



贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价

周超¹ 常鸣¹ 徐璐¹ 车宏晓¹

¹ 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都,610059

摘要:大量的矿产资源开发与特殊的地质环境使贵州省成为矿山地质灾害最为发育的地区之一,矿山地质灾害具有分布广、影响大、潜在灾害隐患突出等特点。以贵州省盘州市盘关镇为研究区,在详细调查矿山地质灾害的基础上,建立了矿山地质灾害风险评价体系:通过证据权重法,选取坡度、坡向、高程、曲率、人类工程活动、地层岩性、距断层距离、距采空区距离等8个评价指标,实现了矿山地质灾害易发性区划;以不同频率(10%、5%、2%、1%)下的年最大日降雨量作为时间动态因素,提出了不同降雨概率下的矿山地质灾害危险性评价方法;根据典型城镇不同承灾体的分布特征,制作了易损性分布图;结合矿山地质灾害危险性和承灾体易损性综合构建了典型城镇矿山地质灾害风险评价模型,为矿山地质灾害防治提供科学依据。结果表明:在不同降雨频率下,80.55%的区域始终保持低风险;19.29%的区域风险等级随降雨频率的降低而增大;0.16%的区域始终保持高风险,应立即采取监测预警、工程防治与应急避险相结合的措施。

关键词:矿山地质灾害;盘关镇;危险性评价;易损性评价;风险评价

中图分类号:P208;P237 **文献标志码:**A

矿产资源开发作为中国经济建设重要来源,其长期大规模和高强度开发对中国经济建设和社会发展作出了巨大贡献。贵州省作为中国矿产资源最为丰富的省份之一,大量的矿产资源开发与特殊的地质环境使其成为矿山地质灾害最为发育的地区之一。矿山地质灾害具有分布广、影响大、潜在灾害隐患突出等特点,严重威胁着矿区人民的生命财产安全,对生态环境造成了巨大破坏^[1]。目前,国内外对地质灾害的评价多应用GIS技术将各影响因子进行叠加分析,以易发性评价和危险性评价为主^[2-6]。文献[7]以三峡库区岸坡为研究区,构建了粒子群算法-支持向量机模型并定量预测了滑坡易发性。文献[8]从不同地理尺度对三峡库区地质灾害进行了调查与评估。文献[9]以湖南省澧源镇为例,综合易发性结果和有效降雨阈值得到了澧源镇的地质灾害危险性区划图。文献[10]以三峡库区重庆市万州区为例,分析了3种日降雨工况下滑坡的发生概率,得到各工况下的万州区滑坡灾害危险性分布图。文献[11]以福建省泉州市德化县浔中镇为例,结合事件树分析和模糊多层次综合评判法

开展了地质灾害风险评价的研究。文献[12]对甘肃省白龙江流域54个城镇和陕西省5个县城开展了城镇地质灾害风险评价,并提出了一套城镇地质灾害风险评价的思路和技术方法。地质灾害风险评价方法理论在中国经过多年发展,已经形成了较为完整的体系,但由于矿山地质灾害地质环境多变,成灾机理复杂,针对矿山地质灾害的风险评价方法仍处于探索阶段,尚未形成完整的矿山地质灾害风险评价体系。

本文以贵州省盘州市盘关镇矿山地质灾害为研究区,利用GIS技术从矿山地质灾害易发性、危险性、易损性和风险性4个方面进行综合分析,构建了贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价模型,为矿山地质灾害的防治提供科学依据。

1 研究区地质环境条件

1.1 自然地理环境

盘关镇位于贵州省盘州市西北部,研究区范围为104°28'38"E~104°31'52"E,25°48'39"N~26°57'42"N,面积约为49.82 km²。该区处于亚热带季风气候区,气候温和湿润,境内多年平均降

收稿日期:2020-05-30

项目资助:国家自然科学基金(41521002,41702312);四川省科技厅重点研发计划(2020YFS0352, 2020YFS0387)。

第一作者:周超,硕士生,主要从事工程地质与地质灾害防治方面的研究。573673916@qq.com

通讯作者:常鸣,博士,副教授。changmxq@126.com

雨量为 1 413.6 mm,降雨集中在 6 月—8 月。研究区位于扬子准地台黔北台隆六盘水断陷普安旋扭构造变形区,区内二叠系、三叠系与第四系的地层均有出露,岩性以碳酸盐为主。近年来,区内人类工程活动日益强烈,主要包括矿山开采、道路修建、城镇化建设等。

1.2 地质灾害隐患识别和分布特征

首先,多期次遥感解译普查发现地质灾害引发的地表变形会导致光谱特性变化,由此可利用光学遥感的颜色变化来有效识别地表变形,从而圈定潜在的地质灾害隐患;然后,无人机航测详查发现研究区内植被茂盛,在合成的无人机正射影像中基岩裸露的区域多为崩塌、滑坡等地质灾害的易发位置;最后,进行地面调查,对此前获得的识别结果进行核查与补充,主要采用传统的工程地质调查方法,着重选取地质灾害易发区、遥感解译视觉盲区、典型地质灾害进行调查^[13]。经遥感解译、无人机航测和野外调查,研究区内共有矿山地质灾害 62 处(见图 1),其中滑坡 21 处、地面塌陷 12 处、崩塌 25 处、不稳定斜坡 4 处。

