
應用地形計測推估可能崩塌區位之研究
The application of geomorphometry on the
estimation of potential landslide areas
成果報告書

執行單位：國立中興大學水土保持學系

執行期間：110 年 01 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：吳俊毅 助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

應用地形計測推估可能崩塌區位之研究

摘要

本研究利用地形計測的方式，針對石門水庫上游集水區採用單方向性窗口計算坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度、地形開闊度與天空開闊度等地形因子，透過不同因子的組合與門檻值設定的方式，提取出遷急線、蝕溝及崩崖等地形特徵結果，與實際之遷急線、地形特徵進行比較，找出最佳之提取結果。

在遷急線的部分，依照遷急線的特性選定因子及門檻值，接著再與河道高程差切割範圍，提取遷急線，再將各提取結果與試驗區真實遷急線位置進行比較，以混淆矩陣計算準確率，找出最佳提取方法。並將相同方法及門檻值提取驗證區之遷急線，驗證是否仍有良好的提取結果。最終， B_L 段遷急線的提取結果以 $B_L(150)$ 最佳； B_M 段的結果以 $B_M(250)$ 最佳； B_H 段則是 $B_H(450)$ 加入支流修正後為最佳提取結果； B_L 、 B_M 、 B_H 在驗證區的準確率，分別為 76.77%、66.54%、56.40%。

地形特徵依其特性、坡向選擇因子及設定門檻值，提取蝕溝及崩崖之區位，再與人工劃設的位置進行比較，並計算邊坡單元內蝕溝、崩崖之個數，最終以成功率曲線的 AUC 值及崩塌個數比圖，探討最佳提取組合及門檻值。蝕溝門檻值以地形開闊度小於 -5 度交集坡度粗糙度大於 15 度為最佳，其 AUC 值為 0.693；崩崖在坡度大於 48 度之網格外擴後交集地形開闊度大於 11 度之門檻值為最佳，AUC 值為 0.637。

本研究的結果顯示，地形特徵的數量與崩塌區位有關聯性，後續可將判釋結果作為崩塌潛勢評估的因子，用於提升崩塌潛勢模式對於集水區崩塌區位之預測能力。

關鍵詞：地形計測、崩塌區位、遷急線、地形特徵

The application of geomorphometry on the estimation of potential landslide areas

Abstract

This study applied geomorphometry method to calculate topographical factors such as slope, topographical roughness, slope roughness, surface openness, sky view factor for the upstream watershed of Shimen reservoir by the unidirectional analysis window. Through the combinations of different factors and settings of the threshold values the results of slope breaks and topographical characteristics, namely scarps and gullies, were extracted. After comparing with the actual slope breaks and topographical characteristics, the best result of extraction would be find out.

To extract the slope breaks, the factors and threshold values were selected according to the properties, and then the range of the elevation difference with the river channel was cut. The results of extraction were compared with the actual slope breaks in the experimental area to calculate the accuracy by confusion matrix to find out the best one. The factors and threshold values of the best results would equally be used to extract the slope breaks in the verification area, and to verify whether the results are still acceptable. Finally, the best result of the B_L slope break was extracted by $B_L(150)$; the best result of the B_M slope break was extracted by $B_M(250)$; the best result of the B_H slope break was extracted by $B_H(450)$ with the addition correction of tributary effect. The accuracy of B_L , B_M , and B_H in the verification area was individually 76.77%, 66.54%, and 56.40%.

In the part of topographical characteristics, this study selected the factors and threshold values by the properties and slope aspects to extract the scarps and gullies. Then, the results of extraction were compared with

the locations of manual delineation and were used to calculate the number of scarps and gullies in every slope unit. Finally, the AUC values of success rate curve and landslide ratio plots were used to investigate the optimal extraction combination and threshold values. The best threshold values of gullies were openness less than -5 degrees intersecting with slope roughness greater than 15 degrees, and the AUC value was 0.693; the best results of scarps were the grids had slope greater than 48 degrees and expanded to intersect the grids with openness greater than 11 degrees, and the AUC value was 0.637.

The results of this study showed that the number of topographical characteristics in slope units was correlated with the landslide location. The results could be used as a factor for landslide susceptibility assessment to improve the prediction capability of the landslide susceptibility model for the landslide locations in the watershed.

Keywords: Geomorphometry, Landslide Location, Slope Break, Topographical characteristic

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	V
表次.....	VIII
圖次.....	X
第一章 前言	1-1
第一節 計畫緣起與目的	1-1
第二節 工作項目及內容	1-2
第三節 工作進度	1-3
第四節 專有名詞列表	1-4
第二章 相關文獻收集	2-1
第一節 崩塌地地形特徵	2-1
第二節 集水區遷急線之判釋	2-2
第三節 推估崩塌發生區位之地文因子及分析方法	2-9
第四節 單一方向窗口分析	2-10
第五節 地形因子之門檻值設定	2-12
第六節 分析單元	2-13
第三章 研究方法	3-1
第一節 研究流程	3-1
第二節 微地形特徵之特性	3-3
第三節 單一方向窗口地形因子分析	3-4
第四節 不同地形因子之結合與門檻值設定提取遷急線	3-10
第五節 地形特徵與崩塌發生之關聯性	3-11
第六節 邊坡單元分析	3-13

第四章	研究區域與材料.....	4-1
第一節	基本資料	4-1
第二節	研究材料	4-3
第五章	集水區遷急線之判釋.....	5-1
第一節	利用地形因子提取遷急線之流程與步驟	5-1
第二節	試驗區(下宇老)各地形因子之結果.....	5-4
第三節	試驗區(下宇老)提取遷急線之方法.....	5-9
第四節	下宇老試驗區遷急線提取最終結果	5-23
第五節	遷急線提取方法的比較	5-33
第六節	驗證區(泰平)各地形因子之結果.....	5-39
第七節	驗證區(泰平)提取遷急線之結果.....	5-45
第六章	地形特徵與崩塌發生之關聯性分析.....	6-1
第一節	劃分邊坡單元	6-2
第二節	崩塌地分佈	6-3
第三節	各地形因子之結果	6-5
第四節	地形特徵之提取方式	6-11
第五節	蝕溝與崩塌發生之關聯性	6-13
第六節	崩崖與崩塌發生之關聯性	6-20
第七章	結論與建議.....	7-1
第一節	結論.....	7-1
第二節	建議.....	7-2
參考文獻.....		參-1
附錄一 核定本審查意見及辦理情形		附-1
附錄二 期初審查意見與辦理情形		附-3
附錄三 期中審查意見與辦理情形		附-9

附錄四 期末審查意見與辦理情形	附-14
-----------------------	------

表次

表 1-1 計畫執行進度表.....	1-3
表 1-2 專有名詞列表.....	1-4
表 3-1 單方向窗口之坡度計算方式	3-6
表 5-1 提取遷急線所需之各參數值	5-10
表 5-2 計算各參數值之結果.....	5-10
表 5-3 提取遷急線之門檻值設定.....	5-11
表 5-4 與河道高程差範圍之修.....	5-24
表 5-5 下宇老試驗區 B _L (50)段遷急線之混淆矩陣結果.....	5-26
表 5-6 下宇老試驗區 B _L (100)段遷急線之混淆矩陣結果.....	5-26
表 5-7 下宇老試驗區 B _L (150)段遷急線之混淆矩陣結果	5-27
表 5-8 下宇老試驗區 B _M (200)段遷急線混淆矩陣結果	5-29
表 5-9 下宇老試驗區 B _M (250)段遷急線混淆矩陣結果	5-29
表 5-10 下宇老試驗區 B _M (300)段遷急線混淆矩陣結果	5-29
表 5-11 下宇老試驗區 B _H (450)段遷急線混淆矩陣結果	5-31
表 5-12 下宇老試驗區 B _H (500)段遷急線混淆矩陣結果.....	5-31
表 5-13 下宇老試驗區 B _H (550)段遷急線混淆矩陣結果.....	5-31
表 5-14 下宇老試驗區 B _H (600)段遷急線混淆矩陣結果.....	5-32
表 5-15 下宇老試驗區 B _H (450+支流修正)段遷急線混淆矩陣結果 .	5-32
表 5-16 地形開闊度在遷急線上中下方之值域變化	5-34
表 5-17 坡度在遷急線上中下方之值域變化	5-34
表 5-18 地形粗糙度在遷急線上中下方之值域變化	5-34
表 5-19 坡度粗糙度在遷急線上中下方之值域變化	5-35
表 5-20 天空開闊度在遷急線上中下方之值域變化	5-35
表 5-21 泰平驗證區 B _L 段遷急線混淆矩陣結果	5-46

表 5-22 泰平驗證區 B _M 段遷急線混淆矩陣結果.....	5-47
表 5-23 支流長度修正.....	5-48
表 5-24 泰平驗證區 B _H 段遷急線混淆矩陣結果.....	5-49
表 6-1 各地形因子之值域所對應的地形特徵	6-11
表 6-2 蝕溝、邊坡坡向與最佳判釋窗口之間的關係	6-12
表 6-3 蝕溝門檻值設定.....	6-12
表 6-4 崩崖、邊坡坡向與最佳判釋窗口之間的關係	6-12
表 6-5 崩崖門檻值設定.....	6-13

圖次

圖 2-1 張力裂隙、反向坡、蝕溝等地形特徵	2-1
圖 2-2 河蝕回春降低坡面穩定性示意圖(千木良雅弘，2011).....	2-2
圖 2-3 遷急點、河道下切及崩塌示意圖(TSOUE ET AL., 2017).....	2-3
圖 2-4 兩段遷急線之上中下範圍與崩塌密度的關係(L2 為靠近河道之遷急線，L1 為遠離河道之遷急線)(LING，2020).....	2-4
圖 2-5 利用 KSN 因子找出遷急點的分佈位置(STRUTH, 2019)	2-5
圖 2-6 利用天空開闊度與坡度疊圖找出遷急線位置(修改自 TSOUE ET AL., 2017)	2-6
圖 2-7 區域地質圖與判釋遷急點位置(修改自 TSOUE，2014)	2-7
圖 2-8 侵蝕基準面下降改變遷急點與遷急線位置(修改自 GALLEN ET AL., 2013)	2-8
圖 2-9 河流長度(L)以及海岸線位置改變量(HRM)與集水面積(DRAINAGE AREA)之關係(LOGET ET AL., 2009)	2-8
圖 2-10 特徵線的四種基本走向及分析窗口(周毅等，2007)	2-11
圖 2-11 特徵延伸示意圖(鄒昆等，2018)	2-11
圖 2-12 利用正、負地形及門檻值提取山脊線(湯國安和楊晰，2006)	2-12
圖 2-13 正負開闊度差值 10° 為門檻值提取溝沿線(王軻等，2015).....	2-12
圖 3-1 研究流程圖.....	3-2
圖 3-2 張力裂隙、反向坡、蝕溝的微地形特徵	3-3
圖 3-3 依照不同坡向設置不同方向性窗口	3-4
圖 3-4 ARCGIS 焦點分析工具	3-5
圖 3-5 坡度計算網格.....	3-6
圖 3-6 單方向性窗口之地形開闊度	3-8

圖 3-7 天空開闊度：(A) 二維示意圖；(B) 八方位天頂角三維示意圖	3-9
圖 3-8 聯集坡度>40 度的結果與開闊度>10 度的結果.....	3-10
圖 3-9 交集坡度>40 度的外擴結果與開闊度>10 度的外擴結果.....	3-11
圖 3-10 地形特徵密度與某一崩塌事件的示意圖	3-11
圖 3-11 成功率曲線與崩塌個數比圖示意圖.....	3-12
圖 3-12 邊坡單元之劃分原理 (圖修改自 XIE ET AL., 2004).....	3-13
圖 4-1 研究計畫區域-石門水庫上游集水區	4-2
圖 4-2 研究區域之地質與斷層分布	4-2
圖 4-3 2014 年麥德姆颱風造成的崩塌區位	4-3
圖 4-4 2015 年蘇迪勒颱風造成的崩塌區位	4-4
圖 4-5 研究區域坡度圖與子集水區範圍	4-5
圖 5-1 提取遷急線之流程圖	5-2
圖 5-2 下宇老之地形開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北-東南向窗口)	5-4
圖 5-3 下宇老之坡度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北-東南向窗口).....	5-5
圖 5-4 下宇老之地形粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北-東南向窗口)	5-6
圖 5-5 下宇老之坡度粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	5-7
圖 5-6 下宇老之天空開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	5-8
圖 5-7 樣本位置(A)高程圖與遷急線位置、(B)坡度與地形開闊度疊圖	5-9
圖 5-8 各單方向地形開闊度小於-15 度之聯集結果.....	5-13

圖 5-9 分別與河道高程差 50M、200M 與 450M 以下之範圍.....	5-13
圖 5-10 BL(50)之提取過程。(A)裁切後的地形開闊度結果(黑色網格) 與黑色網格外擴 30 格之範圍、(B)坡度大於 40 度之四單方向聯集...	5-14
圖 5-11 BM(200)之提取過程。(A)裁切後的地形開闊度結果(黑色網格) 與黑色網格外擴 40 格之範圍、(B)坡度大於 35 度之四單方向聯集	5-15
圖 5-12 BH(450)之提取過程。(A)裁切後的地形開闊度結果(黑色網格) 與黑色網格外擴 50 格之範圍、(B)坡度大於 30 度之四單方向聯集...	5-16
圖 5-13 BL(50)之提取結果	5-17
圖 5-14 BL(100)之提取結果	5-17
圖 5-15 BL(150)之提取結果	5-18
圖 5-16 BM(200)之提取結果.....	5-19
圖 5-17 BM(250)之提取結果.....	5-19
圖 5-18 BM(300)之提取結果.....	5-20
圖 5-19 BH(450)之提取結果.....	5-21
圖 5-20 BH(500)之提取結果.....	5-22
圖 5-21 BH(550)之提取結果.....	5-22
圖 5-22 BH(600)之提取結果.....	5-23
圖 5-23 BH(450)支流修正範圍前後對照.....	5-25
圖 5-24 BH(450)支流修正後之提取結果.....	5-25
圖 5-25 BL 段遷急線最終提取結果	5-27
圖 5-26 BM 段遷急線之最佳提取結果	5-30
圖 5-27 BH 段遷急線之最佳提取結果.....	5-32
圖 5-28 坡度與坡度粗糙度門檻值交集之結果	5-36
圖 5-29 地形粗糙度與坡度門檻值交集之結果	5-37

圖 5-30 天空開闊度與坡度疊圖結果	5-38
圖 5-31 天空開闊度與坡度因子之交集結果	5-38
圖 5-32 驗證區(泰平)地形開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口， C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	5-40
圖 5-33 驗證區(泰平)坡度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	5-41
圖 5-34 驗證區(泰平)地形粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口， C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	5-42
圖 5-35 驗證區(泰平)坡度粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口， C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	5-43
圖 5-36 驗證區(泰平)天空開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口， C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	5-44
圖 5-37 泰平驗證區 B _L 段結果	5-45
圖 5-38 泰平驗證區 B _M 段結果.....	5-47
圖 5-39 泰平驗證區 B _H (450+支流修正)段結果.....	5-48
圖 6-1 地形特徵與崩塌發生關聯性分析之流程圖	6-2
圖 6-2 研究區域之邊坡單元	6-3
圖 6-3 麥德姆颱風造成崩塌區位之邊坡單元	6-4
圖 6-4 蘇迪勒颱風造成崩塌區位之邊坡單元	6-4
圖 6-5 單方向地形開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	6-6
圖 6-6 單方向坡度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	6-7
圖 6-7 單方向地形粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	6-8

圖 6-8 單方向坡度粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	6-9
圖 6-9 單方向天空開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口).....	6-10
圖 6-10 人工劃設之蝕溝位置	6-14
圖 6-11 蝕溝門檻值一($OPENNESS < -5^\circ$ ， $SR > 10^\circ$)之結果.....	6-14
圖 6-12 蝕溝門檻值二($OPENNESS < -5^\circ$ ， $SR > 15^\circ$)之結果	6-15
圖 6-13 蝕溝門檻值三($OPENNESS < -10^\circ$ ， $SR > 10^\circ$)之結果	6-15
圖 6-14 蝕溝門檻值四($OPENNESS < -10^\circ$ ， $SR > 15^\circ$)之結果	6-16
圖 6-15 蝕溝門檻值一($OPENNESS < -5^\circ$ ， $SR > 10^\circ$)之崩塌分析結果 ...	6-17
圖 6-16 蝕溝門檻值二($OPENNESS < -5^\circ$ ， $SR > 15^\circ$)之崩塌分析結果 ...	6-18
圖 6-17 蝕溝門檻值三($OPENNESS < -10^\circ$ ， $SR > 10^\circ$)之崩塌分析結果 .	6-18
圖 6-18 蝕溝門檻值四($OPENNESS < -10^\circ$ ， $SR > 15^\circ$)之崩塌分析結果 .	6-19
圖 6-19 蝕溝門檻值二之雨量分組 AUC.....	6-20
圖 6-20 人工劃設之崩崖位置	6-21
圖 6-21 崩崖門檻值一之結果	6-21
圖 6-22 崩崖門檻值二之結果	6-22
圖 6-23 崩崖門檻值三之結果	6-22
圖 6-24 崩崖門檻值四之結果	6-23
圖 6-25 崩崖門檻值一之崩塌分析結果	6-24
圖 6-26 崩崖門檻值二之崩塌分析結果	6-25
圖 6-27 崩崖門檻值三之崩塌分析結果	6-25
圖 6-28 崩崖門檻值四之崩塌分析結果	6-26
圖 6-29 崩崖門檻值三之雨量分組 AUC.....	6-27

第一章 前言

第一節 計畫緣起與目的

氣候變遷造成極端降雨事件發生機率增加，同時也提高坡地災害之規模及發生頻率，其中，崩塌地為造成集水區土砂災害之主要因素。因此，若能有效掌握崩塌地可能發生區位對於集水區的治理工作及防災規劃相當重要。對集水區為分析單元而言，鄰近遷急線之區位，因地形由緩變陡，上下邊坡容易發生重力變形與崩塌。另一方面，對集水區內邊坡單元而言，分析單元內崩崖、蝕溝等地形特徵數量越多，代表可能越容易發生崩塌。地形計測(Geomorphometry)是將地形資訊量化的分析方法，而近年來空載光達(LiDAR)技術已趨近於成熟，數值地形模型精度的提升，對於地形特徵的分析方式及判釋方法，提供了更多發展性。

前期計畫「方向性分析窗口應用於地形計測之研究」之成果顯示單一方向窗口較多方向窗口有較佳的地形特徵判釋結果，因此本研究擬利用單一方向窗口分析地形因子，進一步探討不同地形因子的結合對遷急線、崩崖、蝕溝等判釋區位之影響，並與實際地形資料、崩塌資料分析比較，藉此選擇適合之因子結合方式及門檻值，可做為集水區可能崩塌區位之推估參考。

第二節 工作項目及內容

一、相關資料的蒐集

- (一)蒐集集水區遷急線等地形特徵判釋的相關文獻
- (二)蒐集推估集水區崩塌發生區位之地形因子、分析方法等相關文獻
- (三)蒐集集水區基本資料、崩塌地資料

二、集水區遷急線之判釋

- (一)分析單一方向窗口的不同地形因子，作為集水區遷急線判釋之基礎資料。
- (二)結合不同地形因子，藉此探討因子結合方式及門檻值設定對遷急線判釋區位之影響。
- (三)選擇集水區之判釋區位，委託專業人員根據地質地形資料圈繪遷急線，藉此選擇適合之因子結合方式及門檻值，以推估集水區可能崩塌區位。

三、邊坡單元地形特徵密度與崩塌發生之關聯性分析

- (一)利用集水區之數值地形模型及反轉後數值地形模型，進行邊坡單元之劃分，做為分析之基本單元。
- (二)結合不同地形因子，藉此探討因子結合方式及門檻值設定對崩崖、蝕溝等判釋區位之影響。
- (三)計算各分析單元中單位面積之崩崖、蝕溝長度，並與各分析單元歷年崩塌數量比較，分析地形特徵密度與崩塌發生之關聯性，以推估集水區可能崩塌區位。

第三節 工作進度

本研究自決標日起至民國一百一十年十二月三十一日完成，執行進度如表 1-1 所示。

表 1-1 計畫執行進度表

工作項目	內容	110 年											
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
相關資料蒐集	文獻蒐集	■	■	■									
	集水區資料蒐集				■	■	■						
集水區遷急線之判釋	以單一方向窗口進行地形因子分析			■	■	■							
	結合地形因子測試遷急線之門檻值					■	■	■					
	現地調查驗證判釋結果							■	■	■			
地形特徵密度與崩塌發生之關聯性分析	劃分集水區之邊坡單元						■	■					
	結合地形因子測試地形特徵(蝕溝、崩崖等)之門檻值							■	■	■	■		
	利用地形特徵密度探討與崩塌地之關聯性									■	■	■	
查核點	工作執行計畫書				■								
	期中報告							■					
	期末報告											■	
	成果報告												■
預訂進度累計百分比		5	10	20	30	35	47	60	70	80	90	95	100
實際進度累計百分比		5	15	25	35	40	55	65	73	82	92	95	100

第四節 專有名詞列表

本研究中所提及之專有名詞列於表 1-2，各名詞之頁數可供未來應用時，得以快速查詢其內容描述。

表 1-2 專有名詞列表

中文	英文	名詞解釋	頁數
地形計測	geomorphometry	地表地形量化分析的科學方法，利用計量、統計或影像分析等技術將地表地形特徵以各類量化指標來描述。	1-1
遷急線	slope break	因地殼隆起或海平面下降導致侵蝕基準面相對下降，造成河流下切或向源侵蝕的過程中，於坡面上產生坡度由緩變急的變化點的連線。	2-2
崩崖	scarp	位於崩塌發育的冠部，坡面因拉張而發育較大落差者稱為冠部崩崖，為崩塌主要判釋特徵。	2-1
蝕溝	gully	土壤沖蝕作用初期在坡面上切割所形成之深溝，形成後即會因下切、橫向與溯源沖蝕而擴張，造成大量的地表沖刷。	2-1
邊坡單元	slope unit	利用數值高程模型及反轉之數值高程模型進行分析，在各別提取集水區範圍後進行劃分獲得之單元，其具有區分地形、坡面的特性。	3-4
地形粗糙度	topographical roughness	為高程標準差，主要利用數值統計的方法來表示地表平坦、地形高差變化的參數。	3-7
地形開闊度	surface openness	反應出該分析窗口內地形凹與凸的程度，正向值表示量測位置水平面之上以及較高的凸形地形面，而負向值表示量測位置水平面之下以及較低的凹形地形面。	3-7
坡度粗糙度	slope roughness	為坡度標準差，將坡度資料進行標準差計算，可以明顯的區分光滑的坡面與坡度大幅改變的區域。	3-8
天空開闊度	Sky View Factor(SVF)	投射到地表上的入射光量與天空可視範圍。值域介於 0 到 1 間，數值越大代表整個半球上的地表面通視越好，數值越小表示幾乎沒有可通視的天空。	3-8
成功率曲線	Success Rate Curve(SRC)	判定資料與崩塌的關聯性，由成功率曲線下面積(AUC)作為判定良窳之依據。	3-13

第二章 相關文獻收集

第一節 崩塌地地形特徵

由於 LiDAR 光達技術漸趨成熟，加上能將植被去除的特性，因此更有機會觀察出潛在大規模崩塌的細部地形特徵(Chigira et al., 2004; 劉治中等，2010)，且在一定規模的重力變形現象下，是有可能從地形特徵判釋出大規模崩塌的可能位置及跡象，其中大規模崩塌的地形特徵包括主崩崖、次崩崖、冠部崩崖、反向坡、張力裂隙、陷溝等線形特徵(Varnes, 1978; 鈴木隆介，2000; Agliardi et al., 2001; 日本土木研究所，2008)。

冠部為崩塌的起始位置，也是崩塌滑動體與邊坡分離之處，當滑動體受重力作用時，會因為坡面拉張製造出與崩塌方向垂直的裂縫，當裂縫持續擴大使表土滑動就形成崩崖。陷落區是崩塌材料的主要來源，地形呈現凹槽狀，其特徵包含主崩崖、次崩崖、反向坡。當滑動體呈現圓弧滑動時，可能會使坡面反轉朝向冠部形成凹谷，朝向冠部之坡面為反向坡。此外，崩塌地發育過程也可在坡面上產生蝕溝(如圖 2-1)。

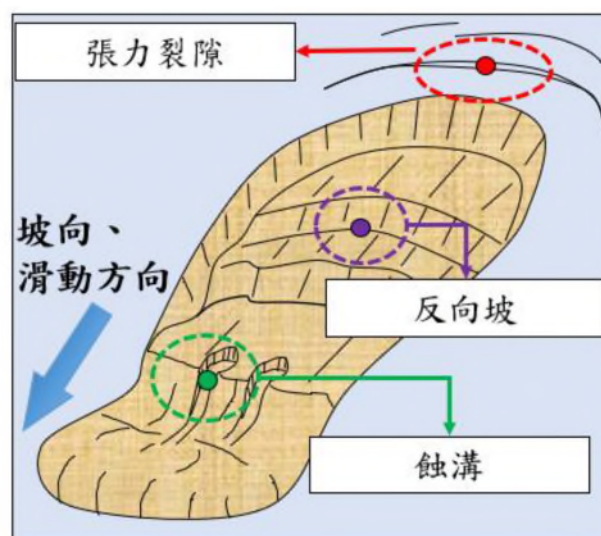


圖 2-1 張力裂隙、反向坡、蝕溝等地形特徵

第二節 集水區遷急線之判釋

一、遷急線與坡地災害

遷急線(slope break)可以做為判定坡地災害風險區的地形指標之一(Ghatterjee, 1999; Hiraishi, et al., 2013; Tsou et al., 2017)。遷急線的形成原因為地殼隆起或海平面下降時，導致侵蝕基準面相對下降，於是河流下切且向河流源頭侵蝕的過程中，於坡面上產生坡度由緩變急的變化點的連線(千木良雅弘，2011)，如圖 2-2 所示。而其他形成遷急線原因也包含在不同的岩石特性（例如岩石硬度）的岩石交界處，會因為侵蝕差異而形成類似的構造（Stock and Montgomery, 1999）、或因為斷層運動等(Whittaker 等, 2007; Berlin and Anderson, 2007)。

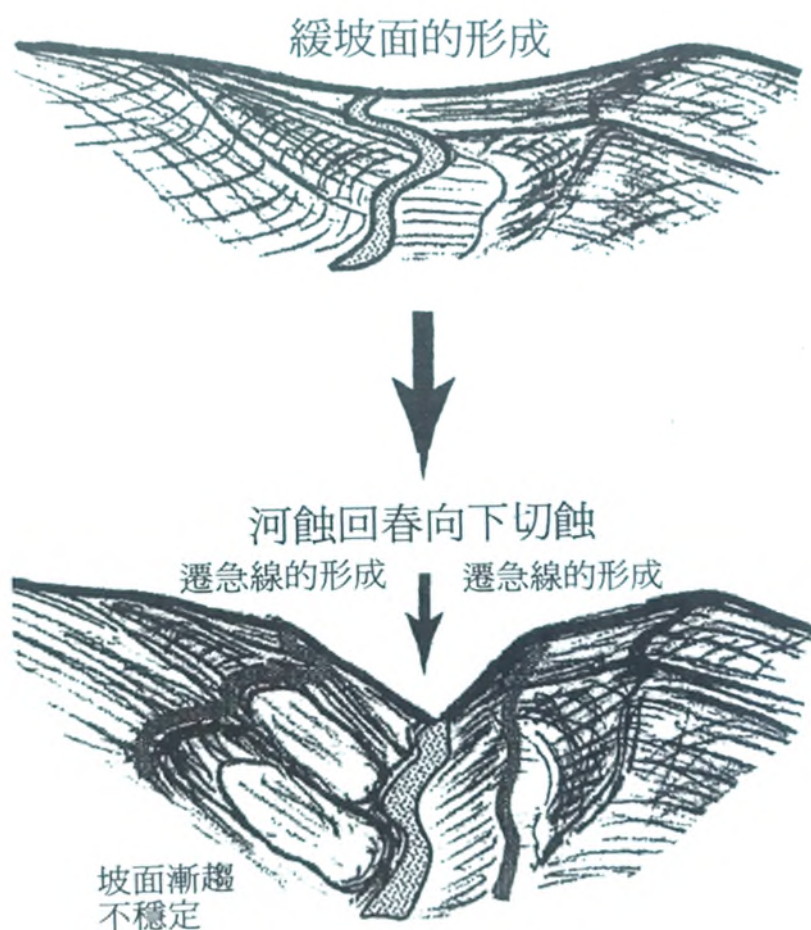


圖 2-2 河蝕回春降低坡面穩定性示意圖(千木良雅弘，2011)

另外，許多研究發現遷急線與崩塌息息相關，發現遷急線的上邊坡雖然沒有受到河流侵蝕的影響，坡面比較穩定，但是接近遷急線上方的部分，由於受到張力作用的影響，坡面容易發生重力變形產生線狀凹地、段差等微地形(Arai and Chigira, 2018)。而遷急線的下邊坡，隨著河道下切，岩體受重力影響產生下坡運動使得岩體變形，且河道下切作用，也使得變形的岩體坡腳被侵蝕，造成邊坡土體不穩定而形成崩塌現象(Hou et al., 2014; Tsou et al., 2015)，如圖 2-3 所示。

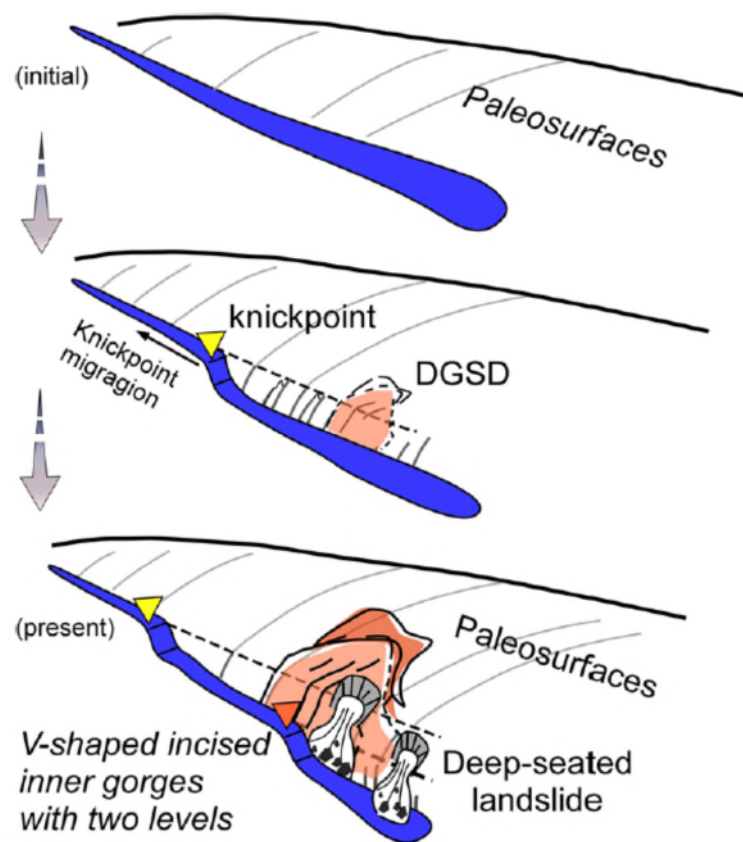


圖 2-3 遷急點、河道下切及崩塌示意圖(Tsou et al., 2017)

以石門水庫集水區為例，Tsou et al. (2014)分析了遷急線與坡地災害分布的關係，研究中發現坡面中分布了三組分別為上、中、下的遷急線，重力變形坡面及大規模崩塌的分布與上、中段的遷急線有關，而小規模崩塌的分布則與下段的遷急線有關。分布於上、中、下段的遷急線位置的崩塌密度是分布於遷急線上方的 3、7、8 倍；而在

Ling(2020)在遷急線的調查中也發現的類似的結果，在研究區內的 L1 與 L2 兩段遷急線中，L1 和 L2 中間的崩塌密度與 L2 下方的崩塌密度分別是在 L1 上方的 5.02 和 9.82 倍(如圖 2-4 所示)。因此，遷急線的分析研究，可以瞭解集水區尺度中，崩塌地的分布特性及劃分災害風險區，進而應用到集水區水土保持治理規劃之工作。

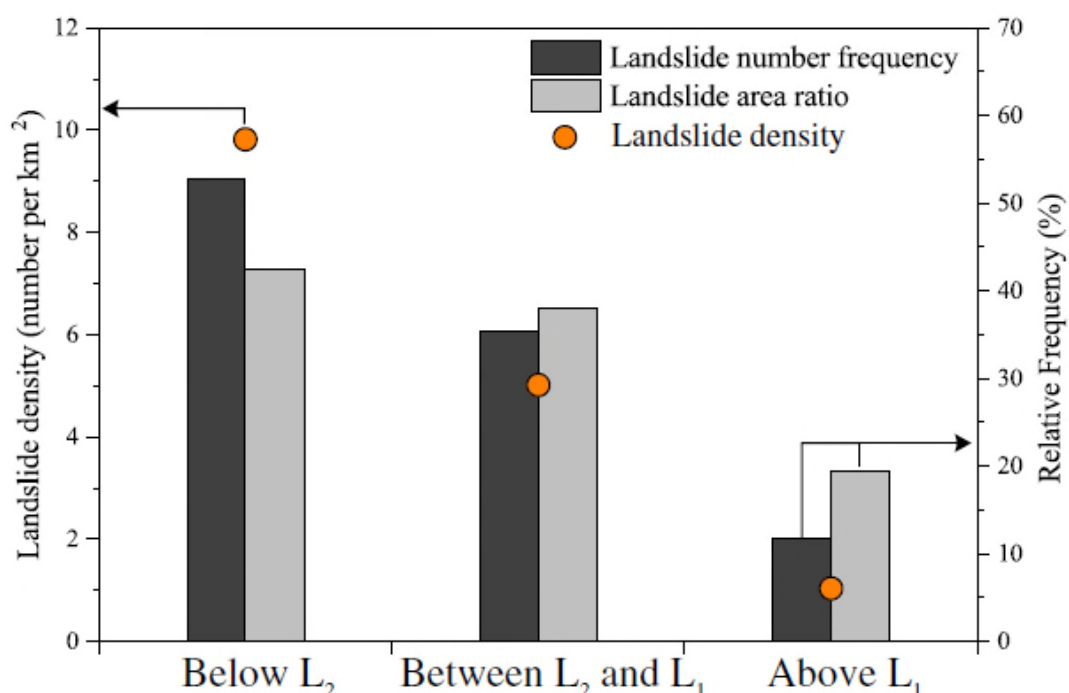


圖 2-4 兩段遷急線之上中下範圍與崩塌密度的關係(L2 為靠近河道之遷急線，L1 為遠離河道之遷急線)(Ling，2020)

二、遷急線之判釋

遷急線的判釋，傳統上以航空相片進行立體判釋或是以地形資料進行坡度分析後，以人工方式判讀(Hiraishi et al., 2013; Tsou et al., 2014)，相當耗費時力。而近年來為了減少人工判釋的時間，許多研究發現地形的凹曲度 (concavity) 和陡度 (steepness) 等地形指標能夠用來反應在判釋地質岩性和構造活動上，凹曲度代表地貌特徵，陡度代表地盤抬昇程度 (Whipple and Tucker, 2002; Synder et al., 2003;

Whipple, 2004; 李準勝, 2009), 後續研究將相關的因子, 如凹曲度、河床坡度 Gd (stream gradient)、標準化陡度 ksn (normalized steepness index) 等應用在遷急點的判釋上 (Babaei, 2020; Struth, 2019; Tsou, 2014)(如圖 2-5)。

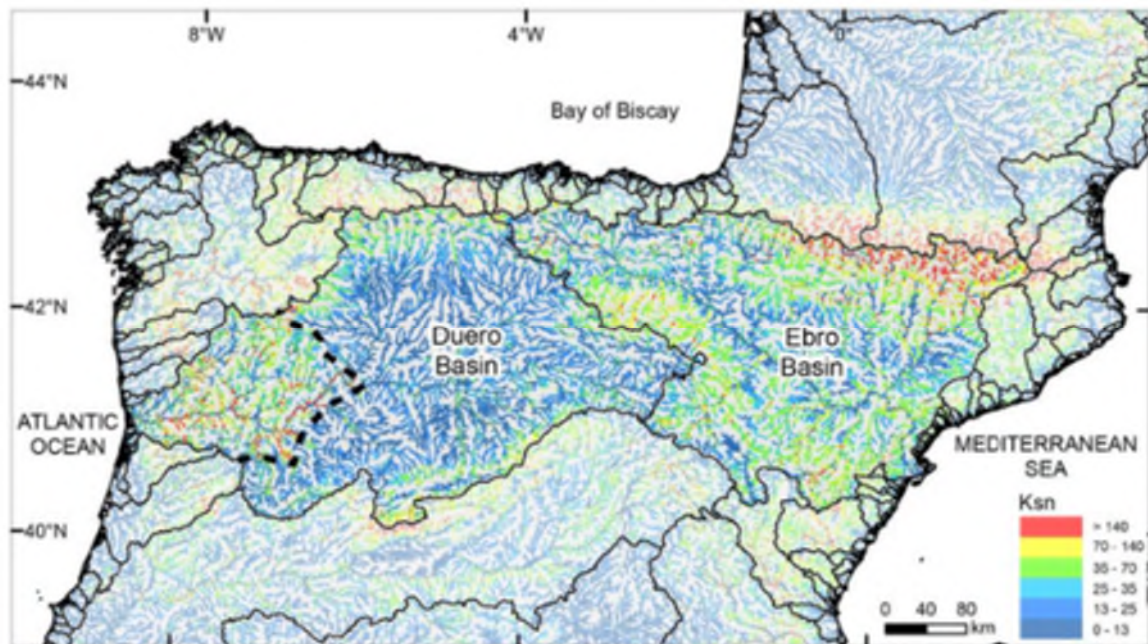


圖 2-5 利用 Ksn 因子找出遷急點的分佈位置(Struth, 2019)

此外, Tsou et al., (2017)利用地形因子的疊圖, 以人工劃設遷急線的位置, 如圖 2-6 所示, 疊合天空開闊度與坡度圖, 且將坡度分類 0-5 度、5-15 度、15-30 度以及 30 度以上共四組, 且 30 度以上的調為透明圖層, 可以發現在坡度 0-30 度與 30 度以上交會處, 有明顯的遷急線輪廓。因此, 本研究嘗試結合其他能夠顯示出區域地形特徵的地形因子, 如地形粗糙度、坡度與地形開闊度等, 並且設立地形因子門檻值且經過測試與驗證, 了解集水區內遷急線的分佈範圍, 並在後續研究上能夠快速的提取遷急線範圍。

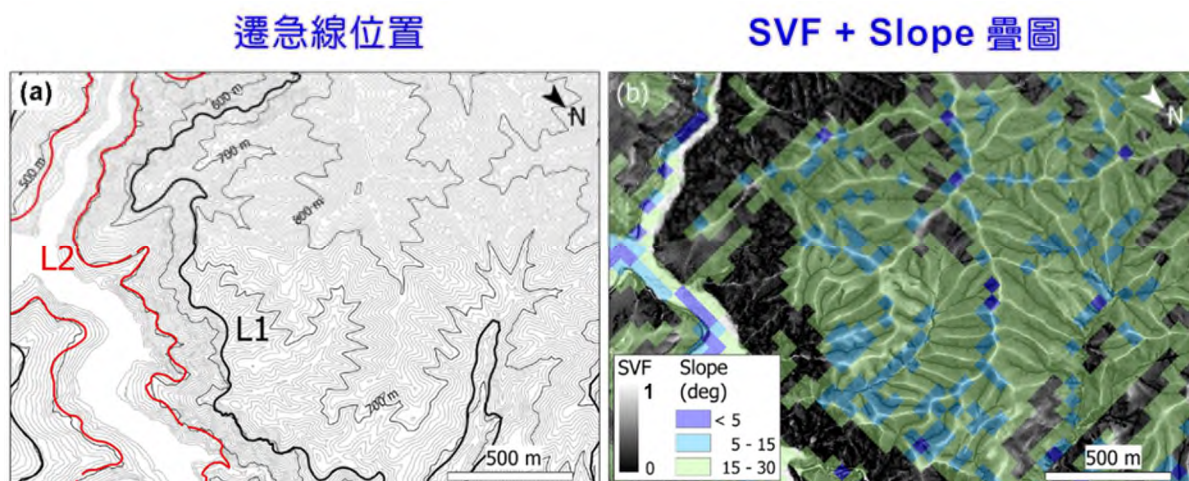


圖 2-6 利用天空開闊度與坡度疊圖找出遷急線位置(修改自 Tsou et al., 2017)

三、遷急線之特性

Tsou(2014)調查石門水庫集水區的遷急點區位，發現遷急點的高程範圍在 670m 至 2704m，儘管遷急點的高程分佈廣泛，但也發現它們通常靠近主河道且有明顯的坡度變化，因此，將上述的這些遷急點的點位，依照距離主河道的遠近分為三部分，分別是 KP_{BH} 、 KP_{BM} 和 KP_{BL} (如圖 2-7)，根據統計發現，這三者和研究區域內的分佈範圍分別是 29%、50%與 21%，平均坡度分別為 35.6° 、 37.7° 與 39.8° 。

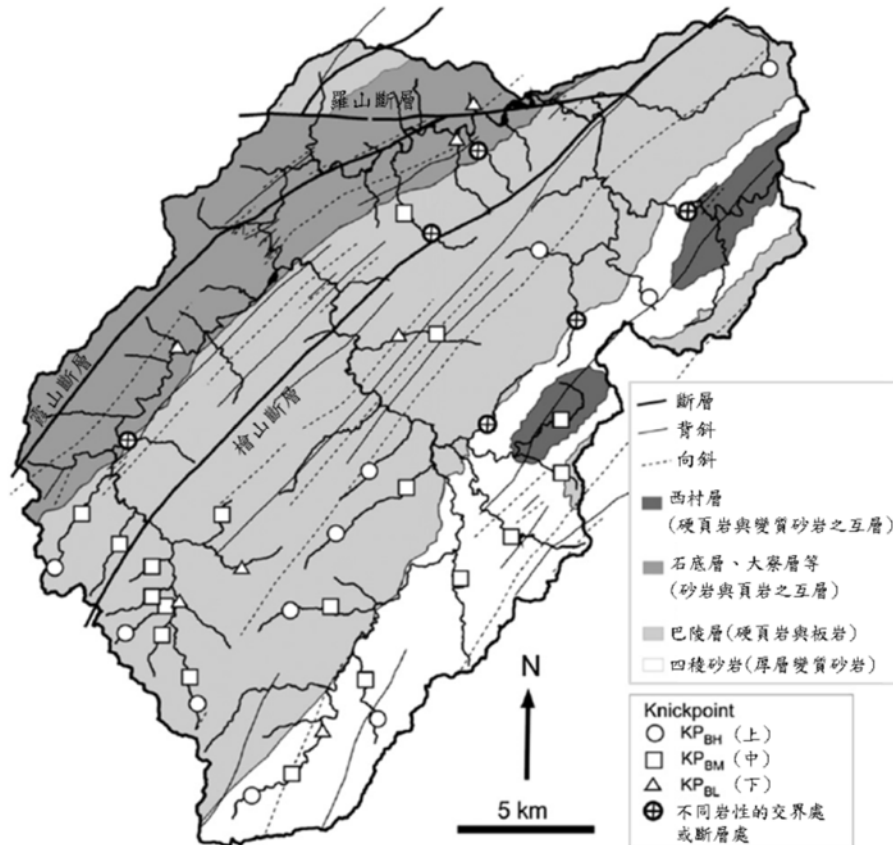


圖 2-7 區域地質圖與判釋遷急點位置(修改自 Tsou, 2014)

而 Tsou et al. (2014)將相近的 KP_{BH} 、 KP_{BM} 和 KP_{BL} 點位連線，形成 B_H 、 B_M 和 B_L 三段遷急線，並且發現在同一段遷急線中，與主河道的高程差值會相近，但支流會影響河道上遷急點的位置，使支流位置的遷急點明顯的往上游偏移，且支流長度越長，往上游的偏移量越大。另外，許多研究也有相似的結果，如 Gallen et al. (2013)的研究中提到，當侵蝕基準面(Base Level of Erosion)下降，使河流的流速加大，侵蝕能力加強，會使遷急點與遷急線的位置往上游遷移(如圖 2-8)；而 Loget et al. (2009)調查中世紀墨西拿期(Messinian)與現今的海岸線的變化量，探討其與河流的集水面積以及河流長度三者之關係，結果發現支流的集水面積與兩時期的海岸線遷移量成線性關係(如圖 2-9 灰色線段)，且河流長度也與集水面積成線性關係(如圖 2-9 黑色線段)。

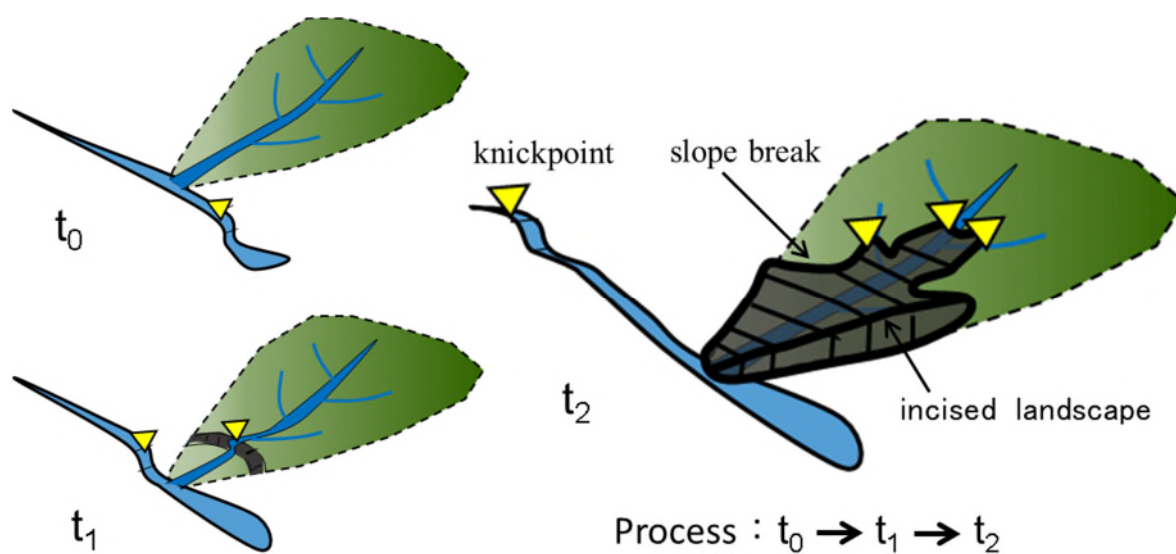


圖 2-8 侵蝕基準面下降改變遷急點與遷急線位置(修改自 Gallen et al., 2013)

