
**結合數據科學與機器學習建立集水區土
砂來源之分析系統 (1-3)**

**Building an Analysis System of the
Watershed Sediment Yield by Data Science
and Machine Learning Approaches (1-3)
(成果報告書)**

執行單位：逢甲大學

執行期間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：黃振家 副教授

共同主持人：連惠邦 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國一一三年十二月

結合數據科學與機器學習建立集水區土砂來源之分析系統 (1-3)

摘要

台灣現行水庫之淤積率已接近 30 %，近 20 年來頻繁發生的短延時強降雨事件加劇土砂災害強度。進而大幅增加水庫集水區保育的風險。本研究以水庫永續發展為目標，擘劃三年藍圖為：分析系統 → 治理規則 → 成效評估，第一年度主要工作為跨域整合發展結合數據科學與機器學習建立集水區土砂來源分析系統，以理解土砂運移模式，並發展合理推估土砂產量的技術。本計畫已完成歷史文獻回顧、基本資料收集、歷史災害分析，並利用水土評估工具 (SWAT, Soil Water Assessment Tool) 合理模擬集水區產砂量，作為建立人工神經網路之訓練資料。成果顯示，預測模式能夠預測石門不同子集水區之尖峰產砂時間及總產砂量，並初步推估產砂熱點。本計畫於第一年度所建立之集水區土砂來源分析系統可於後續年度持續優化，在了解集水區產砂熱點後可做為河道及坡面治理工程佈局之參考，最終評估治理成效，以求達到減砂入庫之終極目標。

關鍵詞：土砂來源分析系統、產砂熱點、治理成效、減砂入庫

Building an Analysis System of the Watershed Sediment Yield by Data Science and Machine Learning Approaches (1-3)

Abstract

Taiwan is a high-risk area for sedimentation disasters, and the current deposition rate of reservoirs has nearly reached 30%, making the effective management of sediment sources in the watershed crucial for sustainable reservoir development. This study proposes a three-year blueprint: System Analysis, Management Rules, and Effectiveness Evaluation. The primary task of the first year is to develop an analysis system for sediment yield sources in the catchment area by integrating data science, SWAT (Soil Water Assessment Tool) model, and machine learning across disciplines. The results indicate that the developed system effectively predicts the peak sediment yield timing and total sediment yield amount for different sub-watersheds and preliminarily identifies potential sediment hotspots. The results indicate that the developed system effectively predicts the peak sediment yield timing and total sediment yield for different sub-watersheds, while preliminarily identifying potential hotspots. In the following year, the system can be further optimized and utilized for planning engineering construction. Ultimately, this project will contribute to achieving the overarching goal of reducing sediment inflow into the reservoir.

Keywords: sediment yield analysis system, sediment hotspots, Effectiveness Evaluation, sediment reduction.

目次

摘要.....	I
Abstract.....	I
目次.....	II
表次.....	IV
圖次.....	V
第一章 緒論	1-1
第一節 研究緣起與目的	1-1
第二節 關鍵課題	1-2
第三節 研究目標	1-5
第二章 研究區域	2-1
第一節 石門水庫資料	2-2
第二節 曾文水庫資料	2-18
第三章 文獻回顧	3-1
第一節 傳統分析方式	3-2
第二節 分析系統之應用	3-3
第三節 分析系統之優化	3-4
第四章 研究方法	4-1
第一節 SWAT 理論基礎.....	4-1
第二節 預測系統之演算法簡介	4-11
第五章 研究成果	5-1
第一節 SWAT 成果	5-1
第二節 預測模型建立	5-9
第三節 預測模式應用	5-13
第六章 應用層面	6-1

第一節	產砂熱區評估	6-1
第二節	實際應用及串聯	6-4
第三節	第一年及整體進度說明	6-5
第七章	結論	7-1
第一節	結論	7-1
第二節	未來工作	7-2
參考文獻.....		參-1
附錄一	期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄一-1
附錄二	期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄二-1
附錄三	期末成果發表簡報	附錄三-1
附錄四	期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄四-1

表次

表 2-1 石門水庫集水區內氣象站及雨量站資料表	2-10
表 2-2 石門水庫集水區內雨量站降雨量統計表	2-10
表 2-3 石門水庫集水區內流量站平均流量統計表	2-11
表 2-4 石門水庫集水區內水位站平均水位統計表	2-11
表 2-5 近年颱風庫容特徵參數分析整理表	2-12
表 2-6 歷年颱風事件資料統計表.....	2-15
表 2-7 曾文水庫集水區內雨量站資料表.....	2-25
表 2-8 曾文水庫集水區內各雨量站降雨量統計表	2-25
表 2-9 曾文水庫集水區內水位站平均水位統計表.....	2-25
表 2-10 曾文水庫歷年颱風豪雨事件入流出流資料表	2-26
表 4-1 水保因子對照表(WISCHMEIER AND SMITH,1978)	4-5
表 4-2 KODATIE EQUATION 之河川分類及迴歸係數.....	4-8
表 4-3 植被係數表(JULIAN AND TORRES, 2006)	4-10
表 5-1 各項參數經調整之設定值.....	5-4
表 5-2 颱風期間平均流量 SWAT 模擬與實測值比較表	5-6
表 5-3 颱風期間產砂量 SWAT 模擬與實測值比較表	5-6
表 5-4 訓練和應用之颱風場次表.....	5-12

圖次

圖 1-1 全台崩塌點位圖	1-2
圖 1-2 台灣水庫有效容量歷年變化圖	1-3
圖 1-3 集水區-水庫聯合治理示意圖	1-4
圖 1-4 計畫全程流程圖 (三個年度)	1-6
圖 2-1 資料探勘示意圖	2-2
圖 2-2 石門水庫集水區範圍圖	2-3
圖 2-3 石門水庫集水區地質圖	2-4
圖 2-4 石門水庫集水區高程分佈圖	2-5
圖 2-5 石門水庫集水區坡向分布圖	2-6
圖 2-6 石門水庫集水區坡度分布圖	2-6
圖 2-7 石門水庫集水區河川水系圖	2-8
圖 2-8 石門水庫集水區土石流潛勢溪流圖	2-8
圖 2-9 水利署北區水資源分署所管雨量測站分布圖	2-9
圖 2-10 水利署北區水資源局管水位及流量站分布圖	2-11
圖 2-11 石門水庫累計淤積量圖	2-15
圖 2-12 曾文水庫集水區範圍圖	2-18
圖 2-13 曾文水庫集水區地質分布圖	2-20
圖 2-14 曾文水庫集水區高程分佈圖	2-20
圖 2-15 曾文水庫集水區坡向分布圖	2-21
圖 2-16 曾文水庫集水區坡度分布圖	2-21
圖 2-17 曾文水庫集水區土地利用分布圖	2-22
圖 2-18 曾文水庫集水區河川水系圖	2-23
圖 2-19 曾文水庫集水區土石流潛勢溪流圖	2-23

圖 2-20 水利署南區水資源局所管雨量測站分布圖	2-24
圖 2-21 水利署南區水資源局管水位及流量站分布圖	2-26
圖 2-22 曾文水庫歷年淤積量和剩餘庫容變化	2-28
圖 3-1 計畫目標示意圖	3-2
圖 4-1 研究整體架構	4-1
圖 4-2 輸入與輸出資料的部份截圖	4-12
圖 4-3 本研究所設計的 U-NET WITH RESIDUAL-CONNECTION 概念	4-13
圖 5-1 分析模式預期成果圖	5-1
圖 5-2 SWAT 模式建置流程圖	5-2
圖 5-3 石門水庫集水區之子集水區分布圖	5-2
圖 5-4 石門水庫集水區土地利用分布圖	5-3
圖 5-5 石門水庫集水區雨量站位置圖	5-3
圖 5-6 颱風期間平均流量模擬值與實測值比對柱狀圖	5-7
圖 5-7 颱風期間產砂量模擬值與實測值比對柱狀圖	5-7
圖 5-8 模擬蘇迪勒颱風期間子集水區單位面積產砂量	5-8
圖 5-9 模擬杜鵑颱風期間子集水區單位面積產砂量	5-8
圖 5-10 模擬梅姬颱風期間子集水區單位面積產砂量	5-9
圖 5-11 土砂來源分析系統建立流程圖	5-10
圖 5-12 不同模型之泥砂量預測曲線比較圖	5-11
圖 5-13 主要模型不同預測時間步長之訓練效能	5-13
圖 5-14 主要模型不同預測時間步長之預測精度	5-14
圖 5-15 不同子集水區之泥砂量預測曲線圖	5-19
圖 5-16 不同子集水區之泥砂總量預測柱狀圖	5-25
圖 6-1 石門水庫野溪集水區與子集水區編號對應圖	6-2

圖 6- 2 T+1 模式模擬蘇迪勒颱風期間子集水區單位面	
積產砂量	6-2
圖 6- 3 T+1 模式模擬杜鵑颱風期間子集水區單位面積	
產砂量	6-3
圖 6- 4 T+1 模式模擬梅姬颱風期間子集水區單位面積	
產砂量	6-3
圖 6-5 石門集水區災害管理系統設計流程圖	6-4
圖 6-6 計畫流程完成進度說明圖.....	6-5

第一章 緒論

第一節 研究緣起與目的

根據「2023 Disasters in Numbers」(2024)資料顯示，2023 年水砂相關災害與過去 20 年 (2003-2022)年平均相比提升 12 %，分別為 2023 年 327 件；過去 20 年平均 292 件。台灣長期以來都被視為水砂災害風險極高的國家，近年來好發的短延時強降雨事件更是加劇水砂災害強度的主因。受上述複合性土砂災害影響，首當其衝的即為水庫集水區保育議題。本研究臚列三大問題：1.集水區不安定土砂提高水環境風險；2.集水區超量土砂造成水庫淤積問題；3.集水區-水庫聯合治理之評估方法。上述問題皆與土砂災害相關，此類災害之難以預測性易衍生應變不及導致水庫集水區保育風險大幅增加。

以台灣而言，現行水庫之淤積率已接近 30 %，特別是石門水庫與曾文水庫原設計有效容量分別為 3.09 億及 8.04 億 m^3 ，經過數十年的運轉後目前庫容已縮減至 2.03 億，淤積率 34.3% (石門水庫)；5.08 億 m^3 ，淤積率 36.77 % (曾文水庫)。以曾文水庫而言，在年平均淤積量高達 600 萬 m^3 的情況下。如何有效分析集水區土砂來源與研擬減砂入庫維持庫容之方法即為水庫能否永續發展之關鍵議題。

為提升集水區保育成效，本研究擘劃三年藍圖，依序為：分析系統 → 治理規則 → 成效評估，第一年主要工作為分析石門集水區土砂來源，第二年度可針對土砂產量進行治理規則擬定，第三年則可針對本計畫所選定之曾文水庫集水區進行綜合成效評估。

許多文獻針對水庫集水區進行改善土砂來源及產量評估的研究，希望研擬有效的防災策略。結合人工智慧進行土砂來源分析即為

近年常見方法。近年來好發的短延時強降雨發生頻率逐年提升而增添分析難度，為爭取應變時間進而研擬有效土砂管理策略，本計畫跨域整合不同方法提出「結合數據科學與機器學習建立集水區土砂來源之分析系統」，提供治理規劃建議，最終達成減砂入庫之終極目標。

第二節 關鍵課題

一、集水區不安定土砂提高水環境風險

「加強水庫集水區保育治理計畫第 3 期(110-111 年度)工程執行計畫書」曾調查 27 座水庫，內容包含集水區內林班地、崩塌地及據此計算之崩塌率，藉由全島崩塌地判釋後發現，98 年莫拉克颱風過後，因國有林坡陡流急特徵明顯致崩塌規模極大，導致殘留坡地上之不安定土砂量，急遽暴增至 9.5 億 m^3 。圖 1-1 為全台崩塌點位圖。

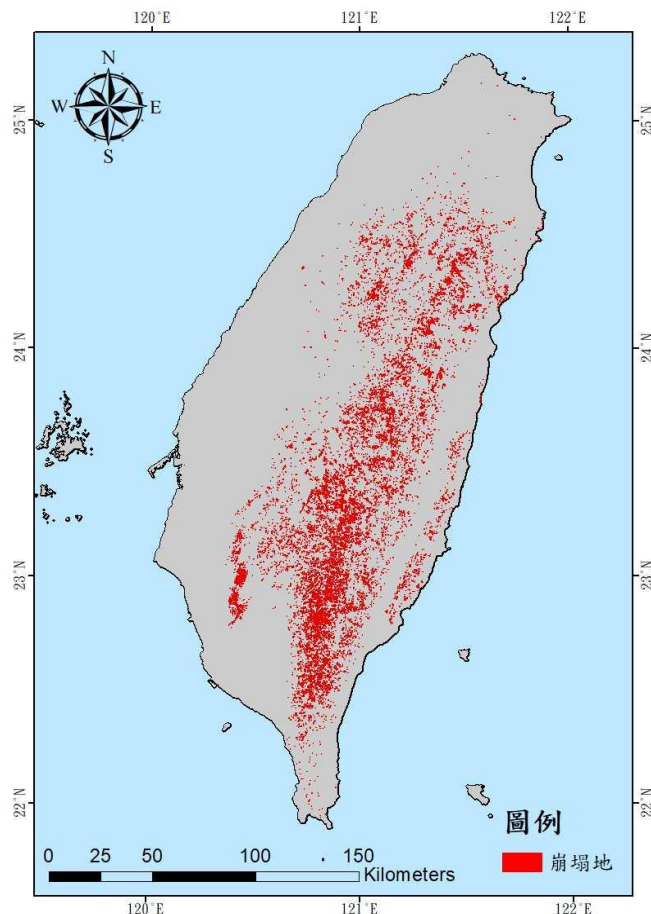


圖 1-1 全台崩塌點位圖

二、集水區超量土砂造成水庫淤積問題

沖刷與崩塌為集水區土砂運移之自然現象，相關研究顯示在集集地震之後集水區地質更顯脆弱，再加上近年短延時強降雨之發生頻率愈趨頻繁，在地震及強降雨持續發生同時將使集水區產生更顯著的沖刷、崩塌等土砂運移現象，進而使超量土砂運移至水庫庫區造成淤積。台灣水庫設計總容量約為 29 億 m^3 ，根據經濟部水利署「公務統計報表-現有水庫概況」(<https://www.wra.gov.tw/Default.aspx>)數據顯示，2001 年水庫總容量為 27.14 億 m^3 ；有效容量為 21.99 億 m^3 ，至 2023 年底 95 座總水庫完工有效容量為 20.56 億 m^3 ；有效容量為 19.89 億 m^3 。由圖 1-2 可知水庫庫容呈現逐年下降趨勢，2017 年後因土砂災害規模略微降低而使清淤工程產生成效，然而單憑清淤手段仍難以抵擋一次極端氣候所可能導致不安定土砂向下輸送所造成的巨大影響。因此，發展一套能夠有效分析集水區土砂來源的系統將能進一步串聯水庫，研擬聯合治理策略。

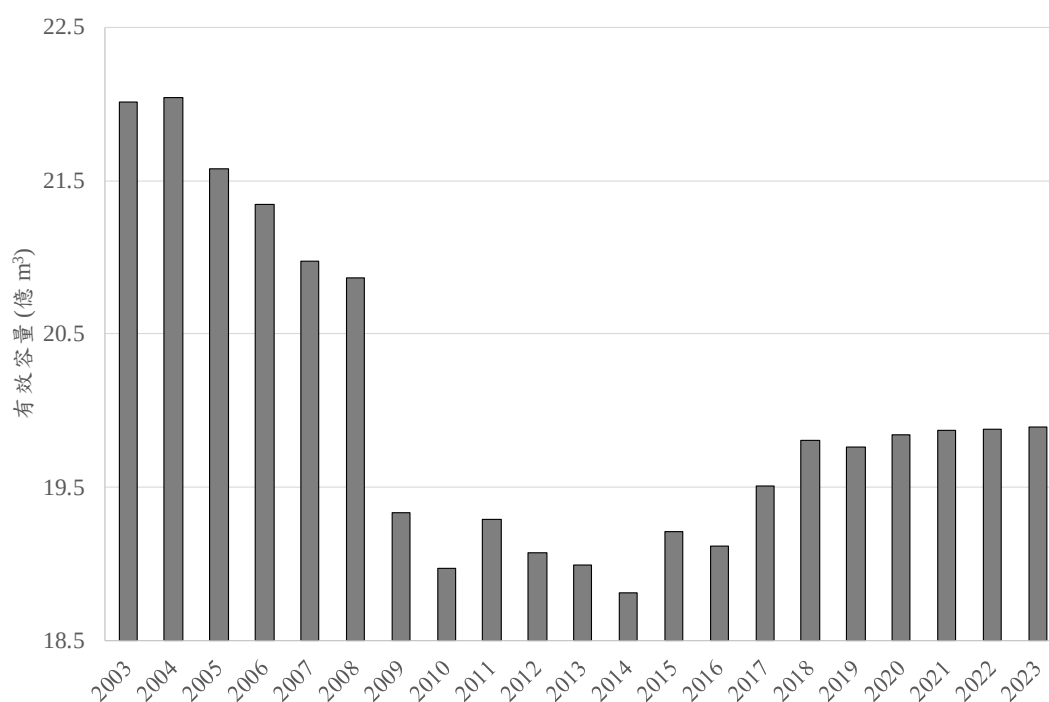
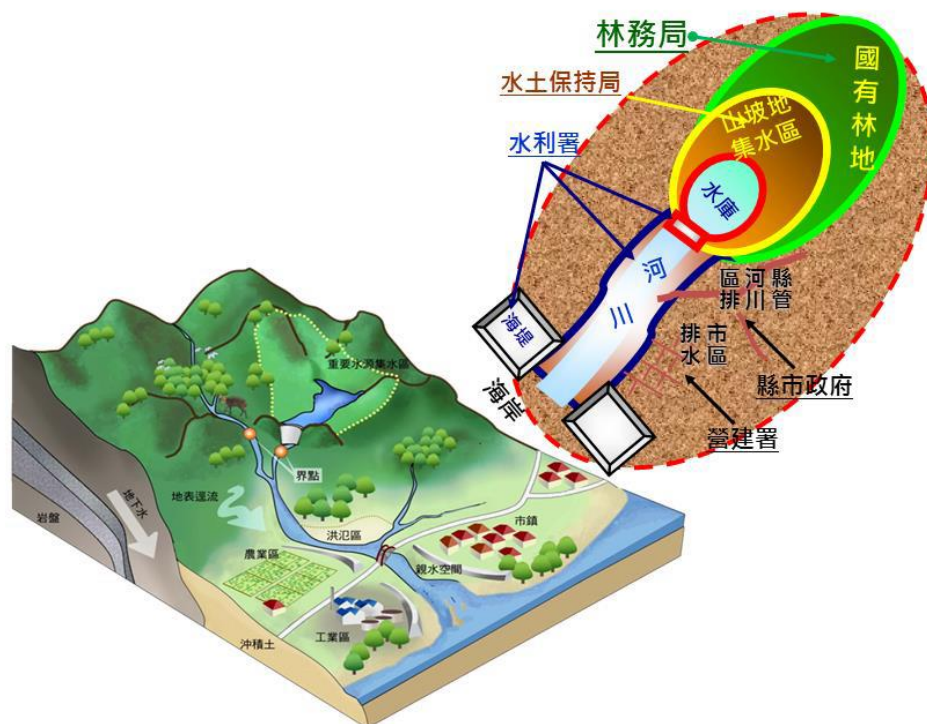


圖 1-2 台灣水庫有效容量歷年變化圖

三、集水區-水庫聯合治理之評估方法

水庫集水區之治理權責單位相當複雜，水庫蓄水範圍（含保護帶）由水利署監督並由各水庫管理機關(構)治理；國有林班地治理（不含蓄水範圍）由林務局負責；上開二款以外之山坡地治理由水保局負責（資料來源：水庫集水區治理權責分工暨有關事項處理原則-六條）。因此，單位間的平行及垂向協調整合與資訊分享格外重要。且近年水文事件中之短延時強降雨發生頻率日趨增加，所帶來的極端雨量常導致深層崩塌發生頻度增加，因而造成崩塌土砂產量增加、土石流影響範圍擴大。以大方向而言，整體集水區聯合治理規劃為重要原則，如何在短時間內獲得重要資訊並進一步擬定因應對策則有賴可合理分析集水區土砂來源之系統，以期災時提高土砂運移預測性，達集水區土砂減量入庫、加速過庫、維持庫容，確保穩定供水及水資源永續利用的目標。



資料來源：「加強水庫集水區保育治理計畫第3期(110-111年度)工程執行計畫書」

圖 1-3 集水區-水庫聯合治理示意圖

第三節 研究目標

一、全程目標：

頻繁發生的極端降雨事件於近年引發愈趨嚴重的土砂災害，此類複合性災害使損失金額及管理成本大幅提升。因此本團隊擘畫一個多年期計畫，各年度目標分別為：第一年度：分析技術優化；第二年度：治理規則訂定；第三年度：成效評估分析。分年度目標簡述如下：

第一年度：結合數據科學與機器學習建立集水區土砂來源之分析系統，以石門集水區為例，藉由理解土砂運移型態發展可合理推估集水區土砂產量的技術。

第二年度：驗證第一年度技術成果，研究在不同情境下集水區土砂產量所衍生的風險，發展適用於台灣集水區之土砂治理規則，做為水保工程佈局之參考。

第三年度：選取南台灣重要的曾文水庫集水區為研究對象，進行集水區土砂來源及產量分析，最後針對治理規則進行成效評估分析。

本計畫撰寫原則以第一年度工作為主。相關內容於「二、本年度目標」中敘述。

二、本年度目標：

第一年度計畫聚焦於為集水區土砂來源分析，計畫分項目目標敘述如下：

- (i)完整收集石門水庫集水區之土砂災害時空變化資料。
- (ii)建立分析模式，分析各子集水區之水砂運移特性。
- (iii)提出適用於推估集水區土砂來源之方法。
- (iv)以石門水庫為例，測試集水區土砂產量之分析模式。

本計畫已完成歷史文獻回顧、石門水庫基本資料收集、歷史災害分析、SWAT 分析模式建立、參數檢定驗證。接著，利用 SWAT 模式建立泥砂運移關係，作為土砂來源分析系統訓練之用。成果顯示土砂來源分析系統能有效推估集水區產砂量。不僅如此，本計畫超前原定三年之工作進度，目前擴充分析系統之預測能力，使其能夠預測 T+2 (2 個小時後) 之產砂量體、尖峰發生時間及初步推估產砂熱點，計畫全程流程圖請見圖 1-4。

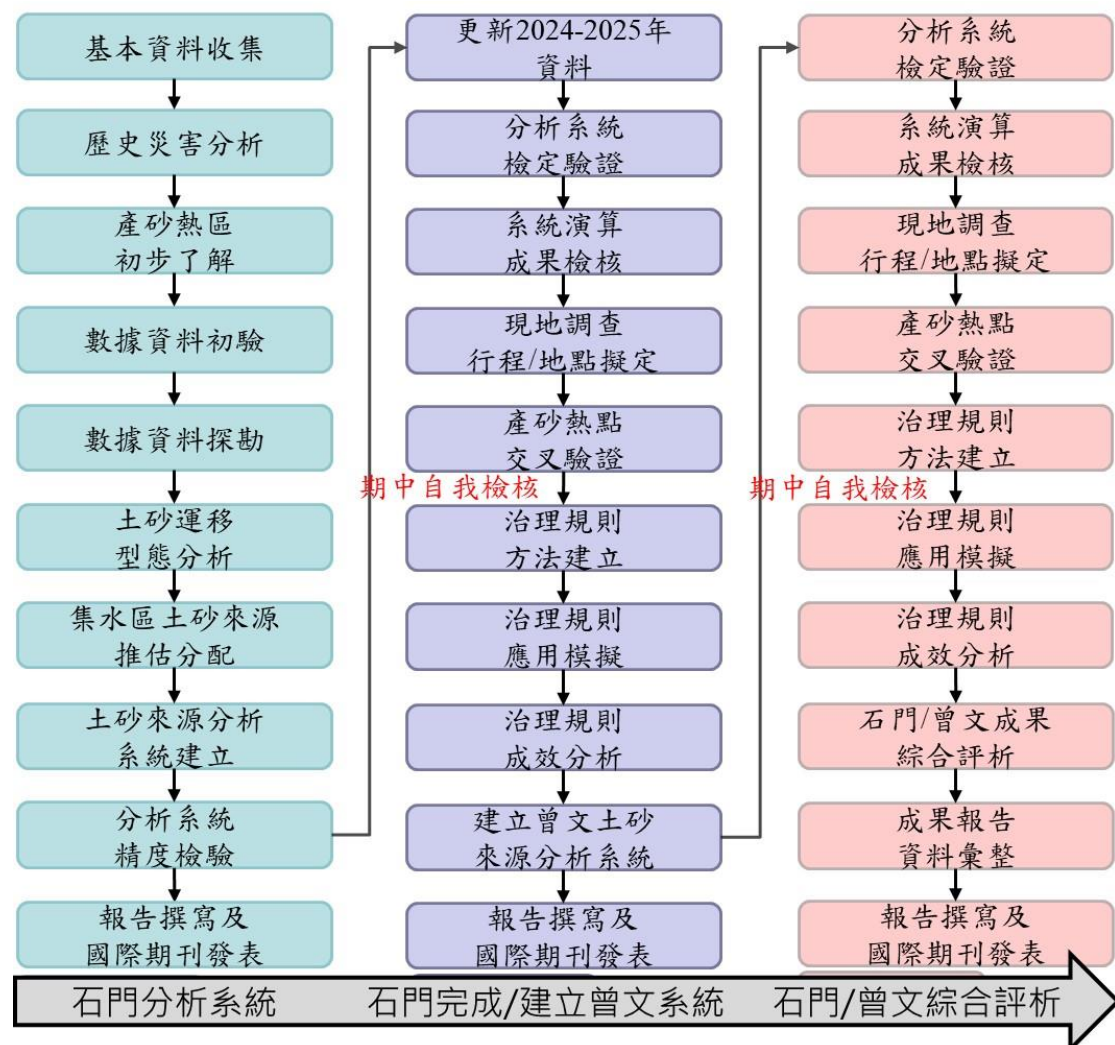


圖 1-4 計畫全程流程圖 (三個年度)

第二章 研究區域

本計畫目標為建立結合數據科學及土砂運動機制的集水區土砂來源分析系統。本階段需先確認數據的多樣性、時效性及準確性。為全盤考慮集水區之歷史土砂運動時空變化關係，本研究收集資料年份涵蓋 1973 至 2023 年。相關資料可分：地文資料、水文資料及災害資料共三大類。在收集資料時須初步建立篩選原則如下：

一、地文資料

須包含研究區域之崩塌資料、淤積資料、地形資料。資料精度、年份及代表性均需以合理方式檢定驗證。例如：崩塌與淤積資料是否具有相關性；前後期地形劇烈變化是否合理等。

二、水文資料

雨量、流量、砂量及水位等量測資料會因環境、儀器等諸多因素影響其量測精度。本計畫將導入信賴區間 (Confidence Interval) 概念進行評估，以確保數據品質。

三、災害資料

不同年度颱風豪雨事件致災規模多所不同，須定義何謂代表性災害資料，並確認所定義之災害事件量是否足夠，避免因數據過多或過少影響分析精度及時間效率。

圖 2-1 為資料探勘示意圖，在此階段最重要的工作就是呈現原始資料，並初步去除雜訊。由圖 2-1 可看出在水砂資料的收集過程會隨著雨量等級造成洪災規模提升而產生難度，尋常時刻所收集資料通常相對完整且具相關性，隨著雨量等級提升常有數據不完整及離群值產生的情況。因此，依據原始資料建立之水砂關係常有準確度不足的問

題。本計畫將建立信賴區間概念淨化所收集數據，初步提升其準確性及可靠性。

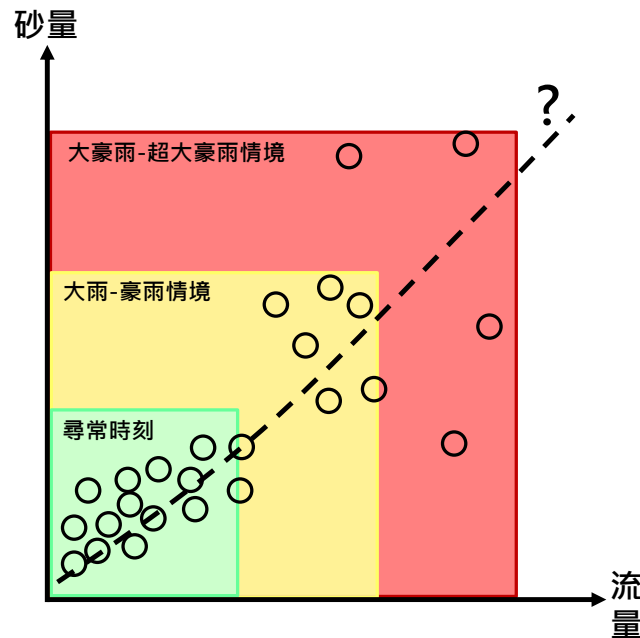


圖 2-1 資料探勘示意圖

第一節 石門水庫資料

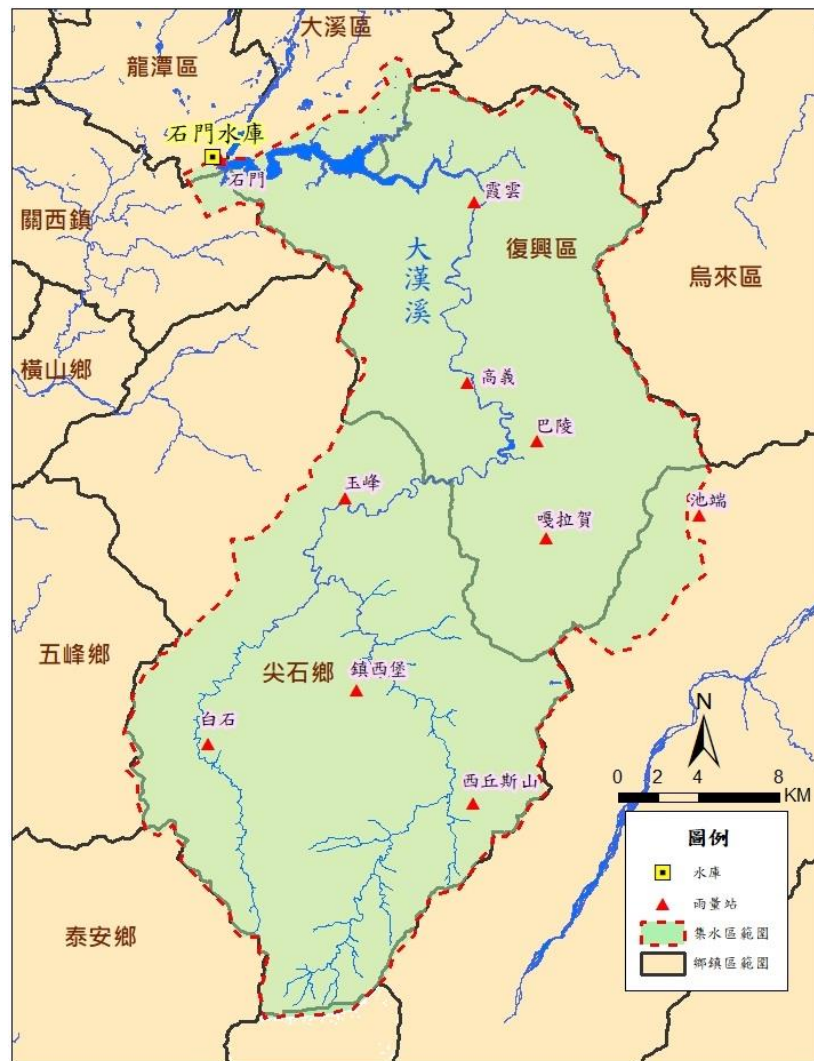
一、石門水庫地文資料

石門水庫是臺灣的第三大水庫（第一與第二分別為曾文及翡翠水庫），屬於在槽水庫，於 1956 年 7 月 7 日開始興建，並於 1964 年 6 月竣工。該水庫具有多種功能，包括灌溉、發電、給水、防洪和觀光等。其設計總容量為 3 億 912 萬立方公尺，截至 2022 年底，有效容量為 2 億 277 萬立方公尺。每日由水庫調蓄的平均供水量約為 80 萬 m^3 ，最大總供水量可達 148 萬 m^3 ，主要供應新北市、桃園市及新竹縣湖口鄉的公共用水。

石門水庫位於淡水河流域上游及大漢溪中下游，其集水區面積為 763.4 km^2 ，範圍包括桃園市大溪區、龍潭區、復興區、新竹縣關西鎮、尖石鄉及宜蘭縣大同鄉，其中有 90.3%，約 689.5 km^2 之面積位於桃

園市復興區及新竹縣尖石鄉兩個鄉鎮。石門水庫集水區範圍如圖 2-2 所示。

本計畫所需蒐集之地文資料包含：地質、地形、土地利用等資料。
茲就蒐集成果說明如下：



資料來源：經濟部水利署北區水資源分署

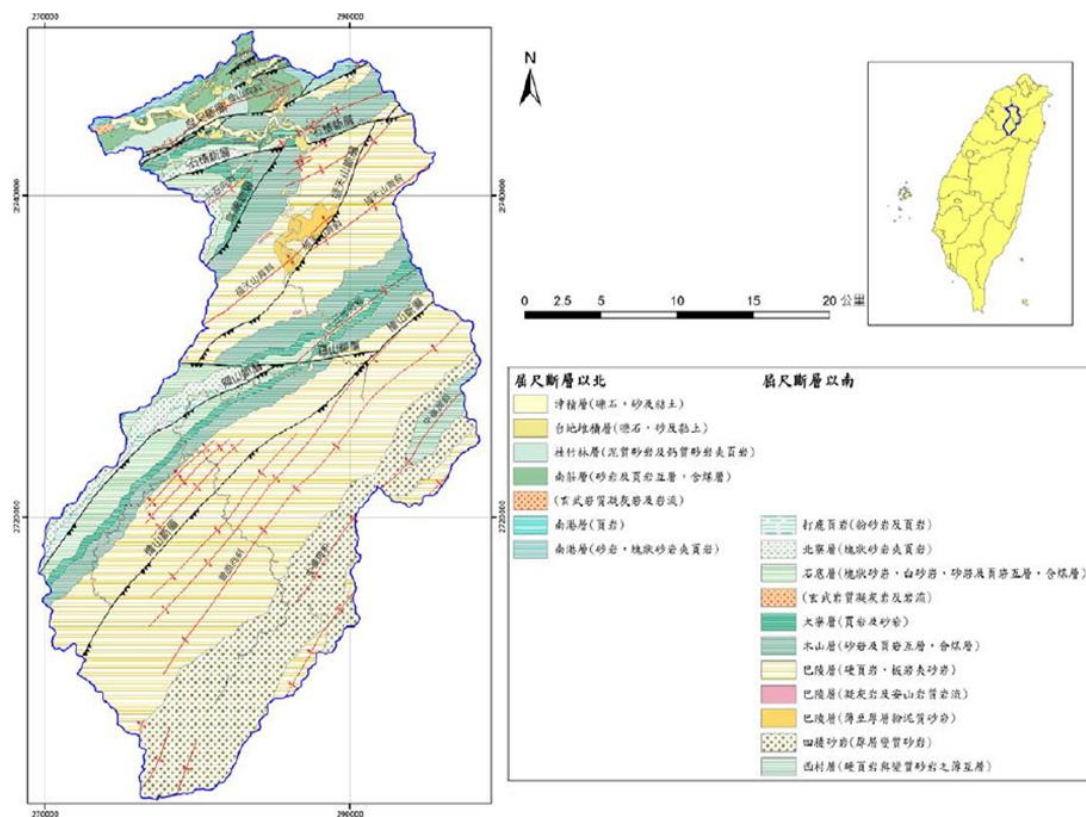
圖 2-2 石門水庫集水區範圍圖

(一) 地質

根據「111-112 年度石門水庫排洪排砂對下游河道生態及沖淤影響研究」所述，石門水庫集水區的地質構造主要呈現東北-西南走向，貫穿整個大漢溪流域。該區域內的主要斷層線由北向南依次包括屈尺

斷層、石槽斷層、鳥嘴斷層（亦稱錦屏斷層）、插天山斷層、霞山斷層、羅山斷層及檜山斷層等。這些斷層主要是東南向西北的逆衝斷層，近期未顯示出顯著的活動跡象。在地層分布方面，屈尺斷層將大漢溪流域的地層系統劃分為北側與南側兩大區塊。屈尺斷層北側的地層包括中新世時期的南港層與南莊層，以及中新世晚期至上新世早期的桂竹林層。南側則包括始新世晚期的西村層、始新世晚期至漸新世早期的四稜砂岩、漸新世的巴陵層，以及中新世的木山層、大寮層、石底層、北寮層和打鹿頁岩等。

這些地層的分布和斷層的走向基本上是平行的，顯示出流域內地質結構的演化過程主要受到來自東南方向的擠壓力量影響。區域內的地層與斷層之間還存在不同密度與規模的褶皺構造，這些褶皺的走向亦多呈現平行於主要斷層的方向。



資料來源：「111-112 年度石門水庫排洪排砂對下游河道生態及沖淤影響研究」

圖 2-3 石門水庫集水區地質圖

(二) 地形地勢

集水區地勢起伏自海拔 211.9 公尺到 3578 公尺，南端之品田山為最高，由東南向西北遞減，高差超過 3000 公尺，如圖 2-4。主要山脈之坡向(圖 2-5)自品田山沿集水區邊境向東北蜿蜒延伸。坡度方面，依據水土保持技術規劃七級坡之分類，各類在集水區中佔比如下：一級坡(坡度小於 5 %)佔 0.9 %，二級坡(坡度 5~15 %)佔 3.8 %，三級坡(坡度 15~30 %)佔 12.2 %，四級坡(坡度 30~40 %)佔 13.3 %，五級坡(坡度 40~55 %)佔 27.7 %，六級坡(坡度 55~100 %)佔 40.1 %，七級坡(坡度大於 100 %)佔 0.7 %。集水區範圍內，六級坡分布最廣，且超過 70 %的區域坡度大於 40 %，如圖2-6 所示。

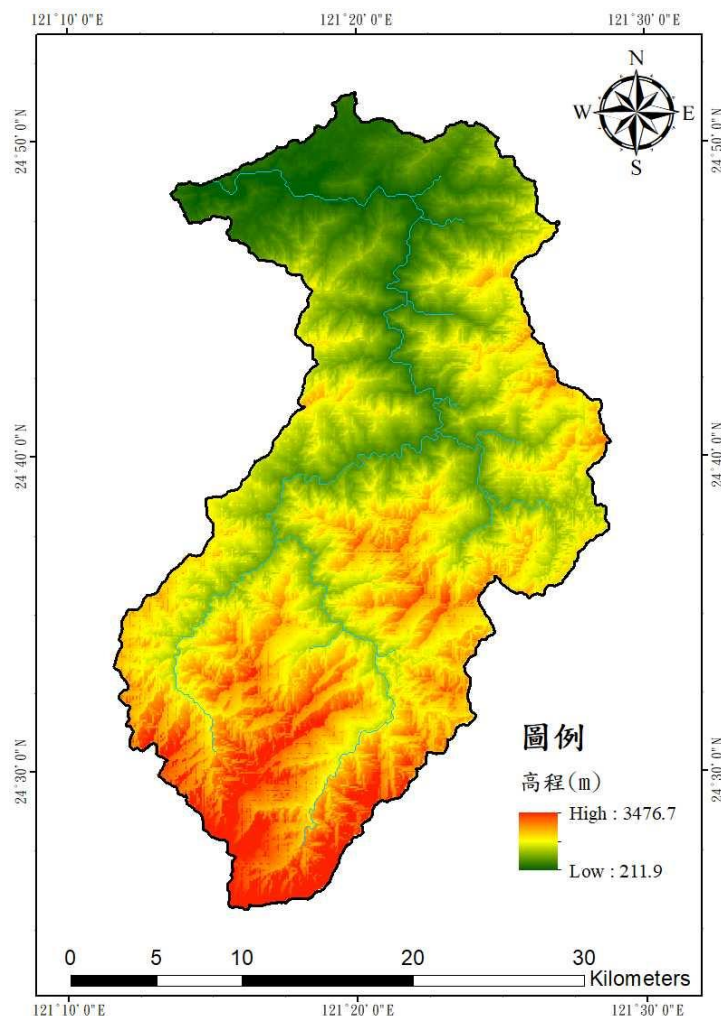


圖 2-4 石門水庫集水區高程分佈圖

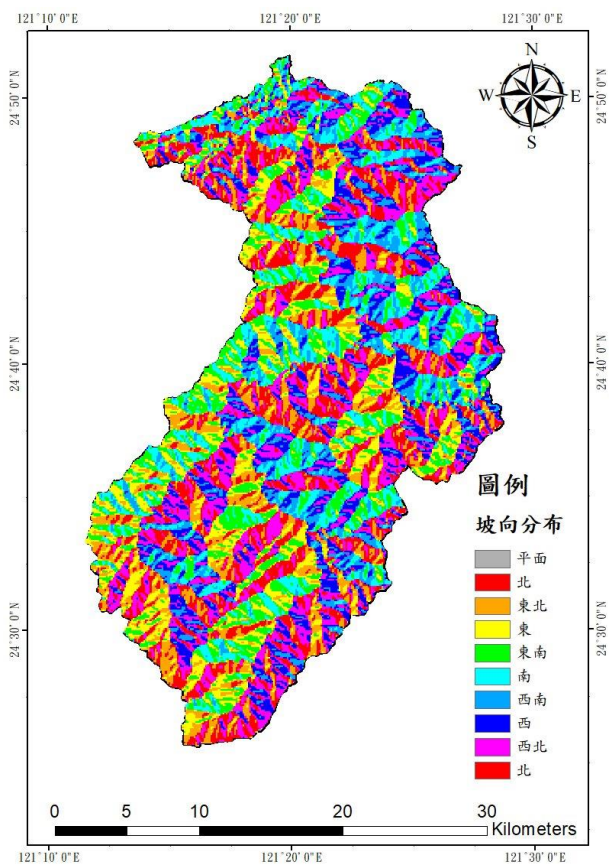


圖 2-5 石門水庫集水區坡向分布圖

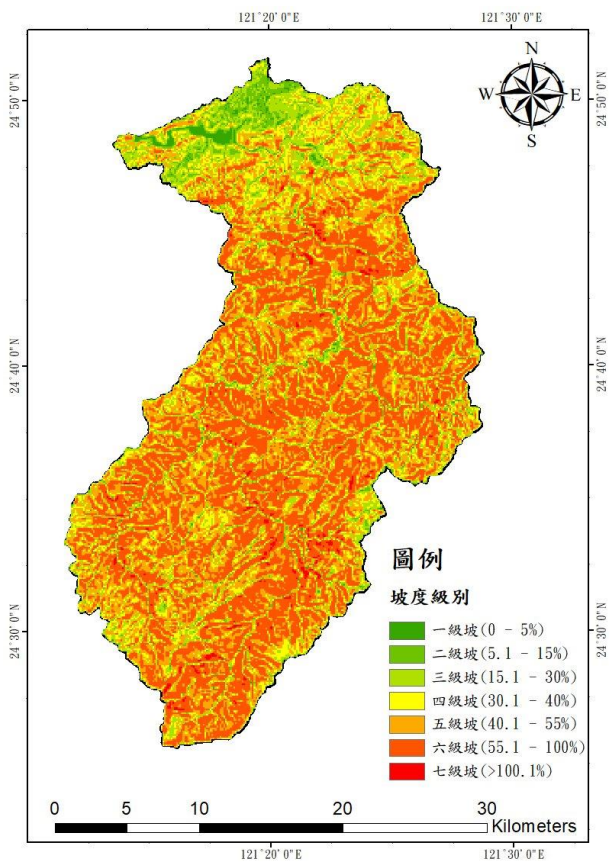


圖 2-6 石門水庫集水區坡度分布圖

(三) 土地利用

根據民國 2009 內政部國土測繪中心資料，石門水庫集水區範圍中各類用地占比如下：農業使用土地佔 2.75%，森林使用土地佔 92.36%，交通使用土地佔 0.52%，水利使用土地佔 2.22%，建築使用土地佔 0.27%，公共使用土地佔 0.04%，遊憩使用土地佔 0.08%，礦鹽使用土地佔 0.01%，其他使用土地佔 1.76%。其中主要以森林使用土地為最多大約 701.6 平方公里，而在森林使用土地中，以天然林 621.1 平方公里為之最，其次為人工林約 80.4 平方公里。而在河川區域內之土地利用以水利用地、農林用地及遊憩用地為主。

