移之天然屏障，對於其移動困難度有所提升。

由形狀類指標（表 4-7）成果可發現，二情境皆以淺流之 MSI、AWMSI 為最高，顯示其形狀較為不規則狀，驗證前述之猜測，而原因應為其多位於淺瀨之外環，將淺瀨包圍之同時又向其他地區延伸，導致其形狀較為多樣，也反映其邊緣較長，魚類進入淺流之入口較多。

由多樣性類指標（表 4-8）計算成果可發現，二情境 SHDI 分別為 1.0873、1.0867；SIDI 分別為 0.6518、0.6548，顯示二情境存在之棲地單元種類相近，且種類較少，整體景觀皆由二種棲地單元為主要組成，使得 SHDI、SIDI 皆較小。

表 4-4 清水溪設計情境之塊區類指標計算成果

	NP (個)		PLAND (%)		塊區面積 (m^2)	
	情境一	情境二	情境一	情境二	情境一	情境二
灘地	22	23	23.84	24.76	343	355
深潭	0	0	0	0	0	0
淺流	3	2	34.01	40.77	491	588
深流	4	2	0.23	0.12	3	2
淺瀨	4	4	41.91	34.35	606	496

表 4-5 清水溪設計情境之邊緣類指標計算成果

	TE (m)		ED (m/ha)	
	情境一	情境二	情境一	情境二
灘地	228.70	236.80	1584.63	1640.75
深潭	0	0	0	0
淺流	604.60	580.00	4189.19	4018.74
深流	20.80	8.60	144.12	59.59
淺瀨	380.90	347.20	2639.20	2405.70

表 4-6 清水溪設計情境之距離類指標計算成果

	ENN (m)	
	情境一	情境二
灘地	2.64	2.43
深潭	0	0
淺流	1.60	1.92
深流	6.74	2.20
淺瀨	3.93	6.59

表 4-7 清水溪設計情境之形狀類指標計算成果

	MSI		AWMSI	
	情境一	情境二	情境一	情境二
灘地	1.39	1.38	2.43	2.44
深潭	0	0	0	0
淺流	3.68	4.50	9.04	7.99
深流	1.42	1.26	2.07	1.27
淺瀨	1.95	2.00	2.52	2.34

表 4-8 清水溪設計情境之多樣性類指標計算成果

	情境一	情境二
SHDI	1.0873	1.0867
SIDI	0.6518	0.6545

第四節　邏輯式迴歸分析

本計畫將棲地品質設定為反應變數 Y，前節已根據棲地適合度進行棲地品質分類，得到五個等級之棲地品質，等級 1 為最不適棲地，等級 5 為最適棲地，對應之棲地適合度別為：等級 1（0）、等級 2（0-0.1）、等級 3（0.1-0.4）、等級 4（0.4-0.7）與等級 5（0.7-1.0）。本計畫將分類閾值設為等級 3，表示等級 4、5 (HSI ≧ 0.4)棲地之二元分類為 1；反之，等級 1、2、3 (HSI < 0.4)棲地之二元分類為 0。而解釋變數 X 則設定為各景觀指標，將由邏輯式迴歸分析探討從低品質棲地轉為高品質棲地時主要控制之景觀指標。

清水溪主要之水域棲地為淺流、淺瀨、深流，其中淺流與淺瀨棲地為主要可提供魚類利用之棲地單元，本計畫將針對此三種棲地單元，透過邏輯式迴歸分析得到景觀指標之係數值，找出影響形成高品質棲地(HSI ≧ 0.4)之景觀指標，成果如圖 4-25、圖 4-26、圖 4-27。景觀指標可細分為塊區類指標、邊緣類指標、形狀類指標與距離類指標，以下將逐一針對各類指標經邏輯式迴歸分析後所得之係數值進行分析。

由塊區類指標結果可發現，淺流與淺瀨兩者之 PLAND 係數值皆為正值，且在淺流之景觀指標當中係數值最大，顯示若想提升高品質棲地之機率，淺流之面積佔比係關鍵指標，淺瀨之 PLAND 係數值為

排第二,顯示仍扮演顯著重要性;而深流之 PLAND 係數值則為負值,顯示若深流之面積佔比增加將不利於高品質棲地之形成,係因大部分高品質棲地皆落在淺流與淺瀨所致。根據圖 4-23、圖 4-24 可以發現高品質棲地多形成帶狀分佈,棲地分佈較集中,主要形成單一、大面積之高品質棲地,可能為淺流與淺瀨之 NP 係數值皆為負數之原因。此現象說明當 NP 越高時,形成高品質棲地之機率就越低,不利於高品質棲地之形成。當 NP 越高即表示此類型之棲地有越多不相連之區塊,棲地分佈較為破碎,而清水溪高品質棲地靠近河道中央,多呈現連續結構,因此 NP 較小;反倒是較低品質棲地被分隔在邊緣,形成較零碎之棲地。另外,深流之 NP 係數值為正值,推測係因在篩選出高品質棲地時,原來面積就小的深流被進一步切割成了小區域面積,雖然數值上仍呈現 NP 值變高,但實際上係因面積過小,導致臨近之棲地被分類成了不同之區塊所致。

由邊緣類指標計算結果發現,淺流和淺瀨之 TE 係數值皆為正值,且在淺瀨中為最大值,顯示增加淺瀨之 TE 有助於提升高品質棲地之機率。若比較相對低與相對高品質之棲地單元分佈時,可以發現高品質棲地多分佈於淺流與淺瀨之交界處,其中淺瀨緊貼於淺流,因而形成較長之 TE。由此推測,在淺流與淺瀨產生交互作用之地方可能是構成高品質棲地之關鍵。另一方面,深流之 TE 係數值為負值,主要

係因深流面積小，區分出高品質棲地使其面積進一步縮小，總邊自然也隨著縮小，因此形成 TE 係數較小之結果。

由形狀類指標中可發現淺流和淺瀨之 AWMSI 係數值皆為正值，推測原因為高品質棲地多分佈於淺流與淺瀨之交界處，而此處之棲地形狀較不規則，多呈現狹長、淺流包夾淺瀨之形狀。比較全區之棲地單元分佈可以發現，淺瀨之形狀相對淺流更為規則，但若是觀察高品質棲地之棲地單元分佈，可發現高品質之淺瀨多緊貼淺流之分佈走向，導致淺瀨之形狀一併較為不規則。而深流情境下則推測因高品質棲地面積接近於單一網格之規則狀，所以呈現之 AWMSI 係數為負值。

由距離類指標分析結果顯示，淺流和淺瀨之 ENN 係數同樣顯示為正值。ENN 越大表示棲地分佈越疏遠，一般導致生物需遷徙之距離增加，使其生存難度增加。但若是檢視高品質棲地之棲地單元分佈，如前面所述可以觀察出高品質棲地多位於淺流與淺瀨之交界處，使得原本單一、面積較大之淺瀨在篩選出高品質棲地之情境下，使得臨近之大面積棲地分隔成了較疏遠之小面積棲地。深流之棲地分佈原來僅有二至三個區塊，在進行高品質棲地之篩選後，因為僅臨近淺瀨與淺流處為高品質棲地，因此進一步在單一塊區中被細分成了臨近之小面積棲地，造成 ENN 係數變小，因此才形成 ENN 係數越小，形成高品質棲地機率越高之結果。

總體來說，在經過邏輯式迴歸分析探討棲地單元與景觀指標之相關性後，發現淺流與淺瀨之推動力相同，同為 PLAND、TE、AWMSI 和 ENN，阻力則為 NP；另一方面，深流之推動力為 NP，阻力則為 PLAND、TE、AWMSI、ENN。針對淺流之分析結果顯示，各個景觀指標之係數值大小相近，即是說增加淺流之大小、總邊、形狀不規則性與平均臨近距離，在提升高品質棲地出現機率之重要性相當。顯示形成大面積佔比之狹長、包夾淺瀨之不規則狀棲地，為最有利於提升高品質棲地形成之淺流之樣態；另一方面，淺瀨之推動力中則以 TE 最為顯著、ENN 為最不顯著，因此可重點增加淺瀨之 TE，即增加與淺流之交界線，可最有效提升高品質棲地出現之機率。增加淺流與淺瀨之交界線有機會提升兩種棲地之交互作用，促進魚類在兩種棲地中穿梭，達到休息、移動與覓食之目之。Kuo et al. (2021)指出形狀複雜度在淺瀨係促使高品質棲地形成之阻力，然而在清水溪則反而為推動力，本計畫分析可能原因有：(1) Kuo et al. (2021)使用之指標物種與本計畫不同，因此在棲地分佈上可能展現不同趨勢；(2)由清水溪高品質棲地之分佈（圖 4-28、圖 4-29、圖 4-30、圖 4-31）可以發現，高品質棲地多分佈於淺流與淺瀨交界處，呈現狹長、不規則狀之分佈，因而造成形狀複雜度增加，係結合清水溪水理、台灣石鱝喜好棲地兩者之在地研究分析結果。