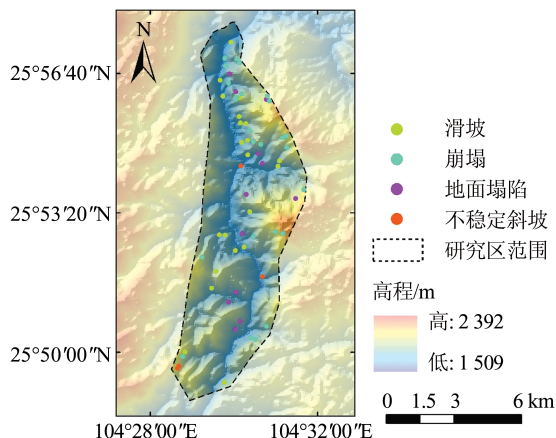


图 1 盘关镇矿山地质灾害分布图

Fig. 1 Distribution Map of Mine Geological Disasters in Panguan Town

滑坡是盘关镇矿山地质灾害中分布较为广泛的一种类型,占研究区灾害点总数的 33.9%,最发育的区段位于盘关镇中部,密集分布于长江两侧岸坡软硬岩互层分布区上,如盘关镇鸡母滑坡(见图 2)。区内发育地面塌陷 12 处,占灾害点总数的 19.4%,最发育的区段位于盘关镇北部,如盘关镇岩鹰山地面塌陷(见图 3)。研究区内发育崩塌 25 处,占灾害点总数的 40.3%,均为岩质崩塌,以倾倒式变形破坏为主,主要分布于二叠系、三叠系地层中。研究区内共发育不稳定斜坡 4 处,占灾害点总数的 6.5%,坡度较陡,局部呈近直立

状,受人类工程活动影响巨大,大多数坡面上已发育裂缝。

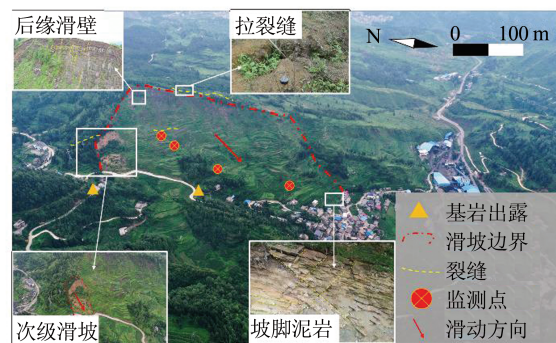


图 2 盘关镇鸡母滑坡视图和典型位置分析

Fig. 2 Analysis of General View and Typical Locations of Jimu Landslide in Panguan Town

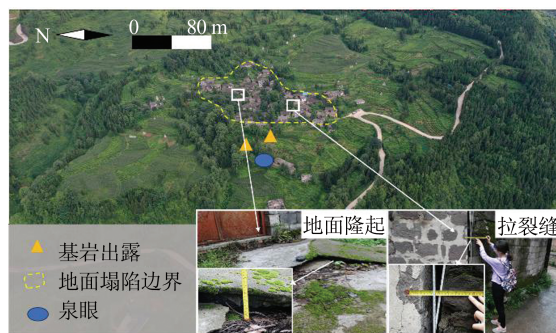


图 3 盘关镇岩鹰山地面塌陷视图和典型位置分析

Fig. 3 Analysis of General View and Typical Locations of Yanyingshan Ground Subsidence in Panguan Town

2 典型城镇矿山地质灾害风险评价方法

2.1 典型城镇矿山地质灾害易发性评价方法

典型城镇矿山地质灾害易发性评价是指一个城镇地质环境条件所决定发生矿山地质灾害的空间概率的量度,常用方法有逻辑回归法^[14]、神经网络法^[15]、决策树法^[16]、旋转森林法^[17]、支持向量机^[18]等。本文选用证据权重法进行典型城镇矿山地质灾害易发性评价,证据权重法是一种基于贝叶斯条件概率的定量预测方法^[19]。首先,评价已知灾害点和各种影响因子之间的空间分布特征,计算影响因子与矿山地质灾害间的空间相关性,即 W_1 和 W_2 ;其次,得出评价因子在不同分级条件下发生矿山地质灾害的概率 P_i ,将 P_i 求和得到矿山地质灾害易发性值 S ,计算公式为:

$$W_1 = \ln \left(\frac{\frac{S_1}{S_1 + S_2}}{\frac{S_3}{S_3 + S_4}} \right) \quad (1)$$

$$W_2 = \ln \left(\frac{S_2}{S_1 + S_2} \right) \quad (2)$$

$$W_f = W_1 - W_2 \quad (3)$$

$$P_i = \exp \{ W_f + \ln P_{P(i)} \} \quad (4)$$

$$S = \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

式中, W_1 为正相关程度即正权重; W_2 为负相关程度即负权重; S_1 为该因子等级中地质灾害的面积; S_2 为其他因子等级中没有地质灾害的面积; S_3 为其他因子等级中地质灾害的面积; S_4 为其他因子等级中没有地质灾害的面积; $P_{P(i)}$ 为先验概率, $P_{P(i)} = \text{地质灾害面积}/\text{区域面积}$ 。

2.2 典型城镇矿山地质灾害危险性评价方法

证据权重法仅适用于静态因素的分析评价,而在影响研究区矿山地质灾害发生的动态时间概率上考虑不足。故本文在地质灾害易发性评价的基础上,考虑降雨为主的外界动态因子,实现典型城镇矿山地质灾害危险性评价,计算公式为:

$$H = S \times (H_{24P} / \bar{H}_{24}) \quad (6)$$

式中, H 为矿山地质灾害危险性; H_{24P} 为 P 频率下研究区年最大日降雨量; \bar{H}_{24} 为年最大日降雨量均值。

2.3 典型城镇矿山地质灾害承灾体易损性评价方法

承灾体是指遭受地质灾害危害的对象,如人类、财产、资源或生态环境^[20]。易损性是在危险范围内承灾体受到地质灾害破坏时,对承灾体所可能产生的损伤、破坏程度的评估^[21]。本文选取物质易损性、社会易损性、环境易损性和经济易损性作为典型城镇矿山地质灾害易损性评价指标。物质易损性主要指研究区内建筑物和道路,环境易损性主要考虑研究区生态环境,社会易损性主要考虑到研究区内人口年龄与受教育程度,各评价指标和权重见表1,经济易损性主要指研究区人均年收入,计算公式为:

$$E = I / N \quad (7)$$

式中, E 为经济易损性,无量纲; I 为区域内每个承灾体人均年收入; N 为区域人均年收入。

经归一化和自然断点法得到典型城镇矿山地质灾害易损性,计算公式为:

$$V = M \times Q \times P \times E \quad (8)$$

式中, V 为矿山地质灾害承灾体易损性值; M 为

物质易损性; Q 为社会易损性; P 为环境易损性。

表1 研究区矿山地质灾害易损性评价因子、权重和标准化分级表

Tab. 1 Factors, Weights and Standardized Classification of Vulnerability Assessment

