地理學報　第三十八期：31-46 (2004)
JOURNAL OF GEOGRAPHICAL SCIENCE (38) : 31-46 (2004)

三江並流區泥石流危險區劃

Hazard Zonation of Debris Flows in the Three River Parallel Area of Yunnan

唐　川*

Chuan Tang

Abstract

Areas of debris flow hazards are regionalized into zones of varying degrees of stability, based on the estimated significance of causative factors inducing instability. For purposes of assessing debris flow hazards, a GIS-based approach was used to estimate the probability of the occurrence of debris flow disasters. This paper discusses the use of GIS technology combined with hazard modeling to demarcate debris flow zones and outlines the special advantage of GIS application for hazard mapping. The study area is the Three River Area of Yunnan Province of China, where suffers from serious debris flow hazards. The major factors of hazard zonation considered for the preparation of debris flow susceptibility maps include rock and soil type, slope, rainfall, land use cover, seismological intensity and human activities. An integration of these factors with certain weights and conditions yielded debris flow susceptibility values. These values were integrated for analysis to create a debris flow hazard zonation map of the study area. The debris flow hazard zonation map shows that the high hazard areas take up 9.2% of total study area of 67,550 km^2, the middle hazard areas account for 29.6%, and the low hazard areas occupy 35.9%, and 25.3% of the study area are not hazard-prone. The hazard zonation map can help planners or engineers to choose favorable locations for the construction of development projects in to reduce the hazards of debris flow disasters.

Keywords: three river parallel area of Yunnan, debris flows, hazard zonation, GIS.

* 成都理工大學地質災害防治與地質環境保護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.

摘　要

泥石流危險區劃是通過評估誘發斜坡不穩定的因數而對地表進行不同危險程度的劃分。基於評價泥石流危險性的目的，應用 GIS 方法可以對泥石流災害可能發生的概率作出評估。本文探討了 GIS 技術與危險性分析模型相結合的泥石流危險區劃，並且闡述了 GIS 技術在危險性製圖中特有的優越性。研究區選擇在遭受泥石流危害嚴重的中國雲南三江並流區。用於泥石流危險區劃的主要敏感因數包括岩土體類型、坡度、降雨、土地利用、地震烈度和人類活動。在對這些因數進行了敏感性評價的基礎上，應用 GIS 的分析工具對敏感因數集成評價而產生了雲南三江並流區泥石流危險區劃圖。泥石流危險區劃結果表明：研究區高危險區面積占全區面積 67,550km^2 的 9.2%，中危險區占全區總面積的 29.6%，低危險區占 35.9%，無危險區占 25.3%。泥石流危險區劃圖可以幫助規劃者或工程師在土地發展規劃中選擇最佳建設場所，以減輕災害的影響。

關鍵字：三江並流區、泥石流、危險區劃、地理資訊系統

前　言

中國三江並流區屬金沙江 (長江)、瀾滄江 (湄公河)、怒江 (薩爾溫江)、獨龍江 (伊洛瓦底江) 四條亞洲著名大江的上游地區。三江並流區在行政區劃上主要包括：雲南省迪慶藏族自治州的德欽縣、香格理拉縣、維西縣，怒江傈僳族自治州的貢山縣、福貢縣、瀘水縣、蘭坪縣，大理白族自治州的大理市、賓川縣、劍川縣、鶴慶縣、洱源縣、雲龍縣，麗江市的寧蒗縣、麗江縣、古城區，共計 16 個縣 (市)。地理位置在北緯 25^{o}30’ 至 29^{o}15’，東經 98^{o}05’ 至 101^{o}15’ 之間，面積為 68,908km^2，占雲南省總面積的 17.48%；1998 年末有人口 309.4 萬，占雲南省總人口的 7.47%。三江並流區地處青藏高原至雲貴高原的過渡地帶，位於喜瑪拉雅山脈東部的橫斷山脈縱谷區，高山挺立，峽谷縱橫，自西向東排列著擔當力卡山、獨龍江、高黎貢山、怒江、怒山、瀾滄江、雲嶺、金沙江。從怒江至金沙江，東西排列的最近距離約 60km，形成地球唯一的三江並流奇觀。從梅裏雪山最高峰的 6,742m 逐漸降到怒江河谷的 700m 左右，高差達 6,000m 多，實屬全球罕見。在此極大起伏的地貌區內，其高聳山系和深切河谷，是各種生物縱向遷徙的走廊和橫向交彙的屏障。複雜的地理環境和多樣的氣候條件，賦予了該區獨特而豐富的生物與文化多樣性、神奇的自然景觀、豐富的水、水能和礦產資源。

三江並流區是多種生態系統下的動植物資源的富集地，又是集生物多樣性、自然景觀多樣性、文化多樣性為一體的人類自然資源遺產。區域內有尚未被人類征服的梅裏雪山、玉龍雪山等大小雪山幾十座，是長江上游最重要的彙水、蓄水、調水區之一，其生態環境的好壞直接影響到下游 2,930,000km^2 流域地區和國家的生態安全，影響著約 5 億人民的生活環境和生產活動。目前，美國大自然保護協會首次進入中國，與雲南省政府合作，在該區開展生物多樣性的保護行動。2003 年三江並流區被批准為世界自然遺產。

由於三江並流區地處中國自然地勢的第一階梯至第二階梯的過渡地帶，為低緯度高山峽谷區，其

地層岩性破碎、歷次構造運動多變、地震活動頻繁；受季風氣候控制，降雨量時空分佈不均，即多暴雨和風雹，亦多乾旱及低溫等災害天氣發生頻繁。此外，該區是少數民族雜居的地區之一，經濟欠發達，長期以來一直以「木頭財政」為其主要的經濟支柱，大量無序的森林採伐，造成江河上游地區的生態環境日益惡化，區域蓄水調水能力下降，水土流失嚴重，使滑坡、泥石流等山地災害頻繁發生，災情日趨嚴重。每年都要造成大量人員傷亡和巨額的經濟損失，成為三江並流區社會、經濟發展和自然環境保護的重要限制性因素之一。泥石流危險區劃是對可能發生的泥石流災情的高度概括，可為泥石流災害活動區的減災、防災和救災提供決策重要資訊。因此，開展三江並流區泥石流危險區劃對於進一步認識該地區的自然災害形成的環境背景、災害現狀和發展趨勢，對減輕災害、保護人民生命財產有重大的作用，同時也對保障該地區國民經濟的持續發展、生物多樣性保護、合理開發和利用資源，促進社會發展、經濟建設都具有現實意義。