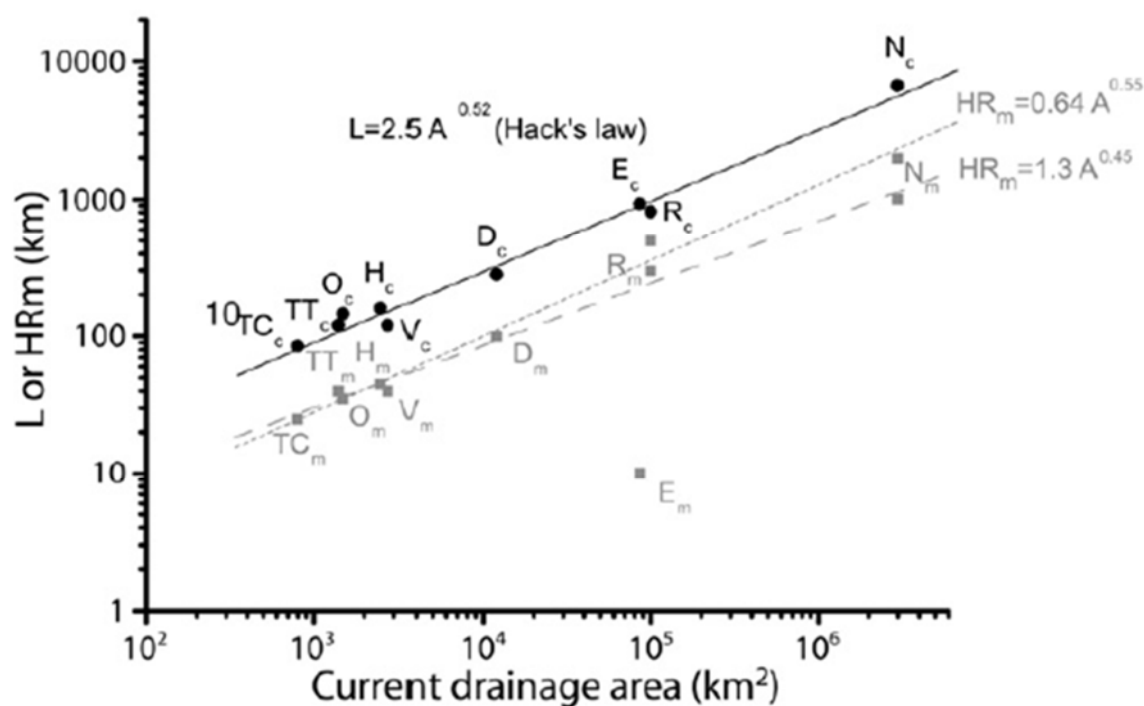


圖 2-9 河流長度(L)以及海岸線位置改變量(HR_m)與集水面積 (Drainage area)之關係(Loget et.al., 2009)

第三節 推估崩塌發生區位之地文因子及分析方法

推估集水區崩塌發生區位即為崩塌潛勢分析(landslide susceptibility analysis)，可分為定性法及定量法兩大類，定量法又可區分為統計分析及人工智慧方法。運用在崩塌潛勢的統計分析方法主要包括：二變量分析(bivariate analysis; Chung and Fabbri, 1993; Zêzere et al., 2007)及多變量分析(multivariate analysis)。多變量分析方法是利用多變量迴歸(multivariate regression; Carrara, 1983; Baeza and Corominas, 2001)、羅吉斯迴歸(logistic regression, Lee et al., 2008; Rossi et al., 2010)或判別分析(discriminant analysis; Guzzetti et al., 2006; Carrara et al., 2008)得到一組能區別崩塌與非崩塌的線性方程式，以求得各分析單元的崩塌潛勢值及完成崩塌潛勢圖。

本研究整理國內外相關研究中使用過的崩塌潛勢因子(林彥享，2003；魏秀珍，2006；鍾佩蓉，2009；張巽昕，2010；蔡雨澄，2012；穆婧、林昭遠，2013；經濟部中央地質調查所，2014；林昭遠等，2016；Chang et al., 2007)，並概分為植生因子、地形因子、地質因子、人為開發因子、雨量因子等5類，分述如下。

一、地形因子：坡向取 SIN、坡向取 COS、距山脊線、相對坡高、碎行維度指標、地形指數、河流距、距平均高度離差、坡度變化程度因子、邊坡陡坡比例因子、坡型因子、坡度粗糙度、地形起伏、順向坡、坡寬、曲率、坡度、坡向。

二、植生因子：植生密度、常態化差值植生指標 NDVI、土壤調整植生指標 SAVI、土壤調整修正植生指標 MSAVI、植生綠劣指數。

三、地質因子：土壤種類、震央距、構造線或構造面距離、岩性、斷層密度、地震強度。

四、人為開發因子：道路開發指標、建地密度、人為活動、土地利用、人口密度、道路密度、農地密度、道路距。

五、雨量因子：日降雨、降雨強度、年降雨、極端降雨指標。

近年來許多研究利用高精度數值高程模型計算地形因子，找出許多地形特徵，如蝕溝(gully)、砂丘(dune)、熔岩區(lava field)、崩崖(scarp)與火山口等(Hunt, 2019; Korzeniowska, 2019; Kennelly, 2020; Walker, 2020)，也有學者進一步將不同的地形因子圖層，進行透明度的調整與疊合，成果如紅色地圖(Red Relief Image Map)(Favalli, 2017; Aguirre, 2021; Komura, 2020)、CS 立體圖(戶堅一郎, 2012)與 H.O.S.T.地圖等，利用多種地形因子疊合不但能夠提升視覺化的效果、顯示區域內的地形輪廓線，也能更立體的描繪出崩崖、蝕溝等地形特徵，因此，本研究希望能夠透過結合多種地形因子，並設立門檻值找出蝕溝與崩崖等潛在崩塌的地形特徵，再進一步探討地形特徵的密度與實際的崩塌資料的相關性。

第四節 單一方向窗口分析

許多研究發現線性窗口對於特定目標物有極佳的提取效果，如 Sánchez-García et al., (2019)提出利用適應性窗口(adaptive window)提取海岸線，利用線性的自適窗口在衛星影像中找出最大的輻射變化量，且區分出陸地與海域，而中間的交際線即為海岸線； Yang et al., (2011)利用一種線性窗口搜索策略(linear window searching strategy)計算木質表面上的應變分佈，發現可以大幅減少計算時間。而也有學者將線性窗口與數值高程模型(DEM)結合，如周毅等(2007)提出了具有方向特性的線狀窗口分析方法，有別於傳統的多方向鄰域分析，將 $R \times 1$ 、 $1 \times R$ 的分析窗口聯集後，發現不但可以得到明顯的山谷線、山

脊線(圖 2-10)，也改善了以多方向網格分析方法使特徵點無法連成線的問題。

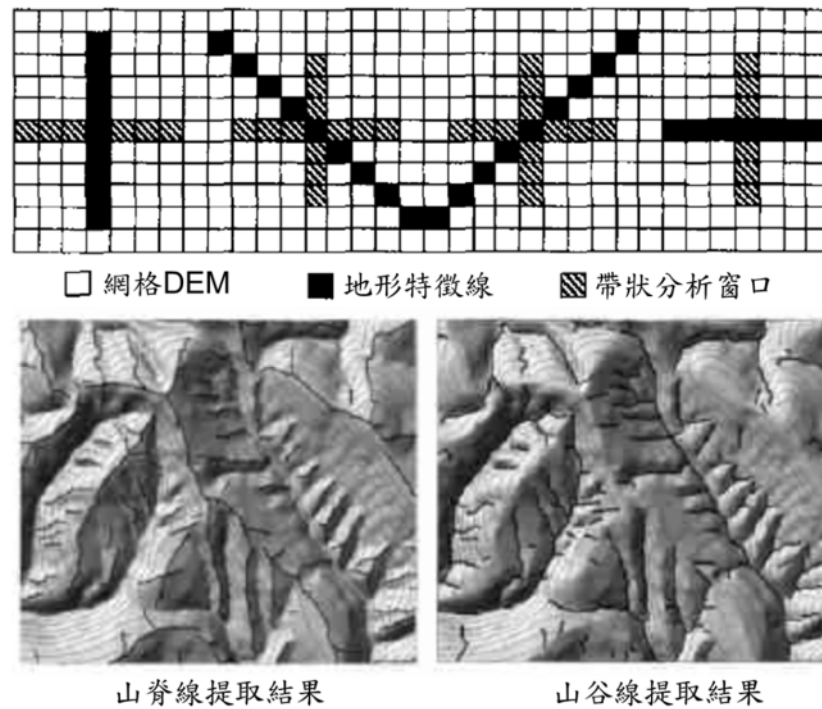


圖 2-10 特徵線的四種基本走向及分析窗口(周毅等，2007)

鄒昆等(2018)分別沿水平、垂直及兩個斜 45° 方向對數值高程模型進行單方向性分析窗口的全局斷面掃描(如圖 2-11)，再利用條件式將特徵線做延伸，使特徵線更加完整、連續，其中在延伸的步驟考慮了特徵方向與掃描斷面相互垂直可以得到顯著的延伸效果。

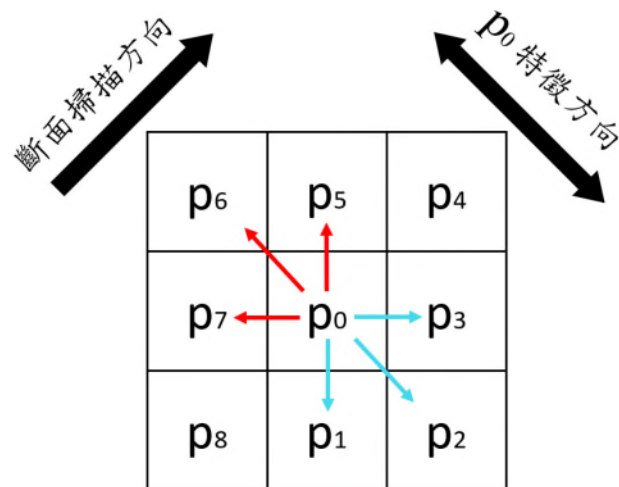


圖 2-11 特徵延伸示意圖(鄒昆等，2018)

第五節 地形因子之門檻值設定

湯國安和楊晰(2006)分別利用 ArcGIS 中的水文模組、地形表面模組分析後得到匯流量及坡向變化率，再配合多方向的鄰域平均分析，以正、負地形及門檻值，將結果求交集獲得山谷、山脊的地形特徵線(如圖 2-12 所示)。

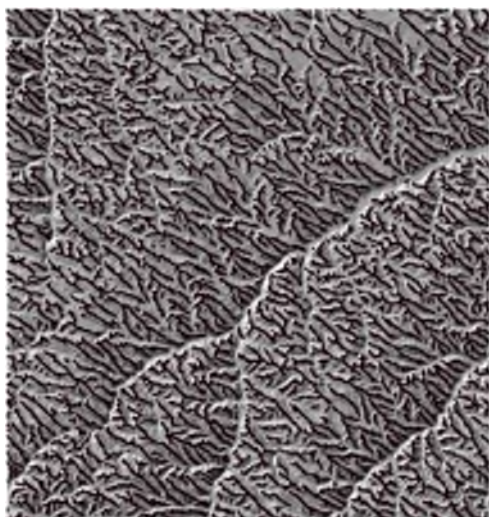


圖 2-12 利用正、負地形及門檻值提取山脊線(湯國安和楊晰，2006)

王軻等(2015)利用正負開闢度之差值設置門檻值的方法，並討論以不同長度的搜索半徑提取黃土塬區溝沿線之成效，結果顯示在綜合層面上，此方法根據不同地域特性調整搜索半徑後能保存更完整、更具連續性的溝沿線特徵，如圖 2-13。

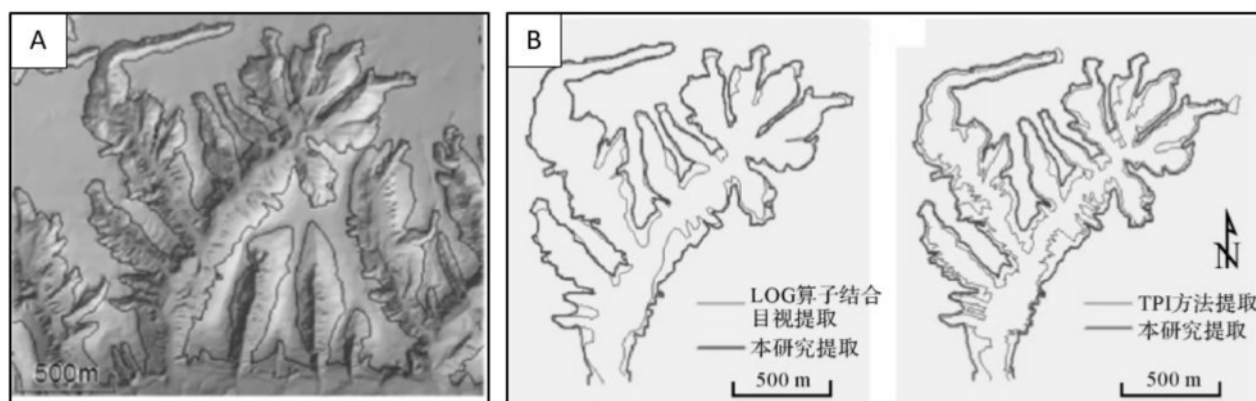


圖 2-13 正負開闢度差值 10° 為門檻值提取溝沿線(王軻等，2015)

第六節 分析單元

一般常用於集水區之劃分方法可分為 6 種，分別是網格、地域單元、均一條件單元、地形單元、行政區單元、邊坡單元(Van Den Eeckhaut et al., 2009；林俐玲等，2011)。

網格單元(Grid cell)是將地表劃分為大小相同的基本單元，並視為均值區紀錄其屬性，由於適應性良好且容易理解，因此被廣泛應用統計分析、地形計測方法、影像分析。地域單元(Terrain units)常應用於有關地形、地質之研究，主要根據自然環境提供的地理資訊進行劃分。均一條件單元(Unique condition units)原先應用於礦物上的分類，但對於地理統計分析而言，種類過多會造成分析結果不夠明確，而缺乏區域的代表性。行政單元(Administrative units)適用於大區域進行整合的統計分析單元，常依據國家、行政區域、人口、宗教等人文因子進行劃分。地形單元(Topographic units)是將集水區或坡面劃分為不同大小、不規則形狀的河道元素(stream tube element)的分析單元，其上邊界及下邊界由周遭的等高線來制定，側向邊界則是由等高線及水流渠道的正交線來繪製。

邊坡單元(Slope unit)是利用數值高程模型及反轉之數值高程模型進行水文分析，在各別提取集水區範圍後進行劃分獲得之單元，其具有區分地形、坡面的特性，因此特別適合做為滑坡之崩塌潛勢的相關分析。(Xie et al., 2004；吳俊毅和葉彥駒，2017；Ba et al., 2018)。

第三章 研究方法

第一節 研究流程

本研究流程如圖 3-1 所示，研究材料為 1 m 精度之數值高程模型，且根據目標地形特徵的大小選擇 1 m 或 5 m 判釋精度，再將數值高程模型計算單方向性分析窗口之坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度、地形開闊度與天空開闊度等地形因子，並且依照地形特徵的特性，選用兩種以上的地形因子，分別建立門檻值以提取遷急線、崩崖、蝕溝等地形特徵。

第二步，我們將根據專家學者所劃設的集水區遷急線區位，與建立門檻值所得的遷急線判釋結果進行比較，利用混淆矩陣等方式評估判釋結果的優劣性(如圖 3-1 紅色框)。

第三步，將 DEM 資料及反向 DEM 資料進行水文分析得到邊坡單元，並且計算各分析單元中崩崖、蝕溝等地形特徵的密度，並與各分析單元歷年崩塌情形比較，分析地形特徵密度與崩塌發生之關聯性，以推估集水區可能崩塌區位(如圖 3-1 橘色框)。

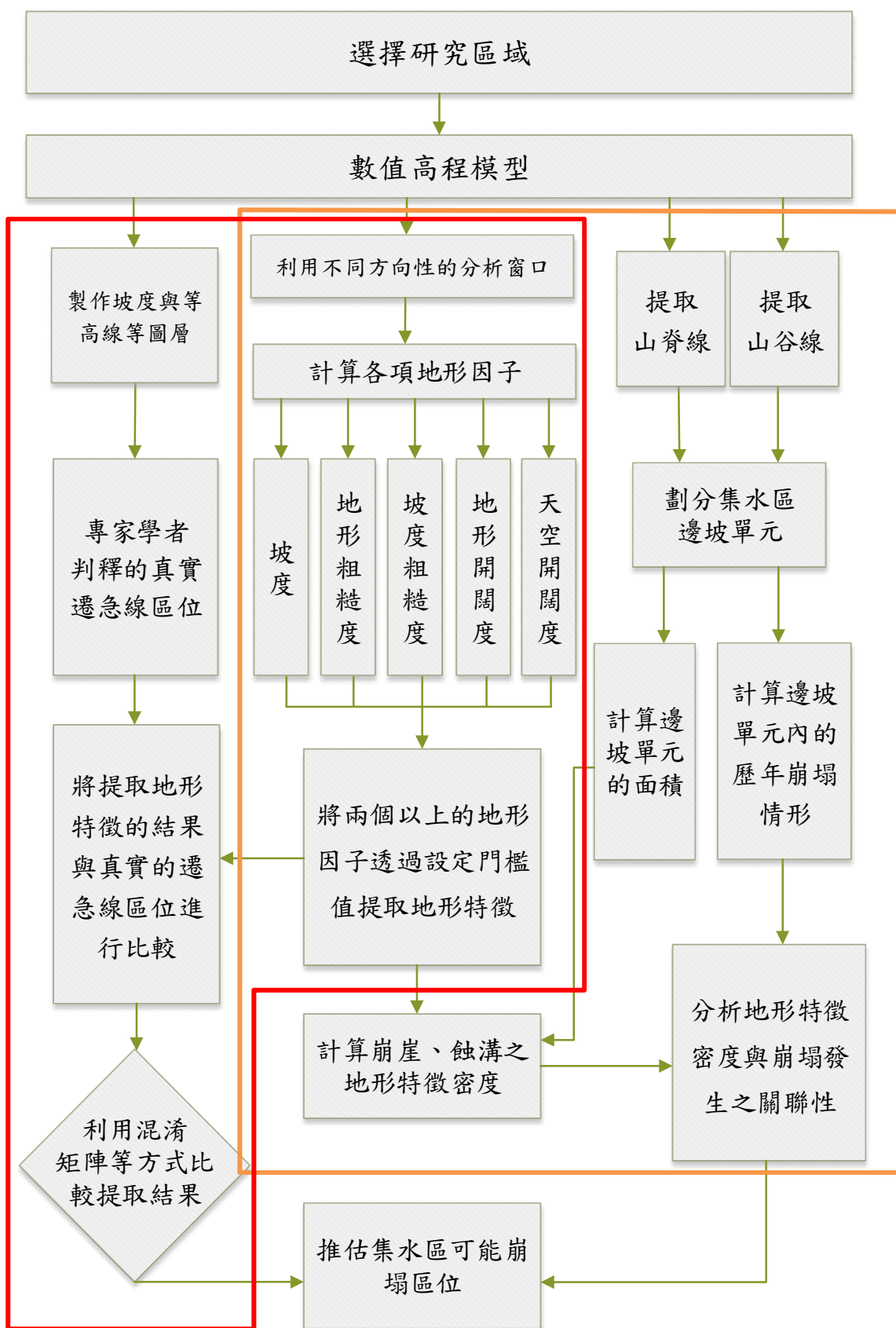


圖 3-1 研究流程圖

第二節 微地形特徵之特性

透過崩塌地地形特徵能夠判釋出崩塌潛勢區位，因此崩塌發育的起始位置之判釋顯得相當重要。在滑動體與邊坡分離初期發育成為崩崖前，會產生凹陷之裂隙。倘若已進入發育中期，則滑動體有可能因圓弧滑動使坡面反轉形成凹谷，也同時產生反向坡，然而大雨造成坡面劇烈沖蝕產生的蝕溝，也是使坡面不穩定的原因之一。張力裂隙、反向坡、蝕溝皆為凹陷地形，且與坡面之坡向有一定的相關性(如圖 3-2)，因此本研究嘗試在不同之地形計測方法中納入方向性的考量後，以進行後續分析。

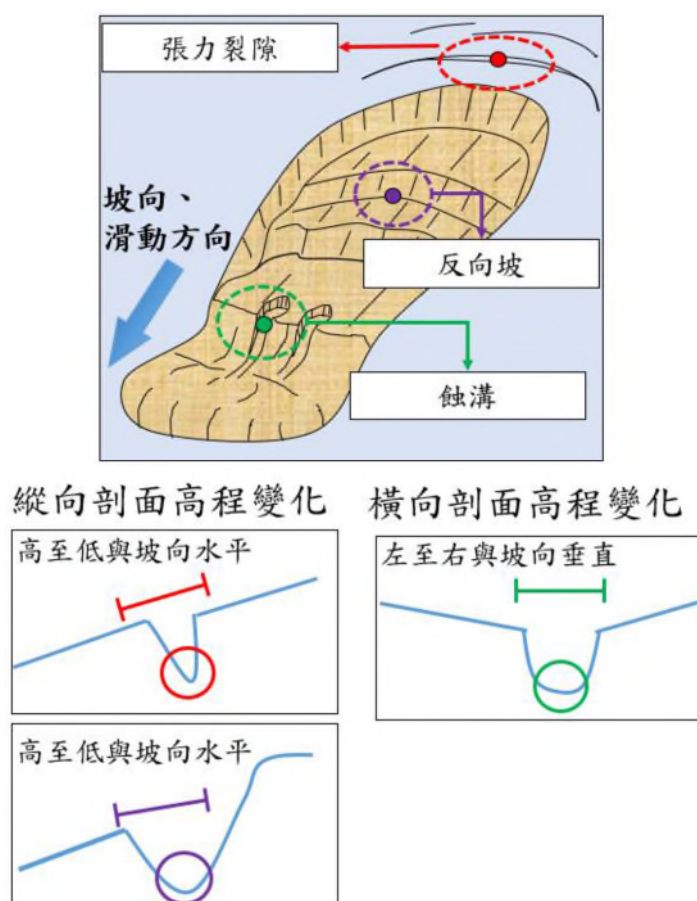


圖 3-2 張力裂隙、反向坡、蝕溝的微地形特徵

第三節 單一方向窗口地形因子分析

本研究採用單一方向窗口進行地形因子之分析(如圖 3-3)，各因子分析方式分述如下。

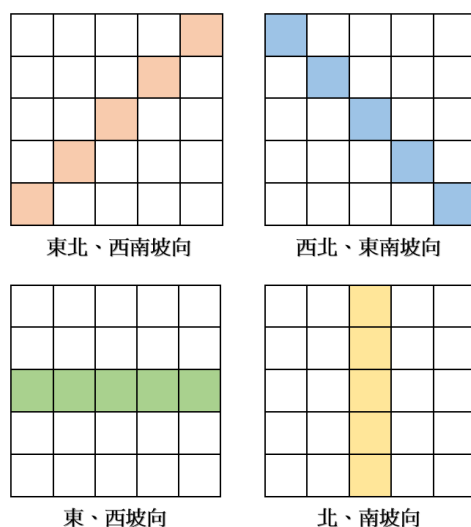


圖 3-3 依照不同坡向設置不同方向性窗口

一、地形粗糙度分析

地表粗糙度為地形的變異程度，主要利用數值統計的方法來表示地表平坦、地形高差變化的參數，包含有地形高程標準差、坡度標準差、坡度、曲率和坡向的變異數等(McKean and Roering, 2004; Frankel and Dolan, 2007; Regmi, 2019)，主要以移動網格的方式來計算(如圖 3-4)，用以表示地形資料中相對變化或差異較大的區域，而應用至各種地形變化的研究(謝有忠，2016)。

本研究將粗糙度的計算公式結合單方向分析窗口，分析南-北向、東-西方向、東南-西北向、西北-東南向的高程標準差，利用 Matlab 程式將研究區域的高程資料匯入，再依據地形粗糙度計算公式分析不同窗口之高程標準差。

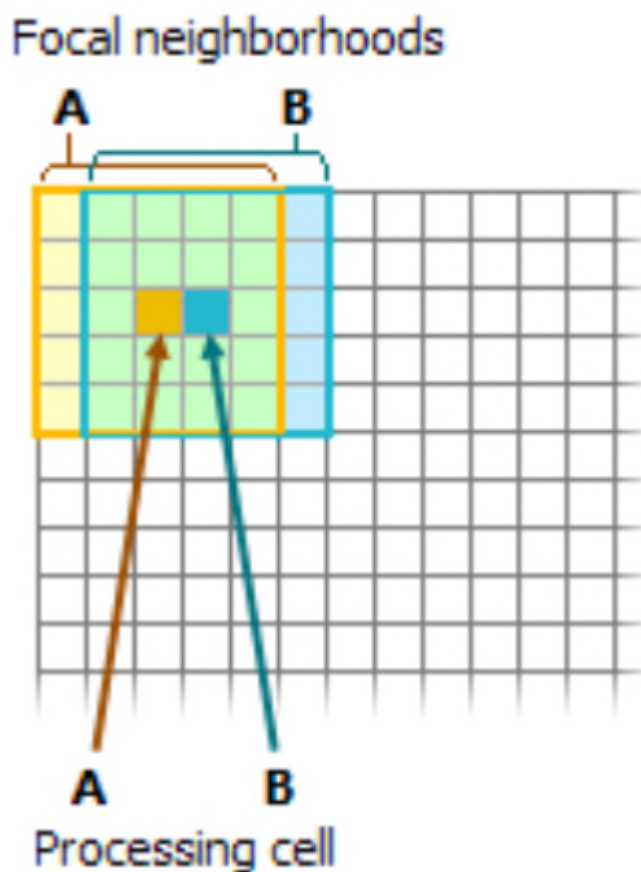


圖 3-4 ArcGIS 焦點分析工具

二、坡度因子分析

坡度表示地形坡面的斜度，即為水平距離內，高程值的平均變化量，呈現數值的方式有度和百分比，常被應用在地形的分析以及展示上。本研究所使用的 Horn(1981)坡度計算方法，又稱為三次加權法 (3rd-Order Weighted)，是將 Sharpnack & Akin(1969)所推導出的公式，進行中心點正交方向的加權，其基本運算為 3x3 的網格大小，將每個網格與鄰近 8 個網格的最大高程變化值統計而得，假設高程值分別為 $Z_a \sim Z_i$ (圖 3-5)，且網格與網格的間距為網格的解析度 (cell resolution)，再針對坡度中心的正交方向進行中央加權，最後分別計算 X 與 Y 方向的變化率。

因此，本研究加入單方向性的計算，分析以南-北向、東-西方向、東南-西北向、西北-東南向的單方向坡度變化率(如表 3-1)，並且使用 Matlab 撰寫四種單方向性窗口的坡度分析，如同焦點分析工具(Focal Statistics)的計算方式，將網格的高程資料每一格逐一進行分析。

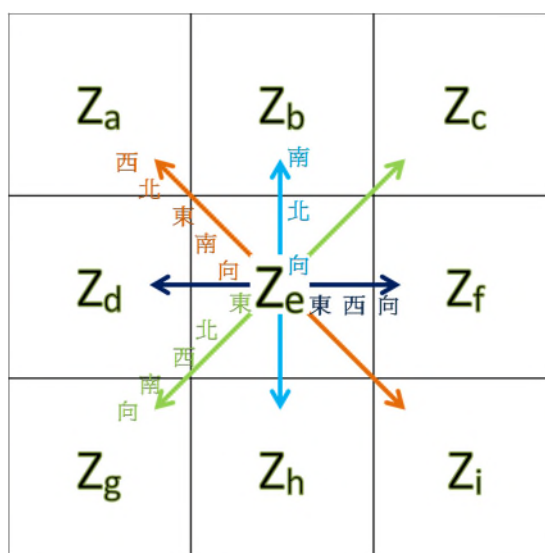


圖 3-5 坡度計算網格

表 3-1 單方向窗口之坡度計算方式

分析窗口類型	窗口方向性	弧度計算方法
單方向性分析窗口	Slope 南-北	$\tan^{-1}(((Z_b - Z_h)/2 * \text{cell resolution})^2)^{0.5}$
	Slope 東-西	$\tan^{-1}(((Z_f - Z_d)/2 * \text{cell resolution})^2)^{0.5}$
	Slope 西北-東南	$\tan^{-1}(((Z_a - Z_i)/2\sqrt{2} * \text{cell resolution})^2)^{0.5}$
	Slope 東北-西南	$\tan^{-1}(((Z_c - Z_g)/2\sqrt{2} * \text{cell resolution})^2)^{0.5}$

三、坡度粗糙度分析

坡度粗糙度即為坡度標準差(standard deviation of slope),將坡度資料進行標準差計算,可以明顯的區分光滑的坡面與坡度大幅改變的區域,可有效的進行地貌分析(Grohmann, 2011)。

本研究針對單方向窗口之坡度計算結果,再各別進行坡度粗糙度之分析,可以了解區域內坡度離散的程度。並且利用 Matlab 程式將研究區域的網格坡度資料匯入,且依據坡度粗糙度計算公式分析不同窗口之坡度標準差。

四、地形開闊度分析

地形開闊度是由 Yokoyama 等人(2002)所提出的地形參數,能反應出該分析窗口內地形凹與凸的程度,其主要分析方法是設紅點(A)為圓心,以等距離(L)將八個方位(以方位角(D)表示)所有的最小天頂角($D_{\theta}L$)、最小天底角($D_{\psi}L$)進行平均,可以分別得到正開闊度(Positive openness, θL)、負開闊度(Negative openness, ψL),最後相減後再次平均得到地形開闊度(Surface openness, I),而本研究利用單方向的分析窗口計算各方向的地形開闊度,只計算單一方向的開闊度值,不與其他方向的開闊度平均,其示意圖與計算式如圖 3-6 所示。地形開闊度正向值表示量測位置水平面之上,較高的凸形地形面,而負向值表示量測位置水平面之下以及較低的凹形地形面。

本研究分別計算南-北向、東-西向、東南-西北向、西北-東南向的地形開闊度,利用 Matlab 程式將研究區域的網格高程資料匯入,再依照地形開闊度計算公式分析不同窗口之地形開闊度。

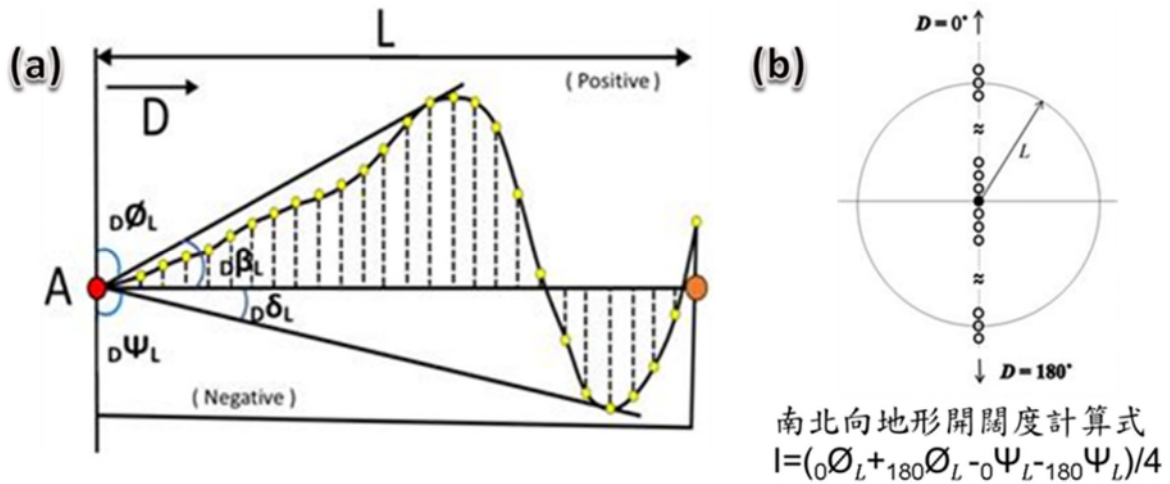


圖 3-6 單方向性窗口之地形開闊度

(a)天頂角、天底角示意圖(修改自 Yokoyama et al., 2002)、(b)
南北向窗口之地形開闊度計算式

五、天空開闊度(Sky View Factor)

在天空開闊度中，投射到地表上的入射光量通常與天空可視範圍有關，山脊可接受到較多周圍的天空光源而呈現較為明亮之特徵(李璟芳，2018)，相反的，山谷可接受到的天空光源較少，呈現較為陰暗的特徵。其計算方式是在觀測點上，在某一搜索半徑(R)中，選擇範圍內與地面夾角為最大角度的網格，此角度即為 γ 角，示意圖如圖3-7所示，而八方位的 γ 角平均即為多方向的SVF值，單方向則是考慮單一方向性的 r 值，如南北向為 γ_0 與 γ_{180} 之平均值。

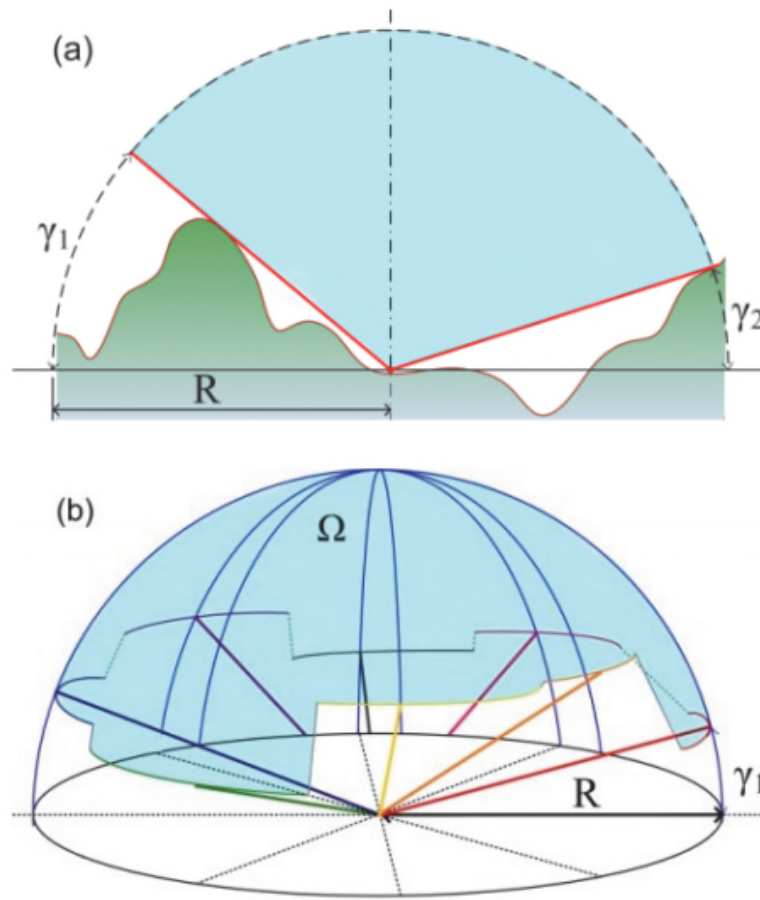


圖 3-7 天空開闊度：(a) 二維示意圖；(b) 八方位天頂角三維示意圖

SVF 的計算過程經簡化後，其計算式如式(1)所示，SVF 值域介於 0 至 1 之間，SVF=1 代表整個半球上的地表面通視良好(如平原、山峰或陵線)，其於圖面反映之灰階度為亮值；反之，SVF=0 意指從觀察點上，幾乎沒有可通視的天空(如溪谷)，圖面上顯示為暗值。

$$SVF = 1 - (\sum_{i=1}^n \sin r_i) / n \quad (1)$$

第四節 不同地形因子之結合與門檻值設定提取遷急線

本研究將結合坡度、地形開闊度、地形粗糙度等多種地形因子，透過門檻值設定來提取遷急線位置，並與實際地形資料進行分析比較，藉此選擇適合之因子結合方式及門檻值。

不同地形因子的結合方式主要分為兩種，第一種是將符合門檻值的結果做聯集，如圖 3-8 所示，為了提取崩崖特徵，將坡度 >40 度與地形開闊度大於 10 度的門檻值設定結果做聯集，得到此組門檻值聯集的結果。第二種方式是各別將坡度與開闊度的門檻值結果向外擴大，再做交集，如圖 3-9 所示，將坡度 >40 度且外擴兩米的門檻值結果，交集地形開闊度大於 10 度且外擴兩米的門檻值結果。

地形因子結合的方式除了上述交集以及聯集的方法外，主要是依照地形特徵的特性，也就是遷急線去設定提取方式，而提取所需要設定的地形因子門檻值，則是根據實際遷急線之特性。因此，本研究將劃定 1-2 段通過遷急線位置的縱剖面(樣本)，由縱剖面得到各地形因子在遷急線位置的值域，再設定門檻值且結合地形因子，得到遷急線的結果。

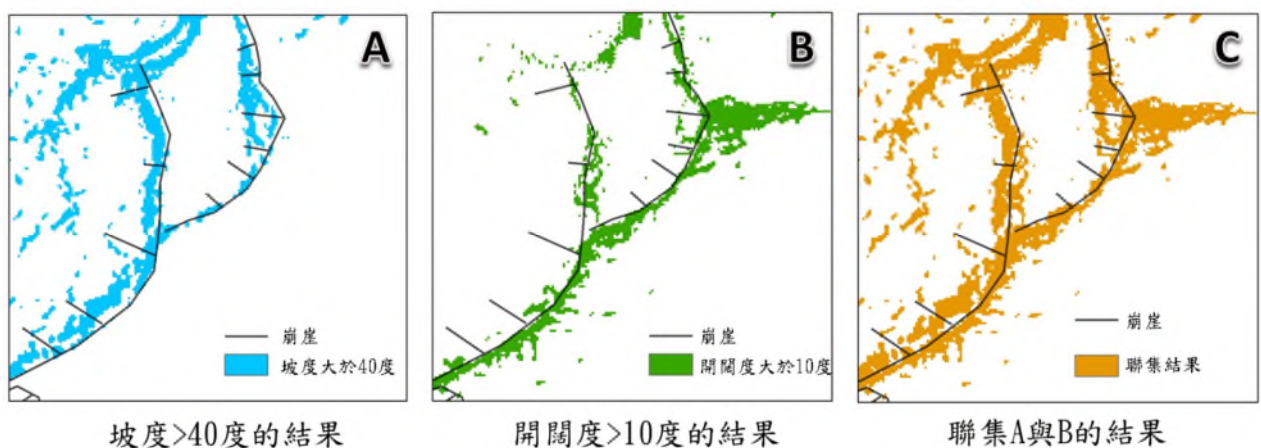


圖 3-8 聯集坡度 >40 度的結果與開闊度 >10 度的結果

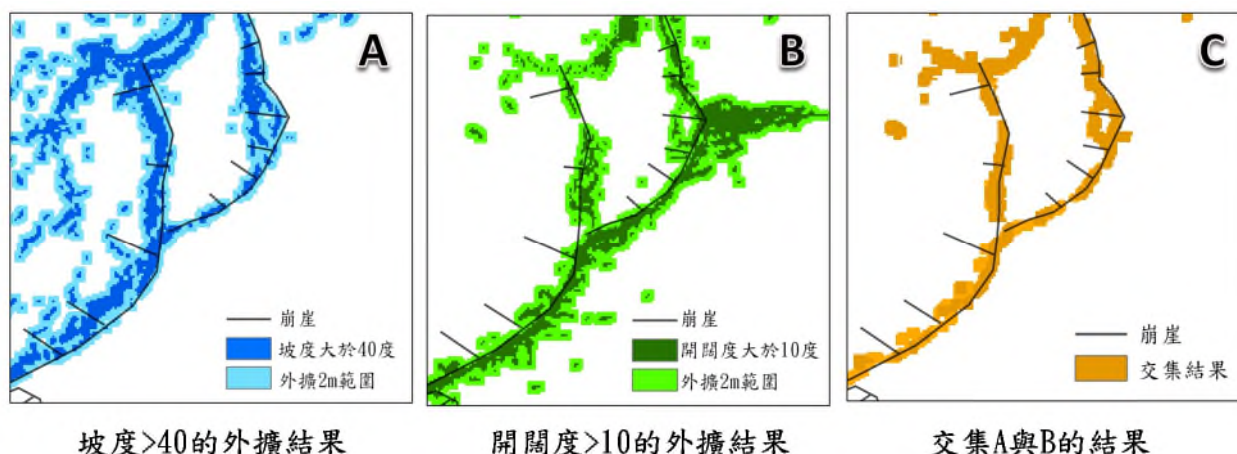


圖 3-9 交集坡度>40 度的外擴結果與開闊度>10 度的外擴結果

第五節 地形特徵與崩塌發生之關聯性

目前研究常使用的崩塌潛勢因子中，地形因子如坡度、坡向等較缺少崩塌地形特徵之考量。因此，本研究在不同地形因子之結合與門檻值設定下，分別計算各分析單元中單位面積之崩崖、蝕溝長度，並與各分析單元某一崩塌事件比較，如圖 3-10 所示，藉此分析地形特徵密度與崩塌發生之關聯性，從中選取具有較佳關聯性之因子組合與門檻值，即可將此地形特徵做為崩塌潛勢因子，進而根據各分析單元之地形特徵密度推估集水區可能崩塌區位。

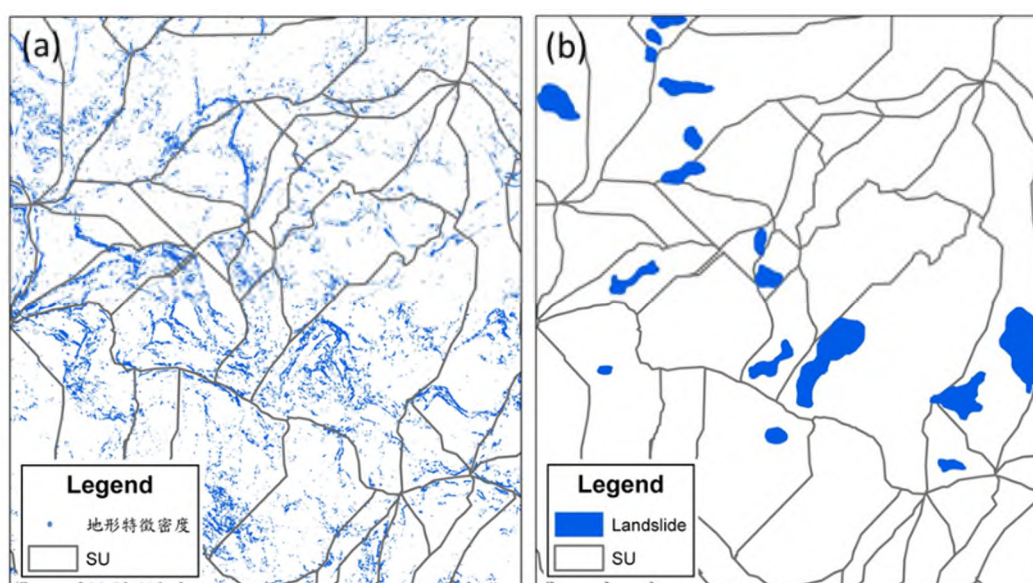


圖 3-10 地形特徵密度與某一崩塌事件的示意圖

其中，不同因子組合與門檻值所得各分析單元之地形特徵密度，可分別繪出其成功率曲線(Success Rate Curve, SRC)、崩塌個數比圖，以進行因子組合與門檻值之選擇。

一、成功率曲線(SRC)：

可由曲線下面積(Area Under Curve, AUC)作為判定該模式良窳之依據(Chung and Fabbri, 1999)，如圖 3-11 所示。AUC 值介於 0~1，越接近 1 代表結果越佳。本研究利用此判定概念，以 SRC 之 AUC 值來評估地形特徵與崩塌的關聯性。成功率曲線下面積 AUC 需大於 0.5，若小於 0.5 代表該組合之地形特徵密度對崩塌發生有如一隨機變數。

二、崩塌個數比圖：

計算地形特徵在不同值域區間下，崩塌樣本數與該區間邊坡單元總數比值，繪製崩塌比值與不同值域之關係圖，如圖 3-11。崩塌個數比圖需符合地形特徵之物理意義，即地形特徵越大，崩塌比應越大。

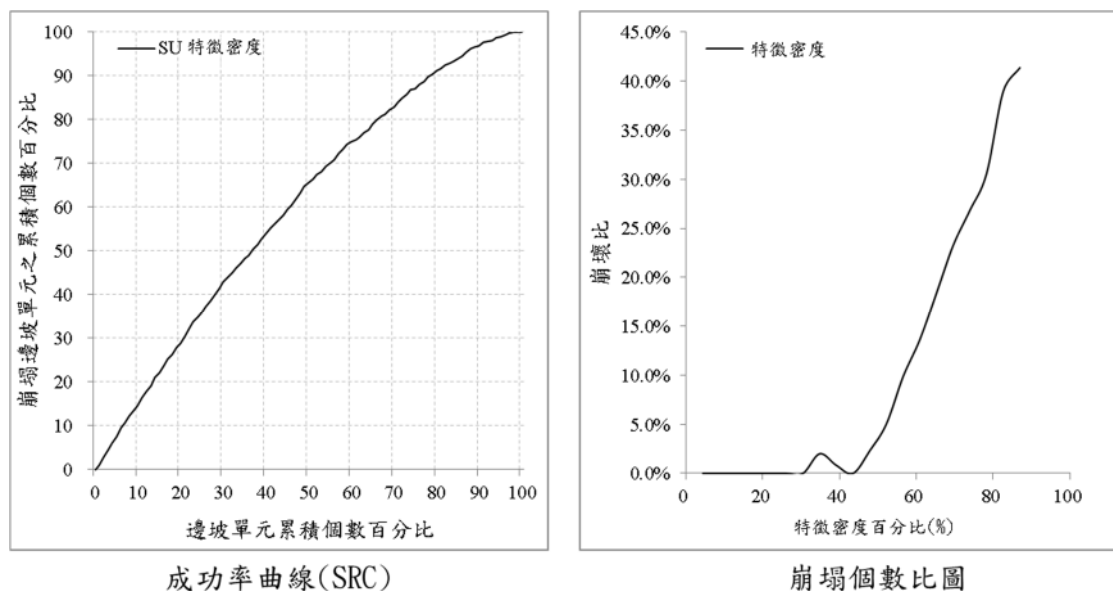


圖 3-11 成功率曲線與崩塌個數比圖示意圖

第六節 邊坡單元分析

邊坡單元(slope unit)因其有較完整之地形分區邊界，較網格式單元具地形、地質上之意義。因此，本研究將集水區劃分成不同邊坡單元，參考 Xie et al.(2004)之劃分方式，以 GIS 之 Hydrology 模組來劃分邊坡單元，其劃分原理係利用水系分析結果，找出面積適合之小集水區，再以主河道將小集水區分割為兩個邊坡單元。劃分步驟首先係針對原始地形劃分小集水區，次將原始地形反轉，再同樣針對反轉地形劃分小集水區，最後將反轉前後之小集水區疊合，即可得到左右兩側邊坡單元(如圖 3-12)。

在進行邊坡單元是屬於崩塌樣本或非崩塌樣本之分類時，乃利用邊坡單元中前後期新增崩塌地面積大於 100m^2 時，定義該邊坡單元為崩塌樣本，小於 100m^2 則為非崩塌樣本(陳樹群等，2012)。

