

## 基于易发性分区的区域滑坡降雨预警阈值确定

宋昭富, 张勇, 余涛, 孙金辉, 韩新强, 陶昶旭

## Determination of regional landslide rainfall warning threshold based on susceptibility zoning: A case study in Longling County of Yunnan Province

SONG Zhaofu, ZHANG Yong, SHE Tao, SUN Jinhui, HAN Xinqiang, and TAO Changxu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209909>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59

#### 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

#### 基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

#### 基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

#### 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



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209909

宋昭富, 张勇, 余涛, 等. 基于易发性分区的区域滑坡降雨预警阈值确定——以云南龙陵县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 22-29.

SONG Zhaofu, ZHANG Yong, SHE Tao, et al. Determination of regional landslide rainfall warning threshold based on susceptibility zoning: A case study in Longling County of Yunnan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 22-29.

## 基于易发性分区的区域滑坡降雨预警阈值确定 ——以云南龙陵县为例

宋昭富<sup>1,2</sup>, 张勇<sup>1,2</sup>, 余涛<sup>1,2</sup>, 孙金辉<sup>1,2</sup>, 韩新强<sup>1,2</sup>, 陶昶旭<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734; 2. 自然资源部地质灾害风险防控  
工程技术创新中心, 四川成都 611734)

**摘要:** 滑坡所处不同易发等级的区域, 降雨预警阈值差别较大。为提高滑坡降雨预警的针对性和准确率, 文章以野外地质调查和滑坡易发条件分析为基础, 结合信息量模型和层次分析法开展滑坡易发性评价, 再通过滑坡发生概率与前期累计降雨量的相关性分析, 分区进行滑坡降雨预警阈值模型研究。结果表明: 坡度、高程、距断层距离、工程地质岩组、水系是龙陵县滑坡的主要孕灾地质条件; 龙陵县滑坡非易发区面积为 14.33 km<sup>2</sup>, 低易发区面积为 1 053.87 km<sup>2</sup>, 中易发区面积为 1 471.65 km<sup>2</sup>, 高易发区面积为 254.73 km<sup>2</sup>; 确定单日和前 3 日为降雨预警时间, 分区分时细化了降雨预警阈值模型; 对比降雨预警阈值模型应用于龙陵县滑坡监测预警中的前后, 预警信息减少了 70 条, 预警准确率提高了 14.4%, 并实现了镇安镇户帕村施家寨组滑坡的有效预警。文章为区域滑坡降雨预警阈值确定提供了一种较好的参考方法。

**关键词:** 滑坡; 易发性分区; 发生概率; 降雨预警阈值模型; 监测预警

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)04-0022-08

## Determination of regional landslide rainfall warning threshold based on susceptibility zoning: A case study in Longling County of Yunnan Province

SONG Zhaofu<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong<sup>1,2</sup>, SHE Tao<sup>1,2</sup>, SUN Jinhui<sup>1,2</sup>, HAN Xinqiang<sup>1,2</sup>, TAO Changxu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, Sichuan 611734, China; 2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 611734, China)

**Abstract:** Areas with different levels of susceptibility to landslides, rainfall warning thresholds vary widely, to improve the pertinence and accuracy of landslide monitoring and early warning. Based on field geological survey and landslide susceptibility condition analysis, this paper combines information quantity model and analytic hierarchy method to carry out susceptibility evaluation, and then analyzes the correlation between landslide occurrence probability and cumulative rainfall, and conducts landslide rainfall early warning threshold model research by zoning. The results showed that: Slope, elevation, geological structure, engineering rock group and water system are the main geological conditions of landslides in Longling

收稿日期: 2022-09-05; 修订日期: 2023-04-04

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(DD20221741)

第一作者: 宋昭富(1995-), 男, 硕士研究生, 从事工程地质和地质灾害研究。E-mail: songzhaofu20@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 张勇(1981-), 男, 正高级工程师, 主要从事工程地质和地质灾害研究工作。E-mail: zhangenhua11@163.com

County; The area of non-prone areas in Longling County was 14.33 km<sup>2</sup>, the area of low prone area was 1 053.87 km<sup>2</sup>, the area of medium prone area was 1 471.65 km<sup>2</sup>, and the area of high prone area was 254.73 km<sup>2</sup>; The rainfall warning time was determined for a single day and the previous 3 days, and the rainfall warning threshold was refined by district; Compared with the rainfall warning threshold model applied to the landslide monitoring and early warning in Longling County, the number of early warning information decreased by 70, the accuracy of early warning was increased by 14.4%, and the effective early warning of landslide in Shijiazhai Formation of Huba Village, Zhen'an Town was realized. This paper provides a good reference method for determining the regional landslide rainfall warning threshold.

