

引用格式:王家柱,铁永波,徐伟,白永健,张鸣之.考虑日降雨强度的滑坡双指标降雨预警模型研究[J].山地学报,2025,43(1):157-166.  
WANG Jiazhu, TIE Yongbo, XU Wei, BAI Yongjian, ZHANG Mingzhi. A dual-indicator rainfall model for landslide early warning based on daily rainfall intensity [J]. Mountain Research, 2025, 43(1): 157-166.

# 考虑日降雨强度的滑坡双指标降雨预警模型研究

王家柱<sup>1,2,3</sup>,铁永波<sup>1,2,3</sup>,徐伟<sup>1,2,3</sup>,白永健<sup>1,2,3</sup>,张鸣之<sup>4</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心),成都 610218;

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

3. 成都市地质环境监测站 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站,成都 610000; 4. 中国地质环境监测院  
(自然资源部地质灾害技术指导中心) 自然资源部地质灾害智能监测与风险预警工程技术创新中心,北京 100081)

**摘要:**基于降雨特征的滑坡预警模型构建是地质灾害防控体系建设的关键环节,其模型精度提升对地质灾害风险管控具有重要实践意义。传统单指标 I(Intensity)-D(Duration)模型,多基于平均降雨强度(I)-历时(D)构建滑坡事件与降雨参数的统计关系确定临界阈值,但弱化了短时强降雨事件的触发作用。本研究以凉山州喜德县 94 个典型滑坡案例及其灾前降雨序列为研究样本,通过最小二乘回归建立降雨强度-历时(I-D)基础模型,在此基础上耦合当日降雨强度(D 值为 1)参数,创新性构建双指标协同预警模型。研究揭示:(1)喜德县滑坡降雨触发机制可划分为先雨后滑型、暴雨致滑型及连雨致滑型三类典型模式。(2)基于 74 个训练样本建立的 I-D 基础模型,其预警响应在暴雨型滑坡中呈现明显滞后性,通过引入当日降雨强度指标并采用双指标极值判别准则,验证集 20 个案例的红色预警占比提升至 40%;(3)模型验证表明,双指标体系对先雨后滑型保持 I-D 模型的识别精度,而对暴雨致滑型的预警时效性提升 2 d。研究成果不仅完善了降雨阈值理论体系,更为滑坡灾害防治提供了新的技术路径。

**关键词:**降雨预警;I-D 模型;双指标;滑坡;雨型

**中图分类号:** P642

**文献标志码:** A

90% 的以上的滑坡事件与降雨存在显著关联<sup>[1-2]</sup>。降雨通过增加土体自重改变边坡应力场分布,同时降低土体有效应力和基质吸力,导致抗剪强度参数的劣化,从而成为滑坡发生的关键诱因。降雨参数是滑坡预警的核心指标,基于降雨特征的滑坡预警模型构建是地质灾害防控体系建设的关键环节<sup>[3-4]</sup>。

滑坡降雨预警主要有两条技术路径<sup>[5]</sup>。其一是基于物理-水文耦合模型的方法,它要求详尽的区域岩土体参数及降雨等实测数据,以此为基础计算滑坡稳定性,进而实现降雨预警目的<sup>[6-7]</sup>。其中,美

国地质调查局开发的滑坡 TRIGRS (The Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model) 模型作为该领域的代表性成果,已在全球多个区域验证了其预测效能<sup>[8-9]</sup>。然而,此类方法对地形参数、土壤渗透系数、抗剪强度参数等输入数据的完备性具有较高要求,且难以动态表征降雨入渗过程中岩土体参数的时变特性<sup>[10]</sup>,制约了其在区域性预警中的普适性应用<sup>[11-12]</sup>。

第二条路径是基于统计学的经验模型方法,通过构建滑坡事件与降雨参数的统计关系确定临界阈值<sup>[13-14]</sup>。尽管该方法不考虑滑坡物理过程,

收稿日期(Received date): 2024-06-16;修回日期(Accepted date): 2025-02-10

基金项目(Foundation item): 自然资源部地质灾害智能监测与风险预警工程技术创新中心项目(TICGM-2023-09);中国地质调查局成都地质调查中心“刘宝珺院士基金”;四川省自然科学面上基金(2023NSFSC2086)。[Technology Innovation Center for Geohazard Monitoring and Risk Early Warning, Ministry of Natural Resources (TICGM-2023-09); Liu Baojun Academician Fund of Chengdu Center, China Geological Survey; Natural Science Foundation of Sichuan Province of China (2023NSFSC2086)]

作者简介(Biography): 王家柱(1992-),男,硕士,工程师,主要研究方向:地质灾害机理分析与监测预警。[WANG Jiazhu (1992-), male, M.Sc., engineer, research on mechanism analysis and early warning] Email:383001693@qq.com

但凭借数据需求简单、可推广性强的优势,在基础数据匮乏地区得到广泛应用<sup>[15-16]</sup>。这一路径从最初基于滑坡事件与累计降雨量的简单关联建立阈值,逐步发展到利用平均降雨强度-历时 $[I(\text{Intensity})-D(\text{Duration})]$ <sup>[13, 17-18]</sup>、累积降雨量-历时 $[E(\text{Effective})-D(\text{Duration})]$ <sup>[19-20]</sup>、累积降雨量-降雨强度 $[I(\text{Intensity})-E(\text{Effective})]$ <sup>[21]</sup>等多元参数组合为基础的预警模型体系,应用实效显著<sup>[22]</sup>。

其中,I-D模型因有效表征前期降雨的累积效应,已成为应用最广泛的预警模型之一<sup>[22]</sup>。Guzzetti<sup>[13]</sup>等认为,当统计样本具有地质条件同质性和气候特征一致性时,I-D模型预警精度显著提升。然而,该模型采用平均降雨强度的计算方式可能弱化短时强降雨事件的触发作用,导致对暴雨型滑坡的预警响应存在滞后风险<sup>[7, 23]</sup>。