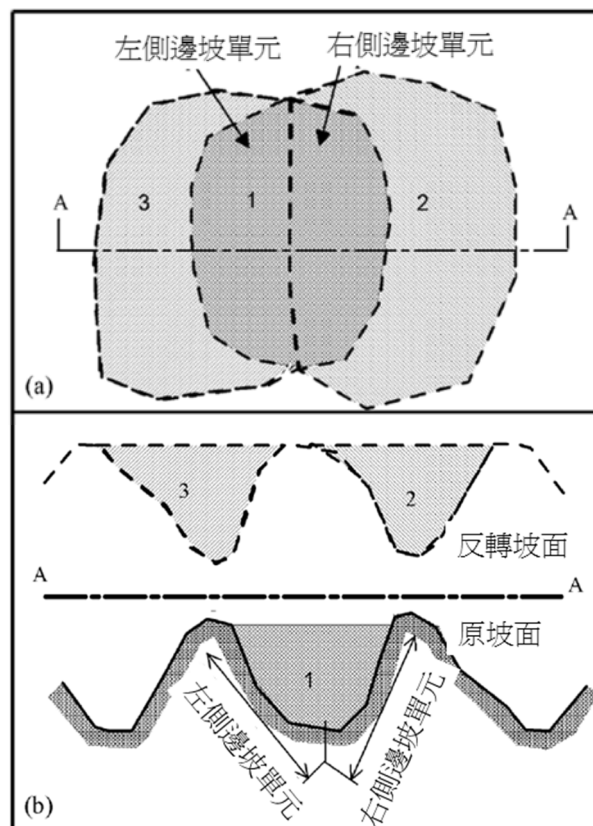


圖 3-12 邊坡單元之劃分原理 (圖修改自 Xie et al., 2004)

第四章 研究區域與材料

第一節 基本資料

本研究區域位於石門水庫上游的集水區(如圖 4-1)，大漢溪流域位於中央山脈的北側，而大漢溪為淡水河主要支流之一。大漢溪上游具有三個主要支流：泰崗溪、白石溪和三光溪。

本研究使用內政部在 2013-2014 年建製的數值高程模型(圖 4-1b)，解析度為 1m，高程分佈自 480 公尺到 3528 公尺，地勢的走向由東南向西北遞減，河流的方向是從東南到西北(Lin, 2011)，其流域範圍包含白石集水區、泰崗集水區、三光集水區與玉峰集水區。

流域之主要降雨集中在每年 5 月至 10 月間，佔全年總降雨量之 80%，大部份為颱風及梅雨所帶來的雨量，如 2004 年之艾利颱風，在石門水庫集水區降下超大雨量，其最大日降雨量為 1262mm，而在颱風期間的總降雨量為 1607mm，高強度的降雨引發了許多崩塌(Tsai, 2012)，且整個石門水庫總計誘發 1,037 處、面積 411 公頃之山崩及 39 條土石流(李錫堤，2008)。

集水區內氣溫約在 12°C 至 26°C 間，年平均溫度約為 20°C，各月份之平均濕度約在 80%~88%，年平均濕度約在 84%(Lin, 2011)。研究區域之地層包括四稜砂岩、大寮、石底、巴稜與西村，褶皺構造暨斷層構造線多呈東北-西南走向，主要褶皺包含萱原向斜與中嶺背斜；主要斷層構造有霞山、檜山等(如圖 4-2 所示)。

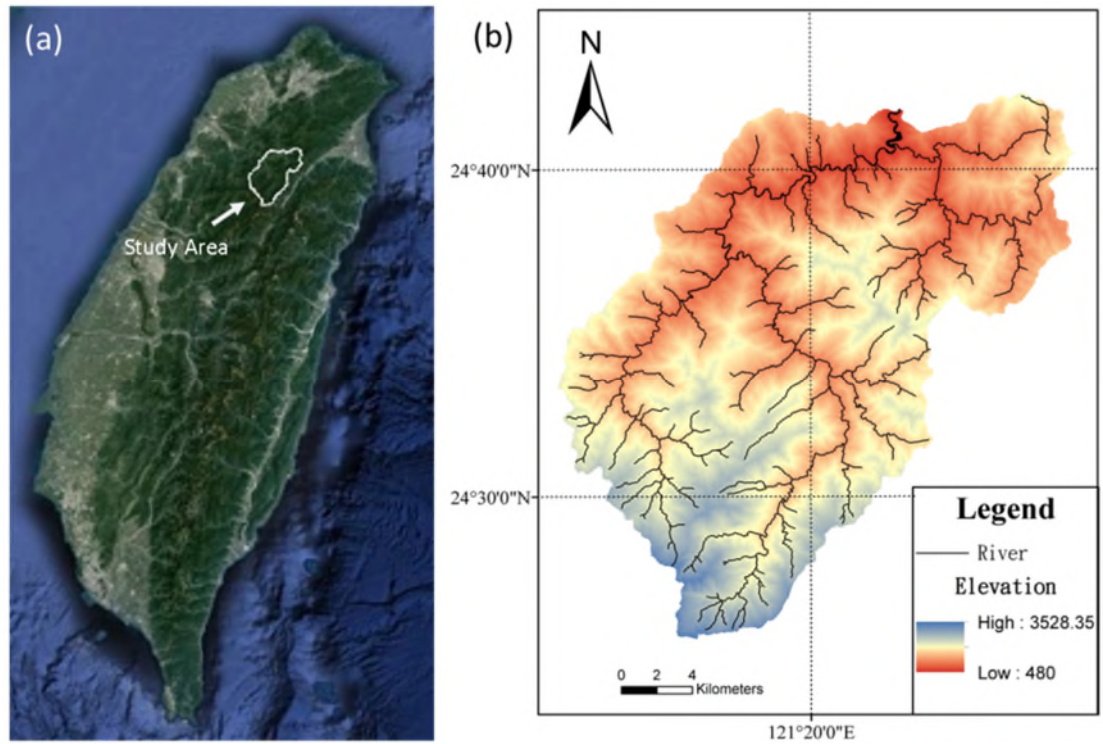


圖 4-1 研究計畫區域-石門水庫上游集水區

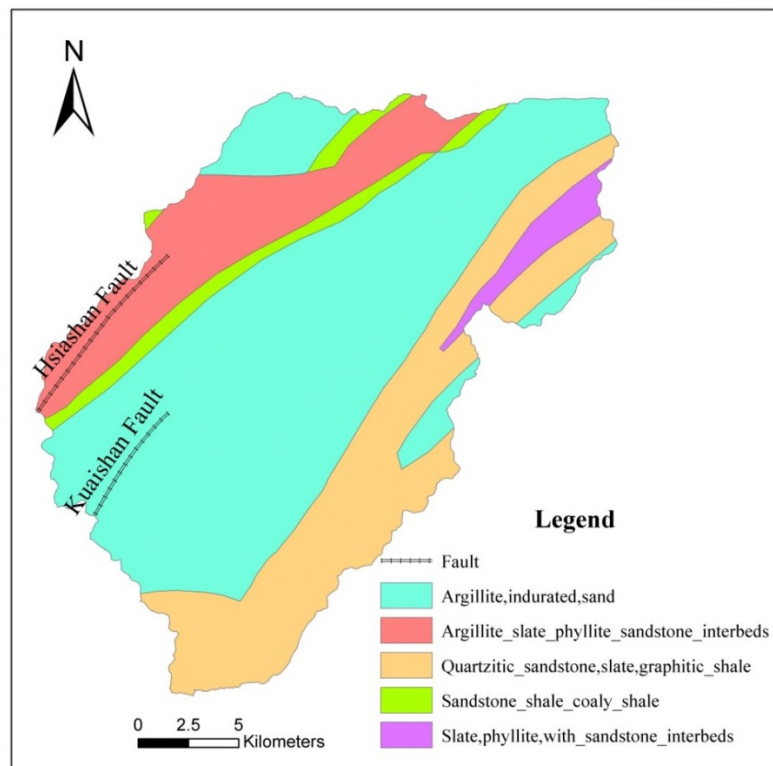


圖 4-2 研究區域之地質與斷層分布

第二節 研究材料

本研究使用的數值高程模型產自 2013-2014 年，因此，為了驗證本研究判釋的地形特徵是否與真實的崩塌事件有相關性，因此本研究使用建製後期的颱風事件，分別是 2014 年 7 月 23 日的麥德姆(Matmo)颱風與 2015 年的 8 月 8 日的蘇迪勒(Soudelor)颱風。崩塌圖層為農委會水土保持局提供，其崩塌區位如圖 4-3、圖 4-4 所示。

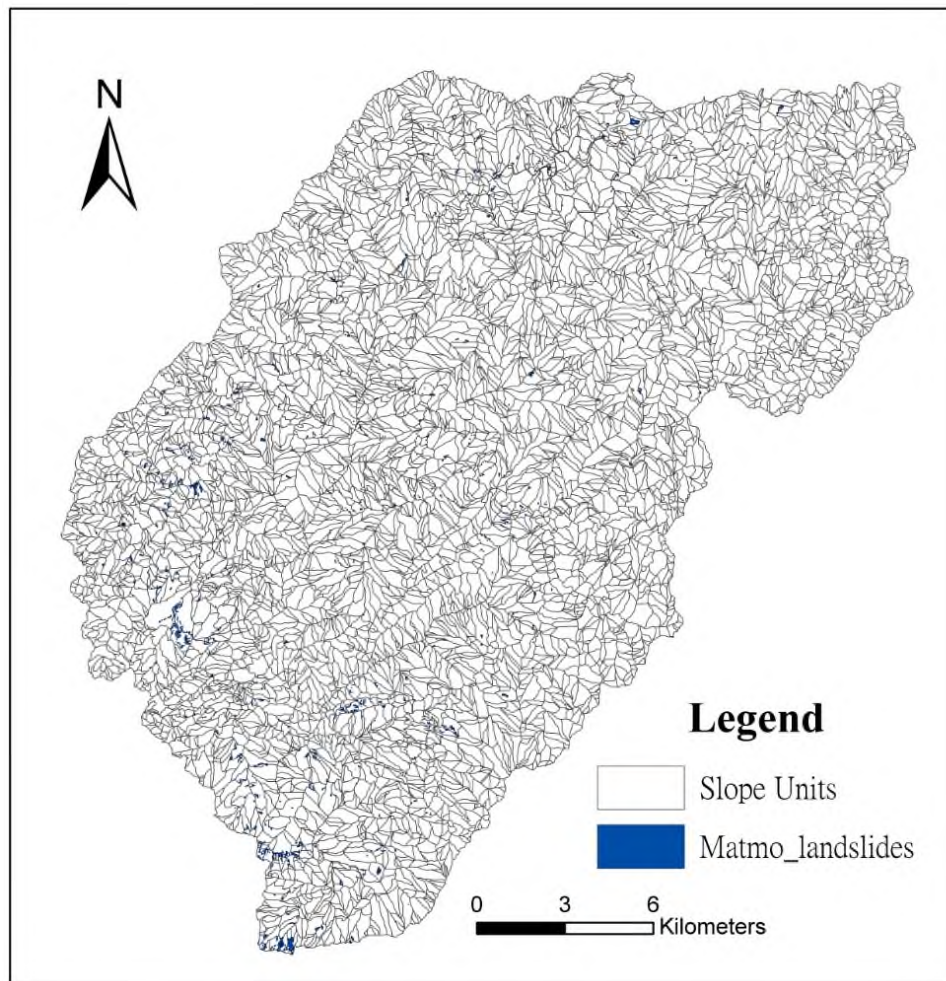


圖 4-3 2014 年麥德姆颱風造成的崩塌區位

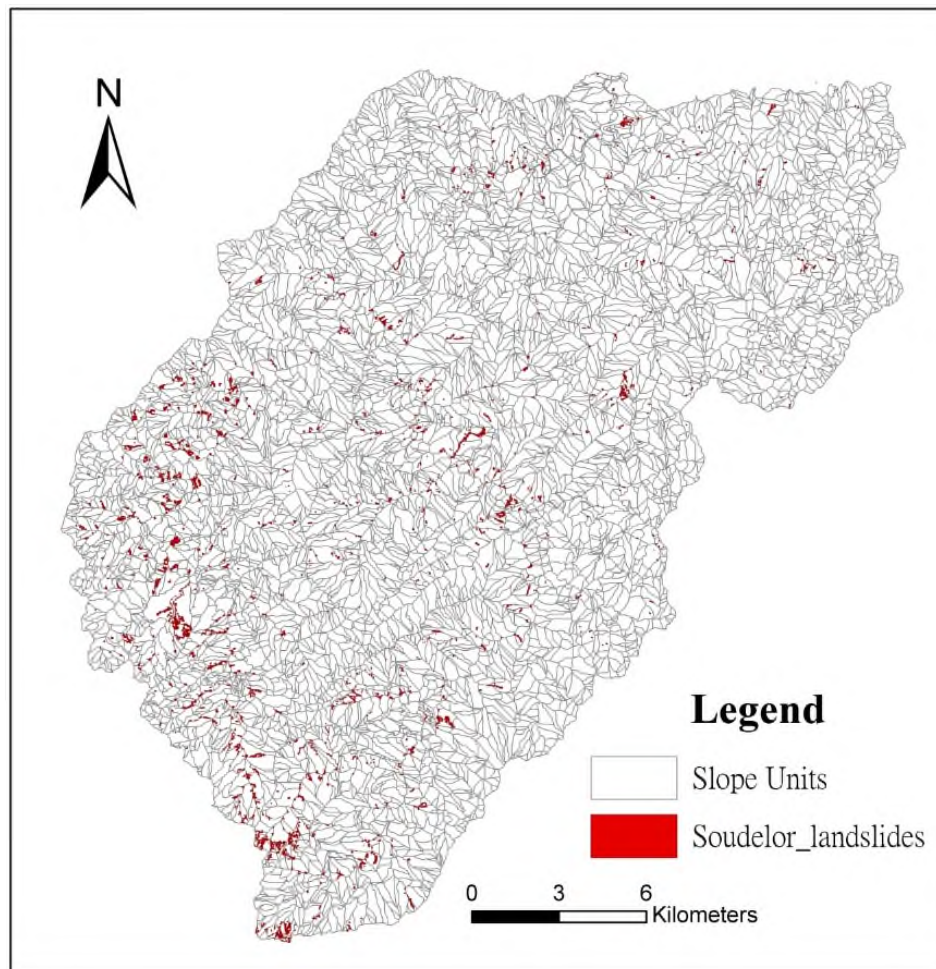


圖 4-4 2015 年蘇迪勒颱風造成的崩塌區位

因此，本研究將探討兩大部分，(1)利用 5 米數值高程模型計算不同的地形因子，並且挑選能夠提取遷急線之地形因子，進一步找出含有潛在崩塌可能性的遷急線範圍，並且選取研究區域內的下宇老子集水區進行做為試驗組，測試及確認門檻值，再利用相同的方法及門檻值驗證泰平子集水區是否也有良好的提取效果(如圖 4-5)；(2)利用地形因子找出與崩塌相關的地形特徵，如蝕溝、崩崖等，將這些含有潛在崩塌地形特徵的網格找出，再結合集水區的邊坡單元，計算在每個邊坡單元中，有多少符合條件之網格，得出崩塌地形特徵密度，最後利用 DEM 建置時間以後的颱風事件，利用其造成的崩塌地資料，探討這些真實的崩塌區位是否與本研究預測的結果有相關性。

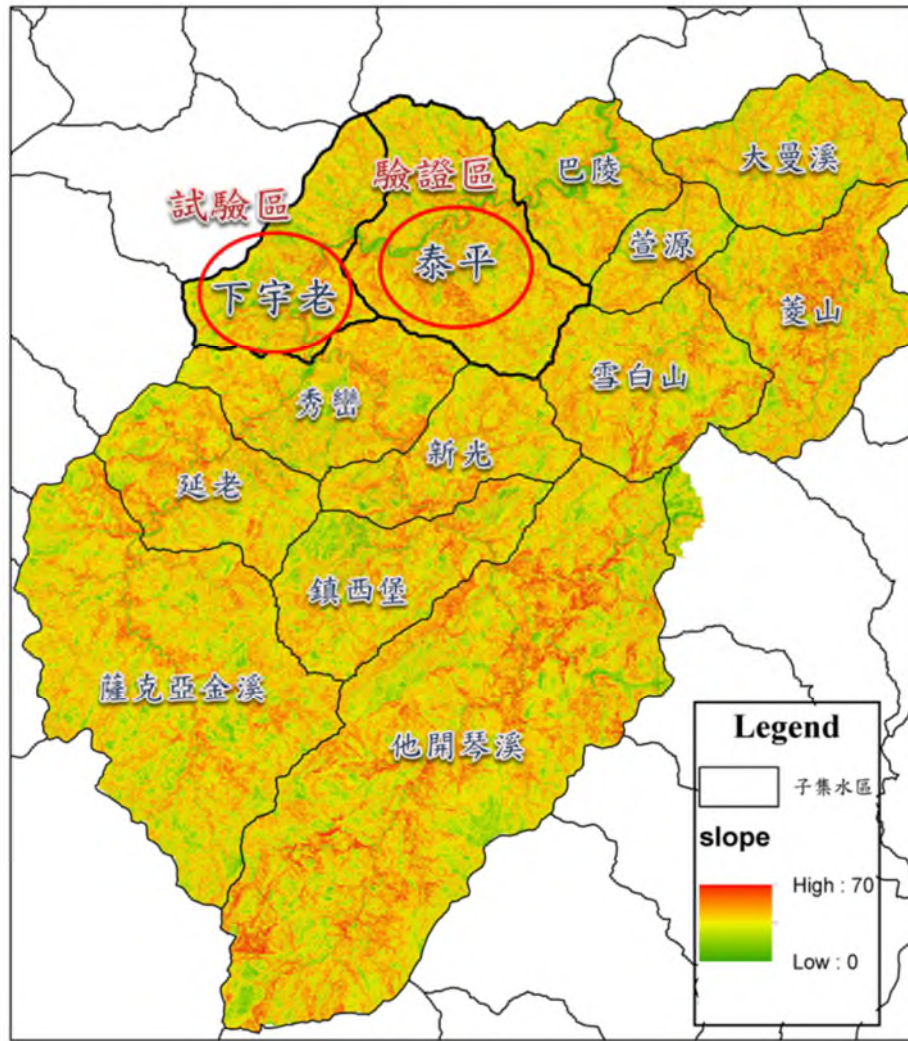


圖 4-5 研究區域坡度圖與子集水區範圍

第五章 集水區遷急線之判釋

第一節 利用地形因子提取遷急線之流程與步驟

一、提取流程

為了利用地形因子提取遷急線的區位，本研究依照遷急線的特性，設定提取方式及地形因子之門檻值，再與下宇老子集水區(試驗區)之實際遷急線位置進行比對，得到最佳的提取方式與門檻值，並且將門檻值驗證泰平子集水區是否也有相同的結果，提取遷急線之流程如圖 5-1 所示。

首先，利用試驗區之數值高程模型計算各地形因子，依照遷急線的特性，選取以及設定地形因子之門檻值，再利用外擴、交集、聯集等方式結合因子之結果，提取遷急線位置，而各個因子門檻值是根據樣本取得。其中，樣本劃設在下宇老試驗區中，以兩段分別通過 B_H 、 B_M 與 B_L 之縱剖面，紀錄各因子在遷急線位置之值域，再利用平均值設定提取遷急線之門檻值。依照樣本之門檻值提取下宇老試驗區之遷急線後，再將相同的方法及門檻值帶入泰平驗證區，討論相同的門檻值及提取方式，是否在驗證區也有相近的提取結果。

本研究考慮遷急線的涵蓋範圍以及解析度大小的影響，利用下宇老與泰平子集水區之 5 m 精度 DEM 分別計算地形開闊度、坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度與天空開闊度等地形因子。

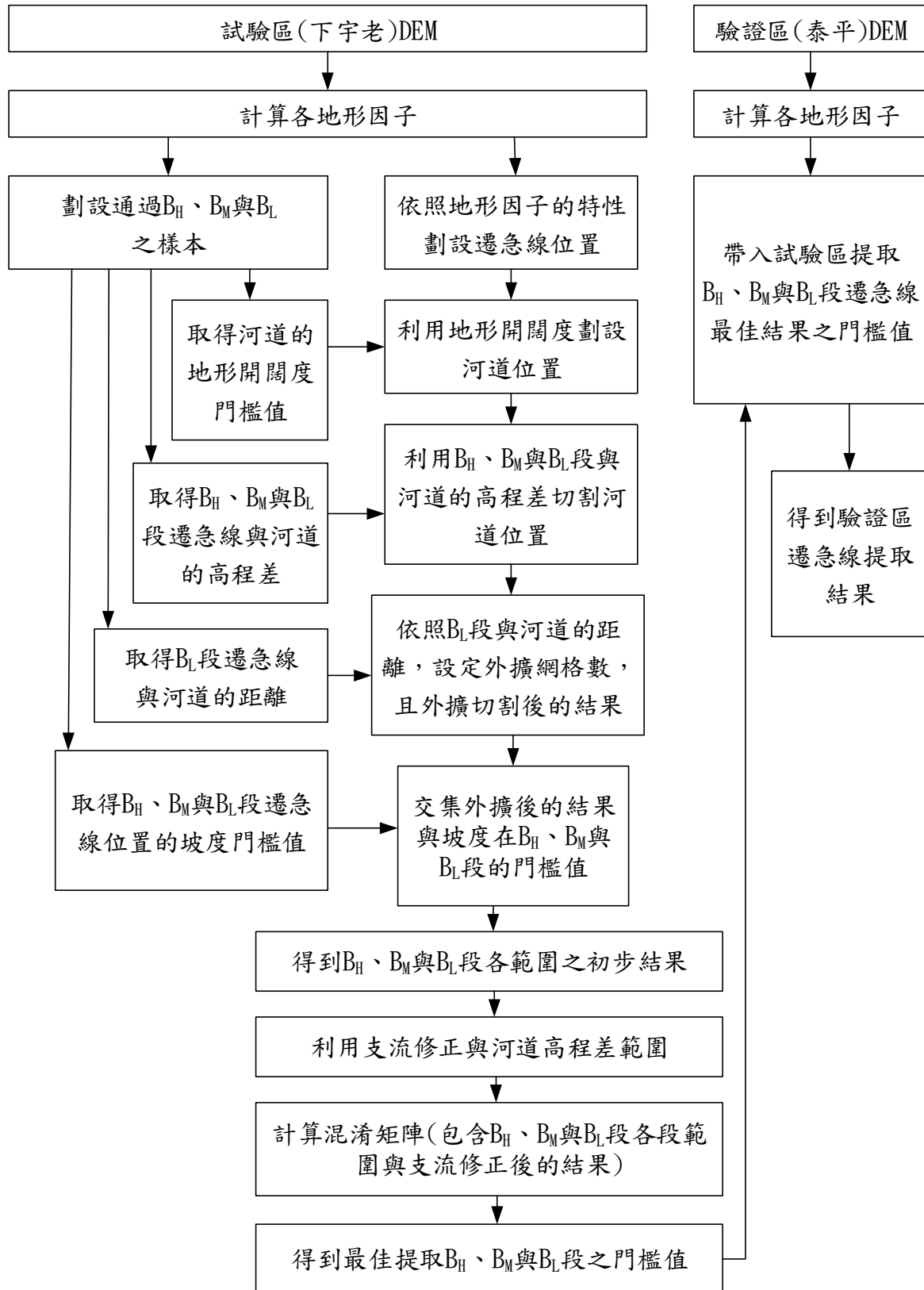


圖 5-1 提取遷急線之流程圖

二、提取步驟

由於遷急線的形成原因為地殼隆起或海平面下降，導致河流下切且向河流源頭侵蝕，因此本研究選定最能夠突顯河道特徵之地形開闊度因子，且設立因子門檻值，得到河道位置。另外，遷急線對於最近距離的主河道有相對的高程差，因此希望劃設與河道之高程差，切割某一範圍之河道，並且外擴得到遷急線的輪廓範圍。再者，坡度在河道兩側的坡面較陡峭，其坡度值較大，且在河道位置之坡度值較小，因此，本研究選定坡度因子，利用坡度大於某一門檻值，與地形開闊度之結果進行交集分析。提取遷急線的步驟主要分為以下三個部分：

第一步，為了設定因子的門檻值，在研究區的範圍內選定兩段樣本，皆與 B_H 、 B_M 與 B_L 遷急線相交之縱剖面，並且記錄與遷急線相交位置之各因子值域，最後再計算因子之平均值，藉此設定試驗區之因子門檻值。其中，因子包含河道位置之地形開闊度值、坡度值、遷急線與主河道之相對高程差等。

第二步，設定地形開闊度門檻值找出河道位置，並且依照 B_H 、 B_M 和 B_L 段之遷急線與河道的高程差範圍，去切割河道位置，接著再外擴切割後的結果，最後與坡度門檻值做交集，得到遷急線的輪廓範圍。

第三步，得到下字老試驗區最佳的提取結果後，再將所使用因子與門檻值套用至泰平驗證區，並評估其提取結果。

第二節 試驗區(下宇老)各地形因子之結果

一、地形開闊度結果

單方向地形開闊度結果如圖 5-2 所示，地形開闊度因子主要以區域地表水平距離與高程間的角度關係($\tan \theta$)顯示該區域不規則地表的主要形貌，開闊度值較大的區域，顏色較黑，表示地形的開闊程度較大，顯示為山脊的位置；而開闊度值較小的區域，顏色較白，表示地形的開闊程度較小，顯示為河道的位置，由圖中可以發現，地形開闊度因子能夠找出連續且明顯的河道位置，且單方向性窗口對於垂直方向的河道，有更顯著的提取結果。

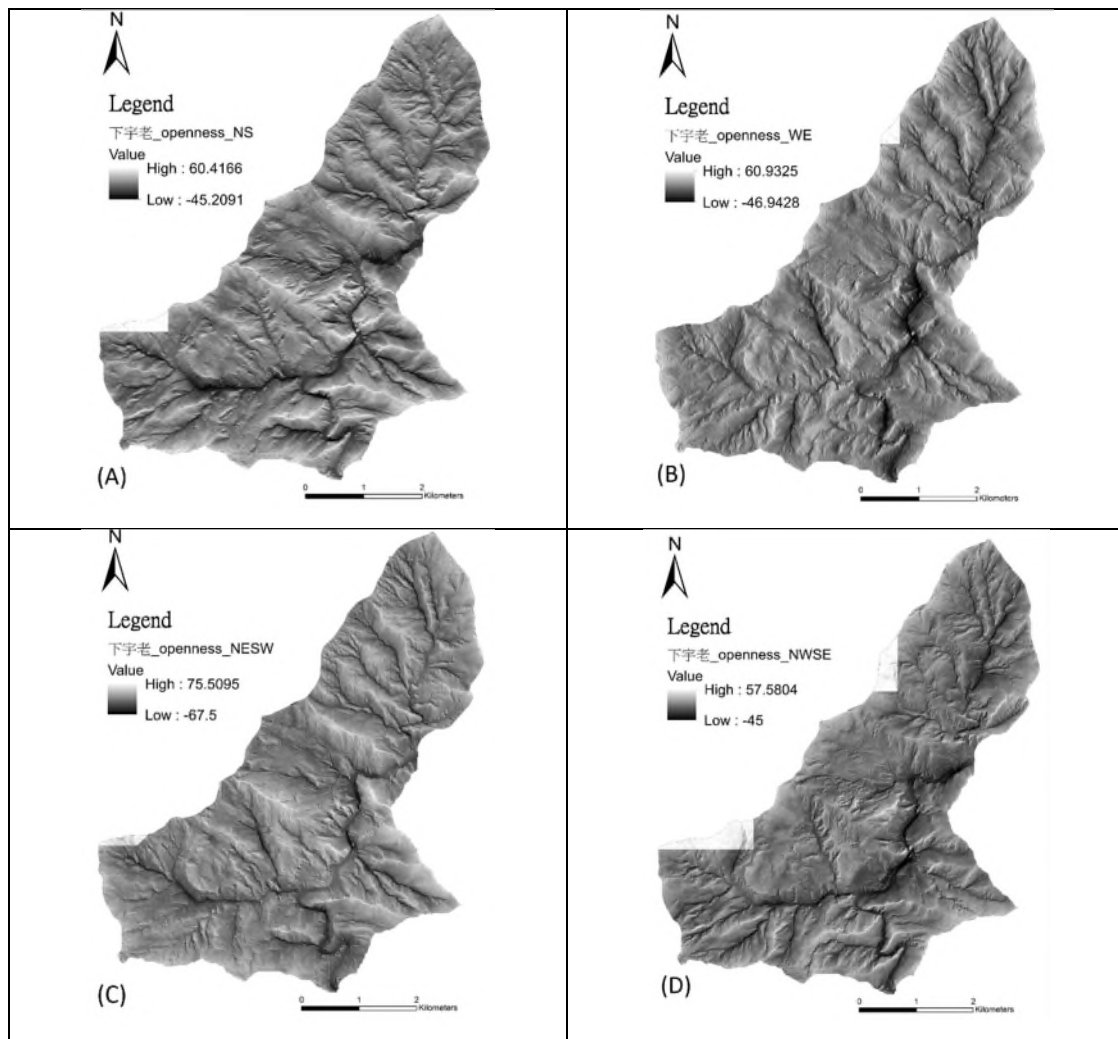


圖 5-2 下宇老之地形開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北-東南向窗口)

二、坡度結果

單方向的坡度結果如圖 5-3 所示，坡度主要用以表示單位水平距離內，高程值的變化量，以表示坡面傾斜的程度，由圖中可以發現，主流河道位置較平坦，其坡度值較小，呈現白色；而河道兩側邊坡較陡，其坡度值較大，呈現紅色。

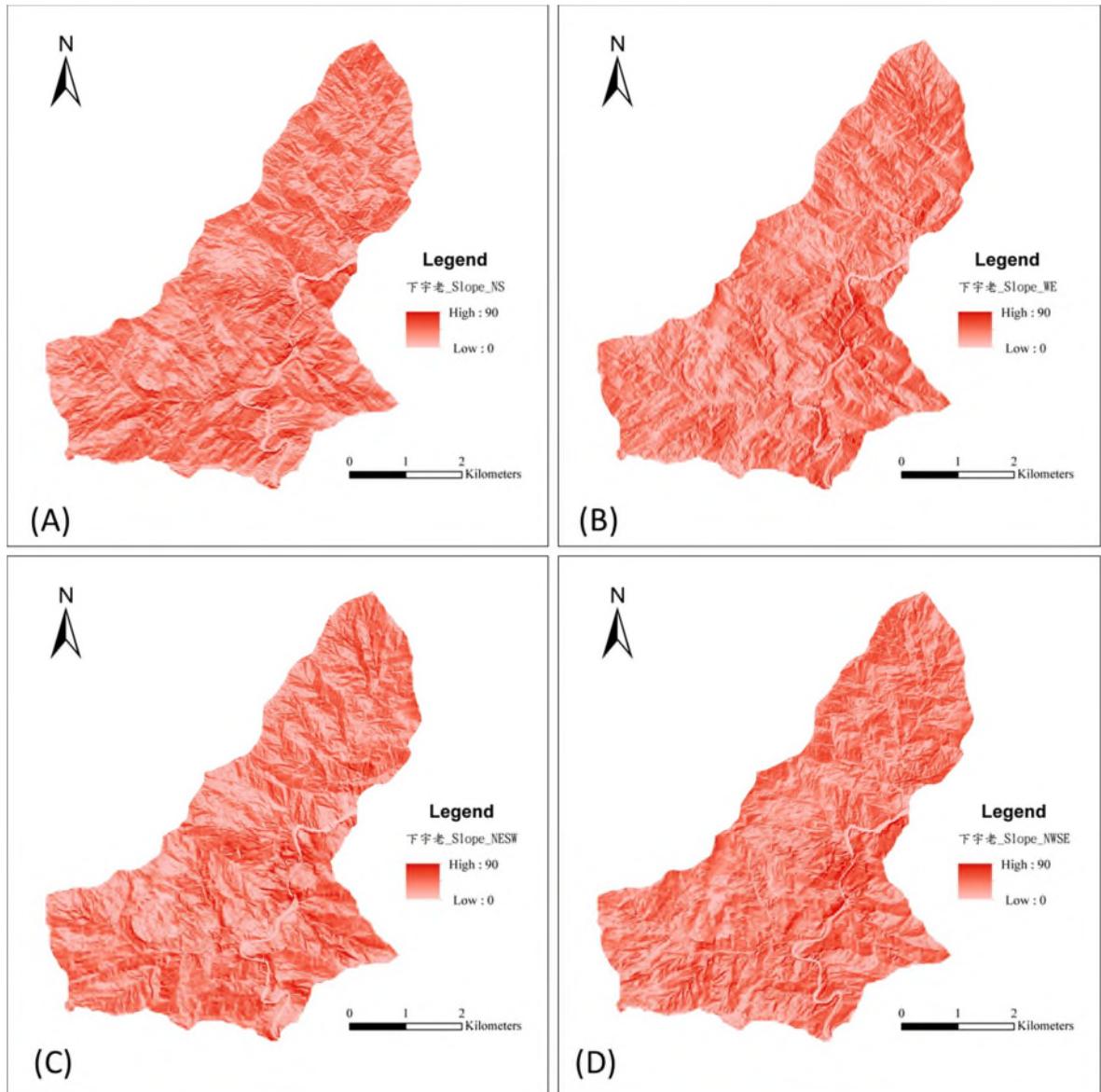


圖 5-3 下字老之坡度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北-東南向窗口)

三、地形粗糙度結果

單方向的地形粗糙度結果如圖 5-4 所示，地形粗糙度為地形的變異程度，利用標準差的方法表示地表平坦、高差變化的參數，由圖中可以發現，在平坦處及河道的位置，其地形粗糙度值較低，呈現黑色；而河道兩側的陡坡，其地形粗糙度值較大，呈現白色。

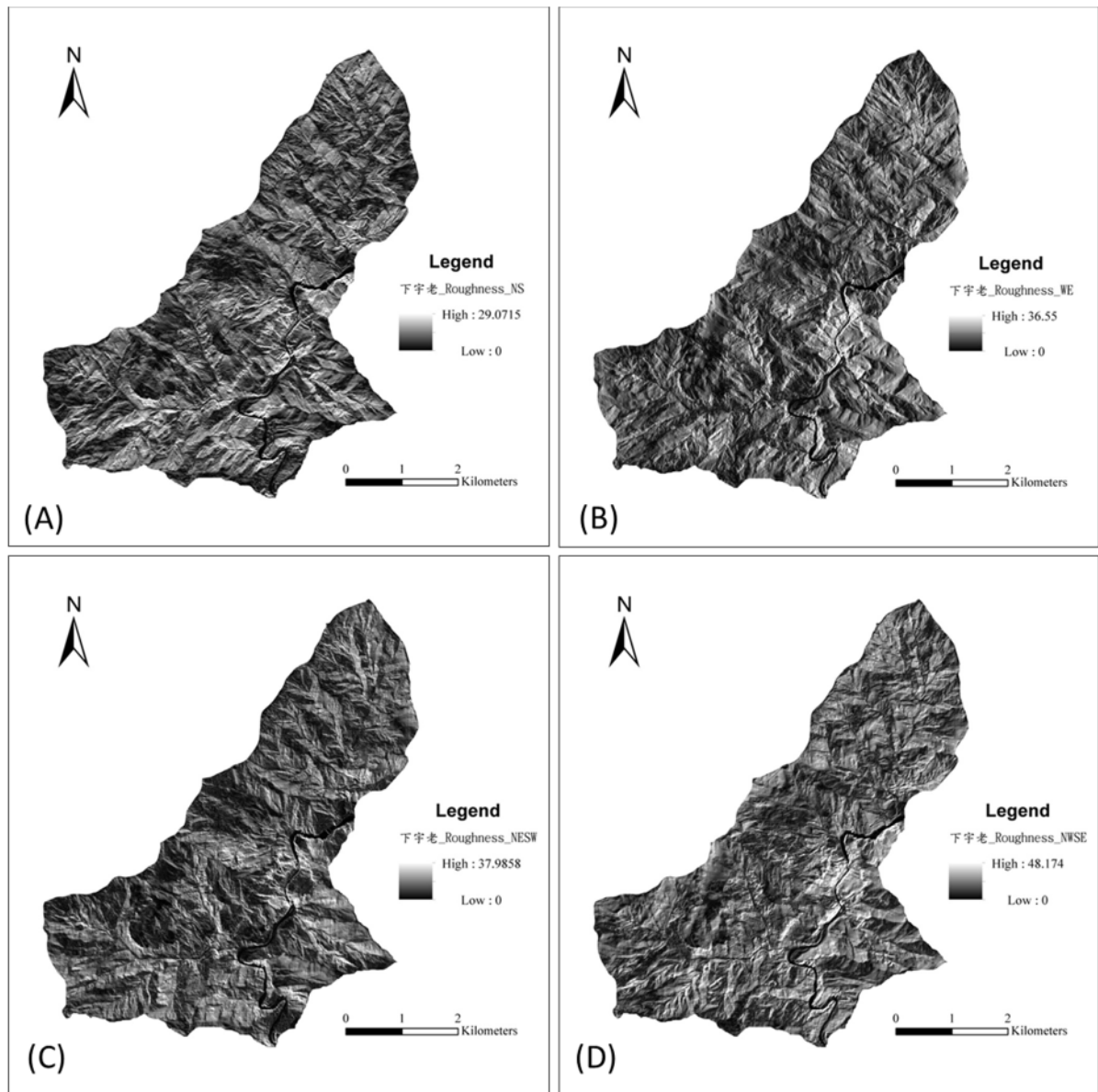


圖 5-4 下字老之地形粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北-東南向窗口)

四、坡度粗糙度

單方向的坡度粗糙度結果如圖 5-5 所示，利用標準差計算坡度變化的區域，由圖中可以發現，在主流河道的位置，其坡度標準差值較小，呈現黑色；而支流與河道兩側邊坡的坡度標準差值較大，呈現白色。

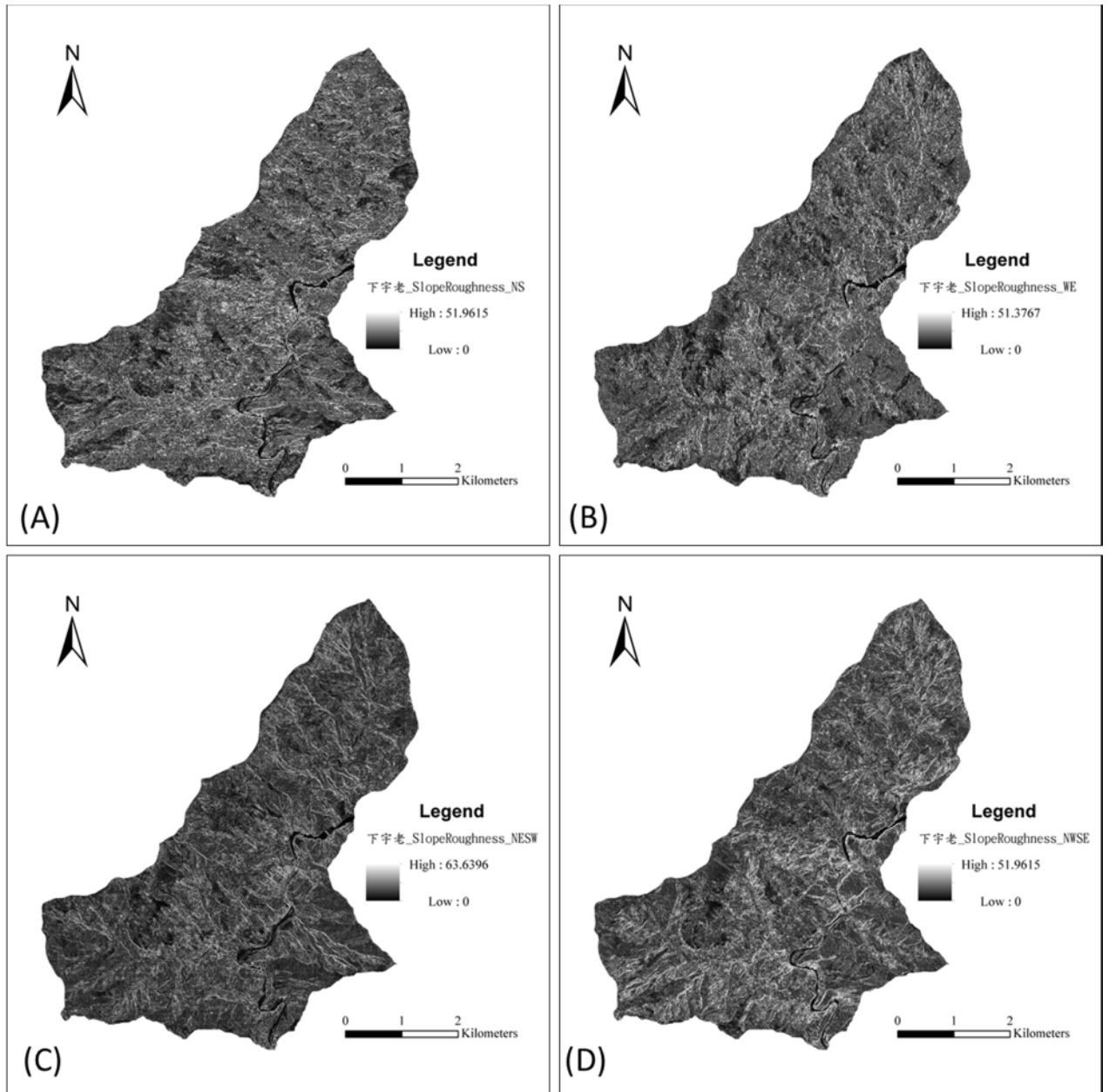


圖 5-5 下宇老之坡度粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

五、天空開闊度結果

單方向的天空開闊度結果如圖 5-6 所示，山脊線會有最大值 1 的天空開闊度值，呈現白色；河道及山谷線位置會有較小的天空開闊度值，呈現灰、黑色。另外，比較地形開闊度的結果可以發現，由於計算方法不同，天空開闊度對於河道及山谷位置的提取較地形開闊度差。

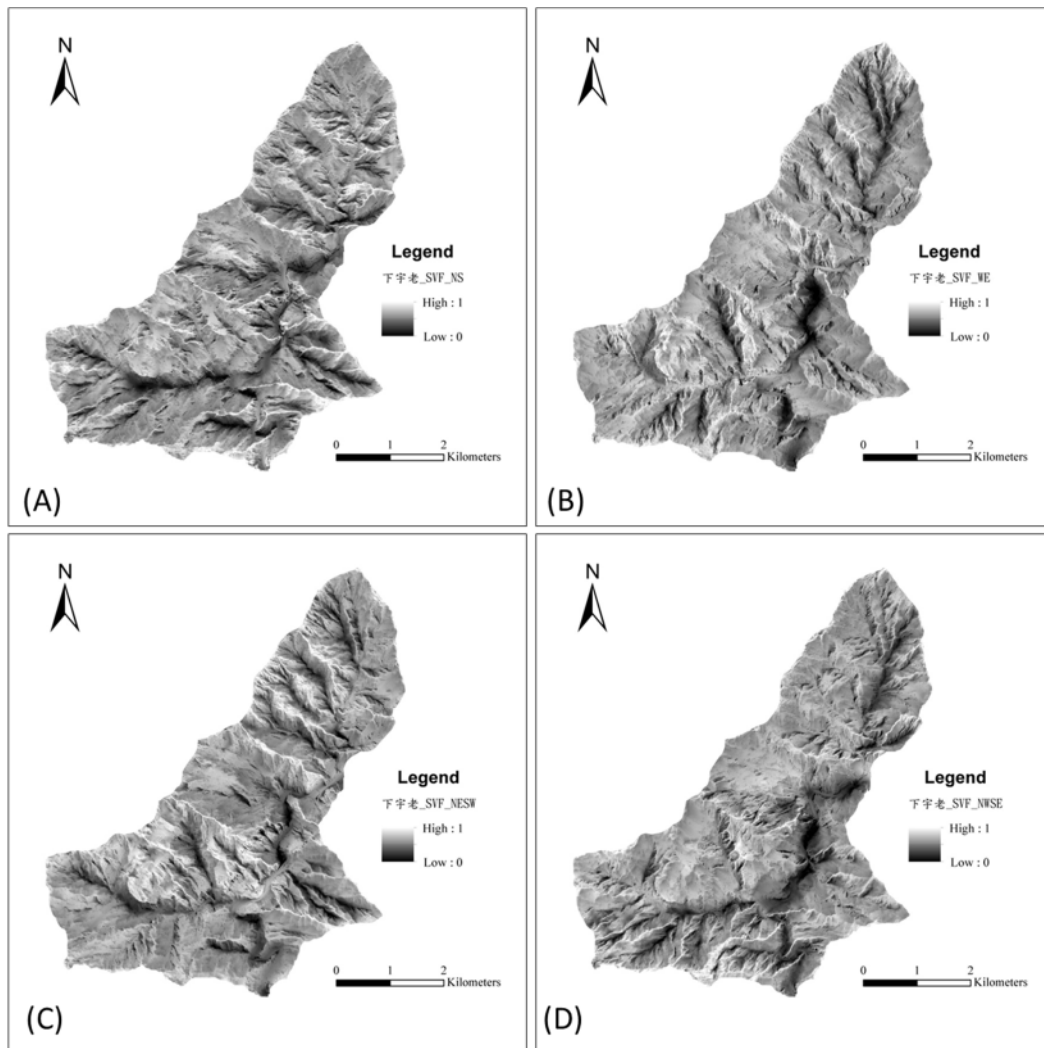


圖 5-6 下宇老之天空開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

第三節 試驗區(下宇老)提取遷急線之方法

一、依樣本結果設定門檻值

本研究首先選取兩個縱剖面(圖 5-7 之 A、B 樣本)，樣本位置選擇之原則，包含以下兩者：(1)涵蓋 B_H 、 B_M 與 B_L 三段遷急線(如圖 5-7(A))、(2)考慮遷急線會受支流的影响，以致於改變遷急線位置的特性，因此，樣本選擇在支流影响較小之區位(如圖 5-7(B))。

