

2024 年汛期重庆市滑坡发育规律 及其与降雨的关联性

曾德强¹, 孙伟², 张钟远¹, 胡明军¹, 余姝¹, 陈鹏飞³, 胡雷¹, 祝田野⁴

(1. 重庆市二零八地质环境研究院有限公司, 重庆 400711;

2. 巫山县规划和自然资源局, 重庆 404700; 3. 重庆市地质矿产勘查

开发局 107 地质队, 重庆 401120; 4. 重庆市地质矿产勘查开发局 205 地质队, 重庆 402160)

摘要: [目的] 分析重庆市降雨型滑坡时空发育规律及其降雨关联性特征, 以期减少地质灾害造成的损失, 为区域性降雨型滑坡预警预测提供科学依据。[方法] 以重庆市 2024 年汛期降雨型滑坡为研究对象, 基于数理统计和地理空间系统分析方法, 分别开展了滑坡地质环境特征、降雨与滑坡关联性分析, 建立 $I-D$ 、 $E-D$ 和 $E-I$ 降雨阈值模型, 采用混淆矩阵对比分析模型精度, 并利用 2025 年 6 月降雨型滑坡数据进行预测能力评价。[结果] ① 研究区滑坡主要发育于低海拔 500~1 000 m, 北坡向, 坡度 10° ~ 30° , 软岩地层, 邻近褶皱及水系 800 m 内的区域; ② 研究区滑坡的发生与降雨关系密切, 表现出明显的临界阈值效应、滞后性和非线性特征; ③ 在建立的多种降雨阈值模型中, $I-D$ 模型的综合预测性能均优于其他模型, 更适用于该地区的滑坡预警; ④ 建立的重庆汛期滑坡 $I-D$ 阈值模型具有地域和时段特异性, 其值高于全球和重庆全年阈值, 但低于华东南地区及全国极端事件阈值, 可作为该地区汛期预警的关键判据。[结论] 地质环境控制了滑坡的空间分布格局, 而降雨是触发滑坡的关键因素。建立的 $I-D$ 阈值模型为区域预警提供了关键依据, 未来实现精准预警需超越单一降雨判据, 构建融合多要素的动态综合模型。

关键词: 降雨型滑坡; 发育规律; 降雨阈值; 重庆市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0121-11

中图分类号: P642.22

文献参数: 曾德强, 孙伟, 张钟远, 等. 2024 年汛期重庆市滑坡发育规律及其与降雨的关联性[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 121-131. Zeng Deqiang, Sun Wei, Zhang Zhongyuan, et al. Patterns of landslide development and their correlation with rainfall in Chongqing City during 2024 flood season [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 121-131.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.031

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.031

Patterns of landslide development and their correlation with rainfall in Chongqing City during 2024 flood season

Zeng Deqiang¹, Sun Wei², Zhang Zhongyuan¹, Hu Mingjun¹, Yu Shu¹, Chen Pengfei³, Hu Lei¹, Zhu Tianye⁴

(1. Chongqing Institute of Geology and Environment Co., Ltd., Chongqing

400711, China; 2. Planning and Natural Resources Bureau of Wushan County, Chongqing

404700, China; 3. 107 Geological Team, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Resources

Exploration and Development, Chongqing 401120, China; 4. 205 Geological Team, Chongqing

Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Chongqing 402160, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal patterns of rainfall-induced landslides in Chongqing City and their correlation with rainfall were analyzed, in order to provide a scientific basis for regional early warning and prediction of such landslides, with the goal of reducing losses caused by geological disasters. [Methods] Using

收稿日期: 2025-05-22

修回日期: 2025-08-20

采用日期: 2025-08-21

资助项目: 重庆市技术创新与应用发展/企业科技攻关联合行动计划项目“基于国产 L-SAR 卫星的重庆市滑坡形变监测方法研究”(CSTB2025TIAD-qykjggX0349); 重庆市二零八地质环境研究院有限公司内部研发课题“极端强降雨条件下小流域浅表层滑坡监测预警模型研究”(YF-202502); 市属国企“四链融合”科技创新项目

第一作者: 曾德强(1982—), 男(汉族), 重庆市渝北区人, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程与地质灾害防治研究。Email: zeng820421@qq.com。

通信作者: 孙伟(1988—), 男(汉族), 湖北省黄冈市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害监测预警工作。Email: 38625695@qq.com。

rainfall-induced landslides during the 2024 flood season in Chongqing City as the research subject, statistical and geospatial analysis methods were applied to examine the geological environmental characteristics of landslides and their association with rainfall. *I-D*, *E-D*, and *E-I* rainfall threshold models were established, and their accuracy was compared using a confusion matrix. The predictive capability of the models was evaluated using landslide data from June 2025. [Results] ① Landslides in the study area primarily occurred in low-elevation areas (500—1 000 m), on north-facing slopes, with gradients of 10° — 30° , in soft rock formations, and within 800 m of folds and river systems. ② The occurrence of landslides was closely related to rainfall, exhibiting clear critical threshold effects, hysteresis, and nonlinear characteristics. ③ Among the various rainfall threshold models established, the *I-D* model demonstrated superior comprehensive predictive performance compared to others, making it more suitable for landslide early warning in the region. ④ The established *I-D* threshold model for Chongqing's flood season landslides was region-and period-specific, with values higher than global and annual thresholds for Chongqing but lower than thresholds for southeastern China and national extreme events. It can serve as a key criterion for early warning during the flood season in this area. [Conclusion] The geological environment controls the spatial distribution pattern of landslides, while rainfall is the key triggering factor. The established *I-D* threshold model provides a critical basis for regional early warning. Achieving precise early warning in the future will require moving beyond single rainfall criteria and developing dynamic comprehensive models that integrate multiple factors.

Keywords: rainfall-induced landslide; development law; rainfall threshold; Chongqing City

多年来,许多学者针对重庆地区开展了大量关于地质灾害的理论与技术应用研究。随着强降雨天气过程频发,地质灾害也呈现高发、多发态势。据统计,2024年重庆市共发生地质灾害284起,其中滑坡162起,超九成成为降雨型滑坡。近年来,地质灾害气象风险预警相关的研究成为热点^[1-2],而地质灾害孕灾地质特征、发育规律,及其与降雨的关联性研究是地质灾害气象风险预警的基础^[3]。

国内外学者在降雨型滑坡触发机制与预测方面开展了广泛研究,核心成果集中于建立降雨阈值模型,揭示滑坡与降雨事件的关联规律。Dai等^[4]研究了香港降雨与浅层滑坡发生之间的关系,结果表明12 h连续强降雨引发浅层滑坡数量较多,与24 h内降雨量密切相关。Sato等^[5]编录了10起日本滑坡的体积、发生时间和降雨数据,通过室内试验和统计分析揭示引发滑坡的降雨特征,提出了降雨量大小与浅层和深层滑坡之间的关系。Zhao Binru等^[6]利用意大利古里亚地区的丰富滑坡记录和密集降雨测量数据,通过贝叶斯分析计算了在极端和非极端降雨条件下滑坡发生的概率,揭示了极端降雨在触发滑坡方面的重要作用和显著性。熊诚等^[7]利用香港2001—2016年滑坡和日降雨量数据,分析香港滑坡数和降雨量之间的定量和定性关系,统计了多时间尺度下累积降雨量大小与导致滑坡发生的概率。许强等^[8]针对2024年4月广东韶关江湾镇极端降雨诱发群发性滑坡事件,利用随机森林模型构建了地质环境与滑坡的非线性关系模型,揭示了研究区群发性降雨型滑坡特征及其发

