

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007011

崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究

解明礼¹, 巨能攀¹, 刘蕴琨¹, 刘秀伟², 赵伟华¹, 张成强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;
2. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 我国地质灾害具有点多面广的分布特点, 而地质灾害风险管控人力和能力有限, 因此需要开展地质灾害风险排序工作, 筛选出优先管控的地质灾害隐患点, 确保地质灾害风险管控对策实施的针对性和高效性。地质灾害风险排序的实质是运用量化风险评价计算出每处隐患点的风险值, 然后根据风险值开展排序工作。目前量化风险评价模型多用于单个地质灾害点风险评价, 并未应用于大范围地质灾害风险排序工作, 且模型较为复杂, 推广应用较难。在分析崩塌、滑坡地质灾害与其环境因素间的响应关系及规律的基础上, 提取崩塌、滑坡地质灾害的主控环境因子与诱发因子, 联合人口、物质、资源等易损性因子建立地质灾害风险评价指标体系; 基于岩石工程系统相互作用矩阵与专家打分法确定各级地质灾害风险评价指标因子权重, 构建地质灾害风险评分体系; 并根据风险评价定义, 提出了能够快速量化的简易地质灾害风险计算模型。以贵州省 98 处地质灾害隐患点为例, 开展模型应用验证, 风险排序结果与灾害管理机构主观认识的实际风险一致, 验证了本模型的合理性与有效性, 提高了地质灾害风险管控能力与效率。

关键词: 地质灾害; 崩塌; 滑坡; 风险评价; 岩石工程系统; 风险排序; 防灾减灾

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0184-09

A study of the risk ranking method of landslides and collapses

XIE Mingli¹, JU Nengpan¹, LIU Yunkun¹, LIU Xiuwei², ZHAO Weihua¹, ZHANG Chengqiang¹

(1. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Guizhou Institute of Geo-environment Monitoring, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: Geological disasters in China are characterized by multi-point and wide-range distribution, while the manpower and ability of geological disaster risk management and control are relatively limited. Therefore, it is necessary to carry out the sequencing work of geological disaster risk, screen out the geological disaster points for priority control and control, and ensure the pertinency and efficiency of the implementation of geological disaster risk management and control countermeasures. The essence of geological hazard risk ranking is to use quantitative risk evaluation to calculate the risk value of each disaster point, and then carry out the ranking work according to the risk value. At present, the quantitative risk assessment model is mostly used in the risk assessment of a single geological disaster point, but is not applied in the risk ranking work of a wide range of geological disasters. Moreover, the model is relatively complex, so it is difficult to popularize and use it. Based on the analysis of the

收稿日期: 2020-07-06; 修订日期: 2020-12-26

基金项目: 国家创新研究群体科学基金项目(41521002); 国家自然科学基金项目(41907250); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题(SKLG2018Z014)

第一作者: 解明礼(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害评价研究。Email: 565725640@qq.com

通讯作者: 巨能攀(1973-), 男, 博士, 博导, 教授, 主要从事地质工程和岩土工程教学研究。E-mail: jnp@cdut.edu.cn

response relationship and law between the collapse-landslide geological disasters and its environmental factors, this paper extracts the main controlling environmental factors and inducing factors of the collapse landslide geological disasters, and establishes the risk evaluation index system of geological disasters together with the vulnerable factors such as population, material and resources. Based on the interaction matrix of rock engineering system (RES) and expert scoring method, the weight of each level of geological hazard risk evaluation index factor is determined, and the geological hazard risk scoring system is constructed. According to the definition of risk assessment, a simple geological hazard risk calculation model which can be quantified quickly is proposed. Taking 98 potential geological hazards in Guizhou province as an example, the model verification and application were carried out by taking 98 potential geological hazards in Guizhou province as examples. The risk ranking results are consistent with the actual risks recognized by the disaster body management agencies, which verify the rationality and effectiveness of the model and greatly improve the ability and efficiency of geological disaster risk management and control.

Keywords: geological hazard; collapse; landslide; risk assessment; rock engineering system; risk ranking; disaster prevention and mitigation

我国地质灾害具有点多面广的分布特点^[1],而地质灾害风险管控人力和能力有限,无法有效开展面面俱到的地质灾害管控工作。开展地质灾害量化风险评价,计算每处隐患点的风险值并进行排序,可以辨识出地质灾害隐患点风险大小的水平等级和管控优先顺序,确保地质灾害风险管控对策实施的针对性和高效性^[2-3]。

香港在边坡风险管控方面做出了卓有成效的工作,并取得了显著的效果^[4-5]。1977年,香港建立的“边坡安全系统”(Slope Safety System)采用产生一定数量的人员伤亡和其他损失年度概率表达香港地区的总体风险度,根据风险度对地质灾害进行排序,对风险度大的地质灾害开展治理、搬迁和监测工程。这套系统建立后,香港每年每人因滑坡死亡的概率由1976年的 5×10^{-6} 降低至 5×10^{-7} ^[6-7]。香港所采用的地质灾害总体风险度排序即是风险排序工作。作为开展地质灾害风险管控措施决策的前提工作,地质灾害风险排序能够实现基于有限投入下地质灾害风险管控效益最大化的目标。

