計畫編號：SWCB-109-263

應用崩塌機率模式
評估震後坡地崩塌影響之研究
Influence Assessment of Post-earthquake Landslides by Using Earthquake-induced Landslide Probability Model

執 行 單 位：逢甲大學

執 行 期 間：109 年 02 月 06 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人：逢甲大學營建及防災研究中心謝孟勳研究副教授

共同主持人：逢甲大學土木工程學系林正紋教授

逢甲大學土木工程學系李秉乾教授

國立中央大學地球科學系馬國鳳教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 109 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）

應用崩塌機率模式評估震後坡地崩塌影響之研究

摘　要

臺灣地區平均每 2.5 年發生一次規模達到 7 以上的地震，具有很高的地震危害度。本計畫的研究目的是建立可有效應用於減災規劃及緊急應變用途的坡地崩塌系統性評估方法、模式和架構，並進一步發展成為能在地震前可靠地進行全臺崩塌模擬預估，地震後能夠有效地掌握可能嚴重區域。此評估方法能夠評估坡地災害發生的規模、大小、機率和位置，進而據以擬定減災策略和降低災害造成的損失。因此，本計畫的研究目標即是整合應用既有的坡地易損性分析模式、地震危害度分析模式 (台灣地震模型) 以及地震引致崩塌危害評估模式，建立全台之震後坡地崩塌評估系統架構。本研究成果能夠在震後早期評估全臺不同震度下之崩塌機率圖，同時進行全臺未來 50 年超越機率 10% (再現期 475 年) 之崩塌風險地圖繪製，做為集水區治理策略的參據。本研究成果可進一步應用於不同之防災需求，作為未來地震引致崩塌災害防減災策略之參考。

關鍵字：地震引致崩塌、坡地易損性曲線、地震危害度分析、崩塌機率、風險分析

Influence Assessment of Post-earthquake Landslides by Using Earthquake-induced Landslide Probability Model

Abstract

Taiwan area has a very high seismic hazard due to an earthquakes of more than 7 magnitude (M_w) once occur every 2.5 years. The purpose of the study is to develop a systematic method, model and framework that can be effectively applied to prevention and emergency planning. The study is expected to be further developed to be able to reliably predict the pre-earthquake landslides estimation of Taiwan, and to be able to effectively estimated the post-earthquake probability landslides area of Taiwan. The evaluation method can evaluate the scale, size, probability and location of landslide disasters, and then draw up a disaster reduction strategies and reduce the losses caused by disasters. Thus, the objective of the study is established a assessment system framework of post-earthquake landslides, which integrated the TEM's Probability Seismic Hazard Analysis (PSHA), landslide fragility analysis (LFA) and earthquake-induced landslide hazard assessment model of the study. The results of the study can evaluate the Taiwan landslide probability under different earthquake intensities in the early post-earthquake and draw the risk map of earthquake-induced landslide hazard for 10% exceedance probability in next 50 years (475 years return period). The results of the study show that the assessment framework can be used for different disaster prevention needs as a reference for future earthquake-induced landslide prevention and mitigation strategies.

Keywords: earthquake-induced landslide, landslide fragility curve, seismic hazard analysis, landslide probability, risk analysis

目　次

摘　要 ..... **I**

目　次 ..... **III**

表　次 ..... **V**

圖　次 ..... **IX**

第一章　前言 **1**

第一節　計畫緣起與目的 1

第二節　工作項目與內容 3

第三節　計畫執行流程 5

第二章　國內外相關文獻回顧 **7**

第一節　災害風險分析 7

第二節　地震易損性分析 9

第三章　地震引致崩塌之坡地易損性模式精進 **15**

第一節　發展坡地易損性模式 15

第二節　坡地易損性曲線建立 22

第三節　坡地易損性曲線優化 23

第四節　921 地震崩塌地與誘發因子分析 27

第五節　環境因子分析 39

第六節　致災資料分析 46

第七節　坡地易損性分析 57

第四章　坡地崩塌評估基礎資料庫建立 **61**

第一節　全台坡面單元資料庫建立 62

第二節　坡面單元資料庫編碼 66

第三節　坡面單元屬性分析方法 67

第四節　崩塌評估基礎資料庫示範 115
第五章　未來地震情境下之崩塌推估 141
第一節　地震危害度分析 141
第二節　再現期 475 年之地震引致崩塌機率分析 146
第三節　未來 50 年超越機率 10%地震引致崩塌風險評估 153
第六章　震後坡地崩塌評估模式建立 167
第一節　特定活斷層之地震引致崩塌評估方法 168
第二節　示範斷層之地震引致崩塌評估 170
第二節　未知斷層之地震引致崩塌評估方法 186
第七章　結論與建議 191
參考文獻 193

附錄一　計畫書審查會議委員意見回復
附錄二　期初審查會議委員意見回復
附錄三　期中審查會議委員意見回復
附錄四　期末聯合審查暨成果發表會審查意見回復

表　次

表 1-1　研究工作進度表 6
表 2-6　易損性曲線常見之機率分布函數 12
表 2-7　易損性曲線其它常見之分布函數 13
表 3-1　中央氣象局地震震度分級表(2020 年新制) 24
表 3-2　中央氣象局地震震度階級對照表(2020 年新制) 25
表 3-3　研究地區裸露地統計 29
表 3-4　研究地區新增崩塌地統計 31
表 3-5　環境資料庫之類型和檔案格式 39
表 3-6　李錫堤教授提出之台灣地區地質分類 41
表 3-7　研究區地質分類統計 49
表 3-8　研究區坡向分類統計 51
表 3-9　研究區坡度分類統計 52
表 3-10　12 類坡地易損性參數表 57
表 4-1　中央地質調查所產製之全台坡面單元資料庫 62
表 4-2　全國各集水區坡面單元劃定基礎資料 63
表 4-3　坡面單元編碼 66
表 4-4　全國各集水區坡面單元地質因子之數量統計 68
表 4-5　全國各集水區坡面單元地質分類之數量統計 70
表 4-6　全國各集水區坡面單元坡向因子之數量統計 73
表 4-7　全國各集水區坡面單元車籠埔斷層方位角之數量統計 75
表 4-8　全國各集水區坡面單元車籠埔斷層夾角之數量統計 77
表 4-9　全國各集水區坡面單元順向坡之數量統計 80
表 4-10　全國各集水區坡面單元對車籠埔斷層坡向敏感因子之數量統計 82
表 4-11　全國各集水區坡面單元九芎坑斷層方位角之數量統計 84

表 4-12　全國各集水區坡面單元九芎坑斷層夾角之數量統計 86
表 4-13　全國各集水區坡面單元對九芎坑斷層坡向敏感因子之數量統計 88
表 4-14　全國各集水區坡面單元花東縱谷斷層方位角之數量統計 90
表 4-15　全國各集水區坡面單元花東縱谷斷層夾角之數量統計 92
表 4-16　全國各集水區坡面單元對花東縱谷斷層坡向敏感因子數量統計 94
表 4-17　全國各集水區坡面單元坡度分級之數量統計 97
表 4-18　全國各集水區坡面單元坡度分類之數量統計 99
表 4-19　全國各集水區坡面單元有效數量統計 102
表 4-20　車籠埔斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G1 類 103
表 4-21　車籠埔斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G2 類 105
表 4-22　九芎坑斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G1 類 107
表 4-23　九芎坑斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G2 類 109
表 4-24　花東縱谷斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G1 類 111
表 4-25　花東縱谷斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G2 類 113
表 5-1　再現期 475 年全台坡面單元崩塌機率統計 149
表 5-2　再現期 475 年全台坡面單元崩塌面積統計 149
表 5-3　未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.23g 以上地震機率統計 155
表 5-4　未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.23g 以上崩塌機率統計 155
表 5-5　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上地震風險值統計 156
表 5-6　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上地震風險指標統計 156
表 5-7　未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.33g 以上地震機率統計 161
表 5-8　未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.33g 以上崩塌機率統計 161
表 5-9　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上地震風險值統計 162
表 5-10　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上地震風險指標統計 162
表 6-1　全台各集水區車籠埔斷層事件(M_w=7.6)坡面單元評估 171

表 6-2　全台各集水區九芎坑斷層事件(M_w=6.9)坡面單元評估 176
表 6-3　全台各集水區花東縱谷斷層事件(M_w=7.5)坡面單元評估 181
表 6-4　坡地評估基礎資料庫架構 189

圖　次

圖 1-1　研究流程圖.....5
圖 2-1　不同損害分級之易損性曲線關係.....9
圖 3-1　坡地易損性曲線建立及優化流程.....26
圖 3-2　研究區域.....27
圖 3-3　前後期影像判識.....28
圖 3-4　九二一地震前後期裸露地分布.....29
圖 3-5　崩塌地變遷及分類示意.....30
圖 3-6　坡面資料套疊網格示意圖.....31
圖 3-7　921 新增崩塌地.....31
圖 3-8　自由場強地動測觀測網(TSMIP)測站分布.....33
圖 3-9　區域趨勢值與空間中隨機變動值之關係.....36
圖 3-10　強地動測站實測值及 Wu 衰減率之推估值比較.....38
圖 3-11　全域尖峰地表加速度分布.....38
圖 3-12　李錫堤教授分類之地質圖.....42
圖 3-13　研究區坡向圖.....43
圖 3-14　研究區坡度圖.....44
圖 3-15　研究區順向坡分布圖.....45
圖 3-16　坡面單元示意圖.....46
圖 3-17　集水區重疊法示意圖.....46
圖 3-18　坡面單元繪製流程.....47
圖 3-19　烏溪集水區之坡面單元.....48
圖 3-20　研究區坡面單元地質分類.....49
圖 3-21　坡面方位角和震波方位角的關係.....50

圖 3-22　坡向敏感因子定義 51
圖 3-23　研究區坡面單元坡向分類 51
圖 3-24　研究區坡面單元坡度分類 52
圖 3-25　崩塌地坡度與深度分佈 53
圖 3-26　崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖 54
圖 3-27　研究區崩塌坡面分佈 56
圖 3-28　G1A1S1 易損性曲線 58
圖 3-29　G1A1S2 易損性曲線 58
圖 3-30　G1A1S3 易損性曲線 58
圖 3-31　G1A2S1 易損性曲線 58
圖 3-32　G1A2S2 易損性曲線 58
圖 3-33　G1A2S3 易損性曲線 58
圖 3-34　G2A1S1 易損性曲線 58
圖 3-35　G2A1S2 易損性曲線 58
圖 3-36　G2A1S3 易損性曲線 59
圖 3-37　G2A2S1 易損性曲線 59
圖 3-38　G2A2S2 易損性曲線 59
圖 3-39　G2A2S3 易損性曲線 59
圖 4-1　地調所繪製之全臺各集水區坡面單元分布圖 65
圖 4-2　全臺順向坡分布圖 79
圖 4-3　車籠埔斷層為例各類坡面單元數量 101
圖 4-4　淡水河流域地質因子 117
圖 4-5　淡水河流域地質分類 117
圖 4-6　淡水河流域坡向因子 117
圖 4-7　淡水河流域之車籠埔斷層坡向夾角 117

圖 4-8　淡水河流域之車籠埔斷層坡向敏感因子 118
圖 4-9　淡水河流域坡度分級 118
圖 4-10　淡水河流域坡度分類 118
圖 4-11　淡水河流域之車籠埔斷層坡面單元分類 118
圖 4-12　淡水河流域之九芎坑斷層方位 119
圖 4-13　淡水河流域之九芎坑斷層坡向夾角 119
圖 4-14　淡水河流域之九芎坑斷層坡向敏感因子 119
圖 4-15　淡水河流域之九芎坑斷層坡面單元分類 119
圖 4-16　淡水河流域之花東縱谷斷層方位 120
圖 4-17　淡水河流域之花東縱谷斷層坡向夾角 120
圖 4-18　淡水河流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子 120
圖 4-19　淡水河流域之花東縱谷斷層坡面單元分類 120
圖 4-20　烏溪流域地質因子 121
圖 4-21　烏溪流域地質分類 121
圖 4-22　烏溪流域坡向因子 121
圖 4-23　烏溪流域之車籠埔斷層坡向夾角 121
圖 4-24　烏溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子 122
圖 4-25　烏溪流域坡度分級 122
圖 4-26　烏溪流域坡度分類 122
圖 4-27　烏溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類 122
圖 4-28　烏溪流域之九芎坑斷層方位 123
圖 4-29　烏溪流域之九芎坑斷層坡向夾角 123
圖 4-30　烏溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子 123
圖 4-31　烏溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類 123
圖 4-32　烏溪流域之花東縱谷斷層方位 124

圖 4-33　烏溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角 124
圖 4-34　烏溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子 124
圖 4-35　烏溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類 124
圖 4-36　濁水溪流域地質因子 125
圖 4-37　濁水溪流域地質分類 125
圖 4-38　濁水溪流域坡向因子 125
圖 4-39　濁水溪流域之車籠埔斷層坡向夾角 125
圖 4-40　濁水溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子 126
圖 4-41　濁水溪流域坡度分級 126
圖 4-42　濁水溪流域坡度分類 126
圖 4-43　濁水溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類 126
圖 4-44　濁水溪流域之九芎坑斷層方位 127
圖 4-45　濁水溪流域之九芎坑斷層坡向夾角 127
圖 4-46　濁水溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子 127
圖 4-47　濁水溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類 127
圖 4-48　濁水溪流域之花東縱谷斷層方位 128
圖 4-49　濁水溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角 128
圖 4-50　濁水溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子 128
圖 4-51　濁水溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類 128
圖 4-52　高屏溪流域地質因子 129
圖 4-53　高屏溪流域地質分類 129
圖 4-54　高屏溪流域坡向因子 129
圖 4-55　高屏溪流域之車籠埔斷層坡向夾角 129
圖 4-56　高屏溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子 130
圖 4-57　高屏溪流域坡度分級 130

圖 4-58　高屏溪流域坡度分類 130
圖 4-59　高屏溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類 130
圖 4-60　高屏溪流域之九芎坑斷層方位 131
圖 4-61　高屏溪流域之九芎坑斷層坡向夾角 131
圖 4-62　高屏溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子 131
圖 4-63　高屏溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類 131
圖 4-64　高屏溪流域之花東縱谷斷層方位 132
圖 4-65　高屏溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角 132
圖 4-66　高屏溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子 132
圖 4-67　高屏溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類 132
圖 4-68　秀姑巒溪流域地質因子 133
圖 4-69　秀姑巒溪流域地質分類 133
圖 4-70　秀姑巒溪流域坡向因子 133
圖 4-71　秀姑巒溪流域之車籠埔斷層坡向夾角 133
圖 4-72　秀姑巒溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子 134
圖 4-73　秀姑巒溪流域坡度分級 134
圖 4-74　秀姑巒溪流域坡度分類 134
圖 4-75　秀姑巒溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類 134
圖 4-76　秀姑巒溪流域之九芎坑斷層方位 135
圖 4-77　秀姑巒溪流域之九芎坑斷層坡向夾角 135
圖 4-78　秀姑巒溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子 135
圖 4-79　秀姑巒溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類 135
圖 4-80　秀姑巒溪流域之花東縱谷斷層方位 136
圖 4-81　秀姑巒溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角 136
圖 4-82　秀姑巒溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子 136

圖 4-83　秀姑巒溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類 136
圖 4-84　林邊溪流域地質因子 137
圖 4-85　林邊溪流域地質分類 137
圖 4-86　林邊溪流域坡向因子 137
圖 4-87　林邊溪流域之車籠埔斷層坡向夾角 137
圖 4-88　林邊溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子 138
圖 4-89　林邊溪流域坡度分級 138
圖 4-90　林邊溪流域坡度分類 138
圖 4-91　林邊溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類 138
圖 4-92　林邊溪流域之九芎坑斷層方位 139
圖 4-93　林邊溪流域之九芎坑斷層坡向夾角 139
圖 4-94　林邊溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子 139
圖 4-95　林邊溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類 139
圖 4-96　林邊溪流域之花東縱谷斷層方位 140
圖 4-97　林邊溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角 140
圖 4-98　林邊溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子 140
圖 4-99　林邊溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類 140
圖 5-1　未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度分布 145
圖 5-2　未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度達 0.23g 和 0.33g 機率分布 145
圖 5-3　再現期 475 年之地震引致崩塌機率分析流程 148
圖 5-4　再現期 475 年之地震坡面單元 PGA 分布 150
圖 5-5　再現期 475 年之地震坡面單元崩塌率分布 151
圖 5-6　再現期 475 年之地震坡面單元崩塌面積分布 152
圖 5-7　未來 50 年超越機率 10%地震引致崩塌風險分析流程 153

圖 5-8　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上地震機率分布 157
圖 5-9　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上崩塌機率分布 158
圖 5-10　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上地震風險值 159
圖 5-11　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上地震風險指標 160
圖 5-12　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上地震機率分布 163
圖 5-13　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上崩塌機率分布 164
圖 5-14　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上地震風險值 165
圖 5-15　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上地震風險指標 166
圖 6-1　地震評估模式 167
圖 6-2　未來 50 年台灣孕震構造發震機率 168
圖 6-3　特定活斷層之地震引致崩塌評估流程 169
圖 6-4　車籠埔斷層事件(M_w=7.6)之地表振動強度分布 173
圖 6-5　車籠埔斷層事件(M_w=7.6)之坡面單元崩塌機率分布 174
圖 6-6　車籠埔斷層事件(M_w=7.6)之坡面單元可能崩塌面積分布 175
圖 6-7　九芎坑斷層事件(M_w=6.9)之地表振動強度分布 178
圖 6-8　九芎坑斷層事件(M_w=6.9)之坡面單元崩塌機率分布 179
圖 6-9　九芎坑斷層事件(M_w=6.9)之坡面單元可能崩塌面積分布 180
圖 6-10　花東縱谷斷層事件(M_w=7.5)之地表振動強度分布 183
圖 6-11　花東縱谷斷層事件(M_w=7.5)之坡面單元崩塌機率分布 184
圖 6-12　花東縱谷斷層事件(M_w=7.5)之坡面單元可能崩塌面積分布 185
圖 6-13　水保局土石流防災應變系統(FEMA) 187
圖 6-14　FEMA 系統接收 PGA 網格資料流程 188
圖 6-15　震後坡地崩塌評估模式流程 189

第一章　前言

第一節　計畫緣起與目的

台灣位處於環太平洋地震帶上，經常性的地殼變動造成土質鬆軟且不穩定，本島和鄰近海域平均每 2.5 年就發生一次規模達到 7 以上的地震，具有很高的地震危害度。強烈地震時除了常見的建物損害，山坡地的崩塌也是地震可能的危害，對於位處菲律賓板塊和太平洋板塊交接處且山坡地佔 74%的台灣，全國山坡地的管理就必須重視地震引致坡地災害的風險，例如坡地崩塌造成的生命財產損失、山區道路因崩塌造成的阻斷等。此外，震後坡地產生的鬆軟土石、崩塌堆積在河道的土方若在尚未復育期間遭受颱風、豪雨等的侵襲，也極易引起二次崩塌、地滑、土石流等土砂災害的發生。例如 1999 年發生的 921 大地震，引發車籠埔斷層與雙冬斷層發生劇烈錯動，造成極為嚴重的建物倒塌、崩塌災害以及往後數年間的土石流災害。近期則有 2018 年 9 月 6 日發生的日本北海道胆振東部地震中，規模 6.7 的地震引發大規模崩塌災害亦是這類災害的重要案例。

由於現今科技對於地震仍難以準確預測，誘發坡地崩塌的物理機制又極為複雜，導致地震直接誘發及引起的廣域坡地災害難以預測、預警及評估。過去相關研究中多以理論法發展局部崩塌為主的工程模式，這類方法蒐集崩塌案例及地震觀測紀錄再輔以地質調查進行分析。然而這類方法要進行大規模地震時的廣域崩塌評估仍有侷限。此外，地震誘發之坡地災害潛勢，無法如颱風或豪雨般利用即時監測系統進行災害預警(pre-disaster prevention)，造成突發性地震事件中對於坡地崩塌狀況無法掌握，後續緊急應變方案及災害管理策略將難以順利進行。反之，若能在地震前或地震中能夠可靠地掌握地震發生可能引致的災害或嚴重災害發生的區域，對於地震引起的坡地災害將可有效地擬定集水區土砂減災策略進而降低災害造成的損失。

目前，本研究團隊在先期的研究中已建立了地震引致崩塌的坡地易損性曲線(Landslide Fragility Curves, LFA)分析模式，並結合台灣地震模型(Taiwan Earthquake Model)團隊的機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)研究成果，完成地震引致崩塌危害評估模式之發展，對於地震引致的崩塌危害評估建立良好的基礎。進一步地，本計畫將以現階段已完成之模式擴展至全台範圍之崩塌影響評估，基於機率式坡地易損性分析建立地震後可快速進行集水區坡地崩塌的系統性評估架構，同時應用地震引致崩塌危害評估模式，結合未來情境模擬進行崩塌災害潛勢和風險評價。

本計畫的研究目的，即是如何建立可有效應用於減災規劃及緊急應變用途的坡地崩塌系統性評估方法、模式和架構，並進一步發展成為能在地震前可靠地進行全臺崩塌模擬預估，地震後能夠有效地掌握可能嚴重區域的系統性資料，甚至能夠評估其發生的規模、大小、機率和位置，進而據以擬定減災策略和降低災害造成的損失。因此，本計畫的研究目標，即是整合應用既有的坡地易損性分析模式、地震危害度分析模式(台灣地震模型)以及地震引致崩塌危害評估模式，建立全台之震後坡地崩塌評估系統架構，能夠在震後早期評估全台不同震度下之崩塌機率圖，同時進行全臺未來 50 年超越機率 10%(再現期 475 年)之崩塌機率圖繪製，做為集水區治理策略的參考。本計畫成果預期可應用於震後集水區坡地崩塌之快速評估(即地震早期評估)，並可發展未來地震情境下之崩塌風險，做為土砂災害減災管理以及治理對策的參據。

第二節　工作項目與內容

本計畫基於既有研究成果，整合坡地易損性分析、機率式地震危害度分析和地震引致崩塌危害評估等方法，應用於震後坡地崩塌影響評估之研究。主要工作項目如下：

一、地震引致崩塌之坡地易損性模式精進

中央氣象局已於 109 年 1 月 1 日施行新制之地震震度分級表，將原 8 震度階級擴增為 10 階級，使得細分之震度和災害的嚴重程度有更大相關性，也讓震級劃分在防災應用上可更加合理運用。本項工作即針對目前新版之地震震度分級中 6 弱以上之震度區，探討本計畫坡地易損性曲線之適用性，並進行 12 類坡地易損性曲線之優化精進，建立適用於新版震級 6 弱以上區域之坡地易損性曲線。

二、坡地崩塌評估基礎資料庫建立

震後坡地崩塌評估係基於合適之評估單元及坡地分類資料庫進行分析，由於全臺範圍之資料巨量龐大，亦須建立良好有效之系統化評估架構。本項工作即針對坡地崩塌評估之基礎資料庫進行蒐集、建置，範圍包括地質、坡度、坡向、順向坡、斷層等必要之地文屬性資料，並針對坡面單元進行資料庫建立、編碼及分類等工作，也將針對坡地崩塌評估之適用範圍進一步研析探討。

三、未來地震情境下之崩塌推估

地震引致的災害風險具有一定之不確定性，因此對於未來地震情境的推估工作有其必要性，使得既有研究成果的整合應用越來越重要。本項工作即應用已發展之地震引致崩塌機率分析模式，針對再現期 475 年之地震進行情境推估，以再現期 475 年之全台發震機率結合易損性曲線，建立全台地震引致崩塌機率分布圖或全台地震引致崩塌風險地圖，探討未來地震情境下之崩塌風險及其影響。

四、震後坡地崩塌評估模式建立

震後坡地崩塌之影響評估須基於系統性的評估方法、模式和架構，使在震後早期能夠快速地提供有效的崩塌評估資料，可靠地做為減災規劃及緊急應變之參考依據。本項工作整合應用既有的坡地易損性分析模式、地震危害度分析模式(台灣地震模型)以及地震引致崩塌危害評估模式，針對震後坡地崩塌評估系統架構進行研析，建立能夠在震後早期(即時或模擬)評估全台不同震度下崩塌機率之震後坡地崩塌評估模式，以利未來震後崩塌風險或災害警戒等初步評估參考。

第三節　計畫執行流程

依研究工作項目及內容，本研究整體工作執行架構包括地震引致崩塌之坡地易損性模式精進、坡地崩塌評估基礎資料庫建立、未來地震情境下之崩塌推估、震後坡地崩塌評估模式建立，整體流程如圖 1-1 所示。

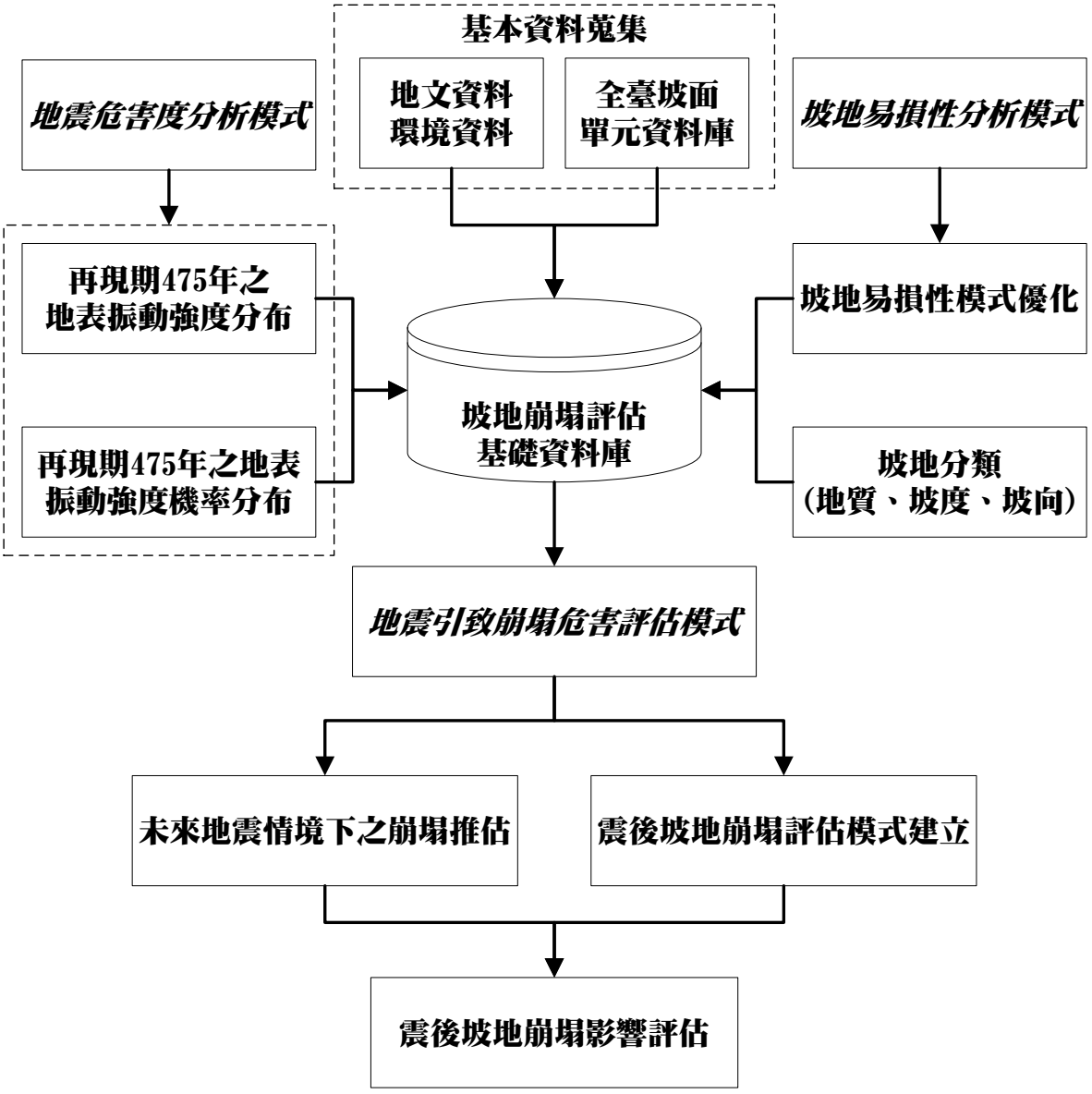


圖 1-1　研究流程圖

表 1-1　研究工作進度表

工作項目	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
地震引致崩塌之坡地易損性模式精進	■	■	■	■	■	■				
坡地崩塌評估基礎資料庫建立		■	■	■	■	■	■			
未來地震情境下之崩塌推估			■	■	■	■	■	■		
震後坡地崩塌評估模式建立				■	■	■	■	■	■	
期中/期末報告					■					■

■ 已完成進度；□ 未完成進度；◎ 落後進度

第二章　國內外相關文獻回顧

第一節　災害風險分析

風險管理最早應用於 19 世紀末經濟課題探討，近代已廣泛應用於不同領域中。風險評鑑係風險管理中最為重要的一環，決定了面對可能風險時之指導、管制、計畫與政策。風險評鑑包含風險鑑別、風險分析和風險評估三個主要過程。根據中華民國國家標準(2012)「風險管理－詞彙」(CNS 14889, Z 4066）所述，本研究以災害管理的觀點將此三個過程分別說明如下：

一、風險鑑別

係發現、認知及描述災害風險之過程，包括風險緣由、事件、大小、其原因及潛在結果(後果)之鑑別，可經由歷史數據、理論分析、已知現象與專家判斷描述災害風險之需求。災害風險鑑別之目的即為瞭解致災環境可能的危害因子，並鑑別災害風險可能造成的衝擊及影響。

二、風險分析

係理解災害風險的本質並決定風險等級之過程，包括頻率分析、脆弱度分析、暴露分析及後果分析。頻率分析即災害事件發生之可能性或週期。脆弱度分析即風險緣由的致災性，表示導致危害後果的本質。暴露分析為針對曝險對象估計或評價其涉入災害風險之程度，描述災害風險實質的危害程度，所以視評價之對象又常稱為暴露度或暴露量。後果分析則為估計災害風險可能造成的損失大小，作為風險對策的成本及效益的基準，例如損失金額或其它損失量。前二者為風險分析中最為關鍵的工作。

三、風險評估

係將風險分析之結果與風險準則相比較，以決定災害風險及／或其後果是否可接受或可容忍的過程。風險準則係依評估災害風險之顯著性所定義。風險準則可定義自標準作業程序、防救災計畫、防救災對策或其它需求。

在上述三個過程中，風險鑑別即是所謂的災害潛勢分析，可藉由災害特性、過去發生事件、理論分析來描述；通常也和風險分析過程中的災害頻率分析共同討論，而形成所謂的危害度分析，例如地震災害的 PGA 推估、水災的淹水深度模擬等。共通特性就是風險鑑別必須基於某個災害規模的想定，作為後續風險管理的基準，一般稱之為災害規模設定或災害防護規模(defense magnitude)。第二個過程－風險分析，涵蓋的數理層次極廣，可應用的元素包括機率(probability)、頻率(frequency)、脆弱度(vulnerability)、易損性(fragility)、風險矩陣(risk matrix)、風險等級(level of risk)等。因此不同類型的災害延生出許多不同的分析方法。一般而言，風險分析皆以危險事件發生的機率與其後果的組合來描述，並根據問題的清楚描述(即災害頻率分析、脆弱度分析、暴露分析及後果分析)建立複雜問題的分析模式。United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO) (1979)曾針對風險問題中的災害風險分析提出一個定量的風險計算模式，表示如下：

$$\textbf{Risk} = \textbf{Hazard} \times \textbf{Vulnerability} \times \textbf{Exposure} \qquad (2\text{-}1)$$

上式中的 $\boldsymbol{R}$ 代表風險；$\boldsymbol{H}$ 為危害度，包含災害潛勢的頻率或規模，係風險鑑別和頻率分析的結果；$\boldsymbol{V}$ 為脆弱度或易損性，表示在災害潛勢的頻率或規模下風險問題發生的性質、程度或機率；$\boldsymbol{E}$ 為暴露度或暴露量，表示曝險對象(保全對象)涉入風險問題之程度(損失)。式(2-1)完整表現災害風險分析的定義和組合特性，因此廣為研究者所採用，亦適於作為災害風險管理課題的基礎。因此亦被許多學者稱為風險三要素(risk triangle, Crichton, 1999)。

對於第三個過程－風險評估，則係依據風險分析之結果與定義自標準作業程序、防救災計畫、防救災對策或其它防救災需求之準則比較。藉以界定災害風險後果是否超過可接受或可容忍的範圍，其中包括防救災物資、機具、人力、資源等需求評估，並據以改進及改善防救災對策。在風險評估過程使用的元素，則包括風險之對策、度量、裕度、迴避、彙整及接受。

第二節　地震易損性分析

工程上易損性曲線(fragility curve)的概念最早被地震工程專家應用於描述地震中橋梁或建築物之損害可能性評估(Ang and Tang, 1975；Rossetto and Elnashai, 2003; Rota *et al*., 2008; Shinozuka *et al*., 2000; 李秉乾等，2005)。在探討地震導致結構物破壞之問題上，可利用結構分析的方式來進行目標結構的耐震分析，不論利用靜力分析或動力分析，皆可輕易得到所設計結構的耐震評估結果，但事實上土木工程未必能夠完全依照結構設計的期望來建造理想的建築物，肇因於工程上具有相當多的不確定性因子，諸如施工技術、品質管理、材料品質變異、地質條件、設計規範等等。因此就巨觀而言，對於建築物遭致地震侵襲時的破壞，就可被描述成一個高度複雜因子的統計問題。而針對這樣的問題，統計學家及地震工程學家即提出以建築物易損性曲線描述建築物受震時可能的破壞機率。近年來，由於越來越重視地震災害的威脅，建築物易損性曲線已成為地震災損評估及風險分析必要的工具之一(Whitman, *et al*. 1997; Yamazaki, 2001; Shibata, 2006)。而所謂建築物易損性曲線，即是描述在不同的強地表因子下(如尖峰地表加速度、尖峰地表速度、地表最大位移等)建築物產生不同損害狀況的機率值；如圖 2-1 所示，不同損害程度可藉由累積機率分布曲線各別描述，可應用於評估建築物在地震後的可能損壞情形(功能性與經濟性)及修復所需的成本(金錢與時間)，並廣泛地應用於地震早期災損評估及減災規劃上，提供評估經濟損失、災後緊急動員參考、耐震需求分析與工程參數研究之用。

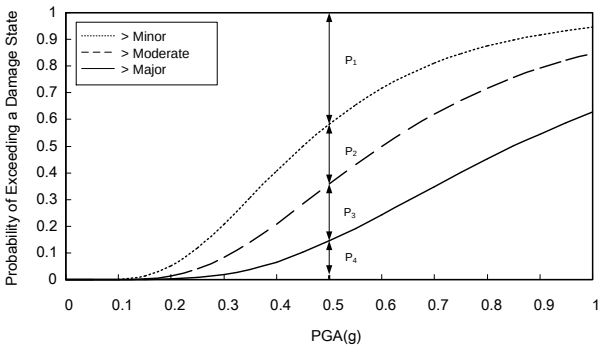


圖 2-1　不同損害分級之易損性曲線關係

一、易損性曲線的求取方法

對於外力引致損害的問題常使用損害機率矩陣(damage probability matrices; DPMs)或是易損性曲線來表示致災因子與災害的關係。損害機率矩陣係將損害程度與致災因子以矩陣型式描述其關係，藉由矩陣關係可以進一步求取特定因子與損害程度的機率關係(例如 Basöz *et al*., 1999; Sarabandi *et al*., 2004; Muñoz *et al*., 2007)。由於自然災害現象之致災原因有時不只一個，例如降雨引致坡地崩塌之原因可能來自於短時最大降雨、長時累積降雨、地下水…等，又或地震引致的崩塌可能原因來自地質、地層弱面、坡度、震波強度、頻率等，因此易損性曲線描述受災本體在災害侵襲時的易致災特性，並表達特定致災因子對於受災本體達到或超過某種損害狀態的超越機率。在地震引致建築物損害的領域，易損性曲線的分析方法非常多元，藉由可取得的致災資料(vulnerability data)可細分五類方法求取(謝孟勳，2013)，包括專家判斷法、靜力分析法、動力分析法、經驗分析法及混合法等。易損性曲線發展迄今專家判斷法仍是不可或缺的重要基準，其它方法亦是建立於專家判斷法的基礎上而發展。而一般認為經驗分析法最為詳實可靠。即藉由過去發生的災害事件取得致災資料，經由假定機率分布配合統計推論方法來決定模式之機率分布。以下分述之：

(一)專家判斷法

基於專家們主觀的經驗及判斷，建立對於損害紀錄的損害等級、致災因子和機率分布的專家共識發展易損性曲線。早期對於易損性評價模式尚未完全瞭解前，對於災害紀錄須借助工程專家評價受災本體的損害情形，進而了解受災本體對於災害的損害特性。專家判斷法係基於專家團隊主觀的經驗及判斷，建立對於調查紀錄的損害分級、致災因子大小和機率分布的專家共識來發展易損性曲線。

(二)理論分析法

不同自然災害事件可發展不同之理論分析方法。例如建築物可發展靜力或動力分析理論。經由建立結構分析模型及定義損害分級，再以設計規範之靜力分析及選定的設計地震力發展易損性曲線。或是再基於地震結構反應譜之動態數值模擬及選定的模擬地震發展易損性曲線。

(三)經驗分析法

基於過去某個災害性事件或是數個事件後的真實損害事件資料，利用統計推論法發展易損性曲線。利用災害性事件後由專家及學者進行損害調查資料，將所調查之資料予以分類再利用統計方法或其它資料訓練方法建立易損性曲線。經驗分析法的發展在於自然災害的可能因素複雜具不確定性，理論分析法不全然能驗證真實的損害機率。其優點在於實際的損害紀錄可真實地表現許多不確定因素對於損害的影響。經驗分析法建立易損性曲線受限於資料不易取得。因此，經驗分析法的缺點在於必須取得足夠的樣本資料才足以掌握受災本體的損害特性，有時還需要進行適當的分類或分級。經驗分析法可利用某個災害地震或是數個地震後的真實損害資料庫進行分析。可將其歸納為三類損害資料庫：

1. 第 1 類：基於單一地區單一事件之損害紀錄。
2. 第 2 類：基於不同地區多個事件之損害紀錄。
3. 第 3 類：基於單一地區多個事件之損害紀錄。

(四)混合法

混合法的原理係結合經驗法和理論法的優點，將經驗資料混合其它方法(例如專家判斷法或理論分析法)的修正結果來提升易損性曲線的可靠度，試圖彌補經驗調查資料的不足、專家判斷法的主觀性和理論分析法的模型缺陷(例如 Penelis, Kappos and Stylianidis, 2003; Kappos *et al*., 2006; Kappos and Panagopoulos, 2010)。

二、經驗易損性曲線之分析模式

易損性曲線表達特定致災因子對於受災本體達到或超過某種損害狀態的超越機率。為了合理表現這個關係必須假定事件機率分布函數以可靠地描述災害發生之特性。這個合理可靠的機率分布函數有兩種求取方式，第一種方式為假定事件發生的機率密度函數(*f*: probability density function; PDF)，再利用統計學的分析方法進行參數推估(parameter estimates)進而繪製累積分布函數(*F*: cumulative distribution function; CDF)以表達易損性曲線，例如最小平方估計(least squares estimation; LSE)或最大概似估計(maximum likelihood estimation; MLE)。既有的易損性曲線相關研究在機率密度函數上常見採用常態分布(normal distribution)、對數常態分布(lognormal distribution)或 β 分布(Beta distribution)來描述致災因子與災害發生之關係。以地震為例，大部份學者普遍認為對數常態分布較能夠符合自然災害引致之外力與受災本體損害之關係。相關論證如 Onose (1982)以鋼筋混凝土建築物遭受地震後之實際損害率探討損害分布的關係，發現致災力與損害發生之關係皆接近對數常態分布。本研究將過去文獻使用之機率密度函數列表整理於表 2-1。

表 2-1　易損性曲線常見之機率分布函數

機率分布	機率密度函數
常態分布	$f(x)=\frac{1}{\zeta\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-c)}{2\zeta^2}}$ (2-2)
對數常態分布	$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x}e^{-\frac{(\log x-c)^2}{2\zeta^2}}$ (2-3)
β 分布	$f(x)=\frac{1}{B(\alpha,\beta)}x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}$ (2-4)

資料來源：本研究整理

第二種方式為假定一個因變量在 0 至 1 間簡單連續且嚴格遞增的函數來表達易損性曲線。此類方法決定分布函數的型式後利用線性或非線性之曲線擬合(curve fitting)求取易損性曲線，因此不受機率密度函數的限制。就定義而言，表 2-1 所述之機率分布亦可以此類方法求取其累積分布函數。過去文獻曾使用之其它分布函數整理於表 2-2，而常見曲線擬合的方法可應用最小平方迴歸估計其待定係數。

表 2-2　易損性曲線其它常見之分布函數

概述	分布函數型式
指數式	$F(x)=ae^{bx}$ (2-5)
對數式	$F(x)=e^{a\log x+b}$ (2-6)
擬羅吉斯	$F(x)=\dfrac{100}{1+(x/a)^{-b}}$ (2-7)

資料來源：本研究整理

在經驗分析法中損害調查紀錄的可用性是影響易損性曲線可靠度的重要關鍵。損害調查紀錄需要獲取可用的致災資料並確保適用於災害評估。因此，為了發展可靠的經驗易損性曲線，應儘可能要求損害調查紀錄的完整性，其中包括必須具備「損害分級」、「損害與否」及「致災因子」三個明確的資訊。「損害分級」通常係經由專家決定損害判定標準，這個判定標準可根據事件前的防災需求或應變計畫來訂定。「損害與否」即藉由事件後完整詳細的調查得到。藉由完整的事件後調查紀錄所建構之致災資料及假定之機率分布函數，即可經由參數推估方法建立易損性曲線。目前對於經驗分析法已發展出許多有用的致災資料產生方法。本研究將這些方法分為三大類，分別為「地域單元法」和「完全調查樣本法」，以下即針對致災資料產生的方法分別介紹其概念和原理。

(一)地域單元法

在大部分的文獻中，基於某區域(例如行政區、集水區等)為單元之損害紀錄可以利用集群分析(cluster analysis)產生數個資料集(dataset)來作為致災資料，並估算每筆致災資料的損害率和致災因子。這些致災資料通常是數個基於地域型損害紀錄所形成的資料集。有了這類百分比型態的致災資料，即可利用機率分布函數的最小平方曲線擬合得到最佳的易損性曲線參數。最小平方估計法最不易控制的變異在於致災資料空間尺度的大小不易掌握，不同空間尺度資料可能求得不同的易損性分析結果，因此實務上需進行易損性曲線的可靠度分析及驗證。

(二)完全調查樣本法

完全調查樣本法係基於最大概似估計法為核心所發展。最大概似估計法之原理是使觀測的樣本發生機率為最大以評估機率分布函數的估計參數。所謂樣本發生機率即概似函數(L : likelihood function)，係可觀察的隨機變量之聯合機率密度函數(joint probability density function; JPDF)。利用最大概似估計法求取易損性曲線的相關研究雖不多，但已成功地應用於建立橋梁易損性曲線。例如 Shinozuka(1998)和 Shinozuka *et al*.(2000, 2003)利用 1994 年北嶺地震後 Caltrans 及阪神地震後 Hanshin Expressway Public Corporation's 的高速公路橋梁損害調查記錄，將橋梁分為無損、輕度、中度、重度及全倒等五種損害程度，再以最大概似估計法對假定之機率分布函數進行參數推計，分別建立兩個地區的橋梁易損性曲線。在 Shinozuka *et al*.(2003)的研究中採用具有雙估計參數之對數常態分布表示第 j 類損害程度之易損性曲線 F_j，分別為中位數(c_j : median)和對數標準差(ζ_j : log-standard deviation)；而概似函數被假定以伯努利試驗(Bernoulli experiment)描述，即 1 代表發生而 0 代表不發生的二元型式，並用來求取各類橋梁之各類損害分級的易損性曲線。

第三章　地震引致崩塌之坡地易損性模式精進

第一節　發展坡地易損性模式

由於自然災害現象之致災原因有時不只一個，例如降雨引致坡地崩塌之原因可能來自於短時最大降雨、長時累積降雨、地下水...等，因此易損性曲線描述受災本體在災害侵襲時的易致災特性，並表達特定致災因子對於受災本體達到或超過某種損害狀態的超越機率。在地震領域發展易損性曲線的分析方法非常多元，藉由可取得的致災資料(vulnerability data)可細分專家判斷法、靜力分析法、動力分析法、經驗分析法及混合法等。易損性曲線發展迄今專家判斷法仍是不可或缺的重要基準，其它方法亦是建立於專家判斷法的基礎上而發展。而一般認為經驗分析法最為詳實可靠，即藉由過去發生之災害事件資料取得致災資料，再假定機率分布配合統計推論來決定模式。

事件發生可能性(例如本研究探討之崩塌)與地震因子之關係，可藉由易損性分析原理建立特定地震因子下某類坡地對於致災因子可能引致崩塌發生之機率，這個關係建立在有良好致災資料所建置之災損資料庫。對於廣域崩塌評估即可依據不同之地文分類及驅動力指標建立不同類別之坡地易損性曲線。以坡地崩塌而言，可用來進行坡地分類之地文因子例如地質、坡度、坡向、斷層距...等。

本研究主要以完全調查樣本法來發展坡地易損性模式，完全調查樣本法係基於最大概似估計法為核心所發展，其原理是使觀測的樣本發生機率為最大以評估機率分布函數的估計參數。所謂樣本發生機率即概似函數(L: likelihood function)，係可觀察的隨機變量之聯合機率密度函數(joint probability density function; JPDF)。最大概似估計法是將每個調查樣本可能存在的損害分級是「發生」或「沒有發生」的紀錄納入易損性分析中，因此

不會有樣本空間尺度變異的問題。某損害程度之伯努利試驗概似函數可表示如式(3-1)所示：

$$L_j(c_j,\zeta_j)=\prod_{i=1}^{N}[F_j]^{n_i}[1-F_j]^{1-n_i} \tag{3-1}$$

上式中，N 為調查之受災本體總數；c_j 和 ζ_j 分別為第 j 類損害程度之中位數及標準差；n_i 為伯努利隨機變數指標(Bernoulli random variable)，表示在致災因子下，若第 n 個受災本體達到第 j 類損害程度，$n_i = 1$；否則，$n_i = 0$。對於對數常態分布之之中位數及標準差，可經由求取式(3-1)概似函數之最大值而得。

易損性分析係對於發生之災害達到或超越某個程度的超越機率。為了合理表現這個關係必須假定事件機率分布函數以可靠地描述災害發生之特性。這個合理可靠的機率分布函數有兩種求取方式，第一種方式為假定事件發生的機率密度函數，再利用統計學的分析方法進行參數推估進而繪製累積分布函數以表達易損性，例如最小平方估計或最大概似估計(maximum likelihood estimation; MLE)。既有的易損性分析相關研究在機率密度函數上常見採用常態分布、對數常態分布或 β 分布來描述致災因子與災害發生之關係。由於易損性模式係表達崩塌發生之隨機變量 x 之分布函數 $F(x)$模型，基於假定(或觀察)的自然災害發生分布模式，通常採用對數常態分布表達發生之頻率分布。所謂隨機變量即為致災因子對於事件的機率分配數學方程式，而機率分配數學方程式由中位數及標準差決定(Shinozuka *et al.*, 2000；李秉乾等人，2005；謝孟勳，2013)，稱為雙估計參數。如式(3-2)所示：

$$f_j(x;c_j,\zeta_j)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_j x}e^{-\frac{1}{2}[\frac{\ln(x/c_j)}{\zeta_j}]^2} \tag{3-2}$$

其中，f_j 為對數常態分布之機率密度函數；c_j 為中位數(median)；ζ_j 為標準差(log-standard deviation)；x 為隨機變量。雙估計參數之機率分配數學方程式即為隨致災因子變化而引致受災本體發生之機率密度函數。其累積分布即為易損性曲線。對數常態累積分布函數解析式表示為：

$$F_j\left(x;c_j,\zeta_j\right)=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}erf\left[\frac{\ln\left(x/c_j\right)}{\zeta_j\sqrt{2}}\right] \tag{3-3}$$

上式中，即為第 j 類損害程度之累積分布函數；erf 為高斯誤差函數，其解析式為：

$$erf\left(x\right)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}dt \tag{3-4}$$

當其中雙估計參數決定後，即可利用「標準常態累積分布函數」推求損害機率與累積分布函數，也就是第 j 類損害程度之易損性曲線(fragility curve)。中位數和標準差之決定可透過最大概似法進行求解。傳統的最大概似估計法將具隨機特性的每次事件發生(樣本)的概似值皆納入分析之中，進而得到事件發生與否的概似函數。以最大概似估計法評估對數常態累積分布之雙估計參數可依致災資料之事件分布型態建立其概似函數。然而，因探勘資料型態的不一致性及隨機特性，亦可結合集群分析(clustering analysis)得到一致性之致災資料。所謂一致性即包含空間影響及權重大小的一致性，這類一致性的致災資料可透過網格分析結合集群分析來達到並得以進行最大概似估計，此即網格集群最大概似法(謝孟勳，2013)，而若無資料集群的需求，則可直接以樣本致災資料求取。此外，依據易損性曲線分析原理，亦可發展多種損害狀態之易損性曲線，以下分別以網格集群最大概似法介紹二項分布型以及多項分布型的原理。

一、二項分布型

當損害資料為巨量的網格資料時，通常可將資料予以適當的分類或分群，所以對於第 k 個集群內假定有 J 個可能損害分類，二項分布型之聯合機率分布表達了每次試驗(受災本體)僅有一個可能的損害結果，且每次試驗是獨立且互斥的。對於第 j 個損害分級，在第 k 個集群內 X 次試驗中達到之次數表示為 x_k。因此機率分布的聯合機率質量函數(join probability mass function; JPMF)可用典型二項分布定義如下：

$$f_{kj}(X) \equiv \binom{X}{x_k} [F_j]^{x_k} [1-F_j]^{X-x_k} \tag{3-5}$$

因此，基於此聯合機率質量函數，對於被分成 K_g 個集群的所有事件資料，第 j 類損害程度之概似函數 L_j^B 可表示為：

$$L_j^B(c_j,\zeta_j) = \prod_{k=1}^{K_g} \binom{X}{x_k} [F_j]^{x_k} [1-F_j]^{X-x_k} \tag{3-6}$$

上式中，K_g 為致災資料數量；X 為每個致災資料的坡地總面積，x_k 為第 k 個資料點之崩塌面積。式(3-6)中，二項函式分別代表發生(左項)與未發生(右項)之崩塌機率。因此，對於崩塌易損性曲線之中位數和標準差，式(3-6)可經由求取概似函數之最大值進行估計。藉由取對數後一階偏導函數求解雙估計參數，聯立方程表示如下：

$$\frac{\partial \ln L_j^B(c_j,\zeta_j)}{\partial c_j} = \frac{\partial \ln L_j^B(c_j,\zeta_j)}{\partial \zeta_j} = 0 \tag{3-7}$$

上式之推導須引入標準化參數 λ_{kj}，即：

$$\lambda_{kj} = ln(x / c_j) / \zeta_j \tag{3-8}$$

即可導出第 j 個損害分級之非線性聯立方程式如下：

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{K_g} R_{kj} \left\{ \dfrac{-e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1+erf\left(\dfrac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} + \sum_{k=1}^{K_g} (1-R_{kj}) \left\{ \dfrac{e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1-erf\left(\dfrac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} = 0 \\ \sum_{k=1}^{K_g} R_{kj} \left\{ \dfrac{-\lambda_{kj} e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1+erf\left(\dfrac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} + \sum_{k=1}^{K_g} (1-R_{kj}) \left\{ \dfrac{\lambda_{kj} e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1-erf\left(\dfrac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} = 0 \end{cases} \tag{3-9}$$

其中；

$$R_{kj} = x_{kj} / X_k \tag{3-10}$$

上式中，x_{kj} 表示第 k 個群組中第 j 個損害分級之崩塌面積；X_k 表示第 k 個群組之總面積。式(3-10)即為以第 k 個集群內之崩塌率表示之最大概似估計聯立方程。若每個集群之致災資料可得到，包含集群之 PGA 值和崩塌率或建物倒塌率，則易損性曲線之 c_j 和 ζ_j 即可以求解。另一方面，由式(3-10)亦可知，當資料不需要進行集群分析時，直接消除方程式中每個集群總數 X_k 求解即可。

二項分布型的特徵是，各類損害狀態 j 並無關聯性，也就是說各類損害之易損性曲線是分別求取的，這對於某些具連續性的物理現象可能並不適用，例如建築物的全半倒損害是逐步累積下的連續過程，不同損害狀態並非獨立，因此若是資料不足則可能在繪製不同損害狀態的易損性曲線時產生不合理的交錯，也就是會無法避免統計樣本精密度不同而產生的誤差。因此，二項分布型法適用於受災本體僅有發生與不發生二種情況，或是其受災情況為不連續的情況時，否則必須採用多項型分布法。

二、多項分布型

同樣地，當損害資料為巨量的網格資料時，通常可將資料予以適當的分類或分群，所以對於第 k 筆試驗資料，多項分布型之聯合機率分布表達每次試驗皆有 J 個可能的損害程度，且每次試驗是獨立且互斥的。因此，在 X 次試驗中，發生第 j 個損害分級之結果可被表示為 x_{kj}，若發生則為 $x_{kj}=1$，若不發生則為 $x_{kj}=0$。因此機率分布的聯合機率質量函數可以多項分布定義：

$$f_k\left(X;P_0,P_1,\cdots,P_j\right)\equiv\binom{X}{x_{k0},x_{k1},\cdots,x_{kJ}}\prod_{j=0}^{J}\left[P_j\right]^{x_{kj}} \tag{3-11}$$

其中；

$$\sum_{j=0}^{J}x_{kj}=X \tag{3-12}$$

式(3-11)中，P_j 為第 j 個損害程度至第 j+1 個損害程度的區間機率，即：

$$P_j=F_j\left(x;c_j,\zeta_j\right)-F_{j+1}\left(x;c_{j+1},\zeta_{j+1}\right) \tag{3-13}$$

且；

$$\sum_{j=0}^{J}P_j=1 \tag{3-14}$$

其中 F_0=1 且 F_{J+1}=0。對於 X 次試驗中所有損害程度之聯合機率分布，可以式(3-11)之聯合機率質量函數來表達。因此，概似函數 L^M 則可表示為：

$$L^M\left(c_1,c_2,\cdots,c_j,\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_j\right)=\prod_{k=1}^{K}\binom{X}{x_{k0},x_{k1},\cdots,x_{kj}}\prod_{j=0}^{J}\left[P_j\right]^{x_{kj}} \tag{3-15}$$

其中 K 為資料數量。對於不同損害分級易損性曲線之 c_j 和 ζ_j，即可經由求取概似函數之最大值進行評估。其聯立方程式表示如下：

$$\frac{\partial \ln L^M\left(c_1,c_2,\cdots,c_j,\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_j\right)}{\partial c_j}=\frac{\partial \ln L^M\left(c_1,c_2,\cdots,c_j,\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_j\right)}{\partial \zeta_j}=0 \quad (3\text{-}16)$$

本研究中損害程度分為二類，即 $J=2$，包含未崩塌($j=0$)及崩塌($j=1$)。若每筆坡面之致災資料可以得到，包含坡面之 PGA 值x和是否發生崩塌，則易損性曲線之c_j和ζ_j即可以式(3-16)求其數值解。當參數決定後，即可繪製依據強地動因子之崩塌發生機率密度函數的累積機率分布函數。需要說明的是，當 $J=2$ 時式(3-16)之解析解與二項式相同，其表示的是在此情況下僅有一條曲線，因此無需考慮易損性曲線的交錯。

本研究將致災因子與事件發生的關係假設為對數常態分佈，其隨機變量即為 PGA 指標。對於坡地易損性分析利用網格集群最大概似法建立坡地受地震引致崩塌之概似函數。對於某個受災事件，在致災因子作用下僅有二個可能的損害結果，即發生與不發生的二元模式，且每次試驗皆是獨立且互斥的，所表達之涵義為某 PGA 下發生災害至少有多大的可能性。因此對於崩塌機率評估之結果，指的是某個坡面單元在某 PGA 下至少有多少機率可能會發生崩塌，這個機率係屬超越機率。另一方面，多項分布型則表達在致災因子作用下坡地有多個可能的損害結果，但僅會發生其中一個，所描述損害機率之意義，係指在某 PGA 下達到或超越某種損害狀態的機率，其物理意義係指某類型坡地在某地震條件下發生崩塌的可能性。因此在本研究中崩塌機率評估之結果，指的是某個坡面單元在某地震下至少有多大機率可能會發生崩塌，進而推估集水區之崩塌情形。上述兩種模式，所有的事件資料皆可利用網格分析來定義致災資料的崩塌。以資料取樣觀點，所有致災資料被災害發生與不發生所定義，由此兩元素來推論事件分布情形。因此致災資料可用連續型或不連續型資料表示，連續型資料可用發生率(例如崩塌率或倒塌率)表示，不連續型則可用 0/1 定義是否發生；前者即可用網格法推求崩塌率，後者可用坡面法評估是否發生崩塌。

第二節　坡地易損性曲線建立

坡地崩塌發生可能性與地震因子之關係，可藉由易損性分析原理建立特定地震因子下某類坡地對於致災因子可能引致崩塌發生之機率，即可建立坡地易損性曲線。這個關係建立在有良好致災資料所建置之崩塌資料庫或崩塌目錄。對於廣域崩塌評估可依據不同之地文分類及驅動力指標建立不同類別之坡地易損性曲線，可用來進行坡地分類之地文因子例如坡度、地質、坡向…等，而引致崩塌之驅動力指標則可採用地震之 PGA，建立與崩塌與否的易崩特性，進一步建構基於機率理論的崩塌評估方法。

由於地震誘發崩塌具有一定地域性，發展坡地易損性模式需要充分且客觀的災損資料和地震紀錄，由於重大地震事件之地震紀錄並不多，本研究基於 921 地震資料建立台灣地區地震誘發坡地崩塌之坡地易損性曲線，可適當表現台灣地文環境特性。針對 921 地震中高震度地區為對象，除針對研究地區的基本資料蒐集外，亦蒐集其集水區範圍相關資料，包括主、次、子集水區範圍、5m 數值高程模型、河川、水系、地質、岩性等；以及事件資料，包括地表加速度、921 地震前後期衛星影像等。藉由 PGA 地震危害度分析和衛星影像判釋崩塌地等技術，將環境及崩塌資料建置成網格式崩塌資料庫。另一方面，藉由 DEM 進行坡面單元分析，提供坡面崩塌評估資訊。再利用網格集群最大概似分析法，可將各類坡地分類資料進行坡地易損性分析，進而繪製易損性曲線。

在進行坡地易損性分析中，必須要考量的另一特性即是坡地崩塌的幾何特性。對於網格崩塌資訊，目前已可藉由高精度衛星影像判釋得到，但此資訊未必完全符合地形特性，同時具有一定的不確定性。因此，本研究考量地形特徵單元與評估合理性引入坡面單(slope unit)分析，坡面單元因具有符合地形特徵之特點，此特點利於未來進一步之分析及坡面評估，相較網格單元更可靠及合理可行，將有助於釐清空間上坡地之影響範圍及機率評估。

第三節　坡地易損性曲線優化

地震引致崩塌現象通常要在一定震度以上才會出現，例如 921 地震事件震級 6 區開始出現零星事件，震級 7 區以上才會有明顯的大量事件(王文能、尹承遠等人，2000)，然而有時即使震度很高卻不發生崩塌，這表示地震引致崩塌現象除了具有臨界現象，也具不確定性。為了降低坡地易損性分析的不確定性，基於經驗統計的崩塌致災資料就必須適度的篩選，消除異質資料的影響，進一步優化易損性曲線分析結果。

過去研究中囿於真實地震紀錄可得資訊有限，調查報告大多以中央氣象局地震分級作為概略的描述，而我國因地震儀器布建越來越精密，舊制震度分級偶爾會出現小規模地震但震度很高的極端情形。這是因為地震在一瞬間發生了很大的加速度，然而這種類型的地震通常不會造成災害，因此，中央氣象局藉由修改震度的計算方法，讓震度和災害的嚴重程度有更大的相關性，如表 3-1 所示。109 年 1 月 1 日起實施的新制震度階級表，將震度 4 級以下和震度 5 級以上切分為二部分，震度 4 級以下以最大地動加速度值(PGA)定義，震度 5 級以上則以最大地動速度值(PGV)定義，如表 3-2 所示。

本研究為降低實際地震中低震度區域零星崩塌的影響，並有效地結合地震危害度分析成果，使本計畫未來研究成果能適用於研究範圍的應用。基於中央氣象局新制地震震度階級對照表，考量實際崩塌現象以震度 6 弱級以上區域的崩塌致災資料作為分析對象，也就是不考慮震級 6 弱以下區域之崩塌致災資料的影響，進而建立震級 6 弱以上地區之坡地易損性曲線。此外，由於目前台灣地震模型(TEM)分析成果是以 0.23g ((約 225.63gal)及 0.33g (約 323.73gal)作為分析界線，因此此方式不僅可降低實際地震中低震度零星崩塌的影響，亦可保守地適於後續風險評估的整合應用，進一步得到適用於本研究目標之坡地易損性曲線優化成果。本研究對於坡地易損性曲線建立及優化流程如圖 3-1 所示。

表 3-1　中央氣象局地震震度分級表(2020 年新制)

震度階級		屋外情形
0 級	無感	—
1 級	微震	—
2 級	輕震	靜止的汽車輕輕搖晃，類似卡車經過，但歷時很短。
3 級	弱震	靜止的汽車明顯搖動，電線略有搖晃。
4 級	中震	電線明顯搖晃，少數建築物牆磚可能剝落，小範圍山區可能發生落石，極少數地區電力或自來水可能中斷。
5 弱	強震	部份建築物牆磚剝落，部份山區可能發生落石，少數地區電力、自來水、瓦斯或通訊可能中斷。
5 強		部份建築物牆磚剝落，部分山區發生落石，鬆軟土層可能出現噴沙噴泥現象，部分地區電力、自來水、瓦斯或通訊中斷，少數耐震較差磚牆可能損壞或崩塌。
6 弱	烈震	部分地面出現裂痕，部分山區可能發生山崩，鬆軟土層出現噴沙噴泥現象，部分地區電力、自來水、瓦斯或通訊中斷。
6 強		部分地面出現裂痕，山區可能發生山崩，鬆軟土層出現噴沙噴泥現象，可能大範圍地區電力、自來水、瓦斯或通訊中斷。
7 級	劇震	山崩地裂，地形地貌亦可能改變，多處鬆軟土層出現噴沙噴泥現象，大範圍地區電力、自來水、瓦斯或通訊中斷，鐵軌彎曲。

資料來源：中央氣象局，2020

表 3-2　中央氣象局地震震度階級對照表(2020 年新制)

震度階級		PGA(gal=cm/s^2)	PGV(cm/s)
0 級	無感	0.8 以下	0.2 以下
1 級	微震	0.8~2.5	0.2~2.7
2 級	輕震	2.5~8.0	0.7~1.9
3 級	弱震	8~25	1.9~5.7
4 級	中震	25~80	5.7~15
5 弱	強震	80~140	15~30
5 強		140~250	30~50
6 弱	烈震	250~440	50~80
6 強		440~800	80~140
7 級	劇震	800 以上	140 以上

資料來源：中央氣象局，2020

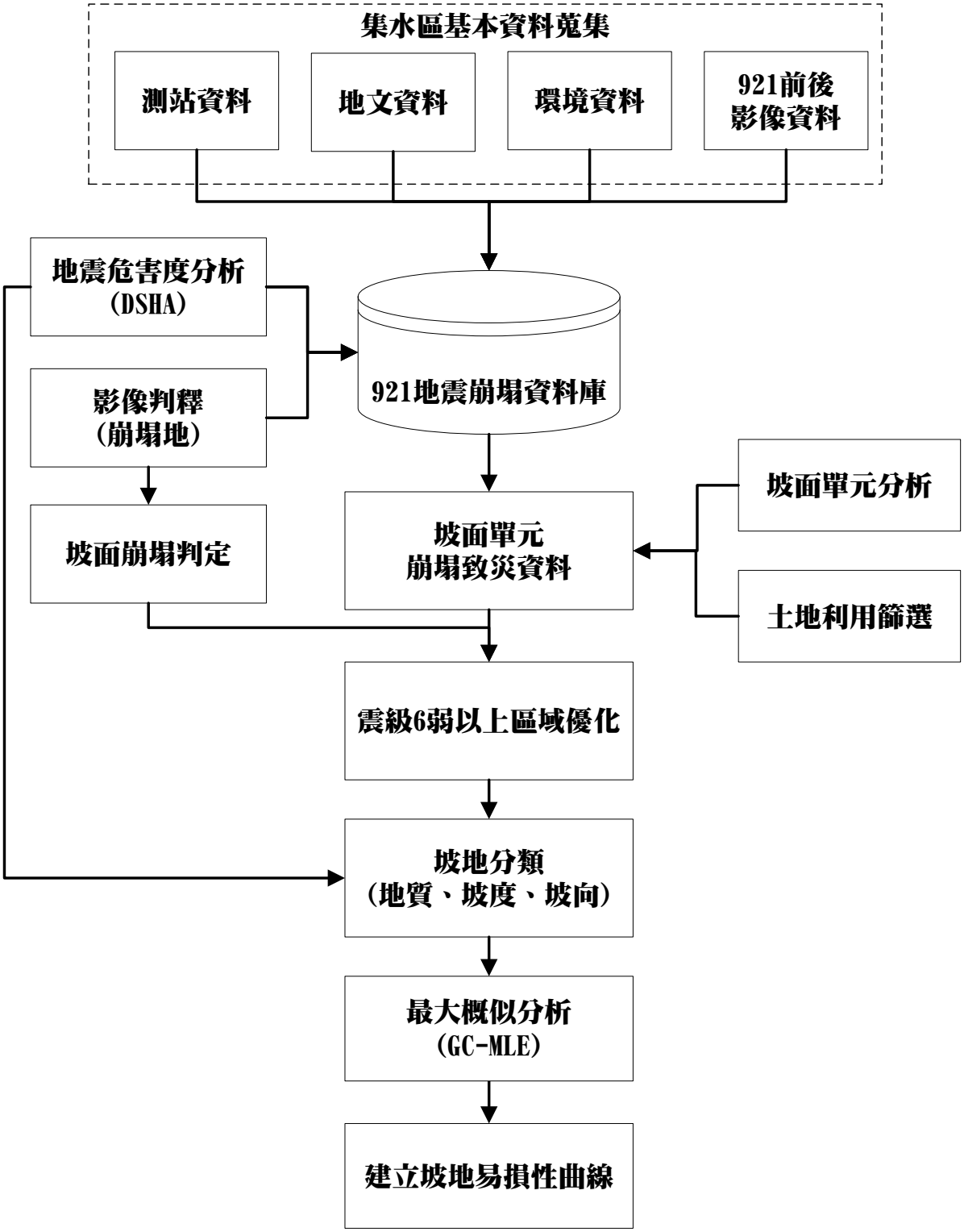


圖 3-1　坡地易損性曲線建立及優化流程

第四節　921 地震崩塌地與誘發因子分析

一、研究基本資料

由於台灣重大地震事件之地震紀錄並不多，因此本研究以具代表性的 921 地震為對象，作為本研究建立易損性曲線的實證地區，優選具高潛勢危害地區，也就是選擇車籠埔斷層鄰近範圍，所選地區同時也是在地震中的高災損地區。同時，由於 921 地震的逆衝斷層效應，上盤(斷層右側)遠比下盤(斷層左側)嚴重,地表加速度和災損相對較高。因此，本研究實證區選擇烏溪流域集水區，行政區域隸屬於台中及南投，由大里、北港、烏溪、貓羅溪、南港溪、水里溪，六個集水區所組成，集水區面積 658.34 平方公里，如圖 3-2 所示。

