

國有林莫拉克風災 土砂二次災害潛勢影響評估 成果報告書



主辦機關：行政院農業委員會林務局

執行機關：國立臺灣大學

中華民國 102 年 10 月



摘 要

民國 98 年莫拉克颱風造成國有林地產生大量崩塌，評估崩塌產生土砂量、崩塌後衍生之土砂殘留於國有林地內之數量，以及對下游是否產生災害性之影響，為土砂災害防治之重要工作。因此，本計畫目標在於彙整與判釋民國 97-101 年國有林崩塌地基本資料、分析新崩塌量、土砂流出和殘留量，並調查與評估國有林殘留土砂二次災害，以提供管理單位行動方案與策略研擬之參考，並辦理研習班推廣本計畫成果，與土砂災害管理單位交流資訊。

本計畫已回顧國內外崩塌潛勢、崩塌土砂量、河川土砂流出量、二次土砂災害和災害潛勢評估之相關文獻(2-1 節)，已建立國有林地崩塌地資料品管流程(3-1 節)、土砂生產量(4-1 節)、土砂流出和土砂殘留量(4-2 節)、土砂流出量和降雨的關係(4-3 節)，以及二次土砂災害潛勢評估方法(5-1 節)。此外，也蒐集歷年崩塌地判釋結果、2,540 處崩塌體積資料與國有林保全對象的資料，並且完成三處聚落(來吉部落、新發部落、油礦巷 14 鄰)之現地、地面光達和 UAV 之調查工作(5-4、5-5 節)，作為模式率定和驗證的基礎。

民國 97~101 年國有林地事業區新增崩塌地面積總和達 60,861 公頃(3-3 節)，推估崩塌量合計 16 億 4,932 萬立方公尺，而莫拉克颱風佔 11 億 7,152 萬立方公尺。各事業區以旗山(4 億 1,373 萬立方公尺)、大武(2 億 9,100 萬立方公尺)為最多。截至 101 年底為止，全國國有林土砂殘留量仍有 9 億 5,166 萬立方公尺的土砂量，其中，莫拉克颱風的土砂殘留量為 5 億 6,010 萬立方公尺，若考慮莫拉克颱風災後的人工清淤和疏浚工程，則土砂殘留量約為 5 億 10 萬立方公尺(4-1 節)。

本計畫已完成四個集水區(阿里山溪、旗山溪、荖濃溪與太麻里溪)、阿里山鐵路，以及國有林地之殘留土砂對於保全對象(建築物、暫准建物、林道、步道、阿里山森林鐵路、森林遊樂區等)之潛勢評估(5-2 節)，並研擬二次土砂災害應急處理及長遠性土砂災害處理策





略(5-6 節)，以及教育訓練的工作(第 6 章)。

本計畫之成果可提供管理單位二次土砂災害防治和野溪清疏工程之參考，因莫拉克災區仍留有大量殘留土砂，建議後續可採滾動式的檢討各年的新增崩塌量、土砂流出量與殘留量、二次土砂災害潛勢，以掌控國有林地土砂殘留的情形。



ABSTRACT

Typhoon Morakot triggered large amount of landslides in the national forest of Taiwan in 2009. It becomes a critical task for disaster prevention to quantify the amount of landslides and residual sediment on hillslopes, as well as the evaluating of impacts on the residents downstream. Therefore, the purposes of this project are collecting and mapping the landslide inventories from 2008 to 2012; quantifying the amount of new landslides, sediment yield, and residual sediment; evaluating and surveying their susceptibility inducing secondary disasters. In addition, the results of this work had been published and promoted by holding a course for disaster prevention.

This project reviewed previous studies about landslide susceptibility, landslide erosion, sediment yield, secondary disaster, and hazards risk (Ch2 Sec1). Based on these studies, this work established (1) the process of quality control for landslide inventory (Ch3 Sec1), (2) the methods for quantifying landslide volume (Ch4 Sec1), sediment yield, and residual sediment (Ch4 Sec2), (3) the relations between rainfall and sediment yield (Ch4 Sec3) as well as, (4) the integrated approach to model the secondary disasters (Ch5 Sec1). In addition, this work had also collected the field data for model calibration and validation. The data includes multi-temporal landslide inventory, a catalogue of 2,540 of landslide with their volume, protection targets (buildings, temporal-buildings, roads, forest roads, railroads, forest recreation areas, bridges) in national forest, as well as the ground LiDAR, UAV, and field survey of three villages with high disaster potential (Ch5 Sec4 and Ch5 Sec5).

The results show that there were 60,861 ha of new landslides triggered in national forest from 2008 to 2012 (Ch3 Sec3). The total volumes of landslides were about $1,649 \times 10^6 \text{ m}^3$, where $1,171 \times 10^6 \text{ m}^3$



were triggered by Typhoon Morakot of landslide volume. In all Forest District Office, Qishan and Tawu district office had the largest amounts of landslide volume, with $414 \times 10^6 \text{ m}^3$ and $291 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectively. By the end of 2012, there are $952 \times 10^6 \text{ m}^3$ of residual sediment in the national forest, $560 \times 10^6 \text{ m}^3$ were triggered by Typhoon Morakot. By accounting the desilting of river, the residual sediment of Typhoon Morakot still had $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Ch4 Sec1).

This project modeled the susceptibility of secondary disasters for four watersheds, Ali-Shan railroad, and the protection targets (Ch5 Sec2). Based on the results, this work also evaluated emergency plans and long-term strategies for disasters prevention (Ch5 Sec6), and made the education works (Ch.6).

The achievement of this project provides useful information for the authorities of disaster prevention to plan their management strategies and engineering works. For disaster mitigation for the residual sediment of Typhoon Morakot, it is necessary to the monitor at all times of new landslides, sediment yield, residual sediment, and susceptibility of secondary disasters in future.



目 錄

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 錄	V
圖 目 錄	VII
表 目 錄	XII
第壹章 前言	1-1
1-1 計畫緣起與目的	1-1
1-2 工作範圍與項目	1-1
1-3 預計期程與成果	1-2
1-4 本階段工作項目與完成事項	1-6
第貳章 研究方法與流程	2-1
2-1 關鍵課題分析	2-1
2-1-1 國有林地降雨誘發崩塌地土石產生量及土砂流出量分析	2-1
2-1-2 國有林地殘留土砂二次災害潛勢評估	2-12
2-1-3 國有林地內保全對象災害潛勢評估	2-18
2-2 計畫背景瞭解	2-19
2-3 工作方法與步驟	2-26
第參章 國有林崩塌地判釋與歷程變化探討	3-1
3-1 彙整判釋國有林崩塌地方法與原則	3-1
3-1-1 遙測判釋崩塌地標準作業流程	3-1
3-1-2 專家判釋崩塌地基本原則	3-2
3-1-3 豪雨型崩塌地判釋地貌特徵	3-3
3-1-4 崩塌地變化歷程探討規劃	3-5
3-2 國有林崩塌地編號及基本資料屬性編列	3-17
3-3 崩塌地成果與變化歷程探討	3-20
3-3-1 流域別崩塌地變化歷程探討	3-22
3-3-2 事業區崩塌地變化歷程探討	3-50
第肆章 國有林崩塌地土石方變化情形探討	4-1
4-1 崩塌土石方估算	4-1
4-1-1 崩塌土方量估算方法	4-1
4-1-2 崩塌土方量分析結果	4-17
4-2 土砂流出量與殘留量分析	4-35
4-2-1 土砂流出量估算	4-35
4-2-2 土砂殘留量估算	4-56
4-3 降雨量與土砂流出量之關係	4-67
4-3-1 流出量和地文因子的關係	4-67
4-3-2 流出量和降雨因子的關係	4-73
第伍章 國有林殘留土砂二次災害潛勢評估	5-1
5-1 殘留土砂二次災害崩塌潛勢及土石流影響範圍率定	5-1
5-1-1 二次土砂災害分析概念與方法概述	5-1
5-1-2 土砂殘留量分布模式	5-2



5-1-3 殘留土砂二次災害土石流影響範圍模擬與率定	5-10
5-2 國有林地內保全對象之災害潛勢評估	5-20
5-2-1 斜坡單元劃設與品管	5-20
5-2-2 國有林地內保全對象潛勢評估	5-30
5-3 保全對象周緣崩塌地與殘留土砂現地調查	5-62
5-4 無人載具(UAV)中低空航拍成果	5-70
5-4-1 無人載具設備介紹	5-71
5-4-2 航拍計畫	5-75
5-4-3 航線規劃	5-76
5-4-4 航拍正射影像拼接成果	5-80
5-4-5 航拍正射影像殘留土砂範圍判釋成果	5-85
5-5 地表雷射掃描儀成果	5-88
5-5-1 地表雷射掃描儀介紹	5-89
5-5-2 LiDAR 作業流程與步驟	5-93
5-5-3 崩塌地與土砂殘留量推估成果	5-98
5-6 國有林殘留土砂處理策略研擬	5-101
第陸章 辦理成果研習會	6-1
第柒章 結論與建議	7-1
7-1 結論	7-1
7-2 建議	7-12
參考文獻	參-1
附錄一 歷次工作會議意見回覆對照表	附 1-1
附錄二 計畫範圍各年度崩塌面積與崩塌率統計表	附 2-1
附錄三 崩塌殘留土砂及周緣環境地質災害現場調查報告	附 3-1
附錄四 成果研習會簽到單	附 4-1
附錄五 成果研習會講義	附 5-1



圖 目 錄

圖 1-2-1 工作計畫架構圖.....	1-4
圖 1-2-2 國有林地內殘留土砂二次災害潛勢評估與保全對象災害潛勢評估研究 集水區範圍.....	1-5
圖 2-1-1 匹亞溪集水區土壤深度與坡度之關係圖.....	2-3
圖 2-1-2 崩塌面積與體積之冪次關係.....	2-4
圖 2-1-3 世界多處崩塌地 V-A 關係的冪次係數與類型.....	2-5
圖 2-1-4 崩塌體積-面積冪次關係式.....	2-5
圖 2-1-5 HSPF 模式、率定曲線模擬結果與實測值比較.....	2-11
圖 2-1-6 崩塌土石流動的歷程.....	2-15
圖 2-1-7 崩塌土石流動的結果驗證.....	2-15
圖 2-2-1 計畫範圍地層分布圖.....	2-22
圖 2-2-2 莫拉克颱風後國有林班地及重災區崩塌地分布.....	2-24
圖 2-3-1 工作流程圖.....	2-28
圖 3-1-1 遙測判釋崩塌地作業流程圖.....	3-6
圖 3-1-2 崩塌地目錄品管作業流程圖.....	3-7
圖 3-1-3 人為整地誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像).....	3-7
圖 3-1-4 農田誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像).....	3-8
圖 3-1-5 房舍誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像).....	3-8
圖 3-1-6 河道堆積誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像).....	3-8
圖 3-1-7 電塔及雲誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像).....	3-9
圖 3-1-8 河道不明顯之野溪崩塌地判釋標準示意圖.....	3-9
圖 3-1-9 人為開發與河道擴張崩塌地判釋標準示意圖.....	3-10
圖 3-1-10 非植生區崩塌地判釋標準示意圖.....	3-10
圖 3-1-11 出露岩壁區崩塌地判釋標準示意圖.....	3-11
圖 3-1-12 河道與鄰近邊坡崩塌地判釋標準示意圖.....	3-11
圖 3-1-13 影像資訊不足區域不列為崩塌地之情況示意圖.....	3-12
圖 3-1-14 低植生反映區域崩塌地判釋標準示意圖.....	3-12
圖 3-1-15 植生反映區域崩塌地判釋標準示意圖.....	3-13
圖 3-1-16 豪雨型特徵崩塌地示意圖.....	3-13
圖 3-1-17 崩塌地呈樹枝狀分布特徵.....	3-14
圖 3-1-18 排水路線或河谷中堆積大量土石示意圖.....	3-14
圖 3-1-19 崩塌地變化歷程與關聯性探討分析規劃.....	3-15
圖 3-1-20 崩塌地類型定義.....	3-15
圖 3-1-21 全臺國有林地崩塌頻率圖.....	3-16
圖 3-3-1 年度崩塌地於流域集水區及林地事業區分布圖.....	3-21
圖 3-3-2 年間崩塌地於流域集水區及林地事業區分布圖.....	3-21
圖 3-3-3 水庫集水區分布圖.....	3-28
圖 3-3-4 水庫集水區各年度崩塌地面積統計成果圖.....	3-29
圖 3-3-5 水庫集水區各年度崩塌率統計成果圖.....	3-30
圖 3-3-6 水庫集水區 97-98 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-31
圖 3-3-7 水庫集水區 98-99 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-32



圖 3-3-8	水庫集水區 99-100 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-33
圖 3-3-9	水庫集水區 100-101 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-34
圖 3-3-10	水庫集水區 97-98 年間崩塌率統計成果圖.....	3-35
圖 3-3-11	水庫集水區 98-99 年間崩塌率統計成果圖.....	3-36
圖 3-3-12	水庫集水區 99-100 年間崩塌率統計成果圖.....	3-37
圖 3-3-13	水庫集水區 100-101 年間崩塌率統計成果圖.....	3-38
圖 3-3-14	流域集水區範圍.....	3-39
圖 3-3-15	各個流域各年度崩塌地面積統計成果圖.....	3-40
圖 3-3-16	各個流域各年度崩塌率統計成果圖.....	3-41
圖 3-3-17	各個流域 97-98 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-42
圖 3-3-18	各個流域 98-99 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-43
圖 3-3-19	各個流域 99-100 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-44
圖 3-3-20	各個流域 100-101 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-45
圖 3-3-21	各個流域 97-98 年間崩塌率統計成果圖.....	3-46
圖 3-3-22	各個流域 98-99 年間崩塌率統計成果圖.....	3-47
圖 3-3-23	各個流域 99-100 年間崩塌率統計成果圖.....	3-48
圖 3-3-24	各個流域 100-101 年間崩塌率統計成果圖.....	3-49
圖 3-3-25	國有林地林區界(林管處)分布圖.....	3-56
圖 3-3-26	國有林地林區界各年度崩塌地面積統計成果圖.....	3-57
圖 3-3-27	國有林地林區界各年度崩塌率統計成果圖.....	3-58
圖 3-3-28	國有林地林區界 97-98 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-59
圖 3-3-29	國有林地林區界 98-99 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-60
圖 3-3-30	國有林地林區界 99-100 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-61
圖 3-3-31	國有林地林區界 100-101 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-62
圖 3-3-32	國有林地林區界 97-98 年間崩塌率統計成果圖.....	3-63
圖 3-3-33	國有林地林區界 98-99 年間崩塌率統計成果圖.....	3-64
圖 3-3-34	國有林地林區界 99-100 年間崩塌率統計成果圖.....	3-65
圖 3-3-35	國有林地林區界 100-101 年間崩塌率統計成果圖.....	3-66
圖 3-3-36	國有林地事業區分布圖.....	3-67
圖 3-3-37	國有林地事業區各年度崩塌地面積統計成果圖.....	3-68
圖 3-3-38	國有林地事業區各年度崩塌率統計成果圖.....	3-69
圖 3-3-39	國有林地事業區 97-98 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-70
圖 3-3-40	國有林地事業區 98-99 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-71
圖 3-3-41	國有林地事業區 99-100 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-72
圖 3-3-42	國有林地事業區 100-101 年間崩塌地面積統計成果圖.....	3-73
圖 3-3-43	國有林地事業區 97-98 年間崩塌率統計成果圖.....	3-74
圖 3-3-44	國有林地事業區 98-99 年間崩塌率統計成果圖.....	3-75
圖 3-3-45	國有林地事業區 99-100 年間崩塌率統計成果圖.....	3-76
圖 3-3-46	國有林地事業區 100-101 年間崩塌率統計成果圖.....	3-77
圖 4-1-1	臺灣地質分區與崩塌地樣本分布.....	4-5
圖 4-1-2	崩塌地橫斷面量測法.....	4-7
圖 4-1-3	南澳地區崩塌地基本資料與相片.....	4-7
圖 4-1-4	南澳地區崩塌橫斷面與平均深度.....	4-9



圖 4-1-5 穩健回歸分析與最小平方法之差異.....	4-12
圖 4-1-6 各地質分區之崩塌體積-面積關係式.....	4-14
圖 4-1-7 民國 97-101 年間國有林各事業區之崩塌量.....	4-22
圖 4-1-8 民國 97-101 年間國有林各流域之崩塌量.....	4-23
圖 4-1-9 民國 97-98 年間事業區單位面積崩塌量.....	4-25
圖 4-1-10 民國 98-99 年間事業區單位面積崩塌量.....	4-26
圖 4-1-11 民國 99-100 年間事業區單位面積崩塌量.....	4-27
圖 4-1-12 民國 100-101 年間事業區單位面積崩塌量.....	4-28
圖 4-1-13 旗山溪與荖濃溪崩塌土石變化與分布.....	4-31
圖 4-1-14 太麻里溪崩塌土石變化與分布.....	4-33
圖 4-1-15 阿里山溪崩塌土石變化與分布.....	4-34
圖 4-2-1 土砂流出量測站與補遺位置.....	4-36
圖 4-2-2 各輸砂量測站之流量-輸砂量率定曲線.....	4-40
圖 4-2-3 石門水庫歷年淤積量、清淤量和霞雲站土砂入流量計算結果比較..	4-49
圖 4-2-4 石門水庫歷年水庫入庫總土砂量和霞雲站土砂流出量.....	4-50
圖 4-2-5 里嶺大橋測站時序輸砂量計算結果.....	4-51
圖 4-2-6 國有林班地土砂流出量計算結果.....	4-52
圖 4-2-7 各事業區土砂流出量統計結果.....	4-56
圖 4-2-8 各流域土砂流出量統計結果.....	4-56
圖 4-2-9 集集地震後濁水河流域之新增崩塌土砂量.....	4-58
圖 4-2-10 各區域土砂殘留量變化.....	4-60
圖 5-1-1 土砂二次災害潛勢概念圖.....	5-2
圖 5-1-2 來吉部落崩塌地形變化量測結果.....	5-5
圖 5-1-3 新發里後方土石流模擬結果.....	5-7
圖 5-1-4 新發里土石流現地調查結果.....	5-7
圖 5-1-5 旗山溪與荖濃溪土砂殘留量分布模擬結果.....	5-8
圖 5-1-6 太麻里溪土砂殘留量分布模擬結果.....	5-9
圖 5-1-7 阿里山溪與阿里山鐵路土砂殘留量分布模擬結果.....	5-9
圖 5-1-8 二次土砂災害分析流程圖.....	5-10
圖 5-1-9 崩塌模式率定(民國 97 年)與驗證(民國 98 年)結果.....	5-15
圖 5-1-10 重現期 100 年延時 24 小時降雨和崩塌潛勢預測結果.....	5-16
圖 5-1-11 旗山溪與荖濃溪二次土砂災害模擬結果.....	5-18
圖 5-1-12 太麻里溪二次土砂災害模擬結果.....	5-19
圖 5-1-13 阿里山溪與阿里山鐵路二次土砂災害模擬結果.....	5-19
圖 5-2-1 斜坡單元兩種定義示意圖.....	5-26
圖 5-2-2 集水區重疊法劃分示意圖.....	5-26
圖 5-2-3 斜坡單元電腦自動化劃分作業流程.....	5-27
圖 5-2-4 Hydrology 模組之網格流向編碼定義.....	5-28
圖 5-2-5 Hydrology 模組之網格累積流量編碼定義.....	5-28
圖 5-2-6 正反地形產生之集水區成果比較圖.....	5-28
圖 5-2-7 斜坡單元合併與劃設結果—以旗山溪與荖濃溪為例.....	5-29
圖 5-2-8 國有林地內保全對象潛勢評估流程.....	5-42
圖 5-2-9 阿里山溪斜坡單元二次土砂災害堆積深度分布圖.....	5-42



圖 5-2-10	旗山溪與荖濃溪斜坡單元二次土砂災害堆積深度分布圖	5-43
圖 5-2-11	太麻里溪斜坡單元二次土砂災害堆積深度分布圖	5-44
圖 5-2-12	阿里山鐵路範圍斜坡單元二次土砂災害堆積深度分布圖	5-44
圖 5-2-13	阿里山溪斜坡單元二次土砂災害土砂量分布圖	5-45
圖 5-2-14	旗山溪與荖濃溪斜坡單元二次土砂災害土砂量分布圖	5-46
圖 5-2-15	太麻里溪斜坡單元二次土砂災害土砂量分布圖	5-47
圖 5-2-16	阿里山鐵路範圍斜坡單元二次土砂災害土砂量分布圖	5-47
圖 5-2-17	阿里山溪斜坡單元崩塌潛勢分級圖	5-48
圖 5-2-18	旗山溪與荖濃溪斜坡單元崩塌潛勢分級圖	5-49
圖 5-2-19	太麻里溪斜坡單元崩塌潛勢分級圖	5-50
圖 5-2-20	阿里山鐵路範圍斜坡單元崩塌潛勢分級圖	5-50
圖 5-2-21	保全對象崩塌影響範圍評估原則	5-51
圖 5-2-22	阿里山溪建築物潛勢分級圖	5-52
圖 5-2-23	旗山溪與荖濃溪建築物潛勢分級圖	5-53
圖 5-2-24	太麻里溪建築物潛勢分級圖	5-54
圖 5-2-25	阿里山溪路網潛勢分級圖	5-54
圖 5-2-26	旗山溪與荖濃溪路網潛勢分級圖	5-55
圖 5-2-27	太麻里溪路網潛勢分級圖	5-56
圖 5-2-28	阿里山鐵路與阿里山溪流域範圍圖	5-56
圖 5-2-29	阿里山鐵路範圍建築物潛勢分級圖	5-57
圖 5-2-30	阿里山鐵路範圍路網潛勢分級圖	5-57
圖 5-2-31	全臺國有林班地斜坡單元崩塌潛勢分級圖 (100 年重現期 72 小時累積 降雨).....	5-58
圖 5-2-32	全臺國有林建築物與暫准建物潛勢分級圖	5-60
圖 5-2-33	全臺國有林路網潛勢分級圖	5-61
圖 5-3-1	現地調查流程	5-69
圖 5-4-1	UAV 航拍範圍空間分布圖	5-70
圖 5-4-2	UAV 系統整體架構圖	5-71
圖 5-4-3	Sky Arrow 55 UAV.....	5-73
圖 5-4-4	地面導控車	5-74
圖 5-4-5	UAV 操作使用程序標準作業流程	5-77
圖 5-4-6	UAV 起降場地	5-78
圖 5-4-7	UAV 飛行航線規劃	5-79
圖 5-4-8	飛行軌跡紀錄	5-81
圖 5-4-9	飛行高度紀錄	5-82
圖 5-4-10	自動導航模式作業	5-82
圖 5-4-11	飛行軌跡紀錄與照片涵蓋範圍	5-83
圖 5-4-12	UAV 拍攝影像拼接校正成果	5-84
圖 5-4-13	UAV 拍攝正射影像成果	5-84
圖 5-4-14	UAV 拍攝拼接影像彙整於 Google Earth 平臺成果	5-85
圖 5-4-15	殘留土砂現地調查軌跡及邊坡全貌照片	5-86
圖 5-4-16	殘留土砂區域判釋結果	5-87
圖 5-5-1	地表雷射掃描作業流程與步驟	5-94





圖 5-5-2 eGPS 儀器	5-94
圖 5-5-3 LiDAR 掃描儀	5-94
圖 5-5-4 點雲拼接示意圖	5-95
圖 5-5-5 轉絕對坐標設置控制點示意圖	5-96
圖 5-5-6 數值地表模型(DSM)產製示意圖	5-96
圖 5-5-7 數值高程模型(DEM)產製示意圖	5-97
圖 5-5-8 土砂殘留量評估與計算示意圖	5-97
圖 5-5-9 高雄市六龜區新發里 14 鄰新發部落後方邊坡掃描點雲處理完成結果	5-99
圖 5-5-10 新發部落後方邊坡 LiDAR 高程分布圖	5-99
圖 5-5-11 新發部落後方邊坡莫拉克颱風前高程分布圖	5-100
圖 5-5-12 新發部落後方邊坡高程差異分布圖	5-100
圖 5-5-13 新發部落後方邊坡天秤颱風後之坡度分布圖	5-101
圖 5-6-1 荖濃溪及旗山溪流域集水區土砂二次土砂災害厚度分布圖	5-103
圖 5-6-2 太麻里溪流域集水區土砂二次土砂災害厚度分布圖	5-104
圖 5-6-3 阿里山溪流域集水區土砂二次土砂災害厚度分布圖	5-104
圖 5-6-4 殘留土砂災害處理策略示意圖	5-106
圖 5-6-5 荖濃溪及旗山溪流域集水區土砂處理策略重點區域分布圖	5-112
圖 5-6-6 太麻里溪流域集水區土砂處理策略重點區域分布圖	5-113
圖 5-6-7 阿里山溪流域集水區土砂處理策略重點區域分布圖	5-113
圖 5-6-8 新發部落崩塌影響範圍模擬結果	5-120
圖 5-6-9 工程配置規劃示意圖	5-121
圖 5-6-10 監測及災害預警系統規劃配置示意圖	5-121
圖 5-6-11 土石流疏散避難圖	5-122
圖 6-1-1 國立臺灣大學校區平面圖	6-2
圖 6-1-2 成果研習會，報到及前置作業	6-4
圖 6-1-3 成果研習會，長官致詞	6-4
圖 6-1-4 成果研習會，講師群	6-5
圖 6-1-5 成果研習會，上課及實機操作與討論	6-5
圖 7-1-1 計畫進度甘梯圖	7-14

表 目 錄

表 1-4-1	應完成事項與本報告已完成事項對照表.....	1-6
表 2-1-1	不同崩塌坡度可能引發之崩塌深度.....	2-2
表 2-1-2	崩塌地產砂量模式比較.....	2-7
表 2-1-3	崩塌體積與面積關係.....	2-8
表 2-1-4	土砂流出量分析方法比較.....	2-14
表 2-2-1	林務局管轄事業區林班地之土地利用類型面積.....	2-20
表 2-2-2	計畫範圍之坡度分級.....	2-21
表 2-2-3	民國 98-101 年颱風事件和重大土石災情統計.....	2-25
表 3-1-1	崩塌地判釋五項研判準則.....	3-6
表 3-2-1	崩塌地目錄基本資料表.....	3-18
表 3-2-2	崩塌地目錄附屬資料表.....	3-19
表 4-1-1	臺灣七大地質區.....	4-2
表 4-1-2	各地質分區之崩塌體積-面積樣本.....	4-4
表 4-1-3	崩塌地量測結果統計.....	4-10
表 4-1-4	崩塌體積-面積關係式統計結果.....	4-13
表 4-1-5	民國 97-101 年國有林事業區崩塌量統計表.....	4-20
表 4-1-6	民國 97-101 年國有林各流域之崩塌量統計表.....	4-21
表 4-2-1	土砂流出量測站與補遺位置.....	4-37
表 4-2-2	土地利用 CN 值對照表.....	4-38
表 4-2-3	各輸砂量測站修正流量-輸砂量參數率定結果.....	4-39
表 4-2-4	石門水庫歷年淤積量、清淤量和霞雲站土砂入流量統計表.....	4-48
表 4-2-5	國有林各事業區土砂流出量統計結果.....	4-54
表 4-2-6	各流域土砂流出量統計結果.....	4-55
表 4-2-7	集集地震後各事業區之流出量和土砂殘留量.....	4-59
表 4-2-8	各事業區土砂殘留量分析結果.....	4-65
表 4-2-9	各流域土砂殘留量分析結果.....	4-66
表 5-1-1	土砂流出量與土砂二次災害潛勢評估參數設定.....	5-4
表 5-1-2	降伏應力建議值參考表.....	5-4
表 5-1-3	二元迴歸模式變數統計量.....	5-11
表 5-1-4	二元迴歸統計分析結果(數值變數).....	5-12
表 5-1-5	二元迴歸統計分析結果(類別變數).....	5-13
表 5-1-6	模式率定結果預測成功率.....	5-14
表 5-1-7	模式驗證結果預測成功率.....	5-14
表 5-1-8	殘留土砂和二次土砂災害模擬統計表.....	5-16
表 5-2-1	斜坡單元崩塌潛勢分級閾值率定表.....	5-37
表 5-2-2	四個研究集水區流域範圍建築物與暫准建物潛勢分級統計.....	5-37
表 5-2-3	四個研究集水區流域範圍路網潛勢分級統計.....	5-38
表 5-2-4	全臺國有林管理處範圍建築物與暫准建物潛勢分級統計.....	5-39
表 5-2-5	全臺國有林管理處範圍路網潛勢分級統計.....	5-40
表 5-2-6	全臺國有林森林遊樂區影響面積統計.....	5-41
表 5-3-1	聚落基本資料調查表.....	5-65



表 5-3-2 崩塌/地滑調查表.....	5-66
表 5-3-3 土石流調查表.....	5-67
表 5-3-4 既有保全對象調查表.....	5-68
表 5-4-1 UAV 載具規格.....	5-73
表 5-4-2 Sky Arrow55 UAV 載具特色.....	5-73
表 5-4-3 數位相機規格表.....	5-75
表 5-4-4 航拍規劃資訊.....	5-78
表 5-4-5 影像外方位姿態(EO)資料欄位.....	5-81
表 5-5-1 地表雷射掃描儀器(RIEGL VZ-1000)諸元性能與掃描距離表現.....	5-92
表 5-6-1 四流域集水區土砂殘留重點區以及殘留土砂統計表.....	5-102
表 5-6-2 災害治理對象與相關治理工程.....	5-109
表 5-6-3 本計畫四流域集水區殘留土砂災害處理策略研擬.....	5-111
表 5-6-4 新發部落高市 DF107 土石流潛勢溪流既有整治設施表.....	5-116
表 5-6-5 應急土砂災害處理原則.....	5-118
表 5-6-6 高市 DF107 集水區治理工程項目與規劃彙整表.....	5-118
表 5-6-7 監測預警設備項目及功能.....	5-119
表 6-1-1 成果研習會報名表.....	6-2
表 6-1-2 成果研習會課程規劃.....	6-3



第壹章 前言

1-1 計畫緣起與目的

民國 98 年莫拉克颱風，雨勢集中降雨時程延長，造成林務局南投處、嘉義處、屏東處、及臺東處轄內國有林崩塌情形嚴重，並衍生嚴重土砂災害，依本局農林航空測量所於民國 99 年 11 月印發之「莫拉克颱風崩塌地航攝調查報告」(林務局農林航空測量所 叢刊第 118 號)顯示，該等 4 個管理處災前崩塌面積為 1 萬 3,786 公頃，災後增加為 3 萬 2,923 公頃，計新增崩塌面積為 1 萬 9,137 公頃；且為逐年管控全島崩塌程度，已逐年分別完成民國 99 年及 100 年全島崩塌地判釋與災害分析工作；惟對於崩塌所生土砂部分，目前仍未有明確調查，故為瞭解該等崩塌後衍生之土砂殘留於國有林地內之數量，以及對下游是否產生災害性之影響，爰辦理本項計畫。

1-2 工作範圍與項目

依據「國有林莫拉克風災土砂二次災害潛勢影響評估」委託計畫需求說明書內容規定，臺灣大學水工試驗所(以下簡稱臺大水工所)按各工作項日期程繪製工作計畫架構圖，如圖 1-2-1 所示，主要工作為(1)彙整判釋國有林崩塌地基本資料、(2)分析土石方之變化情形、(3)國有林殘留土砂二次災害潛勢評估及(4)辦理研習班等四項，而各工作項目之研究方法與步驟，詳見第貳章內容。茲就本計畫工作範圍及項目說明如下：

一、彙整判釋國有林崩塌地基本資料

- (一) 蒐集彙整自民國 98 年至 101 年底之國有林崩塌地資料，逐年建立國有林崩塌地之編號與基本資料；上開基本資料至少應包含編號、行政區域(包含縣市鄉鎮、及事業區林班別)、座標(本計畫座標系統均為 TWD97 座標)、崩塌面積等。
- (二) 國有林崩塌地資料，可參酌本局農林航空測量所於 99 年 11 月印發之「莫拉克颱風崩塌地航攝調查報告」，及 99 年與 100





年崩塌地判釋資料為基礎，以事業區及流域別分析崩塌地之變化。

二、分析土石方之變化情形

- (一) 建立國有林崩塌地土石產生量之估算原則、方法及步驟。
- (二) 以民國 98 年至 101 年底止，逐年分析估算國有林崩塌地所產生之崩塌土砂、留置於國有林地內之土砂、及土砂流出量等。
- (三) 分析自 98 年至 100 年底止，以上開國有林土砂生產量以及流出量等資料，同時配合上開期間內之氣象降雨資料，分析降雨量與土砂流出量之關係。

三、國有林殘留土砂二次災害潛勢評估

- (一) 研析全臺國有林地內殘留土砂二次災害潛勢評估原則、方法及步驟，並據以評估國有林地內保全對象之災害潛勢。
- (二) 以 98 年莫拉克災區之旗山溪、荖濃溪、太麻里溪、阿里山溪等四個集水區，進行其上游國有林地內殘留土砂二次災害潛勢評估與保全對象災害潛勢之現勘工作，作為評估與驗證之標的。
- (三) 就上開旗山溪、荖濃溪、太麻里溪、阿里山溪等 4 集水區之殘留土砂，提出處理策略、原則與方式。

- ## 四、辦理研習班 1 班，期間以 1 天為原則，參加人員以 60 人計之；
- 課程內容至少應含崩塌土砂評估方式與流程、崩塌土砂二次災害評估、國有林降雨與土砂流出量等內容。

1-3 預計期程與成果

受託廠商應於工作執行期間，須依雙方契約之規定提送各項報告初稿計 25 份，本團隊將依甲方規定擇期舉行審查會議。另外，得視需要於履約期限內，不定期召開工作會報，各期報告提交內容如下：





- 一、期初報告(工作執行計畫)：應於議價後 40 日曆天內提出，其內容應包括：工作目標、工作項目及內容、工作計畫及方法、預定工作進度及人力配置、預期成果等。
- 二、第 1 次期中報告：應於 101 年 8 月 30 日前提出，依期初會議結論展延至 9 月 30 日；完成內容至少應有：
 - (一) 完成 98~99 年崩塌地資料蒐集與判釋工作。
 - (二) 提出崩塌地土石方估算原則、方法及步驟。
- 三、第 2 次期中報告：應於 101 年 11 月 30 日前提出；完成內容至少應有：
 - (一) 完成 98~100 年崩塌地資料蒐集與判釋工作。
 - (二) 提出 98~100 年國有林地土砂變化情形。
 - (三) 提出土砂二次災害潛勢評估原則、方法及步驟等。
- 四、第 3 次期中報告：應於 102 年 4 月 30 日前提出；完成內容至少應有：
 - (一) 完成 98~101 年崩塌地資料蒐集與判釋工作。
 - (二) 估算民國 98~101 年國有林土石方、殘留與變化量。
 - (三) 現勘旗山溪、荖濃溪、太麻里溪、阿里山溪等莫拉克災害流域，初步提出上開流域上游國有林地內殘留土砂二次災害潛勢評估與驗證等工作成果。
 - (四) 於第 3 次期中報告後及期末報告提送前，辦理研習班乙班。
- 五、期末報告：內容應包括全部工作項目，並於 102 年 8 月 31 日前提出。
- 六、成果報告：於期末審查會議通過後 21 日曆天內繳交(不含期末審查會議當日)，提送本計畫成果如下：
 - (一) 成果報告書及光碟各 50 份(照片部分需彩色影印)。
 - (二) 上開電子檔案光碟內，應包含成果報告電子檔(MS-Word 格式：*.doc 或.docx)、照片(*.jpg 或*.tiff 格式)及各期報告(含簡報)





之電子檔(MS-Power Point 格式：*.ppt 或.pptx)。

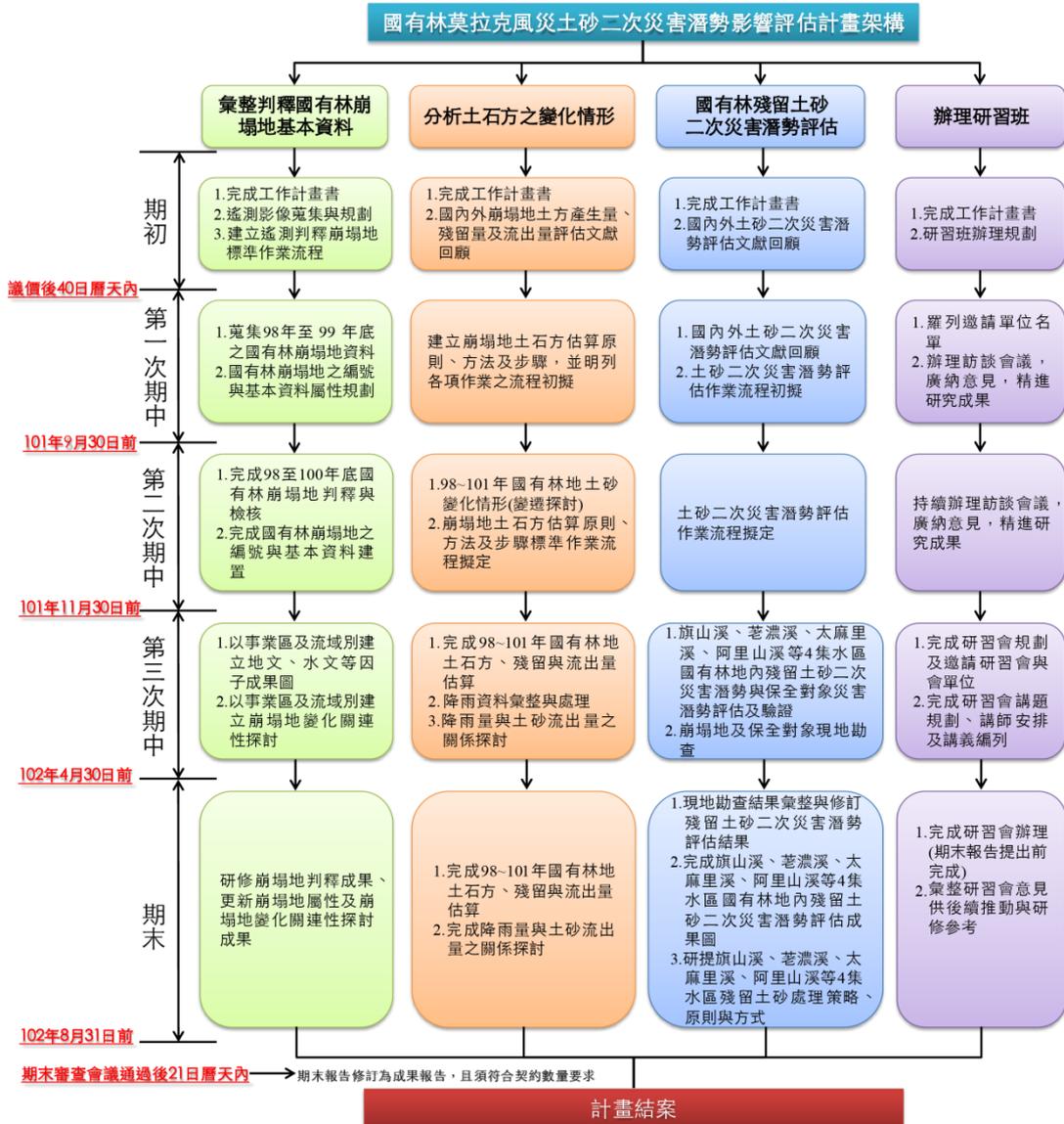
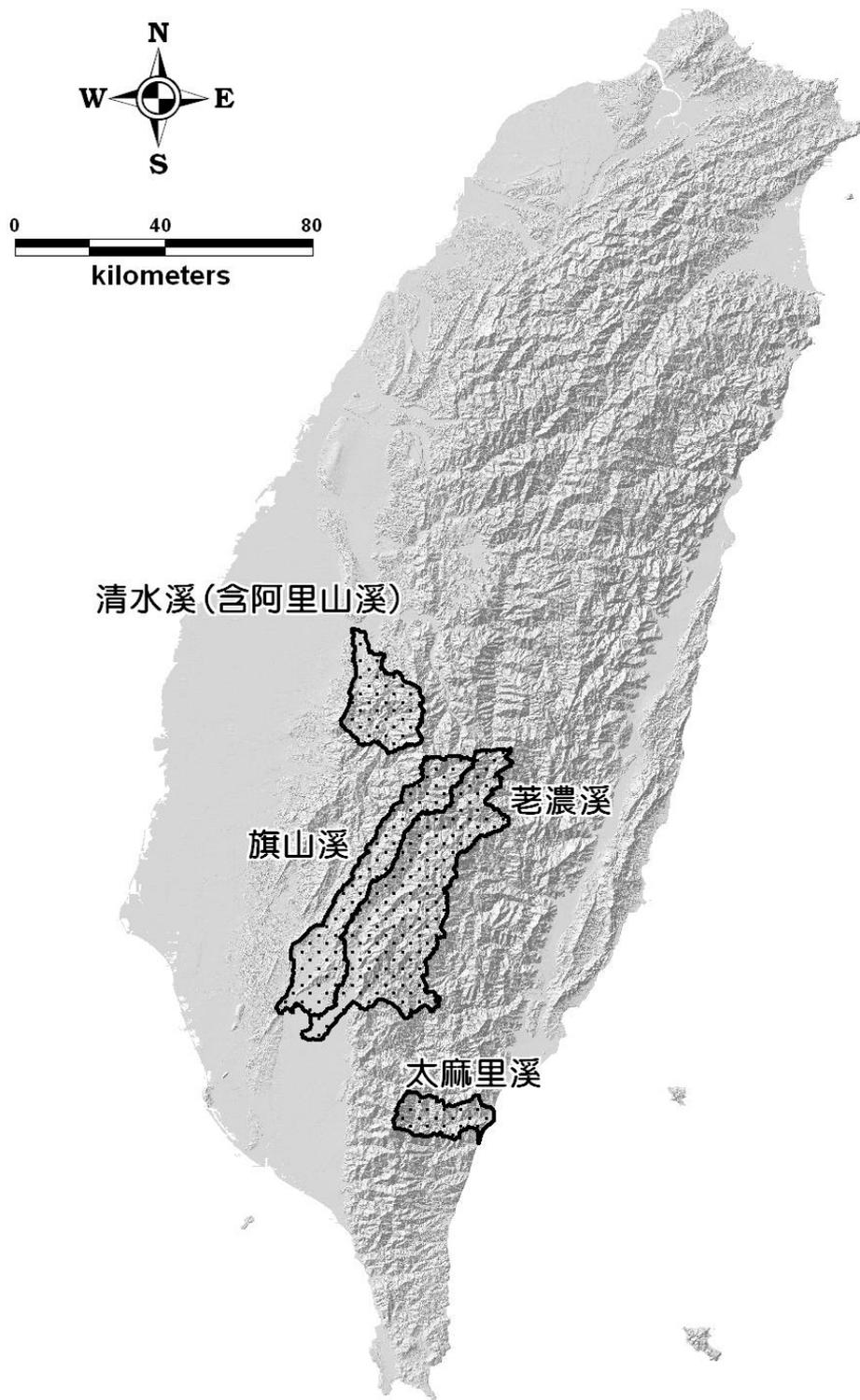


圖 1-2-1 工作計畫架構圖



資料來源：本計畫整理。

圖 1-2-2 國有林地內殘留土砂二次災害潛勢評估與保全對象
災害潛勢評估研究集水區範圍

1-4 本階段工作項目與完成事項

本階段為成果報告，應完成事項與本報告已完成事項如下：

表 1-4-1 應完成事項與本報告已完成事項對照表

編號	工作執行階段	應完成項目	完成事項	對應章節
一	期初報告	工作目標、工作項目及內容、工作計畫及方法、預定工作進度及人力配置、預期成果等	✓	第壹章 第柒章 7-2 節
二	第 1 次期中報告	完成民國 98~99 年崩塌地資料蒐集與判釋工作	✓	第參章
		提出崩塌地土石方估算原則、方法及步驟	✓	第肆章 4-1-1 第肆章 4-2 第肆章 4-3
三	第 2 次期中報告	完成民國 98~100 年崩塌地資料蒐集與判釋工作	✓	第參章
		提出民國 98~100 年國有林地土砂變化情形	✓	第肆章 4-1-2
		提出土砂二次災害潛勢評估原則、方法及步驟等	✓	第伍章 5-1
四	第 3 次期中報告	完成民國 98~101 年崩塌地資料蒐集與判釋工作	✓	第肆章 4-1
		估算民國 98~101 年國有林土石方、殘留與變化量	✓	第肆章 4-2
		現勘旗山溪、荖濃溪、太麻里溪、阿里山溪等莫拉克災害流域，初步提出上開流域上游國有林地內殘留土砂二次災害潛勢評估與驗證等工作成果	✓	第伍章
		於第 3 次期中報告後及期末報告提送前，辦理研習班乙班	✓	第陸章
五	期末報告	全部工作項目	✓	
六	成果報告	成果報告書及光碟各 50 份	✓	
		上開電子檔案光碟內	✓	



第貳章 研究方法與流程

2-1 關鍵課題分析

依據「國有林莫拉克風災土砂二次災害潛勢影響評估」委託計畫需求說明書內容，歸納三項關鍵課題與技術，分別為(1)國有林地降雨誘發崩塌地土石產生量及土砂流出量分析、(2)國有林地殘留土砂二次災害潛勢評估及(3)國有林地內保全對象之災害潛勢評估，本節擬預先進行問題剖析與工作對策初擬，除有助釐清計畫執行要徑外，亦可作為技術研發方向參考。

2-1-1 國有林地降雨誘發崩塌地土石產生量及土砂流出量分析

降雨誘發崩塌的機制，係因降雨水分滲入土壤後，使得邊坡材料孔隙水壓上升，以及弱化了土壤剪力強度 (Montgomery and Dietrich, 1994)，使得材料的下滑趨動力超出抵抗力 (Dietrich et al., 1995; Casadei et al., 2003)。國有林班地邊坡災害的發生往往是由崩落物質所形成的土石流所造成，崩塌地產生土砂堆積於邊坡之上，受到雨水或逕流入滲飽和形成土石流，受到重力或伴隨水流的搬運而向下邊坡移動 (Takahashi, 1991)，當其具有足夠的破壞力時，便將對下邊坡之居民其生命財產造成危害。以下彙整國內外崩塌地土石產生量(產砂)推估方法，以及土砂流出量評估模式的相關文獻，據此探討各法適宜性與限制，以作為本計畫工作執行推展之依據。

一、崩塌地土石產生量推估方法

目前國內許多研究利用各種崩塌地的形貌特徵 (morphological characteristic) 與體積之相關性，建立崩塌體積推估模式。包括：(1) 崩塌坡度-深度關係、(2)崩塌長軸-深度關係、(3)土壤厚度法和(4)體積-面積關係。

(1) 崩塌坡度-深度關係

Khazai and Sitar (2000) 針對不同的坡度範圍給予其崩塌地之代表深度(表 2-1-1)，陳樹群 (2005) 利用颱風前期 DEM 與後期光





達資料分析之不同崩塌坡度可能引發之崩塌深度 (表 2-1-1)，崩塌坡度介於 30~40 度時，崩塌深度最大。

表 2-1-1 不同崩塌坡度可能引發之崩塌深度

崩塌坡度 (°)	< 20	20~30	30~40	40~50	50~60	>60	資料來源
崩塌深度 (公尺)	0.32	2.82	4.27	1.98	0.37	0.20	陳樹群 (2005)
崩塌深度 (公尺)	2		1.5	1		0.5	Khazai and Sitar (2000)

(2) 崩塌長軸-深度

Hovius et al. (1997) 發現崩塌地各大小與其產生頻率呈現冪次關係 (power law)，該研究定義崩塌面積與崩塌累積個數間之關係式，應用於推估紐西蘭南阿爾卑斯山與臺灣東部山脈內之崩塌地土砂產量，認為崩塌的深度與長軸的長度相關，因此崩塌深度 (t) 可以表示為：

$$t(l) = \varepsilon l \quad (\text{式 2-1})$$

其中， l 為崩塌長軸的長度[m]、 ε 為率定係數，在南阿爾卑斯山 $\varepsilon = 0.05 \pm 0.02$ 。

而成大研究發展基金會 (2011) 利用高谷精二 (2008) 提出以崩塌的長寬比 (長軸長度 / 短軸長度)，長軸長度 (Len) 與短軸長度對應於鉛直厚度 (Hv) 與坡面法線厚度 (Hn) 之間的關係，發現崩塌長、短軸長度與深度呈線性關係，相關係數介於 0.28~0.84 之間，若根據不同破壞形式分類 (圓弧形、平面形、楔形、或崩落)，相關係數約為 0.66，認為藉由簡單崩塌形狀因子無法完全反映崩塌地深度與邊坡軸長關係的複雜性。因此，藉由崩塌地類型、坡度、坡向、坡寬、坡高、全坡高、距溪流距離、距道路距離、與地層因子，以類神經網路進行分析，類神經網路預測結果與實測資料相關

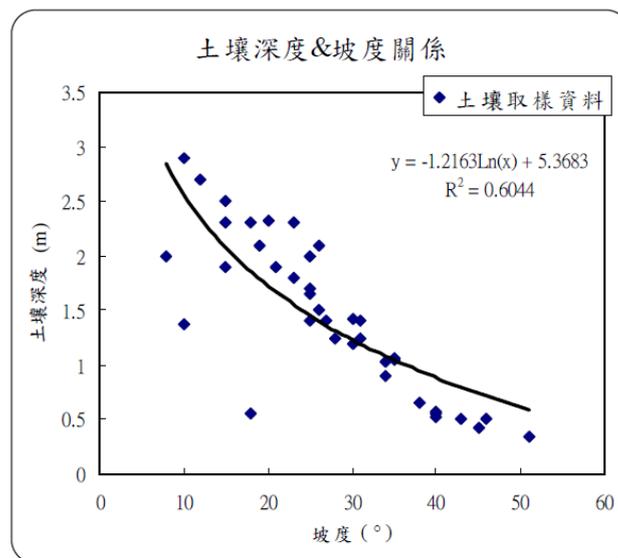




係數達 0.80。

(3) 土壤厚度法

許多研究假設崩塌深度等同於該崩塌坡面的土壤厚度，根據土壤厚度採樣資料，假設土壤深度為一個定值(李馨慈，2004)，或是建立坡度與土壤厚度指數關係，例如：鍾欣翰(2008)蒐集石門水庫集水區的匹亞溪集水區之土壤厚度樣本，建立坡度和土壤厚度指數關係 (圖 2-1-1)，並結合崩塌潛勢模式，假設崩塌厚度等同於土壤厚度，用以推估崩塌量。然而，該方法的假設僅適用於淺層崩塌，而不適用於深層崩塌，此外，部分淺層崩塌的深度可能會小於土壤厚度。因此，此假設可能會導致崩塌體積估算有許多不確定性。



資料來源：鍾欣翰(2008)

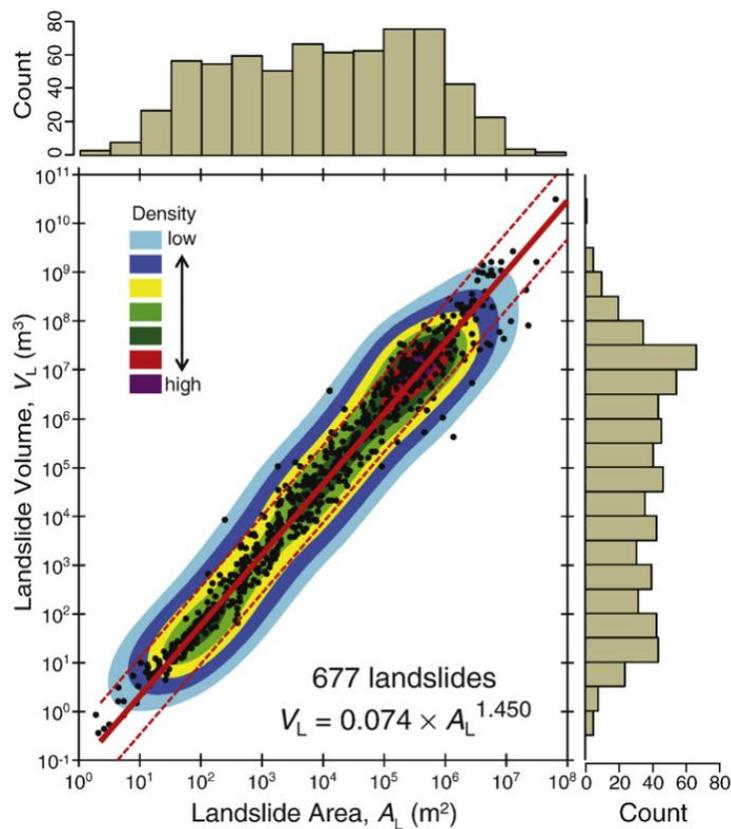
圖 2-1-1 匹亞溪集水區土壤深度與坡度之關係圖

(4) 體積-面積關係

此方法為目前國際上最為廣泛應用的方法，該方法的假設為崩塌有自我相似的特性 (self-similar behavior) (Guzzetti et al., 2009; Hovius et al., 1997)，意指大面積之崩塌與小面積之崩塌形狀相似，因此可藉由此假設推導出崩塌面積與體積之關係式。因自我相似的

特性，崩塌的長、寬和深度相互成正比，則崩塌面積的 0.5 次方與深度成正比，而崩塌體積又等於其面積與深度的乘積，在崩塌呈現完整的自我相似的特性時，崩塌體積與其面積的 1.5 次方成正比。

Guzzetti et al. (2009) 研究義大利 Umbria 地區之崩塌地，發現崩塌地面積與體積呈現幕次關係(圖 2-1-2)，關係式： $V_L = 0.074 \times A_L^{1.450}$ ，相關係數為 0.97，幕次係數為 1.45，接近自我相似的幕次係數 1.5，誤差範圍約在一個級距之內，其中崩塌地面積介於 $10^4 \sim 10^6 \text{ m}^2$ 之間時，此經驗公式最為可靠。並且與世界各國研究結果比較，發現崩塌面積與體積關係式的趨勢相似。部分微小的差異是因為樣本數目與採樣的崩塌面積不同，導致係數有些微差異，推測該係數獨立於集水區地文特性。

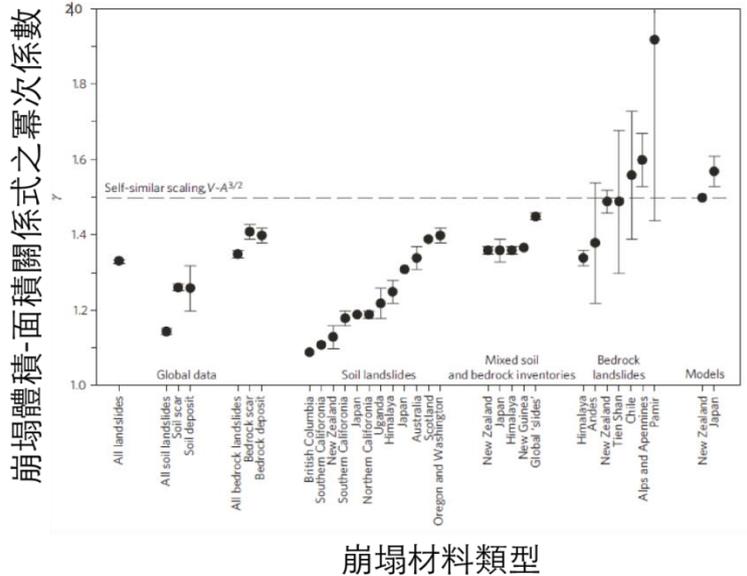


摘自 Guzzetti et al. (2009)

圖 2-1-2 崩塌面積與體積之幕次關係

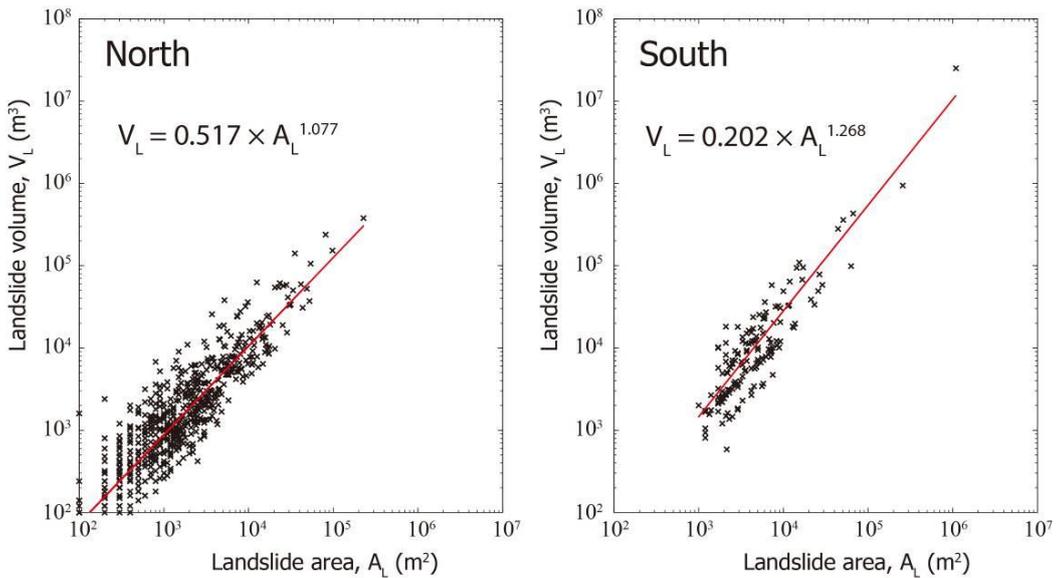


Larsen et al. (2010)蒐集世界各地之崩塌體積資料發現，崩塌體積與面積的關係式並非獨立於崩塌類型或地文特性，而與崩塌材料類型有關(圖 2-1-3)，在底岩為主的崩塌冪次係數介於 1.3~1.6，土壤為主的崩塌則介於 1.1~1.3 之間。Chen et al., 2013 在研究臺灣崩塌時也發現相似的趨勢，如圖 2-1-4。



資料來源：Larsen et al. (2010)

圖 2-1-3 世界多處崩塌地 V-A 關係的冪次係數與類型



資料來源：Chen et al. (2013)

圖 2-1-4 崩塌體積-面積冪次關係式





此外，Klar et al. (2011) 也利用力學理論分析的方法，發現在淺層崩塌的體積-面積關係式的冪次係數 ε 會受到土壤黏滯係數 (c) 與土壤密度 (r) 所影響，可表示為：

$$V_L = 0.53 \left(\frac{c}{r} \right)^{0.36} \cdot A^{1.32} \quad (\text{式 2-2})$$

其中， c 為土壤黏滯係數 [N m^{-2}]、 r 為土壤密度 [g cm^{-3}]。

各方法的優、缺點和假設詳表 2-1-2，其中，以崩塌體積-面積法適用於深層與淺層崩塌的體積估算，配合完整的山崩目錄，則可以估算各崩塌地之土砂生產量。目前已有許多國外學者應用崩塌體積面積關係式，推估大範圍之崩塌土砂生產量，包括：義大利、日本、紐西蘭、中國大陸等地區，各地區關係式發展彙整如(表 2-1-3)所示。國內水利署 (2011) 曾應用此方法推估高屏溪流域之崩塌土砂生產量，其分析效率及評估成效皆獲得不錯的回應。

雖然許多研究已證實崩塌體積-面積關係式具有物理意義，但在應用上仍需小心，因為此關係式的係數受到崩塌類型或土壤特性不同而有所改變，而其微小的改變將會導致崩塌體積推估有很大的誤差 (Larsen et al., 2010)。因此在利用此關係式推估崩塌體積時，需特別注意區域性的差異與其不確定性。本計畫採取崩塌體積-面積法分析國有林班地之崩塌地土石產生量。



表 2-1-2 崩塌地產砂量模式比較

方法	說明	文獻
崩塌體積面積關係 (V-A)	基於崩塌自我相似的假設，由山崩目錄資料，迴歸分析體積與面積的冪次關係，優點為能應用於淺層與深層崩塌，但受地質材料影響，需要藉由現地資料驗證與建立此關係式。	Korup (2005) Guzzetti et al. (2009a) Larsen et al. (2010) Parker et al. (2011) Chen et al. (2013)
崩塌深度-長軸關係	假設崩塌長軸與深度正相關，較少人使用。	Hovius et al. (1997)
崩塌面積-深度關係	崩塌面積越大，則深度越深(應用石門水庫集水區)	地質調查所
崩塌坡度-深度	由崩塌深度資料統計各坡度之平均深度	Khazai & Sitar(2000) NCDR
土壤厚度法	建立土壤厚度與地形特徵的關係，假設崩塌深度等於土壤厚度，適用於淺層崩塌。	鍾欣翰 (2008)

資料來源：本計畫整理。



表 2-1-3 崩塌體積與面積關係

編號	方程式	最小面積 (m ²)	最大面積 (m ²)	個數	資料來源
1	$V_L = 0.074 \times A_L^{1.45}$	2×10^0	1×10^9	67	Guzzetti et al. (2009a)
2	$V_L = 0.1479 \times A_L^{1.368}$	2.3×10^0	1.9×10^5	20	Simonett (1967)
3	$V_L = 0.234 \times A_L^{1.11}$	2.1×10^0	2×10^2	29	Rice et al. (1969)
4	$V_L = 0.329 \times A_L^{1.3852}$	3×10^1	5×10^2	30	Innes (1983)
5	$V_L = 0.1549 \times A_L^{1.0905}$	7×10^2	1.2×10^5	12	Guthrie and Evans (2004)
6	$V_L = 0.00004 \times A_L^{1.95}$	$> 1 \times 10^6$		23	Korup (2005)
7	$V_L = 4.655 \times A_L^{1.95}$	5×10^5	2×10^8	16	ten Brink et al. (2006)
8	$V_L = 0.39 \times A_L^{1.31}$	1×10^1	3×10^3	51	Imaizumi and Sidle (2007)
9	$V_L = 0.0844 \times A_L^{1.4324}$	1×10^1	1×10^9	53	Guzzetti et al. (2008)
10	$V_L = 0.19 \times A_L^{1.19}$	5×10^1	4×10^3	11	Imaizumi et al. (2008)
11	$V_L = 0.328 \times A_L^{1.104}$	1.1×10^1	1.5×10^3	37	Rice and Foggin (1971)
12	$V_L = 0.242 \times A_L^{1.307}$	2×10^5	6×10^7	53	Abele (1974)
13	$V_L = 0.769 \times A_L^{1.25}$	5×10^4	3.9×10^6	45	Whitehouse (1983)
14	$V_L = 1.826 \times A_L^{0.898}$	5×10^1	1.6×10^4	10	Larsen and Torres Sanchez (1998)
15	$V_L = 1.0359 \times A_L^{0.88}$	2×10^2	5.2×10^4	61	Martin et al. (2002)
16	$V_L = 12.273 \times A_L^{1.047}$	3×10^5	3.9×10^{10}	65	Hafidason et al. (2005)
17	$V_L = 0.106 \times A_L^{1.388}$	-	-	-	Parker et al. (2011)
18	$V_L = 0.517 \times A_L^{1.077}$	1.1×10^1	3.7×10^5	736	Chen et al. (2013)
19	$V_L = 0.202 \times A_L^{1.268}$	8.7×10^2	9.4×10^5	153	Chen et al. (2013)

資料來源：Guzzetti et al. (2009a)；本計畫整理。



二、土砂流出量分析方法

目前國內外許多研究利用河川輸砂量和流量觀測資料，建立率定曲線關係來計算集水區泥砂流出量，或以觀測資料率定集水區輸砂模式。包括：(1) 率定曲線法、(2) 分層時間率定曲線法、(3) 月權重平均法和 (4) HSPF 集水區輸砂模式。

(1) 率定曲線法 (rating curve)

率定曲線法的的假設為輸砂量與流量之間呈現一定的冪次關係(林孟龍和林俊全，2003；黃朝恩，1982；陳翰霖和張瑞津，2003；Hovius et al., 2000; Walling, 1977; Walling and Webb, 1987)，率定曲線公式如下：

$$Q_s = aQ_w^b \quad (\text{式 2-3})$$

Q_s 為輸砂量、 Q_w 為流量、 a 與 b 為率定之參數

但是在使用率定曲線計算輸砂量時，必須注意懸移質觀測資料長度與取樣頻率，Fuller et al. (2003) 比較平均法、流量與輸砂量率定曲線，以及修正後的率定曲線等 3 種方法，計算臺灣中央山脈東部河流的年度輸砂量，並討論三種方法的差異，發現懸移質資料採樣的數量和時間會影響侵蝕速率的估算，例如以 27 年間共 780 筆懸移質觀測值，計算之平均侵蝕速率誤差範圍約為± 2.7/4.0 mm。

(2) 分層時間率定曲線法 (stratified time-frame rating curves)

Kao et al. (2005)認為臺灣河川輸砂行為隨著每年邊坡和河川泥砂供應量不同而有很大的變異性。因此，建議應該將各年度的輸砂資料分為低流量(11月至隔年5月)與高流量(6月至隔年10月)期間，並且建立個別的率定曲線計算河川輸砂量，該方法稱分層時間率定曲線法。分析結果顯示利用該方法較能夠反映臺灣高變異性的





河川輸砂行為。

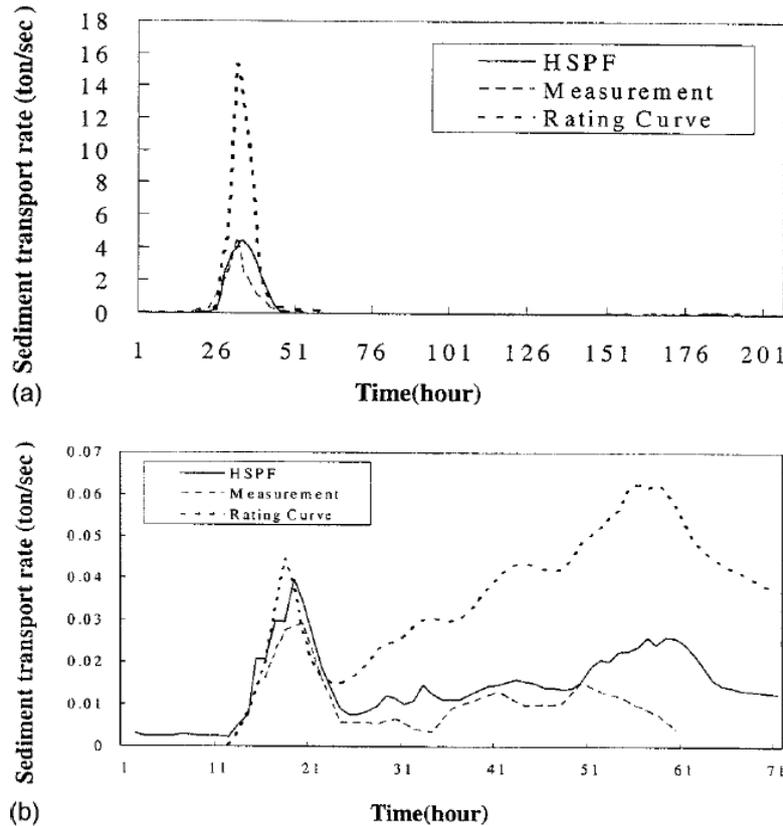
(3) 月權重平均法 (monthly weighted average, MWA)

Dadson et al. (2004)分別利用 6 種平均法以及率定曲線法原理來估算臺灣主要河川的年度輸砂量，並以水庫淤積量進行分析後，發現月權重平均法最適合用來推估臺灣地區河流長期年平均輸砂量。Lin et al. (2008) 認為無參數率定曲線法估算陳有蘭溪流域之年輸砂量會出現明顯高估及外插的現象，因此月權重平均法較為適用。

(4) HSPF 集水區輸砂模式

HSPF 模式利用於集水區非點源污染源推估已有數十年之久，且有相當不錯之模擬結果。楊德良等 (1989、1990) 對模式之逕流、土壤沖蝕及泥砂運移部分做研究和檢定的工作，利用德基水庫集水區資料，進行模式驗證工作，建立德基水庫集水區各逕流、土壤沖蝕、泥砂運移之重要參數，並對合理化公式應用步驟提出探討。李鴻源等 (1990、1991、1992) 利用 HSPF 模式，對大漢溪流域進行非點源污染之模擬，利用模式最佳化基本原理，進行參數敏感度分析，歸納出敏感度較大之參數，作為實際應用之參考。Lee et al. (2006) 於民國 91 年的三場颱風事件，石門水庫集水區的玉峰橋進行逐時懸移質濃度採樣，並分別利用率定曲線與 HSPF 模擬輸砂量，發現 HSPF 較能反映輸砂量實測值，而率定曲線則較實測值高估三倍 (圖 2-1-5)。





(資料來源：Lee et al., 2006)

圖 2-1-5 HSPF 模式、率定曲線模擬結果與實測值比較

目前已經有許多集水區泥砂流出量之分析方法，但各模式皆有其假設條件與適用範圍。一般來說，率定曲線通常較適用於搬運主導 (transport-dominated) 的河川，而較不適用於供給主導 (supply-dominanted) 的河川 (Hovius et al., 2000)。例如，Kao et al. (2005) 從花蓮輸砂量資料的研究中發現，即使在流量小於 10 cms 時，河流流量與輸砂量仍然會維持良好的正相關，因此認為臺灣東部的河流特性仍然是屬於搬運主導，也就是輸砂量的多寡是受到流量大小的控制，使用率定曲線法來估算輸砂量較為精確。從 93 年以來，臺灣歷經敏督利、海棠、卡玫基、辛樂克與莫拉克颱風等重大颱風，在國有林班地產生大量崩塌地，導致河川輸砂量也急遽上升，可推測目前國有林班地河川輸砂行為應多屬於搬運主導的河川，率定曲線法則較為適用。本計畫將採用分層時間率定曲線法估算集



水區土砂流出量，可避免率定曲線偏估的問題，且 98 年莫拉克颱風後，河川輸砂多為搬運主導，故月權重平均法較不適用。而 HSPF 集水區輸砂模式雖然比較具有物理機制，但是其模擬過程太過複雜，實際操作上往往只能將其物理過程視為黑箱(black box)，因此本計畫不採用此方法。

2-1-2 國有林地殘留土砂二次災害潛勢評估

根據農委會水土保持局之「防止土石流二次災害暨復原重建作業手冊」，地震、颱風、洪水災害過後，鬆軟的地質結構、大量的雨水，為引發土石流之關鍵因素，雖然當坡地災害已獲得控制，救援也已完成，但邊坡滑動或土石流災害發生後初期穩定性仍是不足，往往因外營力介入（雨水入滲、地震），再次發生崩塌或土石流，因此，應當在災害發生後盡速進行二次災害的防治工作，才能降低與避免殘留土砂二次災害造成之生命財產損失。

回顧國內外相關文獻，目前尚無針對殘留土砂二次災害潛勢開發的評估模式與分析流程，但殘留土砂導致二次災害的歷程可藉由上述之崩塌地土砂生產量推估，以及土砂流出量評估模式，計算殘留土砂的位置與量體，結合邊坡穩定模式，或多變量統計分析坡地崩塌潛勢，計算國有林地二次土砂災害，當崩塌發生後，崩塌的土石會再次形成土石流的料源，順著重力向下邊坡流動，結合殘留在坡面上或河道上的土砂，衝擊下游之保全對象。因此，本計畫建議結合「邊坡穩定」與「土石流模擬」方式，模擬崩塌潛勢與土石流影響範圍，以國有林地殘留土砂評估二次土砂災害的潛勢。

國內常見的土砂流動模式與方法彙整如表 2-1-4 所示，包括：Debris-2D、Flo-2D、ISOLAD 與經驗公式。茲就各模式分析方法說明如下：





一、土石流災害潛勢分析模式

(1) Debris-2D

為模擬土石流的二維土石流數值模式，由臺灣大學土木系劉格非教授團隊研發。此模式係利用 Julien and Lan 的非線性本構關係式與流體守恆定律，配合流體力學中邊界層分離計算之觀念，發展了一個能應用於現場之土石流數值模式 Debris-2D，可模擬具有降伏應力的土石流之流動情形，藉以獲得工程設計上所需之參考數據 (Liu and Lai, 2000)。模式中各參數之檢定方法可利用簡易之測量法來推估，模式之控制方程式符合土石流之物理特性，但模擬大範圍需要大量的計算時間。本團隊曾經結合崩塌量與 Debris-2D 土石流模式，模擬荖濃河流域之新發部落，在莫拉克颱風期間所引發的土石流災害 (Chen et al., 2012)，模擬崩塌地產砂供應後之土石流動的歷程 (圖 2-1-6)，並根據災害後的航照圖驗證，發現模擬的結果與實際狀況相當吻合 (圖 2-1-7)。結果顯示，結合崩塌地產砂模式與 Debris-2D，應能適用於國有林班地崩塌地土砂生產與流出量之評估。

(2) FLO-2D

為二維洪水災害模擬模式，由 Colorado State University 和 FLO Engineering, Inc. 共同發表。此模式適用於都市淹水、洪水平原管理、工程風險設計、不規則形狀河道水理演算、橋梁涵洞水理，可以處理漫地流、都市水文、泥石流及土石流，為國內最常見之土石流模式，但在土石料源給定與結束條件設定方式上，仍有非液固混合體及無法考量崩塌地料源給定之問題。

(3) ISOLAD (Integrated SOil wetness-LAndslide-Debris flow model)

張康聰教授與姜壽浩博士共同開發的之崩塌-土石流災害評估模式，整合了邊坡穩定計算以及土石流動態模擬 (姜壽浩, 2010)，





土石流模式乃是假設土石流以完全發展層流 (fully developed laminar flow) 之流體模型進行土石流運動模擬 (Hunt, 1994)，假設水分與泥砂較為均勻混和的流體，此模式可應用於暴雨誘發之淺層崩塌而肇生之土石流，以及應用至集水區尺度的災害模擬。

(4) 經驗公式

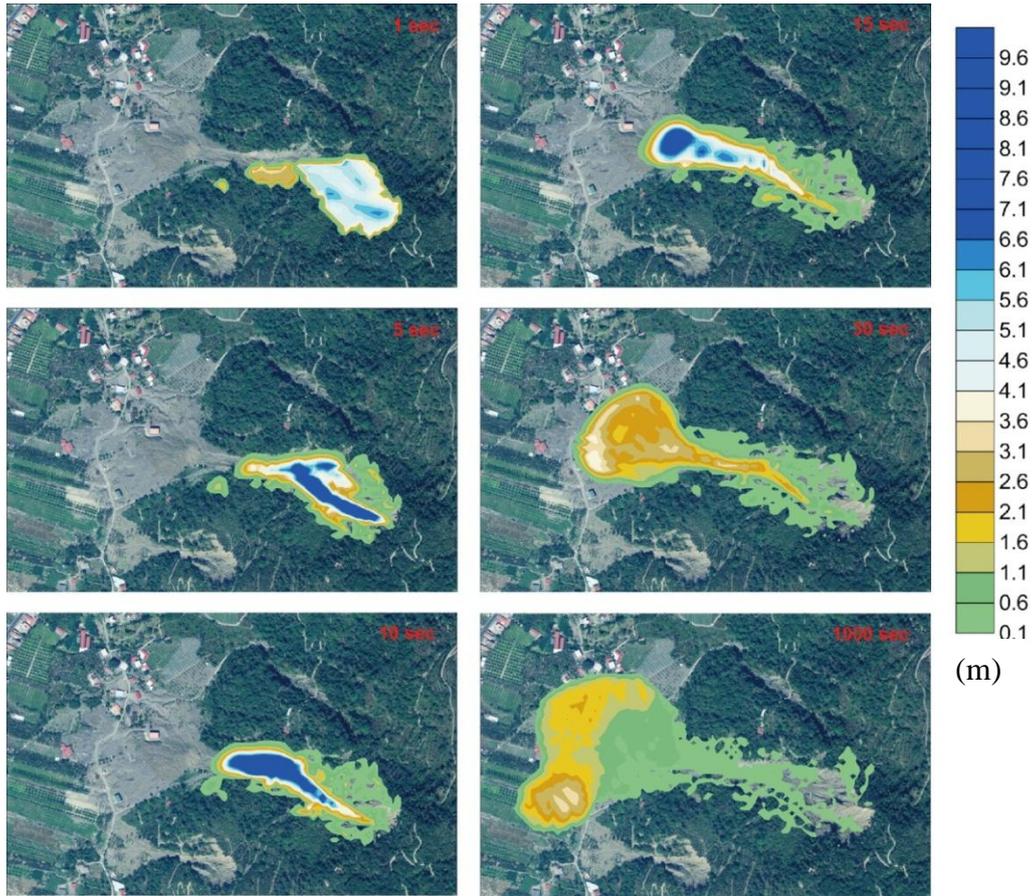
其發展為根據國外學者，依據當地崩塌土石運移距離觀測資料，配合崩塌體積、坡度、崩塌高差等形貌特徵，統計適用各地之經驗公式，惟各經驗公式估算結果差異甚鉅，且臺灣無本土之經驗公式。

表 2-1-4 土砂流出量分析方法比較

方法	說明	文獻
Debris-2D	利用 Julien & Lan 的非線性本構關係式與流體守恆定律，配合流體力學中邊界層分離計算之觀念，發展了一個能應用於現場之土石流數值模式 Debris-2D，來模擬具有降伏應力的土石流之流動情形	Liu and Lai (2000) Tsai et al. (2011) Chen et al. (2012)
Flo-2D	FLO-2D 為二維洪水災害模擬模式，將土石流是鬆散土石和水之混合體，模擬在重力作用下之流動現象	O'Brien et al., 1993
ISOLAD	整合了邊坡穩定計算以及土石流動態模擬，模式邊坡穩定依據無限邊坡假設配合莫爾-庫倫破壞理論。而土石流模式乃是假設土石流以完全發展層流為流體，此模式可應用於暴雨誘發之淺層崩塌而肇生之土石流，以及應用至集水區尺度的災害模擬	Chiang et al. (2011) Chiang (2010) 水土保持局 (2011)
經驗公式	建立崩塌土石運移的經驗公式，參數包含崩塌體積、高差、與坡度，不同公式推估結果差異甚大，且不考慮崩塌土石流動的過程。	Ikeya (1981) Lorente (2003) Rickenmann (1994) Scheidegger (1973) Vandre (1985)

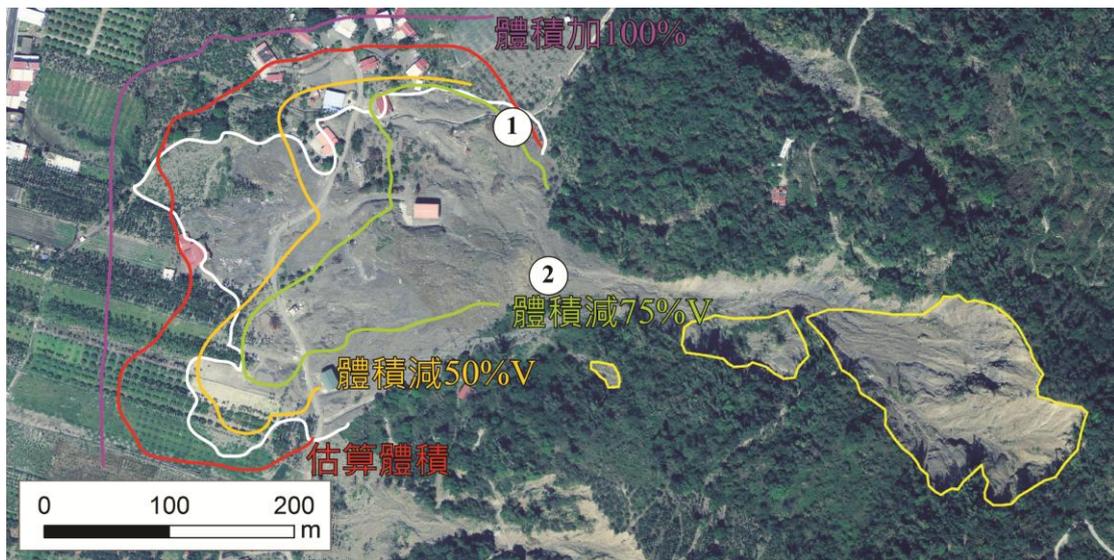
資料來源：本計畫整理。





資料來源：Chen et al. (2012)

圖 2-1-6 崩塌土石流動的歷程



資料來源：Chen et al. (2012)

圖 2-1-7 崩塌土石流動的結果驗證



二、崩塌災害潛勢分析模式

崩塌潛勢模式是用來評估邊坡是否會產生崩塌或其發生機率。根據各模式發展理論基礎大致可分為物理型與經驗統計型模式。常見的物理型模式，例如 SHALSTAB，經驗統計型模式則有二元迴歸模式等模式。此外，張康聰教授與姜壽浩博士也發展物理與經驗統計型整合模式(Integrated model)。以下簡述各模式理論基礎與特性。

(1) SHALSTAB

SHALSTAB 是以水文的基礎結合坡面穩定概念的分析模型 (Montgomery and Dietrich, 1994)，Montgomery and Dietrich (1994) 認為地形、水文及土壤條件會影響一個崩塌地的大小及崩塌機制，利用穩態水文及無限邊坡穩定模式發展 SHALSTAB。

本模式假設土壤無凝聚力且土壤厚度及飽和傳導度(saturated conductivity)為定值，將莫爾庫倫破壞準則加以簡化，在降雨為穩態的情形下，利用土壤濕度(h/z)及坡度($\tan \theta$)結合以不同的降雨強度值，模擬地形單元在不同臨界降雨條件下不穩定的情形。將坡面穩定程度分四個等級：無條件不穩定(unconditionally unstable)、不穩定(unstable)、穩定(stable) 與無條件穩定(unconditionally stable)，並反算各地區產生崩塌的臨界降雨。

(2) 二元迴歸模式

二元迴歸模式能處理具有二元性的資料型態，一般線性迴歸係找出一組推估值與觀測值具有最小平方和(least sum of square)之參數，而二元迴歸則是找出一組具有最大可能性(maximum likelihood)的參數，即預測值最符合觀測值，且能同時處理量化變數(numerical variables)與類別參數(categorical variables)。

二元迴歸模式因為參數較容易取得、使用較為方便且可得到不錯之準確率，目前廣泛被應於國內、外之崩塌潛勢評估 (Bai and





Wang, 2010; Chang et al., 2007; Chang and Chiang, 2009; Chauhan, 2010)。

(3) 物理與經驗統計型整合模式

張康聰教授與姜壽浩博士結合 SHALSTAB 與二元迴歸模式發展出物理與經驗統計型整合模式，稱為 Integrated Model。該模式利用臨界降雨模式(Montgomery and Dietrich, 1994)，分析各網格之降雨事件最大 24 小時降雨和臨界降雨之差值，稱為降雨強度差 (rainfall intensity difference, RID)，再將降雨強度差和降雨延時進行羅吉斯迴歸分析，得到該模式之參數。該模式應用於白石溪子集水區，率定與驗證準確率分別達到 84.0% 與 87.4%。除此之外，該模式也能夠解決傳統物理模式無法計算崩塌機率的問題。

SHALSTAB 雖然較具物理意義，但使用上仍會受到許多限制，(1)崩塌面積過估的問題：該模式在使用時，假設不穩定邊坡等於會產生新增崩塌，可能會導致崩塌面積明顯高估，此現象在 Chiang and Chang (2011)研究白石子集水區模擬結果中已發現，該研究分析結果顯示，白石子集水區不穩定邊坡面積約 1,000 公頃，為艾利颱風造成新增崩塌面積的 10 倍左右。(2)僅限於淺層崩塌：SHALSTAB 模式僅限於估算淺層崩塌，無法應用於深層崩塌，然而根據 Chen et al. (2013)的研究指出，臺灣南部地區多為深層之土壤和岩石混和型崩塌。因此 SHALSTAB 可能在使用上仍有限制。

二元迴歸模式是利用統計計算的方式，雖然缺乏力學基礎及序率之概念，較不具有物理意義，無法得知造成崩塌地之力學、物理現象與崩塌物理機制。但二元迴歸模式能結合水文、地文、人文因子，處理崩塌與未崩塌的二元資料，將輸入於模式中之大量參數量化並轉換成崩塌地發生機率；根據 Chang et al. (2008)與 Chang and Chiang (2009) 應用該模式於陳有蘭溪流域和石門水庫集水區，崩





塌地研判準確度分別達 78 與 84%。經綜合評估後，本計畫採用二元迴歸模式(logistic regression model)建立崩塌潛勢分析模式。

崩塌潛勢模式是用來評估邊坡是否會產生崩塌或其發生機率。根據各模式發展理論基礎大致可分為物理型與經驗統計型模式。常見的物理型模式，例如 SHALSTAB，經驗統計型模式則有二元迴歸模式等模式。此外，張康聰教授與姜壽浩博士也發展物理與經驗統計型整合模式(Integrated model)。以下簡述各模式理論基礎與特性。

2-1-3 國有林地內保全對象災害潛勢評估

斜坡單元係一符合地形邊界的分析單元，因有地形邊界控制，故斜坡單元不會跨越山脊線與水系，相較與網格單元有利於土砂災害管理，可避免邊坡上中下段潛勢不同，而衍生管理配套不一致的問題。斜坡單元分析流程參考地調所(2009)建議之「集水區重疊法」為之，至於人工編修與品管方法亦參考其建議之方法，以利管控斜坡單元均勻性及適宜性，以供後續保全對象潛勢評估參用。

基於上述斜坡單元崩塌潛勢分級與土石流影響範圍成果，套疊以聚落為單元之保全對象圖層(建築物、暫准建物、林道分布圖、阿里山森林鐵路、道路、橋梁、鐵路等)，建立保全對象災害潛勢評估分級，主要分級方法係以土石流影響範圍為主，斜坡單元崩塌潛勢分級為輔。分級方法說明如下：

- (1) 若與土石流影響範圍交集之保全對象即為高潛勢。
- (2) 若沒有與土石流影響範圍交集之保全對象，本計畫擬參考農委會水土保持局(簡稱水保局)(2010)「99 年莫拉克災區山坡地聚落安全調查」報告建議，參考日本「土砂災害防止法」第二條規定辦理，考量斜坡單元的寬度、斜坡單元的高差(ΔH)等參數進行保全對象潛勢分級評估，並依據保全對象所在之邊坡區位





(聚落位於上邊坡或下邊坡)分別評估斜坡單元之崩塌影響範圍，若保全對象與高潛勢斜坡單元影響範圍交集者亦為高潛勢，以此類推區分保全對象不同潛勢分級。但是，若一處聚落遭受多個斜坡單元崩塌影響範圍交集時，則以最高潛勢影響分級為此保全對象之潛勢分級。

- (3) 以上潛勢分級原則將用於建築物、暫准建物、林道分布圖、阿里山森林鐵路、道路、橋梁、鐵路等潛勢分級，統整分析結果彙整國有林地內保全對象潛勢評估成果圖。

2-2 計畫背景瞭解

一、國有林班地範圍基本資料

(1) 土地利用

林務局所管轄事業區與林班 1,569,100 公頃 (表 2-2-1)，約佔臺灣本島總面積的 44%。其中，森林面積共計 1,456,900 公頃 (92.85%)，非森林地面積為 112,200 公頃(7.15%)，森林地則以天然林為主，共計 1,131,800 公頃(72.13%)，其次為人工林的 295,600 公頃(18.84%) (林務局全球資訊網，2012)。

莫拉克災區之旗山溪、荖濃溪、太麻里溪、阿里山溪等四個集水區，位於南投處、屏東處、臺東處及嘉義處的管轄範圍，各集水區面積分別為 826.36、1,423.12、220.51、與 428.48 平方公里，共計 2,898.47 平方公里。四個災區集水區的國有林班地的比例分別為 52.65%、81.36%、65.48%與 46.45%。



表 2-2-1 林務局管轄事業區林班地之土地利用類型面積

土地利用類型	面積 (公頃)	百分比 (%)	土地利用類型	面積 (公頃)	百分比 (%)
森林地面積	1,456,900	92.85	非森林地面積	112,200	7.15
天然林	1,131,800	72.13	其它林業用地	6,700	0.43
天然針葉樹林	215,400	13.73	草地	32,700	2.08
天然闊葉樹林	597,700	38.09	農業用地	24,900	1.59
天然針闊混淆林	318,800	20.32	道路建築用地	1,100	0.07
人工林	295,600	18.84	水面	11,800	0.75
人工針葉樹林	171,800	10.95	裸露地	34,700	2.21
人工闊葉樹林	72,700	4.63	其它	300	0.02
人工針闊混淆林	49,100	3.13			
竹林	29,600	1.89	林地面積總計	1,569,100	100.00

資料來源：林務局全球資訊網 (2012)

(2) 坡度

國有林班地大都位在流域上游地區，地形陡峻，根據「山坡地土地可利用限度分類標準」，計畫範圍的坡度以六級坡為最多(表 2-2-2)，國有林班地的六級坡面積佔 52.7%；旗山溪集水區的六級坡面積佔 29.8%；荖濃溪集水區的六級坡佔 50.7%、太麻里溪集水區的六級坡佔 48.7%、阿里山溪集水區的六級坡佔 35.7%。

(3) 地質

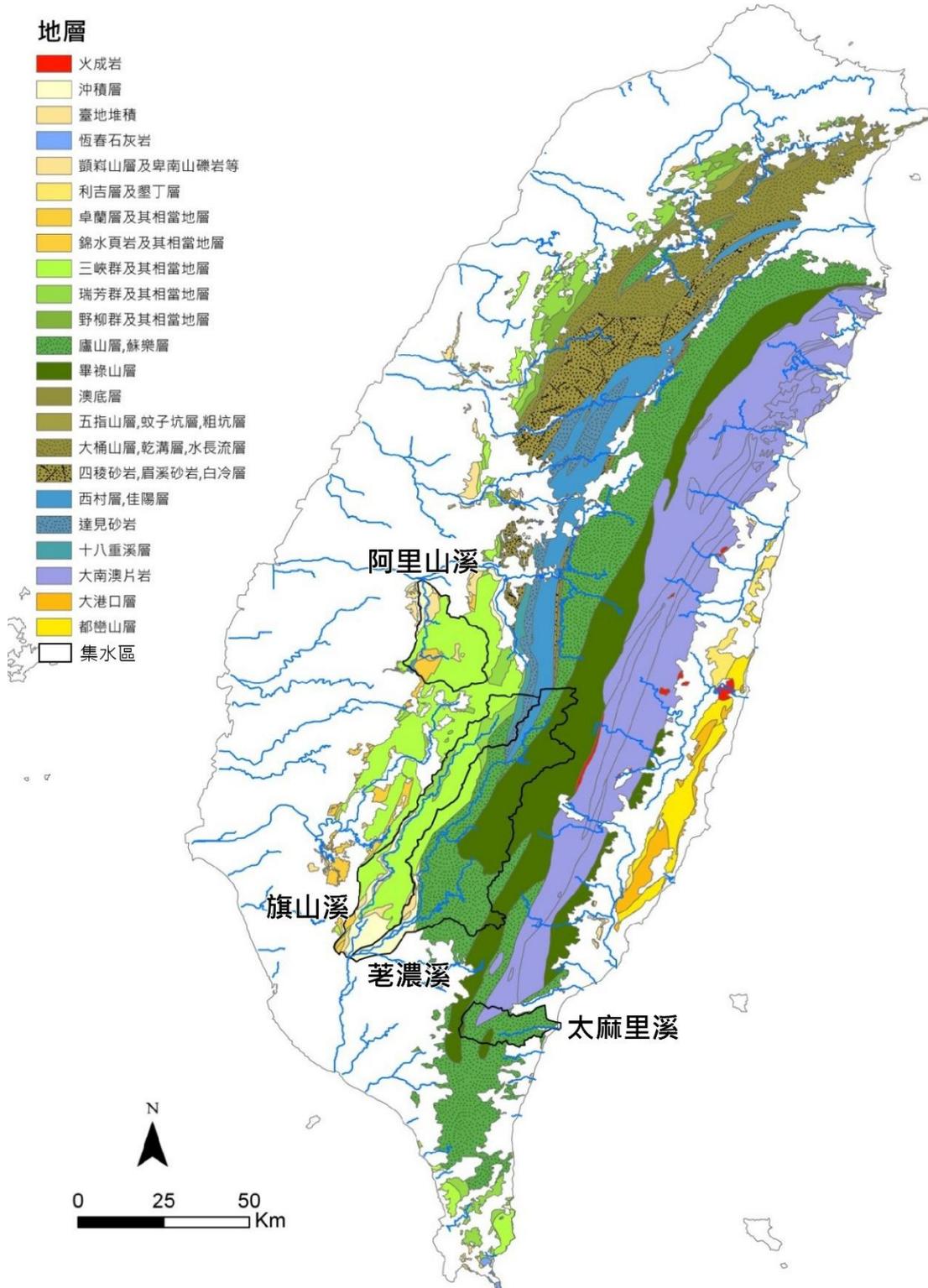
計畫範圍的地質分布圖詳圖 2-2-1，國有林班地範圍廣泛，地層包含了海岸山脈地質區、中央山脈東翼地質區、中央山脈西翼及脊樑山脈地質區、西部麓山帶、與雪山山脈。荖濃溪集水區則位於中央山脈西翼及脊樑山脈地質區，以廬山層和畢祿山層為主；旗山溪集水區則位於西部麓山帶，地層則包括糖恩山砂岩、錦水頁岩層等地層；太麻里溪集水區則位於中央山脈東翼地質區，屬於高度變質，地層主要為大南澳片岩與畢祿山層；阿里山溪則位於西部麓山

帶，地層則包括錦水頁岩、卓蘭層等地層。

表 2-2-2 計畫範圍之坡度分級

坡度分級	坡度百分比 (%)	面積(%)				
		國有林	旗山溪	荖濃溪	太麻里溪	阿里山溪
一級坡	< 5	0.3	19.0	7.3	2.7	5.6
二級坡	5~15	1.9	7.8	2.5	2.8	5.1
三級坡	15~30	7.2	13.2	5.8	7.4	13.5
四級坡	30~40	8.8	10.9	7.1	10.0	12.9
五級坡	40~55	19.5	16.0	17.8	23.5	20.8
六級坡	55~100	52.7	29.8	50.7	48.7	35.7
七級坡	> 100	9.6	3.3	8.8	4.9	6.4

資料來源：本計畫整理



資料來源：中央地質調查所五十萬分之一地質圖

圖 2-2-1 計畫範圍地層分布圖



二、歷史崩塌與重大災害事件

國有林班地坡度陡峭，且多脆弱面及風化作用甚烈影響，復又受斷層、節理及破裂等地質作用因地震頻仍而加劇，尤其 921 地震後更形嚴重。每年颱風豪暴雨過後易有崩塌或土砂災害等情形產生。

民國 98 年 8 月 8 日莫拉克颱風在 5 天內降下超過 2,000 mm 的雨量，打破許多雨量測站的歷史紀錄，最大 24 與 48 小時雨量皆超過 200 年重現期。其中，阿里山測站累積雨量 3,059.5 mm，最大 24 與 48 小時延時雨量分別為 1,623.5 mm 與 2,361 mm，更逼近世界紀錄的 1,825 mm 與 2,467 mm。莫拉克颱風帶來的超大豪雨，引發南部山區大量崩塌(圖 2-2-2)，最嚴重的災害發生在旗山流域的小林村邊坡獻肚山地滑。此外，荖濃河流域上游的新發部落，也因崩塌引發土石流災害。莫拉克風災所引致的坡地災害與山區落石坍方災點統計資料顯示共 1,690 筆，並且造成 677 人死亡，因災致住屋毀損達不堪居住程度者計 1,626 戶(NCDR，2009)。

民國 99 年共有 4 場颱風事件，其中，凡那比颱風為南臺灣帶來高強度降雨，在荖濃河流域的累積雨量計 734 mm(表 2-2-3)，造成六龜鄉大津村、文武村、與荖濃村土石流災害，而在其他集水區則無重大土石災情發生。民國 100 年共有 5 場颱風事件，其中僅有南瑪都颱風期間發布陸上颱風警報，並在 4 個莫拉克重災區中降下較大的雨量，其餘 4 場颱風期間僅發布海上颱風警報，並未對莫拉克重災區產生重大的影響。民國 101 年共有 3 場颱風，其中，天秤颱風在太麻里溪較大的雨量，但並未造成重大土砂災害。民國 102 年則為蘇力颱風在荖濃河流域之六龜造成洪水災害。



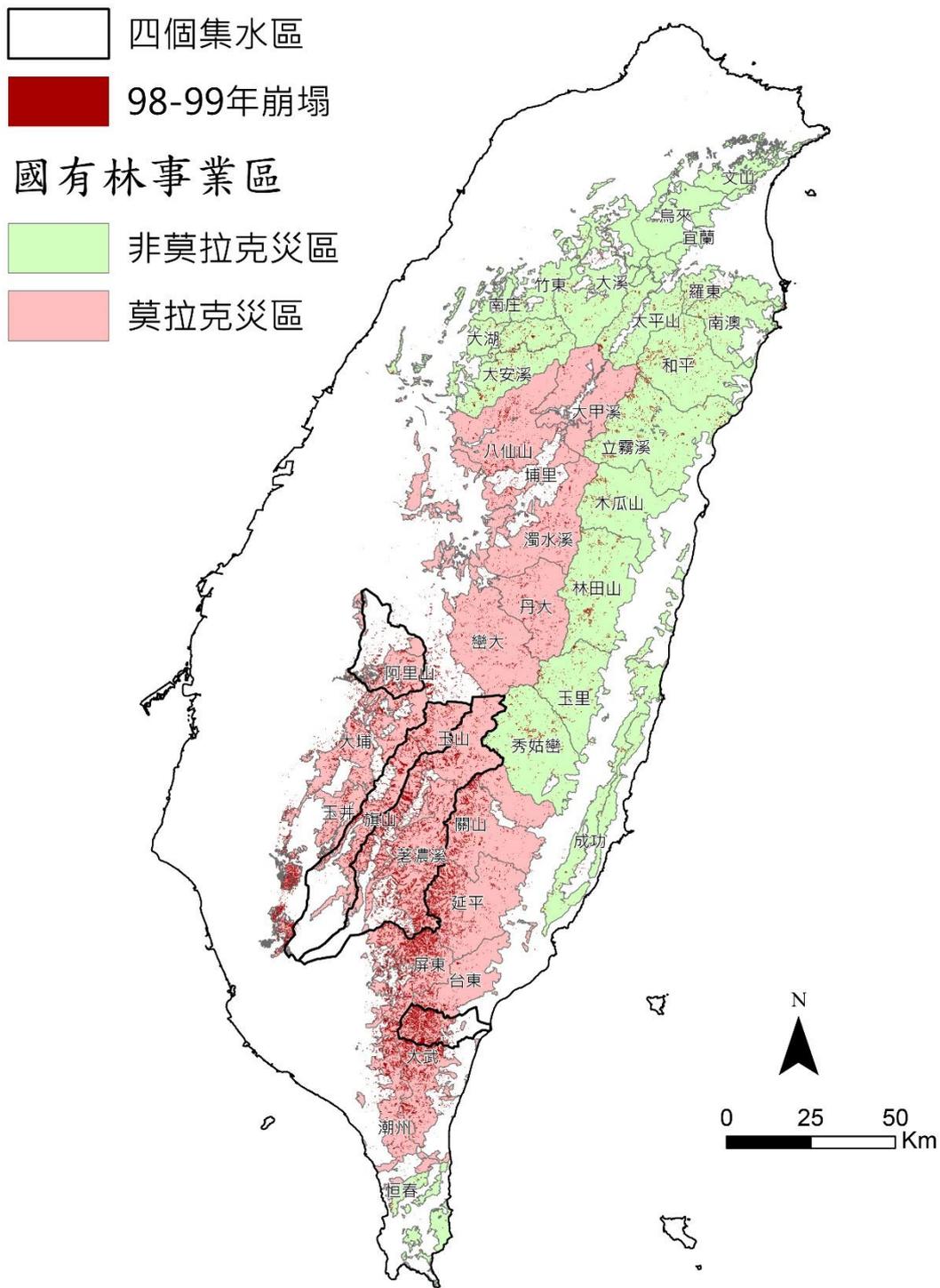


圖 2-2-2 莫拉克颱風後國有林班地及重災區崩塌地分布

表 2-2-3 民國 98-101 年颱風事件和重大土石災情統計

民國年	中文名稱	警報期間	近台強度	侵台路徑分類	累積雨量(公釐)				重大土石災情(件數)			
					旗山溪(甲仙)	荖濃溪(六龜)	太麻里溪(金峰)	阿里山溪(草嶺)	旗山溪	荖濃溪	太麻里溪	阿里山溪
102	蘇力	07/11~07/13	強烈	2	319	359	81	432	0	1	0	0
101	天秤	08/21~08/28	中度	特殊路徑	76	134	887	24	0	0	0	0
	蘇拉	07/30~08/03	中度	2	279	228	43	796	0	0	0	0
	泰利	06/19~06/21	輕度	9	479	592	159	216	0	0	0	0
100	南瑪都	08/27~08/31	強烈	4	357	678	555	214	0	0	0	0
99	梅姬	10/21~10/23	中度	9	49	55	270	16	0	0	0	0
	凡那比	09/17~09/20	中度	4	671	734	537	299	0	4	0	0
	莫蘭蒂	09/09~09/10	輕度	--	182	257	512	96	0	0	0	0
	南修	08/30~08/31	輕度	--	104	140	359	90	0	0	0	0
98	芭瑪	10/03~10/06	中度	特殊路徑	16	31	139	95	0	0	0	0
	莫拉克	08/05~08/10	中度	3	2,210	2,426	910	2,156	18	23	1	25
	蓮花	06/19~06/22	輕度	9	146	141	176	105	0	0	0	0

備註：上表為 98-102 年間發布陸上颱風警報之颱風。

資料來源：中央氣象局、水利署地理資訊倉儲中心、土石流防災資訊網、本計畫整理。

2-3 工作方法與步驟

本節係針對各項工作執行方法與步驟進行說明，圖 2-3-1 為本計畫研擬之估作方法與步驟流程圖，可歸納為「彙整判釋國有林崩塌地」、「國有林土石變化情形分析」與「國有林殘留土砂二次土砂災害潛勢評估」三大部分。

一、彙整判釋國有林崩塌地

蒐集彙整國有林崩塌地資料，本計畫將藉由蒐集 SPOT5 及福衛二號衛星影像，運用遙測技術判釋民國 98 年至 101 年底之國有林崩塌地，並建立國有林崩塌地之編號與基本資料，再依據判釋成果分析事業區及流域別崩塌地之變化。

二、國有林土石變化情形分析

工作流程說明如下：

(1) 土砂產量估算

崩塌地土砂產生量估算，擬蒐集崩塌體積與面積資料，建立臺灣各地質分區之崩塌體積與面積關係式，配合崩塌地判釋成果，計算各重大颱風事件在國有林班地之崩塌土砂生產量。

(2) 土砂流出量分析(Debris-2D)

針對國有林班地，因不涉及保全對象，土砂流出量與殘留量將利用水位站之輸砂量與流量觀測資料，推測逐年國有林班地之土砂流出量與殘留量。莫拉克災區之旗山溪、荖濃溪、太麻里溪、阿里山溪等四個集水區則涉及保全對象的問題，模擬分析上必須更加謹慎。因此，崩塌土石流出量模擬以 Debris-2D 的土石流數值模式，模擬崩塌料源供應後之土石流動的流出量與殘留量，作為殘留土砂二次土砂災害潛勢評估之依據。

(3) 降雨量與土砂流出量之關係

最後再由歷次颱風事件的土石流出量模擬結果，配合該場颱風



的雨量資料，進行相關性與迴歸分析，建立各地質分區降雨量和土石流出量的關係式。

三、國有林殘留土砂二次土砂災害潛勢評估

工作流程說明如下：

(1) 二次災害潛勢評估

二次災害潛勢評估則根據土砂殘留量的分析結果，藉由多變量統計分析之二元迴歸模式評估殘留土砂造成二次崩塌災害潛勢，計算新增崩塌量，將新增土砂量和土砂殘留量合併後，作為 Debris-2D 土砂料源起始條件，模擬新增土砂和殘留土砂產生的二次的影響範圍。

(2) 保全對象災害潛勢評估

依據崩塌潛勢分級與土石流影響範圍，建立保全對象災害潛勢評估分級，將災害與評估分級條件套疊分析，評估保全對象災害潛勢，製作研究區保全對象潛勢評估成果圖，並據此分級研擬分級管理配套。

(3) 易致災區與保全對象調查

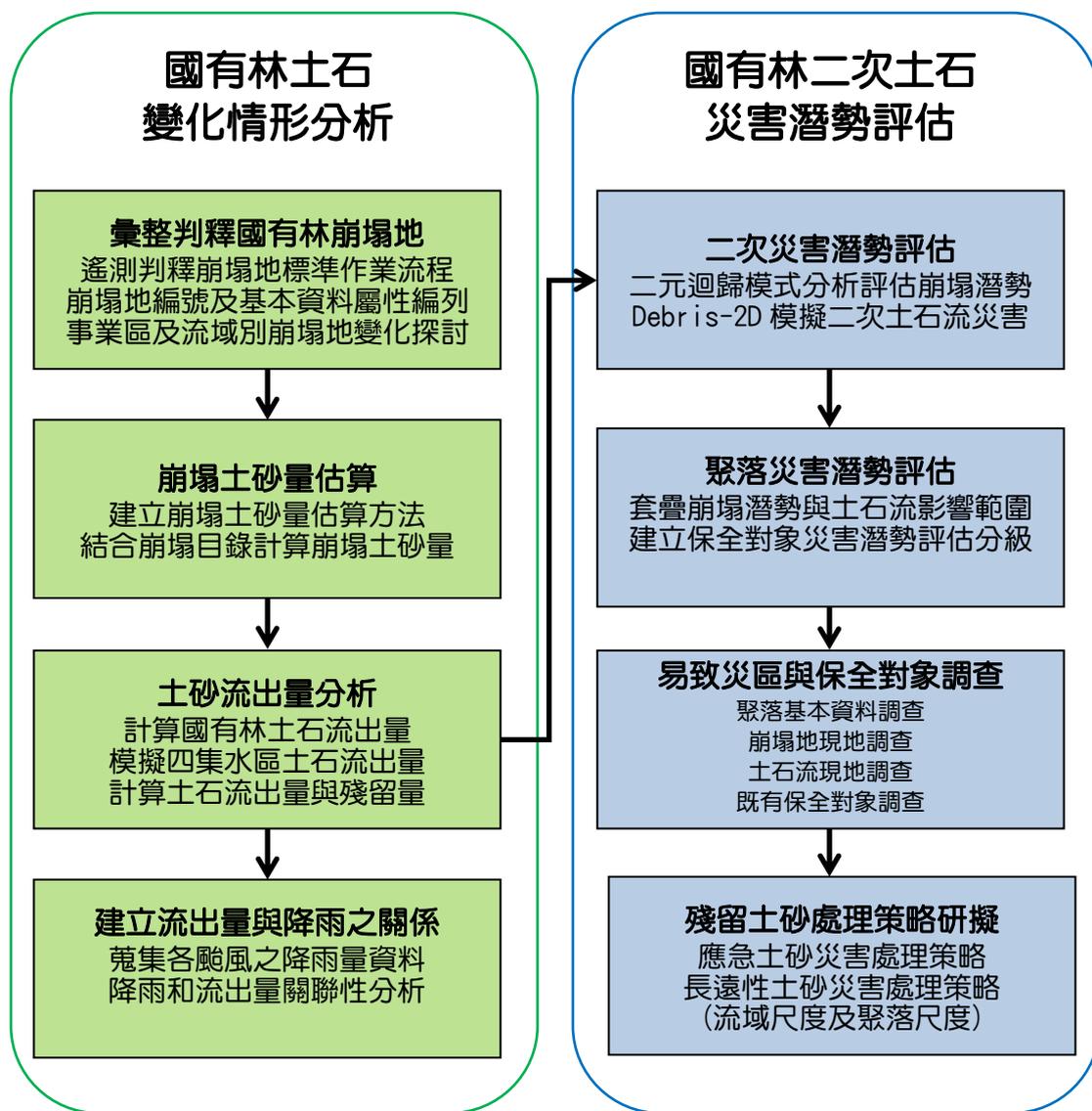
國有林地內殘留土砂二次災害潛勢評估與保全對象災害潛勢之現勘工作，包括聚落基本資料調查、崩塌地現地調查、土石流現地調查及既有保全對象調查等項，以作為評估與驗證基礎資料。此外，並就聚落周邊邊坡，採無人載具航拍方式進行坡面殘留土砂影像拍攝，並將 UAV 空拍影像製作成正射航照影像，以利圈繪判釋殘留土砂分布範圍，以利了解殘留土砂現況與提供模式驗證參考。

(4) 殘留土砂處理策略研擬

根據國有林殘留土砂二次土砂災害潛勢評估結果，擬定應急處理及長遠性土砂災害處理策略，分區分階段進行國有林殘留土砂處置，並以莫拉克風災為例進行國有林殘留土砂處理策略探討，此部



分係為「流域尺度殘留土砂處理策略研擬」。此外，擬就至少一處聚落周邊邊坡進行「聚落尺度殘留土砂處理策略研擬」，輔以地表 LiDAR 掃描製作高精度數值地形，透過 UAV 空拍結果及 LiDAR 高精度數值地形結果，共同圈繪判釋可能造成二次災害之殘留土砂分布，依據分布及地文、水文、現有工程整治點等資訊，研擬聚落尺度殘留土砂處理策略，以供國有林地內聚落尺度土砂二次災害影響之處理策略參考。



資料來源：本計畫整理。

圖 2-3-1 工作流程圖

第參章 國有林崩塌地判釋與歷程變化探討

本章蒐集彙整國有林崩塌地資料，運用遙測技術判釋與品管民國 98 年至 101 年底之國有林崩塌地，並建立國有林崩塌地之編號與基本資料，再依據判釋成果分析事業區及流域別崩塌地之變化歷程。

3-1 彙整判釋國有林崩塌地方法與原則

本項工作應包含(1)民國 98 年至 101 年底之國有林崩塌地資料蒐集與判釋；(2)建立國有林崩塌地之編號與基本資料；(3)事業區及流域別分析崩塌地之變化(99 年與 100 年崩塌地判釋資料為基礎)，茲詳細說明工作執行方法，並將此階段國有林崩塌地判釋與歷程變化探討結果彙整於後：

3-1-1 遙測判釋崩塌地標準作業流程

茲就遙測判釋崩塌地與建置崩塌地目錄作業流程進行說明：

- 一、遙測影像資料選擇與處理：本計畫使用衛星影像進行崩塌地初步圈繪，輔以正射航照影像及數值地形，利用色調、形狀及地形之差異將崩塌地發生區圈繪出來。
- 二、崩塌地判釋與數化：依據衛星影像底圖，根據崩塌地判釋準則進行崩塌地判釋與數化工作，以利建置完整且正確之崩塌地目錄。遙測判釋準則參考劉進金等人(2001)所提 SPOT 假色影像(以紅外線波段視為紅綠藍顏色組合之紅色波段，即 R band)之增揚處理方法，以及「五項研判準則」，主要藉由崩塌及其所處環境之物理特性進行研判。崩塌地判釋的五項研判準則(表 3-1-1)，而遙測判釋作業參考經濟部中央地質調查所(簡稱地調所)(2010)建議方法為之，遙測判釋崩塌地作業流程如圖 3-1-1 所示。

三、崩塌地判釋檢核與品管：數化完之崩塌地目錄須透過室內正射航照複核與現地調查檢核後，方可確認其數化正確性。崩塌地目錄品管作業流程如圖 3-1-2 所示。品管流程參考地調所(2010)建議採三級品管，茲說明品管內容如下：

- (1) 初步品管：利用航照與衛星照片再度確認是否所有影像變異區域都被圈繪，以避免雲霧遮蔽及地形陰影遮蔽遺漏之崩塌地。
- (2) 二次品管：經過初步品管認可後，則進行二次品管。品管重點在於刪除誤判之區域(如竹林、茶園、墓地、電塔、人工構造或菜園等非崩塌地區)，搭配正射航照進行再次檢核，以利濾除誤判之區域，即可獲得完整之崩塌地目錄。剔除誤判區域原則參考地調所(2009)建議，應先確認人為整地、農田、房舍、河道堆積、電塔及雲之誤判區域是否剔除，以確保崩塌地目錄之品質，圖 3-1-3 至圖 3-1-7 為正射航照和衛星影像對比，清楚表示進行二次品管剔除誤判區域之意義。
- (3) 專家品管：本團隊具有遙測影像判釋崩塌地之豐富經驗及專業品管人員，此階段品管程序將採用林務局農林航空測量所 40 公尺數值高程模型(DTM)產製之地形陰影圖(Shading map)、坡度圖進行地形合理性校驗，輔以相關 GIS 圖層(土地利用圖、路網圖、水系線分布圖、等高線等)進行崩塌堆積區、道路與河道等非屬崩塌發生區之剔除工作，以減少崩塌體積計算誤差。

3-1-2 專家判釋崩塌地基本原則

搭配全島衛星影像、土地使用分類資料與前期影像之下，操作崩塌地專家判釋的基本原則如下：

- 一、若前期影像中不明顯之上游野溪，在後期判釋影像中出現大規模崩塌或土石流者，均屬崩塌地(如圖 3-1-8)。以本計畫判釋之

- 2 公尺解析度福衛二號多光譜影像為例，前期影像中不明顯野溪之河道寬度皆在 10 公尺以內。
- 二、判釋影像中公路或人為開發區域出現大規模的邊坡崩塌，均屬崩塌地。然而若河水暴漲，導致河道擴張刷寬造成人為開發區域之毀壞，則不列入崩塌地(如圖 3-1-9)。
 - 三、若前期影像中未出現崩塌，在後期判釋影像中出現崩塌之區域，在本團隊判釋原則裡，均屬崩塌地(如圖 3-1-10)。
 - 四、裸露之岩壁在本計畫中均歸為崩塌地。然於比對年間資料分析時，並不影響新增崩塌地之面積(如圖 3-1-11)。
 - 五、進行崩塌地判釋的過程必然遭遇到河流因洪水擴張河道寬度的問題，基於前述內容可知主河道範圍視為非崩塌地區域，主河道範圍以周遭的邊坡為界限，河道旁崩塌之邊坡視為崩塌地。主河道需以人工裁切方式將河道濾除，因河水暴漲或刷寬之坡度平緩處視為堆積區，併同河道不列為崩塌地(如圖 3-1-12)。
 - 六、影像資訊不足之區域，如：陰影區(如圖 3-1-13(a))、白雲覆蓋區(如圖 3-1-13(b))以及雲覆區(圖 3-1-13(c)與圖 3-1-13(d))，無法從影像判釋該區域是否為崩塌地，故以上影像資訊不足區域不列為崩塌地。
 - 七、採用 3D 立體假色影像(False Color，係指近紅外波段衛星影像)進行判釋，輔以植生指標(如：NDVI 等)進行崩塌地研判，部分低植生區域(如：高山箭竹林)會被判釋圈繪，此時以 3D 立體假色影像為判釋要件，若該區域在 3D 立體假色影像中顯示植生訊號，則該區域不列為崩塌地(如圖 3-1-14 及圖 3-1-15)。

3-1-3 豪雨型崩塌地判釋地貌特徵

臺灣島地理位置特殊，夏秋之際經常遭受颱風侵襲。颱風自身挾帶或其引進之西南氣流常帶來強烈的豪雨，時常造成崩塌、土石流等

土砂災害的發生。劉進金等人(2001)將此種因豪雨造成的崩塌地稱為「豪雨型崩塌地」，並將其於衛星影像上的地貌特徵進行詳細地描述，彙整如下：

- 一、植生因被剝除或被崩積物覆蓋，呈現裸露的狀態，影像上色調明亮。
- 二、河系最上游一級河處常擴大成為湯匙狀。
- 三、形貌呈現細長條狀，具有完整之發源地、流通段及堆積扇。發源地位於陡坡處；流通段位於坡腹，邊坡深切；堆積扇位於陡坡下方坡度變緩處或直接匯入河谷，上述特徵如圖 3-1-16 所示。
- 四、河道攻擊側經常造成崩塌，河流轉彎呈帶狀崩塌，顯示流動之土石具有相當大的側蝕力(lateral erosion)。
- 五、大量鬆散的土壤或岩塊堆積於陡坡下。
- 六、集中的豪雨常使許多細長條狀崩塌帶下來的物質匯集在陡坡下方或主河道上，個別之長條狀崩塌沿流路如同水系發育般的匯集在一起，呈現樹枝狀的分布，如圖 3-1-17 所示。

另外，劉守恆(2002)曾依據財團法人工業技術研究院資料列舉幾項崩塌地在航空照片上可能的特徵，本計畫參考林務局(2011)成果列出前述未提及之項目，彙整如下：

- 一、河岸或邊坡趾部受河流切割。
- 二、河道突然變窄或彎曲：滑動中或不久前滑動之崩塌地，其趾部會凸向河流，導致河流變窄或轉彎。
- 三、在崖坡具有斷裂及張力裂隙。
- 四、崖坡下具有圓丘狀滑動體及起伏地形。
- 五、在照片上色調變化很大的區域。
- 六、色調較暗表示有較多的水分。
- 七、因潛移造成樹木傾斜及籬笆移位。

八、排水路線或河谷中堆積大量土石，如圖 3-1-18 所示，圈圈部分係因崩塌導致排水路線堆積大量土石產生之堰塞湖。

3-1-4 崩塌地變化歷程探討規劃

本計畫參酌林務局提供之崩塌地目錄(崩塌地分布圖)，並依據上揭衛星影像判釋流程完成 98 年至 101 年全臺國有林崩塌地判釋與蒐集工作，基於此成果，本節規劃以流域別、國有林地事業區與臺灣七大地質分區等單元探討崩塌地之變化與特性。崩塌地變化歷程分析規劃如圖 3-1-19 所示。分項說明於後：

一、崩塌地變化歷程探討

本計畫自行新增一期 97 年全臺國有林崩塌地，併同 98 年至 101 年崩塌地，有助於研判國有林近 5 年崩塌地變化歷程。執行方法係以 GIS 空間分析技術將各年度崩塌地區分為新增崩塌地(包含完全新增崩塌地及舊崩塌地擴大)、復育地兩類，依據流域別、事業區、與臺灣七大地質分區等單元分析崩塌地面積、崩塌率變化歷程。崩塌地類型定義參考地調所(2009)建議，定義示意如圖 3-1-20 所示。

二、新增崩塌地與地文因子關聯性探討

依據林務局提供與自行蒐集的 92 至 101 年間新增崩塌地(含完全新增崩塌地、舊崩塌地擴大)為基礎，利用 GIS 空間分析技術計算網格累積新增崩塌次數，再以 10 年時間進行時間尺度正規化，完成全國尺度崩塌頻率圖(landslide frequency map) (Glade, 1997; Reid, 1998)，如圖 3-1-21 所示，此結果可表示區域歷年崩塌發生頻率及易崩區域，可供國有林地崩塌地防治與管理參考。

表 3-1-1 崩塌地判釋五項研判準則

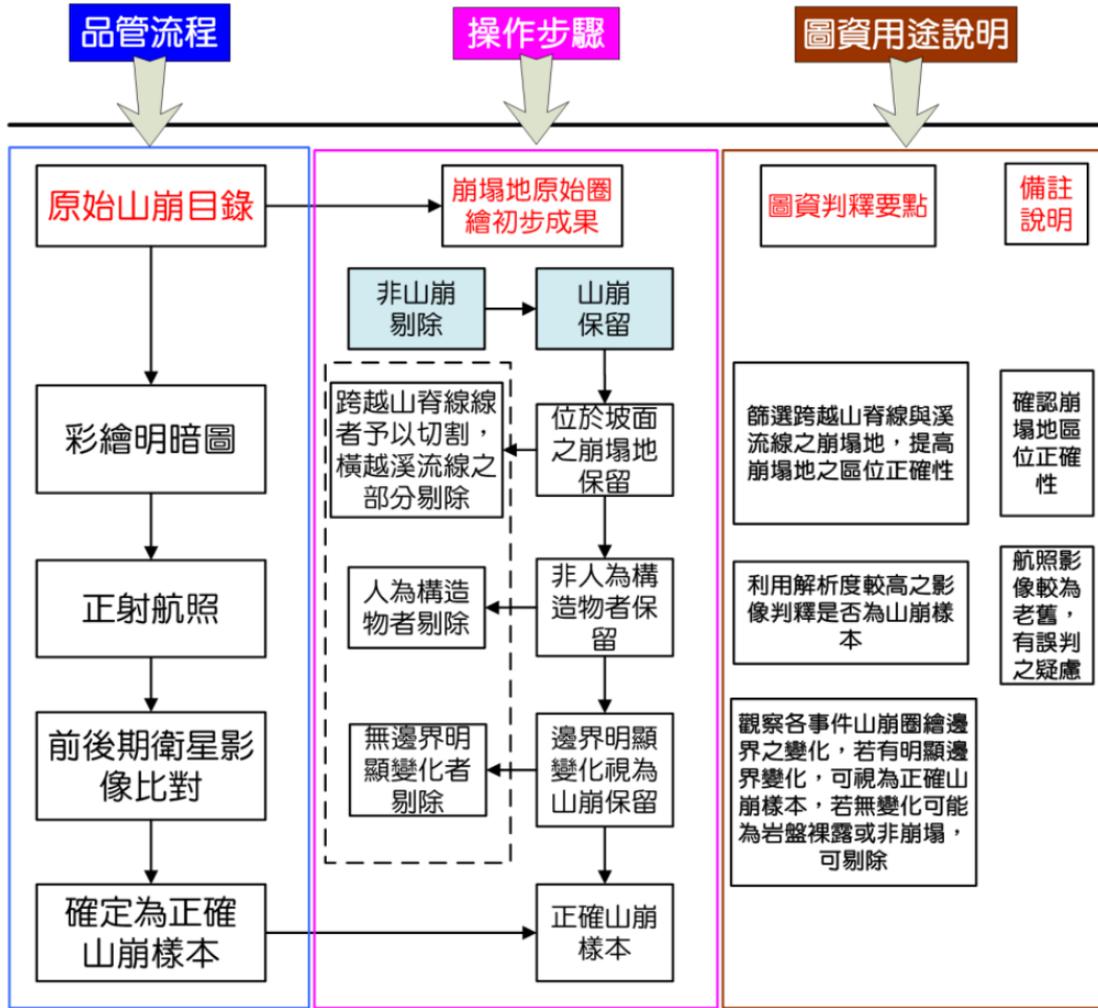
準則名稱與內涵	作業說明
色調準則(淡藍色、藍綠色、淡褐色、綠褐色)	崩塌地地區通常裸露或植生較稀疏，利用這個光譜特性作影像增揚處理，將崩塌地體與周圍環境的對比拉大。
區位準則 (靠近山脊、河谷衝擊坡、與道路等地方)	自然條件最易發生崩塌地之區位，其他區位的疑似崩塌地要審慎觀查與判斷。此準則量化分析時可使用山脊、河谷、與道路之特定距離的環域緩衝帶(buffer zone) 代替。
形狀準則 (一般長條型或湯匙型或匯集為樹枝狀，河谷旁可能成三角型或矩型)	對於類似「人工田野」(crop fields)規則狀的疑似崩塌地要審慎觀查與判斷。此準則量化分析時可使用崩塌地的圓度(即崩塌地的面積與周長的比值) 代替。
方向準則 (長軸方向與重力方向或邊坡水流方向一致)	此準則用於篩除不合理的形狀，量化分析時可使用崩塌地的滑落方向與邊坡方向之夾角代替。
陰影準則 (輔助 2D 影像之 3D 的視覺，可分辨河谷與山脊)	對於「跨山脊」或「跨河谷」的疑似崩塌地要審慎觀查與判斷。此準則用於篩除不合理的分布，量化分析時可使用崩塌地與山脊線及水系網路的交集代替。

