

引用格式: 王智昊, 杨赛霓, 姚可桢, 佟彬, 唐得胜. 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, TONG Bin, TANG Desheng. Precipitation threshold for rainfall-type landslides in the Qinba Mountains area, Sichuan province, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(2): 238-248.

四川秦巴山区降雨型滑坡灾害降雨阈值

王智昊^{1a,1b,1c,1d}, 杨赛霓^{1a,1b*}, 姚可桢^{1a,1b,1c,1d}, 佟彬², 唐得胜³

(1. 北京师范大学 a. 教育部巨灾模拟与系统性风险应对国际合作联合实验室, 广东 珠海 519087; b. 国家安全与应急管理学院; c. 地理科学学部; d. 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 3. 四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院, 成都 610081)

摘要: 四川省秦巴山区因其复杂地形和频发的极端降雨, 成为中国滑坡灾害高发区, 降雨是其主要自然致灾因素之一。尽管现有区域滑坡预警系统提供了基本的监测, 但在准确性方面仍有提升空间。本研究通过分析 2000—2020 年间 1850 起滑坡灾害及同期逐时降雨数据, 识别影响滑坡发生的关键降雨特征, 采用混淆矩阵和技能得分等评价指标, 拟合筛选确定最佳阈值曲线。研究表明: (1) 拟合确定了诱发滑坡灾害的最佳降雨阈值曲线, 并将其应用于 2021 年滑坡灾害预报, 预测正确率达到 87.72%。(2) 通过滑坡隐患点编目数据进行滑坡危险性区划, 中高危及高危险性区域(4 级和 5 级)的滑坡灾害点占比 51.46%, 中至高危险性区域(3 级至 5 级)的灾害点占比 91.23%, 显示出阈值曲线在空间预测上的有效性。最佳降雨阈值曲线的应用显著提高了滑坡预警系统的准确性和可靠性。研究成果有助于优化现行滑坡预警系统, 提高灾害管理效率, 可为滑坡灾害预防和减灾工作提供科学支持。

关键词: 降雨型滑坡; 降雨阈值; 气象预警; 秦巴山区

中图分类号: X43

文献标志码: A

降雨是地质灾害的诱因之一^[1-2]。关于降雨与滑坡灾害二者关系的数学模型主要分为两大类: 基于数据统计的经验模型^[3-4]和基于斜坡失稳的物理机理模型^[5-8]。

基于统计的经验模型, 通过回归分析历史灾害事件与降雨参数之间的对应关系, 建立地质灾害与降雨之间的定量或半定量联系。经验模型以其数据获取方便、模型构建简单、实用性强等优势, 在全球范围内得到广泛应用^[9-10]。在美国, 早期研究通过分析浅层滑坡和泥石流与降雨条件之间的关系, 为该国地质灾害预警系统的建立提供了科学依据^[11-12]。中国香港地区滑坡早期预警系统

(Landslide Early Warning Systems, LEWS)^[8]是基于降雨强度和 24 h 降雨量来确定地质灾害的临界降雨阈值^[13]。此外, 意大利^[14]、加拿大^[15]、巴西^[16]、印度尼西亚^[17]等多个国家以及中国东南沿海地区^[18-19]、西南地区^[20-22]、青藏地区^[23-24]等都开展了地质灾害与降雨阈值的相关研究工作。

尽管经验模型可以为降雨型地质灾害的预报提供实用可靠的临灾预警指标, 但其预测效果高度依赖于长期、系统的本底观测数据。若观测数据不足, 或区域地形与关键地质条件在外力作用下发生根本改变(如地震效应), 模型的预测准确性则可能受到严重影响, 甚至不再适用。

收稿日期(Received date): 2023-12-22; 改回日期(Accepted date): 2024-03-25

基金项目(Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0906) [The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program(STEP) (2019QZKK0906)]

作者简介(Biography): 王智昊(1998-), 女, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 地质灾害风险评估。[WANG Zhihao (1998-), female, born in Xiangyang, Hubei province, M. Sc. candidate, research on risk assessment of geohazards] E-mail: zhihaowang@mail.bnu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 杨赛霓(1975-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 风险评估与应急管理。[YANG Saini (1975-), female, Ph. D., professor, specialized in risk assessment and emergency management] E-mail: yangsaini@bnu.edu.cn

