

四川省汶川地震灾区震后山地灾害综合风险评价

苏鹏程^{1,2,3}, 韦方强^{1,2}, 徐爱淞^{1,2,3}, 江玉红^{1,2}

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 水利部
成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 汶川地震触发了大量次生山地灾害,震后山地灾害活动风险对灾区的发展规划决策有着重要的参考价值。通过对四川境内震后灾区基础资料的分析,分别对灾区的 44 个县(市)进行了山地灾害危险性、易损性和风险评价,并以震后灾害点密度对危险性评价结果进行了验证,结果发现二者之间具有线性函数关系。评价结果表明,高度危险区集中于龙门山断裂附近,并且呈现明显的带状分布,面积比例为 39.8%;极高易损和高度易损区则主要分布于成都、绵阳、德阳、雅安等大城市周边地区,面积比例为 13.1%;高度风险区则主要位于龙门山腹地向山前平原的过渡带,属于高度危险和高度易损的结合部位,面积比例为 11.0%。高风险区是今后恢复重建和发展规划中需要重点关注的地区;中度风险区由于灾后恢复重建的推进,其承灾体的易损性将会上升,容易导致其向高度风险转化,也要给予重视。

关键词: 汶川地震; 山地灾害; 风险评价; 四川省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0231-07

中图分类号: P642.23

Integrated Risk Assessment of Mountainous Hazards in Seismic Disastrous Areas of Sichuan Province After Wenchuan Earthquake

SU Peng-cheng^{1,2,3}, WEI Fang-qian^{1,2}, XU Ai-song^{1,2}, JIANG Yu-hong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Wenchuan earthquake caused a variety of secondary mountainous hazards. Risk assessment regarding secondary hazards is therefore very important for reconstruction projects in the affected areas. Based on regional data analysis, assessments of dangerousness, vulnerability, and risk were carried out. A linear relationship was found between dangerousness degree and disaster density. Assessment results show that highly dangerous regions concentrated along Longmengshan fault, accounting for 39.8% of the total area. Regions of high and extremely high vulnerability mainly surrounded the cities of Chengdu, Mianyan, Deyang, and Ya'an, accounting for 13.1% of the total area. Regions of high risk, accounting for 11% of the total area, occupied the transitional zone between Longmeng Mountain and the piedmont plain, which had high dangerousness degree and high vulnerability, respectively. Special attention should be paid to the regions of high risk and vulnerability during the reconstruction. However, the regions of moderate should also be cared as the risk and vulnerability of these areas could be potentially deteriorated due to the rapid expansion of the reconstruction areas.

Keywords: Wenchuan earthquake; mountain hazard; risk assessment; Sichuan Province

5.12 汶川地震触发了上万处崩塌、滑坡,造成了 地灾害活动异常活跃,其危害也十分严重^[3-5]。由地
惨重的人员伤亡和巨大的财产损失^[1-2]。震后灾区山 震直接触发山地灾害的或者震后次生的山地灾害(主

收稿日期:2010-07-25

修回日期:2010-08-11

资助项目:国家科技支撑计划课题“重大滑坡、泥石流灾害综合风险评估技术”(2008BAK50B04);科技部国际合作项目“汶川地震灾区山地灾害评估与预警应用技术”(2009DFR20620);国家公益性行业(气象)专项“强降水诱发山体滑坡、泥石流气象预报预警技术”(GYHY201006039)

作者简介:苏鹏程(1981—),男(汉族),安徽省桐城市人,博士研究生,助理研究员,主要从事山地灾害风险评价与预测预报方面的研究。
E-mail:supengcheng@imde.ac.cn。

要为崩塌、滑坡、泥石流等)已经对灾区造成了灾难性的后果,并且仍将对灾区未来的恢复重建和发展产生深远的影响。因此,汶川震后地震灾区的山地灾害发展趋势怎样,其未来的活动风险如何,是震后防灾减灾领域需要回答的关键问题。