資料來源：劉進金等人(2001)。



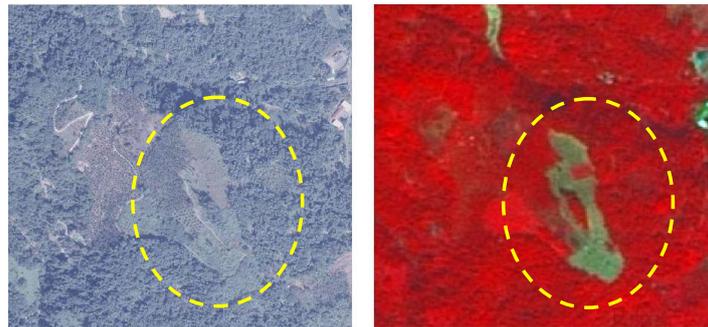
資料來源：摘自地調所(2010)。

圖 3-1-1 遙測判釋崩塌地作業流程圖



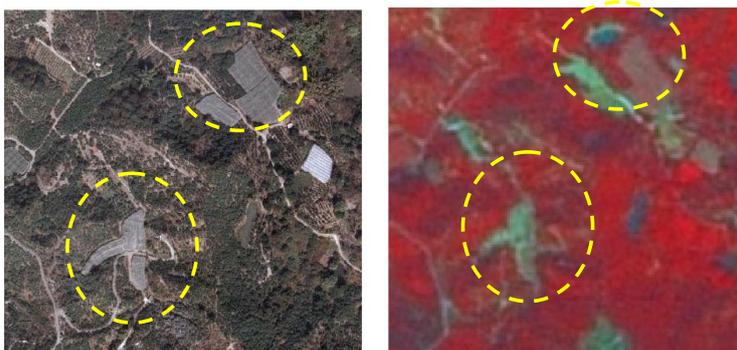
資料來源：摘自地調所 (2010)

圖 3-1-2 崩塌地目錄品管作業流程圖



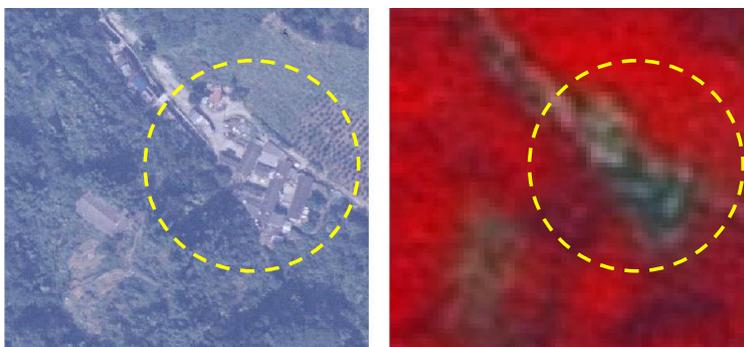
資料來源：摘自地調所 (2009)

圖 3-1-3 人為整地誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像)



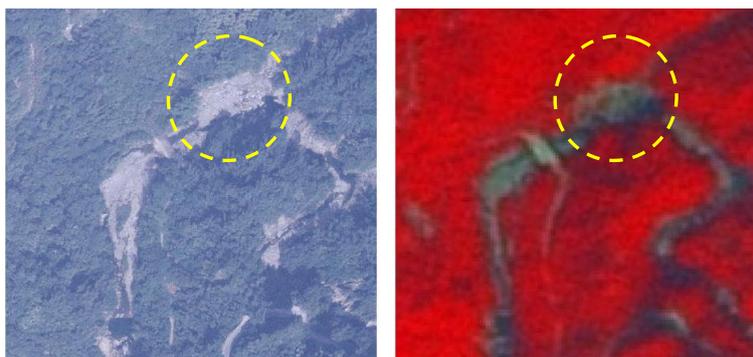
資料來源：摘自地調所 (2009)

圖 3-1-4 農田誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像)



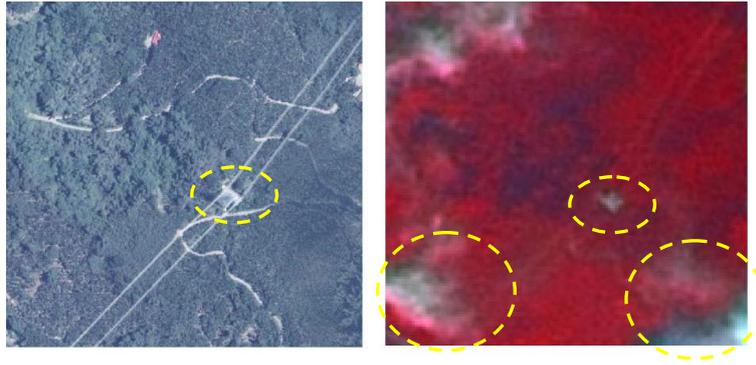
資料來源：摘自地調所 (2009)

圖 3-1-5 房舍誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像)



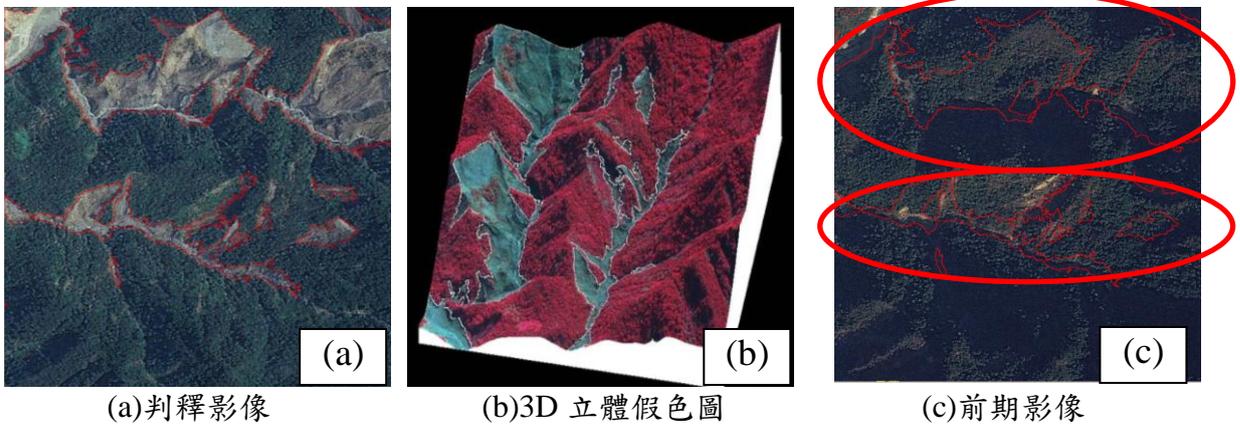
資料來源：摘自地調所 (2009)

圖 3-1-6 河道堆積誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像)



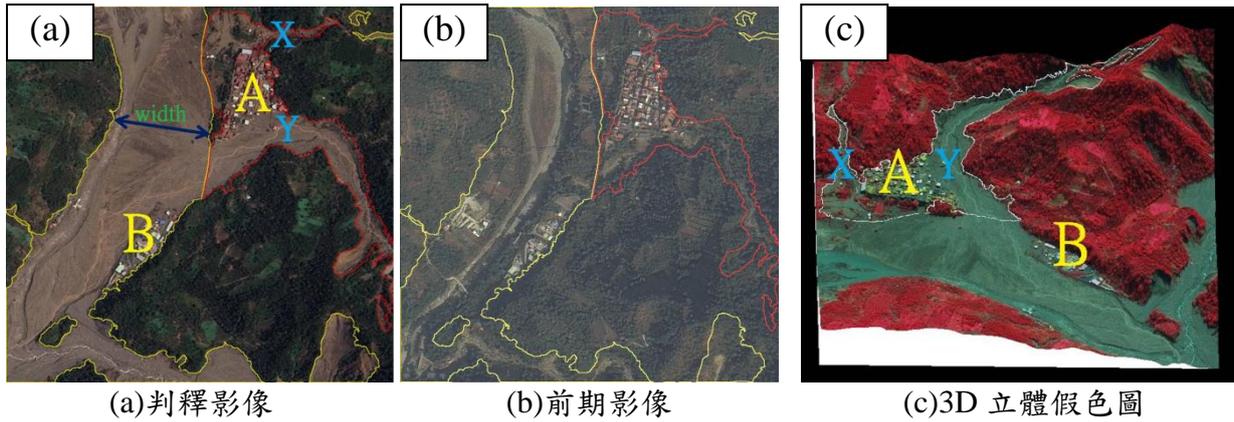
資料來源：摘自地調所 (2009)

圖 3-1-7 電塔及雲誤判區示意圖(左為航照、右為衛星影像)



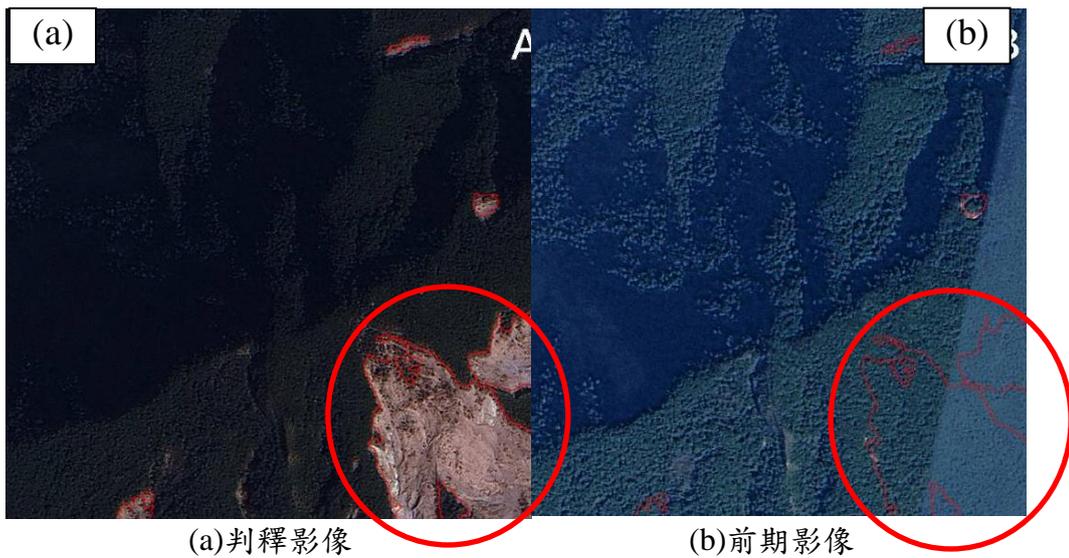
(a)判釋影像 (b)3D 立體假色圖 (c)前期影像
資料來源：本計畫整理。
說明：判釋影像中所圈繪之崩塌地區域在前期影像中屬於河道不明顯之野溪，將其視為崩塌地。

圖 3-1-8 河道不明顯之野溪崩塌地判釋標準示意圖



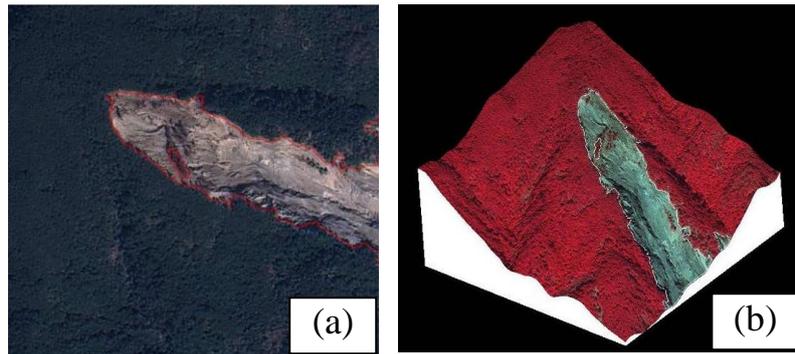
說明：前期影像中有兩處人為開發區(A區和B區)，此二區在判釋影像中皆出現明顯的毀壞；A區之毀壞除了河道擴張沖刷外，亦有X和Y兩處野溪所造成的土石崩塌因素，因此視A區為崩塌地，圈選之。B區之毀壞則屬於河道擴張沖刷所致，不列入崩塌地。

圖 3-1-9 人為開發與河道擴張崩塌地判釋標準示意圖



說明：判釋影像中圈繪的崩塌地區域，在前期影像中並未出現，此類型的非植生區域將其歸為崩塌地。

圖 3-1-10 非植生區崩塌地判釋標準示意圖

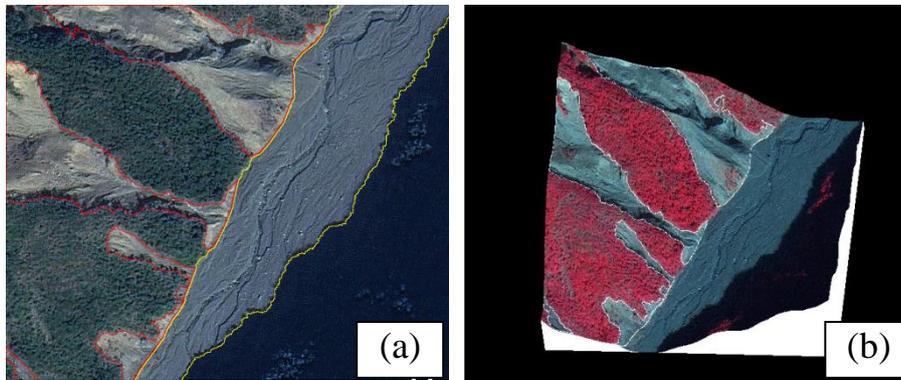


(a)判釋影像

(b)3D 立體假色圖

資料來源：本計畫整理。

圖 3-1-11 出露岩壁區崩塌地判釋標準示意圖



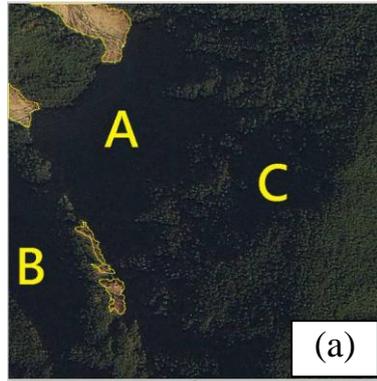
(a)判釋影像

(b)3D 立體假色圖

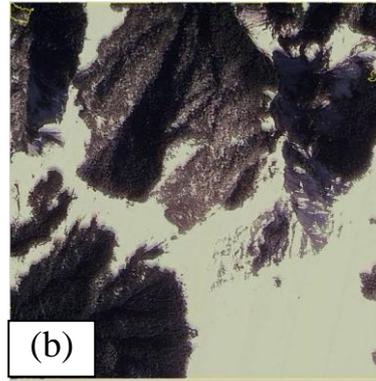
資料來源：本計畫整理。

說明：判釋影像中紅色圈選部分屬於崩塌地，黃色部分屬於主河道範圍，兩者以河道邊界作為判釋要件，坡度較陡之河道邊坡崩塌視為崩塌

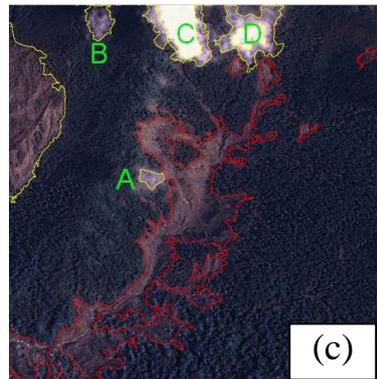
圖 3-1-12 河道與鄰近邊坡崩塌地判釋標準示意圖



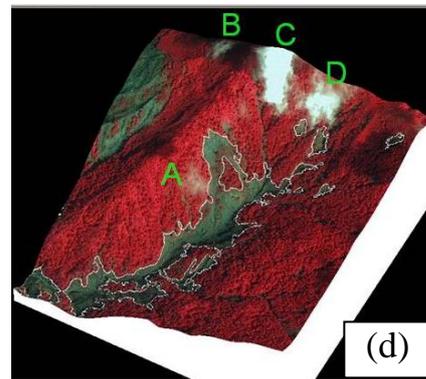
(a)判釋影像中 A、B、C 三區屬於陰影區



(b)判釋影像中有白雪覆蓋區



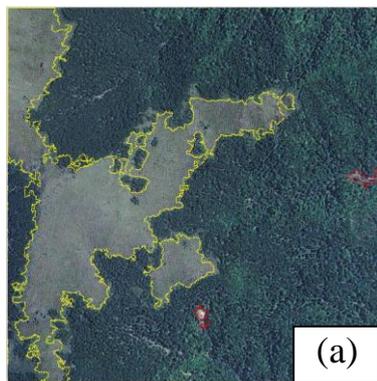
(c)判釋影像中 A、B、C、D 四區為白雲覆蓋區



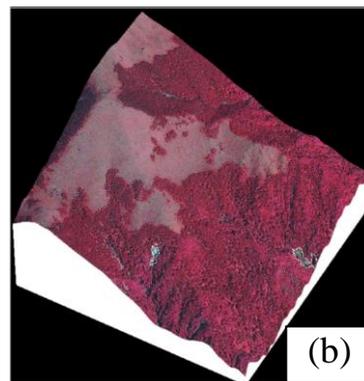
(d)為(c)圖的 3D 立體假色圖

資料來源：本計畫整理。

圖 3-1-13 影像資訊不足區域不列為崩塌地之情況示意圖



(a)判釋影像

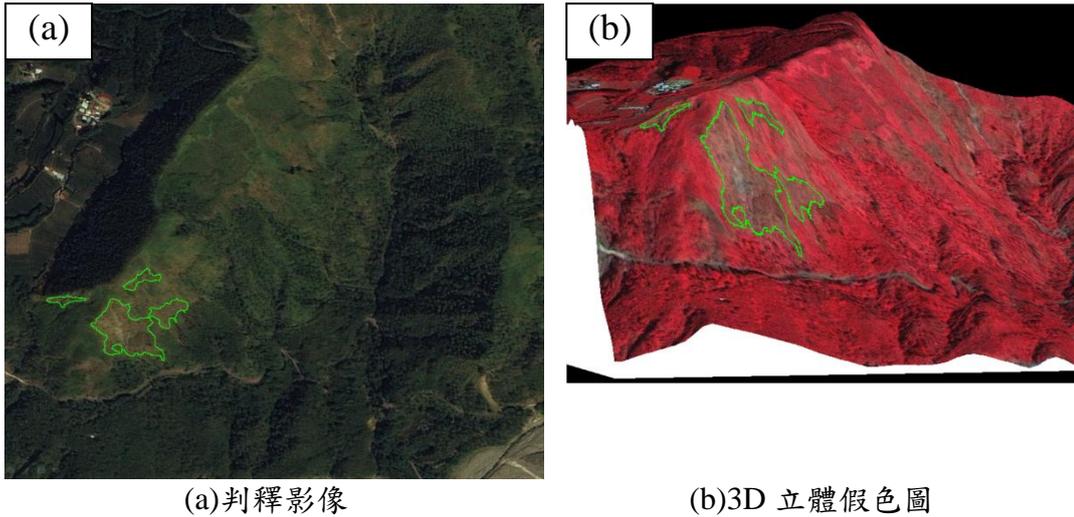


(b)3D 立體假色圖

資料來源：本計畫整理。

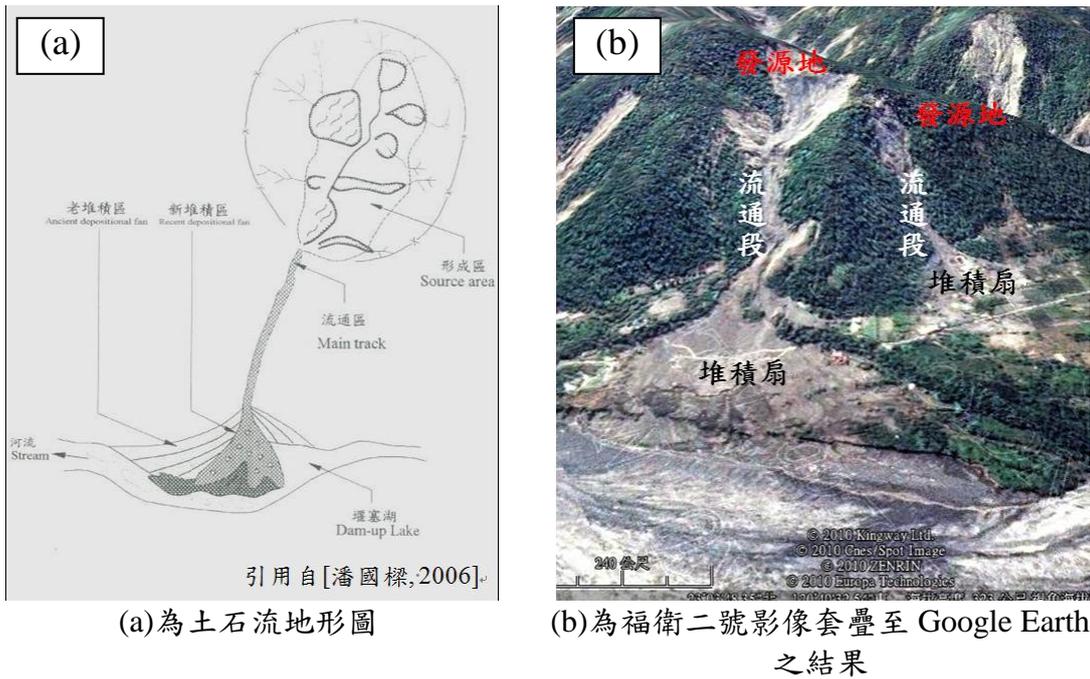
說明：判釋影像中所圈繪的區域屬於低植生區域，該區在(b)圖中仍顯示植生訊號，因此不將其列為崩塌地

圖 3-1-14 低植生反映區域崩塌地判釋標準示意圖



(a) 判釋影像
 (b) 3D 立體假色圖
 資料來源：本計畫整理。
 說明：判釋影像中，綠色圈選的部分在假色立體圖可明顯看出這些區域依然顯示出植生訊號，故不列入崩塌地

圖 3-1-15 植生反映區域崩塌地判釋標準示意圖

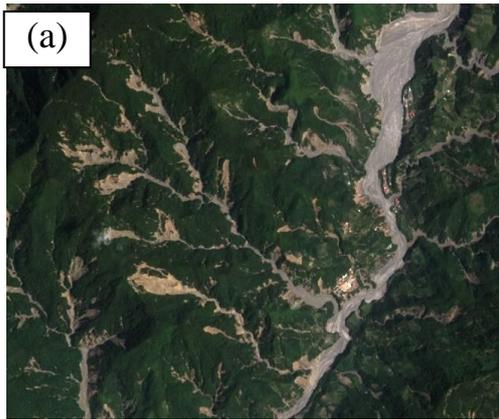


(a) 為土石流地形圖

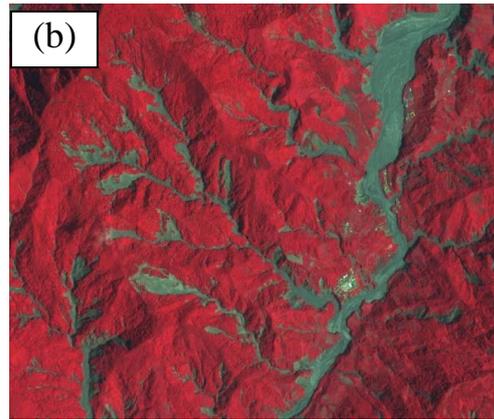
(b) 為福衛二號影像套疊至 Google Earth 之結果

資料來源：林務局(2011)

圖 3-1-16 豪雨型特徵崩塌地示意圖



(a)為真實自然色之福衛二號影像



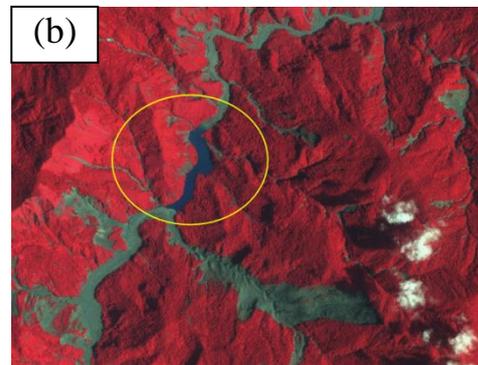
(b)為標準假色之福衛二號影像

資料來源：本計畫整理。

圖 3-1-17 崩塌地呈樹枝狀分布特徵



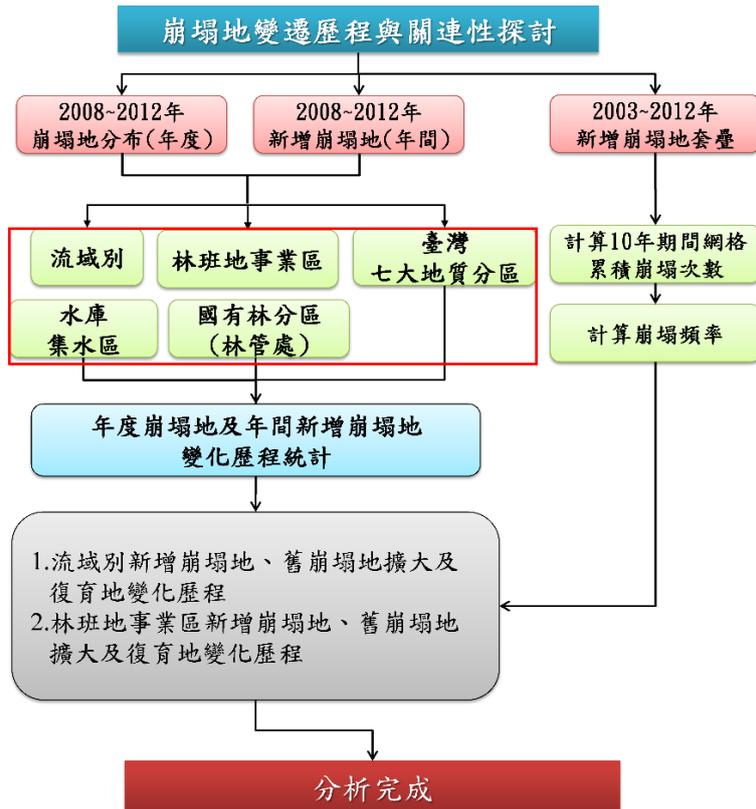
(a)真實自然色之福衛二號影像



(b)標準假色之福衛二號影像

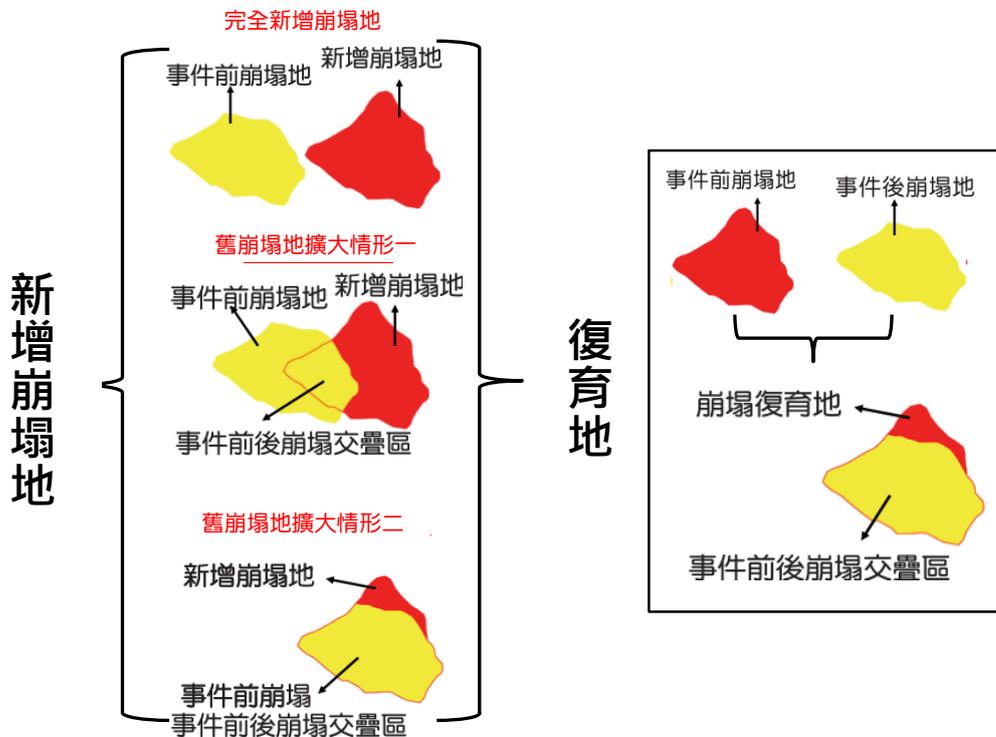
資料來源：本計畫整理。

圖 3-1-18 排水路線或河谷中堆積大量土石示意圖



資料來源：本計畫整理。

圖 3-1-19 崩塌地變化歷程與關聯性探討分析規劃



資料來源：本計畫整理。

圖 3-1-20 崩塌地類型定義

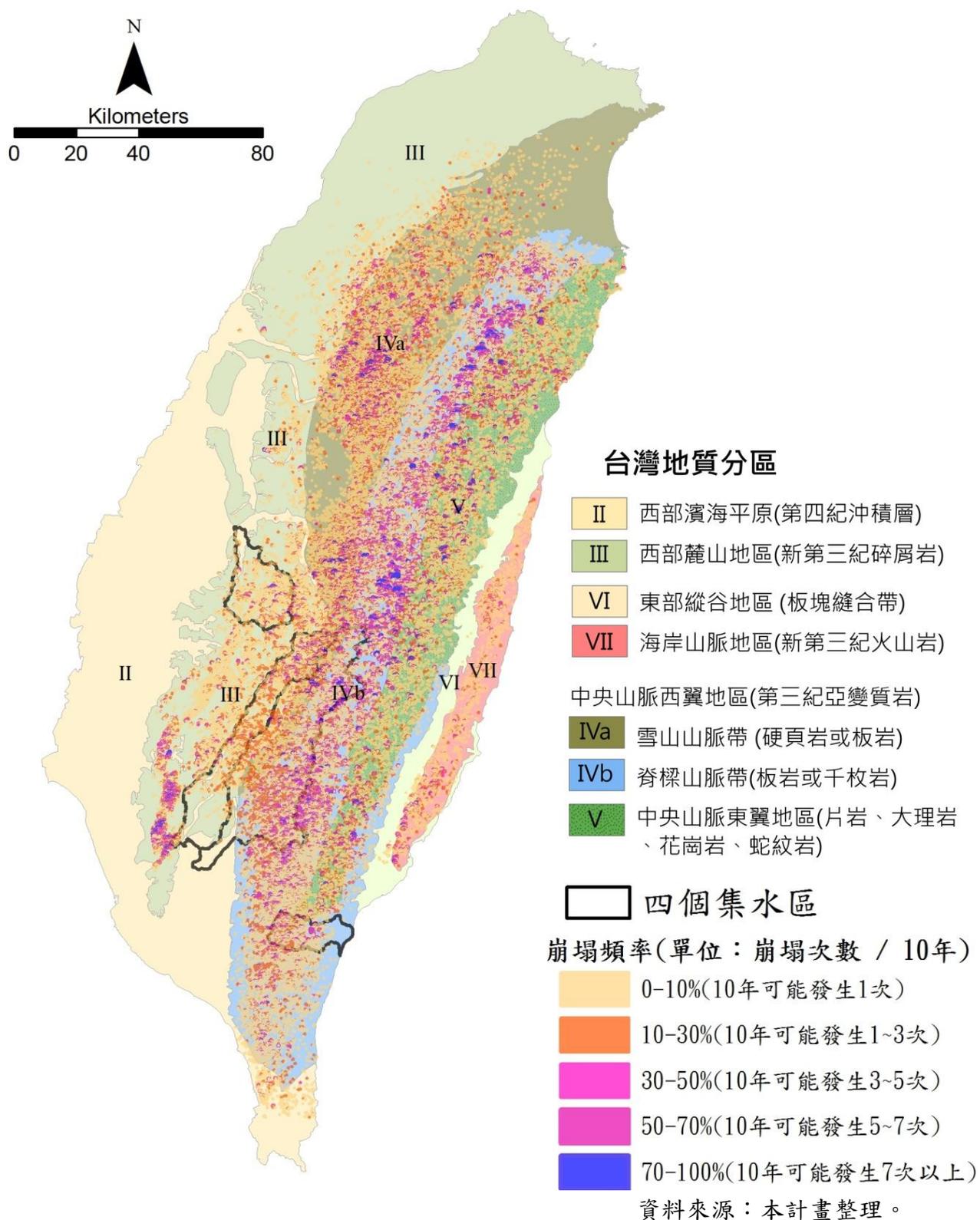


圖 3-1-21 全臺國有林地崩塌頻率圖

3-2 國有林崩塌地編號及基本資料屬性編列

近年來 GIS 能獲得各領域之廣泛使用，最主要原因是透過 GIS 軟體可進行強大的空間統計、關聯、預測及規劃等計算，進而獲致傳統分析所不能達到的空間整合資訊。為發揮 GIS 的優勢，首先需具有妥善規劃的圖層屬性資料，根據計畫目的，產製之崩塌地圖層資料需協助貴局統計 98~101 年崩塌地變化歷程，以協助未來土砂治理與監測對策研擬參考。

崩塌地屬性編列擬透過與其它已建立圖資之連結，取得更豐富的空间資訊。預計使用之圖資包括：

- 一、經濟部中央地質調查所：兩萬五千分之一環境地質圖、五萬分之一地質圖(若沒有五萬分之一地質圖的區域，將以其他尺度地質圖替代)
- 二、內政部基本圖：縣市界、鄉鎮界、村里界、五千分之一地形圖框
- 三、農委會水土保持局：土石流潛勢溪流、全省山坡地土壤圖
- 四、農委會林務局：林班圖、林地土壤圖、數值地形模型
- 五、內政部國土測繪中心：數值地籍圖、國土利用調查成果
- 六、經濟部水利署：全島流域範圍圖、集水區範圍、水庫集水區等

實際執行方面，以民國 98 年至 101 年底之國有林崩塌地目錄為主，利用 GIS 軟體 SQL 語法方式進一步加值處理填入適當之崩塌地屬性資訊，以建立國有林崩塌地之編號與基本資料編列，上開基本資料至少應包含編號、行政區域(包含縣市鄉鎮、及國有林地事業區)、座標、崩塌面積等項，為使崩塌地目錄能發揮崩塌地管理及崩塌量追蹤用途，本計畫參考地調所(2010)建議，規劃崩塌地目錄基本資料表(表 3-2-1)與附屬資料表(表 3-2-2)，以利持續維護與擴充崩塌地目錄，達成崩塌地土砂二次災害管理及崩塌地變遷歷程探討參用。

表 3-2-1 崩塌地目錄基本資料表

屬性欄位	資料型態	備註
崩塌地編號	Char(14)	所屬林班地編號(2)+1/25,000 比例尺圖框編號(6)+流水號(6)
事件名稱	Char(20)	颱風或地震事件名稱 (如：莫拉克颱風後)
縣市界	Char(6)	例如：高雄市
鄉鎮界	Char(10)	例如：六龜區
村里界	Char(10)	例如：六龜里
崩塌地所屬圖號	Char(10)	1/5,000 圖號，例如：97223058
崩塌地所屬圖名	Char(10)	1/5,000 圖名，例如：寒溪
所屬集水區名稱	Char(20)	崩塌地隸屬子集水區名稱， 例如：梵梵溪
所屬流域名稱	Char(20)	崩塌地隸屬流域名稱， 例如：高屏溪流域
林業事業區名稱	Char(20)	崩塌地隸屬林業事業區名稱
崩塌地中心 X 座標	Float	TM2_X(TWD97)
崩塌地中心 Y 座標	Float	TM2_Y(TWD97)
崩塌地所屬影像類型	Char(6)	SPOT4/SPOT5/FS2/航照或其他
崩塌地所屬影像日期	Char(8)	YYYYMMDD
崩塌地所屬影像解析度	Char(6)	2/2.5/5/6.25/10 公尺或其他
判釋日期	Char(8)	YYYYMMDD
現場調查與檢核日期	Char(8)	YYYYMMDD

資料來源：本計畫整理。

表 3-2-2 崩塌地目錄附屬資料表

屬性欄位	資料型態	備註
崩塌地編號	Char(14)	所屬林班地編號(2)+1/25,000 比例尺圖框編號(6)+流水號(6)
崩塌地類別	Integer	1.新增/2.舊崩塌地擴大/3.復育地
崩塌地面積	Float	單位：平方公尺
崩塌地周長	Float	單位：公尺
崩塌地平均坡度	Float	擷取自數值地形，例如：10 度。
崩塌地主要坡向	Char(5)	A 東、B 東南、C 南、D 西南、E 西、F 西北、G 北、H 東北
崩塌地平均高程	Float	擷取自數值地形，例如：500 公尺。
崩塌地平均曲率	Float	擷取自數值地形，例如：0.1 1/公尺
崩塌地平均地形粗糙度(高程標準差)	Float	擷取自數值地形，例如：0.1 公尺。
崩塌地所屬地層	Char(16)	擷取自地調所 1/50,000 地質圖或其他比例尺地質圖資訊，例如：廬山層清水湖段
崩塌地所屬地層說明	Char(100)	例：板岩或千枚岩，偶夾薄層變質砂岩
崩塌位於坡面位置	Char(7)	A 坡頂、B 坡腹、C 坡趾、D 全坡面
崩塌地點之坡面形狀	Char(7)	A 凸谷形、B 凸直形、C 凸脊形、D 直谷形、E 平直形、F 直脊形、G 凹谷形、H 凹直形、I 凹脊形
崩塌地附近植被狀況	Char(7)	A 裸露、B 稀疏、C 茂密、D 完全覆蓋
崩塌地區域土地利用	Char(50)	連接至國土利用調查成果， 例如：天然竹林
推估崩塌體積	Float	根據本計畫發展 之崩塌面積-體積經驗公式推估

資料來源：本計畫整理。

3-3 崩塌地成果與變化歷程探討

本計畫依據前述崩塌地品管流程完成 97~101 年國有林崩塌地三級品管，初步確認崩塌地區位正確性，再以品管完成之崩塌地，進行流域別及國有林地事業區變化歷程探討，並就新增崩塌地空間分布進行地文因子特性分析與歸納。

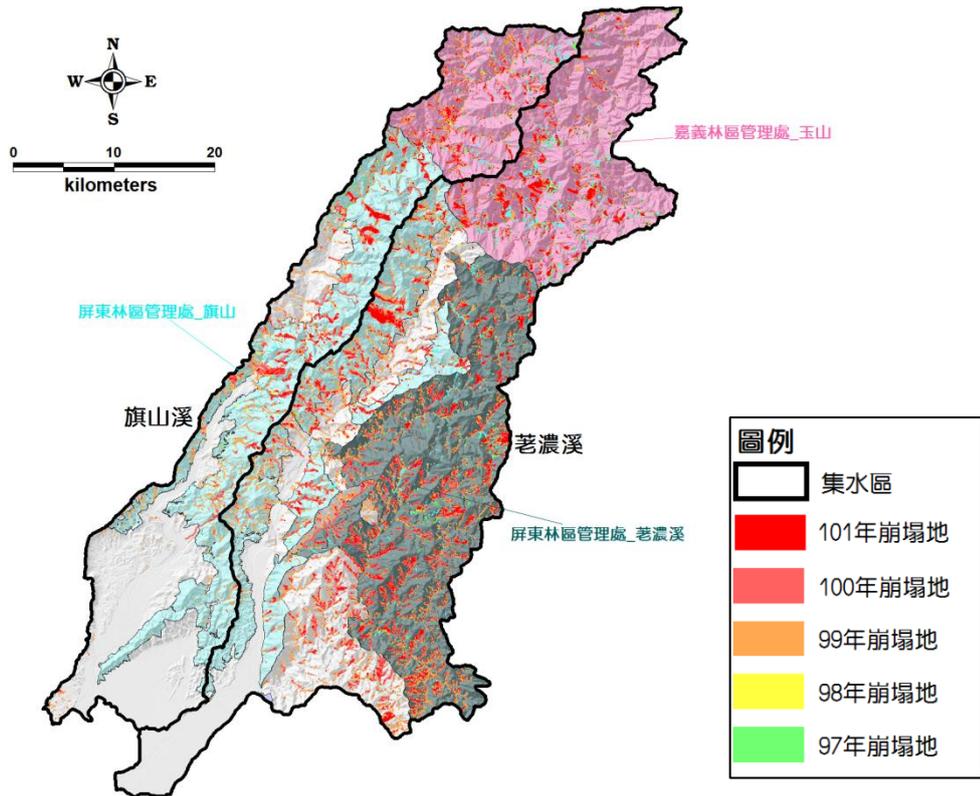
各年度崩塌地判釋最具代表性及影響力颱風事件分別是，97 年崩塌地代表卡玫基颱風前、98 年崩塌地代表莫拉克颱風前、99 年崩塌地代表莫拉克颱風後至凡那比颱風前、100 年崩塌地代表凡那比颱風後及 101 年崩塌地代表蘇拉颱風與天秤颱風前。各年度崩塌地於流域及國有林地事業區分布以旗山溪與荖濃溪為例，如圖 3-3-1 所示。

根據上述 97 年至 101 年崩塌地分布，進行兩年間崩塌地(新增崩塌地、舊崩塌地擴大)及復育地產製。年間崩塌地分布結果於流域及事業區分布以旗山溪與荖濃溪為例如圖 3-3-2 所示。

後續崩塌地變化歷程探討，以崩塌地面積為主，因各分區中(水庫集水區、集水區、國有林地林區界、國有林地事業區)子分區面積大小不一，為統一探討基準，故以崩塌地面積進行年度與年間崩塌地變化探討，而崩塌率結果可供了解崩塌地分布佔探討區域之比例及影響程度。

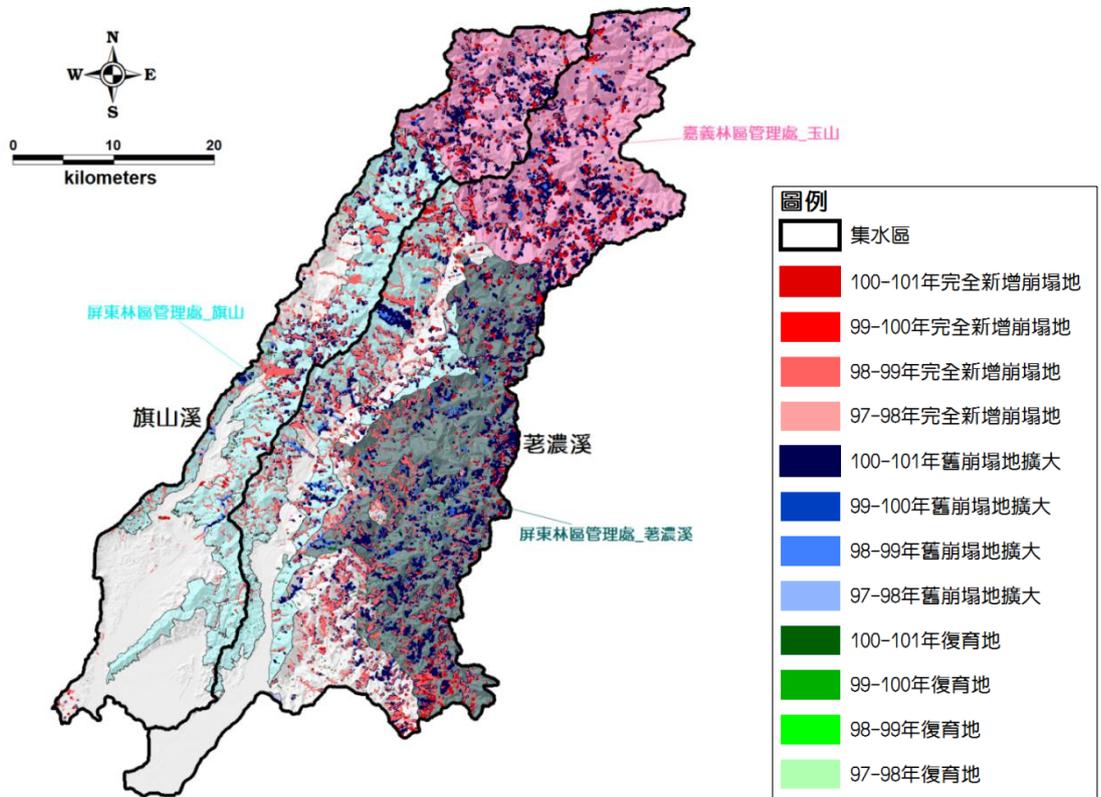
$$LSR_i = \frac{A_{i,ls}}{A_i} \times 100\% \quad (\text{式 3-1})$$

上式中， LSR_i 為崩塌率(landslide ratio)，單位為無因次； $A_{i,ls}$ 為探討分區中子分區崩塌地面積總和； A_i 為子分區面積，單位須與崩塌地面積一致，本計畫採用公頃為單位。



資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-1 年度崩塌地於流域集水區及林地事業區分布圖



資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-2 年間崩塌地於流域集水區及林地事業區分布圖

3-3-1 流域別崩塌地變化歷程探討

依據蒐集與判釋的 97~101 年崩塌地目錄為基礎，進行流域別崩塌地變化歷程探討，分析上就水庫集水區及集水區範圍分別進行崩塌地變化歷程探討，主要分就不同年度崩塌地及各年間新增崩塌地、舊崩塌地擴大及復育地進行統計分析，期了解年度與年間崩塌地變化歷程。水庫集水區及流域別崩塌地變化歷程統計數值請參見附錄二，分析結果摘要說明如後：

一、水庫集水區

依據林務局提供之水庫集水區(圖 3-3-3)進行年度及年間崩塌地統計，各水庫集水區年度崩塌地面積與崩塌率統計結果如圖 3-3-4 與圖 3-3-5；各水庫集水區年間崩塌地面積與崩塌率統計結果如圖 3-3-6 至圖 3-3-13。

(1) 年度崩塌地統計結果

崩塌地面積統計結果顯示，97 及 98 年以德基水庫集水區崩塌面積最大，分別達 804 公頃及 250 公頃之多；99 及 100 年以曾文水庫集水區崩塌面積最大，因受 98 年莫拉克颱風及 99 年凡那比颱風影響，致使南部曾文水庫集水區產生大量崩塌地，崩塌面積分別達 1,387 公頃及 728 公頃之多；101 年因受蘇拉颱風與天秤颱風之影響，以中部地區之德基水庫崩塌面積最大，高達 719 公頃之多。綜合年度崩塌地統計結果可知，近五年崩塌地分布位置於水庫集水區範圍，北部以石門水庫影響較大；中部以德基水庫、霧社水庫集水區影響較大，南部地區則以曾文水庫、南化水庫及烏山頭水庫集水區(曾南烏水庫集水區)較為嚴重。

(2) 年間崩塌地統計結果

以下茲就本計畫水庫集水區年間崩塌地變化歷程統計結果說明如下：



- A. 97~98 年：新增崩塌地面積以南化水庫集水區最大，達 77 公頃之多；舊崩塌地擴大以曾文水庫集水區最大，達 39 公頃；復育地面積以德基水庫集水區最大，達 594 公頃之多。以整體趨勢來看，各水庫集水區新增崩塌地面積總和達 316 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 152 公頃，復育地面積總和達 1,252 公頃，結果顯示 97~98 年水庫集水區新增崩塌地多屬完全新增崩塌地，面積高達 277 公頃，且以南化水庫集水區比例最高，單以南化水庫集水區之新增崩塌地就佔了全部水庫集水區新增崩塌地的 24.4% 之多，以 97 至 98 年崩塌變遷情形可知為崩塌復育多於新增崩塌之情形。
- B. 98~99 年：新增崩塌地面積以曾文水庫集水區最大，達 1,276 公頃之多；舊崩塌地擴大以曾文水庫集水區最大，達 345 公頃；復育地面積以德基水庫集水區最大，達 123 公頃之多。以整體趨勢來看，各水庫集水區新增崩塌地面積總和達 2,207 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 818 公頃，復育地面積總和達 287 公頃，結果顯示 98~99 年水庫集水區新增崩塌地多屬完全新增崩塌地，且以曾文水庫集水區比例最高，單以曾文水庫集水區之新增崩塌地就佔了全部水庫集水區新增崩塌地的 57.8% 之多，以 98 至 99 年崩塌變遷情形可知新增崩塌多於復育之情形，主要原因係 98 年莫拉克颱風引致新增崩塌地眾多，且既有崩塌復發比例頗高，導致新增崩塌多於復育情況。
- C. 99~100 年：新增崩塌地面積以德基水庫集水區最大，達 341 公頃之多；舊崩塌地擴大以曾文水庫集水區最大，達 166 公頃；復育地面積以曾文水庫集水區最大，達 888 公頃之多。以整體趨勢來看，各水庫集水區新增崩塌地面積總和達 925 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 445 公頃，復育地面積總和



達 1,797 公頃，結果顯示 99~100 年水庫集水區完全新增與舊崩塌地擴大各約佔新增崩塌地面積總和一半，且以德基水庫集水區比例最高，單以德基水庫集水區之新增崩塌地就佔了全部水庫集水區新增崩塌地的 36.9% 之多，復育地以曾文水庫集水區最多，復育地面積佔全部水庫集水區復育地面積的 49.4%，主要是 98 年莫拉克颱風後並未因 99 年凡那比颱風再造成大面積之新增崩塌，反而舊有崩塌地復育比例提高，整體而言，99 至 100 年崩塌變遷情形為復育多於新增崩塌之情形。

- D. 100~101 年：新增崩塌地面積以德基水庫集水區最大，達 350 公頃之多；舊崩塌地擴大以德基水庫集水區最大，達 231 公頃；復育地面積以曾文水庫集水區最大，達 413 公頃之多。以整體趨勢來看，各水庫集水區新增崩塌地面積總和達 721 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 516 公頃，復育地面積總和達 832 公頃，結果顯示 100~101 年水庫集水區完全新增與舊崩塌地擴大各約佔新增崩塌地面積總和一半，且以德基水庫集水區比例最高，單以德基水庫集水區之新增崩塌地就佔了全部水庫集水區新增崩塌地的 48.6% 之多，以 100 至 101 年崩塌變遷情形可知為復育略多於新增崩塌之情形，主要影響的颱風事件為 100 年南瑪都和泰利颱風。

二、流域別

依據林務局提供之流域集水區(圖 3-3-14)進行崩塌地進行年度及年間崩塌地統計，各流域年度崩塌地面積與崩塌率統計結果如圖 3-3-15 與圖 3-3-16；各流域年間崩塌地面積與崩塌率統計結果如圖 3-3-17 至圖 3-3-24。

(1) 年度崩塌地統計結果



崩塌地面積統計結果顯示，97 至 101 年若以 98 年莫拉克颱風事件為分界，莫拉克颱風前以濁水溪流域崩塌面積最大，莫拉克後崩塌地則主要集中於高屏溪流域，各年度崩塌面積分別達 4,561 公頃、2,607 公頃、17,169 公頃、13,845 公頃及 12,212 公頃之多。綜合年度崩塌地統計結果可知(詳附錄二)，97~101 年崩塌面積分別達到 1,473 公頃、848 公頃、1,331 公頃、987 公頃及 1,370 公頃，近 5 年崩塌地分布以南部地區較大，又以高屏溪流域為最大。依據統計結果可得知，北部地區近 5 年崩塌地面積以南澳沿海河系流域較大；中部 97~101 年崩塌面積分別達到 5,430 公頃、2,952 公頃、4,941 公頃、5,791 公頃及 6,118 公頃，近 5 年崩塌地面積以濁水溪流域影響較大；東部 97~101 年崩塌面積分別達到 2,414 公頃、1,132 公頃、5,118 公頃、3,919 公頃及 5,101 公頃，近 5 年崩塌地面積以卑南溪流域較為嚴重。

(2) 年間崩塌地統計結果

以下茲就本計畫各年間流域及流域內林班地變化歷程統計結果說明如下：

年間崩塌地面積統計結果說明如下：

- A. 97~98 年：新增崩塌地面積、舊崩塌地擴大面積、復育地面積均以濁水溪流域最大，分別達 753 公頃、514 公頃、3,231 公頃之多。以整體趨勢來看，各流域集水區新增崩塌地面積總和達 5,143 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 3,206 公頃，復育地面積總和達 16,419 公頃，結果顯示 97~98 年流域集水區新增崩塌地偏向舊崩塌地擴大之情形，各流域舊崩塌地擴大總和佔新增崩塌地總和比例達 62.3%，以 97 至 98 年崩塌變遷情形為崩塌復育多於新增崩塌之情形。





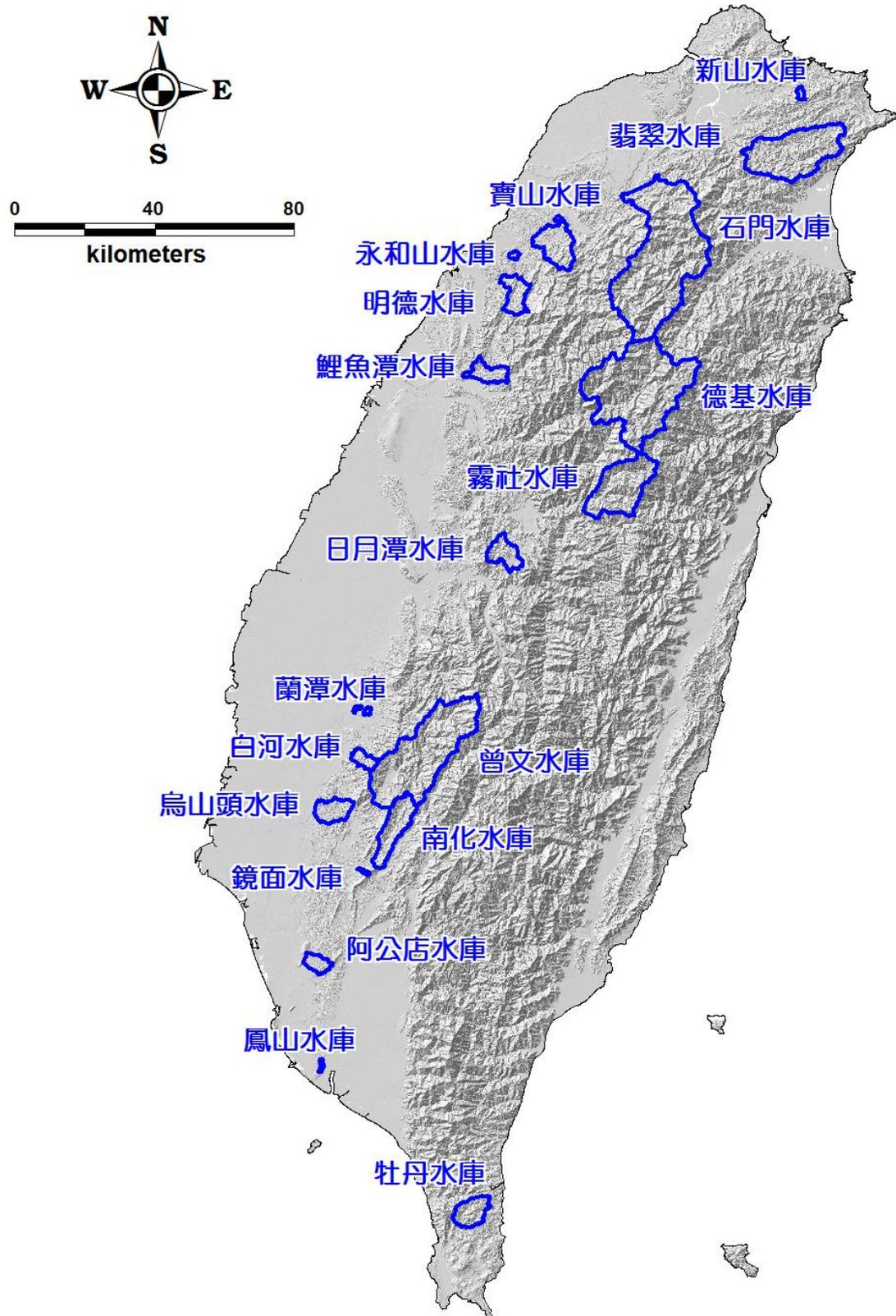
- B. 98~99 年：新增崩塌地面積以高屏溪流域最大，達 15,031 公頃之多；舊崩塌地擴大以高屏溪流域最大，達 8,711 公頃；復育地面積以濁水溪流域最大，達 815 公頃之多。以整體趨勢來看，各流域集水區新增崩塌地面積總和達 37,923 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 21,929 公頃，復育地面積總和達 4,415 公頃，結果顯示 98~99 年流域集水區舊崩塌地擴大總和約佔新增崩塌地面積總和 57.8%，且南部地區以高屏溪流域比例較高，單以高屏溪流域之新增崩塌地就佔了全部流域集水區新增崩塌地的 39.6% 之多，以 98 至 99 年崩塌變遷情形為新增崩塌多於復育之情形，其中 98 年莫拉克颱風豪雨引致大規模面積崩塌所致，且既有崩塌復發比例頗高，導致南部地區如曾文溪流域、高屏溪流域、卑南溪流域、南台東河系流域及林邊溪流域新增崩塌遠遠多於復育情況。
- C. 99~100 年：新增崩塌地面積、舊崩塌地擴大面積與復育地皆以高屏溪流域為最大，新增崩塌地面積達 4,149 公頃，舊崩塌地擴大面積達 2,910 公頃，復育地面積達 7,473 公頃之多。以整體趨勢來看，各流域集水區新增崩塌地面積總和達 13,993 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 8,573 公頃，復育地面積總和達 24,395 公頃，結果顯示 99~100 年流域集水區舊崩塌地擴大總和約佔新增崩塌地面積總和 61.3%，且以高屏溪流域比例最高，單以高屏溪流域之新增崩塌地就佔了全部流域集水區新增崩塌地的 29.6% 之多，復育地仍以高屏溪流域最多，復育地面積佔全部流域集水區復育地面積的 30.6%，主要是 98 年莫拉克颱風後並未因 99 年凡那比颱風再造成大面積之新增崩塌，反而舊有崩塌地復育比例提高，整體而言，99 至 100 年崩塌變遷情形為復育



多於新增崩塌之情形。其中，因為 99 年凡那比颱風豪雨引致崩塌地主要集中在大安溪、大甲溪、濁水溪與高屏溪等流域，主要以中部地區為主，且 98 年莫拉克颱風產生之崩塌地復發比例不高，致使南部地區如高屏河流域、卑南河流域、二仁河流域、南台東河系流域及林邊河流域有為數不少復育。

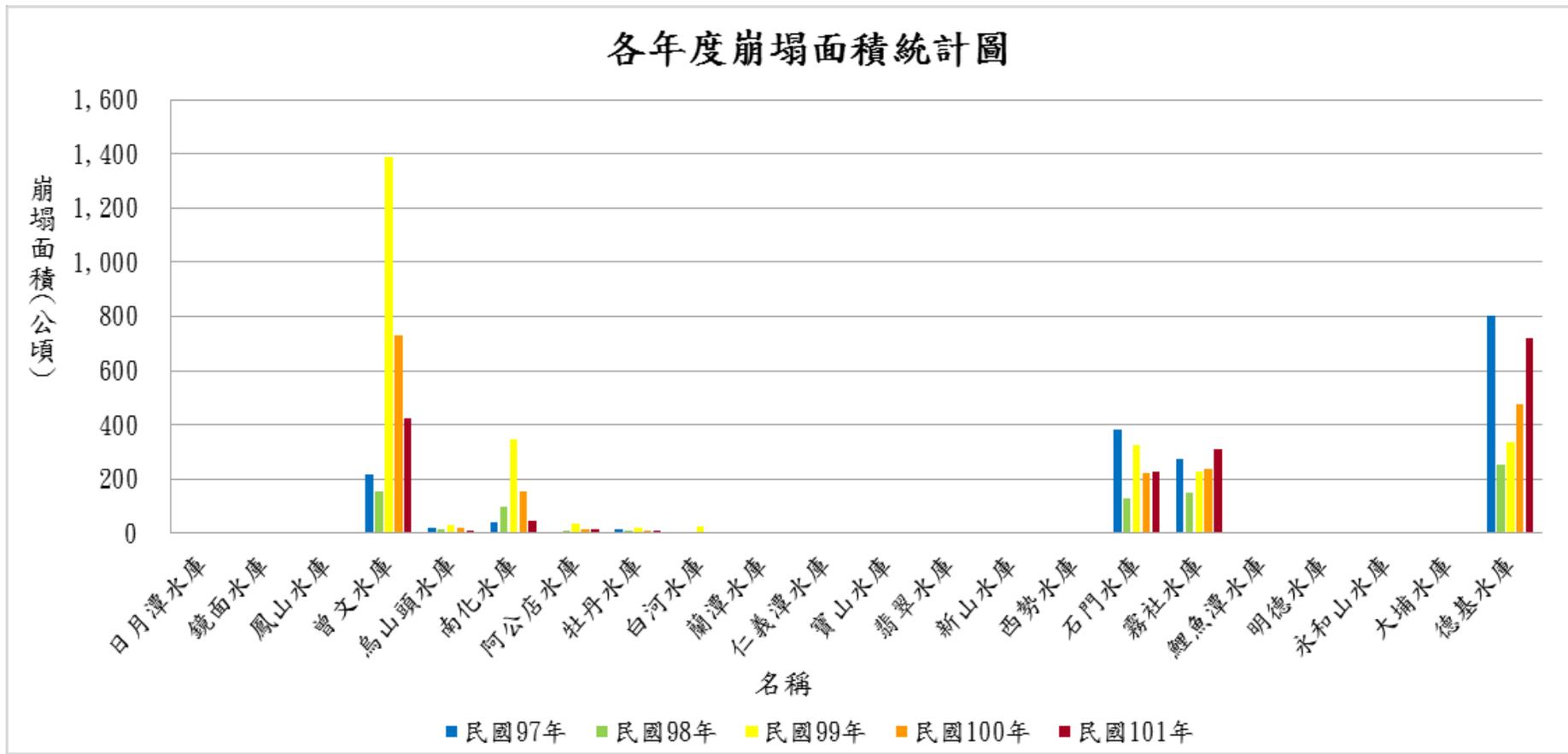
- D. 100~101 年：新增崩塌地面積、舊崩塌地擴大面積與復育地皆以高屏河流域為最大，新增崩塌地面積達 3,108 公頃，舊崩塌地擴大面積達 2,594 公頃，復育地面積達 4,741 公頃之多。以整體趨勢來看，各流域集水區新增崩塌地面積總和達 14,237 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 10,897 公頃，復育地面積總和達 11,973 公頃，結果顯示 100~101 年流域集水區新增崩塌地以完全新增崩塌地情形者為多，且以高屏河流域比例最高，單以高屏河流域之新增崩塌地就佔了全部流域集水區新增崩塌地的 21.8% 之多，以 100 至 101 年崩塌變遷情形為復育與新增崩塌之情形互現，新增崩塌地面積略多於復育地，主要影響的颱風事件為 100 年南瑪都和泰利颱風，後續仍應注意各流域集水區崩塌殘留土砂向下游運移情形。





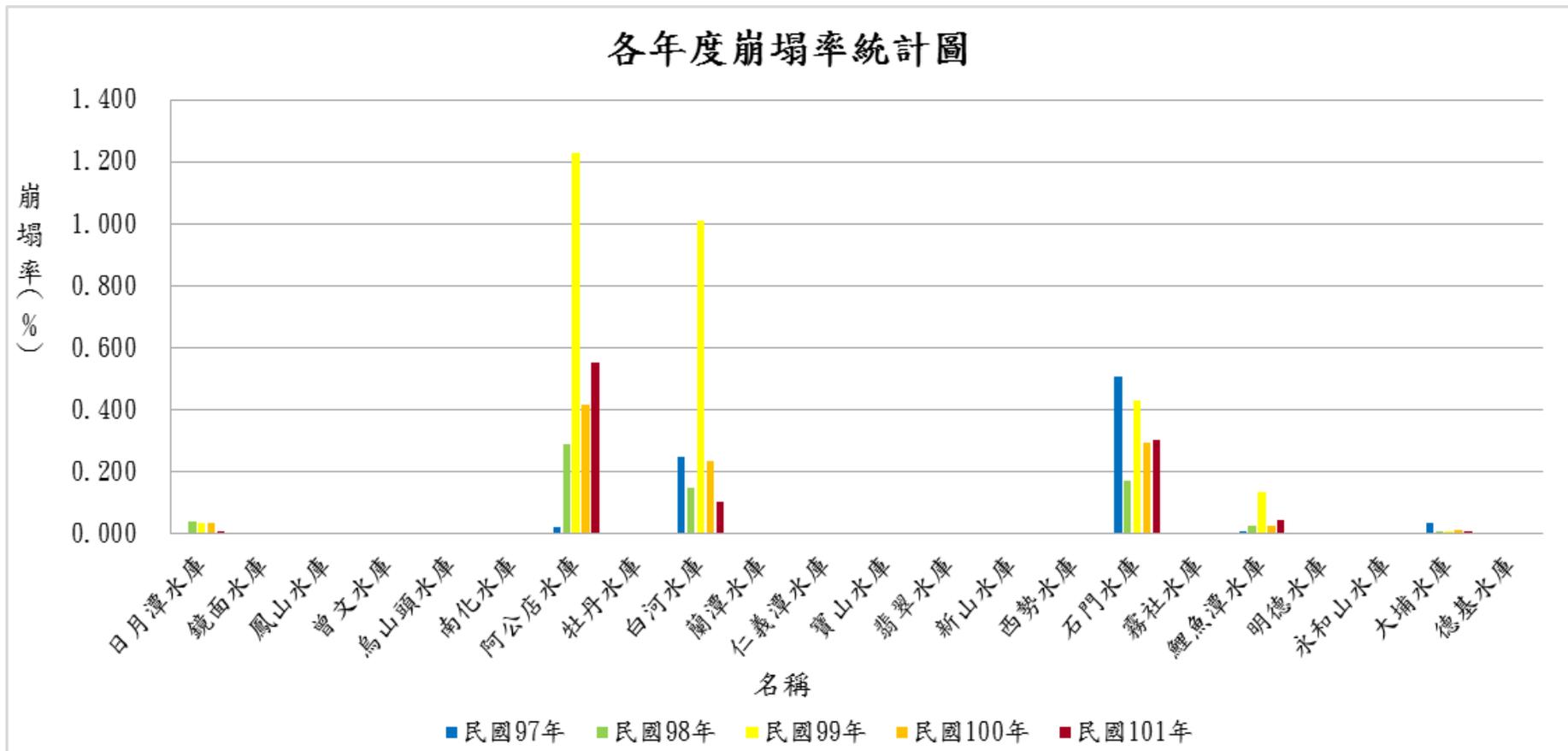
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-3 水庫集水區分布圖



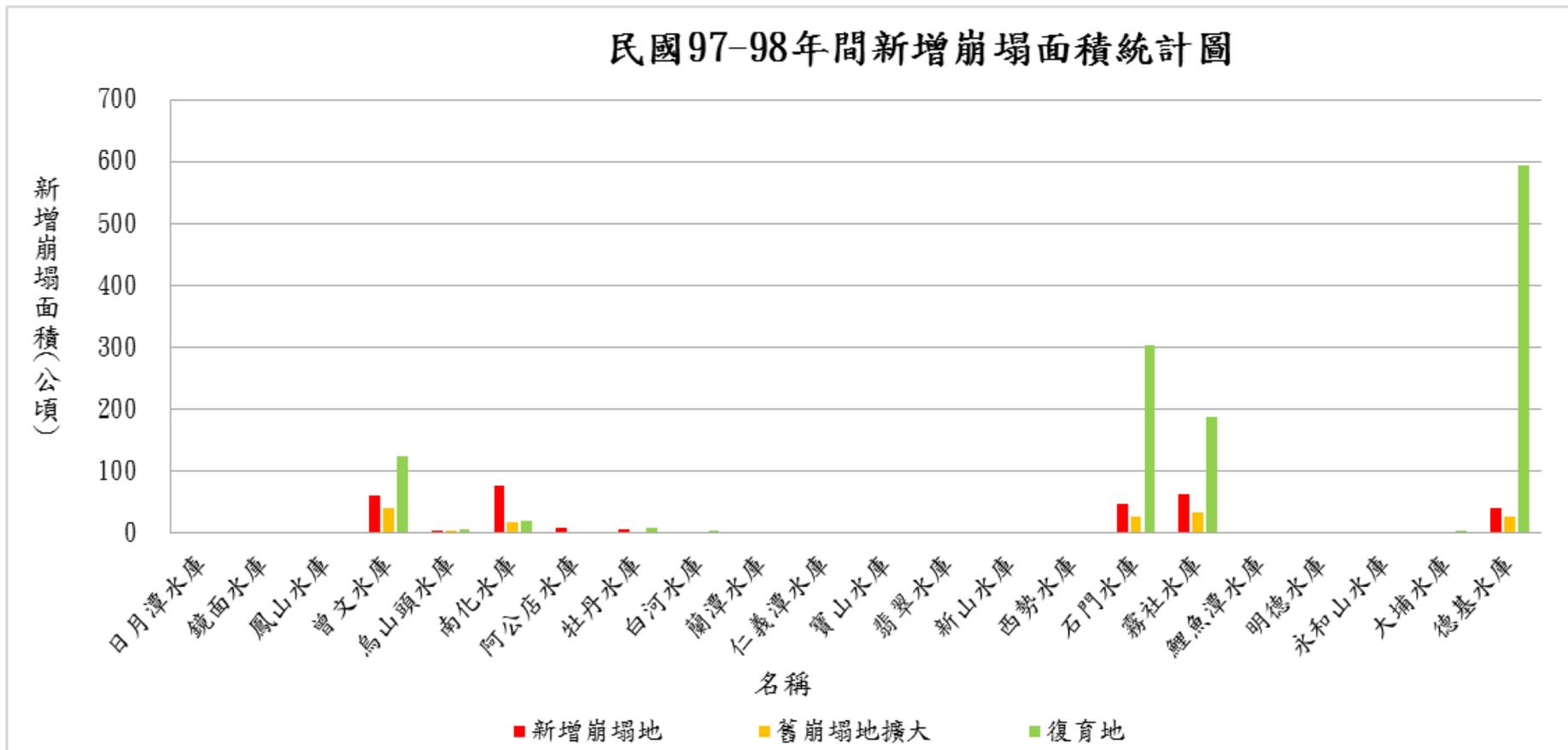
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-4 水庫集水區各年度崩塌地面積統計成果圖



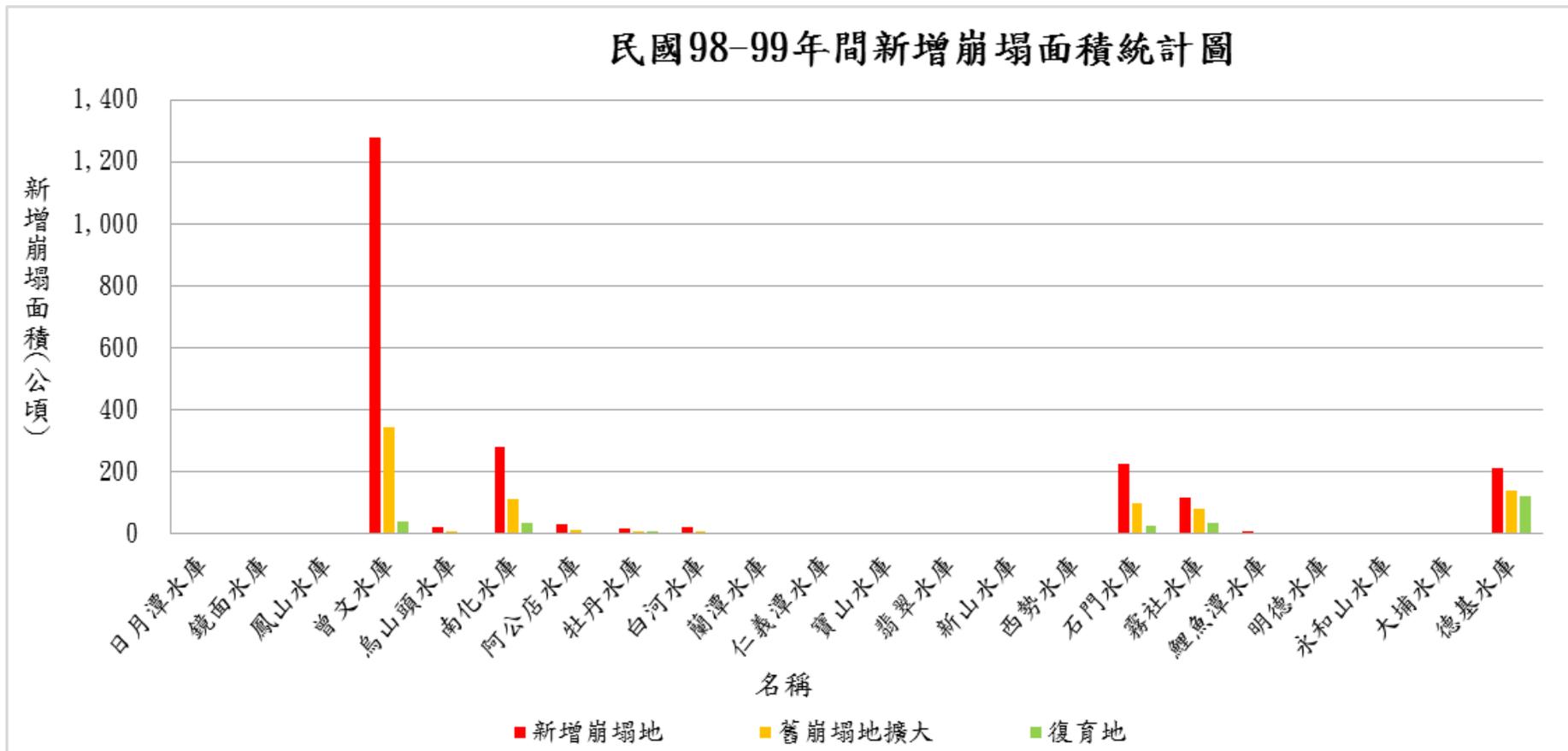
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-5 水庫集水區各年度崩塌率統計成果圖



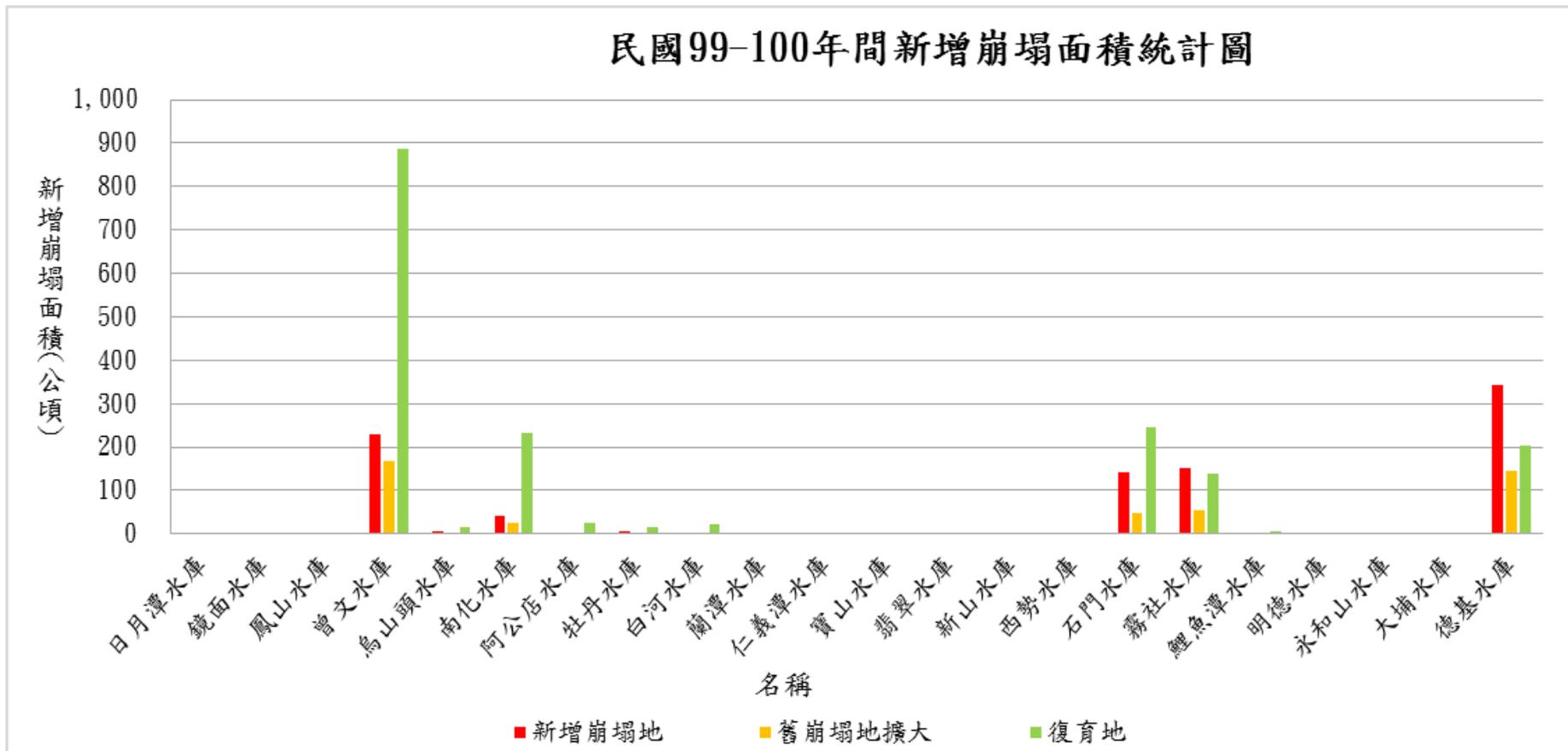
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-6 水庫集水區 97-98 年間崩塌地面積統計成果圖



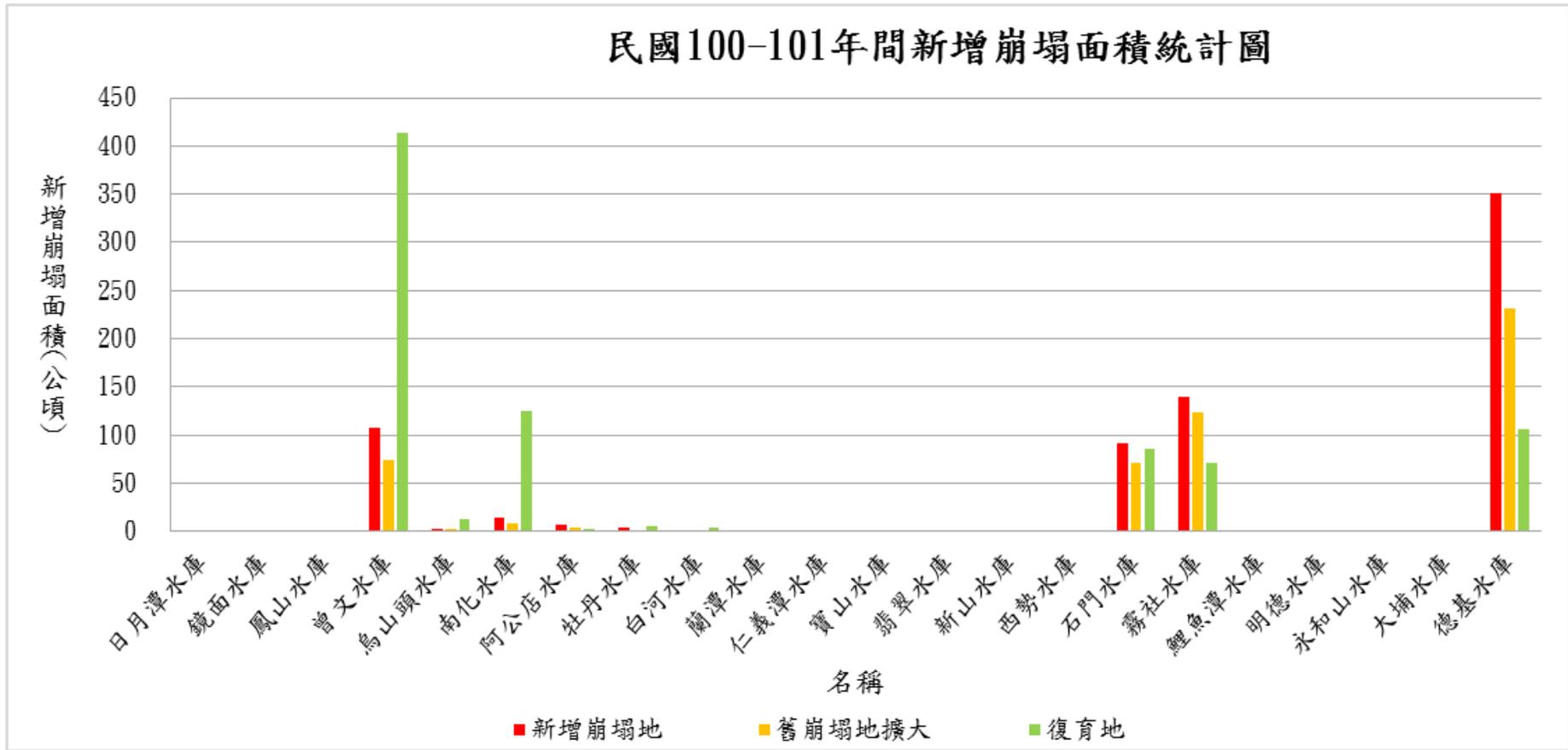
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-7 水庫集水區 98-99 年間崩塌地面積統計成果圖



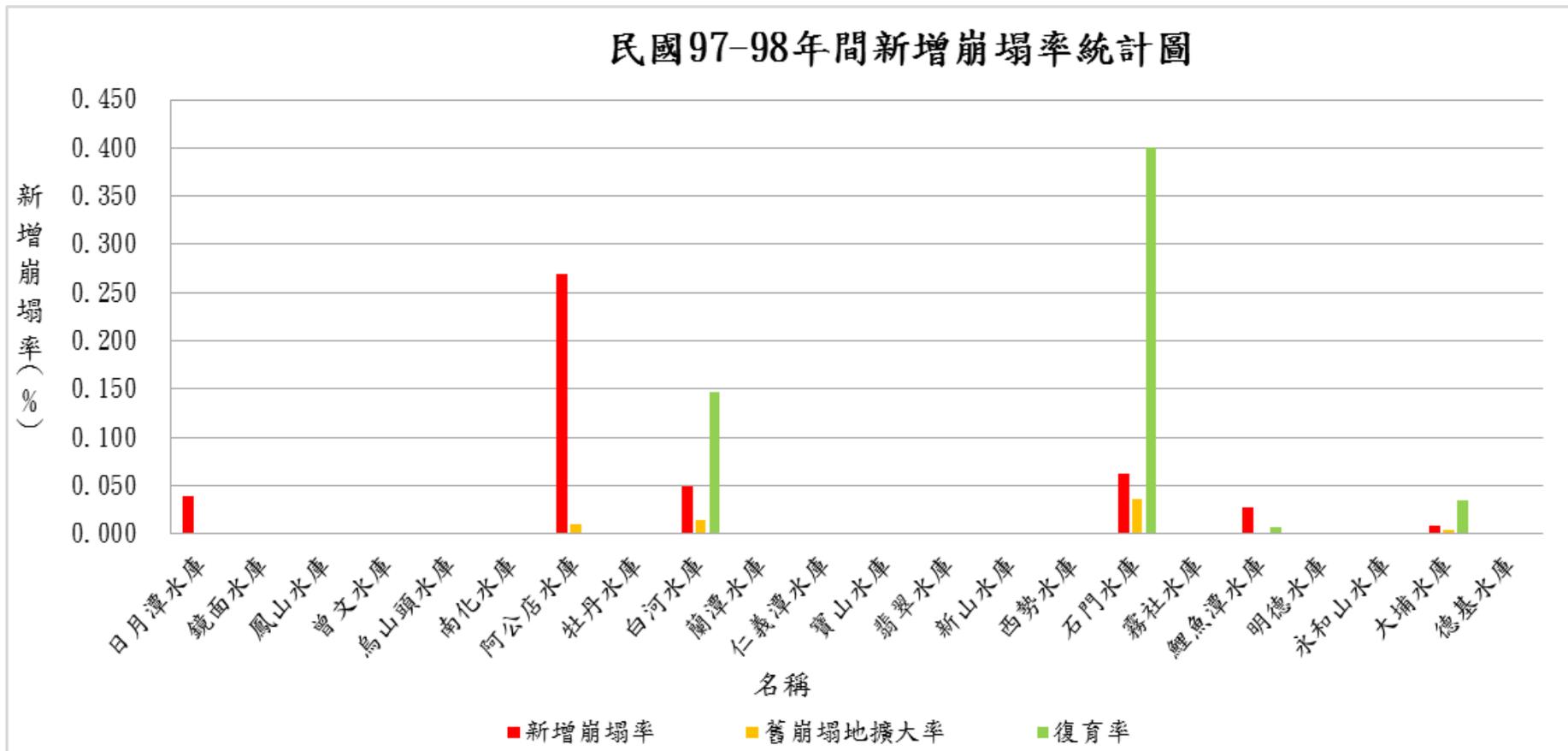
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-8 水庫集水區 99-100 年間崩塌地面積統計成果圖



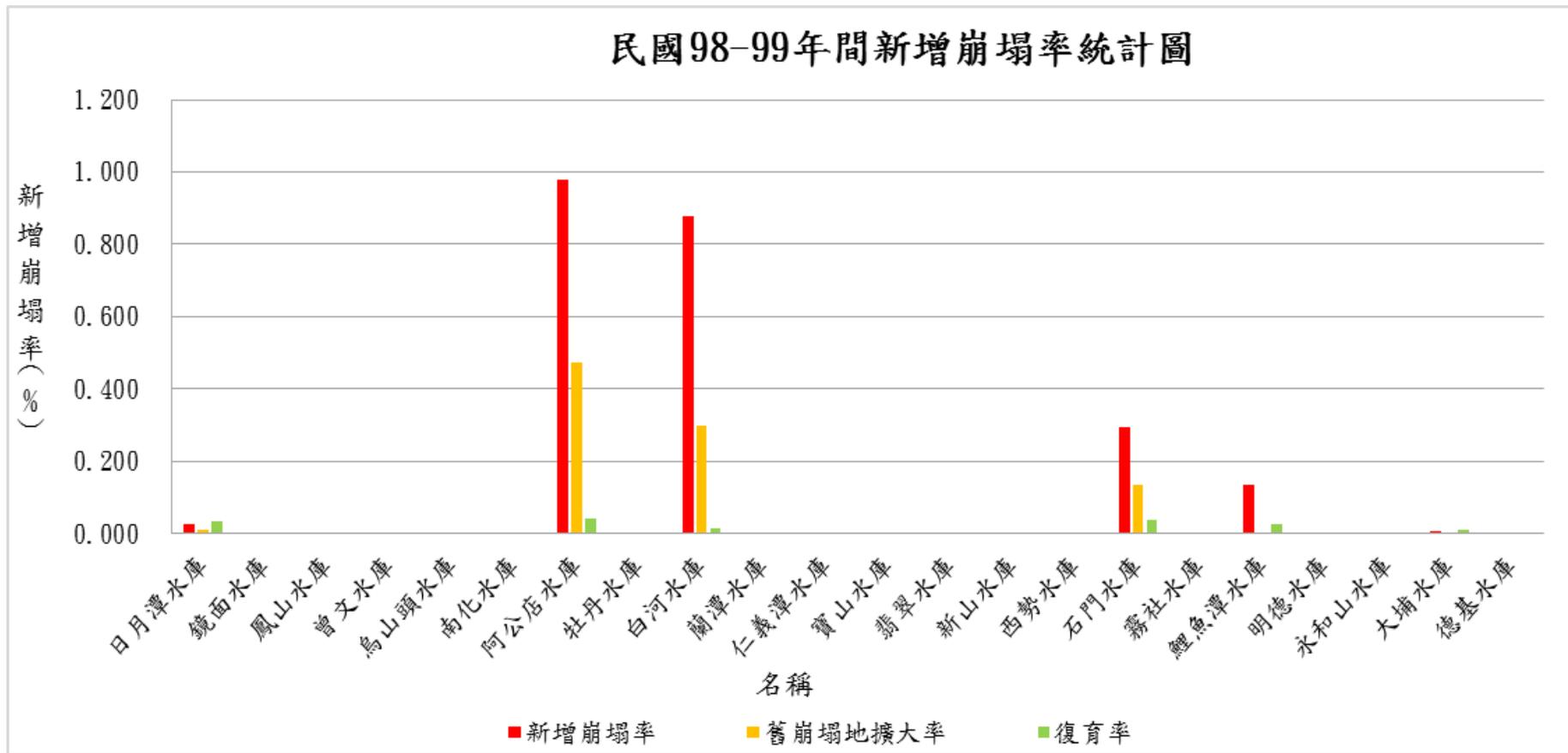
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-9 水庫集水區 100-101 年間崩塌地面積統計成果圖



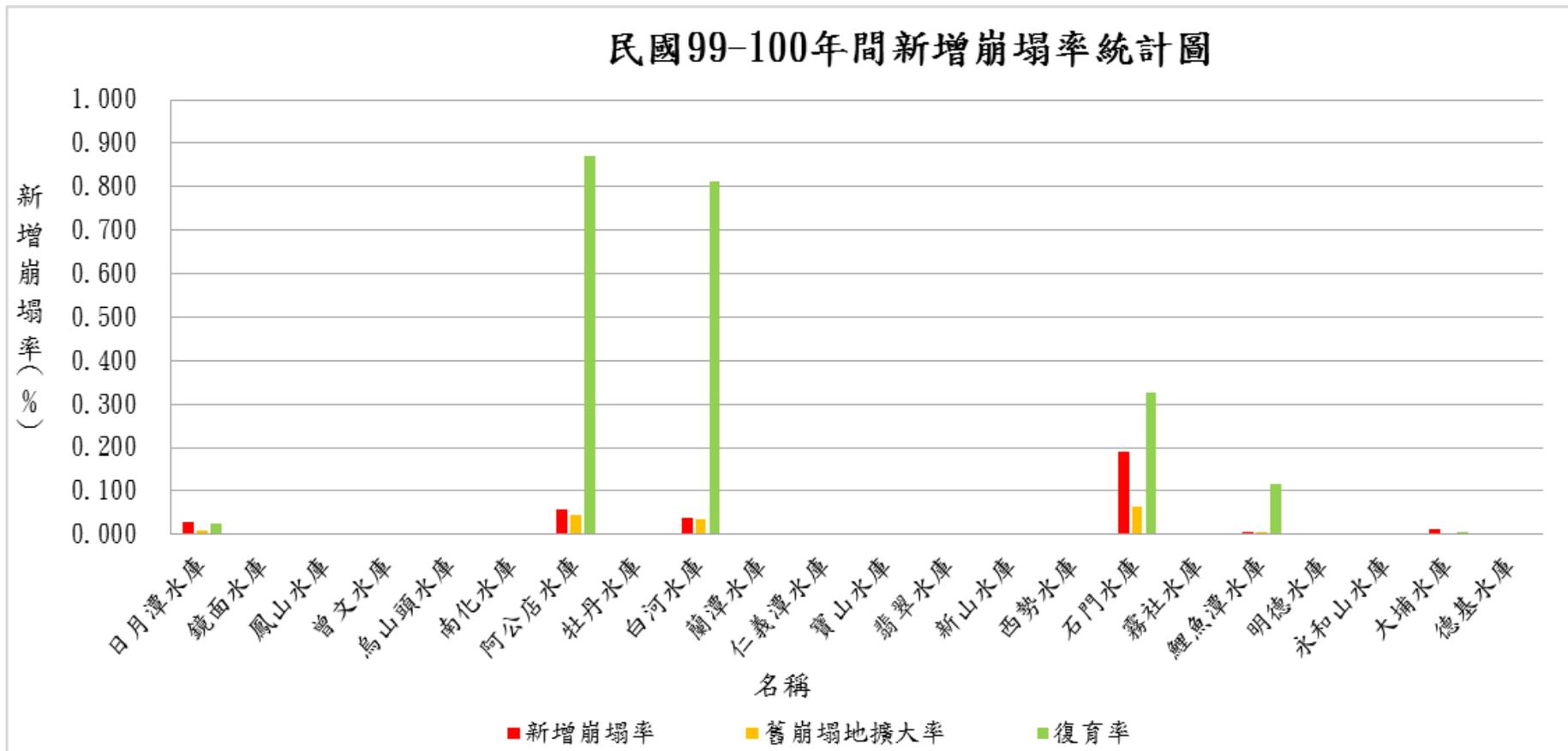
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-10 水庫集水區 97-98 年間崩塌率統計成果圖



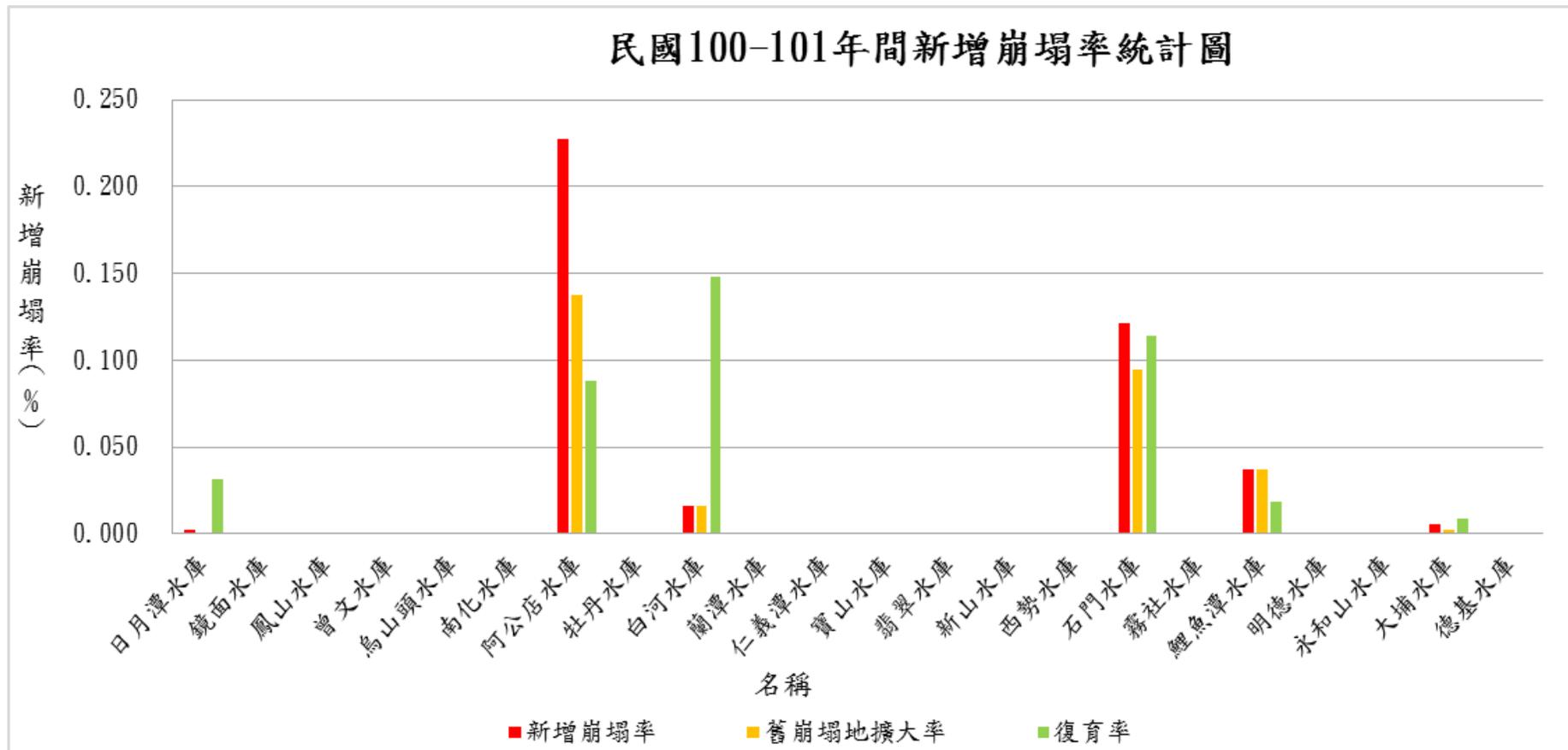
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-11 水庫集水區 98-99 年間崩塌率統計成果圖



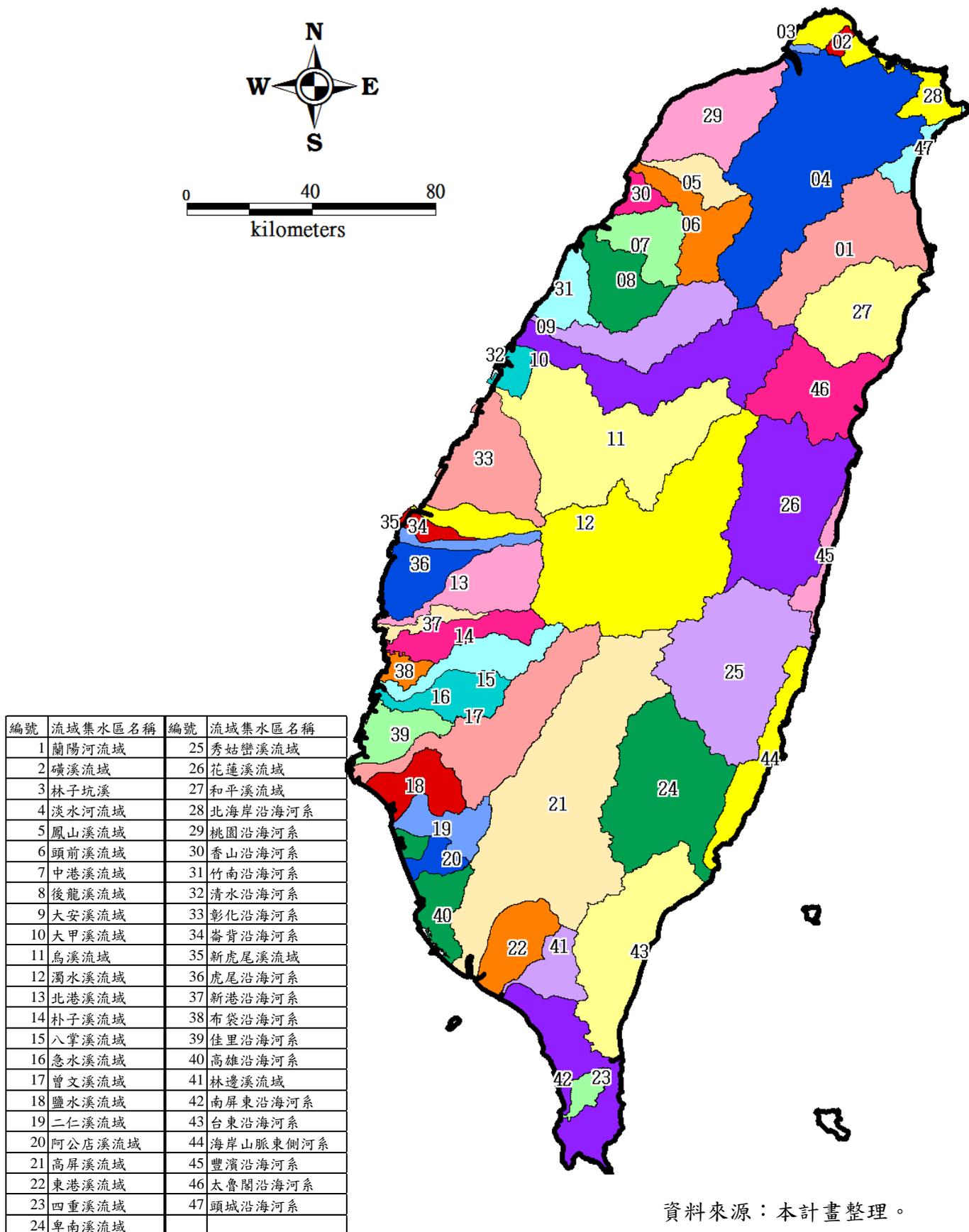
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-12 水庫集水區 99-100 年間崩塌率統計成果圖



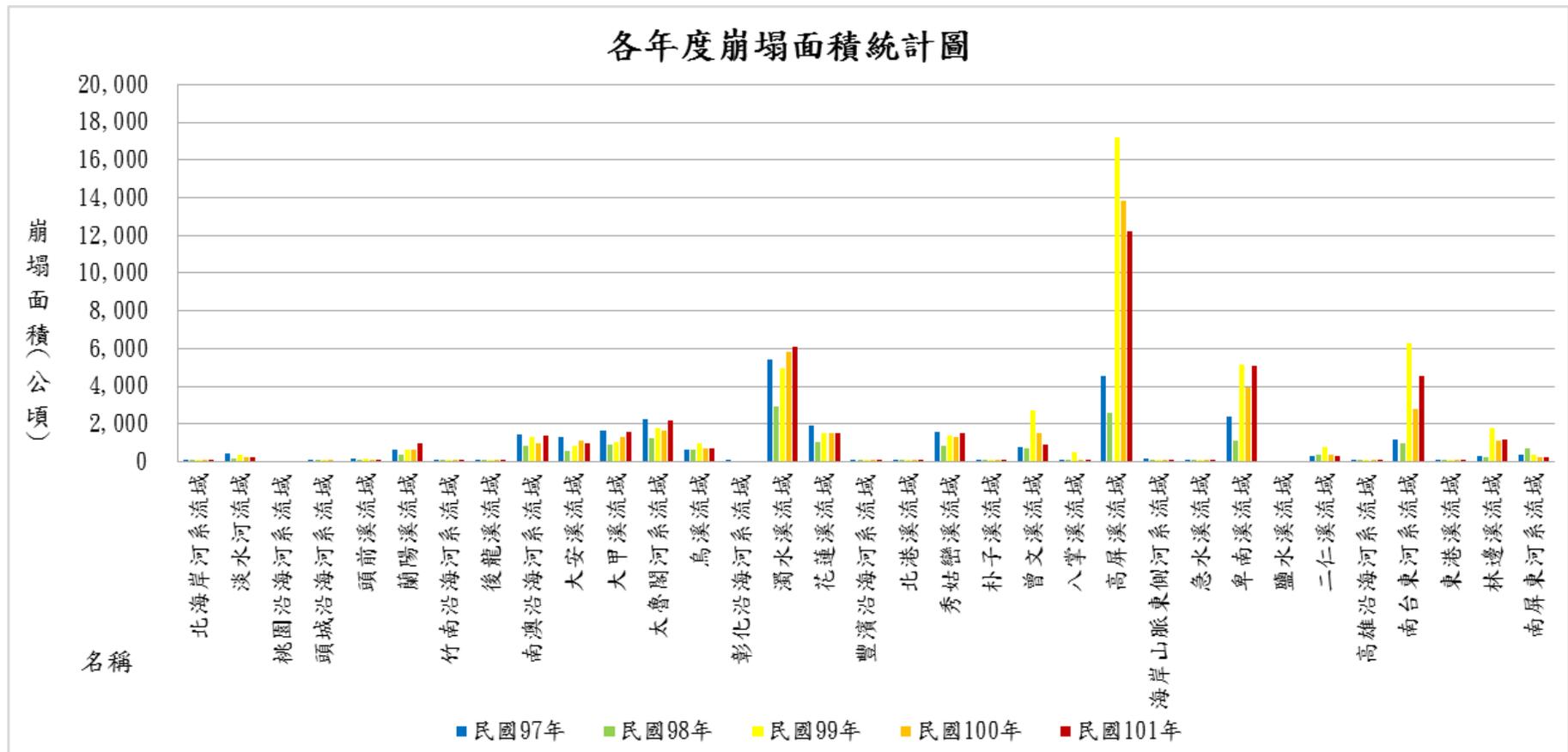
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-13 水庫集水區 100-101 年間崩塌率統計成果圖



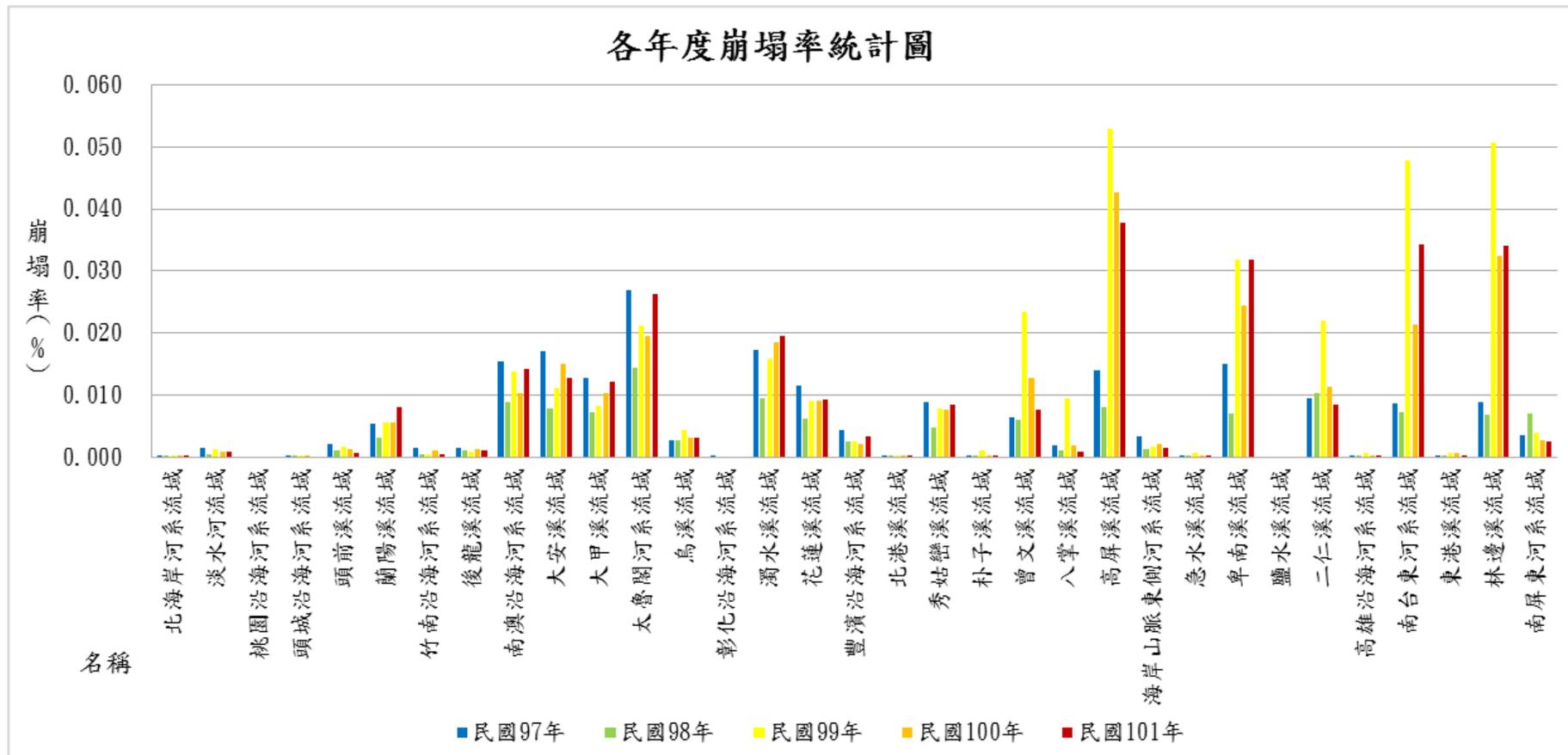
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-14 流域集水區範圍



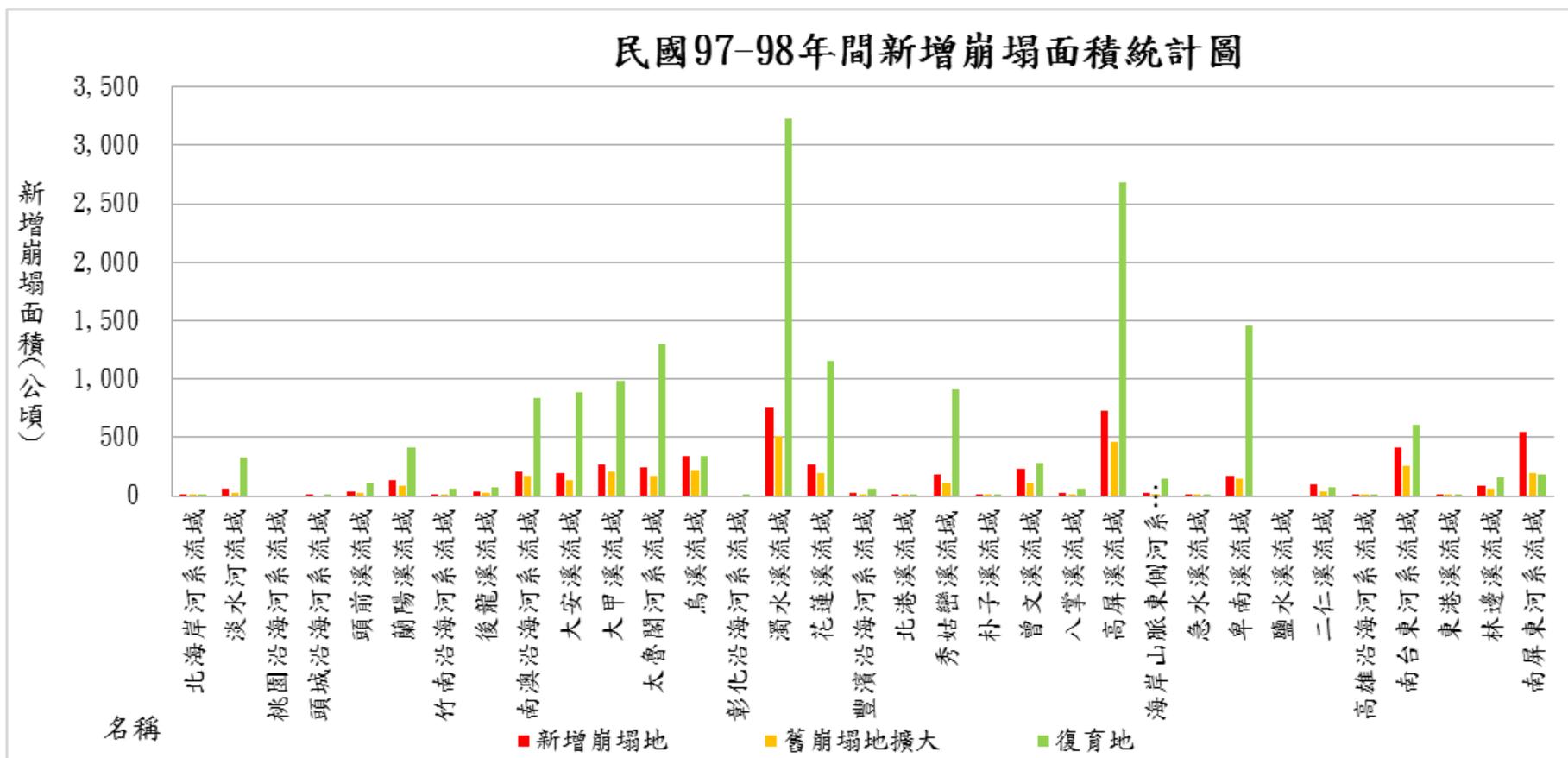
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-15 各個流域各年度崩塌地面積統計成果圖



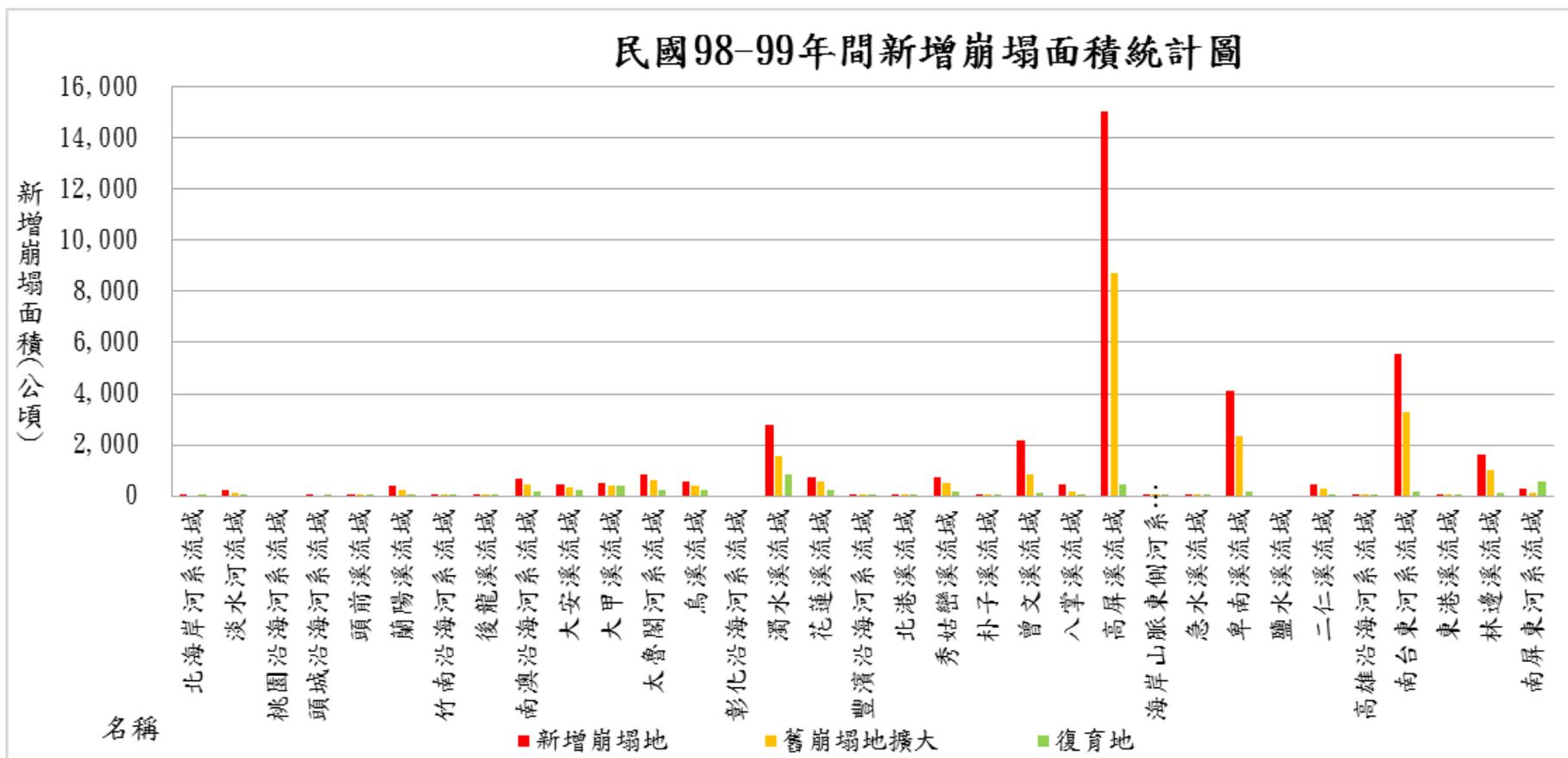
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-16 各個流域各年度崩塌率統計成果圖



資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-17 各個流域 97-98 年間崩塌地面積統計成果圖



資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-18 各個流域 98-99 年間崩塌地面積統計成果圖