**Keywords:** landslide; susceptibility zoning; probability of occurrence; the rainfall warning threshold model; monitoring and early-warning

## 0 引言

滑坡灾害预警预报是减少因灾人员伤亡和经济损失的重要手段,由于降雨是滑坡灾害的主要诱因,区域滑坡预警通常采用降雨作为主要指标之一。在滑坡降雨预警阈值模型构建过程中,通常以不同降雨诱发概率,或通过统计滑坡发生与降雨的关系来确定阈值。而实际上,由于滑坡孕灾地质环境条件不同,降雨诱发滑坡的概率也有所差异。如地形平缓、岩土体工程地质特性较好的区域,强降雨诱发滑坡等地质灾害的概率较小;而地形陡峭,岩土体性状软弱的区域,较小的雨量就会诱发滑坡。因此,区域滑坡降雨预警阈值模型的构建不能一概而论,应当考虑地质环境的差异,区分不同孕灾条件下的降雨阈值。近年来,部分学者开展了基于易发性区划的滑坡灾害降雨预警阈值模型构建研究<sup>[1-5]</sup>,孙德亮<sup>[6]</sup>将奉节县滑坡灾害易发性区划、有效降雨阈值和当日降雨滑坡预警等级调整标准结合,构建了滑坡灾害降雨时空联合预报预警模型;Rosi等<sup>[7]</sup>认为滑坡所处位置发育的植被和岩性组合不同,滑坡发育程度不同,区域降雨预警阈值应分别进行计算;朱映橙等<sup>[8]</sup>利用信息量模型对怒江州地质灾害易发性进行静态评价,采用广义线性模型将动态降雨预报和静态的易发性评价结合起来,建立了地质、气象耦合模型和地质、降雨综合模型。综上所述,基于易发性分区的滑坡灾害降雨预警阈值模型已有一定的研究基础,但降雨预警时间选择,细化易发分区后的预警阈值,在监测预警中的实际应用仍处于探索阶段。本文以云南省龙陵县滑坡灾害为研究对象,在分析地质环境孕灾条件和开展易发性评价的基础上,采用滑坡发生概率和累计降雨量对不同易发区开展降雨预警阈值模型研究,精确降雨预警时间,细化各分区的预警阈值,通过降雨预警阈值模型的实际应用来分析其可行性和有效性,为区域滑坡监测预警中降雨阈值的模型构建提供参考。

## 1 研究区概况

### 1.1 区域概况

龙陵县位于云南省西南边陲,境内山脉起伏盘错,沿怒江流域形成中部高、向东西两侧倾斜的地形;区内以构造侵蚀、剥蚀和岩溶构造地貌为主,同时发育构造堆积地貌和火山地貌;研究区属于怒江大断裂以西的滇西地区,该区域构造运动强烈,断裂活动频繁,形成了一系列沿北东向断裂带发育的新生代断陷盆地;岩性较为复杂,包含第四系覆盖层、碎屑岩、碳酸盐岩、岩浆岩和变质岩等(图1)。龙陵县兼具低纬、季风和山原地势气候特征,属于多雨区,年平均降水量高达2 112.6 mm。区内怒江、龙川江两江环绕,数十条河流和溪沟纵横密布。境内地质灾害以滑坡为主,当前记录在册的降雨型滑坡共132处。

### 1.2 滑坡灾害分布规律和发育特征

研究区内降雨型滑坡主要分布在高程1 500~2 000 m,地形坡度多在16°~21°,多以浅表层土质滑坡为主,沿主要断裂带和河流呈散点状分布,具有规模小、数量多等特点。

## 2 滑坡易发性评价

### 2.1 数据来源

数据源主要包括:(1)滑坡灾害数据来自龙陵县地质灾害管理系统;(2)降雨数据来自县内雨量站点和部分隐患点雨量计监测数据(1996年6月—2022年9月);(3)坡度、高程、水系等信息的提取来自12.5 m×12.5 m DEM数据;(4)地质构造和地层岩性的信息来自1:50 000区域地质图。