泥石流危險區劃是分析和預測某區域未來某時段內泥石流災害的孕災環境和致災因數的各種危險性指標的變化情況，並估計它們的概率分佈。泥石流危險區劃的理論與方法仍在不斷的探索與完善之中，其研究已從過去單一的、定性研究向綜合化、定量化發展 (劉希林和唐川，1995; Leroi, 1996)。由於泥石流危險區劃涉及的內容多、影響因素複雜，這些均給區劃圖的編制造成了較大的困難。泥石流災害的發生既有隨機性，又具有可預測性；其隨機性包括泥石流發生的不確定性。泥石流發生受控於地形地貌、岩土體組合、水文氣象和人類活動等多種因素，但泥石流孕育、發生、發展是有規律性可循的，泥石流事件可測定的非確定性反映出泥石流風險的存在 (劉希林和莫多聞，2002)。概括泥石流危險區劃的定義，一個完整的泥石流危險區劃圖編制主要應包括三個方面的過程：1. 進行研究區泥石流災害的調查與編目；2. 構建與泥石流危險區劃有關的因數空間數據庫；3. 進行確定的研究區泥石流危險性評價與分區，最終完成泥石流危險區劃圖的編制。

近十多年來，GIS 技術的發展為滑坡 (含泥石流) 危險區劃的空間分析提供了強有力的工具，使區劃的空間資訊整合更簡便、分析速度更快、精度更高，從而大大促進了該領域快速發展 (Grunert, 1988; Dikau, 1990; Jones, 1992; Fell, 1994)，其代表性的工作是由義大利學者 A. Carrara 完成的滑坡危險區劃製圖中的 GIS 技術研究，該文系統總結了近年來滑坡危險區劃製圖的技術方法和存在的問題。目前泥石流風險評價工作關鍵在於 GIS 專家、統計專家和地學工作者共同對相關空間資料獲取、處理和分析，開發可靠性強的評價模型 (Alison, 1993; Wadge, 1994)。

本文以雲南三江並流區為研究區,在雲南省泥石流區域調查分析 (唐川，1997) 和前期研究 (唐川和 Grunert, 1998；唐川和朱靜，2001；唐川和朱大奎，2002) 的基礎上，進一步探討泥石流危險度的集成分析和區劃的方法，特別是探討如何將 GIS 分析和成圖技術應用于泥石流形成的環境因數分析和危險性區劃中，從而解決這類信息量大、系統複雜的問題，真實地反映區域泥石流危險度的空間特徵。

泥石流災情與分佈特徵

三江並流區是中國泥石流活動最強烈的地區之一，泥石流災害危及國民經濟各個部門和人民生命財產的安全。區內每年泥石流都要造成人員傷亡、沖毀房屋、中斷交通、摧毀各種工程設施和毀壞農

田等災害，泥石流災害已成為該地區社會經濟發展的限制性因素之一。

(一) 泥石流危害城鎮

三江並流區山高坡陡，城鎮選址相當困難，有些就直接建在泥石流堆積扇上，泥石流一旦暴發，它們便成為危害對象。研究區受泥石流危害或威脅的縣及縣級以上城市多達 10 個，占研究區同級城市的 60% 以上，它們是德欽、維西、六庫、貢山、福貢、蘭坪、雲龍、洱源、漾濞。此外，研究區還有 40 多個鄉鎮政府駐地受泥石流嚴重影響。六庫鎮系怒江州州政府所在地，1989 年 10 月 20 日，位於怒江西岸的芭蕉河暴發了一場災害性泥石流，高約 3m 的泥石流龍頭挾裹著巨大漂礫急泄而下，沖毀、淤埋溝道兩岸附近的州運輸總站、州郵電局、州民族師範學校等 6 個機關單位的房屋 659 間、建築面積 10,790m^2，橋樑兩座，淤埋、毀壞客車 13 輛、貨車 22 輛、掛車 43 輛，損失糧食 1.25×10^{4}kg，並造成城鎮水電中斷、交通阻塞，直接經濟損失 889 萬元。德欽縣城位於三江並流區的瀾滄江左岸三級支流直溪河與水磨坊河交彙形成的狹長老泥石流堆積扇上，城區長期受到這兩條泥石流的危害，嚴重影響該縣城的建設與發展。據調查，直溪河 1913、1945、1959、1966、1984、1985 和 1988 年均暴發過較大的泥石流，並造成嚴重災害。目前該溝尚威脅兩岸 13 個縣級單位及 20 餘戶居民、共 1,700 餘人和價值 800 多萬元固定資產的安全。漾濞縣城位於滇西瀾滄江東側一級支流漾濞江左岸。1986 年 6 月 19 日因暴雨發生泥石流沖入縣城造成災害，沿河毀壞了二級水電站，5 座橋樑，衝垮公路 5km，中斷交通 8 個月，淤埋農田 50 畝，造成直接經濟損失 300 萬元。1987 年 7 至 9 月又連續暴發泥石流災害，直接危害縣城建築物。

(二) 泥石流危害廠礦

三江並流區礦產資源豐富，在礦產資源開發和建設中，也受到滑坡、泥石流的嚴重危害，不僅直接影響了礦山的開採和建設，而且嚴重影響了礦山周圍的農業建設和人民生活環境。根據調查和有關資料，目前全區有 12 個礦山、礦區不同程度受到泥石流的危害和威脅，造成災害的原因：一是礦山、礦區位於老滑坡體或泥石流堆積扇上；二是礦山的不合理開採引起的崩塌、滑坡和泥石流。例如，露天採礦場剝離的廢棄土石的不合理堆放；坑采的開拓，生產探礦等工程的掘進排水；坑采常用崩落法，往往進行大規模爆破；採空區圍岩因受震動而失穩；以及採空區不均勻沉陷引起斜坡變形而發生滑坡、崩塌。此外，礦山建設中普遍加陡邊坡，抬高河床，廢石堵塞溝床等都是促進泥石流活動的因素。近期，一些礦山、礦區都受到了泥石流的危害。造成礦山停產，報廢和居民搬遷，其經濟損失較大。受泥石流、滑坡危害的礦山主要有維西縣拉井鹽礦、洱源縣三營煤礦、貢山縣城後山錫礦、雲龍順蕩鹽礦、瀘水縣石缸河錫礦、福貢縣拉甲木底大理石礦、蘭坪金頂鉛鋅礦。瀘水縣石缸河錫礦 1989 年 10 月 15 日遭受泥石流襲擊，2.5km 排導堤被沖毀，11 臺破碎機被沖走，主要開採區被阻，停產一個多月，造成經濟損失 70 多萬元。1997 年再次暴發泥石流災害，造成 12 人死亡，13 人失蹤，直接經濟損失達 1200 多萬元。目前，大量礦渣堆積在溝道及兩岸坡地上，還有可能發生泥石流，威脅礦區的選礦廠、倉庫和民宅近 200 萬元的固定資產。