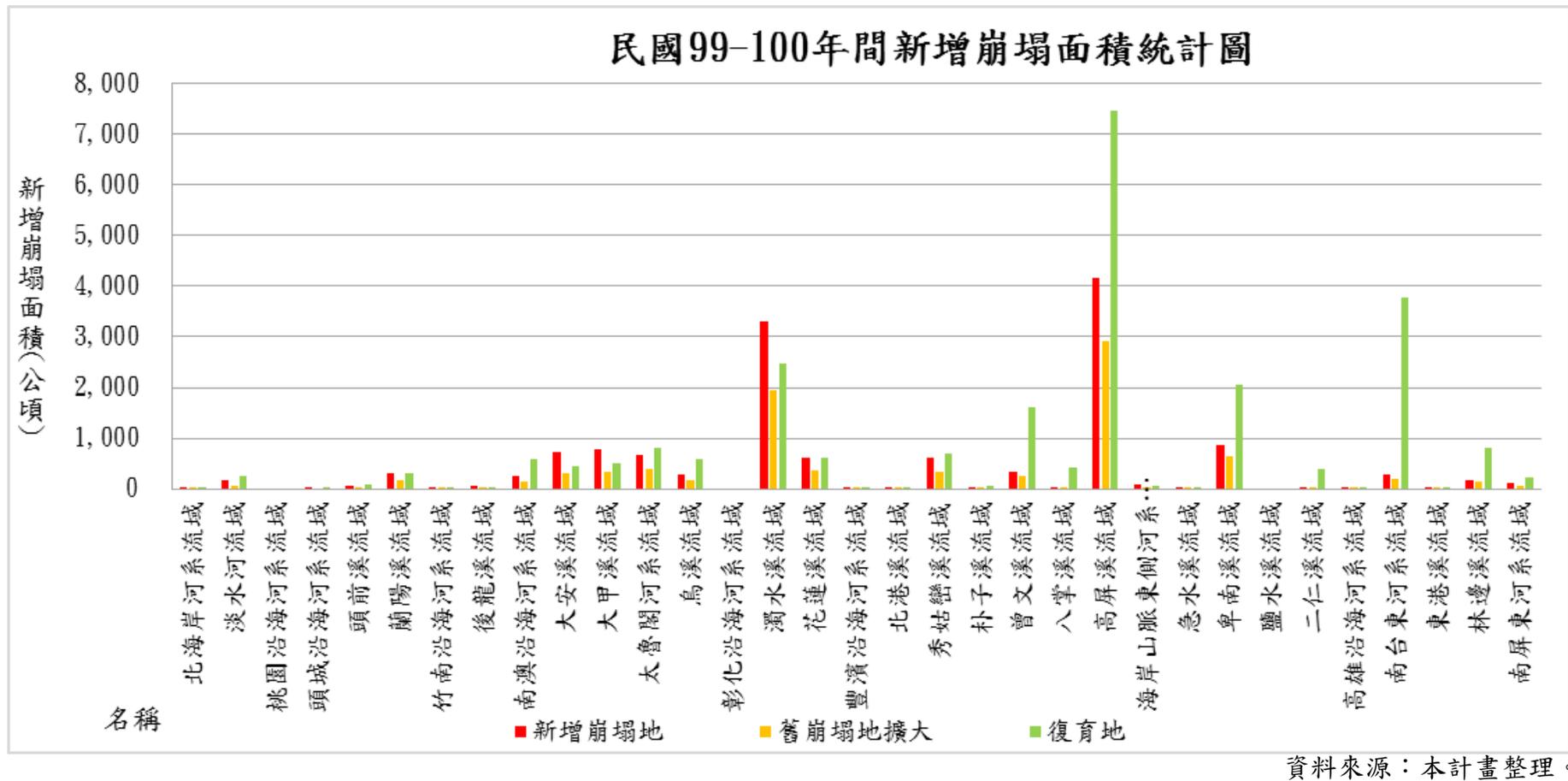
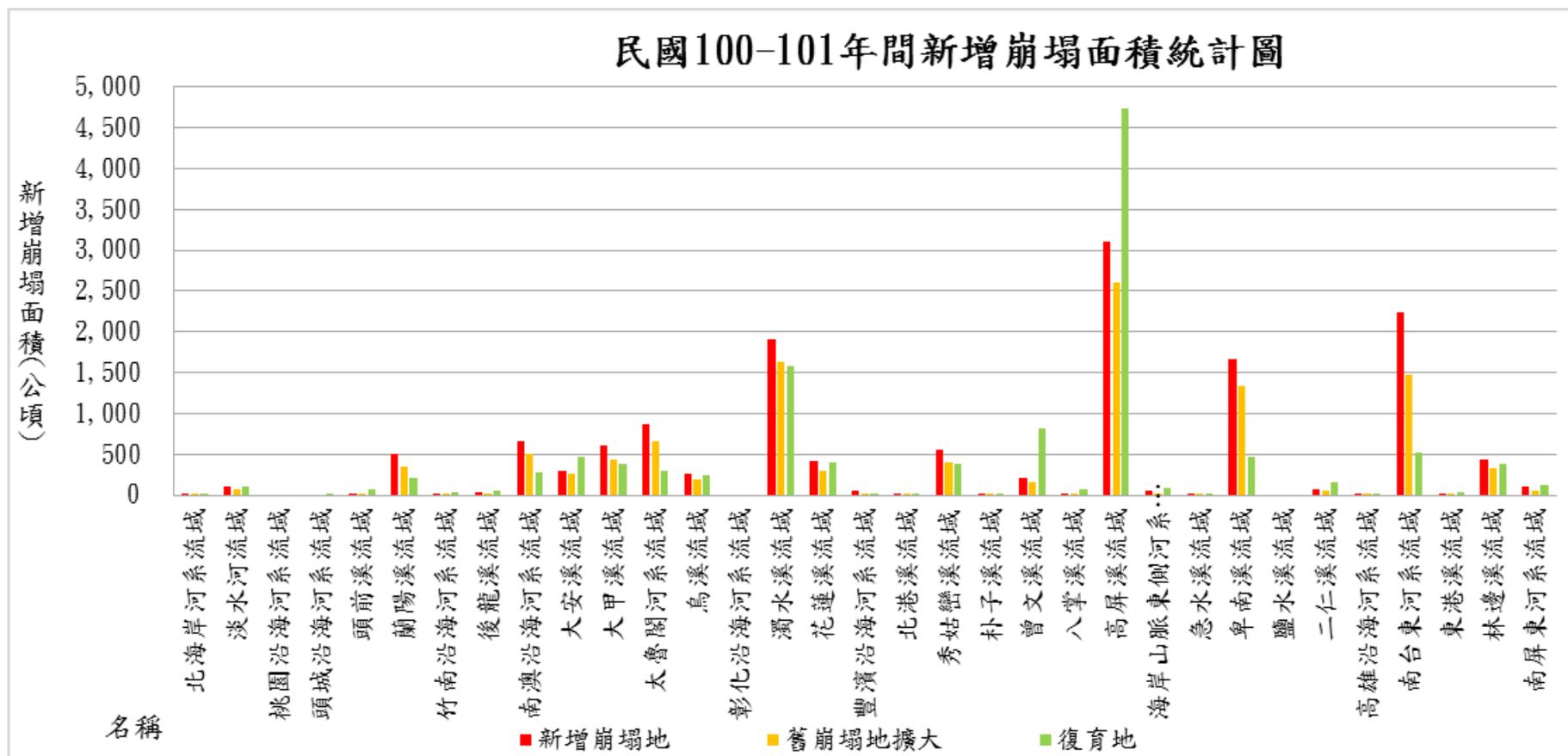
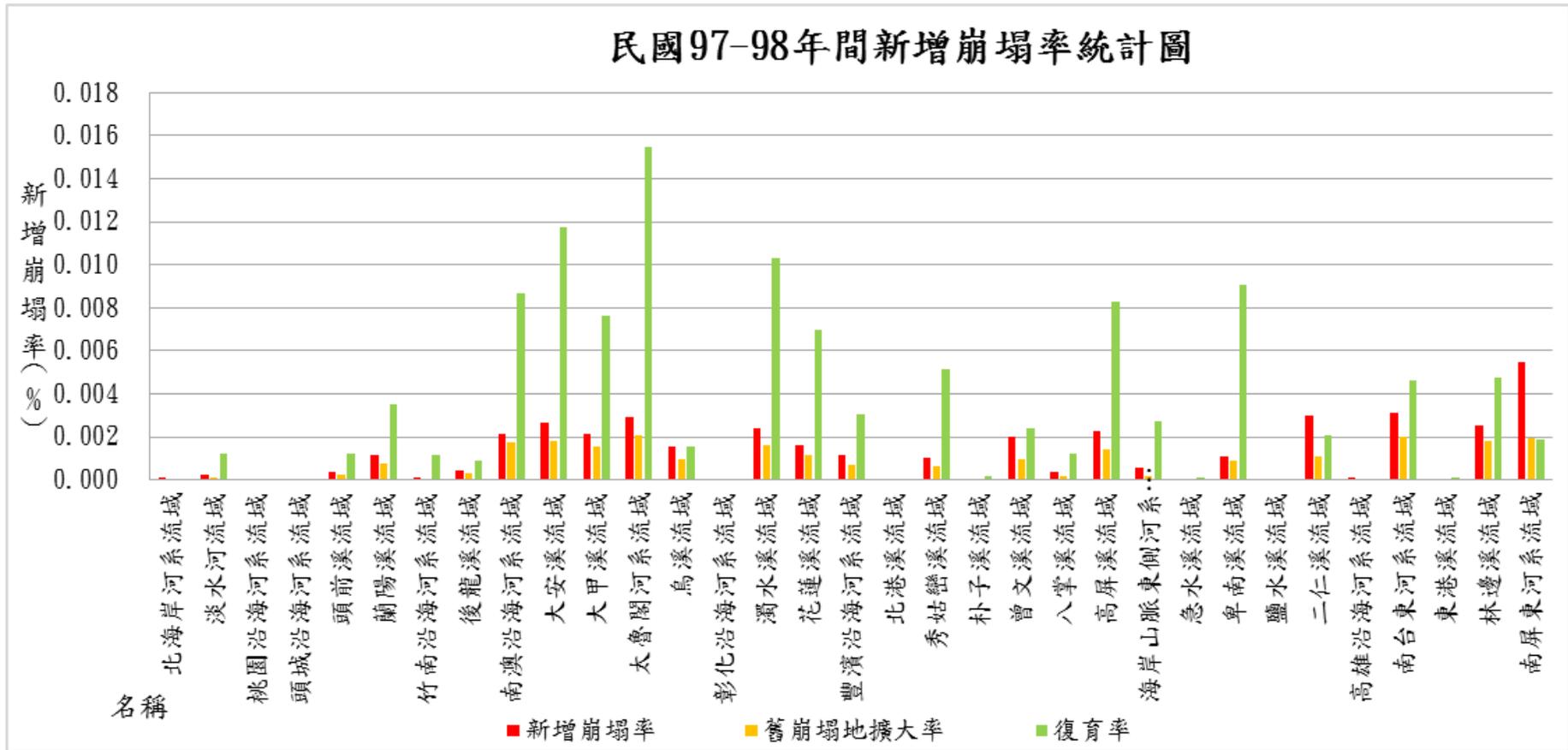


圖 3-3-19 各個流域 99-100 年間崩塌地面積統計成果圖



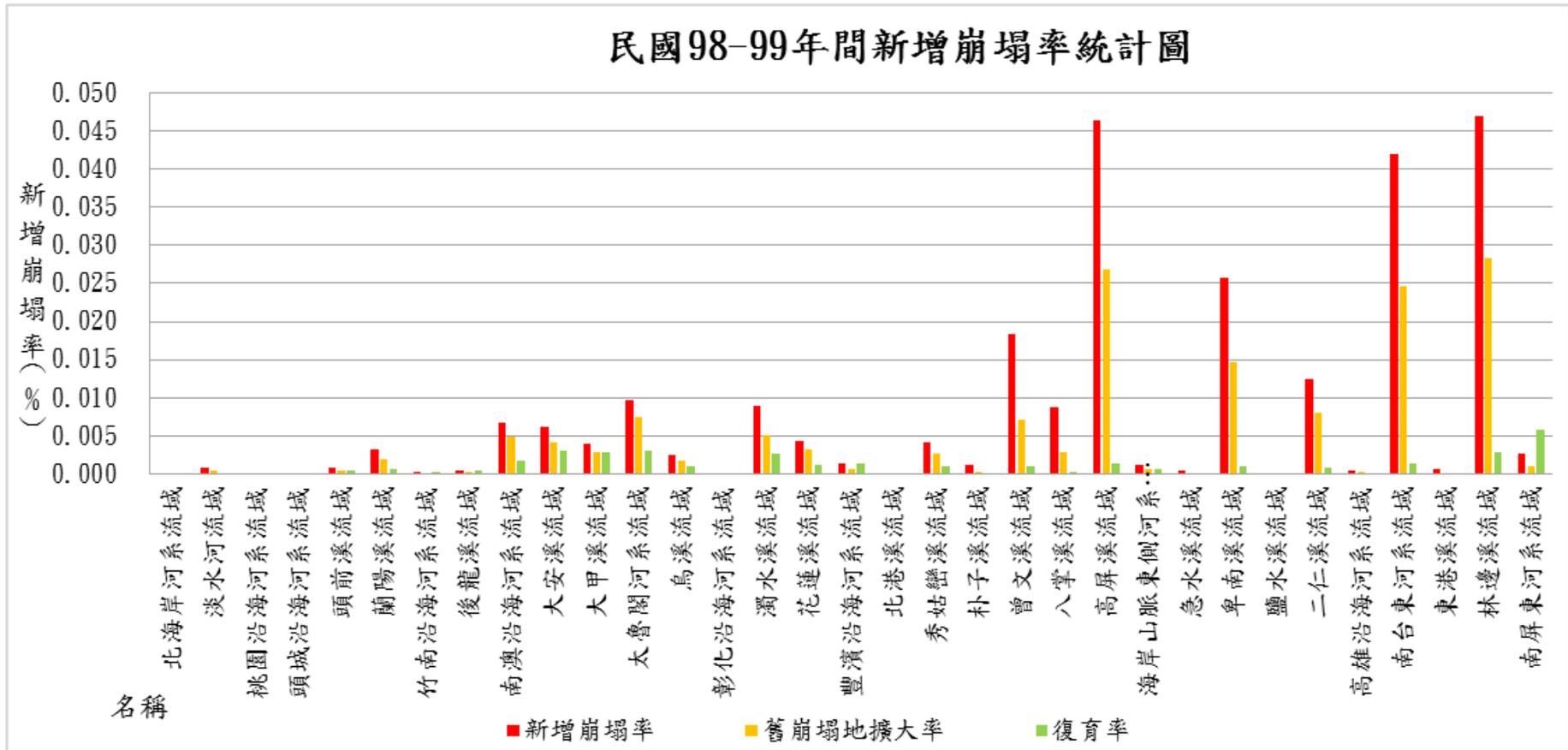
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-20 各個流域 100-101 年間崩塌地面積統計成果圖



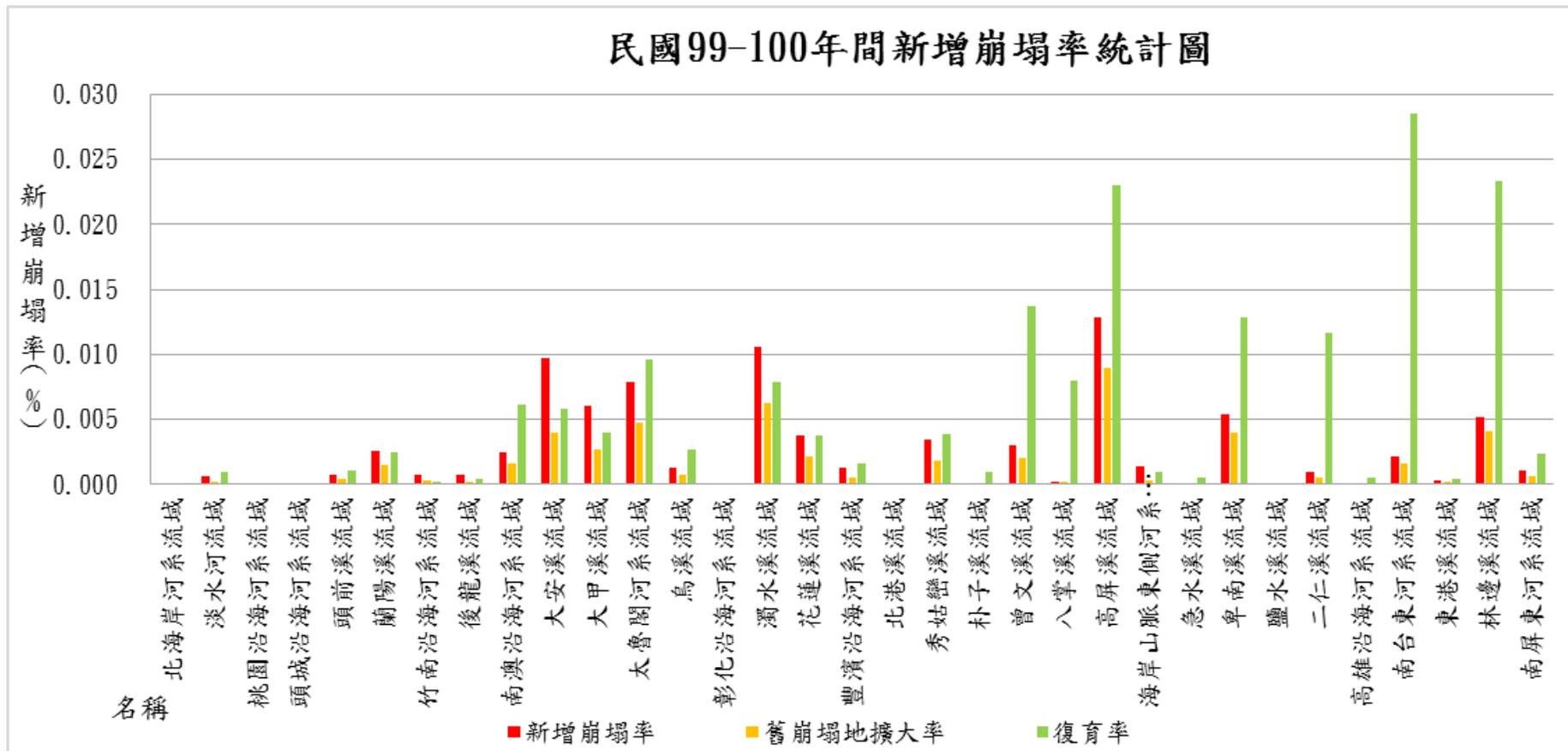
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-21 各個流域 97-98 年間崩塌率統計成果圖



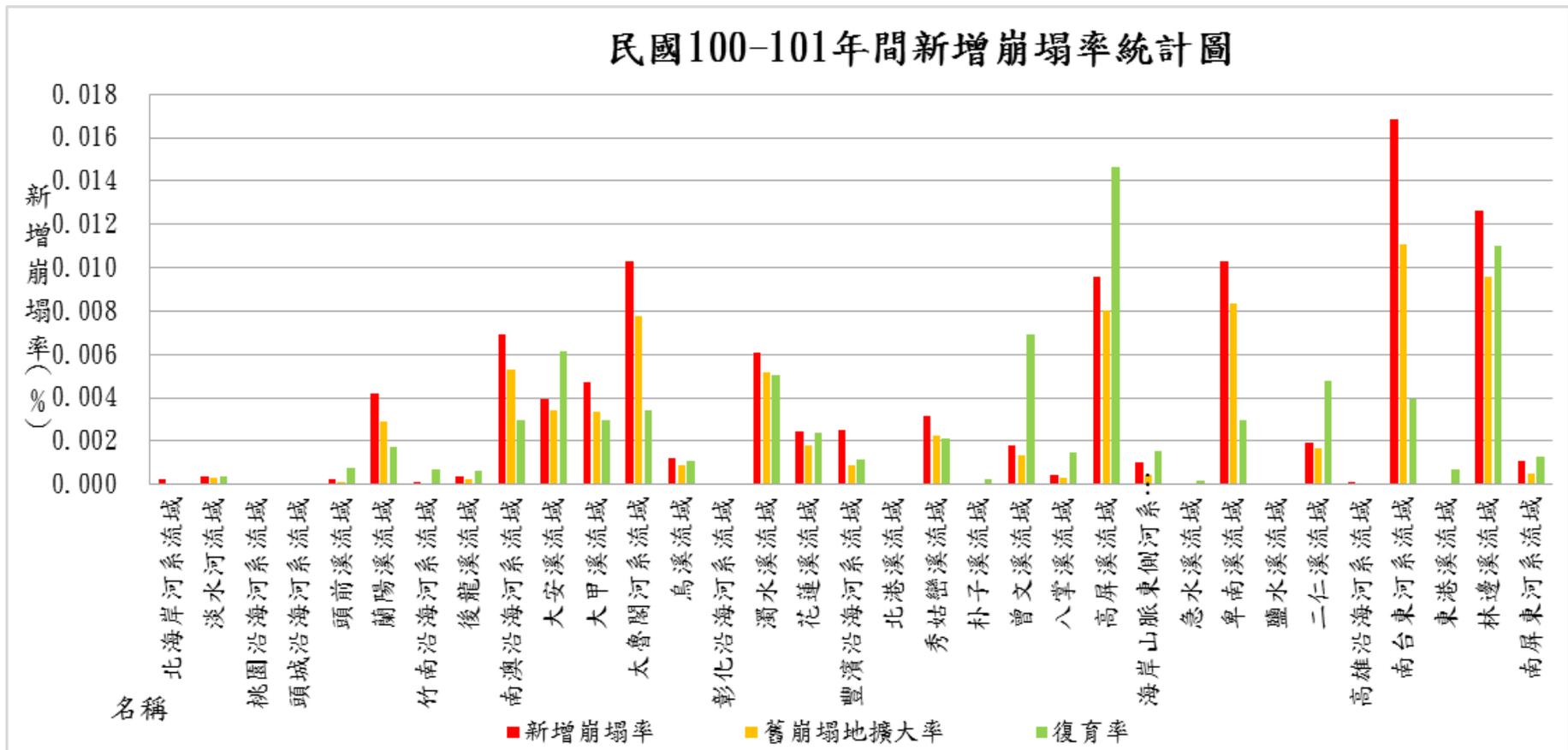
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-22 各個流域 98-99 年間崩塌率統計成果圖



資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-23 各個流域 99-100 年間崩塌率統計成果圖



資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-24 各個流域 100-101 年間崩塌率統計成果圖



3-3-2 事業區崩塌地變化歷程探討

依據蒐集與判釋的民國 97~101 年崩塌地目錄為基礎，就國有林地林區界(各林管處)及國有林地事業區進行崩塌地變化歷程探討，主要分就不同年度崩塌地及各年間新增崩塌地、舊崩塌地擴大及復育地進行統計分析，期了解年度與年間崩塌地變化歷程。國有林地林區界及國有林地事業區崩塌地變化歷程統計數值請參見附錄二，分析結果摘要說明如後：

一、國有林地林區(林管處)界

本計畫依據林務局提供之國有林地林區界圖(即林管處分區)(圖 3-3-25)作為崩塌地變化歷程探討分區，探討民國 97 年至 101 年崩塌地面積與崩塌率變化。各年度崩塌面積與崩塌率統計結果如圖 3-3-26 與圖 3-3-27；各年間崩塌面積與崩塌率統計結果如圖 3-3-28 至圖 3-3-35 所示。

(1) 年度崩塌地統計結果

林管處分區年度崩塌地面積統計結果顯示，97 年及 98 年以花蓮林區管理處崩塌地面積最高，面積達 5,854 公頃與 3,164 公頃；99 年至 101 年以屏東林區管理處崩塌地面積最高，面積達 14,081 公頃、10,431 公頃與 9,519 公頃。由統計結果可知，99 年汛期前主要是莫拉克颱風所造成之崩塌地，致使各林區管理處崩塌地面積皆比 99 年前大，且於 100 年後仍有較大崩塌地面積之情形。

(2) 年間崩塌地統計結果

以下茲就本計畫各國有林地林區界年間崩塌地變化歷程統計結果說明如下：

- A. 97~98 年：新增崩塌地面積以屏東林區管理處最大，達 995 公頃之多；舊崩塌地擴大以屏東林區管理處最大，達 528 公頃；復育地面積以花蓮林區管理處最大，達 3,369 公頃





之多。以整體趨勢來看，各林管處新增崩塌地面積總和達 4,205 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 2,785 公頃，復育地面積總和達 14,686 公頃，結果顯示 97~98 年以屏東林區管理處比例最高，單以屏東林區管理處之新增崩塌地就佔了全部林管處新增崩塌地的 23.7% 之多，復育地以花蓮林區管理處最多，復育地面積佔全部林管處復育地面積的 22.9%。總結而言，97 至 98 年崩塌變遷情形為崩塌復育多於新增崩塌之情形。

B. 98~99 年：新增崩塌地面積、舊崩塌地擴大面積與復育地面積皆以屏東林區管理處最大，分別達 12,232 公頃、7,235 公頃與 748 公頃。以整體趨勢來看，各林管處新增崩塌地面積總和達 31,458 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 18,823 公頃，復育地面積總和達 3,631 公頃，結果顯示 98~99 年以屏東林區管理處比例最高，單以屏東林區管理處之新增崩塌地就佔了全部林管處新增崩塌地的 38.9% 之多。總結而言，98 至 99 年崩塌變遷情形為新增崩塌多於復育之情形，主要原因係 98 年莫拉克颱風豪雨引致大規模新增崩塌之影響，且既有崩塌復發比例頗高，導致新增崩塌多於復育情況。

C. 99~100 年：新增崩塌地面積、舊崩塌地擴大面積與復育地面積皆以屏東林區管理處最大，分別達 2,626 公頃、2,025 公頃與 6,276 公頃。以整體趨勢來看，各林管處新增崩塌地面積總和達 12,330 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 7,594 公頃，復育地面積總和達 20,202 公頃，結果顯示 98~99 年單以屏東林區管理處之新增崩塌地就佔了全部林管處新增崩塌地的 21.3% 之多，復育地也是屏東林區管理處最多，復育地面積佔全部林管處復育地面積的 31.1%。總結而言，



99 至 100 年崩塌變遷情形為復育多於新增崩塌之情形，主要原因係 98 年莫拉克颱風後產生大規模之崩塌地，99 年凡那比颱風並未加劇原有舊崩塌地，反而復育比例提昇。

D. 100~101 年：新增崩塌地面積以台東林區管理處最大，達 3,701 公頃之多；舊崩塌地擴大以台東林區管理處最大，達 2,738 公頃；復育地面積以屏東林區管理處最大，達 3,459 公頃之多。以整體趨勢來看，各林管處新增崩塌地面積總和達 12,868 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 10,012 公頃，復育地面積總和達 9,569 公頃，結果顯示 100~101 年林管處新增崩塌地以舊崩塌地擴大情形者為多，且以台東林區管理處比例最高，單以台東林區管理處之新增崩塌地就佔了全部林管處新增崩塌地的 28.8% 之多，主要原因係台東林區管理處包含部分高屏溪流域及卑南溪流域範圍重災區，故 100 至 101 年崩塌變遷情形可知為新增崩塌略多於復育之情形，主要影響的颱風事件為 100 年南瑪都和泰利颱風影響。

二、國有林地事業區

依據林務局提供之國有林地事業區(圖 3-3-36)進行崩塌地進行年度及年間崩塌地統計，各事業區年度崩塌地面積與崩塌率統計結果如圖 3-3-37 與圖 3-3-38 所示；各年間崩塌地面積與崩塌率統計結果如圖 3-3-39 至圖 3-3-46 所示。

(1) 年度崩塌地統計結果

國有林地事業區年度崩塌地面積統計結果顯示，97 年及 98 年崩塌地面積以花蓮林區管理處立霧溪事業區最高，面積分別達 2,362 公頃與 1,282 公頃；99 年及 101 年崩塌地面積以台東林區管理處大武事業區最高，面積分別達 5,408 公頃與 3,768 公頃；100



年崩塌地面積以屏東林區管理處荖濃溪事業區最高，面積達 3,750 公頃。由上述統計結果可知，99 年汛期前主要是莫拉克颱風所造成之崩塌地，致使各國有林地事業區皆有為數不少的崩塌地產生，且於 100 年仍存在相當多崩塌地，未來應持續關注崩塌產生量及流出量，以免土砂向下游運移影響保全對象安全。

(2) 年間崩塌地統計結果

以下茲就本計畫各年間國有林地事業區崩塌地變化歷程統計結果說明如下：

- A. 97~98 年：新增崩塌地面積以屏東林區管理處潮州事業區最大，達 399 公頃之多；舊崩塌地擴大以東勢林區管理處八仙山事業區最大，達 304 公頃；復育地面積以花蓮林區管理處立霧溪事業區最大，達 1,327 公頃之多。以整體趨勢來看，各國有林地事業區新增崩塌地面積總和達 4,205 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 2,785 公頃，復育地面積總和達 14,686 公頃，結果顯示 97~98 年國有林地事業區新增崩塌地偏向舊崩塌地擴大之情形，舊崩塌地擴大面積總和佔新增崩塌地總和比例達 66.2%。總結而言，以 97 至 98 年崩塌變遷情形為復育多於新增崩塌之情形。
- B. 98~99 年：新增崩塌地面積與舊崩塌地擴大面積皆以台東林區管理處大武事業區最大，分別達 4,755 公頃與 3,012 公頃之多；復育地面積以屏東林區管理處潮州事業區最大，達 444 公頃之多。以整體趨勢來看，國有林地事業區新增崩塌地面積總和達 31,458 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 18,820 公頃，復育地面積總和達 3,631 公頃，結果顯示 98~99 年國有林地事業區舊崩塌地擴大面積總和佔新增崩塌地總和比例達 59.8%，且以台東林區管理處大武事業區



比例最高，單以台東林區管理處大武事業區之新增崩塌地就佔了全部國有林地事業區新增崩塌地的 15.1% 之多，主要原因是台東林區管理處大武事業區包含高屏溪與卑南溪流域山區重災區範圍，故其新增崩塌地受莫拉克颱風影響為最大。整體而言，98 至 99 年崩塌變遷情形為新增崩塌多於復育之情形，主要原因係 98 年莫拉克颱風豪雨引致大規模面積崩塌所致。

C. 99~100 年：新增崩塌地面積與舊崩塌地擴大面積皆以屏東林區管理處荖濃溪事業區為最大，面積分別達 1,215 公頃與 902 公頃；復育地面積以台東林區管理處大武事業區最大，達 3,163 公頃之多。以整體趨勢來看，各國有林地事業區新增崩塌地面積總和達 12,330 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 7,562 公頃，復育地面積總和達 20,202 公頃，結果顯示 99~100 年國有林地事業區舊崩塌地擴大面積總和佔新增崩塌地總和比例達 61.3%，且以屏東林區管理處荖濃溪事業區比例最高，單以屏東林區管理處荖濃溪事業區之新增崩塌地就佔了全部國有林地事業區新增崩塌地的 9.9% 之多，復育地仍以台東林區管理處大武事業區最多，復育地面積佔全部國有林地事業區復育地面積的 15.6%，主要是 98 年莫拉克颱風後並未因 99 年凡那比颱風再造成大面積之新增崩塌，反而舊有崩塌地復育比例提高，整體而言，99 至 100 年崩塌變遷情形為復育多於新增崩塌之情形。

D. 100~101 年：新增崩塌地面積與舊崩塌地擴大面積皆以台東林區管理處大武事業區為最大，面積分別達 1,765 公頃與 1,231 公頃；復育地面積以屏東林區管理處旗山事業區最大，面積達 1,397 公頃之多。以整體趨勢來看，各國有



林地事業區新增崩塌地面積總和達 12,868 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 10,011 公頃，復育地面積總和達 9,569 公頃，結果顯示 100~101 年國有林地事業區新增崩塌地以舊崩塌地擴大情形者為多，且以台東林區管理處大武事業區比例最高，單以台東林區管理處大武事業區之新增崩塌地就佔了全部國有林地事業區新增崩塌地的 13.7% 之多，以 100 至 101 年崩塌變遷情形為新增崩塌略多於復育之情形，主要影響的颱風事件為 100 年蘇拉颱風與天秤颱風，後續仍應注意各國有林地事業區崩塌殘留土砂向下游運移情形。



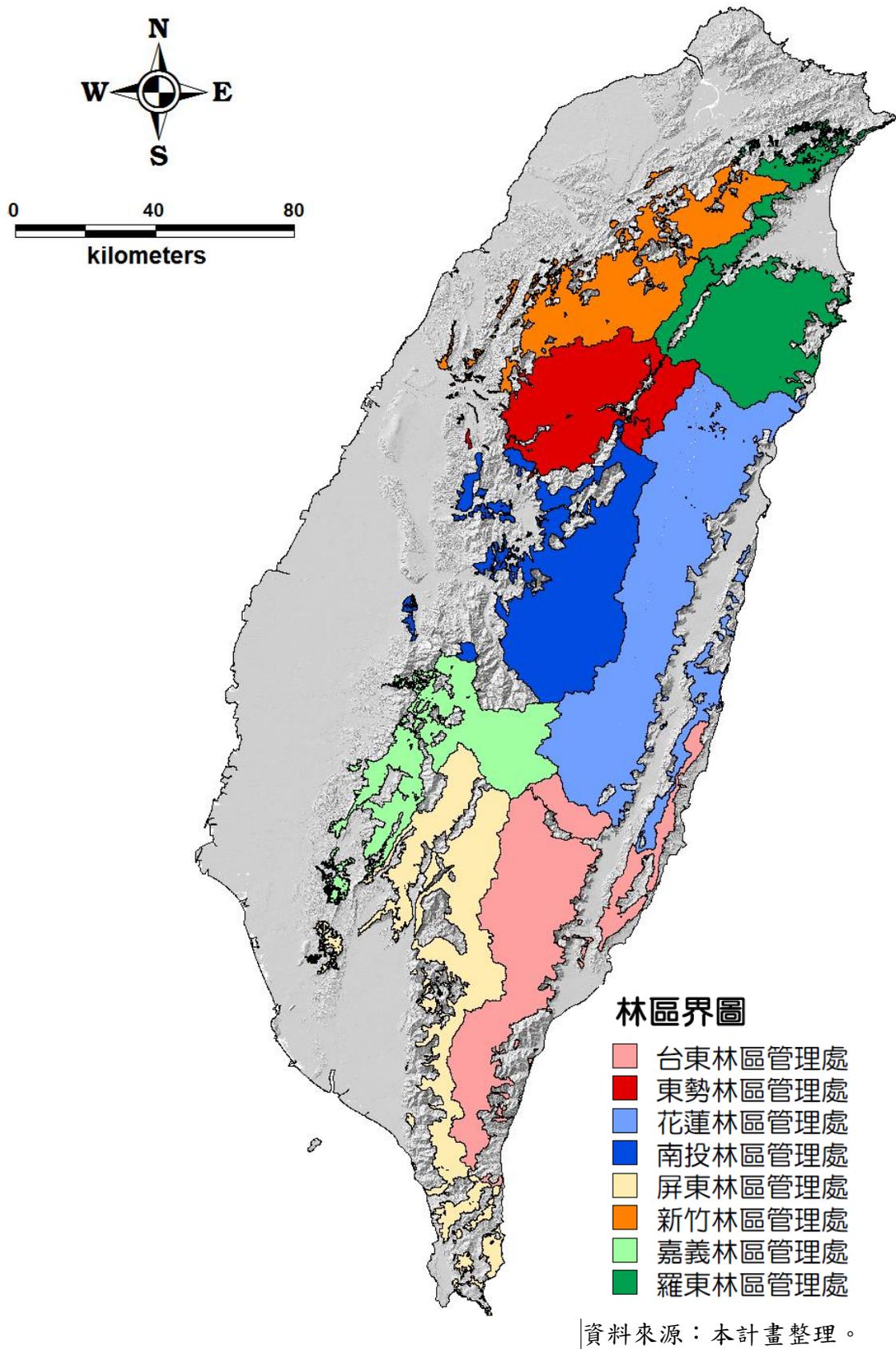
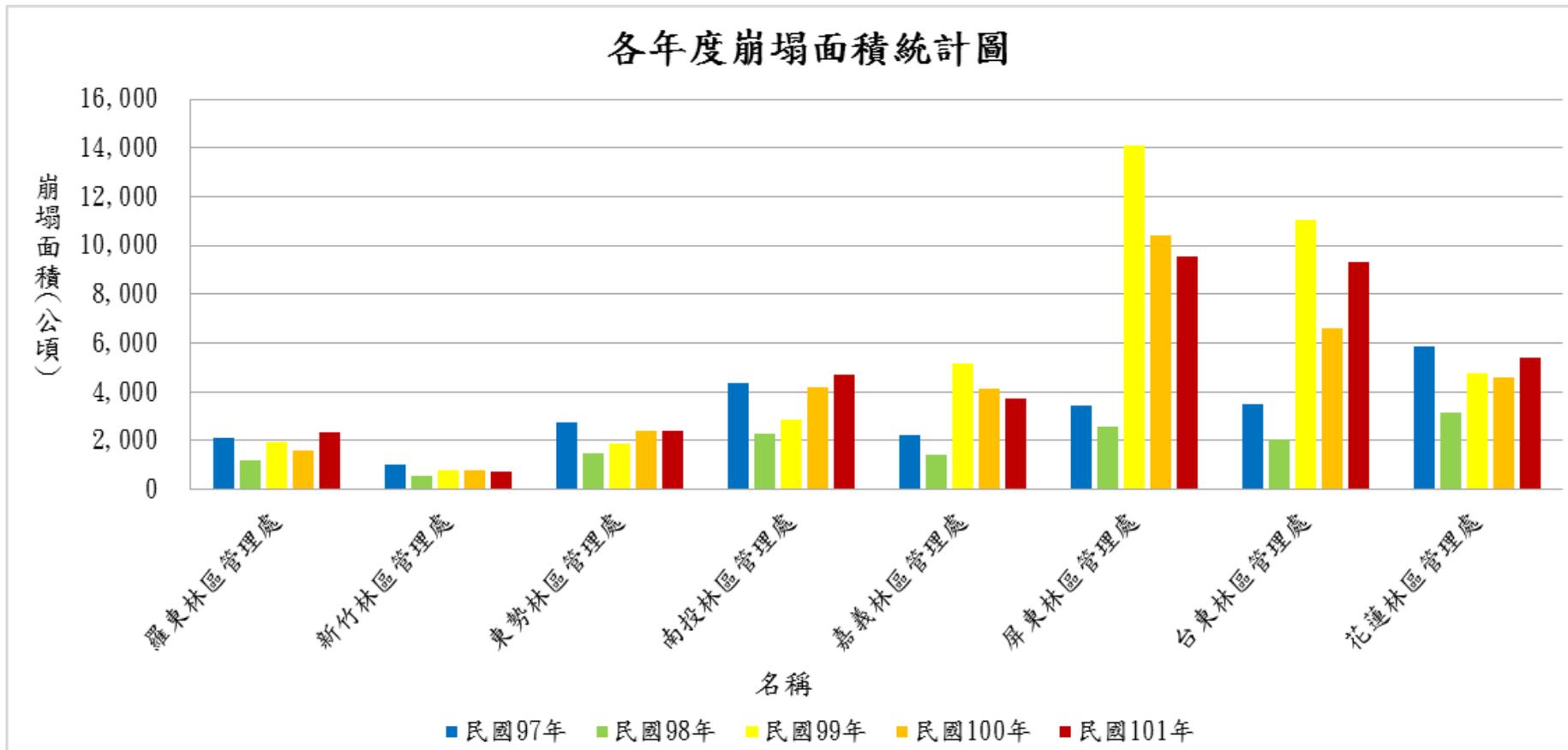
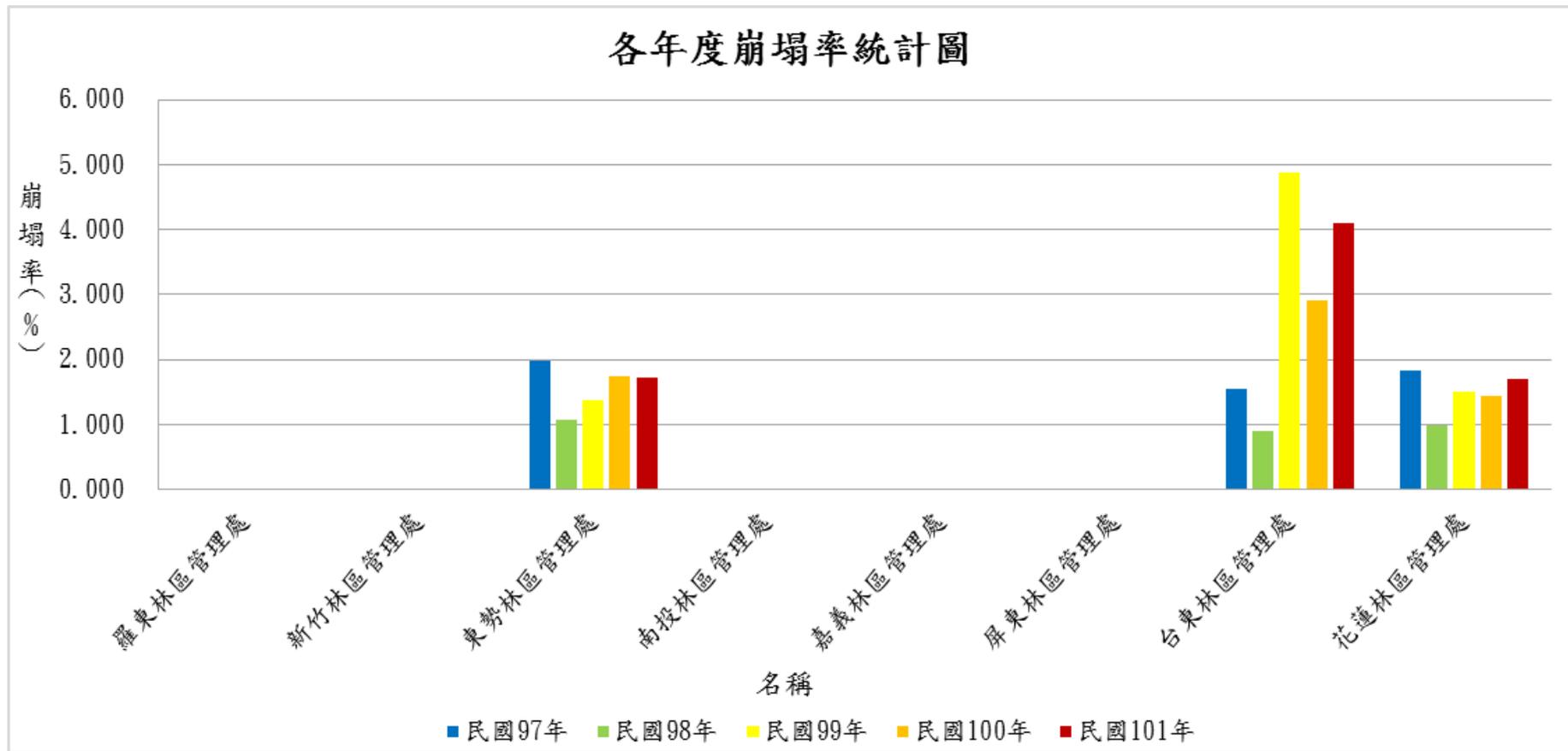


圖 3-3-25 國有林地林區界(林管處)分布圖



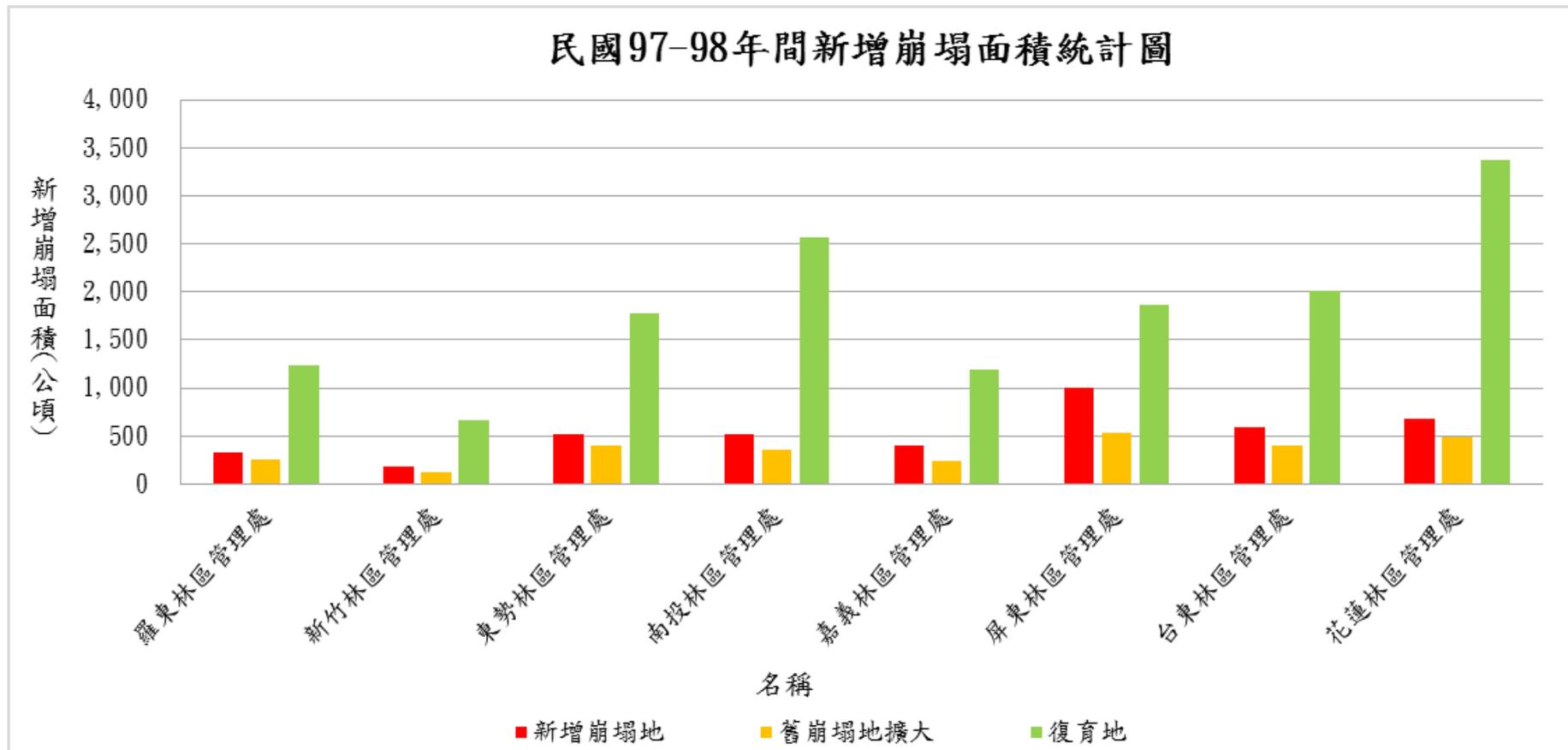
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-26 國有林地林區界各年度崩塌地面積統計成果圖



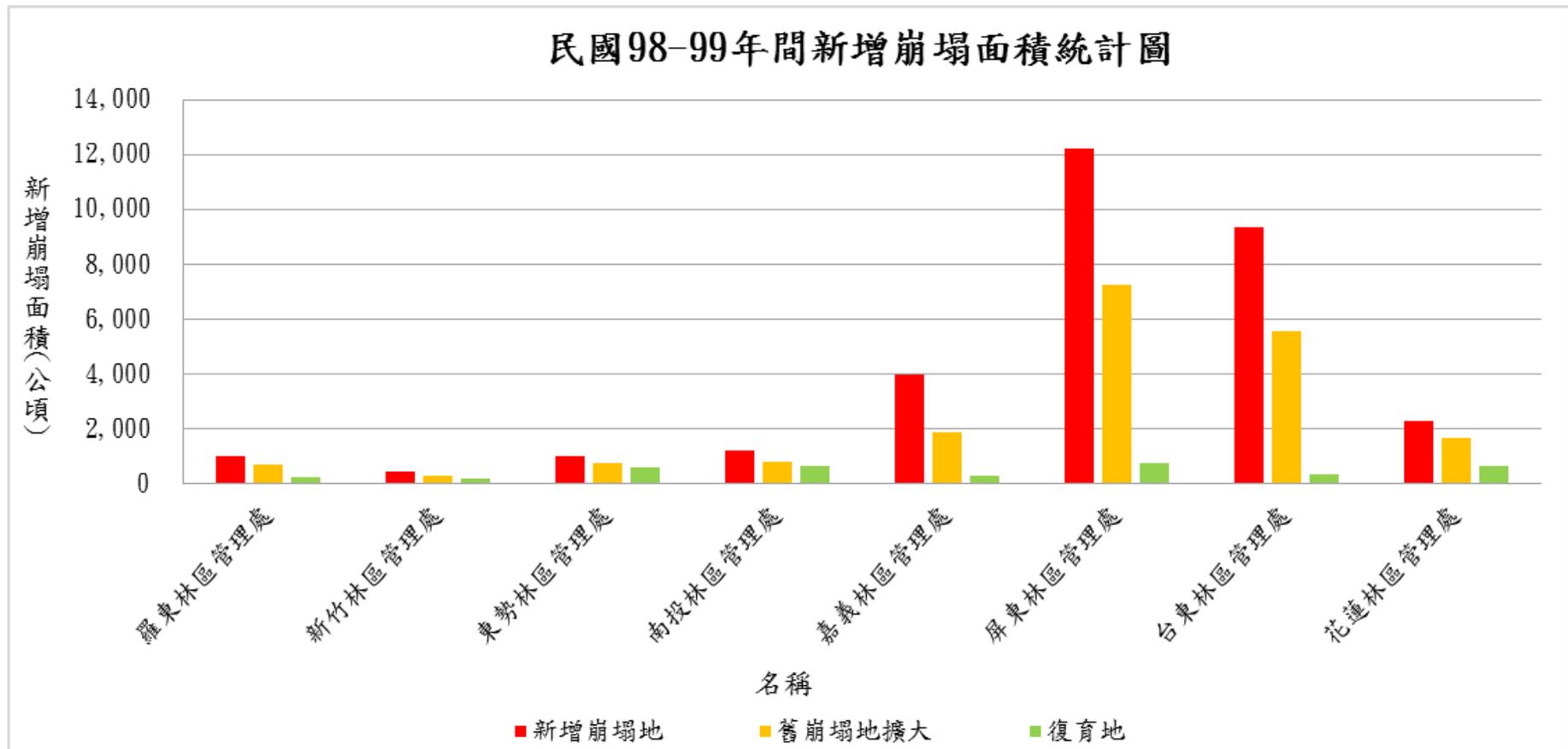
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-27 國有林地林區界各年度崩塌率統計成果圖



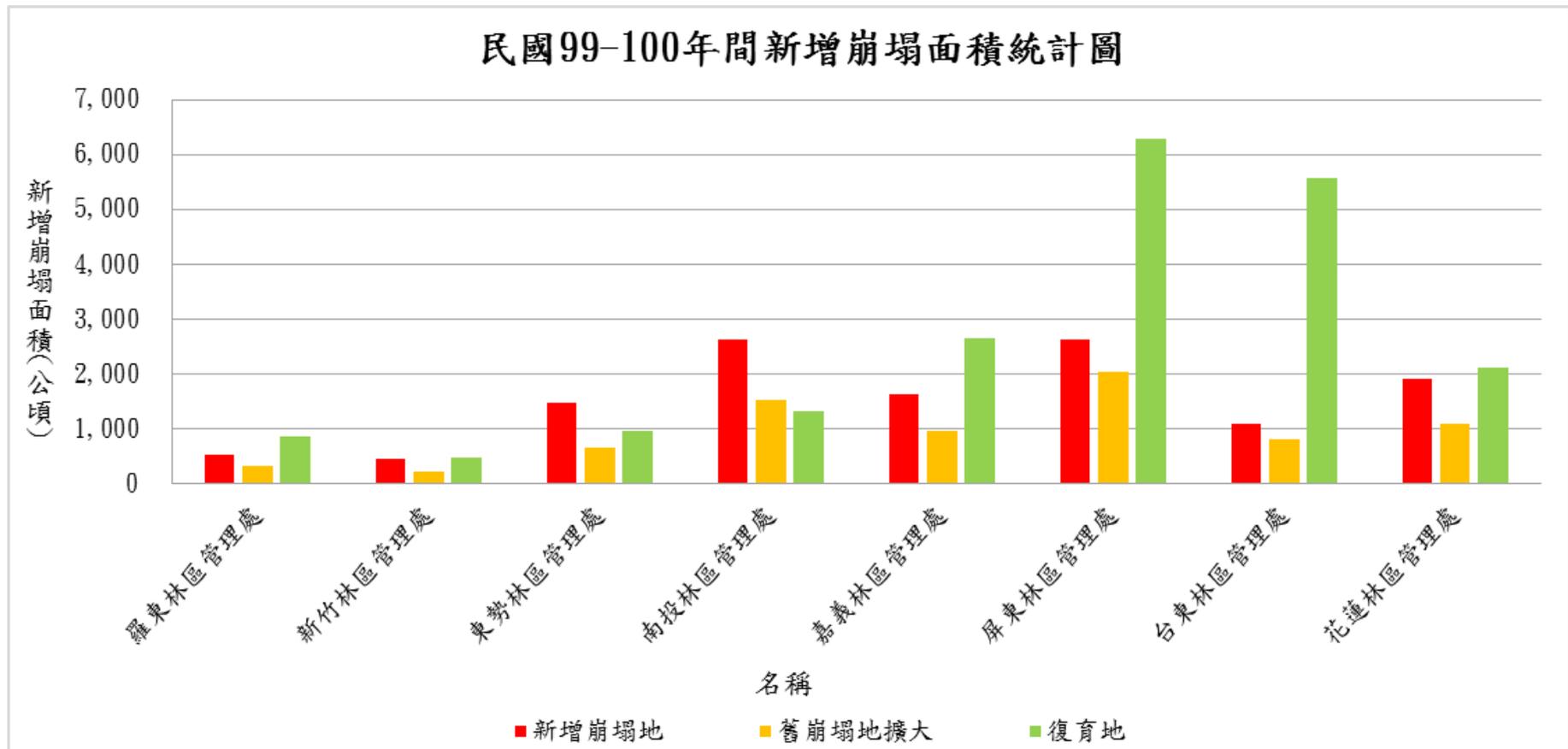
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-28 國有林地林區界 97-98 年間崩塌地面積統計成果圖



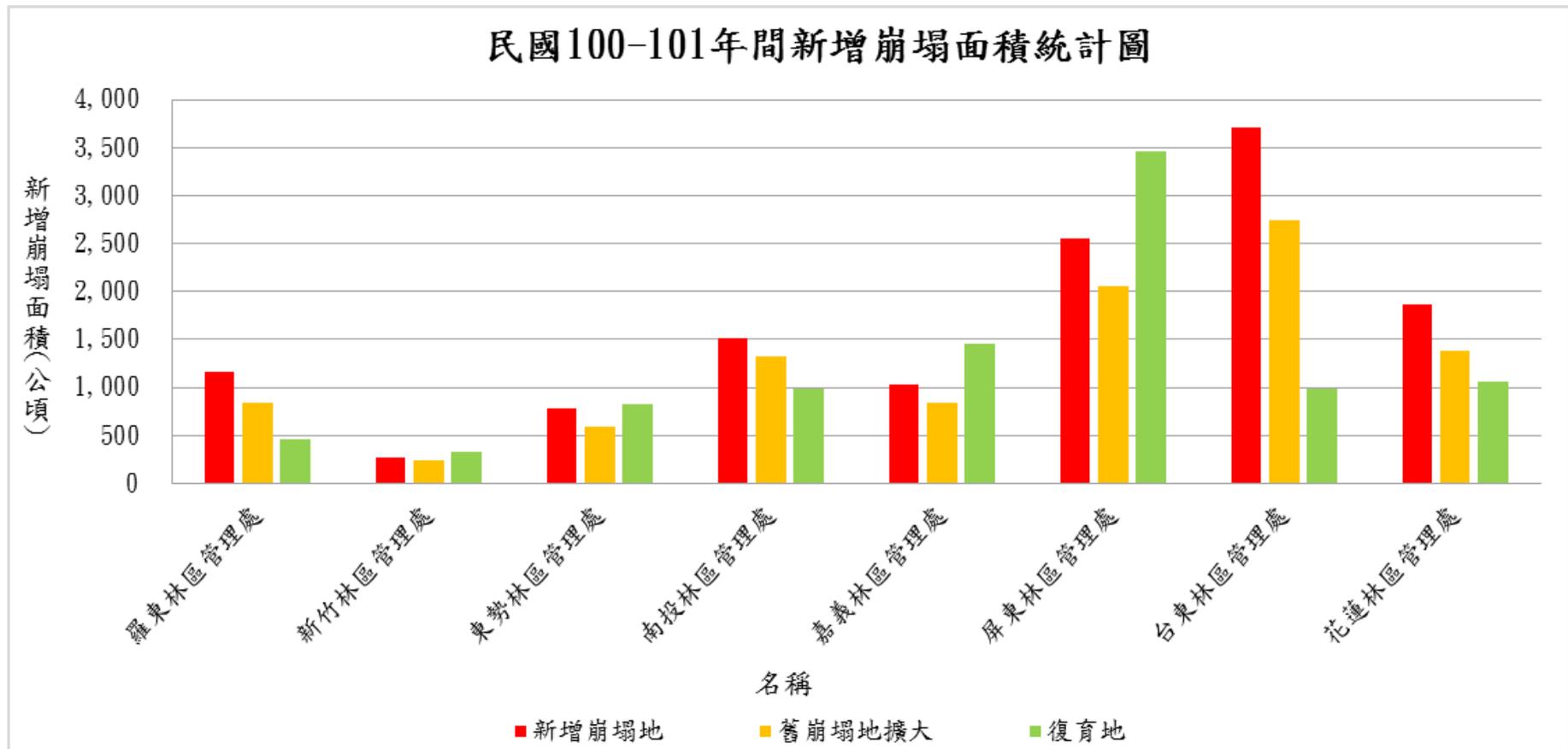
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-29 國有林地林區界 98-99 年間崩塌地面積統計成果圖



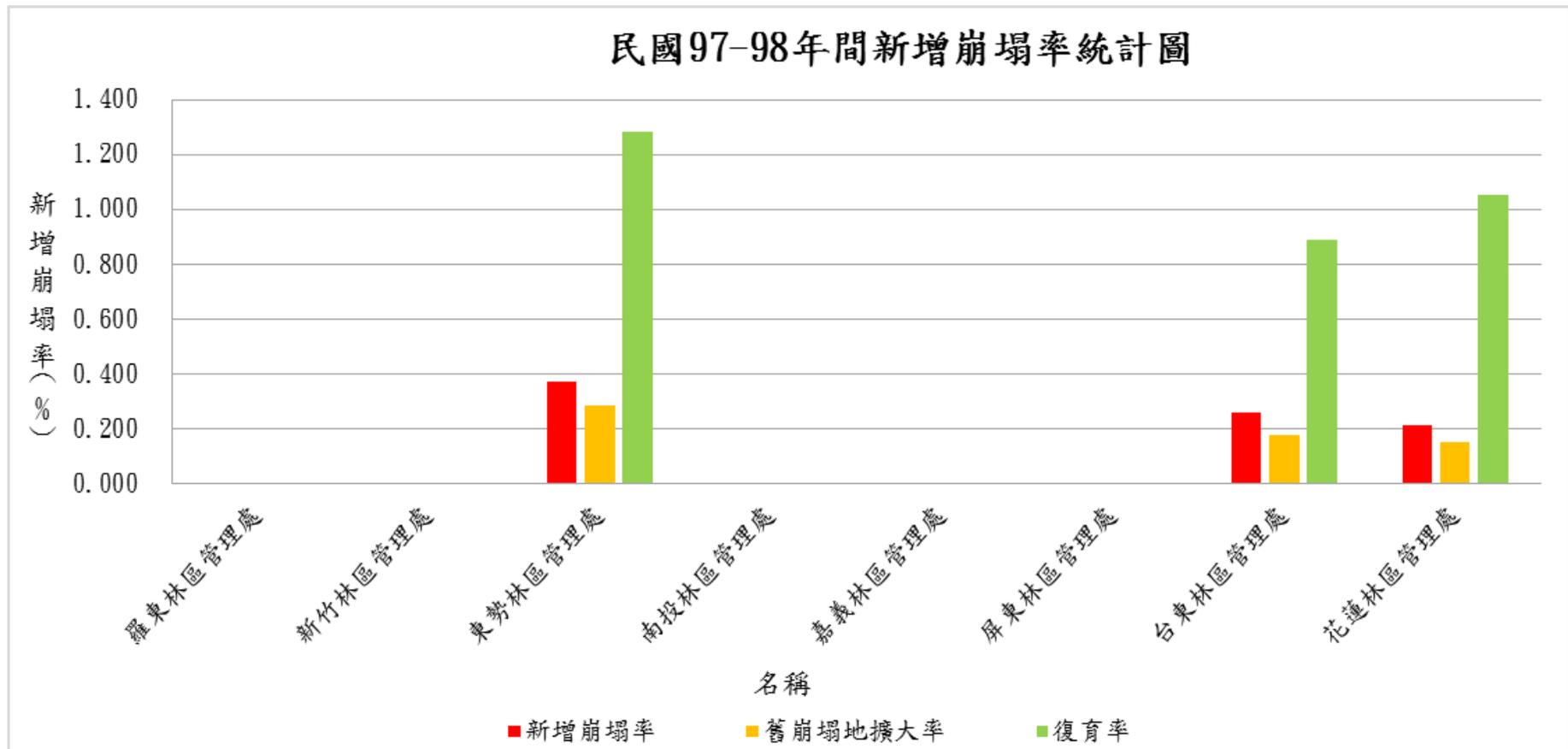
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-30 國有林地林區界 99-100 年間崩塌地面積統計成果圖



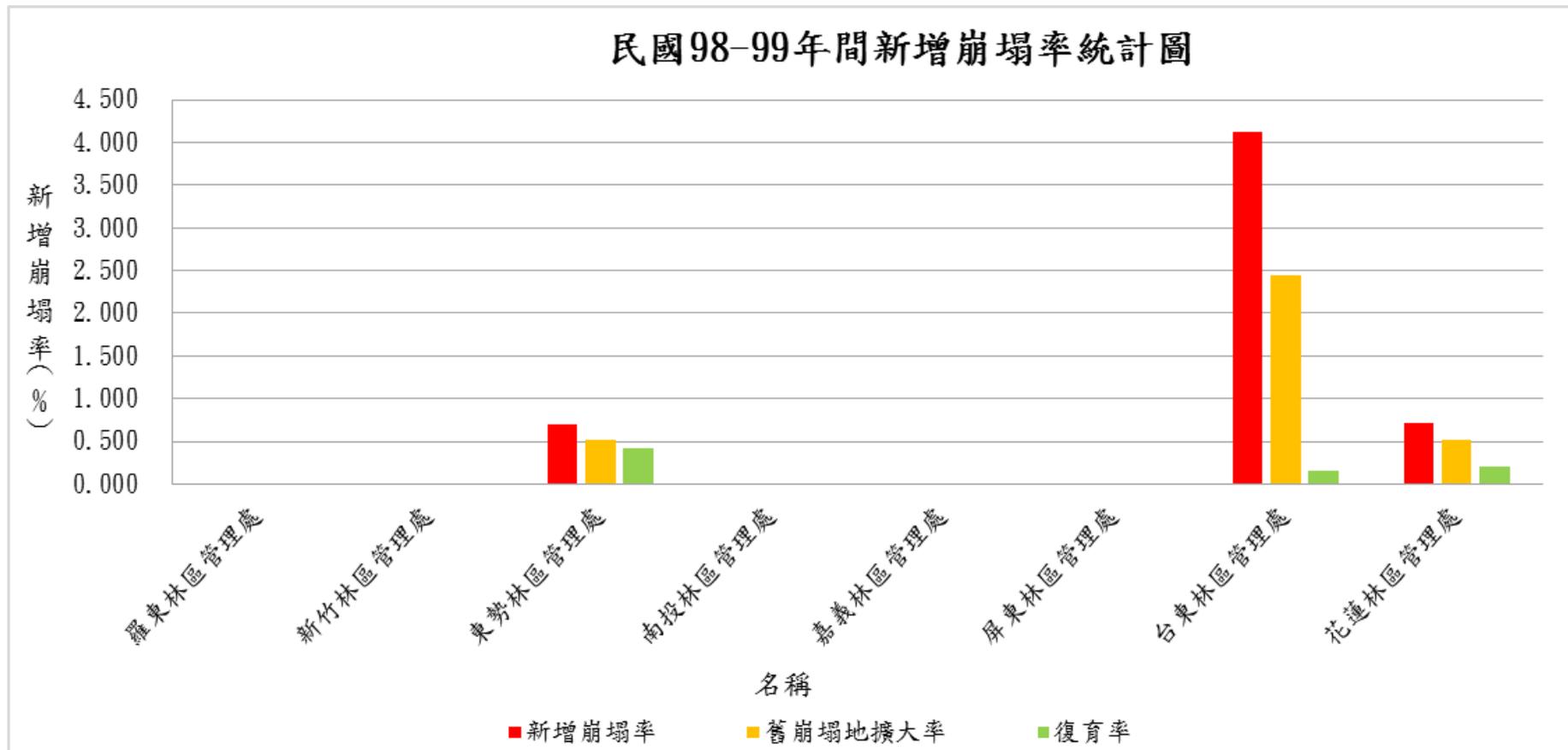
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-31 國有林地林區界 100-101 年間崩塌地面積統計成果圖



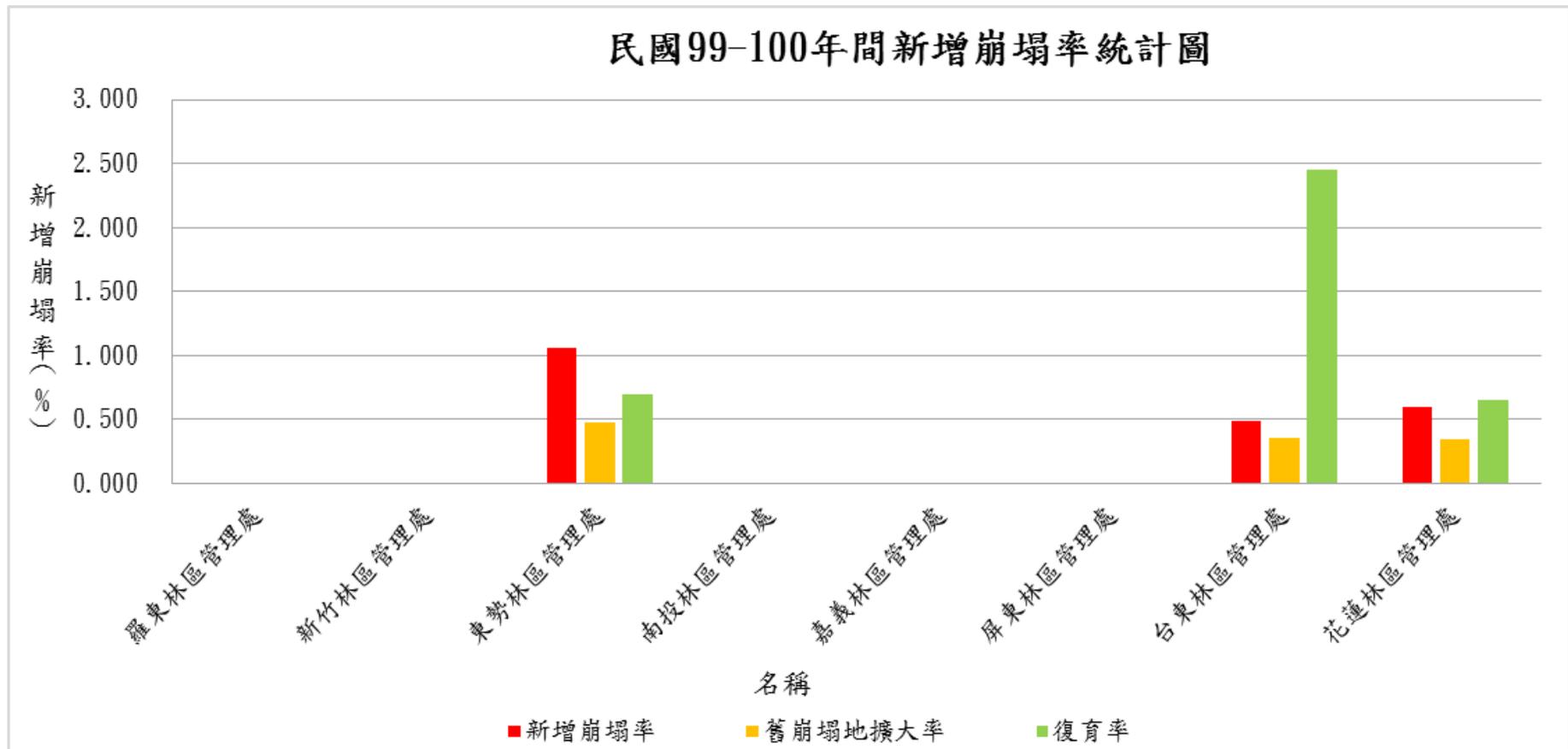
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-32 國有林地林區界 97-98 年間崩塌率統計成果圖



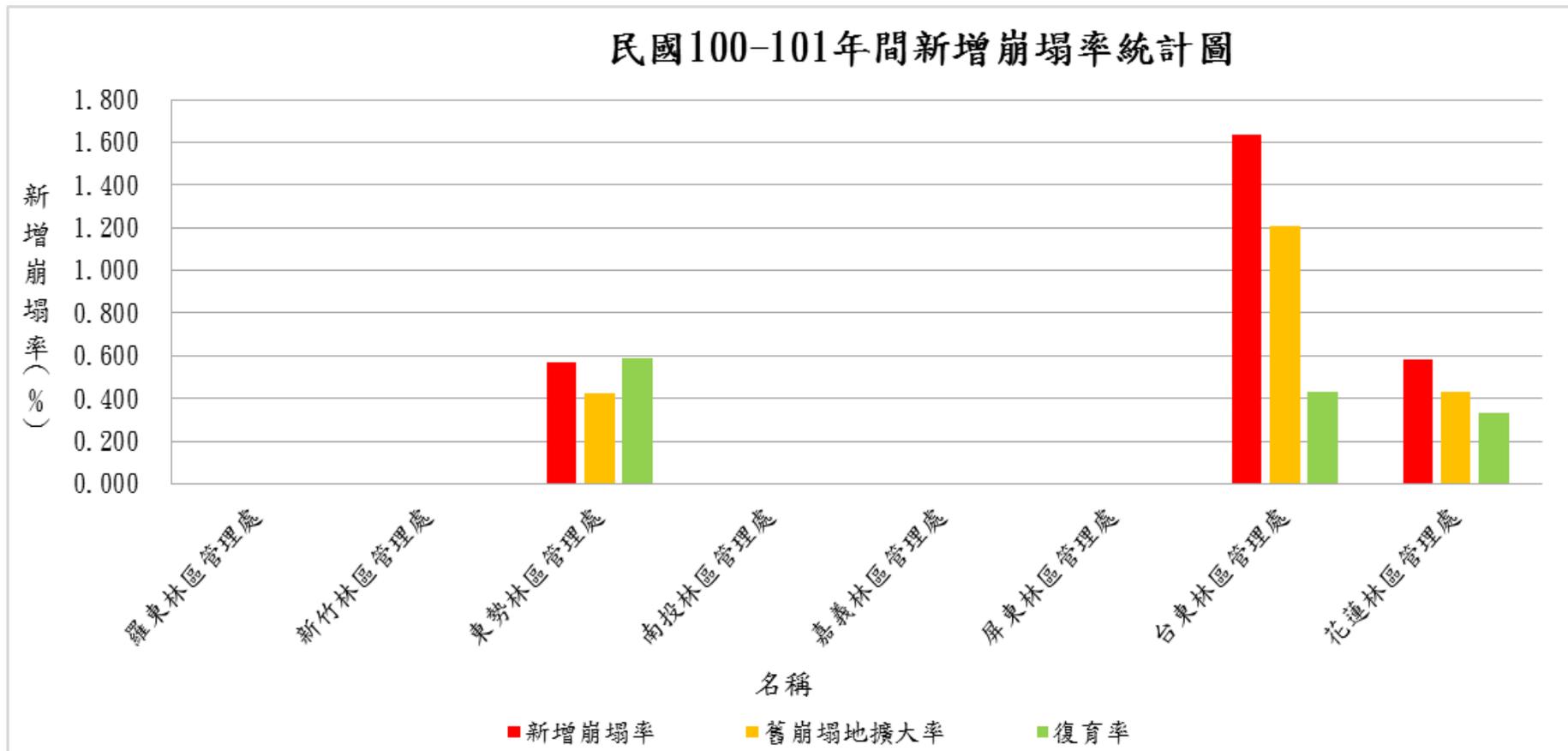
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-33 國有林地林區界 98-99 年間崩塌率統計成果圖



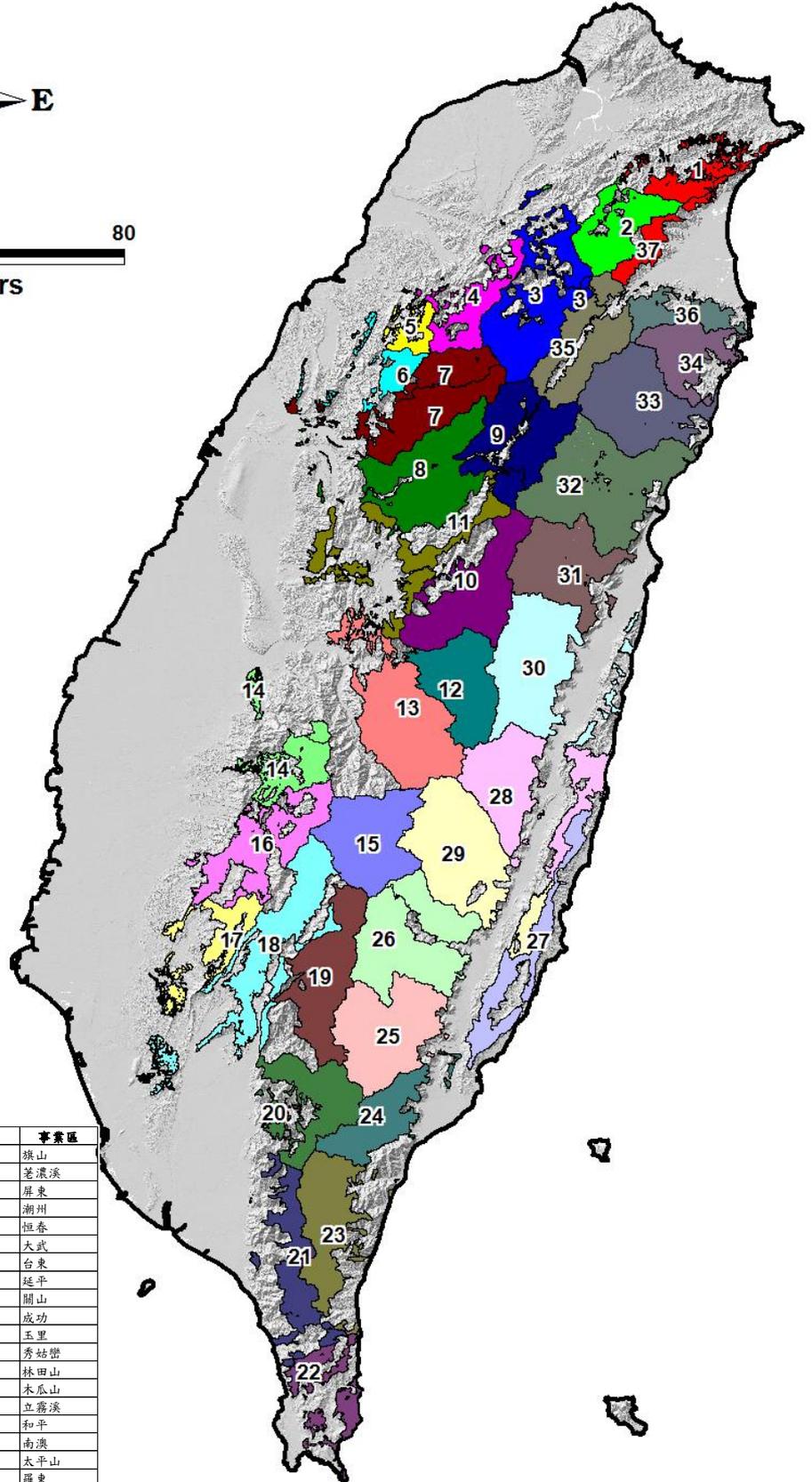
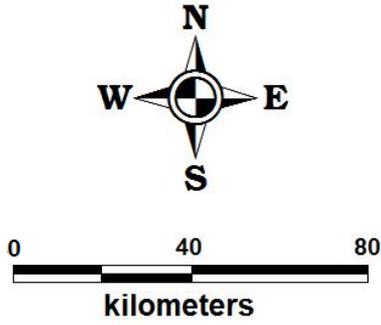
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-34 國有林地林區界 99-100 年間崩塌率統計成果圖



資料來源：本計畫整理。

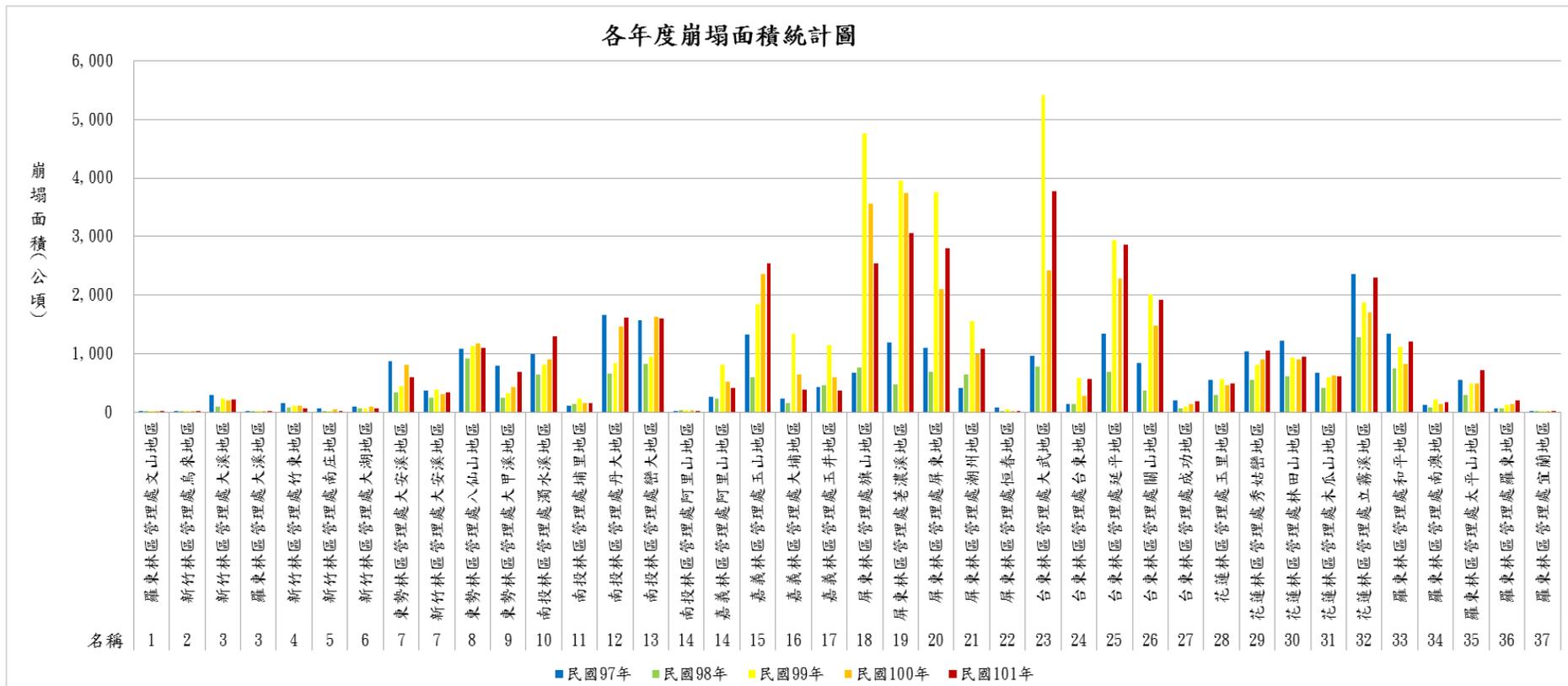
圖 3-3-35 國有林地林區界 100-101 年間崩塌率統計成果圖



編號	林區界	事業區	編號	林區界	事業區
1	羅東林區管理處	文山	18	屏東林區管理處	旗山
2	新竹林區管理處	烏來	19	屏東林區管理處	荖濃溪
3	羅東林區管理處	大溪	20	屏東林區管理處	屏東
3	新竹林區管理處	大溪	21	屏東林區管理處	潮州
4	新竹林區管理處	竹東	22	屏東林區管理處	恆春
5	新竹林區管理處	南庄	23	台東林區管理處	大武
6	新竹林區管理處	大湖	24	台東林區管理處	台東
7	東勢林區管理處	大安溪	25	台東林區管理處	延平
7	新竹林區管理處	大安溪	26	台東林區管理處	關山
8	東勢林區管理處	八仙山	27	台東林區管理處	成功
9	東勢林區管理處	大甲溪	28	花蓮林區管理處	玉里
10	南投林區管理處	濁水溪	29	花蓮林區管理處	秀姑巒
11	南投林區管理處	埔里	30	花蓮林區管理處	林田山
12	南投林區管理處	丹大	31	花蓮林區管理處	木瓜山
13	南投林區管理處	巒大	32	花蓮林區管理處	豆腐溪
14	南投林區管理處	阿里山	33	羅東林區管理處	和平
14	嘉義林區管理處	阿里山	34	羅東林區管理處	南澳
15	嘉義林區管理處	玉山	35	羅東林區管理處	太平山
16	嘉義林區管理處	大埔	36	羅東林區管理處	羅東
17	嘉義林區管理處	玉井	37	羅東林區管理處	宜蘭

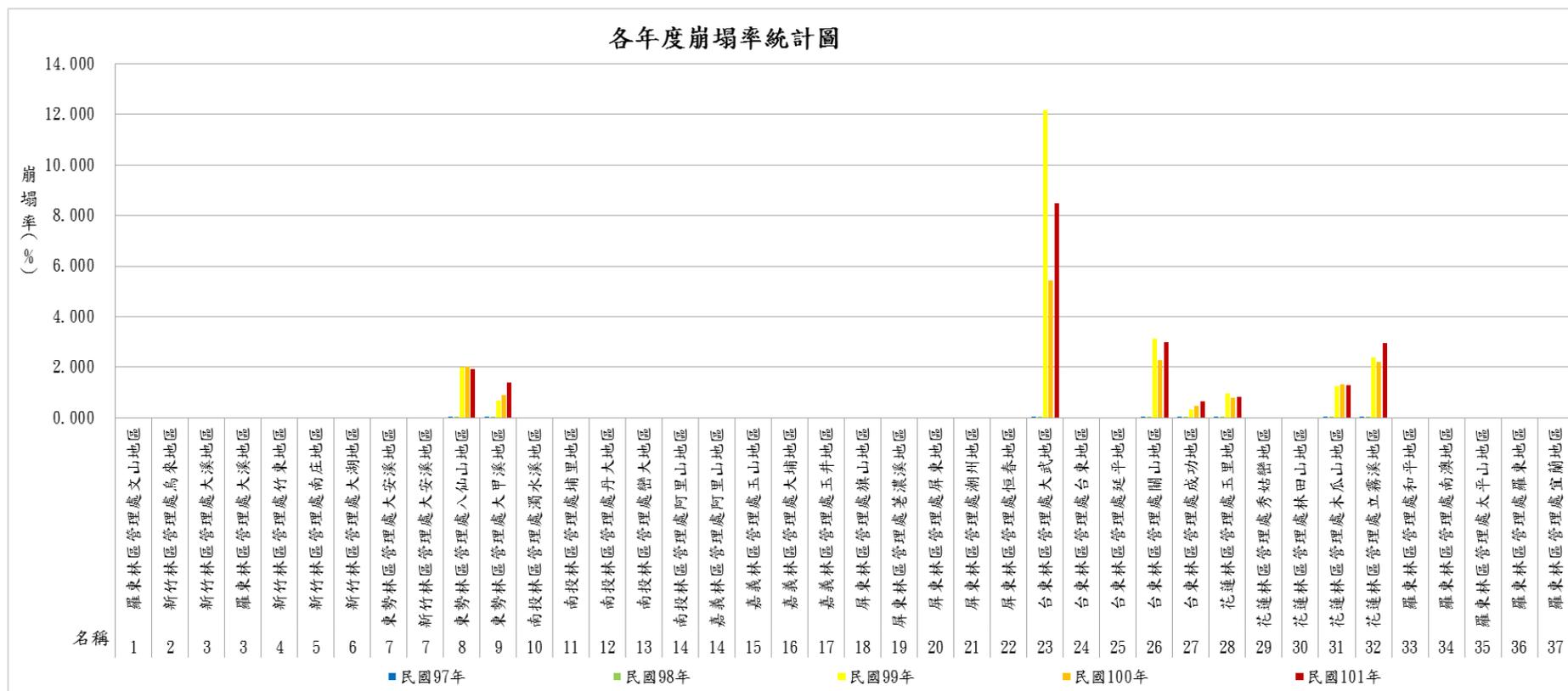
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-36 國有林地事業區分布圖



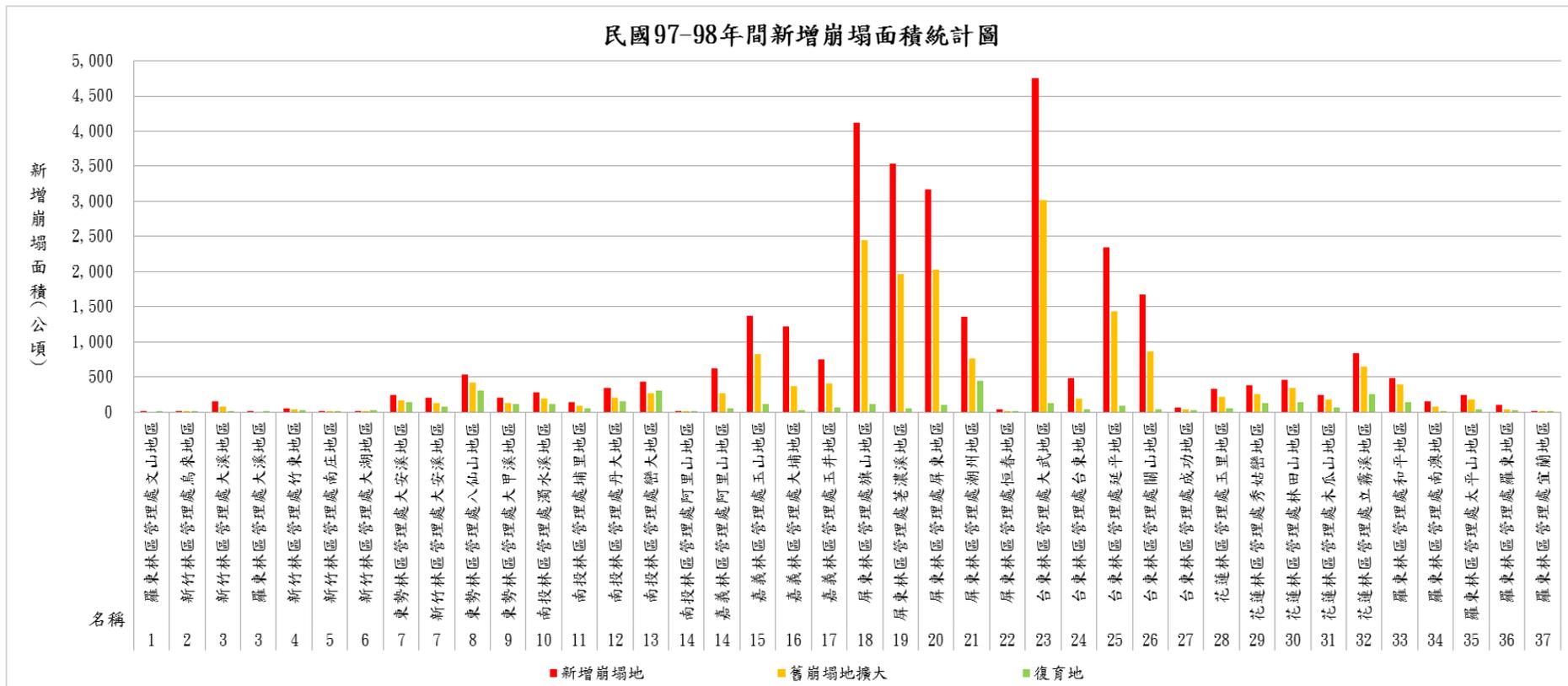
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-37 國有林地事業區各年度崩塌地面積統計成果圖



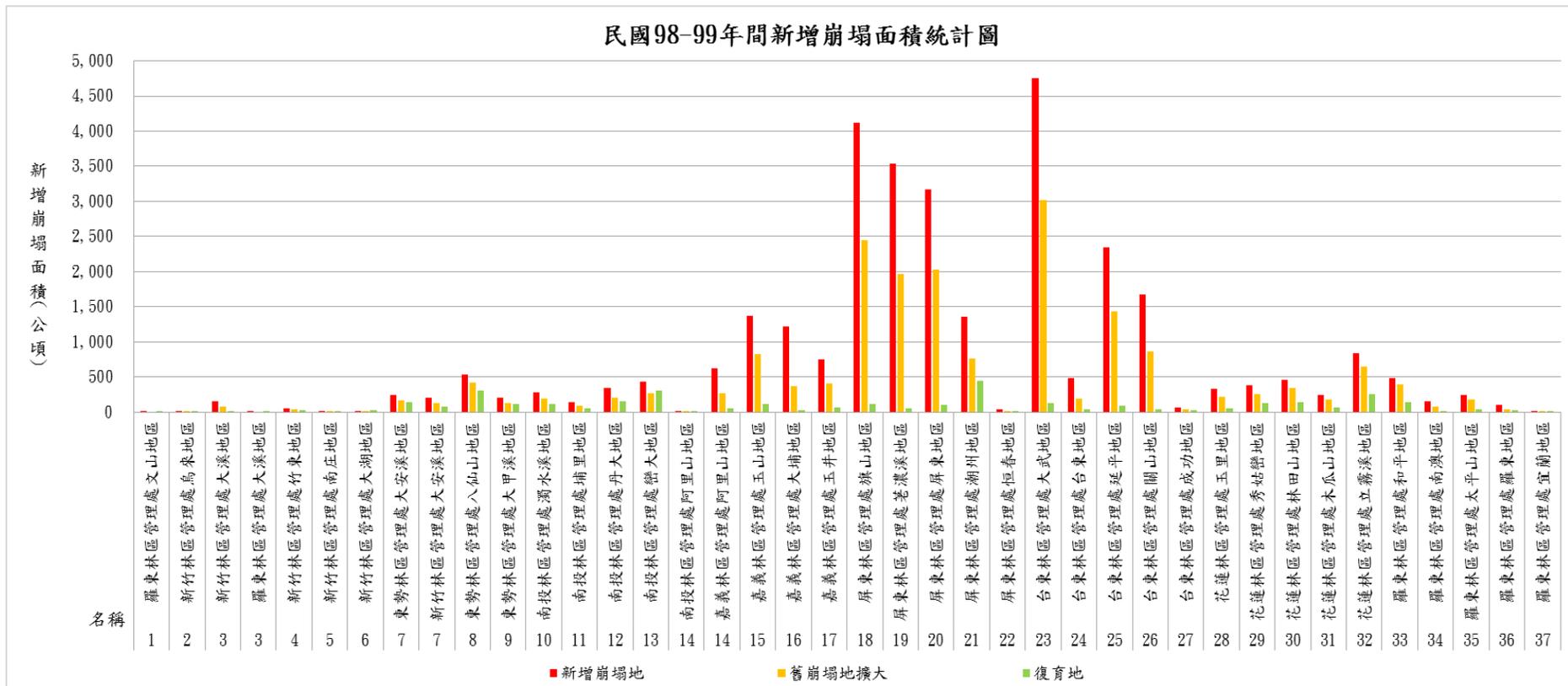
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-38 國有林地事業區各年度崩塌率統計成果圖



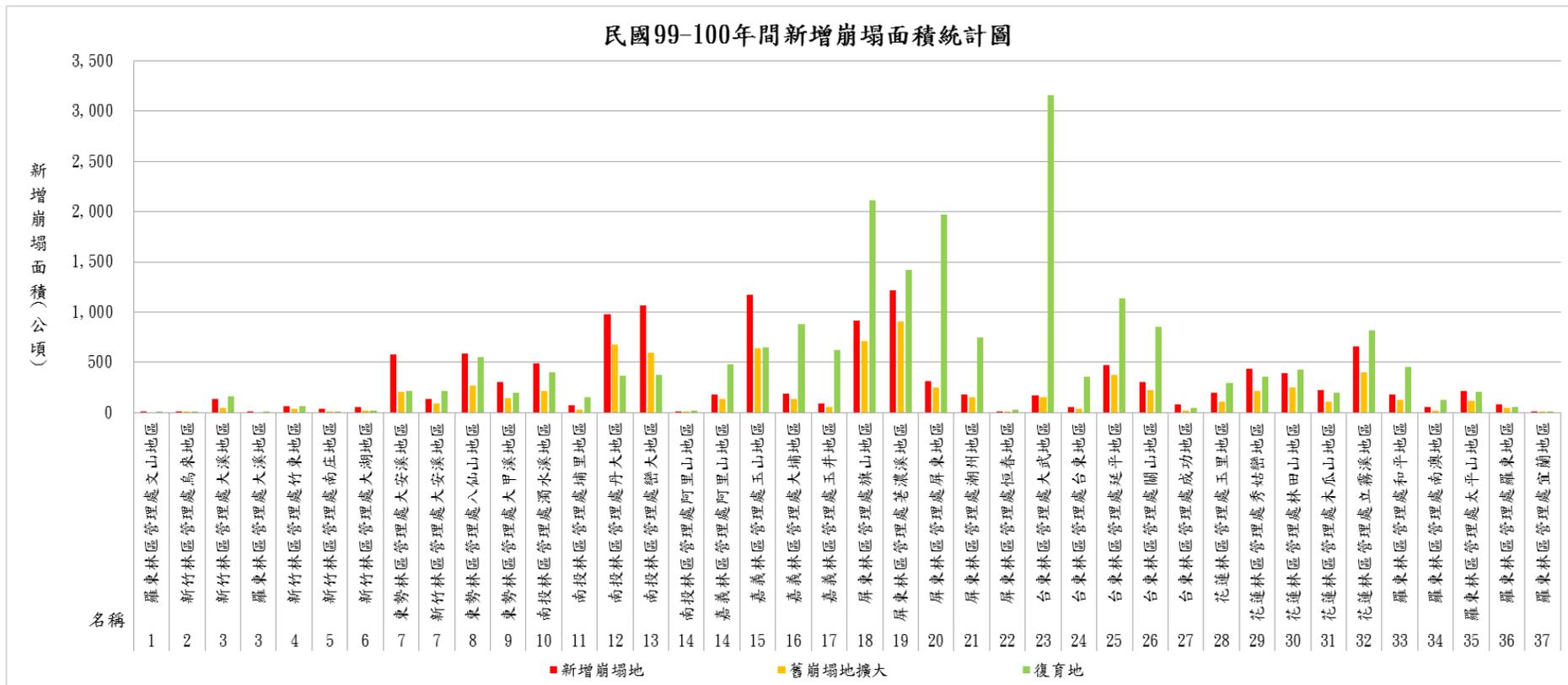
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-39 國有林地事業區 97-98 年間崩塌地面積統計成果圖



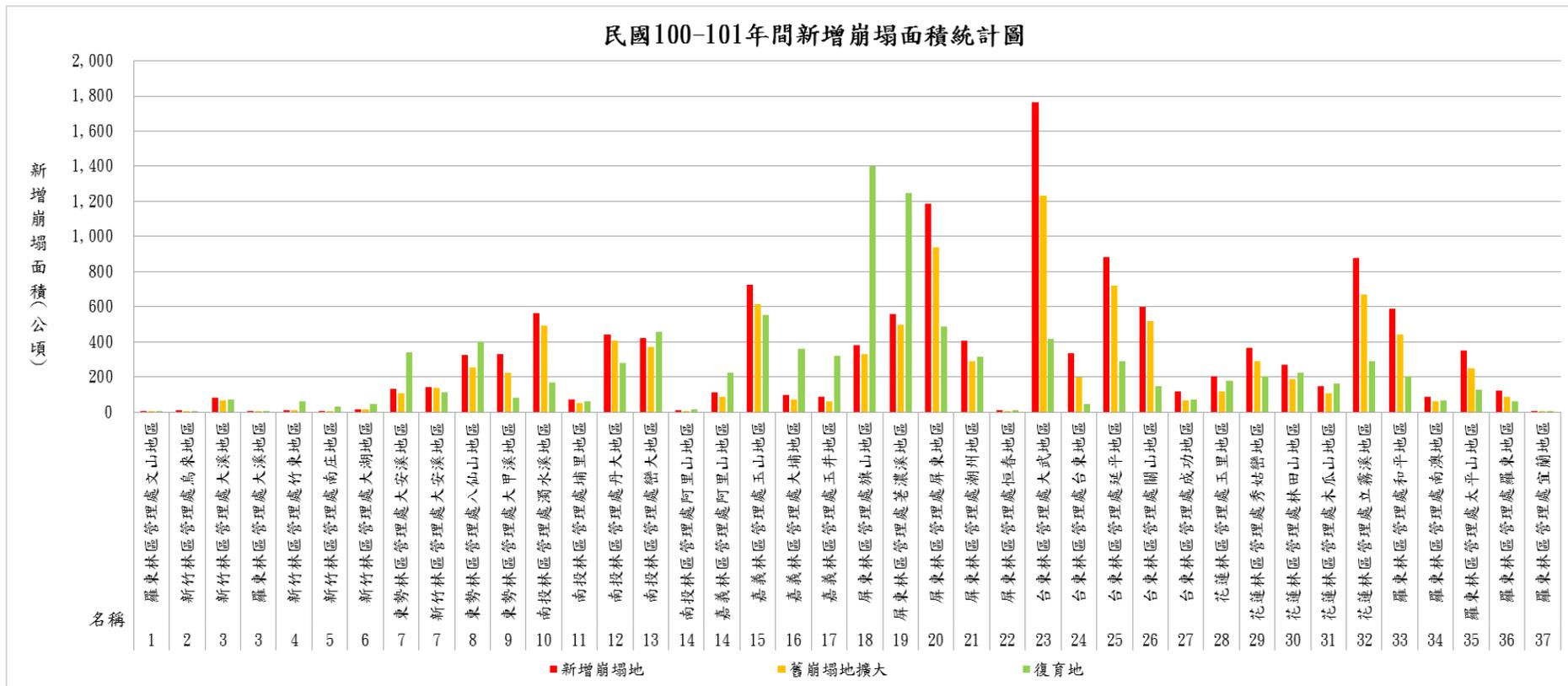
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-40 國有林地事業區 98-99 年間崩塌地面積統計成果圖



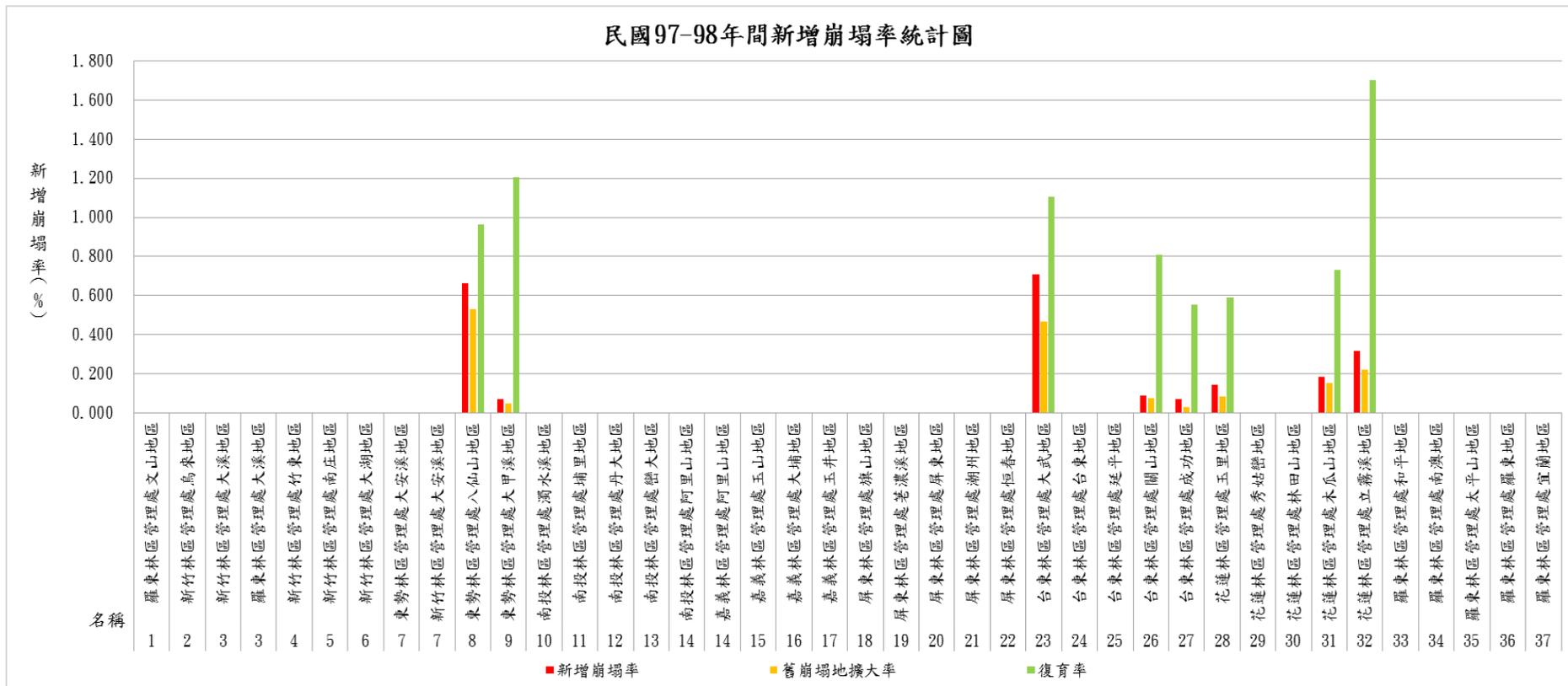
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-41 國有林地事業區 99-100 年間崩塌地面積統計成果圖



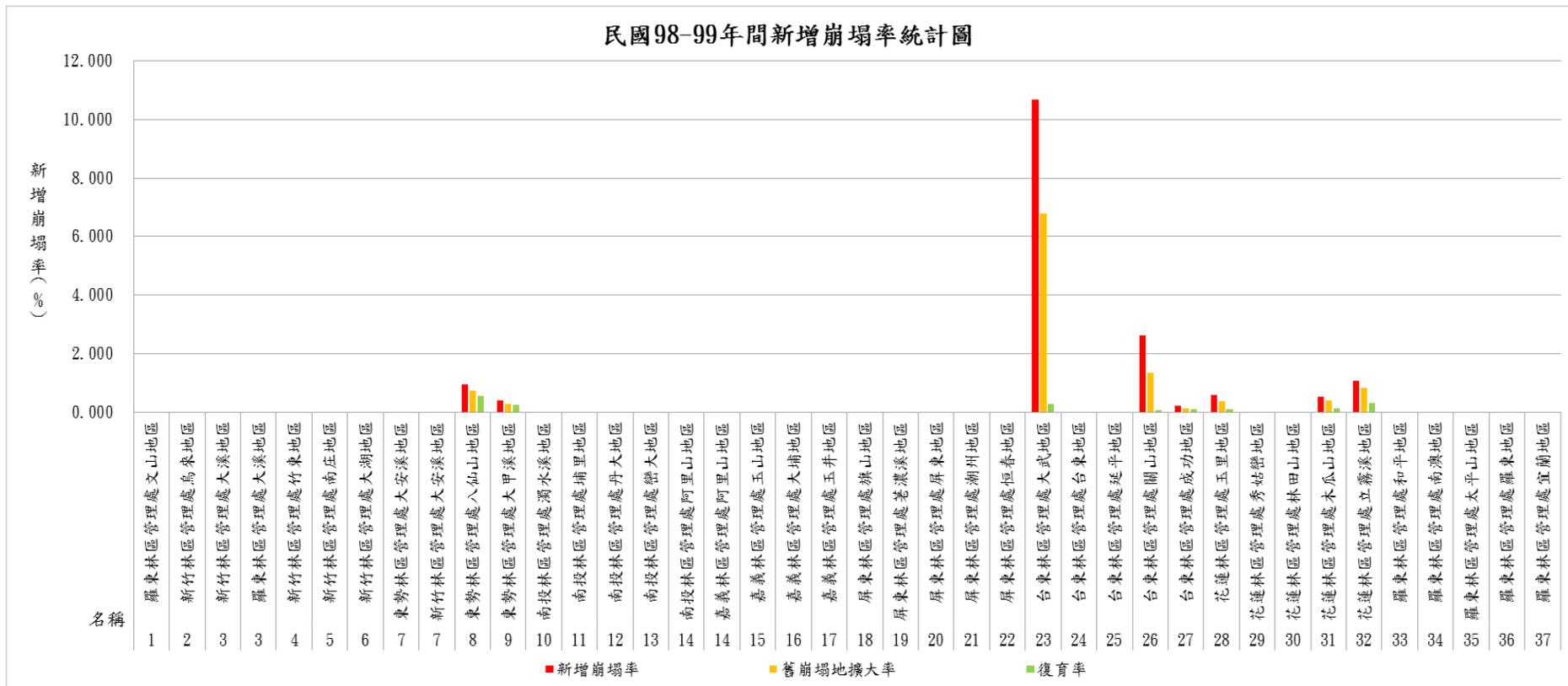
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-42 國有林地事業區 100-101 年間崩塌地面積統計成果圖



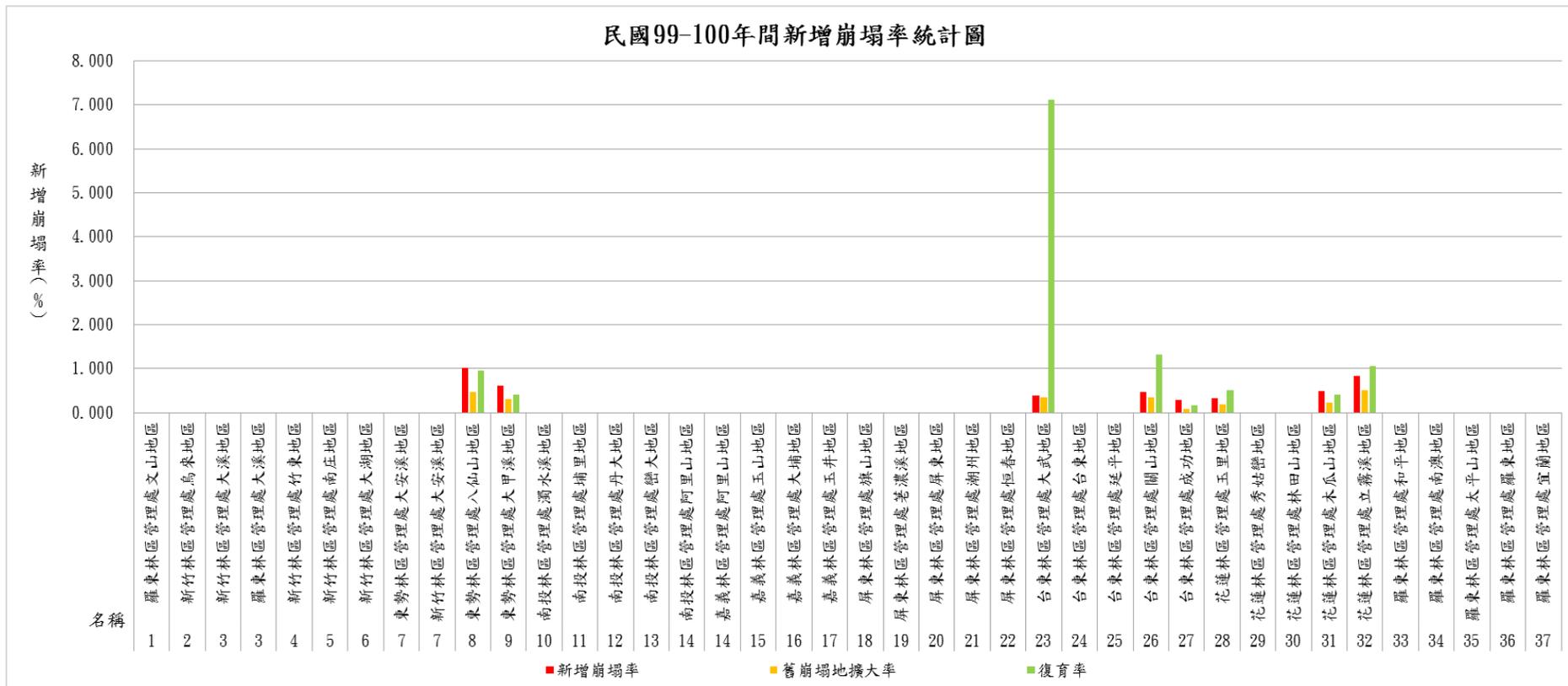
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-43 國有林地事業區 97-98 年間崩塌率統計成果圖



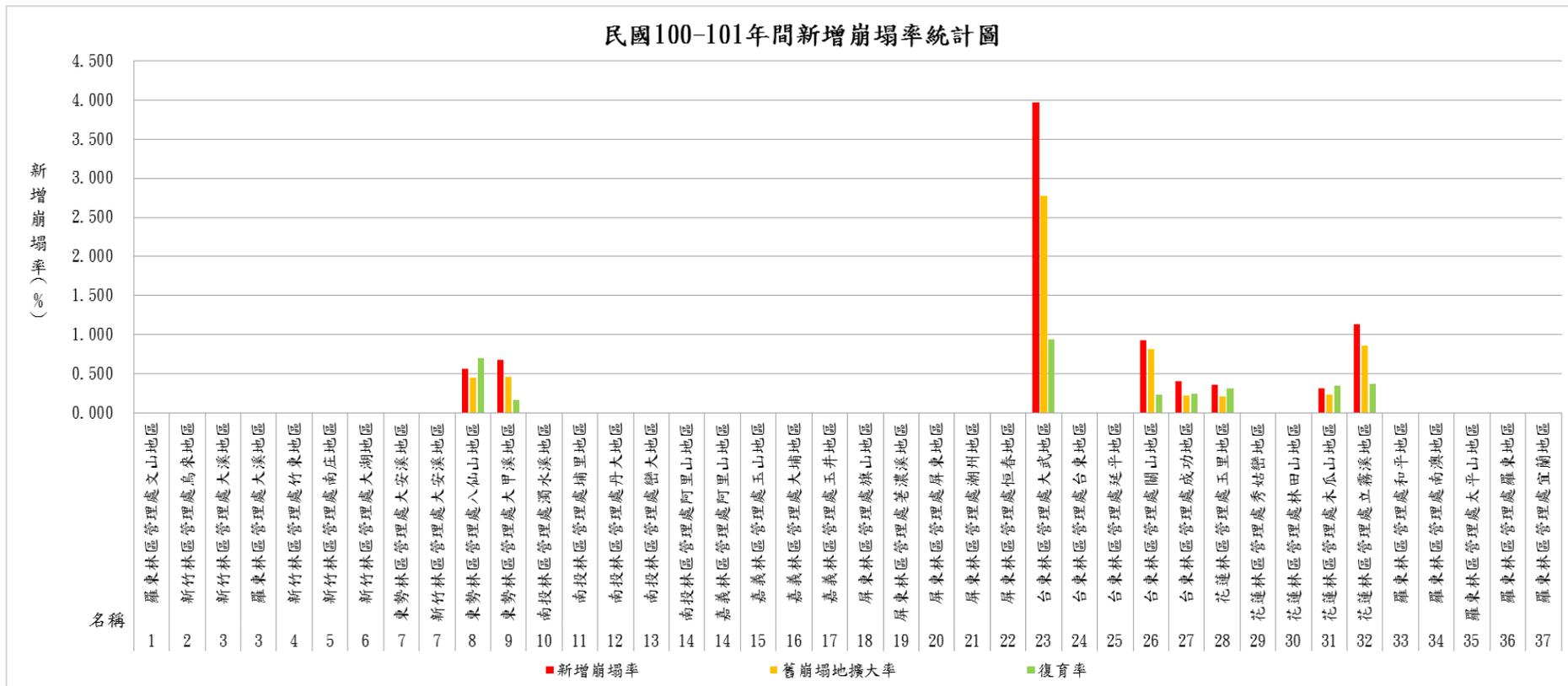
資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-44 國有林地事業區 98-99 年間崩塌率統計成果圖



資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-45 國有林地事業區 99-100 年間崩塌率統計成果圖



資料來源：本計畫整理。

圖 3-3-46 國有林地事業區 100-101 年間崩塌率統計成果圖

第肆章 國有林崩塌地土石方變化情形探討

本章將探討民國 97-101 年之國有林崩塌地土石方變化情形，包括(1)建立國有林崩塌地土石產生量之估算原則、方法及步驟；(2)逐年分析估算民國 97 年至 101 年底止，國有林崩塌地所產生之崩塌土砂、留置於國有林地內之土砂、及土砂流出量等；(3) 分析自民國 97 年至 101 年底止，以國有林土砂生產量以及流出量等資料，同時配合上開期間內之氣象降雨資料，分析降雨量與土砂流出量之關係。

4-1 崩塌土石方估算

崩塌土石方估算方法係根據國有林地降雨誘發崩塌地土石產生量及土砂流出量的關鍵課題分析討論結果，選定由崩塌體積-面積關係式量化國有林地之崩塌土石變化。

4-1-1 崩塌土方量估算方法

一、崩塌體積資料蒐集

本計畫採用崩塌體積-面積關係式來推估國有林班地之崩塌土砂生產量，但由於此關係式可能會受到地質材料的影響，需要將本計畫研究範圍進行劃分，以獲得適用於各地質材料之關係式。本計畫以臺灣七大地質區將崩塌資料進行分群，七大地質區如表 4-1-1。其中，澎湖群島(I)、西部濱海平原(II)與東部縱谷地區(VII)不在本計畫範圍內，並且該地區多屬平原或無明顯崩塌災害，故不予以分析。再者，中央山脈西翼地區範圍廣闊，根據其岩性可細分為雪山山脈帶(VIa)、脊樑山脈帶(VIb)，本計畫在此採用此次分區，雖然中央山脈東翼地區可細分為太魯閣帶(Va)和玉里帶(Vb)，但其範圍較小，故採取中央山脈東翼地區的主要分區作為崩塌分群的依據。

表 4-1-1 臺灣七大地質區

編碼	名稱	岩性或構造	次分區		
			編號	子分區	岩性
I	澎湖群島	更新世玄武岩			
II	西部濱海平原	第四紀沖積層			
III	西部麓山地區*	新第三紀碎屑岩			
IV	中央山脈西翼地區	第三紀亞變質岩	a	雪山山脈帶*	硬頁岩或板岩
			b	脊樑山脈帶*	板岩或千枚岩
V	中央山脈東翼地區*	先第三紀變質雜岩	a	太魯閣帶	片岩、大理岩、花崗岩
			b	玉里帶	片岩、蛇紋岩
VI	東部縱谷地區	板塊縫合帶			
VII	海岸山脈地區*	新第三紀火山岩			

附註：*表示本計畫採用崩塌樣本分區

本計畫藉由文獻蒐集與野外量測得到地區之崩塌體積和面積的資料。已蒐集西部麓山地區(III)樣本數共計 157 處；中央山脈西翼地區-雪山山脈帶(IVa)共計 1,996 處；中央山脈西翼地區-脊樑山脈帶(IVb)304 處；中央山脈東翼地區(V)共 32 處；海岸山脈地區(VII)共 46 處，共計 2,535 處，整理如圖 4-1-1 和表 4-1-2。

崩塌體積的來源與量測體積的方法皆不相同，大致可歸類為四種方法，分別為航空攝影測量、空載光達、斷面量測和野外直接觀測。各種崩塌體積量測方法說明如下：

- (1) 航空攝影測量：利用兩張重疊率達 60% 以上的航空照片，建立立體像對 (stereographic pairs)，利用兩張航空照片的視差距，推算物體的高程，又稱之為立體測量，崩塌前、後兩期的航空照片進行立體測量，得到崩塌前與崩塌後的高程變化。例如，石門水庫集水區治理規劃小組(1968)和農林航空測量隊(1972、1976、1980)皆採用此方法得到崩塌深度與體積。
- (2) 空載光達：光達的好處能夠快速、有效地獲得大面積地面三維資訊的技術，並可建立高精度之數值高程模型 DEM。透過比較前後兩期 DEM，則可以計算崩塌體積，例如，Tsou et al. (2011)以



此方法量測獻肚山崩塌的體積。

(3) 斷面量測：現地崩塌斷面量測為最簡易的方式，利用全測站 (total station)，針對崩塌崖面或斷面進行測量，推算崩塌深度與體積。例如，李鴻源等(2012) 和陳毅青(2012)等採用此法量測崩塌深度和體積。

(4) 野外直接觀測：利用尺標或肉眼觀測崩塌發生區側壁的深度，需要有經驗之調查人員。例如山地農牧局第五工作處(1984，1985)採取此方法調查臺灣東部地區之崩塌深度與體積。

雖然崩塌體積資料來源不同，量測方法也有所差異，但量測的對象皆為崩塌地發生區或崩塌槽(landslide scar)，因此，應可避免土石實方和鬆方差異，導致崩塌體積量測結果不一致。



表 4-1-2 各地質分區之崩塌體積-面積樣本

分區	地區	崩塌體積 (m ³)	個數	資料來源
III	國道 3 號崩塌	2.3×10 ⁴	1	高工局(2011)
	草嶺大崩塌	1.2×10 ⁸	1	Hung et al. (2002)
	九份二山崩塌	4.2×10 ⁷	1	Hung (2000)
	曾文水庫集水區	5.9×10 ² ~4.1×10 ⁶	153	農林航空測量隊(1980)
	獻肚山崩塌	2.5×10 ⁷	1	Tsou et al. (2010)
IVa	石門水庫集水區 A	1.1×10 ¹ ~1.2×10 ⁶	1,974	石門水庫集水區治理規劃小組(1968)、農林航空測量隊(1972)、農林航空測量隊(1976)
	石門水庫集水區 B	6.6×10 ¹ ~7.4×10 ⁴	12	李鴻源等(2012)
	淡水河流域	1.3×10 ¹ ~2.5×10 ⁴	8	李鴻源等(2012)
	高屏溪流域	1.0×10 ⁴ ~2.1×10 ⁵	2	陳毅青(2012)
IVb	高屏溪流域	4.9×10 ¹ ~4.6×10 ⁵	8	陳毅青(2012)
	太麻里溪包盛社	1.2×10 ⁸	1	林務局台東林區管理處
	大竹溪	3.0×10 ² ~1.2×10 ⁴	14	山地農牧局第五工作處(1984)
	大武溪	2.0×10 ² ~3.0×10 ³	6	山地農牧局第五工作處(1984)
	大鳥沿海	5.0×10 ² ~1.5×10 ³	3	山地農牧局第五工作處(1984)
	太平溪	4.0×10 ² ~2.9×10 ⁵	33	山地農牧局第五工作處(1984)
	太麻里沿海	1.8×10 ² ~3.1×10 ⁴	36	山地農牧局第五工作處(1984)
	太麻里溪	2.1×10 ² ~7.8×10 ⁴	60	山地農牧局第五工作處(1984)
	利嘉溪	4.5×10 ² ~8.0×10 ⁴	19	山地農牧局第五工作處(1984)
	卑南溪	3.3×10 ² ~1.2×10 ⁵	61	山地農牧局第五工作處(1984)
	知本溪	4.5×10 ² ~1.3×10 ⁵	32	山地農牧局第五工作處(1984)
	金崙溪	7.5×10 ² ~2.5×10 ⁴	17	山地農牧局第五工作處(1984)
	新武呂溪	2.5×10 ³ ~1.6×10 ⁵	3	山地農牧局第五工作處(1984)
	觀音鼻沿海	1.5×10 ² ~4.0×10 ³	11	山地農牧局第五工作處(1984)
V	新武呂溪	3.0×10 ² ~6.0×10 ⁴	32	山地農牧局第五工作處(1984)
	南澳溪	7~1.4×10 ³	5	本計畫(2011)
VII	卑南溪	8.0×10 ² ~5.2×10 ⁶	40	山地農牧局第五工作處(1985)
	新武呂溪	9.0×10 ² ~1.5×10 ⁵	6	山地農牧局第五工作處(1985)

資料來源：本計畫整理

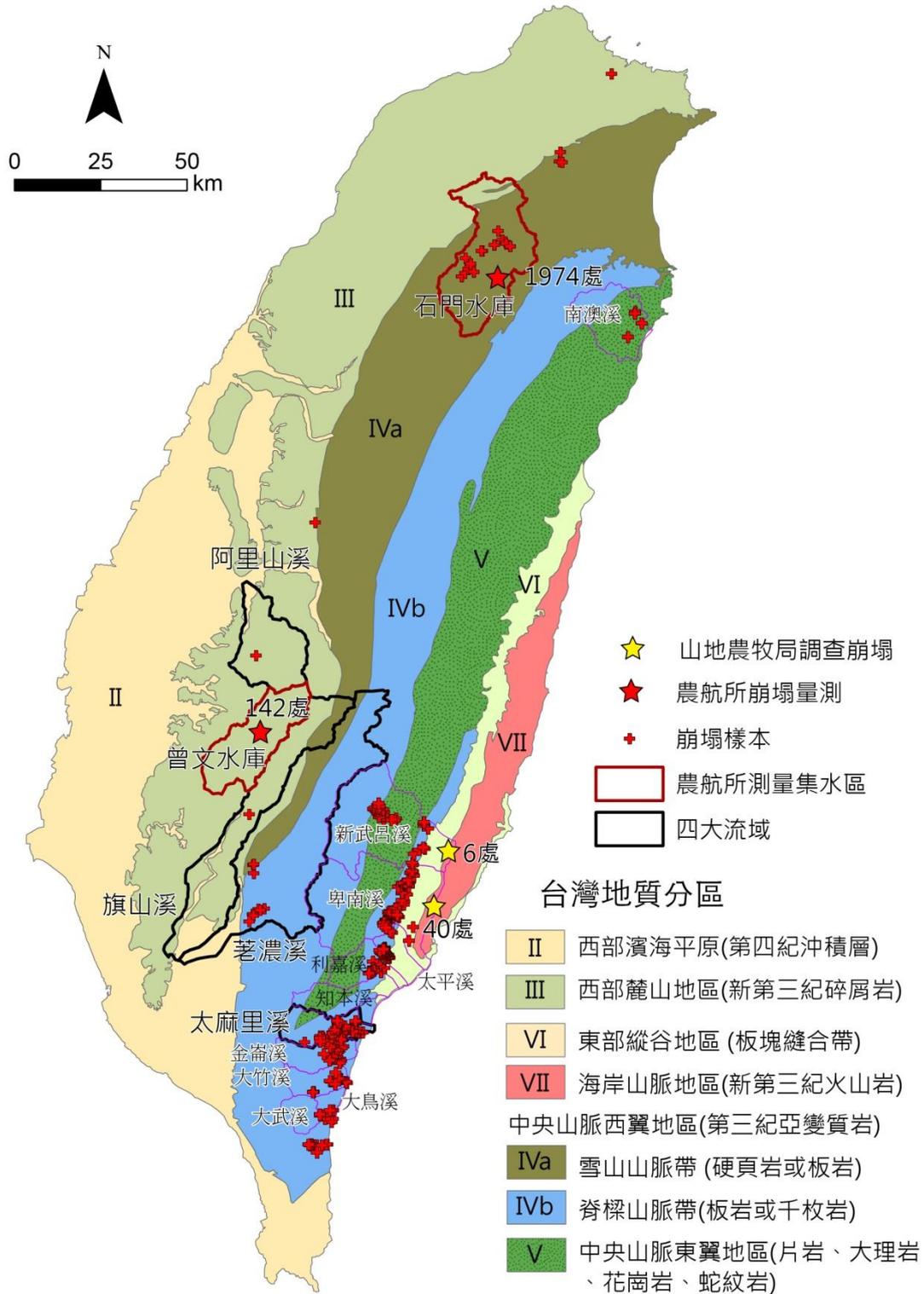


圖 4-1-1 臺灣地質分區與崩塌地樣本分布

此外，為增加該中央山脈東翼地區之地質分區之樣本數量，本計畫也於民國 101 年 11 月 22 日至宜蘭縣南澳鄉進行崩塌測量。南澳地區受到民國 101 年 8 月的蘇拉颱風的豪雨影響，產生大量之崩塌與土石流災害，經現場探勘之後，選定南澳北溪與南澳南溪共 5 處崩塌進測量。採取橫斷面法，利用無菱鏡全站量測崩塌地，野外量測流程說明如下：

- (1) 使用工具：Topcon 公司生產的全站式免菱鏡光波經緯儀，型號為 GPT-3005LN，精度與距離(D)的關係為 $\pm(10\text{mm}+10\cdot 5D)$ ；
- (2) 選擇可通視的崩塌地，並且距離在 500 公尺以內（全站儀無菱鏡最大量測離約為 700 m）；
- (3) 使用全站儀進行崩塌地斷面座標量測，並記錄測量點座標、時間、所在區域、崩塌地與量測點的相對位置並拍照記錄；
- (4) 每個崩塌地隨機選擇量測 2~5 個斷面，崩塌地的上緣、中緣、下緣的斷面各選取一個進行量測（圖 4-1-2）；
- (5) 使用全站儀計算各斷面地形起伏點的座標，一個斷面計算 8~20 個點座標；
- (6) 利用全站儀所量測的斷面座標，進行各點座標與高程的轉換後，得到各橫剖面曲線，並計算崩塌地平均深度與體積。

崩塌基本資料詳圖 4-1-3。量測結果繪製之橫斷斷面圖與平均深度計算結果詳圖 4-1-4。崩塌面積、體積、深度量測結果詳表 4-1-3，崩塌體積從最小的 7 立方公尺到最大為 1,402 立方公尺，並將量測結果納入中央山脈東翼地區(V)的樣本中，使該區樣本數為 37 處，總樣本數合計 2,540 處。



圖 4-1-2 崩塌地橫斷面量測法

編號	S01	編號	S02
區域	南澳北溪	區域	南澳北溪
X 座標 (TWD97)	328,119	X 座標 (TWD97)	328,059
Y 座標 (TWD97)	2,710,744	Y 座標 (TWD97)	2,710,242
坡度(度)	41	坡度(度)	40

