

甘肃省白龙江流域不同岩性滑坡降雨阈值研究

陈海龙, 宋晓玲, 张永军, 刘凯欢, 张黎, 刘明霞, 陈冠

Study on rainfall threshold of different lithologic landslides in Bailong River Basin of Gansu Province

CHEN Hailong, SONG Xiaoling, ZHANG Yongjun, LIU Kaihuan, ZHANG Li, LIU Mingxia, and CHEN Guan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202401019>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123

基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11

2004—2018年北京市突发地质灾害时空分布特点和监测预警状况

Temporal-spatial distribution and monitoring and early warning of sudden geological disasters in Beijing during the period of 2004 to 2018

程素珍, 路璐, 翟淑花, 张长敏, 郝春燕, 任凯珍 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 38-46

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

甘肃定西地区地质灾害危险性评价

Risk assessment of geological hazards in Dingxi region of Gansu Province

沈迪, 郭进京, 陈俊合 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 134-142

基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202401019

陈海龙, 宋晓玲, 张永军, 等. 甘肃省白龙江流域不同岩性滑坡降雨阈值研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 40-46.

CHEN Hailong, SONG Xiaoling, ZHANG Yongjun, et al. Study on rainfall threshold of different lithologic landslides in Bailong River Basin of Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 40-46.

甘肃省白龙江流域不同岩性滑坡降雨阈值研究

陈海龙¹, 宋晓玲¹, 张永军¹, 刘凯欢¹, 张 黎¹, 刘明霞¹, 陈 冠²

(1. 甘肃省地质环境监测院(甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室), 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州大学资源环境学院/甘肃省环境地质与灾害防治技术创新中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 降雨引发斜坡破坏的阈值是地质灾害预警的基础。文章以 2004—2019 年白龙江流域甘肃段 5 个县区内因长期强降雨引发的滑坡作为研究对象, 采用频数法研究不同岩性特征的滑坡降雨预警阈值。构建了不同概率等级下, 引发滑坡的事件降雨量(event rainfall)与降雨历时(duration of rainfall)之间的关系模型, 并给出了下限临界累计降雨阈值。通过 2020 年陇南武都区暴雨灾害引发的滑坡特征及降雨数据验证, 滑坡前雨量计监测获得的累计降雨量与模型给出的临界累计降雨阈值基本相符, 对持续强降雨引发的滑坡灾害的预警具有指导意义。

关键词: 白龙江流域; 地质灾害; 气象风险预警; 预警模型研究

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)02-0040-07

Study on rainfall threshold of different lithologic landslides in Bailong River Basin of Gansu Province

CHEN Hailong¹, SONG Xiaoling¹, ZHANG Yongjun¹, LIU Kaihuan¹, ZHANG Li¹, LIU Mingxia¹, CHEN Guan²

(1. Geological Environment Monitoring Institute of Gansu Province / Gansu Province Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University/Gansu Environmental Geology and Geohazards Engineering Research Centre, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The research results regarding the threshold values for slope disasters caused by rainfall are crucial for geological disaster prevention. In this study, landslides induced by long-term heavy rainfall occurred in five counties within the Gansu section of the Bailongjiang Basin between 2004 and 2019. Using the frequency method, the rainfall thresholds for early warning of rainfall type landslides with different rock characteristics were investigated. A relationship model between event rainfall and the duration of rainfall leading to landslides was constructed under different probability levels, and a lower threshold for critical cumulative rainfall was provided. Through verification of landslide characteristics and rainfall data resulting from a flash flood disaster in Wudu District in 2020, the accumulated rainfall measured by the rainfall gauge before the landslide is found to be consistent with the threshold given by the model. This finding is of guiding significance for early warning of landslide disasters caused by sustained heavy rainfall.

Keywords: Bailongjiang Basin; geological hazards; meteorological risk early warning; early warning model research

收稿日期: 2024-01-11; 修订日期: 2024-03-07

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(3ZYQA03262); 自然资源部 2023 年度部省合作试点项目(202351)

第一作者: 陈海龙(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: chenhailong0001@126.com

通讯作者: 张永军(1976—), 男, 正高级工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 445880788@qq.com

0 引言

强降雨多发生在每年 7—8 月,降雨因素为该时间段地质灾害发生的主要影响因素。据历史数据统计,中国约 60% 的突发地质灾害的发生与降雨强度及累计降雨量密切相关,突发地质灾害集中发生在每年暴雨多发的汛期^[1]。

