

計畫編號：108 保發-10.1-保-01-06-001(12)

氣候變遷下集水區土砂管理之風險評估
與動態調適策略研究

**Risk Assessment and Dynamic
Adjustment Strategy of Sediment
Management in Watershed under Climate
Change**

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：108 年 02 月 20 日 至 108 年 12 月 31 日

計畫主持人：范正成 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 108 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)

氣候變遷下集水區土砂管理之風險評估

與動態調適策略研究

摘要

近年隨氣候變遷影響，極端水文事件之強度與發生頻率增加，也造成集水區內的土砂管理問題有更加嚴峻的趨勢。國內外雖已有針對氣候變遷下土砂災害潛勢進行許多研究，但尚無針對河道上的土砂管理問題與風險評估進行探討。有鑒於此，為因應氣候變遷對土砂環境所帶來之衝擊，本文應用 CCHE2D 輸砂動床模式探討集水區土砂問題，結合氣候變遷下 AR5 情境之降雨變化，將未來情境下降雨的變化納入考量，重新檢視災害風險的變化，擬定土砂風險評估指標，以供相關單位針對氣候變遷情境擬定相對應治理對策。研究結果顯示，土砂沖淤模擬結果與現場趨勢吻合；而未來氣候變遷的情境下，面臨 50 年頻率洪水侵襲時，河道內構造物與橋梁下游河段的淘刷情形以及土砂淤積有明顯加劇的趨勢。建議可透過壩體高度降低或是開口調節、增設橫向設施與整流工減緩沖刷情形，並針對土砂淤積段規劃清疏工程。最後，本文透過土砂風險圖之繪製、相對應調適策略之擬定以及各策略試作適當性評估，有助於相關單位未來在因應極端水文事件時，提出更適宜之因應對策。

關鍵字：土砂管理、氣候變遷、風險評估指標。

Risk Assessment and Dynamic Adjustment Strategy of Sediment Management in Watershed under Climate Change

Abstract

In recent years, with the impact of climatic change, the intensity and frequency of extreme hydrological events have increased, which has also caused a more severe trend in soil and water management in the catchment area. Although there have been many studies on the potential of sediment disasters under climate change at home and abroad, there is no discussion on the problem of sediment management and risk assessment on the river. In view of this, in order to cope with the impact of climate change on the sediment environment, this paper applies the CCHE2D sediment transport moving bed model to discuss the sediment problem in the catchment area, combined with the rainfall change of the AR5 situation under climate change, re-examine the changes in disaster risks, and formulate sediment risk assessment indicators, so that competent authority can formulate corresponding countermeasures against climate change scenarios.

The results show that the simulation results of sediment scouring and silting are consistent with the on-site trend. In the face of 50 years of frequency flooding, the brushing situation of the structures in the river and the downstream sections of the bridge and the silt of sediment have obviously increased. It is suggested that the height of dam reduction or opening adjustment, the addition of lateral facilities and rectifiers to reduce the scour situation, and the planning of the dredging project for the sediment siltation section. Finally, this study helps the competent authority to propose more appropriate countermeasures in response to extreme hydrological events in the

future through the mapping of sediment risk figures, the formulation of corresponding adaptation strategies, and the appropriateness assessment of each strategy.

Key Words : climatic change, sediment management, risk assessment indicators.

目次

摘要	I
Abstract	II
目次	IV
表次	VI
圖次	VIII
第一章 前言	1-1
第一節 計畫緣起及目的	1-1
第二節 工作項目與內容	1-4
第三節 計畫架構、預期成果與預定工作進度	1-6
第二章 資料蒐集與關鍵問題界定	2-1
第一節 國內外氣候變遷相關研究報告或文獻之蒐集與探討	2-1
第二節 研究區域之基礎資料彙整與評析	2-5
第三節 示範集水區篩選與綜合評析	2-8
第三章 集水區土砂管理之風險評估方式建立與試行	3-1
第一節 土砂管理風險評估之相關文獻探討	3-1
第二節 土砂災害風險評估流程	3-8
第三節 集水區土砂管理模式參數分析	3-13
第四章 氣候變遷下集水區土砂管理之影響評估與風險地圖制定	4-1
第一節 氣候變遷情境分析	4-1
第二節 各時期之土砂管理風險地圖繪製	4-7
第五章 氣候變遷影響之動態調適策略研擬	5-1
第一節 氣候變遷之土砂管理調適策略分析	5-1
第二節 調適策略規劃與啟動機制	5-4
第六章 結論與建議	6-1

第一節 結論.....	6-1
第二節 建議.....	6-1
參考文獻.....	參 1
附錄一、天然河流的曼寧粗糙係數 n 值	附 1
附錄二、期初審查意見回覆表	附 3
附錄三、期中審查意見回覆表	附 7
附錄四、期末審查意見回覆表	附 9

表次

表 1-1 預定工作進度	1-8
表 2-1 氣候變遷影響範疇界定與涵蓋面向探討彙整	2-1
表 2-2 文獻探討議題及對應之土砂管理影響問題	2-4
表 2-3 研究區域所需之資料蒐集項目評析	2-5
表 2-4 排除林班地範圍後之山坡地子集水區列表	2-10
表 2-5 子集水區易致災程度相關資料整理	2-11
表 2-6 子集水區工程投入情形整理	2-13
表 2-7 治理需求篩選之 39 處子集水區	2-14
表 2-8 示範集水區篩選原則優先順序	2-17
表 2-9 示範集水區篩選資料使用需求	2-17
表 2-10 示範集水區篩選資料使用需求	2-18
表 2-11 土石流潛勢溪流詳表	2-21
表 2-12 土砂管理措施與方案	2-23
表 2-13 富源溪既有防洪工程一覽表	2-24
表 2-14 富源溪跨河構造物一覽表	2-24
表 3-1 災害風險定義之相關文獻彙整	3-2
表 3-2 本計畫災害風險各因子之定義	3-3
表 3-3 土砂災害風險評估方式盤點與彙整	3-4
表 3-4 災害風險分析架構對應土砂災害彙整	3-7
表 3-5 水環境各領域災害風險因子分析架構	3-10
表 3-6 坡地災害致災原因	3-11
表 3-7 HEC-HMS 模式探討	3-15
表 3-8 臨前降雨條件分類表	3-16
表 3-9 土壤類型分類表	3-17

表 3-10 各種土地利用在不同土壤類型下之 CN2	3-17
表 3-11 水理輸砂模式分析比較表	3-20
表 3-12 二維水理—輸砂模式比較表	3-21
表 3-13 水文測站一覽表	3-23
表 3-14 水理相關參數設定	3-24
表 3-15 輸砂相關參數設定	3-25
表 3-16 模式輸砂公式彙整表	3-26
表 4-1 臺灣之氣候分區以及全臺灣所適合之 GCM 列表	4-1
表 4-2 水文統計參數一覽表	4-3
表 5-1 土砂管理措施與方案	5-1
表 5-2 氣候變遷下土砂管理之調適策略	5-2
表 5-3 土砂管理調適策略評估流程	5-8

圖次

圖 1-1 計畫架構與流程	1-6
圖 2-1 研究區域基礎資料蒐集類別一覽	2-7
圖 2-2 花蓮分局所轄之子集水區分布圖	2-9
圖 2-3 示範集水區篩選流程圖	2-16
圖 2-4 富源溪集水區水文測站分布圖	2-20
圖 2-5 富源土地利用型態分布圖	2-22
圖 2-6 富源溪災害潛勢分布圖	2-22
圖 2-7 富源溪地質分布圖	2-22
圖 2-8 富源溪高程分布圖	2-22
圖 2-9 富源溪坡度分析圖	2-22
圖 2-10 富源溪坡向分析圖	2-22
圖 2-11 示範集水區(富源溪)模擬河段	2-26
圖 2-12 上游河段往下游拍攝之遠景	2-26
圖 2-13 計畫河段 UAV 正交 DSM 模型	2-26
圖 3-1 風險評估流程圖	3-8
圖 3-2 風險定義	3-9
圖 3-3 土砂分析流程圖	3-13
圖 3-4 流量輸入示意圖	3-14
圖 3-5 一維輸砂模式參數率定流程	3-18
圖 3-6 二維輸砂模式模擬流程	3-19
圖 4-1 氣候變遷下現況與未來之土砂問題評析方法	4-2
圖 4-2 計畫區域氣候變遷情境分區	4-3
圖 4-3 一維模式建模示意圖	4-4
圖 4-4 降雨逕流模擬示意圖	4-4

圖 4-5 率定事件選取結果	4-5
圖 4-6 單場事件一維河川水位校準	4-5
圖 4-7 一維模擬高程趨勢校準	4-6
圖 4-8 二維模型建模示意圖	4-6
圖 4-9 脆弱度因子分析成果圖	4-8
圖 4-10 暴露度因子分析成果圖	4-9
圖 4-11 河道土砂管理風險情境模擬圖	4-10
圖 4-12 防砂壩下游掏刷嚴重(2019.08)	4-10
圖 4-13 馬遠二號橋下游相對穩定(2019.08)	4-11
圖 4-14 馬遠大橋下游河道掏刷嚴重(2019.08)	4-11
圖 5-1 集水區治理目標與對策研擬圖	5-3
圖 5-2 UKCIP 調適精靈評估流程	5-5

第一章 前言

第一節 計畫緣起及目的

一、計畫緣起

近年來受到氣候變遷的影響，極端水文事件之強度與發生頻率增加，集水區之土砂管理問題亦受到日趨嚴峻的挑戰。以往雖已針對氣候變遷下土砂災害潛勢進行許多研究，但由於氣候變遷造成降雨之時間及空間動態變異性逐年擴大，而極端降雨事件亦造成複合型災害事件頻率增加。為因應氣候變遷對土砂環境所帶來的衝擊，土砂管理策略應朝向更加新穎宏觀的思維進行研擬。傳統治山防災工程的規劃與設計，皆建立在歷史雨量資料的基礎上，以重現期距之設計暴雨計算，藉以評估集水區內之土砂量體、規模與工程設計標準。然而，隨著氣候變遷的影響、極端降雨事件發生的頻率與規模皆有顯著的增長。李鎮洋等(2011)指出，近年來極端氣象災害事件倍增，因極端降雨所引發災害型態，已由過去單純局部區域的洪水、土砂災害，轉變為大規模區域的洪水與土砂複合型災害的同步發生。

Kawata(2011)將複合災害定義為「雙重或三重的災害衝擊，比起獨立發生的單一災害事件，複合災害會造成更嚴重的損傷累積。在全球環境變遷下，暴雨與相關的氣候條件迅速改變，皆可能造成洪災、坡地與相關災害發生的頻率與強度增加，亦可能造成都會周邊地區的脆弱度提升，使其暴露在更高的環境風險(黃怡靜，2011)。因此，現有的風險評估方式或工程設計標準，能否因應氣候變遷所產生的衝擊，實為一大課題。氣候變遷影響隨極端氣候逐年加劇，而現今降雨又有極端事件常態化的現象，故在土砂災害風險評估上，相關治理策略的研擬確有納入氣候變遷影響探討之必要性。而吳杰穎(2008)亦指

出過去臺灣並未建立完善災害統計指標體系，又因災害在不同的時空與背景條件下造成各地不同程度的影響，因此不易進行各種災害綜合分析與動態監測。

在因應氣候變遷的調適策略方面，目前在工程設計上，普遍認知應適度提高設計斷面及保護工法來據以因應。但其最大之問題，仍在於使用歷史數據進行土砂收支平衡與管理計算依據，因此，在氣候變遷的衝擊與挑戰下，極端氣候與複合型災害的分析與調適、歷史災害規模與現有防護能力的檢視以及集水區內土砂管理的風險評估與對策研擬，實有加以考量未來災害風險之必要性，並重新檢討精進之。有鑑於此，本計畫利用土砂運移模式，進行示範集水區內之土砂運移分析，並將未來氣候變遷情境下降雨的變化納入考量，重新檢視河段土砂災害風險的變化，納入危險度、脆弱度、暴露度等風險評估因子，擬定土砂風險管理指標，有助未來進行土砂收支平衡分析、治理對策研擬，甚至調適(治理)策略啟動時機之執行。

二、全程計畫目標(本計畫為一年期計畫)

因應氣候變遷導致極端降雨事件之發生頻率與規模有大幅加劇的趨勢，集水區的土砂管理與治理對策執行應納入創新思維，重新針對土砂風險與管理目標進行界定，並相對應的提出調適策略。同時，考量到未來的不確定性，也應將調適策略的啟動時機、執行成效回饋等，一併納入探討。因此，透過本計畫之執行，預期達成目標如下：

- (一)依據國際間對於災害風險之最新定義，重新界定集水區內土砂管理之風險因子及其評估方式。
- (二)藉由歷年土砂管理策略與執行成效的彙整，因應氣候變遷下土砂風險評估結果，制定後續調適策略執行的啟動時機與風險管理目標。
- (三)綜合前述，以一重點示範集水區為例，進行土砂風險評估與動態調適策略研擬之試行，藉以建立完整的集水區土砂管理策略制定之標準流程，可提供後續集水區因應氣候變遷影響整體治理規劃之參考依據。

第二節 工作項目與內容

一、資料蒐集與關鍵問題界定

- (一) 國內外相關研究報告或文獻之蒐集與探討：以氣候變遷調適科技知識平臺(TaiCCAT)的知識庫為基礎，針對因應氣候變遷於集水區土砂管理之影響及調適策略等，進行國內外相關研究之彙整。並根據彙整結果，進行集水區土砂管理之關鍵問題界定。
- (二) 透過研究區域內之相關基礎資料彙整與評析，篩選一處適宜規劃區域作為後續研究之示範集水區。其中，篩選示範集水區可參考研究區域內之歷年調查規劃成果、集水區治山防洪分級表等作為篩選依據。
- (三) 示範集水區內之地形、土壤分布、土地利用、歷年崩塌目錄、衛星影像資料等之蒐集與彙整。
- (四) 蒐集示範集水區內歷年土砂管理之軟硬體治理策略與相關成效評估結果。

二、集水區土砂管理之風險評估方式建立與試行

- (一) 因應國際間對於災害風險的最新定義，以集水區土砂管理的角度出發，提出危害度、脆弱度及暴露度之標準評估流程。
- (二) 考量氣候變遷對集水區土砂管理的各種衝擊，制定完整的風險評估因子與對應之計算方式。
- (三) 水文、水理及土砂生產與運移模式之發展，並結合相關地形圖驗證。其中，土砂生產與運移模式至少應建立特定重現期、特定降雨延時之降雨量與土砂流失、土砂生產、土砂生產抑制與流出抑制量等關係。

- (四) 以一重點示範集水區為例，進行上述評估方式之試行，並據以回饋調整，最後提出因應氣候變遷之集水區土砂管理風險評估方法。

三、氣候變遷下集水區土砂管理之影響評估與風險地圖制定

- (一) 根據 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 政府間氣候變遷問題小組)提供之大氣環流模式及未來情境資料，篩選適用於研究區域的大氣環流模式及未來情境。
- (二) 以前述篩選出的大氣環流模式為基礎，並以 1985~2005 年作為基期，進行研究區域內未來各時期的影響評估。其中，評估時期應為近未來時期 2021-2040 年。
- (三) 以上述評估結果為基礎，繪製研究區域內未來各時期之土砂管理風險地圖，並與基期結果進行比較，探討其受氣候變遷之影響程度。藉由各時期土砂管理風險地圖的產製與比較，可提供後續集水區因應氣候變遷影響的整體治理規劃之參考依據。

四、氣候變遷影響之動態調適策略研擬

- (一) 根據上述研究區域內未來土砂管理風險之影響評估結果，再結合研究區域內現況之風險評估，探討研究區域內於氣候變遷影響下之調適能力，並據此研擬未來降低泥砂生產風險之因應調適策略。
- (二) 參考 UKCIP 所建議之評估準則，並以本研究待解決問題為基礎，建立調適策略選項之評估準則。並依據此評估準則，制定未來調適策略的優先次序。
- (三) 結合蒐集土砂管理策略的實施成效與未來風險評估結果，研擬調適策略的啟動時間與動態回饋檢討機制。

第三節 計畫架構、預期成果與預定工作進度

一、計畫工作內容及流程

依據前述章節之方法與步驟，本計畫工作內容分為四大項目，包括：(1)資料蒐集與關鍵問題界定、(2)集水區土砂管理之風險評估方式建立與試行、(3)氣候變遷下集水區土砂管理之影響評估與風險地圖制定、(4) 氣候變遷影響之動態調適策略研擬，其內容與流程如圖 1-1 所示。透過各工作項目循序執行，期能提出氣候變遷下集水區土砂管理之動態調適策略，藉以提供後續滾動式檢討其集水區土砂管理方式。

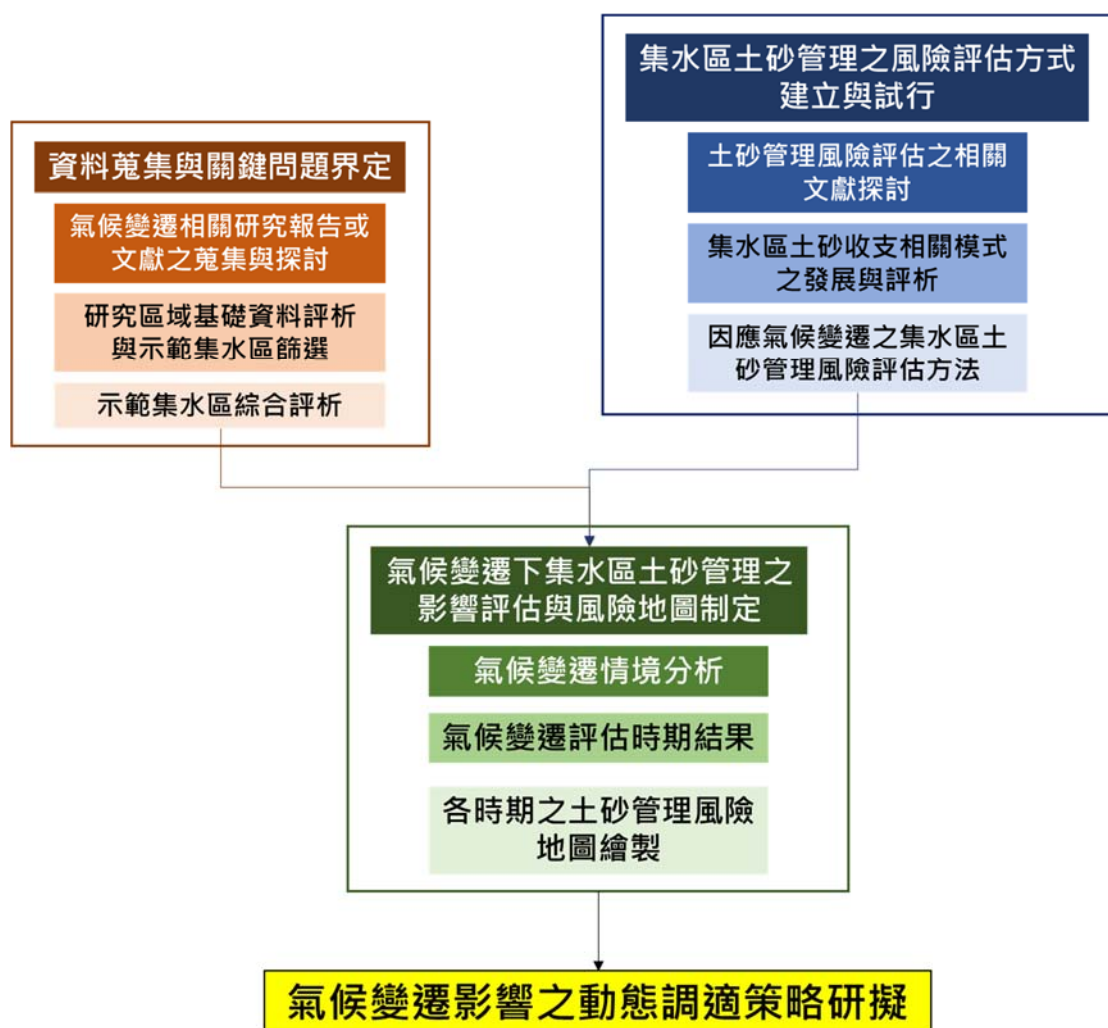


圖 1-1 計畫架構與流程

二、計畫預期效益

(一) 技術應用面

結合傳統土砂分析技術、氣候變遷與風險評估等領域技術，建立完整的集水區土砂管理策略制定之標準流程。

(二) 學術創新面

可發表國內外期刊或研討會投稿 1 篇。

(三) 制度及其他面

預計聘任一位專任研究助理，執行本計畫，可培養兼具土砂分析、氣候變遷領域之專業人才

三、預定工作進度

本計畫執行期限自 108 年 02 月 20 日至 108 年 12 月 31 日，預定進度如下表所示。

表 1-1 預定工作進度

工作項目	查核點內容	工作 比重	108 年											
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
資料蒐集 與關鍵問 題界定	1. 氣候變遷之文獻蒐集與回顧	10%												
	2. 關鍵問題界定													
	3. 示範集水區篩選													
	4. 示範集水區資料蒐集與分析													
集水區土 砂管理之 風險評估 方式建立 與試行	1. 風險評估之文獻蒐集與回顧	30%												
	2. 提出風險評估流程													
	3. 制定評估因子													
	4. 示範集水區土砂收支模式分析													
	5. 模擬成果探討													
	6. 土砂管理措施分析													
氣候變遷 下集水區 土砂管理 之影響評 估與風險 地圖制定	1. 氣候變遷之土砂收支情境分析	40%												
	2. 界定並劃分風險地圖單元													
	3. 各時期風險評估													
	4. 繪製土砂管理風險地圖													
氣候變遷 影響之動 態調適策 略研擬	1. 研擬土砂管理調適策略	20%												
	2. 研擬調適策略啟動機制與動態回饋													
各階段報告繳交期程		日期												
工作執行計畫書		108/05/06				●								
期中報告書		108/08/09						●						
期末報告書		108/11/15									●			
成果報告		108/12/24										◎		
累計總進度		百分比	35				60		90			100		

註：●表示已完成；◎表示待完成

第二章 資料蒐集與關鍵問題界定

第一節 國內外氣候變遷相關研究報告或文獻之蒐集與探討

一、文獻蒐集與彙整

本節針對文獻內容有述及土砂與氣候變遷影響範疇界定與涵蓋面向之氣候變遷相關計畫進行彙整與探討，以界定氣候變遷下在各領域所遭遇到的問題。針對涵蓋問題所界定之文獻，受氣候變遷影響之領域及衝擊，彙整如表 2-1 所示。

表 2-1 氣候變遷影響範疇界定與涵蓋面向探討彙整

出處		領域	氣候變遷對各領域產生的衝擊
文獻名稱	年份		
地方氣候變遷調適計畫規劃作業指引(更新版)	107	土砂	1. 降雨強度增加，導致坡地災害風險提高，直接衝擊山區道路、聚落安全、山區觀光與產業，以及高齡化人口與醫療資源缺乏之防災弱勢族群。 2. 降雨不均將影響土壤保水能力，進一步危及水土環境永續與安全。
臺灣氣候變遷科學報告 2017－衝擊與調適面向	106	土砂	1. 因極端降雨頻率與強度可能增加的趨勢(尤其是中長延時強降雨)，臺灣的坡地災害風險有逐漸提高的趨勢(土砂崩塌、土石流)。 2. 氣候變遷衝擊對於土砂量衝擊以濁水溪的影響最大，且氣候變遷也都會造成土石流潛勢溪流的數量明顯增加，南部的曾文水庫上游的坡地土砂災害亦不容小覷，都是未來氣候變遷下坡地災害高風險區域。
		土砂 洪災	氣候變遷衝擊下，產製巨量的土砂災害，將會影響河道型態。
		土砂 水資源	極端暴雨事件使集水區土石沖刷與崩塌，泥砂隨雨進入並淤積於蓄水設施之中，使可使用的庫容減少，水資源調配能力降低，也使蓄水設施永續性受到衝擊。