圖 4-1-3 南澳地區崩塌地基本資料與相片

編號	S03	編號	S04
區域	南澳北溪	區域	南澳南溪
X 座標 (TWD97)	330,008	X 座標 (TWD97)	325,990
Y 座標 (TWD97)	2,707,317	Y 座標 (TWD97)	2,703,307
坡度(度)	43	坡度(度)	43
			

編號	S05
區域	南澳南溪
X 座標 (TWD97)	326,017
Y 座標 (TWD97)	2,703,280
坡度(度)	43
	

圖 4-1-3 南澳地區崩塌地基本資料與相片(續)

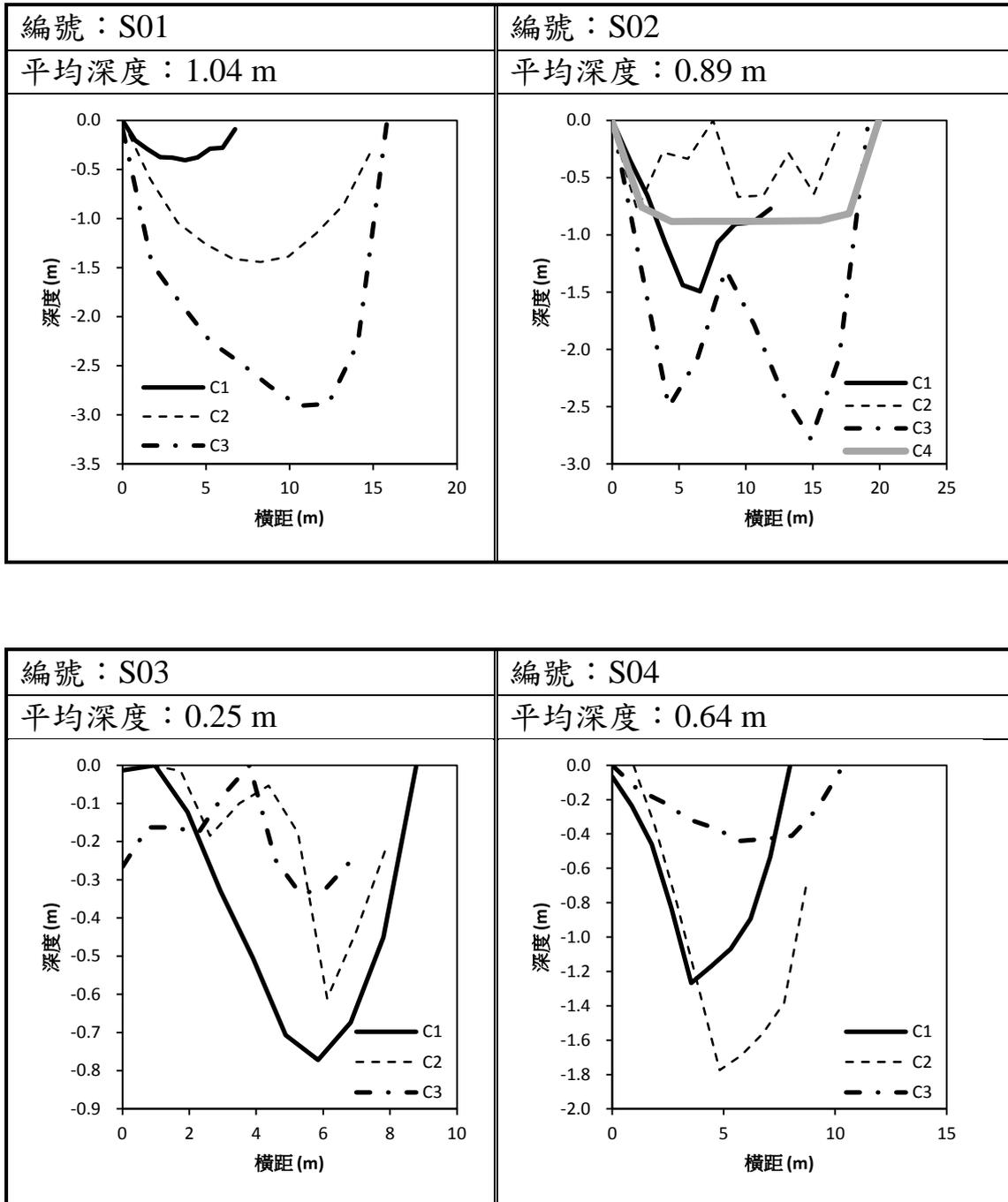


圖 4-1-4 南澳地區崩塌橫斷面與平均深度

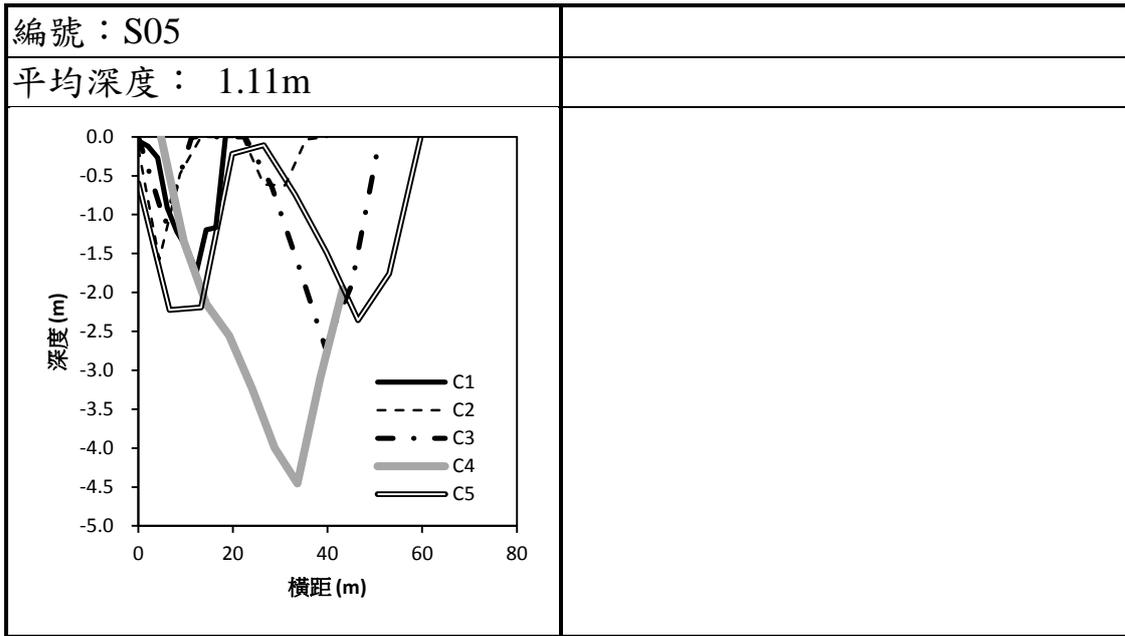


圖 4-1-4 南澳地區崩塌橫斷面與平均深度(續)

表 4-1-3 崩塌地量測結果統計

編號	座標 X	座標 Y	坡度(°)	深度(m)	面積(m ²)	體積(m ³)
S01	328,119	2,710,744	41	1.04	434	451
S02	328,059	2,710,242	40	0.89	196	174
S03	330,008	2,707,317	43	0.25	29	7
S04	325,990	2,703,307	43	0.64	126	81
S05	326,017	2,703,280	43	1.11	1,263	1,402

二、崩塌體積-面積關係式

將所有崩塌體積與面積資料輸入統計軟體，進行穩健迴歸分析 (Robust Regression) 建立崩塌體積面積經驗公式。崩塌體積與面積冪次關係如下(4-1)式，由於崩塌面積與體積資料範圍差距甚大，且呈非線性(non-linear)分布型態，若使用普通最小平方法 (ordinary least squares regression)，估計的參數值則不符合不偏估、一致且有最小變異數的性質，將會導致迴歸結果偏向離群值 (圖 4-1-5)。而本計畫採用穩健迴歸分析即可解決上述問題，方法係利用加權最小平方法 (weighted least squares, WLS) 概念，藉由降低離群值的權重，降低估計值偏向離群值問題 (Guzzetti et al., 2009a)。

$$V_L = \varepsilon \times A_L^\alpha \quad (\text{式 4-1})$$

其中， V_L [m^3] 為崩塌體積、 A_L [m^2] 為崩塌面積、 ε 與 α 為待率定係數。為了要評估崩塌體積的不確定性，必須計算體積與面積關係式的標準估計誤差 (Standard error of the estimate, SEE) (Kirk, 2007)，體積取對數後的標準估計誤差 ($S_{\log V}$)：

$$S_{\log V} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-2}} \quad (\text{式 4-2})$$

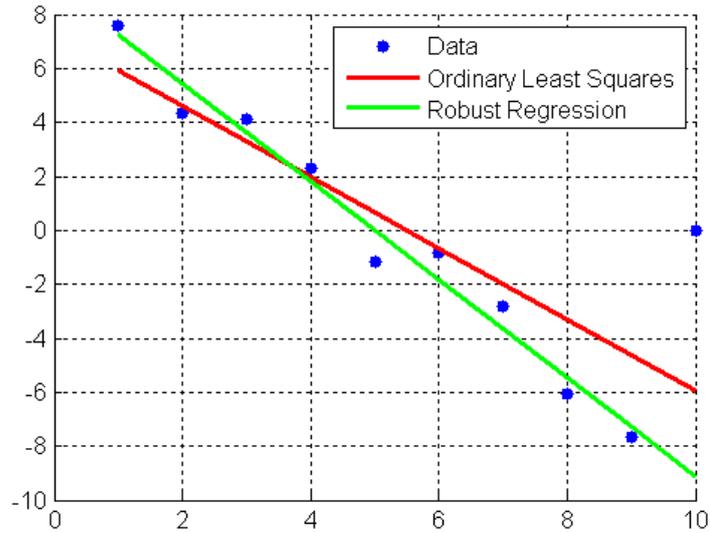
其中， e_i [m^3] 體積取對數後的殘差、 n 崩塌樣本數量、體積的標準估計誤差 S_V [m^3]：

$$S_V = V_L \sqrt{(\ln 10)^2 S_{\log V}^2} \quad (\text{式 4-3})$$

其中， V_L 為崩塌體積 [m^3]，根據誤差傳遞理論，總體積的標準誤差 (S_T) [m^3] 為：

$$S_T = \sqrt{S_{V1}^2 + S_{V2}^2 + \dots + S_{Vn}^2} \quad (\text{式 4-4})$$

其中， S_{Vn} [m^3] 體積的標準估計誤差。



資料來源: Matlab Handbook

圖 4-1-5 穩健回歸分析與最小平方法之差異

分析結果得到各別地質分區之崩塌體積-面積關係式(圖 4-1-6)，相關統計結果如表 4-1-4。各個地質分區之崩塌體積-面積關係式皆有不錯可靠度，決定係數介於 0.81~0.92 之間。崩塌體積估算結果受到關係式的冪次係數影響很大(Larsen et al., 2010)，冪次係數越大導致大面積之崩塌地有較大之崩塌體積，各地質分區之冪次係數分別為：西部麓山地區(III)為 1.356、雪山山脈帶(IVa)為 1.188、脊樑山脈帶(IVb)為 1.073、中央山脈東翼地區(V) 為 1.132、海岸山脈地區(VII) 為 1.147，全部地區為 1.191。顯示西部麓山地區(III)之大面積崩塌地具有較高之崩塌體積，因該地質分區廣泛分布著膠結不良的軟弱岩盤，平均岩體單壓強度為 20.0 ± 13.8 MPa (Dadson et al., 2003)，強度遠低於其它地質分區，容易產生大規模的崩塌，例如草嶺大崩塌、九份二山崩塌、高屏河流域之獻肚山崩塌和布唐布那斯溪的崩塌，皆屬於該地質分區，顯示本計畫得到之崩塌體積-面積關係式應屬合理。

表 4-1-4 崩塌體積-面積關係式統計結果

地質分區	樣本數	關係式	R^2	Adjust R^2	標準誤
西部麓山地區(III)	157	$V_L = 0.099 \times A_L^{1.356}$	0.85	0.85	0.29
雪山山脈帶(IVa)	1,996	$V_L = 0.238 \times A_L^{1.188}$	0.89	0.89	0.27
脊樑山脈帶(IVb)	304	$V_L = 0.607 \times A_L^{1.073}$	0.85	0.85	0.28
中央山脈東翼地區(V)	37	$V_L = 0.351 \times A_L^{1.132}$	0.92	0.92	0.22
海岸山脈地區(VII)	46	$V_L = 0.337 \times A_L^{1.147}$	0.87	0.87	0.27
全部	2,540	$V_L = 0.240 \times A_L^{1.191}$	0.89	0.89	0.28

資料來源：本計畫整理

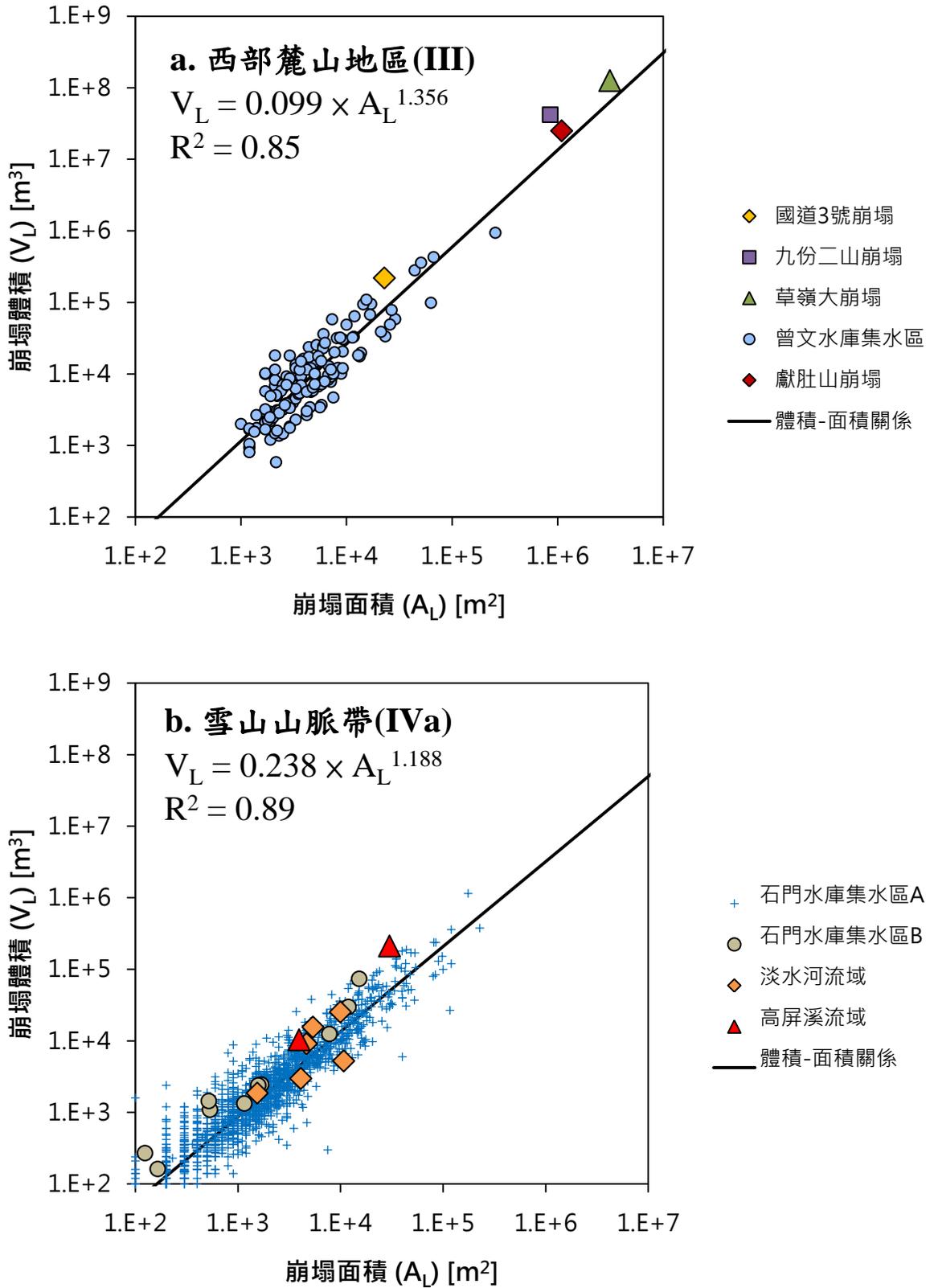


圖 4-1-6 各地質分區之崩塌體積-面積關係式

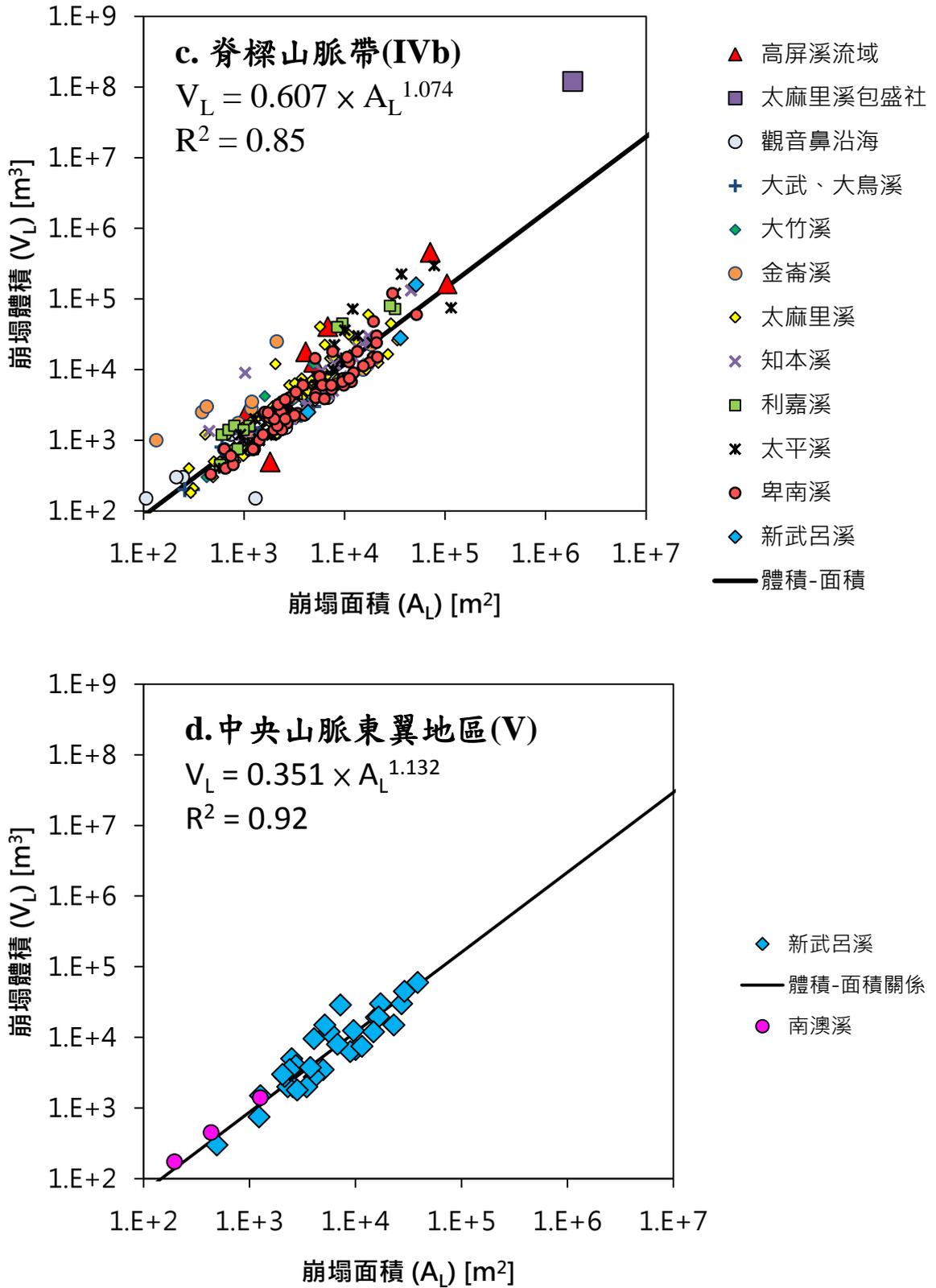


圖 4-1-6 各地質分區之崩塌體積-面積關係式(續 1)

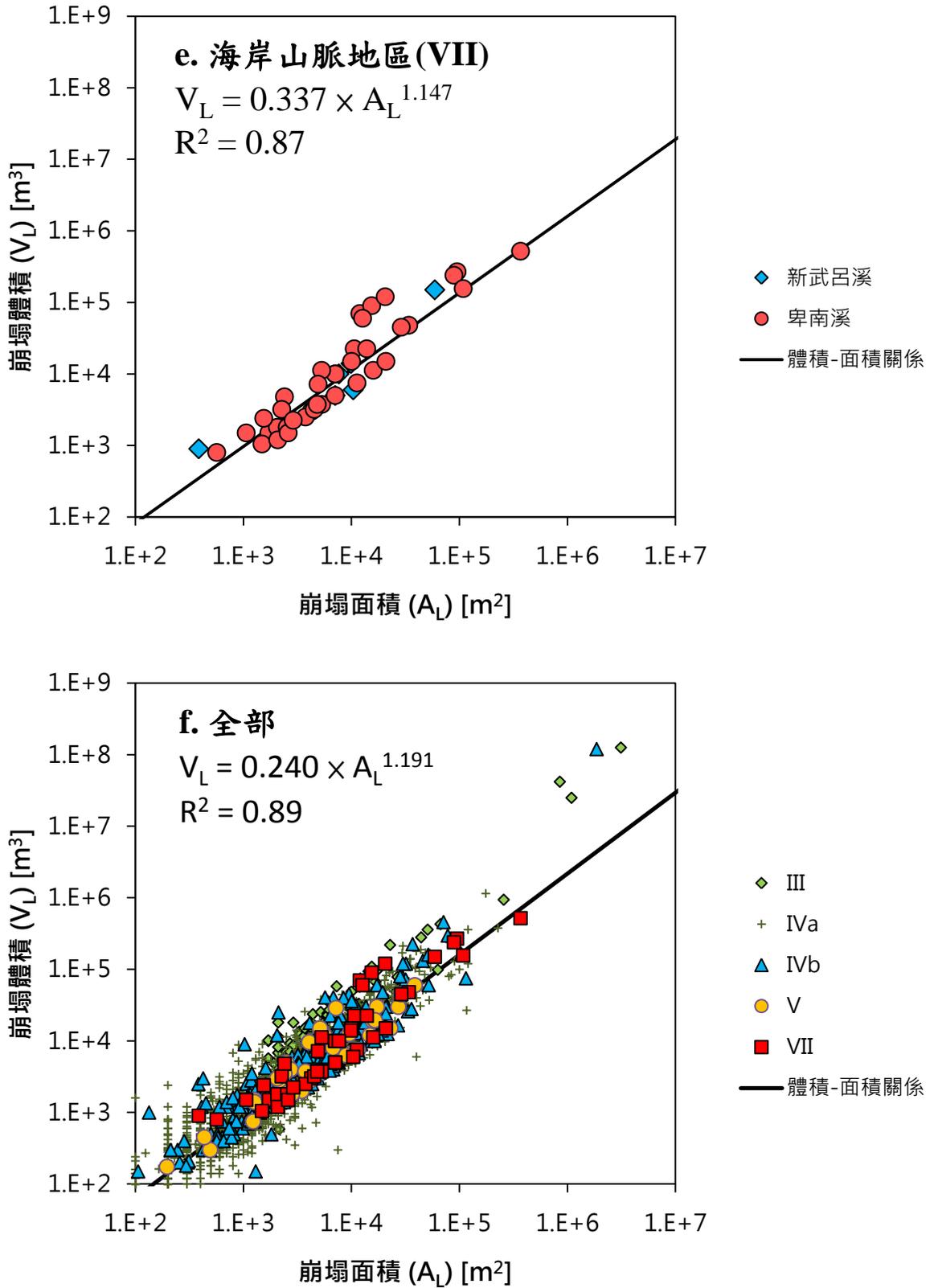


圖 4-1-6 各地質分區之崩塌體積-面積關係式(續 2)



三、崩塌總體密度

崩塌產生土體往下邊坡崩壞後，原本為實方的岩石或塊體，會隨者運動過程而變得鬆散，土方孔隙率增加，總體密度下降。例如，Chen et al. (2006) 利用空載光達 (light detection and ranging, LiDAR) 量測南投草嶺大崩塌，發現崩塌發生區與堆積區的體積分別為 0.126 立方公里與 0.150 立方公里。

崩塌材料則又可分為土壤、岩屑和岩石(Varnes, 1978)，而淺層崩塌帶動的材料大多為土壤，崩塌材料密度較小，根據 Chang and Chiang(2009)現場實際採集土樣分析求得土砂密度為 1.72~1.82 公噸/立方公尺，平均密度約為 1.77 公噸/立方公尺；而深層崩塌能帶動地表的土壤及深層的破碎岩體材料，崩塌材料密度較大，平均密度約為 2.6~2.65 公噸/立方公尺 (Hovius et al., 1997；蔡宗賢，2012)。

臺灣崩塌地類型北部以土壤型為主；南部地區多為岩屑或土壤、岩石混合類型 (Chen et al., 2013)。本計畫則取土壤與岩石材料密度平均值 2.2 公噸/立方公尺，堆積在下邊坡或河道之土壤密度則採 1.6 公噸/立方公尺計算 (水規所，2010)。

4-1-2 崩塌土方量分析結果

基於上述，本計畫藉由新增與擴大之崩塌地判釋成果，利用各地質分區的崩塌體積-面積關係式，計算個別崩塌地之體積，並且換算為堆積在邊坡或河道上之鬆方土砂體積(總體密度 1.6 公噸/立方公尺)，分析結果詳表 4-1-5。計算之崩塌體積之不確定性，以 98 年高屏溪流流域為例，利用崩塌體積-面積法估算的崩塌量為 5.40 億立方公尺，而其一個標準誤差為±0.52 億立方公尺，誤差約為±10%，在可接受範圍內。



一、國有林事業區新增崩塌量變化

民國 97-98 年間經歷四場重大颱風事件(卡玫基、鳳凰、辛樂克與薔蜜颱風)，該年新增崩塌量為 1 億 6,299 萬立方公尺。民國 98-99 年經歷莫拉克颱風與芭瑪颱風，在中、南部山區造成大規模的崩塌地，新增崩塌量總計 11 億 7,152 萬立方公尺，相當於前年總量的 7.2 倍。民國 99-100 年則經歷凡那比與梅姬颱風，新增崩塌量為 1 億 460 萬立方公尺。民國 100-101 年則經歷南瑪都和泰利颱風，新增崩塌量為 2 億 1,021 萬立方公尺。97-101 年年間，國有林共產生 16 億 4,932 萬立方公尺的土砂量，其中，民國 98-99 年間之崩塌量佔總量的 63%。

二、國有林事業區崩塌量空間分布

民國 97-101 年各事業區崩塌量以旗山事業區的 4 億 1,373 萬立方公尺最多，並且遠大於其他事業區(表 4-1-5 和圖 4-1-7)，因為莫拉克颱風在此區引發多處大規模崩塌，包括，獻肚山崩塌、布唐布那斯溪崩塌，與那瑪夏鄉之多處重大崩塌等，此崩塌量皆超過 1,000 萬立方公尺之崩塌量。第二為大武事業區的 2 億 9,100 萬立方公尺，因為大武事業區內的太麻里流域在莫拉克颱風期間產生大量崩塌，例如，包盛社之大規模崩塌。第 3~10 名依序為屏東(8,723 萬立方公尺)、荖濃溪(8,708 萬立方公尺)、大埔(7,680 萬立方公尺)、玉山(7,497 萬立方公尺)、延平(5,976 萬立方公尺)、立霧溪(5,034 萬立方公尺)、阿里山(5,020 萬立方公尺)、玉井(4,355 萬立方公尺)，這 10 個事業區的新增崩塌量共 12 億 3,466 萬立方公尺，佔總崩塌量之 75%。

三、國有林各流域崩塌量空間分布

各流域崩塌量以高屏溪流域的 6 億 4,344 萬立方公尺最多(表 4-1-6 和圖 4-1-8)，因該流域包含旗山溪、荖濃溪和隘寮溪集水區之莫拉克颱風重災區。其次為南台東河系的 3 億 679 萬立方公尺，因該



流域包含了太麻里溪流域。第 3~10 名依序為濁水溪(1 億 3,772 萬立方公尺)、曾文溪(1 億 794 萬立方公尺)、卑南溪(1 億 511 萬立方公尺)、太魯閣河系(4,965 萬立方公尺)、大甲溪(3,761 萬立方公尺)、花蓮溪(3,099 萬立方公尺)、林邊溪(3,079 萬立方公尺)、大安溪(3,023 萬立方公尺)，這 10 個流域之崩塌量佔總量之 90%。



表 4-1-5 民國 97-101 年國有林事業區崩塌量統計表

事業區	97-98 年	98-99 年	99-100 年	100-101 年	加總
1.文山	3	1	1	0	5
2.烏來	25	8	0	19	52
3.大溪	13	407	129	124	673
4.竹東	36	260	70	17	383
5.南庄	0	91	27	9	127
6.大湖	16	132	33	39	220
7.大安溪	415	1,118	718	638	2,889
8.八仙山	1,284	1,070	348	499	3,201
9.大甲溪	726	303	351	490	1,870
10.濁水溪	489	737	175	866	2,267
11.埔里	995	370	28	106	1,499
12.丹大	1,141	450	1,110	646	3,347
13.巒大	1,321	602	1,034	587	3,544
14.阿里山	224	3,963	469	364	5,020
15.玉山	1,119	4,173	1,012	1,193	7,497
16.大埔	76	7,098	217	289	7,680
17.玉井	121	3,989	19	226	4,355
18.旗山	341	38,784	1,422	826	41,373
19.荖濃溪	374	6,539	995	800	8,708
20.屏東	270	6,352	196	1,905	8,723
21.潮州	70	2,803	113	661	3,647
22.恒春	4	56	3	44	107
23.大武	189	25,868	92	2,951	29,100
24.台東	107	953	6	501	1,567
25.延平	460	3,911	295	1,310	5,976
26.關山	528	2,708	158	903	4,297
27.成功	85	70	28	174	357
28.玉里	243	454	54	303	1,054
29.秀姑巒	632	518	273	530	1,953
30.林田山	795	613	220	364	1,992
31.木瓜山	611	210	121	211	1,153
32.立霧溪	2,066	1,047	497	1,424	5,034
33.和平	770	596	68	1,070	2,504
34.南澳	102	240	4	141	487
35.太平山	514	509	150	596	1,769
36.羅東	129	144	24	191	488
37.宜蘭	7	4	0	3	14
加總	16,301	117,151	10,460	21,020	164,932

 附註：單位： 10^4 m^3 ；土砂密度為 1.6 公噸/立方公尺

表 4-1-6 民國 97-101 年國有林各流域之崩塌量統計表

流域	97-98 年	98-99 年	99-100 年	100-101 年	加總
1.北海岸河系	0	0	0	0	0
2.淡水河	50	419	129	144	742
3.頭前溪	36	260	70	16	382
4.竹南沿海河系	0	91	27	9	127
5.後龍溪	56	145	34	74	309
6.大安溪	510	1,109	729	675	3,023
7.大甲溪	1,465	792	651	853	3,761
8.烏溪	1,410	976	67	223	2,676
9.濁水溪	3,215	5,279	2,819	2,459	13,772
10.北港溪	0	2	0	0	2
11.朴子溪	0	34	0	0	34
12.八掌溪	24	1,486	1	77	1,588
13.急水溪	0	50	0	0	50
14.曾文溪	196	9,927	235	436	10,794
15.二仁溪	0	1,722	6	86	1,814
16.高雄沿海河系	0	93	0	10	103
17.高屏溪	2,053	54,060	3,605	4,626	64,344
18.東港溪	0	20	2	0	22
19.林邊溪	32	2,411	86	550	3,079
20.南屏東河系	43	433	28	154	658
21.南台東河系	296	26,826	99	3,458	30,679
22.卑南溪	1,023	6,652	478	2,358	10,511
23.秀姑巒溪	870	960	307	787	2,924
24.海岸山脈東側	44	53	5	44	146
25.花蓮溪	1,378	818	342	561	3,099
26.豐濱沿海河系	24	24	0	45	93
27.太魯閣河系	2,049	1,022	494	1,400	4,965
28.南澳沿海河系	870	825	74	1,177	2,946
29.頭城沿海河系	1	0	0	0	1
30.蘭陽溪	656	662	172	798	2,288
加總	16,301	117,151	10,460	21,020	164,932

 附註：單位： 10^4 m^3 ；土砂密度為 1.6 公噸/立方公尺

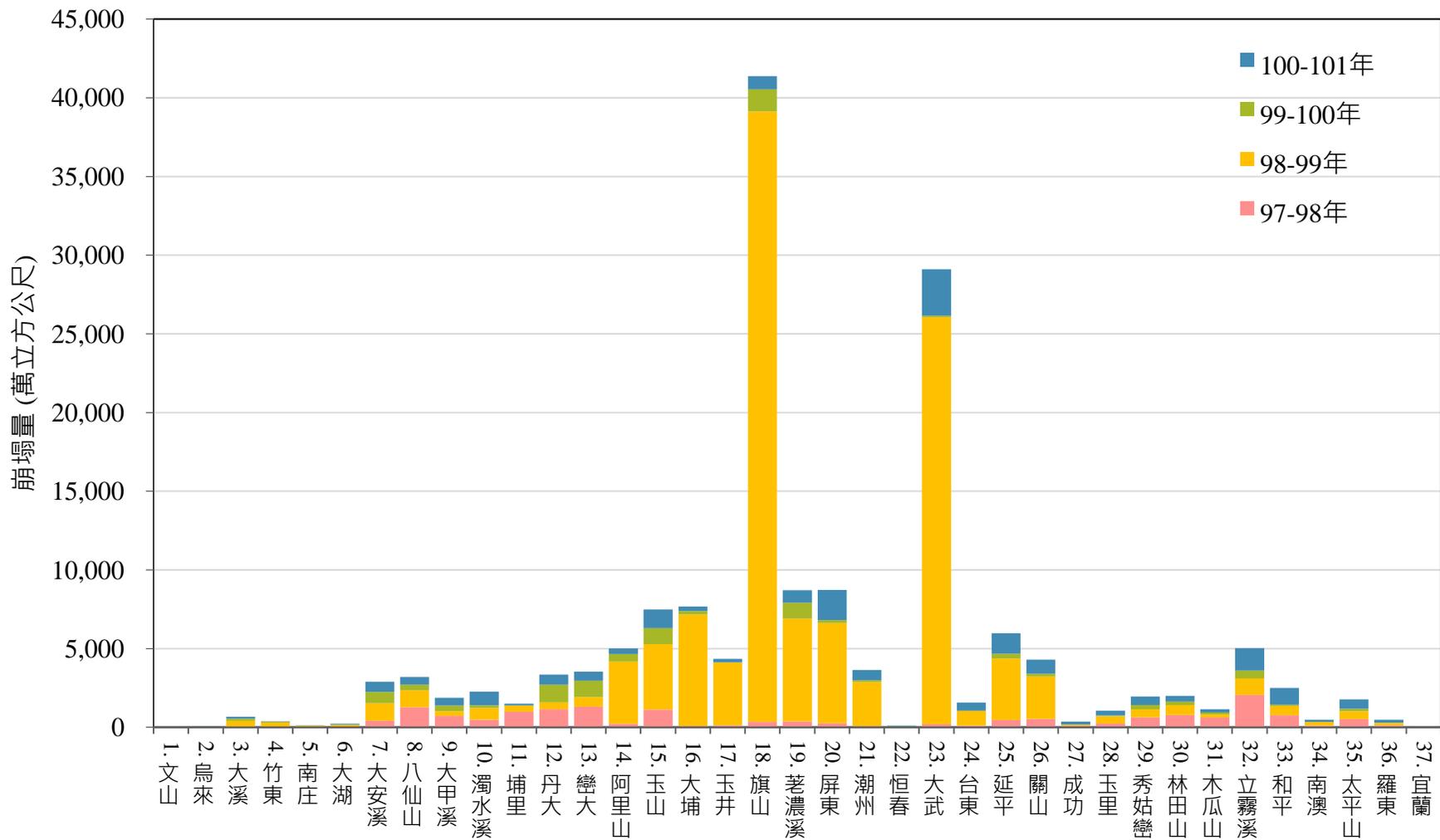


圖 4-1-7 民國 97-101 年間國有林各事業區之崩塌量

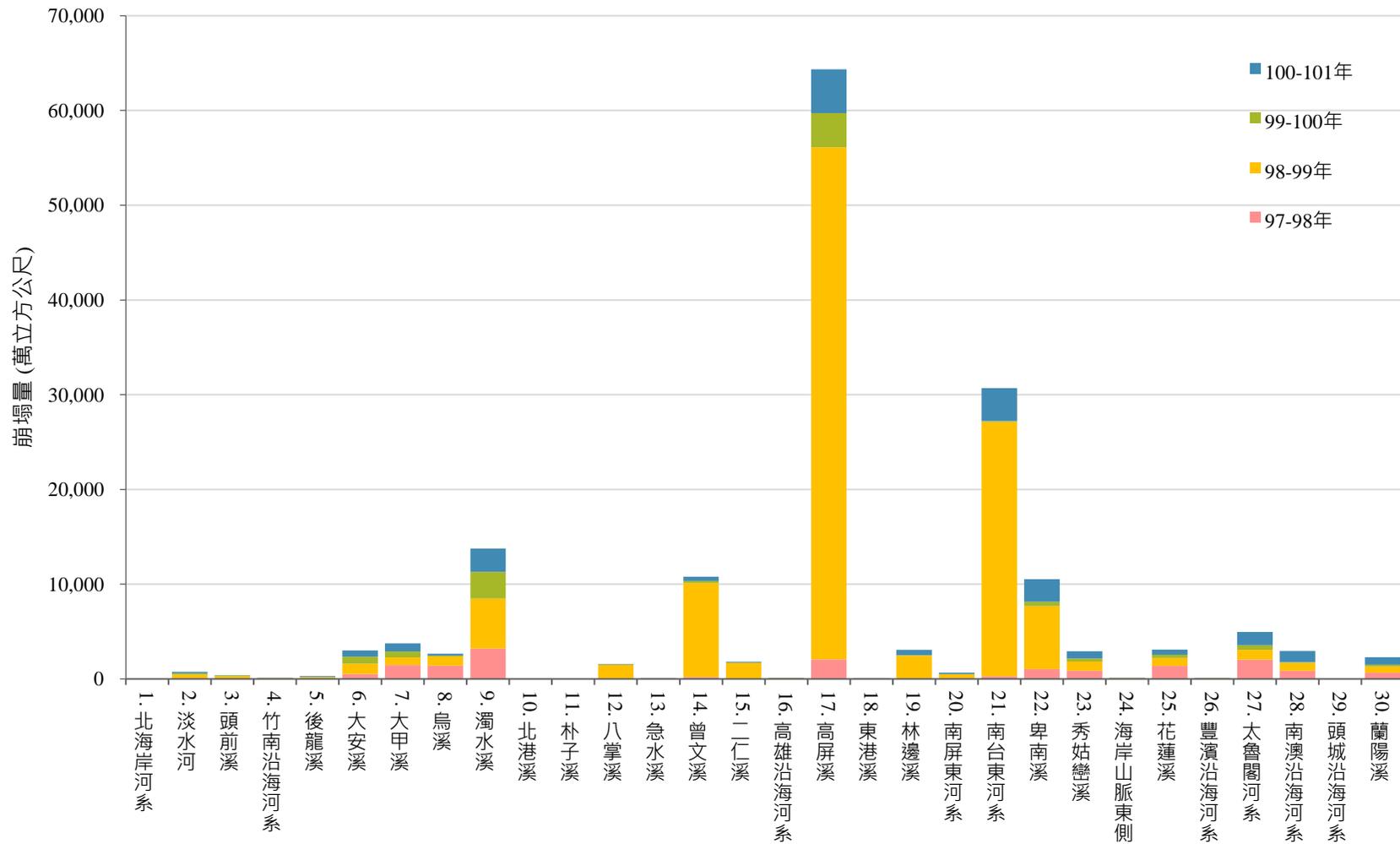


圖 4-1-8 民國 97-101 年間國有林各流域之崩塌量

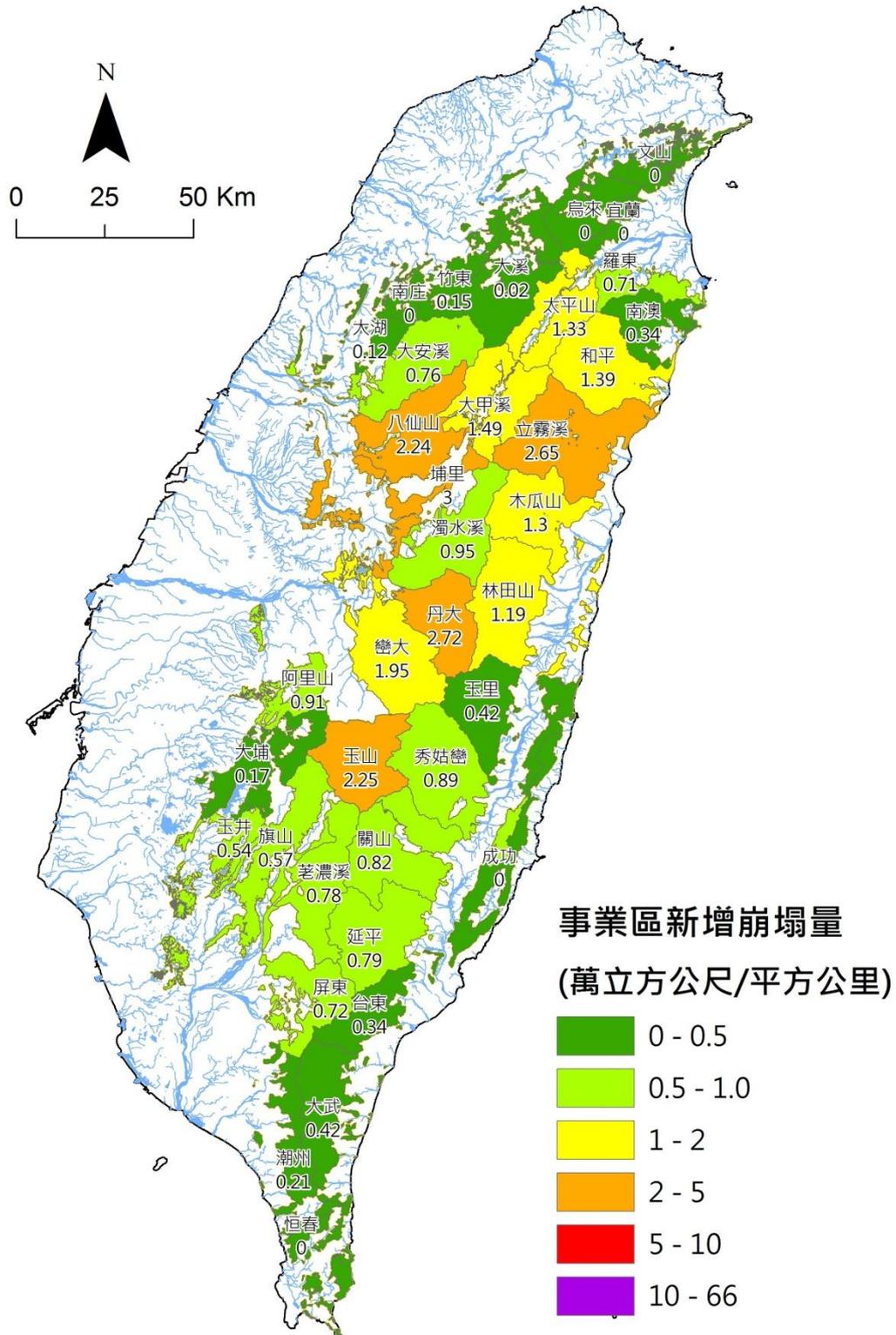
四、單位面積崩塌量

將各事業區之崩塌量除以該事業區的面積，得到其單位面積崩塌量。民國 97-98 年國有林受到卡玫基、鳳凰、辛樂克與薔蜜颱風影響，具有較高的崩塌量，該年度平均每平方公里量為 0.9 萬立方公尺。中部地區的事業區具有較高之單位面積崩塌量，例如，丹大、立霧溪、八仙山與玉山，每平方公里崩塌量皆超過 2 萬立方公尺(圖 4-1-9)。

民國 98-99 年則受到莫拉克颱風影響，國有林平均每平方公里崩塌量為 6.0 萬立方公尺。特別在南部地區的事業區，包括旗山、阿里山、玉井、荖濃溪、大埔、屏東與大武事業區，每平方公里崩塌量皆超過 10 萬立方公尺。其中，旗山事業區更高達每平方公里 66 萬立方公尺(圖 4-1-10)。

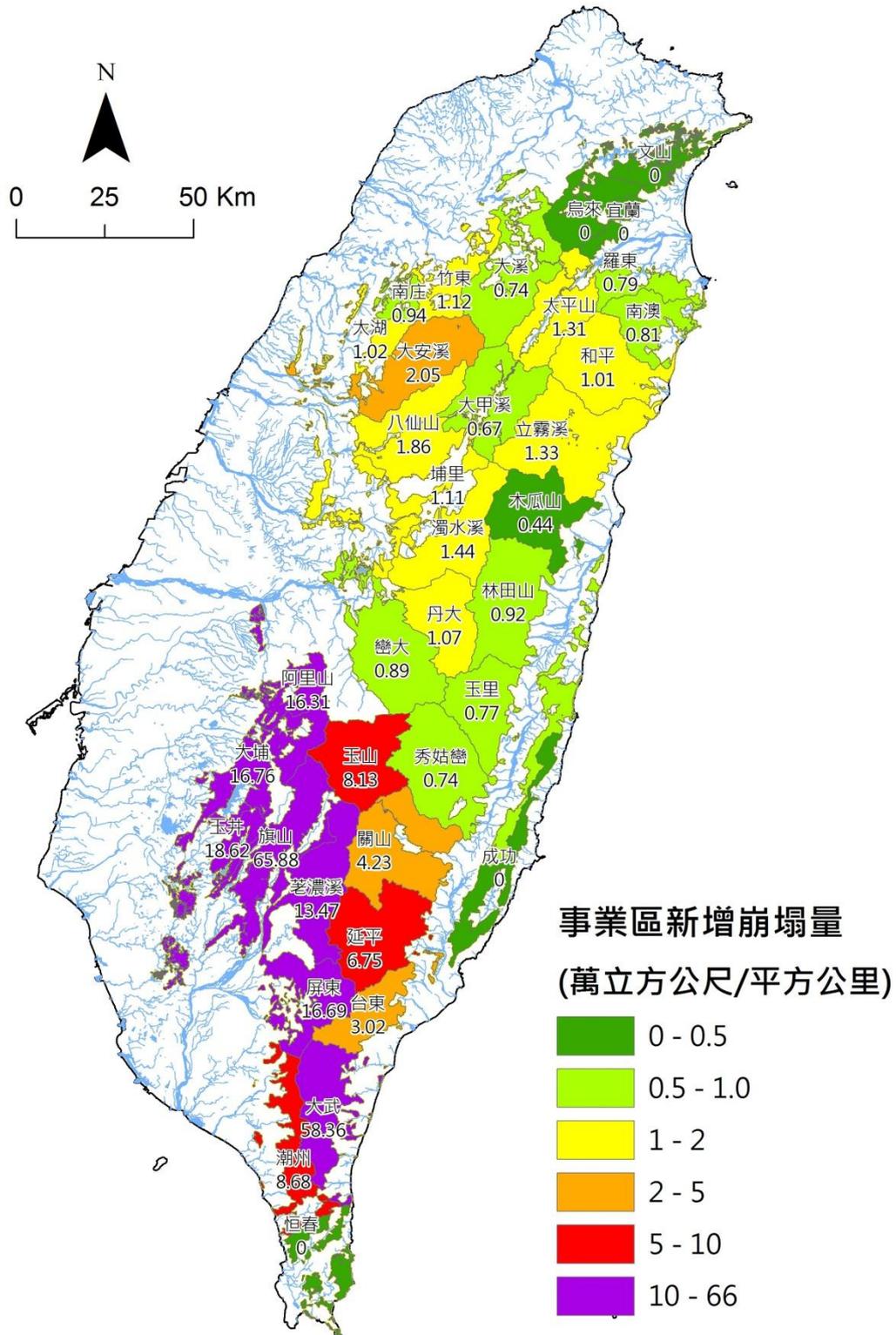
民國 99-100 年則受到凡那比與梅姬颱風影響，國有林平均每平方公里崩塌量為 0.6 萬立方公尺。崩塌仍集中在中、南部的事業區，包括旗山、荖濃溪與丹大每平方公里崩塌量超過 2 萬立方公尺。玉山、阿里山與巒大事業區則介於每平方公里 1.5~2.0 萬立方公尺(圖 4-1-11)。

100-101 年則受到南瑪都和泰利颱風影響，在南部地區有較大的雨勢，崩塌仍集中在南部的事業區，國有林平均每平方公里崩塌量為 1.4 萬立方公尺。包括屏東與大武事業區每平方公里崩塌量超過 5 萬立方公尺。玉山與延平事業區則介於每平方公里 1.5~2.0 萬立方公尺(圖 4-1-12)。



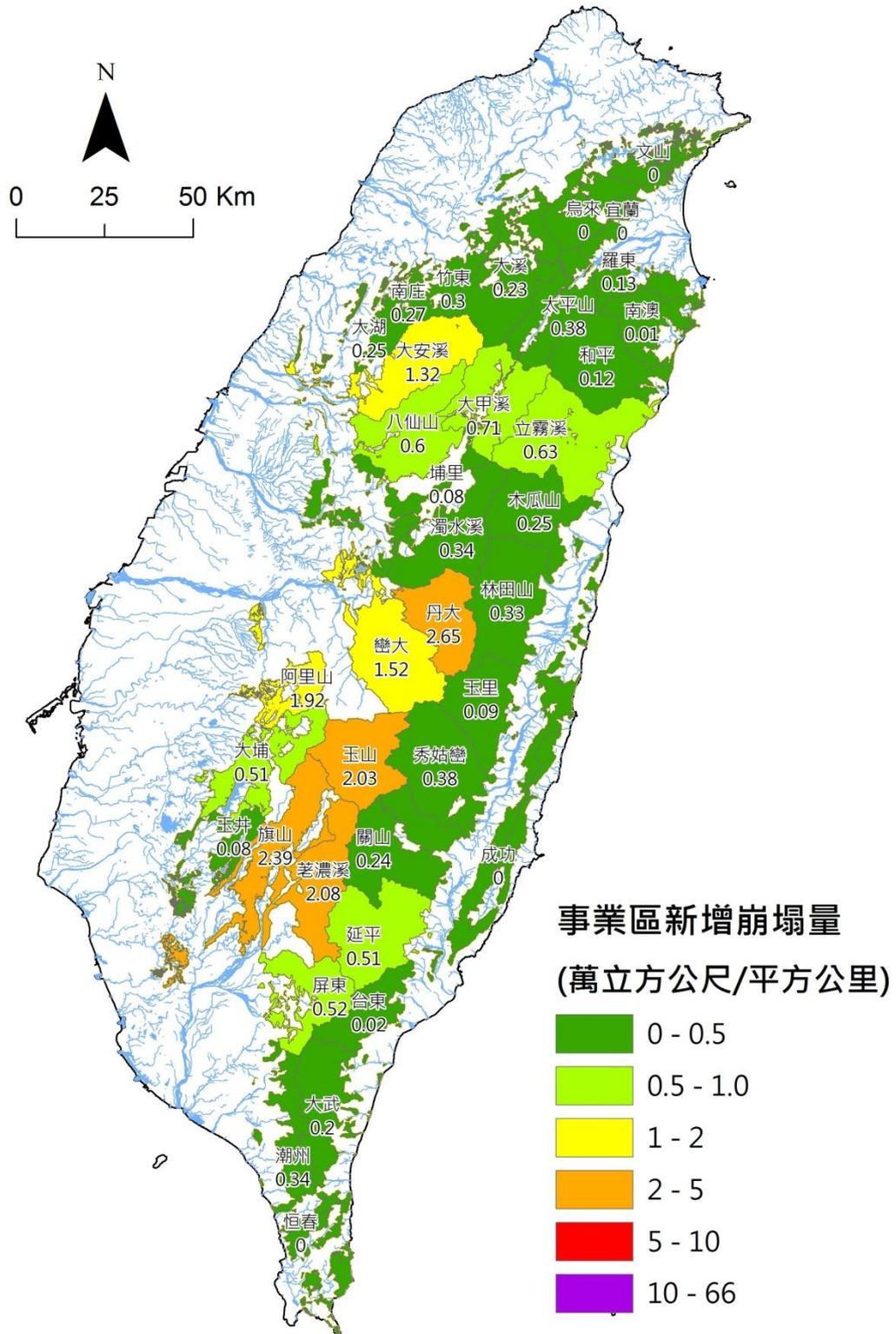
附註：數值表示該年度單位面積崩塌量(萬立方公尺/平方公里)

圖 4-1-9 民國 97-98 年間事業區單位面積崩塌量



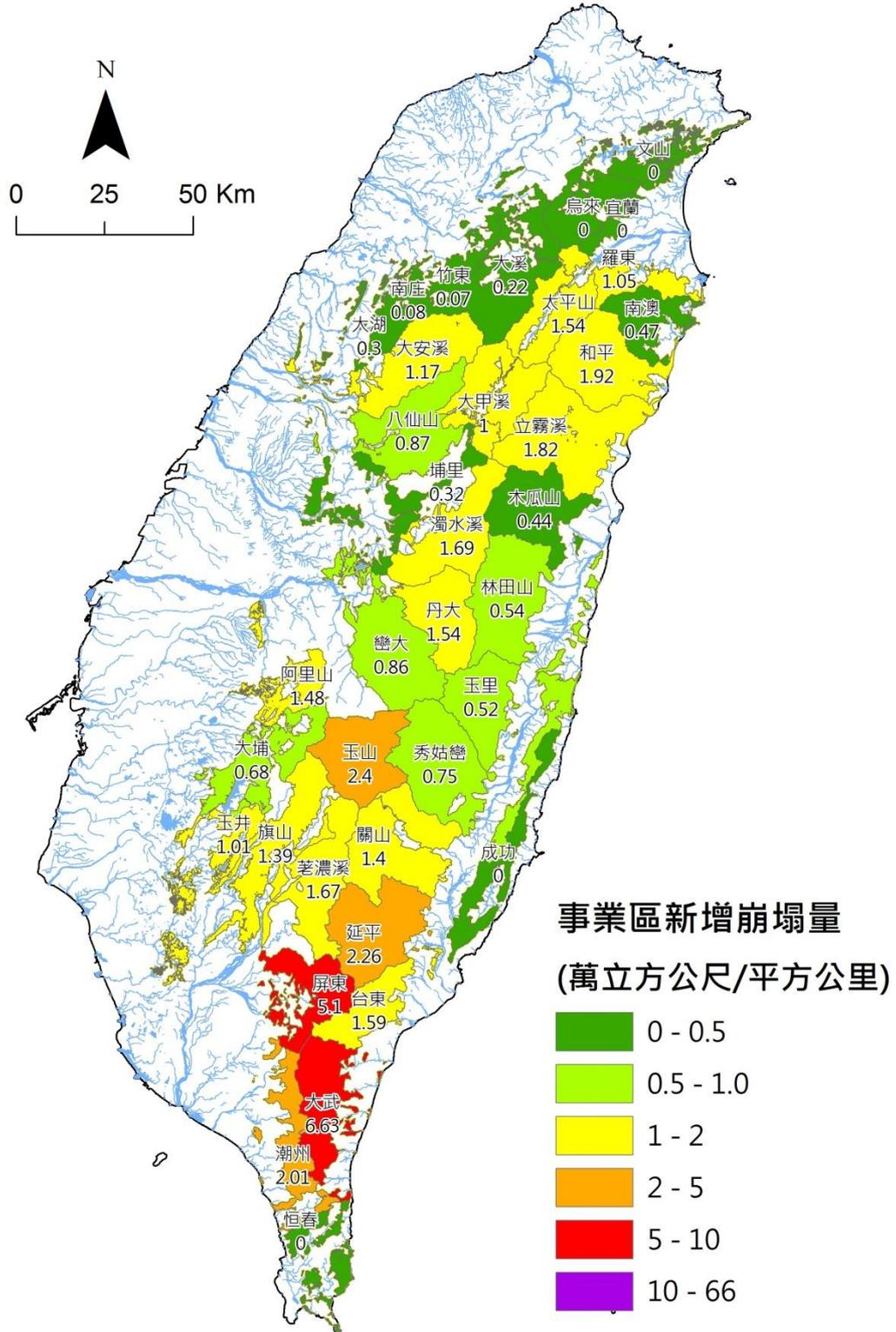
附註：數值表示該年度單位面積崩塌量(萬立方公尺/平方公里)

圖 4-1-10 民國 98-99 年間事業區單位面積崩塌量



附註：數值表示該年度單位面積崩塌量(萬立方公尺/平方公里)

圖 4-1-11 民國 99-100 年間事業區單位面積崩塌量



附註：數值表示該年度單位面積崩塌量(萬立方公尺/平方公里)

圖 4-1-12 民國 100-101 年間事業區單位面積崩塌量



五、四集水區崩塌量

四集水區(包含國有林與非國有林地)歷年新增崩塌土石量變化計算結果詳表 4-1-7，以及圖 4-1-13 到圖 4-1-15。荖濃溪集水區的土砂變化量與旗山溪相似，在民國 97-98 年新增崩塌土砂量為 1,437 萬立方公尺(圖 4-1-13)，民國 98-99 年因莫拉克颱風增加 3 億 1,421 萬立方公尺，民國 99-100 年則增加 2,245 萬立方公尺，民國 100-101 年則增加 2,119 萬立方公尺，共計增加 3 億 7,222 萬立方公尺，平均每年新增 9,305 萬立方公尺。因該集水區崩塌量最大，故後續描述則以荖濃溪集水區為比較基礎。

旗山溪集水區在民國 97-98 年新增崩塌土砂量為 421 萬立方公尺，98-99 年因莫拉克颱風增加 2 億 2,070 萬立方公尺，民國 99-100 年則增加 1,413 萬立方公尺，民國 100-101 年則增加 846 萬立方公尺，共計增加 2 億 4,750 萬立方公尺，平均每年新增崩塌土砂量 6,187 萬立方公尺(圖 4-1-13)，為荖濃溪之 66%。

太麻里溪在民國 97-98 年無重大颱風或豪雨事件，僅新增 144 萬立方公尺，98-99 年因莫拉克颱風增加 2 億 910 萬立方公尺，民國 99-100 年則僅增加 35 萬立方公尺，民國 100-101 年則增加 1,604 萬立方公尺，共計增加 2 億 2,693 萬立方公尺，平均每年新增 5,673 萬立方公尺，為荖濃溪集水區的 61%(圖 4-1-14)。

阿里山溪在民國 97-98 年無重大颱風或豪雨事件，僅新增 353 萬立方公尺，民國 98-99 年新增 4,764 萬立方公尺，民國 99-100 年則僅增加 484 萬立方公尺，民國 100-101 年則僅增加 459 萬立方公尺，共計增加 6,060 萬立方公尺，平均每年新增崩塌土砂量為 1,515 萬立方公尺，為荖濃溪集水區的 16%(圖 4-1-15)。

四集水區在國有林班地之崩塌量變化與全流域範圍的變化趨勢相似，民國 97-98 年之崩塌量合計為 2,355 萬立方公尺，約為全流域的 90%。民國 98-99 年則受到莫拉克颱風的影響，崩塌量合計為 7 億



9,165 萬立方公尺，約為全集水區的 91%。民國 99-100 年則受到凡那比颱風的影響，崩塌量合計為 4,117 萬立方公尺，約為全集水區的 94%。民國 100-101 年崩塌量合計為 5,028 萬立方公尺，約為全集水區的 91%。

由各集水區來看，以荖濃溪的國有林地崩塌量最多，合計為 3 億 2,025 萬立方公尺，約為該集水區的 86%。其次為旗山溪的 2 億 3,641 萬立方公尺，約為該集水區的 96%。太麻里溪的崩塌量與旗山溪相當，合計為 2 億 2,430 萬立方公尺，約為該集水區的 99%。最少的為阿里山溪集水區的 4,501 萬立方公尺，約為該集水區的 74%。整體來說，民國 97-101 年間國有林的崩塌量合計 8 億 2,597 萬立方公尺，佔該四集水區的 91%。

表 4-1-7 四集水區崩塌土砂量變化

類別	集水區名稱	崩塌量 (萬立方公尺)				
		97-98 年	98-99 年	99-100 年	100-101 年	加總
全集水區	旗山溪	421	22,070	1,413	846	24,750
	荖濃溪	1,437	31,421	2,245	2,119	37,222
	太麻里溪	144	20,910	35	1,604	22,693
	阿里山溪	353	4,764	484	459	6,060
	合計	2,355	79,165	4,177	5,028	90,725
國有林	旗山溪	418	21,012	1,387	824	23,641
	荖濃溪	1,370	26,726	2,022	1,907	32,025
	太麻里溪	131	20,757	30	1,512	22,430
	阿里山溪	201	3,486	468	346	4,501
	合計	2,120	71,981	3,907	4,589	82,597

資料來源：本計畫整理

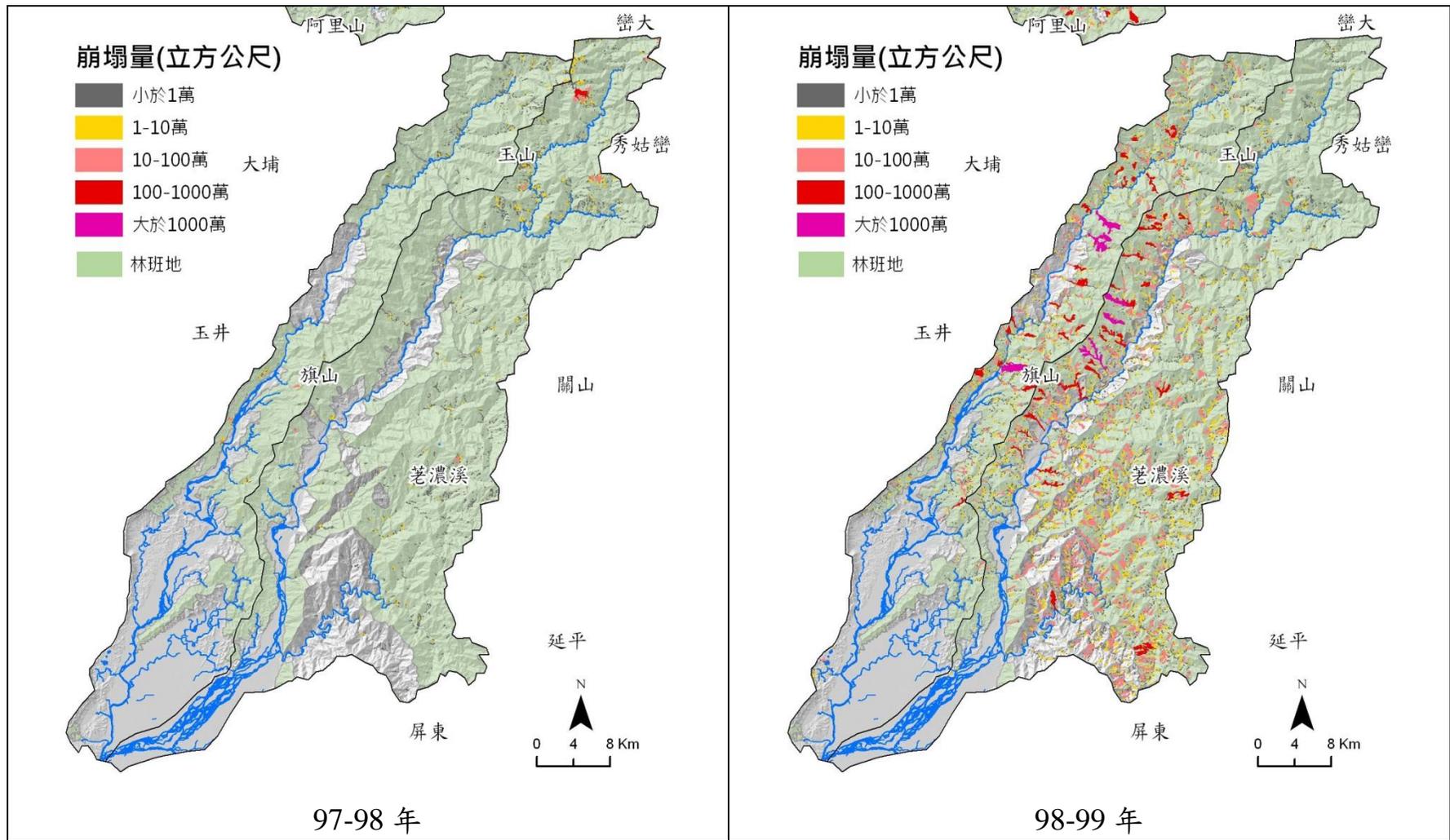


圖 4-1-13 旗山溪與荖濃溪崩塌土石變化與分布

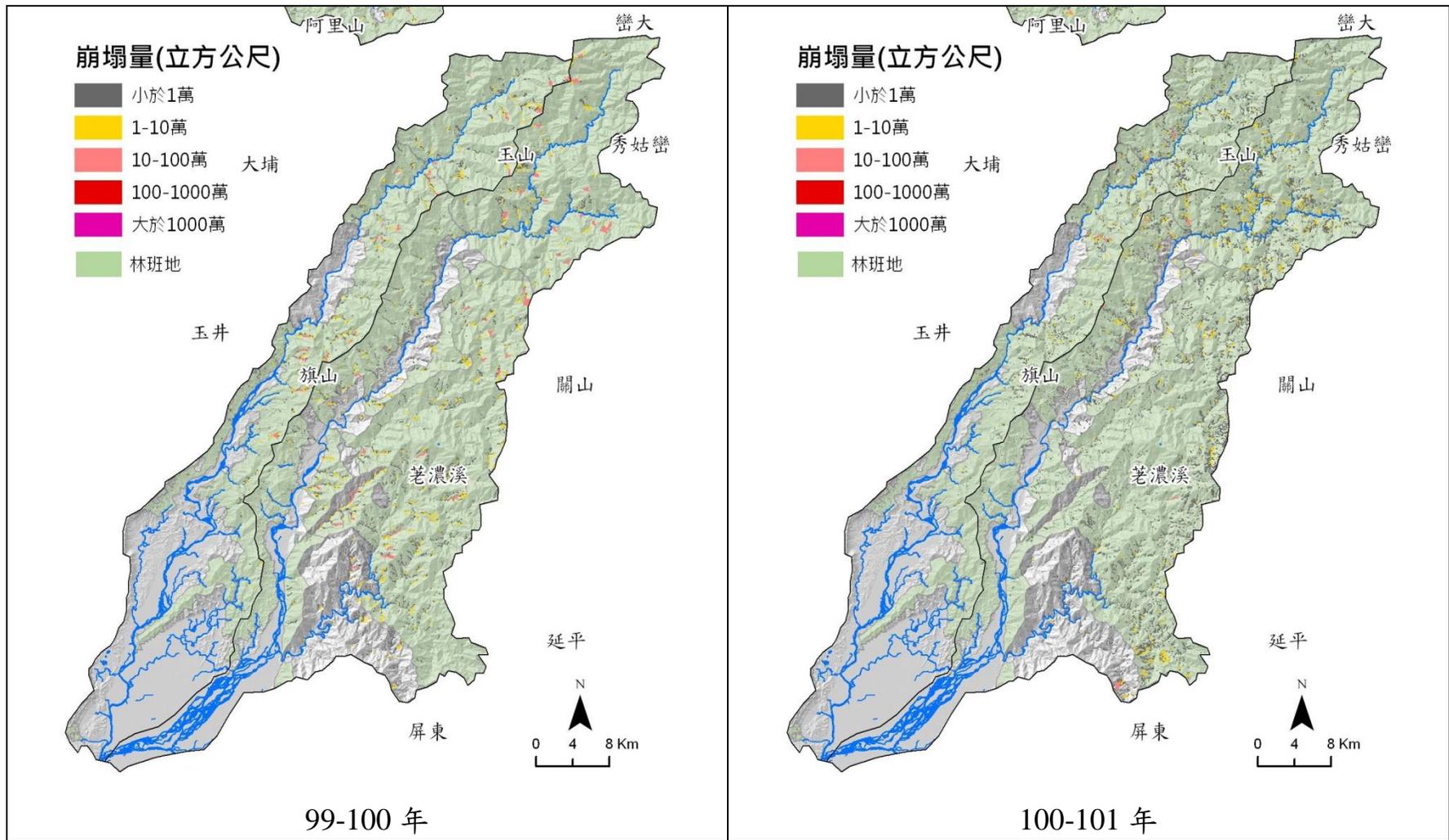


圖 4-1-13 旗山溪與荖濃溪崩塌土石變化與分布(續 1)

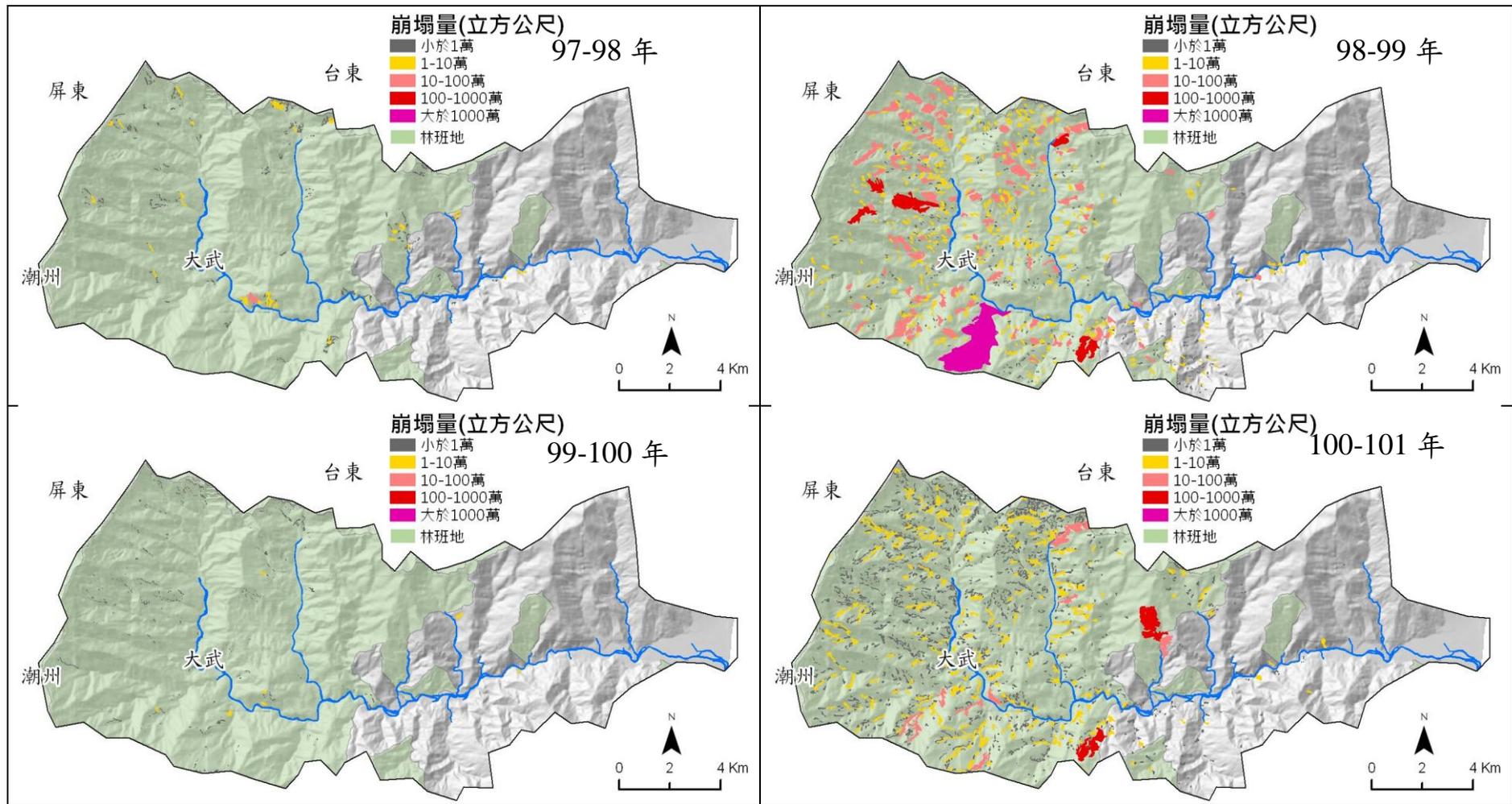


圖 4-1-14 太麻里溪崩塌土石變化與分布

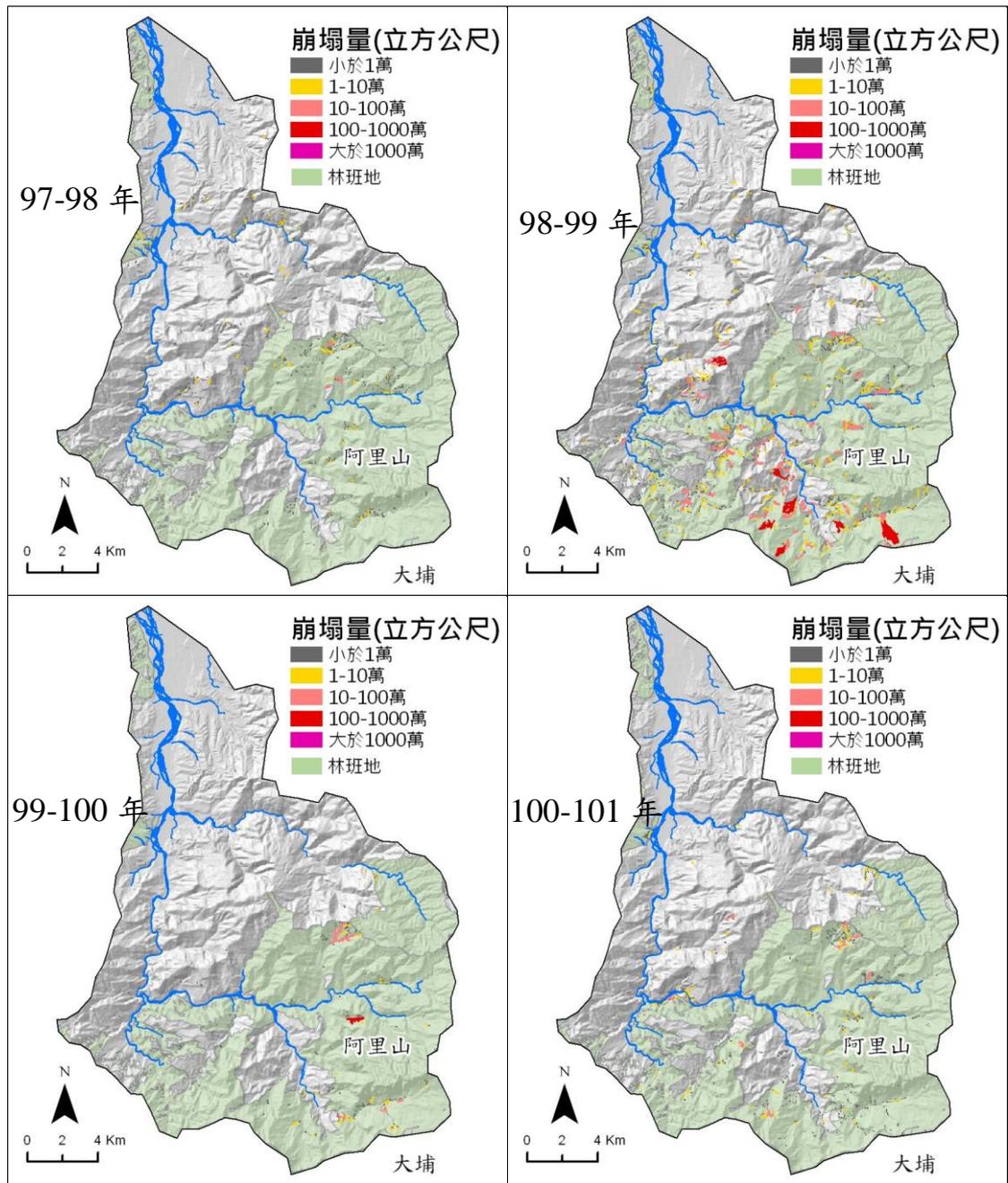


圖 4-1-15 阿里山溪崩塌土石變化與分布

4-2 土砂流出量與殘留量分析

崩塌土砂流出量與殘留量將利用水位站之輸砂量與流量觀測資料，推測逐年國有林班地之土砂流出量與殘留量。而四集水區範圍的土砂殘留涉及到保全對象保安問題，需要釐清土石殘留量，因此，四集水區除了利用水位站之輸砂量觀測資料外，也藉由 Debris-2D 進行土砂殘留量與流出量的分析，該章節移至第五章「國有林殘留土砂二次災害潛勢評估」探討。

4-2-1 土砂流出量估算

一、土砂流出量估算方法

國有林班地透過河川泥砂觀測資料分析之逐年崩塌土砂產生、殘留及土砂流出量。分析流程首先蒐集 98 至 102 年水利署河川日流量與含砂量觀測資料，建立各測站流量和輸砂量之率定曲線 ($Q-Q_s$ rating curve)，將率定曲線帶入流量資料，計算河川輸砂量變化。

本計畫蒐集水利署於 98 至 102 間現存的流量與含砂量測站，且未於國有林範圍的集水區出口測站共計 40 站 (圖 4-2-1)，測站分布遍及國有林班地內之各流域，其中大部分水位站同時記錄懸移質的濃度，每個水位站之觀測頻率約為每年 25 至 50 筆，而各站或各年份的採樣時間皆不相同，在夏季颱風期間的採樣頻率會略高於平時低流量時期。

惟部分測站因受到颱風影響損毀或廢棄，使得少部分流域缺少觀測資料，無法計算該流域之流出量，例如：立霧溪流域、太麻里溪流域等。河川輸砂量資料將採取(1)歷史輸砂資料或(2)鄰近測站補遺。歷史輸砂量資料則是根據測站損毀前的觀測資料。若該集水區過去從未有輸砂觀測資料，則利用鄰近、相似地質與地形條件集水區之觀測資料來補遺，各站所使用的輸砂量測站詳表 4-2-1。

流量補遺則利用美國陸軍工兵團發展之水文模式系統 Hec-HMS 模擬，水文參數方面則輸入該年之時雨量進行分析，降雨損失採用美

國水土保持局 (SCS)的方法，SCS 法中的曲線值(curve number, CN)設定如表 4-2-2。河道演算的方面以動力波法(kinematic wave method)進行河道演算。其他相關參數則參照 Hec-HMS 之說明書。

水文與輸砂測站

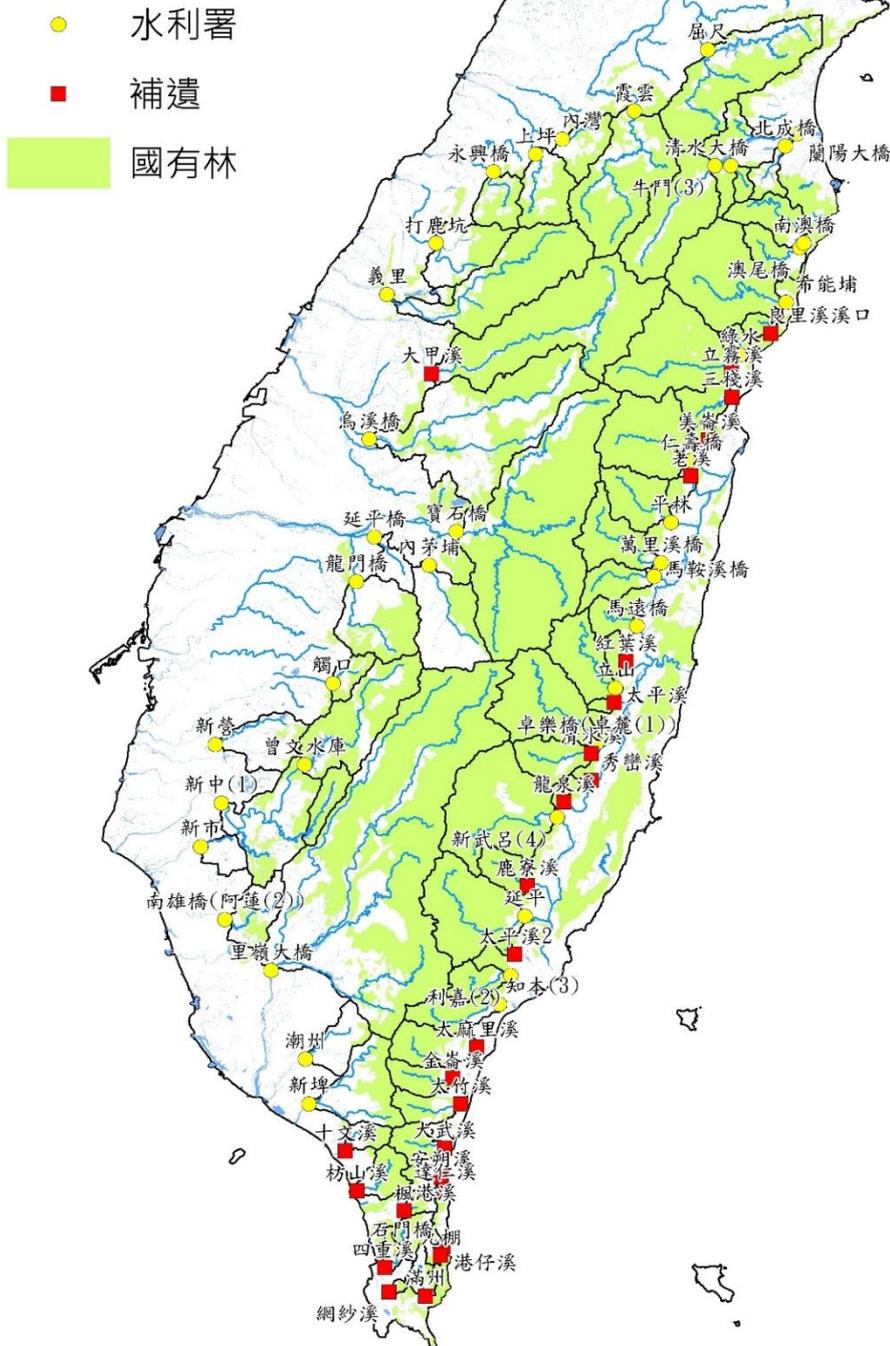


圖 4-2-1 土砂流出量測站與補遺位置

表 4-2-1 土砂流出量測站與補遺位置

站名	流域	集水區面積(km ²)	使用輸砂量測站	站名	流域	集水區面積(km ²)	使用輸砂量測站
屈尺	淡水河	646	屈尺	新中(1)	曾文溪	431	新中(1)
內灣	頭前溪	139	內灣	清水大橋	蘭陽溪	37	清水大橋
上坪	頭前溪	222	上坪	北成橋	蘭陽溪	74	蘭陽大橋
永興橋	竹南沿海河系	144	永興橋	牛鬥(3)	蘭陽溪	453	牛鬥(3)
打鹿坑	後龍溪	247	打鹿坑	綠水	太魯閣河系	44	綠水
義里	大安溪	633	義里	霞雲	淡水河	610	霞雲
烏溪橋	烏溪	1,051	烏溪橋	*良里溪溪口	太魯閣河系	43	綠水
內茅埔	濁水溪	367	內茅埔	*立霧溪	太魯閣河系	543	希能埔
延平橋	濁水溪	86	延平橋	*三棧溪	太魯閣河系	114	綠水
寶石橋	濁水溪	1,542	寶石橋	*美崙溪	花蓮溪	30	仁壽橋
觸口	八掌溪	83	觸口	*荖溪	花蓮溪	44	仁壽橋
新營	急水溪	227	新營	*紅葉溪	秀姑巒溪	46	紅葉
新市	鹽水溪	146	新市	*太平溪	秀姑巒溪	20	立山
南雄橋	二仁溪	175	南雄橋	*清水溪	秀姑巒溪	167	卓樂橋
里嶺大橋	高屏溪	2,895	里嶺大橋	*秀巒溪	秀姑巒溪	18	卓樂橋
潮州	東港溪	175	潮州	*龍泉溪	秀姑巒溪	21	新武呂(4)
新埤	林邊溪	310	新埤	*鹿寮溪	卑南溪	109	武陵台電
石門橋	南屏東河系	77	石門橋	*太平溪 2	南台東河系	13	利嘉(2)
知本(3)	南台東河系	166	知本(3)	*金崙溪	南台東河系	115	金崙(2)
利嘉(2)	南台東河系	149	利嘉(2)	*太麻里溪	南台東河系	195	金蘭
延平	卑南溪	476	延平	*大竹溪	南台東河系	125	知本(3)
新武呂(4)	卑南溪	639	新武呂(4)	*大武溪	南台東河系	103	新興(2)
卓樂橋	秀姑巒溪	456	卓樂橋	*安朔溪	南台東河系	49	新興(2)
立山	秀姑巒溪	249	立山	*達仁溪	南台東河系	13	新興(2)
馬遠橋	秀姑巒溪	86	馬遠橋	*楓港溪	南屏東河系	40	石門橋
平林	花蓮溪	214	平林	*港仔溪	南屏東河系	16	石門橋
仁壽橋	花蓮溪	426	仁壽橋	*九棚	南屏東河系	19	石門橋
馬鞍溪橋	花蓮溪	136	馬鞍溪橋	*滿州	南屏東河系	61	石門橋
萬里溪橋	花蓮溪	242	萬里溪橋	*網紗溪	南屏東河系	12	石門橋
希能埔	南澳沿海河系	553	希能埔	*四重溪	南屏東河系	120	石門橋
澳尾橋	南澳沿海河系	139	澳尾橋	*枋山溪	南屏東河系	124	士文橋
南澳橋	南澳沿海河系	170	南澳橋	*十文溪	南屏東河系	68	士文橋
蘭陽大橋	蘭陽溪	821	蘭陽大橋	*大甲溪	大甲溪	480	白鹿橋
龍門橋	濁水溪	360	龍門橋				

*表示為補遺之測站

表 4-2-2 土地利用 CN 值對照表

Landuse	code	A	B	C	D	Landuse	code	A	B	C	D
農作	101	59	70	78	81	工業	503	81	88	91	93
水產養殖	102	99	99	99	99	其他建築用地	504	68	79	86	89
畜牧	103	30	58	71	78	政府機關	601	68	79	86	89
農業附帶設施	104	59	74	82	86	學校	602	68	79	86	89
天然林	201	36	60	73	79	醫療保健	603	68	79	86	89
人工林	202	36	60	73	79	社會福利設施	604	68	79	86	89
其他森林使用地	203	36	60	73	79	公用設備	605	68	79	86	89
機場	301	98	98	98	98	環保設施	606	68	79	86	89
鐵路	302	98	98	98	98	文化設施	701	68	79	86	89
道路	303	98	98	98	98	休閒設施	702	39	61	74	80
港口	304	98	98	98	98	礦業	801	76	85	89	91
河道	401	98	98	98	98	土石	802	76	85	89	91
溝渠	402	98	98	98	98	鹽業	900	72	82	87	89
蓄水池	403	98	98	98	98	軍事設施	902	68	79	86	89
水道沙洲灘地	404	72	82	87	89	濕地	903	44	65	76	82
水力構造物	405	100	100	100	100	草生地	904	32	85	72	79
防汛道路	406	100	100	100	100	裸露地	905	72	82	87	89
海面	407	100	100	100	100	灌木荒地	906	48	67	77	83
商業	501	89	92	94	95	營建剩餘土石方	907	76	85	89	91
住宅	502	68	79	86	89	空置地	908	68	79	86	89

資料來源：本計畫整理

河川輸砂量計算方法則參考 Kao et al. (2005) 建議的分層時間率定曲線法，其方法根據河川流量-輸砂量的率定曲線進行修正，避免流量-輸砂量的率定曲線在統計上有低估的現象。流量-輸砂量的率定曲線計算式如下：

$$Q_{si} = \alpha Q_i^r + \varepsilon_i \quad (\text{式 4-5})$$

Q_{si} 為實測輸砂量； Q_i 為流量； α 和 γ 分別為待率定係數； ε_i 為誤差。而修正係數 β 則為：

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_i)}{\sum_{i=1}^N \alpha Q_i^r}, \quad i=1 \sim N \quad (\text{式 4-6})$$

將修正係數帶入流量-輸砂量的率定曲線，則修正後的輸砂量 Q_s [m^3 / day] 計算式如下：

$$Q_s = (1 + \beta) \times \alpha Q^r \quad (\text{式 4-7})$$

表 4-2-3 與各輸砂量測站修正流量-輸砂量參數率定結果，圖 4-2-2 為各輸砂量測站的流量-輸砂量率定曲線，虛線為未修正的率定曲線；實線為修正後的率定曲線。

表 4-2-3 各輸砂量測站修正流量-輸砂量參數率定結果

編號	測站名	$\beta+1$	α	γ	編號	測站名	$\beta+1$	α	γ
1	屈尺	6.97	0.07	1.71	24	立山	1.22	5.32	1.70
2	內灣	1.26	0.81	1.32	25	馬遠橋	2.57	1.64	1.89
3	上坪	3.95	1.14	1.14	26	平林	1.14	102.14	1.14
4	永興橋	6.66	1.47	1.54	27	仁壽橋	1.50	63.20	1.11
5	打鹿坑	1.84	0.82	1.46	28	馬鞍溪橋	1.26	3.69	1.83
6	義里	1.02	14.65	1.22	29	萬里溪橋	5.17	12.72	1.36
7	烏溪橋	3.46	13.46	1.18	30	希能埔	0.31	1.96	2.12
8	內茅埔	0.80	1.97	2.22	31	澳尾橋	1.08	4.13	1.08
9	延平橋	13.17	5.34	1.49	32	南澳橋	1.30	1.17	2.04
10	寶石橋	0.43	1.36	2.26	33	蘭陽大橋	1.18	0.58	1.91
11	觸口	3.22	4.50	1.83	34	龍門橋	1.28	2.46	2.11
12	新營	1.32	2.76	1.77	35	新中(1)	0.99	7.19	1.75
13	新市	2.28	4.43	1.38	36	清水大橋	0.45	4.05	1.25
14	南雄橋(阿蓮(2))	5.56	8.70	1.54	37	牛鬥(3)	4.02	3.32	1.82
15	里嶺大橋	6.35	19.96	1.33	38	紅葉	1.05	1.61	1.72
16	潮州	1.99	33.32	1.19	39	武陵台電	1.65	72.19	1.23
17	新埤	7.42	38.67	1.14	40	金崙(2)	1.90	4.47	1.90
18	石門橋	3.20	29.97	1.13	41	金蘭	1.34	10.86	1.81
19	知本(3)	3.38	21.26	1.48	42	新興(2)	1.43	134.81	1.04
20	利嘉(2)	2.12	20.06	1.32	43	石門橋	3.20	29.97	1.13
21	延平	0.81	17.37	1.85	44	士文橋	1.04	0.98	2.13
22	新武呂(4)	1.75	5.52	1.79	45	白鹿橋	5.54	1.45	1.23
23	卓樂橋(卓麓(1))	2.75	22.67	1.20	46	霞雲	1.02	3.02	1.41

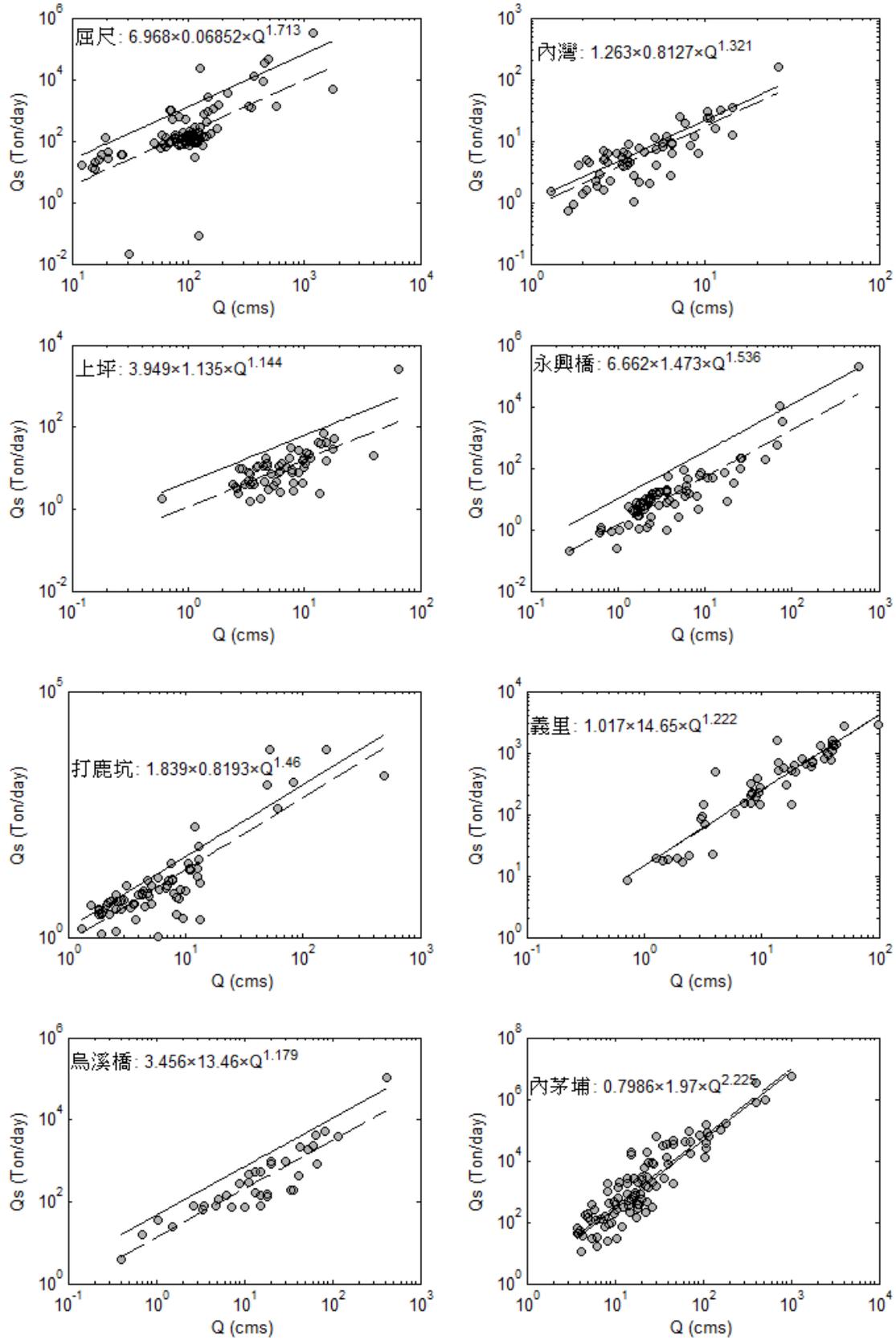


圖 4-2-2 各輸砂量測站之流量-輸砂量率定曲線

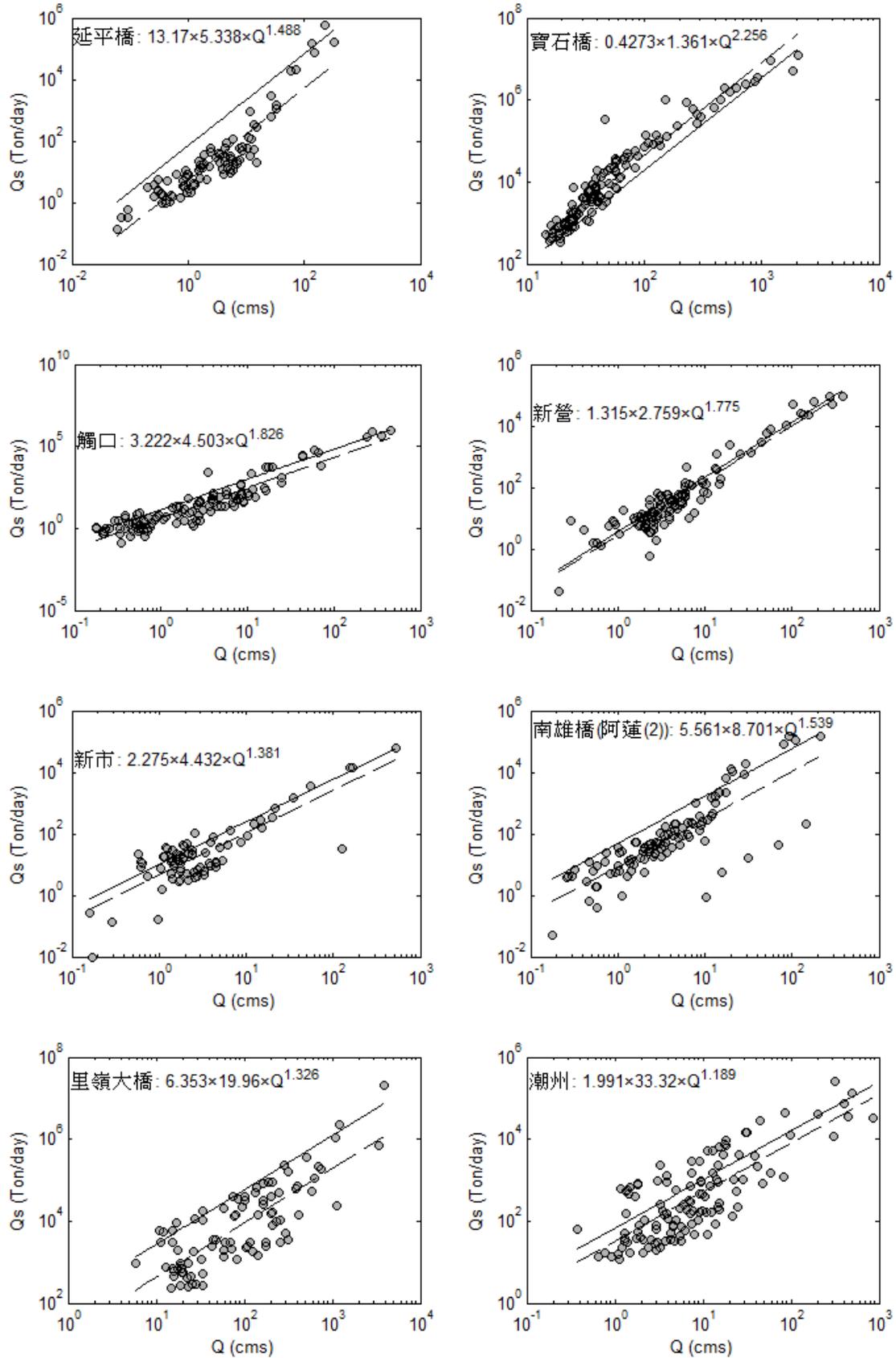


圖 4-2-2 各輸砂量測站之流量與輸砂量率定曲線(續 1)

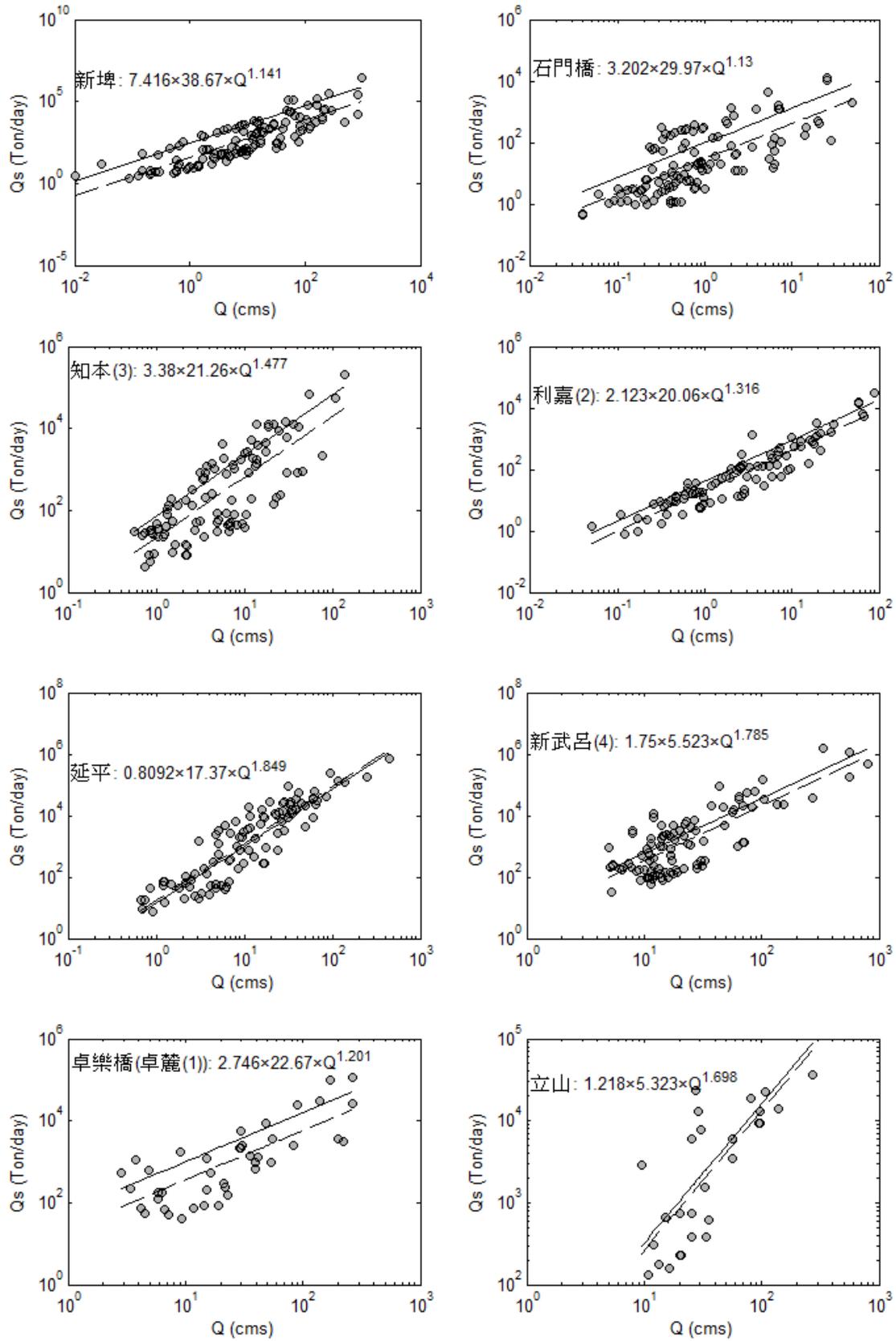


圖 4-2-2 各輸砂量測站之流量與輸砂量率定曲線(續 2)

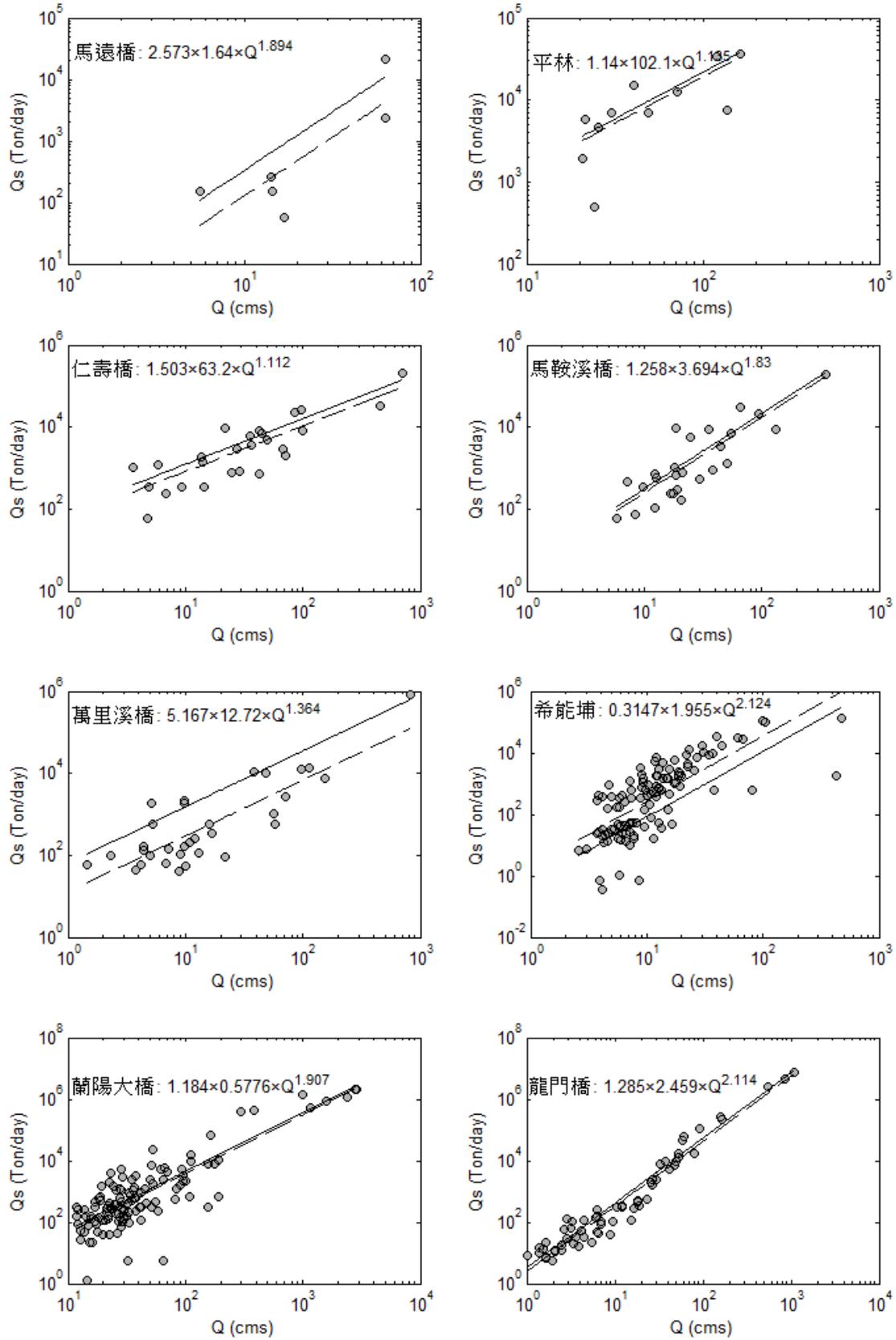


圖 4-2-2 各輸砂量測站之流量與輸砂量率定曲線(續 3)

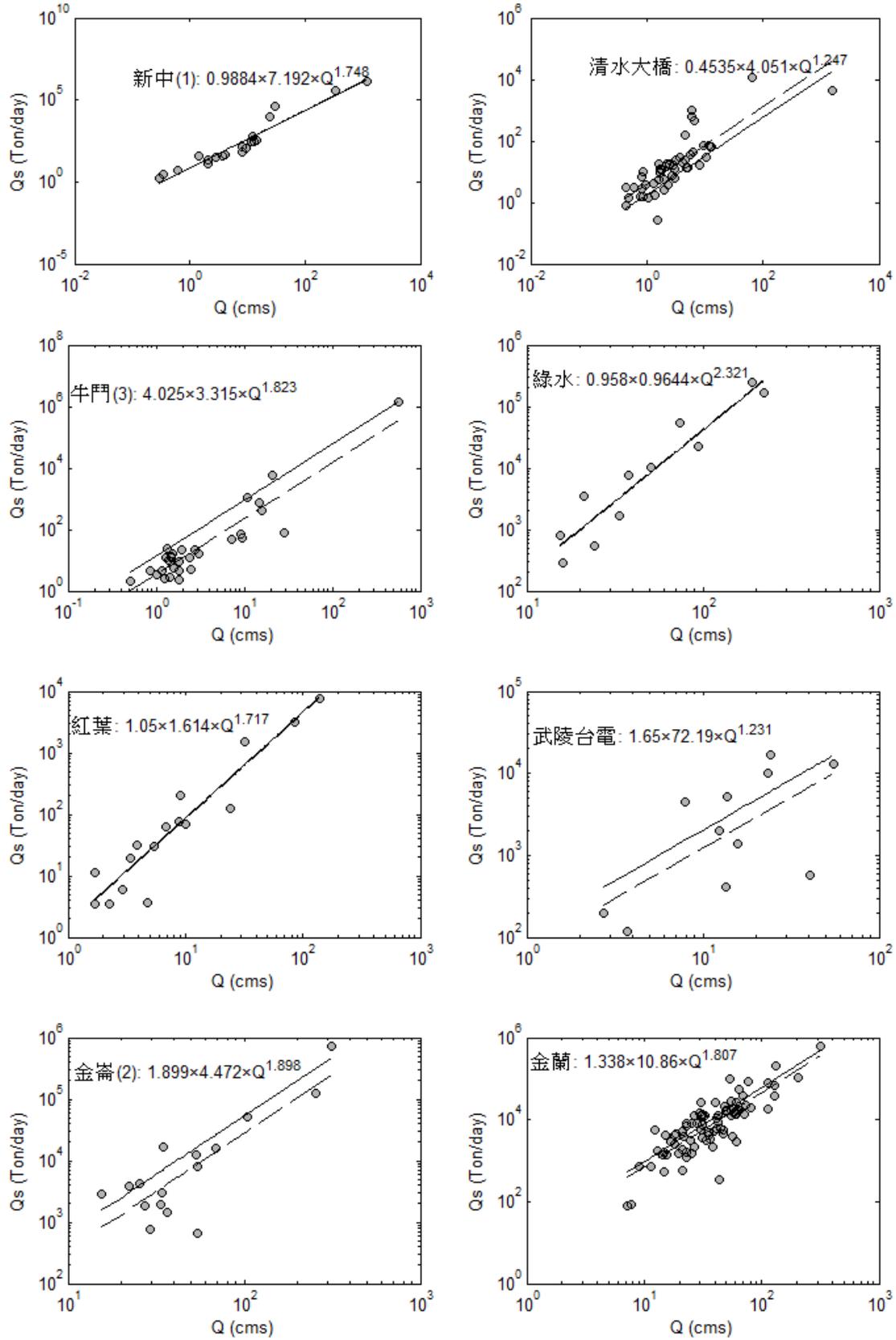


圖 4-2-2 各輸砂量測站之流量與輸砂量率定曲線(續 4)

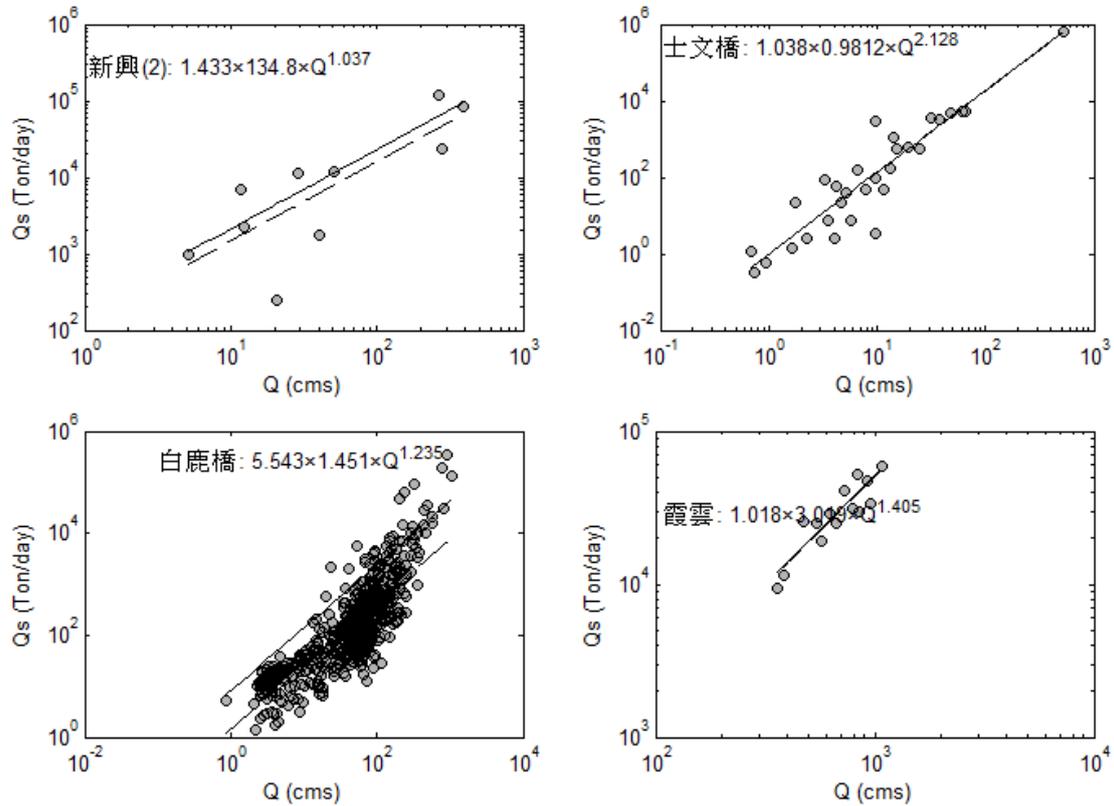


圖 4-2-2 各輸砂量測站之流量與輸砂量率定曲線(續 5)

由於水利署之水位站之含砂量觀測資料僅包含懸移質(suspended load)，而未包含推移質(bedload)，未考慮推移質將會低估總輸砂量。吳健民(1991)指出，在輸砂量甚小而泥砂之移動以推移質為主時，或水流甚淺時，推移質可近似代表總輸砂量(total load)。反之，深水河流之推移質可能僅為總輸砂量之 10~20%。根據石門水庫管理局(1968)河床粒徑調查結果，河床上懸移質和推移質比例約為 82:18。張侑瑛(2011)於濁水溪下游(自強大橋處)低水流況下($Q < 1000$ cms)，觀測推移質佔總輸砂量的 20%。Dadson et al. (2003)計算台灣河川輸砂量時，假設懸移質與推移質比例為 7:3。由於本計畫使用的輸砂量測站大多位在河川下游處，水深較深，故假設懸移質與推移質比例為 80%:20%，計算河川總輸砂量。

二、土砂流出量估算驗證

為了驗證河川土砂流出量計算結果，本計畫以淡水河流域之霞雲站土砂流出量為例，因其位於石門水庫集水區下游，接近石門水庫入流點，故可藉由水庫淤積量驗證河川土砂流出量計算結果之合理性。

然而，當土砂流入水庫之後，並非所有泥砂都會保留在水庫內，必須考慮人工清淤之效應和水庫囚砂率。水庫淤積泥砂部分已因各種人工清淤方式，將泥砂從水庫中除，故計算水庫總入庫土砂量則需要加上清淤量，才會等於實際保留在庫內的泥砂量。而囚砂率是指水庫攔截和保留沈積物（沈滓）的能力，它是保留在庫內的泥砂與進入庫內的泥沙之比，固可藉由囚砂率和庫內的泥砂淤積量(淤積量)反推進入庫內泥砂量。故根據上述之說明，石門水庫入庫土砂量計算式則為(水庫淤積量 + 清淤量) / 囚砂率。以下分別針對(1)水庫淤積量、(2)清淤量和(3)囚砂率分析方法進行說明：

(1) 水庫淤積量：

根據北區水資源局歷年水庫淤積測量結果，石門水庫從民國52年5月至102年2月為止，水庫淤積量共計9,198萬立方公尺，主要淤積量來自於93年的艾利颱風和52年的葛樂禮颱風，該年淤積量分別為2,788萬立方公尺和1,947萬立方公尺。水庫淤泥的總體密度(bulk density)約為 $1.4\sim 1.5\text{ g/cm}^3$ (取平均值 1.45 g/cm^3)。

(2) 清淤量：

水庫清淤量之數據係參考北水局(2009)「石門水庫集水區泥砂推估與處置綜合評析計畫」。義興壩及羅浮沉砂區清淤、庫區水力排砂和庫區抽泥之清淤工程，國61年12月至102年2月為止清淤量估計共1,570萬立方公尺。

(3) 囚砂率：

囚砂率的計算方式參考經濟部水利署(2006)「石門水庫集水

區保育整體實施計畫」之方法，以布魯恩式 Brune 囚砂效率包絡線求得石門水庫的囚砂率，計算結果則顯示石門水庫的囚砂率約介於 0.9003~0.9166 之間。

石門水庫歷年淤積量、清淤量、土砂入庫量和霞雲站土砂入流量統計結果詳表 4-2-4。在考慮清淤量和囚砂率下，石門水庫 52 年的葛樂禮颱風和 94 年艾利颱風的入庫土砂量分別為 2,124 萬立方公尺和 3,134 萬立方公尺，歷年入庫土砂量總量為 1 億 1,818 萬立方公尺。

霞雲站的土砂流出量則以 4-2-1 節所說明之方法，計算該站歷年土砂流出量，霞雲站歷年土砂流出量詳表 4-2-4 和圖 4-2-3。自國 52 年 5 月至 101 年 12 月止，河川土砂流出量共 1 億 1,091 萬立方公尺，計算結果與水庫總入庫土砂量相當接近。

由逐年進行驗證，結果除了民國 93 年之外，各年度的水庫總土砂量的觀測結果和霞雲站土砂流出量計算結果相當接近(圖 4-2-4)。其中，民國 52 年因葛樂禮颱風產生的 2,124 萬立方公尺實測土砂流出量，與估算土砂流出量 2,050 萬立方公尺相當吻合。推測民國 93 年土砂量低估的原因，可能因該年艾利颱風的暴雨所帶來的高含砂水流，至水庫庫區形成異重流，擾動水庫底淤泥(袁承偉，2007)，導致水庫淤積測量的淤積量遠大於計算的土砂流出量計算結果。

根據上述結果，本計畫的土砂入流量方法與流程，確實能夠計算集水區河川土砂流出量之變化。

表 4-2-4 石門水庫歷年淤積量、清淤量和霞雲站土砂入流量統計表

(1)民國年	(2)水庫淤積量 (10^4 m^3)	(3)清淤量 (10^4 m^3)	(4)因砂率	(5)入庫土砂量 (10^4 m^3)	(6)土砂流出量 (10^4 m^3)	(7)差異 (10^4 m^3)
52.05-53.03	1,947	0	0.9166	2,124	2,050	-74
53.03-54.04	77	0	0.9164	84	8	-76
54.04-55.05	199	0	0.9161	217	35	-182
55.05-56.05	219	0	0.9159	239	95	-144
56.05-57.06	118	0	0.9161	129	54	-75
57.06-58.05	133	0	0.916	145	95	-50
58.05-59.06	503	0	0.9153	550	322	-228
59.06-60.06	141	0	0.9148	154	139	-15
60.06-61.12	523	0	0.9146	572	719	147
61.12-63.08	24	15	0.9146	43	40	-3
63.08-64.11	30	12	0.9148	46	113	67
64.11-65.11	203	19	0.9139	243	124	-119
65.11-66.11	79	17	0.9140	105	68	-37
66.11-67.11	51	22	0.9138	80	28	-52
67.11-68.11	18	20	0.9137	42	109	67
68.11-69.11	83	7	0.9138	98	46	-52
69.11-70.11	12	22	0.9139	37	106	69
70.11-71.11	89	88	0.9139	194	80	-114
71.11-72.11	10	96	0.9141	116	48	-68
72.11-73.11	7	71	0.9141	85	159	74
73.11-74.11	370	71	0.9132	483	285	-198
74.11-75.11	13	58	0.9130	78	160	82
75.11-76.11	22	58	0.9128	88	111	23
76.11-77.11	-41	114	0.9129	80	21	-59
77.11-78.11	17	69	0.9127	94	203	109
78.11-79.11	69	124	0.9128	211	370	159
79.11-80.11	-140	66	0.9132	-81	26	107
80.11-81.11	0	23	0.9132	25	156	131
81.11-82.11	-98	4	0.9135	-103	6	109
82.11-83.11	53	5	0.9141	63	346	283
83.11-84.11	-10	21	0.9143	12	13	1
84.11-85.11	867	10	0.9124	961	172	-789
85.11-86.11	148	26	0.9122	191	207	16
86.11-87.11	101	26	0.9119	139	252	113
87.11-88.11	46	25	0.9118	78	18	-60
88.11-89.11	27	52	0.9117	87	65	-22
89.11-90.11	-362	31	0.9138	-362	313	675
90.11-92.04	41	46	0.9136	95	80	-15
92.04-93.03	28	28	0.9136	61	7	-54
93.03-93.12	2,788	52	0.9062	3,134	1,477	-1,657
93.12-94.12	233	31	0.9057	291	514	223
94.12-95.12	-101	38	0.9057	-70	139	209
95.12-96.12	962	13	0.9018	1,081	278	-803
96.12-97.12	-70	48	0.9021	-24	530	554
97.12-98.12	346	58	0.9003	449	87	-362
98.12-99.12	-176	83	0.9009	-103	57	160
99.12-100.12	-212	0	0.9016	-235	41	276
100.12-102.02	-188	0	0.9021	-208	721	929
合計	9,199	1,570	-	11,818	11,091	-727

說明：(3)清淤量為北區水資源局水庫抽泥等淤積物清除數量。(4)因砂率公式為布魯恩式 Brune 因砂效率包絡線。(5)入庫土砂量 = (水庫淤積量 + 清淤量) / 因砂率。(6)為霞雲水文站土砂流出量計算結果。(7)為入庫土砂量和土砂流出量差異，為(6)-(5)。