育规律。降雨阈值模型是揭示滑坡发生与降雨关联性规律的有效途径,广泛应用的降雨阈值模型主要包括降雨强度—持续时间阈值(rainfall intensity-duration, *I-D*)、累积降雨量—持续时间阈值(empirical accumulative rainfall-duration, *E-D*)、累积降雨量—降雨强度阈值(empirical accumulative rainfall-intensity, *E-I*)和降雨强度—前期有效降雨量(intensity-previous effective rainfall, *I-P*)等。在阈值模型的应用效果研究方面,Peruccacci S等^[9]通过意大利大量滑坡案例建立了区域*I-D*阈值并对比了其有效性,曾新雄等^[10]、Zhao Kailang等^[11]及孙强等^[12]分别针对珠海、陕西和浙江泰顺台风降雨滑坡,建立了*E-D*或*I-D*阈值模型,并探索了其在灾害预警或概率阈值计算中的应用。陈贺等^[13]结合GIS和核密度估计法,研究了进藏通道贡山段公路滑坡的地质特征与降雨的关联性,构建了滑坡降雨阈值和预警曲线。

现有研究在识别区域关键降雨触发阈值、探索地质背景的影响以及推动模型在灾害预警中的应用方面奠定了重要基础。虽然*I-D*、*E-D*、*E-I*等阈值模型被广泛应用,但在复杂山地城市中,哪种模型形式最能有效反映滑坡发生的降雨临界条件,缺乏系统性的实证比较和定量评估。鉴于此,本研究以2024年重庆市汛期强降雨诱发149起滑坡事件为例,从地形地貌、地质条件和水文环境等角度分析滑坡与地质环境的关联性,统计滑坡发生前所经历雨强的时间规律,分别建立*I-D*、*E-D*和*E-I*降雨阈值模型,采用混淆矩阵对比分析模型精度,并利用2025年

6月降雨型滑坡数据进行预测能力评价,得出研究区最优阈值曲线,旨在为重庆市突发强降雨或持续强降雨条件下的滑坡地质灾害气象风险预警提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市位于 $105^{\circ}11'—110^{\circ}11'E, 28^{\circ}10'—32^{\circ}13'W$ 。处四川盆地东部盆周山地及盆缘斜坡区,地跨扬子准地台和秦岭褶皱系两大构造单元,地貌以丘陵、山地为主。该区山地、丘陵占91%,地表水系发育、地形切割强烈,岩土体结构及地质构造复杂,具有形成滑坡、崩塌、地面塌陷、泥石流等地质灾害的不良地质条件,是全国地质灾害高易发省市之一。地质灾害主要发生在汛期,尤其是主汛期6—9月最为集中,受短时强降雨、华西秋雨、旱涝急转作用影响较大。2024年汛期共发生地质灾害284起,其中,记录由降雨诱发的共149起(图1)。

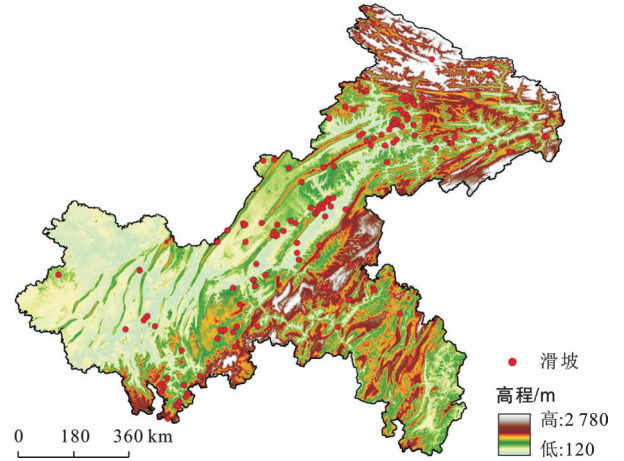


图1 2024年汛期重庆市滑坡分布
Fig.1 Distribution of landslides in Chongqing City during flood season of 2024

1.2 数据来源

本文涉及数据主要有滑坡数据、降雨数据、地质图、数字高程模型DEM(digital elevation model, DEM)。数据来源及质量评述见表1。

表1 研究涉及数据

Table 1 Research data involved

序号	数据类型	数据来源	数据精度	质量评述
1	滑坡数据		坐标定位精确到秒	驻守地质工程师现场调查核实
2	降雨数据	重庆市规划和自然资源局	空间精度为乡镇;时间精度为1h	降雨数据为乡镇多个雨量站监测平均值
3	地质图(提取工程地质岩组、褶皱)		1:50 000	实测数据,满足本研究需要
4	DEM(提取海拔、坡向、坡度、水系)	地理空间数据云	空间分辨率30 m×30 m	用于区域研究,精度满足本研究需要

1.3 研究方法

1.3.1 滑坡样本选取

2024年重庆市汛期共发生降雨型地质灾害149起,剔除数据质量较差的19起,该19起中仅有3起发生于同一乡镇管辖内,其余均零散分布于各乡镇,在时间和空间上分布离散,总体上对研究结果偏差影响不大。将其余130起“滑坡样本”用于建立降雨阈值模型。随机选取45起“滑坡样本”,从发生的时间点倒推一定时间作为“非滑坡”样本的时间点,得到“滑坡”和“非滑坡”样本共175个,用于混淆矩阵分析,确定最优阈值曲线。

1.3.2 降雨阈值模型构建

考虑持续降雨型滑坡的雨量衰减,本研究采用有效降雨模型计算作用于滑坡的前期有效降雨量,计算公式为

$$R_e = R_0 + \alpha R_1 + \alpha^2 R_2 + \dots + \alpha^n R_n \quad (1)$$

式中: R_e 为有效降雨量(mm); R_0 为滑坡发生当日降雨量(mm); R_n 为滑坡发生前 n 天降雨量(mm); α 为有效降雨系数,反映前期降雨的实际入渗情况,参考相关研究, α 取0.8^[14-15]。

降雨强度—持续时间模型($I-D$)、累积降雨量—持续时间模型($E-D$)和累积降雨量—降雨强度模型($E-I$),表达式分别为式(2)、式(3)和式(4)^[16-20]。

$$I = \alpha \cdot D^\beta \quad (2)$$

$$E = \alpha \cdot D^\beta \quad (3)$$

$$E = \alpha \cdot I^\beta \quad (4)$$

式中: I 为降雨强度(mm/h); D 为降雨持续时间(h); E 为累积降雨量(mm); α 和 β 为统计参数。

以降雨持续时间(D)为横轴,降雨强度(I)为纵轴,绘制 $I-D$ 阈值模型双对数坐标散点图。以降雨持续时间(D)为横轴,累积降雨量(E)为纵轴,统计降雨诱发滑坡地质灾害的持续时间和累积降雨量,绘制