### 2.2 易发条件分析与因子选取

滑坡是由本身所处的孕灾地质条件和外部诱发因素共同作用引发的,滑坡易发性评价主要针对孕灾地质环境条件进行分析。通过野外地质调查和发育特征、

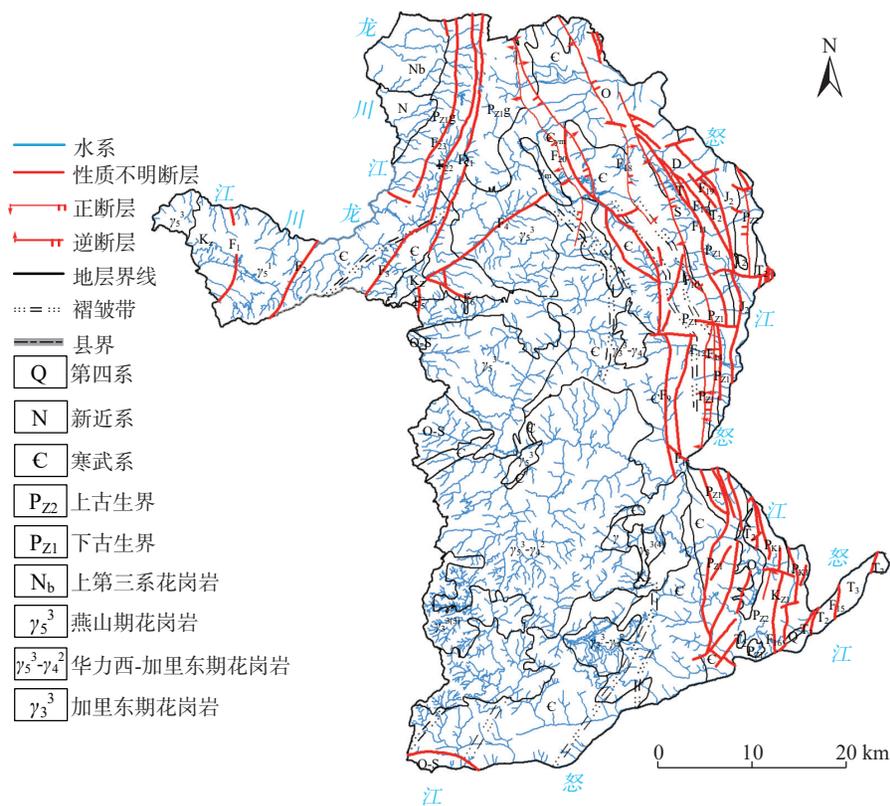


图 1 龙陵县地质环境和滑坡灾害分布图

Fig. 1 Overview of geological and environmental conditions and landslide disaster distribution of Longling County

分布规律的分析, 滑坡灾害集中发育在地形坡度  $16^{\circ} \sim 21^{\circ}$ 、高程 1 500 ~ 2 000 m、距离断裂带小于 500 m、较硬-硬层状碎屑岩的区域中, 并沿水系分布。因此, 选取主要孕灾地质条件开展易发性评价, 包括: 地貌因子(坡度、高程), 地质因子(距断层距离、工程岩组), 水文因子(距水系距离)。

### 2.3 易发性评价

研究区地质环境条件各控灾因子与滑坡分布关系如图 2 所示。基于信息量模型, 采用 GIS 软件提取并计算各个地质环境条件的信息量数据, 各分级区间的信息量值如表 1 所示。利用层次分析法确定其权重值(表 2), 借助 GIS 软件中的地图代数工具进行加权叠加计算, 最后使用自然断点法划分 4 级易发分区, 最终获取研究区易发性分区结果(图 3)。

对易发区划成果进行灾点统计得出, 随着易发等级的提高, 灾害点密度越大(表 3)。采用受试者特征曲线(receiver operating characteristics, ROC)检验易发评价成果。其中 ROC 曲线纵轴代表敏感性, 表示滑坡灾害真实发生的累计频率值; 横轴代表特异性, 表示易发性指数由高到低的栅格累计频率值<sup>[9-10]</sup>。ROC 曲线通过曲线和横轴围成的面积(AUC 值)来检验易发评价成果精

度的高低。其值范围在 0 ~ 1 之间, 值越接近于 1 预测精度越高, 低于 0.5 易发评价成果无意义<sup>[11-12]</sup>。从图 4 模型检验 ROC 图可以看出, AUC 值等于 0.86 接近于 1, 表明易发区划成果较为合理且预测精度较高。

## 3 区域滑坡降雨预警阈值模型构建

### 3.1 滑坡灾害与降雨量相关性分析

滑坡灾害的发生与累积降雨量有密切的关系<sup>[13]</sup>, 研究区多为连续强降雨, 研究滑坡发生和降雨累计天数的相关关系是开展预警阈值研究的前提。Pearson 模型的相关系数是衡量 XY 双变量的线性相关系数, 其绝对值越接近于 1, 相关程度越高。栗倩倩等<sup>[14]</sup>和夏梦想等<sup>[15]</sup>学者在丽水市和张家界地区利用该模型分析部分滑坡灾害发生和前期累计降雨天数的相关性, 同时使用其余滑坡灾害点进行检验, 准确率分别为 84.8% 和 92.5%, 其模型具有良好的分析准确性。利用 SPSS 软件双变量方法中的 Pearson 模型检验滑坡滑动与累计降雨量的相关性, 将 132 个滑坡事件对应时间内滑动次数记作 X 变量, 选取前 1 ~ 8 d 的累计降雨量作为 Y 变量, 导入 SPSS 软件中分析得到相关系数 r(表 4), 参考相关系数与相关程度对照表(表 5)确定降雨预警模型中的累计