物理机理模型是基于斜坡失稳机制的力学模型,依赖于确定的岩土、水文参数等,采用数学物理方法反演降雨入渗导致的边坡失稳,可以合理地确定降雨激发条件,虽然模型构建相对复杂,但为制定更为精准的预防措施提供了可能。

秦巴山区是中国降雨型滑坡灾害的高发区。该地区复杂的地形地貌、强烈的构造活动、广泛发育的易滑地层,为滑坡灾害的发生提供了物理条件。秦巴山区汛期雨日多、降水范围广、区域性强降雨及局地暴雨为主的降雨模式,为滑坡灾害的发生提供了激发条件。随着山区开发建设的持续,区域内水电开发、公路铁路、城镇建设等人类工程活动不断增加,滑坡灾害对当地居民的生命和财产安全的威胁也在不断升级。因此,优化该地区滑坡灾害管理及预警系统已成为迫切需求。

本研究以秦巴山区降雨型滑坡灾害为研究对象,统计分析滑坡灾害数据和降雨数据之间的联系,构建诱发该区域滑坡灾害的降雨阈值曲线,细化秦巴山区降雨诱发滑坡阈值研究,为四川省秦巴山区及相似地理特征地区的滑坡预警与风险管理工作提

供参考,同时,对进一步加强区域滑坡气象预警的准确性和时效性,支撑滑坡灾害精准防控具有重要意义。

1 研究区概况

秦巴山区纵贯中国中部,包含秦岭和大巴山,覆盖陕西、四川、重庆和湖北等省份,自甘肃延伸至河南,是重要的地理和生态区。地质学上,秦岭与大巴山同属秦岭造山带,二者相互毗邻,构成了一个连续的地形带。秦巴山区以其独特的地理位置和地形条件,成为中国南北天然分水岭,将湿润的南方和干燥的北方分隔开来。

本研究聚焦于四川省内秦巴山区(图1),覆盖达州市、巴中市、广元市、绵阳市和南充市,地理范围为 103°45'E ~ 108°32'E、30°47'N ~ 33°2'N。该区域地貌类型丰富,以中山、低山和丘陵为主,占研究区总面积的 91%。地势总体呈西高东低、北高南低的格局,大部分地区海拔低于 2000 m,平均海拔约 952 m。四川秦巴山区属亚热带湿润季风气候,全年