(三) 泥石流危害交通

三江並流區泥石流災害嚴重段多為山區公路沿河線。由於沿河線大多線位過低，且在高山坡腳，

多年來受泥石流的嚴重危害，路基、橋涵、車輛、站場被毀壞數量較多，進入七十年代以後災情越來越嚴重。區內受泥石流危害最嚴重的公路線有下關－中甸－鹽井線，瓦窯－六庫－貢山線。下關－中甸－鹽井線全線長 594km，屬國道。全線有泥石流溝 82 條，崩塌 25 處，滑坡 32 處，每年雨季均阻車約 25 至 30 天，損失巨大；瓦窯－六庫－貢山線全線長 338km，屬省道，該公路多從泥石流扇體上通過，每到雨季，公路均要中斷。從 1975 年到 2000 年危害公路的泥石流溝有 92 條，每年雨季都要阻斷公路。

(四) 泥石流危害水利水電

泥石流對水電站、水庫、河道危害影響很大，影響了水資源充分開發利用和行洪。由於泥石流帶來的大量泥砂石塊，對水利工程造成的影響和危害主要表現為淤積庫區，減少庫容及灌溉面積，影響壩體安全，淤埋及摧毀引水渠，影響水庫來水量等；對水電工程的影響和危害主要表現是沖毀和淤埋電站引水渠，造成電站報廢停產等。表 1 是受泥石流災害威脅危害的電站和水庫一覽表。

表 1　三江並流區受泥石流威脅危害的電站及水庫一覽表

	電　站	水　庫
大理州	漾濞縣雪山河電站，鶴慶縣新莊電站，劍川縣漾濞江電站，洱源縣下山口電站。	雲龍縣木瓜樹、和平水庫，鶴慶縣松毛水庫。
麗江地區	麗江巨甸電站，寧蒗縣大麥地二村電站。	寧蒗縣翠依水庫。
迪慶州	中甸縣沖江河電站引水壩，維西縣新樂電站。	
怒江州	瀘水縣老窩河電站。	

研究區的地形坡度大、地表切割密度大，構成了泥石流形成的關鍵性動力條件；泥石流的發育和分佈明顯受該區域的地層岩性、地質構造和地形地貌的控制，泥石流頻發區多分佈在岩土體結構破碎的地區，主要是含凝灰岩夾層的玄武岩、節理裂隙發育的變質岩類和強烈風化的花崗岩的分佈區；區域斷裂、構造新構造運動和地震活動都對泥石流的形成和演化有很大的影響。因此，三江並流區的泥石流在區域分佈上表現出明顯的地帶差異性。根據我們地面調查和統計，研究區現有流域面積 0.5km^2 以上的泥石流溝 690 條；按平均每 1,000km^2 國土面積內的泥石流溝數量計，全區泥石流溝的分佈密度平均為 11.7 條。研究區各縣泥石流溝數目超過 20 條以上的有：雲龍 95 條、維西 86 條、瀘水 72 條、德欽 68 條、福貢 61 條、蘭坪 61 條、麗江 46 條、貢山 45 條、洱源 34 條、中甸 27 條、寧蒗 27 條、大理 25 條；若按流域來看，怒江河谷、瀾滄江河谷和金沙江河谷的部分地帶泥石流呈帶狀集中分佈，其空間分佈特徵見圖 1。整個研究區的泥石流分佈數量特徵是南部多於北部，西部多於東部；泥石流區域分佈帶與區域大斷裂走向相吻合，區內發育的怒江斷裂、瀾滄江斷裂、金沙江斷裂、麗江—劍川斷裂、中甸—劍川斷裂等，這些斷裂規模大，活動性強，其破碎帶及影響帶可達幾公里至數十公里，沿線新構造活動異常強烈，這些地段是泥石流集中分佈活動區。泥石流分佈密集區多分佈於山區各級河流的沿岸，山區河流是塑造和改造地表形態最活躍的營力，自然也是泥石流等外動力地質作用最活躍的場所。對地表自然結構擾動大的人類活動場所，如城鎮、居民點、礦山剝采區附近以及公路沿線，