出處		領域	氣候變遷對各領域產生的衝擊
文獻名稱	年份		
曾文溪流域因應氣候變遷總合調適研究(3/3) 曾文溪流域因應氣候變遷總合調適研究(2/3) 曾文溪流域因應氣候變遷總合調適研究(1/3)	106	土砂	集水區坡面在氣候變遷或極端降雨條件下，仍有坡面崩塌等運動，將造成部落直接或是間接(道路毀損之孤島效應)致災的可能性。
	105	土砂 水資源	1. 極端土砂生產、快速淤積，造成防砂壩的淤埋，並使其喪失儲砂功能，使得水資源調配與運用更加困難。 2. 生產後之土砂材料最終將進入水庫，造成水庫庫容量一次的大幅減少。 未來各水庫經常性排砂將影響區域供水品質。
	104	土砂 洪災	若持續堆積影響下游防洪構造物，或是排洪斷面的減少，為下游河道與易淹水區之衝擊。
韌性水城市評估與調適研究(2/2) 韌性水城市評估與調適研究(1/2)	107	土砂 水資源	1. 複合性災害破壞水庫壩堰集水區環境，造成水庫淤積、蓄水量降低及豐水期缺水。 2. 暴雨沖刷與山坡地崩坍將提高水的濁度，而拉長淨水廠處理時間，造成缺水風險有增加之趨勢。
	106	洪災 土砂	降雨強度增加提高淹水、坡地土砂與複合型災害風險，造成生命財產損失。
暖化情境下極端颱風災害風險評估與減災調適-以大甲溪流域為例	105	土砂	短時間所造成的大量土砂，對於集水區的主流河川造成大量含砂量，可能衝擊地理環境以及生態的平衡，甚至進一步對中下游造成間接的衝擊。
		土砂 水資源	短延時強降雨易造成坡面沖蝕及小規模崩塌等，如發生於水庫集水區上游，易造成原水濁度提升，導致取水不易，民生用水受限等。
		洪災 土砂	1. 降雨強度增加，提高淹水風險並導致嚴重之水土複合型災害。 2. 在洪水型態改變下，造成洪水稽延時間縮短及洪峰流量增加等情況，河道輸砂沖淤變化加劇，造成嚴重的沖刷或淤積情形等。 模擬結果顯示，在 21 世紀末期降雨型態有趨於極端的現象，因此所誘發之土石流區域規模、崩塌率、下游淹水損失、輸砂率等衝擊，均高於 20 世紀末。

二、文獻探討與關鍵問題界定

總結上述文獻內容，氣候變遷對於土砂災害之影響，以短延時強降雨之極端降雨誘發坡地災害為主，並間接導致土砂管理的問題亦日趨嚴重。緣此，有關氣候變遷對於集水區內土砂管理之影響，可歸納重點內容如下：

(一) 土砂面向

1. 上游崩落土砂堆積於河道，導致土砂收支不平衡致災。
2. 河道土砂量增加，改變原有河道地理環境，間接影響生態棲地環境與安全。
3. 氣候變遷影響提高坡地災害潛勢規模，間接造成土砂管理之不確定性。

(二) 土砂及水資源面向

1. 水庫集水區因極端氣候導致逕流量變大，輸砂量增加，間接影響水庫淤積嚴重，使水資源調度壓力與日遽增。
2. 水庫集水區因河道輸砂量增加，使防砂設施喪失其防止掏刷、減緩崩落土砂運移，以減少災害為目的之功能性。
3. 水庫集水區因河道輸砂量增加、原水濁度上升，導致減量供水並影響供水品質。

(三) 土砂及洪災面向

1. 因極端氣候導致地表逕流量變大，河道輸砂量增加，造成水土之複合型災害發生。
2. 承上述，也造成河道沖淤不平衡，影響構造物安全以及下游排洪能力。

有關氣候變遷文獻所提及之土砂災害影響，以及土砂管理之間接

影響，列於表 2-2。

表 2-2 文獻探討議題及對應之土砂管理影響問題

議題	氣候變遷造成之土砂災害影響	對應之土砂管理影響
土砂	坡地崩塌與土石流發生機率增加、崩塌發生面積提升、土石流潛勢溪流數量明顯增加。	集水區土砂生產量增加，導致河道淤積深度增加。
	河道土砂量大量增加可能衝擊地理環境以及生態的平衡，甚至更進一步對中下游造成間接的衝擊。	短延時強降雨所造成的大量土砂進入河道，使得河道含砂量增加，衝擊地理環境以及生態平衡。
	氣候變遷造成極端降雨事件的發生頻率與強度皆有增長趨勢，也導致未來屬高防災潛勢區域的範圍有顯著增加的趨勢。	集水區坡地災害潛勢增加，將影響整體河道土砂運移量體之不確定性。
土砂及水資源	水庫、壩堰可使用的庫容減少蓄水量降低及豐水期缺水，導致水資源調配能力降低，也使蓄水設施永續性受到衝擊。	極端事件破壞水庫、壩堰集水區坡地環境，土砂隨逕流進入並淤積於蓄水設施之中。
	土砂材料因防砂設施失能，最終將進入水庫，使得水庫庫容減少、進而使水資源調配與運用更加困難。	土砂生產、快速淤積，造成防砂設施淤埋，並使其喪失儲砂功能。
	導致取水不易、拉長淨水廠處理時間，造成缺水風險有增加之趨勢，且未來各水庫經常性排砂亦將影響區域供水品質。	極端事件破壞水庫、壩堰集水區坡地環境，大量土砂進入河道將提高原水的濁度。
土砂及洪災	極端事件將提高淹水風險與淹水損失，亦增加土石流區域規模、崩塌率，導致嚴重之水土複合型災害。	極端事件導致河道輸砂率均高於現況。
	極端事件影響沖淤變化加劇，將影響下游防洪構造物基礎安全，以及構造物有效排洪斷面減少，將為下游河道與易淹水區帶來衝擊。	洪水型態改變下，造成稽延時間縮短及洪峰流量增加，河道輸砂沖淤變化加劇，造成嚴重的冲刷或淤積情形。

第二節 研究區域之基礎資料彙整與評析

鑒於目前國內氣候變遷與土砂管理之相關研究，皆以西北部地區各主要流域為主，包括蘭陽溪、大漢溪、大甲溪、高屏溪等，而較少針對臺灣東部地區來進行土砂管理探討。因此，本計畫選擇花蓮縣為研究區域，期能探討氣候變遷對花蓮縣境內集水區的土砂管理影響。

為瞭解研究區域內環境背景，需進行基礎資料蒐集並加以分析討論。表 2-3 為研究區域內相關所需資料蒐集項目之彙整表，圖 2-1 為研究區域基礎資料蒐集類別一覽，其中相關資料皆已取得並進行彙整與評析。

表 2-3 研究區域所需之資料蒐集項目評析

項目	內容	來源	辦理情形
計畫範圍	本計畫涵蓋花蓮縣之花蓮市、秀林鄉、新城鄉、吉安鄉、壽豐鄉、鳳林鎮、萬榮鄉、玉里鎮、富里鄉、瑞穗鄉、豐濱鄉、卓溪鄉及光復鄉等 13 鄉鎮。	---	已取得
1.集水區概述			
集水區分布	就規劃區內各集水區說明，同時應以航照圖、地形圖或正射影像圖等標示分布。	國土測繪中心 WMS 介接 1/25000 地形圖	已取得
集水區資訊	子集水區編號、名稱、地理位置、溪流分布	水土保持局	已取得
水庫資料	蒐集集水區內水庫資料，由於東部地區無水庫分布，故忽略此項目。	---	無需取得
2.地文資料			
地形地勢分析	高程、坡度、坡向分布	農林航測所 5m DEM	已取得
地形地勢分析	高程、坡度、坡向分布	中央地調所 1m DEM	已取得
地質	地質構造	中央地調所	已取得
	地質敏感區	中央地調所	已取得
土壤	土壤分布	農業試驗所	已取得

項目	內容	來源	辦理情形
3.水文資料			
氣象水文觀測站資料	空間分布、觀測年限等相關資訊	氣象局	已取得
氣象資料	氣溫/濕度/風速(年/月平均、最低/最高等)	氣象局	已取得
水文資訊	河溪水位與含砂量(月/日/時/平均/最高/最低)	水文年報	已取得
4.人文資料			
行政區域	所屬縣市、鄉鎮、村里	國土測繪中心	已取得
人口	人口數量	主計總處	已取得
產業型態	產業比例及空間分布	主計總處	已取得
自然生態保護區	國家公園	營建署	已取得
	國家自然公園	營建署	已取得
	自然保留區	農委會	已取得
	野生動物保護區	農委會	已取得
	野生動物重要棲息環境	農委會	已取得
	自然保護區	林務局	已取得
遊憩區	歷史古蹟	文化資產局	已取得
	休閒農業區	農委會	已取得
	國家森林遊樂區	林務局	已取得
	國家風景特定區	觀光局	已取得
5.交通資料			
道路	國道、省道、縣市道、鄉道、區道	交通部	已取得
	農路、林道、其他道路	農委會水保局/林務局	已取得
6.土地利用與權屬			
土地利用現況	土地使用類別分析統計	國土測繪中心、水土保持局	已取得
	土地可利用限度資料分析與統計	農委會	已取得
7.生態環境資料			
既有調查資料蒐集	水域及陸域動植物種類	各流域情勢報告、相關集水區調查成果	已取得
	水域迴游性生物、特有種、保育類		
8.以往災害情形及處理情形			
歷史災害	災害發生時間、原因，災損區位及規模	國家災害防救中心	已取得
處理情形	清疏及保育治理工程種類、構築時間、施工單位、經費、位置分布、非工程措施及各項措施之效益	相關執行成果報告	已取得
歷年災害之處理情形	工程管考資料及歷年規劃報告分析	相關執行成果報告	已取得

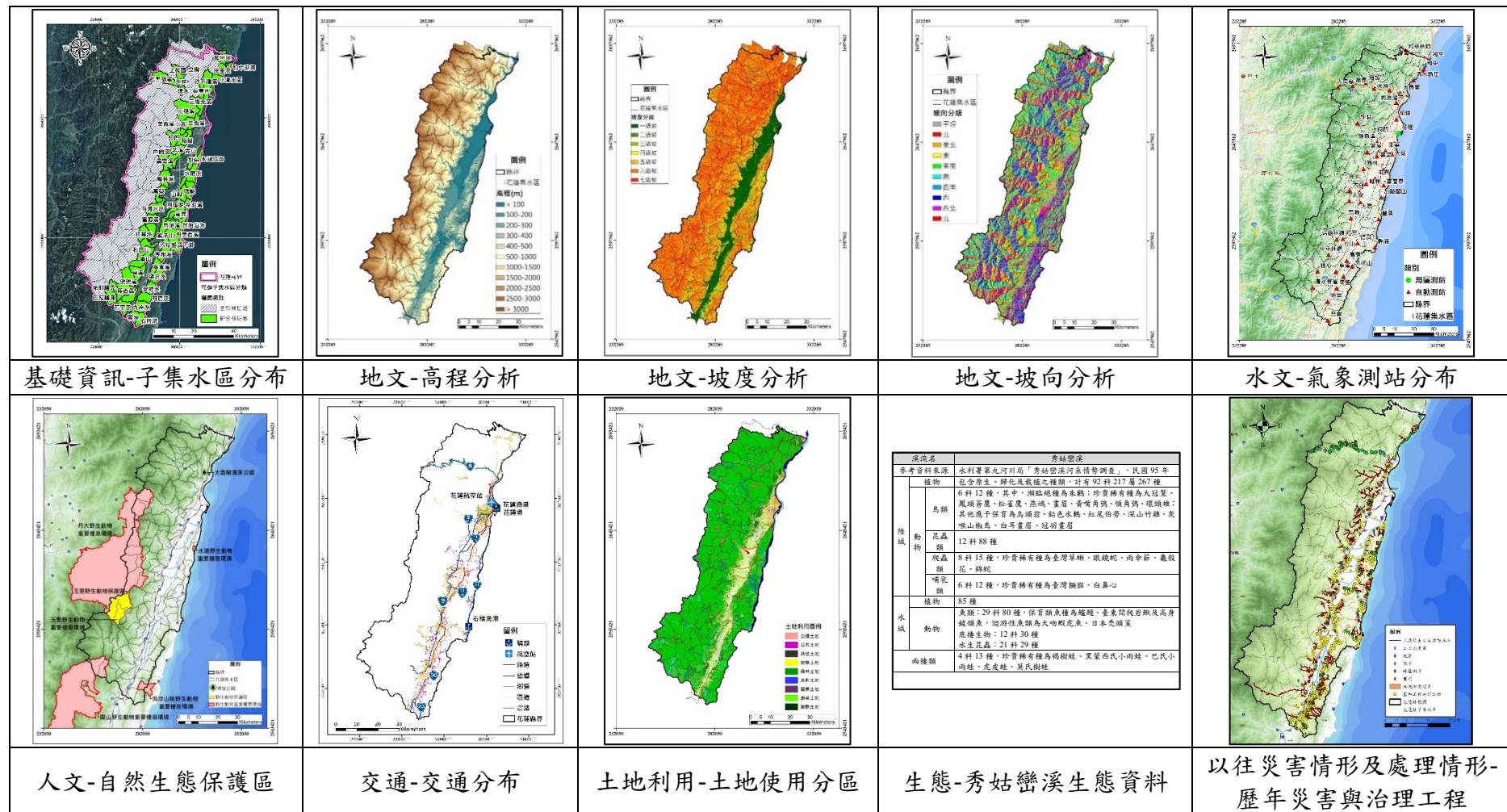


圖 2-1 研究區域基礎資料蒐集類別一覽

第三節 示範集水區篩選與綜合評析

利用前述相關花蓮縣基礎資料分析，並透過水土保持局花蓮分局轄區所執行之各項保育治理計畫、工程管考系統、規劃案成果及相關計畫治理區位範圍圖資等資料，並篩選出一處適宜規劃之集水區。其後，據以建立集水區土砂管理模式，並探討氣候變遷下不同情境之變化。最後，因應風險評估之結果，擬定相對應之動態調適策略。茲將各項工作之內容分述如下：

一、示範集水區篩選

為釐清集水區治理現況，以作為後續之參考依據，本計畫由治山防災及保育治理面向進行考量，篩選一處適宜規劃集水區進行土砂分析與治理規劃評估與建議。說明如下：

(一) 集水區篩選範圍界定

本研究區域為花蓮縣，故篩選單元以花蓮分局所轄範圍之各子集水區為對象。依據行政院農業委員會水土保持局劃定之山坡地子集水區，花蓮縣內總計共有 122 個山坡地子集水區，其分布情形及內容如圖 2-2 所示。

再者，在 122 個子集水區中，因國有林班地之治理權責屬林務局，故先將全部均為林班地之集水區(圖例標示「全部林班地」，共 53 個)排除不進行篩選。經排除後，剩餘 69 個集水區之治理權責為以治理界點分區治理，即為圖例標示「部份林班地」區域，如表 2-4 所示。後續示範集水區篩選清單，以此 69 個集水區為標的。

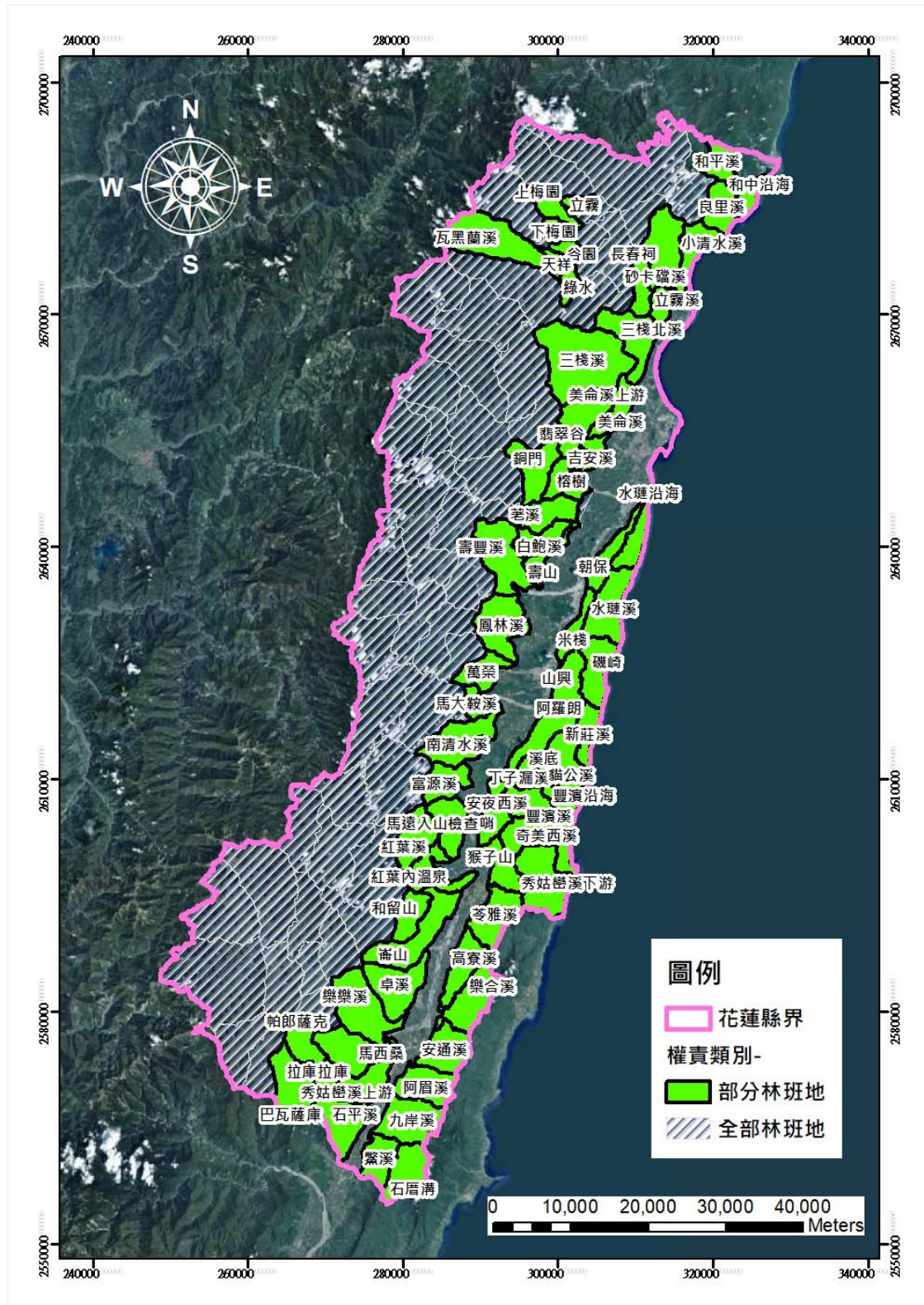


圖 2-2 花蓮分局所轄之子集水區分布圖

表 2-4 排除林班地範圍後之山坡地子集水區列表

項次	子集水區	子集水區編號	項次	子集水區	子集水區編號
1	豐濱溪	2220001F	36	南清水溪	2420015F
2	丁子漏溪	2220002F	37	馬太鞍溪	2420019F
3	貓公溪	2220003F	38	萬榮	2420021F
4	溪底	2220004A	39	鳳林溪	2420023F
5	豐濱沿海	2220005F	40	壽豐溪	2420025F
6	巴瓦薩庫	2370007F	41	銅門	2420027F
7	帕郎薩克	2370009F	42	阿羅朗	2420029F
8	拉庫拉庫	2370014F	43	白鮑溪	2420030F
9	石平溪	2370015F	44	壽山	2420031F
10	馬西桑	2370019F	45	荖溪	2420032F
11	樂樂溪	2370022F	46	山興	2420033F
12	秀姑巒溪上游	2370024F	47	榕樹	2420034F
13	鯨溪	2370025F	48	翡翠谷	2420035F
14	卓溪	2370026F	49	米棧	2420036F
15	石厝溝	2370028F	50	吉安溪	2420038A
16	九岸溪	2370029F	51	朝保	2420039F
17	和留山	2370030F	52	美侖溪上游	2440001F
18	紅葉溪	2370031F	53	美侖溪	2440002F
19	紅葉內溫泉	2370032F	54	三棧溪	2450001F
20	阿眉溪	2370033F	55	三棧北溪	2450002F
21	崙山	2370034F	56	瓦黑蘭溪	2460003F
22	安通溪	2370035F	57	上梅園	2460007F
23	馬遠入山檢查哨	2370036F	58	天祥	2460008F
24	富源溪	2370037F	59	下梅園	2460009F
25	高寮溪	2370038F	60	谷園	2460010F
26	樂合溪	2370039F	61	綠水	2460011F
27	苓雅溪	2370040F	62	立霧	2460012F
28	安夜西溪	2370041F	63	長春祠	2460019F
29	猴子山	2370042F	64	砂卡礑溪	2460021F
30	奇美西溪	2370043F	65	立霧溪	2460022F
31	秀姑巒溪下游	2370044F	66	小清水溪	2470001F
32	新莊溪	2410001F	67	良里溪	2490002F
33	磯崎	2410002F	68	和中沿海	2491001F
34	水璉溪	2410003F	69	和平溪	2500004F
35	水璉沿海	2410004A			

(二) 篩選原則

1. 集水區具易致災區域

河道中若有瓶頸段、轉彎段等區域，易造成土砂淤積而影響通洪斷面，有溢淹成災之可能，因此若子集水區內包含易致災區域，則有土砂災害風險，建議優先選擇進行評估。為進一步了解各子集水區之易致災程度，本計畫蒐集歷年專管計畫所提報易致災區域的數量、98-108 年清疏點位資料及 105 年衛星影像判釋之崩塌面積等資訊。其中，若歷年專管計畫提報數量越多或清疏點位越多，則表示該集水區內土砂問題可能較為嚴重。因此，需要進行多次清疏作業；而崩塌的發生亦直接影響集水區內的土砂生產，若有大面積崩塌發生，則可預期將有更多泥沙進入河道，提升災害發生風險。子集水區易致災程度相關資料如表 2-5 所示。

表 2-5 子集水區易致災程度相關資料整理

項次	子集水區	歷年專管 提報區域	清疏 點位	集水區面積 (公頃)	崩塌面積 (平方公尺)
1	九岸溪	0	6	3,996	0
2	山興	0	4	2,691	0
3	安夜西溪	0	10	2,273	23,705
4	良里溪	0	0	2,347	112,945
5	阿眉溪	0	9	3,038	56,572
6	紅葉內溫泉	0	1	2,792	108
7	荖溪	0	2	2,451	7,458
8	崙山	1	3	4,705	7,690
9	猴子山	0	1	2,208	19,283
10	溪底	0	3	2,854	22,282
11	樂合溪	0	7	3,664	183,864
12	貓公溪	0	1	1,574	44,704
13	三棧北溪	0	2	3,704	83,815

項次	子集水區	歷年專管 提報區域	清疏 點位	集水區面積 (公頃)	崩塌面積 (平方公尺)
14	水璉沿海	0	0	1,954	2,698
15	白鮑溪	0	1	1,897	19,598
16	石厝溝	0	1	3,185	4,930
17	立霧溪	0	0	1,271	0
18	安通溪	1	2	3,046	0
19	米棧	3	0	1,453	1,506
20	秀姑巒溪上游	0	3	2,920	29,092
21	秀姑巒溪下游	0	0	4,726	23,953
22	和中沿海	0	0	998	9,423
23	和留山	0	3	2,170	12,344
24	阿羅朗	0	4	3,109	16,516
25	南清水溪	1	3	4,196	2,999
26	苓雅溪	0	6	3,343	0
27	馬太鞍溪	0	0	1,079	0
28	馬西桑	2	1	3,723	159,414
29	馬遠入山檢查哨	0	2	2,715	1,181
30	高寮溪	0	5	2,758	0
31	富源溪	1	0	2,353	5,628
32	朝保	0	0	1,989	0
33	新莊溪	0	2	1,745	6,107
34	萬榮	0	0	2,035	6,471
35	壽山	0	2	1,354	0
36	壽豐溪	2	0	4,558	169,548
37	鳳林溪	0	6	4,135	12,644
38	磯崎	1	1	3,095	20,098
39	鰲溪	0	4	2,223	0

2. 集水區內治理工程投入狀況

透過歷年各集水區治理規劃報告內容，可釐清短中長期工程規劃與配置，並比對 90~106 年工程管考系統資料，統計各子集水區內所投入之工程案件數。因此，亦將歷年大型防砂設施的數

量一併計入，藉以提供後續各區域內治理概況的參考依據。其中大型防砂設施之定義，依照竣工圖說，其壩長需大於 15m 且竣工壩高需大於 5m。工程投入情形如表 2-6 所示。

