

暖化情境下氣候變遷坡地災害風險圖

陳韻如、劉俊志、林宣汝、陳永明

國家災害防救科技中心 氣候變遷組

摘要

「氣候變遷因應法」於 112 年 2 月 15 日公布實行，其中調適專章第 17 條中提到以科學為基礎，檢視現有資料、推估未來可能之氣候變遷，並評估氣候變遷風險，藉以強化風險治理及氣候變遷調適能力。因此，在氣候變遷衝擊與調適評估流程中，指認高風險區位為重要的前期工作，氣候變遷造成的極端降雨不斷攀升，增加了坡地災害發生的機率，需針對易致災的區位建議優先採取減災與調適措施。本研究根據聯合國政府間氣候變化專門委員會(IPCC, 2012)之風險架構概念，以及最新第六代耦合模(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)的氣候情境資料，評估不同暖化情境下，相對高風險坡地災害區域。研究分析結果顯示，在 2°C 暖化情境下，整體氣候危害度在花東與宜蘭、南投等部分地區，因未來極端降雨機率增加，故北部與中南部山區有較高的坡地災害風險。

一、前言

國家災害防救科技中心發展氣候變遷災害風險圖多年，自 2012 年剛開始的氣候情境資料科研成果應用，至目前的政策評估需求與氣候情境與時俱進，發展自今為第三版本的災害風險圖，研發歷程如圖 1 所示。

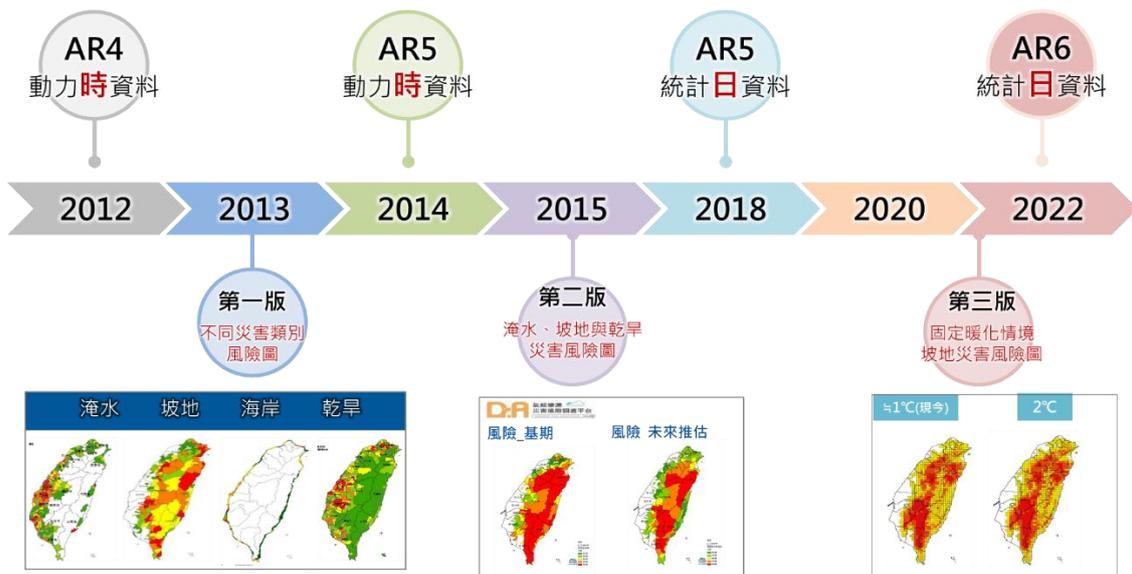


圖 1 氣候變遷下坡地災害風險圖研發歷程

第一版與第二版坡地災害風險圖，採用高解析度單一 GCM(General Circulation Model)模式 MRI 的小時資料進行分析災害特性的極端降雨資料。當時在無其他大氣環流模式可供應用，此為最佳可用的氣候變遷情境資料。第三版圖資則是採用國家科學及技術委員會的「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(TCCIP)」產製最新 CMIP6 的多模式統計降尺度日資料，利用多模式(GCMs)的評估，以降低氣候變遷情境的不確定性，並與現今接近 1°C 情境相互比較其未

來坡地災害風險等級之空間變化。

氣候變遷因應法中國土計畫法調適專章提到需並評估氣候變遷風險。而國土空間發展之策略中，也提出高潛勢區域應避免建置重大公共設施，並指認出高風險區域，以做為後續規劃城鄉發展之參考依據。在國家氣候變遷調適行動方案(2023-2027 年)的能力建構領域調適策略中亦提及，需落實氣候風險辨識與評估，做為推動氣候變遷災害風險管理與後續優先規劃評估參考。