山地灾害的孕育、发生和发展相对来说是一个缓慢的过程,而地震则在瞬间以一种极端的方式大大加速了这个过程,震后山地灾害以远超常规的强度和频率在活动。与炉霍地震(7.9级)、松潘—平武地震(7.2级)、台湾集集地震(7.3级)和西藏察隅地震(8.5级)类似^[6-10],汶川震区的山地灾害也将进入一个新的活跃期^[11]。作为重要的非工程减灾措施,灾害的风险评估可为定量分析震后山地灾害对当地恢复重建的影响以及未来的活动特征提供参考,还可以为相应的灾害管理和有效的灾害风险防御提供依据。目前已有的研究中,学者们分别针对山地灾害不同灾种开展了风险评价工作^[12-16],通过分析可以发现,这些工作在风险评价指标体系的选取原则,评价模型的构建方法上有着很多的共同之处;同时,确定各影响因素权重的方法如灰色聚类、AHP决策分析法、综合模糊评判法等也有一定的相似性。因此,本研究从山地灾害(包括滑坡、泥石流、崩塌)形成的基本条件出发,选择其具有共性的指标进行山地灾害的危险性评价,结合当地社会经济指标进行易损性评价,完成四川境内汶川震区山地灾害的综合风险评价。

1 研究区概况

汶川地震对四川境内的成都市、绵阳市、德阳市、雅安市、广元市、乐山市、达州市、巴中市、阿坝州和甘孜州等10个市(州)产生了影响,其中重灾区的44个县(市)总面积达 $1.31 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。研究区位于四川省西北部,地处我国地貌第1阶梯与第2阶梯的交界处,区内以高山峡谷地貌为主,地形十分陡峻,各种重力地貌现象发育,除龙门山山前平原地区外,山谷河谷间仅有零星平坝分布,受季风气候和地形条件共同影响,降雨量年内及区域分布差异很大,为山地灾害的孕育、形成和发展提供了有利的条件。

在地层上该区域属于马尔康分区与龙门山及四川盆地分区的结合部,海拔高度由西向东呈阶梯式下降,地壳厚度也随之变小,属于地壳厚度相对缓变区。由于处于亚欧板块内部扬子地台与滇藏地槽系的交界处,受青藏高原隆起影响,研究区构造作用强烈,区内构造线多为北北东向或北东东向,基本上与地形等高线、重力等值线、莫霍面等深线方向保持一致,岩浆活动发育,变质作用普遍。研究区位于西部中生界褶

皱带,大部分在印支活动前还是古特提斯海的边缘海,印支期发生板块俯冲才成为褶皱带的。喜马拉雅运动中,亚欧板块与印度板块、太平洋板块碰撞,喜马拉雅及青藏高原强烈的整体隆起,同时地壳厚度变厚,川西北也参与了这次整体隆升。新构造运动中研究区属于强烈上升区,新老断裂活跃。本研究区覆盖了汶川地震地表烈度VI—XI区。

2 山地灾害危险性评价

山地灾害风险包括3方面的内容,即灾害过程的危险性、承灾体的易损性和可能的灾害损失。因此,风险是危险性和易损性的结合。同时,作为灾害风险管理的核心技术,风险评价也是行之有效的规避山地灾害的非工程减灾措施。本研究围绕山地灾害风险评价的两个方面的基本内容和方法进行展开。

2.1 评价指标选取和层次模型构建

山地灾害的危险性属于其自身的属性,主要受形成山地灾害的地质、地貌等环境和降雨(或冰川融水)等激发因素的影响。本研究采用AHP(analytic hierarchy process)对诸多影响因素进行综合分析。AHP决策分析方法是一种定性定量相结合的决策分析方法。它通过将决策思维过程模型化、数量化,将复杂问题分解为若干层次和若干程度的权重,为最佳方案的选择提供依据。AHP决策分析方法自1980年提出以来,目前已经在经济、科研、生产等众多领域得到广泛的应用^[17-18]。综合考虑山地灾害形成的基本条件以及地震的影响,拟选用地质、地形、地震和激发因素等开展危险性评价(图1)。

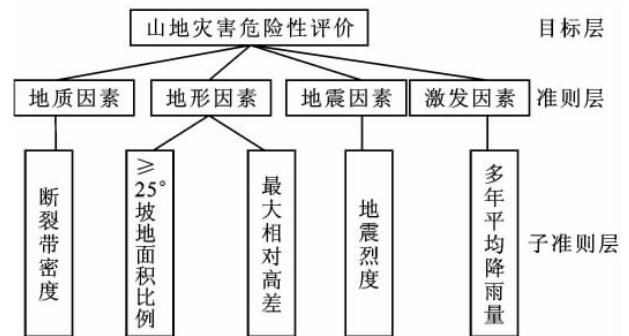


图1 山地灾害区域危险性评价 AHP 决策分析层次结构

(1) 地质因素(A₁)。地质构造情况直接决定了研究区域的山体的稳定性和岩石风化破碎程度,从根本上影响山地灾害的形成和发展,本研究采用断层密度指标表示(x₁)该因素。

