地理學報　第四十四期：1-22 (2006)
JOURNAL OF GEOGRAPHICAL SCIENCE (44) : 1-22 (2006)

基於 RS/GIS 的城市泥石流災害綜合評價研究

以中國昆明市東川城區為例

Integrated Assessment of Urban Debris Flow Hazards Using RS/GIS

A Case Study of Dongchuan Urban Area, Kunming City, China

唐　川[*]　　沖村孝[**]

Chuan Tang　　Takashi Okimura

Abstract

This paper focus on the problems of urban debris flow hazard in the recent years and reviews the current study status and future research work about assessment of urban debris flow hazard. A case study is selected in Dongchuan Urban Area, a district of the Kunming City in China, and an integrated methodology for urban debris flow risk assessment is approached. Procedure of the methodology involves debris flow hazard zonation in the alluvial area, urban vulnerability analysis, loss evaluation and risk assessment. Debris flow hazard zonation on the alluvial fan is created by the numerical simulation method associated with geomorphologic method. Detailed land

* 成都理工大學地質災害防治國家專業實驗室教授
Professor, National Professional Laboratory for Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, China.

** 神戶大學都市安全研究中心教授
Professor, Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, Japan.

cover information is derived using the high spatial resolution satellite imagery and then we evaluate the vulnerability value to different land-use features. Based on a GIS statistical and analytical tool, debris flow potential damage and risk for urban area is evaluated. This assessment can be used for debris flow mitigation by identifying hazard prone areas allowing for avoidance through zoning or other land use policy decision. In addition, residents who live in debris flow prone areas need risk information for evacuation and hazard prevention

Keywords: debris flow, hazard zonation, vulnerability, loss evaluation, risk assessment.

摘　要

本文針對目前城市泥石流災害的突出問題，分析了國內外研究狀況和發展趨勢；以中國昆明市東川城區為研究區，探討了城市泥石流災害綜合評價的系統方法，包括了泥石流危險區劃、城市易損性分析、城市泥石流災害損失評估和城市泥石流風險評價四個主要內容。泥石流危險區劃採用數值仿真方法完成；以高解析度遙感衛星影像為資料源，為城市土地覆蓋類型分析提供了重要依據，在此基礎上分析城市泥石流災害易損度，應用 GIS 提供的統計和分析工具進行泥石流災害損失評估和風險評價。泥石流災害綜合評價可用於指導對城市洪氾區的不同危險、風險地帶的土地利用進行規劃和決策，從而達到規避和減災的目的，也為生活在泥石流災害影響區的城市居民提供災害風險資訊，以作為避難和防災的依據。

關鍵字：泥石流、危險區劃、易損性、損失評估、風險評價

前　言

泥石流以其沖毀、淤埋的成災方式對人類的生命安全和財產構成威脅 (Takahashi, 1991; Blong, 1992；唐邦興，2002)，其中泥石流對城市的危害尤為突出，目前中國已查明受泥石流危害或威脅的縣級以上城市有 138 個，受泥石流危害或威脅的鄉鎮級城市數量更大 (韋方強與胡凱衡，2002；康志成等，2004)。據不完全統計，近 50 多年中，中國縣級以上城市因泥石流致死的人數已約 4,400 人，並威脅上萬億財產，由此可見泥石流對山區城市的危害之重。隨著中國西部城市化的發展迅速，人口與財富將進一步向城市集中，面對泥石流災害，提高城市安全性已成為關係國計民生的第一需要。從新世紀的永續發展觀念出發，解決西部受泥石流災害影響的城市安全和防災減災問題，已成為當前及未來發展的重要目標之一，儘快把山區城市泥石流災害綜合評價作為減災的重點工作，是目前城市的泥石流防災減災工作的重點。

風險 (risk) 的概念於 19 世紀末最早出現在西方經濟領域中，目前已廣泛應用於經濟學、社會學、工程科學、環境科學和災害學等領域中。80 年代中期，美國風險分析學會提出 14 種不同的風險定義

(Kaplan, 1991)，聯合國公佈了自然災害風險的定義：風險是在一定區域和給定時段內，由於特定的自然災害而引起的人們生命財產和經濟活動的期望災情值，並採用了「風險度 *(R)* =危險度 *(H)* ×易損度 *(V)* 」的運算式 (United Nations, Department of Humanitarian Affairs, 1991)，這一定義和運算式已逐漸為廣大學者和有關機構所認同 (Fell, 1994; Mejia *et al.*, 1994; Hearn, 1995; Smith, 1996; Leroi, 1996)。災害的「風險」包含有三方面的含義：即災害造成的災情、事件發生的概率和可能產生的後果 (IUGS, Working Group on Landslide, Committee on Risk Assessment, 1997)；因此，從泥石流風險形成機制角度，泥石流風險可以分解為：泥石流強度的概率分佈函數，稱之為危險性；泥石流強度與泥石流災情之間的函數關係，稱之為災害易損性 (vulnerability)。綜上所述，泥石流危險性、易損性和損失評估三者，組成了泥石流的風險結構，也是泥石流災害綜合評價的核心和關鍵；從系統工程的角度看，泥石流災害風險可作為一個系統，其系統輸入為泥石流危險性，其系統轉換為泥石流易損性，而其系統輸出就是泥石流災情。

滑坡 (含泥石流) 的風險結構中的危險性、易損性、災情評估和風險評價一直是國內外廣泛關注的課題 (Aleotti and Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.*，1999)。區域滑坡、泥石流危險性的研究在理論方法和實踐應用的探索已取得了顯著的成果 (Hansen, 1984; Varnes, 1984; Aniya, 1985; Carrara *et al*., 1992; Baldelli *et al*., 1996；唐川與朱靜，2004)，其研究已從過去單一的、定性研究向綜合化、定量化發展，特別是這些成果為其後深入開展泥石流災害綜合評價奠定了重要基礎 (Dietrich and Sitar, 1997; Palla *et al.*, 2004; Pasuto and Soldati, 2004)。泥石流成災的焦點多位於其堆積扇 (Schick, *et al.*, 1999; Okunishi and Suwa, 2001)，而與之密切相關的城市或單溝泥石流堆積區危險性的分析由於評價指標體系複雜，資料提取難度大，因此研究成果較少，而且遠沒有區域性研究成熟，逐步成為研究的難點和重點，目前利用數值仿真、數理統計是解決該問題是主要的方向 (沖村孝與國村省吾，1988; Takahashi, 1991; Huebl and Steinwendtner, 2001; Ambrosio *et al*., 2003; Palla, *et al*., 2004; Chau and Lo, 2004)，其中採用數值仿真能較詳細地分析整個泥石流運動、停淤、停積過程和獲取有關運動過程的原始資料，結合實地調查和歷史資料，能夠更深刻地認識泥石流堆積泛濫過程的特性 (唐川與周鉅幹，1994)。目前，區域泥石流危險性研究在指標體系、技術方法和區劃目標方面也已趨於成熟 (Varnes, 1984; Einstein, 1997; Dai, *et al*., 2002)，評價成果已用於重點地區的評價 (Chau and Lo, 2004；唐川，2004)，但涉及城市泥石流危險性分析卻是薄弱環節。由於泥石流危險區劃與地理空間資訊和屬性資訊關係密切，而 GIS 軟體又具有功能齊全的處理地理空間資訊的能力和良好的模型結合與處理效果，因而逐漸運用於泥石流分析的每一環節，特別是在資料登錄、存貯、計算、分析和顯示等方面；其強大的資料處理能力使泥石流災害資料集成更簡便，評估速度更快、精度更高，極大地促進了其應用發展，相關的研究成果大量湧現 (Carrara, 1991; Alison, 1993; Wadge, 1994; Carrara *et al*., 1995; Morgenstern, 1997; Carrasco and Pedraza, 2003; Delmonaco *et al*., 2003)。

易損性評價是對承災區的社會經濟水平及承災能力的分析，並揭示其空間分佈狀況。隨著減災研究的深入，人們開始意識到災害的易損性分析對於指導高風險區的減災防災的重要作用 (Weichselgartner, 2001)；目前國內外在自然災害易損性的定義、分析方法和指導減災方面都取得了顯著的成果 (Varley, 1991; Cannon, 1993; Maskey, 1993; Tobin and Montz, 1997; Ayala, 2002)，城市易損性也成為國際上減災防災關注的問題 (Uitto, 1998; Thouret, 1999; Mollerhaug, 2003)。國內外學者從不同

的角度提出了多種關於易損性 (vulnerability) 的定義，聯合國 1992 年公佈了易損性的定義為：潛在損害現象可能造成的損失程度 (United Nations, Department of Humanitarian Affairs, 1992)。我們綜合聯合國和 Panizza (1996) 對易損性認識的基本含義，將易損性定義為「在給定的自然、社會和經濟空間內，由於突發的自然災害過程而可能導致的潛在損失」。劉希林等還針對泥石流災害特點，提出泥石流易損性是指在一定區域和給定時段內，由於泥石流災害而可能導致的該區域內所存在的一切人、財、物的潛在最大損失 (劉希林等，2001)。基於上述對泥石流易損性的理解，我們認為泥石流易損性既反映了承災體易於受到泥石流的破壞的特性，又反映了各類承災體對泥石流災害承受能力。

近年來泥石流災情評估成為災害科學中熱點研究內容之一，在理論方法上進行了深入探討，並取得了顯著成果 (Guzzetti, 2000)，然而，目前泥石流災情評估並沒在減災實踐中得到廣泛應用，從而影響了減災效果的發揮，其原因之一是對承災體價值災情核算非常複雜，災情的調查、統計、計算等一系列過程需要投入大量的時間、人力和財力 (Jonkman *et al*., 2003)。