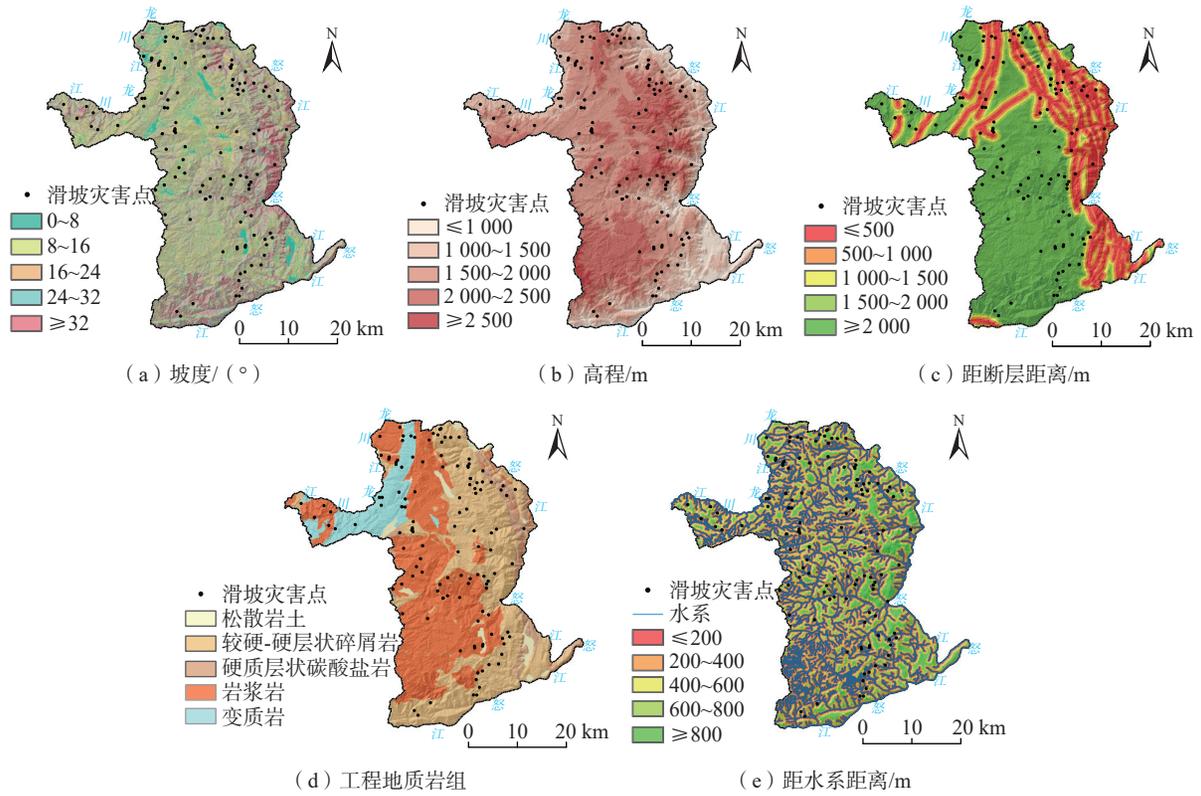


图 2 控灾地质环境条件与滑坡分布图

Fig. 2 Geological environmental conditions and landslide distribution map

表 1 不同孕灾地质环境条件的信息量

Table 1 Information of different disaster-induced geological environmental conditions

孕灾地质条件	分类区间	信息量
坡度/(°)	[0, 8)	-0.116 78
	[8, 16)	0.091 39
	[16, 21)	0.243 05
	[24, 32)	0.222 23
	[32, 90]	-0.175 98
高程/m	[540, 1 000)	-1.871 18
	[1 000, 1 500)	-0.012 76
	[1 500, 2 000)	0.363 76
	[2 000, 2 500)	-0.354 01
	[2 500, 3 001]	-0.925 29
距断层距离/m	[0, 500)	0.556 38
	[500, 1 000)	0.337 42
	[1 000, 1 500)	-0.086 59
	[1 500, 2 000)	-0.008 10
工程地质岩组	[2 000, 25 805]	-0.118 11
	松散岩土	-0.400 00
	较硬-硬层状碎屑岩	0.247 66
	硬质层状碳酸盐岩	-0.309 88
	岩浆岩	-0.164 51
距水系距离/m	变质岩	0.175 83
	[0, 200)	0.038 17
	[200, 400)	0.232 06
	[400, 600)	-0.166 29
	[600, 800)	-0.015 17
[800, 6 134]	-0.053 21	