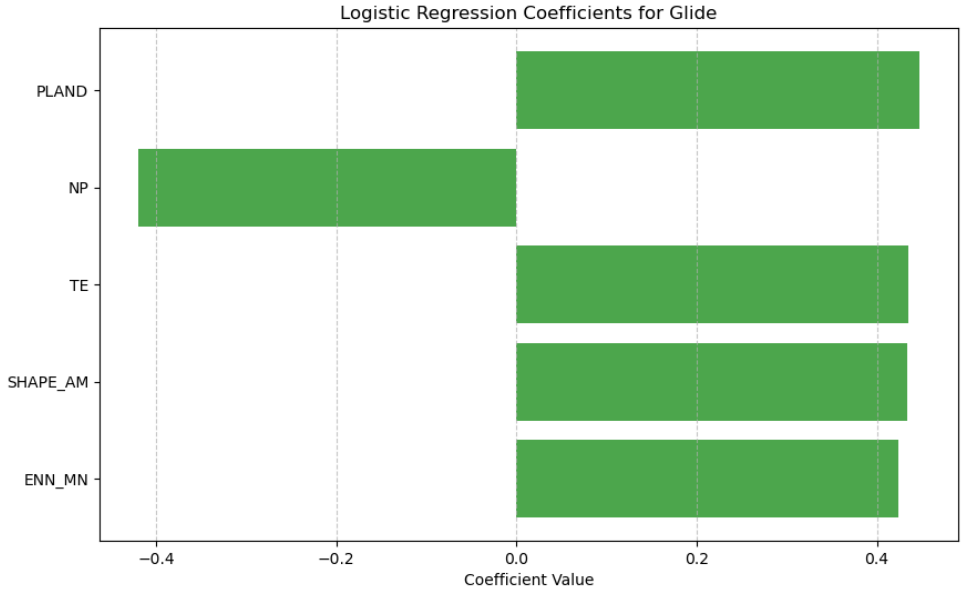


圖 4-25 淺流景觀指標係數值

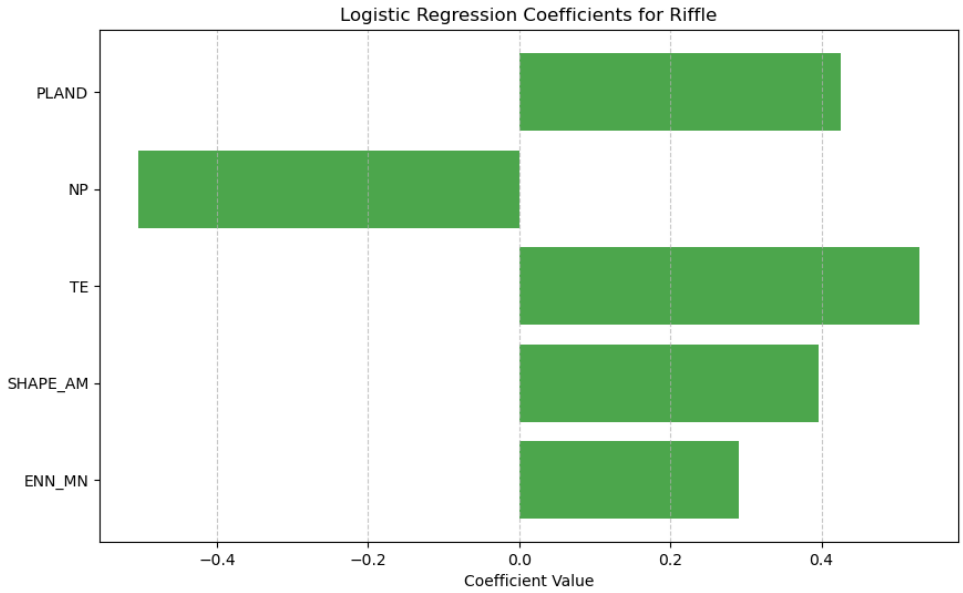


圖 4-26 淺瀨景觀指標係數值

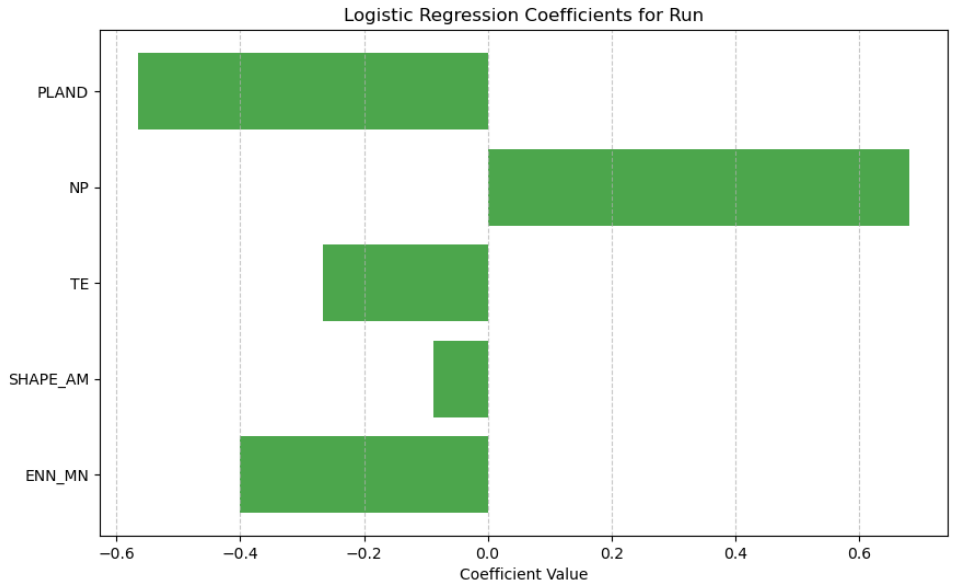


圖 4-27 深流景觀指標係數值

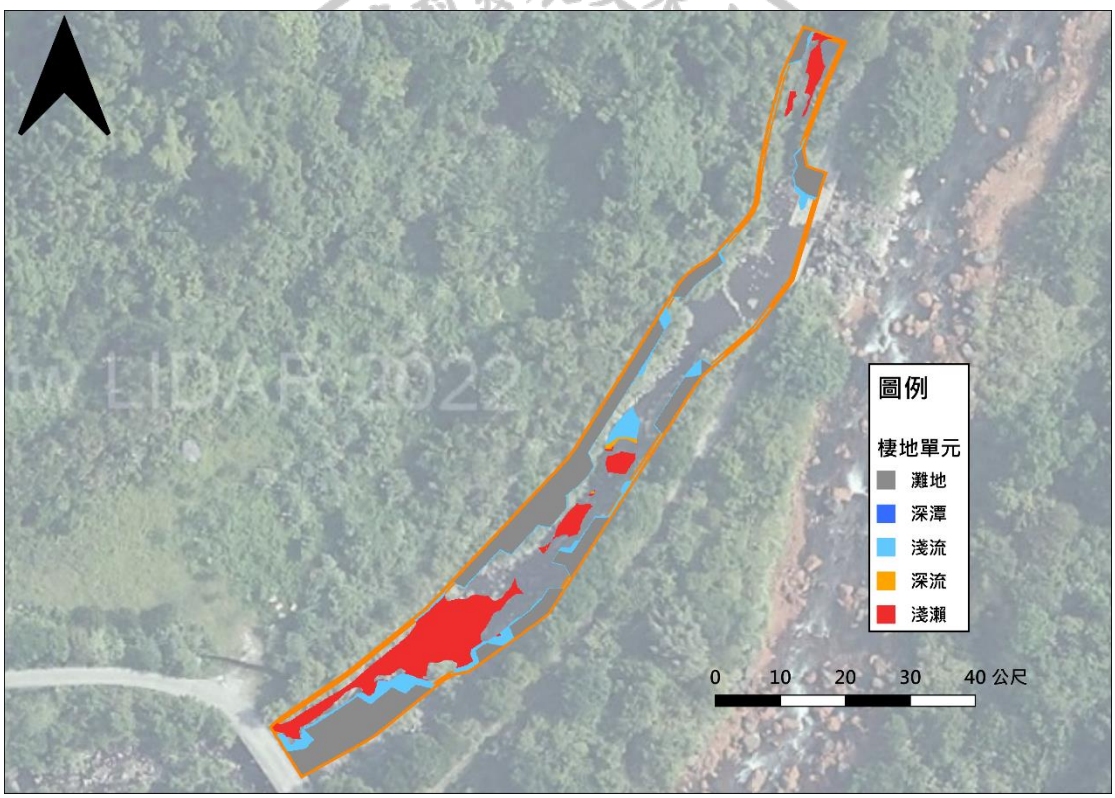


圖 4-28 低品質棲地(HSI < 0.4)之棲地單元分佈（情境一）

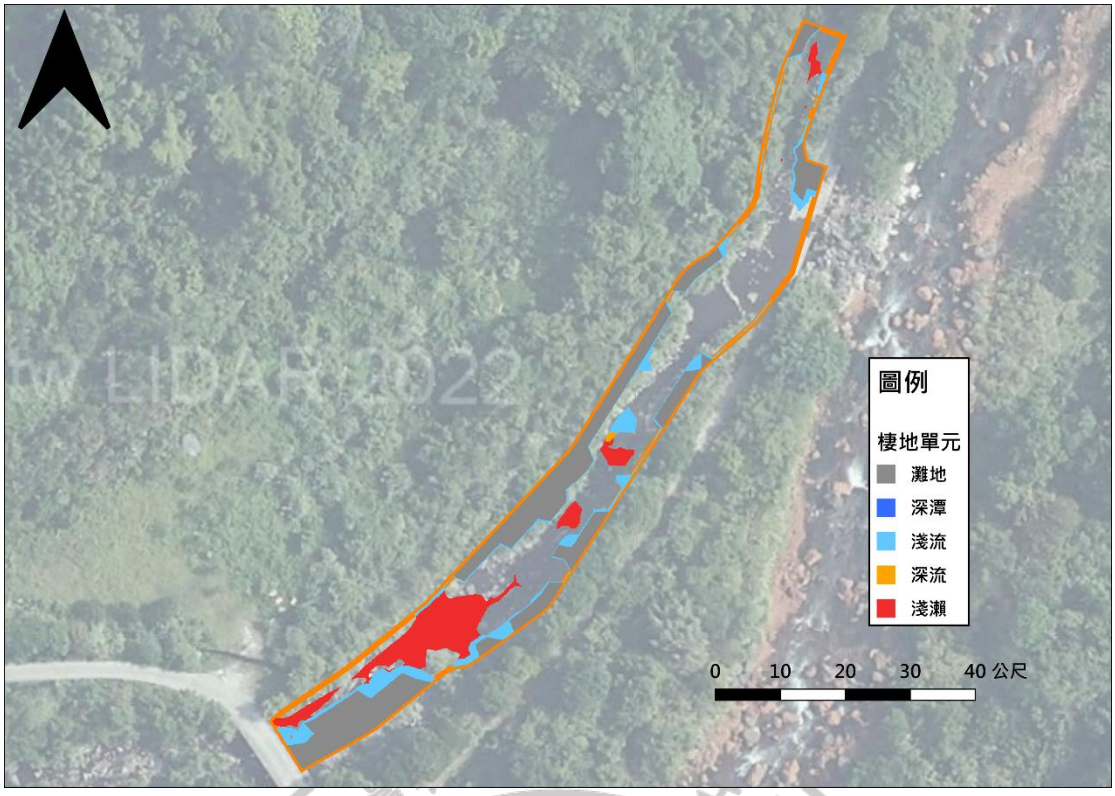


圖 4-29 低品質棲地(HSI < 0.4)之棲地單元分佈（情境二）

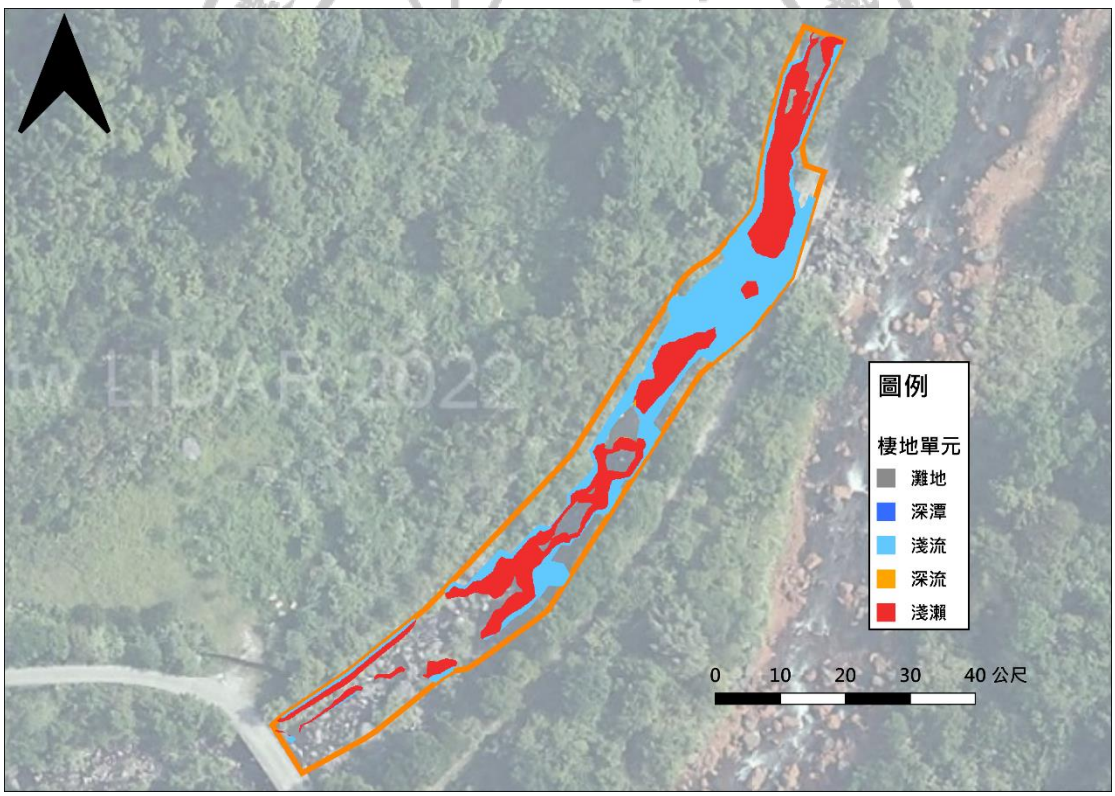


圖 4-30 高品質棲地(HSI ≧ 0.4)之棲地單元分佈（情境一）

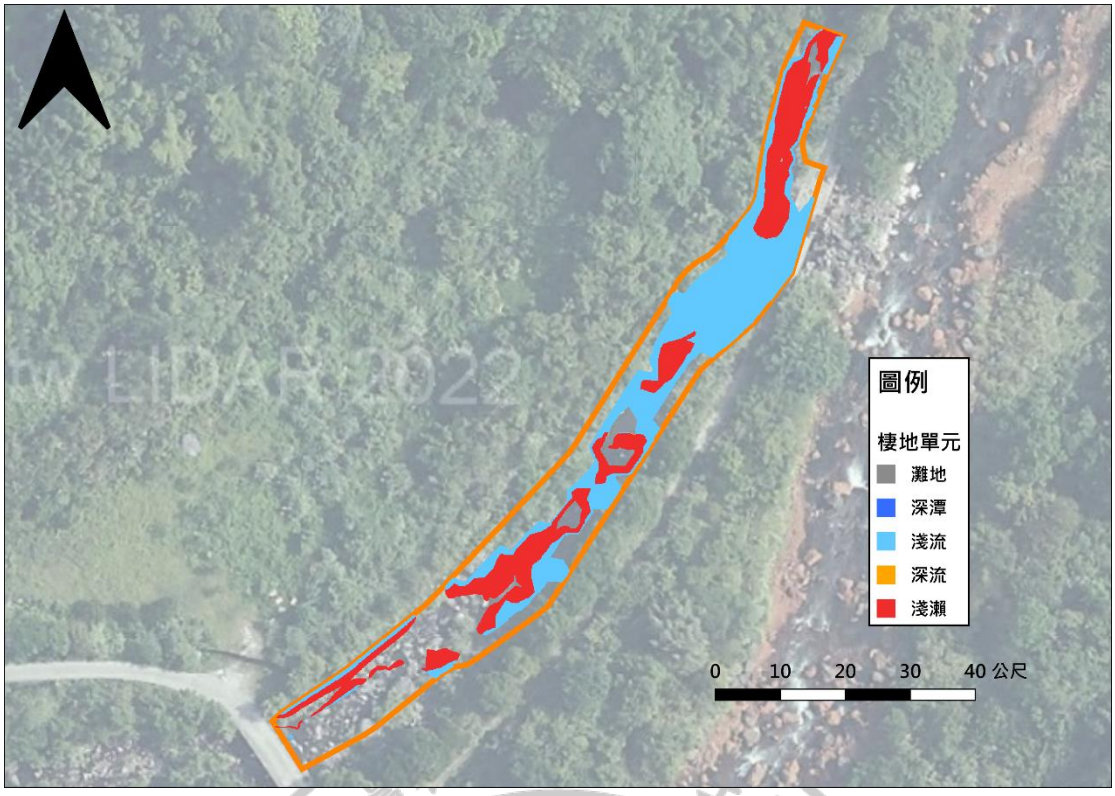


圖 4-31 高品質棲地(HSI ≧ 0.4) 之棲地單元分佈（情境二）

第五章　河川形貌與棲地結構演化初探

本計畫是以二年期程設計整體研究，今年度為第一年，相關研究成果已大致完成，部分更深化研究內容將於成果報告中呈現，而團隊也預計持續申請本創新研究計畫，延續今年度之成果，以設計之第二年度研究目標撰寫研究計畫。