承灾体	主要指标	主级权重	标准化	次级指标	次级权重	标准化
建筑物	建筑结构	3	1	钢结构	1	0.25
				砖混	2	0.50
				砌体	3	0.75
				砖木	4	1
	层数	2	0.67	3及3以上	1	1
				2	2	0.67
				1	3	0.33
	用途	1	0.33	商铺	1	0.33
				仓库	2	0.67
				民房	3	1
道路	材料	3	1	土石	1	0.33
				水泥	2	0.67
				柏油沥青	3	1
				地方公路	1	0.25
	类型	2	0.67	集散公路	2	0.50
				干线公路	3	0.75
				高速公路	4	1
	宽度	1	0.33	>10 m	1	0.33
				5~10 m	2	0.67
				1~5 m	3	1
生态环境	类型	1	1	荒地	1	0.25
				草地	2	0.50
				林地	3	0.75
				耕地	4	1
	人口年龄	2	1	0~14	3	0.33
				15~65	2	0.67
				>65	1	1
	受教育程度	1	0.5	大专及以上	3	0.33
				中学	2	0.67
				小学及文盲	1	1

2.4 典型城镇矿山地质灾害风险评价方法

结合矿山地质灾害的危险性与暴露在危险范围内承灾体的损失程度,典型城镇矿山地质灾害风险的计算公式为:

$$R = H \times V \quad (9)$$

式中, R 为矿山地质灾害风险性。

3 典型城镇矿山地质灾害风险评价

3.1 典型城镇矿山地质灾害易发性评价

选取坡度、坡向、高程、曲率、距水系距离、人

类工程活动、地层岩性、距断层距离、距采空区距离因子作为易发性评价指标,为保证评价指标的客观性和相互独立性,采用相关系数来度量指标因子间的相关关系^[22]。利用 SPSS 软件,将已分级的指标因子矩阵导入,进行 Pearson 分析检验。除高程与距水系距离之间存在高度相关外,其余各指标因子之间均满足相互独立的要求(见表 2)。结合盘关镇的实际情况,排除距水系距离因子^[23]。

以坡度、坡向、高程、曲率、人类工程活动、

地层岩性、距断层距离、距采空区距离作为研究区矿山地质灾害易发性评价指标(见图 4),运用证据权重法,按式(1)~(4)求取各指标权重(见表 3),对以上各因子进行叠加分析,归一化后根据自然断点法将易发性评价结果分为 5 级:低易发性(0~0.468)、较低易发性(0.468~0.646)、中易发性(0.646~0.711)、较高易发性(0.711~0.804)、高易发性(0.804~1.000)。计算分析后得到本文研究区的矿山地质灾害易发性评价图(见图 5)。

表 2 各指标因子间的相关关系
Tab. 2 The Correlation Between Index Factors

因子	坡度	坡向	高程	曲率	距水系距离	人类工程活动	地层岩性	距断层距离	距采空区距离
坡度	1.000								
坡向	0.261	1.000							
高程	0.275	0.145	1.000						
曲率	0.028	-0.044	0.038	1.000					
距水系距离	0.146	0.084	0.677	0.025	1.000				
人类工程活动	-0.020	-0.104	-0.024	-0.003	-0.027	1.000			
地层岩性	0.137	0.165	0.282	0.041	0.115	-0.195	1.000		
距断层距离	0.094	-0.014	0.115	-0.053	-0.059	-0.128	0.173	1.000	
距采空区距离	0.080	-0.094	-0.033	-0.055	-0.195	0.153	-0.169	0.266	1.000

地质灾害易发性评价过程中,常用工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)对评价结果进行检验,通过计算曲线下面积(area under curve, AUC)值来评价结果的准确性^[24]。本文采用 SPSS 软件,将基于证据权重法的矿山地质灾害易发性模型预测结果与研究区内的地质灾害情况随机采样并绘制 ROC 曲线(见图 6)。结果显示 AUC 值为 0.856,表明利用上述研究方法得到的易发性评价较为合理。

3.2 典型城镇矿山地质灾害危险性评价

矿山地质灾害危险性是在易发性的基础上,以不同频率下的降雨作为时间动态因素,研究地质灾害在不同时间概率下的动态的危险性变化程度。地下采矿引起岩土体产生整体变形,但未直接导致地质灾害的发生^[25],降雨是地质灾害的直接诱发因素^[26]。降雨过程中,地表水入渗岩土体,使坡体富水,地下水位升高,增加孔隙水压力,软化滑动面及裂隙,破坏岩土体的稳定性。本文参考《贵州省雨洪手册》中的相关计算公式,选用皮尔逊Ⅲ型分布函数对研究区进行频率分析。根据手册中最大 24 h 暴雨均值等值线图,确定年最大日降雨量均值 \overline{H}_{24} 取 87.80 mm,变差系