(2) 地形因素(A₂)。地形因素为山地灾害的运动提供动力条件,采用陡坡面积比例(x₂)和区域最大

高差(x_3)2 个指标反映该因素,其中陡坡面积比例定义为坡度 $\geq 25^\circ$ 的坡地面积比例。

(3) 地震因素(A_3)。汶川大地震破坏了山体的稳定性,并且产生了大量的新增松散固体物质,为震后滑坡、泥石流等次生山地灾害的发生埋下了严重的隐患。本研究用地表烈度(x_4 ,取各评价单元平均烈度)表示。

(4) 激发因素(A_4)。由于本研究区山地灾害主要的诱发因素是降雨,采用多年平均降雨量(x_5)来表示。上述指标可以从相应的地形图、地质图、地震烈度分布图以及地方志等资料上获取。

2.2 构造判断矩阵

评价指标在整个指标体系中的作用主要体现在其权重上,因子的权重可通过判断矩阵来确定。判别矩阵的构造是 AHP 决策分析的一个关键步骤,它通过比较同一层次各个因素间相互的重要性,将这种不完全确定的相对重要性确定性地量化。在评价过程中,相对于上一层中某一准则,每层中各元素所占比重不一定相同。为得到各因素的相对重要性,一般做法是将统计得到的与各因素相关的原始数据标准化处理后提供给专家,专家根据层次结构中上下层次指标间的隶属关系及其个人专业知识,对同一层次的指标两两比较其重要性,比较结果以数字 1—9 表示,从而量化这种相对重要性的关系(表 1)。

表 1 标度值含义

标度值	标度值的含义
1	两个因素相比,具有同样重要性
3	两个因素相比,前者比后者稍重要
5	两个因素相比,前者比后者明显重要
7	两个因素相比,前者比后者显著重要
9	两个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值

构造山地灾害危险性的判断矩阵形式如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \cdots & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 中任一元素 a_{ij} 表示在指标 A 下,子指标 A_i 相对于 A_j 的重要程度。针对山地灾害风险评价的层次结构,本研究需要构建 2 个判断矩阵:山地灾害危险性评价综合判断矩阵 A ,下一级地形影响因素评价判断矩阵 A_2 。在山地灾害危险性综合判断矩阵中,地质因素直接决定着山地灾害的区域分布,地形因素为山地灾害发生提供动力条件,因此,

这 2 个因素是灾害形成的前提条件,也最为重要;汶川大地震使得研究区内岩层破碎度增加,并且产生了巨量新增松散物质,重要性次之;激发因素为山地灾害起动的必要条件,重要性又略微次之。而在地形影响因素的评价判别矩阵中, $> 25^\circ$ 坡地面积体现了研究区域的整体地形起伏状况,比最大相对高差更能说明问题。因此构建矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3 评价指标层次单排序

层次单排序是为了确定该层次内与之有联系的各个元素重要性次序的权重值,也是该层次所有元素对上一层某元素而言的重要性排序的基础。以本文中的山地灾害危险性评价因子为例,地质因素、地形因素、地震因素和激发因素为第 1 层次,断裂带密度、 $> 25^\circ$ 坡地面积、最大相对高差、地震烈度和多年平均降雨量为第 2 层次,其中 $> 25^\circ$ 坡地面积和最大相对高差同属地形因素的下一个层次。计算评价指标层次单排序的基本步骤为:

- (1) 计算判断矩阵的最大特征值(λ_{\max}),矩阵 A 和 A_2 的最大特征值分别为 4.0104 和 2.0。
- (2) 解出该特征值对应的特征向量(W),矩阵 A 和 A_2 最大特征值对应的特征向量分别为 $[-0.647\ 3, -0.647\ 3, -0.348\ 7, 0.201\ 3]^T$ 和 $[0.8994, 0.4422]^T$ 。
- (3) 对 W 归一化,其分量 W_i 即为对应元素在该层次的权重值,归一化后的 W 见表 2。

表 2 山地灾害区域危险性评价指标判断矩阵的单排序权值及一致性比例

判断矩阵	层次单排序权值				一致性比例
	W_1	W_2	W_3	W_4	
A	0.350 9	0.350 9	0.176 5	0.117 6	0.003 9
A_2	0.666 7	0.333 3	—	—	0

由于客观事物的复杂性和主观人为判断的随意性和片面性,得出的判断矩阵不具有完全的一致性,因素多,规模大的问题更是如此。为了保证分析结果的合理性,需通过对判断矩阵进行一致性检验。首先需要计算判断矩阵的一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