本研究针对传统I-D模型的固有缺陷,以喜德县为典型实例,创新性地纳入滑坡当日的降雨强度作为第二个预警指标,构建滑坡双指标降雨预警模型,实现单指标I-D模型向双指标I-D模型的升级。研究成果不仅可以完善滑坡降雨阈值理论体系,还可以为滑坡灾害防治提供新的技术路径。

## 1 研究方法

### 1.1 最小二乘法回归

普通最小二乘法(Ordinary Least Squares)是一种常见的数据拟合方法,也是一种常见的统计学估计方法,可以反映未知变量和已知变量之间的关系,被广泛用于各种领域,其基本原理是通过最小化误差平方和来估计线性拟合模型的参数。

### 1.2 双I-D降雨阈值模型

I-D降雨阈值模型首先需要确定降雨历时与平均降雨强度,其中平均降雨强度在数值上等于前期有效降雨量与降雨历时的比值。前期有效降雨量是指在一次降雨过程中,除坡面径流及蒸发外真正入渗并作用于滑坡体的雨量,本文引入Crozier提出的有效降雨量经验公式<sup>[24]</sup>:

$$P_a = \sum_{i=1}^n K^{i-1} P_i \quad (1)$$

式中, $P_a$ 为地质灾害发生前*i*天的累计有效降雨量; $P_i$ 为第*i*天的降雨量; $K$ 为降雨衰减系数,根据Crozier等推荐值,本文取0.84; $n$ 为降雨历时。

降雨历时的确定主要取决于降雨事件划分原则。部分学者将连续降雨事件进行相关性分析,相关性系数最大的时间作为整个区域的降雨历时。该方法适用于地质条件相对简单的地区,考虑到研究区地貌变化大、地质条件复杂,本文在已有研究的基础上<sup>[25]</sup>,将日降雨量大于等于5 mm作为降雨事件的开始时间,连续2天降雨量低于5 mm则降雨结束(图1)。

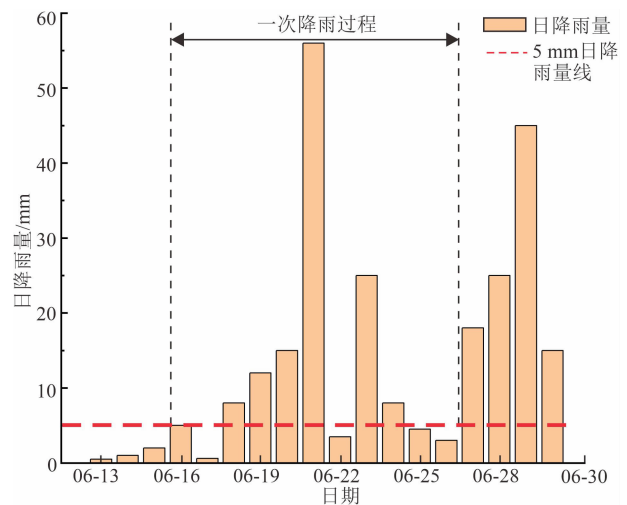


图1 降雨事件划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the rainfall event division

由于平均降雨强度是一个平均指标,短时强降雨会由于降雨历时的拉长而大幅度降低,同时已有研究表明,当日降雨量对灾害的发生尤为重要<sup>[26-27]</sup>。因此,本文将日降雨量作为另一预警指标引入到预警模型中,将日降雨强度和平均有效降雨强度同时作为预警指标,取其预警等级高者作为最终的预警等级,构建考虑日降雨强度的双指标预警模型。

## 2 研究区概况

### 2.1 自然地理与地质灾害

喜德县地处四川省西南部山区、凉山彝族自治州中北部(图2),总面积2206 km<sup>2</sup>。区内地形整体北高南低,东高西低,由东北向西南倾斜,最大高差2900 m,属典型的高山峡谷区。滑坡受岩性和断裂控制作用明显,主要分布在砂岩、粉砂岩、泥岩、灰岩等沉积岩为主的地层中;同时,滑坡沿河谷和构造断裂呈带状分布。

