

高山峡谷区地质灾害危险性评价

易靖松, 王 峰, 程英建, 张 勇

Study on the risk assessment of geological disasters in alpine valley area: A case study in Aba County, Sichuan Province

YI Jingsong, WANG Feng, CHENG Yingjian, and ZHANG Yong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

安徽黄山市徽州区地质灾害危险性评价研究

Study on risk assessment of geological hazards in Huizhou District, Huangshan City, Anhui Province

刘乐, 杨智, 孙健, 刘钦, 彭鹏, 段俊斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 110-116

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价

Risk assessment of high-level collapse and landslide disasters in typical basin-edge mountainous areas in northeast Chongqing: A case study of the Ningqiao area in Wuxi

谭真艳, 罗晓龙, 陈怡, 周灏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 70-78

基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China

周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

渤海海域海底地质灾害危险性区划

Risk zonation on the submarine geological hazards in Bohai Sea

宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 刘晓瑜, 王振豪, 曹成林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 140-146

基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价

Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP

郭学飞, 王志一, 焦润成, 曹颖 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 70-76



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-15

易靖松, 王峰, 程英建, 等. 高山峡谷区地质灾害危险性评价——以四川省阿坝县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 134-142.

YI Jingsong, WANG Feng, CHENG Yingjian, *et al.* Study on the risk assessment of geological disasters in alpine valley area: A case study in Aba County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 134-142.

高山峡谷区地质灾害危险性评价 ——以四川省阿坝县为例

易靖松¹, 王 峰², 程英建¹, 张 勇¹

(1. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心/中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;

2. 四川省地矿局成都水文地质工程地质中心/四川省华地建设工程有限责任公司,

四川 成都 610036)

摘要: 针对崩塌、滑坡和泥石流等灾种齐全的高山峡谷区, 选取四川省阿坝县为研究区, 采用多灾种耦合的评价思路, 开展地质灾害危险性精细化评价。崩塌、滑坡等斜坡类灾害危险性评价以栅格为评价单元, 泥石流灾害危险性评价以流域为评价单元。基于信息量模型和层次分析法, 分别开展危险性评价, 进而采用取大值的方法, 获取研究区综合地质灾害危险性评价结果。研究表明, 工作区综合地质灾害极高危险区、高危险区面积明显大于单灾种评价结果, 极高危险区、高危险区主要位于崩塌、滑坡较发育的碎裂岩区域和极度易发的泥石流流域。针对高山峡谷区地质灾害危险性评价, 多灾种耦合的评价思路能更合理的反映不同类型灾害在形态及空间上的差异, 获取更精确的危险性评价结果。

关键词: 信息量模型; 流域单元; 多灾种耦合; 层次分析法

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)03-0134-09

Study on the risk assessment of geological disasters in alpine valley area: A case study in Aba County, Sichuan Province

YI Jingsong¹, WANG Feng², CHENG Yingjian¹, ZHANG Yong¹

(1. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS/Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, Sichuan 611734, China; 2. Chengdu Hydrogeology and Engineering Geology Center of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources/Sichuan Huadi Construction Engineering Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610036, China)

Abstract: The geological hazard assessment was carried out by the evaluation train thought the study area of multiple disaster species coupling, which has a complete range of disasters such as collapse, landslide and debris flow. The evaluate unit of collapse, landslide and other slopes are grids and the debris flow disasters evaluate units are watershed. Based on the information model and analytic hierarchy process, the risk assessment is carried out respectively, then, the comprehensive geological disaster risk evaluation results of the study area were obtained by taking the method of large value. In the study area, the area of extremely high and high risk area of comprehensive geological disaster is obviously larger than that of the evaluation results of single hazard. The extremely high and high risk area is mainly located in the cataclastic rock area with relatively

收稿日期: 2022-02-08; 修订日期: 2022-04-21

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190643)

第一作者: 易靖松(1990-), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事地质灾害调查、勘查、设计与防治技术研究等方面的工作。

E-mail: 991591136@qq.com

developed collapse and landslide and extremely prone debris flow basin. In view of the risk assessment of geological disasters in high mountains and valleys, the idea of dividing first and combining later can more reasonably reflect the morphological and spatial differences of different disaster types in the process of risk assessment, and obtain more accurate risk assessment results.

Keywords: information model; watershed unit; multiple disaster species coupling; analytic hierarchy process

0 引言

随着城镇区域经济的发展,人类工程活动日益加剧,诱发了大量滑坡、崩塌等地质灾害,这些地质灾害对人类生产活动、区域经济发展和生态环境都产生了极为重要的影响。为解决城镇开发建设带来的次生地质灾害问题,众多学者开展了不同尺度单元的地质灾害危险性评价研究,以期为城镇的规划建设,提供参考依据。目前地质灾害危险性评价方法众多,多数学者基于统计模型类方法(信息量模型、逻辑回归模型、证据权模型等)对地质灾害危险性评价开展了大量研究工作^[1-4]。曾林峰等^[5]采用加权信息量模型结合层次分析法对湖北省恩施市进行研究,评价结果较为可靠,但层次分析法还是有一定的主观性,需要对研究区域成灾机理等问题进行深入研究;张春山等^[6]在黄河上游区域地质灾害风险评价过程中研究了要素权值计算方法及应用;牛瑞卿等^[7]采用支持向量机模型,对九龙县进行研究,评价结果与实际调查成果相符合;叶潇潇等^[8]、陈亮胜等^[9]、牛全福等^[10]使用组合赋权法、非饱和渗流理论及灰色关联分析法等方法模型,半定量地开展了滑坡、泥石流等地质灾害危险性评价工作,并得到了很好的结果。