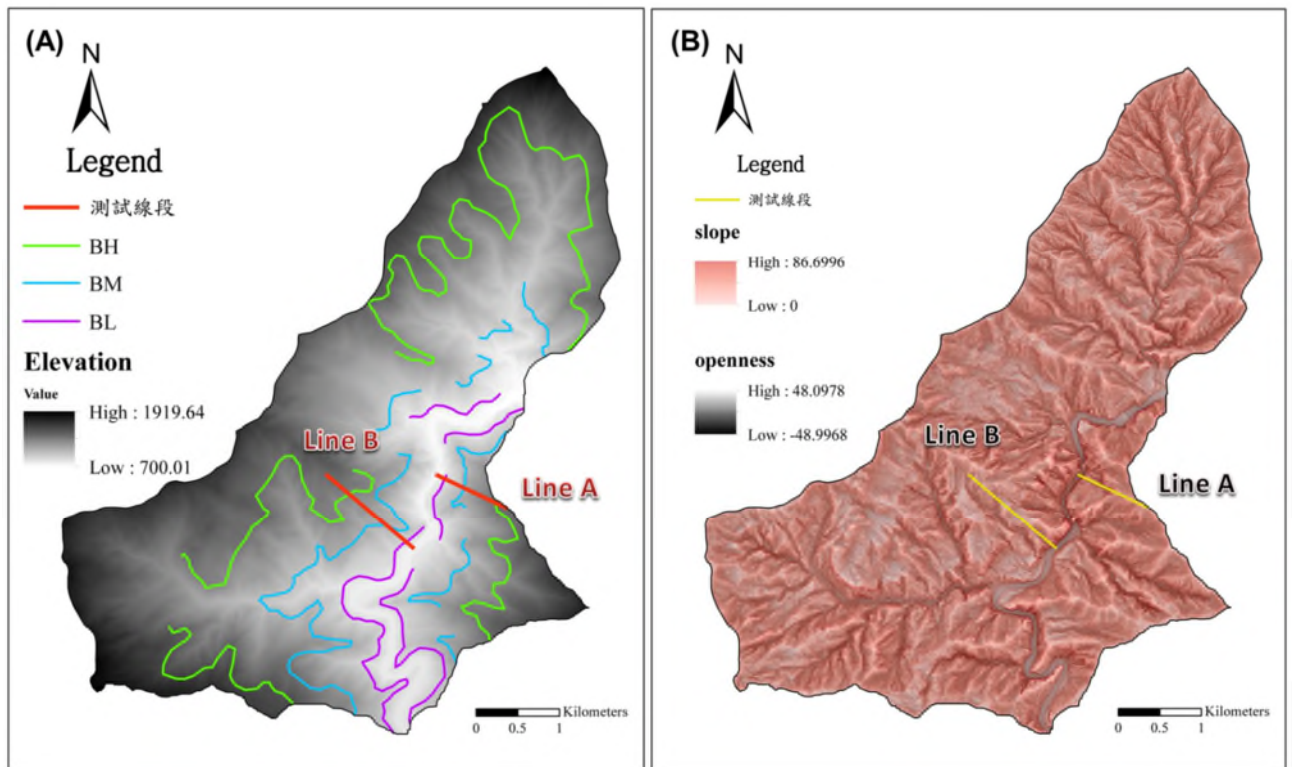


圖 5-7 樣本位置(A)高程圖與遷急線位置、(B)坡度與地形開闊度疊圖

依照樣本得到河道位置之地形開闊度值、遷急線與河道位置的高程值、 B_L 與河道之距離與遷急線下邊坡之坡度值，如表 5-1 所示，經過計算之後得到與河道高程差、 B_L 與河道之間網格數、平均坡度與平均河道地形開闊度值，如表 5-2 所示。

表 5-1 提取遷急線所需之各參數值

	position	Test lines	
		A	B
Openness (°)	river	-14.84	-11.96°
Elevation (m)	B _H	1297	1258
	B _M	996	1014
	B _L	824	887
	River	733	757
Horizontal distance (m) between B _L and river		97.31	128.36
Slope (°)	B _H	33.53	29.34
	B _M	44.59	27.73
	B _L	42.89	39.22

表 5-2 計算各參數值之結果

	position	Test lines		
		A	B	Average(LineA,LineB)
Openness (°)	river	-14.84	-11.96	-13.4
Difference of elevation (m)	B _H -River	564	501	532.5m
	B _M -River	263	257	260m
	B _L -River	91	130	110.5m
Number of grid(units) between B _L and river		20	26	23 units
Slope (°)	B _H	33.53	29.34	31.435
	B _M	44.59	27.73	36.16
	B _L	42.89	39.22	41.055

本研究依照樣本之因子分析結果，設定相關參數之門檻值，如表 5-3 所示。

表 5-3 提取遷急線之門檻值設定

	position	Setting threshold
Openness (°)	river	<-15
Cutting range	B _H	與河道高程差 450m、500m、550m、600m 以下
	B _M	與河道高程差 200m、250m、300m 以下
	B _L	與河道高程差 50m、100m、150m 以下
expansion grid (units)	B _H	30、40、50
	B _M	30、40、50
	B _L	30、40、50
Slope (°)	B _H	大於 30
	B _M	大於 35
	B _L	大於 40

首先，利用地形開闊度小於-15 度，並且聯集四個單方向的結果，做為河道位置的參考圖層，再依照 B_H、B_M 與 B_L 三段遷急線，分別設定與河道高程差之範圍、外擴網格數與交集的坡度值，其分述如下：

B_H 段遷急線在樣本中，平均與河道高程差為 532.5m，因此設定利用與河道高程差 450m、500m、550m、600m 之範圍切割河道圖層，再分別外擴 30、40、50 個網格，再與坡度大於 30 度之結果做交集分析，得到初步提取結果。

B_M 段遷急線在樣本中，平均與河道高程差為 260m，因此設定利用與河道高程差 200m、250m、300m 之範圍切割河道圖層，再分別

外擴 30、40、50 個網格，再與坡度大於 35 度之結果做交集分析，得到初步提取結果。

B_L 段遷急線在樣本中，平均與河道高程差為 110.5m，因此設定利用與河道高程差 50m、100m、150m 之範圍切割河道圖層，再分別外擴 30、40、50 個網格，再與坡度大於 40 度之結果做交集分析，得到初步提取結果。

二、遷急線提取過程

設定提取遷急線之門檻值後，首先聯集各單方向之地形開闊度小於-15 之網格，得到相近於河道之位置，如圖 5-8 所示，由圖中可以發現，遷急線的形成與河道有關，且同一階的遷急線與相近河道的距離接近定值。

第二步，利用 50 公尺為間距的等高線，劃設 B_H、B_M 與 B_L 段遷急線所設定的與河道的高程差範圍，依序將河道圖層進行裁切，並且透過外擴裁切河道的結果，能夠得到遷急線的輪廓範圍，最後再與坡度因子做交集。

以下過程為選取與河道高程差 450m、200m、50m 三個範圍、且各別外擴 50、40、30 個網格，做為示意圖(如圖 5-9)，標示方式以 B_H(450)、B_M(200)與 B_L(50)表示。

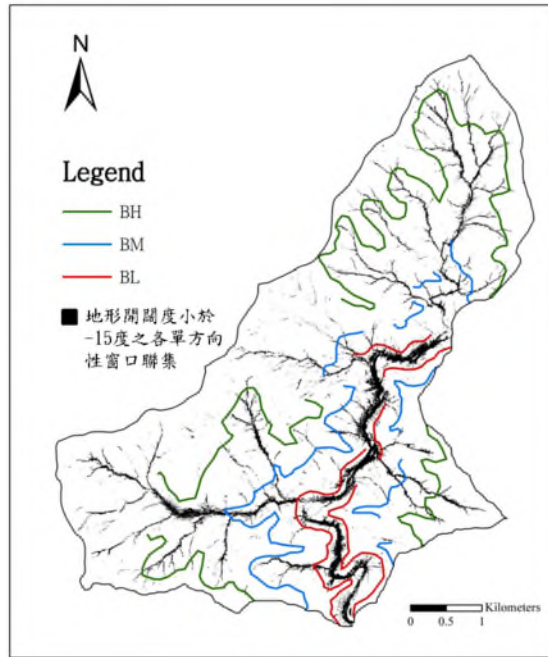


圖 5-8 各單方向地形開闊度小於-15
度之聯集結果

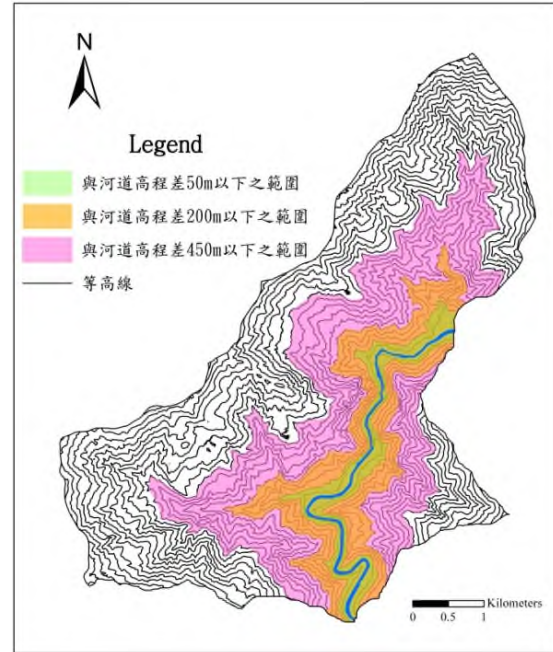


圖 5-9 分別與河道高程差 50m、200m
與 450m 以下之範圍

$B_L(50)$ 以河道高程差 50m 之範圍裁切圖 5-8 之地形開闊度結果(圖 5-10(A)中黑色網格)，並且外擴 30 個網格(圖 5-10(A)中綠色網格)，並且與坡度大於 40 度之範圍(圖 5-10(B))做交集分析，而坡度為各單方向符合門檻值之聯集結果。

由圖中可以發現，圖 5-10(A)的黑色河道線段，經過外擴 30 個網格後，其綠色輪廓範圍剛好在 B_L 段遷急線範圍上，而圖 5-10(B)結果顯示，越靠近河道的區位，其邊坡越陡峭，坡度值越大，而隨著距離河道越遠，其坡度值越小，另外，坡度值大於 40 度之門檻值除了能夠切割遷急線的上下邊坡以外，還能夠排除河道之範圍。

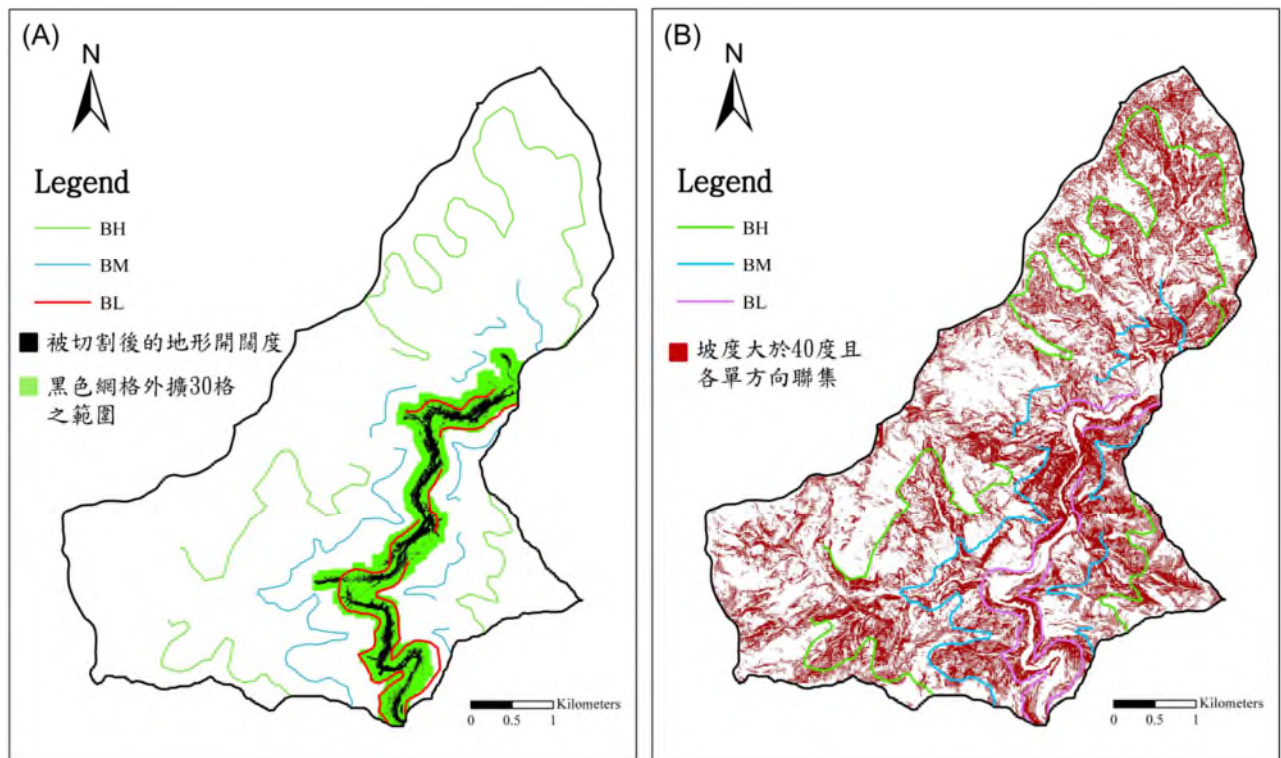


圖 5-10 BL(50)之提取過程。(A)裁切後的地形開闊度結果(黑色網格)與黑色網格外擴 30 格之範圍、(B)坡度大於 40 度之四單方向聯集

$B_M(200)$ 以河道高程差 200m 之範圍裁切圖 5-8 之地形開闊度結果(圖 5-11(A)中黑色網格),並且外擴 40 個網格(圖 5-11(A)中黃色網格),並且與坡度大於 35 度之範圍(圖 5-11(B))做交集分析,而坡度為各單方向符合門檻值之聯集結果。

由圖中可以發現,圖 5-11(A)中的黑色河道線段,經過外擴 40 個網格後,其黃色輪廓範圍接近在 B_M 段遷急線範圍上,而圖 5-11(B)結果顯示,越靠近河道的區位,其邊坡越陡峭,坡度值越大,而隨著距離河道越遠,其坡度值越小,相較於圖 5-10(B)坡度的結果,可以發現涵蓋的範圍越大,且涵蓋較多網格在 B_M 段遷急線下方的位置,另外,坡度值大於 35 度之門檻值除了能夠切割遷急線的上下邊坡以外,還能夠排除河道之範圍。

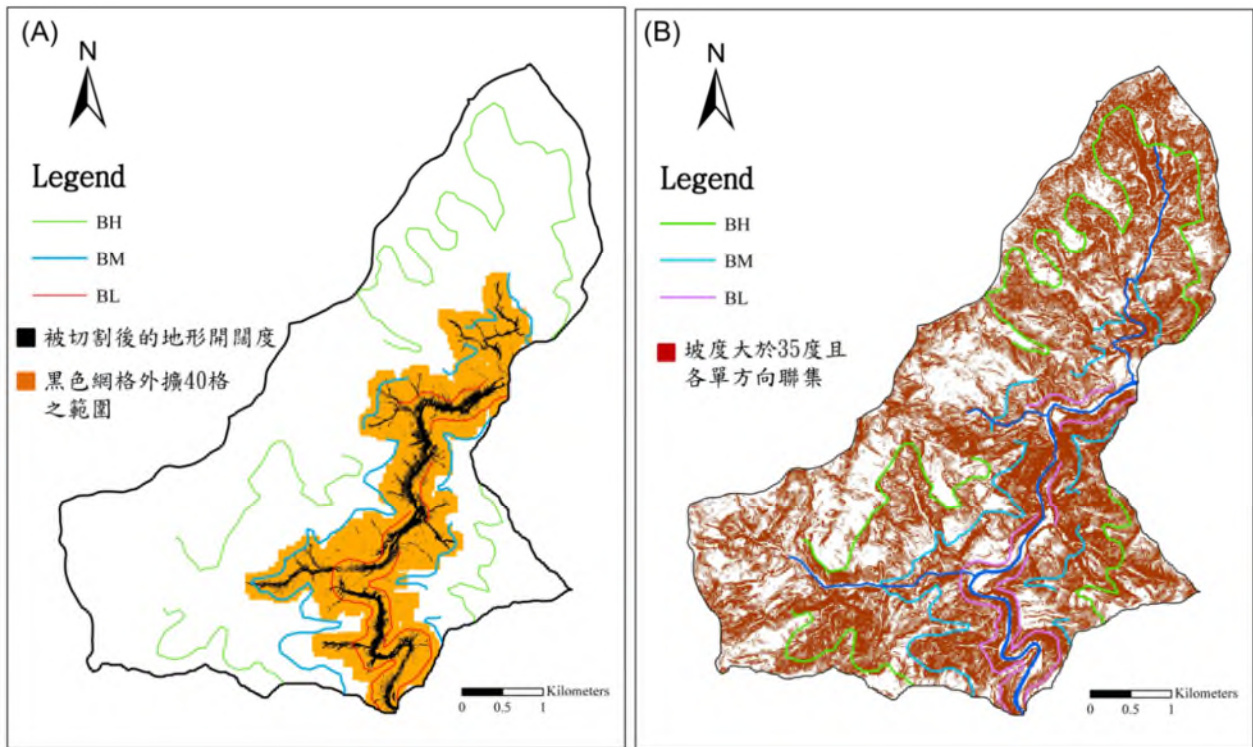


圖 5-11 BM(200)之提取過程。(A)裁切後的地形開闊度結果(黑色網格)與黑色網格外擴 40 格之範圍、(B)坡度大於 35 度之四單方向聯集

$B_H(450)$ 以河道高程差 450m 之範圍裁切圖 5-8 之地形開闊度結果圖 5-12 (A)中黑色網格)，並且外擴 50 個網格(圖 5-12(A)中粉紫色網格)，並且與坡度大於 30 度之範圍(如圖 5-12(B))做交集分析，而坡度為各單方向符合門檻值之聯集結果。

由圖中可以發現，圖 5-12(A)的黑色河道線段，經過外擴 50 個網格後，其粉色輪廓範圍與 B_H 段遷急線在受支流影響的範圍，相差甚遠，需另外校正，而圖 5-12(B)結果顯示，坡度值大於 30 度之門檻值能夠在某些區域切割遷急線的上下邊坡與河道位置。

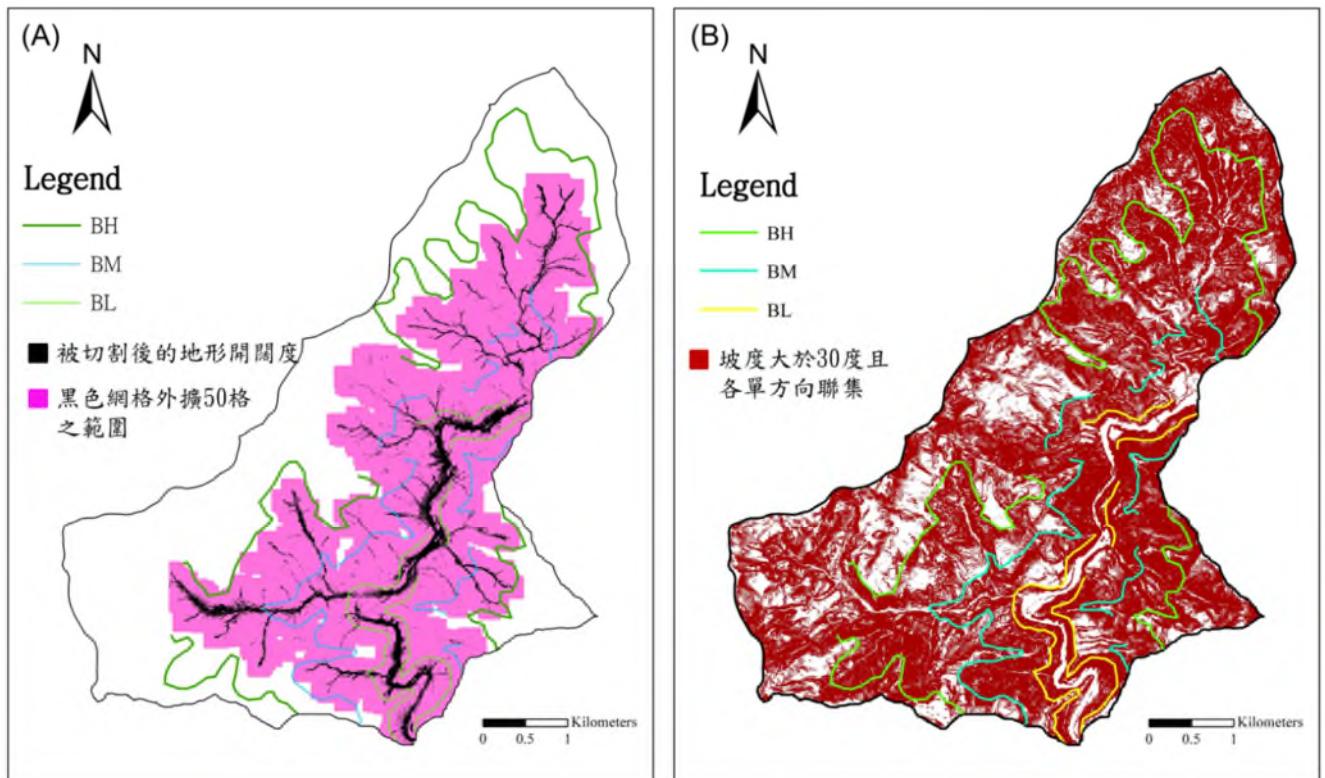


圖 5-12 BH(450)之提取過程。(A)裁切後的地形開闊度結果(黑色網格)與黑色網格外擴 50 格之範圍、(B)坡度大於 30 度之四單方向聯集

三、遷急線 BL、BM、BH 段各範圍之結果

(一) B_L 段遷急線提取結果

本研究利用 $B_L(50)$ 、 $B_L(100)$ 與 $B_L(150)$ 三個範圍分別提取 B_L 段遷急線，在提取結果中，發現外擴 30、40 與 50 個網格的結果，以外擴 30 格的結果最接近河道到 B_L 段遷急線的距離。因此，利用 $B_L(50)$ 、 $B_L(100)$ 與 $B_L(150)$ 的結果皆以外擴 30 格的呈現，如圖 5-13~圖 5-15 所示。

由圖中可以發現 $B_L(50)$ 的結果最靠近 B_L 段遷急線，而隨著與河道的高程差值越大，提取結果受支流影響的程度也越多(如圖 5-15 紅框處)。

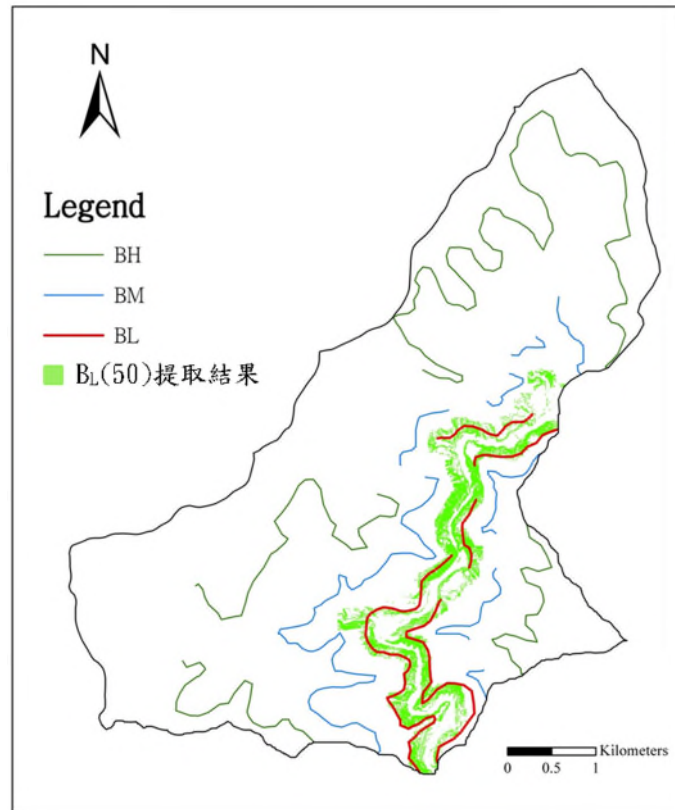


圖 5-13 BL(50)之提取結果

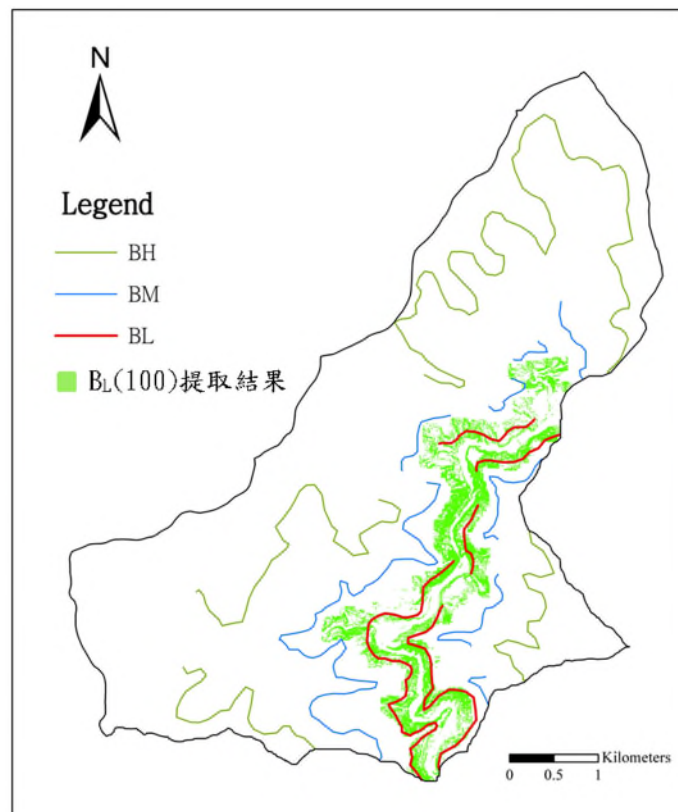


圖 5-14 BL(100)之提取結果

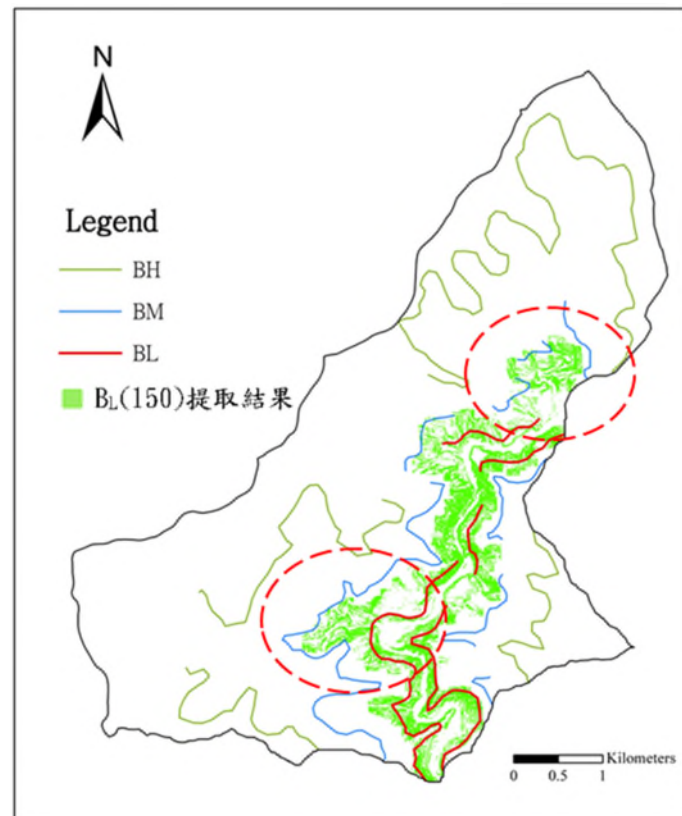


圖 5-15 $B_L(150)$ 之提取結果

(二) B_M 段遷急線提取結果

本研究利用 $B_M(200)$ 、 $B_M(250)$ 與 $B_M(300)$ 三個範圍分別提取 B_M 段遷急線，在外擴 30、40、50 個網格的提取結果中，發現當支流離主河道越遠，其河道寬度越小，以致於支流與 B_M 段遷急線的外擴網格數較 B_L 段遷急線大，而外擴 40 格的結果最接近切割河道與 B_M 段遷急線的距離。因此， $B_M(200)$ 、 $B_M(250)$ 與 $B_M(300)$ 的結果皆以外擴 40 格的呈現，如圖 5-16~圖 5-18 所示。

在三段提取 B_M 段遷急線的結果中，可以發現 $B_M(200)$ 的結果最靠近真實區位，而隨著與河道的高程差值越大，提取結果往遷急線上方移動，且受支流影響的位置結果較佳，但 $B_M(300)$ 的結果，明顯偏移真實遷急線的區位。

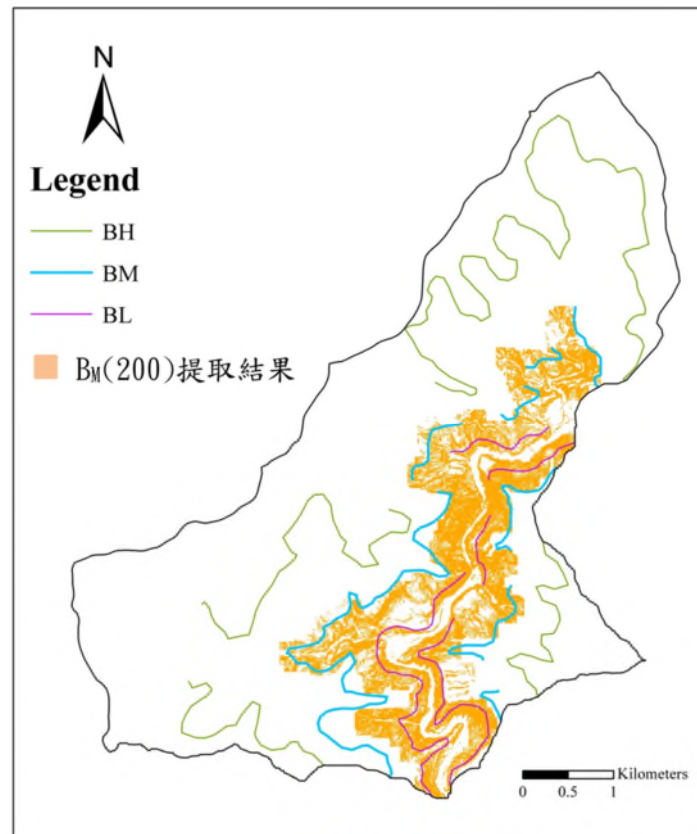


圖 5-16 BM(200)之提取結果

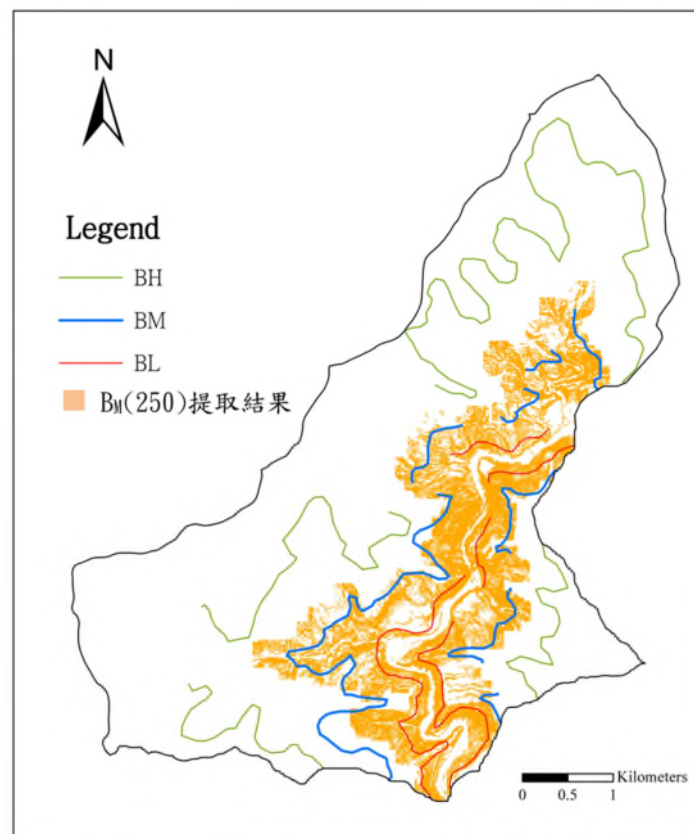


圖 5-17 BM(250)之提取結果

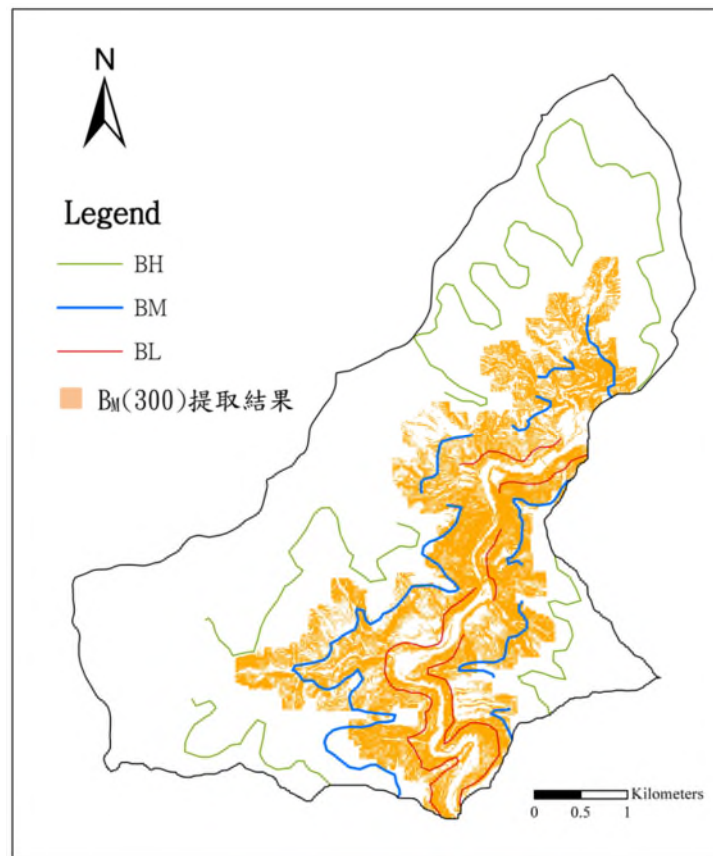


圖 5-18 BM(300)之提取結果

(三) B_H 段遷急線提取結果

本研究利用 $B_H(450)$ 、 $B_H(500)$ 、 $B_H(550)$ 與 $B_H(600)$ 四個範圍分別提取 B_H 段遷急線，在外擴 30、40、50 個網格的提取結果中，發現支流離主河道越遠，河道寬度越小，以致於支流與 B_H 段遷急線的外擴網格數較 B_L 、 B_M 段大，而外擴 50 格的結果最接近支流與 B_H 段遷急線的距離。因此， $B_H(450)$ 、 $B_H(500)$ 、 $B_H(550)$ 與 $B_H(600)$ 的結果皆以外擴 50 格的呈現，如圖 5-19~圖 5-22 所示。

由結果可以發現， $B_H(450)$ 與 $B_H(500)$ 的結果在無支流影響或者是支流長度較短的遷急線位置，其提取結果較佳，但在受支流影響的遷急線區位，其提取結果與真實的遷急線位置差異較大；

而 $B_H(550)$ 與 $B_H(600)$ 的結果剛好與前者相反，在受支流影響的遷急線位置，其提取結果較佳，但在無支流影響或者是支流長度較短的遷急線位置，其提取結果反而與真實的遷急線位置差異更大。

再者，遷急線受支流影響之結果與前人研究的發現相符，因此，本研究針對 B_H 段遷急線某一切割範圍，加入支流修正，得到修正後的與河道高程差範圍。

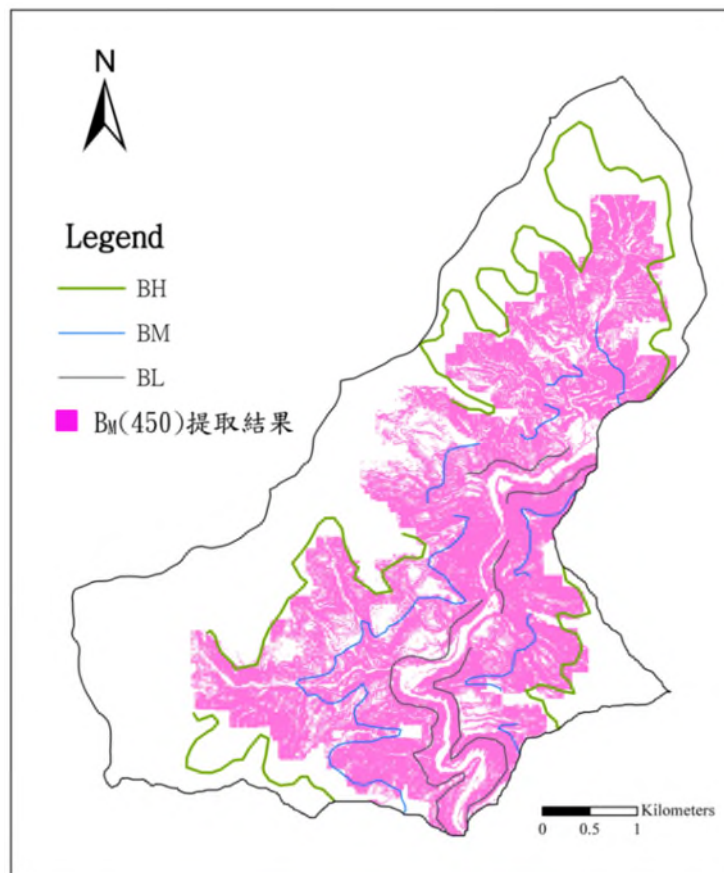


圖 5-19 BH(450)之提取結果

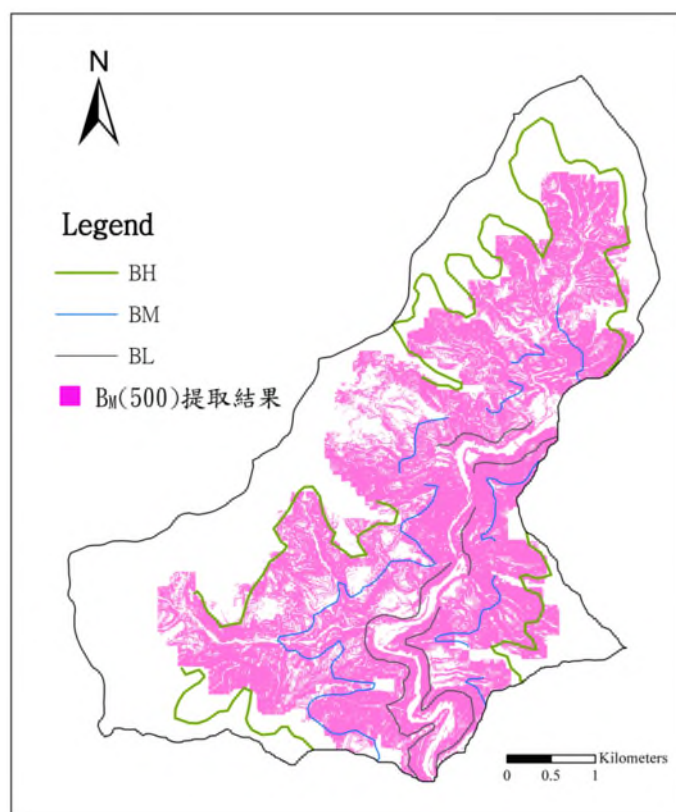


圖 5-20 BH(500)之提取結果

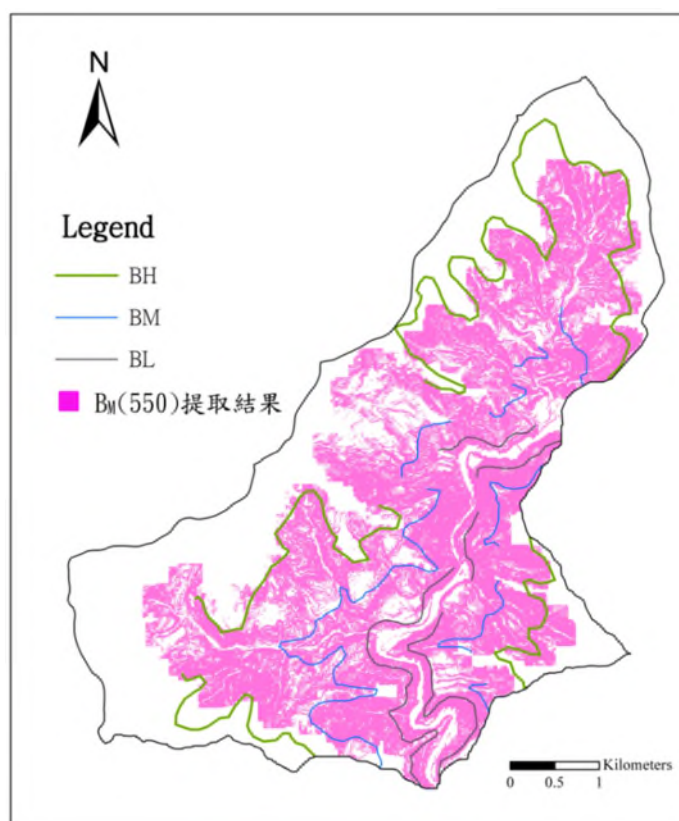


圖 5-21 BH(550)之提取結果

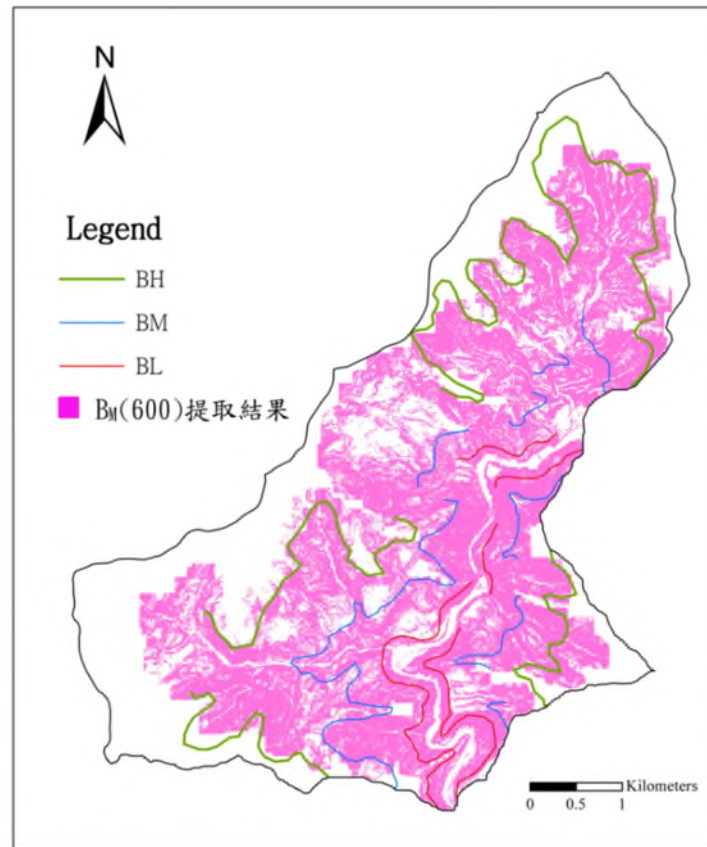


圖 5-22 BH(600)之提取結果

第四節 下宇老試驗區遷急線提取最終結果

為了將提取結果更接近真實遷急線的線段，本研究將依照支流的影响，修正提取方式。此外，本研究目前提取結果皆為一個面，為了能夠與真實遷急線進行比較，本研究將 B_L 、 B_M 、 B_H 的提取結果，各別加以修正得到最終線段結果，並且計算混淆矩陣，藉此選取最佳的提取結果。

(一)加入支流修正

在同一階遷急線中，位於支流上的遷急點，相較於其他不受支流影响的遷急線位置，有往上游偏移的情形(Gallen et al., 2013；Loget et al., 2009；Tsou et al., 2014)。本研究結果也顯示，支流大

幅影響遷急線的提取結果，而其中長度越長的支流影響會越大，因此，本研究將選定受支流影響最嚴重之 B_H 段遷急線做修正。

首先選定 $B_H(450)$ 與河道高程差範圍做修正，而選擇 $B_H(450)$ 的原因在於該結果在支流影響較小之區域有最佳的提取結果；反之，在支流影響較大之區域，其提取結果較差。而與河道高程差範圍之修正量是根據 $B_H(450)$ 之提取結果與真實遷急線線段的距離，且修正位置主要是針對兩條主要支流，其中一條修正量為 50 公尺，其支流長度在 3000-4000 公尺；另一條支流則是修正量為 150 公尺，其支流長度在 4000-5000 公尺，如表 5-4 所示。

表 5-4 與河道高程差範圍之修正

修正量	支流長度
+50	3,000-4,000
+150	4,000-5,000

$B_H(450)$ 與河道高程差之範圍，在修正前後之對照圖如圖 5-23 所示，圖中綠色線段為與河道高程差 450m 之範圍，藍色線段則是修正後的結果，將修正後的範圍再重複一次相同之提取方式，其提取結果如圖 5-24 所示。

由圖 5-24 之結果可以發現，在加入支流的修正後，其提取結果更加接近真實的遷急線位置，但在靠近子集水區邊界的位置，提取結果仍與實際遷急線位置有所誤差。

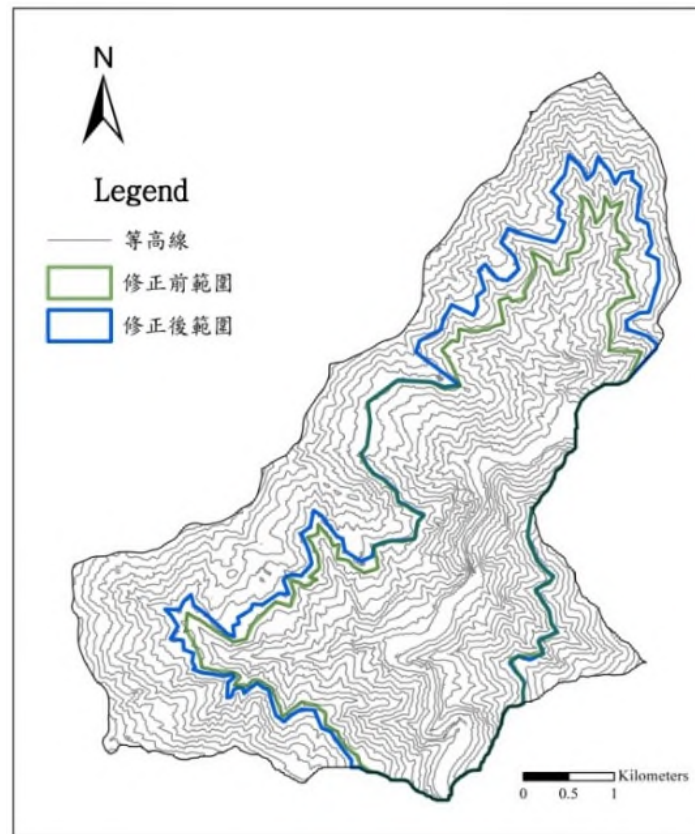


圖 5-23 BH(450)支流修正範圍前後對照

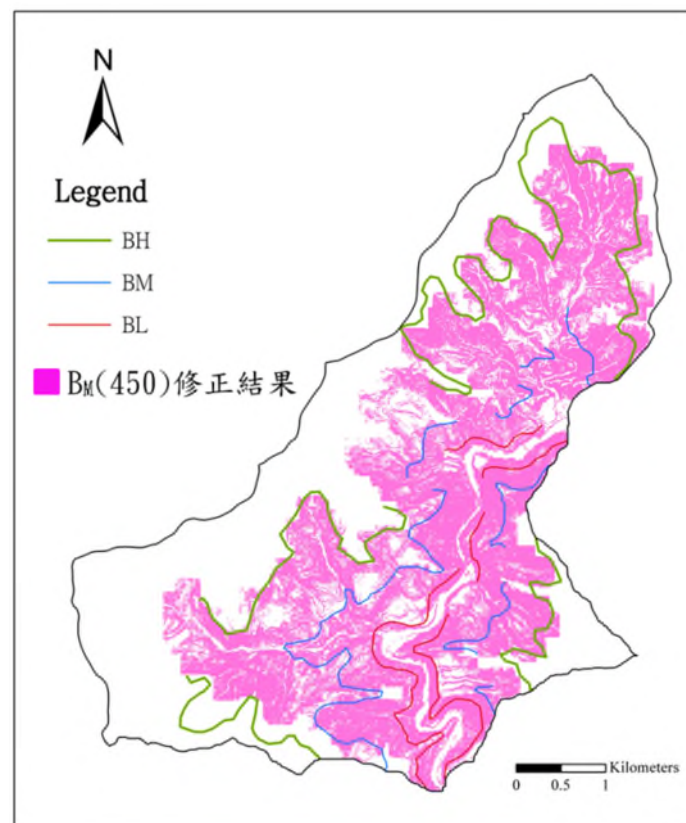


圖 5-24 BH(450)支流修正後之提取結果

(二)B_L段最佳提取結果

混淆矩陣的計算方式，以 B_L段遷急線之下邊坡 20m 為正確的提取範圍，其正確範圍的面積約為 22.15 公頃、涵蓋 8,861 個網格，佔下宇老子集水區面積的 0.86%。