E - D 阈值模型双对数坐标散点图。以降雨强度(I)为横轴,累积降雨量(E)为纵轴,统计强降雨诱发滑坡地质灾害的降雨强度和累积降雨量,绘制 E - I 阈值模型双对数坐标散点图。分别采用最小二乘法进行拟合,获得 α 、 β 值,对应代入公式(2)~(4),得到研究区滑坡发生概率为50%时对应的阈值曲线。将统计数据集(I, D)(E, D)(E, I)中的 D, I 数值分别代入50%时对应的阈值线计算,形成 $I_f(D)$ 、 $E_f(D)$ 和 $E_f(I)$ 数据集。将 $I_f(D)$ 、 $E_f(D)$ 和 $E_f(I)$ 减去对应数据集(I, D)(E, D)和(E, I)中的 I, E 和 D ,分别获得差值数据集 d_1, d_2 和 d_3 ,通过核密度估计法,分别构建差值 d_1, d_2 和 d_3 的概率密度和累积概率分布,进一步换算得到滑坡不同发生概率(α),形状参数(β)保持不变^[13,17]。

1.3.3 最优阈值曲线

引入混淆矩阵分类模型,评价降雨阈值曲线的准确性,对比不同阈值模型在研究区的适用性。分类模型有4种可能的结果,分别是真阳性(true positive, TP)、假阳性(false positive, FP)、真阴性(true negative, TN)、假阴性(false negative, FN)。其中,TP表示降雨超过阈值,滑坡发生;FP表示降雨超过阈值,滑坡未发生;TN表示降雨低于阈值,滑坡未发生;FN表示降雨低于阈值,滑坡发生。

根据混淆矩阵进行计算,其中,阈值模型准确率(accuracy, A)表示降雨超过阈值滑坡发生和降雨低于阈值滑坡未发生的数量占滑坡总数的比值;漏报率(miss rate, MR)表示降雨低于阈值滑坡发生数量占总滑坡数量的比值;误报率(false alarm, FA)表示降雨量超过阈值滑坡未发生数量占非滑坡数的比值^[18]。计算公式为

$$A = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (5)$$

$$MR = \frac{FN}{TP + FN} \quad (6)$$

$$FA = \frac{FP}{FP + TN} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 滑坡发育特征

2.1.1 地形地貌关联性

研究区滑坡发生在海拔500—1 000 m的数量最多,有76起,占51%;其次为<500 m的区域,有62起,占总数的42%。在海拔500—1 000 m之间发育密度最高,达25.14起/ 10^4 km²,其次为<500 m的区域,达18.79起/ 10^4 km²。总体上,滑坡主要发生在

低海拔地区(图2a,表2)。这可能与低海拔地区岩土侵蚀程度更高有关。坡向决定了斜坡受阳光照射强弱,影响着植被覆盖和岩土含水率,进而决定了岩土体侵蚀风化程度^[19]。研究区滑坡在北坡发生最多,有25起,占17%,发育密度也最高,达3.03起/ 10^4 km²,滑坡在各个坡向上均有分布(图2b,表2)。不同坡向的斜坡受到日照、降雨的影响不同,导致土壤湿度、植被生长条件存在差异,不同坡向的斜坡土壤侵蚀和滑坡的风险不尽相同。滑坡主要发育在坡度10°~20°和20°—30°两个区间,分别有57起和55起,发育密度分别达到26.19起/ 10^4 km²和28.43起/ 10^4 km²。整体上,随着坡度的增加,滑坡发育密度升高,坡度10°—30°之间发育密度达到峰值,坡度继续升高时,发育密度逐渐降低(图2c,表2)。坡度10°—30°区内应力分布和松散堆积物为滑坡提供了有利条件,坡度过缓时,松散物质容易积累,而坡度较陡时,虽然应力增大,但松散物质较少,因此滑坡发生的频率降低^[20]。

2.1.2 基础地质关联性

岩土体是滑坡发生的物质来源基础,岩石类型、坚硬程度决定岩土体的力学强度、抗风化能力和抗侵蚀能力^[21]。按照成因、结构类型、岩性组合及物理力学性质的差异,将研究区工程地质岩组分为8类:① I₁(坚硬中—厚层白云岩、灰岩、灰质白云岩岩组);② I₂(较坚硬薄—厚层泥晶、粉晶灰岩、白云质灰岩岩组);③ II₁(较软弱泥岩、泥质粉砂岩夹砂岩、砂质页岩岩组);④ II₂(较坚硬中厚层石英砂岩夹砂质页岩、泥岩岩组);⑤ III₁(坚硬薄—中厚层白云岩、泥灰岩夹粉砂岩、页岩岩组);⑥ III₂(较坚硬灰岩、白云岩夹炭质、钙质页岩、粉砂岩岩组);⑦ III₃(较坚硬薄—厚层灰岩、泥灰岩夹粉砂岩、页岩岩组);⑧ IV(土层)。滑坡在II₁岩组中发生数量最多,有107起,发育密度也最高,达12.99起/ 10^4 km²(图2d,表2)。II₁类岩组为软岩或软硬互层岩,是重庆地区的易滑地层。

构造控制着区域地形地貌、岩层倾角,通常褶皱发育的地区,岩层倾角较大。构造作用使得岩层发生塑性变形,可能导致岩体内部应力分布不均,引起应力集中和应力重分布,岩层受到挤压或拉张产生节理裂隙,导致岩体破碎,稳定性较差,易发生滑坡。通过地理空间信息系统,按照距离褶皱的远近程度分为5级(<1 000, 1 000—2 000, 2 000—3 000, 3 000—4 000, ≥4 000 m)。研究结果表明,滑坡在距离褶皱<1 000 m发育数量最多,有36起,在1 000—