喜德县为典型亚热带季风 and 高原气候,冬季

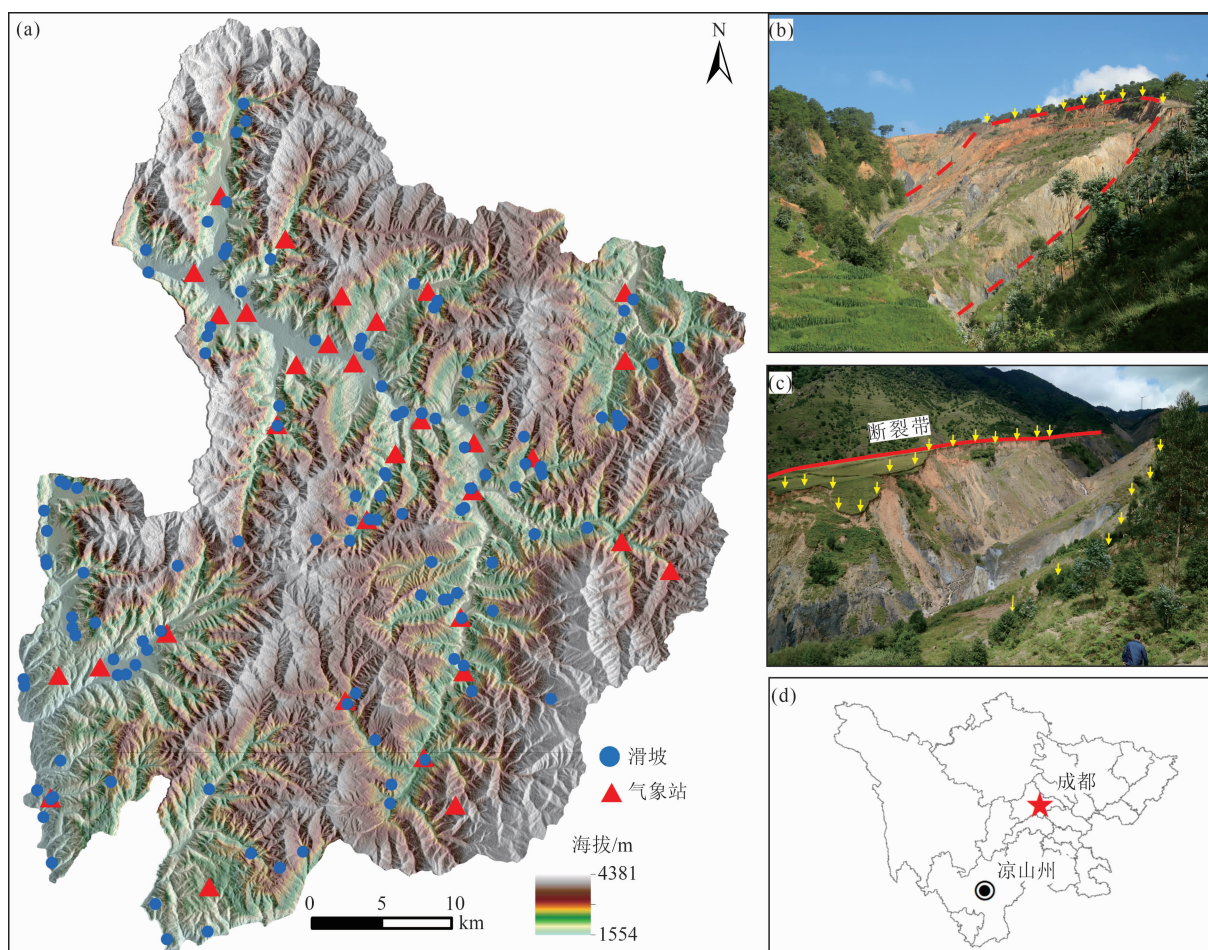


图2 喜德县地质灾害与雨量站点分布图:

(a) 喜德县滑坡与雨量站分布图; (b) 区内典型牵引式滑坡; (c) 区内活动断裂诱发滑坡; (d) 喜德县所处位置图

Fig. 2 Distribution of precipitation station and landslides location;

(a) distribution of landslides and rainfall stations in Xide County; (b) typical landslide in the region;

(c) landslide induced by active faults in the region; (d) location map in Xide County

干燥无严寒,夏季温凉多雨,四季不分明,气温日差大,年差较小,风多、夜雨多、冰雹多,多年平均降雨量 1006.1 mm,近二十年内最高年降雨量达 1245.4 mm,出现在 2004 年,最低降雨量 639.9 mm 出现在 2011 年。降雨集中,夏秋两季降雨量占总降雨量的 82.36%,暴雨主要出现在 6—8 月(图 3)。

## 2.2 滑坡与降雨数据

滑坡降雨预警研究的前提是明确的滑坡事件和雨量数据。本研究共收集具有明确时间和地点的滑坡灾害共计 94 例,选取其中 74 例作为训练集,20 例作为验证集。滑坡灾害点在发灾当天或发灾前 3 发生过中雨及以上的降雨天气(24 h 降雨量大于 10 mm),降雨是其主要诱发因素。降雨数据采用境内数据齐全的 33 个气象站,依据就近原则,以灾害点空间距离最短处雨量站降雨数据为准,获取了

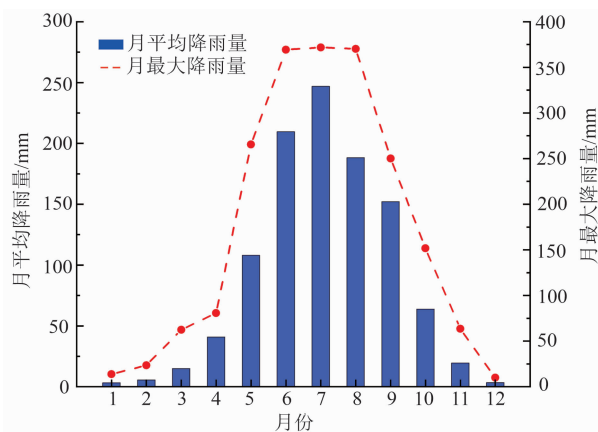


图3 喜德县月降雨量统计图

Fig. 3 Monthly rainfall in Xide County

滑坡灾害发生的当日激发雨强和前期有效降雨量。

根据收集数据,可将喜德县滑坡灾害与降雨关系分为以下三类(表 1)。其中,类型(1)属先雨后

表 1 喜德县部分地质灾害与降雨数据  
Tab. 1 Typical landslide and precipitation data in Xide County

类型	降雨量/mm							
	$R_0$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$
(1)先雨后滑	1.6	17.0	25.1	28.9	27.8	23.3	0.0	0.1
(2)暴雨致滑	71.8	32.2	30.0	20.7	0	0	0	0
(3)连雨致滑	18.1	32.0	30.3	31.4	6.2	41.2	5.4	10.5