通过查阅区域地质灾害危险性评价的诸多文献,多数学者在基于统计模型的基础上,利用 ArcGIS 平台,开展地质灾害危险性评价过程中,将不同类型的地质灾害统一作为已知点,代入统计模型进行计算预测^[11-12]。然而,高山峡谷区发育地质灾害类型通常包括了崩塌、滑坡和泥石流等灾种,不同类型的地质灾害在形成机理及破坏模式上存在较大的差异,崩塌、滑坡等斜坡类地质灾害和泥石流地质灾害在形态、控制影响因素、危险性特征等方面具有截然不同的特点。一般前者面积相对较小,主要受斜坡局部地质环境的影响,地形、地层岩性等要素的空间变化相对稳定,在危险性评价时可用面积较小的方形规则格网单元对地质环境要素进行模拟、概化。泥石流的发生受流域综合地形、物源、水动力条件的共同影响,流域面积相对较大,流域内地形、物源乃至水动力条件在空间上具有较显著的变化性。不分灾种直接代入统计模型计算的评价方式存在着一定的疏漏。

基于以上认识,提出“多灾种耦合”的评价思路,选取典型高山峡谷区县域,对不同类型的灾种选取针对性的评价因子,先分别评价其危险性,得到不同灾种的危险性评价结果,再通过取大值的方式将不同灾种的危险性评价结果进行叠加,得到地质灾害综合危险性评价结果。

1 评价思路及方法

1.1 评价思路

据前期资料收集,选取位于青藏高原峡谷区的四川阿坝县作为研究区。基于 2021 年开展的四川省阿坝县地质灾害风险评价调查项目,查明研究区内 2021 年有地质灾害隐患点 175 个,其中,泥石流灾害有 87 处,崩塌灾害 11 处,滑坡灾害 77 处,地质灾害分布情况如图 1。由图可以看出,阿坝县地质灾害主要沿人类工程活动密集的区域分布,在部分高海拔区域,虽然降雨量大,但由于受人类工程活动影响较小,灾害数量的分布也较少。

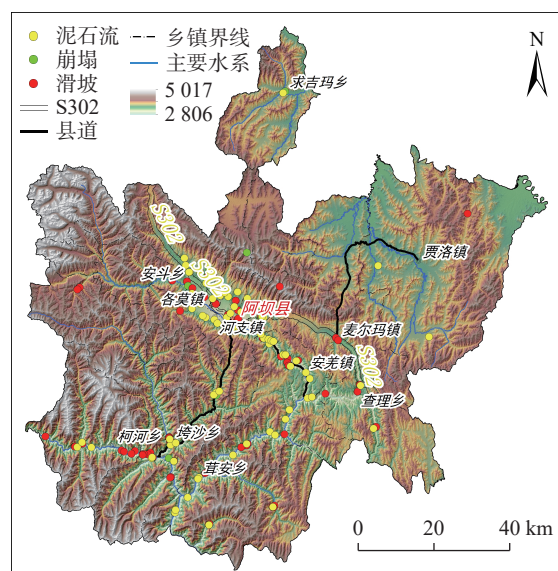


图 1 研究区地质灾害分布图

Fig. 1 The geological hazard distribution map of the study area

针对研究区地质灾害灾种类型特点,采用“多灾种耦合”的思路(图2),将崩塌、滑坡等斜坡灾害和泥石流灾害分开评价,崩塌、滑坡等斜坡灾害采用点信息量值

建立模型, 泥石流灾害采用面域信息量值建立模型, 分别得到斜坡灾害的危险性评价图和泥石流灾害的危险性评价图, 最后再将两张图的危险值取大值叠加, 得到研究区综合地质灾害危险性评价图。

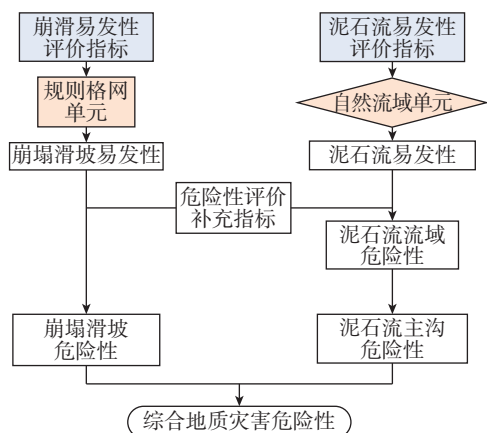


图 2 地质灾害危险性评价技术路线图

Fig. 2 Technical roadmap of geological hazard assessment

1.2 评价模型及方法

(1) 斜坡灾害信息量模型

地质灾害的形成受多种因素影响, 信息量模型反映了一定地质环境下最易致灾因素及其细分区间的组合; 具体是通过特定评价单元内某种因素作用下地质灾害发生频率与区域地质灾害发生频率相比较实现的。由于每个评价单元受多因素的综合影响, 各因素又存在若干状态, 各状态因素组合条件下地质灾害发生的总信息量可用式(1)确定:

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

式中: I ——对应特定单元地质灾害发生的总信息量, 指示地质灾害发生的可能性, 可作为地质灾害危险性指数;

N_i ——对应特定因素、第 i 状态(或区间)条件下的地质灾害面积或地质灾害点数;

N ——调查区地质灾害总面积或总地质灾害点数;

S_i ——对应特定因素、第 i 状态(或区间)的分布面积;

S ——调查区总面积。

(2) 泥石流灾害信息量模型

区域泥石流灾害危险性评价也是在对研究区域格网单元划分的基础上进行的。如果某区域内共划分成 N 个单元, 那么已经发生泥石流灾害的单元为 N_0 个。则具有相同因素 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 组合的单元共 M 个, 而在这些单元中发生泥石流灾害的单元数为 M_0 个。按照统计

概率代表先验概率原理, 采用面域信息量来计算各栅格单元的值, 面域信息量计算公式如式(2)。

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \log_2 \frac{S_0^i/S^i}{A_0/A} \quad (2)$$

式中: I ——评价区某单元信息量预测值;

S_0^i ——因素 x_i 单元中发生泥石流灾害的单元面积之和;

S^i ——因素 x_i 所占单元总面积;

A_0 ——已经发生泥石流灾害的单元面积之和;

A ——区域内单元总面积。

泥石流灾害信息量计算公式虽然与斜坡灾害信息量的公式相似, 但公式分子代表的含义却不相同。泥石流灾害信息量值采用面积占比的方法来求取, 能更好反应沟域内物源的的真实情况, 对灾害的危险程度评价更为准确。

2 崩塌、滑坡危险性评价

2.1 评价指标体系

崩塌、滑坡的发生主要受斜坡局部地质环境的影响, 地形、地层岩性等要素的空间变化相对稳定, 结合崩塌、滑坡灾害发育分布规律、主控因素以及野外调查结果分析, 初步确定采用坡度、高程、工程地质岩组、斜坡结构、距断层距离、距水系距离、距道路距离等 7 个指标作为斜坡类灾害易发性评价指标, 充分反映地形、岩性、构造及人类工程活动对斜坡类灾害的影响, 采用栅格作为评价单元, 将各评价因子量化(图 3), 将汛期月平均降雨量(B8)和地震峰值加速度(B9)作为诱发因素, 进行叠加开展危险性评价。

2.2 评价指标信息量

根据 2021 年调查数据, 共采用了 88 处斜坡类地质灾害进行分析, 其中滑坡 77 处, 崩塌 11 处。通过上述信息量模型, 将各因子图层分级后, 计算各因子的分级面积及区域内分布的斜坡类灾害点数量, 然后将各数据代入式(1), 得到各因子分级的信息值(表 1), 利用软件重分类功能, 将各因子图层赋值, 形成下一步危险性叠加的基础数据。

2.3 评价指标权重

(1) 构建判断矩阵

通过层次分析法确定各个易发性评价因子的权重, 对各个评价因子通过专家打分法来判断各个指标的相对重要性, 构造判断矩阵, 利用层次分析法确定 7 个因子的权重(表 2)。

