

四川汶川 Ms 8 级地震重灾区地质灾害危险性评价和预测

张春山^{1,2}, 孙炜锋^{1,2}, 谭成轩^{1,2}, 韩金良^{1,2}, 何淑军¹,
吴树仁^{1,2}, 杨为民^{1,2}, 王 涛¹, 张永双^{1,2}, 石菊松^{1,2}
ZHANG Chun-shan^{1,2}, SUN Wei-feng^{1,2}, TAN Cheng-xuan^{1,2},
HAN Jin-liang^{1,2}, HE Shu-jun¹, WU Shu-ren^{1,2}, YANG Wei-min^{1,2},
WANG Tao¹, ZHANG Yong-shuang^{1,2}, SHI Ju-song^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China*

摘要:在地质灾害调查和遥感解译资料的基础上,采用专家评判方法,利用 GIS 技术对重灾区 14 个县市的地质灾害进行快速定量的危险性评价,并在此基础上进行定性评价。强烈的地震诱发大量的次生地质灾害,主要为滑坡和崩塌,其次为地裂缝、泥石流和地面塌陷,局部有沙土液化,主要分布在龙门山断裂带附近及山区。总结了 14 个县市重灾区内地质灾害的分布特征,分析了地质灾害的形成条件,建立了地质灾害评价指标体系,确定了地质灾害危险性判别标准,进行了地质灾害危险区划。共划分为高危险区、中危险区、低危险区 3 个等级,在此基础上又划分了若干个亚区。对地质灾害的可能发生区带进行了分析预测,针对高危险区提出了相应的防治对策。

关键词:汶川 Ms8 级地震;重灾区;地质灾害;危险性评价;预测分析

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2009)08-1138-08

Zhang C S, Sun W F, Tan C X, Han J L, He S J, Wu S R, Yang W M, Wang T, Zhang Y S, Shi J S. Assessment of geo-hazard in severely damaged region by Wenchuan Ms 8 earthquake, Sichuan Province, China. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8):1138-1145

Abstract: Based on investigation of geo-hazard and remote image interpretation of 14 counties within severely damaged region by Wenchuan Ms 8 earthquake, speedy quantitative assessment of hazards fatalness was carried out using GIS technology by means of expert experience method. Qualitative assessment is therefore conducted on this basis. This strong earthquake has induced many geo-hazard, mainly landslide and collapse, secondly debris-flow, geo-fracture and surface collapse, and locally sandy soil liquidation. These hazards mostly distribute around Longmenshan fault zone and its vicinities. This article has summed up the distribution characters, analyzed the forming conditions of geo-hazard in research region. It has also set up the assessment system, and has accomplished the fatalness zoning. The research region is thus divided into high dangerous region, medium dangerous region, and low dangerous region, then some regions are sub-divided into few sub-regions. Moreover, this paper has provided some disaster prevention and mitigation measures for highly dangerous geo-hazard region.

Key words: Wenchuan Ms 8.0 earthquake; severely damaged region; geo-hazard; fatalness assessment; forecast and analysis

收稿日期: 2009-05-07; 修订日期: 2009-05-18

基金项目: 科技部科技支撑项目(编号: 2008BAK07B04、2006BAC04B05)、国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室和中国地质科学院重点开放实验室专项资金联合资助

作者简介: 张春山(1964-), 男, 博士, 研究员, 从事地质灾害、地应力、环境地质等方面的科研工作。E-mail: zhangcs401@sina.com

2008 年 5 月 12 日四川省汶川县发生 Ms8.0 级地震,发震断裂为龙门山断裂带的中央断裂,余震均沿龙门山断裂带展布。强烈的地震诱发大量的次生地质灾害。在重灾区范围内主要为滑坡、崩塌次生灾害,其次为地震缝、泥石流和地面塌陷,局部有沙土液化,主要分布在龙门山断裂带附近及山区。根据县市地质灾害调查和震后遥感解译资料,重灾区 14 个县市共发生 5276 次滑坡、崩塌、泥石流灾害。其中震前 1994 次,震后 3282 次。共威胁居民地 122 处,威胁道路 128.21 km,威胁河流长度 178.62 km,毁坏农田 14.92 km²,毁坏林地 19.26 km²。