表 2-6 子集水區工程投入情形整理

項次	子集水區	投入之工程案件數	大型防砂設施
1	九岸溪	136	8
2	山興	89	0
3	安夜西溪	85	14
4	良里溪	2	0
5	阿眉溪	107	14
6	紅葉內溫泉	9	4
7	荖溪	2	3
8	崙山	123	4
9	猴子山	30	0
10	溪底	34	1
11	樂合溪	28	1
12	貓公溪	31	0
13	三棧北溪	17	9
14	水璉沿海	25	1
15	白鮑溪	15	2
16	石厝溝	15	0
17	立霧溪	5	6
18	安通溪	106	9
19	米棧	75	2
20	秀姑巒溪上游	31	4
21	秀姑巒溪下游	30	0
22	和中沿海	11	9
23	和留山	19	0
24	阿羅朗	52	2
25	南清水溪	39	15
26	苓雅溪	33	4
27	馬太鞍溪	24	2
28	馬西桑	7	0
29	馬遠入山檢查哨	29	18

項次	子集水區	投入之工程案件數	大型防砂設施
30	高寮溪	123	4
31	富源溪	13	0
32	朝保	36	5
33	新莊溪	38	13
34	萬榮	25	1
35	壽山	55	9
36	壽豐溪	12	2
37	鳳林溪	90	10
38	磯崎	39	0
39	鰲溪	53	1

3. 集水區治理需求性

透過水保局明年度「集水區上游水土保持需求性調查」報告評估為「立即處理」及「優先處理」等級的子集水區。其代表所對應的子集水區因應崩塌地綠覆率、土石流潛勢溪流、投入工程件數、治理計畫完成度進行滾動式檢討後，所評估之治理需求仍處於較為優先等級，應納入評估規劃之考量。經篩選後，共有 39 處子集水區屬於「立即處理」及「優先處理」等級，後續即以此 39 處作為篩選標的，並陳列如表 2-7 所示。

表 2-7 治理需求篩選之 39 處子集水區

項次	子集水區	治理需求性	項次	子集水區	治理需求性
1	九岸溪	立即處理	21	秀姑巒溪下游	優先處理
2	山興	立即處理	22	和中沿海	優先處理
3	安夜西溪	立即處理	23	和留山	優先處理
4	良里溪	立即處理	24	阿羅朗	優先處理
5	阿眉溪	立即處理	25	南清水溪	優先處理
6	紅葉內溫泉	立即處理	26	苓雅溪	優先處理
7	荖溪	立即處理	27	馬太鞍溪	優先處理
8	崙山	立即處理	28	馬西桑	優先處理
9	猴子山	立即處理	29	馬遠入山檢查哨	優先處理

項次	子集水區	治理需求性	項次	子集水區	治理需求性
10	溪底	立即處理	30	高寮溪	優先處理
11	樂合溪	立即處理	31	富源溪	優先處理
12	貓公溪	立即處理	32	朝保	優先處理
13	三棧北溪	優先處理	33	新莊溪	優先處理
14	水璉沿海	優先處理	34	萬榮	優先處理
15	白鮑溪	優先處理	35	壽山	優先處理
16	石厝溝	優先處理	36	壽豐溪	優先處理
17	立霧溪	優先處理	37	鳳林溪	優先處理
18	安通溪	優先處理	38	磯崎	優先處理
19	米棧	優先處理	39	鯨溪	優先處理
20	秀姑巒溪上游	優先處理			

4. 集水區資料豐富程度

為有效分析、量化子集水區之治理規劃，在資料蒐集準備方面，需包含崩塌裸露地、數值地形、既有雷達影像及光學衛星影像等四類資料，始可進行分析工作，茲說明各項資料應用特性，參見如下。

(1) 崩塌裸露地

藉由既有崩塌裸露區域掌握主要土砂料源生產與環境變異區域。

(2) 既有數值地形資料

藉由數值地形以掌握各期地形貌境況，原則須考量內政部、地調所及水保局等公部門既有數值地形資料，以作為災害發生前、災害發生後且於投入工程治理治理前等階段之數值地形。

(3) 衛星影像

針對選定子集水區單元，藉歷史衛星影像以掌握集水區中崩塌裸露區位與植生覆蓋歷程，進而追蹤工程投入治理後崩塌

復育境況及治理績效。

(4) 規劃報告數量及完整性

因集水區調查規劃報告內容，應包含集水區基礎資料、歷史致災成因、工程治理成效與後續保育治理對策等相關資料，可藉以釐清該集水區保育治理整體之需求性。

(5) 區內水文測站分布數量

水文測站包含自記式雨量站、河川水位站、河川流量站等，可藉以取得相關水文分析或泥砂運移模擬之監測資料，搭配模式進行率定驗證，提供更具體且可信的模擬成果。

(三) 篩選結果

篩選子集水區除透過治山防災與保育治理面向外，亦應考量其他面向(如治理經費等)酌以調整其候選子集水區之擇定。根據上述篩選原則，篩選流程如圖 2-3，優先篩選順序如表 2-8 所示，示範集水區之篩選考量首重其治理需求性。

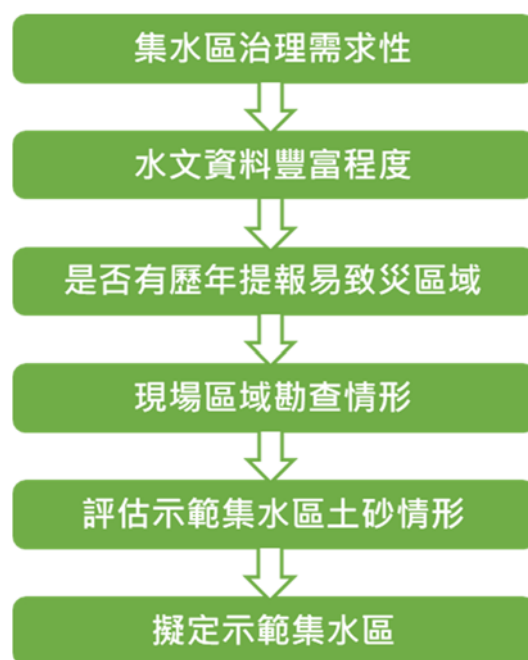


圖 2-3 示範集水區篩選流程圖

表 2-8 示範集水區篩選原則優先順序

考量面向	對應項目	依照「資料分析與規劃」項目需求性排序
集水區具易致災區域	歷年專管提報易致災區域數量	3
治理工程投入狀況	投入工程案件數與大型防砂設施分布	3
集水區規劃治理成效評估	集水區治理需求性	1
分析使用所需資料	既有資料豐富程度	2

依據總局「集水區上游水土保持需求性調查」計畫內容，剔除明年度「暫緩處理」等級之集水區後，候選單元由 69 個子集水區剔除 30 個暫緩處理等級後，剩餘立即處理與優先處理之子集水區計有 39 個。為進行相關土砂分析，應以相關資料豐富程度篩選，並依照其需求程度排定順序，示範集水區所需資料集優先條件排序如表 2-9 所示，示範集水區篩選結果如表 2-10。根據集水區資料使用需求，初步篩選區域為富源溪集水區、萬榮集水區以及和留山集水區。

其中，因萬榮集水區與和留山集水區並無歷年專管計畫提報點位故予以汰除。根據現場調查結果，富源溪之保全對象主要分布於中下游河段，且現場調查後發現其於河川治理起點河段有明顯掏刷情形，實有進行土砂風險評估之必要性，故本計畫擬定富源溪集水區為計畫示範集水區。

表 2-9 示範集水區篩選資料使用需求

資料需求條件	相關所需資料	資料使用需求
優先條件	具有 <u>歷年雨量資料</u> (氣象局雨量站為主，水利署雨量站為輔)	水文水理分析主要輸入資料
次要條件	歷年相關 <u>水文實測資料</u> (水利署水位資料等)	相關參數率定使用之實測資料(C 值、曼寧係數)
第三條件	<u>歷史規劃報告</u> 參考	歷年規劃資料、環境資料

表 2-10 示範集水區篩資料使用需求

子集水區 名稱	雨量資料		水文量資料		歷年規劃資料
	雨量站 (氣象局)	雨量站 (水利署)	水位站	含砂量 測站	近十年規劃 報告數量(95-108)
九岸溪	0	1	0	0	4
山興	0	0	0	0	1
安夜西溪	1	0	0	0	2
良里溪	0	0	0	0	0
阿眉溪	0	0	0	0	4
紅葉內溫泉	1	0	0	0	1
荖溪	1	0	0	0	3
崙山	1	1	0	0	2
猴子山	1	0	0	0	2
溪底	0	1	0	0	1
樂合溪	0	0	0	0	3
貓公溪	1	0	0	0	2
三棧北溪	1	0	0	0	2
水璉沿海	0	0	0	0	1
白鮑溪	0	0	0	0	1
石厝溝	0	0	0	0	3
立霧溪	2	0	0	0	1
安通溪	1	0	0	0	4
米棧	0	0	0	0	1
秀姑巒溪上游	0	0	0	0	1
秀姑巒溪下游	1	1	0	0	1
和中沿海	1	0	0	0	2
和留山	0	1	1	1	1
阿羅朗	0	0	0	0	2
南清水溪	0	0	0	0	2
苓雅溪	0	0	0	0	1
馬太鞍溪	0	0	0	0	1
馬西桑	0	1	0	0	2
馬遠入山檢查哨	0	0	0	0	3

子集水區 名稱	雨量資料		水文量資料		歷年規劃資料
	雨量站 (氣象局)	雨量站 (水利署)	水位站	含砂量 測站	近十年規劃 報告數量(95-108)
高寮溪	1	0	0	0	1
富源溪	1	1	3	2	2
朝保	1	0	0	0	2
新莊溪	0	0	0	0	2
萬榮	1	0	2	1	1
壽山	0	0	0	0	2
壽豐溪	0	1	0	0	1
鳳林溪	1	0	0	0	4
磯崎	2	0	0	0	1
鰲溪	1	0	0	0	4

二、示範集水區之基礎資料蒐集與分析

經上節所列子集水區篩選條件之評估，本計畫篩選秀姑巒溪支流富源溪流域為示範集水區。為進行集水區土砂模擬分析，考量完整之集水區範圍除包含水保局子集水區外，將範圍延伸至下游處水利署所轄之子集水區範圍，以保持集水區之完整性。除進行集水區範圍內水文分析，也將進行區域水文地文資料蒐集，規劃集水區內後續欲進行土砂收支之探討河段。為掌握子集水區之區域基本概況，應針對集水區之基本資料，包括規劃區基本資料、地形地勢、土壤地質、氣象、水文、人文、交通、土地利用、生態環境以及以往災害情形及處理情形等項目進行蒐集，以利於後續規劃作業之執行。

富源溪發源於丹大山東坡，於馬遠、富源出山谷處河道左側形成沖積扇，右岸幾乎不發育，成為左右不對稱之偏形沖積扇。目前最新公告河川界點，區域河段自馬遠二號橋上游防砂壩(富斷 22)至與秀姑巒溪合流點(富斷 1)，全長約 10.4 公里，平均坡度約 1:111。上游段自馬遠橋至富興溪合流點止，河床坡降稍陡且深槽明顯，河床平均坡

降約在 1:83。下游段自富興溪合流點至秀姑巒溪合流點止(富斷 1 至富斷 13)，河幅擴大，河床坡降逐趨平緩，河床平均坡降約在 1:130。

本流域屬亞熱帶氣候區，冬季東北季風盛行，大量水汽受阻於山脈，普遍帶來降雨，夏季則因雷雨及颱風侵襲，雨量更多。以中央氣象局花蓮站為例，年平均氣溫為 22.9°C，其月平均氣溫以 7 月之 27.8°C 最高，而 1 月之 17.4°C 最低。年平均氣壓為 1012 百帕，年平均相對濕度約 80.5%，平均年總日照時數為 1579 小時，年平均降雨量約為 2300 公厘。圖 2-4 為富源溪現存水文測站分布圖，流域內計有一水位站可作為土砂收支模式水文率定測站，雨量測站部分，上游有一大坪水利署局屬測站，下游分別有富源及瑞穗兩個氣象局局屬測站，入砂濃度部分則可參考馬遠橋之含砂量測站製作流量-含砂量率定曲線，測站位置分布詳如下。

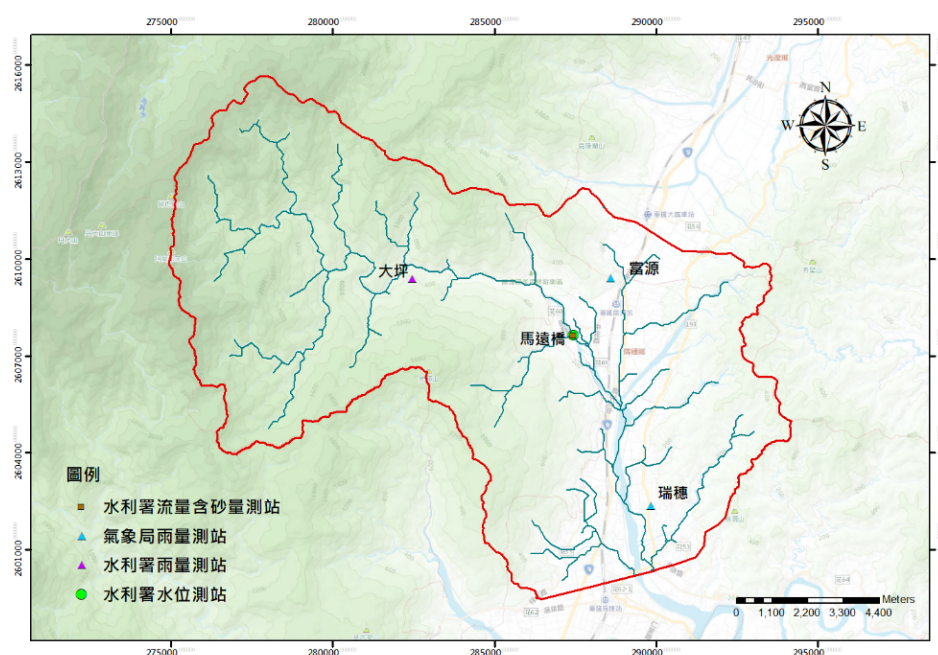


圖 2-4 富源溪集水區水文測站分布圖

為進行區域之土砂模型模擬分析，首先須利用降雨—逕流模式進行集水區水文模擬，給定後續土砂模型之水文邊界條件，蒐集富源溪集水區之降雨—逕流模式設定所需地文參數如下。本計畫根據內政部

國土測繪中心第 I 類土地利用型態調查資料，彙整後之土地利用型態分布如圖 2-5 所示，資料顯示，集水區上游以森林使用土地為主，下游則以農業使用為大宗。本計畫已選定集水區內具土砂收支管理必要之河段，進行後續河道泥砂動床模擬，故進行集水區災害潛勢分析，蒐集區域內土石流潛勢溪流計有 14 條(表 2-10)，分布於大豐村、富源村、富興村、瑞祥村，以及馬遠村等村里，山崩地滑敏感區域多分布於中上游，並有一活動斷層通過此區，集水區災害潛勢分析如圖 2-6。

表 2-11 土石流潛勢溪流詳表

位置	編號	鄰近道路	保全對象	潛勢級別	長度(m)
光復鄉大豐村	花縣 DF083	管真巷	1~4 戶	低	0.758
光復鄉大豐村	花縣 DF121	花 56 鄉道	無	低	1.085
光復鄉大豐村	花縣 DF122	花 56 鄉道	1~4 戶	低	0.621
瑞穗鄉富源村	花縣 DF084	台 9 線	1~4 戶	低	0.686
瑞穗鄉富源村	花縣 DF085	花 58 鄉道	1~4 戶	高	5.333
瑞穗鄉富興村	花縣 DF090	台 9 線	1~4 戶	高	3.211
瑞穗鄉富興村	花縣 DF091	台 9 線	無	中	4.726
瑞穗鄉富興村	花縣 DF092	台 9 線	5 戶以上	中	1.378
瑞穗鄉瑞祥村	花縣 DF086	花 55-1 鄉道	1~4 戶	低	4.387
萬榮鄉馬遠村	花縣 DF030	台 9 線	5 戶以上	高	5.447
萬榮鄉馬遠村	花縣 DF031	台 9 線	5 戶以上	高	2.023
萬榮鄉馬遠村	花縣 DF032	花 60 鄉道	無	低	8.603
萬榮鄉馬遠村	花縣 DF168	馬遠聯絡道路	5 戶以上	高	1.227
光復鄉大豐村	花縣 DF083	管真巷	1~4 戶	低	0.758

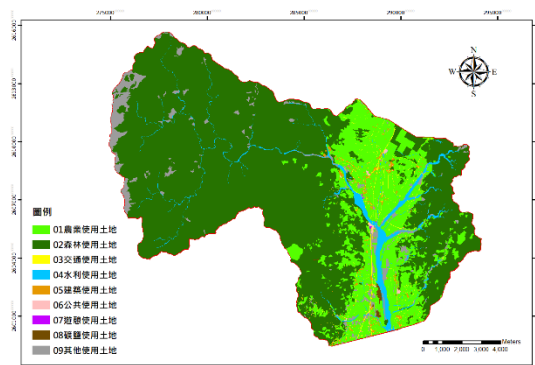


圖 2-5 富源土地利用型態分布圖

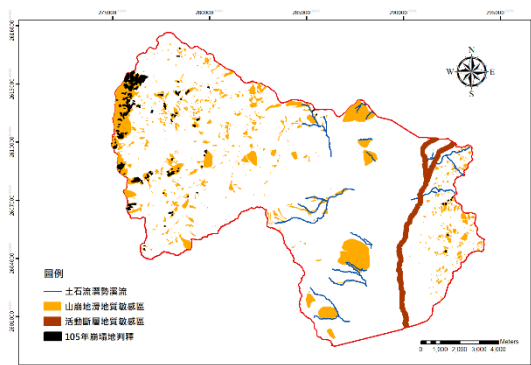


圖 2-6 富源溪災害潛勢分布圖

為探討示範集水區內之災害類型進行特性分析，提供後續建模與模擬河段篩選之參考，本計畫除蒐集災害潛勢分析資料與歷年重大土砂災害事件之衛星影像與航照圖，另需蒐集示範集水區地層組成型態、高程部分、坡度與坡向分析等資料，以供後續模擬河段上游入流之子集水區劃分與逕流模擬所需之地文條件，研究所需資料如圖 2-7 至圖 2-10。

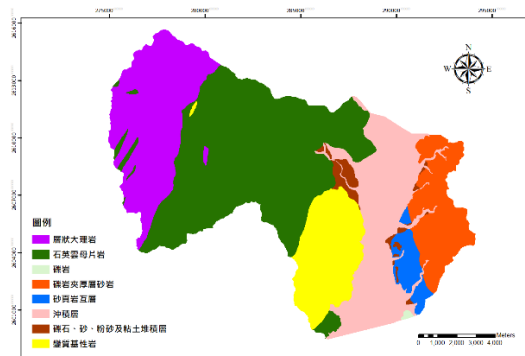


圖 2-7 富源溪地質分布圖

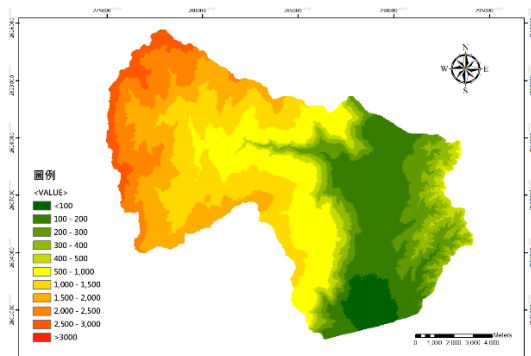


圖 2-8 富源溪高程分布圖

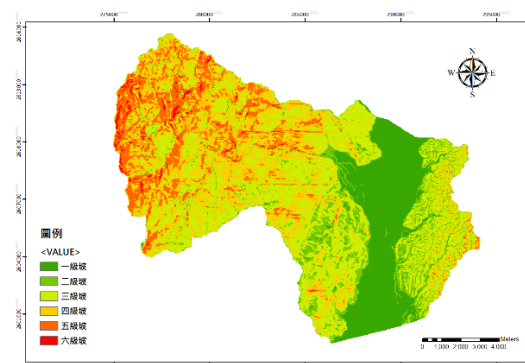


圖 2-9 富源溪坡度分析圖

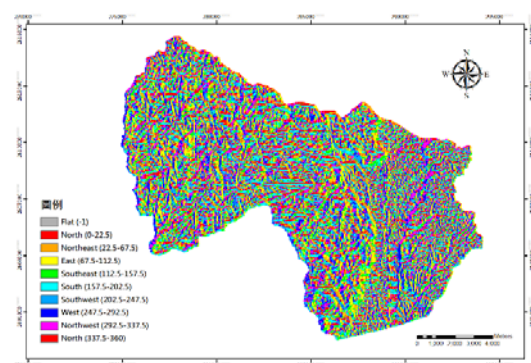


圖 2-10 富源溪坡向分析圖

三、示範集水區之治理策略與相關成效評估

透過前述示範集水區資料蒐集與彙整，可綜整集水區保育治理對策，並從中篩選屬於「影響土砂量體管理」之治理對策，如河道整理、築建防砂壩、河岸邊坡整治等，並針對既有治理手段之成效評估結果進行探討，藉以作為後續因應氣候變遷調適策略擇定之參考依據，進而擬定短中長期治理方向與調適策略，以因應氣候變遷下土砂管理之不確定性。土砂管理之策略目標，係以穩定河道為最主要目標，並應避免野溪河段間因掏刷造成周遭構造物毀損；或因土砂淤積而導致溪水溢淹兩岸而影響安全。在氣候變遷極端降雨的衝擊之下，極端事件的降雨將更容易引發大規模土砂災害。本計畫綜整前述的文獻與研究，歸納與土砂管理相關的調適策略如表 2-12 所示，可作為後續因應氣候變遷對土砂管理影響之調適策略選擇的參考。

表 2-12 土砂管理措施與方案

治理目標	治理策略	具體方案	注意事項
穩定溪床演變趨勢	1.避免縱、橫向冲刷 2.穩定流心 3.提升溪床抗冲刷能力	1.人為溪、坡整治工程(固床工、護岸)，或設計跌水等消能措施 2.設計複式斷面深槽/佈置丁壩等方式 3.整體性佈置防砂工程或整流工程	需考量上下游河段一致性，避免冲刷區位轉移
防止大量土砂下移	1.攔阻過多土砂量體 2.降低可能土砂來源	1.依實際環境需求佈置防砂工程與整治工程 2.進行源頭水土保持工程處理(崩落地整治/植生復育)	應避免工程過度擾動原始環境
避免影響下游排洪能力	1.維持通洪斷面 2.避免土石淤積阻塞	1.護岸/堤防工程 2.針對異常土砂淤積段辦理清疏工程	1.應避免兩岸設計過度渠化 2.定期檢討清疏成效與需求性
減少衝擊環境	1.落實生態工程技術 2.實踐環境友善目標	1.減輕混凝土工程量體，或利用生態預鑄槽減少現場施工等措施 2.利用軟性土地管制措施或環境	軟性管理措施與硬體工程設備應以不相互衝突為主目標

治理目標	治理策略	具體方案	注意事項
		友善考量進行軟硬體措施配合進行	
生態保育措施	1.維持溪流水流棲地 2.避免破壞生態廊道	1.依生態調查營造棲地環境 2.縱向：維持橫向構造物設計連續性 3.橫向：設計縱向構造物時考量生物濱水路線	應於工程生命週期間進行生態檢核，滾動式檢討相關措施合理性。

富源溪集水區之河道治理邊界起點為馬遠二號橋上游防砂壩至下游與秀姑巒溪合流點為終點。根據 2015 年經濟部水利署秀姑巒溪水系治理規劃報告顯示，目前富源溪兩岸多已築堤禦洪，通洪能力部分，根據調查結果，舊鐵路橋、馬遠橋以及馬遠二號橋目前有橋梁跨距不足問題存在。根據 105 年經濟部水利署第九河川局秀姑巒溪治理規劃報告顯示，彙整既有防洪工程與跨河構造物一覽如表 2-13 至表 2-14 所示。

表 2-13 富源溪既有防洪工程一覽表

岸別	編號	工程名稱	岸別	編號	工程名稱
左岸	1	鶴岡堤防	右岸	2	瑞美堤防
	3	北岡堤防		4	瑞北堤防
	5	富民護岸堤防二段		6	公路東側堤防
	7	富民護岸		8	馬蘭鈎堤防
	9	富民堤防		10	馬遠村堤防