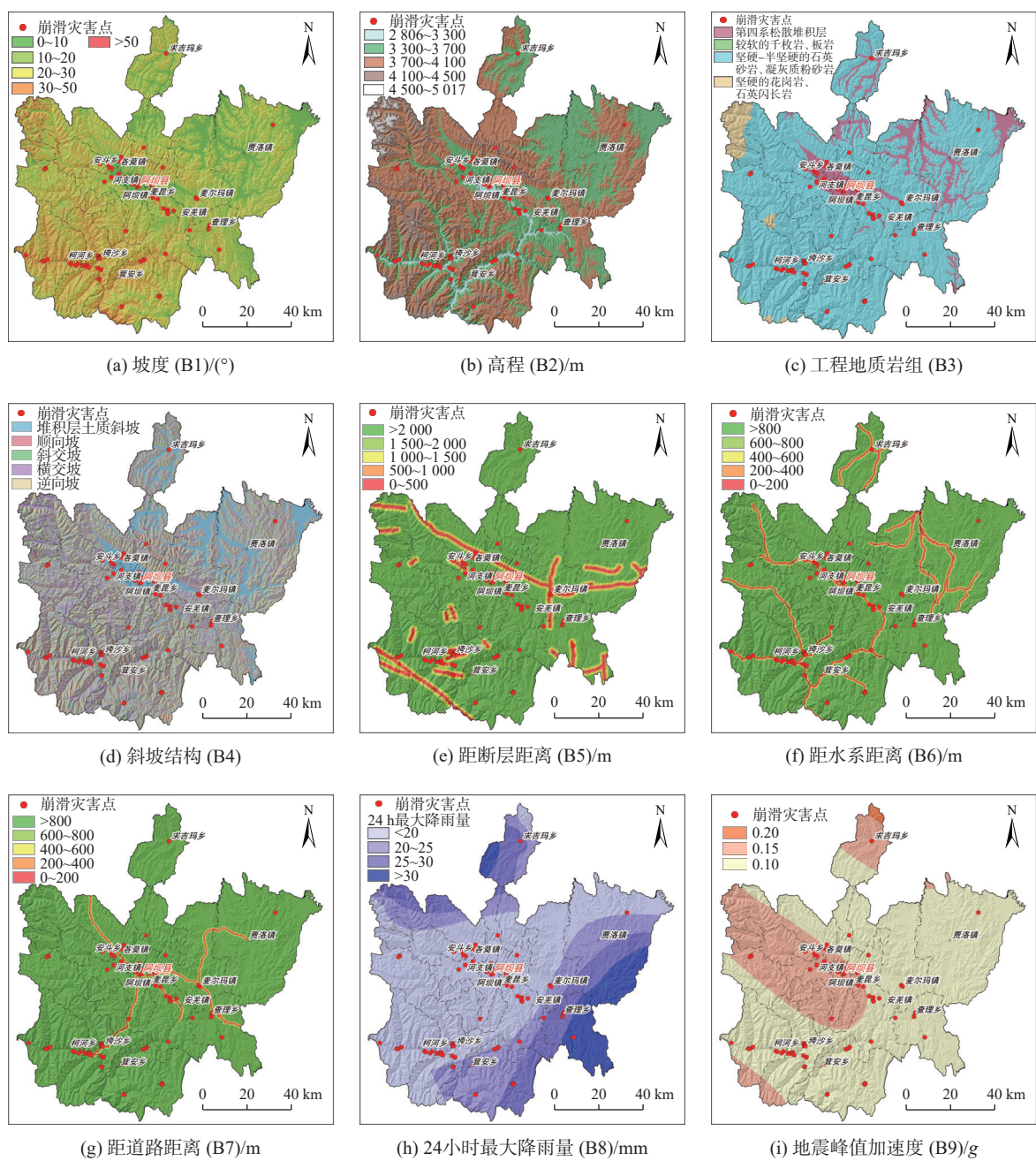


图 3 滑坡、崩塌危险性评价因子图

Fig. 3 Diagram of risk assessment factors of landslide and collapse

(2)判断矩阵一致性检验

计算出其归一化处理后的特征向量为 $W_1=[0.413, 0.045, 0.576, 0.329, 0.105, 0.073, 0.259]$, 最大实数特征根为 7.233 7。

查表可知 7 阶矩阵的平均随机一致性指标为 1.32, 因此 $CR=[(7.233\ 7-7)/7]/1.32=0.025<0.1$, 满足一致性检验, 判断矩阵具有很好的判断一致性。

按照上述层次分析法求出坡度、高程、工程地质岩组、斜坡结构类型、距水系距离、距道路距离等 7 个指

标的权重值, 详见表 3。

2.4 崩塌、滑坡危险性评价结果

根据上述评价指标信息量值进行评价因子的加权计算, 再叠加汛期月平均降雨量, 形成研究区崩塌、滑坡危险性评价图(图 4)。

根据栅格计算结果, 将崩塌、滑坡危险性评价图划分为极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区, 结果表明, 极高危险区面积 23.68 km², 高危险区面积 362.12 km², 极高危险区、高危险区面积占全县总面积

表 1 崩塌、滑坡评价指标信息量表		
Table 1 The evaluation index information scale of collapse and landslide		
因子	区间	信息量
坡度/(°)	0 ~ 10	-2.269 7
	10 ~ 20	-1.242 9
	20 ~ 30	0.757 4
	30 ~ 50	0.421 3
	>50	0.081 2
高程/m	<3 300	2.667 3
	3 300 ~ 3 700	0.027 6
	3 700 ~ 4 100	-1.525 3
	4 100 ~ 4 500	-2.365 2
工程地质岩组	第四系松散堆积层	1.082 8
	较软的千枚岩、板岩	0.000 0
	坚硬-半坚硬的石英砂岩、凝灰质粉砂岩	-0.258 5
	坚硬的花岗岩、石英闪长岩	-0.889 5
斜坡结构类型	松散堆积层土质斜坡	1.082 9
	顺向坡	0.255 5
	斜交坡	-0.731 9
	横交坡	-0.241 7
	逆向坡	-0.674 5
距构造距离/m	0 ~ 500	1.692 1
	500 ~ 1 000	1.180 8
	1 000 ~ 1 500	0.965 5
	1 500 ~ 2000	0.705 2
	>2000	-0.529 6
距水系距离/m	0 ~ 200	2.462 0
	200 ~ 400	1.273 3
	400 ~ 600	1.035 2
	600 ~ 800	-0.725 2
距道路距离/m	0 ~ 200	2.540 7
	200 ~ 400	2.476 7
	400 ~ 600	2.270 0
	600 ~ 800	1.810 7
	>800	-0.436 5
24小时最大降雨量/mm	<20	-0.261 9
	20 ~ 25	-0.058 2
	25 ~ 30	0.193 7
	>30	0.227 1
地震峰值加速度/g	0.20	0.657 4
	0.15	0.181 6
	0.10	0.105 3