泥石流災害綜合評價作為是一門新興的邊緣交叉學科，其評估理論與方法仍在不斷的探索與完善之中，與國外同期研究水平相比，尚存在以下幾方面的不足：1. 技術手段落後，許多評價與分區圖採用手工編制，效率低且不便於儲存、查詢和資料更新，雖然 RS 和 GIS 方法已開始用於區域性災前風險評估工作中，但還不是主流；2. 以定性和半定量評估為主，評價效果不理想且應用性差，在城市減災決策中的作用尚未充分發揮；3. 持續性的研究工作不多。

本文目標是針對中國泥石流災害風險綜合評價的現狀，建立一套針對城市的泥石流災害綜合評價體系和方法，具體目標為下列四項：1. 構建城市泥石流風險結構體系，完善單溝泥石流綜合評價內容；2. 掌握 RS/GIS 支援下的城市泥石流風險集成評價與製圖方法；3. 提出城市泥石流危險範圍和危險度識別方法；4. 提出城鎮泥石流災害易損性和損失評估的方法。

研究區概況

昆明市東川區位於金沙江一級支流小江流域，是中國著名的泥石流災害強烈活動區；其城區面積 9.1km^2，人口 5.3 萬人。城市座落在穿越城區的石羊溝、深溝、尼拉姑溝等溝谷泥石流形成的複合堆積扇上 (圖 1)，歷史上曾暴發過規模較大的泥石流災害，沖毀、淤埋部分老城區街道和房屋。石羊溝位於城區南側，流域面積 10.8 km^2，主溝長 4.61km，該溝固體鬆散物質豐富，是一條相當活躍的黏性泥石流溝；石羊溝緊靠東川城區南端通過，素有東川「南大門」之稱，對東川城區安全及交通運輸有重要的地理意義。位於石羊溝北側的深溝是一條老泥石流溝，該溝發源於小江右岸最高峰—大牯牛寨山，源頭高程 4,017.3m，由東向西流入小江，其匯合口處為高程 1,160m，高差達 2,800m，主溝長 9.05 km，流域面積 28.32 km^2；其主溝左側有尼拉姑支溝彙入，位於深溝和石羊溝之間，流域面積 4.06 km^2，是處於發育期的黏性泥石流溝；溝口距東川城區僅 lkm，與東川城區高差 200-400m，最高達 600m，居高臨下，形成頂沖，勢態險要。由於石羊溝和深溝分別包圍東川城區南北端，兩溝在城區毗鄰，最近處相距不足 2 km，且深溝的支溝－泥拉姑溝正沖城區中心，造成東川城區左右和後背三面受泥石流威脅的局勢，對東川城區安危有舉足輕重的影響。

隨著城市化進程的加快，城市聚集的社會財富和人口越來越多，城市的易損性也隨之越來越高。

東川是 1958 年國務院批准建立省轄地級東川市，1999 年設立為昆明市東川區；作為一個山區型城市，其城區範圍和人口變化很大，泥石流災害對城市人口和財產安全影響也越來越突出，隨著目前東川城區建設速度的加快，高危險區的建築密度增加很快，一旦泥石流活動成災造成的損失也就越大，圖 2 能夠很好地反映昆明市東川城區易損性從 1979 到 2004 年的 25 年變化。

城市泥石流危險區劃

(一) 數學模型

泥石流平面運動方程是基於有限元流體的質量守恒原理推導出流體分別沿 x、y 方向的連續性方程，根據動量守恒原理推導出二維流體的動量方程，並建立描述泥石流二維非恒定流方程組，即聖維南方程，其中阻力項採用日本 Takahashi (1991) 運算式：

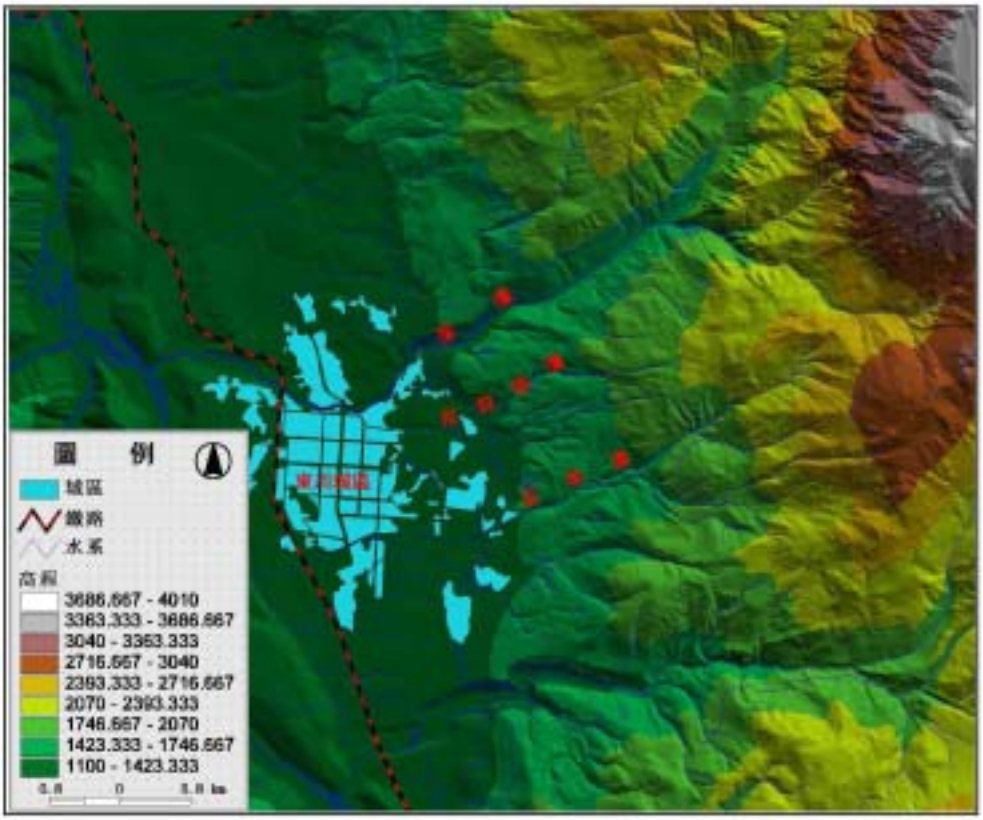


圖 1　東川城區及後山泥石流溝分佈

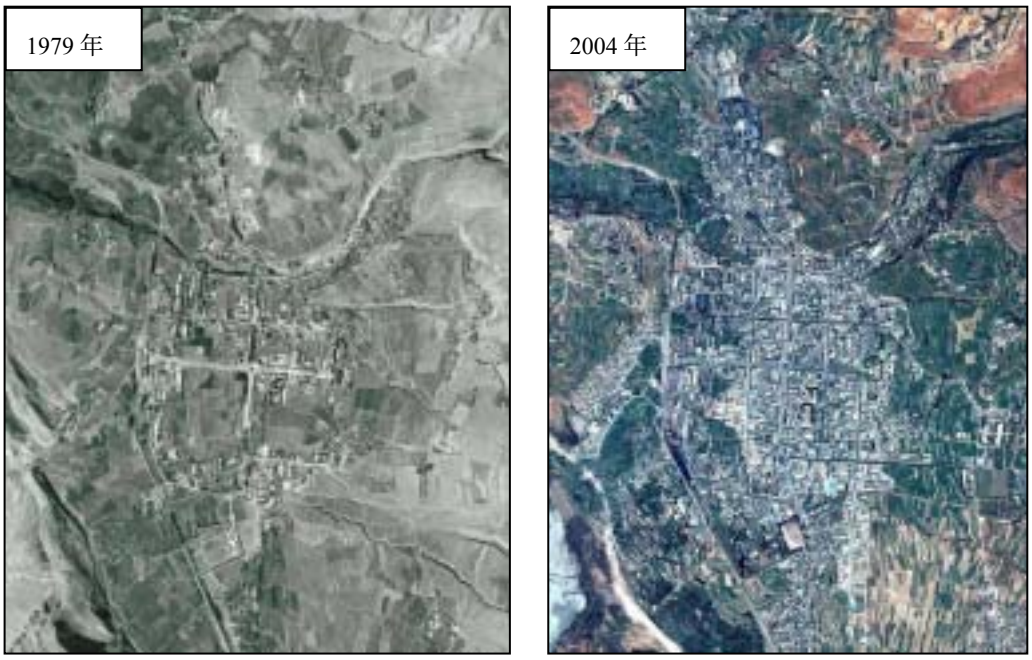


圖 2　研究區—東川城區易損性從 1979 年到 2004 年間 25 年的變化

$$\begin{cases} \dfrac{\partial h}{\partial t}+\dfrac{\partial M}{\partial X}+\dfrac{\partial N}{\partial Y}=0 \\ \dfrac{\partial M}{\partial t}+\beta\dfrac{\partial (M\cdot U)}{\partial X}+\beta\dfrac{\partial (M\cdot V)}{\partial Y}=-gh\dfrac{\partial H}{\partial X}-\dfrac{F_x}{\sigma_f} \\ \dfrac{\partial N}{\partial t}+\beta\dfrac{\partial (N\cdot U)}{\partial X}+\beta\dfrac{\partial (N\cdot V)}{\partial Y}=-gh\dfrac{\partial H}{\partial Y}-\dfrac{\partial F_y}{\sigma_f} \end{cases}$$