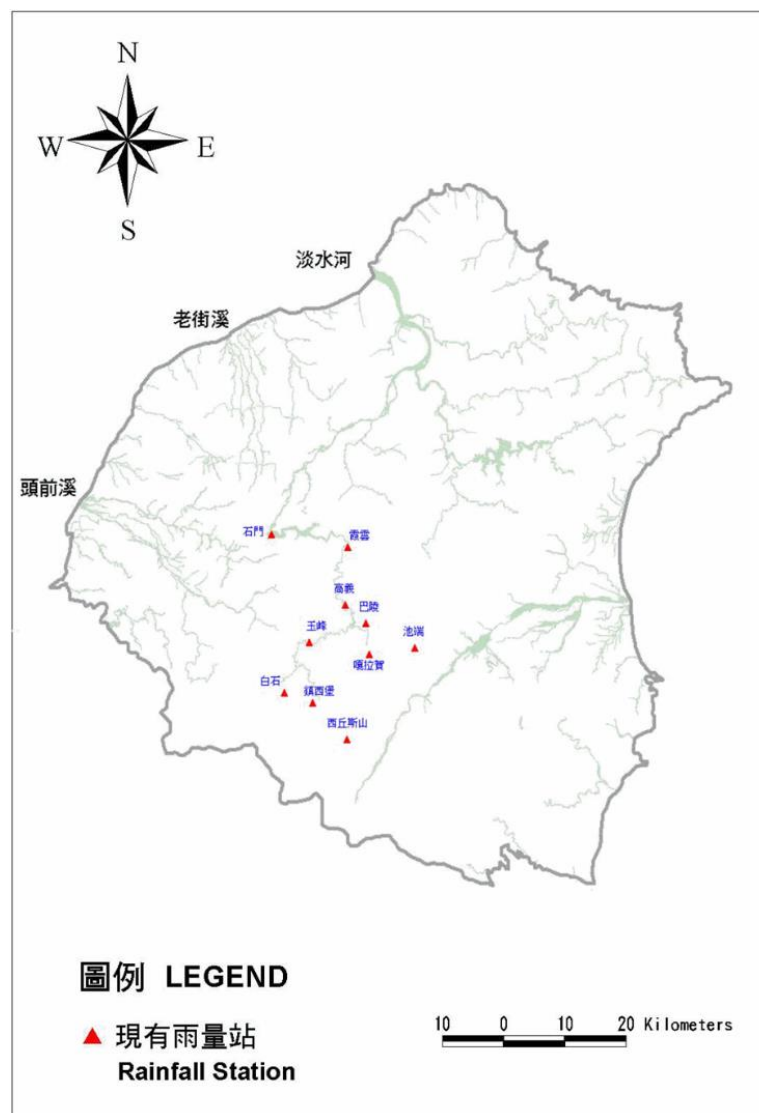
二、石門水庫水文資料

根據「111-112 年度石門水庫排洪排砂對下游河道生態及沖淤影響研究」所述，石門水庫集水區之水系，以大漢溪為主，由泰崗溪、白石溪、三光溪、卡拉溪、黑白庫溪、匹亞溪、雪霧鬧溪、高坡溪、義盛溪、霞雲溪、奎輝溪、三民溪、高遶溪、南子溝溪等支流匯合而成，本支流總數 64 條，總長約 352.63 公里，其水系圖如圖 2-7。

根據 2024 年農業部農村發展及水土保持署公告之 1,736 條土石流潛勢溪流中，位於石門水庫集水區範圍內的共有 40 條，其分布位置如圖 2-8 所示；其中共有 6 條在新竹縣內，而其餘 34 條則位於桃園市境內。

(一) 雨量資料

依據中央氣象署之資料，集水區內氣象站共有 1 站，為復興站。而集水區範圍內經濟部水利署北區水資源分署所管之雨量測站共有 10 站，分別為石門、霞雲、高義、巴陵、嘎拉賀、玉峰、白石、鎮西堡、西丘斯山及池端等 10 站，雨量站分布圖如圖 2-9 所示；各雨量站之基本資料如表 2- 1 所示；平均降雨量統計表如表 2- 2 所示。經本計畫雨量統計，石門水庫集水區的雨季為 5 月至 10 月，年平均雨量在 2000 至 3,500 毫米間。



資料來源：經濟部水利署「中華民國一一二年臺灣水文年報」

圖 2-9 水利署北區水資源分署所管雨量測站分布圖

表 2-1 石門水庫集水區內氣象站及雨量站資料表

站號	雨量站站名	設站年份	標高	經度	緯度	管理單位
C0C460	復興	1990	482	121.3523	24.8202	中央氣象署
1140P022	石門	1941	255	121.2484	24.8093	經濟部水利署
1140P114	霞雲	1968	350	121.3581	24.7982	經濟部水利署
1140P015	高義	1937	620	121.3581	24.7149	經濟部水利署
1140P012	巴陵	1937	1220	121.3914	24.6815	經濟部水利署
1140P088	嘎拉賀	1956	1260	121.4081	24.6315	經濟部水利署
1140P007	玉峰	1954	780	121.3081	24.6649	經濟部水利署
1140P003	白石	1940	1620	121.2248	24.5482	經濟部水利署
1140P001	鎮西堡	1954	630	121.3081	24.5649	經濟部水利署
1140P150	西丘斯山	1986	2000	121.3581	24.5815	經濟部水利署
2560P011	池端	1964	1150	121.4748	24.6314	經濟部水利署

資料來源：中央氣象署及經濟部水利署

表 2-2 石門水庫集水區內雨量站降雨量統計表

雨量站	歷年月平均雨量(mm)												年平均雨量 (mm)
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
復興	99.6	153.2	180.0	207.0	298.4	421.3	321.4	451.9	366.1	174.2	83.8	85.5	2842.6
石門	108.2	168.5	195.7	189.5	263.6	365.8	332.0	383.1	305.0	119.7	78.4	86.4	2579.3
霞雲	81.8	144.3	172.6	186.4	297.3	415.2	325.6	452.2	420.5	191.3	70.7	63.3	2657.7
高義	63.0	114.6	126.0	128.7	215.6	291.9	273.3	403.5	407.2	166.4	60.3	49.2	2157.9
巴陵	68.9	106.4	121.4	121.2	190.2	265.7	295.9	375.7	383.7	193.8	75.3	56.4	2156.2
嘎拉賀	65.1	103.1	117.3	114.6	197.3	301.2	263.5	402.9	412.3	213.2	78.0	63.3	2204.3
玉峰	71.0	116.7	134.4	131.2	209.3	287.6	265.8	426.7	368.5	148.3	57.7	54.3	2170.7
白石	86.8	143.2	155.6	154.8	230.9	294.1	286.8	416.7	363.5	121.0	63.5	70.7	2295.1
鎮西堡	69.5	119.9	130.7	122.3	192.1	271.8	279.2	369.8	358.1	129.5	54.6	56.7	2064.4
西丘斯山	49.1	84.0	92.0	114.0	176.3	250.2	301.3	366.3	413.3	311.9	93.1	70.0	2114.3
池端	155.7	170.7	139.3	126.2	238.8	348.6	335.4	462.8	572.4	578.6	294.7	194.2	3438.1

資料來源：中央氣象署及經濟部水利署「中華民國一一二年臺灣水文年報」

(二) 流量資料

經濟部水利署北區水資源分署所管之水位及流量測站在集水區範圍內共有 5 站，水位流量站分別為霞雲、稜角、玉峰、秀巒，而高義站於 2015 起從水位流量站變為單純的水位站，其分布圖如圖 2-10 所示；而表 2-3 及表 2-4 分別為平均流量及水位統計表。

表 2-3 石門水庫集水區內流量站平均流量統計表

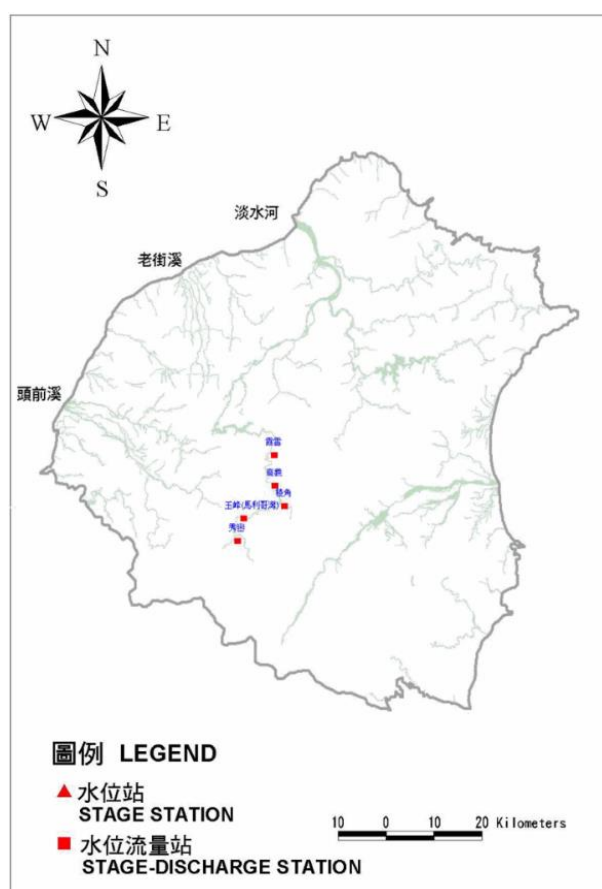
流量站	歷年月平均流量(cms)												年平均流量 (cms)
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
霞雲	12.81	18.53	21.53	20.83	30.76	41.88	40.74	67.95	84.69	51.23	22.95	14.86	37.63
稜角	4.41	4.86	4.75	4.62	5.56	9.10	9.37	13.51	15.18	12.95	7.17	5.29	8.39
玉峰	6.3	10.34	11.85	10.69	12.48	23.18	23.37	34.48	40.23	26.06	9.73	9.25	17.88
秀巒	1.98	3.34	3.88	4.62	4.60	7.60	7.12	13.18	14.13	7.60	3.16	2.03	6.21

資料來源：經濟部水利署「中華民國一一二年臺灣水文年報」

表 2-4 石門水庫集水區內水位站平均水位統計表

水位站	歷年月平均水位(m)												年平均水位 (m)
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
霞雲	246.72	246.78	246.84	246.81	246.87	247.04	246.98	247.07	247.12	247.04	246.78	246.50	246.83
稜角	533.12	533.01	533.15	533.19	533.07	533.34	533.47	533.52	533.45	533.72	532.43	532.91	533.69
玉峰	682.87	682.88	682.93	682.20	683.11	683.25	683.29	683.15	683.13	683.16	683.46	682.83	683.20
秀巒	827.91	827.99	827.89	827.84	829.14	828.06	829.79	828.81	828.08	828.09	827.90	827.96	828.47
高義	437.49	437.53	437.45	437.55	437.70	438.28	438.39	438.28	438.85	438.89	438.53	438.42	437.83

資料來源：經濟部水利署「中華民國一一二年臺灣水文年報」



資料來源：經濟部水利署「中華民國一一二年臺灣水文年報」

圖 2-10 水利署北區水資源局管水位及流量站分布圖

(三) 水庫放流資料

表 2-5 近年颱風庫容特徵參數分析整理表

		1	2	3	4	5	6	7	8	9 (7/6)	10 (6/8)	11	12	13	14	15
颱風事件	警報期間 (資料計算時間)	尖峰 時雨量 (mm)	降雨 延時 >15 mm/hr	累積 雨量 (mm)	入庫尖 峰流量 (cms)	入庫流 量>300 cms 延 時(hr)	入庫 水量 ($10^4 m^3$)	出庫 水量 ($10^4 m^3$)	原蓄存 清水量 (萬噸)	過庫 水量比 (%)	水庫 置換比 (%)	入庫 砂量 (10^4 ton)	電廠過 庫砂量 (10^4 ton)	出庫 砂量 (10^4 ton)	過庫砂 量比	水庫 淤積測 量-淤 積量 $10^3 m^3$
鳳凰	2008/7/26-7/29 (7/27 18 時-7/30 0 時)	19.5	5	273.9	2040	35	12447	12078	19413	97	64	179.4	16	23.2	0.13	-698
辛樂克	2008/9/11-9/16 (9/12 18 時-9/18 6 時)	32.4	21	965.2	3447	173	63344	62272	18148	98	349	1009.2	103	267	0.27	
薔蜜	2008/9/26-9/29 (9/28 10 時-10/1 2 時)	30.7	9	427.1	3292	68	23050	23182	21112	101	109	403.7	35	73.1	0.18	
莫拉克	2009/8/05-8/10 (8/6 20 時-8/10 2 時)	17.4	4	471.3	1838	92	22799	9302	6704	41	340	184	18	26.4	0.14	3463
凡那比	2010/9/17-9/20 (9/18 5:30-9/20 14:30)	23	4	166.6	1056	16	4392	2043	16169	47	27	20.1	0.3	0.5	0.03	-1761
蘇拉	2012/7/30-8/3 (8/1 16:30-8/6 12 時)	44.3	18	830.8	5385	111	49230	49773	17710	101	278	765.1	15.4	115.1	0.15	-1884
天秤	2012/8/22-8/28 (8/24 08 時-8/24 15 時)	13.4	0	137	363	2	7205	7610	19708	106	37	-	-	-	-	
蘇力	2013/7/11-7/13 (7/12 21 時-7/17 12 時)	94.2	8	450	5458	47	26410	26119	16170	99	162	921.9	162.3	323	0.35**	9945
潭美	2013/8/20-8/22 (8/21 13 時-8/23 19 時)	29.6	10	525.3	2412	85	16531	17547	18956	106	93	320.5	25.9	119.3	0.37**	
菲特	2013/10/4-10/7 (10/6 12 時-10/7 21 時)	13	0	281.8	1393	47	8725	9863	21302	113	46	49.7	1.5	6.1	0.12	
麥德姆	2014/7/22-7/23 (7/22 14 時-7/23 19 時)	14.9	0	170.4	1179	16	4560	4626	20203	101	23	49.1	0	1.3	0.03	-1064

鳳凰	2014/9/19-9/22 (9/21 06 時-9/22 12 時)	11.8	0	63.1	376	2	4058	1796	16104	44	25	-	-	-	-	
蘇迪勒	2015/8/6-8/9 (8/7 22 時-8/10 16 時)	52.7	12	500.8	5634	54	29639	29126	18405	98	161	254.2	13.2	90.4	0.36**	3549
杜鵑	2015/9/29-9/30 (9/28 10 時-9/30 23 時)	39.4	12	334.4	3802	46	19519	16127	17456	83	112	188.23	20.1	61.41	0.33**	
尼伯特	2016/07/06-07/09 (7/6 8 時-7/9 6 時)	5.2	0	55	135	0	1412	2577	18557	182	8	0.4	-	-	-	2719
馬勒卡	2016/09/16-09/18 (9/16 8 時-9/20 12 時)	12.4	0	135.7	742	23	7477	6838	19150	91	39	0.59	0.3	0.3	0.5	
梅姬	2016/09/26-09/28 (9/26 0 時-10/2 0 時)	46.2	12	442	4268	65	29485	29326	19580	99	150	351	11.4	73.2	0.21**	
尼莎	2017/07/28-07/30 (7/28 8 時-7/30 14 時)	22.5	4	139	934.5	8	2563	1873	16302	73	6	14.78	0.2	0.84		
瑪莉亞	2018/7/9-7/11 (7/10 10 時-7/11 14 時)	23.9	8	186	1702	20	4803	72	9150	1.5	2	26.83	-	0		-1273
利奇馬	2019/8/8-8/9 (8/7 0 時-8/12 0 時)	23	1	277.4	1168	37	5274	3573	17468	68	3	18.84	0.042	0.194	0.01	222
米塔	2019/9/30-10/1 (9/29 00 時-10/3 00 時)	14.3	0	208.3	1091	26	4264	4759	19878	112	5	12.45	0.067	1.028	0.08	
烟花	2021/7/21-7/24 (7/21 20 時~7/26 12 時)	26.3	2	470.9	2309	53	22429	17427	14999	78	150	68.38	2.14	11.58	0.17**	
璨樹	2021/9/10-9/13 (9/11 18 時~9/13 12 時)	19.3	1	133.3	495	10	2749	1767	19291	64	14	2.62	0.19	0.68	0.26	
軒嵐諾	2022/09/02-09/04 (9/2 16 時~9/7 10 時)	17.4	2	343.1	1426	55	18806	13968	15482	74	121	46.4	1.88	9.58	0.21**	
尼莎	2022/10/15-10/16 (10/15 20 時~10/19 0 時)	26.7	11	308.6	1750	47	14717	14774	19713	1	75	67.2	2.46	11.17	0.17**	

過庫砂量比欄位中有上標**:表示排砂隧道有開啟進行排砂操作

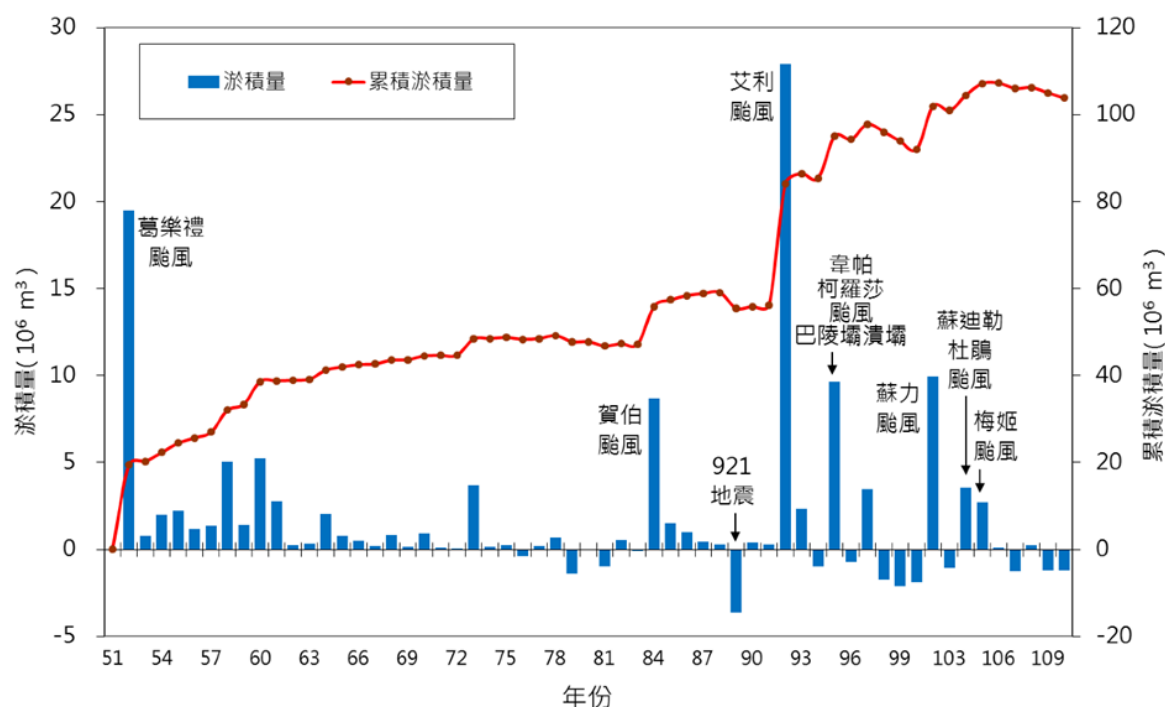
資料來源：「110-111 年度石門水庫泥砂運移監測設施維護與全洪程觀測」

三、石門水庫災害資料

根據「石門水庫及其集水區防災通報系統建置計畫」所述，石門水庫自 1963 年 9 月開始蓄水期間，即遭遇葛樂禮颱風，洩洪量達到每秒 10,000 立方公尺，創下營運以來的最高紀錄，並新增泥砂淤積量 1,947 萬立方公尺。2004 年的艾利颱風對石門水庫影響尤為嚴重。根據水利署資料，艾利颱風期間，石門水庫平均降雨量達 967 毫米，造成大範圍崩塌與土砂災害，尖峰流量高達每秒 8,594 立方公尺，新增泥砂淤積量 2,788 萬立方公尺，水庫總蓄水容量減少 9%，庫容剩餘 73%，自來水供應中斷長達 17 天。

2005 年 7 月中旬至 9 月上旬，臺灣連續遭受海棠、馬莎及泰利三場颱風侵襲，洪峰流量分別為每秒 3,199 立方公尺、5,322 立方公尺及 3,689 立方公尺。儘管洪峰流量不及艾利颱風，但颱風降雨集中於艾利颱風造成大量崩塌的尖石地區，導致該地區土石嚴重坍塌及沖刷，集水區崩塌面積再增加約 36 公頃，大量泥砂隨洪水流入水庫。2007 年 9 月 17 日至 19 日，韋帕颱風在石門水庫集水區平均降下約 360 毫米的雨量，導致巴陵攔砂壩潰堤，庫區原水濁度上升。

歷史上，石門水庫集水區多次經歷重大颱風災害，這些颱風事件往往因強降雨導致地表逕流大幅增加、沖蝕和崩塌的機率提升，而攜帶大量泥砂進入水庫，加速了庫區的淤積進程，導致庫容減少，截至 2023 年底，石門水庫的累積淤積量已達 1 億 450 萬立方公尺，淤積率 33.93%，具體的歷年淤積量則如圖 2-11 所示。這過程對水庫壽命和效能產生了顯著影響，大量泥砂的累積不僅降低了水庫的有效蓄水能力，還對水庫的運行及其多重功能，如灌溉、發電、給水和防洪，構成了嚴重的挑戰，需有效的泥砂管理策略和應對措施對於保持石門水庫的長期穩定運行至關重要。



資料來源：「110-111 年度石門水庫泥砂運移監測設施維護與全洪程觀測」

圖 2-11 石門水庫累計淤積量圖

(一) 歷年颱風

本研究收集颱風事件資料年份涵蓋 1973 年至 2023 年，各颱風資訊大致如下表表 2-6。

表 2-6 歷年颱風事件資料統計表

颱風名稱	年份	起迄時間	總降雨量 (mm)	洪峰流量 (cms)	最大放流量 (cms)
奈格	2022	10/29-11/04	65	251	378
尼莎	2022	10/14-10/22	379	1750	1682
梅花	2022	09/10-09/19	336	1103	1084
軒嵐諾	2022	09/01-09/09	435	1426	1381
圓規	2021	10/10~10/16	283	1301	1284
煙花	2021	07/21~07/29	512	2309	2304
米塔	2019	09/28~10/04	217	1047	1091
利奇馬	2019	08/07~08/13	279	1166	997
瑪莉亞	2018	07/10~07/14	190	1702	60
梅姬	2016	09/26~10/04	431	4268	4000
杜鵑	2015	09/27~10/03	413	3802	3051
蘇迪勒	2015	08/06~08/11	474	5634	5026

麥德姆	2014	07/21~07/28	195	1180	882
菲特	2013	10/04~10/14	310	1393	1320
天兔	2013	09/18~09/27	332	1195	1060
潭美	2013	08/20~08/29	543	2410	1953
蘇力	2013	07/12~07/18	449	5458	4949
蘇拉	2012	07/30~08/10	897	5385	5379
米雷	2011	06/23~07/01	282	1059	320
凡那比	2010	09/18~09/22	179	1059	313
莫拉克	2009	08/06~08/14	483	1838	976
薔蜜	2008	09/25~10/05	390	3292	3117
辛樂克	2008	09/11~09/23	899	3447	3164
鳳凰	2008	07/26~07/31	272	2040	2011
柯羅莎	2007	10/04~10/14	668	5300	4575
韋帕	2007	09/17~09/26	437	2788	2714
聖帕	2007	08/16~08/23	311	1844	1813
龍王	2005	10/01~10/07	233	1369	978
泰利	2005	08/31~09/09	388	3689	3110
馬莎	2005	08/03~08/09	847	5322	5183
海棠	2005	07/17~07/23	511	3199	2679
海馬	2004	09/11~09/21	317	1637	1563
艾利	2004	08/23~09/06	1056	8594	8472
蘭寧	2004	08/10~08/16	284	1208	823
雷馬遜	2002	07/03~07/08	475	2536	77
利奇馬	2001	09/22~10/07	439	1505	1666
納莉	2001	09/15~09/23	947	4123	4112
象神	2000	10/30~11/05	329	1852	1641
碧利斯	2000	08/22~08/27	395	2230	847
瑞伯	1998	10/15~10/20	558	4643	4617
安珀	1997	08/28~09/04	313	1351	869
溫妮	1997	08/16~08/23	512	3411	3135
賀伯	1996	07/30~08/09	780	6363	5385
席斯	1994	10/08~10/17	522	3638	2841
弗雷特	1994	08/19~08/30	355	2440	1620
道格	1994	08/07~08/15	456	3065	2668
提姆	1994	07/09~07/15	255	1171	116

寶莉	1992	08/26~09/03	585	2243	1506
黛特	1990	09/06~09/15	359	2593	2171
亞伯	1990	08/29~09/04	511	3358	3060
楊希	1990	08/16~08/26	565	4344	2062
莎拉	1989	09/07~09/21	722	2959	2157
琳恩	1987	10/22~10/29	440	1688	1150
傑魯得	1987	09/06~09/15	380	1444	935
艾貝	1986	09/16~09/24	413	2129	1403
韋恩	1986	08/23~08/31	348	1773	1436
白蘭黛	1985	10/03~10/10	219	1621	1579
尼爾森	1985	08/22~08/31	633	4906	4471
郝麗	1984	08/18~08/23	350	2166	2152
芙瑞達	1984	08/06~08/11	305	1721	766
西仕	1982	08/08~08/16	281	1248	896
安迪	1982	07/27~08/04	326	1262	114
莫瑞	1981	07/18~07/27	457	2217	861
裘恩	1981	06/19~06/29	316	1441	148
珀西	1980	09/15~09/23	214	1240	107
諾瑞斯	1980	08/27~08/29	193	1231	103
歐敏	1979	08/13~08/22	489	1795	917
薇拉	1977	07/30~08/06	387	2715	135
畢莉	1976	08/09~08/17	439	5488	887
貝蒂	1975	09/20~09/28	211	1153	722
妮娜	1975	08/02~08/09	342	2100	771

資料來源：石門水庫主題網(<https://web.wra.gov.tw/shihmen/Default.aspx>)

(二) 本研究選用之案例颱風

本研究選用 2008 年至 2020 年期間較重大之颱風事件，其中包含 2008 年之卡玫基、鳳凰、辛樂克、薔蜜、2009 年莫拉克、2010 年凡那比、2012 年蘇拉、2013 年蘇力、潭美、2014 年麥德姆、2015 年昌鴻、蘇迪勒、杜鵑、2016 年梅姬、2017 年尼莎、2019 年利奇馬等共 16 場。

第二節 曾文水庫資料

一、曾文水庫地文資料

曾文水庫是臺灣庫容量最大的一座水庫，於 1967 年 10 月 31 日開始動工興建，1973 年 3 月大壩工程竣工並於 4 月 28 日開始蓄水，同年 10 月曾文水庫正式完工。水庫設計容量達 7 億 4,840 萬立方公尺，而目前有效蓄水量約為 5 億 685 萬立方公尺(2022 年底淤積測量)。曾文水庫主要為提供嘉南地區灌溉用水，並供台南地區公共用水，另具發電、防洪和觀光的功能，是個多目標利用的水庫，並與烏山頭水庫串聯運轉。

曾文水庫位於曾文溪上游大埔溪上，其集水面積達 481 平方公里，而集水區範圍包括嘉義縣大埔鄉(33%)、番路鄉(7%)、阿里山鄉(54%)及高雄市那瑪夏區(6%)，集水區範圍圖如圖 2-12 所示。



圖 2-12 曾文水庫集水區範圍圖

(一) 地質

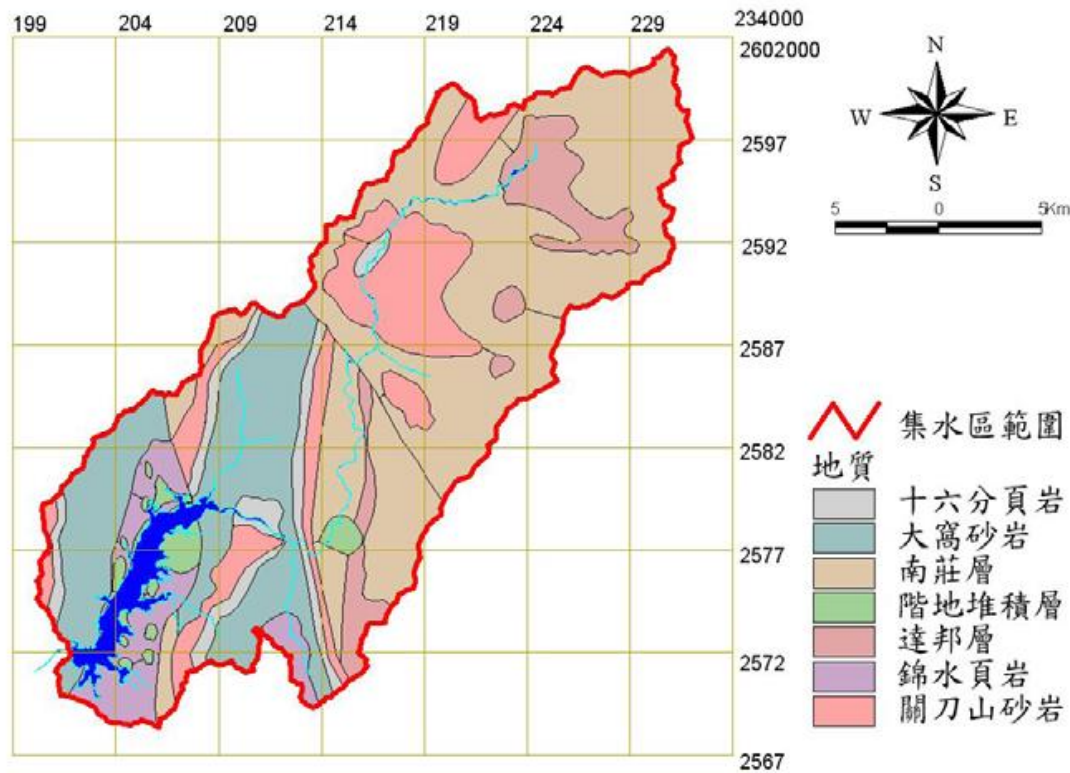
集水區內地質以中新世及上新世地層為主，如圖 2- 13 所示，東北側(內磅斷層以東)主要為第三紀中新世下部南莊層和達邦，而西南側內茶山下游至柳藤潭壩址間以大窩細砂岩為主，有一些岩石性質較為軟弱的十六份頁岩與錦水頁岩層，而些許階地堆積層則分佈於曾文溪本流及其主要支流兩側(蔡光榮 et al., 2017)。

(二) 地形地勢

集水區地勢起伏自海拔 193 公尺到 2613 公尺(圖 2- 14)，地勢成高程大致由東北向西南遞減 (圖 2-15)。依據水土保持技術規劃七級坡之分類，各類在集水區中佔比如下：一級坡(坡度小於 5 %)佔 3.5 %，二級坡(坡度 5~15 %)佔 3.9 %，三級坡(坡度 15~30 %)佔 9.4 %，四級坡(坡度 30~40 %)佔 10.1 %，五級坡(坡度 40~55 %)佔 19.7 %，六級坡(坡度 55~100 %)佔 43.0 %，七級坡(坡度大於 100 %)佔 10.3 %。集水區範圍內，六級坡佔比最高，且四級坡以上(坡度大於 40 %)約佔各集水區的 83.2 %，如圖 2- 16 所示。因為坡地陡峭，沖蝕作用旺盛，遇較大颱風豪雨時，易因大量崩塌與沖蝕加劇水庫淤積問題。

(三) 土地利用

根據內政部國土測繪中心資料，曾文水庫集水區範圍中依照第一級分類(代碼 01~09)各類用地占比如下：農業使用土地佔 10.56%，森林使用土地佔 79.50%，交通使用土地佔 0.63%，水利使用土地佔 4.28%，建築使用土地佔 0.36%，公共使用土地佔 0.03%，遊憩使用土地佔 0.14%，礦鹽使用土地佔 0.00%，其他使用土地佔 4.49%，如圖 2- 17。其中森林用地約 382.4 km² 為最多，而在森林使用土地中又可分為天然林及人造林，分別為 267.6 及 114.8 km²。



資料來源：「極端降雨影響曾文水庫集水區大規模崩塌土砂量之變異分析，鑛冶：中國鑛冶工程學會會刊 61 卷 3 期」

圖 2- 13 曾文水庫集水區地質分布圖

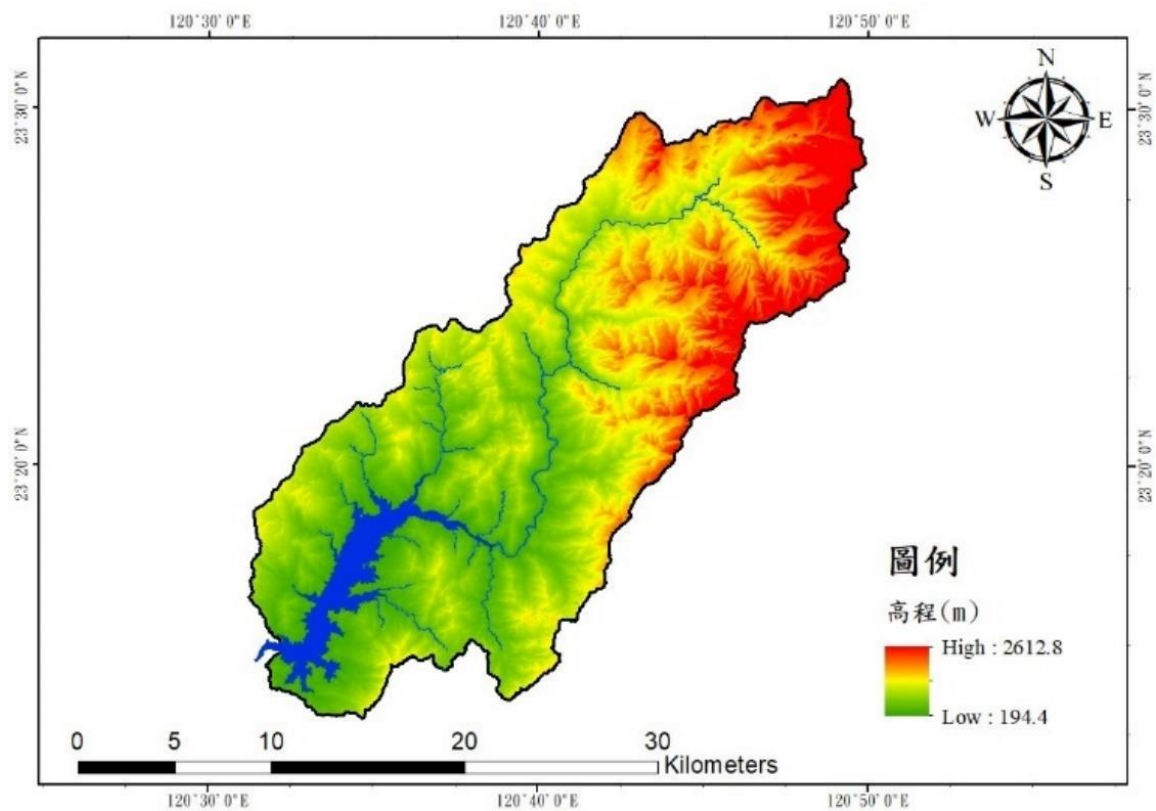


圖 2- 14 曾文水庫集水區高程分佈圖

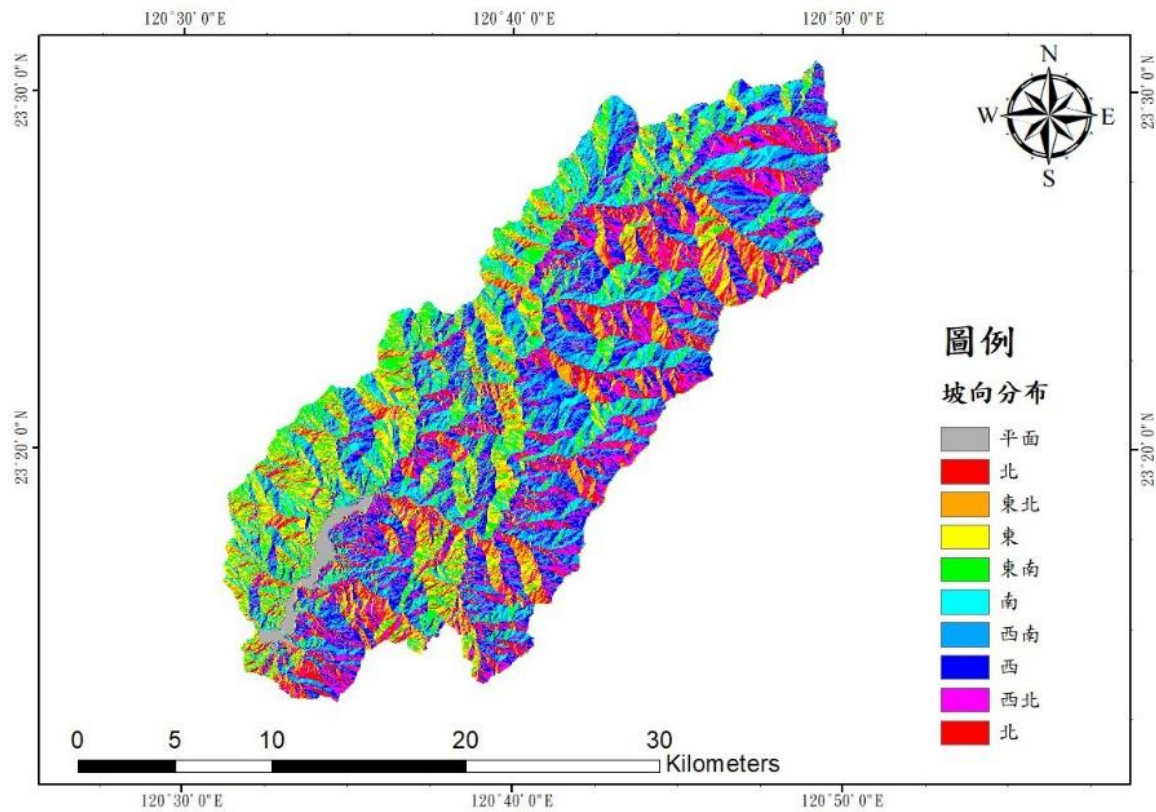


圖 2- 15 曾文水庫集水區坡向分布圖

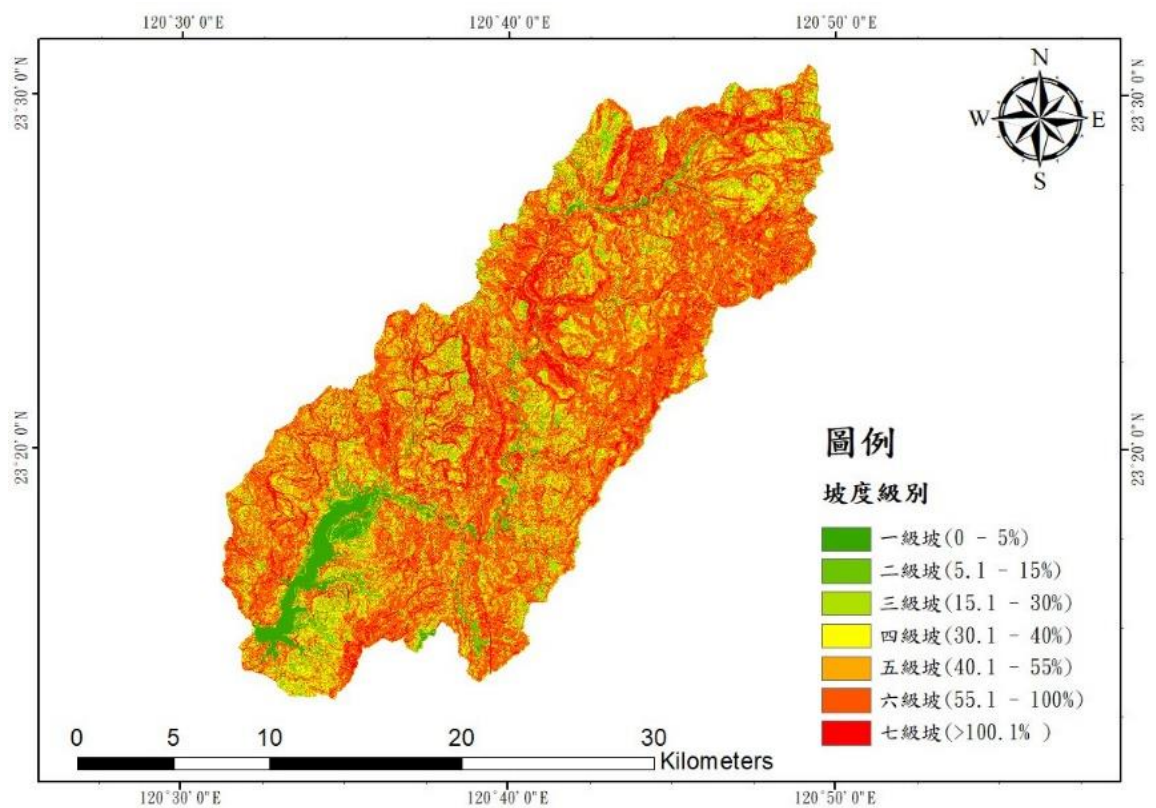


圖 2- 16 曾文水庫集水區坡度分布圖

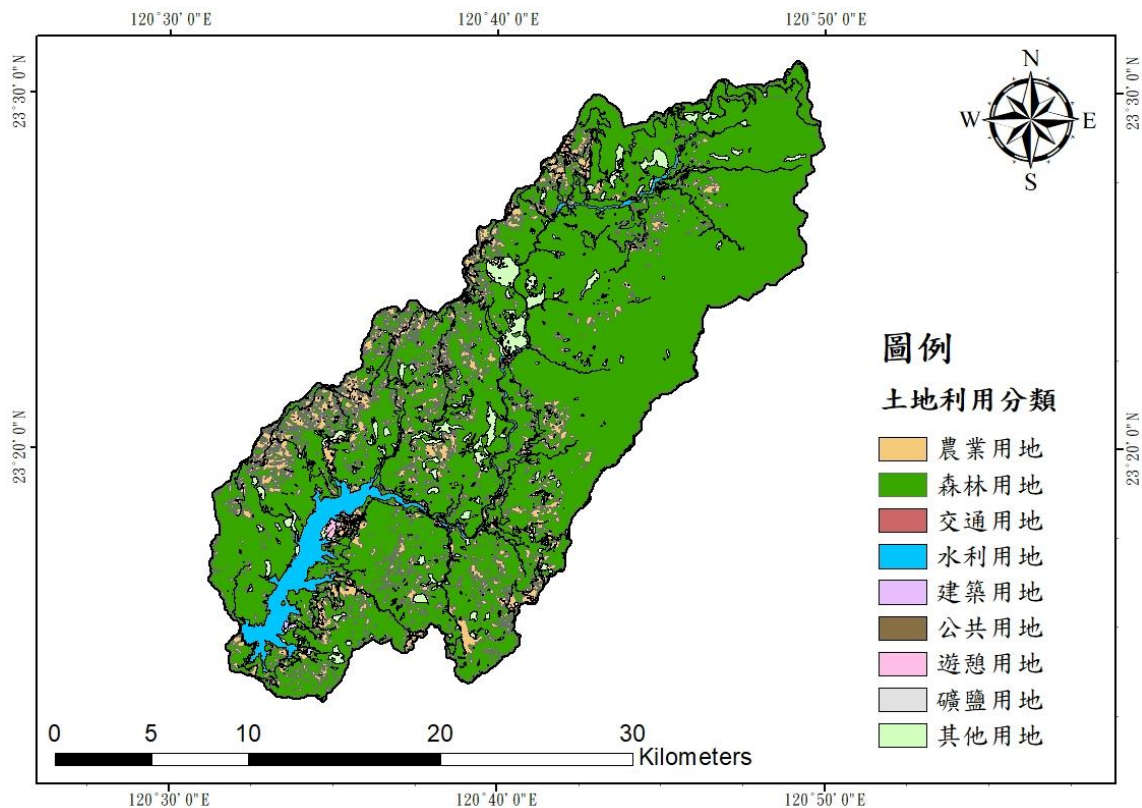


圖 2-17 曾文水庫集水區土地利用分布圖

二、曾文水庫水文資料

曾文水庫的上游集水區，是由曾文溪、草山溪、二寮溪流域水系所匯集而成，水系圖如圖 2-18 所示。曾文水庫集水區範圍內的水系，以曾文溪主流貫穿中央部位，主要支流有：長谷川溪、中坑溪、伊斯基安那溪、達德安溪、烏奇那溪、塔乃庫溪、山美坑溪、塔庫布央溪、沙力基溪、埔仔寮溪、陀亞奇伊溪、雷公溪、竹坑溪、水底寮溪、草蘭溪及東西坑溪等。主支流總數共 18 條，總長約 213.1 公里。