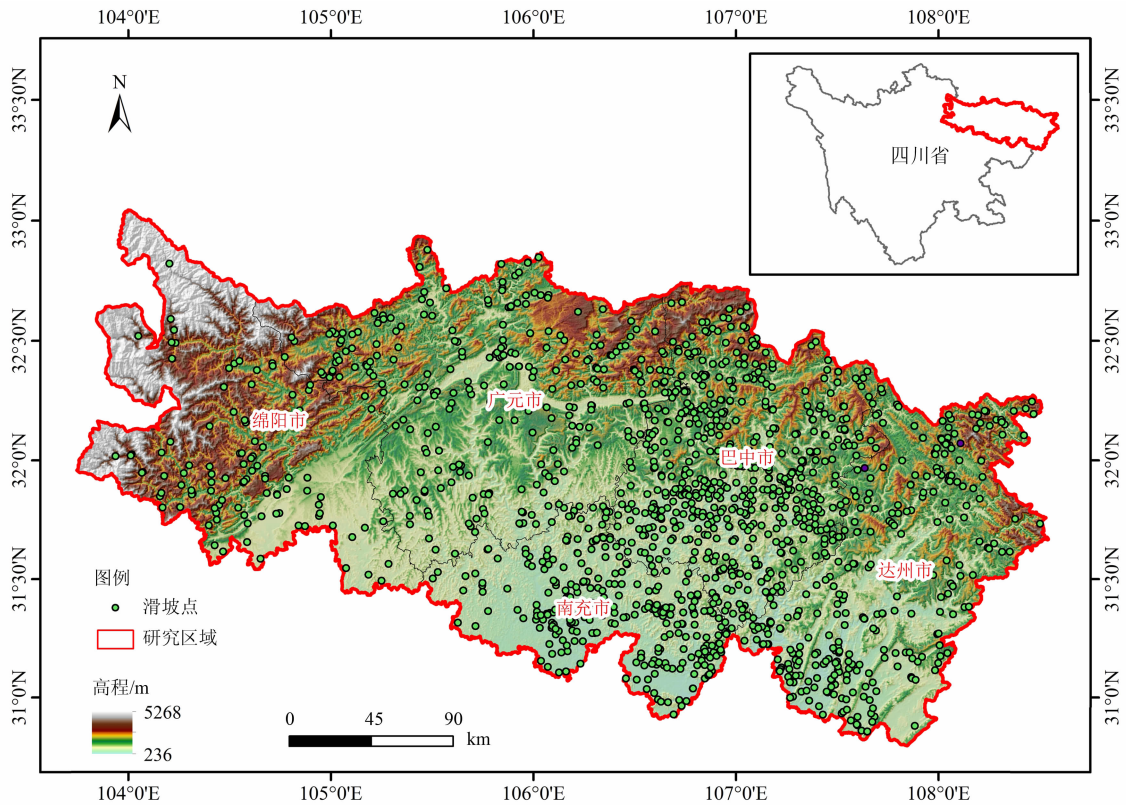


图1 四川秦巴山区地形及降雨型滑坡灾害分布

Fig. 1 Terrain of the Qinba Mountains area in Sichuan province, China, and distribution of the rainfall-type landslides

日照充足,四季分明,降水充沛。雨季通常从4月开始,持续到10月,其中6月至8月雨水较为集中,且多暴雨。受地形和大气环流影响,该区域降雨分布呈自西向东递增趋势,全区多年平均降水量为1151 mm。

秦巴山区雨量充沛,植被覆盖率高。但表层土质及附着层结构不稳定,加上人类活动对地表自然结构的影响,导致形成裸露断面^[25]。每年夏季,频繁发生的暴雨、大暴雨等短时强降雨事件,通过改变斜坡岩土体水动力状况,进而影响斜坡稳定性^[26]。雨水的冲蚀和下渗作用导致斜坡自重增加,引发斜坡失稳变形^[27],从而成为诱发滑坡灾害的主要因素之一。

2 数据材料与方法

2.1 数据收集与预处理

2.1.1 灾害数据

本文收集整理了研究区2000—2021年间发生的4200余起地质灾害^[28-29],涵盖崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降以及地裂缝六种灾害类型。每起灾害的属性详细记录了发生时间、地点(经纬度)、灾害类型及诱发因素等关键信息。为确保研究的精确性和结果的可靠性,依据灾害属性对由降雨诱发的滑坡事件进行初步筛选。随后,对筛选出的滑坡事件进行前期降雨数据审查,确保其与降雨之间存在直接相关性。经过对数据的综合分析,最终确定了2021起由降雨诱发的滑坡灾害事件(图1)。其中,2000—2020年间发生的1850起滑坡灾害作为校准集,用于模型构建和参数调整;2021年内发生的171起滑坡灾害作为验证集,用于检验降雨阈值的识别和预测能力。

2.1.2 降雨数据

研究所用降雨数据来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的第五代全球气候再分析数据集ERA5-Land^[30]。该数据集通过高精度模拟ECMWF ERA5气候再分析数据中陆地部分生成,提供自1950年1月以来全球小时降雨量记录,并以9 km的空间分辨率呈现。ERA5-Land数据集因其较高的时空分辨率,在气候变化研究、环境监测和自然灾害预警等领域得到广泛应用^[31-32]。本研究截

取2000—2021年研究区小时降雨数据,将其与滑坡灾害数据进行关联分析。

2.2 方法

为了探究降雨与滑坡灾害的关系,本研究通过设定无雨间隔重构灾前降雨路径,并基于Gumbel I型极值分布对降雨事件进行分析,识别临界降雨事件。根据诱发滑坡的临界降雨条件,拟合降雨强度与持续时间之间的阈值曲线。最终,通过对混流矩阵和相关技能得分的综合考量,确定了研究区诱发降雨型滑坡灾害的最佳阈值曲线。