数 C_v 取 0.43。利用皮尔逊Ⅲ型曲线,通过其离均系数 K_p ,计算不同降雨频率下的年最大日降雨量 H_{24P} ,计算公式为:

$$H_{24P}=K_p\times\overline{H}_{24}\tag{10}$$

计算结果见表 4。

将研究区矿山地质灾害易发性和 4 种不同频率的年最大日降雨量叠加分析,利用 GIS 空间运算后分为 5 级:低危险(0~0.395)、较低危险(0.395~0.482)、中危险(0.482~0.561)、较高危险(0.561~0.658)、高危险(0.658~1.000),得到研究区矿山地质灾害危险性评价图(见图 7)。

3.3 典型城镇矿山地质灾害承灾体易损性评价

本文对研究区内的不同承灾体开展遥感解译与野外调查,共统计各类房屋 6 528 间,道路总里程 67.477 km,将房屋建筑用途、结构、层数等作为承灾体参数,构建典型城镇承灾体空间属性数据库。根据式(8)计算后将承灾体易损度划分为 5 个等级:低易损性(0~0.090)、较低易损性(0.090~0.247)、中易损性(0.247~0.460)、较高易损性(0.460~0.726)、高易损性(0.726~1.000),得到研究区矿山地质灾害易损性评价图(见图 8)。

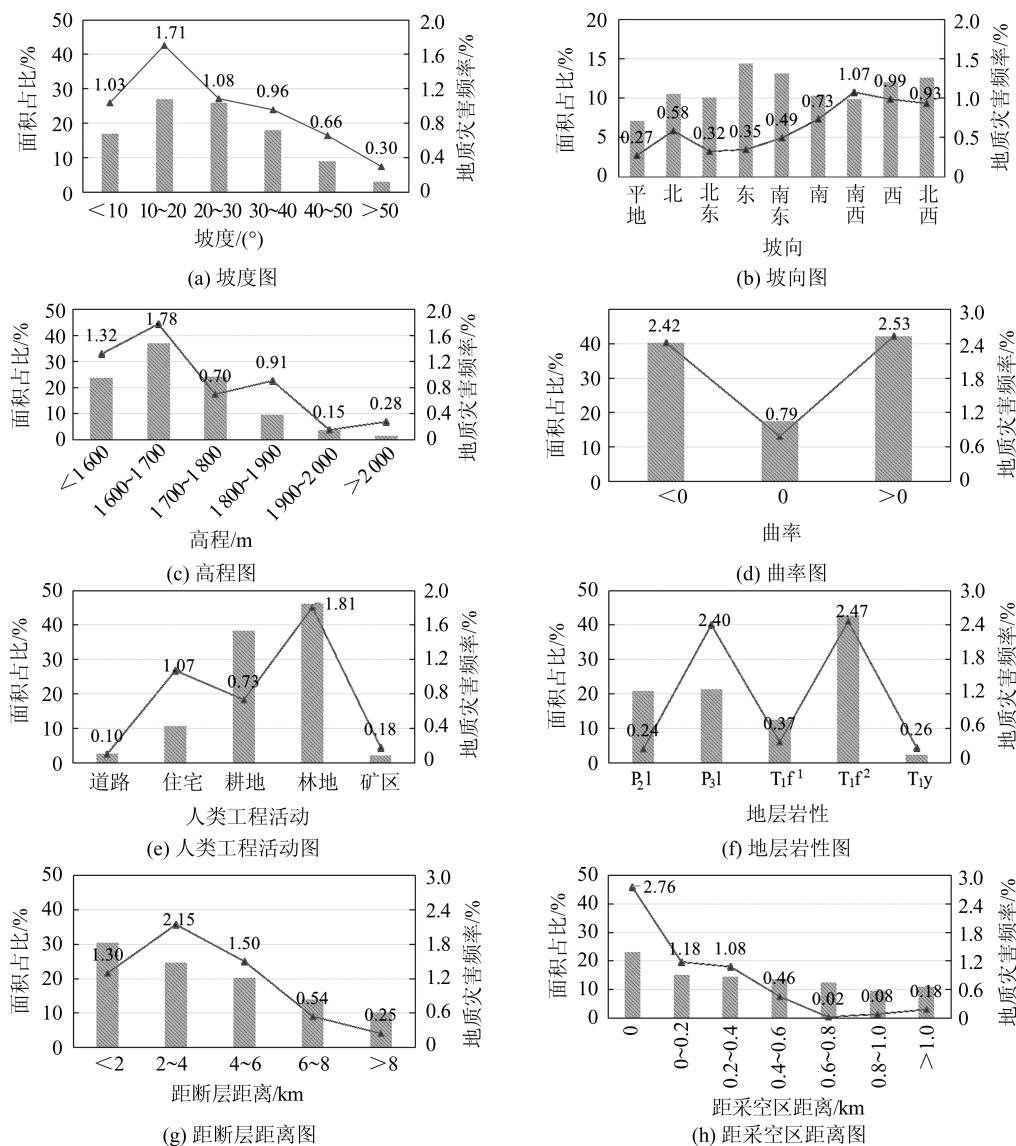


图4 研究区各证据因子分级面积百分比(阴影条)和地质灾害频率(折线)分布图

Fig. 4 Study Area Frequency (Shaded Bars) and Geological Disasters Density (Lines) Distributions for Each Feature Strata

3.4 典型城镇矿山地质灾害风险评价

结合矿山地质灾害危险性评价和承灾体易损性评价模型,根据式(9)归一化计算后按自然断点法分为5级:低风险(0~0.167)、较低风险(0.167~0.306)、中风险(0.306~0.454)、较高风险(0.454~0.556)、高风险(0.556~1.000),得到研究区矿山地质灾害风险评价图(见图9)。

在不同的降雨频率下,80.55%的区域始终保持低风险,主要为人迹罕至的森林或荒地,即使发生大规模地质灾害也不会造成较大损失,因此仅需要采取不定时巡查;19.29%的区域风险随着降雨频率的降低而增大,以大铺子村新园小区为例,从十年一遇降雨到百年一遇降雨,由中风险逐渐升至高风险,须开展定期巡查,建立专业的监测预警设施;0.16%的区域由于人口财产分