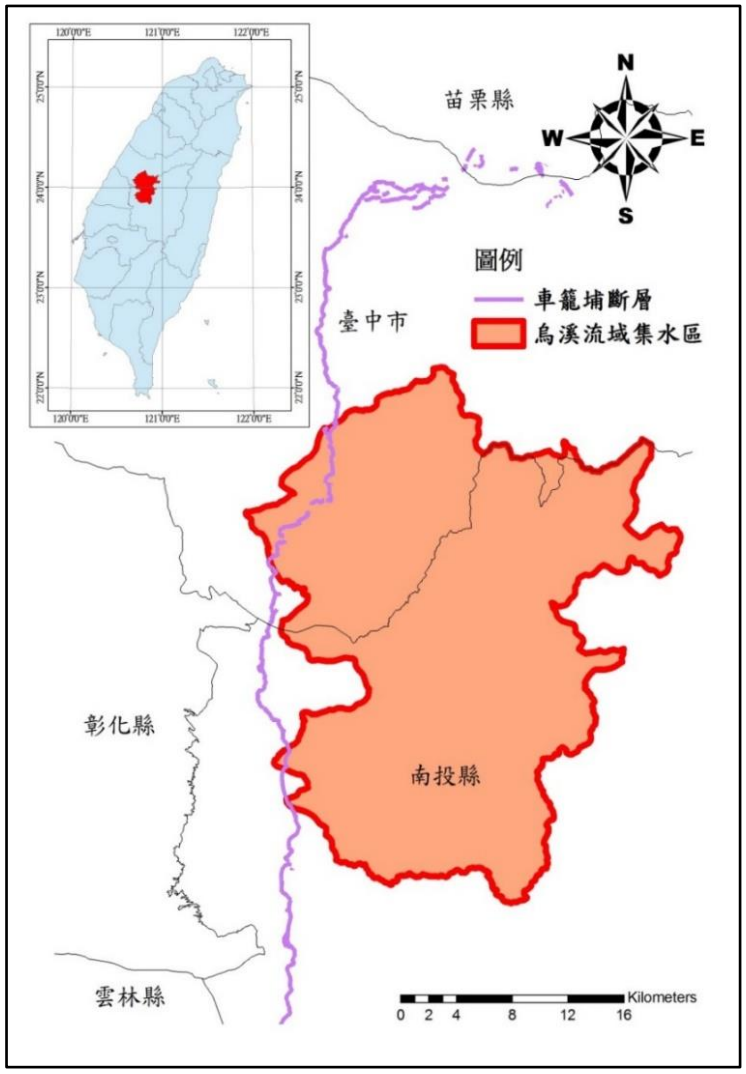
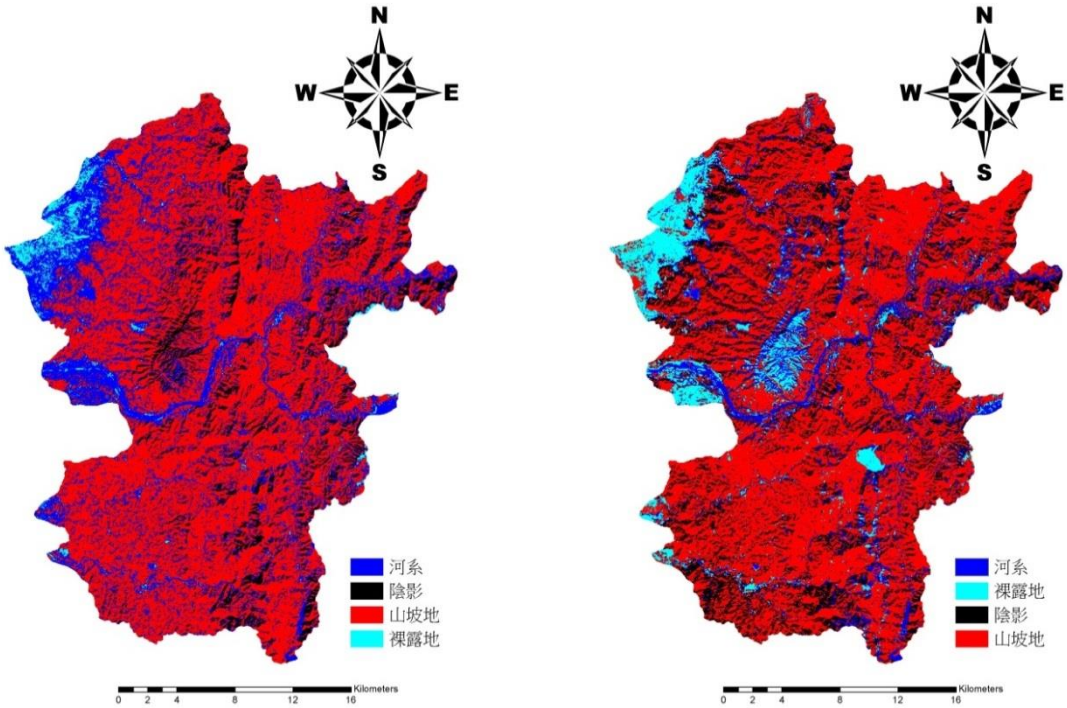


圖 3-2　研究區域

二、事件前後期裸露地

本研究以各期事件衛星影像可進行裸露地判釋，初步瞭解可能崩塌地位置。所使用之原始影像資料為自中央大學太空及遙測研究中心購買之SPOT-2 衛星多波段(XS)影像資料，影像等級為 LEVEL3。各幅衛星影像皆經過相對輻射校正及影像幾何、正射校正等程序，像元大小為 12.5m×12.5m。

本研究使用 921 地震前後期衛星影像以及影像處理系統 ERDAS IMAGINE 進行衛星影像人工判釋，如圖 3-3 所示為前後期影像判釋成果，可見影像判釋可分為四個種類，包括河系為藍色、陰影為黑色、山坡地為紅色、裸露地為淡藍色。其中河系與陰影無法利用，山坡地即為未崩塌的區域，而該次事件崩塌地之變遷狀況，則可藉由前後時期之裸露地分布情形獲得。藉由數化圖資以地理資訊系統進行套疊比對，即可得各種崩塌地變遷狀況。前後期裸露地之狀況如圖 3-4 所示。裸露地面積統計如表 3-3 所示。

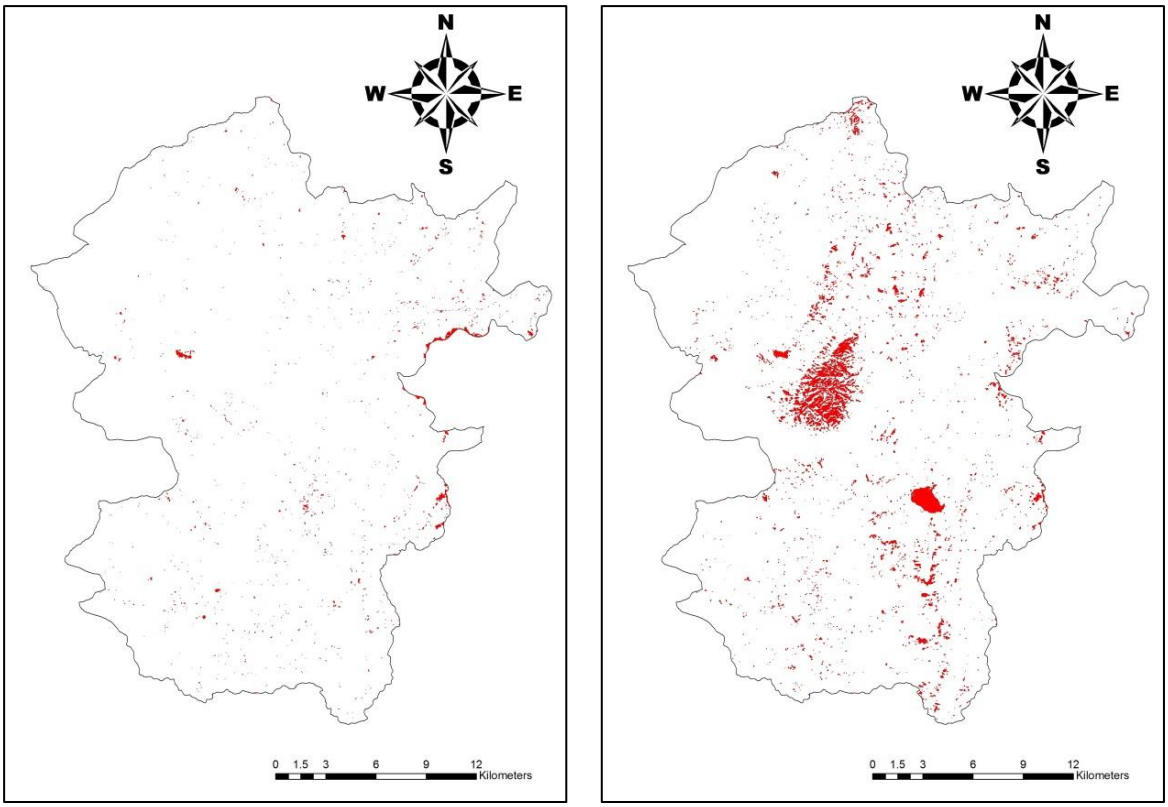


(a)前期影像　　(b)後期影像

圖 3-3　前後期影像判識

表 3-3　研究地區裸露地統計

事件名稱	集水區有效面積	裸露地面積	裸露比例
921 地震前期	38,446.00ha	236.04ha	0.61%
921 地震後期		1688.40ha	4.39%



(a)前期崩塌地　　(b)後期崩塌地

圖 3-4　九二一地震前後期裸露地分布

三、新增崩塌地

事件崩塌地之變遷狀況，可藉由前後時期之裸露地變異情形獲得。賴志強(2007)、陳俞旭(2008)等人對於地震及降雨引致之崩塌地分類，考慮植被復育之影響，將崩塌地分類為四類。如圖 3-5 所示，包括：

(一)崩塌復育：(1)與(5)

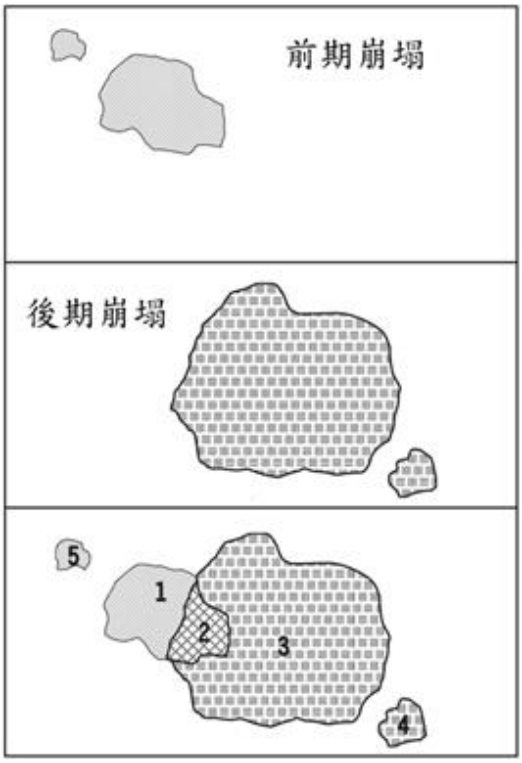
(二)舊有崩塌地：(2)

(三)舊有崩塌地擴大：(3)

(四)新生崩塌地：(4)

而其定義「新增崩塌地」，則為「舊有崩塌地擴大」加上「新生崩塌地」的

部分，即(3)與(4)。上述之分類方法，對於前後期崩塌地變遷情形，在技術層面上具有清晰的定義，可由此判定某區塊是否確實發生崩塌。然而，雖然在大部份的情形下，舊有崩塌地地的擴大確實與事件相關，但並無法確切知道舊有崩塌地也在該次事件產生崩塌。尤其擴大有時並非只是往外擴增，也可能有內部加深之情形；然而此狀況並不能以空間區位判別而獲得，且其內部是否真的發生加深情形，須進行現地勘查才可能得知。根據上述崩塌地之分類，本研究將各颱風事件前後時期之崩塌地圖資進行套疊，由此獲得崩塌地變遷資訊。



資料來源：修改自賴志強(2007)；陳俞旭(2008)

圖 3-5　崩塌地變遷及分類示意

新增崩塌地關聯性查詢可直接針對裸露地進行網格套疊，即可顯示出崩塌地相對應位置的集水區網格，再將顯示出崩塌地之網格標記成數字 1，表示該網格發生崩塌，未發生崩塌之網格則標記為數字 0，如圖 3-6 所示，藉由前後期裸露地得到之崩塌地，即為 921 地震後所造成之崩塌，如表 3-4 及圖 3-7 所示。

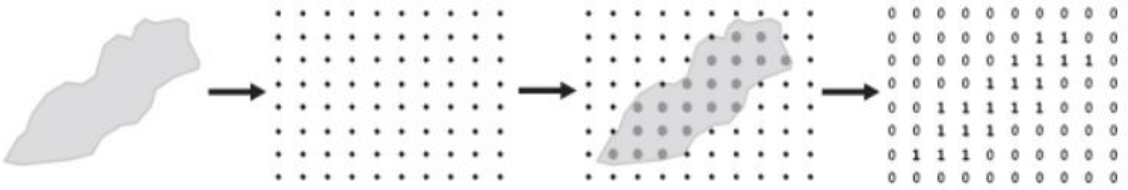


圖 3-6　坡面資料套疊網格示意圖

表 3-4　研究地區新增崩塌地統計

崩塌類別	921 地震
集水區有效面積	38,446.00ha
新增崩塌地面積	965.84ha
新增崩塌率	2.51%

資料來源：本研究整理

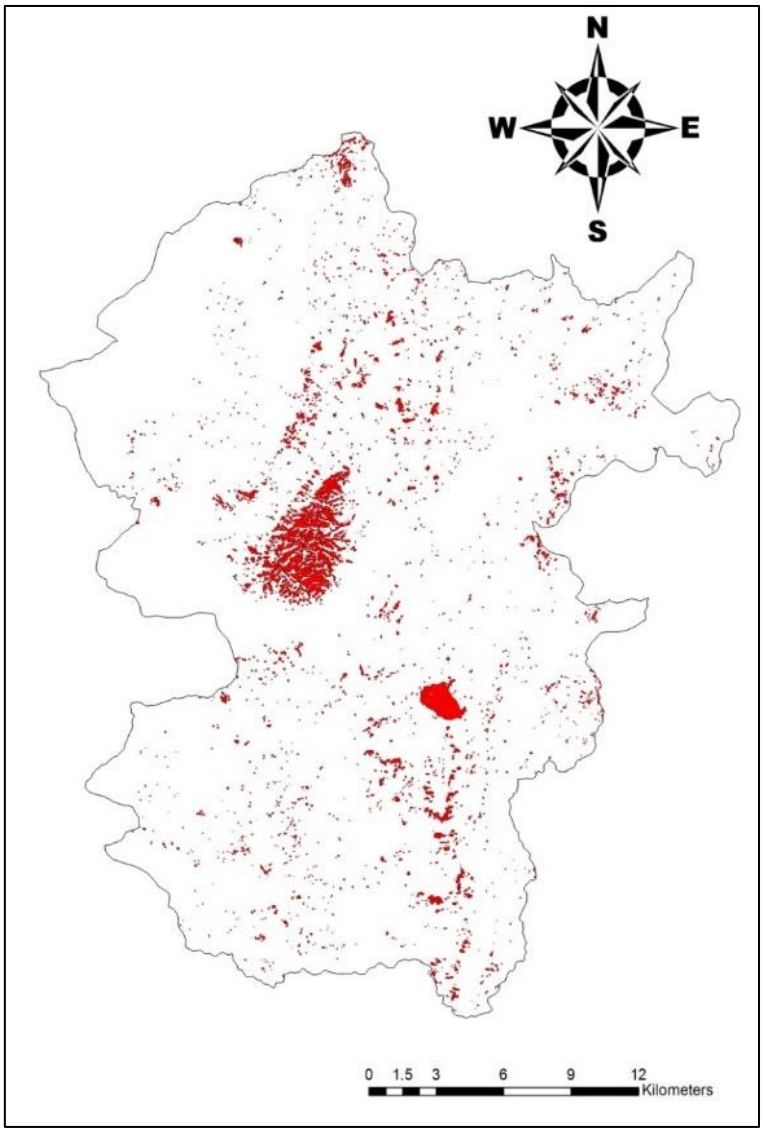


圖 3-7　921 新增崩塌地

四、地震誘發崩塌之尖峰地表加速度

地震災害潛勢分析之目的在於瞭解地震發生後可能造成區域潛在威脅之程度，可利用尖峰地表加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)或尖峰地表速度(Peak Ground Velocity, PGV)等表達潛勢分析的物理量。地震潛勢分析可經由區域鄰近之活動斷層分布，考量適合之震源參數(包括活斷層帶、地震規模及深度)及震度衰減率來推估尖峰地表加速度值，此種方法亦稱為定量地震危害度分析(Deterministic Seismic Hazard Analysis, DSHA)。

為了進行地表震度之空間分布，本研究自 TSMIP 中蒐集經中央氣象局校正且可信度較高之 444 個臺灣本島強地動測站紀錄，測站分布與車籠埔斷層帶之關係如圖 3-8 所示，其中有十數筆的資料是位於近斷層處，將有利於描述斷層特性(溫國樑與柴駿甫，1999)。

本研究以上述 444 個強地動測站所得 921 地震主震之三軸向地表加速度歷時記錄，分別取歷時記錄中最大值做為該測站之場址三軸向 PGA 值。然而，對於地震引致建築物損害主要係水平向地震力所造成，因此某測站之場址 PGA 值多以較為重要之雙軸水平向 PGA 進行探討。過去許多研究曾採用雙軸水平向 PGA 之幾何平均值(geomean)、最大值(maximum value)或算術平均值(average)等作為某測站之場址 PGA 值，本研究則採用其中的幾何平均值定義之，可表示如下：

$$S_{site} = \sqrt{S_x S_y} \tag{3-17}$$

上式中，S_{site} 為某測站之場址 PGA 值；S_x 及 S_y 分別為測站之東西向及南北向 PGA 值。此測站之場址 PGA 值可作為未設測站場址推估 PGA 空間分布之基準值。

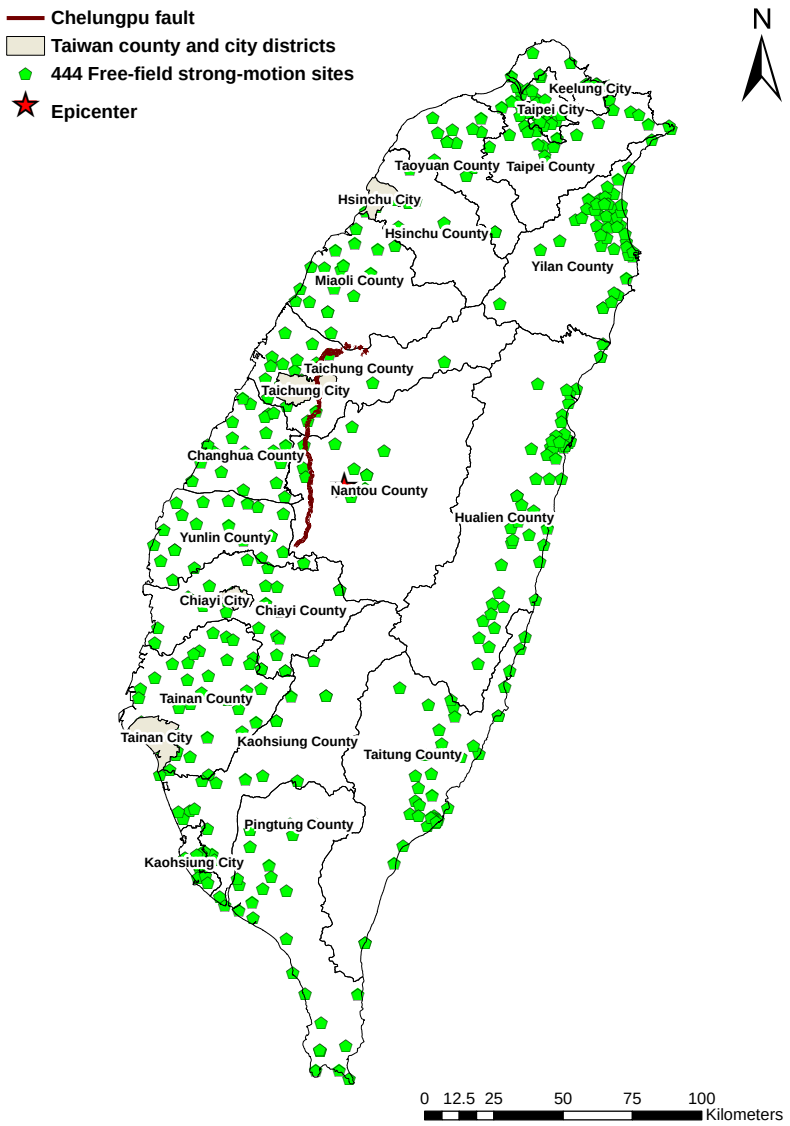


圖 3-8　自由場強地動測觀測網(TSMIP)測站分布

(一)地表震度衰減率

根據以往地震學家對於地震的觀察，場址地表震度的大小與斷層之距離呈負相關。地表震度衰減率被用以描述場址隨著震源距離遠近導致地表震度衰減之關係。全世界對於地表震度衰減率之研究相當多，主要是以歷史地震資料為基礎，依據不同的地質條件，提出許多不同型式之衰減公式，再透過統計回歸的方式求得。早期較為著名的學者有 Campell(1977)、Boore and Joyner(1997)、Sadigh *et al.*(1997)等人所提出之地表震度衰減公式。對於本研究採用之致災因子－PGA，地表震度之衰減關係則分別採用近期學者吳逸民等人對於臺灣地區之衰減率研究成果(Wu *et al.*, 2001，以下簡稱 Wu 衰減

率)。吳逸民等人針對 1995－1999 年臺灣地區發生之 60 筆地震事件記錄進行統計回歸，其所得之水平向 PGA 衰減率表示為：

$$\log_{10}(S_h) = 0.00215 + 0.581M_w - \log_{10}(R + 0.00871\times 10^{0.5M_w}) - 0.00414R \tag{3-18}$$

式(3-18)中，S_h 為雙軸水平向 PGA 之幾何平均值，單位為 cm/s^2；M_w 為地震之震矩規模；R 為場址至震央之距離，單位為 km，定義為斷層帶至場址的最短距離。

地表震度衰減率是國內外學者蒐集多次地震實測記錄後之回歸結果，實際上不完全能夠適用 921 地震實測資料，因此必須對地表震度衰減率進行修正以反應衰減率之函數特性。地表震度衰減率修正之方法係將震矩規模 M_w 與場址至斷層帶之最短距離 R 分別帶入衰減率中，得到 PGA 之推估值後再乘上一修正係數，並使測站實測值與修正後推估值間之誤差絕對和為最小，即可分別求取修正係數。修正之模型如下式：

$$min\Delta = \sum_{m=1}^{M} \left| (S_m)_T - \alpha (S_m)_E \right| \tag{3-19}$$

上式中 $(S_m)_T$ 為第 m 個強地動測站之實測資料；$(S_m)_E$ 為第 m 個強地動測站以地表震度衰減率推估之結果；M 為測站數量；α 為修正係數。曾有文獻提出 921 地震之 PGA 衰減趨勢與全世界資料相差不多，但加速度值較小約 0.4－0.7 倍(溫國樑與柴駿甫，1999)。本研究利用 444 個測站進行地表震度衰減率之修正，對於 Wu 衰減率所得到之修正係數為 0.568。

(二)強地動因子空間推估

由於自然界中的諸多現象多具有時間或空間上之變異，因此對於散佈在空間中的自然變量，經常利用地理統計之區域化變數理論表現其性質。自然界的許多現象均可視為隨機變域的表現，例如降雨量、溫度等。由於在空間中不同區域之各隨機變數並非完全獨立，而是可能具有不同程度的相關

性，隨機變域之表現值即被稱為區域化變數(regionalized variable)。區域化變數理論近年來已被廣泛應用於氣象、土壤物理、地下水、礦冶、地震、環境監測及水文等領域當中。

散佈在空間中的自然變量若存在明確的空間結構特性即可稱之為區域化(regionalization)，而區域化變數通常包含能夠明確以數學關係式表示的確定性資料與具隨機特性的非確定性資料，也稱之為非統計問題和統計問題這兩種類別。對於地震所引致之地表震度分布問題而言，確定性資料即所謂的地表震度衰減率，代表由任意震源引發的地表震度在空間中之分布模式；但對於非確定性資料，則係時間與空間之不同而產生之隨機變異，由於無法使用明確的數學關係式來表達，而且每次觀測的結果也可能不同。因此，基於地理統計理論之觀點，空間中任意區域之地表震度 $Z(x)$ 即具有隨機變域的特性，其係由區域化趨勢值 $M(x)$ 和殘差分量 $R(x)$ 所組成。對於空間中之地表震度，震度分布即可滿足下式(Journel, 1983)：

$$Z(x)=M(x)+R(x) \tag{3-20}$$

上式中 $Z(x)$ 為位於 x 處之地表震度之區域化隨機變數值；$M(x)$ 為區域趨勢值，可表示為在 x 處的一個緩慢變化的定率函數(deterministic function)，即所謂的地表震度衰減率，其值等於 $Z(x)$ 在 x 處之期望值，滿足：

$$M(x)=E\left[Z(x)\right] \tag{3-21}$$

$R(x)$ 為殘差分量，即為空間中隨機變動值(erratic fluctuations)，期望值為零，滿足：

$$E\left[R(x)\right]=0 \tag{3-22}$$

殘差分量定義為在 x 處之地表震度值與對應區域趨勢值之差，其表達隨機變數的空間變異(Yamazaki, Onishi & Tayama, 1999; Yamazaki, Motomura &

Hamada, 2000)。因此，此殘差分量即符合區域化變數理論之假設，可應用克利金方法進行空間中隨機變動值推估。如圖 3-9 所示，完成隨機變動值的推估後再將任意 x 處之區域趨勢值與推估結果相加，即為空間全域推估。

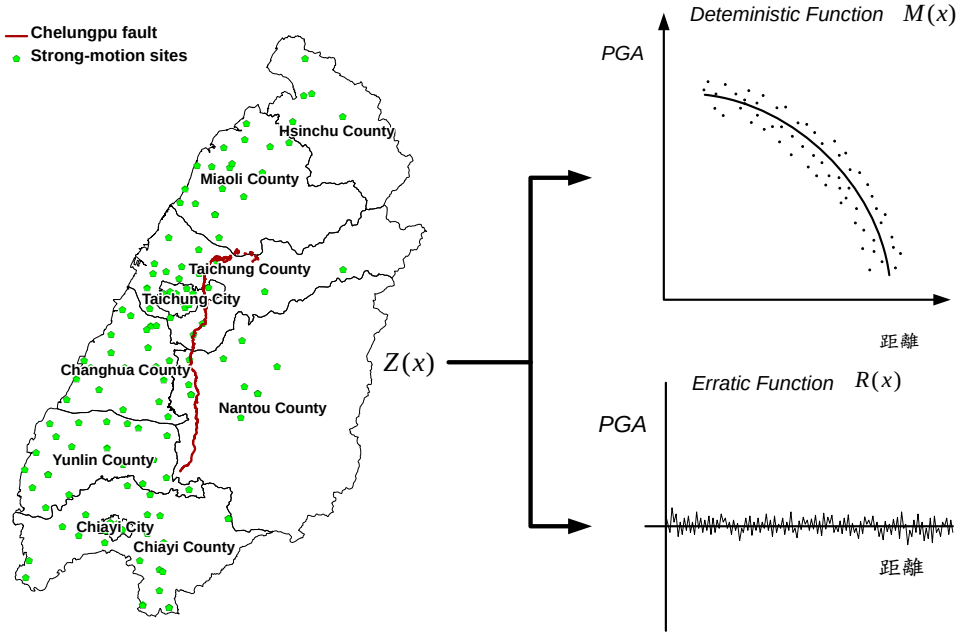


圖 3-9　區域趨勢值與空間中隨機變動值之關係

進行空間中隨機變動值推估前必須對空間資料進行空間結構分析，而以克利金空間內插方法進行地表震度之空間結構分析，其核心即須進行所謂的半變異數分析(semivariogram analysis)。半變異數代表觀測資料之空間變異，係描述區域變數(regionalized variable)沿著某一特定方向的變化率值，以此估計已知觀測資料的空間變異度。

對於地表震度之空間分布，本研究採用克利金空間內插方法。克利金空間內插方法係利用已知位置之觀測資料，藉由地理統計技術推估空間中未觀測位置之隨機變數的內插方法(即在任意 x 處之區域化隨機變數值 $Z(x)$)(Matheron, 1971; Journel, 1983; Journel & Rossi, 1989; Cressie, 1993)。克利金空間內插方法使用變異函數(variogram model)表達隨機變數的空間變異，而其估計原理係使分布於空間中已知位置之觀測資料的誤差預估值為最小(Cressie, 1993)。因此，克利金空間內插方法係建立在線性回歸的基

本假定上，使假定之共分散模型(covariance model)的估計變異為最小(Journel, 1983)。過去已有許多研究已成功地應用克利金空間內插方法在地表震度之推估及模擬，並進一步地應用於地震危害評估(例如 Carr, 1983; Carr & Glass, 1984; Maruyama *et al.*, 2010; Shabestari *et al.*, 2004; Wu, Hsiao & Teng, 2004; Yamazaki, Onishi & Tayama, 1999; Yamazaki, Motomura & Hamada, 2000)。

本研究利用 921 地震 444 個強地動測站之場址 PGA 值，採用 Wu 衰減率做為定率函數分別以一般克利金系統方程式推估未設測站之全域 PGA 空間分布，並以 100 m×100 m 之網格做為空間全域推估之尺度。藉由殘差分量套配之最佳半變異數模式及參數，本研究利用地理資訊系統軟體 Arc GIS 內建之空間分析克立金內插模組推估空間中之隨機變動值。如式(3-22)，空間推估之隨機變動值 $R(x)$ 再與區域趨勢值 $M(x)$ 相加，即可完成地表震度之全域推估 $Z(x)$。

Wu 衰減率所得之殘差分量套配之最佳半變異數模式為指數模式，藉由克立金空間內插方法先針對已知測站之推估值比較。如圖 3-10 所示為各測站之實測值(PGA_T)與推估值(PGA_E)之比較結果，圖中顯示 444 個測站中大部分之推估值皆相當良好，其平均絕對誤差(mean absolute error)為 1.87 %，此準確度已可作為推估全域地表震度之有效基準。PGA 之空間推估結果如所示，由圖 3-11 中顯示在車籠埔斷層帶沿線之推估結果較高，最大 PGA 值為 815.07 cm/s^2，此一結果相當符合 921 地震之地表震度在中部區域之表現，亦顯示在車籠埔斷層帶沿線具有相當合理的推估能力。此外，對於震波傳遞之盆地放大效應(basin effect)，如圖中右側數值較高之埔里盆地，空間描述能力亦相當良好。顯示 Wu 衰減率模式之 PGA 空間推估結果可做為發展坡地易損性曲線的有效地表震度資料。

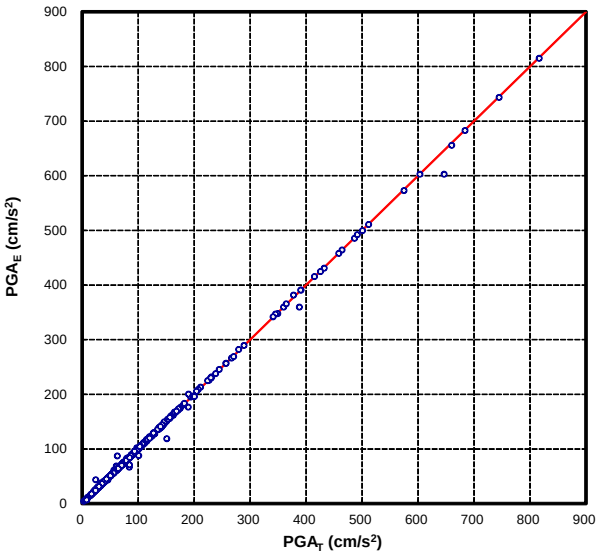


圖 3-10　強地動測站實測值及 Wu 衰減率之推估值比較

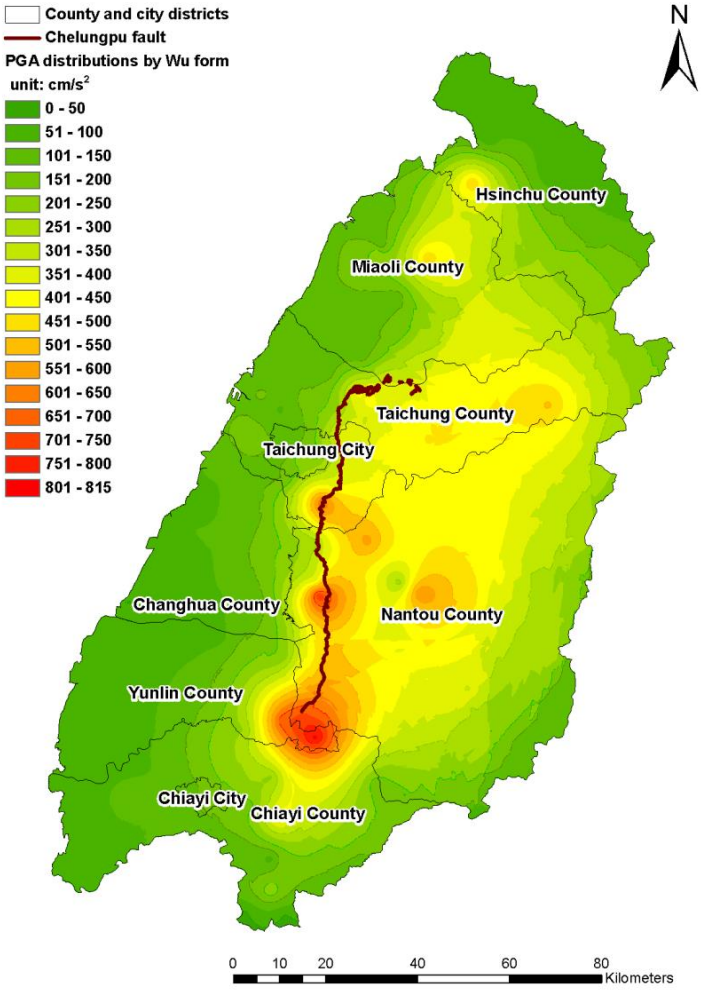


圖 3-11　全域尖峰地表加速度分布

第五節　環境因子分析

本研究進行坡地易損性分析前須建立集水區各類環境因子資料，集水區資料蒐集自林務局農林航測所以及水土保持局全國集水區圖層，資料範圍包括烏溪流域集水區及鄰近集水區之相關地文、水文地理資訊圖資，採用圖層範圍包括主、次、子集水區範圍圖、河系圖等地理資訊基礎圖資。在集水區環境因子方面，本研究藉由網格資料庫建置各類環境因子屬性及崩塌事件等資訊。環境資料庫將以 20m×20m 之網格尺度將不同集水區範圍內所有屬性因子鏈結，資料庫細分為四個部分：(1)地文因子；(2)篩選因子及(3)崩塌資訊。資料庫基礎為調查蒐集之基本資料，例如集水區基本圖資、事件衛星影像、數值高程模型、地質圖、國土利用圖等基本共通資料，並且須進一步處理各類資訊，例如坡度、坡向、高程、順向坡、事件陰影、崩塌地資訊等。此外，篩選因子中部份不適用區域被剔除，例如無法判釋區(陰影區塊)、已開發地區(建物、農地、行水區)、河系(河流、湖泊)、地質(沖積層)、較緩坡度區(1~3 級坡)等。環境資料庫之類型和檔案格式如表 3-5 所示。

表 3-5　環境資料庫之類型和檔案格式

類型	資料名稱	檔案形式
地文因子	地質	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
	坡度	影像檔案(Raster，解析度：5m)
	坡向	影像檔案(Raster，解析度：5m)
	順向坡	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
	距斷層遠近	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
篩選因子	高程(1500 以上)	影像檔案(Raster，解析度：5m)
	河系圖	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
	國土利用	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
	921 地震後期陰影	向量檔案(Raster，解析度：20m)
崩塌資訊	921 地震前期裸露地	影像檔案(Raster，解析度：20m)
	921 地震後期裸露地	影像檔案(Raster，解析度：20m)

資料來源：本研究整理

一、數值地形模型

數值地形模型(Digital Terrian Model; DTM)泛指任何以數值化(digital)的方式來展現 3D 空間地形起伏變化的狀況。其應用範圍相當廣泛，在地形分析上可用來進行坡度坡向計算、等高線製作，土木工程方面用來做挖填方計算、坡地或道路開挖，災害評估方面可用在災害崩塌體積計算，其他常見可用來做三度空間展示等等，DSM(Digital Surface Model)則指的是地表上所有地物，包含人工構造物或自然森林或人工作物覆蓋地面的高程；數值高程模型(Digltal Elevation Model; DEM)是指所有關於地形表面的數值表現及描述(Carter, 1988；Miller and Leflamme, 1985)，可視為地表的替代模式。DEM 首見於 1970 年代美國地質調查署以二維矩陣方式儲存高程資料的資料格式，為有利於未來應用及發展，本研究蒐集內政部所製作，解析度為 5m×5m 矩形網格結構之數值高程模型，此資料將提供計畫區域空間位置之高程資訊，並用於計算相關地形參數，例如坡度、高程、坡向以及坡面單元劃定等基礎資料。

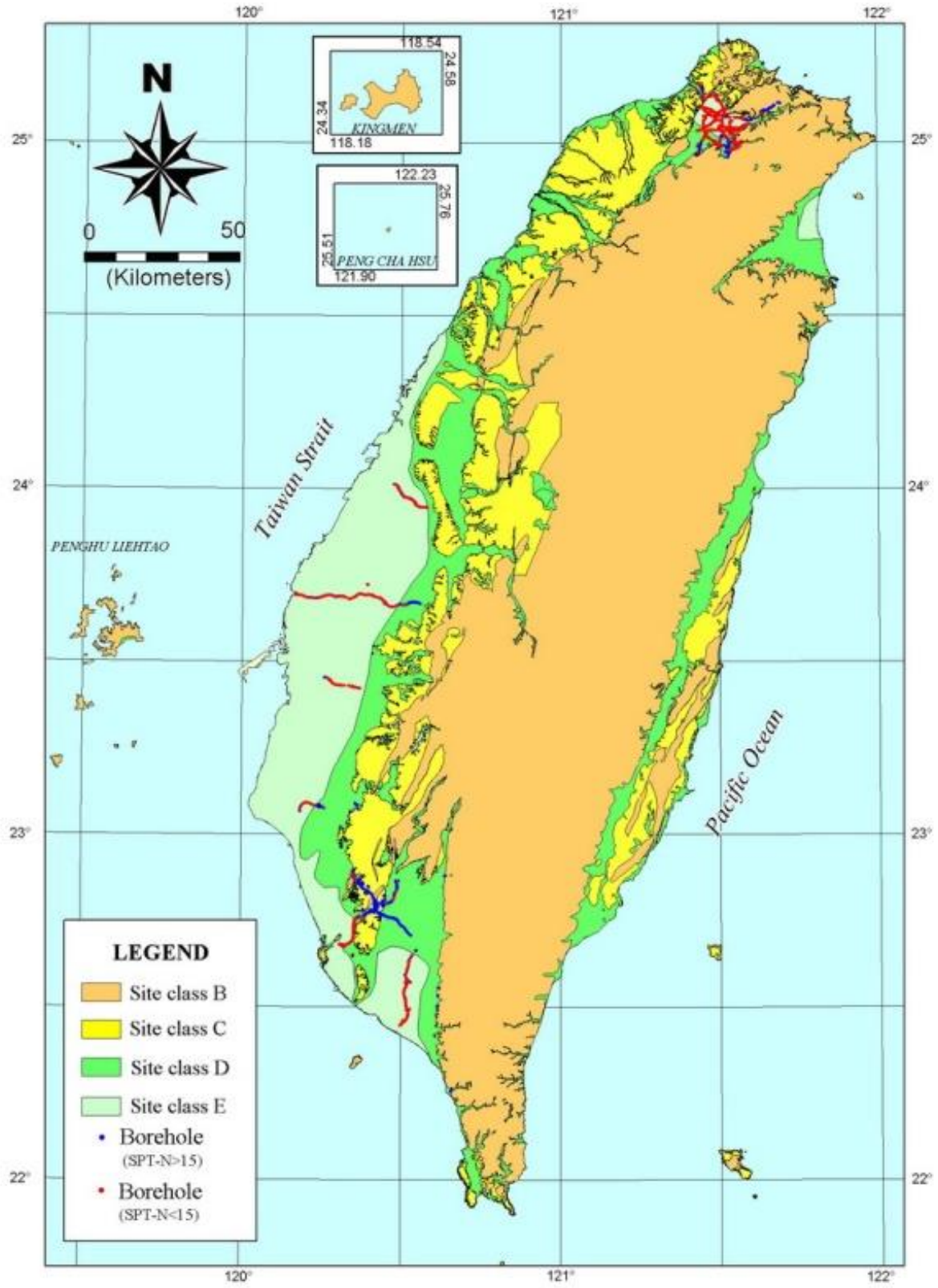
二、地質資料

根據過去研究，地震引致的崩塌與年代、岩性、地層的相關性較不易確認，而與地震引致的震動、加速度與波速更為直接相關。以地震工程學的觀點，地震波(能量)的傳遞與岩土硬度具有較大關係，影響地振動的大小，通常堅硬的岩盤傳遞更多能量至地表，也引致更高的震度。李錫堤等人(Lee *et al.*, 2001)將全台灣地區的地震測站所在之場址，由硬至軟依序分為 B、C、D、E 四類，如表 3-6 及圖 3-12 所示，本研究依據該研究之分類將地質圖資套疊至集水區網格內。此分類模式將作為地震崩塌評估的地質因子。

表 3-6　李錫堤教授提出之台灣地區地質分類

分類	1997 UBC 分類準則	台灣地區分類準則
B	Rock, shear velocity is from 760 to 1500 m/s	中新世或較老的地層,包含石灰 岩、火成岩及變質岩等
C	Very dense soil and soft rock, shear velocity is from 360 to 760 m/s, Undrained shear strength us≧2000 psf (us≧100 kPa) or N≧50 blows/ft	上新世及更新世地層，包含礫 石層、 火山角礫岩、火山碎屑 岩…等，以及紅土台地
D	Stiff soils, shear velocity is from 180 to 360 m/s, Stiff soil with undrained shear strength 1000 psf≦us≦2000 psf (50 kpa≦us≦100 kPa), or 15≦N≦50 blows/ft	更新世晚期與全新世地層，低位河階地,以及緻密的黏土層或 砂泥層平均地表 30m 內 SPT N 值≧15
E	Soft soils, Profile with more than 10ft (3m) of soft clay defined as soil with plasticity index PI>20, moisture content w > 40% and undarined shear strength us < 1000 psf (50kPa), or N<15 blows/ft	全新世沈積物及回填物等，平均地表 30m 內 SPT N 值 <15

資料來源：Lee *et al*., 2001



資料來源：Lee *et al*., 2001

圖 3-12　李錫堤教授分類之地質圖

三、坡向資料

回顧過去大多數地震和降雨引致崩塌的相關文獻中皆顯示(Pearce and O'loughlin, 1985)，坡向與崩塌具有一定的相關性，但無法有一個定性的關係，主因在於降雨或地震與坡向的關係是變動的相對關係，因此難以掌握其定性關係。坡向是指坡面的朝向，它表示表面某處最陡的傾斜方向。它可以被認為是山體所面向的坡向或指南針的方向。在計算坡向的過程中，坡向以度為單位按逆時針方向從 0 度(正北方向)至 360 度來度量，可分為九方向，包含平坡及北向、東北向、東向、東南向、南向、西南向、西向、西北向等。坡向圖中的每個單元的值表示此網格單元所在坡的面向。水平的坡沒有面向，均被賦予「-1」值。本研究將坡向納入環境因子之分析考量，並考慮其與地震波方向的相關性。坡向可以烏溪流域 DEM 之資料計算各網格坡向，如圖 3-13 所示。

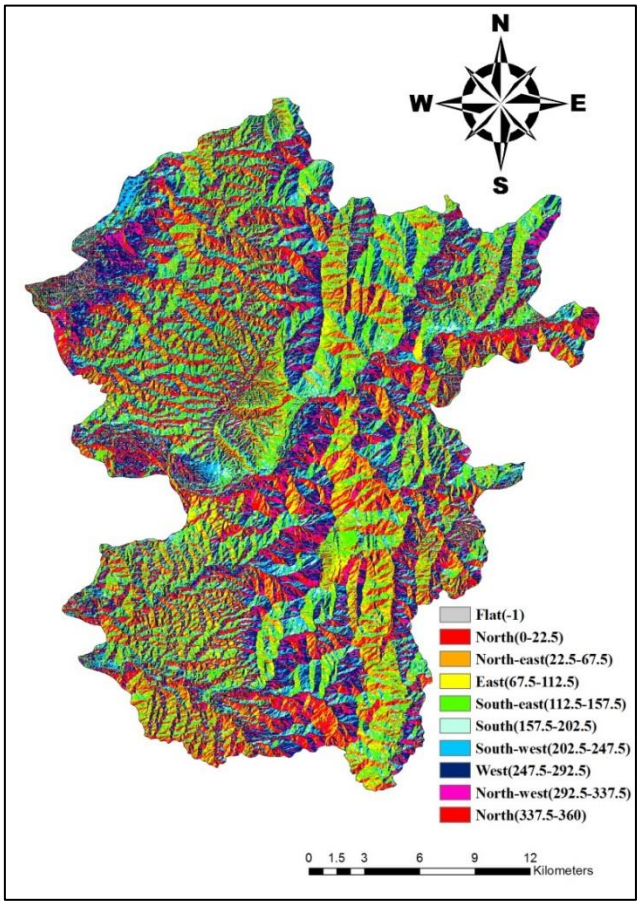


圖 3-13　研究區坡向圖

四、坡度資料

某地形的斜度即為坡度，常用於標記丘陵的傾斜程度，一般坡度的數值是以角度(degree)表示(三角函數的正切函數)，亦有以百分比表示，即為「高程增量除以水平增量再乘以 100」。而水土保持技術規範(2012)第 23 條指出：「山坡地坡度係指一坵塊土地之平均傾斜比」。本研究坡度亦以此定義，其計算方式係以 DEM 資料利用 ArcGIS 軟體輔助計算集水區 5m 網格之平均傾斜比。ArcGIS 預設坡度計算係採用「坵塊法」，為水土保持技術規範內二種容許方法之一(另一為等高線法)。如圖 3-14 所示，研究區以 10°為級距分析各網格之坡度值，所得數值可為度數(˚)或是百分比型式(%)。

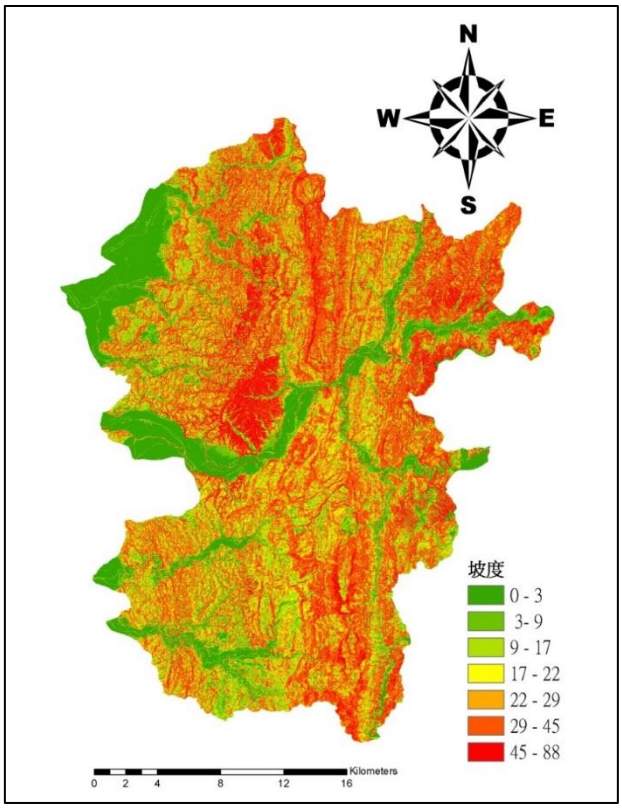


圖 3-14　研究區坡度圖

五、土地利用資料

為探討集水區流域內坡地潛在之自然崩塌，須刪除無崩塌潛勢區域或經人為擾動之非自然崩塌區域；前者如河流、河道、湖泊等，後者如建物、農地、利用地等。尤其是後者區域於崩塌地判釋時，在崩塌地、河谷、建地

的光譜值會相當接近，造成影像判釋上容易混淆與誤判。本研究採用內政部國土測繪中心所繪製 95 年土地利用調查圖資，濾除無崩塌潛勢或非自然崩塌區域。

六、順向坡資料

順向坡是與岩層面或其他規則而具延續性之不連續面大致同向之坡面，在地質上表示一個坡面的沈積堆疊方向，因其地層走向與坡面相同，地勢影響下較逆向坡容易發生崩塌，在防災工程中屬危險山坡，必須要嚴謹處理。在台灣過去的災例中，1997 年 8 月的林肯大郡災變、2009 年 8 月的小林村災變以及 2010 年 4 月的福爾摩沙高速公路崩塌災變，皆是順向坡地滑崩塌所造成。順向坡的崩塌大多半隨著地滑機制呈現，因此對於地震而言，順向坡地勢更容易產生崩塌，而順向坡地勢因地質條件的不同，有些非常容易崩塌，輕微的振動可能就會造成崩塌，因此也更難評估。本研究針對順向坡資料，蒐集中央地質調查所已公布的順向坡調查資料，作為本研究坡向敏感因子資料選取的參考依據，如圖 3-15 所示。

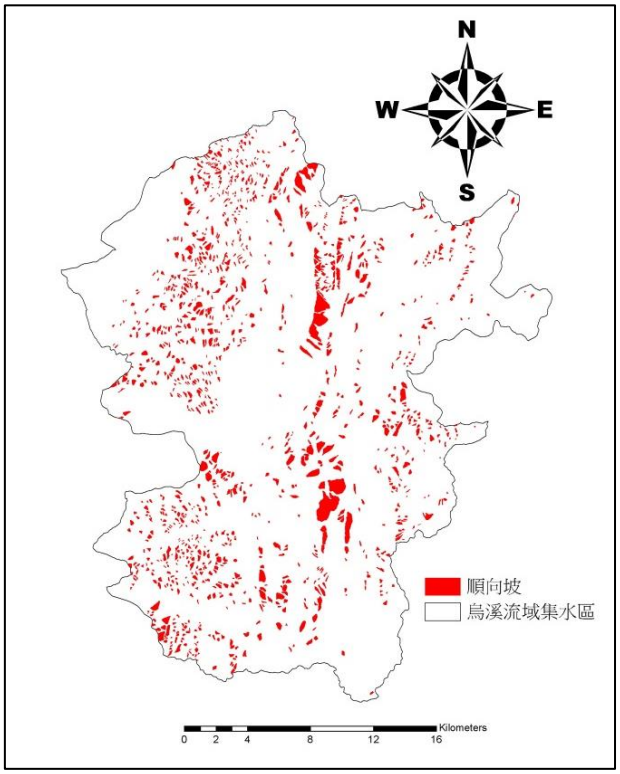


圖 3-15　研究區順向坡分布圖

第六節　致災資料分析

一、坡面單元繪製

目前對於廣域崩塌評估模式的基本單元可分為網格單元及坡面單元，此二種方法各有其優缺點。網格單元係將分析區域切分成較小網格再進行統計推估，其優點是符合統計的權重一致性，缺點是無法考慮地形邊界效應而導致統計上的偏估。網格單元對於整體坡地狀況(如一個邊坡)掌握度亦不佳，較難描述坡面的力學與物理機制。坡面單元則係先將分析區域之坡地劃分出來，考量單一坡地致災可能性之後剔除不適用區域再進行統計迴歸，如圖 3-16 所示。本研究使用的坡面單元劃分方法為集水區重疊法，集水區重疊法首先以原始數值高程模型進行集水區分析，再將數值高程模型高低值反轉，山稜線會反轉為河谷線；接著同樣進行集水區分析，將兩次分析所得到的集水區結合，利用地理資訊系統之分割功能，將原集水區分割為左右兩坡面單元，如圖 3-17 所示。圖中顯示編號 1 之集水區係藉由數值高程模型之集水區分析得到，編號 2 和編號 3 則係利用反轉 DEM 得到。

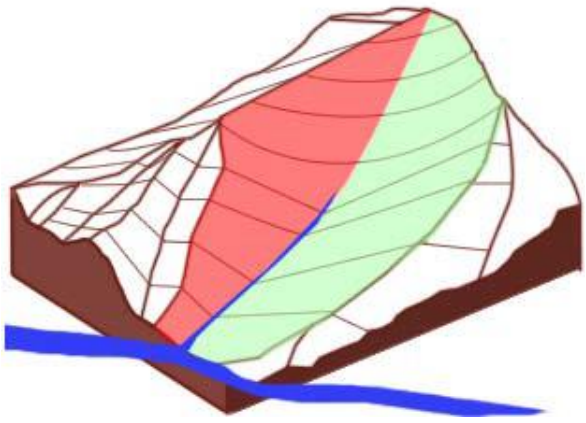


圖 3-16　坡面單元示意圖

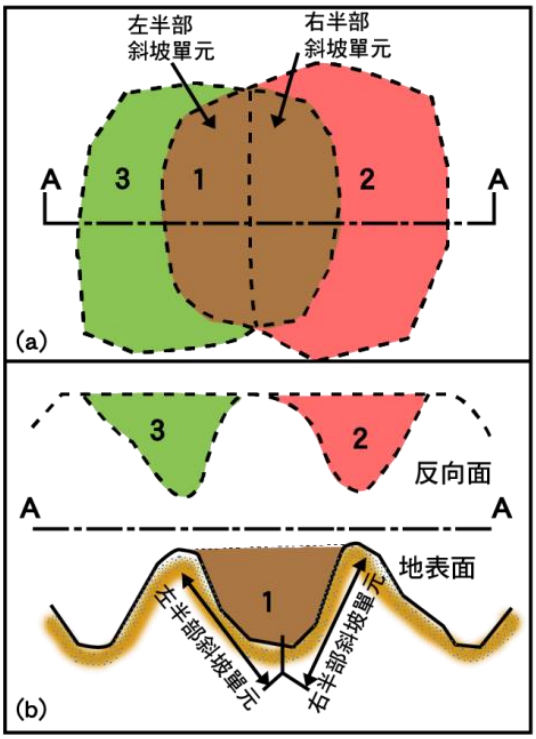


圖 3-17　集水區重疊法示意圖

本研究使用地理資訊系統軟體ArcGIS 10.0之水文及地形工具進行坡面單元分析。藉由DEM分析得到之集水區，多邊形的輪廓線就是山脊線；而山谷線則使用反轉之DEM資料，藉由DEM網格分析互換其高低值，原山谷線即能反轉為山脊線，同樣地亦可得到反轉之山谷線。坡面單元主要繪製流程如圖3-18所示，繪製原則如下：

(一)坡面單元須符合地形特徵，其邊界不可跨越地形邊界，例如稜線、河谷。

(二)為避免聚落管理單元面積過小，坡面單元控制在約3至10公頃為原則。

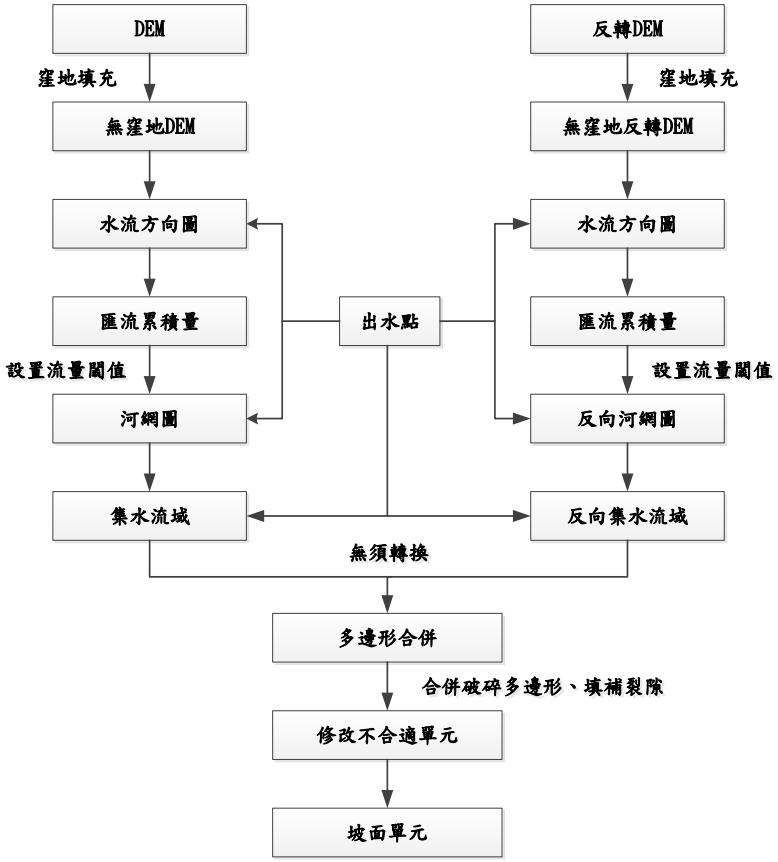


圖 3-18　坡面單元繪製流程

本研究以ArcGIS軟體進行坡面單元的自動繪製，可以降低人為主觀劃分坡面單元之變異性，但現實之地表起伏相當複雜，而數值高程模型的影像資料精細度有限，使得電腦自動繪製流程並無法完全根據地形做出劃分，會產生出細小破碎的網格。因此，以電腦自動繪製坡面單元後仍需進行人工編

修透過山影圖及坡向圖的輔助確認及編修，才能將坡面單元應用於崩塌分析。為了使所建立之地震引致崩塌之坡地易損性曲線更可靠，所繪製之坡面單元必須考量是否崩塌的可能性及納入分析合理性。因此，除不考慮沖積層、平坦地以及平坡之區域外。亦不考慮(1)河道區域；(2)非自然邊坡；(3)低坡度之坡面單元。此步驟係將坡面單元匯入 Google Earth，將不納入考慮之研究因子進行切除，包括河系、河道、農業用地、水利用地、聚落、建物等。

在實際繪製過程中，雖坡面單元希望控制在 10 公頃以內，但坡面單元分析時若有大於 10ha 之坡面單元，則會獨立處理使之小於 10ha。此外，部分坡面單元若藉由坡向與山影圖檢視，並無明顯的地形起伏，則無須再編修，因此會有部分坡面單元大於 10ha。對於小於 3ha 之坡面單元，編修時須再與 Google Earth 三維立體地圖比對，小於 3ha 之坡面單元則會與鄰近之坡面單元合併。藉由上述步驟，即可劃分及篩選出集水區之坡面單元，以烏溪流域劃分完成之坡面單元如圖 3-19 所示，總計有 6,333 個坡面單元。

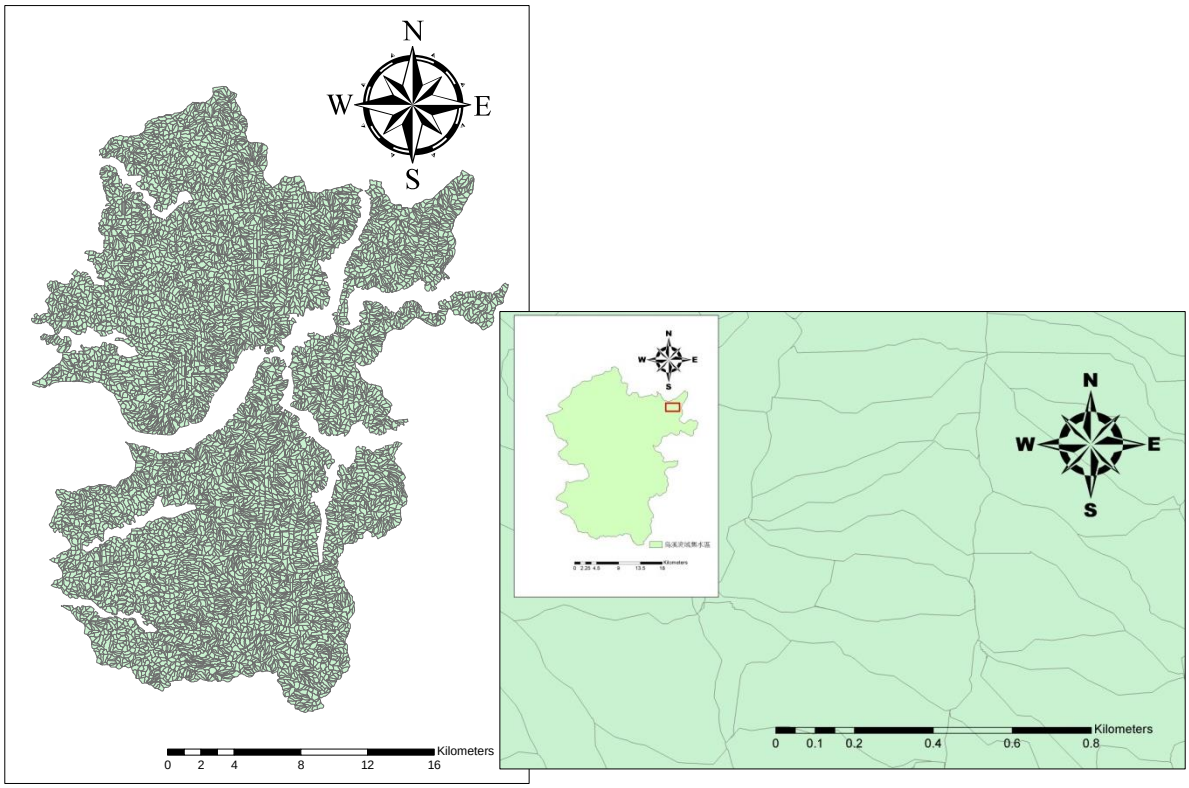


圖 3-19　烏溪集水區之坡面單元

二、坡面單元分類

1. 坡面之地質分類(G)

地質因子採用李錫堤教授之分類，依照網格法計算以佔較多面積的分類為依據分出兩種類別，site class B 為堅硬且脆性的岩石為地質分級一、site class C 為密集的土壤和軟岩為地質分級二。以烏溪集水區為例劃分完成之坡面單元地質分類統計如表 3-7 和圖 3-20 所示。

表 3-7　研究區地質分類統計

級序	地質	坡面數	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			個數	%	個數	%	
G1	Site B	1,039	125	12.03%	914	88%	12.03%
G2	Site C	5,294	896	16.92%	4,398	83%	16.92%
總和		6,333	1,021	100.00%	5,312	100.00%	16.12%

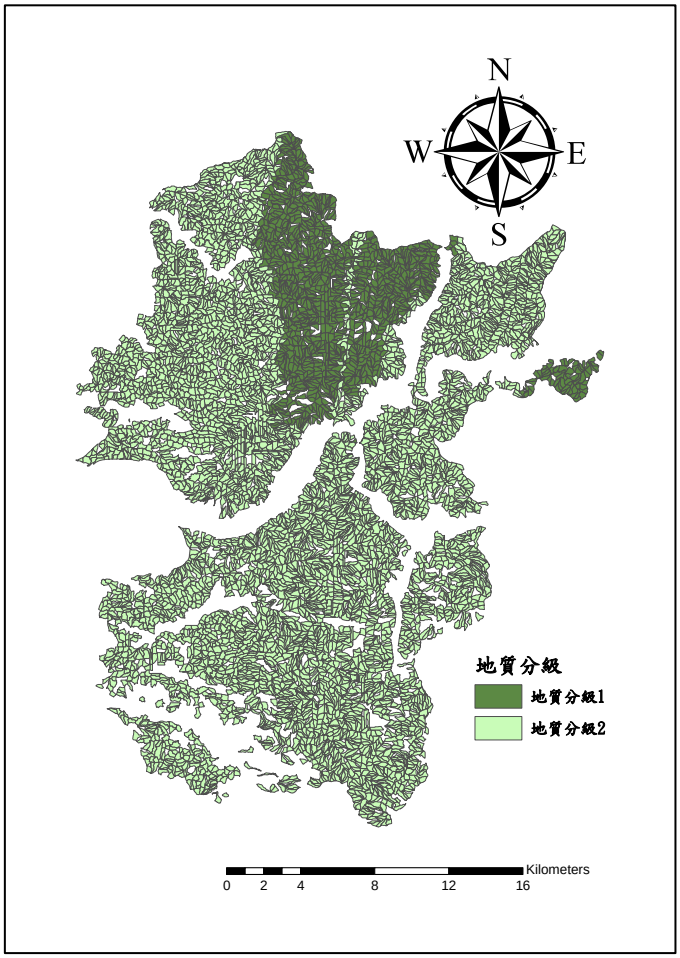


圖 3-20　研究區坡面單元地質分類

2. 坡面之坡向敏感因子(A)

由於坡面崩塌受地震波方向的影響極大，震波衝擊的方向是否與坡面呈正向或平行關係影響是否容易崩塌，因此本研究考慮坡面法線方向與地震波方向的關係，如圖 3-21，將坡向分為強面與弱面兩類。強面表示該坡面法線方向與震波方向垂直或接近垂直的不利崩塌的狀態，弱面表示該坡面法線方向與震波方向平行或接近平行利於崩塌狀態，此即坡向敏感因子。

為簡化分析過程，本研究假定地震發生為線斷層模式，即任一處之地震波係沿著斷層線任一點切線向外傳遞，因此地震發生後任一個坡面單元受衝擊的震波方向，即可定義為坡面形心距斷層線的最短距離所指的方向，稱之為震波方位角。其次，再以坡面單元最高點至最低點的反函數計算出坡面方位角，此坡面方位角和震波方位角所夾的角度越小則越有利於崩塌，也就是傾向於弱面的情況。如圖 3-22 所示，本研究以 30°為強面與弱面之分界評估某坡面單元之坡向敏感分類，也就是當所夾角度為-30°~30°以及 150°~210°時定義為弱面。此外，本研究考慮順向坡的影響，當坡面為順向坡時則取保守情況直接定義為弱面，以烏溪集水區為例劃分完成之坡面單元坡向分類如表 3-8 和圖 3-23 所示。

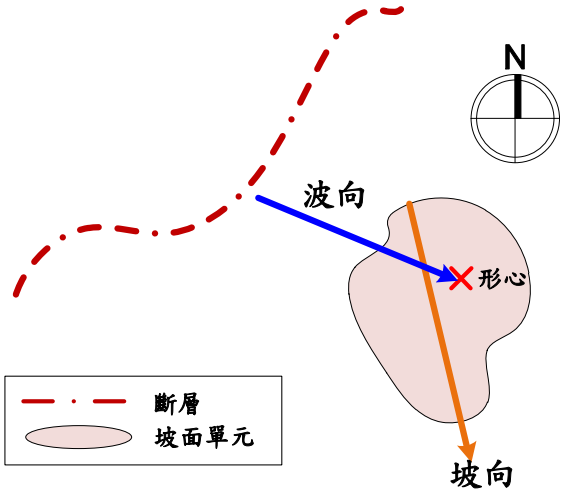


圖 3-21　坡面方位角和震波方位角的關係

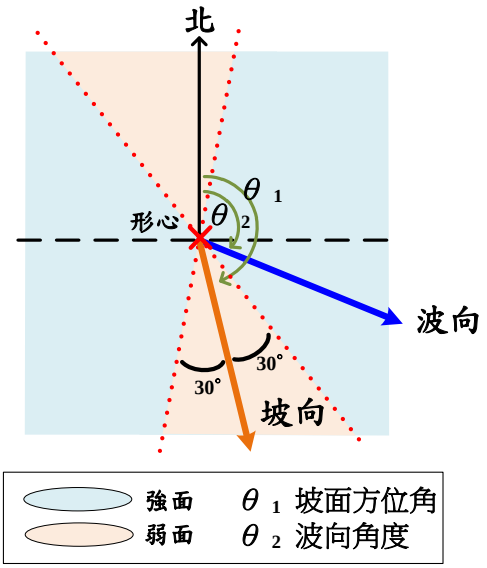


圖 3-22　坡向敏感因子定義

表 3-8　研究區坡向分類統計

級序	坡向	坡面數	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			個數	%	個數	%	
A1	強面	3,188	492	48.19%	2,696	50.75%	15.43%
A2	弱面	3,145	529	51.81%	2,616	49.25%	16.82%
總和		6,333	1,021	100.00%	5,312	100.00%	16.12%