2.2.1 重构灾前降雨路径

降雨是诱发滑坡灾害的关键因素,对其发生具有显著影响^[18, 33]。考虑到长时序降雨的复杂性,可能涉及多次短时强降雨和长时间弱降雨,或二者交替出现,本研究引入“无雨间隔”以区分诱发单次滑坡灾害的多个降雨子事件。“无雨间隔”是指两次连续降雨事件之间降雨量为0的持续时长。当无雨间隔超过设定值时,则认为这两次降雨事件相互独立。通过“无雨间隔”的设定,将灾前的降雨分布划分为若干独立子事件,进而深入分析降雨子事件与滑坡灾害之间的关系。

2.2.2 识别临界降雨事件

滑坡灾害的临界降雨事件是指在特定地理环境下,一段时间内降雨量达到或超过特定值时,显著增加滑坡灾害风险的降雨事件。确定滑坡灾害降雨阈值的关键在于识别出诱发灾害的临界降雨事件。然而,这一过程往往具有挑战性,因为难以区分灾害是整个降雨事件的累积效应引发,还是单个异常降雨高峰直接导致。因此,本研究聚焦于分析灾前最异常的降雨事件,以此作为揭示滑坡灾害临界降雨特征的关键。

为全面分析降雨事件,采用Gumbel I型极值分布^[27, 34-35](式1~4)对灾前所有降雨子事件进行极值分析,并计算其重现期。其中,重现期最高的降雨事件被视为最异常降雨事件,也即引发灾害的临界降雨事件。根据临界降雨事件的降雨量 R 和持续时间 D ,计算可得临界降雨强度 I (式5)。

$$F(x_N < x_r) = \exp[-\exp(-y)] \quad (1)$$

$$\text{其中, } y = \alpha(x_r - u) \quad (2)$$

$$u = \mu - (c/\alpha) \quad (3)$$

$$\alpha = \pi/(\sqrt{6} \sigma) \quad (4)$$

$$I = R/D \quad (5)$$

式中, x_N 为大小为 N 的样本的最大值; x_r 为 x_N 的参考值; y 为简化的 Gumbel 变量; u 服从 Gumbel 分布; μ 为 Gumbel 分布的平均值; σ 为 Gumbel 分布的标准差; c 为欧拉常数(0.577)。

2.2.3 拟合阈值曲线

将各滑坡的临界降雨事件的平均降雨强度与持续时间数据对绘制成散点图。基于 Caine 的相关研究^[36], 诱发滑坡灾害的降雨事件, 其平均降雨强度与降雨持续时间的关系服从幂律分布, 一般形式如下:

$$I = aD^b \quad (6)$$

式中, I 为降雨事件的平均强度(mm/h); D 为降雨事件的持续时间(h); a 为比例参数; b 为形状参数; a, b 均为常数。

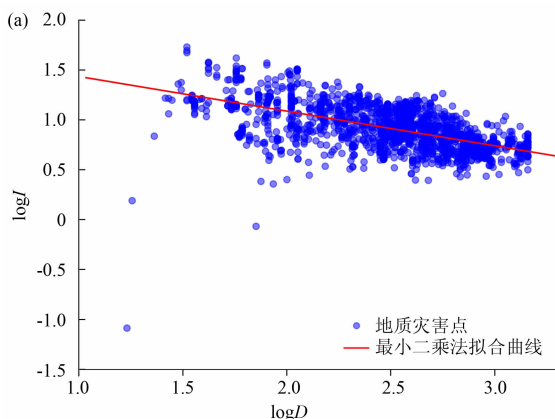
由于 I 与 D 之间存在显著的数量级差异, 为了更准确地描述二者的关系, I - D 阈值通常在半对数坐标系或双对数坐标系下进行拟合获取^[37-38]。对降雨事件数据及式(6)进行对数变换处理, 采用最小二乘法进行拟合(图 2a), 计算如下:

$$\log I = \log a + b \log D \quad (7)$$

然后, 采用频率法^[39]确定不同阈值曲线的参数 a 和 b 。计算各点平均强度实际值与拟合值之间的对数差 Δ , 即 $\Delta = \log I_{\text{实际}} - \log I$ 。通过核密度估计确定 Δ 分布的概率密度函数, 并对其进行高斯拟合。基于高斯拟合曲线(图 2b), 设置不同的概率水平, 进而得到不同的阈值曲线。