式中阻力項為：

$$F_x=(\sigma-\rho)\bullet g\bullet h\bullet Cd\bullet\cos\theta_x\bullet\tan\alpha+k\frac{D}{d}\sqrt{U^2+V^2}\bullet U$$

$$F_y=(\sigma-\rho)\bullet g\bullet h\bullet Cd\bullet\cos\theta_y\bullet\tan\alpha+k\frac{D}{d}\sqrt{U^2+V^2}\bullet V$$

式中：*U*:*X* 方向流速；*V*:*Y* 方向流速；*h*：泥深；*M*:*X* 方向流量；*N*:*Y* 方向流量；β：運動修正係數；*g*：重力加速度；*H*：泥石流表面標高；*Fx*、*Fy*：摩擦阻力；σ_f：泥石流容重；σ、ρ：分別為泥石、水的比重；*Cd*：流體中泥石體積比；θ*x*、θ*y*：沿 *X*、*Y* 方向的堆積區坡度；tanα：動摩擦係數；κ：泥石流阻力係數，*D*：堆積扇表面微起伏度，*d*：顆粒平均粒徑。

(二) 數值解方法和計算條件控制

描述泥石流二維非恒定流的方程為一雙曲線方程組，目前常用的數值解方法有：有限差分法和有限單元法。考慮到有限差分法計算速度快，比較直觀，而且在數學理論上也比較成熟，本研究採用此

法進行數值解。有限差分的基本思想是：用泥石流堆積區有限個離散點的集合代替連續的堆積域，在這些離散點上用差商近似代替微商，將微分方程及其定解條件化為以未知函數在離散點上的近似值為未知量的代數方程 (差分方程)，然後求解差分方程，從而得到微分方程的解在離散點上的近似值。用差分法求解泥石流平面運動的控制方程組的過程簡述如下：

1. 剖分堆積域，確定離散點

將所研究的堆積域分割成矩形網格系統，研究區的邊界可用最接近它的格線近似表示，對區域進行剖分並確定離散點後，再進行時間、空間離散化，組成時空網格，有限差分法求解泥石流非恒定流動問題就是計算出時空網格上的各離散點處的泥深和流速值，或是不同的時間層各空間離散點的泥深和流速值。

2. 建立和求解差分方程組

最簡單而又有效的一種格式是時間步為前差分，空間步為中心差分的顯式格式。輸入初始資料，並根據網格大小選定時間步長，電腦逐格求解方程組，算出不同時刻泥石流運動要素。將各時間的泥石流運動狀態聯繫起來即可得到堆積域的流速、泥深分佈圖。

計算條件主要包括初始條件、邊界條件、水文條件和時間步長。

初始條件：在計算域內，泥石流沖出溝口的流速值 U 和泥深 h 可根據歷史泥石流發生情況或推算出某頻率值進行評定，可設為常數，法向流速 V 的初始值為零。

邊界條件：在平面流動情況下，任意擴散邊界有兩類，一類是半封閉邊界 (流動邊界的一側或兩側有阻擋物)；一類是開敞性邊界 (流動邊界無任何阻擋物)。本研究主要以泥石流堆積區為邊界。

水文條件：對侵入計算域的一條或幾條泥石流的水文參數根據歷史資料或推算，進行遭遇組合分析，確定某一頻率情況下各溝入流情況。

時間步長：時間步長採用 $\Delta t \le \dfrac{\Delta X\ (\text{或}\ \Delta Y)}{\sqrt{U^2+V^2}}$ 進行控制，其中 $\sqrt{U^2+V^2}$ 為最大流速模，即根據網格大小選定 Δt 和 ΔX、ΔY。

研究區三條泥石流溝的運動堆積數值仿真的主要計算參數取值見表 1。

DEM 地形資料：根據數值類比結果，我們應用 1:1 萬比例尺 DEM 資料 (解析度為 40 × 40m) 對下墊面地形進行處理，圖 3 反映了仿真計算範圍的 3D 和 2D 地形特徵；根據 DEM 所反映的泥石流可能堆積區的地形坡度、溝道位置，我們將仿真範圍進行計算網格 (mesh) 劃分，計算網格解析度根據泥石流主溝道的分佈規律而確定，由圖 4 可以看出在泥石流堆積區溝道附近的計算網格分佈密度大，而地形平緩位置則密度相對較低。

表 1　主要參數值

	σ f (g/cm^3)	σ (g/cm^3)	ρ (g/cm^3)	Cd	tan α	κ	D (cm)	θ x	θ y
深溝	1.50	2.6	1.0	0.4	0.55	0.1	22	0.16	0.08
石羊溝	1.70	2.6	1.0	0.6	0.60	0.1	18	0.15	0.07
尼拉姑溝	1.60	2.6	1.0	0.5	0.65	0.1	16	0.17	0.09

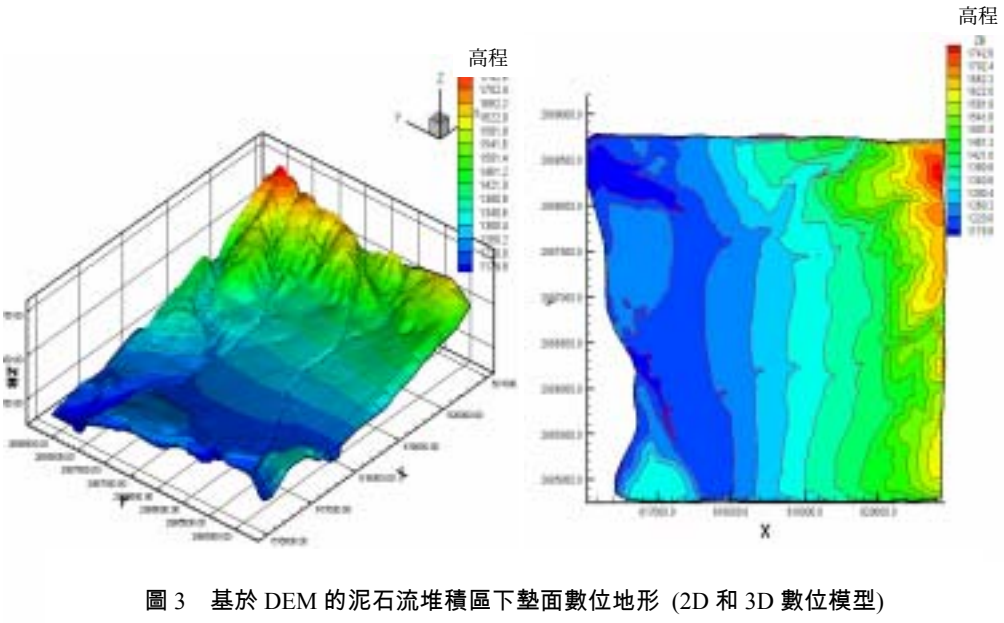


圖 3　基於 DEM 的泥石流堆積區下墊面數位地形 (2D 和 3D 數位模型)

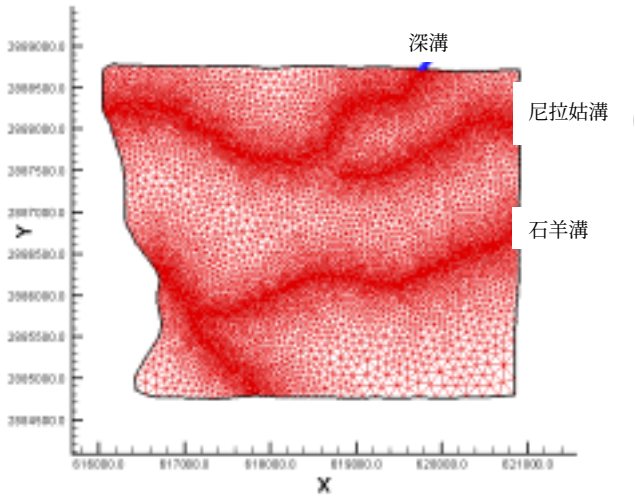


圖 4　數字地形轉化的計算網格

(三) 分區指標和方法

我們採用流速和泥深作為泥石流堆積區危險區劃分的定量指標，並且根據我們對東川小江流域 12 次泥石流成災後的現場調查和泥石流動力參數計算 (杜榕桓等，1987；唐川與朱靜，2003)，定性總結了不同流速和泥深條件下的損失狀況，為此，將東川城區泥石流堆積泛濫區域劃分為 3 級危險區 (表 2)。為此，我們完成了 50 年一遇 (2%頻率) 條件下的泥石流泛濫範圍的最大泥深和最大流速分佈的計算，其數值仿真的流速場、泥深分佈特徵見圖 5 和圖 6。由於泥石流數值類比是基於目標過程的定量描述，其數學模型擬合性與計算仿真性受多種因素的影響，加之泥石流類型、性質的多樣性，使數值仿真結果不可能達到滿意結果，與天然泥石流過程有一定的差異，需要作進一步的實地調查和分析

(Parry *et al*., 2005)，現場補充調查的內容主要包括 4 個方面：最大石塊粒徑、扇面縱比降、扇面溝道位置和扇面糙度，這些影響因素直接反映了泥石流危險性，對其分析如下：