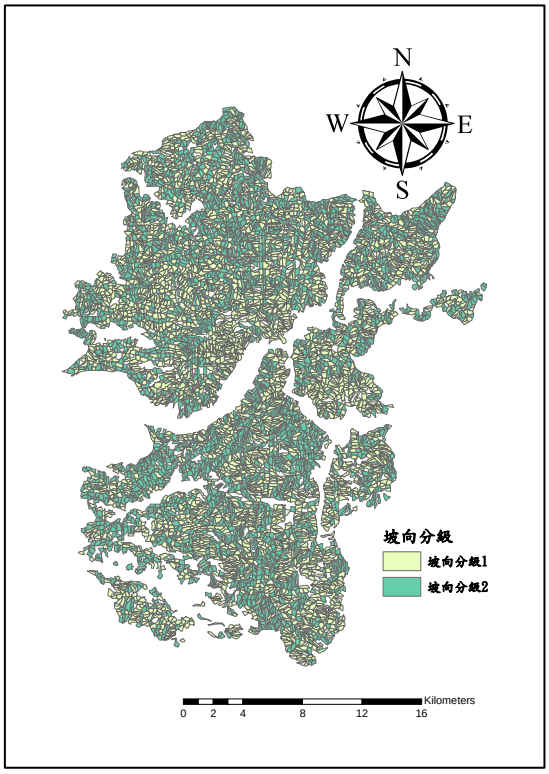


圖 3-23　研究區坡面單元坡向分類

3. 坡面之坡度分類(S)

坡面單元的坡度分級方面，本研究考量以水土保持技術規範(2013)坡度分級定義為依據，將坡度自五級坡之上下界分三個分級，定義為S1(緩坡)、S2(中坡)以及 S3(陡坡)，如表 3-9 所示。再採用坡面斜率法來計算坡面單元坡度，計算方式是將坡面單元最高點至最低點的高程差作為坡高，及最高點至最低點水平投影下的水平距離作為坡長，計算該坡面單元之斜率即求得坡度分級。以烏溪集水區為例劃分完成之坡面單元坡度分類如圖 3-24 所示。

表 3-9　研究區坡度分類統計

級序	坡度	坡面數	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			個數	%	個數	%	
S1	三、四級坡	3,605	570	55.83%	3,035	57.13%	15.81%
S2	五級坡	1,400	212	20.76%	1,188	22.36%	15.14%
S3	六、七級坡	1,328	239	23.41%	1,089	20.50%	18.00%
總和		6,333	1,021	100.00%	5,312	100.00%	16.12%

註：一、二級坡在網格資料庫中已刪除，但坡面單元計算仍可能有三級坡坡度值。

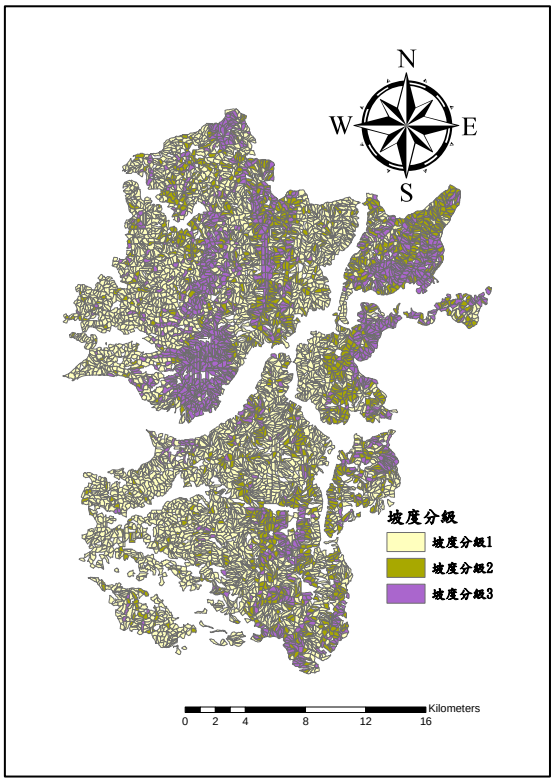
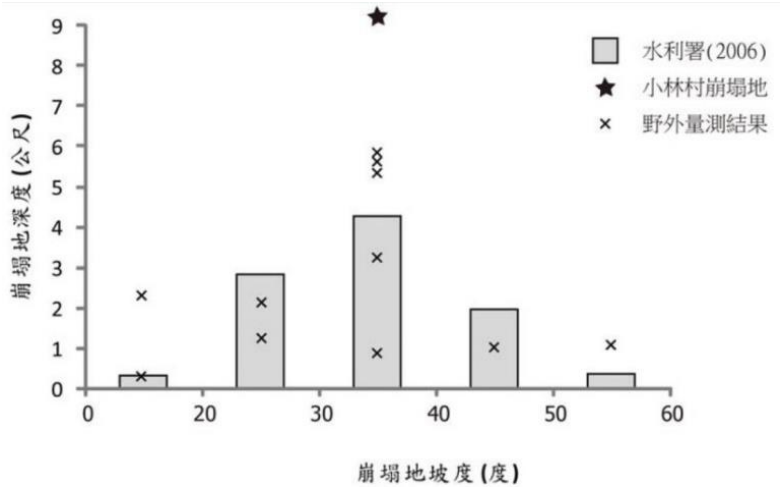


圖 3-24　研究區坡面單元坡度分類

三、坡面單元崩塌定義與程度

坡地易損性曲線係描述單一坡面單元在某震度下之崩塌機率，換句話說，就是不論坡面單元的實際大小，以崩塌機率的方式表達某坡面單元的崩塌可能性，因此首先必須探討此可能性所表示的物理意涵。以統計而言，崩塌機率所描述的是某個崩塌狀態發生的可能性，也就是必須針對坡面定義某種崩塌狀態是否發生，再根據這個定義進行機率分析，通常對崩塌現象而言最簡單直接的作法，即是以訂定崩塌門檻值作為某種崩塌狀態，因此採取合理的崩塌定義與程度即相當重要。

首要考慮的是，以衛星影像判釋崩塌地實際上並不能考慮地形與深度的影響，因此必要考慮崩塌量體和崩塌表面積的相關性，並將判釋所得的崩塌水平投影與實際崩塌量體之關係量化修正。這個修正概念在過去已有許多研究者針對崩塌斜面積、體積與深度的關係作過相關研究(例如 Evans and DeGraff, 2002; Imaizumi et al., 2008; Guzzettiet *et al*., 2009; 經濟部水利署，2006, 2010, 2011)。本研究以經濟部水利署(2006, 2010, 2011)針對石門水庫集水區與高屏溪集水區崩塌地深度與坡度相關研究為例，該研究藉由野外量測結果發現崩塌地深度與坡度呈現鐘型曲線，坡度在 30-40 度之間崩塌深度最大，且在相同的坡度間距內深度變異相當大，如圖 3-25 所示。



資料來源：氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究-以高屏溪為例，經濟部水利署，2010

圖 3-25　崩塌地坡度與深度分佈

此外，過去研究結果顯示，理論上崩塌深度與坡度具有一定相關性，因此崩塌地斜面積、崩塌體積與深度亦有關係，如圖 3-26，理論上若崩塌體積與斜面積關係式成立，就可以進一步利用崩塌體積推算不同坡度下之崩塌斜面積，再計算崩塌水平投影面積，這也就是影像判釋所得之近似崩塌面積。也就是說，同樣可經由推估的方法，由崩塌水平投影面積及坡度進一步推估可能的斜面積與體積。然而，由於地層條件的不穩定性，要藉由崩塌深度推估適於任意坡地的關係式是相當困難的，這也是崩塌現象具有高度不確定性的原因。因此，通常的作法是藉由過去的經驗以較定性的方式建立坡度與深度相關性(例如 Khazai and Sitar, 2000、國家災害防救科技中心)。

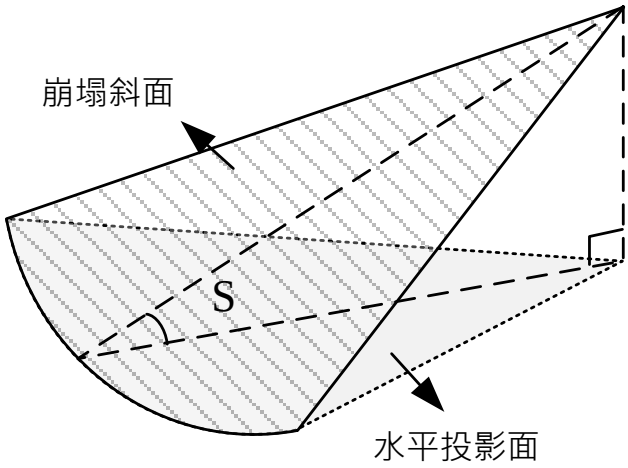


圖 3-26　崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖

根據上述，本研究針對坡面單元之崩塌定義，參考水利署曾於 2010 至 2011 年間執行之「氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究-以高屏溪為例」，該計畫針對高屏溪流域以野外量測之崩塌地斜面積與產砂量迴歸崩塌體積與斜面積關係式，由於是經驗公式，因此將深度因子消除，得到：

$$V = 0.2 \times A^{1.3} \tag{3-23}$$

式中 V 為崩塌體積(立方公尺)；A 為崩塌斜面積(平方公尺)；相關係數為 0.84。

本研究利用式(3-23)推估崩塌體積期望值下產生之崩塌斜面積，再由已

知坡度計算可能的崩塌水平投影面積。因此將坡面單元的崩塌狀態，參考該計畫所調查崩塌地中，屬中高程度崩塌的六處崩塌地之平均崩塌體積約 V=5,692 立方公尺來估算(例如小林村崩塌深度有疑慮即剔除)，將崩塌體積期望值概取整數為 V=6,000 立方公尺，藉由反推崩塌斜面積並估計不同坡度分類下的崩塌水平投影面積門檻。在 S1~S3 的坡度分類下，各類坡度取平均值計算可能的崩塌水平投影面積，並結合崩塌率(崩塌水平投影面積/坡面單元水平投影面積)和判識所得之崩塌水平投影面積以試誤法得到較佳門檻值組合：

1. S1 類坡度：坡面單元崩塌率達 5%，或崩塌水平投影面積達 0.28ha 者為崩塌(7 個網格以上)；其餘為未發生崩塌。
2. S2 類坡度：坡面單元崩塌率達 5%，或崩塌水平投影面積達 0.24ha 者判定坡面單元為崩塌(6 個網格以上)；其餘為未發生崩塌。
3. S3 類坡度：坡面單元崩塌率達 5%，或崩塌水平投影面積達 0.22ha 者判定坡面單元為崩塌(5 個網格以上)；其餘為未發生崩塌。

上述崩塌率 5%門檻值的設定，主要是考量當坡面單元過小時，僅考慮崩塌水平投影面積可能無法定義崩塌坡面的情形，例如當坡面單元 3ha 時，5%的崩塌率約僅 4 個網格。經反覆計算，本研究採用的坡面單元崩塌定義與狀態具有較佳的分析結果，也能夠合理地修正影像判釋為水平投影面積的不足。最後，以烏溪集水區為例所得到之各坡面單元崩塌評估結果如圖 3-27 所示。

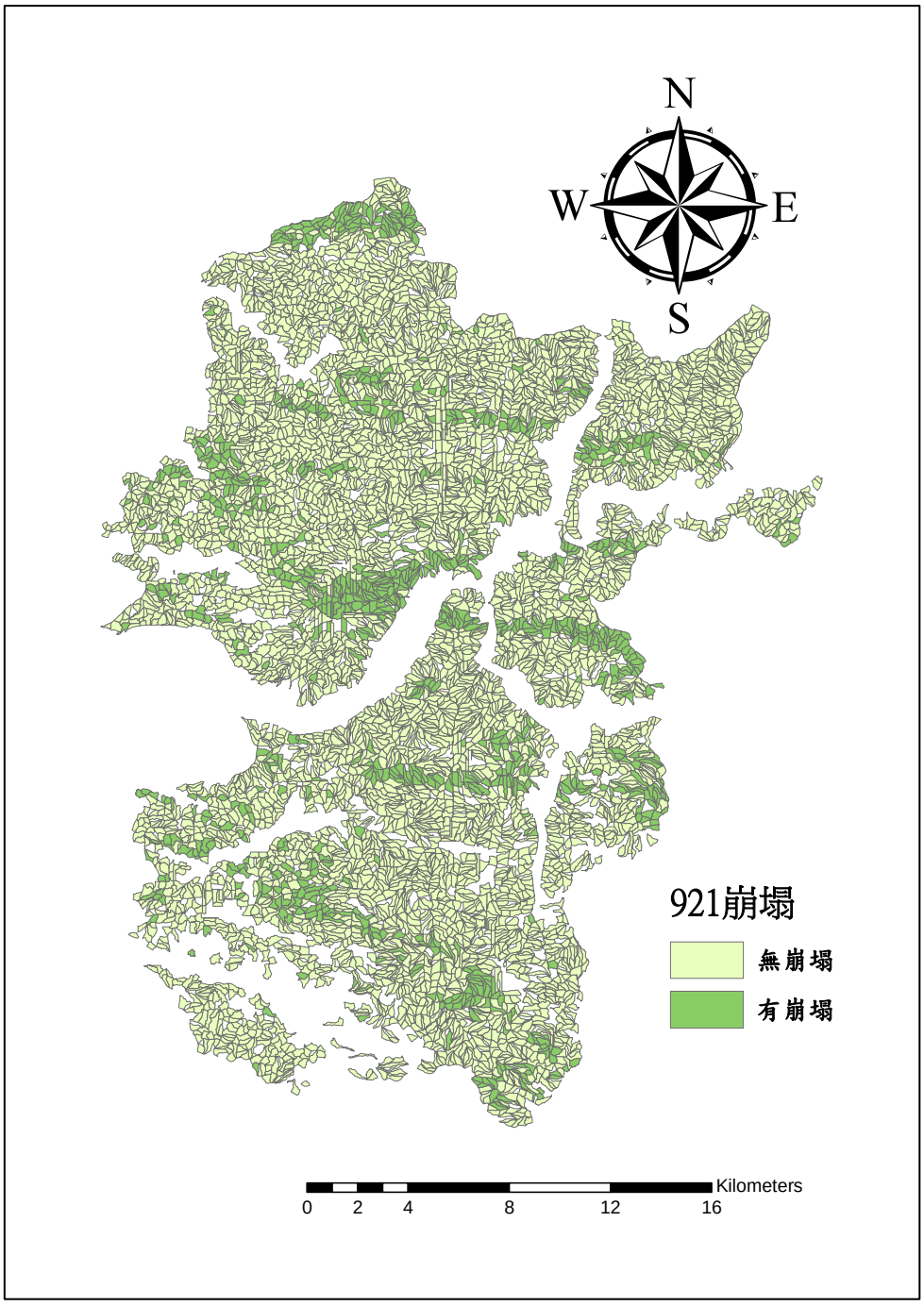


圖 3-27　研究區崩塌坡面分佈

第七節　坡地易損性分析

本研究利用 921 地震崩塌資料庫以坡地易損性分析方法（網格集群最大概似法）進行 12 類型坡地之易損性分析。根據前述因子定義之分類將坡面環境因子分類屬性賦予固定編碼以顯示其環境特徵，分別建立 G(地質)、A(坡向敏感)、S(坡度)之編號順序組合，其中包括地質二類、坡向敏感二類以及坡度三類，共計 12 種類型坡地組合，

本計畫依據新制地震震度階級表優化篩選，其中包括每個坡面在 921 地震中之 PGA 震度值(震級六弱分界 250gal 以下刪除)，以及該坡面是否發生崩塌(有崩為 1，未崩為 0)，各類坡地之崩塌致災資料數量如表 3-10 所示。經由易損性分析各類坡地即可根據崩塌致災資料求解其中位數及標準差等易損性參數，分析所得之坡地易損性參數結果如表 3-10 所示。各類坡地易損性曲線和致災資料點共繪如圖 3-28 至圖 3-39 所示。根據曲線所對應的 PGA 關係，即可估計該類坡地在某 PGA 震度下的崩塌機率，表達地震下之崩塌可能性。

表 3-10　12 類坡地易損性參數表

分類編號	數量	中位數	標準差	適用範圍(cm/s^2)	
G1A1S1	261	0.952	0.681	250.00	474.48
G1A1S2	131	0.771	0.581	250.00	476.34
G1A1S3	116	0.683	0.498	250.00	480.94
G1A2S1	262	1.035	0.734	250.00	473.17
G1A2S2	67	0.878	0.662	250.00	462.68
G1A2S3	63	0.789	0.598	250.00	484.24
G2A1S1	1498	0.496	0.128	250.00	592.74
G2A1S2	553	0.482	0.118	250.00	573.98
G2A1S3	552	0.486	0.112	250.00	558.90
G2A2S1	1354	0.525	0.164	250.00	601.62
G2A2S2	474	0.521	0.152	250.00	595.41
G2A2S3	543	0.518	0.139	250.00	585.77

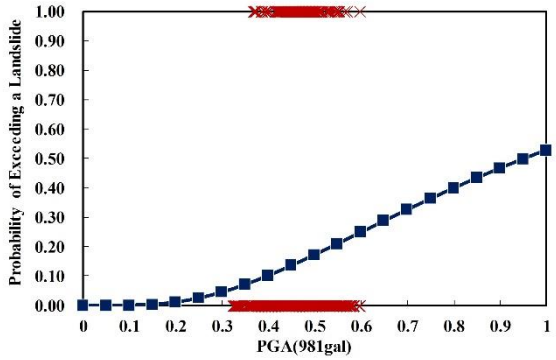


圖 3-28　G1A1S1 易損性曲線

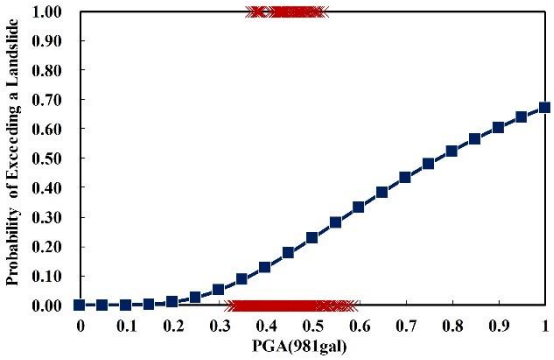


圖 3-29　G1A1S2 易損性曲線

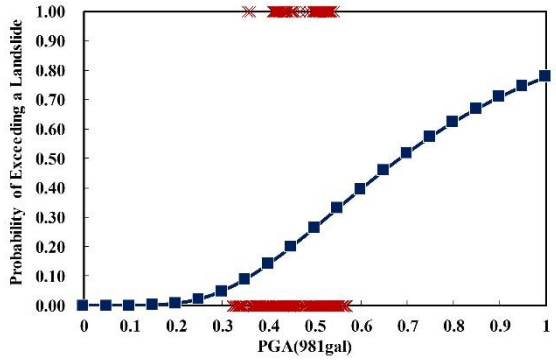


圖 3-30　G1A1S3 易損性曲線

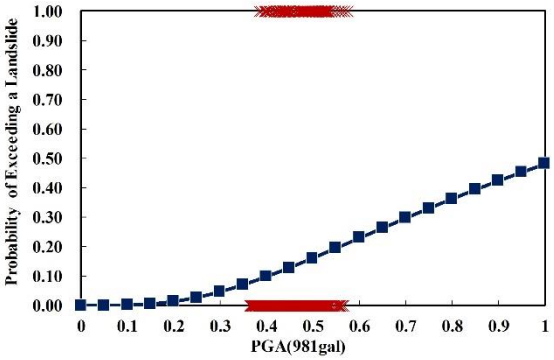


圖 3-31　G1A2S1 易損性曲線

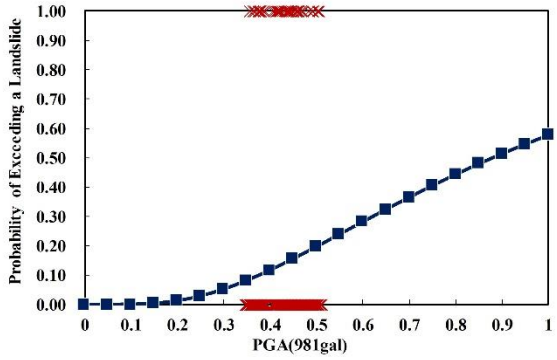


圖 3-32　G1A2S2 易損性曲線

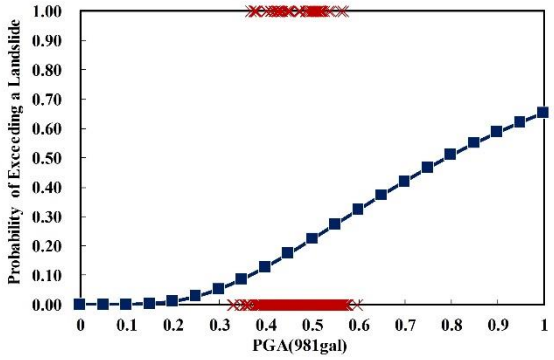


圖 3-33　G1A2S3 易損性曲線

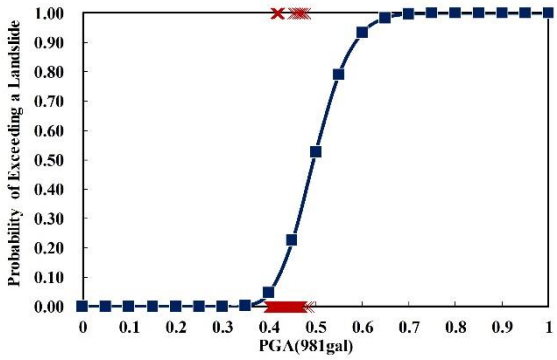


圖 3-34　G2A1S1 易損性曲線

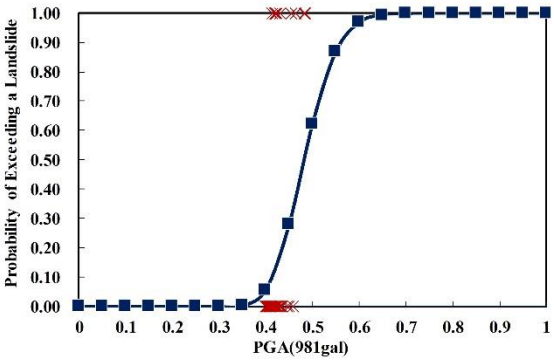


圖 3-35　G2A1S2 易損性曲線

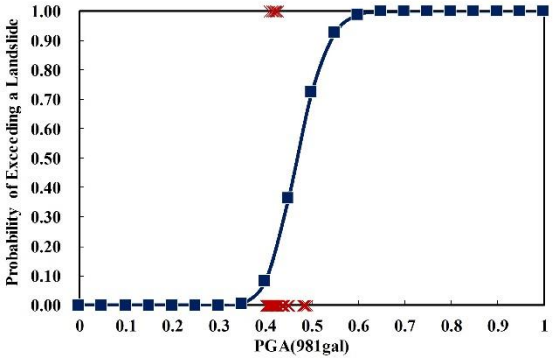


圖 3-36　G2A1S3 易損性曲線

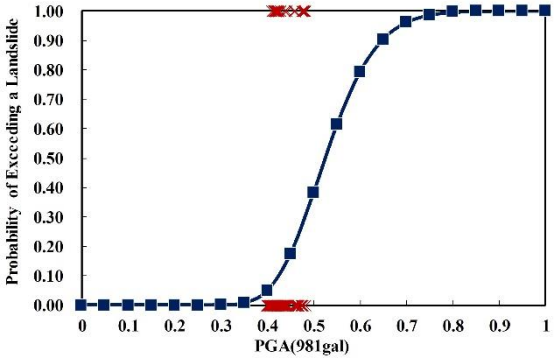


圖 3-37　G2A2S1 易損性曲線

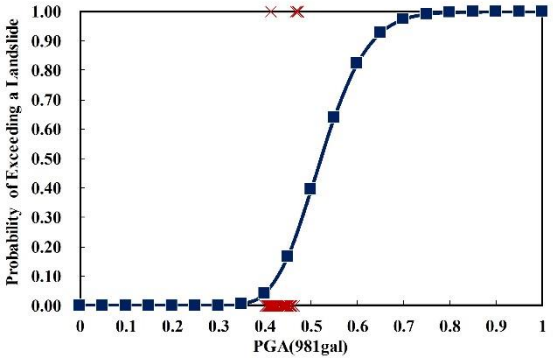


圖 3-38　G2A2S2 易損性曲線

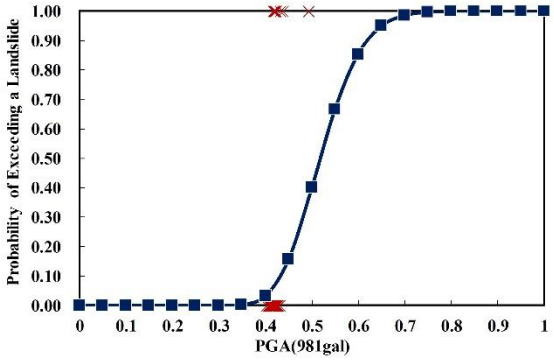


圖 3-39　G2A2S3 易損性曲線

第四章　坡地崩塌評估基礎資料庫建立

本研究之崩塌危害評估模式係以坡面單元為評估單元，因此對於坡面單元劃定的一致性及坡面分類的合理性必須確保，才能在未來利用於崩塌評估時得到可靠的應用成果。為了能夠有效地進行坡地崩塌評估工作，本模式首先需要建立：(1)全台之坡面單元，以及(2)完整的地文因子資料庫，以坡面單元為基礎的資料庫架構須考慮如地文因子、致災因子等，而由於各式基礎資料乃至於震度資料通常都是網格式資料(庫)，因此還需將網格資料庫與坡面單元資料庫予以介接，固定編碼及地理位置，以利於未來在系統端的運算和降低運算資源。

在全台坡面單元建置方面，由於坡面單元繪製所需之時間和人力需求極大，本計畫自行建置全台之坡面單元資料庫不易。此外，由於坡面單元產製具有一定的主觀性(臨界值設定)，因此目前對於坡面單元產製仍未有一致公認標準和流程，但大多仍基於本研究第三章所闡述的原理。因此，本研究考量計畫目標的成效及時程因素，採用中央地質調查所已繪製完成的全台坡面單元成果作為資料庫建置基礎，並以此為基礎進行坡面單元之地文分類屬性定義。各式地文因子所需基礎資料如下概述：

1. 地質因子：地質分類(100m × 100m)；
2. 高程因子：數值高程模型 DEM(20m × 20m)；
3. 坡度因子：數值高程模型 DEM(20m × 20m)；
4. 坡向因子：數值高程模型 DEM(20m × 20m)；
5. 斷層因子：全台斷層圖資；
6. 順向坡因子：全台順向坡圖資。

上述因子 1~4 的基礎資料皆是以網格型資料建立，可基於這些資料和第三章之計算方法，計算坡面單元之地質分類(G)、坡向敏感因子(A)、坡度分類(S)。

第一節　全台坡面單元資料庫建立

本計畫取得之中央地質調查所所繪製之全台坡面單元圖資係建置更新於民國 108 年，該圖資係根據 20m-DEM 所劃定，並以全台縣市為區塊獨立劃分坡面單元後再行整併，如表 4-1 所示。本計畫根據各縣市之坡面單元資料，重新整併為以集水區為單元的坡面單元資料庫，如所圖 4-1 示，可知坡面單元涵蓋全台 47 個主集水區中的 43 個集水區，其中未劃定坡面單元的集水區有 4 個，分別是崙背沿海河系、新虎尾沿海河系、新港沿海河系以及布袋沿海河系，主要是因位屬平原地帶，因此無必要繪製坡面單元。

如所表 4-2 示，經集水區逐一校對查驗，全台集水區共計 143822 個坡面單元，佔全台面積 68.21%；數量最多的前三個分別是濁水溪流域(15775 個，佔集水區面積 85.26%)、淡水河流域(14907 個，佔集水區面積 83.08%)、高屏溪流域(14766 個，佔集水區面積 75.52%)；數量最少的前三個分別是佳里沿海河系(8 個，佔集水區面積 0.18%)、新虎尾溪流域(32 個，佔集水區面積 2.35%)、林子坑溪(51 個，佔集水區面積 45.90%)。如所圖 4-1 示，可知全台坡面單元分布在台灣山坡地，可作為本研究震後坡地崩塌評估之基礎資料庫。

表 4-1　中央地質調查所產製之全台坡面單元資料庫

編號	縣市	編號	縣市
01	108 年度北北基坡面單元	10	108 年度雲林縣市坡面單元
02	108 年度宜蘭縣市坡面單元	11	108 年度新北市坡面單元
03	108 年度花蓮縣市坡面單元	12	108 年度新竹縣市坡面單元
04	108 年度南投縣市坡面單元	13	108 年度嘉義縣市坡面單元
05	108 年度屏東縣市坡面單元	14	108 年度彰化縣市坡面單元
06	108 年度苗栗縣市坡面單元	15	108 年度臺中市坡面單元
07	108 年度桃園市坡面單元	16	108 年度臺北市坡面單元
08	108 年度高雄市坡面單元	17	108 年度臺東縣市坡面單元
09	108 年度基隆市坡面單元	18	108 年度臺南市坡面單元

資料來源：中央地質調查所

表 4-2　全國各集水區坡面單元劃定基礎資料

編號	集水區	集水區面積 (km^2)	坡面單元總面積 (km^2)	坡面單元面積占比(%)	坡面單元數量
1	蘭陽河流域	1201.74	864.48	71.94%	4746
2	磺溪流域	49.49	42.04	84.94%	162
3	林子坑溪	25.86	11.87	45.90%	51
4	淡水河流域	2733.93	2271.28	83.08%	14907
5	鳳山溪流域	251.20	174.43	69.44%	1357
6	頭前溪流域	567.45	451.65	79.59%	2250
7	中港溪流域	450.26	357.12	79.31%	2661
8	後龍溪流域	558.13	438.48	78.56%	3111
9	大安溪流域	769.16	669.55	87.05%	3459
10	大甲溪流域	1309.22	1074.26	82.05%	6457
11	烏溪流域	2054.82	1378.48	67.09%	9000
12	濁水溪流域	3167.49	2700.71	85.26%	15775
13	北港溪流域	616.97	119.52	19.37%	1146
14	朴子溪流域	418.95	96.80	23.10%	1171
15	八掌溪流域	463.41	187.72	40.51%	1936
16	急水溪流域	410.70	127.10	30.95%	1846
17	曾文溪流域	1253.67	917.42	73.18%	8474
18	鹽水溪流域	404.45	64.07	15.84%	1103
19	二仁溪流域	337.84	144.42	42.75%	2318
20	阿公店溪流域	155.40	24.46	15.74%	409
21	高屏溪流域	3320.39	2507.70	75.52%	14766
22	東港溪流域	478.84	83.75	17.49%	472
23	四重溪流域	126.70	112.41	88.72%	720
24	卑南溪流域	1605.15	1431.10	89.16%	5718
25	秀姑巒溪流域	1795.97	1571.71	87.51%	5892
26	花蓮溪流域	1643.31	1295.65	78.84%	5101
27	和平溪流域	956.91	919.92	96.14%	3538
28	北海岸沿海河系	439.20	357.60	81.42%	2414

表 4-2　全國各集水區坡面單元劃定基礎資料

編號	集水區	集水區面積 (km^2)	坡面單元總面積 (km^2)	坡面單元面積占比(%)	坡面單元數量
29	桃園沿海河系	885.46	118.08	13.34%	929
30	香山沿海河系	140.72	72.88	51.79%	884
31	竹南沿海河系	316.23	173.39	54.83%	1609
32	清水沿海河系	158.93	16.36	10.29%	117
33	彰化沿海河系	904.36	57.98	6.41%	655
34	崙背沿海河系	112.57	0.00	0.00%	0
35	新虎尾溪流域	154.79	3.64	2.35%	32
36	新虎尾沿海河系	449.01	0.00	0.00%	0
37	新港沿海河系	126.49	0.00	0.00%	0
38	布袋沿海河系	121.57	0.00	0.00%	0
39	佳里沿海河系	372.69	0.67	0.18%	8
40	高雄沿海河系	400.22	47.95	11.98%	747
41	林邊溪流域	314.69	265.62	84.41%	1041
42	南屏東沿海河	896.68	684.38	76.32%	4009
43	台東沿海河系	1306.71	1144.87	87.62%	4859
44	海岸山脈東側河系	535.76	454.69	84.87%	2711
45	豐濱沿海河系	207.20	194.05	93.65%	1028
46	太魯閣沿海河系	856.45	822.03	95.98%	3499
47	頭城沿海河系	175.16	105.74	60.36%	734
合計		36002.30	24558.03	68.21%	143822

資料來源：本研究整理

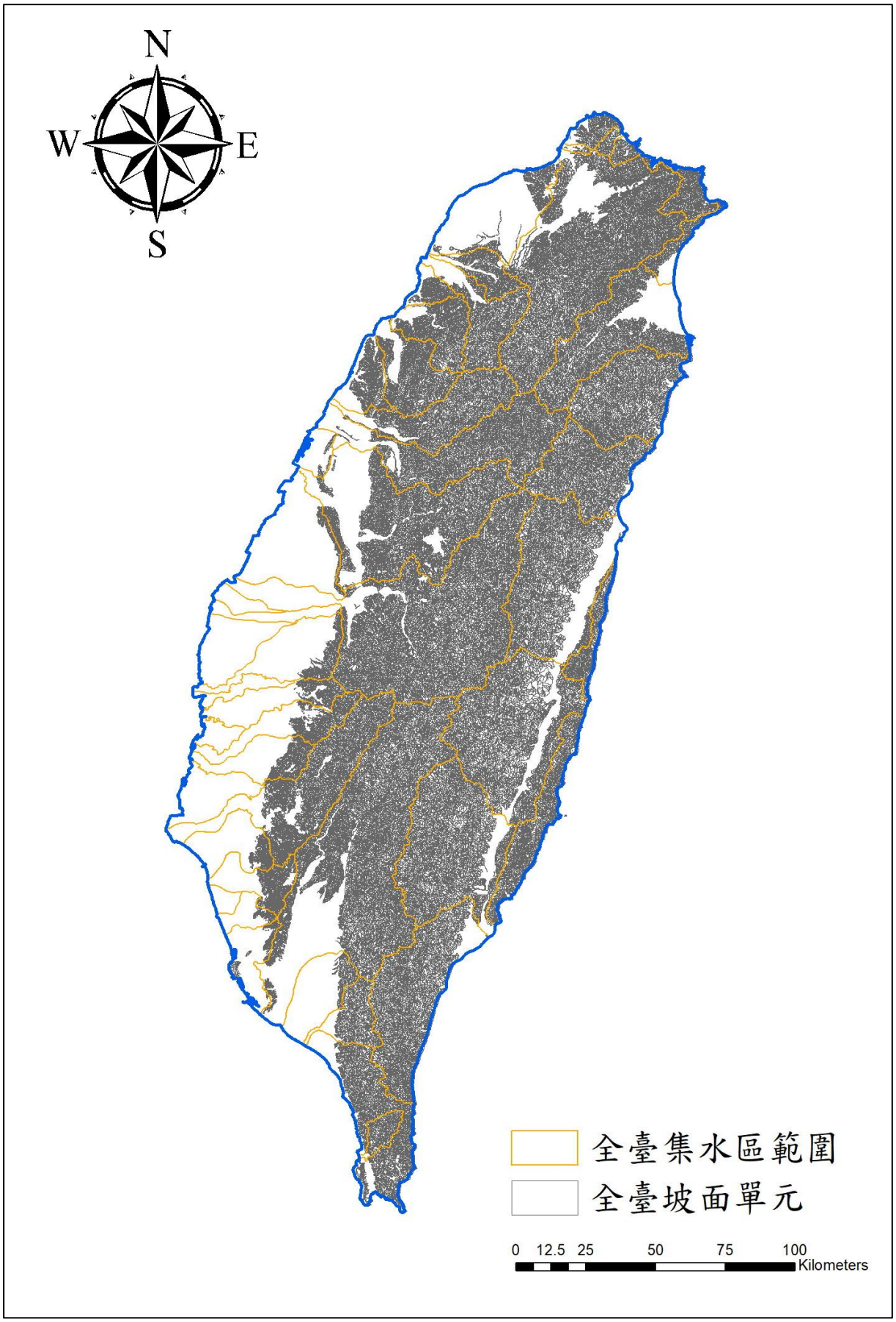


圖 4-1　地調所繪製之全臺各集水區坡面單元分布圖

第二節　坡面單元資料庫編碼

坡面單元資料庫的一個重要目的，即是便於未來能夠進行系統化的資料庫運算；同時，也必須是一個具有穩定的資料庫結構型態的數值資料。為了能夠達到這個目的，本研究將全台坡面單元重新進行資料庫分類整理，並賦予固定編碼和因子定義，以便於後續應用流通。此外，未來在 FEMA 系統的整合中，借助固定編碼資料，將可利於資料庫的運算及製圖。

如表 4-3 所示，坡面單元編碼為 16 位 string 格式，其中包含主集水區、次集水區、子集水區、子集水區隨機碼、坡面單元等資訊，其中主次子集水區依全國統一規定編碼，子集水區隨機碼由電腦亂數產生，主要是為了預留給未來可能的坡面單元變動增減，坡面單元編碼由本研究自行依序編定。坡面單元完整編碼以【主集水區】+【次集水區】+【子集水區】+【子集水區隨機碼】+【坡面單元】的方式組合成 16 位之 string 格式。坡面單元編碼是坡面具集水區資訊的且是唯一的身分標識，未來將可依此編碼進行相關資料庫關聯運算，並可便於相關單位的資料流通使用。

此外，目前水保局針對全國主、次及子集水區之更名及編碼工作正在進行，部分資訊尚未更新完畢，待未來新版集水區圖資更新後，亦可藉由新訂主、次及子集水區完整中文名同步更新全台坡面單元編碼。

表 4-3　坡面單元編碼

欄位名稱	定義
【BASIN】	主集水區完整中文名
【BASINNAME】	次集水區完整中文名
【SUBBASINNA】	子集水區完整中文名
【BASINCODE】	主集水區 2 碼+次集水區 2 碼
【SUBBASINCO】	主次集水區 4 碼+子集水區 3 碼，共 7 碼
【SUBALL ID】	子集水區隨機碼 4 碼
【SLOPE ID】	坡面單元 5 碼
【SLOPECODE】	坡面單元完整編碼，共 16 碼

資料來源：本研究整理

第三節　坡面單元屬性分析方法

坡面單元屬性係結合各因子資料及斷層特性描述坡面單元之易損特徵，各斷層由於對坡面單元的坡向敏感度不同，因此須要建立對應的評估基礎資料庫。根據本計畫工作內容，選定三條示範斷層建置坡地崩塌評估基礎資料庫，根據 TEM 地震危害度分析結果，分別選定中部車籠埔斷層、南部九芎坑斷層以及東部花東縱谷斷層。以下分別說明坡面單元屬性中各因子之分析結果。

一、地質因子

地質因子分析方法如第三章第五節所述，全台坡面單元地質因子係以李錫堤等人(Lee *et al.*, 2001)之地質分類，由硬至軟依序分為 B、C、D、E 四類。各集水區坡面單元地質因子以比例法決定(多數法則)，少數坡面單元地質無法以比例法決定時則採用參考地質，即是以相鄰坡面單元地質來決定。各集水區坡面單元地質因子統計如表 4-4 所示，其中 B、C 類地質為較主要之地質，D 類地質則較少，E 類地質則無。

進一步地，坡面單元地質分類即依據第三章第六節之分類方法予以決定，各集水區坡面單元地質分類如表 4-5 所示，各類坡面之地質被分類為 G1、G2 二類，其中 G1 類 99548 個坡面，G2 類 42141 個坡面。由於目前坡地易損性曲線並無 D 類地質，因此坡面單元地質因子屬 D 類地質則被歸屬於不適用地質(N/A)，共計有 2133 個坡面。在後續分析中將不作評估。由表 4-5 中可知，大部分坡面單元仍屬有效地質，僅少數坡面單元不適用，對整體坡面評估影響不大。

表 4-4　全國各集水區坡面單元地質因子之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	B	C	D	E
1	蘭陽河流域	4746	4005	582	159	0
2	磺溪流域	162	77	84	1	0
3	林子坑溪	51	19	32	0	0
4	淡水河流域	14907	13500	1307	100	0
5	鳳山溪流域	1357	493	826	38	0
6	頭前溪流域	2250	1732	493	25	0
7	中港溪流域	2661	1073	1544	44	0
8	後龍溪流域	3111	1907	1135	69	0
9	大安溪流域	3459	2809	627	23	0
10	大甲溪流域	6457	5306	1130	21	0
11	烏溪流域	9000	3489	5305	206	0
12	濁水溪流域	15775	13560	2109	106	0
13	北港溪流域	1146	128	1012	6	0
14	朴子溪流域	1171	295	851	25	0
15	八掌溪流域	1936	842	1014	80	0
16	急水溪流域	1846	332	1492	22	0
17	曾文溪流域	8474	3511	4890	73	0
18	鹽水溪流域	1103	0	1095	8	0
19	二仁溪流域	2318	137	2176	5	0
20	阿公店溪流域	409	44	362	3	0
21	高屏溪流域	14766	12823	1686	257	0
22	東港溪流域	472	435	22	15	0
23	四重溪流域	720	586	127	7	0
24	卑南溪流域	5718	4994	620	104	0

表 4-4　全國各集水區坡面單元地質因子之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	B	C	D	E
25	秀姑巒溪流域	5892	4768	995	129	0
26	花蓮溪流域	5101	4562	470	69	0
27	和平溪流域	3538	3340	187	11	0
28	北海岸沿海河系	2414	1520	879	15	0
29	桃園沿海河系	929	7	845	77	0
30	香山沿海河系	884	0	878	6	0
31	竹南沿海河系	1609	115	1414	80	0
32	清水沿海河系	117	0	117	0	0
33	彰化沿海河系	655	0	652	3	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	32	0	32	0	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	8	0	8	0	0
40	高雄沿海河系	747	8	730	9	0
41	林邊溪流域	1041	1012	29	0	0
42	南屏東沿海河	4009	3047	892	70	0
43	台東沿海河系	4859	4430	390	39	0
44	海岸山脈東側河系	2711	613	1923	175	0
45	豐濱沿海河系	1028	88	940	0	0
46	太魯閣沿海河系	3499	3403	78	18	0
47	頭城沿海河系	734	538	161	35	0
合計		143822	99548	42141	2133	0

資料來源：本研究整理

表 4-5　全國各集水區坡面單元地質分類之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	G1	G2	N/A
1	蘭陽河流域	4746	4005	582	159
2	磺溪流域	162	77	84	1
3	林子坑溪	51	19	32	0
4	淡水河流域	14907	13500	1307	100
5	鳳山溪流域	1357	493	826	38
6	頭前溪流域	2250	1732	493	25
7	中港溪流域	2661	1073	1544	44
8	後龍溪流域	3111	1907	1135	69
9	大安溪流域	3459	2809	627	23
10	大甲溪流域	6457	5306	1130	21
11	烏溪流域	9000	3489	5305	206
12	濁水溪流域	15775	13560	2109	106
13	北港溪流域	1146	128	1012	6
14	朴子溪流域	1171	295	851	25
15	八掌溪流域	1936	842	1014	80
16	急水溪流域	1846	332	1492	22
17	曾文溪流域	8474	3511	4890	73
18	鹽水溪流域	1103	0	1095	8
19	二仁溪流域	2318	137	2176	5
20	阿公店溪流域	409	44	362	3
21	高屏溪流域	14766	12823	1686	257
22	東港溪流域	472	435	22	15
23	四重溪流域	720	586	127	7
24	卑南溪流域	5718	4994	620	104

表 4-5　全國各集水區坡面單元地質分類之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	G1	G2	N/A
25	秀姑巒溪流域	5892	4768	995	129
26	花蓮溪流域	5101	4562	470	69
27	和平溪流域	3538	3340	187	11
28	北海岸沿海河系	2414	1520	879	15
29	桃園沿海河系	929	7	845	77
30	香山沿海河系	884	0	878	6
31	竹南沿海河系	1609	115	1414	80
32	清水沿海河系	117	0	117	0
33	彰化沿海河系	655	0	652	3
34	崙背沿海河系	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	32	0	32	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	8	0	8	0
40	高雄沿海河系	747	8	730	9
41	林邊溪流域	1041	1012	29	0
42	南屏東沿海河	4009	3047	892	70
43	台東沿海河系	4859	4430	390	39
44	海岸山脈東側河系	2711	613	1923	175
45	豐濱沿海河系	1028	88	940	0
46	太魯閣沿海河系	3499	3403	78	18
47	頭城沿海河系	734	538	161	35
合計		143822	99548	42141	2133

資料來源：本研究整理

二、坡向敏感度

在坡向敏感度分析方面，由於本因子與斷層方位相關，根據坡面單元對各條斷層帶的方位不同將具有不同的坡向敏感度，以下以車籠埔斷層為例進行示範說明。

坡向敏感度分析方法如第三章第六節所述，其中包括幾個重要因子，包括坡向因子、斷層方位角、順向坡因子等綜合考量。首先，各集水區坡面單元坡向因子利用 DEM 資料套取坡面單元最高最低點座標後予以計算坡面方向，各集水區坡面單元坡向如表 4-6 所示；斷層方位角則選取車籠埔斷層計算各坡面單元到斷層的最短距離相應位置，並計算車籠埔斷層方位角，各集水區坡面單元斷層方位角如表 4-7 所示；坡面方位角(坡向)與斷層方位角之夾角即為車籠埔斷層夾角，表達坡面方位角和震波方位角之關係，各集水區坡面單元車籠埔斷層夾角計算如表 4-8 所示。

坡向敏感度還須考量順向坡因子，本計畫以坡面單元套疊分析全國順向坡圖資，如圖 4-2 所示。坡面單元屬順向坡則被歸類為 A1 類弱面，套疊結果如表 4-9 所示，共計 28864 個面，佔總體坡面約 20.04%。坡面單元坡向敏感度依據第三章第六節之分類方法予以決定，各集水區坡面單元坡向敏感度如表 4-10 所示，各類坡面之坡向敏感度被分類為 A1、A2 二類，其中 A1 類 48045 個坡面，A2 類 95777 個坡面。由於存在平坡坡面，因此坡面單元坡向敏感度存在不適用坡面(N/A)，在後續分析中將不作評估。由表 4-10 中可知，大部分坡面單元仍屬有效地質，僅烏溪流域 4 個、濁水溪流域 2 個和曾文溪流域 1 個等 7 個坡面單元不適用，對整體評估影響不大。

本計畫中九芎坑斷層以及花東縱谷斷層分析過程相同不再贅述，九芎坑斷層之坡面單元斷層方位角如表 4-11 所示，斷層夾角如表 4-12 所示，坡向敏感度如表 4-13 所示，；花東縱谷斷層之坡面單元斷層方位角如表 4-14 所示，斷層夾角如表 4-15 所示，坡向敏感度如表 4-16 所示。

表 4-6　全國各集水區坡面單元坡向因子之數量統計

編號	集水區	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北	平坡
1	蘭陽河流域	611	352	306	654	738	807	493	785	0
2	磺溪流域	11	4	1	10	31	44	29	32	0
3	林子坑溪	2	3	12	22	9	1	0	2	0
4	淡水河流域	1894	1765	1238	2489	2649	1887	1146	1839	0
5	鳳山溪流域	213	249	153	229	226	100	61	126	0
6	頭前溪流域	222	315	277	458	406	332	123	117	0
7	中港溪流域	253	326	319	676	486	296	121	184	0
8	後龍溪流域	242	433	440	743	464	343	241	205	0
9	大安溪流域	442	564	489	725	527	304	149	259	0
10	大甲溪流域	858	968	795	964	741	721	563	847	0
11	烏溪流域	1237	1466	1099	1411	948	1137	654	1044	4
12	濁水溪流域	1370	2061	1914	2718	2211	2304	1548	1647	2
13	北港溪流域	71	190	240	384	147	62	23	29	0
14	朴子溪流域	121	326	205	217	105	70	36	91	0
15	八掌溪流域	187	374	324	447	270	159	83	92	0
16	急水溪流域	148	320	380	437	223	150	99	89	0
17	曾文溪流域	1078	1490	1297	1532	862	658	589	967	1
18	鹽水溪流域	107	226	221	212	109	84	55	89	0
19	二仁溪流域	324	492	347	355	257	131	145	267	0
20	阿公店溪流域	41	89	55	81	52	39	21	31	0
21	高屏溪流域	2260	2450	1871	2186	1596	1213	1065	2125	0
22	東港溪流域	75	99	69	88	89	16	9	27	0
23	四重溪流域	129	99	72	102	67	33	81	137	0
24	卑南溪流域	814	742	448	634	632	706	614	1128	0
25	秀姑巒溪流域	751	777	562	774	775	771	606	876	0

表 4-6　全國各集水區坡面單元坡向因子之數量統計

編號	集水區	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北	平坡
26	花蓮溪流域	655	656	407	666	644	712	527	834	0
27	和平溪流域	577	408	216	351	562	582	303	539	0
28	北海岸沿海河系	207	129	156	468	533	393	224	304	0
29	桃園沿海河系	100	143	134	240	151	74	33	54	0
30	香山沿海河系	112	124	92	171	177	121	37	50	0
31	竹南沿海河系	110	248	247	465	261	170	65	43	0
32	清水沿海河系	6	12	42	50	4	1	1	1	0
33	彰化沿海河系	53	199	222	133	24	3	11	10	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	1	1	11	14	2	2	1	0	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	2	2	3	0	0	0	1	0	0
40	高雄沿海河系	127	163	103	112	78	51	37	76	0
41	林邊溪流域	169	199	132	193	172	49	26	101	0
42	南屏東沿海河	656	649	429	506	478	368	305	618	0
43	台東沿海河系	772	467	176	318	515	803	684	1124	0
44	海岸山脈東側系	427	157	101	116	159	408	502	841	0
45	豐濱沿海河系	147	43	22	55	117	205	162	277	0
46	太魯閣沿海河系	556	449	241	381	449	515	351	557	0
47	頭城沿海河系	150	48	14	21	66	86	81	268	0
合計		18288	20277	15882	22808	19012	16911	11905	18732	7

資料來源：本研究整理

表 4-7　全國各集水區坡面單元車籠埔斷層方位角之數量統計

編號	集水區	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
1	蘭陽河流域	1400	0	0	0	3346	0	0	0
2	磺溪流域	0	0	0	0	162	0	0	0
3	林子坑溪	0	0	0	0	51	0	0	0
4	淡水河流域	0	0	0	0	14907	0	0	0
5	鳳山溪流域	0	0	0	321	1036	0	0	0
6	頭前溪流域	0	0	0	183	2067	0	0	0
7	中港溪流域	0	0	0	1940	721	0	0	0
8	後龍溪流域	0	0	0	2637	474	0	0	0
9	大安溪流域	597	18	23	524	2012	70	201	14
10	大甲溪流域	4449	637	14	59	44	1015	106	133
11	烏溪流域	5129	277	485	3	283	2697	84	42
12	濁水溪流域	9687	581	142	2	24	5201	100	38
13	北港溪流域	0	1	246	0	0	0	152	747
14	朴子溪流域	0	412	0	0	0	0	0	759
15	八掌溪流域	0	1194	0	0	0	0	0	742
16	急水溪流域	0	371	0	0	0	0	0	1475
17	曾文溪流域	0	6801	0	0	0	581	0	1092
18	鹽水溪流域	0	598	0	0	0	0	0	505
19	二仁溪流域	0	2318	0	0	0	0	0	0
20	阿公店溪流域	0	409	0	0	0	0	0	0
21	高屏溪流域	0	11793	0	0	0	2973	0	0
22	東港溪流域	0	472	0	0	0	0	0	0
23	四重溪流域	0	720	0	0	0	0	0	0
24	卑南溪流域	0	1446	0	0	0	4272	0	0
25	秀姑巒溪流域	1697	0	0	0	0	4195	0	0

表 4-7　全國各集水區坡面單元車籠埔斷層方位角之數量統計

編號	集水區	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
26	花蓮溪流域	2474	0	0	0	0	2627	0	0
27	和平溪流域	3538	0	0	0	0	0	0	0
28	北海岸沿海河系	0	0	0	0	2414	0	0	0
29	桃園沿海河系	0	0	0	146	783	0	0	0
30	香山沿海河系	0	0	0	884	0	0	0	0
31	竹南沿海河系	0	0	0	1094	0	0	515	0
32	清水沿海河系	0	0	108	0	0	0	9	0
33	彰化沿海河系	0	0	620	0	0	0	0	35
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	0	0	28	0	0	0	4	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	0	0	0	0	0	0	0	8
40	高雄沿海河系	0	747	0	0	0	0	0	0
41	林邊溪流域	0	1041	0	0	0	0	0	0
42	南屏東沿海河	0	4009	0	0	0	0	0	0
43	台東沿海河系	0	4656	0	0	0	203	0	0
44	海岸山脈東側系	151	0	0	0	0	2560	0	0
45	豐濱沿海河系	855	0	0	0	0	173	0	0
46	太魯閣沿海河系	3460	0	0	0	0	39	0	0
47	頭城沿海河系	0	0	0	0	734	0	0	0
合計		33437	38051	1666	7793	29058	26606	1171	5590

資料來源：本研究整理

表 4-8　全國各集水區坡面單元車籠埔斷層夾角之數量統計

編號	集水區	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
1	蘭陽河流域	480	1665	828	1773
2	磺溪流域	7	69	56	30
3	林子坑溪	1	4	5	41
4	淡水河流域	2337	4310	2488	5772
5	鳳山溪流域	335	269	205	548
6	頭前溪流域	400	385	447	1018
7	中港溪流域	398	475	484	1304
8	後龍溪流域	376	719	549	1467
9	大安溪流域	734	803	336	1586
10	大甲溪流域	1083	2590	883	1901
11	烏溪流域	1774	3419	1126	2681
12	濁水溪流域	3063	4797	2014	5901
13	北港溪流域	66	590	297	193
14	朴子溪流域	111	552	316	192
15	八掌溪流域	319	1034	326	257
16	急水溪流域	234	1042	310	260
17	曾文溪流域	1157	3712	1550	2055
18	鹽水溪流域	122	564	217	200
19	二仁溪流域	283	970	552	513
20	阿公店溪流域	65	192	85	67
21	高屏溪流域	2332	5748	2817	3869
22	東港溪流域	107	226	100	39
23	四重溪流域	93	246	173	208
24	卑南溪流域	890	1693	1298	1837

表 4-8　全國各集水區坡面單元車籠埔斷層夾角之數量統計

編號	集水區	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
25	秀姑巒溪流域	956	1954	1018	1964
26	花蓮溪流域	674	1754	865	1808
27	和平溪流域	353	1431	478	1276
28	北海岸沿海河系	172	673	519	1050
29	桃園沿海河系	169	135	149	476
30	香山沿海河系	168	142	227	347
31	竹南沿海河系	105	300	473	731
32	清水沿海河系	4	32	66	15
33	彰化沿海河系	14	133	287	221
34	崙背沿海河系	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	1	9	19	3
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	0	3	4	1
40	高雄沿海河系	99	297	196	155
41	林邊溪流域	230	457	226	128
42	南屏東沿海河	605	1433	892	1079
43	台東沿海河系	691	827	1173	2168
44	海岸山脈東側河系	146	604	1050	911
45	豐濱沿海河系	41	334	277	376
46	太魯閣沿海河系	380	1389	495	1235
47	頭城沿海河系	51	472	110	101
合計		21626	48453	25986	47757

資料來源：本研究整理

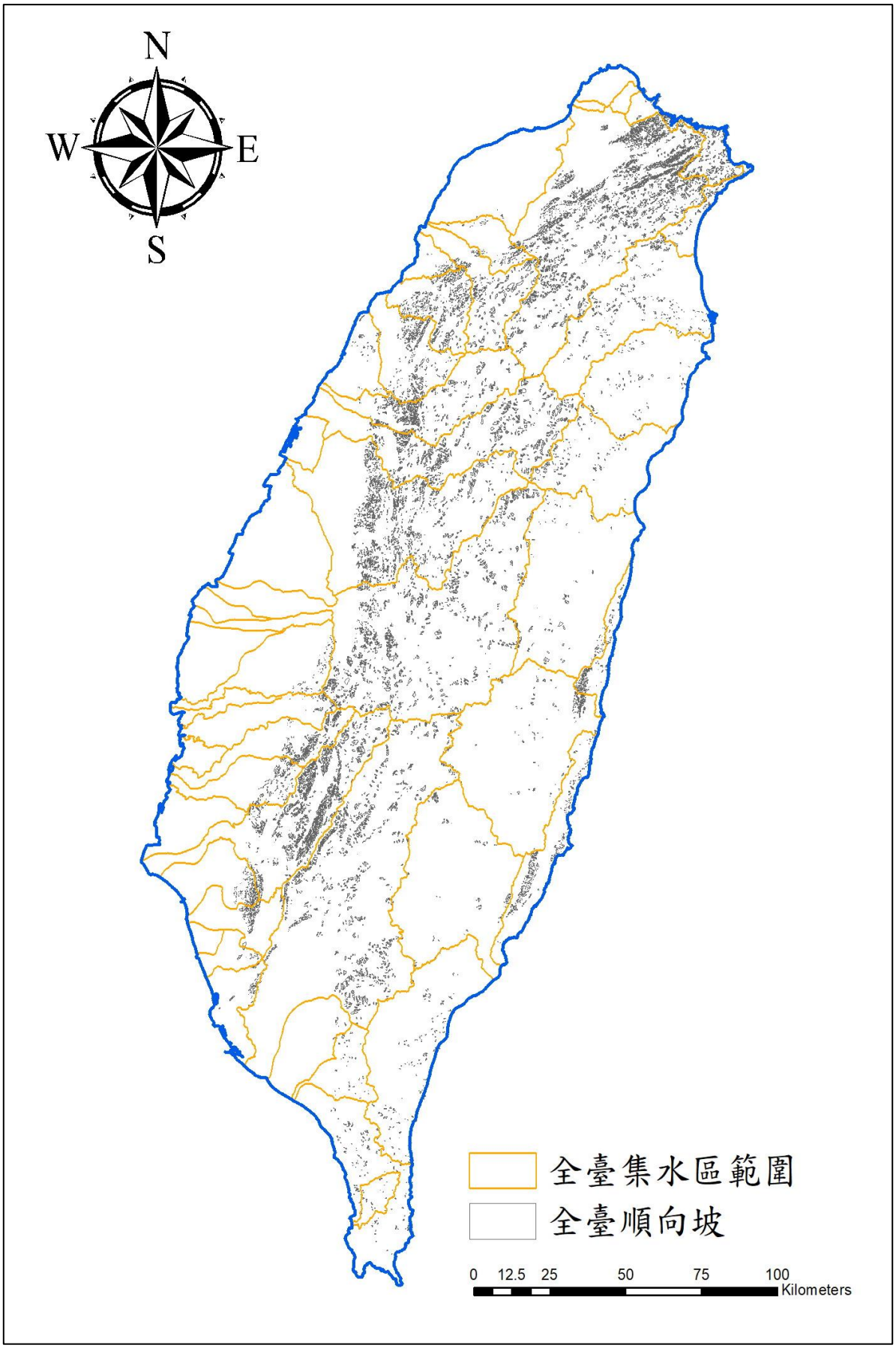


圖 4-2　全臺順向坡分布圖

表 4-9　全國各集水區坡面單元順向坡之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	非順向坡	順向坡	百分比
1	蘭陽河流域	4746	4155	591	12.45%
2	磺溪流域	162	162	0	0%
3	林子坑溪	51	51	0	0%
4	淡水河流域	14907	9394	5513	36.98%
5	鳳山溪流域	1357	1139	218	16.06%
6	頭前溪流域	2250	1628	622	27.64%
7	中港溪流域	2661	1623	1038	39.01%
8	後龍溪流域	3111	2322	789	25.36%
9	大安溪流域	3459	2520	939	27.15%
10	大甲溪流域	6457	4524	1933	29.94%
11	烏溪流域	9000	6295	2705	30.06%
12	濁水溪流域	15775	12962	2813	17.83%
13	北港溪流域	1146	954	192	16.75%
14	朴子溪流域	1171	1021	150	12.81%
15	八掌溪流域	1936	1286	650	33.57%
16	急水溪流域	1846	1317	529	28.66%
17	曾文溪流域	8474	5843	2631	31.05%
18	鹽水溪流域	1103	566	537	48.69%
19	二仁溪流域	2318	1945	373	16.09%
20	阿公店溪流域	409	319	90	22.00%
21	高屏溪流域	14766	12340	2426	16.43%
22	東港溪流域	472	453	19	4.03%
23	四重溪流域	720	675	45	6.25%
24	卑南溪流域	5718	5577	141	2.47%

表 4-9　全國各集水區坡面單元順向坡之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	非順向坡	順向坡	百分比
25	秀姑巒溪流域	5892	5627	265	4.50%
26	花蓮溪流域	5101	4849	252	4.94%
27	和平溪流域	3538	3316	222	6.27%
28	北海岸沿海河系	2414	1671	743	30.78%
29	桃園沿海河系	929	918	11	1.18%
30	香山沿海河系	884	710	174	19.68%
31	竹南沿海河系	1609	1473	136	8.45%
32	清水沿海河系	117	117	0	0%
33	彰化沿海河系	655	655	0	0%
34	崙背沿海河系	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	32	32	0	0%
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	8	2	6	75%
40	高雄沿海河系	747	533	214	28.65%
41	林邊溪流域	1041	974	67	6.44%
42	南屏東沿海河	4009	3695	314	7.83%
43	台東沿海河系	4859	4578	281	5.78%
44	海岸山脈東側河系	2711	2137	574	21.17%
45	豐濱沿海河系	1028	780	248	24.12%
46	太魯閣沿海河系	3499	3265	234	6.69%
47	頭城沿海河系	734	555	179	24.87%
合計		143822	114958	28864	20.07%

資料來源：本研究整理

表 4-10　全國各集水區坡面單元對車籠埔斷層坡向敏感因子之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	A1	A2	N/A
1	蘭陽河流域	4746	1741	3005	0
2	磺溪流域	162	63	99	0
3	林子坑溪	51	6	45	0
4	淡水河流域	14907	4825	10082	0
5	鳳山溪流域	1357	540	817	0
6	頭前溪流域	2250	847	1403	0
7	中港溪流域	2661	882	1779	0
8	後龍溪流域	3111	925	2186	0
9	大安溪流域	3459	1070	2389	0
10	大甲溪流域	6457	1966	4491	0
11	烏溪流域	9000	2900	6096	4
12	濁水溪流域	15775	5077	10696	2
13	北港溪流域	1146	363	783	0
14	朴子溪流域	1171	427	744	0
15	八掌溪流域	1936	645	1291	0
16	急水溪流域	1846	544	1302	0
17	曾文溪流域	8474	2706	5767	1
18	鹽水溪流域	1103	339	764	0
19	二仁溪流域	2318	835	1483	0
20	阿公店溪流域	409	150	259	0
21	高屏溪流域	14766	5149	9617	0
22	東港溪流域	472	207	265	0
23	四重溪流域	720	266	454	0
24	卑南溪流域	5718	2188	3530	0

表 4-10　全國各集水區坡面單元對車籠埔斷層坡向敏感因子之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	A1	A2	N/A
25	秀姑巒溪流域	5892	1974	3918	0
26	花蓮溪流域	5101	1539	3562	0
27	和平溪流域	3538	831	2707	0
28	北海岸沿海河系	2414	691	1723	0
29	桃園沿海河系	929	318	611	0
30	香山沿海河系	884	395	489	0
31	竹南沿海河系	1609	578	1031	0
32	清水沿海河系	117	70	47	0
33	彰化沿海河系	655	301	354	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	32	20	12	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	8	4	4	0
40	高雄沿海河系	747	295	452	0
41	林邊溪流域	1041	456	585	0
42	南屏東沿海河	4009	1497	2512	0
43	台東沿海河系	4859	1864	2995	0
44	海岸山脈東側河系	2711	1196	1515	0
45	豐濱沿海河系	1028	318	710	0
46	太魯閣沿海河系	3499	875	2624	0
47	頭城沿海河系	734	161	573	0
合計		143822	48045	95777	7

資料來源：本研究整理

表 4-11　全國各集水區坡面單元九芎坑斷層方位角之數量統計

編號	集水區	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
1	蘭陽河流域	0	4746	0	0	0	0	0	0
2	磺溪流域	0	162	0	0	0	0	0	0
3	林子坑溪	0	51	0	0	0	0	0	0
4	淡水河流域	0	14907	0	0	0	0	0	0
5	鳳山溪流域	229	1128	0	0	0	0	0	0
6	頭前溪流域	137	2113	0	0	0	0	0	0
7	中港溪流域	1641	1020	0	0	0	0	0	0
8	後龍溪流域	2542	569	0	0	0	0	0	0
9	大安溪流域	750	2709	0	0	0	0	0	0
10	大甲溪流域	353	6104	0	0	0	0	0	0
11	烏溪流域	1728	7272	0	0	0	0	0	0
12	濁水溪流域	0	5007	10737	31	0	0	0	0
13	北港溪流域	0	212	538	93	0	0	295	8
14	朴子溪流域	0	0	379	322	79	64	322	5
15	八掌溪流域	0	0	182	482	952	320	0	0
16	急水溪流域	0	0	0	0	1175	671	0	0
17	曾文溪流域	0	0	581	1503	6096	294	0	0
18	鹽水溪流域	0	0	0	0	1102	1	0	0
19	二仁溪流域	0	0	0	0	2318	0	0	0
20	阿公店溪流域	0	0	0	0	409	0	0	0
21	高屏溪流域	0	0	1211	5110	8445	0	0	0
22	東港溪流域	0	0	0	0	472	0	0	0
23	四重溪流域	0	0	0	0	720	0	0	0
24	卑南溪流域	0	0	0	5718	0	0	0	0
25	秀姑巒溪流域	0	0	4607	1285	0	0	0	0

表 4-11　全國各集水區坡面單元九芎坑斷層方位角之數量統計

編號	集水區	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
26	花蓮溪流域	0	1472	3629	0	0	0	0	0
27	和平溪流域	0	3538	0	0	0	0	0	0
28	北海岸沿海河系	0	2414	0	0	0	0	0	0
29	桃園沿海河系	130	799	0	0	0	0	0	0
30	香山沿海河系	884	0	0	0	0	0	0	0
31	竹南沿海河系	1609	0	0	0	0	0	0	0
32	清水沿海河系	117	0	0	0	0	0	0	0
33	彰化沿海河系	646	9	0	0	0	0	0	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	6	26	0	0	0	0	0	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	0	0	0	0	0	8	0	0
40	高雄沿海河系	0	0	0	0	747	0	0	0
41	林邊溪流域	0	0	0	0	1041	0	0	0
42	南屏東沿海河	0	0	0	0	4009	0	0	0
43	台東沿海河系	0	0	0	1173	3686	0	0	0
44	海岸山脈東側系	0	0	845	1866	0	0	0	0
45	豐濱沿海河系	0	0	1028	0	0	0	0	0
46	太魯閣沿海河系	0	3499	0	0	0	0	0	0
47	頭城沿海河系	0	734	0	0	0	0	0	0
合計		10772	58491	23727	17583	31251	1358	617	13

表 4-12　全國各集水區坡面單元九芎坑斷層夾角之數量統計

編號	集水區	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
1	蘭陽河流域	496	1699	1036	1515
2	磺溪流域	6	74	55	27
3	林子坑溪	2	3	5	41
4	淡水河流域	2387	4240	2783	5497
5	鳳山溪流域	334	264	206	553
6	頭前溪流域	381	387	483	999
7	中港溪流域	397	461	487	1316
8	後龍溪流域	407	636	541	1527
9	大安溪流域	706	644	465	1644
10	大甲溪流域	1222	1984	923	2328
11	烏溪流域	1846	2684	1216	3254
12	濁水溪流域	2905	4243	2236	6391
13	北港溪流域	336	264	85	461
14	朴子溪流域	258	513	74	326
15	八掌溪流域	455	943	218	320
16	急水溪流域	254	1061	274	257
17	曾文溪流域	1301	3715	1411	2047
18	鹽水溪流域	129	569	204	201
19	二仁溪流域	310	994	527	487
20	阿公店溪流域	66	195	77	71
21	高屏溪流域	2536	5778	2686	3766
22	東港溪流域	113	230	90	39
23	四重溪流域	98	247	178	197
24	卑南溪流域	864	1784	1353	1717

表 4-12　全國各集水區坡面單元九芎坑斷層夾角之數量統計

編號	集水區	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
25	秀姑巒溪流域	902	2069	929	1992
26	花蓮溪流域	708	1893	770	1730
27	和平溪流域	511	1301	672	1054
28	北海岸沿海河系	188	677	580	969
29	桃園沿海河系	168	131	147	483
30	香山沿海河系	176	132	224	352
31	竹南沿海河系	184	202	316	907
32	清水沿海河系	4	6	7	100
33	彰化沿海河系	89	21	37	508
34	崙背沿海河系	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	1	1	2	28
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	0	4	3	1
40	高雄沿海河系	100	306	192	149
41	林邊溪流域	240	461	220	120
42	南屏東沿海河	619	1438	904	1048
43	台東沿海河系	653	878	1279	2049
44	海岸山脈東側河系	152	776	990	793
45	豐濱沿海河系	36	420	240	332
46	太魯閣沿海河系	510	1357	603	1029
47	頭城沿海河系	70	472	109	83
合計		23120	46157	25837	48708