布集中,矿山地质灾害发生频繁,始终保持高风险,如罗家地村、丘田村等地方,应立即采取长期监测预警措施,规划设计相关防治工程,制定应急避险与救援方案。

4 结语

本文以贵州省盘州市盘关镇矿山为研究对象,利用GIS技术从矿山地质灾害易发性、危险性、易损性和风险性4个方面对典型城镇矿山地质灾害风险等级进行区划,主要结论如下:

1)研究区内现存矿山地质灾害62处,其中滑坡21处,密集分布于长江两侧岸坡软硬岩互层分布区上;地面塌陷12处,集中位于盘关镇北部矿区;崩塌25处,均为岩质崩塌,以倾倒式变形破坏

为主;不稳定斜坡 4 处,受人类工程活动影响巨大,已经发育大量裂缝。

表 3 研究区矿山地质灾害各证据因子权重值表
Tab. 3 Weight Values of Each Feature Strata in Mine Geological Disasters

因子	分级	W_1	W_2	W_f	$P_{P(i)}$	P
坡度/(°)	<10	0.049 6	−0.010 6	0.060 2	0.028 7	0.030 5
	10~20	0.097 5	−0.038 6	0.136 1	0.028 7	0.032 9
	20~30	−0.327 5	0.094 5	−0.422 0	0.028 7	0.018 8
	30~40	−0.075 1	0.015 8	−0.090 9	0.028 7	0.026 2
	40~50	0.264 0	−0.029 5	0.293 5	0.028 7	0.038 5
	>50	0.594 0	−0.024 3	0.618 3	0.028 7	0.053 2
坡向	平地	−0.423 7	0.026 3	−0.450 0	0.028 7	0.018 3
	北	−0.035 3	0.004 1	−0.039 4	0.028 7	0.027 6
	北东	−0.599 5	0.050 1	−0.649 7	0.028 7	0.015 0
	东	−0.887 4	0.096 2	−0.983 6	0.028 7	0.010 7
	南东	−0.430 4	0.052 0	−0.482 4	0.028 7	0.017 7
	南	0.218 8	−0.028 3	0.247 1	0.028 7	0.036 7
	南西	0.670 1	−0.106 5	0.776 5	0.028 7	0.062 4
	西	0.370 3	−0.062 3	0.432 7	0.028 7	0.044 2
	北西	0.262 3	−0.043 7	0.306 0	0.028 7	0.039 0
高程/m	<1 600	−0.030 3	0.009 2	−0.039 6	0.028 7	0.027 6
	1 600~1 700	0.115 8	−0.074 6	0.190 4	0.028 7	0.034 7
	1 700~1 800	−0.701 6	0.152 4	−0.854 0	0.028 7	0.012 2
	1 800~1 900	0.512 4	−0.072 8	0.585 2	0.028 7	0.051 5
	1 900~2 000	−0.368 6	0.012 0	−0.380 6	0.028 7	0.019 6
	>2 000	1.2012	−0.035 1	1.236 2	0.028 7	0.098 8
曲率	<0	0.044 2	−0.031 0	0.075 2	0.028 7	0.030 9
	0	−0.245 4	0.045 3	−0.290 7	0.028 7	0.021 5
	>0	0.047 0	−0.035 7	0.082 7	0.028 7	0.031 2
人类工程活动	道路	−0.423 4	0.009 3	−0.432 7	0.028 7	0.018 6
	住宅	0.579 2	−0.096 4	0.675 5	0.028 7	0.056 4
	耕地	−2.852 2	0.479 5	−3.331 8	0.028 7	0.001 0
	林地	0.445 6	−0.630 3	1.076 0	0.028 7	0.084 1
	矿区	0.407 8	−0.010 6	0.418 4	0.028 7	0.043 6
地层岩性	P ₂ l	−1.437 5	0.188 7	−1.626 1	0.028 7	0.005 6
	P ₃ l	0.892 1	−0.465 8	1.358 0	0.028 7	0.111 6
	T ₁ f ¹	−0.503 4	0.055 5	−0.558 9	0.028 7	0.016 4
	T ₁ f ²	0.189 8	−0.168 7	0.358 5	0.028 7	0.041 1
	T ₁ y	0.901 0	−0.033 9	0.934 9	0.028 7	0.073 1
距断层距离/km	<2	−0.305 0	0.110 4	−0.415 4	0.028 7	0.018 9
	2~4	0.428 6	−0.189 4	0.618 0	0.028 7	0.053 2
	4~6	0.258 1	−0.077 3	0.335 4	0.028 7	0.040 1
	6~8	−0.410 1	0.054 2	−0.464 3	0.028 7	0.018 0
	>8	−0.872 1	0.065 9	−0.938 1	0.028 7	0.011 2
距采空区距离/km	0	0.760 3	−0.400 7	1.161 0	0.028 7	0.091 6
	0~0.2	0.316 0	−0.067 8	0.383 8	0.028 7	0.042 1
	0.2~0.4	0.256 0	−0.050 8	0.306 7	0.028 7	0.039 0
	0.4~0.6	−0.558 4	0.067 0	−0.625 4	0.028 7	0.015 4
	0.6~0.8	−3.584 4	0.133 9	−3.718 3	0.028 7	0.000 7
	0.8~1.0	−1.966 4	0.090 7	−2.057 1	0.028 7	0.003 7
	>1.0	−1.293 8	0.089 0	−1.382 8	0.028 7	0.007 2

