

doi:10.3799/dqkx.2010.034

基于GIS与信息量模型的汶川次生地质灾害危险性评价

杜军¹, 杨青华², 严嘉¹, 薛重生¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 广西师范大学环境资源学院, 广西桂林 541004

摘要: 5·12汶川大地震诱发了大量滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害,对人民群众的生命财产和社会经济的发展形成了严重威胁。针对次生地质灾害危险性评价,选取重灾区汶川县作为研究区域,利用遥感与地理信息技术的空间数据管理和空间数据分析平台,获取了研究区的次生地质灾害信息,分析了研究区内次生地质灾害与各影响因子,包括地形地貌、地层岩性、水系、地震断裂之间的相关性特征,并结合信息量法模型进行次生地质灾害危险性评价。高度、中度和轻度危险区的面积分别为1130.196 km²、1739.584 km²、1213.219 km²。本次地震触发次生地质灾害的分布具有集群式分布的特点,即断裂带及其附近地区地质灾害集中发育,而远离断裂带区地质灾害很快衰减,呈零星分布;从灾害发育的区域特征分析,汶川县震后次生地质灾害呈现出北部和东部重、西部和南部轻的特点。所得研究结果与实际情况较吻合,表明地理信息系统结合信息量模型能够快速、有效地对次生地质灾害的空间分布以及危险性作出评价。

关键词: 危险评价;次生地质灾害;汶川;GIS;信息量模型。

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2010)02-0324-07

收稿日期: 2009-11-15

Hazard Evaluation of Secondary Geological Disaster Based on GIS and Information Value Method

DU Jun¹, YANG Qing-hua², YAN Jia¹, XUE Chong-sheng¹

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. College of Resource and Environmental Science, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China

Abstract: 5·12 Wenchuan earthquake triggered a series of secondary landslides, landslides, debris flows, and other geological disasters, which posed a major threat to peoples' lives and property and socio-economic development. For risk assessment of secondary geological hazards in the area, the worst-hit Wenchuan County was selected as the study area. Remote sensing and geographic information technology spatial data management and spatial data analysis platform have been applied to gain relevant information, to make a correlative analysis between secondary geological disasters in the study area and the topography, lithology, hydrology, earthquake rupture. In addition, information value method has been used to evaluate the risk of secondary geological disasters. It is found that the area of high risk, moderate risk and low risk is 1130.196 km², 1739.584 km², 1213.219 km² respectively. The distribution of secondary geology disaster triggered by earthquake has the colony type distribution characteristic featured with a concentrated development of geological disasters in the fault zone and the nearby regions and a quick decay and the fragmentary distribution farther away form the fault zone areas. Analysis also shows that risk of secondary geological disaster in north and east areas of Wenchuan is heavy, while that in the west and south areas is light, which is coincident with the reality. The study further demonstrates that the geographical information system combined with information value model can quickly and effectively evaluate the spatial distribution and risk of secondary geological disasters.

Keywords: hazard evaluation; secondary geological disaster; Wenchuan; geographical information system (GIS); information value method.

地震次生地质灾害是指由地震活动引起的地质灾害。地震次生地质灾害增强了地震灾害的破坏效应,加剧了地震的损失程度。因此次生地质灾害危险性评价是地震灾情评估工作的重要组成部分,在地质灾害危险范围预测、地质灾害损失预评估和地质灾害防治工程评价等方面发挥着重要的作用(刘凤民等,2006)。汶川地震发生以后,国内学者对震后次生地质灾害的特征和分布规律做了相关的研究,王涛等(2008)通过野外和遥感数据调查对汶川地震断裂活动与次生地质灾害的相关性进行了定性分析,张永双等(2008)在实地调查的基础上,对四川汶川强震次生地质灾害进行了较全面地研究,较深入地探讨了次生地质灾害的类型和次生地质灾害的主要特征。韩金良等(2009)对汶川地震次生地质灾害的基本特征、分布规律和主要影响因素进行了初步总结,并对地震滑坡的形成机制和运动模式进行了初步探讨。