考量上述法規與政策評估隊氣候變遷災害風險辨識之需求，本研究利用國科會 TCCIP 計畫提供最新的 CMIP6 情境之 0.05 度解析度之日降雨資料模式資料，評估坡地災害的危害度指標，進而應用地調所位公告的地質災害潛勢圖資等評估坡地災害脆弱圖，利用不同指標分級方式疊加後完成的圖資，作為空間上風險辨識之參考。

二、 坡地災害風險圖評估方法

坡地災害評估中常用於推估可能發生降雨觸崩的崩塌潛勢 (Landslide Susceptibility) 的評估方法有專家評分法(如層級分析法 (AHP)、因子加權分析等)、統計法(邏輯式回歸、類神經網路、機器學習、指標疊加等)與定率法(數值模式 TRIGRS、崩塌降雨入滲模式、三維地下水數值模式 FEMWATER 等)(鐘明劍等人，2011)。

過去評估氣候變遷坡地災害風險相關研究，崩塌潛勢評估多是利用數值模擬與專家評分法，針對「小範圍的研究區域（如流域、特定崩塌面）」評估極端降雨、河川土砂量及土石流數量之變化，此評估方法較易受限研究區域的大小、模擬所需耗費的時間等，無法短時間內完成大範圍全台灣山坡地區熱區空間分布比較，故為了解現況與未來呈現較全面的氣候情境下崩塌趨勢。本研究採用「指標法」，挑選代表性指標反應各地區的崩塌特性，搭配大氣環流多個模式的降雨結果，利用指標疊加統計方法評估未來固定暖化期間的全台的坡地災害衝擊等級差異，再以圖資呈現臺灣氣候變遷風險熱點區域空間分布。

指標評估是根據 IPCC(2012)之危害度、脆弱度與暴露度三個元素的風險定義（陳韻如等人，2016）。利用不同暖化情境下的日降雨資料，分析極端降雨機率作為危害度指標，脆弱度指標則採用地質災害潛勢及全台崩塌範圍分析，以評估分析坡地的危害-脆弱度，相關風險指標如圖 2 所示，各指標說明如下：

指標	資料	資料來源
危害度	1日降雨量超過350mm機率	TCCIP-AR6
脆弱度	地質災害潛勢	順向坡、岩屑崩滑、岩體滑動、落石 地調所
	裸露地面積比指標	福衛判釋全島崩塌地圖 林務局
暴露度	鄉鎮、人口最小統計區	內政部、台北大學

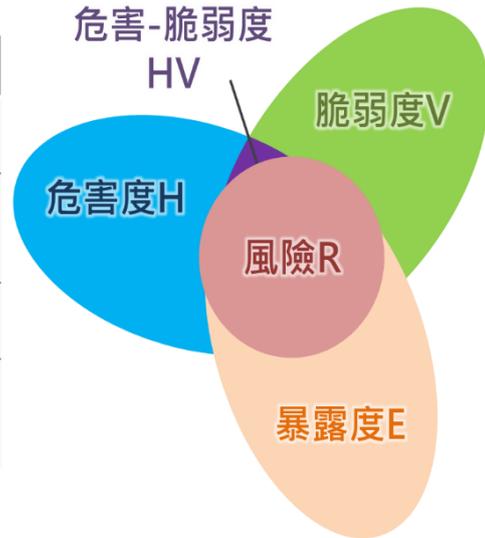


圖 2 坡地災害風險圖各指標定義示意圖

1. 危害度(Hazard)：

利用 CMIP6 的不同全球暖化情境下的日降雨資料，經過 TCCIP 利用統計降尺度方法後的 5km 網格日資料，進行雨量頻率分析。根據災防科技中心，過去針對全台坡地災害應變警戒值的範圍之平均值，與氣象局大豪雨 為 24 小時累積雨量達 350 毫米以上之標準，訂定全台坡地災害致雨量以 1 日降雨量超過 350 毫米，分析推估 CMIP6 模式於 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 2°C 與 4°C 情境下，推估之降雨機率值。坡地危害度指標之計算流程如圖 3 所示。