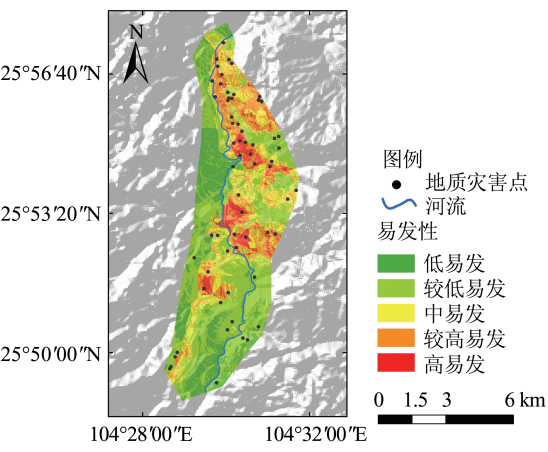


图5 研究区矿山地质灾害易发性评价图

Fig. 5 Susceptibility Map of Mine Geological Disasters in the Study Area

2)运用证据权重法,选取8个评价指标构建了研究区矿山地质灾害易发性评价模型。结果显示,22.11%的区域为高易发和较高易发,呈带状分布于河流两岸和西南侧沟谷内。进一步考虑降雨为主的外界动态因子,求取不同降雨频率下研究区年最大日降雨量,实现了典型城镇矿山

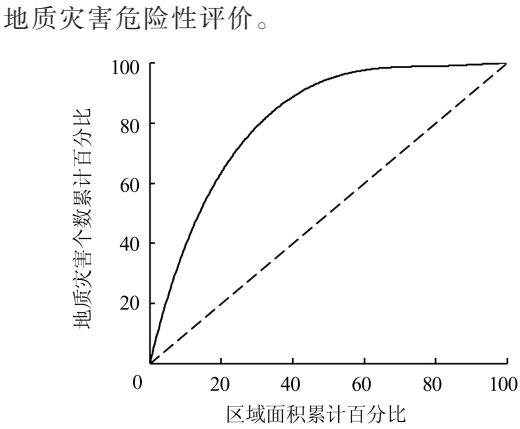


图6 易发性评价结果ROC验证曲线

Fig. 6 ROC Curve of Susceptibility Assessment

表4 研究区不同降雨频率下的年最大日降雨量计算结果

Tab. 4 Calculated Results of Maximum Daily Rainfall in a Year at Different Frequencies

$P/\%$	K_P	H_{24P}/mm
10	1.57	137.85
5	1.84	161.55
2	2.18	191.40
1	2.43	213.35

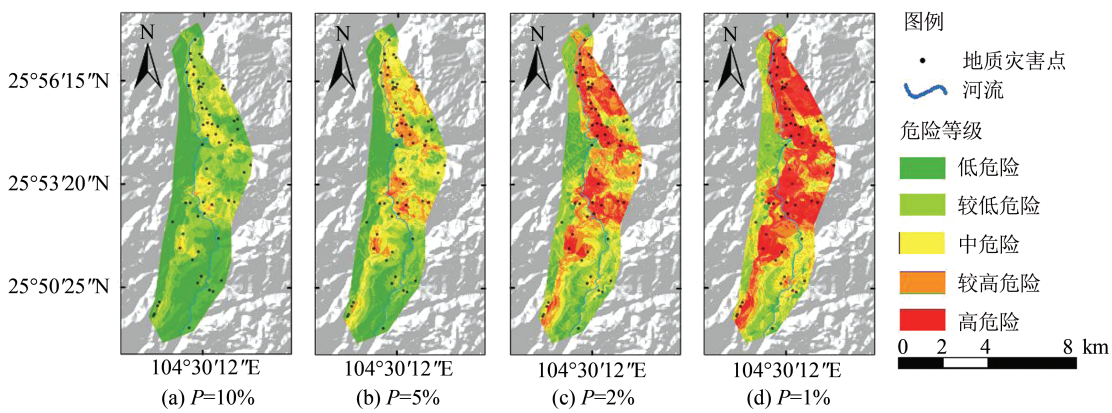


图7 研究区矿山地质灾害危险性评价图

Fig.7 Hazard Map of Mine Geological Disasters in the Study Area

3)选取物质易损性、社会易损性、环境易损性和经济易损性组建了典型城镇矿山地质灾害承灾体易损性评价模型。结果表明,高易损区域主要分布在场镇和矿区,占总面积的4.25%;较高易损区域主要分布于中部和南部河流两岸,占17.68%;中易损区域主要分布在场镇外围,占7.86%。

4)充分结合地质灾害危险性评价模型和承灾体易损性评价模型,实现了典型城镇矿山地质灾害风险评价。结果表明,在不同降雨频率下,80.55%的区域始终保持低风险;19.29%的区域风险等级随着降雨频率的降低而增大;0.16%的区域始终保持高风险,应立即采取监测预警、工程防治与应急避险相结合的措施。