考量第二年度之研究目標以河川形貌與棲地結構演化為主，其中又將針對河段彎道做重點分析，故於本年度預先進行準備，包含：(1) 以磺溪主流為第二年度預計之研究區域，盤點其河川蜿蜒處，並由歷年空照圖資與現地調查篩選較適合之重點河段；(2) 以數值模式模擬河川形貌變遷與棲地結構演化，預先測試多種數值模式之能力與案例成果，篩選出能夠達成第二年度研究目標之數值模式作為研究工具。

第一節　磺溪主流現地調查

本計畫設計之第二年度研究目標將應用本年度所建立之「棲地廊道及潭瀨流棲地結構特性與品質評估模組」並加入河川形貌模式，針對蜿蜒河道之彎道區段進行二次流對於潭瀨流棲地結構演化之評估，深化棲地結構受特殊水理環境之影響與演化，且導入自然解方 NbS，探究由生態疏濬恢復自然河川對於河川生態系統之韌性提升效益。研究區域預計設定為彎曲河段，探討其蜿蜒程度變遷演化，而本計畫今

年度研究區域之清水溪較為平直，河道中以大型石塊居多，較不適合第二年研究目標。故本計畫預計於第二年度將研究區域轉移至磺溪主流，並已於今年度進行部分河段之現地勘查，初步選擇二處關鍵河段（如圖 5-1），後續可能擇一作為第二年度之研究區域。

根據磺溪治理規劃報告（經濟部水利署第十河川局，2017）之磺溪流路變遷圖，磺溪主流過去經歷過多次形貌演化，其主深槽位置發生多次改變，本計畫使用 Google Earth 資料蒐集歷年磺溪主流之衛星影像圖資，並以本計畫初步選擇之二處關鍵河段比較其過往之河相特徵，如圖 5-2、圖 5-3，整體可發現河道中出現交互砂洲(alternate bar)、河心島等形貌，並有觀察到部分河岸受侵蝕之現象。另本計畫於今年度 10 月份執行現勘，沿陽金公路分別勘查二處關鍵河段之現況與周遭環境，以下將分述二處關鍵河段。

關鍵河段一始於上磺溪橋，終於磺溪主流之二號攔砂壩，總河段長約 1.5 公里，河川蜿蜒度約為 1.073，屬於蜿蜒河段。透過歷史圖資比較，該河段有交互砂洲與河岸侵蝕之現象發生（圖 5-5），於現勘時亦發現在林莊橋附近之凹岸有明顯受到侵蝕 7 圖 5-4）。關鍵河段二始於磺溪主流二號攔砂壩下游，終於二號攔砂壩與磺溪中橋之間，總河段長約 1.9 公里，河川蜿蜒度約為 1.058，屬於蜿蜒河段，本次現勘時間為山陀兒(KRATHON；強烈颱風)颱風過境之後，當日可見二

號攔水壩正進行清淤、整理及檢修工程（圖 5-4）。透過歷史圖資比較，該河段有砂洲消長、河心島等形貌變化（圖 5-6），以長時間之圖資比對亦可明顯觀察出河岸侵蝕現象（圖 5-7）。與關鍵河段一相比，關鍵河段二中包含較多護岸、導流工、丁壩等河工構造物，其形貌變化趨勢初步推測可能與關鍵河段一有所不同，後續將視研究方向及目標之調整，擇一作為計畫研究區域。

磺溪發源於大屯火山群，環境天然，上游高山峻嶺，地處陽明山國家公園保護區，受自然山勢分水走向而呈樹枝狀，可為上、下游生物縱向連結之廊道；下游地勢則趨於平坦，且有人開渠使河道逐漸平整，兩岸之土地利用多為農田、農塘，可扮演生物之橫向通道角色。透過歷史圖資可發現，磺溪主流有發生顯明之形貌改變，其中人工構造物可能為其中重要之影響因子，在自然河相演化過程中造成局部河相變化之加速或趨緩，如護岸工程可能使得河岸侵蝕作用減弱、丁壩可能加速主深槽向下侵蝕作用加速，進一步影響磺溪主流之棲地樣態與功能。河道自然蜿蜒對於水域棲地營造之效果重大，平直型河段一般多以高流速、高水深之深流型棲地單元為主，而彎道則有機會趨緩局部流速，使河水有足夠時間累積而增加河道中潭、瀨型棲地單元之形成，使得河段之棲地樣貌更加多元，提供不同生物棲息與捕食環境。本計畫由歷史圖資分析與現地調查發現，前述關鍵河段具有發展出彎

道之潛能，初步規劃以河岸侵蝕模式進行河相演化之探討，規劃以其河相演化執行棲地評估並研擬改善方案，以期恢復河相自然變化，提供河川治理之相關建議。

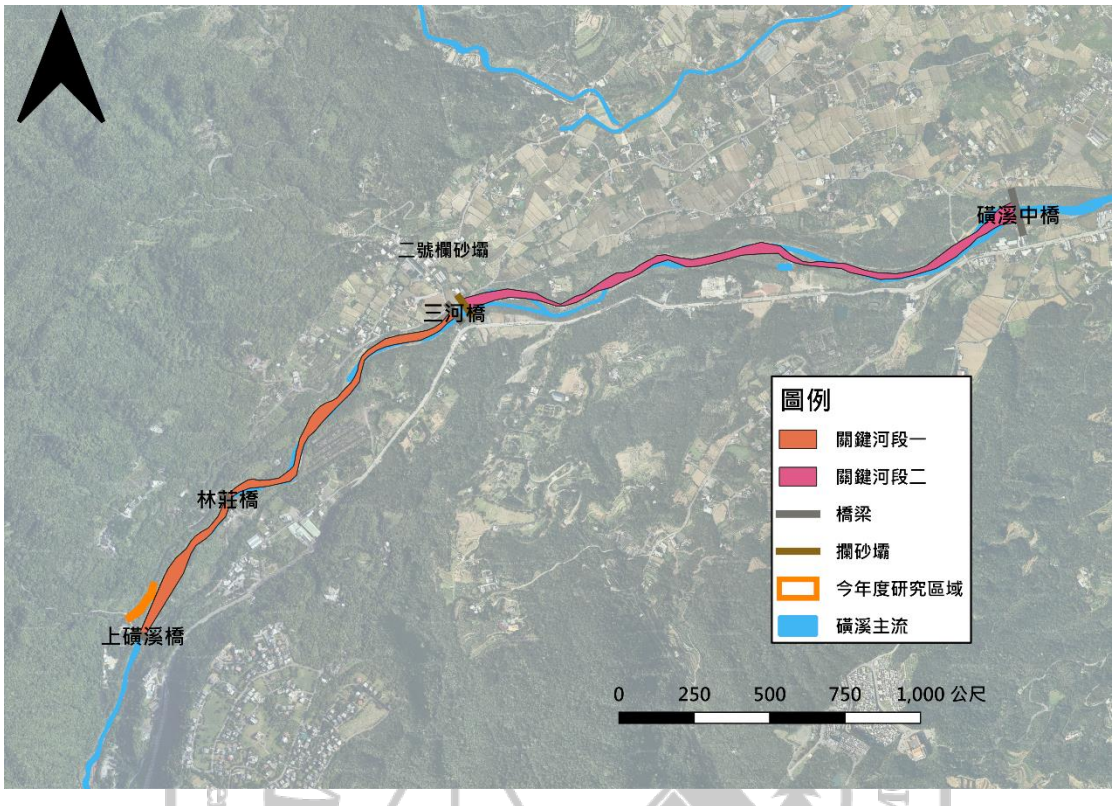


圖 5-1 關鍵河段位置圖

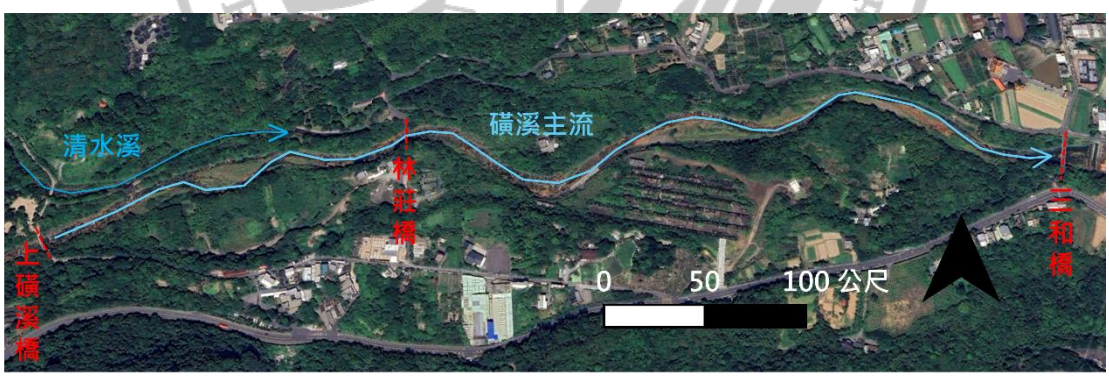


圖 5-2 關鍵河段一



圖 5-3 關鍵河段二



圖 5-4 本計畫現地勘查照片



圖 5-5 關鍵河段一之歷年比較

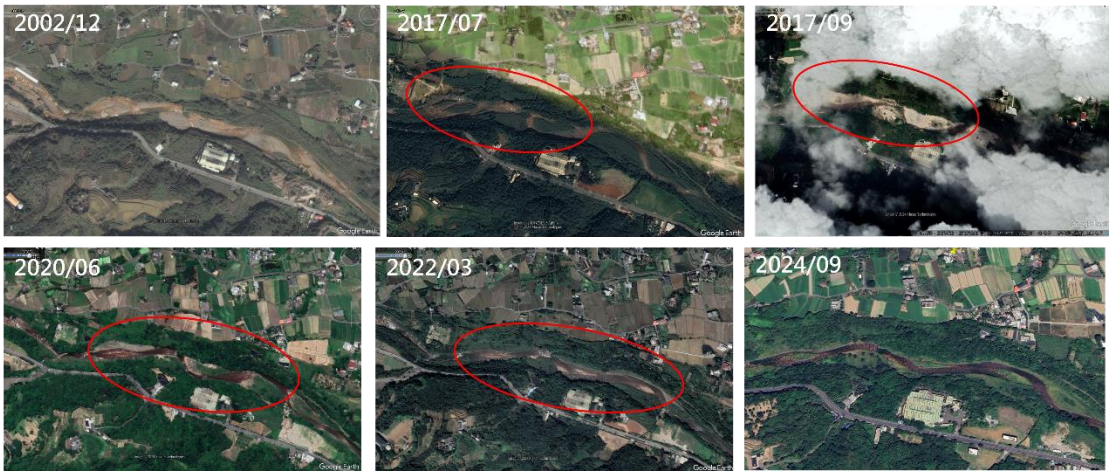


圖 5-6 關鍵河段二之歷年比較

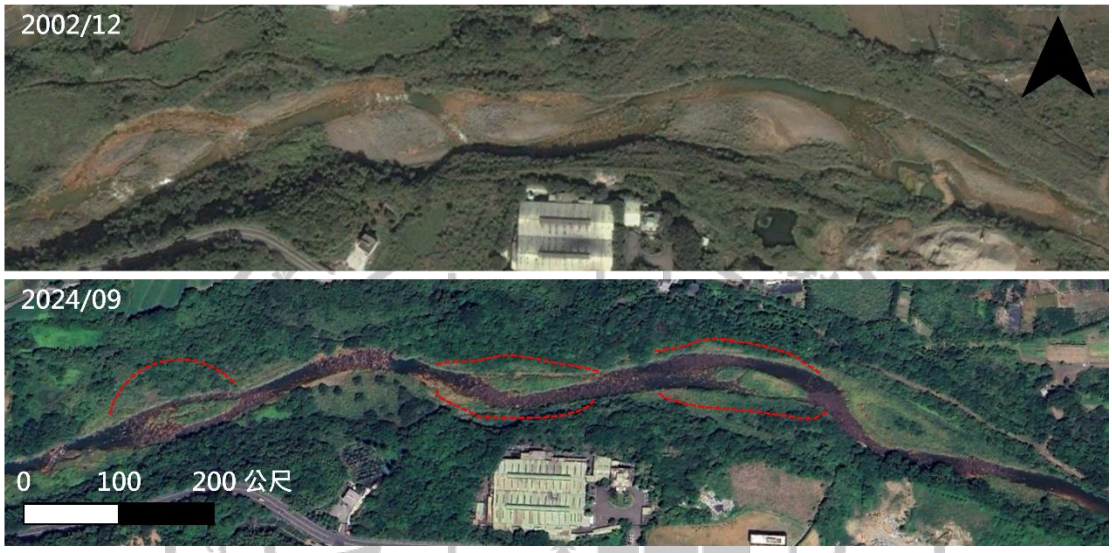


圖 5-7 關鍵河段二之河岸侵蝕現象

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Rural Development & Soil and Water Conservation,