表 2 龙陵县滑坡灾害地质环境条件权重统计表

Table 2 Statistics of weights of geological and environmental conditions of landslide disaster in Longling County

地质环境条件	坡度	高程	距断层距离	工程地质岩组	距水系距离
权重	0.186	0.142	0.315	0.259	0.098

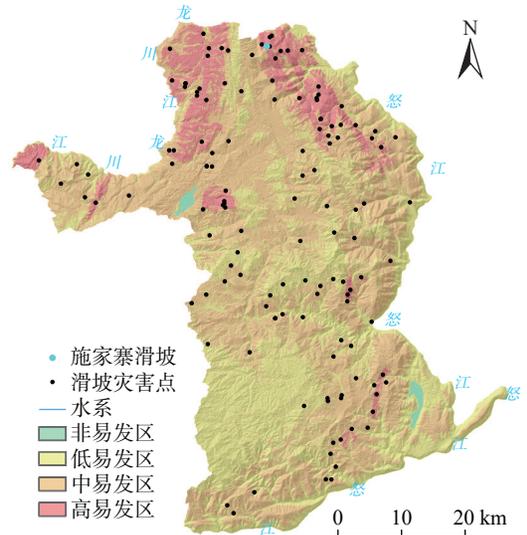


图 3 龙陵县滑坡易发性评价图

Fig. 3 Map of the landslide susceptibility of Longling County

表 3 不同等级的易发区划与实际滑坡分布对比

Table 3 Comparison of the prone zoning of different grades with the actual landslide distribution

易发分区	灾点数量/个	灾点比例/%	面积/km <sup>2</sup>	面积比例/%	灾点密度/km <sup>2</sup>	滑坡面积/km <sup>2</sup>	占总滑坡面积比例/%
非易发区	0	0	14.33	0.51	0	0	0
低易发区	16	12.12	1 053.87	37.46	0.02	0.13	6.11
中易发区	70	53.03	1 471.65	52.96	0.05	0.98	46.71
高易发区	46	34.84	254.73	9.10	0.18	0.99	47.18

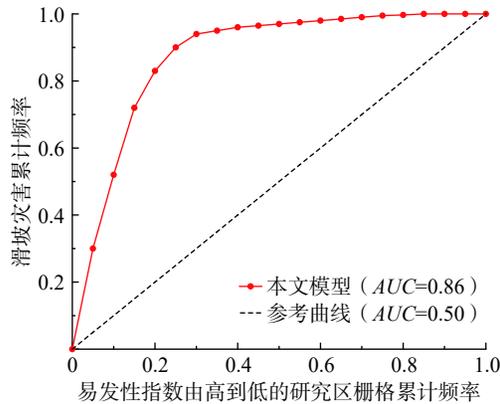


图 4 模型检验 ROC 图

Fig. 4 Model check ROC diagram

降雨量天数<sup>[16-17]</sup>。

表 4 和表 5 表明研究区滑坡发生与前 1 d 和前 3 d 累计降雨量呈高度相关, 因此本文选取前 1 d 和前 3 d 作为滑坡预警参考的累计降雨量天数。

### 3.2 滑坡日降雨量预警阈值选取

滑坡致灾概率值表示滑坡在降雨过程中累计雨量值达某个界限触发的滑坡数量比例<sup>[18-19]</sup>, 参考规范有效降雨致灾概率的划分标准(20%、40%、60%、80%, 其中滑坡非易发区的降雨致灾概率可取 0)<sup>[20]</sup>, 将研究区致灾概率划分为 4 个预警等级, 即蓝色预警(20%~40%)、黄色预警(40%~60%)、橙色预警(60%~80%)和红色预警( $\geq 80\%$ )。不同易发区的降雨致滑坡概率值通过分区统计方式获得, 形成的日降雨量预警阈值选取结果见图 5(图中四色降雨量线条指达到该预警等级

表 4 累计降雨量和滑坡相关性分析

Table 4 Correlation analysis of different times and landslides in the previous period

累计降雨量	相关系数	累计降雨量	相关系数
前 1 d	0.819	前 5 d	0.524
前 2 d	0.785	前 6 d	0.412
前 3 d	0.808	前 7 d	0.316
前 4 d	0.615	前 8 d	0.213

表 5 相关系数与相关强度对照表<sup>[6]</sup>

Table 5 Comparison of correlation coefficient and correlation intensity

相关系数的值	直线相关程度
$ r =0$	完全不相关
$ r \leq 0.3$	微弱相关
$0.3< r \leq 0.5$	低度相关
$0.5< r \leq 0.8$	显著相关
$0.8< r < 1$	高度相关
$ r =1$	完全相关