降雨型滑坡预测预报研究一直以来受到国内外学者的关注,研究方向可分为滑坡破坏机理分析和预警预报研究两方面。降雨型滑坡预测预报研究方法包括试验分析法、数值模拟法和数学统计法。黄润秋等^[2]通过室内模型试验揭示了降雨型滑坡随着降雨量的增大,滑坡岩土体孔隙水压力逐渐升高,最终形成滑坡,揭示了降雨型滑坡存在降雨阈值的根本原因。Guzzetti 等^[3]、Sharir 等^[4]认为降雨型滑坡的发生通常与临界降雨量有关,若超过此雨量界限,可能会发生滑坡。

根据分析对象不同,数学统计法又分为滑坡位移与降雨相关性分析法^[5]、滑坡结构与降雨相关性分析法^[6]、经验统计模型法^[7]。甘肃省地质构造复杂,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害非常发育。按年度统计,降雨引发的地质灾害占比约 60% 以上,最高可达 99%(图 1)。甘肃省以区域降雨统计模型、滑坡 24 h 趋势预警模型、泥石流预警模型均属于以数学统计为主的第一代预警模型,在地质灾害气象风险预警中发挥了重要作用^[8-10]。

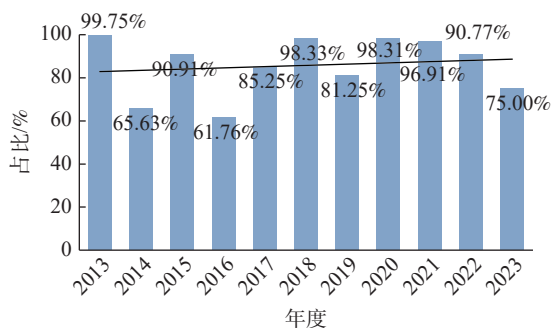


图 1 2013—2023 年甘肃省降雨引发的地质灾害占年度地质灾害的比例图

Fig. 1 Proportion of geological disasters caused by rainfall in annual geological disasters from 2013 to 2023 in Gansu Province

目前,甘肃省的地质灾害气象风险预警模型研究仍处于第一代隐式统计模型向第二代显示统计模型的过渡阶段^[11],预警模型研究及应用相对滞后,精度有待提高。近年来,甘肃省地质灾害气象风险预警模型研究主要集中在地质灾害高发、频发的白龙江流域,且以泥石流灾害预警模型研究为主。比如王高峰等^[12]选取泥石流危险性评价因子:泥石流沟的规模、主沟纵比降、沟

谷发育密度、物源区沟道纵比降,通过综合分析研究,得出了自然沟谷发生泥石流灾害的定量评价模型,为中小型泥石流预警预报提供思路,而针对斜坡类灾害的预警模型研究相对较少。

本文以白龙江流域降雨型滑坡为研究对象,针对不同岩性特征的滑坡,建立了不同概率等级下的滑坡发生时事件降雨量(event rainfall)与降雨历时(duration of rainfall)之间的关系模型,以下简称 ED 模型,为不同岩性类型的斜坡在降雨作用下发生滑坡的阈值研究提供新思路。

1 白龙江流域灾害概况

1.1 地质灾害发育特征

白龙江流域甘肃段包含 5 个县(区),位于长江上游,区内植被发育,受新生代印度—亚洲板块挤压作用影响,断裂构造变形明显^[13]。区内山大沟深,地形地貌复杂、岩土体类型多样、新构造活动强烈、生态环境脆弱,加之地震活动频繁、降雨集中、暴雨频发,建设用地紧张、发展与环境保护矛盾突出。滑坡、泥石流灾害的暴发,不仅严重威胁当地人民的生命财产,也严重制约社会经济发展。

研究区是中国滑坡、泥石流四大高易发区之一,开展区内降雨引发滑坡灾害预警模型研究意义重大。据统计,截至 2023 年底,研究区共发育地质灾害隐患点 5 035 处,占当年全省隐患点总数的 22.97%,隐患点密度为 0.24 处/km²;按类型划分,滑坡 2 776 处,崩塌 910 处,泥石流 1 341 处,地裂缝 1 处,地面塌陷 7 处;按行政区划,宕昌 380 处,武都 2 251 处,文县 1 530 处,迭部 401 处,舟曲 473 处。