注:  $R_0, R_1, \dots, R_7$  分别代表灾害发生前 0 天、1 天……7 天。

滑型灾害,此类滑坡灾害受前期降雨影响较大,而受灾害发生当日降雨强度影响较小(既发灾当日无雨或小雨,降雨量显著低于前期平均有效降雨量)。如图 4 所示,类型(1)滑坡在发生前累计降雨量达 123.8 mm,有效累计降雨量达 74.3 mm,发灾当日激发雨强仅 1.6 mm,主要受前期降雨诱发。类型(2)为暴雨致滑型灾害,滑坡灾害与当日降雨相关性较大,发灾前日降雨量较发灾当日明显偏低,滑坡在发灾前最高日降雨量仅 32.2 mm,发灾当日降雨量达 71.8 mm,明显高于发灾前降雨量,此类滑坡主要受当日强降雨诱发(既发灾当日降雨量显著高于前期平均有效降雨量且大于发灾前任意一日的日降雨量)。类型(3)为连雨致滑型,滑坡受前期降雨与当日降雨共同作用(即发灾当日降雨略低或略高于

发灾前平均有效降雨量),滑坡发灾当日激发雨量为 18.1 mm,发灾前 7 天滑坡区内一直受降雨作用,最高日降雨量达 41.2 mm,至发灾当日累计降雨量达 173.1 mm,累计有效降雨量达 108.3 mm,在前期降雨和当日激发降雨共同作用下发生滑坡灾害。

### 3 研究结果

#### 3.1 双 I-D 指标降雨阈值结果

将研究区 74 例有明确时间和地点的滑坡灾害用于曲线拟合,拟合方法选用最小二乘法,其中降雨历时为横轴,平均降雨强度为纵轴。综合考虑《暴雨诱发的地质灾害气象风险预警等级》和已有研究<sup>[3]</sup>关于宁都县取值标准,以 15%、50%、70%、90% 概率曲线作为划分标准,该划分标准既能满足不同层级的预警需求,也能避免频繁发布橙色与红色预警造成过度预警的情况,评价结果如图 5 所示,得到各级临界阈值方程为: $I_{15\%} = 8 \times D^{-0.44}$ 、 $I_{50\%} = 20 \times D^{-0.44}$ 、 $I_{70\%} = 30 \times D^{-0.44}$ 、 $I_{90\%} = 68 \times D^{-0.44}$ 。平均降雨强度与降雨历时呈明显负相关,即随着降雨历时增加,滑坡发生所需平均降雨量减少。当灾害点位于 90% 阈值曲线上方时,意味着平均降雨强度超过了滑坡发生概率为 90% 的预警值,滑坡处于极

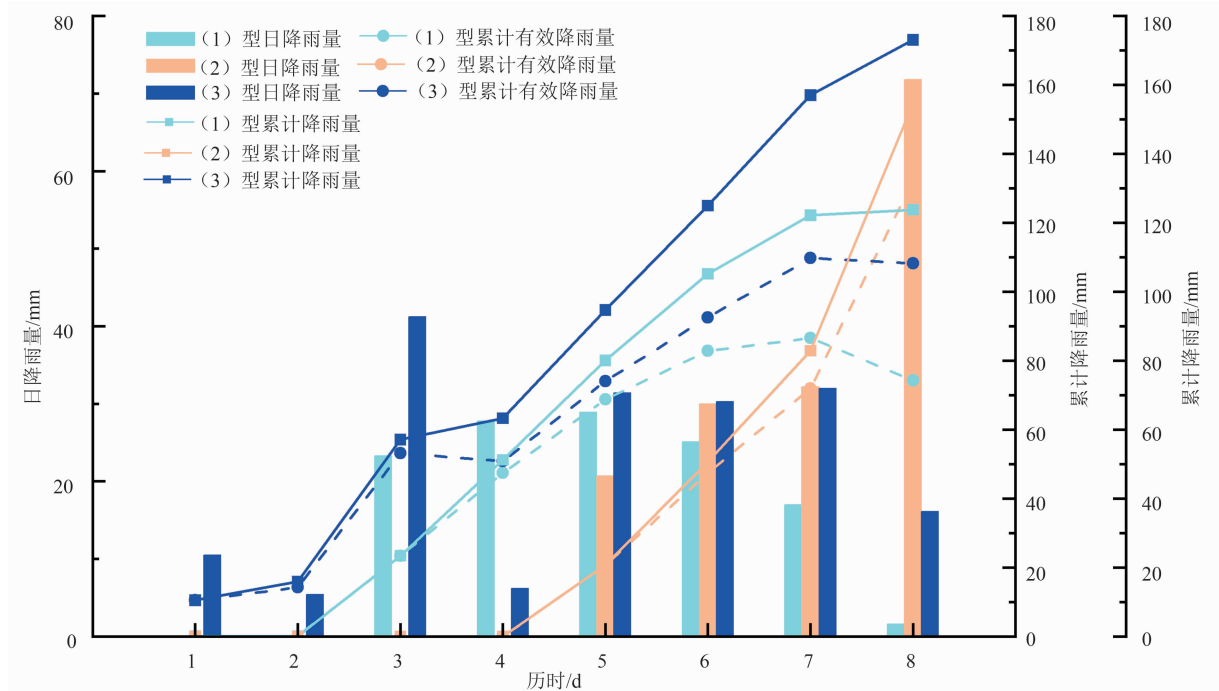


图 4 喜德县滑坡灾害雨型图

Fig. 4 Precipitation pattern of the landslide disasters in Xide County

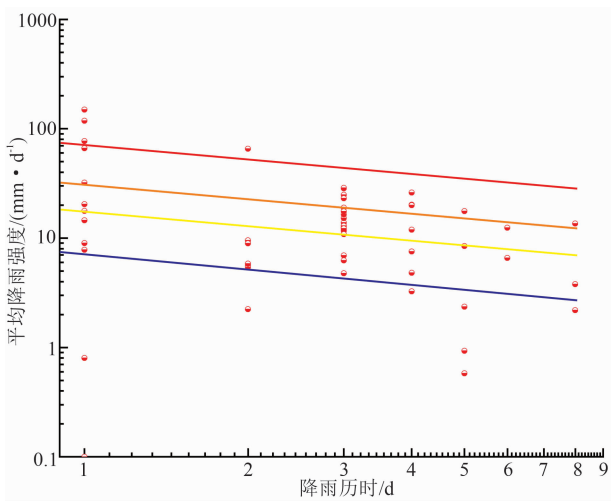


图5 基于最小二乘法的 I-D 降雨阈值临界曲线  
Fig.5 Critical curve of I-D rainfall threshold based on least square method