的最低降雨量值, 同图 6)。

### 3.3 滑坡前 3 d 有效降雨计算与预警阈值选取

滑坡降雨过程中, 雨水入渗速度与岩土体的渗透系数和降雨强度相关。当降雨强度小于或等于渗透系数时, 雨水入渗速度取决于降雨强度或渗透系数; 当降雨强度大于渗透系数时, 坡体表面将形成暂态饱和区, 地表径流量增大, 同时考虑降雨过程中的蒸腾、渗漏及植物吸收作用, 雨水并非全部作用于坡体。本文采用赵衡等<sup>[21]</sup>学者提出的有效降雨定量计算公式:

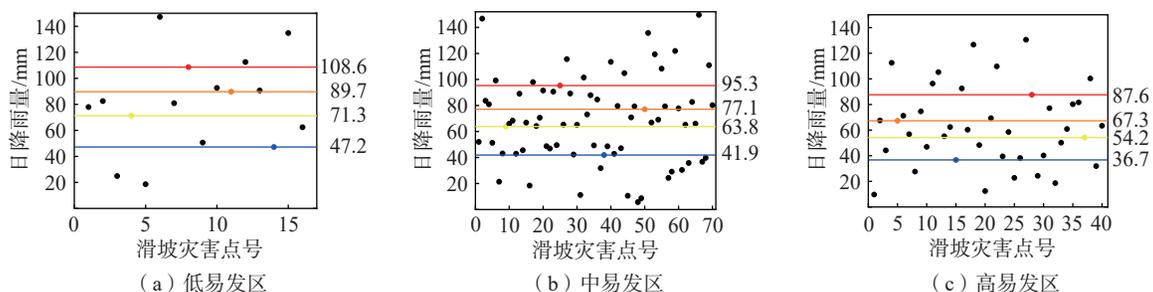


图 5 不同易发等级区划日降雨量预警阈值选取

Fig. 5 Selection of the daily rainfall intensity warning threshold for different susceptibility levels

$$R_{cp} = \sum \alpha^{n_i} R_i \quad (1)$$

式中:  $R_{cp}$ ——一次降雨过程中有效降雨量/mm;  
 $\alpha$ ——滑坡有效降雨系数, 根据云南省滑坡有效降雨系数的研究成果, 本文有效降雨系数取经验值 0.61<sup>[22]</sup>;  
 $R_i$ ——该降雨过程中第  $i$  天的降雨量/mm;

$n_i$ ——降雨时间长度/d。

即研究区 3 d 有效降雨公式为:

$$R_{cp} = 0.61 R_1 + 0.61^2 R_2 + 0.61^3 R_3 \quad (2)$$

统计不同易发分区中前 3 d 降雨情况, 利用式(2)计算滑坡前期有效降雨量值, 得到不同易发区的前期有效降雨预警阈值见图 6。

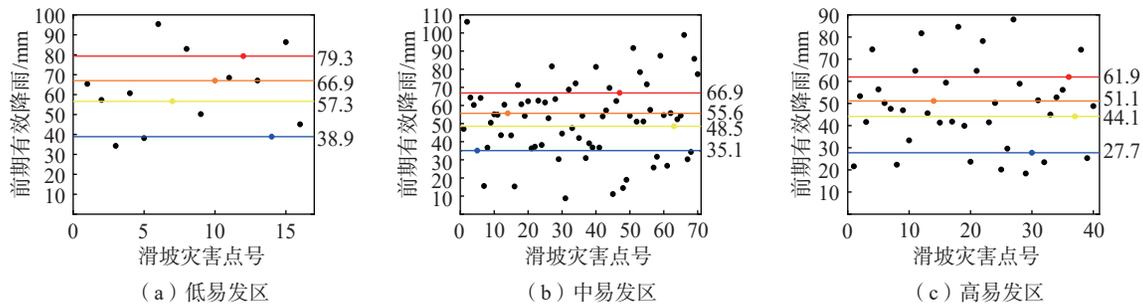


图 6 不同易发等级区划前期有效降雨预警阈值选取

Fig. 6 Selection of effective rainfall warning thresholds in the early stage of different susceptibility levels

图 5 和图 6 表明, 不同易发分区的单日和前 3 d 降雨预警阈值差异较大, 易发等级越高的区域, 诱发滑坡的降雨量值越小, 进一步说明基于易发性分区细化区域滑坡降雨预警阈值的重要性。

### 3.4 滑坡降雨预警阈值选取

基于上述不同等级易发区划, 分别对日降雨量和前 3 d 有效降雨进行四色预警阈值的统计分析, 形成龙陵县滑坡降雨预警阈值模型(表 6)。

表 6 龙陵县滑坡四色预警降雨阈值

Table 6 Landslide four-color warning rainfall threshold of Longling County

易发分区	降雨时段	不同等级预警阈值/mm			
		蓝色	黄色	橙色	红色
低易发区	单日	47.2	71.3	89.7	108.6
	前3 d	38.9	57.3	66.9	79.3
中易发区	单日	41.9	63.8	77.1	95.3
	前3 d	35.1	48.5	55.6	66.9
高易发区	单日	36.7	54.2	67.3	87.6
	前3 d	27.1	44.1	51.1	61.9