地质灾害风险排序的实质是运用量化风险评价公式计算出每处隐患点的风险值,并根据风险值开展排序。2005年,Fell等^[8]提出涵盖了灾害发生概率、灾害体达到承灾体的概率、个人年死亡率、承灾体易损性等要素^[8-9]的量化风险公式。目前在我国部分省份开展了重点区域地质灾害风险调查评价工作,在实施过程中颁布的相关技术规范或指南等,如《贵州省地质灾害详细调查及风险评价技术指南》《浙江省乡镇地质灾害风险调查与评价规范(试用稿)》,

通常将Fell的这个公式作为风险评价的主要公式,但在实际应用中却难以被有效理解,同时在项目实施过程中,这个公式包含的所有评价要素无法完全调查清晰。按照评价尺度与精度,地质灾害风险评价可分为区域地质灾害风险评价与单体地质灾害风险评价^[10]。区域地质灾害风险评价往往以县级及以上区域为评价单元,将地形、地质、人口密度、土地利用等因素叠加计算并进行风险区划,精度往往最高达到乡镇级^[11-12]。而单体地质灾害风险评价是在现场详细调查隐患点、承灾体的空间、时间等属性信息的基础上,开展隐患点潜在失稳与威胁范围预测,分析潜在的生命财产损失^[13-14]。地质灾害风险排序的需求实质是将风险定义在管理实践层面的应用和深化,是将影响因素与风险的概率量化赋值形成“风险排列次序”^[15-16]。

本文在简要分析崩塌、滑坡地质灾害风险评价因素的基础上,从灾害链效应的角度建立涵盖地质灾害基础地质环境条件因素、地质灾害诱发因素与后效应与承灾体易损性的崩塌、滑坡地质灾害风险评价指标体系,基于岩石工程系统(Rock Engineering System, RES)相互作用矩阵与专家打分法确定各级地质灾害风险评价指标因子权重,构建评价因子评分体系,并选用贵州省98处崩塌、滑坡地质灾害隐患点开展模型应用,检验模型的有效性。

1 地质灾害量化风险计算模型

1.1 地质灾害风险评价概念简述

地质灾害风险是指在一定范围内在地质灾害发

生的可能性及其所产生的后果两方面。在对评价区的孕灾环境、致灾因子和承灾因子进行充分研究的基础上,对评价区遭遇不同强度地质灾害的可能性及其可能造成的后果进行定量分析和评估,其定量评价模型^[8]表达如下:

$$R = S \cdot P \cdot V \quad (1)$$

式中: R ——地质灾害风险值,指特定地质灾害造成的人员伤亡、财产损失或经济活动破坏的期望值;

S ——地质灾害易发性值,为基础地质环境条件参数组合值,即在相对稳定的孕育环境下地质灾害发生的可能性,指的是空间尺度;

V ——地质灾害易损性值,指地质灾害失稳运动过程中途经的承灾体的损坏程度;

P ——地质灾害发生概率,为地质灾害诱发因素与后效应参数组合值。

S 与 P 的乘积为地质灾害危险性值 H ,即一定区域和一定时间内在动态影响因素作用下潜在地质灾害发生的概率,指的是空间与时间综合尺度。地质灾害风险体现了地质灾害的自然性和社会性; H 越大表明越容易发生地质灾害,同时 R 越大,表明风险越大,从而可对地质灾害按轻重缓急依次处理,对风险大的灾害体要优先处理。

1.2 地质灾害风险评价因子选取

综合前人研究工作^[17-20],遵循评价指标普遍性与适用性的选取原则,将危险性评价指标分为两大类:(1)地质灾害基础地质环境条件因素(易发性评价指标体系):几何特征参数、岩土体特征参数、灾害体状态参数;(2)地质灾害诱发因素与后效应参数(发生概率指标体系):诱发因素参数、灾害体运动参数与灾害发生后效应参数。将易损性指标划分为三大类:人口易损性因素、物质易损性因素、资源易损性因素。根据地质灾害风险评价因素选取原则、地质灾害危险性评价因素与地质灾易损性评价因素,建立地质灾害风险评价指标体系,包含四层:类型指标层、一级指标层、二级指标层、三级评价指标层,为二级因子的分级参数。

1.3 因子权重确定

评价模型中一级评价指标和二级评价指标采用RES理论考虑各个因子相互作用的影响,综合分析确定评价因子的权重。其方法为:将选取的评价指标置于矩阵的主对角线上,两个评价指标的相互作用置于其他节点上,编码方式选择半定量专家取值法:0表示

无相互影响,1表示弱相互影响,2表示中等相互影响,3表示强烈相互影响,4表示极强相互影响。以此建立RES相互作用矩阵并求取权重值^[21]。

三级评价指标为二级因子的分级参数,其权重通常采用半定量方式,总结各类参数因子及其分支,确定二级因子各个分级的权重值,由0~10表示因子分级的重要程度。

综合以上两种因子权重的确定方法,建立“地质灾害风险评分体系”(表1)。

1.4 地质灾害风险精细化排序模型

总结多年来多位学者研究成果^[17-19]、地质灾害形成机理理论知识与地质灾害风险评价的定义,风险评价的结果主要由地质灾害空间发生概率、时间发生概率、影响范围、后效应与承灾体组成,即易发性、发生概率与易损性的乘积。则定量化风险值计算方法为:

$$R_t = \{[f(a) + f(b) + f(c)] \cdot [f(d) + f(e) + f(g)]\} \cdot f(v) \quad (2)$$