高危险性,属红色预警;同理,当滑坡位于 70% ~ 90% 时,滑坡处于高危险性,属橙色预警;50% ~ 70% 时,滑坡处于中危险性,属黄色预警;15% ~ 50% 时,滑坡处于低危险性,属蓝色预警;低于 15% 时滑坡处于安全阶段,不预警。

由于平均降雨强度将随着降雨历时的拉长而降低,因此本文考虑将日降雨强度(即 D 值为 1 时)作为另一指标引入到预警模型中,两者取其预警等级高者作为最终预警等级,其预警模型如表 2 所示。

表 2 双指标预警模式表  
Tab.2 Double index warning pattern

当日 雨强/mm	I-D 曲线			
	15% ~ 50%	50% ~ 70%	70% ~ 90%	大于 90%
8 ~ 20	蓝色预警	黄色预警	橙色预警	红色预警
20 ~ 30	黄色预警	黄色预警	橙色预警	红色预警
30 ~ 68	橙色预警	橙色预警	橙色预警	红色预警
大于 68	红色预警	红色预警	红色预警	红色预警

注:预警采用就高原则,如降雨位于 I-D 模型的 15% ~ 50% 概率曲线区间或当日雨强 8 ~ 20 mm,发布蓝色预警。

3.2 预警能力评价

3.2.1 预警模型验证

将 20 例验证集滑坡数据代入到 I-D 曲线中,结果如图 6 所示。结果显示,80% 的滑坡位于发生概率高于 50% 的区域,65% 的滑坡位于发生概率高于 70% 的区域,10% 的滑坡位于发生概率高于 90% 的

极高危险区。将当日激发雨强作为另一指标加入到预警模型后,预警情况见表 3。通过双指标进行预警后,红色预警次数显著提升,红色预警占比达 40%,较单一 I-D 预警模型,预警能力得到提升。

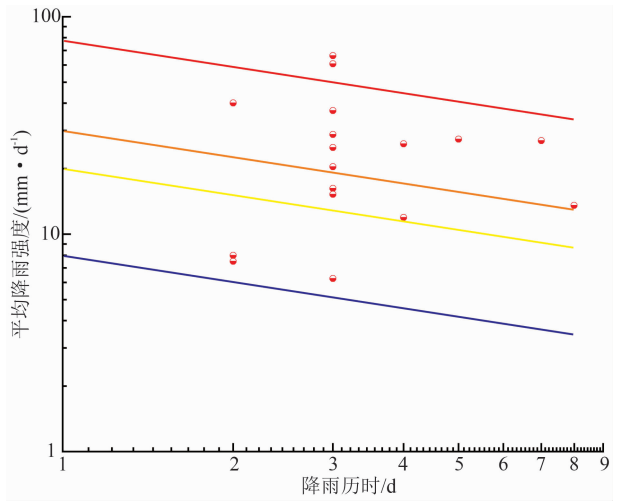


图 6 I-D 预警模型验证图  
Fig.6 Prediction ability test of the I-D warning model

表 3 双指标预警结果表  
Tab.3 Result of the double index warning model

预警模型	预警次数/次			
	蓝色预警	黄色预警	橙色预警	红色预警
I-D 预警	4	3	11	2
双指标预警	3	3	6	8

3.2.2 模型实例验证

针对先雨后滑型、暴雨致滑型、连雨致滑型这三类滑坡,各选取一例典型案例对研究区降雨诱发的滑坡进行预警分析,结果见图 7 ~ 图 9。对于先雨后滑型滑坡,发灾当日激发雨强较低,主要受前期降雨控制,因此 I-D 降雨预警具有较好的效果,预警等级从第 2 天开始保持橙色预警,而基于当日降雨强度预警等级波动较大,在第 5 天至第 6 天由蓝色预警降低到不预警。

对于暴雨致滑型滑坡,基于当日降雨强度预警效果较好,预警等级由第 3 天橙色预警至第 5 天(滑坡发生当日)转变为红色预警,而 I-D 降雨预警模型在此期间仅从黄色预警转变橙色预警。