根據 2024 年農業部農村發展及水土保持署公告之 1,736 條土石流潛勢溪流中，位於曾文水庫集水區範圍內的共有 20 條，其分布位置如圖 2-19 所示；其中有 2 條之潛勢等級為高，分別為嘉縣 DF057 及嘉縣 DF080。

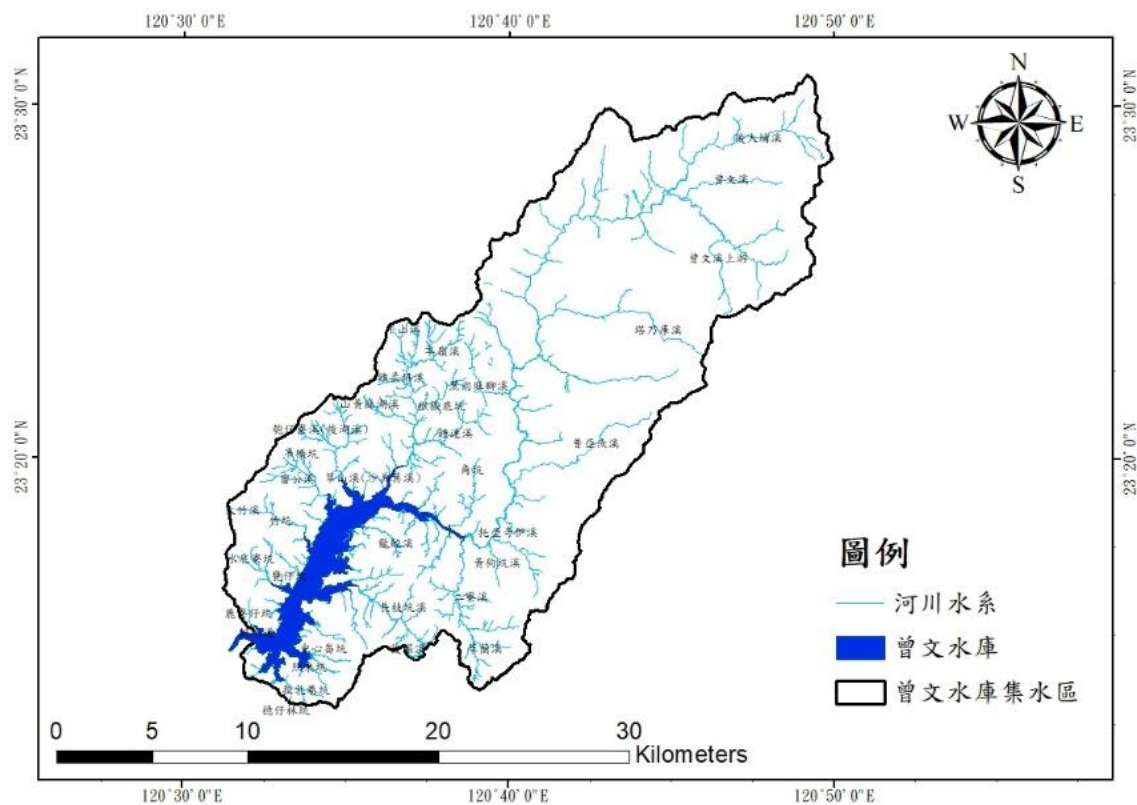


圖 2- 18 曾文水庫集水區河川水系圖

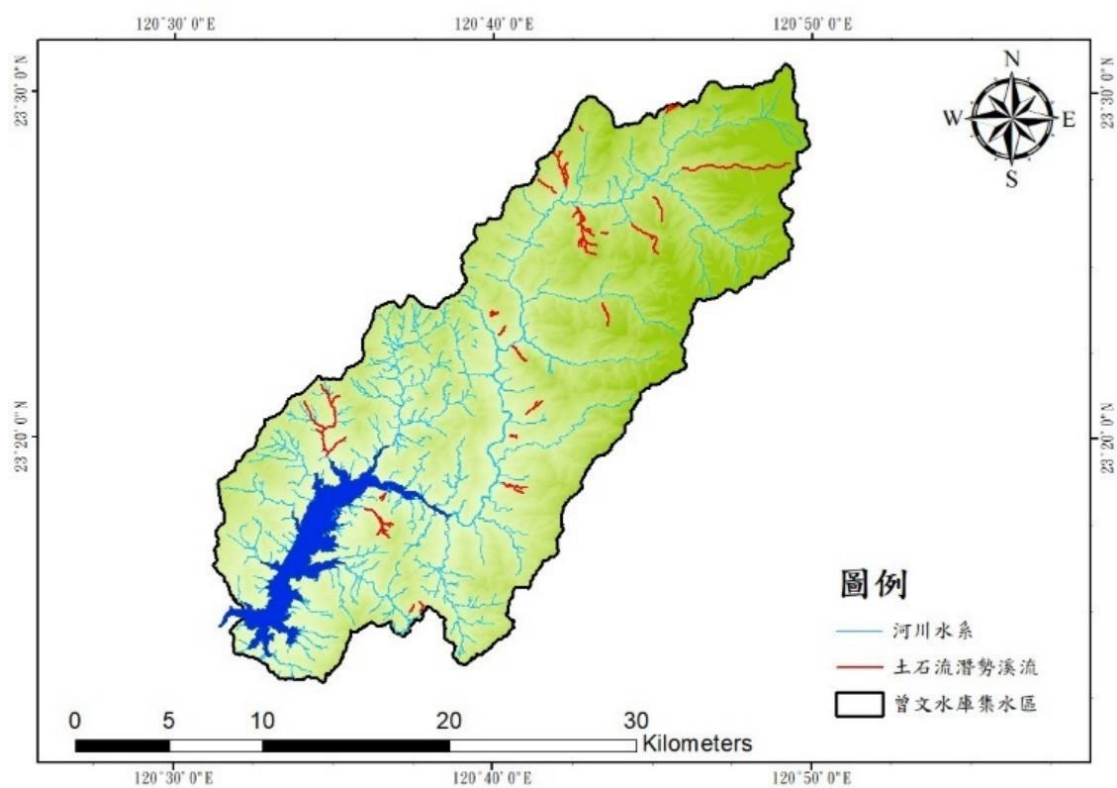
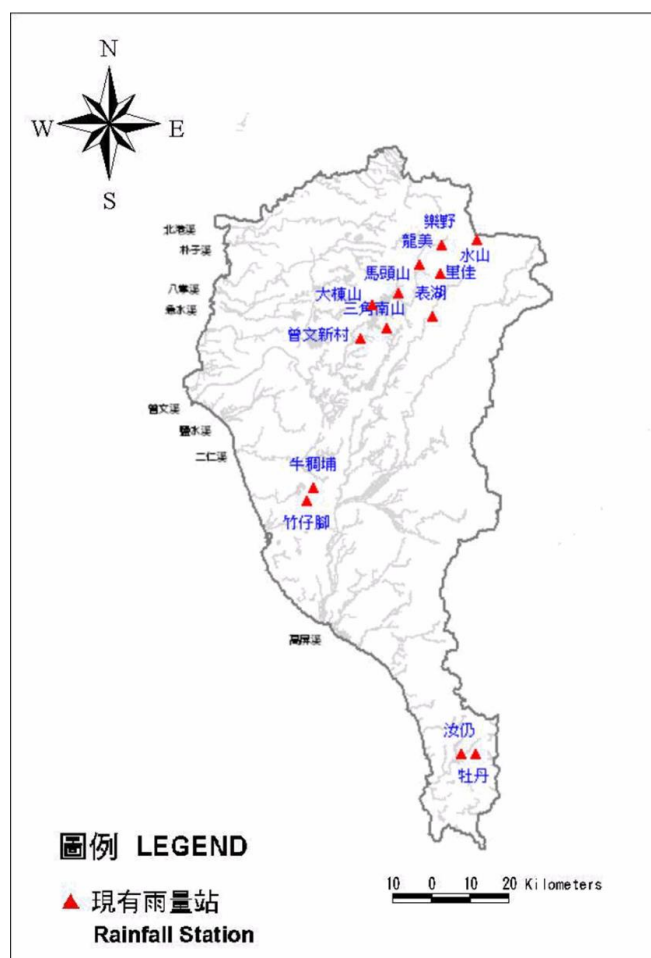


圖 2- 19 曾文水庫集水區土石流潛勢溪流圖

(一) 雨量資料

經濟部水利署南區水資源分署所管之雨量測站在集水區範圍內共有 9 站，分別為曾文新村、三角南山、大棟山、馬頭山、表湖、龍美、里佳、樂野及水山，雨量站分布圖如圖 2-20；表 2-7 為各雨量站之基本資料；表 2-8 為平均降雨量統計表。

經雨量統計，自每年 2 月份開始，由東北季風轉為西南季風，因受中央山脈地形影響，其位置恰位於臺灣西部、西南季風之迎風面，降雨逐漸增多，降雨多集中於 5 月至 9 月，占全年降雨量 80 % 以上，其因 5 至 6 月的梅雨及 7 至 9 月的颱風侵襲下，亦有豪大雨發生之可能性，年平均雨量在 2000 至 3,200 毫米之間。



資料來源：經濟部水利署「中華民國一一二年臺灣水文年報」

圖 2-20 水利署南區水資源局所管雨量測站分布圖

表 2-7 曾文水庫集水區內雨量站資料表

站號	雨量站站名	設站年份	標高	經度	緯度	管理單位
H00660	曾文新村	1968	147	120.4903	23.2226	經濟部水利署
H1M420	三角南山	1990	328	120.5635	23.2476	經濟部水利署
H1O940	大棟山	1990	1234	120.5228	23.3098	經濟部水利署
H1M250	馬頭山	1969	1020	120.5953	23.3381	經濟部水利署
H1P970	表湖	1976	1100	120.6913	23.2783	經濟部水利署
H1M430	龍美	1990	1200	120.6542	23.4118	經濟部水利署
H1M220	里佳	1969	1550	120.7119	23.3881	經濟部水利署
H1M240	樂野	1976	1850	120.7166	23.4634	經濟部水利署
H1M230	水山	1969	2450	120.8125	23.4745	經濟部水利署

資料來源：經濟部水利署「中華民國一一二年臺灣水文年報」

表 2-8 曾文水庫集水區內各雨量站降雨量統計表

雨量站	歷年月平均雨量(mm)												年平均雨量 (mm)
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
曾文新村	24.3	34.2	45.6	89.6	269.2	485.2	549.2	726.5	390.6	69.7	24.3	34.2	2727.6
三角南山	27.1	37.5	49.1	106.4	302.6	523.2	525.9	682.1	333.0	74.9	22.6	23.9	2727.5
大棟山	29.9	41.2	52.7	103.5	311.4	510.9	612.4	818.9	467.3	96.4	25.6	29.0	3118.4
馬頭山	31.8	40.7	55.5	107.8	346.0	524.5	512.3	699.8	357.7	77.9	22.7	22.6	2801.2
表湖	31.3	46.5	64.8	116.3	323.2	474.4	492.7	632.8	302.7	80.9	28.9	27.0	2602.1
龍美	36.9	51.3	76.0	144.9	395.5	537.0	541.9	708.0	351.4	98.6	28.9	33.6	3027.6
里佳	46.6	58.9	77.3	144.8	404.5	596.0	566.6	726.4	337.6	105.7	34.1	37.7	3142.1
樂野	48.7	64.0	88.6	150.2	391.0	515.7	507.9	670.4	295.2	79.7	33.0	33.8	2883.9
水山	55.3	68.0	88.7	144.5	368.2	469.5	395.2	530.9	283.4	96.0	45.2	42.8	2593.0

資料來源：經濟部水利署「中華民國一一二年臺灣水文年報」

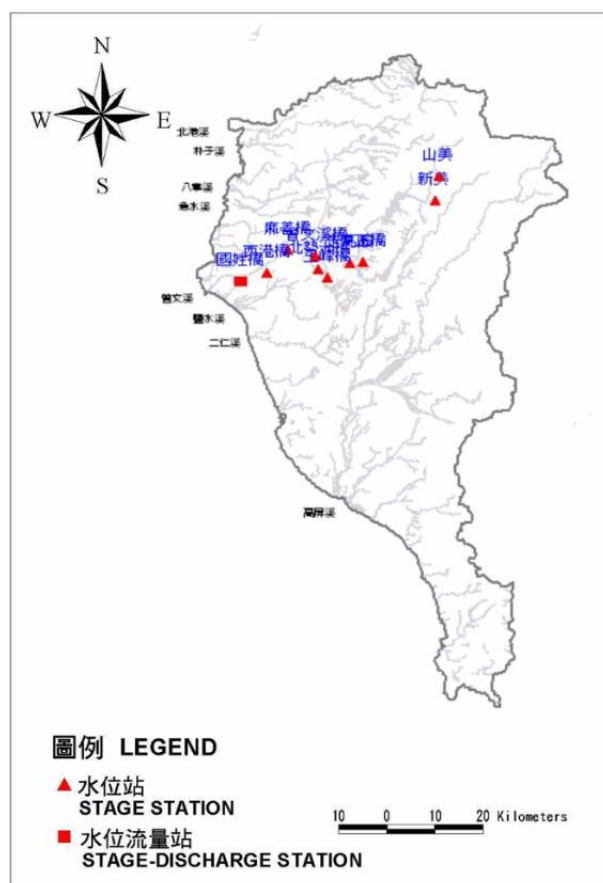
(二) 流量資料

此區域為經濟部水利署南區水資源分署所管，在曾文水庫集水區範圍內沒有設置流量站，兩站水位站分別為山美、新美，其分布圖如圖 2-21 所示；表 2-9 為曾文水庫集水區內水位站平均水位統計表。

表 2-9 曾文水庫集水區內水位站平均水位統計表

水位站	歷年月平均水位(m)												年平均水位 (m)
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
山美	401.93	402.00	402.14	402.78	403.48	404.35	404.03	404.09	403.72	403.23	402.31	402.26	403.33
新美	279.66	279.68	279.71	279.74	280.02	280.30	280.04	280.20	279.95	279.48	279.42	279.55	279.71

資料來源：經濟部水利署「中華民國一一二年臺灣水文年報」



資料來源：經濟部水利署「中華民國一十二年臺灣水文年報」

圖 2- 21 水利署南區水資源局管水位及流量站分布圖

(三) 水庫放流資料

表 2- 10 曾文水庫歷年颱風豪雨事件入流出流資料表

事件	日期	颱風強度	累積降雨量 (mm)	最大時雨量 (mm/hr)	入流體積 ($10^6 m^3$)	洪峰流量 (cms)	起始水位 (El.m)	最高水位 (El.m)	最大放流 (cms)
畢利	1976/08/09~08/11	強烈	353	36	161	2,846	223.16	226.96	964
賽洛瑪	1977/07/25~07/28	中度	600	37	296	3,610	222.35	227.87	1,550
薇拉	1977/07/31~08/02	強烈	240	19	117	1,882	225.11	226.12	1,550
愛美	1977/08/22~08/24	輕度	304	38	130	2,685	224.52	227.37	1,550
艾妮絲	1981/08/31~09/04	中度	1,030	56	483	7,143	211.41	228.2	5,300
楊希	1990/08/18~08/23	中度	719	27	371	2,752	224.89	227.84	2,297
道格	1994/08/07~08/16	強烈	694	23	367	1,429	205.4	226.17	429
賀伯	1996/07/29~08/01	強烈	1,508	75	710	8,175	178.81	227.65	447
奧托	1998/08/03~08/05	輕度	298	47	73	1,486	218.26	222.19	50
碧利斯	2000/08/22~08/26	強烈	317	23	117	1,415	202.55	212.35	54
桃芝	2001/07/29~07/31	中度	343	38	177	4,350	213.24	224.96	112
納莉	2001/09/17~09/20	中度	721	36	328	3,800	226.2	229.97	3,502
敏督利	2004/07/02~07/07	中度	1,092	44	509	5,190	173.24	222.64	50

艾利	2004/08/23~08/27	中度	440	35	186	1,900	219.84	227.32	1,335
海棠	2005/07/17~07/22	強烈	1,025	45	539	5,690	225.31	227.46	2,447
泰利	2005/08/31~09/03	強烈	493	52	303	6,665	226.9	227.72	4,850
艾維尼	2006/07/08~07/11	中度	290	31	100	2,084	223.58	226.01	1,308
碧利斯	2006/07/12~07/17	輕度	644	17	360	2,664	224.7	225.2	1,608
帕布	2007/08/11~08/14	輕度	407	23	165	1,992	193.66	208.25	56
聖帕	2007/08/18~08/22	強烈	676	31	361	2,854	210.68	226.73	1,310
柯羅莎	2007/10/06~10/08	強烈	623	43	333	5,784	226.54	227.49	4,850
卡玫基	2008/07/17~07/21	中度	677	31	351	6,940	207.58	226.39	700
鳳凰	2008/07/28~07/30	中度	437	54	214	2,640	221.32	224.58	1,550
辛樂克	2008/09/12~09/16	強烈	776	40	374	4,251	221.46	227.64	2,840
薔蜜	2008/09/27~10/01	強烈	556	33	315	4,424	225.54	227.88	1,940
莫拉克	2009/08/06~08/13	中度	2,397	101	1,191	11,729	194.71	230.96	8,367
凡那比	2010/09/18~09/21	中度	267	29	125	2,017	225.7	226.63	2,000
泰利	2012/06/18~06/22	輕度	385	19	194	1,979	219.54	220.9	1,250
蘇拉	2012/07/31~08/03	中度	403	28	156	2,634	221.1	224.36	1,850
蘇力	2013/07/12~07/14	強烈	334	30	153	2,712	212.57	222.31	50
潭美	2013/08/21~08/24	輕度	511	43	223	2,373	220.91	227.99	1,600
康芮	2013/08/27~09/02	輕度	779	41	393	2,743	228.23	228.23	1,450
麥德姆	2014/07/22~07/24	中度	267	27	83	1,560	208.18	213.64	50
蘇迪勒	2015/08/07~08/09	中度	313	33	167	3,786	210.82	221.74	1,250
杜鵑	2015/09/28~09/30	強烈	341	40	179	3,307	225.64	228.44	2,480
梅姬	2016/09/24~09/29	中度	465	40	299	5,280	227.67	228.01	4,350
尼莎	2017/07/28~07/30	中度	89	25	8	612	222.72	222.98	750
海棠	2017/07/30~08/01	輕度	307	25	166	1,853	222.02	223.87	750
0823 豪雨	2018/08/22~08/25	--	649	47	308	3,363	223.02	229.85	2,650
利奇馬暨 0815 豪雨	2019/08/06~08/20	強烈	957	39	518	2,581	226.14	228.65	1,950
0521 豪雨	2020/05/21~05/23	--	274	32	54	821	191.95	200.93	50
彩雲颱風	2021/06/03~06/07	輕度	227	24	36	536	187.55	196.4	0
0803 及 0805 豪雨	2021/07/31~08/08	輕度	999	47	496	3,911	220.59	227.72	3,150
璨樹	2021/09/10~09/12	強烈	30	9	5	53	229.28	229.38	50
海葵	2023/09/02~09/05	中度	42	4	10	97	224.61	224.68	50
小犬	2023/10.04~10/06	中度	1	0.2	4	20	229.85	229.85	20

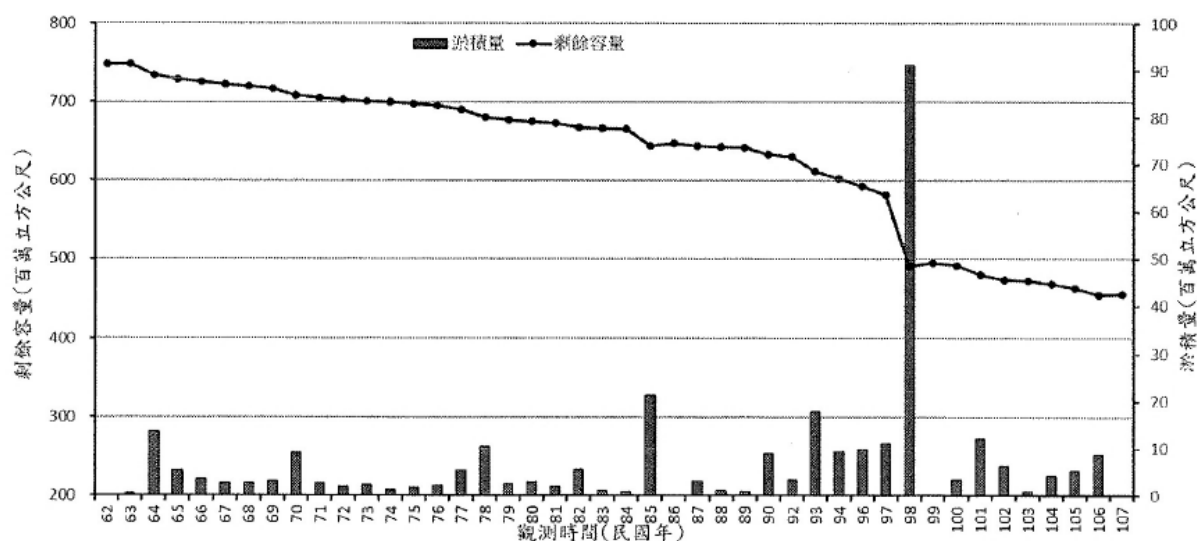
資料來源：「112 年防汛整合與曾文水庫防洪排砂運轉決策支援」

三、曾文水庫災害資料

根據「112 年防汛整合與曾文水庫防洪排砂運轉決策支援」中所述，曾文水庫上游集水區因重大颱風和大型豪雨事件導致最大累積雨量超過 200 毫米的降雨事件共計 58 場。其中前六大降雨事件分別為：2009 年莫拉克颱風、1981 年艾妮絲颱風、2004 年敏督利颱風、2005

年海棠颱風、1996 年賀伯颱風及 2006 年 0609 豪雨事件。這些極端天氣事件對水庫的淤積影響極為顯著。而曾文水庫歷年庫容量和淤積量變化如圖 2- 22 所示。而其中賀伯颱風和莫拉克颱風最為嚴重。賀伯颱風所造成的水庫淤積量達 2121 萬立方公尺；而莫拉克颱風期間，集水區內的坡面大量崩塌，土砂流入河道，高含砂水流沖刷河岸，因滔刷導致河道岸坡面崩塌，土砂崩落至河道。莫拉克颱風共造成水庫達 9108 萬立方公尺的淤積量，使得水庫總容量降至 5 億立方公尺以下。上述可看出，曾文水庫的淤積問題與極端氣候事件密切相關，特別是大型颱風對集水區內地質穩定性的影響巨大。因此有效的泥砂管理和預防措施對於維持水庫的有效運作至關重要。

而本研究選用之事件為 2008 年至 2020 年期間較重大之颱洪事件，包含 2008 年之卡枚基、鳳凰、辛樂克、薔蜜、2009 年莫拉克、2010 年凡那比、2012 年蘇拉、2013 年蘇力、潭美、2014 年麥德姆、2015 年昌鴻、蘇迪勒、杜鵑、2016 年梅姬、2017 年尼莎、2019 年利其馬等共 16 場。



資料來源：「112 年防汛整合與曾文水庫防洪排砂運轉決策支援」

圖 2- 22 曾文水庫歷年淤積量和剩餘庫容變化

第三章 文獻回顧

近 20 年來，2004 年艾利颱風造成石門水庫淤積及停水 18 天等災情；2008 年辛樂克颱風掏空上游河道造成廬山溫泉飯店倒塌，以及霧社水庫庫容急遽減少；2009 年莫拉克颱風之極端降雨使導致集水區堰塞湖潰決，曾文水庫大量泥砂淤積，全台各地河川出現高重現期流量紀錄；2012 年蘇拉颱風造成多處地區發生土石流、淹水、道路中斷等災情；2015 年蘇迪勒颱風造成的短延時強降雨使南勢溪溪水混濁導致原水濁度升高影響供水；20180823 熱帶低壓水災為西南部地區多處帶來超過 1000 mm 降雨，統計共有 1545 筆通報淹水災點，坡地災點數共 66 筆；2021 盧碧颱風造成荖濃溪溪水暴漲，沖毀位於台 20 線南橫公路之明霸克露橋；2023 年卡努颱風在氣象局仁愛、霧社測站分別創下單日降雨最高紀錄，大量水砂自集水區一瀉而下，不僅導致河床大幅抬升，也致使部分聯外道路坍塌、橋梁沖毀，使仁愛鄉蒙受嚴重災損。（資料參考：<https://den.ncdr.nat.gov.tw/>）。

集水區降雨會造成地表逕流驅動泥砂運動並受重力影響產生輸送現象；高濃度含砂流體進入水庫造成異重流；部分泥砂自水庫閘門排出；部分泥砂於颱風事件結束後於庫區落淤。上述三種泥砂輸送現象包含了亞臨界流、超臨界流、異重流況、沉降行為等不同運動狀態。不同流況發生於不同地區不僅有獨特輸送機制，亦具備相異時空變化關係。若僅輸入原始數據訓練機器人而忽略土砂運動的物理現象及數據間的數學關係，通常無法進一步提升分析機器人的功能。

過去多數研究針對演算法優化以提升機器人分析能力，本研究將植入術具科學及土砂運動機制於訓練迴路中，協助機器人學習將資料去蕪存菁並藉此淨化不合理輸入所產生的雜訊，提升分析精度後發展視覺化分析平台提升民眾防災應變量能。圖 3-1 為計畫目標示意圖。



圖 3-1 計畫目標示意圖

第一節 傳統分析方式

當上游集水區產生降雨並落至地面形成地表逕流開始，山區河道的生命週期即與輸砂行為脫離不了關係 (Chiang et al., 2021; Nazir et al., 2016; L. Wu et al., 2018)。近年來氣候變遷導致極端降雨頻率及強度大增，且因台灣多為陡坡和急流的特性引發嚴重崩塌及沖刷行為 (Chen et al., 2019; Ghorbanzadeh et al., 2021; Lin et al., 2017)。上述泥砂輸送現象將使洪水中夾帶之泥砂濃度遽增，進而在颱風時期影響水庫操作及儲水效能 (Chiu et al., 2019; Lee et al., 2022; Schleiss et al., 2016)。因此，了解山區河道之泥砂輸送量體即為優化水砂預警的第一道防線。

在過去的幾十年中，研究者廣泛開發集水區土壤沖蝕及泥砂輸送模式，透過對不同地區的降雨量、地表逕流量、集水區特性、泥砂材質進行定性及定量分析，並發現不同地區各自具備其輸送形式、特徵強度及發生頻率 (Garcia-Ruiz et al., 2015; Poesen, 2018; Wuepper et al., 2020)。Nearing et al. (2017)考量土壤顆粒的運移、沖刷和沉降機制，說明模式須經水文地文資料建置、運動機制評估、敏感度分析等步驟，方可於現地應用中取得成效。Batista et al. (2019)回顧相關模式應用成果，不同模式各有其於特定區域的適用性，所有模式皆須經過嚴

謹的檢驗過程，透過參數優化以消除其不確定性，如此可提升應用在特定集水區的一致性及準確性。Alewell et al. (2019)比較通用土壤流失公式 (USLE, Universal Soil Loss Equation)與其他模式之應用成果及限制性，文獻成果認為應結合更先進技術如遙測、空拍等技術來提高相關數據的空間分辨率，當務之急為擴充量測能量以建立集水區泥砂輸送大數據資料庫。Borrelli et al., (2021)為全面了解現行應用狀況，回顧近 30 年相關應用案例並建立數據庫，認為目前雖有空間-時間分布不確定性之限制存在，然現行技術在經合理的科學檢驗後可合理預估其沖蝕及輸砂行為，惟其仍不足以獨立應用於預測系統。

第二節 分析系統之應用

利用分析系統即時獲取災害訊息，進而採取因應措施為減少災損的關鍵 (Perera et al., 2020)。世界各國皆發展各類感測儀器獲取可用數據藉以發展分析技術。

美國建立感測網絡後利用大量觀測數據進行分析以求優化災害管理系統，並考量風險矩陣來評估災損程度 (Chen et al., 2022)。歐洲各國監測雨量-水位關係進行流域防洪系統設計 (Fernández-Nóvoa et al., 2020)。頻受土砂災害影響的中國則進行最大洪峰流量及砂量的研究，提供易致災地區更可靠的分析及減災系統 (Cui et al., 2021 Zang et al., 2022)。東南亞各國也常受水砂複合性災害侵襲，這些國家建立雨量-流量-砂量關係，針對短延時強降雨土石流災害進行災會規模評估，優選適用演算法並提出初步調適方案 (Chantraket et al., 2022)。東北亞日、韓兩國同樣為複合性災害風險極高的國家，韓國持續研究水砂之時間-空間關係以期改善災害分析精度；日本則將災害管理系統所提供資訊與不同資料庫及社群媒體進行整合，進一步提升決策分析及臨災應變之整體量能 (Cvetković, 2021; Kitazawa & Hale, 2021)。

台灣進行災害風險管理研究已久，Huang et al. (2019)結合多目標遺傳算法和支持向量機進行極短期泥砂濃度預警，符合分析系統所需之時效性，提供管理人員足夠應變時間。台灣官方單位如：交通部中央氣象局提供降雨預報資料；水庫管理單位發展入流水砂量監測系統；經濟部水利署開發二維即時洪水預警系統；各地方政府建構都市智慧防汛網；農業委員會水土保持局發展土石流監測及分析系統。由上述說明可知，世界各國及台灣諸多相關研究已能夠透過廣布感測元件取得大數據，並利用測量資料進行災害規模分析。下一階段即須整合不同技術以求提升分析精度。

第三節 分析系統之優化

許多學者從電腦發明後便朝著研發人工智慧的方向邁進。然而，在數十年後才因 Hubel & Wiesel (1962)研究貓的視覺神經元對光刺激的反應有了新的進展。學者將神經元研究從生物學移植到人工智慧領域研發人工神經網路的概念。並發展出機器學習以至於深度學習等許多演算法。

人工神經網路隸屬人工智慧下的一個分支，其使用不同階級神經元鍵結特性建立讓電腦從大量資訊學習、訓練、測試、改善的系統。以工程角度而言，人工神經網路首先會建立測試過程，即從已知輸入與輸出變量之間建立線性/非線性關係。經優化後神經網路可進行預測並產出新數據 (驗證過程)。若其整體誤差在經比對後為零即可稱為完美預測。因人工神經網路具備不須對物理關係多做著墨即可藉由演算法分析產出數據的特性並進行預測。在各個領域已被大量應用且產出豐碩成果。

承上，人工神經網路可透過測量資料輸入搭配不同演算法取得時間序列分析成果。然而，人工神經網路應用在防災系統之關鍵課題為

資料合理性及完整性，若欲提升資料合理性須考慮土砂運移機制，同時導入數據科學則可進一步提升資料的完整性。建立完整且合理的數據系統再導入人工神經網路技術方可有效提升分析系統精度。

本研究意欲發展的分析技術須考慮造成土砂的啟動、運移、沉積等運動行為，讓分析系統具備思考土砂運動機制的能力。最重要的是，過去較少以水庫排砂及淤積數據分析集水區土砂來源，本研究考量聯合集水區-庫區進行土砂來源分析，並將資訊整合發展決策分析平台。如此不僅具備學術獨特性也兼顧實務可行性，可提升分析系統精確性及時效性。

第四章 研究方法

本計畫之研究架構可區分為三大區塊，分別為資料前處理、SWAT 模式建立與人工神經網路建立，藉由上述研究步驟建立集水區土砂來源之分析系統。本計畫已完成資料收集並於第二章詳述，在此不再贅述。SWAT 模式之理論基礎則會於第一節中詳述；另模擬成果於第五章中敘述。人工神經網路之演算法選取原則會於第二節中敘述，初步測試成果同楊於第五章內容呈現。圖 4-1 為本研究之整體架構圖。

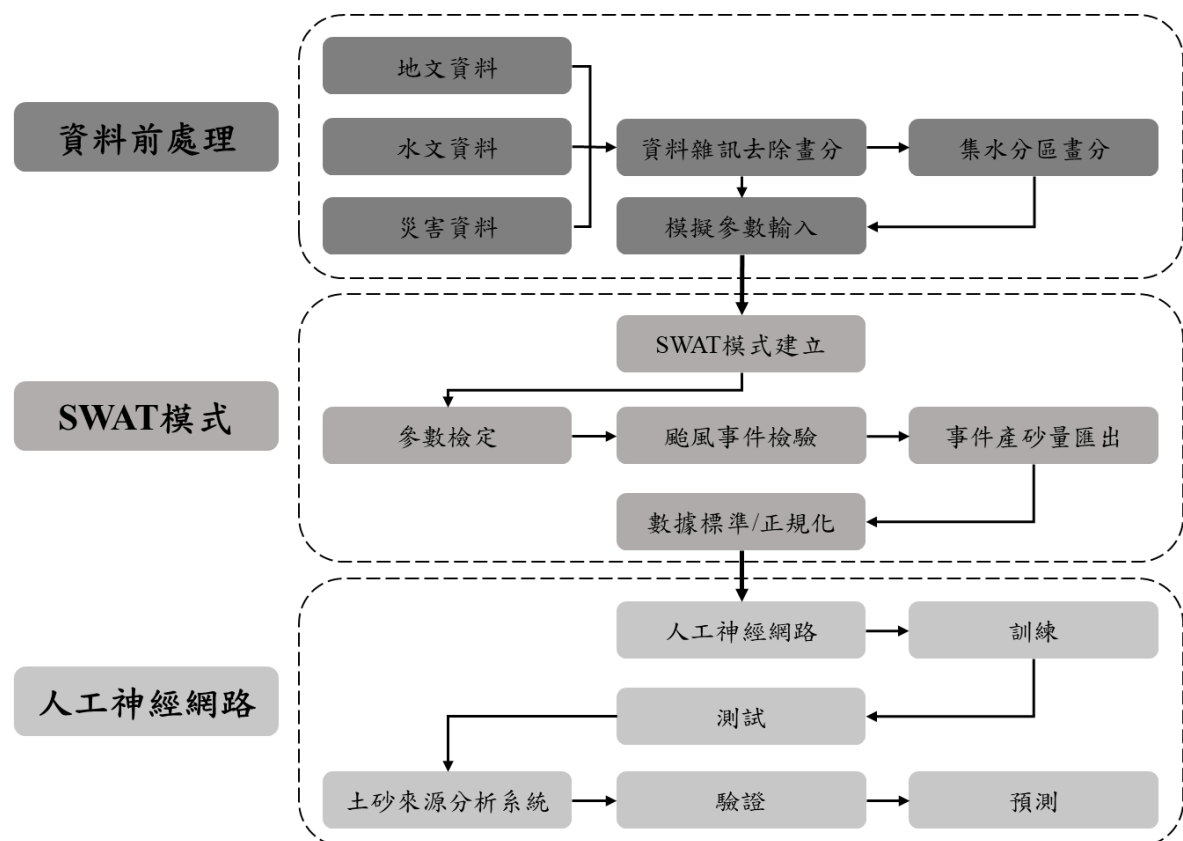


圖 4-1 研究整體架構

第一節 SWAT 理論基礎

SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) 模型是由美國農業部(USDA, United States Department of Agriculture)之農業研究中心(ARS, Agricultural Research Service)所研發。SWAT 模型劃定一個流

域再將其劃分成多個子流域，再根據每個子流域內不同的土地利用、土壤及地形條件進一步劃分為若干水文響應單元(HRU, Hydrologic Response Unit)，以便更精確地模擬分析流域內的運動過程。每個 HRU 都代表一組具有相似特徵的土地單位，使得模型可以針對不同區域的具體情形進行準確的模擬，且得以用不同的時間尺度(時、日、月、年)進行模擬流域、子集水區中的水循環、流量、輸砂量、地下水、營養鹽、農藥等項目的傳輸過程(Parajuli et al., 2013; 盧至美, 2018)。

一、模式建立所需資料

建立 SWAT 模型所需的資料包括多種基本數據，如地形數值高程模型 (DEM, Digital Element Model)、水系圖、土壤圖、土地利用分布圖。此外，還需要詳細的氣象資料，包括測站的基本資料、降雨量、最高和最低氣溫、相對濕度、風速和太陽輻射等。在必要時，可以根據具體需求，額外輸入更多相關數據，例如水庫資訊、點源污染、殺蟲劑和肥料等數據，以便更精確地模擬和分析流域內的各種環境和水文運移過程。

二、模式模擬使用公式

(一) 地表逕流

SWAT 模擬地表徑流量是根據每日降雨量使用美國土壤保持局於 1972 年發展之 SCS 曲線法(SCS Curve Number method)進行計算，其公式如下：

$$Q_{surf} = \frac{(R - I_a)^2}{(R - I_a + S)}, P \geq I_a \quad (1)$$

式中， Q_{surf} 為地表逕流量(mm)； R 為降雨量(mm)； I_a 為初始損失量

(mm)(包含窪蓄、入滲、截流等，通常假設 $I_a = 0.2S$)； S 為集水區最大蓄水量(mm)，其值受土壤特性、土地利用狀況、坡度與水土保持工程措施等因素影響而改變，因此美國土壤保持局將 S 值轉換為經驗公式如下：

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

式中， CN (Curve Number)為逕流曲線係數，值會隨土壤含水量呈現非線性變化。

(二) 土壤沖蝕量

SWAT 模擬降雨徑流量產生之土壤沖蝕量是採用修正土壤流失方程式(MUSLE, Modified Universal Soil Loss Equation) (Williams, 1995)來計算，其公式如下：

$$S = 11.8 (Q_{surf} \times q_{peak} \times A)^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times CFRG \quad (3)$$

式中， S 為土壤流失量(ton)； Q_{surf} 為地表逕流量(mm/ha)； q_{peak} 為洪峰逕流量(cms)； A 為 HRU 面積(ha)； K 為土壤沖蝕因子； C 為植被覆蓋與管理因子； P 為水土保持處理因子； LS 為地形因子； $CFRG$ 為直徑大於 2mm 的粗碎塊因子(Neitsch et al., 2002)。

修正土壤流失方程式(MUSLE)是將 Wischmeier and Smith (1965、1978)開發之通用土壤流失方程式(USLE, Universal Soil Loss Equation)的修正形式，其差別在於 USLE 依據降雨動能計算年總土壤流失量，而在 MUSLE 公式中逕流因子取代了降雨與逕流侵蝕指數，能夠更好地反映流域中逕流能量和泥砂的輸送過程，便不需要考慮泥砂遞移率，可估算單次降雨事件的土壤沖蝕量，提高預測的精確度也更適合用於水文模型和降雨事件驅動的情況下(Neitsch et al., 2002)。

1. 土壤沖蝕因子(K)

Wischmeier and Smith (1978)將土壤沖蝕因子定義為土壤在單位土塊上每單位侵蝕指數的土壤流失率。並指出不管砂和黏土比例是否增加，土壤的可蝕性隨著粉土的含量降低而降低。而在 SWAT 模式中，使用者可直接於資料庫輸入土壤沖蝕因子，或使用 Wischmeier et al. (1971) 所開發的通用公式，其適用於粉土和極細砂比例不超過 70% 土壤粒徑分佈的情況下。公式如下：

$$K = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3.25 \cdot (C_{soilstr} - 2) + 2.5 \cdot (C_{perm} - 3)}{100} \quad (4)$$

式中， K 為土壤沖蝕因子； M 為粒徑尺寸參數； OM 為有機物含量百分比； $C_{soilstr}$ 為土壤分類中的土壤結構代號； C_{perm} 為土壤可滲透性等級。

2. 覆蓋與管理因子(C)

覆蓋與管理因子意義是在地形、土壤、降雨條件相同的條件下，耕作的土地、林草地與連續休閒地土壤流失量的比值。在 SWAT 模式中，因需考慮植被生長週期，需每天計算更新 C 值，其計算公式如下：

$$C = \exp\{\ln(0.8) - \ln(C_{min})\} \cdot \exp[-0.00115 \cdot rsd_{surf}] + \ln(C_{min}) \quad (5)$$