早期的地质灾害空间预测主要依据野外调查与航空像片解译情况,由专家进行地质灾害敏感性判断和评价,故称之为专家评价法(Aleotti and Chowdhury, 1999)。该方法评价结果精度取决于野外调查的详细程度和专家的知识与经验,评价中运用的隐含规则使结果分析与更新困难,而且不同调查者与专家得出的结果无法进行比较。GIS的运用使原先计算复杂,甚至无法考虑的因子能够引入地质灾害的危险性研究,众多的数学模型,如多元统计分析、数理统计、概率理论等在滑坡危险性研究中开始被使用,大大提高了滑坡危险性研究的水平。如Carrara(1983)将多元统计分析预测方法引用到区域滑坡空间预测中,Carrara *et al.* (1991)将GIS结合统计模型用于滑坡灾害的评价,使用逐步回归方法分析了地形因素对单个滑坡的影响。多元分析方法具有很严密的数学推理,自然必须在满足其苛刻的应用条件(即各因素之间不相关、因素与目标线性强相关)的前提下才能得出较好的结果。但是,在实际评价过程中,往往已知样本的取得已经是非常困难的一件事,更为糟糕的是形成的已知样本常常通不过假设检验。因此这种方法在适用性上要差一些,其应用也受到一定的限制;Greco *et al.* (2007)将Logistic回归模型运用到大规模运动的风险评估,得出结果的可靠性较高;Lin and Tung(2003)利用信息量法分析了由于Chi-Chi地震造成的潜在滑坡危险性,发现信息量模型具有较高的客观性,实施简便。

本文结合汶川县地质灾害调查与区划项目,探讨了GIS技术与信息量法相结合的评价方法及其在汶川县地质灾害危险性评估中的具体实施过程。利用遥感与地理信息技术的空间数据管理和空间数据分析平台,提取次生地质灾害的诱发因子,并对其与次生地质灾害的相关性进行了量化评述,然后运用信息量模型,针对现有的次生地质灾害,对以后再发生次生灾害的潜在危险性进行预测和定位。

1 次生地质灾害危险性评价的信息量模型

次生地质灾害现象(Y)受多种因素 x_i 的影响,各种因素所起作用的大小、性质是不同的。在各种不同的地质环境中,对于次生地质灾害而言,总会存在一种“最佳因素组合”。因此,对于区域次生地质灾害的预测要综合研究“最佳因素组合”,而不是停留在单个因素上。信息预测的观点认为,次生地质灾害产生与否与预测过程中所获取的信息的数量和质量有关,是用信息量来衡量的(殷坤龙,2004)。信息量法是以已知灾害区的影响因素为依据,推算出标志危险性的信息量,建立评价预测模型,并依照类比原则外推到相邻地区,从而对整个地区的危险性做出评价。

假设次生地质灾害(L)受多种因素影响,即 $L=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$,

$$I(L, x_1, x_2, \dots, x_n) = \ln \frac{P(L, x_1, \dots, x_n)}{P(L)}, \quad (1)$$

式中: $I(L, x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为因素组合 $x_1 x_2 \dots x_n$ 对次生地质灾害所提供的信息量; $P(L, x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为因素 x_1, x_2, \dots, x_n 组合条件下次生地质灾害发生的概率; $P(L)$ 为次生地质灾害发生的概率。模型建立过程如下:

(1)单独计算各因素 x_i 对次生地质灾害发生事件(L)提供的信息量 $I(L, x_i)$,在实际计算中可运用频率来进行条件概率的估算,即:

$$I(L, x_i) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S}, \quad (2)$$

式中: S 为研究区评价单元总数; N 为研究区含有次生地质灾害分布的单元总数; S_i 为研究区内含有评价因素 x_i 的单元数; N_i 为分布在因素 x_i 内特定类别内的次生地质灾害单元数。

(2)计算单个评价单元内总的信息量:

$$I_j = \sum_{i=1}^n I(L, x_i) = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S}, \quad (3)$$

式中: I_j 为评价单元总的信息量值; n 为参评因子数。

(3)用总的信息量 I_j 作为该单元影响次生地质灾害发生的综合指标,其值越大表明越有利于次生地质灾害的发生,该单元的次生地质灾害危险性也越高;最后对最终的全部单元的信息量值划分类别,分成不同的危险等级。