地质灾害除受地形地貌、地层岩性、地质构造、斜坡结构等基础条件控制外,还与地震、降雨、人类活动等诱发因素密切相关。地震重灾区的易滑地层主要为 4 类,其一是志留系,岩性为中—浅变质的灰色、绿色千枚岩;其二是寒武系和泥盆系,岩性为千枚岩、绢云母石英千枚岩、铁硅质灰岩、结晶灰岩、块状灰岩等;其三是三叠系,岩性为紫灰色厚层泥质粉砂岩、灰色炭质页岩、砂质页岩等。这些地层均为软硬相间地层,存在软弱结构,是本区形成滑坡、崩塌的主要地层。此外,第四系松散碎屑堆积物及地表风化层也是易滑地层,由于本区山高坡陡,在强降雨等因素作用下,饱水后极易起动与水混合在一起形成泥石流。

本文在进行地质灾害调查和遥感解译资料的基

础上,采用专家评判方法,利用 GIS 技术对重灾区 14 个县市的地质灾害进行快速定量的危险性评价,并在此基础上进行定性评价。这种方法可以进行快速评价和制图,为地震灾区恢复重建工作中重建规划,特别是场地选址、地质灾害的防治提供急需的次生灾害方面的基础资料,为国家和地方政府规划决策提供科学依据。

1 地质灾害危险性评价指标体系

控制和影响地质灾害形成的地质条件很多,但归纳起来主要包括 2 个方面的条件,即地质灾害形成的基础条件和诱发条件^[1-10]。依此可建立地质灾害危险性评价指标体系(图 1)。

(1)地质灾害活动程度:指地质灾害活动的历史,本次地质灾害危险性评价主要考虑地质灾害活动的点密度和面密度,将其作为地质灾害危险性分区的依据。但地质灾害活动的历史只能说明地质灾害的过去,而未来地质灾害活动程度怎样、危险性大小主要取决于地质灾害的潜在形成条件和诱发因素。

(2)地质灾害潜在形成条件:包括地质灾害形成的主要控制因素和影响条件,本次地质灾害危险性评估中主要选取斜坡结构类型、工程地质岩组、水文地质条件、斜坡几何形态、断裂构造、植被条件、地震、降雨条件、人类活动等。