式中: R_t ——风险值;

$f(a)$ ——灾害体几何参数函数;

$f(b)$ ——岩土体特征参数函数;

$f(c)$ ——灾害体状态参数函数;

$f(d)$ ——诱发因素参数函数;

$f(e)$ ——运动参数函数;

$f(g)$ ——灾害发生后效应函数;

$f(v)$ ——易损性参数函数,即易损性值 V_t 。

易发性值、发生概率值与易损性值组合参数可分为三个等级因子:一级因子(A_i)为特征参数,二级因子(B_{ij})为特征参数的子参数,三级因子(C_{ijk})为子参数的分级结果。其计算方法为:

$$Value = \sum_{i=1}^m w_i A_i \cdot \sum_{j=1}^n w_{ij} B_{ij} \cdot \sum_{k=1}^o w_{ijk} C_{ijk} \quad (3)$$

式中: w_i ——一级因子权重;

w_{ij} ——二级因子权重;

w_{ijk} ——三级因子权重。

为直观表现地质灾害风险值,对计算得到的危险性值、易损性值、风险值进行归一化处理,处理方法为:

$$S = \frac{S_t}{S_{\max}} \quad (4)$$

$$H = \frac{H_t}{H_{\max}} \quad (5)$$

$$V = \frac{V_t}{V_{\max}} \quad (6)$$

表 1 地质灾害风险评分体系
Table 1 Geological disaster risk scoring system

因子类型	一级评价因子 (权重)	二级评价因子 (权重)	三级分级(权重)	因子类型	一级评价因子 (权重)	二级评价因子 (权重)	三级分级(权重)
地质灾害基础 地质环境条件 因素(易发性评 价指标体系)	几何特征参数 (16.67)	斜坡高度 (31.82)	$h<50\text{ m}$ (1)	地质灾害诱发 因素与后效应 参数(发生概率 指标体系)	人类工程活动(50)	无(0) 灌溉活动(3) 不合理切坡、蓄水(7) 采矿活动、修建隧道(10)	$<1\ 000\text{ mm}$ (1)
			$50\text{ m}\leq h<100\text{ m}$ (4)				
			$100\text{ m}\leq h<150\text{ m}$ (7)				
			$h\geq 150\text{ m}$ (10)				
			滑坡: $\theta<15^{\circ}$ 、 崩塌: $\theta<25^{\circ}$ (1)				
		斜坡坡度 (31.82)	滑坡: $15^{\circ}\leq \theta<30^{\circ}$ 、 崩塌:			1 000 ~ 1 200 mm(4)	
			$25^{\circ}\leq \theta<50^{\circ}$ (4)				
			滑坡: $30^{\circ}\leq \theta<45^{\circ}$ 、 崩塌:				
			$50^{\circ}\leq \theta<75^{\circ}$ (7)				
			滑坡: $\theta\geq 45^{\circ}$ 、 崩塌: $\theta\geq 75^{\circ}$ (10)				
	潜在失稳范围 方量(36.36)	小型(1)	1 200 ~ 1 400 mm(7)				
		中型(4)					
		大型(7)					
		特大型(10)					
		土质(10)					
	岩土体类型 (24.48)	碎屑(4)	运动参数 (32.14)	灾害体下部是否 有拦挡物(50)	挡墙(2) 茂盛高大树木、竹排墙(5) 低矮树木、拦石网(7)		
		岩质(1)					
		逆向坡(1)					
		土质(10)					
		碎屑(4)					
	斜坡结构类型 (21.43)	水平坡(3)	灾害发生后效 应(35.72)	是否会发生涌浪、堰塞 湖等次生灾害(100)	无(10) 缩减型(1) 约束型(3) 向前(下)推移(5) 向后(上)扩展(7) 扩大型(10)		
						斜向坡(5)	
						顺向坡(8)	
						基覆界面坡(10)	
						$\theta<30^{\circ}$ (1)	
		控滑结构面倾 角(17.35)	$30^{\circ}\leq \theta<50^{\circ}$ (4)	人员易损性 (40.62)	威胁人数(100)	11 ~ 30 人(3) 31 ~ 100 人(5) 101 ~ 1 000 人(7) >1 000 人(10)	
			$50^{\circ}\leq \theta<70^{\circ}$ (7)				
			$\theta\geq 70^{\circ}$ (10)				
			次块状、块状、 整体结构(1)				
			碎块状、镶嵌、 松弛结构(6)				
	岩体结构 (18.37)	松动、散体、 碎裂结构(10)	经济易损性 (34.38)	威胁房屋(30)	21 ~ 50 间(5) 51 ~ 100 间(7) >100 间(10)		
		坚硬岩(1)					
		中等坚硬岩(3)					
		软弱岩体(7)					
		松散体(10)					
	工程岩组 (18.37)	地表未发现明显 变形破坏现象(1)	地质灾害易损 性参数(易损性 指标体系)	威胁道路(30)	无(0) 乡道(3) 县道(5) 省道(7) 国道(10)		
		地表产生少量裂缝, 未贯穿坡体(4)					
		地表产生大量张拉 裂缝,圈闭等(10)					
		开展防灾教育, 开展工程治理(0)					
		进行多类型地质 灾害监测(3)					
	灾害体状态 参数(50)	防灾工程 (16.37)	开展防灾教育, 树立警示牌(7)	是否有大型工厂(40)	无(0) 有(10) 学校、医院(10)		
			无任何防灾工程(10)				
			稳定阶段(1)				
			蠕滑阶段(3)				
			加速阶段(7)				
变形阶段 (43.63)	临滑阶段(10)	资源易损性 (25)	主要威胁对象(100)	旅游区(9) 工厂(7) 居民地(5) 道路(3) 土地(1)			