其中 n 为判断矩阵阶数,当判断矩阵具有完全一致性时, $\lambda_{\max} = n$ 。CI=0。CI 越大,则判断矩阵的一

致性就越差。为了检验判断矩阵是否具有令人满意的一致性,需要将 CI 与平均随机一致性指标 RI(表 3)相比较。一般而言,1 或 2 阶判断矩阵总是具有完全一致性。对于 2 阶以上的判断矩阵,其一致性指标 CI 与同阶的平均随机一致性指标 RI 之比,称为判断矩阵的随机一致性比例,记为 CR。一般地,当 $CR < 0.10$ 时,认为判断矩阵具有令人满意的一致性,否则需要对判断矩阵进行调整,直到满足条件为止。

表 3 平均随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2.4 评价指标层次总排序

利用同一层次中所有层次单排序结果计算针对高一层中该层次所有元素的重要性权重值,这就成为层次总排序。层次总排序需要从上到下逐次进行,对于最高层,其层次单排序也就是总排序。在山地灾害危险性判断矩阵 A 中,地质因素、地形因素、地震因素、激发因素是最高层,它们的权重值就是由矩阵 A 计算出的特征向量均一化后的分量。而地形因素下属的 $\geq 25^\circ$ 坡地面积和最大相对高差是第 2 层,其权重为在地形因素权重的基础上按照地形因素评价判断矩阵 A_2 计算出的该层次权重值进行分配。

虽然各层次已通过层次单排序一致性检验,但综合起来时各层次的非一致性有可能积累起来,最终导致严重的非一致性,因此有必要对层次总排序作一致性检验。因为本文中采用的评价指标层次模型结构较为简单,山地灾害危险性判断矩阵 A 一致性比例符合条件,地形因素评价判断矩阵 A_2 一致性比例为 0,所以不需另行对层次总排序一致性进行检验。

2.5 山地灾害危险性评价模型

根据构建的判断矩阵计算出第 1 层次和第 2 层次权重向量和一致性比例,检验计算结果符合整体一致性比例要求。最后确定各因子权重如下:断裂带密度因子的权重为 0.350 9, $\geq 25^\circ$ 坡地面积因子的权重为 0.233 9,区域最大高差因子的权重为 0.117 0,地震烈度因子的权重为 0.176 5,年平均降雨量因子的权重为 0.117 6。基于 AHP 决策分析的山地灾害危险性评价模型为:

$$H_{\text{区}} = 0.3509x_1 + 0.2339x_2 + 0.1170x_3 + 0.1765x_4 + 0.1176x_5$$

山地灾害危险性评价各指标的原始值见表 4,通过各指标初始值取对数并经过归一化处理,带入山地灾害危险性评价模型,得出四川省汶川地震灾区 44 县(市)山地灾害危险性的评价结果见表 4。

3 山地灾害易损性评价

3.1 山地灾害易损性评价指标

山地灾害的易损性是其威胁对象即承灾体的属性。根据承灾体的特点,同样采用 AHP 决策分析法来确定各指标的权重。选择人口因素、社会经济因素为第 1 层次,其中人均 GDP 和人均全社会固定资产投资同属于社会经济因素的下一个层次。因此,易损性评价模型指标体系的结构层次如图 2 所示。各影响因素具体指标情况分述如下:(1) 山地灾害最大的危害对象是当地居民的人身安全,因而也是易损性最重要的组成部分,因此,人口因素采用人口密度指标(y_1 , 或根据实际调查采用平均每个灾害点威胁人数)来反映山地灾害对人口的威胁情况;(2) 社会经济因素,包括当前社会发展现状和未来的趋势,可以采用人均 GDP(y_2)和人均全社会固定资产投资(y_3)2 个指标来表示。上述 3 个指标均可以从统计年鉴上获取。



图 2 山地灾害区域易损性评价 AHP 决策分析层次结构

在构建山地灾害易损性评价判断矩阵时,考虑到当地居民的人身安全是山地灾害最重要威胁对象,其人口密度指标的重要性高于其它任何单项指标,将其重要性与其它所有社会经济因素总和的重要性设为相同标度值。而在构建社会经济因素矩阵时,赋予人均 GDP 和人均全社会固定资产投资同等的重要性。因此,分别建立判断矩阵 B 和 B_2 ,其计算结果及整体一致性验证见表 5。