### 3.5 实际应用成效

将上述研究取得的易发分区降雨阈值参数应用于龙陵县的滑坡监测预警中, 通过对比分析阈值改变前后(2021 年和 2022 年 5—9 月, 合计监测点 40 个)的降雨预警信息量和预警准确率。降雨预警阈值改变后, 预警信息量明显下降, 预警信息由 172 条下降至 102 条, 其中蓝、黄色和橙、红色预警信息数量分别下降了 62 条

和 8 条。同时通过复核现场变形情况, 预警准确率由 76.8% 提升至 91.2%, 预警的有效性和准确性得到明显提高, 并于 2022 年 7 月 4 日成功预警镇安镇户帕村施家寨组滑坡。

镇安镇户帕村施家寨组滑坡位于龙陵县北部(图 3), 属于高易发区, 地形陡峭, 出露地层岩性为上寒武统保山组泥质条带灰岩, 滑坡体体积约  $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 属于小型土质滑坡。2022 年 7 月 4 日凌晨 4 时日累计降雨量达 51.5 mm, 未达到 2021 年设置的蓝色预警阈值 55.0 mm (未优化前), 满足表 6 中高易发区滑坡降雨蓝色预警的单日降雨预警判据, 云南省地质灾害监测预警管理系统发出雨量蓝色预警(图 7)。同日上午 9 时现场复核发现, 滑坡中后部发育 1~5 cm 的拉张裂缝以及高 40 cm 的错台, 居民房屋墙体出现 2~5 cm 的裂缝(图 8), 滑坡存在明显的变形迹象, 及时对该滑坡补充了简易监测手段并立即上报地方政府, 立即撤离了受威胁的群众。

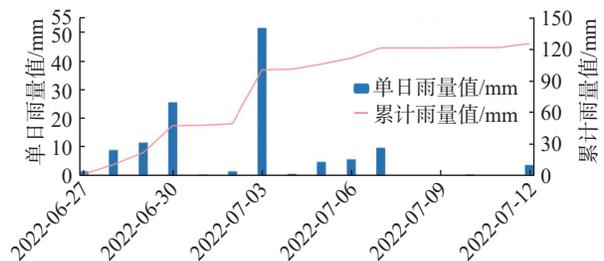


图 7 镇安镇户帕村施家寨组滑坡雨量计蓝色预警前后监测曲线  
 Fig. 7 Monitoring curves of landslide rain gauge before and after early-warning at Shijiazhai of Hupa Village in Zhen'an Town



图 8 镇安镇户帕村施家寨组滑坡现场变形记录图

Fig. 8 Deformation record of the landslide site at Shijiazhai of Hupa Village in Zhen'an Town

#### 4 结论

(1) 基于滑坡野外地质调查和易发条件分析, 总结出坡度、高程、距断层距离、工程地质岩组、水系距离是区域滑坡的主要孕灾地质条件。

(2) 运用信息量模型和层次分析法相结合的滑坡易发性评价方法, 较好的计算出龙陵县滑坡易发性分区, 其中非易发区面积为 14.33 km<sup>2</sup>, 低易发区面积为 1 053.87 km<sup>2</sup>, 中易发区面积为 1 471.65 km<sup>2</sup>, 高易发区面积为 254.73 km<sup>2</sup>。

(3) 通过龙陵县不同易发区滑坡发生概率和累积降雨量的相关性分析, 确定单日和前 3 d 为降雨预警时间, 分区分时细化了降雨预警阈值。

(4) 对比降雨预警阈值模型应用于龙陵县滑坡监测预警中的前后, 预警信息减少了 70 条, 预警准确率提高了 14.4%, 并实现了 2022 年 7 月 4 日镇安镇户帕村施家寨组滑坡的有效预警。