在使用基于 GIS 的信息量法开展地质灾害危险性评估时,利用 GIS 技术提取出各评价因子图层;在完成各评价因子图层提取后,需要将因子图层和地质灾害分布图进行栅格化,并进行栅格单元的划分,然后进行栅格图层的运算。各评价因子图层在完成与地质灾害分布图的栅格乘运算后可得到地质灾害在各评价因子图层中的分布密度,各因子图层进行栅格叠加运算后得到地质灾害危险性信息量图。最后,参照地质灾害危险性分级标准,利用 GIS 技术对地质灾害危险性评估信息量图进行重新分类得到区域地质灾害危险性评估图,完成区域地质灾害危险性评估。

2 次生地质灾害影响因子提取与分析

强烈地震导致的地质灾害不仅取决于地震本身,而且也与边坡所处的地质背景、坡体结构类型、物质组合、地形地貌条件、水文地质条件等各种因素密切相关,不同地区的地震诱发的滑坡特点也不相同(孙崇绍和蔡红卫,1997)。次生地质灾害的发育受控于很多因素,如地形、地层岩性(易滑动地层)、地质构造(特殊构造部位、断层破碎带等)、河谷切割密度(区域内线性沟谷分布)等,深入研究每一个主控因素与次生地质灾害发育之间的关系,对深入研究区域次生地质灾害的发生和分布规律是有帮助的。

2.1 地形地貌因子提取与分析

本研究利用覆盖研究区 1:50 000 DEM 数据中提取研究区的坡度、坡向及高程信息,通过在 ArcGIS 中对次生地质灾害数据与各环境因素进行空间分析,总结出了研究区次生地质灾害事件与以上各背景因子之间的关系特征。

2.1.1 坡度 研究区坡度图层是利用 DEM 在 ArcGIS 3D 中生成。为了能表示出次生地质灾害与坡度的关系特征,把坡度按 5° 间隔分为 14 个类别,然后与次生地质灾害进行叠加统计。从坡度曲线形

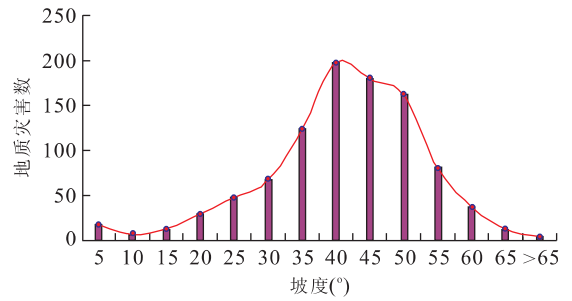


图 1 研究区次生地质灾害与坡度关系

Fig. 1 Relation between secondary geological disaster distribution and slope

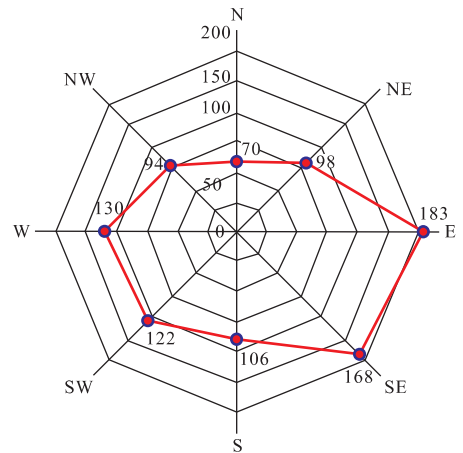


图 2 研究区次生地质灾害与坡向关系

Fig. 2 Relation between secondary geological disaster distribution and aspect

态看(图 1),次生地质灾害集中发育区域的坡度在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 。整个研究区内共有次生地质灾害点 974 个,计算得出坡度 $30^\circ \sim 50^\circ$ 的次生地质灾害点 729 个,占次生地质灾害总数的 74.85%, $0^\circ \sim 30^\circ$ 区间的次生地质灾害数为 114 个,坡度大于 50° 的次生地质灾害数为 131 个。

2.1.2 坡向 在 ArcGIS 中,利用 3×3 的窗口进行扫描,获取研究区的坡向图层,并进行统计分析。从图 2 中可看出,研究区内 449 个次生地质灾害发生在坡面正东、东南和东北方向,占到所有灾害的 46.1%。从遥感影像的解译中也能发现,岷江河两岸汶川县城以南,坡向朝东—东南侧的山体破坏严重,次生地质灾害多呈群状分布,而西侧次生地质灾害规模相对较小,表明不同坡向的边坡对地震响应存在差异。