2 000 m 发育密度最高,达 20.28 起/10⁴ km²。虽然,距离褶皱 ≥ 4 000 m 也发育了 36 起滑坡,但其发育密

度最低。总体上距离褶皱越近,滑坡越发育(图 2e,表 2)。

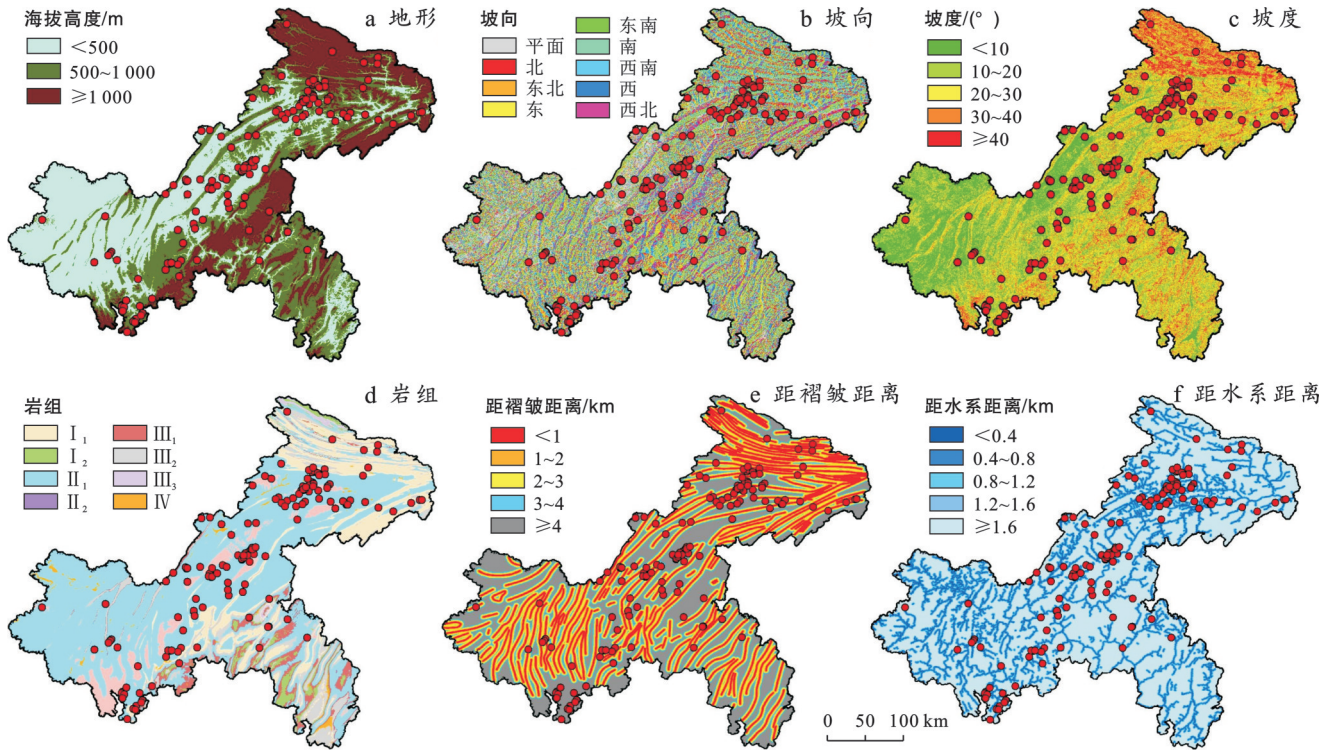


图 2 滑坡在地质环境因素中的分布

Fig.2 Distribution of landslides among geological environmental factors

表 2 滑坡在地质环境因素中的分布统计结果

Table 2 Statistical distribution of landslides among geological environmental factors

地质环境	分类	数量/ 起	分类面积/ 10 ⁴ km ²	滑坡密度/ (起·10 ⁻⁴ km ⁻²)	地质环境	分类	数量/ 起	分类面积/ 10 ⁴ km ²	滑坡密度/ (起·10 ⁻⁴ km ⁻²)
海拔 高度 范围/m	<500	62	3.30	18.79	工程地质 岩组	I ₁	14	1.21	1.70
	500—1 000	76	3.02	25.14		I ₂	0	0.20	0.00
	≥1 000	11	1.92	5.74		II ₁	107	4.95	12.99
坡向	平面	2	0.60	0.24		II ₂	16	0.55	1.94
	北	25	0.90	3.03		III ₁	6	0.44	0.73
	东北	11	0.89	1.33		III ₂	5	0.77	0.61
	东	13	0.97	1.58		III ₃	0	0.04	0.00
	东南	20	0.99	2.43		IV	1	0.08	0.12
	南	20	0.91	2.43		褶皱 距离/m	<1 000	36	1.87
西南	18	0.93	2.18	1 000—2 000			34	1.68	20.28
西	20	1.00	2.43	2 000—3 000	27		1.34	20.11	
西北	20	1.05	2.43	3 000—4 000	16		0.98	16.30	
坡度 范围/(°)	0—10	15	2.24	6.69	≥4 000		36	2.37	15.18
	10—20	57	2.18	26.19	水系 距离/m	<400	26	0.97	26.84
	20—30	55	1.93	28.43		400—800	27	0.85	31.61
	30—40	21	1.21	17.29		800—1 200	19	0.79	24.07
	≥40	1	0.67	1.49		1 200—1 600	16	0.72	22.14
				≥1 600		61	4.90	12.44	

2.1.3 水系环境关联性

河流水系的发育程度反映了地表受到侵蚀的强弱,是引发滑坡的重要影响因素^[22]。水系对岩土体具有较强的侵蚀作用,主要表现在物理冲刷、化学溶蚀,导致斜坡岩体裂隙变宽,物质被冲蚀挖空,临空面变陡等,易引发滑坡地质灾害。滑坡在水系距离 <400 m 和 400~800 m 处发生数量相对较多,分别有 26 起和 27 起,发育密度最高,分别达到 26.84 起/10⁴ km² 和 31.61 起/10⁴ km²(图 2f,表 2)。因此,距离水系越近,滑坡发育密度越大。

2.2 降雨时序规律

2.2.1 月降雨量与滑坡的关系

重庆市汛期的降雨与滑坡数据分析表明(图 3),5—7 月平均降雨量逐月上升,滑坡数量随之呈现非线性加速增长。7 月出现爆发性跃升,7 月降雨量较 6 月增加 21%,滑坡数量增加 567%,表明该区域滑坡活动对降雨的响应存在显著的临界阈值效应,当降雨量达到并超过某一临界水平时,导致滑坡数量急剧增加。尽管 8 月降雨量骤降至 31.2 mm(较 7 月减少 85%),但仍发生了 8 起滑坡,可能是受到前期降雨的累积效应和岩土体响应的时滞性的影响。因此,重庆市汛期月降雨量与滑坡数量的关系并非简单的线性正相关,而是表现出 5 月降雨诱发滑坡能力有限,呈弱响应,6 月响应开始增强,但增长相对平缓,7 月响应发生爆发性跃升,滑坡集中爆发,8 月滞后效应主导,滑坡数量下降率远低于降雨量下降率。

2.2.2 滑坡与雨强的关系

为探明滑坡与雨强的关系,将日降雨量 ≥ 1.0 mm

视为一个影响地质灾害的“有效降雨日”^[1-2],统计滑坡发生前 14 d 内的最大雨强(表 3)。从滑坡发生当日最大雨强来看,当日最大雨强为小雨时发生数量最多,有 69 起,占比 45%。理论上降雨强度越大、诱发地质灾害的可能性越大,但统计结果显示滑坡发生日大多为小雨天气。滑坡发生前 3,7,14 d 内最大雨强统计表明,最大雨强为暴雨及以上时滑坡发生数量均最多,分别有 70,84,86 起,占比分别为 46%,55%,57%。同时,该统计基于单点最大雨强指标,未能反映统计时段内详细降雨过程的时间分布特征。降雨时间分布的不均匀性会影响岩土含水率的累积速率和程度,进而影响滑坡发生的具体滞后时间。尽管如此,统计数据显示,近 58% 的滑坡发生前 14 d 经历过暴雨及以上的强降雨事件,表明强降雨是触发滑坡的关键因素,且滑坡的发生通常具有滞后性,多出现在强降雨后的一段时间内。