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2 山地灾害易损性评价模型

经检验计算结果符合整体一致性比例要求,确定山地灾害区域易损性评价各指标的权重如下:人口密度(y_1)指标的权重为 0.50,人均 GDP(y_2)指标的权重为 0.25,人均全社会固定资产投资(y_3)指标的权重为 0.25。从而确定易损性评价模型为:

$$V_{\text{区}} = 0.50y_1 + 0.25y_2 + 0.25y_3$$

山地灾害易损性评价各指标的原始值见表 4,通过各指标初始值取对数并经过归一化处理,带入山地灾害的易损性评价模型,得出四川省汶川地震灾区 44 县(市)山地灾害的易损性评价结果(见表 4)。

表 4 四川省汶川地震灾区震后山地灾害风险评价指标原始值及评价结果

编号	州(市)名称	县(市)名称	灾害点密度(个/100 km ²)	断层密度 [km/(1000 km ²)]	地震烈度	最大高差/m	≥25°坡地面积比例/%	多年平均降雨量/mm	人均GDP/元	人均固定资产投资/元	总人口/10 ⁴ 人	危险值	易损值	风险值
1	阿坝州	汶川县	10.29	185.8	9.10	5 470	58.5	528.7	12 757	8 774	10.4	0.74	0.36	0.27
2	阿坝州	金川县	5.87	15.0	6.00	3 053	34.9	616.2	5 337	6 499	7.2	0.40	0.14	0.05
3	阿坝州	黑水县	4.21	21.2	6.40	3 496	38.9	620.2	7 381	26 637	6.0	0.46	0.33	0.15
4	阿坝州	理县	8.45	37.1	7.40	4 500	57.9	632.9	8 290	20 543	4.6	0.59	0.29	0.17
5	阿坝州	茂县	9.03	138.9	8.45	4 340	49.0	490.7	6 239	11 781	10.9	0.66	0.29	0.19
6	阿坝州	松潘县	1.45	31.8	7.35	4 506	24.3	720.0	7 661	6 474	7.3	0.50	0.14	0.07
7	阿坝州	小金县	3.31	10.9	6.67	3 500	44.5	617.2	5 490	6 884	8.0	0.44	0.10	0.04
8	甘孜州	康定县	1.04	138.9	6.67	6 166	36.6	804.0	22 072	33 554	10.9	0.62	0.44	0.27
9	甘孜州	泸定县	8.27	135.3	6.00	6 570	56.0	664.4	7 659	15 879	8.3	0.62	0.39	0.24
10	甘孜州	丹巴县	5.39	114.2	6.00	4 100	47.3	609.8	8 474	14 698	5.9	0.57	0.28	0.16
11	成都市	都江堰市	31.46	293.1	9.50	3 990	19.5	1 243.8	12 301	13 623	61.2	0.74	0.71	0.53
12	成都市	彭州市	14.58	89.2	8.22	4 329	17.7	1 225.7	12 998	6 196	80.0	0.62	0.66	0.41
13	成都市	崇州市	25.05	227.4	7.30	4 884	12.6	1 012.4	14 472	8 087	67.0	0.62	0.71	0.44
14	成都市	大邑县	10.17	218.0	7.20	4 889	12.5	1 098.2	15 172	11 304	51.7	0.62	0.70	0.43
15	成都市	邛崃市	13.37	36.1	7.00	1 571	2.4	1 117.3	15 003	8 385	65.6	0.44	0.69	0.31
16	绵阳市	北川县	17.18	73.5	9.50	4 229	40.9	1 399	6 735	12 151	15.4	0.72	0.38	0.27
17	绵阳市	平武县	4.02	64.2	8.13	4 988	40.2	866.5	7 741	5 994	18.6	0.63	0.27	0.17
18	绵阳市	安县	9.40	175.9	8.65	2 557	13.7	1 261.0	10 086	4 975	51.5	0.65	0.55	0.36
19	绵阳市	江油县	10.26	132.3	8.60	101	86.8	1 143.0	15 981	6 172	88.3	0.73	0.63	0.46
20	德阳市	旌阳区	1.54	12.4	7.10	307	0.3	893.4	29 225	1 466	65.7	0.15	0.90	0.14
21	德阳市	绵竹市	19.92	243.0	9.00	3 901	24.4	1 053.2	21 292	5 567	51.4	0.71	0.69	0.49
22	德阳市	什邡市	19.24	69.0	8.70	4 430	21.4	938.9	21 498	6 294	43.3	0.61	0.72	0.44
23	雅安市	雨城区	20.06	34.7	6.20	2 113	4.9	1 774.3	17 470	13 056	35.2	0.46	0.72	0.33
24	雅安市	汉源县	9.97	48.4	6.60	3 966	26.2	741.8	7 834	19 887	32.1	0.50	0.55	0.27
25	雅安市	宝兴县	4.23	216.7	7.10	4 578	46.9	953.0	19 939	16 896	5.8	0.69	0.46	0.32
26	雅安市	芦山县	10.12	216.1	7.00	4 644	28.0	1 311	12 267	6 213	11.9	0.67	0.45	0.30
27	雅安市	石棉县	3.73	110.7	6.00	5 013	45.4	801.3	21 819	33 070	12.1	0.59	0.63	0.37
28	雅安市	天全县	3.54	212.5	6.15	4 550	37.5	1 660	15 188	8 344	15.2	0.68	0.12	0.08
29	雅安市	荥经县	4.66	241.4	6.00	2 966	16.7	1 233	17 395	6 929	15.0	0.59	0.10	0.06
30	眉山市	丹棱县	11.36	52.7	6.00	692	0.1	1 200.8	13 233	8 335	16.4	0.41	0.64	0.27
31	眉山市	洪雅县	4.06	123.9	6.18	2 673	10.5	1 435.5	13 358	7 152	34.4	0.54	0.55	0.30
32	广安市	华蓥市	31.12	288.6	6.00	1 497	2.8	1 282.2	18 354	8 502	35.7	0.54	0.77	0.42
33	广元市	广元市	13.03	163.0	7.55	1 463	4.6	1 080.0	11 192	8 250	68.6	0.56	0.56	0.32
34	广元市	青川县	15.08	197.6	8.75	3 345	16.2	1 027.2	5 324	5 658	24.6	0.66	0.31	0.20
35	广元市	剑阁县	4.15	6.2	7.10	962	0.5	1 085.0	6 539	3 336	68.4	0.32	0.39	0.13
36	广元市	苍溪县	10.56	1.0	7.00	1 017	1.8	1 050.0	6 859	4 372	78.8	0.20	0.48	0.10
37	广元市	旺苍县	13.37	44.1	7.00	1 946	12.6	1 209.0	8 771	4 047	46.0	0.50	0.42	0.21
38	乐山市	金口河区	9.70	51.8	6.00	2 791	44.1	1 246.0	27 908	9 040	5.3	0.52	0.61	0.32
39	达州市	万源市	6.91	95.3	6.00	2 030	14.0	1 246.0	11 073	6 498	60.0	0.51	0.50	0.25
40	达州市	宣汉县	0.91	41.1	6.00	1 678	7.3	1 230.0	8 884	8 304	126.4	0.44	0.56	0.25
41	达州市	达县	1.97	172.6	6.00	1 309	0.6	1 185.2	10 231	5 380	133.2	0.45	0.59	0.27
42	巴中市	巴州区	3.59	1.0	6.20	1 159	0.8	1 119.0	7 376	2 522	135.4	0.18	0.48	0.08
43	巴中市	南江县	16.61	45.3	6.60	2 137	9.2	1 200.0	6 847	3 756	67.1	0.48	0.40	0.19
44	巴中市	通江县	3.47	9.0	6.10	1 874	8.5	1 399.2	6 430	3 323	75.3	0.36	0.37	0.14