式中， C 為覆蓋與管理因子； C_{min} 為覆蓋和管理因子係數的最小值； rsd_{surf} 為地表殘留量(kg/ha)，其中 C_{min} 可以根據已知的年平均 C 值(C_{aa})使用以下公式進行計算：

$$C_{min} = 1.463 \ln(C_{aa}) + 0.1034 \quad (6)$$

3.水土保持因子(P)

水土保持因子指有保持措施的地表土壤流失與不採取任何措施的地表土壤流失的比值，在 SWAT 中，P 值由坡度與坡長進行訂定，耕作的耕地通常可減少多數之土壤沖蝕，除了對高強度的降雨保護作用則很小，其建議 P 值對照表 4- 1。(Neitsch et al., 2002)。

表 4- 1 水保因子對照表(Wischmeier and Smith,1978)

坡度(%)	水土保持處理因子(P 值)	最長坡長
1~2	0.6	122
3~5	0.5	91
6~8	0.5	61
9~12	0.6	37
13~16	0.7	24
17~20	0.8	18
21~25	0.9	15

資料來源：「Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009」

4.地形因子(LS)

地形因子則表示坡面單位面積與標準試區(長 22m、坡度 9%)單位面積土壤流失的比值，其計算式如下：

$$LS = \left(\frac{L}{22.1} \right)^k \cdot (65.41 \cdot \sin^2 \alpha + 4.56 \cdot \sin \alpha + 0.065) \quad (7)$$

$$k = 0.6 \cdot [1 - \exp(-35.835 \cdot slp)] \quad (8)$$

上式中， LS 為地形因子； L 為坡長(m)； α 為坡度； k 為指數參數； $slp = \tan \alpha$ 為 HRU 之斜率表示上升幅度(m/m)。

5.粗糙因子(CFRG)

粗糙因子由表土層岩石比例(rock)去進行計算，其計算式如下：

$$CFRG = \exp(-0.053 \cdot rock) \quad (9)$$

(三) 輸砂公式

SWAT 目前共有四種輸砂公式可供選擇使用包含了 Bagnold model、Kodatie model、Molinas and Wu model 和 Yang sand and gravel model，可根據使用者模擬區域泥砂種類及特性選擇最適用之輸砂計算公式(Neitsch et al., 2011)。

1. Bagnold model

Williams (1980) 採用 Bagnold (1977) 定義的水流功率發展了根據河道坡度和流速計算沖刷的方程式，可根據河道最大流速運算出該河段可輸移的最大泥砂量，其公式如下：

$$CONC_{sed,ch,mx} = C_{sp} \cdot V_{ch,pk}^{spexp} \quad (10)$$

式中， $CONC_{sed,ch,mx}$ 為河道可輸移的最大泥砂濃度(ton/m^3 或 KG/L)； C_{sp} 為線性係數(在模式參數設定中為 SPCON，可供使用者定義)； $V_{ch,pk}$ 為河道尖峰流速(m/s)； $spexp$ 為指數係數(在模式參數設定中為 SPEXP，可供使用者定義)，範圍通常在 1.0~2.0 之間。

而最大泥砂濃度需與時間步長開始時河道泥砂濃度進行比較，若 $conc_{sed,ch,mx} < conc_{sed,ch,i}$ 時，則表示模式判定此河道的主要過程為沉澱、淤積，反之，若 $conc_{sed,ch,mx} > conc_{sed,ch,i}$ 時，此河道的主要過程為沖刷、侵蝕。其沉積量、沖蝕量的計算式如下：

$$sed_{dep} = (conc_{sed,ch,i} - conc_{sed,ch,mx}) \cdot V_{ch} \quad (11)$$

$$sed_{deg} = (conc_{sed,ch,mx} - conc_{sed,ch,i}) \cdot V_{ch} \cdot K_{ch} \cdot C_{ch} \quad (12)$$

式中， sed_{dep} 為河段沉積泥砂量(metric tons)； sed_{deg} 為河段沖刷泥砂量(metric tons)； $conc_{sed,ch,i}$ 為河道初始泥砂濃度(ton/m^3 或 KG/L)； $conc_{sed,ch,mx}$ 為河道可輸移的最大泥砂濃度(ton/m^3 或 KG/L)； V_{ch} 為

水體體積(m^3)； K_{ch} 為河道侵蝕因子； C_{ch} 為河道覆蓋因子。

確認了河段之沉積與侵蝕量後，即可計算出河道中的懸浮泥砂量，其式如下：

$$sed_{ch} = sed_{ch,i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad (13)$$

式中， sed_{ch} 為河道中的懸浮泥砂量(metric tons)； $sed_{ch,i}$ 為時間步長開始時河道中的懸浮泥砂量(metric tons)。

而河道中最終輸出的泥砂量之計算式為：

$$sed_{out} = sed_{ch} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad (14)$$

式中， sed_{out} 為河道中輸出的泥砂量(metric tons)； V_{out} 為時間步長內的出流量(m^3)

2.Kodatie model

Kodatie (2000) 使用非線性最佳化和不同粒徑河床質的現場數據修改了 Posada (1995) 開發的方程式計算河川輸砂量，並河川類型依照河床質不同粒徑(D_{50})大小分為四種。而河川最大可容許輸砂量其計算式如下：

$$conc_{sed,ch,mx} = \left(\frac{a \cdot v_{ch}^b \cdot y^c \cdot S^d}{Q_{in}} \right) \cdot \left(\frac{W + W_{btm}}{2} \right) \quad (15)$$

式中， $conc_{sed,ch,mx}$ 為河道可輸移的最大泥砂濃度(ton/m^3 或 KG/L)； v_{ch} 為平均流速(m/s)； y 為平均水位(m)； S 為能量坡度(m/m)； Q_{in} 為時間步長內河段入流量(m^3)； W 為河道水面渠道寬(m)； W_{btm} 為河床寬(m)； a 、 b 、 c 、 d 為迴歸係數，會依河床質粒徑不同而有所不同，詳見表 4-2。

表 4-2 Kodatie equation 之河川分類及迴歸係數

河川分類	粒徑(D_{50})	a	b	c	d
粉土質河川	$D_{50}^* < 0.05mm$	281.4	2.622	0.182	0
細骨材質河川	$0.05mm < D_{50} \leq 0.25mm$	2829.6	3.646	0.406	0.412
砂質河川	$0.25mm < D_{50} \leq 2mm$	2123.4	3.3	0.468	0.613
礫石河川	$D_{50} > 2mm$	431884.8	1	1	2

資料來源：「Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009」

3. Molinas and Wu model

Molinas and Wu equation 適用於砂質粒徑之河川，Molinas and Wu (2001) 基於通用河流動力，利用經驗公式計算懸浮固體濃度。其公式如下：

$$C_w = M\Psi^N \quad (16)$$

式中， C_w 為懸浮固體重量濃度(mg/L)； Ψ 為通用河流動力，M、N 為係數。此方程式經過 414 個大型河床數據檢驗後，包括亞馬遜河、密西西比河等，結果計算式如下：

$$C_w = \frac{1430 \cdot (0.86 + \sqrt{\Psi})\Psi^3}{0.016 + \Psi} \cdot 10^{-6} \quad (17)$$

$$\Psi = \frac{\Psi^3}{(S_g - 1) \cdot g \cdot depth \cdot \omega_{50} \cdot \left[\log_{10} \left(\frac{depth}{D_{50}} \right) \right]^2} \quad (18)$$

$$\omega_{50} = \frac{411 \cdot D_{50}^2}{3600} \quad (19)$$

式中， S_g 為懸浮固體相對密度(2.65)； g 為重力加速度($9.81 m/s^2$)； $depth$ 為水深(m)； D_{50} 為平均粒徑(mm)； ω_{50} 為平均沉降速度(m/s)，

是根據 Stokes' Law 所計算出假設在 22° C、懸浮固體密度為 1.2 t/m³。

將重量濃度轉換為體積濃度，以得到河道可輸移的最大泥砂濃度 $conc_{sed, ch, mx}$ (ton/m³)，如下式：

$$conc_{sed, ch, mx} = \frac{C_w}{C_w + (1 - C_w) \cdot S_g} \cdot S_g \quad (20)$$

4. Yang sand and gravel model

Yang sand and gravel model (1996) 適用於砂質及礫石河川並針對兩種個別建立了單獨的方程，並求解了懸浮固體重量濃度。迴歸方程式是基於單位水流功率、臨界單位水流功率、剪切速度、沉降速度、動力黏度和沉積物尺寸而建立的方程式。

砂質河川 ($D_{50} < 2mm$) 公式如下：

$$\begin{aligned} \log C_w = & 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega_{50} D_{50}}{v} - 0.457 \frac{V_*}{\omega_{50}} \\ & + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega_{50} D_{50}}{v} - 0.314 \frac{V_*}{\omega_{50}} \right) \log \left(\frac{V_{ch} S}{\omega_{50}} - \frac{V_{cr} S}{\omega_{50}} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

礫石河川 ($2mm \leq D_{50} \leq 10mm$) 公式如下：

$$\begin{aligned} \log C_w = & 6.681 - 0.6331 \log \frac{\omega_{50} D_{50}}{v} - 4.816 \frac{V_*}{\omega_{50}} \\ & + \left(2.784 - 0.305 \log \frac{\omega_{50} D_{50}}{v} - 0.282 \frac{V_*}{\omega_{50}} \right) \log \left(\frac{V_{ch} S}{\omega_{50}} - \frac{V_{cr} S}{\omega_{50}} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

式中， C_w 為重量濃度 (ppm)； ω_{50} 為平均粒徑的平均沉降速度 (m/s)； v 為動力黏度 (m²/s)； V_* 為剪切速度 $\sqrt{gRS}$ (m/s)； V_{ch} 為平均流速 (m/s)； V_{cr} 為臨界速度 (m/s)； S 為能量坡度 (m/m)。再將 C_w 從重量濃度 (ppm) 除以 10⁶ 轉換為體積濃度，得到河道可輸移的最大泥砂濃度 $conc_{sed, ch, mx}$ (ton/m³)。

三、敏感參數

在 SWAT 模式中，選擇使用輸砂公式時，是根據 CH_EQN 參數，本計劃使用 Bagnold model，式(10)來計算河道泥砂演進時河道可輸移的最大泥砂濃度，其中 c_{sp} 為線性係數(在參數設定中為 SPCON)，其值介於 0.0001~0.01 之間； $spexp$ 為指數係數(在參數設定中為 SPEXP)，其值通常在 1.0~2.0 之間。SPCON、SPEXP 兩者皆會直接影響最大泥砂濃度，從而對最終產砂量有著直接性的影響。

除了上述參數外，參數 CH_ERODMO 代表河道的可侵蝕性，其值為 0.0~1.0 之間，可視為是否允許河道侵蝕的直接開關。而 CH_COV1、CH_COV2 兩個參數分別代表河岸及河床中的植被係數詳見表 4-3，而植被會降低河岸、河床表面附近的水流速度並使其侵蝕力減少，其對產砂量有著顯著的影響，因此可根據實際狀況給定植被係數，以增加模擬的準確性。

表 4-3 植被係數表(Julian and Torres, 2006)

植被情形	CH_COV1(河岸)	CH_COV2(河床)
無	1.00	1.00
草叢	1.97	1.97
樹木稀疏	5.40	5.40
樹木茂密	19.20	19.20

資料來源：「Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009」

參數 ADJ_PRK 為子集水區沉積物路徑的峰值速率調整因子。由於使用每日雨量，SWAT 無法直接計算次日水位線，該變數是為調整峰值流量對泥砂演進的影響。此因子用於 MUSLE 方程式並會影響 HRU 中產生的土壤沖蝕量(Neitsch et al., 2002)。參數 PRF 為主河道泥砂輸送時的峰值速率調整因子，與 ADJ_PRK 相似，但 PRF 用於調整主河道泥砂運輸的速率，而 ADJ_PRK 則是調整坡面土壤沖蝕沉積物運輸過程。兩者都會直接影響流量的峰值，從而影響產砂量的變化。

第二節 預測系統之演算法簡介

本章節考量使用統計方法、深度學習、集成學習建立預測系統，相關說明如下：

一、統計方法

本計畫在多重演算階段將採用包含：線性回歸 (Linear Regression)、多項式回歸 (Polynomial Regression)、逐步回歸 (Stepwise Regression)及邏輯回歸 (Logistics Regression)等方法進行訓練與測試。各方法之相關說明如下：

(一) 線性回歸

線性回歸屬於一元問題，主要建立自變數(X，在此可選擇流量)和因變數(Y，在此可選擇泥砂濃度)的關係，此時訓練數據的回歸線為一條直線。然而，此方法對奇異點 (極端值)非常敏感，因此須注意數據探勘和補遺的合理性。

(二) 多項式回歸

多項式回歸可視為非線性回歸，考量水砂運移的時間-空間變化並無法全以線性關係解釋，故可納入多項式回歸進行評估。應用此方法時應注意高階多項式可能出現過度擬合 (over-fitted)情形而影響分析模式精度。

(三) 逐步回歸

上述兩回歸方法主要針對 Y 選擇單一目標 X，接著透過線性、非線性方法建立「相對較佳」回歸方程式，並藉此分析因變數之值。逐步回歸方法則會選取多個 X (如雨量、流速、崩塌量...等)，並採取「逐一加入」或「全部加入後再逐一剔除」，藉此優選較佳 X 進行

回歸，並建立回歸方程式進行分析。

(四) 羅吉斯回歸

羅吉斯回歸通常用於判斷某事件成功或失敗的機率，可將 Y 視為真/假；是/否；或以 1/0 來取代。在本計畫中可藉由羅吉斯回歸的特性，將 Y 的值域 (0-1)重新進行權重分配得出分析值。

二、深度學習

由於輸入與輸出的維度與資料量差距過大且無效值比例過高(如圖 4- 2 所示)，傳統的機器學習模式無法處理這類的問題，所以我們需要導入新型態的深度學習 (Deep Learning, DL)或者是集成式學習 (Ensemble Learning)來處理本議題。

Input		Label																				
Input	Label	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
石門水庫八景區	人跡罕至	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr	ton/hr
95.703	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.444	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.008	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.339	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.725	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.539	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.085	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
137.55	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
172.55	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.083	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.731	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.13	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.235	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.845	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.764	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.754	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75.55	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

圖 4- 2 輸入與輸出資料的部份截圖

另一方面，本研究所使用的資料為水量以及泥沙量，但原始數據的數量及過大，在訓練模型時會導致無法順利收斂，因此會對資料進行前處理。首先，會使用標準化公式 $(X - \mu) / \sigma$ ，來將所有數值進行標準化，其中 X 為原始數值、 μ 為平均值以及 σ 為標準差。再來將標準化後的資料利用本計畫設計的正規化公式 $\left[\frac{X - \min}{\max - \min} \right] * 2 - 1$ 將資料數值範圍縮放至[-1, 1]間，其 X 為數值資料、min 為該資料集中的最小值以及 max 為資料集中的最大值。

本計畫的模型修改於 U-Net 的架構形式，將中間的連結從

skip-connection 改為 residual-connection 來進行特徵合併。其中 U-Net 是一種卷積神經網路（Convolutional Neural Network, CNN）架構，也是一種機器學習的方法，它原先的設計目的是為了處理像素級的影像任務；residual-connection 則是一種用於深度神經網路中的技術，可以視為實現神經網路時的一個設計模組，用於解決深層網路中梯度消失或梯度爆炸的問題，以提升訓練效果。

因此，我們設計的主要概念為：由於各測站的資料以時間軸排序時，可以視為一個二維資料集，加上 U-Net 以往在重建二維資料時能夠取得不錯的研究成果，而額外使用 residual-connection 則是為了在模型後端重建二維資料時能夠有對應層數的資料能夠參考，以進一步地幫助訓練。圖 4-3 為構成本研究的網路架構的主要模組，可以觀察到整體網路可視為 residual-connection 版本的 U-Net 架構。最後，目前用來評估誤差的損失函數（Loss Function）是使用均方誤差（Mean Square Error, MSE）。

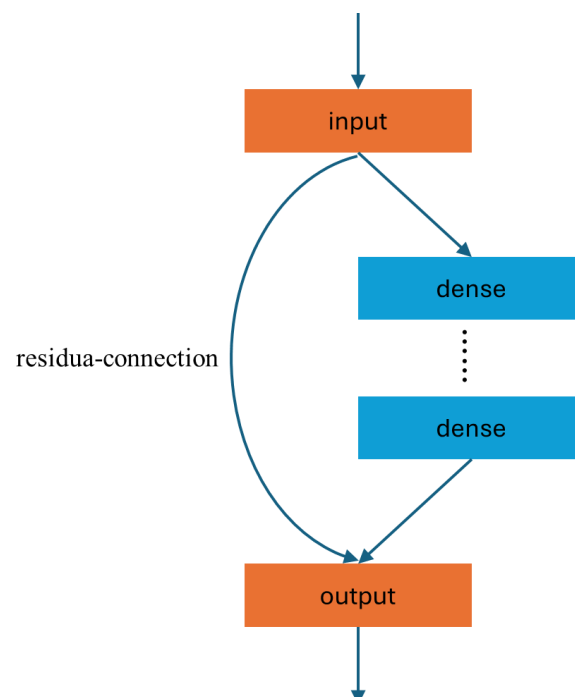


圖 4-3 本研究所設計的 U-Net with residual-connection 概念

第五章 研究成果

本計畫在 *Impact* 階段須將成果量化建立分析系統。過往集水區產砂量推估以總量為主，本模式特點為利用所建立之水砂關係分配集水區產砂量，進而評估各集水區的逐時砂量，如此即可收預先掌握災情之效。圖 5-1 為預期成果圖（箭頭僅示意，非實際集水分區）。

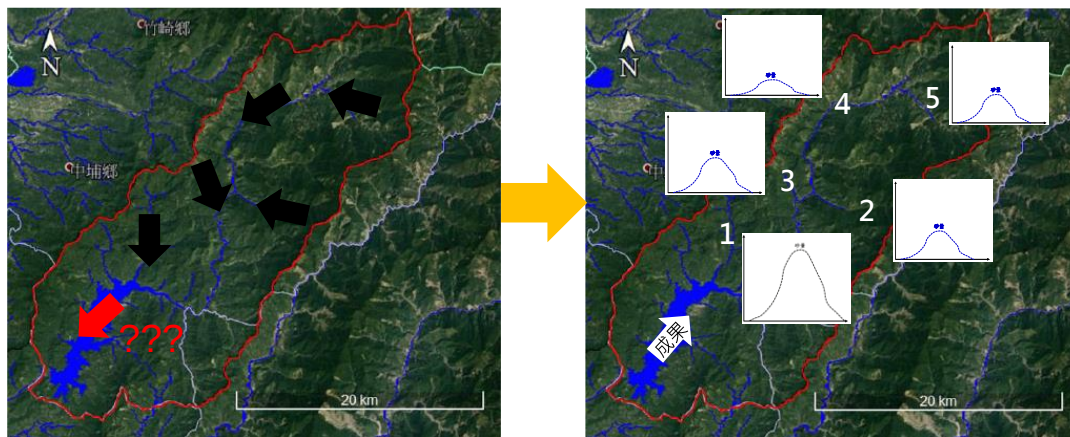


圖 5-1 分析模式預期成果圖

第一節 SWAT 成果

一、SWAT模型建置

本研究使用 SWAT2012 模式，模式建置的流程圖如圖 5-2 所示，首先在建置模式時依照所選之流域依照放入之高程及水系資料，將石門水庫集水區劃分成 21 個集水區，其位置與編號如圖 5-3。

後續，配合土地利用、土壤及坡度再細劃分成 HRU(水文響應單元)，本研究之土地利用使用 2009 內政部國土測繪中心之資料如圖 5-4 所示，以森林使用土地為主佔了 92.3%。而土壤圖部分，則使用聯合國糧食及農業組織（FAO）所發布之土壤地圖。而 HRU 的劃設能夠依照土地類型更細緻的模擬，本研究共劃設了 29 個 HRU。

接下來放入氣象資料，本研究選擇使用日模擬，因此天氣資料須為日尺度的，其中包含雨量、相對溼度、風速、氣溫、太陽輻射及氣

象站基本資料（氣象站座標及高程等），即可進行模式模擬，SWAT 模式會根據雨量計算流量及輸砂量等，因此雨量站之位置與資料完整準確性就非常重要。圖 5-5 為石門水庫集水區中雨量站位置圖以及各子集水區使用的雨量站示意圖。

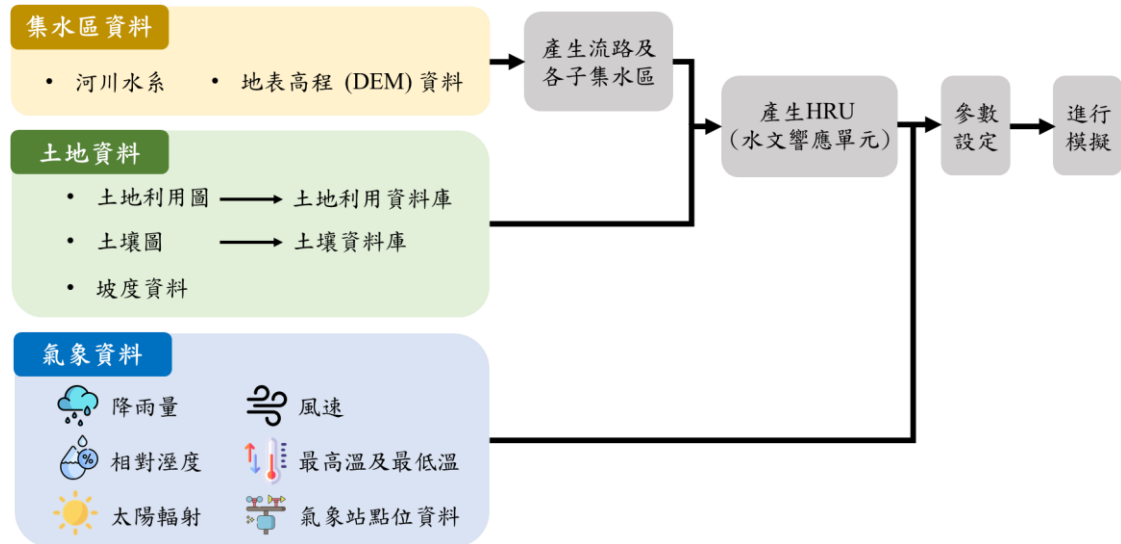


圖 5-2 SWAT 模式建置流程圖

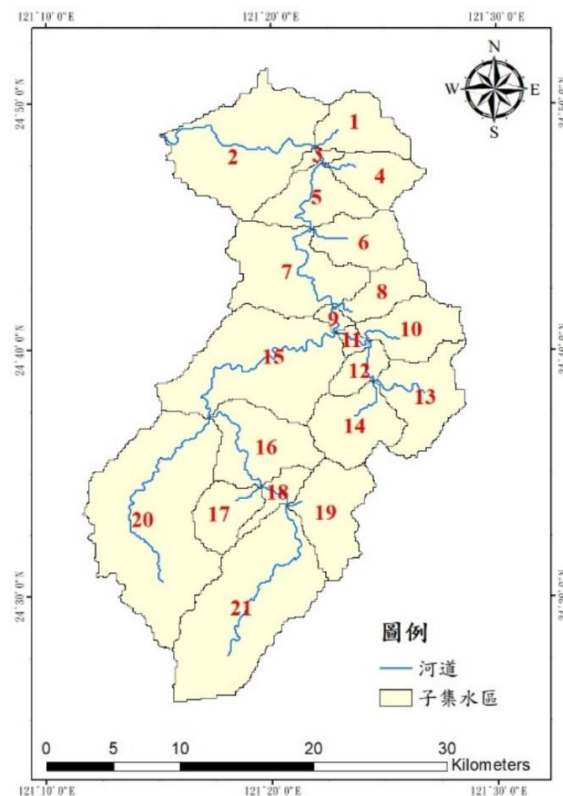


圖 5-3 石門水庫集水區之子集水區分布圖

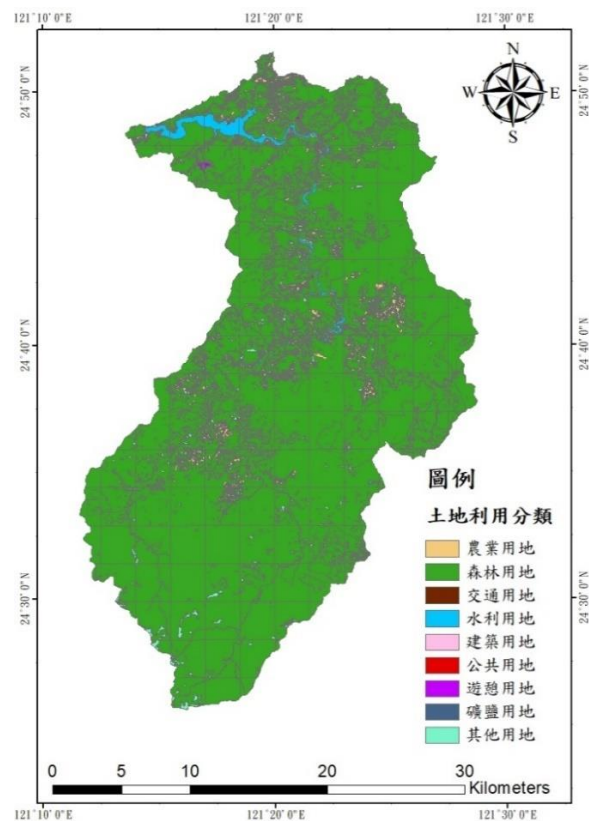


圖 5- 4 石門水庫集水區土地利用分布圖

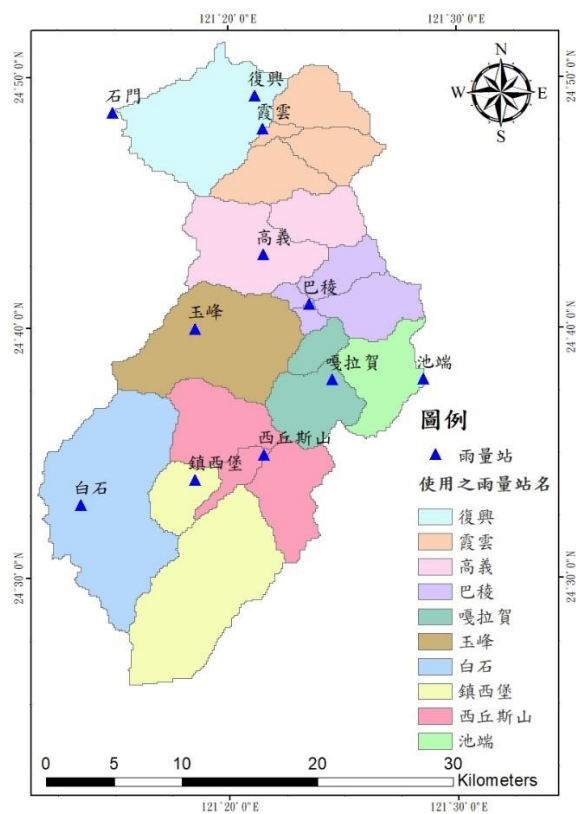


圖 5- 5 石門水庫集水區雨量站位置圖

二、參數選用

本計畫在參數檢定與驗證過程中，選用 2015 年蘇迪勒颱風及杜鵑颱風作為檢定案例，並以 2016 年梅姬颱風作為驗證對象。而在 SWAT 模式中有 4 種輸砂公式(Bagnold model、Kodatie model、Molinas and Wu model、Yang sand and gravel model)可進行模擬，本研究選用 Bagnold model。在原始使用預設值時，並未考慮河道可沖刷性，在各子集水區出口的產砂量會嚴重低估，需透過調整參數值來使模擬成果符合實際泥砂運動機制。因此，模式中的河道可沖刷性須開啟，並將可輸移最大含砂濃度之線性係數(SPCON)、可輸移最大含砂量之指數係數(SPEXP)進行參數敏感性分析，不僅如此，為了適切反映尖峰時期之泥砂輸送量體，本研究也針對 PRF 和 ADJ_PKR 這兩項修正係數進行參數敏感度分析，模式中重要參數經較佳化設定後，相關設定值羅列如表 5-1 所示。

表 5-1 各項參數經調整之設定值

參數名稱	參數意義	參數設定值	所屬檔案名
CH_EQN	選擇使用之輸砂公式	1	.rte
CH_ERODMO	河道的可侵蝕性係數	1	.rte
SPCON	可輸移的最大泥砂濃度之線性係數	0.005	.rte
SPEXP	可輸移的最大泥砂濃度之指數係數	1.4	.rte
ADJ_PKR	坡面土壤沖蝕沉積物運輸過程之峰值 速率調整因子	5	.sub
PRF	主河道泥砂輸送時的峰值速率調整因 子	5	.rte
CH_COV1	河岸的植被係數	0	.rte
CH_COV2	河床的植被係數	0	.rte

三、SWAT模擬成果

本研究收集 2008 至 2022 年的水文資料，並選取近年最具代表性的颱風事件作為檢驗案例，選取之原則為：1.造成水庫顯著發生異重流事件；2.同一年度發生兩場以上颱風且為同一年度；3.連續年度皆有顯著之颱風事件共計三大選取原則。經檢視後，2015 至 2016 年三場颱風事件最為符合。因此，後續 SWAT 及預測模型之成效皆以 2015 年蘇迪勒颱風、杜鵑颱風及 2016 梅姬颱風為標的進行說明。

泥砂運移受流量影響甚大，因此本計畫首先檢驗 SWAT 模擬流量成果，比較基準採用石門水庫入庫觀測點羅浮測站於颱風期間所測得之資料與 SWAT 的模擬值進行比較。以流量而言，檢定與驗證案例之模擬值與實測值比較如表 5- 2 及圖 5- 6 所示，可以看出蘇迪勒颱風期間的模擬平均流量為 $718.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，與實測值 $713.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 相比，差距僅為 0.71 %，若考量杜鵑颱風之模擬成效 (8.37 %)，兩者於 2015 年之模擬與實測平均流量之差距僅為 4.6 %。將相同參數輸入進行梅姬颱風模擬時，模擬與實測平均流量相差 0.97 %。整體而言，針對三場具代表性颱風的流量模擬時，SWAT 展現一定程度準確性，可進一步進行產砂量評估。

至於產砂量部分，實測產砂量是根據石門水庫入庫觀測點羅浮測站於颱風期間所測得之濃度與入流量所換算之入庫砂量，將實測值與 SWAT 模擬結果進行比較之成果如表 5- 3 及圖 5- 7 所示。模擬蘇迪勒颱風期間石門水庫上游集水區所產生的砂量為 2,541,735 噸，與實測值 2,883,400 噸相比，差距 13.44%，而杜鵑與梅姬颱風分別差距了 22.83%與 37.95%。三場颱風合計之平均誤差約為 24.77%，以輸砂成果而言具備一定程度準確性。

承上所述，SWAT 能夠適切反映流入水庫之水砂量，因此，SWAT 所模擬之各子集水區產砂量可作為預測模式訓練資料之用。由於 SWAT 的模擬是由模式最小單元 HRU 傳遞至子集水區後，再經過河道不斷運移匯集直至集水區出口(羅浮)之模擬結果，所以可經過計算得到各個子集水區的單獨產砂量，圖 5- 8 是根據 SWAT 模擬蘇迪勒颱風期間之各子集水區產砂量除以其面積所得之單位面積產砂量，並將 21 個子集水區分為 8 個等級，可從其看出每 1 平方公里產出 40000 噸以上的第一級分別為 3、11、18 子集水區，而第二級的產出 20000 ~ 40000 噸的分別為第 9、12 子集水區。圖 5- 9 及圖 5- 10 分別為杜鵑颱風與梅姬颱風期間各子集水區單位面積產砂量。結果顯示，在三場颱風事件中，第 5、7、9、11、12、15 及 18 號子集水區的單位面積產砂量均偏高。

表 5- 2 颱風期間平均流量 SWAT 模擬與實測值比較表

颱風事件	起迄時間	模擬值 (m ³ /s)	實測值 (m ³ /s)	誤差
蘇迪勒	2015/08/07 ~ 2015/08/10	718.30	713.22	0.71%
杜鵑	2015/09/28 ~ 2015/09/30	816.11	753.06	8.37%
梅姬	2016/09/26 ~ 2016/09/29	712.35	719.33	0.97%

表 5- 3 颱風期間產砂量 SWAT 模擬與實測值比較表

颱風事件	起迄時間	模擬值 (噸)	實測值 (噸)	誤差
蘇迪勒	2015/08/07 ~ 2015/08/10	2883400	2541735	13.44%
杜鵑	2015/09/28 ~ 2015/09/30	2272130	1849871	22.83%
梅姬	2016/09/26 ~ 2016/09/29	2177940	3510151	37.95%

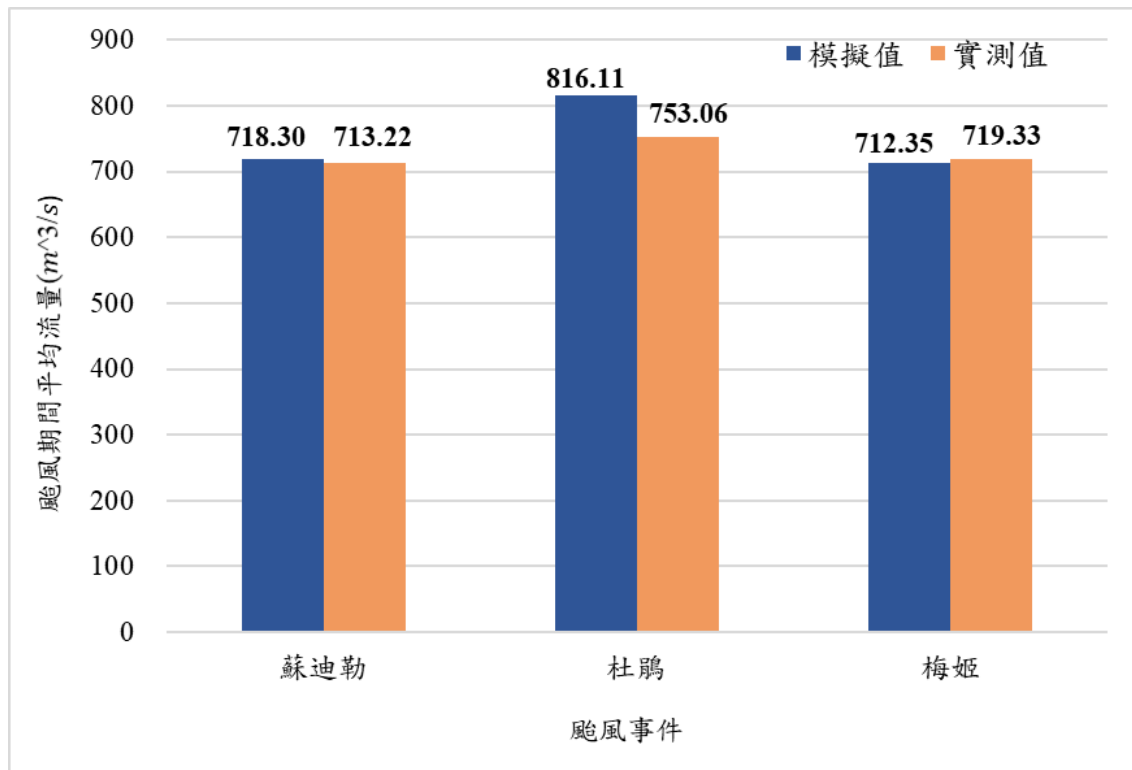


圖 5- 6 颱風期間平均流量模擬值與實測值比對柱狀圖

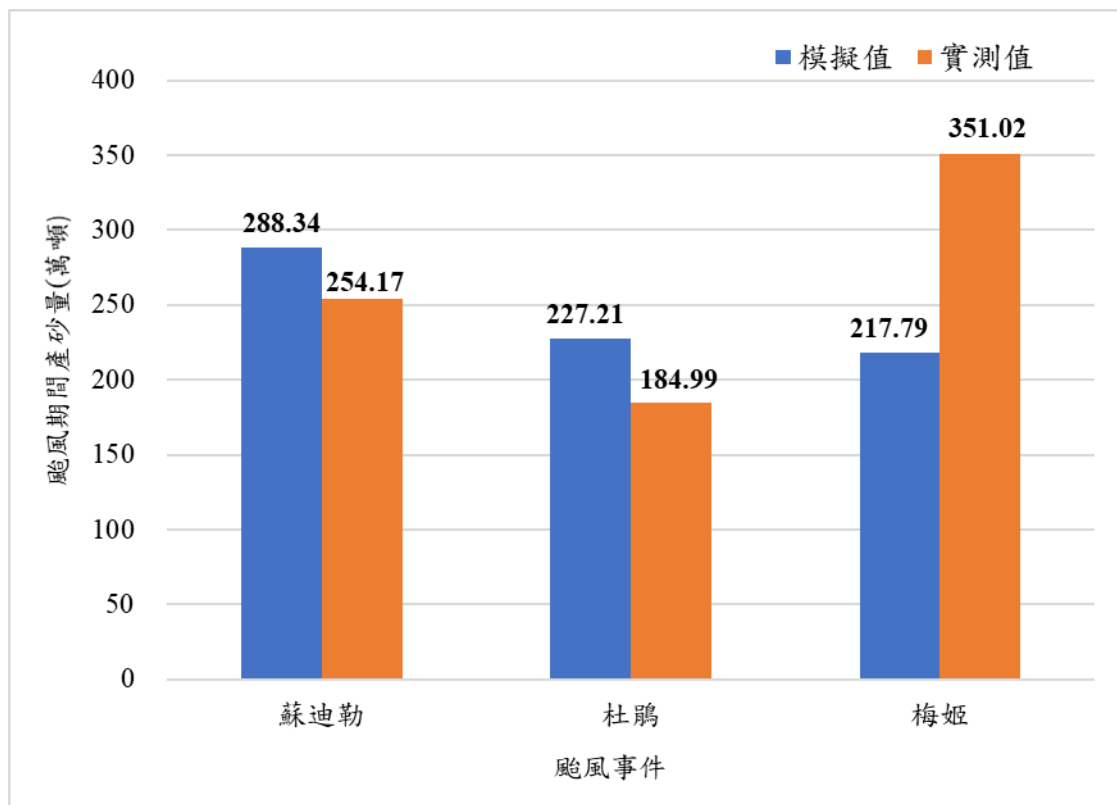


圖 5- 7 颱風期間產砂量模擬值與實測值比對柱狀圖

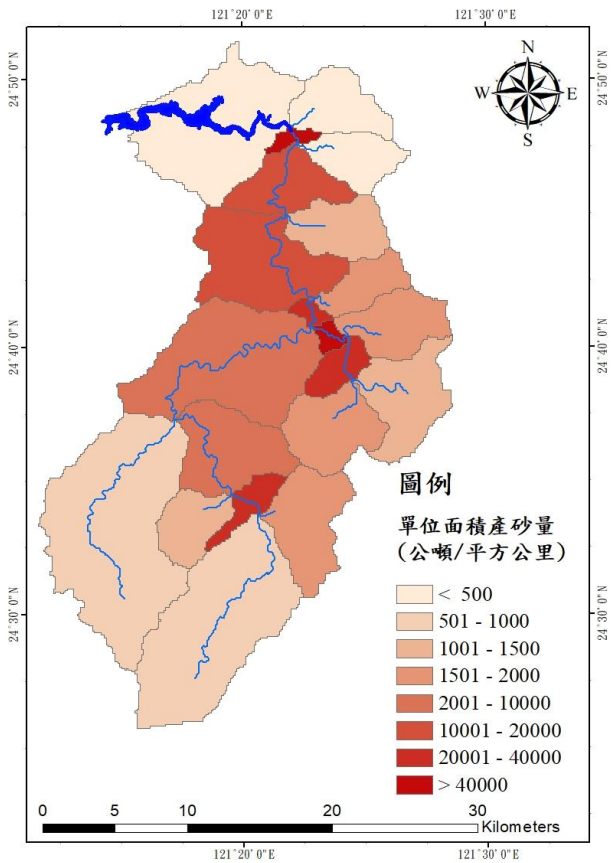


圖 5- 8 模擬蘇迪勒颱風期間子集水區單位面積產砂量

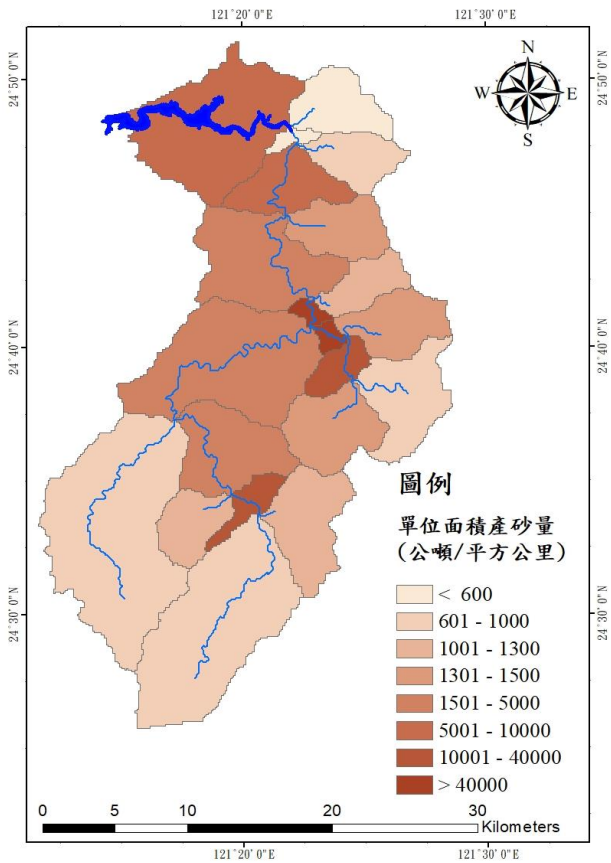


圖 5- 9 模擬杜鵑颱風期間子集水區單位面積產砂量

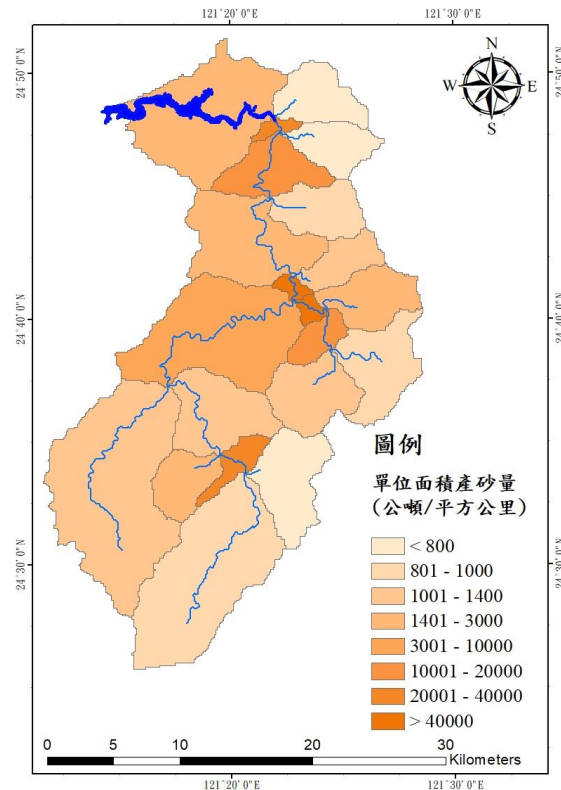


圖 5- 10 模擬梅姬颱風期間子集水區單位面積產砂量

第二節 預測模型建立

本計畫之土砂來源分析系統建立流程圖如圖 5- 11 所示。本計畫建立四個不同統計模型及本計畫之主要模型，並以一小時後 T+1 之預測成果進行成效評估，圖 5- 12 選取產砂量較顯著之子集水區 5、7、11、12、18 進行蘇迪勒、杜鵑、梅姬三場颱風的時間序列比較，藍色線段為 SWAT 成果；橘色線段為主要模型成果；四種統計模型因預測成果相似，因此以其餘模型代稱。由圖 5- 12(a)可知，橫軸代表時間，縱軸表示泥砂量 (噸)主要模型能夠適切反映蘇迪勒及杜鵑颱風之尖峰產砂量，其餘模型則較難反映此係現象。圖 5- 12(b)可看出主要模型能夠適切掌握尖峰產砂發生時間，整體產砂量值則略有高估。其餘模型以多項式回歸之變化較大，但對於尖峰產砂發生時間之預測並不準確。圖 5- 12(c)(d)(e)與上述成果趨勢類似，皆是主要模型能夠較適切預測尖峰產砂時間及量體，其餘模型掌握度相對較弱。