B_L(50)、B_L(100)與 B_L(150)段遷急線之提取結果即為線段圖形，因此不需加以修正，分別計算三組之混淆矩陣結果，如表 5-5~表 5-7 所示。B_L(50)、B_L(100)與 B_L(150)的提取結果中，可以發現隨著與河道的高程差值越大，TPR 值會越高，在受支流影響的位置，其結果較好，但同時 TNR 值也會降低，表示雜點較多。綜合評分以準確率(Accuracy Rate, ACC)評判，其準確率分別為 72.15%、73.19%與 73.56%，以 B_L(150)為最佳結果(圖 5-25)。此外，三者之切割範圍為相同的主流河道，因此在外擴數也相同的情況下，其結果差異性並不大。

表 5-5 下宇老試驗區 B_L(50)段遷急線之混淆矩陣結果

TP	4281	FP	41023	ACC	72.15%
FN	4580	TN	983384		
TPR	48.31%	FPR	4.0%		
FNR	51.69%	TNR	96.00%		

表 5-6 下宇老試驗區 B_L(100)段遷急線之混淆矩陣結果

TP	4583	FP	54703	ACC	73.19%
FN	4278	TN	969704		
TPR	51.72%	FPR	5.34%		
FNR	48.28%	TNR	94.66%		

表 5-7 下宇老試驗區 BL(150)段遷急線之混淆矩陣結果

TP	4796	FP	71831	ACC	73.56%
FN	4065	TN	952576		
TPR	54.12%	FPR	7.01%		
FNR	45.88%	TNR	92.99%		

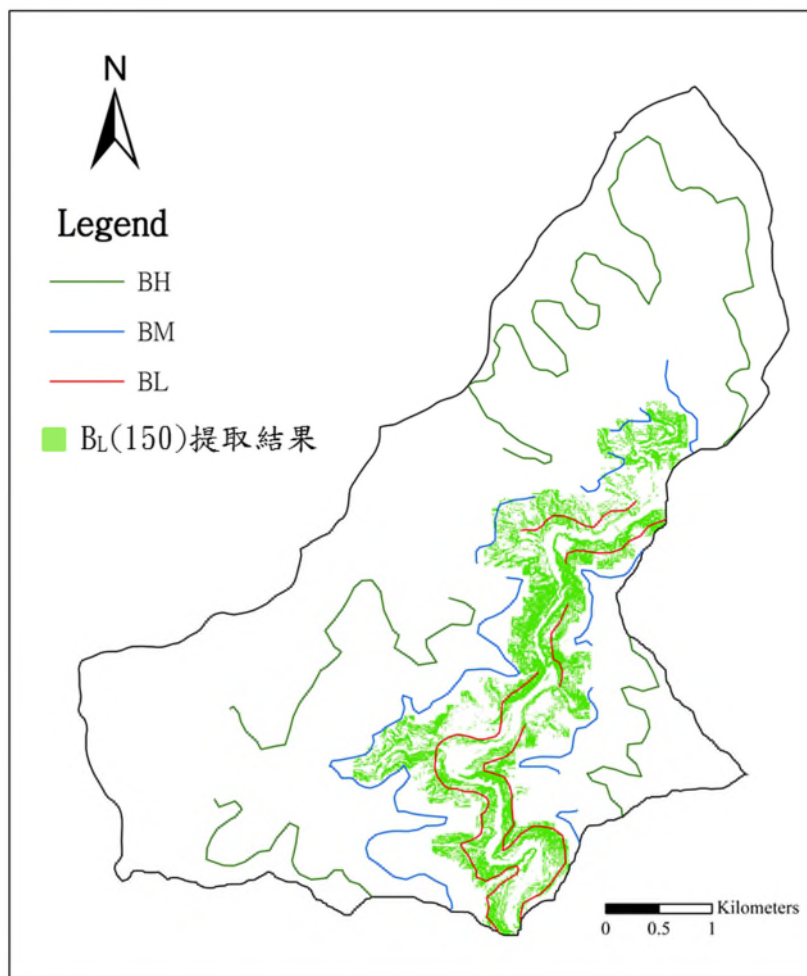


圖 5-25 BL 段遷急線最終提取結果

(三) B_M 段最佳提取結果

為了將 B_M 段的提取結果跟真實的遷急線比較，本研究將 $B_M(200)$ 、 $B_M(250)$ 、 $B_M(300)$ 之提取結果減去與高程差相差 100m 之結果，以 $B_M(200)$ 為例，即利用與河道高程差 100m 之範圍，再利用相同的方式(切割河道、外擴 40 格網格且交集坡度 35 度)，再將 $B_M(200)$ 的提取結果減去 $B_M(100)$ 的結果，得到最終 B_M 段的線段結果。

得到 $B_M(200)$ 、 $B_M(250)$ 、 $B_M(300)$ 的線段結果後，分別計算其混淆矩陣與準確率，而混淆矩陣的計算方式，以 B_M 段遷急線之下邊坡 20m 當做正確的提取範圍，其正確範圍的面積約為 31.05 公頃、涵蓋 12,420 個網格，且佔下宇老子集水區面積的 1.20%。

$B_M(200)$ 、 $B_M(250)$ 、 $B_M(300)$ 混淆矩陣結果如表 5-8~表 5-10 所示，準確率分別為 62.24%、66.16%與 55.74%，以 $B_M(250)$ 的結果最佳(如圖 5-26 所示)， $B_M(300)$ 的結果最差。其顯示在受支流影響的區位， $B_M(250)$ 的結果之 TNR 值較高；在不受支流影響的區位， $B_M(300)$ 的結果較差，綜合評估以 $B_M(250)$ 之準確率最佳。

在圖 5-26 之結果中，發現少數與真實遷急線位置不符的提取結果。在子集水區的邊界處，其真實的遷急線位置相較於提取結果，有往上游偏移的情形，推論原因可能為該處的支流影響較大，亦或者該段遷急線在子集水區的邊界，會因為山脊而增加與河道的高程差。

表 5-8 下宇老試驗區 BM(200)段遷急線混淆矩陣結果

TP	3583	FP	44519	ACC	62.24%
FN	8837	TN	976329		
TPR	28.85%	FPR	4.36%		
FNR	71.15%	TNR	95.64%		

表 5-9 下宇老試驗區 BM(250)段遷急線混淆矩陣結果

TP	4738	FP	59553	ACC	66.16%
FN	7682	TN	961295		
TPR	38.15%	FPR	5.83%		
FNR	61.85%	TNR	94.17%		

表 5-10 下宇老試驗區 BM(300)段遷急線混淆矩陣結果

TP	2090	FP	54506	ACC	55.74%
FN	10330	TN	966342		
TPR	16.83%	FPR	5.34%		
FNR	83.17%	TNR	94.66%		

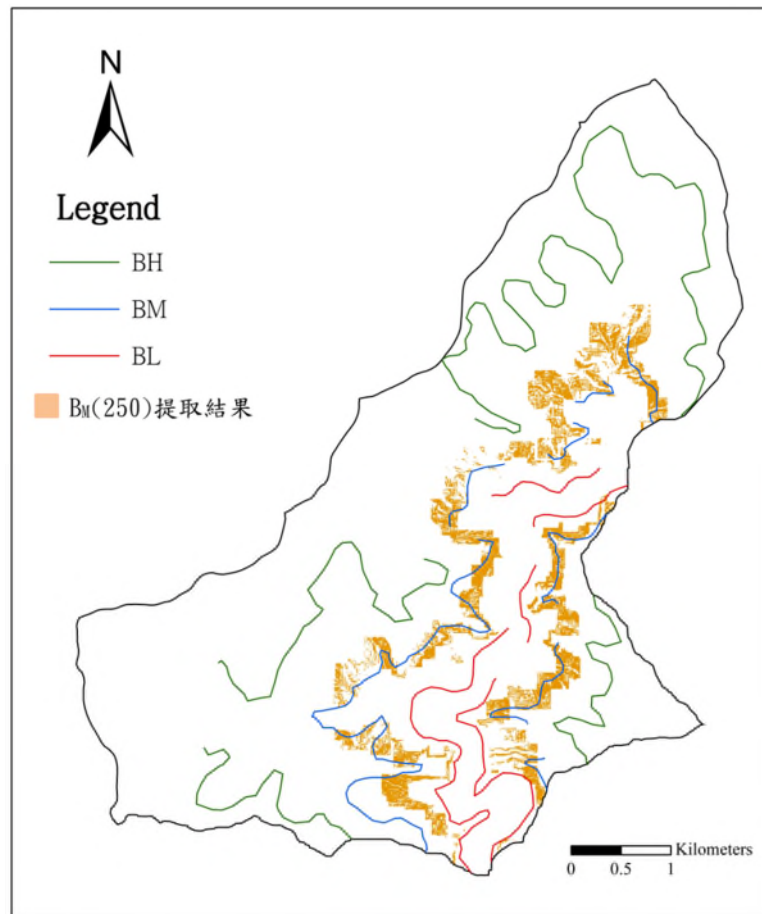


圖 5-26 BM 段遷急線之最佳提取結果

(四) B_H 段最佳提取結果

B_H 段將 $B_H(450)$ 、 $B_H(500)$ 、 $B_H(550)$ 、 $B_H(600)$ 與 $B_H(450+$ 支流修正) 之結果，利用與提取 B_M 線段相同的方式，各別減去與高程差相差 100m 之結果且計算混淆矩陣，上述的方式能夠提取結果的頂部，以一連續線段的方式與真實遷急線比對。

混淆矩陣的計算方式，以 B_H 段遷急線之下邊坡 20m 為正確的提取範圍，其正確範圍的面積約為 48.30 公頃、涵蓋 19,321 個網格，佔下宇老子集水區面積的 1.87%。

$B_H(450)$ 、 $B_H(500)$ 、 $B_H(550)$ 、 $B_H(600)$ 與 $B_H(450+$ 支流修正) 混淆矩陣之結果如表 5-11~表 5-15 所示，準確率分別為 55.21%、58.06%、57.73%、57.63%、60.28%，以 $B_H(450+$ 支流修正) 為最

佳(圖 5-27)， $B_H(450)$ 為最差。在 $B_H(450)$ 、 $B_H(500)$ 、 $B_H(550)$ 與 $B_H(600)$ 四組結果中，可以發現，隨著範圍越大，受支流影響的區位，其提取結果較佳，但 $B_H(450+支流修正)$ 反而修正了 $B_H(600)$ 在未受支流影響區位的提取結果，因此提取結果較佳。

本試驗區 B_H 線段的提取結果在子集水區的邊界處，與 B_M 段遷急線出現相同的情形，其遷急線位置也有往上游偏移的情況，推論原因可能為該處的支流影響較大，亦或者該段遷急線在子集水區的邊界，會因為山脊而增加與河道的高程差值。

表 5-11 下宇老試驗區 $B_H(450)$ 段遷急線混淆矩陣結果

TP	3416	FP	73627	ACC	55.21%
FN	15905	TN	940320		
TPR	17.68%	FPR	7.26%		
FNR	82.32%	TNR	92.74%		

表 5-12 下宇老試驗區 $B_H(500)$ 段遷急線混淆矩陣結果

TP	4689	FP	82525	ACC	58.06%
FN	14632	TN	931422		
TPR	24.27%	FPR	8.14%		
FNR	75.73%	TNR	91.86%		

表 5-13 下宇老試驗區 $B_H(550)$ 段遷急線混淆矩陣結果

TP	4339	FP	70864	ACC	57.73%
FN	14982	TN	943083		
TPR	22.46%	FPR	6.99%		
FNR	77.54%	TNR	93.01%		

表 5-14 下宇老試驗區 BH(600)段遷急線混淆矩陣結果

TP	4313	FP	71643	ACC	57.63%
FN	15008	TN	942304		
TPR	22.32%	FPR	7.07%		
FNR	77.68%	TNR	92.93%		

表 5-15 下宇老試驗區 BH(450+支流修正)段遷急線混淆矩陣結果

TP	5166	FP	62684	ACC	60.28%
FN	14155	TN	951263		
TPR	26.74%	FPR	6.18%		
FNR	73.26%	TNR	93.82%		

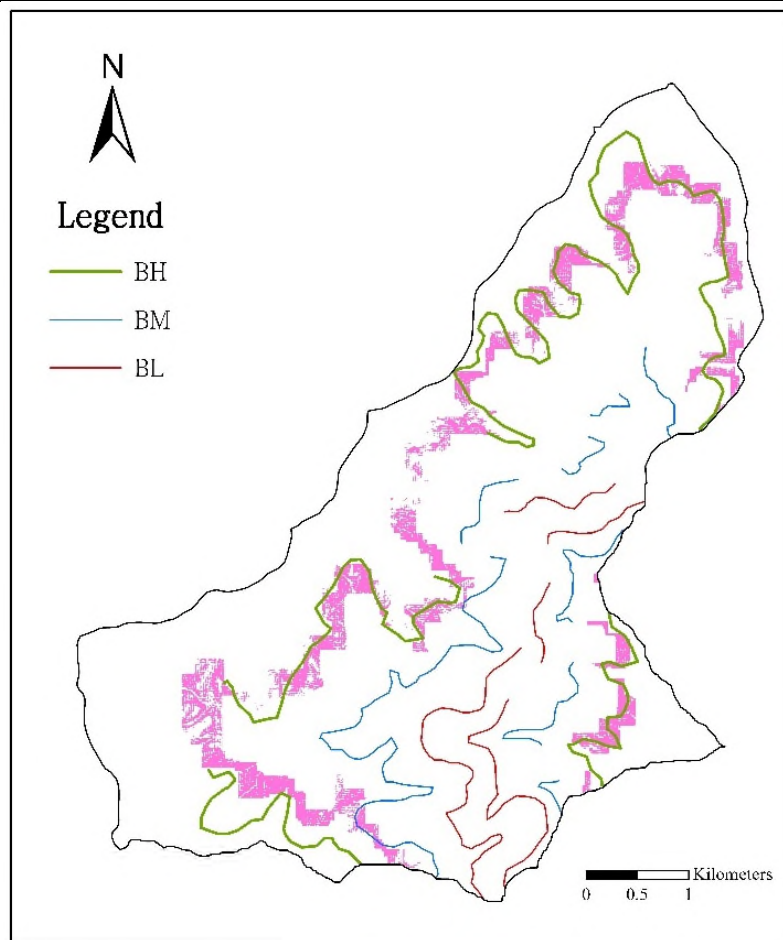


圖 5-27 B_H段遷急線之最佳提取結果

第五節 遷急線提取方法的比較

本節主要目的在比較與討論不同的遷急線提取方法，因此，為了簡化內容，以多方向性分析結果之圖表進行說明。首先記錄在樣本 B 線段上，各地形因子分別在 B_H 、 B_M 與 B_L 段遷急線，上中下位置之值域，如表 5-16~表 5-20 所示。

表 5-16 為地形開闊度因子在 B_H 、 B_M 與 B_L 段遷急線，上中下位置之值域，由表中可以發現地形開闊度在三段遷急線上中下位置，值域在 1~8 度之間，無明顯之變化。

表 5-17 為坡度因子在 B_H 、 B_M 與 B_L 段遷急線，上中下位置之值域，由表中可以發現坡度因子在三段遷急線中，在遷急線下方的坡度值明顯大於遷急線上方的坡度值，且三段遷急線的坡度值，以 B_L 段遷急線之平均坡度值最大， B_H 段平均坡度值最小。

表 5-18 為地形粗糙度在 B_H 、 B_M 與 B_L 段遷急線，上中下位置之值域，由表中可以發現地形粗糙度在 B_H 段的上中下值域沒有明顯的差異，但在 B_M 與 B_L 段遷急線中，遷急線下方之地形粗糙度值明顯大於遷急線位置與遷急線上方。

表 5-19 為坡度粗糙度在 B_H 、 B_M 與 B_L 段遷急線，上中下位置之值域，由表中可以發現，在三段遷急線中，遷急線下方之坡度粗糙度值皆大於遷急線位置與遷急線上方。

表 5-20 為天空開闊度在 B_H 、 B_M 與 B_L 段遷急線，上中下位置之值域，由表中可以發現，天空開闊度在三段遷急線的上中下方皆無明顯差異，值域在 0.6~0.85 中。

表 5-16 地形開闊度在遷急線上中下方之值域變化

地形因子	遷急線	值(度)
openness	B_H	(上)1.97
		(中)1.92
		(下)3.20
	B_M	(上)1.52
		(中)5.152
		(下)7.63
	B_L	(上)7.51
		(中)2.39
		(下)2.59

表 5-17 坡度在遷急線上中下方之值域變化

地形因子	遷急線	值(度)
slope	B_H	(上)26.06
		(中)31.71
		(下)37.37
	B_M	(上)20.59
		(中)28.77
		(下)29.92
	B_L	(上)54.69
		(中)48.17
		(下)51.30

表 5-18 地形粗糙度在遷急線上中下方之值域變化

地形因子	遷急線	值(公尺)
Roughness	B_H	(上)6.10
		(中)6.82
		(下)5.17
	B_M	(上)3.29
		(中)4.60
		(下)8.29
	B_L	(上)8.50
		(中)9.83
		(下)19.31

表 5-19 坡度粗糙度在遷急線上中下方之值域變化

地形因子	遷急線	值(度)
Slope Roughness	B _H	(上)3.84
		(中)4.59
		(下)8.88
	B _M	(上)4.72
		(中)5.09
		(下)6.44
	B _L	(上)7.72
		(中)6.75
		(下)8.00

表 5-20 天空開闊度在遷急線上中下方之值域變化

地形因子	遷急線	值
Sky View Factor	B _H	(上)0.761
		(中)0.738
		(下)0.771
	B _M	(上)0.811
		(中)0.848
		(下)0.686
	B _L	(上)0.709
		(中)0.717
		(下)0.642

綜上，本研究將利用在三段遷急線中，有明顯變化之坡度、地形粗糙度與坡度粗糙度因子，設立因子門檻值並且做交集分析，比較交集的結果與遷急線之關聯性。此外，本研究並根據 Tsou et al. (2017)，結合天空開闊度以及坡度之結果，比較其與遷急線之關聯性。

一、坡度結合坡度粗糙度之結果

首先以坡度結合坡度粗糙度因子，依照其在遷急線下方之值域，設定地形因子之門檻值，再將兩因子符合門檻值之結果做交集分析。

圖 5-28 為坡度>35 度與坡度粗糙度>7 度之結果，由圖中可以發現，同時符合坡度與坡度粗糙度門檻值之區域，為河道往上游侵蝕的

範圍，然而，河道會不斷地往上游侵蝕，當河道侵蝕的範圍剛好在遷急線之下邊坡時(圖 5-28 中框繪處)，利用此方法會有不錯的提取結果，但大部分的河道會繼續往上游侵蝕，因此，利用坡度與坡度粗糙度因子，並無法準確的提取遷急線。

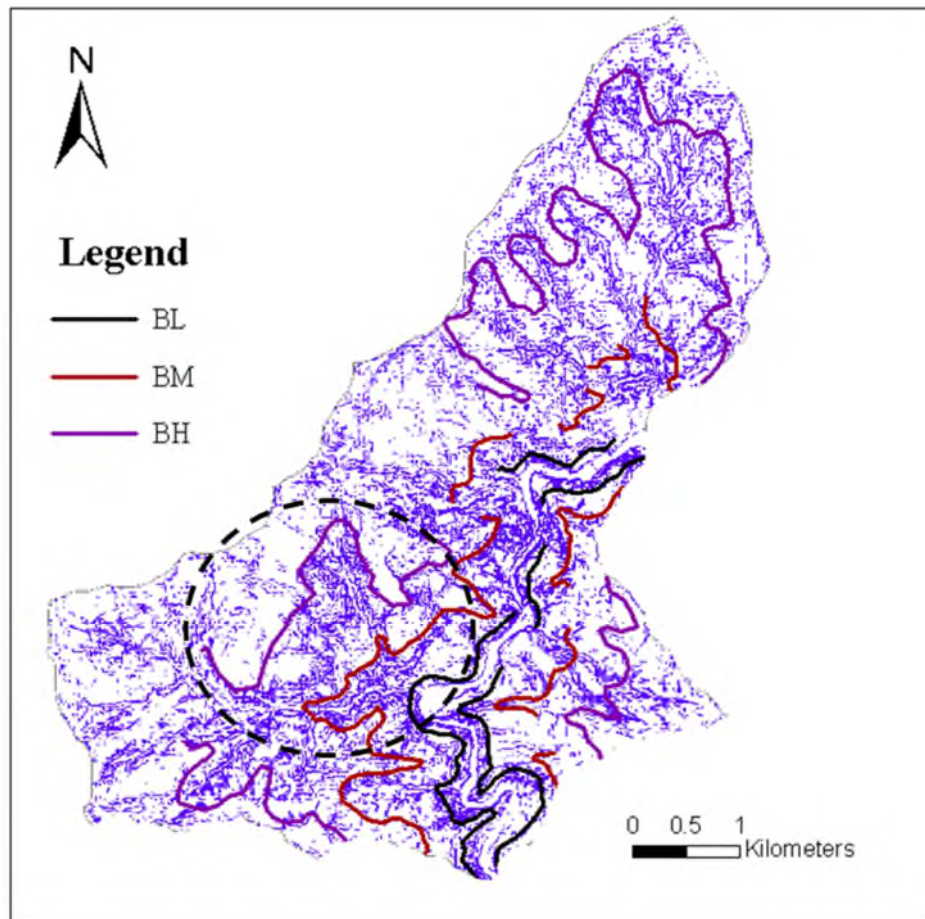


圖 5-28 坡度與坡度粗糙度門檻值交集之結果

二、地形粗糙度結合坡度之結果

第二組嘗試之方法，以地形粗糙度結合坡度因子，同樣依照其在遷急線下方之值域，設定地形因子之門檻值，再將兩因子符合門檻值之結果做交集分析。

圖 5-29 為地形粗糙度 >8 公尺與坡度 >35 度之結果，由圖中可以發現，同時符合地形粗糙度與坡度門檻值之區域，即為河道往上游侵

蝕的範圍，因此，較佳的提取結果依然出現在當河道侵蝕的範圍剛好在遷急線之下邊坡時，其他的位置的提取結果較不佳。

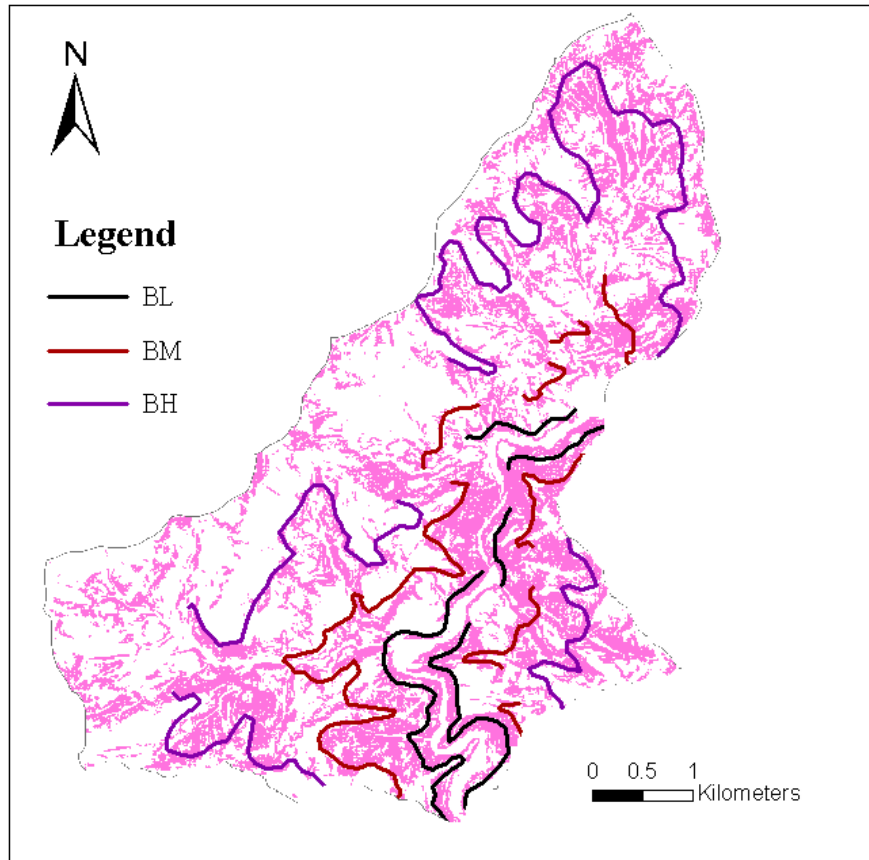


圖 5-29 地形粗糙度與坡度門檻值交集之結果

三、天空開闊度結合坡度之結果

本研究利用解析度 20m 之天空開闊度與分級坡度的疊圖劃設遷急線位置，如圖 5-30 所示，而本研究也進一步設立因子門檻值，利用坡度大於 30 度與天空開闊度介於 0.6~0.85 中間的值域，交集分析後得到圖 5-31 之結果。在此結果中，可以發現在圖中框繪的位置，三段遷急線中皆有明顯的坡度值域變化，但在其他的區位，只有些許 B_H 段遷急線有明顯的坡度值域變化，在 B_M 與 B_L 段的結果則較差。

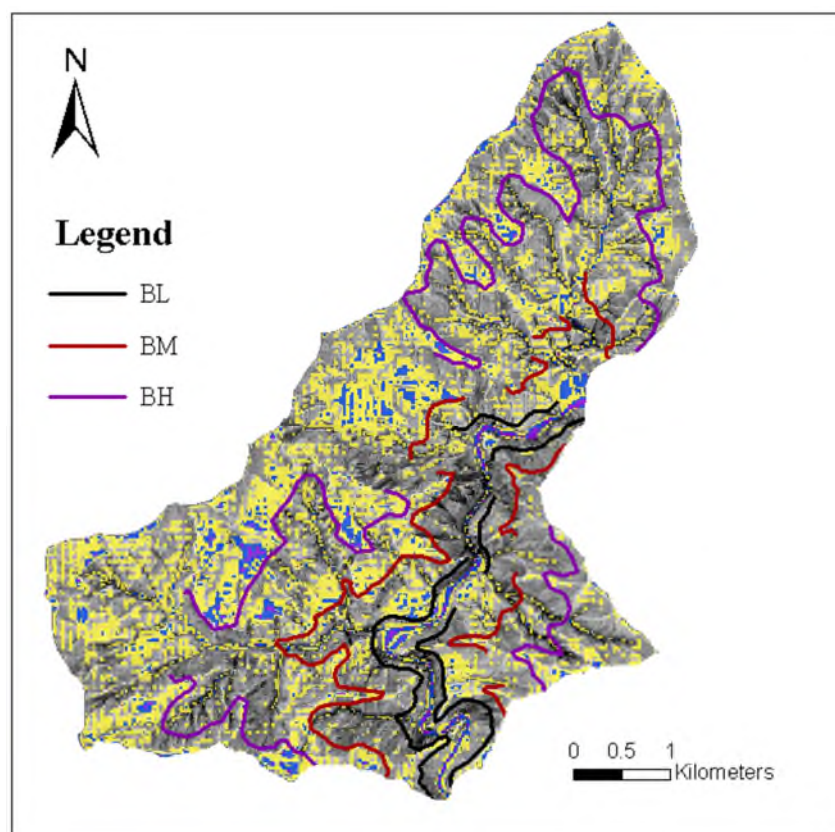


圖 5-30 天空開闊度與坡度疊圖結果

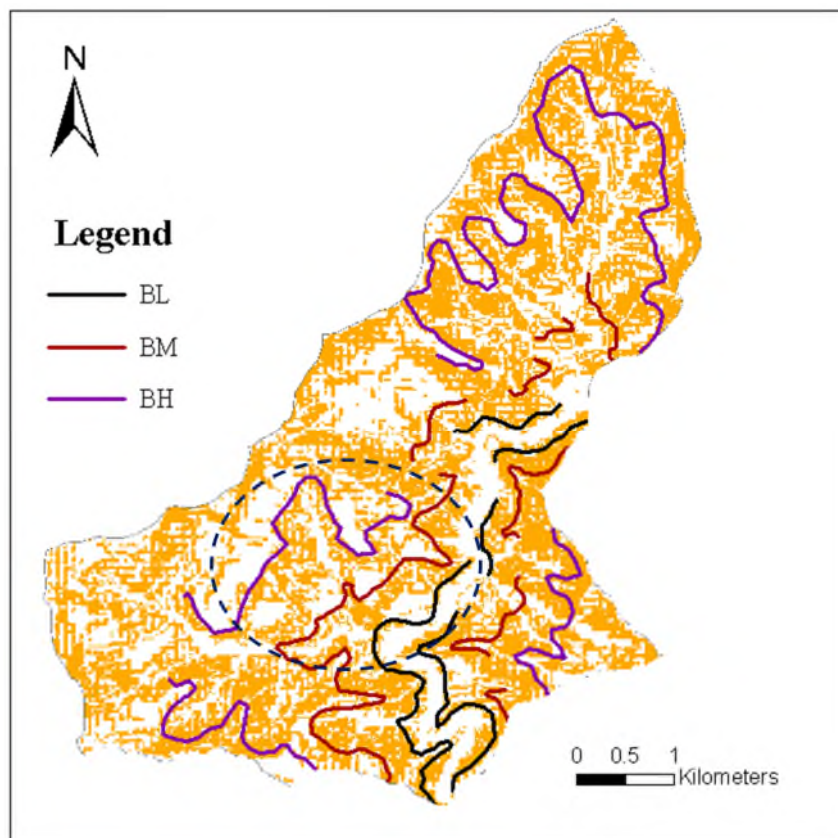


圖 5-31 天空開闊度與坡度因子之交集結果

四、小結

比較上一節提取下宇老試驗區遷急線之結果，本節中坡度結合坡度粗糙度之結果、地形粗糙度結合坡度之結果、天空開闊度結合坡度之結果因流程較簡化，遷急線提取效果較差。因此，後續分析採用上一節之流程進行泰平子集水區之驗證。

第六節 驗證區(泰平)各地形因子之結果

驗證區各地形因子之結果如圖 5-32~圖 5-36 所示，分別為地形開闊度、坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度與天空開闊度結果，由圖中可以發現，泰平驗證區之地形因子凸顯的地形特徵，與下宇老試驗區相同，如地形開闊度的較小與較大值能夠明顯的展示山谷與山脊的位置；坡度在河道的兩側坡面有較大值；地形粗糙度與坡度粗糙度在河道位置與其他地形變化較小處有較小值；天空開闊度在山脊位置有最大值 1。

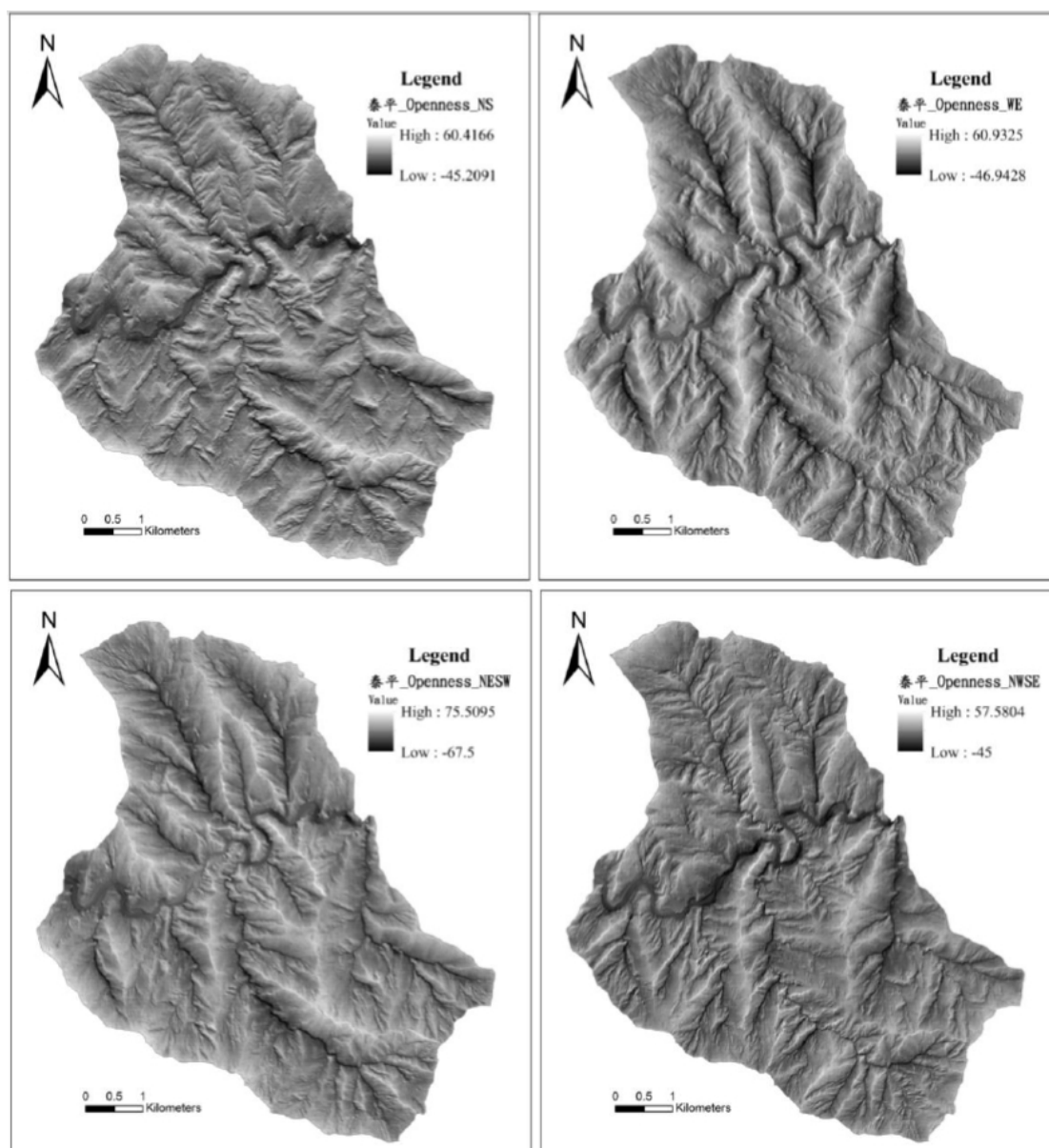


圖 5-32 驗證區(泰平)地形開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，
C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

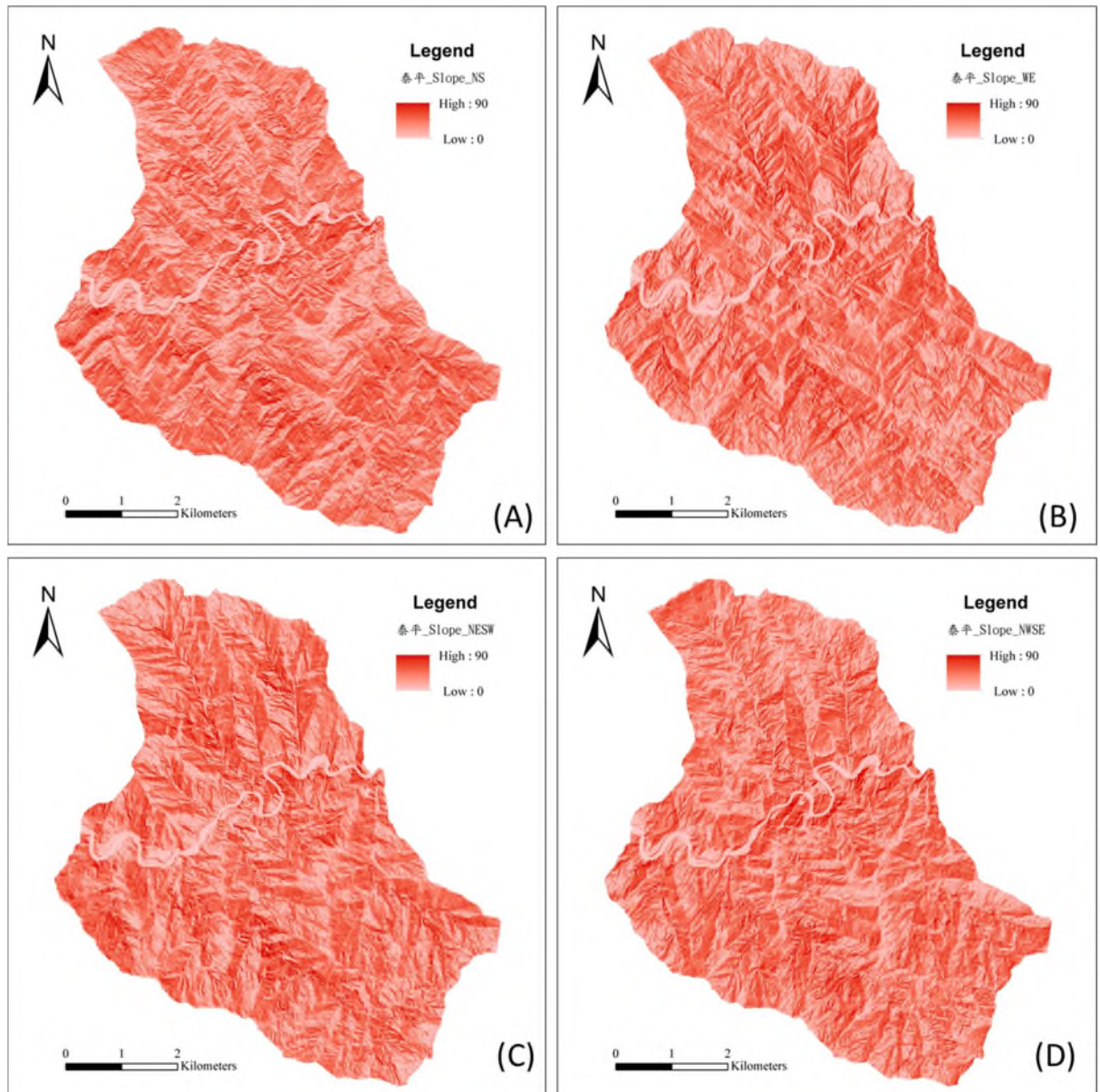


圖 5-33 驗證區(泰平)坡度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

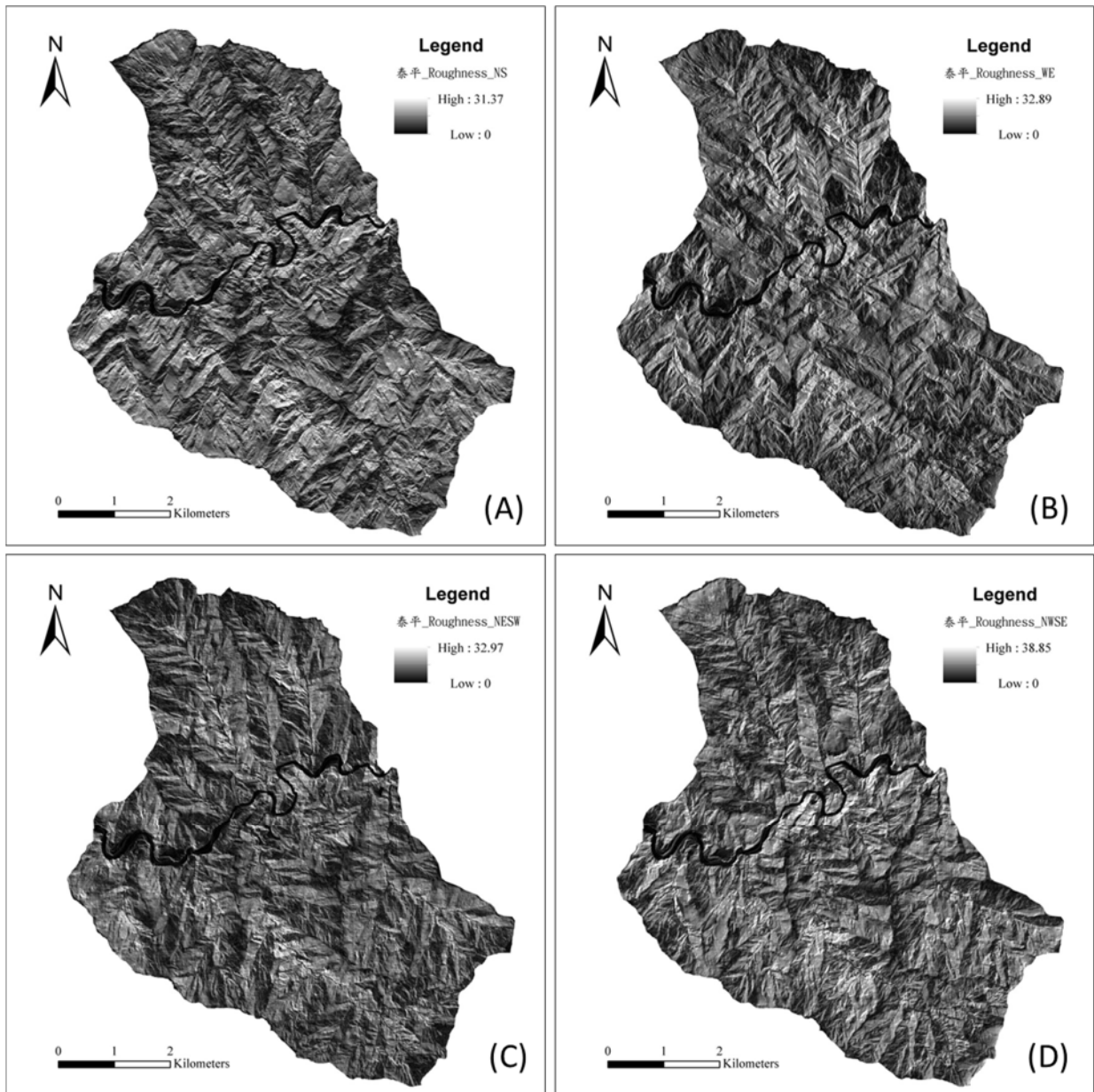


圖 5-34 驗證區(泰平)地形粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，
C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

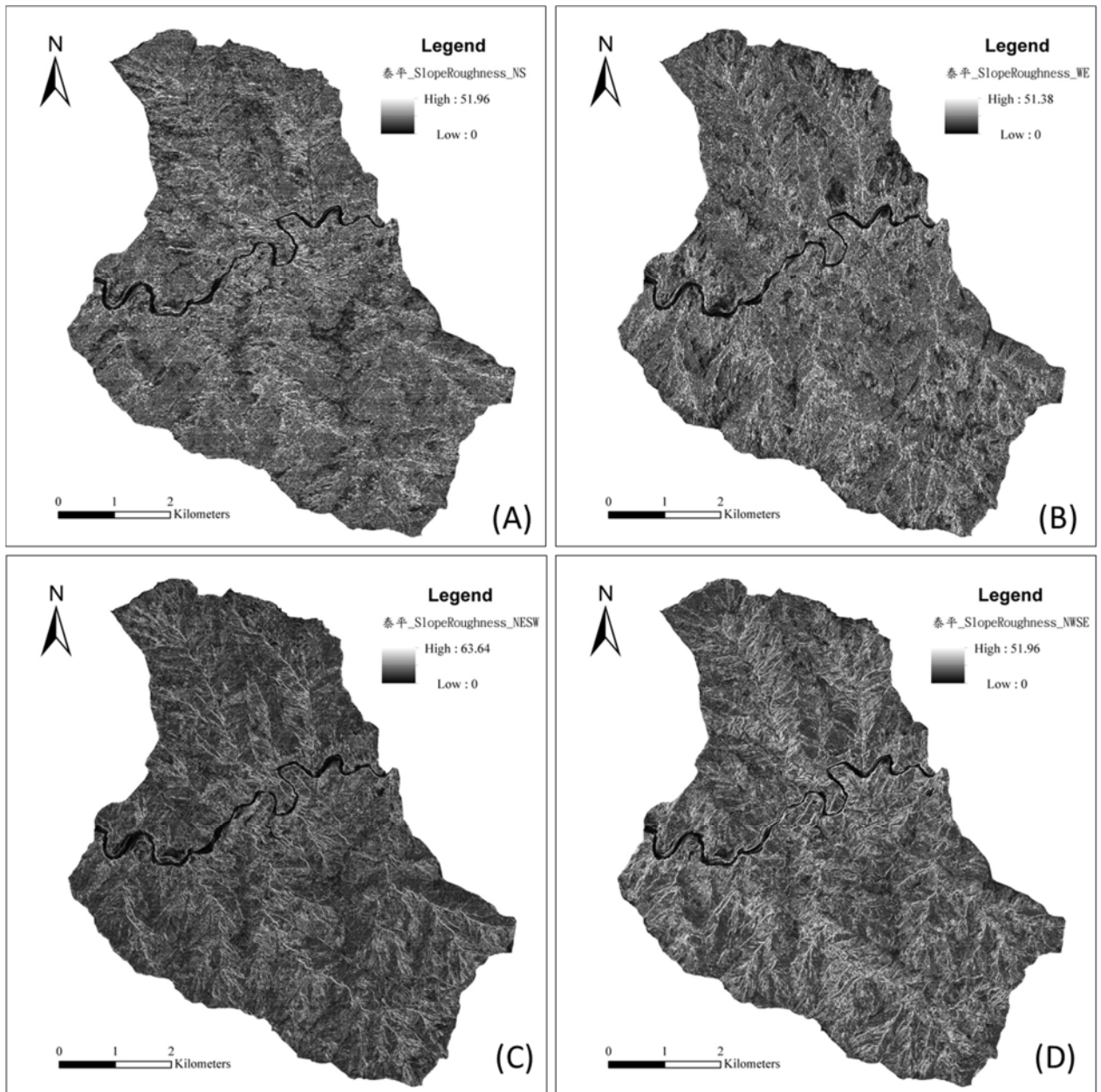


圖 5-35 驗證區(泰平)坡度粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，
C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

