doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2022.05.013

自然崩落法诱发井下泥石流降雨临界阈值试验

李志钧[1],牛向东[2,3],曾庆田[1],侯克鹏[2,3],李争荣[1,2,3],吴 明[1],彭 张[1],魏银鸿[1]

(1.云南迪庆有色金属有限责任公司,云南 迪庆 674400;
2.昆明理工大学 国土资源工程学院,昆明 650093;
3.云南省中-德蓝色矿山与特殊地下空间开发利用重点实验室,昆明 650093)

摘 要:诱发井下泥石流灾害的降雨阈值是矿山井下泥石流防控重要参数。为获得普朗铜矿诱发井下泥石流的降雨临界阈值,以室内试验为研究方法,开展矿区不同降雨强度工况下诱发井下泥石流的降雨阈值及暴发时间研究。结果表明:当雨强为 0.563 mL/min 时发生破坏性较大井下泥石流概率较大,当雨强为 0.293 mL/min 时诱发井下泥石流概率较小,当雨强为 0.186 mL/min 时则不易形成井下泥石流;降雨强度 0.293 mL/min 是井下泥石流发生的极限临界状态,是诱发井下泥石流的降雨阈值;降雨强度 0.563 mL/min 时,3#、4#和 2#不同放矿口诱发井下泥石流的暴发时间分别为 240、260 和 220 min;降雨强度 0.293 mL/min 时,3#、4#和 2#放矿口诱发井下泥石流的暴发时间分别为 180、200 和 220 min;最后基于水量总量原理验证了试验确定降雨临界阈值的科学性和合理性。研究成果为普朗铜矿及类似矿山井下泥石流的预防和管控提供重要的科学理论依据。

关键词:自然崩落法;细粒冰碛物;井下泥石流;降雨临界阈值;暴发时间

中图分类号:TD853.36;TD862.1;P642.23 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-4172(2022)05-0079-07

Experiment on critical threshold value of rainfall induced by natural caving method for underground debris flow

LI Zhijun[1],NIU Xiangdong[2,3],ZENG Qingtian[1],HOU Kepeng[2,3],LI Zhengrong[1,2,3],
WU Ming[1],PENG Zhang[1],WEI Yinhong[1]

(1. Yunnan Diqing Nonferrous Metals Co.,Ltd.,Diqing Yunnan 674400,China;
2. School of Land and Resources Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650093,China;
3. Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space,Kunming 650093,China)

Abstract:The rainfall threshold is a critical hydrodynamic condition for the formation of downhole debris flow and an important parameter for preventing and controlling the formation of downhole debris flow. In this paper,the indoor similar simulation test is used as a research method to study the rainfall threshold and outbreak time of the mud-rock flow induced by the Pulang copper mine. The results show that:1)When the rainfall intensity is 0.563 mL/min,it will induce a large-energy downhole debris flow. When the rainfall intensity is 0.293 mL/min,there is the potential for the occurrence of underground debris flow. When the rainfall intensity is 0.186 mL/min,there will be no downhole debris flow. 2)Rainfall intensity 0.293 mL/min is the limit critical state for the occurrence of downhole debris flow,and rainfall intensity 0.293 mL/min is the rainfall threshold value for inducing downhole debris flow. 3)When the rainfall intensity is 0.563 mL/min,the eruption times of the underground debris flow induced by different ore outlets of 3#,4#,and 2# are 240 min,260 min,and 220 min,respectively. When the rainfall intensity is 0.293 mL/min,the outburst times of underground debris flow induced by the 3#,4#,and 2# ore exits are 180 min,200 min,and 220 min,respectively. Finally,based on the principle of the total amount of water,the scientificity and rationality of the experimental determination of the rainfall threshold are verified. The research results in this article can provide the theoretical basis for the prevention and control of downhole debris flow in the Pulang copper mine and similar mines.