1.2 降雨型滑坡界定

本研究以 2000—2019 年研究区发生的滑坡灾害数据为基础。结合自然资源部门地质灾害隐患点台账、县(区)地质灾害区划报告资料、地质灾害调查报告、县志等资料,同时采用多期遥感数据对比分析、室内解译、野外调查、访问、取样、测试等手段,修正补充已有的滑坡灾害台账数据,结合前期降雨事件分析比对,最终整理形成 128 个因降雨引发滑坡的记录,资料详细记录了滑坡事件发生的地点、时间、类型、成因等,数据较为可靠,成为本次研究的对象。经分析,该类滑坡主要分布在白龙江两岸的山坡地带,在 6—9 月多发,占比为 74%,7 月下旬及 8 月上旬,滑坡发生数量达到峰值,其余月份滑坡发生的数量较少,滑坡的发生数量与降雨量和降雨强度基本吻合^[14],与当地灾害发生的规律相符(图 2—3)。

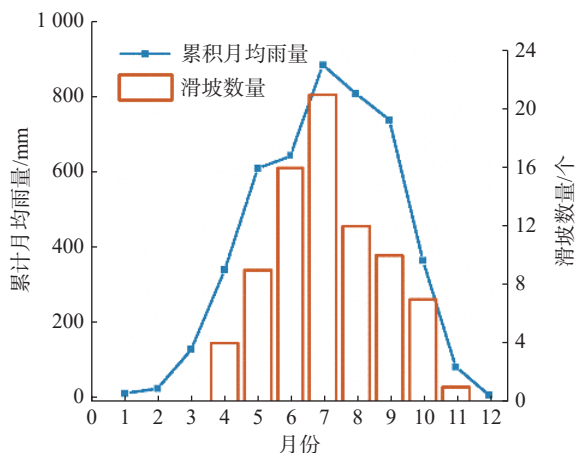


图 2 累计月降雨量与滑坡数量的相关关系

Fig. 2 Correlation between cumulative monthly average rainfall and number of landslides

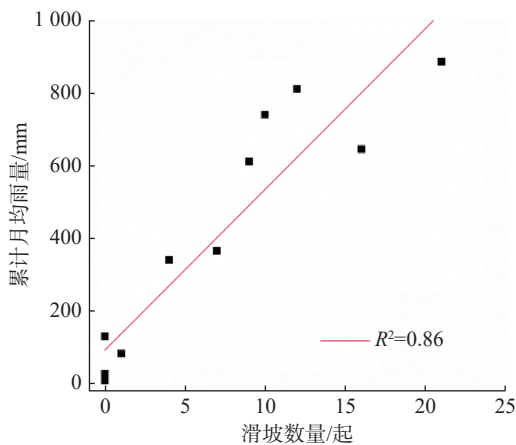


图 3 累计月降雨量与滑坡数量的相关性分析图

Fig. 3 Correlation analysis diagram between cumulative monthly rainfall and number of landslides

2 研究方法

按照滑坡岩性特征将滑坡分为较硬、极软、软硬相间三种类型。对于每种类型的滑坡,采用频数法,分别计算不同降雨事件下滑坡发生的概率,即不同岩性类型的滑坡发生前的事件雨量和降雨历时关系,基于频率法分别获得不同概率条件下 ED 降雨阈值曲线^[15-16],建成滑坡发生概率预警模型。

2010 年 Brunetti 等^[15]发表的论文中指出基于频率法的 ED 降雨阈值符合幂律法则:

$$E = (\alpha \pm \Delta\alpha) \cdot D^{(\gamma \pm \Delta\gamma)}$$

式中: E ——事件雨量/mm;

D ——降雨持续时间/d;

α ——截距, $\Delta\alpha$ 为与 α 相关的变量;

γ ——指数, $\Delta\gamma$ 为与 γ 相关的变量。

假设选择一组滑坡数据,以滑坡发生的概率为 5%、20% 和 50% 3 种情况下,获得对应的截距和指数,绘制 3 条曲线,将滑坡事件分为 4 个区间。即,位于 5% 概率线以下的点表示该降雨事件下的雨量及降雨历时引发滑坡的概率小于 5%。如图 4 所示,通过对滑坡降雨事件数据统计分析,分别获取滑坡发生概率为 5%、20% 和 50% 的 ED 关系曲线,其中,RLs 为诱发滑坡的降雨事件, NRLs 为未诱发滑坡的降雨事件。根据样本数据中滑坡发生概率,采用数据拟合方法,计算获得截距和指数 $\gamma \pm \Delta\gamma$ 取 0.64 ± 0.09 , 概率为 5% 的直线关系 (T5) 为 $E = (5.01 \pm 0.06) \cdot D^{(0.64 \pm 0.09)}$, 概率为 20% 的直线关系为 (T20) $E = (7.08 \pm 0.67) \cdot D^{(0.64 \pm 0.09)}$, 概率为 50% 的直线关系 (T50) 为 $E = (15.14 \pm 1.15) \cdot D^{(0.64 \pm 0.09)}$ 。 a 取值介于 2.07 ~ 16.29, D 取值介于 1 ~ 40 d, 随着滑坡事件概率的增大,相对不确定性增加, ED 之间的关系趋于离散^[17]。通过对本次研究中数据的分析,在概率为 50% 的直线关系中,其相对不确定度为 7.6%;在概率为 20% 的直线关系中,其相对不确定度为 9.5%;在概率为 5% 的直线关系中,其相对不确定度为 1.2%。从图 2 中可以看出,概率为 50% 的曲线关系中,其相对不确定度较低,说明数据较为集中^[18]。