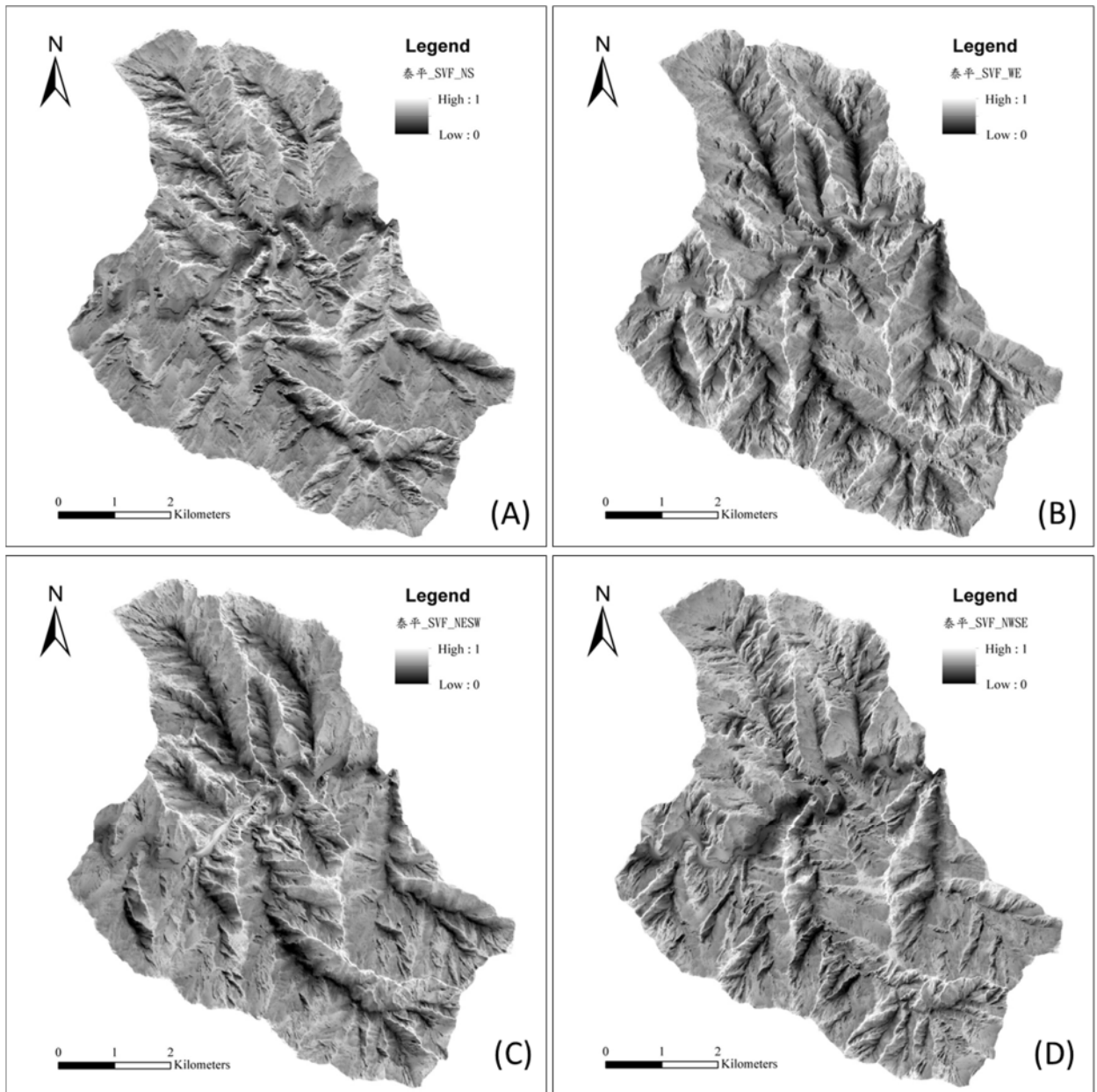


圖 5-36 驗證區(泰平)天空開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，
C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

第七節 驗證區(泰平)提取遷急線之結果

將下宇老試驗區三段遷急線所設定的門檻值，分別是 $B_L(150)$ 、 $B_M(250)$ 與 $B_H(450+ \text{支流修正})$ 套用在泰平驗證區，其結果如圖 5-37~圖 5-39 所示。

B_L 段的正確範圍仍以遷急線之下邊坡 20m 為正確的提取範圍，其正確範圍的面積約為 35.95 公頃、涵蓋 14,380 個網格，佔泰平子集水區面積的 0.88%。由圖中可以發現，對於 B_L 段的遷急線，其 $B_L(150)$ 的提取結果良好，混淆矩陣之準確值為 76.77%(如表 5-21)，對照 $B_L(50)$ 與 $B_L(100)$ 的提取結果， $B_L(150)$ 仍最佳。

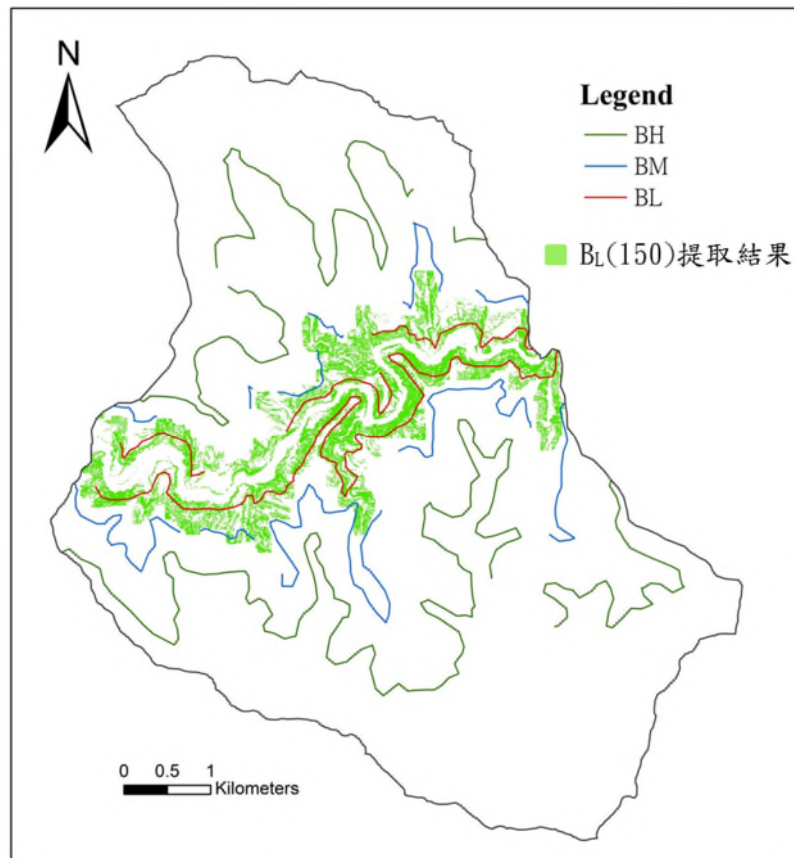


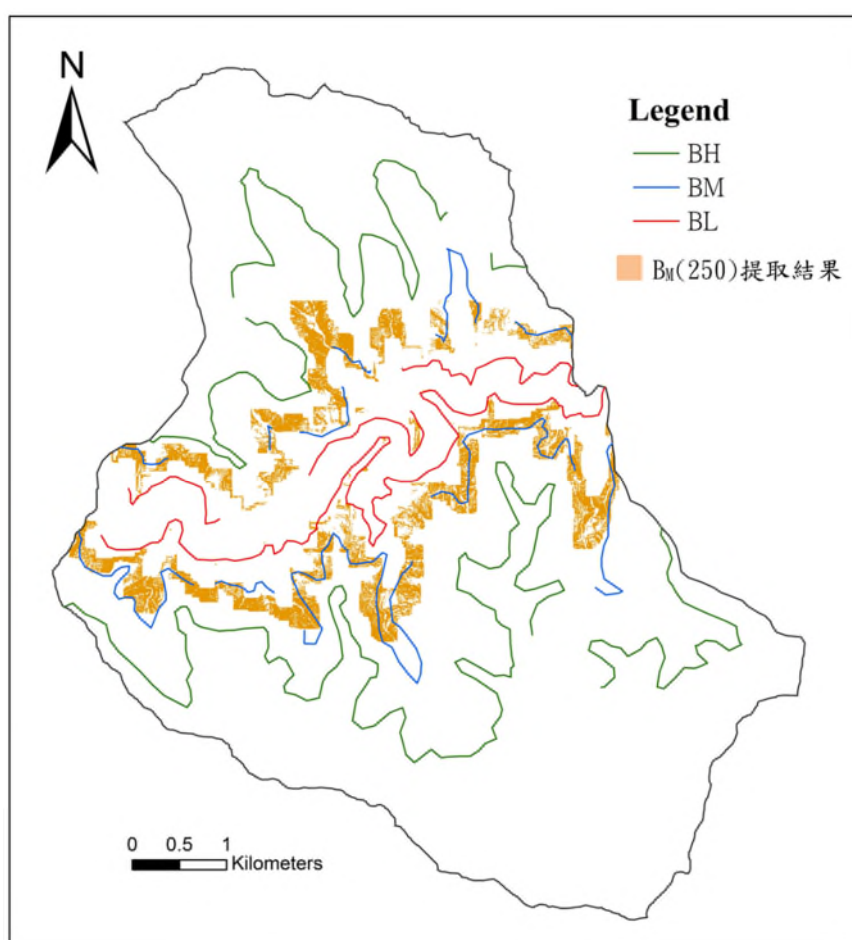
圖 5-37 泰平驗證區 B_L 段結果

表 5-21 泰平驗證區 B_L 段遷急線混淆矩陣結果

與河道高程差	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	FNR	TNR	ACC
150	8586	99890	5794	1519119	59.71%	6.17%	40.29%	93.83%	76.77%
100	8348	75242	6032	1543767	58.05%	4.65%	41.95%	95.35%	76.70%
50	6461	55285	7919	1563724	44.93%	3.41%	55.07%	96.59%	70.76%

B_M段遷急線之下邊坡 20m 為正確的提取範圍，其正確範圍的面積約為 40.89 公頃、涵蓋 16,355 個網格，佔泰平子集水區面積的 1.0%。

在 B_M段的遷急線結果中，同樣在受支流影響的位置有較大的偏差，但大致上提取結果良好，混淆矩陣之準確值為 66.54%(如表 5-22)，對照 B_M(200)與 B_M(300)的提取結果，B_M(250)仍最佳，而此區域之 B_M遷急線較不連續，因此利用本研究提取遷急線的方式，其準確值會受影響。

圖 5-38 泰平驗證區 B_M 段結果表 5-22 泰平驗證區 B_M 段遷急線混淆矩陣結果

與河道高程差	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	FNR	TNR	ACC
300	3746	82216	12609	1534818	22.90%	5.08%	77.10%	94.92%	58.91%
250	6372	95234	9983	1521800	38.96%	5.89%	61.04%	94.11%	66.54%
200	4663	73597	11692	1543437	28.51%	4.55%	71.49%	95.45%	61.98%

B_H 段遷急線之下邊坡 20m 為正確的提取範圍，其正確範圍的面積約為 77.37 公頃、涵蓋 30,949 個網格，佔泰平子集水區面積的 1.89%。

相較於 B_L 與 B_M 段的遷急線結果， B_H 段因為有加入支流的修正，修正量依照下字老試驗區等比推估，如表 5-23 所示。在支流的修正後，受支流影響的位置，其提取結果佳，準確值為 56.40%(如表 5-24)。

此外，泰平驗證區 B_H 段與下宇老試驗區有相同的情形，也就是在子集水區的邊界位置，其提取結果與真實遷急線位置的差異性較大。

表 5-23 支流長度修正

修正量	支流長度
+50	3,000-4,000
+150	4,000-5,000
+250	5,000-6,000
+350	6,000-7,000

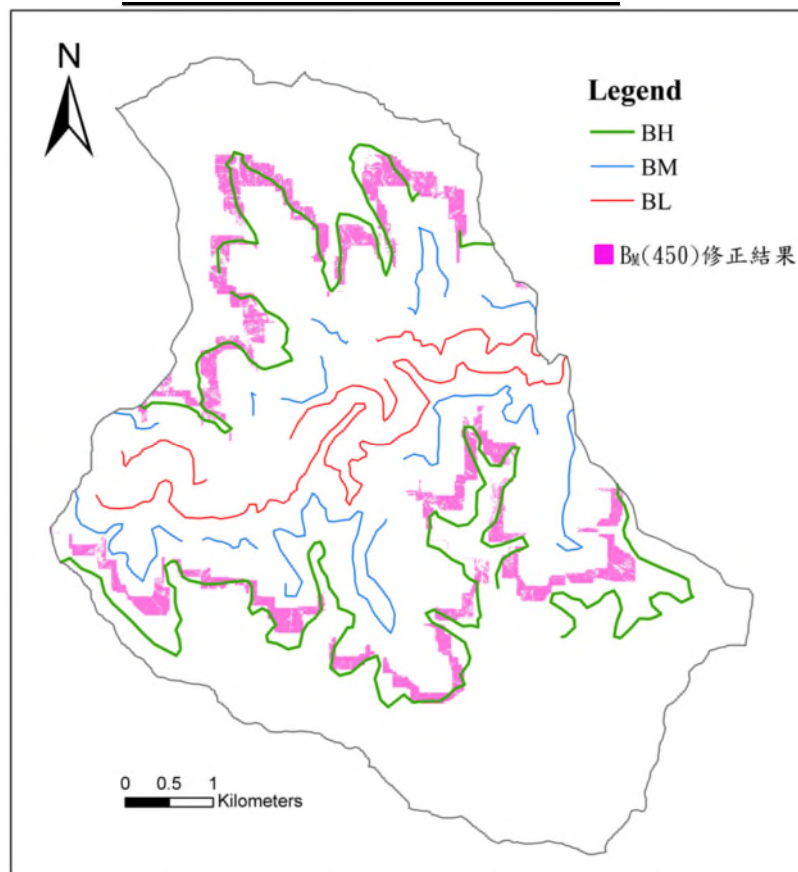


圖 5-39 泰平驗證區 BH(450+支流修正)段結果

表 5-24 泰平驗證區 BH 段遷急線混淆矩陣結果

與河道高程差	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	FNR	TNR	ACC
600	4567	90407	26382	1528602	14.76%	5.58%	85.24%	94.42%	54.59%
550	4665	89630	26284	1529379	15.07%	5.54%	84.93%	94.46%	54.77%
500	5774	95106	25175	1523903	18.66%	5.87%	81.34%	94.13%	56.39%
450	5324	92810	25625	1526199	17.20%	5.73%	82.80%	94.27%	55.73%
450+支流修正	5317	70904	25632	1548105	17.18%	4.38%	82.82%	95.62%	56.40%

第六章 地形特徵與崩塌發生之關聯性分析

本研究利用地形因子提取與崩塌有關之地形特徵及區位，並且與真實的崩塌資料比對，探討邊坡單元具有這些地形特徵是否有較高的機率發生崩塌，分析流程如圖 6-1，步驟如下所述：

首先利用研究區域之數值高程模型，計算各方向性之地形因子，且依照地形特徵的特性劃設門檻值，提取蝕溝、崩崖之區位，並且與人工劃設的位置進行比較，選取最佳提取蝕溝、崩崖之地形因子及門檻值。

另一方面，利用數值高程模型劃設邊坡單元，並且選取數值高程模型建製後的崩塌事件，得到含有崩塌區位之邊坡單元。

最後，計算邊坡單元內蝕溝、崩崖之網格數，再結合含有崩塌區位之邊坡單元，探討含有較多地形特徵網格的邊坡單元，是否發生崩塌的機率會更大。

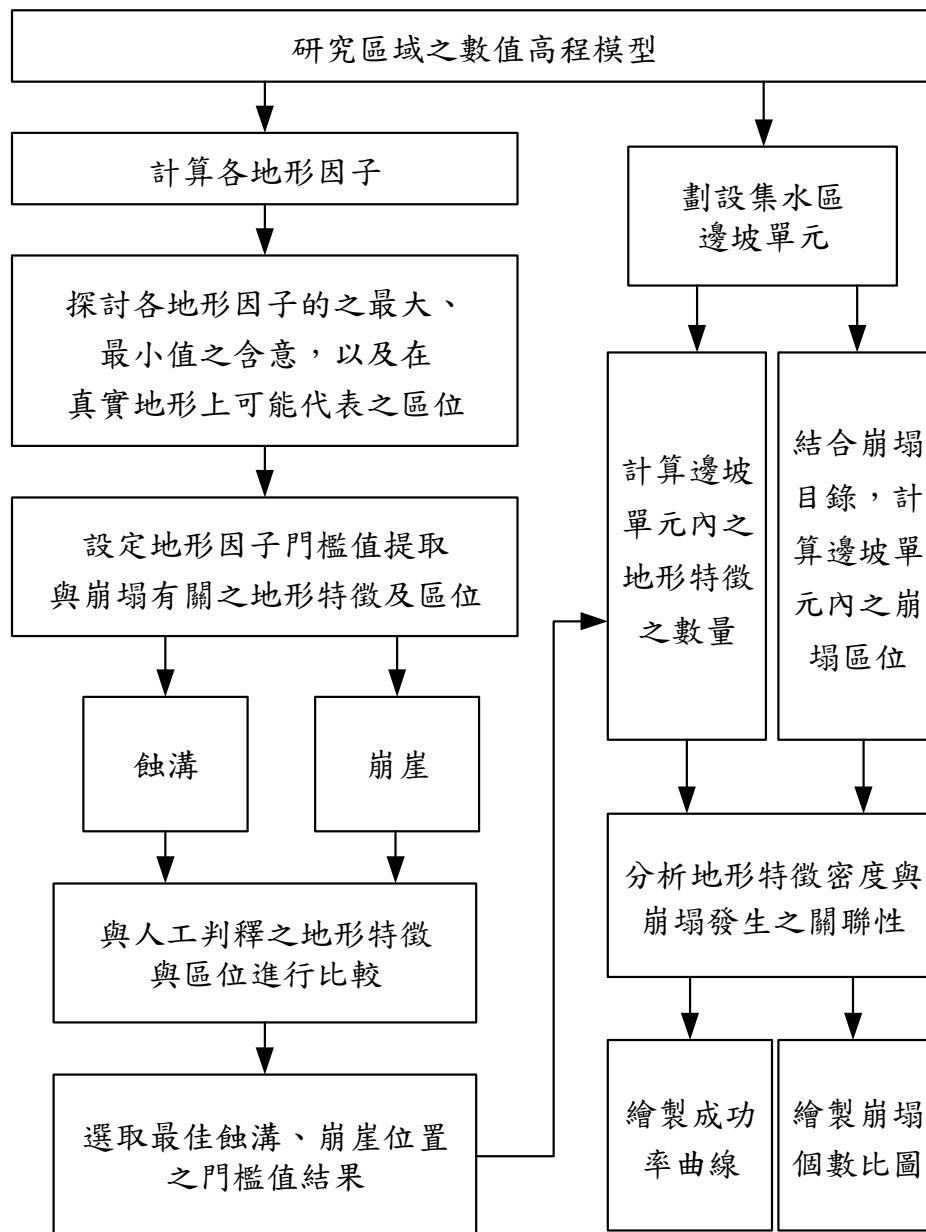


圖 6-1 地形特徵與崩塌發生關聯性分析之流程圖

第一節 劃分邊坡單元

本研究利用石門水庫上游集水區 DEM 來劃分邊坡單元，將原始地形可劃分為數個子集水區，再將原始地形反轉後亦可劃分成不同子集水區單元，將地形反轉前後所得之子集水區單元結合即可得到邊坡單元。石門水庫上游集水區共可分為 5,838 個邊坡單元，如圖 6-2 所示，圖中顯示每一個邊坡單元的主要坡向。

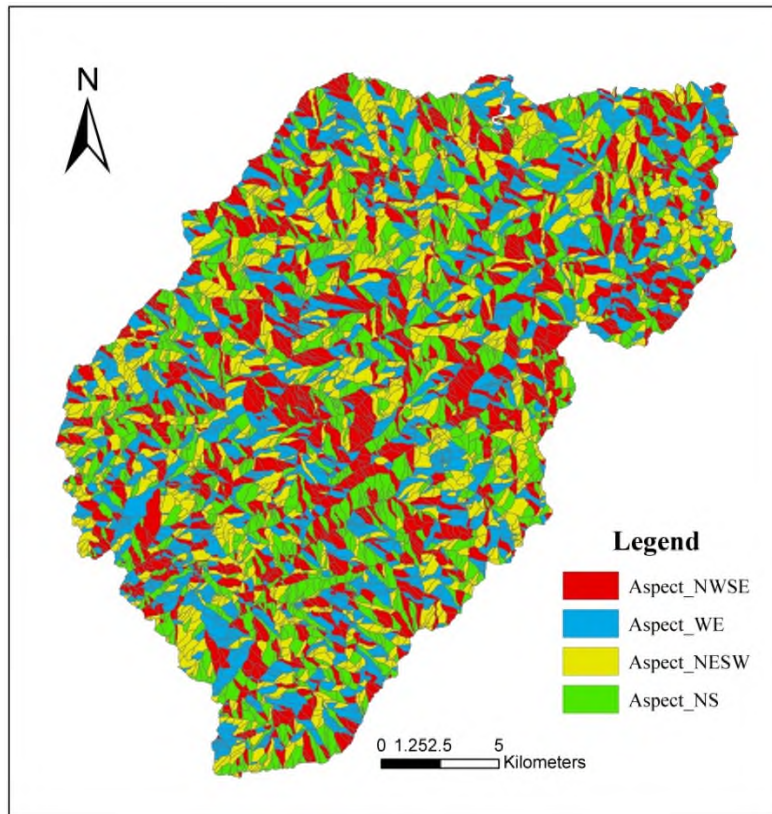


圖 6-2 研究區域之邊坡單元

第二節 崩塌地分佈

本研究利用 2013-2014 年所建製之數值高程模型，因此，選取的颱風事件為 2014 年之麥德姆(Matmo)颱風與 2015 年之蘇迪勒(Soudelor)颱風。而 5,838 個邊坡單元中，計算涵蓋崩塌面積超過 100m^2 之邊坡單元，為該颱風事件崩塌之邊坡單元，而麥德姆颱風的崩塌事件影響的邊坡單元有 266 個(圖 6-3)、蘇迪勒颱風的崩塌事件影響的邊坡單元有 789 個(圖 6-4)。

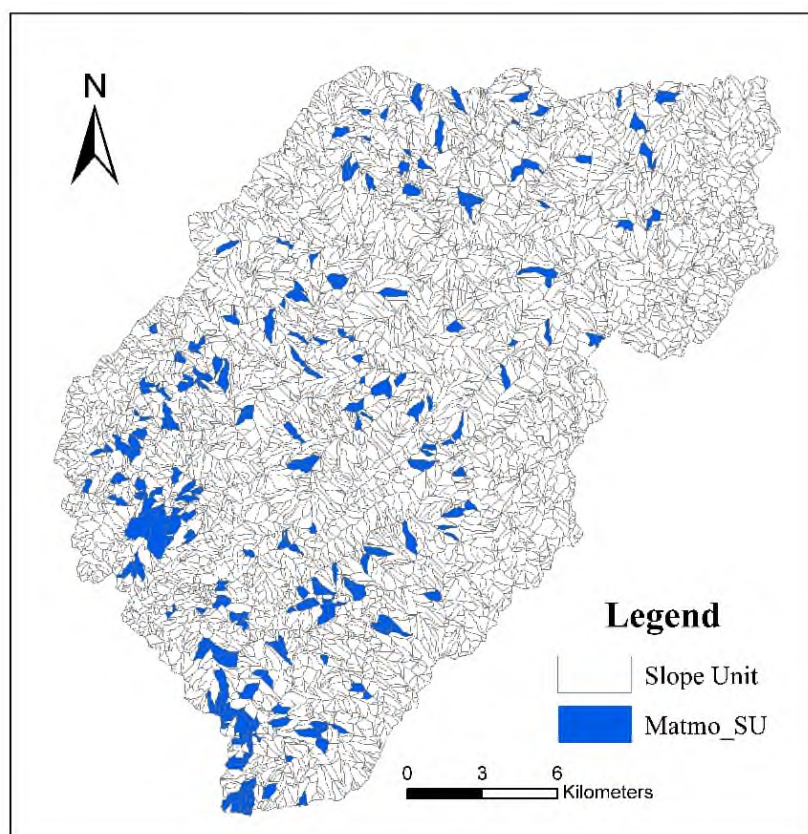


圖 6-3 麥德姆颱風造成崩塌區位之邊坡單元

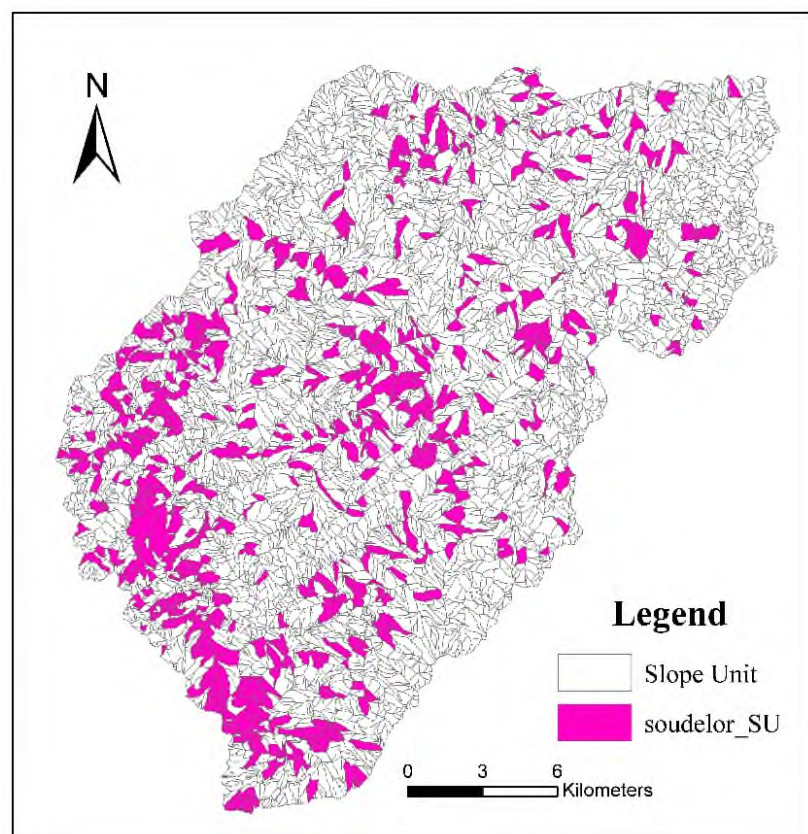


圖 6-4 蘇迪勒颱風造成崩塌區位之邊坡單元

第三節 各地形因子之結果

各單方向性之地形因子結果如圖 6-5~圖 6-9 所示，分別為地形開闊度、坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度與天空開闊度。

地形開闊度值較大的區域，顏色較紅，表示地形的開闊程度較大，顯示為山脊的位置，而開闊度值較小的區域，顏色較藍，表示地形的開闊程度較小，顯示為河道的位置，其餘坡面位置的開闊度值，顯示為米色。

坡度值較小的位置，主要為河道、山脊等位置，呈現白色，而邊坡位置的坡度值較大，呈現紅色。地形粗糙度值較小的位置，主要在平坦處及河道的位置，呈現黑色，而地形粗糙度值較大，主要在河道兩側的坡面，呈現白色。坡度粗糙度值較小的區域，主要出現在主流河道與其他坡度變化小的位置，呈現黑色，而支流、蝕溝與山脊線位置的坡度粗糙度值較大，呈現白色。

天空開闊度結果在山脊線會有最大值 1，呈現紅色；河道及山谷線位置會有較小的天空開闊度值，呈藍色。另外，比較地形開闊度的結果可以發現，由於計算方法不同，天空開闊度對於河道及山谷位置的提取較地形開闊度差，雜訊也較多。

將上述五個地形因子之結果，統整其值域、本研究計算的窗口大小、最大、最小值所對應的位置，如表 6-1 所示，以利後續提取地形特徵之參考。

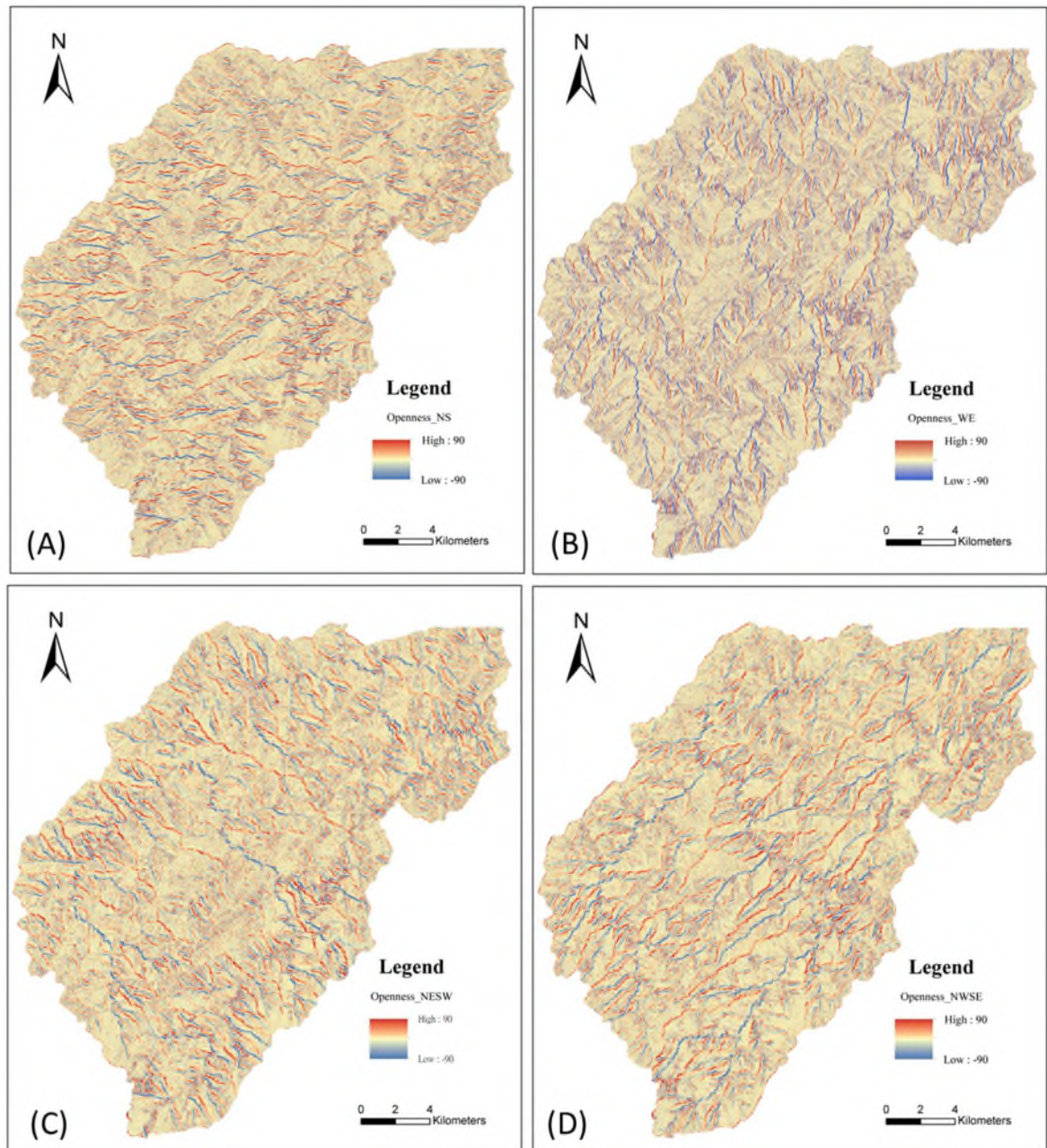


圖 6-5 單方向地形開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

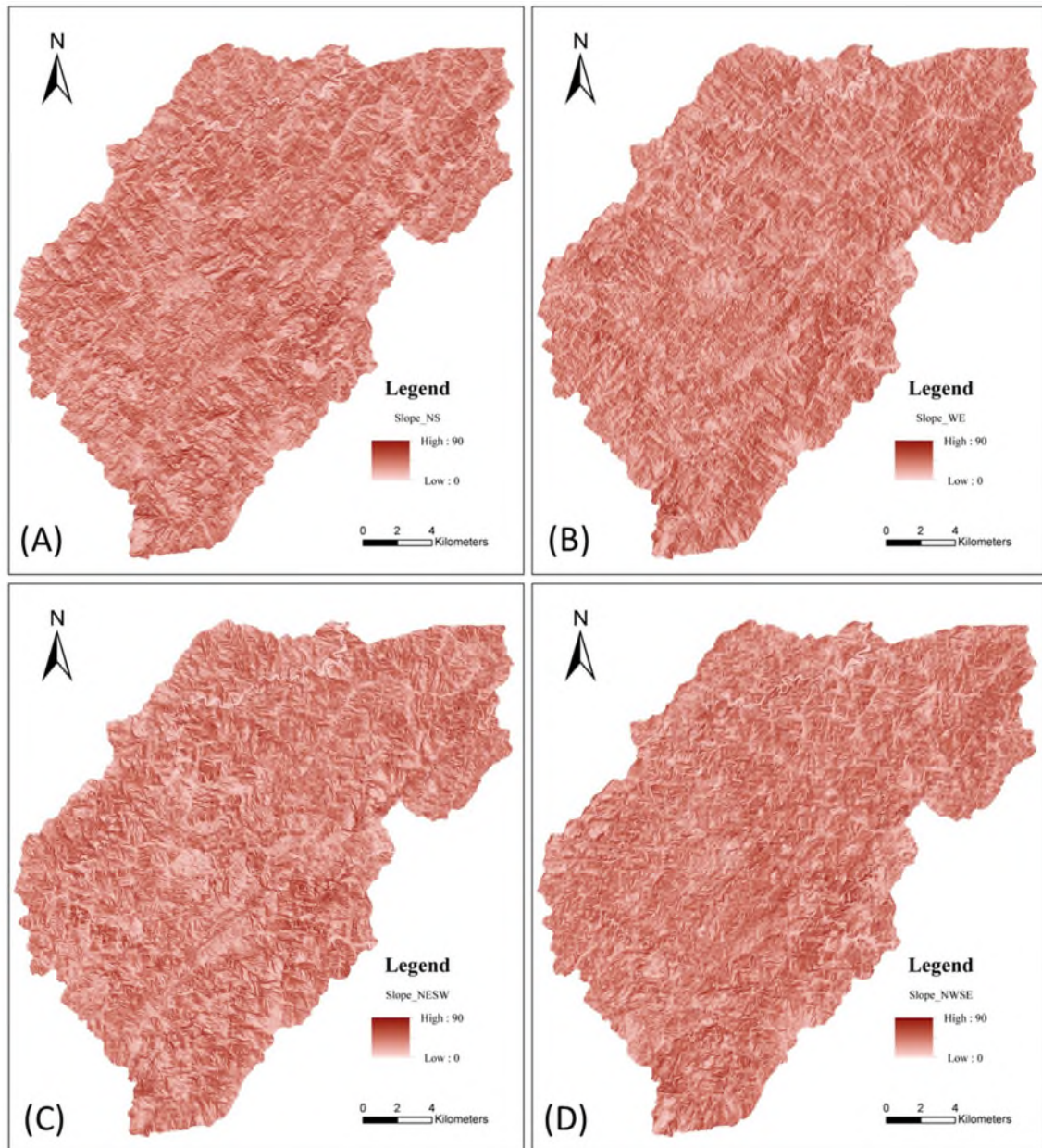


圖 6-6 單方向坡度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

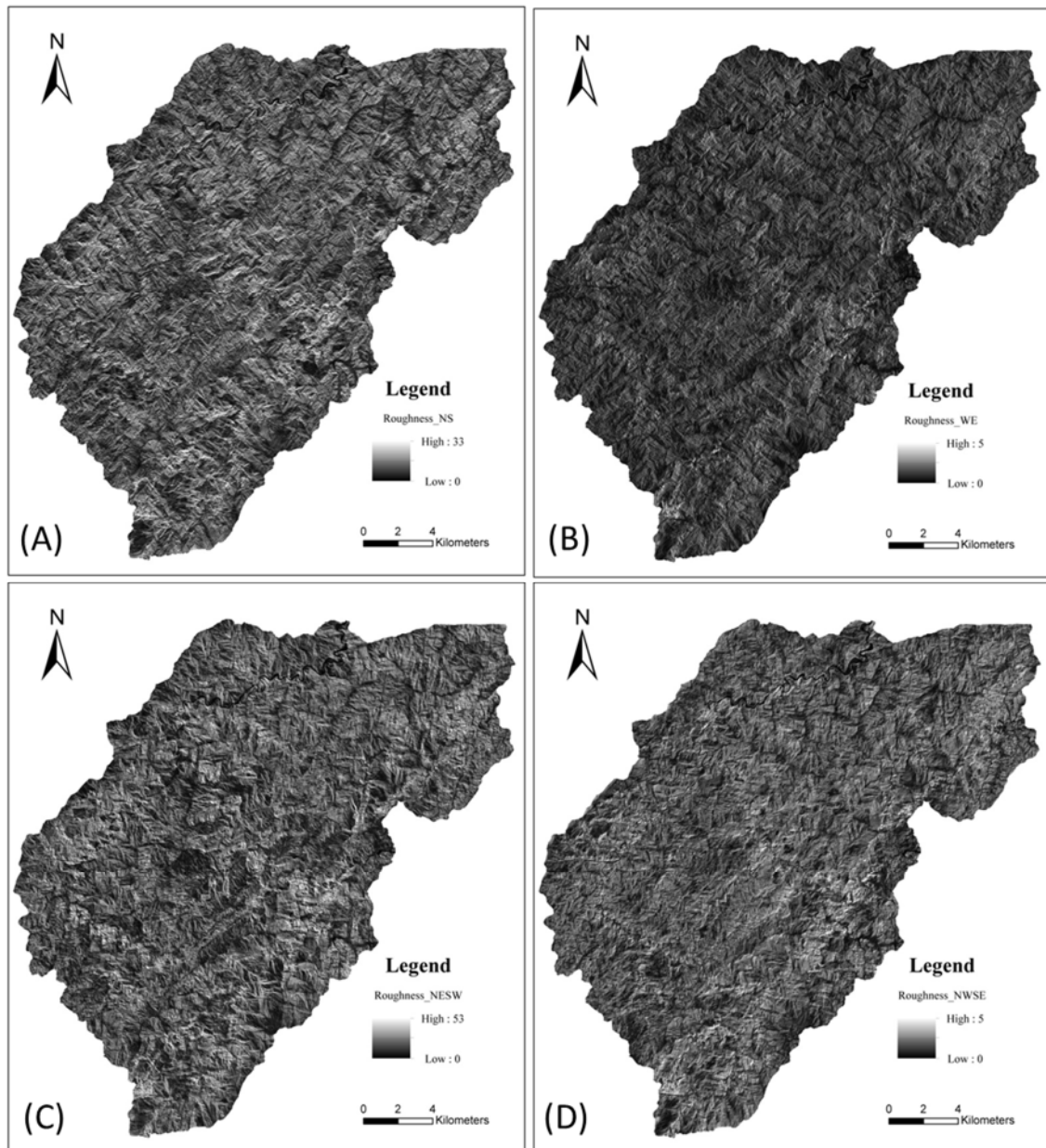


圖 6-7 單方向地形粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

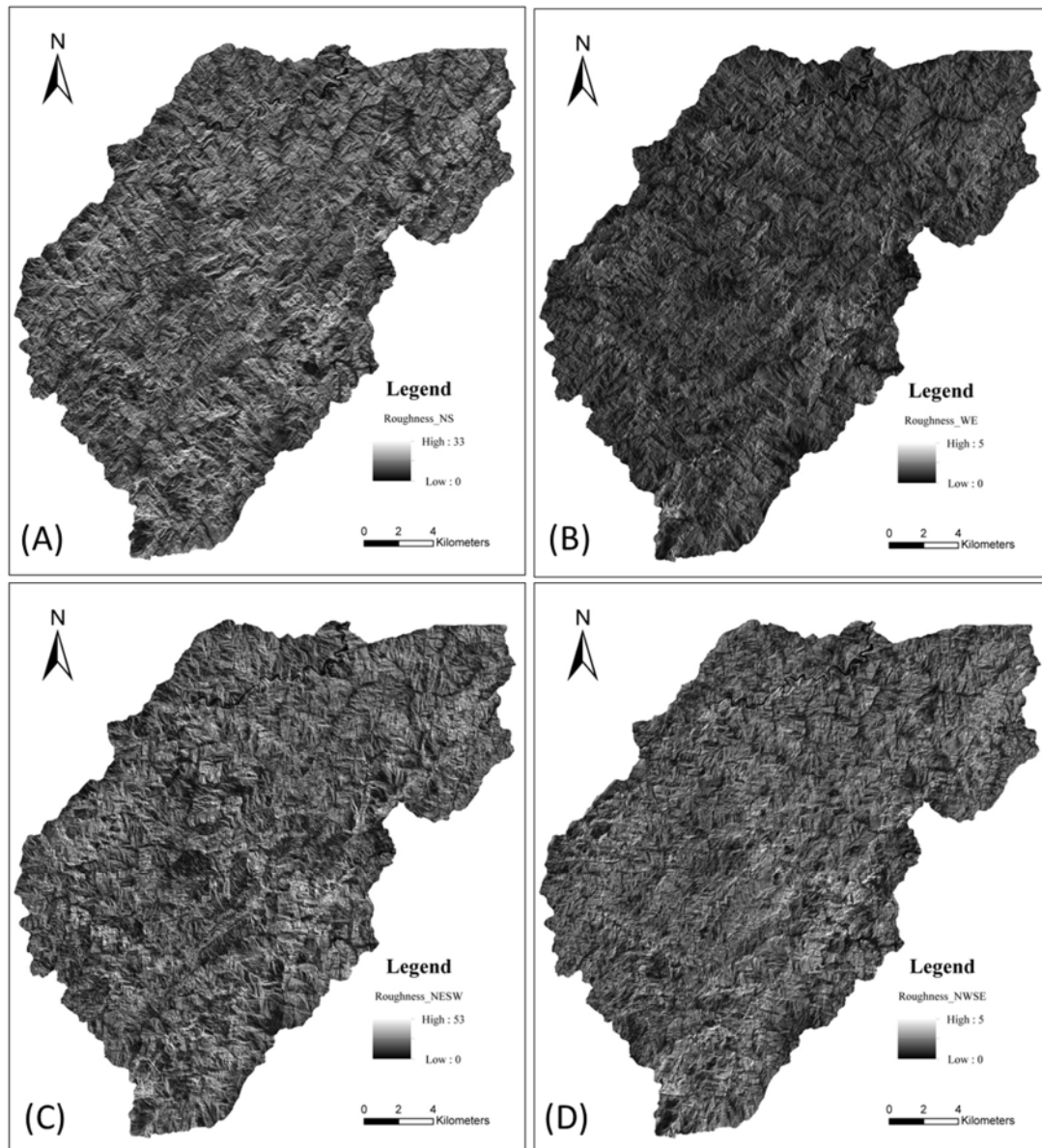


圖 6-8 單方向坡度粗糙度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

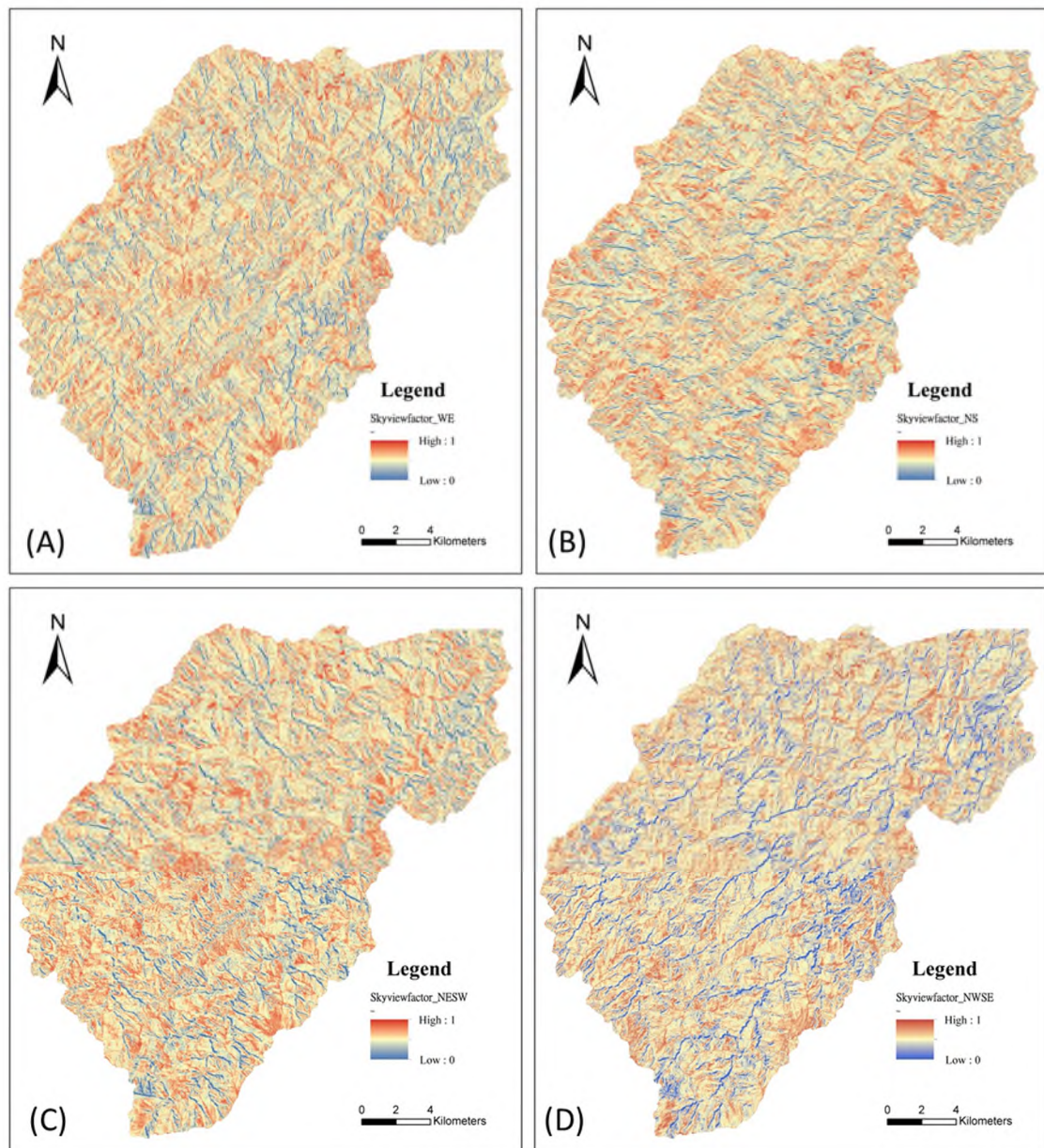


圖 6-9 單方向天空開闊度結果(A.南北向窗口，B.東西向窗口，C.東北-西南向窗口，D.西北東南向窗口)