最大石塊粒徑：泥石流對工程建築物的破壞往往是流體中的石塊衝擊所致，根據原形觀測和實地調查，泥石流流體中包含的巨大漂礫，其體積和重量都非常巨大，經常達數百噸以上，當流體中的漂礫以一定速度向下游運動時，對其流路上的一切工程及其它建築物都是異常危險的。為了便於野外測量，我們以石塊的最大粒徑作為表徵泥石流活動的危險性，在野外可用鋼卷尺直接測量。根據原蘇聯 Флейшман 的劃分標準 (Флейшман, 1978)，石塊粒徑危險度分級標準為：泥石流堆積扇上的石塊的最大粒徑大於 1.0 m 為高危險，1.0-0.2 m 為中危險，小於 0.2 m 為低危險。

扇面縱坡降：泥石流扇形地的坡度大小直接關係到泥石流運動最後減速過程的快慢，亦反映了泥石流最終堆積長度和麵積的大小。一般來說，扇面縱坡降越大，泥石流堆積範圍就越大，危害程度也越大。泥石流扇形地的縱坡降一般由扇頂向扇緣逐漸減小，通常扇體中上部縱軸坡降 10-15%，下部和側緣坡降非常小，一般只有約 2-4%。因此可將泥石流扇面的縱坡作如下危險度分級：扇面縱坡降大於 7%為高危險區，5-7%為中危險區，小於 5%為低危險區。

扇面溝道位置：在大中型溝谷型泥石流扇形地上常發育任意擺動的主溝道，常見的溝道一般 2-6 米深，扇頂部位更深，寬約 10-20 米。當一定規模的泥石流進入堆積區時，在扇的中上部多沿溝道流動，在中下部則脫離溝道，而選擇地勢低凹處停積，當出現大規模泥石流時，流體則可能淤滿溝道而選擇阻力最小的位置泛濫堆積，或是在凹岸外側超高越溝泛濫。因此，扇形地的溝道通常是泥石流發育初期選擇的最佳流通位置，並進行沖蝕切割而成，對後期泥石流的泛濫堆積位置也有一定制約，由此亦可將扇面溝道位置作為一個危險分區的因數。對於演化的新泥石流和間歇多年的泥石流來說，在扇面可能無明顯的溝道或是有普通的洪水溝，在分析評價時，可以用正對泥石流溝谷方向至扇緣的中軸線作為泥石流可能的主流線。泥石流堆積的幅寬受泥石流的容重和沖出量等因素的影響較大，一般離溝道 (與溝道的垂直距離) 越近，危險性就越大，反之則小。因此，在勾畫泥石流堆積扇危險區時應給予充分的考慮。

表 2　泥石流危險區劃分標準和災害含義

危險區類型	劃分標準	災害含義
Ⅰ級危險區 (高危險區)	流速 >3m/s，泥深大於 1.0m	泥石流沖出溝口的主流區，泥石流來勢兇猛，以沖毀的成災形式對城市建築物及其各種設施構成嚴重破壞，可造成人員傷亡和財產損失。
Ⅱ級危險區 (中危險區)	流速 3-1m/s，泥深 1-0.5m	位於泥石流主流附近的扇形地建設帶，泥石流主要以淤埋的成災形式對城市建築物和交通設施有局部破壞，城郊部位民房損壞嚴重，幾乎無人員傷亡，災情顯著。
Ⅲ級危險區 (低危險區)	流速低於 1m/s，泥深 <0.5m	該區屬泥石流漫流區，對城市建築物基本無破壞作用，對城郊部位民房有局部破壞，災情相對較輕。

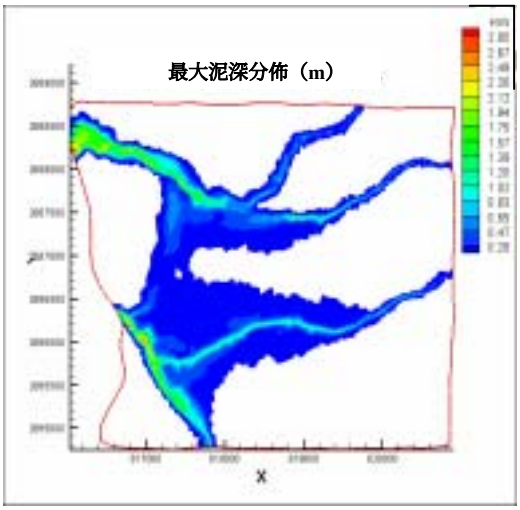


圖 5　數值模擬的泥石流泥深分佈

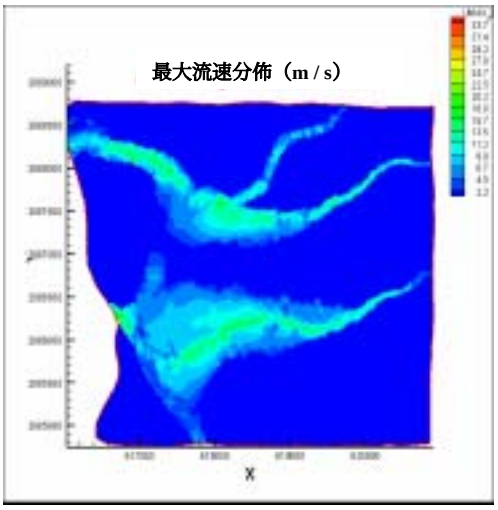


圖 6　數值模擬的泥石流流速場

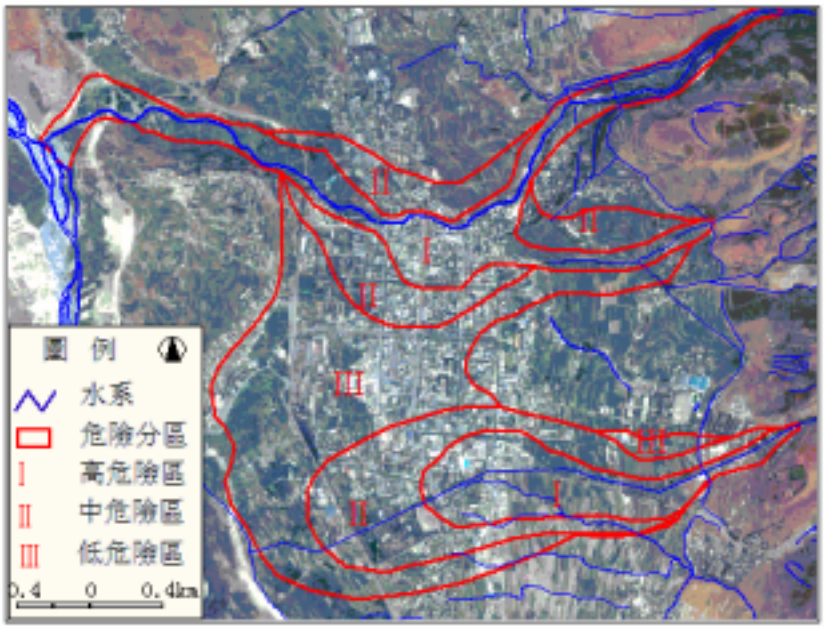


圖 7　昆明市東川城區泥石流危險度分區

扇面糙率特徵：扇面的糙率也是影響泥石流運動的重要阻力因素，平整光滑的扇面，泥石流堆積範圍就大，堆積距離就長，反之則影響泥石流扇形地的發育完整程度，造成的災害嚴重度就小。本研究採用了原蘇聯的巴克諾夫斯基的分級方案 (李德基，1997) 並結合我國劉德昭的泥石流溝槽的糙率系統分級方案 (康志成等，2004)，將其引用於扇形地面的糙率確定，既極高危險扇面特徵為扇面堆積

物質能完全滾動，表面光滑，無任何建築物和植被；高危險扇面特徵為在開闊的扇面上有可滾動礫石和卵石，扇面有稀疏的草本植物；中危險扇面特徵為扇面由難於繼續滾動的礫石和卵石組成，灌叢較稠密，扇面局部凸凹；低危險扇面特徵為扇面凸凹不平，灌叢稠密，扇面有建築物，對泥石流有阻礙作用。

通過我們對上述問題的調查和分析，結合數值仿真計算結果，將研究區的 1:1 萬比例尺 DEM 資料和東川城區泥石流災情的歷史資料進行對比分析，對不同等級的危險邊界作了進一步的調整，使其更與實際情況擬合，最終完成的東川城區泥石流危險區劃見圖 7，該圖的底圖即為 2003 年 4 月獲取的美國「快鳥」衛星影像。研究區泥石流危險區總面積為 4.92km^2，其中Ⅰ級危險區為 1.39km^2，Ⅱ級危險區為 1.64 km^2，Ⅲ級危險區為 1.89 km^2。

城市易損性評價

(一) 指標體系

易損性評價指標繁多而複雜，對於區域易損性可以概括為四類：即物質易損性 (建築物、基礎設施)、經濟易損性 (經濟收入、個人財產和國內生產總植)、環境易損性 (水、氣和土地資源) 和社會易損性 (人口及其結構)。前兩類易損性可以比較容易的轉化為貨幣量，而社會易損性的不確定性很大。考慮到物質、經濟易損性實際上與社會易損性有很高的相關性，而易損性評價所要揭示的是一種易損性單位的空間分佈序列，所以在具體操作上一般都略去了社會易損性。而對於特定的城市易損性如何選取既能代表易損性的主要內容，又能反映城市特徵的因數，這是我們對城市易損性評價具有科學性、合理性和可操作性的關鍵。