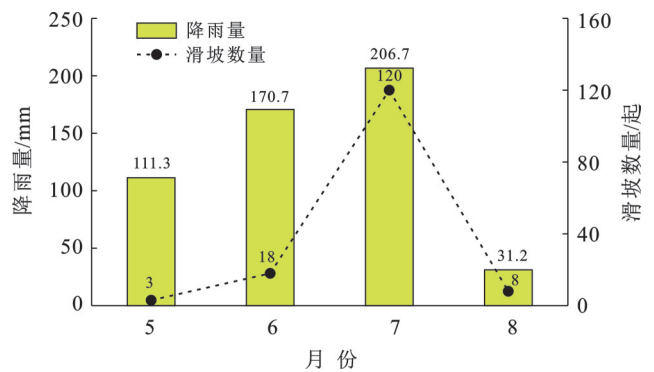


图 3 月降雨量与滑坡数量的关系
Fig.3 Relationship between rainfall in March and landslide numbers

表 3 滑坡与降雨雨强统计

Table 3 Statistics of landslides and rainfall intensity

雨强/mm	当日雨强		前 3 d 内最大雨强		前 7 d 内最大雨强		前 14 d 内最大雨强	
	数量/起	占比/%	数量/起	占比/%	数量/起	占比/%	数量/起	占比/%
0	30	20	23	15	23	15	9	6
小雨(0,10)	69	46	29	19	19	13	30	20
中雨[10,25)	9	6	17	11	14	9	15	10
大雨[25,50)	13	9	10	7	9	6	9	6
暴雨及以上[50,∞)	28	19	70	47	84	56	86	58
合计	149	100	149	100	149	100	149	100

2.2.3 滑坡与连续降雨的关系

为揭示滑坡发生与连续降雨的关系,统计了滑坡发生前所经历的连续降雨天数。结果表明,在 149 起降雨型滑坡中,发生前经历了 7 d 连续降雨的有 80 起,占比 54%;发生前经历了 8 d 连续降雨的有 19 起,占比 13%。从统计概率上看,当连续降雨达 7~8 d 时,滑坡发生概率高达 69%,尤其是当连续降雨达 7 d

时,滑坡发生的可能性最大。该结论对滑坡监测预警具有一定参考意义。例如,当监测到滑坡隐患区域连续降雨达 7~8 d 时,当天发生滑坡的可能性增大,应重点关注(图 4)。

2.3 滑坡降雨阈值模型研究

通过上述滑坡降雨时序规律可知,重庆市汛期降雨与滑坡数量之间并非简单的线性相关,需进一

步开展 I - D 、 E - D 和 E - I 降雨阈值模型研究。

2.3.1 阈值模型结果

I - D 阈值、 E - D 阈值和 E - I 阈值结果显示(图 5 和图 7):当该区域滑坡发生概率为 10% 时, $I_{10\%}=6.71 D^{-0.69}$, $E_{10\%}=5.97 D^{0.31}$, $E_{10\%}=42.42 I^{0.71}$;当该区域滑坡发生概率为 50% 时, $I_{50\%}=24.66 D^{-0.69}$, $E_{50\%}=24.59 D^{0.31}$, $E_{50\%}=129.60 I^{0.71}$;当该区域滑坡发生概率为 75% 时, $I_{75\%}=257.79 D^{-0.69}$, $E_{75\%}=41.28 D^{0.31}$, $E_{75\%}=91.75 I^{0.71}$;当该区域滑坡发生概率为 90% 时, $I_{90\%}=300.82 D^{-0.69}$, $E_{90\%}=70.11 D^{0.31}$, $E_{90\%}=190.59 I^{0.71}$ 。

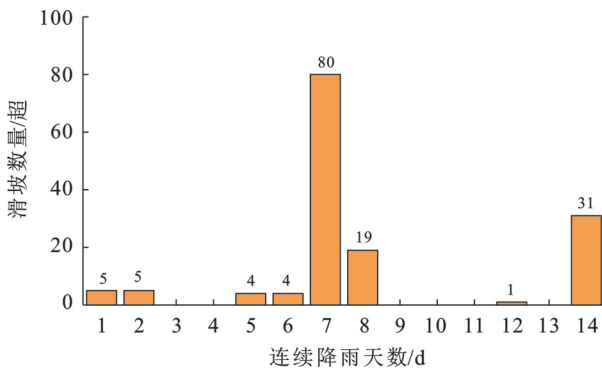


图 4 连续降雨天数与滑坡数量的关系

Fig.4 Relationship between number of consecutive rainy days and major geological disasters

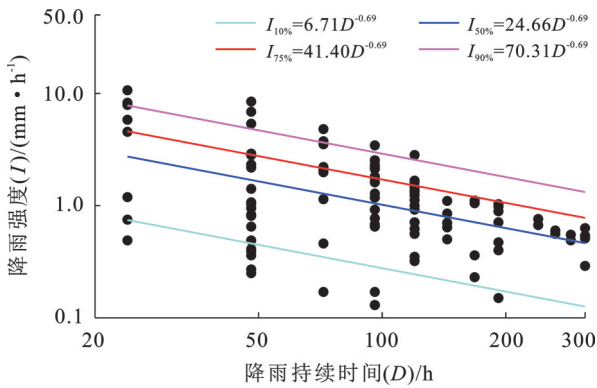


图 5 降雨强度与持续时间的关系曲线

Fig.5 Relationship curve between rainfall intensity and duration

2.3.2 混淆矩阵验证

选择阈值模型 50% 曲线进行对比分析。表 4 表明, I - D 模型准确率最高, 漏报率和误报率均最低。因此, I - D 模型相较于另外两种模型更适宜于作为研究区的降雨阈值线。

2.3.3 预测能力评价

2025年6月重庆市强降雨天气频发、范围广,在彭水县、云阳县、奉节县等区域发生数起滑坡。选取有效降雨日(日降雨量 ≥ 1.0 mm)发生的降雨型滑坡 21 起,结合降雨数据,再次对本研究建立的 3 种阈值

模型进行对比验证。滑坡在 3 种阈值曲线中的分布如图 8 所示,分布区间如表 5 所示。在 I - D 、 E - D 和 E - I 模型中,10% 阈值线以上的滑坡分别有 20, 20, 19 起;50% 阈值线以上的滑坡分别有 15, 14, 10 起;75% 阈值线以上的滑坡分别有 12, 12, 4 起;90% 阈值线以上的滑坡分别有 8, 7, 1 起。由验证滑坡的分布可知, I - D 阈值模型预测评价能力优于 E - D 和 E - I 模型,更能反映研究区降雨诱发滑坡的实际特征。