表 6-1 各地形因子之值域所對應的地形特徵

	Slope	Openness	Roughness	Slope Roughness	SVF
值域	0° ~ 90°	-90° ~ 90°	0 ~ ∞(m)	0 ~ ∞(°)	0 ~ 1
單方向性之 窗口大小	1*3m (半徑=1)	1*201m (半徑=100)	1*7m (半徑=3)	1*7m (半徑=3)	1*201m (半徑=100)
較大值	坡度陡峭之 區域(邊坡)	山脊、陡峭 懸崖	高程變化大 的區域	坡度變化大 的區域(如 山脊、溝渠)	天空開闊程 度較大之區 域
較小值	山脊與河谷	河谷、河 道、溝渠	平坦處	坡度變化小 的區域(如 較寬的河 道)	天空開闊程 度較小之區 域

第四節 地形特徵之提取方式

一、蝕溝位置提取方式

本研究依照表 6-1 統整的結果，利用地形開闊度與坡度粗糙度因子。首先，選定地形開闊度小於 0 的範圍，包含了河道、河谷等大範圍的特徵，並包括了蝕溝、溝壑、大型窪地等小範圍特徵；再加上可表現坡度變化的坡度粗糙度，在蝕溝的位置會有較大值，在河道邊坡的位置會因為坡度的變化較小，坡度粗糙度值較小，故在與地形開闊度因子組合後，可避開河道的區位，得到蝕溝特徵。

此外，單方向性窗口對於線性特徵的提取效果較佳。因此，本研究為了增加提取蝕溝的準確性，只選定了與坡面垂直的方向性窗口結果，如坡面是南北向，大部分的蝕溝也會是南北向，因此選擇東西向窗口的結果，蝕溝與坡面之關係如表 6-2 所示。

表 6-2 蝕溝、邊坡坡向與最佳判釋窗口之間的關係

邊坡坡向	南北向	東西向	東北-西南向	西北-東南向
蝕溝方向	南北向	東西向	東北-西南向	西北-東南向
最佳判釋之窗口方向	東西向	南北向	西北-東南向	東北-西南向

最終，依照坡向選擇地形因子之方向後，再各別設定地形開闊度與坡度粗糙度因子兩組門檻值，且兩兩交集得到四組結果，再將結果與人工判釋的蝕溝位置做比較。本研究設定提取蝕溝之門檻值，在地形開闊度之數值為小於 -5° 及 -10° ，坡度粗糙度則是大於 10° 及 15° ，兩兩交集後得出之四組門檻值如表 6-3 所示。

表 6-3 蝕溝提取之門檻值設定

Openness Thresholds		SR Thresholds
Gully	蝕溝門檻值一	$<-5^{\circ}$
	蝕溝門檻值二	$<-5^{\circ}$
	蝕溝門檻值三	$<-10^{\circ}$
	蝕溝門檻值四	$<-10^{\circ}$

二、崩崖位置提取方式

崩崖的提取方式同樣參照表 6-1，因崩崖多分布於滑動面的前緣，即山脊往坡面向下延伸的部分，故採用地形開闊度較大值找出山脊的區位，以及利用坡度因子較大的陡坡處，分別將其區位外擴並交集出共同區位，交集處即為崩崖之提取區位。另外，同樣在單方向性窗口對於線性特徵的提取效果較佳的情況下，崩崖的位置則是與坡面呈垂直分布，故選定與坡面平行方向的窗口，作為找出崩崖區位的方式，其之間關係如表 6-4。

表 6-4 崩崖、邊坡坡向與最佳判釋窗口之間的關係

邊坡坡向	南北向	東西向	東北-西南向	西北-東南向
崩崖方向	東西向	南北向	西北-東南向	東北-西南向
最佳判釋之 窗口方向	南北向	東西向	東北-西南向	西北-東南向

最後，設定地形開闊度與坡度因子門檻值，透過不同程度的外擴並交集後，根據邊坡坡向選擇其對應之窗口，再將結果與人工判釋的崩崖位置進行比較，本研究經由不同因子組合後，最終呈現的門檻值如表 6-5 所示。

表 6-5 崩崖提取之門檻值設定

		Openness Thresholds	是否外擴	Slope Thresholds	是否外擴
Scarp	門檻值一	>12°	是	>48°	是
	門檻值二	>11°	是	>48°	否
	門檻值三	>11°	否	>48°	是
	門檻值四	>12°	否	>48°	是

第五節 蝕溝與崩塌發生之關聯性

一、提取結果與實際位置之比較

本研究利用坡度粗糙度與地形開闊度因子，分別設定四組門檻值以提取蝕溝位置，為了將提取結果與真實的蝕溝位置比對，本研究另外利用坡度與地形開闊度的疊圖，達到類似 H.O.S.T 地圖之地形呈現方式，本研究劃設兩個子集水區的蝕溝位置，如圖 6-10 所示，橘線處即是依疊圖劃設之蝕溝。

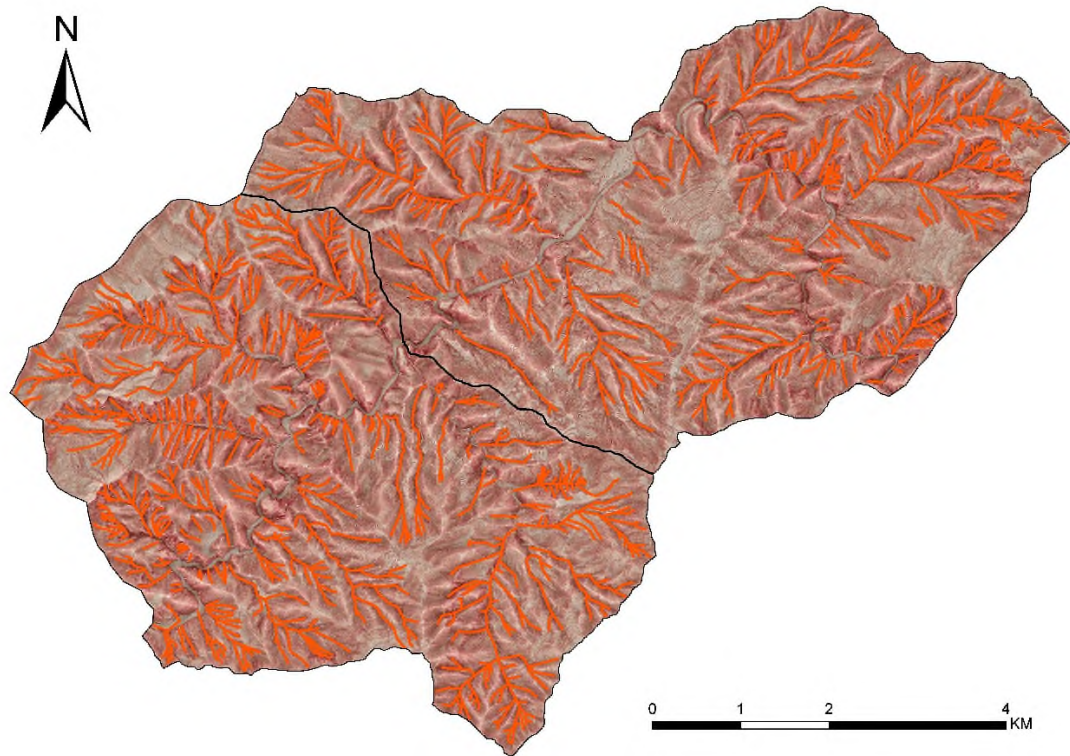


圖 6-10 人工劃設之蝕溝位置

利用人工劃設的結果，衡量提取蝕溝門檻值之優劣，而四組蝕溝門檻值之結果依序如圖 6-11~圖 6-14 所示，綠點即該門檻值之結果。

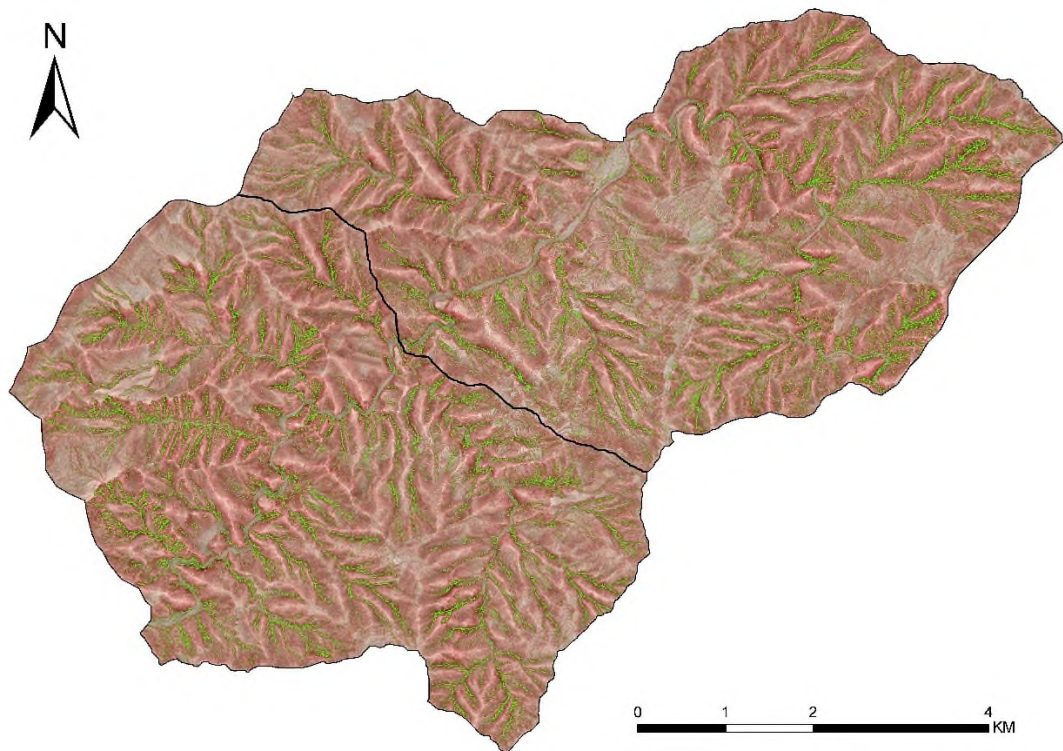


圖 6-11 蝕溝門檻值一($\text{Openness} < -5^\circ$, $\text{SR} > 10^\circ$)之結果

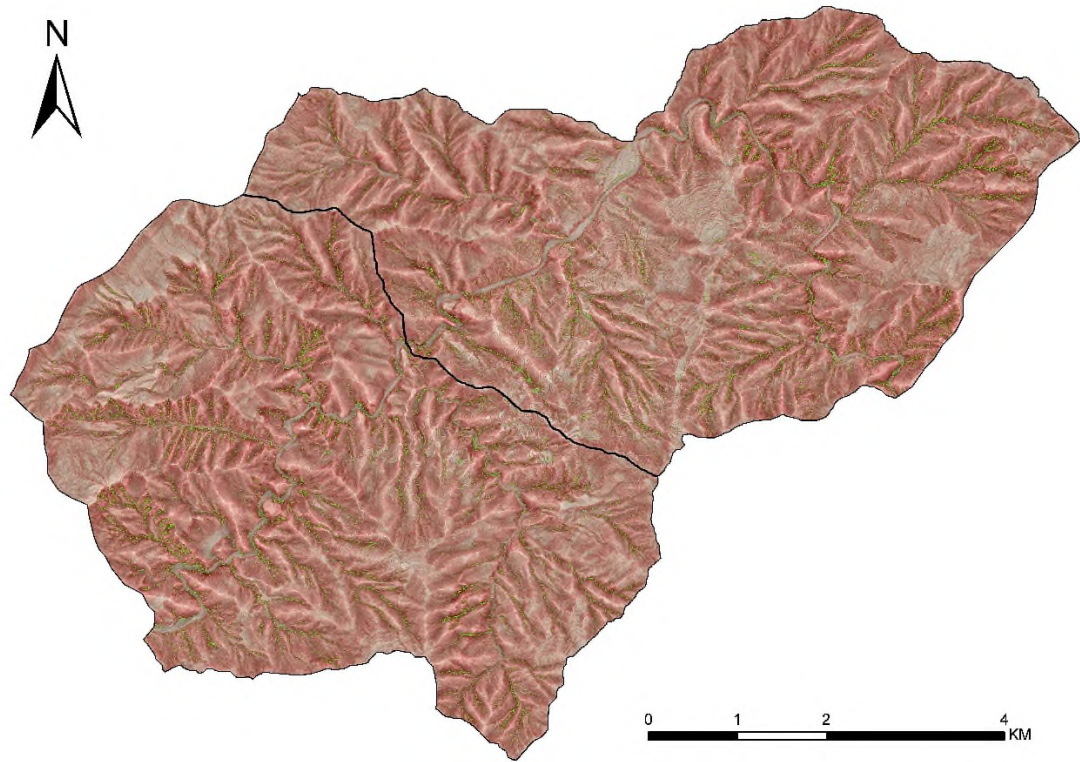


圖 6-12 蝕溝門檻值二($\text{Openness} < -5^\circ$, $\text{SR} > 15^\circ$)之結果

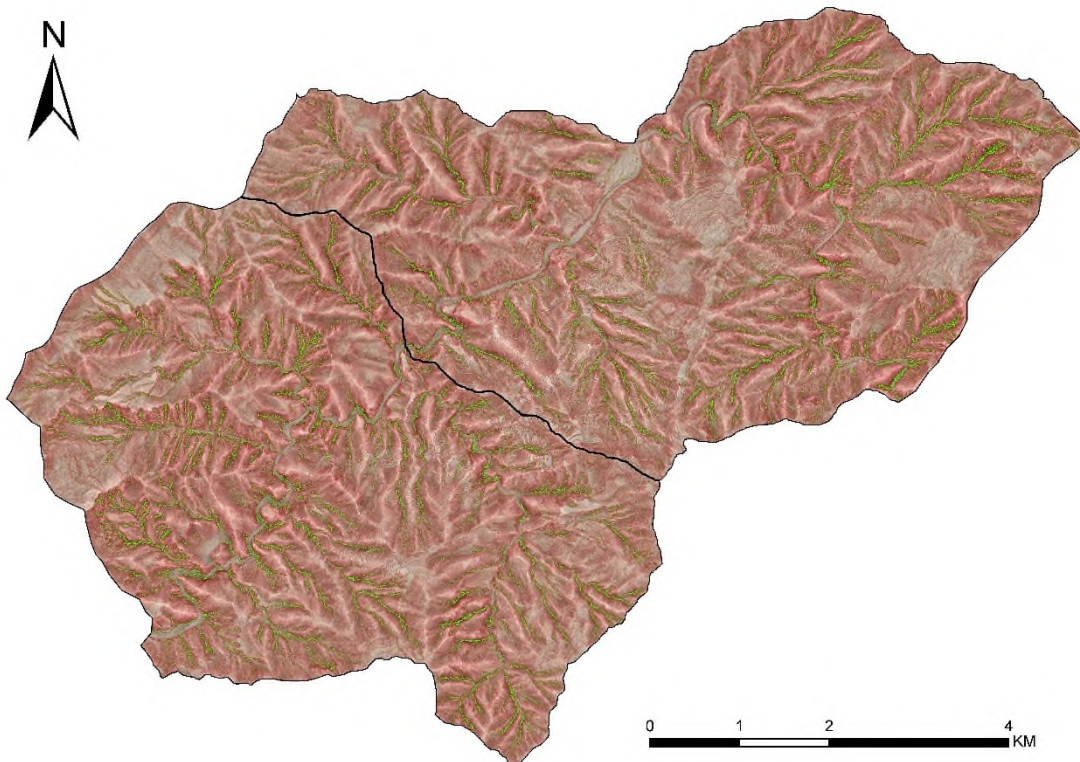


圖 6-13 蝕溝門檻值三($\text{Openness} < -10^\circ$, $\text{SR} > 10^\circ$)之結果

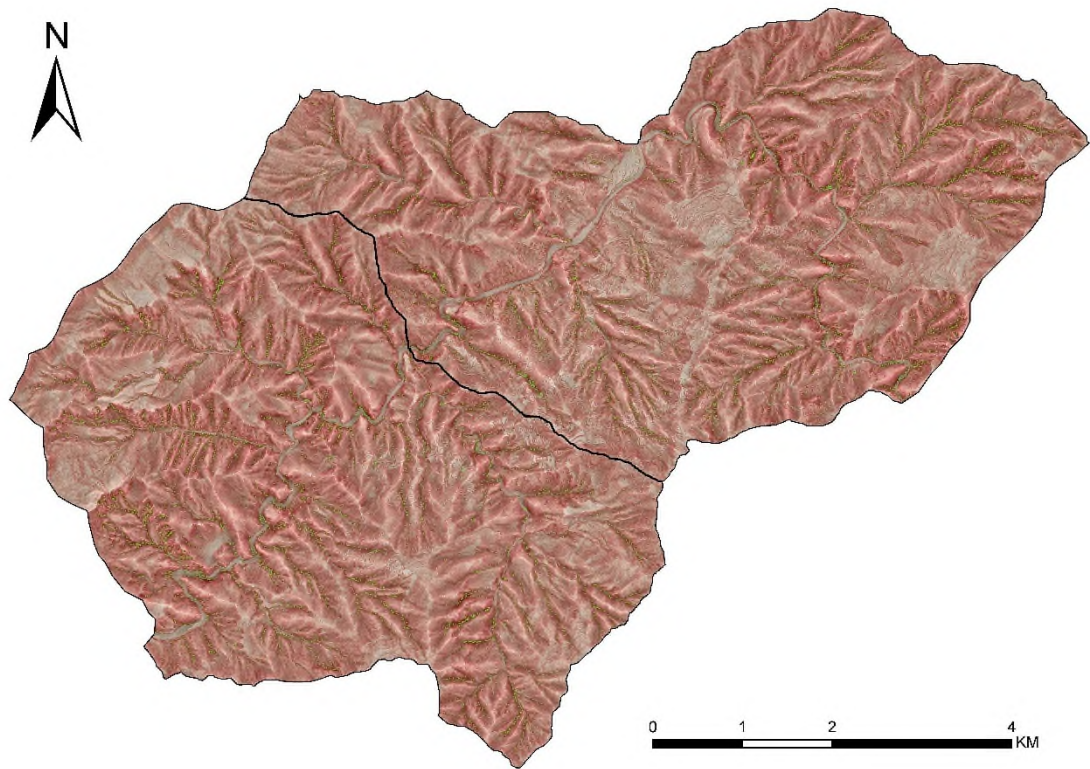


圖 6-14 蝕溝門檻值四($\text{Openness} < -10^\circ$, $\text{SR} > 15^\circ$)之結果

由圖 6-11~圖 6-14 的結果顯示，由於坡度粗糙度因子在主河道上的值域較小，提取位置集中在主河道的兩側，因此在提取蝕溝特徵時，不會包含主河道的位置。

在相同的坡度粗糙度門檻值中，地形開闊度 $< -5^\circ$ 之門檻值結果，其雜點較地形開闊度 $< -10^\circ$ 之門檻值結果多；在相同地形開闊度因子門檻值下，坡度粗糙度 $> 15^\circ$ 之門檻值結果較坡度粗糙度 $> 10^\circ$ 者，其提取結果稀疏且不連續，但與真實的蝕溝區位相比，坡度粗糙度 $> 15^\circ$ 之區位較接近真實的蝕溝結果。綜合四組門檻值與人工劃設之蝕溝進行比對及不同門檻值之分析後，門檻值二($\text{Openness} < -5^\circ$, $\text{SR} > 15^\circ$)之結果為較佳組合。

二、崩塌關聯分析

得到各組門檻值提取蝕溝之結果後，計算每個邊坡單元內蝕溝的網格數，再與崩塌資料結合，分別計算成功率曲線之 AUC 值、崩塌個數比圖，藉此探討蝕溝與崩塌之關聯性。

蝕溝門檻值各組之分析結果，如圖 6-15~圖 6-18 所示，在四組門檻值分析結果中，成功率曲線之 AUC 值分別為 0.685、0.693、0.685 與 0.691，與崩塌發生的相關性高，但四組門檻值之 AUC 值差異不大。

崩塌個數比圖在四組蝕溝門檻值結果中，整體趨勢都隨著地形特徵數量越高，崩壞比越高。雖然各組的斜率在後半段都變為較小，但門檻值二仍維持較大的斜率，且為四組門檻值中最大的組別。

綜合成功率曲線、崩塌個數比圖的結果，以第二組門檻值結果為最佳，與實際崩塌的區位有較高之關聯性。

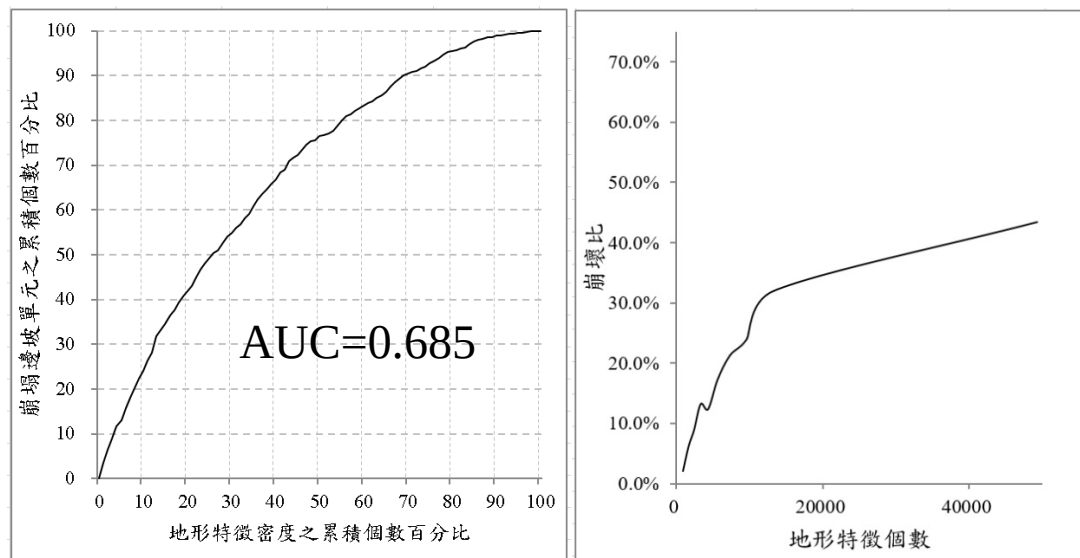


圖 6-15 蝕溝門檻值一($\text{Openness} < -5^\circ$, $\text{SR} > 10^\circ$)之崩塌分析結果

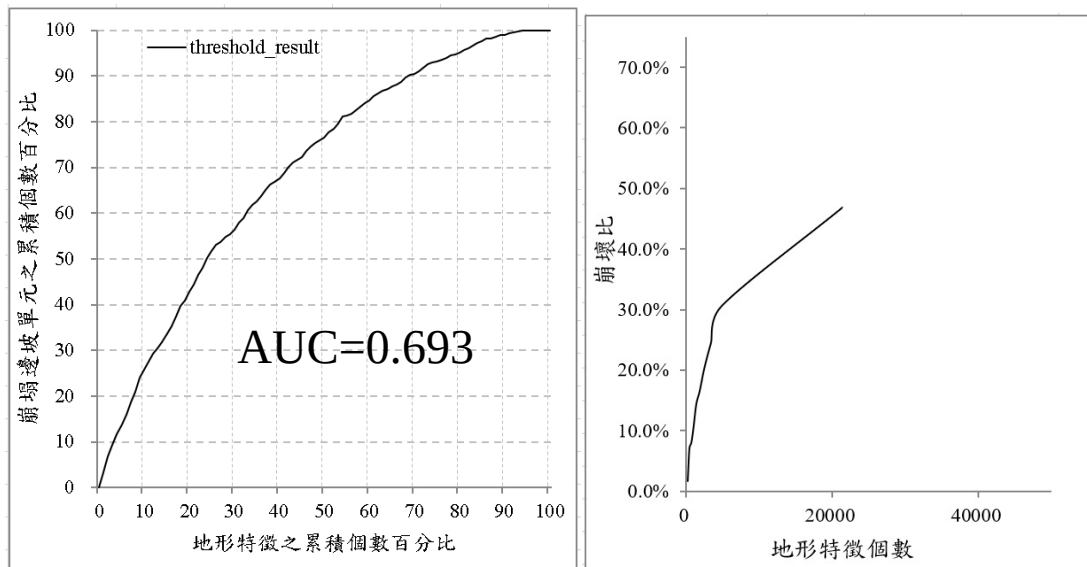


圖 6-16 蝕溝門檻值二($\text{Openness} < -5^\circ$, $\text{SR} > 15^\circ$)之崩塌分析結果

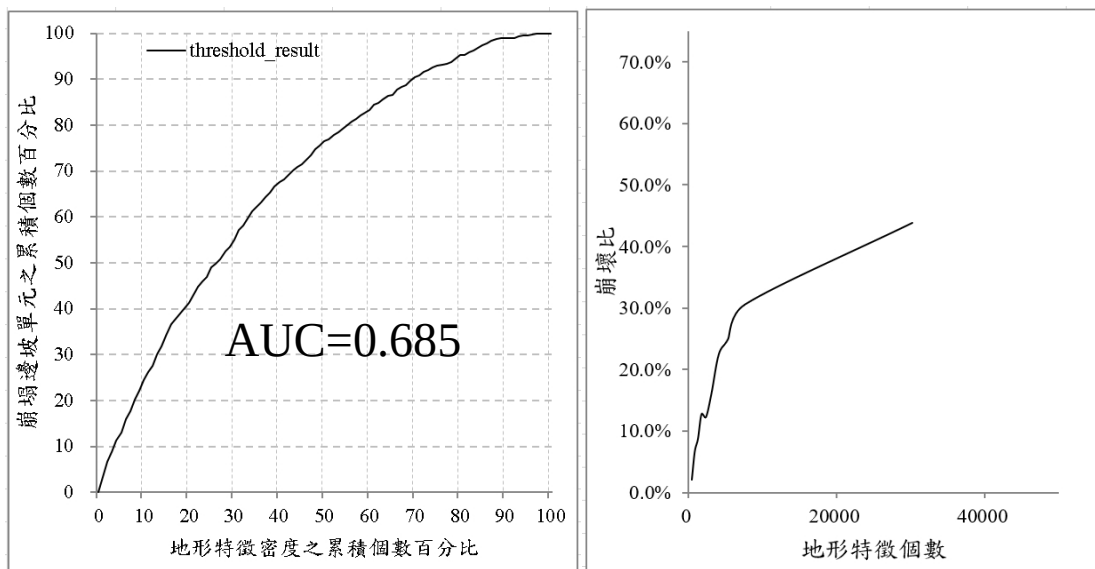


圖 6-17 蝕溝門檻值三($\text{Openness} < -10^\circ$, $\text{SR} > 10^\circ$)之崩塌分析結果

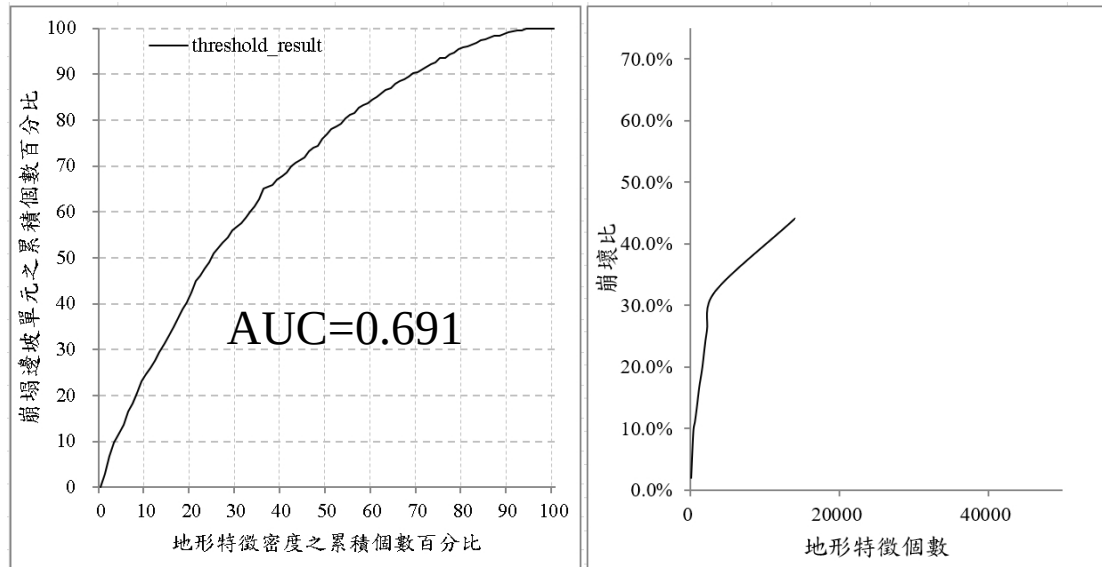


圖 6-18 蝕溝門檻值四($\text{Openness} < -10^\circ$, $\text{SR} > 15^\circ$)之崩塌分析結果

三、考量雨量因子之分析

因研究區範圍較大，雨量分布可能並非均勻的情況下，將雨量因子納入考慮，採用麥德姆(Matmo)及蘇迪勒(Soudelor)兩個颱風事件的最大 24 小時降雨量加總進行探討，各邊坡單元加總後之雨量介於 605 至 290 毫米。

根據上述兩項分析結果，可得知不管在人工判釋比較及崩塌關聯性分析，均可發現在門檻值二($\text{Openness} < -5^\circ$, $\text{SR} > 15^\circ$)為較佳的因子，故採用門檻值二分析雨量因子之影響。

依照不同降雨量對各邊坡單元進行分組後，各雨量組的 AUC 值如圖 6-19 所示，從圖中可看到 AUC 值大致呈現常態分佈，在中間的 450~400 毫米部分最大，往更高或是更低的降雨量區間時，AUC 值均逐漸變小。由圖中不同雨量組之 AUC 數值均超過 0.693 可知，邊坡單元中蝕溝的數量確實與崩塌有關聯性。

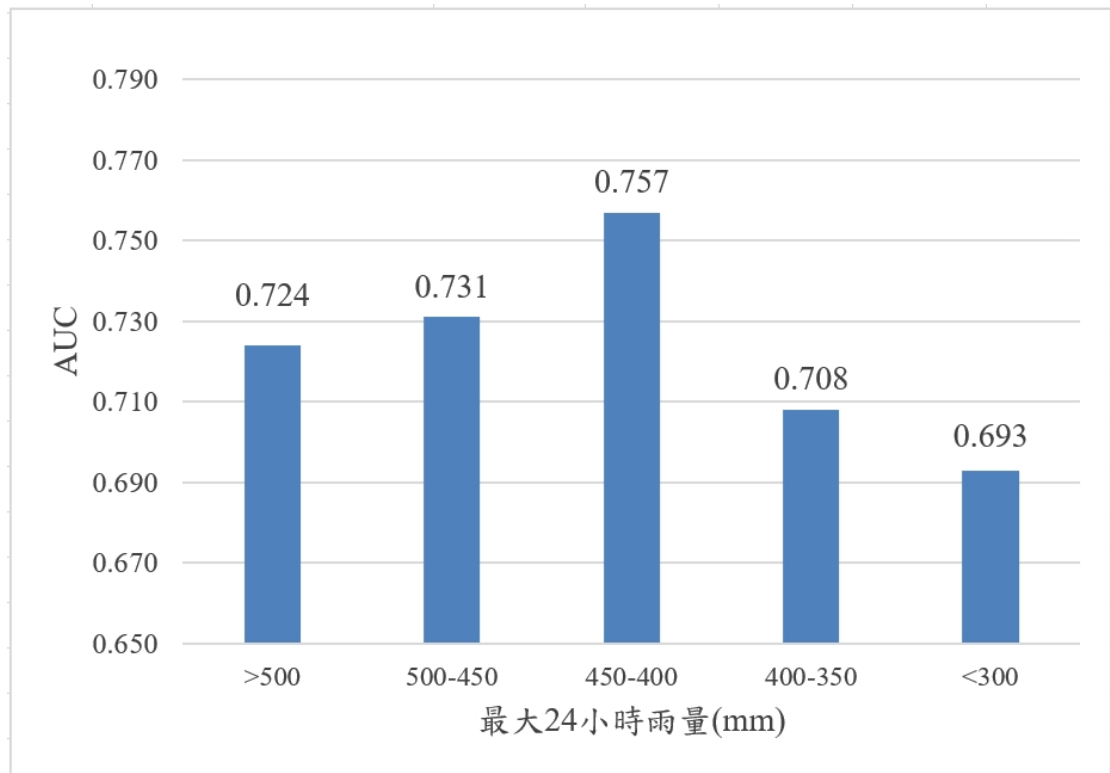


圖 6-19 蝕溝門檻值二之雨量分組 AUC

第六節 崩崖與崩塌發生之關聯性

一、提取結果與實際位置之比較

利用坡度與地形開闊度因子，分別設定四組門檻值以提取崩崖位置，同樣將提取結果與真實的崩崖位置比對，使用坡度與地形開闊度的疊圖，本研究劃設兩個子集水區的崩崖位置，如圖 6-20 所示，藍色線段即為依坡度與地形開闊度疊圖後人工劃設之崩崖區位。

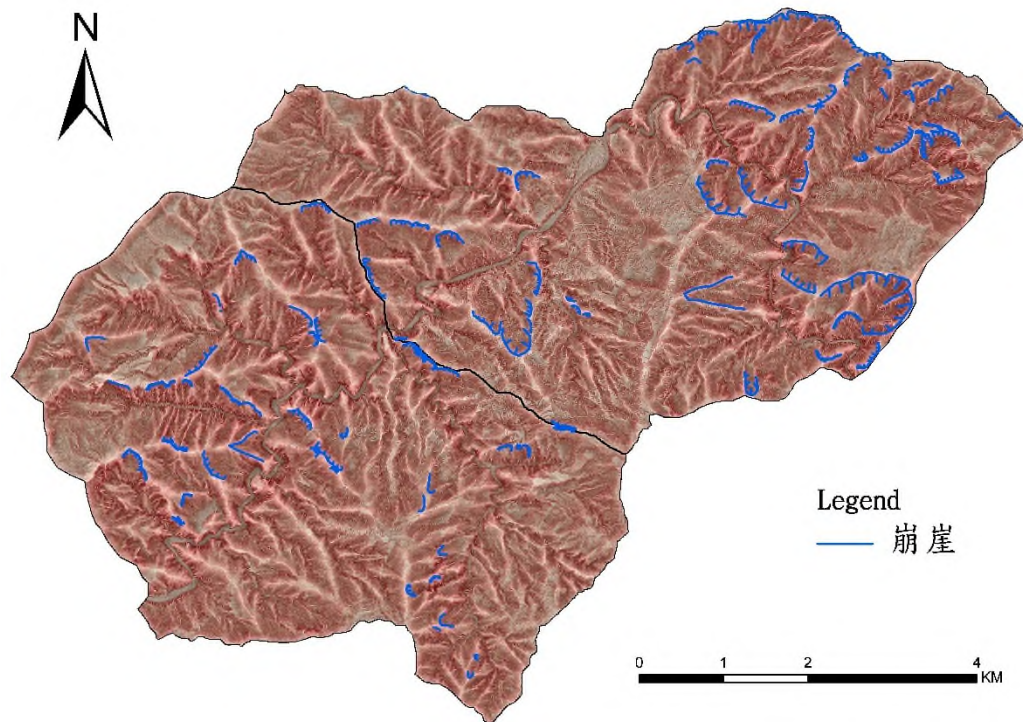


圖 6-20 人工劃設之崩崖位置

利用人工劃設的結果，衡量提取崩崖門檻值之優劣，四組門檻值之結果依序如圖 6-21~圖 6-24 所示，綠點即該門檻值之結果，人工劃設之崩崖為原藍色線段處。

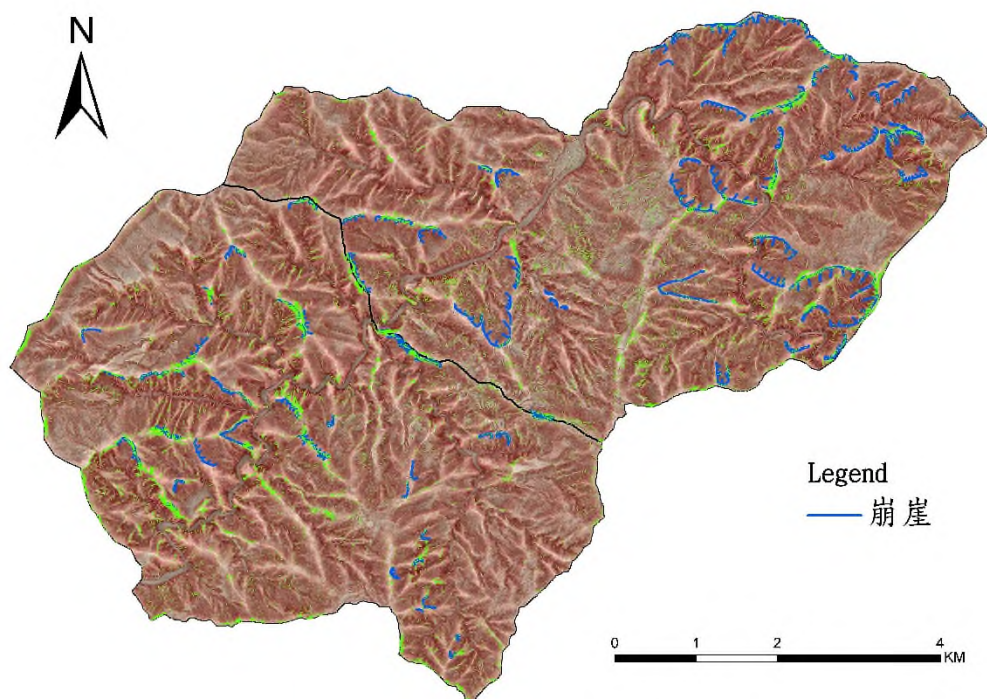


圖 6-21 崩崖門檻值一之結果

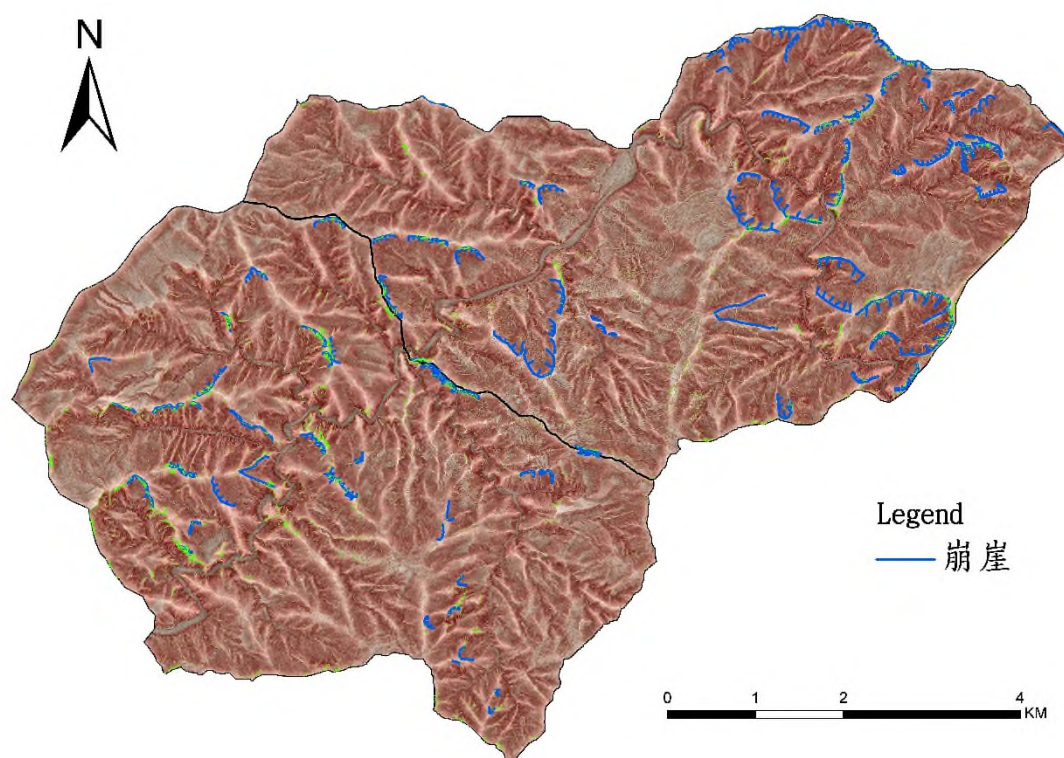


圖 6-22 崩崖門檻值二之結果

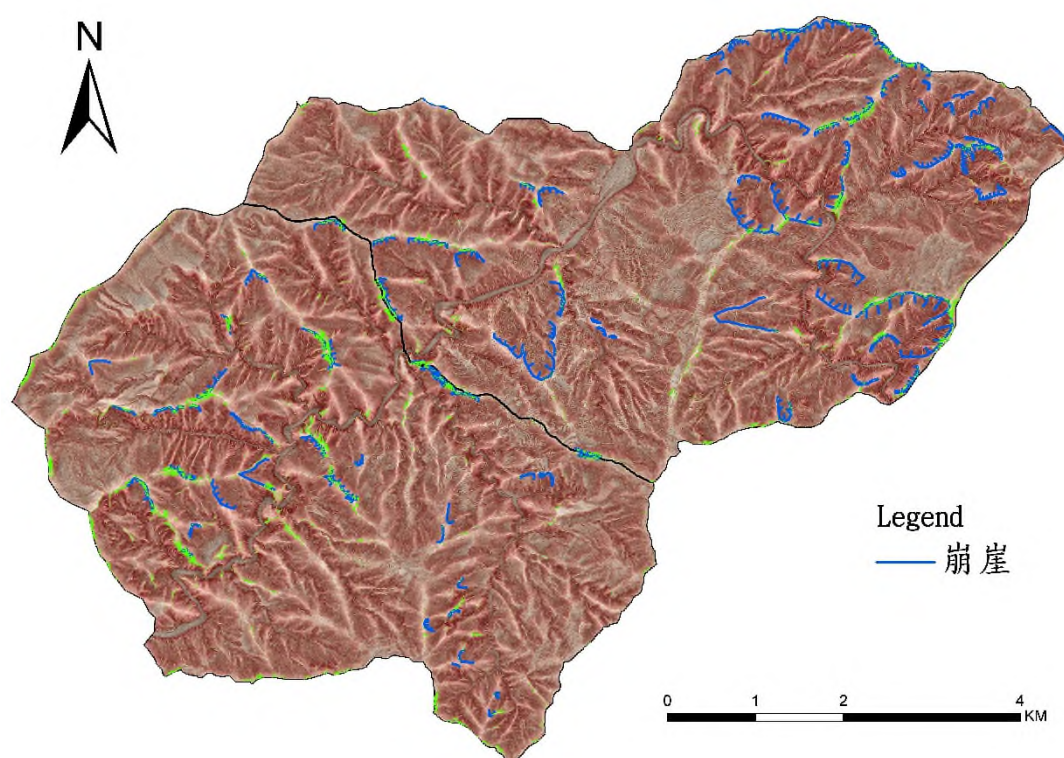


圖 6-23 崩崖門檻值三之結果

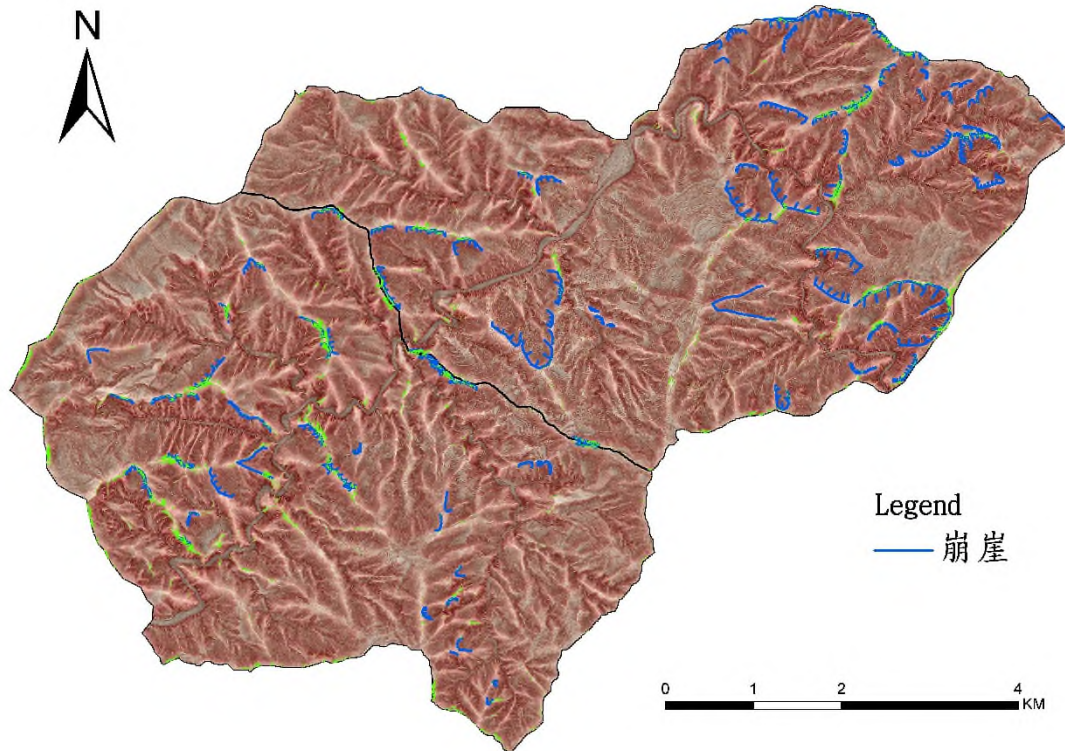


圖 6-24 崩崖門檻值四之結果

由圖 6-21~圖 6-24 的結果顯示，在門檻值一的坡度及地形開闊度均外擴的情況下，兩者交集後會有較多的雜點產生，大多分布在靠近河道較突出的區位；如僅對地形開闊度外擴與坡度交集，則崩崖的提取結果較不連續，由門檻值二的組合可以看到這樣的情況；門檻值三及四均為坡度外擴後與地形開闊度交集的結果，可以發現其對崩崖的提取結果之線段較連續。從四組門檻值結果圖比較後，可發現門檻值三對人工劃設之崩崖有較佳的提取結果。

二、崩塌關聯分析

得到各組門檻值提取崩崖之結果後，計算每個邊坡單元內崩崖的網格數，再與崩塌資料結合，分別計算成功率曲線之 AUC 值、崩塌個數比圖，藉此探討崩崖與崩塌之關聯性。

崩崖門檻值各組之分析結果，如圖 6-25~圖 6-28 所示，在四組門檻值分析結果中，成功率曲線之 AUC 值分別為 0.666、0.676、0.637 與 0.634，與崩塌發生的相關性高。