多為泥石流活動區。此外，山區的濫砍濫伐、陡坡墾耕、粗放耕作、礦山開採和修築公路為泥石流形成發育提供了重要的基礎條件。

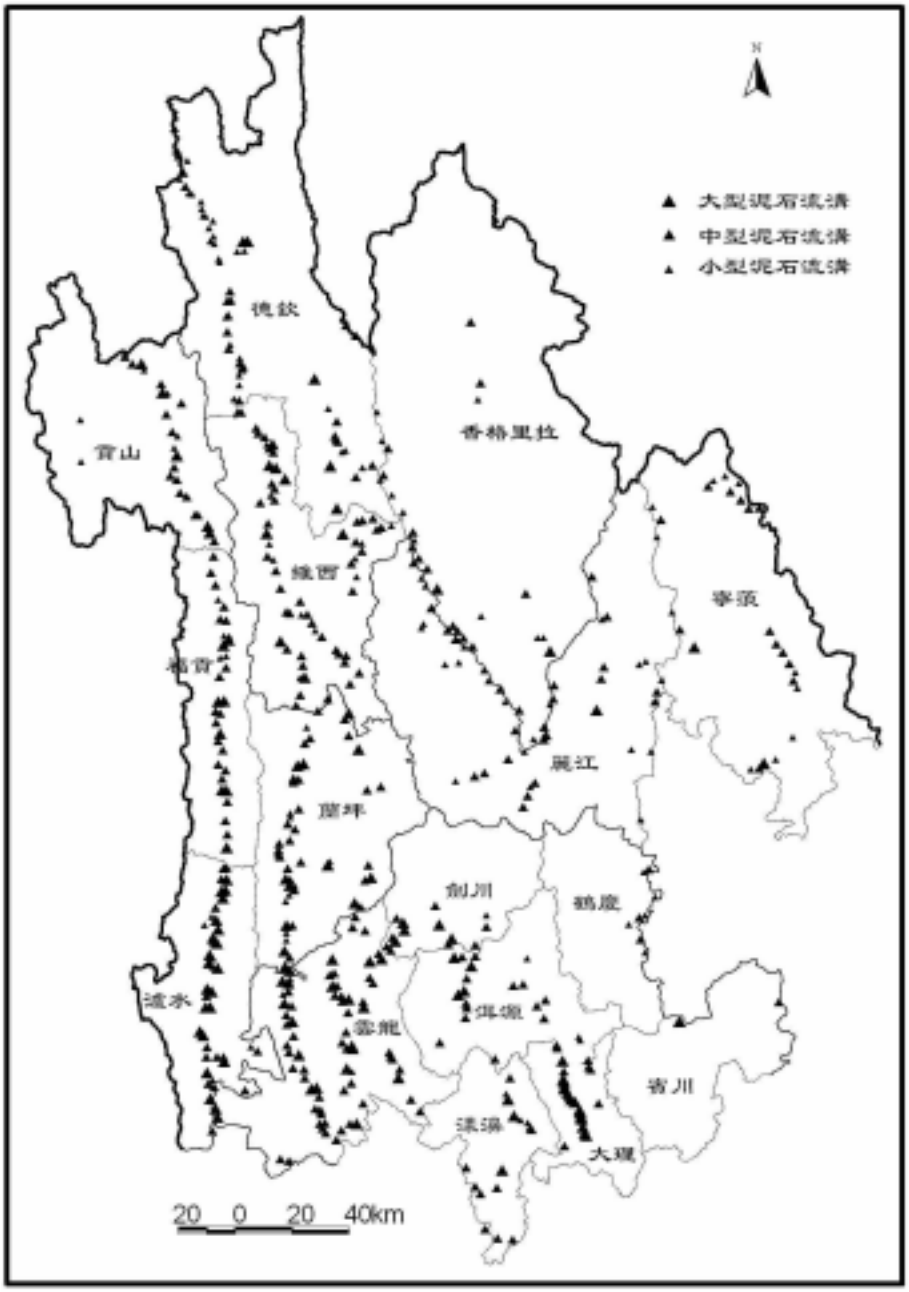


圖 1　三江並流區泥石流區域分佈圖

研究方法

(一) 指標因數選擇

影響泥石流形成的自然因素眾多，因素之間的關係也錯綜複雜，歷史泥石流發生的數量、分佈範圍、活動規模都直接反映了其發育的背景環境的地層岩性、地形地貌、地震動力環境和水文氣象條件對泥石流形成和分佈的控制作用；此外，土地利用、地下水、人類活動等因素也對泥石流形成起到一定程度的影響。為了突出反映本研究區的泥石流形成的主導因數作用，我們參考了許多在滑坡危險性評價研究所採用的區劃因數 (Varnes, 1984; Aniya, 1985; Dikau, 1990; Carrara *et al.*, 1992; Hutchinson, 1992; Jones, 1992; Einstein, 1997)，同時結合本研究擬採用的 GIS 技術進行危險區劃所要求的因數容量、可圖形化和經濟可靠性，我們重點選擇了六大評價指標，即地形指標 (坡度)、岩性指標 (岩土體類型)、降水指標 (暴雨天數)、地震與地質構造指標 (地震烈度)、人為活動指標 (土地利用和公路分佈)，這些因數在泥石流危險區劃中的作用分析如下：

1. 地形因數

山坡坡度的陡緩直接影響泥石流發育的鬆散碎屑物的分佈和聚集，凡是泥石流發育的山地，山坡坡度都較陡，對研究區泥石流溝所處的坡度統計表明，泥石流多發育在山坡平均坡度 25-50^{o}，特別是 <45^{o} 的山坡，風化的鬆散碎屑物易於積累，在 25-45^{o} 的斜坡的鬆散殘積物的內摩擦角大致與山坡坡度相同，多處於極限平衡狀態，一遇暴雨激發，便促成泥石流活動。涉及泥石流危險區劃的地形因數採用 1995 年國家測繪局完成的 1:25 萬數位地理底圖，應用 ARC/INFO 生成雲南省數位高程模型和坡度圖。為了分析不同地形坡度條件下的泥石流危險度，將坡度值劃分 0-5^{0}、6^{0}-10^{0}、11^{0}-15^{0}、16^{0}-20^{0}、21^{0}-25^{0}、26^{0}-30^{0}、31^{0}-35^{0}、36^{0}-40^{0} 和大於 40^{0} 共 9 個屬性，參與地形坡度因數的敏感性的評價。

2. 岩性因數

在斜坡地形條件相同的情況下，內聚力和內摩擦角越大的岩層，斜坡穩定性越高。岩層的工程地質性能取決於原岩的岩性，又取決於後期遭受褶皺、斷裂破碎的程度和風化的狀況。就岩土體類型而言，完整的厚層碳酸鹽岩類，強度高，不易風化，組成的斜坡不易失穩。新第三系河湖相半成岩地層，含大量粘土岩，遇水易軟化，強度低，組成的斜坡穩定性差。研究區易於發生泥石流災害的岩層主要有新生界河湖相地層和古沖洪積；中生界陸相砂葉岩，特別是含膏鹽的紅層；各時代煤系地層；含凝灰岩夾層的玄武岩；構造破碎、風化強烈的花崗岩、玄武岩、變質岩和各類沈積岩。根據原岩的工程力學性質和抗風化程度，我們採用 1984 年編制的 1:50 萬雲南省岩土體類型圖及說明書的資料，將三江並流區出露的岩層概化為四大建造類型、十六種岩組，表 2 列出了這些岩組的岩體工程地質特徵。我們將這 16 類岩組作為研究區泥石流危險區劃的因數敏感性評價的屬性。

3. 土地利用

由雲南省地理研究所完成的 1:50 萬雲南省土地利用圖較為全面系統地反映了雲南省土地利用開發的基本特徵、區域差異和分佈規律。不同的土地利用方式與泥石流發育和形成有著極為密切的關係。該圖採用三級分類系統，第一級按國民經濟部門結構分為 10 個類型；第二級按土地利用方式和經營目的的分為 33 個類型；第三級按土地利用方式的內部形態、地形部位以及林型、疏密度等分為 48 個三

級類型，形成泥石流危險區劃因數敏感性評價的屬性，其主要類型見表 3 所列。

表 2　三江並流區岩體工程地質類型表

	工程地質岩組	岩　　性	抗壓強度 (Mpa)	軟化係數
岩漿岩建造	堅硬的塊狀為主的侵入岩岩組	花崗岩、輝橄岩、輝綠岩、輝長岩、閃長岩等。	99.9-196.0	0.65-0.83
	堅硬的塊狀為主的噴出岩岩組	玄武岩、安長岩。	123.6-241.7	0.61-0.93
變質岩建造	堅硬的中—厚層狀為主的石英岩岩組	石英岩。		
	堅硬的薄層狀為主的片麻岩、混合岩、變粒岩岩組	片麻岩、混合岩、夾片岩、石英岩、大理岩。	135.7 (片麻岩)	0.67 (片麻岩)
	較堅硬的薄層狀為主的片岩岩組	片岩。	98.6	0.46
	較堅硬、軟弱的薄層狀為主的千枚岩、板岩岩組	千枚岩、板岩夾砂岩、石英岩。	38.7 (千枚岩) 29.0 (板岩)	0.56 (千枚岩) 0.53 (板岩)
碎屑岩建造	堅硬的中—厚層狀為主的砂岩、礫岩岩組	長石石英砂岩、長石砂岩、礫岩。	81.1-118.4	0.77
	較堅硬、軟弱的中—厚層狀為主的砂礫岩夾粘土岩岩組	砂岩、礫岩。	65.0-93.4	0.69-0.77
		泥岩。	30.3-39.9	0.14
	較堅硬、軟弱的中—厚層狀及頁片狀為主的砂礫岩、粘土岩互層岩組	砂礫岩。	59.2-72.3	0.42-0.63
		泥岩、葉岩。	36.8-62.8	0.53-0.66
	較堅硬、軟弱的中—厚層狀為主的粘土岩夾砂礫岩岩組	泥岩、葉岩。	29.7-97.3	0.7
		砂礫岩。	88.5-107.6	0.53-0.68
	軟弱的中—厚層狀為主的粘土岩岩組	粉砂質泥岩、灰質粉砂岩、頁片狀葉岩。	3.0-30.1	0.35-0.64
	堅硬、軟弱的中—厚層狀為主的碎屑岩夾碳酸鹽岩岩組	砂岩、葉岩、泥岩夾灰岩、白雲岩。	38.0-102.1 (碎屑岩)，99.6 (灰岩)	0.43-0.74 (碎屑岩)，0.8 (灰岩)
碳酸岩建造	堅硬的中—厚層狀為主的強、中岩溶化的石灰岩、白雲岩岩組	生物碎屑灰岩、細晶白雲岩、白雲質灰岩、燧石灰岩。	84.9-94.0	0.74-0.76
	堅硬的中—厚層狀為主的弱岩溶化的大理岩岩組	大理岩。	109.3	0.84

