

崩塌臨近預報之有效累積雨量計算與精度評估

劉正千^{1,2*}

尹孝元³

鍾曉緯¹

嚴科偉³

成功大學全球觀測與資料分析中心¹

成功大學地球科學系²

行政院農委會水土保持局土石流防災中心³

摘要

崩塌臨近預報(landslide nowcast)必須先應用多年期詳盡之地區型崩塌目錄(landslide inventory)，對各種可能之潛勢因子(preparatory factor)進行多變量統計分析，決定主要潛勢因子及其相對貢獻，以建立崩塌潛勢指標(landslide Susceptibility Index; LSI)模式。再根據研究區域特定崩塌事件之雨量記錄，及針對該事件所建立之事件型崩塌目錄，再次進行多變量統計分析，以決定該地區降雨誘發因子之相對貢獻，建立崩塌危害指標(landslide Hazard Index; LHI)模式。在颱風豪雨期間，才能根據降雨臨近預報，計算各預報期間對應之LHI，達成崩塌臨近預報之目標。唯實務上並無法獲得每一塊崩落地發生崩塌的確切時間，建立崩塌發生基準與降雨模式如強度或延時之明確關係，目前降雨誘發因子之計算，還是遵循Dai and Lee (2001)之結論，假設崩塌與降雨延時呈正相關，計算有效累積雨量，由事件型崩塌目錄與該事件有效累積雨量，來統計分析降雨誘發因子之相對貢獻，再根據同地區另外一場降雨促崩事件，評估在此假設的前提下，使用有效累積雨量所發佈的崩塌臨近預報之精度。本文使用2015年8月上旬蘇迪勒颱風侵襲台灣北部期間，中央氣象局所發佈的系集颱風定量降雨預報(Ensemble Typhoon Quantitative Precipitation Forecast; ETQPF)資料，針對新北市新店及烏來地區，計算有效累積雨量，進行崩塌臨近預報，並針對災點位置提出警示。分析結果顯示，本研究採用之評估方法大致可呈現因強降雨所造成之崩塌危害趨勢，於蘇迪勒颱風事件中所分析之崩塌警示歷程，其出現警示面積明顯增加之時間點，大致與實際崩塌時間點相近；雖與實際災害發生時間點有所落差，成果仍具參考價值。

關鍵字：崩塌臨近預報，崩塌目錄，潛勢因子，誘發因子，多變量統計分析，崩塌潛勢指標，崩塌危害指標，系集颱風定量降雨預報，有效累積雨量，蘇迪勒颱風

一、前言

台灣地區地形陡峻、降雨強度集中，根據氣象局統計，每年侵襲颱風平均約3到4次，豪大雨數十次，平均年損失約128億元以上。歷年山區大規模土石滑落與崩塌事件愈趨頻繁，實有必要瞭解台灣地區易發生崩塌之高潛勢區域。因此，藉由分析過去崩塌區域之動態變化情形，建立預警模式，以有效而快速的方式，評估大區域範圍之崩塌潛勢概況；期可提高防減災能力，並作為緊急應變時的決策依據。研究中主要針對新北市烏來區，其可能之崩塌潛勢分析因子進行研究，藉以調整崩塌潛勢分析模式。再配合颱風豪雨事件之雨量預測資料，進行崩塌危害分析，並依據不同事件之崩塌危害分析成果，整理歸納出合宜之崩塌警示方法。

二、崩塌潛勢分析

崩塌潛勢分析(landslide susceptibility analysis, LSA)之機率統計方法，乃是分析已發生崩落地點，其地

形、地質、區位及水文等崩塌潛勢因子之統計參數特性，篩選適當的因子，建立潛勢模式，以計算全區各分析單元的崩塌潛勢指標(landslide susceptibility index, LSI)。一個良好的潛勢模式可用來預測研究區或相鄰地區，其具有相似因子組合特性之地點，其發生崩塌的可能性。運用在LSA的統計分析方法主要包括：二變量分析(bivariate analysis)與多變量分析(multivariate analysis)兩種。二變量分析是依照實際崩塌在各因子分級的出現頻度做因子評分，再以適當的統計方法決定各因子的權重，最後以線性疊加法計算全區各分析單元的LSI (Brabb, 1984; Brabb et al., 1972; Chung and Fabbri, 1993; Kobashi and Suzuki, 1988; van Westen, 1992; Yin and Yan, 1988)。常被使用在LSA的條件機率分析(conditional probability)是利用事前機率(prior probability)與事前差異機率(priori odds)來計算各崩塌潛勢因子的權重，再由權重值與事前差異機率，推得各個分析單元的事後機率(posteriori probability) (Chung, 2006; Chung and Fabbri, 1999; Duman et al., 2005; Lee et al., 2002)。國內，鄭元振(1992)最早以條件機率方法分析立霧河流域天祥至