Key words:natural caving;fine-grained moraine;underground mudslides;rainfall threshold;outbreak time

收稿日期:2022-05-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51964023);云南省基金人培项目(KKSY201521064)
作者简介:李志钧(1983—),男,采矿工程专业。
通信作者:侯克鹏(1966—),男,博士生导师,主要从事边坡力学与岩石力学研究。

相对于井下泥石流而言,地表泥石流具有较强的普遍性及致灾伤亡大,往往引起人们的异常关注,是学者研究的热点之一[1-4]。目前关于泥石流降雨临界阈值研究成果多集中在地表自然坡度下形成的泥石流[5-12];唐旺等[13]为研究降雨型泥石流与降雨量间的关系,采用统计分类方法对丹巴县 254 条自然泥石流的降雨预警阈值进行分类,并给出预警等级和发生可能性大小;李宁等[14]采用遥感技术对沟道泥石流进行了相关研究,结果显示震后泥石流在 2008－2013 年间表现出降雨阈值逐渐增大规律,然而在 2019 年时降雨阈值逐渐减小变化;李锡强等[15]对高山泥石流相关资料分析,表明暴雨诱发泥石流具有很强的时空特点,雨强超过 20 mm/h 工况条件下较易发生泥石流且泥石流发生的高发时段是 20:00-02:00。魏学利等[16]根据公路泥石流的激发雨型及激发雨量特点,研究了降雨型泥石流诱发的降雨阈值,表明降雨历时和雨强均值间表现出反比规律。徐继维等[17]对舟曲泥石流降雨阈值进行了相关研究,基于水文理论获得各频率工况下洪峰流量和降雨阈值,确定了不同预警级别工况时的泥石流发生所需雨强。

相对于地表自然泥石流降雨阈值丰富的研究成果,目前矿山井下泥石流研究成果较少,其中对于地下矿山诱发井下泥石流的降雨阈值和暴发时间研究更是寥寥无几[18-23]。而目前降雨阈值可通过物理模型和经验模型确定,其中物理模型又分为试验模型和概念模型,经验模型分为历史模型和体积模型[24]。因试验模型具有室内重现、直观、可靠等优点被大量用于泥石流研究[25]。通过开展诱发井下泥石流降雨阈值和暴发时间试验模型研究,对具有诱发井下泥石流风险的矿山具有重要的现实指导意义。

1 矿区概况及地质构造

普朗铜矿采用自然崩落法开采,以岩体自重应力对矿体进行崩落,随着开采深度增加和地表塌陷区域不断扩大,一旦遇到汛期,矿区降雨、上游地表径流、高山积雪消融水、甚至滑坡山体等,带动地表的细粒冰碛物覆盖层及风化的破碎岩屑一起涌入塌陷区,极易诱发矿山井下泥石流灾害,给井下出矿系统及人员设备等带来重大安全威胁。矿山从 2019 年开始就已发生多次规模不一的井下泥石流事故,给矿山生产带来较大经济损失。矿区内断裂发育且中、新生代构造活动强烈,矿区范围内主要出露地层见表 1。

表 1 矿区内主要揭露地层系统信息

Table 1 The main outcropping strata within the mining area

地层系统						地层代号	厚度/m
界	系	统	组	段	层		
新生界	第四系					Q	0～81.59
中生界	三叠系	上统	图姆沟组	二段	第二层	T_3t^{2-2}	＞1 000
					第一层	T_3t^{2-1}	1 000
				一段		T_3t^1	＞400
		中统	尼汝组	二段		Tn^2	＞1 485.2

2 矿区细粒冰碛物物源条件

井下泥石流与地表泥石流形成具有一些共性,因此诱发形成井下泥石流也要同时满足三个基本条件:1)物源条件:存在大量松散的固体物质,即矿区地表丰富松散的冰碛物质,矿区第四系地表冰碛物面积约 0.65 km^2,厚度 0～81.59 m;2)有利地形地貌(通道):崩落法回采矿体过程中,地表出现变形塌陷,形成的塌陷坑使地表细粒冰碛物颗粒向塌陷坑内分选汇集,将地表与井下连通,为井下泥石流形成创造有利的通道条件,见图 1;3)水动力条件:能够在短时间补给充足的水源,普朗铜矿矿区内水最大的来源是降雨,每年 5～10 月为矿区雨季,具有降雨集中且降雨历时长等特点。

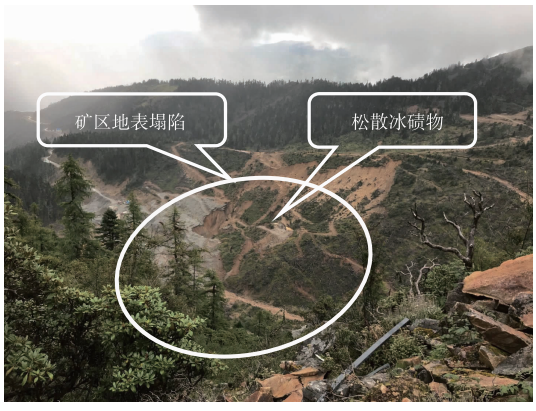


图 1 矿区现场塌陷坑范围

Fig. 1 Surface mining subsidence area scene FIG deformation

3　降雨阈值室内试验研究

3.1　放矿模型及物料技术参数

为开展矿区不同降雨强度工况下诱发井下泥石流的降雨阈值及暴发时间研究,对室内放矿试验模型进行设计,放矿模型试验系统主要由储水装置、放矿装置和降雨装置三部分组成,见图 2～4。