2.2 岩性类因子

斜坡的地层岩性是发生次生地质灾害的物质基

表 1 研究区地层与次生地质灾害分布统计

Table 1 Statistic of strata and secondary geological disasters

代码	面积(km ²)	占总面积比例(%)	灾害数量	灾害密度	代码	面积(km ²)	占总面积比例(%)	灾害数量	灾害密度
SM ₃	555.9	13.60	139	0.25	Pξ	471.5	11.53	15	0.03
Pt ₂ HS	60.4	1.48	123	2.04	Pt ₁ v	84.9	2.08	11	0.13
T ₂₋₃ zg-z	161.2	3.94	93	0.58	Z ₁ m-sh	404.5	9.90	11	0.03
P ₂ w	158.8	3.89	88	0.55	D ₂₋₃ h	287.5	7.03	10	0.03
Pt ₂ γ	421.3	10.31	86	0.20	D ₁₋₂ p-gw	7.5	0.18	8	1.07
T ₁ b	372.4	9.11	85	0.23	P ₁ -w	184.8	4.52	4	0.02
Dw	55.5	1.36	71	1.28	C ₂ P ₁ xg-s	2.7	0.07	3	1.11
Pt ₁ K	238.3	5.83	71	0.30	Z ₁ s	63.3	1.55	1	0.02
T ₃ zh	117.9	2.88	50	0.42	C ₁ m _j -z	5.6	0.14	0	0
Z ₁ γ	10.0	0.24	36	3.61	Cc-sl	86.4	2.11	0	0
Z ₂ g-d	21.7	0.53	25	1.15	D ₃ s	42.6	1.04	0	0
Zn-d	5.0	0.12	25	5.00	Pt ₁ N	22.0	0.54	0	0
Pt ₂ sl	144.6	3.54	19	0.13	Pt ₂ σ	101.7	2.49	0	0

础,在一定震级下,地层的岩性不同会导致它的最大加速度和震动幅值各不相同,因此发生次生地质灾害的难易程度也就不同。

研究区分布自三叠系至元古界共 26 个地层(岩类)。从表 1 可以看出,Zn-d(震旦纪沙砾岩、砂质页岩、白云岩)与 Z₁γ(早震旦世普通花岗岩)岩层面积虽小,次生地质灾害密度却很大。此外,还有 SM₃(志留纪绿色绢云母板岩)、Pt₂HS(元古代灰绿—紫红色变基性—中酸性火山岩、碎屑岩)与 T₂₋₃zg-z 三个岩层总面积仅占整个区域面积的 19.02%,却分布有 355 个次生地质灾害,占次生地质灾害总数的 36.45%。表明研究区岩性变化大,岩体工程地质特性空间变化复杂,以第四系松散地层及强风化岩浆岩为代表的软弱岩土体分布广泛,其抗剪性能差,稳定性和抗风化程度不高,在外力作用下极易发生滑坡、崩塌等次生地质灾害,为地质灾害的发育提供了基本条件,地层岩性对地质灾害的分布起着重要的控制作用。

2.3 水系因子

对历史地震次生地质灾害资料的调查研究表明,河流两岸往往有大型的地震次生地质灾害发生,造成巨大危害(晏鄂川等,1998)。研究区内水系发育,岷江为主要河流,纵贯汶川县境西部地区,长达 88 km,有多处支流分布,如图 3 所示。绝大多数次生地质灾害分布在距河流 0~1 000 m 的范围内,占次生地质灾害总面积的 80.29%,而且离水系越远,次生地质灾害密度有明显逐渐减小的趋势。