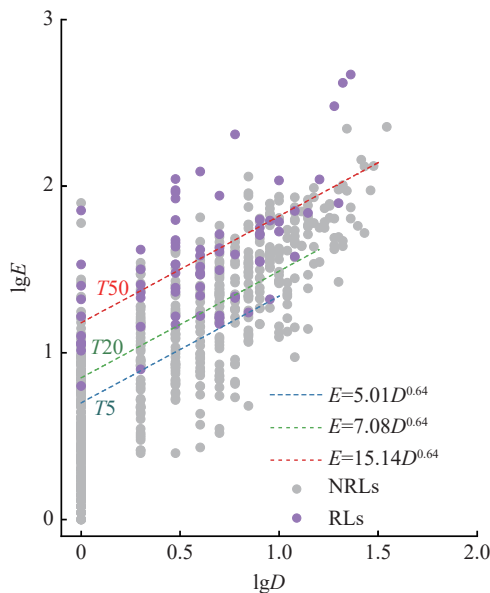


图 4 概率为 T5、T20、T50 的阈值曲线

Fig. 4 Threshold curves for T5, T20, and T50 obtained by frequency method

3 不同岩性滑坡的降雨阈值

根据地层年代、岩体工程性质特征等因素综合考

虑, 将区域内地层岩性按照软弱程度进行分类, 分类标准详见表 1。通过岩性分类结果与 128 处滑坡样本空间分布进行对比, 得出松散物质、软硬相间、极软三种类型的岩性中滑坡灾害多发, 其中, 有 72 起滑坡分布在松散层内, 岩土体类型主要为第四系残坡积碎石土、粉质黏土、强风化千枚岩、砾石, 占比约 56.25%; 有 37 起滑坡分布在软硬相间的岩性中, 岩体类型主要有板岩、千枚岩、浅变质砂岩、砂岩与千枚岩互层岩体, 占比约 28.91%; 有 12 起滑坡分布极软的岩组中, 岩性主要是新近系砾岩、页岩、泥质砂岩等, 占比 9.38%^[19-20]。而坚硬、较软、较硬三种岩性类型中滑坡分布数量为 7 起, 数量较少, 滑坡降雨阈值曲线的拟合效果差, 因此此处不做分析(图 5)。

表 1 岩性类型的划分标准	
软硬类型	主要岩性类型
极软	层状碎屑岩: 古近系砾岩; 新近系砾岩、页岩、泥质砂岩
坚硬	块状岩类: 花岗岩、辉绿岩、辉长岩、闪长岩、闪长玢岩、闪斜煌斑岩等
较软	层状碎屑岩: 白垩系砾岩、砂岩、泥岩
较硬	层状碳酸盐岩: 三叠系、二叠系灰岩、砂岩、页岩等 泥盆系板岩、砂岩、页岩、灰岩等
软硬相间	①层状变质岩: 二叠系砂岩、砂质板岩、凝灰岩、千枚岩; 志留系砂岩、石灰岩、千枚岩、板岩
	②层状碳酸盐岩: 泥盆系板岩、千枚岩、灰岩
	③层状碎屑岩: 侏罗系砂岩、泥岩、砾岩、页岩
松散物质	第四系残坡积碎石土、粉质黏土、强风化千枚岩、砾石

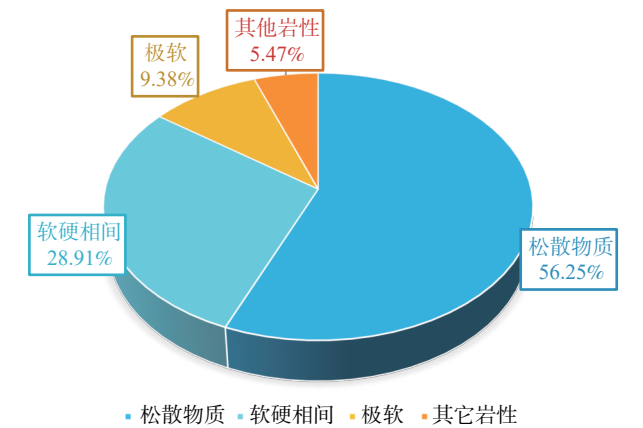


图 5 降雨型滑坡岩土类型分类图

Fig. 5 Classification diagram of rainfall-induced landslides in different rock and soil types