2.2.4 选择最佳阈值曲线

分析 2000—2020 年期间研究区历史降雨数据,



通过设定不同的无雨间隔, 识别出 21 年内所有降雨事件, 并将降雨事件的持续时间代入对应的阈值曲线中进行比较, 以判断是否超过阈值。随后, 将超过阈值的降雨事件与滑坡灾害记录进行对比, 使用混淆矩阵及相关技能得分评价各阈值曲线的识别和预测效果。

混淆矩阵是一种衡量分类模型预测准确性的工具, 其展示了四种可能的结果: 真阳性(True Positive, TP, 即降雨事件超过阈值且引发滑坡)、假阳性(False Positive, FP, 即降雨事件超过阈值但未引发滑坡)、真阴性(True Negative, TN, 即降雨事件未超过阈值且未引发滑坡)、假阴性(False Negative, FN, 即降雨事件未超过阈值但引发滑坡)。在灾害预警中, 假阳性相当于误报, 假阴性相当于漏报。

基于这四个参数, 可以计算以下技能得分: 真阳率(True Positive Rate, TPR), 也称为命中率, 是指降雨条件超过阈值且引发了滑坡的降雨事件在实际引发了滑坡的降雨事件中的占比; 假阳率(False Positive Rate, FPR), 也称为虚警率, 是指降雨条件超过阈值且未引发滑坡的降雨事件在未引发滑坡的降雨事件中所占的比例; 假警率(Probability of False Alarms, POFA), 即超过阈值但未引发滑坡的降雨事件在超过阈值的降雨事件中的占比; Hanssen-Kuipers 技能得分(HK)^[40], 即命中率和误报率之差, 提供了对事件和非事件准确性的衡量标准^[41]。各技能得分计算公式如下:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

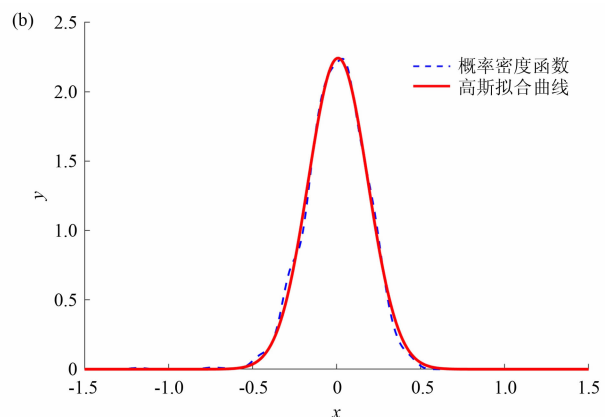


图 2 阈值曲线生成过程: (a) 滑坡临界降雨事件及最小二乘拟合曲线; (b) 降雨强度差值核密度估计

Fig. 2 Threshold curve generation process: (a) least squares fitted curve for critical rainfall events of landslides;

(b) kernel density estimation of rainfall intensity differences

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (9)$$

$$POFA = \frac{FP}{FP + TP} \quad (10)$$

$$HK = TPR - FPR \quad (11)$$

为了实现模型错误预测最小化及正确预测最大化, Gariano^[42]等提出了指数 Λ , 该指数综合考虑了 HK 、 $POFA$ 以及与理想预测之间的偏差 δ , 计算公式为:

$$\Lambda = \lambda_1 HK - \lambda_2 POFA - \lambda_3 \delta \quad (12)$$

式中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为权重系数, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。