第二節　Nays2DH 模式

一、基本介紹

Nays2DH 係為 iRiC (International River Interface Cooperative)軟體之二維水理輸砂模式，由北海道大學與美國地質調查所(USGS)於 2007 年共同開發一組河道模擬軟體，其模式功能包含淹水模擬、水文、海嘯、土石流、棲地評估等。該模組整合了過去 Nays2D 和 Morpho2D 模式之優勢，具備支流匯入、構造物與植生設置、河岸侵蝕與崩塌功能，且模組具備網格自動拓寬(adaptive moving mesh)能力，極具模擬彎道演化能力。

該模組採用四邊形均勻網格系統，透過在網格內設置構造物可模擬水流阻擋效果，亦可設置植生高度與密度考量額外拖曳力；另外，輸砂模組中之河岸崩塌與侵蝕功能有潛力模擬彎道造成外岸沖刷、內岸堆積的效果。其主要控制方程式為質量守恆方程式（式 5-1）和動量守恆方程式（式 5-2）：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial hu}{\partial s}+\frac{\partial hv}{\partial n}=0 \qquad \text{式 5-1}$$

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}}+\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{s}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{n}}+\mathrm{g}\frac{\partial \mathrm{z_w}}{\partial \mathrm{s}}+\frac{\mathrm{gu}\sqrt{\mathrm{u^2+v^2}}}{\mathrm{C^2h}} - v_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial s^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial n^2}\right)+F_s=0 \qquad \text{式 5-2}$$

$$\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{t}}+\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{s}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{n}}+\mathrm{g}\frac{\partial \mathrm{z_w}}{\partial \mathrm{n}}+\frac{\mathrm{gv}\sqrt{\mathrm{u^2+v^2}}}{\mathrm{C^2h}}-v_t\left(\frac{\partial^2 v}{\partial s^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial n^2}\right)+F_n=0$$

其中，s 是流線方向座標；n 是垂直流線方向座標；z_w 是自由水面表面高度；u 是 s 方向的水深平均流速 (m/s)；h 是水深 (m)；C 是 Chezy 粗糙度 ($m^{0.5}/s$)；g 為重力加速度常數 (m/s^2)；v_t為水平向渦流黏性係數；$F_{s,n}$ 分別是各自方向的阻力因流線曲率而產生的加速度項。

在邊坡侵蝕方面，該模式透過將 x-y 軸轉換為 s-n 軸，將輸砂分為流向與垂直向，利用垂直輸砂模擬邊坡侵蝕與堆積，其公式如下：

$$\mathrm{der}=\pm\frac{1}{1-\lambda\eta_r B_h}\tilde{q}_b^{\eta}\Delta t+\frac{\Delta z}{\tan\theta_c} \qquad \text{式 5-3}$$

其中，Der 表示河岸侵蝕量；λ 表示土壤孔隙率；$\tilde{q}_b^{\eta}$表示η方向輸砂量；η_r表示座標軸轉換係數；B_h 是河岸高度；Δz表示底床高程變化；θ_c 是安息角。

該模式考量邊坡侵蝕過程中可能發生的邊坡崩塌(slope collapse)，根據使用者輸入之安息角進行修正。當坡度大於此值時即發生崩塌使其回到安息角，並將崩塌量計入泥砂連續方程式（式 5-4）之中。

$$\frac{\partial}{\partial t}(c_b E_b) + (1-\lambda)\frac{\partial z}{\partial t} + [\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + q_{su} - w_f c_b] = 0 \quad \text{式 5-4}$$

將以上公式轉換為$\xi-\eta$座標軸後形成：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{c_b E_b}{J}\right) + (1-\lambda)\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{z}{J}\right) + \left[\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{q_b^{\xi}}{J}\right) + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{q_b^{\eta}}{J}\right) + \frac{q_{su} - W_f c_b}{J}\right] = 0 \cdots E_{sd} \geq E_{be}\frac{c_b}{1-\lambda} \quad \text{式 5-5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{Z}{J}\right) = 0 \quad \cdots \quad E_{sd} \leq E_{be}\frac{c_b}{1-\lambda}$$

式中，ξ、η表示曲線座標軸，J表示座標轉換的一個係數；c_b表示懸浮質的參考濃度；E_b表示底床載層厚度；z是底床高程；q_b^{ξ}、q_b^{η}分別表示ξ和η方向的輸砂量；q_{su}表示向上的懸浮載通量；W_f表示懸浮質沉積速度；E_{sd}表示泥砂層厚度；E_{be}表示平衡狀態時的底床載層厚度。

模式界面主要分為計算條件輸入、格網設定與底圖（圖 5-8）。首先，設定網格。網格設定可使用模式內建計算工具快速創建。接著，根據需求輸入計算條件，最後再輔以適合的底圖。以下將實際操作三組案例，主要展現該模式在模擬特定形貌（交互砂洲、蜿蜒侵蝕）的能力。

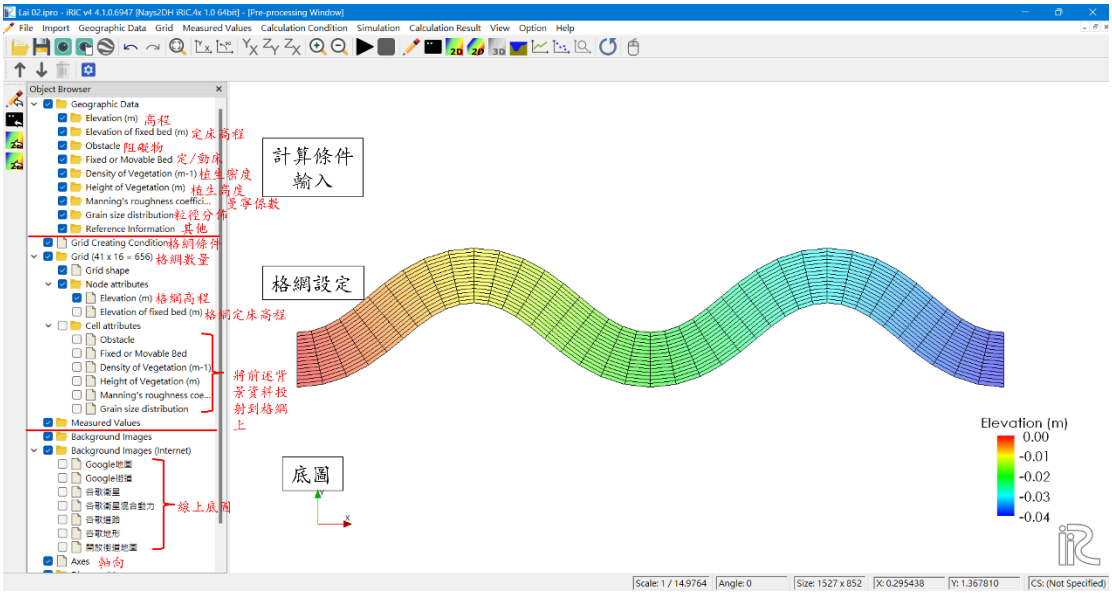


圖 5-8 Nays2DH 模式界面

二、範例一：交互砂洲

此範例模擬堤防束縮的複式蜿蜒河道的形貌演變，設定條件及格網如表 5-1 及圖 5-9 所示。蜿蜒河道因凹岸沖刷、凸岸堆積的特性常形成交替砂洲，此現象也可由磺溪主流歷史影像觀察出。結果如圖 5-10 所示，此處所展現之物理量為高程變化，並可明顯看出交互砂洲形成。

表 5-1 堤防束縮蜿蜒河道之計算條件

參數	值
坡度	0.01
粒徑	0.34 mm
粗糙度	0.013 (河道) 0.05 (灘地)
蜿蜒角度	40°
河岸坡度	2：1
上游流量	0.002 m^3/s
下游水位	均勻流

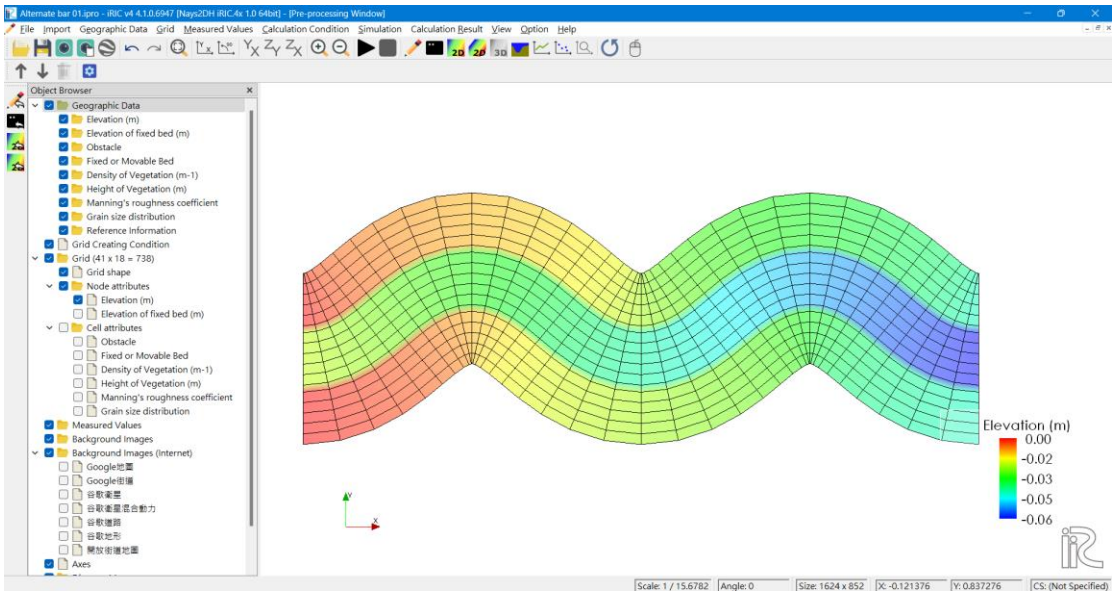


圖 5-9 堤防束縮之蜿蜒河道網格

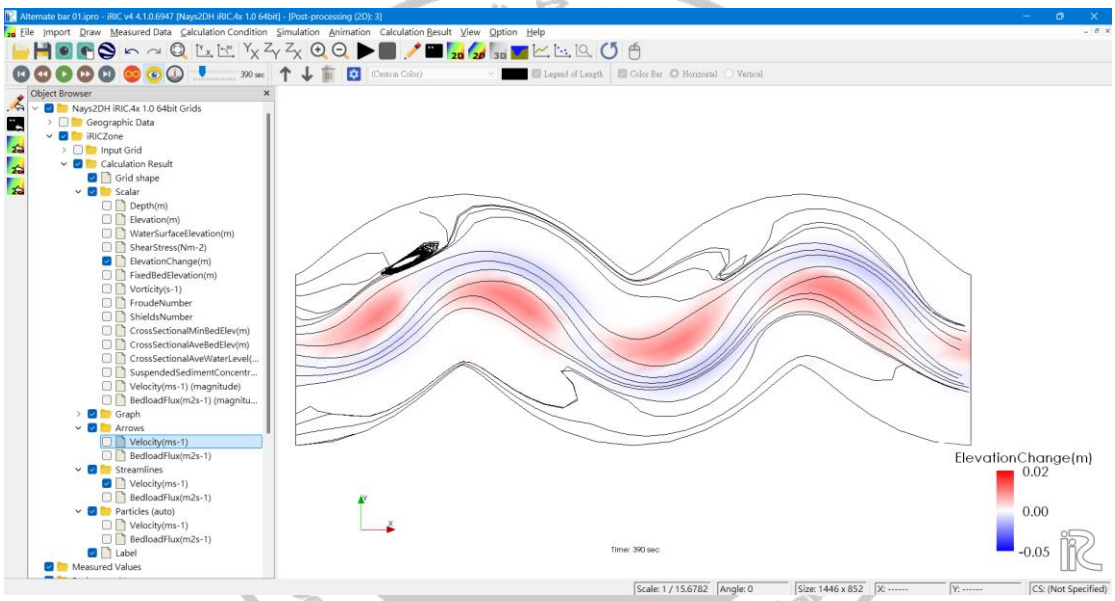


圖 5-10 交互砂洲模擬成果

三、範例二：蜿蜒侵蝕

此範例測試該模式河岸侵蝕與邊坡崩塌功能。其計算條件如表 5-2 所示，網格設定如圖 5-11 所示。從圖 5-12、圖 5-13 可以發現，原先設定的格網形狀受河岸侵蝕與崩塌影響，自動進行邊界網格拓寬，展現蜿蜒河道的變化趨勢。