(3)地质灾害扩展范围:指地质灾害一旦发生可能影响波及的范围,也就是地质灾害存在危险的范

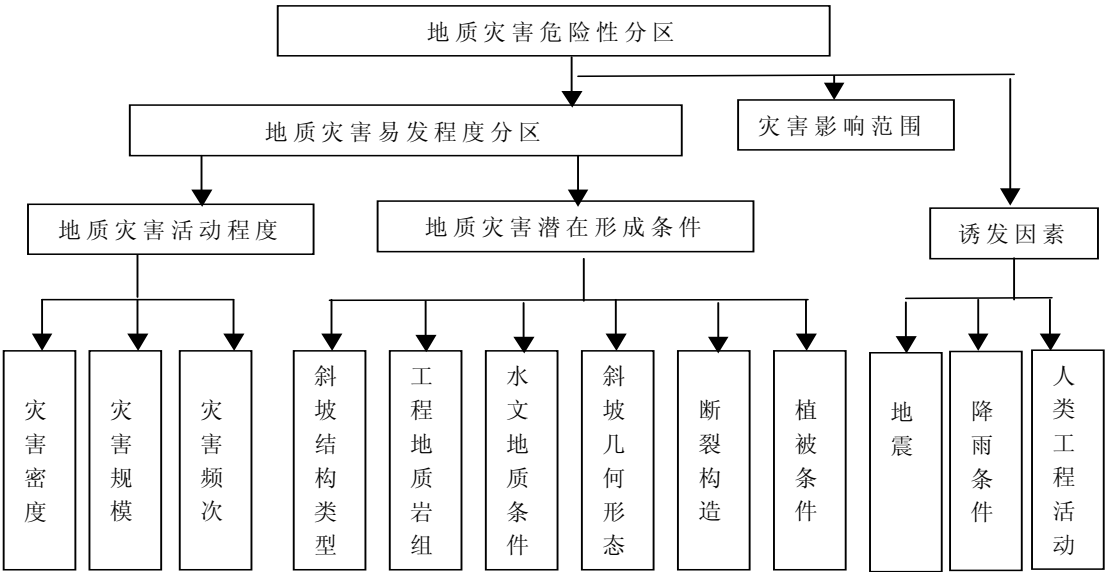


图 1 地质灾害危险性程度评价指标体系

Fig. 1 Assessment indicator system of geo-hazard fatalness

围。本次确定的地质灾害扩展范围主要包括易发区本身的斜坡地带,也包括沟谷底部及河流、水库内的一定范围。

(4)地质灾害的诱发因素:指能够使地质环境系统向着地质灾害发生的方向演化或者导致地质灾害发生的内动力和外动力地质作用。本区诱发条件主要包括地震、降雨和人类工程活动。能够代表地震活动程度的指标用地震烈度来表示,人类工程活动用公路、铁路等的线密度表示。由于缺少本区的降雨资料,如暴雨日数、多年平均降雨量等,且本次研究主要考虑地震次生地质灾害,因此评价中未考虑降雨诱发因素。

2 地质灾害危险性评价模型的建立

地质灾害危险程度国外一般用概率表示^[11-14],但概率获得比较困难,因此本文用国内常用的危险性指数来表示^[3-5,15-19]。危险性指数越高,未来发生地质灾害的危险性就越大。危险性指数概念模型可用下式表示:

$$WX_i=\sum_{j=1}^mR(j)\cdot X(i,j)$$

式中:WX_i—评价单元的危险性指数;m—危险性要素关联因子总数;R(j)—各关联因子的权重值;X(i,j)—各关联因子概化归一后的数据。

根据目前掌握的资料和对地质灾害分析的结果,本次危险性评价选取的主要影响因素包括七大类:地层岩性中选取易灾岩土、断裂构造中选取活动构造、地震条件中选取地震烈度、地形地貌中选取斜坡坡度、边坡坡高、历史活动中选取灾害点密度和人类工程活动。根据已往的经验 and 本次对地震次生灾害野外调查的认识,由专家评判法确定各主要影响因素的权值(表1)。

3 危险性要素的原始数据整理

为了对本区崩塌、滑坡、泥石流(简称崩滑流)等地质灾害进行综合性评价,在广泛收集资料和实地

调查的基础上,根据崩塌、滑坡、泥石流的形成条件和危险构成,对地质灾害的危险性要素进行了统计和概化。有些要素的数据是可以进行量化统计的,有些要素则只是描述性的,只能根据一定的标准进行概化,用数据来表示。描述性的危险性要素的原始数据整理与概化按照确定的各要素的等级标准(表2)进行,其他危险性要素可从资料直接取得,得到各评价单元的危险性要素的统计分析结果,将其按评价单元统计,形成基础属性数据库。

基础数据的来源与统计方法如下。

(1)崩滑流发育密度主要来源于县市地质灾害调查和震后遥感解译资料,利用 MAPGIS 软件绘制在 1:50 万图上并进行统计分析获得。用每平方千米崩滑流发育的处数来表示,单位为处/km²。

(2)活动断裂发育程度主要来源于 1:50 万地质图,利用 MAPGIS 软件的缓冲分析和叠加分析功能,首先考虑断裂的影响范围,划分为 0.5 km 影响带、1km 影响带、2 km 影响带、4km 影响带和大于 4 km 影响带。此前笔者也曾从图上量取得到活动断裂长度,用活动断裂的线密度来表示,单位为 km/km²,本次未用该方法。

(3)边坡坡度主要来源于 1:5 万地形图,利用 MAPGIS 软件的分析功能从图上量取得到边坡坡度,用角度来表示,单位为°。

(4)边坡坡高(切割程度):主要来源于 1:5 万地形图,利用 MAPGIS 软件的分析功能从图上量取得到边坡高差,用坡高来表示,单位为 m。

(5)易灾岩土主要来源于 1:50 万地质图。根据调查结果和前人的资料对岩土组合类型进行岩组划分,从图上按各评价单元的岩土类型或组合类型得到易灾岩土的等级。

(6)人为活动主要根据公路、铁路的发育程度和土地利用程度进行划分,得到人类活动程度的等级,考虑缓冲带宽度为 1 km。

(7)地震烈度主要来源于中国地震局^[20]对本次地震圈定的地震烈度图,直接从图上得到各评价单

表 1 各主要影响因素的权值
Table 1 Weight value of mainly influencing factors of geo-hazards

因素	易灾岩土	活动构造	地震烈度	边坡坡度	边坡坡高	灾点密度	人类活动	合计
权值	0.15	0.10	0.13	0.18	0.15	0.20	0.09	1.00
代号	X(i,1)	X(i,2)	X(i,3)	X(i,4)	X(i,5)	X(i,6)	X(i,7)	