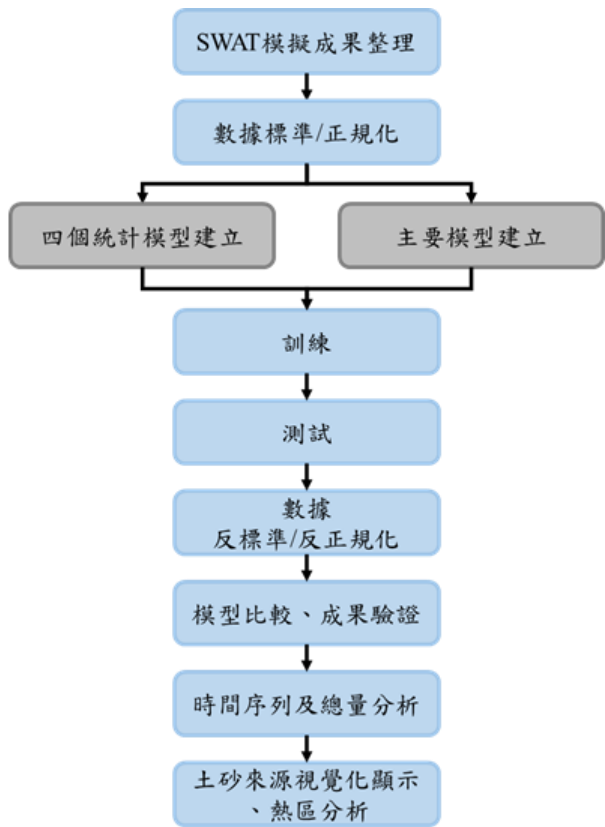
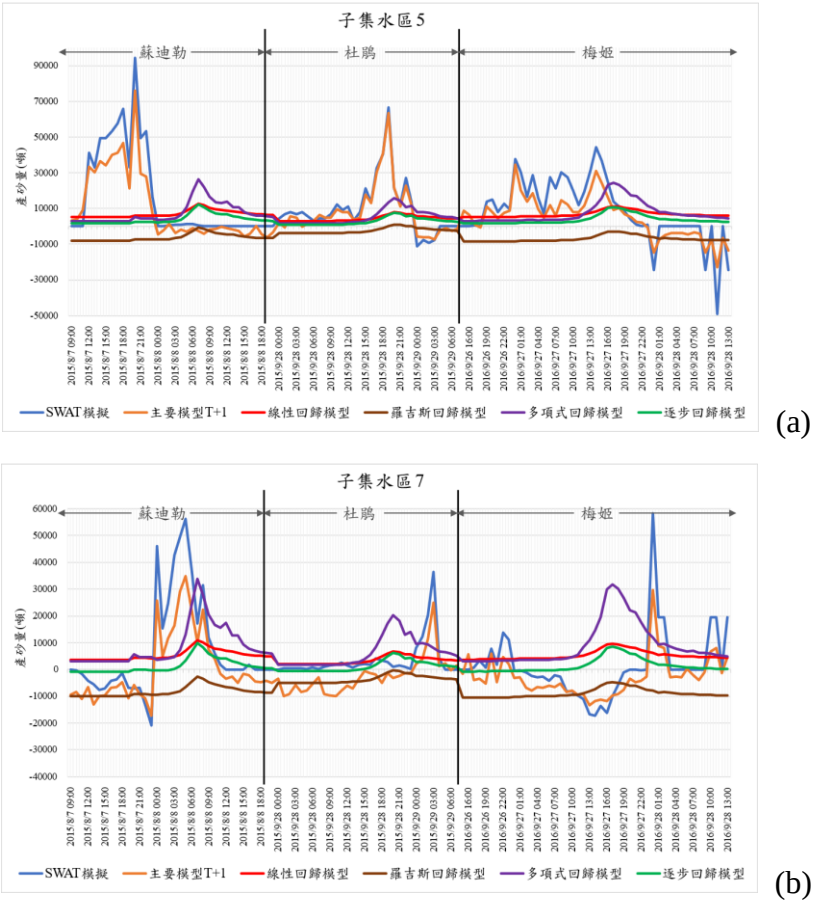


圖 5- 11 土砂來源分析系統建立流程圖



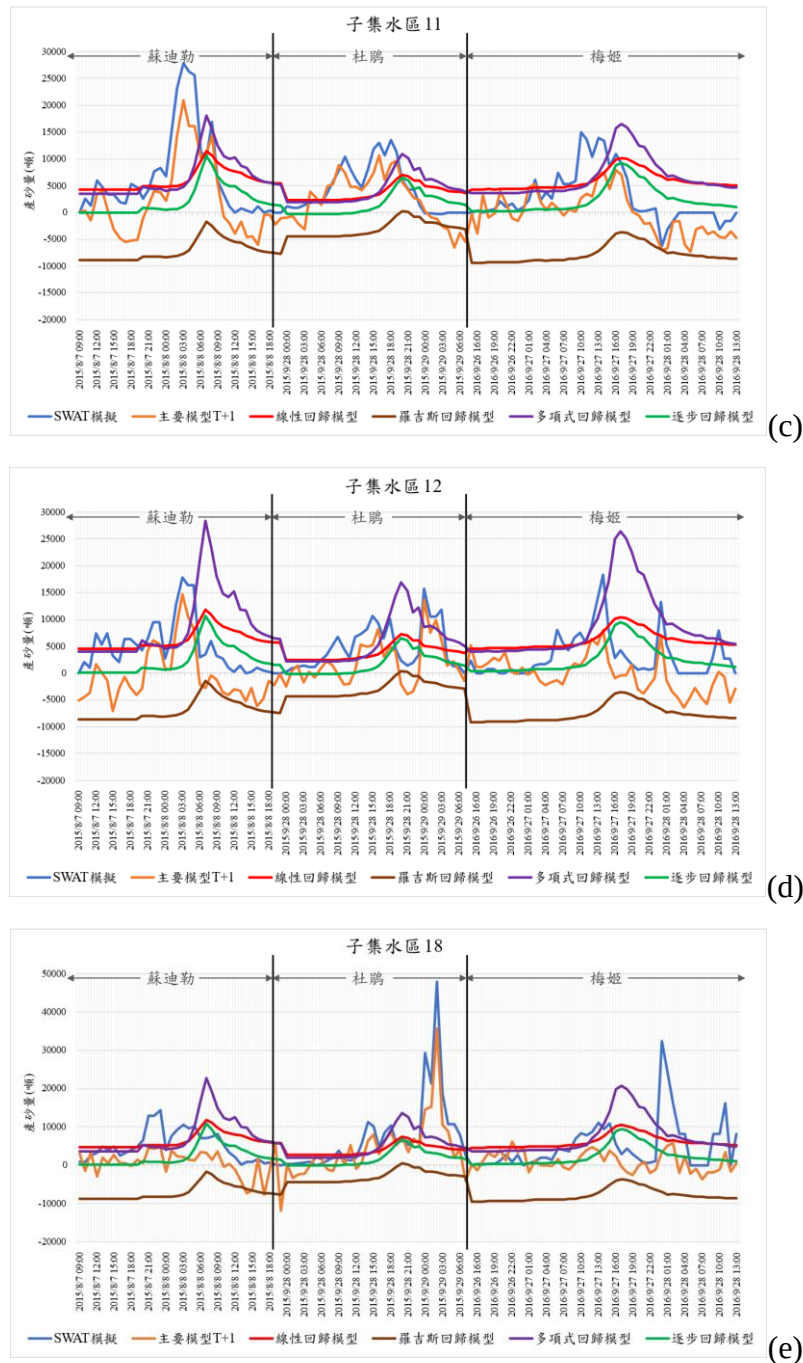


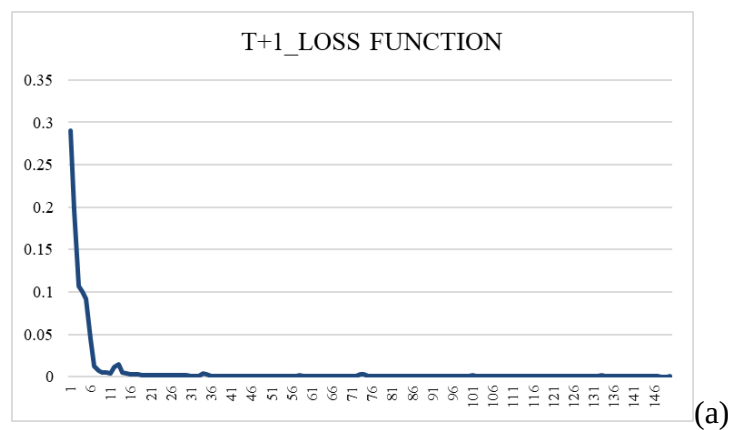
圖 5- 12 不同模型之泥砂量預測曲線比較圖 (依數字排列)

本研究建立主要模型進行不同時間步長 (T+1 到 T+2；1 小時後到 2 小時後)的產砂量預測，首先，必須代入不同子集水區數據進行訓練，表 5- 4 為用來進行訓練和應用的颱風場次。本計畫為求預測模型可適用於不同情境，將訓練與應用場次分開，即指三場應用案例不會加入訓練過程，在模型完成訓練後會直接用三場模型不曾見過的颱

風案例進行預測。圖 5- 13 顯示主要模型在不同預測時間步長的 loss function (損失函數)變化趨勢，可反映出模型的訓練效果。每張圖的橫軸代表訓練迭代次數，縱軸則為損失函數值。可以觀察到兩種時間步長的損失函數在早期迭代中迅速下降，並逐漸趨近於穩定，顯示出模型在各預測步長下均能有效收斂。總體而言，模型在不同預測時間步長上的損失函數變化表明，隨著迭代次數的增加，模型的預測精度逐步提升，可以進行預測。

表 5- 4 訓練和應用之颱風場次表

年份	颱風名稱	時間	訓練	應用
2008	卡枚基	07/17~07/18	✓	
	鳳凰	07/27~07/29	✓	
	辛樂克	09/12~09/17	✓	
	薔蜜	09/28~10/01	✓	
2009	莫拉克	08/06~08/10	✓	
2010	凡那比	08/06~08/07	✓	
2012	蘇拉	07/31~08/04	✓	
2013	蘇力	07/12~07/16	✓	
	潭美	08/20~08/23	✓	
2014	麥德姆	07/22~07/23	✓	
2015	昌鴻	07/10~07/11	✓	
	蘇迪勒	08/07~08/10		✓
	杜鵑	09/28~09/30		✓
2016	梅姬	09/26~09/29		✓



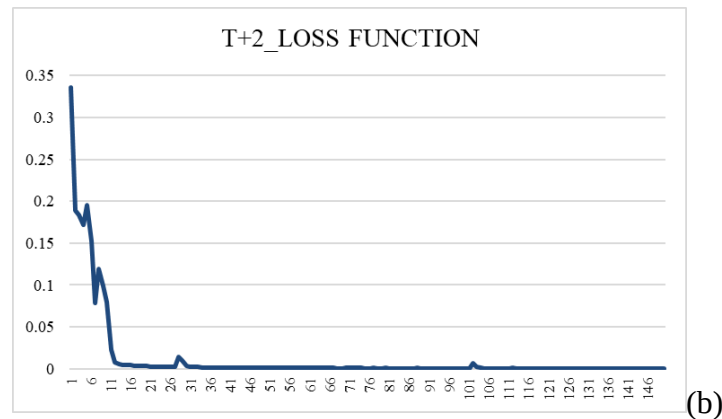


圖 5- 13 主要模型不同預測時間步長之訓練效能

第三節 預測模式應用

一、模式預測效能

由圖 5- 14 可知，主要模型不同預測時間步長之預測值皆有極高的精確度。從圖 5- 15 時間序列圖可以觀察到， $T+1$ 及 $T+2$ 模型在時間序列的波動表現上展現極高的一致性。從結果可見，預測模型在每小時產砂量低於約 5000 噸的子集水區中，對其值及波動的預測準確度相對較低。SWAT 模型中的產砂量正負值具有特殊意義，分別代表該區域泥砂為侵蝕（正值）或淤積（負值）；然而，對於預測模型而言，正負僅視為數值，無法反映這層含義。因此，在產砂量較小的區域，預測值可能呈現負值。此外，由於訓練與測試數據在模型中可能經過標準化與正規化處理，亦影響了小產砂量區域的預測精度。相較之下，模型對於產砂量較大的子集水區（如第 2、3、5、7、9、11、12、14、15、16、18、20 和 21 號）展現出更高的預測能力。

針對 $T+1$ 及 $T+2$ 在三場颱風中各子集水區的總產砂量進行分析，如圖 5- 16，可發現結果與時間序列分析中觀察到的趨勢一致。同樣在產砂量較小的區域，預測值可能會呈現負值，預測精度及準確度較不佳。相較而言，這些模型在針對產砂量較大的子集水區有較高的預測準確性。

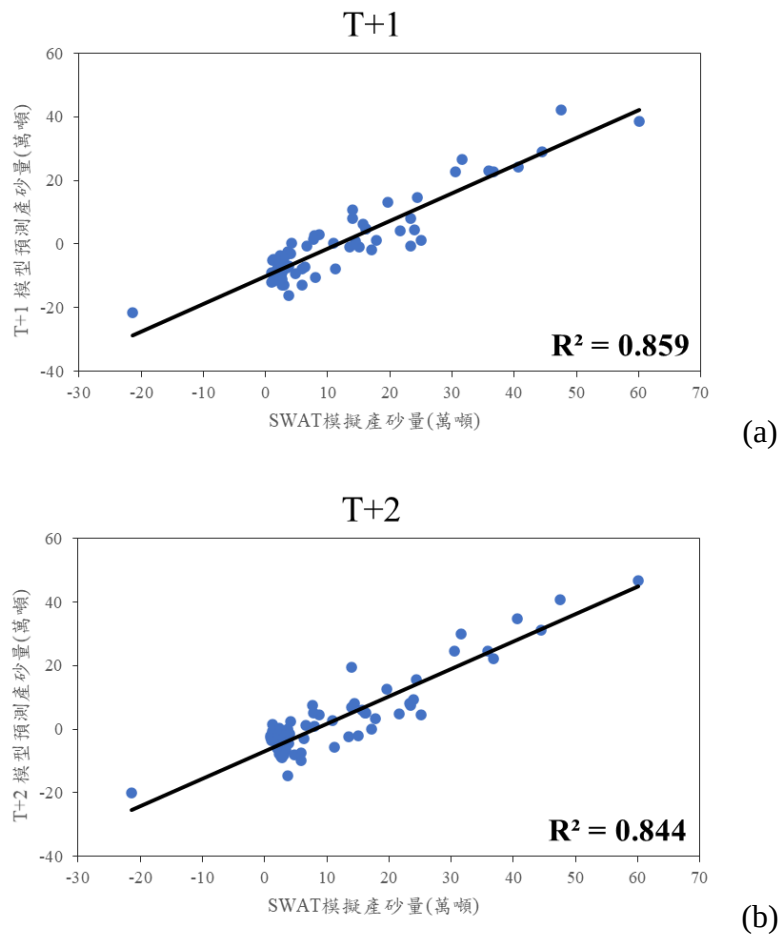
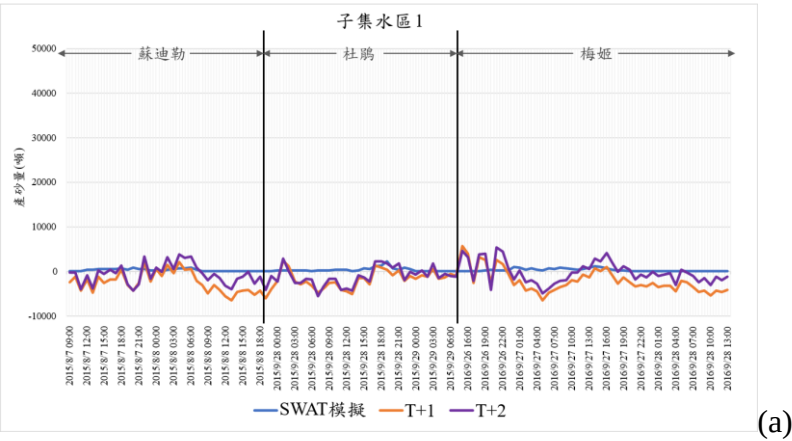
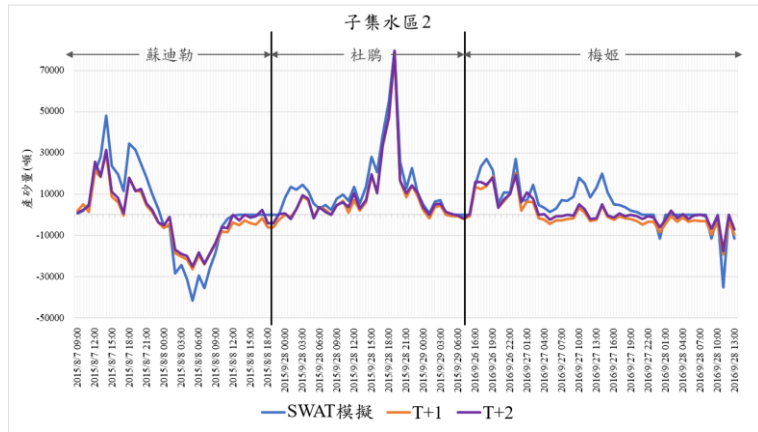
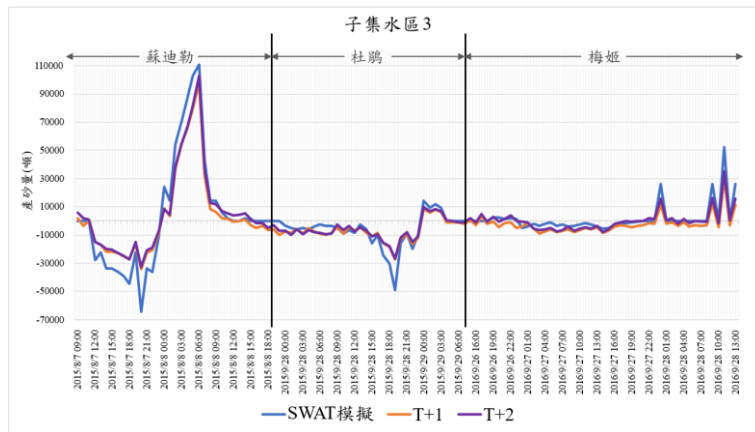


圖 5-14 主要模型不同預測時間步長之預測精度

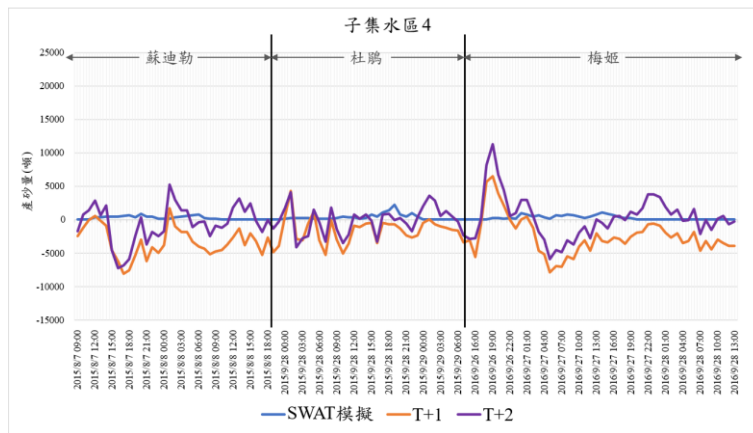




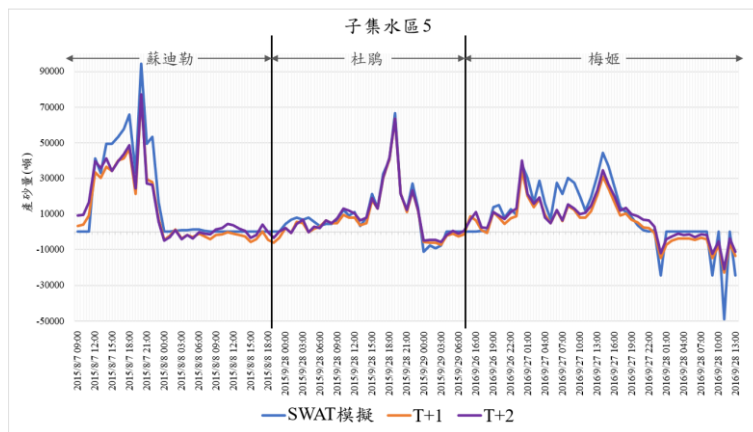
(b)



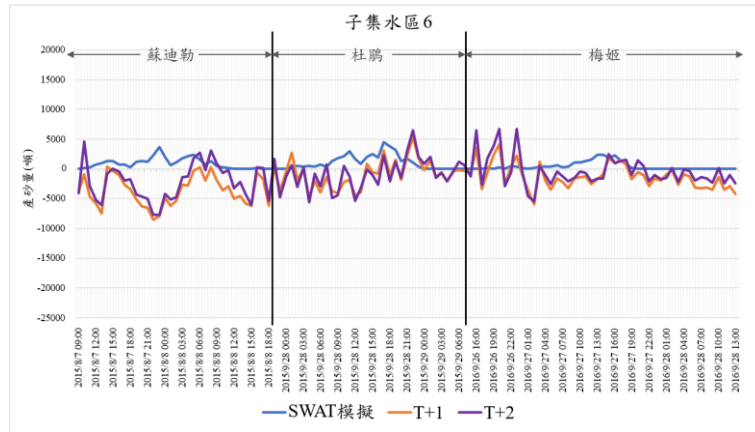
(c)



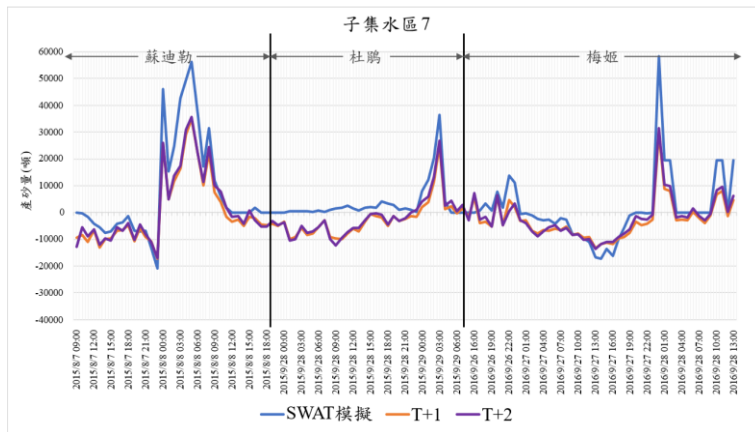
(d)



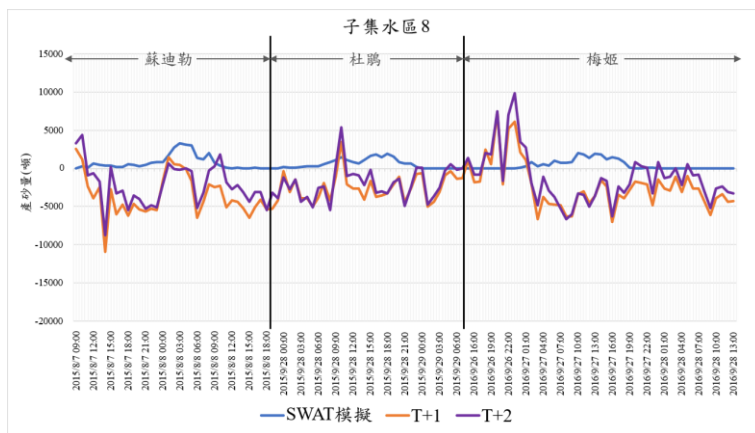
(e)



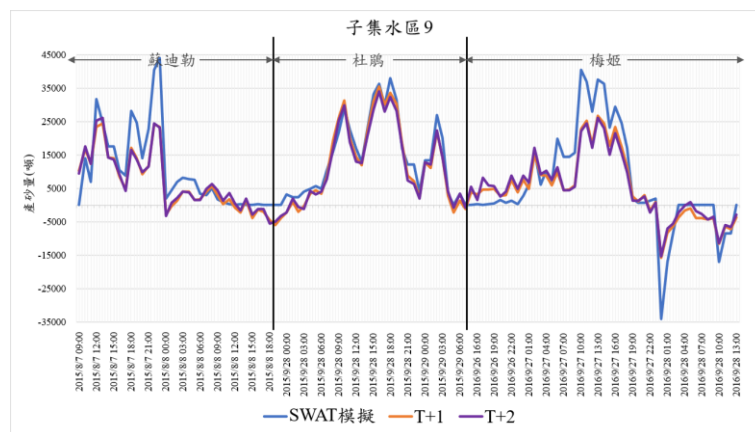
(f)



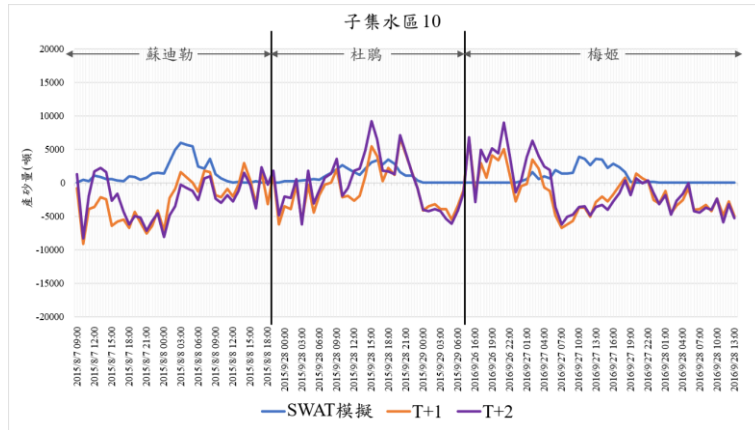
(g)



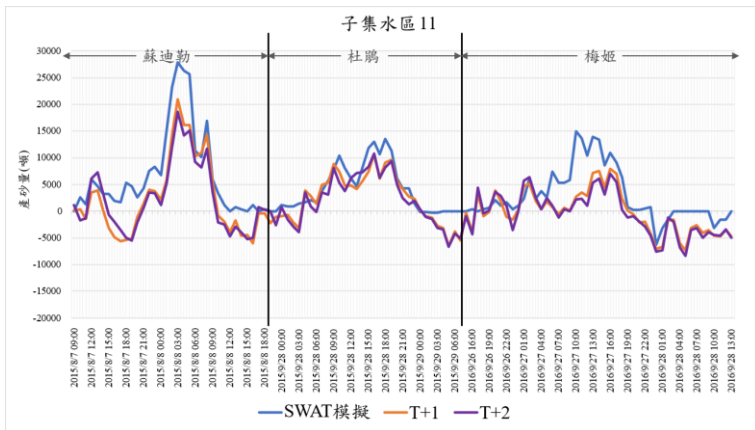
(h)



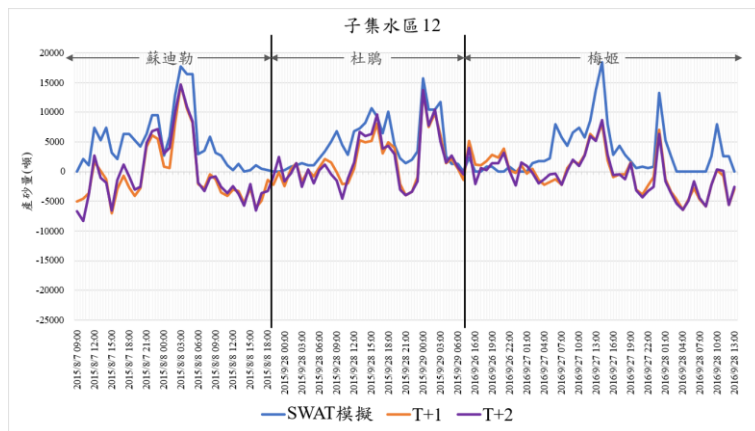
(i)



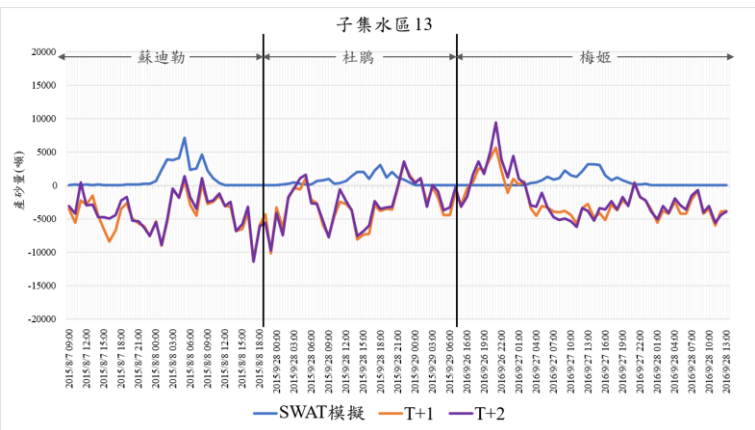
(j)



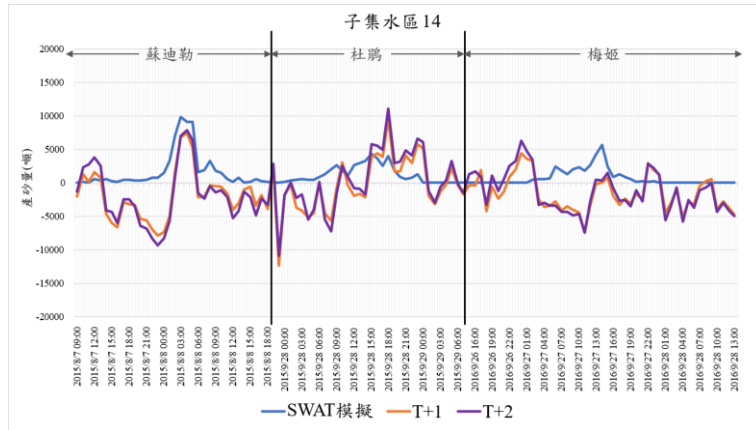
(k)



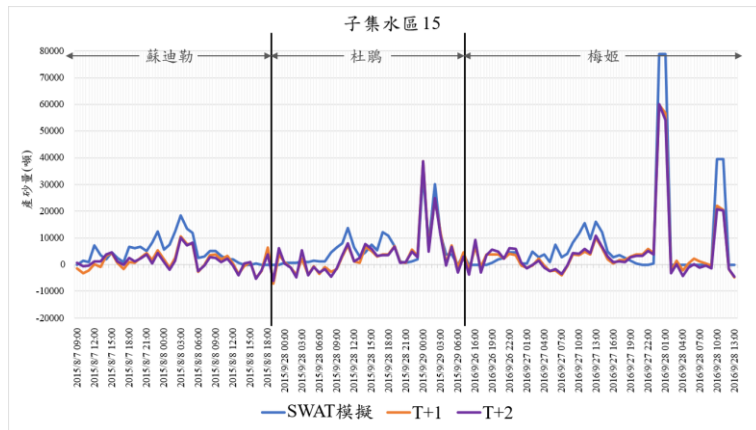
(l)



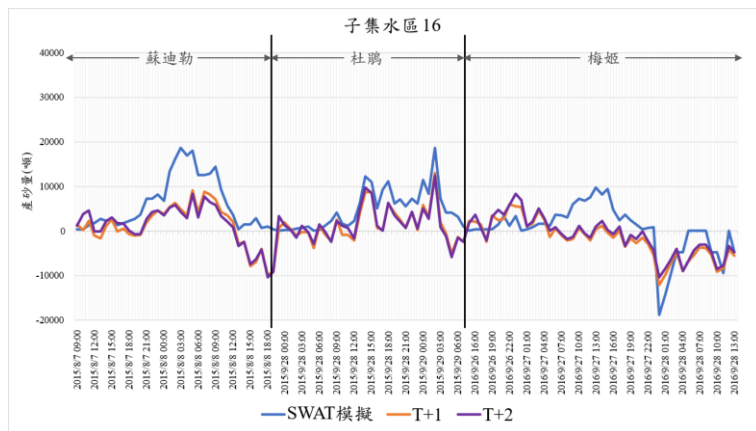
(m)



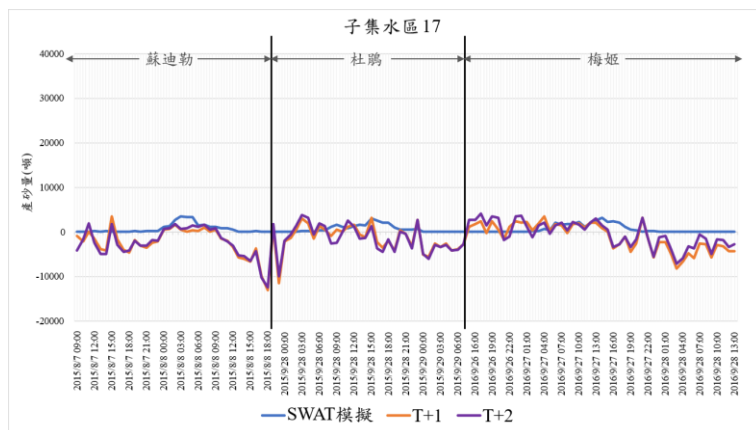
(n)



(o)



(p)



(q)

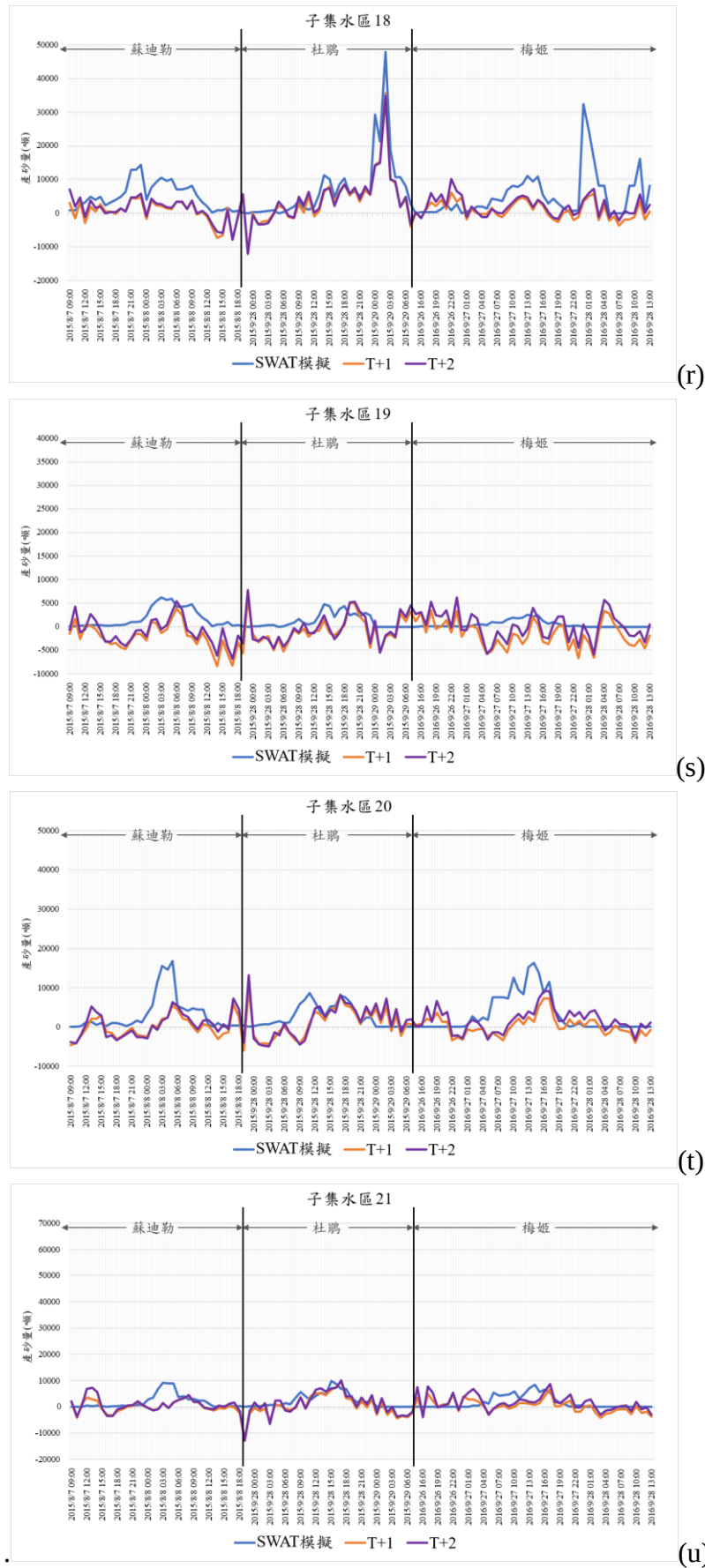
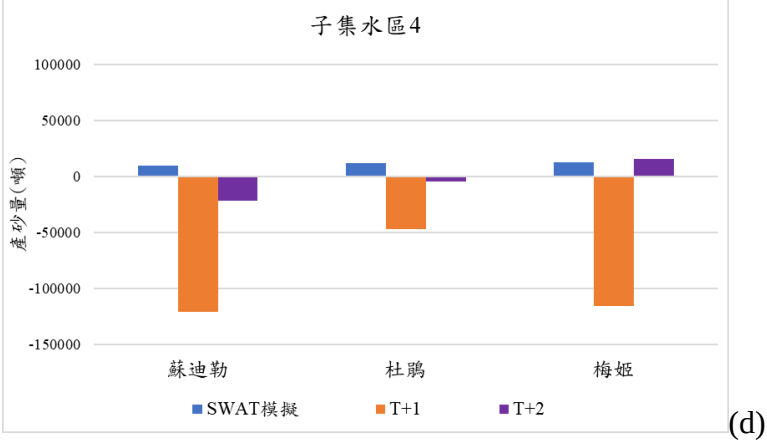
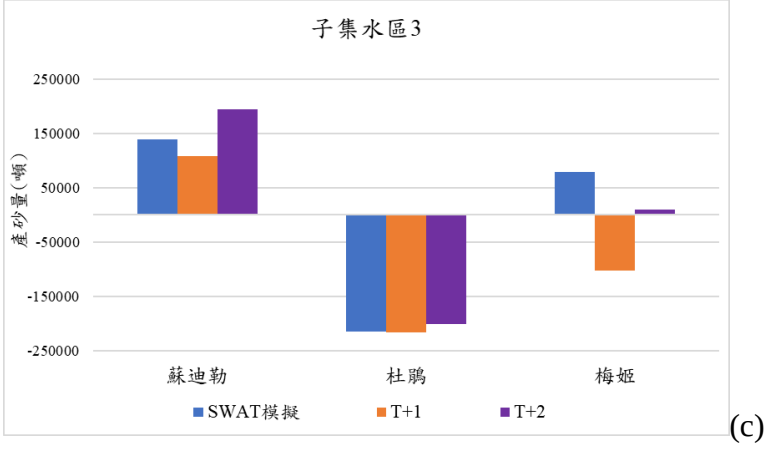
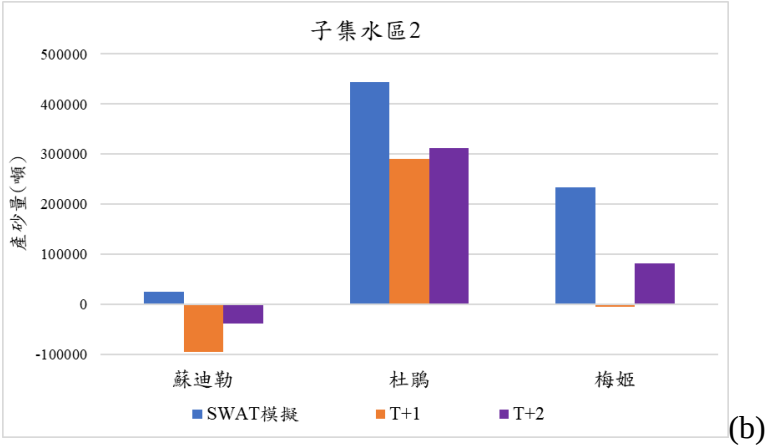
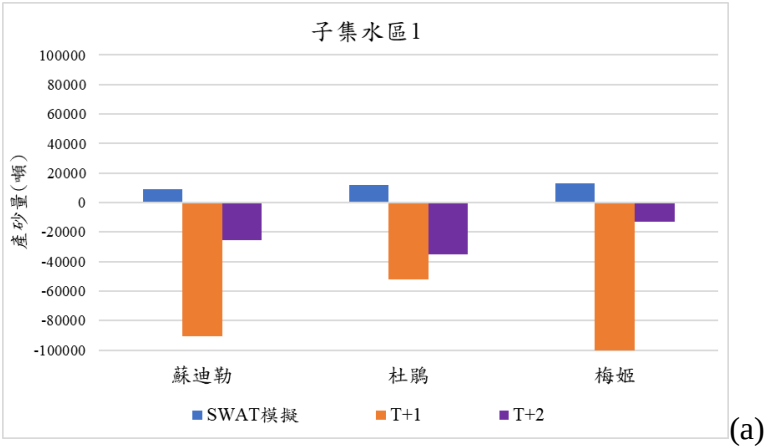
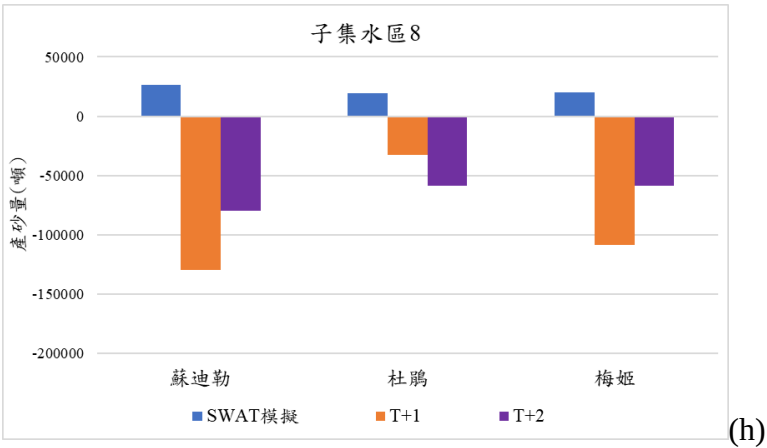
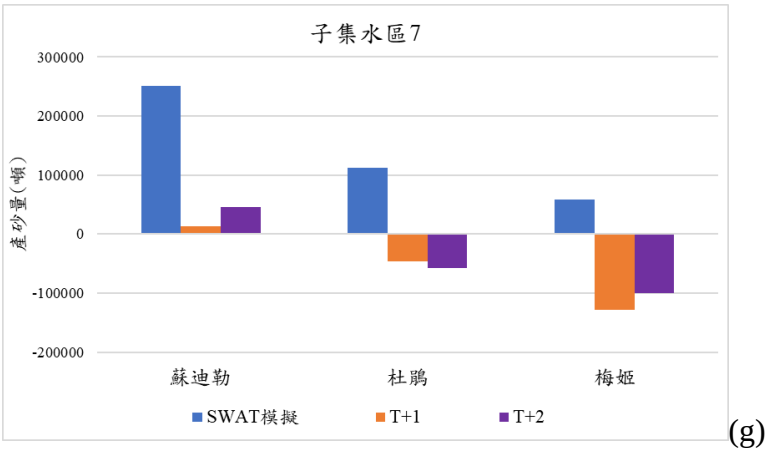
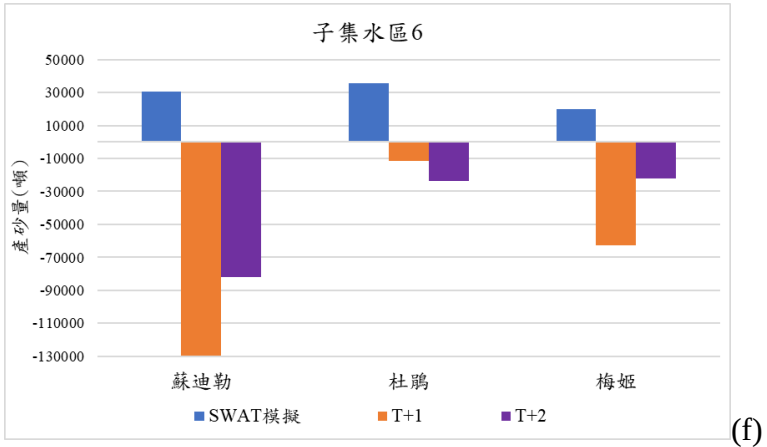
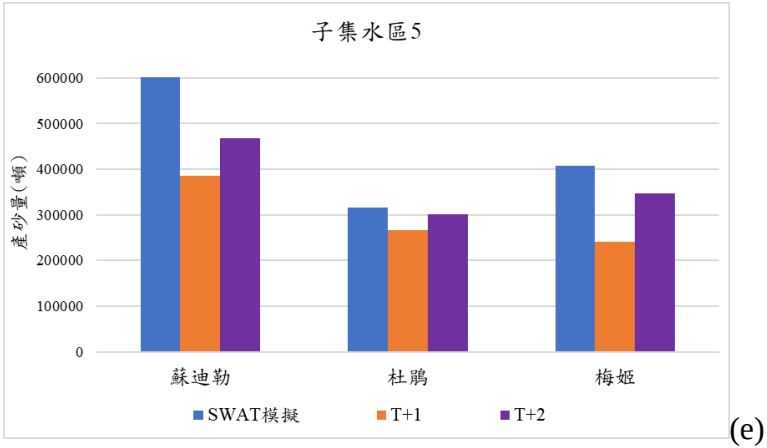
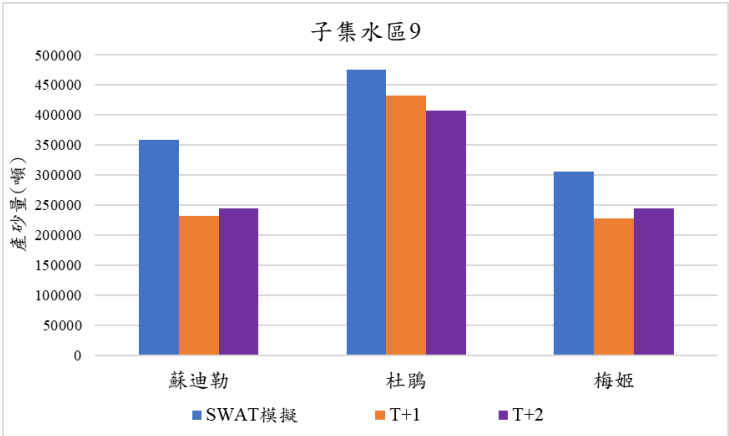