太魯閣段的LSA。林中興(1994)亦運用條件機率方法，選取水系距離、坡度、坡型等因子，針對梨山地區進行LSA。國內常用的不安定指數法(林書毅, 1999; 許煜煌, 2002; 簡李濱, 1992; 蘇苗彬, 1998)亦屬此類(李錫堤, 2009)。

多變量分析方法則是利用多變量迴歸(multivariate regression)、羅吉斯迴歸(logistic regression)、或是判別分析(discriminant analysis)得到一組能區別崩塌群組與非崩塌群組的線性方程式，再將各分析單元的各個崩塌潛勢因子代入此一方程式，求得各分析單元的LSI，並完成LSM (Brenning, 2005; Carrara, 1983, 1988; Carrara et al., 1992; Carrara et al., 1990; Carrara et al., 1991; Gao and Lo, 1991; Guzzetti et al., 1999; Hearn, 1995; Kobashi and Suzuki, 1988; Koukis and Ziourkas, 1991; Lee and Min, 2001; Neuland, 1976; van Westen et al., 2006)。多變量分析方法的優點在於可以解決因子相依(dependency)的問題；具有相依性的兩個或多個因子被同時採用在分析模式中，並不影響分析結果的正確性。國內學者中，林書毅(1999)嘗試利用多變量分析法中的主成份分析(principle component analysis)，將各個因子轉換到互相獨立的主軸上，再進行不安定指數分析，以解決因子間相依性的問題。李錫堤(李錫堤 et al., 2003, 2004, 2005)等人運用判別分析方法在國姓、東勢、雲林、玉里及台北等地進行LSA，繪製集集、桃芝、敏督利及賀伯等促崩事件之LSM (landslide susceptibility map)。張弼超(2005)運用羅吉斯迴歸方法進行國姓地區之LSA (李錫堤, 2009)。因此，本研究主要採用崩塌潛勢分析方式，計算研究區域之崩塌潛勢指標。

1. 分析因子

Koukis and Ziourkas (1991)針對曾應用於崩塌潛勢分析之各種因子，進行全面性的總覽與探討；而大約有64種因子直接與崩塌發生有關。然而，部分因子並非相互獨立、部分因子無法明確量化、部分因子無法取得完整資料；為能建立可實際執行及通用的崩塌潛勢模式，本研究綜合相關前人研究，初步針對地形、地質、水文等類別進行因子篩選；並將各因子與既有崩塌圖層進行套疊，而將該因子分為山崩及非山崩兩類，分別繪製次數百分比分布圖(如圖1)。再藉由因子次數百分比分布圖，選取山崩分布與非山崩分布曲線區別較明顯者作為重要因子。最後再針對選定之重要因子進行各因子間之相關係數分析，若有相關性過高的因子(>0.5)，則需擇一剔除，以避免因子間相依性過高，而降低後續分析之效率。