表 2 崩滑流描述性危险评价要素概化分级

Table 2 Primary grading for descriptive fatallness assessment indicators of debris flow

危险性要素等级	极低危险	低危险	中等危险	高危险	极高危险
易灾性岩土发育程度	坚硬岩组，主要为岩浆岩、变质岩浆岩、厚层灰岩、厚层砂岩、砂砾岩或变质砂岩	较坚硬岩组，主要为中薄层砂岩、灰岩、白云岩,部分地区发育易灾性岩土	软硬相间岩组，主要为中薄层砂岩夹薄层泥岩、中薄层灰岩夹泥页岩或煤层	软弱岩组，主要为千枚岩、片岩、板岩、泥岩、弱胶结的断裂带构造岩，易灾性岩土发育	松散岩组，主要为岷江两岸和山前冲洪积扇土层、冰水沉积物、残坡积物、岩浆岩强风化带
活动断裂发育程度	距断裂>4km	距断裂 2~4km	距断裂 1~2km	距断裂 0.5~1km	距断裂<0.5km
人为活动程度	微弱	较微弱	较强烈	强烈	特别强烈

元的地震烈度值。

4 危险性评价要素的数据预处理

(1)将前面统计和概化的数据(表 3)进行赋值预处理。首先用崩滑流发育处数与单元国土面积相除后得到崩滑流发育密度，用活动断裂的长度与单元国土面积相除后得到活动断裂的发育程度。然后按表 3 的分级标准进行赋值预处理，即将各要素按照不同的标准分为 5 级,并按 1、2、4、7、10 从低到高依次赋值,得到赋值预处理的结果。

(2)将赋值预处理后的各评价要素的数据进行归一化处理，目的是使所有要素的评价结果均位于区间[0,1]之间。其计算公式为：

$$X_i(i,j)=\frac{X(i,j)-\min(x(i,j))}{\max(x(i,j))-\min(x(i,j))}$$

式中： $X_1(i,j)$ —评价要素 j 的第 i 评价单元归一后的数值； $X(i,j)$ —评价要素 j 的第 i 评价单元的数值； $\min(x(i,j))$ —评价要素 j 的最小值； $\max(x(i,j))$ —评价要素 j 的最大值。

5 崩滑流地质灾害危险性评价

(1)崩滑流危险性评价的数学模型

利用危险性评价的数学模型，将各因素的权重值代入模型,建立起崩滑流危险性评价的数学模型：

$$WX_i=0.15X(i,1)+0.1X(i,2)+0.13X(i,3)+0.18X(i,4)+0.15X(i,5)+0.2X(i,6)+0.09X(i,7)$$

(2)崩滑流危险性评价

按危险性评价的数学模型,利用 ARCGIS 进行栅格运算,单元大小为 30 m×30 m,分别计算出各评价单元的危险性指数,最大值为 0.719，最小值为

表 3 崩滑流危险性评价要素概化赋值分级

Table 3 Valuation grading for fatallness assessment indicators of debris flow

危险性评价要素	危险性评价要素分级				
	极低危险	低危险	中等危险	高危险	极高危险
崩滑流发育密度(处/km ²)	0	0.01~0.2	0.2~0.5	0.5~0.1	>1.0
地震烈度	<6	6~7	7~8	8~9	>9
活动断裂发育程度	1	2	3	4	5
易灾性岩土发育程度	1	2	3	4	5
边坡坡度	按实际读取数值用于算子中				
边坡坡高	按实际读取数值用于算子中				
人为活动程度	1	2	3	4	5
等级赋值	1	2	4	7	10

0.074。为了比较直观地反映各评价单元的危险程度,本文利用自然断点法对危险性指数进行分组区划,共划分为3个等级:高危险区、中等危险、低危险区。其中高危险区面积为10493.72 km²,灾点平均密度为18.3处/100 km²,震后次生灾点8.9处/100 km²,占评价区总面积的23.48%;中危险区面积为17631.64 km²,灾点平均密度为8.9处/100 km²,震后次生灾点5.3处/100 km²,占评价区总面积的39.46%;低危险区面积为16557.36 km²,灾点平均密度为3.4处/100 km²,震后次生灾点2.1处/100 km²,占评价区总面积的37.06%(表4、表5)。危险等级以专题图的形式反映危险程度分布(图2)。