調查城市承受主體的易損性分佈及估算其價值需要花費很大的人力、物力和時間；特別是不同類別承受體的易損性特徵難以獲得，定量分析承災能力也是複雜而困難的。因此，要對城市承受體易損性指標進行全面評價是極其困難的，通常需要概括易損性評價的目標、任務，有重點地選擇其評價指標體系。採用何種社會經濟指標反映城市承受體易損性的大小還是有待深入研究的問題。本文是以城市為評價主體，涉及到的受災體類型的財產指標體系我們採用中國土地利用分類方案，並結合城市地物類型特徵，重點對城市用地的房屋建築、道路、綠化用地、城郊農作物、有林地等土地覆蓋類型特徵進行評價，為此將評價區財產指標按土地覆蓋類型劃分了三級 21 類 (表 3)，其中城市的房屋資產的評估是重點，不僅是因為房屋資產是城市財產主體，而且房屋分佈與人口密度、室內財產、城市生命線、土地資源都有密切的相關性。一旦城市遭受泥石流災害，城區的房屋建築的破壞最明顯，這是導致城市人員傷亡和財產損失的焦點，因此本文主要對城市資產的易損性進行評價。

(二) 評價方法

本文探討的以城市為承災主體的泥石流易損性評價方法，其技術路線和方法包括四個主要內容：(1) 劃分易損體類型；(2) 調查統計各類易損體數量及分佈情況；(3) 易損性評價模型構建；(4) 核算

易損體價值。前兩個內容主要利用遙感和 GIS 技術對城市土地覆蓋類型進行解譯和分析計算。

表 3　城市泥石流易損性評價結果 (貨幣種類：人民幣)

一級類型	二級類型	三級類型	單價 (元／m^2)	易損性評價		
				面積 (m^2)	價值 (萬元)	百分比
1 耕地	11 水田		15	648,454	972.68	1.37
	14 旱地		5	5,373,872	2,686.94	
3 林地	31 有林地		20	504,584	1,009.17	0.49
	32 灌木林		5	631,694	315.85	
5 城市用地	52 居民地	521 平房	300	874,150	26,224.50	74.62
		522 二層樓房	500	1,232,336	61,616.80	
		523 三層樓房	700	357,471	25,022.97	
		524 四層樓房	700	838,772	58,714.04	
		525 五層樓房	700	251,990	17,639.30	
		526 六層樓房	700	91,506	6,405.42	
		527 七層樓房	700	40,453	2,831.71	
		528 八層樓房	900	13,096	1,178.64	
		529 九層樓房	900	6,696	602.64	
	55 特殊用地	551 公共用地	200	29,985	599.70	13.11
		552 城市空地	150	1,542,156	23,132.34	
		553 城市綠地	300	381,414	11,442.42	
6 交通用地	61 鐵路		1,200	20,860	2,503.20	9.15
	62 公路	621 主街道	800	171,570	13,725.60	
		622 次街道	500	166,454	8,322.70	
7 水域	71 河水面		200	60,154	1,203.08	1.26
	72 塘水面		300	72,713	2,181.39	
總 計				13,310,380	268,331.10	100%

註：該表統計的土地覆蓋面積為平面面積，在進行易損體價值核算時，居民地的房屋建築面積以其平面面積乘以其相應樓層層數計算；價值核算單位均以人民幣計，以下相同。

劉希林等 (2002) 認為單溝泥石流易損度評價過程複雜，全部採用現場調查承受體的類型、數量和分佈並估算承受體的價值是件極其艱巨的工作，費時、費力且獲取資料的成本很高，難以達到易損度快速評價的目的。目前高解析度遙感技術為城市泥石流易損性的調查和分析提供了重要的資料來源，與 GIS 技術集成又為不同類型的易損體數量的統計提供了高效手段。遙感和 GIS 技術在自然災害易損性評價和損失評估中已得到廣泛的應用，並取得了顯著的成果，Ikonos 和 Quickbird 遙感資料以其特有的高解析度在自然災害分析中開始發揮特有的作用 (Van der Sande *et al*., 2003)，本文就是探討利用高解析度遙感資料和 GIS 技術實現城市泥石流易損性的評價。

(1) 城市易損體類型和數量統計

遙感和 GIS 一體化技術在土地利用／覆被變化，以及自然災害研究中已得到廣泛應用 (Anderson, *et al*., 1976; Van der Sande *et al*., 2003)，針對城市資產主要類型和空間分佈特點，以高解析度遙感影像為資料源進行城市土地覆蓋類型解譯，以此作為城市泥石流易損體類型和數量統計的依據。該文中用於土地覆蓋類型解譯的遙感資料源採用的是 2003 年 4 月獲取的美國「快鳥」(Quickbird) 衛星影像，該影像資料來源於美國數位全球 (Digital Globe) 發射的解析度最高的商業成像衛星，其全色解析度為 0.61m，分類譜有紅、綠、藍、近紅外四個波段，這種高解析度的大比例尺圖像足夠滿足對城市地物覆蓋類型判讀的需要。

針對研究區土地利用的主要類型，我們參考了中國土地利用分類方案，並結合城市地物類型特徵，重點對城市用地的房屋建築、街道、綠化用地、城郊農作物、有林地等土地覆蓋類型特徵進行解譯。本研究採用三級分類系統，一級分為 5 類，二級分為 10 類，三級分為 21 類 (表 3)。遙感圖像的判讀解譯比例尺為 1:1,500，以其覆蓋地物的空間特徵和光譜特徵為基礎，應用圖像中的形狀、大小、圖形、陰影、位置和紋理等要素作為判讀標誌，直接在遙感影像上數位元元元化，提取研究區的地表地物覆蓋類型、數量和空間分佈等資訊；並將遙感影像看作含有地物圖形資訊的柵格地圖，經過幾何校正和投影匹配之後，在 GIS 軟體中數位化，最終獲取滿足要求的 GIS 資料。評價範圍涉及東川城區主體部分共 11.5km^2，由於該遙感圖像不能準確地判讀城市的樓房層數，為了準確計算城市房屋的建築面積和價值，我們對整個城區的樓房層數進行了實地調查和統計，與解譯提供的資料融合，以作為城市房屋易損性評價依據，所完成的研究區土地覆蓋類型和特徵見圖 8。通過對研究區實施高解析度遙感圖像判讀和分類，按 1:2,000 比例尺成圖，將資料結果輸入到 ARCVIEW 中分類統計與製圖表達，獲取的城市易損體類型、面積的計算結果如表 3 所示。

(2) 評價模型

本文探討的城市泥石流易損性評價是基於目前城市的受災體空間分佈、數量特徵和實際價值。因此，在對研究區受災體類型劃分、受災體數量提取、地面調查和受災體災前價值的統計分析的基礎上，採用分類統計方法按如下評估模型對泥石流易損性進行評價：

$$V(u)=\sum_{i=1}^{n}E(d)i\cdot F(s)i$$

式中：V (u) 為城市泥石流易損體財產價值，E (d) $_i$ 為 i 類易損體平均單價，F (s) $_i$ 為 i 類易損體的實際面積，i 為受災體類型。

城市泥石流易損體價值可歸結為兩大類，一類屬資產價值，如房屋、基礎設施、鐵路、公路、宅內財產等；另一類屬資源價值，如土地資源等 (張梁等，1998)。由於中國資源經濟剛起步，目前對土地資源價值還缺少相應的標準和參考數值，在本研究中沒有予以考慮。此外，室內財產與城市房屋等建築有密切關係，已有模型分析。因此，本文評價主要採用上述的高解析度遙感影像解譯城市土地覆蓋類型，各類型的單價主要根據昆明市東川區城建局提供的參考資料 (見表 3)。

(3) 評估結果

根據上述討論的評估指標體系和模型，應用 ARCVIEW 提供的統計和分析工具，可計算出評價區各類地物覆蓋類型的面積和最終核算價值，其評價結果見表 3 和圖 9。圖 9 採用 16 級灰度表示東川城區單位面積財產的價值數量大小，即每平方米財產價值由人民幣 5 元至 8,100 元的空間分佈特徵，也

反映了城市高層樓房的財產價值最高，其易損性也相對要高於其他城市建築物。

泥石流易損性評價結果表明研究區的易損體總價值核算為人民幣 268,331.1 萬元，其中耕地價值為 3,659.62 萬元，占總價值的 1.37%；林地價值為 1,325.02 萬元，占總價值的 0.49%；居民地房屋價值為 200,236.02 萬元，占總價值的 74.62%；特殊用地價值為 35,174.46 萬元，占總價值的 13.11%；交通用地價值為 24,551.5 萬元，占總價值的 9.15%；水域價值為 3,384.47 萬元，占總價值的 1.26%。由此看出城市房屋建築的易損性最大，是城市防災減災的重中之重。