2. 脆弱度(Vulnerability)：

坡地災害脆弱度是由地質災害潛勢及裸露地面積比兩個指標所組成，根據中央地質調查所 2014 年與 2016 年公告之岩屑崩滑、岩體

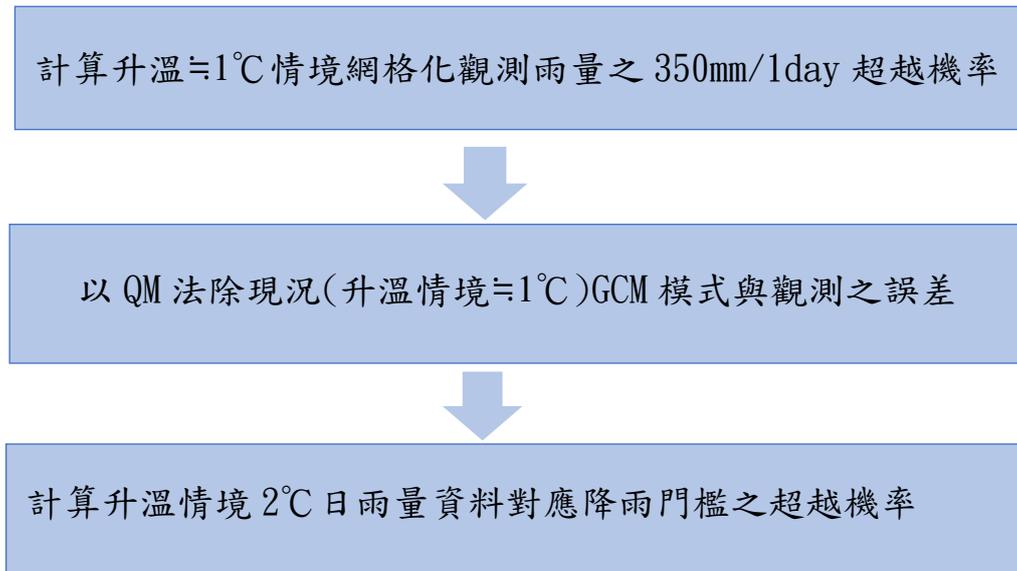


圖 3 坡地危害度指標之計算流程

滑動、落石範圍與順向坡地質範圍資料，計算此四種脆弱地質範圍地質災害潛勢面積比，再以不同空間尺度的分析單元計算面積比做為地質災害潛勢指標。而裸露地面積比指標，則是利用林務局 2018 年之福衛判釋全島崩塌地圖的範圍，也是以不同空間尺度的分析單元計算其崩塌面積比做為指標。將兩指標分級後，以等權重之方式，評估坡地災害脆弱度圖指標。

3. 暴露量(Exposure)：

主要分析之空間單元為鄉鎮市區及最小統計區，利用山坡地區域內鄉鎮人口密度計算暴露量，人口密度越高，暴露量高，除了使用現況人口(內政部，2021)，也考量到未來人口會有變動，因此亦分析 2036

年未來人口推估資料(黃國慶，2019)。另一空間尺度為最小人口統計區，僅有現況人口資料(內政部，2021)未有推估資料，因此在計算未來風險時，則是採現況人口資料分析計算暴露度。

4. 風險(Risk):

坡地災害風險是由前述危害度、脆弱度與暴露度三個指標所組成，是指山坡地在氣候變遷極端降雨下，具有崩塌潛勢區域可能衝擊暴露的人或資產的損失，同時氣候變遷災害風險具有不確定性。本研究利用分級方式呈現風險高低，等級越高，風險越高。

若無考量暴露度，則以坡地災害危害-脆弱度呈現，此指標圖可用於套疊不同的暴露量，如其他農作物分布、其他產業、工業空間分布，以了解是否位在高危害-脆弱度的區位。等級越高，則代表災害危害-脆弱度越高。

5. 指標計算方法

本研究指標分級採用，常見的等分類法(Quantile)，分為 5 個等級，每個等級區間樣本數個數相同。以坡地災害風險圖計算為例，將危害度、脆弱度及暴露度各指標原始數值分別以 Quantile 法分級。先將危害度的觀測值(≒1 度 C)降雨機率以 Quantile 法分為 5 個等級，而 99 個未來推估模式(2°C)結果則依據觀測值的級距標準進行分級。