注：① 断裂带密度来源于 1：20 万地质图；≥25°坡地面积比例来源于 1：25 万 DEM；② 表中社会经济数据来源于文献[19]，年平均降雨量和相对高差来源于地方志；③ 危险值和易损值的分级标准是 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0；风险值的分级标准是 0.0, 0.04, 0.16, 0.64, 1.0；④ 表中灾害点密度包括崩塌、滑坡和泥石流等 3 类灾害，其统计值来源于国土资源部 2008 年 6 月震后各县的地质灾害排查报告，并根据文献[20]对阿坝州相关县的泥石流数量进行了修正。

4 山地灾害综合风险评估

通过采用 AHP 决策分析方法确定了评价指标的权重后,分别得到了危险性和易损性的评价模型,进而可以对山地灾害风险进行量化评估。根据联合国人道主义事务部 1991 年公布的自然灾害风险的定义及其数学表达式,山地灾害区域风险评价可以表示为:

$$R_{\text{区}} = H_{\text{区}} \times V_{\text{区}}$$

式中: $R_{\text{区}}$ ——山地灾害的区域风险值(0~1); $H_{\text{区}}$ ——山地灾害的区域危险值(0~1); $V_{\text{区}}$ ——山地灾害的区域易损值(0~1)。山地灾害区域风险数值及其分级是由危险性和易损性的数值和分级决定的,一旦危险性和易损性的分级确定下来,风险分级也就相应地确定下来了。采用常用的五分法,山地灾害的区域危险性和易损性在 0~1 范围内等分为 0~0.2(极低),0.2~0.4(低度),0.4~0.6(中度),0.6~0.8(高度),0.8~1(极高)等 5 个区间。由此,可以得到山地灾害风险的 5 个等级: $0.00 < R_{\text{区}} < 0.04$ (极低风险), $0.04 < R_{\text{区}} < 0.16$ (低度风险), $0.16 < R_{\text{区}} < 0.36$ (中等风险), $0.36 < R_{\text{区}} < 0.64$ (高度风险), $0.64 < R_{\text{区}} < 1.00$ (极高风险)。研究区山地灾害危险性、易损性和风险评价结果见表 4,其对应的分区结果见附图 3—5。