对于连雨致滑型滑坡,两类指标预警结果类似,均有较好的效果,但基于当日雨强预警阈值模型波动较大,如在第 4 天至第 5 天预警等级由不预警直

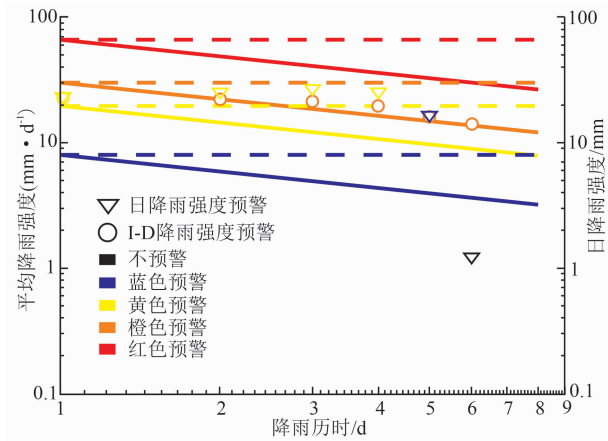


图7 先雨后滑型灾害预警结果

Fig. 7 Prediction ability test for post-rainfall-induced landslide

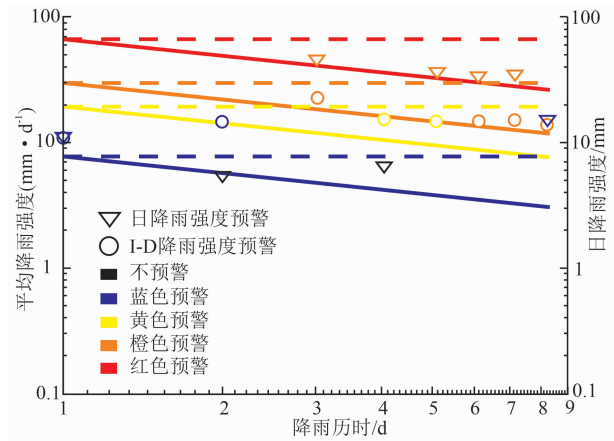


图9 连雨致滑型灾害预警结果

Fig. 9 Prediction ability test for continuous rainfall-induced landslide

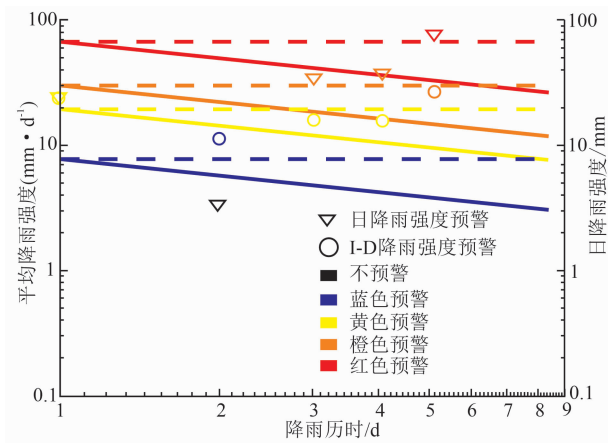


图8 暴雨致滑型灾害预警结果

Fig. 8 Prediction ability test for rainstorm-induced landslide

接转变为橙色预警,通过与 I-D 降雨预警相结合,滑坡发生前 8 日内,预警等级整体呈初步上升的趋势,符合实际情况。

整体说来,通过将当日降雨强度与 I-D 模型相结合的方法,可显著提升降雨预警模型准确性,尤其是针对暴雨致滑型滑坡,模型可有效降低短时强降雨在一定程度上被 I-D 模型均值所削弱的影响。

### 3.2.3 典型案例分析

两河口镇波振村 2 组滑坡位于凉山州喜德县两河口镇波振村,滑坡主要由两部分组成,滑坡整体长约 130 m,宽约 180 m,方量约 20.82 万  $\text{m}^3$ ,属中型土质滑坡(图 10a),于 2012 年 8 月 31 日暴雨后产生整体滑动,直接威胁坡脚波振村 2 组居民聚集区(图 10b)。滑坡发生前 7 天降雨数据如图 11 所示,最大降雨强度发生在 2012 年 8 月 31 日,达 75 mm,最大平均有效降雨量达 21.32 mm,属典型的降雨诱发的滑坡灾害。

采用本文提出的双指标预警模型对该滑坡进行预警,结果如图 12 所示。仅采用 I-D 预警模型,最



图10 波振村2组滑坡发育特征图

Fig. 10 Characteristics map of the landslide in group 2, Bozhen Village

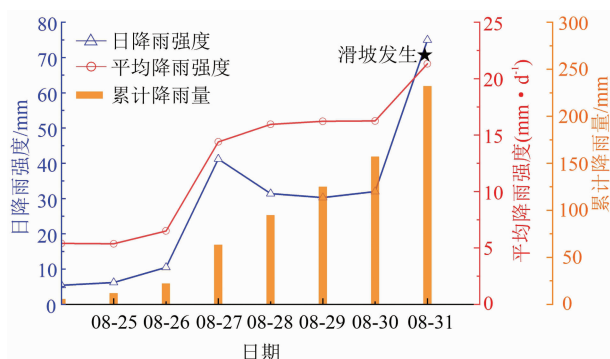


图 11 滑坡降雨特征图

Fig. 11 Characteristics of rainfall before landslide

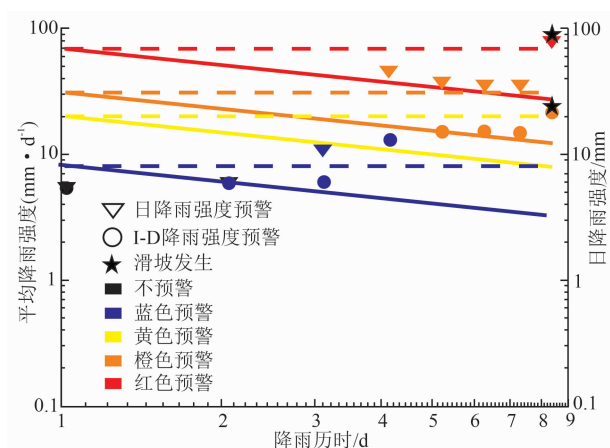


图 12 滑坡降雨等级实时预警图

Fig. 12 Real-time early warning of the rainfall grade

高预警等级为橙色预警,由发灾前 3 d 开始发布;引入当日降雨强度作为另一预警指标后,最高预警等级升级为红色,由发灾前 4 d 开始发布橙色预警。相较于单一预警模型,双指标预警模型在预警等级和预警发布时间上都存在一定优势,应用效果较好。

## 4 讨论

Caine 等早在 1980 年第一次根据全球多地的降雨和地质灾害数据建立了全球范围的 I-D 阈值模型<sup>[29]</sup>,但受限于地质灾害数据数量较少且降雨数据精度较低,以及数据处理手段相对落后等,其思路想法意义远大于其实际应用意义。因此,Guzzetti 等在 2008 年利用多年平均降雨量 (MAP) 和多年平均降雨天数 (RDN) 把降雨数据信息进行归一化,建立了全新的全球范围的 I-D 阈值模型<sup>[28]</sup>,它明显低于 Caine 建立的阈值,同时也是具有更高准确度和可靠