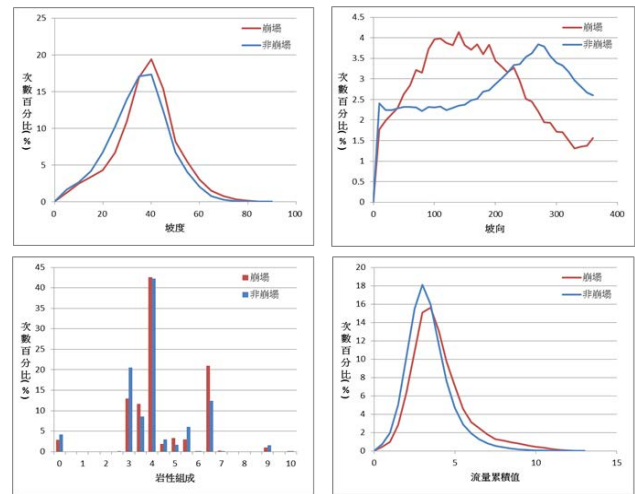


圖 1 影響因子統計分析

2. 因子權重

研究中參考蘇苗彬(1998)等人所提出之不安定指數法(Instability Index Method)，其屬於多變量分析方法；主要是應用地理資訊系統進行不同影響因子分級，再利用崩塌地對各影響因子等級之分布進行統計，計算崩塌密度；再評估較易崩塌之地區，找出高風險度之邊坡。研究中首先蒐集與分析各因子之資料分布圖，並依據不同因子分布圖之值域給予分級；而各因子 pf 不同分級 i 之面積比 $AR_{pf(i)}$ 可表示為

$$AR_{pf(i)} = \frac{A_{pf(i)}}{A_t} = \frac{A_{pf(i)}}{\sum_{i=1}^n A_{pf(i)}}$$

式中 $A_{pf(i)}$ 為第 i 級範圍之面積； A_t 為分析區域之總面積； n 為分級個數。同時再配合已判釋完成之崩塌地分布圖，即可進行不同因子 pf 於各分級 i 範圍下之崩塌密度計算

$$LR_{pf(i)} = \frac{L_{pf(i)}}{L_t} = \frac{L_{pf(i)}}{\sum_{i=1}^n L_{pf(i)}}$$

式中 $LR_{pf(i)}$ 為第 i 級範圍之崩塌密度； $L_{pf(i)}$ 為第 i 級範圍內之崩塌面積； L_t 為總崩塌面積。而後，即可利用上式結果，計算各分級範圍之崩塌評分值

$$W_{pf(i)} = \frac{LR_{pf(i)}}{AR_{pf(i)}}$$

最後，本研究即可將各因子數值分布結果，依據各位置點數值所屬之分級類別，重新給定其評分值。

3. 崩塌潛勢指標

本研究利用上述各分析因子，其不同分級之評分值資料，再配合因子疊加方式，以綜合考量各因子反映崩塌之影響程度；最後即可推估得分析範圍內不同位置點之崩塌潛勢指數，藉以瞭解崩塌的風險性。

研究中利用上述雙變數統計分析後的評分值分類資料，配合幾何多變量元素法，即可計算得分析範圍內不同位置點之崩塌潛勢指數。Liu et al. (2004)表示坡度與岩性兩因子係為相互影響關係；一般而言，坡度愈高則應較易誘發崩塌，然而坡度愈高處其岩石組成及構造卻愈為堅硬；反之，下游坡度緩和地區，卻因上游崩壞岩石冲刷至下游堆積，岩性反而較為脆弱。因此，研究中採用因子相乘方式以計算崩塌潛勢指標，亦可反映該不同因子相互影響之關係。

$$LSI(j) = \prod_{k=1}^m W_{pfk}^{C_k}$$

式中 m 為分析因子個數； $W_{pfk}^{C_k}$ 為各因子 k 之評分值； C_k 為各因子 k 之權重係數。因此，本研究即可應用崩塌地分布資料，配合崩塌潛勢分析方法，進行多變量迴歸分析；再計算研究區域之崩塌潛勢指標值，進而建立崩塌潛勢分布圖層。

三、崩塌危害分析

研究中為能進一步建立降雨與崩塌危害之關聯性，採用崩塌潛勢分析模式，其所計算之崩塌潛勢指標，再加入雨量致災因子進行考量；即可得到針對特定雨量事件之崩塌危害指標(landslide hazard index, LHI)，而該崩塌危害指標係是指某區域於外力影響下，不同位置發生崩塌的可能性。

1. 雨量資料

目前中央氣象局針對台灣地區之雨量推估資料，大致包含分為QPESUMS (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors)及ETQPF (Ensemble Typhoon Quantitative Precipitation Forecast)兩種類型。為加強對於颱風、梅雨、雷暴等災害性天氣的監測與極短期預報能力，中央氣象局自2002年起，與經濟部水利署、農委會水土保持局及美國劇烈風暴實驗室(National Severe Storm Laboratory, NSSL)，整合多重觀測資料並結合地理資訊發展劇烈天氣監測系統QPESUMS。系統中除了開發台灣地區整合後之定量降水估計與極短時定量降水外延預報產品外，並提供即時性劇烈天氣監測資訊。該系統期可提昇預報作業之品質、效率及精確度；促進國內氣象科技之研究發展；促進水資源規劃利用及減少天然災害損失等目的。同時依鄉鎮、流域及土石流潛勢分區進行定量降雨估計相關產品的開發，以適應不同防、救災機構的作業所需。