表 4-13　全國各集水區坡面單元對九芎坑斷層坡向敏感因子之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	A1	A2	N/A
1	蘭陽河流域	4746	1954	2792	0
2	磺溪流域	162	61	101	0
3	林子坑溪	51	7	44	0
4	淡水河流域	14907	8779	6128	0
5	鳳山溪流域	1357	676	681	0
6	頭前溪流域	2250	1264	986	0
7	中港溪流域	2661	1595	1066	0
8	後龍溪流域	3111	1502	1609	0
9	大安溪流域	3459	1773	1686	0
10	大甲溪流域	6457	3425	3032	0
11	烏溪流域	9000	3062	5934	4
12	濁水溪流域	15775	7058	8715	2
13	北港溪流域	1146	556	590	0
14	朴子溪流域	1171	440	731	0
15	八掌溪流域	1936	1096	840	0
16	急水溪流域	1846	917	929	0
17	曾文溪流域	8474	4454	4019	1
18	鹽水溪流域	1103	723	380	0
19	二仁溪流域	2318	1087	1231	0
20	阿公店溪流域	409	210	199	0
21	高屏溪流域	14766	6793	7973	0
22	東港溪流域	472	209	263	0
23	四重溪流域	720	304	416	0
24	卑南溪流域	5718	2294	3424	0

表 4-13　全國各集水區坡面單元對九芎坑斷層坡向敏感因子之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	A1	A2	N/A
25	秀姑巒溪流域	5892	2025	3867	0
26	花蓮溪流域	5101	1663	3438	0
27	和平溪流域	3538	1341	2197	0
28	北海岸沿海河系	2414	1264	1150	0
29	桃園沿海河系	929	322	607	0
30	香山沿海河系	884	400	484	0
31	竹南沿海河系	1609	581	1028	0
32	清水沿海河系	117	11	106	0
33	彰化沿海河系	655	126	529	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	32	3	29	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	8	7	1	0
40	高雄沿海河系	747	416	331	0
41	林邊溪流域	1041	486	555	0
42	南屏東沿海河	4009	1708	2301	0
43	台東沿海河系	4859	2103	2756	0
44	海岸山脈東側河系	2711	1468	1243	0
45	豐濱沿海河系	1028	459	569	0
46	太魯閣沿海河系	3499	1295	2204	0
47	頭城沿海河系	734	314	420	0
合計		143822	66231	77584	7

表 4-14　全國各集水區坡面單元花東縱谷斷層方位角之數量統計

編號	集水區	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
1	蘭陽河流域	0	3346	1400	0	0	0	0	0
2	磺溪流域	0	162	0	0	0	0	0	0
3	林子坑溪	51	0	0	0	0	0	0	0
4	淡水河流域	0	14907	0	0	0	0	0	0
5	鳳山溪流域	321	1036	0	0	0	0	0	0
6	頭前溪流域	183	2067	0	0	0	0	0	0
7	中港溪流域	1940	721	0	0	0	0	0	0
8	後龍溪流域	2637	474	0	0	0	0	0	0
9	大安溪流域	524	2012	597	70	18	14	23	201
10	大甲溪流域	59	44	4449	1015	637	133	14	106
11	烏溪流域	3	283	5129	2697	277	42	485	84
12	濁水溪流域	2	24	9687	5201	581	38	142	100
13	北港溪流域	0	0	0	0	1	747	246	152
14	朴子溪流域	0	0	0	0	412	759	0	0
15	八掌溪流域	0	0	0	0	0	0	1008	928
16	急水溪流域	0	0	0	0	371	1475	0	0
17	曾文溪流域	0	0	0	581	6801	1092	0	0
18	鹽水溪流域	0	0	0	0	598	505	0	0
19	二仁溪流域	0	0	0	0	2318	0	0	0
20	阿公店溪流域	0	0	0	0	409	0	0	0
21	高屏溪流域	0	0	0	2973	11793	0	0	0
22	東港溪流域	0	0	0	0	472	0	0	0
23	四重溪流域	0	0	0	0	720	0	0	0
24	卑南溪流域	0	0	0	4272	1446	0	0	0
25	秀姑巒溪流域	0	0	1697	4195	0	0	0	0

表 4-14　全國各集水區坡面單元花東縱谷斷層方位角之數量統計

編號	集水區	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
26	花蓮溪流域	0	0	2474	2627	0	0	0	0
27	和平溪流域	0	0	3538	0	0	0	0	0
28	北海岸沿海河系	0	2414	0	0	0	0	0	0
29	桃園沿海河系	146	783	0	0	0	0	0	0
30	香山沿海河系	884	0	0	0	0	0	0	0
31	竹南沿海河系	1094	0	0	0	0	0	0	515
32	清水沿海河系	0	0	0	0	0	0	108	9
33	彰化沿海河系	0	0	0	0	0	35	620	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	0	0	0	0	0	0	28	4
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	0	0	0	0	0	8	0	0
40	高雄沿海河系	0	0	0	0	747	0	0	0
41	林邊溪流域	0	0	0	0	1041	0	0	0
42	南屏東沿海河	0	0	0	0	4009	0	0	0
43	台東沿海河系	0	0	0	203	4656	0	0	0
44	海岸山脈東側系	0	0	845	1866	0	0	0	0
45	豐濱沿海河系	0	0	855	173	0	0	0	0
46	太魯閣沿海河系	0	0	3460	39	0	0	0	0
47	頭城沿海河系	0	734	0	0	0	0	0	0
合計		7844	29007	34712	25912	37307	4848	2674	2099

表 4-15　全國各集水區坡面單元花東縱谷斷層夾角之數量統計

編號	集水區	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
1	蘭陽河流域	480	1665	828	1773
2	磺溪流域	7	69	56	30
3	林子坑溪	2	3	12	34
4	淡水河流域	2337	4310	2488	5772
5	鳳山溪流域	335	269	205	548
6	頭前溪流域	400	385	447	1018
7	中港溪流域	398	475	484	1304
8	後龍溪流域	376	719	549	1467
9	大安溪流域	734	803	336	1586
10	大甲溪流域	1083	2590	883	1901
11	烏溪流域	1774	3419	1126	2681
12	濁水溪流域	3004	4796	2058	5917
13	北港溪流域	66	590	297	193
14	朴子溪流域	111	552	316	192
15	八掌溪流域	112	608	508	708
16	急水溪流域	234	1042	310	260
17	曾文溪流域	1157	3712	1550	2055
18	鹽水溪流域	122	564	217	200
19	二仁溪流域	283	970	552	513
20	阿公店溪流域	65	192	85	67
21	高屏溪流域	2325	5755	2823	3863
22	東港溪流域	107	226	100	39
23	四重溪流域	93	246	173	208
24	卑南溪流域	889	1694	1300	1835

表 4-15　全國各集水區坡面單元花東縱谷斷層夾角之數量統計

編號	集水區	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
25	秀姑巒溪流域	956	1954	1018	1964
26	花蓮溪流域	674	1754	865	1808
27	和平溪流域	353	1431	478	1276
28	北海岸沿海河系	172	673	519	1050
29	桃園沿海河系	169	135	149	476
30	香山沿海河系	168	142	227	347
31	竹南沿海河系	105	300	473	731
32	清水沿海河系	4	32	66	15
33	彰化沿海河系	14	133	287	221
34	崙背沿海河系	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	1	9	19	3
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	0	3	4	1
40	高雄沿海河系	99	297	196	155
41	林邊溪流域	230	457	226	128
42	南屏東沿海河	605	1433	892	1079
43	台東沿海河系	691	827	1173	2168
44	海岸山脈東側河系	146	604	1050	911
45	豐濱沿海河系	41	334	277	376
46	太魯閣沿海河系	380	1389	495	1235
47	頭城沿海河系	51	472	110	101
合計		21353	48033	26227	48209

表 4-16　全國各集水區坡面單元對花東縱谷斷層坡向敏感因子數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	A1	A2	N/A
1	蘭陽河流域	4746	1741	3005	0
2	磺溪流域	162	63	99	0
3	林子坑溪	51	14	37	0
4	淡水河流域	14907	8531	6376	0
5	鳳山溪流域	1357	674	683	0
6	頭前溪流域	2250	1256	994	0
7	中港溪流域	2661	1584	1077	0
8	後龍溪流域	3111	1495	1616	0
9	大安溪流域	3459	1718	1741	0
10	大甲溪流域	6457	3270	3187	0
11	烏溪流域	9000	2900	6096	4
12	濁水溪流域	15775	7000	8773	2
13	北港溪流域	1146	482	664	0
14	朴子溪流域	1171	529	642	0
15	八掌溪流域	1936	1069	867	0
16	急水溪流域	1846	934	912	0
17	曾文溪流域	8474	4491	3982	1
18	鹽水溪流域	1103	727	376	0
19	二仁溪流域	2318	1081	1237	0
20	阿公店溪流域	409	213	196	0
21	高屏溪流域	14766	6715	8051	0
22	東港溪流域	472	214	258	0
23	四重溪流域	720	295	425	0
24	卑南溪流域	5718	2262	3456	0

表 4-16　全國各集水區坡面單元對花東縱谷斷層坡向敏感因子數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	A1	A2	N/A
25	秀姑巒溪流域	5892	2173	3719	0
26	花蓮溪流域	5101	1719	3382	0
27	和平溪流域	3538	1004	2534	0
28	北海岸沿海河系	2414	1207	1207	0
29	桃園沿海河系	929	325	604	0
30	香山沿海河系	884	395	489	0
31	竹南沿海河系	1609	672	937	0
32	清水沿海河系	117	70	47	0
33	彰化沿海河系	655	301	354	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	32	20	12	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	8	8	0	0
40	高雄沿海河系	747	414	333	0
41	林邊溪流域	1041	481	560	0
42	南屏東沿海河	4009	1689	2320	0
43	台東沿海河系	4859	2040	2819	0
44	海岸山脈東側河系	2711	1506	1205	0
45	豐濱沿海河系	1028	493	535	0
46	太魯閣沿海河系	3499	1028	2471	0
47	頭城沿海河系	734	301	433	0
合計		143822	66231	77584	7

三、坡度分級

坡度分級分析方法如第三章第六節所述，全台坡面單元以水土保持技術規範(2013)坡度分級定義為依據，將坡度自五級坡之上下界分三個分級，定義為 S1(緩坡)、S2(中坡)以及 S3(陡坡)。各集水區坡面單元坡度分級以坡面斜率法決定，利用 DEM 套取高程後與以計算。各集水區坡面單元坡度分級統計如表 4-17 所示，其中六級坡最多，其次為五級坡，再次為三級坡。

進一步地，坡面單元坡度分類即依據第三章第六節之分類方法予以決定，各集水區坡面單元坡度分類如表 4-18 所示，各類坡面之地質被分類為 S1、S2、S3 二類，其中 S1 類 53620 個坡面，S2 類 35111 個坡面，S3 類 43387 個坡面。由於目前坡地易損性曲線僅涵蓋水土保持技術規範三~七級坡，一、二級坡和平坡坡面則被歸屬於不適用地質(N/A)，共計有 11704 個坡面。在後續分析中將不作評估。由表 4-18 中可知，大部分坡面單元仍屬有效地質，僅少數坡面單元不適用，約佔 8%。

表 4-17　全國各集水區坡面單元坡度分級之數量統計

編號	集水區	1 級	2 級	3 級	4 級	5 級	6 級	7 級	平坡
1	蘭陽河流域	0	39	543	896	1777	1474	17	0
2	磺溪流域	0	10	60	40	40	12	0	0
3	林子坑溪	2	10	16	8	13	2	0	0
4	淡水河流域	18	504	3752	3466	4348	2769	50	0
5	鳳山溪流域	10	313	707	202	99	26	0	0
6	頭前溪流域	3	123	385	373	770	590	6	0
7	中港溪流域	15	475	1102	459	399	208	3	0
8	後龍溪流域	13	295	1043	746	653	358	3	0
9	大安溪流域	1	66	537	433	804	1561	57	0
10	大甲溪流域	7	111	581	576	1547	3491	144	0
11	烏溪流域	42	831	2370	1783	1918	2016	36	4
12	濁水溪流域	28	294	1390	1960	4364	7344	393	2
13	北港溪流域	9	252	636	140	67	41	1	0
14	朴子溪流域	3	237	563	145	119	100	4	0
15	八掌溪流域	12	242	671	379	403	224	5	0
16	急水溪流域	6	295	888	406	184	67	0	0
17	曾文溪流域	53	1119	2852	1626	1842	962	19	1
18	鹽水溪流域	20	527	458	62	27	9	0	0
19	二仁溪流域	10	781	1093	266	149	19	0	0
20	阿公店溪流域	6	146	174	57	21	5	0	0
21	高屏溪流域	31	873	1902	1859	3988	5831	282	0
22	東港溪流域	7	19	76	105	170	94	1	0
23	四重溪流域	7	24	344	214	108	23	0	0
24	卑南溪流域	16	90	488	705	1844	2462	113	0

表 4-17　全國各集水區坡面單元坡度分級之數量統計

編號	集水區	1 級	2 級	3 級	4 級	5 級	6 級	7 級	平坡
25	秀姑巒溪流域	8	160	718	776	1657	2455	118	0
26	花蓮溪流域	2	50	383	506	1344	2665	151	0
27	和平溪流域	0	9	168	430	1296	1559	76	0
28	北海岸沿海河系	9	357	1063	550	340	93	2	0
29	桃園沿海河系	20	409	426	59	14	1	0	0
30	香山沿海河系	3	458	367	40	15	1	0	0
31	竹南沿海河系	14	707	721	117	43	6	1	0
32	清水沿海河系	4	73	32	5	2	1	0	0
33	彰化沿海河系	1	225	365	54	7	3	0	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	0	4	25	3	0	0	0	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	0	3	5	0	0	0	0	0
40	高雄沿海河系	6	246	371	83	36	5	0	0
41	林邊溪流域	1	25	70	144	381	409	11	0
42	南屏東沿海河	42	504	1364	960	813	325	1	0
43	台東沿海河系	4	57	609	1056	1759	1343	31	0
44	海岸山脈東側系	14	249	813	560	497	541	37	0
45	豐濱沿海河系	2	19	333	315	229	130	0	0
46	太魯閣沿海河系	0	4	34	158	780	2269	254	0
47	頭城沿海河系	0	13	165	235	244	77	0	0
合計		449	11248	30663	22957	35111	41571	1816	7

資料來源：本研究整理

表 4-18　全國各集水區坡面單元坡度分類之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	S1	S2	S3	N/A
1	蘭陽河流域	4746	1439	1777	1491	39
2	磺溪流域	162	100	40	12	10
3	林子坑溪	51	24	13	2	12
4	淡水河流域	14907	7218	4348	2819	522
5	鳳山溪流域	1357	909	99	26	323
6	頭前溪流域	2250	758	770	596	126
7	中港溪流域	2661	1561	399	211	490
8	後龍溪流域	3111	1789	653	361	308
9	大安溪流域	3459	970	804	1618	67
10	大甲溪流域	6457	1157	1547	3635	118
11	烏溪流域	9000	4153	1918	2052	877
12	濁水溪流域	15775	3350	4364	7737	324
13	北港溪流域	1146	776	67	42	261
14	朴子溪流域	1171	708	119	104	240
15	八掌溪流域	1936	1050	403	229	254
16	急水溪流域	1846	1294	184	67	301
17	曾文溪流域	8474	4478	1842	981	1173
18	鹽水溪流域	1103	520	27	9	547
19	二仁溪流域	2318	1359	149	19	791
20	阿公店溪流域	409	231	21	5	152
21	高屏溪流域	14766	3761	3988	6113	904
22	東港溪流域	472	181	170	95	26
23	四重溪流域	720	558	108	23	31
24	卑南溪流域	5718	1193	1844	2575	106

表 4-18　全國各集水區坡面單元坡度分類之數量統計

編號	集水區	坡面單元總數	S1	S2	S3	N/A
25	秀姑巒溪流域	5892	1494	1657	2573	168
26	花蓮溪流域	5101	889	1344	2816	52
27	和平溪流域	3538	598	1296	1635	9
28	北海岸沿海河系	2414	1613	340	95	366
29	桃園沿海河系	929	485	14	1	429
30	香山沿海河系	884	407	15	1	461
31	竹南沿海河系	1609	838	43	7	721
32	清水沿海河系	117	37	2	1	77
33	彰化沿海河系	655	419	7	3	226
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	32	28	0	0	4
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	8	5	0	0	3
40	高雄沿海河系	747	454	36	5	252
41	林邊溪流域	1041	214	381	420	26
42	南屏東沿海河	4099	2324	813	326	546
43	台東沿海河系	4859	1665	1759	1374	61
44	海岸山脈東側河系	2711	1373	497	578	263
45	豐濱沿海河系	1028	648	229	130	21
46	太魯閣沿海河系	3499	192	780	2523	4
47	頭城沿海河系	734	400	244	77	13
合計		143822	53620	35111	43387	11704

資料來源：本研究整理

四、坡面單元分類

完成坡面單元屬性分析後，即可據以進行坡面單元分類，根據第三章七節所述，根據前述因子定義之分類將坡面環境因子分類屬性賦予固定編碼，以 G(地質)、A(坡向敏感)、S(坡度)之編號順序組合，其中包括地質二類、坡向敏感二類以及坡度三類，共計 12 種類型坡地組合。

由於坡面屬性分析中具有不適用坡面(N/A)，這些坡面屬性組合後將形成無效坡面，經綜合分析後各集水區坡面單元分類如表 4-19 所示，在 143822 個坡面中，有效坡面為 130620 個坡面，無效坡面數量為 13202 個個坡面，有效坡面比例達 90.82%。少數集水區的有效坡面比例較低，例如香山沿海河系、清水沿海河系等低於 50%，主要原因是該類坡面原本的坡面數量即較少，因此比例較高。綜上所述，後續坡面單元評估實際數量為 130620 個坡面，選定之斷層帶不影響坡面單元評估之數量。

以車籠埔斷層為例，全台集水區坡面分類結果如表 4-20 及表 4-21 所示，各集水區中各類坡面單元總計 130620 個，其中 G1 類型的坡面共 98061 個，G2 類型的坡面共 32559 個，各類坡面數量如表 4-21 所示，其中以 G1A2S3 最多，達 28100 個，G2A1S3 最少，僅 764 個，全臺各類坡面單元數量如圖 4-3 所示。

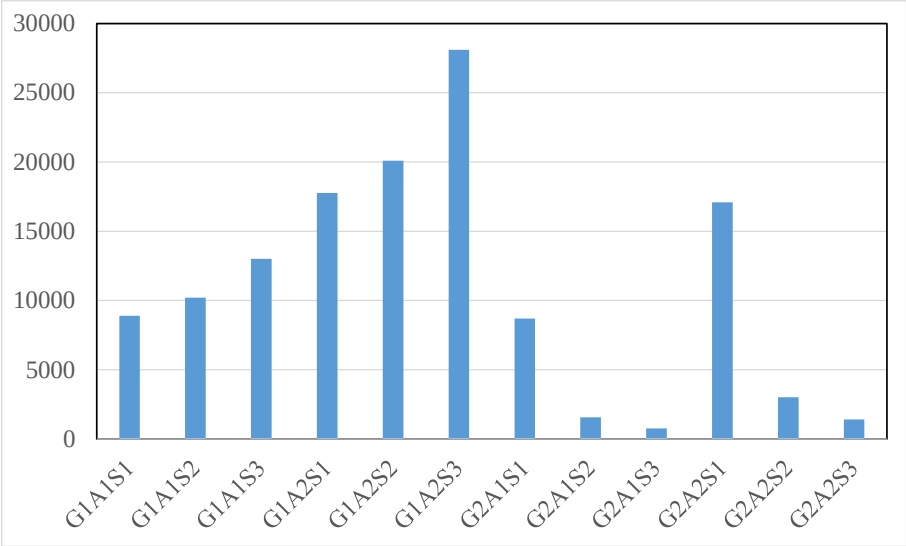


圖 4-3　車籠埔斷層為例各類坡面單元數量

表 4-19　全國各集水區坡面單元有效數量統計

編號	有效數量	無效數量	有效比例	編號	有效數量	無效數量	有效比例
1	4555	191	95.98%	25	5613	279	95.26%
2	151	11	93.21%	26	4984	117	97.71%
3	39	12	76.47%	27	3518	20	99.43%
4	14300	607	95.93%	28	2043	371	84.63%
5	1005	352	74.06%	29	466	463	50.16%
6	2106	144	93.60%	30	423	461	47.85%
7	2148	513	80.72%	31	841	768	52.27%
8	2764	347	88.85%	32	40	77	34.19%
9	3377	82	97.63%	33	426	229	65.04%
10	6325	132	97.96%	34	-	-	-
11	7994	1006	88.82%	35	28	4	87.50%
12	15354	421	97.33%	36	-	-	-
13	882	264	76.96%	37	-	-	-
14	914	257	78.05%	38	-	-	-
15	1635	301	84.45%	39	5	3	62.50%
16	1531	315	82.94%	40	486	261	65.06%
17	7266	1208	85.74%	41	1015	26	97.50%
18	553	550	50.14%	42	3439	570	85.78%
19	1526	792	65.83%	43	4766	93	98.09%
20	255	154	62.35%	44	2316	395	85.43%
21	13695	1071	92.75%	45	1007	21	97.96%
22	443	29	93.86%	46	3477	22	99.37%
23	683	37	94.86%	47	690	44	94.01%
24	5536	182	96.82%	合計	130620	13202	90.82%

資料來源：本研究整理

表 4-20　車籠埔斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	集水區	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
1	蘭陽河流域	372	553	488	633	1001	936	3983
2	磺溪流域	27	6	2	21	13	6	75
3	林子坑溪	1	1	0	9	8	0	19
4	淡水河流域	1972	1315	881	4188	2921	1909	13186
5	鳳山溪流域	120	21	6	216	67	16	446
6	頭前溪流域	157	269	201	250	457	390	1724
7	中港溪流域	148	91	53	373	247	142	1054
8	後龍溪流域	253	170	117	731	390	212	1873
9	大安溪流域	158	201	470	350	518	1102	2799
10	大甲溪流域	214	381	980	487	911	2285	5258
11	烏溪流域	195	370	616	463	658	1132	3434
12	濁水溪流域	754	1391	2182	1351	2502	5241	13421
13	北港溪流域	12	6	5	47	30	25	125
14	朴子溪流域	29	27	31	80	67	57	291
15	八掌溪流域	107	100	63	240	206	113	829
16	急水溪流域	57	19	11	151	53	33	324
17	曾文溪流域	395	399	248	834	951	624	3451
18	鹽水溪流域	0	0	0	0	0	0	0
19	二仁溪流域	20	4	0	67	23	4	118
20	阿公店溪流域	11	0	0	19	0	1	31
21	高屏溪流域	917	1413	2120	1755	2414	3943	12562
22	東港溪流域	80	73	36	86	93	59	427
23	四重溪流域	167	28	8	290	63	11	567
24	卑南溪流域	296	700	914	381	1054	1642	4987

表 4-20　車籠埔斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	集水區	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
25	秀姑巒溪流域	303	504	772	522	930	1711	4742
26	花蓮溪流域	188	375	780	339	859	2012	4553
27	和平溪流域	93	254	424	463	979	1120	3333
28	北海岸沿海河系	352	80	17	720	199	51	1419
29	桃園沿海河系	2	0	0	5	0	0	7
30	香山沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
31	竹南沿海河系	33	16	1	48	5	1	104
32	清水沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
33	彰化沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	0	0	0	0	0	0	0
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-	-	
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-	-	
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-	-	
39	佳里沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
40	高雄沿海河系	4	0	0	1	0	0	5
41	林邊溪流域	76	181	188	125	196	227	993
42	南屏東沿海河	658	292	127	1158	464	190	2889
43	台東沿海河系	531	607	575	857	1063	773	4406
44	海岸山脈東側河系	60	61	145	104	80	157	607
45	豐濱沿海河系	9	3	4	46	14	10	86
46	太魯閣沿海河系	54	258	533	132	507	1916	3400
47	頭城沿海河系	65	34	11	219	155	49	533
合計		8890	10203	13009	17761	20098	28100	98061

資料來源：本研究整理

表 4-21　車籠埔斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G2 類

編號	集水區	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
1	蘭陽河流域	135	86	25	195	95	36	572
2	磺溪流域	17	5	1	34	16	3	76
3	林子坑溪	1	1	0	13	3	2	20
4	淡水河流域	359	45	12	621	60	17	1114
5	鳳山溪流域	216	1	0	330	9	3	559
6	頭前溪流域	132	18	1	203	25	3	382
7	中港溪流域	353	18	6	666	41	10	1094
8	後龍溪流域	217	25	6	551	68	24	891
9	大安溪流域	164	27	15	290	53	29	578
10	大甲溪流域	134	79	131	309	175	239	1067
11	烏溪流域	997	258	85	2385	619	216	4560
12	濁水溪流域	359	162	114	819	295	184	1933
13	北港溪流域	238	10	4	476	21	8	757
14	朴子溪流域	221	10	0	362	14	16	623
15	八掌溪流域	220	38	22	444	52	30	806
16	急水溪流域	321	30	7	753	80	16	1207
17	曾文溪流域	1021	138	34	2197	352	73	3815
18	鹽水溪流域	164	5	2	353	22	7	553
19	二仁溪流域	427	50	5	844	72	10	1408
20	阿公店溪流域	63	6	0	136	15	4	224
21	高屏溪流域	325	39	13	631	100	25	1133
22	東港溪流域	6	2	0	6	2	0	16
23	四重溪流域	44	4	2	52	12	2	116
24	卑南溪流域	168	29	5	290	48	9	549

表 4-21　車籠埔斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G2 類

編號	集水區	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
25	秀姑巒溪流域	200	72	27	380	129	63	871
26	花蓮溪流域	101	42	9	217	50	12	431
27	和平溪流域	4	11	34	35	51	50	185
28	北海岸沿海河系	160	26	3	376	35	24	624
29	桃園沿海河系	162	4	0	282	10	1	459
30	香山沿海河系	164	5	0	243	10	1	423
31	竹南沿海河系	249	9	2	463	11	3	737
32	清水沿海河系	22	2	0	15	0	1	40
33	彰化沿海河系	209	2	1	207	5	2	426
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	17	0	0	11	0	0	28
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	1	0	0	4	0	0	5
40	高雄沿海河系	159	13	2	282	22	3	481
41	林邊溪流域	4	1	5	9	3	0	22
42	南屏東沿海河	187	21	3	297	36	6	550
43	台東沿海河系	79	31	9	176	51	14	360
44	海岸山脈東側系	466	156	116	643	185	143	1709
45	豐濱沿海河系	174	84	39	419	128	77	921
46	太魯閣沿海河系	0	3	22	2	9	41	77
47	頭城沿海河系	39	5	2	63	37	11	157
合計		8699	1573	764	17084	3021	1418	32559
G1/G2 總計		17289	11776	13773	34845	23119	29518	130620

資料來源：本研究整理

表 4-22　九芎坑斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	集水區	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
1	蘭陽河流域	445	647	543	560	907	881	3983
2	磺溪流域	27	4	2	21	15	6	75
3	林子坑溪	1	1	0	9	8	0	19
4	淡水河流域	4051	2285	1371	2109	1951	1419	13186
5	鳳山溪流域	183	48	11	153	40	11	446
6	頭前溪流域	267	396	287	140	330	304	1724
7	中港溪流域	297	199	84	224	139	111	1054
8	後龍溪流域	491	257	158	493	303	171	1873
9	大安溪流域	298	343	663	210	376	909	2799
10	大甲溪流域	346	669	1624	355	623	1641	5258
11	烏溪流域	227	331	550	431	697	1198	3434
12	濁水溪流域	963	1802	3059	1142	2091	4364	13421
13	北港溪流域	40	18	19	19	18	11	125
14	朴子溪流域	49	62	44	60	32	44	291
15	八掌溪流域	180	174	99	167	132	77	829
16	急水溪流域	83	33	21	125	39	23	324
17	曾文溪流域	670	797	458	559	553	414	3451
18	鹽水溪流域	0	0	0	0	0	0	0
19	二仁溪流域	36	13	4	51	14	0	118
20	阿公店溪流域	17	0	0	13	0	1	31
21	高屏溪流域	1305	2024	2582	1367	1803	3481	12562
22	東港溪流域	89	71	35	77	95	60	427
23	四重溪流域	187	32	8	270	59	11	567
24	卑南溪流域	342	777	842	335	977	1714	4987

表 4-22　九芎坑斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	集水區	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
25	秀姑巒溪流域	290	486	728	535	948	1755	4742
26	花蓮溪流域	174	377	880	353	857	1912	4553
27	和平溪流域	160	420	667	396	813	877	3333
28	北海岸沿海河系	633	149	27	439	130	41	1419
29	桃園沿海河系	2	0	0	5	0	0	7
30	香山沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
31	竹南沿海河系	41	11	2	40	10	0	104
32	清水沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
33	彰化沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	0	0	0	0	0	0	0
36	新虎尾沿海河系	-		--	-		-	
37	新港沿海河系	-	--	-	-	--	-	
38	布袋沿海河系	-	-	--	-	-	-	
39	佳里沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
40	高雄沿海河系	4	0	0	1	0	0	5
41	林邊溪流域	91	191	192	110	186	223	993
42	南屏東沿海河	770	352	131	1046	404	186	2889
43	台東沿海河系	597	718	590	791	952	758	4406
44	海岸山脈東側河系	73	61	137	91	80	165	607
45	豐濱沿海河系	11	3	2	44	14	12	86
46	太魯閣沿海河系	58	274	931	128	491	1518	3400
47	頭城沿海河系	114	78	17	170	111	43	533
合計		13612	14103	16768	13039	16198	24341	98061

表 4-23　九芎坑斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G2 類

編號	集水區	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
1	蘭陽河流域	141	78	25	189	103	36	572
2	磺溪流域	19	3	1	32	18	3	76
3	林子坑溪	2	1	0	12	3	2	20
4	淡水河流域	615	71	18	365	34	11	1114
5	鳳山溪流域	235	2	0	311	8	3	559
6	頭前溪流域	193	31	3	142	12	1	382
7	中港溪流域	655	33	11	364	26	5	1094
8	後龍溪流域	349	58	18	419	35	12	891
9	大安溪流域	339	58	26	115	22	18	578
10	大甲溪流域	294	187	251	149	67	119	1067
11	烏溪流域	1218	326	122	2164	551	179	4560
12	濁水溪流域	621	268	146	557	189	152	1933
13	北港溪流域	340	16	9	374	15	3	757
14	朴子溪流域	201	7	9	382	17	7	623
15	八掌溪流域	420	54	38	244	36	14	806
16	急水溪流域	575	61	15	499	49	8	1207
17	曾文溪流域	1605	305	58	1613	185	49	3815
18	鹽水溪流域	383	16	7	134	11	2	553
19	二仁溪流域	569	60	7	702	62	8	1408
20	阿公店溪流域	98	14	0	101	7	4	224
21	高屏溪流域	417	77	19	539	62	19	1133
22	東港溪流域	4	2	0	8	2	0	16
23	四重溪流域	55	6	2	41	10	2	116
24	卑南溪流域	209	28	7	249	49	7	549

表 4-23　九芎坑斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G2 類

編號	集水區	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
25	秀姑巒溪流域	263	107	42	317	94	48	871
26	花蓮溪流域	142	33	5	176	59	16	431
27	和平溪流域	15	27	39	24	35	45	185
28	北海岸沿海河系	297	43	13	239	18	14	624
29	桃園沿海河系	160	4	0	284	10	1	459
30	香山沿海河系	169	5	0	238	10	1	423
31	竹南沿海河系	225	11	2	487	9	3	737
32	清水沿海河系	5	0	0	32	2	1	40
33	彰化沿海河系	74	2	1	342	5	2	426
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	3	0	0	25	0	0	28
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	5	0	0	0	0	0	5
40	高雄沿海河系	244	23	4	197	12	1	481
41	林邊溪流域	4	1	5	9	3	0	22
42	南屏東沿海河	214	22	3	270	35	6	550
43	台東沿海河系	108	43	11	147	39	12	360
44	海岸山脈東側系	666	200	126	443	141	133	1709
45	豐濱沿海河系	280	119	40	313	93	76	921
46	太魯閣沿海河系	1	5	20	1	7	43	77
47	頭城沿海河系	57	22	3	45	20	10	157
合計		12489	2429	1106	13294	2165	1076	32559
G1/G2 總計		26101	16532	17874	26333	18363	25417	130620

表 4-24　花東縱谷斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	集水區	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
1	蘭陽河流域	482	735	606	523	819	818	3983
2	磺溪流域	18	9	3	30	10	5	75
3	林子坑溪	2	3	0	8	6	0	19
4	淡水河流域	4343	2537	1483	1817	1699	1307	13186
5	鳳山溪流域	200	64	17	136	24	5	446
6	頭前溪流域	246	364	278	161	362	313	1724
7	中港溪流域	372	210	98	149	128	97	1054
8	後龍溪流域	634	300	159	350	260	170	1873
9	大安溪流域	317	410	716	191	309	856	2799
10	大甲溪流域	384	738	1666	317	554	1599	5258
11	烏溪流域	214	365	608	444	663	1140	3434
12	濁水溪流域	980	1799	3139	1125	2094	4284	13421
13	北港溪流域	36	22	18	23	14	12	125
14	朴子溪流域	54	67	49	55	27	39	291
15	八掌溪流域	170	172	104	177	134	72	829
16	急水溪流域	104	41	26	104	31	18	324
17	曾文溪流域	747	864	465	482	486	407	3451
18	鹽水溪流域	0	0	0	0	0	0	0
19	二仁溪流域	42	17	3	45	10	1	118
20	阿公店溪流域	19	0	1	11	0	0	31
21	高屏溪流域	1213	1807	2493	1459	2020	3570	12562
22	東港溪流域	49	42	31	117	124	64	427
23	四重溪流域	160	23	7	297	68	12	567
24	卑南溪流域	311	676	634	366	1078	1922	4987

表 4-24　花東縱谷斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	集水區	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
25	秀姑巒溪流域	295	525	750	530	909	1733	4742
26	花蓮溪流域	223	478	889	304	756	1893	4553
27	和平溪流域	286	582	654	270	651	890	3333
28	北海岸沿海河系	677	169	34	395	110	34	1419
29	桃園沿海河系	4	0	0	3	0	0	7
30	香山沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
31	竹南沿海河系	46	13	0	35	8	2	104
32	清水沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
33	彰化沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	0	0	0	0	0	0	0
36	新虎尾沿海河系	-		--	-		-	
37	新港沿海河系	-	--	-	-	--	-	
38	布袋沿海河系	-	-	--	-	-	-	
39	佳里沿海河系	0	0	0	0	0	0	0
40	高雄沿海河系	1	0	0	4	0	0	5
41	林邊溪流域	68	117	141	133	260	274	993
42	南屏東沿海河	744	277	125	1072	479	192	2889
43	台東沿海河系	568	593	488	820	1077	860	4406
44	海岸山脈東側河系	60	61	130	104	80	172	607
45	豐濱沿海河系	23	3	5	32	14	9	86
46	太魯閣沿海河系	89	348	1012	97	417	1437	3400
47	頭城沿海河系	122	101	26	162	88	34	533
合計		14303	14532	16858	12348	15769	24241	98061

表 4-25　花東縱谷斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G2 類

編號	集水區	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
1	蘭陽河流域	161	90	25	169	91	36	572
2	磺溪流域	4	2	2	10	2	0	76
3	林子坑溪	2	1	0	12	3	2	20
4	淡水河流域	626	69	16	354	36	13	1114
5	鳳山溪流域	237	5	1	309	5	2	559
6	頭前溪流域	188	27	3	147	16	1	382
7	中港溪流域	712	35	8	307	24	8	1094
8	後龍溪流域	427	62	18	341	31	12	891
9	大安溪流域	330	51	24	124	29	20	578
10	大甲溪流域	308	167	267	135	87	103	1067
11	烏溪流域	1047	284	96	2335	593	205	4560
12	濁水溪流域	588	254	156	590	203	142	1933
13	北港溪流域	332	15	5	382	16	7	757
14	朴子溪流域	203	7	10	380	17	6	623
15	八掌溪流域	395	54	39	269	36	13	806
16	急水溪流域	601	69	14	473	41	9	1207
17	曾文溪流域	1684	326	60	1534	164	47	3815
18	鹽水溪流域	369	18	8	148	9	1	553
19	二仁溪流域	546	45	8	725	77	7	1408
20	阿公店溪流域	94	13	4	105	8	0	224
21	高屏溪流域	354	74	17	602	65	21	1133
22	東港溪流域	2	0	0	10	4	0	16
23	四重溪流域	28	5	1	68	11	3	116
24	卑南溪流域	217	35	7	241	42	7	549

表 4-25　花東縱谷斷層各集水區坡面單元類型之數量統計-G2 類

編號	集水區	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
25	秀姑巒溪流域	263	110	42	317	91	48	871
26	花蓮溪流域	166	59	13	152	33	8	431
27	和平溪流域	22	42	33	17	20	51	185
28	北海岸沿海河系	303	40	21	233	21	6	624
29	桃園沿海河系	174	4	1	270	10	0	459
30	香山沿海河系	144	6	1	263	9	0	423
31	竹南沿海河系	350	6	1	362	14	4	737
32	清水沿海河系	26	2	1	11	0	0	40
33	彰化沿海河系	165	4	1	251	3	2	426
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	3	0	0	25	0	0	28
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	4	0	0	1	0	0	5
40	高雄沿海河系	240	21	2	201	14	3	481
41	林邊溪流域	7	3	2	6	1	3	22
42	南屏東沿海河	201	16	3	283	41	6	550
43	台東沿海河系	98	22	12	157	60	11	360
44	海岸山脈東側系	615	200	120	494	141	139	1709
45	豐濱沿海河系	310	120	49	283	92	67	921
46	太魯閣沿海河系	1	7	19	1	5	44	77
47	頭城沿海河系	54	25	5	48	17	8	157
合計		12601	2395	1115	13145	2182	1065	32559
G1/G2 總計		26904	16927	17973	25493	17951	25306	130620

第四節　崩塌評估基礎資料庫示範

由於全台坡面單元涵蓋 43 個集水區，篇幅有限無法全部呈現，本節選取較具代表性之淡水河流域(編號 04)、烏溪流域(編號 11)、濁水溪流域(編號 12)、高屏溪流域(編號 21)、秀姑巒溪流域(編號 25)、林邊溪流域(編號 41)為範例，呈現各集水區坡地崩塌評估基礎資料庫建立成果。

淡水河流域之地質因子、地質分類分別如圖 4-4 至圖 4-5 所示，坡向因子、車籠埔斷層之坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-6 至圖 4-8 所示，坡度分級、分類分別如圖 4-9 至圖 4-10 所示，車籠埔斷層之坡面單元分類如圖 4-11 所示。對於九芎坑斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-12 至圖 4-14 所示，九芎坑斷層之坡面單元分類如圖 4-15 所示。對於花東縱谷斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-16 至圖 4-18 所示，花東縱谷斷層之坡面單元分類如圖 4-19 所示。

烏溪流域之地質因子、地質分類分別如圖 4-20 至圖 4-21 所示，坡向因子、車籠埔斷層之坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-22 至圖 4-24 所示，坡度分級、分類分別如圖 4-25 至圖 4-26 所示，車籠埔斷層之坡面單元分類如圖 4-27 所示。對於九芎坑斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-28 至圖 4-30 所示，九芎坑斷層之坡面單元分類如圖 4-31 所示。對於花東縱谷斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-32 至圖 4-34 所示，花東縱谷斷層之坡面單元分類如圖 4-35 所示。

濁水溪流域之地質因子、地質分類分別如圖 4-36 至圖 4-37 所示，坡向因子、車籠埔斷層之坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-38 至圖 4-40 所示，坡度分級、分類分別如圖 4-41 至圖 4-42 所示，車籠埔斷層之坡面單元分類如圖 4-43 所示。對於九芎坑斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-44 至圖 4-46 所示，九芎坑斷層之坡面單元分類如圖 4-47 所示。對於花東縱谷斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-48

至圖 4-50 所示，花東縱谷斷層之坡面單元分類如圖 4-51 所示。

高屏溪流域之地質因子、地質分類分別如圖 4-52 至圖 4-53 所示，坡向因子、車籠埔斷層之坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-54 至圖 4-56 所示，坡度分級、分類分別如圖 4-57 至圖 4-58 所示，車籠埔斷層之坡面單元分類如圖 4-59 所示。對於九芎坑斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-60 至圖 4-62 所示，九芎坑斷層之坡面單元分類如圖 4-63 所示。對於花東縱谷斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-64 至圖 4-66 所示，花東縱谷斷層之坡面單元分類如圖 4-67 所示。

秀姑巒溪流域之地質因子、地質分類分別如圖 4-68 至圖 4-69 所示，坡向因子、車籠埔斷層之坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-70 至圖 4-72 所示，坡度分級、分類分別如圖 4-73 至圖 4-74 所示，車籠埔斷層之坡面單元分類如圖 4-75 所示。對於九芎坑斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-76 至圖 4-78 所示，九芎坑斷層之坡面單元分類如圖 4-79 所示。對於花東縱谷斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-80 至圖 4-82 所示，花東縱谷斷層之坡面單元分類如圖 4-83 所示。

林邊溪流域之地質因子、地質分類分別如圖 4-84 至圖 4-85 所示，坡向因子、車籠埔斷層之坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-86 至圖 4-88 所示，坡度分級、分類分別如圖 4-89 至圖 4-90 所示，車籠埔斷層之坡面單元分類如圖 4-91 所示。對於九芎坑斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-92 至圖 4-94 所示，九芎坑斷層之坡面單元分類如圖 4-95 所示。對於花東縱谷斷層，斷層之方位、坡向夾角、坡向敏感因子分別如圖 4-96 至圖 4-98 所示，花東縱谷斷層之坡面單元分類如圖 4-99 所示。