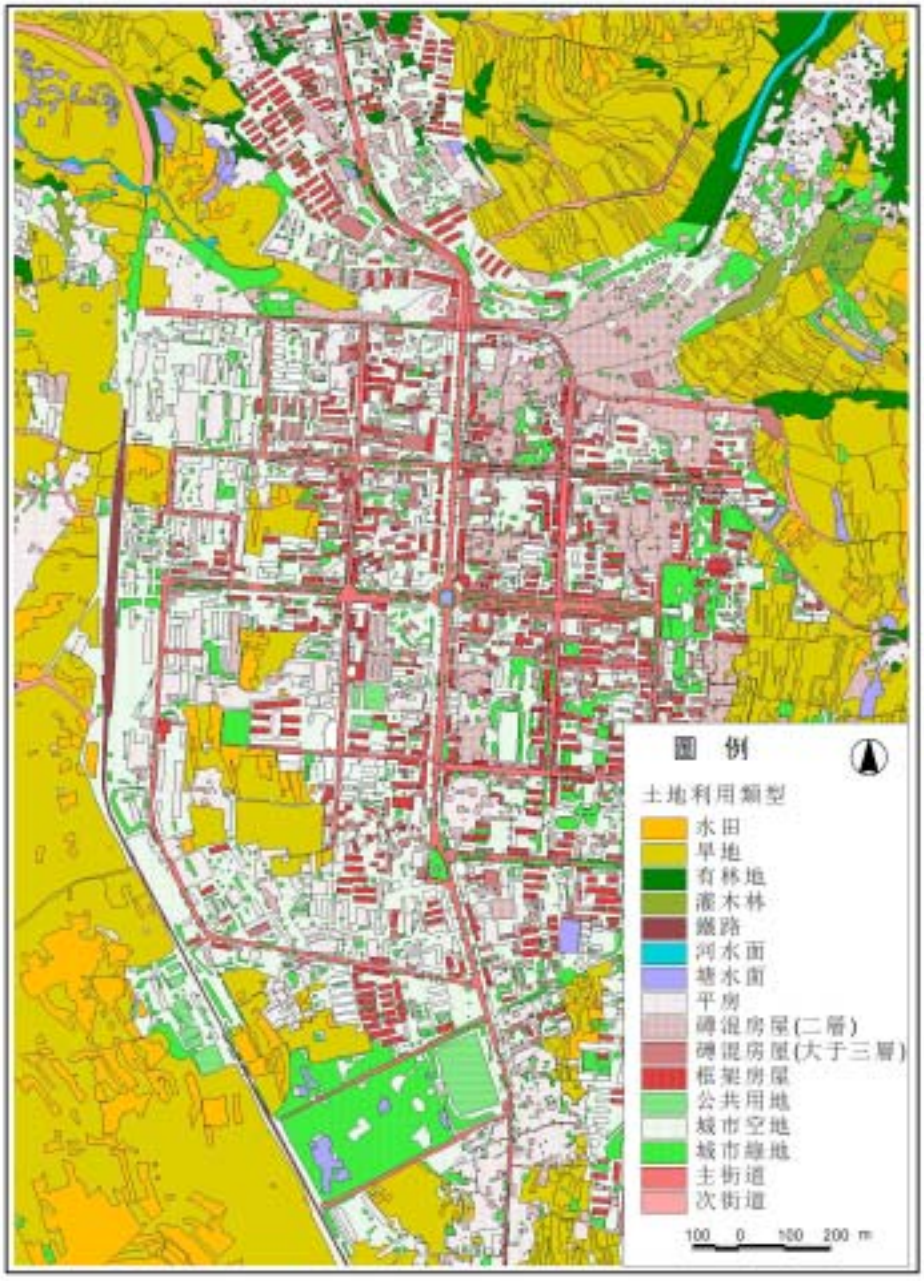


圖 8　研究區土地覆蓋分類圖

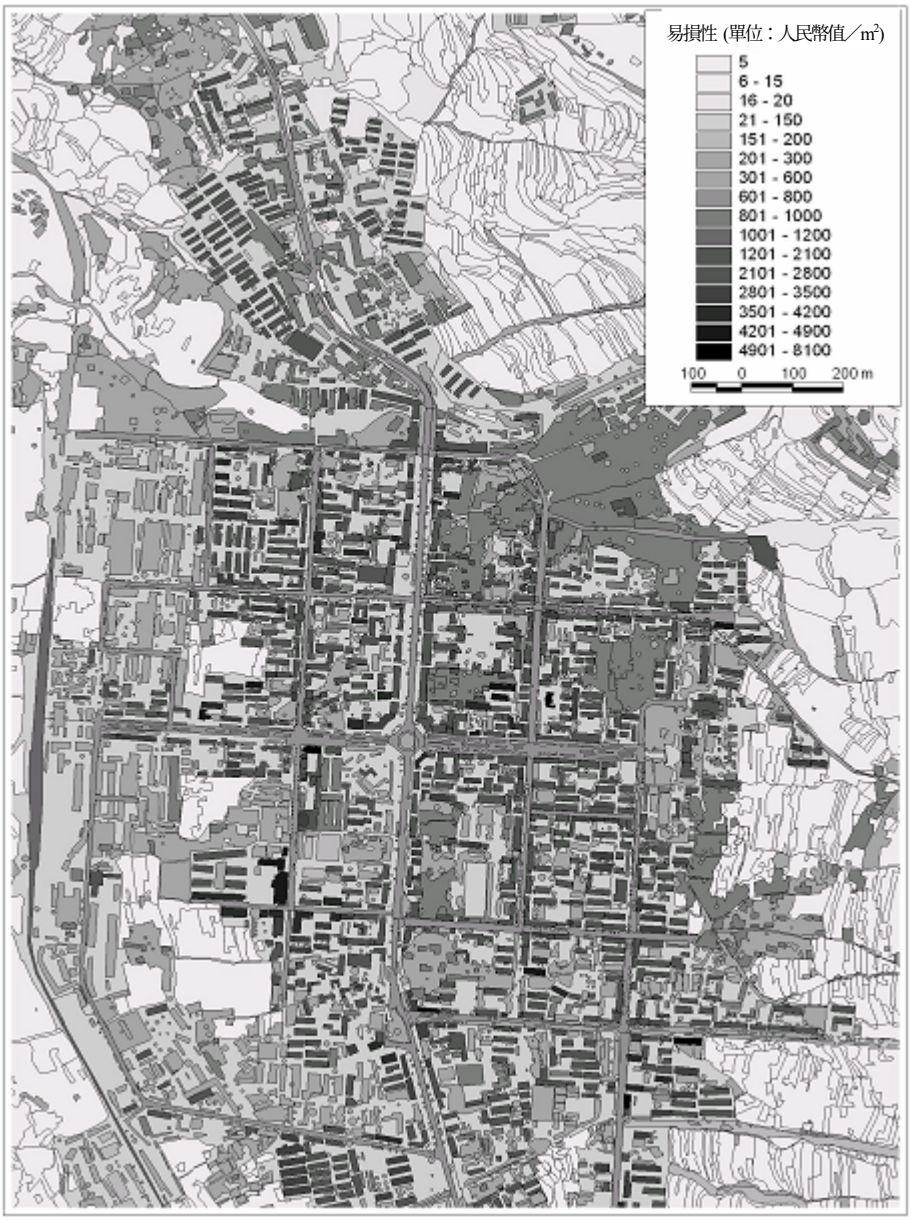


圖 9　城市泥石流易損性評價圖

城市泥石流災害損失評估

(一) 評估模型

泥石流災害屬隨機事件，可能造成的破壞損失有很大的不確定性。因此，預測未來某段時期內可能造成的經濟損失，只能在對該區域的危險性和易損性評價基礎上，核算泥石流災害可能損失的平均

值，並根據期望損失的空間變化，分析評估期望損失的空間分佈和數量特徵。受災體的價值可歸結為兩大類，一類屬資產價值，如房屋、鐵路、公路、設備及宅內財產等；另一類屬資源價值，如土地、森林等。本研究探討的泥石流災害損失評估的基本模型概括為:受災體價值損失=受災體成本價值 ╳ 受災體價值損毀度。因此，在對研究區受災體類型劃分、受災體數量提取、地面調查和受災體災前價值、損毀程度的統計分析的基礎上，採用分類調查統計方法按如下評估模型對泥石流不同危險區的期望損失進行核算：

$$D(s) = \sum_{n=i}^{n} \sum_{m=j}^{m} D(d)_i \cdot F_{ij} \cdot G_{ij}$$

式中，$D(s)$ 為泥石流災害財產損失，$D(d)\ i$ 為 i 類受災體災前平均單價，F_{ij} 為 i 類受災體發生 j 級損毀的數量，G_{ij} 為 i 類受災體發生 j 級損毀時，平均價值損失率，i 為受災體類型，j 為受災體損毀等級。評估的承受體採用上述的高解析度遙感影像解譯的城市土地覆蓋類型，各類型的單價主要根據昆明市東川區城建局提供的參考資料 (表 3)。

由於泥石流運動、堆積過程的複雜性和堆積扇地形變動的複雜性，要確定泥石流堆積扇不同位置的破壞率是很困難的，不同泥石流堆積扇在危險區劃分及其破壞率確定上有較大的差異，但是我們通過對大量泥石流堆積泛濫過程的觀測和現場調查，總結出一般性規律和特徵；在此基礎上分析泥石流堆積扇不同位置的破壞率，使泥石流損失評價計算趨於合理。根據許多城市泥石流災害調查資料 (唐邦興，2002；康志成等，2004) 以及本文第一作者對雲南省和四川省 26 個城鎮泥石流災情現場調查成果，初步確定泥石流堆積扇的不同部位遭受泥石流毀壞程度的大小，以及根據泥石流堆積扇不同危險區劃分結果，我們將泥石流可能的破壞率確定為Ⅰ級危險區為 70%，Ⅱ級區為 50%和Ⅲ級區為 30%。

(二) 評估結果

根據以上對研究區的泥石流危險程度和土地覆蓋類型特徵的分析與計算，我們應用 GIS 提供的分析工具將泥石流危險區劃圖與城市易損性評價圖進行疊加處理，提取不同危險等級的財產資料，從而完成了研究區不同土地覆蓋類型的泥石流災害損失計算和評價，具體計算結果如表 4 所示。

泥石流災害損失評估結果表明，研究區可能遭受泥石流災害損失的總計為人民幣 86,209.53 萬元，其中Ⅰ級危險區 33,261.72 萬元，Ⅱ級危險區 34,423.96 萬元，Ⅲ級危險區 18,523.85 萬元 (表 4)。對評估區的各土地覆蓋類型損失評估統計結果中居民地損失價值為 64,504.67 萬元，占總損失價值的 74.82%，說明城市房屋建築是泥石流災害損失的主要承受體，所以也是城市防災減災的重中之重。