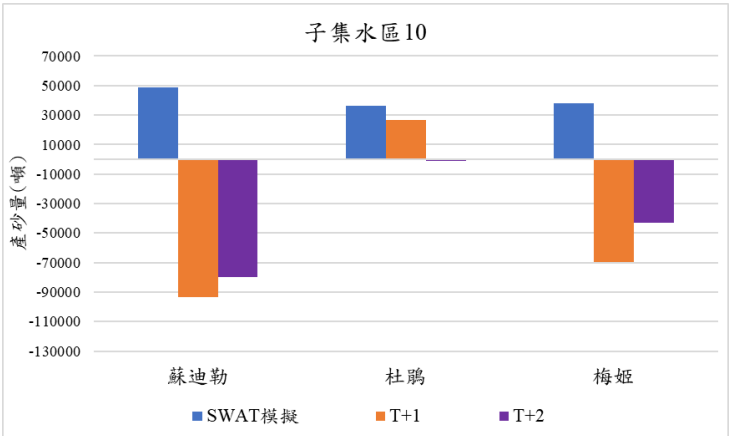
圖 5-15 不同子集水區之泥砂量預測曲線圖



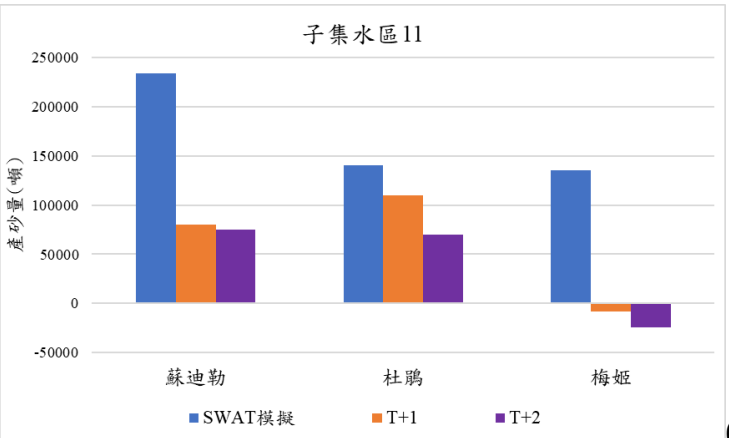




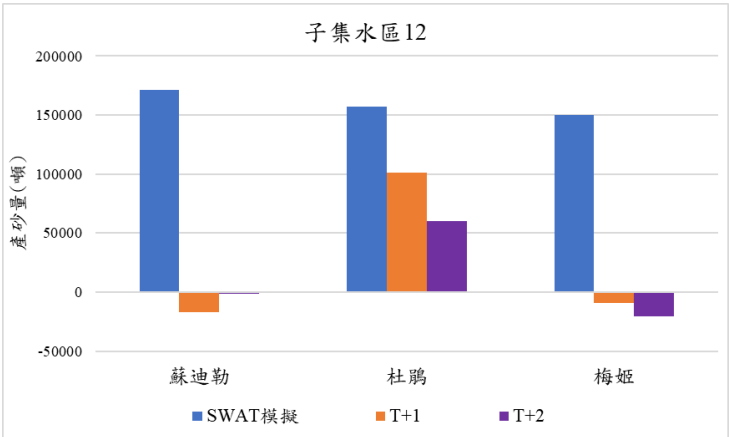
(i)



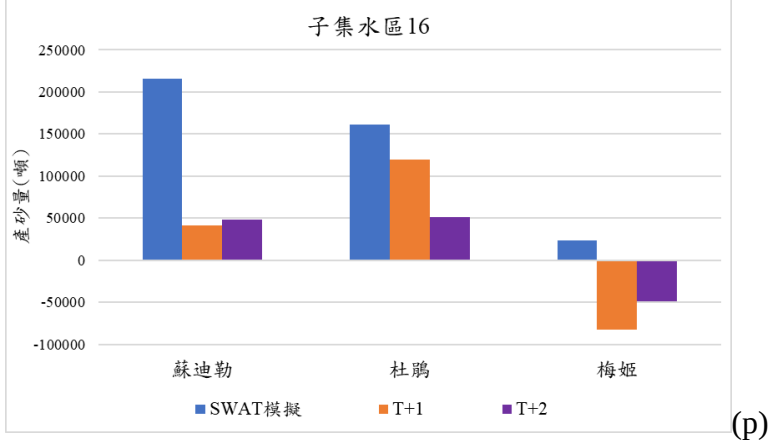
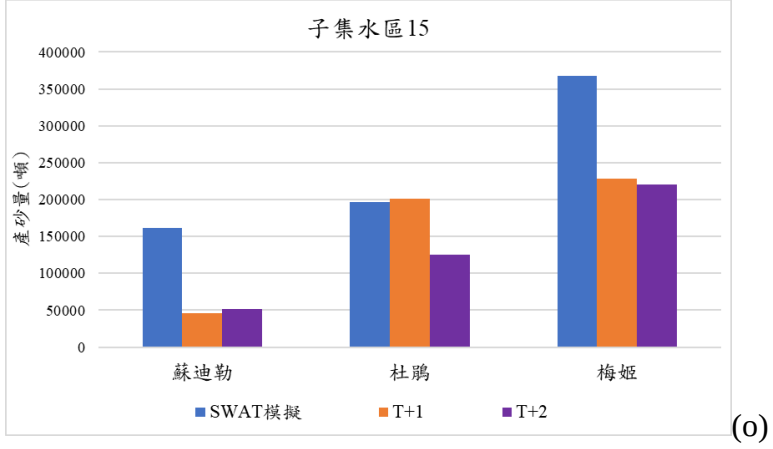
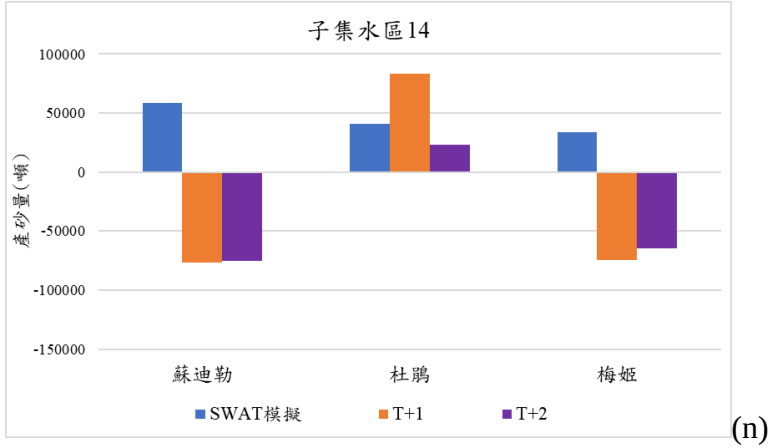
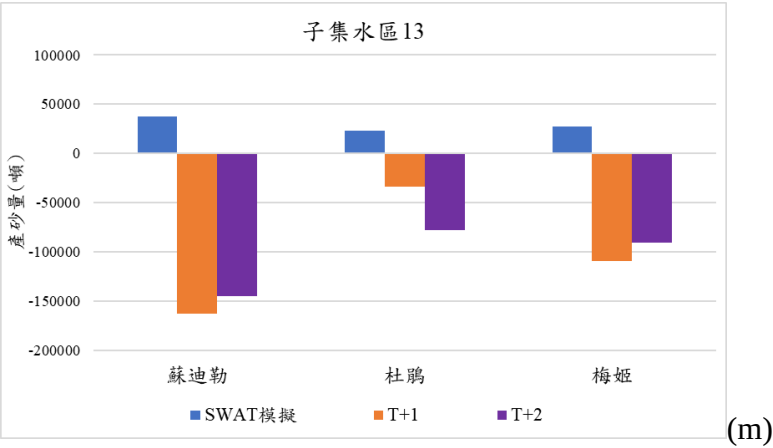
(j)

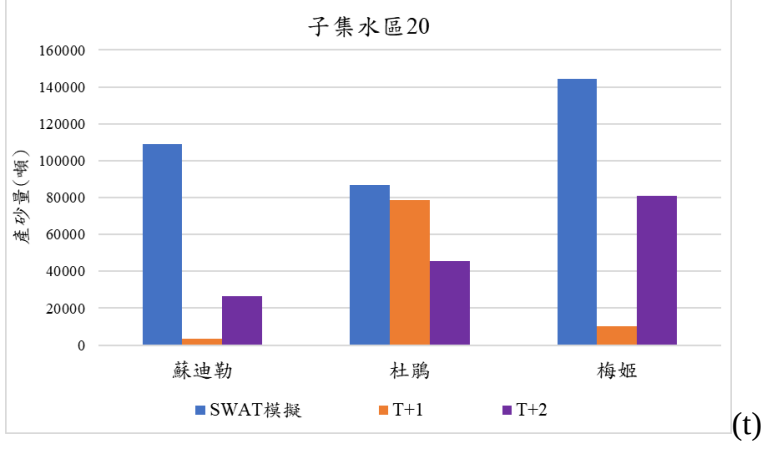
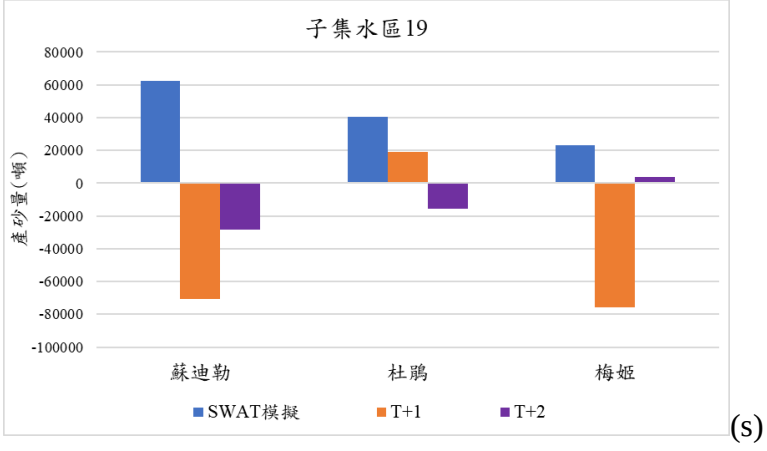
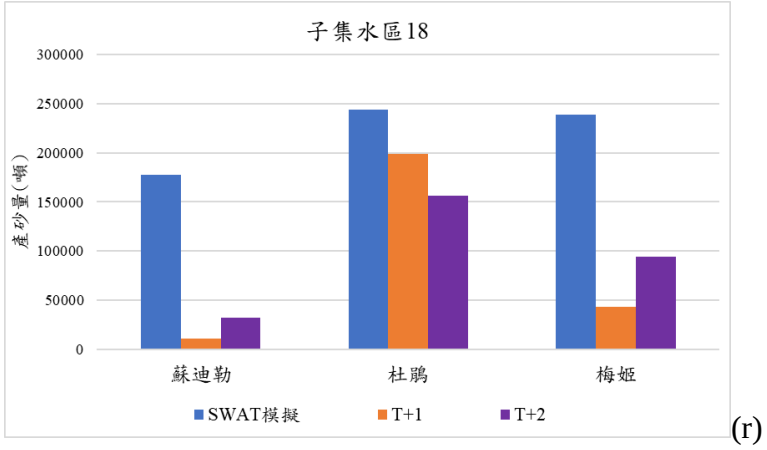
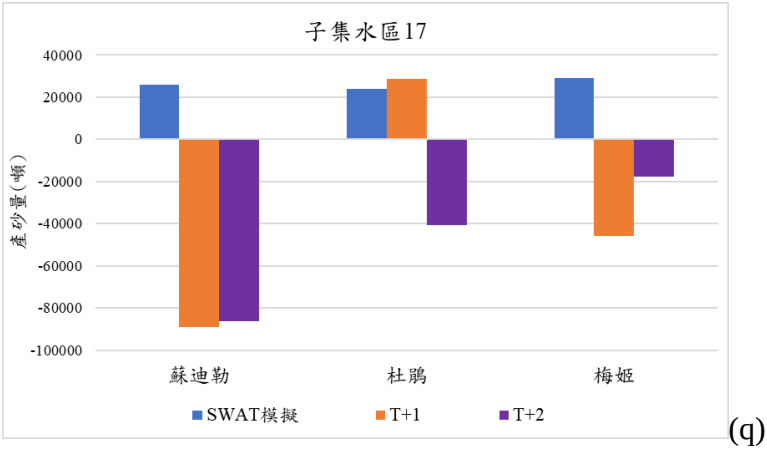


(k)



(l)





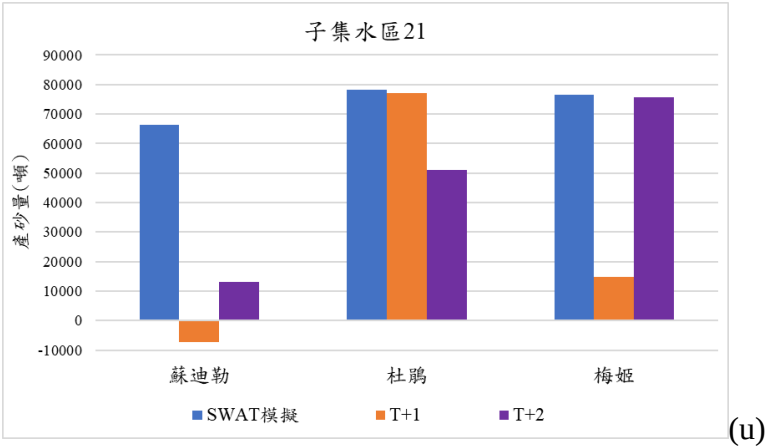


圖 5- 16 不同子集水區之泥砂總量預測柱狀圖

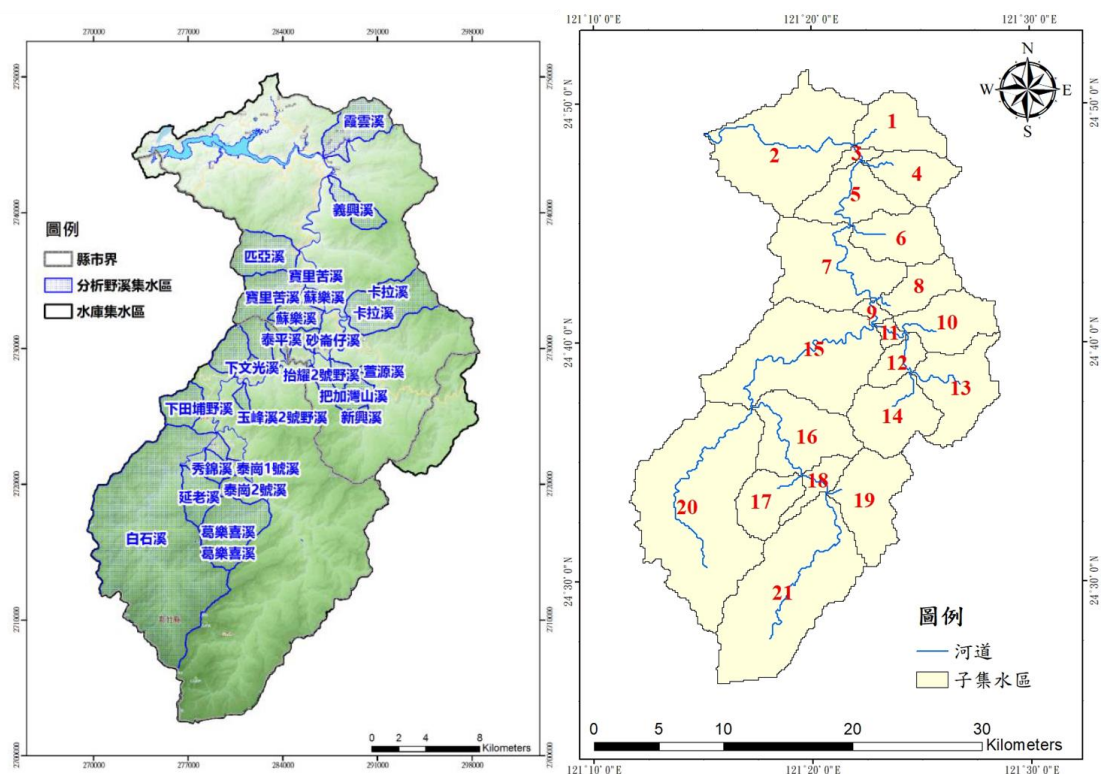
第六章 應用層面

第一節 產砂熱區評估

根據本計畫所建立的預測模型之結果顯示，2015 至 2016 年間，蘇迪勒、杜鵑及梅姬等三場颱風事件時，各子集水區的產砂量經由計算分析後，將各區域的單位面積產砂量進行視覺化呈現，如圖 6- 2 至圖 6- 4 所示，可清晰看出在這三場颱風事件中，第 5、9、11、15、18 和 20 號子集水區的單位面積產砂量明顯較高。

而根據圖 6- 1 的對應示意圖，這些產砂量較高的子集水區，包括第 9、11、15、20 號子集水區，與過往研究和報告中所提及的水庫上游高產砂量區域，如卡拉溪、蘇樂溪及泰平溪集水區相符合，顯示出模型在這些區域的預測具有較高的準確性與一致性。這一發現表明，在特定的水文與地理條件下，這些區域在颱風影響下具有較高的土砂輸出潛勢。

此外，相對而言，位於右側外圍的第 4、6、8、13 和 19 號子集水區則顯示出顯著較低的單位面積產砂量。這些區域的產砂量較低，可能與其地形位置、地文或水文條件相關。整體而言，土砂來源分析系統能初步評估不同子集水區在颱風事件中的產砂量體，未來可於第二年度持續優化，若可提升集水區產砂熱點之準確度，未來可做為河道及坡面治理工程措施之參考，並於第二年度結束前初步評估治理成效，以求達到減砂入庫之終極目標。



資料來源：「110 年度石門水庫集水區土砂來源調查分析及治理對策與成效評估
及本計畫繪製

圖 6- 1 石門水庫野溪集水區與子集水區編號對應圖

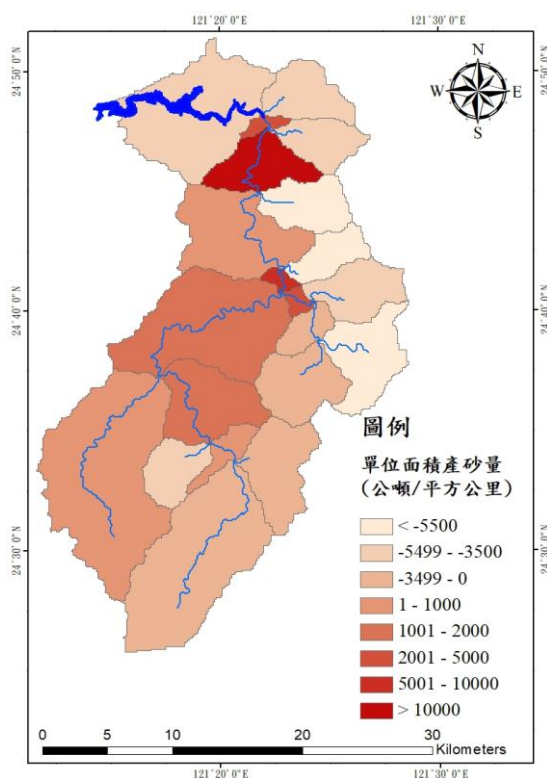


圖 6- 2 T+1 模式模擬蘇迪勒颱風期間子集水區單位面積產砂量

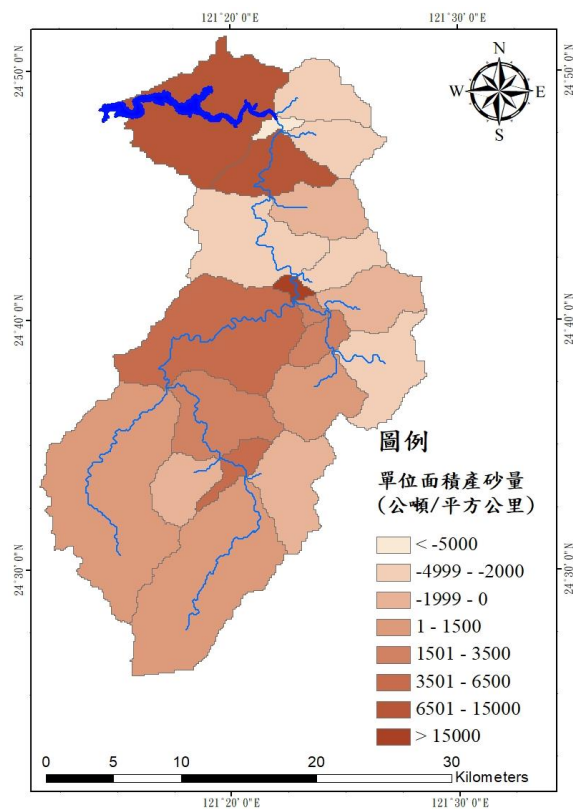


圖 6- 3 T+1 模式模擬杜鵑颱風期間子集水區單位面積產砂量

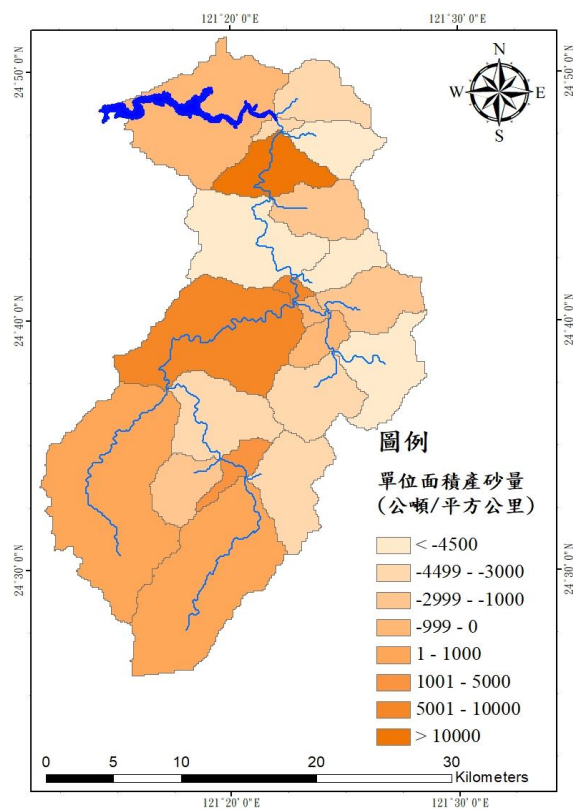


圖 6- 4 T+1 模式模擬梅姬颱風期間子集水區單位面積產砂量

第二節 實際應用及串聯

圖 6-5 設計針對石門集水區的減砂入庫設計流程，整體流程分為四大階段如下：

- (i)產砂時空變化關係：第一年度所發展之土砂來源分析系統已可合理推估產砂時空變化關係。第二年度將持續優化其預測能力。
- (ii)砂空間分布驗證：利用所建立土砂來源分析系統預測各集水區的產砂量，結合現地調查成果驗證產砂熱點的空間分布特徵。
- (iii)熱點驗證資訊建立：確認產砂熱點之空間特徵後，可建立熱點驗證資訊庫，做為檢視既有工程措施成效之依據。
- (iv)減砂入庫策略研擬：利用產砂熱點的空間分布特徵，提出治理策略並進行模擬分析。

整體而言，本計畫目的是透過土砂來源分析預測及工程策略來降低災害風險，達到集水區土砂減量入庫之終極目標。

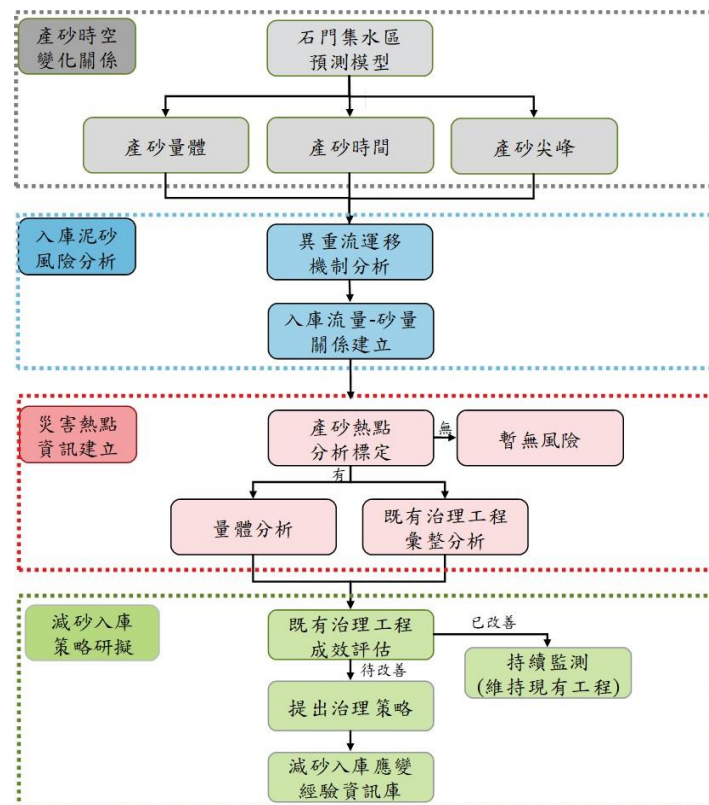


圖 6-5 石門集水區災害管理系統設計流程圖

第三節 第一年及整體進度說明

本計畫之完成進度如圖 6-6 所示，為確保整體計畫能夠在三年內按時完成，本年度不僅完成既定工作，還超前進度執行第二年度部分內容，提前完成工作將有助於推進未來兩年度之工作。



圖 6-6 計畫流程完成進度說明圖

第七章 結論

本計畫目前進行至期末報告階段，以整體計畫流程而言已完成歷史文獻回顧、基本資料收集、歷史災害分析、分析模式建立、參數檢定驗證、泥砂運移關係建立、集水區產砂量推估分配、預測模式參數檢驗、反向預測模式建立及分析系統測試。以下敘述各工作項目成果及未來工作。

第一節 結論

- 一、完成歷史文獻回顧、石門水庫基本資料收集與歷史災害分析。所有資料皆經標準化流程轉換為分析系統之數據格式。
- 二、完成SWAT模式建立，並選取近十年最具代表性的三場颱風進行模式參數檢定驗證，利用模擬成果與石門水庫入流量交叉檢驗，成果顯示SWAT模式能夠合理模擬集水區流量。
- 三、利用SWAT模式建立泥砂運移關係，並利用蘇迪勒、杜鵑及梅姬三場颱風進行檢驗，成果顯示SWAT模式能夠合理模擬石門集水區產砂量。
- 四、分析不同集水分區的產砂量比例，將產出資料正規化後做為反向預測模式參數檢驗之用，成果顯示在不同預測時間步長時之損失函數均能收斂，證明土砂來源分析系統已有效建立並具備可行性。
- 五、利用近年颱風資料進行模式訓練，並保留最具代表性的蘇迪勒、杜鵑及梅姬颱風作為預測案例。成果顯示土砂來源分析系統能有效預測不同子集水區之尖峰泥砂量發生時間，針對總產砂量也能合理預測。

本計畫已完成本年度預期工作，為求能夠在三年內完成所有工作，本年度完成部分第二年度內容並說明如下：

- 一、本計畫擴充土砂來源分析系統預測能力，目前已可將預測時間擴展至T+2 (2個小時後)，成果顯示顯示並保留最具代表性的蘇迪勒、杜鵑及梅姬颱風作為預測案例。成果顯示土砂來源分析系統在不同時間步長時皆能合理反映產砂量體、尖峰發生時間及產砂熱點。
- 二、針對土砂來源分析系統之模擬成果，發現第5、9、11、12、15和18號子集水區(卡拉溪、蘇樂溪、泰平溪等集水區)為產砂熱點，經與歷史資料比對後發現預測熱點尚屬合理，可據此持續進行風險熱點標定工作。
- 三、完成曾文水庫之基本資料收集與歷史災害分析，利用所收集資料初步建立曾文水庫SWAT模型。作為後續年度持續執行計畫之用。

第二節 未來工作

- 一、優化預測模式精度，具備評估集水區產砂熱點能力。
- 二、產砂熱點及治理規則建立
- 三、初步評估治理工程成效
- 四、初步建立曾文水庫土砂來源分析模型模型。

參考文獻

1. 行政院農業委員會林務局(2021)。加強水庫集水區保育治理計畫第 3 期(110-111 年度)工程執行計畫書。行政院農業委員會林務局。
2. 多采工程顧問有限公司(2023)。112 年防汛整合與曾文水庫防洪排砂運轉決策支援」。經濟部水利署南區水資源分署。
3. 財團法人成大研究發展基金會 (2008)。石門水庫及其集水區防災通報系統建置計畫。經濟部水利署北區水資源局。
4. 財團法人中興工程顧問社 (2021)。110 年度石門水庫集水區土砂來源調查分析及治理對策與成效評估。行政院農業委員會水土保持局。
5. 逢甲大學 (2023)。111-112 年度石門水庫排洪排砂對下游河道生態及沖淤影響研究。北區水資源分署。
6. 國立陽明交通大學 (2022)。110-111 年度石門水庫泥砂運移監測設施維護與全洪程觀測。經濟部水利署北區水資源局。
7. 國立臺灣大學生物環境系統工程學系暨研究所 (2022)。河川輸砂承载力與流域永續發展研究：以秀姑巒溪流域為例。國家科學及技術委員會。
8. 經濟部水利署(2023)。中華民國一一二年臺灣水文年報。經濟部

水利署。

9. 廖啟鈞(2020)。SWAT 修正模式應用於台灣多流域之輸砂模擬適宜性評估。國立聯合大學。
10. 蔡光榮、李明熹、陳怡睿、陳筱妍(2017)。極端降雨影響曾文水庫集水區大規模崩塌土砂量之變異分析。鑛冶：中國鑛冶工程學會會刊，61(3)，8-24。
11. 盧至美(2018)。整合 TUSLE 於 SWAT 模式於小型山區集水區之輸砂模擬-以陳有蘭溪為例。國立聯合大學。
12. Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and water conservation research*, 7(3), 203-225.
13. Batista, P. V., Davies, J., Silva, M. L., & Quinton, J. N. (2019). On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Reviews*, 197, 102898.
14. Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., & Chalise, D. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, 780, 146494.
15. Chen, C.-W., Tung, Y.-S., Liou, J.-J., Li, H.-C., Cheng, C.-T., Chen, Y.-M., & Oguchi, T. (2019). Assessing landslide characteristics in a changing climate in northern Taiwan. *Catena*, 175, 263–277.
16. Chiu, Y.-J., Lee, H.-Y., Wang, T.-L., Yu, J., Lin, Y.-T., & Yuan, Y.

- (2019). Modeling sediment yields and stream stability due to sediment-related disaster in Shihmen Reservoir watershed in Taiwan. *Water*, 11(2), 332.
17. Cvetković, V. M. (2021). Innovative solutions for disaster early warning and alert systems: A literary review. *Archibald Reiss Days*, 11.
 18. Chiang, L.-C., Liao, C.-J., Lu, C.-M., & Wang, Y.-C. (2021). Applicability of modified SWAT model (SWAT-Twn) on simulation of watershed sediment yields under different land use/cover scenarios in Taiwan. *Environmental monitoring and assessment*, 193(8), 1–23.
 19. Chen, M., Li, Z., & Gao, S. (2022). Multisensor Remote Sensing and the Multidimensional Modeling of Extreme Flood Events: A Case Study of Hurricane Harvey–Triggered Floods in Houston, Texas, USA. *Remote Sensing of Water-Related Hazards*, 87–104.
 20. Chantraket, P., Kirtsaeng, S., Chaotamonsak, C., Chantara, S., Nakapan, S., & Panityakul, T. (2022). Radar-Based Rainfall Estimation of Landfalling Tropical Storm “PABUK” 2019 over Southern Thailand. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022.
 21. Cui, P., Peng, J., Shi, P., Tang, H., Ouyang, C., Zou, Q., Liu, L., Li, C., & Lei, Y. (2021). Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk. *Geography and Sustainability*, 2(3), 216 – 223.
 22. Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., de Gonzalo, C., Rodríguez-Suárez, J. A., Ruiz del Portal, C., &

- Gómez-Gesteira, M. (2020). MIDAS: a new integrated flood early warning system for the Miño River. *Water*, 12(9), 2319.
23. Garcia-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., Gonzalez-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160–173.
24. Ghorbanzadeh, O., Crivellari, A., Ghamisi, P., Shahabi, H., & Blaschke, T. (2021). A comprehensive transferability evaluation of U-Net and ResU-Net for landslide detection from Sentinel-2 data (case study areas from Taiwan, China, and Japan). *Scientific Reports*, 11(1), 1–20.
25. Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of physiology*, 160(1), 106.
26. Huang, C.-C., Fang, H.-T., Ho, H.-C., & Jhong, B.-C. (2019). Interdisciplinary application of numerical and machine-learning-based models to predict half-hourly suspended sediment concentrations during typhoons. *Journal of Hydrology*, 573, 661–675.
27. Kitazawa, K., & Hale, S. A. (2021). Social media and early warning systems for natural disasters: A case study of Typhoon Eta in Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 52, 101926.
28. Lin, S. C., Ke, M. C., & Lo, C. M. (2017). Evolution of landslide hotspots in Taiwan. *Landslides*, 14(4), 1491–1501
29. Lee, F.-Z., Lai, J.-S., & Sumi, T. (2022). Reservoir Sediment Management and Downstream River Impacts for Sustainable Water

- Resources—Case Study of Shihmen Reservoir. *Water*, 14(3), 479.
30. Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., & King, K. W. (2002). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000. GSWRL Report 02-01, BRC Report 02-05, TWRI Report TR-191.
 31. Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406.
 32. Nazir, M. H. M., Awang, S., Shaaban, A. J., Yahaya, N., Jusoh, A. M., Arumugam, M., & Ghani, A. A. (2016). Sediment transport dynamic in a meandering fluvial system: Case study of Chini River. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 136(1), 012072.
 33. Nearing, M. A., Lane, L. J., & Lopes, V. L. (2017). Modeling soil erosion. In *Soil erosion research methods* (127–158). Routledge.
 34. Parajuli, P. B., Jayakody, P., Sassenrath, G. F., Ouyang, Y., & Pote, J. W. (2013). Assessing the impacts of crop-rotation and tillage on crop yields and sediment yield using a modeling approach. *Agricultural Water Management*, 119, 32–42.
 35. Perera, D., Agnihotri, J., Seidou, O., & Djalante, R. (2020). Identifying societal challenges in flood early warning systems. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 51, 101794.
 36. Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(1), 64–84.
 37. Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C., & De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6),

- 595-614.
38. Wu, L., Liu, X., & Ma, X. (2018). Research progress on the watershed sediment delivery ratio. *International Journal of Environmental Studies*, 75(4), 565–579.
 39. Wuepper, D., Borrelli, P., & Finger, R. (2020). Countries and the global rate of soil erosion. *Nature Sustainability*, 3(1), 51–55.
 40. Zang, Y., Meng, Y., Guan, X., Lv, H., & Yan, D. (2022). Study on urban flood early warning system considering flood loss. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 103042.