三、 氣候變遷情境下坡地災害風險圖

1. 坡地危害-脆弱圖

根據前述的指標疊加法，繪製山坡地範圍之坡地災害風險圖，各指標空間分布圖，如圖 4 所示。危害度圖(H)中分為接近 1°C 情境的現況與 2°C 情境下的坡地致災降雨機率空間分布，危害度較高的區域，主要集中於北部與中南部的山區，極端降雨發生的機率高，在未來推估(2°C)北部與宜蘭山區次之，高脆弱度區則是主要是分布在於中央山脈的兩側與東北角。兩指標疊加後，在 2°C 情境(世紀中期間)下危害-脆弱度圖，因北部與花東地區危害等級加重，在未來推估除了原本就高危害-脆弱的中南部山區，北部山區亦是屬於高危害-脆弱等級。

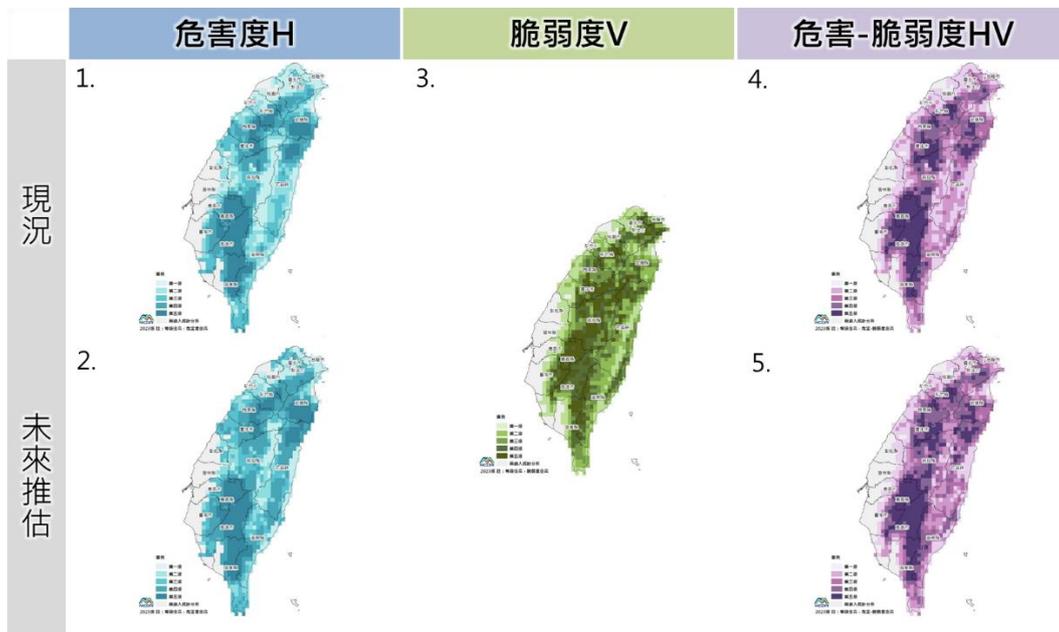


圖 4 增溫 2°C 情境下坡地災害風險圖

不同增溫情境下坡地危害-脆弱度圖，如圖 5 所示，由圖中可知隨著增溫情境增加，中部、北部、東部等區域，高危害-脆弱度的等級範圍有擴增的趨勢，可針對高風險區位優先規劃調適措施。