采用频数法对不同岩体类型的滑坡进行分析, 得到概率分别为 15%(低)、25%(中)、40%(高)、60%(极高)时, 降雨 ED 曲线(图 6), 以曲线为下限, 将曲线上部 4 个区间自下而上依次对应定义为低风险区、中风险区、高风险区、极高风险区 4 个预警等级, 即降雨事

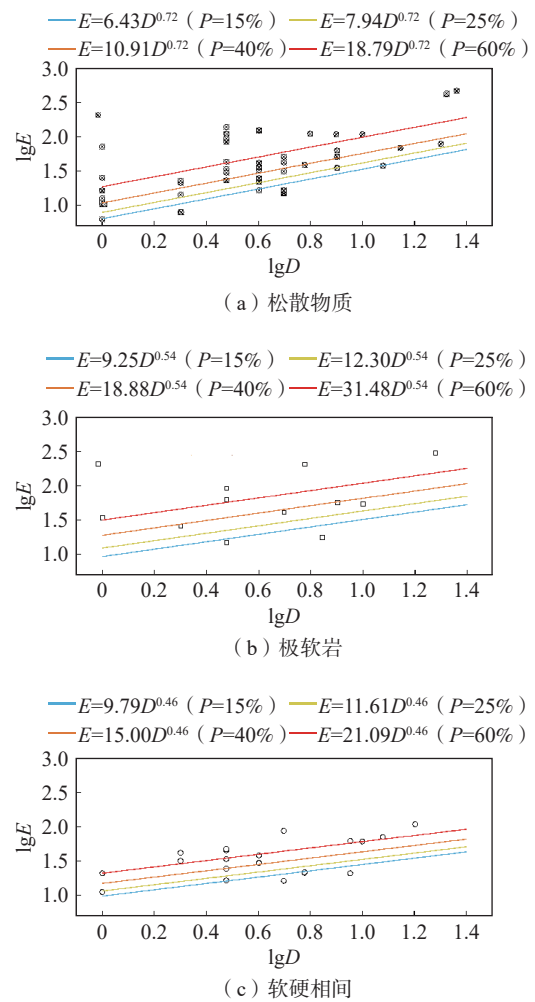


图 6 不同岩性类型滑坡不同预警等级的降雨阈值曲线

Fig. 6 Rainfall threshold curves for different warning levels of landslides with different lithological types

件雨量与降雨历时所对应的点落入 4 个区间中的某一个, 即判定该滑坡的风险等级为该区间的风险等级。

3 种岩性类型的滑坡不同预警等级下限的降雨阈值曲线分别如下:

松散物质: $E=6.43D^{0.72}$ ($P=15\%$, 蓝色预警)、 $E=7.94D^{0.72}$ ($P=25\%$, 黄色预警)、 $E=10.91D^{0.72}$ ($P=40\%$, 橙色预警)、 $E=18.79D^{0.72}$ ($P=60\%$, 红色预警)。

极软岩类: $E=9.25D^{0.54}$ ($P=15\%$, 蓝色预警)、 $E=12.30D^{0.54}$ ($P=25\%$, 黄色预警)、 $E=18.88D^{0.54}$ ($P=40\%$, 橙色预警)、 $E=31.48D^{0.54}$ ($P=60\%$, 红色预警)。

软硬相间: $E=9.79D^{0.46}$ ($P=15\%$, 蓝色预警)、 $E=11.16D^{0.46}$ ($P=25\%$, 黄色预警)、 $E=15.00D^{0.46}$ ($P=40\%$, 橙色预警)、 $E=21.09D^{0.46}$ ($P=60\%$, 红色预警)。

从图 6 中可知, 松散层滑坡降雨阈值曲线的间距较小, 不同预警等级临界累计降雨量差值最小, 降雨量对松散层滑坡作用较快。极软岩类滑坡降雨阈值曲线的

间距较大,不同预警等级临界累计降雨量差值较大,降雨量对滑坡发生反映慢。软硬相间岩类滑坡降雨阈值曲线的间距中等,不同预警等级临界累计降雨量差值中等,降雨量对滑坡发生反映中等。按照 12 d 降雨历时,计算得不同岩性类型斜坡分别在 4 种预警等级下的下限临界累计雨量值(表 2)。