此外，中央氣象局接續所提出之系集模式颱風定量降水預報(ETQPF)，乃是使用系集模式的雨量預報結果為基準，搭配一組颱風路徑預報、及颱風相關氣象參數作為篩選條件，找出模式颱風中心位置在預報路徑附近，同時模式颱風降水結構與真實颱風相近的個案，重新組合成一組颱風降雨預報。此方法保留氣候

法中颱風環流與地形降水高度相關的優點，並使用系集模式資料取代歷史個案，解決氣候法中個案不足的問題。同時，因系集模式為準即時預報，比歷史個案更能掌握即時綜觀天氣條件，所以此法比一般氣候法更有機會可以處理，像共伴效應等颱風與綜觀環境交互作用所產生的降水。

針對研究應用需求，中央氣象局可提供每10分鐘全台雨量站即時紀錄資料、QPESUMS每10分鐘可提供過去1小時雷達降水估計且經雨量觀測修正之格點資料、未來1小時定量降水預報之格點資料；而ETQPF則可提供每日8次預報(2時、5時、8時、11時、14時、17時、20時、23時)，每次預報為72小時，每3小時一筆之雨量格點資料。

2. 崩塌危害計算

Dai and Lee (2001)採用香港地區1984至1996年間之崩塌空間分布資料，分析崩塌面積與頻率、以及崩塌數量與降雨量間之關係。由其研究結果顯示，崩塌面積與崩塌頻率呈現幕次關係，而崩塌數量與延時12小時之總降雨量相關性最高；然而隨著個別崩塌面積提升，崩塌數量與降雨量相關性最高之降雨延時，則由12小時延長至24小時。同時，水保局現行土石流潛勢溪流之雨量警戒方法，其所考量當下之有效累積雨量為

$$R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i$$

式中 R_0 為該時刻前0-24小時之累積雨量， R_i 為該時刻前25-48小時之累積雨量，其餘以此類推； α 為加權係數(=0.7)；同時以6小時內總雨量小於4 mm時作為雨場結束點。因此，本研究參考水保局現行土石流潛勢溪流之雨量警戒方法，採用中央氣象局之實測雨量資料，推估有效累積雨量，以作為崩塌危害之降雨考量因子。

林恩如(2013)曾應用台灣東部卑南河流域LSI分布圖，進行不同颱風事件降雨量與崩塌發生之相關性分析，進而建立崩塌危害關係式。而於前期研究中亦以崩塌潛勢分析模式為基礎，再行考量降雨因素之影響，提出崩塌危害分析方法。再利梅姬颱風與蘇拉颱風事件的雨量資料，並配合以宜蘭太平山研究區的事件崩塌資料，進行模式檢定與驗證工作，進而建立可配合雨量預測資料，分析推估崩塌危害程度之土砂災害預警模式。因此，研究中依據前期研究成果，決定崩塌潛勢因子與雨量致災因子之關係

$$LHI = LSI \times R^C$$

式中 R 為有效累積雨量(mm)， C 為迴歸係數。而利用該關係式即可配合雨量資料，針對研究區域進行崩塌危害指標計算，進而完成崩塌危害分布圖。此外，再加上中央氣象局每10分鐘QPESUMS針對未來1小時預測雨量、或是每6小時ETQPF針對未來72小時預測

雨量進行考量，即可針對推估得未來可能之崩塌危害指標，進而提出崩塌預警之參考資料。

最後，若能取得研究區域災後之崩塌資料，再透過多變量迴歸之最佳化求解方法，以獲取崩塌區域內計算出最高崩塌危害指標為目標，進行疊代反算；即可建立該區域之崩塌危害預測模式，進行崩塌危害指標之計算。此外，研究中為能於颱風期間針對不同崩塌危害程度，提出警示參考資訊；需應用不同颱風事件資料進行檢定驗證，期可定義出因應不同程度崩塌危害所發布之警示值。