表 5-2 蜿蜒河道計算條件

參數	值
坡度	0.01
粒徑	0.34 mm
粗糙度	0.013
上游流量	0.002 m^3/s
下游水位	均勻流

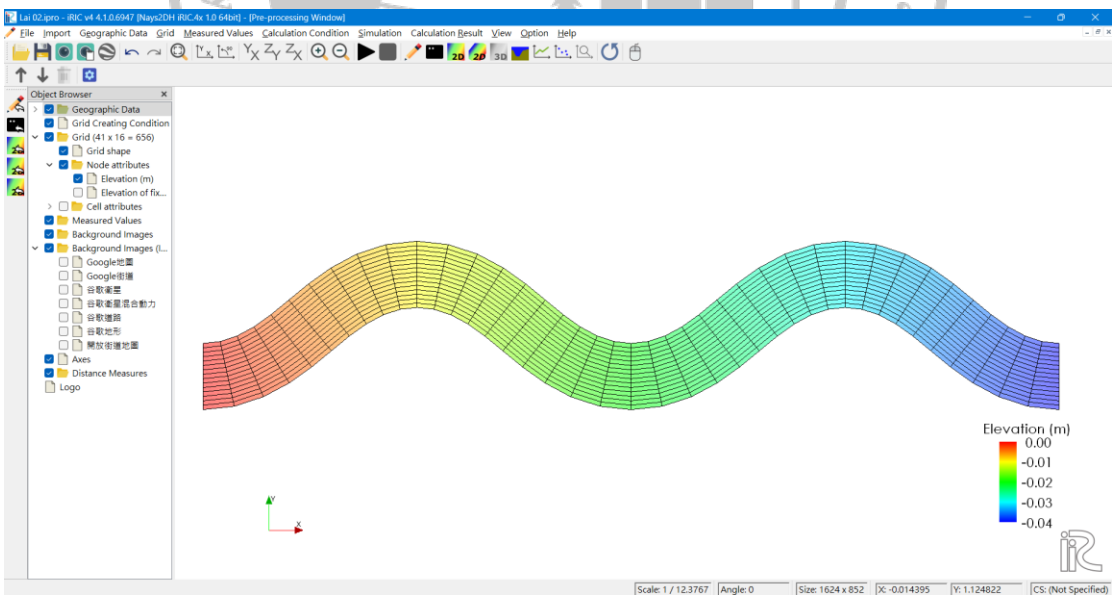


圖 5-11 蜿蜒河道格網設定

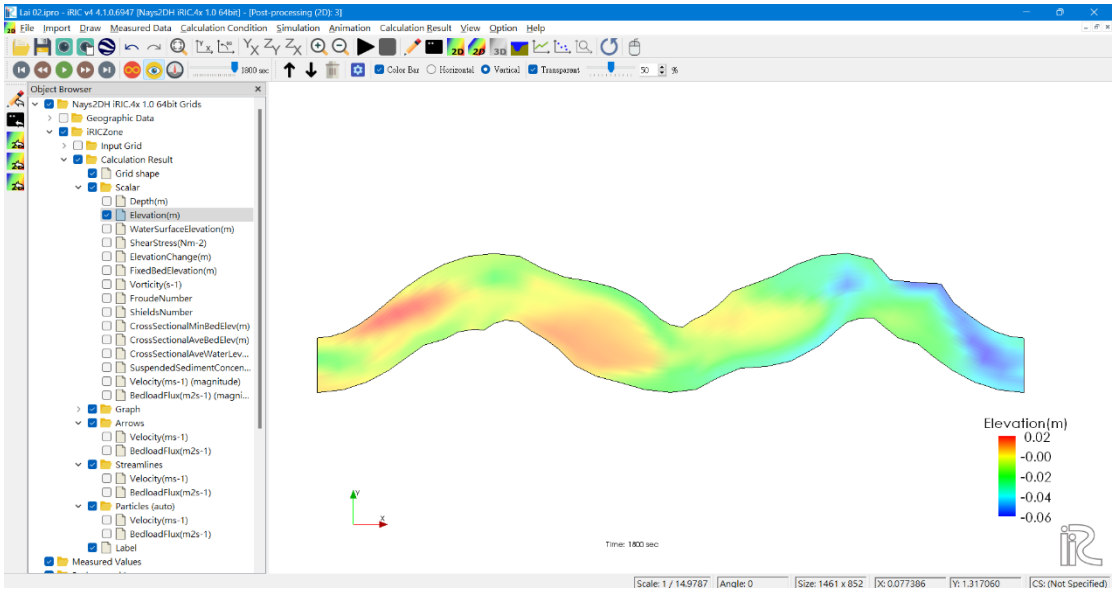


圖 5-12 河岸侵蝕與崩塌後之底床高程

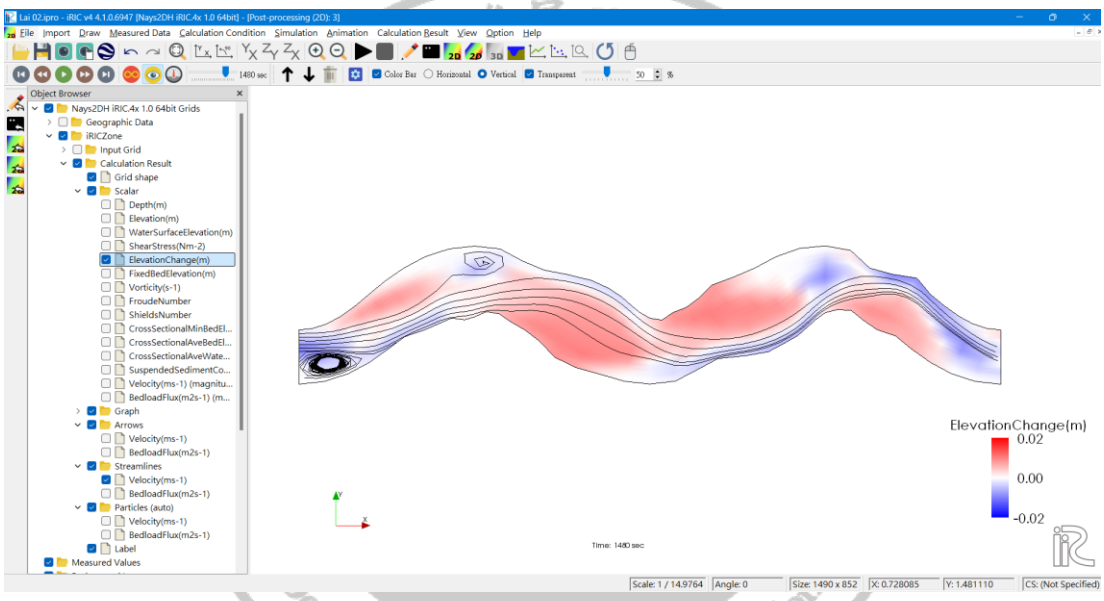


圖 5-13 河岸侵蝕與崩塌後之底床高程差

四、範例三：平直渠道蜿蜒化

此範例嘗試重現 Asahi et al. (2013)使用該模式模擬平直渠道發展為蜿蜒河道之歷程（圖 5-14），模式參數依照 Asahi et al. (2013)進行設定，盡量於相同條件下進行模擬，其結果成功模擬出相似之河道蜿蜒化現象，然目前尚無法觀察到下游段彎道之細部發展狀況，推測原因為本計畫目前使用的免費版本並未納入砂洲與漫灘轉換(bar-floodplain conversion)之功能，才造成結果與 Asahi et al. (2013)之成果有些差異，但仍可展現蜿蜒河道之下游遷移(downstream migration)和側向遷移(lateral migration)的現象（圖 5-15）。

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

Table 1. Discharges and Froude Numbers for the Three Cases Investigated

Case	Stage	Q (m^3/s)	Duration (s)	W_0 (m)	Slope	Bank Height (m)	H_c (m)	d (mm)	D_0 (m)	V_0 (m/s)	T_{dry} (s)	Fr	τ_*
Case 1	-	0.003	Constant	0.2	0.004	0.03	0.01	0.9	0.03	0.449	10.0	0.79	0.09
Case 2	-	0.0008	Constant	0.2	0.004	0.03	0.01	0.9	0.02	0.265	10.0	0.69	0.04
Case 3	high	0.003	800	0.2	0.004	0.03	0.01	0.9	0.03	0.449	10.0	0.79	0.09
	low	0.0008	400	0.2	0.004			0.9	0.02	0.265		0.69	0.04

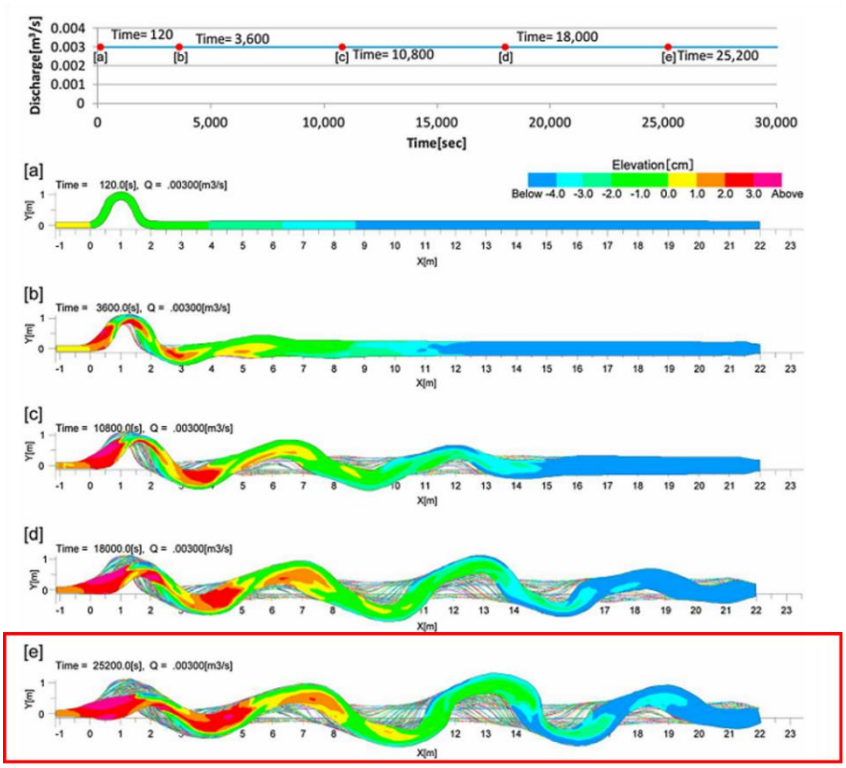


圖 5-14 使用 Nays2DH 模擬平直渠道蜿蜒化(Asahi et al., 2013)

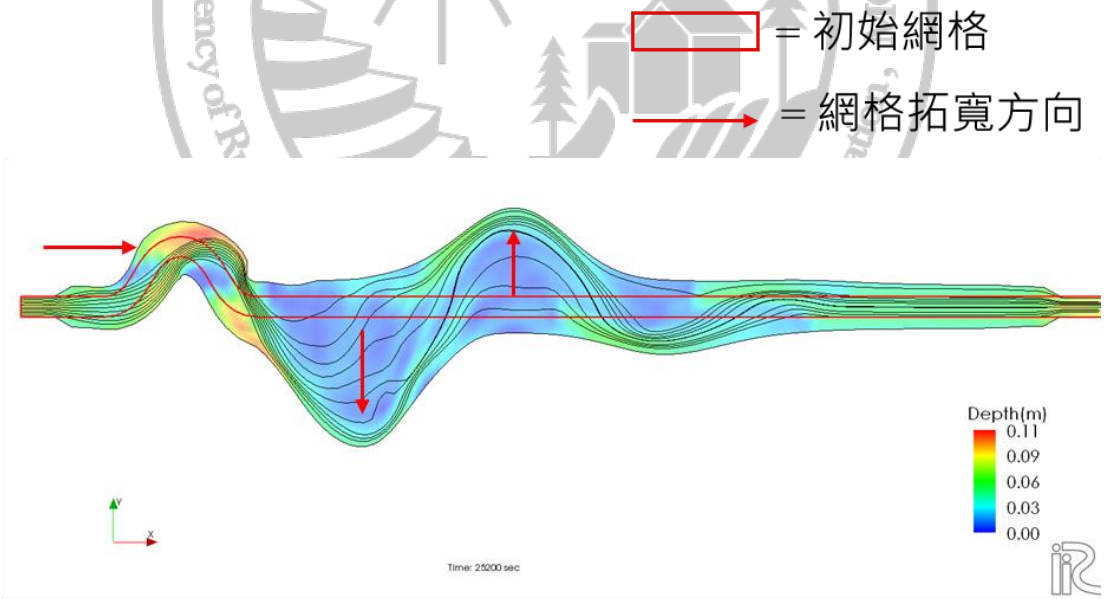


圖 5-15 本計畫重現 Asahi (2013)之結果

第三節 HEC-RAS 耦合 BSTEM 模式

HEC-RAS 係由美國陸軍工兵團(U.S Army Corps of Engineers)轄下之水文工程中心(Hydrologic Engineering Centre, HEC)所開發之河川分析系統，具備一維及二維水理模擬及輸砂能力，可處理亞臨界流、超臨界流及混合流之水面剖線演算，也能模擬構造物如橋墩、水壩等阻擋水流的效果。在輸砂方面，模式具備模擬非均勻粒徑泥砂的能力，可考量由此造成的級配與護甲現象，已廣泛應用在台灣的研究與實務工作中。然而，HEC-RAS 僅能模擬垂向沖淤變化，無法模擬橫向侵蝕(lateral erosion；圖 5-16)。本計畫為了探討彎道對潭瀨演化的影響，橫向侵蝕將扮演影響彎道發育的重要角色，因此進行 HEC-RAS 耦合 BSTEM 模組之嘗試。