表 2 不同岩性类型的斜坡在各预警等级下发生滑坡前不同降雨历时下的累计雨量

Table 2 Duration and cumulative rainfall before landslides occur on slopes of different rock types at different warning levels

/mm

滑坡类型	预警等级	降雨历时/d											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
松散物质	低($P=15\%$)	6.43	10.59	14.18	17.45	20.49	23.36	26.10	28.74	31.28	33.75	36.14	38.48
	中($P=25\%$)	7.94	13.08	17.51	21.54	25.30	28.85	32.23	35.49	38.63	41.67	44.63	47.52
	高($P=40\%$)	10.91	17.97	24.06	29.60	34.76	39.64	44.29	48.76	53.07	57.26	61.32	65.29
	极高($P=60\%$)	18.79	30.95	41.44	50.98	59.87	68.26	76.28	83.98	91.41	98.61	105.62	112.44
极软岩类	低($P=15\%$)	9.25	13.45	16.74	19.55	22.06	24.34	26.45	28.43	30.30	32.07	33.77	35.39
	中($P=25\%$)	12.30	17.88	22.26	26.00	29.33	32.37	35.18	37.81	40.29	42.65	44.90	47.06
	高($P=40\%$)	18.88	27.45	34.17	39.91	45.02	49.68	54.00	58.03	61.84	65.46	68.92	72.24
	极高($P=60\%$)	31.48	45.77	56.97	66.55	75.07	82.84	90.03	96.76	103.12	109.15	114.92	120.45
软硬相间	低($P=15\%$)	9.79	13.47	16.23	18.52	20.53	22.32	23.96	25.48	26.90	28.23	29.50	30.70
	中($P=25\%$)	11.61	15.97	19.24	21.97	24.34	26.47	28.42	30.22	31.90	33.48	34.98	36.41
	高($P=40\%$)	15.00	20.63	24.86	28.38	31.45	34.20	36.71	39.04	41.21	43.26	45.20	47.05
	极高($P=60\%$)	21.09	29.01	34.96	39.90	44.22	48.09	51.62	54.89	57.95	60.82	63.55	66.15

4 预警模型检验

本文收集了 2020 年陇南“8·17”暴洪灾害期间 59 起滑坡信息及前期降雨资料,其中,滑坡发生与 8 月 11—17 日,降雨数据为滑坡附近雨量站点 8 月 5—18 日逐日累计降雨数据,共计 372 条。按照 3 种岩性类型,分别与上述不同预警等级的降雨阈值曲线对比分析,检验模型的准确性。

根据滑坡事件分析,滑坡多在降雨持续 6 d 后集中暴发。松散物质类滑坡共计 38 起,其中,25 起滑坡发生前降雨事件位于极高风险区,占比约 65.79%;10 起位于高风险区($40\% \leq P < 60\%$),占比约 7.89%;3 起位于中风险区($25\% \leq P < 40\%$),占比约 0。极软岩类滑坡事件共计 9 起,其中,8 起滑坡时降雨事件位于极高风险区($P \geq 60\%$),占比约 88.89%;1 起位于高风险区($40\% \leq P < 60\%$),占比约 11.11%;中、低风险区($P < 40\%$)无滑坡发生。软硬相间滑坡事件共计 12 起,其中,10 起滑坡降雨事件位于极高风险区($P \geq 60\%$),占比约 83.33%;1 起位于高风险区($40\% \leq P < 60\%$),占比约 8.33%;1 起位于低风险区($40\% \leq P < 60\%$),占比约 8.33%;中风险区无滑坡发生(表 3、图 7)。

综上所述,位于极高风险预区的降雨事件,比例最低的为松散物质类滑坡,占比 65.79%,其次为软硬相间滑坡,占比 83.33%,最高为极软岩类滑坡,占比 88.89%,

但都大于 60%,因此,极高风险阈值曲线基本准确。

5 结论

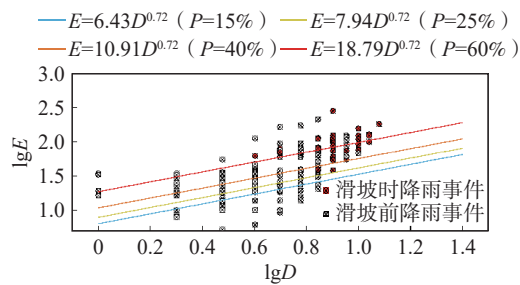
(1)白龙江流域甘肃段地质灾害数量多,严重威胁当地群众的生命财产安全,制约社会经济发展,针对降雨引发斜坡类灾害研究较少,本文为开展该区地质灾害预警预报模型研究提供了新思路。