表 2　三江並流區岩體工程地質類型表 (續)

	工程地質岩組	岩　　性	抗壓強度 (Mpa)	軟化係數
碳酸岩建造	堅硬、較堅硬的薄—厚層狀為主的中岩溶化的碳酸鹽岩夾碎屑岩岩組	灰岩、白雲岩、砂岩、泥岩及葉岩。	83.3-93.6 (碳酸鹽岩), 26.3-89.6 (碎屑岩)	0.72-0.75 (碳酸鹽岩), 0.50-0.75 (碎屑岩)
	堅硬、較堅硬的中—厚層狀及頁片狀為主的弱岩溶化的碳酸鹽岩與碎屑岩互層岩組	灰岩、白雲岩和砂岩、葉岩、泥岩。	72.0-119.2 (碳酸鹽岩), 35.5-119.3 (碎屑岩)	0.77 (碳酸鹽岩), 0.17-0.78 (碎屑岩)

4. 地震因數

地震動力活動可導致岩層破碎，岩體強度降低；地震時產生的振動增加斜坡岩土下滑力，導致斜坡失穩。考慮到地震因數中已包含了斷裂構造的內涵，我們在進行三江並流區泥石流危險性評價時，未選用斷裂因數，而是採用 1990 年國家地震局頒佈的 1:400 萬中國地震烈度區劃圖為依據，並將圖件數位化，存儲於 GIS 柵格資料平臺中與其他數位圖件比例尺相匹配。研究區主要分佈在 VI、VII、VIII 和大於 IX 的地震烈度區內，劃分為 4 個屬性因數，參與因數敏感性的分析。

5. 降水因數

為了表徵暴雨空間分佈特徵對泥石流危險程度的影響，我們選擇了平均大到暴雨權重綜合天數作為因數參與評價。統計方法是根據三江並流區的 16 個站為代表站的 1960 至 2000 年共 40 年的遂月各日資料，統計方法是根據各站的遂日雨量資料，將大到暴雨劃分為 40.0-79.9mm，80.0-179.9mm 和大於 180.0mm 三個雨級。權重確定方法是以日雨量 40.0-79.9mm 的大到暴雨計為 1 次，出現 80.0-179.9mm 計為 2 次，出現大於 180.0mm 計為 4 次，即把各級雨量綜合到大到暴雨次數上，以此分析研究區內的暴雨分佈和地區的差異。在 GIS 支持下用多年平均的大到暴雨以上權重綜合天數等值線圖生成 TIN，並轉換為數位高程模型。為了定量反映降雨對泥石流危險程度的影響，將暴雨權重綜合天數分佈按小於 0.5、0.5-1.0、1.1-1.5、1.6-2.0、2.1-3.0、3.1-4.0、4.1-5.0、5.1-6.0、6.1-7.0、7.1-8.0、8.1-9.0、9.1-10 和大於 10 天共計 13 個屬性因數賦給各 1×1km 柵格單元，參與因數敏感性的分析。

6. 人類活動因數

人類活動在不同程度上影響了斜坡的穩定，例如修築公路、開採礦山、興建水庫渠道等人類工程活動都促進了泥石流災害的發生。人類活動對泥石流形成發育是多方面而極為複雜的，如何定量或半定量反映人類活動是個很困難的問題；考慮到研究區公路修建是人類活動最頻繁，對斜坡穩定性影響最明顯，而且具有區域性特點，我們選用公路作為人類活動的一個代表性危險指標因數，與土地利用類型共同作為人類活動因數參與泥石流危險區劃。具體的做法是將 1:25 萬研究區公路線系統作緩衝區 (Buffer) 處理，將公路兩側不同距離的區域確定為可能的泥石流危險帶，經柵格化處理後參與敏感性的分析。根據我們對雲南境內受山地災害影響最典型的中甸到西藏邊境的鹽井線和羊街至東川的公路進行了實地調查和統計，總結了的公路線的空間分佈與山地災害活動帶的關係；通過這些分析和對比，將研究區的公路對山地災害最大影響帶確定為 3km。依此分析結果，我們在作公路緩衝區分析中，劃分了距離主要公路 1.0km 以內區域、1.0km-2km、2.1km-3.0km 和 3.0km 以外區域四個等級的危險區。

(二) 因數敏感性分析

區域泥石流危險性是由影響斜坡穩定性因素綜合評定的，分析和優選區劃因數並確定其貢獻率是泥石流危險區劃的基礎和關鍵。為了突出反映泥石流形成的環境因數對危險區劃的不同影響程度和劃分因數的屬性等級，我們重點探討了泥石流危險因數的敏感性分析，Aniya (1985)、唐川和 Jorg Grunert (1998) 討論的滑坡危險評價的原理和方法可用於本研究中，其技術路線是採用以柵格為樣本的區域圖層資料統計學方法對研究區泥石流災害點與各因數的每個屬性進行相對頻率組合的定量計算。該方法強化了泥石流活動歷史資訊和現今分佈狀況對危險區劃中的形成環境因數的影響程度，這種技術路線符合 Varnes 於 1984 年提出的滑坡危險度分區的基本原理 (Varnes, 1984)，即過去和現在是預測未來的關鍵。具體方法是：1. 建立區劃因數的 GIS 圖形資料庫；2. 建立泥石流災害點的 GIS 空間資料庫，提取泥石流災害點所處位置各因數屬性資料；3. 分別計算泥石流災害點和各因數屬性的相對組合頻率，並計算每 1,000km^2 內災害點數量，以表示每個屬性因數的敏感性。