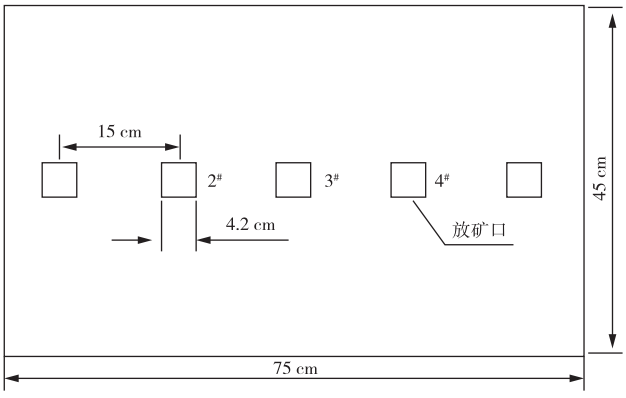


图 2　室内相似试验模型底部结构放矿口设计图

Fig. 2　Indoor test model similar bottom structure ore port design

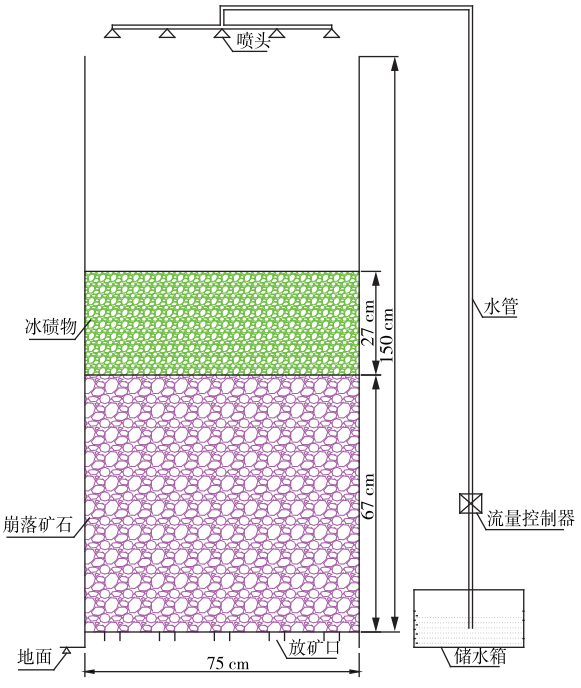


图 3　室内相似试验模型设计图

Fig. 3　Interior design is similar to test model

泥石流室内相似模拟试验所使用冰碛物试验颗粒粒径见表 2,试验矿石颗粒最大粒径不超过 2.3 cm。

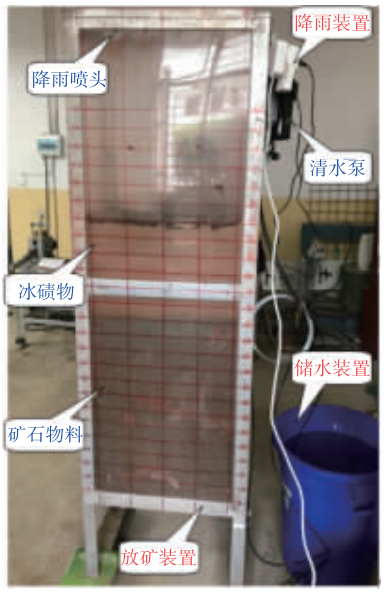


图 4　室内相似试验模型装置实物图

Fig. 4　Physical map of indoor similar test model device

表 2　室内模拟试验冰碛物颗粒特征参数

Table 2　Landslides interior diameter similar simulation test listing particles moraine

原冰碛物颗粒粒径/mm	原冰碛物不同颗粒粒径含量/%	试验所用碛物颗粒粒径/mm
＞20	60.21	＞0.7
20～2	19.67	0.7～0.07
2～0.075	15.55	0.07～0.002 5
≤0.075	4.56	≤0.002 5