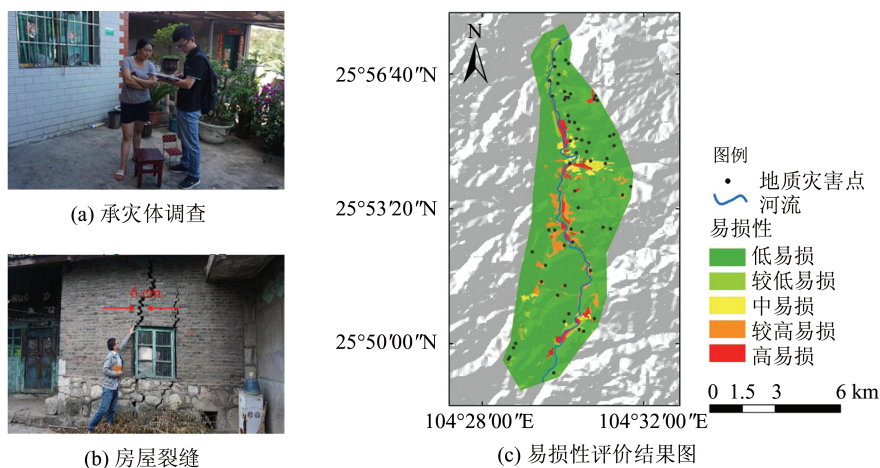


图 8 研究区矿山地质灾害易损性评价

Fig. 8 Vulnerability Assessment of Mine Geological Disasters in the Study Area

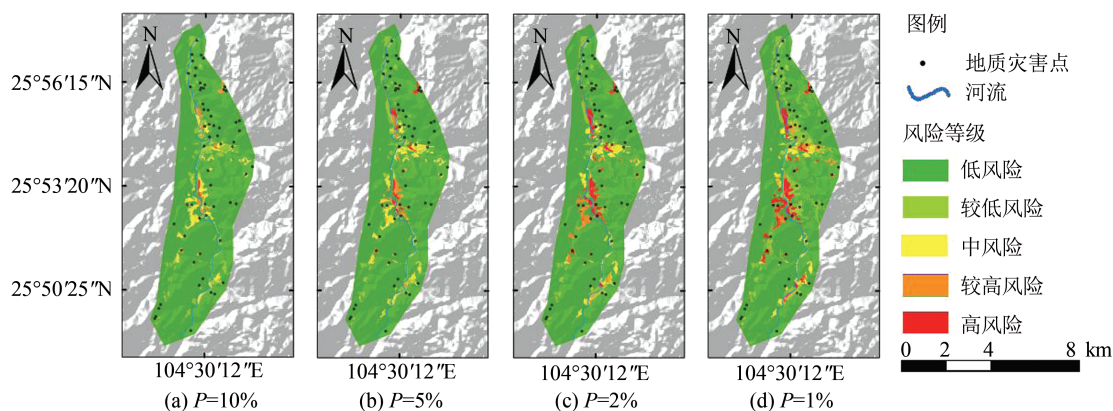


图 9 研究区矿山地质灾害风险评价图

Fig. 9 Risk Map of Mine Geological Disasters in the Study Area

参 考 文 献

- [1] Uitto J I, Shaw R. Sustainable Development and Disaster Risk Reduction[M]. Tokyo: Springer, 2016
- [2] Nagarajan R, Roy A, Kumar R V, et al. Landslide Hazard Susceptibility Mapping Based on Terrain and Climatic Factors for Tropical Monsoon Regions[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2000, 58:275-287
- [3] Ohlmacher G C, Davis J C. Using Multiple Logistic Regression and GIS Technology to Predict Landslide Hazard in Northeast Kansas[J]. *Engineering Geology*, 2003, 69:331-343
- [4] Xiang Xiqiong, Huang Runqiu. Application of GIS-Based Artificial Neural Networks on Assessment of Geohazards Risk[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(3): 23-27 (向喜琼, 黄润秋. 基于 GIS 的人工神经网络模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11(3): 23-27)
- [5] Xu Qiang, Huang Runqiu, Xiang Xiqiong. Time and Spacial Predicting of Geological Hazards Occurrence[J]. *Mountain Research*, 2000, 18 (Supplement): 112-117(许强, 黄润秋, 向喜琼. 地质灾害发生时间和空间的预测预报[J]. *山地学报*, 2000, 18(增刊): 112-117)
- [6] Huang Runqiu, Xiang Xiqiong, Ju Nengpan. Assessment of China's Regional Geohazards: Present Situation and Problems[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004(11): 1 078-1 082(黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 中国区域地质灾害评价的现状 & 问题[J]. *地质通报*, 2004(11): 1 078-1 082)
- [7] Wu Xueling, Shen Shaoqing, Niu Ruiqing. Landslide Susceptibility Prediction Using GIS and PSO-SVM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 665-671(武雪玲, 沈少青, 牛瑞卿. GIS 支持下应用 PSO-SVM 模型预测滑坡易发性[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2016, 41(5): 665-671)
- [8] Liu Chuazheng, Liu Yanhui, Wen Mingsheng, et al. Geo-hazard Initiation and Assessment in the Three Gorges Reservoir[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- [9] Zhao Haiyan, Yin Kunlong, Chen Lixia, et al.