性的全球范围阈值模型。

将喜德县降雨阈值分别与 Guzzetti 的全球范围阈值等进行对比(图 13),结果显示喜德县降雨阈值符合高于全球阈值的规律,同时又明显低于浙江金华市和中国台湾省的阈值。降雨量越大的地方,阈值越高(中国台湾省>浙江金华>喜德县),这是因为在降雨量更大的地方,低降雨水平所能够诱发的地质灾害较少,或在地质历史时期就早已发生,未有数据记录。

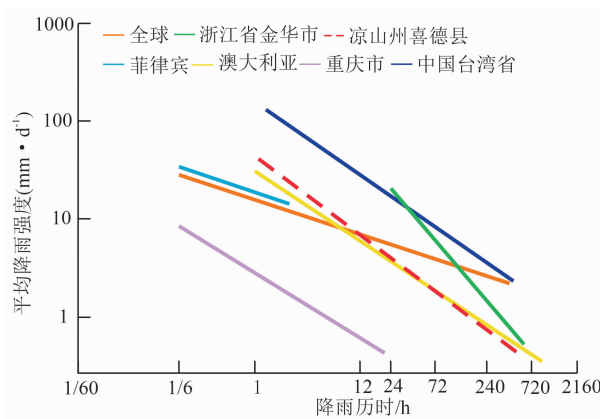


图 13 喜德县与世界范围及其他地区的阈值对比

Fig. 13 Comparison of the threshold values between Xide County and the other regions

## 5 结论

本文通过引入当日降雨量为预警因子,构建双参数的 I-D 滑坡降雨预警模型,并对模型精度进行了验证,取得以下结论。

(1)喜德县属典型的高山峡谷区,典型亚热带季风 and 高原气候特征,降雨集中,暴雨多发于 6—7 月。根据喜德县滑坡灾害与降雨关系,可将喜德县滑坡灾害雨型分为:先雨后滑型、暴雨致滑型、连雨致滑型三大类。

(2)将研究区 74 例滑坡灾害作为训练集,建立 I-D 预警模型,并引入当日降雨强度形成双参数预警指标,两者取其预警等级高者作为最终预警等级,建立双指标预警模型。

(3)对研究区 20 例验证集数据进行预警模型验证,双指标模型红色预警占比显著提升。对于先雨后滑型滑坡,I-D 降雨预警模型具有较好的效果,而对于暴雨致滑型滑坡,基于当日降雨强度的预警