3.2　放矿试验降雨强度确定

为研究普朗铜矿放矿过程中诱发井下泥石流的降雨阈值,选取矿区 1975－2010 年间(其中 2006 和 2007 年数据缺失)的日最大雨量、日最小雨量和日平均雨量进行试验。室内模拟试验不同工况条件下的雨强参数,见表 3。

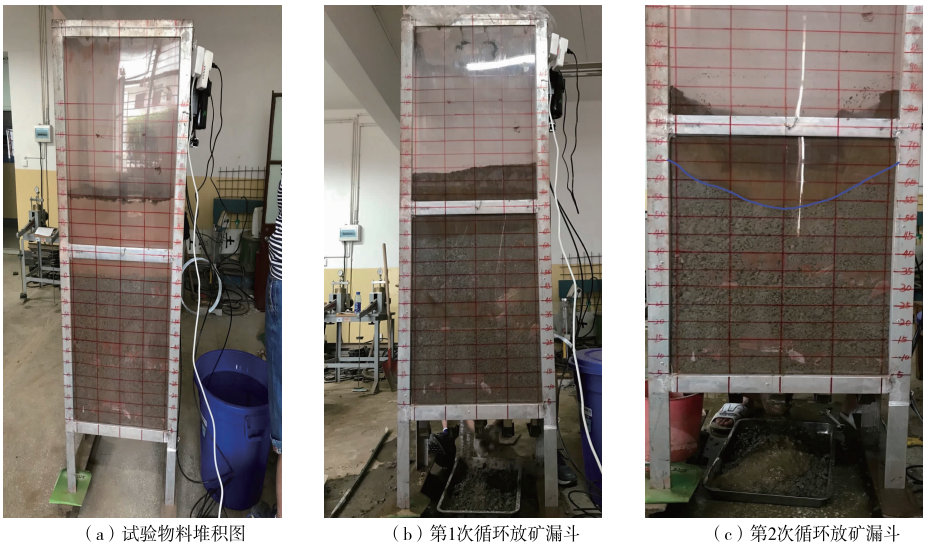
表 3　室内模拟试验不同工况条件下的雨强参数

Table 3　Rainfall intensity list of laboratory tests used

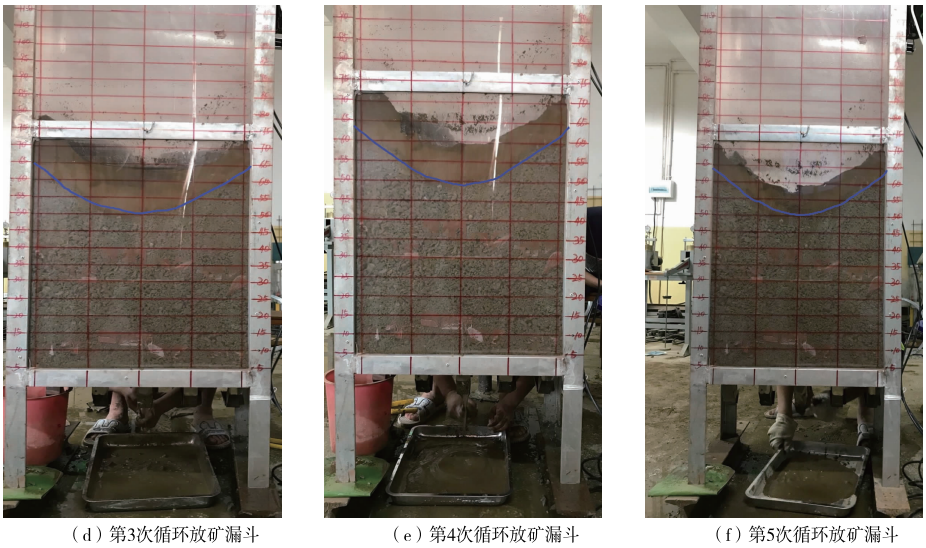
雨强	实际雨强/(mm·h^{-1})	试验雨强/(mL·min^{-1})
日最大雨强	72.2	0.563
日平均雨强	37.7	0.293
日最小雨强	23.7	0.186

3.3　试验过程及数据处理

采用均衡放矿模式进行出矿,出矿口按照 3#→4#→2# 次序放矿,3# 放矿口在雨强 0.563 mL/min时各循环放矿漏斗形态,见图 5。对各放矿口放出的矿石量、地表冰碛物量和水量进行数据分析,得到 3#、4# 和 2# 放矿口放出各物质量占比随放矿时间的变化规律,见图 6～8。