5 评价结果分析及验证

通过对汶川地震灾区(四川境内)44 个县(市)山地灾害的危险性、易损性和风险性的评价结果统计分析(表 4),可以看出三者的分布具有如下特点(如图 3 所示)。

(1) 震后灾区山地灾害的危险性主要分布于中度危险和高度危险 2 个等级。44 个县(市)中处于高度危险区的有 18 个(占总面积的 39.8%),处于中度危险区的有 21 个(占总面积的 50.3%),处于低度危险区的有 3 个(占总面积的 7.4%),处于极低危险区的有 2 个(占总面积的 2.5%)。

(2) 震后灾区山地灾害的易损性主要分布于低度易损、中度易损和高度易损 3 个等级。44 个县(市)中处于极高易损区的有 1 个(占总面积的 0.5%),处于高度易损区的有 13 个(占总面积的 12.6%),处于中度易损区的有 14 个(占总面积的 36.0%),处于低度易损区的有 11 个(占总面积的 32.8%),处于极低易损的有 5 个(占总面积的 18.1%)。

(3) 震后灾区山地灾害的风险主要分布于低度风险、中度风险和高度风险 3 个等级。44 个县(市)中

处于高度风险区的有 10 个(占总面积的 11.0%),处于中度风险区的有 23 个(占总面积的 57.9%),处于低度风险区的有 11 个(占总面积的 31.1%)。

表 5 山地灾害区域易损性评价指标判断矩阵的单排序权值及一致性比例

判断矩阵	层次单排序权值		一致性比例
	W_1	W_2	
B	0.5	0.5	0
B_2	0.5	0.5	0

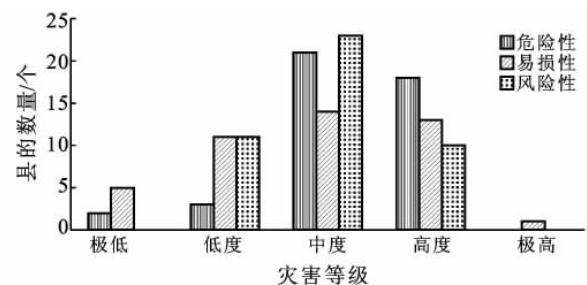


图 3 汶川震区 44 县(市)山地灾害危险性、易损性和风险性等级分布图

为对危险性的评价结果进行验证,本研究统计了震后山地灾害的危险性与灾害点分布密度之间的关系,点密度的统计情况见表 4。依据研究区山地灾害危险值的分布范围(0.18~0.75)按危险等级将其划分为 4 个区间(间距为 0.2),分别统计出各等级内山地灾害(包括滑坡、泥石流和崩塌 3 类)点密度(个/100 km²)的平均值,得出其随危险值变化的分布图(图 4)。

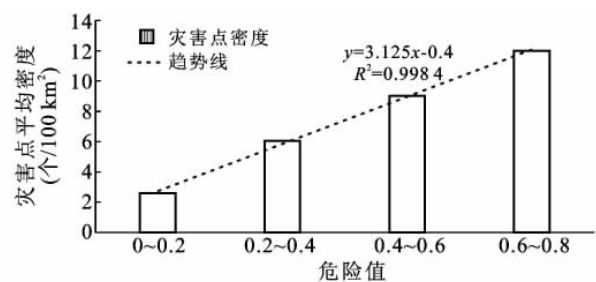


图 4 汶川震区山地灾害危险性与灾害点平均密度关系

从图 4 中可以看出,山地灾害分布的点密度随山地灾害危险性的升高呈现明显的增加趋势,并且两者之间符合线性函数分布关系($R^2 = 0.9984$)。由于山地灾害的分布密度是最能反映山地灾害危险性的直接指标,评价结果表明山地灾害的分布密度与危险性呈现明显的正相关,这与实际情况相符,也表明危险性评价结果具有合理性。需要指出的是,本研究在进行危险性和易损性评价的过程中原始数据经过归一