設 Fmn 為因數 m 的某屬性 n 的災害點出現的相對頻率 (因數敏感性)；Nmn 為某因數 m 中某屬性的災害點出現數，Smn 為某因數某屬性的面積；那麼各因數屬性中災害點的敏感性按該式計算：

$$Fmn = Nmn/Smn \quad (\text{單位：個/1000km}^2)$$

根據上述方法應用 GIS 的疊合統計分析工具對地形坡度 (9 個屬性因數)、岩土體類型 (18 個屬性因數)、土地利用 (24 個屬性因數)、地震烈度 (4 個屬性因數)、暴雨綜合天數 (13 個屬性因數)、公路分佈 (4 個屬性因數) 共 6 個因數 72 個屬性的敏感性進行計算和統計。按敏感性計算模式的步驟可確定每個因數屬性的相對頻率和敏感性，其計算結果見表 3 所示。

因數敏感性分析結果表明地形坡度在 30^o 以上的敏感性最高，這類坡度範圍的斜坡最易產生滑坡和泥石流；岩土體類型對泥石流發育影響明顯，特別是 1. 土體；2. 堅硬的薄層狀為主的片麻岩、混合岩；3. 較堅硬的片岩岩組；4. 較堅硬、軟弱的砂礫岩夾粘土岩岩組等岩土體類型更易發育泥石流；在土地類型因數方面，裸土、裸沙、泥石灘、城鎮用地、水田、梯田和疏林灌叢草坡等土地類型顯示了較高的敏感度；距離公路帶距離在 1.0km 範圍的敏感性達到最大值；屬性因數敏感度與地震烈度關係表明了實際情況極為吻合的規律，地震烈度≧IX地帶的敏感度最高；計算結果表明暴雨天數分佈與因數屬性敏感性不一致的特徵，我們認為其主要原因是，研究區屬印度洋季風氣候區，具有獨特的山地季風氣候，降水條件對泥石流的形成十分有利。三江並流區大部分地區的年降水量在 1,000mm 以上，少雨區一般也在 800mm 以上，這樣的雨量已達到或超過中國一些半乾旱、半濕潤地區的泥石流強烈活動地區的年降水量，這表明三江並流區絕大部分雨季的降水已能滿足泥石流強烈活動對水分的要求。由於三江並流區降水多集中在 5 至 10 月份，占全年降水量的 70%至 80%，而且暴雨日數一般都在 1 日以上，多者達 4 日，尤其多是暴雨中心小，強度大的局地性暴雨大雨，極易引發泥石流，這表明，降水已成為泥石流活動的必要條件。為了綜合反映金沙江流域的不同暴雨強度對山地災害數量和規模的影響，在危險性評價中，仍將暴雨空間分佈特徵作為評價因數進行分析。

(三) 綜合區劃

研究涉及泥石流危險區劃的物件涉及雲南省三江並流範圍 67,550 km^2，由於該地區泥石流形成條件的複雜性，各區劃指標因數的影響程度也不盡相同，而且開展大範圍泥石流危險性的評價的標誌和

界級又是相當不分明，因此在技術上採用區域圖層疊代綜合評價法進行泥石流危險區劃。本文作者通過對三江並流區及其一些大流域區域性泥石流區域性評價的實踐認為：採用因數疊置法是一條較理想的技術路線，這種方法主要優點在於：指標因數劃分明確、方法簡便，特別是容易利用 GIS 空間分析

表 3　各區劃因數敏感性計算結果 (單位：個/1,000km^2)

地形坡度	敏感性	岩土類型	敏感性	土地利用類型	敏感性	地震烈度	敏感性	公路緩衝區 (km)	敏感性	暴雨天數 (天)	敏感性
0-5	4.58	堅硬的侵入岩岩組	4.35	水田	21.22	VI	1.24	>3.0	2.46	<0.5	8.25
6-10	5.73	堅硬的噴出岩岩組	5.83	梯田	12.42	VII	6.55	2.1-3.0	4.24	0.5-1.0	11.05
11-15	6.71	堅硬的石英岩岩組	5.35	平壩旱地	8.46	VIII	8.06	1.1-2.0	9.06	1.1-1.5	12.16
16-20	7.58	堅硬的片麻岩、混合岩、變粒岩岩組	11.30	坡旱地	8.77	>=IX	15.42	<1.0	14.61	1.6-2.0	9.58
21-25	10.46	較堅硬的片岩岩組	9.61	輪耕地	3.01					2.1-3.0	8.18
26-30	10.85	較堅硬、軟弱的千枚岩、板岩岩組	5.45	茶園	5.09					3.1-4.0	4.92
31-35	11.79	堅硬的砂岩、礫岩岩組	3.03	橡膠園	3.11					4.1-5.0	5.63
36-40	15.91	較堅硬、軟弱的砂礫岩夾粘土岩岩組	7.70	針葉林	3.72					5.1-6.0	4.73
>40	12.69	較堅硬、軟弱的砂礫岩、粘土岩互層岩組	5.46	闊葉林	1.43					6.1-7.0	4.80
		較堅硬、軟弱的粘土岩夾砂礫岩岩組	7.12	針闊混交林	4.05					7.1-8.0	2.90
		軟弱的粘土岩岩組	5.14	竹林	3.13					8.1-9.0	3.84
		堅硬-軟弱的碎屑岩夾碳酸鹽岩岩組	2.79	灌叢	4.91					9.1-10	3.89
		堅硬的石灰岩、白雲岩岩組	3.65	疏幼林	5.04					>10	2.25
		堅硬的大理岩岩組	6.35	高山亞高山草甸草場	1.02						
		堅硬、較堅硬的碳酸鹽岩夾碎屑岩岩組	4.24	草山草坡	5.86						
		堅硬、較堅硬的碳酸鹽岩、碎屑岩互層岩組	7.65	疏林灌叢草坡	13.31						
		土體 (單層結構)	26.83	城鎮用地	39.17						
		水體	4.68	冰川永久積雪	0.00						
				裸岩	5.52						
				裸土、裸沙、泥石灘	168.18						
				裸岩草坡	2.31						
				裸岩灌叢	1.35						
				高山灌叢	1.48						
				高寒荒漠草場	1.36						

工具處理和計算，因而被國內外普遍被採用 (Dikau, 1990; Carrara *et al.*, 1992; Anderson *et al.*, 1996; Chowdhury, 1996; Fell and Hartford, 1997)。該方法雖然只能達到半定量的程度，但很適合目前研究程度，且容易把握，其方法切實可行。

由於各區劃因數的計量單位不同，屬半定性半定量取值，而且取值範圍變幅較大，因此必須要對資料標準化進行處理。應用 GIS 分析將上述編制的多層空間因數數位圖層進行數值化和歸一化處理，即根據對因數屬性的敏感性計算結果，分別按數值大於 12、12-8、8-4 和小於 4 的四個區間值作為劃分 6 個區劃因數的極高、高、中和低危險因數的上下限界值。該界限值的劃分依據主要考慮到所計算得出的各因數屬性敏感度的數值分佈範圍，以便於將複雜的因數屬性整合為可反映出不同因數對泥石流危險性的貢獻大小，其歸一化處理方案見表 4。