四、崩塌潛勢危害預測結果與討論

由於2015年蘇迪勒颱風侵襲，新北市烏來山區成為該次事件後的重點災區；同時研究中亦蒐集到該區域詳細之災後崩塌判釋資料；因此本研究乃採用新北烏來為研究區域，以進行崩塌危害分析的災後驗證工作(如圖3)。研究中首先建立新北烏來研究區之崩塌潛勢分布資料(如圖4)，以提供後續分析計算之應用。



圖3 新北烏來研究區

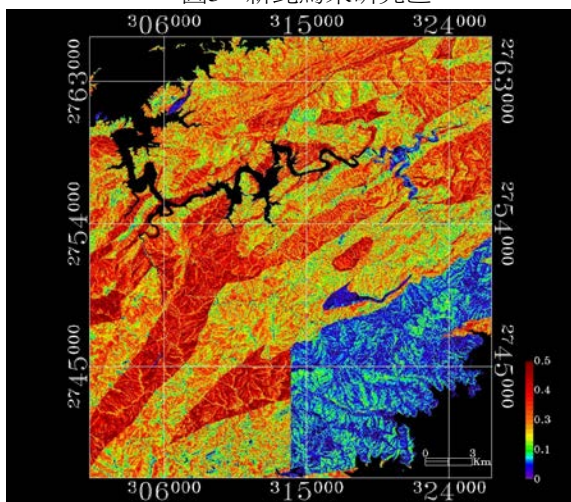


圖4 烏來研究區之崩塌潛勢分布圖

由於蘇迪勒颱風事件前，本研究並無針對新北烏來研究區進行LHI分析模式的參數檢定；因此計畫中首先參照前期計畫內容，採用鄰近的宜蘭太平山研究區之參數檢定結果，以進行崩塌預警分析計算。

$$LHI = LSI \times R^{0.2510}$$

然而，研究中為驗證新北烏來研究區，應用宜蘭太平山研究區參數資料之合理性；乃利用宜蘭太平山研究區參數，所建立之新北烏來研究區LHI分析模式，配合蘇迪勒颱風期間內所發生之最大有效累積雨量值、以及蘇迪勒颱風事件後新北烏來研究區之災後崩塌資料，以針對該次颱風事件，進行新北烏來研究區LHI模式的驗證工作。

圖5為採用既有宜蘭太平山研究區之參數檢定結果，針對蘇迪勒颱風之新北烏來研究區的崩塌危害分布情形；紅色區域為高危害區域，反應出颱風期間發生崩塌危害的機率較大；藍色區域則為颱風期間所評估之低危害區域；而白色區塊則為災後之崩塌範圍。研究中經模式分析評估(如圖6)，該條件下的崩塌正確率，如表1所示。由表中可知，利用該應用方式所進行的分析計算結果，正確率約為7成左右。

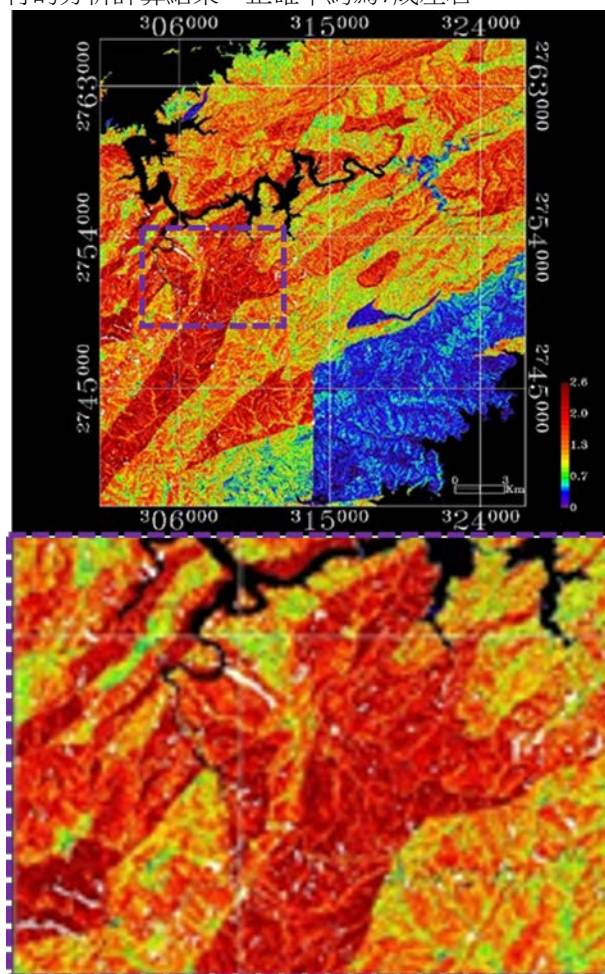


圖5 烏來研究區災後驗證之崩塌危害分布與實際崩塌(白色區域)