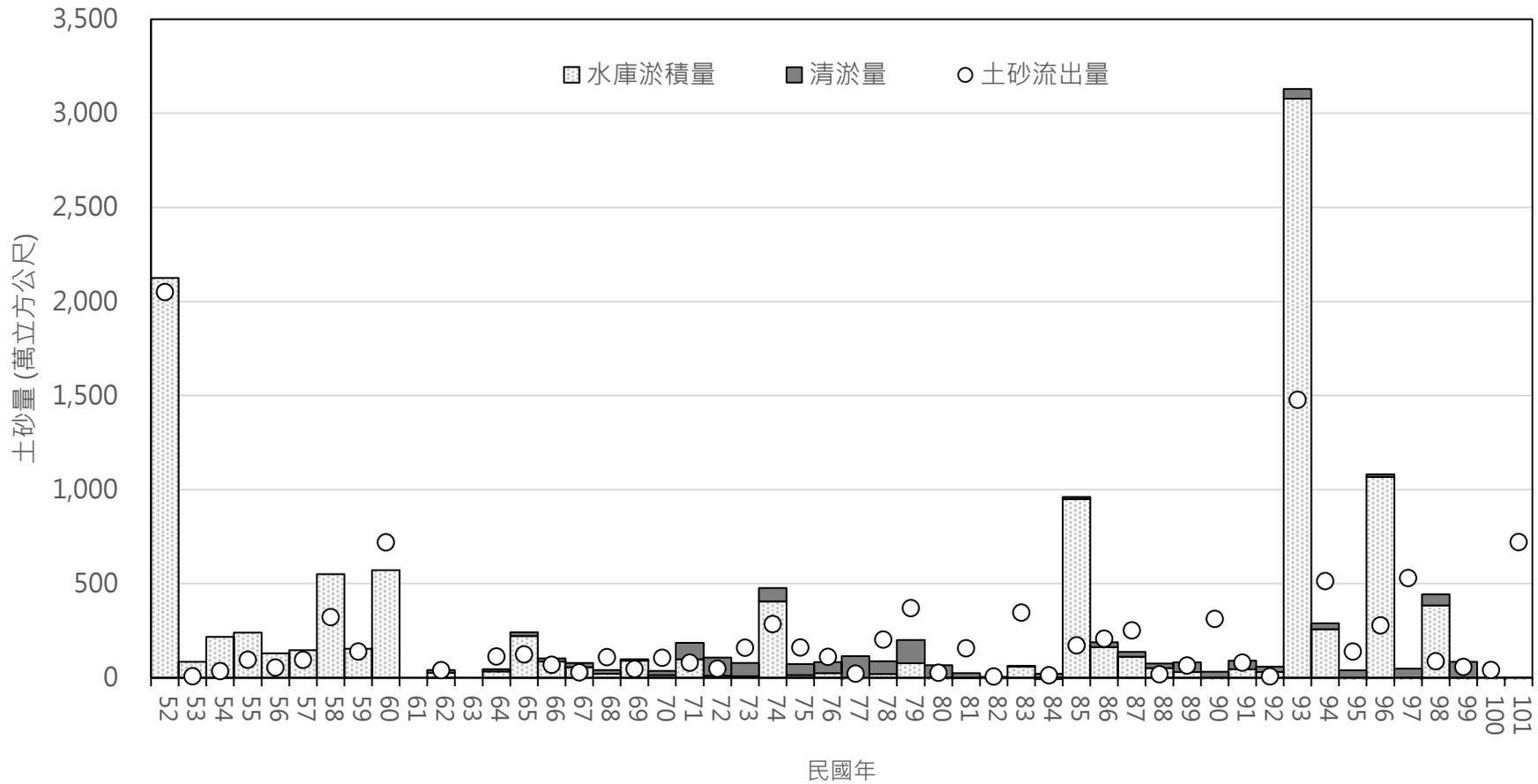


圖 4-2-3 石門水庫歷年淤積量、清淤量和霞雲站土砂入流量計算結果比較

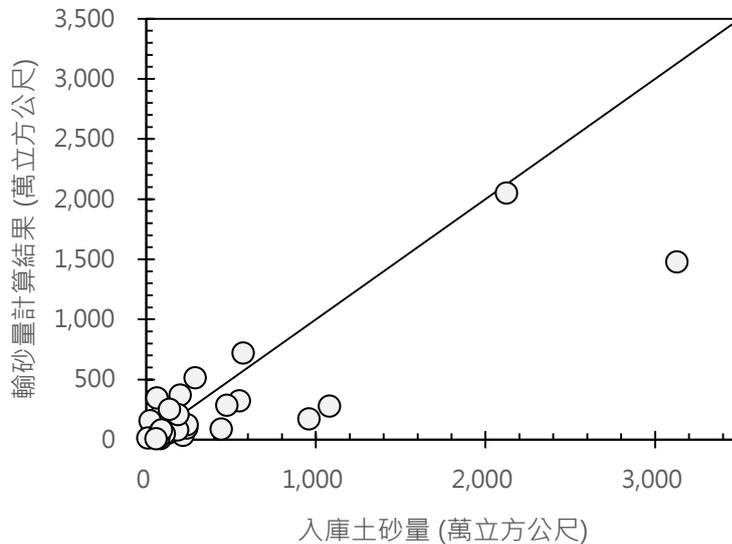


圖 4-2-4 石門水庫歷年水庫入庫總土砂量和霞雲站土砂流出量

三、土砂流出量計算結果

根據上述之分析方法，計算 67 站的土砂流出量。計算結果以里嶺大橋測站的時序輸砂量為例，該測站位在高屏溪下游，故表量測高屏流域實際河川流出量，結果詳圖 4-2-5。河川輸砂量主要皆發生在 7~10 月的颱風季節，而非颱風季的輸砂量幾乎可以忽略，其中，在 98 年 8 月 7~12 日莫拉克颱風期間，該站觀測的總輸砂量超過 7 千萬立方公尺，約佔總輸砂量的 20%。而各河川輸砂量計算結果詳圖 4-2-6。

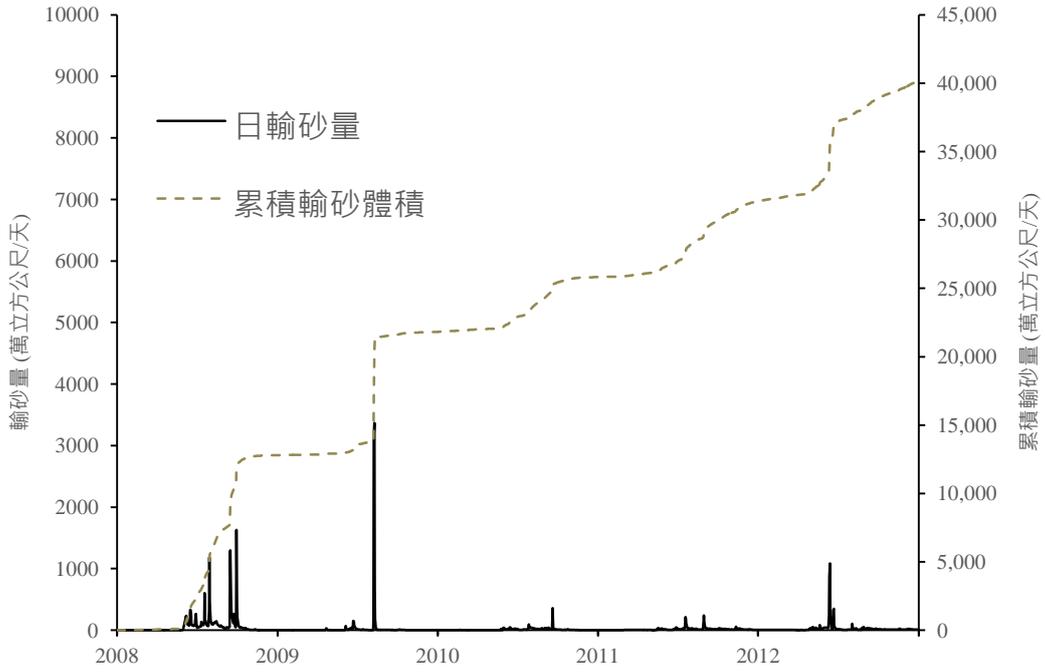
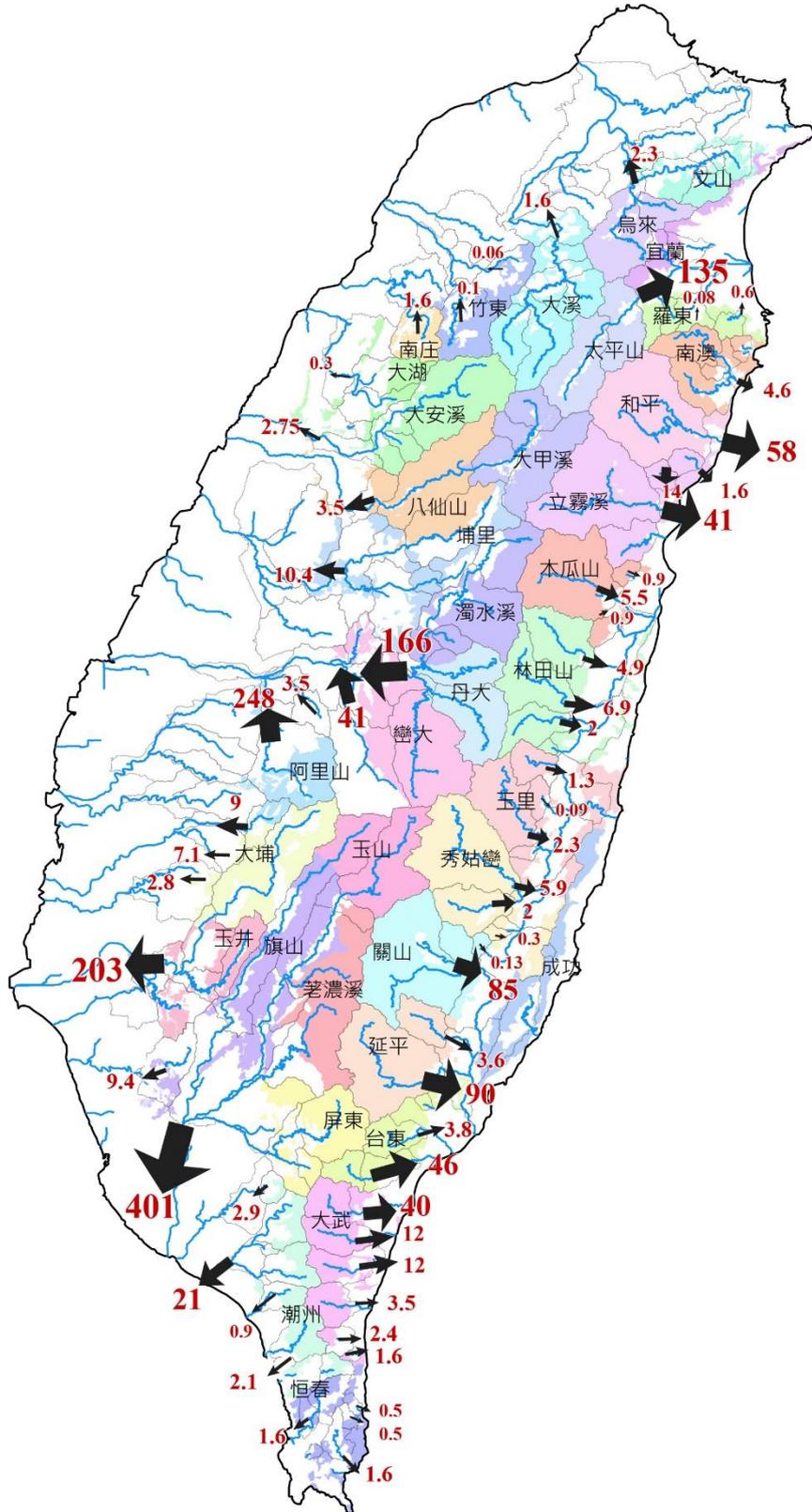


圖 4-2-5 里嶺大橋測站時序輸砂量計算結果



說明：紅色數字表示 97-101 年間河流輸砂量(單位：百萬立方公尺)；
 黑色箭頭大小則表式流出量大小。

圖 4-2-6 國有林班地土砂流出量計算結果



國有林班地的範圍大多為不規則的多邊形，與各水位站的控制集水區範圍並未完全相符，故各站流出量換算為各林班地的流出量則必須經轉換。根據許多研究指出，臺灣河川輸砂量主要受集水區崩塌土砂量所控制，崩塌量增加時，河川輸砂量也會隨之明顯增加(Hovius et al., 2000; Fuller et al., 2003; Dadson et al., 2004)，而河川輸砂量增加幅度可以用線性的 ΔK 表示。故本計畫在此假設各各單元的輸砂量與其範圍內的崩塌量成正比，故各區塊單元的輸砂量(Q_{SU})則可表示為：

$$Q_{SU} = Q_s \times \frac{V_{Li}}{\sum V_{Li}} \quad (\text{式 4-8})$$

其中， Q_s 為該區塊單元(事業區)參考輸砂量 [m^3 / day]； V_{Li} 表示該區塊單元的崩塌量 [m^3]； $\sum V_{Li}$ 表示該區塊單元的總崩塌量 [m^3]。

國有林各事業區土砂流出量統計結果詳表 4-2-5 與圖 4-2-7。土砂量以旗山事業區最大，每年流出量介於 2,231~7,091 萬立方公尺，共流出 2 億 2,460 萬立方公尺。其次為阿里山事業區，每年流出量則介於 314~8,866 萬立方公尺，年間流出量差異甚大，總量為 1 億 8,935 萬立方公尺。第 3~5 名則分別為玉井事業區(1 億 6,079 萬立方公尺)、太平山事業區(1 億 3,089 萬立方公尺)與延平事業區(8,910 萬立方公尺)。

國有林歷年土砂流出量以 98 年流出量最大，共計 4 億 8,870 萬立方公尺，其次為 97 年的 4 億 5,309 萬立方公尺，而 99-101 年則較少，介於 1 億 1,862 萬立方公尺至 3 億 1,758 萬立方公尺。總流出量為 15 億 7,565 萬立方公尺。根據 Dadson et al. (2003) 的研究指出在集集大地震之前，臺灣年平均河川輸砂量約為 5 億公噸(總載)，約相當於 3 億 1,250 萬立方公尺的土砂量。並在集集大地震後，靠近震央的河川輸砂量增加約 2~4 倍 (Dadson et al., 2004)。該研究結果與本計畫估算結果相似，故本計畫推估之河川土砂流出量(表 4-2-5 與圖 4-2-8)應屬可靠。





表 4-2-5 國有林各事業區土砂流出量統計結果

事業區	97年	98年	99年	100年	101年	加總
1.文山	27	34	24	46	26	157
2.烏來	25	47	59	27	48	206
3.大溪	39	11	21	11	52	134
4.竹東	4	2	2	3	6	18
5.南庄	40	23	10	10	49	131
6.大湖	6	7	5	2	5	24
7.大安溪	92	68	18	6	74	259
8.八仙山	135	75	83	62	203	558
9.大甲溪	88	45	36	27	80	276
10.濁水溪	1,705	1,883	84	52	617	4,341
11.埔里	99	56	68	47	183	452
12.丹大	2,541	2,808	124	77	918	6,468
13.巒大	2,104	2,458	111	69	830	5,572
14.阿里山	8,866	8,367	435	314	953	18,935
15.玉山	1,324	938	413	571	906	4,152
16.大埔	893	5,870	75	31	259	7,127
17.玉井	5,276	5,708	1,302	162	3,630	16,079
18.旗山	7,091	4,982	2,231	3,205	4,951	22,460
19.荖濃溪	1,527	1,076	479	662	1,047	4,791
20.屏東	1,531	1,078	480	663	1,049	4,802
21.潮州	339	541	329	277	379	1,865
22.恒春	48	58	59	70	86	320
23.大武	994	2,314	1,420	851	1,200	6,779
24.台東	259	578	595	3,283	358	5,075
25.延平	428	2,802	198	2,440	3,042	8,910
26.關山	1,048	2,463	436	2,968	1,440	8,355
27.成功	41	49	31	73	35	229
28.玉里	81	50	45	121	76	373
29.秀姑巒	151	169	109	142	179	751
30.林田山	320	262	157	343	351	1,432
31.木瓜山	132	111	85	88	184	601
32.立霧溪	2,417	1,232	882	823	1,107	6,462
33.和平	353	124	247	2,107	2,909	5,740
34.南澳	74	36	5	10	333	458
35.太平山	5,178	2,501	1,175	73	4,162	13,089
36.羅東	7	16	10	7	7	46
37.宜蘭	25	29	18	44	21	137
加總	45,309	48,870	11,862	19,766	31,758	157,565

單位：萬立方公尺





表 4-2-6 各流域土砂流出量統計結果

流域	97年	98年	99年	100年	101年	加總
1.北海岸河系	0	0	0	0	0	0
2.淡水河	27	52	65	29	53	226
3.頭前溪	4	2	2	3	6	18
4.竹南沿海河系	40	23	10	10	49	132
5.後龍溪	6	7	5	2	4	23
6.大安溪	95	70	19	7	76	267
7.大甲溪	102	54	52	46	97	350
8.烏溪	182	103	126	87	338	835
9.濁水溪	15,137	15,452	728	492	3,234	35,041
10.北港溪	30	15	9	7	21	82
11.朴子溪	9	4	3	2	6	23
12.八掌溪	162	190	41	32	182	608
13.急水溪	33	29	11	5	35	112
14.曾文溪	6,029	11,424	1,339	167	3,735	22,693
15.二仁溪	180	115	65	210	214	785
16.高雄沿海河系	2	1	1	2	2	7
17.高屏溪	11,288	7,950	3,537	4,890	7,735	35,401
18.東港溪	12	15	31	20	15	93
19.林邊溪	276	450	242	210	287	1,466
20.南屏東河系	98	133	115	117	163	626
21.南台東河系	1,253	2,892	2,015	4,134	1,558	11,852
22.卑南溪	1,471	5,260	630	5,403	4,477	17,242
23.秀姑巒溪	204	186	139	224	236	989
24.海岸山脈東側	41	49	31	73	35	229
25.花蓮溪	422	339	223	387	512	1,884
26.豐濱沿海河系	49	58	37	87	42	274
27.太魯閣河系	2,423	1,236	885	820	1,105	6,468
28.南澳沿海河系	425	158	252	2,124	3,249	6,209
29.頭城沿海河系	49	58	37	87	42	274
30.蘭陽溪	5,258	2,545	1,214	92	4,248	13,357
加總	45,309	48,870	11,862	19,766	31,758	157,565

單位：萬立方公尺



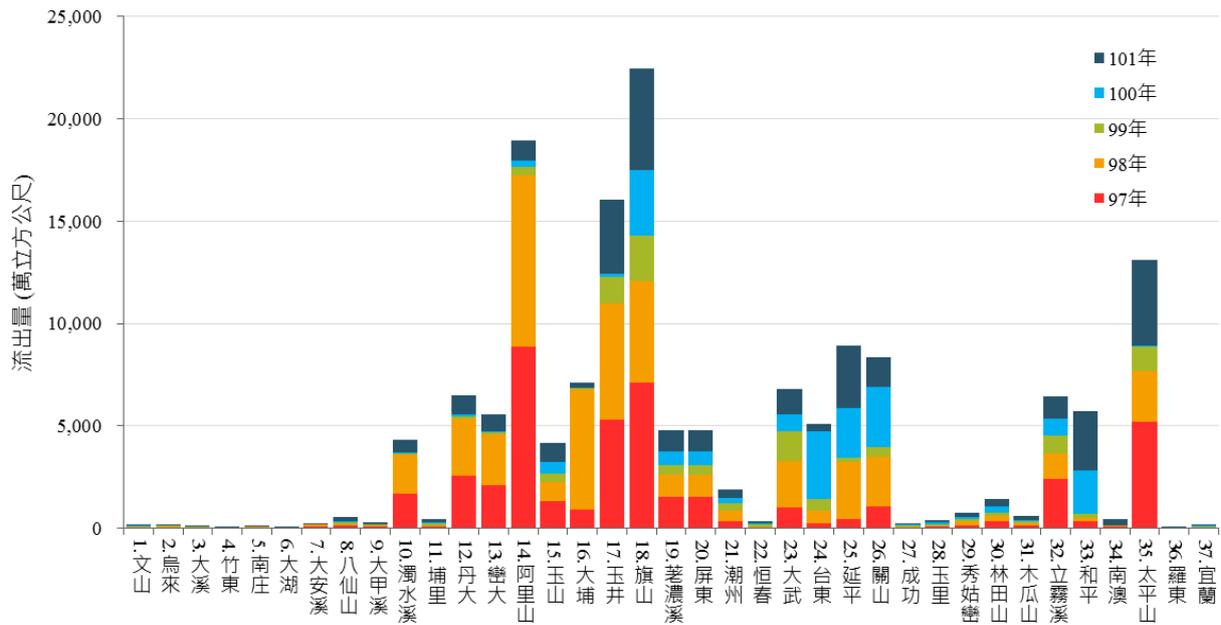


圖 4-2-7 各事業區土砂流出量統計結果

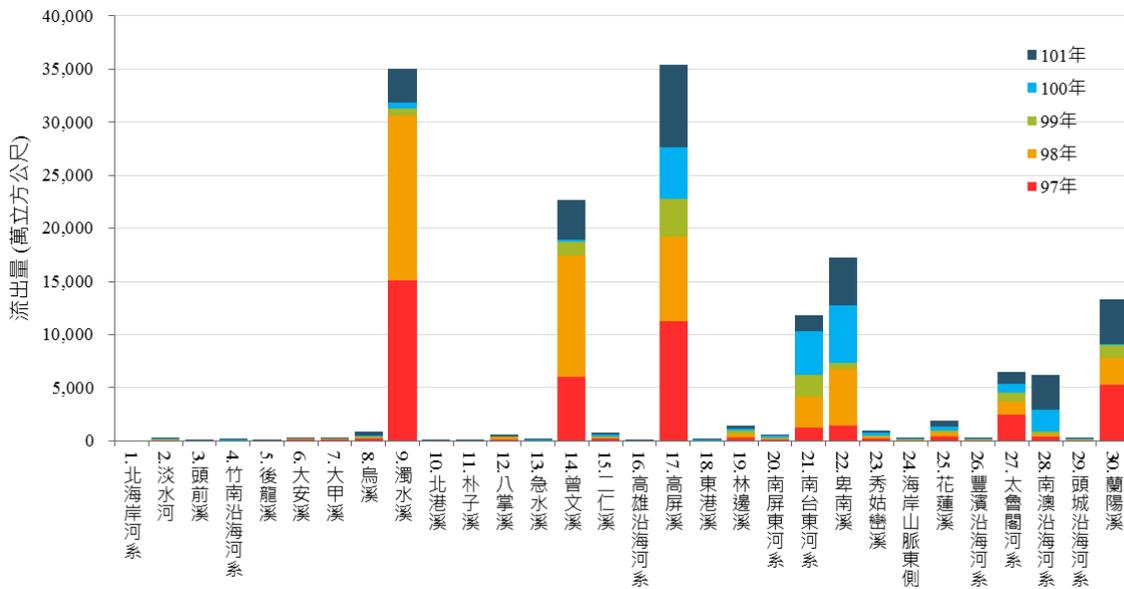


圖 4-2-8 各流域土砂流出量統計結果

4-2-2 土砂殘留量估算

一、土砂殘留量分析方法

國有林集水區之土砂殘留量則以集水區泥砂收支(sediment budget)



的概念來考量，土砂殘留量等於崩塌土砂生產量減去土砂流出量，根據此方法則可以計算出歷年土砂殘留變化量，計算式如下：

$$S_r(t) = V_L(t) + S_r(t-1) - Q_{su}(t) \quad (\text{式 4-9})$$

S_r 為土砂殘留量[m³]； V_L 為新增崩塌量[m³]； Q_{su} 為土砂流出量[m³]； t 為時間[年]。表示當年的土砂殘留量為當年新增崩塌量加上前一年的殘留量，並且減掉當年的土砂流出量。殘留比則為最後一年的土砂殘留量除以所有時間的總崩塌量，若當土砂殘留量小於零時，則將土砂殘留量視為零。

二、集集地震土砂殘留量

許多研究指出濁水河流域受到 88 年集集地震影響產生大量的崩塌，並且導致河川輸砂量明顯增加 (Dadson et al., 2004; Chen et al., 2008; Hovius et al., 2011)。雖然許多研究也指出集集大地震所產生的崩塌則大約在地震後 6 年趨於穩定，然而集集地震所產生的崩塌仍有多少殘留於坡面或河道上？這些殘留土砂是否是造成濁水溪高土砂流出量的原因？相關問題目前仍尚未釐清，因此，在計算濁水河流域的阿里山、巒大、丹大和濁水溪事業區的土砂殘留量，將考慮集集大地震之效應，和 88 年 10 月到 96 年 12 月底之間的土砂流出量。

集集大地震在濁水河流域產生的崩塌地分布和土砂量分析結果如圖 4-2-9，流域總崩塌量共計 6 億 4,730 萬立方公尺的土砂量，國有林的土砂量共佔 4 億 5,538 萬立方公尺，其中，阿里山事業區佔 2 億 5,863 萬立方公尺的土砂量(草嶺崩塌 1 億 6,500 萬立方公尺)，巒大事業區 1 億 785 萬立方公尺，丹大事業區 5,626 萬立方公尺，濁水溪事業區 3,264 萬立方公尺。

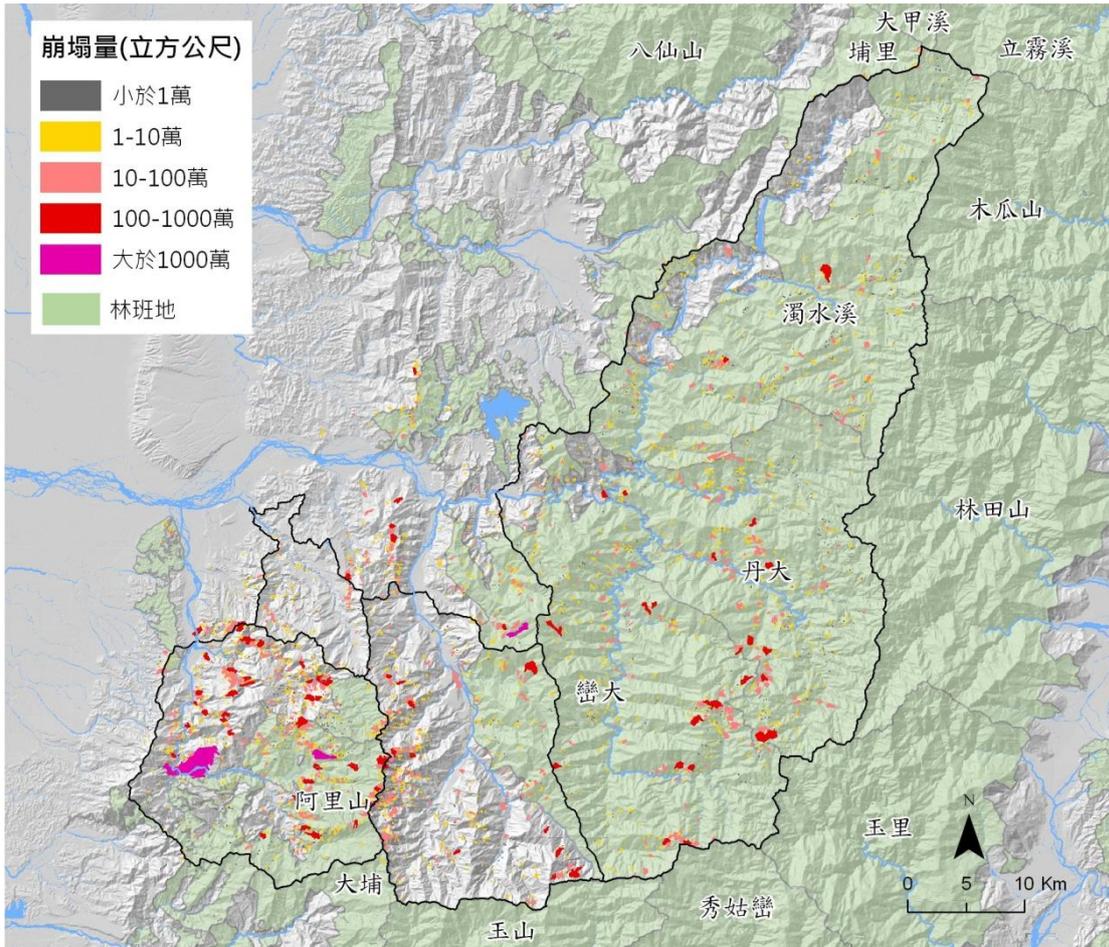


圖 4-2-9 集集地震後濁水河流域之新增崩塌土砂量

為分析集集大地震後續(88-96年)的新增崩塌量和土砂流出量，假設 97-101 年平均值崩塌量為該流域之自然背景崩塌量(background rate)，各事業區的平均崩塌量：阿里山事業區每年 1,255 萬立方公尺；巒大事業區每年 886 萬立方公尺；丹大事業區每年 837 萬立方公尺；濁水溪事業區每年 567 萬立方公尺；河川土砂流出量地分析方法與 4-2-1 節的方法相同，計算結果如表 4-2-7。

表 4-2-7 集集地震後各事業區之流出量和土砂殘留量

民國年	事業區流出量 (萬立方公尺)				事業區殘留量 (萬立方公尺)			
	阿里山	巒大	丹大	濁水溪	阿里山	巒大	丹大	濁水溪
88	0	85	44	26	25,863	10,696	5,582	3,238
89	139	1,296	676	392	26,979	10,286	5,743	3,413
90	2,029	2,053	1,071	622	26,204	9,119	5,508	3,358
91	91	114	59	34	27,369	9,891	6,286	3,891
92	83	456	238	138	28,541	10,321	6,885	4,320
93	2,032	1,990	1,038	602	27,764	9,218	6,684	4,284
94	3,069	2,895	1,511	877	25,950	7,208	6,010	3,975
95	2,435	2,399	1,252	726	24,770	5,696	5,595	3,816
96	1,496	2,359	1,231	714	24,529	4,223	5,201	3,669

備註：民國 88 年的土砂流出量指 88 年 9 月 21 日至 12 月 31 日止。

土砂流出量與殘留量計算結果詳表，集集大地震後至 96 年底為止，阿里山事業區平均每年土砂流出量約 1,422 萬立方公尺，略大於自然背景崩塌量，故至 96 年底時，土砂殘留量仍有 2 億 4,529 萬立方公尺。巒大事業區平均每年土砂流出量約 1,695 萬立方公尺，約為自然背景崩塌量的兩倍，至 96 年底時，土砂殘留量剩 4,223 萬立方公尺，約為集集地震崩塌量的一半。丹大事業區平均每年土砂流出量約 885 萬立方公尺，略大於自然背景崩塌量，土砂殘留量仍有 5,201 萬立方公尺。濁水溪事業區平均每年土砂流出量約 567 萬立方公尺，小於自然背景崩塌量，故土砂殘留量有增加的現象，約為 3,669 萬立方公尺。

由上述分析結果可以得知，在集集地震發生後 7 年，濁水溪流域地各國有林事業區仍有大量的殘留土砂尚未被河川帶走，共計 3 億 7,622 萬立方公尺，特別是阿里山事業區因草嶺大崩塌影響，仍有相當大的土砂堆積在河道上。而集集地震土砂殘留量則影響 97-101 年間的土砂殘留量計算結果，將這四個事業區的殘留土砂納入後續分析的起始值。



三、97-101 年土砂殘留量

根據上述分析方法，以及集集地震所產生的殘留土砂，逐年計算各事業區土砂殘留量(圖 4-2-10 與圖 4-2-11)，結果詳表 4-2-7，以及國有林各流域詳表 4-2-8。

計算結果顯示(圖 4-2-10)，在 97 年度因土砂流出量較大，使得中部地區的土砂殘留量由 3 億 7,622 萬立方公尺減少為 2 億 7,115 萬立方公尺，而南部地區土砂殘留量為零，表示該年河川屬於侵蝕或是將之前的殘留土砂持續帶走。98 年則因莫拉克颱風造成大量的新增崩塌，造成中、南及東部事業區新增大量的土砂量，使得該年度之土砂殘留量明顯增加。99-101 年期間，因較無重大的崩塌事件，雖然仍有部分新增崩塌土砂，但整體來說，土砂流出量大於新增崩塌量，故土砂殘留量則持續下降。

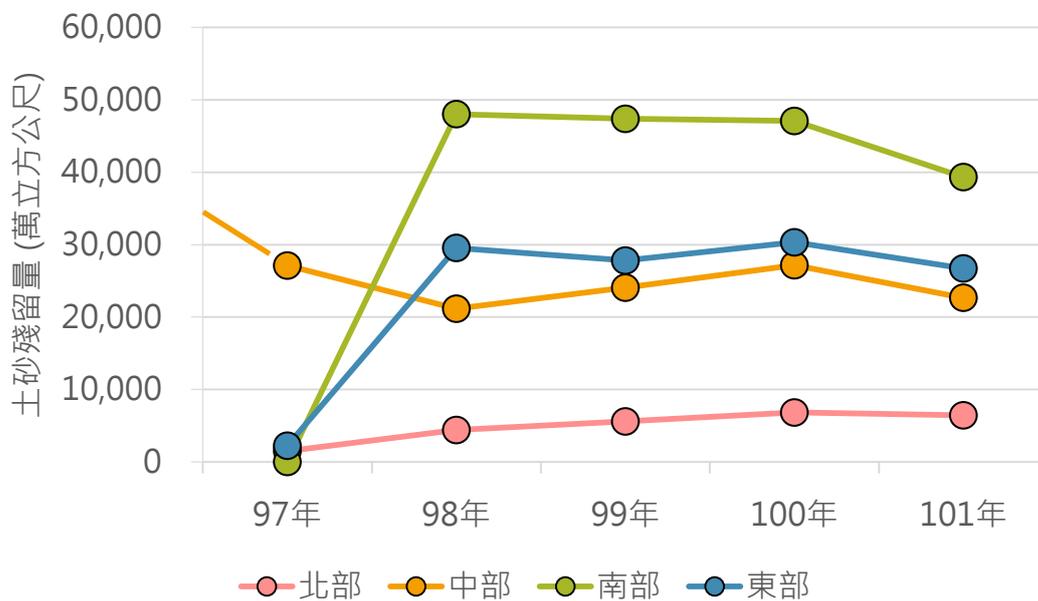
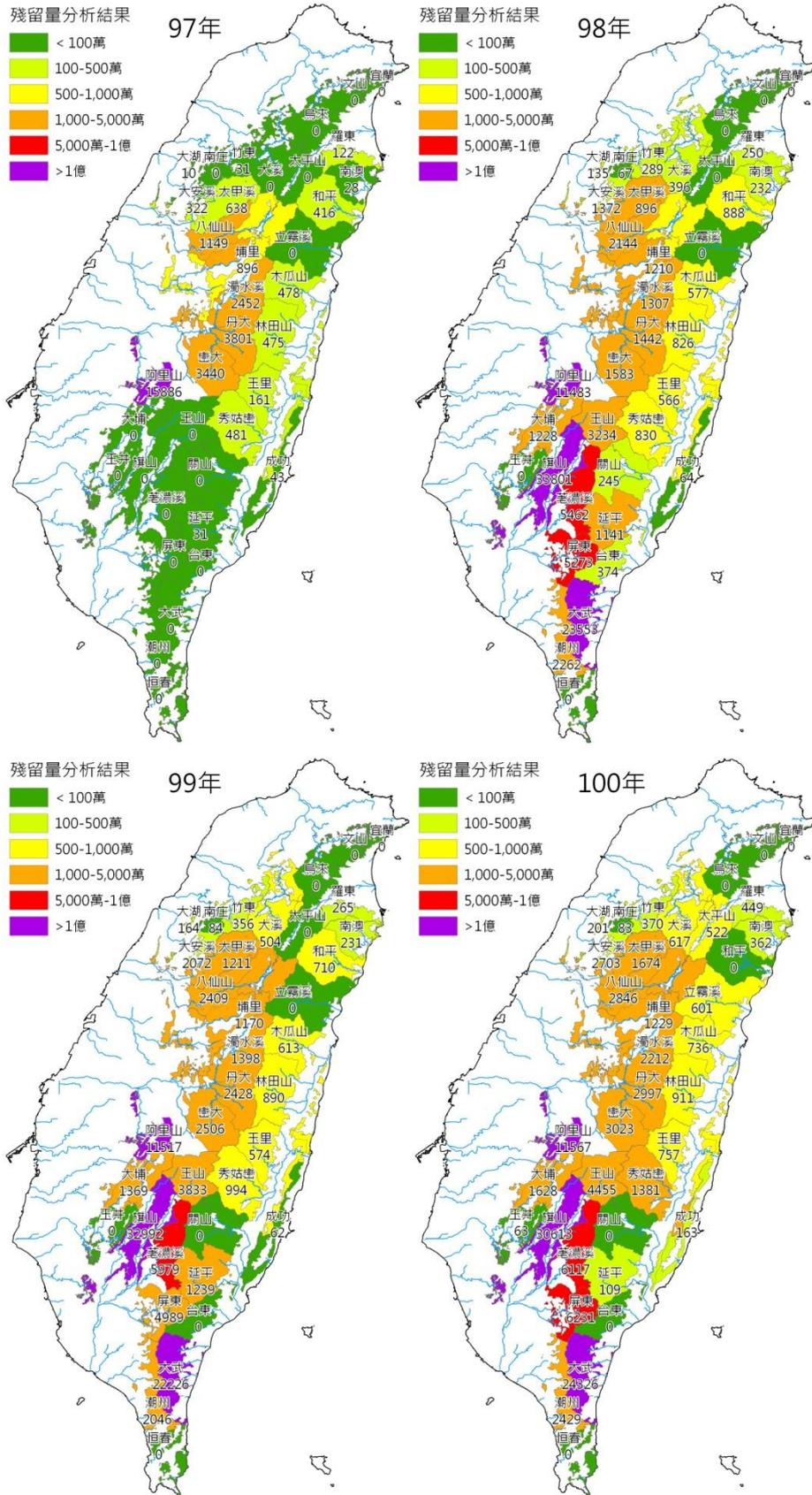


圖 4-2-10 各區域土砂殘留量變化



附註:上圖數值表示各國有林事業區土砂殘留量(萬立方公尺)

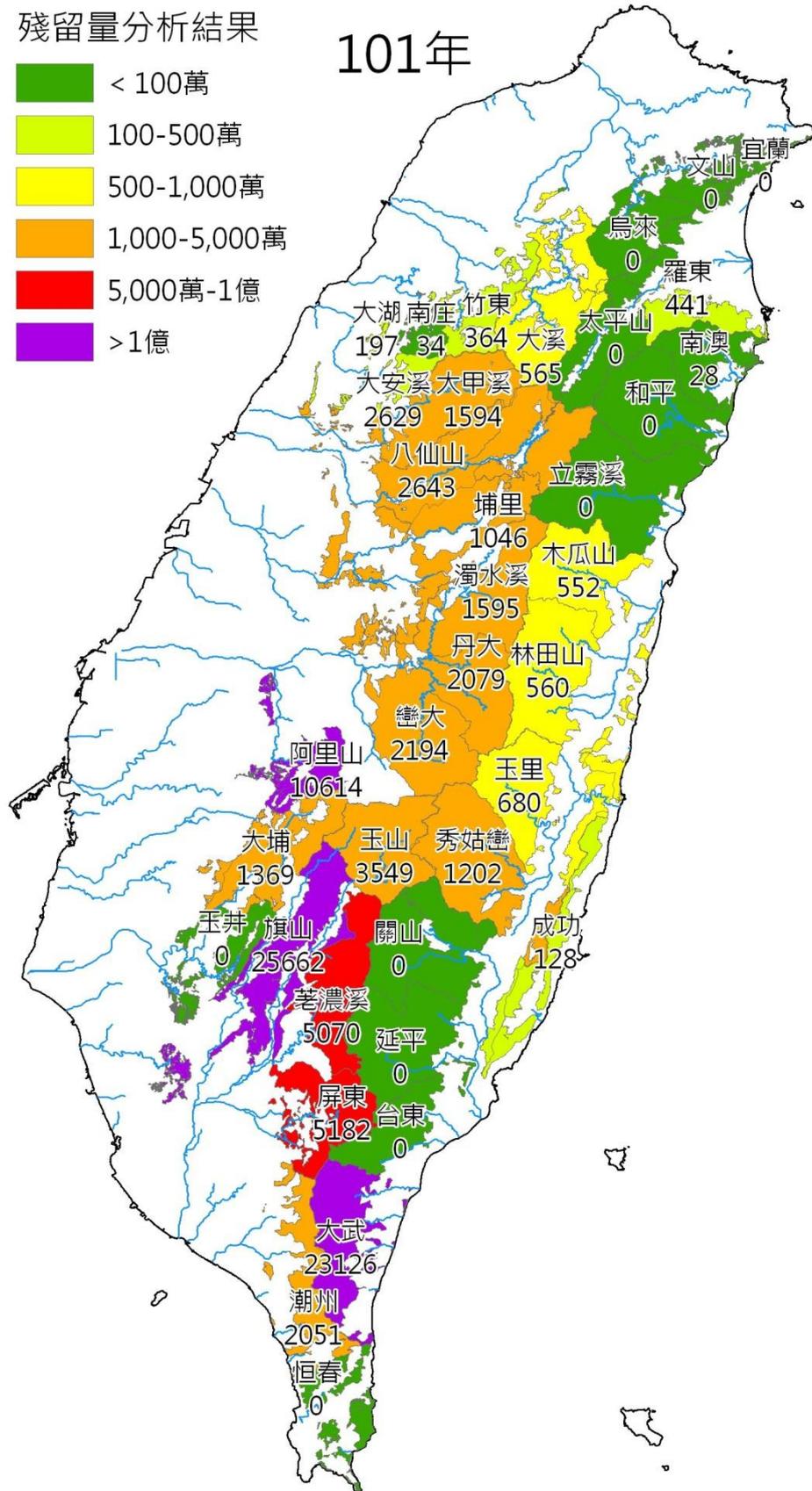
圖 4-2-11 國有林土砂殘留量變化



殘留量分析結果



101年



附註:上圖數值表示各國有林事業區土砂殘留量(萬立方公尺)

圖 4-2-11 101 年底國有林土砂殘留量(續 1)





截至 101 年底為止，全國國有林土砂殘留量合計 9 億 5,166 萬立方公尺的土砂量(表 4-2-8 與圖 4-2-12)，其中，莫拉克颱風的土砂殘留量 (98 年新增崩塌量 - 莫拉克颱風後土砂流出量)為 5 億 6,010 萬立方公尺。相較於莫拉克颱風產生之崩塌土砂量之 11 億 7,151 萬立方公尺，莫拉克颱風殘留比 (98 年新增崩塌量 - 莫拉克颱風後土砂流出量) / 98 年新增崩塌量) 則為 48%(5 億 6,010 萬/11 億 7,151 萬)。各事業區土砂殘留量以旗山事業區多有 2 億 5,663 萬立方公尺，莫拉克颱風殘留比約為 60%。其次為大武事業區的 2 億 3,126 萬立方公尺，殘留比約為 79%，第三為阿里山事業區的 1 億 614 萬立方公尺。其他事業區土砂殘留量皆不足 1 億立方公尺，第 4 至第 6 大的依序為屏東事業區(5,182 萬立方公尺)、荖濃溪事業區(5,070 萬立方公尺)與玉山事業區(3,550 萬立方公尺)。

由國有林各流域分析，土砂殘留量以高屏溪流域最多(表 4-2-9 與圖 4-2-13)，有 3 億 8,179 萬立方公尺的土砂量，殘留比約為 59%，其次為南台東河系流域的 1 億 9,784 萬立方公尺，再者為濁水溪流域的 1 億 6,352 萬立方公尺，第 4 至第 6 大的依序為大甲溪流域(3,413 萬立方公尺)、大安溪流域(2,756 萬立方公尺)與秀姑巒溪(1,936 萬立方公尺)。

若考慮莫拉克颱風災後的人工清淤和疏浚工程，清疏量約 6 千萬立方公尺，則全國國有林土砂殘留量約 8 億 9,166 萬立方公尺。相較於莫拉克颱風產生之崩塌土砂量之 11 億 7,151 萬立方公尺，莫拉克颱風殘留比莫拉克颱風的土砂殘留量約為 5 億 10 萬立方公尺，則莫拉克颱風殘留比約為 43%(5 億 10 萬/11 億 7,151 萬)。



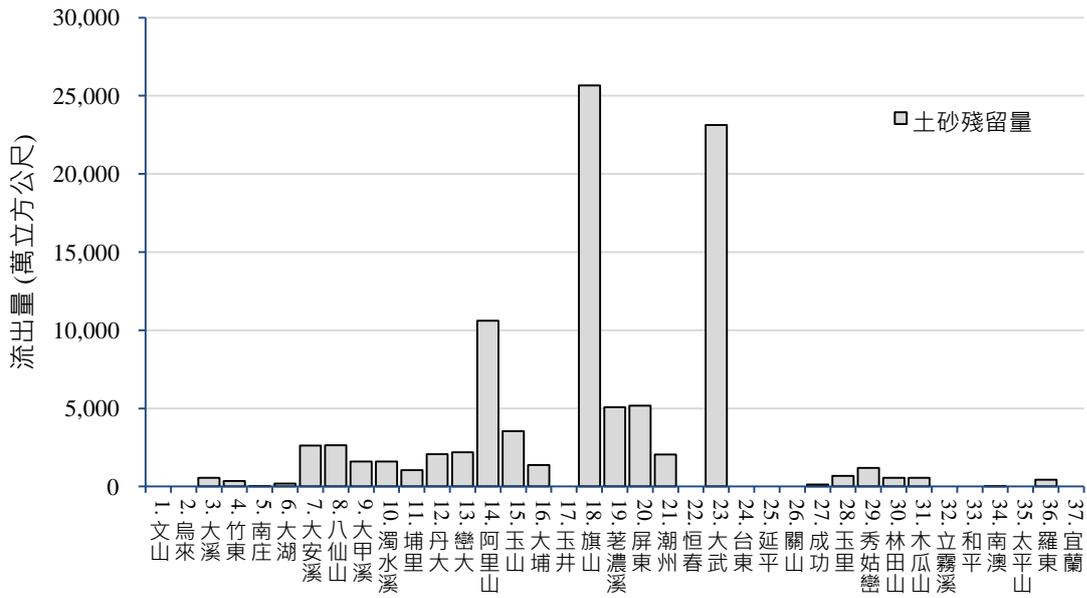


圖 4-2-12 各事業區土砂殘留量分析結果

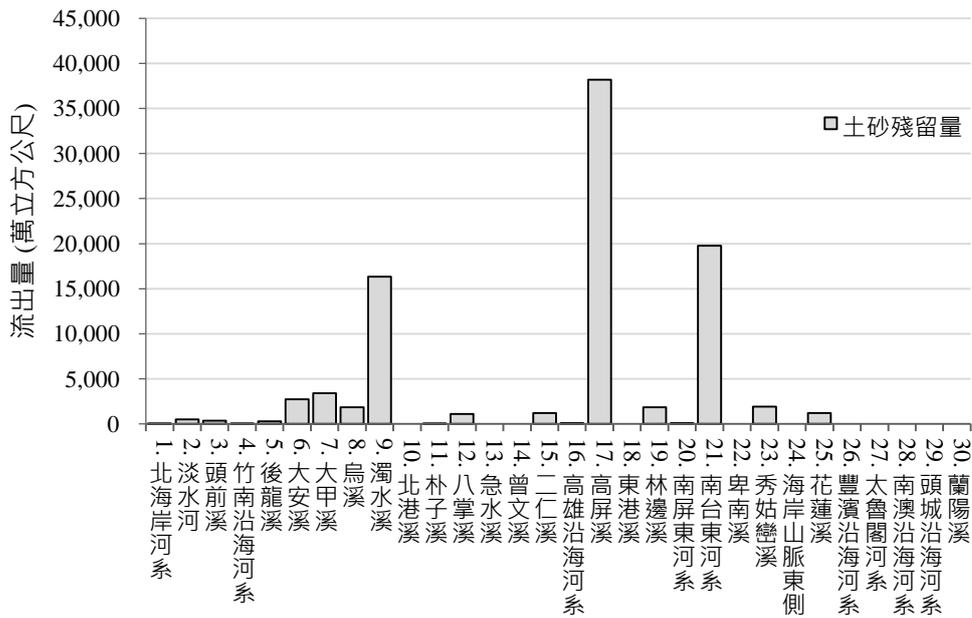


圖 4-2-13 各流域土砂殘留量分析結果



表 4-2-8 各事業區土砂殘留量分析結果

事業區	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	莫拉克土砂殘留量	莫拉克颱風土砂殘留比 (%)
1.文山	0	0	0	0	0	0	0
2.烏來	0	0	0	0	0	0	0
3.大溪	0	396	504	617	565	312	77
4.竹東	32	289	357	371	365	246	95
5.南庄	0	68	84	83	35	0	0
6.大湖	10	136	164	202	197	114	86
7.大安溪	322	1,373	2,072	2,704	2,630	952	85
8.八仙山	1,149	2,145	2,409	2,847	2,643	647	60
9.大甲溪	638	896	1,211	1,674	1,595	115	38
10.濁水溪	2,453	1,307	1,398	2,212	1,595	0	0
11.埔里	896	1,211	1,171	1,229	1,046	16	4
12.丹大	3,801	1,443	2,428	2,997	2,079	0	0
13.巒大	3,440	1,584	2,507	3,024	2,194	0	0
14.阿里山	15,887	11,483	11,517	11,567	10,614	0	0
15.玉山	0	3,235	3,833	4,456	3,550	1,345	32
16.大埔	0	1,229	1,370	1,628	1,369	864	12
17.玉井	0	0	0	63	0	0	0
18.旗山	0	33,801	32,992	30,613	25,663	23,415	60
19.荖濃溪	0	5,463	5,979	6,117	5,070	3,275	50
20.屏東	0	5,274	4,990	6,232	5,182	3,082	49
21.潮州	0	2,263	2,046	2,430	2,051	1,277	46
22.恒春	0	0	0	0	0	0	0
23.大武	0	23,554	22,226	24,326	23,126	20,083	78
24.台東	0	374	0	0	0	0	0
25.延平	32	1,141	1,239	109	0	0	0
26.關山	0	245	0	0	0	0	0
27.成功	43	65	63	164	128	0	0
28.玉里	162	566	575	757	681	162	36
29.秀姑巒	482	831	995	1,382	1,203	0	0
30.林田山	476	827	891	911	560	0	0
31.木瓜山	479	578	614	736	552	0	0
32.立霧溪	0	0	0	602	0	0	0
33.和平	417	889	710	0	0	0	0
34.南澳	28	232	231	362	29	0	0
35.太平山	0	0	0	523	0	0	0
36.羅東	122	250	265	449	442	104	72
37.宜蘭	0	0	0	0	0	0	0
合計	30,869	103,147	104,842	111,391	95,166	56,010	48

備註：單位為萬立方公尺；莫拉克颱風土砂殘留比為
 $(98 \text{ 年新增崩塌量} - \text{莫拉克颱風後土砂流出量}) / 98 \text{ 年新增崩塌量}$ 。





表 4-2-9 各流域土砂殘留量分析結果

流域	97 年	98 年	99 年	100 年	101 年	莫拉克颱風 土砂殘留比 (%)
1.北海岸河系	0	0	0	0	0	0
2.淡水河	23	390	455	570	517	53
3.頭前溪	32	290	357	371	365	95
4.竹南沿海河系	0	68	84	83	34	0
5.後龍溪	50	189	218	291	286	88
6.大安溪	415	1,453	2,163	2,832	2,756	85
7.大甲溪	1,364	2,103	2,702	3,509	3,413	69
8.烏溪	1,228	2,101	2,043	2,179	1,841	33
9.濁水溪	25,700	15,528	17,619	19,586	16,352	0
10.北港溪	0	0	0	0	0	0
11.朴子溪	0	30	27	26	20	57
12.八掌溪	0	1,296	1,256	1,300	1,118	70
13.急水溪	0	21	10	5	0	0
14.曾文溪	0	0	0	269	0	0
15.二仁溪	0	1,607	1,547	1,423	1,209	65
16.高雄沿海河系	0	92	92	100	99	95
17.高屏溪	0	46,110	46,177	45,914	38,179	55
18.東港溪	0	5	0	0	0	0
19.林邊溪	0	1,961	1,805	2,145	1,857	51
20.南屏東河系	0	300	213	250	87	0
21.南台東河系	0	23,934	22,017	21,342	19,784	60
22.卑南溪	0	1,392	1,240	0	0	0
23.秀姑巒溪	667	1,441	1,609	2,172	1,936	18
24.海岸山脈東側	1	5	0	0	0	0
25.花蓮溪	955	1,434	1,553	1,727	1,215	0
26.豐濱沿海河系	0	0	0	0	0	0
27.太魯閣河系	0	0	0	579	0	0
28.南澳沿海河系	445	1,111	933	0	0	0
29.頭城沿海河系	0	0	0	0	0	0
30.蘭陽溪	0	0	0	705	0	0
合計	30,869	103,147	104,842	111,391	95,166	48

備註：單位為萬立方公尺；莫拉克颱風土砂殘留比為
(98 年新增崩塌量 - 莫拉克颱風後土砂流出量) / 98 年新增崩塌量。





4-3 降雨量與土砂流出量之關係

河川的土砂流出量係受控於其上游集水區的地文與降雨狀況。集水區的邊坡的高程、坡度、崩塌、河川密度等等的地文特徵不僅會影響降雨-逕流的特性，也會影響邊坡土砂供應量的多寡，集水區地文特性對於河川的土砂流出量，則較屬影響於靜態的物理特性，影響集水區長期的河川土砂流出量。而降雨則是直接影響河川土砂流出量直接的驅動力，當天氣晴朗無雨時，河川流量較低，河川泥砂相對較少，則河川土砂流出量則明顯較低；當豪雨或颱風來臨時，河川流量快速上升，並且水中泥砂也會因流速增加或新的料源供應，導致河川土砂流出量隨之增加，因此，降雨則驅動短期或事件型(event-based)的河川土砂流出量。

本計畫分別考慮流域的地文和水文因子，分析地文因子和年平均(97-101年)土砂流出量的關係，並分析各降雨事件的雨量對於土砂流出量的關係，提供管理單位簡易的土砂流出量推估工具。以下針對各因子計算方法和檢定結果說明：

4-3-1 流出量和地文因子的關係

過去許多學者藉由地形計測(morphometry)將地景形貌加以量化方式，藉此可比對不同的地形特徵、構造活動度，以及河川水文和輸砂的特性(Price et al., 2001; Keller and Pinter, 2002; 孫稜翔和蔡衡，2008)。目前已發明或發現不少有用的指標，例如，面積高度曲線(hypsometric curve)、面積高度積分(hypsometric integral) (Strahler, 1952)、水系密度(Simoni et al., 2003; Booth-Rea et al., 2004)、以及細長比(Delcaillau et al., 2006)等，本計畫使用的地文因子係參考 Price et al (2001)使用的各項地文因子，以及本計畫產出之崩塌潛勢和崩塌量等，各地文因子說明和計算方式詳表 4-3-1。



表 4-3-1 使用的地文參數說明

類別	地文因子	原文	縮寫	說明
高程	高程最大值	Basin elevation, maximum	E _{max}	DEM 數值最大值
	高程平均值	Basin elevation, mean	E _{mean}	DEM 數值平均值
	高程中位數	Basin elevation, median	E _{mid}	DEM 數值中位數
	高程最小值	Basin elevation, minimum	E _{min}	DEM 數值最小值
	高程標準差	Basin elevation, SD	E _{std}	DEM 數值標準差
	高程相對起伏	Basin relative relief	ER _{ref}	高程起伏/集水區周長
	高程起伏	Basin relief	E _{ref}	DEM 數值最大與最小的差
	面積高度指數 1	Hypsometric index 1	HypI _{x1}	25~75% 高程積分的差
	面積高度指數 2	Hypsometric index 2	HypI _{x2}	面積高度指數 1/面積
	面積高度指數 3	Hypsometric index 3	HypI _{x3}	面積高度指數 1 除 50~75% 的差
	面積高度積分	Hypsometric integral	HypIntegra	測高曲線的積分
	面積高度峰值	Hypsometric kurtosis	Hypkurt	測高曲線分布的峰值
	面積高度偏態	Hypsometric skewness	kurtSk	測高曲線分布的偏態
	地形指數平均值	Topographic index, mean	TI _{mean}	$\ln(\tan(\text{slope})/CA)$ 的平均值
地形指數標準差	Topographic index, SD	TI _{std}	$\ln(\tan(\text{slope})/CA)$ 的標準差	
流域形狀	流域面積	Basin area	B _{area}	集水區面積
	流域之圓比值	Basin circularity ratio	B _{cirr}	$4\pi \times \text{流域面積} / (\text{流域周長})^2$
	流域緊密比	Basin compactness ratio	B _{com}	$\text{流域周長} / 2(\pi \times \text{流域面積})^{0.5}$
	流域細長比	Basin elongation	B _{elong}	$2(\text{流域周長} / \pi)^{0.5} / \text{流域長度}$
	流域長度	Basin length	B _{length}	流域出口到分水嶺距離
	流域長度當量	Basin length, equivalent	B _{lengthE}	$(\text{周長} + (\text{周長}^2 - 16 \times \text{面積})^{0.5}) / 4$
	流域相對長度	Basin length, relative	B _{lengthR}	$\text{流域周長} / (\text{流域面積})^{0.5}$
	流域周長	Basin perimeter	B _{perimeter}	流域邊界之長度
	流域起伏比	Basin relief ratio	B _{reliefR}	高程起伏/流域長度×1000
	流域崎嶇度 1	Basin ruggedness 1	B _{ruggedne1}	高程起伏/(流域面積) ^{0.5}
	流域崎嶇度 2	Basin ruggedness 2	B _{ruggedne2}	高程起伏×水系密度
	流域形狀指數	Basin shape	B _{shape}	$\text{流域面積} / (\text{流域長度})^2$
	流域厚度	Basin thickness	B _{thickness}	網格面積×高程總和/流域面積
坡向	東向坡比例	Aspect, east facing	AspE	坡向 45°~135° 的比例
	北向坡比例	Aspect, north facing	AspN	坡向 315°~45° 的比例
	南向坡比例	Aspect, south facing	AspS	坡向 135°~225° 的比例
	西向坡比例	Aspect, west facing	AspW	坡向 225°~315° 的比例
	坡向餘弦	Cos(aspect)	AspCos	流域坡向餘弦的平均值
	坡向正弦	Sin(aspect)	AspSin	流域坡向正弦的平均值
	坡度	坡度大於 2% 比例	Slope, basin area <2%	Sa02
坡度大於 5% 比例		Slope, basin area <5%	Sa05	坡度數值大於 5% 比例
坡度大於 10% 比例		Slope, basin area <10%	Sa10	坡度數值大於 10% 比例
坡度大於 20% 比例		Slope, basin area <20%	Sa20	坡度數值大於 20% 比例
坡度峰度		Slope, kurtosis	Skur	坡度數值分布的峰度
坡度最大值		Slope, maximum	S _{max}	坡度數值的最大值
坡度平均數		Slope, mean	S _{mean}	坡度數值的平均值
坡度中位數		Slope, median	S _{mid}	坡度數值的中位數
坡度偏態		Slope, skewness	S _{ske}	坡度數值分布的偏態
坡度標準差		Slope, SD	S _{std}	坡度數值的標準差
水系	水系密度	Drainage density	DrinageD	河流總長/流域面積
崩塌	潛勢大於 0.5 比例	Susceptibility, area >0.5	P05	100 年重現期降雨下崩塌潛勢值大於 0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9 的比例。
	潛勢大於 0.6 比例	Susceptibility, area >0.6	P06	
	潛勢大於 0.7 比例	Susceptibility, area >0.7	P07	
	潛勢大於 0.8 比例	Susceptibility, area >0.8	P08	
	潛勢大於 0.9 比例	Susceptibility, area >0.9	P09	
	崩塌量	Unit landslide volume per	Pls	97~101 年單位面積崩塌量

備註：修改自 Price et al. (2001)



將上述的各地文因子分別與所有集水區土砂流出量(圖 4-2-6)分別和進行相關性分析，相關性繪圖結果詳圖 4-3-1。為了檢定各地文因子和流出量相關性是否達到顯著水準，本計畫採用皮爾森相關係數 (Pearson correlation coefficient)和 Kendall 等級相關(Kendall's coefficient of rank correlation)檢定其相關性是否達到顯著水準。



圖 4-3-1 流出量和地文因子之相關性分析繪圖

表 4-3-2 集水區地文因子與流出量相關性檢定結果

類別	地文因子	相關性		類別	地文因子	相關性	
		Pearson	Kendull's			Pearson	Kendull's
高程	高程最大值	0.151	0.110	流域 形狀	流域形狀指數	0.006	0.234**
	高程平均值	0.085	0.063		流域厚度	0.110	0.152
	高程中位數	0.076	0.062	坡向	東向坡比例	-0.172	-0.060
	高程最小值	0.029	-0.147		北向坡比例	-0.011	-0.150
	高程標準差	0.102	0.098		南向坡比例	0.066	0.176*
	高程相對起伏	-0.118	-0.089		西向坡比例	0.152	0.057
	高程起伏	0.156	0.124	坡度	坡向餘弦	-0.046	-0.043
	面積高度指數 1	-0.167	-0.019		坡向正弦	-0.007	0.024
	面積高度指數 2	-0.193	-0.150		大於 2% 比例	-0.044	-0.044
	面積高度指數 3	-0.047	-0.016		大於 5% 比例	-0.024	-0.046
	面積高度積分	-0.075	-0.017		大於 10% 比例	-0.005	-0.050
	面積高度峰值	0.216	0.080		大於 20% 比例	0.005	-0.033
	面積高度偏態	0.129	0.014		坡度峰度	0.115	0.105
	地形指數平均值	-0.050	-0.035		坡度最大值	0.164	0.116
地形指數準差	-0.007	-0.051	坡度平均數		0.041	0.055	
			坡度中位數		0.026	0.049	
流域 形狀	集水區面積	0.169	0.161	水系	坡度偏態	0.205	0.147
	流域之圓比值	-0.016	-0.104		坡度標準差	0.141	0.123
	流域緊密度	0.002	0.104	崩塌 潛勢	水系密度	0.009	0.022
	流域細長比	0.094	0.234**		大於 0.5 比例	-0.001	-0.007
	流域長度	0.182	0.111		大於 0.6 比例	0.010	0.019
	流域長度當量	0.169	0.180*		大於 0.7 比例	0.022	0.037
	流域相對長度	-0.249*	-0.234**		大於 0.8 比例	0.045	0.057
	流域周長	0.189	0.173*		大於 0.9 比例	0.091	0.066
	流域起伏比	-0.010	-0.029		崩塌量	0.323**	0.426**
	流域崎嶇度 1	-0.136	-0.085				
流域崎嶇度 2	-0.134	-0.095					

備註：相關性分別為 Pearson 和 Kendull's 相關性；

*和**表示達到 95 % 和 99% 信心水準。

皮爾森相關係數檢定結果僅流域相對長度(BlengthR)，以及崩塌量(Pls)和土砂流出量相關性達到 95 % 信心水準(圖 4-3-2)，相關係數為 -0.249，表示當集水區的形狀越接近圓形時，該河川的土砂流出量越大；反之，當集水區形狀越接近長條形時，則土砂流出量越小。推測原因可能是因為圓形集水區集流時間較短，容易造成較大的洪峰流量，導致河川具又較高的輸砂能力。此外，崩塌量也和土砂流出量相關，

因崩塌量為台灣山區河川輸砂的主要來源(Chen et al., 2013)，故崩塌量越多的集水區，其河川土砂流出量也就越大。而其它地文因子皆未通過相關性檢定。

Kendall's 等級相關分析結果為流域細長比(Belong)、流域相對長度(BlengthR)、流域長度當量(BlengthE)、流域形狀指數(Bshape)、南向坡比例(AspS)、以及崩塌量(Pls) 相關性達到 95 % 信心水準(圖 4-3-2)，其中，流域細長比、流域相對長度、流域長度當量和流域形狀指數皆表示集水區的圓度，也說明集水區形狀影響土砂流出量，而四個變數高度相關，故選取流域相對長度作為分析的變數。此外，南向坡比例越多則表示該流域可能位於南部地區，一般來說，台灣南部地區的河川輸砂量比台灣北部高約 1.5~6 倍(Dadson et al., 2003)，使得南向坡比例和流出量呈顯著相關。

根據上述分析結果，將流域相對長度、崩塌量與南向坡比例的地文因子的地文因子和單位面積土砂流出量進行複迴歸分析，結果詳表 4-3-3。因此，可以得到單位面積土砂流出量的計算式如下：

$$Q_s = 7.066 - 7.914 \times B_{lengthR} + 15.012 \times Asp_s + 0.1656 \times P_{ls}$$

其中， Q_s 為單位面積土砂流出量[萬 $m^3/km^2 \cdot 年$]； $R_{lengthR}$ 為流域相對長度[]； Asp_s 南向坡的比例[]； P_{ls} 為單位面積新增崩塌量[萬 $m^3/km^2 \cdot 年$]。

表 4-3-3 集水區地文因子與流出量複迴歸分析結果

模式	未標準化之係數		標準化之係數	相關係數
	係數(B)	標準誤 (Std. Error)	係數(Beta)	
常數	1.413	1.823		0.366
流域相對長度	-1.583	1.106	-0.175	
南向坡比例	3.002	6.810	0.052	
崩塌量	0.166	0.000	0.270	

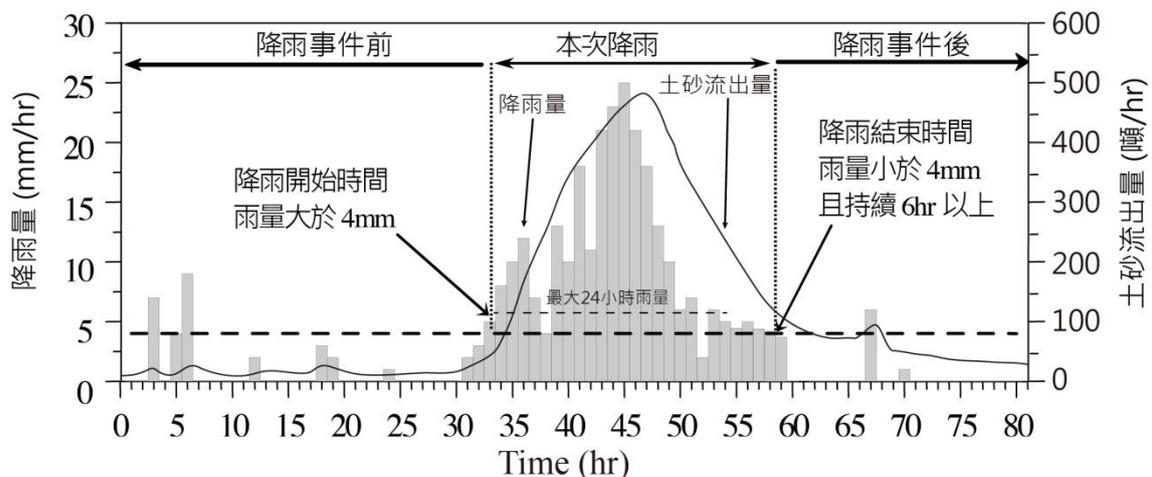
表 4-3-4 各河川輸口年平均土砂流出量計算結果

出口站名	面積 [km ²]	相對長度	南向坡比例	崩塌量 [萬 m ³ /km ²]	土砂流出量 [萬 m ³]	出口站名	面積 [km ²]	相對長度	南向坡比例	崩塌量 [萬 m ³ /km ²]	土砂流出量 [萬 m ³]	出口站名	面積 [km ²]	相對長度	南向坡比例	崩塌量 [萬 m ³ /km ²]	土砂流出量 [萬 m ³]
屈尺	636	0.14	0.23	0.02	7,397	平林	210	0.56	0.23	1.08	3,148	延平	468	0.54	0.26	3.03	7,163
霞雲	610	0.30	0.23	0.34	7,872	萬里溪橋	240	0.66	0.23	0.46	3,787	利嘉(2)	108	0.62	0.28	0.69	1,739
內灣	148	0.92	0.20	0.15	2,565	延平橋	84	0.71	0.12	0.26	1,216	知本(3)	164	0.55	0.28	1.96	2,555
北成橋	74	0.85	0.16	0.27	1,194	馬鞍溪橋	134	0.59	0.18	0.88	1,933	潮州	157	0.44	0.24	0.10	2,208
清水大橋	37	0.79	0.19	0.56	598	寶石橋	1,565	0.38	0.26	1.39	21,734	太麻里溪	195	0.43	0.25	29.02	2,786
蘭陽大橋	250	0.86	0.22	0.34	4,285	龍門橋	362	0.66	0.23	4.15	5,696	新埤	311	0.52	0.29	3.28	4,809
上坪	220	0.70	0.20	0.43	3,450	內茅埔	382	0.65	0.18	4.56	5,675	金崙溪	115	0.48	0.27	9.07	1,707
永興橋	143	0.71	0.15	0.27	2,130	紅葉溪	46	0.76	0.24	0.42	770	大竹溪	125	0.50	0.30	3.06	1,947
南澳橋	168	0.55	0.24	0.53	2,527	觸口	81	0.70	0.26	5.27	1,326	十文溪	68	0.59	0.26	0.84	1,064
牛鬥(3)	453	0.56	0.21	1.00	6,646	立山	250	0.56	0.21	0.49	3,668	大武溪	103	0.57	0.31	3.02	1,670
打鹿坑	244	1.25	0.24	0.25	5,028	太平溪	20	1.34	0.31	0.08	438	安朔溪	49	0.73	0.27	0.22	835
澳尾橋	137	0.52	0.21	0.13	1,963	卓樂橋	448	0.66	0.24	1.00	7,100	達仁溪	13	0.89	0.26	0.01	227
大甲溪	964	0.20	0.25	1.00	12,009	里嶺大橋	2,869	0.22	0.28	6.34	37,077	枋山溪	124	0.65	0.31	0.69	2,085
義里	628	0.48	0.22	1.13	8,942	新營	226	0.83	0.24	0.13	3,885	楓港溪	40	0.81	0.28	0.13	703
希能埔	536	0.70	0.25	1.17	8,770	曾文	484	0.40	0.25	4.09	6,740	港仔溪	16	0.99	0.28	0.00	300
良里溪溪口	43	0.73	0.25	1.11	714	清水溪	167	0.49	0.20	0.23	2,346	石門橋	79	0.87	0.29	0.11	1,446
綠水	44	0.60	0.29	0.54	708	秀巒溪	18	1.44	0.26	0.05	392	九棚	19	0.93	0.23	0.01	345
立霧溪	543	0.83	0.26	1.72	9,519	龍泉溪	21	0.98	0.31	0.19	412	四重溪	41	1.09	0.27	0.08	804
烏溪橋	1,050	0.29	0.25	0.75	13,772	新中(1)	431	0.38	0.25	2.03	5,980	網紗溪	12	0.92	0.22	0.07	204
三棧溪	114	0.77	0.24	1.06	1,911	新市	85	1.01	0.25	0.00	1,591	滿州	61	0.77	0.28	0.14	1,066
美崙溪	30	0.75	0.26	0.17	504	鹿寮溪	109	0.53	0.24	0.72	1,618	新武呂(4)	628	0.46	0.28	1.72	9,335
仁壽橋	420	0.69	0.24	0.67	6,791	南雄橋	176	0.56	0.24	4.18	2,657						
荖溪	44	1.24	0.21	0.10	878	太平溪 2	13	0.78	0.36	0.09	245						

4-3-2 流出量和降雨因子的關係

降雨則驅動短期或事件型(event-based)的河川土砂流出量重要因素，本計畫採用各降雨事件最大 24 小時雨量做作為分析的基礎，並藉由迴歸分析以建立各集水區雨量和土砂流出量的關係。

雨量資料則是蒐集各中央氣象局 97 年至 101 年時雨量資料，並以徐昇氏法加權計算各河川上游集水區平均雨量，降雨事件的定義參考土石流降雨警戒值的定義(水土保持局，2003)，降雨時間序列中以時雨量大於 4 mm 處為本次降雨開始時刻(圖 4-3-2)，以時雨量連續 6 小時均小於 4 mm 處為該次降雨結束時刻)，然後將降雨時間序列分割成許多的降雨場次，再分析出每場降雨引發土砂流出量的最大 24 小時雨量(R_{m24})及期間的土砂流出量。將降雨事件分割後，各集水區分別有 131~413 場降雨事件，平均為 251 場降雨事件。



修改自：水土保持局等(2003)

圖 4-3-2 降雨事件分割示意圖

將各場降雨事件的最大 24 小時雨量和土砂流出量進行迴歸分析，得到土砂流出量推估的方程式(圖 4-3-3)，各集水區的判定係數(R^2)介於 0.21~0.92(表 4-3-5)，超過一半集水區的方程式判定係數大於 0.7；約有 80%的判定係數大於 0.5，顯示率定方程式能有效概估颱風豪雨事件之土砂流出量。

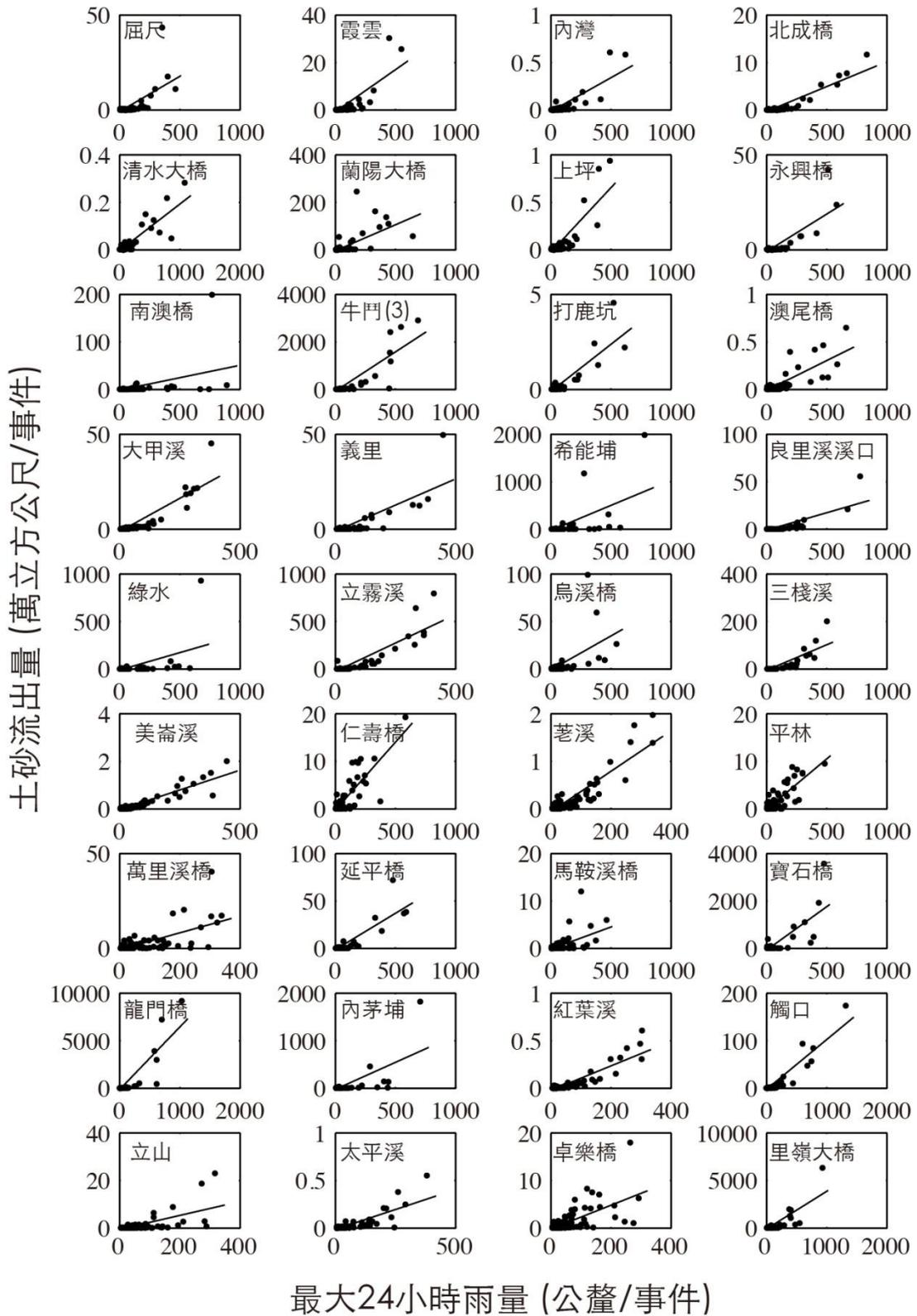


圖 4-3-3 土砂流出量與降雨量關繪圖

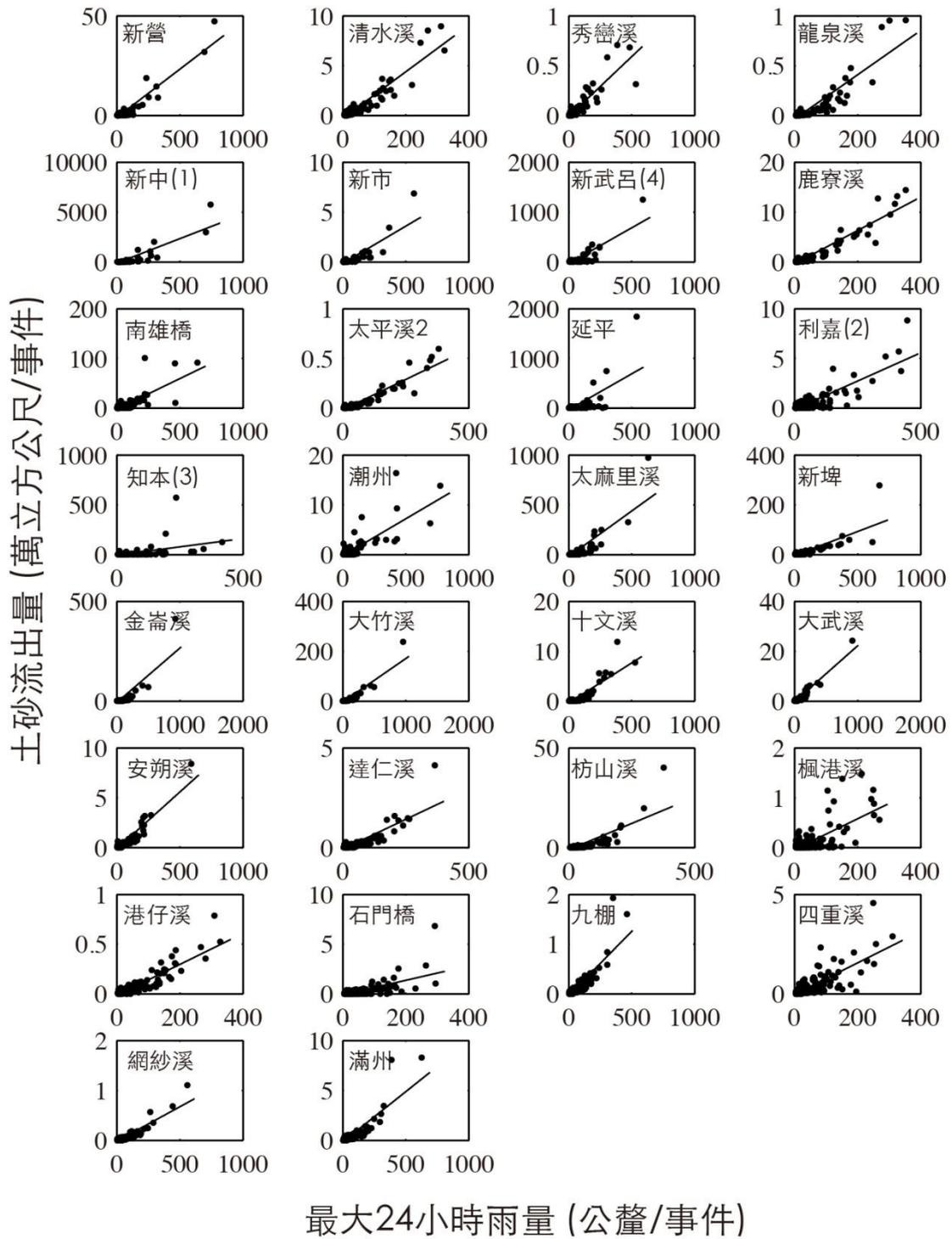


圖 4-3-3 土砂流出量與降雨量關係圖(續)

表 4-3-5 河川土砂流出量和最大 24 小時雨量關係清單

出口站名	事件 次數	Qs 方程式 [萬立方公尺]	R ²	出口站名	事件 次數	Qs 方程式 [萬立方公尺]	R ²
屈尺	266	0.0370R _{m24} - 0.8867	0.47	太平溪	173	0.0008 R _{m24} - 0.0154	0.68
霞雲	249	0.0354 R _{m24} - 0.7886	0.66	卓樂橋	191	0.0250 R _{m24} - 0.2030	0.46
內灣	312	0.0007 R _{m24} - 0.0155	0.7	里嶺大橋	221	3.9586 R _{m24} - 109.24	0.67
北成橋	252	0.0105 R _{m24} - 0.3317	0.85	新營	294	0.0485 R _{m24} - 1.0838	0.87
清水大橋	257	0.0002 R _{m24} - 0.0042	0.78	清水溪	184	0.0234 R _{m24} - 0.2952	0.89
蘭陽大橋	237	0.2190 R _{m24} - 4.4089	0.43	秀巒溪	221	0.0012 R _{m24} - 0.0118	0.8
上坪	271	0.0014 R _{m24} - 0.0258	0.73	龍泉溪	199	0.0022 R _{m24} - 0.0378	0.81
永興橋	295	0.0395 R _{m24} - 0.9943	0.65	新中(1)	267	4.9065 R _{m24} - 126.71	0.75
南澳橋	248	0.0523 R _{m24} - 1.6947	0.21	新市	237	0.0075 R _{m24} - 0.1549	0.73
牛鬥(3)	224	3.3025 R _{m24} - 78.847	0.76	鹿寮溪	171	1.4324 R _{m24} - 34.551	0.72
打鹿坑	246	0.0050 R _{m24} - 0.1097	0.75	南雄橋	237	0.0336 R _{m24} - 0.4243	0.9
澳尾橋	227	0.0006 R _{m24} - 0.0120	0.67	太平溪 2	256	0.1229 R _{m24} - 2.1844	0.62
大甲溪	217	0.0700 R _{m24} - 1.3001	0.81	延平	281	0.0012 R _{m24} - 0.0166	0.89
義里	234	0.0550 R _{m24} - 1.1091	0.66	利嘉(2)	251	1.4444 R _{m24} - 34.971	0.46
希能埔	233	1.0536 R _{m24} - 26.629	0.38	知本(3)	257	0.0114 R _{m24} - 0.1257	0.73
良里溪溪口	244	0.0367 R _{m24} - 1.0870	0.63	潮州	244	0.3320 R _{m24} - 5.6441	0.21
綠水	174	0.3660 R _{m24} - 11.344	0.28	太麻里溪	299	0.0149 R _{m24} - 0.2601	0.65
立霧溪	131	1.1949 R _{m24} - 25.766	0.79	新埤	260	0.9138 R _{m24} - 21.081	0.71
烏溪橋	240	0.0716 R _{m24} - 1.0329	0.37	金崙溪	265	0.1927 R _{m24} - 4.0973	0.64
三棧溪	162	0.2152 R _{m24} - 5.9102	0.7	大竹溪	257	0.2733 R _{m24} - 7.9276	0.71
美崙溪	268	0.0033 R _{m24} - 0.0428	0.87	十文溪	258	0.1749 R _{m24} - 4.4442	0.82
仁壽橋	175	0.0286 R _{m24} - 0.2948	0.71	大武溪	231	0.0160 R _{m24} - 0.3909	0.76
荖溪	193	0.0043 R _{m24} - 0.0624	0.82	安朔溪	257	0.0225 R _{m24} - 0.3309	0.92
平林	217	0.0212 R _{m24} - 0.1408	0.72	達仁溪	300	0.0114 R _{m24} - 0.1391	0.88
萬里溪橋	218	0.0441 R _{m24} - 0.6418	0.48	枋山溪	308	0.0060 R _{m24} - 0.0821	0.76
延平橋	266	0.0768 R _{m24} - 1.4471	0.76	楓港溪	239	0.0527 R _{m24} - 1.1176	0.65
馬鞍溪橋	413	0.0093 R _{m24} - 0.1466	0.34	港仔溪	320	0.0031 R _{m24} - 0.0398	0.50
寶石橋	230	3.6682 R _{m24} - 78.188	0.62	石門橋	349	0.0016 R _{m24} - 0.0163	0.83
龍門橋	286	6.5768 R _{m24} - 159.36	0.76	九棚	325	0.0073 R _{m24} - 0.1028	0.46
內茅埔	244	1.1366 R _{m24} - 25.548	0.47	四重溪	340	0.0026 R _{m24} - 0.0389	0.75
紅葉溪	197	0.0013 R _{m24} - 0.0233	0.81	網紗溪	267	0.0080 R _{m24} - 0.0385	0.62
觸口	346	0.1048 R _{m24} - 2.7009	0.86	滿州	315	0.0014 R _{m24} - 0.0210	0.83
立山	182	0.0292 R _{m24} - 0.5558	0.43	新武呂(4)	351	0.0101 R _{m24} - 0.1740	0.76

備註：R_{m24} 為降雨事件最大 24 小時雨量[mm]。

當 Qs 小於零時，則土砂流出量則視為零。

本節根據土砂流出量、降雨量、崩塌量和集水區地文因子之統計分析，分別建立推估長期和事件型的土砂流出量經驗式，計算的方程式詳表 4-3-4 和表 4-3-5，方便管理單位概估各河川之土砂流出量。

然而，各河川的土砂流出量不管在時間或空間的變異仍然相當大，且各河川上游集水區在降雨影響下，可能會產生許多新增崩塌。因此，若利用簡單的迴歸方程式推算未來可能的流出量與殘留量，將會產生極大的誤差。故本計畫建議未來仍須根據歷年衛星影像判釋與河川輸砂量的觀測資料，滾動式的檢討各年的新增崩塌量、土砂流出量與殘留量，較能掌控國有林地土砂殘留與流出的情形。

第五章 國有林殘留土砂二次災害潛勢評估

本計畫國有林地內保全對象之災害潛勢評估，係指受殘留土砂二次災害(崩塌及土石流)影響下游國有林班地內保全對象之災害潛勢評估，欲進行保全對象災害潛勢評估之前，應先行推估集水區崩塌地土砂產生量及殘留量，並完成崩塌地殘留土砂二次災害崩塌潛勢及土石流影響範圍率定，才能進行後續保全對象災害潛勢評估及潛勢分級。其關鍵課題計有四項，分別為(1)殘留土砂二次災害崩塌潛勢及土石流影響範圍率定；(2)國有林地內保全對象之災害潛勢評估；(3)土砂二次災害與保全對象現地調查與(4)國有林殘留土砂處理策略研擬。

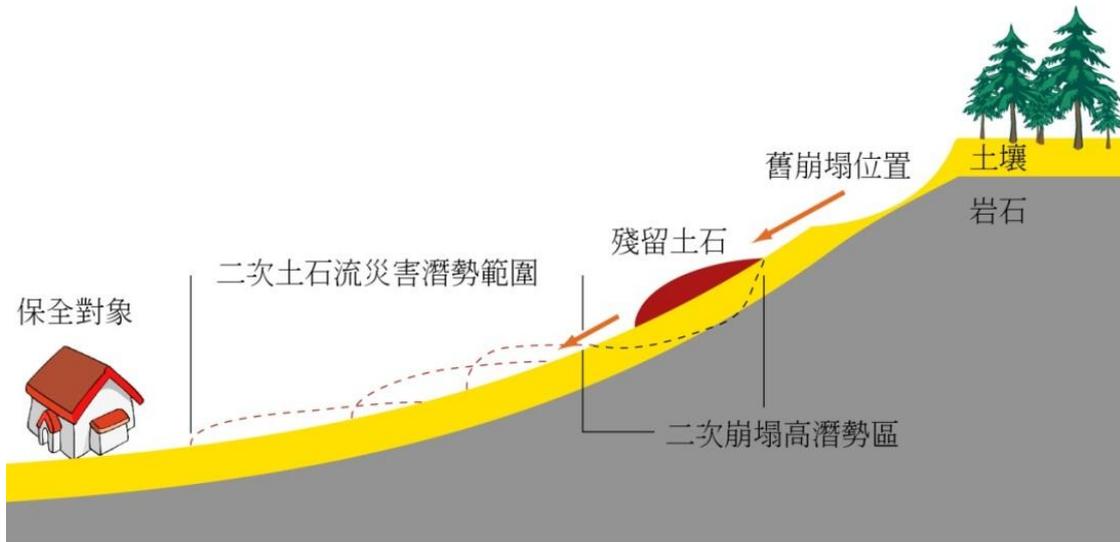
5-1 殘留土砂二次災害崩塌潛勢及土石流影響範圍率定

本計畫根據 4-1-1 節建立之崩塌體積與面積關係式，以及第參章彙整之颱風事件前後期之事件型山崩目錄，得到個別崩塌地之土方量，再以 Debris-2D 分析土石流殘留位置 (圖 5-1-1)。接著將殘留土砂採用多元迴歸模式中的二元迴歸模式分析坡地崩塌潛勢，並將兩者模式結合已模擬二次土砂災害的影響範圍，參考 Xie et al.(2004)建議以「坡單元」(slope unit)表示坡地崩塌潛勢分級。此外，採 Debris-2D 分析殘留土砂衍生為土石流之影響範圍，結合上述坡單元崩塌潛勢分級與土石流影響範圍結果，即完成國有林坡地殘留土砂二次災害潛勢評估，進一步套疊聚落圖層即可進行保全對象災害潛勢評估。以下茲就關鍵技術內容進行說明。

5-1-1 二次土砂災害分析概念與方法概述

四集水區之逐年崩塌土砂產生、殘留及土砂流出量的分析採用 Debris-2D 進行模擬，分析的概念如圖 5-1-1 所示，當颱風豪雨誘發崩塌土砂，往下邊坡移動後，部分進入河道的土砂量，則為土石流出量；其餘的土砂因為驅動力小於等於土石流之降伏應力時，而殘

留在邊坡上，該區域之土砂總量則為土砂殘留量。當下一次颱風豪雨來臨時，新崩塌產生的土砂和殘留的土砂混和後，增加殘留土砂的驅動力，使得坡面之土砂重新分配。模擬過程中，將納入本年度新增崩塌地土砂生產量，將殘留量作為土砂料源的輸入條件進行模擬，將對土砂殘留於坡面之土砂生產、運移與流動進行較完整的描述與評估。故本計畫所定義的「二次土砂災害」係指坡面的崩塌和土石流造成的邊坡災害，而河道洪水與輸砂非本計畫分析範疇內。



資料來源：本計畫繪製

圖 5-1-1 土砂二次災害潛勢概念圖

5-1-2 土砂殘留量分布模式

根據土砂流出量評估模式回顧與探討內容，本計畫擬採用 Debris-2D 土石流數值模式，評估國有林土砂流出量與殘留量。茲就工作方法與步驟說明如下：

一、Debris-2D 土石流數值模式

Debris-2D 模式控制方程式如式 5-1 至式 5-4 所示，以求解土石流 x 軸方向之平均速度 u 、 y 軸方向之平均速度 v 及水深 h ，控制方程式為 Julien and Lan (1991) 土石流本構關係式質量與動量守恆方程式，搭

配 Von-Karman 動量積分法研發，模式分析忽略強剪層之效應。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hV_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hV_y)}{\partial y} = 0 \quad (\text{式 5-1})$$

$$\frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(uvH)}{\partial y} = -gH \cos \theta \frac{\partial B}{\partial x} - gH \cos \theta \frac{\partial H}{\partial x} + gH \sin \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\tau_0 u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (\text{式 5-2})$$

$$\frac{\partial(vH)}{\partial t} + \frac{\partial(uvH)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2H)}{\partial y} = -gH \cos \theta \frac{\partial B}{\partial y} - gH \cos \theta \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\tau_0 v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (\text{式 5-3})$$

$$\left(\frac{\partial B}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} - \tan \theta \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 > \left(\frac{\tau_0}{\rho g \cos \theta H} \right)^2 \quad (\text{式 5-4})$$

其中， t 為時間； θ 為地形坡度； ρ 為土石流密度； g 為重力； H 為流深； B 為河床地床高程； u 與 v 分別是 x 與 y 方向的深度平均速度； τ_0 為降伏應力。

二、模式地形初始條件設定

本計畫擬定土砂流出量的相關輸入資料與參數如表 5-1-1，本計畫模擬分析的範圍包括荖濃溪、旗山溪、太麻里溪和阿里山溪的四個集水區，以及阿里山鐵路沿線。由於模擬範圍廣大，本計畫擬先進行廣域的模擬，以農航所 40 公尺x40 公尺數值地形作為初始地形。此外，根據本團隊過去模擬的經驗，建物存在會阻礙土石流的流動行為，導致影響範圍的改變，因此模擬時必須考慮建物的效應。然而，農航所和內政部的數值高程模擬皆屬數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM) 為不含地表植被及人工構造物時，地球表面自然地貌起伏的數值模型，而非為地表(含建築物、植被等)之三度空間的數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)。因此，本計畫在模擬前會根據建地資料增加建物之高度，修正為數值地表模型，作為模式之地形初始條件。

表 5-1-1 土砂流出量與土砂二次災害潛勢評估參數設定

參數	說明
模擬範圍	廣域：荖濃溪、旗山溪、太麻里溪、阿里山溪與阿里山鐵路 局部：廣域模擬結果影響保全對象者。
數值地形	農航所 40 公尺×40 公尺數值地形
崩塌料源	殘留土砂：本計畫評估之新增崩塌量 二次土砂災害：土砂殘留量與崩塌潛勢
降伏應力	500 Pa

資料來源：本計畫整理

三、模式降伏應力參數設定

Debris-2D 土石流數值模式需要輸入降伏應力(yield stress)條件。Johnson and Rodine (1984)提出的力學觀念以及現地估計兩種方法可以用來估計降伏應力：(a)臨界坡度法：利用無限邊坡的觀念，使土石流停止流動之門檻剪應力為降伏應力；(b)特殊大塊石尺寸：Johnson 與 Pierson 依現場估計方法所得到之降伏應力介於 600~3,800 Pa；而 Berti 與 Genevois 兩位學者所求得的降伏應力約在 18~5,400 Pa 之間。然而，上述的方法卻僅適用於體積濃度小於 0.5 時，當體積濃度為 0.603 時則不適用。故本計畫參考 Debris-2D 建議料源降伏應力參考表 (表 5-1-2)，依據料源顆粒大小不同，分別有降伏應力建議值。根據農委會水土保持局民國 98 年土石流年報的紀錄，莫拉克颱風災區的土石流平均粒徑大多介於 5~30 cm，以 5~10 cm 的小粒徑的土石為主，故本計畫初步設定降伏應力為 500 Pa 進行模擬。

表 5-1-2 降伏應力建議值參考表

現地料源型態	降伏應力建議值 (Pa)
礫石型態料源	1,000~1,500
砂質壤土含礫石料源	700~1,000
砂質壤土含泥質型態料源	300~700
泥質型態料源	70~300

四、模式驗證

為了驗證本計畫之二次土砂災害模擬結果，本計畫藉由來吉部落和新發部落兩處場址的現場調查和地面光達量測結果，以驗證模擬的合理性(兩聚落調查與測量的方法和成果說明詳本報告書 5-3 節和 5-5 節)。

由於本計畫的二次土砂災害模式牽涉到崩塌料源推估和土石流影響範圍模擬兩部分，故分別以來吉部落之崩塌地驗證崩塌量推估之準確性，因該崩塌的土砂直接流入河道中(圖 5-1-2)，難以由野外或影像上判斷其土石流影響範圍，而較適合用於驗證崩塌量。因新發部落(圖 5-1-3)的土石流從發生、移動、堆積的過程並未延伸到野溪或主流河道上，故由災害的航照圖或現場調查，仍可觀察土石流完整的堆積形貌，適合作為土石流模式驗證的依據。

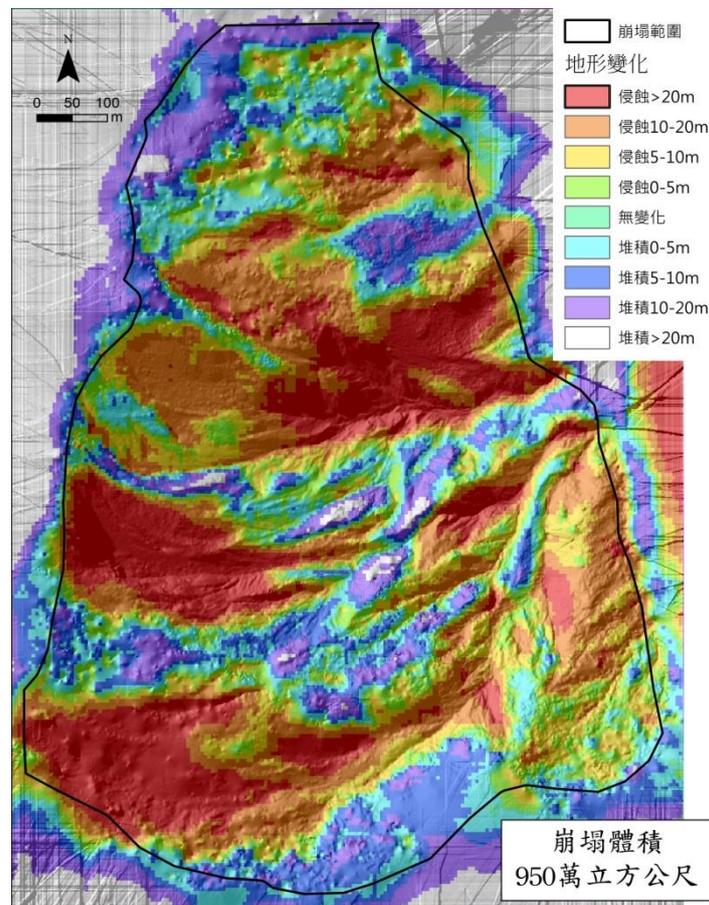


圖 5-1-2 來吉部落崩塌地形變化量測結果

來吉部落的崩塌面積約為 77.56 公頃(圖 5-1-2)，由來吉部落的地面光達量測結果與內政部五公尺數值地形相減，平均崩塌深度為 12.25 公尺，計算該崩塌體積約為 950 萬立方公尺，屬於深層崩塌(滑動面積常在 1 公頃以上、平均厚度約 5~10 m 以上、規模滑動面深度較深的山崩，滑動面常深入岩層內)。在崩塌體積推估方面，因該崩塌的地質分區屬於西部麓山帶，本計畫採用的崩塌體積-面積公式為： $V_L = 0.099 \times A_L^{1.356}$ (圖 4-1-6)，計算結果該崩塌體積為 959 萬立方公尺，與調查結果相當吻合，由該案例顯示崩塌體積-面積法能夠有效推估深層崩塌之崩塌體積，該方法對於模擬二次土砂災害之深層和淺層崩塌量，以及在於決定土石流模擬的崩塌料源具有相當可靠度。

在新發部落的案例中，土石流模擬的方法根據表 5-1-1 的局部範圍參數設定，土石流最終影響範圍的模擬結果如圖 5-1-3 所示，其土石流最終影響範圍與觀測的影響範圍相當接近。此外，根據本計畫現地調查結果，在土石流堆積扇的北側的土石流堆積厚度約 4 到 5 公尺，與模擬結果的 4 公尺堆積厚度相當吻合(圖 5-1-4A)。而在土石流堆積扇(圖 5-1-3 圖中 B 點)也發現土石流的前鋒的地形特徵(圖 5-1-4A)，與模擬結果的地形相似。顯示 Debris-2D 能夠模擬崩塌引至土石流的運移與堆積行為。

由來吉部落和新發部落兩處場址驗證說明崩塌體積-面積關係式和 Debris-2D 模擬與現地量測結果相當吻合，說明本計畫採用的二次土砂災害模擬方法能夠有效地分析在邊坡上崩塌土砂生產、運移和堆積的過程，因此，本計畫則採用該方法模擬土砂殘留量和二次土砂災害潛勢。

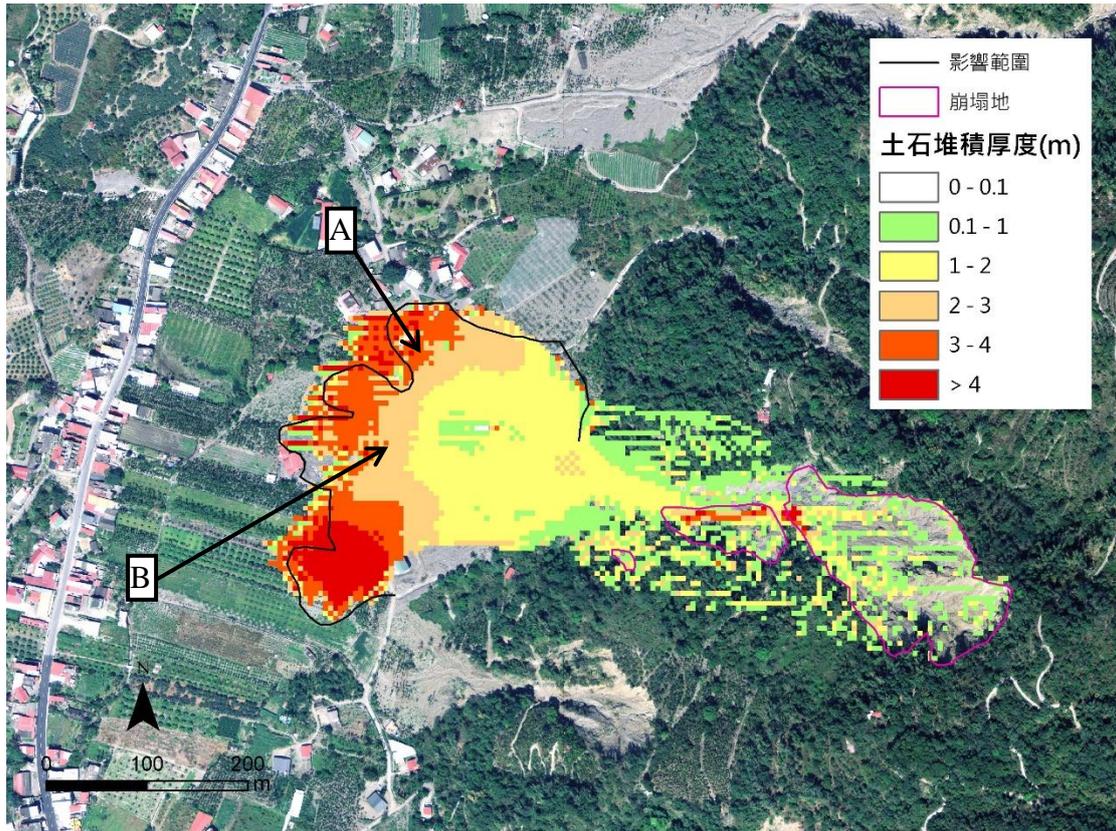


圖 5-1-3 新發里後方土石流模擬結果



A. 土石流堆積深度

B. 土石流前鋒

圖 5-1-4 新發里土石流現地調查結果

五、土砂殘留量模擬結果

根據上述模式與方法，旗山溪、荖濃溪、太麻里溪、阿里山溪四個集水區，以及阿里山鐵路的土砂殘留量模擬結果詳圖 5-1-5 至 5-1-7，模擬結果顯示在各流域皆有大量土砂殘留於坡面或野溪上，例如，荖

濃溪集水區的桃源里溪北測野溪和邊坡上仍許多土砂；太麻里溪嘉蘭村北方溪谷仍有大量殘留土砂。於第 5-2 節將根據此模擬結果評估國有林地內保全對象之災害潛勢。

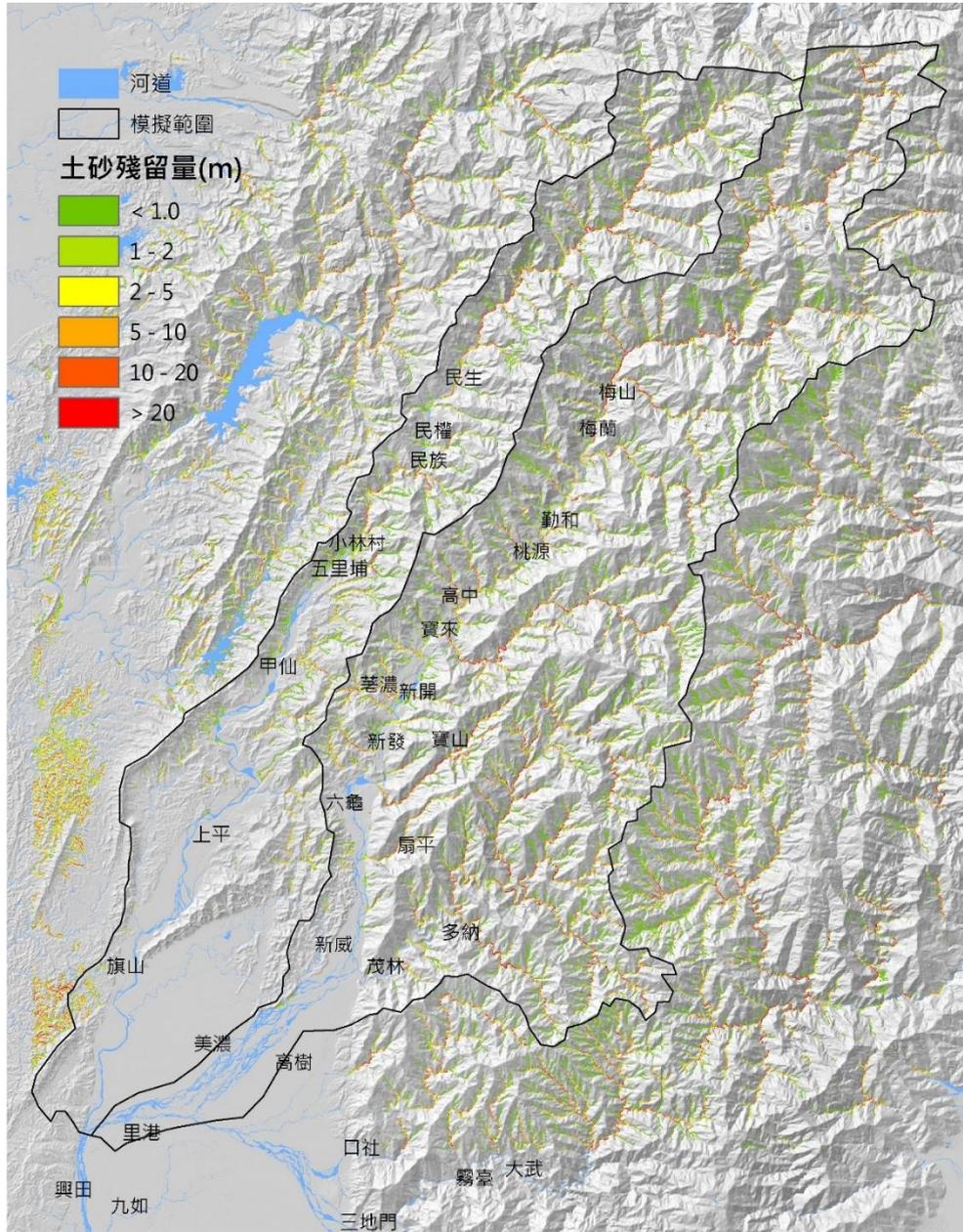


圖 5-1-5 旗山溪與荖濃溪土砂殘留量分布模擬結果

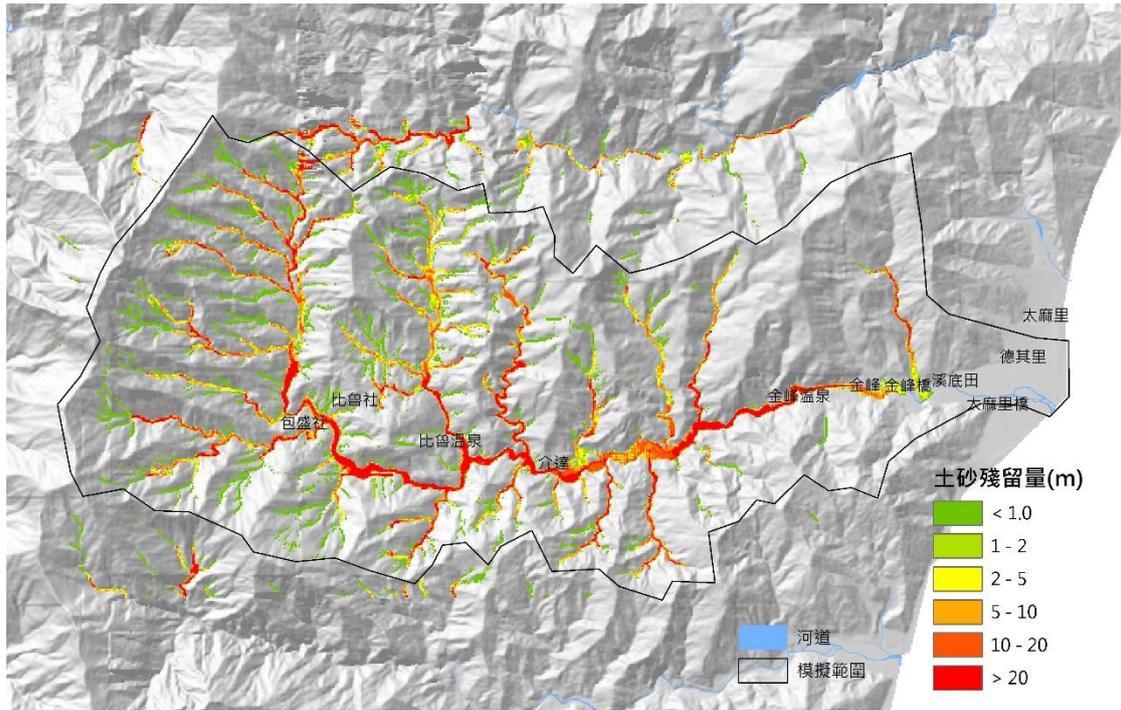


圖 5-1-6 太麻里溪土砂殘留量分布模擬結果

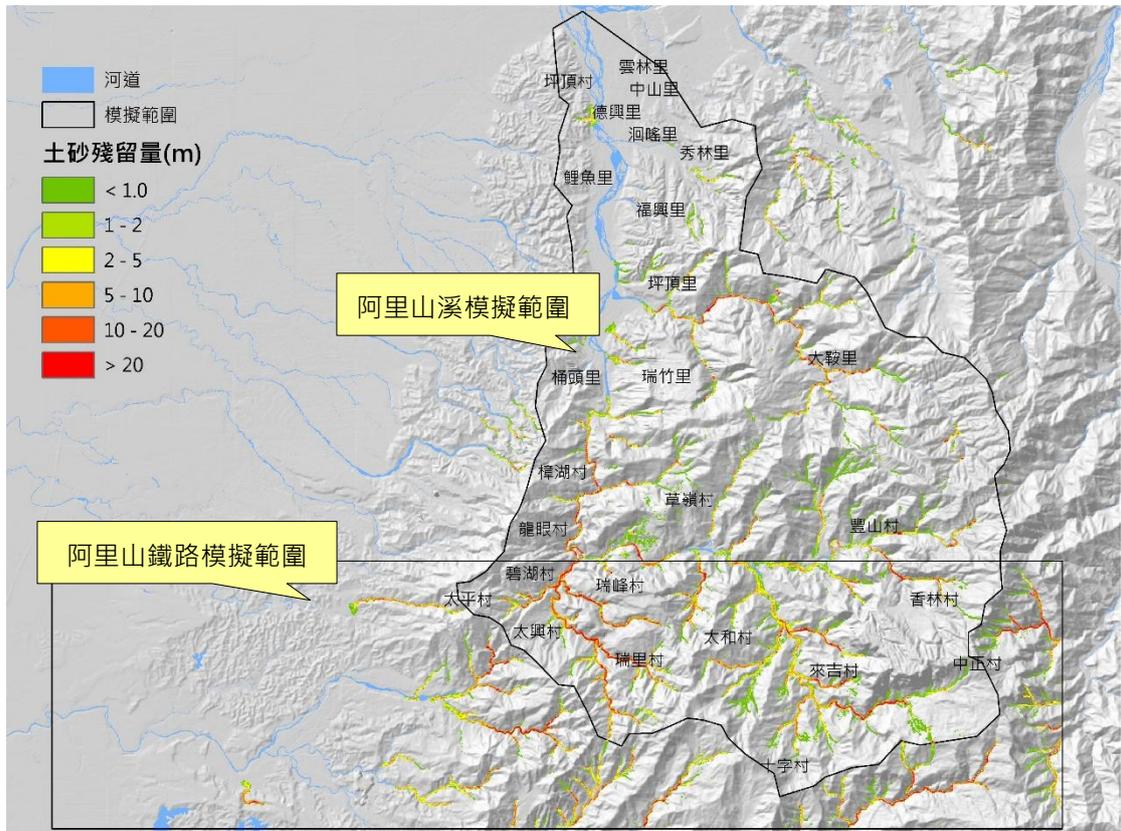


圖 5-1-7 阿里山溪與阿里山鐵路土砂殘留量分布模擬結果

5-1-3 殘留土砂二次災害土石流影響範圍模擬與率定

二次土砂災害影響範圍係根據 5-1-2 節的土砂殘留量分布模擬結果(圖 5-1-8)，將坡面上的土砂殘留量設定為土石流料源，並且利用第 5-1-2 節的崩塌災害潛勢分析，計算新增崩塌量，將新增土砂量和土砂殘留量合併後，作為 Debris-2D 土砂料源起始條件，模擬新增土砂和殘留土砂產生的二次的影響範圍。

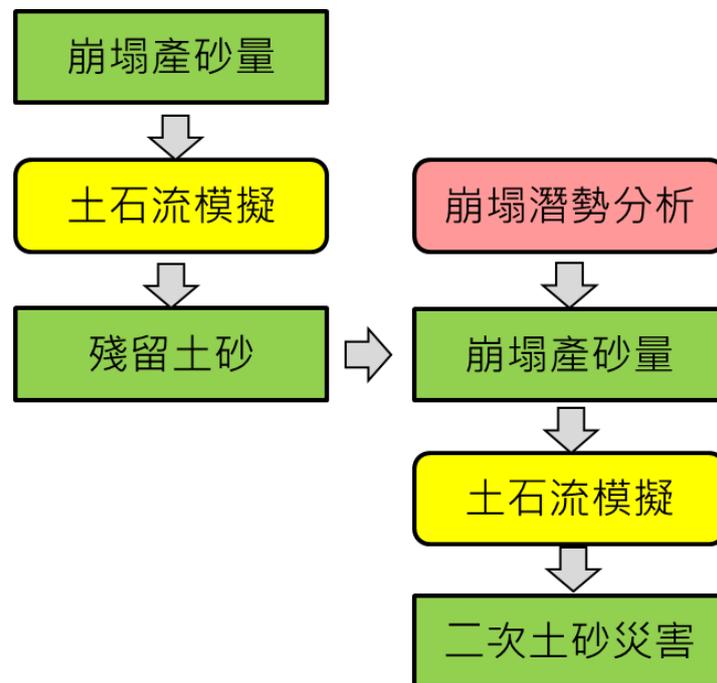


圖 5-1-8 二次土砂災害分析流程圖

一、崩塌災害潛勢分析模式

為評估新增崩塌可能帶來的土砂，本計畫採用二元迴歸模式建立崩塌預測模式(Chang et al. 2008)，二元迴歸統計分析(Menard, 2002)係將各影響崩塌因子之參數代入二元迴歸統計，計算各參數之係數而得下式：

$$\text{Logit}(y) = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots e \quad (\text{式 } 5-5)$$

其中， y 為獨立變數、 x_i 為解釋變數(地形或降雨參數)及 b_i 為迴歸係數。將計算所得之獨立變數以下式計算，可得各統計面積單元發生崩塌之機率：

$$P = \frac{\exp(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots)}{1 + \exp(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots)} \quad (\text{式 5-6})$$

其中， P 為崩塌發生機率。

二、參數選用

本計畫參考 Chang et al. (2008)和水規所(2011、2012) 崩塌災害潛勢分析選擇的因子，變數中又包含量化及類別變數(表 5-1-3)，量化變數係指可藉由數字呈現之變數，如高程、坡度、坡向(正弦、餘弦)、平均坡面曲率，距離斷層和河道的距離；類別變數則以類別為劃分，如地質分區。為加強區分坡向為東西向及南北向的差異，坡向分為正弦及餘弦參數，範圍從-1 至 1；坡面曲率可為凹或凸，凹表面會導致地下水的集中，造成較高孔隙水壓力，容易引發淺層崩塌。地形指數(topographic index)計算方法是將集水面積除以坡度再取自然對數，能夠反映地表水飽和度，雨量變數參考 Chen et al. (2013)之研究成果，最大 24 小時降雨量和崩塌侵蝕量在北部和南部地區皆高度相關，故採用最大 24 小時降雨量作為降雨變數。

表 5-1-3 二元迴歸模式變數統計量

變數	範圍	平均值
坡度[°]	0 ~ 83.0	19.5
坡向正弦 [-]	-1 ~ 1	-0.03
坡向餘弦[-]	-1 ~ 1	0.07
地形曲率[m ⁻¹]	-19.3 ~ 37.2	0.07
地形指數 []	0 ~ 18.9	6.6
距離斷層距離 [km]	0 ~ 124.6	9.0
最大 24 小時雨量 [mm]	151 ~ 1,245	412
地質(類別變數)	-	-

三、模式率定和驗證

本計畫以 98 年度之新生崩塌地做為模式率定的基礎，並且以 97 年度的新生崩塌進行模式驗證。模式參數的率定係利用 SPSS 統計軟體，將所有因子帶入二元迴歸統計中，以歷次颱風之崩塌地作為應變數 (dependent variable)，地形參數則作為獨立變數 (independent variables)，各變數 p-value 小於 0.05 視為顯著性高的原則，剔除不顯著的因子後，再重新率定各因子權重，直到所有因子都達顯著水準。

驗證方法則以修正成功機率(modified success rate, MSR)評估模式之優劣。修正成功機率則由 Huang and Kao (2006) 提出評估本模式率定之成功機率。修正成功機率係考量正確崩塌地與非崩塌地的判釋率，修正成功機率公式如下：

$$\text{修正成功機率} = (\text{正確崩塌地判釋率} + \text{非崩塌地判釋率}) / 2 \quad (\text{式 5-7})$$

模式率定結果顯示(表 5-1-4 及表 5-1-5)，高程、坡度、平均地形曲率、地形指數、距離斷層距離、距離河道距離、坡向正弦、坡向餘弦、最大 24 小時雨量和地質分區皆達到顯著水準(p-value < 0.01)。

表 5-1-4 二元迴歸統計分析結果(數值變數)

變數	係數	P-value
坡度[°]	0.054	< 0.01
坡向正弦 [-]	0.510	< 0.01
坡向餘弦[-]	-0.855	< 0.01
地形曲率[m-1]	-0.145	< 0.01
地形指數 []	0.209	< 0.01
距離斷層距離 [km]	0.010	< 0.01
最大 24 小時雨量 [mm]	0.00375	< 0.01
常數	-24.473	-

表 5-1-5 二元迴歸統計分析結果(類別變數)

地層名稱	係數	地層名稱	係數
沉積層	16.071	大桶山層等	18.545
澳底層	17.942	片麻岩	17.622
錦水頁岩	18.838	變質石灰岩	18.844
卓蘭層	20.209	黑、綠色片岩	18.875
恆春石灰岩	-1.046	黑色片岩	18.571
西村層、佳陽層	18.879	臺地堆積	16.297
瑞芳群	18.456	顛崙山層	17.136
利吉層及墾丁層	18.966	卑南山礫岩	-1.545
十八重溪層	19.594	都巒山層	18.103
畢祿山層	19.436	五指山層	15.604
三峽群	18.766	野柳群	18.470
十八重溪層	18.490	安山岩	19.484
四稜砂岩等	19.102	玄武岩	0.000
達見砂岩	18.984	基性火成岩	18.948
大港口層	19.341		

根據表 5-1-4 及表 5-1-5 的率定參數，可得到崩塌預測模式如式 5-8，將 $Logit(y)$ 的計算結果帶入式 5-6，則可計算出崩塌機率，民國 97 年與 98 年之崩塌機率計算結果詳圖 5-1-9。

$$\begin{aligned}
 Logit(y) = & 0.054[Slope] + 0.510[AspSin] - 0.855[AspCos] \\
 & - 0.145[Cur] + 0.209[Topo] + 0.01[Dis_fault] \\
 & + 0.00375[R_{m24}] + [Geo] - 24.473
 \end{aligned}
 \tag{式 5-8}$$

由圖 5-1-9 的結果顯示，崩塌預測模式確實能夠反映崩塌之空間分布，民國 98 年之崩塌地大多集中在中、南部地區，而模式預測結果也顯示此區具有較高的崩塌潛勢。民國 97 年之崩塌地(黑色)大多分布於中央山脈、雪山山脈及玉山山脈與高潛勢的崩塌位置相當吻合。

由修正成功機率評估模式成功率，以民國 98 年崩塌地進行模式率定(表 5-1-6)，非崩塌地預測成功率為 76.4%；崩塌地預測成功率為 84.4%；修正成功率為 80.4%。以民國 98 年崩塌地進行模式驗證(表 5-1-7)，非崩塌地預測成功率為 84.9%；非崩塌地預測成功率為 58.8%；修正成功率為 68.9%。故該模式成功率在可接受範圍內。

表 5-1-6 模式率定結果預測成功率

預測值 觀察值	非崩塌地 (%)	崩塌地 (%)	非崩塌地 成功率(%)	崩塌地 成功率(%)	修正成功率 (%)
非崩塌地	76.4	27.6	76.4	84.4	80.4
崩塌地	15.6	84.4			

表 5-1-7 模式驗證結果預測成功率

預測值 觀察值	非崩塌地 (%)	崩塌地 (%)	非崩塌地 成功率(%)	崩塌地 成功率(%)	修正成功率 (%)
非崩塌地	84.9	15.1	84.9	58.8	68.9
崩塌地	41.2	58.8			

四、新增崩塌與二次土砂災害模擬

為了評估研究區二次土砂災害潛勢，本計畫參考經濟部中央地質調查所「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置」，採用 100 年重現期降雨的情境(圖 5-1-10)，評估新生崩塌之發生位置和崩塌量。