(a)试验物料堆积图 (b)第1次循环放矿漏斗 (c)第2次循环放矿漏斗



(d)第3次循环放矿漏斗 (e)第4次循环放矿漏斗 (f)第5次循环放矿漏斗

图 5 3# 放矿口在雨强 0.563 mL/min 时各循环放矿漏斗图

Fig. 5 3# Drawing funnel diagram of each cycle when the ore exit is at a rain intensity of 0.563 mL/min

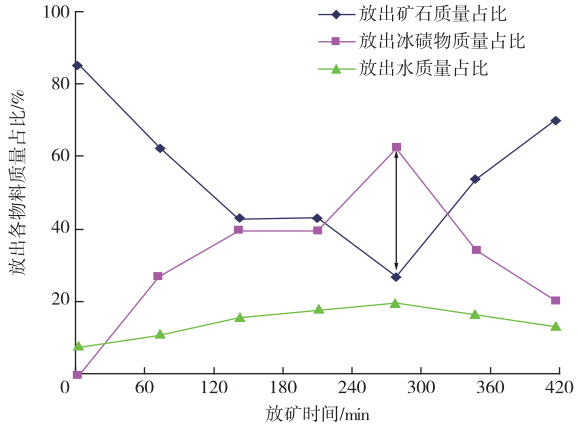


图 6 3# 放矿口放出各物料质量占比随时间变化规律

Fig. 6 3# Variation law of the proportion of the quality of each material discharged from the ore outlet over time

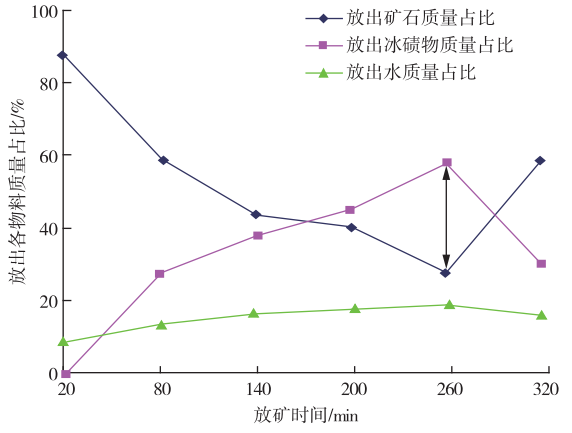


图 7 4# 放矿口放出各物料质量占比随时间变化规律

Fig. 7 4# Variation law of the proportion of the quality of each material discharged from the ore outlet over time

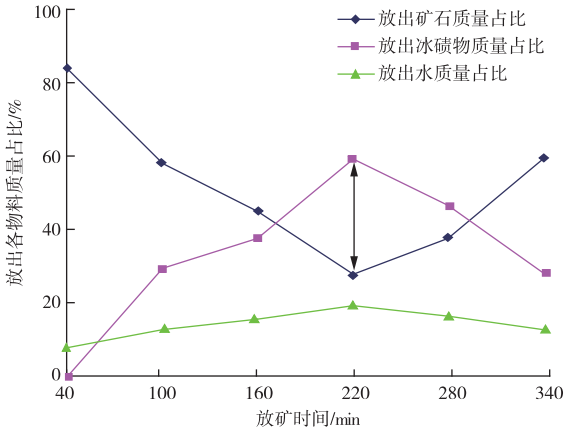


图 8　2# 放矿口放出各物料质量占比随时间变化规律

Fig. 8　2# Variation law of the proportion of the quality of each material discharged from the ore outlet over time

3.4　试验结果分析

地表冰碛物细颗粒物质为井下泥石流发生提供丰富物源条件,矿区雨季持续降雨为井下泥石流形成提供水动力条件。随着放矿量不断增加,冰碛物颗粒逐渐被放出,当冰碛物颗粒放出一定量时会在矿石层中形成通道,为井下泥石流发生奠定有利流通条件。在矿山生产过程中,若满足泥石流发生的三个必要条件,则极易诱发井下泥石流事故。

通过对试验过程和数据分析,在雨强 0.563 mL/min工况条件下,细粒冰碛物与水形成浆体经矿石层中的通道由放矿口以较大速度流出,形成具有能量较大的井下泥石流;在雨强 0.293 mL/min 工况条件下,冰碛物颗粒和水的黏稠混合物流动性较弱,只会在放矿过程中缓慢流出,具有发生井下泥石流的潜能;在雨强 0.186 mL/min 工况条件下,冰碛物颗粒和少量雨水形成黏性较大半固体状膏体,基本不具流动性,形成井下泥石流概率较低。因此,降雨强度 0.293 mL/min 为诱发井下泥石流的临界降雨强度,是井下泥石流发生的极限临界状态,则降雨强度 0.293 mL/min 为诱发井下泥石流的降雨阈值。