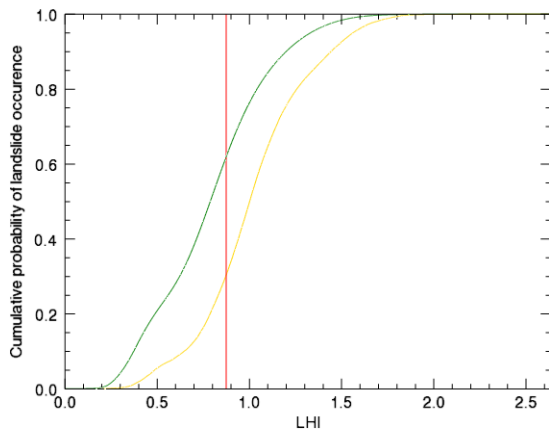


圖6 烏來研究區災後驗證之崩塌危害門檻值推估
表1 烏來研究區災後驗證之崩塌危害正確率評估

Positive Right (%)	69.61
Negative Right (%)	61.99
Miss (%)	30.39
False Alarm (%)	38.01

五、結論與建議

本研究應用中央氣象局所提供之ETQPF雨量預報結果，並配合LHI分析模式進行推估演算；並針對未來3、6、12、24、48、72小時，進行崩塌危害警示預報。然而ETQPF雨量預測資料隨著預測時間愈長，與實際發生之降雨量及分布情況有較明顯之落差。因此，研究中乃針對不同分析時間點之未來3小時ETQPF雨量預測結果，進行崩塌警示歷程的分析工作。

同樣與土石災害防治相關，目前水保局所發布之土石流警戒區預報，係依颱風或豪雨開始降雨之不同階段，區分為黃色警戒及紅色警戒。當中央氣象局發布某地區之預測雨量大於土石流警戒基準值時(此時可能尚未開始降雨)，由水土保持局發布該地區為黃色警戒土石流警戒區。某地區實際降雨已達土石流警戒基準值時，由水土保持局發布該地區為紅色警戒土石流警戒區。由於本研究所提出的崩塌危害各級警示預報結果，亦是依據實際雨量與預測雨量，並配合LHI分析模式進行分析演算，再依據該計算結果進行警示區域定義分類；研究中推估之崩塌警示區域，大致反應與颱風期間土石流紅黃警戒區相同的位置。

有鑑於本研究乃是利用各區位的崩塌潛勢值，再配合不同時刻的前期有效累積降雨與未來雨量預測資料，以評估不同地區之崩塌危害情況；大致可利用不同警示面積，反應目前累積降雨及未來短延時降雨針對不同位置所造成之可能危害情形。而研究中所分析之崩塌警示歷程，其出現警示面積明顯增加之時間點，大致與實際崩塌時間點相近；雖與實際災害發生時間點有所落差，應仍可提供相關參考資訊。

六、參考文獻

- Brabb, E. E. 1984. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping, in Proc. In Fourth International Symposium on Landslides, 307-324.
- Brabb, E. E., E. H. Pampeyan & M. G. Bonilla. 1972. Landslide susceptibility in San Mateo County, California, U.S. In Geol. Surv., MF-360. Misc. Field Studies Map.
- Brenning, A. (2005) Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5.
- Carrara, A. (1983) Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15.
- . 1988. Landslide hazard mapping by statistical methods: A "black box" approach. In *Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries*, 205-224.
- Carrara, A., M. Cardinali, R. Detti & F. Guzzetti (1992) Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC Journal*, 2.
- Carrara, A., M. Cardinali, R. Detti, F. Guzzetti, V. Pasqui & P. Reichenbach. 1990. Geographical information systems and multivariate models in landslide hazard evaluation, In *ALPS 90 Alpine Landslide Practial Seminar, Sixth International Conference and Field Workshop on Landslides*, . In *Sixth International Conference and Field Workshop on Landslides*, 17-28.
- Carrara, A., M. Cardinali, R. Detti, F. Guzzetti, V. Pasqui & P. Reichenbach (1991) GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16.
- Chung, C. F. (2006) Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment. *Computer & Geosciences*, 32.
- Chung, C. F. & A. G. Fabbri (1993) The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable Resources*, 2.
- Chung, C. F. & A. G. Fabbri (1999) Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Seneing*, 65.
- Dai, F. & C. Lee (2001) Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*, 59.
- Duman, T. Y., T. Can, C. Gokceoglu & H. A. Nefeslioglu (2005) Landslide susceptibility mapping of Cekmece area (Istanbul, Turkey) by conditional