化处理,因此,评价结果在研究区范围内具有相对意义,若与其它地区进行比较,应将其它地区与本研究区置于同一评价范围内。

6 结论

经过对四川境内汶川地震灾区山地灾害危险性、易损性和风险评价及其结果的验证,可以得出如下的结论。

(1) 山地灾害高度危险区沿龙门山呈现明显的带状分布特点,与龙门山断裂的走向一致,主要集中于研究区内的青川、江油、北川、安县、绵竹、什邡、彭州、都江堰、汶川、崇州、大邑、宝兴、芦山、天全以及康定和泸定等县(市)。该区域地处龙门山腹地,地表破裂主要沿此方向延伸,并且雨量充沛,未来山地灾害将长期处于活跃状态。而沿龙门山后山断裂的地区大都属于中度危险地区,汶川地震对该区域造成了一定的影响,在一定条件下也容易发生山地灾害,是需要关注的地区。而其余地处低度危险区山地灾害的危险性相对较小。

(2) 山地灾害高度易损性的地区主要集中于社会经济发展较好的成都、绵阳、德阳等大城市周边地区的县(市),其中以德阳市旌阳区最高(属于极高易损)。此外,广安市的华蓥市,乐山市的金口河区以及雅安市的雨城区和石棉县也属于高度易损地区。高度易损表明该地区一旦遭受山地灾害,其损失将比较严重。

(3) 山地灾害高度风险区集中于龙门山向山前平原过渡地带的江油、安县、绵竹、什邡、彭州、都江堰、崇州和大邑等县(市),还包括雅安地区的石棉和广安的华蓥市。这是由于此过渡区山地灾害危险等级高;同时该地区一部分属山区,一部分则位于平原地带,社会经济较为发达。因此,高度危险性与高度易损性的结合必然产生高度风险。此外,由于龙门山地区是山地灾害较集中的地区,随着灾区恢复重建的推进以及未来社会经济发展,中度风险区的易损性也将上升,其风险很容易向高度转化。所以从长远来看,也要给予重视。

[参 考 文 献]

- [1] 崔鹏,韦方强,何思明,等. 5·12汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报,2008,26(3):280-282.
- [2] Yin Y, Wang F, Sun P. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. Landslides, 2009(6):139-151.
- [3] 谢洪,钟敦伦,矫震,等. 2008年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报,2009,27(4):501-509.
- [4] 黄润秋,李为乐. 汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J]. 地质灾害与环境保护,2009,20(3):1-7.
- [5] Tang C, Zhu J, Li W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake [J]. Bull. Eng. Geol. Environ., 2009,68:187-194.
- [6] 田连权. 四川炉霍地震泥石流:泥石流(三) [M]. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1986:58-66.
- [7] 朱平一,罗德富,寇玉贞. 西藏古乡沟泥石流发展趋势[J]. 山地研究,1997,15(4):296-299.
- [8] Lin C W, Shieh C L, Yuan B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: Example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan[J]. Engineering Geology, 2003,71:49-61.
- [9] 崔鹏,柳素清,唐邦兴,等. 风景名胜区泥石流研究与防治[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [10] Chen H, Hawkins A B. Relationship between earthquake disturbance, tropical rainstorms and debris movement: An overview from Taiwan[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68: 161-186.
- [11] 唐川,丁军,梁京涛. 汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J]. 工程地质学报,2010,18(1):1-7.
- [12] 丁继新,杨志法,尚彦军. 区域泥石流灾害的定量风险分析[J]. 岩土力学,2006,27(7):1071-1076.
- [13] 樊晓一,乔建平,陈永波. 层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J]. 自然灾害学报,2004,13(1):73-77.
- [14] 刘希林. 区域泥石流风险评价研究[J]. 自然灾害学报,2000,9(1):54-60.
- [15] 许强,陈伟. 单体危岩崩塌灾害风险评价方法:以四川省丹巴县危岩崩塌体为例[J]. 地质通报,2009,28(8):1039-1046.
- [16] 张春山,李国俊,张业成,等. 黄河上游地区崩塌滑坡泥石流地质灾害风险评价[J]. 地质力学学报,2006,12(2):211-218.
- [17] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-HillCompany, 1980:48-52.
- [18] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002:84-86.
- [19] 四川省统计局,国家统计局四川调查总队. 四川统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2009.
- [20] 唐邦兴,柳素清. 四川省阿坝藏族羌族自治州泥石流及其防治研究[M]. 成都:成都科技大学出版社,1993.