一、淡水河流域

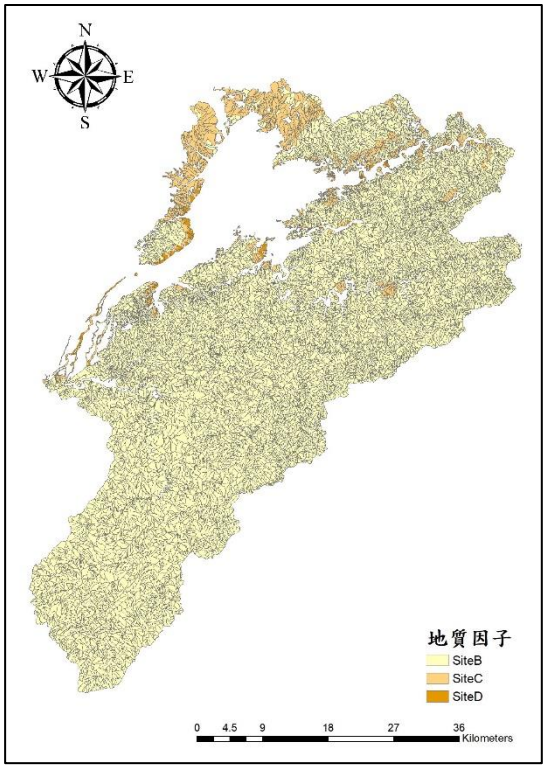


圖 4-4　淡水河流域地質因子

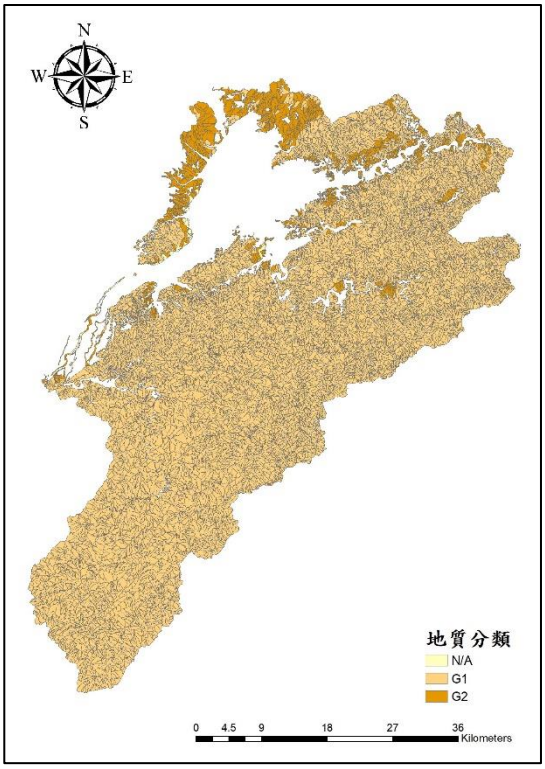


圖 4-5　淡水河流域地質分類

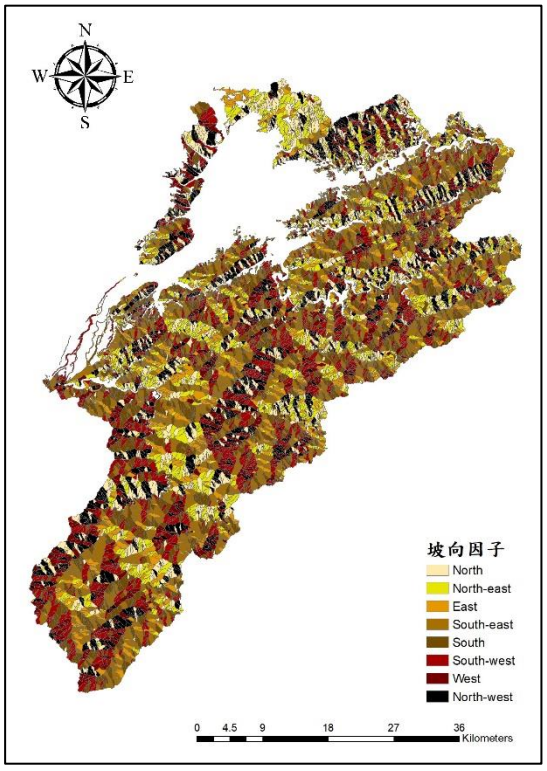


圖 4-6　淡水河流域坡向因子

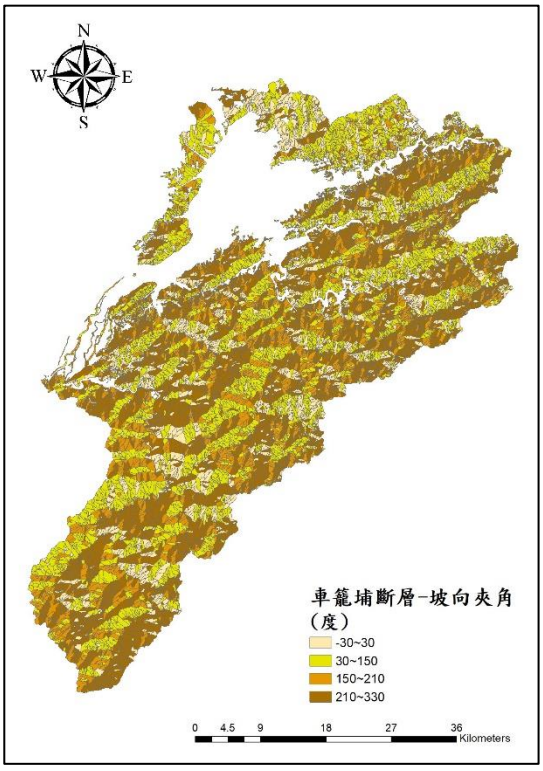


圖 4-7　淡水河流域之車籠埔斷層坡向夾角

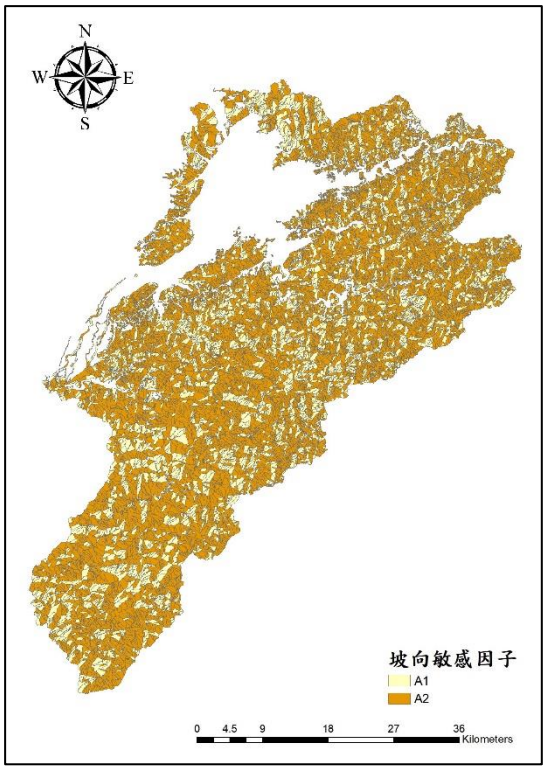


圖 4-8　淡水河流域之車籠埔斷層坡向敏感因子

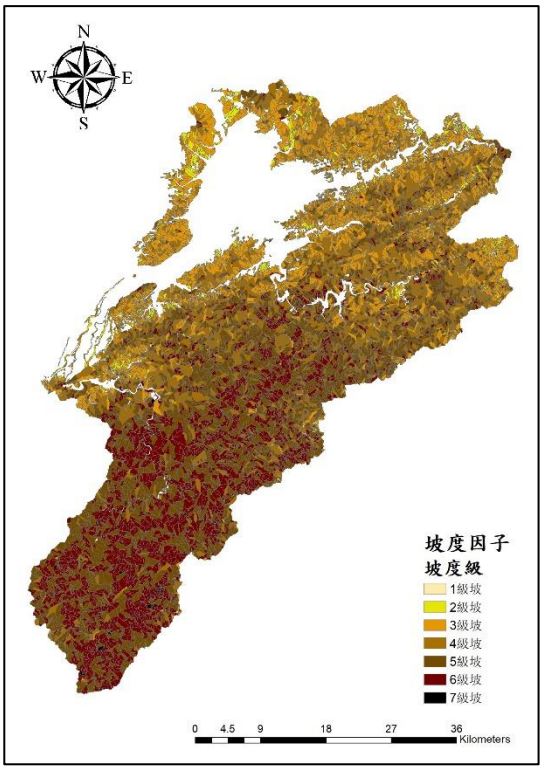


圖 4-9　淡水河流域坡度分級

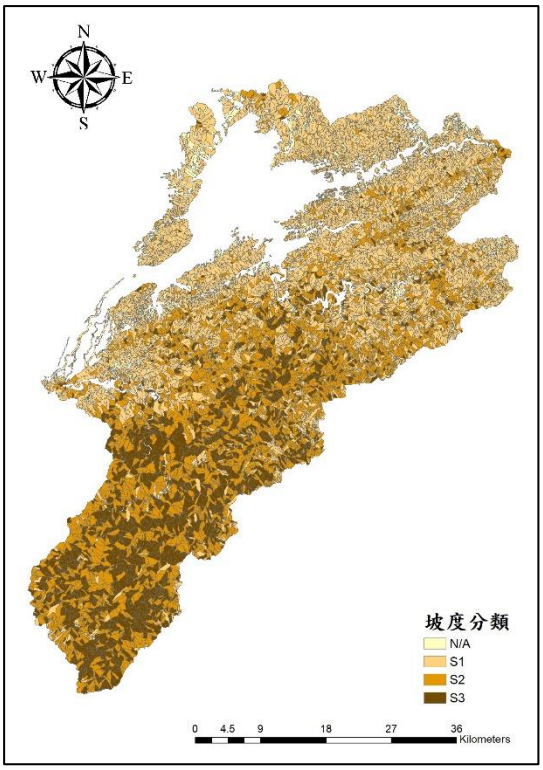


圖 4-10　淡水河流域坡度分類

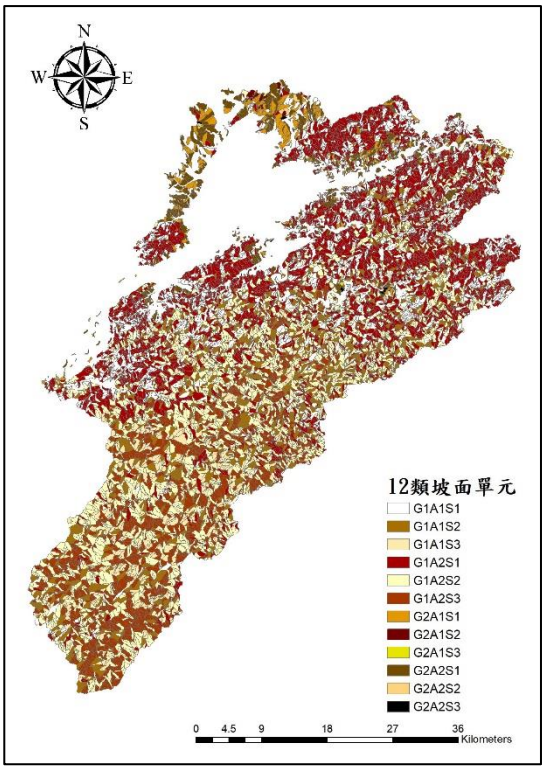


圖 4-11　淡水河流域之車籠埔斷層坡面單元分類

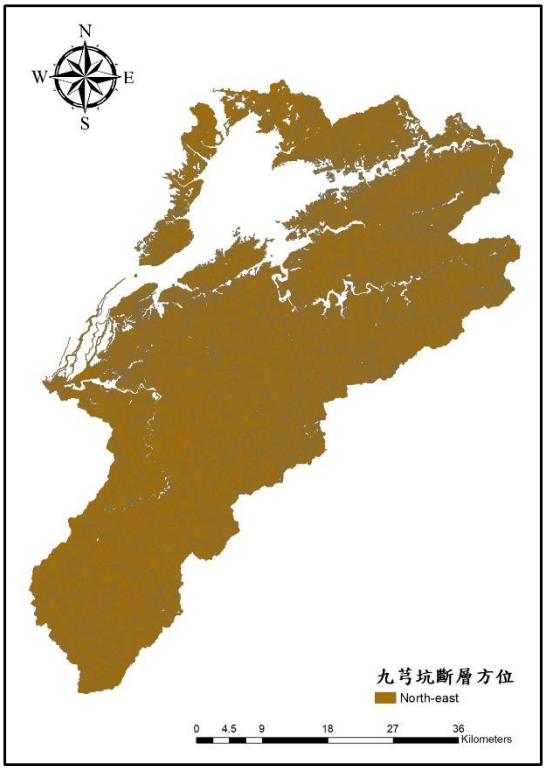


圖 4-12　淡水河流域之九芎坑斷層方位

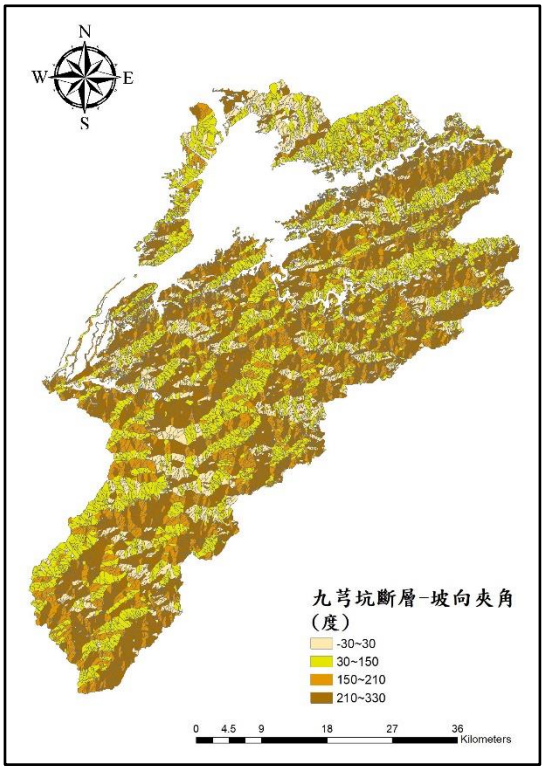


圖 4-13　淡水河流域之九芎坑斷層坡向夾角

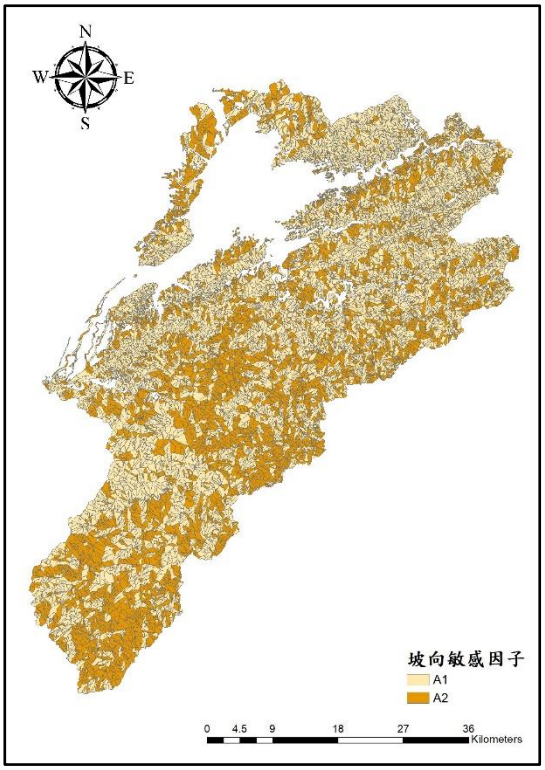


圖 4-14　淡水河流域之九芎坑斷層坡向敏感因子

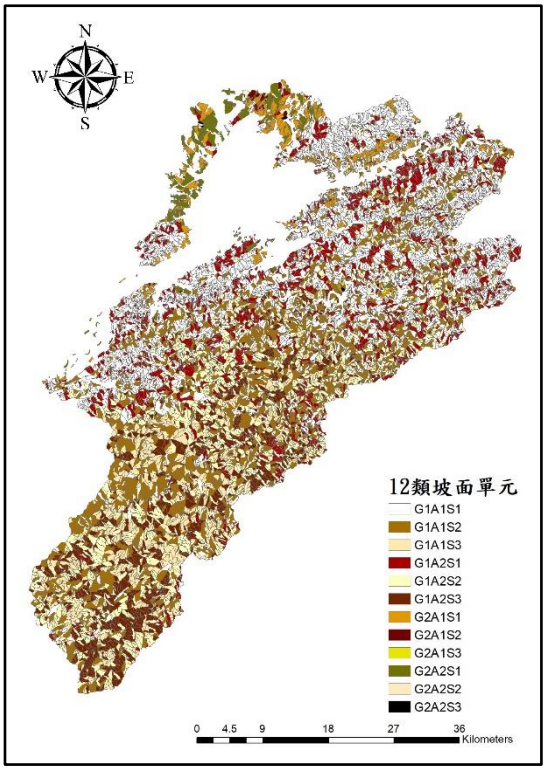


圖 4-15　淡水河流域之九芎坑斷層坡面單元分類

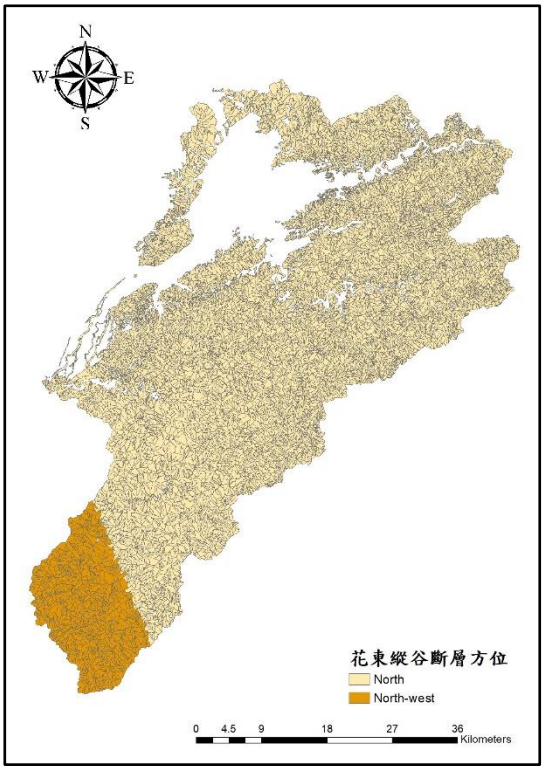


圖 4-16　淡水河流域之花東縱谷斷層方位

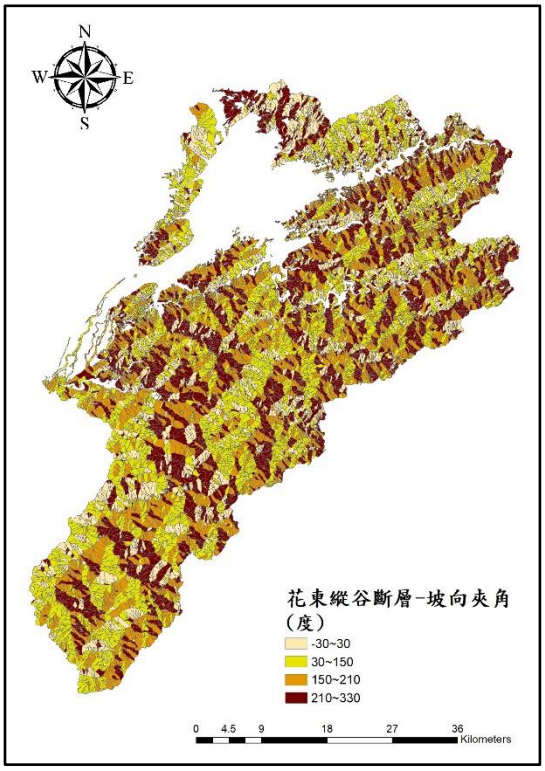


圖 4-17　淡水河流域之花東縱谷斷層坡向夾角

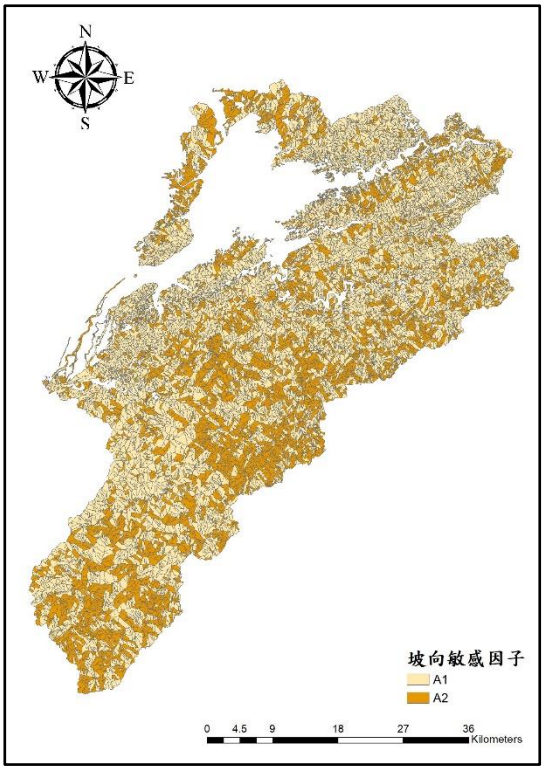


圖 4-18　淡水河流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子

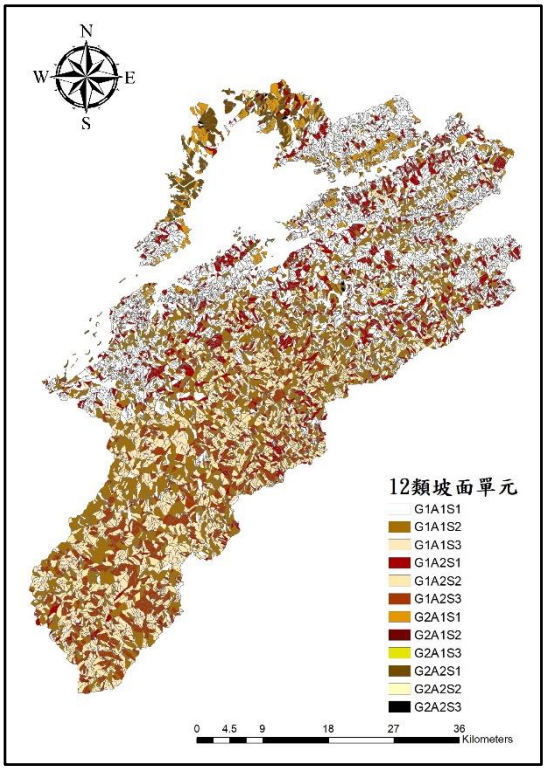


圖 4-19　淡水河流域之花東縱谷斷層坡面單元分類

二、烏溪流域

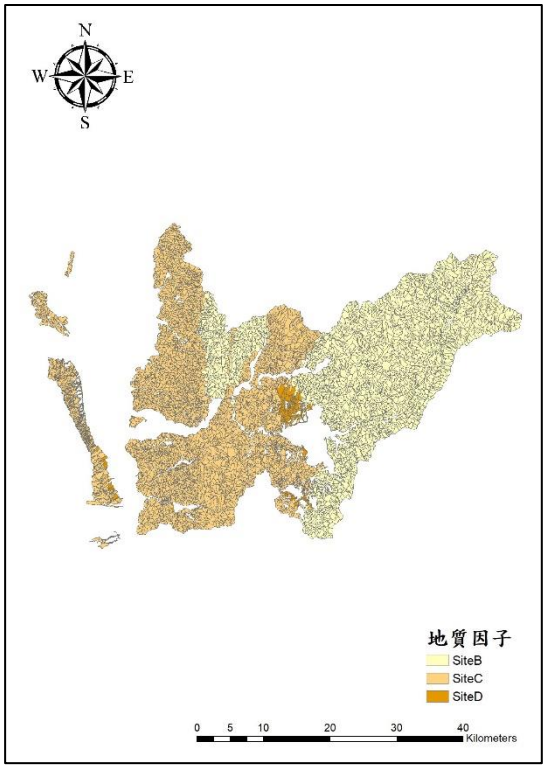


圖 4-20　烏溪流域地質因子

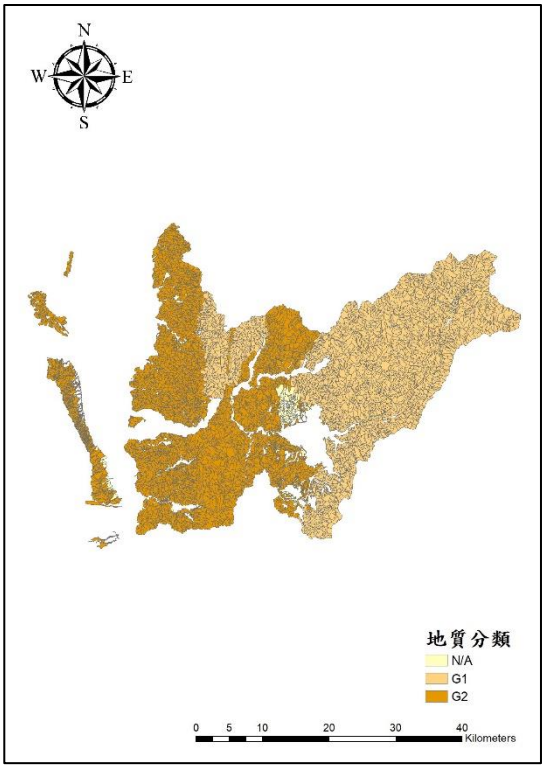


圖 4-21　烏溪流域地質分類

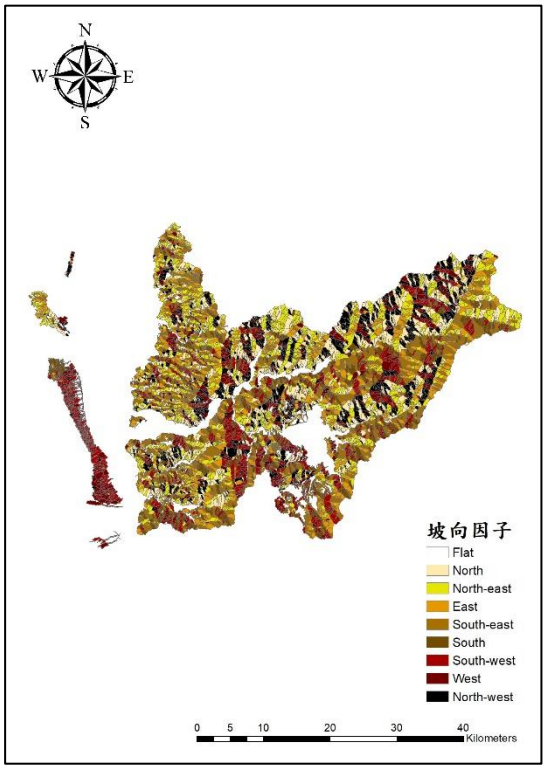


圖 4-22　烏溪流域坡向因子

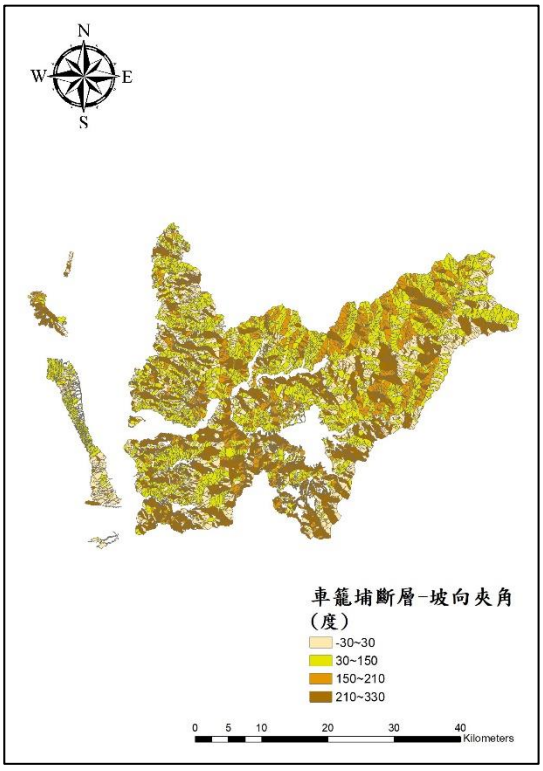


圖 4-23　烏溪流域之車籠埔斷層坡向夾角

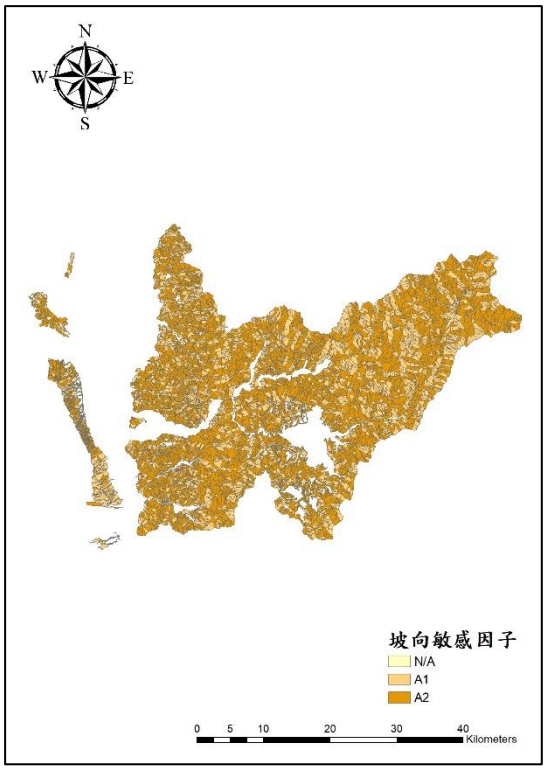


圖 4-24　烏溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子

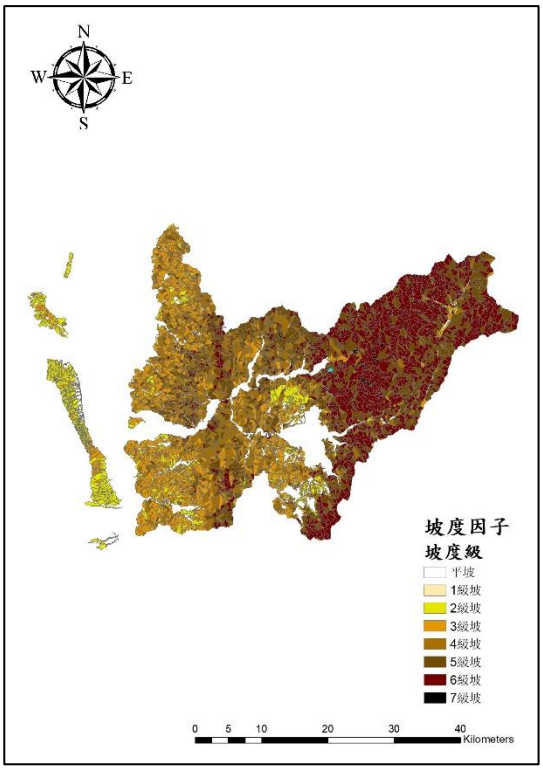


圖 4-25　烏溪流域坡度分級

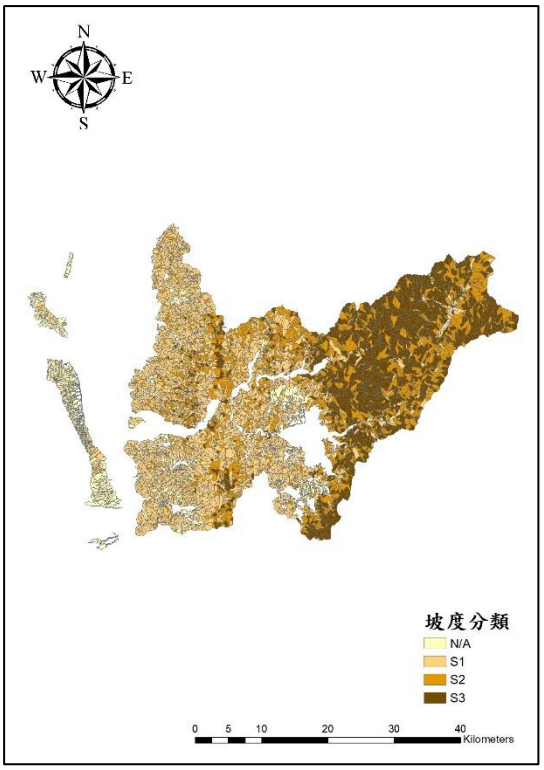


圖 4-26　烏溪流域坡度分類

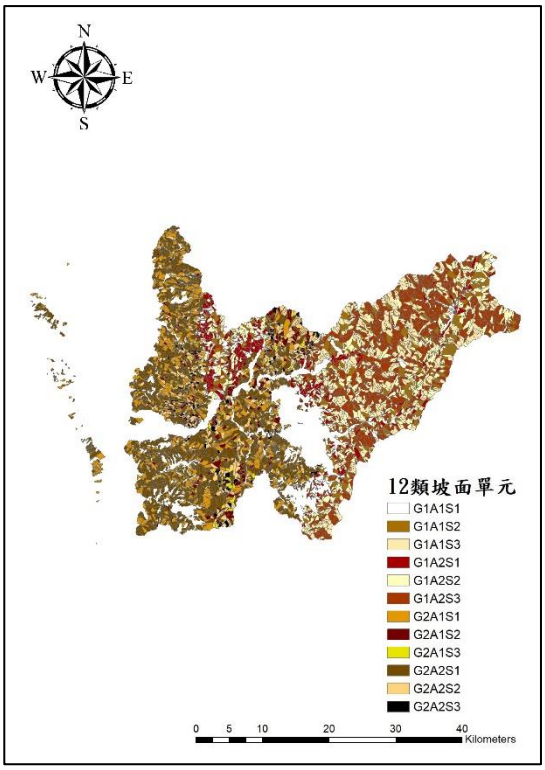


圖 4-27　烏溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類

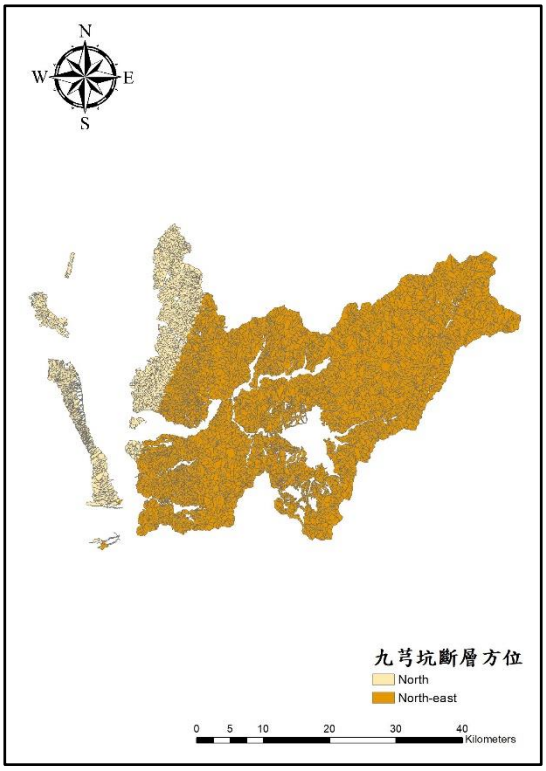


圖 4-28　烏溪流域之九芎坑斷層方位

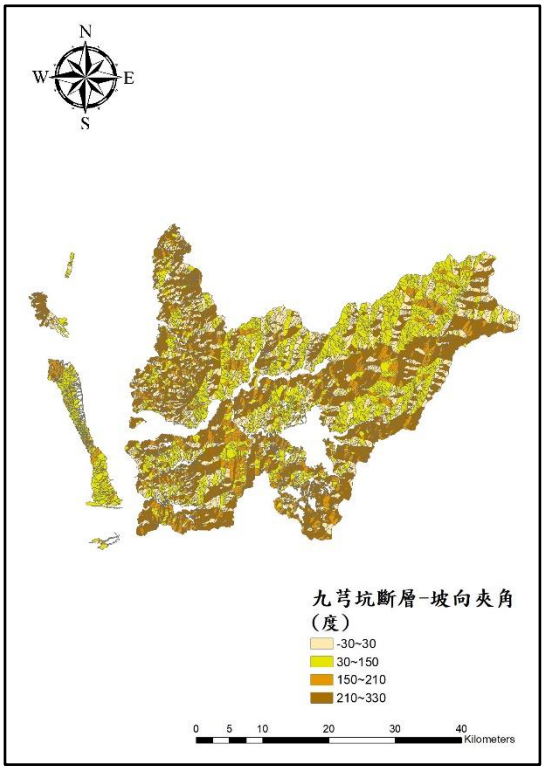


圖 4-29　烏溪流域之九芎坑斷層坡向夾角

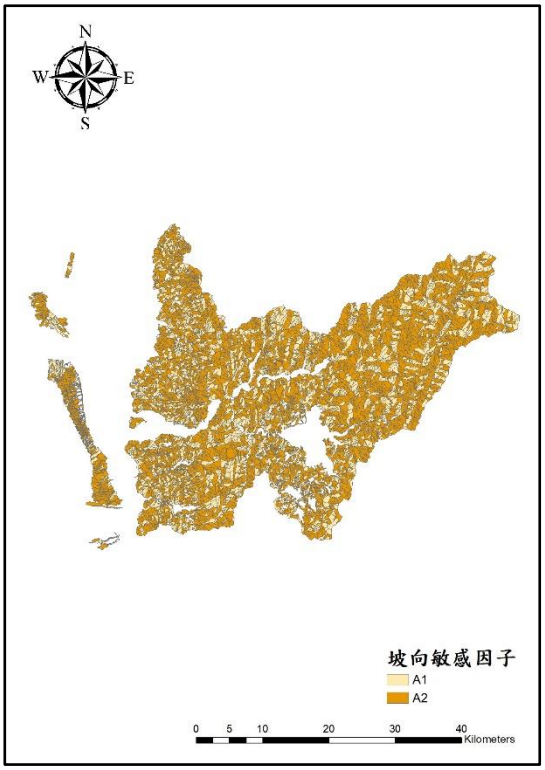


圖 4-30　烏溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子

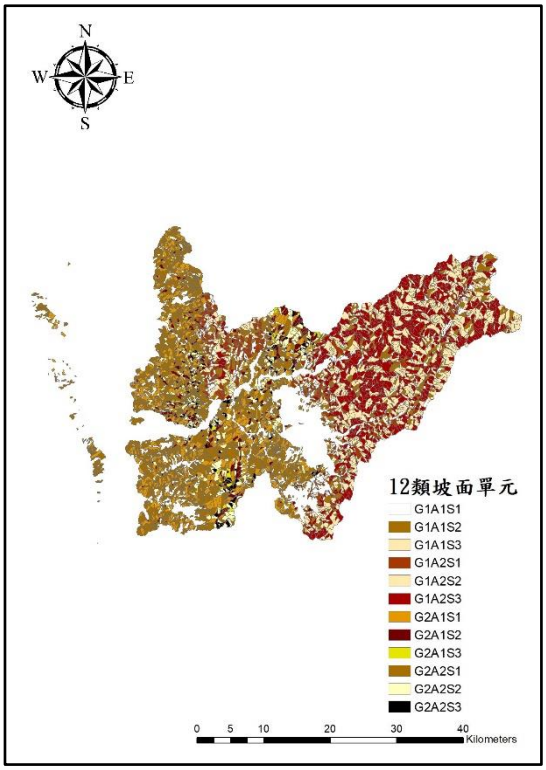


圖 4-31　烏溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類

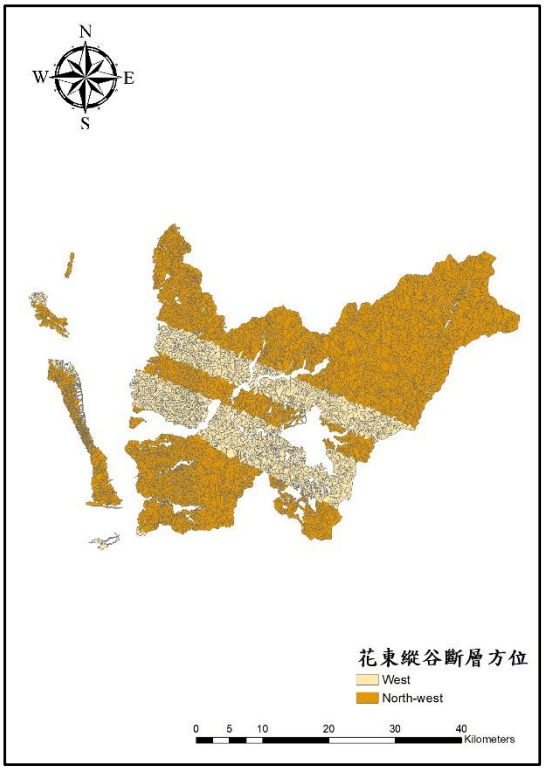


圖 4-32　烏溪流域之花東縱谷斷層方位

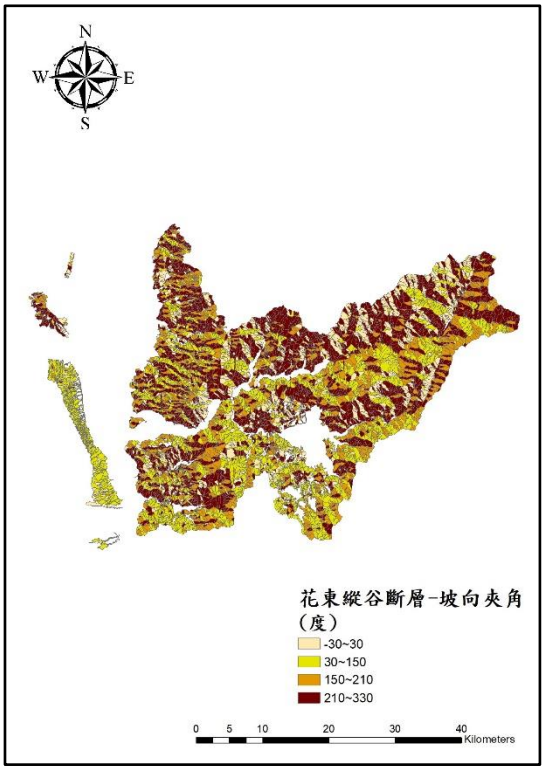


圖 4-33　烏溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角

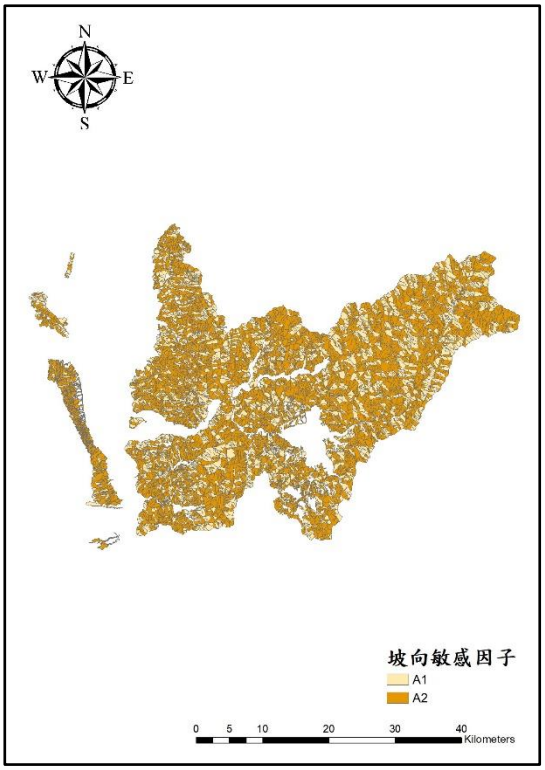


圖 4-34　烏溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子

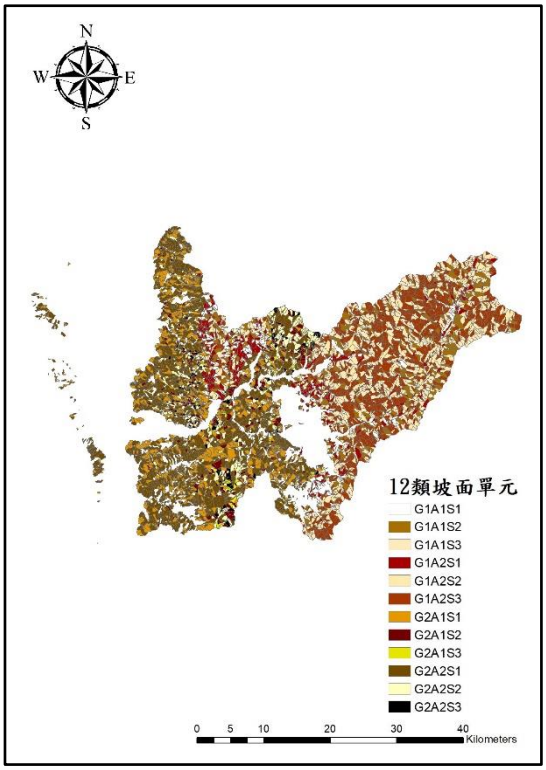


圖 4-35　烏溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類

三、濁水溪流域

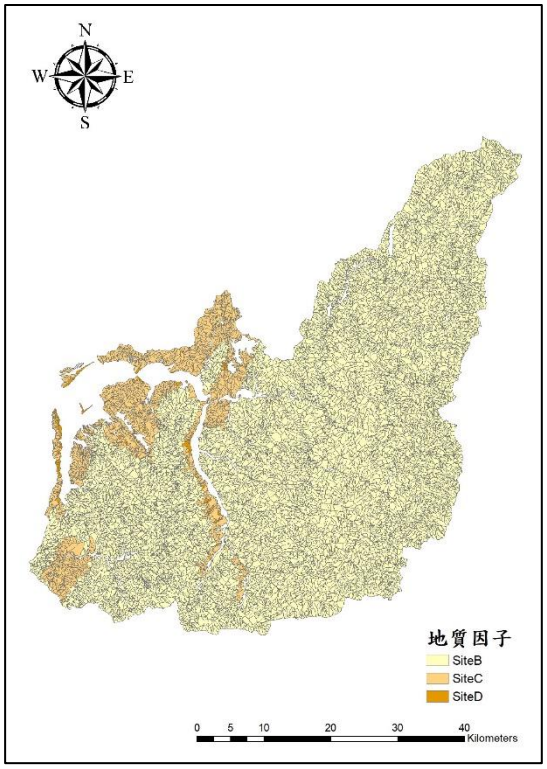


圖 4-36　濁水溪流域地質因子

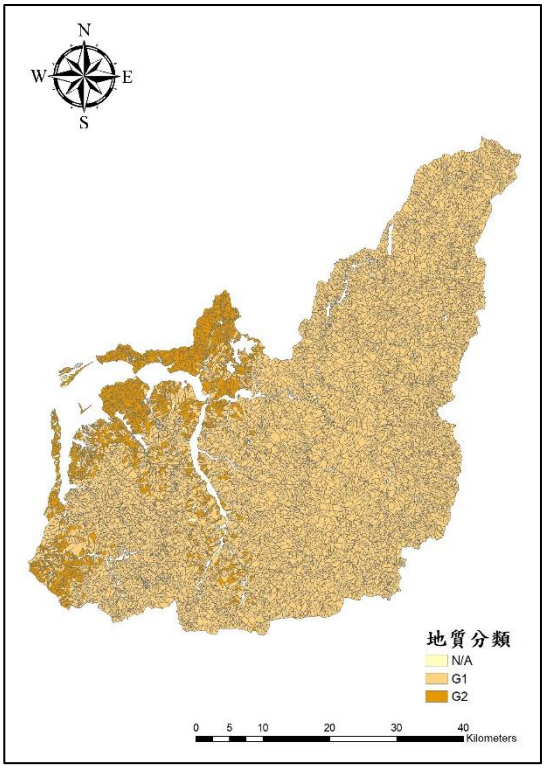


圖 4-37　濁水溪流域地質分類

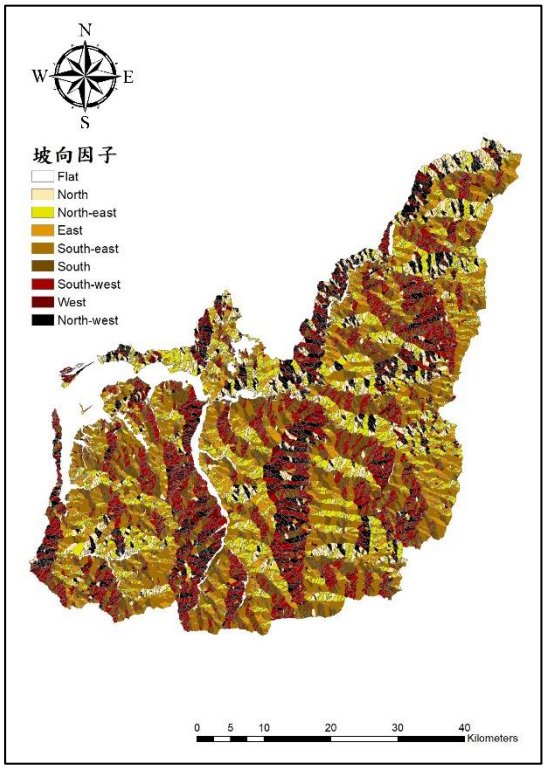


圖 4-38　濁水溪流域坡向因子

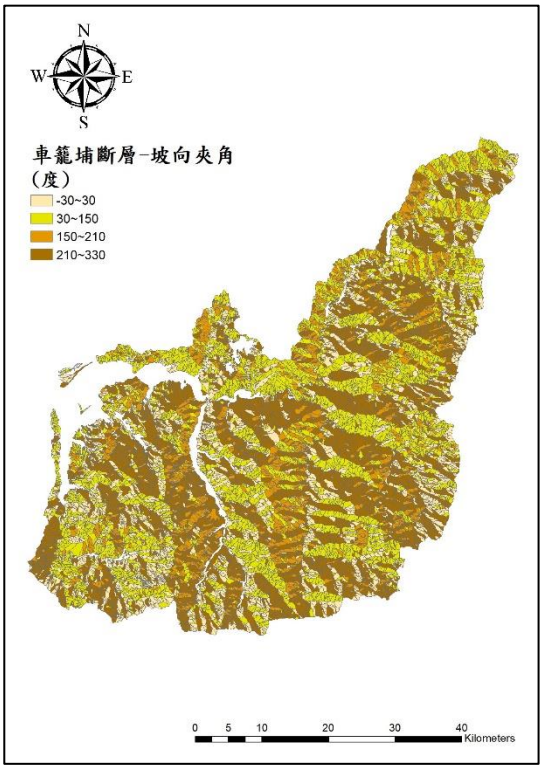


圖 4-39　濁水溪流域之車籠埔斷層坡向夾角

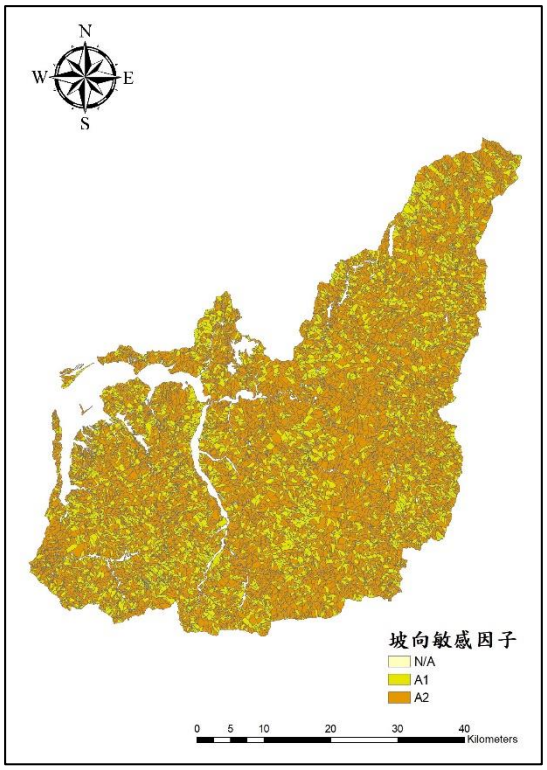


圖 4-40　濁水溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子

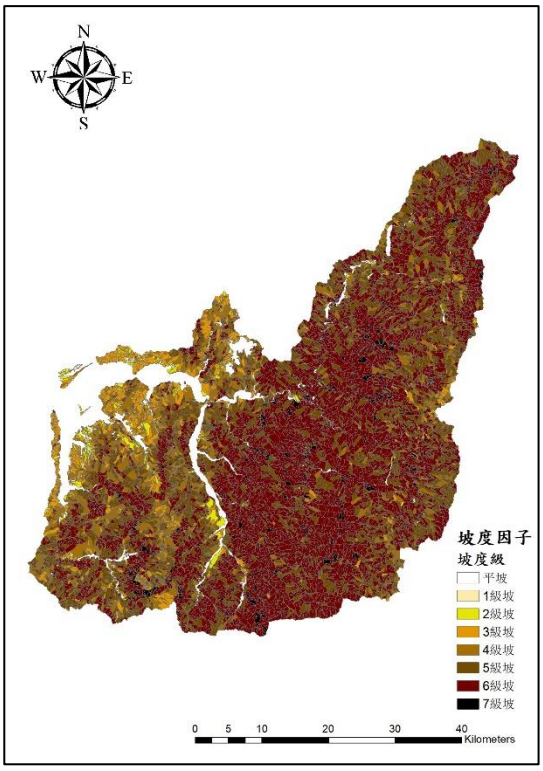


圖 4-41　濁水溪流域坡度分級

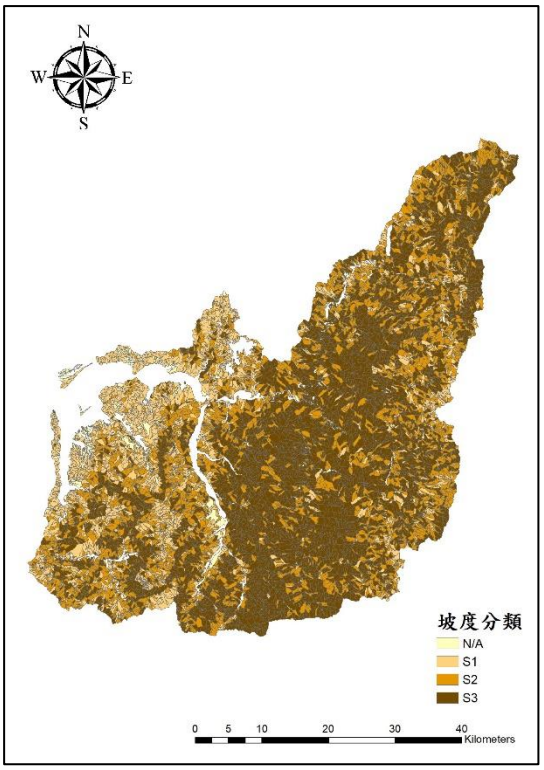


圖 4-42　濁水溪流域坡度分類

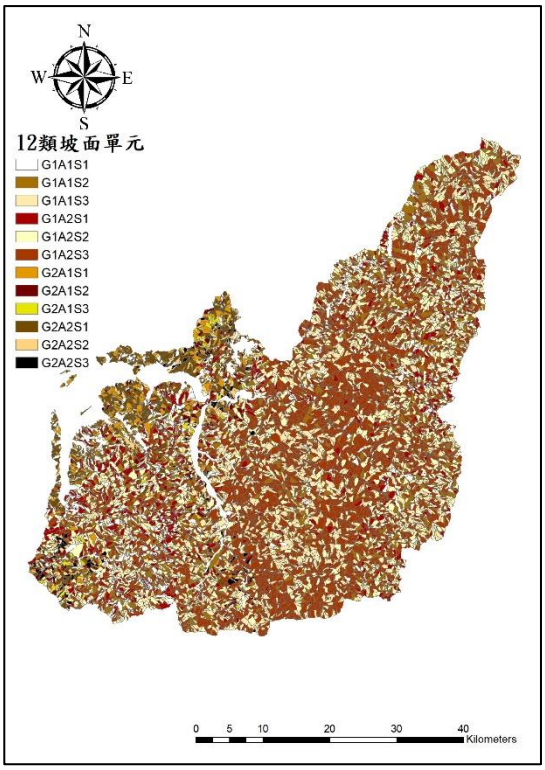


圖 4-43　濁水溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類

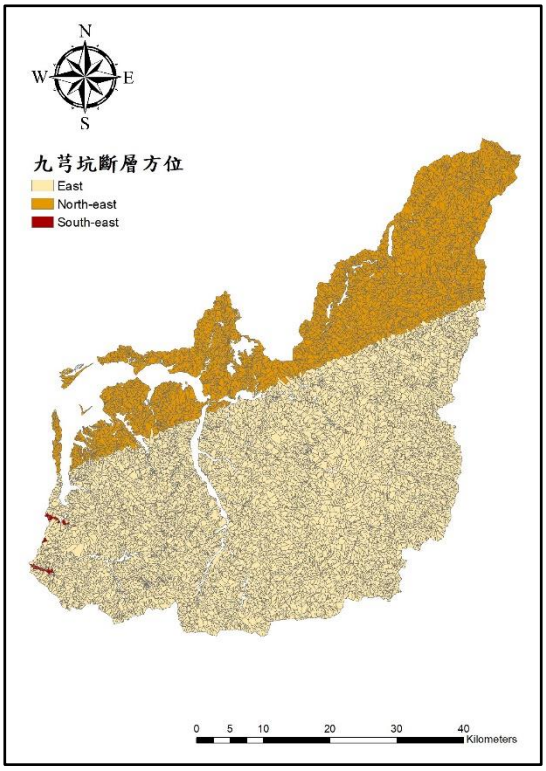


圖 4-44　濁水溪流域之九芎坑斷層方位

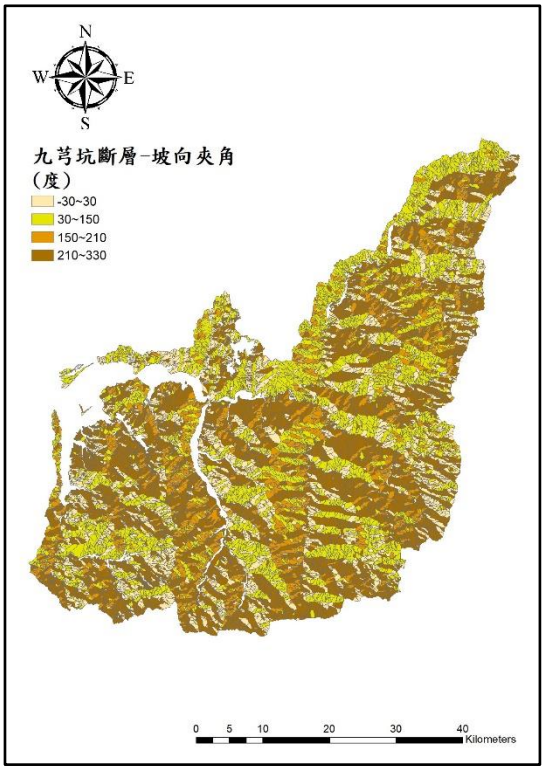


圖 4-45　濁水溪流域之九芎坑斷層坡向夾角

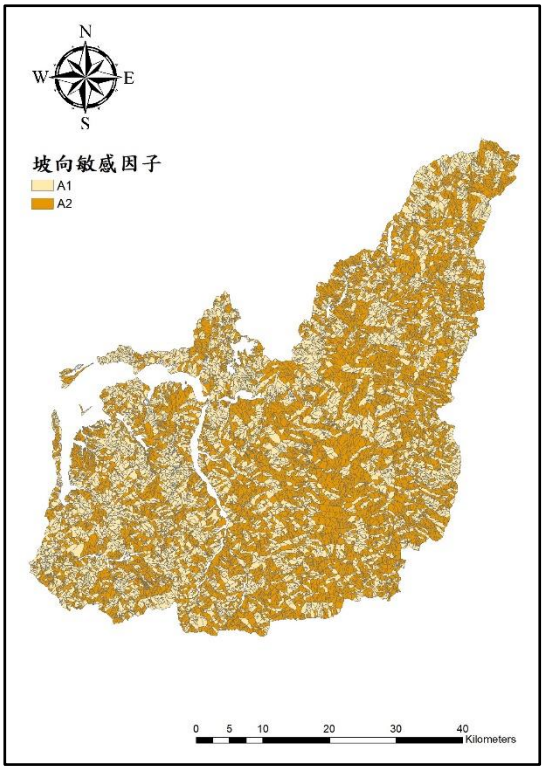


圖 4-46　濁水溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子

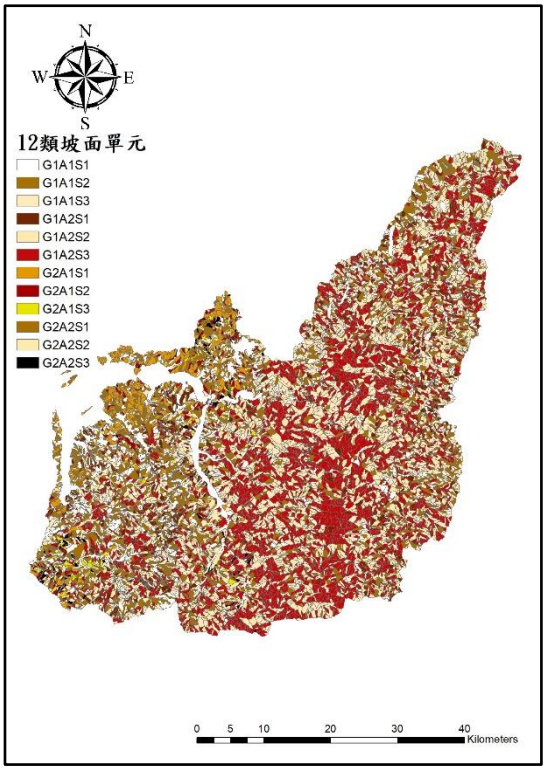


圖 4-47　濁水溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類

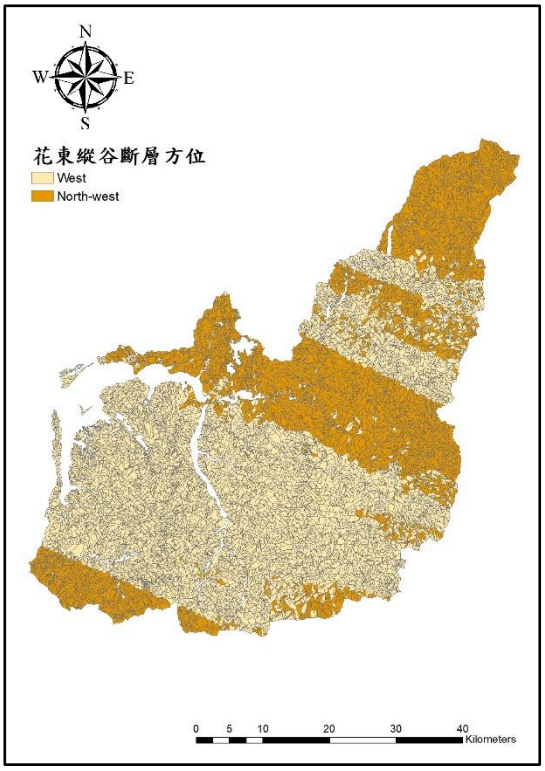


圖 4-48　濁水溪流域之花東縱谷斷層方位

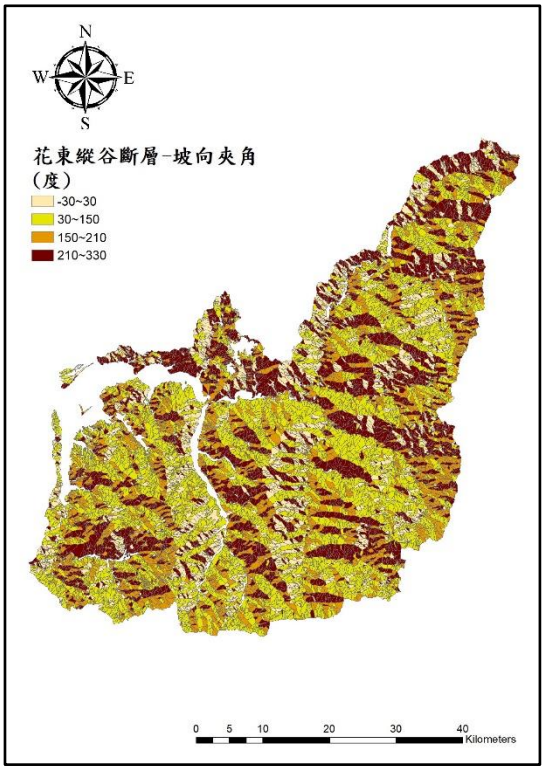


圖 4-49　濁水溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角

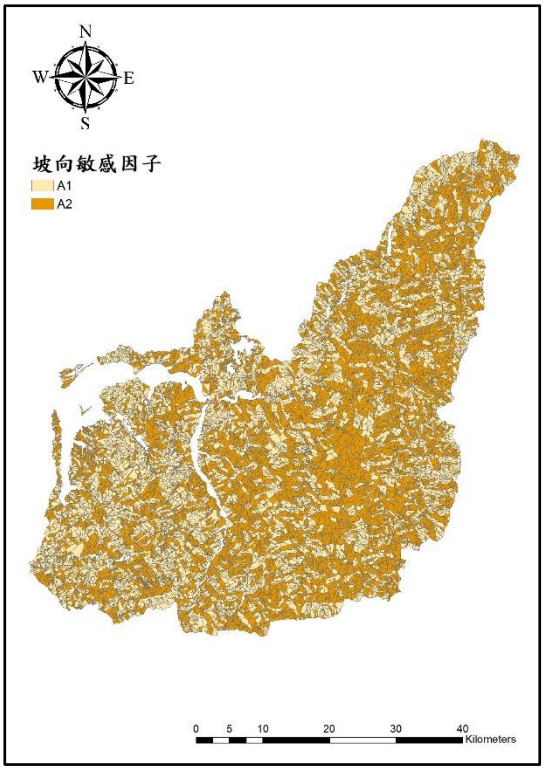


圖 4-50　濁水溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子

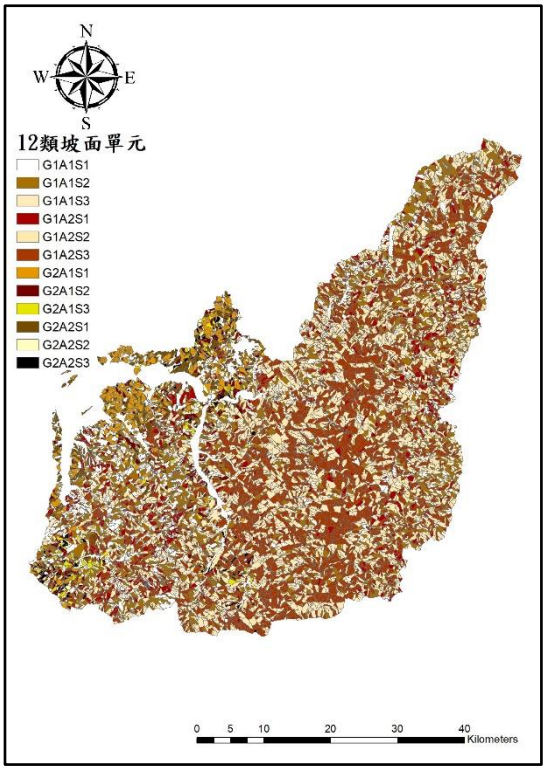


圖 4-51　濁水溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類

四、高屏溪流域

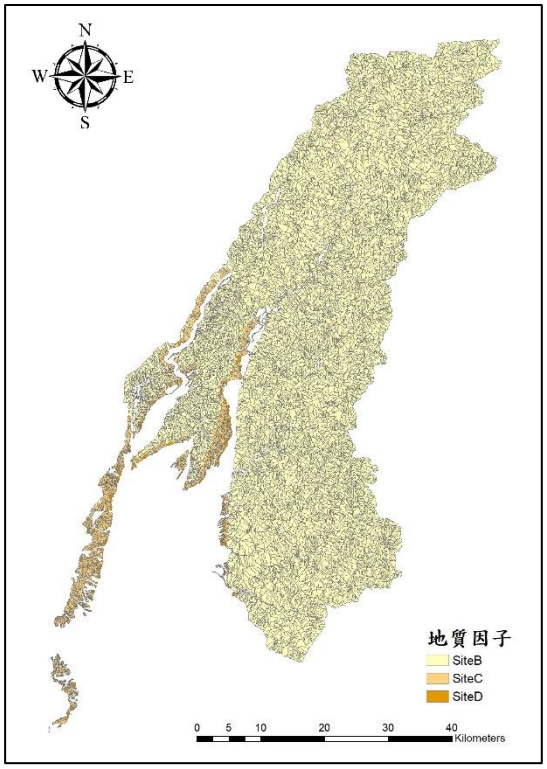


圖 4-52　高屏溪流域地質因子

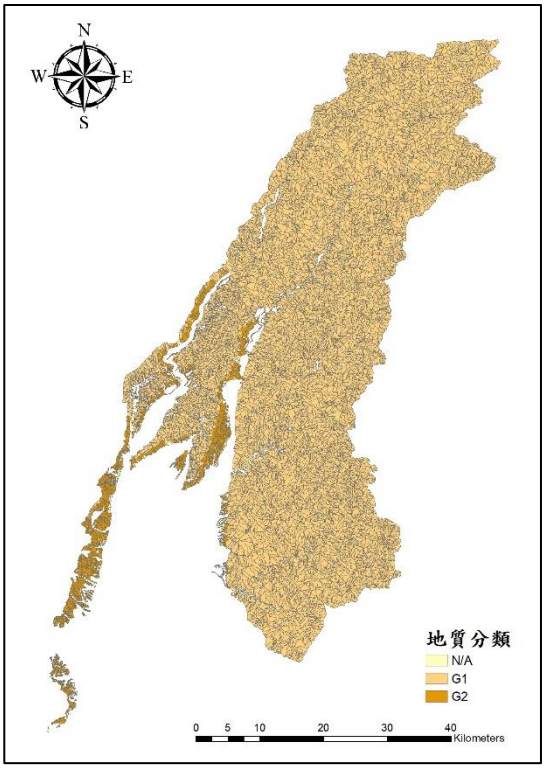


圖 4-53　高屏溪流域地質分類

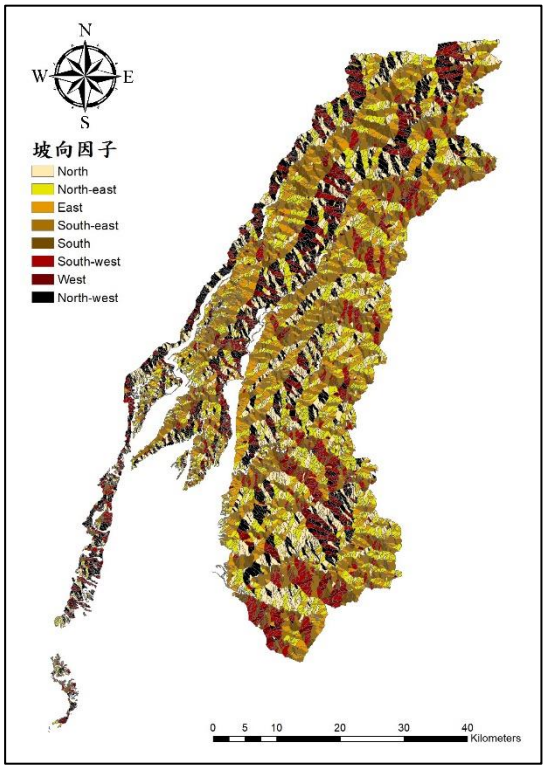


圖 4-54　高屏溪流域坡向因子

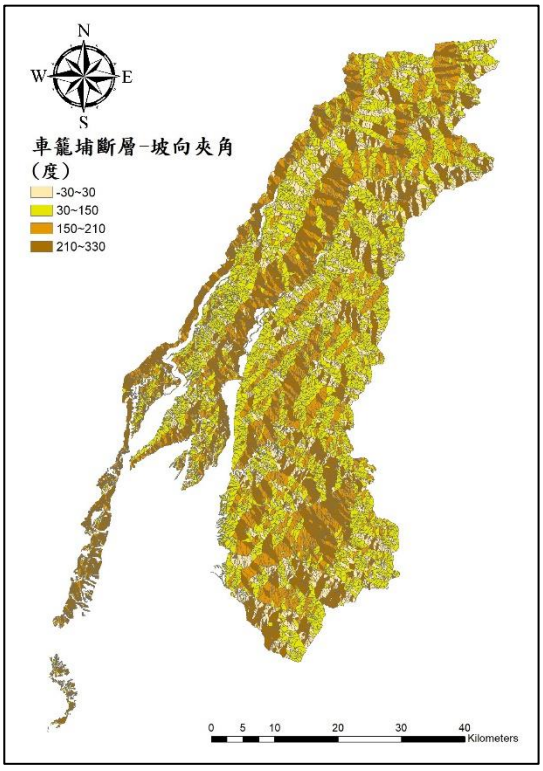


圖 4-55　高屏溪流域之車籠埔斷層坡向夾角

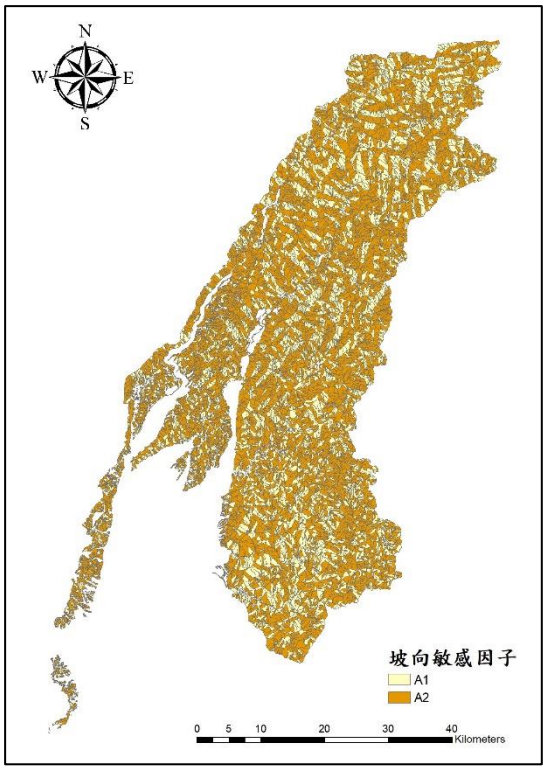


圖 4-56　高屏溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子

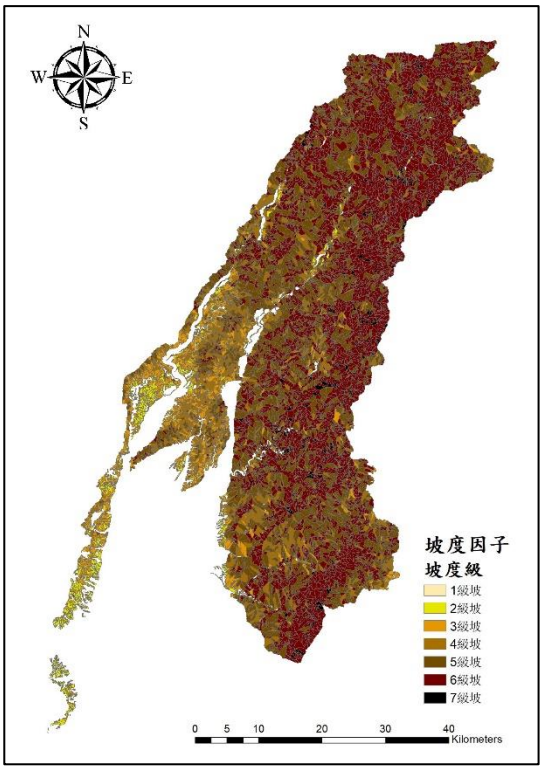


圖 4-57　高屏溪流域坡度分級

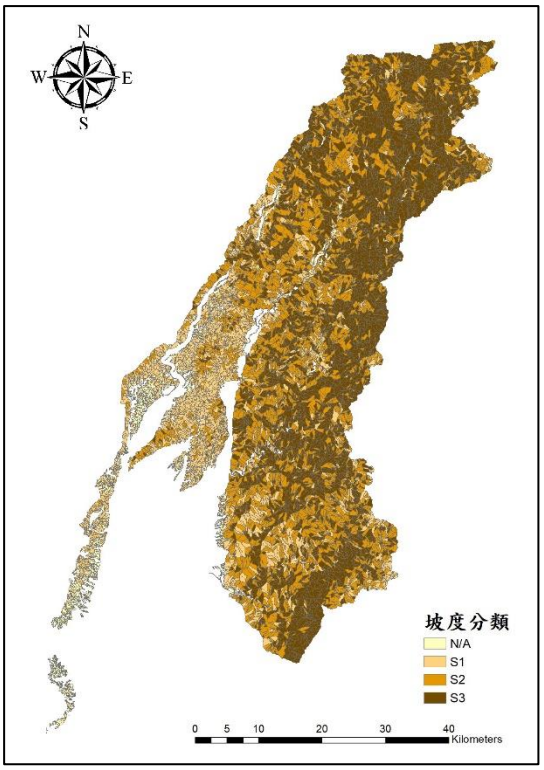


圖 4-58　高屏溪流域坡度分類

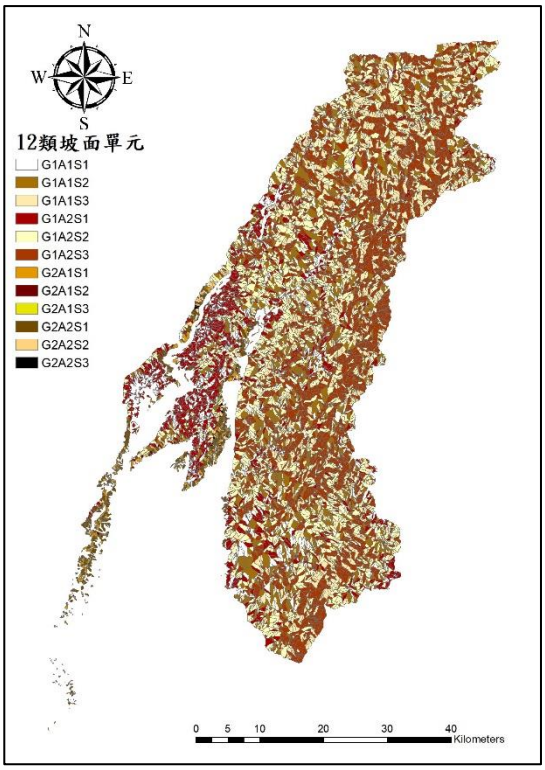


圖 4-59　高屏溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類

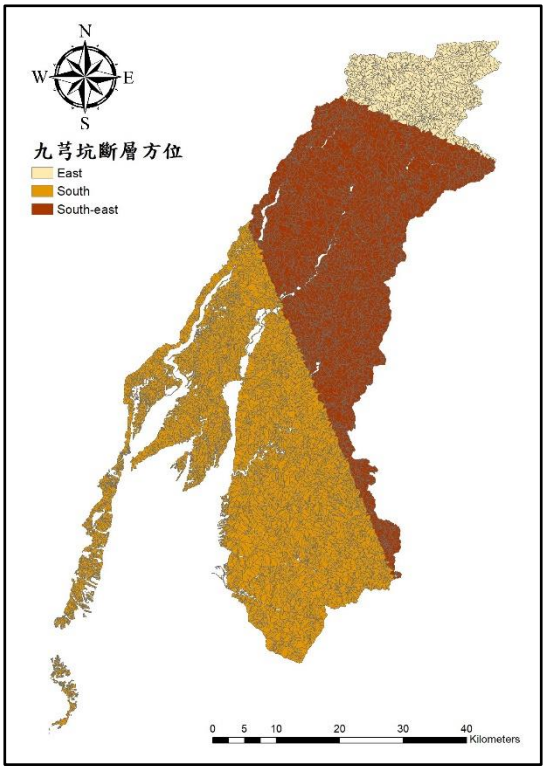


圖 4-60　高屏溪流域之九芎坑斷層方位

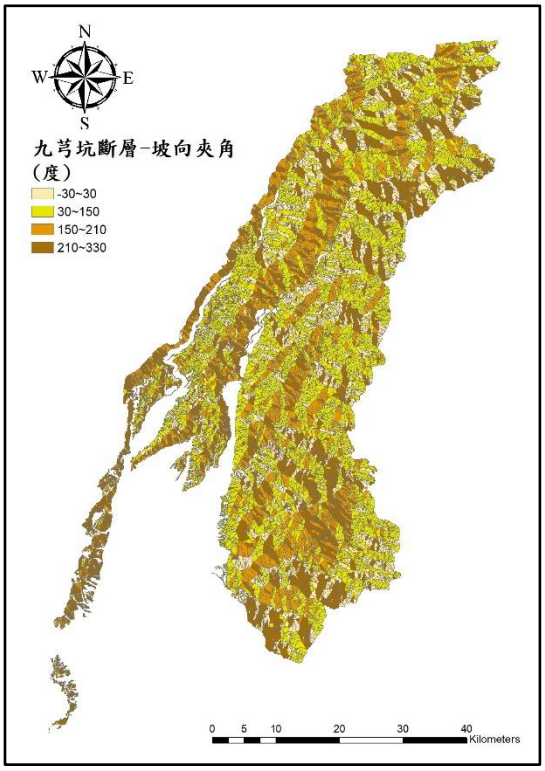


圖 4-61　高屏溪流域之九芎坑斷層坡向夾角

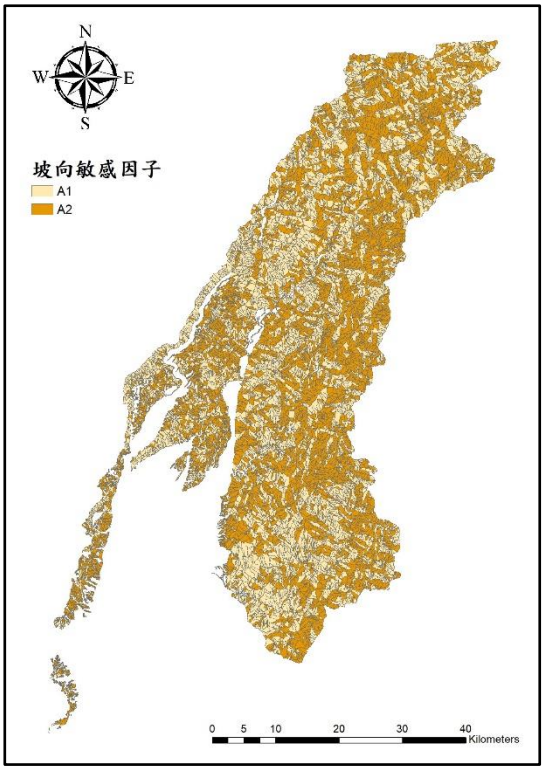


圖 4-62　高屏溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子

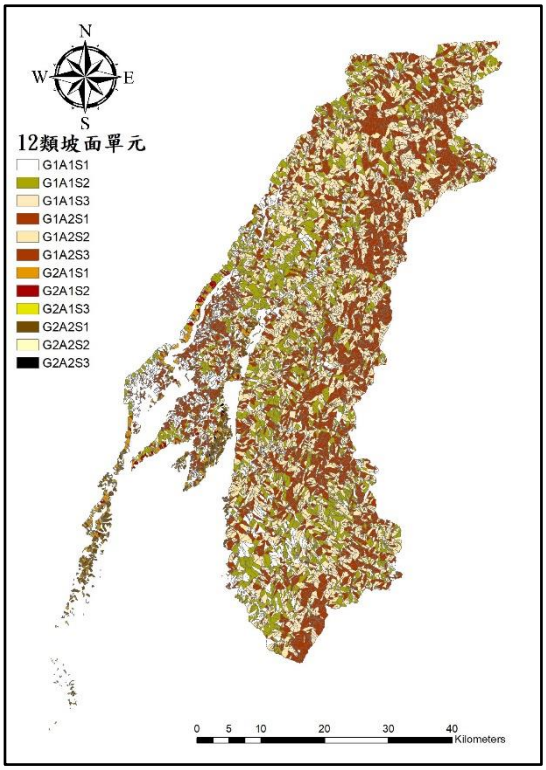


圖 4-63　高屏溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類

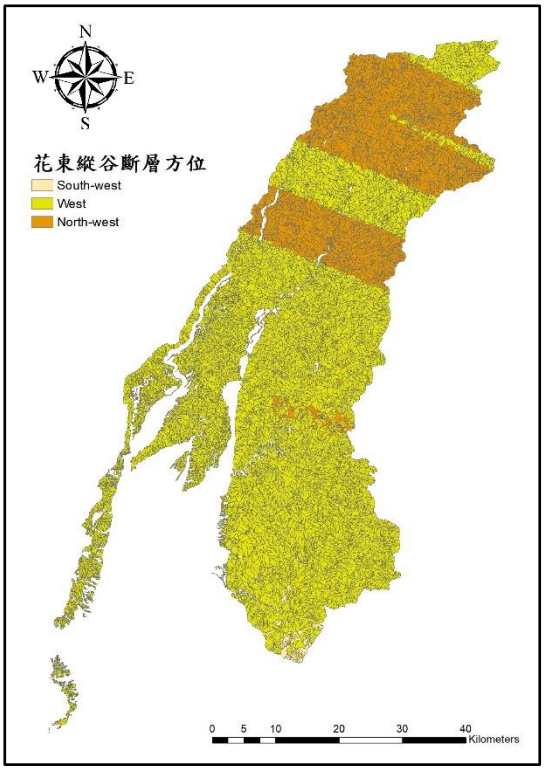


圖 4-64　高屏溪流域之花東縱谷斷層方位

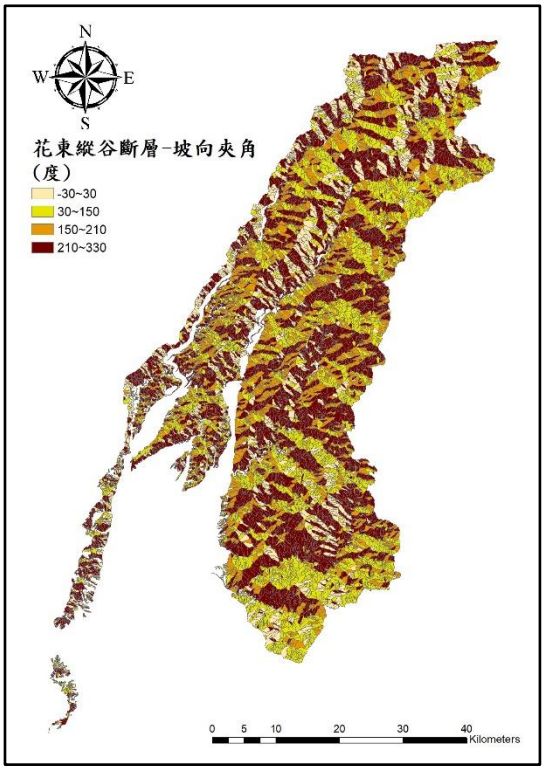


圖 4-65　高屏溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角

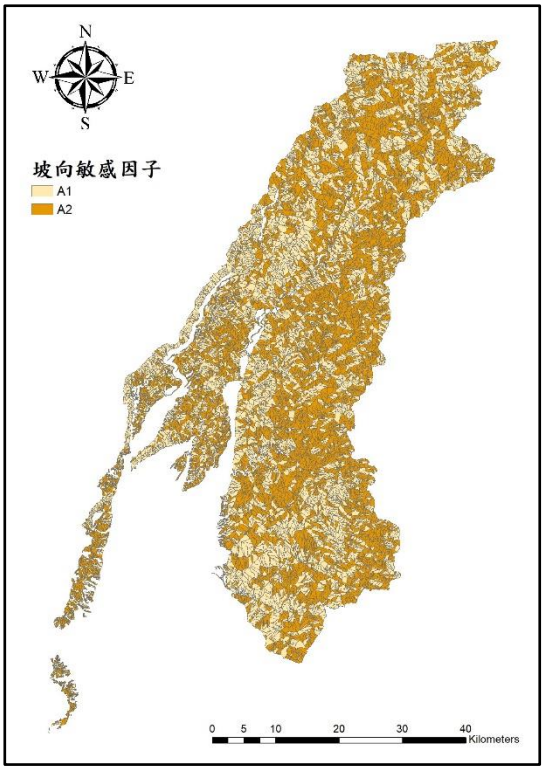


圖 4-66　高屏溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子

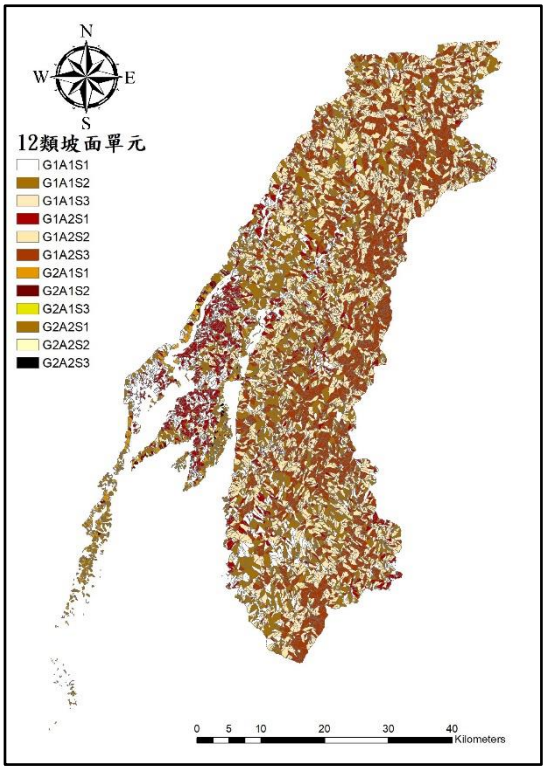


圖 4-67　高屏溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類

五、秀姑巒溪流域

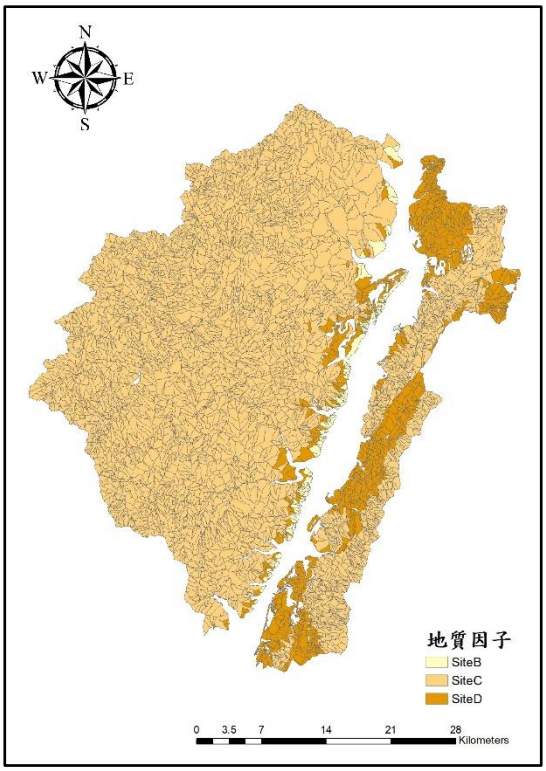


圖 4-68　秀姑巒溪流域地質因子

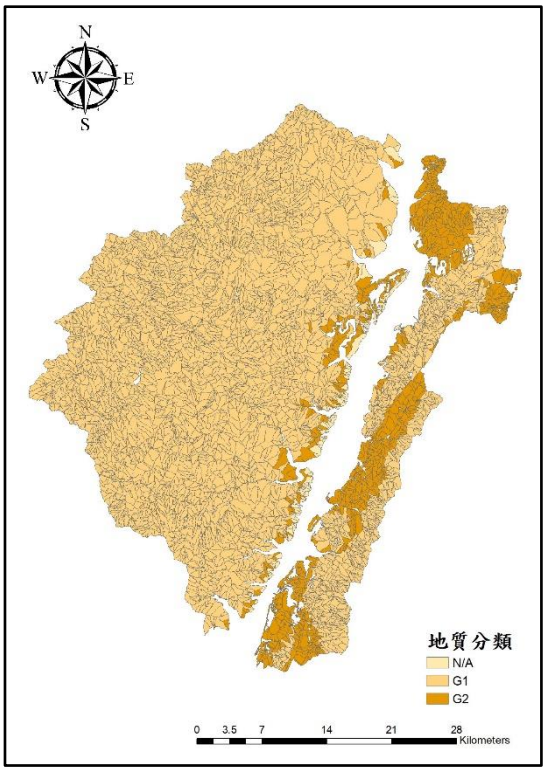


圖 4-69　秀姑巒溪流域地質分類

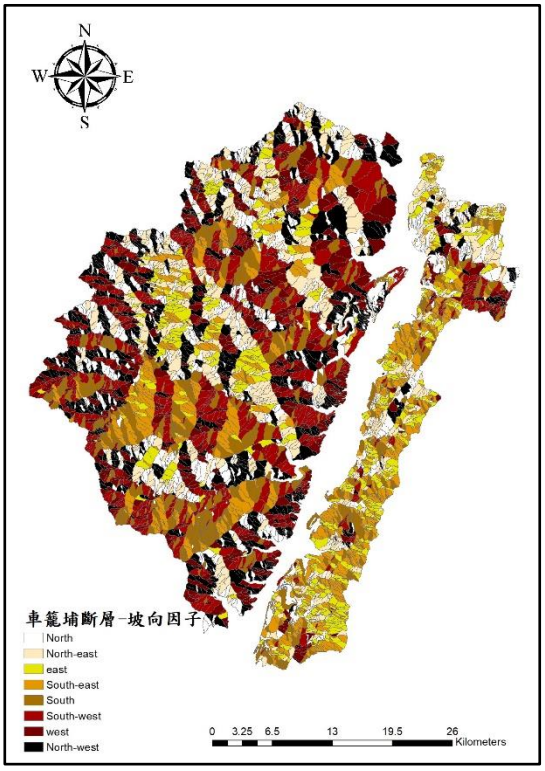


圖 4-70　秀姑巒溪流域坡向因子

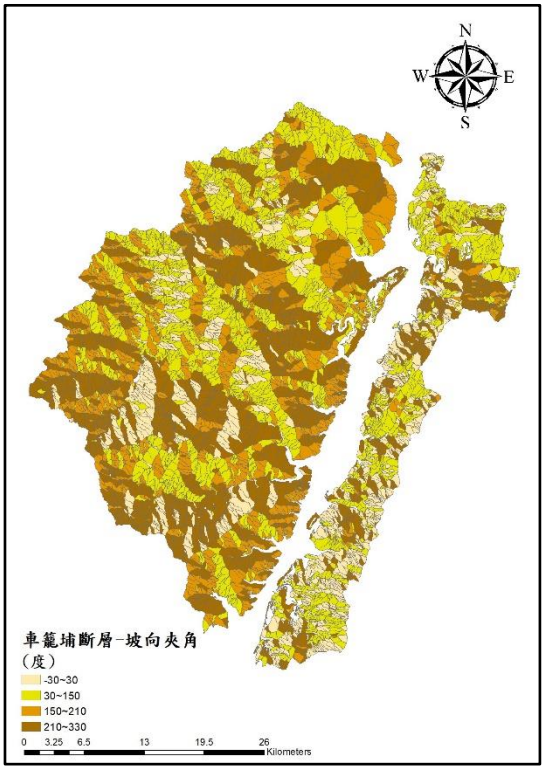


圖 4-71　秀姑巒溪流域之車籠埔斷層坡向夾角

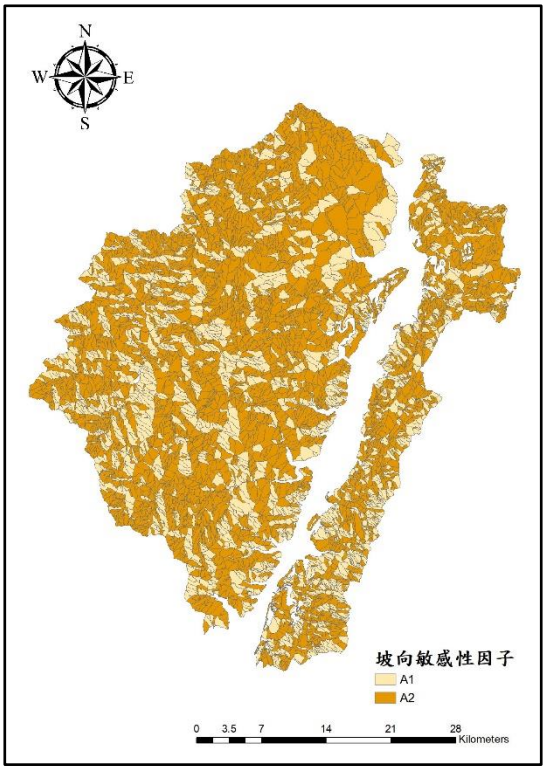


圖 4-72　秀姑巒溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子

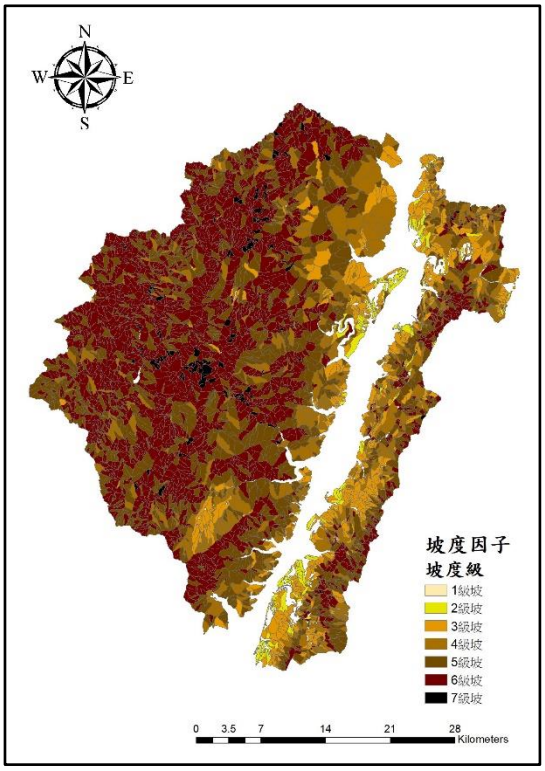


圖 4-73　秀姑巒溪流域坡度分級

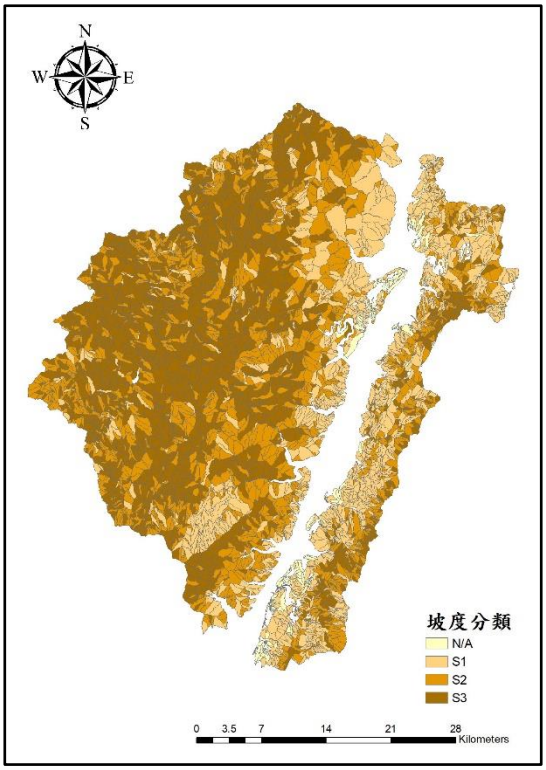


圖 4-74　秀姑巒溪流域坡度分類

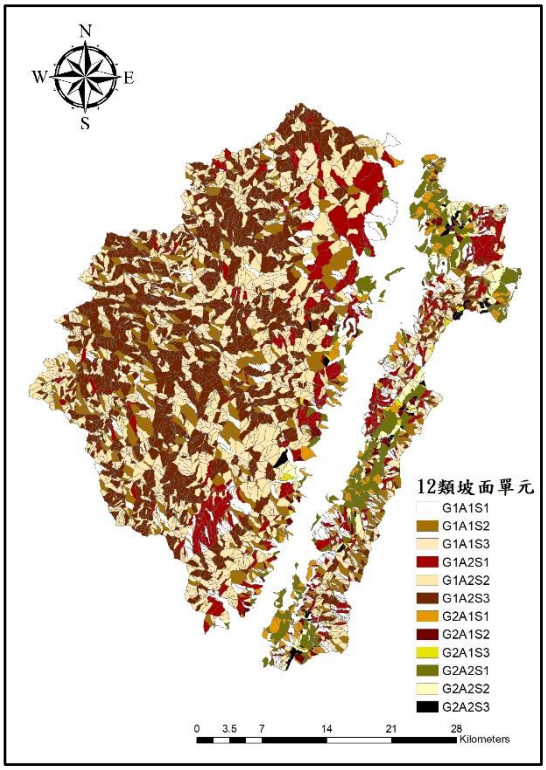


圖 4-75　秀姑巒溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類

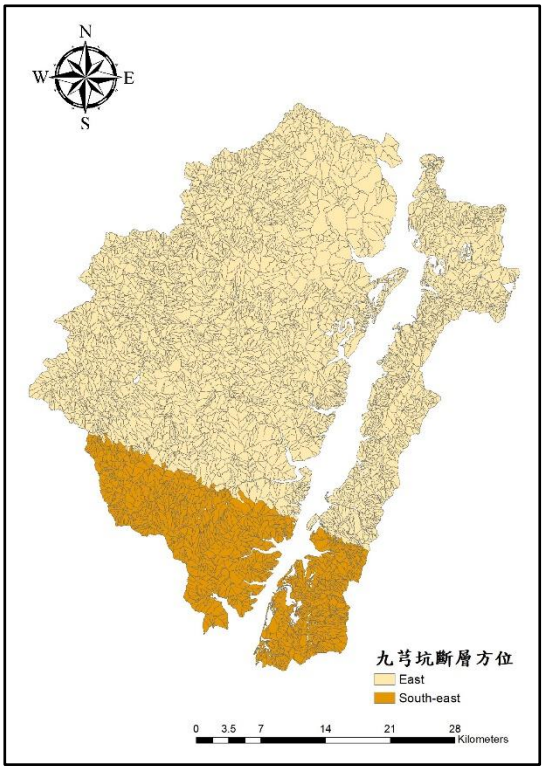


圖 4-76　秀姑巒溪流域之九芎坑斷層方位

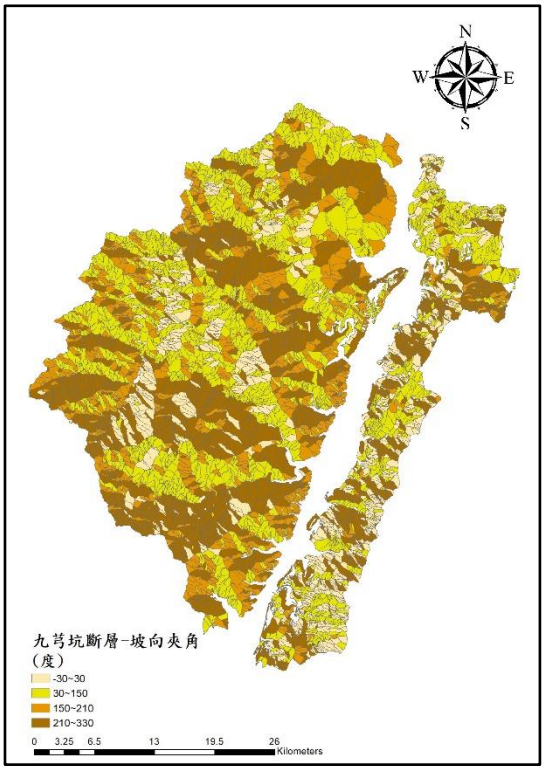


圖 4-77　秀姑巒溪流域之九芎坑斷層坡向夾角

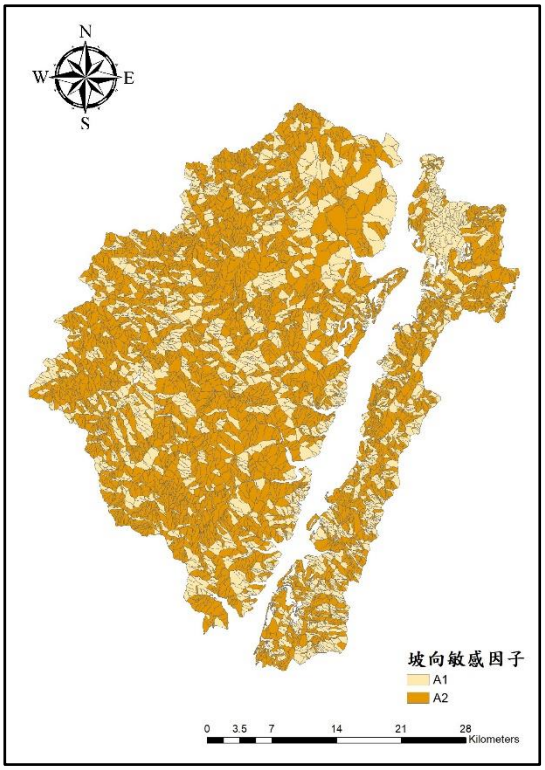


圖 4-78　秀姑巒溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子

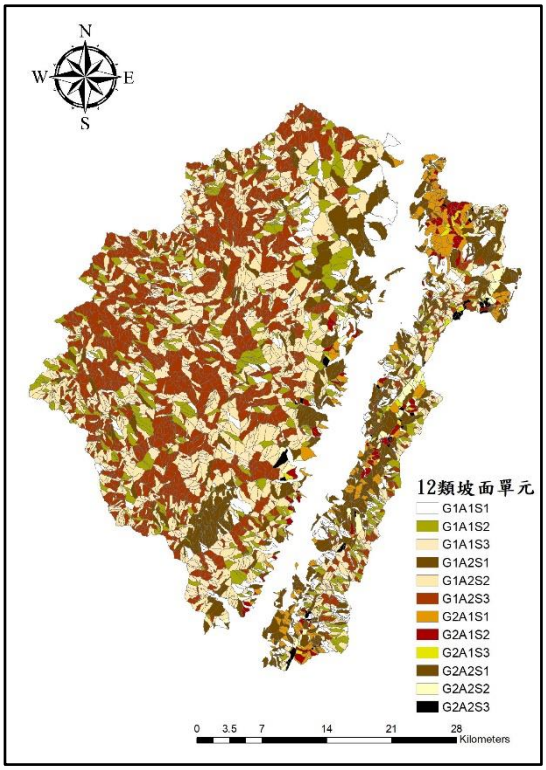


圖 4-79　秀姑巒溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類

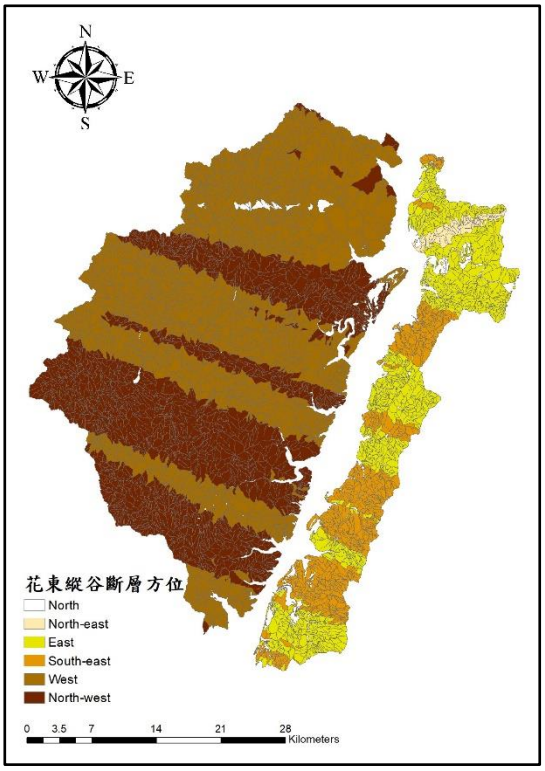


圖 4-80　秀姑巒溪流域之花東縱谷斷層方位

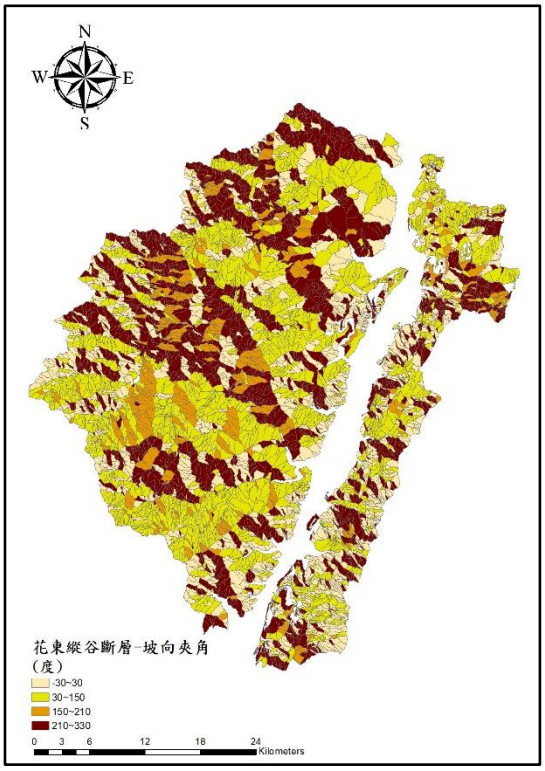


圖 4-81　秀姑巒溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角

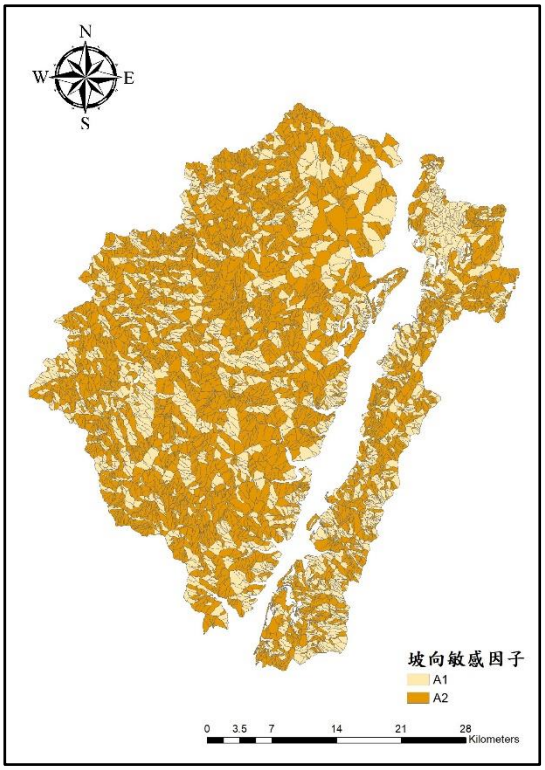


圖 4-82　秀姑巒溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子

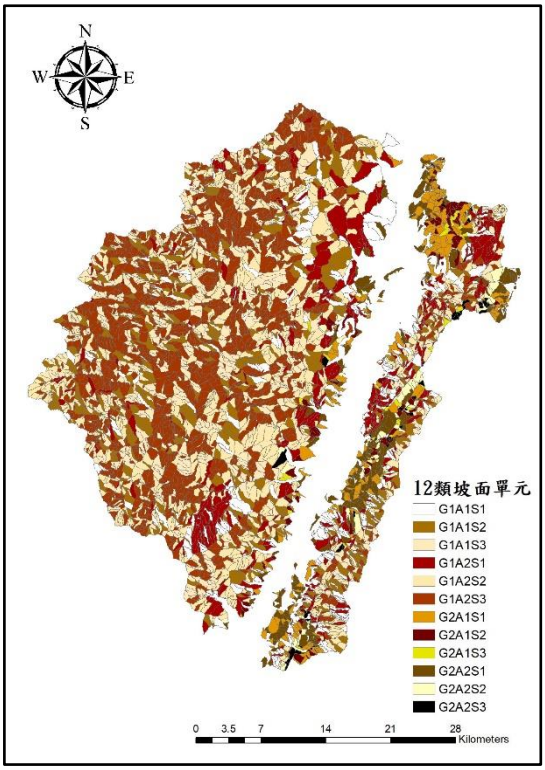


圖 4-83　秀姑巒溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類

六、林邊溪流域

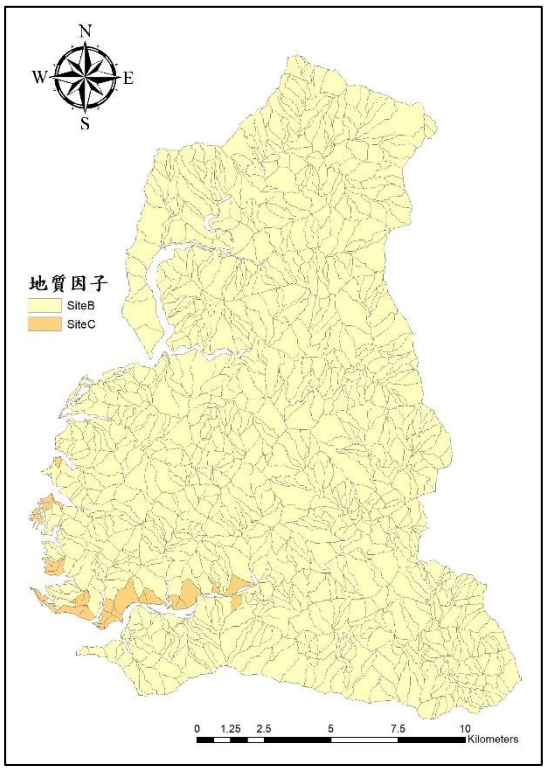


圖 4-84　林邊溪流域地質因子

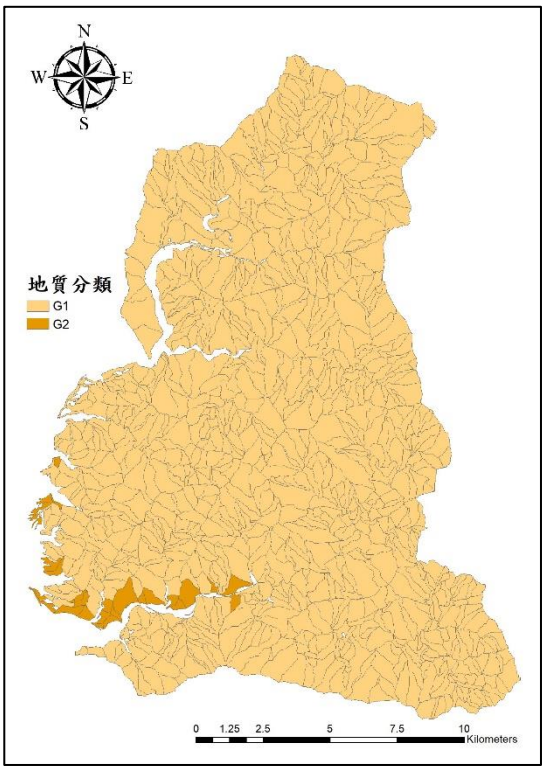


圖 4-85　林邊溪流域地質分類

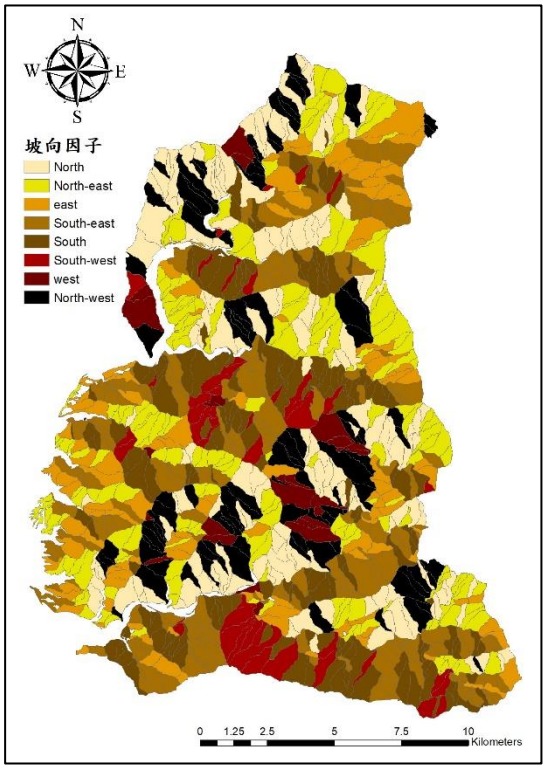


圖 4-86　林邊溪流域坡向因子

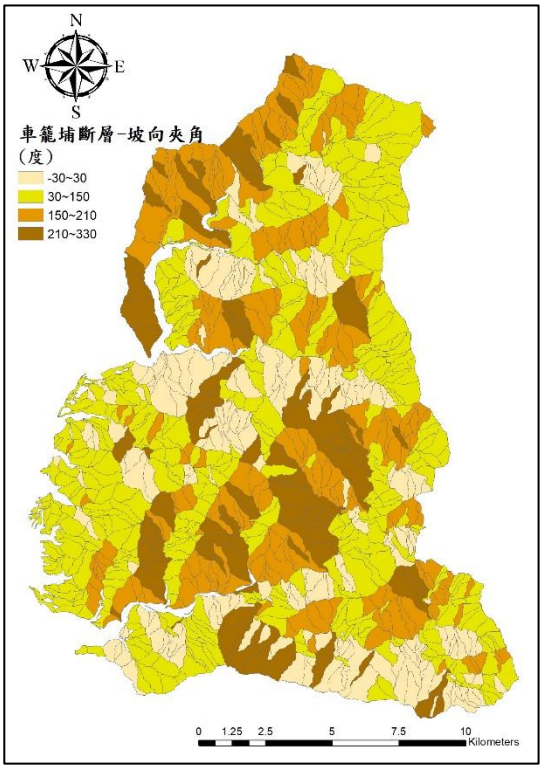


圖 4-87　林邊溪流域之車籠埔斷層坡向夾角



圖 4-88　林邊溪流域之車籠埔斷層坡向敏感因子

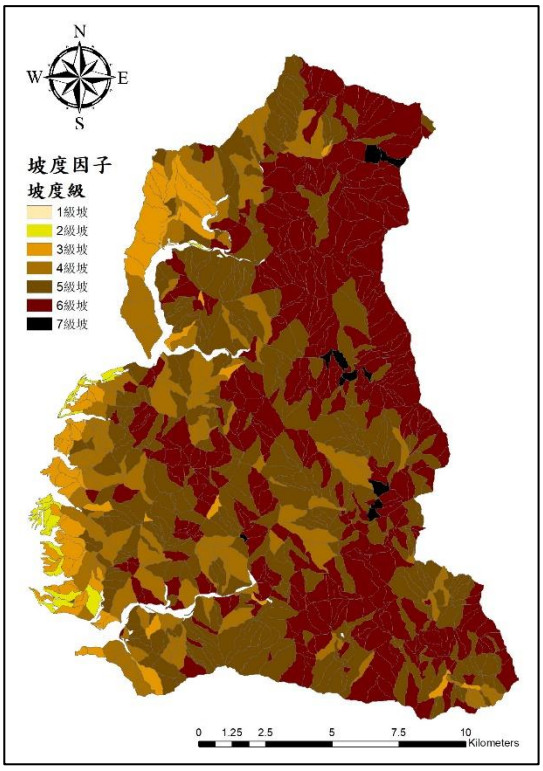


圖 4-89　林邊溪流域坡度分級

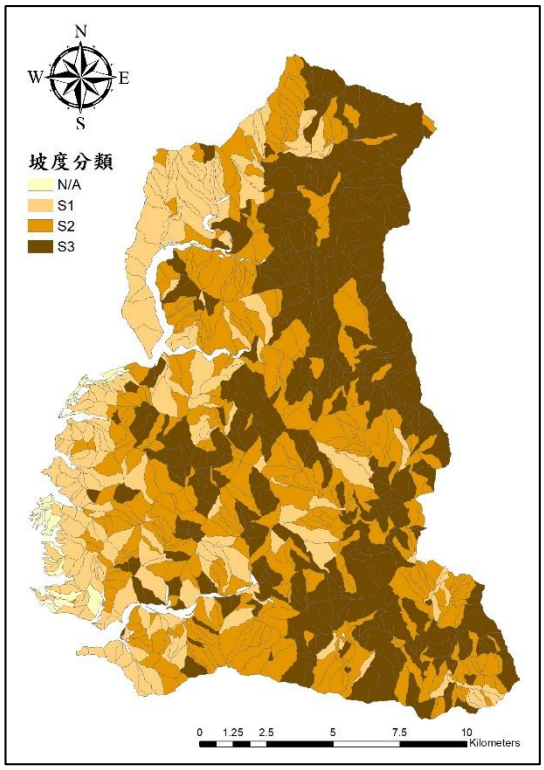


圖 4-90　林邊溪流域坡度分類

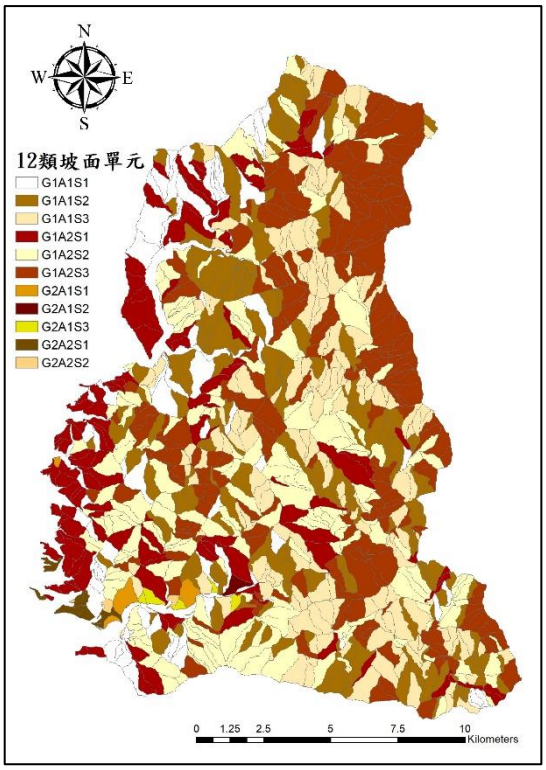


圖 4-91　林邊溪流域之車籠埔斷層坡面單元分類

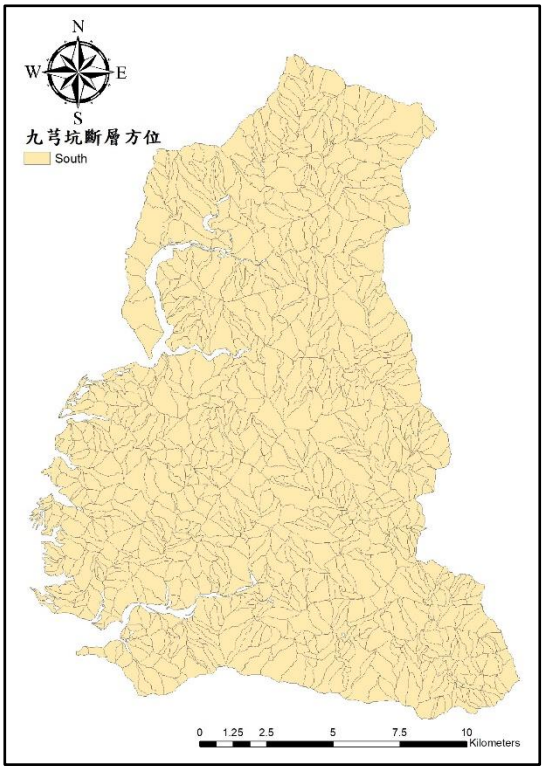


圖 4-92　林邊溪流域之九芎坑斷層方位

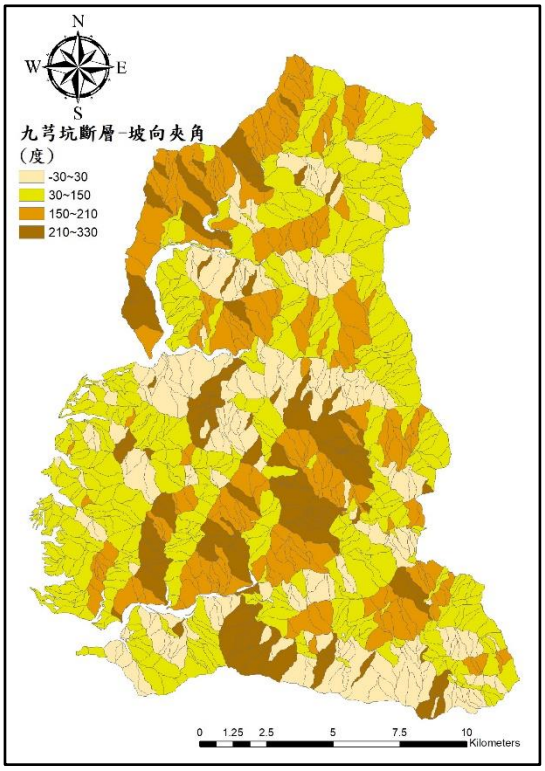


圖 4-93　林邊溪流域之九芎坑斷層坡向夾角

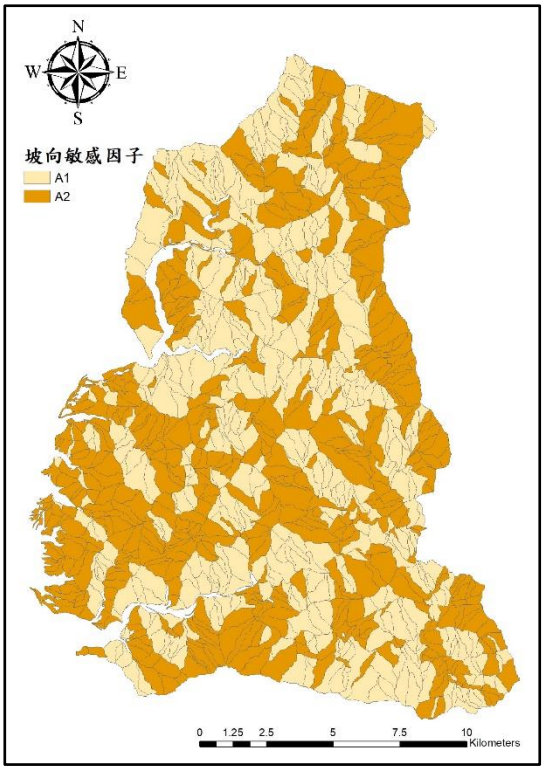


圖 4-94　林邊溪流域之九芎坑斷層坡向敏感因子

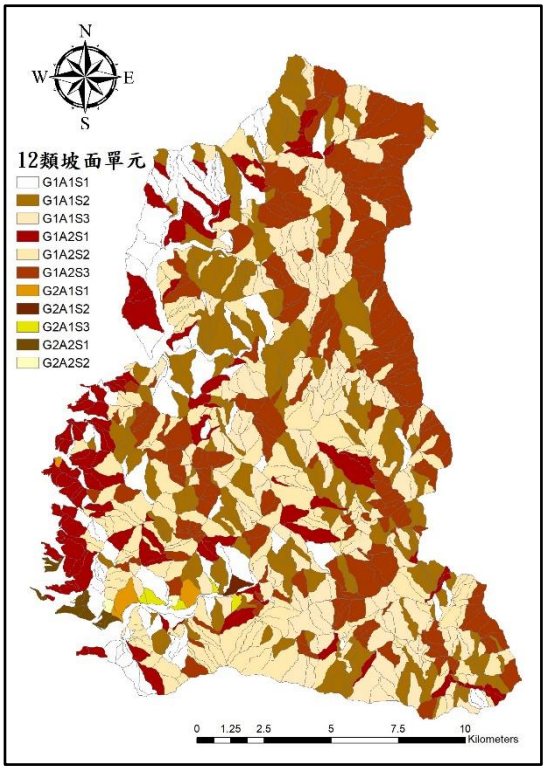


圖 4-95　林邊溪流域之九芎坑斷層坡面單元分類

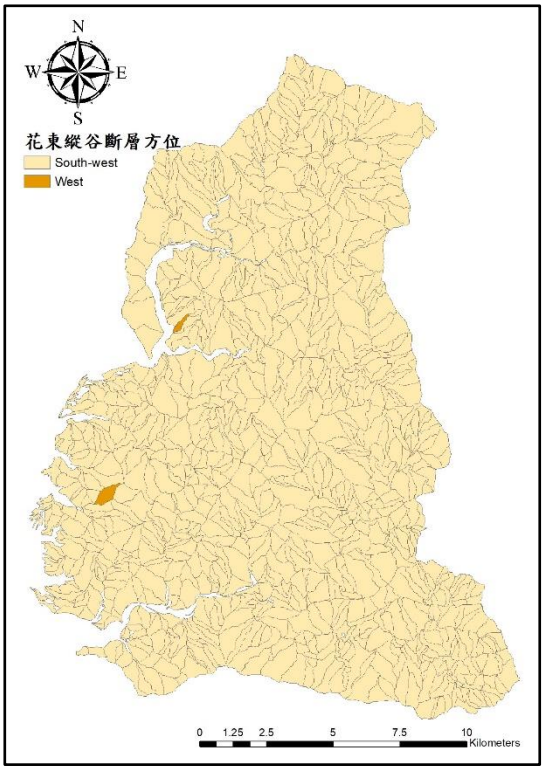


圖 4-96　林邊溪流域之花東縱谷斷層方位

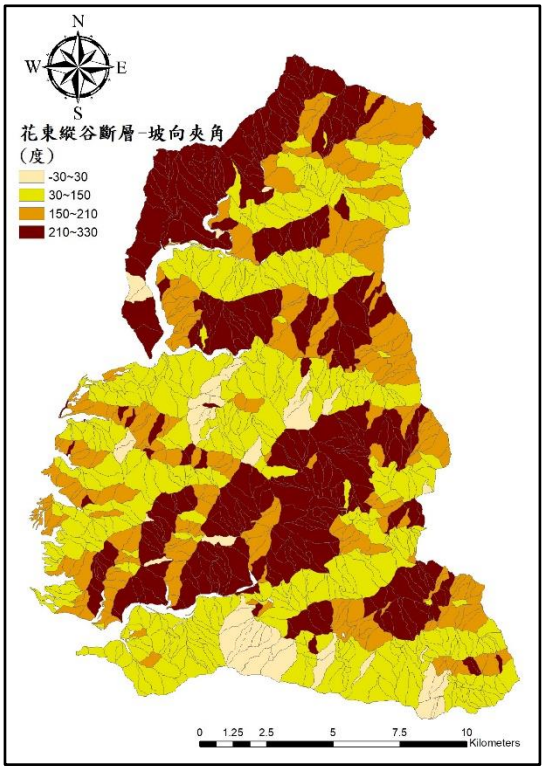


圖 4-97　林邊溪流域之花東縱谷斷層坡向夾角

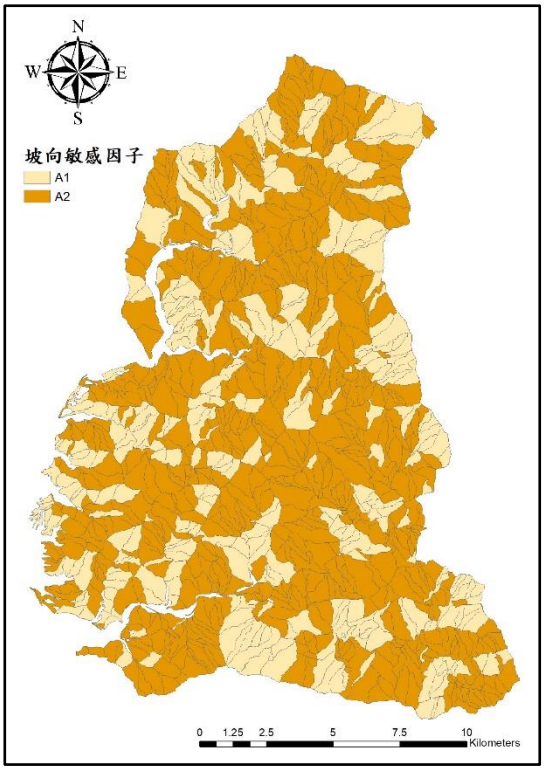


圖 4-98　林邊溪流域之花東縱谷斷層坡向敏感因子

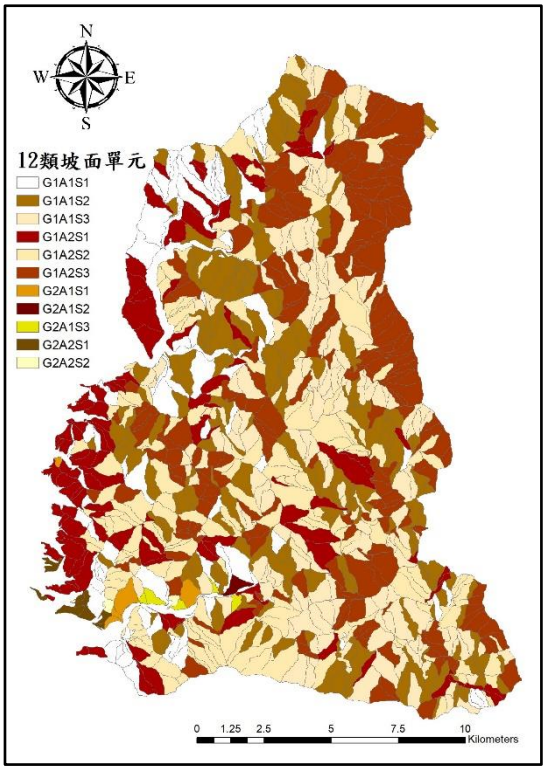


圖 4-99　林邊溪流域之花東縱谷斷層坡面單元分類

第五章　未來地震情境下之崩塌推估