分析图 6～8 的 3#、4# 和 2# 放矿口放出各物料质量占比随时间变化规律,当降雨强度 0.563 mL/min时,3#、4# 和 2# 放矿口分别在 240、260 和 220 min 放出矿石量最少且放出冰碛物量最多,同时伴随着大量水被放出,说明各出矿口在此刻形成了冰碛物流动通道,大量冰碛物浆体由出矿口涌出,由此可判断 3#、4# 和 2# 放矿口诱发井下泥石流的暴发时间分别为 240、260 和220 min。同理,当降雨强度 0.293 mL/min 时,3#、4# 和 2# 放矿口诱发井下泥石流的暴发时间分别为 180、200 和 220 min。

4　降雨临界阈值理论核算验证

降雨是井下泥石流形成的主要触发因素,临界阈值是指降雨、水文等因素达到或超过某一数值时可能引发矿山工程灾害[26-27]。目前临界雨量研究方法主要有统计法及理论法,利用水文学理论方法,基于水量总量原理来构建并计算井下泥石流触发的降雨阈值[28-29]。水量平衡方程为:

$$R = P - I \tag{1}$$

式中,R 为径流量水深,m;P 为一次降雨总量,mm;I 为一次降雨入渗量,mm。

以 1 h 为单位,径流区域内径流水深表达式为:

$$R = \frac{3.6 \times 10^6 \sum Q\Delta t}{A} = \frac{3.6 \times 10^6 Q}{A} \tag{2}$$

式中,Q 为径流区域内最大流量,m^3/s;A 为径流区域面积,m^2。

径流系数 K 定义为径流量与降雨总量之比,即:

$$K = \frac{R}{P} = \frac{R}{R + I} \tag{3}$$

则降雨总量 P 可以由径流量 R 和径流系数 K 计算得到:

$$P = \frac{R}{K} = \frac{3.6 \times 10^6 Q}{KA} \tag{4}$$

基于 2020 年普朗矿山井下泥石流事件数据进行分析,2020 年 9 月地表塌陷坑径流区域面积 $A = 233\ 626\ 2.48\ m^2$,通过室内地表冰碛物径流试验得到径流系数 $K = 0.555$,经统计径流区域内最大流量 $Q = 896.497\ m^3/min$。将上述参数带入公式(1)～(4)计算得到 1 h 内的降雨总量 P=41.5 mm,大于试验获得的实际降雨阈值 37.7 mm/h,证明了试验确定井下泥石流降雨临界阈值的科学性和合理性。

5　结论

1)在雨强 0.563 mL/min 工况条件下,极易诱发能量较大的井下泥石流;在雨强 0.293 mL/min 工况条件下,具有发生井下泥石流的潜能;在雨强 0.186 mL/min 工况条件下,形成井下泥石流概率较低。

2)降雨强度 0.293 mL/min 是井下泥石流发生的极限临界状态,是诱发井下泥石流的降雨阈值。

并利用水文学理论方法,基于水量总量原理验证了试验确定降雨临界阈值的科学性和合理性。

3)降雨强度0.563 mL/min时,3#、4#和2#放矿口诱发井下泥石流的暴发时间分别为240、260和220 min;降雨强度0.293 mL/min时,3#、4#和2#放矿口诱发井下泥石流的暴发时间分别为180、200和220 min。

参 考 文 献

[1] 张炜光.控制矿山泥石流沟谷水土流失的防治对策[J].世界有色金属,2019(7):215-218.
ZHANG Weiguang. Control measures of soil and water loss in debris flow valley of mine[J]. World Nonferrous Metals, 2019(7):215-218.

[2] 姜圩.泥石流风险预警模型及应用研究[D].北京:中国地质大学,2019.
JIANG Wei. Research on debris flow risk early warning model and its application [D]. Beijing: China University of Geosciences,2019.

[3] 赵丽娅,韩丽君,樊姝芳,等.台风暴雨型矿山泥石流的形成条件及起动模式[J].地质论评,2018,64(4):947-955.
ZHAO Liya, HAN Lijun, FAN Shufang, et al. Formation condition and starting mode of mine debris flow in typhoon rainstorm[J]. Geological Review,2018,64(4):947-955.