6 地质灾害的预测分析

地质灾害危险性预测评价的内容包括:依据地质灾害的历史活动程度、潜在形成地质灾害的地质环境条件、人类工程活动程度、地震烈度和距本次震中、余震发育带的距离等组合条件,对研究区内发生地质灾害的可能性做出预测分析。

汶川地震震中区属下扬子地台地层分区,各时代的地层自元古宇至新生界均有不同程度的出露,受龙门山断裂带切割的影响,岩石相对比较破碎。

该区构造运动强烈,地层发生强烈褶皱和断裂,并伴随大量岩浆侵入,岩层遭受构造作用变质、破碎。受龙门山3条主要大断裂(青川-茂汶断裂带、北

川-映秀断裂带、江油-灌县断裂带)的影响,龙门山断裂带及其两侧岩石破碎,完整性差,工程性质差。

本区的易滑地层主要包括:志留系中一浅变质的灰色、绿色千枚岩,寒武系和泥盆系千枚岩、绢云母石英千枚岩、铁硅质灰岩、结晶灰岩、块状灰岩等,三叠系紫灰色厚层泥质粉砂岩、灰色炭质页岩、砂质页岩等。这些地层均为软硬相间的地层,存在软弱结构,是本区形成滑坡、崩塌的主要地层。此外,松散碎屑堆积物及地表风化层,由于本区山高坡陡,在降雨等因素的作用下,饱水后极易起动与水混合在一起形成泥石流。

预测汶川震中区滑坡、崩塌、泥石流等灾害可能发生在上述地层发育的地区,特别是新滑坡体的边缘和后缘陡坎部位,更容易发生滑坡、崩塌灾害。这是由于先期发生的滑坡、崩塌等灾害已造成周边岩体松动,比其他部位更容易发生滑坡、崩塌等灾害。

依据本区地质灾害的分布特征和岩性组合特征,结合危险性定量评价的结果,圈定了本区次生地质灾害高危险的区域主要包括以下几个地区(图3):水磨镇-都江堰-汉旺镇-安县低山丘陵地带,理县-薛城-汶川-茂县 G317、G213 国道及两侧沟谷中,卧龙镇-映秀镇 S303 省道两侧,北川县 S302 省道两侧及沟谷中,江油市-重华镇-雁门镇一带,响岩镇-南坝镇-凉水镇 S302 省道及沟谷中,平武县古城镇-水晶镇及 S302 省道沿线,青溪镇北部地区

表 4 地质灾害危险性评价结果
Table 4 Results of fatalness assessment of geo-hazards

危险等级	危险指数范围	单元数	面积/km ²	震前+震后灾点总数				灾点密度 (处/km ²)
				崩塌	滑坡	泥石流	总数	
高危险	>0.438	262343	10493.72	411	1157	289	1911	0.183
中危险	0.332~0.438	440791	17631.64	419	1091	100	1641	0.089
低危险	<0.332	413934	16557.36	184	343	7	537	0.034
合计		1117068	44682.72					

表 5 地震次生地质灾害危险性评价结果
Table 5 Results of fatalness assessment of secondary geo-hazards triggered by earthquake

危险等级	危险指数范围	单元数	面积/km ²	震后次生灾点数				灾点密度 (处/km ²)
				崩塌	滑坡	泥石流	总数	
高危险	>0.438	262343	10493.72	185	692	57	934	0.089
中危险	0.332~0.438	440791	17631.64	283	672	34	989	0.053
低危险	<0.332	413934	16557.36	186	198	4	338	0.021
合计		1117068	44682.72					