BSTEM 係美國農業部(USDA)發展的河岸穩定與坡腳沖刷模式(Bank Stability and Toe-Erosion Model)，最初使用 Excel 之 Solver 功能計算橫向侵蝕、安全係數與崩塌現象，後來成功整合到 HEC-RAS 中。HEC-RAS 自 5.0 版本起可順利與 BSTEM 連結，考量更完整的上下游輸砂與邊坡侵蝕、河岸退縮現象。

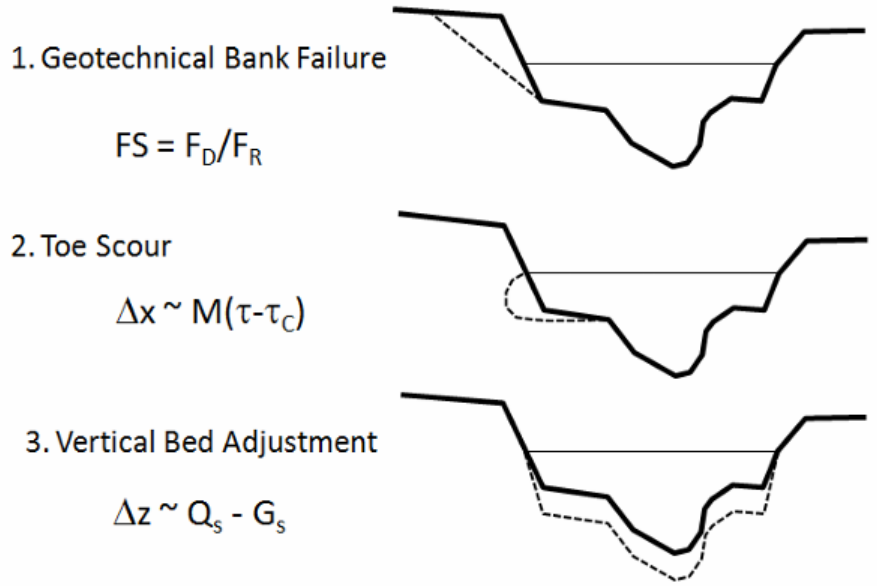


圖 5-16 一維斷面中的垂向沖淤與橫向侵蝕行為。1.河岸崩塌；2.坡腳侵蝕；3.垂向沖淤

HEC-RAS 之控制方程式為質量守恆方程式（式 5-6）與動量守恆方程式（式 5-7）：

$$\frac{\partial A_T}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}-q_1=0 \qquad \text{式 5-6}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial QV}{\partial x}+gA\left(\frac{\partial z}{\partial x}+S_f\right)=0 \qquad \text{式 5-7}$$

式中，A_T 表示通量面積；Q 表示流量；q_1 表示單位長度的側向流入流量；V 表示流速(m/s)，z 表示底床高程(m)，S_f 表示能量坡度。

BSTEM 設定界面位在 HEC-RAS 的泥砂資料(sediment data)中（圖 5-17），一般若不需考量河岸退縮，僅需設定第一欄的輸砂參數包含沖刷深度、動床邊界、河床質資料等與第二欄的邊界條件；若需考量河岸退縮則需於第三欄進一步設定河岸與坡腳資料。最後，在泥砂輸

出(sediment output)視窗中將輸出級別(output level)設為「6」，即能產出 BSTEM 模擬之結果。

圖 5-17 為泥砂資料中之 BSTEM 輸入界面，可見在邊坡侵蝕模組中斷面被分為左岸和右岸，需各別輸入河岸邊界(Bank Edge Station)、坡腳(Toe Station)和河岸材料(Bank Material)。該模式根據使用者輸入的動床邊界與坡腳，使垂向沖淤限制在動床邊界內，側向的侵蝕始於坡腳以外的地方。河岸邊界與坡腳之間將被視為坡面，如若發生崩塌，模式會將破壞面與坡面所夾之面積作為砂源，帶入輸砂模擬中。另外，河岸除了可以自定粒徑分佈、臨界剪應力、可侵蝕率等土壤參數外(圖 5-18)，亦可選擇模式內建之資料庫(圖 5-19)。該模式也供使用者進一步設定垂向河岸材料變化，模擬真實河岸中土壤分層的現象。

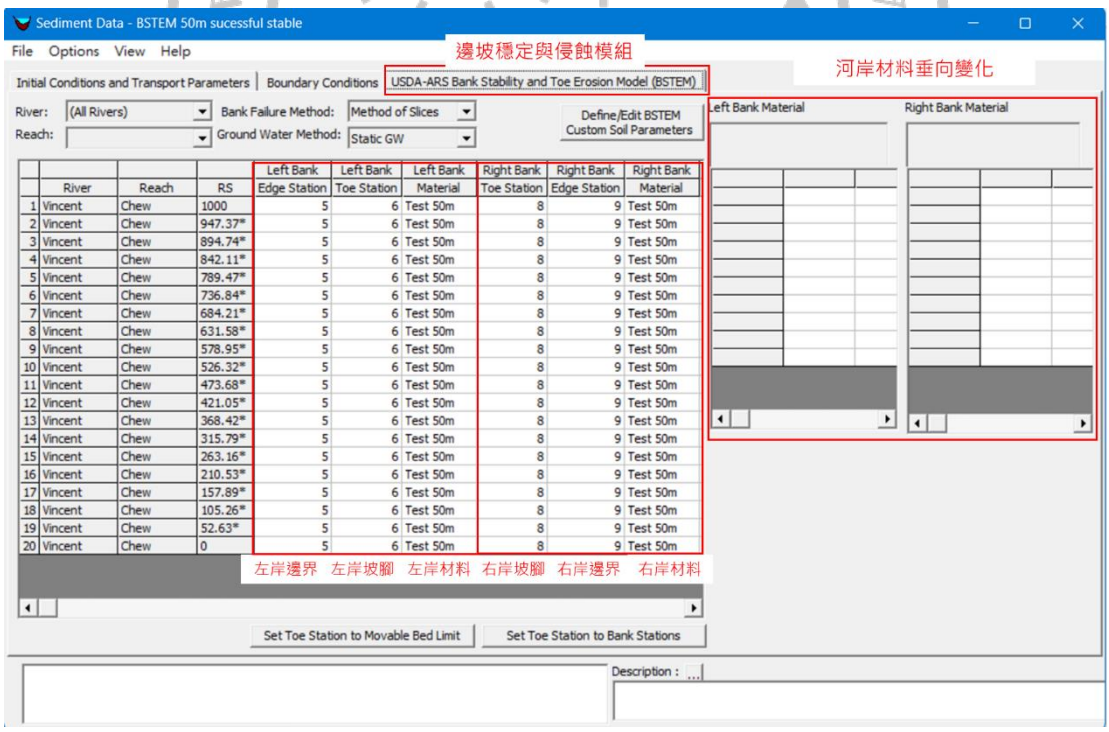


圖 5-17 BSTEM 設定界面

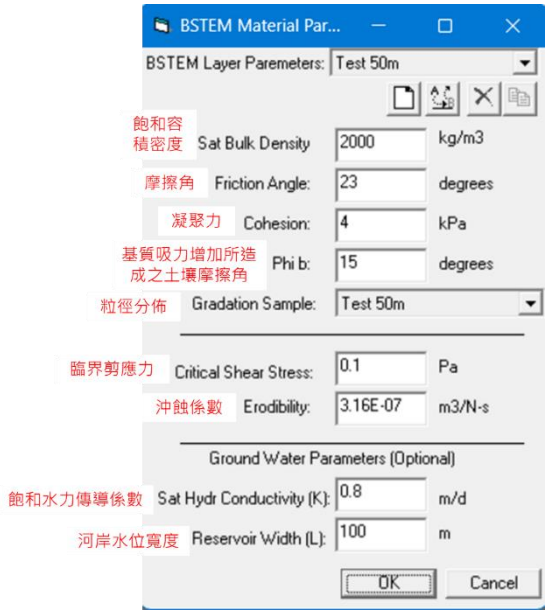


圖 5-18 河岸土壤參數

Table 2. Default materials and material parameters

Default Material Type	Saturated Unit Weight (lbf/ft³)	Friction Angle (□)	Cohesion (lb/ft²)	□ □ □ᵇ	Critical Shear (lb/ft²)	Erodibility (ft³/lbf-s)
Boulders	127.3	42.0	0	15	10.4	2.85E-05
Cobbles	127.3	42.0	0	15	2.59	5.73E-05
Gravel	127.3	36.0	0	15	0.23	1.92E-04
Coarse Angular Sand	117.8	32.3	8.354	15	0.0106	8.95E-04
Course Round Sand	117.8	28.3	8.354	15	0.0106	8.95E-04
Fine Angular Sand	117.8	32.3	8.354	15	0.00267	8.95E-04
Fine Round Sand	117.8	28.3	8.354	15	0.00267	8.95E-04
Erodible Silt	114.6	26.6	89.81	15	0.00209	2.01E-03
Moderate Silt	114.6	26.6	89.81	15	0.1044	2.86E-04
Resistant Silt	114.6	26.6	89.81	15	1.0443	8.91E-05
Erodible Soft Clay	112.7	26.4	171.26	15	0.00209	2.01E-03
Moderate Soft Clay	112.7	26.4	171.26	15	0.1044	2.86E-04
Resistant Soft Clay	112.7	26.4	171.26	15	1.0443	2.01E-03
Erodible Stiff Clay	112.7	21.1	263.16	15	14.6	2.01E-03
Moderate Stiff Clay	112.7	21.1	263.16	15	0.1044	2.86E-04
Resistant Stiff Clay	112.7	21.1	263.16	15	1.0443	2.01E-03

圖 5-19 HEC-RAS 內建之河岸材料參數

為測試 HEC-RAS 耦合 BSTEM 之能力，本計畫使用 HEC-RAS 提供之水庫大壩沉積案例進行模擬。(Cantelli et al., 2004)研究發現拆壩後可能造成壩前垂向及側向不同階段不同程度的侵蝕現象，本計畫因此使用該模式進行拆壩模擬，同時觀察壩前斷面之側向侵蝕。首先，

根據該案例設定邊界條件與橫向構造物（圖 5-20），利用案例提供之50 年流量資料進行拆壩前設定邊界條件，模擬現壩前淤積、壩後沖刷之形貌變化（圖 5-21）。最後，移除橫向構造物並結合 BSTEM 模組，使用相同之 50 年流量資料進行模擬，成功同時觀察到發生壩前垂向與側向之侵蝕現象（圖 5-22、圖 5-23）。