$$R = \frac{R_i}{R_{\max}} \quad (7)$$

式中: S 、 H 、 V 、 R ——归一化易发性值、危险性值、易损性值和风险值;

S_i 、 H_i 、 V_i 、 R_i ——由公式求得的易发性值、危险性值、易损性值和风险值;

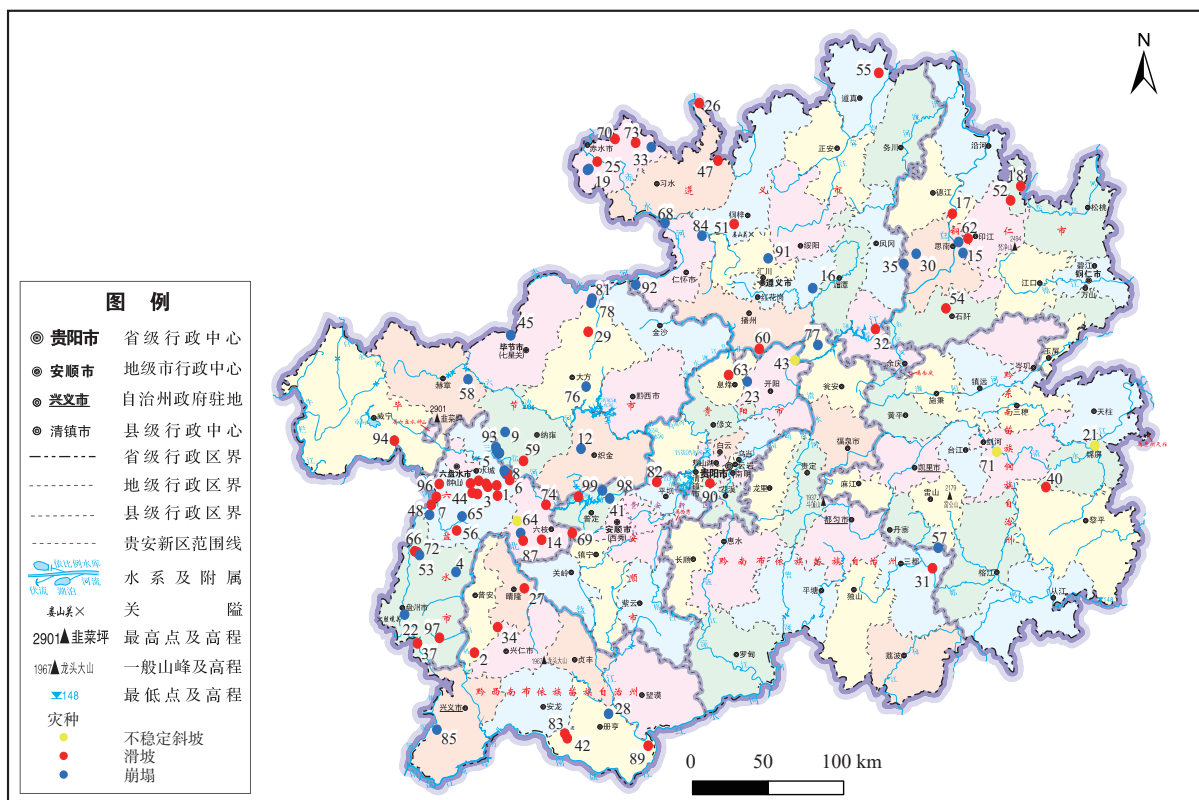
$S_{\max}$ 、 $H_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 、 $R_{\max}$ ——由公式求得的最大易发性值/ 10^5 、最大危险性值/ 10^{10} 、最大易损性值/ 10^5 、最大风险值/ 10^{15} 。