城市泥石流風險評價

根據城市泥石流風險管理的目標，在泥石流危險性分析、易損性分析和損失評估的基礎上，進一步集成分析研究區泥石流可能發生的概率及其災害發生時對城市生命財產的危害。在技術方法上應用 ARCVIEW 系統的地圖代數功能，將泥石流危險度和易損度評價結果進行數位疊合分析 (圖 10)。根據我們對研究區泥石流災害對城市程度影響的分析，以及與東川區政府和東川城市建設局、東川泥石

表 4　研究區泥石流災害損失評估結果（貨幣種類：人民幣，單位：萬元）

土地類型	Ⅰ級危險區		Ⅱ 級危險區		Ⅲ 級危險區	
	毀損率	核算價值	毀損率	核算價值	毀損率	核算價值
11	0.7	90.65	0.5	50.04	0.2	76.49
14	0.7	173.19	0.5	120.78	0.2	106.30
31	0.7	177.79	0.5	18.73	0.2	4.78
32	0.7	3.17	0.5	3.89	0.2	0.43
521	0.7	1,517.03	0.5	2,134.04	0.2	2,103.37
522	0.7	8,631.52	0.5	4,214.42	0.2	1,739.06
523	0.7	3,864.18	0.5	3,847.75	0.2	1,583.70
524	0.7	7,196.47	0.5	10,360.63	0.2	4,911.06
525	0.7	2,862.49	0.5	3,437.26	0.2	1,320.77
526	0.7	933.01	0.5	1,083.63	0.2	871.62
527	0.7	-	0.5	320.45	0.2	657.23
528	0.7	349.99	0.5	-	0.2	203.62
529	0.7	209.63	0.5	151.72	0.2	-
551	0.7	29.81	0.5	207.21	0.2	23.44
552	0.7	2,190.17	0.5	3,197.47	0.2	1,907.11
553	0.7	1,415.83	0.5	2,443.64	0.2	661.79
61	0.7	-	0.5	183.11	0.2	581.64
621	0.7	2,047.66	0.5	2,080.48	0.2	1,516.50
622	0.7	444.98	0.5	300.19	0.2	220.06
71	0.7	688.98	0.5	49.83	0.2	-
72	0.7	435.16	0.5	218.71	0.2	34.87
合計 (萬元)		33,261.72		34,423.96		18,523.85

流災害防治研究所的多次討論的基礎上，對該城區泥石流風險度大小和位置分佈有了較完整認識；在此基礎上，我們按數值 >3.0、3.0-2.5 和 <2.5 作為劃分高、中、低風險區的上下限界值，並用不同顏色或圖斑表示各風險等級的區域，由此得到昆明市東川城區泥石流風險性評價圖 (圖 11)；統計結果表明：研究區泥石流危險範圍內高風險區面積 1.38 km^2，占研究區面積的 28.1%；中風險區面積約 2.58km^2，占研究區總面積的 52.4%；低風險區面積 0.96km^2，占研究區總面積 19.5%。

結　論

1. 本文針對城市泥石流孕災環境、致災因素和承受體的社會經濟狀況，形成了一套基於 RS 和

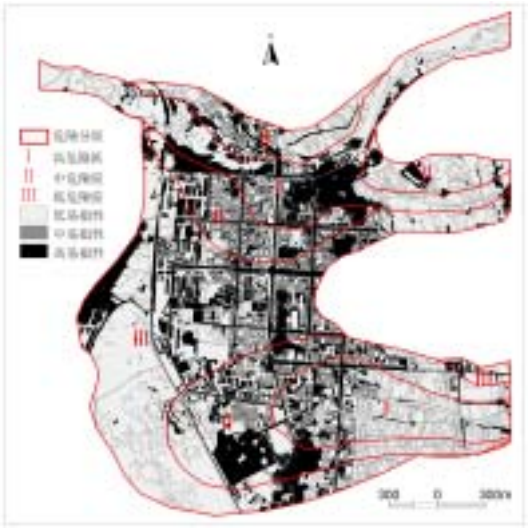


圖 10 昆明市東川城區泥石流危險區劃

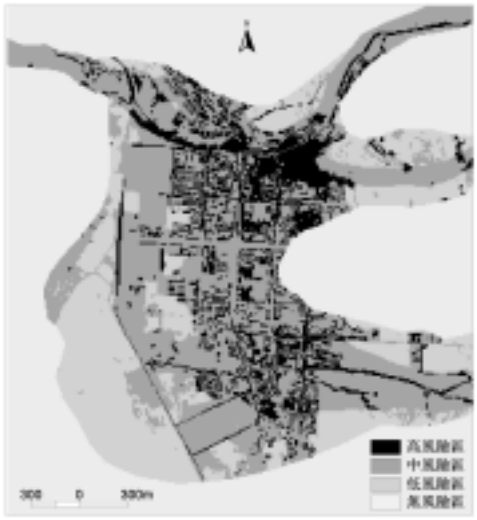


圖 11 昆明市東川城區泥石流風險評價結果

GIS 的從資料獲取→空間屬性資料庫建立→評價指標體系選擇→空間分析→泥石流扇形地危險區劃→城市易損性分析→損失評估→風險評價的技術路線和方法體系。建立了城市泥石流綜合評價和風險區劃的體系；最終編制了研究區的泥石流災害綜合評價系列圖，我們認為本研究提出的昆明市東川城區泥石流綜合評價結果是符合實際情況的，可以作為該城市泥石流風險管理和風險決策的科學依據。

2. 根據泥石流數值類比計算結果，結合研究區的 1:1 萬比例尺 DEM 資料和泥石流災情的歷史資料將東川城區劃分出三級危險區，Ⅰ級危險區面積為 1.39km^2，占總危險評價範圍面積 (4.92 km$^{2)}$ 的 28.3%；Ⅱ級危險區面積為 1.64 km^2，占總危險面積的 33.3%；Ⅲ級危險區面積為 1.89 km^2，占總危險面積的 38.4%。

3. 實踐表明應用 Quickbird 遙感影像展示的豐富的地表易損體資訊，可以為城市泥石流易損性評價提供可靠的資料源，使複雜的易損性評價簡便化，也提高了評價精度。研究區的泥石流易損性評價結果表明，其易損體總價值核算為 268,331.10 萬元，其中耕地價值為 3,659.62 萬元，占總價值的 1.37%；林地價值為 1,325.02 萬元，占總價值的 0.49%；居民地房屋價值為 200,236.02 萬元，占總價值的 74.62%；特殊用地價值為 35,174.46 萬元，占總價值的 13.11%；交通用地價值為 24,551.50 萬元，占總價值的 9.15%；水域價值為 3,384.47 萬元，占總價值的 1.26%。由此看出城市房屋建築的易損性最大，是泥石流災害損失的主要承受體。

4. 將扇形地泥石流破壞損失率確定為Ⅰ級危險區為 70%，Ⅱ級區為 50%和Ⅲ級區為 30%，評估結果表明，研究區Ⅰ級危險區可能遭受泥石流災害損失數額為 33,261.72 萬元，Ⅱ級危險區為 34,423.96 萬元，Ⅲ級危險區為 18,523.85 萬元，其中城市房屋建築是泥石流災害損失的主要承受體，所以也是城市防災減災的重中之重。

5. 根據對研究區泥石流危險度和易損度綜合分析，將評價範圍劃分出高、中、低風險區，其中高風險區面積 1.38 km^2，占研究區評價範圍總面積的 28.1%；中風險區面積約 2.58km^2，占 52.4%；低風

險區面積 0.96km^2，占 19.5%。

(6) 本文建立了以靜態分析為核心的易損性和損失評估體系，而未來的城市發展迅速；因此，泥石流易損性評價和風險評價應該是隨時間變數而變化的，這就要求對城市社會經濟易損性變化規律和趨勢作出準確的分析，在此基礎上完成的風險評價對未來相當長的一段時期內可以充分發揮其防災減災作用。此外，城市人口是重要的易損性指標，因此在分析城市人口易損性空間特徵上，除了利用城市人口統計資料外，亦可通過高解析度遙感影像的解譯，識別和勾劃出居民邊界，確定居民地的人口密度，在此基礎上計算每個評價單元居民地上的人口數量。

(7) 本文利用 RS 資料源和 GIS 的空間資料處理分析方法，使複雜的城市泥石流災害綜合評價簡便化，也提高了評價的精度，是一種值得推廣應用的新方法。城市泥石流災害綜合評價過程複雜，在危險性、易損性、損失和最終的風險性評價因素選取上，應充分考慮其科學性、合理性和可操作性。

謝　辭

感謝中國國家自然科學基金和日本神戶大學 COE 專案資助。在該研究中，成都理工大學地質災害防治國家實驗室朱靜副教授、法國 Cean University 的師玉娥博士生和中國科學院成都山地災害與環境研究所劉洪江博士生等參與了數值仿真和 GIS 製圖工作；雲南大學張軍博士和萬石雲、鐵永波和周春花碩士生參與了野外調查和 RS 資料處理；在此表示感謝。

引用文獻

李德基 (1997) 泥石流減災理論與實踐，北京：科學出版社。

杜榕桓、康志成、陳循謙、朱平一 (1987) **雲南小江泥石流綜合考察與防治規劃研究**，重慶：科學技術文獻出版社重慶分社，78-96。

韋方強、胡凱衡 (2002) 山區城鎮泥石流減災決策支援系統，**自然災害學報**，11 (2): 31-37。

唐川 (2004) 三江並流區泥石流危險性評價，**地理學報** (臺灣)，38: 31-46。

唐川、朱靜 (2003) **雲南滑坡泥石流研究**，北京：商務印書館。

唐川、周鉅幹 (1994) 泥石流堆積扇危險度分區評價的數值仿真研究，**災害學**，9 (4): 7-13。

唐邦興 (2002) **中國泥石流災害**，北京：商務印書館。

康志成、李焯芬、馬蔼乃、羅錦添 (2004) **中國泥石流研究**，北京：科學出版社。

張梁、張業成、羅元華 (1998) **地質災害災情評估理論與實踐**，北京：地質出版社。

劉希林、莫多聞、王小丹 (2001) 區域泥石流易損性評價，**中國地質災害與防治學報**，12 (2): 1-12。

Флейшман, С. М. (1978) Сели，姚德基譯 (1985) **泥石流**，北京：科學出版社。

沖村孝、國村省吾 (1988) **数値地形モデルを使った土石流の流下・堆積域のシミュレーションモデルの応用--島根県三隅町西の谷地区の場合**，**建設工學研究所論文報告集**，30: 163-188。

Aleotti, P. and Chowdhury, R. (1999) Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 21-44.