的 3.69%; 中危险区面积 6 918.8 km², 占全县总面积的 66.30%; 低危险区面积 3 130.5 km², 占全县总面积的 30.0%。

3 泥石流危险性评价

3.1 评价指标体系

泥石流的发生受流域综合地形、物源、水动力条件

表 2 构建 A-B 层判断矩阵								
Table 2 A-B layer judgment matrix								
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	权重W1
B1	1	1/2	3	3	1/5	3	5	0.413
B2	2	1	3	3	1/7	3	2	0.045
B3	1/3	1/3	1	1/3	1/7	1/2	3	0.576
B4	1/3	1/3	3	1	1/5	3	2	0.329
B5	5	7	7	5	1	5	1	0.105
B6	1/3	1/3	2	1/3	1/5	1	1	0.073
B7	1/5	1/2	1/3	1/2	1	1	1	0.259

表 3 崩塌、滑坡危易发性评价因子权重统计表							
Table 3 weight statistics table of risk assessment factors of collapse and landslide							
评价指标	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
权重	0.413	0.045	0.576	0.329	0.105	0.073	0.259

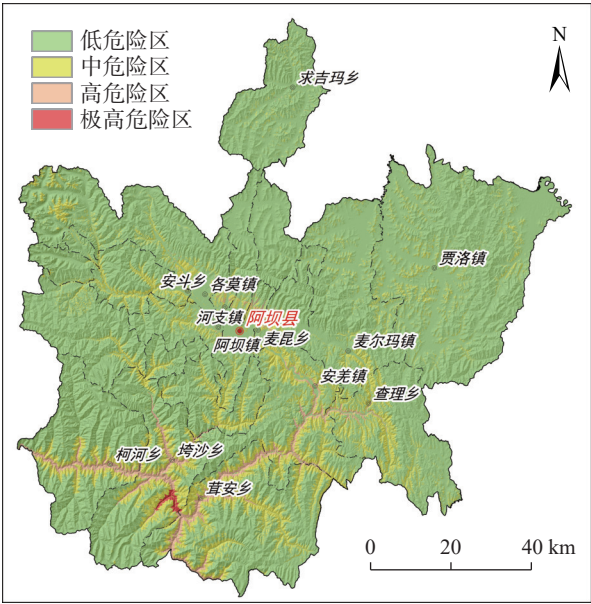


图 4 滑坡、崩塌危险性评价图

Fig. 4 The hazard assessment map of landslide and collapse

的共同影响。因此, 泥石流灾害的危险性评价采用流域为评价单元, 通过流域坡度、流域地形起伏度等因子表征地形; 流域崩滑密度、断层密度、流域工程地质岩组、植被覆盖率等因子反应物源的活跃程度; 流域水系密度、流域面积表征流域的水动力条件。确定采用流域面积、坡度、流域地形起伏度、工程地质岩组、崩塌滑坡灾害点密度、流域断层密度、流域水系密度、流域道路密度、植被覆盖率等 9 个指标作为泥石流易发性评价指标, 以流域为评价单元, 将流域月累积降雨量作为诱发因素(B10), 进行叠加开展泥石流灾害危险性评价。

3.2 评价指标信息量

基于 2021 年开展的四川省阿坝县地质灾害风险评价调查项目,查明研究区内 2021 年现有泥石流灾害有 87 处。通过上述信息量模型,将各因子图层分级后,计算各因子的分级面积及区域内分布的斜坡地灾点数量,然后将各数据代入式(2),得到各因子分级的信息值,利用软件重分类功能,将各因子图层赋值(表 4),形成下一步危险性叠加的基础数据(图 5)。

3.3 评价指标权重

按照上述层次分析法求出流域面积、流域坡度、流域地形起伏度、流域工程地质岩组、崩塌滑坡灾害点密度、流域断层密度、流域水系密度、流域道路密度、流域植被覆盖率等 9 个指标的权重值,详见表 5。

3.4 泥石流危险性评价结果

根据上述 9 个评价指标信息量值进行评价因子的加权计算,再叠加流域汛期月累积降雨量,形成研究区泥石流灾害危险性评价图(图 6)。

根据计算结果,将泥石流危险性评价图划分为极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区。结果表明,极高危险区面积 38.38 km², 占全县总面积的 0.37%; 高危险区面积 250.12 km², 占全县总面积的 2.39%; 中危险区面积 1 654.2 km², 占全县总面积的 15.85%; 低危险区面积 6 324.3 km², 占全县总面积的 60.61%。

4 地质灾害综合危险性评价

针对斜坡类地质灾害与泥石流类地质灾害截然不同的特点,前面分别对崩塌、滑坡灾害和泥石流灾害的危险性进行了分析评价,为了综合反映地质灾害危险性大小,将区内的崩塌、滑坡、泥石流危险性进行综合合成。

在获取滑坡、崩塌地质灾害危险性评价结果和泥石流灾害危险性评价结果后,将两者采用取大值的方法获取综合地质灾害危险性评价图(图 7),即同一个栅格单元的危险性值为泥石流灾害危险值和崩塌、滑坡灾害危险值的大值。计算公式如下:

综合地质灾害危险值=MAX [泥石流灾害危险值,崩塌灾害危险值,滑坡灾害危险值]

这里并不采用直接的叠加的原因是,直接叠加会导致处于泥石流极高危险栅格单元叠加斜坡灾害低危险栅格之后综合危险值位于中位值左右,在叠加之后采用自然间断法分级时,中位值附近的数值被分为中危险或高危险,这就与实际情况产生了偏离,因此,采用取大值叠加的方法求取综合危险性更合理。