2.4 地震断裂

区域性大断裂往往控制次生地质灾害密集发育并呈带状分布,原因在于断层带及其附近一定范围

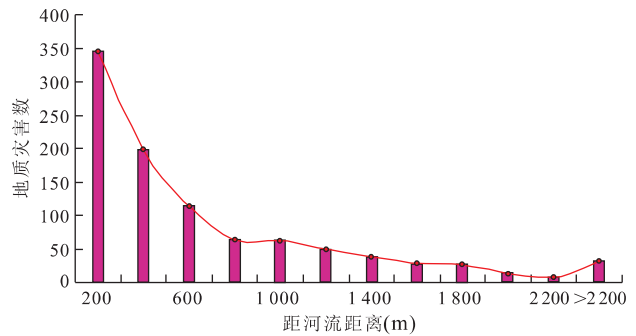


图 3 地质灾害与距离河流远近关系

Fig. 3 Relation between secondary geological disasters and hydrology

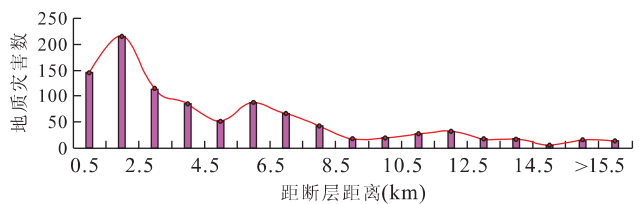


图 4 研究区地质灾害与距断层距离的关系

Fig. 4 Relation between secondary geological disasters and fault

内的岩土体容易遭到破坏,从而降低坡体的完整性,为次生地质灾害提供充足的物质保障(李忠生,2003;陈晓利等,2008);从图 4 可看出,研究区内次生地质灾害发生密度最高的区域在断层附近 0~2.5 km 范围内,共 475 处次生地质灾害发生,占研究区次生地质灾害总数的 48.77%。由此可见,本次地震所引发的次生地质灾害很大程度上受发震断裂和同震断裂的控制,距离断层较远的区域,发生次生

地质灾害的可能性会减小,但沿地震断裂带方向,其次生地质灾害规模同时也受到当地地形地貌等因子的影响,因而变化不是很均匀。

3 致灾因子信息量的计算及危险性评价

3.1 评价因子的选取

前面已对研究区次生地质灾害分布的面层和次生地质灾害各影响因子进行了提取和相关性分析,根据分析结果,最终选取坡度、坡向、岩性、地震断裂、河流水系作为次生地质灾害危险性评价的因子(图 5)。

在已获取数据的基础上,只需利用 GIS 软件的栅格化功能将研究区参与评价的影响因子数据栅格化,然后采用 GIS 栅格空间分析方法开展次生地质灾害空间的工作。所有因子图层转换成 25 m×25 m 的栅格图层后,考虑到某些因素对次生地质灾害的影响并不完全是按要素量的增加而成正比,而往往在一个数量范围内对次生地质灾害的影响是稳定的,因此对各个因子图层进行重分类。

3.2 基于 GIS 的信息量模型计算

首先,利用 ArcGIS 的 3D Analyst 模块对等高

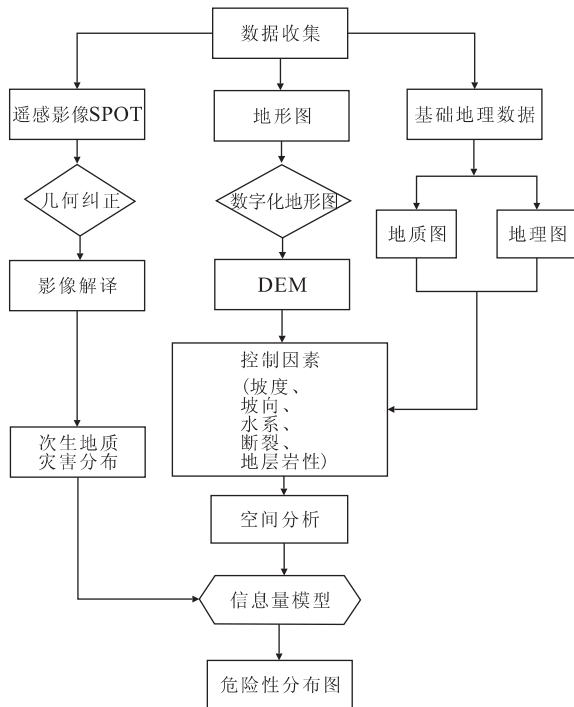


图 5 基于 GIS 和信息量模型的次生地质灾害危险性评价流程

Fig. 5 Flow chart of secondary geological disaster assessment based on GIS and information value model