- probability. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2.
- Gao, J. & C. P. Lo (1991) GIS modeling of influence of topography and morphology on landslide occurrence in Nelson County, Virginia. *GIS/LIS '91 Proceedings*, 1.
- Guzzetti, F., A. Carrara, M. Cardinali & P. Reichenbach (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-Scale study, central Italy. *Geomorphology*, 31.
- Hearn, G. J. (1995) Landslide and erosion hazard mapping at Ok Tedi Cooper Mine. *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28.
- Kobashi, S. & M. Suzuki. 1988. Hazard index for the judgement of slope stability in the Rokko mountain region. In *Interpraevent*.
- Koukis, G. & C. Ziourkas (1991) Slope instability phenomena in Greece: A statistical analysis. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43.
- Lee, S., J. Choi & K. Min (2002) Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability mode. *Environmental Geology*, 43.
- Lee, S. & K. Min (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40.
- Liu, J. G., P. J. Mason, N. Clerici, S. Chen, A. Davis, F. Miao, H. Deng & L. Liang (2004) Landslide hazard assessment in the Three Gorges area of the Yangtze river using ASTER imagery: Zigui-Badong. *Geomorphology*, 61, 171-187.
- Neuland, H. (1976) A prediction model of landslips. *Catena*, 3.
- van Westen, C. J. 1992. Medium scale landslide hazard analysis using a PC based GIS: A case study from Chinchina, Colombia. In *In Proc., 1er Simposio Internacional sobre Sensores Remotes Sistemas de Informacion Geografica (SIG) para el Estudio de Riesgos Naturales*, 20.
- van Westen, C. J., T. W. J. van Asch & R. Soeters (2006) Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 65.
- Yin, K. L. & T. Z. Yan. 1988. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In *Proceedings of the International Symposium on Landslides*.
- 李錫堤 (2009) 山崩及土石流災害分析的方法學回顧與展望. *台灣公共工程學刊*, 5.
- 李錫堤, 潘國樑 & 林銘郎. 2003. 山崩調查與危險度評估-山崩潛感分析之研究 (1/3). 經濟部中央地質調查所.
- . 2004. 山崩調查與危險度評估-山崩潛感分析之研究 (2/3). 經濟部中央地質調查所.
- . 2005. 山崩調查與危險度評估-山崩潛感分析之研究 (3/3). 經濟部中央地質調查所.
- 林中興. 1994. 山坡穩定性評估之因子分析及地理資訊系統之應用. In *應用地質研究所*. 中壢市: 國立中央大學.
- 林恩如. 2013. 計算崩塌因子之相對貢獻度並根據颱風與地震事件進行驗證—以卑南溪流域為例. In *地球科學研究所*. 台南市: 國立成功大學.
- 林書毅. 1999. 區域性山坡穩定評估方法探討—以林口台地為例. In *應用地質研究所*. 中壢市: 國立中央大學.
- 張弼超. 2005. 運用羅吉斯迴歸法進行山崩潛感分析—以臺灣中部國姓地區為例. In *應用地質學系*. 中壢市: 國立中央大學.
- 許煜煌. 2002. 以不安定指數法進行地震引致坡地破壞模式分析. In *土木工程學研究所*. 台灣大學.
- 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. In *礦冶及材料科學研究所*. 台南市: 國立成功大學.
- 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. In *土木工程研究所*. 台中市: 國立中興大學.
- 蘇苗彬 (1998) 集水區坡地安定評估之計量分析方法. *中華水土保持學報*, 29.