此处, 设置 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{3}$ 。

3 结果分析

3.1 滑坡灾害降雨阈值曲线

针对 2000—2020 年期间研究区内发生的 1850 次滑坡灾害, 设置 6 h、12 h、18 h、24 h 四个无雨间隔, 以及 5% 和 1% 两个阈值概率水平(如, 5% 超越概率水平表示有 5% 的灾害点位于阈值曲线下方)。通过不同组合, 共生成 8 条阈值曲线(表 1)。同时, 使用 2000—2020 年历史降雨事件, 反向评估阈值曲线的识别效果。

理想情况下, 最佳阈值曲线应当具有低 FPR 、 $POFA$ 和 δ 值, 同时具有高 TPR 和 HK 值。且在滑坡灾害预警系统中, 考虑到漏报(FN)可能会导致严重

损失, 因此应尽可能减少漏报次数。但现实中, 很难在同一条曲线上同时达到所有理想状态。如表 1 所示, $T_{12, 1}$ 阈值曲线表现出了最少的漏报和最高的 TPR , $T_{6, 5}$ 阈值曲线具备最低的 FPR 和最小的 δ 值, $T_{24, 5}$ 阈值曲线具备最低的 $POFA$, 而 $T_{6, 1}$ 阈值曲线拥有最高的 HK 值。每条曲线各有优缺点, Λ 代表对各项技能得分的综合考量。最终, $T_{6, 5}$ 阈值曲线因表现出最低的 Λ 值, 被选为四川秦巴山区诱发降雨型滑坡灾害的最佳阈值曲线(图 3a)。

随着降雨持续时间的增加, 研究区诱发滑坡灾害所需的平均降雨强度逐渐降低。由最佳阈值曲线可知, 当短时降雨(如 $D \leq 8$ h)的平均强度超过 14.9 mm/h 时, 便可引发滑坡。若降雨持续时间超过 96 h, 诱发滑坡的平均降雨强度则低至 6.3 mm/h。这表明, 无论是短时强降雨还是长历时的持续降雨(即使是小雨), 均可引发滑坡。短时强降雨对坡体表面的冲刷和侵蚀作用可能改变坡体的形态和稳定性, 从而增加滑坡的发生概率^[43-45], 而长时间的持续降雨导致土壤含水量增加, 可能引发地下水水位上升, 增加滑坡发生的可能^[46-47]。

3.2 阈值有效性的时空验证

为了验证阈值曲线的有效性, 利用研究区 2021 年降雨数据, 结合该年内发生的 171 起具有确切发生时间和精确地理坐标的滑坡灾害进行验证。结果显示, 有 150 起灾害的关联降雨事件达到了临界降雨条件, 其对应的 $I-D$ 散点均位于阈值曲线之上。阈值曲线对灾害的正确识别率达 87.72% (图 3b),

表 1 不同无雨间隔和阈值概率水平下的降雨阈值曲线及技能得分表

Tab. 1 Precipitation threshold curves and skill scores under different no-rain intervals and probability levels

曲线名称	无雨间隔/h	阈值概率水平	阈值曲线	FN	TPR	FPR	POFA	HK	δ	Λ
$T_{6, 5}$	6	0.05	$I = 30.6655D^{-0.3473}$	81	0.9525	0.0531	0.9516	0.8995	0.0946	-0.0489
$T_{6, 1}$	6	0.01	$I = 23.1446D^{-0.3473}$	24	0.9849	0.0836	0.9679	0.9013	0.0959	-0.0542
$T_{12, 5}$	12	0.05	$I = 28.9726D^{-0.3484}$	86	0.9489	0.1013	0.9430	0.8476	0.1417	-0.0790
$T_{12, 1}$	12	0.01	$I = 19.4760D^{-0.3484}$	19	0.9888	0.1771	0.9657	0.8117	0.1848	-0.1129
$T_{18, 5}$	18	0.05	$I = 25.5927D^{-0.3389}$	79	0.9495	0.1643	0.9379	0.7852	0.2003	-0.1177
$T_{18, 1}$	18	0.01	$I = 15.9227D^{-0.3389}$	24	0.9860	0.2898	0.9631	0.6963	0.2997	-0.1882
$T_{24, 5}$	24	0.05	$I = 36.5047D^{-0.3911}$	75	0.9605	0.2280	0.9214	0.7325	0.2516	-0.1468
$T_{24, 1}$	24	0.01	$I = 22.0673D^{-0.3911}$	23	0.9872	0.3979	0.9532	0.5893	0.4043	-0.2560