表 2-14 富源溪跨河構造物一覽表

橋名	橋長(m)	橋寬(m)	橋墩寬 (數量 x 寬度 m)	橋墩形狀	梁底高程(m)	權責單位
瑞岡大橋	560.2	6.6	13×1.68	圓形	83.66	縣政府
馬蘭鈎溪橋	240.2	12.61	7×2.00	橢圓形	135.38	公路總局
新鐵路橋	高架	6.5	9×2.29	圓形	136.41	鐵路局
舊鐵路橋	145.2	3.8	6×4.00	圓形	136.21	鐵路局
馬遠橋	90.1	5.94	2×1.90	圓形	165.86	縣政府
馬遠二號橋	120.67	8.18	2×1.90	圓形	186.29	縣政府

富源溪集水區流域內計有 14 條土石流潛勢溪流，崩塌地位置主要分布於流域內西半部之萬榮鄉及卓溪鄉，部分於玉里鎮的樂合溪之上游、富里鄉的阿眉溪之上游等。於主流秀姑巒溪上游與支流富源溪、紅葉溪、卓溪、豐坪溪、九岸溪與清水溪集水區內有高危險級潛勢溪流，為造成河道淤積之因素之一。流域上游除加強坡地水土保持外，應再配合淤積段河道疏浚與整理計畫，使其能符合河川通洪之需要。並針對河道受衝擊段之堤防或護岸加強基礎保護，避免沖刷後之土石淤積造成河道深槽過度擺動影響防洪建造物安全。日前水土保持局花蓮分局已於富源溪流域調查評估集水區野溪土砂量，利用旋翼無人載具空拍調查崩塌地，並蒐集已有資料及配合現勘推估土砂量，根據其治理必要性進行流域清疏作業，富源溪流域內共計有 15 個點位已進行相關野溪清疏工程。

本計畫旨在進行流域土砂收支風險評估，已選定示範集水區內河段，利用河道輸砂模式並考量邊界泥砂濃度輸入進行土砂收支數值模擬。土砂模式之水文參數來源為根據水文測站之量測結果進行模擬檢定，考量區域內水文測站分布位址，中下游河段為適宜模擬區段。根據 2015 年經濟部水利署秀姑巒溪水系治理規劃報告顯示，富源溪境內有 4 處近岸崩塌地，上游地形破碎，崩塌料源豐富，在颱風豪雨事件後將持續擴大。配合近岸崩塌點位、水保局花蓮分局清疏點位、土石流潛勢溪流分布情形、現地勘查情形，以及水文測站分布位址，規劃至富源溪河川治理界點斷面編號 022 馬遠二號橋上游防砂壩至下游斷面標號 018 馬遠橋水位站，作為本次重點模擬河段。模擬河段如圖 2-11 所示。

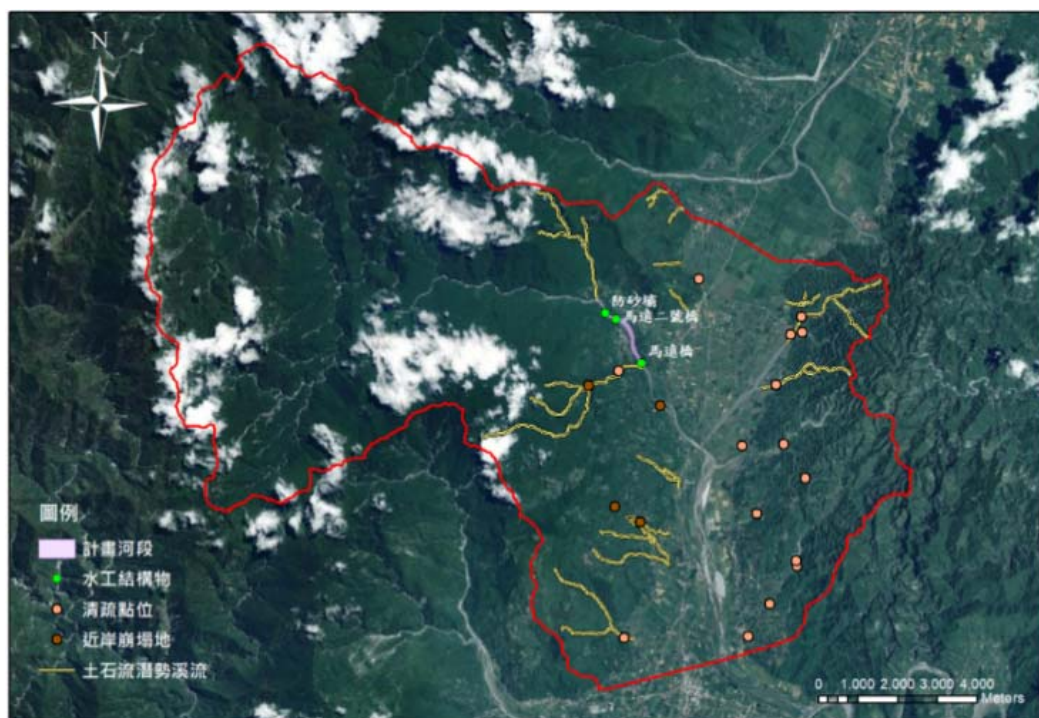


圖 2-11 示範集水區(富源溪)模擬河段

本計畫於模擬河段進行現場勘查作業，另於 2019 年 7 月針對計畫河段進行 UAV 人工載具之航測，並已完成高程資料之校準，可提供後續驗證資料所需，如圖 2-12 至圖 2-13 所示。本次 UAV 航測平均地面採樣距離為 4.39 公分，涵蓋面積約 98.54 公頃，本計畫拍攝河段採用 250 張影像拼接而成，RMSE 誤差僅 0.047 公尺，輸出為 100 公分間隔之高程資料。



圖 2-12 上游河段往下游拍攝之遠景

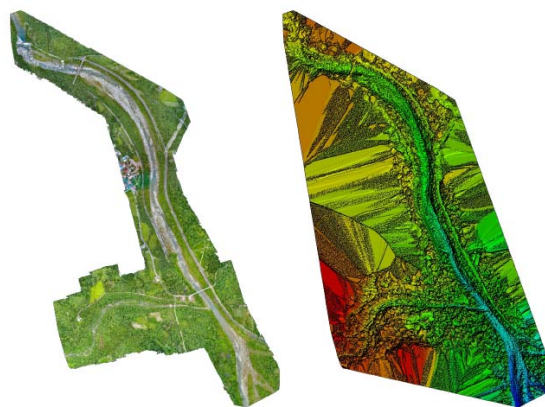


圖 2-13 計畫河段 UAV 正交 DSM 模型

第三章 集水區土砂管理之風險評估方式建立與試行

在氣候變遷造成極端事件頻繁的影響下，導致未來土砂管理的議題，具有更高程度的不確定性。因此，在擬定後續治理策略上，需仰賴先進的風險評估方法，以機率概念降低系統性失敗的風險，並提高其可靠性。緣此，本計畫嘗試提出一個適用於氣候變遷下災害風險分析的通用性風險定義架構，利用災害風險的定義與風險因子評估，建立土砂管理之災害風險，藉以提供後續因應氣候變遷下，可承受風險範圍之動態調適策略擬定。

國內已有許多研究針對土砂災害進行風險評估，然而，其評估過程中所定義的各項名詞與其內涵，名稱雖然接近，但內涵卻不盡相同。因此，以下回顧與釐清氣候變遷下土砂管理各面向之災害風險分析內容，並提出本計畫之災害風險定義與分析架構。

第一節 土砂管理風險評估之相關文獻探討

一、災害風險定義

災害(Disaster)廣義定義係指人類生命財產或環境資源因危害發生而導致大量損失之事件，而災害風險則表示特定危害發生的可能性。因此，危害指的是威脅的因子，而風險則指危害發生的機率，至於災害，則指危害後果的具體實現。災害風險之定義，目前已有許多文獻進行定義與評估，彙整如表 3-1 所示。

根據文獻彙整可知，災害風險定義中，一般均包含兩個或三個元素(危害度、脆弱度與暴露)，為了可以明確的區分各風險因子的作用，本計畫參考 IPCC AR5 之風險定義，採用較多(三個)元素定義風險，即風險為危害度、脆弱度與暴露度的乘積。

表 3-1 災害風險定義之相關文獻彙整

類別	文獻名稱	風險分析計算方式
災害風險定義	IPCC WGII AR5 (2014)	對於風險有許多闡述，例如風險通常表示為發生危險事件或趨勢的機率(probability)乘以衝擊(impact)、或風險為(發生事件或趨勢的可能性)與所引致後果的乘積；風險應為脆弱度、暴露和危害度三者相互作用下的結果。其中、危害度係指自然或人為產生的物理事件、趨勢或其物理影響，可能會導致傷亡或其他健康影響，以及財產、基礎設施、生計、服務供應、生態系統、環境資源的損害和損失；在此報告中，「危害」一詞通常指與氣候有關的物理事件、趨勢或其物理影響。暴露度為在環境中可能會受到不利影響的人(與其生活)、物種或生態系統、環境機能、服務和資源、基礎設施、經濟、社會或文化資產。脆弱度包括敏感度(sensitivity)、易受傷害以及缺乏應對和適應能力等概念。財富、社會地位和性別等一系列的因素決定了與氣候相關風險的脆弱度和暴露度。
災害風險定義	Liu 等人(2016)	風險是危險事件發生的機率以及暴露事件的後果（若危害發生會造成的衝擊程度）的乘積；具體而言，風險為危害度、脆弱度與暴露度之乘積。其中，危害度是指可能會使某一地區受到破壞的物理事件；脆弱度與會使單元易或不易受到不利影響的性質特點相關；暴露是指暴露於危害因子中單元的數量、類型和價值。
災害風險定義	科技部災害管理資訊研發應用平臺-氣候變遷之災害衝擊與調適(2018)	依據 IPCC2012 及 IPCC2014，定義風險為危害度、暴露量與脆弱度三者之交集。危害度的內容為災害發生的自然變異因素與程度，如強降雨、颱風次數增加等造成的災害，以淹水和坡地災害為例，主要考量降雨因素造成的自然危害。脆弱度的內容為系統面臨特定危害是否容易致災的程度，如該地區是否容易淹水或是發生坡地崩塌。暴露量為災害可能受影響的對象，可能是人口、設施、作物、經濟行為。

二、災害風險分析架構

目前風險分析多為定性描述或利用安全係數概念計算，例如若(供給/需求)小於 1，則為失效事件；如此計算則忽略需求端與供給端不確定性。為求更精準地掌握風險，風險之不確定性應以機率形式表

示。因此，災害風險(Risk)則表示特定危害發生的可能性，可表示成：

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \times \text{Exposure}$$

其中，危害度(Hazard)可分為人為或自然所引致的危害事件之超越機率，本計畫僅考慮與氣候相關之危害度，不同重現期之危害度的具體實現為降雨量。

脆弱度(Vulnerability)為關注目標對特定重現期之危害事件的損害程度或敏感度，根據上述定義，脆弱度是介於 0~1 之間的危害事件條件機率，用以呈現危害事件發生下，目標的受損程度。

暴露度(Exposure)為對特定重現期之危害事件發生且造成損害時，所影響之居民、經濟價值或生產面積；本計畫所定義之暴露度為特定期間內一個常數值，且依據土砂管理之概念，暴露度定義對象以土砂管理問題之受損規模為主，如因河道土砂淤積而溢淹之農田範圍等，並將該值進行正規化。關於上述各風險之定義，詳見表 3-2。

表 3-2 本計畫災害風險各因子之定義

風險因子	定義
危害度 Hazard	1. 危害度(hazard)可分為人為或自然所引致 2. 本計畫僅考慮與氣候相關之危害度 3. 不同重現期之危害度的具體實現為降雨量
脆弱度 Vulnerability	1. 脆弱度(vulnerability)為對特定重現期之危害事件的損害程度或敏感度 2. 脆弱度為一個條件機率(介於 0~1 之間的數值)
暴露度 Exposure	1. 暴露度(Exposure)為對特定重現期之危害事件發生且造成損害時，所影響之居民、經濟價值或生產面積 2. 暴露度為一個常數值，以土砂管理問題所致災之受損規模為主 3. 暴露度應以受損規模進行正規化

三、土砂風險評估方式之文獻探討

為釐清土砂災害之相關風險評估，蒐整並彙整國內外於氣候變遷下之坡地災害風險因子，如表 3-3 所示。

表 3-3 土砂災害風險評估方式盤點與彙整

出處		風險評估方式	
文獻名稱	年份	說明	風險因子計算方式
臺灣氣候變遷科學報告 2017—衝擊與調適面向	106	本報告彙整相關文獻所使用之風險評估方法：	
		我國過去探討坡地災害風險及其風險圖的研究中多數僅探討危害度及脆弱度的因子。	水保局(2011)、水保局(2012)、內政部營建署 (2011)、林又青等(2010)： 危害度 ：降雨量、坡地災害潛勢(例如：土石流潛勢、崩塌潛勢)。 脆弱度 ：社會因子(例如：人口密度、人類發展指標、防災避難設施)、經濟發展因子(例如：土地利用強度)，以及環境因子(例如：歷史崩塌率)。
		陳韻如等(2014)使用不同氣候變遷衝擊風險因子指標，綜合風險為這些指標的乘積，並給予風險等級，最後以圖資的方式呈現臺灣氣候變遷災害風險之熱點區域。	危害度 ：發生極端降雨之機率(24 小時累積雨量達 350mm 以上(超大豪雨))。 環境脆弱度 ：歷史崩塌率、坡度、地質災害面積。 暴露量 ：人口密度。 社會脆弱度 ：人類發展指標。
曾文溪流域因應氣候變遷總合調適研究 (3/3)	106	風險為脆弱度與危害度的組合，以風險矩陣表現。	危害度 ：計算崩塌潛勢、河床平均沖蝕深度並分級。 脆弱度 ：評估因子包含建物(0.5)、交通設施(0.2)、現地整治成效(0.3)，再進行分級評分。
曾文溪流域因應氣候變遷總合調適研究 (2/3)	105		
曾文溪流域因應氣候變遷總合調適研究 (1/3)	104		

出處		風險評估方式	
文獻名稱	年份	說明	風險因子計算方式
大甲溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫 (2/2)	104	分別計算所得防洪及土砂的脆弱度及危險度，並從AHP 獲得權重值，因此可以計算得風險值，並採用「風險矩陣」具排列風險因素之特性，以表現不同程度之風險，並產生風險地圖。	脆弱度 ：建物(0.5)、交通設施(0.2)、現地整治成效(0.3)。 危害度 ：利用二元迴歸模式計算崩塌危害度。
大甲溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫(1/2)	103		
氣候變遷衝擊下縣市災害風險評估-以臺南市為例	103	風險圖指標由危害度、環境脆弱度與社經脆弱度組成。分別計算各指標等級後，再以等權重方式，將危害度、環境脆弱度與社經脆弱度三面向指標相乘，以獲得各個災害風險值。風險圖呈現則是將相乘後之風險值，再劃分為五個等級呈現，等級越高，災害風險越高。	危害度 ：25 年期間發生『24 小時內降雨超過 350mm』之機率。 環境脆弱度 ：歷史崩塌率、坡度及地質災害面積。 社會脆弱度 ：人口密度。
高屏溪流域因應氣候變遷防洪及土砂更新研究計畫	102	$\text{Risk(風險)} = \text{Hazard (危險度)} \times \text{Vulnerability (脆弱度)}$ 。	危險度 ：二元迴歸模式評估坡地土砂災害 脆弱度 ：建物、交通設施、坡地整治成效。
曾文溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫	102	風險 R =危險度 H)× 脆弱度 V。 H: Hazard V: Vulnerability	脆弱度 ：建物、交通設施、現地整治成效。 危險度 ：以崩塌風險評估模式作為危險度指標評估工具，輸入氣候變遷的情境雨量計算崩塌潛勢，並依據危險度的等級分類，將崩塌潛勢分為非常高、高、中、低及非常低等 5 個危險度等級。
淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫	102	$\text{Risk(風險)} = \text{Hazard(危險度)} \times \text{Vulnerability (脆弱度)}$	脆弱度 ：建物、交通、整治成效、面積。 危險度 ：降雨情境崩塌潛勢分級。

出處		風險評估方式	
文獻名稱	年份	說明	風險因子計算方式
氣候變遷對高屏溪流域坡地災害發生潛勢之影響評估	100	根據蒐集之災例資料及相關因子，分別建置完成崩塌及土石流發生潛勢影響評估模式，可用以評估在特定降雨條件下的災害發生機率。	危害度： 鑒於引發坡地災害的降雨特性，分別以當日累積雨量及連續二日至四日累積雨量，配合歷史災害發生事件，界定誘發災害的降雨門檻值。 脆弱度： 崩塌潛勢評估模式以坡向、坡度、水系比、道路比及岩性等地文因子為基礎；土石流潛勢評估模式以溪床平均坡度、有效集水區面積及崩塌率等地文因子為基礎。配合降雨參數與實際災害，以羅吉斯回歸模型進行評估模式建置。
氣候變遷對坡地防災規劃之影響評估	101	以前一年度成果為基礎，加入地表覆蓋因子建置坡地災害潛勢評估模式。由歷史資料進行模式驗證的結果可知，使用連續二日雨量及相關地文因子，崩塌模式準確率約為八成、土石流模式則約為七成。	危害度： 以連續二日累積雨量作為誘發坡地災害事件降雨參數。 脆弱度： 崩塌潛勢評估模式以坡度、順向坡比、具斷層距離、道路比及地表覆蓋等地文因子為基礎；土石流潛勢評估模式以溪床平均坡度、有效集水區面積及地表覆蓋等地文因子為基礎。配合降雨參數與實際災害，以羅吉斯回歸模型進行評估模式建置。 另考量研究區域內的保全對象，結合災害發生潛勢，進行防災風險地圖製作。
氣候變遷下坡地災害潛勢評估及調適策略制定之研究	102	與 101 年度計畫相同。 (僅研究區域不同)	與 101 年度計畫相同。 (僅研究區域不同)
103 年氣候變遷衝擊下坡地災害風險評估及調適能力之研究	103	與 101 年度計畫相同。 (僅研究區域不同)	與 101 年度計畫相同(僅研究區域不同)，另將發生潛勢結合保全對象之風險地圖進行空間尺度細緻化的製作。然風險評估定義與前述相同，係以危險度與脆弱度的乘積而得。

經前述文獻回顧，可得知坡地災害分析中，定義危害度一般以降雨因子為自然致災之主要指標；而脆弱度因子部分，以土砂管理之致災潛勢等級為主；暴露度因子，則以土砂管理影響之災害影響規模為主。故結合前述災害風險定義與分析，本計畫定義土砂風險評估方式如表 3-4 所示。

表 3-4 災害風險分析架構對應土砂災害彙整

災害風險因子	定義	對應災害內容	相關可能因子
危害度 Hazard	1. 危害度可分為人為或自然所引致 2. 本計畫僅考慮與氣候相關之危害度 3. 不同重現期之危害度的具體實現為降雨量	以降雨因子為主要參數，考量不同重現期距下，不同降雨強度、降雨延時及累積降雨量作為設計值	● 重現期距 ● 降雨強度 ● 降雨延時 ● 累積降雨量
脆弱度 Vulnerability	1. 脆弱度為對特定重現期之危害事件的損害程度或敏感度 2. 脆弱度為一個條件機率 3. 脆弱度為一個介於 0~1 之間的數值	泛指土砂管理之致災潛勢等級，以河道沖刷、河道淤積為主。	● 河道蜿蜒度 ● 底床坡度 ● 地質條件 ● 地形條件
暴露度 Exposure	1. 暴露度為對特定重現期之危害事件發生且造成損害時，所影響之居民、經濟價值或生產面積 2. 暴露度為一個常數值，以土砂管理問題所致災之受損規模為主 3. 暴露度應以受損規模進行正規化	泛指土砂管理影響之災害影響規模，以河道沖刷、河道淤積為主。	● 易溢淹之保全對象 ● 束縮段鄰近保全對象 ● 轉彎段鄰近保全對象

第二節 土砂災害風險評估流程

在氣候變遷衝擊下，集水區內的土砂管理及災害風險評估，實有加以考量未來災害風險之必要性，因此制定完整的風險評估因子與指標計算方式應為首要任務。制定完整的風險評估流程，有利於災害風險量化與計算，於本計畫中將針對一示範集水區進行河道土砂收支模擬，並分別計算氣候變遷下不同時期之土砂災害風險以進行比較，分析結果可作為參考依據，供集水區進行後續治理規劃。風險評估流程，如下圖所示：



圖 3-1 風險評估流程圖

一、風險定義與計算方式

據前述章節文獻整理歸納風險之意涵，係指氣候變遷衝擊下，對自然與人類社會系統造成的可能損害程度，如颱風災害、洪水災害、崩塌災害等。依據 IPCC 在 2012 及 2014 年對災害風險之定義，以危害度、暴露量、脆弱度三者之交集表示之(如圖 3-2)，計算上則可界定風險為前述三項指標之乘積，則表示為下式：

$$\text{風險} = \text{危害度} \times \text{脆弱度} \times \text{暴露度} \quad (3-1)$$



圖 3-2 風險定義

風險由危害度、脆弱度及暴露度組成，必須界定各項評估指標以後續量化與計算，然而根據探討領域之不同，將擇定不同因子進行災害風險分析，如水利署 2018 年《氣候變遷下水環境跨領域動態策略技術評析與規劃報告》中，對於水環境、洪災及土砂災害分別提出不同的評估因子，以符合該探討目標之需求，如表 3-5。本計畫以集水區土砂管理為目標，期望了解氣候變遷對土砂災害風險之影響，以研

擬相對應之管理策略，因此本計畫將擇定一示範集水區進行土砂收支計算，並根據河道沖淤情形進行災害風險分析，詳細評估因子界定及量化計算方法，將於後續章節進行詳細說明。

表 3-5 水環境各領域災害風險因子分析架構

風險因子	水資源	洪災	土砂
危害度 (hazard)	特定時間(旬或月)，降雨量小於某門檻值的機率	「特定時間(時或日)降雨超過特定事件」之發生機率	「特定時間(時或日)降雨超過特定事件」之發生機率
脆弱度 (vulnerability)	特定事件下供給小於需求的機率	特定事件下發生淹水的機率	特定事件下發生泥砂入庫的影響程度
暴露 (exposure)	民生：人口密度之正規化 工業：工業產值之正規化 農業：水稻面積之正規化	鄉鎮市區保全對象密度之正規化	剩餘有效庫容之正規化
風險(Risk)= 危害度(hazard) ×脆弱度(vulnerability) ×暴露(exposure)			

資料來源：氣候變遷下水環境跨領域動態策略技術評析與規劃報告 2018

二、制定風險評估指標與計算

進行集水區土砂災害風險管理時，首先定義風險為危害度、脆弱度與暴露度的乘積，後續章節針對土砂災害定義及危害度、脆弱度、暴露度指標進行進一步說明，並界定本計畫所使用之各項評估因子。

(一) 土砂災害之定義

以集水區土砂管理作為目標，當集水區內發生土砂災害時，部分土壤、岩屑等坡地材料，將直接或間接進入河道，影響河段土砂收支平衡，然坡地災害之成因相當複雜，外在因素如暴雨、地震、人為開發等誘因，內在因素如地形、地質條件等都將造成影響。

(二) 危害度評估因子

危害度應考量引致災害事件發生之因子，可分為人為及自然因素，歸納如表 3-6。在此欲針對氣候變遷衝擊進行風險管理，探討模擬河段之危害程度並進行正規化，雨量為一常見危害度指標，本計畫旨要河段之土砂風險程度，其危害程度亦將取決於輸入該河段之水文頻率，故將危害度定義如式 3-2。本研究欲蒐集大坪站之歷年雨量資料進行頻率分析，並以 50 年頻率之一日最大暴雨為例，故危害度為 0.02。

$$\text{危害度} = \frac{1}{\text{洪水頻率年}} \quad (3-2)$$

表 3-6 坡地災害致災原因

自然因素	人為因素
1.地形地勢陡峭 (坡度) 2.地質脆弱地區 (地質構造、土壤岩石特性) 3.地震破壞地質穩定 4.當地環境因素 (風化程度、植被) 5.地下水位 6.降雨過大	1.森林砍伐 2.集水區內山坡地過度開發及超限利用 3.山區開闢道路或興建水庫 4.工程選址或道路選項不當 5.邊坡排水系統與護坡工程維護不周 6.坡地保育政策不足