2 模型应用

2.1 模型应用隐患点简析

贵州省具有地质环境复杂、地壳活动剧烈、岩土体松散破碎、植被覆盖率低、地表沟谷发育、采空区分布广等特点,使其成为全国地质灾害发生最频发的地区之一^[22-23]。本次模型应用选取分布在贵州省各个市州的98处地质灾害隐患点(图1),其中包含5处不稳定性斜坡、52处滑坡与41处崩塌。按地理位置划分,隐患点主要分布在六盘水市,共32处,占总数的33.65%;其次为毕节市,共17处,占17.34%;黔东南布依族苗族自治州隐患点最少,仅有3处隐患点;其他市州隐患点数均在5~10处。按照1:5万地质灾害详查标准与所建立的地质灾害风险评价指标体系,查明98处地质灾害隐患点的地质和水文特征、变形破坏现象、人类活动等信息,综合地层岩性、岩体结构、地下水条件、变形破坏迹象以及人类工程活动,对隐患点的发育规模以及潜在失稳范围、体积、潜在威胁的对象数量进行初步估算。

此次调查的不稳定斜坡演变趋势主要以滑坡类型为主,按规模分类均为大型。滑坡有特大型3处、大型13处、中型20处、小型16处,其中岩质滑坡37处、土质滑坡15处;崩塌有特大型9处,大型11处,中型15处,小型6处。所调查的隐患点多以逆向坡为主,仅4处顺向坡;隐患体变形破坏现象较为明显,部分隐患点地表产生大量张拉裂缝;98处隐患点全部开展了专业监测工作,部分灾害点开展了搬迁避让与工程治理相关防灾工作;灾害形成的诱发因素主要有人类活动(修建公路开挖坡脚、采矿等)、自然降雨等;承灾体多以居民地、道路为主,部分隐患点的



审图号: 黔S(2020)007号

图1 模型应用隐患点分布

Fig. 1 Disaster point distribution for model application

承灾体有大型煤矿工厂。

2.2 风险排序结果分析

根据所建立的风险排序模型及评分体系, 对所调查的 98 处地质灾害隐患点开展风险排序工作, 排序结果主要由四个指标值组成(表 2): ①易发性值: 其意义为地质灾害自身条件综合影响下隐患点的稳定性, 易发性值排名前五处隐患点依次为: 杨莫洞崩塌、偏坡组滑坡、马路组崩塌、徐家大塆崩塌、椒子坪崩塌; ②危险性值: 其意义为在外部降雨、开挖等条件影响下隐患点的稳定性, 排名前五处隐患点依次为: 偏坡组滑坡、马路组崩塌、杨莫洞崩塌、松树坡滑坡、小偏坡滑坡; ③易损值: 其意义为灾害一旦发生, 可能造成的人员伤亡及经济损失的严重程度, 排名前五处隐患点依次为: 大偏坡崩塌、岩脚组滑坡、两河口滑坡、园林组滑坡、大坪组滑坡; ④风险值: 其意义为综合考虑灾害发生的可能性及可能造成的人员伤亡、经济损失的评判结果, 排名前五处隐患点依次为: 马路组崩塌、小偏坡滑坡、园林组滑坡、松树坡组滑坡、丫口组崩塌。

部分地质灾害隐患点风险值计算结果如表 2 所示。计算结果中各个值仅代表相对意义, 并无实际代表意义, 因此本模型中未考虑风险等级划分, 这也是地质灾害风险排序真正的意义, 即只是对隐患点风险进行排序, 筛选风险值处于前列的隐患点开展防治工作, 而不是进行风险等级划分。综合按照各个风险值

排序的结果及表 2 中前五位的隐患点风险指标值分析, 地质灾害风险值是由易发性值、危险性值、易损性值综合决定, 例如由计算结果显示易发性值与危险性值排在前列的杨莫洞崩塌、偏坡组滑坡由于其威胁对象相对较少(易损性值较小), 尤其是偏坡组滑坡仅威胁村道和一户人家, 风险分别排在第 18 位与第 67 位。此外, 杨莫洞崩塌在 2019 年 5 月失稳, 由此说明本模型是有效的。

表 3 为风险值前五位的地质灾害隐患点信息概要。5 处隐患点的共同特点为均由地下采空诱发的崩塌与滑坡, 变形量大、威胁人口多等, 威胁区多为人口聚集地(工厂、住宅区), 说明本次工作具有一定合理性。

其中松树坡组滑坡体积最小, 仅 $0.45 \times 10^6 \text{ m}^3$, 属于中型滑坡, 相较于其他 4 处地质灾害点规模较小, 但其山高坡陡, 为滑坡失稳后运动提供了良好条件, 且下方为松树村集中的居民地, 因此该处灾害点风险较大。

2.3 高风险地质灾害隐患点分析

对风险最高的马路组崩塌进行详细分析。崩塌体所在斜坡坡度 $50^\circ \sim 85^\circ$, 长约 950 m, 平均宽 200 m, 厚约 20 m, 体积约 $4.26 \times 10^6 \text{ m}^3$, 崩塌方向 223° , 组成物质为砂页岩及松散第四系黏土(图 2、图 3)。坡顶植被发育, 主要为林木; 崩塌体后缘发现多条地裂缝, 崩塌体前缘发生崩塌, 崩塌堆积物分布于坡脚, 呈倒三角形分布, 坡体表面被崩落碎石覆盖。崩塌体临空面分布较为广泛, 前面开阔, 为灾害体失稳运动提供了地形条件。