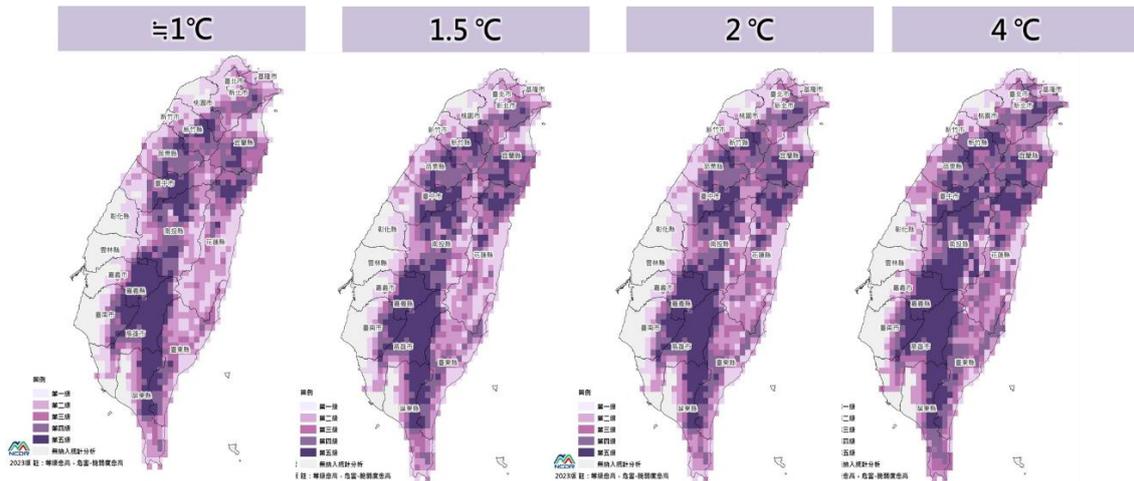


圖 5 不同增溫情境下坡地災害危害-脆弱圖

2. 坡地災害風險圖

全台坡地災害風險圖，利用鄉鎮區人口密度作為暴露度指標，評估山坡地鄉鎮相對高風險區位，圖 6 呈現不同增溫情境下鄉鎮市區坡地災害風險圖。由圖中可知較接近平地的鄉鎮，因人口密度較高，故風險等級較高，隨著增溫情境的衝擊，4°C 情境坡地高風險鄉鎮區有明顯的增加，高風險等級仍是集中於新竹以南的接近平地的鄉鎮市區。

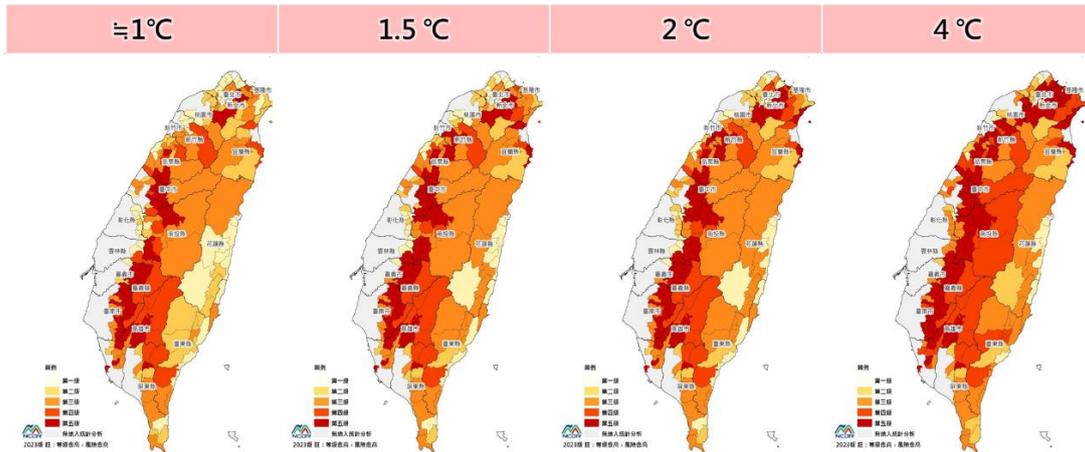


圖 6 不同增溫情境下坡地災害風險圖

四、 坡地災害風險圖應用

為瞭解特定脆弱族群在山區部落，未來可能遭受氣候變遷坡地災害的影響，故本研究利用危害-脆弱圖套疊山區聚落的空間分布，以了解相對高風險聚落的位置，如圖 7 顯示，較高的危害-脆弱區的部落在南部的山區。新竹、宜蘭、屏東與臺東部分山區聚落無重要省、縣道經過，易成孤島聚落需多加注意。在 4°C 情境下，花東地區聚落之危害-脆弱等級增加。

對於危害-脆弱度等級越高(深紅色)的聚落，可進一步規劃相關山區特定脆弱族群區域(如弱勢人口、高齡人口、獨居等)、做物資準備規劃與易成孤島區規劃相關的替代道路作為防災通道選擇。隨著增溫情境的加重，南部山區與花東地區道路危害-脆弱等級增加，山區部落需更加注意未來氣候變遷災害衝擊，對於邊坡崩塌易致災道路與易成