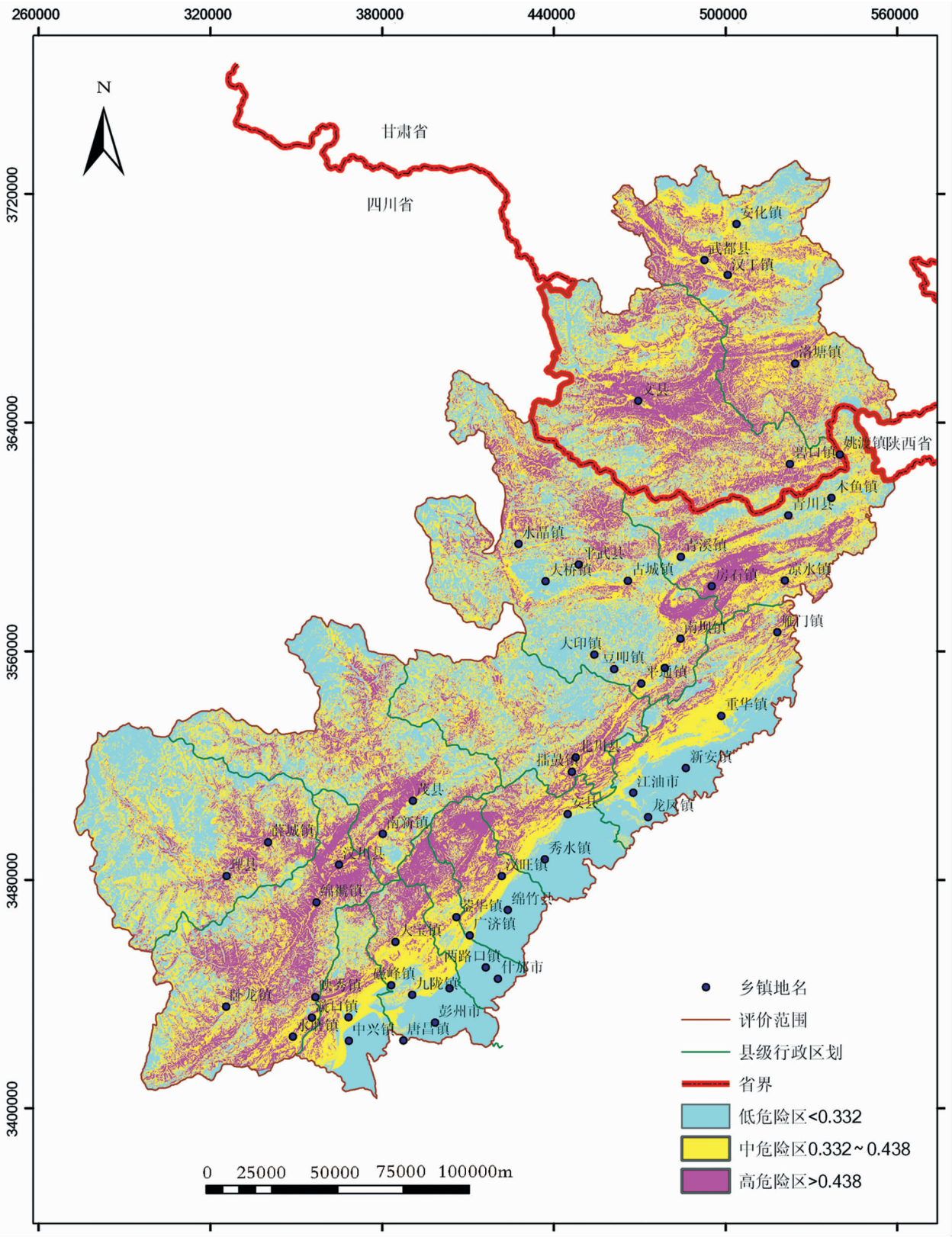


图 2 汶川地震重灾区地质灾害危险性定量评价结果

Fig. 2 Quantitative results of geo-hazards fatalness assessment in severely damaged area by Wenchuan earthquake

小流域内,甘肃文县与四川的省道两侧,武都县城四周及省道两侧。

7 结 语

(1)本文只是从宏观上对 2008 年 5 月 12 日汶川大地震 9 度烈度带内的地区各类灾害的分布规律、形成条件、易发岩层等进行了初步分析。由于资料来源不同,有的地区缺少必要的资料,难免存在偏差,建议补充收集资料后再进行详细的次生灾害评价工作。