資料來源：國家災害防救科技中心

(三) 脆弱度評估因子

由脆弱度之定義，應衡量關注目標對於特定危害事件的損害程度。一般界定土砂災害之脆弱度因子常為崩塌潛勢評估、土石流潛勢

評估、坡面坡度、順向坡比等，而以集水區土砂管理角度而言，乃應針對河段之土砂沖淤情形進行探討，尚能評估該河段之脆弱程度。於氣候變遷效應下，本計畫以集水區土砂管理為目標，脆弱度計算方面將河段之沖淤土砂量體進行正規化，如下所列。

為量化脆弱度因子，以土砂數值模擬結果而言，將每一網格作為一節點，並依各節點模擬結果將其分為淤積段及沖蝕段。若該點為淤積段，則脆弱度因子應為淤積土砂深度除以河段最大淤積深度，反之若該點為沖刷段，則脆弱度因子為沖刷土砂深度除以該河段最大沖刷深度，以下式進行計算：

$$\text{河道脆弱度(淤積段)} = \text{河段各節點模擬相對淤積深度(m)} \quad (3-3)$$

$$\text{河道脆弱度(沖刷段)} = \text{河段各節點模擬相對沖刷深度(m)} \quad (3-4)$$

(四) 暴露度評估因子

根據暴露度之定義，應評估當危害事件發生且造成損害時，將受影響的對象，可能包括居民人身安全及經濟生產量等，一般常以人口密度、土地使用及經濟生產價值作為暴露度之評估準則。

本計畫針對河道土砂管理進行風險評估，因此以河段作為受災害影響對象，將可沖淤深度進行正規化，作為暴露度之量化因子。在進行量化前，同樣地需先將各節點區分為淤積段及沖刷段，若為淤積段，則以河床至河道頂部之可淤積深度進行正規化(最大值為 1)；若為沖刷段，則以構造物之基礎深度推求其可沖刷深度進行正規化(最大值為 1)，將暴露度定義如下式所列：

$$\text{河道暴露度(淤積段)} = \text{原始河床至堤頂之相對深度(m)} \quad (3-5)$$

$$\text{河道暴露度(沖刷段)} = \text{構造物之基礎相對深度(m)} \quad (3-6)$$

第三節 集水區土砂管理模式參數分析

本計畫以富源集水區作為示範區，模擬河段以富源溪馬遠橋河段(富源溪主流斷面編號 018 至 022)作為土砂管理之分析場址。土砂模擬分析流程如圖 3-3 所示，本節將針對土砂模擬各數值模型使用參數進行說明，以下主要針對：(一)數值模擬流程、(二)數值模型比較篩選、(三)選用數值模式介紹以及(四)適用參數分析等四個部分分別詳述之。

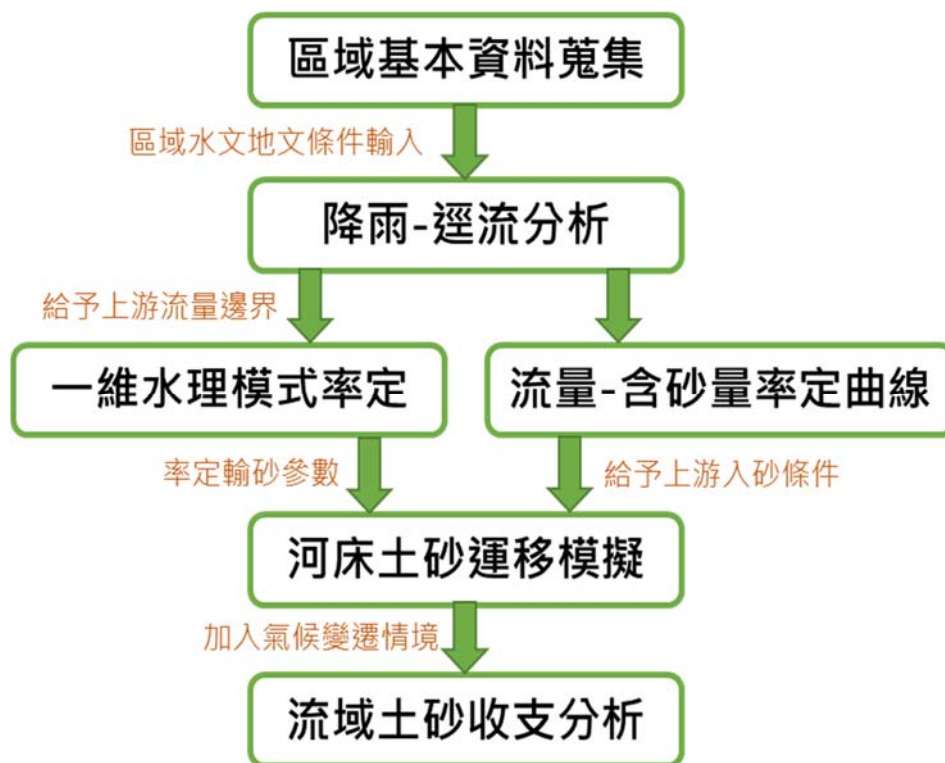


圖 3-3 土砂分析流程圖

一、降雨—逕流模式參數分析

(一)逕流模擬流程

本計畫於上游集水區逕流量推估部分，採用降雨—逕流推估模式進行輸砂重點模擬河段之上游逕流輸入歷線推估，流量輸入如圖 3-4 所示。利用 ARC-GIS 地理資訊系統進行集水區數值高程分析，並根

據匯流點位置劃分其集水範圍，分析其水文地文因子等參數後輸入適用之逕流推估模式，乃獲得模擬河段之上游入流歷線，作為後續動床模擬之邊界條件輸入。



圖 3-4 流量輸入示意圖

(二)降雨逕流模式比較

若要模擬集水區降雨流入河川形成逕流的過程，主要須以流域內水文及地文特性為參數，來推估降雨事件所帶來的洪水流量。降雨逕流模式的發展，不但可作為水理分析之依據，近年來也在水工結構物之設計建置上提供設計參考。常見之逕流模式如 SWMM 暴雨逕流管理模式、Tank Model 水筒模式、AGNPS 農業非點源污染模式、BASINS(HSPF)水文模擬程式、GWLF 水平衡收支模式，以及 HEC-HMS 降雨逕流模式等常見模式，皆已被廣泛利用於台灣地區之河川逕流推估。

集水區逕流推估模式的選擇，必須以研究區域水文地文特性、輸入輸出資料特性等需求為考量，以選出最適合該研究之集水區逕流推估模式。由於 HEC-HMS (The Hydrologic Modeling System)操作視窗相對簡單方便，過去於台灣地區流域逕流推估經常被使用且成效良好，因此本研究採用此模式來進行逕流量的推估。

(三)HEC-HMS 模式介紹

降雨－逕流模式係透過一系列經驗或半經驗公式之系統計算後，將輸入之雨量資料轉換成模擬流量歷線，其中以 HEC-HMS 模式最為廣用。HEC-HMS 水文模式系統建立主要包含三個模組，流域模組 (Basin model)、氣象模組 (Meteorologic model)、控制設定模組 (Control specification)。流域模組主要用來架構流域內地理環境分佈，輸入模擬集水區之模擬方法及水文參數。氣象模組主要在指定流域內水文過程演算所需之雨量資訊，及選擇面積雨量之估算方法，雨量資訊給定方式包括雨量組體圖及各雨量站之權重。控制設定模組主要設定模擬起始和結束時間以及控制時間間距。

地表逕流模擬係將超滲降雨套入單位歷線或運動波轉換以推算逕流歷線。單位歷線若為已知可直接輸入，或由 Clark 法、Snyder 法或 SCS 法推演。在該模式中，Snyder 法僅用以推出尖峰流量，故需以 Clark 法配合才能求得整個單位歷線。運動波轉換法主要是為模擬市區逕流而設計，此法之逕流與降雨量關係為非線性。有關 HEC-HMS 模式細部探討，已彙整於表 3-7。

表 3-7 HEC-HMS 模式探討

演算背景	將集水區視為水文均勻，依實際地形分成之不同小區組成流網，各以漫地流、運動波及 Muskingum 等方法演算逕流。
演算特性	集水區內假設為水文、地文條件均一亦即將子集水區視為一均質區域。若集水區內之各項水文地文參數無法代表該子集水區之特性則應再細分集水區。
適用範圍	地形變化不大且無人工結構物之小集水區。
限制	1. 同一子集水區內假設為水文、地文條件均一，亦即將集水區視為一均質區域，若與事實不符或所求取之各項水文、地文參數無法代表該子集水區之特性，則應再細分子集水區。 2. 僅能模擬單峰流量，對於連續降雨事件則模擬不佳。

(四)逕流演算法

本計畫於逕流歷線推估部分採用 SCS-CN 值法，主要因其所需土壤相關參數及氣象站資訊皆可由政府公開資訊搭配地理資訊系統求得，綜上所述資料輸入之合理性及取得之可行性故採用此法。關於降雨損失的部分，本研究採用美國土壤保持局(The U. S. Soil Conservation Service, SCS)之 SCS Curve Number 值法作為降雨損失的方法，需要設定之參數為起始損失 (Initial Loss)、CN 值(Curve Number)、非滲透百分比(Impervious)。另外本研究採用 SCS Unit Hydrograph，其參數為稽延時間 (lag time, tL)，由前面所求之 CN 值求出，而稽延時間則與集水區長度、平均坡度、土壤型態以及土地利用等資訊有關，參數相關設定如下。

CN 值即為 Curve Number，依土壤水分含量將其分為三種狀況，在乾燥狀況下為 CN1，一般狀況下為 CN2，潮濕狀況下為 CN3，判定方法如表 3-8，此三種狀況則受到臨前五天降雨量判斷。CN1 及 CN3 則根據 CN2 推求，彼此之間的轉換關係如下式所示。CN 除了臨前條件影響外，亦與土地利用型態與土壤類別有關，CN 值法將土壤分為四種類別，如表 3-9，依不同種類土壤得到對應之 CN2 值，如表 3-10，CN 值轉換關係式 3-6 至 3-7 所列。

表 3-8 臨前降雨條件分類表

CN 值類型	臨前五日總降雨量	
	冬眠季節	生長季節
I	小於 12.7 mm	小於 35.6 mm
II	12.7-27.9 mm	36.6-53.5 mm
III	大於 27.9 mm	大於 53.5 mm

資料來源：Chow et al, 1988

$$CN1 = \frac{4.2CN2}{10 - 0.058CN2} \quad (3-6)$$

$$CN3 = \frac{23CN2}{10 + 0.13CN2} \quad (3-7)$$

表 3-9 土壤類型分類表

土壤類型	土壤組成
A	深層砂土、黃土、團粒坩土
B	淺層黃土、砂質壤土
C	黏質壤土、淺層砂壤土、低有機含量壤土、高粘土含量壤土
D	高塑性黏土、鹽鹼土

資料來源：易任、王如意，應用水文學

表 3-10 各種土地利用在不同土壤類型下之 CN2

土地利用型態	土壤類型			
	A	B	C	D
農業	63	75	83	87
草地	39	61	74	80
林業	30	55	70	77
水面	100	100	100	100
建築用地	98	98	98	98
裸露地	68	79	86	89

資料來源：易任、王如意，應用水文學

直接逕流演算法部分，本研究採用 SCS Unit Hydrograph，其參數為稽延時間(lag time, t_L)，而稽延時間可由前段所求之 CN 值求出，採用美國水土保持局三角形歷線法求得稽延時間：

$$t_L = 0.000526 \frac{L^{0.8}}{S^{0.5}} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7} \quad (3-8)$$

式中 t_L 為稽延時間 (hr); L 為集水區長度 (ft); S 為集水區平均坡度 (%); CN 為不同土壤形態與土地利用的曲線值。

二、水理—輸砂模式適用參數分析

(一)輸砂模擬流程

本計畫採用河道動床輸砂模式進行集水區泥砂運移數值模擬，根據 2-3 節篩選河段進行區域網格建置，因模式之驗證尚需實際觀測值進行水文輸砂參數之檢定，本計畫已蒐集內政部國土測繪中心 104 年之最新 1m 間隔高精度數值高程地形，使用 104 年至今(108 年)之歷史暴雨事件進行模式檢定，並利用馬遠橋水位站與現地量測數據進行模式之驗證。因驗證暴雨事件之時間較長，本計畫規劃使用一維輸砂模式進行輸砂參數之率定，始進行二維模式之沖淤分布探討。一維輸砂模式之率定流程如圖 3-5 所示，二維輸砂模式之模擬流程如圖 3-6 所示。



圖 3-5 一維輸砂模式參數率定流程



圖 3-6 二維輸砂模式模擬流程

(二) 水理輸砂模式比較

水理數值模擬方法與功能，係利用質量與動量守恆方程式或質量與能量守恆方程式作為控制方程式，並配合初始與邊界條件、地形條件、參數設定等條件，計算斷面流速、水深、水位等水流特性；而經水理演算後，可代入不同輸砂經驗公式，並配合不同溪床條件(如河床值粒徑等)計算，則稱為水理—輸砂之動床模式。

隨著計算機不斷進步，數值模式演算對象也由一維數值解逐步發展至二維及三維數值解。而因求解目標與探討主題不同，水理—輸砂分析亦有其適用範圍，如表 3-11 所示。數值地形部分，本計畫採用內政部國土測繪中心，2015 年以空載光達測製之 1 公尺網格數值地形模型作為原始地形高程，搭配本團隊於 2019 年 7 月至富源溪河段量測之 UAV 地形進行模擬高程之率定。因模擬時間區段較長，以模式分析效率的考量，並比較表 3-11 各模式之特性。後續在參數率定上，採用一維輸砂模式進行，而輸砂模擬部分則採用二維模式進行模擬分析。

表 3-11 水理輸砂模式分析比較表

	計算範圍	優點	缺點	適用範圍	常見模式
一維水理模式	以斷面為主要計算，橋墩處則以通水斷面改變為考量，用以探討斷面沖淤情形	計算快、河道整體趨勢考量	斷面之沖淤為每一位置平均分配沖淤量，難比較高灘地與深槽間之差異	1. 不要求水流傳播影響 2. 可明確定義河道/洪氾區 3. 溪床高程資料不足或精度不佳。	● NETSTARS(擬似二維河道) ● PSED(擬似二維河道) ● HEC-RAS(一維河道) ● CCHE-1D(一維河道) ● SOBEK(一維河道+二維漫地流)
二維水理模式	為河段地形探討，如堰流、固床工均屬二維問題，可推估短期與長期河床質移動層厚度、河槽橫斷面束縮導致之沖刷深度	考量河段地形之沖淤特性、可符合工程與設計規劃時使用	計算範圍受到限制，無法對三維水流強烈之局部沖刷特性有效計算	1. 預期洪水波向外傳播效應。 2. 考量沖積河川之地形影響，如沖積扇、沖積河川或洪水平原等。	● FLO-2D(二維河道) ● CCHE-2D(二維河道) ● SRH-2D(二維河道)
三維水理模式	為構造物局部周邊地形之探討，如橋墩前之局部沖刷、丁壩有三維水流強烈之局部沖刷特性	推估構造物間之短中長期河床質移動層厚度、河槽橫斷面束縮導致之沖刷深度與局部沖刷等特性	計算範圍受到限制與計算時間相對較長	1. 預測橋墩/橫向構造物等跨河構造物受水流沖刷影響情形 2. 模擬構造物溢流、潰決等致災歷程	● FLOW-3D(三維河道) ● CCHE-3D(三維河道)

由於本計畫旨在探討河段地形變化及土砂管理風險，因此後續以二維水理—輸砂模式進行數值分析。為釐清二維水理—輸砂模式之適用性與優勢所在，茲將各模式原理與內容概述等彙整如表 3-12。因採用輸砂參數限制，需挑選模式內建配備之輸砂公式，故本計畫於輸砂模式選用評估後，採用 CCHE1D 與 CCHE2D 做為模擬工具。

表 3-12 二維水理—輸砂模式比較表

模式		CCHE-2D	SRH-2D	FLO-2D
數值方法		有效元素法	有限體積法	中央有限差分法
		(efficient element method)	(finite volume method)	(central finite difference scheme)
水 理	超、亞、混合流	O	O	O
	定量流、變量流	O	O	O
	乾濕點處理	O	O	O
	紊流模式	1、parabolic eddy viscosity model	1、parabolic eddy viscosity model	k-ε model
		2、mixing length model	2、k-ε model	
		3、k-ε model		
輸 砂	懸浮載、推移載 分離	O	O	O
	床質級配	O	O	O
	護甲作用	O	O	O
	非均勻沉澱	O	O	O
	非平衡輸砂	O	O	O
	凝聚性沉澱	O	O	X
	軟岩沖刷	O	O	X
	軟岩沖刷機制	1、泥砂磨蝕	1、泥砂磨蝕	無
		2、流功門檻	2、流功門檻	
			3、剪力門檻	
岸壁沖刷	O	O	X	
幾 何	主支合流	O	O	O
	格網挖空與河中 島	O	O	X
	變形格網	O	O	X
程式取得		免費下載	免費下載	免費下載

資料來源：經濟部水利署水利規劃試驗所網站

(三)CCHE1D、CCHE2D 模式介紹

美國國家計算水科學及工程中心為了配合台灣河川之特性，針對台灣常見之軟弱岩盤與岸壁沖刷進行 CCHE2D 模組建置與修正，軟岩模組納入 Sklar and Dietrich (2004)之泥砂磨蝕機制，並進行適當修正；岸壁沖刷模組則引用 Osman and Thorne (1988)之理論，並採用移動格網技巧使外部邊界格網可隨著岸壁沖刷過程移動。整體來說，CCHE2D 模式功能具有應用於台灣河川之一般化特性，故為本計畫所採用，而率定部分則因其輸砂公式限制採用其一維模式 CCHE1D 進行輸砂參數率定，本計畫蒐集模式之特點與其應用範圍詳如下。

CCHE1D 模式之特點係以質量守恆為基礎，引用水理條件及沉滓特性相關之經驗公式，來考量眾多輸砂影響因子，目前已成功應用於臺灣大安溪、濁水溪及高屏溪等河川之底床沖淤預測。CCHE1D 模式之計算架構可分為水理模組及輸砂模組，其中，水理模組係用以求解洪水波於河道傳遞之過程，而輸砂模組則用於模擬泥砂沉滓於河道之傳輸行為。CCHE1D 一維水理與輸砂模式是以一般化為目標，同時可考慮短期與長期河川網路沖淤過程之模式(Wu and Vieira, 2002)，其可計算變量流情況下之複式斷面河川網路，對於水工結構物之影響方面，諸如箱涵、橋樑、跌水工等皆可考慮。為使模式能更具有現況案例模擬之實用性，CCHE1D 提供了多元輸砂參數之設定，如輸砂量、沖洗載粒徑大小、河床質孔隙率、混合層厚度等，所有設定可由使用者透過使用者介面進行參數設定。

CCHE-2D 模式理論係以二維水深平均方式分析變量流與相關之泥砂輸送，能模擬複雜之變量流自由液面問題，CCHE-2D 採用有效元素法或指數差分法離散控制方程式，水理模組採用交錯格網方式求解連續方程式之水位，特別之速度校正法來求解系統方程式；變量流

模擬採用隱式時間推進法求解，洪水變量流過程衍生之河道乾濕點問題處理採用移動邊界法；紊流模式部分，除了兩種零方程渦黏滯模式，還可選用 $k-\epsilon$ 紊流模式；懸浮載傳輸為求解對流傳輸方程式，推移載傳輸採用非平衡輸砂方程式，且考慮底床坡度與彎道二次流效應。CCHE-2D 模式中水理模組建構於水深平均之納維－斯托克斯方程式，紊流剪應力項係由 Boussineq's 近似法之假設，以三種不同之紊流閉合模組求解渦黏滯係數，其中包含兩種零方程紊流閉合模組，另有二階方程之 $k-\epsilon$ 紊流閉合模組。輸砂模組係以非均勻砂方式求解非平衡輸砂方程式，非平衡輸砂計算考慮輸砂過程受懸浮載 (Suspended load)、推移載 (Bed load) 或總載 (Total load) 等不同輸砂控制方式，計算分析懸浮載與推移載之運移、底床變化以及底床泥砂篩選等泥砂輸送現象，而模式計算總載時則是忽略沖洗載 (Wish load) 對底床沖淤之影響，並採用有效元素法或指數差分法離散控制方程式進行演算。

(四)適用輸砂參數分析

邊界條件輸入部分，率定用事件根據地緣條件採用經濟部水利署水文觀測站資料如表 3-13 所列，利用大坪雨量站之雨量資料進行模擬河段上游入流量推估，馬遠橋水位站數據作為水位驗證根據，入砂量設定則根據馬遠橋含砂量測站數據進行流量與輸砂量之迴歸方程式推求，其中，大坪雨量站缺漏之雨量資料，以方圓 12km 內之雨量測站以內插法進行補遺。

表 3-13 水文測站一覽表

測站編號	測站名稱	資料年限	所屬單位
01T650	大坪雨量站	2004-2017	經濟部水利署
01T660	馬太安雨量站	2004-2019	經濟部水利署
C0Z210	瑞穗雨量站	2017-2019	中央氣象局

測站編號	測站名稱	資料年限	所屬單位
C0Z080	富源雨量站	2012-2019	中央氣象局
C1Z030	紅葉雨量站	1993-2019	中央氣象局
C1T970	大農雨量站	1996-2019	中央氣象局
C1T950	太安雨量站	1996-2019	中央氣象局
C0Z250	瑞穗林道雨量站	2018-2019	中央氣象局
2370H019	馬遠橋水位站	2004-2019	經濟部水利署
2370H019	馬遠橋含砂量測站	1994-2019	經濟部水利署

河道地形部分，本計畫採用內政部國土測繪中心 104 年地形調查資料進行底床高程建置，河床質粒徑則根據經濟部水利署 104 年秀姑巒溪水系治理規劃檢討之富源溪粒徑調查結果進行設定。曼寧粗糙係數則利用表面粒徑法，求得各河段之曼寧 n 值，對於未分析表面粒徑之區域，依照 106 年水土保持手冊並配合現場踏勘結果，選擇適當的曼寧粗糙係數(附錄 1)，再根據模擬結果進行調整。水理參數與輸砂參數相關設定詳如表 3-14 至表 3-15 所列。

表 3-14 水理相關參數設定

項目	設定值	說明
Simulation times(sec)	模擬時間依據流量歷線設定	視案例事件長度
Time steps(sec)	1	演算時間間距 $\Delta t=1$ (sec)
History file	3600	每演算 3600 個步驟(1hr),自動記錄模擬結果
Turbulence Model	Parabolic Eddy Viscosity Model	拋物線渦流黏滯係數公式
Wall slipness coefficient	0.5	系統建議值
Depth to Consider dry(m)	視區域而定	乾點與濕點水深分界
Time Iteration	Method 1 Method 2 Method 3	分別代表低中高的疊代次數
重力加速度	$9.8(m^2/sec)$	系統建議值
Von Karman constant	0.41	系統建議值
運動黏滯係數	$0.000001(m^3/sec)$	系統建議值

表 3-15 輸砂相關參數設定

項目	設定值	說明
Time Step	0.1s	計算間隔
曼寧係數	全段採 0.050	視區域而定
Number of bed layers	1	底床分層
Minimum Mixing Layer Thickness	兩倍 D_{50}	Wu and Vieira (2002) 建議值
Mean diameter(m) of each size class	視區域而定	泥砂粒徑分布
Transport Model	Total Load as Bed Load	主要考量底床載
Transport Capacity Formula	1.Wu et al. 2.Modified Ackers and White 3.Modified Engelund and Hansen 4.SEDTRA module	輸砂公式選取(根據檢定結果)
Adaptation Length for bedload	Set as 7.3 of average dune length	與推移質輸砂量變化有關
Adaptation Factor for suspended load	調適因子範圍(0.0001~1)	與懸浮質輸砂量變化有關
Schmidt Number	1	與紊流擴散項有關
泥砂比重	2.65	系統建議值
Erosion/Deposition limit	0.01	為避免泥砂沖淤過於激烈之設定值
Erodibility	YES NO	可沖刷區
Bank Erosion	Osman and Thome (1988)	近岸沖刷

輸砂公式設定部分，動床數值模式應用須引用輸砂經驗公式來推估輸砂量，但不同經驗式仍各有其適用範圍及優缺點，搭配不同輸砂公式之沖淤情形模擬也有明顯差異，因此選定適合計畫流域之輸砂公式尚需透過實測數據進行檢定。本計畫採用 CCHE1D 與 CCHE2D 進行流域土砂收支分析，輸砂公式選擇上，歸納其共有 4 種輸入設定值可供選擇，輸砂公式彙整如表 3-16 所列。