地震引致的災害風險具有一定之不確定性，因此對於未來地震情境的推估工作有其必要性。而地震危害度分析即是瞭解區域潛在的地震威脅程度的方法，地震危害度分析可分為定率式地震危害度分析(Deterministic Seismic Hazard Analysis, DSHA)及機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)兩種，是地震災害潛勢分析的二種主要方法。本項工作目標即是應用本研究地震引致崩塌機率分析模式結合台灣地震模型(TEM)機率式地震危害度分析成果，針對再現期 475 年之地震進行情境推估，以再現期 475 年之全台發震機率結合易損性曲線，建立再現期 475 年之全台地震引致崩塌機率分布圖及全台地震引致崩塌風險地圖。

第一節　地震危害度分析

DSHA 是藉由歷史地震紀錄推求大地震發生之震源參數(包括位置、規模、再現期)、地震衰減率及其對場址之可能影響。PSHA 則係藉由已知的地震與多個地震震源之模擬（亦需要地震衰減率）與地質資料，以統計方法或其他機率方法推求場址的結構物在使用年限下，達到或某程度強地動值的機率，再推估某一再現期下所遭受的強地動值(National Research Council, 1988; EERI Committee on Seismic Risk, 1989)。在災害管理的應用上，目前我國防災計畫仍多以 DSHA 為主，即選定最大歷史災害事件作為地震災害防護規模。主要原因係相較 PSHA 而言，DSHA 為較保守之分析方法。PSHA 雖為較客觀的分析方法，然各地活斷層帶及其歷史資料未必充分瞭解，台灣又屬斷層多且地震密集地區，因此目前實務上仍未能針對 PSHA 分析流程有一致性之共識，以下分別針對二種方法介紹其分析流程和應用方式。

一、定率式地震危害度分析

定率法通常利用尖峰地表加速度、地表速度或位移量表達潛勢分析的物理量。經由區域鄰近之活動斷層分布，考量適合之震源參數(包括活斷層

帶、地震規模及深度)及震度衰減率來推估尖峰地表加速度值，是較早採用之方法，分析時研究確定鄰近工址具威脅潛能之震源(活動斷層)的最大規模，逐一評估各震源之規模與距離工址最短距離，代入適當之強地動衰減關係式，評估各震源影響工址之震度大小，其最大者即該工址之設計地震。

二、機率式地震危害度分析

機率式地震危害度分析是當前學術界及工程實務中最廣為運用並被接受之機率法則專指 Cornell 方法，此方法之基本理論及分析程序最早由Cornell(1968)提出，假設地震是以點震源模式釋放能量，且地震發生符合隨機之卜桑過程(Poisson process)，其它常見之機率法還包括振幅分布法(amplitude distribution method)、極值法(extreme value method)等(李錫堤，1991)。地震之發生機率是針對實際的地震目錄資料進行分析，並使用地震、地質及地球物理資料來進行震源分區，同一震源區內的地震發生率被均化。由於點震源模式無法完全反應地震之破裂機制，導致地震危害度分析結果可能過低(低估)，因此 Kiureghian and Ang (1977)提出斷層開裂模式以解決上述問題。Youngs and Coppersmith (1985)首先採用斷層滑移速率來建立地震的發生次數與規模關係式，稱為特徵地震模式(characteristic earthquake model)，因此地震危害度分析除了以地震目錄資料分析地震的活動性外，尚須考慮斷層的滑移速率，以決定因斷層活動而發生特徵地震的機率(National Research Council, 1988)。自此之後，PSHA 研究除根據地震目錄資料分析地震的活動性外，尚須考慮斷層的滑移速率，以決定因斷層活動而引致特徵地震的發生機率。在國內常利用地理資訊系統輔助，根據地體構造、活斷層、地震震央分佈等資訊劃分震源區，並進行全台地震危害度分析。例如鄭錦桐(2002)使用斷層滑移速率來描述斷層的活動性，並且在震源分區方面著重地質與地體構造及地球物理知識的考量，最後使用邏輯樹方法進行危害度計算。

PSHA 機率法係利用既有之地震與地質資料，以統計方法或其他機率方法推求場址的結構物在使用年限 T 下，遭受超過各程度的強地動值，進一步推估某一再現週期下所遭受的強地動值，再配合地動衰減關係式及震源發震規模與次數之機率分布，即可計算某場址於特定時間內發生指定地動值之超越機率。

假設地震發生符合卜桑模式，Cornell(1968)推導在週期 T 時間內，區域中所有震源至少有一次使場址強地動值 Z 超越 z 的機率如下：

$$P(Z>z|T)=1.0-e^{-\nu(z)T}\le\nu(z)\cdot T \tag{5-1}$$

其中 $\nu(z)$ 為場址強地動值 Z 超越 z 的年平均發生次數。強地動超越 z 的年發生次數 $\nu(z)$ 是一個地震發生率的函數，與地震規模大小和位置的隨機性，以及強地動值分佈的分散性(dispersion)有關(National Research Council, 1988; EERI Committee on SeismicRisk, 1989)。其計算式為：

$$\nu(z)=\sum_{N}\dot{N}_n(m_0)\int_{m_0}^{m_u}f(m)\left[\int_0^{\infty}f(\mathrm{r}|m)\cdot P(Z>z|m,\mathrm{r})dr\right]dm \tag{5-2}$$

上式中，$\dot{N}_n(m_0)$ 是在第 n 個震源，工程分析考量的最小地震規模 m_0 以上的年發生次數；$f(m)$ 是在最小規模 m_0 至最大震源規模 m_u 間發生規模 m 的機率密度函數；$f(r|m)$ 是距離密度函數，在規模 m 時斷層破裂至場址最短距離 r 的機率；$P(Z>z|m,\mathrm{r})$ 是在規模 m 以及距離 r 時強地動值 Z 超越 z 的機率。在實際運算上，式(5-2)中 $f(m)$ 與 $f(r|m)$ 會改為離散總和函數(discrete mass function)，所以 $\nu(z)$ 改寫為：

$$\nu(z)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{m_i=m_0}^{m_i=m_u}\lambda_n(m_i)\left[\sum_{r_j=0}^{r_j=r_{\max}}P_n(R=r_j|m_i)\cdot P(Z>z|m_i,r_j)\right] \tag{5-3}$$

上式中，$\lambda_n(m_i)$ 是第 n 個震源在 m_i 規模區間下的地震發生率，而規模的範圍

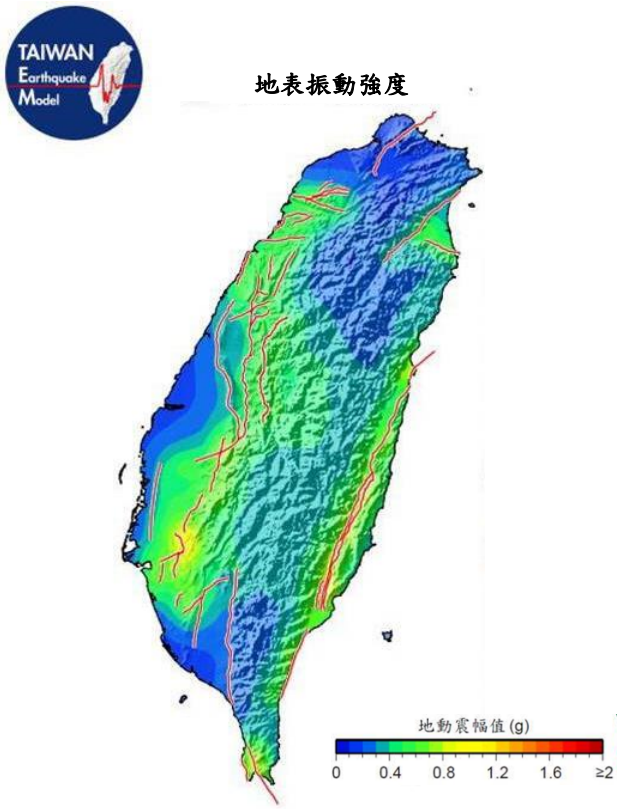
從最小規模m_0至最大震源規模m_u；$P_n(R=r_j|m_i)$是針對第 n 個震源在規模m_i時，離場址距離r_j情形下的機率。而年超越機率 P 的倒數即再現週期，對不同之工址地動值z，計算其年超越機率P，即得到該工址之地震危害度曲線，依據此圖可找到設計水準所需之工址地動值，例如 50 年結構物使用期中有 10%超越機率之地震水準，相當於再現期 475 年之地震水準。

由上述可知，要發展台灣地區的機率式地震危害度分析圖，不僅需要完整的地質資料還需要蒐集長期的地震目錄，並藉由充足的人力及資金支持方能完成，而台灣地震模型(Taiwan Earthquake Model, TEM)計畫是在 2013 年起由科技部支持下，整合地質和地震研究繪出台灣地區的地震危害潛勢圖，並希望結合地震工程及社會風險研究，瞭解台灣地區未來大地震的潛勢及其可能的社會經濟影響，以供未來地震防災規劃應用，主要成果說明如下。

如圖 5-1 所示，未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度分布，係藉由台灣地震模型之孕震構造參數，評估未來 50 年內超越機率 10%之可能地動震幅值，進而推估最大地表加速度(PGA)，該成果顯示全台各地未來 50 年可能之最大地表加速度，可作為全台防護地震力之參考。

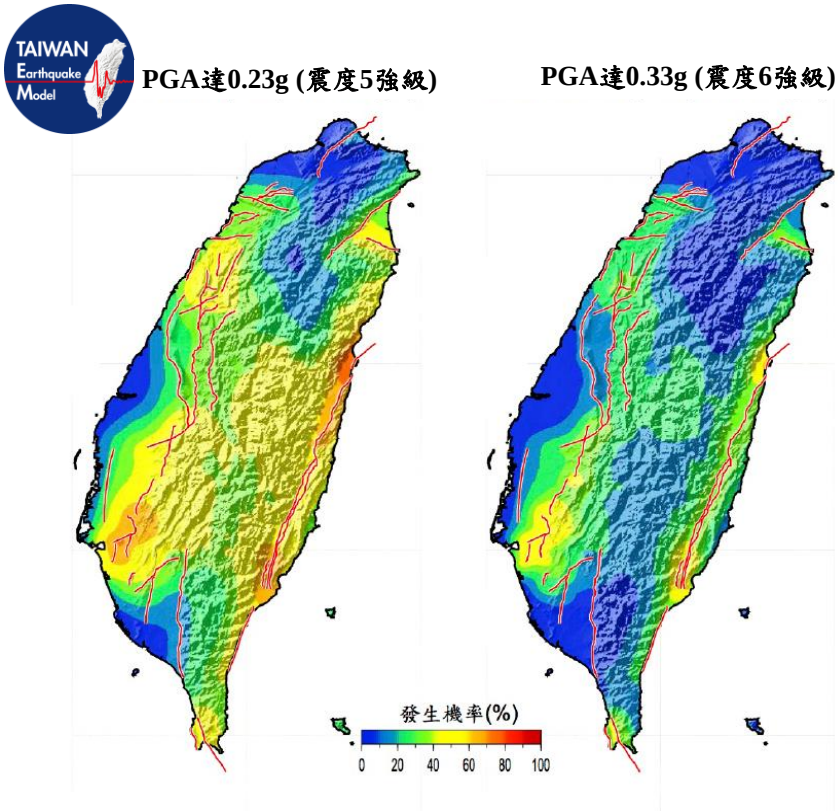
如圖 5-2 所示，未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度機率分布，同樣係經由地震危害度分析方法，考慮各活斷層的地震目錄及全台地質，評估未來 50 年內超越機率 10%之地表振動強度機率，並基於工程結構物設計地震力達 0.23g 和達 0.33g 分為二種，該成果也可適當表達舊版地震分級震度 5 級強震和 6 級烈震之發生機率，對照新版地震分級相當於震度 5 強級和 6 弱級之發生機率，可作為工程結構設計地震力之參考。

目前 TEM 之地震危害度係以 PGA=0.23g (約 226gal)和 PGA=0.33g (約 324gal)進行分析，分別位於中央氣象局震級五強和震級六弱之間，對於未來地震情境風險分析仍在合理適當範圍，因此未來地震情境分析仍沿用 0.23g 及 0.33g 研究成果，待未來 TEM 新的研究成果發表後即可更新。



資料來源：國立中央大學地震災害鍊風險評估與管理研究中心提供 (2019)

圖 5-1　未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度分布



資料來源：國立中央大學地震災害鍊風險評估與管理研究中心提供 (2019)

圖 5-2　未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度達 0.23g 和 0.33g 機率分布

第二節　再現期 475 年之地震引致崩塌機率分析

本研究對於未來地震情境下之崩塌推估係基於定量風險計算模式來考量，風險管理之方法可應用於災害管理的各個階段，不僅可定量地分析危害可能之風險，亦可由其回饋進而降低或改善危害可能造成的損失。在自然災害的應用中，由於災害風險的不確定因素來自許多不同層面，各種應用領域皆有其特定的風險描述或定義，例如以脆弱度為例，Ezell (2007)列舉出至少 14 種脆弱度之定義，並認為對於風險評估的定義模糊不清，會導致使用時誤解風險分析的結果；或是以暴露量為例，必須牽涉到具體的社會經濟評價、價值、金額或損失等物理量。因此，聯合國在 2000 年成立的組織 International Strategy for Disaster Reduction (ISDR)建議在災害管理領域上災害風險應更具體與一致，並建議：

$$R = H \times V \tag{5-4}$$

上式形成一無因次的量值，對於不同災損問題成因的暴露量，則建議於後果分析中因應風險評價問題的不同而調整。式(5-4)在風險理論上雖僅係定量風險分析中的其中一種形式，然而對於災害風險分析卻是較為適用的方法，因此本研究採用式(5-4)建立地震引致崩塌風險分析之計算式。對於暴露量則可利用本研究之風險分析結果，進一步基於實際暴險對象或保全對象進行廣域崩塌定量風險評估和後果分析。

式(5-4)中之危害度 H 即地震致災因子的發生頻率或規模，於本研究中即為地震災害潛勢，例如經風險鑑別和頻率分析所得到的地表振動強度發生機率、斷層發震機率等；脆弱度 V 即地震引致崩塌風險問題發生的性質、程度或機率，即坡地崩塌的脆弱度，於本研究中即為地震引致坡地崩塌發生的機率，其與坡地類型、地表振動強度大小相關，可經由坡地易損性曲線分析求得。因此，地震引致崩塌機率分析的計算式可表示如下：

$$V = I \times F \tag{5-5}$$

上式中，I 為地表振動強度，F 為坡地易損性。實際上，坡地易損性曲線是以地表振動強度 x 為變量的函式，因此，式(5-5)可改寫為：

$$V = F(x) \tag{5-6}$$

因此，對於地震引致崩塌風險，式(5-6)則可改寫為：

$$R = H \times F(x) \tag{5-7}$$

上式中，H 與 F 皆為機率值，因此其乘積 R 為一無因次的量值，範圍介於 0~1 之間，此風險值表達的是：在地震發生的特定頻率或特定規模下，某類坡地因致災因子導致坡地發生某種程度以上崩塌之風險。此崩塌風險值即可做為未來進行廣域崩塌定量風險評估的基礎。由前述可知，對於地震引致之崩塌機率分析，可利用式(5-5)或式(5-6)計算；對於地震引致之崩塌風險分析，可利用式(5-4)或式(5-7)計算。

一、分析流程

再現期 475 年之地震引致崩塌機率，可利用未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度分布結合各類坡地易損性曲線，計算未來 50 年超越機率 10%之地震引致崩塌機率，並進一步繪製其崩塌機率分布圖，此分布圖表達的是地震高潛勢坡地在遭受未來 50 年超越機率 10%的可能地震下(再現期 475 年)，坡面因地表振動導致發生崩塌水平投影面積達 5%以上的超越機率。

再現期 475 年之地震引致崩塌機率分析流程如圖 5-3 所示，分析過程首先利用未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度分布(如圖 5-1)將震級 6 弱以上區域圈繪出來(以下不適用)，再針對這些區域套疊研究地區坡面單元，得到研究區震級 6 弱以上之地震高潛勢坡地區域。同樣藉由未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度分布，地震高潛勢坡地可進一步分析其坡面單元振動強度，再利用坡地易損性曲線 $F(x)$即可導入式(5-6)進行地震引致崩塌

機率分析，最後繪製未來 50 年超越機率 10%之地震引致崩塌機率分布圖。

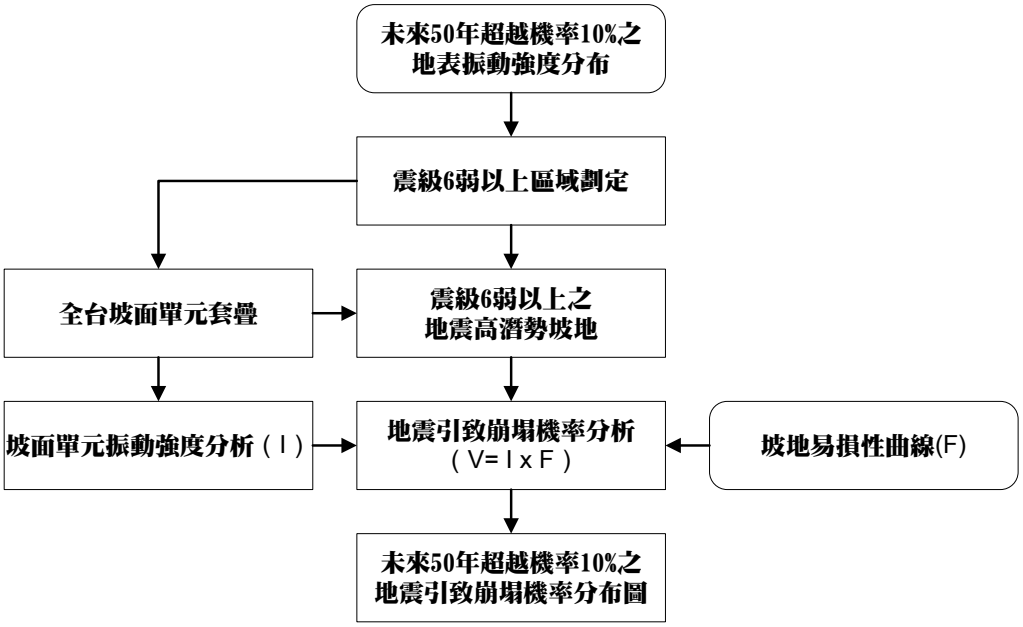


圖 5-3　再現期 475 年之地震引致崩塌機率分析流程

二、分析成果

(一)再現期 475 年地震引致崩塌機率

依據圖 5-3 之分析流程，再現期 475 年之地震引致崩塌機率分析係藉由未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度分布進一步分析而來，可直接藉由研究地區之坡面單元套疊地表振動強度分布圖(如圖 5-1)得到坡面單元地表振動強度分布，分析結果如圖 5-4 所示。基於各類坡面分類和坡面單元之地表振動強度，坡面單元之崩塌機率可直接導入式(5-6)藉由坡地易損性曲線計算得到。如表 5-1 和圖 5-4 所示，顯示研究地區再現期 475 年之地震引致崩塌機率分布，由於地表振動強度最高值達到 1079.20gal，因此崩塌機率之最大值將近 1，沿著活斷層帶鄰近皆具有極高的崩塌危害度，數量分布如表 5-1 所示。如表 5-2 和圖 5-6 所示，藉由坡面單元崩塌機率可進一步計算可能崩塌量，顯示研究地區再現期 475 年之地震坡面單元崩塌地分布，同樣地，高崩塌機率意味著較高崩塌量體，沿著活斷層帶鄰近坡面單元皆具有較多的崩塌地，最高達到 168 公頃，數量分布如表 5-2 所示。

表 5-1　再現期 475 年全台坡面單元崩塌機率統計

崩塌機率	數量	數量百分比
0.00	16377	11%
0.01~0.10	41871	29%
0.11~0.20	41343	29%
0.21~0.30	12348	9%
0.31~0.40	5001	3%
0.41~0.50	2511	2%
0.51~0.60	1691	1%
0.61~0.70	1799	1%
0.71~0.80	2455	2%
0.81~0.90	3844	3%
0.91~1.00	14582	10%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

表 5-2　再現期 475 年全台坡面單元崩塌地統計

崩塌面積	數量	數量百分比
0.00	16063	11%
0.01~10.00	115919	81%
10.01~20.00	8741	6%
20.01~30.00	1979	1%
30.01~40.00	631	< 0%
40.01~50.00	242	< 1%
50.01~60.00	109	< 1%
60.01~70.00	58	< 1%
70.01~80.00	34	< 1%
80.01~90.00	16	< 1%
90.01~100.00	11	< 1%
100.01~150.00	14	< 1%
150.01~168.00	5	< 1%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

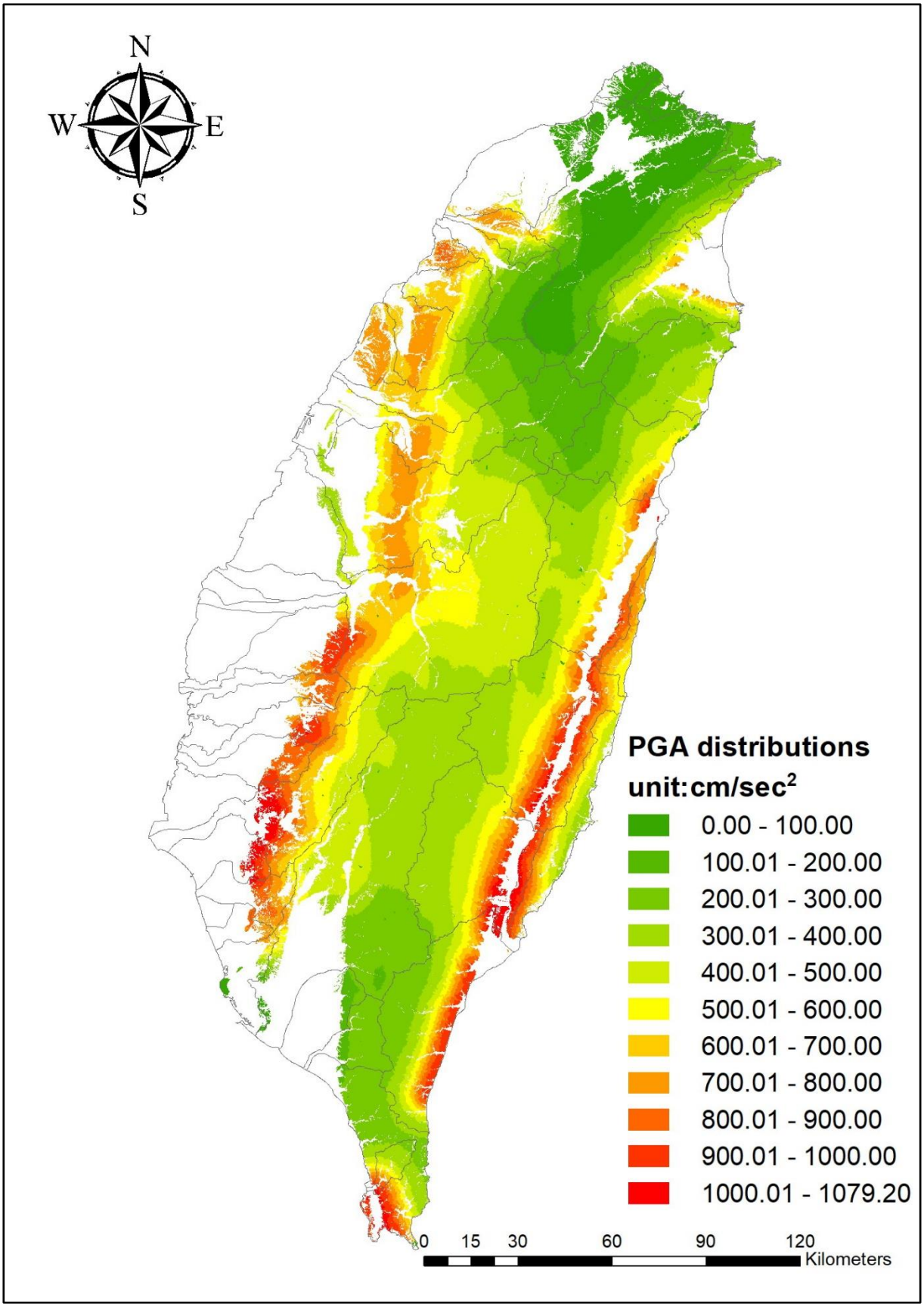


圖 5-4　再現期 475 年之地震坡面單元 PGA 分布

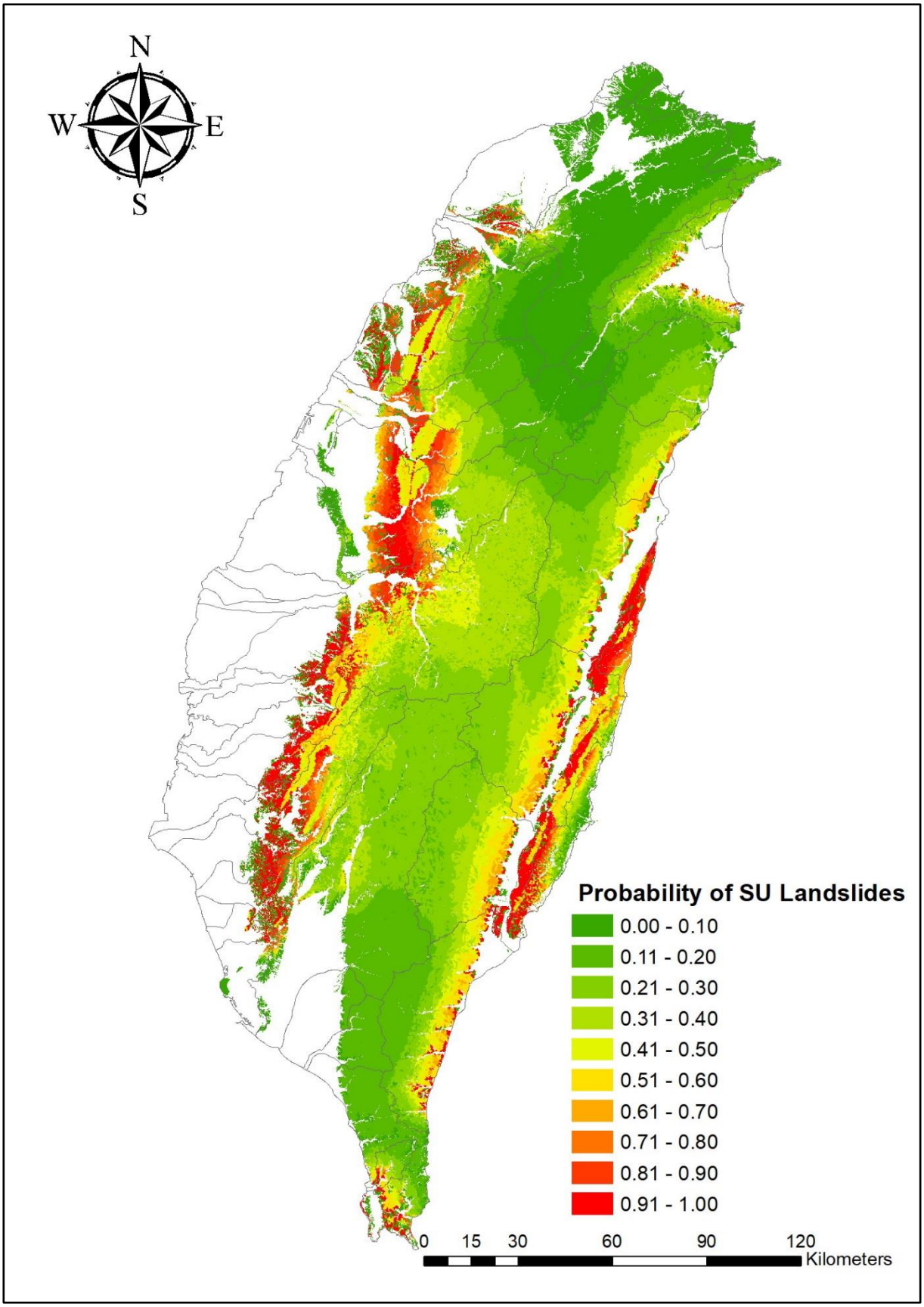


圖 5-5　再現期 475 年之地震坡面單元崩塌機率分布

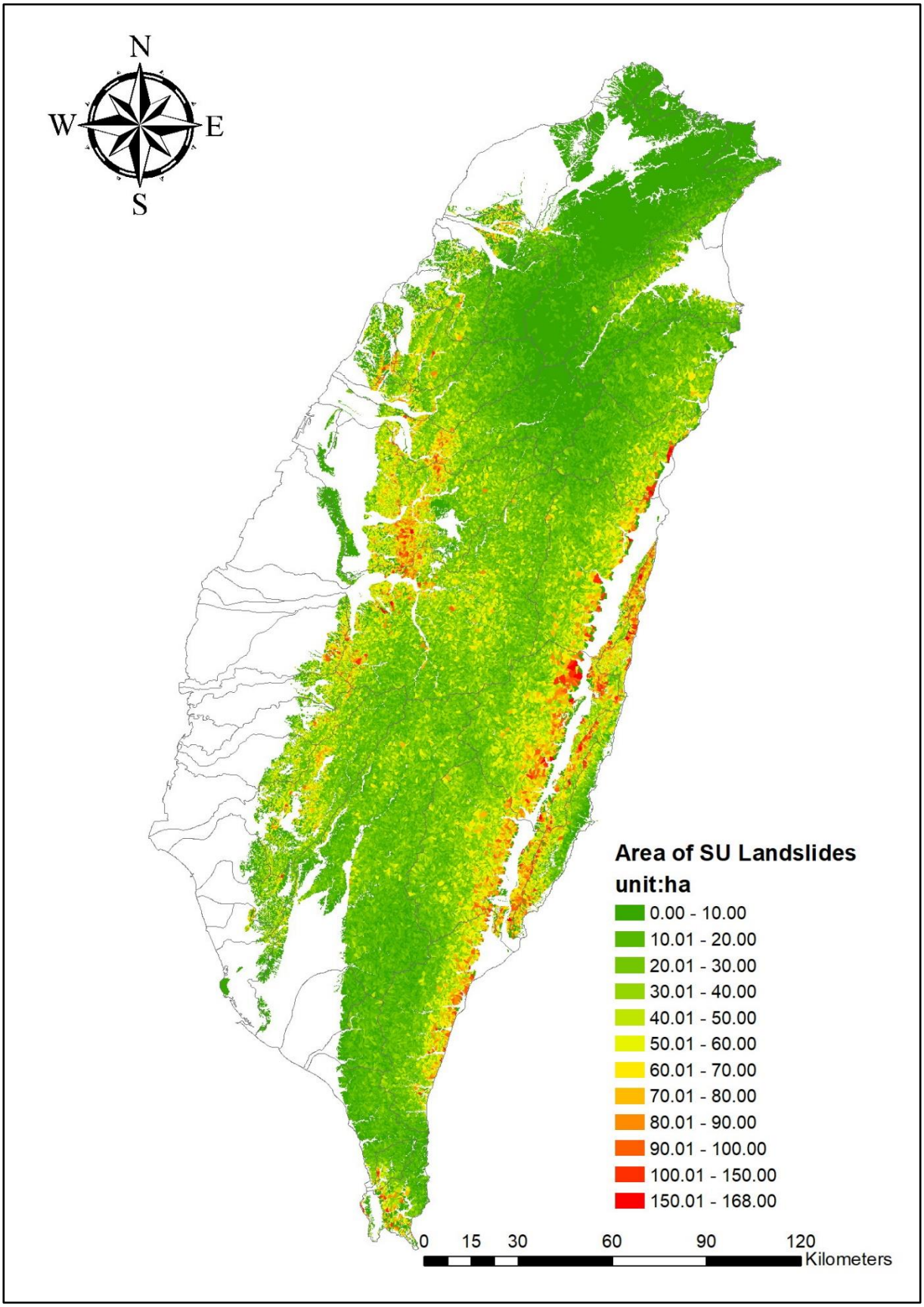


圖 5-6　再現期 475 年之地震坡面單元崩塌面積分布

第三節　未來 50 年超越機率 10%地震引致崩塌風險評估

一、分析流程

未來 50 年超越機率 10%地震引致之崩塌風險，可利用未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度達 0.23g 或 0.33g 機率分布結合各類坡地易損性曲線先以 0.23g 或 0.33g 計算地震引致崩塌機率，再計算未來 50 年超越機率 10%之地震引致崩塌風險，並進一步繪製其崩塌風險地圖，此風險地圖表達的是研究地區在遭受未來 50 年超越機率 10%的可能地震下(再現期 475 年)，坡面因地表振動達 0.23g 或 0.33g 以上導致發生崩塌水平投影面積達 5%以上之最低風險。所謂最低風險係因此處地震危害度 H 考慮地表振動達某強度以上，也就是包含 0.23g 或 0.33g 以上的所有可能性，因此對於未來 50 年超越機率 10%地震之風險估計結果實為所有可能性之最小值。