(2)本文的评价工作主要针对重灾区的恢复重建和居民安置,但在研究的深度和广度上还有待于深化,应进行后续的风险评估与管理等方面的研究。

(3)震区的降雨高峰主要集中在 7—8 月份,其间的降雨量是 5 月份降雨量的 3 倍左右。由于地震的影响,很多山体已经发生滑坡或坍塌,地质结构欠稳定,由此将会带来更多的滑坡、泥石流等地质灾害和道路坍塌、植被被毁、可能威胁水库运行安全、余震使堰塞湖决堤等问题,建议地方政府应当给予高度关注。

(4)依据本文地质灾害危险性评价的结果,在汶川地震灾害城镇和居民点恢复重建的过程中,应充分考虑次生地质灾害的破坏能力,选址时应尽可能避开高危险区,对于必须在高危险区进行建设选址的,应采取必要的防治措施和加强工程本身的强度,并编制相应的应急预案。

(5)建议政府和科技部门加强和重点支持地震次生灾害形成机理、危险性评估、场地安全评价、区域地壳稳定性评价、国土安全评价、风险评价与风险管理、应急预案研究编制等方面的科研工作。

致谢:交通部科学研究院张庆研究员、王江平副研究员和刘礼勇副研究员等曾与笔者一起参加科技部汶川抗震救灾专家组的工作,并提供了部分公路损毁方面的资料,在此表示感谢。

参考文献

[1]张春山,韩金良,孙炜锋,等.陕西陇县地质灾害危险性分区评价[J].地质通报,2008,27(11):1795—1801.

- [2]刘希林.四川省泥石流风险评价[J].灾害学,2000,15(3):7—11.
- [3]张春山,张业成,马寅生,等.区域地质灾害风险评价要素权值计算方法及应用[J].水文地质工程地质,2006,33(6):84—88.
- [4]张春山,吴满路,张业成.地质灾害风险评价方法及展望[J].自然灾害学报,2003,12(1):96—102.
- [5]张春山,张业成,张立海.中国崩塌、滑坡、泥石流灾害危险性评价[J].地质力学学报,2004,10(1):27—32.
- [6]魏平新,汤连生,张建国,等.基于 GIS 的广东省滑坡灾害区划研究[J].水文地质工程地质,2005,32(4):6—9.
- [7]张春山.北京北山地区泥石流灾害危险性评价[J].北京地质,1996,8(2):11—20.
- [8]张梁,张业成,罗元华,等.地质灾害灾情评估理论与实践[M].北京:地质出版社,1998.
- [9]张春山,张业成,胡景江,等.中国地质灾害时空分布特征与形成条件[J].第四纪研究,2000,20(6):559—566.
- [10]Fell R, Ho K K S, Lacasse S, et al. A framework for landslide risk assessment and management [C]//Fell, Couture, Eberhardt. Landslide Risk Management. Hungr, Taylor & Francis Group, London, 2005, ISBN 04 1538 043 X.
- [11]Bell F G. Geological Hazards: Their Assessment, Avoidance and Mitigation[M]. Published by E & FN Spoon, London, 1999:648.
- [12]Azm S Al-homoud, Gutaiba A Al-masri. An expert system for analysis and design of cut slopes and embankments[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 1999,5(2): 157—172.
- [13]Van Westen C J, Van Asch T W J, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?[J]. Original Paper, Bulletin of Engineering Geology and Environment,2005,64:5—23.
- [14]Nichl J E, Shaker A, Wong M S. Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment[J]. Geographology, 2006,76(1/2):68—75.
- [15]Wu Shuren, Jin Yimin, Zhang Yongshuang, et al. Investigation and assessment of landslide hazards of Fengdu County in the reservoir region of Three Gorges Project on the Yangtze River[J]. Environmental Geology, 2004,45:560—566.
- [16]张永波,张礼中,周小元,等.地质灾害信息系统的设计与开发[M].北京:地质出版社,2001.
- [17]殷跃平,康宏达,陈波.三峡工程移民区滑坡防治与利用技术研究[J].地质灾害与环境保护,2000,11(2):135—140.
- [18]殷跃平,柳源.中国地质灾害防治研究——对国际减灾十年活动(1990—2000)的思索[J].工程地质学报,2000,(增刊):1—10.
- [19]张梁,张业成,高兴和,等.地质灾害经济学[M].石家庄:河北人民出版社,2002.
- [20]国家地震局.中国地震烈度区划图(1/400 万)[M].北京:地震出版社,2001.