灾害体所在斜坡主要为龙潭组(P_3l)黄色砂页岩夹煤层, 灰、灰黄色中细粒岩屑砂岩、砂质页岩夹煤层。坡体内节理裂缝大量发育, 破坏了岩体的整体性, 使岩体呈各向异性特征, 对斜坡稳定性影响较大。区内所调查裂缝多沿结构面开裂, 通过调查统计研究区发育三组优势结构面(C: $40^\circ \angle 10^\circ$ 、J1: $297^\circ \angle 83^\circ$ 、J2: $26^\circ \angle 80^\circ$)。坡体结构面发育, 坡表浅层岩体为碎裂结构, 坡内一定深度岩体为镶嵌-碎裂结构。

经现场调查, 崩塌体裂缝主要分布于后缘和侧边界, 且发育裂隙多集中于后缘。最大裂隙宽度约 2.5 m, 裂缝深度大于 20 m。

现场调查结果表明, 崩塌体威胁 150 户 499 人及坡脚公路上行人车辆的生命财产安全。综合调查区宏观变形破坏现象及邻近灾害体形态, 在陡倾结构面的影响下, 采空区边界一定范围内产生向采空区方向的倾倒变形, 采空区上覆岩体主要以垂直向下的沉陷

表 2 风险指标值

Table 2 Risk indicator values

序号	隐患点名称	易发性值	危险性值	易损值	风险值
1	马路组崩塌	0.656	0.359	0.810	0.291
2	小偏坡滑坡	0.591	0.352	0.777	0.273
3	园林组滑坡	0.557	0.304	0.864	0.263
4	松树坡组滑坡	0.594	0.353	0.714	0.252
5	丫口组崩塌	0.609	0.333	0.714	0.238
6	岩脚组滑坡	0.534	0.249	0.886	0.221
7	金竹组滑坡	0.590	0.322	0.681	0.219
8	苦瓜地崩塌	0.455	0.249	0.809	0.201
9	马路组崩塌	0.656	0.359	0.810	0.291
10	大偏坡滑坡	0.591	0.352	0.777	0.273
18	杨莫洞崩塌	0.719	0.358	0.407	0.146
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
24	两河口滑坡	0.461	0.156	0.867	0.135
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
38	椒子坪崩塌	0.623	0.170	0.659	0.112
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
67	偏坡组滑坡	0.709	0.624	0.168	0.105
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 3 前五处隐患点信息详情

Table 3 Information summary of the first five disasters

序号	隐患点名称	隐患点特征
1	马路组崩塌	总体积约 $4.26\times 10^6\text{ m}^3$,组成物质为砂页岩及松散第四系黏土。坡体结构面发育,坡表浅层岩体为碎裂结构,坡内一定深度岩体为镶嵌-碎裂结。坡顶出现拉张裂缝、塌陷、坡表垮塌、坡顶树木倾倒歪斜等。地下采矿引起;威胁599人、潜在受威胁财产约8 500万元;欠稳定状态
2	小偏坡滑坡	总体积约 $9.22\times 10^6\text{ m}^3$,斜坡结构呈上陡下缓形态,组成物质为泥岩、泥质粉砂岩,岩体节理裂隙发育,岩体破碎。变形破坏特征主要以山顶多条宽约1 m裂缝和坡体中部危岩体为主。地下采矿引起;威胁156人、潜在威胁财产约8 000万元;欠稳定状态
3	园林组滑坡	总体积约 $1.20\times 10^6\text{ m}^3$,斜坡物质组成以崩坡积泥岩、泥质灰岩、砂岩块碎石土为主,基岩节理裂隙发育呈层状碎裂结构或镶嵌碎裂结构,主要受产状为 $298^\circ\angle 85^\circ$ 及缓倾坡内产状为 $34^\circ\angle 12^\circ$ 的层面两组裂隙控制。滑坡后缘已产生两条长度近100 m的平行于斜坡走向的主控裂缝。地下采矿活动引起;威胁295人、固定资产约千万元以上;欠稳定状态
4	松树坡组滑坡	总体积约 $0.45\times 10^6\text{ m}^3$,主要为三叠系下统飞仙关组泥质粉砂岩为主,结构面发育,发育3组结构面: J1: $332^\circ\angle 71^\circ$; J2: $65^\circ\angle 69^\circ$; J3: $13^\circ\angle 67^\circ$,较破碎。滑坡后缘有多条宽约0.5~1 m,长约20~30 m的裂缝。地下采煤活动引起;威胁476人、固定资产约4 500万元;欠稳定状态
5	丫口组崩塌	总体积约 $7.42\times 10^6\text{ m}^3$,崩塌方向 225° ,组成物质为砂页岩及松散第四系黏土。发育三组优势结构面(C: $162^\circ\angle 18^\circ$; J1: $333^\circ\angle 89^\circ$; J2: $247^\circ\angle 82^\circ$)。坡体结构面发育,坡表浅层岩体为碎裂结构,坡内一定深度岩体为镶嵌-碎裂结构。崩塌体后缘发现多条地裂缝,崩塌体前缘发生崩塌,崩塌堆积物分布于坡脚,呈倒扇形分布,地下采煤活动引起;威胁469人、潜在受威胁财产约3 700万元;欠稳定状态