表 2 信息量计算结果

Table 2 Results of information values

因子	分类	信息量	因子	分类	信息量
坡向	平	-0.463 0	地层岩性	C_1mj-z	0.000 0
	北	-0.546 2		C_2P_1xg-s	-0.548 2
	东北	0.176 3		$Cc-sl$	0.000 0
	东	0.367 3		$D_{1-2}p-gw$	-0.024 6
	东南	0.157 7		$D_{2-3}h$	-1.233 5
	南	-0.173 2		D_3s	0.000 0
	西南	0.033 1		Dw	-0.647 8
	西	-0.027 4		P_1-w	-0.165 2
	西北	-0.463 0		P_2w	0.025 2
坡度	<5	0.447 3	地层岩性	Pt_1K	0.114 7
	5~10	-0.023 6		Pt_1N	0.000 0
	10~15	-0.896 5		Pt_1v	1.444 6
	15~20	-0.408 3		Pt_2HS	0.906 5
	20~30	-0.348 8		$Pt_2\sigma$	0.000 0
	30~45	-0.095 4		Pt_2sl	0.229 4
	>45	0.578 2		$P\xi$	-0.365 6
距河流的距离	0~200	1.167 5	地层岩性	SM_3	0.155 1
	200~400	0.504 8		T_1b	0.630 8
	400~600	-0.022 8		$T_{2-3}zg-z$	-0.044 0
	600~800	-0.535 0		T_3zh	-0.797 7
	800~1 000	-0.550 3		Z_1m-sh	-0.357 2
	1 000~1 500	-0.684 0		Z_2g-d	2.002 0
	>1 500	-1.022 2		$pt_2\gamma$	-0.134 3
距断层的距离	<1 500	0.371 2	地层岩性	$Z_1\gamma$	0.021 3
	1 500~3 000	-0.009 3		$Zn-d$	0.899 9
	3 000~8 000	0.126 3		Z_1s	0.292 6
	8 000~15 000	-0.014 7			
	>15 000	-1.972 4			

注:表中距离单位为 m。

线信息进行预处理,生成基于栅格的 DEM 数据。然后,从 DEM 数据中提取坡度与坡向地形数据,生成坡度与坡向因子图;利用遥感数据和野外调查成果,完成地质灾害分布图;从地质图中提取出地层岩性图和地质构造图,从地形图中提取出水系图。其次,将经过栅格转换的各因子图层分别与地质灾害分布图进行空间分析,通过公式(3)得到各影响因素对地质灾害发生“贡献”的信息量值。最后,根据次生地质灾害致灾因子属性量化表(表 2)对各因子图进行重新赋值,生成各单因子对次生地质灾害的信息量图。