未來 50 年超越機率 10%地震引致崩塌風險分析流程如圖 5-7 所示，分析過程首先以地表振動強度 0.23g 或 0.33g 代入各類坡地易損性曲線 $F(x)$進行研究地區坡面單元之地震引致崩塌機率分析，如式(5-6)，得到研究地區各類坡面單元之崩塌機率值，所得分析結果再與未來 50 年超越機率 10%之地表振動強度達 0.23g 或 0.33g 機率分布(如圖 5-2)導入式(5-7)進行地震引致崩塌風險計算，得到研究地區各坡面單元之地震引致崩塌風險值，最後繪製未來 50 年超越機率 10%地震引致崩塌風險地圖。

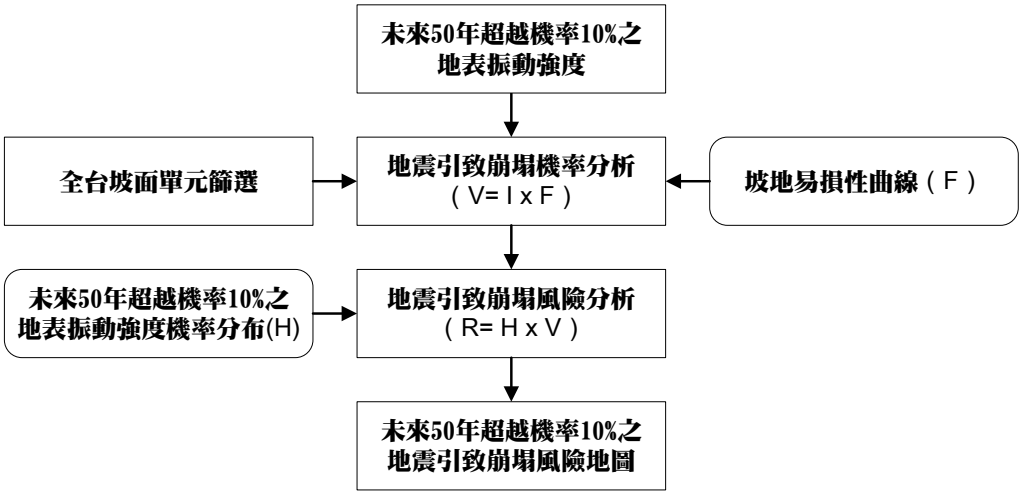


圖 5-7　未來 50 年超越機率 10%地震引致崩塌風險分析流程

必須說明的是，由於中央氣象局自 109 年 1 月 1 日起實施新制地震分級表，新制地震震度階級對照表對於震級 6 弱以上之定義已非由地表加速度決定，而是由地表速度決定，真實地震中地表加速度累積之速度振幅不穩定，因此目前可行的應用方式仍是依其對應之加速度值做計算，如表 3-2 所示。也就是說，未來 50 年超越機率 10%地震引致崩塌風險僅是對應相應震度階級的風險值，用以描述 0.23g 或 0.33g 以上之地震引致崩塌風險，由於實測中加速度值通常較高，因此此方式亦較為保守，如此亦可與再現期 475 年之地震引致崩塌機率相符，有利於作為震後坡地崩塌評估模式之基礎。

二、分析成果

未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.23g 以上地震機率分布如表 5-3 和圖 5-8 所示，由分析結果可知地震機率位於 0.00~0.80 之間；0.23g 以上地震引致崩塌機率分析結果如表 5-4 和圖 5-9 所示，由分析結果可知由於 0.23g 地震並不大，因此崩塌機率因坡面屬性不同分別位於 0.0141~0.0160 和 0.0181~0.0187 二個區間；0.23g 以上地震引致崩塌風險分析結果如表 5-5 和圖 5-10 所示，最終將其正規化為風險指標如表 5-6 和圖 5-11 所示，崩塌風險指標可呈現高崩塌風險區域。

未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.33g 以上地震機率分布如表 5-7 和圖 5-12 所示，由分析結果可知地震機率位於 0.00~0.62 之間，相較於 0.23g 地震較不易發生；0.33g 以上地震引致崩塌機率分析結果如表 5-8 和圖 5-13 所示，由分析結果可知大約 70%以上坡面單元會發生崩塌(崩塌 5%以上)，此高崩塌結果係因假定全台皆發生 0.33g 以上地震，屬於較低可能性的極端事件假定；0.33g 以上地震引致崩塌風險分析結果如表 5-9 和圖 5-14 所示，最終將其正規化為風險指標如表 5-10 和圖 5-15 所示，風險指標分析結果可合理呈現未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.33g 以上地震可能引致坡地崩塌之風險，未來可作為集水區考量地震風險因子時相關治理規劃之參考。

表 5-3　未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.23g 以上地震機率統計

機率	數量	數量百分比
0.00~0.10	10581	7%
0.11~0.20	14423	10%
0.21~0.30	18531	13%
0.31~0.40	35077	24%
0.41~0.50	41007	29%
0.51~0.60	17935	12%
0.61~0.70	6118	4%
0.71~0.80	150	<1%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

表 5-4　未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.23g 以上崩塌機率統計

機率	數量	數量百分比
0.0000	45761	32%
0.0000~0.0020	0	0%
0.0021~0.0040	0	0%
0.0041~0.0060	0	0%
0.0061~0.0080	0	0%
0.0081~0.0100	0	0%
0.0101~0.0120	0	0%
0.0121~0.0140	0	0%
0.0141~0.0160	41109	29%
0.0181~0.0180	0	0%
0.0181~0.0187	56952	40%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

表 5-5　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上地震風險值統計

機率	數量	數量百分比
0.0000	45976	32%
0.0000~0.0020	9558	7%
0.0021~0.0040	17691	12%
0.0041~0.0060	22467	16%
0.0061~0.0080	29501	21%
0.0081~0.0100	16096	11%
0.0101~0.0120	2236	2%
0.0121~0.0140	294	<1%
0.0141~0.0142	3	<1%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

表 5-6　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上地震風險指標統計

崩塌率	數量	數量百分比
0.00	45976	32%
0.00~0.10	3758	3%
0.11~0.20	12492	9%
0.21~0.30	13255	9%
0.31~0.40	14885	10%
0.41~0.50	22191	15%
0.51~0.60	17806	12%
0.61~0.70	10820	8%
0.71~0.80	1934	1%
0.81~0.90	633	<1%
0.91~1.00	72	<1%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

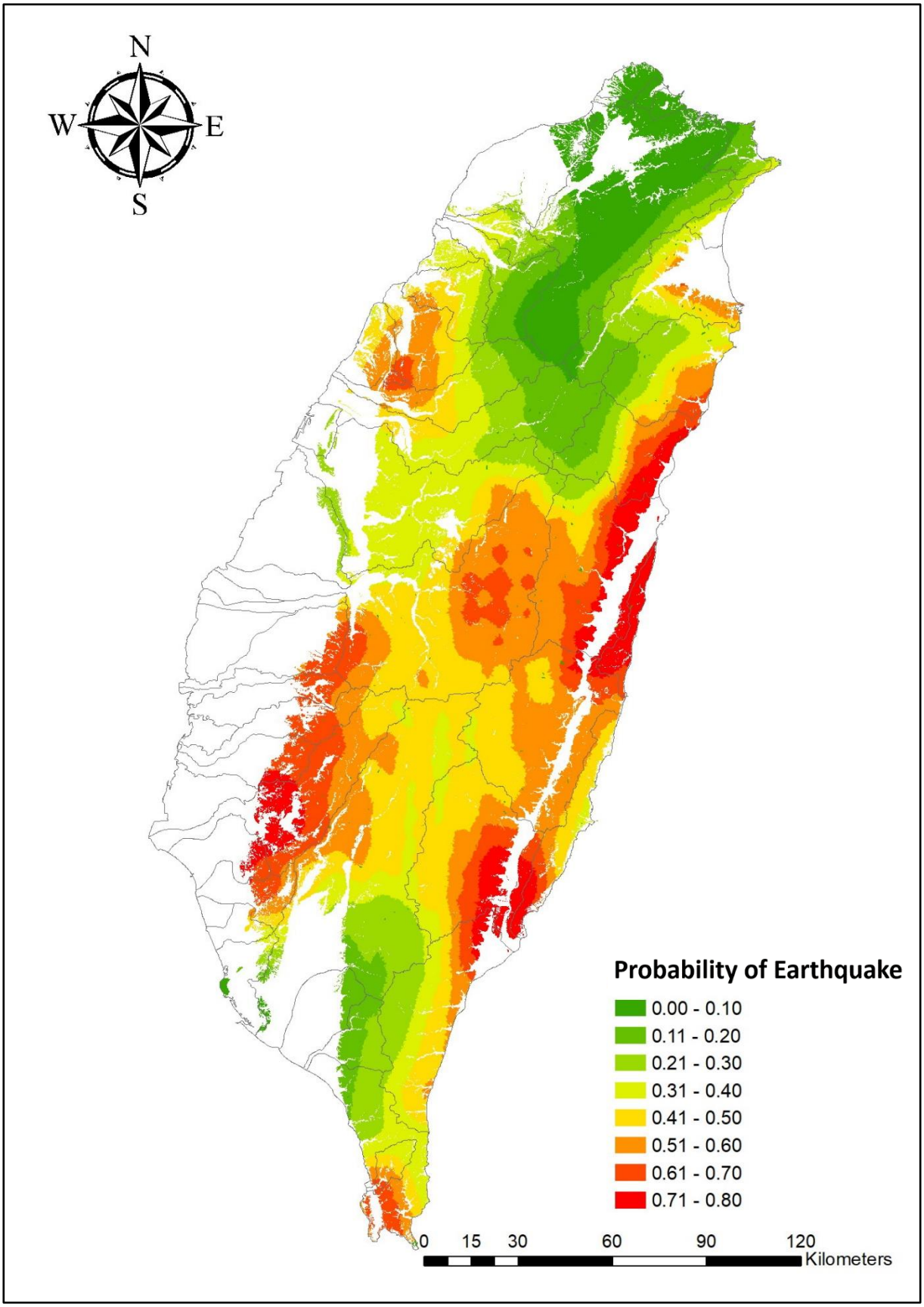


圖 5-8　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上地震機率分布

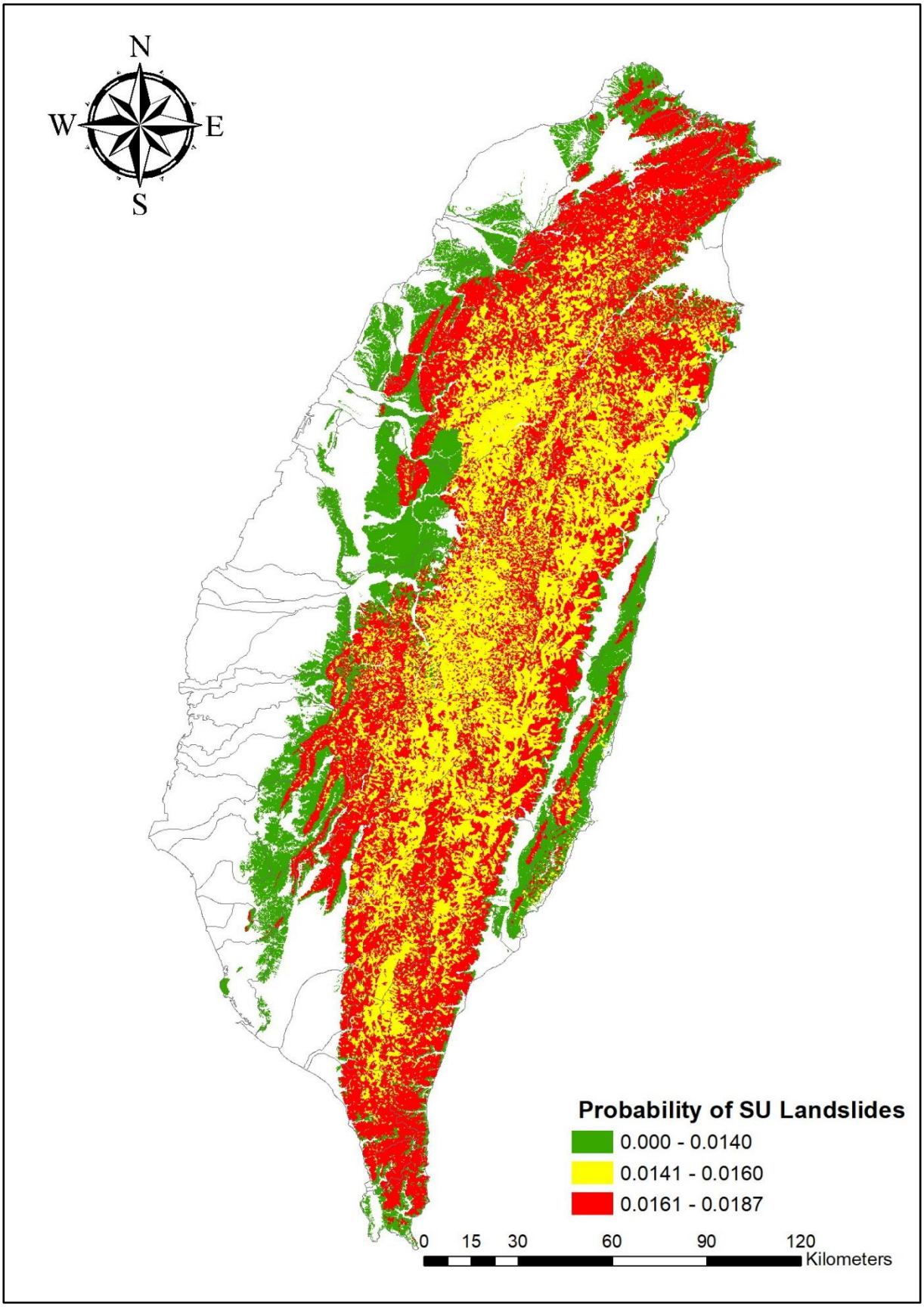


圖 5-9　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上崩塌機率分布

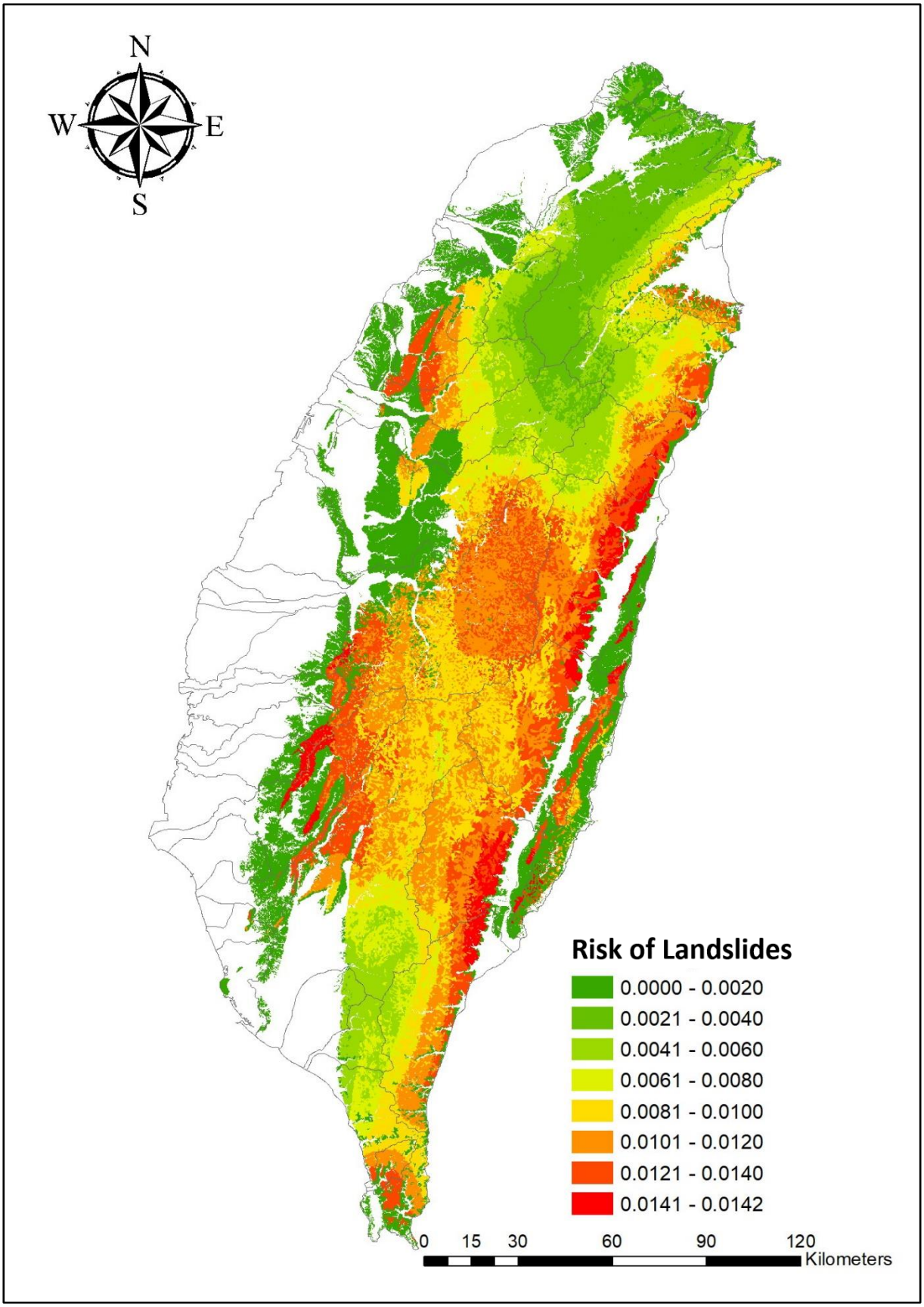


圖 5-10　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上崩塌風險值

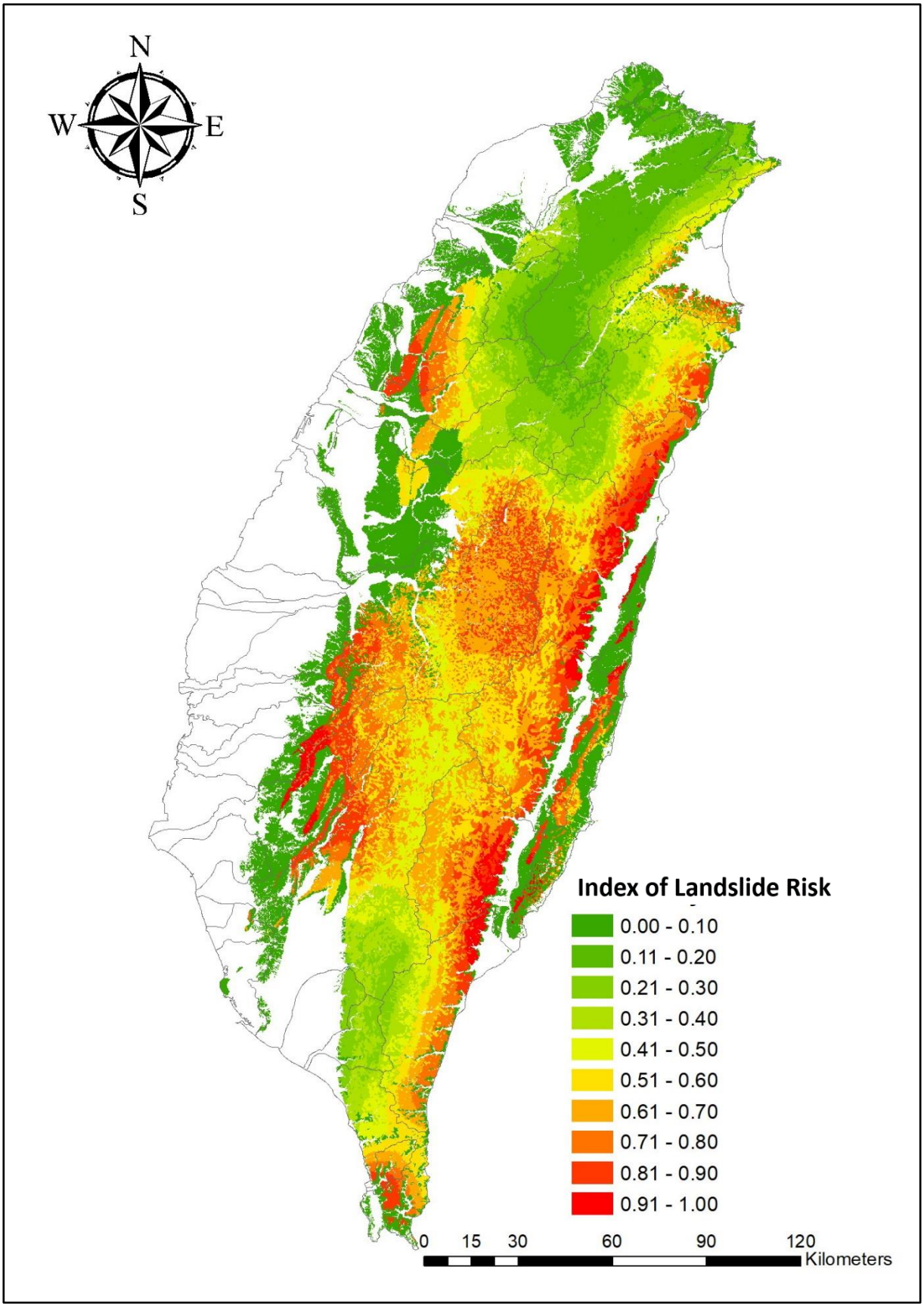


圖 5-11　未來 50 年超越機率 10%發生 0.23g 以上崩塌風險指標

表 5-7　未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.33g 以上地震機率統計

機率	數量	數量百分比
0.00~0.10	34965	24%
0.11~0.20	43970	31%
0.21~0.30	41951	29%
0.31~0.40	17036	12%
0.41~0.50	4634	3%
0.51~0.60	1264	1%
0.61~0.62	2	<1%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

表 5-8　未來 50 年超越機率 10%地震發生 0.33g 以上崩塌機率統計

機率	數量	數量百分比
0.000	15384	11%
0.000~0.010	30377	21%
0.011~0.020	0	0%
0.021~0.030	0	0%
0.031~0.040	0	0%
0.041~0.050	0	0%
0.051~0.060	26651	19%
0.061~0.070	0	0%
0.071~0.073	71410	50%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

表 5-9　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上地震風險值統計

機率	數量	數量百分比
0.0000	45976	32%
0.0000~0.0050	21016	15%
0.0051~0.0100	22051	15%
0.0101~0.0150	32096	22%
0.0151~0.0200	16493	11%
0.0201~0.0250	4700	3%
0.0251~0.0300	1215	1%
0.0301~0.0350	224	<1%
0.0351~0.0395	51	<1%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

表 5-10　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上地震風險指標統計

崩塌率	數量	數量百分比
0.00	52546	37%
0.00~0.10	16807	12%
0.11~0.20	16913	12%
0.21~0.30	24872	17%
0.31~0.40	21122	15%
0.41~0.50	6886	5%
0.51~0.60	3255	2%
0.61~0.70	1040	1%
0.71~0.80	272	<1%
0.81~0.90	99	<1%
0.91~1.00	10	<1%
合計	143822	-

資料來源：本研究整理

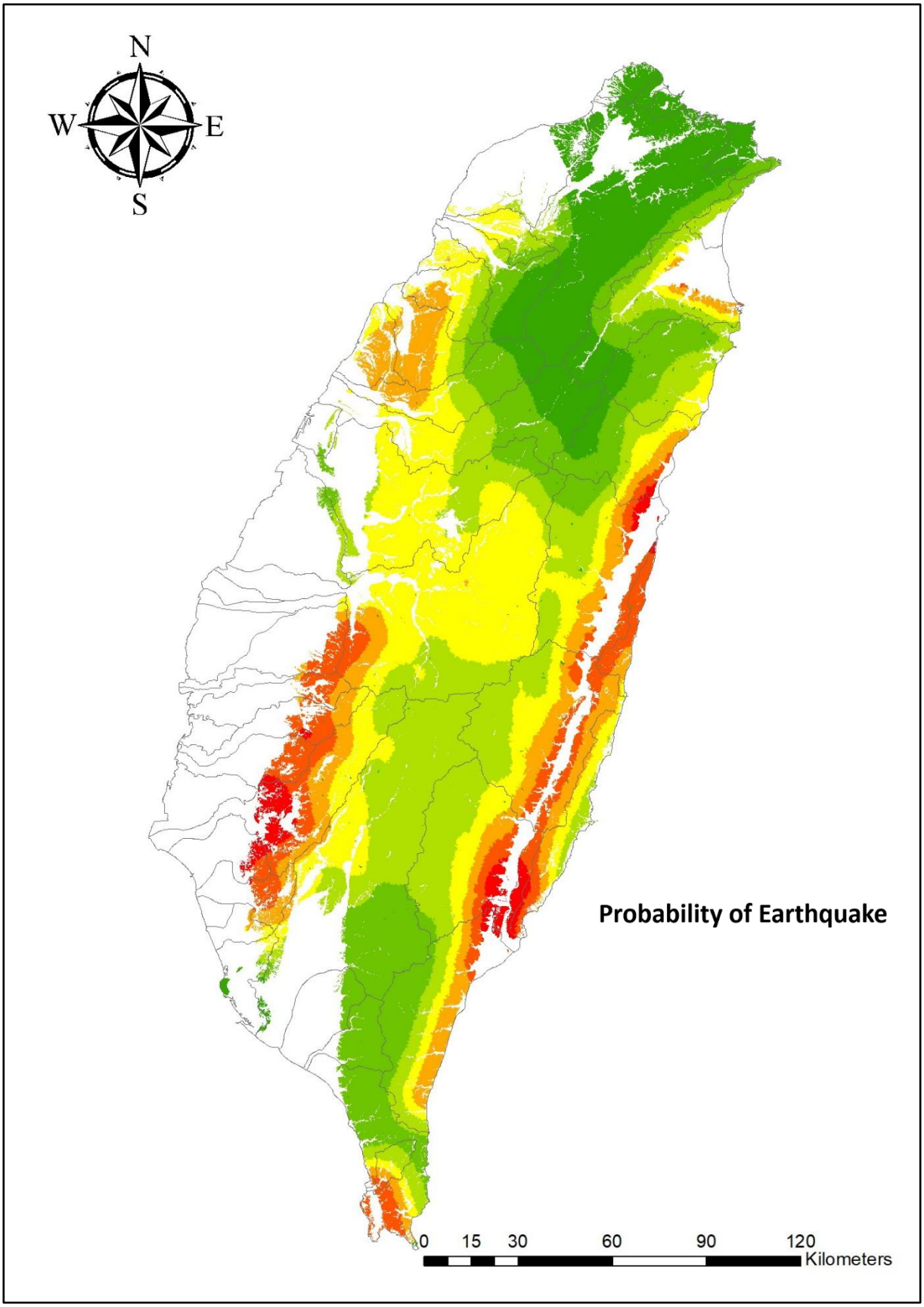


圖 5-12　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上地震機率分布

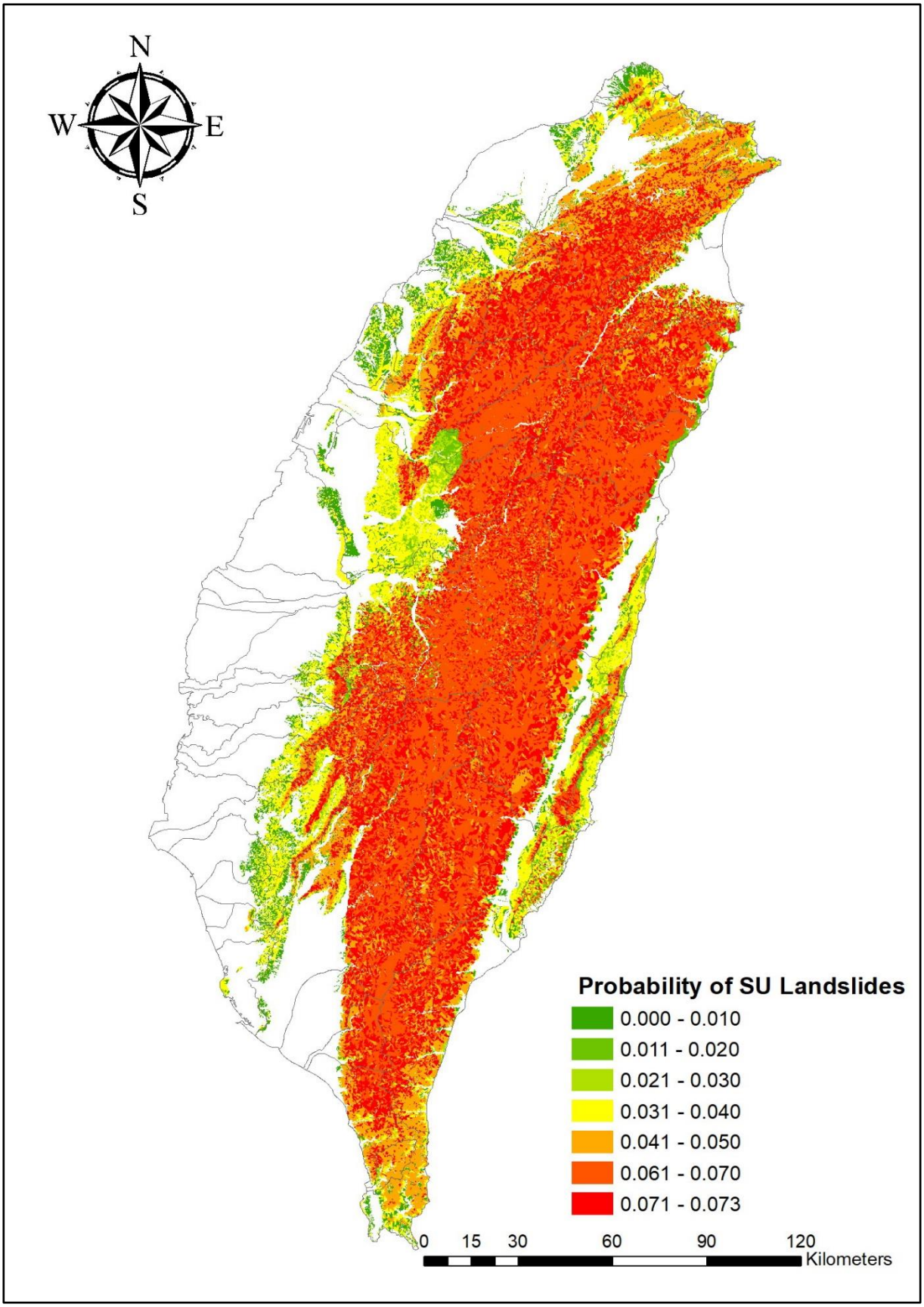


圖 5-13　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上崩塌機率分布

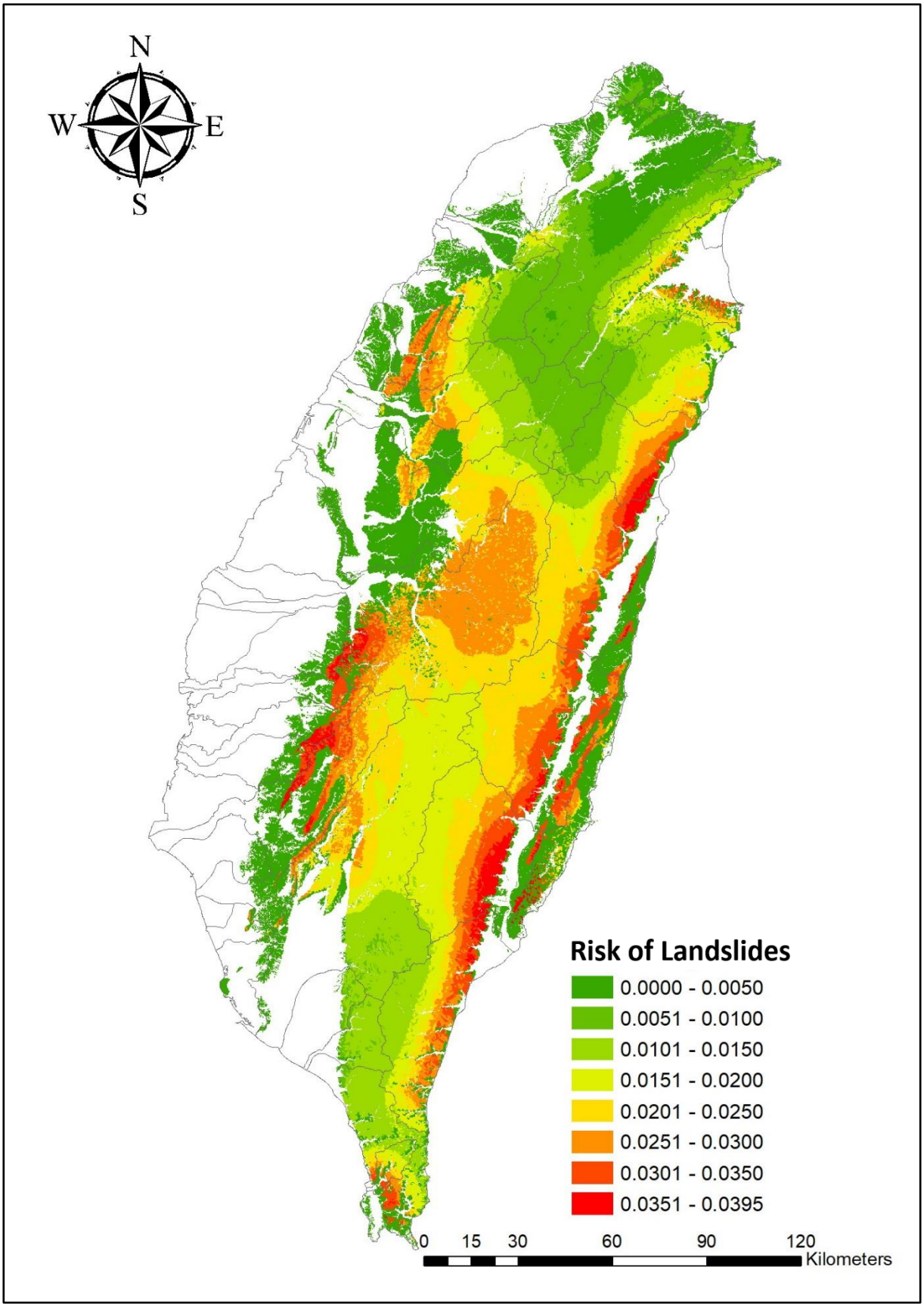


圖 5-14　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上崩塌風險值

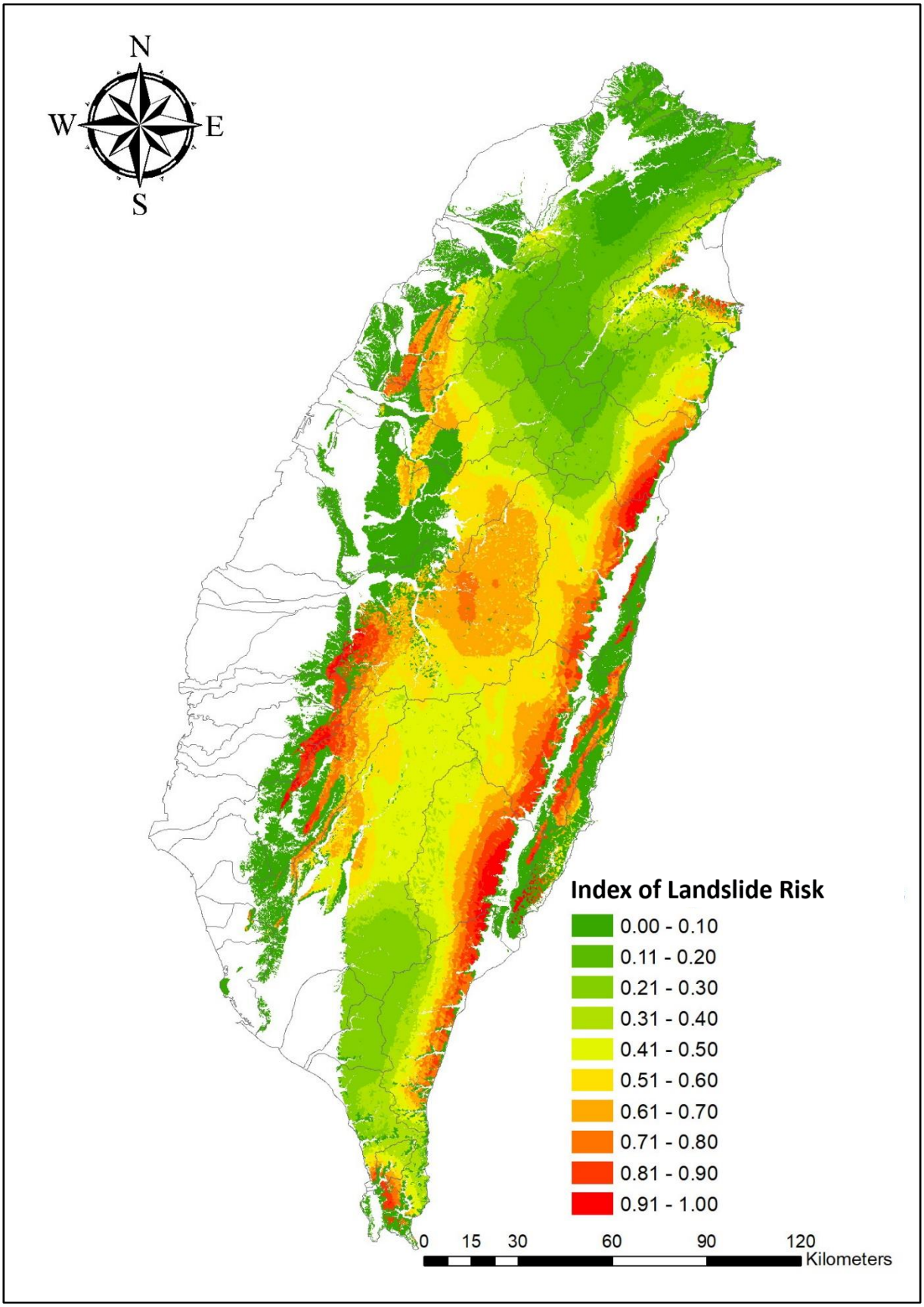


圖 5-15　未來 50 年超越機率 10%發生 0.33g 以上崩塌風險指標

第六章　震後坡地崩塌評估模式建立

震後坡地崩塌之影響評估須基於系統性的評估方法、模式和架構，使在震後早期能夠快速地提供有效的崩塌評估資料，可靠地做為減災規劃及緊急應變之參考依據。本項工作將整合應用既有的坡地易損性分析模式、前述地震危害度分析模式(台灣地震模型)以及地震引致崩塌危害評估模式，針對震後坡地崩塌評估系統架構進行研析，基於水土保持局 FEMA 系統介接中央氣象局即時地震速報資料的架構，提出能夠在震後早期(即時或模擬)評估全台不同震度下崩塌機率之震後坡地崩塌評估模式，將有助於未來震後崩塌災害初步警戒評估之參考。

震後坡地崩塌評估模式首要考量實際地震發生的二種情況，其一是已知斷層的地震，其二則是未知斷層的地震。未知斷層的地震即須依據即時地震速報的震度資料據以進行災害評估，已知斷層的地震則可進一步以線斷層模式進行更細緻的災害評估。一般而言，地震初期通常對於誘發斷層是未知的，甚至大多是盲斷層發生地震，因此地震早期評估通常是先以借助即時地震速報資料的未知斷層地震評估模式，待接收到更為明確的地震資料後確定誘發斷層，再進行已知斷層地震評估模式。然而在平常整備時期，已知斷層模式仍可做為災前減災規劃或情境模擬的工具，了解斷層可能帶來的危害與風險，及早進行相關震前準備和預估可能的防救災資源。因此，以下分別針對已知特定活斷層模式和未知斷層早期平估模式進行介紹。

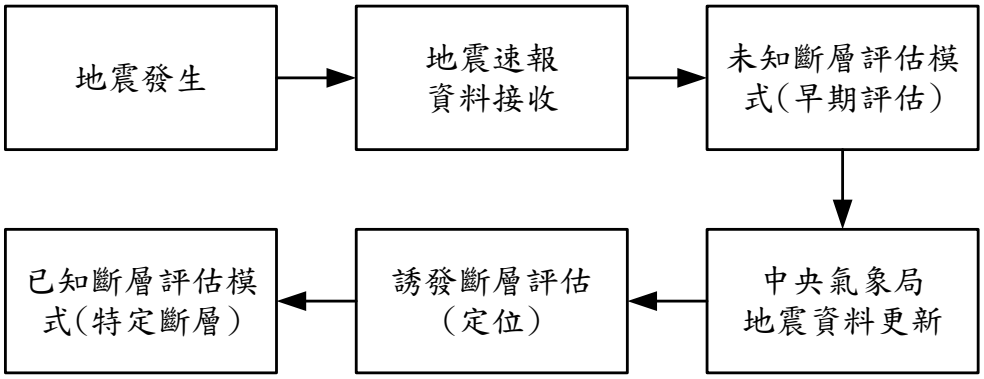
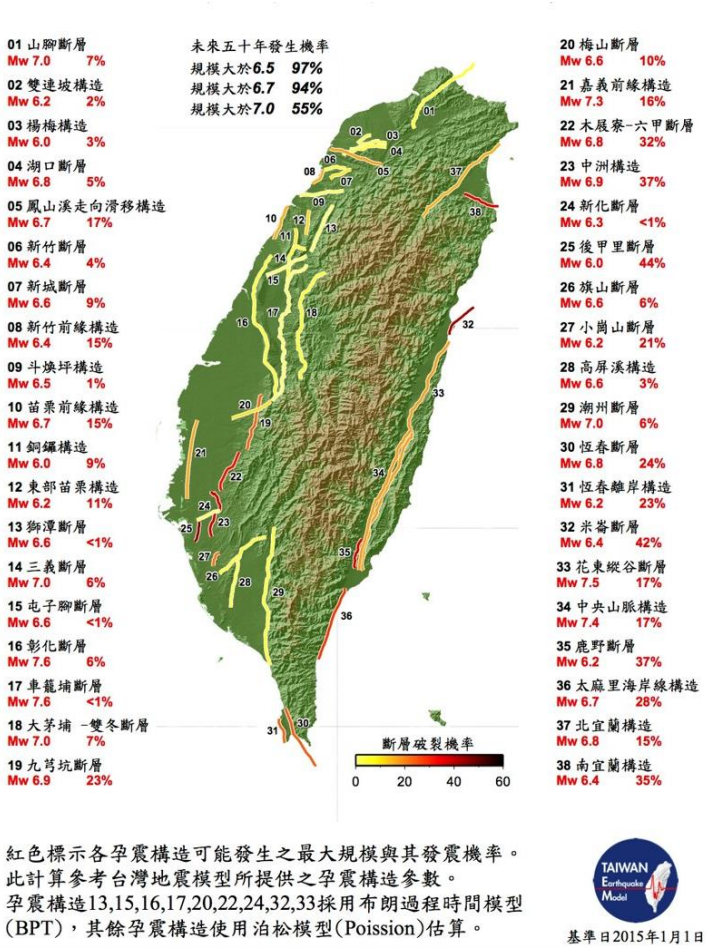


圖 6-1　地震評估模式

第一節　特定活斷層之地震引致崩塌評估方法

台灣地震模型中未來 50 年台灣孕震構造發震機率，如圖 6-2 所示，係針對全台 38 條重要活斷層可能發生之最大規模與其發生機率進行分析，評估未來 50 年全台發生規模大於 6.5、6.7 和 7.0 的機率，分別是 97%、94%和 55%。在這樣的條件下，進一步估計 38 條活斷層可能最大規模與其發生機率，顯示不同斷層的孕震特性及發震可能性，作為地震防護的參考。

因此，特定活斷層之地震引致崩塌評估，即可基於未來 50 年特定活斷層之發震機率設定某斷層震源參數，再以此震源參數推估區域之地表振動強度分布，所得結果代入各類坡地易損性曲線計算地震引致崩塌機率以及崩塌面積，即可表達研究地區在遭受特定活斷層的最大可能地震和地震規模下，坡面因地表振動導致發生崩塌水平投影面積達 5%以上之可能性。



資料來源：國立中央大學地震災害鍊風險評估與管理研究中心提供 (2019)

圖 6-2　未來 50 年台灣孕震構造發震機率

特定活斷層之地震引致崩塌評估流程如圖 6-3 所示，分析過程首先利用未來 50 年台灣孕震構造發震機率設定情境斷層及其最大可能地震和規模，再以此震源參數推估研究地區坡面單元之地表振動強度，所得結果代入各類坡地易損性曲線 $F(x)$進行全台坡面單元之地震引致崩塌機率分析，如式(5-6)，並進一步計算各坡面單元可能崩塌面積(A_{su})，最後彙總得到各集水區坡面單元之地震引致崩塌評估結果(A)。

由於在全台坡面單元資料庫中，坡面屬性資料是與斷層位置相關的，對應不同目標斷層時坡面類型可能不同，這也將影響崩塌機率分析與評估的結果。由於建立全台坡面單元資料庫所需人力及時間需求比較大，須逐一計算各集水區中各坡面單元與各條活斷層之相對位置及關係，這使得坡面單元分類中坡向敏感度因子具備變動條件，各已知斷層所對應的坡面單元分類也將不同，這是本模式最重要的特點。本研究根據未來 50 年台灣孕震構造發震機率圖，如圖 6-2，參考全台各斷層之區位、可能最大規模與其發生機率，在計畫中選定三條活斷層進行特定活斷層之地震引致崩塌評估，分析成果可直接進行特定斷層發震時全台坡面單元崩塌機率及各集水區崩塌量評估，做為防減災之參考。

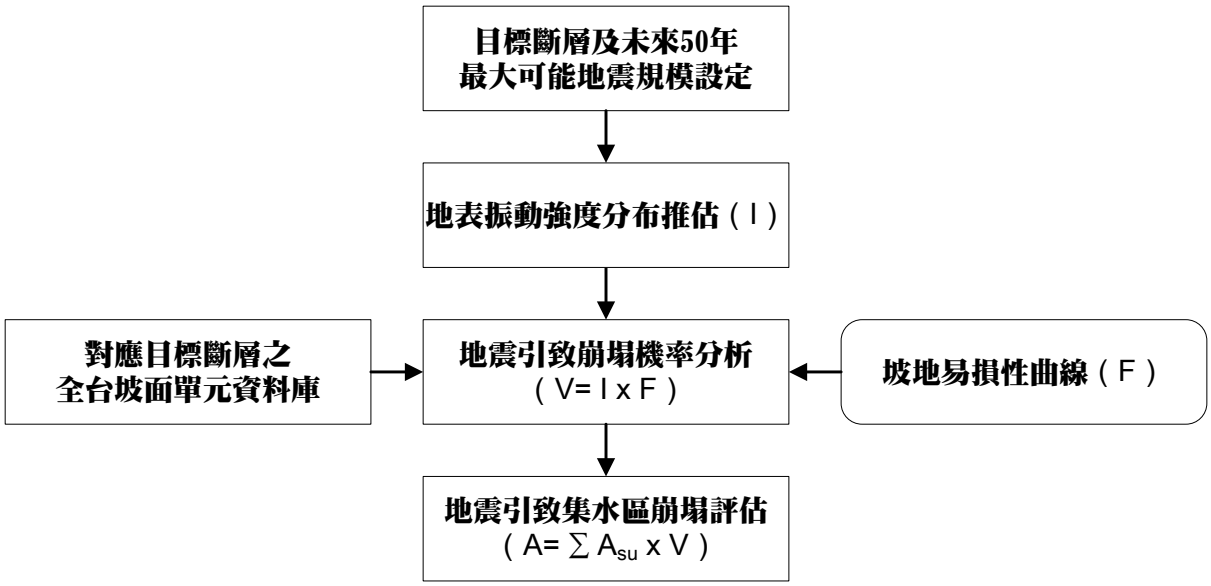


圖 6-3　特定活斷層之地震引致崩塌評估流程

第二節　示範斷層之地震引致崩塌評估

本研究選定的三條活斷層，分別為中部車籠埔斷層、南部九芎坑斷層和東部花東縱谷斷層。根據各斷層位置及最大可能規模作為地震引致崩塌評估之震源參數，並基於坡地崩塌評估基礎資料庫進行全台坡面單元評估。

一、車籠埔斷層事件

最大可能規模 7.6，未來 50 年發生機率<1%。各集水區可能崩塌評估分析結果如表 6-1 所示，包括坡面單元 PGA 之最大最小值，坡面單元崩塌率(RL)之最大最小值，以及各集水區之可能崩塌面積。經評估全台可能總崩塌面積為 29973.57ha，前五高崩塌集中在濁水溪流域(8596.96 ha)、烏溪流域(6400.44 ha)、大安溪流域(4528.71 ha)、大甲溪流域(3998.28 ha)和後龍溪流域(1695.83 ha)，占全部可能崩塌面積 84.14%。各坡面單元地表振動強度分布如圖 6-4 所示，坡面單元崩塌機率分布如圖 6-5 所示，坡面單元可能崩塌面積分布如圖 6-6 所示。

二、九芎坑斷層事件

最大可能規模 6.9，未來 50 年發生機率<23%。各集水區崩塌評估分析結果如表 6-2 所示，經評估全台可能總崩塌面積為 1789.11 ha，前五高崩塌集中在濁水溪流域(678.26 ha)、曾文溪流域(271.41 ha)、朴子溪流域(266.14 ha)、北港溪流域(248.20 ha)和八掌溪流域(228.77 ha)，占全部可能崩塌面積 94.62%。各坡面單元地表振動強度分布如圖 6-7 所示，坡面單元崩塌機率分布如圖 6-8 所示，坡面單元可能崩塌面積分布如圖 6-9 所示。

三、花東縱谷斷層事件

最大可能規模 7.5，未來 50 年發生機率<17%。各集水區崩塌評估分析結果如表 6-3 所示，經評估全台可能總崩塌面積為 41099.19ha，前五高崩塌集中在秀姑巒溪流域(12496.28 ha)、卑南溪流域(8935.78 ha)、花蓮溪流域(8151.92 ha)、台東沿海河系(2601.23 ha)和海岸山脈東側河系(1899.27 ha)，占全部可能崩塌面積 82.93%。各坡面單元地表振動強度分布如圖 6-10 所示，坡面單元崩塌機率分布如圖 6-11 所示，坡面單元可能崩塌面積分布如圖 6-12 所示。

表 6-1　全台各集水區車籠埔斷層事件(M_w=7.6)坡面單元評估

編號	集水區	PGA_{max} (gal)	PGA_{min} (gal)	RL_{max}	RL_{min}	崩塌面積 (ha)
1	蘭陽河流域	166.24	59.47	0.00674	0.00000	81.81
2	磺溪流域	48.97	41.86	0.00002	0.00000	0.01
3	林子坑溪	53.48	49.67	0.00003	0.00000	0.01
4	淡水河流域	187.22	39.96	0.01050	0.00000	184.94
5	鳳山溪流域	143.67	107.88	0.00386	0.00000	11.35
6	頭前溪流域	233.50	114.98	0.02277	0.00000	249.51
7	中港溪流域	260.61	150.00	0.03543	0.00000	328.20
8	後龍溪流域	408.17	192.31	0.14433	0.00000	1695.83
9	大安溪流域	476.12	183.69	0.51164	0.00000	4528.71
10	大甲溪流域	476.08	137.17	0.50050	0.00000	3998.28
11	烏溪流域	474.57	184.59	0.48101	0.00000	6400.44
12	濁水溪流域	476.01	135.76	0.49912	0.00000	8596.96
13	北港溪流域	455.62	291.56	0.33938	0.00000	735.21
14	朴子溪流域	351.81	263.15	0.08990	0.00000	231.16
15	八掌溪流域	315.82	203.66	0.06626	0.00000	373.13
16	急水溪流域	209.31	139.20	0.01496	0.00000	34.48
17	曾文溪流域	299.39	91.99	0.05610	0.00000	903.37
18	鹽水溪流域	108.99	85.73	0.00000	0.00000	0.00
19	二仁溪流域	100.79	69.56	0.00081	0.00000	0.52
20	阿公店溪流域	75.11	64.45	0.00017	0.00000	0.05
21	高屏溪流域	246.50	41.35	0.02837	0.00000	718.83
22	東港溪流域	60.35	44.68	0.00006	0.00000	0.09
23	四重溪流域	26.24	21.14	0.00000	0.00000	0.00
24	卑南溪流域	145.94	56.43	0.00359	0.00000	64.53
25	秀姑巒溪流域	176.25	76.79	0.00837	0.00000	193.51

表 6-1　全台各集水區車籠埔斷層事件(M_w=7.6)坡面單元評估

編號	集水區	PGA_{max} (gal)	PGA_{min} (gal)	RL_{max}	RL_{min}	崩塌面積 (ha)
26	花蓮溪流域	165.08	84.48	0.00615	0.00000	156.77
27	和平溪流域	137.57	62.29	0.00320	0.00000	43.72
28	北海岸沿海河系	51.74	35.65	0.00002	0.00000	0.13
29	桃園沿海河系	122.08	57.27	0.00020	0.00000	0.01
30	香山沿海河系	171.55	140.88	0.00000	0.00000	0.00
31	竹南沿海河系	391.30	213.35	0.12834	0.00000	122.20
32	清水沿海河系	347.82	303.60	0.00835	0.00000	0.87
33	彰化沿海河系	420.18	328.48	0.11208	0.00000	166.55
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	408.09	387.17	0.08401	0.00000	19.79
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	140.76	137.17	0.00000	0.00000	0.00
40	高雄沿海河系	68.63	41.43	0.00006	0.00000	0.00
41	林邊溪流域	52.56	36.40	0.00002	0.00000	0.06
42	南屏東沿海河	37.65	16.34	0.00000	0.00000	0.02
43	台東沿海河系	68.42	26.90	0.00011	0.00000	0.93
44	海岸山脈東側河系	89.78	56.13	0.00042	0.00000	1.05
45	豐濱沿海河系	97.92	78.84	0.00047	0.00000	0.56
46	太魯閣沿海河系	183.39	81.59	0.00916	0.00000	129.83
47	頭城沿海河系	63.35	36.65	0.00008	0.00000	0.15
合計		-	-	-	-	29973.57

資料來源：本研究整理

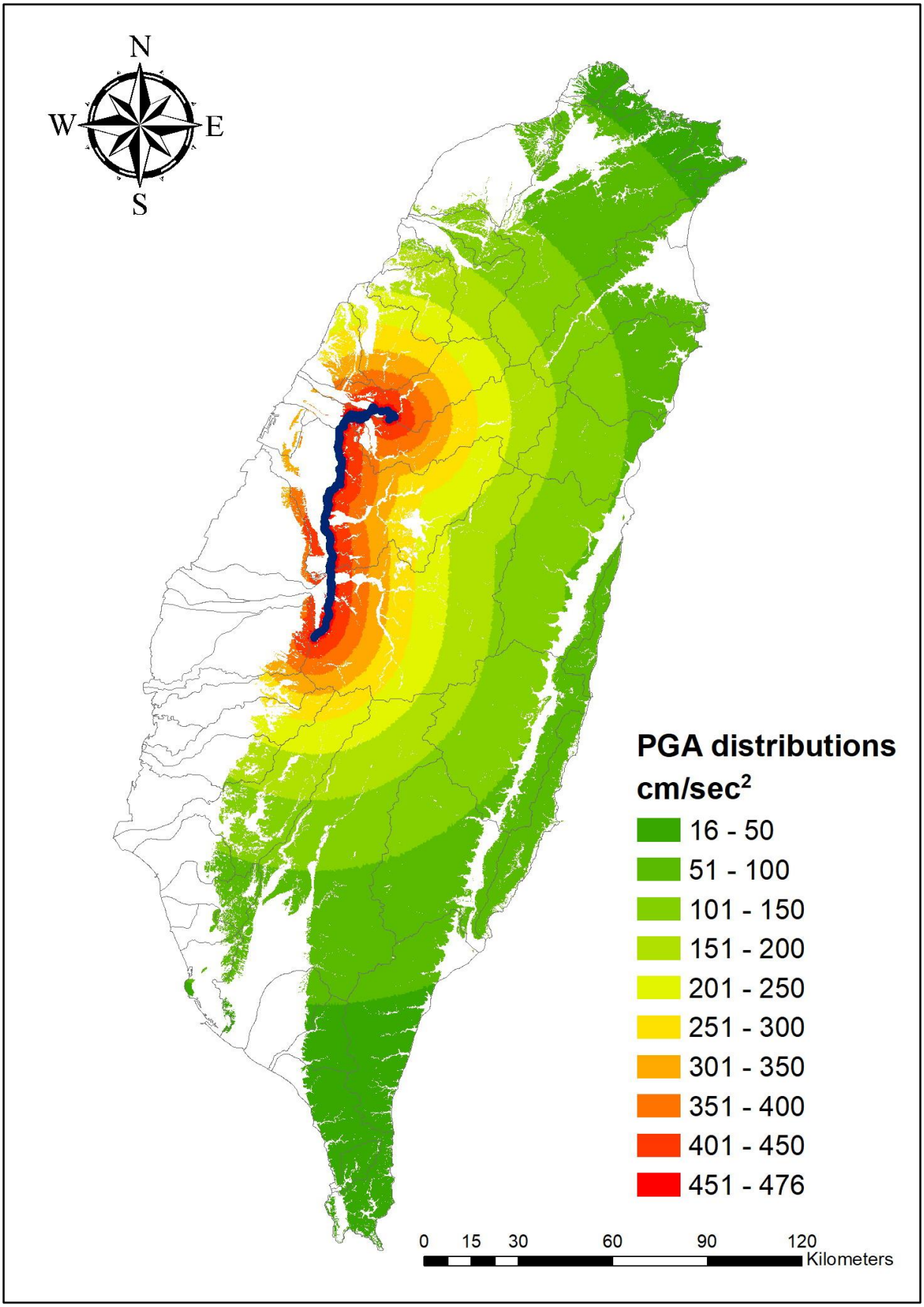


圖 6-4　車籠埔斷層事件(M_w=7.6)之地表振動強度分布

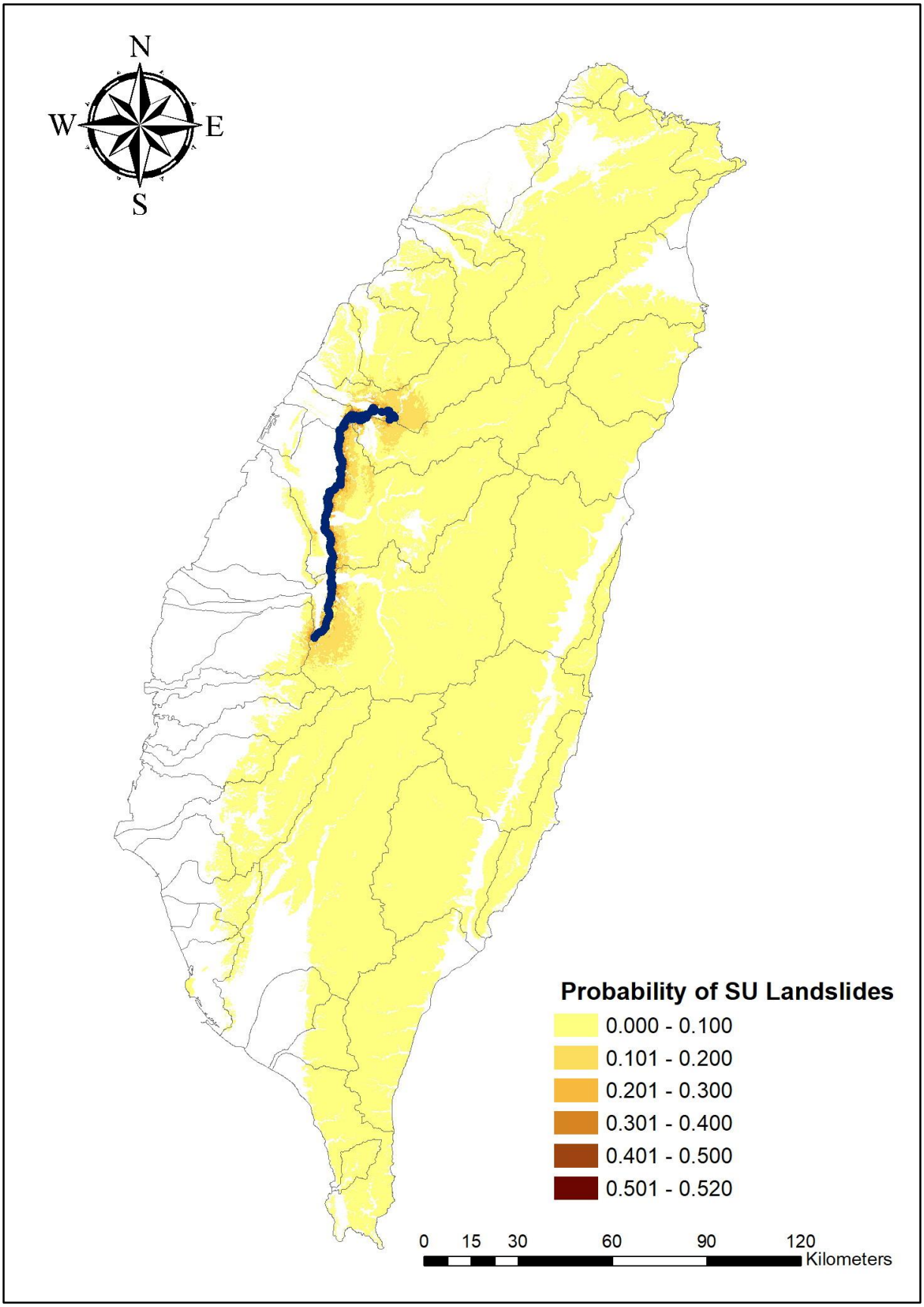


圖 6-5　車籠埔斷層事件(M_w=7.6)之坡面單元崩塌機率分布

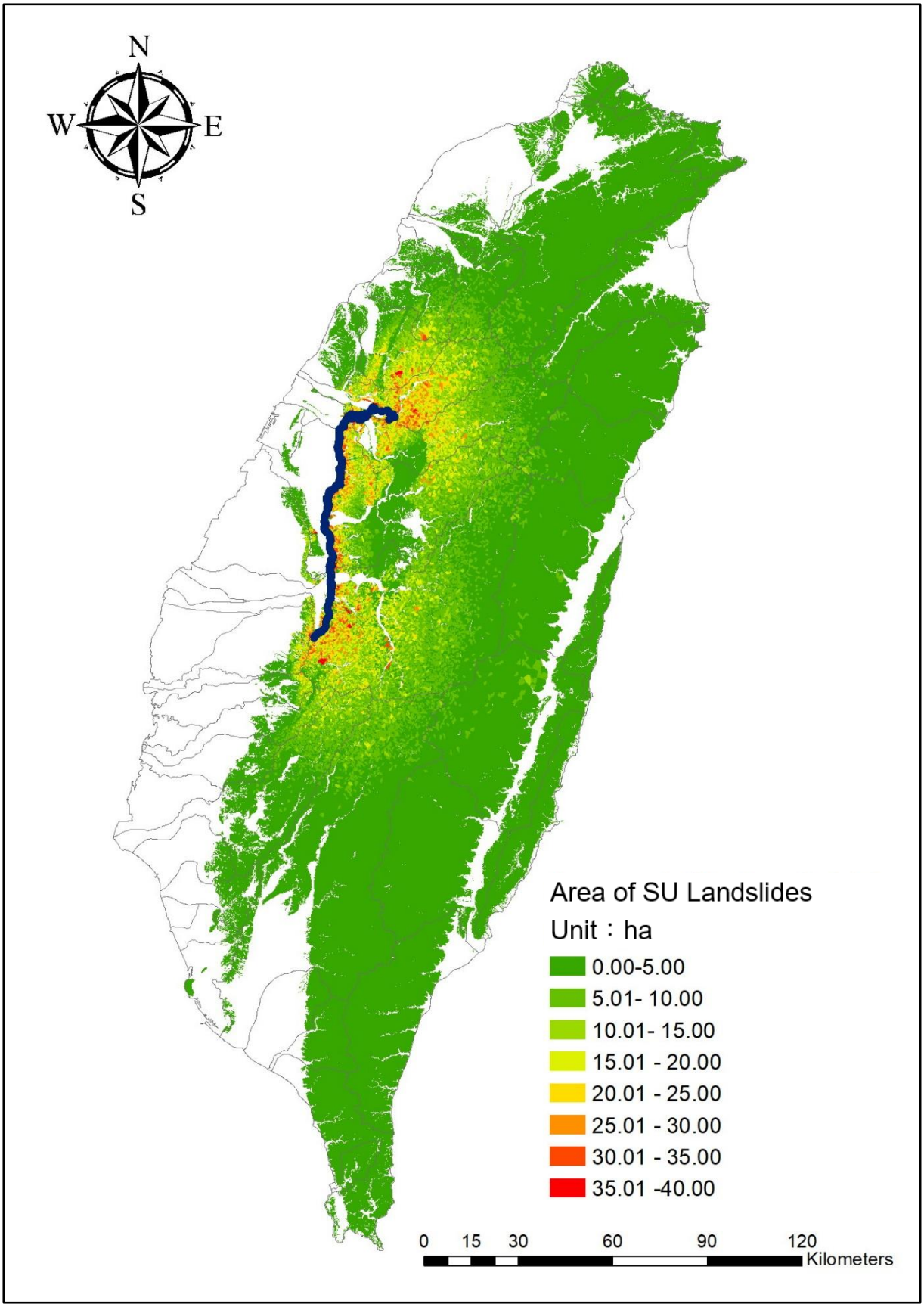


圖 6-6　車籠埔斷層事件(M_w=7.6)之坡面單元可能崩塌面積分布

表 6-2　全台各集水區九芎坑斷層事件(M_w=6.9)坡面單元評估

編號	集水區	PGA_{max} (gal)	PGA_{min} (gal)	RL_{max}	RL_{min}	崩塌面積 (ha)
1	蘭陽河流域	25.20	9.86	0.00000	0.00000	0.00
2	磺溪流域	7.25	6.31	0.00000	0.00000	0.00
3	林子坑溪	7.79	7.33	0.00000	0.00000	0.00
4	淡水河流域	26.27	6.30	0.00000	0.00000	0.00
5	鳳山溪流域	18.73	14.56	0.00000	0.00000	0.00
6	頭前溪流域	28.38	15.74	0.00000	0.00000	0.00
7	中港溪流域	30.42	19.35	0.00000	0.00000	0.00
8	後龍溪流域	43.38	25.04	0.00001	0.00000	0.03
9	大安溪流域	51.51	24.62	0.00002	0.00000	0.05
10	大甲溪流域	71.56	23.05	0.00015	0.00000	0.28
11	烏溪流域	185.61	36.83	0.00071	0.00000	2.91
12	濁水溪流域	319.68	36.85	0.06472	0.00000	678.26
13	北港溪流域	417.50	251.32	0.14327	0.00000	248.20
14	朴子溪流域	417.58	256.66	0.11493	0.00000	266.14
15	八掌溪流域	331.34	195.74	0.04495	0.00000	228.77
16	急水溪流域	210.81	115.97	0.01349	0.00000	23.84
17	曾文溪流域	222.60	65.42	0.01868	0.00000	271.41
18	鹽水溪流域	82.93	61.16	0.00000	0.00000	0.00
19	二仁溪流域	72.68	46.47	0.00016	0.00000	0.06
20	阿公店溪流域	51.57	42.77	0.00002	0.00000	0.01
21	高屏溪流域	153.04	25.47	0.00437	0.00000	64.02
22	東港溪流域	37.49	26.75	0.00000	0.00000	0.00
23	四重溪流域	14.52	11.67	0.00000	0.00000	0.00
24	卑南溪流域	86.26	30.10	0.00031	0.00000	2.36
25	秀姑巒溪流域	87.38	33.52	0.00033	0.00000	2.44