[4] 林巍,李远耀,徐勇,等.湖南慈利县滑坡灾害的临界降雨量阈值研究[J].长江科学院院报,2020,37(2):48-54.
LIN Wei,LI Yuanyao,XU Yong,et al. Rainfall thresholds of rainfall-triggered landslides in Cili county, Hunan province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(2):48-54.

[5] 杨宗佶,王礼勇,石莉莉,等.降雨滑坡多指标监测预警方法研究[J].岩石力学与工程学报,2019,39(10):1-13.
YANG Zongji, WANG Liyong, SHI Lili, et al. Research on monitoring and early warning methods for rainfall-induced landslide based on multivariate thresholds[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,39(10):1-13.

[6] ROSATTI G,ZUGLIANI D,PIRULLI M,et al. A new method for evaluating stony debris flowrainfall thresholds: The backward dynamical approach[J]. Heliyon,2019(5):1-13.

[7] 谢敏,陆甲,李艳兰,等.广西泥石流和滑坡地质灾害临界雨量界定方法[J].气象研究与应用,2018,39(1):15-17.
XIE Min,LU Jia,LI Yanlan,et al. Study on rainfall thresholds for mud slides and landslides in Guangxi[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2018,39(1):15-17.

[8] 李冬,沈世伟.老帽山区泥石流预警雨量阈值研究[J].路基工程,2018(1):225-229.
LI Dong,SHEN Shiwei. Study on rainfall threshold for debris flow presentiment in laomao mountain area[J]. Subgrade Engineering,2018(1):225-229.

[9] 刘海知,马振峰,范广洲.四川省典型区域滑坡、泥石流致灾临界雨量阈值确定方法[J].水土保持通报,2017,37(4):126-131.
LIU Haizhi,MA Zhenfeng,FAN Guangzhou,et al. Methods of determining rainfall thresholds of landslides and debris flows in typical region in Sichuan province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2017,37(4):126-131.

[10] 丁桂伶,王翊虹,冒建,等.北京市泥石流易发区降雨预警阈值研究[J].水文地质工程地质,2017,44(3):136-142.
DING Guiling,WANG Yuhong,MAO Jian,et al. A study of the rainfall threshold of debris flow forewarning in Beijing based on susceptibility analysis[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2017,44(3):136-142.

[11] 刘海知,徐辉,包红军,等.区域降雨诱发滑坡阈值特征分析[J].自然灾害学报,2021,30(4):181-190.
LIU Haizhi, XU Hui, BAO Hongjun, et al. Characteristics analysis of rainfall-induced landslide thresholds in local regions[J]. Journal of Natural Disasters,2021,30(4):181-190.

[12] 左双英,蒲泉,史文兵,等.基于PFC^{3D}位移判据的低渗堆积层滑坡临界降雨阈值反演[J].自然灾害学报,2021,30(3):161-170.
ZUO Shuangying,PU Quan,SHI Wenbing,et al. Back analysis of critical rainfall threshold for landslide in lowpermeable stacking based on displacement criteria on PFC^{3D}[J]. Journal of Natural Disasters,2021,30(3):161-170.

[13] 唐旺,马尚昌,陈锐.基于LSTM的川西北地区降雨型泥石流预警方法[J].桂林理工大学学报,2020,40(4):719-725.
TANG Wang,MA Shangchang,CHEN Rui. LSTM-based early warning method of rainfall debris flow in northwest Sichuan[J]. Journal of Guilin University of Technology,2020,40(4):719-725.

[14] 李宁,唐川,卜祥航,等."5.12"地震后汶川县泥石流特征与演化分析[J].工程地质学报,2020,28(6):1233-1245.
LI Ning, TANG Chuan, BU Xianghang, et al. Characteristics and evolution of debris flows in Wenchuan county after "5·12" earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2020,28(6):1233-1245.

[15] 李锡强,王敏,冉王群,等.四川省九龙县暴雨诱发泥石流的时空特征及其阈值确定[J].四川师范大学学报(自然科学版),2020,43(3):411-416.
LI Xiqiang, WANG Min, RAN Wangqun, et al. Spatial-temporal characteristics and threshold determination for rainfall-induced debris flows in Jiulong county, Sichuan province[J]. Journal of Sichuan Normal University(Natural Science),2020,43(3):411-416.

[16] 魏学利,陈宝成,陈瑞考,等.中巴公路盖孜河段降雨型泥石流的激发雨型及临界阈值研究[J].灾害学,2018,33(增刊1):75-80.
WEI Xueli, CHEN Baocheng, CHEN Ruikao, et al. Rainfall pattern and critical threshold of rainfall type debris flow in Gezi river section of China Pakistan highway[J]. Journal of Catastrophology,2018,33(S1):75-80.