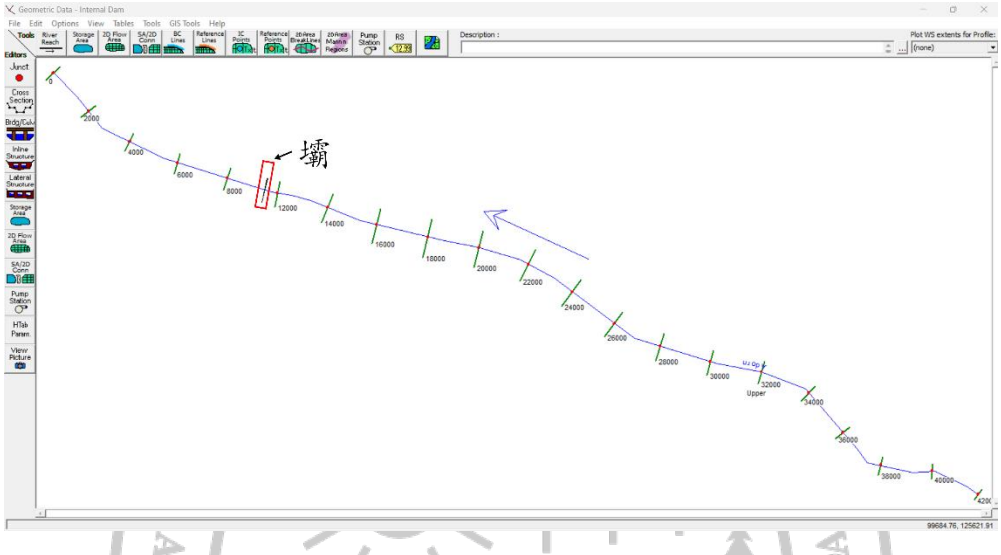


圖 5-20 水庫沉積案例

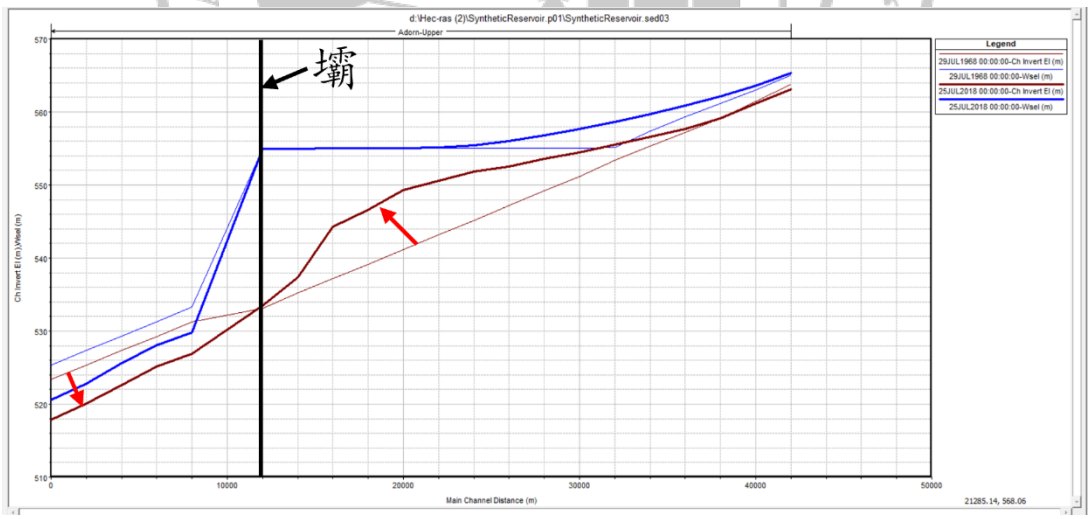


圖 5-21 拆壩前縱向高程與水面高程變化

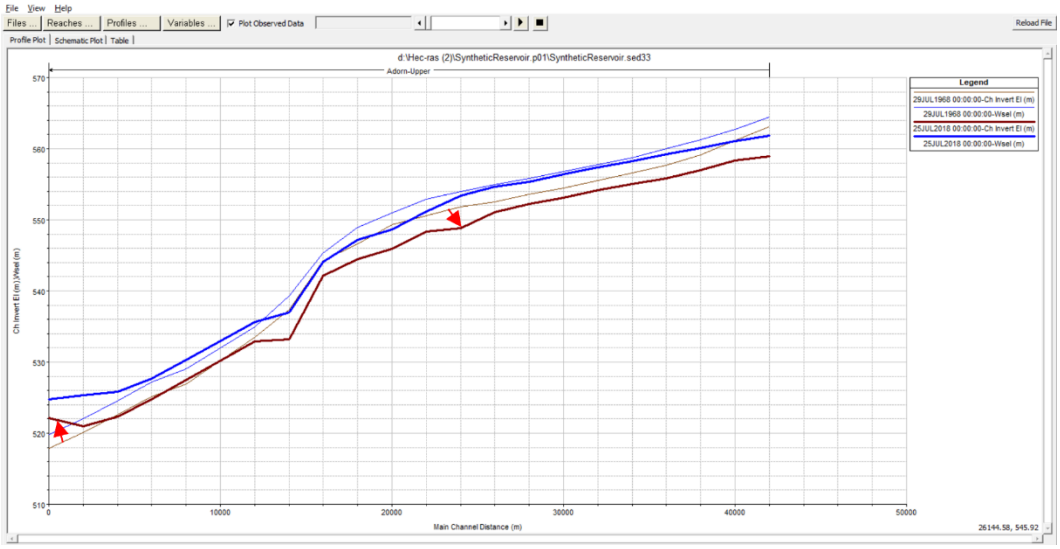


圖 5-22 拆壩後縱向高程與水面高程變化

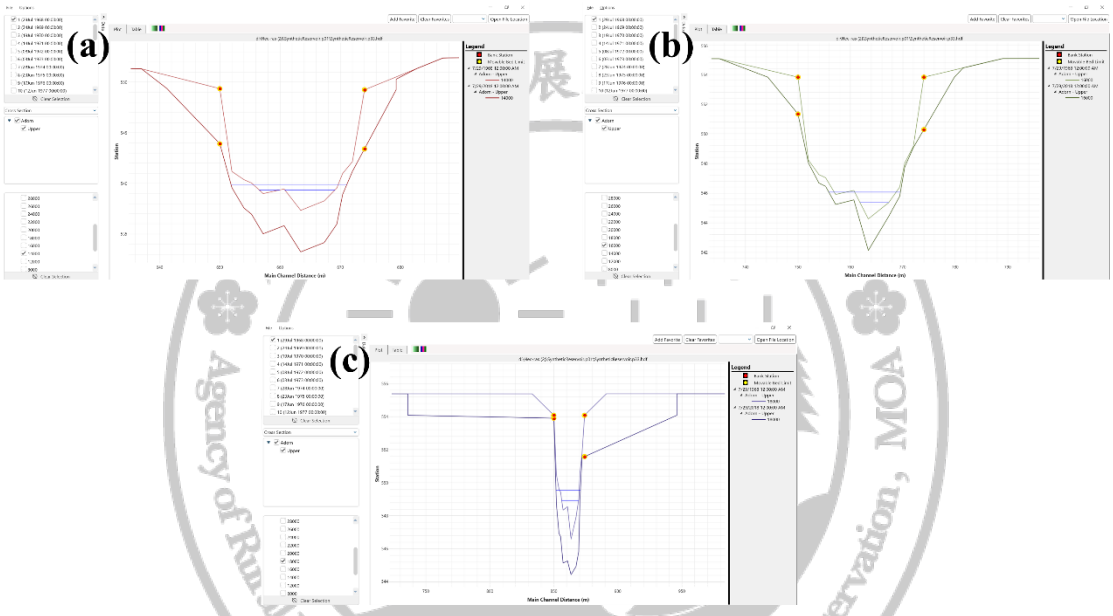


圖 5-23 於河心(a)累距 14,000 公尺處、(b)累距 16,000 公尺處、(c)累距 18,000 公尺處之斷面觀察拆壩後壩前橫斷面側向侵蝕現象

第六章　結論

本計畫整合生態水文模式、水動力模式 SRH-2D、棲地廊道模式並進行模組化（圖 6-1），對於清水溪之水文、水理、生態特徵多有掌握，同時導入邏輯式迴歸分析法，對於多種之景觀指標與棲地品質進行連結，找出其中關連性與重要指標。

各模組之重要成果說明如下：(1)水文模組進行集水區範圍內的水資源蘊藏量進行估算，由降雨量轉化成逕流量後，透過超越機率分析及小波分析，找出清水溪之流量特徵，以及流量變化之時間週期，提供水動力模式邊界條件之用；(2)水動力模式係用來模擬局部河道之二維水深及流速，以掌握研究區域之流場分佈；(3)以棲地廊道模式完成棲地單元辨識及棲地適合度計算，其使用之重要參數係為水動力模式提供之流速、水深資料，接著透過景觀指數計算，了解棲地單元空間分佈特徵；(4)採用邏輯式迴歸分析法篩選出重要之景觀指標，與棲地品質進行比較分析，成果顯示在淺流與淺瀨棲地單元中，增加 PLAND、TE、AWMSI、ENN，或是降低 NP，皆可幫助提升高品質棲地形成之機率；而在深流棲地單元則可透過增加 NP，或是減少 PLAND、TE、AWMSI、ENN，達到提升高品質棲地形成機率之目的。顯示在不同之棲地單元中，影響其形成高品質棲地之關鍵景觀指標有所相異，於執行工程、棲地營造時可根據調整景觀指標，來達到生態

棲地保育或功能提升之目的。

另考量第二年度之河川形貌與棲地結構演化研究，本計畫於今年度已先行探討並調查可能之研究區域，並測試多種河道演變數值模式，作為明年度之持續研究基礎，預期可增加河川彎道演化之研究深度。

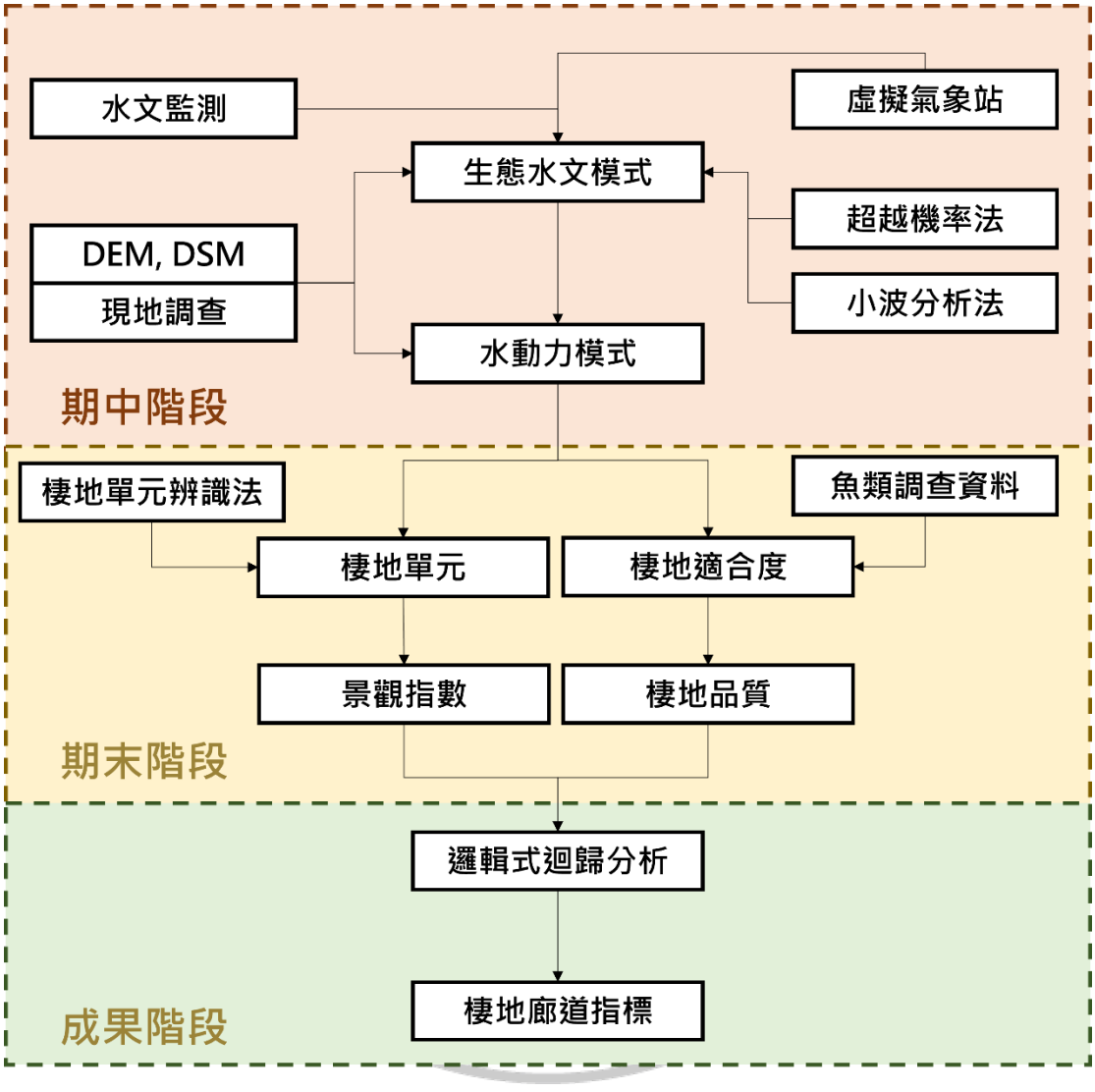


圖 6-1 第一年研究整合之評估模組運作流程

參考文獻

1. Asahi, K., Shmizu, Y., Nelson, J., & Parker, G. (2013). Numerical simulation of river meandering with self-evolving banks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *118*. https://doi.org/10.1002/jgrf.20150

2. Bovee, K. D. (1982). *A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology* (Vol. 1). Western Energy and Land Use Team, Office of Biological Services, Fish and ….

3. Cantelli, A., Paola, C., & Parker, G. (2004). Experiments on upstream-migrating erosional narrowing and widening of an incisional channel caused by dam removal. *Water Resources Research*, *40*(3).

4. Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. (Vol. N.Y.). McGraw-Hill.

5. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology* (Vol. N.Y.). McGraw-Hill.

6. Clarke, I., Stokes, Z., & Wallace, R. (2010). Habitat restoration planning guide for natural resource managers. *Government of South Australia, through Department of Environment and Natural Resources, Adelaide*.

7. Daubechies, I. (1990). THE WAVELET TRANSFORM, TIME-FREQUENCY LOCALIZATION AND SIGNAL ANALYSIS. *Ieee Transactions on Information Theory*, *36*(5), 961-1005. https://doi.org/10.1109/18.57199

8. Elkins, E. M., Pasternack, G. B., & Merz, J. E. (2007). Use of slope creation for rehabilitating incised, regulated, gravel bed rivers. *Water Resources Research*, *43*(5).

9. Entwistle, N., Heritage, G., Milan, D. J. R. R., & Applications. (2019). Ecohydraulic modelling of anabranching rivers. *35*(4), 353-364.

10. Fang, W. T., Cheng, B. Y., Shih, S. S., Chou, J. Y., & Otte, M. L. (2016). Modeling driving forces of avian diversity in a spatial configuration surrounded by farm ponds. *Paddy and Water Environment*, *14*(1), 185-197. https://doi.org/10.1007/s10333-015-0489-8

11. Hassan, M. A., Radić, V., Buckrell, E., Chartrand, S. M., & McDowell, C. (2021). Pool-riffle adjustment due to changes in flow and sediment supply. *Water Resources Research*, *57*(2), e2020WR028048.