表 4 泥石流灾害评价指标信息量统计表
Table 4 Statistical table of debris flow disaster assessment index information

因子	区间	信息量
流域面积/km ²	<2	2.774 5
	2 ~ 5	1.742 9
	5 ~ 10	0.896 4
	10 ~ 20	0.274 2
	>20	-1.467 2
坡度/(°)	0 ~ 10	-2.225 0
	10 ~ 20	0.173 0
	20 ~ 30	-0.407 1
	30 ~ 50	0.588 7
	>50	-1.347 0
流域地形起伏度/m	<600	1.287 1
	600 ~ 900	0.274 9
	900 ~ 1 200	-0.548 9
	1 200 ~ 1 500	-0.635 0
	>1 500	-2.293 2
工程地质岩组	一般土松散岩类(1)	0.419 0
	碳酸盐岩半坚硬-坚硬岩类(3)	-0.130 5
	碎屑岩半坚硬-坚硬岩类(4)	-0.044 0
流域断层密度/(km·km ⁻²)	0	-0.040 5
	0 ~ 0.1	-0.319 2
	0.1 ~ 0.2	-0.056 2
	0.2 ~ 0.4	1.163 8
	>0.4	3.045 1
流域滑坡、崩塌密度/(个·km ⁻²)	0	-0.277 1
	0 ~ 0.02	-0.864 0
	0.02 ~ 0.04	0.237 0
	0.04 ~ 0.08	0.873 1
	>0.08	1.336 5
水系密度/(km·km ⁻²)	0 ~ 0.1	1.627 7
	0.1 ~ 0.3	-1.161 0
	0.3 ~ 0.5	-0.910 5
	0.5 ~ 0.7	-0.293 8
	>0.7	0.138 0
道路密度/(km·km ⁻²)	0	1.653 9
	0 ~ 0.4	-0.331 2
	0.4 ~ 0.7	-0.713 4
	0.7 ~ 1.0	0.133 3
	>1.0	1.191 7
植被覆盖率/%	<30	0.174 8
	30 ~ 44	0.853 2
	44 ~ 48	-0.008 0
	48 ~ 52	-0.714 3
	>52	0.982 5
流域月累积降雨量/mm	<120	0.057 1
	120 ~ 150	0.089 3
	150 ~ 200	0.274 1
	>200	0.510 9