图 2 马路组崩塌全貌

Fig. 2 Panorama of the Maluzu slide

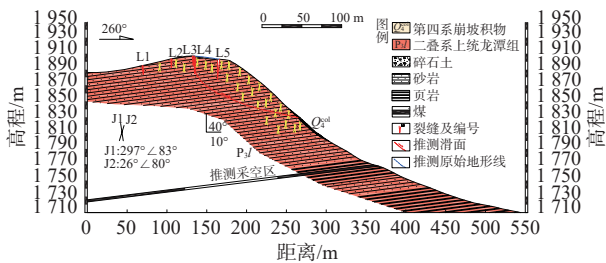


图 3 马路组崩塌剖面图

Fig. 3 Profile of the Maluzu slide

变形为主,这两种变形导致采空区外侧岩体沿煤层产生向坡外的位移。此类变形常具有时效特点,随着煤层开采,坡内发生应力重分布,并向坡表逐渐扩展。首先是采空区顶板产生塌陷,进而导致上覆岩层变形,变形体后缘沿陡倾深大裂缝下错,中部沿弯曲后倾向坡外的层面与陡倾节理组合形成阶梯状滑动面,推动前缘碎裂岩体产生剪切变形,最终形成贯通的滑动面,在斜坡外侧煤层部位形成剪出口。因此采空区诱发斜坡变形机制可以概括为:由采空区顶板变形引发的阶梯状滑移-拉裂变形-剪切滑移式滑坡。

斜坡发育在二叠系龙潭组,其岩性为泥岩、粉砂

岩、泥质粉砂岩、黏土岩及煤层等,其岩石强度低,遇水易软化,抗风化能力差,当地下形成大面积采空区特别是多层重复采动后,易形成崩塌、滑坡、地裂缝、地面塌陷等地质灾害。隐患点坡顶开裂明显,局部可见明显沉降塌陷特征,崩塌中上部山体陡峭,形成陡崖,可以看到明显垮落迹象,目前仍有大规模岩体持续垮塌,特别是雨季垮塌体积更大,在持续垮塌过程中,极易形成大规模崩塌。历年变形迹象对比分析结果显示,崩塌体整体变化较小,但后缘裂缝持续增大,因此判定崩塌处于欠稳定状态。

3 讨论

地质灾害风险排序的工作介于区域地质灾害风险评价与单体地质灾害精细化风险评价工作尺度(精度)之间。区域地质灾害风险评价的目的在于对单元进行地质灾害防治区划,通常是建立在查明地质灾害点与承灾体分布(往往以人口密度、土地利用为主)等信息的基础上,将其转换为空间矢量数据,运用GIS技术进行图层叠加并完成风险分区;其工作覆盖区域大,但精度较低,整个实施过程较为简单。单体地质灾害风险评价基于对单个地质灾害隐患点的详细调查,查明隐患点工程地质条件、变形破坏现象、承灾体分布等,在室内数值模拟、物理模拟等基础上,完成地质灾害潜在失稳范围、影响范围预测及失稳概率分析,同时也需要分析承灾体的暴露度,综合以上工作完成单体地质灾害风险区划;单体地质灾害风险评价实施过程中工作较为繁杂,需要大量专业的地质分析工作,工作精度较高。而地质灾害风险排序工作实质上是一种简化的单体地质灾害风险评价工作,查

明区域内地质灾害隐患点分布特征,按照 1:5 万地质灾害调查标准查明各个隐患点基础地质信息与潜在威胁对象数量等。实现风险排序需要一定的专业基础知识,但不需要复杂的数值模拟、物理模拟等工作。地质灾害风险排序的工作目的与区域地质灾害、单体地质灾害风险评价的目的不同,风险排序旨在查找出一定数量的地质灾害隐患点详查数据中风险处于前列的隐患点,指导开展灾害防治工作。

本文所建立的地质灾害风险排序模型考虑了崩塌、滑坡地质灾害变形阶段等动态因素,但这些因素时效性较低。而地质灾害影响因素众多,演化过程具有明显的非线性与不确定性,同时,地质灾害风险是一个包含时间尺度的概念,是实时动态变化的,因此模型中需加入动态化指标因子,如库水位变化、实时降雨量、人口流动信息等,从而建立动态的实时风险排序模型。此外,本文的模型主要针对崩塌、滑坡,而泥石流无法采用本模型,在后续研究工作中仍需综合考虑崩塌、滑坡、泥石流综合的风险评价模型。

4 结论

(1)本文构建了包含地质灾害基础地质环境条件因素(包括几何特征参数、岩土体特征参数、灾害体状态参数)、地质灾害诱发因素与后效应参数(包括诱发因素参数、灾害体运动参数、灾害发生后效应)与承载易损性参数(包括人口易损性、物质易损性与资源易损性)的崩塌、滑坡地质灾害风险评价指标体系。

(2)以贵州省 98 处地质灾害隐患点为例,开展风险排序模型应用,检验了模型的合理性与有效性。模型中获取的四个风险指标值——易发性值、危险性值、易损性值、风险值,在实际应用过程中可指导不同工作。