12. Heber Green, W., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Phyics. *The Journal of Agricultural Science*, *4*(1), 1-24. https://doi.org/10.1017/S0021859600001441

13. Horton, R. E. (1939). Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity. *Transactions-American Geophysical Union*, *20*, 693-711. <Go to ISI>://WOS:000202046100012

14. Kuo, P. H., Shih, S. S., & Otte, M. L. (2021). Restoration recommendations for mitigating habitat fragmentation of a river corridor. *Journal of Environmental Management*, *296*, 12, Article 113197. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113197

15. MacVicar, B., & Thompson, D. (2023). The diversity of pool-riffle morphologies. *Geomorphology*, *440*, 108868.

16. Matthews, W. J. (1986). Fish Faunal Structure in an Ozark Stream: Stability, Persistence and a Catastrophic Flood. *Copeia*, *1986*(2), 388-397. https://doi.org/10.2307/1444997

17. McGarigal, K. (2015). FRAGSTATS help. *University of Massachusetts: Amherst, MA, USA*, *182*.

18. McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., & Ene, E. (2012). FRAGSTATS V2: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. *Forest Science Department, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA*.

19. McGarigal, K., & Marks, B. J. (1994). FRAGSTATS V2: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure.

Forest Science Department, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA.

20. Mouton, A. M., Schneider, M., Depestele, J., Goethals, P. L., & De Pauw, N. (2007). Fish habitat modelling as a tool for river management. *Ecological Engineering*, *29*(3), 305-315.

21. Philip, J. R. (1969). Theory of Infiltration. In V. T. Chow (Ed.), *Advances in Hydroscience* (Vol. 5, pp. 215-296). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9936-8.50010-6

22. Services, W. S. D. o. E. (1981). *Standards for the Development of Habitat Suitability Index Models* (Vol. 103). Division of Ecological Services, US Fish and Wildlife Service, Department of ….

23. Shih, S.-S., Lee, H.-Y., & Chen, C.-C. (2008). Model-based evaluations of spur dikes for fish habitat improvement: A case study of endemic species Varicorhinus barbatulus (Cyprinidae) and Hemimyzon formosanum (Homalopteridae) in Lanyang River, Taiwan. *Ecological Engineering*, *34*(2), 127-136.

24. Shih, S.-S., & Lee, K.-Y. (2023). Time-series-based habitat model development for surface water management on endangered aquatic plant Isoetes taiwanensis conservation in mountain wetlands. *Ecological Indicators*, *154*, 110489.

25. Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *79*(1), 61-78. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:Apgtwa>2.0.Co;2

26. Weibull, W. (1939). *A Statistical Theory of the Strength of Materials*. Generalstabens litografiska anstalts förlag. https://books.google.com.tw/books?id=otVRAQAAIAAJ

27. White, M. A., Schmidt, J. C., & Topping, D. J. (2005). Application of wavelet analysis for monitoring the hydrologic effects of dam operation: Glen Canyon Dam and the Colorado River at Lees Ferry, Arizona. *River Research and Applications*, *21*(5), 551-565.

https://doi.org/10.1002/rra.827

28. Zolezzi, G., Bellin, A., Bruno, M. C., Maiolini, B., & Siviglia, A. (2009). Assessing hydrological alterations at multiple temporal scales: Adige River, Italy. *Water Resources Research*, *45*(12). https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2008WR007266

29. 經濟部水利署第十河川局，2014，磺溪(含支流及河口海域)河川情勢調查。
30. 經濟部水利署第十河川局，2017，磺溪治理規劃檢討報告。
31. 經濟部水利署第十河川局，2020，磺溪水系風險評估。
32. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2016，河川原生魚種及棲地適合度曲線調查(2/5)。

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	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： 1. 計畫說明書請確認係新提計畫或延續計畫。所述第一年延續水土保持署 112 保發計畫成果，又欲於 113 年度建立評估模組、114 年度建立彎道評估模組，應予詳述 112 保發計畫成果及與後續年度內容之區別。 2. 本計畫是二年計畫之第一年,全期計畫預期發展一套完整的，包括：生態水文模式、水動力模式、景觀指標計算模式，具以分析並提出「新穎的生態基流量計算模式（第一年）」，並發展「潭、瀨、流棲地結構演化模式」及評估集水區產砂、「NbS 生態疏濬」等影響以建立魚類等水生物之「河溪廊道品質指標（第二年）」。	感謝委員建議，以下將就各項進行說明： 1.本計畫係屬新提計畫，主要目的在建立一套完整的水文、水理、流態、棲地分析以提出新穎的生態基流量計算模式（第一年），並發展潭、瀨、流棲地結構演化模式及評估集水區產砂、NbS 生態疏濬等影響以建立魚類等水生物之河溪廊道品質指標（第二年）。而 112 保發計畫成果係以既有構造物（防砂壩）發展小水力發電，並兼顧下游濱溪生態系統之保育，所發展之「防砂壩小水力發電潛能評估模組」為主要成果，與本計畫之研究目的有所不同。惟本計畫初步規劃之研究區域新北市金山區磺溪與112保發計畫屬相同場域，於 112 保發計畫成果已蒐集大量該區域之基本資料（數值高程模型、水文監測成果等），並對於該場域進行水理模擬、水域棲地分析，大致可掌握該場域之水理特徵及棲地分布，故本計畫於第一年度將以此作為基礎，發開新穎之生態基流量計算模式，其著重於河川流態於乾溼季對於生態基流量、棲地結構、魚類棲地適合度與棲地廊道品質之

		影響；第二年度則應用並深化第一年度之成果，探討蜿蜒河道二次流作用下，潭瀨流結構演化及回饋，結合生態疏濬強化河川生態系統之韌性。 2.本計畫第一年度將透過結合多種模式，發開新穎之生態基流量計算模式，第二年度則應用並深化第一年度之成果，發展「潭、瀨、流棲地結構演化模式」，針對集水區產砂、河川形貌演化，思考「NbS 生態疏濬」以建立魚類等水棲生物之「河溪廊道品質指標」。
二	有關計畫書格式及經費審查部分： 1. 本計畫請以補助經費 750 仟元調整編列。 2. 本年度執行期限請修正為自 113 年 2 月 7 日至 113 年 12 月 31 日。(10.9 個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限 10.9 個月內編列。年終獎金亦配合計畫期程。 3. 25-00 物品，單價未達一萬元之消耗或非消耗品(如墨水匣、碳粉匣、電腦耗材)購置費用屬之，請細分量化單價數量說明。車輛油料請編在「物品」項下，並應註明車牌號碼(租車者除外)，且不得編列私有車輛油料，油料費用請依時價編列並量化。	感謝委員提醒，經重新審視後，已修正本計畫之經費編列。

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	表 1-1 年度誤植為 112 年，請確認修正。	感謝委員提醒,已修正為 113 年。
二	[評估生態基流量及潭瀨流棲地結構特性與品質]係本研究之目標，請於期末報告詳細說明，勿僅敘說方法論。	感謝建議。本計畫之第一年目標為建立一套完整的水文、水理、流態、棲地分析以提出新穎的生態基流量計算模式,其中包含多種模式之整合與流程建立,並以清水溪進行案例操作,以評估其生態基流量及棲地結構特性與品質。
三	圖 2-2 磺溪流域土壤分佈圖資料來源標注為十河局規劃報告，惟圖中又標示資料來源為水保局，請確認其資料來源為何，其產製年度，才能正確引用。	本計畫引用之土壤分布圖資係由農業部農業試驗所提供,其產製年份為 2020 年，為目前可索取之最新版本,本計畫以該圖資作為基礎,擷取本計畫範圍內之土壤分布圖，如圖 2-2。
四	P2-17，文中提及 20mx20m 數值地形資料來源之產製年度為何？請註明並確認是否為最新之資料。另文中提及前開資料精確度不足，有進行局部地形測量，規劃 181 處測量點結合 20 公尺網格數值資料建立數值模型，其結合之方法為何？重新建立之數值地形模式其解析度提昇至多少？新建立之數值模型之成果為何亦需同時於報告展現，並說明其與原本 20mx20m 數值地形資料之差異。	1. 20 公尺網格數值地形模型係由內政部地政司於 2024 年產製並提供,已確認為目前最新之版本，並補充說明於內文中，詳如 P.2-17~P.2-18。 2. 本計畫以 VBS-RTK 進行局部地形測量,將其測量成果製作 raster 檔案格式圖層與 20 公尺網格數值地形模型套疊,接著使用線性內插之方式即可完成局部地形加密之圖層。 3. 經加密測量後,整體數值地形模型解析度可提升至 1~5 公尺，其原因為 VBS-RTK 測量位於河道中執行,需考量樹木遮蔭是否影響 RTK 連線訊號，同時避免

		流速過快、水深過深、大型石塊阻礙等區域以確保測量人員之安全，故於規劃測量斷面時較難以固定測量斷面間距，於同斷面測量點也容易遇到前述之困難，整體盡量以 3~5 公尺劃設一處測量斷面，同測量斷面內之測量點間則以 1 公尺為間距。另外，新建立之數值地形模型與原本之 20 公尺網格數值之比較與說明詳如圖 3-4。
五	各觀測站雨量統計成果部分，僅以 5 年資料是否足夠？另觀察 2019 年-2023 年月雨量資料，在雨量較豐沛之月份各雨量站高低落差有時相當大(如 2022 年 10 月最高和最低雨量相差約 2000mm，其他也有多個月雨量落差較大)，結論整體降雨趨勢和其他 4 處觀測站一致是否有相關統計數據佐證？採何程統計分析認定？請說明。	1. 本計畫預期分析近年清水溪之流態特徵，故以近 5 年之降雨量進行日流量轉換較具有代表性，並可由小波分析計算逐年之 GWPS 比值，找出其 GWPS 相對較為穩定之重現期，結合超越機率分析，推算其重現其流量作為清水溪較為穩定之流量。 2. 經重新檢視降雨量資料之建立，清水溪子集水區中無降雨量觀測站，故本計畫假設一虛擬測站代表該子集水區之降雨量事件，即清水溪測站，其降雨量資料係由其他鄰近之 4 處已知測站之降雨量資料，透過以距離倒數為權重之四象限法進行資料建立，因此清水溪測站之整年降雨趨勢會與距其最近之三和測站之降雨趨勢最為接近，詳如 P.4-4~P.4-5。
六	景觀指數計算部分，列了許多景觀生態指標，初步適合樣區之指標為何？其採用理由？景觀生態指標計算基礎圖資來源(棲地景觀型態分類)，如等以	1. 景觀指數係用以評估棲地景觀特徵的空間現象，目前選以區塊數量 (NP) 、景觀比例 (PLAND)、總邊(TE)、邊緣密度 (ED)、平均形狀指標(MSI)、面積

	上均未說明，應於報告中補充。	加權平均形狀指標(AWMSI)、Shannon 多樣性指標(SHDI)、Simpson 多樣性指標(SIDI)等指標進行棲地品質評估。NP、PLAND 可用以了解棲地單元之數量與面積佔比；TE、ED 可用以了解棲地單元與其他棲地單元之接觸機會；MSI、AWMSI 可用以了解棲地單元之形狀；SHDI、SIDI 可用以了解棲地單元之種類數量與其多樣性。 2. 景觀指標計算之圖資則採用本計畫完成之水動力模擬成果進行棲地單元辨識，所獲得之棲地單元分佈成果圖，以瞭解其於空間上之分布與組成。
七	參考文獻所列 33 則，大部分與內文之關聯難以確認，請標示清楚，藉以清楚了解方法學依據、資料來源。	感謝寶貴建議，本計畫已重新檢視本報告所使用之參考文獻，並於內文中註記參考來源，包含作者姓名及刊登年份，且完整列出文獻之其他作者、刊登之國際期刊或書籍名稱、出版地等詳細資訊於 P.參-1~P.參-3。

附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	關於地景指標運用水域棲地之邊界劃定,可否反應實際之棲地組成和物種互動關係?有無驗證方式?	景觀指標可幫助了解各水域棲地之空間分佈與幾何特徵，可有效掌握水域棲地之組成，並推估不同水域棲地間之交互作用。與物種之關聯性則可由棲地適合度曲線評估，以反映不同物種喜好之水域環境。驗證方法一般多依靠現地調查，水域棲地可透過水深、流速調查掌握其分佈，物種則需透過生態調查或長期監測，才可了解其主要使用之水域棲地。
二	LCP 分析之阻力及連通度在水域棲地應如何設定?	LCP 係由上游起算，以阻力(resistance)最小之水域向下游連線而成，可反映生物由上游向下游移動最有可能選擇之路徑。當河道中有大範圍高阻力之區域，LCP 需沿著此範圍連線，增加其路徑長，同時也顯示生物之棲地廊道較可能受到壓縮，需要花費更多時間及體力移動，反之，若 LCP 可沿主流連線形成，對於生物移動較為便利，在遷移、躲避、覓食上可更加順暢。