由于不同区域的孕灾地质条件和降雨特征存在明显差异, 后期将进一步总结归纳典型地区的降雨阈值选取方法并进一步优化, 继续支撑服务好地方地质灾害监测预警工作。

#### 参考文献(References):

- [1] 李媛, 杨旭东. 降雨诱发区域性滑坡预报预警方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(2): 101-103. [LI Yuan, YANG Xudong. Research on the forecasting and early warning of the regional precipitation-induced landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(2): 101-103. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 温铭生, 王连俊, 李铁锋, 等. 云南省新平县滑坡预警区划研究 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 103-106. [WEN Mingsheng, WANG Lianjun, LI Tiefeng, et al. Early-warning zoning studying of landslides in Xinping [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 103-106. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 温智熊, 蓝俊康, 梁一敏. 广西龙胜县崩塌和滑坡地质灾害的气象预警预报 [J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(3): 464-468. [WEN Zhixiong, LAN Junkang, LIANG Yimin. Meteorological forecasting and alarming system against geological disasters in Longsheng of Guangxi [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(3): 464-468. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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 of rainfall landslide in Huanggang City, Hubei Province [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 45-53. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 曹中山. 基于易发性和临界降雨阈值的滑坡危险性预警建模研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020. [CAO Zhongshan. Study on landslide risk early warning modeling based on susceptibility and critical rainfall threshold [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 孙德亮. 基于机器学习的滑坡易发性区划与降雨诱发滑坡预报预警研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2019. [SUN Deliang. Study on landslide susceptibility zoning and rainfall-induced landslide prediction and early warning based on machine learning [D]. Shanghai: East China Normal University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [7] ROSI A, SEGONI S, CATANI F, et al. Statistical and environmental analyses for the definition of a regional rainfall threshold system for landslide triggering in Tuscany (Italy) [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(4): 617-629.
- [8] 朱映橙, 李益敏, 魏苏杭. 怒江州滑坡地质灾害气象预警模型研究 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 610-619. [ZHU Yicheng, LI Yimin, WEI Suhang. A prediction model study on landslide in Nujiang State [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2016, 38(4): 610-619. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 夏辉, 殷坤龙, 梁鑫, 等. 基于SVM-ANN模型的滑坡易发性评价——以三峡库区巫山县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 13-19. [XIA Hui, YIN Kunlong, LIANG Xin, et al. Landslide susceptibility assessment based on SVM-ANN Models: A case study for Wushan County in the Three Gorges Reservoir [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 13-19. (in Chinese with English abstract)]

- [10] 刘福臻,王灵,肖东升.机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(6):98-106. [LIU Fuzhen, WANG Ling, XIAO Dongsheng. Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 98-106. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张纪恺,凌斯祥,李晓宁,等.九寨沟县滑坡灾害易发性快速评估模型对比研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8):1595-1610. [ZHANG Qikai, LING Sixiang, LI Xiaoning, et al. Comparison of landslide susceptibility mapping rapid assessment models in Jiuzhaigou County, Sichuan Province, China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1595-1610. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 郭子正,殷坤龙,黄发明,等.基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,2019,38(2):287-300. [GUO Zizheng, YIN Kunlong, HUANG Faming, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on landslide classification and weighted frequency ratio model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 287-300. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张勇,温智,程英建.四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨[J].水文地质工程地质,2020,47(2):178-182. [ZHANG Yong, WEN Zhi, CHENG Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 178-182. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 栗倩倩,史绪山,柴波,等.台风-非台风降雨型滑坡的多时段临界雨量值预测模型[J].地质科技通报,2022,41(2):267-273. [LI Qianqian, SHI Xushan, CHAI Bo, et al. Multiduration critical rainfall prediction model for typhoons and non-typhoon rainfall landslides [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 267-273. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 卢纹岱.SPSS统计分析(第4版)[M].电子工业出版社,2012. [LU Wendai. SPSS Statistical Analysis (4th Edition) [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘谢攀,殷坤龙,肖常贵,等.基于I-D-R阈值模型的滑坡气象预警[J/OL].地球科学,2022(2022-09-05) [2022-07-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220708.1511.002.html>. [LIU Xiepan, YIN Kunlong, XIAO Changgui, et al. Meteorological early warning of landslide based on I-D-R threshold model [J]. Earth Science, 1-15. [2023-05-24] (in Chinese with English abstract)]
- [19] 黄发明,曹中山,姚池,等.基于决策树和有效降雨强度的滑坡危险性预警[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(3):472-482. [HUANG Faming, CAO Zhongshan, YAO Chi, et al. Landslides hazard warning based on decision tree and effective rainfall intensity [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(3): 472-482. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 中国气象局.暴雨诱发的地质灾害气象风险预警等级:QX/T 487—2019[S].北京:气象出版社,2019. [China Meteorological Bureau of the People's Republic of China. Meteorological risk early warning levels of geological disaster induced by torrential rain: QX/T 487—2019 [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2019. (in Chinese)]
- [21] 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)]
- [22] 戴丛蕊,黄玮,李蒙,等.云南降雨型滑坡县级预警雨量阈值分析[J].气象科技,2015,43(4):675-680. [DAI Congrui, HUANG Wei, LI Meng, et al. County-level rainfall warning thresholds for rainfall-induced landslides in Yunnan [J]. Meteorological Science and Technology, 2015, 43(4): 675-680. (in Chinese with English abstract)]