崩塌個數比圖在四組崩崖門檻值結果中，整體趨勢都隨著地形特徵個數越多，崩壞比越高，但在崩壞比最高的位置，四組門檻值的斜率都變得較小，其中門檻值二在後半段崩壞比較高的部份，斜率為四組門檻值中最大。

綜合成功率曲線、崩塌個數比圖的結果，門檻值二有較佳的崩塌關聯分析結果，可能因門檻值二提取之點位較少，使得雜點同樣減少；而與人工劃設比較結果較佳的門檻值三，在雜點較多的情況下使得崩塌關聯分析結果較門檻值二差，可透過後續更有效的去除雜點方法，留下真實崩崖區位之連續線段，故門檻值三仍在呈現上是較佳的選擇。

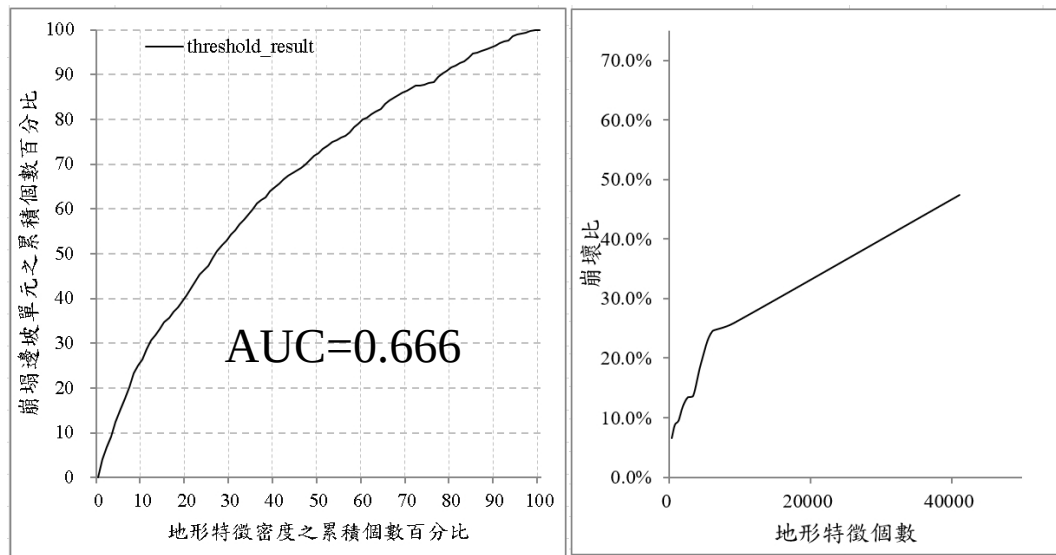


圖 6-25 崩崖門檻值一之崩塌分析結果

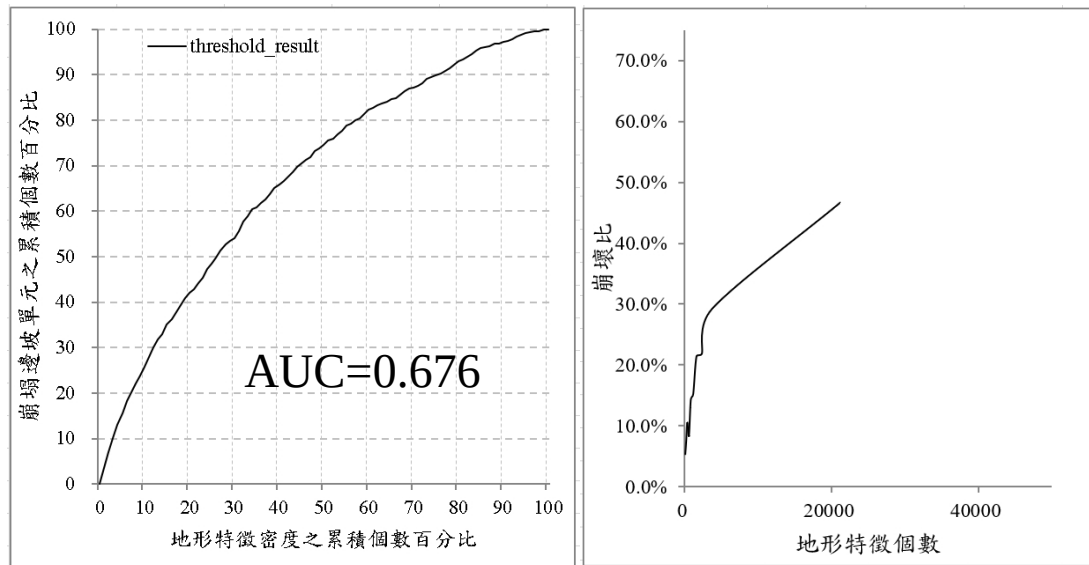


圖 6-26 崩崖門檻值二之崩塌分析結果

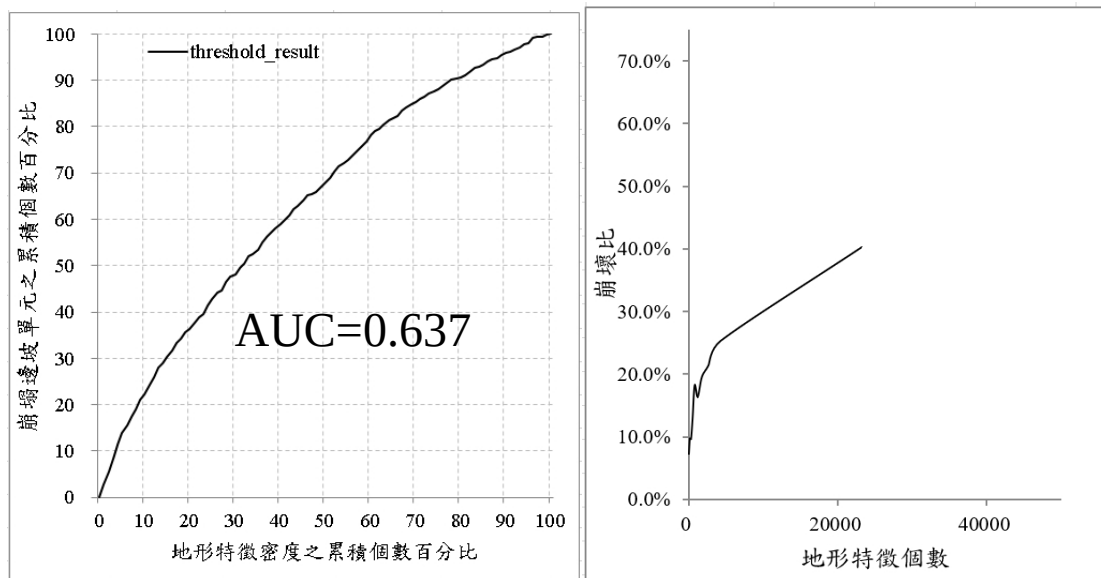


圖 6-27 崩崖門檻值三之崩塌分析結果

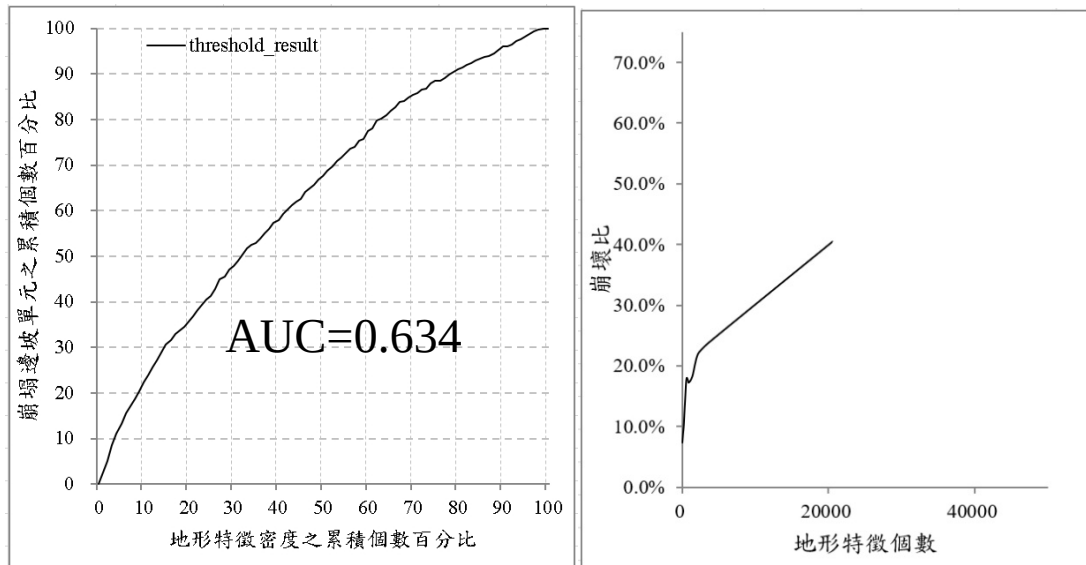


圖 6-28 崩崖門檻值四之崩塌分析結果

三、考量雨量因子之分析

因研究區範圍較大，雨量分布並非均勻的情況下，故將雨量因子納入考慮，採用麥德姆(Matmo)及蘇迪勒(Soudelor)兩個颱風事件的最大 24 小時降雨量加總進行探討，各邊坡單元加總後之雨量介於 605 至 290 毫米。

根據上述兩項分析結果，人工劃設比較的部分在門檻值三為較佳的組合，而與崩塌關聯性分析則是門檻值二有較佳的結果，優先考量與人工劃設之區位，故採用門檻值三為較好之組合分析雨量因子之影響。

依照不同降雨量對各邊坡單元進行分組後，各雨量組的 AUC 值如圖 6-29 所示，從圖中可看到 AUC 值大致呈現常態分佈，在中間的 450~400 毫米部分為最大之 0.694，往更高或是更低的降雨量區間時，AUC 值均逐漸變小。由圖中不同雨量組之 AUC 數值均超過 0.620 可知，邊坡單元中崩崖的數量確實與崩塌有關聯性。

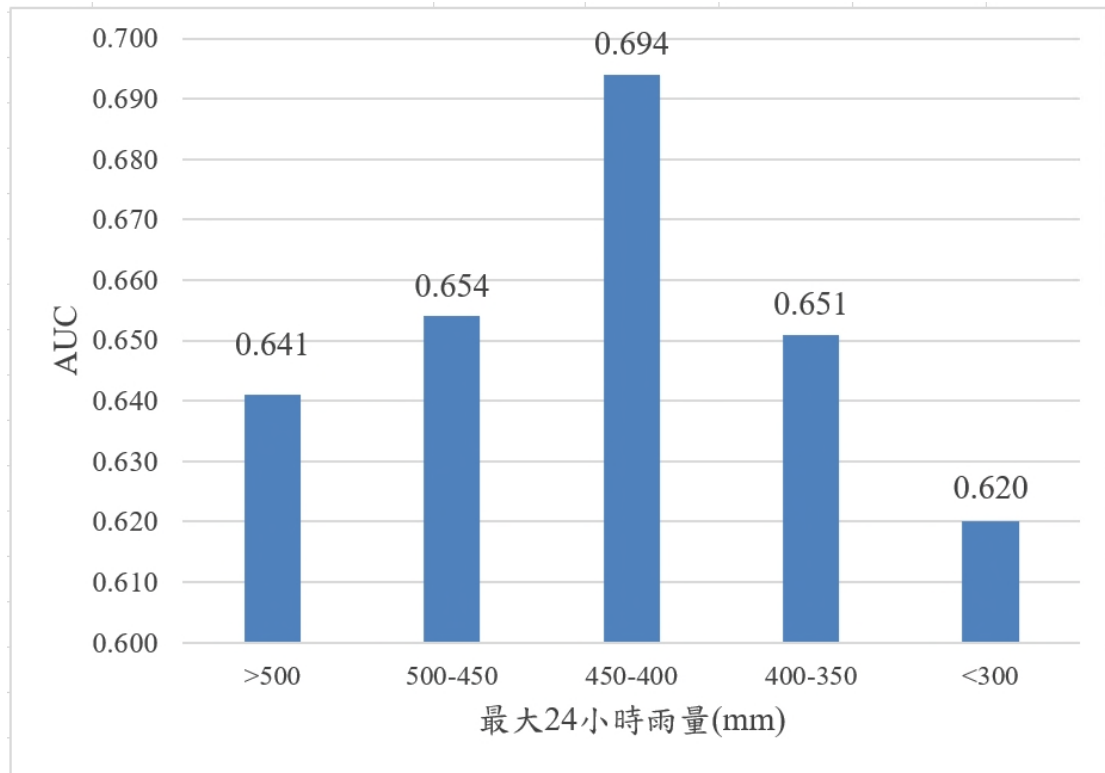


圖 6-29 崩崖門檻值三之雨量分組 AUC

第七章 結論與建議

第一節 結論

- 1.本研究主要分為兩部份，第一部分是利用地形因子提取石門水庫上游 2 個子集水區之遷急線，先劃設樣本取得各因子之門檻值，並利用與河道高程差範圍，依序切割河道、外擴網格，再與坡度因子交集，分別提取 B_L 、 B_M 與 B_H 三段遷急線，並且與真實的遷急線位置進行比較，計算混淆矩陣以得到最佳的提取方式及門檻值。第二部份是利用地形因子提取蝕溝與崩崖等區位，並且將這些含有潛在崩塌地形特徵的網格與集水區的邊坡單元結合，並且根據真實的崩塌地分布，探討崩塌發生與本研究提取的地形特徵的網格數之關聯性。
- 2.在提取 B_L 段遷急線的結果中，切割不同的河道高程差範圍，以 $B_L(150)$ 為最佳結果；在提取 B_M 段遷急線的結果中，以 $B_M(250)$ 的結果最佳；在提取 B_H 段遷急線的結果中， $B_H(450)$ 與 $B_H(500)$ 的結果在無支流影響或者是支流長度較短的遷急線位置，其提取結果較佳。此外，本研究利用 $B_H(450)$ 的結果加入支流修正，發現在修正後更加接近真實的遷急線位置，顯示在支流修正後有較佳的提取結果。
- 3.在 B_M 與 B_H 之結果中發現，少數與真實遷急線位置不符的提取結果，在子集水區的邊界處，其真實的遷急線位置相較於提取結果，有往坡面上方偏移的情形，推論原因可能為該處的支流影響較大，亦或者該段遷急線在子集水區的邊界，會因為鄰近山脊線而增加與河道的高程差。
- 4.將下宇老子集水區之最佳門檻值結果， $B_L(150)$ 、 $B_M(250)$ 與 $B_H(450+$ 支流修正)結果套用在泰平驗證區，在 B_L 段的遷急線提取結果中顯示，混淆矩陣之準確值為 76.77%，提取效果佳；在 B_M 段的遷急線

提取結果中顯示，混淆矩陣之準確值為 66.54%；在 B_H 段的遷急線提取結果中顯示，混淆矩陣之準確值為 56.40%。本研究提取結果為較連續的線段，實際經地形判釋的 B_M 、 B_H 線段結果較不連續，為避免使用推估之線段進行比較造成誤差，故僅採用原實際線段進行評估，造成準確率較低。此外，泰平驗證區 B_H 段與下宇老試驗區有相同的情形，也就是在子集水區的邊界位置，其提取結果與真實遷急線位置的差異性較大。

5.在蝕溝的提取結果中，發現坡度粗糙度因子門檻值主要影響提取線段的連續性，而地形開闊度門檻值則是影響提取雜點的多寡。與實際蝕溝區位相比，第二組地形開闊度小於 -5° 與坡度粗糙度大於 15° 之門檻值提取結果最佳。進一步分析蝕溝與崩塌之關聯性，結合成功率曲線、崩塌個數比圖，以第二組門檻值最佳，其 AUC 值為 0.693，與崩塌發生的相關性高，但四組門檻值結果彼此差異不大，顯示地形因子的門檻值高低主要影響提取線段的連續性，不影響提取結果在邊坡單元中的個數排序。

6.在崩崖的提取結果中，利用對兩個地形因子外擴的結果，發現地形開闊度影響提取的連續性。與實際崩崖區位相比，第三組之門檻值提取結果最佳。進一步分析崩崖與崩塌之關聯性，結合成功率曲線、崩塌個數比圖，以第二組之門檻值最佳，顯示邊坡單元中崩崖的數量確實與崩塌有關聯性。

第二節 建議

1.本研究發現支流會影響遷急線與河道的高程差，在經過支流的修正後，發現在子集水區邊界位置，此處的遷急線仍會受山脊的影響而增加與河道的高程差值，建議未來可以加以修正或調整，讓提取結果更接近實際遷急線位置。

- 2.本研究準確度評估方法應用在較不連續的遷急線線段時，其準確率會較低，建議未來可以加入其他方式剔除非目標區位線段或是將較不連續的遷急線藉由地形圖推估成連續的線段。
- 3.在探討地形特徵密度與崩塌地分布之關聯性時，本研究使用的是麥德姆與蘇迪勒颱風後兩期的崩塌目錄，建議未來可以增加其他事件崩塌地資料，探討多年期的崩塌目錄與提取結果之相關性。
- 4.本研究於遷急線及蝕溝、崩崖的判釋上初步有不錯之成效，但在部分的區位仍有少許雜點產生，如能將這些雜點更完整去除，方能降低雜點對判釋結果之影響，因此建議可透過機器學習方法加以精進對遷急線、蝕溝等地形特徵之判釋。
- 5.根據本研究目前的結果顯示，邊坡單元中地形特徵的數量與崩塌確實有關聯性，建議後續可將地形特徵之判釋結果做為崩塌潛勢評估的因子，用於提升崩塌潛勢模式對於集水區崩塌區位之預測能力。

參考文獻

1. 千木良雅弘 (2011), 「大規模崩塌潛感區」, 科計圖書股份有限公司, 71-72。
2. 戶堅一郎 (2012), 「航空レーザ測量データを用いた微地形図の作成」, 砂防学会誌, 65(2), 51-55。
3. 日本土木研究所 (2008), 深層崩塌潛勢溪流檢出方法說明書。
4. 王軻、王琤、張青峰、丁凱隆 (2015), 「地形開度和差值圖像閾值分割原理相結合的黃土高原溝沿線提取法」, 測繪學報, 44(1), 67-75。
5. 李準勝、蔡龍珩 (2009), 「集水區水流下切動力模型的量化分析」, 中華水土保持學報, 40(3), 211-223。
6. 李璟芳、曹鼎志、黃韋凱、林聖琪、尹孝元 (2017), 「天空開闊度與局部立體模型於山崩判釋及地形變異評估：以台東縣紅葉村為例」, 中華水土保持學報, 49(1), 27-39。
7. 周毅、湯國安、張婷、王春 (2007), 「基於網格DEM線狀分析窗口的地形特徵快速提取方法」, 測繪通報, 10, 67-69。
8. 林俐玲、林可薇、陳品岡、沈哲緯 (2011), 「斜坡單元進行山坡地土壤流失量之推估」, 中華水土保持學報, 43(4), 395-410。
9. 林彥享 (2003), 「運用類神經網路進行地震誘發山崩之潛感分析」, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
10. 林昭遠、黃文彥、黃文政 (2016), 「集水區深層崩塌區位之推估及應用」, 水土保持學報 48(3), 1763-1778。
11. 張巽昕 (2010), 「強降雨山崩因子之探討-以旗山溪流域為例」, 國立成功大學資源工程學系碩士論文。

12. 湯國安、楊昕 (2006)，ArcGIS地裡訊息系統空間分析實驗教程。
13. 經濟部中央地質調查所 (2014)，「強化豪雨引致山崩之即時動態潛勢評估與警戒模式發展(4/4)」。
14. 鄒昆、沃焱、徐翔 (2018)，「利用特征显著度提取地形特征线的方法」，武漢大學學報，43(3)，342-348。
15. 鈴木隆介 (2000)，「建設技術者のための地形図読図入門第3巻段丘・丘陵・山地」，東京，古今書院。
16. 劉治中、蕭國鑫、饒見有、劉進金、吳哲榮、黃群修 (2010)「結合空載LiDAR與彩色航照應用於崩塌地研判」，航測及遙測學刊，15，111-122。
17. 蔡雨澄 (2012)，「極端降雨下之山崩潛感分析-以莫拉克颱風誘發山崩為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
18. 穆婧、林昭遠 (2013)，「集水區崩塌地環境指標分析與崩塌潛感推估」，中華水土保持學報，44(2)，121-130。
19. 鍾佩蓉 (2009)，「統計方法與GIS之結合應用於山坡地災害潛勢分析」，臺北科技大學土木與防災研究所學位論文。
20. 魏秀珍 (2006)，「以小集水區崩塌地密度來探討影響曾文水庫流域邊坡穩定之因子」，國立成功大學資源工程學系碩士論文。
21. Agliardi, F., Crosta, G., and Zanchi, A. (2001). "Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics." *Engineering Geology*, 59, 83-102.
22. Aguirre, E., Benavente, C., Audinb, L., Wimpenny, S., Baize, S., Rosell, L., Delgado, F., García, B., and Palominoa, A. (2021). "Earthquake surface ruptures on the altiplano and geomorphological evidence of normal faulting in the December

- 2016 (Mw 6.1) Parina earthquake, Peru.” *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 98-103.
23. Arai, N., and Chigira, M. (2018). “Rain-induced deep-seated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan.” *Island Arc*, 27.
 24. Babaei, S., Dehbozorgi, M., Hosseiniasl, A., Asiabar, S.H. (2020). “New insights into the effect of the quaternary fault activity on river knickpoints in the Central Alborz (Iran).” *Quaternary International*, 562, 104-120.
 25. Baeza, C., and Corominas, J. (2001). “Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques.” *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1251-1263.
 26. Berlin, M.M., and Anderson, R.S. (2007). “Modeling knickpoint retreat on the Roan Plateau, western Colorado.” *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F3).
 27. Bosino, A., Bernini, A., Botha, G.A., Bonacina, G., Pellegrini, L. Omran, A., Hochschild, V., Sommer, C., and Maerker, M. (2020). “Geomorphology of the upper Mkhomazi River basin, KwaZulu-Natal, South Africa, with emphasis on late Pleistocene colluvial deposits.” *Journal of Maps*.
 28. Carrara, A. (1983). “A multivariate model for landslide hazard evaluation.” *Mathematical Geology*, 15, 403–426.
 29. Carrara, A., Crosta, G., and Frattini, P. (2008). “Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment.” *Geomorphology*, 94, 353-378.

30. Chang, K.T., Chiang, S.H., and Hsu, M.L. (2007). "Modeling typhoon- and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression." *Geomorphology*, 89, 335-347.
31. Chigira, M., Duan, F., Yagi, H., and Furuya, T. (2004). "Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics." *Landslides*, 1, 203-209.
32. Chung, C.F., and Fabbri, A.G. (1993). "The representation of geoscience information for data integration." *Natural Resources Research*, 2, 122-139.
33. Chung, C. F., and Fabbri, A. G. (1999). "Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(12), 1389-1399.
34. Favalli, M., and Fornaciai, A. (2017). "Visualization and comparison of DEM-derived parameters. Application to volcanic areas." *Geomorphology*, 290, 69-84.
35. Frankel, K.L., and Dolan, J.F. (2007). "Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data." *Journal of Geophysical Research*, 112.
36. Gallen, S.F., Wegmann, K.W., and DelWayne R. (2013). "Miocene rejuvenation of topographic relief in the southern Appalachians." *The Geological Society of America*, 23(2), 4-10
37. Ghattejee, D. (1999). "A GIS-assisted Analysis of Landslide Distribution on Hillslopes Divided by Slope Breaks." *The science reports of the Tohoku University.7th series, Geography*, 49, 69-80.
38. Grohmann, C.H., Smith, M.J., and Riccomini, C. (2011). "Multiscale analysis of topographic surface roughness in the midland valley, Scotland." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 49(4), 1200-1212.

39. Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., and Cardinali, M. (2006). "Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 115-131.
40. Hiraishi, N., Chigira, M., and Matsushi, Y., (2013). *Convex slope breaks in the Tenkawa District, Northern Kii Mountains*. Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 56(B), 731-740.
41. Horn, B.K.P. (1981). "Hill shading and the reflectance map." *Proceedings of the IEEE*, 69, 14.
42. Hou, Y., Chigira, M., and Tsou, C.Y. (2014). "Numerical study on deep-seated gravitational slope deformation in a shale-dominated dip slope due to river incision." *Engineering Geology*, 179, 59-75.
43. Hunt, J.A., Pyle¹, D.M., and Mather, T.A. (2019). "The geomorphology, structure, and lava flow dynamics of peralkaline rift volcanoes from high-resolution digital elevation models." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 1508-1538.
44. Kennelly, P.J., Patterson, T., Jenny, B., Huffman, D.P., Marston, B.E., Belle, S., and Tait, A.M. (2020). "Elevation models for reproducible evaluation of terrain representation." *Cartography and Geographic Information Science*, 48(1), 63-77.
45. Komura, K., Kaneda, H., Tanaka, T., Kojima, S., Inoue, T., and Nishio, T. (2020). "Synchronized gravitational slope deformation and active faulting: A case study on and around the Neodani fault, central Japan." *Geomorphology*, 365.
46. Korzeniowska, K., Pfeifer c, N., and Landtwing, S. (2018). "Mapping gullies, dunes, lava fields, and landslides via surface roughness." *Geomorphology*, 301, 53-67.

47. Lee, C.T., Huang, C.C., Lee, J.F., Pan, K.L., Lin, M.L., and Dong, J.J. (2008). "Statistical approach to storm event-induced landslides susceptibility." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 941-960.
48. Ling, S., Sun, C., Li, X., Ren, Y., Xu, J., and Huang, T. (2020). "Characterizing the distribution pattern and geologic and geomorphic controls on earthquake-triggered landslide occurrence during the 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou earthquake, Sichuan, China." *Landslides*.
49. Loget, N., and Van Den Driessche, J., (2009). "Wave train model for knickpoint migration." *Geomorphology*, 106, 376-382.
50. McKean, J., and Roering, J. (2004). "Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry." *Geomorphology*, 57, 331-351.
51. Regmi, N.R., and Walter, J. (2020). "Detailed mapping of shallow landslides in eastern Oklahoma and western Arkansas and potential triggering by Oklahoma earthquakes." *Geomorphology*, 366.
52. Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A. C., and Peruccacci, S. (2010). "Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts." *Geomorphology*, 114, 129-142.
53. Sánchez-García, E., Balaguer-Beser, A., Almonacid-Caballer, J., and Pardo-Pascual, J. (2019). "A new adaptive image interpolation method to define the shoreline at sub-pixel level." *Remote Sensing*, 11(16), 1880.
54. Sharpnack, D.A., and Akin, G. (1969). "An algorithm for computing slope and aspect from elevation." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 35, 347-248.

55. Stock, J.D., Montgomery, D.R. (1999). "Geologic constraints on bedrock river incision using the stream power law." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B3), 4983-4993.
56. Struth, L., Garcia-Castellanos, D., Viaplana-Muzas, M., and Vergés, J. (2019). "Drainage network dynamics and knickpoint evolution in the Ebro and Duero basins: From endorheism to exorheism." *Geomorphology*, 327, 554-571.
57. Synder, N.P., Whipple, K.X., Tucker, G.E., and Merritts, D.J. (2003), "Channel response to tectonic forcing: Analysis of stream morphology and hydrology in the Mendocino triple junction region, northern California," *Geomorphology*, 53, 97-127.
58. Tsou, C.Y., Chigira, M., Matsushi, Y., and Chen, S.C., (2014). "Fluvial incision history that controlled the distribution of landslides in the Central Range of Taiwan." *Geomorphology*, 226, 175-192.
59. Tsou, C.Y., Chigira, M., Matsushi, Y., and Chen, S.C. (2015). "Deep-seated gravitational deformation of mountain slopes caused by river incision in the central range, Taiwan: spatial distribution and geological characteristics." *Engineering Geology*, 196, 126-138.
60. Tsou, C.Y., Chigira, M., Matsushi, Y., Hiraishi, N., and Arai, N. (2017). "Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment: a case study in a transient landscape in Japan." *Landslides*, 14, 1901-1914.
61. Van Den Eeckhaut, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Rossi, M., and Poesen, J. (2009). "Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an

- example from the Flemish Ardennes, Belgium,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 507-521.
62. Varnes, D.J. (1978). “Slope Movement Types and Processes.” *National Academy of Sciences*, 11-33.
63. Walker, S.J., Wilkinson, S.N., Van Dijk, A.I.J.M., and Hairsine, P.B. (2020). “A multi-resolution method to map and identify locations of future gully and channel incision.” *Geomorphology*, 358, 107-115.
64. Wang, D., Laffan, S.W., Liu, Y., and Wu, L. (2010). “Morphometric characterisation of landform from DEMs.” *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2), 305-326.
65. Whipple, K.X., and Tucker G.E. (2002). “Implication of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution.” *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107, 3-13-3-20.
66. Whipple, K.X. (2004). “Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens.” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 151-185.
67. Whittaker, A.C., Cowie, P.A., Attal, M., Tucker, G.E., and Roberts, G.P. (2007). “Contrasting transient and steady-state rivers crossing active normal faults: new field observations from the central Apennines, Italy”. *Basin Research*, 19, 529-556.
68. Xie, M., Esaki, T., and Zhou, G. (2004). “GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-Dimensional Deterministic Model.” *Natural Hazards*, 33, 265-282.
69. Yang, Y., Gong, M., Leblon, B., and Chui, Y.H. (2011). “Linear window correlation: new image processing based approach to strain distribution analysis of wood.” *Canadian Journal of Forest Research*, 41, 11.

70. Yokoyama, R., Shirasawa, M., and Pike, R.J. (2002). "Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 257-265.
71. Zevenbergen, L.W. (1987). "Quantitative analysis of land surface topography." *Earth Surface Processes and Landforms*. 12, 47-56.
72. Zezere, J.L., Oliveira, S.C., Garcia, R.A.C., and Reis, E. (2007). "Landslide risk analysis in the area North of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements." *Landslides*, 4, 123-136.

附錄一 核定本審查意見及辦理情形

項次	審查意見	辦理情形
1	本計畫擬以單一方向窗口分析地形因子，並以門檻值判釋遷急線，作為判定後續崩塌發生之關聯性。在分析時，於判定地形因子，包括遷急線等，因有設定門檻故已累積誤差，後續進行地形特徵密度與崩塌關聯時，再度累積誤差。在誤差持續傳遞下，成果較難確保。	謝謝委員意見，本計畫擬採用單一方向窗口分析不同地形因子，再利用兩種以上的因子以交集或聯集的方式，分別建立門檻值以提取遷急線、崩崖、蝕溝等地形特徵。因此，在進行地形特徵密度與崩塌發生之關聯性分析時，僅考慮崩崖、蝕溝密度，不納入遷急線，避免累積誤差產生。
2	對於集水區劃設之坡單元並未討論崩塌之定義方式。	謝謝委員意見，本研究定義邊坡單元是否屬於崩塌樣本時，乃利用邊坡單元中前後期新增崩塌地面積大於100m ² 時，定義該邊坡單元為崩塌樣本，小於100m ² 則為非崩塌樣本。
3	分析成果宜與實際案例比對驗證。	謝謝委員意見，本研究透過門檻值設定來提取遷急線、崩崖、蝕溝等地形特徵，並與實際地形資料、崩塌資料分析比較。目前擬選擇石門水庫集水區內子集水區進行分析。

4	本研究成果似仍需許多人為判斷，建議宜提供後續推廣訓練。	謝謝委員意見，設定門檻值時需由人為進行判斷，後續可視需要進行推廣。
5	所選取之集水區如何確認其是否具有代表性，需要好好探討。	謝謝委員意見，目前擬選擇石門水庫集水區內子集水區進行分析，將再進一步選擇具有代表性之子集水區

附錄二 期初審查意見與辦理情形

項次	審查意見	辦理情形
1	由陡變緩之線應正名遷緩線。	謝謝委員意見，本研究已統一將坡面上坡度由緩變急的變化點的連線表示為遷急線。
2	Knick point 應名為遷急點。	謝謝委員意見，本研究內容已修正為遷急點。
3	所選之地形因子是否為獨立因子？	謝謝委員意見，在各地形因子中，天空開闊度與地形開闊度較有關聯性，兩者在較大值時，代表著開闊的程度較大；反之，兩者在較小值時，代表著開闊的程度較小，兩者差異在於計算的方式以及值域大小。其他因子則為獨立因子。
4	遷緩(急)線是否為一條平滑之直或曲線(在平面圖上)？若否則有何地形與地質之特性？又與崩塌有和連帶關係？	謝謝委員意見，遷急線為一條平滑的曲線，形成原因也受不同的岩石交界處或斷層運動等影響。遷急線位置的崩塌密度較遷急線上方來得高，詳如第二章第二節。
5	建議先釐清分析對象為淺崩或大崩。	謝謝委員意見，在邊坡單元地形特徵密度與崩塌發生之關聯性分析中主要的分析對象為淺層崩塌。

6	目前以崩崖及蝕溝主要分析特徵，但以大規模崩塌之地形特徵，兩者均可能為崩塌後之地形特徵，故請確認研究之主題目標為潛勢或崩塌特性？	謝謝委員意見，本研究嘗試將蝕溝、崩崖等地形特徵密度，做為預測崩塌是否發生的因子，因此屬於潛勢因子的範疇。
7	單方向性為網格尋找線性特徵，地形因子為網格分析，而又與坡單元比較，是將三種不同分析單元基準加以合併或比對，其意義相對混淆，且有分析基準不一的問題	謝謝委員意見，本研究找出最佳提取地形特徵之因子門檻值後，將計算各邊坡單元內，地形特徵之網格數，與是否含有崩塌區位，藉此探討目標地形特徵的數量越多，是否發生崩塌的機率更高。此外，單方向性窗口只是計算地形因子的方式之一，相較於多方向性的計算方式，單方向性窗口只考慮單一方向。而邊坡單元的目的是做為分析單元，藉此分析目標地形特徵的網格數與崩塌的關聯性。
8	目前以地形特徵密度之不同組合及門檻值建立成功率曲線，但各地形特徵值將如何整合？	謝謝委員意見，本研究將利用特徵之特性，設定不同地形因子之門檻值，再比對真實的地形特徵區位，得到最佳的提取方式及因子門檻值。

9	簡報第 14 頁多處坡度<5 度處均位於稜線上，似不合理。	謝謝委員意見，該圖為參考文獻的成果，主要用於說明遷急線在不同地形因子之變化情形。
10	劃設坡單亦有採用遷急點分析，故與坡單元疊合時會落於邊界上，使密度降低。	謝謝委員意見，本研究主要分成兩個部分，第一部分為判釋子集水區內遷急線，此部份不採用邊坡單元；第二部分則針對崩崖、蝕溝判釋後的結果，以邊坡單元為分析單元，研究地形特徵密度與崩塌發生的關聯性。
11	遷急線係由緩變陡的地形特徵，是坡地崩塌的前沿。	謝謝委員意見，本研究已統一將坡面上坡度由緩變急的變化點的連線表示為遷急線。
12	建議就本研究地形特徵密度(崩崖、蝕溝)的相關文獻提出說明，遷急線與特徵密度有關？	謝謝委員意見，本研究主要分為兩部分，第一部分是利用地形因子組合提取遷急線位置，並與實際遷急線比對；第二部分是利用地形因子組合提取蝕溝與崩崖等位置，再結合邊坡單元與實際崩塌區位，探討地形特徵密度與崩塌之關係，兩部分獨立討論。相關文獻已於第二章補充。

13	與崩塌的地形因子很多，宜有較為系統性的探討。	謝謝委員意見，本研究整理國內外相關研究中使用過的崩塌潛勢因子，並概分為植生因子、地形因子、地質因子、人為開發因子、雨量因子等 5 類。其中，本研究所分析地形特徵密度較接近地形因子一類。
14	在本地形研判時，多採用遷急線作為判定之依據，建議收集這方面的研究成果。	謝謝委員意見，遷急線之判釋及遷急線之特性等相關文獻如第二章。
15	LiDAR 資料是否需要取得？	謝謝委員意見，已向內政部申請並取得 LiDAR 資料。
16	簡報第 14 頁中，SVF + Slope 疊圖之 Slope 圖宜採用 GIS 連續坡度分析圖。	謝謝委員意見，該圖為參考文獻的成果，主要用於說明遷急線在不同地形因子之變化情形。
17	邊坡單元及網格如何分析？	謝謝委員意見，本研究利用數值高程模型計算地形因子，並且找出最佳提取地形特徵之因子門檻值後，將計算各邊坡單元內，地形特徵之網格數，與是否含有崩塌區位，藉此探討目標地形特徵的數量越多，是否發生崩塌的機率更高。其中，邊坡單元分析方法詳如第三章第六

		節。
18	工作流程宜應調整。	謝謝委員意見，已重新調整並說明工作流程，詳如第三章第一節。
19	本計畫利用不同的地形因子，找出含有潛在崩塌可能性的遷急線範圍，請問地形因子之選取原則？不同地形因子組合方式？	謝謝委員意見，本研究根據呈現紅色地圖、CS 圖等地形圖之因子，選取其中常用之地形因子，再加上因子間的交集、聯集等不同組合，找出遷急線的位置。
20	本計畫所提專有名詞建議表列(含中英文及索引)，以利未來應用。	謝謝委員意見，待本研究之成果完備後，將於成果報告書中表列專有名詞。
21	部分本文所提代號未於圖示中標示。(例 P2-3，BH、BM、BL)	謝謝委員意見，此部分已修正。
22	報告書格式請參考本局範例。	謝謝委員意見，報告書格式已依照範例編排。
23	本研究有關遷急線、崩崖、蝕溝長度等，是否均由地形資料自動產生(向量圖資)？或仍需人工判釋及數化？	謝謝委員意見，本研究提取遷急線、崩崖與蝕溝等地形特徵的方式，是利用地形特徵的特性，設定地形因子之門檻值，藉此產生地形特徵的網格檔，並且與人工判釋之結果做比對，以得到最佳提取地形

		特徵的方式及門檻值。
24	如欲探討地形特徵密度與崩塌發生關聯性，則 DEM 必須為崩塌事件前。目前選定之試區(石門水庫)是否有此資料？	謝謝委員意見，目前採用的 DEM 為 2013-2014 年所產製，因此選擇 2014 年後的崩塌事件進行分析。
25	本研究所關注的崩塌標的是以大崩或淺崩為主？	謝謝委員意見，在邊坡單元地形特徵密度與崩塌發生之關聯性分析中主要的分析對象為淺層崩塌。

附錄三 期中審查意見與辦理情形

項次	審查意見	辦理情形
1	期初意見回覆說明為針對淺層崩塌，但報告內文說為大規模崩塌，究為何者？	謝謝委員意見，本研究以遷急線、崩崖、蝕溝等地形特徵找出潛在的崩塌區位。在遷急線部份，大規模崩塌的分布與上、中段的遷急線有關，而小規模崩塌的分布則與下段的遷急線有關。在崩崖、蝕溝部份，將地形特徵密度做為預測崩塌是否發生的因子，屬於潛勢因子的範疇，主要的分析對象為淺層崩塌。
2	計畫分別採用 5m 及 1mDEM，但二者產製時期不同，代表不同時期之地形特徵，且精度不同，不宜混用。	謝謝委員意見，5m 之 DEM 為使用 1m DEM 重新取樣而成，故其產製時期相同。5m DEM 應用於遷急線的判釋，因其有較佳之判釋結果且雜點較少；1m DEM 則應用於崩崖、蝕溝的判釋，因其特徵規模較小，使用解析度較高的 DEM 能有較佳的結果。
3	地形因子計算於部份區域出現空值，宜加以檢討。	謝謝委員意見，因在計算上的半徑設定會使網格邊界地區出現空值，但不影響集水區內之判釋結果。

4	目前 B_L、B_M、B_H 之提取，兩側已擴及高達 600m 才能涵蓋，非常不合理。	謝謝委員意見，B_L、B_M、B_H 為下、中、上三段遷急線，依照不同的河道高程差進行提取。根據實際觀察的資料，上段遷急線與河道高程差平均為 532.5m，因此設定利用與河道高程差 450m 至 600m 之範圍切割河道圖層。
5	提取 B_L、B_M、B_H 之過程一再述及受到支流影響，但一般流域普遍有多條支流為其常態，故在分析時，本應納入支流。	謝謝委員意見，遷急線形成的主因為侵蝕基準面相對下降，主河道下切所導致，故起始的形成為受主河道影響；後期支流的形成，則會影響遷急點的位置，使支流位置的遷急點明顯的往上游偏移，且支流長度越長，往上游的偏移量越大。故本研究根據支流長度進行修正，已於分析過程中納入支流修正的說明。
6	流域地形為上游高、下游低之高程特徵，目前不論 B_L、B_M、B_H 在上、下游均選取相同環域，導致經常出現下游過高，上游不及之情形。	謝謝委員意見，B_L、B_M、B_H 三段遷急線是依照河道高程差選取劃設區域，故上、下游之選取環域會根據地形高程有所改變。

7	因以上因素，導致坡度糙度及天空開闊度在遷急線上、中、下方之值域變化不一致。	謝謝委員意見，坡度粗糙度及天空開闊度的數值呈現在表 5-19、5-20，從中發現遷急線上、中、下方之值域有所不同。
8	請補充 2014 年麥德姆颱風及 2015 年蘇迪勒颱風造成之崩塌圖資來源。	謝謝委員意見，崩塌圖資來源為農委會水土保持局。
9	本研究既已申請 1m DEM 資料，但分析地形因子時卻使用 5m DEM 的原因為何，請補充說明。另，P5-36 為何又使用 20 m 解析度的天空開闊度與分級坡度圖？	謝謝委員意見，因遷急線的判釋上，使用 5m DEM 之地形因子有較佳的判釋結果且雜點較少，故使用 5m DEM 應用於遷急線的判釋；1m DEM 則應用於崩崖、蝕溝的判釋。此外，使用 20 m 解析度的天空開闊度與坡度，乃為了與 Tsou et al. (2017)之結果進行比較。
10	P5-3 圖5-2 開闊度較大值之山脊部份如改為白色顯示，是否較為直覺？	謝謝委員意見，已將圖 5-2 開闊度的表示方式做修正。
11	第五章第五節遷急線提取方法之比較，似乎看不出較佳之方案，是否尚未完成？	謝謝委員意見，本節主要目的在比較與討論不同的遷急線提取方法，坡度結合坡度粗糙度之結果、地形粗糙度結合坡度之結果、天空開闊度結合坡度之結果因流程較簡化，

		遷急線提取效果較差。因此，建議採用上一節之流程進行分析。
12	第六章地形特徵密度與崩塌發生之關連性，因研究區範圍較大，故雨量分布並非均勻，在分析關連性時，是否宜將雨量因子考慮進去？	謝謝委員意見，本研究分析地形特徵密度與崩塌發生之關聯性時，將納入麥德姆及蘇迪勒颱風的降雨量進行探討。
13	坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度和地形開闊度4種因子不同組合結果提取遷急線，其結果何種組合方式較佳？門檻值設定原則？(p5-34~p5-36)	謝謝委員意見，本節中坡度結合坡度粗糙度之結果、地形粗糙度結合坡度之結果、天空開闊度結合坡度之結果因流程較簡化，遷急線提取效果較差。本研究遷急線的提取以坡度、地形開闊度為組合，並且依照圖 5-7 中 A、B 兩段樣本之 B_H 、 B_M 與 B_L 三段遷急線的地形因子數值，根據樣本數值做為設定依據，如表 5-1、表 5-2。
14	綜整說明本期研究成果及後續辦理事項。	謝謝委員意見，研究成果及後續辦理事項已於第七章結論與建議中說明。
15	表 7-1 除預定執行進度請加上實際進度，以了解進度是否符合	謝謝委員意見，已於表 1-1 中納入實際進度之說明。

	合預期。	
16	請修正封底本局官網網址，修正為 https://www.swcb.gov.tw/	謝謝委員意見，已將封底之網址修正完成。
17	本計畫目次與實際頁面不符，且有編排錯誤之問題，請修正。	謝謝委員意見，已將錯誤之地方修正完成。
18	第 5-1 頁，出現"錯誤!找不到參照來源"，請修正。	謝謝委員意見，已完成修正。

附錄四 期末審查意見與辦理情形

項次	審查意見	辦理情形
1	本研究使用 DEM 抽取地形特徵，並嘗試探討特徵線數量與崩塌的關聯性。使用 DEM 資料進行分析不可避免地面臨資料解析度和分析尺度的問題。將地形特徵連結到集水區崩塌地的預測，存有太多可能的變數，本研究發想具有高度創新性，實際預測能力則有待更多研究。	謝謝委員意見，本研究在崩崖、蝕溝判釋上初步有不錯的成效，在與崩塌區位比較後也發現存有關聯性。後續建議可納入機器學習等方式，精進地形特徵的判釋，使的提取結果更加準確，並將所得地形特徵用於崩塌區位之預測。
2	研究結果受限於研究區域影響而有所差異，建議後續可討論如何訂定相應標準，以適用於不同區域。	謝謝委員意見，後續建議納入機器學習的方式，找出相應的判釋標準，並於其他地區進行測試，使提取方法可適用於不同區域。
3	研究的判釋結果，後續建議納入現地查核、驗證。	謝謝委員意見，在遷急線的部分是採用實際的遷急線區位進行驗證，崩崖、蝕溝等則因其數量較多且不易抵達而較難進行實地勘查，故以坡度及開闊度疊圖達到類似 H.O.S.T 地圖進行人工劃設，以驗證

		其實際區位。
4	相關地形因子判釋上採用多種數值資料，是否有更為快速的方法可簡化流程？	謝謝委員意見，地形因子是依照邊坡的坡向選擇其相對應的單方向性分析窗口，再根據地形特徵的特性選定適合的地形因子組合及門檻值，提取出崩崖、蝕溝的區位。可直接採用多方向性分析窗口來簡化流程，惟可能同時降低判釋之準確性。
5	文中有表列專有名詞提供查詢，建議可新增專有名詞解釋。	謝謝委員意見，已在第一章第四節新增專有名詞解釋於表列之欄位中。
6	第二章第二節為遷急線之判釋，然第三點遷急線內容皆為遷急點，應釐清標的為線狀或點狀？	謝謝委員意見，本研究主要探討遷急線等地形特徵之判釋，而遷急點主要受侵蝕基準面相對下降的影響形成於河道上，與坡面遷急線有相應的區位關係，故亦收集其相關文獻。
7	本研究以下宇老及泰平子集水區為試驗區與驗證區，然此二區域其在颱風事件後所致之崩塌區位較少，是否會影響	謝謝委員意見，本研究以下宇老及泰平子集水區做為遷急線判釋之試驗區與驗證區，透過設定因子及門檻值提取遷急線，與實際遷急線比

	分析成效?	較後找出最佳組合。崩塌區位較少反而降低影響遷急線正確判釋之機會，故在分析上不影響正確率的計算及成效。
8	建議崩崖之判釋與實際案例比對驗證成果。	謝謝委員意見，崩崖之判釋在第六章第六節中，以秀巒、延老兩個子集水區的人工劃設結果進行比對，並透過成功率曲線之 AUC 值及崩壞個數比圖進行驗證之成果呈現。