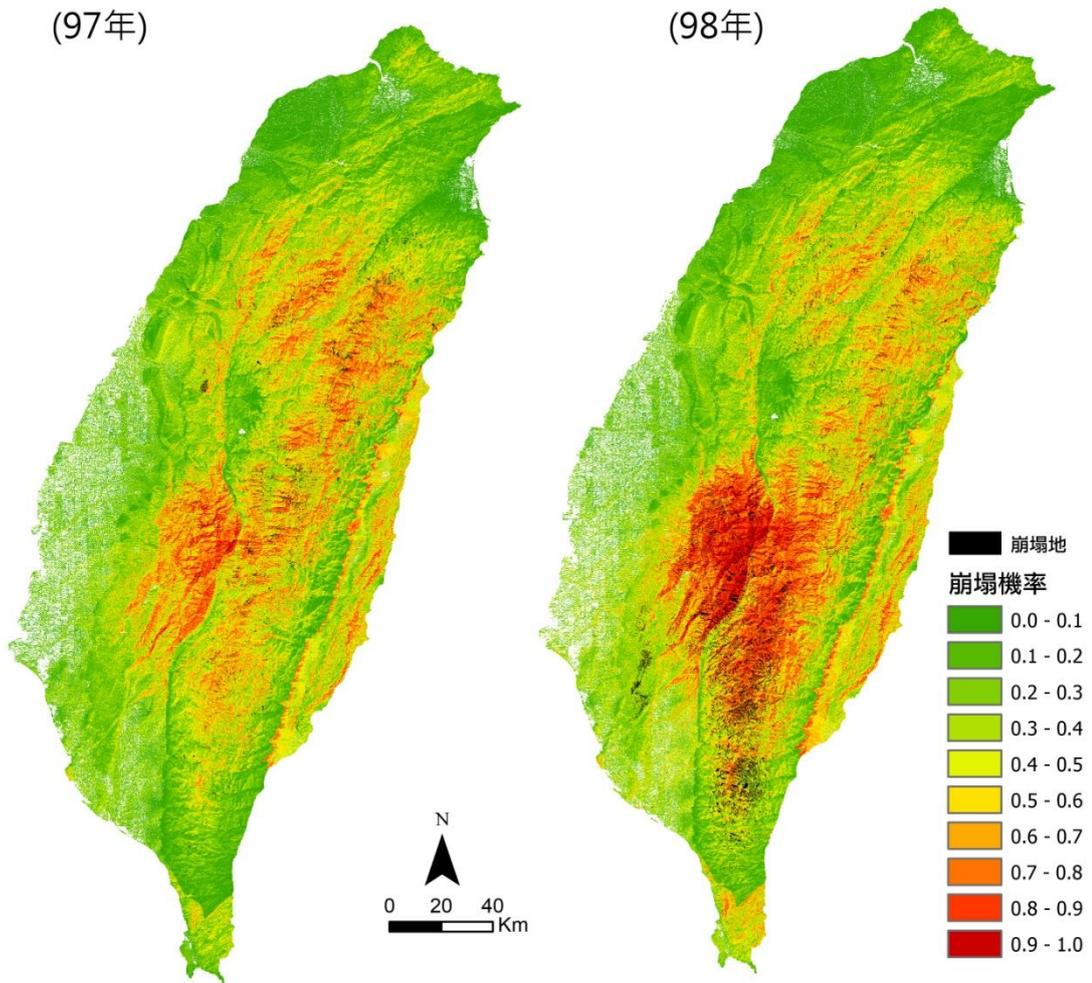


圖 5-1-9 崩塌模式率定(民國 97 年)與驗證(民國 98 年)結果

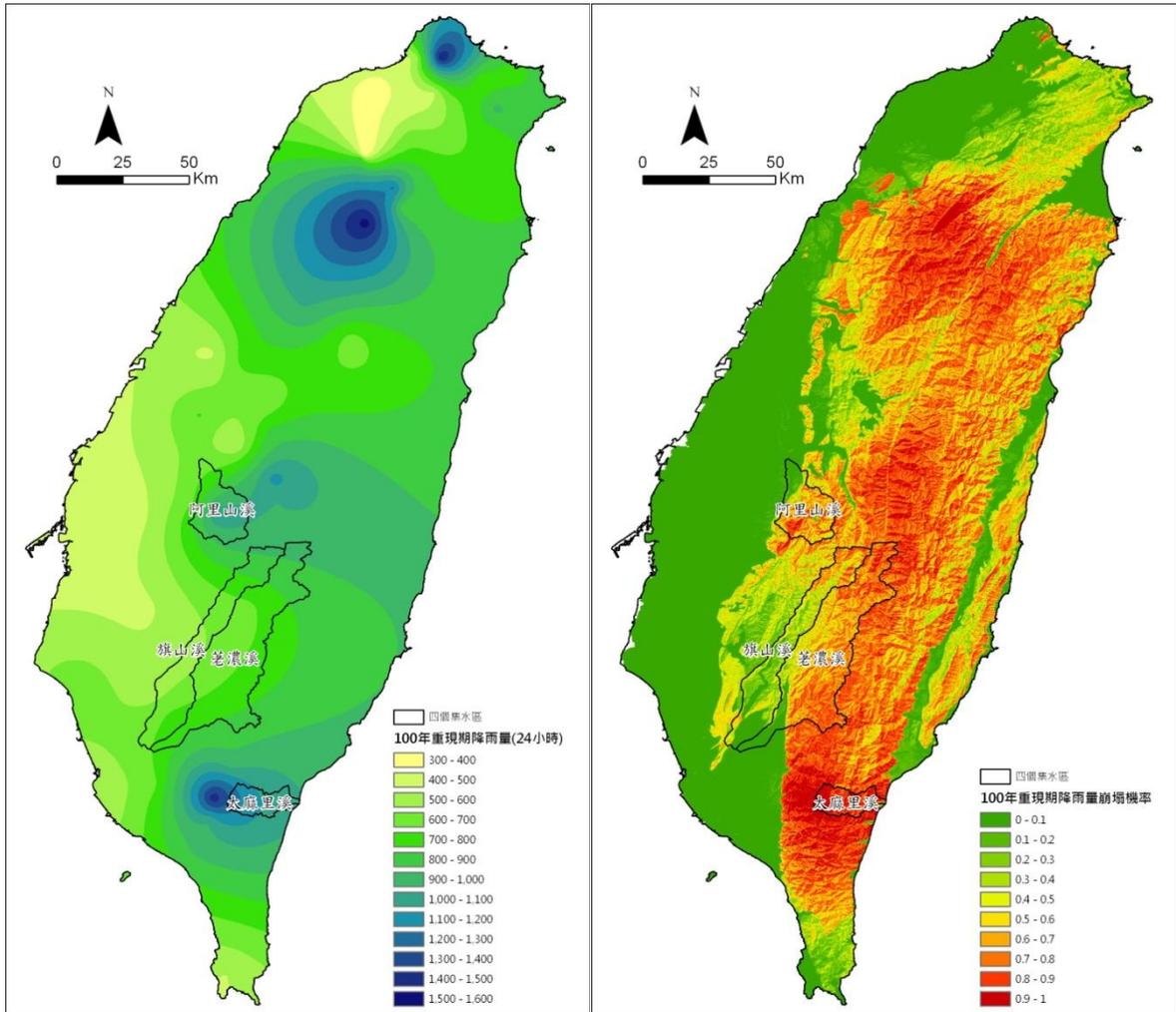


圖 5-1-10 重現期 100 年延時 24 小時降雨和崩塌潛勢預測結果

表 5-1-8 殘留土砂和二次土砂災害模擬統計表

集水區	流域土砂殘留量 (萬立方公尺)			二次土砂災害		
	坡面或野溪	河道	總計	雨量 (mm)	新增崩塌面積 (公頃)	新增崩塌量 (萬立方公尺)
旗山溪	11,678	5,277	16,954	689	551.0	2,073
荖濃溪	14,514	8,043	22,557	742	2,190.0	4,054
太麻里溪	15,048	4,578	19,626	1,114	1,855.2	3,728
阿里山溪	4,371	3,175	7,545	910	144.3	798

各模擬範圍的新增崩塌與二次土砂災害模擬結果詳圖 5-1-11 至圖 5-1-13 及表 5-1-8。旗山溪與荖濃溪集水區在 100 年重現期雨量分別為 689 mm 與 742 mm，分別產生新生崩塌面積 551 公頃和 2,190.3 公頃，新生崩塌量分別為 2,073 萬立方公尺和 4,054 萬立方公尺的土砂(圖 5-1-11)。太麻里溪流域雨量為 1,114 mm，產生新生崩塌面積 1,855.2 公頃(圖 5-1-12)，新生崩塌量 3,782 萬立方公尺的土砂。阿里山溪集水區雨量為 910 mm，產生新生崩塌面積 144.3 公頃，新增崩塌量共計 798 萬立方公尺(圖 5-1-13)。模擬結果顯示新生崩塌產生的土砂可能會造成邊坡與野溪土砂淤積並造成土砂災害。第 5-2 節將根據模擬結果評估國有林地內保全對象之災害潛勢。

本計畫之殘留土砂和二次土砂災害分析與模擬方法，屬於大範圍尺度之模擬，可提供相關單位二次土砂災害潛勢之空間分布，以及廣域的保全對象可能遭受到的災害潛勢。惟評估流域內的保全對象之潛勢，以及工程規劃設計時，仍須採用更精密的數值高程模型(如 5 公尺×5 公尺數值高程模型或光載量測結果)，進行二次土砂災害之分析與模擬。

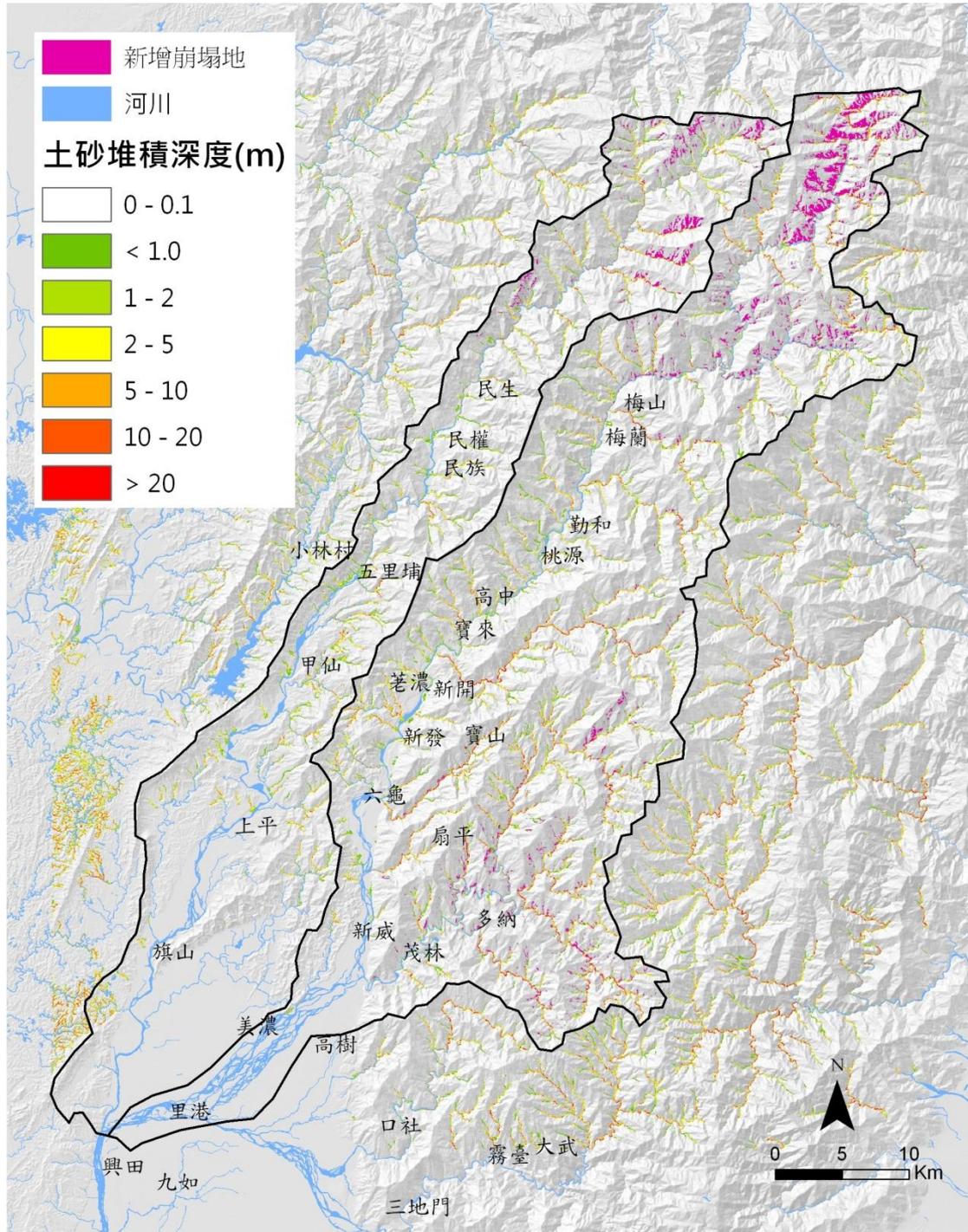


圖 5-1-11 旗山溪與荖濃溪二次土砂災害模擬結果

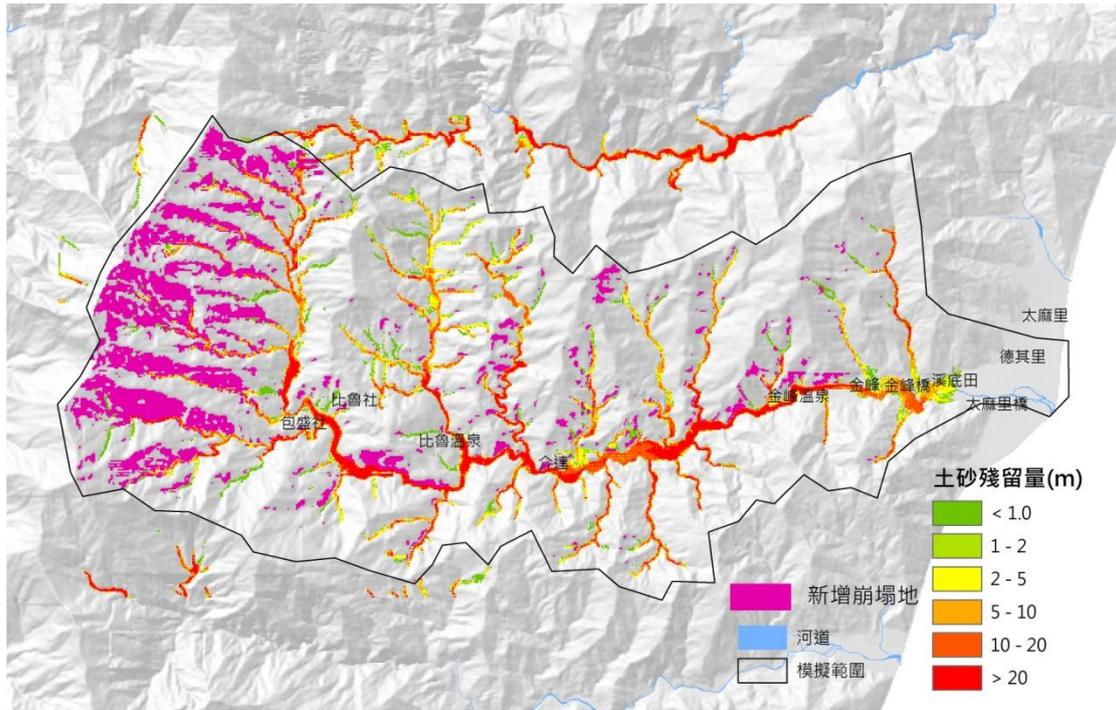


圖 5-1-12 太麻里溪二次土砂災害模擬結果

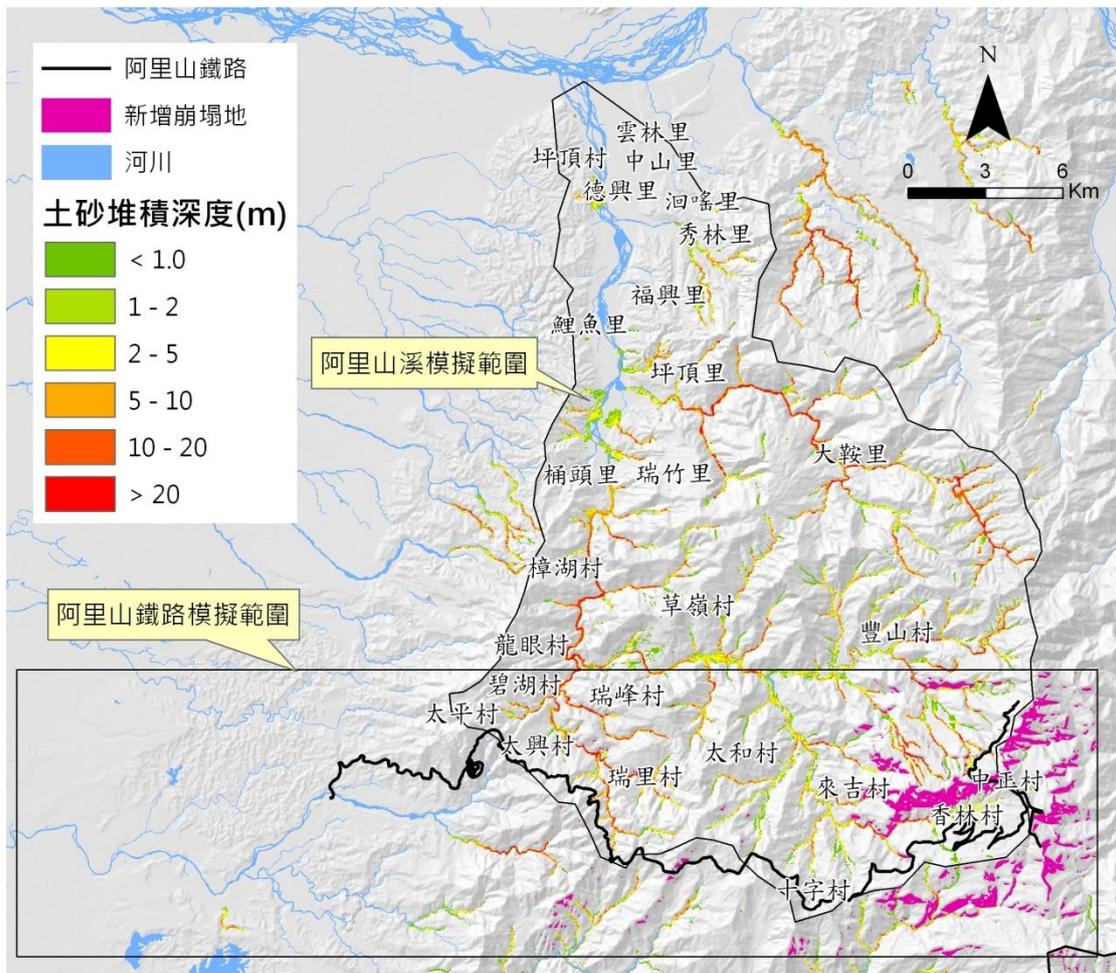


圖 5-1-13 阿里山溪與阿里山鐵路二次土砂災害模擬結果

5-2 國有林地內保全對象之災害潛勢評估

基於林班地內斜坡單元崩塌潛勢分級及殘留土砂二次災害影響範圍成果，套疊保全對象圖層(建築物、暫准建物、林道分布圖、步道、阿里山森林鐵路、鐵路等項)，建立保全對象災害潛勢評估分級，主要分級方法係以殘留土砂二次災害影響範圍為主，斜坡單元崩塌潛勢分級為輔。茲就斜坡單元劃設方法及潛勢分析方法說明如下：

5-2-1 斜坡單元劃設與品管

一、斜坡單元緣由及優勢

目前崩塌地潛勢分析中最被普遍使用之劃設方法有網格單元法與斜坡單元法。義大利國家科學委員會水文地質防災研究中心為最早使用斜坡單元進行崩塌地潛勢分析評估的部門，Carrara et al.(1991, 1999)使用斜坡單元的觀念，並利用判別分析法對義大利 Umbria 地區進行崩塌地潛勢分析與崩塌地潛勢圖繪製，得到含泥岩地層、植生覆蓋率、含水及不含水之地層為當地最為顯著之因子。Guzzeti et al.(1999)利用判別分析法針對義大利不同尺度的訓練區，進行五種劃設製圖單元方法比較，發現斜坡單元最適用於崩塌地潛勢分析研究。

基於上述，以網格單元進行潛勢分析，其分析單元小，且空間分布零碎，不易應用於坡地災害管理。故本計畫參考義大利(Carrara et al., 1991, 1999)之崩塌地潛勢分析概念，以斜坡單元做為土砂二次崩塌潛勢分析之基本單元，而採行斜坡單元之目的如下所述(參考地調所，2009)：

- (1) 提升分析時效：具地形條件之分析單元，主要將鄰近具相近地形者，歸為同一分析單元，可減少分析時間，提升分析效率。舉例說明，以往採用網格單元分析須針對一斜坡上多個網格點資料進行分析，本計畫將地形條件相似者劃設為同一斜坡，如此分析單元不但具有地形概念，亦可提昇分析時效。



- (2) 符合地形邊界的分析單元：斜坡單元較符合地形條件，可視單一斜坡為地形均勻單元，因有地形邊界控制，故斜坡單元不會跨越山脊線與水系。
- (3) 利於崩塌地管理與崩塌地清查作業：可避免邊坡上中下段潛勢不同，而衍生管理配套不一致的問題，若以斜坡單元做為管理單元，較易定期進行崩塌地清查與管理。此概念與香港 GEO 在 1977 年開始推行長遠的「防止山泥傾瀉計畫」預計達成之目標一致。
- (4) 易建立崩塌地管理資料庫：斜坡單元更可透過 GIS 軟體進行編輯與管理，於 GIS 軟體中登錄圖層屬性，屬性可包括崩塌地目錄、地文因子與雨量因子等相關資訊，可做為落實崩塌地及土砂管理資料庫建置基礎，亦可提供歷史崩塌地變遷分析使用。
- (5) 崩塌地預警與決策：透過斜坡單元型崩塌地潛勢分析結果，搭配即時雨量資料，有利於主管機關進行坡地災害管理、預警與決策。

二、斜坡單元劃分方法原理

斜坡單元(slope unit)綜觀有兩種不同的定義：一是指在斜坡縱斷面上可由變坡點(slope break)分割為最小的單元，另一是指侵蝕基準以上的整個斜坡系統(Jackson, 1997)。第一種定義較常被地理學者用來區分一個斜坡上的各個小單元，例如：崩崖、崖錐等(Giles and Franklin, 1998)。第二種定義較常被運用在崩塌地災害研究上，一個集水區的水系兩側斜坡各被視為一個斜坡單元(Carrara et al., 1991; Guzzetti et al., 1999; Xie et al., 2004)。如圖 5-2-1 所示，若以第一種定義來劃分，則會被劃分為三個斜坡單元，而以第二種定義則視為一個斜坡單元。

斜坡單元一般須先利用數值地形劃分水系與稜線後，找出適當大



小的集水區，以供切割。適當的集水區大小宜採用一級河(Strahler, 1952)，再以主流將集水區切割為二，此兩多邊形即為斜坡單元(slope unit)。實際的崩塌地災害分析上，一級河的左右兩斜坡單元有時面積會過大，另須依據坡度、坡向與崩塌地類型進行適當劃分，對於大型的順向坡及岩體滑動型崩塌地則有時面積會過小，若地形均勻則需合併成一斜坡單元進行後續分析較為合理(紀宗吉等人，2007)。

斜坡單元劃分可以分為單流向或多流向水文演算法，現行 GIS 商業軟體中單流向水文演算法以 ArcGIS 的 ArcHydro、Hydrology 模組及 MapInfo 的 TopoView 模組為主。多流向水文演算法則以 TauDEM 為主。經了解斜坡單元劃分原理後，因目前的商用軟體系統並無斜坡單元自動劃分之程式，故本計畫擬參考「集水區重疊法」(Xie et al., 2004)，以 ArcGIS 的 Hydrology 模組，制定一套斜坡單元自動劃分流程，以供自動產生合適的斜坡單元。集水區重疊法原理敘述如後：

- (1) 須先以數值地形進行集水區分析。
- (2) 將數值地形(DEM)高程值反轉後，產生反地形，再進行集水區分析，則原水系可反轉為稜線，並與鄰近的水系聯合成反轉後的集水區。
- (3) 利用地理資訊系統之分割功能，以反轉地形集水區將原始地形集水區分割為左右兩斜坡單元。圖 5-2-2 為集水區重疊法的分割示意圖。

三、斜坡單元自動劃分流程

前述已說明斜坡單元劃設方法理論，本計畫參考「集水區重疊法」(Xie et al., 2004)概念，以 ArcGIS 的 Hydrology 模組為分析基礎，制定一套斜坡單元自動劃分流程，以達自動產生合適的斜坡單元。斜坡單元劃分流程如圖 5-2-3，其劃設成果將有助於全國國有林保全對象潛勢評估使用。流程圖中斜坡單元之編修及品管作業流程與步驟說明

如下：

(1) 製作反轉地形

集水區重疊法須先以數值地形進行集水區分析，首先要將數值地形(DEM)高低值反轉後，產生反轉地形，再利用原始及反轉後之數值地形各自進行集水區分析，即後續步驟(2)至步驟(6)。

(2) 地形填補

進行集水區分析前，為避免數值地形中有局部窪地，使水系分析時會有水流入局部窪地而無法流出，導致程式終止無法完整執行，故數值地形輸入進行集水區分析之前，需要進行地形填補(Fill)。而反轉地形則無需進行地形填補，主要是因為反轉之地形並非合理地形，若進行填補反而會造成過多區域之地形被填平。

(3) 建立流向

集水區自動劃分第一步即是建立水流方向(Flow Direction)，進行流向分析。ArcGIS Hydrology 模組內之流向分析是採用單流向水文演算法中之八流向法，此方法主要是判斷網格中每一點之流向，依照與鄰近之八個方向之網格點之高程大小，此法之流動方向設定為往最低點流動，故依照八個方向給予特定代表值(Direction Coding)，示意如圖 5-2-4 所示。

(4) 累積流量計算

當流向分析完成，可獲得每一網格點之流向，即可開始計算累積流量(Flow Accumulation)，即是計算流經每一網格其上游流入之累積總個數，如圖 5-2-5 所示。

(5) 河川網絡計算

根據使用者指定累積流量之門檻值判定出研究區域之各流出點位，即是水系或稱河川網絡計算(Stream Link)，當門檻值愈大，其水系線則愈疏，反之當門檻值愈小，則水系線愈密。不同地理區域、地形及數值地形解析度，皆會影響門檻值的選定，本計畫擬經

過測試來選擇適合符合本計畫需求之門檻值。

(6) 集水區繪製

繪製水系後，依各集水區流出點計算出集水區範圍(Watershed)，依據流出點位向上游萃取得到集水區範圍。

(7) 正反集水區相互切割

上述步驟可得到由正反地形產製之集水區，將集水區圖層疊上陰影圖，由反地形分析出來的集水區，原山脊線則反轉為谷線，明顯可把地形坡頂圈繪出來(圖 5-2-6)，因此依據斜坡單元劃分原理，可利用 GIS 軟體將正反地形產製出之山脊線山谷線做切割，意即將集水區切割為左右兩塊斜坡單元。

四、斜坡單元品管作業流程

編修完畢之斜坡單元仍須進行品管覆核，品管項目如前述圖 5-2-3 中所列之重點檢核項目，待品管完成後即可完成斜坡單元劃設作業，各項品管原則詳述如下：

(1) 地形合理性檢核

針對編修完的斜坡單元，第一步仍採用水系與陰影圖進行品管，根據陰影圖與水系圖中的山脊、地形邊界進行大範圍檢核，使斜坡單元符合地形貌表徵，以不跨越山脊線及水系線為主要品管原則。

(2) 面積合理性檢核

以 GIS 軟體之 SQL 語法找出斜坡單元面積小於 1 公頃之物件，逐一檢查是否可與鄰近斜坡單元合併，依據地形因子坡度、坡向向鄰近斜坡單元進行必要之合併工作。

(3) 物件密合與重疊檢核

經編修人員完成後之斜坡單元，偶有邊界不密合或是圖幅相接處會有重疊或是物件缺漏之情形。因此可先新增一個空白圖層使其可編輯，選取需要檢查的斜坡單元範圍，執行 GIS 軟體重疊(Overlap)

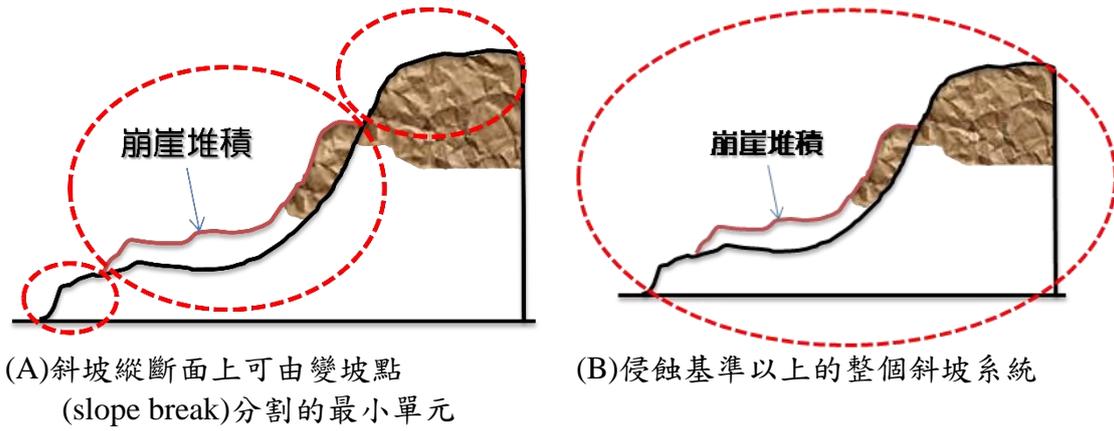
偵測功能，若有發現重疊錯誤的物件即會出現在空白圖層裡面，擬將其予以刪除，偶有因編修失誤造成非常小面積之重疊，另外圖幅相接處也會發生物件重疊的錯誤情形，皆經由此法可將重疊物件找出並刪除。

(4) 缺漏檢核

由於編修時以分幅方式編修，故合併後需特別檢查各幅相接位置。其邊界可能產生不合理或物件缺漏之情形，建議將斜坡單元設定為半透明，並搭配研究區域 1/5,000 圖框來檢查，以避免有缺漏之斜坡單元。而邊界不合理處應以地形狀況加以編修。

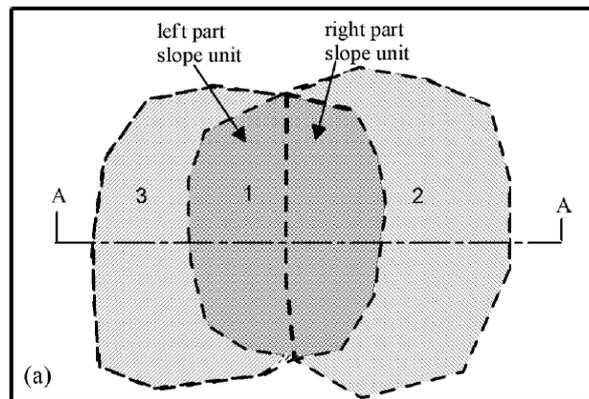
五、斜坡單元成果

然劃設全臺國有林地斜坡單元之工作量非常龐大，本計畫將以地調所(2009~2012)「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置計畫—集水區地質調查及崩塌地土石流調查與發生潛勢評估」產製的斜坡單元成果為主，結合本計畫以農航所 40 公尺×40 公尺數值高程模型劃設太麻里河流域斜坡單元，依據上述原則編修斜坡單元邊界線，品管地形合理性、面積合理性、物件密合與重疊及缺漏檢核等，以完成四個集水區流域斜坡單元劃設成果，俾利進行二次土砂災害保全對象潛勢評估使用。斜坡單元合併與劃設成果，以旗山溪與荖濃溪為例，斜坡單元劃設成果如圖 5-2-7 所示。

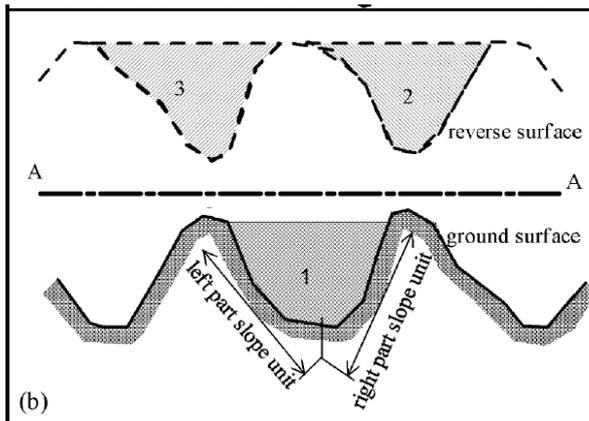


資料來源：摘自地調所(2009)

圖 5-2-1 斜坡單元兩種定義示意圖



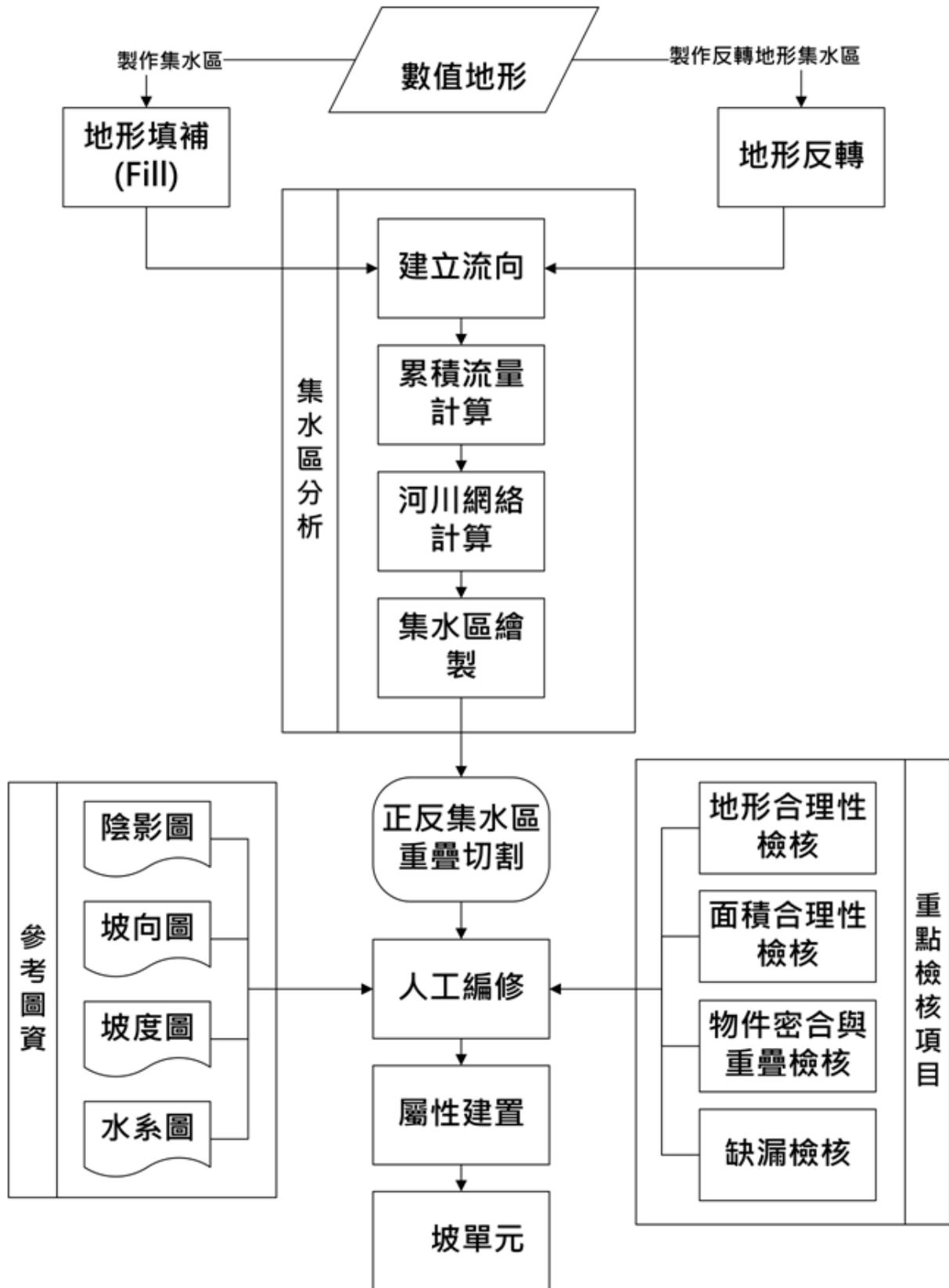
(A) 深灰色(範圍 1)表示原集水區，淡灰色(範圍 2)表示反轉數值地形之集水區，利用範圍 2 將範圍 1 切割為左右兩半，即獲致兩斜坡單元



(B) 剖面 A-A

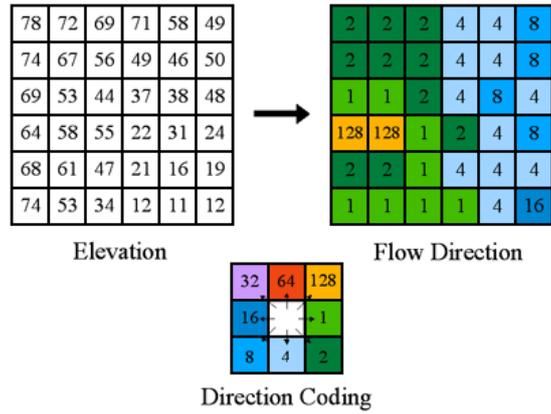
資料來源：Xie et al., 2004

圖 5-2-2 集水區重疊法劃分示意圖



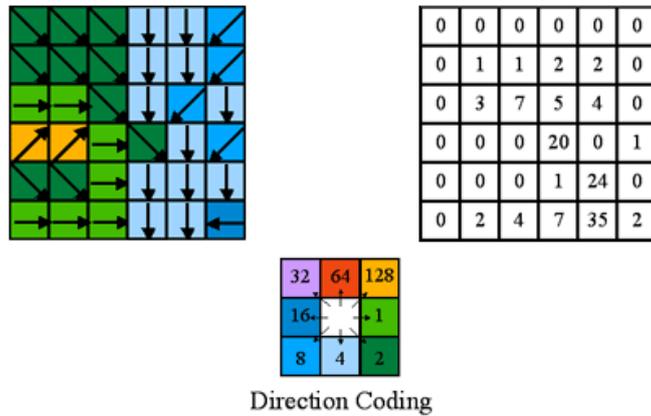
資料來源：修改自地調所(2009)

圖 5-2-3 斜坡單元電腦自動化劃分作業流程



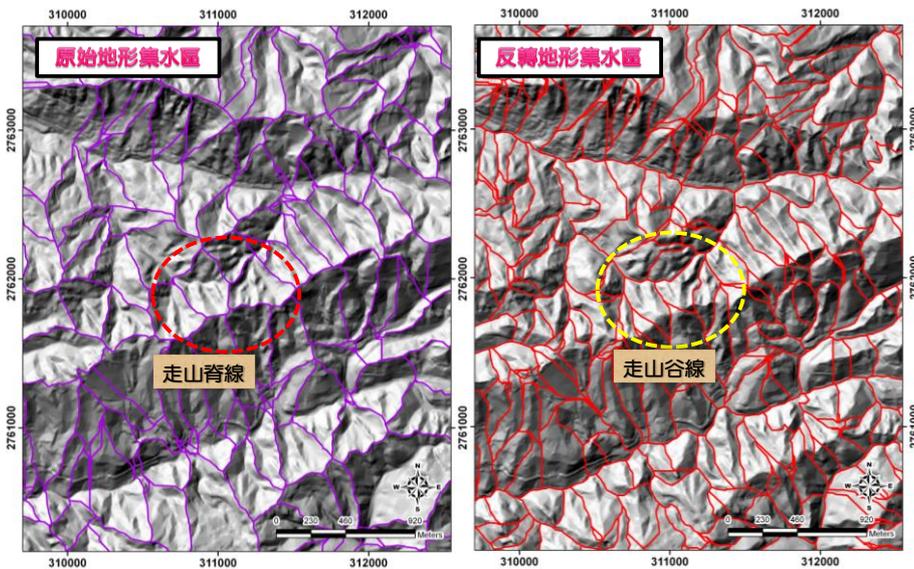
資料來源：本計畫整理。

圖 5-2-4 Hydrology 模組之網格流向編碼定義



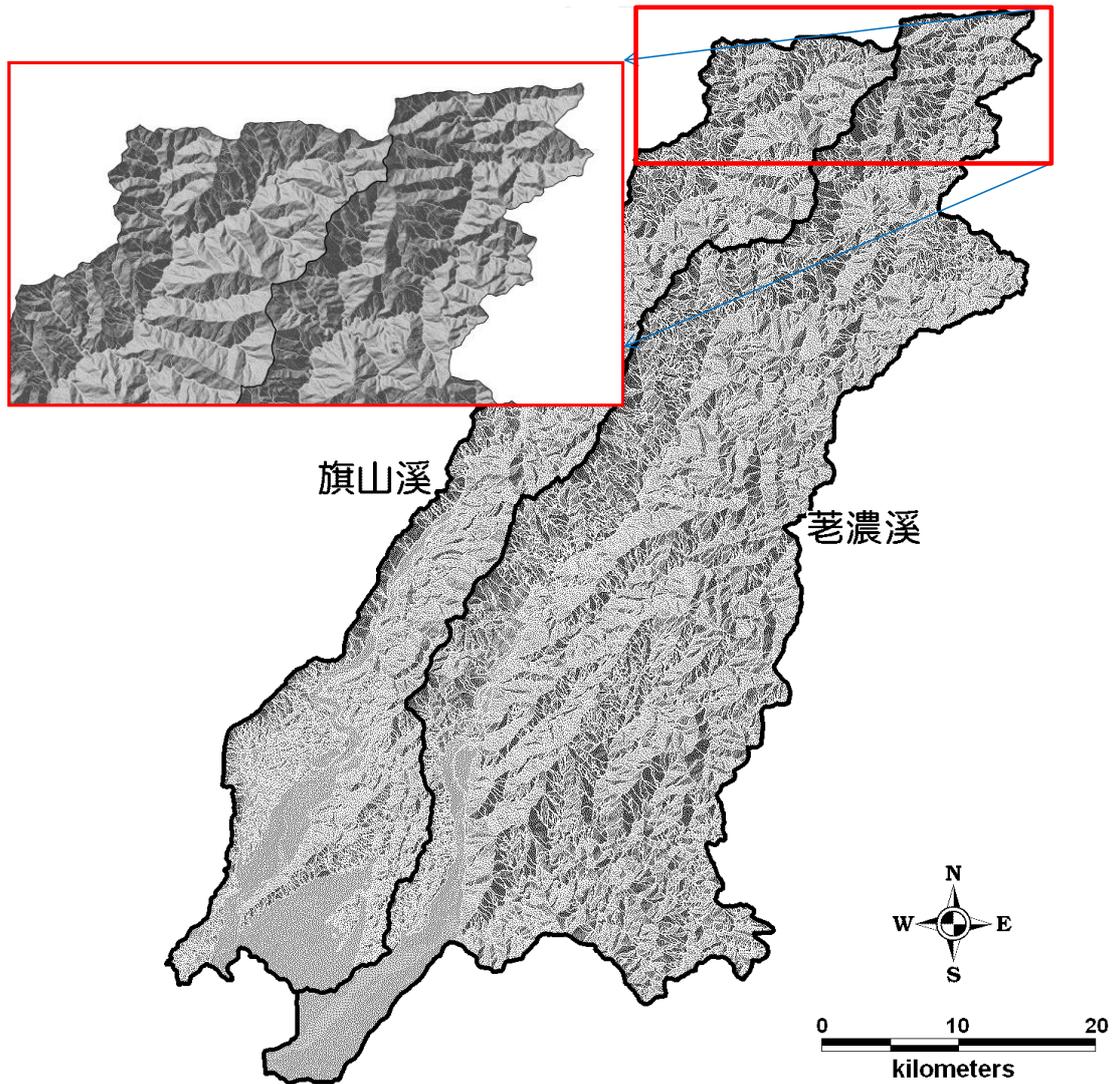
資料來源：本計畫整理。

圖 5-2-5 Hydrology 模組之網格累積流量編碼定義



資料來源：修改自地調所(2009)

圖 5-2-6 正反地形產生之集水區成果比較圖



資料來源：本計畫整理

圖 5-2-7 斜坡單元合併與劃設結果—以旗山溪與荖濃溪為例

5-2-2 國有林地內保全對象潛勢評估

國有林地內保全對象潛勢評估係針對四個集水區流域(阿里山溪[位處於清水溪內]、旗山溪、荖濃溪、太麻里溪)及另增加阿里山鐵路範圍進行評估,保全對象範圍定義為建築物、暫准建物、林道分布圖、林區道路(產業道路)、步道、阿里山森林鐵路等項,分析流程如圖 5-2-8 所示,成果係屬大尺度之評估,可能受災情況及影響程度尚需進一步詳細評估。分析流程區分為三種情況,(1)保全對象與二次土砂災害影響範圍交集、(2)保全對象未與二次土砂災害影響範圍交集及(3)保全對象遭受多個斜坡單元交集等三種情況,以下茲就國有林地內保全對象潛勢評估之分析流程與分析成果進行說明:

一、分析流程

以斜坡單元為分析單元,延續上述第四章分析完成之二次土砂災害與崩塌機率網格成果,採平均統計完成四個集水區流域斜坡單元型二次土砂災害堆積土砂量分布與崩塌機率圖。

- (1) 斜坡單元型二次土砂災害堆積土砂量分布圖:係以斜坡單元計算單元內二次土砂災害堆積平均深度及累積土砂量(單元內各網格土砂體積),可了解每個邊坡因殘留土砂及新增崩塌土砂量作用下,向下邊坡運移堆積之土砂量及堆積深度。斜坡單元型二次土砂災害成果圖如圖 5-2-9 至圖 5-2-16 所示。
- (2) 斜坡單元型崩塌潛勢圖:係以斜坡單元計算單元內崩塌機率平均值,考量國有林地 97 至 101 年崩塌地目錄,率定曾發生崩塌之斜坡單元閾值(表 5-2-1),大於等於閾值者為高潛勢斜坡單元,閾值以下依據平均崩塌機率均分為中潛勢與低潛勢,綜合各類崩塌潛勢結果,可了解每個邊坡發生崩塌之可能性。斜坡單元型崩塌潛勢分級圖如圖 5-2-17 至圖 5-2-20 所示。

二、保全對象與二次土砂災害影響範圍交集

國有林地內保全對象潛勢評估流程主要以二次土砂災害堆積土砂量為高潛勢評估依據，考量堆積深度至少一層樓高(3 公尺)，故堆積深度大於 3 公尺的斜坡單元且有影響保全對象時，該保全對象為高潛勢保全對象，代表保全對象位處殘留土砂二次災害影響範圍之內，恐遭受土石流等二次災害之影響，可能造成影響範圍內保全對象人命及財產損失，故令其為高潛勢保全對象。

三、保全對象與未與二次土砂災害影響範圍交集

參考農委會水土保持局(簡稱水保局)(2010)「99 年莫拉克災區山坡地聚落安全調查」報告建議，參考日本「土砂災害防止法」第二條規定辦理，考量斜坡單元的寬度、斜坡單元的高差(ΔH)等參數進行保全對象潛勢分級評估，並依據保全對象所在之邊坡區位(聚落位於上邊坡或下邊坡)分別評估斜坡單元之崩塌影響範圍，若保全對象與高潛勢斜坡單元影響範圍交集者亦為高潛勢保全對象；若與中潛勢斜坡單元影響範圍交集者即為中潛勢保全對象；若與低潛勢斜坡單元影響範圍交集者即為低潛勢保全對象。以下說明斜坡單元崩塌潛勢分級影響範圍率定之方法(屬經驗公式)：

- (1) 保全對象位於邊坡下方：保全對象位於邊坡下方之崩塌影響範圍主要為塌滑土石之擠壓、掩埋、撞擊等災害。崩塌影響範圍之繪製，寬度以斜坡單元底部寬度為基礎，另增加考量左右各 30° 的崩塌潰散範圍；縱長則依分析之崩塌地潛勢等級，以高、中及低潛勢之區分，分別以 2 倍、1 倍與 1/2 倍斜坡單元高差(ΔH)之水平距離為其影響範圍，且影響區範圍依潛勢等級，高、中及低潛勢區分別不超過 50 公尺、30 公尺及 15 公尺為原則。**圖 5-2-21** 為崩塌潛勢分級影響範圍率定示意圖，惟影響範圍需依據保全對象實地狀況調整。



- (2) 保全對象位於邊坡上方：保全對象位於邊坡上方之崩塌影響範圍，主要為考量下邊坡崩塌造成邊坡上方之張力破壞、坍塌、基礎流失等。崩塌影響範圍寬度為地形單元頂部寬度；縱長則依崩塌地潛勢等級，依高、中及低潛勢區分，分別以 1 倍、2/3 倍與 1/3 倍地形單元高差(ΔH)之水平距離為其影響範圍，但均以不超過 10 公尺為原則。圖 5-2-21 為崩塌潛勢分級影響範圍率定示意圖，惟影響範圍需依據保全對象實地狀況調整。
- (3) 上述影響範圍須以水系及山脊線進行地形邊界線修正，即影響範圍以不跨越水系與山脊為原則。其中，水系與山脊線以 40 公尺x40 公尺數值地形產生。

四、保全對象遭受多個斜坡單元交集：一處保全對象遭受多個斜坡單元崩塌影響範圍交集時，以最高潛勢影響為此保全對象之潛勢分級。

五、分析成果：基於以上潛勢分級原則完成不同保全對象潛勢評估主題圖，此成果係屬大尺度之評估，可能受災情況及影響程度尚需進一步詳細評估。

(1) 建築物潛勢評估成果

包含建築物及暫准建物，成果圖如圖 5-2-22 至圖 5-2-24，四個研究區流域範圍保全對象潛勢分級統計結果如表 5-2-2 至表 5-2-3 所示。分析結果說明如下：

- A. 阿里山溪：建築物與暫准建築物潛勢分級統計結果如表 5-2-2 所示。高潛勢建築物與暫准建築物主要受嘉義縣山區高潛勢斜坡單元與土石流影響範圍影響，建築物分布集中在阿里山溪溪旁兩側，以雲林縣古坑鄉與嘉義縣梅山鄉居多，在溪流中下游南投縣竹山鎮範圍內建築物多屬低至中潛



勢。

- B. 旗山溪與荖濃溪：建築物與暫准建築物潛勢分級統計結果如表 5-2-2 所示。旗山溪與荖濃溪暫准建築物多為高潛勢，又以旗山溪流域中游高雄市甲仙區居多。旗山溪流域除高雄市甲仙區有較多高潛勢保全對象外，杉林區、美濃區也有為數不少高潛勢建築物分布，主要集中於旗山溪流域中至下游位置，未來仍須注意殘留土砂對旗山溪中下游之溪流兩側建築物影響。至於荖濃溪暫准建物與建築物較少，可能受影響之建物多為中至高潛勢建築物，主要分布在荖濃溪沿岸，又以高雄市六龜區居多。
- C. 太麻里溪：建築物與暫准建築物潛勢分級統計結果如表 5-2-2 所示。太麻里溪範圍無暫准建物，太麻里溪下游多為中至高潛勢建築物，溪流兩岸河彎處多有高潛勢建築物情形，因此未來應注意高潛勢斜坡單元及溪流河彎處殘留土砂及土砂運移對保全對象之影響。
- (2) 路網潛勢評估成果：包含林道、林區道路(係指產業道路)、步道、鐵路，成果圖如圖 5-2-25 至圖 5-2-27 所示。
- A. 阿里山溪：路網潛勢分級統計結果如表 5-2-3 所示。流域內林區道路多為高潛勢，以流域內雲林縣古坑鄉及嘉義縣梅山鄉範圍為主；流域內阿里山鐵路部分多為中至高潛勢，集中在流域內嘉義縣竹崎鄉與阿里山鄉範圍；流域步道多為中高潛勢，主要分布於流域內嘉義縣阿里山鄉與梅山鄉範圍。
- B. 旗山溪與荖濃溪：路網潛勢分級統計結果如表 5-2-3 所示。流域內林區道路多為高潛勢，以流域內高雄市甲仙區、杉林區、美濃區範圍為主；流域步道多為中高潛勢，主要分布於流域內高雄市桃源區範圍；旗山溪與荖濃溪流域上游多為中至高潛勢步道。歸納旗山溪與荖濃溪流域結果，可知高潛勢

斜坡單元與河彎處為主要高潛勢保全對象分布區域，後續仍應持續注意整體流域內高潛勢斜坡單元與河道蜿蜒度較高區域對路網保全對象之影響。

- C. 太麻里溪：路網潛勢分級統計結果如表 5-2-3 所示。流域內多為中至高潛勢林區道路，高潛勢林區道路主要集中於中游河川束縮主流兩側及高潛勢斜坡單元區域，其餘多為中潛勢林區道路，而步道多以位於高潛勢區為主。

(3) 阿里山鐵路保全對象潛勢評估

研究區範圍內阿里山鐵路為重要的交通網絡，歷史紀錄也常有坡地災害災情傳出，實有必要針對阿里山鐵路範圍進行保全對象潛勢分析，以提供相關業管單位防減災參考。分析範圍如圖 5-2-28 所示，範圍包含阿里山溪流流域竹崎鄉、梅山鄉與阿里山鄉部分區域，分析成果包含區內國有林建築物潛勢分級圖(圖 5-2-29)及路網潛勢分級圖(圖 5-2-30)。茲將區內相關結果歸納說明如下：

- A. 建築物潛勢分級圖：建築物與暫准建築物潛勢分級統計結果如表 5-2-2 所示。阿里山鐵路範圍暫准建物與建築物分布多為中至高潛勢，主要集中在嘉義縣梅山鄉與阿里山鄉。
- B. 路網潛勢分級圖：路網潛勢分級統計結果如表 5-2-3 所示。範圍內山區部分多為高潛勢林區道路、高潛勢阿里山鐵路、高潛勢步道、高潛勢林道，主要受阿里山鐵路範圍山區高潛勢斜坡單元及土石流影響範圍之影響。

六、全臺國有林保全對象潛勢分析成果

保全對象潛勢分析結果影響土砂處理策略及防救災作為，故本計畫基於前述全臺崩塌機率結果，以斜坡單元率定分級門檻(如表 5-2-1)，完成 100 年重現期雨量情境斜坡單元崩塌潛勢分級結果(圖

5-2-31)，依據前述斜坡單元影響範圍率定原則，完成全臺斜坡單元崩塌影響範圍劃設，進而套疊保全對象，完成全臺國有林保全對象潛勢分析，建立全臺國有林建築物潛勢分級圖(圖 5-2-32)及路網潛勢分級圖(圖 5-2-33)。基於分析結果，統計全臺國有林集水區流域及林區管理處內各項保全對象潛勢分布結果如表 5-2-4 至表 5-2-5 所示。本小節以林區管理處為探討分區，分就建築物、暫准建物、林道、林區道路(產業道路)、步道、森林遊樂區等保全對象分析結果歸納說明如下：

- (1) 建築物與暫准建物潛勢評估：建築物圖層係本團隊以莫拉克颱風後全臺福衛二號衛星影像數化而得，故計算上建築物以面積表示；暫准建物係林務局提供，僅有點座標，其單位為棟。建築物與暫准建物潛勢評估結果如表 5-2-4 所示。在各林區管理處範圍內，高潛勢建築物面積總計 0.22 平方公里，中潛勢建築物面積總計 0.49 平方公里，低潛勢建築物面積總計 3.70 平方公里，其中高潛勢建築物面積以新竹林區管理處(0.07 平方公里)最高，嘉義林區管理處(0.06 平方公里)次之。在各林區管理處範圍內，高潛勢暫准建物總計有 43 棟，中潛勢暫准建物總計 184 棟，低潛勢暫准建物總計 1,215 棟，其中高潛勢暫准建物也是新竹林區管理處最多(27 棟)，嘉義林區管理處(7 棟)次之。
- (2) 路網潛勢評估：路網潛勢評估結果如表 5-2-5 所示。在各林區管理處範圍內，高潛勢林區道路總計 831.29 公里，中潛勢林區道路總計 1,894.88 公里，低潛勢林區道路總計 4,683.72 公里，其中高潛勢林區道路以新竹林區管理處(200.66 公里)最高，東勢林區管理處(158.82 公里)次之。在各林區管理處範圍內，高潛勢林道總計 215.39 公里，中潛勢林道總計 474.04 公里，低潛勢林道總計 769.96 公里，其中高潛勢林道以新竹林區管理處(74.71 公里)最高，東勢林區管理處(73.98 公里)次之。在各林區管理處範圍內，高潛勢步道總計 79.72 公里，中潛勢步道總計 109.75 公

里，低潛勢步道總計 169.83 公里，其中高潛勢步道以新竹林區管理處(20.42 公里)最高，花蓮林區管理處(18.75 公里)次之。

- (2) 森林遊樂區潛勢評估：基於前述 100 年重現期崩塌機率模式推估之新增崩塌網格(圖 5-2-31(A))，計算各森林遊樂區範圍影響面積，據此計算各森林遊樂區影響面積百分比，以影響面積百分比定義潛勢分級，以免因一處高潛勢斜坡單元交集就定義該森林遊樂區為高潛勢森林遊樂區之誤解。無影響面積為低潛勢，影響面積百分比小於 1% 為中潛勢，影響面積百分比大於等於 1% 為高潛勢，據此完成森林遊樂區潛勢評估結果(如表 5-2-6)。
- 由分析結果可知，武陵森林遊樂區、知本森林遊樂區、阿里山森林遊樂區為高潛勢；太平山森林遊樂區、觀霧森林遊樂區、大雪山森林遊樂區、奧萬大森林遊樂區、富源森林遊樂區、向陽森林遊樂區為中潛勢。其中，高潛勢森林遊樂區中以武陵森林遊樂區影響面積百分比最高，達 13.9%，其次為知本森林遊樂區(2.8%)，第三順位為阿里山森林遊樂區(2.4%)。

表 5-2-1 斜坡單元崩塌潛勢分級閾值率定表

流域名稱	高潛勢	中潛勢	低潛勢
太麻里溪	$p \geq 0.88$	$0.44 \leq p < 0.88$	$P < 0.44$
高屏溪	$p \geq 0.70$	$0.35 \leq p < 0.70$	$P < 0.35$
阿里山溪	$p \geq 0.70$	$0.35 \leq p < 0.70$	$P < 0.35$
阿里山鐵路範圍	$p \geq 0.70$	$0.35 \leq p < 0.70$	$P < 0.35$
全臺灣	$p \geq 0.957$	$0.914 < p < 0.957$	$P < 0.914$

資料來源：本計畫整理

表 5-2-2 四個研究集水區流域範圍建築物與暫准建物潛勢分級統計

保全對象潛勢評估結果			子集水區				合計 (12.27 平方公里)
			阿里山溪 (2.15 平方公里)	荖濃溪 (1.41 平方公里)	旗山溪 (8.52 平方公里)	太麻里溪 (0.19 平方公里)	
建築物	面積 (平方公里)	低	0.98	0.01	0.03	0.01	1.03
		中	0.50	0.01	0.03	0.04	0.58
		高	0.67	1.39	8.46	0.14	10.66
	百分比(%)	低	45.58	0.71	0.35	5.26	-
		中	23.26	0.71	0.35	21.05	-
		高	31.16	98.58	99.30	73.69	-
保全對象潛勢評估結果			子集水區				合計 (358 棟)
			阿里山溪 (118 棟)	荖濃溪 (14 棟)	旗山溪 (226 棟)	太麻里溪 (0 棟)	
暫准建物	棟數	低	40	0	18	0	58
		中	55	1	8	0	64
		高	23	13	200	0	236
	百分比(%)	低	33.90	0.00	7.96	0.00	-
		中	46.61	7.14	3.54	0.00	-
		高	19.49	92.86	88.50	0.00	-

資料來源：本計畫整理

表 5-2-3 四個研究集水區流域範圍路網潛勢分級統計

保全對象潛勢評估結果			子集水區				合計 (76.08 公里)
			阿里山溪 (36.84 公里)	荖濃溪 (29.23 公里)	旗山溪 (5.03 公里)	太麻里溪 (4.98 公里)	
步道	長度 (公里)	低	2.27	0.00	2.39	0.24	4.90
		中	12.84	15.20	2.64	0.00	30.68
		高	21.73	14.03	0.00	4.74	40.50
	百分比(%)	低	6.16	0.00	47.51	4.82	-
		中	34.85	52.00	52.49	0.00	-
		高	58.99	48.00	0.00	95.18	-
保全對象潛勢評估結果			子集水區				合計 (342.14 公里)
			阿里山溪 (6.39 公里)	荖濃溪 (235.24 公里)	旗山溪 (100.51 公里)	太麻里溪 (0 公里)	
林道	長度 (公里)	低	2.49	0.00	0.00	0.00	2.49
		中	3.90	0.00	0.00	0.00	3.90
		高	0.00	235.24	100.51	0.00	335.75
	百分比(%)	低	38.97	0.00	0.00	-	-
		中	61.03	0.00	0.00	-	-
		高	0.00	100.00	100.00	-	-
保全對象潛勢評估結果			子集水區				合計 (2270.39 公里)
			阿里山溪 (525.37 公里)	荖濃溪 (1059.39 公里)	旗山溪 (589.91 公里)	太麻里溪 (95.72 公里)	
林區道路 (產業道路)	長度 (公里)	低	65.04	0.00	0.00	15.69	80.73
		中	188.73	10.00	0.00	37.54	236.27
		高	271.60	1049.39	589.91	42.49	1953.39
	百分比(%)	低	12.38	0.00	0.00	16.39	-
		中	35.92	0.94	0.00	39.22	-
		高	51.70	99.06	100.00	44.39	-

資料來源：本計畫整理

表 5-2-4 全臺國有林管理處範圍建築物與暫准建物潛勢分級
統計

建築物 潛勢評估結果		潛勢分級			合計 (4.38 平方公里)
		高潛勢 (0.22 平方公里)	中潛勢 (0.49 平方公里)	低潛勢 (3.70 平方公里)	
面積 (平方 公里)	羅東林區管理處	0.01	0.05	0.36	0.42
	新竹林區管理處	0.07	0.14	0.33	0.54
	東勢林區管理處	0.02	0.05	0.35	0.41
	南投林區管理處	0.03	0.04	0.80	0.87
	嘉義林區管理處	0.06	0.05	0.88	0.99
	屏東林區管理處	0.03	0.02	0.57	0.62
	台東林區管理處	0.01	0.03	0.09	0.13
	花蓮林區管理處	0.01	0.12	0.31	0.44
暫准建物 潛勢評估結果		潛勢分級			合計 (1,442 棟)
		高潛勢 (43 棟)	中潛勢 (184 棟)	低潛勢 (1,215 棟)	
棟數 (棟)	羅東林區管理處	2	3	37	42
	新竹林區管理處	27	86	162	275
	東勢林區管理處	0	3	146	149
	南投林區管理處	0	0	89	89
	嘉義林區管理處	7	38	252	297
	屏東林區管理處	1	3	322	326
	台東林區管理處	1	26	89	116
	花蓮林區管理處	5	25	118	148

資料來源：本計畫整理

表 5-2-5 全臺國有林管理處範圍路網潛勢分級統計

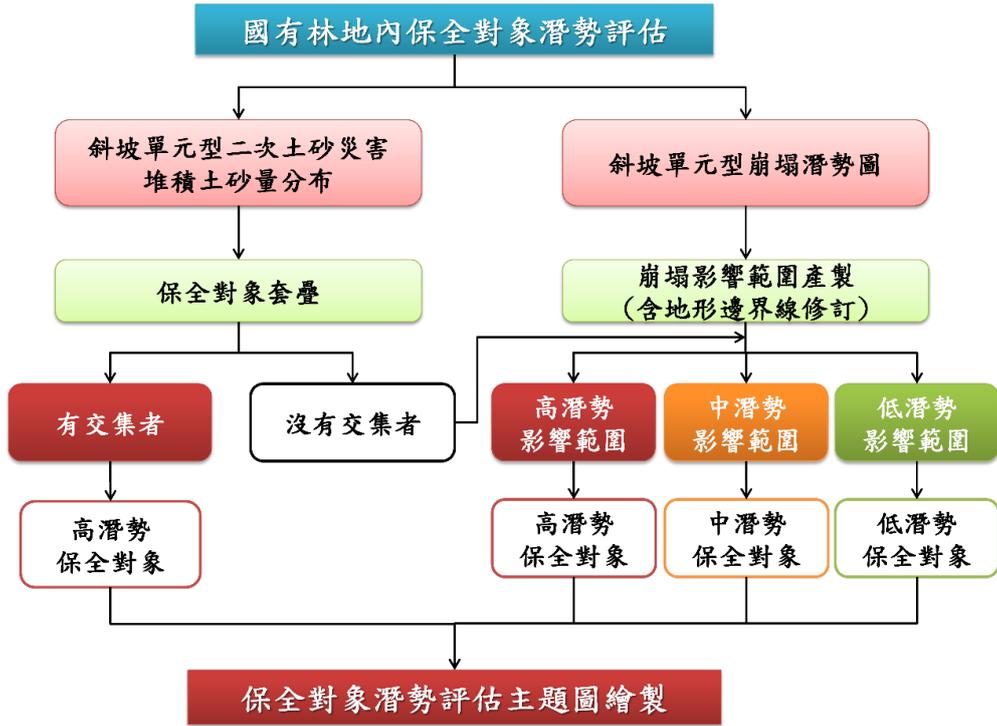
林道 潛勢評估結果		潛勢分級			合計 (1,459.39 公里)
		高潛勢 (215.39 公里)	中潛勢 (474.04 公里)	低潛勢 (769.96 公里)	
長度 (公里)	羅東林區管理處	14.80	80.55	95.67	191.02
	新竹林區管理處	74.71	42.29	59.44	176.44
	東勢林區管理處	73.98	99.29	101.10	274.37
	南投林區管理處	13.76	97.17	92.23	203.15
	嘉義林區管理處	2.32	11.45	65.57	79.34
	屏東林區管理處	7.10	49.25	156.40	212.75
	台東林區管理處	15.49	55.19	65.90	136.58
	花蓮林區管理處	13.23	38.85	133.66	185.75
步道 潛勢評估結果		潛勢分級			合計 (3,59.30 公里)
		高潛勢 (79.72 公里)	中潛勢 (109.75 公里)	低潛勢 (169.83 公里)	
長度 (公里)	羅東林區管理處	0.20	8.07	9.15	17.42
	新竹林區管理處	20.42	3.03	30.21	53.66
	東勢林區管理處	1.93	12.44	15.51	29.88
	南投林區管理處	2.42	17.11	6.21	25.73
	嘉義林區管理處	11.68	18.44	27.45	57.58
	屏東林區管理處	15.82	5.85	9.31	30.97
	台東林區管理處	8.50	15.28	8.62	32.41
	花蓮林區管理處	18.75	29.54	63.37	111.66
林區道路(產業道路) 潛勢評估結果		潛勢分級			合計 (7,409.88 公里)
		高潛勢 (831.29 公里)	中潛勢 (1,894.88 公里)	低潛勢 (4,683.72 公里)	
長度 (公里)	羅東林區管理處	62.82	332.51	402.86	798.20
	新竹林區管理處	200.66	170.85	300.58	672.08
	東勢林區管理處	158.82	257.33	346.55	762.70
	南投林區管理處	83.56	273.02	911.83	1,268.41
	嘉義林區管理處	70.33	127.26	790.60	988.18
	屏東林區管理處	90.11	173.90	781.05	1,045.06
	台東林區管理處	64.62	268.74	480.23	813.60
	花蓮林區管理處	100.37	291.27	670.02	1,061.66

資料來源：本計畫整理

表 5-2-6 全臺國有林森林遊樂區影響面積統計

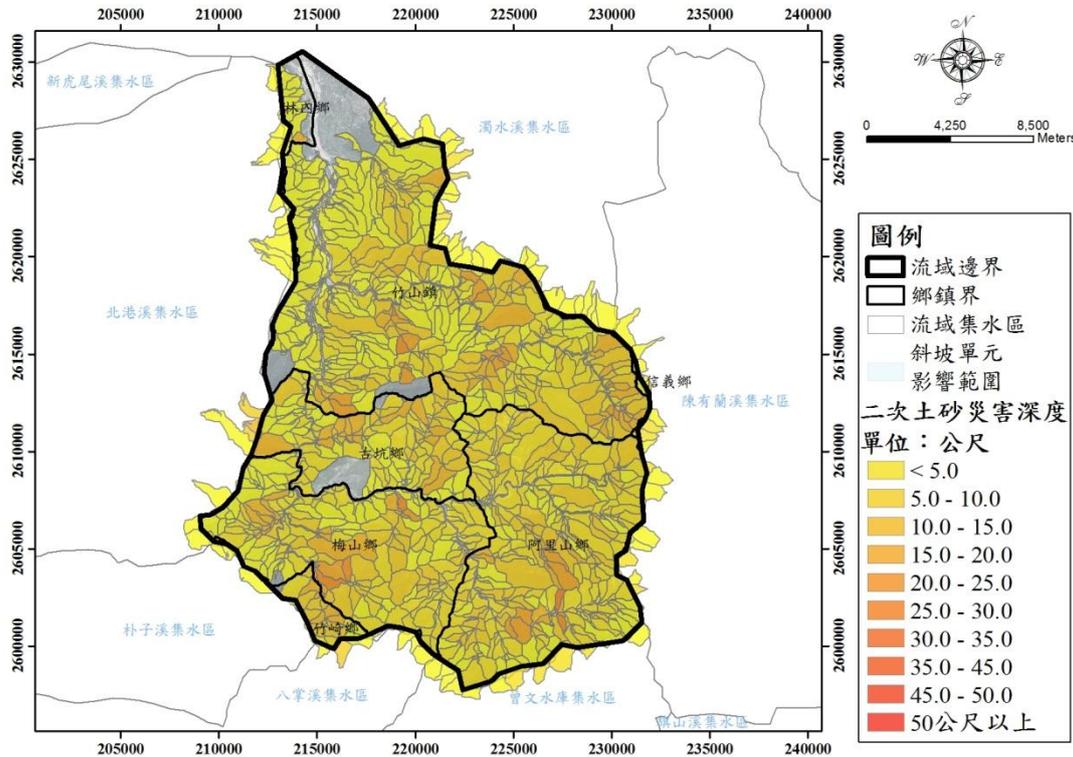
編號	森林遊樂區名稱	潛勢分級	遊樂區面積 (平方公里)	二次土砂災害 影響面積 (平方公里)	影響面積百分比 (%)
1	滿月圓森林遊樂區	低	162.784	0.000	0.000
2	東眼山森林遊樂區	低	92.832	0.000	0.000
3	內洞森林遊樂區	低	120.560	0.000	0.000
4	太平山森林遊樂區	中	1308.660	2.368	0.181
5	觀霧森林遊樂區	中	86.768	0.224	0.258
6	武陵森林遊樂區	高	369.280	51.264	13.882
7	大雪山森林遊樂區	中	428.848	0.848	0.198
8	八仙山森林遊樂區	低	247.952	0.000	0.000
9	合歡山森林遊樂區	低	60.928	0.000	0.000
10	奧萬大森林遊樂區	中	275.536	0.160	0.058
11	池南森林遊樂區	低	1.232	0.000	0.000
12	富源森林遊樂區	中	77.392	0.096	0.124
13	藤枝森林遊樂區	低	75.760	0.000	0.000
14	知本森林遊樂區	高	102.976	2.896	2.812
15	雙流森林遊樂區	低	158.480	0.000	0.000
16	墾丁森林遊樂區	低	10.032	0.000	0.000
17	阿里山森林遊樂區	高	140.832	3.408	2.420
18	向陽森林遊樂區	中	39.200	0.016	0.041

資料來源：本計畫整理



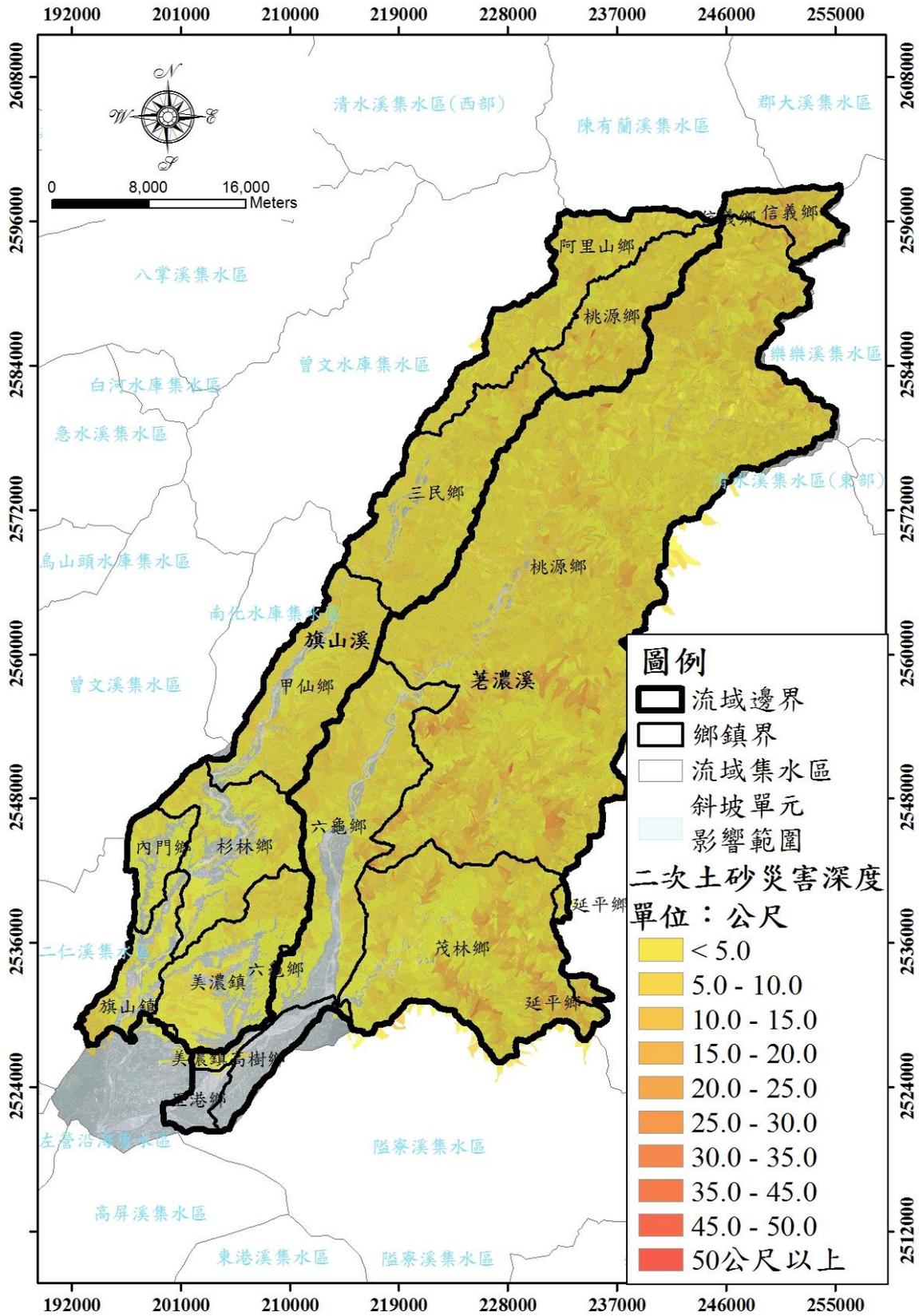
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-8 國有林地內保全對象潛勢評估流程



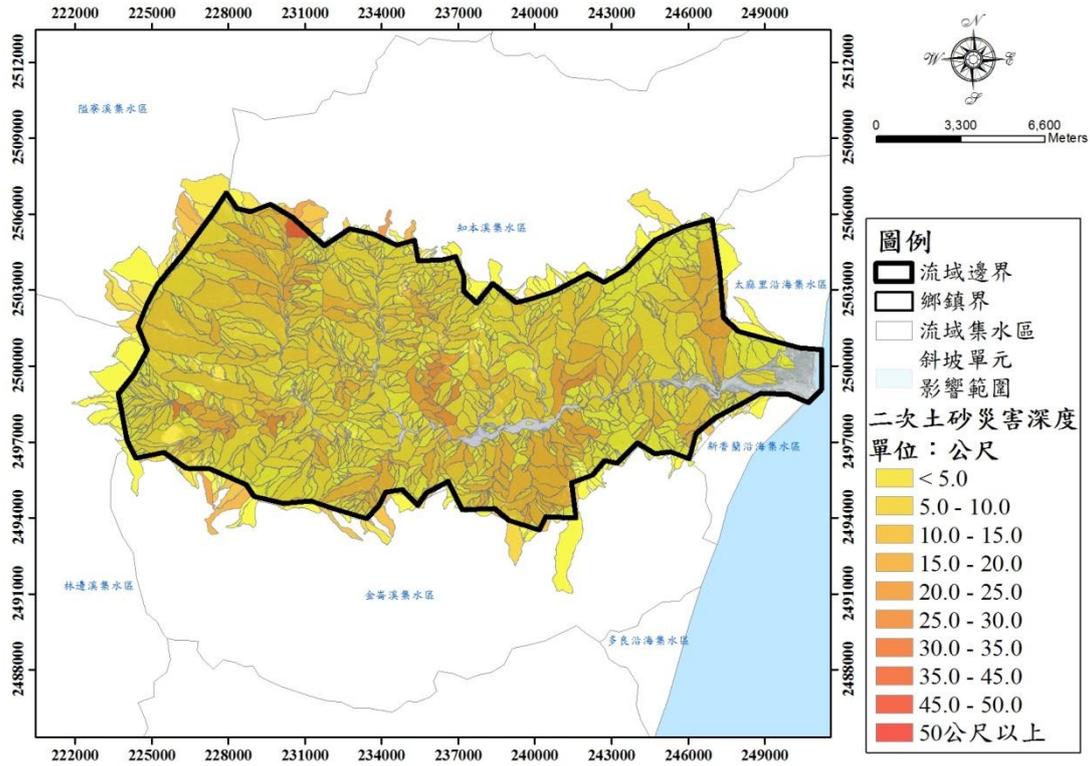
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-9 阿里山溪斜坡單元二次土砂災害堆積深度分布圖



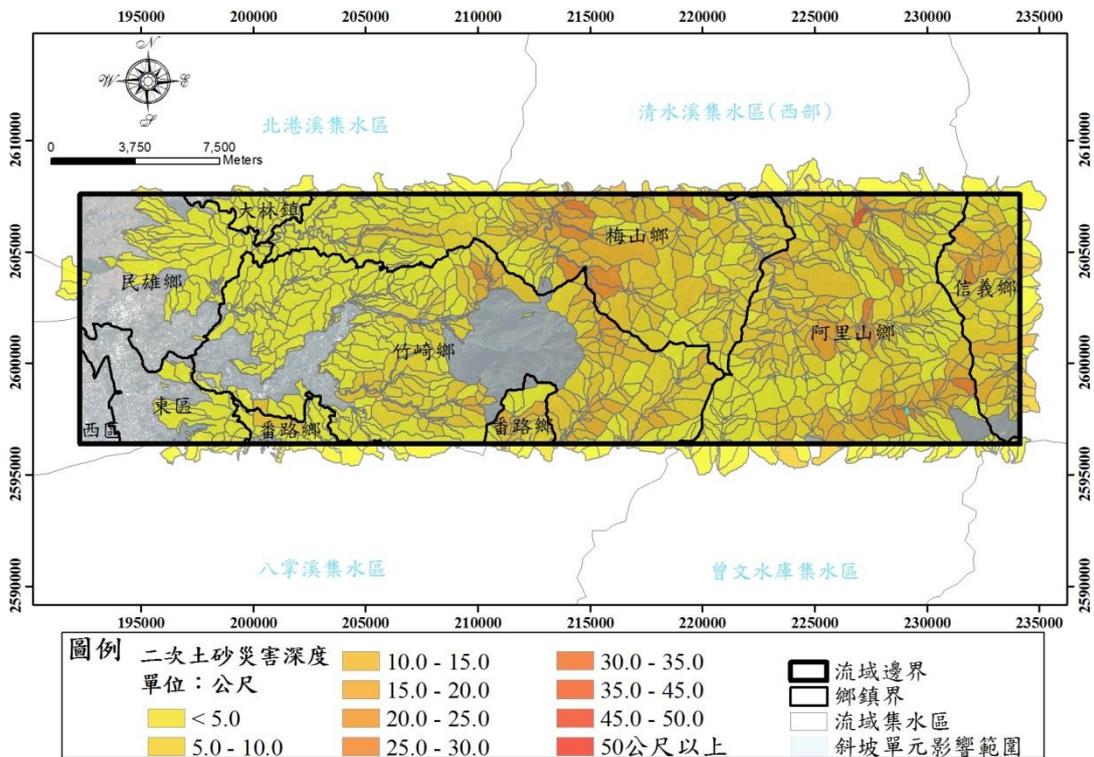
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-10 旗山溪與荖濃溪斜坡單元二次土砂災害堆積深度分布圖



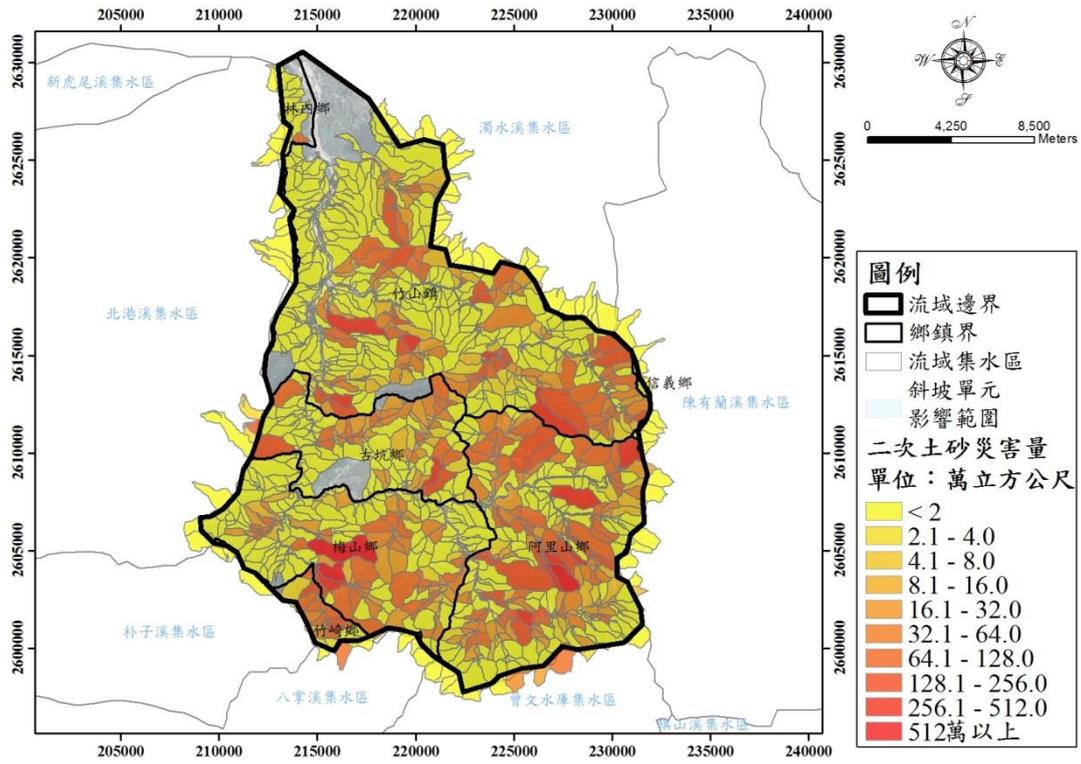
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-11 太麻里溪斜坡單元二次土砂災害堆積深度分布圖



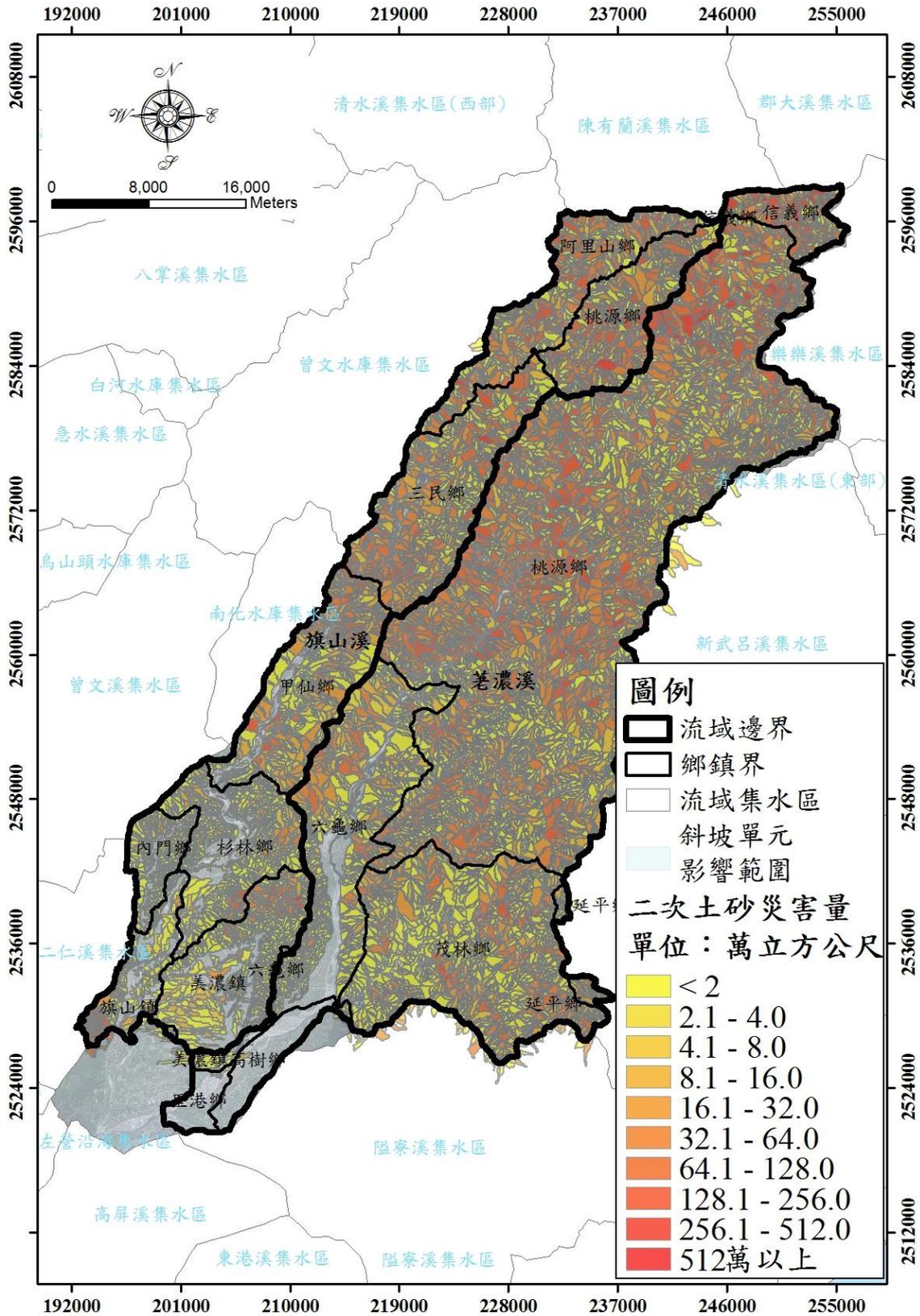
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-12 阿里山鐵路範圍斜坡單元二次土砂災害堆積深度分布圖



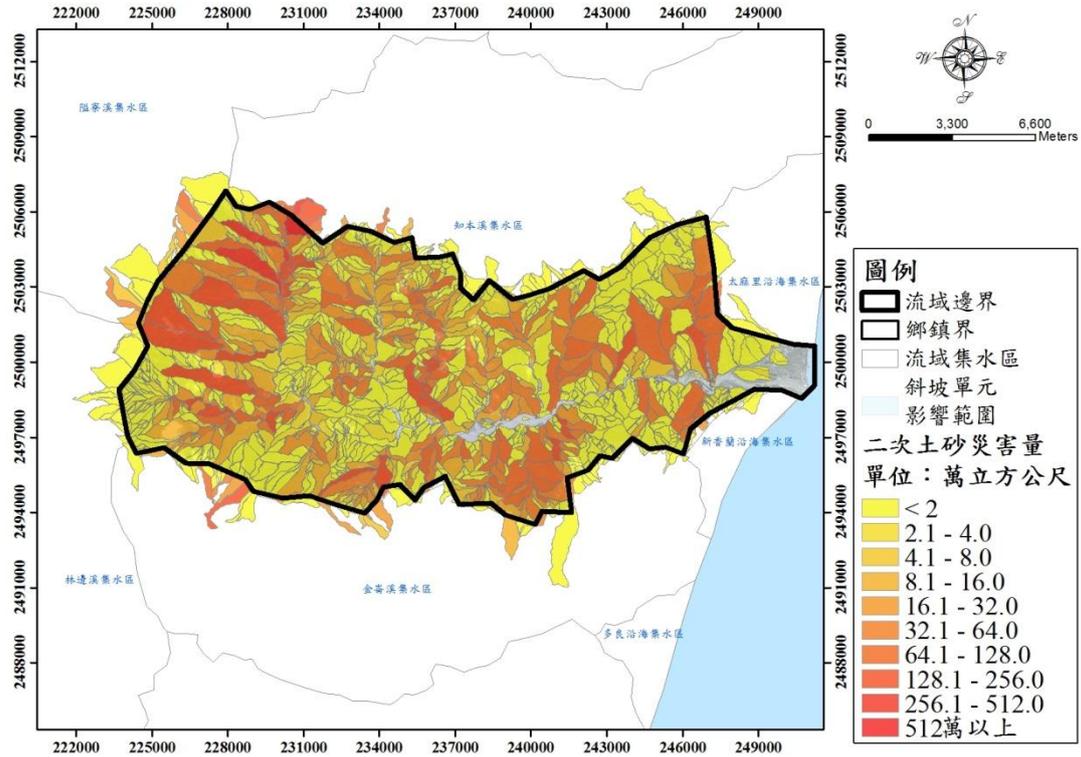
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-13 阿里山溪斜坡單元二次土砂災害土砂量分布圖



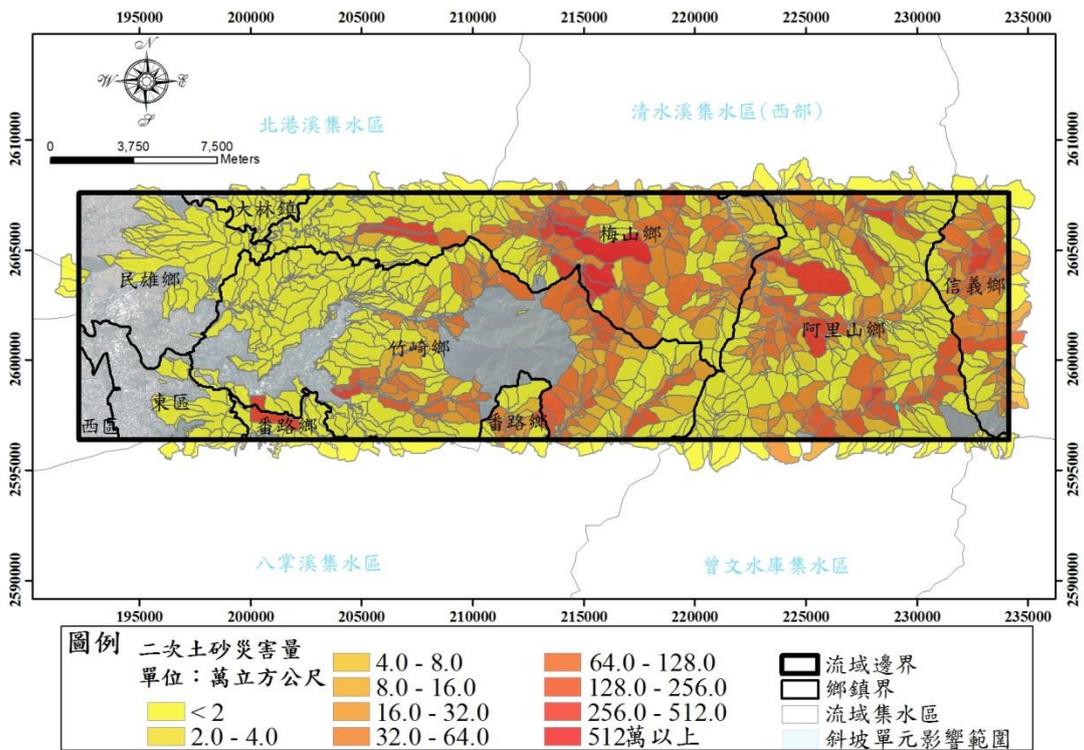
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-14 旗山溪與荖濃溪斜坡單元二次土砂災害土砂量分布圖



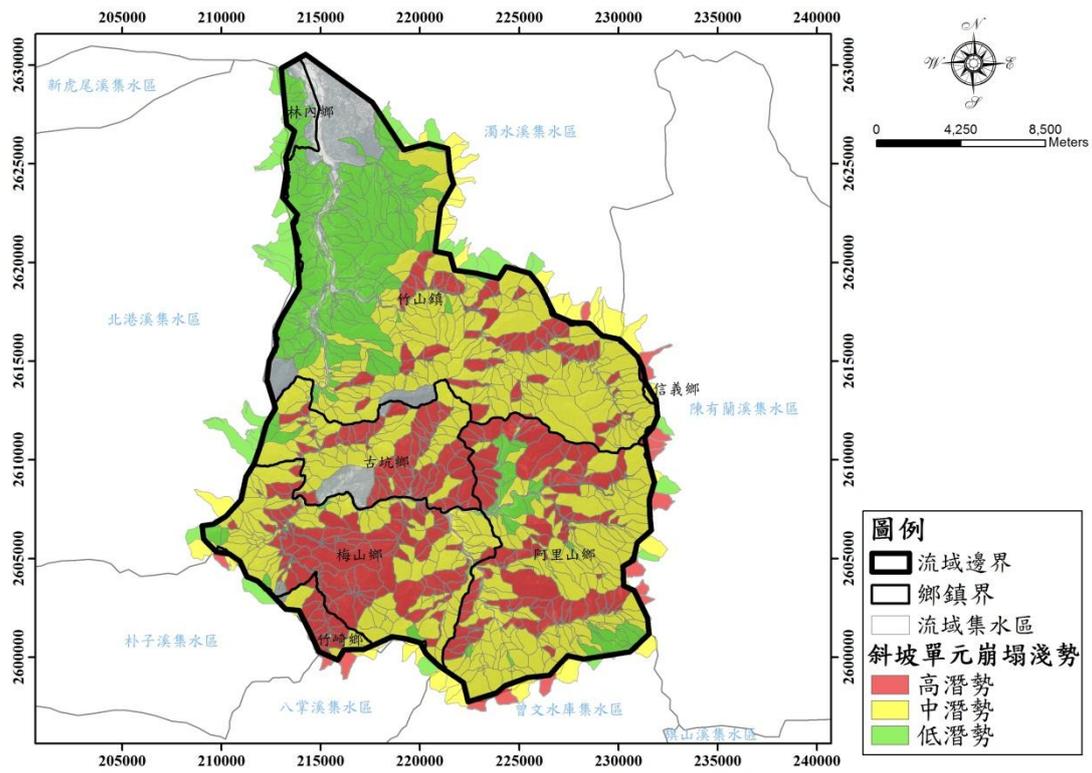
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-15 太麻里溪斜坡單元二次土砂災害土砂量分布圖



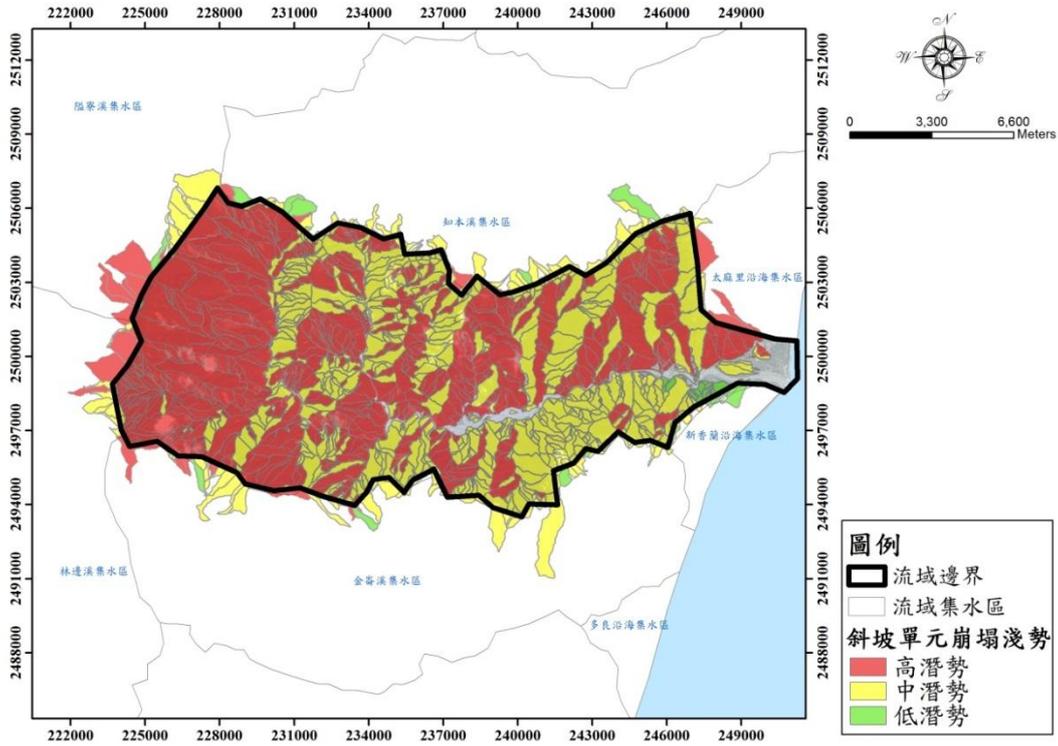
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-16 阿里山鐵路範圍斜坡單元二次土砂災害土砂量分布圖



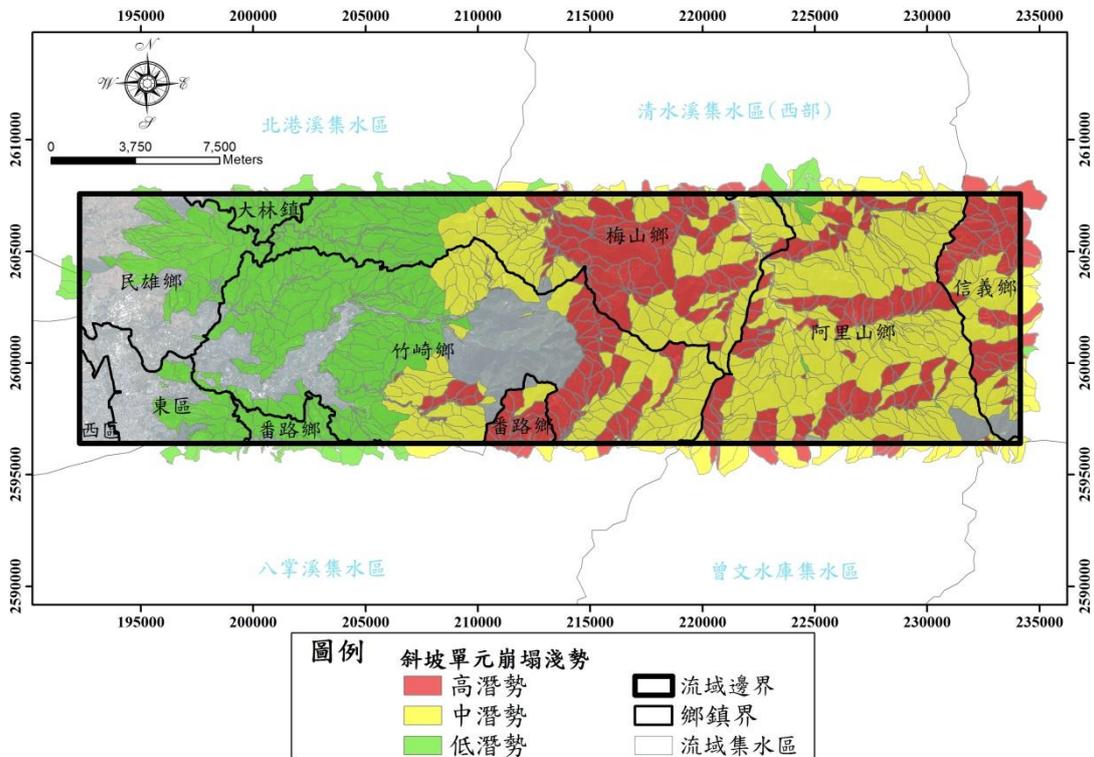
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-17 阿里山溪斜坡單元崩塌潛勢分級圖



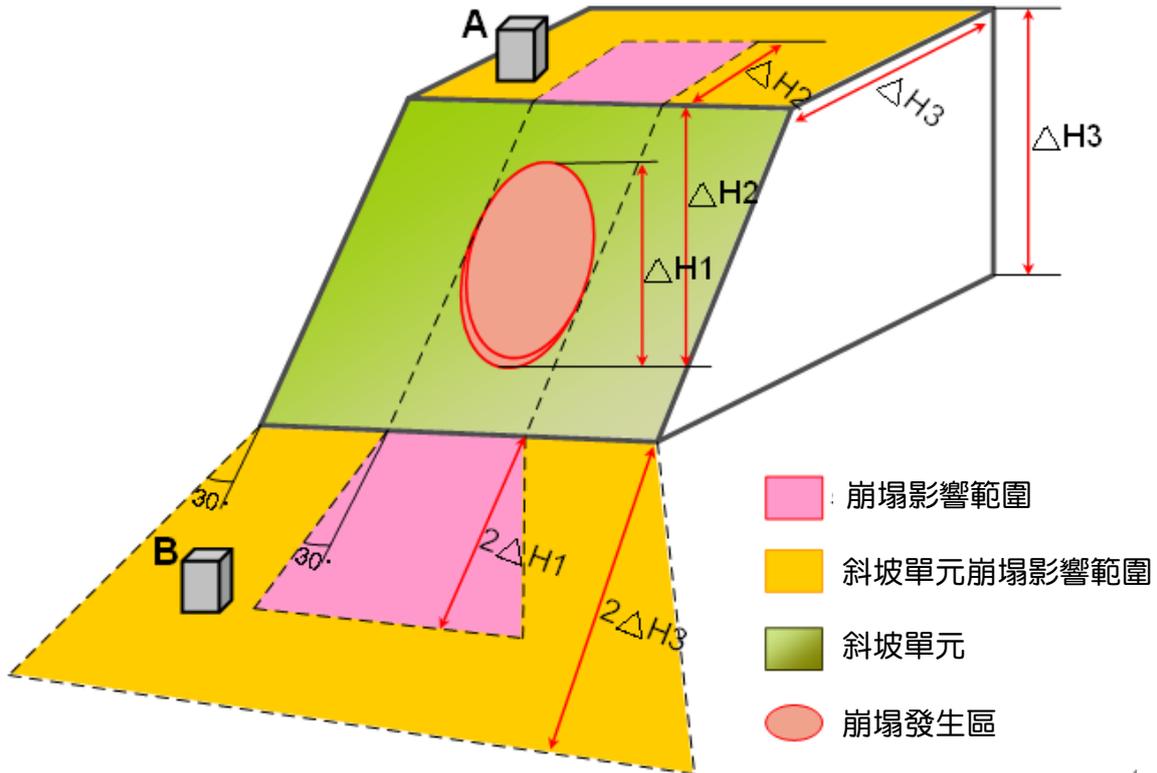
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-19 太麻里溪斜坡單元崩塌潛勢分級圖



資料來源：本計畫整理

圖 5-2-20 阿里山鐵路範圍斜坡單元崩塌潛勢分級圖

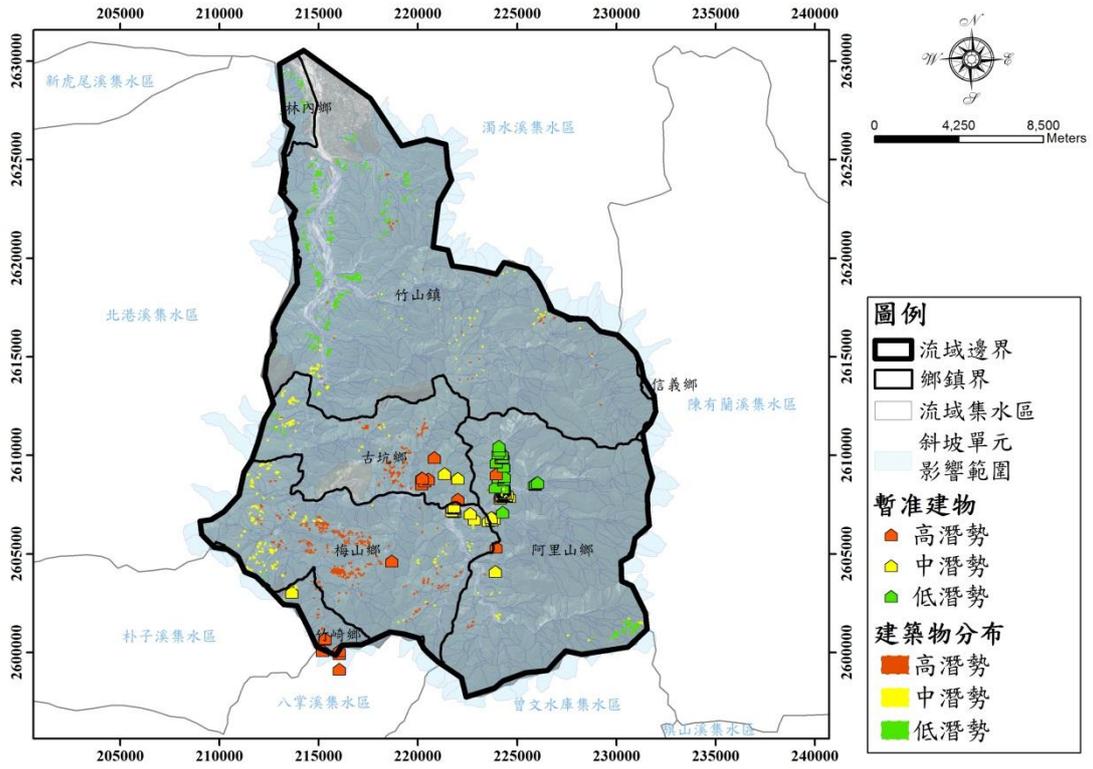


崩塌潛勢分級	崩塌影響範圍劃設原則	
	建築物在下邊坡	建築物在上邊坡
高潛勢	$2 * \Delta H3$ ， 不超過50公尺為原則	$1 * \Delta H3$ ， 不超過10公尺為原則
中潛勢	$1 * \Delta H3$ ， 不超過30公尺為原則	$2/3 * \Delta H3$ ， 不超過10公尺為原則
低潛勢	$0.5 * \Delta H3$ ， 不超過15公尺為原則	$1/3 * \Delta H3$ ， 不超過10公尺為原則

註1：本計畫採災害最大影響範圍進行保全對象潛勢評估。
 註2：災害影響範圍須以保全對象現地狀況進行調整結果為準。

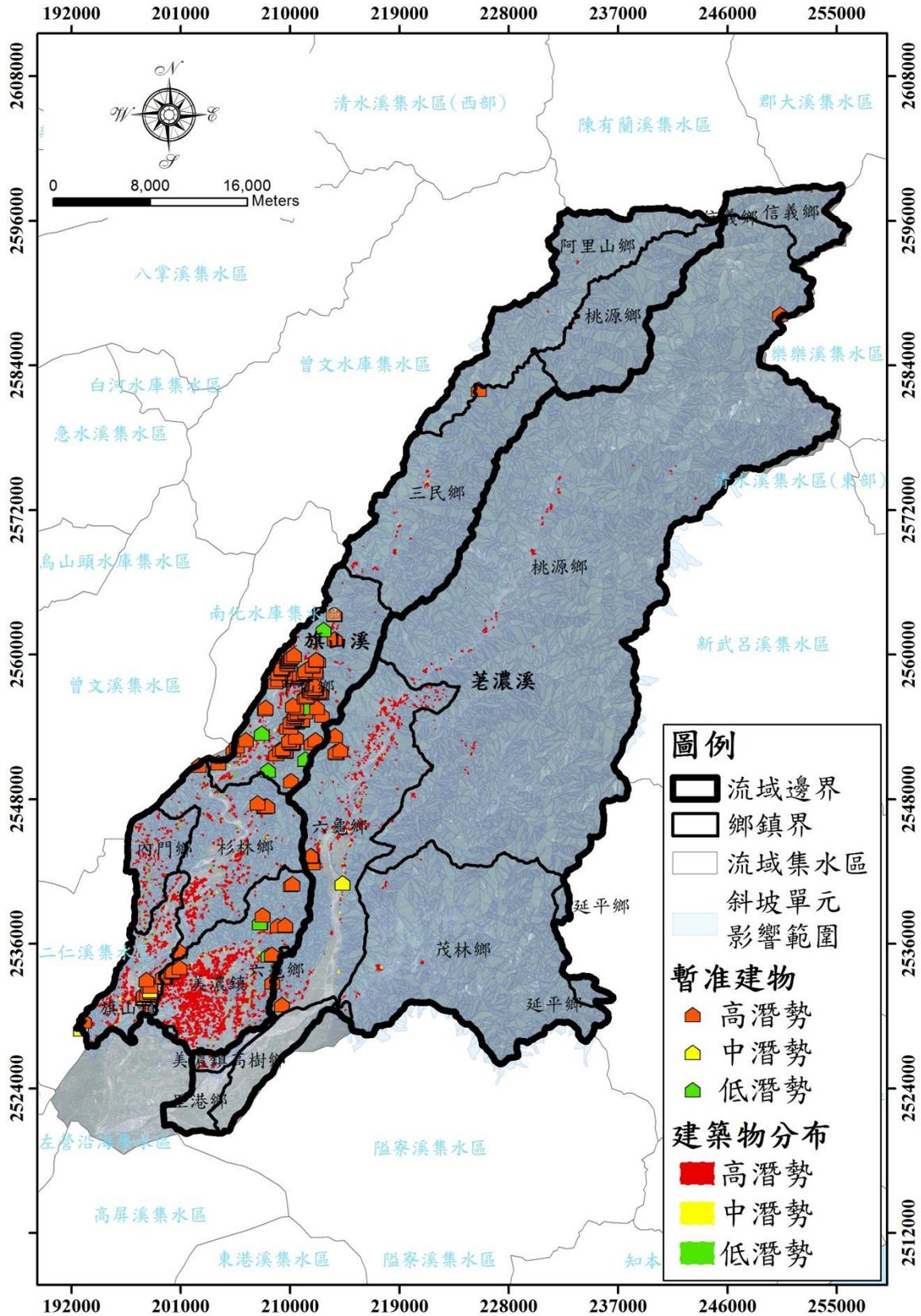
資料來源：重繪自日本土砂災害防止法第二條規定

圖 5-2-21 保全對象崩塌影響範圍評估原則



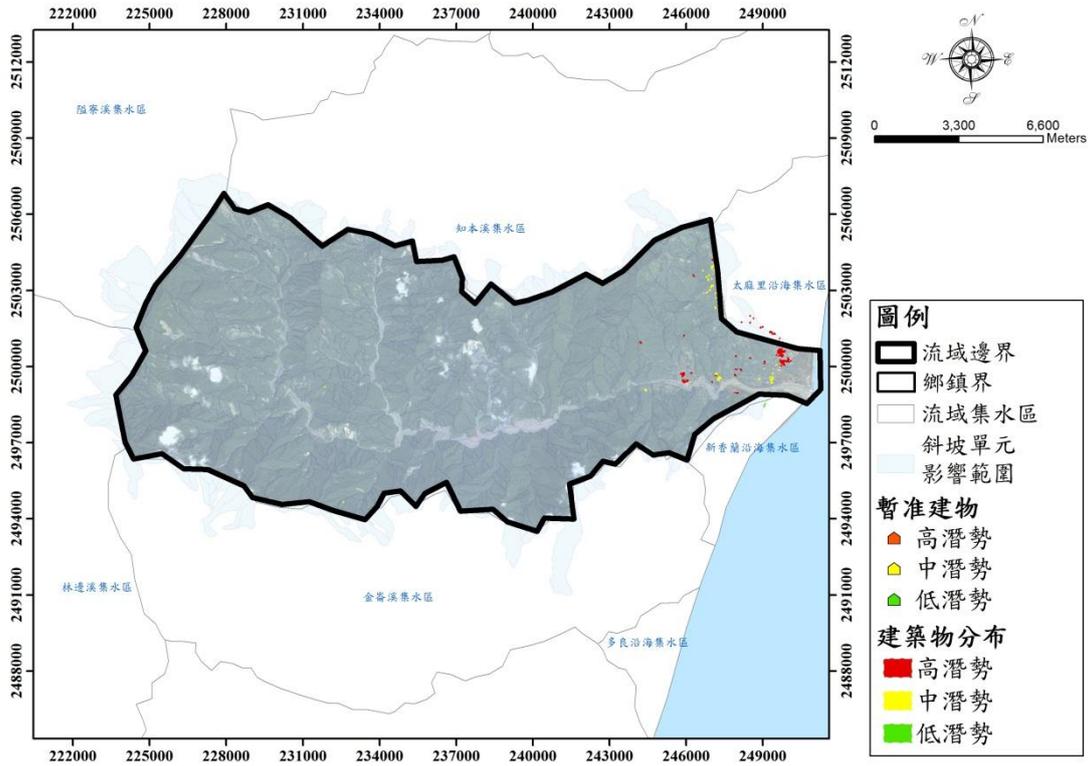
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-22 阿里山溪建築物潛勢分級圖



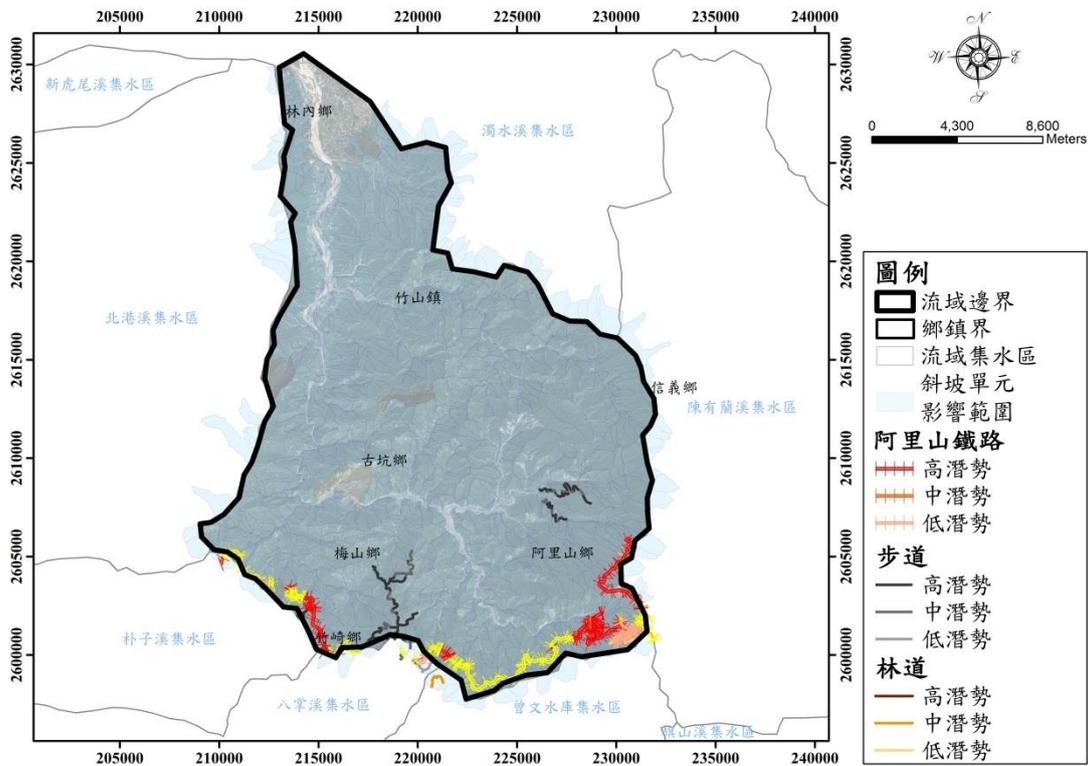
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-23 旗山溪與荖濃溪建築物潛勢分級圖



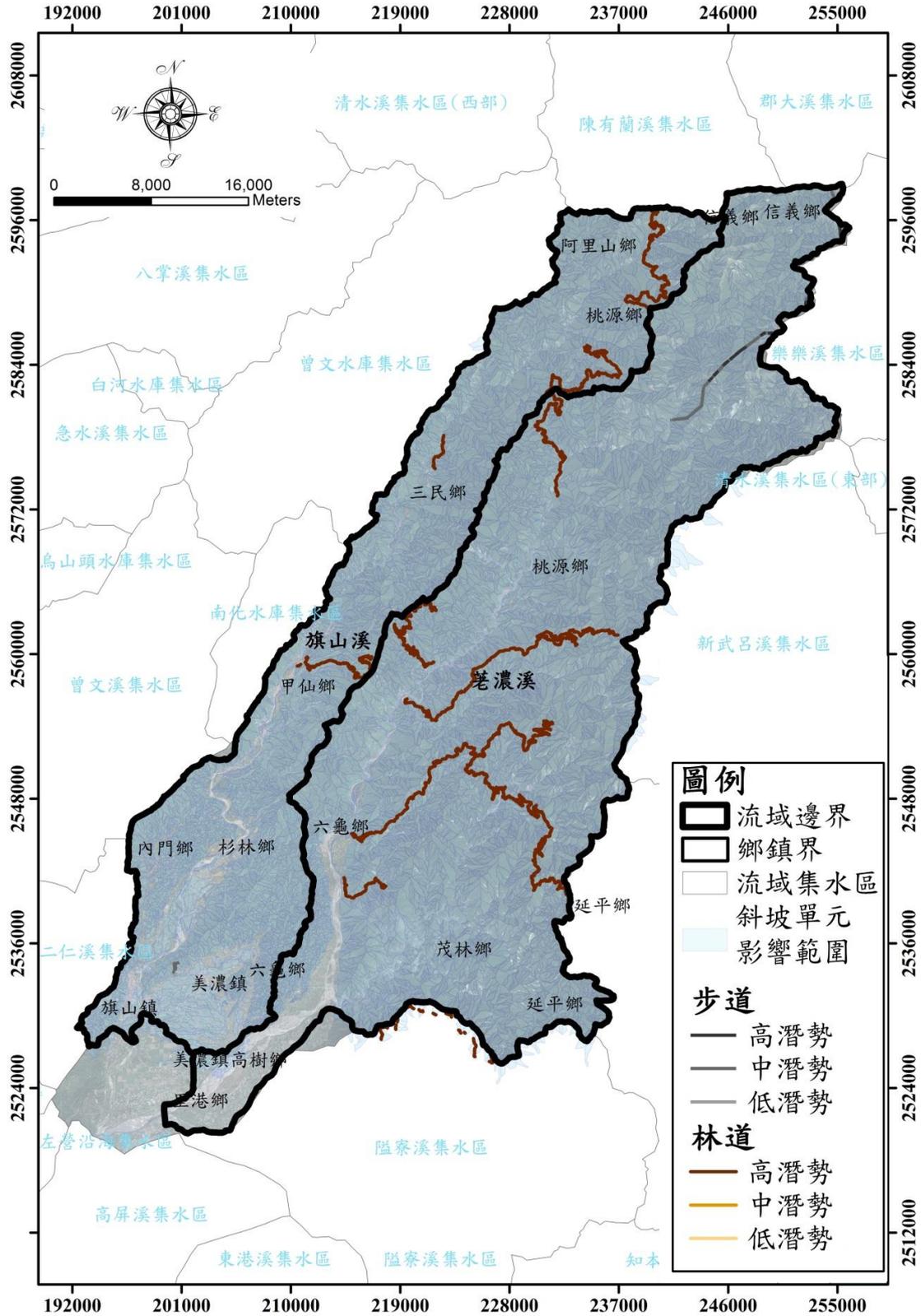
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-24 太麻里溪建築物潛勢分級圖