表 4　各因數危險度劃分與賦值

地形坡度		岩土體類型		土地類型		地震烈度		暴雨天數		公路緩衝區	
敏感度分級	危險度賦值	敏感度分級	危險度賦值	敏感度分級	危險度賦值	敏感度分級	危險度賦值	敏感度分級	危險度賦值	敏感度分級	危險度賦值
>12	4	>12	4	>12	4	>12	4	>12	4	>12	4
12-8	3	12-8	3	12-8	3	12-8	3	12-8	3	12-8	3
8-4	2	8-4	2	8-4	2	8-4	2	8-4	2	8-4	2
<4	1	<4	1	<4	1	<4	1	<4	1	<4	1

表 5　三江並流區泥石流危險等級劃分標準

	極高危險區	高危險區	中危險區	低危險區
計算值	大於 20	20-15	15-7	小於 7

根據上述因數的歸一化處理結果，每個因數被劃分出四個危險性等級。應用 GIS 處理模組將因數資料圖層作 1km×1km 解析度的柵格化處理，按 1、2、3 和 4 數值分別賦給每個製圖柵格單元，分別反映因數的高、中、低和無危險等級。通過 ARC/INFO 或 ARCVIEW 的 overlay 工具進行各因數的疊置運算，由此產生了一個新的分析結果圖層。我們將每個柵格單元計算獲得的數值按高斯分佈法進行危險等級劃分，其劃分標準見表 5。按此分類方法即可將三江並流區區劃出不同危險等級泥石流的活動區域，按紅、黃、藍、綠四種顏色或不同色斑分別表示泥石流危險性的不同等級，由此得到三江並流區泥石流危險區劃圖 (圖 2)。

為了進一步評價和檢驗泥石流危險區劃結果，我們將已完成的研究區泥石流分佈密度圖 (劉希林, 1992) 與之對比分析，該圖在對研究區大量地面調查基礎上，集成了影響泥石流發生發展的地質、地貌、水文、氣象、森林植被和人類活動因數，應用關聯讀分析方法，建立了泥石流相對分佈密度的

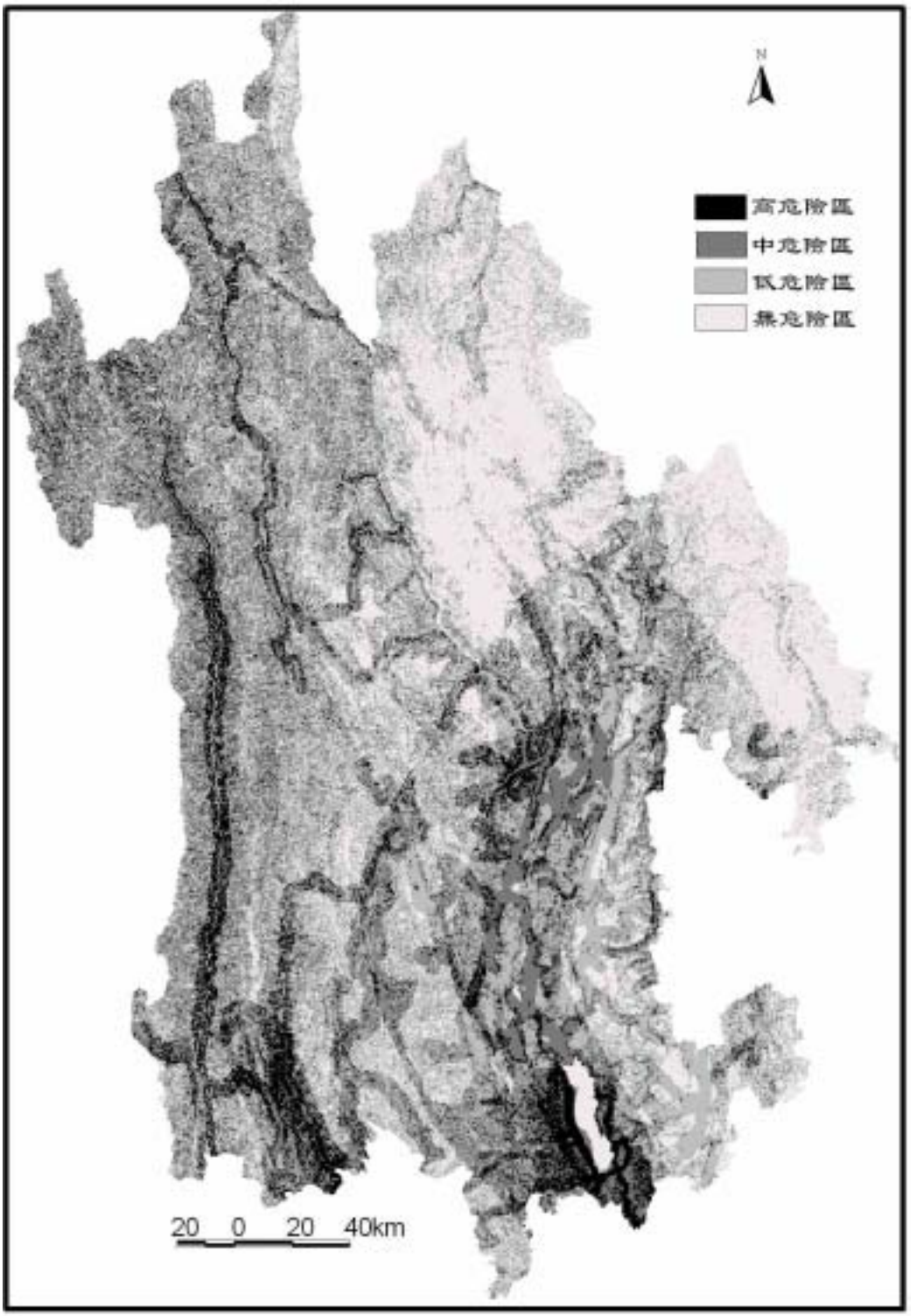


圖 2　三江並流區泥石流危險區劃圖

數學模型。將本研究區劃出的高、中、低危險度分佈區域與泥石流分佈密度圖中劃分出的高、中、低密度區進行高、中、低與面積統計，其擬和度為 82%；此外也與本研究完成的區域泥石流溝分佈規律作了對比分析，我們認為本研究提出的三江並流區泥石流危險區劃圖是符合實際情況的。

結果與討論

1. 危險區劃結果表明三江並流區泥石流極高危險區面積約 6,235 km^2，占全區面積的 9.23%，高危險區面積約 20,248 km^2，占全區總面積的 29.98%，中危險區面積 24,263km^2，占全面積 35.92%，低危險區面積 16,802km^2，占全區總面積的 24.87%。