Alison, J. R. (1993) A GIS for the prediction of landsliding potential and hazard in Southwest Greece, *Zeitschript fuer Geomorphologie*, 87 (Supplement): 141-149.

Ambrosio, D., Gregorio, S., Iovine, J. (2003) First simulations of the Sarno debris flows through Cellular Automata modeling, *Geomorphology*, 54: 91-117.

Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T. and Witmer, R. E. (1976) A land use and land cover classification system for use with remote sensor data, *Geological Survey Professional Paper 964*. Washington DC: US Government Print Office.

Aniya, A. (1985) Landslide-susceptibility mapping in the Amahata River Basin, Japan, *Annals of the Association of American Geographers*, 75 (1): 102-114.

Ayala, I. A. (2002) Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries, *Geomorphology*, 47: 107–124.

Baldelli, P. Aleotti, P. and Polloni, G. (1996) Landsliding susceptibility numerical mapping at the Messina Strait crossing site, Italy. *Proceeding VII of Internatinal Symposium on Landslides*, Trondheim, Norway: Balkema, 1: 153-158.

Blong, R. J. (1992) Some perspectives on geological hazards. In: McCall, G. J. H., Laming, D. J. C. and Scott, S. C. (eds.) *Geohazards Natural and Man-Made*, London: Chapmans & Hall, 209-216.

Cannon, T. (1993) A hazard need not a disaster make: vulnerability and the causes of natural disasters. In: Merriman, P. A. and Browitt, C. W. A. (eds.) *Natural Disasters: Protecting Vulnerable Communities*, London: Thomas Telford, 92-105.

Carrara, A. (1991) GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard, *Earth Surface Processes and Landform*, 16: 427-445.

Carrara, A., Cardinali, M. and Guzzetti, F. (1992) Uncertainty in assessing landslide hazard and risk, *ITC Journal*, (2):172-183.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., and Reichenbach, P. (1995) GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.) *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazard*, Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publisher, 135-175.

Carrasco, R. M. and Pedraza, J. F. (2003) Hazard zoning for landslides connected to debris flowial floods in the Jerte Valley (Spain) by using GIS techniques, *Natural Hazards*, 30: 361–381.

Chau, K. T. and Lo, K. H. (2004) Hazard assessment of debris flows for Leung King Estate of Hong Kong by incorporating GIS with numerical simulations, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 103-116.

Dai, F. C., Lee, C. F. and Ngai, Y. Y. (2002) Landslide risk assessment and management: an overview, *Engineering Geology*, 64: 65–87.

Delmonaco, G., Leoni, G. and Margottini, C. (2003) Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modeling, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 443-455.

Dietrich, W. E. and Sitar, N. (1997) Geoscience and geotechnical engineering aspects of debris-flow hazard

assessment, *Proc. First International Workshop on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, S. Francisco: ASCE, 656-675.

Einstein, H. H. (1997) Landslide risk-systematic approaches to assessment and management. In: Cruden, D. M. and Fell, R. (eds.) *Landslide Risk Assessment*, Rotterdam: A. A. Balkema, 51-109.

Fell, R. (1994) Landslide risk assessment and acceptable risk, *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 261-272.

Guzzetti, F. (2000) Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy, *Engineering Geology*, 58: 89-107.

Guzzetti, F., Carrara, A. and Cardinali, M. (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, *Central Italy. Geomorphology*, 31: 181-216.

Hansen, A. (1984) Landslide hazard analysis. In: Brunsden, D. and Prior, D. B. (eds.) *Slope Instability*, New York: Wiley, 523-543.

Hearn, G. J. (1995) Landslide and erosion hazard mapping at Ok Tedi copper mine, Papua New Guinea, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28: 47-60.

Huebl, J. and Steinwendtner, H. (2001) Two-dimensional simulation of two viscous debris flows in Austria, *Physical and Chemstry of the Earth*, 26 (9): 639-644.

IUGS, Working Group on Landslide, CommitteeHueb on Risk Assessment. (1997) Quantitative risk assessment for slope and landslides-the state of the art. In: Cruden, D. M. and Fell, R. (eds.) *Landslide Risk Assessment*, Rotterdam: A. A. Balkema, 3-12.

Jonkman, S. N., Gelder, P. H. and Vrijling, J. K. (2003) An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage, *Journal of Hazardous Materials*, A99: 1-30.

Kaplan, S. (1991) The general theory of quantitative risk assessment. In: Haimes, Y. Y., Moser, D. A. and Stakhiv, E. Z. (eds.) *Risk Based Decision Making in Water Resources*, New York: American Society of Civil Engineers, Water Resources Planning and Development Division, 11-391.

Leroi, E. (1996) Landslide hazard-Risk maps at different scales: Objectives, tools and development. In: Proc. Seventh International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, 35-52.

Maskey, A. (1993) Vulnerability accumulation in peripheral regions in Latin America: the challenge for disaster prevention and management. In: Merriman, P. A. and Browitt, C. W. A. (eds.) *Natural Disaster: Protecting Vulnerable Communities,* London: Thomas Telford, 461-472.

Mejia, N. M., Wohl, E. E. and Oaks, S. D. (1994) Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS model for Glenwood Springs, Colorado, *Geomorphology*, 10: 3531-3541.

Mollerhaug, S. (2003) Useful vulnerability assessment, *Information Security Technical Report*, 8 (4): 78-84.

Morgenstern, N. R. (1997) Toward landslide risk assessment in practice. In: Cruden, D. M. and Fell, R. (eds.) *Landslide Risk Assessment*, Rotterdam: A. A. Balkema, 15-24.

Okunishi, K. and Suwa, H. (2001) Assessment of debris-flow hazards of alluvial fans, *Natural Hazards*, 23: 259-269.

Palla, R., Vilaplana, J. M. and Guinau, M. (2004) A pragmatic approach to debris flow hazard mapping in

areas affected by Hurricane Mitch: example from NW Nicaragua.Engineering, *Geology*, 72: 57-72.

Panizza, M. (1996) *Environmental Geomorphology*, Amsterdam: Elsevier.

Parry, S., Ruse, M. E., and Williamson, S. J. (2005) Discussion on "Hazard assessment of debris flows for Leung King Estate of Hong Kong by incorporating GIS with numerical simulations", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 23-24.

Pasuto, A. and Soldati, M. (2004) An integrated approach for hazard assessment and mitigation of debris flows in the Italian Dolomites, *Geomorphology*, 61: 59-70.

Schick, A. P., Grodek, T. and Wolman, M. G. (1999) Hydrologic processes and geomorphic constraints on urbanization of alluvial fan slopes, *Geomorphology*, 31: 325-335.

Smith, K. (1996) *Environment Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*, London: Routledge.

Takahashi, T. (1991) *Debris Flow*, Rotterdam: A. A. Balkema.

Thouret, J. C. (1999) Urban hazards and risks: consequences of earthquakes and volcanic eruptions: an introduction, *GeoJournal*, 49 (2): 131–135.

Tobin, G., and Montz, B. E. (1997) *Natural Hazards: Explanation and Integration*, New York: The Guilford Press.

Uitto, J. I. (1998) The geography of disaster vulnerability in megacities, *Applied Geograpgy*, 18 (1): 7-16.

United Nations, Department of Humanitarian Affairs (1991) *Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options-A Manual for Policy Makers and Planners*. New York: United Nations, 1-164.

United Nations, Department of Humanitarian Affairs (1992) *Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management.* DNA/93/B6, Geneva: United Nations.

Van der Sande, C. J., de Jong, S. M. and de Roo, A. P. J. (2003) A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4: 217-229.

Varley, A. (1991) Disasters: vulnerability and response, *Disasters*, 15 (3): 285–287.

Varnes, D. J. (1984) Landslide hazard zonation: a review of principle and practice, UNESCO, 75700 Paris, France, 1-34.

Wadge, G. (1994) The potential of GIS modeling of gravity flows and slope instability, *International Journal of Geographical Information Systems*, 2 (2): 143-152.

Weichselgartner, J. (2001) Disaster mitigation: the concept of vulnerability revised, *Disaster Prevention and Management*, 2: 85-94.

94 年 11 月 25 日　收稿
95 年 3 月 4 日　修正
95 年 3 月 16 日　接受