孤島聚落，需提早做相關防減災的規劃。

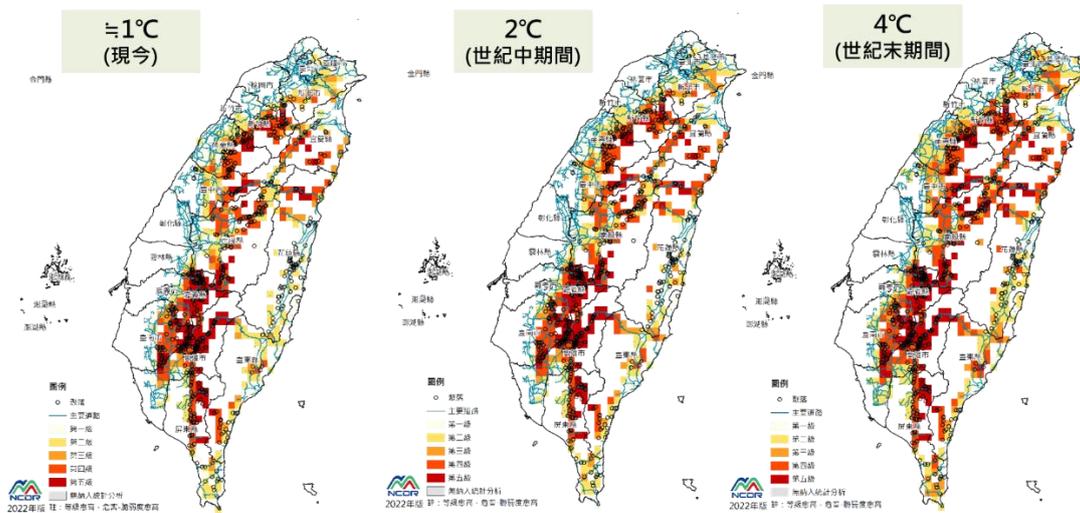


圖 7 不同全球增溫情境下坡地危害-脆弱度圖套疊主要道路與聚落

五、 結論與建議

本研究利用指標疊加法評估全台坡地災害風險圖，可快速計算多情境多模式之坡地災害風險圖，以提供上位階的決策者，在進行前置的空間規劃時，辨識全台坡地區域相對風險等級，以及未來風險空間變化趨勢。根據評估的結果顯示，隨著增溫情境的增加，在 4°C 情境下(相當於世紀末期間)，東部地區與北部地區山區之坡地災害風險等級明顯增加。

不同全球增溫情境下坡地風險圖各指標空間分布圖，危害度指標現況南部山區危害度等級較高，在 4°C 情境下，北部桃園、新竹、苗栗與東北部山區危害度增加，脆弱度指標則是依據現況的資料評估，

中央山脈兩側的鄉鎮區有較高的脆弱度等級。隨著增溫情境的加重，南部山區與花東地區道路危害-脆弱等級增加，山區部落需更加注意未來氣候變遷災害衝擊，對於邊坡崩塌易致災道路與易成孤島聚落，需提早做相關防減災的規劃。

全球暖化情境評估坡地災害高危害脆弱度之區位，在未來全國國土計畫中訂定氣候變遷調適章節時，可進一步參考利用套疊不同土地利用的規劃，並針對高風險區域優先進行調適作為。

後續的研究可利用數值模式模擬流域崩塌衝擊評估模式，評估流域內坡面穩定性，配合氣候情境資料評估氣候變遷衝擊對崩塌災害的衝擊影響，進而推動相關崩塌潛勢與調適策略擬定。

參考文獻

- 1、IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX). Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- 2、Oliver Korup and Amelie Stolle, 2014, Landslide prediction from machine learning, Geology Today, Vol. 30, No. 1. <https://doi.org/10.1111/gto.12034>.
- 3、內政部人口統計資料，2021，<https://www.ris.gov.tw/app/portal/346>
- 4、陳振宇、陳均維、陳國威、林詠喬，2019，坡地降雨致災熱區警戒模式，中華水土保持學報, 50(1):1-10
- 5、陳韻如、林宣汝、劉俊志、黃亞婷、童裕翔、陳永明，2023，暖化情境下坡地災害風險辨識技術報告，國家災害防救科技中心。
- 6、陳韻如、陳偉柏、林又青、劉佩鈴、施虹如、蘇元風、陳永明、

- 張志新，2014，氣候變遷衝擊下災害風險地圖，國家災害防救科技中心。
- 7、林又青、張志新、黃柏誠、陳永明、詹士樑，2011，從土地利用分析探討高坡地災害風險地區的減災策略，第九屆土地研究學術研討會論文集，12 頁。
 - 8、陳韻如、林宣汝、陳永明(2016)。氣候變遷下淹水及坡地災害風險地圖圖集。國家災害防救科技中心。
 - 9、鍾明劍、譚志豪、冀樹勇(2011)，不同尺度分析模式於崩塌潛勢評估之整合應用－以莫拉克颱風事件為例，中興工程，111 期，P47 - 59，DOI：10.30154/SE.201104.0006。
 - 10、黃國慶、詹士樑、蘇冠臻、王姿懿(2019)。臺灣都市階層體系變動趨勢之探討。中華民國都市計劃學會。第四十八卷，第一期，P.1~P.26。