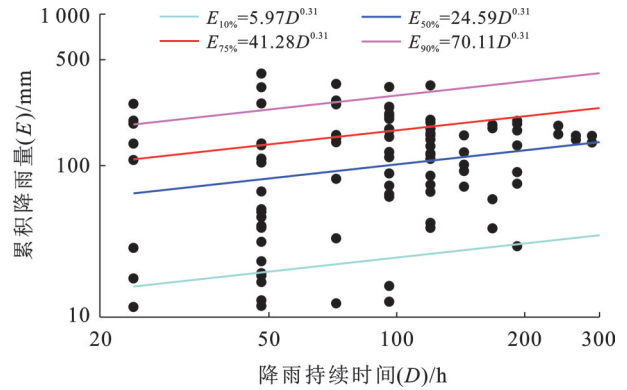


图 6 累积降雨量与持续时间关系曲线

Fig.6 Relationship curve between cumulative rainfall and duration

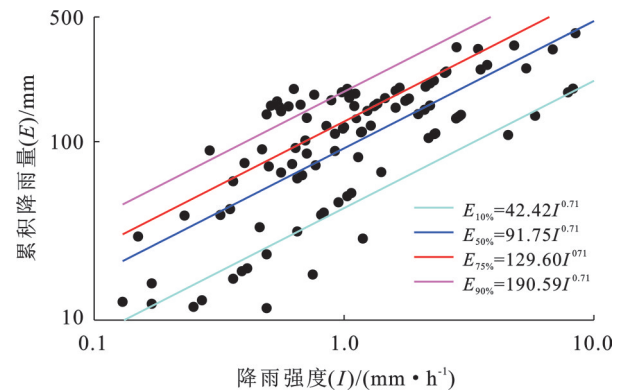


图 7 累积降雨量与降雨强度关系曲线

Fig.7 Relationship curve between cumulative rainfall and rainfall intensity

表 4 降雨阈值模型性能评价指标

Table 4 Performance evaluation indicators of rainfall threshold model

评价模型	TP	FP	TN	FN	A	MR	FA
$I_{50\%}=24.66D^{-0.69}$	81	17	28	49	0.62	0.38	0.38
$E_{50\%}=24.59D^{0.31}$	79	19	26	51	0.60	0.39	0.42
$E_{50\%}=129.60I^{0.71}$	69	25	20	61	0.51	0.47	0.56

研究结果表明,验证数据集诱发滑坡的持续时间为 24~192 h,短时强降雨诱发的滑坡均位于 I - D 模型 75% 阈值曲线以上,71% 的滑坡位于 I - D 模型 50% 曲线以上。可见, I - D 模型在短时强降雨和持续降雨诱发滑坡方面均有较强的预测评价能力。

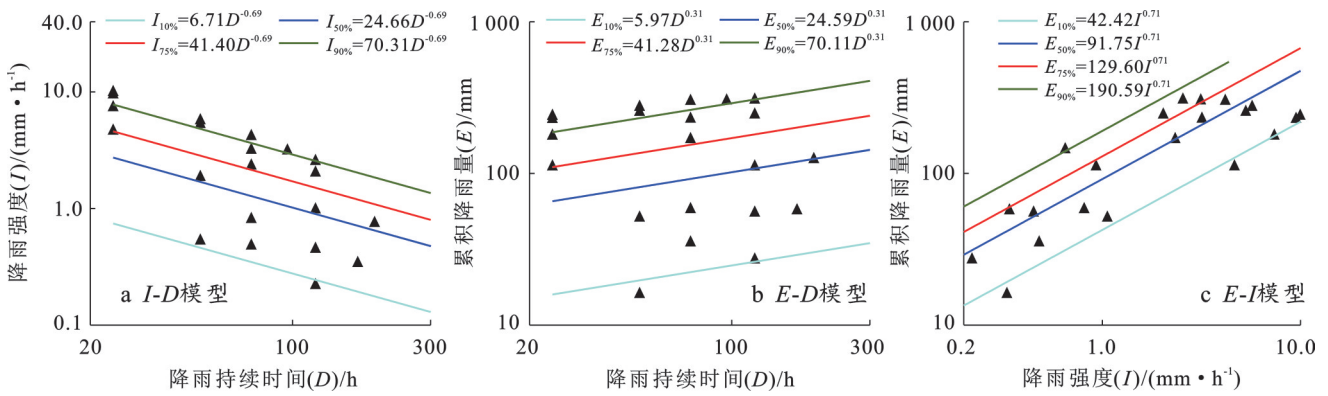


图 8 阈值模型预测评价验证

Fig.8 Evaluation verification of threshold model prediction

表 5 验证滑坡数据集分布情况

Table 5 Verification of landslide dataset distribution

滑坡概率	<10%	[10%, 50%)	[50%, 75%)	[75%, 90%)	≥90%
I-D模型	1	5	3	4	8
E-D模型	1	6	2	5	7
E-I模型	2	9	6	3	1

3 讨论

每个滑坡的发育条件不一、受到降雨影响程度不同,导致不同研究区内的滑坡降雨阈值有差别。本研究建立的最优阈值曲线(I-D)与不同范围、不同地区、相同地区建立的阈值曲线进行对比(图 9,表 6),结果显示本研究阈值高于 Caine N 及 Hong Y 建立的全球阈值,主要原因可能在于全球阈值囊括了各种地质气候背景、不同季节发生的降雨型滑坡,其样本具有极大的异质性,包含了大量在较低降雨强度下触发的滑坡,拉低了整体阈值。而本研究聚焦于重庆汛期,此时段以短时强降雨、暴雨为主,触发的滑坡多为降雨峰值诱发型,其临界降雨强度较高,高于周剑建立的重庆阈值。进一步发现其研究包含了重庆地区全年(含非汛期)的降雨型滑坡样本。非汛期降雨型滑坡主要受持续性中一小雨影响,往往比汛期滑坡形成演化时间更长,触发降雨强度低于汛期短时强降雨直接接触时的强度,而本研究针对的是汛期强降雨滑坡,因此阈值相对较高。同时,本研究建立的阈值低于李巍岳建立的全国阈值,李巍岳阈值主要基于媒体报道或造成人员伤亡的滑坡样本,这类事件往往伴随极端强降雨过程,如台风暴雨、特大暴雨等,其降雨强度远超一般滑坡的触发阈值,因此其建立的全国阈值偏高具有合理性,反映了极端灾害事件的降雨特征。另外,也低于中国浙江、福建、广东、广西等华东南地区省市县阈值,华东南

地区受台风、暖湿气流影响更为频繁和强烈,小时雨强、日雨量极值等极端降雨事件的发生频率和强度普遍高于重庆所在的西南地区。此外,该区域广泛分布的强风化花岗岩、层状砂岩和风化残积土等结构松散岩土^[8,15],在极端暴雨下极易发生浅层崩滑,导致其区域性阈值整体高于重庆。