4 研究区次生地质灾害危险性评估结果及分析

利用 ArcGIS 强大的空间分析功能,采用栅格加权叠加,对 5 个影响次生地质灾害发生发展的单因子信息量图利用评价模型进行复合,通过统计分

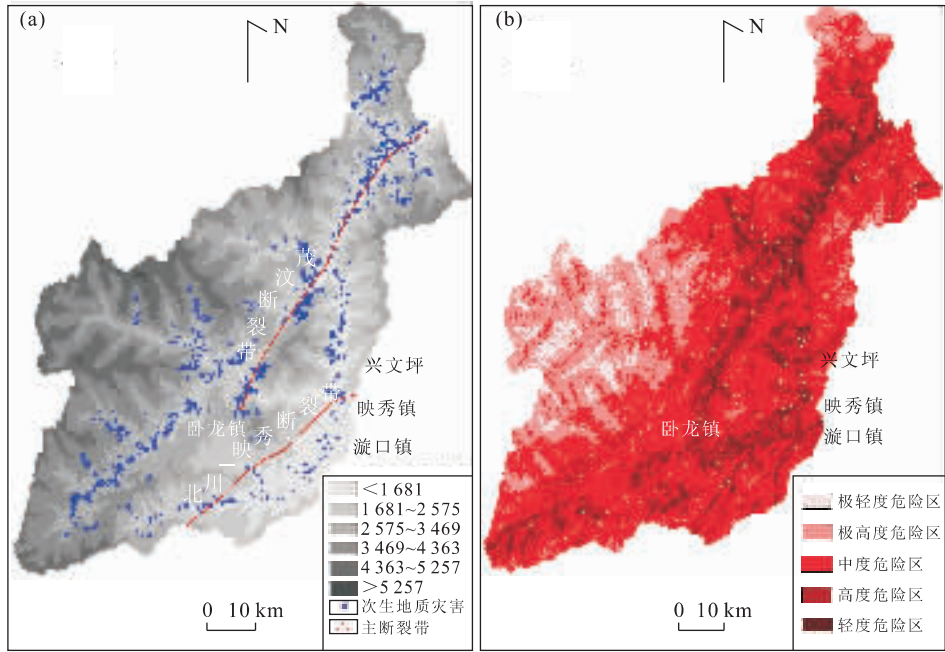


图 6 汶川县次生地质灾害分布(a)和危险评估(b)

Fig. 6 Distribution (a) and assessment maps (b) of secondary geological disasters in Wenchuan

析,利用频率和频数分布直方图,确定次生地质灾害危害程度的分区阈值,从而对研究区次生地质灾害危险度作出定量区划评价。

参照地质灾害危险度分级标准,结合研究区实际情况,利用 ArcGIS 的重分类功能对获得的次生地质灾害危险图进行重新分类,依次划为极高度、高度、中度、低度、极低度五级危险区,得到研究区的地质灾害危险度评价分级(图 6b)。从图 6b 可以看出,本次地震触发次生地质灾害的分布具有集群式分布的特点,即断裂带及其附近地区地质灾害集中发育,而远离断裂带区地质灾害很快衰减,呈零星分布;从灾害发育的区域特征分析,汶川县震后崩滑次生地质灾害呈现出北部和东部重、西部和南部轻的特点。同时,无论是北部还是南部,次生地质灾害的规模和集中程度又都表现为非均衡分布,具体表现为公路河流沿线地质灾害规模大且集中呈带状发育,其它地方相对较轻。由于分布位置相对集中,本文分地质灾害极高度和高度危险区、地质灾害中度危险区、地质灾害低度和极低度危险区 3 个区域对汶川县震后次生地质灾害进行分析,以期为当地灾后经济建设和生态建设服务。

4.1 地质灾害极高度和高度危险区

主要分布在岷江、寿江河、渔子溪、杂古脑河河谷地区,以岷江干流流域和沿茂汶断裂带及其附近地区次生地质灾害集中发育,距离断层较远处的流

域破坏相对较少。该区面积共 1 130. 196 km², 占全县面积的 27. 68%, 地质灾害高发主要与区内相对强烈的人类工程活动及志留系茂县群千枚岩、三叠系须家河组砂岩夹页岩分布有关。首先,这些地区是汶川县人口分布最为密集和工程、经济活动强度最大的地区,分布着县城(威州镇)以及卧龙、耿达、水磨、三江、绵虬、映秀、克枯等重要的集镇和国道 213 线、省道 303 线、省道 317 线等重要交通设施。其次,当地地层岩性复杂,构造发育,地形切割强烈,山高坡陡,临空条件好。

4.2 地质灾害中易发区

主要分布在绵虬以南的岷江河谷沿岸以及草坝河中下段河谷沿岸的草坡、银杏、映秀等乡镇。该区总面积 1 739. 584 km², 占全县面积的 42. 61%, 灾害种类以中小型的次生地质灾害和泥石流为主。这些灾害的发生与石英石等矿产资源的开发及区内筑路、水电梯级开发建设等较强烈的人类工程经济活动密切相关。

4.3 地质灾害极低度和低度危险区

主要分布在汶川县西部卧龙自然保护区、拟建的草坡自然保护区以及汶川北部高山极高山区和岷江东部高山极高山区。该区面积共 1 213. 219 km², 占全县面积的 29. 71%, 当地地势陡峻、降雨丰沛集中,但人居分散、人口密度小、人类工程经济活动强度较小。