表 6-2　全台各集水區九芎坑斷層事件(M_w=6.9)坡面單元評估

編號	集水區	PGA_{max} (gal)	PGA_{min} (gal)	RL_{max}	RL_{min}	崩塌面積 (ha)
26	花蓮溪流域	60.94	25.72	0.00006	0.00000	0.29
27	和平溪流域	23.42	11.28	0.00000	0.00000	0.00
28	北海岸沿海河系	7.68	5.70	0.00000	0.00000	0.00
29	桃園沿海河系	16.47	8.30	0.00000	0.00000	0.00
30	香山沿海河系	22.27	18.56	0.00000	0.00000	0.00
31	竹南沿海河系	45.71	28.12	0.00001	0.00000	0.00
32	清水沿海河系	72.86	53.60	0.00000	0.00000	0.00
33	彰化沿海河系	205.62	91.53	0.00000	0.00000	0.00
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	260.91	232.33	0.00002	0.00000	0.00
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	117.78	113.59	0.00000	0.00000	0.00
40	高雄沿海河系	45.73	25.54	0.00000	0.00000	0.00
41	林邊溪流域	31.62	20.85	0.00000	0.00000	0.00
42	南屏東沿海河	22.11	8.76	0.00000	0.00000	0.00
43	台東沿海河系	38.79	14.78	0.00000	0.00000	0.02
44	海岸山脈東側河系	40.01	29.73	0.00001	0.00000	0.01
45	豐濱沿海河系	40.46	26.93	0.00000	0.00000	0.00
46	太魯閣沿海河系	37.85	16.80	0.00000	0.00000	0.01
47	頭城沿海河系	9.99	6.04	0.00000	0.00000	0.00
合計		-	-	-	-	1789.11

資料來源：本研究整理

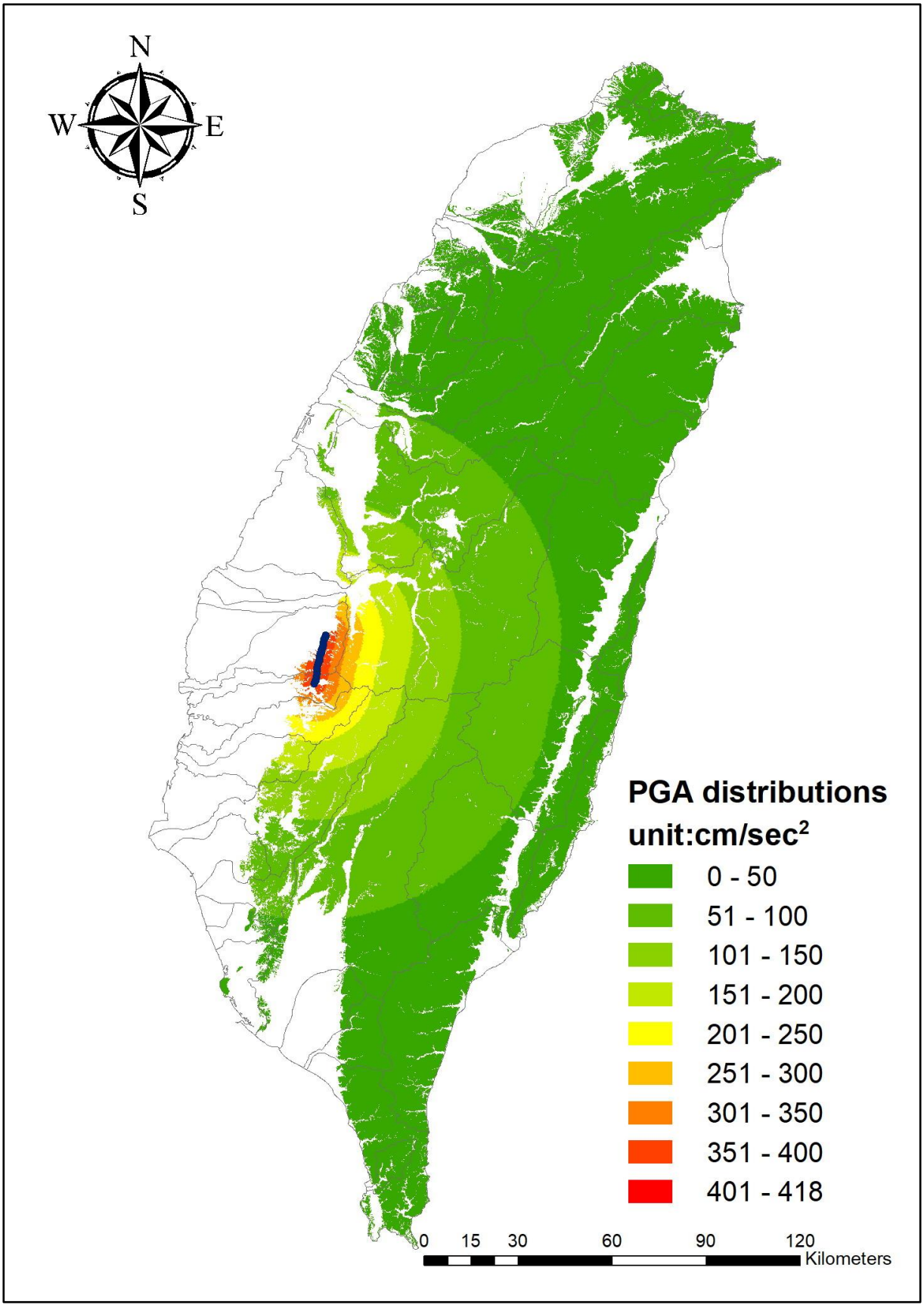


圖 6-7　九芎坑斷層事件(M_w=6.9)之地表振動強度分布

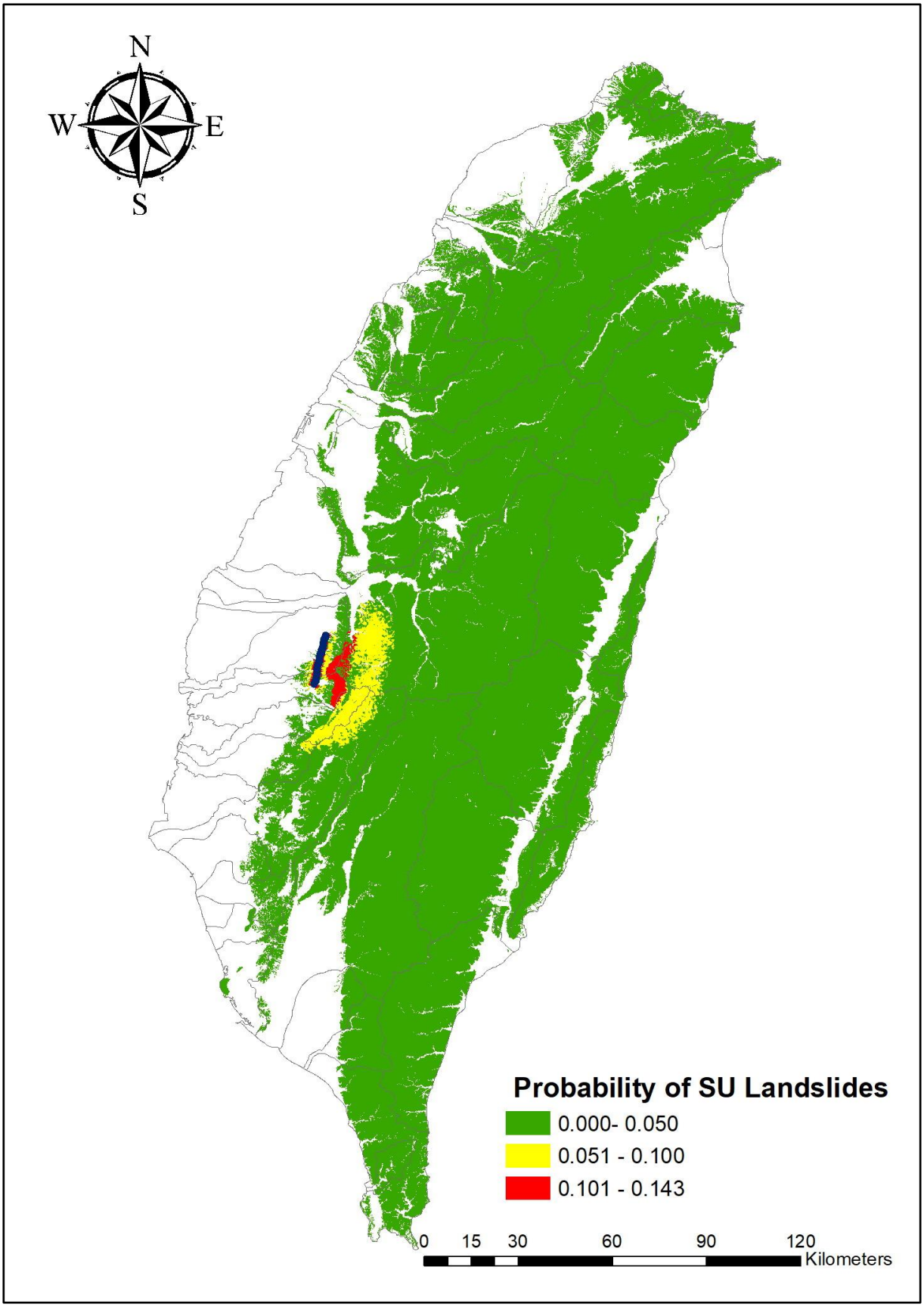


圖 6-8　九芎坑斷層事件(M_w=6.9)之坡面單元崩塌機率分布

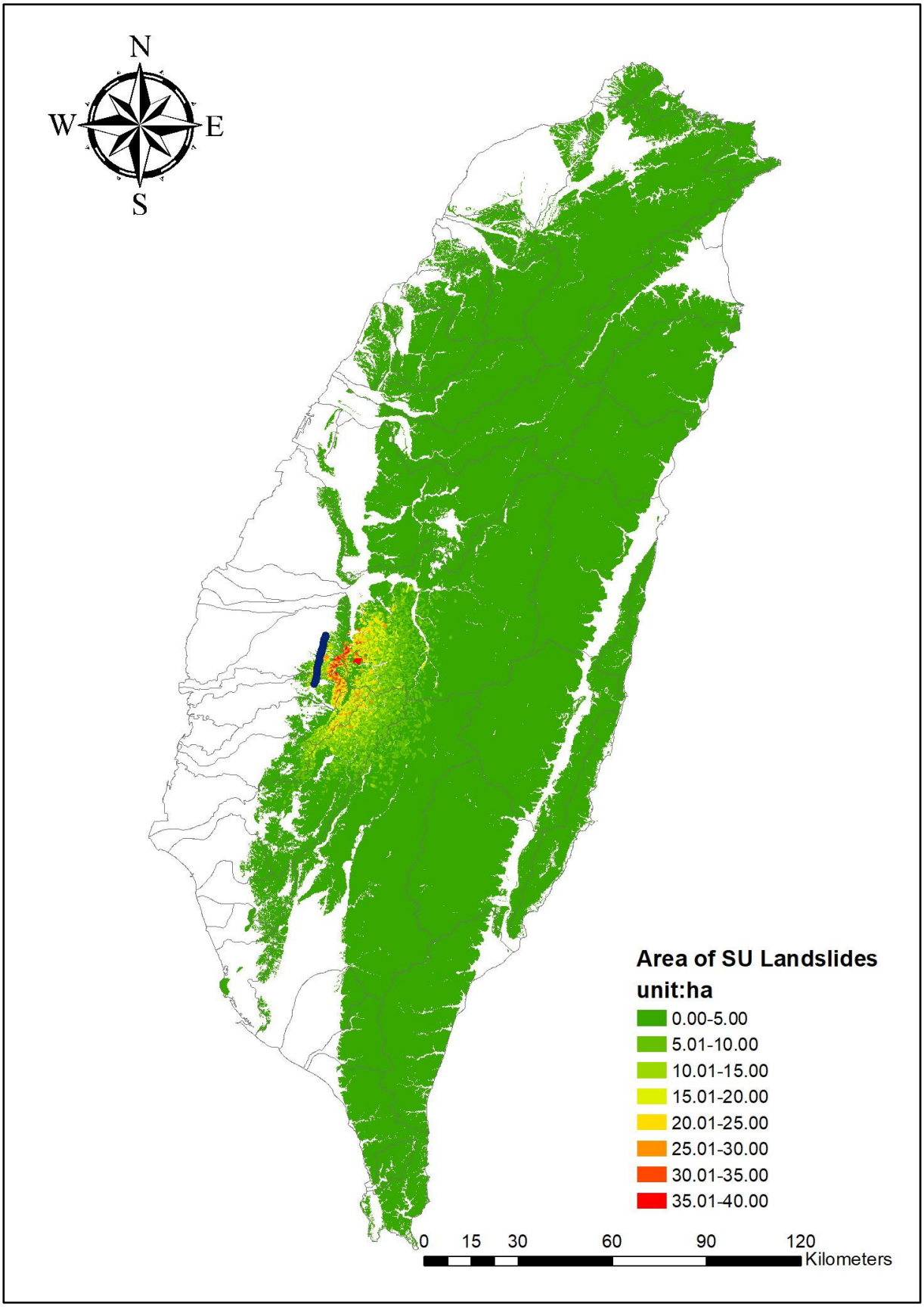


圖 6-9　九芎坑斷層事件(M_w=6.9)之坡面單元可能崩塌面積分布

表 6-3　全台各集水區花東縱谷斷層事件(M_w=7.5)坡面單元評估

編號	集水區	PGA_{max} (gal)	PGA_{min} (gal)	RL_{max}	RL_{min}	崩塌面積 (ha)
1	蘭陽河流域	138.85	60.26	0.00326	0.00000	33.98
2	磺溪流域	34.23	29.90	0.00000	0.00000	0.00
3	林子坑溪	33.77	32.06	0.00000	0.00000	0.00
4	淡水河流域	113.21	33.20	0.00131	0.00000	11.62
5	鳳山溪流域	63.87	43.92	0.00008	0.00000	0.19
6	頭前溪流域	90.25	48.00	0.00046	0.00000	2.46
7	中港溪流域	79.93	48.79	0.00022	0.00000	0.89
8	後龍溪流域	82.53	47.68	0.00027	0.00000	2.01
9	大安溪流域	114.35	54.37	0.00113	0.00000	11.55
10	大甲溪流域	181.20	52.98	0.00881	0.00000	134.74
11	烏溪流域	176.70	54.13	0.00788	0.00000	124.54
12	濁水溪流域	289.34	83.95	0.04880	0.00000	1887.24
13	北港溪流域	88.00	71.53	0.00043	0.00000	0.25
14	朴子溪流域	98.95	73.04	0.00064	0.00000	0.80
15	八掌溪流域	110.14	76.76	0.00121	0.00000	4.89
16	急水溪流域	95.25	75.84	0.00061	0.00000	1.03
17	曾文溪流域	141.56	76.56	0.00335	0.00000	48.52
18	鹽水溪流域	90.66	76.53	0.00000	0.00000	0.00
19	二仁溪流域	106.13	81.76	0.00105	0.00000	0.74
20	阿公店溪流域	95.69	81.90	0.00063	0.00000	0.12
21	高屏溪流域	262.48	78.83	0.03567	0.00000	1606.48
22	東港溪流域	155.93	123.74	0.00484	0.00000	22.45
23	四重溪流域	105.20	73.52	0.00101	0.00000	3.76
24	卑南溪流域	467.11	203.60	0.45677	0.00000	8935.78
25	秀姑巒溪流域	464.60	203.26	0.38803	0.00000	12496.28

表 6-3　全台各集水區花東縱谷斷層事件(M_w=7.5)坡面單元評估

編號	集水區	PGA_{max} (gal)	PGA_{min} (gal)	RL_{max}	RL_{min}	崩塌面積 (ha)
26	花蓮溪流域	455.56	203.01	0.35953	0.00000	8151.92
27	和平溪流域	196.82	94.48	0.01233	0.00000	209.71
28	北海岸沿海河系	45.96	27.57	0.00001	0.00000	0.05
29	桃園沿海河系	54.02	34.55	0.00001	0.00000	0.00
30	香山沿海河系	55.90	46.23	0.00000	0.00000	0.00
31	竹南沿海河系	66.81	46.72	0.00009	0.00000	0.05
32	清水沿海河系	56.34	53.00	0.00000	0.00000	0.00
33	彰化沿海河系	84.01	57.71	0.00000	0.00000	0.00
34	崙背沿海河系	-	-	-	-	-
35	新虎尾溪流域	83.84	80.89	0.00000	0.00000	0.00
36	新虎尾沿海河系	-	-	-	-	-
37	新港沿海河系	-	-	-	-	-
38	布袋沿海河系	-	-	-	-	-
39	佳里沿海河系	76.64	76.15	0.00000	0.00000	0.00
40	高雄沿海河系	98.50	70.22	0.00061	0.00000	0.02
41	林邊溪流域	168.35	110.89	0.00683	0.00000	54.29
42	南屏東沿海河	128.89	58.26	0.00190	0.00000	30.61
43	台東沿海河系	467.07	109.04	0.37462	0.00000	2601.23
44	海岸山脈東側河系	432.67	283.68	0.17414	0.00000	1899.27
45	豐濱沿海河系	451.38	334.83	0.24462	0.00000	1363.78
46	太魯閣沿海河系	333.08	148.16	0.07903	0.00000	1457.81
47	頭城沿海河系	63.38	39.79	0.00007	0.00000	0.13
合計		-	-	-	-	41099.19

資料來源：本研究整理

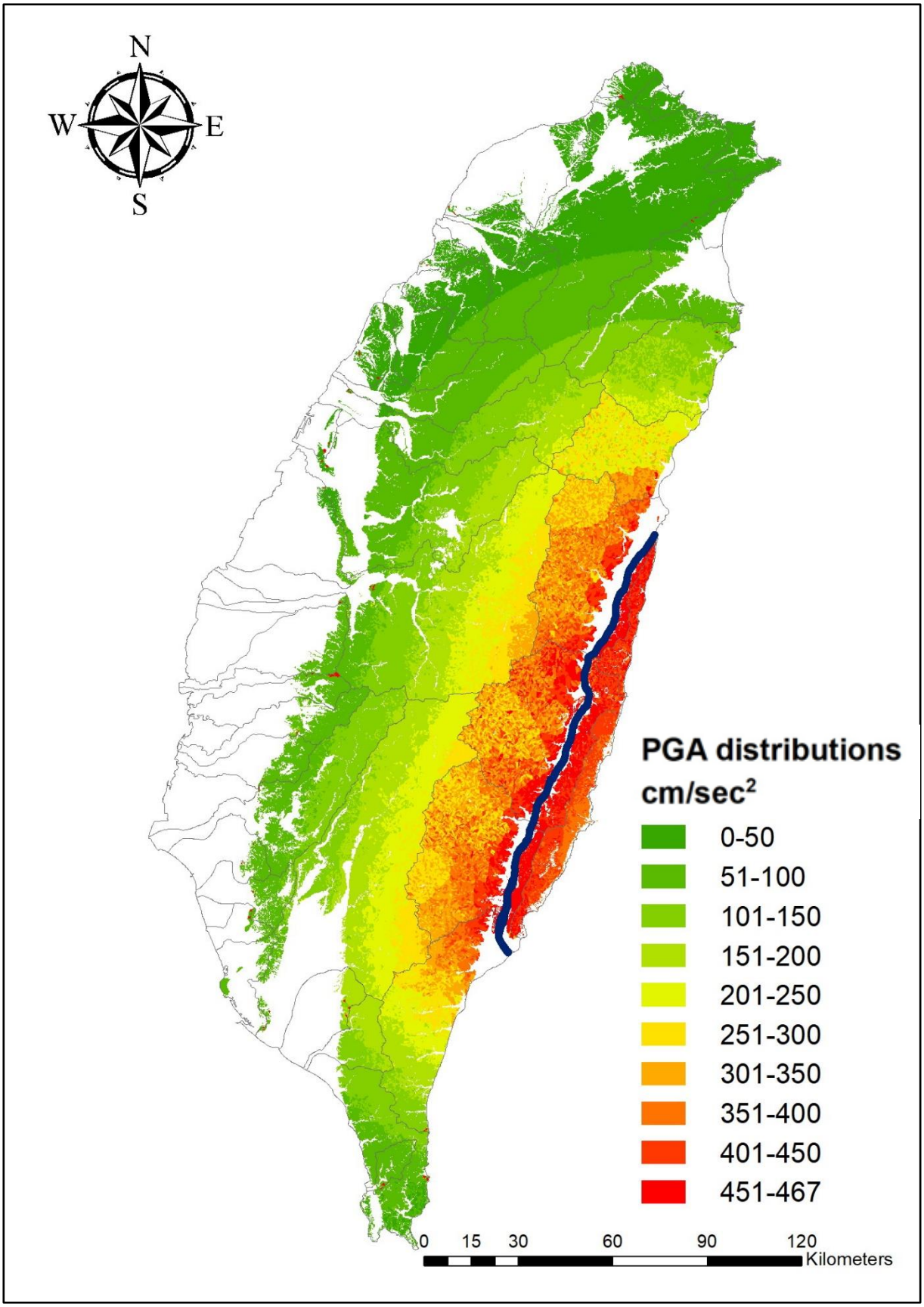


圖 6-10　花東縱谷斷層事件(M_w=7.5)之地表振動強度分布

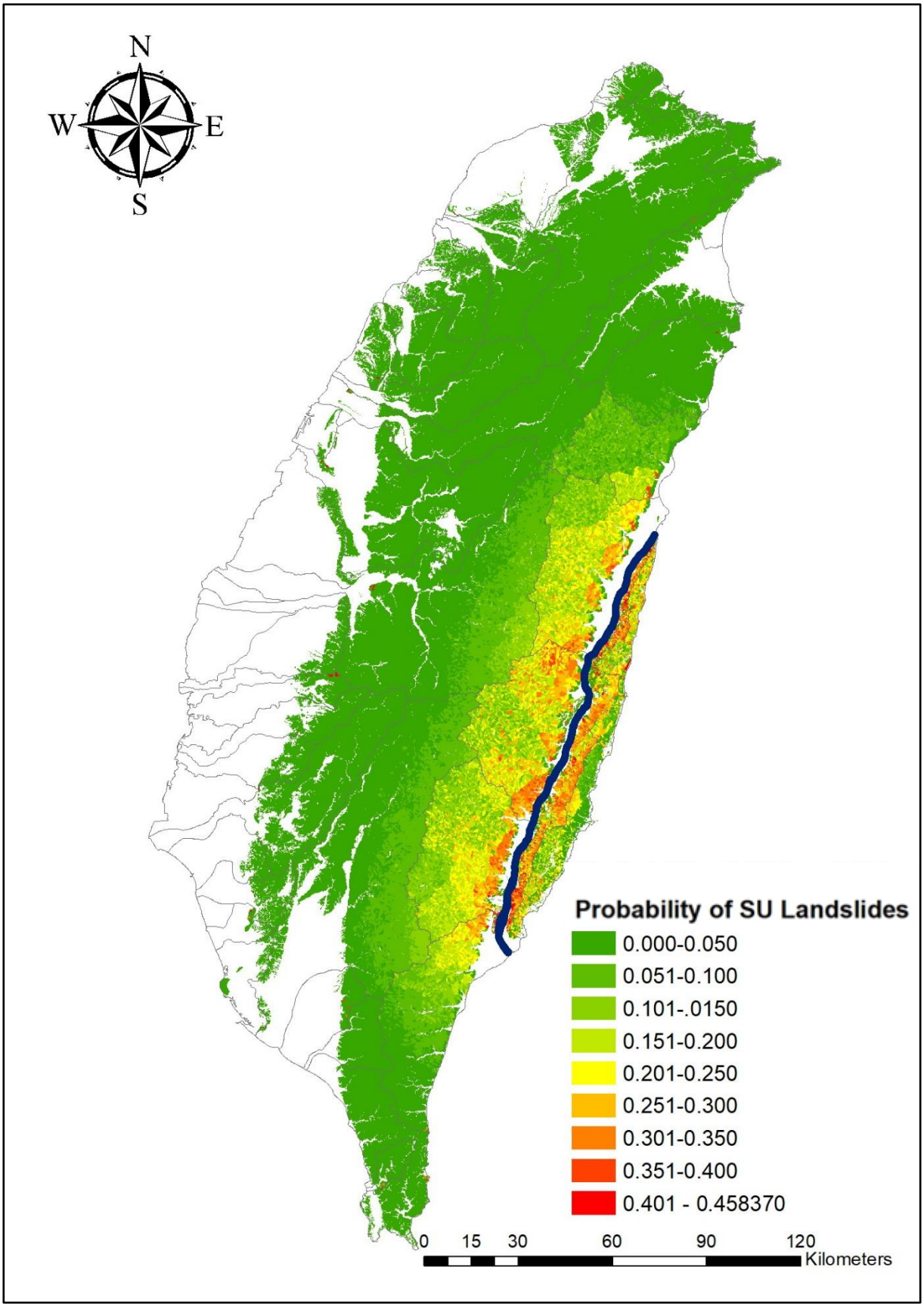


圖 6-11　花東縱谷斷層事件(M_w=7.5)之坡面單元崩塌機率分布

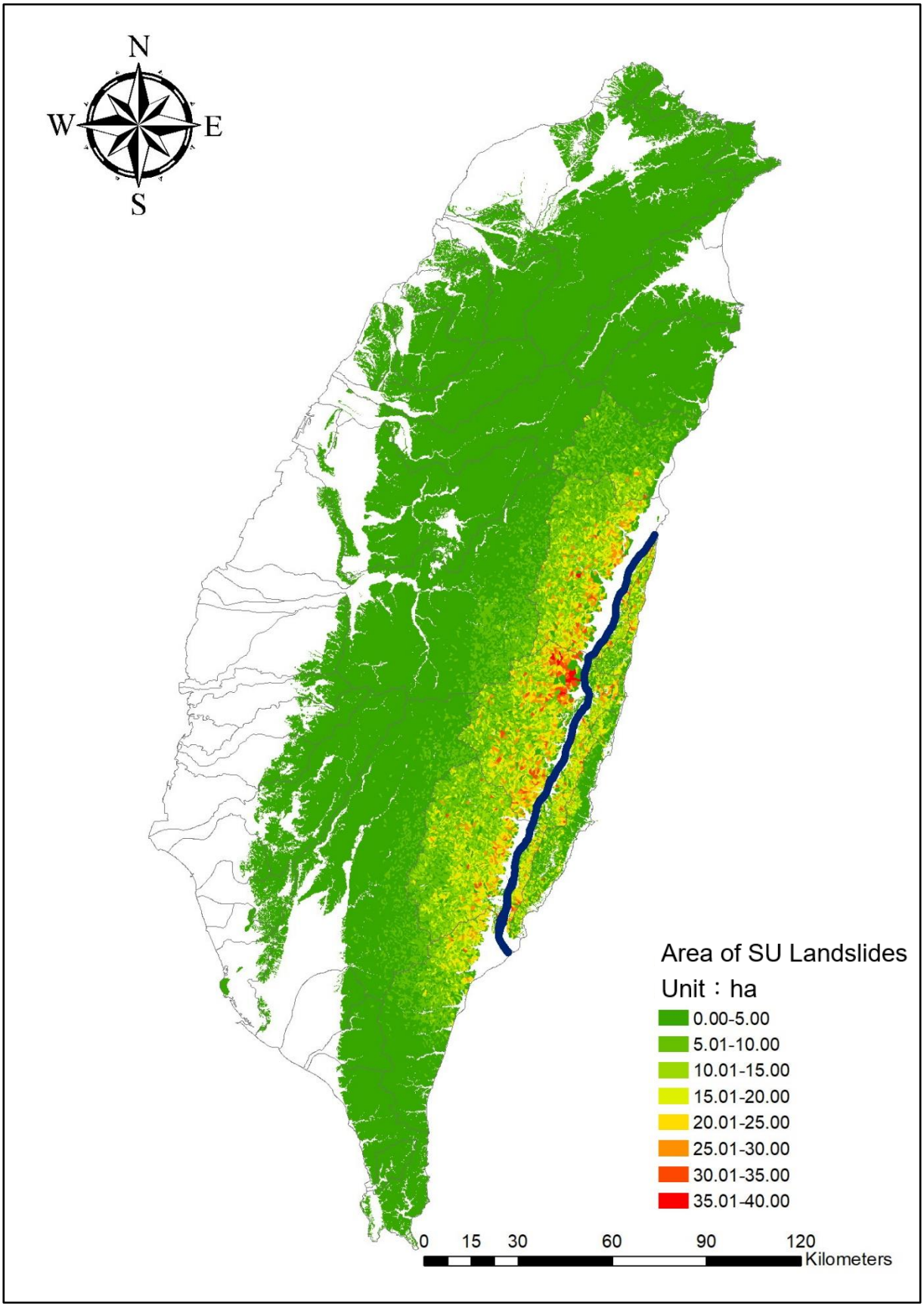


圖 6-12　花東縱谷斷層事件(M_w=7.5)之坡面單元可能崩塌面積分布

第二節　未知斷層之地震引致崩塌評估方法

建立震後坡地崩塌評估模式的目的，主要是為了在地震後的短時間內進行地震損失評估，這也就是地震早期評估方法。雖然在地災防災領域有所謂地震情境模擬可作為災前準備的方案，但在面臨實際地震發生時仍有所不足，尤其是對於未知斷層的地震評估模式，相當大的程度有賴於地震早期評估的手段。而關鍵的要素，則是建立在良好的地震速報體系和觀測系統，透過現今電腦資訊及網絡科技，達到短時間內進行災損評估的目的。而台灣具有全球密度最高的強地動觀測網(平均每 5 平方公里一個測站)，在震後數分鐘內即可估算出全國各地震度，並藉由科學測量定位出地震震央位置及深度，再配合達到先進國家水準的資通訊技術，這樣的條件下使得我國發展地震早期評估具有良好的基礎條件，也讓我們要發展震後坡地崩塌評估模式得到可靠的保證。

震後坡地崩塌評估模式的核心是藉由建立致災誘因與崩塌的簡易關係，能夠快速地評估出災害的大致情況，所要求的並非精確地計算出崩塌量體大小或是具體位置，而是在重大災害性地震後快速地得到可能發生災害的高風險地區或相對嚴重地區，使得災害應變和救災資源得到有效地利用。在這個前提下，坡地易損性曲線即提供了對於地震誘發坡地災害及時評估的解決關鍵。而本研究發展的震後坡地崩塌評估模式的核心技術即是坡地易損性分析，由於易損性分析屬於災害機率化評估，因此在實際應用層面可進行災損評估、風險估計等分析。也就是說，對於災害的平時減災、前期整備、災中應變皆可利用這個模式，提供一個具備學理基礎的可靠依據。

目前，水土保持局的「土石流防災應變系統」(簡稱 FEMA)，如圖 6-13，已與中央氣象局介接全國各行政區觀測 PGA、全國 PGA 網格資料及強震警報資料，故已發展完成地震觀測 PGA 資料庫接收與分析模組，於地震事件發生時，分析受影響之土石流警戒分區，並發送通知水土保持局，以利用掌

控土石流潛勢地區受影響程度。並依據水土保持局土石流警戒基準值動態性調整機制，地震震度達 5 級時，得依據實際情況調整受影響地區之土石流警戒基準值一級距(50mm)。



圖 6-13　水保局土石流防災應變系統(FEMA)

在早期評估的災害應變應用上，須建置可靠的地震速報接收系統，當地震發生後，能夠讓中央氣象局的地震速報資料可在 3~5 分鐘內接收、評估完成並發送速報，而速報資料包括地震時間、地震深度、地震規模、震央位置、各地震度、各項評估結果等訊息。而 FFEMA 系統於地震強震警報發布時，主要即是根據中央氣象局介接的網格化震度資料，FEMA 系統主要功能為接收與處理原始 PGA 網格資料，並寫入至資料庫做為後續分析使用，其處理流程如圖 6-14 所示，在資料處理的介面上，主要包括接收 PGA 網格資料、產生 PGA 影像檔等功能，並能夠適當地插補缺露資料(IDW 內插)。

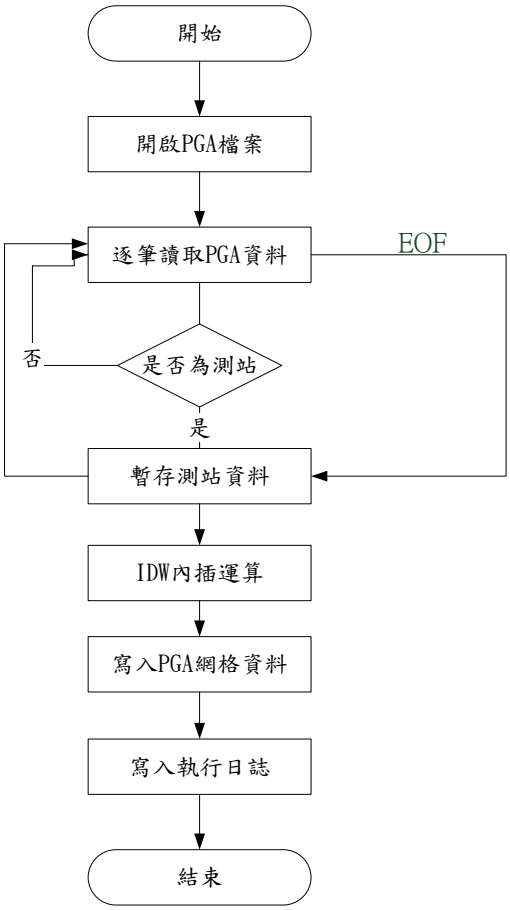


圖 6-14　FEMA 系統接收 PGA 網格資料流程

前述 FEMA 的氣象局介接訊息中對於本研究坡地崩塌評估直接相關的即是震度資訊，而震度資訊無須透過中央氣象局伺服器即可透過 FEMA 後台進一步運算，快速得到坡面單元震度等資料，即可進一步進行坡地崩塌評估分析。此外，在地震發生後，震後坡地崩塌評估模式主要包括地震測站震度資料蒐集、強地動因子推估、坡面單元崩塌率計算、集水區崩塌評估等。除了崩塌評估模式，評估基礎資料建置也相當重要。如表 6-4 所示，坡地評估基礎資料庫架構主要包括全台坡面單元編號、坡面類型、坡地易損性參數等內容，當震度資料蒐集後，藉由坡面單元的強地動因子推估計算各坡面單元之震度值，導入震度值欄位後即可利用資料庫計算各坡面單元之崩塌率，進而繪製地震事件引致之崩塌機率分布地圖，此快速災損評估資料即可作為震後崩塌風險或災害警戒等初步評估之參考。整體震後坡地崩塌評估模式流程如圖 6-15 所示。

表 6-4　坡地評估基礎資料庫架構

坡面編號	坡面類型	FC 中位數	FC 標準差	震度值	崩塌率
1	G1A1S1	…	…		
2	G1A1S2	…	…		
3	G1A1S3	…	…		
…	…	…	…		

資料來源：本研究整理

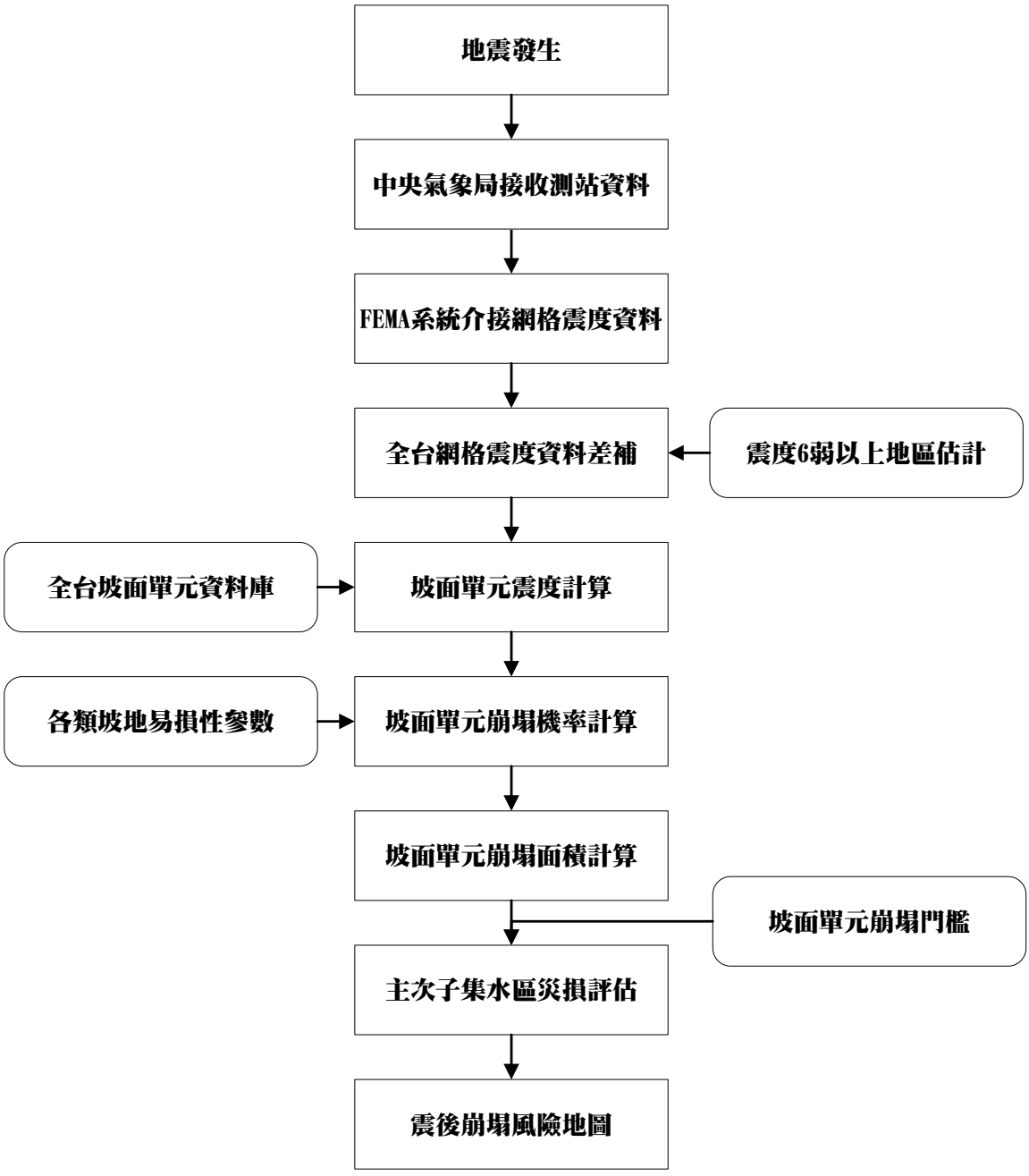


圖 6-15　震後坡地崩塌評估模式流程

上述震後坡地崩塌評估模式亦可以模擬方式進行,分析步驟說明如下:

1. 模擬事件選取

模擬事件主要定義地震參數，地震規模設定通常為線震源模式(對於已知斷層已有詳實開挖調查，可以採用面震源模式)，因此地震參數包括了震源深度、芮氏規模、震央位置等。

2. 地表加速度分布推估

根據模擬之斷層事件、地震深度、地震規模、震央位置，可藉由水平地表震度衰減率公式推估地表加速度分布，得到各地震度值，推估尺度為 100 X 100 m^2 之網格作空間尺度，並進一步計算坡面單元的震度值，例如本研究以各單元內網格的平均震度作為代表震度值。

3. 坡面單元崩塌機率計算

利用坡面單元的代表震度值,可在各類坡面的坡地易損性曲線上,根據 PGA 對應之曲線機率值，計算得到每個坡面單元的崩塌機率。

4. 主次子集水區災損評估

基於坡面單元的崩塌機率，可直接利用坡面單元資料庫中的有效面積求出其崩塌量,該崩塌量的物理意義為某一程度以上的崩塌損失。將子集水區中各坡面單元的崩塌量加總累計,即為該集水區的可能崩塌損失總量,可了解各子集水區可能之崩塌規模。

發展震後坡地崩塌系統，首要條件是針對各斷層建立完整詳實的坡面單元評估資料庫,才能夠針對特定活斷層進行震後坡面崩塌評估,評估結果可直接呈現斷層地震發震時之坡面單元崩塌機率和崩塌面積。然而建置完整的坡面單元評估資料庫所需要人力時間，建議可先劃分北、中、南、東 4 個地震分區的方式建置對應的坡面單元評估資料庫，再逐步擴充建置完整詳實的坡面單元評估資料庫，此方式亦可應用於未知斷層之地震引致崩塌評估，將有利於未來相關單位震後崩塌風險和警戒機制等實務應用參考。

第七章　結論與建議

一、109 年 1 月 1 日施行之新制地震震度分級表，將原 8 級距擴增為 10 級距，為精進本計畫坡地易損性曲線及探討其適用性，本研究依據新版地震震度分級表所定震度範圍，建立震度 6 弱以上區域的坡地易損性曲線，作為震後坡地崩塌評估模式建立之基礎。

二、震後崩塌危害評估模式係以坡面單元為評估單元，然而坡面單元繪製所需之時間和人力需求比較高，本計畫以中央地質調查所產製之全臺坡面單元作為評估基準，該圖資相較之下較為客觀可靠，圖資業經產製單位校驗具可靠度，並已授權水土保持局使用。而本研究團隊在取得全台圖資後，已完成比對檢視其與地形特徵相符程度，比對結果顯示該套圖資品質可靠良好，可作為本研究評估單元之基礎圖資。

三、未來地震情境下之崩塌推估具有一定的不確定性，本研究所建立之地震引致崩塌危害評估方法，係基於地震危害度分析和坡地易損性曲線分析。藉由地震危害度分析之再現期 475 年之地震引致崩塌機率分析，可建立全台地震引致崩塌機率分布和全台地震引致崩塌面積分布；藉由未來 50 年超越機率 10%地震引致崩塌風險評估，可建立全台地震引致崩塌機率分布和全台地震引致崩塌風險，探討未來地震情境下之崩塌可能性及其風險。

四、本計畫選定三條斷層完成特定活斷層之地震引致崩塌評估，分別為中部車籠埔斷層事件(規模 7.6)、南部九芎坑斷層事件(規模 6.9)和東部花東縱谷斷層事件(規模 7.5)，並完成全台各集水區之震後坡地崩塌評估，評估結果顯示本研究發展之震後崩塌評估模式可應用於特定活斷層之地震引致崩塌評估。對於不同斷層、不同規模地震評估結果可表達震後坡地崩塌之可能性，未來在實際應用上可系統化計算已知斷層之震後可能引發坡地崩塌的機率和崩塌量體，作為緊急應變之參考依據。

五、震後坡地崩塌評估模式整合坡地易損性分析、地震危害度分析(台灣地震模型)以及地震引致崩塌風險分析，未來可進一步進行系統化架構研究，本研究已初步基於 FEMA 系統接收 PGA 網格資料流程，提出系統化評估可行方式，建議可作為相關單位震後崩塌風險或警戒機制等實務應用參考。

六、震後坡地崩塌系統需針對各斷層建立完整詳實的坡面單元評估資料庫，然而建置完整的坡面單元評估資料庫所需要人力時間，建議可以北、中、南、東 4 個地震分區的方式建置對應的坡面單元評估資料庫，未來再逐步擴充建置完整詳實的坡面單元評估資料庫，此方式亦可應用於實際地震時未知斷層之地震引致崩塌評估，有利於實際地震後之崩塌風險評估和警戒機制等實務應用參考。

參考文獻

王文能、尹承遠、陳志清、李木青(2000)。九二一地震崩塌地現況與災害防治，九二一震災後中日土砂災害調查及治理研討會論文集，79-90頁。

王美惠(2008)。應用 SPOT 衛星影像及 GIS 於崩塌地潛感分析之研究－以稍來溪為例。

王嘉燁(2002)。GPS/GIS 應用於南橫公路邊坡崩塌災害調查與潛感危險路段之劃定研究。

行政院農業委員會(2012)。水土保持技術規範。農水保字第 1011862646 號公告修正。

何春蓀(1999)。普通地質學。國立編譯館(修訂第三版)

吳佐川(1993)。台灣地區崩塌地區域性之研究。

吳俊鋐、陳樹群(2004)。崩塌潛勢預測方法於台灣適用性之初探。

呂政諭(2001)。地震與颱風作用下阿里山地區公路邊坡崩壞特性之研究。

李三畏(1984)。台灣崩塌地問題探討。地工技術 7：43–49。

李三畏(1986)。台灣的崩塌地。水土保持文獻專輯。

李伯薔(2015)。應用坡面單元於崩塌易損性曲線。

李秉乾、周天穎、雷祖強、林哲彥、黃碧慧、吳政庭(2005)。利用集集大地震資料建立建築震害危險度評估模式 I-地震建築損害資料庫建立。中國土木水利工程學刊。17(1)：121–131。

李秉乾、周天穎、雷祖強、林哲彥、吳政庭(2005)。利用集集大地震資料建立建築物地震危險度評估模式 II. 易損曲線與風險評估分析。中國土木水利工程學刊。

李秉乾、雷祖強、謝孟勳、黃亦敏、方耀民、周天穎、連惠邦(2015)。104年應用坡地易損性模式於崩塌風險評估與警戒模式研析。行政院農業委員會水土保持局，委託計畫成果報告。

李秉乾、劉純之、雷祖強、謝孟勳、黃亦敏、方耀民、周天穎、連惠邦(2014)。易損性曲線於坡地崩塌警戒模式應用與坡地巨災保險研析。行政院農業委員會水土保持局，委託計畫成果報告。

李馨慈(2010)。重大地震地表擾動衰減特性於震後高強度降雨之崩塌潛勢分析。

沖村孝(1996)。六甲山地山腹斜面的崩壞，兵庫縣南部地震地形災害，pp.110-126，古今書院。

林彥享(2003)。運用類神經網路進行地震誘發崩塌之潛感分析。

林書毅(1999)。區域性山坡穩定評估方法探討-以林口台地為例。

林淑媛(2003)。地形地質均質區之劃分與崩塌因子探討。

林慶偉，謝正倫，王文能(2002)。集集地震對中部災區崩塌與土石流之影響，集集地震對中部災區崩蹋與土石流之影響/臺灣之活動斷層與地震災害研討會，124-134 頁。

林慶偉、謝正倫(2001)。桃芝風災土石流災害初步調查成果，土石流災害及防治對策研討會 2001 年論文集，57-69。

施俊廷(2005)。台灣中部山區道路邊坡崩塌特性之數值模式建置研究。

高雅嫻(2005)。應用崩塌密度及累積位移法於地震引起之崩塌潛感分析。

國立中興大學(2006)。水庫集水區崩塌地潛勢分析及崩塌土方量估算之研究。經濟部水利署。

張子瑩(2002)。降雨與地震對形成崩塌區位之比較研究，國立台灣大學地理環境資源學所碩士論文。

張石角(1987)。山坡地潛在危險之預測及其在環境影響評估之應用。中華水土保持學報，18(2)：41–48。

張石角(1995)。台灣東部之環境地質分區與崩塌類型，工程環境月刊，第14 期，59-85 頁。

張政亮，張瑞津，紀宗吉(2005)。遙測與地理資訊系統應用於大甲溪流域之崩塌災害的調查與分析，地理研究第 43 期，101-122 頁。

張哲銘(2004)。21 地震後大甲溪流域全方位治理之研究。

張碩芬(2013)。利用坡面單元進行崩塌潛感分析。

莊光澤(1994)。阿里山地區道路邊坡穩定性因子之探討。

陳永寬(1994)。數值地形模型應用於潛在崩塌地之預測。

陳宏宇(1999)。地質災害與山坡地開發，地工技術 第 73 期，31-44 頁。

陳志豪(2009)。集集地震後荖濃溪流域崩塌發生特性分析。

陳俞旭(2008)。地震對崩塌與土石流發生影響之研究。成功大學水利及海洋工程學系碩士論文,臺南。

陳信雄(1995)。崩塌地調查與分析。渤海堂出版社，臺北。

彭文飛(2008)。地震引起崩塌之潛勢圖製作-考慮地形放大效應與土體滑動堆積行為。

曾聖權(2005)。SPOT 衛星影像應用於陳有蘭溪流域崩塌調查之研究。

游中榮(1996)。應用地理資訊系統於北橫地區崩塌潛感之研究。

費立沅(2009)。臺灣坡地災害與地質敏感區的關係。地質，28(1)：16–22。

馮梓琁(2007)。九分二崩塌塌地變遷之研究。

黃臺豐(1999)。瑞里地震誘發之崩塌，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。

奧西一夫(1996)。六甲山地的斜面崩壞災害特徵，兵庫縣南部地震地形災害，pp.127-142，古今書院。

楊佳勳(2001)。地震對控制邊坡破壞之內在因子的影響之研究。

楊智堯(1999)。類神經網路於邊坡破壞潛能分析之應用研究。國立成功大學土木工程研究所碩士論文。

溫振宇(2005)。結合地震與颱風因子之崩塌模式分析。

葉錦勳(2003)。台灣地震損失評估系統－TELES。國家地震工程研究中心報告(報告編號：NCREE-03-002)，臺北市：國家地震工程研究中心。

詹永振(2001)。台 14 線公路邊坡崩塌影響因子之探討。

廖軒吾(2000)。集集地震誘發之崩塌，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。

廖啟岳(2008)。大漢溪流域崩塌地發生特性分析。

廖啟雯(2004)。機率式地震誘發崩塌危害度分析–以國姓地區為例。

劉盈劭(2001)。地形敏感性的比較研究-以陳有蘭溪北段小支流為例，國立臺灣師範大學地理研究所碩士論文，138 頁。

劉盈劭(2013)。陳有蘭溪源流區之崩塌與土石流發生特性與空間差異：以和社溪流域為例。

潘國樑(1985)。台灣省重要都會區環境地質資料庫。

潘國樑(2007)。山坡地的地質分析與有效防災。科技圖書股份有限公司。

鄭元振(1992)。地理資訊系統在區域邊坡穩定分析之應用—中橫公路天祥至太魯閣段。

鄭傑銘(2003)。應用 GIS 進行豪雨及地震引致崩塌之潛感性分析。

賴志強(2007)。台灣地區降雨及地震誘發崩塌之特性研究。國立成功大學水及海洋工程學系碩士論文。

謝有忠(1999)。陳有蘭溪流域土石流發育之地質控制，國立成功大學地球科學研究所碩士論文，120 頁。

謝孟勳(2013)。以網格集群最大概似法建立建築物易損性曲線及其用於震災緊急運送路徑之選擇。逢甲大學土木及水利工程博士學位學程博士論文。

謝昂泰(2014)。應用坡面單元在崩塌易損性曲線之研究，逢甲大學土木工程學系碩士論文。

齋藤迪孝(1980)。斜面崩壞予測。土と基礎，29(5)，72–81。

簡李濱(1992)。應用地理資訊系統建立坡地安定評估之計量方法。

簡瑋延(2011)。應用物件導向分類方法自動產製坡面單元，國立中央大學應用地質學系碩士論文。

藍世欽(2000)。工程地質因子對道路邊坡穩定性之影響。

蘇苗彬(2009)。坡地防災預警技術(二)－坡地災害的分類。水保技術，2(4)：144–150。

Alfredo H-S. Ang and Wilson H. Tang. (1975). Probability Concepts in Engineering Planning and Design Vol 1, Basic Principles. John Wiley &; Sons,New York.

Atkinson PM, Massari R(1997).Generalised linear modeling of susceptibility to landslide in the central Apennines, Italy，Computer&Geosciences，Vol.24 No.4，P.373-385.

Barredo JI, Benavides A, Hervas J, van Westen CJ(2000).Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island,Spain，JAG，Vol.2，Issue1，P.9-23.

Bonham-Carter, G. F. (1994). Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS, Pergamon, Ottawa, 398 p. :305.

Burnett, A.D., Brand, E.W., Styles, K.A. (1985). Terrain classification mapping for a landslide inventory in Hong Kong, 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo, 63-68.

Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation.

Carrara, A. (1988). Drainage and divide networks derived from high-fidelitydigital terrain models. NATO ASI series. Series C, Mathematical and Physical Sciences, 223: 581-597.

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard, Earth Surface Processes and Landforms, 16, 5, 427-445.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (1995). GIS Technology in Mapping Landslide Hazard. Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht,135–176.

Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999). Use of GIS Technology in The Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. Natural Hazards, 20: 117–135.

Carter, J.R. (1988). Digital Representations of Topographic Surfaces. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54: 1577–1580.

Cooke, R. U., Doornkamp, J. C. (1974). Geomorphology in environmental management, Clarendon press, Oxford, 410.

Crichton, D. (1999). The Risk Triangle. In Journal Ingleton, ed., Natural Disaster.

Fernadez T, Irigaray C, EL Hamdouni R, Chacon J(2003).Methodology for landslidesusceptibility mapping by means of a GIS. Application to the Contraviesa area Granada, Spain，Natural Hazards，Vol.30，P.297-308.

Fookes, P.G., Sweeney, M., Manby, C.N.D., Martin, R.P. (1985). Geological and Geotechnical Engineering Aspects of Low-cost Roads in Mountainous Terrain. Engineering Geology, 21: 1–152.

Giles, P.T., Franklin, S.E. (1998). An Automated Approach to the Classification of the Slope Units Using Digital Data. Geomorphology, 21(3-4): 251–264.

Gokceoglu C, Aksoy H(1996).Landslide susceptibility mapping of the slope in the residual soils of the Mengen region Turkey by deterministic stability

analyses and image processing techniques，Engineering Geology，Vol.44，P.147-161.

Gorsevski PV, Gessler P, Foltz RB(2000).GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop.

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.

Hansen, A. (1984) .Landslide hazard analysis, In: Brunsden, D. and Prior, D.B.(eds.), Slope instability, Wiley & Sons, New York, 523-602.

Hansen, A., Franks, C.A.M., Kirk, P.A., Brimicombe, A.J., Tung, F. (1995) .Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong, Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.

Jackson, J.A.(1997). Glossary of geology (4th ed.). American Geological Institute.

Keefer, D. K.(1984). “Landslides caused by earthquakes”, Geol. Soc. Amer. Bull., Vol. 95, pp 406-421.

Lump, P. (1975). Slope failures in Hong Kong. Quarterly Journal of Engineering Geology, 8: 31–65.

Mathematical Geology, 15(3): 403-426.

Meijerink, A. (1988) Data acquisition and data capture through terrain mappingunits, ITC-Journal (Netherlands), 1, 23-44.

Miller, C.L., Laflamme, R.A. (1985). The Digital Terrain Model-theory and Application. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 24(3): 433–443.

O’Loughlin, E. M., (1986) Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis, Water Resources Research, 22, 5,794-804.

Penck, W. (1953).Morphological Analysis of Landforms. London,MacMillan,429 .

Rossetto, T. & Elnashai A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. Engineering Structures, 25(10): 1241–1263.

Rota, M., Penna, A., Strobbia, C.L. (2008). Processing Italian Damage Data to Derive Typological Fragility Curves. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28: 933–947.

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J. andNaganuma,T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126(7): 769-777.

Sidle, R.C., Percea, A.J., O'loughlin, C.L. (1985). Hillslope Stability and Land Use. American Geophysical Union, Washington, D.C: 19–20.

Speight, J. G. (1977). Landform pattern description from aerial photographsm,Photogrammetria, 32, 5, 161-182.

van Westen CJ, Rengers N, Terlien MTJ, Soeters R(1997).Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation，Geol Rundsch， Vol.86，P.404-414.

Van Westen, C. J., Soeters, R., Sijmons, K. (2000). Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpago area, Italy. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2(1): 51-60.

Van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R. (2006). Landslide Hazard and Risk Zonation : Why Is It Still So Difficult? Bulletin of Engineering Geology and Environment, 65: 167–184.

Varnes, D.J.(1958). Landslide Types and Process. in E.B. Eckel (ed.). Special Report 29: Landslides and Engineering Practice (Washington, DC: HRB, National Research Council), 20–47.

行政院農業委員會水土保持局
應用崩塌機率模式評估震後坡地崩塌影響之研究
計畫書審查會議委員意見回復

委員意見	意見回復
1. 此研究從 106 年至 108 年已有初步良好成果，惟前三年僅針對南投地區進行資料整理、易損性分析及震後風險分析等，建議先以現階段已完成之模式建立全台不同震度下之崩塌機率圖或對照表，以利後續於震後崩塌風險或災害警戒等初步評估參考。	遵照辦理，已修訂工作目標與項目內容。
2. 建議可將 108 年度所採用之全台發震機率圖結合易損性曲線，建立一全台地震引致崩塌機率分布圖或全台地震引致崩塌風險地圖。	遵照辦理，已修訂工作目標與項目內容。
3. 房屋倒塌有明確的對象，而崩塌屬不確定位置；以地震模擬房屋倒塌與以地震或降雨模擬不確定坡面崩塌乃為不同之概念，宜再檢討。	感謝委員建議，以易損性分析方法原理，房屋與坡面皆屬不確定位置的評估方法，在大量數據統計分析中進行廣域災害評估。

行政院農業委員會水土保持局
應用崩塌機率模式評估震後坡地崩塌影響之研究
期初審查會議委員意見回復

委員意見	意見回復
1. 本計畫延續地震導致崩塌之坡地易損性模式及其優化，從坡地崩塌評估基礎資料庫之建立、未來地震情境下的崩塌推估，到本次提出的「應用崩塌機率模式評估震後坡地崩塌影響之研究」，循序漸進，逐步朝向既定目標邁進，應用性高，值得肯定。	感謝委員肯定，研究團隊將持續朝本究目標努力。
2. 本計畫之「崩塌危害模式」係以坡面單元為評估單元。工作執行計畫書之第 69 頁，言及「坡面單元繪製所需之時間和人力需求比較大，因此自行建立全區之坡面單元不易。」。建議參考 Xie et al. (2004)，「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.」所提出之電腦程式解決。其坡地單元的面積大小，要由使用者決定。	感謝委員建議，重製坡面單元所需之時間和人力需求的確非本計畫規模能及，因此本研究採用中央地調所產製之全台坡面單元圖資，該套坡面單元圖資繪製方法與 Xie et al. (2004)所提出之方法大致相同，皆是以集水區重疊法進行繪製，該圖資業經產製單位校驗具可靠度，並已授權水土保持局使用。而本研究團隊在取得全台圖資後，亦有進行比對檢視其與地形特徵相符程度，比對結果顯示該套圖資品質可靠良好，可作為本研究評估單元之基礎圖資。
3. 在地震發生後，岩石和土壤強度會降低，地表可能裸露。但隨著時間增加，強度會增加(reconsolidate)，植生會復育(revegetate)，使得坡地抵抗崩塌的能力漸強；這些因子的變化，建議納入考量。	感謝委員建議，地震引致崩塌的許多因子皆可能有長期或短期的變化，影響也可能是正面的或是負面的。通常地震引致的危害度因子較少短期變動，在沒有災害性地震的情況下，長期變動可定期做資料更新即可，例如 5 年做一次 PSHA 或地文資料更新。
4. 每個坡面單元之立地條件都不相同，如何選擇及量化評估所需之因子，需要非常謹慎和費心。	感謝委員指教，研究團隊對於坡面單元考量的影響因子及其代表性皆有深入評估，並審慎評估應用有效性。

5. 坡度、坡向因子計算係採網格，但最終分析單元為坡面單元，兩者並未一致，請說明原因。	感謝委員指教，本研究中坡地易損性曲線的分析係基於坡面單元建立，報告中坡度、坡向的網格資料僅是呈現其特性。網格僅用計算坡面單元崩塌率以利於判定坡面單元是否達到崩塌門檻，因此報告中以崩塌率呈現各因子的崩塌比率高低及統計分析。
6. 所採地質因子分項過於粗略，坡地所在之山坡地區域僅有兩類，平地部分反而分項更細，不符分析區域之地質特質。	感謝委員指教，相較於降雨，地震引致崩塌的地質因子較為單純，根據李錫堤等人的研究，考慮波速敏感相關地質即可。此外，本研究將坡面單元分為 12 類，考慮分類太細反而不利於坡地易損性的實際應用。
7. 易損性之實務意義宜加以說明，以利防災管理之參考。	感謝委員建議，已補充於成果報告中。
8. 有關震後崩塌地評估模式建立，建議可於完成後先以歷史重大地震事件震度數據(如 0206 地震)以及地震後一年新生崩塌地判釋成果進行比對，以驗證其可靠性。	遵照辦理，本研究後續將針對達門檻的地震事件進行分析比對，以驗證其可靠性。
9. 承上，前述成果或可提供本局作為地震後各地土石流警戒值調降之界線。	感謝委員建議，本研究團隊將持續蒐集地震事件紀錄及衛星影像紀錄，期待充足的分析資料於未來可進行震後土石流警戒值調整研究。
10. 全台坡面單元係選用地調所提供之圖資，惟計畫內已進行檢討、分類並賦予固定編碼和因子定義，這部份如係計畫自行定義，建議確認地調所是否已有相關編碼定義或格式，以利提升後續資料流通之方便性。	遵照辦理，本計畫已取得中央地調所產製之全台坡面單元圖資，該圖資內容並無進行固定格式編碼，因此本計畫將其進行重新校對及編碼，未來將可提供水保局一致的資料流通使用。此外，目前亦針對本研究定義之 12 類坡面，完成 42 集水區之坡面單元分類工作。
11. 震後坡地崩塌評估模式部分，建議可進行模式計算時間之評估與說明，因地震災害幾乎無法事先預測，僅能進行事件發生後之早期評估與警示發布，故在災害	遵照辦理，根據地震災損評估的相關研究(台灣地震損興評估系統，TELES)，國內的經驗已可 30 分鐘內完成評估並發布簡訊，本研究崩塌評估模式亦屬同類型評估方法。

應變上所需時間愈短越好。	
12. 期盼本計畫不僅由於震後坡地「崩塌」之影響，未來計畫可進一步研究包含降雨所造成的崩塌(含土石流)災損評估。	感謝委員肯定，研究團隊將持續朝本究目標努力，進一步與降雨所造成的崩塌(含土石流)災損評估進行整合。
13. 歷次計畫書(含核定本)審查意見與回覆，建議列於各期報告書附錄。	遵照辦理。

行政院農業委員會水土保持局
應用崩塌機率模式評估震後坡地崩塌影響之研究
期中審查會議委員意見回復

委員意見	意見回復
1. 目前以震度六弱、六強、不同PGA、特定活斷層等不同地震致崩風險分析，未來在實際操作應用時，並無法提供足夠判定及選取。	感謝委員指教，未來地震情境風險分析並非用於及時應變階段，實際操作時可利用氣象局即時震度資料導入崩塌易損資料庫進行分析即可。
2. 震度六弱以 PGA=0.23g 代入，與原定義之震度並無法完全對比。	感謝委員指教，目前 TEM 之地震危害度係以 PGA=0.23g (約 226gal)和 PGA=0.33g (約 324gal)進行分析，分別位於中央氣象局震級五強和震級六弱之間，對於未來地震情境風險分析仍在合理適當範圍，待未來 TEM 新的研究成果發表後即可更新。另一方面，實務操作上可依實際震度進行分析，大尺度的震度分級區域不影響實際風險評估。
3. 以坡單元為分析單元，其解析度約在 1/25,000(地調所)，而所採之地層分級精度低於 1/100,000，完全無法匹配，其他因子分級，亦有相同問題。	感謝委員指教，在實務上廣域崩塌評估屬大尺度估計，本就存在一定不確定性，精度誤差之顯著性較低，而坡面單元相較網格為更大尺度的分析單元，亦可降低精度之影響。此外，地調所繪製之坡面單元係根據 20m-DEM 所劃定，本研究對於各類地文因子亦以 20m×20m 之網格作為正規化尺度。
4. P120 表 4-3 坡面單元編碼中，有關主、次、子集水區之欄位應為本局舊圖資所用名稱，請洽本局取得新版子集水區圖資後更新。	遵照辦理，待未來新版子集水區圖資更新後，即可更新資料庫名稱。
5. P108~P114 坡向敏感度目前係以每一條斷層去分別評估全台各集水區坡面單元之坡向因子，	遵照辦理，目前中央地質調查所公告之活斷層帶共計 33 條，而 TEM 所採用之構造斷層為 38 條，理論上各

	因全台有數十條斷層，這種作法相當費時；建議初步先將台灣分成幾個區域，再依各區去評估全台各集水區坡面單元之坡向因子，較能儘早得到相關成果進行測試。	斷層對應之坡向敏感不同，因此需要建置對應全台斷層帶之坡面單元資料庫，然而資料庫建置較為費時，因此本研究初步根據 TEM 研究成果進行斷層帶分區規劃，將全台斷層分為北、中、南、東 4 個分區。
6.	此研究已完成多年計畫，其成果日益完善，相當值得肯定，盼未來能夠成為本局震後評估之參考依據。	感謝委員肯定，研究團隊將持續朝本究目標努力。
7.	此研究所採用坡面單元編碼係採用集水區編號為主，惟目前本局針對主、次及子集水區等部分資訊尚未更新完畢，建議後續定案後，再行更新全台坡面單元之編碼。	遵照辦理，待未來新版子集水區圖資更新後，即可更新全台坡面單元之編碼。

行政院農業委員會水土保持局
應用崩塌機率模式評估震後坡地崩塌影響之研究
期末聯合審查暨成果發表會審查意見回復

委員意見	意見回復
1. 建議可針對不同地震情境先作相關風險地圖，以便作為早期評估。	感謝委員建議，本計畫未來研究方向將以不同情境條件之震後坡地崩塌評估進行研究，並以風險評估技術做為地震早期評估的方法。
2. 針對地震誘發崩塌發生之災害進行評估，可增加山坡地崩塌災害潛勢之掌握度。	感謝委員肯定，研究團隊預期在未來研究中，持續進行坡地崩塌災害潛勢快速評估模式的發展。以利相關防災業務主管單位於震後快速掌握災害區域。
3. 不同區域對地震造成的崩塌可能有不同的地文潛勢因子，應用至全台灣時應考量如何選取最佳。	感謝委員建議，地震誘發崩塌確屬潛因複雜的問題，因此在研究中之坡地易損性模式綜合考慮坡面之地質、坡度、坡向、高程、順向坡、斷層遠近、斷層方位等不同的地文潛勢因子，並將其分為 12 種不同類型之坡面。