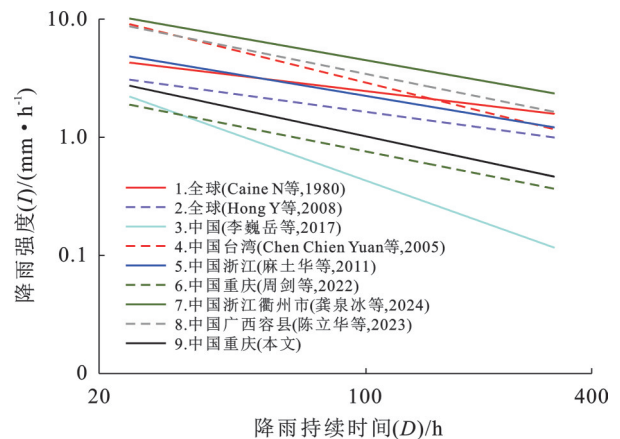


图 9 不同区域 I-D 阈值对比

Fig.9 Comparison of I-D thresholds in different regions

基于上述分析,本研究建立的阈值曲线是针对重庆地区汛期的降雨型滑坡,清晰地界定了其适用范围。可将本研究建立的 I-D 阈值作为汛期滑坡触发或提升预警等级的关键判据之一,将模型按照滑坡发生概率,合理划分蓝色、黄色、橙色、红色预警等级,当预报或实况降雨强度一持续时间组合达到

或超过该阈值曲线时,系统可自动触发或提升相应区域的滑坡预警等级,为相关部门发布预警信息、

组织避险转移提供更符合重庆汛期特点的科学依据。

表6 不同区域*I-D*阈值对比

Table 6 Comparison of *I-D* thresholds in different regions

序号	适用范围	阈值公式	取值条件
1	全球(Caine N等,1980) ^[23]	$I=14.82D^{-0.39}$	0.17 h< D <240 h
2	全球(Hong Y等,2008) ^[24]	$I=12.45D^{-0.44}$	0.1 h< D <1 000 h
3	中国(李巍岳等,2017) ^[25]	$I=85.72D^{-1.15}$	3 h< D <45 h
4	中国台湾(Chen C等,2005) ^[26]	$I=115.47D^{-0.80}$	1 h< D <400 h
5	中国浙江(麻士华等,2011) ^[27]	$I=26.92D^{-0.54}$	1 h< D <100 h
6	中国重庆(周剑等,2022) ^[28]	$I=14.45D^{-0.64}$	5 h< D <228 h
7	中国浙江衢州市(龚泉冰等,2024) ^[19]	$I=62D^{-0.568}$	24 h< D <240 h
8	中国广西容县(陈立华等,2023) ^[18]	$I=68.545D^{-0.645}$	48 h< D <192 h
9	中国重庆(本文)	$I_{50\%}=24.66D^{-0.69}$	1 h< D <312 h

然而,直接应用单一阈值进行预警也存在局限性。由于滑坡降雨阈值曲线在不同时空范围内均存在较大差异,本研究建立的阈值曲线只适用于重庆地区汛期,并不适宜于非汛期滑坡的预测。此外,即使是在汛期内,重庆市域内不同区县的地质环境背景和人类活动强度也存在空间异质性,这可能导致同一降雨事件在不同区域诱发滑坡的实际临界值有所波动。需要指出的是,当前模型是基于区域整体数据拟合得到的阈值模型。事实上,研究区域内不同地质构造单元、地貌类型、工程地质岩组、植被覆盖等对降雨敏感性和响应可能存在显著差异,这些差异体现在临界降雨强度和持续时间上。鉴于此,针对降雨阈值进行地质灾害气象风险预警研究,通过通用模型来预测大范围、全年段的降雨型地质灾害预测可能存在诸多局限性,未来研究县域、乡镇、小流域或更为精细的尺度空间,以及汛期、非汛期或能代表降雨特点的不同时期,针对性地建立地质灾害气象风险预警模型,提升其预测精度。

为了进一步提升重庆地区滑坡预警的精准性和实用性,更深入地研究和业务应用可在本研究建立的汛期阈值基础上,从以下几方面展开。①时空精细化。首先,亟需针对非汛期(特别是春季连阴雨、秋季华西秋雨等)建立独立的降雨阈值,形成覆盖全年的动态阈值体系。其次,在空间上,应积极推进研究县域、乡镇甚至小流域尺度,结合高分辨率地质、地形和土地利用数据,构建更精细的空间分区阈值或动态调整模型参数,以反映区域内部的差异性。②多源信息融合。单一降雨阈值难以反映滑坡发生的全部复杂性。未来的预警模型应深度整合易发性分区等地质环境脆弱性信息、实时降雨监测和工程

活动影响等多源数据。例如,在降雨数据接近该阈值时,叠加滑坡易发性评价分区,可显著提升预警的针对性和有效性;结合土壤含水率,可更准确地评估降雨入渗和触发滑坡的临界条件。③模型动态更新与验证。利用新的滑坡灾情记录和降雨数据,定期评估阈值的有效性,并根据检验结果和新的认识对阈值或预警模型参数进行优化调整,确保其长期适用性。

4 结论

本研究以2024年汛期重庆市滑坡为研究对象,基于数理统计和地理空间系统分析方法,分别开展了滑坡地质环境特征、降雨与滑坡关联性分析,建立*I-D*、*E-D*和*E-I*降雨阈值模型,并采用混淆矩阵对比分析模型精度,得到以下结论。

(1)重庆滑坡发育受控于特定地质环境条件,集中发生于低海拔高度(500—1 000 m)、缓坡(10°—30°)、北向坡、软岩地层(Ⅱ₁岩组)及临近褶皱与水系(<800 m)的区域。这些因素共同构成了滑坡发生的物质基础与先天条件。

(2)降雨是重庆滑坡事件发生的核心触发因素,其作用机制复杂,表现出显著的临界阈值效应、滞后性及非线性特征。

(3)分别建立了研究区*I-D*、*E-D*和*E-I*3种阈值模型,通过混淆矩阵和预测能力评价对比分析发现,*I-D*模型相较于另外两种模型更适宜于作为研究区的降雨阈值线。最优模型根据滑坡发生概率分别为 $I_{10\%}=6.71 D^{-0.69}$, $I_{50\%}=24.66 D^{-0.69}$, $I_{75\%}=257.79 D^{-0.69}$ 和 $I_{90\%}=300.82 D^{-0.69}$ 。

(4)突破现行单一降雨阈值模型的局限是提升

预警精度的关键。未来方向是构建融合地质环境本底、实时降雨监测、土壤含水率及工程活动等多元信息的动态综合预警模型,并实现时空尺度(汛期/非汛期、县域/流域)的精细化应用。

参考文献 (References)