附錄一 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	目前期中成果大多在於石門水庫與曾文水庫資料蒐集及歷史災害蒐集，第四章研究於法則描述現有方法之理論及公式，SWAT模擬之案例也僅於2015-2016之蘇迪勒、杜鵑、梅姬三場颱風，建議應用較近期之事件做為驗證較有價值。。	本計畫選取近年颱風事件作為土砂來源分析系統之預測案例。選取2015-2016三場颱風(蘇迪勒、杜鵑、梅姬)作為檢驗案例之主要原因為上述颱風事件為近10年最具代表性颱風(入庫流量及砂量最為顯著)。
二	目前以機器學習應用SWAT成果之進度少，僅提出-Encoder/Decode架構構想、希望加強模型訓練與測試、並須事先建立成效評估方式。	本計畫的模型修改於U-Net的架構形式。U-Net是卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)架構，也是一種機器學習的方法，它原先的設計目的是為了處理像素級的影像任務；residual-connection則是一種用於深度神經網路中的技術，可以視為實現神經網路時的一個設計模組，用於解決深層網路中梯度消失或

項次	審查意見	回覆辦理情形
		梯度爆炸的問題，以提升訓練效果。預測效能請見P.5-9至P.5-17內容。
三	請針對圖5-10 本研究所設計之 Encoder/Decoder架構再深化、針對輸入資料參數調整，輸出資料加以說明、以闡述學習機制在集水區土砂來源分析中運作機制。	土砂來源分析系統之主要設計概念為：由於各測站的資料以時間軸排序時，可以視為一個二維資料集，加上 U-Net 以往在重建二維資料時能夠取得合理研究成果，而額外使用 residual-connection 則是為了在模型後端重建二維資料時能夠有對應層數的資料能夠參考，以進一步地幫助訓練。圖 4- 3 為構成本研究的網路架構的主要模組，可以觀察到整體網路可視為 residua-connection 版本的 U-Net 架構。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	對於基本資料的蒐集相當完整，建議蒐集不同單位、不同年度的崩塌相關圖資，並補上此計畫所使用的崩塌圖層的年份與來源，如圖1-1。	感謝委員建議，本計畫第一年度之工作向內容為建立土砂來源分析系統，並初步建立系統預測產砂熱點能力。第二年度將持續建立石門水庫不同年度的崩塌相關圖資，第三年度則為曾文水庫。利用上述資料可檢驗系統之預測能力是否良好。
五	計畫有提到第三年度會針對曾文水庫集水區進行研究分析，不過第一年度的計畫已詳細的蒐集曾文水庫的相關資訊，或許第三年度可以考慮其他重要水庫的集水區進行探討。	本計畫擬定第一年度建立石門集水區土砂來源分析系統，第二年度建立治理規則，第三年度加入曾文水庫來評估系統預測成效。為求能夠於3年內完成此龐大計畫，本計畫在第一年度即努力收集曾文水庫基本資料，並預訂於第二年度期末報告前建立曾文集水區之土砂來源分析系統。綜上，本計畫所選取之石門及曾文集水區為台灣南北之指標水庫。本計畫希望能夠利用三年時間探索土砂來源分析

項次	審查意見	回覆辦理情形
		系統之可用性，以期符合集水區土砂減量入庫之目標。
六	如果已經有現地資料，為何還需SWAT 模式計算模擬的數值？並且用其作為後續的訓練資料？	本計畫主要目的為利用水庫入流砂量建立土砂來源分析系統，主要原因為目前石門集水區之不同子集水區並無實測土砂資料。因此，本計畫利用 SWAT 模擬不同颱風事件建立訓練資料。期望利用所發展之土砂來源分析系統合理預測產砂量體，並於第二年度持續優畫期預測成果，作為推估產砂熱點之工具，未來進一步作為水保治理工程參考，達集水區土砂減量入庫之目標。
七	圖5-11的橘線顯示MSE Loss趨近於0，是否有相關佐證資料或是公式證明經過訓練後可以確實提高預測效果。	本研究建立主要模型進行不同時間步長 (T+1 到 T+2；1小時後到 2 小時後)的產砂量預測，首先，必須代入不同子

項次	審查意見	回覆辦理情形
		集水區數據進行訓練，表 5- 4 為用來進行訓練和應用的颱風場次。本計畫為求預測模型可適用於於不同情境，將訓練與應用場次分開，即指三場應用案例不會加入訓練過程，在模型完成訓練後會直接用三場模型不曾見過的颱風案例進行預測。圖 5- 13 顯示主要模型在不同預測時間步長的 loss function (損失函數)變化趨勢，可反映出模型的訓練效果。每張圖的橫軸代表訓練迭代次數，縱軸則為損失函數值。

附錄二 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	本計畫於所提集水區土砂來源分析系統中，採用四種迴歸分析方法獲得初步成果後，再以四種不同方法進行交叉驗證，但似乎缺乏說明如何根據交叉驗證成果進行土砂來源之分析。	本計畫將利用官方公布的集水區產砂資料、水庫歷年入砂資料、淤積資料及排砂資料作為檢驗基準，藉此交叉分析土砂來源。
二	本研究欲提出適用於推估集水區土砂來源方法，其是依據過往歷史多期地形變動資料進行統計迴歸方式呈現，或是依何種方法呈現，再請補充說明。	本研究將採用土壤水文評估模式不同演算工具搭配不同時期資料進行模擬，產出足夠資料作為人工神經網路所需之訓練驗證資料集，同時可利用統計迴歸方式分析不同集水區之產砂量，做為未來土砂來源評估之依據。
三	本研究利用機器學習土砂運移機制，其在資料量時空間分布上，是以災害事件時間序列及曾文水庫集水空間區域為單位，或是何種資料分布方	本研究所採用之資料量將具備時間-空間分布關係，主要利用災害期間之時間序列資料，包含集水區雨量、水庫入砂量、水庫排砂量等逐時數據

項次	審查意見	回覆辦理情形
	式，再請補充說明。	為單位。考量本研究之架構為多年期計畫，報告所撰寫之研究區域雖以曾文水庫為主，在計畫後續執行時也會加入石門水庫進行輔助研究。
四	本研究在多重演算分析模型上，藉由不同迴歸分析成果與水保評估模型進行交叉驗證，但無實測資料比對，其機器學習建構之分析系統可靠性，再請補充說明。	本研究將利用水利署官方公布的水庫歷年入砂資料、淤積資料及排砂資料搭配模式成果進行檢驗，如此方能使建構機器學習所需之訓練驗證資料集具備可信度。
五	水庫上源來砂來源可能眾多，如何以水庫排砂及淤積數據分析出集水區土砂來源？	本研究將利用雨量資料、數值模式資料進行各集水分區的土砂來源比例分析，並利用水庫入出流砂量及歷年淤積資料作為驗證。了解各子集水分區在不同災害事件下的土砂來源集產量。
六	計畫內容僅說明 DIKE 之定義，未見實際適用於本案之具體做法？	本研究將採用具備時間-空間分布關係的資料集，主要利用災害期間之時間序列資料，包含集水區雨量、水庫入砂量、水庫排砂量等逐時數據為單

項次	審查意見	回覆辦理情形
		位。產出足夠資料作為人工神經網路所需之訓練驗證資料集。做為未來土砂來源評估之依據。由於本研究之整體架構為多年期計畫，本計畫研究區域不僅只於曾文水庫，也會加入石門水庫進行研究。
七	計畫書多介紹傳統之演算法，如線性迴歸、多項式迴歸、邏輯迴歸等，及USLE公式搭配崩塌量推估土砂流失量，並未對所有採用之機器學習方法多做介紹，創新性及可行性待確認。	本研究依循委員意見，在期中報告階段加入深度學習 (Deep Learning, DL) 與集成學習 (Ensemble Learning, EL) 不同演算法作為本計畫之機器學習方法，上述方法皆為當今熱門之演算法，具備一定程度之創新性及可行性。

附錄三

期末成果 發表簡報

結合數據科學與機器學習建立

集水區土砂來源之分析系統

水保創研計畫-黃振家



一、緒論

二、研究區域

三、研究方法

四、研究成果

五、應用層面

六、結論

一、緒論

計畫緣起

- 2023年水砂災害與過去20年平均相比提升12 %
- 近年來好發的短延時強降雨事件更是加劇水砂災害強度的主因。
- 現行水庫之淤積率已接近30 %，有效分析集水區土砂來源與維持水庫庫容為永續發展之關鍵

計畫目的

- 本研究擘劃三年藍圖：分析系統 → 治理規則 → 成效評估
- 結合數據科學與機器學習建立集水區土砂來源之分析系統
- 研擬有效土砂管理策略進而爭取應變時間

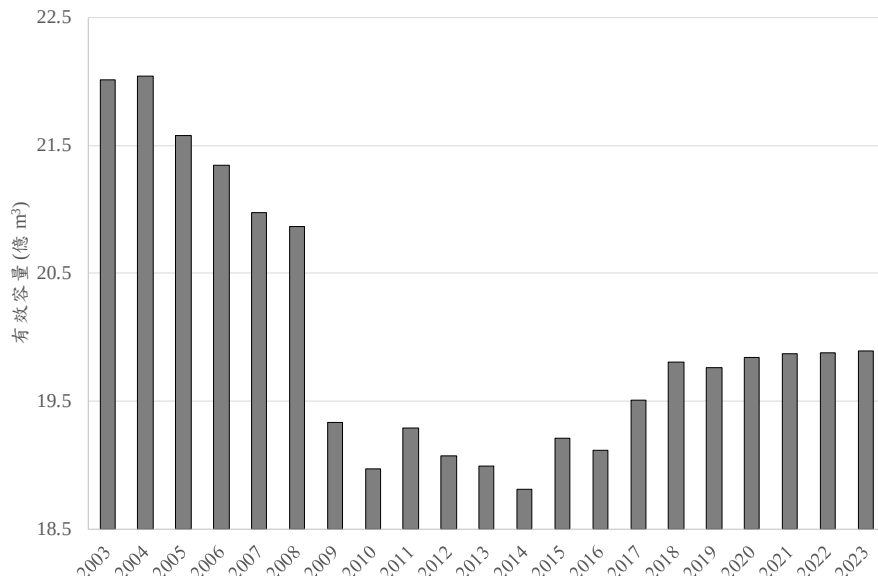
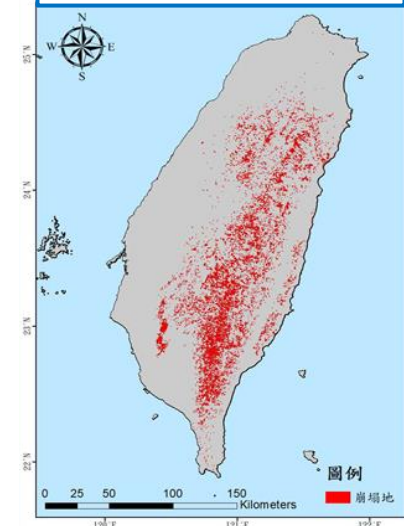
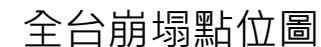
關鍵課題

關鍵課題

- 集水區**不安定土砂**提高水環境風險
- 集水區超量土砂造成**水庫淤積**問題
- 集水區-水庫**聯合治理**之評估方法

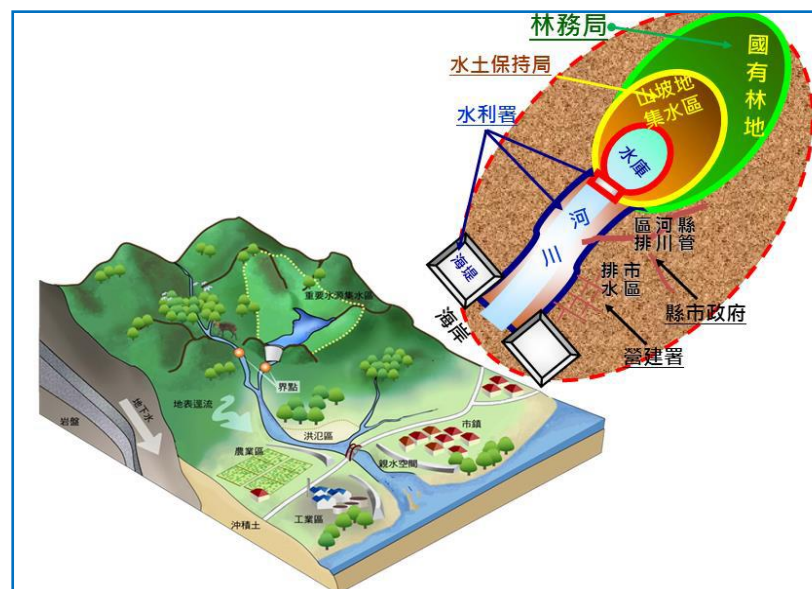
- 集水區超量土砂造成水庫淤積問題

- 集水區-水庫聯合治理之評估方法



台灣水庫有效容量歷年變化圖

資料來源：經濟部水利署「公務統計報表-現有水庫概況」



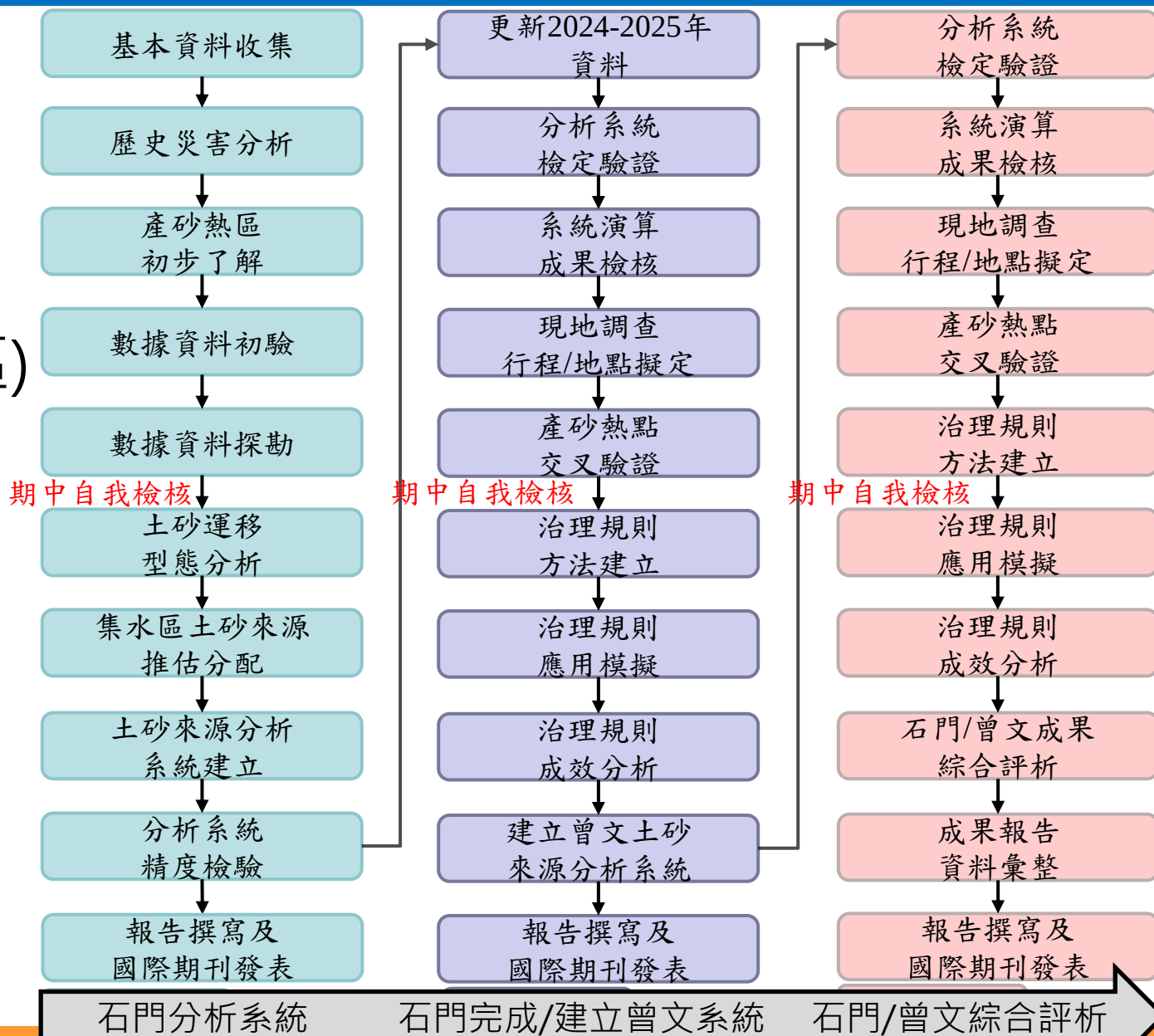
集水區-水庫聯合治理示意圖

資料來源：「加強水庫集水區保育治理計畫第3期(110-111年度)工程執行計畫書」

全程流程圖

研究區域

(石門/曾文集水區)

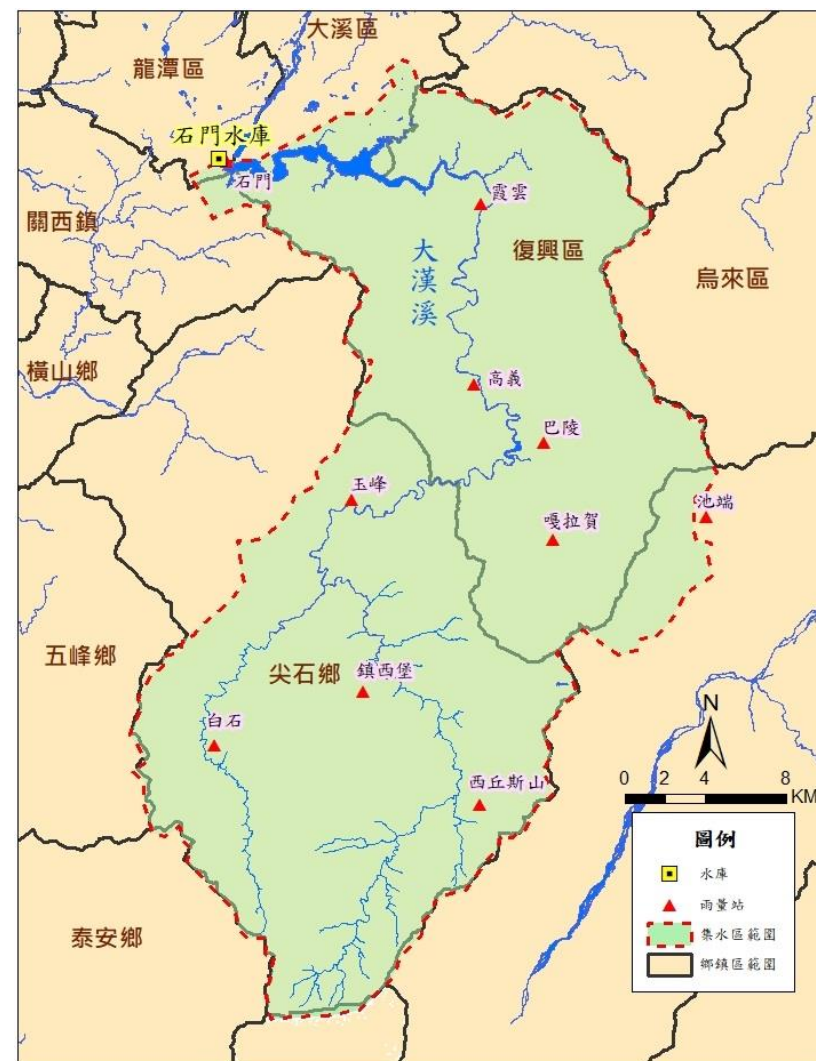


二、研究區域



(一)石門水庫 – 地文資料

- 臺灣的**第三大水庫**
- 於1964年6月竣工
- 位於淡水河流域上游及大漢溪中下游，
集水區面積為**763.4 平方公里**
- 範圍包括桃園大溪區、龍潭區、復興區、
新竹關西鎮、尖石鄉及宜蘭大同鄉



石門水庫集水區範圍圖

資料來源：經濟部水利署北區水資源分署

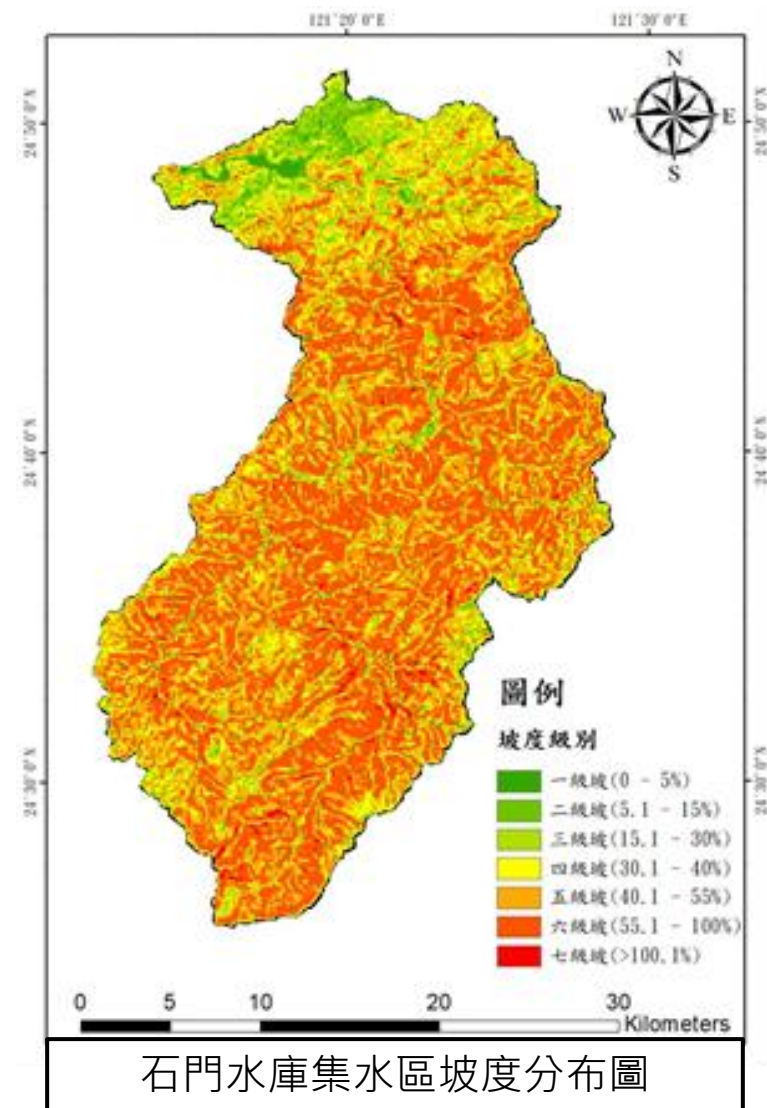
(一)石門水庫 – 地文資料

地形地勢

- 地勢由東南向西北遞減
- 坡度：六級坡分布最廣，坡度大於40%占78.5%

土地利用

- 森林用地佔92.36%，約701.6平方公里
- 森林用地中，天然林621.1平方公里，人工林約80.4平方公里



(一)石門水庫 – 水文資料

水系

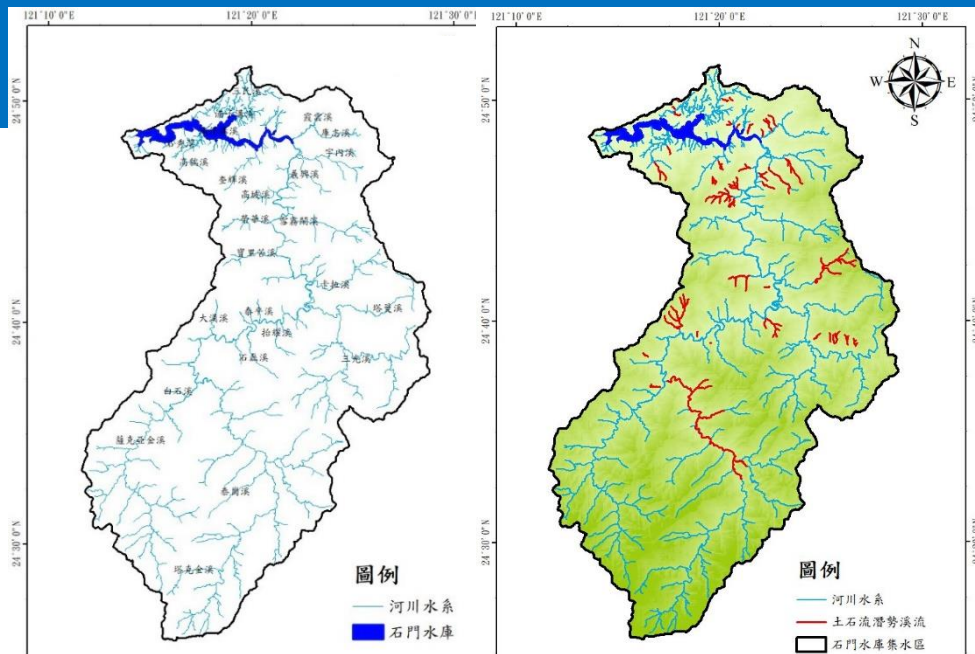
- 以大漢溪為主，由三光溪、卡拉溪、霞雲溪等共**64條支流**匯合而成
- 河流總長約352.63公里

土石流潛勢溪流

- 2024年農村水保署公告位於石門水庫集水區範圍內的共有**40條**土石流潛勢溪流

雨量

- 1站氣象站、10站雨量站
- 雨季為5月至10月，**年平均雨量在2000至3,500毫米間**



石門水庫集水區河川水系及土石流潛勢溪流圖

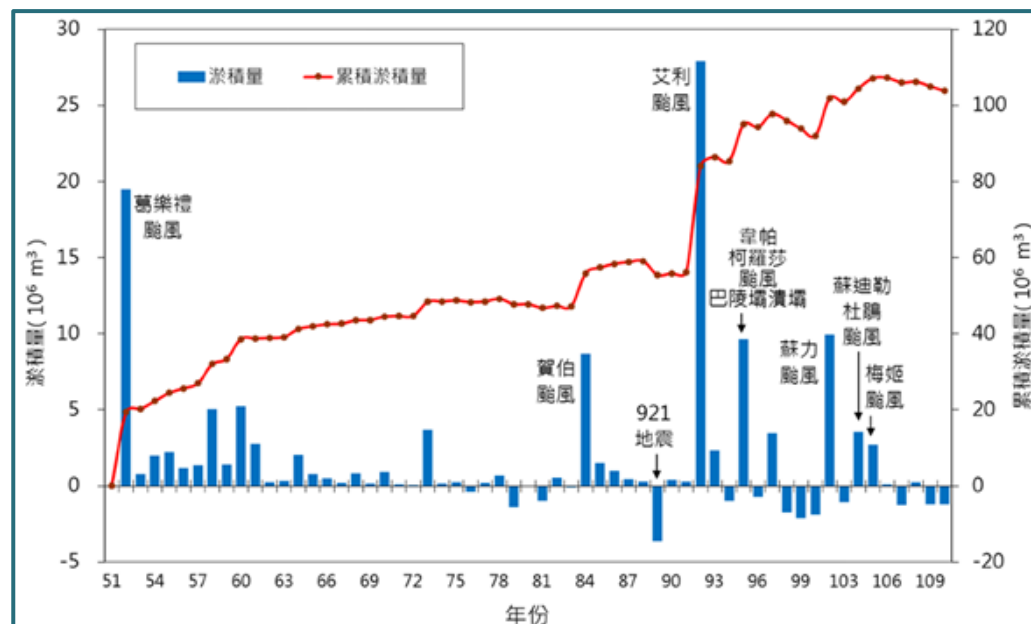
流量

- 5站水位及流量測站

流量站	年平均流量 (cms)
霞雲	37.63
稜角	8.39
玉峰	17.88
秀巒	6.21

(一)石門水庫 – 災害資料

- 葛樂禮颱風新增淤積量1,947萬立方公尺
- 2004年艾利颱風新增淤積量2,788萬立方公尺，水庫總蓄水容量減少9%
- 2007年韋帕颱風導致巴陵攔砂壩潰堤，庫區原水濁度上升
- 經歷多次重大颱風，截至2023累積淤積量已達1億450萬立方公尺，淤積率33.93%



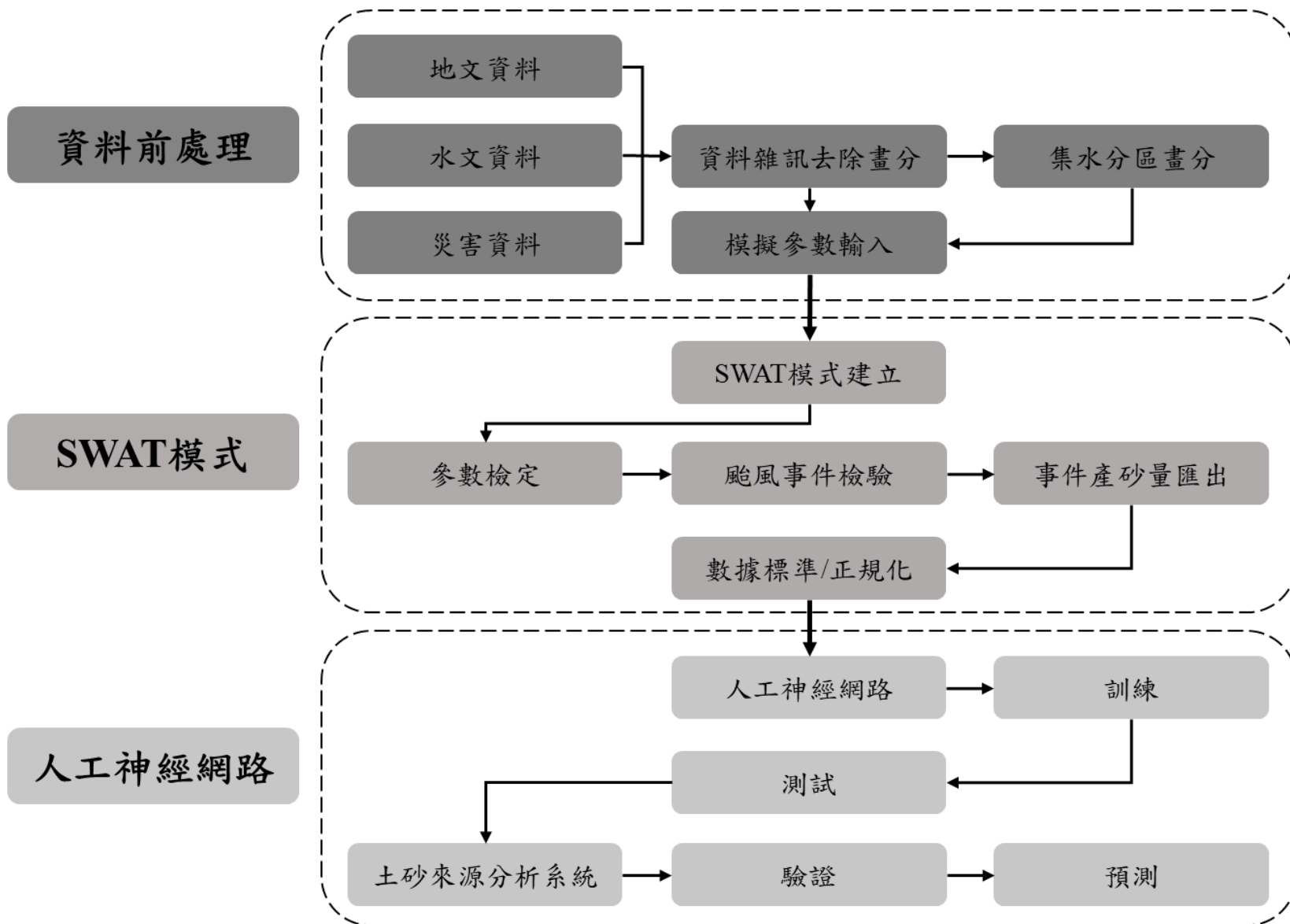
石門水庫累計淤積量圖

資料來源：「110-111 年度石門水庫泥砂運移監測設施維護與全洪程觀測」

三、研究方法

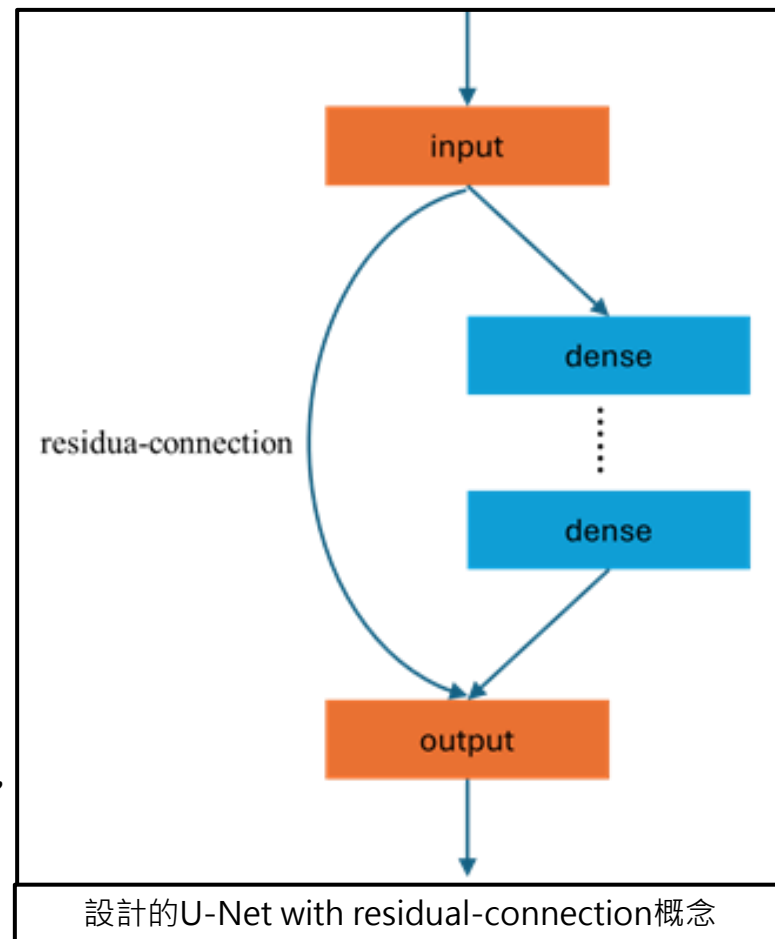


研究之整體架構圖



預測系統之演算法簡介 – 深度學習

- 輸入與輸出的維度與資料量差距過大且無效值比例較高，傳統的機器學習模式無法處理，所以導入新型態的深度學習或集成式學習
- 流量及泥砂量的原始數據的數量及值過大，訓練時會無法收斂，因此對資料進行標準化後再正規化處理
- 模型修改於U-Net的架構，將中間的連結從skip-connection改為residual-connection來特徵合併。
- residual-connection則是用於深度神經網路中的技術，解決深層網路中梯度消失或爆炸的問題，提升訓練效果。



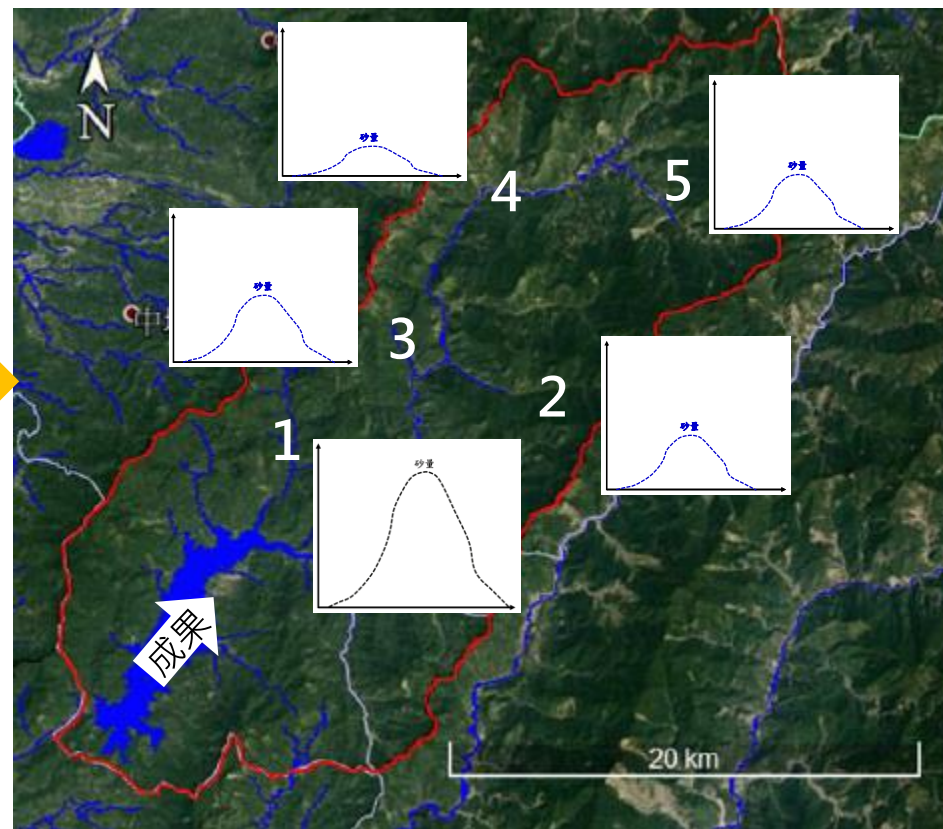
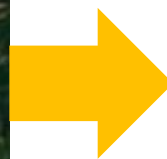
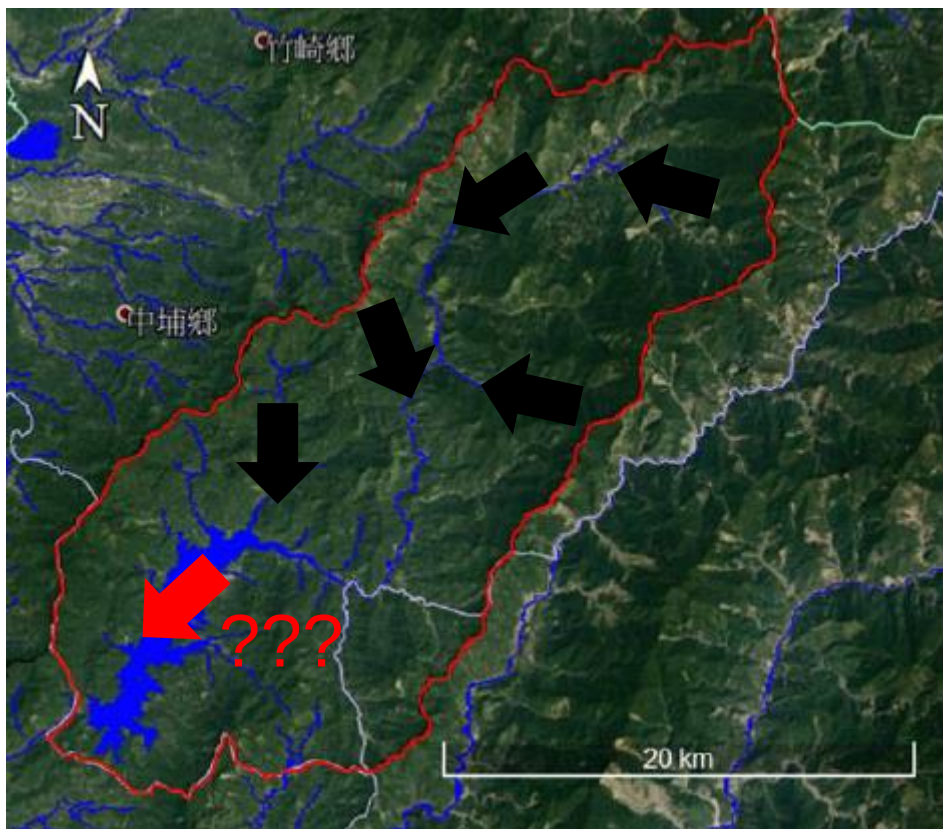
預測系統之演算法簡介 – 深度學習



四、研究成果

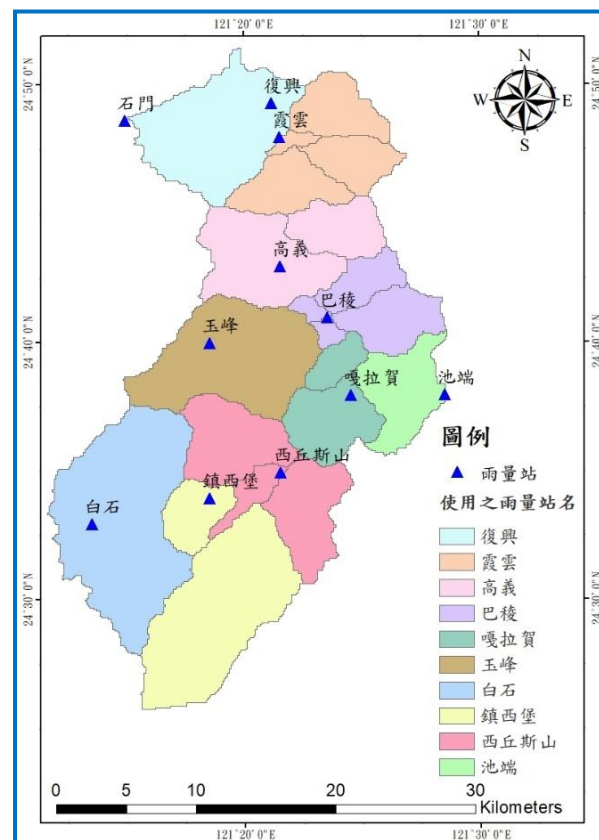
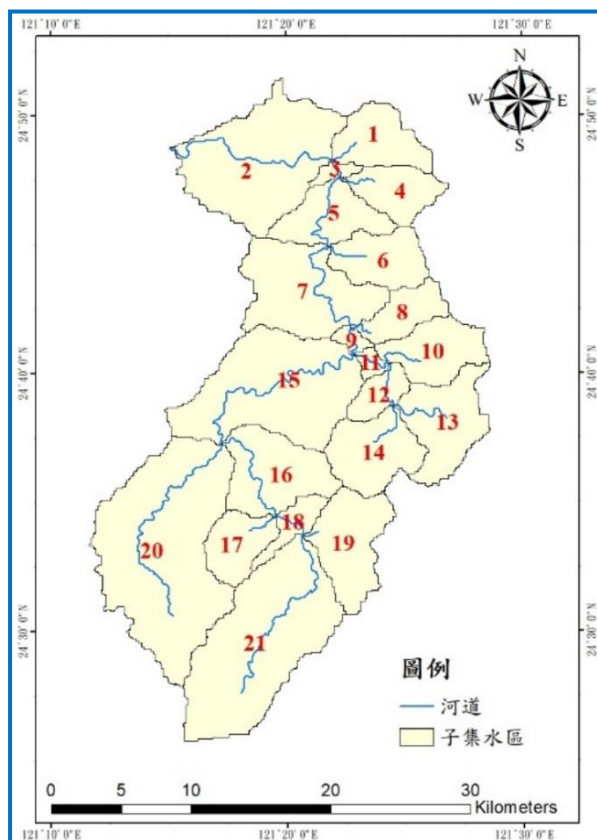


分析模式預期成果圖



(一)SWAT成果 - 模型建置

- 依高程及水系資料，劃分**21個子集水區**
- 配合土地利用、土壤及坡度，共劃設了**29個HRU(水文響應單元)**
- 各子集水區使用距離最近之雨量站資料



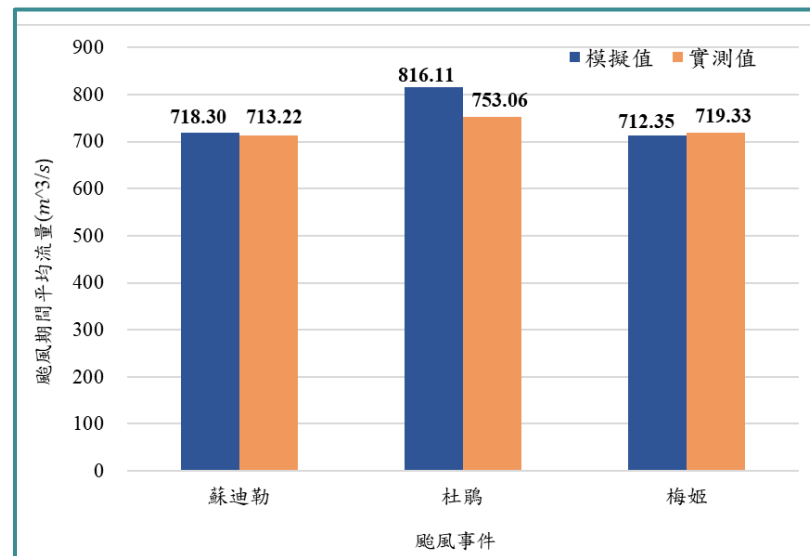
(一)SWAT成果 – 模擬成果

- 收集2008至2022年的天氣資料，並選取2013至2016年近期具有代表性的颱風年份
- 將2013至2014年作為模式的暖機期間，模擬2015至2016年的颱風事件
- 比較基準採用石門水庫入庫觀測點羅浮測站於颱風期間所測得之資料與SWAT的模擬值進行比較

流量部分

- 蘇迪勒颱風期間的模擬平均流量為 $718.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，與實測值 $713.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 相比，差距為0.71%
- 杜鵑及梅姬颱風的模擬與實測分別相差8.37%和0.97%
- SWAT對於流量的模擬具有一定的準確性

颱風事件	起迄時間	模擬值 (m^3/s)	實測值 (m^3/s)	誤差
蘇迪勒	2015/08/07 ~ 2015/08/10	718.30	713.22	0.71%
杜鵑	2015/09/28 ~ 2015/09/30	816.11	753.06	8.37%
梅姬	2016/09/26 ~ 2016/09/29	712.35	719.33	0.97%