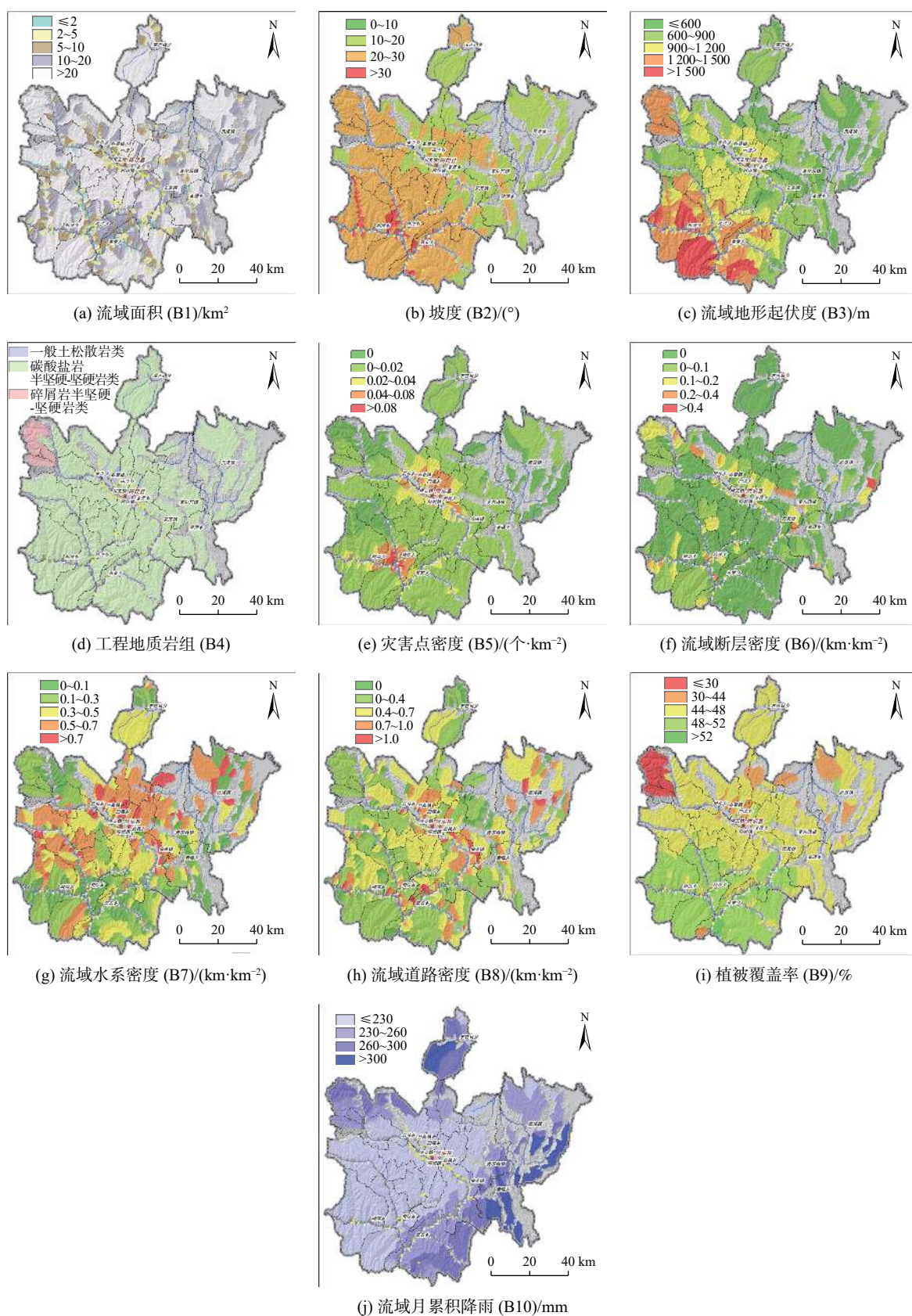


图 5 泥石流危险性评价指标因子图

Fig. 5 Risk assessment index factor of debris flow

表 5 泥石流易发性评价因子权重统计表

Table 5 The weight statistics table of debris flow evaluation factors

评价指标	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
权重	0.207	0.165	0.13	0.093	0.108	0.126	0.085	0.049	0.037

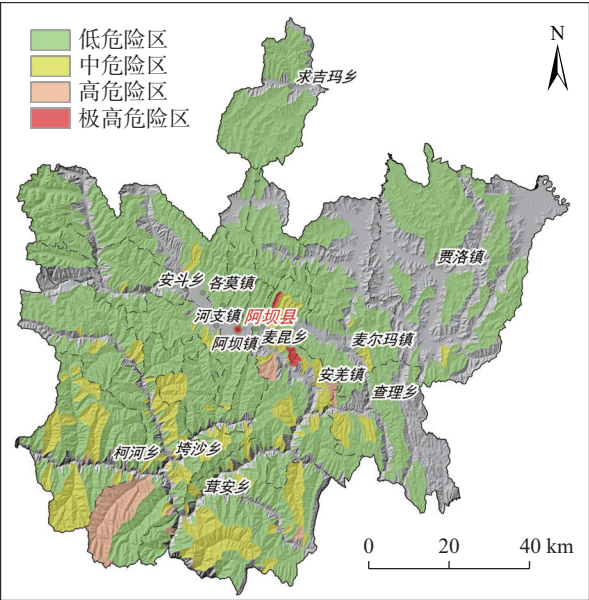


图 6 泥石流灾害危险性评价图

Fig. 6 The hazard assessment map of debris flow

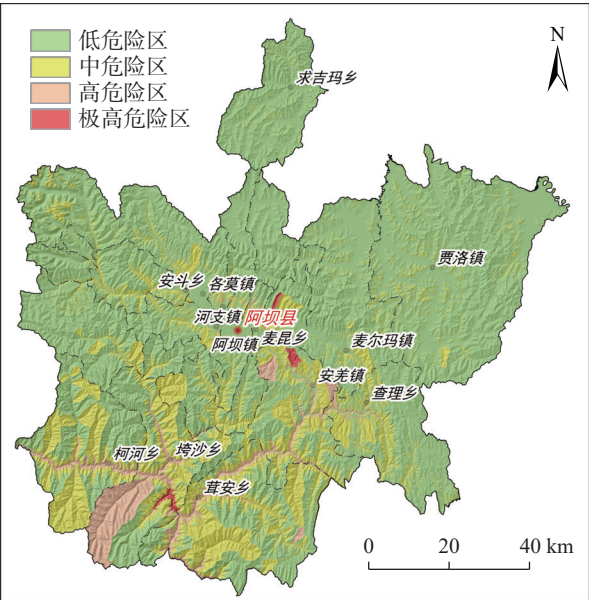


图 7 研究区综合地质灾害危险性评价图

Fig. 7 The hazard assessment map of comprehensive geological hazards in the study area

结果表明, 极高危险区面积 54.79 km², 占全县总面积的 0.53%; 高危险区面积 382.25 km², 占全县总面积

的 3.66%; 极高危险区、高危险区主要位于崩塌、滑坡较发育的碎裂岩区域和极度易发的泥石流流域; 中危险区面积 2 902.16 km², 占全县总面积的 27.81%; 低危险区面积 7 095.8 km², 占全县总面积的 68.0%。

5 结论

(1) 通过各类灾种的危险性评价结果统计可以发现, 研究区综合地质灾害极高危险区、高危险区面积明显大于分灾种评价结果, 极高危险区、高危险区主要位于崩塌、滑坡较发育的碎裂岩区域和极度易发的泥石流流域(表 6)。

表 6 各类灾害危险性评价结果统计表

Table 6 The Statistical table of all kinds of disaster risk assessment results

危险分级	极高危险区	高危险区	中危险区	低危险区
斜坡类灾害评价结果	23.68	362.19	2 467.93	7 581.2
泥石流灾害评价结果	38.38	250.12	1 654.2	8 492.3
综合评价结果	54.79	382.25	2 902.16	7 095.8