表 3-16 模式輸砂公式彙整表

公式名稱	輸砂公式	特點與說明
SEDTRA module (Garbrecht, Kuhnle and Alonson, 1995)	$C_{*t} = \sum_k p_k C_{*k}$ $d_{ek} = d_k \left(\frac{d_k}{d_m}\right)^{-x}; x = \frac{1.7}{B};$ $B = \left(\frac{d_c}{d_f}\right)^{0.5} \sum p_m$	本模組依不同粒徑大小選擇三種輸砂公式來求取輸砂量，公式分別為 Laursen's(1958)、Yang's(1973)、Meyer-Peter and Mueller's (1948)。
Wu, Wang and Jia's(2000) Formula	$\frac{q_{bk}}{p_{bk} \sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right) g d_k^3}} = 0.0053 \left[\left(\frac{n'}{n}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{\tau_b}{\tau_{ck}} - 1 \right]^{2.2}$ $\frac{q_{sk}}{p_{bk} \sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right) g d_k^3}} = 0.0000262 \left[\left(\frac{\tau_b}{\tau_{ck}} - 1\right) \frac{U}{\omega_{sk}} \right]^{1.74}$ $\tau_{ck} = 0.03 \left(\frac{p_{hk}}{p_{ek}}\right)^{0.6} (\gamma_s - \gamma) d_k$ $p_{hk} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_j}{d_k + d_j}; p_{ek} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_k}{d_k + d_j};$ $\tau_b = \gamma R_b S; R_b = (nU)^{3/2} / S^{3/4}$ $\omega_k = \sqrt{(13.95v/d_k)^2 + 1.09 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right) g d_k} - 13.95v/d_k$	應用新發展的隱顯參數(hiding and exposure factor)來建立非均勻輸砂時的啟動門檻、推移載及懸浮載。

公式名稱	輸砂公式	特點與說明
Wu, Wang and Jia's(2000) Formula	$v = 1.792 \times \frac{10^{-6}}{1.0 + 0.03368T + 0.000221T^2}; d = 0.01mm \sim 10mm$	
Modified Ackers and White's Formula (Proffitt and Sutherland,1983)	$F_{gr,k} = \varepsilon_k \frac{U_*^n}{[(\gamma_s/\gamma - 1)gd_k]^{1/2}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \log(\frac{10h}{d_k})} \right]^{1-n}$ $\varepsilon_k = \begin{cases} 1.30, & d_k/d_u > 3.7 \\ 0.53 \log\left(\frac{d_k}{d_u}\right) + 1.0, & 0.075 < d_k/d_u \leq 3.7 \\ 0.40, & d_k/d_u \leq 0.075 \end{cases}$ $G_{gr,k} = C \left(\frac{F_{gr,k}}{A} - 1 \right)^m$ $G_{gr,k} = \frac{C_k h}{p_{bk} d_k \gamma_s} \left(\frac{U_*}{V} \right)^n$	應用 Bagnold 之水流功率概念推導而成；其中 n、A、m、C 是利用大量實驗室資料對應求出。
Modified Engelund and Hansen's 1967 Formula(with Wu et al's correction factor, 2000)	$f' \phi_k = 0.1(\varepsilon_k \tau_{*k})^{5/2}$ $f' = \frac{2gSd}{U^2}; \tau_{*k} = \tau_0 / \left[\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} \right) d_k \right]$ $\phi_k = q_{t*k} / [p_{bk} \sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) gd_k^3}]$ $\varepsilon_k = \left(\frac{p_{ek}}{p_{hk}} \right)^{0.45}$	應用 Bagnold 之水流功率概念及相似性理論推導而成，並導入 Wu et al.(2000) 之校正係數 ε_k 來調整隱顯作用在非均勻輸砂中之影響

資料來源：行政院國家科學委員會專題研究計畫-流域水情模擬與預報模式精度與效能提升之研究(2012)

第四章 氣候變遷下集水區土砂管理之影響評估與風險地圖制定

第一節 氣候變遷情境分析

在氣候變遷情境分析資料方面，計畫使用 TCCIP 團隊降尺度之 IPCC AR5 情境來模擬未來雨量。在 IPCC AR5 之推估情境中，以基數 1985~2005 年為基礎資料，可將氣候變遷情境資料分成「2021~2040 年」、「2041~2060 年」、「2061~2080 年」、「2081~2100 年」等四個時期。再者，在 GCM 模式選用部分，根據童慶斌、劉子明、林嘉佑、曹榮軒(2016)的研究，歸納全臺灣所適合之 GCM 列表，而本計畫範圍屬東部地區，故 GCM 模式之選擇上可參考 bcc-csm1.1、CESM1-CAM5、NorESM1-ME、HadGEM2-AO、MRI-CGCM3 等模組最為洽當。而氣候變遷所對應之碳排放情境包含 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 等情境，未來可能發生的情境模擬評估已於後續進行說明，藉以提供氣候變遷調適策略擬定之參考。

表 4-1 臺灣之氣候分區以及全臺灣所適合之 GCM 列表

Name Rank	Rank 1	Rank 2	Rank 3	Rank 4	Rank 5
北部	HadGEM2-AO	NorESM1-ME	CSIRO-Mk3-6-0	CCSM4	bcc-csm1.1m
東北部	MRI-CGCM3	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5	HadGEM2-AO	NorESM1-ME
東部	CESM1-CAM5	GISS-E2-R	CCSM4	bcc-csm1.1	CSIRO-Mk3-6-0
西南部	HadGEM2-AO	MIROC5	bcc-csm1.1m	CCSM4	CESM1-CAM5
南部	MIROC5	GISS-E2-R	CCSM4	CSIRO-Mk3-6-0	HadGEM2-AO
北部山區	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5	NorESM1-ME	HadGEM2-AO	MRI-CGCM3
中部	MIROC5	CCSM4	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	MRI-CGCM3
南部山區	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	MIROC5	MRI-CGCM3	CCSM4
西部外島	HadGEM2-AO	MIROC5	CESM1-CAM5	bcc-csm1.1m	CCSM4
東部外島	GISS-E2-R	CSIRO-Mk3-6-0	CESM1-CAM5	CCSM4	bcc-csm1.1m
全台	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	CCSM4	MIROC5	GISS-E2-R

資料來源：氣候變遷水資源風險評估與調適決策之探討(2015)

鑑於現今已為 2019 年，即將進入到 IPCC AR5 所稱之「近未來時期 2021-2040 年」。因此，在降雨有集中化且增長的明顯趨勢下，集水區內土砂管理的因應對策，有精進與檢討之空間。茲將氣候變遷下現況與未來水土保持問題評析之創新作為歸納如圖 4-1 所示。因此，在氣候變遷的衝擊與挑戰下，集水區內土砂管理之風險評估與對策研擬，實有加以考量未來災害風險變化之必要性。

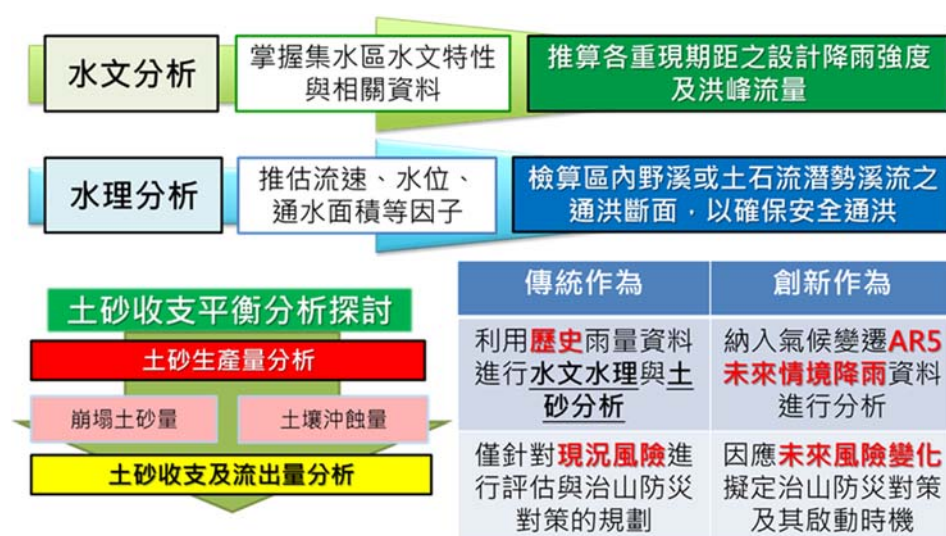


圖 4-1 氣候變遷下現況與未來之土砂問題評析方法

依據上述氣候變遷的推估情境，可得到全球氣候變遷模式之情境模擬結果。以水文量的變化而言，舉例來說，花蓮溪區域，在「近未來時期 2021-2040 年」期間，年平均雨量改變率增加了 1.26%~2.52%；而在秋季間之豐水期，更增加了 6.44%~10.61%之多。氣候變遷模擬結果顯示，近期未來水文量變化將劇變，也間接影響後續土砂管理之評估。故本計畫將納入氣候變遷情境，進行集水區土砂管理影響評估，氣候變遷情境之選定如下所述。

一、氣候變遷情境選定

本計畫已於 TCCIP 申請統計降尺度推估資料，並採用 IPCC AR5 大氣海洋環流模式 5 公里解析度推估資料，且採用 GCM 模式

「CESM1-CAM5」模組進行未來氣候變遷影響之水文量推估，並以大坪雨量站所在位置之經緯座標，對應其所屬未來雨量變化量如圖 4-2。本計畫採用碳排放情境 RCP4.5 與 RCP8.5 之常用情境與極端情況，進行未來「2021~2040 年」之近未來時期之水文變化量推估。

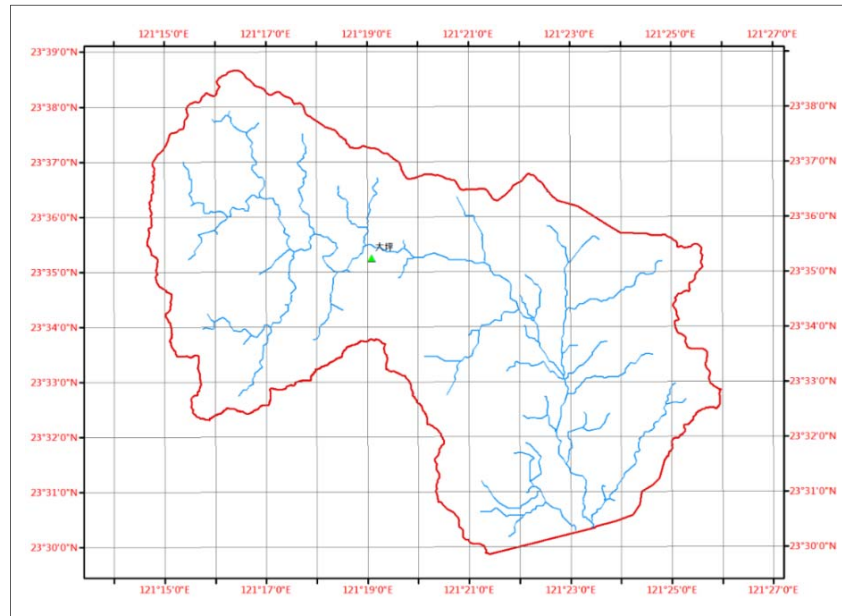


圖 4-2 計畫區域氣候變遷情境分區

水文統計與頻率分析部分，本計畫根據大坪雨量站之基期年水文觀測資料，採用年最大值法進行一日最大暴雨量之樣本篩選，統計參數之期望值、變異性以及對稱性參數如表 4-2 所列，頻率分析部分採用對數皮爾遜 III 型分布始得其最大一日暴雨量，再根據 SCS 無因次單位歷線法進行 24 小時設計線性疊加流量歷線之推估。

表 4-2 水文統計參數一覽表

統計參數	係數	表示法
期望值	平均數	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
變異性	變異數	$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
對稱性	偏度係數	$C_s = \frac{n}{(n-1)(n-2)s^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3$

二、數值模型情境分析

數值模擬部分，本計畫首先建立模擬河段之一維數值模型，採用 CCHE1D 數值模式由馬遠二號橋上游防砂壩之河道治理界點為起點，至馬遠大橋下游共計建置 24 個節點，全長 1.8 公里，由 2015 年地調所空載光達測製之 1 公尺網格數值地形作為原始地形斷面高程，CCHE1D 一維河道建模如圖 4-3 所示。完成河道模型建置後，根據 3-3 節所述之模擬參數建置集水區上游之降雨逕流模型，其模擬結果作為模擬河道之上游邊界流量輸入，逕流模擬如圖 4-4 所示，

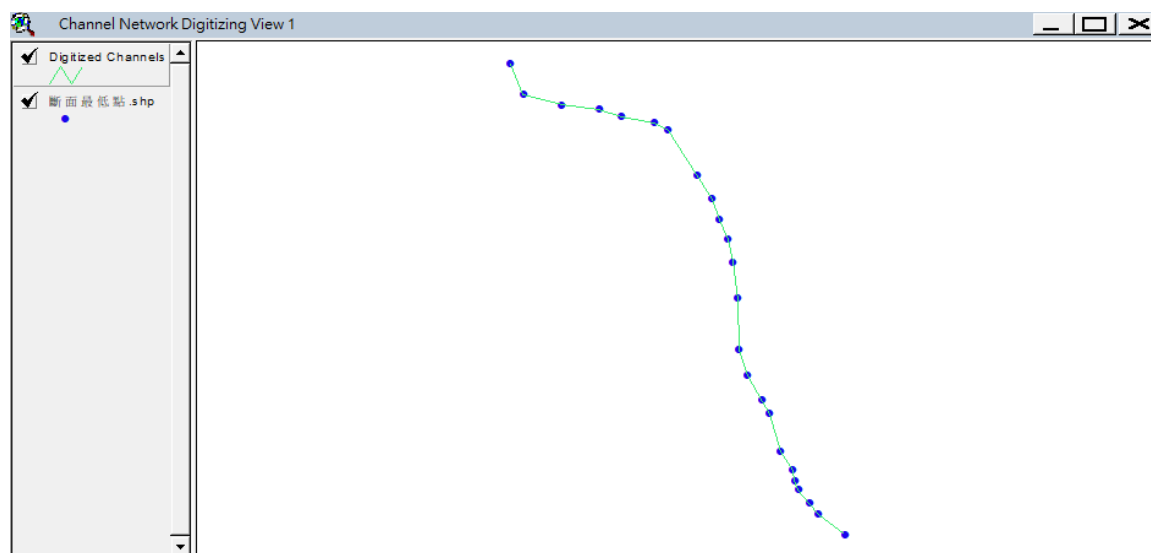


圖 4-3 一維模式建模示意圖

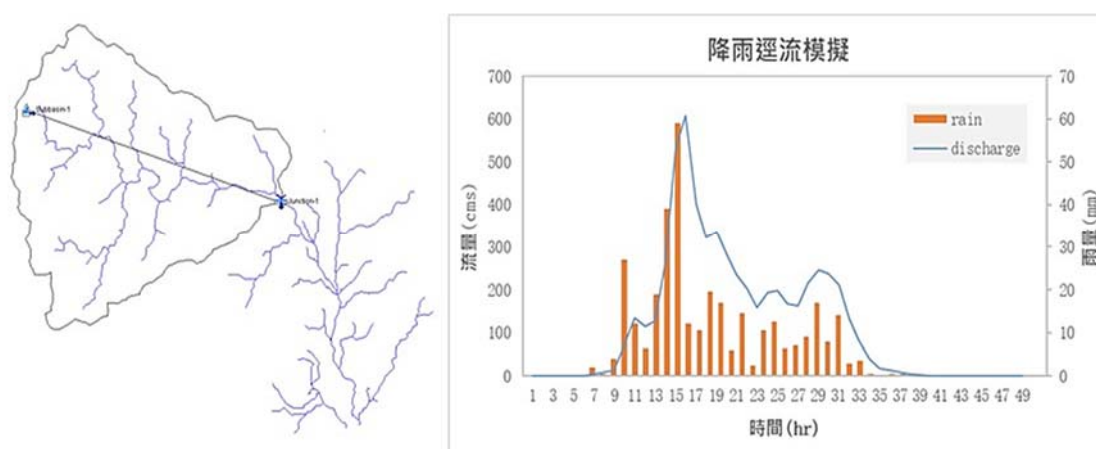


圖 4-4 降雨逕流模擬示意圖

本研究於一維水理輸砂參數校準採用 CCHE1D 一維輸砂模式，根據 2015 年地調所之地形高程資料與 2019 年現地 UAV 航測高程資料進行模擬參數之檢定，選用 2015 年至 2019 年間單場暴雨累積降雨量達 150mm 之大型水文事件作為條件輸入(圖 4-5)，進行水位與高程之率定，水位校準結果如圖 4-6 所示，以單場事件之水位率定結果顯示其水文量輸入具合理性，惟模式對小型降雨事件較為敏感，但不影響其水位校準結果。高程率定部分，採用本土化輸砂公式 Wu(2000)與 Sedtra(1995)進行沖刷趨勢之率定，率定結果如圖 4-7 所示，藍色線為地調所原始高程，橘色線為數值模擬高程，灰色線為 UAV 實測高程。結果顯示，Sedtra(1995)之高程變動較為劇烈，與實測趨勢較不相符，故輸砂公式部分選定 Wu(2000)進行後續二維沖淤分布之模擬條件。



圖 4-5 率定事件選取結果

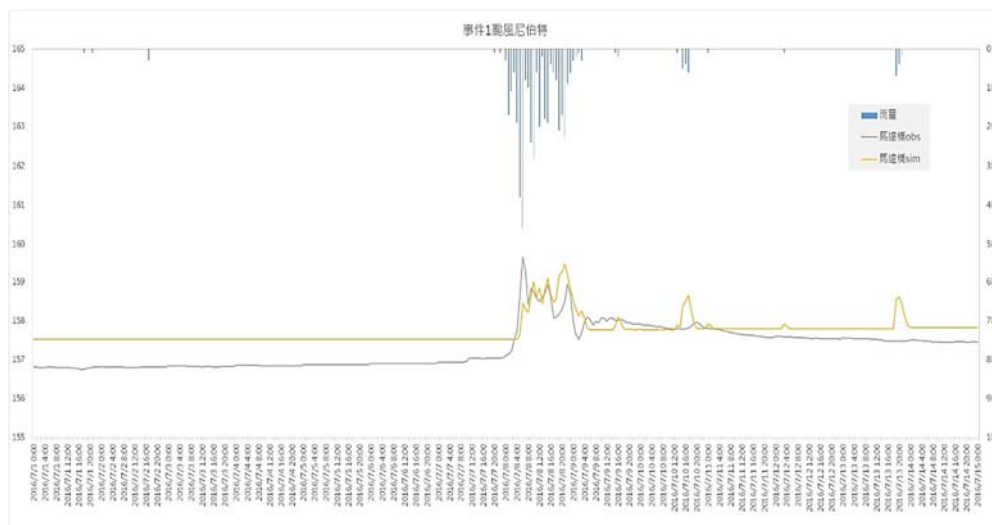


圖 4-6 單場事件一維河川水位校準

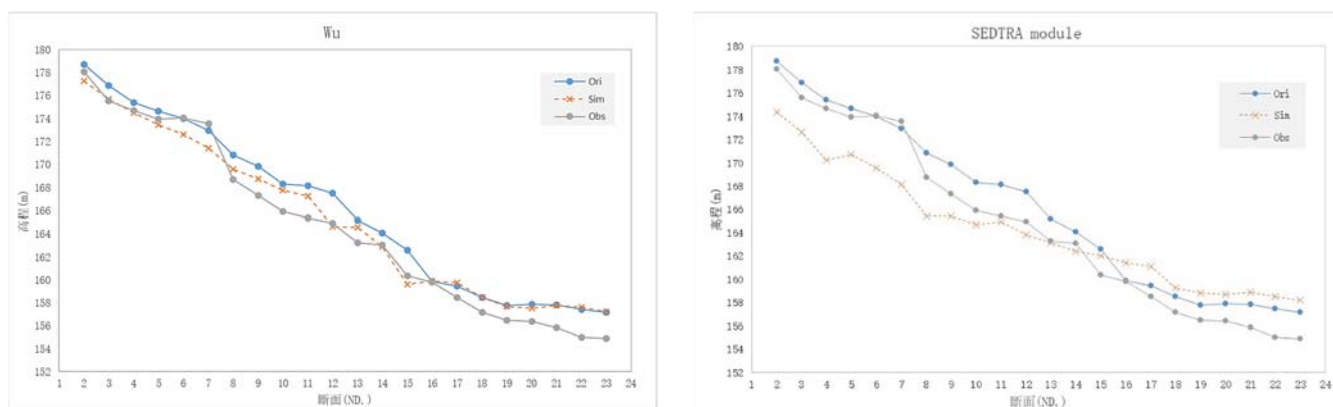


圖 4-7 一維模擬高程趨勢校準

完成一維模型之輸砂參數校準後，本研究以 CCHE2D 模式根據檢定之模擬參數進行後續情境分析，二維網格模型之建置如圖 4-8 所示，共建置 17x280 個單元。其中，本模擬河段之上游處為一防砂壩，流經中上游馬遠二號橋，模擬河段終點為馬遠大橋下游。

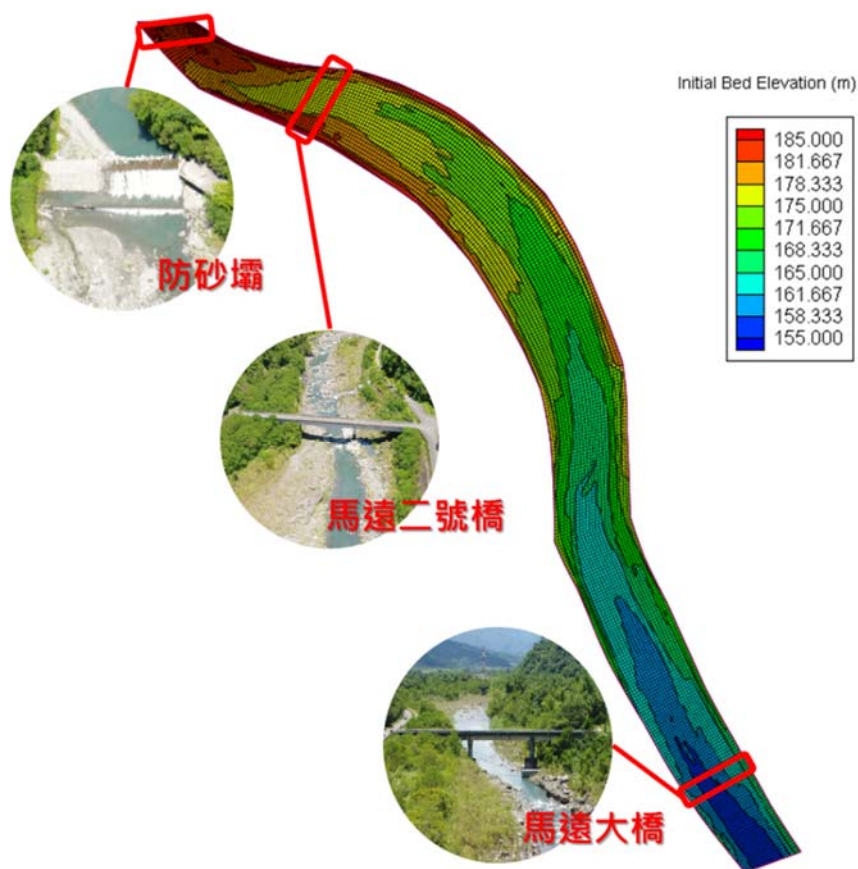


圖 4-8 二維模型建模示意圖

完成區域建模後，本文搭配 TCCIP 團隊降尺度之 IPCC AR5 情境，採用 CESM1-CAM5 模組，RCP4.5 與 RCP8.5 碳排放情境，以 50 年重現期洪水進行洪水頻率分析，模擬近未來「2021~2040 年」氣候變遷條件下之沖淤情形，並根據前一章所訂之風險評估因子進行正規化，繪製災害風險地圖，茲將相關分析結果說明如後。