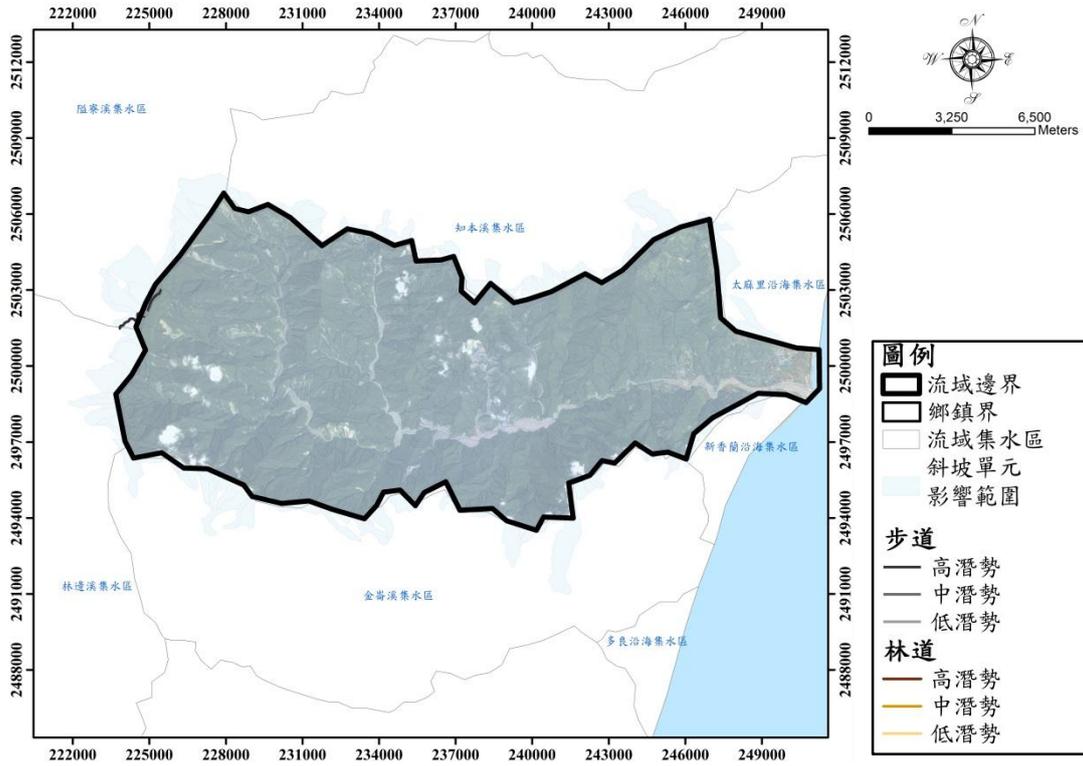
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-25 阿里山溪路網潛勢分級圖



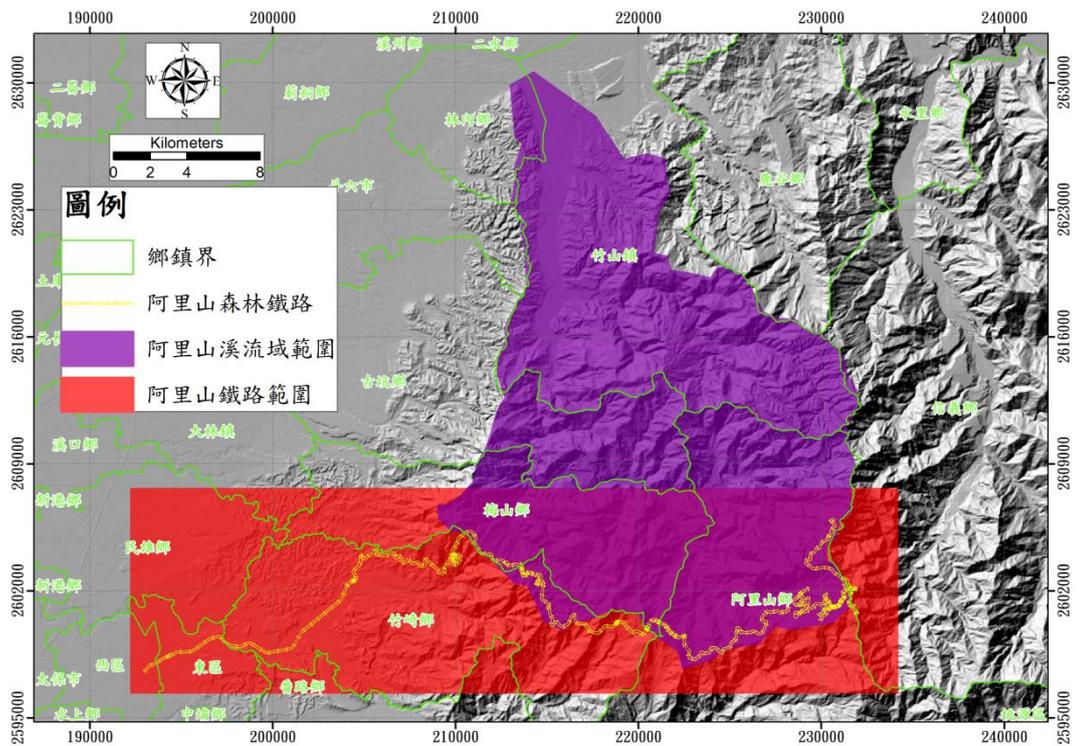
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-26 旗山溪與荖濃溪路網潛勢分級圖



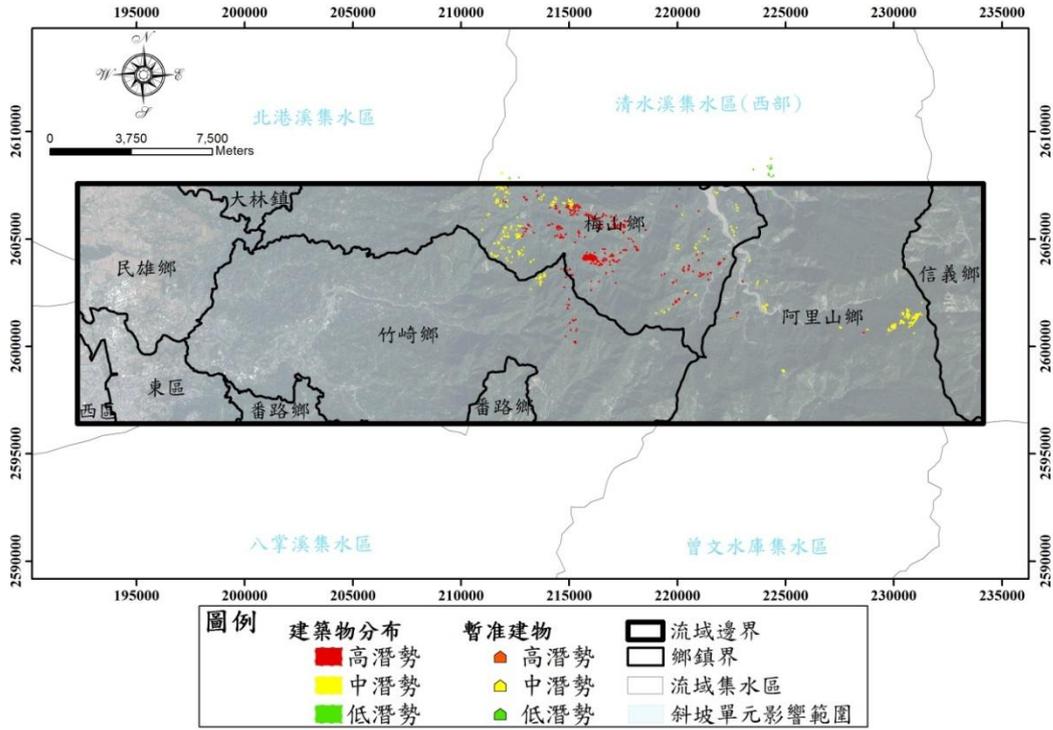
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-27 太麻里溪路網潛勢分級圖



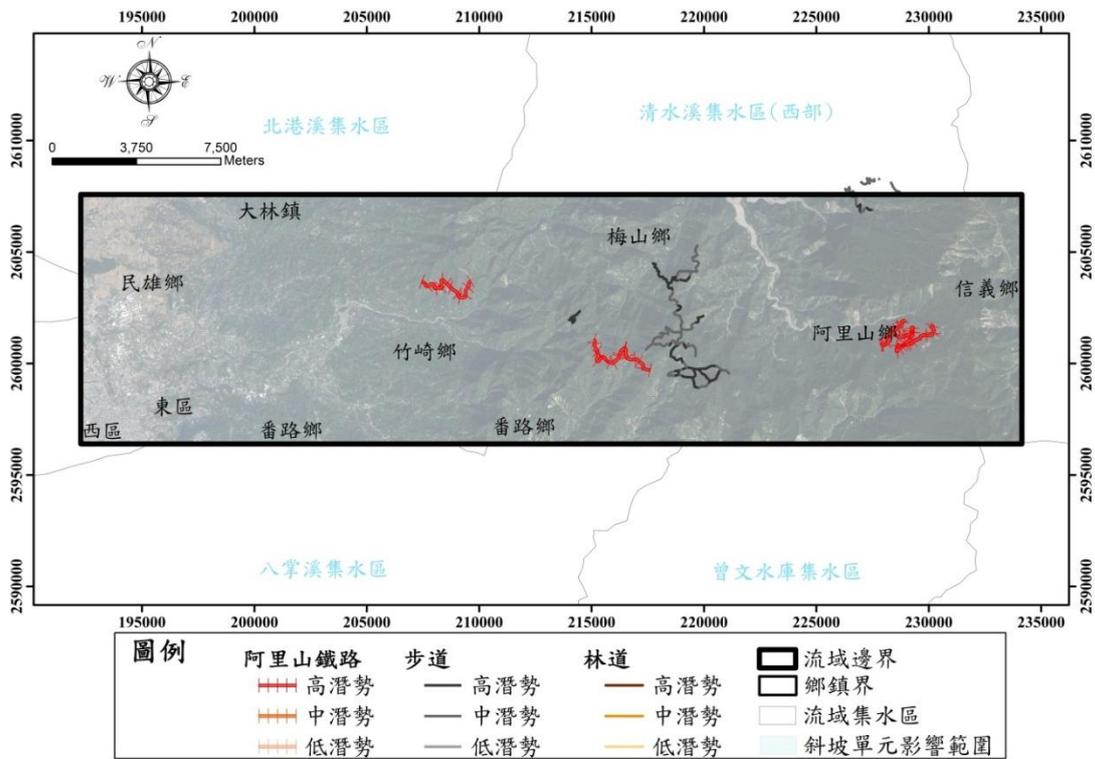
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-28 阿里山鐵路與阿里山溪流流域範圍圖



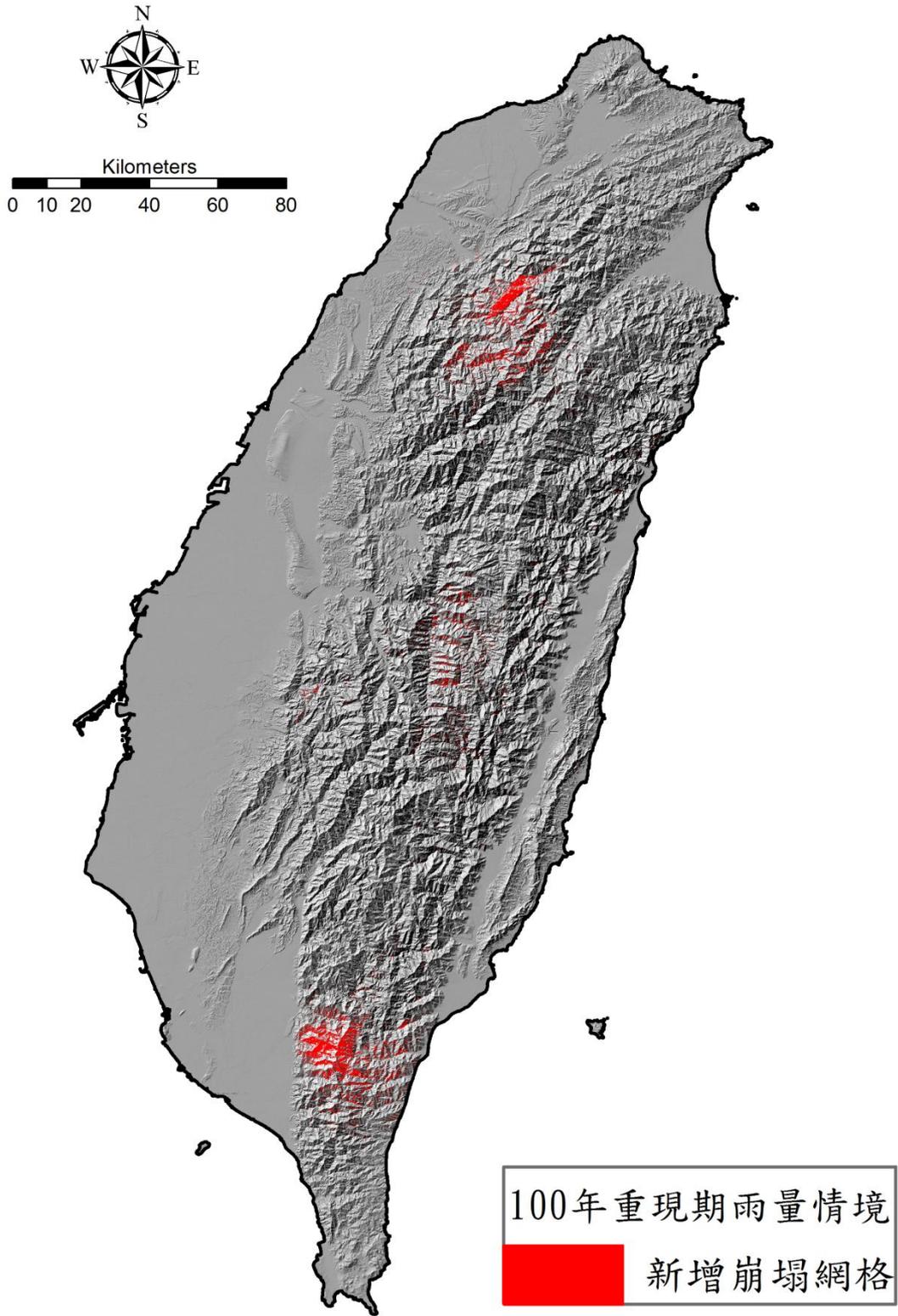
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-29 阿里山鐵路範圍建築物潛勢分級圖



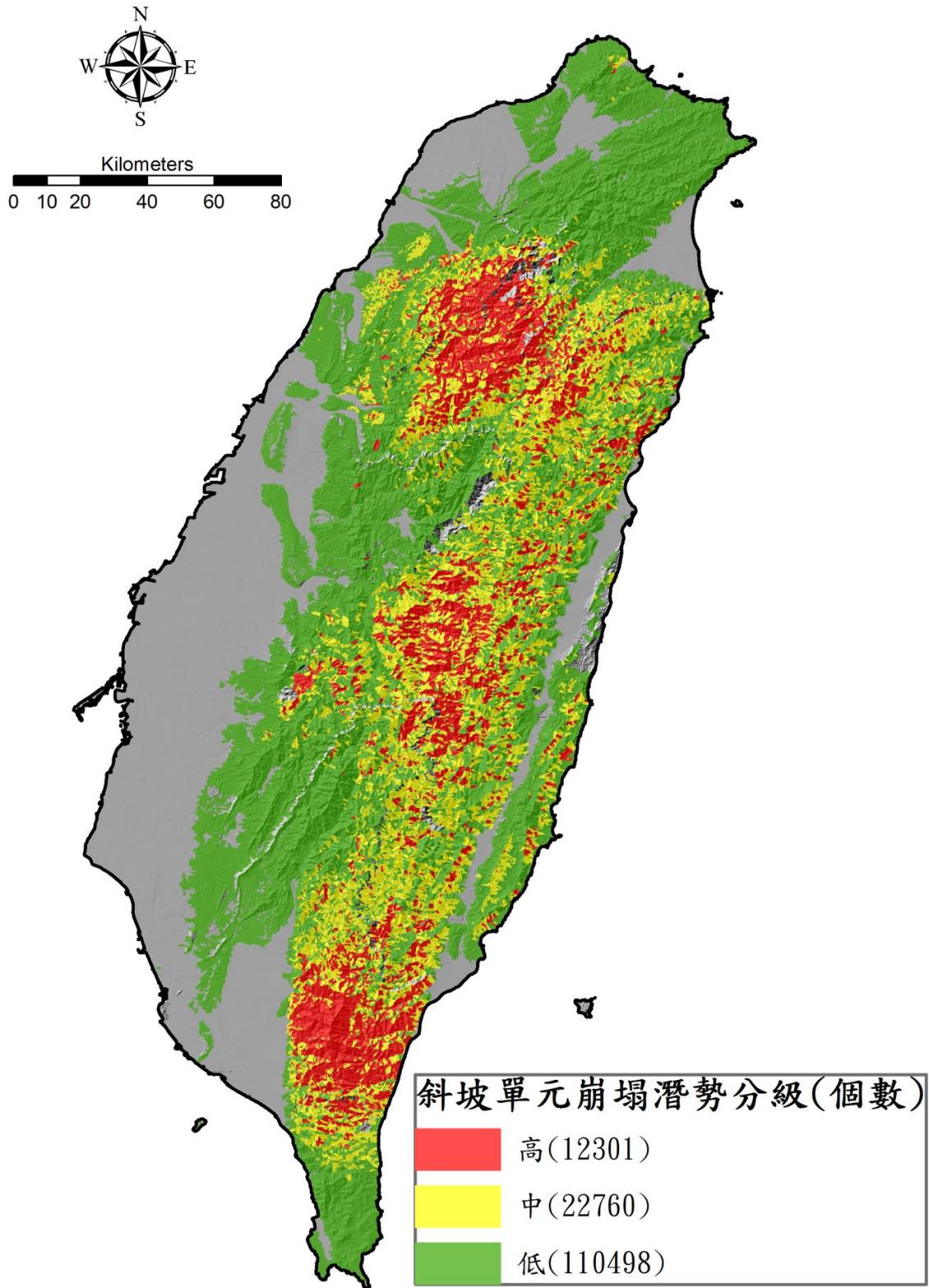
資料來源：本計畫整理

圖 5-2-30 阿里山鐵路範圍路網潛勢分級圖



(A) 新增崩塌網格分布

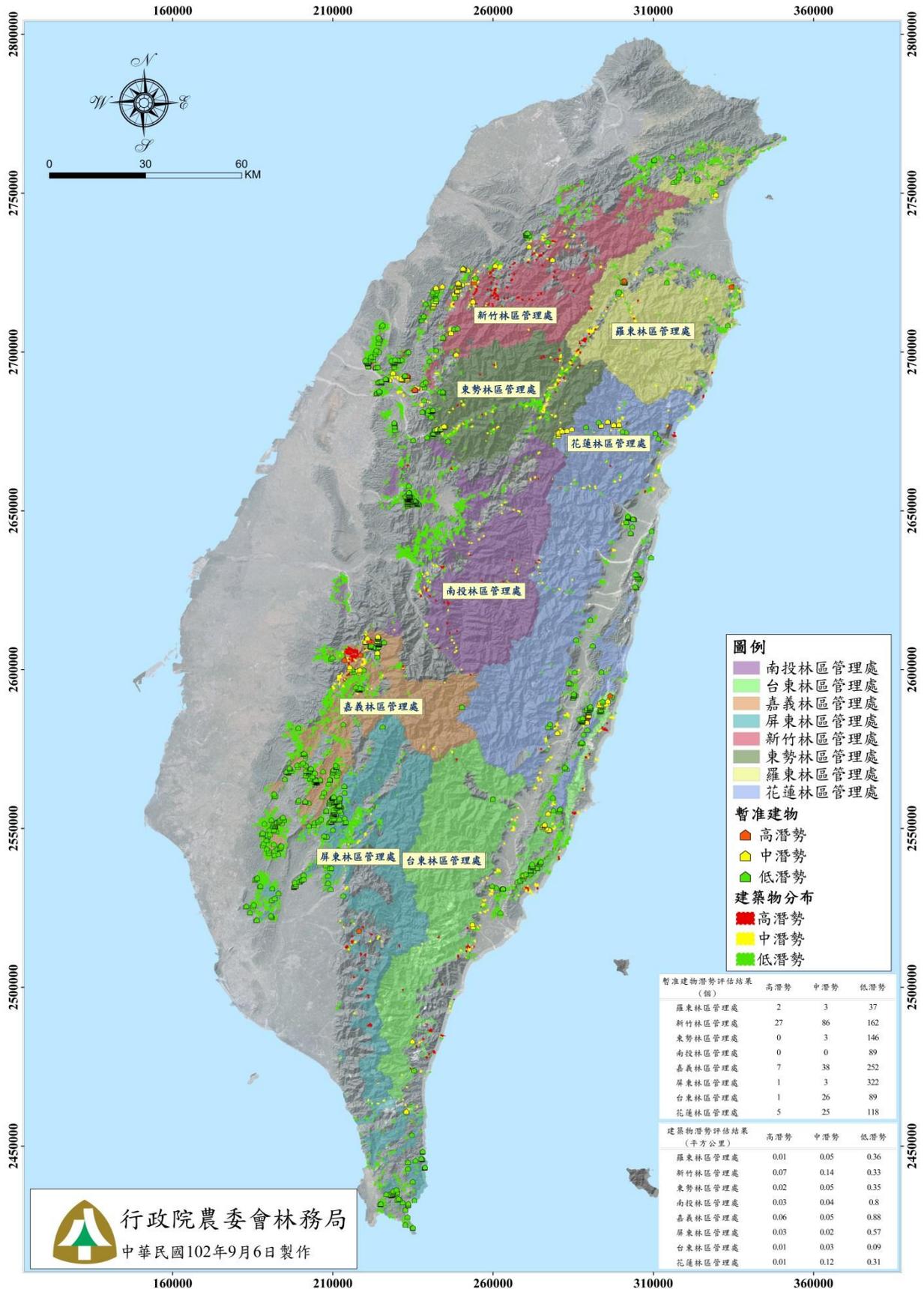
圖 5-2-31 全臺國有林班地斜坡單元崩塌潛勢分級圖
(100年重現期 72小時累積降雨)



(B) 斜坡單元崩塌潛勢分級

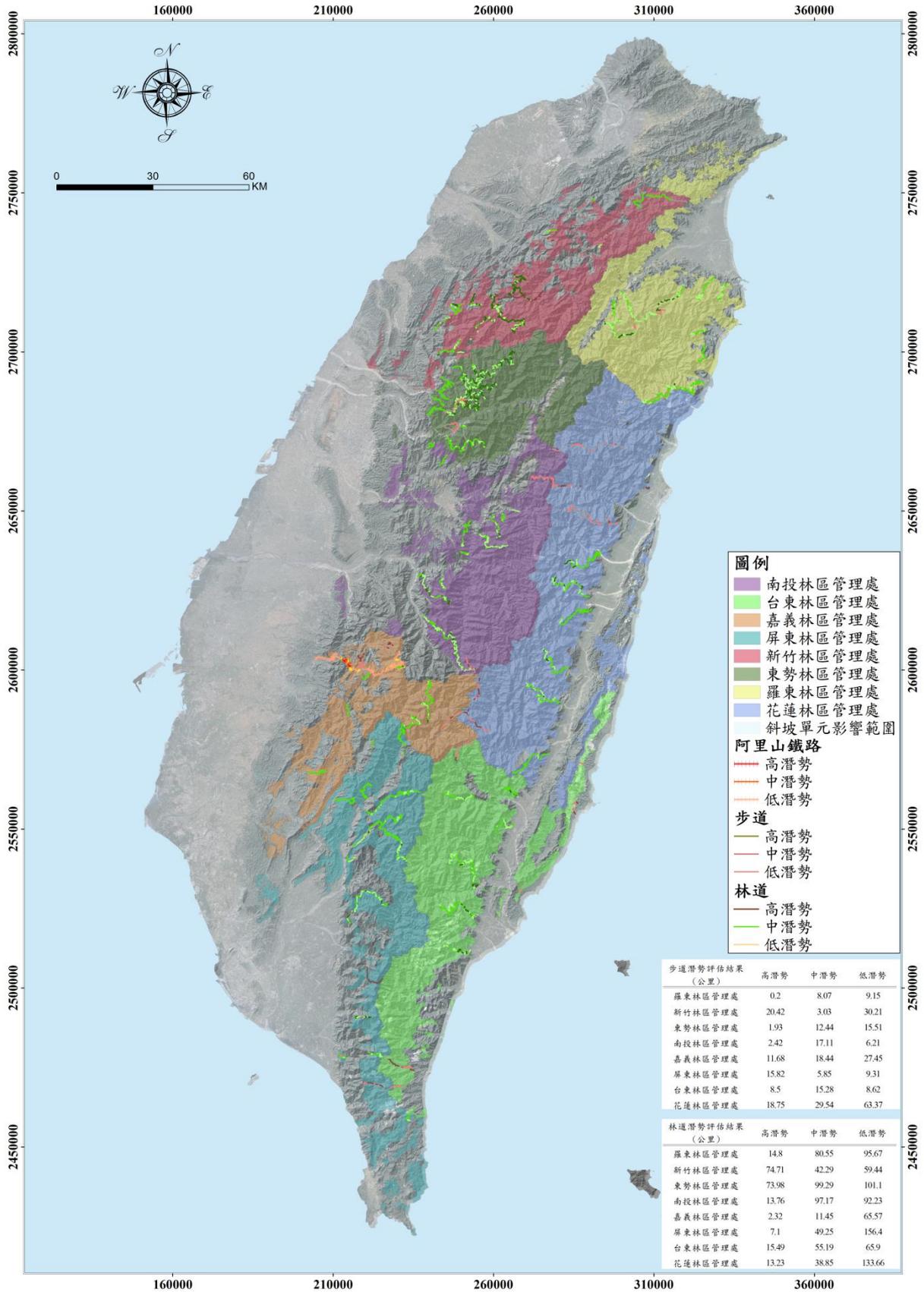
資料來源：本計畫整理。

圖 5-2-31 全臺國有林班地斜坡單元崩塌潛勢分級圖
(100 年重現期 72 小時累積降雨)(續)



資料來源：本計畫整理。

圖 5-2-32 全臺國有林建築物與暫准建物潛勢分級圖



資料來源：本計畫整理。

圖 5-2-33 全臺國有林路網潛勢分級圖

5-3 保全對象周緣崩塌地與殘留土砂現地調查

基於上述分析與評估成果，國有林地內崩塌地、殘留土砂二次災害潛勢評估結果及保全對象潛勢評估成果，須透過現地勘查進行分析與評估結果驗證。有鑑於此，本計畫擬以聚落單元(保全對象)為調查標的，參考國內外相關研究調查表，研擬以保全對象(聚落單元)為主之周緣崩塌地及殘留土砂二次災害(土石流)之現地調查流程與調查表，以利現地調查與模式驗證工作之推展，現地調查流程如圖 5-3-1 所示，調查表分為聚落基本資料調查表、崩塌地現地調查表、土石流現地調查表及既有保全對象調查表四項(表 5-3-1 至表 5-3-4)。

本計畫依據莫拉克颱風崩塌地分布範圍篩選新發部落與來吉部落為聚落調查之範例，針對聚落主要致災崩塌地、土石流潛勢溪流及坡面殘留土砂進行調查，並進行 UAV 航拍及地面 LiDAR 拍攝，分析崩塌與堆積分布及坡面殘留土砂分布結果，提供分析模式堆積高度及影響範圍驗證之用。

以下說明各項調查表內容與目的：

一、聚落基本資料調查表

參考水保局(2010)「99 年莫拉克災區山坡地聚落安全調查」計畫基本資料表，進行聚落基本資料調查與記錄，內容分類說明如下：

- (1) 基本資訊：聚落名稱、聚落編號、行政區、重要地標、地形區分區等。
- (2) 地形地質地表調查項目：山坡地區位與型態、河階地崖高、河谷地分類與集水區資料、平均坡度、地層與地質構造、排水設施、地表張裂凹陷、地表擠壓隆起、擋土設施與現況等項。
- (3) 聚落上下邊坡調查：邊坡尺度、邊坡型態、土地利用、地質構造、表層堆積及致災因子等項。
- (4) 訪談項目紀錄。



二、崩塌地現地調查表

參考水保局(2010)「99年莫拉克災區山坡地聚落安全調查」計畫崩塌地滑調查表，調查項目與地調所(2006)「都會區及周緣坡地整合性環境地質資料庫建置—坡地環境地質災害調查研究」計畫中調查項目雷同，崩塌地現地調查表項目如下所述：

- (1) 地形、地質與植生特性：地質構造、不連續面種類、崩塌材料、植生狀況、地形坡度、發生區位置、邊坡型態、邊坡坡向、趾部突出河道、河岸侵蝕等項。
- (2) 水文特性：地下水狀況、地面水匯集。
- (3) 人為因素：趾部人為開挖。
- (4) 落石崩塌調查、岩屑崩滑調查與地滑調查。
- (5) 防治工程。
- (6) 崩塌土砂殘留量評估與現況。

三、土石流現地調查表

參考水保局(2010)「99年莫拉克災區山坡地聚落安全調查」計畫土石流調查表，調查項目與水保局(2006)「土石流危險部落易致災因子調查與整治對策」的土石流易致災因子調查表項目相同，土石流現地調查表項目如下所述：

- (1) 土石流溪流特性：土石流上游發生區坡度、土石流流動段堆積材料及破碎情形、溢流點位置、溪流災害類型。
- (2) 集水區地文及植生特性：集水區面積、集水區內地層名稱、集水區內崩塌面積、集水區內崩塌區位、集水區內崩塌規模、地質構造、集水區內主要植生生長狀況等項。
- (3) 防治工程位置與型態。
- (4) 堆積區與流動區土砂殘留量評估與現況。





四、既有保全對象調查表

參考水保局(2010)「99年莫拉克災區山坡地聚落安全調查」及水保局(2008)「集水區整體調查規劃參考手冊」，研擬既有保全對象調查表，調查表內容如下所述：

- (1) 建物構造類型。
- (2) 既有保全對象住戶說明 (調查項目含保全住戶總數、其它建物類別、交通設施)。





表 5-3-1 聚落基本資料調查表

一、聚落基本資料調查表											
聚落基本資料	聚落名稱				行政區					調查時間	
	事業區編號	林班地編號			坐標(TW97)	N:	E:			記錄者	
	照片編號				地形區分類	<input type="checkbox"/> 山坡地 <input type="checkbox"/> 河階地 <input type="checkbox"/> 河谷地(含扇狀地)					
	山坡地	區位	<input type="checkbox"/> 坡頂 <input type="checkbox"/> 坡腹 <input type="checkbox"/> 坡趾								
		邊坡型態	<input type="checkbox"/> 順向坡 <input type="checkbox"/> 逆向坡 <input type="checkbox"/> 斜交坡 <input type="checkbox"/> 正交坡 <input type="checkbox"/> 階地崖 <input type="checkbox"/> 其他								
	河階地	河階崖高	<input type="checkbox"/> <5公尺 <input type="checkbox"/> 5-20公尺 <input type="checkbox"/> >20-40公尺 <input type="checkbox"/> >40公尺								
	河谷地	分類	<input type="checkbox"/> 次要河川兩岸低緩階地或緩坡地形 <input type="checkbox"/> 河川出口處具有扇狀堆積地形 <input type="checkbox"/> 其他								
		主河道寬度	公尺	集水區面積	公頃	溪流名稱					
		集水區地質災害分類與數量	<input type="checkbox"/> 崩塌	<input type="checkbox"/> 土石流	<input type="checkbox"/> 潛勢溪流	編號/等級					
			處	條	條	(水保局)					
	平均坡度	<input type="checkbox"/> <5% <input type="checkbox"/> 5%-15% <input type="checkbox"/> >15%-30% <input type="checkbox"/> >30%-40% <input type="checkbox"/> >40%-55% <input type="checkbox"/> >55%-100% <input type="checkbox"/> >100%(一至七級坡)									
	地質構造	<input type="checkbox"/> 斷層通過 <input type="checkbox"/> 褶皺通過 <input type="checkbox"/> 無			地層			主要岩性			
	表層堆積	<input type="checkbox"/> 崩積層 <input type="checkbox"/> 土石流扇狀堆積 <input type="checkbox"/> 河階堆積層 <input type="checkbox"/> 紅土礫石層 <input type="checkbox"/> 火山岩屑堆積層 <input type="checkbox"/> 其他									
	排水設施	<input type="checkbox"/> Y有 <input type="checkbox"/> N無	排水設施現況	<input type="checkbox"/> 良好 <input type="checkbox"/> 輕微淤積 <input type="checkbox"/> 阻塞現象 <input type="checkbox"/> 損壞							
	地表張裂凹陷	<input type="checkbox"/> Y有 <input type="checkbox"/> N無									
地表擠壓隆起	<input type="checkbox"/> Y有 <input type="checkbox"/> N無										
擋土設施	<input type="checkbox"/> Y有 <input type="checkbox"/> N無	擋土設施現況	<input type="checkbox"/> 良好 <input type="checkbox"/> 局部損壞 <input type="checkbox"/> 嚴重損壞								
<input type="checkbox"/> 聚落上邊坡	照片編號										
	邊坡尺度	平均投影	坡長	公尺	平均坡高	公尺	平均坡度	<input type="checkbox"/> <5% <input type="checkbox"/> 5%-15% <input type="checkbox"/> >15%-30% <input type="checkbox"/> >30%-40% <input type="checkbox"/> >40%-55% <input type="checkbox"/> >55%-100% <input type="checkbox"/> >100%			
	邊坡型態	<input type="checkbox"/> 順向坡 <input type="checkbox"/> 逆向坡 <input type="checkbox"/> 斜交坡 <input type="checkbox"/> 正交坡 <input type="checkbox"/> 階地崖 <input type="checkbox"/> 其他									
	土地利用	<input type="checkbox"/> 農墾地 <input type="checkbox"/> 裸露地 <input type="checkbox"/> 林地 <input type="checkbox"/> 竹林 <input type="checkbox"/> 草地 <input type="checkbox"/> 其他							備註		
	地質構造	<input type="checkbox"/> 斷層通過 <input type="checkbox"/> 褶皺通過 <input type="checkbox"/> 無			地層			主要岩性			
	表層堆積	<input type="checkbox"/> 崩積層 <input type="checkbox"/> 土石流扇狀堆積 <input type="checkbox"/> 河階堆積層 <input type="checkbox"/> 紅土礫石層 <input type="checkbox"/> 火山岩屑堆積層 <input type="checkbox"/> 其他									
	致災因子	<input type="checkbox"/> 崩塌	<input type="checkbox"/> 土石流	<input type="checkbox"/> 溝谷侵蝕	<input type="checkbox"/> 潛勢溪流	編號/等級					
<input type="checkbox"/> 聚落下邊坡	照片編號										
	邊坡尺度	平均投影	坡長	公尺	平均坡高	公尺	平均坡度	<input type="checkbox"/> <5% <input type="checkbox"/> 5%-15% <input type="checkbox"/> >15%-30% <input type="checkbox"/> >30%-40% <input type="checkbox"/> >40%-55% <input type="checkbox"/> >55%-100% <input type="checkbox"/> >100%			
	邊坡型態	<input type="checkbox"/> 順向坡 <input type="checkbox"/> 逆向坡 <input type="checkbox"/> 斜交坡 <input type="checkbox"/> 正交坡 <input type="checkbox"/> 階地崖 <input type="checkbox"/> 其他									
	土地利用	<input type="checkbox"/> 農墾地 <input type="checkbox"/> 裸露地 <input type="checkbox"/> 林地 <input type="checkbox"/> 竹林 <input type="checkbox"/> 草地 <input type="checkbox"/> 其他							備註		
	地質構造	<input type="checkbox"/> 斷層通過 <input type="checkbox"/> 褶皺通過 <input type="checkbox"/> 無			地層			主要岩性			
	表層堆積	<input type="checkbox"/> 崩積層 <input type="checkbox"/> 土石流扇狀堆積 <input type="checkbox"/> 河階堆積層 <input type="checkbox"/> 紅土礫石層 <input type="checkbox"/> 火山岩屑堆積層 <input type="checkbox"/> 其他									
	致災因子	<input type="checkbox"/> 崩塌	<input type="checkbox"/> 土石流	<input type="checkbox"/> 潛勢溪流	編號/等級						
備註	訪談項目記錄：										

資料來源：修改自水保局(2010)「99年莫拉克災區山坡地聚落安全調查計畫」





表 5-3-2 崩塌/地滑調查表

二、崩塌/地滑調查表											
林班地編號	區位			<input type="checkbox"/> 上邊坡 <input type="checkbox"/> 下邊坡	調查編號						
類型	<input type="checkbox"/> 落石 <input type="checkbox"/> 岩屑崩滑 <input type="checkbox"/> 地滑 <input type="checkbox"/> 順向坡			坐標(TW97)	N:	E:					
照片編號				調查時間	紀錄者						
防治工程	<input type="checkbox"/> 全面整治 <input type="checkbox"/> 局部整治 <input type="checkbox"/> 無			防治工程現況	<input type="checkbox"/> 損壞 <input type="checkbox"/> 良好						
地質構造	<input type="checkbox"/> 斷層通過 <input type="checkbox"/> 褶皺通過 <input type="checkbox"/> 無			地層	主要岩性						
不連續面種類	<input type="checkbox"/> 層理 <input type="checkbox"/> 劈理 <input type="checkbox"/> 片理 <input type="checkbox"/> 無法研判			不連續面位態	N / <input type="checkbox"/> 無法量測						
崩塌材料	<input type="checkbox"/> 新鮮岩塊 <input type="checkbox"/> 風化土石 <input type="checkbox"/> 礫石(紅土礫石) <input type="checkbox"/> 崩積土石 <input type="checkbox"/> 礦渣堆積 <input type="checkbox"/> 填土 <input type="checkbox"/> 其他(可複選)										
植生狀況	<input type="checkbox"/> 裸露 <input type="checkbox"/> 稀疏 <input type="checkbox"/> 茂密 <input type="checkbox"/> 完全覆蓋										
地形坡度	<input type="checkbox"/> <5% <input type="checkbox"/> 5%-15% <input type="checkbox"/> >15%-30% <input type="checkbox"/> >30%-40% <input type="checkbox"/> >40%-55% <input type="checkbox"/> >55%-100% <input type="checkbox"/> >100%(一至七級坡)										
發生區位置	<input type="checkbox"/> 坡頂 <input type="checkbox"/> 坡腹 <input type="checkbox"/> 坡趾 <input type="checkbox"/> 全坡面										
邊坡型態	<input type="checkbox"/> 順向坡 <input type="checkbox"/> 逆向坡 <input type="checkbox"/> 斜交坡 <input type="checkbox"/> 正交坡 <input type="checkbox"/> 階地崖 <input type="checkbox"/> 其他										
邊坡坡向	<input type="checkbox"/> 東 <input type="checkbox"/> 東南 <input type="checkbox"/> 南 <input type="checkbox"/> 西南 <input type="checkbox"/> 西 <input type="checkbox"/> 西北 <input type="checkbox"/> 北 <input type="checkbox"/> 東北										
地下水狀況	<input type="checkbox"/> 乾 <input type="checkbox"/> 溼 <input type="checkbox"/> 滲水 <input type="checkbox"/> 湧水			地面水匯集	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無		河岸侵蝕	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無			
趾部人為開挖	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無			趾部突出河道	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無		岩盤出露	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無			
落石	坡面幾何	崖高: _____ m 崖寬: _____ m		活動頻率 <input type="checkbox"/> 經常 <input type="checkbox"/> 偶爾 <input type="checkbox"/> 極少							
	危石有無	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無									
	崖錐堆積	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無	平均厚度	<input type="checkbox"/> ≤10m <input type="checkbox"/> >10m		崖錐塊石	最大粒徑 _____ m				
岩屑崩滑	主要塊石粒徑	<input type="checkbox"/> <20 cm <input type="checkbox"/> 20-50 cm <input type="checkbox"/> 50-100 cm <input type="checkbox"/> 100-200 cm <input type="checkbox"/> >200 cm									
	堆積	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無	平均厚度	<input type="checkbox"/> ≤2m <input type="checkbox"/> 2-5m <input type="checkbox"/> 5-10m <input type="checkbox"/> >10 m			崩塌面積				
地滑	崩體材料組成	<input type="checkbox"/> 岩屑(≥2mm) _____ % <input type="checkbox"/> 土砂(<2mm) _____ %									
	主崩崖特徵	崖高: _____ m 崖寬: _____ m	崖面新鮮		<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否						
		主崩崖下方有窪地或水池	<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否		冠部有無張力裂隙	<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否					
	平面型(含楔型)滑動體特徵	坡面位態	N /		坡頂殘留岩塊	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無		坡面崩積岩塊	<input type="checkbox"/> Y.有 <input type="checkbox"/> N.無		
		不連續面1位態	N /		不連續面1種類	<input type="checkbox"/> 層面 <input type="checkbox"/> 節理面 <input type="checkbox"/> 劈理、片理面					
		不連續面2位態	N /		不連續面2種類	<input type="checkbox"/> 層面 <input type="checkbox"/> 節理面 <input type="checkbox"/> 劈理、片理面					
		坡趾坡度是否大於不連續面傾角			<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否		坡趾是否有自由端出露			<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否	
圓弧型滑動體特徵	外觀呈凹陷地形		<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否		上段呈下陷地形			<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否			
	中段呈緩坡狀		<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否		下段呈隆起地形			<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否			
	崩塌體與圍岩剪切破壞, 土石破碎		<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否		兩翼排水溝呈雙溝同源			<input type="checkbox"/> Y.是 <input type="checkbox"/> N.否			
其他描述											

資料來源：修改自水保局(2010)「99年莫拉克災區山坡地聚落安全調查計畫」



表 5-3-3 土石流調查表

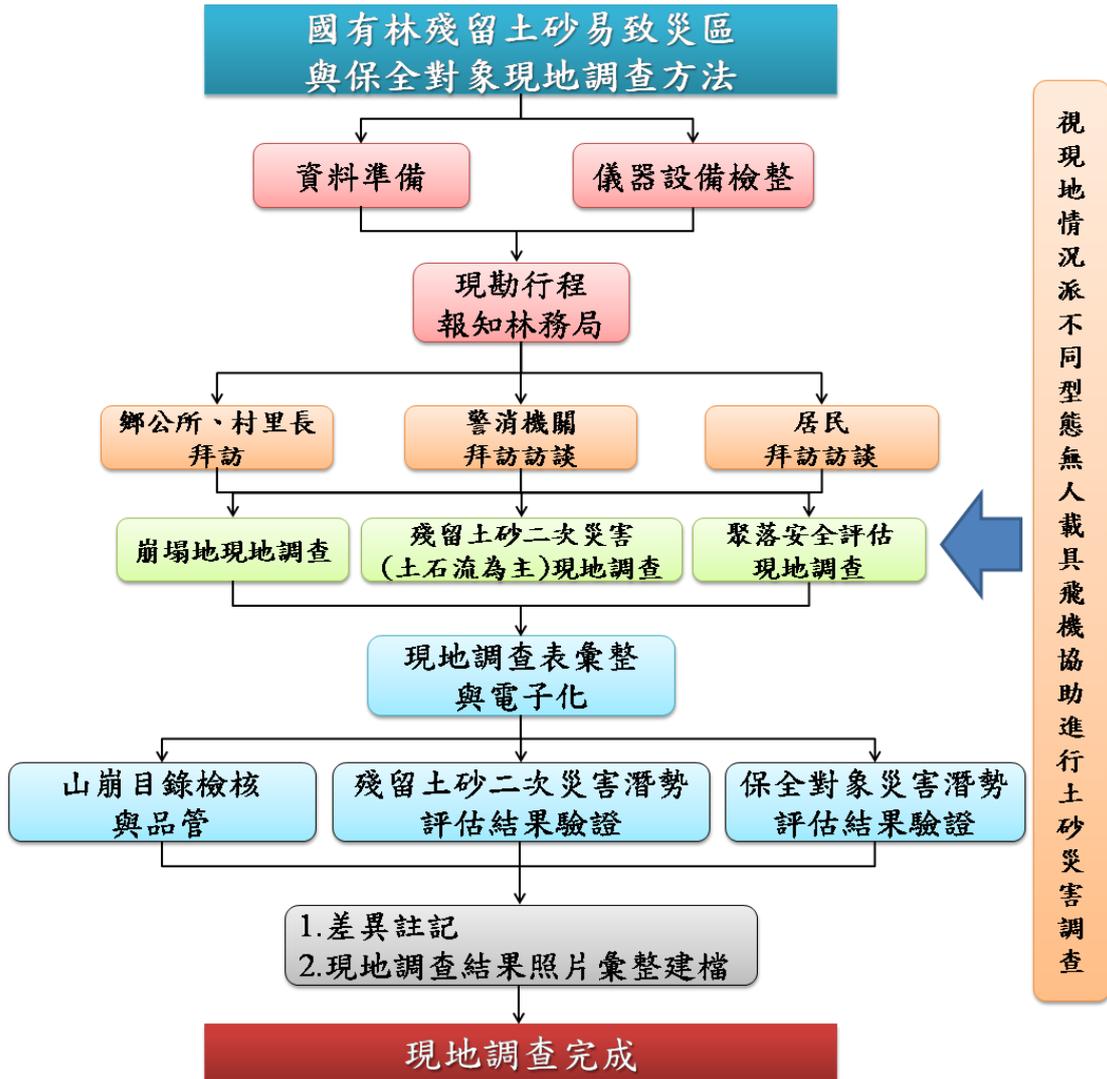
三、土石流調查表						
林班地編號		區位	<input type="checkbox"/> 上邊坡 <input type="checkbox"/> 下邊坡 <input type="checkbox"/> 左側邊 <input type="checkbox"/> 右側邊		調查時間	
調查點編號		溢流點坐標(TW97)	N:	E:	照片編號	記錄者
溢流點位置	<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 坡度陡變處 <input type="checkbox"/> 地形開闊處起點 <input type="checkbox"/> 谷口 <input type="checkbox"/> 障礙物處 <input type="checkbox"/> 河道轉彎處 <input type="checkbox"/> 其他位置【請加描述】					
防治工程	<input type="checkbox"/> 全面整治 <input type="checkbox"/> 局部整治 <input type="checkbox"/> 無			防治工程現況	<input type="checkbox"/> 損壞 <input type="checkbox"/> 良好	
地質構造	<input type="checkbox"/> 斷層通過 <input type="checkbox"/> 褶皺通過 <input type="checkbox"/> 無			水流狀況	<input type="checkbox"/> 常年有水 <input type="checkbox"/> 乾季無水	
集水區面積(公頃)		溪流長度(m)		溪流平均坡度(%)		
集水區內地層名稱		主要岩性				
集水區內崩塌面積(公頃)		集水區內崩塌率	<input type="checkbox"/> 0% <input type="checkbox"/> ≤5% <input type="checkbox"/> 5%~10% <input type="checkbox"/> 10%~15% <input type="checkbox"/> ≥15%			
集水區內崩塌區位	<input type="checkbox"/> 上游(U) <input type="checkbox"/> 中游(M) <input type="checkbox"/> 下游(D)					
集水區內崩塌規模	<input type="checkbox"/> 無明顯崩塌(崩塌率<1%) <input type="checkbox"/> 小規模崩塌(崩塌率1~5%) <input type="checkbox"/> 明顯大面積崩塌(崩塌率>5%)					
土石流上游發生區坡度	<input type="checkbox"/> <5% <input type="checkbox"/> 5%-15% <input type="checkbox"/> 15%-30% <input type="checkbox"/> 30%-40% <input type="checkbox"/> 40%-55% <input type="checkbox"/> >55%-100% <input type="checkbox"/> >100%(一至七級坡)					
土石流流動段堆積材料破碎情形	A.土石材料平均粒徑≥30公分		堆積材料破碎情形		照片編號	
	B.土石材料平均粒徑8~30公分		上游：，最大粒徑__m			
	C.土石材料平均粒徑≤8公分		中游：，最大粒徑__m			
	D.無明顯堆積材料		下游：，最大粒徑__m			
集水區內主要植生狀況	A.裸岩			植生狀況	照片編號	
	B.落石堆積(無植被，或植被面積<10%)					
	C.植被稀疏：10% ≤ 植被面積 < 30%				上游：	
	D.植被中等稀疏：30% ≤ 植被面積 < 80%				中游：	
	E.植被密集：植被面積 ≥ 80%				下游：	
溪流災害類型(可複選)	A.溪流型土石流 B.坡地型土石流			災害類型	照片編號	
	C.非土石流/崩塌 D.非土石流/岩屑崩滑			上游：		
	E.非土石流/侵蝕溝 F.非土石流/淺層滑動			中游：		
	G.其它【請加描述】			下游：		
土石流殘留土砂評估與現況	現況說明	流動區： 堆積區：	殘留土砂 範圍與面積	流動區： 堆積區：	殘留土砂厚度	流動區： 堆積區：
土石流殘留土砂現況照片與相關說明						

資料來源：修改自水保局(2010)「99年莫拉克災區山坡地聚落安全調查計畫」

表 5-3-4 既有保全對象調查表

四、既有保全對象調查表				
聚落名稱	聚落編號		林班地編號	
建物構造	<input type="checkbox"/> 鋼筋混凝土 <input type="checkbox"/> 鋼結構 <input type="checkbox"/> 磚造 <input type="checkbox"/> 木造 <input type="checkbox"/> 其他			
保全對象 住戶說明	1. 保全住戶總數	<input type="checkbox"/> 無住戶 <input type="checkbox"/> 1~4戶 <input type="checkbox"/> 5戶以上		
	2. 其他建物類別	<input type="checkbox"/> 學校 <input type="checkbox"/> 醫院 <input type="checkbox"/> 工廠 <input type="checkbox"/> 地方信仰中心 <input type="checkbox"/> 農舍或倉庫 <input type="checkbox"/> 活動中心 <input type="checkbox"/> 其他公共建物【 】		
	3. 交通設施	<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 橋梁【 】 <input type="checkbox"/> 道路【 】		
保全住戶編號	照片編號	致災因子	坐標(TW97)	保全住戶地址
		<input type="checkbox"/> 崩塌 <input type="checkbox"/> 地滑 <input type="checkbox"/> 土石流	N_____ E_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 鄰
		<input type="checkbox"/> 崩塌 <input type="checkbox"/> 地滑 <input type="checkbox"/> 土石流	N_____ E_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 鄰
		<input type="checkbox"/> 崩塌 <input type="checkbox"/> 地滑 <input type="checkbox"/> 土石流	N_____ E_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 鄰
		<input type="checkbox"/> 崩塌 <input type="checkbox"/> 地滑 <input type="checkbox"/> 土石流	N_____ E_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 鄰
		<input type="checkbox"/> 崩塌 <input type="checkbox"/> 地滑 <input type="checkbox"/> 土石流	N_____ E_____	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 鄰

資料來源：修改自水保局(2010)「99年莫拉克災區山坡地聚落安全調查計畫」



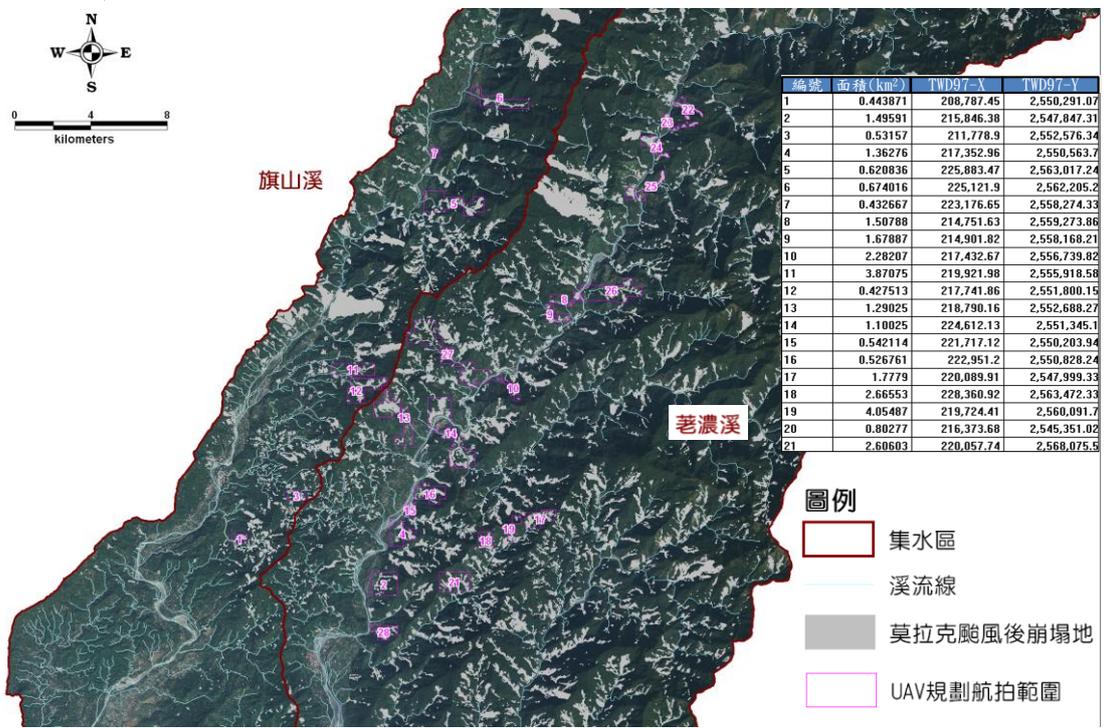
資料來源：本計畫整理

圖 5-3-1 現地調查流程

5-4 無人載具(UAV)中低空航拍成果

依據莫拉克颱風後崩塌地分布研判，初步評估旗山溪及荖濃溪部分重災區辦理崩塌地與殘留土砂現地調查，恐遭遇道路阻斷或人員無法通達之情況。有鑑於此，本計畫考量調查地點周遭地形、氣候與交通狀況，派遣不同型式(定翼機及旋翼機)之無人載具飛機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV，以下簡稱 UAV)執行中低空航拍任務，拍攝現地調查區域既有崩塌地及殘留土砂分布，透過現況照片研判崩塌、土石流殘留土砂分布範圍，並蒐集最近期影響颱風事件雨量資料，搭配土砂模擬殘留分布結果修正之數值地形，完成土砂二次災害數值模擬成果，以 UAV 研判之殘留土砂分布範圍進行模式驗證，據此修訂土砂二次災害模式結果，完善模式預測準確性，亦可藉由上述現地調查、UAV 研判之彙整結果，綜合研修土砂產生量、流出量與殘留量之驗證工作。本計畫 UAV 航拍範圍以聚落周緣邊坡為主，範圍分布如圖

5-4-1 所示。



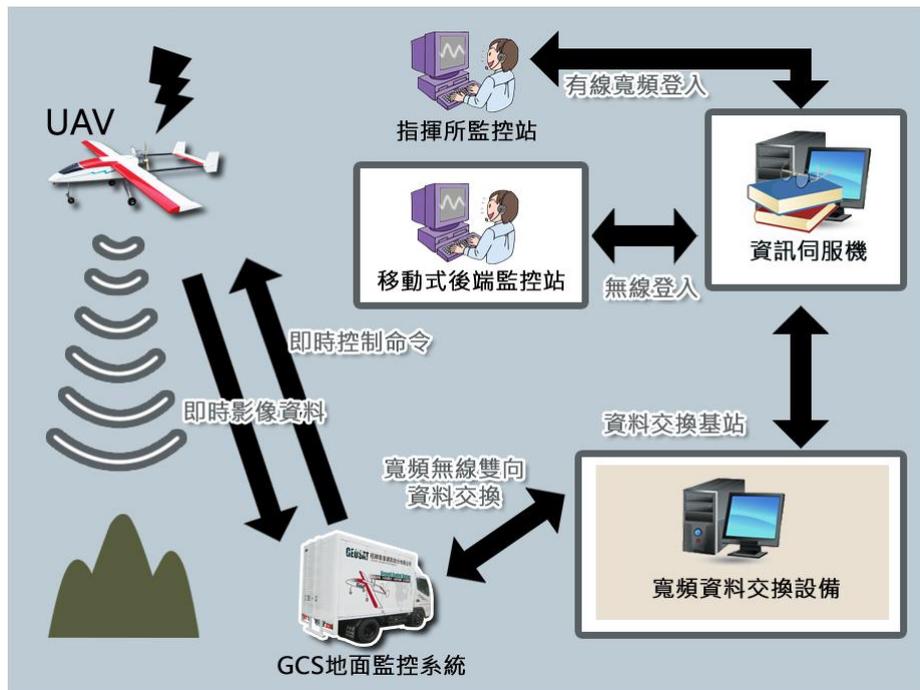
資料來源：本計畫整理

圖 5-4-1 UAV 航拍範圍空間分布圖

5-4-1 無人載具設備介紹

一、UAV 架構

本團隊將採用進行調查航拍之 UAV 系統之基本構成包括飛行載具、飛行導航與控制系統(以下簡稱飛控系統)、地面導控系統、任務酬載設備、資料傳輸系統。整體架構示意如圖 5-4-2 所示。



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-2 UAV 系統整體架構圖

二、各部功能

(1) 飛行載具

飛行載具負責裝載飛行導航與控制系統，並搭載各項任務酬載設備以執行航拍與遙測之飛行任務。

(2) 飛控系統

飛控系統用於進行飛行載具的導航、定位和自主飛行控制。

(3) 地面導控系統

地面導控系統用於任務執行前的飛行任務規劃與設計。任務執行中，通過資料傳輸系統，地面導控站可以向飛控系統發送資料和控制指令，並可接收、存儲、顯示、重播 UAV 的飛行資料，及顯示

各設備工作狀態。

(4) 任務酬載設備

任務設備依所裝載的設備不同，分別可進行航拍影像的獲取與存儲、即時監控影像的拍攝、近紅外光影像拍攝或高光譜影像取像。

(5) 資料傳輸系統

用於地面導控站與飛控系統以及其他酬載設備之間的資料和控制指令的傳輸，以及地面站與後端監控站的資料通訊交換。

三、無人飛行載具系統

(1) UAV 載具

定翼型 UAV 載具為自主開發設計的『天箭級』Sky Arrow 55 中航程後推式定翼型 UAV 載具，所採用的機體設計為後推式引擎設計(如圖 5-4-3 所示)，可避免傳統前置式引擎運轉時產生之廢氣隨氣流向後汙染儀器與相機鏡頭之慮。飛行限制為現場風速不能過大，當風力變化量達蒲福風級 3 級、陣風超過蒲福風級 8 級、跑道與風向之側風夾角超過 45 度、雨天或颱風天，如遇上述天候條件，若非必要則不建議執行任務，即使於天候條件良好的情況下飛行，現場亦須隨時掌握天候變化。此外，本案所規劃 UAV 所採用的數位相機拍攝波段為可見光波段，在有雲霧在航線下方之狀態皆無法取得被遮蔽區域之清晰照片，不過 UAV 航高可以降低，故受雲霧主體遮蔽的機率較小，反而是機身上方的雲霧於地面所造成陰影的效應更為常見。載具基本規格資料如表 5-4-1 所示。

Sky Arrow 55 UAV 在飛控電腦的控制下，任務執行範圍可以達到半徑 100 公里以上，加上長達 3.5 小時之有效滯空時間與針對航遙測應用最佳化的性能設計，使得 Sky Arrow 55 UAV 成為最適合航遙測應用的飛行載具。此型式的 UAV 的酬載重量與空間可依任務需求做彈性調整，使任務的調度更為靈活，表 5-4-2 為本機型特色。

表 5-4-1 UAV 載具規格

翼展	3.0 m	長度	2.4 m
最大重量	24 kg	滯空時間	> 3.5 hrs
最高速度	145 km/hr	最大航程	> 350 km
巡航速度	105 km/hr	最大操作高度	4000 m
推進系統	O.S GT-55 Gas Engine(5.5 BHP@7000rpm)		

資料來源：本計畫整理

表 5-4-2 Sky Arrow55 UAV 載具特色

特色	詳細說明
推進系統	引擎型式為 O.S GT-55 Gas Engine 二行程汽油引擎，使用 92 無鉛汽油做為燃料，提供穩定的馬力輸出
巡航速度	105 公里/小時
最大航程	250 km
滯空時間	未加掛副油箱即可達 2.5 小時以上
最大高度	4000 m
抗風能力	蒲福風級 8 級風力(不含)以下(即風速 34 knot 以下)
起降操作	傳統跑道 (起飛距離 30 公尺，降落距離 80 公尺)
酬載重量	5 公斤以上，可搭載： 1. 高畫素單眼相機或高縮放倍率攝影模組，以及 GPS/INS 2. 數據通訊與即時影像傳輸設備，可將資訊下傳至地面導控站儲存供後處理使用 安裝於機體內均配置被動防振機構，防止設備振動影響功能。
搬運方式	機體採模組化設計，可拆卸進行運送

資料來源：本計畫整理



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-3 Sky Arrow 55 UAV

(2) 地面導控車

地面導控車結合地面站電腦、地面站系統軟體、自動追蹤無人飛機之天線系統、多監看畫面之導控系統及其他各項系統整合而成，地面導控車首要任務為搭載地面導控站系統與導控人員，搭配地面站電腦與軟體，提供地面導控人員最即時的導控資訊。地面導控車如圖 5-4-4 所示。

經緯公司新一代的地面站控制系統，加入 GPS 模組定位，當地面站移動後，可提供新的位置座標，增加地面站機動性；並增加天線追蹤控制，提供地面導控車天線追蹤 UAV 功能，可有效增加地面站與 UAV 之通訊距離。同時並可設置氣壓壓力計，提供 UAV 之地面高度之校準依據，提高 UAV 之高度準確度，以上改進提升與改善地面站控制系統，讓地面導控站系統功能更加完善。



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-4 地面導控車

(3) 數位相機

本案裝載於飛行載具上之航拍設備，為符合高精度的需求，因此選用高解析度之全片幅數位單眼相機(DSLR)－Canon 5D Mark II，

以及搭配使用 20mm 焦距鏡頭，並經過相機率定程序，詳細規格如表 5-4-3 所示。

表 5-4-3 數位相機規格表

項目	規格
影像感測器	有效畫素 2110 萬畫素之全片幅 CMOS 感測器
鏡頭焦距	20mm 焦距定焦鏡頭
記憶卡容量	32GB、64GB
影像格式	JPEG
記錄畫素	最高 5616x3744 pixels
儲存張數	1500 張以上
連拍速度	每秒 3.9 張 (最高)
快門速度	最快可達 1/8000 秒，提供外部觸發快門
ISO 感光度	ISO 50 ~ ISO 25,600

資料來源：本計畫整理

5-4-2 航拍計畫

本章主要說明 UAV 航拍作業流程，根據目前相關法規規範，規劃航拍工作區域時受以下限制：航拍區域若位於機場周圍禁、限航區，則無法執行任務。航拍區位於訓練空域、軍方管制空域、目視航線等，則需視與民航局及軍方單位協調後狀況方可執行任務。鄰近禁、限航區，可能影響民航機或軍機起降及其他航空器安全，亦需與相關單位協調後方能進行航拍。執行航拍任務前置作業在機務整備外，視需天候條件許可下操作使用，另在任務規劃與勤前提示與工作分配是為重要的工作，UAV 操作使用程序標準作業流程可參考圖 5-4-5。各階段工作流程：

一、執行任務前

由任務規劃人員根據航遙測任務條件，配合當地空域限制、飛行路徑與所經地形條件、及參考起降地點等資料，在地面導控系統軟體的導控地圖 GIS 平台上，標示出航點、航線、航拍與感測器啟動序列，及設定執行模式等，儲存成飛航任務檔。

二、任務執行中

將飛航任務檔的任務資料傳輸至飛控電腦。由飛控電腦根據飛航任務資料進行自動控制飛行載具，並依控制任務設備操作序列執行任務工作。在執行任務的過程中，可以經由資料傳輸系統將機載設備以及飛行載具的狀態，即時地在地面導控系統軟體上各種儀表、導控地圖 GIS 平台上顯示，讓工作人員清楚了解任務執行中狀況。工作人員也可根據任務執行的狀況所需，即時經由資料傳輸系統上傳更新控制指令給飛控電腦，進行即時性的飛航任務調整與更新。

地面導控系統可透過有線或無線數據傳輸，將任務執行的資訊傳送給後端資料處理的電腦，進一步讓 UAV 執行任務取得的資料得到最大的利用價值。

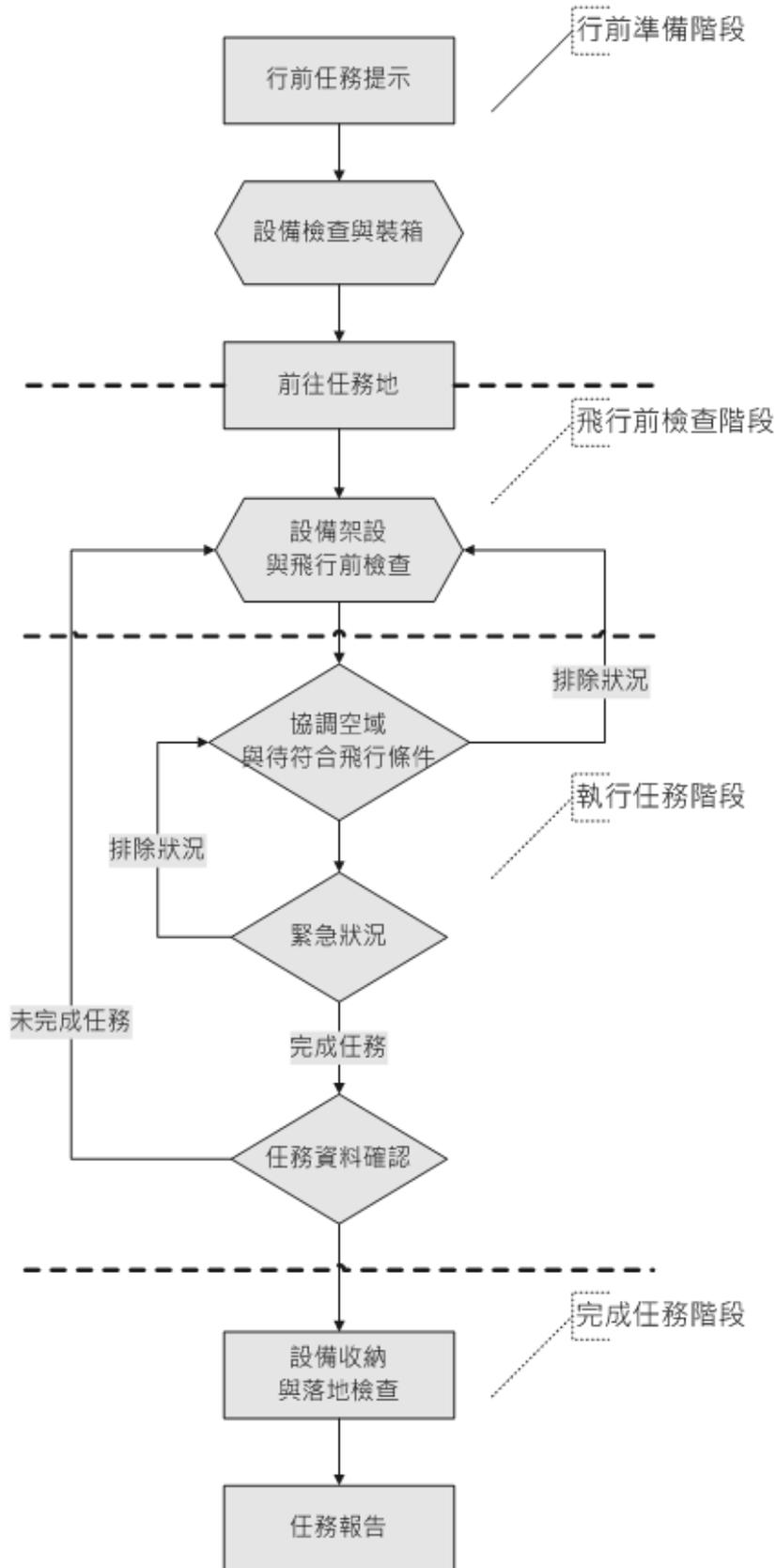
三、任務執行後

將機載所有感測器紀錄資料，與高解析數位影像進行下載，並進行資料後處理與其他加值應用。

5-4-3 航線規劃

本計畫針對調查地點周遭地形、氣候與交通狀況情況，派遣不同型式(定翼機及旋翼機)之無人載具飛機(UAV)執行中低空航拍任務。

兩次飛行航線規劃皆由高雄舊寮堤防河堤道路起降(如圖 5-4-6)，沿曾文溪河谷飛行進入本計畫工作區域進行拍攝，航拍規劃資訊如表 5-4-4，飛行航線規劃如圖 5-4-7 所示。



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-5 UAV 操作使用程序標準作業流程

表 5-4-4 航拍規劃資訊

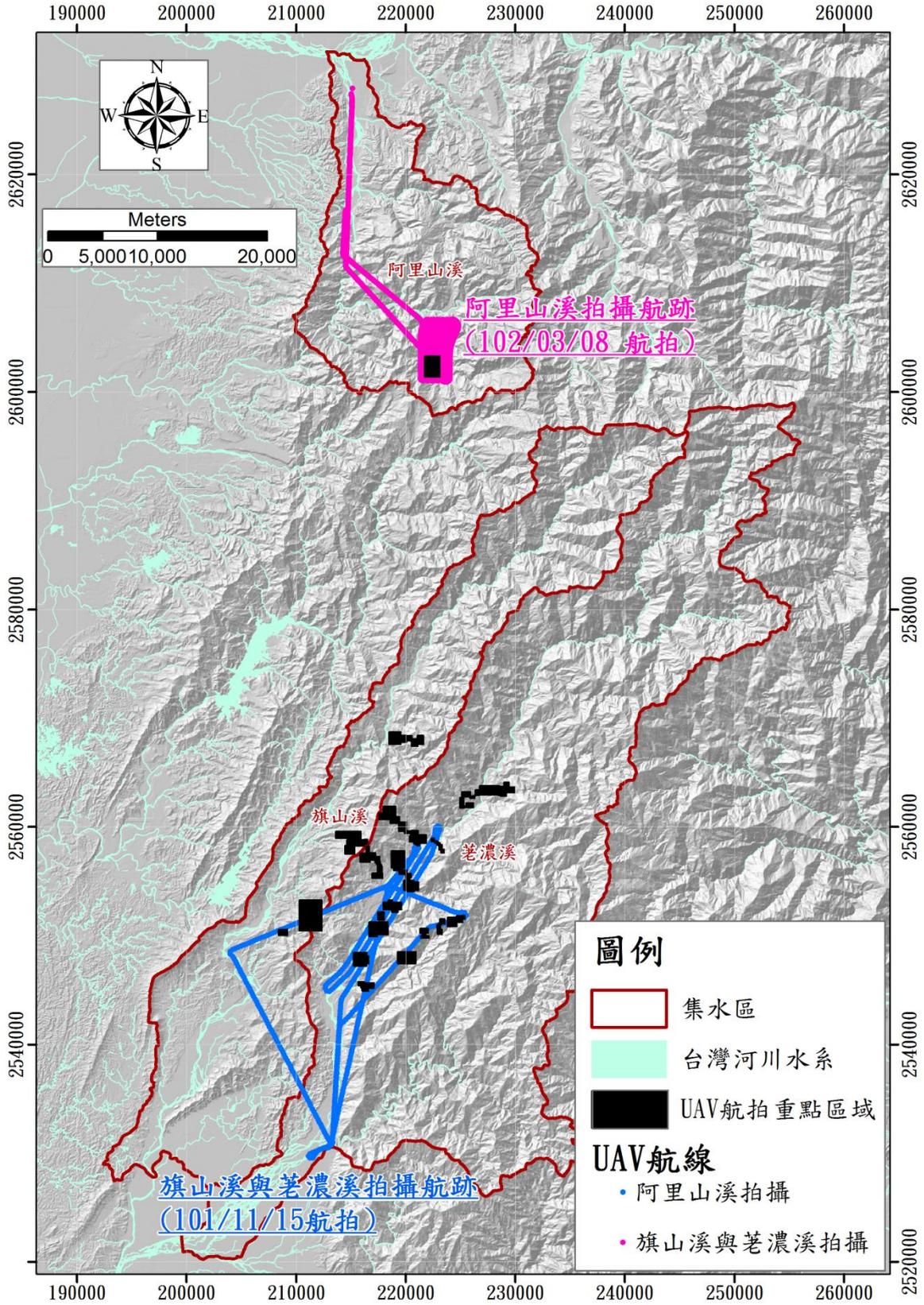
項目	資訊	備註
相機焦距	20 公釐	採用高素質 20mm 手動定焦鏡頭，避免 UAV 震動造成自動對焦位移。
像元解析度	6.4 μ m	
航帶寬	約 1200 公尺	航拍影像有效寬度
飛航高度	2500 公尺	依照地形高程部分會有所調整
航線間距	600 公尺	確保側向重疊率>40%
側向重疊	> 40%	
前後重疊	> 80%	提高前後重疊，降低後續立製時遮蔽情形及提高正射品質
航空攝影	以 GPS/IMU 輔助	可提高後續製作空三及測圖等精度
地面解析度	約 30 公分	山區高程起伏劇烈，地面解析度依高程變化，介於 30~50cm

資料來源：本計畫整理



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-6 UAV 起降場地



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-7 UAV 飛行航線規劃

5-4-4 航拍正射影像拼接成果

本團隊於 101 年 11 月 15 日及 102 年 3 月 8 日分別進行 UAV 任務航拍，飛行軌跡如圖 5-4-8，飛行高度紀錄如圖 5-4-9 所示。

UAV 相關航拍作業準備工作完成後，於寬廣地(如：河堤防汛道路)起飛，先執行 WP1(WayPoint1)至 WP2(WayPoint2)間兩點飛行測試及自動導航模式(圖 5-4-10)，確認 UAV 電腦系統均正常後，進入自動導航 A/P 模式(autopilot，自動導航模式模式)飛行航線，約 30 分鐘後爬升至任務高度，隨即放飛執行航拍航線飛行，空中情況均正常；兩趟 UAV 總飛行時間約 400 分鐘，總航程大於約 300km，檢查機務情況與相片拍攝均正常。

兩趟 UAV 執行任務飛行時間大於 5 小時，為提高影像重疊率，拍攝影像相片張數大於 800 張，同時由 UAV 上飛行電腦的紀錄，可以準確紀錄每張 UAV 影像的曝光位置與外方位姿態(EO)，飛航紀錄檔欄位如表 5-4-5 所示，完整拍攝影像及正射影像，將於成果報告時提交林務局備查及土砂災害相關計畫使用。

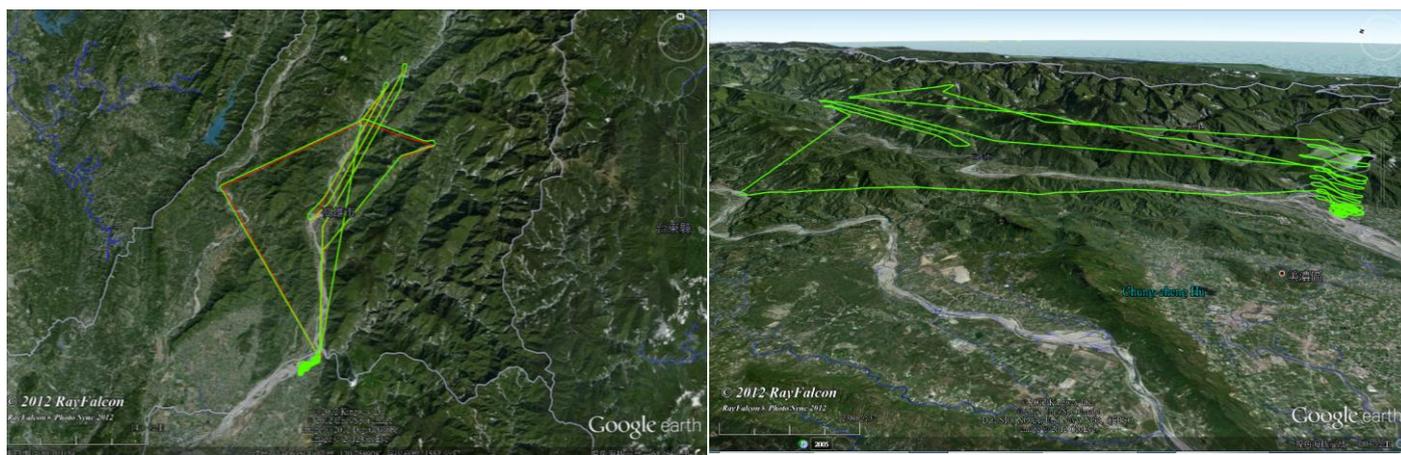
此外，UAV 飛行軌跡與相片重疊涵蓋範圍也一併紀錄，以利檢核涵蓋範圍是否包含整個航拍任域區域，以利後續製作殘留土砂研判使用，任務飛行軌跡與相片重疊涵蓋範圍如圖 5-4-11 所示。

UAV 航空相片成果與拼接校正之正射影像如圖 5-4-12 與圖 5-4-13 所示，所有空拍拼接之正射影像已彙整於 Google Earth 上，成果如圖 5-4-14 所示。

表 5-4-5 影像外方位姿態(EO)資料欄位

欄位名稱	欄位代碼	內容(範例)
系統 SD 卡流水號	SD_Cnt	242
航線	UAV_Waypoint_Cnt	1
GPS 時間(UTC time)	hours	1
	minutes	15
	seconds	56.70
日/月/西元年	day	15
	month	11
	year	2012
緯度	latitude	22.8705
經度	longitude	120.6258
GPS 高度值	altitude	135.9889
對地速度	Ground_speed	0.036
航線角	Track_angle	99.5013
GPS 衛星數量	Number_of_SVs	9
飛控導航模式	System_mode	3
快門曝光(1=True)	CameraToggle	1
三軸姿態角	Yaw	-142.8454
	Pitch	-2.4510
	Roll	0.5486
氣壓高度值	Pressure_Altitude	76.6986
差壓空速值	AirSpeed	0
照片檔名	PhotoName	IMG_0001.JPG
參考用	WGS-84 X	-2995358.3822
	WGS-84 Y	5059654.5804
	WGS-84 Z	2463572.1256
TWD97 座標	TWD-97 TM2 E	211612.6970
	TWD-97 TM2 N	2530000.1065

資料來源：本計畫整理

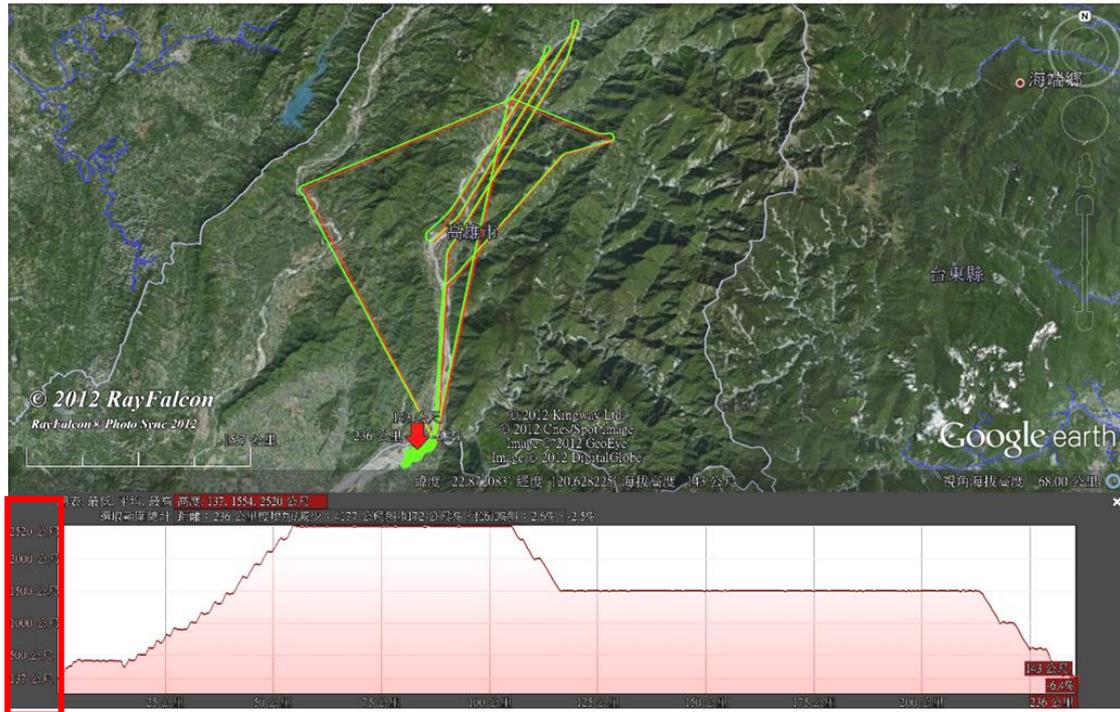


(a) 飛行軌跡(2D)紀錄

(b) 飛行軌跡(3D)紀錄

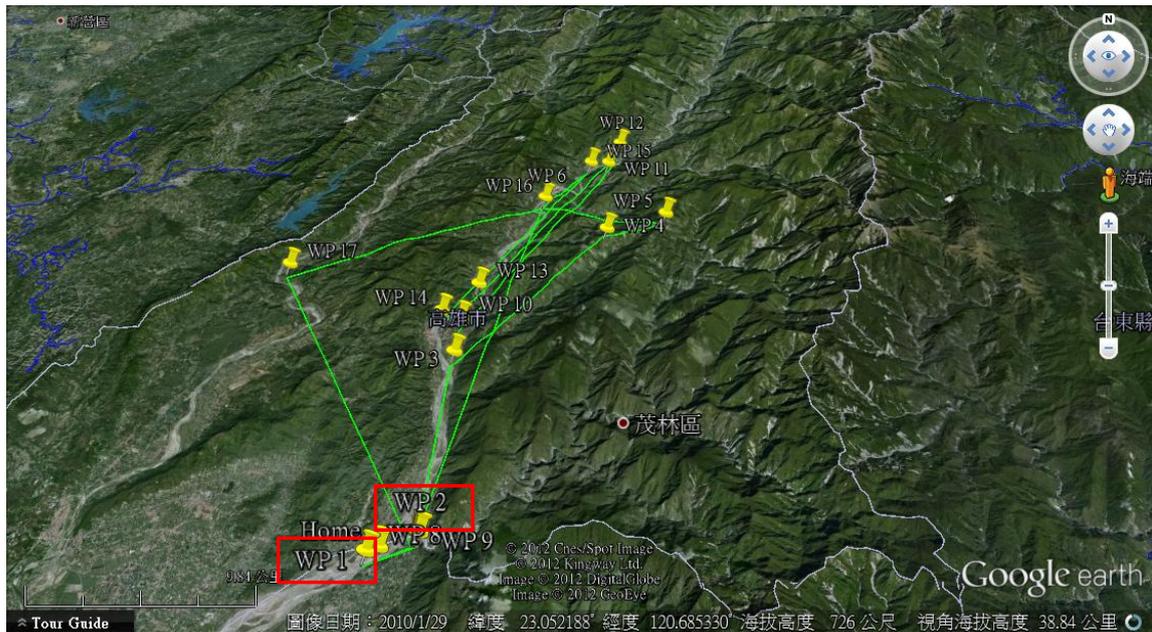
資料來源：本計畫整理

圖 5-4-8 飛行軌跡紀錄



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-9 飛行高度紀錄

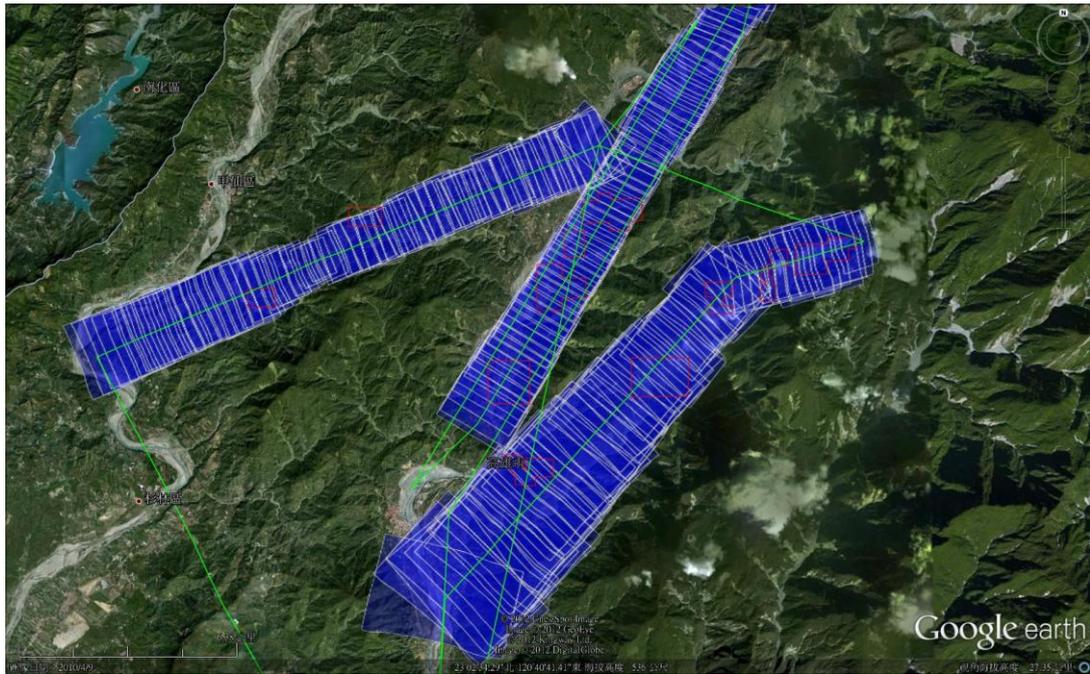


飛行任務確認作業：

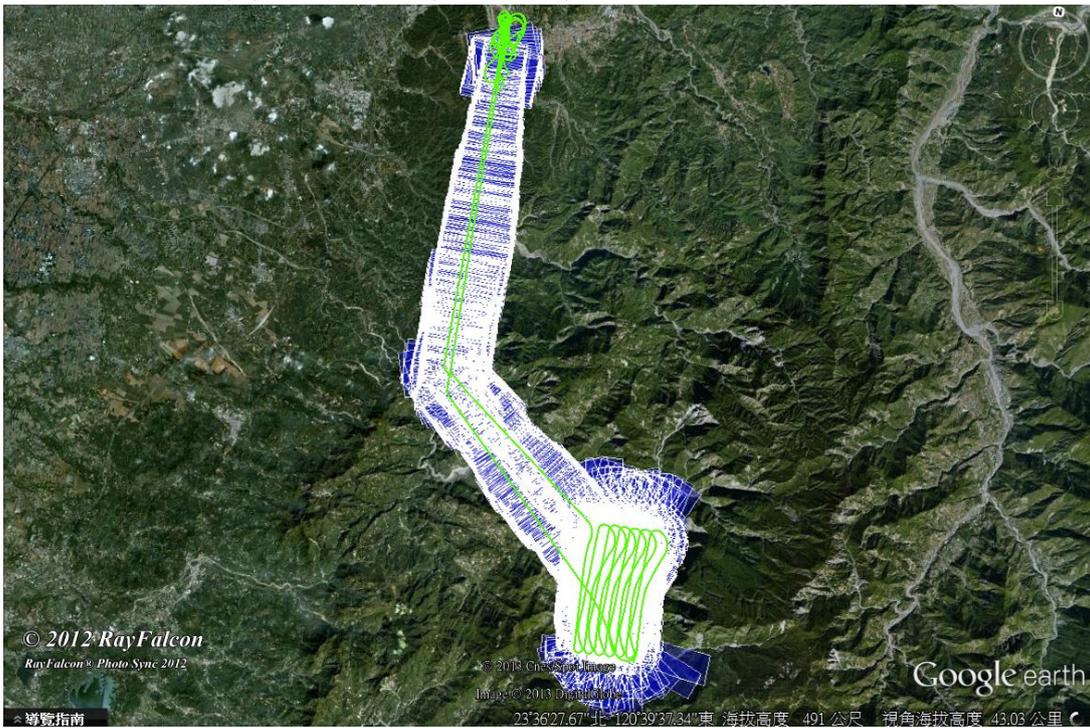
1. WP1至WP2：為執行飛行測試
2. WP3至WP17：為執行自動導航飛行模式
3. 待上述確認飛行順暢無誤，即可開始後續任務執行及空拍作業

資料來源：本計畫整理

圖 5-4-10 自動導航模式作業



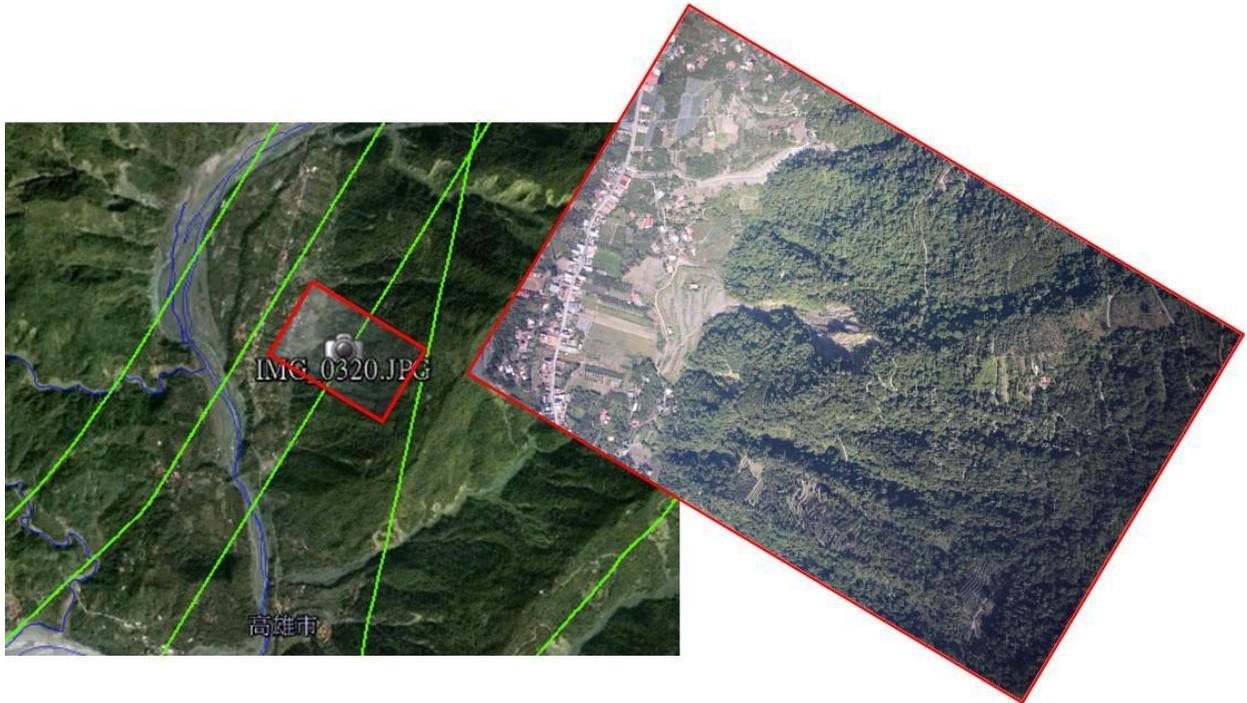
(A)第一次航拍(101/11/15)-旗山溪與荖濃溪航跡



(B)第二次航拍(102/03/08)-阿里山溪航跡

資料來源：本計畫整理

圖 5-4-11 飛行軌跡紀錄與照片涵蓋範圍



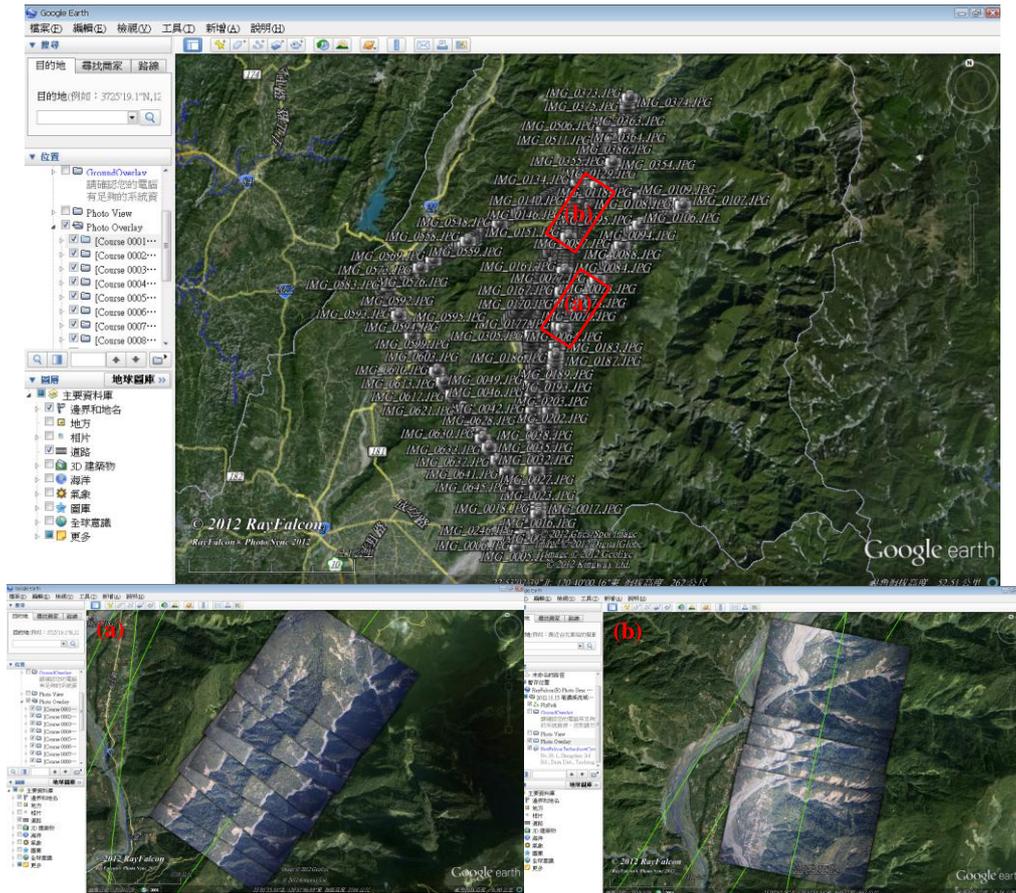
資料來源：本計畫整理

圖 5-4-12 UAV 拍攝影像拼接校正成果



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-13 UAV 拍攝正射影像成果



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-14 UAV 拍攝拼接影像彙整於 Google Earth 平臺成果

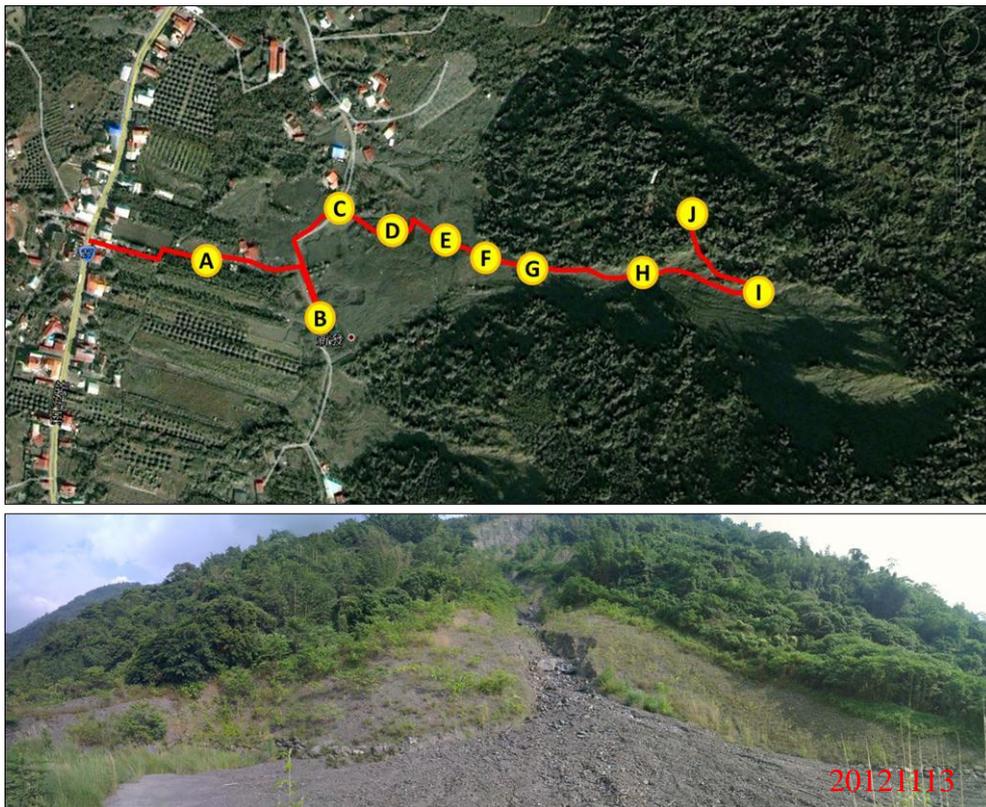
5-4-5 航拍正射影像殘留土砂範圍判釋成果

本計畫已完成阿里山溪、荖濃溪、旗山溪各一處聚落鄰近邊坡殘留土砂現地調查，分別為來吉部落、新發部落、油礦巷 14 鄰，調查報告詳如附錄三，其中太麻里溪林班地範圍內因未有聚落分布，故未進行現地調查。

本節以新發聚落為說明案例，本計畫團隊全體研究人員於 101 年 11 月 12 日至 11 月 13 展開為期兩天殘留土砂與環境地質災害現地調查工作，分為殘留土砂調查組及無人載具空拍組。現地調查循著邊坡向上方邊坡人力推進，現調軌跡如圖 5-4-15 中 A 至 J 路徑，現調觀察地貌表徵可知源頭區之大規模崩塌主要由兩條蝕溝向源侵蝕所引

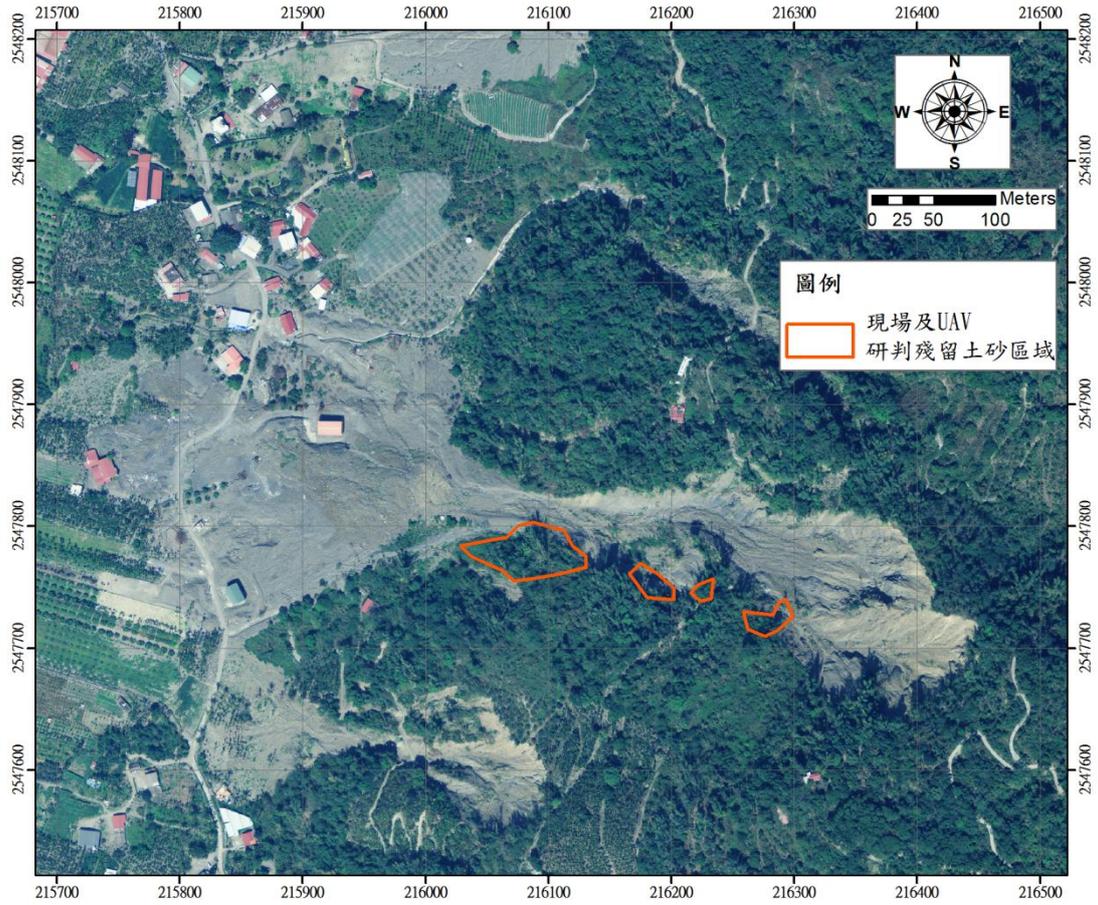
起，上邊坡已呈傾倒竹林植披與鬆軟堆積殘留土砂，屬於較不穩定狀態，極可能伴隨地震或豪雨事件外力誘發再度崩落。

根據現場調查以及 UAV 拍攝初步成果進行比對，輔以莫拉克災後航照圖圈繪出坡面殘留土砂區域(圖 5-4-16)，若以現地地下水豐沛(銹染現象)以及堆積材料鬆散的現況，極可能在未來的地震或豪雨事件誘發下發生殘留土砂二次災害情事。



資料來源：本計畫整理

圖 5-4-15 殘留土砂現地調查軌跡及邊坡全貌照片



底圖拍攝日期：2011/03/06

資料來源：本計畫整理

圖 5-4-16 殘留土砂區域判釋結果

5-5 地表雷射掃描儀成果

本計畫為瞭解崩塌與土石流之土砂殘留量模擬結果是否正確，故增加此一工作項目，採目前掃描距離及效能較佳的 RIEGL VZ-1000 型的地表雷射掃描儀(Groud LiDAR)，進行高雄市六龜區新發里 14 鄰新發部落後方邊坡掃描，透過 LiDAR 掃描獲致邊坡地形貌點雲資料，透過點雲拼接、植被濾除獲致該邊坡 101 年天秤颱風後之數值高程模型(DEM)，以利後續分析模擬成果驗證使用，以說明分析方法之正確性與穩定性。此部分工作為本計畫團隊自行增加的項目，此範例應可提供未來林務局就重大崩塌地或土石流殘留土砂評估參考，應較能準確研判崩塌或土石流土砂運移及殘留量，亦可對土砂二次災害進行研判及提早因應進行疏散避難作業。

本計畫以此案例作為模擬成果驗證，參考水保局(2012)「101 年土石流潛勢地區易致災因子調查」計畫成果，可得知此集水區莫拉克颱風後之崩塌率約 33%，依據水保局土石流潛勢地區易致災因子調查表可知屬大規模崩塌，其土砂向下運移因豪大雨造成土石流，破壞下游民房，下游段具有完整之土石流堆積扇，莫拉克颱風後水保局將此邊坡列為高市 DF107 土石流潛勢溪流(坡面型土石流)，此案例因民房破壞已無人居住，故尚保留自然之土石流堆積扇，僅堆積扇外緣以 4 公尺高之擋土牆圍束囚砂，經查此擋土牆工程完成時間為 99 年 5 月左右，現場勘查初估獲知土砂堆積高度，截至目前為止以 99 年凡那比颱風及 101 年蘇拉颱風影響產生之土砂為主，故分析上須考量凡那比颱風及蘇拉颱風之影響，以此驗證模式分析結果。驗證程序可分為以下兩個步驟：

一、土砂產量計算：基於上述 LiDAR 獲致 DEM，將其與莫拉克颱風前之數值高程模型進行高程差異量計算(即後期 DEM 減前期 DEM)，假設忽略兩期 DEM 因高程施測內部誤差及精度不同之問題，可將其高程差異量視為土砂沖淤分布圖，基於此成果，篩選土砂淤積網格，將其另存為向量圖，即可獲致殘留土砂分布圖，

且下游已被擋土牆圍束囚砂，故堆積土砂推測未經人工清除，故此殘留土砂分布結果可視為凡那比颱風與蘇拉颱風兩起事件影響下之殘留量(包含坡面殘留量及堆積區的堆積量)。

二、崩塌與土石流殘留土砂模擬：蒐集此案例附近 99 年凡那比颱風及 101 年蘇拉颱風雨量資料，以及崩塌地分布資料，再依據此案例現地調查殘留土砂之土石粒徑及 LiDAR 計算堆積區縱坡坡度決定 Debris-2D 降伏剪應力(yield stress)，結合上述地形貌、雨量資料進行殘留土砂分布模擬，將模擬結果與上揭殘留土砂分布圖進行比對與驗證，藉此修訂模式與驗證模式正確性。

5-5-1 地表雷射掃描儀介紹

一、儀器組成

- (1) 本體：為雷射掃描器本體，利用大量之雷射點雲進行地形地物之掃描作業。以直徑 20cm 高度為 30.8cm 圓柱體之機殼包覆整體零件，本體組件可再細分為：
 - A. 雷射發射接收組件：依據系統設定提供儀器雷射掃描之能量與發射接收。
 - B. 操作控制器：以高解析度之彩色 TFT 顯示螢幕，提供儀器操作控制，雷射掃描距離點雲密度等所有系統操作設定之控制。
 - C. 儲存媒體之界接點：USB2.0 的外部儲存設備進行掃描資料的儲存以及備份。
- (2) 電源供應：可利用交、直流電設備進行充電並具有保護電路之可充電鎳氫電池組。供應掃描器之雷射產生裝置所需要之電能，以及外部延伸設備所需之電力供應。並具有電源開關、10/100 mb/sec 以及 10/100/1000 mb/sec 之 LAN 傳輸設備。
- (3) 外部延伸設備



- A. GPS 接收器：可接收 L1 波，提供掃描器之概略位置。
- B. 數位全相幅相機：提供掃描位置範圍內之全像幅影像資訊，並透過相機率定後之成果，將掃描範圍與拍照範圍應用函數產生匹配。
- C. WLAN 之遙控裝控操作：可以利用 WLAN 連接 NB 或是 PAD 設備，以遙控面板的模式進行掃描儀操作。
- D. 外接電源：利用輕量化之鎳氫電池進行電源供應，提供長時間操作掃描之需求。
- E. 傾斜感測器：於垂直掃描時可以控制在一定的傾斜範圍內。
- F. 數位羅盤：於垂直掃描時可提供位置設定。
- G. 內建系統時間：可提供即時的系統掃描時間。

二、掃描表現

(1) 掃描角度寬度

- A. 垂直方向：總共 100 度(+60°/-40°)
- B. 水平方向：最大為 360°

(2) 掃描機械

- A. 垂直方向：旋轉式之多面鏡
- B. 水平方向：旋轉頭

(3) 掃描速度

- A. 垂直方向：3 線/秒 至 120 線/秒
- B. 水平方向：0°/秒至 60°/秒

(4) 角距寬度

- A. 垂直方向：0.0024°~0.288°
- B. 水平方向：0.0024°~0.5°

(5) 角距量測解析度

- A. 垂直方向：優於 0.0005°(1.8 弧秒)
- B. 水平方向：優於 0.0005°(1.8 弧秒)





三、優勢

- (1) 掃描資料非常快速。
- (2) 掃描視角廣濶並可在掃描時進行同步操作。
- (3) 具有線上波形處理以及回波數值化之關係，所以掃描資料具有高精度及高準確度。
- (4) 掃描雷射可穿透多層次的物體產生不同層次的回波資訊，例如樹冠層、樹葉層以及地面層等資訊。
- (5) 高超的大氣狀態量測能力，以增加雷射掃描的準確性。
- (6) 高精度的數值光學像機，並與掃描儀結合在一起同步控制。
- (7) 整合傾斜感測器以及雷射對點器。
- (8) 整合 GPS 天線以及接收儀。
- (9) 各種不同的介面包括(LAN,WLAN, USB2.0)
- (10) 整合各種不同的資料儲存設備。

四、操作模式

- (1) 不需要網頁即可以獨立獲取資料，並由內建的使用者界面進行基本的界面配置以及指令操作。
- (2) 可遙控操作以及利用 NB 安裝之 RISCAN PRO 的軟體進行操作。
- (3) 具有完善的操作指示說明文件，可以流暢地與手持式掃描系統進行整合。
- (4) 可以進行軟體的預處理。

五、使用者界面

- (1) 整合人機界面(HMI)，並可以獨立操作而不需要倚賴電腦的控制操作。
- (2) 高解析度 320x430 的 3.5 吋 TFT 顯示螢幕，並利用具有防反射



膜的保護蓋加以保護並增加強光下的可閱讀性，另外並有多國語言的操作界面。

- (3) 具有防水以及防塵的大型按鈕鎖鑰護墊。
- (4) 透過揚聲器發出訊息聲音，以增加操作便利性。

六、應用範圍

- (1) 測量(土砂量評估等)
- (2) 建築以及直接對向的量測
- (3) 考古以及文化遺產的量測保存
- (4) 城市模型
- (5) 隧道測量
- (6) 土木工程測量

七、掃描距離表現

本計畫採用之地表雷射掃描儀器(RIEGL VZ-1000)諸元性能與掃描距離表現彙整如表 5-5-1 所示。

表 5-5-1 地表雷射掃描儀器(RIEGL VZ-1000)諸元性能與掃描距離表現

地面雷射掃描儀 RIEGL VZ-1000					
	Laser PRR (Peak)	70 kHz	100 kHz	150 kHz	300 kHz
	雷射速度	29,000點/秒	42,000點/秒	62,000點/秒	122,000點/秒
	最遠測距				
	目標反射率 $\rho \geq 90\%$	1,400 m	1,200 m	950 m	450 m
	目標反射率 $\rho \geq 20\%$	700 m	600 m	500 m	350 m
	準確度	8 mm			
	精密度	5 mm			
	最近測距	2.5 m			
	雷射等級	一級雷射			

資料來源：本計畫整理。

5-5-2 LiDAR 作業流程與步驟

地表 LiDAR 作業流程與步驟(圖 5-5-1)分項說明如下：

一、施測規劃

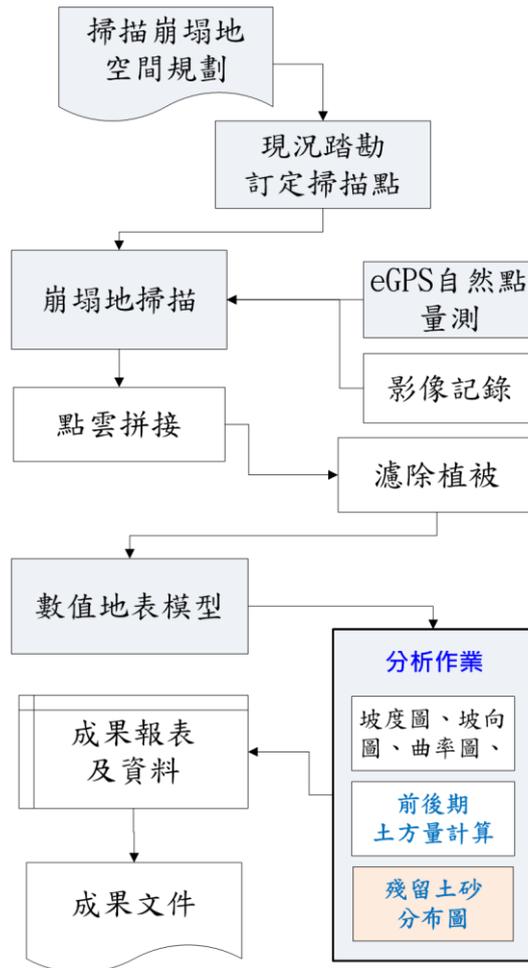
依據崩塌地圖層篩選預計進行地表雷射掃描之區域，採用航空照片、衛星影像及路網圖規劃施測路線及初步規劃掃描點，初步規劃完成後，須赴現場踏勘標註與訂定 eGPS 定位點與 LiDAR 掃描點，以利現場儀器架設定位，亦可節省外業規劃與定位的時間。

二、點雲處理

外業 e-GPS(圖 5-5-2)測量成果座標，主要透過內政部大地基準及座標系統轉換程式轉換為 TM2-97 座標平面與橢球高後，再由內政部大地起伏程式進行正高改正(橢球高轉為正高)。依據外業 LiDAR(圖 5-5-3)掃描等資訊進行①掃描站點雲拼接；②絕對座標轉換；③植被過濾等點雲處理工作。執行程序示意如圖 5-5-4 至圖 5-5-8 所示。

三、數值地形模型產製與分析

依據上述拼接處理、座標轉換後，可獲致數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)，經過植被濾除後可獲致數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，本計畫依據 LiDAR 產生之 DEM 進行相關分析作業，分別產製殘留土砂分布圖及崩塌土方量估算成果。



資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-1 地表雷射掃描作業流程與步驟



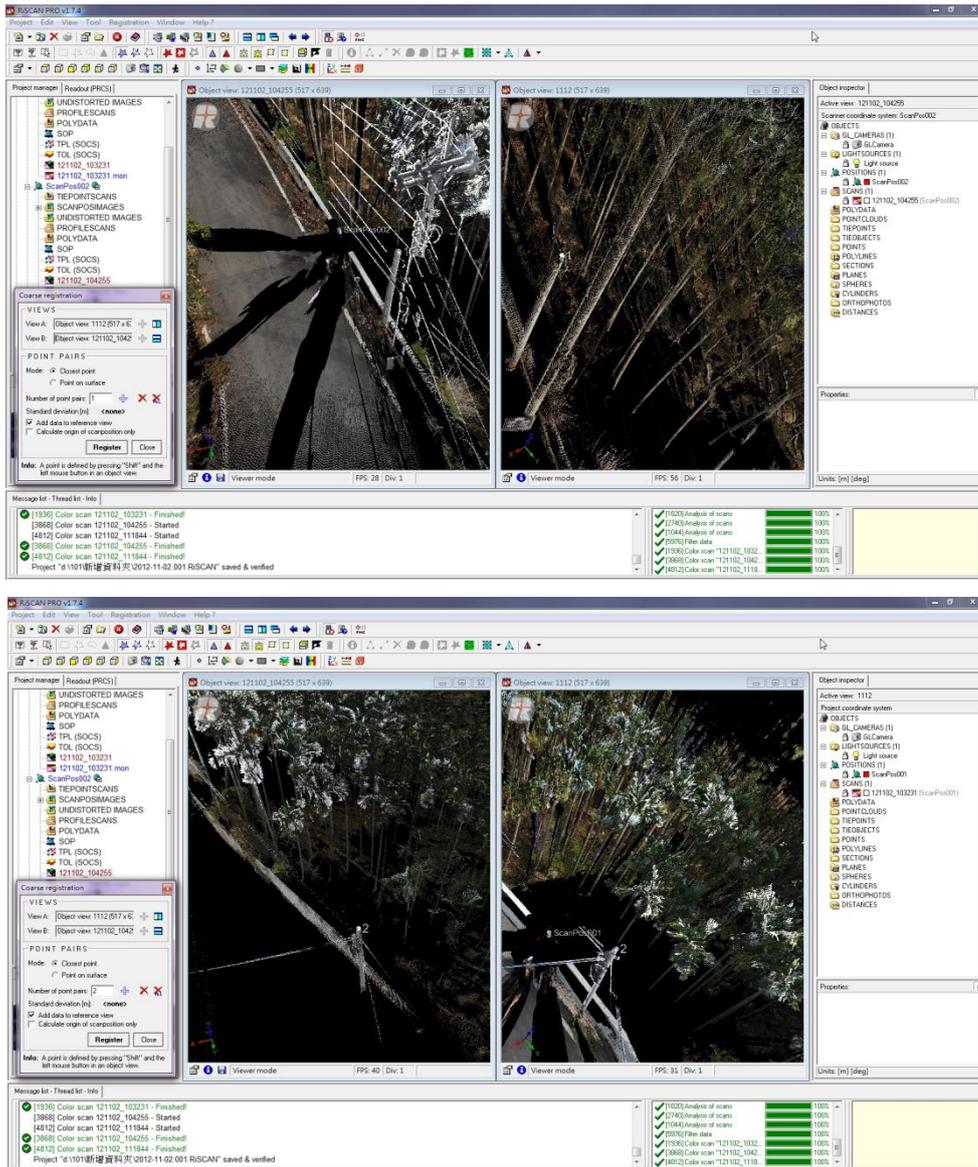
資料來源：本計畫整理。



資料來源：本計畫整理。

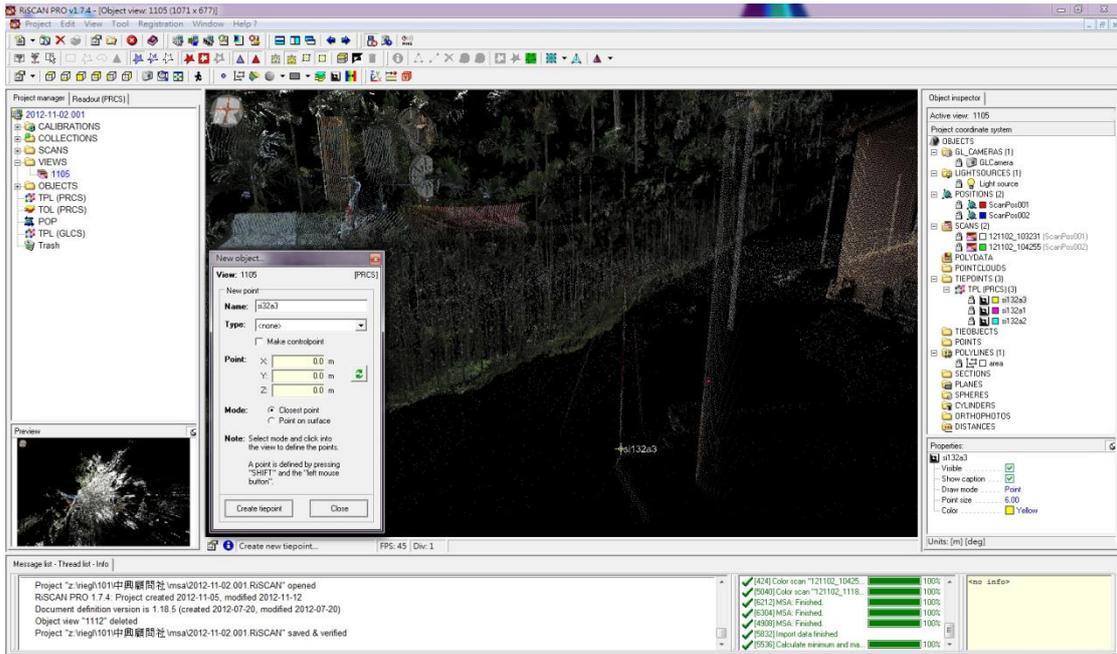
圖 5-5-2 eGPS 儀器

圖 5-5-3 LiDAR 掃描儀



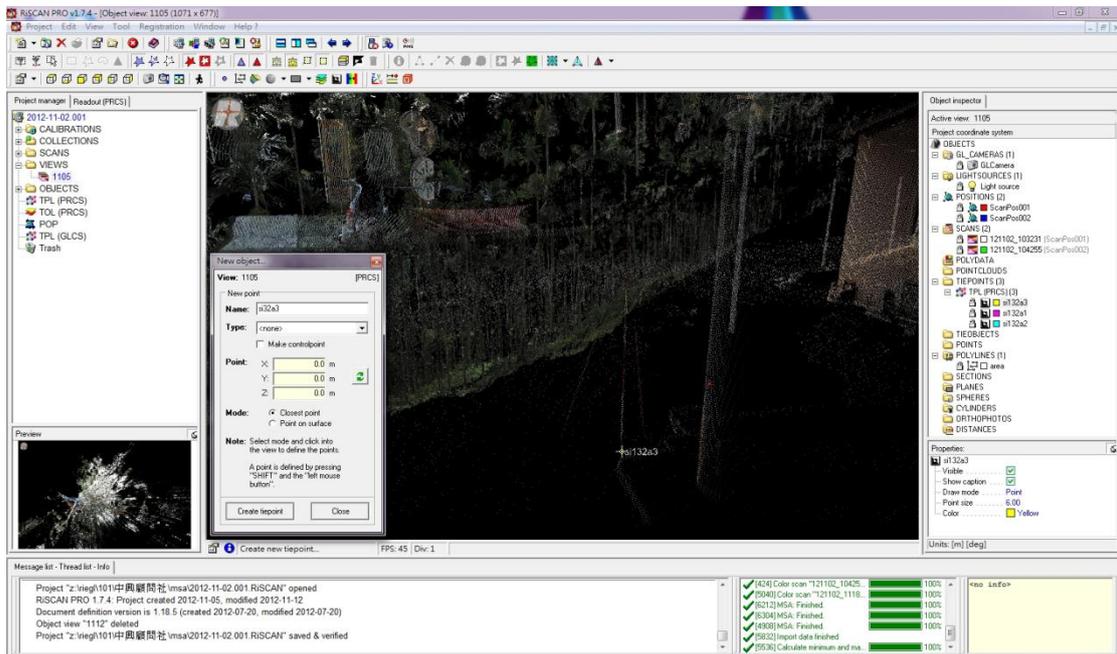
資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-4 點雲拼接示意圖



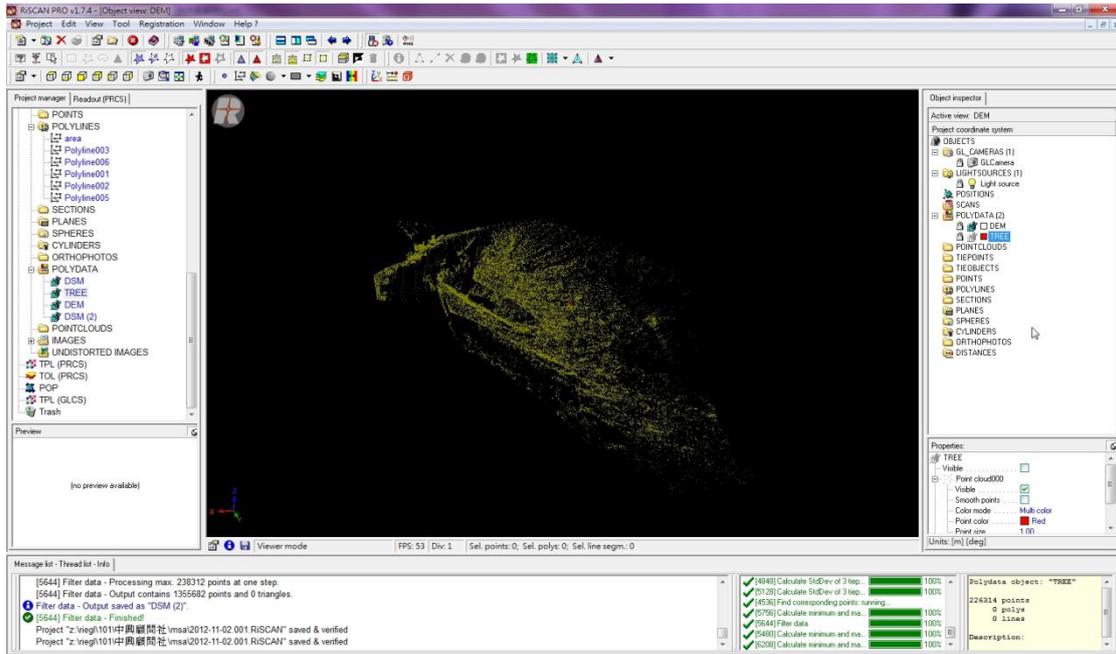
資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-5 轉絕對坐標設置控制點示意圖