(2)基于频率法建立了白龙江流域不同岩性特征的滑坡降雨阈值 ED 模型,并给出了累计雨量下限阈值,对白龙江流域斜坡类灾害预警预报具有指导意义。

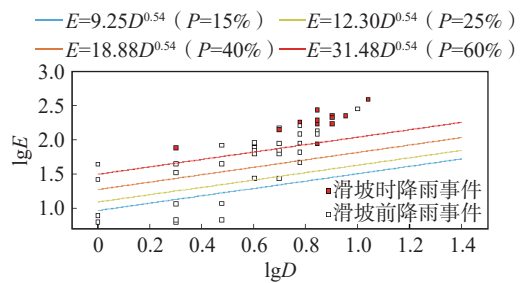
表 3 不同岩性类型滑坡事件对应的预警等级

Table 3 Warning levels corresponding to landslide events of various lithologic types

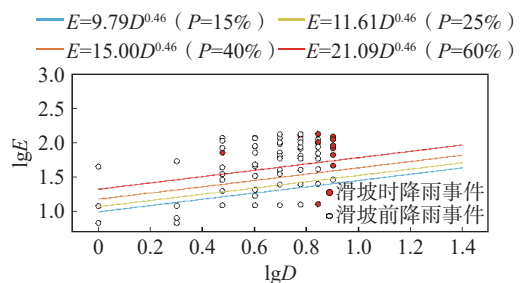
滑坡类型	预警等级	滑坡/处	事件比例/%
松散物质	低($P < 25\%$)	0	0
	中($25\% \leq P < 40\%$)	3	7.89
	高($40\% \leq P < 60\%$)	10	26.32
	极高($P \geq 60\%$)	25	65.79
极软岩类	低($P < 25\%$)	0	0
	中($25\% \leq P < 40\%$)	0	0
	高($40\% \leq P < 60\%$)	1	11.11
	极高($P \geq 60\%$)	8	88.89
软硬相间	低($P < 25\%$)	1	8.33
	中($25\% \leq P < 40\%$)	0	0
	高($40\% \leq P < 60\%$)	1	8.33
	极高($P \geq 60\%$)	10	83.33



(a) 松散物质类滑坡降雨事件与降雨阈值曲线对应关系



(b) 极软岩类滑坡降雨事件与降雨阈值曲线对应关系



(c) 软硬相间滑坡降雨事件与降雨阈值曲线对应关系

图7 滑坡发生前降雨事件与降雨阈值曲线对应关系

Fig. 7 Correspondence between rainfall events and rainfall threshold curves before landslides

(3)通过 2020 年陇南“8·17”暴洪灾害期间,降雨引发的 59 起滑坡事件前期降雨量分析对比,引发滑坡的降雨事件约 65.79% 以上均位于极高风险预警区,与极高风险($P>60\%$)阈值曲线一致。

(4)本文获取的滑坡下限降雨预警曲线,只能通过已发生的滑坡灾害结合前期降雨事件来验证模型准确性,对滑坡发生前的预警曲线校验存在困难,下一步研究中应考虑滑坡发生前不同风险等级预警模型或阈值,为斜坡类地质灾害降雨预警预报提供依据。

参考文献(References):

[1] 刘传正,刘艳辉,温铭生,等.中国地质灾害区域预警方法与应用[M].北京:地质出版社,2009. [LIU Chuanzheng, LIU Yanhui, WEN Mingsheng, et al. Regional early warning method and application of geological disasters in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]

[2] 黄润秋,戚国庆.滑坡基质吸力观测研究[J].岩土工程学报,2004,26(2):216-219. [HUANG Runqiu, QI Guoqing. Observation of suction in a landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 216-219. (in Chinese with English abstract)]

[3] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update [J]. Landslides, 2008, 5(1): 3-17.

[4] SHARIR K, ROSLEE R, LEE K E, et al. Landslide factors and susceptibility mapping on natural and artificial slopes in kudasang, Sabah [J]. Sains Malaysiana, 2017, 46(9): 1531-1540.