效果较好。相较于单一预警模型,双指标预警模型在预警等级和预警发布时间上都存在一定优势,应用效果较好。

## 参考文献 (References)

- [1] HUANG Faming, ZHANG Jing, ZHOU Chuangbing, et al. A deep learning algorithm using a fully connected sparse autoencoder neural network for landslide susceptibility prediction [J]. *Landslides*, 2020 (1): 217–229. DOI: 10.1007/s10346-019-01274-9
- [2] 宋宇飞, 曹琰波, 范文, 等. 基于贝叶斯方法的降雨诱发滑坡概率型预警模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(3): 558–574. [SONG Yufei, CAO Yanbo, FAN Wen, et al. Probabilistic early warning model for rainfall-induced landslides based on Bayesian approach [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3): 558–574] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0382
- [3] 黄发明, 陈佳武, 范宣梅, 等. 降雨型滑坡时间概率的逻辑回归拟合及连续概率滑坡危险性建模[J]. *地球科学*, 2022, 47(12): 4609–4628. [HUANG Faming, CHEN Jiawu, FAN Xuanmei, et al. Logistic regression fitting of rainfall-induced landslide occurrence probability and continuous landslide hazard prediction modeling [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geoscience*, 2022, 47(12): 4609–4628] DOI: 10.3799/dqkx.2021.164
- [4] 吴益平, 张秋霞, 唐辉明, 等. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(7): 889–895. [WU Yiping, ZHANG Qiuxia, TANG Huiming, et al. Landslide hazard warning based on effective rainfall intensity [J]. *Earth science: Journal of China University of Geoscience*, 2014, 39(7): 889–895] DOI: 10.3799/dqkx.2014.083
- [5] 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, ZHOU Hao, et al. Meteorological early warning criterion of rainfall-induced landslide in Huanggang City, Hubei Province [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(6): 45–53] DOI: 10.19509/j.cnki.dzkq.2022.0132
- [6] 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] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000718
- [7] 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]. *地球科学*, 2024, 49(3): 1039–1051. [LIU Xiepan, YIN Kunlong, XIAO Changgui, et al. Meteorological early warning of landslide based on I-D-R threshold model [J]. *Earth Science*, 2024, 49(3): 1039–1051] DOI: 10.3799/dqkx.2022.233
- [8] GODT J W, BAUM R L, SAVAGE W Z, et al. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework [J]. *Engineering Geology*, 2008, 102(3–4): 214–226. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.03.019
- [9] 李同录, 袁思凡, 徐家隆, 等. 降雨引起的两类不同浅层滑坡稳定性的计算模型——与“浅层黄土滑坡易发性评价: 以晋西黄土区蔡家川农地小流域为例”一文商榷[J]. *山地学报*, 2023, 41(6): 916–925. [LI Tonglu, YUAN Sifan, XU Jialong, et al. Two different types of models for stability assessment of rainfall triggered shallow landslides: Discuss with the paper risk assessment of shallow loess landslides: Taking a small watershed of Caijiachuan farmland in the loess region of western Shanxi of China as an example [J]. *Mountain Research*, 2023, 41(6): 916–925] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000797
- [10] SATYANINGSIH R, JETTEN V, ETTEMA J, et al. Dynamic rainfall thresholds for landslide early warning in Progo Catchment, Java, Indonesia [J]. *Natural Hazards*, 2023, 119(3): 2133–2158. DOI: 10.1007/s11069-023-06208-2
- [11] RANA H, BABU G L S. Regional back analysis of landslide events using TRIGRS model and rainfall threshold: An approach to estimate landslide hazard for Kodagu, India [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(4): 160. DOI: 10.1007/s10064-022-02660-9
- [12] KIM D, IM S, LEE S H, et al. Predicting the rainfall-triggered landslides in a forested mountain region using TRIGRS model [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 7(1): 83–91. DOI: 10.1007/s11629-010-1072-9
- [13] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, 98(3–4): 239–267. DOI: 10.1007/s00703-007-0262-7
- [14] 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. DOI: 10.1007/s11442-012-0951-0
- [15] MARTINOVIĆ K, GAVIN K, REALE C, et al. Rainfall thresholds as a landslide indicator for engineered slopes on the Irish Rail network [J]. *Geomorphology*, 2018, 306: 40–50. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.01.006
- [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 threshold in local regions [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(4): 181–190] DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0420
- [17] LAGOMARSINO D, SEGONI S, ROSI A, et al. Quantitative comparison between two different methodologies to define rainfall thresholds for landslide forecasting [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15(10): 2413–2423. DOI: 10.5194/nhess-15-2413-2015
- [18] 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] DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0422
- [19] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced shallow failures [J]. Engineering Geology, 2004, **73**(3 – 4): 247 – 265. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.01.007
- [20] ZÉZERE J L, TRIGO R M, TRIGO I F. Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): Assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, **5**(3): 331 – 344. DOI: 10.5194/nhess-5-331-2005
- [21] HONG Yong, HIURA H, SHINO K, et al. The influence of intense rainfall on the activity of large-scale crystalline schist landslides in Shikoku Island, Japan [J]. Landslides, 2005, **2**(2): 97 – 105. DOI: 10.1007/s10346-004-0043-z
- [22] SEGONI S, PICIULLO L, GARIANO S L. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence [J]. Landslides, 2018, **15**(8): 1483 – 1501. DOI: 10.1007/s10346-018-0966-4
- [23] 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] DOI: 10.19509/j.cnki.dzkg.tb20220254
- [24] GLADE T, CROZIER M, SMITH P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical antecedent daily rainfall model [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, **157**(6 – 8): 1059 – 1079. DOI: 10.1007/s000240050017
- [25] 李长江, 麻士华, 李炜, 等. 滑坡频度-降雨量的分形关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, **21**(1): 87 – 93. [LI Changjiagn, MA Tuhua, LI Wei, et al. Fractal relation of landslide frequency and rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, **21**(1): 87 – 93] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2010.01.027
- [26] 罗渝, 何思明, 何尽川. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, **39**(9): 1357 – 1363. [LUO Yu, HE Siming, HE Jinchuan. Effect of rainfall patterns on stability of shallow landslide [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2014, **39**(9): 1357 – 1363] DOI: 10.3799/dqkx.2014.118
- [27] 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 relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, **47**(2): 178 – 182] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201906036
- [28] 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. DOI: 10.1007/s10346-007-0112-1
- [29] 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. DOI: 10.1080/04353676.1980.11879996

## A Dual-Indicator Rainfall Model for Landslide Early Warning Based on Daily Rainfall Intensity

WANG Jiazh<sup>1,2,3</sup>, TIE Yongbo<sup>1,2,3</sup>, XU Wei<sup>1,2,3</sup>, BAI Yongjian<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Mingzhi<sup>4</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, 610218; 2. Engineering Technology Innovation Center of Geological Disaster Risk Prevention and Control, Ministry of Natural Resources, Institute of Prospecting Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, 611734; 3. Chengdu Geological Hazard Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Chengdu Institute of Geo-environment Monitoring, Chengdu, 610000; 4. Engineering Technology Innovation Center of Geological Hazards Intelligent Monitoring and Risk Early Warning, Ministry of Natural Resources, China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081)

**Abstract:** The construction of a landslide warning model based on rainfall characteristics constitutes a critical component of a geological disaster prevention and control system, with model accuracy enhancement holding significant practical implications for geological risk management. Traditional single-indicator I-D models,

predominantly established through statistical relationships between average rainfall intensity (I) and duration (D) to determine critical thresholds, often overlook the triggering effects of short-duration rainstorm events.

In this study, 94 typical landslide occurrences and related pre-failure rainfall sequences in Xide County, Liangshan Prefecture, Sichuan Province, China, were used as research samples. A basic rainfall intensity-duration (I-D) model was established using least squares regression, and on this basis, the daily rainfall intensity (D value is 1) parameter was coupled to innovatively construct a dual-indicator collaborative warning model.

(1) The rainfall-triggered landslide mechanisms in Xide County were classified into three typical patterns: antecedent rainfall-induced, rainstorm-induced slide, and prolonged rainfall-triggered slide.

(2) The I-D basic model established based on 74 training samples showed a significant lag in early warning response for rainstorm-induced landslides. By introducing the daily rainfall intensity indicator and adopting dual-indicator extreme value discrimination criteria, the proportion of red warnings in the validation set of 20 cases increased to 40%.

(3) By model validation tests, it confirmed that the dual-indicator system maintained I-D model recognition accuracy for antecedent rainfall-induced landslides, while the timeliness of warnings for rainstorm-induced landslides was improved by 2 days.

The research results not only improve the theoretical system of rainfall thresholds but also provide a new technical path for the prevention and control of landslide disasters.

**Key words:** rainfall model; I-D model; double index; landslide; rainfall types

(责任编辑 朱颖彦 李 嵘)