[17] 徐继维,于国强,张茂省,等.舟曲地区泥石流降雨临界阈值[J].山地学报,2017,35(1):39-47.
XU Jiwei, YU Guoqiang, ZHANG Maosheng, et al. Critical

rainfall thresholds for debris flows in Zhouqu, China [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 35(1): 39-47.

[18] 刘晋. 甘肃省岷县矿山泥石流地质灾害治理浅析——以元山沟泥石流为例[J]. 世界有色金属, 2019(3): 236-238.
LIU Jin. Study on Minxian mine geological disaster control in Gansu province [J]. World Nonferrous Metals, 2019(3): 236-238.

[19] 胡以德, 余海东, 杨涛. 基于固相沉积法的大型排土场暴雨泥石流流动特性预测研究——以四川某矿山泥石流为例[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(6): 275-278.
HU Yide, YU Haidong, YANG Tao. The prediction of raintorm debris floes characteristics about large dump based on solid sedimentary-take the mine debris flow in Sichuan as an example [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2016, 30(6): 275-278.

[20] 张青山, 单元磊. 小秦岭矿山泥石流灾害发育现状与防治对策[J]. 河南科技, 2016(9): 148-149.
ZHANG Qingshan, SHAN Yuanlei. Development present situation and control countermeasures of debris flow disaster of the Xiaoqinling mine [J]. Henan Science and Technology, 2016(9): 148-149.

[21] 夏梦想, 李远耀, 吴吉民, 等. 基于 I-D 统计模型的张家界市滑坡灾害降雨预警阈值研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 203-212.
XIA Mengxiang, LI Yuanyao, WU Jimin, et al. Research on rainfall early warning threshold of landslide disaster in Zhangjiajie city based on I-D statistical model[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(4): 203-212.

[22] 常鸣, 唐川. 基于水动力的典型矿山泥石流运动模式研究[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1318-1326.
CHANG Ming, TANG Chuan. Study on typical movement model in mine debris flow based on hydrodynamic force conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1318-1326.

[23] 胡磊, 胡玉乾, 孙鹏, 等. 藏东南地区降雨型滑坡致灾阈值及滑坡危险性量化分析[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 194-199.
HU Lei, HU Yuqian, SUN Peng, et al. A Quantitative analysis of disaster threshold and landslide risk of rainfall-type landslide in Southeast Tibet [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 194-199.

[24] 朱君星, 刘蕊. 排土场滑坡与泥石流成因机理分析及临界雨量的确定[J]. 有色金属(矿山部分), 2017, 69(5): 75-79, 91.
ZHU Junxing, LIU Rui. Mechanism analysis on the dump slide and debris flow and the determination of critical rainfall intensity [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2017, 69(5): 75-79, 91.

[25] 牛向东, 谢晋谊, 侯克鹏, 等. 普朗铜矿井下冰碛补给型泥石流启动机理试验研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(7): 100-106.
NIU Xiangdong, XIE Jinyi, HOU Kepeng, et al. Experimental study on the start-up mechanism of moraine-supplied debris flow in the Prang copper mine [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(7): 100-106.

[26] 何爽爽, 汪君, 王会军. 滑坡泥石流大尺度统计预报模型的实时检验[J]. 大气科学学报, 2019, 42(1): 78-92.
HE Shuangshuang, WANG Jun, WANG Huijun. Real-time warning test of landslide and debris flow with a statistical model in large scale[J]. Trans Atmospheric Sciences, 2019, 42(1): 78-92.

[27] 范江琳, 郭晓军, 青泉, 等. 基于降雨分级的泥石流降雨 I-D 预报模型[J]. 气象科技, 2020, 48(2): 242-247.
FAN Jianglin, GUO Xiaojun, QING Quan, et al. Study of I-D relationship for debris flows based on rainfall classification[J]. Meteorological Science Technology, 2020, 48(2): 242-247.

[28] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
RUI Xiaofang. Principles of hydrology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.

[29] 黄森, 崔素丽, 辛鹏, 等. 天水市"7.25"群发性浅层滑坡降雨阈值及空间分布研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(3): 181-190.
HUANG Sen, CUI Suli, XIN Peng, et al. Study on rainfall threshold and spatial distribution of clustered shallow landslides in Tianshui city on July 25[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(3): 181-190.

(编辑:郭文晶)