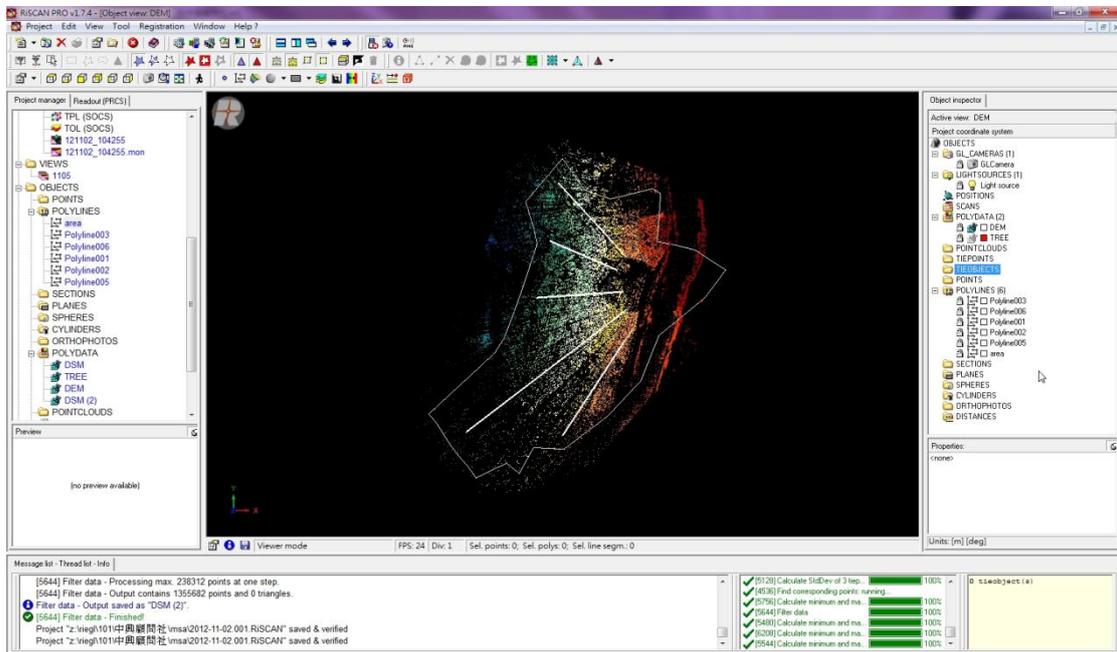
資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-6 數值地表模型(DSM)產製示意圖



資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-7 數值高程模型 (DEM) 產製示意圖



資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-8 土砂殘留量評估與計算示意圖

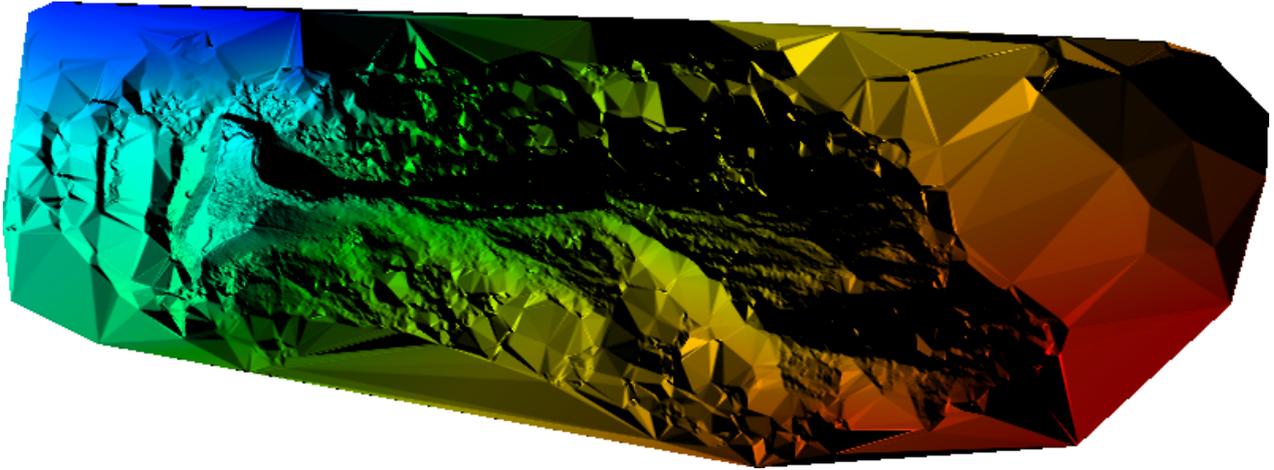
5-5-3 崩塌地與土砂殘留量推估成果

經過上述點雲拼接、絕對座標轉換等點雲處理工作，可獲致數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)，經過植被濾除後可獲致數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，高雄市六龜區新發里 14 鄰新發部落後方邊坡掃描點雲處理完成結果如圖 5-5-9 所示。

本節依據 LiDAR 的 DEM 結果計算崩塌地崩塌深度及土砂殘留量推估，分析上以 LiDAR 的 DEM(圖 5-5-10)與莫拉克颱風前 DEM(圖 5-5-11)進行相減，可獲致莫拉克颱風前至今(天秤颱風後)之地形貌變化量，即是高程差異分布圖(圖 5-5-12)，現今邊坡坡度分布圖如圖 5-5-13，後續綜合 DEM 與坡度資訊可供 Debris-2D 模擬地形建置與降伏應力推估參考。

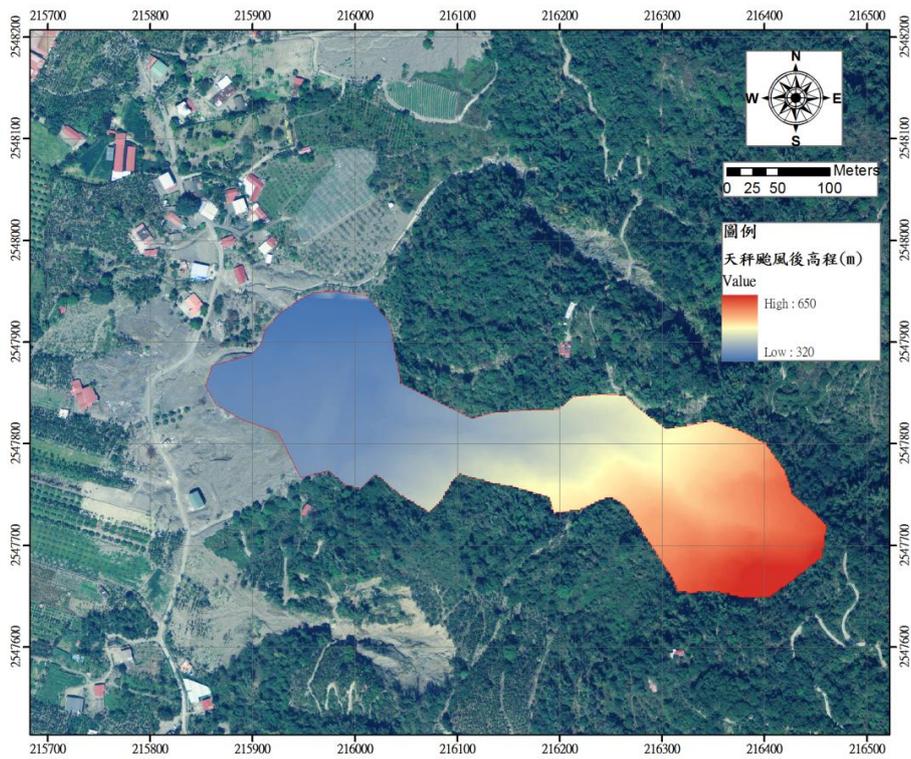
由高程差異分布圖結果可知，上邊坡北側區域發生的大規模崩塌，崩塌深度最深達約 70 公尺，規模大且崩塌量亦相當可觀，其土砂向下運移堆積於邊坡南側坡腹及下邊坡堆積段區位，堆積深度最深可達 22.3 公尺。由高程差異圖經由 ArcGIS 空間分析模組可推估崩塌深度平均為 31.4m，崩塌體積為 1,116,650 立方公尺，實屬一個規模相當大的崩塌地；坡面殘留土砂平均厚度 6.0 公尺左右，殘留土砂體積為 65,132 立方公尺，其餘土砂已轉為鬆方堆積於下邊坡或部分土砂已遭人為清除。此外，本次 LiDAR 施測主要以坡面為主，主要提供殘留土砂供模式分析之用，故無法推估整體堆積區域土方量，亦無法推估實方轉鬆方之土砂膨脹率及坡面土砂遞移率，為目前採用地表 LiDAR 方法之限制，然成果將有助於研判土砂運移及模擬結果驗證參用。

此外，由上分析結果可知上邊坡南側區域無明顯崩塌現象而呈現土砂堆積現象，經現場調查研判應有發生局部崩塌，然上邊坡北側崩塌可能向下堆積於南側，故致使上邊坡南側邊坡呈現小區域崩塌及多數為堆積之現象。



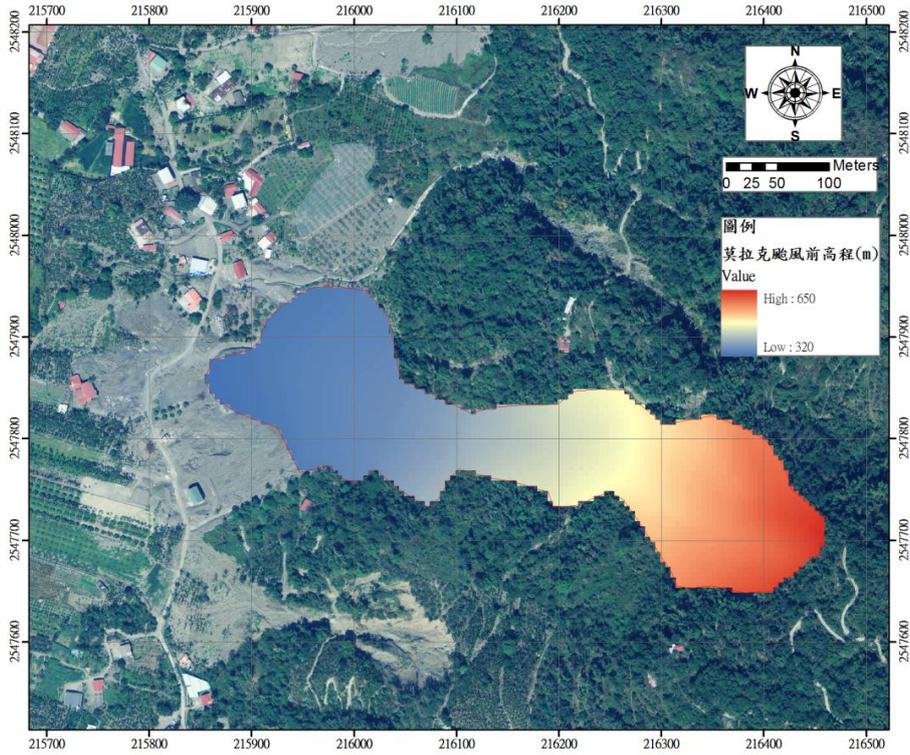
資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-9 高雄市六龜區新發里 14 鄰新發部落後方邊坡掃描點雲處理完成結果



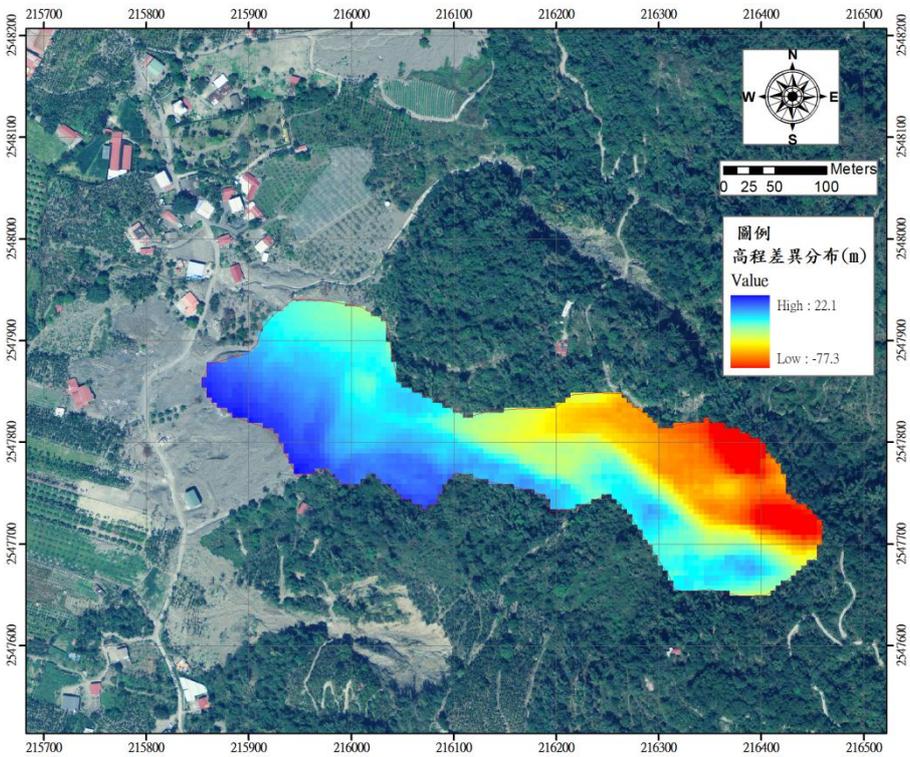
資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-10 新發部落後方邊坡 LiDAR 高程分布圖



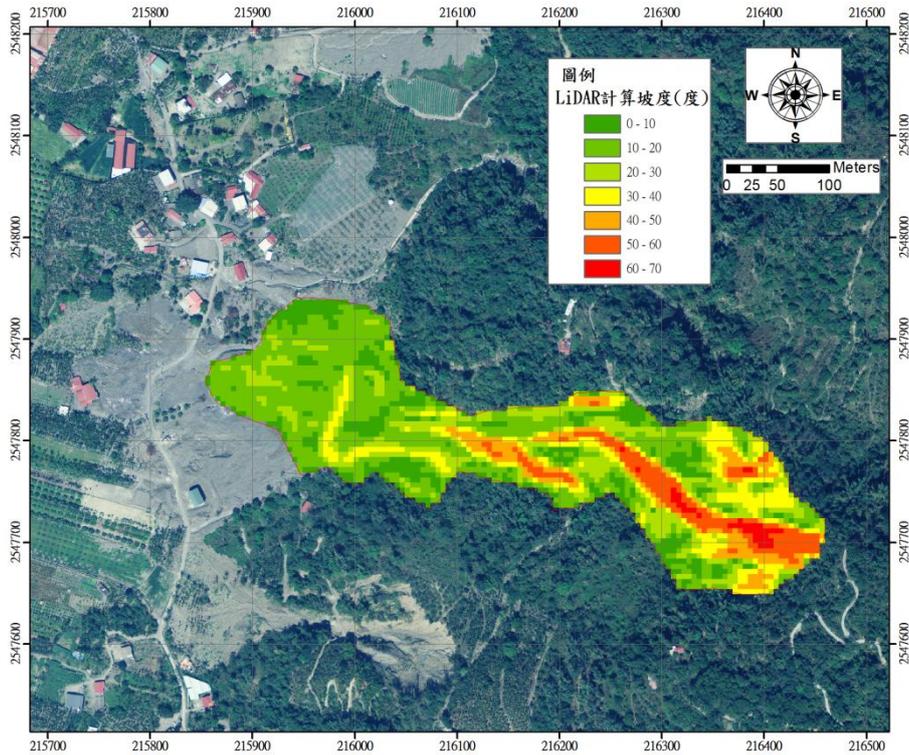
資料來源：林務局提供。

圖 5-5-11 新發部落後方邊坡莫拉克颱風前高程分布圖



資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-12 新發部落後方邊坡高程差異分布圖



資料來源：本計畫整理。

圖 5-5-13 新發部落後方邊坡天秤颱風後之坡度分布圖

5-6 國有林殘留土砂處理策略研擬

爰據國有林殘留土砂二次土砂災害潛勢評估及土砂量體估算結果，莫拉克風災後(98年~101年)旗山溪、荖濃溪、太麻里溪以及阿里山溪等四流域集水區土砂殘留重點區域以及殘留土砂統計彙整如表 5-6-1，並展繪如圖 5-6-1 至圖 5-6-3。由各年度統計資料可知，各年度流域集水區土砂殘留重點區除阿里山溪主要集中於主河道外，其餘集水區土砂殘留區域均集中於坡面或野溪內，且除旗山溪流集水區外，各年度平均崩塌土砂產生量均大於土砂流出量，顯見各流域於莫拉克風災後之殘留土砂仍均存留於集水區內。綜以上述，各流域集水區土砂殘留重點區域以及所對應面臨治理與處理策略均不盡相同。有鑑於此，本計畫以莫拉克風災後旗山溪、荖濃溪、太麻里溪以及阿里山溪等流域集水區整體分區評估結果，訂定長遠性流域集水區殘留土砂災害處理策略，以供國有林殘留土砂災害處理策略參考。另一方

面，配合本計畫高雄市新發里新發部落之國有林地災後重點聚落調查，透過崩塌地土砂生產量及土砂殘留量之估算結果，以及地文、水文、UAV 空拍結果、LiDAR 高精度數值地形、現有工程整治點等資訊，瞭解國有林區內災害重點聚落崩塌坡面土砂生產與殘留情形，據此訂定聚落應急殘留土砂災害處理對策，藉以優先保障及提升保全對象安全。

表 5-6-1 四流域集水區土砂殘留重點區以及殘留土砂統計表

流域 集水區	年度	流域集水區土砂殘留量 (萬立方公尺)			流域集水區 土砂殘留 重點區	集水區土砂流 出量與崩塌 土砂量關係	殘留土砂 重點村里
		坡面或野溪	河道	總計			
旗山溪	98~99 年	13,492	4,430	17,922	坡面或野溪	流出>新增崩塌	高雄市那瑪夏區 - 南沙魯里、 達卡努瓦里、瑪雅里 高雄市甲仙區 - 小林里、東安里
	99~100 年	13,453	4,483	17,936	坡面或野溪	流出>新增崩塌	
	100~101 年	11,678	5,277	16,954	坡面或野溪	流出>新增崩塌	
	各年度平均	12,874	4,730	17,604	坡面或野溪	流出>新增崩塌	
荖濃溪	98~99 年	15,906	6,889	22,796	坡面或野溪	新增崩塌>流出	高雄市六龜區 - 寶來里、興龍里、 中興里、新發里 高雄市桃源區 - 復興里、勤和里、 寶山里
	99~100 年	16,031	7,021	23,052	坡面或野溪	新增崩塌>流出	
	100~101 年	14,514	8,043	22,557	坡面或野溪	流出>新增崩塌	
	各年度平均	15,484	7,318	22,802	坡面或野溪	新增崩塌>流出	
太麻里 溪	98~99 年	15,146	4,285	19,431	坡面或野溪	新增崩塌>流出	台東縣太麻里鄉 - 大王村 台東縣金峰鄉 - 嘉蘭村
	99~100 年	14,481	4,096	18,577	坡面或野溪	新增崩塌>流出	
	100~101 年	15,048	4,578	19,626	坡面或野溪	流出>新增崩塌	
	各年度平均	14,892	4,320	19,211	坡面或野溪	新增崩塌>流出	
阿里山 溪	98~99 年	4,030	3,511	7,541	河道	新增崩塌>流出	嘉義縣阿里山鄉 - 來吉村、達邦村、 山美村
	99~100 年	4,136	3,342	7,479	河道	流出>新增崩塌	
	100~101 年	4,371	3,175	7,545	河道	新增崩塌>流出	
	各年度平均	4,179	3,343	7,522	河道	新增崩塌>流出	

註：流域集水區土砂殘留重點區：

坡面或野溪土砂量較多，重點區即為坡面或野溪；河道土砂量較多，重點區即為河道；

若坡面或野溪與河道約同，則重點區即為坡面或野溪與河道皆重要。

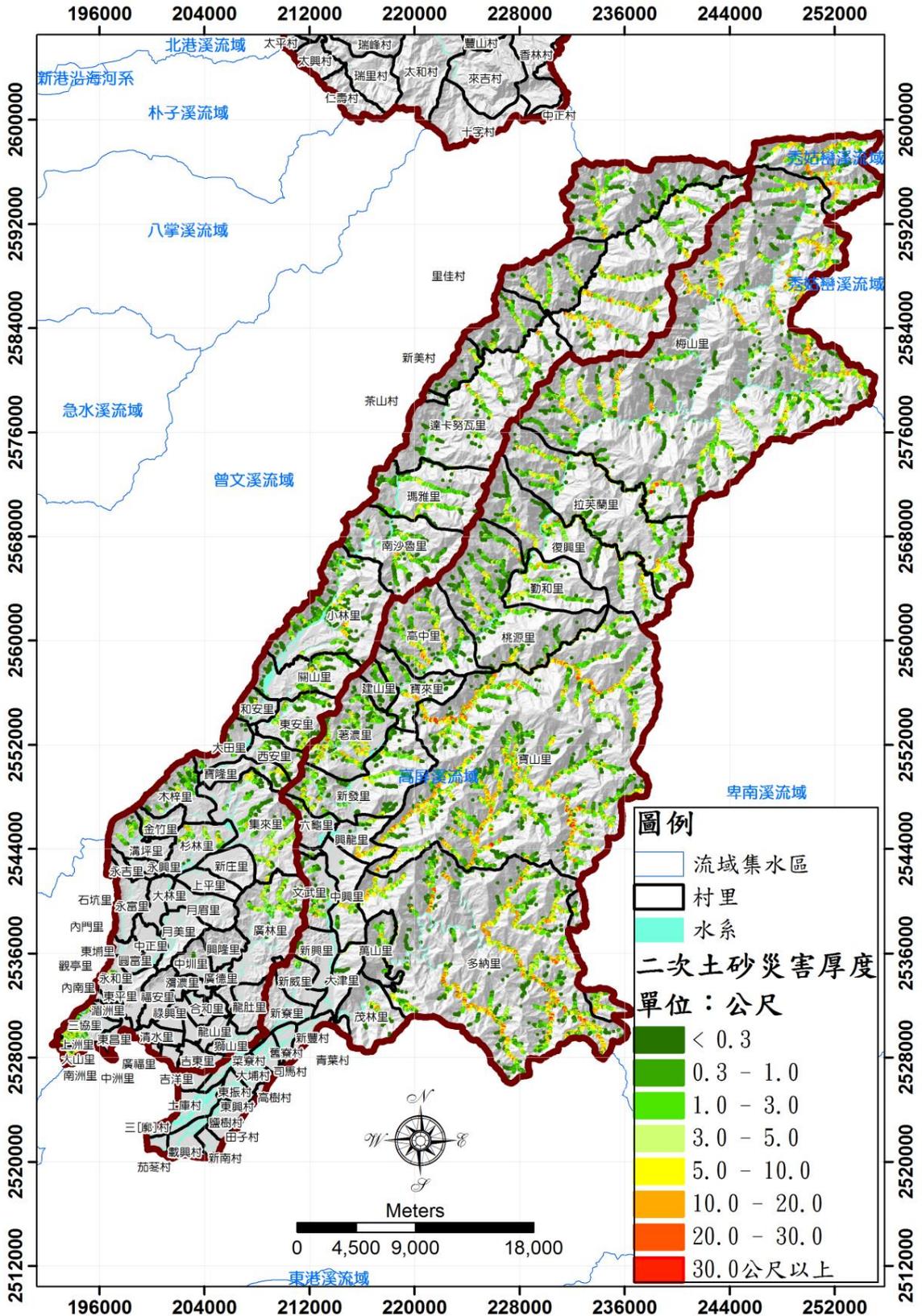


圖 5-6-1 荖濃溪及旗山溪流集水區土砂二次土砂災害厚度分布圖

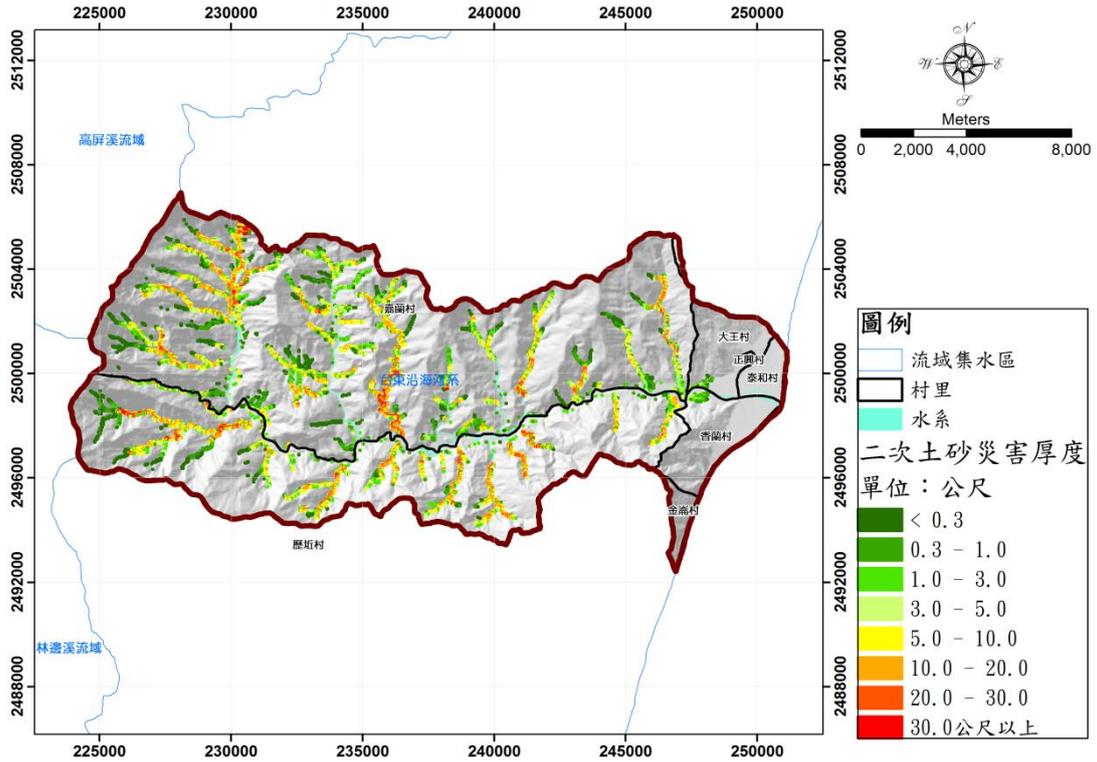


圖 5-6-2 太麻里溪流流域集水區土砂二次土砂災害厚度分布圖

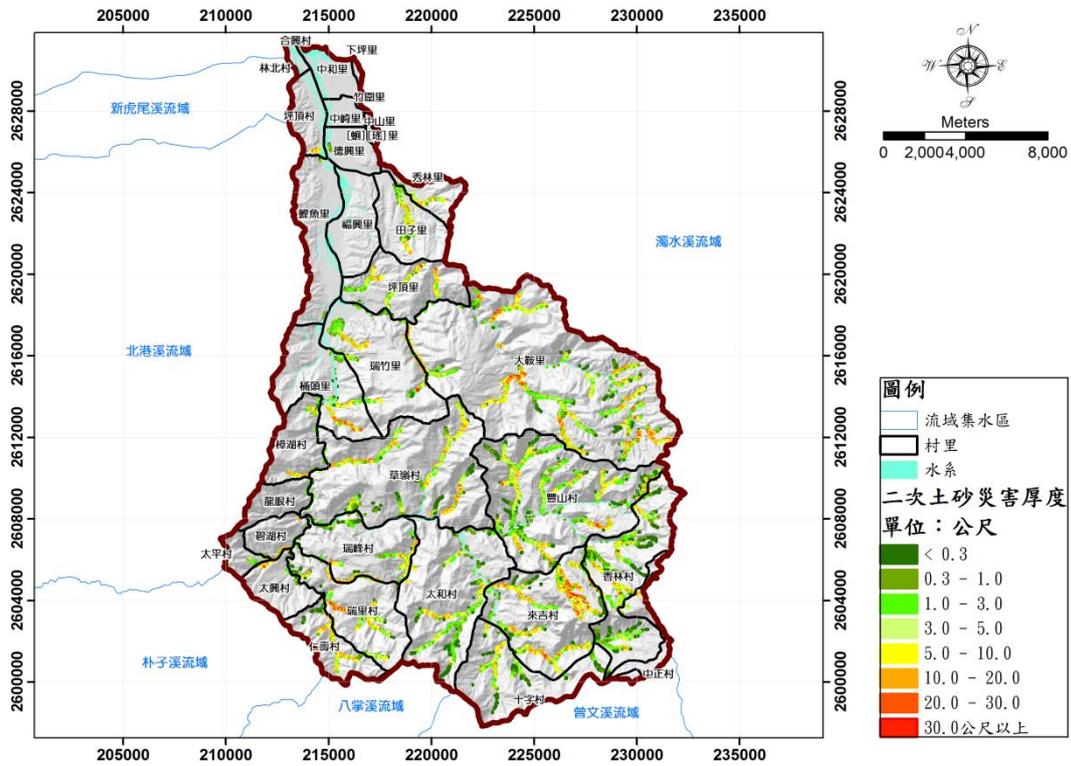


圖 5-6-3 阿里山溪流流域集水區土砂二次土砂災害厚度分布圖

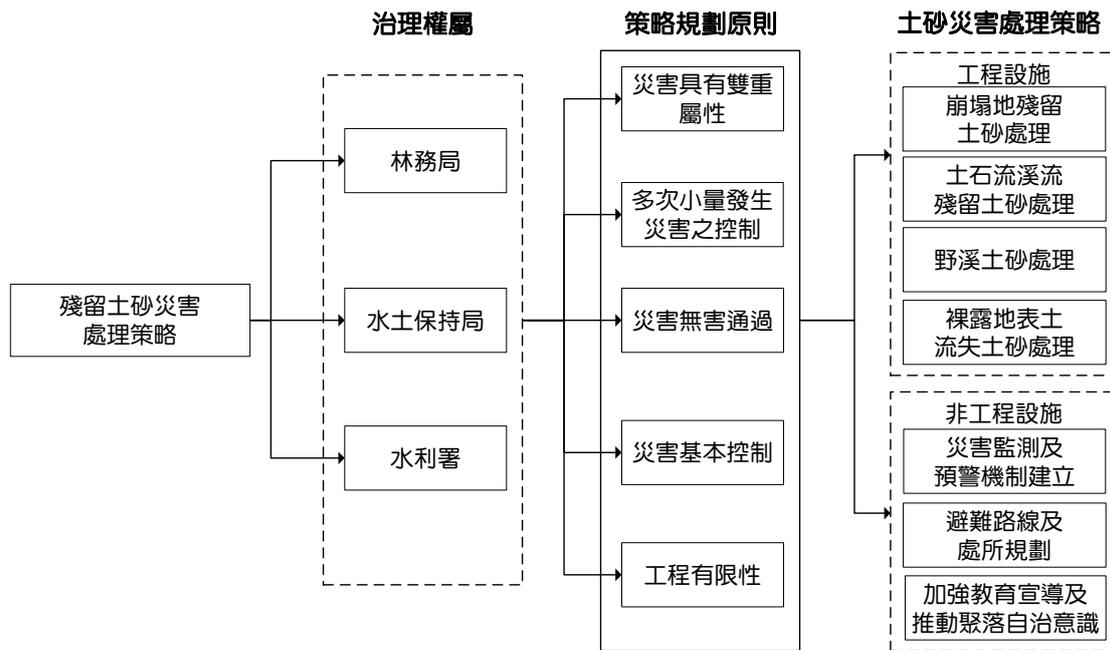
以下茲就長遠性流域集水區殘留土砂災害處理策略以及聚落應急殘留土砂災害處理對策分別說明如下：

一、長遠性流域集水區殘留土砂災害處理策略

針對流域集水區之殘留土砂災害處理仍應以集水區單元為對象，進行集水區整體土砂災害處理策略擬訂工作(水保局，2011)；目前相關治理工作之權屬劃分，基本上以林班地界及河川治理界點為限，分別由林務局、水土保持局及水利署依據屬地及業務職掌負責。不同流域集水區治理地點會因面對問題之差異而有不同之管理目標與措施，這些管理手段包含非工程措施(法令管制、土地利用管制)和工程措施(農藝、植生及工程)方法，惟各種管理方式，均應以流域集水區上中下游之整體性保育治理做一全盤考量。土砂災害處理觀念應以順應自然方式辦理，以受災流域集水區為單元，進行「土砂生產抑止」、「土砂流出抑制」與「減災避災規劃」辦理策略規劃，並採下列原則辦理：

1. 體認「災害具有雙重屬性」，即自然變異及社會環境。災害是自然災情超過人為控制能力後所造成對社會的損失，故減災可由降低自然災情或保護對象遠離自然災情兩方面並進。
2. 「一次大量發生災害之防止」改為「多次小量發生災害之控制」，期減少土砂災害影響範圍，減少其衝擊力及致災風險。
3. 「災害無害通過」策略，控制土砂災害在一定的路徑及堆積範圍，不影響保全對象即可，並規劃緊急避難場所。
4. 「災害基本控制」策略，僅就災因進行控制，避免擴大，不予全面處理，改採基本控制，如淤積土石方面則採隨到隨清策略。
5. 「工程有限性」策略，現有工程方法無法克服地區，或重覆復建地區，採自然復育，並加強防災應變計畫。

各種土砂防治原則均包含多項措施，其具體實施時需考量土砂災害類型特性、規模和保護對象之重要性，進行整體規劃與交互運用，才能發揮最大的功效，殘留土砂災害處理策略示意詳圖 5-6-4 所示。



資料來源：本計畫整理。

圖 5-6-4 殘留土砂災害處理策略示意圖

針對流域集水區不同面向問題，有對應之策略可予以處理，以下首先針對國有林殘留土砂災害處理之「工程措施」與「非工程措施」進行說明，接著就本計畫「四流域集水區殘留土砂災害處理策略」與「殘留土砂災害前、中、後」以及「短、中、長期」處理策略分述如下：

(一) 工程措施

就工程措施而言，依流域集水區殘留土砂災害處理策略規劃，可分為「崩塌地殘留土砂處理對策」、「土石流溪流殘留土砂處理對策」、「野溪土砂處理對策」、「裸露地表土流失土砂處理對策」。整體而言，流域集水區土砂災害處理策略規劃應首重坡面，再以河道作為最後防線，在流域集水區上游需抑制土砂生產，中下游區域則控制其流路並調節土砂量及攔阻巨石。

1. 崩塌地殘留土砂處理對策

崩塌係指邊坡土石或岩塊崩落或滑動現象，崩塌復育由源頭整治優先，降低或消除其導致崩塌之誘因著手，或以各種工程構造物



或植生方式來增加抵抗力或減低驅動力，達安定之目的。崩塌地處理係以防止和抑制崩塌之發生，減輕或消除其造成之災害，維繫水土資源之有效與永續利用，其處理手段大致可從消除或減低其導致崩塌之誘因著手，或以各種工程結構物來增加抵抗力，以達成安定之目的。

(1) 消除誘因(抑制工程)

消除誘因包括改變邊坡幾何形狀，減少崩塌滑動力、降低地下水減少水壓力及減緩雨水沖蝕等。另外，亦可進行地表水與地下水排水工程，以減少表面沖蝕及降低地下水壓力之作用，如噴凝土或植生護坡等工法；源頭處理，包含引導坡頂、坡面之地表水至安全地點，裂縫填補避免地表水沿節理裂縫滲入至地下，並於坡面植生以保護坡面。

(2) 增加抵抗力(抑止工程)

除了作適度之土壤改良外，大多為設計強度足夠之工程構造物來抵抗崩塌之發生，如排樁、微型樁、地錨、擋土牆或坡腳填土增加抵抗力等。

(3) 植生處理方法

對於崩塌地邊坡應先行施作植生基礎工程後，再種植適生植物、加強覆蓋。交通不便處，可以空中撒播方式處理。植生處理依崩塌類型及崩塌位置可單獨使用或與配合抑制、抑止工程使用。

2. 土石流溪流殘留土砂處理對策

土石流依其本身流動特性，分別於土石流發生區、流動區及堆積區分別實施抑制、攔阻、淤積、疏導、緩衝等處理措施及對策，茲分述如下：

(1) 土石流抑制工法

主要應用在溪谷之上游處。由於上游區坡度較陡常是土石流





之發生地點，而土石流在發生階段會對溪床堆積物及側岸產生急遽之沖蝕，藉以獲得足夠之土石材料，達到土石流該有之濃度。因此在坡度較陡之上游區，土石流之防治原則上以防止溪床及側岸沖蝕，阻止土石流獲得土石材料之補充為主。此類工法主要包含固床工、潛壩、連續壩、山腹工等。

(2) 土石流攔阻工法

主要應用於溪谷之中上游。當土石流在上游獲取充分之土石材料後其土石濃度已近乎飽和，因此對溪床沖刷能力也相對降低，然因其動量仍大，且先端之巨礫與流木破壞力仍強，因此在本區土石流之防治應以直接之攔阻為原則。此類攔阻工法主要分為非透過性壩及透過性壩兩種。

(3) 土石流淤積工法

主要係局部加大溪床之寬度或局部減小溪床之坡度，使土石流在事先規劃妥當之沉砂池內產生淤積。

(4) 土石流疏導工法

主要應用於中、下游或扇狀地上，以渠道或導流堤等誘使土石流沿一安全之路線流動。

(5) 土石流緩衝林帶

主要應用於土石流扇狀地上，以樹林帶為緩衝區，避免土石流直接侵襲。

3. 野溪土砂處理對策

由於野溪災害因子複雜，其土砂處理對策除需符合治理目標外，尚需參酌當地之自然環境、工程佈置及社會經濟狀況，來選定適當之治理工法，一般可透過蝕溝控制、護坡工程、防砂壩及潛壩等設施來穩定中上游地區潛在危害之問題，以確保下游聚落之安全。相關野溪土砂處理對策之治理工程整理如表 5-6-2。



表 5-6-2 災害治理對象與相關治理工程

治理對象	相關治理工程
坡面沖蝕、蝕溝發達地區	造林、植生、蝕溝治理、縱橫向排水、坡面保護工、節制壩
岸坡崩塌	防砂壩、固床工、潛壩、護岸、丁壩、植生、排水
亂流河段	潛壩、整流工程、防砂壩、堤防、丁壩
淤砂嚴重河段	防砂壩、潛壩、沉砂工程、土壩、疏浚
縱、橫向沖刷河段	防砂壩、固床工、潛壩、消能檻
土石流地區	源頭處裡、防砂壩、固床工、沉砂工程、梳子壩
洪氾地區	滯洪壩、堤防、護岸、疏濬

資料來源：本計畫整理。

4. 裸露地表土流失土砂處理對策

依源頭、裸露面（沖蝕面）、堆積區等不同位置，採用不同工法處理。分述如下：

- (1) 源頭處理：坡頂截水、裂隙處理等。
- (2) 裸露面（沖蝕面）處理：坡面截導水、蝕溝處理、植生工程等。
- (3) 堆積區處理：泥砂清除、擋土構造物、整流工程等。

(二) 非工程措施

針對受災範圍廣大或工程處理難達到，且災害不易完全控制者，應避免工程衍生更多災害前提下，尊重自然環境，不冒然實施工程治理，並可建議採取「監測及預警機制建立」、「避難路線及處所規劃」或「加強教育宣導及推動聚落自治意識」等非工程措施進行土砂避災處理。

1. 監測及預警機制建立

以下分就監測面與預警面兩面向進行說明。

(1) 監測面

為儘速瞭解並有效掌控國有林殘留土砂情形，並在災時提供現場資訊作為後端應變防災措施參考。本計畫建議可針對國有林殘留土砂監測，透過崩塌區或堆積區的地表變動監測、地層變動



監測及地下水位監測、雨量計、CCD 攝影機、鋼索檢知器、地聲檢知器等監測設備，即時監控重點區域之土砂變動狀況。

此外，針對國有林殘留土砂範圍廣大且無法到達之區域，上述監測方式受限於時空因素而不易實施，則可採以遙測技術以遠端且非接觸性質進行資料蒐集，可提供迅速且大範圍面積之災害監測，掌握地面人員無法即時到達狀況，並提供定量資訊供分析參考。監測系統之建立，常因災害類型、空間條件或人為因素的限制，故需選擇適當方式，得以達至監測目的與成效。

(2) 預警面

預警機制係為提供未來發生二次土砂災害的預測，一般可藉由建立致災因子與土砂災害經驗關聯式，搭配氣象預報的降雨估計值來預測土砂災害發生時間點。此外，配合即時警報系統之設置，於災害發生時，能立即偵測並發出警報，以提醒相關保全對象進行緊急應變或疏散。

2. 避難路線及處所規劃

藉由土砂災害可能成災狀況、規模及波及範圍，規劃疏散避難路線、處所及疏散時機，並於平時配合災害教育宣導、預警通報與整備規劃，引導影響範圍內之人員進行疏散避難演練，致力提昇民眾於地區防災及避災之應變能力。

3. 加強教育宣導及推動聚落自治意識

流域集水區內水土保持、森林管理、土地管理、水庫管理及地方政府等機關（構），應透過教育訓練辦理，灌輸民眾土地永續利用觀念；透過宣導的方法，教導民眾自主防災觀念，啟發聚落意識，以在地力量來保育土地及生活環境。

(三) 本計畫四流域集水區殘留土砂災害處理策略

流域集水區殘留土砂災害處理主要以強化各流域集水區綜合土砂治理、提高保全對象耐災能力以及強化災害緊急應變能力為主要目



標，且於聚落或人口密集處以硬性設施為主，搭配軟性宣導或避災方式進行災害策略研擬；反之，針對人煙稀少，人口密集不高，則以軟性宣導或避災為主。

根據本計畫四流域集水區莫拉克風災二次土砂模擬以及土砂量體估算結果，可發現各流域集水區國有林殘留土砂重點區域及影響聚落，以及流域集水區土砂生產與流出情形，經統合各流域集水區土砂災害問題，彙整各流域集水區二次土砂災害高潛勢區之殘留土砂重點區域以及相關處理對策(如表 5-6-3 所示)，以供後續相關治理單位參考使用。

表 5-6-3 本計畫四流域集水區殘留土砂災害處理策略研擬

流域集水區	土砂殘留重點區域以及相關對策
旗山溪	<p>加強二次土砂災害高潛勢區崩塌地及溪流治理 油礦溪、崩坪坑溪</p> <p>加強二次土砂災害高潛勢區野溪治理及溪溝改善 油礦溪、崩坪坑溪、那托爾薩溪、達卡努瓦溪</p> <p>聚落安全防護及緊急疏散 那瑪夏區(南沙魯里、達卡努瓦里、瑪雅里)甲仙區(小林里、東安里)</p>
荖濃溪	<p>加強二次土砂災害高潛勢區崩塌地及溪流治理 布唐布納斯溪、建山二橋野溪</p> <p>加強二次土砂災害高潛勢區野溪治理及溪溝改善 桃源溪、少年溪、寶來溪</p> <p>聚落安全防護及緊急疏散 六龜區(寶來里、六龜里、中興里、新發里) 桃源區(復興里、勤和里)</p>
太麻里溪	<p>加強二次土砂災害高潛勢區崩塌地及溪流治理 太麻里溪</p> <p>加強二次土砂災害高潛勢區野溪治理及溪溝改善 都拉利吉橋野溪</p> <p>聚落安全防護及緊急疏散 太麻里鄉(大王村) 金峰鄉(嘉蘭村)</p>
阿里山溪	<p>加強二次土砂災害高潛勢區崩塌地及溪流治理 阿里山溪、乾坑溪、石鼓盤溪、豐山溪、蛟龍溪</p> <p>加強二次土砂災害高潛勢區野溪治理及溪溝改善 乾坑溪、生毛樹溪、瑞峰隙仔溪</p> <p>聚落安全防護及緊急疏散 阿里山鄉(豐山村、來吉村) 梅山鄉(太和村、瑞里村)</p>

資料來源：本計畫整理。

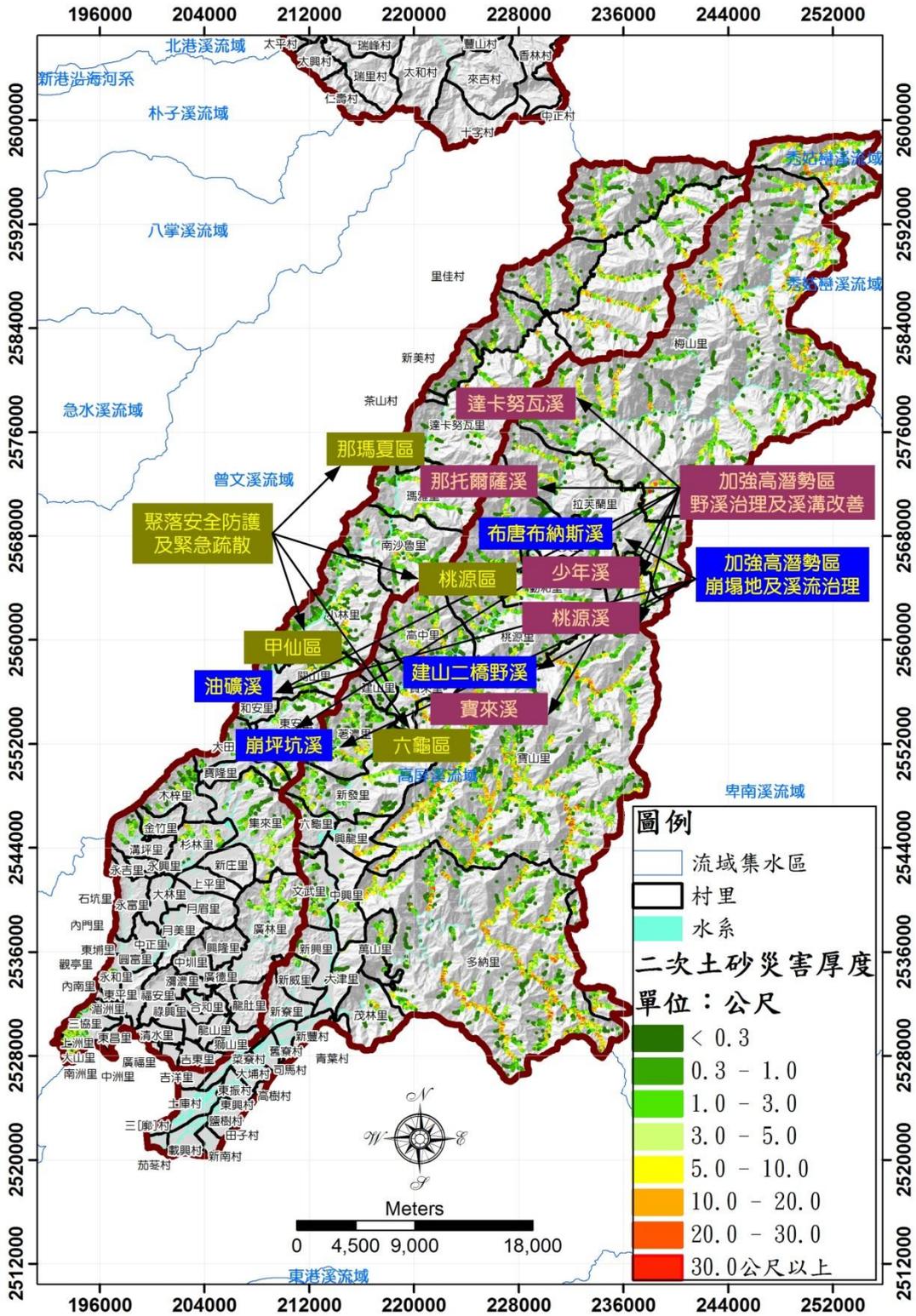


圖 5-6-5 荖濃溪及旗山溪流流域集水區土砂處理策略重點區域分布圖

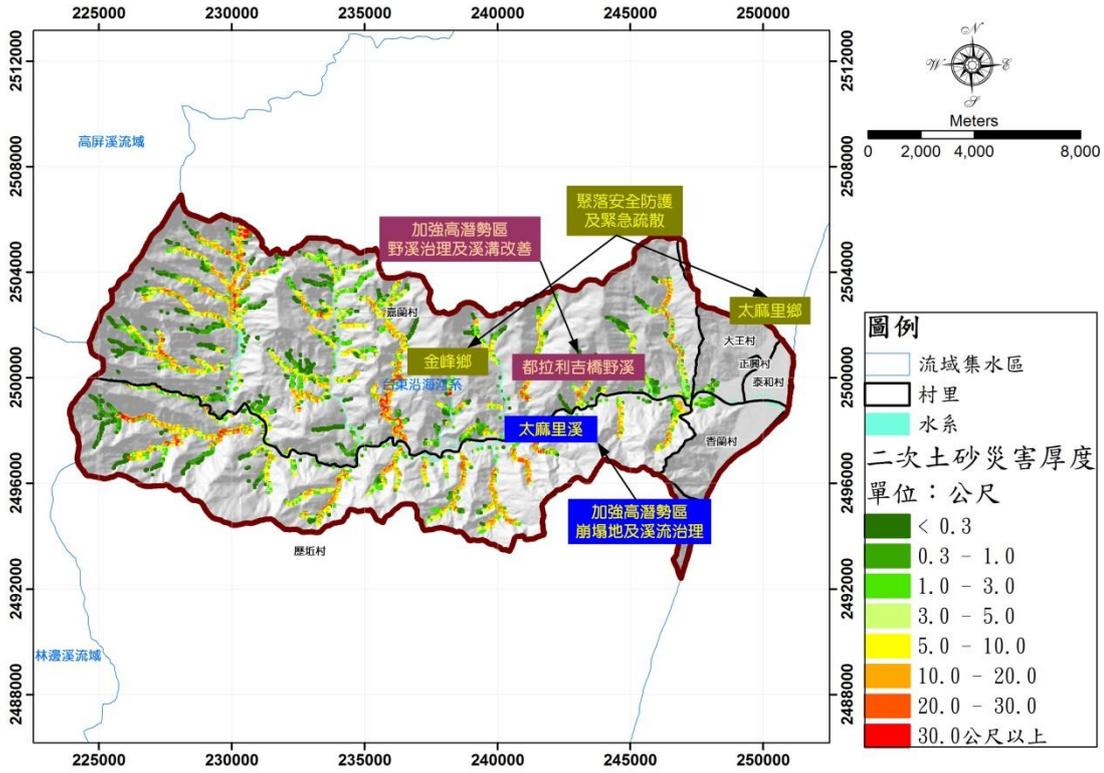


圖 5-6-6 太麻里溪流流域集水區土砂處理策略重點區域分布圖

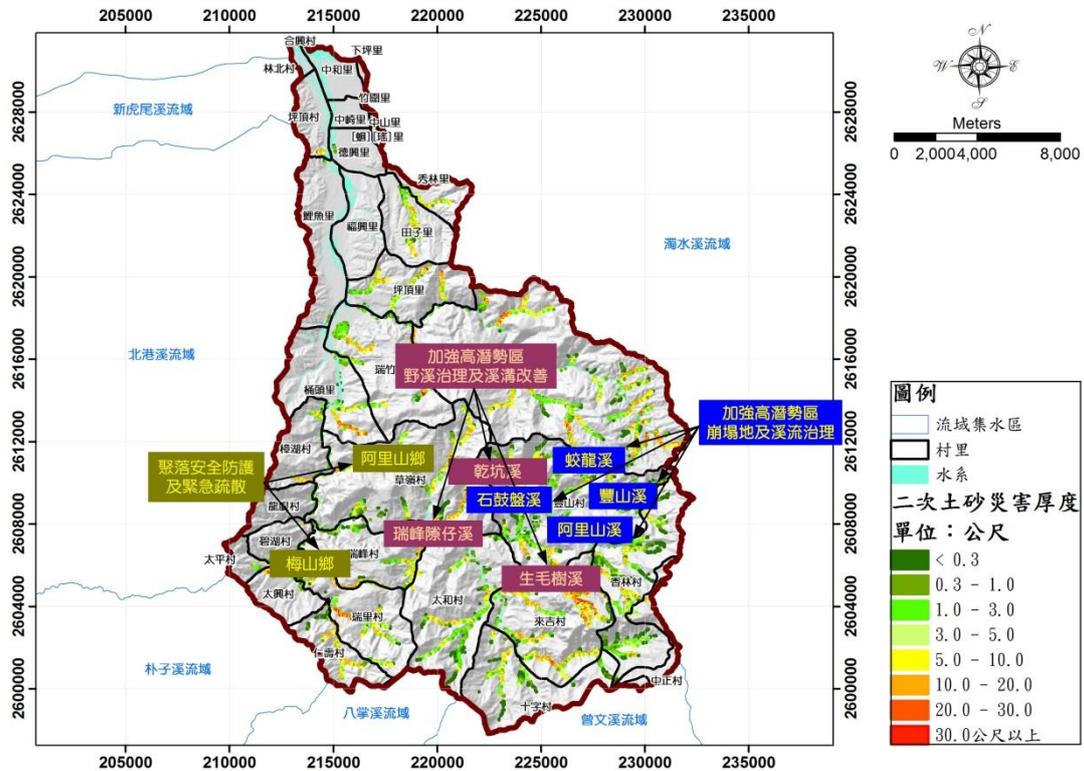


圖 5-6-7 阿里山溪流流域集水區土砂處理策略重點區域分布圖



(四) 「殘留土砂災害前、中、後」以及「短、中、長期」處理策略

1. 殘留土砂災害前、中、後處理策略

本計畫針對流域集水區殘留土砂災害前、中、後「流域集水區坡面或野溪」以及「流域集水區河道」等兩類殘留土砂處理對策進行研擬，相關說明如后：

(1) 流域集水區坡面或野溪殘留土砂災害處理對策

- A. 災前：以坡地殘餘土砂復育、加強造林植被改善、加強崩塌地治理、加強野溪溪溝治理、防砂設施施作維護、橋梁道路改善維護、災害潛勢教育宣導、坡地土地利用管理、強化緊急應變能力及熟捻疏散避難演練為主。
- B. 災中：以土石流即時監測、災害預警發布、緊急疏散避難、封橋機制啟動及災民妥善安置為主。
- C. 災後：以道路橋梁搶通及備援系統啟動為主。

(2) 流域集水區河道土砂殘留災害處理對策

- A. 災前：以河道土砂清淤整理、防洪構造物安全評估、災害潛勢教育宣導、河道兩側土地管理、強化緊急應變能力、熟捻疏散避難演練及河口淤砂清淤為主。
- B. 災中：以水位即時監測、災害預警發布、緊急疏散避難、封橋機制啟動及災民妥善安置為主。
- C. 災後：以清淤土砂恢復取水、道路橋梁搶通及備援系統啟動為主。

2. 短、中、長期處理策略

為健全整體流域集水區土砂收之平衡，故將流域集水區殘留土砂處理問題，依重要性分為近程、中程與遠程處理；其中在短、中、長期殘留土砂處理策略規劃下，應考量以下幾點作為分期的主要依據：保全對象的安全性、民眾陳情事項、效益成本、長期考量(包含其他事項與棲地生態等)。以下針對短、中、長期規劃說明如下：





- (1) 短期以「急迫災損區位復原及改善」為主，針對保全對象明確且影響範圍大之災害區位優先進行規劃。
- (2) 中期則以「影響程度較輕微或保全對象較少之區位」及「既有災損修復」為主，針對災害影響保全對象較少或立即性致災發生性較低及部分既有災損進行改善。
- (3) 長期則以「集水區潛在災害治理」為主，針對集水區內具潛在災害之區域進行改善(及預防性治理)。

未來各階段殘留土砂災害處理策略，可依據流域集水區環境、崩塌地分布、土石流或野溪調查等，訂定不同時期土砂災害處理策略，以供未來治理單位參考。

二、聚落應急殘留土砂災害處理對策

本計畫以莫拉克颱風影響甚為劇烈之荖濃河流域高雄市六龜區新發里新發部落(14~15 鄰)高市 DF107 土石流潛勢溪流集水區，作為土砂應急處理區域示範案例說明，並根據本計畫災後現場聚落調查之崩塌、土石流、現有工程整治資訊、UAV 空拍結果以及 LiDAR 高精度數值地形(詳附錄三)，據以訂定示範區內坡地堆積土砂及野溪堆積土砂之處理對策，以達控制上游國有林殘留土砂問題並提升下游聚落安全為目標，並希冀將相關殘留土砂災害處理對策提供日後規劃參考。以下分別說明示範聚落基本資料、整治現況、致災因子、殘留土砂現調成果以及後續相關土砂處理對策與因應作為等。

1. 聚落基本資料

新發部落(14~15 鄰) 位於高雄市六龜區新發里高市 DF107 土石流潛勢溪流集水區內，且於莫拉克颱風時，上游源頭崩塌造成下游新發部落(14~15 鄰)住戶遭直接撞擊及淤埋。部落交通主要聯外道路為省道台 27 線，往南可通往茂林區，向北則可經由台 20 線通往甲仙區與桃源區等地。部落鄰近地區地勢陡峭，且主要位於階地





堆積層上，西側有美瓏山斷層與樟山斷層等構造線通過，對於斷層錯動導致之影響甚大，連帶區內地質亦較為脆弱與破碎。

2. 整治現況

新發里境內高市 DF107 溪流於莫拉克颱風後於下游形成一明顯之土石流堆積扇，整治單位於堆積扇區設置植生護坡工程，並於堆積扇邊緣設置有擋土牆圍束囚砂，現有整治設施現況整理如表 5-6-4。

表 5-6-4 新發部落高市 DF107 土石流潛勢溪流既有整治設施表

工程設施編號	數量	X 座標	Y 座標	結構物名稱	長度(m)	寬度(m)	高度(m)
1	1	215514	2547758	護坡	-	-	-
2	1	215859	2547924	擋土牆		-	4

資料來源：本計畫整理。

3. 致災因子

(1) 上游源頭處崩塌

本計畫經由現地調查與正射影像判釋成果發現，高市 DF107 土石流潛勢溪流集水區上游源頭處國有林地內有 1 處大規模崩塌，坡面殘留土砂平均厚度 7.0 公尺，殘留土砂體積為 65,132 立方公尺，現調發現此崩塌仍存在明顯下移現象。另經本計畫現場調查、UAV 以及 LiDAR 拍攝成果比對，針對此處大規模崩塌所圈繪出坡面殘留土砂區域，詳前述圖 5-4-16。此外，經由山坡地斜坡單元與地調所完成之山崩潛勢分析結果進行套疊後發現，聚落全區域均屬山崩高潛勢地區，並依據現場聚落調查成果，劃定崩塌影響範圍(附錄三)。

(2) 新發部落(高市 DF107 土石流潛勢溪流)

高市 DF107 集水區植生狀況屬植被稀疏，且河道內尚有大量土石堆積，且溪流並無明顯流路可疏通水流，兩岸沖刷情形嚴重，且地下水豐沛，當颱風豪雨來臨時應無法立即宣洩而造成洪水挾帶土石漫流，而提高下游新發部落(14~15 鄰)受災潛勢。





4. 後續相關土砂處理對策與因應作為

整體而言，高市 DF107 集水區上游河道與坡面皆有大量殘留土石堆積，且現場並無整流工程及任何監測預警設備，且崩塌地下方既有擋土工程據現場勘查發現，結構已受崩塌土石下移影響出現裂縫甚或傾斜，對既有構造物功能出現威脅。此外，根據本計畫 Debris-2D 模擬結果顯示(如圖 5-6-8)，假設於坡面土砂殘留量整體崩落且往下游運移之狀況下，仍將會影響新發部落(14~15 鄰)保全住戶之安全。有鑑於此，本計畫根據應急土砂災害處理原則(如表 5-6-5)，針對高市 DF107 集水區以及保全對象研擬殘留土砂災害處理對策，進以減低未來現地殘留土砂災害影響，確實保障鄰近聚落之安全，以下分就工程措施及非工程措施兩方面進行說明。

(1) 工程措施

針對整體集水區除就河道加強固床工、跌水工、防砂設施或消能檻設置等整流設施外，上游源頭崩塌地殘留土砂區建議可進行坡面縱橫向截排水、掛網噴植、苗木植栽等坡面源頭治理，並以擋土構造物穩定坡腳及防止河岸沖刷與淘空，相關因應工程項目與規劃彙整如表 5-6-6 所示，現場工程配置規劃示意如圖 5-6-9，然各聚落存在問題不同，應因地制宜調整工程減災配置方案。

(2) 非工程措施

本計畫除針對現場工程措施研擬相關對策外，另為即時監控集水區土砂移動及環境狀況，並於災害來臨前或災時提供現場資訊作為災害預警及後端應變防災措施參考，本計畫建議於現地架設 CCD 攝影機、雨量計、鋼索檢知器、地聲檢知器、相關警報預警傳輸系統以及固定式觀測站及信號發射機(相關監測設備功能參考表 5-6-7)，以監測山區降雨狀況及提供土砂即時影像，並配合水保局土石流疏散避難規劃(圖 5-6-10)，作為緊急防災避難參考。本計畫研擬即時監測預警系統相關規劃配置如圖 5-6-11 所示，各聚落關鍵致災因素仍有差異，也需因應致災因素配置適宜監測系統才能有效達成災害預警之目的。



表 5-6-5 應急土砂災害處理原則

項次	項目	處理原則
1	坡地堆積土砂處理	<ul style="list-style-type: none"> ● 有保全對象地區適度清除堆積土石量，以恢復聚落之生活機能，包括連通道路修復與重建及工程措施興建，以穩定未清除之堆積土石。 ● 無保全對象地區則以自然方式處理，即自然復育。
2	造成二次災害之防治	<ul style="list-style-type: none"> ● 檢視土石堆積區之穩定狀況，遇有可能發生災害的地區以工程設施穩定坡面。
3	減少土砂下移量	<ul style="list-style-type: none"> ● 經處理有保全對象地區之土砂量及自然復育無保全對象地區之坡面後，為減少坡地土砂下移量以維持疏浚後河道之通暢，必須設置坡地安全排水，盡量降低地表沖蝕及再度崩塌之可能性。
4	監測與避災系統建立	<ul style="list-style-type: none"> ● 流域內坡地土砂堆積量甚多，不及清除或不預計清除之地區，設置監測系統以隨時監測坡地土石下移狀況，並規劃避災路線及場所，避免再度發生崩塌時減少人員傷亡。
5	河道土砂處理	<ul style="list-style-type: none"> ● 上游段山區淤積段無法運送，先辦理河道疏通。

資料來源：修改自水利署，2010

表 5-6-6 高市 DF107 集水區治理工程項目與規劃彙整表

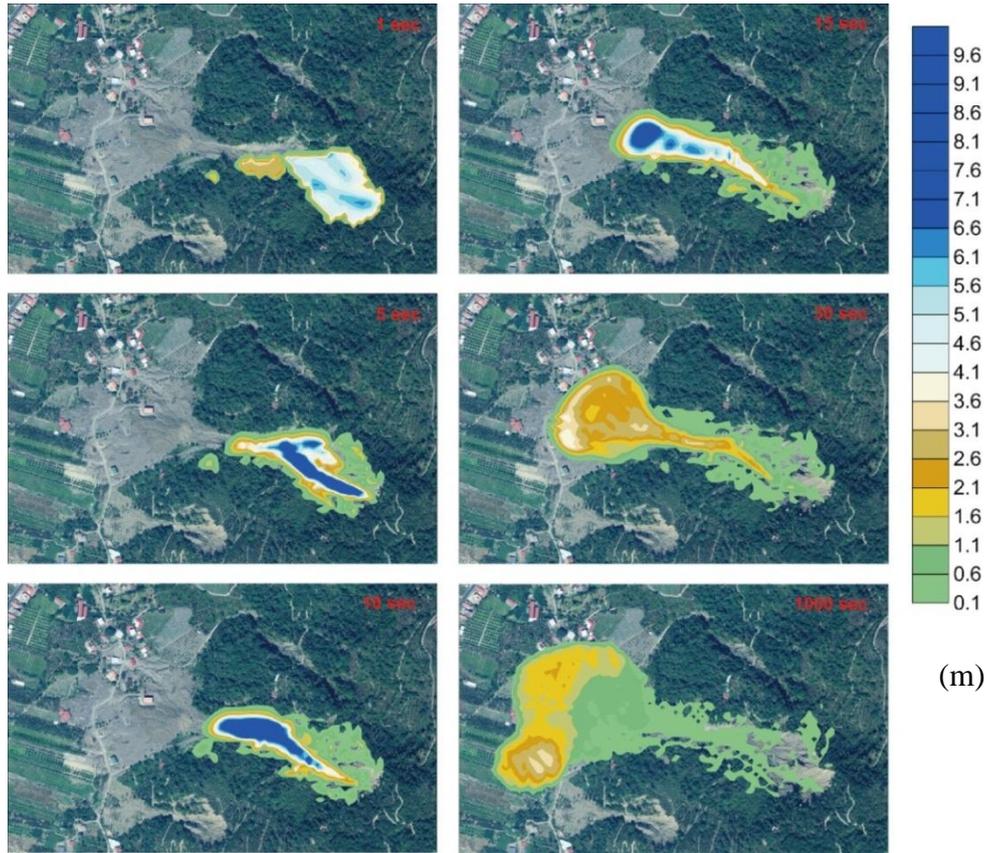
治理類型	治理區位	治理工程規劃
坡面	上游源頭崩塌坡面	掛網噴植、苗木植栽、坡面縱橫向截排水、坡面保護工
	崩塌地坡趾	擋土牆或落石防護網
河道	亂流河段	防砂壩或潛壩、護岸、整流工程、
	淤砂嚴重河段	土砂清疏、沉砂池
	縱、橫向沖刷河段	防砂壩或潛壩、固床工、跌水工、消能檻

資料來源：修改自水利署，2010

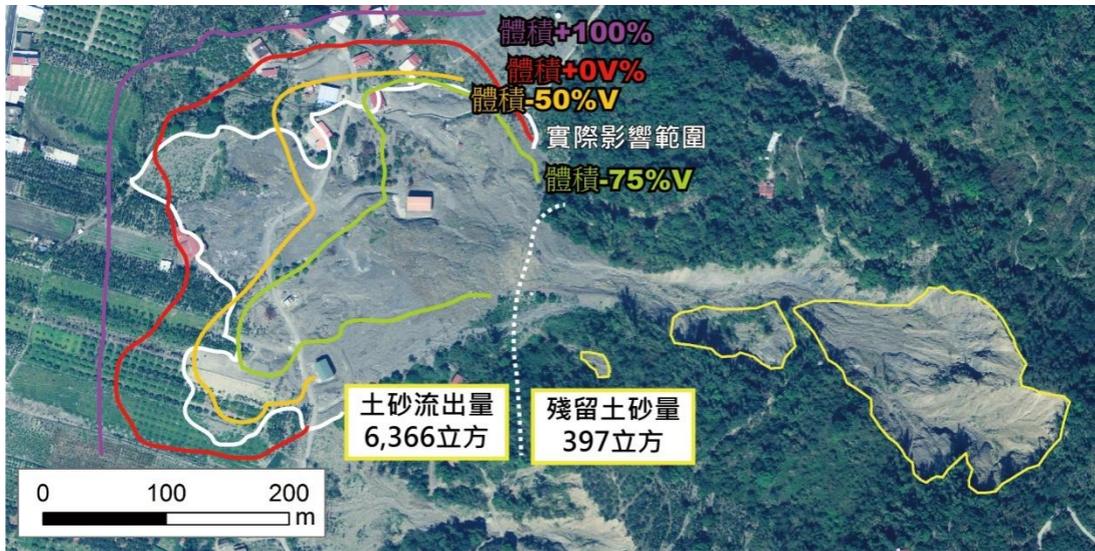
表 5-6-7 監測預警設備項目及功能

監測預警儀器	記錄資訊	功能
雨量計	雨量值	計讀該區降雨資訊，即時掌握最新且正確的當地降雨量，配合公告雨量警戒值，作為土石流預警參用。
CCD 攝影機	視訊影像	記錄現場災況及即時影像。
鋼索檢知器	土石流發生信息	偵測崩塌或土石流衝擊力，提供土砂災害預警參考。
地聲檢知器	地表振動量	監測崩塌或土石流發生所引之震動頻率，提供土砂災害預警參考。
固定式觀測站及信號發射機	資料整合	整合現地監測資料或災害訊息，即時傳送室內判讀及通報。
警報系統	-	提醒當地聚落或保全對象，並進行適當之避難疏散。

資料來源：本計畫整理。



(A) 新發部落崩塌影響範圍模擬(採用 Debris2D 模擬 98 年莫拉克颱風事件)

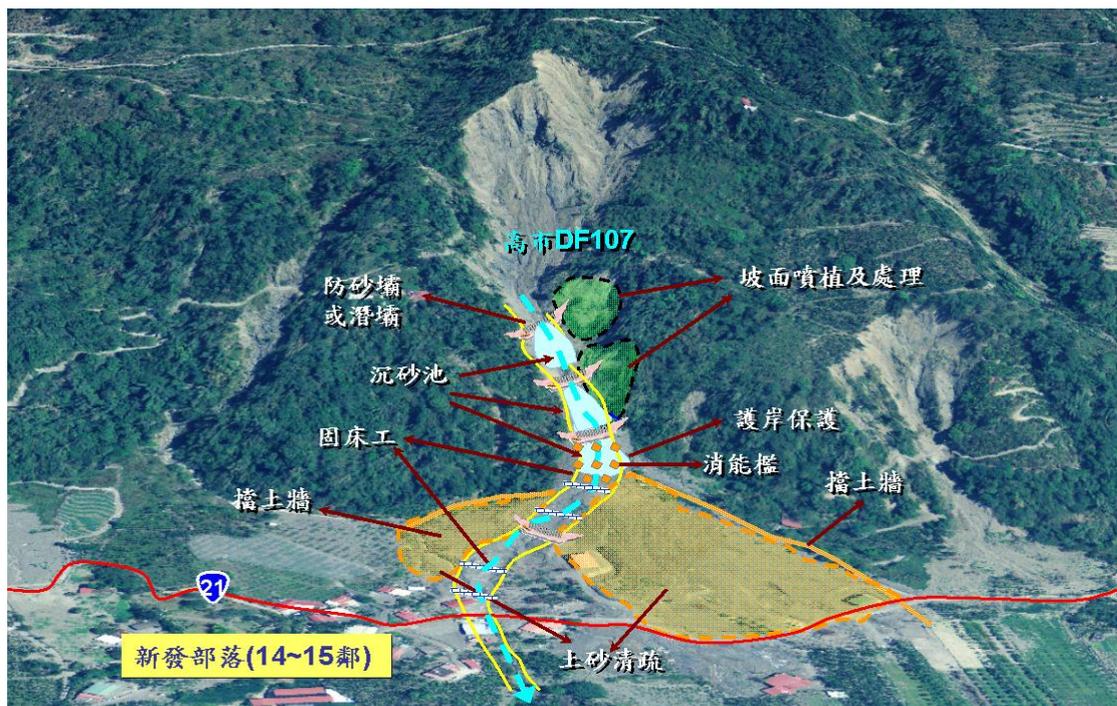


(B) 不同崩塌體積量之影響範圍模擬

資料來源：本計畫整理。

圖 5-6-8 新發部落崩塌影響範圍模擬結果

(採 Debris-2D 模擬莫拉克颱風事件)



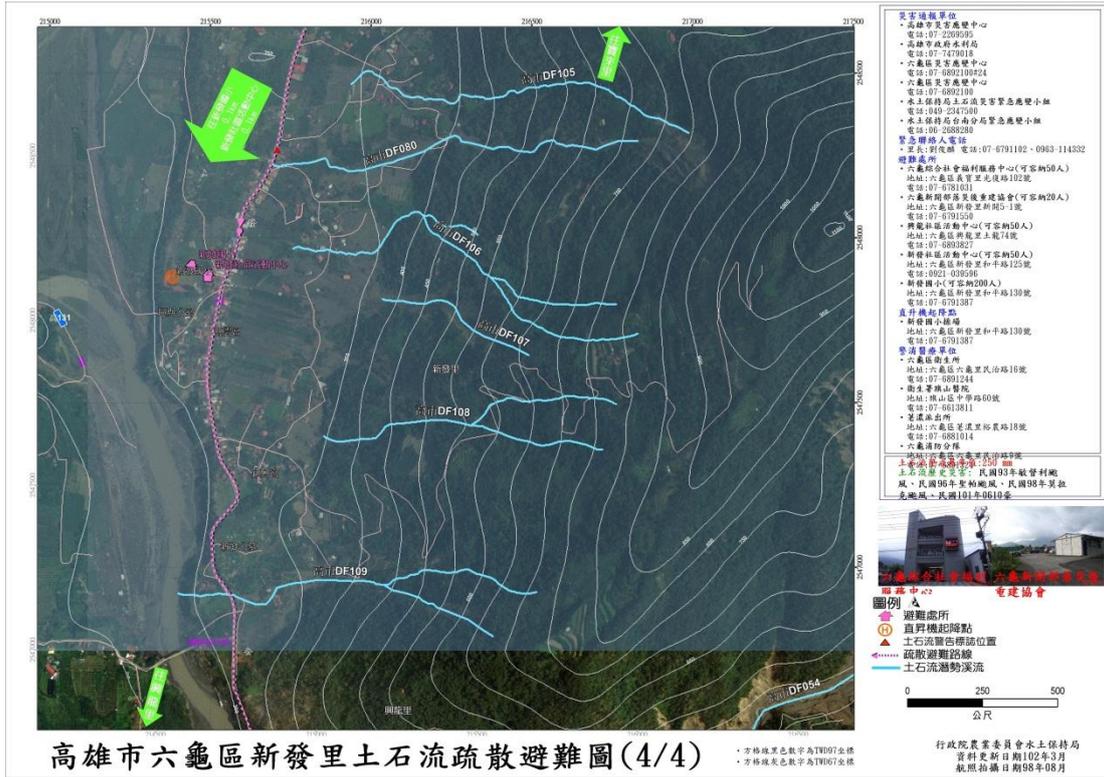
資料來源：本計畫整理。

圖 5-6-9 工程配置規劃示意圖



資料來源：本計畫整理。

圖 5-6-10 監測及災害預警系統規劃配置示意圖



資料來源：摘自 水保局網站(<http://246.swcb.gov.tw/preventInfo/RefugeMap.aspx>)

圖 5-6-11 土石流疏散避難圖

第陸章 辦理成果研習會

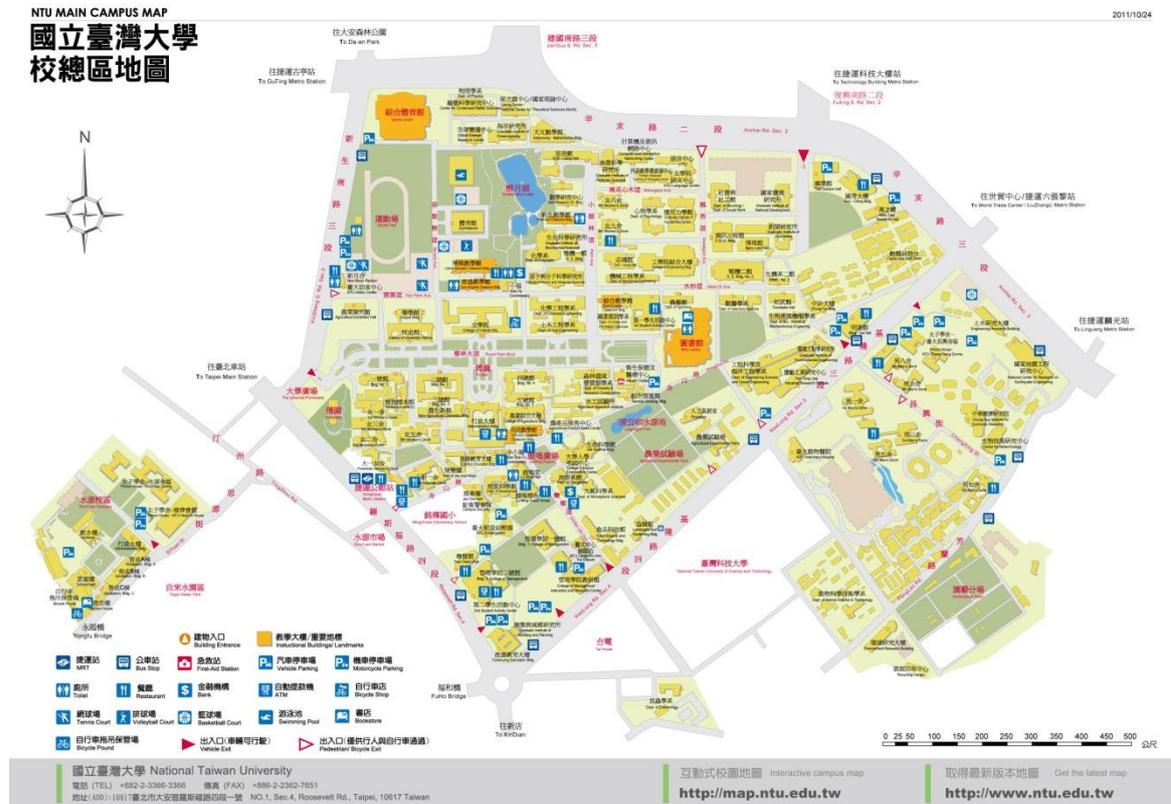
本計畫就執行成果，辦理教育訓練乙場，期望與會人員能熟悉本計畫國有林莫拉克風災土砂二次災害潛勢影響評估成果，以及本計畫使用坡地泥沙運移模式 Debris-2D 之操作與介紹，輔助災防業務進行，並且獲取同仁在資料面、功能面及災防實務應用上寶貴的經驗及建議，作為後續發展之參考。辦理時間為民國 102 年 7 月 25 日(星期四) 9:00~16:00，辦理地點為國立臺灣大學水工試驗所四樓會議室，位置如圖 6-1-1 所示。邀請對象為林務局、各林區管理處、水保局、水利署及相關執行單位同仁等均可免費參加。報名方式是請將下列報名表 6-1-1 填寫完傳真至台大水工所或 E-Mail 給相關聯絡人員，名額以 80 人為限，報名截止日為民國 102 年 7 月 22 日。研習會課程如表 6-1-2 所示，共計五堂課 6 小時。此次報名踴躍，參與單位有 16 個，教育訓練當日實際參與之人員約四十人(報到狀況及前置作業如圖 6-1-2)(成果研習會簽到單如附錄四)，在長官致詞之後接著就是基本理論、本計畫實際成果說明及理論說明與實際操作(課程講義如附錄五)，課程說明如下：

- 1.崩塌地判釋、品管與現地殘留土砂調查方法等基本觀念
- 2.土石方變化及二次災害潛勢評估流程說明與成果展示
3. Debris-2D 二維土石流模式理論說明與實際操作

本次邀請行政院農業委員會林務局集水區治理組王昭堡組長及國立台灣大學水工試驗所劉格非主任為此次會議致詞，詳如圖 6-1-3。而課程邀請的第一位講師為財團法人中興工程顧問社沈哲緯副研究員；第二位講師為國立台灣大學水工試驗所陳毅青博士後研究員；第三位講師為國立台灣大學土木工程學系吳映昕博士候選人，如圖 6-1-4。除上課情形外亦有實際操作及討論時間，如圖 6-1-5 所示。

表 6-1-1 成果研習會報名表

姓名	聯絡電話		
	行動電話		
服務單位/部門	職稱		
身分證字號 (時數認證用)	出生年月日	年 月 日	
性別	<input type="checkbox"/> 男； <input type="checkbox"/> 女	用餐	<input type="checkbox"/> 葷； <input type="checkbox"/> 素； <input type="checkbox"/> 不需要
電子信箱：			
公務人員終身學習認證時數(6小時)： <input type="checkbox"/> 需要； <input type="checkbox"/> 不需要			
個資使用同意請打勾		<input type="checkbox"/> 同意； <input type="checkbox"/> 不同意	
備註： 請於 102年7月22日(一)下午5點 前填妥報名表，以傳真、E-mail 或網路方式報名，為確保報名成功，請於傳遞報名表後洽詢工作人員確認收件。 ● 聯絡人員：紀怡君 02-336-62609 ● 傳真電話：02-336-65866 ● 電子信箱：eg_nono@yahoo.com.tw			



資料來源：國立臺灣大學網站

圖 6-1-1 國立臺灣大學校區平面圖

表 6-1-2 成果研習會課程規劃

時間	課程內容	講師	
上午	08:30-09:00	報到	
	09:00-09:10	長官致詞	
	09:10-10:00	崩塌地判釋、品管與現地調查方法	沈哲緯 副研究員
	10:00-10:20	休息時間	
	10:20-11:10	國有林土石方之變化情形，以及降雨與土砂流出量關係	陳毅青 博士
	11:10-12:00	國有林殘留土砂二次災害潛勢評估方法與流程	陳毅青/沈哲緯
下午	12:00-13:30	午膳時間	
	13:30-14:20	Debris-2D 二維土石流模式理論解說	吳映昕 博士候選人
	14:20-14:40	休息時間	
	14:40-15:30	Debris-2D 二維土石流模式實作示範	吳映昕 博士候選人
	15:30-16:00	綜合討論	
	16:00	賦歸	



圖 6-1-2 成果研習會，報到及前置作業



圖 6-1-3 成果研習會，長官致詞



圖 6-1-4 成果研習會，講師群



圖 6-1-5 成果研習會，上課及實機操作與討論

第七章 結論與建議

7-1 結論

綜合期末報告內容，彙整已完成工作及結論如下：

一、彙整判釋國有林崩塌地基本資料部分

本計畫滿足契約要求蒐集與判釋 98 至 101 年國有林崩塌地，另補充 97 年崩塌地目錄，以近五年崩塌歷史探討國有林地流域別及事業區之崩塌歷程變化。此外，建立了遙測判釋崩塌地之標準作業流程、三級品管程序、判釋範例及崩塌地基本資料屬性編列(基本資料與附屬資料)。茲就流域別及事業區崩塌地變化歷程分析結果說明如下：

(1) 流域別

A. 年度崩塌地面積統計結果

崩塌地面積統計結果顯示，97 至 101 年若以 98 年莫拉克颱風事件為分界，莫拉克颱風前以濁水河流域崩塌面積最大，莫拉克後崩塌地則主要集中於高屏河流域，各年度崩塌面積分別 4,560 公頃、2,607 公頃、17,169 公頃、13,845 公頃及 12,212 公頃之多。綜合年度崩塌地統計結果可知，近 5 年崩塌地分布以南部地區較大，又以高屏河流域為最大。

依據統計結果可得知，北部地區近 5 年崩塌地面積以南澳沿海河系流域較大，崩塌面積分別達到 1,437 公頃、847 公頃、1,331 公頃、986 公頃及 1,370 公頃；中部近 5 年崩塌地面積以濁水河流域影響較大，崩塌面積分別達到 5,430 公頃、2,952 公頃、4,941 公頃、5,791 公頃及 6,118 公頃；東部地區近 5 年崩塌地面積以卑南河流域較為嚴重，崩塌面積分別達到 2,414 公頃、1,132 公頃、5,118 公頃、3,919 公頃及 5,110 公頃。



B. 年間崩塌地面積統計結果

- (A) 97~98 年間：新增崩塌地面積、舊崩塌地擴大面積、復育地面積均以濁水溪流域最大，分別達 753 公頃、514 公頃、3,231 公頃之多，以整體趨勢來看，各流域集水區新增崩塌地面積總和達 5,143 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 3,206 公頃，復育地面積總和達 16,419 公頃，結果顯示 97~98 年流域集水區新增崩塌地偏向舊崩塌地擴大之情形，為崩塌復育多於新增崩塌之情形。
- (B) 98~99 年間：新增崩塌地面積以高屏溪流域最大，達 15,031 公頃之多；舊崩塌地擴大以高屏溪流域最大，達 8,711 公頃；復育地面積以濁水溪流域最大，達 815 公頃之多，以整體趨勢來看，各流域集水區新增崩塌地面積總和達 37,923 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 21,929 公頃，復育地面積總和達 4,415 公頃，結果顯示 98~99 年流域集水區舊崩塌地擴大總和約佔新增崩塌地面積總和 57.8%，且以南部地區高屏溪流域比例較高，結果顯示 98~99 年新增崩塌多於復育之情形，主要原因係 98 年莫拉克颱風豪雨引致大規模面積崩塌所致。
- (C) 99~100 年間：新增崩塌地面積、舊崩塌地擴大面積與復育地皆以高屏溪流域為最大，新增崩塌地面積達 4,149 公頃，舊崩塌地擴大面積達 2,910 公頃，復育地面積達 7,473 公頃之多。以整體趨勢來看，各流域集水區新增崩塌地面積總和達 13,993 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 8,573 公頃，復育地面積總和達 24,395 公頃，結果顯示 99~100 年流域集水區舊崩塌地擴大總和約佔新增崩塌地面積總和 61.3%，且以高屏溪流域比例最高，整體而言，99 至 100 年崩塌變遷情形為復育多於新增崩塌之情形，復育地以高屏溪流域最多，佔全





部流域集水區復育地面積的 30.6%，主要是 98 年莫拉克颱風後並未因 99 年凡那比颱風再造成大面積之新增崩塌，反而舊有崩塌地復育比例提高。

(D) 100~101 年間：新增崩塌地面積、舊崩塌地擴大面積與復育地皆以高屏溪流域為最大，新增崩塌地面積達 3,108 公頃，舊崩塌地擴大面積達 2,594 公頃，復育地面積達 4,741 公頃之多。以整體趨勢來看，各流域集水區新增崩塌地面積總和達 14,237 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 10,897 公頃，復育地面積總和達 11,973 公頃，結果顯示 100~101 年流域集水區新增崩塌地以完全新增崩塌地情形者為多，且以高屏溪流域比例最高，以 100 至 101 年崩塌變遷情形為復育與新增崩塌之情形互現，新增崩塌地面積略多於復育地。

(2) 國有林地事業區

A. 年度崩塌地面積統計結果

國有林地事業區年度崩塌地面積統計結果顯示，97 年及 98 年崩塌地面積以花蓮林區管理處立霧溪事業區最高，面積分別達 2,362 公頃與 1,282 公頃；99 年及 101 年崩塌地面積以台東林區管理處大武事業區最高，面積分別達 5,408 公頃與 3,768 公頃；100 年崩塌地面積以屏東林區管理處荖濃溪事業區最高，面積達 3,750 公頃。由上述統計結果可知，99 年汛期前主要是莫拉克颱風所造成之崩塌地，致使各國有林地事業區皆有為數不少的崩塌地產生。

B. 年間崩塌地面積統計結果：

(A) 97~98 年間：新增崩塌地面積以屏東林區管理處潮州事業區最大，達 399 公頃之多；舊崩塌地擴大以東勢林區管理處八仙山事業區最大，達 304 公頃；復育地面積以花蓮林區管理





處立霧溪事業區最大，達 1,327 公頃之多。以整體趨勢來看，各國有林地事業區新增崩塌地面積總和達 4,205 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 2,785 公頃，復育地面積總和達 14,686 公頃。總結而言，97 至 98 年崩塌變遷情形為復育多於新增崩塌之情形。

(B) 98~99 年間：新增崩塌地面積與舊崩塌地擴大面積皆以台東林區管理處大武事業區最大，分別達 4,755 公頃與 3,012 公頃之多；復育地面積以屏東林區管理處潮州事業區最大，達 444 公頃之多。以整體趨勢來看，國有林地事業區新增崩塌地面積總和達 31,458 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 18,820 公頃，復育地面積總和達 3,631 公頃，結果顯示 98~99 年國有林地事業區舊崩塌地擴大面積總和佔新增崩塌地總和比例達 59.8%，且以台東林區管理處大武事業區比例最高，為新增崩塌多於復育之情形，主要原因係 98 年莫拉克颱風豪雨引致大規模面積崩塌所致。

(C) 99~100 年間：新增崩塌地面積與舊崩塌地擴大面積皆以屏東林區管理處荖濃溪事業區為最大，面積分別達 1,215 公頃與 902 公頃；復育地面積以台東林區管理處大武事業區最大，達 3,163 公頃之多。以整體趨勢來看，各國有林地事業區新增崩塌地面積總和達 12,330 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 7,562 公頃，復育地面積總和達 20,202 公頃，結果顯示 99~100 年國有林地事業區舊崩塌地擴大面積總和佔新增崩塌地總和比例達 61.3%，復育地以台東林區管理處大武事業區最多，整體而言，99 至 100 年崩塌變遷情形為復育多於新增崩塌之情形。

(D) 100~101 年間：新增崩塌地面積與舊崩塌地擴大面積皆以台東林區管理處大武事業區為最大，面積分別達 1,765 公頃與



1,231 公頃；復育地面積以屏東林區管理處旗山事業區最大，面積達 1,397 公頃之多。以整體趨勢來看，各國有林地事業區新增崩塌地面積總和達 12,868 公頃，舊崩塌地擴大面積總和達 10,011 公頃，復育地面積總和達 9,569 公頃，結果顯示 100~101 年國有林地事業區新增崩塌地以舊崩塌地擴大情形者為多，且以台東林區管理處大武事業區比例最高，崩塌變遷情形為新增崩塌略多於復育之情形。

二、分析土石方之變化情形

- (1) 藉由文獻蒐集與野外量測得到地區之崩塌體積和面積的資料。已蒐集西部麓山地區樣本數共計 157 處；中央山脈西翼地區-雪山山脈帶共計 1,996 處；中央山脈西翼地區-脊樑山脈帶 304 處；中央山脈東翼地區共 37 處；海岸山脈地區共 46 處，共計 2,540 處。利用穩健迴歸分析，得到各別地質分區之崩塌體積-面積關係式，決定係數介於 0.81~0.92 之間，發現西部麓山地區之大面積崩塌地具有較高之崩塌體積，因該地質分區廣泛分布著膠結不良的軟弱岩盤，平均岩體單壓強度為 20.0 ± 13.8 MPa，強度遠低於其它地質分區，容易產生大規模的崩塌。
- (2) 97-101 年間全臺 37 處國有林事業區，受到 97 年卡玫基、鳳凰、辛樂克、薔蜜、98 年之莫拉克、99 年的凡那比和梅姬，以及 100 年南瑪都和泰利颱風影響，新增的土砂量總計 16 億 4932 萬立方公尺。其中，98-99 年佔總量之 63%。各事業區之最大前 10 名依序為旗山(4 億 1,373 萬立方公尺)、大武(2 億 9,100 萬立方公尺)、屏東(8,723 萬立方公尺)、荖濃溪(8,708 萬立方公尺)、大埔(7,679 萬立方公尺)、玉山(7,497 萬立方公尺)、延平(5,977 萬立方公尺)、立霧溪(5,035 萬立方公尺)、玉井(4,355 萬立方公尺)、阿里山(5,020 萬立方公尺)，這 10 個事業區之崩塌



量佔總量之 75%。

- (3) 四集水區新增的土砂量總計 9 億 725 萬立方公尺，以荖濃溪 3 億 7,222 萬立方公尺最多，旗山溪的 2 億 4,750 萬立方公尺次之，太麻里溪和阿里山溪則分別為 2 億 2,693 萬立方公尺和 6,060 萬立方公尺。其中，國有林的崩塌量合計 8 億 2,597 萬立方公尺，佔該四集水區的 91%，以荖濃溪 3 億 2,025 萬立方公尺最多，旗山溪的 2 億 3,641 萬立方公尺次之，太麻里溪和阿里山溪則分別為 2 億 2,430 萬立方公尺和 4,501 萬立方公尺。

三、土砂流出量與殘留量分析

- (1) 本計畫已完成國有林各事業區土砂流出量統計。國有林歷年土砂流出量以 98 年流出量最大，共計 4 億 8,870 萬立方公尺，其次為 97 年的 4 億 5,309 萬立方公尺，而 99-101 年則較少，介於 1 億 1,862 萬立方公尺至 3 億 1,758 萬立方公尺。總流出量為 15 億 7,565 萬立方公尺。根據 Dadson et al. (2003) 的研究指出在集集大地震之前，臺灣年平均河川輸砂量約為 5 億公噸(總載)，約相當於 3 億 1,250 萬立方公尺的土砂量。並在集集大地震後，靠近震央的河川輸砂量增加約 2~4 倍 (Dadson et al., 2004)。該研究結果與本計畫估算結果相似，故本計畫推估之河川土砂流出量應屬可靠。
- (2) 各事業區土砂流出以旗山事業區最大，每年流出量介於 2,231~7,091 萬立方公尺，共流出 2 億 2,460 萬立方公尺。其次為阿里山事業區，每年流出量則介於 314~8,866 萬立方公尺，年間流出量差異甚大，總量為 1 億 8,935 萬立方公尺。第 3~5 名則分別為玉井事業區(1 億 6,079 萬立方公尺)、太平山事業區(1 億 3,089 萬立方公尺)與延平事業區(8,910 萬立方公尺)。





- (3) 集集地震發生後 7 年，濁水溪流域內各國有林事業區仍有大量的殘留土砂尚未被河川帶走，共計 3 億 7,622 萬立方公尺，阿里山事業區土砂殘留量仍有 2 億 4,529 萬立方公尺。巒大事業區為 4,223 萬立方公尺；丹大事業區為 5,201 萬立方公尺；濁水溪事業區為 3,669 萬立方公尺。其中，阿里山事業區因草嶺大崩塌影響，仍有相當大的土砂堆積在河道上。而集集地震土砂殘留量則影響 97-101 年間的土砂殘留量計算結果，將這四個事業區的殘留土砂納入後續分析的起始值。
- (4) 國有林地 在 97 年度因土砂流出量較大，使得中部地區的土砂殘留量由 3 億 7,622 萬立方公尺減少為 2 億 7,115 萬立方公尺，而南部地區土砂殘留量為零，表示該年河川屬於侵蝕或是將之前的殘留土砂持續帶走。98 年則因莫拉克颱風造成大量的新增崩塌，造成中、南、東部事業區新增大量的土砂量，使得該年度之土砂殘留量明顯增加。99-101 年間因較無重大的崩塌事件，雖然仍有部分新增崩塌土砂，但整體來說，土砂流出量大於新增崩塌量，故土砂殘留量則持續下降。
- (5) 截至 101 年底為止，全國國有林土砂殘留量合計 9 億 5,166 萬立方公尺的土砂量，其中，莫拉克颱風的土砂殘留量為 5 億 6,010 萬立方公尺，莫拉克颱風殘留比約為 48%。各事業區土砂殘留量以旗山事業區多有 2 億 5,663 萬立方公尺，莫拉克颱風殘留比約為 60%。其次為大武事業區的 2 億 3,126 萬立方公尺，殘留比約為 79%，第三為阿里山事業區的 1 億 614 萬立方公尺。其他事業區土砂殘留量皆不足 1 億立方公尺。若考慮莫拉克颱風災後的人工清淤和疏浚工程，清淤量約 6 千萬立方公尺，則全國國有林土砂殘留量約 8 億 9,166 萬立方公尺，莫拉克颱風的土砂殘留量約為 5 億 10 萬立方公尺，則莫拉克颱風殘留比約為 43%。



- (6) 本計畫已分析土砂流出量和地文因子關係，發現土砂流出量與集水區的流域相對長度、南向坡的比例和新增崩塌量相關，並建長期平均土砂流出量的複迴歸關係式。此外，並分別建立各流域之土砂流出量和降雨事件之最大 24 小時雨量的關係式，以方便管理單位概估各場颱風事件引致的土砂量流出量。然而，各河川的輸砂量不管在時間上或空間的變異仍然相當大，若利用簡單的迴歸方程式推算未來可能的流出量與殘留量，將會產生極大的誤差。建議未來仍須根據歷年衛星影像判釋與河川輸砂量的觀測資料，滾動式的檢討各年的新增崩塌量、土砂流出量與殘留量，較能掌控國有林地土砂殘留與流出的情形。

四、國有林殘留土砂二次災害潛勢評估部分

- (1) 本計畫已完成國有林地內保全對象之災害潛勢評估方法、流程與步驟研擬。因土砂殘留而引致的二次土砂災害的現象模擬，崩塌潛勢分析採用二元迴歸模式，並透過崩塌體積-面積關係式推估土石流料源，再以 Debris-2D 二維土石流模式模擬土石流災害潛勢和影響範圍，崩塌潛勢分析結果的率定和驗證修正成功率分別為 80.4% 和 68.9%。崩塌體積-面積關係式則以來吉部落案例之光達量測結果驗證，推估崩塌體積之 959 萬立方公尺與觀測之 950 萬立方公尺相當吻合，說明該方法能有效推估深層崩塌之崩塌體積。土石流災害潛勢模擬結果則由新發部落案例驗證，在土石流堆積扇的北側的土石流堆積厚度約 4 到 5 公尺，與模擬結果的 4 公尺堆積厚度相當吻合，結果顯示該模式能夠用於模擬崩塌引發的土石運移和堆積行為。
- (2) 本計畫已完成 100 年重現期雨量下，四個集水區與阿里山鐵路沿線的殘留土砂、新增崩塌與二次土砂災害模擬。旗山溪與荖濃溪集水區在 100 年重現期雨量分別為 689 mm 與 742 mm，分



別產生新生崩塌面積 551 公頃和 2,190 公頃，新生崩塌量分別為 2,073 萬立方公尺和 4,054 萬立方公尺的土砂。太麻里溪流域雨量為 1,114 mm，產生新生崩塌面積 1,855 公頃，新生崩塌量 3,782 萬立方公尺的土砂。阿里山溪集水區雨量為 910 mm，產生新生崩塌面積 144 公頃，新增崩塌量共計 798 萬立方公尺。模擬結果顯示新生崩塌產生的土砂可能會造成邊坡與野溪土砂加劇並造成土砂災害。

(3) 國有林地內保全對象潛勢評估：

- A. 現地調查方法、流程與步驟：現已完成國有林地內保全對象之災害潛勢評估方法、流程與步驟研擬，基於殘留土砂二次災害影響範圍及斜坡單元崩塌潛勢分級成果，套疊保全對象圖層(建築物、暫准建物、林道、林區道路[產業道路]、步道、阿里山森林鐵路等)，建立全台國有林班地保全對象災害潛勢評估分級，並就四個研究區域考量二次土砂災害影響範圍及斜坡單元崩塌潛勢，評估研究區內各類保全對象受二次災害影響之潛勢，進而將不同類型保全對象潛勢評估結果彙整成主題圖供防災整備參考。
- B. 保全對象潛勢評估：現已完成全台國有林班地、四個研究流域及阿里山鐵路範圍之保全對象潛勢評估主題圖，計有建築物潛勢評估成果及路網潛勢評估成果圖，並就森林遊樂區範圍內二次土砂災害(新增崩塌地)影響面積進行探討。
- C. 保全對象潛勢評估結果

(A)建築物潛勢評估結果顯示，①阿里山流域內高潛勢建築物與暫准建築物主要受嘉義縣山區高潛勢斜坡單元與土石流影響範圍影響，建築物分布集中在阿里山溪溪旁兩側，以雲林縣古坑鄉與嘉義縣梅山鄉居多，在溪流中下游南投縣竹山





鎮範圍內建築物多屬低至中潛勢；②旗山溪與荖濃河流域內暫准建築物多為高潛勢，又以旗山溪流域中游高雄市甲仙區居多，旗山溪流域除高雄市甲仙區有較高潛勢保全對象外，杉林區、美濃區也有為數不少高潛勢建築物分布，主要集中於旗山溪流域中至下游位置；③阿里山鐵路範圍暫准建物與建築物分布多為中至高潛勢，主要集中在嘉義縣梅山鄉與阿里山鄉；④太麻里溪範圍無暫准建物，太麻里溪下游多為中至高潛勢建築物，溪流兩岸河彎處多有高潛勢建築物情形，因此未來應注意高潛勢斜坡單元及溪流河彎處殘留土砂及土砂運移對保全對象之影響。

(B)路網潛勢評估結果顯示，①阿里山溪流域內流域內林區道路多為高潛勢，以流域內雲林縣古坑鄉及嘉義縣梅山鄉範圍為主；流域內阿里山鐵路部分多為中至高潛勢，集中在流域內嘉義縣竹崎鄉與阿里山鄉範圍；流域步道多為中高潛勢，主要分布於流域內嘉義縣阿里山鄉與梅山鄉範圍；②旗山溪與荖濃河流域結果，可知高潛勢斜坡單元與河彎處為主要高潛勢保全對象分布區域，後續仍應持續注意整體流域內高潛勢斜坡單元與河道蜿蜒度較高區域對路網保全對象之影響；③阿里山鐵路範圍內山區部分多為高潛勢阿里山鐵路、高潛勢步道、高潛勢林道，主要受阿里山鐵路範圍山區高潛勢斜坡單元及土石流影響範圍之影響；④太麻里溪流域內多為中至高潛勢林區道路，高潛勢林區道路主要集中於中游河川束縮主流兩側及高潛勢斜坡單元區域，其餘多為中潛勢林區道路，而步道多以位於高潛勢區為主。

(C)森林遊樂區潛勢評估結果顯示，武陵森林遊樂區、知本森林遊樂區、阿里山森林遊樂區為高潛勢；太平山森林遊樂區、觀霧森林遊樂區、大雪山森林遊樂區、奧萬大森林遊樂區、





富源森林遊樂區、向陽森林遊樂區為中潛勢。其中，高潛勢森林遊樂區中以武陵森林遊樂區影響面積百分比最高，達13.9%，其次為知本森林遊樂區(2.8%)，第三順位為阿里山森林遊樂區(2.4%)。

(4) 保全對象周緣崩塌地與殘留土砂現地調查：

- A. 現地調查方法、流程與步驟：本計畫已完成現地調查規劃、方法、流程與步驟研擬，包含現地調查所需工具、調查表、調查報告及殘留土砂分析等項。
- B. 殘留土砂調查報告內容：本計畫完成阿里山溪、荖濃溪、旗山溪各一處聚落鄰近邊坡殘留土砂與環境地質災害現地調查，分別為來吉部落、新發部落、油礦巷 14 鄰部落，並於 101 年 11 月 15 日及 102 年 3 月 8 日分別進行兩趟次 UAV 航拍任務，根據現場調查及 UAV 拍攝正射航照進行比對，輔以莫拉克災後航照圖圈繪出坡面殘留土砂區域，增加三處部落地表雷射掃描，透過以 LiDAR 的 DEM 與莫拉克颱風前 DEM 進行相減，可獲致莫拉克颱風前至天秤颱風後之地形貌變化量，進而推估兩部落邊坡崩塌平均深度、崩塌體積、坡面殘留土砂平均厚度、殘留土砂體積及堆積區坡度等成果，將有助於後續 Debris-2D 模擬參數率定與驗證參用，亦可較完整了解邊坡崩塌機制、崩塌土砂產生量及坡面土砂殘留量等重要資訊。

- (5) 國有林殘留土砂處理策略研擬：依據國有林殘留土砂二次土砂災害潛勢評估結果，研擬應急處理及長遠性土砂災害處理策略，分階段進行國有林殘留土砂處置。有鑑於此，本計畫以莫拉克風災後流域集水區整體分區評估，訂定長遠性流域殘留土砂災害處理策略，以供國有林殘留土砂災害處理策略參考。另一方



面，針對國有林災後重點聚落透過崩塌地土砂生產量及土砂殘留量及土砂流出量之估算結果，以及地文、水文、現有工程整治點等資訊，以乙處災害重點聚落(荖濃溪新發部落)土砂生產與殘留情形，並配合災後現地調查、UAV 空拍結果、LiDAR 高精度數值地形，評估治理需求，據此訂定聚落應急殘留土砂災害處理對策(防災應變與監測等項)，藉以優先保障及提升保全對象安全。

五、辦理研習班

本計畫就執行成果，於民國 102 年 7 月 25 日(星期四) 9:00~16:00，在國立臺灣大學水工試驗所四樓會議室，辦理教育訓練乙場，期望與會人員能熟悉本計畫國有林莫拉克風災土砂二次災害潛勢影響評估成果，以及本計畫使用坡地泥沙運移模式 Debris-2D 之操作與介紹，輔助災防業務進行，並且獲取同仁在資料面、功能面及災防實務應用上寶貴的經驗及建議，作為後續發展之參考。參與人數 40 人，與會貴賓包括林務局、各林區管理處、水保局、水利署及相關執行單位同仁等。課程包含 1.崩塌地判釋、品管與現地殘留土砂調查方法等基本觀念；2.土石方變化及二次災害潛勢評估流程說明與成果展示；3.Debris-2D 二維土石流模式理論說明與實際操作，與會人員討論踴躍，圓滿完成。

7-2 建議

一、滾動式管理建議

本計畫已建立坡地整合土砂評估方法，能評估坡地土砂產生量至殘留土砂結果，建議配合貴局全島國有林地崩塌地判釋結果，採滾動式的檢討各年的新增崩塌量、土砂流出量與殘留量、二次土砂災害潛勢，以掌控國有林地土砂殘留情形及保全對象安全。

二、試驗集水區細部研究建議

本計畫為全國尺度坡度整合土砂評估方法與保全對象潛勢評估成果，若要應用於集水區內邊坡尺度土砂處理對策研擬，仍是限制，建議未來可配合貴局重點治理集水區，建立邊坡尺度殘留土砂評估方法與流程，輔以現地調查、LiDAR 量測及清淤資料等，較能正確評估斜坡單元殘留土砂堆積深度與堆積土砂量，以利研提邊坡尺度工程與非工程方法降低殘留土砂對下游保全對象產生二次災害。

三、考量工程減災與囚砂效應

集水區坡面上存在許多人工構造物，諸如擋土牆、攔砂壩、護坡工及排水工等，其對坡面穩定、降低地下水及土砂攔阻都有其功用，然目前多數崩塌潛勢評估與土砂量估算，甚少考量坡面穩定及囚砂效應，建議未來能以一個試驗集水區為示範區，嘗試開發考量人工構造物減災效應與囚砂效應，較符合實際坡面崩塌潛勢與土砂攔阻情況，也能結合既有工程設置研提合理適宜的土砂處理對策。

四、二次災害模擬建議

本計畫之殘留土砂和二次土砂災害分析與模擬方法，屬於大範圍尺度之模擬，可提供相關單位二次土砂災害潛勢之空間分布，以及廣域保全對象可能遭受到災害潛勢。惟評估流域內的保全對象之潛勢，以及工程規劃設計時，仍須採用更精密的數值高程模型(如 5 公尺x5 公尺數值高程模型或光載量測結果)，進行二次土砂災害之分析與模擬。

工作項目	月次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	年別	101年							102年								
	月份	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
一、彙整判釋國有林崩塌地基本資料																	
二、分析土石方之變化情形																	
三、國有林殘留土砂二次災害潛勢評估																	
四、辦理研習班																	
預定進度累計百分比		10	15	20	25	30	40	45	55	60	65	70	75	80	85	90	100
				8/31			11/30					4/30				8/31	10/15
		期 初 審 查		期 中 審 查 第 一 次			期 中 審 查 第 二 次					期 中 審 查 第 三 次				期 末 審 查	成 果 報 告

(展延至 9/30)

圖 7-1-1 計畫進度甘梯圖



參考文獻

一、【期刊】

1. Casadei M, Dietrich WE, Miller NL. 2003. Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms* **28** : 925-950.
2. Chang KT, Chiang SH. 2009. An integrated model for predicting rainfall-induced landslides. *Geomorphology* **105** : 366-373.
3. Chen, YC., Chang, KT., Chiu, YJ, Lau, SM., Lee, HY. (2013) Quantifying rainfall controls on catchment-scale landslide erosion in Taiwan, *Earth Surface Processes and Landforms* **38** : 372-382.
4. Chen, YC. Chiu, YJ Wu, YH. Lee, HY. Shen, CW. (2012) Combination of landslide volumes estimation and debris flow simulation in the Xinkai village, southern Taiwan. EGU General Assembly 2012. Vol. 14, EGU2012-4043, Wien.
5. Chiang SH, Chang KT, Mondini AC, Tsai BW, Chen CY. 2011. Simulation of event-based landslides and debris flows at watershed. *Geomorphology* **138** : 306-318.
6. Chiang SH, Chang KT. 2009. Application of radar data to modeling rainfall-induced landslides. *Geomorphology* **103** : 299-309.
7. Dadson SJ, Hovius N, Chen H, Dade WB, Hsieh ML, Willett SD, Hu JC, Horng MJ, Chen MC, Stark CP, Lague D, Lin JC. 2003. *Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. Nature* **426**(6967): 648-651.
8. Dadson SJ, Hovius N, Chen H, Dade WB, Hsieh ML, Willett SD, Hu JC, Horng MJ, Chen MC, Stark CP, Lague D, Lin JC. 2003. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature* **426**(6967): 648-651.
9. Dadson SJ, Hovius N, Chen H, Dade WB, Lin JC, Hsu ML, Lin CW, Horng MJ, Chen TC, Milliman J, Stark CP. 2004. Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt. *Geology* **32**(8): 733-736.
10. Dietrich WE, Reiss R, Hsu ML, Montgomery DR. 1995. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes* **9** : 383-400.
11. Fuller CW, Willett SD, Hovius N, Slingerland R. 2003. Erosion rates for Taiwan mountain basins: New determinations from suspended sediment records and a stochastic model of their temporal variation. *The Journal of Geology* **111**(1): 71-87.
12. Guthrie RH, Evans SG. 2004. Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms* **29** : 1321-1339.
13. Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* **31**(1-4) : 181-216.
14. Guzzetti F, Manunta M, Ardizzone F, Pepe A, Cardinali M, Zeni G, Reichenbach P, Lanari R. 2009b. Analysis of ground deformation detected using the SBASS-DInSAR technique in Umbria, Central Italy. *Pure and Applied Geophysics* **166**.
15. Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, Galli M, Reichenbach P. 2008. Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, Central Italy. *Geomorphology* **96** : 105-122.





16. Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, Rossi M, Valigi D. 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters* **279** : 222-229. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.01.005
17. Hafliadason H, Lien R, Sejrup HP, Forsberg CF, Bryn P. 2005. The dating and morphometry of the Storrega Slide. *Marine and Petroleum Geology* **22** : 187-194.
18. Hovius N, Stark CP, Allen PA. 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. *Geology* **25** : 231-234.
19. Hovius N, Stark CP, Hao-Tsu C, Jiun-Chuan L. 2000. Supply and removal of sediment in a landslide-dominated mountain belt: Central Range, Taiwan. *The Journal of Geology* **108**(1): 73-89.
20. Hovius N, Meunier P, Lin CW, Chen H, Chen YG, Dadson S, Horng MJ, Lines M. 2011. Prolonged seismically induced erosion and the mass balance of a large earthquake. *Earth and Planetary Science Letters* **304**(3-4): 347-355.
21. Hunt B. 1994. Newtonian fluid mechanics treatment of debris flow and avalanches. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*. **120** : 1350-1363.
22. Imaizumi F, Sidle RC, Kamei R. 2008. Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. *Earth Surface Processes and Landforms* **33** : 827-840. doi:10.1002/esp.1574.
23. Imaizumi F, Sidle RC. 2007. Linkage of sediment supply and transport processes in Miyagawa Dam catchment, Japan. *Journal Geophysical Research* **112** (F03012). doi:10.1029/2006JF000495.
24. Innes JN. 1983. Lichenometric dating of debris-flow deposits in the Scottish Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms* **8** : 579-588.
25. Julien PY, Lan Y. 1991. Rheology of Hyperconcentrations. *Journal of Hydrological Engineering* **117** : 346-353.
26. Kao S, Lee T, Milliman JD. 2005. Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences* **16**(3): 653.
27. Korup O. 2005. Distribution of landslides in southwest New Zealand. *Landslides* **2** : 43-51.
28. Larsen IJ, Montgomery DR, Korup O. 2010. Landslide erosion controlled by hillslope material. *Nature Geoscience* **3** : 247-251. DOI: 10.1038/NAGEO776
29. Larsen MC, Torres Sanchez AJ. 1998. The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico. *Geomorphology* **24** : 309-331.
30. Lin GW, Chen H, Hovius N, Horng MJ, Dadson S, Meunier P, Lines M. 2008. Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment. *Earth Surface Processes and Landforms* **33**(9): 1354-1373.
31. Lorente A, Beguería S, Bathurst JC, García-Ruiz JM. 2003. Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **3** : 683 - 691.
32. Martin Y, Rood K, Schwab JW, Church M. 2002. Sediment transfer by shallow landsliding in the Queen Charlotte Islands, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences* **39** : 189-205.
33. Montgomery DR, Dietrich WE. 1994. A physically based model for topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* **30** : 1153-1171.
34. O'Brien JS, Julien PY, Fullerton WT. 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* **119** : 244-259.





35. O'Laughlin EM. 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resource Research* **22** : 794-804.
36. Parker RN, Densmore AL, Rosser NJ, de Michele M, Li Y, Huang R, Whadcoat S, Petley DN. 2011. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth. *Nature Geoscience* **4** : 449-452.
37. Rice RM, Corbett ES, Bailey RG, 1969. Soil slips related to vegetation, topography, and soil in Southern California. *Water Resources Research* **5** : 647-659.
38. Rice RM, Foggin III GT, 1971. Effects of high intensity storms on soil slippage on mountainous watersheds in Southern California. *Water Resources Research* **7** : 1485-1496.
39. Rickenmann D. 1999. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards* **19** : 47-77.
40. Scheidegger AE. 1973. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics* **5** : 231-236.
41. ten Brink US, Geist EL, Andrews BD. 2006. Size distribution of submarine landslides and its implication to tsunami hazard in Puerto Rico. *Geophysical Research Letters* **33** : L11307.
42. Tsai MP, Hsu YC, Li HC, Shu HM, Liu KF. 2011. Application of simulation technique on debris flow hazard zone delineation - a case study in the Daniao tribe, Eastern Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **11** : 3053-3062.
43. Tsou CY, Feng ZY, Chigira M. 2011. Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan. *Geomorphology* **127** : 166-178.
44. Walling DE. 1977. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin, *Water Resources Research* **13** (3): 531-538.
45. Whitehouse IE, 1983. Distribution of large rock avalanche deposits in the Central Southern Alps, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* **26** : 271-279.
46. Xie M, Esaki T, Zhou G. 2004. GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model. *Natural Hazards* **33** : 265-282.
47. Hung JJ, Lee CT, Lin ML, 2002. Tsao-Ling rockslides, Taiwan, catastrophic landslides: effects, occurrence, and mechanisms. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology* **15** : 91-115.
48. Hung JJ. 2000. Chi-Chi earthquake induced landslide in Taiwan. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology* **2(2)** : 25-33.
49. 打荻珠男, 1971, ひと雨によろ山腹崩壊について, 新砂防: 9。
50. 李昶谷, 2007, 蝕溝沖蝕產砂量推估之研究, 國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。
51. 水土保持局, 2003, 以降雨因子進行土石流警戒基準值訂定, 九十二年度土石流防災暨監測科技計畫成果彙編。
52. 袁承偉, 2007, 石門水庫集水區的山崩與輸砂量在不同颱風事件中之相對應關係, 國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文。
53. 林孟龍、林俊全, 2003, 颱風對於蘭陽溪上游集水區懸移質生產特性的影響, 地理學報, 33: 39-53。
54. 林俐玲、蘇煒哲、與蔡義誌, 2009, 不同土地利用下土壤飽和水力傳導度與粗孔隙之探討, 中華水土保持學報, 40: 195-204。
55. 林務局農林航空測量隊, 1980, 曾文水庫集水區崩坍地航測調查研究計畫報





- 告，臺灣省曾文水庫管理局。
56. 姜壽浩，2010，多重災害模擬-崩塌誘發及土石流，國立臺灣大學地理環境資源學研究所博士論文
 57. 姜壽浩與徐美玲，2006，以局部穩定條件率定之土壤厚度估測模式，地理學報，44: 23-38.
 58. 陳志勤，2007，蝕溝產砂量推估與模式建置之研究，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。
 59. 陳毅青，2012，降雨誘發崩塌侵蝕之規模頻率及其控制因子，國立臺灣大學土木工程研究所博士論文。
 60. 陳翰霖、張瑞津，2003，曾文水庫對流量和輸沙量的影響，師大地理研究報告，39: 37-53。
 61. 黃朝恩，1982，臺灣河川輸沙特性及其地形意義，師大學報，27: 649-679。
 62. 蔡宗賢，2012，石門水庫集水區崩塌地產砂與後續沖刷之量化研究，國立臺灣大學土木工程學系博士論文。
 63. 鍾欣翰，2008，考慮水文模式的地形穩定分析—以匹亞溪集水區為例，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。

二、【研討會論文】

1. Chen YC, Chiu YJ, Wu YH, Lee HY, Shen CW. 2012. Combination of landslide volumes estimation and debris flow simulation in the Xinkai village, southern Taiwan. EGU General Assembly 14 EGU2012-4043, Wien.
2. Liu K F, Lai KW. 2000. Numerical simulation of two-dimensional debris flows, Proceedings of the 2nd International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation 531-535.
3. 劉進金、翁勳政、黃金鴻、楊明宗 (2001)，豪雨型崩塌地之遙測影像分析，二十一世紀土木工程技術與管理研討會論文集，P.C23~C33，明新技術學院土木系主辦。

三、【研究報告】

1. Abele G. 1974. *Bergsturze in Den Alpen ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen. Wissenschaftliche, Alpenvereinshefte, 25, 230p.* Italian translation by Nicoletti, P.G. (1990–1994) *Bergsturz nelle Alpi. Rapporti Interni CNR-IRPI, Cosenza.*
2. Khazai B, Sitar N. 2000. *Landsliding in Native Ground: A GIS-Based Approach to Regional Seismic Slope Stability Assessment.* Internet Report.
3. 水土保持局，2011，坡地崩塌及土石流動態預測模式開發及驗證成果，行政院農委會水土保持局委託計畫報告。
4. 臺灣省林務局農林航空測量所，1976，石門水庫集水區崩坍地航測調查報告臺灣省石門水庫管理局。
5. 臺灣省林務局農林航空測量隊，1972，石門水庫集水區崩坍地航測調查報告臺灣省石門水庫管理局。
6. 石門水庫集水區治理規劃小組，1968，石門水庫集水區治理調查規劃報告 臺灣省石門水庫管理局。
7. 石門水庫管理局(1968)石門水庫集水區治理調查規劃報告，石門水庫管理局





- 編，桃園。
8. 地調所，2007，易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置計畫(第一期)-子計畫：集水區地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估計畫，經濟部中央地質調查所委託計畫。
 9. 成大研究發展基金會，2011，易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置實施計畫集水區侵蝕及堆積之調查與評估計畫，經濟部中央地質調查所。
 10. 行政院農委會水土保持局，2010，99 年莫拉克災區山坡地聚落安全調查，行政院農業委員會水土保持局委託計畫。
 11. 行政院農委會林務局，2011，運用衛星影像於全島崩塌地判釋與災害分析-100 年度成果報告，行政院農委會林務局託計畫。
 12. 李鴻源，2012，應用崩塌體積經驗公式與鈹-7 法推估集水區降雨事件之產砂量，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
 13. 林務局臺東林區管理處，2010，太麻里溪包盛社堰塞湖緊急評估及全流域短中長期對策建議計畫。
 14. 張侑瑛(2011)濁水溪下游河段低水流況下推移載於總輸砂量之比例—以自強大橋處為例，逢甲大學利工程與資源保育研究所碩士論文。
 15. 陳樹群，2005，石門水庫集水區泥砂產量推估之研究(3/3)，經濟部水利署。
 16. 經濟部中央地質調查所，2009，地質敏感區災害潛勢評估與監測-都會區周緣坡地山崩潛勢評估(4/4)，經濟部中央地質調查所委託計畫。
 17. 經濟部中央地質調查所，2010，地質敏感區災害潛勢評估與監測-都會區周緣坡地山崩潛勢評估(4/4)，經濟部中央地質調查所委託計畫。
 18. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2010，氣候變遷下臺灣南部河川流域土砂處理對策研究-以高屏溪為例(1/2)，經濟部水利署水利規劃試驗所委託計畫報告。
 19. 山地農牧局第五工作處，1984，東部地區崩坍地調查研究計畫調查報告-台東縣中央山脈東側部分山坡地，經濟部中央地質調查所出版。
 20. 山地農牧局第五工作處，1985，東部地區崩塌地調查研究計劃調查報告-台東縣海岸山脈西側部分山坡地，經濟部中央地質調查所出版。

四、【圖書】

1. Ikeya H. 1981. A Method of Designation for Area in Danger of Debris Flow, *Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands*, Proc., Int. Assoc. Hydro. Sci. Symp., IAHS Publ. No.132, Wallingford, U.K., pp. 576-588.
2. Johnson AM, Rodine JD. 1984. *Debris flow, Slope Instability*. John Wiley & Son Ltd., 257-361.
3. Simonett DS. 1967. Landslide distribution and earthquakes in the Bewani and Torricelli Mountains, New Guinea. In: Jennings, J.N., Mabbutt, J.A. (Eds.), *Landform Studies from Australia and New Guinea*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 64-84.
4. Takahashi T. 1991. *Debris flow. Balkema*, Rotterdam: 165.
5. Taylor DW. 1948. *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley, New York: 700.
6. Terzaghi K. 1925. *Erdbaumechanik*, Franz Deuticke, Vienna.
7. Vandre BC. 1985. *Rudd Creek debris flow*. Delineation of landslide, Flash Flood, and Debris Flow Hazards in Utah, General Series Rep., 117-131.
8. Walling, D. E. and Webb, B. W. (1987) *Suspended load in gravel bed rivers*: UK





experience. In: Thorne, C. R., Bathurst, J. C. and Hay, R. D. (eds.) Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, New York: John Wiley and Sons, 691-732.

五、【網路相關】

1. 林務局全球資訊網(2012)，<http://www.forest.gov.tw/>.
2. 土石流災資訊網(2012)，<http://246.swcb.gov.tw/>.
3. 水利署地理資訊倉儲中心(2012)，
<http://gic.wra.gov.tw/gic/HomePage/Index.aspx>