(2) 崩塌、滑坡这类斜坡灾害和泥石流灾害在形态、控制影响因素、危险性特征等方面具有截然不同的特点, 因而, 在分灾种评价过程中, 选取评价单元及评价因子也大不相同。

(3) 滑坡、崩塌等斜坡类地质灾害危险性评价以栅格为单元, 选取主要评价因子主要有坡度、高程、工程地质岩组、斜坡结构、距断层距离、距水系距离、距道路距离等; 泥石流灾害危险性评价以流域为评价单元, 选取主要评价因子主要有流域面积、坡度、流域地形起伏度、工程地质岩组、崩塌滑坡灾害点密度、流域断层密度、流域水系密度、流域道路密度、植被覆盖率等。

(4) 针对高山峡谷区地质灾害危险性评价, 多灾种耦合的评价思路能更合理的反映危险性评价过程中, 不同灾害类型形态及空间上的差异, 获取更精确的危险性评价结果。

(5) 在泥石流危险性评价过程中, 诸多学者通常选取传统的距水系距离、距道路距离、距断层距离等评价因子, 这几个因子概化后, 各个流域之间受道路、断层、水系等因素的影响差别很难体现, 进而导致评价结果欠佳; 文章选取的流域道路密度、流域水系密度、流域断层密度等评价因子能更准确反应流域内受道路到开挖影响程度、水动力条件、受断层影响的程度, 获取更精准的评价结果, 可为其它高山峡谷区开展危险性评价时提供参考借鉴。

参考文献 (References) :

- [1] 汪茜, 李广杰. 数量化理论在泥石流灾害预测预报中的应用——以吉林和龙市泥石流为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(2): 85–88. [WANG Qian, LI Guangjie. Application of quantification theory in forecasting debris flows: An example of Helong City, Jilin Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(2): 85–88. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 周国云, 陈光齐. 基于GIS和数量化理论II的滑坡危险性预测 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12): 2494–2500. [ZHOU Guoyun, CHEN Guangqi. Landslide risk prediction based on coupling gis and second theory of quantification [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12): 2494–2500. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 唐亚明, 张茂省, 李林, 等. 滑坡易发性危险性风险评价例析 [J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(2): 125–129. [TANG Yaming, ZHANG Maosheng, LI Lin, et al. Discrimination to the landslide susceptibility, hazard and risk assessment [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(2): 125–129. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 乔建平, 王萌, 吴彩燕. 基于概率方法的区域地质灾害风险防御工程效益评估 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 28(2): 131–136. [QIAO Jianping, WANG Meng, WU Caiyan. Preventing engineering benefit evaluation of regional geological disaster risk based on probability method [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(2): 131–136. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 范林峰, 胡瑞林, 曾逢春, 等. 加权信息量模型在滑坡易发性评价中的应用——以湖北省恩施市为例 [J]. *工程地质学报*, 2012, 20(4): 508–513. [FAN Linfeng, HU Ruilin, ZENG Fengchun, et al. Application of weighted information value model to landslide susceptibility assessment: A case study of Enshi City, Hubei Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(4): 508–513. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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——以黄河上游地区地质灾害风险评价为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(6): 84–88. [ZHANG Chunshan, ZHANG Yecheng, MA Yinsheng, et al. Calculation method and application of the right-weighty value on geological hazards in region [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(6): 84–88. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 牛瑞卿, 彭令, 叶润青, 等. 基于粗糙集的支持向量机滑坡易发性评价 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(2): 430–439. [NIU Ruiqing, PENG Ling, YE Runqing, et al. Landslide susceptibility assessment based on rough sets and support vector machine [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(2): 430–439. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 叶潇潇, 钱德玲, 朱志鹏, 等. 基于组合赋权法的中巴公路奥依塔克至布伦口段泥石流危险性评价 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38(1): 246–251. [YE Xiaoxiao, QIAN Deling, ZHU Zhipeng, et al. Hazard assessment of debris flow at aoyitake-bulunkou section of China-Pakistan Highway based on combined weight method [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 246–251. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 等. 膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 132–140. [CHEN Liangsheng, WEI Bingxu, LIAO Huan, et al. A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 132–140. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 牛全福, 陆铭, 李月锋, 等. 基于灰色关联与粗糙依赖度的甘肃兰州市区泥石流危险性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 48–56. [NIU Quanfu, LU Ming, LI Yuefeng, et al. Hazard assessment of debris flow in Lanzhou City of Gansu Province based on methods of grey relation and rough dependence [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 48–56. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 孟凡奇, 李广杰, 秦胜伍, 等. 基于证据权法的泥石流危险度区划 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(6): 1380–1384. [MENG Fanqi, LI Guangjie, QIN Shengwu, et al. Zoning of debris flow hazard degree with weight-of-evidence method [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(6): 1380–1384. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘力维, 程传周. 基于GIS的滑坡泥石流风险评估及其应用 [J]. *地理空间信息*, 2014, 12(3): 8–10. [LIU Liwei, CHENG Chuazhou. Landslide and debris flow risk assessment based on GIS and its application [J]. *Geospatial Information*, 2014, 12(3): 8–10. (in Chinese with English abstract)]