- [1] Mukhtar R. Review of national multi-hazard early warning system plan of Pakistan in context with Sendai framework for disaster risk reduction [J]. *Procedia Engineering*, 2018,212:206-213.
- [2] Ma Ruining, Liu Jida, An Shi. Early warning response to rainstorm: Designing a model with incentive and supervision mechanisms based on the principal-agent theory [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2024,111:104683.
- [3] Siddique T, Haris P M, Pradhan S P. Unraveling the geological and meteorological interplay during the 2021 Chamoli disaster, India [J]. *Natural Hazards Research*, 2022,2(2):75-83.
- [4] Dai F C, Lee C F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides [J]. *Engineering Geology*, 2001,59(3/4):253-266.
- [5] Sato T, Shuin Y. Rainfall characteristics and magnitude control the volume of shallow and deep-seated landslides: Inferences from analyses using a simple runoff model [J]. *Geomorphology*, 2024,466:109453.
- [6] Zhao Binru, Zhang Lulu, Gu Xia, et al. How is the occurrence of rainfall-triggered landslides related to extreme rainfall? [J]. *Geomorphology*, 2025, 475: 109666.
- [7] 熊诚,李晴岚,雷呈斌,等.2001—2016年香港滑坡与降雨的时序特征[J].*地球科学与环境学报*,2022,44(4):605-616.
Xiong Cheng, Li Qinglan, Lei Chengbin, et al. Temporal characteristics of landslides and rainfall in Hong Kong, China from 2001 to 2016 [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022,44(4):605-616.
- [8] 许强,徐繁树,蒲川豪,等.2024年4月广东韶关江湾镇极端降雨诱发群发性滑坡初步分析[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2024,49(8):1264-1274.
Xu Qiang, Xu Fanshu, Pu Chuanhao, et al. Preliminary analysis of extreme rainfall-induced cluster landslides in Jiangwan township, Shaoguan, Guangdong, April 2024 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024,49(8):1264-1274.
- [9] Peruccacci S, Brunetti M T, Gariano S L, et al. Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy [J]. *Geomorphology*, 2017,290:39-57.
- [10] 曾新雄,刘佳,赖波,等.广东珠海市降雨型崩塌滑坡预警阈值研究[J].*中国地质灾害与防治学报*,2024,35(5):141-150.
Zeng Xinxiong, Liu Jia, Lai Bo, et al. Study on warning rainfall threshold for rainfall-induced collapses and landslide geological hazards in Zhuhai City, Guangdong Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024,35(5):141-150.
- [11] Zhao Kailiang, Qiu Haijun, Liu Ya, et al. Probability of rainfall-induced landslides coupled with effective-duration threshold and soil moisture [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025,57:102112.
- [12] 孙强,刘明军,张泰丽,等.诱发台风暴雨型滑坡的降雨阈值研究:以泰顺县为例[J].*水文地质工程地质*, 2024,51(4):197-205.
Sun Qiang, Liu Mingjun, Zhang Taili, et al. Rainfall thresholds of typhoon rainstorm induce landslides: A case study over Taishun County [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024,51(4):197-205.
- [13] 陈贺,付有旺.贡山县进藏通道群发性滑坡地质特征与降雨阈值[J].*岩石力学与工程学报*,2024,43(增刊2):3861-3871.
Chen He, Fu Youwang. Geological characteristics and rainfall threshold of multiple landslides in the passage into Tibet in Gongshan County [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024,43(Suppl.2):3861-3871.
- [14] 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.
- [15] 龚泉冰,殷坤龙,肖常贵,等.基于I-D阈值的滑坡气象预警双指标模型[J].*地质科技通报*,2024,43(1):262-274.
Gong Quanbing, Yin Kunlong, Xiao Changgui, et al. Double-index model of landslide meteorological warning based on the I-D threshold [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024,43(1):262-274.
- [16] 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.
- [17] 王智昊,杨赛霓,姚可桢,等.四川秦巴山区降雨型滑坡灾害降雨阈值[J].*山地学报*,2024,42(2):238-248.

- Wang Zhihao, Yang Saini, Yao Kezhen, et al. Precipitation threshold for rainfall-type landslides in the Qinba Mountains area, Sichuan Province, China [J]. *Mountain Research*, 2024, 42(2): 238-248.
- [18] 陈立华, 羊汉平, 廖丽萍, 等. 容县2010年6月滑坡灾害降雨阈值研究[J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(1): 228-235.
- Chen Lihua, Yang Hanping, Liao Liping, et al. Study on the rainfall threshold of the landslide disaster in Rong County in June 2010 [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(1): 228-235.
- [19] 张钟远, 邓明国, 徐世光, 等. 镇康县滑坡易发性评价模型对比研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(1): 157-171.
- Zhang Zhongyuan, Deng Mingguo, Xu Shiguang, et al. Comparison of landslide susceptibility assessment models in Zhenkang County, Yunnan Province, China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(1): 157-171.
- [20] 曾莹, 张迎宾, 张钟远, 等. 基于X-多层感知器耦合模型的滑坡易发性评价: 以贵州省松桃自治县为例[J]. *山地学报*, 2023, 41(2): 280-294.
- Zeng Ying, Zhang Yingbin, Zhang Zhongyuan, et al. Landslide susceptibility evaluation based on coupled X-multilayer perceptron model: A case study of Songtao autonomous county of Guizhou Province, China [J]. *Mountain Research*, 2023, 41(2): 280-294.
- [21] 许强, 唐然. 红层及其地质灾害研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(1): 28-50.
- Xu Qiang, Tang Ran. Study on red beds and its geological hazards [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(1): 28-50.
- [22] 祁生文, 李永超, 刘春玲, 等. 横断山区水电工程扰动灾害及风险分析[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(3): 729-759.
- Qi Shengwen, Li Yongchao, Liu Chunling, et al. Risk of disturbance disasters of hydropower project in Hengduan mountains [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(3): 729-759.
- [23] Caine N. The rainfall intensity: Duration control of shallow landslides and debris flows [J]. *Geografiska Annaler (Series A: Physical Geography)*, 1980, 62(1/2): 23-27.
- [24] Hong Yang, Adler R F. Predicting global landslide spatiotemporal distribution: Integrating landslide susceptibility zoning techniques and real-time satellite rainfall estimates [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2008, 23(3): 249-257.
- [25] 李巍岳, 刘春, Marco SCAIONI, 等. 基于滑坡敏感性与降雨强度-历时的中国浅层降雨滑坡时空分析与模拟[J]. *中国科学(地球科学)*, 2017, 47(4): 473-484.
- Li Weiyue, Liu Chun, Scaioni M, et al. Spatio-temporal analysis and simulation on shallow rainfall-induced landslides in China using landslide susceptibility dynamics and rainfall *I-D* thresholds [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2017, 47(4): 473-484.
- [26] Chien-Yuan C, Tien-Chien C, Fan-Chieh Y, et al. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring [J]. *Environmental Geology*, 2005, 47(5): 715-724.
- [27] 麻士华, 李长江, 孙乐玲, 等. 浙江地区引发滑坡的降雨强度-历时关系[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2011, 22(2): 20-25.
- Ma Tuhua, Li Changjiang, Sun Leling, et al. Rainfall intensity-duration thresholds for landslides in Zhejiang region, China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011, 22(2): 20-25.
- [28] 周剑, 汤明高, 许强, 等. 重庆市滑坡降雨阈值预警模型[J]. *山地学报*, 2022, 40(6): 847-858.
- Zhou Jian, Tang Minggao, Xu Qiang, et al. Early warning model of rainfall-induced landslide in Chongqing of China based on rainfall threshold [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(6): 847-858.