- Landslide Hazard Analysis of Liyuan Town Based on Effective Rainfall Threshold[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2020, 39(4):85-93 (赵海燕, 殷坤龙, 陈丽霞, 等. 基于有效降雨阈值的澧源镇滑坡灾害危险性分析[J]. 地质科技情报, 2020, 39(4):85-93)
- [10] Wang Fang, Yin Kunlong, Gui Lei, et al. Landslide Hazard Analysis Under Different Daily Rainfall Conditions in Wanzhou District [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(1): 190-195 (王芳, 殷坤龙, 桂蕾, 等. 不同日降雨工况下万州区滑坡灾害危险性分析[J]. 地质科技情报, 2018, 37(1): 190-195)
- [11] Hu Shengwu, Wang Yuhong. GIS Dynamic Risk Assessment of Geological Disasters Based on Event Tree Analysis and Fuzzy Theory [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7): 983-989 (胡圣武, 王育红. 基于事件树和模糊理论的GIS动态地质灾害评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(7): 983-989)
- [12] Zhang Maosheng, Xue Qiang, Jia Jun, et al. Methods and Practices for the Investigation and Risk Assessment of Geo-hazards in Mountainous Towns [J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 125-135 (张茂省, 薛强, 贾俊, 等. 山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 125-135)
- [13] Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966 (许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 957-966)
- [14] Luo Luguang, Pei Xiangjun, Huang Runqiu, et al. Landslide Susceptibility Assessment by GIS Based on Certainty Factor and Logistic Regression Model in Jiuzhaigou Scenic Area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-202 (罗路广, 裴向军, 黄润秋, 等. GIS支持下CF与Logistic回归模型耦合的九寨沟景区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2020, DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-202)
- [15] Dou J, Yamagishi H, Pourghasemi H, et al. An Integrated Artificial Neural Network Model for the Landslide Susceptibility Assessment of Osado Island, Japan [J]. *Natural Hazards*, 2015, 78(3): 1749-1776
- [16] Tsangaratos P, Ilia I. Landslide Susceptibility Mapping Using a Modified Decision Tree Classifier in the Xanthi Perfection, Greece[J]. *Landslides*, 2016, 13(2): 305-320
- [17] Liu Yuanbo, Nui Ruiqing, Yu Xianyu, et al. Application of the Rotation Forest Model in Landslide Susceptibility Assessment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 959-964 (刘渊博, 牛瑞卿, 于宪煜, 等. 旋转森林模型在滑坡易发性评价中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(6): 959-964)
- [18] Tehrany M, Pradhan B, Mansor S, et al. Flood Susceptibility Assessment Using GIS-Based Support Vector Machine Model with Different Kernel Types [J]. *Catena*, 2015, 125(125): 91-101
- [19] Tinto-Moliner A, Martin M. Quantitative Weight of Evidence Method for Combining Predictions of Quantitative Structure-Activity Relationship Models [J]. *SAR and QSAR in Environmental Research*, 2020, 31(4): 1-19
- [20] Liu Chuanyang. Analysis Methods on the Risk Identification of Landslide Disasters [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1): 88-97 (刘传正. 崩塌滑坡灾害风险识别方法初步研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 88-97)
- [21] Zhang S, Li C, Zhang L, et al. Quantification of Human Vulnerability to Earthquake-Induced Landslides Using Bayesian Network [J]. *Engineering Geology*, 2019, 265: 105436
- [22] Zhang Jun, Yin Kunlong, Wang Jiajia, et al. Evaluation of Landslide Susceptibility for Wanzhou District, Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 284-296 (张俊, 殷坤龙, 王佳佳, 等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 284-296)
- [23] Zhou Jingjing, Zhang Xiaomin, Zhao Fasuo, et al. Research on Risk Assessment of Geological Hazards in Qinling-Daba Mountain Area, South Shaanxi Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(4): 544-553 (周静静, 张晓敏, 赵法锁, 等. 陕南秦巴山区地质灾害危险性评价研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(4): 544-553)
- [24] Chuang C J F, Fabbri A G. Probabilistic Prediction Models for Landslide Hazard Mapping [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, 65(12): 1389-1399
- [25] Zhao Jianjun, Li Jinsuo, Ma Yuntao, et al. Experimental Study on Failure Process of Mining Landslide Induced by Rainfall [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 760-769 (赵建军, 李金锁, 马运韬, 等. 降雨诱发采动滑坡物理模拟试验研究[J].

煤炭学报, 2020, 45(2): 760-769)
[26] Liu Yanhui, Su Yongchao. Early-Warning Model of Regional Geological Disasters Based on Meteorological Factor in Qingchuan County, Sichuan Province

[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1): 134-143(刘艳辉, 苏永超. 四川青川县区域地质灾害气象风险预警模型研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 134-143)

Risk Assessment of Typical Urban Mine Geological Disasters in Guizhou Province

ZHOU Chao¹ CHANG Ming¹ XU Lu¹ CHE Hongxiao¹

¹ State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: **Objectives:** Due to the exploitation of many mineral resources and the unique geological environment, Guizhou Province has become one of the most developed places of mine geological disasters, which has the characteristics of wide distribution, significant influence, and prominent potential hazards. It has threatened the life and property safety in the mining area and caused great damage to the geological environment seriously. An effective risk assessment model of mine geological disasters needs to be established urgently. **Methods:** The study area is Panguan Town, Guizhou Province. Based on the detailed investigation of mine geological disasters, the risk assessment model of mine geological disasters is established. Slope, aspect, elevation, curvature, human engineering activities, lithology, distance to fault and distance to mine goaf are selected as the evaluation indexes to construct susceptibility assessment model. Combined with the maximum daily rainfall in a year of different frequencies (10%, 5%, 2%, 1%), the hazard assessment method of mine geological disasters under different rainfall probabilities is proposed. According to the distribution characteristics of different land utilization types, a vulnerability model is set up. Based on the hazard of mine geological disasters and vulnerability of different land utilization types, the risk assessment model of mine geological disasters is constructed. **Results:** The results show that under different rainfall frequencies, 80.55% of the study area remains low risk. The regional risk level of 19.29% increases with the decrease of rainfall frequency. 0.16% of the study area is always at high risk, and measures should be taken immediately, such as monitoring, early warning, engineering prevention and emergency risk avoidance. **Conclusions:** The risk assessment of geological disasters is a fundamental work about geological disasters, and it is indispensable to make the emergency plan of geological disasters. It is preliminarily proposed combined with the characteristics of mine geological disasters, which provided a scientific basis for the prevention of mine geological disasters.

Key words: mine geological disasters; Panguan Town; hazard assessment; vulnerability assessment; risk assessment

First author: ZHOU Chao, postgraduate, specializes in engineering geology and geological disasters prevention. E-mail: 573673916@qq.com

Corresponding author: CHANG Ming, PhD, associate professor. E-mail: changmxq@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41521002, 41702312); the Key Research and Development Program of the Department of Science and Technology of Sichuan Province (2020YFS0352, 2020YFS0387).

引文格式: ZHOU Chao, CHANG Ming, XU Lu, et al. Risk Assessment of Typical Urban Mine Geological Disasters in Guizhou Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1782-1791. DOI: 10.13203/j.whugis.20200261 (周超, 常鸣, 徐璐, 等. 贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(11): 1782-1791. DOI: 10.13203/j.whugis.20200261)