[5] 朱智杰,卢书强.基于有效降雨量的滑坡位移-降雨相关性研究[J].长江科学院院报,2022,40(12):162-168. [ZHU Zhijie, LU Shuqiang. Correlation between landslide displacement and rainfall on account of effective rainfall [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 40(12): 162-168. (in Chinese with English abstract)]

[6] 康璇,徐光黎,刘府生,等.降雨条件下多层结构喷出岩滑坡孔隙水压力变化与稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(1):15-22. [KANG Xuan, XU Guangli, LIU Fusheng, et al. Pore pressure and stability analysis of a multi-layered volcanic rock landslide under continuous rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1): 15-22. (in Chinese with English abstract)]

[7] 赵衡,宋二祥.诱发区域性滑坡的降雨阈值[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(5):1481-1487. [ZHAO Heng, SONG Erxiang. Rainfall thresholds for regional landslides [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1481-1487. (in Chinese with English abstract)]

[8] 王锡稳,张铁军,冯军,等.甘肃地质灾害气象等级预报研究[J].干旱气象,2004,22(1):8-12. [WANG Xiwen, ZHANG Tiejun, FENG Jun, et al. Study of the geological calamity meteorological grade prediction in Gansu Province [J]. Journal of Arid Meteorology, 2004, 22(1): 8-12. (in Chinese with English abstract)]

[9] 郭富赞,宋晓玲,谢煜,等.甘肃地质灾害气象预警技术方法探讨[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):127-133. [GUO Fuyun, SONG Xiaoling, XIE Yu, et al. A discussion on the geological hazards meteorological warning system in Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 127-133. (in Chinese with English abstract)]

[10] 刘艳辉,温铭生,苏永超,等.台风暴雨型地质灾害时空特征及预警效果分析[J].水文地质工程地质,2016,43(5):119-126. [LIU Yanhui, WEN Mingsheng, SU

- Yongchao, et al. Characteristics of geo-hazards induced by typhoon rainstorm and evaluation of geo-hazards early warning [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(5): 119 – 126. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 等. 中国地质灾害气象预警实践: 2003—2012 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(1): 1 – 8. [LIU Chuazheng, LIU Yanhui, WEN Mingsheng, et al. arly warning for regional geo-hazards during 2003—2012E, China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(1): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王高峰, 高幼龙, 姚亚辉, 等. 甘肃省白龙江流域降雨型潜在泥石流危险性预报模型 [J]. *中国地质*, 2022, 49(3): 732 – 748. [WANG Gaofeng, GAO Youlong, YAO Yahui, et al. Prediction model of potential debris flow hazard of rainfall type in Bailong River Basin, Gansu Province [J]. *Geology in China*, 2022, 49(3): 732 – 748. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 谢正团. 白龙江流域地质灾害高发区典型城镇地质环境承载力评价与防灾对策 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [XIE Zhengtuan. Geological environment bearing capacity assessment and hazard prevention strategy in typical urban centers with high-frequency geological hazards in Bailong River Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 蒋万钰. 基于贝叶斯概率的降雨数据稀缺山区滑坡预警模型研究——以白龙江中下游为例 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022. [JIANG Wanyu. Landslides early warning model of mountainous areas with scarce rainfall data based on Bayesian probability [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [15] BRUNETTI M T, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(3): 447 – 458.
- [16] 朱文慧, 晏鄂川, 邹浩, 等. 湖北省黄冈市降雨型滑坡气象预警判据 [J]. *地质科技通报*, 2022, 41(6): 45 – 53. [ZHU Wenhui, YAN Echuan, ZOU Hao, et al. Meteorological early warning criterion for rainfall-induced landslides in Huanggang City, Hubei Province [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(6): 45 – 53. (in Chinese with English abstract)]
- [17] ABRAHAM M T, SATYAM N, ROSI A, et al. Usage of antecedent soil moisture for improving the performance of rainfall thresholds for landslide early warning [J]. *CATENA*, 2021, 200: 105147.
- [18] ZHAO Binru, DAI Qiang, HAN Dawei, et al. Probabilistic thresholds for landslides warning by integrating soil moisture conditions with rainfall thresholds [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 276 – 287.
- [19] 汪美华, 李勇, 裴叶青. 甘肃临夏盆地韩集北山滑坡群致灾特征与稳定性评价 [J]. *地质通报*, 2023, 42(2/3): 460 – 468. [WANG Meihua, LI Yong, PEI Yeqing. Disaster-causing characteristics and stability evaluation of landslide group in Hanjibei Mountain, Linxia Basin, Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2/3): 460 – 468. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 卢海峰, 陈海龙, 杨勇, 等. 甘肃武威盆地南缘断裂带晚第四纪活动特征及变形分析 [J]. *地质通报*, 2022, 41(2/3): 327 – 346. [LU Haifeng, CHEN Hailong, YANG Yong, et al. Late quaternary activity characteristics and deformation analysis of the southern margin fault zone in Wuwei Basin, Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(2/3): 327 – 346. (in Chinese with English abstract)]