(3)本文所建立的风险排序模型是在地质灾害现场调查基础上,运用模型计算出各个隐患点的风险值,对地质灾害风险进行排序从而确定合理的管理次序,最终取得最大化的风险管理效率或效果。在实际应用过程中取决于调查人员对地质灾害隐患点的主观认识。同时,本模型是基于西南山区地质环境背景条件所建立的,在其他地区应用时部分因子需要进行调整。

参考文献 (References) :

- [1] 刘传正,陈春利.中国地质灾害防治成效与问题对策[J].工程地质学报,2020,28(2):375-383. [LIU

- Chuanzheng, CHEN Chunli. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 375-383. (in Chinese with English abstract)]
- [2] COOPER D F. Project risk management guidelines: Managing risk in large projects and complex procurements[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] 戴婧,毕军,马宗伟.风险排序及其在环境风险管控中的应用[J].环境监控与预警,2016,8(1):1-4. [DAI Jing, BI Jun, MA Zongwei. Risk ranking and its applications in environmental risk management[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2016, 8(1): 1-4. (in Chinese with English abstract)]
- [4] MALONE A W, 黄润秋.香港的边坡安全管理与滑坡风险防范[J].山地学报,2000,18(2):187-192. [MALONE A W, HUANG Runqiu. Slope safety and landslides risk management[J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(2): 187-192. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 向喜琼.区域滑坡地质灾害危险性评价与风险管理[D].成都:成都理工大学,2005. [XIANG Xiqiong. Regional landslide assessment and risk management[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005. (in Chinese with English abstract)]
- [6] PUN W K, CHUNG P W K, WONG T K C, et al. Landslide risk management in Hong Kong - experience in the past and planning for the future[J]. Landslides, 2020, 17(1): 243-247.
- [7] KONG V W W, KWAN J S H, PUN W K. Hong Kong's landslide warning system—40 years of progress[J]. Landslides, 2020, 17(6): 1453-1463.
- [8] FELL R, HO KKS, LACASSE S, et al. A framework for landslide risk assessment and management[C]//HUNGR O, FELL R, COUTURE R, et al. Landslide risk management. Vancouver: Taylor & Francis, 2005: 3-25.
- [9] 唐亚明,冯卫,李政国,等.滑坡风险管理综述[J].灾害学,2015,30(1):141-149. [TANG Yaming, FENG Wei, LI Zhengguo, et al. An overview of landslide risk management[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 141-149. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈伟.西南山区城镇建设地质灾害风险管理控制方法研究[D].成都:成都理工大学,2011. [CHEN Wei. Study on geohazard risk management methods in southwest mountain towns construction[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)]

- [11] VAN WESTEN C J, VAN ASCH T W J, SOETERS R. Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult?[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 65(2): 167 – 184.
- [12] 范强, 巨能攀, 解明礼, 等. 2017年九寨沟 $M_s7.0$ 地震前后地质灾害风险对比[J]. *地震研究*, 2019, 42(3): 419 – 427. [FAN Qiang, JU Nengpan, XIE Mingli, et al. Comparison of geological hazard risks before and after Jiuzhaigou $M_s7.0$ Earthquake in 2017[J]. *Journal of Seismological Research*, 2019, 42(3): 419 – 427. (in Chinese with English abstract)]
- [13] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management: An overview[J]. *Engineering Geology*, 2002, 64(1): 65 – 87.
- [14] LUO H Y, ZHANG L L, ZHANG L M. Progressive failure of buildings under landslide impact[J]. *Landslides*, 2019, 16(7): 1327 – 1340.
- [15] CHAPMAN C. Project risk analysis and management—PRAM the generic process[J]. *International Journal of Project Management*, 1997, 15(5): 273 – 281.
- [16] 解明礼. 矿山崩滑地质灾害风险评价与管理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [XIE Mingli. Risk assessment and management of landslide geohazards induced by underground mining[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [17] WARD S C. Assessing and managing important risks[J]. *International Journal of Project Management*, 1999, 17(6): 331 – 336.
- [18] 刘传正. 论地质灾害风险识别问题[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(4): 1 – 7. [LIU Chuansheng. Research on the risk recognition of geological disasters[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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. [LIU Chuansheng. Analysis methods on the risk identification of landslide disasters[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1): 88 – 97. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 何宇航, 裴向军, 梁靖, 等. 基于Rockfall的危岩体危险范围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 24 – 33. [HE Yuhang, PEI Xiangjun, LIANG Jing, et al. Risk assessment and range prediction of dangerous rockmass based on rockfall: a case study of the Xuangou Collapse[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 24 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 李滨, 殷跃平, 高杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 5 – 13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 5 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 陈筠, 郭果. 基于RES理论的潜在滑坡识别[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(3): 456 – 463. [CHEN Jun, GUO Guo. Rock engineering system based identification model for potential landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(3): 456 – 463. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 朱立军, 黄润秋, 朱要强, 等. 中国西南岩溶山地重大地质灾害成灾机理与监测预警系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018. [ZHU Lijun, HUANG Runqiu, ZHU Yaoqiang, et al. Study on the mechanism and monitoring and early warning system of major geological disasters in karst mountainous areas of southwest China [M]. Beijing: China Science Publishing House, 2018. (in Chinese)]

编辑: 汪美华