第二節 各時期之土砂管理風險地圖繪製

災害風險圖是假設在氣候變遷推估情境下，經由各項指標分析後，以空間分布方式呈現各地區可能遭受特定災害的風險程度，藉由風險圖的等級區分及展示，瞭解風險區位相對分佈，能提供決策者了解區域內之風險分布，針對高風險區進行調適措施與減災規劃等，以減緩災害風險的發生。風險地圖繪製透過風險因子定義之建立，量化影響土砂災害之危害度、脆弱度、暴露度等影響因子，進一步評估其風險等級，以計算不同致災條件之風險程度。本計畫係以風險評估結果為基礎，繪製示範集水區內未來各時期之土砂風險地圖，並與基期結果進行比較，探討其受氣候變遷之影響程度。藉由各時期土砂管理風險地圖的產製與比較，可提供後續集水區因應氣候變遷影響的整體治理規劃之參考依據。本計畫風險評估時期以 1985~2005 年作為基期，評估時期為「2021~2040 年」近未來時期，模擬結果詳如下。

首先，在危害度方面，本研究將危害度風險評估指標定義為洪水事件之發生頻率，假設洪水事件為每 x 年才會發生一次之機率，其危害度 y 與 x 呈反比關係，將其定義為 $y=1/x$ 。本案例將模擬情境設定為 50 年頻率年，危害度評估因子於基期降雨、RCP4.5、RCP8.5 等情境，皆以 50 年頻率進行降雨頻率分析，故危害度皆設定為 $0.02(1/50)$ 。

再者，脆弱度風險評估部分，以 CCHE2D 模式之沖淤模擬結果進行正規化，將沖刷與淤積程度以 0 到 1 代表其沖淤的危險程度，愈

趨近 1 代表危險程度愈高。於脆弱度風險因子估算部分，該節點若為淤積段，則其脆弱度因子應為淤積土砂深度除以河段最大淤積深度，反之若該點為沖刷段，則脆弱度因子為沖刷土砂深度除以該河段最大沖刷深度。脆弱度風險評估如圖 4-9 所示，紅色為淤積，藍色為沖刷，正值數值愈大代表淤積危險度愈高，負值數值愈小代表沖刷危險度愈高。結果顯示，各情境於 50 年頻率之洪水衝擊下差異不大，防砂壩下游皆有明顯的沖刷情形。其中，基期暴雨之沖刷程度較高，RCP8.5 情境之沖刷範圍較廣。再者，在河段彎道處則以基期暴雨之流路較為穩定，而 RCP4.5 與 RCP8.5 皆有沖淤互現情形發生，流心較不穩定，馬遠大橋上游之沖淤情況則以 RCP8.5 之沖刷情形較為劇烈。

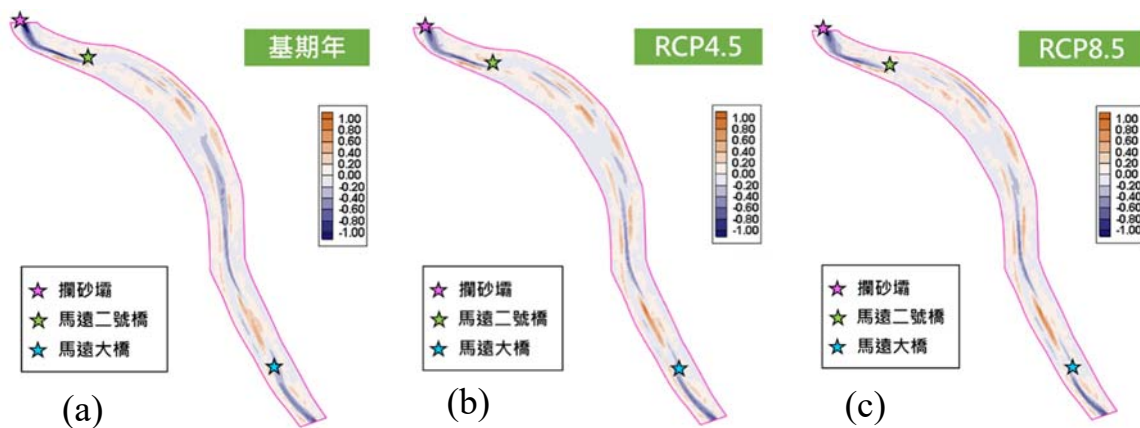


圖 4-9 脆弱度因子分析成果圖

最後，在暴露度因子評估的部分，定義為河道上可容許沖淤的空間，將可淤積與可沖刷空間進行正規化，並以 0-1 表示，趨近 1 代表可沖淤空間愈小，危險程度較高。淤積部分之估算，以河床高度至堤頂高度進行正規化，沖刷部分則以至構造物之基礎高程進行正規化，如圖 4-10 所示，代表可供沖淤的空間越小，意即此區段的危險度越高。結果顯示，淤積部分以上下游邊界之危險程度較高，乃因上下游部分未設置堤防，故可淤積深度較低。而馬遠橋上游於淤積暴露度部分也明顯看出流路較窄，可能有渠化明顯之現象，須根據現場情形評

估有無清疏之必要，避免河槽持續下刷。此外，在冲刷的部分，考量馬遠二號橋附近之流路明顯向左側偏移，需評估有無發生堤防基腳冲刷現象以免溢堤情形發生。其沖淤暴露度將與危害度、脆弱度等風險評估指標應用於後續整體河道土砂管理風險評估之估算。

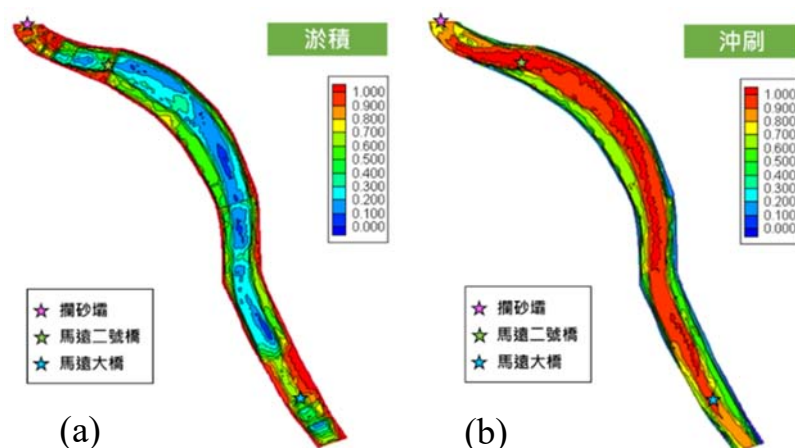


圖 4-10 暴露度因子分析成果圖

根據危害度、脆弱度以及暴露度之模擬情形，繪製風險地圖如圖 4-11 所示，紅色為淤積，藍色為冲刷，正值數值愈大代表淤積危險度愈高，負值數值愈小代表冲刷危險度愈高。結果顯示，防砂壩下游以及馬遠大橋上游區域冲刷危險程度略高；而在風險評估圖中，結構物附近之危險程度與脆弱度評估圖相比，受到暴露度指標影響，該河段的風險明顯提高。主要因構造物附近的原有冲刷情形已相當明顯，故未來可供冲刷的深度較小。因此，未來在面臨 50 年頻率之洪水衝擊時，其風險程度會明顯加劇，顯示構造物之設置尚有改善空間，建議後續應針對構造物附近河段進行監控，藉以提升該河段之安全性。此外，由各風險評估因子之危險程度繪製結果也顯示，以河段沖淤模擬結果之單一因子而言，對於河段土砂風險評估尚不能全面考量，透過本計畫針對危害度、脆弱度、暴露度等風險評估因子重新定義，始能更宏觀、具體考量河段面臨氣候變遷環境下，於不同程度之水文量衝擊、歷史災害事件沖淤結果，所造成之河道土砂風險與其影響程度，

有助於未來極端事件之河段土砂風險評估提出更全面、創新之評估思維。

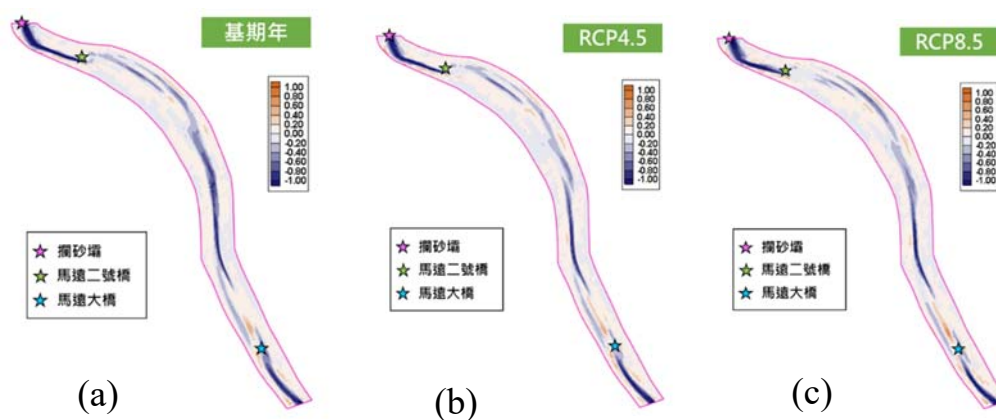


圖 4-11 河道土砂管理風險情境模擬圖

本計畫根據土砂模擬結果與現場情況進行比對，防砂壩下游至馬遠二號橋間以及馬遠大橋下游沖刷情形嚴重，實際比對現場照片(2019.08)，圖 4-12 顯示防砂壩下游確有土砂沖淤問題，並持續至馬遠二號橋(圖 4-13)。另外，現場拍攝照片顯示，馬遠大橋下游開始出現流速變快情形(圖 4-14)，推斷其為沖刷段，與模擬結果相符。由此可證，本計畫二維情境模擬結果與現場沖淤趨勢吻合，具有相當程度之可信度。

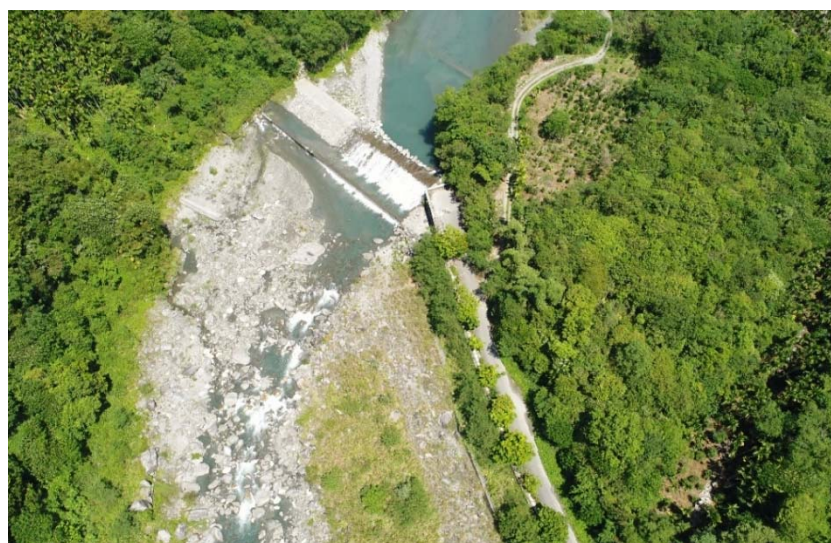


圖 4-12 防砂壩下游淘刷嚴重(2019.08)



圖 4-13 馬遠二號橋下游相對穩定(2019.08)



圖 4-14 馬遠大橋下游河道掏刷嚴重(2019.08)

第五章 氣候變遷影響之動態調適策略研擬

第一節 氣候變遷之土砂管理調適策略分析

土砂管理之策略目標，係以穩定河道為最主要目標，並應避免野溪河段間因掏刷造成周遭構造物毀損；或因土砂淤積而導致溪水溢淹兩岸影響安全。在氣候變遷極端降雨的衝擊之下，極端事件的降雨將更容易引發大規模土砂災害。本計畫綜整前述的文獻與研究，歸納與土砂管理相關策略如表 5-1 所示，可作為後續因應氣候變遷對土砂管理影響之調適策略選擇的參考。

表 5-1 土砂管理措施與方案

治理目標	治理策略	具體方案	注意事項
穩定溪床演變趨勢	1.避免縱、橫向沖刷 2.穩定流心 3.提升溪床抗沖蝕能力	1.人為溪、坡整治工程(固床工、護岸)，或設計跌水等消能措施 2.設計複式斷面深槽/佈置丁壩等方式 3.整體性佈置防砂工程或整流工程	需考量上下游河段一致性，避免沖刷區位轉移
防止大量土砂下移	1.攔阻過多土砂量體 2.降低可能土砂來源	1.依實際環境需求佈置防砂工程與整治工程 2.進行源頭水土保持工程處理(崩塌地整治/植生復育)	應避免工程過度擾動原始環境
避免影響下游排洪能力	1.加速水流通過，降低水位 2.避免土石淤積阻塞	1.護岸/堤防工程 2.針對異常土砂淤積段辦理清疏工程	1.應避免兩岸設計過度渠化 2.定期檢討清疏成效與需求性
減少衝擊環境	1.落實生態工程技術 2.實踐環境友善目標	1.減輕混凝土工程量體，或利用生態預鑄槽減少現場施工等措施 2.利用軟性土地管制措施或環境友善考量進行軟硬體措施配合進行	軟性管理措施與硬體工程設備應以不相互衝突為主目標
生態保育措施	1.維持溪流水流棲地 2.避免破壞生態廊道	1.依生態調查營造棲地環境 2.縱向：維持橫向構造物設計連續性 3.橫向：設計縱向構造物時考量生物濱水路線	應於工程生命週期間進行生態檢核，滾動式檢討相關措施合理性。

本計畫所論之土砂管理調適策略，大致可分為兩大部分：一是依照過往土砂管理措施進行策略之彙整，已列第二章第三節內容所述；二是依相關氣候變遷之參考文獻內容，將有關於土砂管理之調適策略進行彙整與討論。最後將兩大部分綜整結合，以完成調適策略之初擬列表清單，可提供後續集水區土砂管理之調適策略擬定的參考依據。

本計畫參考水利署 102 年度「曾文溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫」、「高屏溪流域因應氣候變遷防洪及土砂更新研究計畫」、「淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫」內容，初步篩選適用於花蓮地區之土砂管理調適策略，如表 5-2 所示，治理目標與對策研擬如圖 5-1。

表 5-2 氣候變遷下土砂管理之調適策略

區域	治理措施	類別	調適策略
上游 集水區 坡地 保育	1. 重點土砂生產子集水區保育治理規劃	工程	1. 子集水區崩塌地治理與土砂穩定 2. 子集水區蝕溝整治 3. 子集水區野溪清疏治理工程
	2. 上游河道異常土砂之適地暫置	工程	1. 河道土砂適地暫置區位規劃 2. 土砂粗顆粒支流暫置 3. 土砂細顆粒沉砂暫置 4. 細顆粒土砂暫置區疏濬工程
	3. 集水區雨量站網檢討	非工程	集水區雨量站網檢討
	4. 坡面土砂生產監測	工程	1. 坡面高精度地形資料監測 2. 重點崩塌地監測與對策研擬
	5. 土地利用監測與合理利用規劃	非工程	土地利用監測與合理利用規劃
	6. 土地利用與逕流管制	非工程	1. 土地利用與逕流管制法規研議
	7. 合理土地利用與山區水土保持教育推廣與訓練	非工程	1. 合理土地利用教育訓練 2. 山區水土保持教育訓練
	8. 土砂災害避難疏散規劃	非工程	崩塌、土石流及堰塞湖災害避難

區域	治理措施	類別	調適策略
中游河段及易淹水區域治理	9. 滯洪池操作系統規劃與施工	工程	1. 滯洪系統規劃 2. 流路調整規劃
	10. 排水系統調查	工程	1. 排水系統渠道調查與規劃
	11. 構造物總體檢調查	工程	1. 構造物檢驗與調查 2. 未治理部分檢討及補強作為
	12. 土砂侵蝕及堆積調查	工程	1. 土砂侵蝕與堆積調查與規劃
	13. 非自然力之土砂運移管制	非工程	1. 土方去化法規研議 2. 土方去化區域規劃 3. 土方去化路線規劃
	14. 自主防災社區與防汛志工訓練	非工程	兩岸社區與易淹水社區自主防災社區訓練與防汛志工培訓
下游區域改善計畫	15. 保全聚落區位鄰近道路規劃與路堤改善	工程	1. 保全聚落區位鄰近道路規劃 2. 保全聚落區位鄰近路堤改善
	16. 出口段流量輸砂量監測	工程	出口段流量輸砂量監測
	17. 區域避難疏散檢討	非工程	低窪地區避難疏散檢討

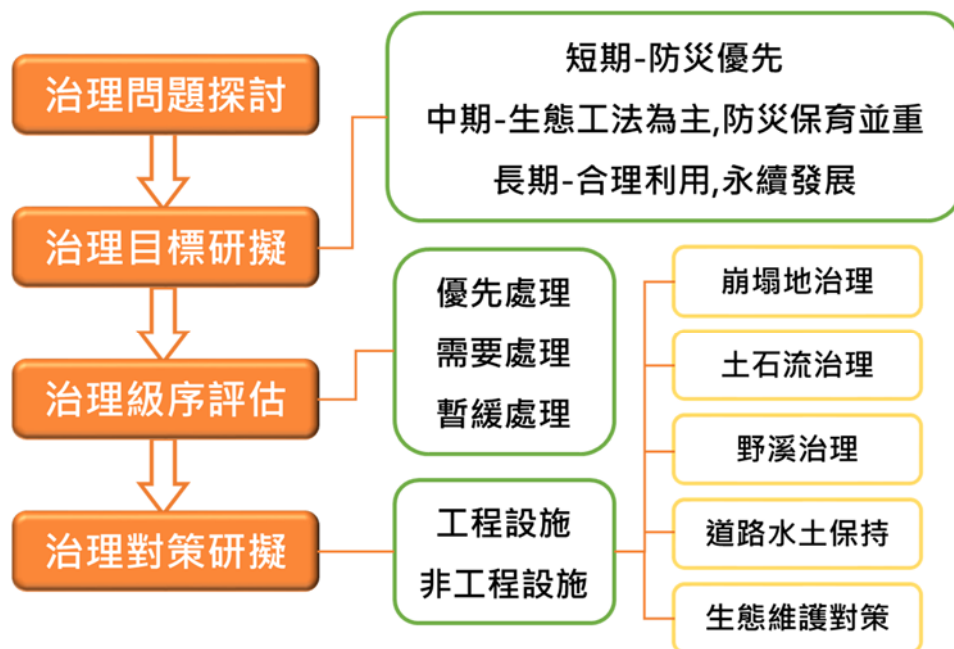


圖 5-1 集水區治理目標與對策研擬圖

第二節 調適策略規劃與啟動機制

一、調適策略路線規劃

策略路線圖訂定與調適策略各項方案之執行先後順序有關，牽扯到各方案之時間性、有效性、效益、環境衝擊以及不確定性等，必須通盤考量才能提供各策略方案之優先順序，因此調適策略路線圖即可視為調適方案執行之優先順序建議及指引。

未來各項風險地圖已根據前述分析方法分析評估完畢，然而如何透過分析結果選定適合極可能之調適策略，則須加以深入探討，本計畫以英國 UKCIP (UK Climate Impacts Programme) 調適精靈 (Adaptation Wizard) 為基礎，利用其分析架構，進行調適策略之評估選擇，然而調適精靈當面臨必須多準則考量不同層面與特性之調適策略時，為提供決策者快速搜尋及篩選之工具，並有具體可行決策之評斷依據，為使調適策略路線圖之應用更快速且有效，因此調適策略之挑選評比時，本計畫採多準則排序評估法 (multicriteria ordering method)，將各方案依此方法於各準則下排序後，將其次序加總後比較，作為調適方案執行優先順序之參考。

英國 UKCIP (UK Climate Impacts Programme) 調適精靈 (Adaptation Wizard) 提出評估調適策略的五大步驟(如圖 5-2)，在進行策略評估之前，首先必須確定系統範圍並確定系統管理目標，針對可能的影響因子進行分析(步驟 1)，接著針對現況條件風險度(步驟 2)及未來風險度(步驟 3)進行分析，配合現況條件風險度及未來風險度，則可進行策略之挑選及評估(步驟 4)，當未來風險度並未明顯提升，或是已挑選的策略是否需要進行修改或調整以及調整的時機判斷，則透過步驟 5 進行評估。



圖 5-2 UKCIP 調適精靈評估流程

UKCIP 調適精靈評估流程主要先進行現況條件之風險度評估，接著探討氣候變遷情境之風險度，而後擬定適當調適策略，最後進行監測與檢核工作。以基期降雨之風險圖顯示，以現況基期降雨模擬 50 年重現期洪水，於構造物附近之沖刷危險度較高，加入氣候變遷情境後，僅以馬遠大橋上游處，由原本的河道沖刷趨勢轉為沖淤互現，沖淤互現情形亦可能影響河道渠化愈趨明顯，尚需後續持續監測評估，但整體而言，本案例以 50 年重現期洪水之模擬並無顯著變化，皆以構造物附近之沖刷程度較為劇烈，因此構造物確有其改善評估之必要以保護其保全對象之安危，後續可針對不同重現期洪水進行土砂管理評估，更能適時提出相對應改善措施。本計畫根據河道土砂模擬結果之風險圖，由前一節所彙整之調適策略分析，提出下列幾點調適方案作為未來集水區面對土砂風險評估之規劃參考。

(一) 壩體改善：防砂壩與馬遠大橋之構造物下游掏刷情況，在不同情境之模擬結果均顯示有明顯加劇的現象。顯示防砂壩下游河段的來砂量不足，建議可針對壩體高度降低或是開口調節等方向進行研議。

(二) 辦理清疏：未來面臨 50 年重現期洪水時，各情境中游河道主深槽的沖刷現象皆有加劇的趨勢，同時兩岸產生淤積，渠化明顯，可針對異常土砂淤積段辦理清疏工程，以維持通洪斷面。

(三) 消能設計：馬遠大橋下游沖刷情形加劇，為提升溪床抗沖蝕能力，應進行河溪相關治理工程，如固床工、護岸等，或設計跌水等消能措施來據以因應。

(四) 整流工程：馬遠大橋上游河道流路改變，應考量上下游河段一致性，避免沖刷區位轉移，建議可進行整體性佈置防砂工程或丁壩、跌水工等整流工程。

(五) 清淤工程：而馬遠大橋上游之河道異常土砂淤積段，應評估是否有辦理清疏工程之必要，避免河道流路改變，洪水向兩側氾濫。

二、調適策略啟動機制

應用調適路徑動態調適策略規劃的過程中，需釐清各動態調適策略因應不同時間與不同指標下之啟動機制為何，可簡單歸納如以下三點內容：

(一) 調適策略啟動時機

調適策略執行之目的，即在於使集水區內土砂管理的風險能降低到可承受的範圍。因此，透過不同時期風險評估之成果可知，調適策略啟動的最佳時機，期使風險控制在可承受的範圍內。

(二) 調適策略動態評估

由於氣候變遷本身具備高度不確定性，調適策略啟動之後，必須加以檢核評估成效，評估何種頻率是較符合在氣候變遷不確定影響下之最佳效益。

(三) 調適策略排程

調適策略排程的方法論，需考慮的因子包括成本效益、社會接受度、技術效期等。

上述已根據土砂風險評估圖，提出五個調適方案，為評估方案實施之可行性，於多準則排序評估法部分，參照謝明昌等人(2006)提出之八項選擇標準，茲分別說明如下。

(一) 不後悔(no regrets)：對於環境、經濟皆有正面影響，可為人類帶來實質利益，短期內不會有後悔產生。

(二) 可逆性(reversibility)：短期內(十年內)可以恢復者，而不致於造成環境生態之永久破壞。

(三) 最小環境衝擊(minimize environmental impacts)：將環境衝擊減到最小，不損壞自然環境維護生態永續。考量水環境與人文面向，並避免調適策略對環境產生不必要之壓力，此可透過環境影響評估比較方案對環境之衝擊。

(四) 成本效益(cost effectiveness)：分析調適策略之成本效益，選擇最具潛力者。

(五) 公平性(equity)：適當將公共建設之效益，合理的分配給全社會，而非少數特定人。

(六) 減少脆弱度(reduce vulnerability)：儘量推動可減少脆弱度之

策略，至少應避免可能增加脆弱度者。

(七) 可完成性(ease of implementation； feasibility)：所採行的策略最好在短期內（10 年內）完成，而且不需要太大預算支出者。

(八) 有效性 (effectiveness)：在通盤考量前述選擇標準後，最後必須比較各項策略間之有效性。當然往往具高效性之策略，所需要費也相當高，惟若其同時符合前述各項標準，代表迫切需要此策略。