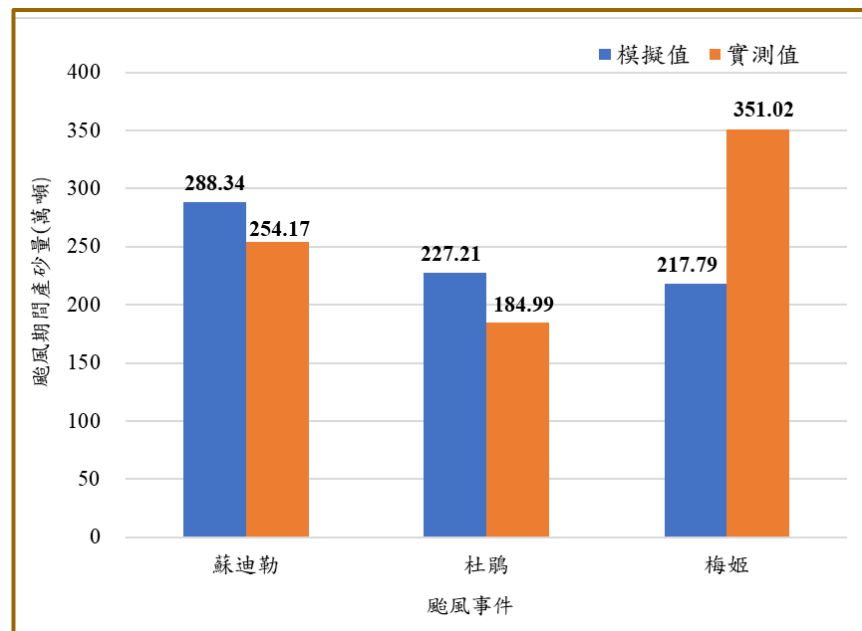


(一)SWAT成果 – 模擬成果

產砂量部分

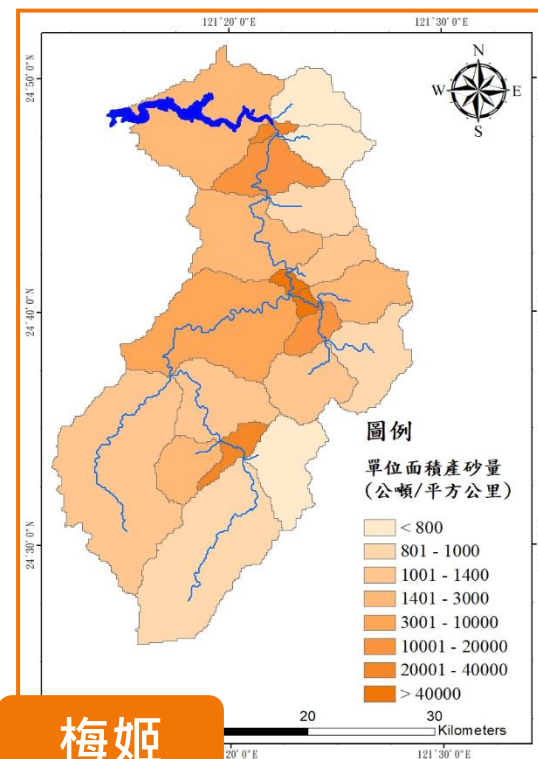
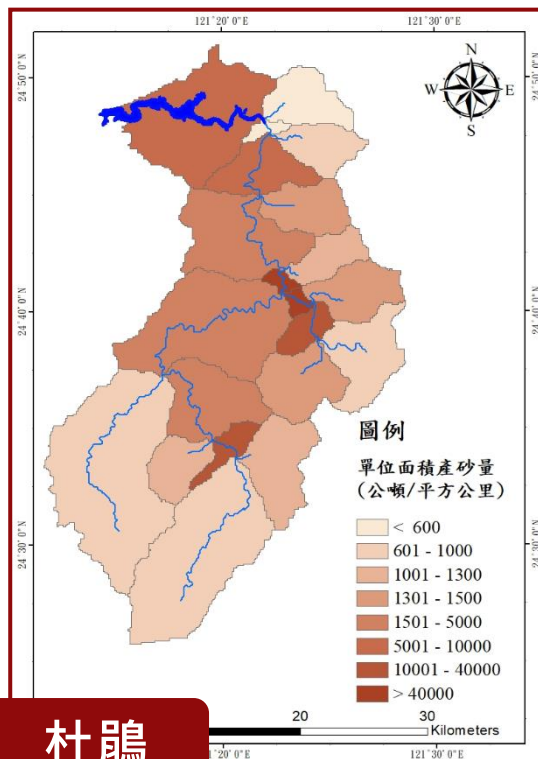
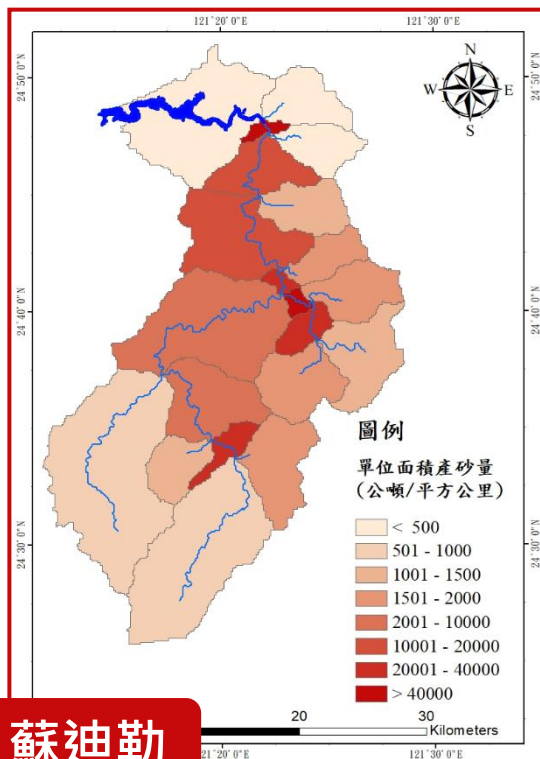
- 蘇迪勒颱風期間石門水庫上游集水區**模擬產砂量為2,541,735噸**，與**實測值2,883,400噸**相比，差距**13.44%**
- 杜鵑與梅姬颱風分別差距了22.83%與37.95%
- 三場颱風合計之平均誤差約為24.77%

颱風事件	起迄時間	模擬值(噸)	實測值(噸)	誤差
蘇迪勒	2015/08/07 ~ 2015/08/10	2,883,400	2,541,735	13.44%
杜鵑	2015/09/28 ~ 2015/09/30	2,272,130	1,849,871	22.83%
梅姬	2016/09/26 ~ 2016/09/29	2,177,940	3,510,151	37.95%



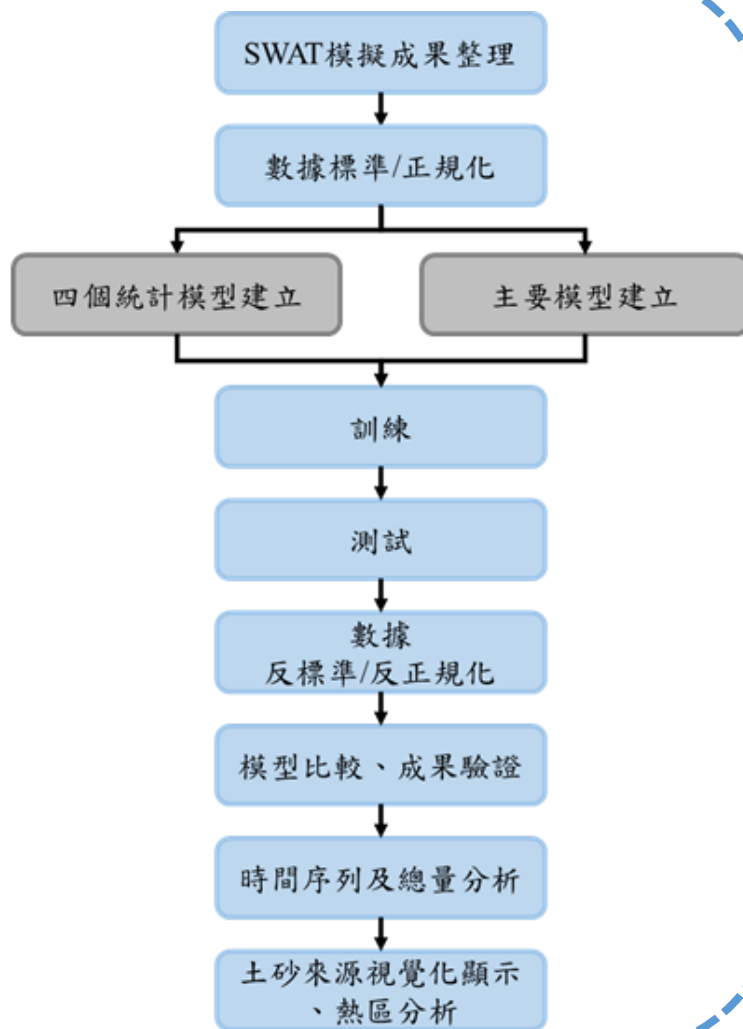
(一)SWAT成果 – 模擬成果

- SWAT的模擬是由最小單元HRU傳遞至子集水區後，再移動至河道不斷匯集直到出口，所以可計算得到**各個子集水區的產砂量**
- 圖是根據模擬颱風期間之各子集水區產砂量除以其面積所得之**單位面積產砂量**
- 在三場颱風事件中，**第5、7、9、11、12、15及18號子集水區的單位面積產砂量均偏高**



(二) 預測模型建立

土砂分析系統建立流程圖

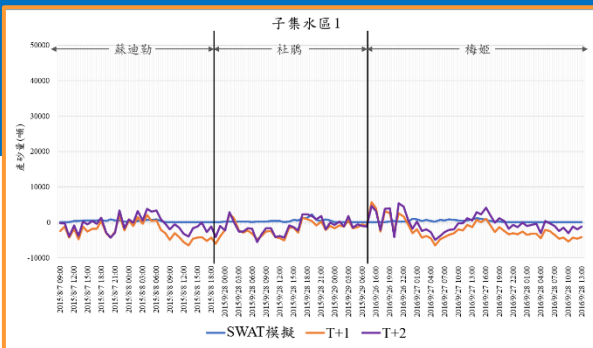


- 模型完成訓練後會直接用三場模型不曾見過的颱風案例進行預測。

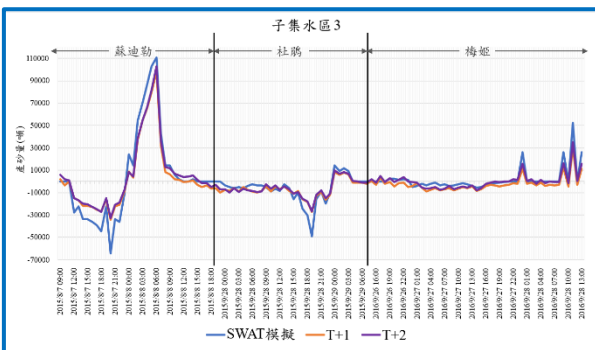
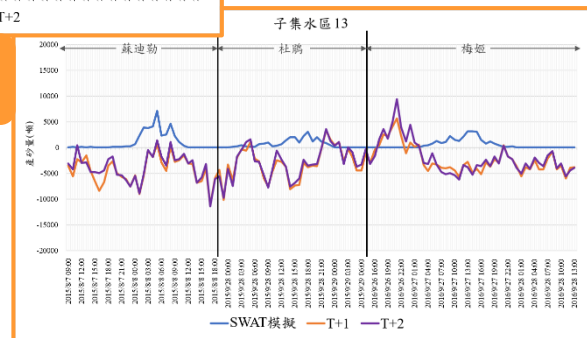
訓練和應用之颱風場次表				
年份	颱風名稱	時間	訓練	應用
2008	卡枚基	07/17~07/18	✓	
	鳳凰	07/27~07/29	✓	
	辛樂克	09/12~09/17	✓	
	薔蜜	09/28~10/01	✓	
2009	莫拉克	08/06~08/10	✓	
2010	凡那比	08/06~08/07	✓	
2012	蘇拉	07/31~08/04	✓	
2013	蘇力	07/12~07/16	✓	
	潭美	08/20~08/23	✓	
2014	麥德姆	07/22~07/23	✓	
2015	昌鴻	07/10~07/11	✓	
	蘇迪勒	08/07~08/10		✓
	杜鵑	09/28~09/30		✓
2016	梅姬	09/26~09/29		✓

(三) 預測模式應用

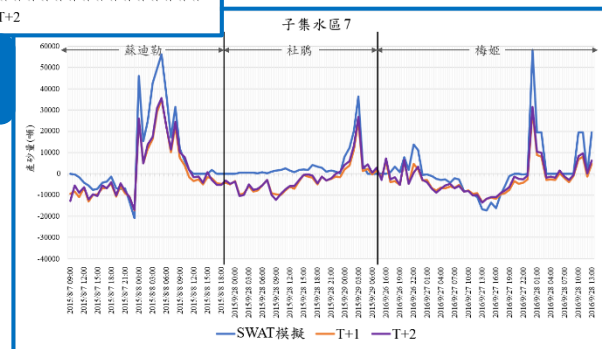
- T+1及T+2模型在時間序列的波動表現上展現了蠻高的一致性
- 在每小時產砂量低於約 5000 噸的子集水區中，對其值及波動的預測準確度相對較低
- SWAT 中產砂量正負值分別代表該區域泥砂為侵蝕（正值）或淤積（負值）；而對預測模型，正負僅為數值，無法反映這層含義
- 對於產砂量較大的子集水區（如第 2、3、5、7、9、11、12、14、15、16、18、20 和 21 號）展現出較高的預測能力



產砂量較低區域

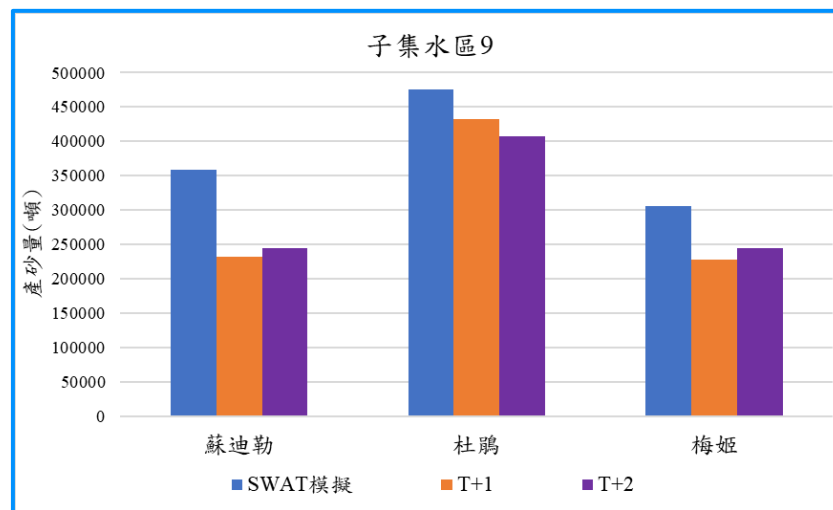
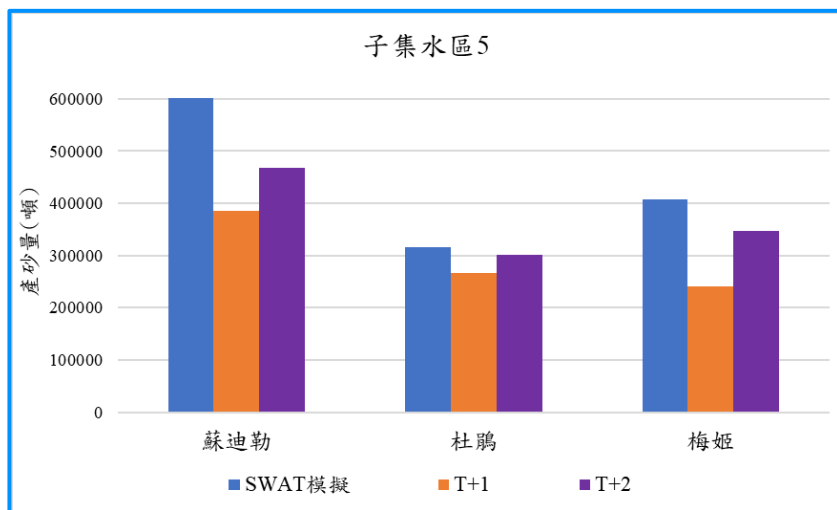


產砂量較高區域



(三) 預測模式應用

- 總產砂量結果分析，與時間序列分析中觀察到的**趨勢一致**。
- 在產砂量較小的區域，預測值可能會呈現負值，預測精度較不佳。
- **產砂量較大的子集水區有較高的預測準確性**。

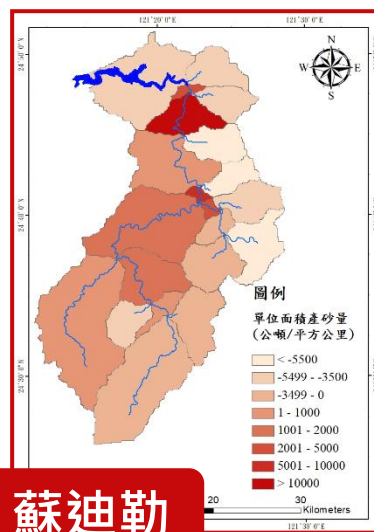
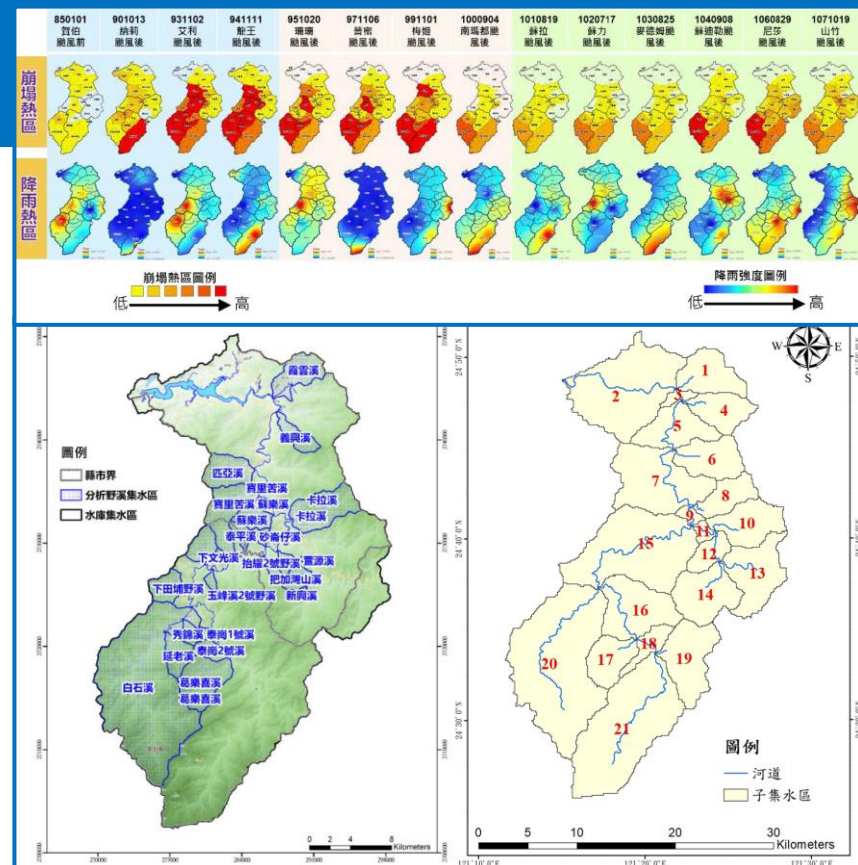


五、應用層面

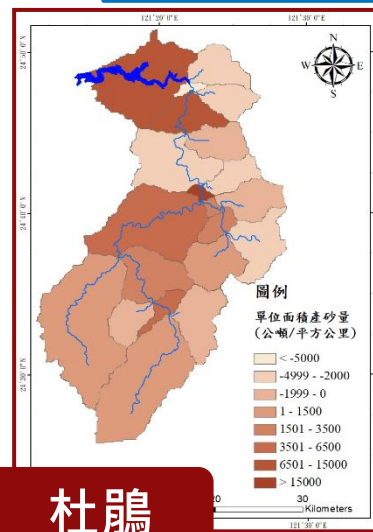


(一)產砂熱區評估

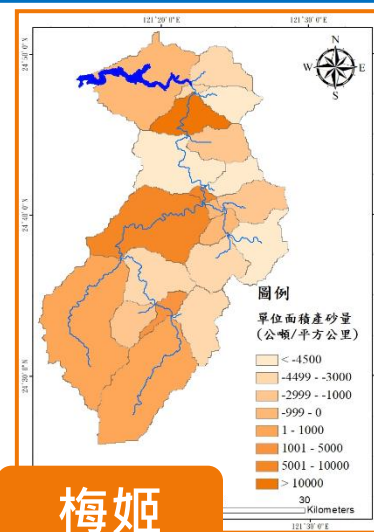
- 預測模型T+1之結果，經計算後，進行視覺化呈現，第5、9、11、15、16、18和20號子集水區的產砂量明顯較高
- 產砂量高的子集水區(第9、11、15、20號子集水區)與過往報告中所提及的水庫上游高產砂量區域，如白石溪、蘇樂溪及泰平溪集水區相符合
- 右側外圍第4、6、8和13號子集水區則顯示出顯著較低的單位面積產砂量



蘇迪勒



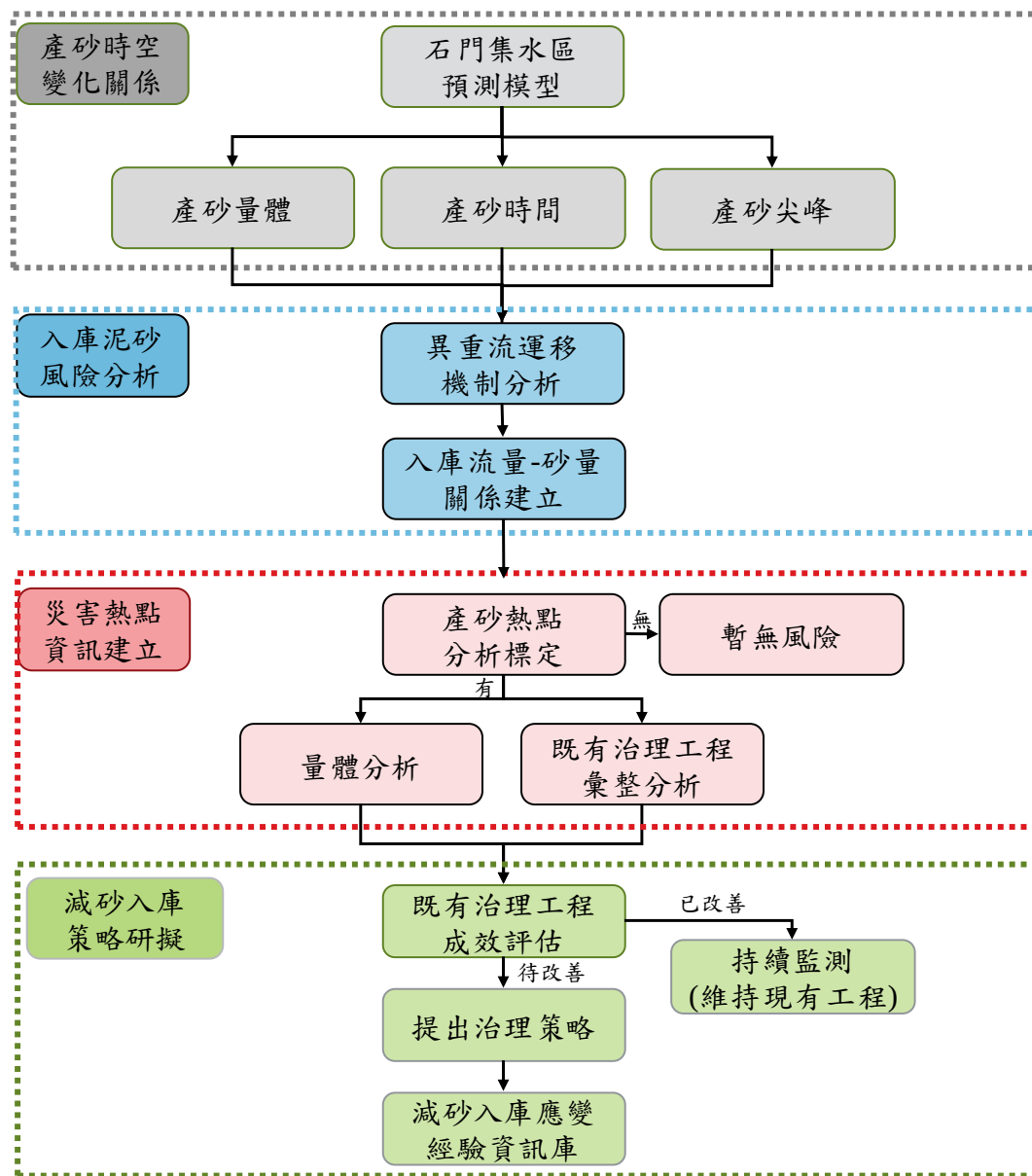
杜鵑



梅姬

(二) 實際應用及串聯

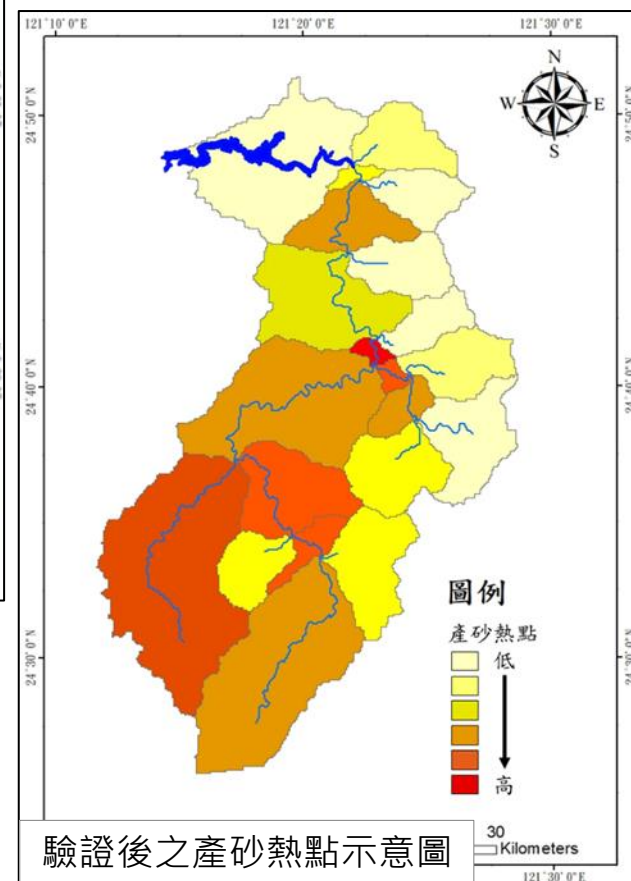
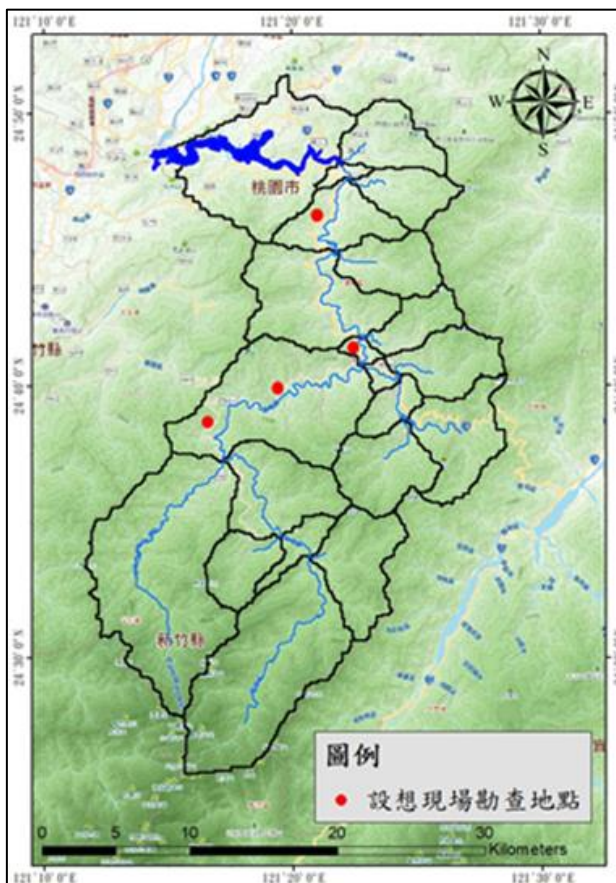
- 石門集水區災害管理系統設計流程圖，重點在於泥砂災害的時空變化關係和預測分析
- 系統需進行熱點標定，進而建立災害熱點資訊，以識別災害應變經驗知識庫中的高產砂區域
- 目的是透過泥砂分析系統研擬檢砂入庫策略。



(二) 實際應用及串聯

產砂熱點建立及驗證

- 根據預測結果設置**現場勘查點**位。希望藉此**確認預測結果與實際情況之間的合理性**。
- 建立熱點資訊驗證機制，結合**現地勘查與多源數據交叉分析**進行全面評估。
- 經現地勘查與交叉比對驗證之後，各熱點的產砂等級根據實地狀況進行調整

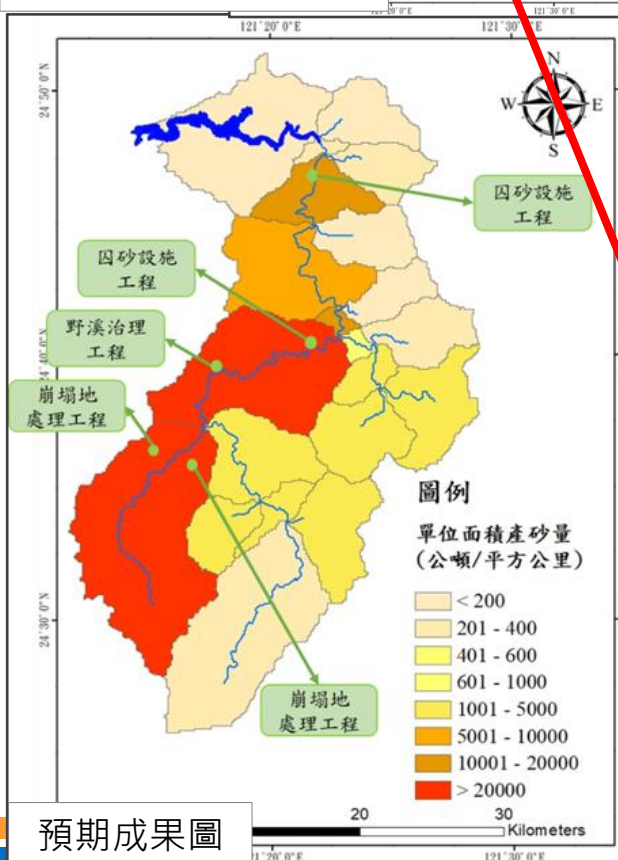


(二) 實際應用及串聯

減砂入庫策略研擬

- 中上游的**高產砂熱點**多為**工程密集區域**，提供評估既有工程成效的重要參考
- 結合各區域的問題特性，提出適合的治理策略
- 作為未來水土保持治理工程規劃之依據，最終達成**降低災害風險與有效減砂入庫**的目標

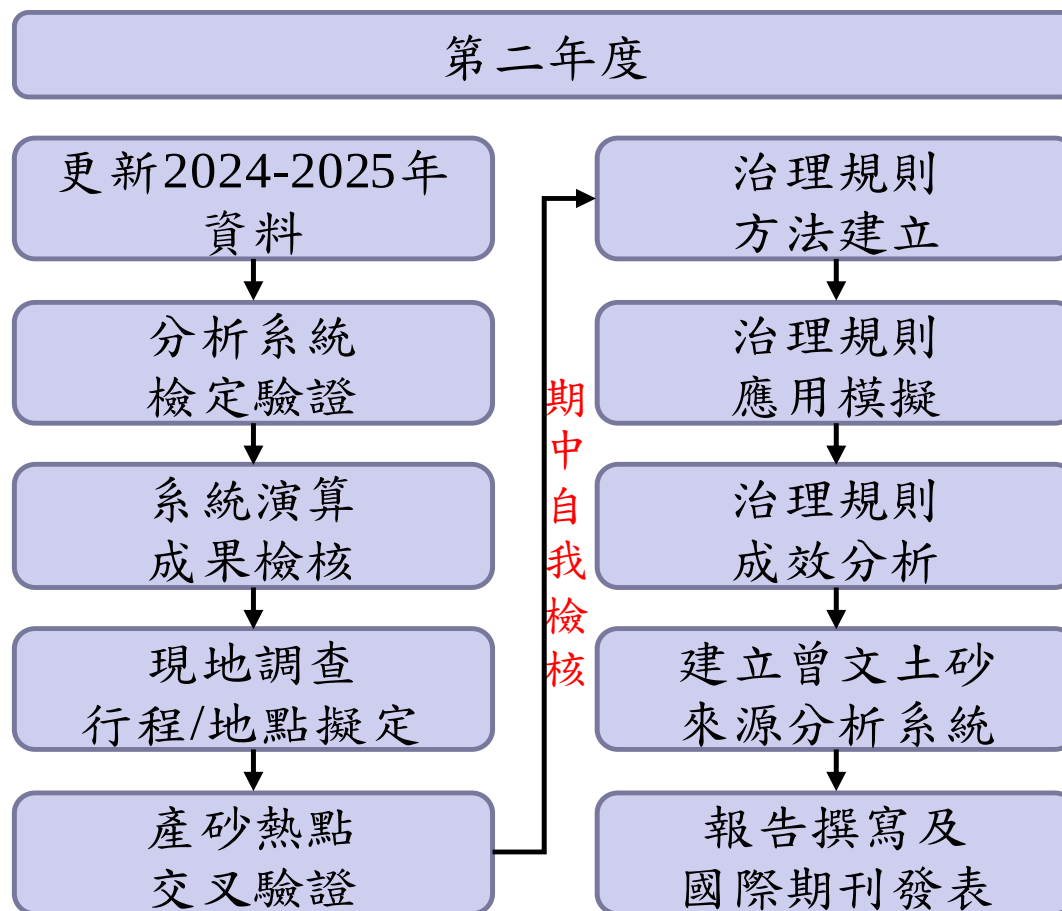
既有治理工程點位圖



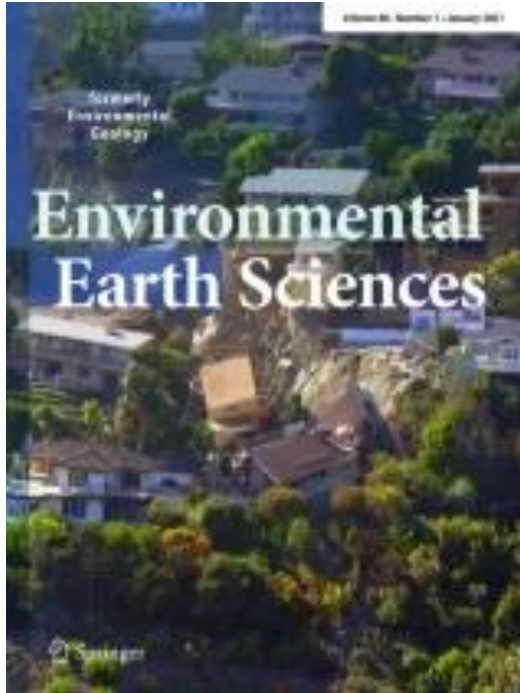
集水區編號	產砂熱點排名	90~113年工程數量	100~113年工程數量
1	18	29	20
2	5	86	45
3	16	13	0
4	19	11	10
5	1	18	8
6	17	6	5
7	15	51	15
8	20	24	8
9	2	4	0
10	14	10	2
11	6	3	2
12	8	21	5
13	21	0	0
14	11	12	0
15	3	209	35
16	10	18	1
17	12	26	11
18	4	3	0
19	13	0	0
20	7	62	19
21	9	0	0

(三)第二年進度說明

- 已順利**完成本年度**預期的所有工作內容
- **超前進度**展開進行了部分第二年度內容

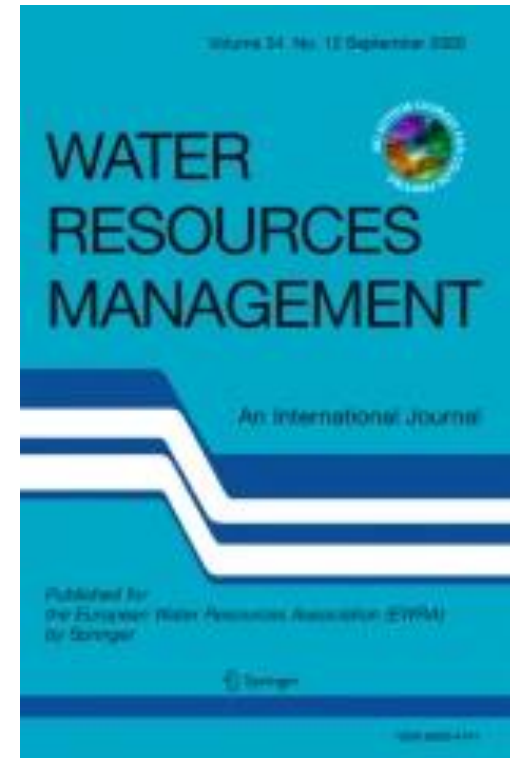


擬定發表文章



Application of the Sediment Yield Analysis System in Watershed-Reservoir for Management Strategy Formulation

Establishing an Inverse Prediction System for Sediment Yield in Watersheds by Integrating SWAT and Artificial Intelligence



六、結論



(一) 結論

各工作項目成果

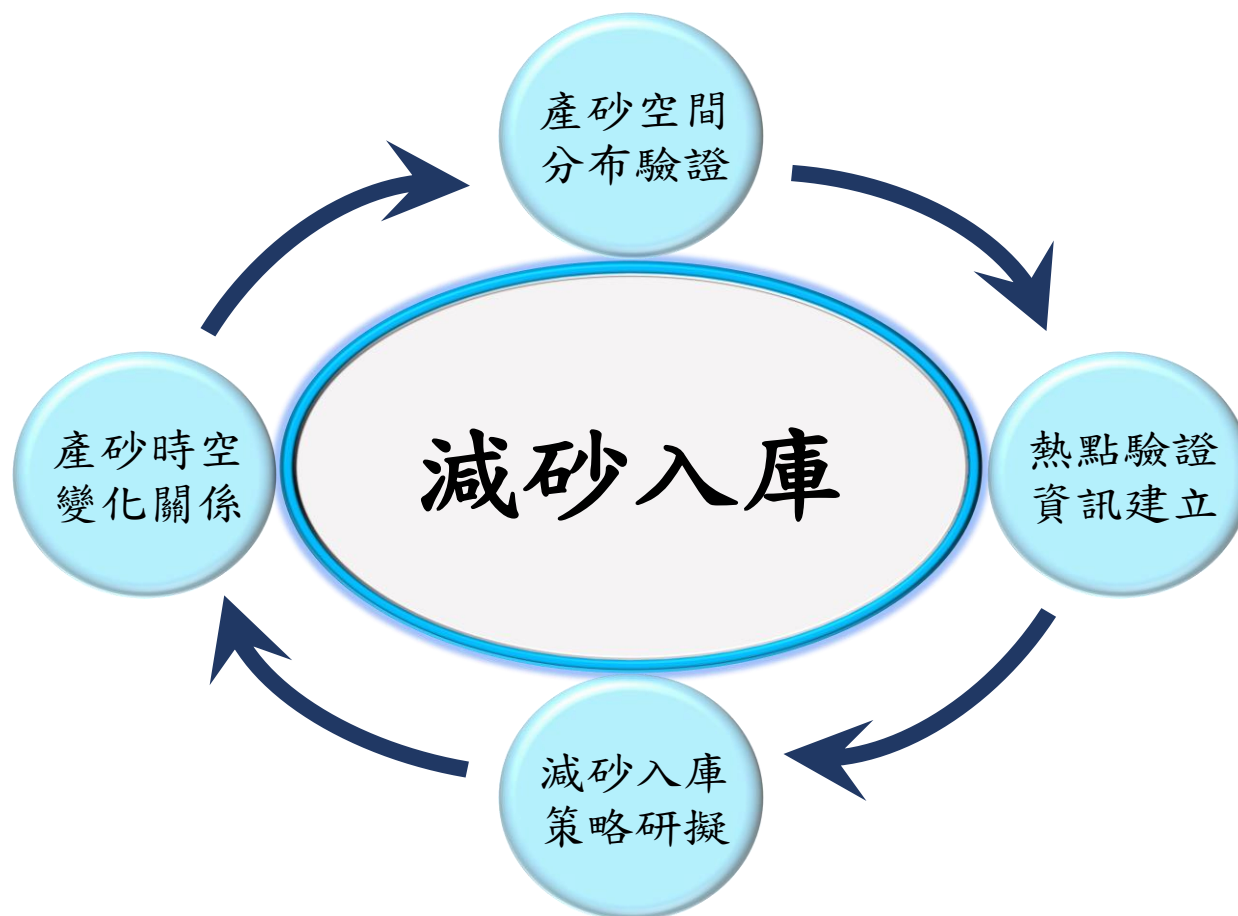
1. 完成文獻回顧、基本資料收集與歷史災害分析。資料皆轉換為分析系統之數據格式。
2. 完成SWAT模式建立，近十年最具代表性的三場颱風進行檢定驗證，模擬成果與石門水庫入流量及入庫砂量交叉檢驗，顯示**SWAT模式能合理模擬集水區流量及產砂量**。
3. 分析集水分區的產砂量比例，將產出資料正規化後做為反向預測模式參數檢驗之用，成果顯示**在不同預測時間步長時之損失函數均能收斂**，證明土砂來源分析系統已有效建立並具備可行性。
4. 利用近年颱風資料進行模式訓練，並保留最具代表性的蘇迪勒、杜鵑及梅姬颱風作為預測案例。成果顯示土砂來源分析系統能有效**預測不同子集水區之尖峰泥砂量發生時間**，針對**總產砂量也能合理預測**。

(一)結論

完成部分第二年度內容

1. 擴充土砂來源分析系統預測能力，將預測時間擴展至T+2，成果顯示**土砂來源分析系統在不同時間步長時皆能合理反映產砂量體**、尖峰發生時間及產砂熱點。
2. 針對成果發現第5、9、11、12、15和18號子集水區(泰平溪、蘇樂溪、白石溪等集水區)為產砂熱點，與**歷史資料比對發現熱點尚屬合理**，可持續進行風險熱點標定工作。
3. 完成曾文水庫之基本資料收集與歷史災害分析，並初步**建立曾文水庫SWAT模型**。作為後續年度持續執行計畫之用。

(二)未來工作



Thank You



附錄四 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	機器學習訓練的資料量需要多少，其模型成果才能收斂？	依本研究機器學習之訓練經驗，時間序列的資料量若可大於 1200 筆可收合理預測成果。最重要的是，訓練資料之穩定性非常重要，若時間序列資料變動劇烈，或上下限值範圍太大，都會影響模型預測能力。因此，去除資料雜訊是能夠維持預測模型穩定運作的關鍵。
二	SWAT 模擬的料源主要來自沖刷，和崩塌所產生的料源不同	SWAT模型主要用來計算邊坡沖刷及河道沖蝕所造成運移現象土砂量體，因此崩塌量體需另以經驗公式推估。
三	輸砂情形和工程治理的因果關係是因為產砂量大才需要更多的工程	感謝主席補充說明。若獲執行第二年計畫機會，將親赴現場驗證模式預測集水區產砂熱點之正確性。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	該研究的目標是要了解土砂來自特定邊坡或是子集水區？	本研究主要想了解各個子集水區匯入主河道之土砂量體，不僅如此，也想藉此了解產砂熱點區位，提供後續治理工程施作之參考依據。