5 结论

利用基于 GIS 的信息量模型进行汶川次生地质灾害危险性评价,将区域划分成极高度、高度、中度、低度、极低度五级危险区,危险区的分布规律能较好地反映实际调查成果。基于 GIS 的信息量模型综合了 GIS 分析法与信息量计算的各自优点,能比较快速地获取区域灾害研究所需的因子数据,如高程模型、遥感影像数据等。由于基于 GIS 的信息量法数据处理重点是获取栅格单元内地质灾害的分布密度,数据易获取,因此其可操作性强。信息量模型与一般的统计模型相比,客观性更高。

References

- Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1): 21–44.
- Carrara, A., 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3): 403–426.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., et al., 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(5): 427–445.
- Chen, X. L., Ran, H. L., Qi, S. W., 2008. Triggering factors susceptibility of earthquake-induced landslides in 1976 Longling earthquake. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (On-Line First)*, 2: 50–56 (in Chinese with English abstract).
- Greco, R., Sorriso-Valvo, M., Catalano, E., 2007. Logistic regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: the Aspromonte case study, Calabria, Italy. *Engineering Geology*, 89(1–2): 47–66.
- Han, J. L., Wu, S. R., He, S. J., et al., 2009. Basal characteristics and formation mechanisms of geological hazards triggered by—the May 12, 2008 Wenchuan earthquake with a moment magnitude of 8.0. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 306–326 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. S., 2003. The state of the art of the research on seismic—landslide hazard at home and abroad. *Journal of Catastrophology*, 18(4): 64–70 (in Chinese with English abstract).
- Lin, M. L., Tung, C. C., 2003. A GIS-based potential analysis of the landslides induced by the Chi-Chi earthquake. *Engineering Geology*, 71(1–2): 63–77.

- Liu, F. M., Zhang, L. H., Liu, H. Q., et al., 2006. Danger assessment of earthquake-induced geological disasters in China. *Journal of Geomechanics*, 12(2): 127–131 (in Chinese with English abstract).
- Sun, C. S., Cai, H. W., 1997. Developing and distributing characteristics of collapses and landslides during strong historic earthquake in China. *Journal of Natural Disasters*, 6(1): 25–30 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Ma, Y. S., Long, C. X., et al., 2008. Fault activity of the Wenchuan earthquake in Sichuan, China and seismic secondary geohazards. *Geological Bulletin of China*, 27(11): 1913–1922 (in Chinese with English abstract).
- Yan, E. C., Liu, H. C., Zhang, Z. Y., 1998. A study on the distribution regularity of landslide in the Minjiang River between Maowen and Wenchuan County. *Mountain Research*, 16(2): 109–113 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K. L., 2004. Landslide hazard prediction and evaluation. China University of Geosciences Press, Wuhan, 27–29 (in Chinese).
- Zhang, Y. S., Lei, W. Z., Shi, J. S., et al., 2008. General characteristics of 5·12 earthquake-induced geohazards in Sichuan. *Journal of Geomechanics*, 14(2): 109–116 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈晓利, 冉洪流, 祁生文, 2008. 1976 年龙陵地震诱发滑坡的影响因子敏感性分析. 北京大学学报(自然科学版)网络版(预印本), 2: 50–56.
- 韩金良, 吴树仁, 何淑军, 等, 2009. 5·12 汶川 8 级地震次生地质灾害的基本特征及其形成机制浅析. 地质前缘, 16(3): 306–326.
- 李忠生, 2003. 国内外地震滑坡灾害研究综述. 灾害学, 18(4): 64–70.
- 刘凤民, 张立海, 刘海青, 等, 2006. 中国地震次生地质灾害危险性评价. 地质力学学报, 12(2): 127–131.
- 孙崇绍, 蔡红卫, 1997. 我国历史地震时滑坡崩塌的发育及分布特征. 自然灾害学报, 6(1): 25–30.
- 王涛, 马寅生, 龙长兴, 等, 2008. 四川汶川地震断裂活动和次生地质灾害浅析. 地质通报, 27(11): 1913–1922.
- 晏鄂川, 刘汉超, 张倬元, 1998. 茂汶—汶川段岷江两岸滑坡分布规律. 山地研究, 16(2): 109–113.
- 殷坤龙, 2004. 滑坡灾害预测预报. 武汉: 中国地质大学出版社, 27–29.
- 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等, 2008. 四川 5·12 地震次生地质灾害的基本特征初析. 地质力学学报, 14(2): 109–116.