因構造物改善與興建尚須評估施作成果，故在不後悔選項中難以判斷，可逆性部分則以土砂清疏屬可回復性，其餘工程一經施作皆不可逆。環境衝擊部分則以上游防砂壩改善之擾動範圍較小，僅針對現有構造物進行改善，其餘皆直接施作於河床上，係對環境造成直接衝擊，整體評估如表 5-3 所示。其中，建議可優先執行的策略包括防砂壩壩體改善、中游段清疏工程及馬遠大橋上游清疏工程等。

表 5-3 土砂管理調適策略評估流程

調適策略	評估標準	不後悔	可逆性	最小環境衝擊	成本效益	公平性	減少脆弱度	可完成性	有效性	判斷結果	
										適當	待評估
(一)上游防砂壩壩體改善	*	—	+	+	+	+	+	+	+	○	
(二)中游段辦理清疏工程	+	+	—	+	+	+	+	+	+	○	
(三)馬遠大橋下游消能改善	*	—	—	+	+	+	+	+	+		○
(四)馬遠大橋上游整流工程	*	—	—	+	+	+	+	+	+		○
(五)馬遠大橋上游清疏工程	+	+	—	+	+	+	+	+	+	○	

註：「+」表符合該標準；「*」表難以判斷；「—」則表不符合該標準。

第六章 結論與建議

第一節 結論

本計畫已根據各工作項目之方法、流程及預定工作進度，完成模擬區域之土砂管理關鍵問題界定，並根據土砂管理需求提出河道土砂風險評估標準，有助後續調適策略擬定更具實務與經濟價值。而結果顯示，富源溪流域中游，由河川治理界點至下游 1.8 公里間，在面臨 50 年頻率洪水時，河道內構造物與橋梁下游河段的淘刷情形以及土砂淤積將明顯加劇，建議可透過壩體高度降低或是開口調節、增設橫向設施與整流工減緩沖刷情形，並針對土砂淤積段規劃清疏工程。而土砂管理模式建立部分，根據一維水位與高程校準結果與現場照片顯示，本計畫所採用之水文水理條件具備一定程度適用性，且後續二維情境模擬論述具有可靠性。而後，透過本計畫針對危害度、脆弱度、暴露度等風險評估因子重新定義，相比過往單以氣候變遷情境下之土砂沖淤模擬結果進行風險評估，更能考慮在河段遭受不同程度之水文量衝擊與歷史災害事件造成可沖淤空間改變，對於河段土砂風險的影響程度。最後，也透過土砂風險圖之繪製、調適策略之擬定以及試作適當性評估，有助於未來在因應極端水文事件時，提出更適宜之因應對策。

第二節 建議

本研究使用之氣候變遷情境為基期年與 RCP4.5 與 RCP8.5 之碳排放情境，皆以 50 年頻率年之結果來看僅略有差異，未來可嘗試比較其他頻率年之風險評估變化，即時擬訂適當調適策略，而本計畫所擬定之風險評估流程，未來也可嘗試應用於其他流域進行河道土砂風險評估。

參考文獻

1. 行政院農委會水土保持局，民國 102 年，《重大土砂災害集水區土石清疏與保育治理之規劃執行工作手冊》。
2. 行政院農委會水土保持局，民國 103 年，「103 年度集水區上游水土保持需求性調查」。
3. 行政院農委會水土保持局，民國 107 年，《水土保持手冊》。
4. 行政院農委會水土保持局花蓮分局，民國 105 年，「花蓮分局山坡地集水區調查規劃檢討評估及防減災計畫」。
5. 行政院農委會水土保持局南投分局，民國 100 年，「雲林縣易淹水區域排水及縣管河川上游集水區整體治理規劃」。
6. 何智超，民國 108 年，「強化水庫集水區因應氣候變遷治山、防洪及排淤調適能力」。
7. 李霽修，民國 107 年，「金岳等集水區大規模土砂收支模式及觀測站建置與評估」。
8. 范正成、楊智翔、張世駿、黃效禹、郭嘉峻，民國 102 年，「氣候變遷對高屏溪流域崩塌潛勢之影響評估」，中華水土保持學報，44(4)，頁 335-350。
9. 財團法人中興工程顧問社，民國 104 年，「坡地災害風險管理探討」。
10. 財團法人中興工程顧問社，民國 98 年，「建立石門水庫集水區豪雨誘發淺層崩塌之土方量推估模式」。
11. 國家災害防救科技中心，民國 103 年，「氣候變遷衝擊下災害風險地圖」。
12. 國家災害防救科技中心，民國 105 年，「氣候變遷下不同暖化情境差異比較」。

13. 連惠邦，民國 106 年，「土砂災害與防治」。
14. 葉克家、趙勝裕、廖仲達、林恩添，民國 100 年，「水平二維動床模式之研發及應用(二)岸壁沖刷」。
15. 游保杉、郭振民、楊道昌、曾宏偉，民國 106 年，「氣候變遷降雨量情境差異對洪旱衝擊評估(2/2)」。
16. 童慶斌、劉子明、李明旭、洪念民、宋睿唐、林嘉佑、曹榮軒，民國 102 年，「氣候變遷下區域水資源供水承载力整合評估之研究」，台灣水利，61(3)，頁 1-13。
17. 童慶斌、劉子明、林嘉佑、曹榮軒、李明旭，民國 105 年，「氣候變遷水資源風險評估與調適決策之探討」，土木水利，42 卷 4 期，頁 30-45。
18. 經濟部中央地質調查所，民國 95 年，「濁水溪侵蝕及堆積評估模式」。
19. 經濟部水利署，民國 102 年，「濁水溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫」。
20. 經濟部水利署，民國 103 年，「氣候變遷對水環境之衝擊與調適研究洪水防護(含土砂管理)」。
21. 經濟部水利署，民國 107 年，「氣候變遷下水環境跨領域動態策略技術評析與規劃」。
22. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 102 年，「高屏溪流域因應氣候變遷防洪及土砂更新研究計畫」。
23. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 102 年，「淡水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫」。
24. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 102 年，「曾文溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫」。

25. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 96 年，「美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之引進及應用研究(1/3)~(3/3)」。
26. 經濟部水利署第九河川局，民國 103 年，「秀姑巒溪水系大斷面測量計畫成果報告書」。
27. 經濟部水利署第九河川局，民國 105 年，「秀姑巒溪水系治理規劃檢討」。
28. 廖仲達、葉克家、陳春宏，民國 100 年，「二維軟弱岩盤河道冲刷模式之研發與應用」。
29. 蔡易達，民國 107 年，「集水區土砂收支數值分析模型及其應用」。
30. 鄭志維、謝慧民、黃煌輝，民國 96 年，「秀姑巒溪之河川沖淤演變趨勢模擬之探討分析」，中華水土保持學報，38(4)，頁 373-384。
31. 謝正倫、蔡元融、林彥均、陳俞旭、邱禎龍，民國 98 年，「應用動床演算於流域土砂收支模式之研究」。
32. 謝明昌、王如意、童慶斌，民國 95 年，「氣候變遷對台灣地區水資源之衝擊與調適」，第十五屆水利工程研討會論文集，頁 45-52。
33. 鍾昕育，民國 106 年，「以 CCHE1D 建立集水區水系水砂運移規律之研究」。
34. Ching-Pin Tung, Tzu-Ming Liu, Szu-Wei Chen, Kai-Yuan Ke, and Ming-Hsu Li (2014, Mar). Carrying Capacity and Sustainability Appraisals on Regional Water Supply Systems under Climate Change. British Journal of Environment and Climate Change, 4(1), 27-44.

35. C. L. Shieh, C. D. Shieh, S. Y. Lee, J. C. Chen, S. P. Lee. (2002). On the Study of an Integrated Sediment Evaluation Model for River Basins, The 15th AIT-TECRO Water Resources Program Annual Review Meeting, Taiwan.
36. Jia, Y. and Wang, Sam S.Y. (2001a). CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed., Technical Report, NCCHE-TR-2001-1.
37. Jia, Y. and Wang, Sam S.Y. (2001b). CCHE2D Verification and Validation Tests Documentation., Technical Report, NCCHE – TR-2001-2.
38. Tzu-Ming Liu, C.P. Tung, K.Y. Ke, L.H. Chuang, C.Y. Lin (2009, Oct). Application and development of a decision-support system for assessing water shortage and allocation with climate change. Paddy and Water Environment, No.7, p.301-p.311. (SCI).
39. Wu, W., Wang, S.S.Y., and Jia, Y. (2000). Nonuniform sediment transport in alluvial rivers., J. Hydr. Res., IAHR, 38(6), 427-434.
40. Wu, W., (2009). CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1)., Tech Report No. NCCHE -TR-2001-3, NCCHE, University of Mississippi, pp: 58.

附錄一、天然河流的曼寧粗糙係數 n 值

河道狀況	最小值	平均值	最大值
(一)小河流(洪水位時水面寬小於30公尺)			
(1)平原河流			
a.清潔，順直，無淺灘和深潭	0.025	0.030	0.033
b.同上，多石及雜草	0.030	0.035	0.040
c.清潔，彎曲，有深潭和淺灘	0.033	0.040	0.045
d.同上，但有些雜草和石塊	0.035	0.045	0.050
e.同上，水深較淺，河底坡度多變，平面上回流區較多	0.040	0.048	0.055
f.與 d.相同，但有較多石塊	0.045	0.050	0.060
g.流動很慢的河段，多草，有深潭	0.050	0.070	0.080
h.多雜草的河段，多深潭，或林木灘地上的過洪	0.075	0.100	0.150
(2)山區河流(河槽無草樹，河岸較陡，岸坡樹叢過洪時淹沒)			
a.河底：礫石、卵石間有孤石	0.030	0.040	0.050
b.河底：卵石和大孤石	0.040	0.050	0.070
(二)大河流(洪水位時水面寬大於30公尺)相應於上述小河流的各種情況，惟因河岸阻力較小，n值略小			
(1)斷面比較規整，無孤石或叢木	0.025		0.060
(2)斷面不規整，床面粗糙	0.035		0.100
(三)洪水時期灘地漫流			
(1)草地，無叢木			
a.短草	0.025	0.030	0.035
b.長草	0.030	0.035	0.050
(2)耕種面積			
a.未熟禾稼	0.020	0.030	0.040
b.已熟成行禾稼	0.025	0.035	0.045
c.已熟密植禾稼	0.030	0.040	0.050
(3)矮叢木			
a.稀疏，多雜草	0.035	0.050	0.070
b.不密，夏季情況	0.040	0.060	0.080
c.茂密，夏季情況	0.070	0.100	0.160

河道狀況	最小值	平均值	最大值
(4)樹木			
a.平整田地，幹樹無枝	0.030	0.040	0.050
b.同上，幹樹多新枝	0.050	0.060	0.080
c.密林，樹下小植物，洪水位在枝下	0.080	0.100	0.120
d.同上，洪水位淹及樹枝	0.100	0.120	0.160

資料來源：水土保持手冊 106 版

附錄二、期初審查意見回覆表

意見	回覆
1. P.2-11 集水區篩選建議將全省其他地區納入研究。	感謝委員意見，本案考量花蓮地區集水區之土砂收支資料建置評估近年較少相關研究，故選擇花蓮地區做為分析集水區篩選區域。
2. P.7-3 災害風險因子中危害度建議較多考慮其他因子，或納入綜合因子。	感謝委員意見，因後續進行土砂災害風險評估主要探討河道內土砂運移，其危害度因子後續定義詳如 3-2 節所示。
3. P.3-8，土砂量生產及運移過程，未納入脆弱度分析。	感謝委員意見，遵照辦理，土砂運移之脆弱度分析已定義於 3-2 節。
4. P.4-2 圖 4-1，創新作為之特性優點補充說明。	感謝委員意見，已補充如 4-5 所述。
5. P.4-3，風險評估基期及未來四期評估，期程相當長，基本資料是否足夠，短期資料推估長期是否合理。	感謝委員意見，已申請彙整歷史測站統計數據。因本案預計採用 TCCIP-AR5 情境，該情境以 1986~2005 年為基期，考量母體樣本差異性，故測站統計資料以 1986~2005 為主。
6. P.5-2，土砂管理策略對研究集水區之資料是否足夠。	感謝委員意見，本案已持續蒐集土砂管理策略與研究所需水文地文資料，詳如 2-3 節所列。
7. P.1-4，UKCIP 宜有全文和說明。	感謝委員意見，遵照辦理，詳如 5-2 節所述。
8. P.1-3 內容宜和 P.1-7 表 1-1 整合。	感謝委員意見，為清楚呈現各項工作進度安排，故於表 1-1 依據 P1-3 內容，擬定各項工作查核點，詳如表 1-1 所述。
9. P.6-1，英文縮寫宜敘明。	感謝委員意見，遵照辦理，詳如 P.1-4 所述。
10. P.2-11，集水區篩選原則建議可利用流程圖來呈現篩選步驟之先後順序及關連性，如(五)集水區治理需求性與(七)集水區治理需求之綜合考量等。	感謝委員意見，遵照辦理，詳如 2-3 節所述，請參照。

意見	回覆
11. P.3-3，土砂管理之議題分為土砂、土砂及水資源、土砂及洪災三類，其災害影響對象即風險元素不同，建議本研究可先定義風險評估之對象。	感謝委員意見，遵照辦理，風險評估定義已補充詳如 3-2 節所述。
12. P.3-7，表3-6中本研究危害度定義建議修正為「氣候變遷情境下不同 重現期之降雨量」。	感謝委員意見，遵照辦理，後續危害度風險評估因子已定義，主要考量重現期洪水發生頻率，詳如 3-2 節所述。
13. P.3-7，表3-6中集水區土砂量是否納入相關可能因子中？	感謝委員意見，遵照辦理，後續已定義風險評估因子，脆弱度主要考量重現期洪水事件下之土砂生產量，詳如 3-2 節所示。
14. P.3-7，暴露度定義為危害事件發生且造成損害時，所影響之居民、經濟價值或生產面積，應說明如何將不同對象加總比較。	感謝委員意見，遵照辦理，因本案之土砂風險主要考量河道內土砂運移，故後續暴露度定義主要考量河工構造物之暴露程度，詳如 3-2 節所示。
15. P.3-11，SDR 公式應用於本研究應小心，集水區面積太小所得 SDR 值 會很大。	感謝委員意見，遵照辦理，後續考量 SDR 公式於本案之不適用性，於河段土砂輸入部分，將採用泥砂觀測資料並進行迴歸分析。
16. P.3-11，不同降雨量所導致崩塌量、沖蝕量等土砂生產量如何於二維 水理-輸砂模式反應，此影響後續風險推估結果，請補充說明。	感謝委員意見，後續於河段土砂輸入部分，於崩塌量與沖蝕量體計算，將直接採用泥砂觀測資料並進行迴歸分析。
17. P.4-2，水文量的變化如年平均雨量改變率或豐水期增加率等時間尺度 較長，應補充說明如何應用到單一事件降雨量的推估。	感謝委員意見，後續將考量年平均雨量變化量後統計一日最大暴雨量，請參照 4-1 節。

意見	回覆
18. P.1 所提到的土砂收支平衡與 P.5-1 之圖 5-1 氣候變遷下之治理策略 概念,兩者是不同的概念,建議在做動態調適策略時宜做通用性區隔。	感謝委員意見,遵照辦理,已修正如 5-1 節所述。
19. 土砂收支平衡較通用在小規模災害。	感謝委員意見,遵照辦理,後續土砂收支平衡將考量特定河段內於氣候變遷影響下之土砂收支情形。
20. P.1-4, 三(二), 以 1985 年~2005 年作為基期理由是? 又與相對比較 來評估2006年~2018年的情形。	感謝委員意見,因本案預計採用 TCCIP-AR5 情境,該情境以 1986~2005 年為基期,考量母體樣本差異性,故測站統計資料將以 1986~2005 為主。
21. 表 2-3 土砂及水資源與水庫及堰壩相關,現在選花蓮縣,其土砂管理 影響去掉 1/3,那文獻部分,能否蒐集自來水公司的或農田水利會的資料。	感謝委員意見,本案主要目的為探討氣候變遷下土砂收支與調適策略的研擬,故係針對土砂管理單位相關之資料進行蒐集。
22. 表 2-4 集水區資訊歷年災害之處理情形,林務局或水利署部分資料是 否需要納入考量?	感謝委員意見,本案之分析對象主要為針對水土保持局轄區,故有關集水區之篩選資料係以歷年坡地災害處理情形為主。
23. 表3-12, 治理策略中水保工程並未有要加速水流通過。	感謝委員意見,遵照辦理,已修正如表 2-11 所示,請參照。
24. 花蓮地區集水區之土砂收支資料建置評估近年較少相關研究,建議可列入研究範圍。	感謝委員意見,遵照辦理,本案於示範集水區篩選主要以花蓮地區為主,詳如 2-3 節所示。
25. 氣候變遷下之集水區土砂管理策略,除以往本局提出之雙防線策略外,建議將土地利用調整、遠離危險地區等評估納入調適策略。	感謝委員意見,遵照辦理,待氣候變遷下之集水區土砂分析完成後,將在期末報告中提出。

意見	回覆
26. P.4-2第二段第一行，”現今已近2019年”，今年已是2019，文字請修正。	感謝委員意見，遵照辦理，已修正於4-1節所示。
27. 風險地圖完成後，如何後續應用在策略擬定，請補充說明。	感謝委員意見，本案完成之風險地圖可針對分析河段產出各情境下土砂堆積與淘刷分布變化，即可依據此圖資，擬定工程與非工程治理策略。

附錄三、期中審查意見回覆表

意見	回覆
1. P.2-2 韌性水城市評估與調適研究，缺第二期(2/2)計畫。	感謝委員意見，遵照辦理，已更新如表 2-1 所示。
2. P.2-6 表 2-3 國道非屬公路總局，且宜增設區道。	感謝委員意見，遵照辦理，已更新如圖 2-1 所示。
3. P.2-9 圖 2-2 資料和 P.2-10 表 2-4 不符之項次，2、3、8、12、19、23、28、37、48、49、50、59、60、65 等 14 項未出現在圖 2-2。	感謝委員意見，遵照辦理，已更新如圖 2-2 所示。
4. P.2-11 表 2-5，宜檢附集水區面積、崩塌體積。	感謝委員意見，遵照辦理，已更新如表 2-5 所示。
5. P.2-20 圖 2-4 圖宜放大並和內文整合。	感謝委員意見，遵照辦理，已更新如圖 2-4 所示，並已於敘述補充說明各水文測站分布。
6. P.2-21，宜檢附 12 條土石流潛勢溪流資料。	感謝委員意見，遵照辦理，已更新如圖 2-6 所示，其基本資料詳列於表 2-11。
7. P.2-21，圖 2-7 圖 2-10 宜補強資料分析。	感謝委員意見，遵照辦理，茲將資料用途補充於 P.2-22 所述。
8. P.2-21，12 條土石流潛勢溪流和 P.2-24 中 13 條宜一致。	感謝委員意見，遵照辦理，已更正於表 2-11 所列。
9. P.2-23，橋梁跨距不足問題存在，宜檢附佐證資料。	感謝委員意見，遵照辦理，已詳述資料來源為 2015 年經濟部水利署秀姑巒溪水系治理規劃報告。
10. P.2-24，富源溪共計有 15 個點位清疏工程和 P.2-11 表 2-5 宜一致。	感謝委員意見，表 2-5 之清疏點位以水保局集水區範圍區分(圖 2-2)，P.2-24 所述之清疏點位為集水區篩選後，以河川治理界點內之完整集水範圍(圖 2-11)之清疏工程所計。
11. P.2-24，4 處近岸崩塌地缺佐證資料。	感謝委員意見，遵照辦理，已詳述資料來源為 2015 年經濟部水利署秀姑巒溪水系治理規劃報告。

意見	回覆
12. P.2-25，圖 2-11，比例尺太小，請放大。。	感謝委員意見，遵照辦理，已修正如圖 2-11。
13. P.2-14，水保局集水區上游...調查，請述明年度，P.2-17 亦同。	感謝委員意見，遵照辦理，已更正如 P.2-14、P.2-17 所述。
14. P.2-17，初步篩選 3 處，其中萬榮有說明，和留山集水區亦請說明落選原因。	感謝委員意見，遵照辦理，已更新表格並敘述擇定篩選原則如 P.2-17 所述。
15. P.3-1 表 3-5，請說明來源機關。	感謝委員意見，遵照辦理，表 3-5 已補充資料來源。
16. P.3-11 表 3-6，請說明來源機關，又坡地災害類型與定義並未完全，且有許多相似處，本表是否有其需要。	感謝委員意見，遵照辦理，已修正。
17. 圖 3-4，Q1 及 Q2 分別代表什麼。	感謝委員意見，遵照辦理，已修正如圖 3-4 所示。
18. P.3-17，美國”土壤”保持局(或水土保持局) U.S. Soil conservation Service。	感謝委員意見，遵照辦理，已修正如 P.3-16 所示。
19. 表 4-1 請補充資料來源之年度。	感謝委員意見，遵照辦理，表 4-1 已更新資料來源年度。
20. 第四章、第五章尚未見富源溪集水區的風險地圖與調適策略。	感謝委員意見，遵照辦理，風險地圖與調適策略已於期末報告更新。

附錄四、期末審查意見回覆表

意見	回覆
1. 極端氣候下，所提之土砂管理風險評估其判斷調適策是否仍可適用。	感謝委員意見，本文已於調適策略部分以多準則排序評估法定義，於氣候變遷、極端降雨事件皆可比照評估法則。
2. 在報告中出現調適策略評估表，表內出現「不後悔」及「可逆性」，「不後悔」似乎又與暴露度(保全對象)有關，「可逆性」是否也與施作手段造成環境影響有關，是否也與最小環境衝擊有關？可否再多加說明。	感謝委員意見，遵照辦理，本文所提最小環境衝擊為透過環境影響評估選擇對於環境及經濟最小衝擊之方案，而可逆性則以短期內可恢復者作為評估標準，如築塘蓄水。不後悔則以對環境、經濟皆有正面影響，可帶來實際利益者，如推動節水措施。詳如 p.5-7 所述。
3. 土砂管理脆弱度以考量崩塌潛勢、土石流潛勢、坡面、坡度、坡向為影響沖刷深度之參數，地質或河道堆積之河床質其亦是關鍵因子，是否納入考量。	感謝委員意見，遵照辦理，本文以河道為受保護對象，為量化脆弱度因子，將脆弱度定義為沖淤土砂模擬深度與河段最大沖淤深度之比值，坡面條件之入砂以濃度回歸歷線輸入，河床質亦為模擬輸入條件，故皆已納入考量，詳如 P.3-11 所述。
4. 在極端事件下，其頻率可能大於 50 年，本案以 50 年頻率進行風險分析，是否足夠。	感謝委員意見，遵照辦理，本文主要探討情境為以 50 年頻率，判斷氣候變遷情境下 RCP4.5 與 RCP8.5 之碳排放情境之差異，未來可擬以不同重現期作為評估條件進行風險分析。
5. 有關附錄一之曼寧粗糙係數之資料來源為何？請補充說明。	感謝委員意見，遵照辦理，已補充於 p.3-24 所述，附錄一之曼寧粗糙係數來源為參考水土保持手冊工程方法篇表工-3-13 之渠道及天然河流的曼寧粗糙係數 n 值建議。
6. 本計畫研究成果如何做驗證？	感謝委員意見，本計畫於一維模式之高程校準採用現場 UAV 航測結果進行模擬條件檢定，而二維模擬為氣候變遷情境，故以現場空拍照片作為驗

意見	回覆
	證條件，僅能代表其現場沖淤趨勢與模擬結果吻合。而特定事件沖刷歷程之驗證，除水位站資料外，乃需藉由沖刷磚等量測儀器之埋設始能記錄沖刷歷程完成沖刷深度之驗證。
7. 建議可以歷史案件(極端氣候事件)回推本研究成果，做為驗證。	感謝委員意見，遵照辦理，本研究於一維參數校準採用歷史事件包括2015年至2019年之歷史颱風事件完成洪水位與沖淤趨勢之模擬參數校準(p.4-5)。
8. 氣候變遷及極端氣候之水文參數如何定義？	感謝委員意見，遵照辦理，本文於水文參數之定義除危害度將雨量量化為洪水頻率年，於脆弱度之模擬分析也考慮其水文條件將降雨逕流量作為輸入條件，本文所提出之量化標準於氣候變遷與極端氣候情境皆適用。