2. 本文探討的區域泥石流危險區劃能夠反映出的泥石流潛在活動性的差異。分區和整體特徵，其目的不是以精確的方式計算泥石流發生概率，也不能代表單溝泥石流危險度，所完成的泥石流危險區劃圖不能認為是大量野外調查、觀測和勘查的集成，因為用於泥石流災害區劃的環境空間資訊和評價因數在某些條件下是非確定性的或是不充足的，要進一步解決區域泥石流發生預測預報的精確性問題，還需要結合地質工程勘察、地貌調查和降雨分析，使泥石流危險區劃險圖在減災防災中發揮出其更顯著的作用。

3. 區劃指標因數的選取與單溝泥石流危險指標因數的選取有顯著的差別，如何涵蓋影響區域泥石流危險度的主導因素是區劃的關鍵和難題之一。泥石流危險區劃是地貌區劃的一種特殊類型，應用盡可能以多因數綜合分析評價為主線，但是如果選取的因數過多，也會降低主導因數在區劃中的突出作用，而且不便資料的整合，也增大了計算分析的難度。因此要針對區劃的對象進行致災成因的綜合分析，盡可能提取能夠反映泥石流形成的地質、地形、降雨、土地利用、人類活動等起主導作用的因數。

4. 區劃因數的等級劃分和危險分區指標只能是反映其相對的差異性，不同的研究者可能有不同的劃分標準，從而導致區劃的物件可能存在一定程度的相異，這要依據我們所要對泥石流危險區劃的預期目標和區劃原則而確定其研究方法和技術路線，並作出區劃方案。目前多數的區域性的評價和區劃主要是突出其區域災害發生危險性概率分佈的相對差異性，以便於在實際減災防災中確定防禦的重點區域和對象。

5. 應用 GIS 技術方法，是將影響泥石流形成的因數的數值賦予每一個網格單元，然後將每個柵格作為一個樣本進行統計分析和處理，其優點是突出 GIS 分析工具應用的簡捷性，保證區域評價的精度；但是應用該區劃方法也存在不足，例如劃分的柵格單元沒有充分反映地質、地形等因數的邊界條件，而使區劃偏於理想化。

6. 儘管應用 GIS 技術能夠容易地劃分出一定解析度的區劃單元，所獲得的泥石流危險區劃亦是以柵格單位表示，其區劃結果應該進一步整合，特別是如何將區劃結果與行政區域邊界、流域邊界進行整合，這樣的區劃結果更便於各級行政政府部門和不同流域管理機構在防災減災決策中的廣泛應用。

結　論

本文以雲南三江並流區為研究區，採用 Varnes 提出的「過去和現在是預測未來的關鍵」作為泥石

流危險區劃的基本原理，構建了與區域泥石流孕災環境和致災因數有關的 1:25 萬比例尺空間圖形資料庫；以 1km×1km 的評價單元對泥石流危險性進行了空間分析，最終編制了研究區的泥石流危險區劃圖，其區劃結果經過與研究區的現存泥石流分佈密度和規模進行對比，我們認為本研究提出的三江並流區泥石流危險區劃圖是符合實際情況的。

區劃結果表明雲南三江並流區泥石流危險程度在區域分佈上現出明顯的地帶差異性，泥石流的危險度在南部高於北部，西部高於東部；泥石流高危險分佈帶與區域大斷裂走向相吻合，區內發育了怒江斷裂、瀾滄江斷裂、金沙江斷裂、麗江—劍川斷裂、中甸—劍川斷裂等斷裂構造，這些斷裂規模大，活動性強，其破碎帶及影響帶可達幾公里至數十公里，沿線新構造活動異常強烈，這些地段是泥石流集中分佈和活動區。泥石流高危險區多沿研究區內的各級河流兩岸成帶狀分佈，對於地表自然結構擾動大的人類活動場所，如城鎮、公路沿線以及礦山剝采區附近，多為泥石流危險區。

本研究將 GIS 技術引入泥石流分析與製圖中，可以更詳細地闡述 GIS 在泥石流危險區劃中的特殊功能和評價效果，尤其是在因數敏感性計算和參評因數優選上充分顯示了 GIS 對圖形資料和參數資料分析管理的優越性，能夠更精確地、更經濟地進行區域泥石流的危險性評價和區劃。

引用文獻

唐川 (1997) 雲南省泥石流災害區域特徵調查與分析，**雲南地理環境研究**，9 (1) : 1-10。

唐川、Grunert J. (1998) 滑坡災害評價原理和方法研究，**地理學報**，53 (增刊) : 149-157。

唐川、朱靜 (2001) GIS 支持下的滇西北地區泥石流災害評價，**水土保持學報**，15 (6) : 84-87。

唐川、朱大奎 (2002) 基於 GIS 技術的泥石流風險評價研究，**地理科學**，22 (3) : 300-304。

劉希林 (1992) 泥石流相對分佈密度的確定方法，**水土保持學報**，6 (1) : 57-62。

劉希林、唐川 (1995) **泥石流危險性分析**，北京：科學出版社，1-11。

劉希林、莫多聞 (2002) **泥石流風險評價**，成都：四川科技出版社，1-8。

Alison, J. R. (1993) A GIS for the prediction of landsliding potential and hazard in Southwest *Greece. Z., Geomorphology*, 87 (Suppl.) : 141-149.

Anderson, L. R., Bowles, D. S. and Pack, R. T. (1996) A risk-based method for landslide mitigation, *Proceedings of Seventh International Symposium on Landslides*, Norway: Trondheim, 135-140.

Aniya, A. (1985) Landslide-Susceptibility Mapping in the Amahata River Basin, *Japanese Annual of Association American Geographer*, 75 (1) : 102-114.

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

Chowdhury, R. N. (1996) Aspect of risk assessment for landslide, *Proceedings of Seventh International Symposium on Landslides*, Norway: Trondheim, 183-188.

Dikau, R. (1990) Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods, *Zeitschript fur Geomorphologie*, 80 (Suppl.) : 45-55.

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.

Fell, R. and Hartford, D. (1997) Landslide risk management. In: Cruden, D. M. and Fell, R. (eds.) *Landslide*

Risk, Assessment, Rotterdam: A. A. Balkema, 51-109.

Grunert, J. (1988) Geomorphologische entwicklung des Bonner Raums, *Arb. 2. Rhein, Landeskde*, 58: 165-180.

Hutchinson, J. N. (1992) Landslide hazard assessment, *Proceedings of Sixth International Symposium on Landslides*, Christhurch, 1805-1842.

Jones, D. K. C. (1992) Landslide hazard assessment in the context of development. In: McCall, G. J. H., Laming, D. J. C. and Scott, S. C. (eds.) *Geohazards-Nature and Man-mad*, 117-142.

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

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

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

92 年 12 月 29 日　收稿
93 年　5 月 11 日　修正
93 年　5 月 20 日　接受