注: 表内加粗数据表示在此项指标下的最优情况。

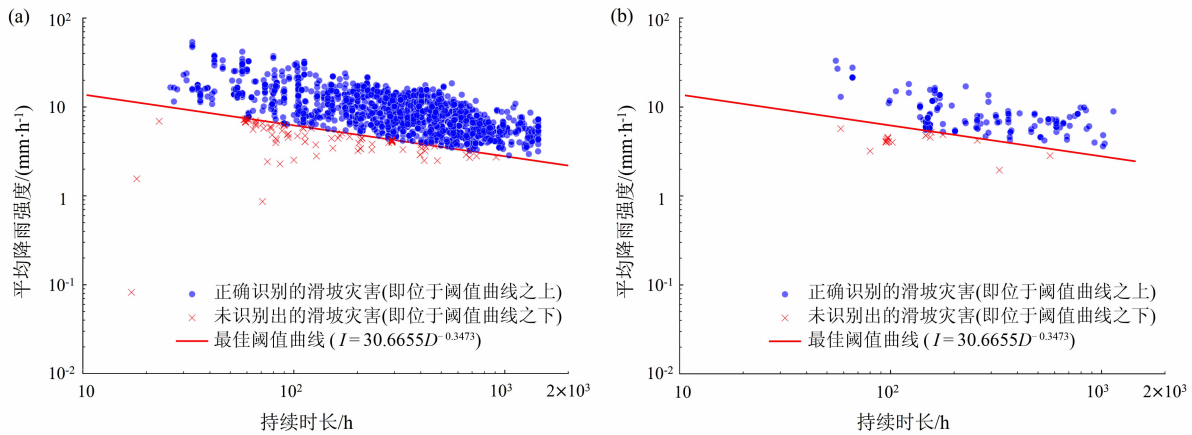


图3 秦巴山区降雨阈值分析:

(a) 2000—2020年滑坡事件的降雨条件及最佳阈值曲线; (b) 2021年滑坡事件的降雨条件及最佳阈值曲线

Fig. 3 Precipitation threshold analysis in the Qinba Mountains area; (a) rainfall conditions and optimal threshold curve for landslides (2000 - 2020); (b) rainfall conditions and optimal threshold curve for landslides in 2021

表现了最佳阈值曲线在实际应用中的可靠性。

根据四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院收集到的数据,秦巴山区现行地质灾害气象风险短临预警系统主要采用四个关键雨量指标:1 h、3 h、6 h及12 h短临预警。在各雨量指标下,根据不同的降雨量参考值,设定了相应的预警等级。在本研究中,对于现行滑坡灾害预警阈值,只要任一关键雨量指标达到其预警阈值,即视此次灾害被成功预警。结果显示,在2000至2020年期间,现行阈值对滑坡灾害的预警正确率为66.58%,2021年预警正确率为74.27%。相比之下,本文提出的最佳阈值曲线在2021年滑坡灾害预警中,正确率达87.72%,显著优于现行预警系统,提高了滑坡灾害预警的准确性。

除对已发生灾害事件进行时序验证外,本研究还利用最佳阈值曲线对秦巴山区已勘测滑坡隐患点危险性开展空间有效性验证。首先,提取各滑坡灾害隐患点2021年的降雨时间序列,划分降雨子事件,计算每场降雨子事件的持续时间和平均强度。根据阈值曲线上对应的临界降雨条件,统计各隐患点的潜在滑坡频次。使用自然断点法,将灾害隐患点的滑坡危险性划分为五个等级:低危险性(1级,潜在滑坡频次≤2次)、中低危险性(2级,2<潜在滑坡频次≤4次)、中危险性(3级,4<潜在滑坡频次≤6次)、中高危险性(4级,6<潜在滑坡频次≤7次)、高危险性(5级,潜在滑坡频次≥8次)。

运用泰森多边形,将各隐患点的危险性等级传递到区域面上,确保每个区块内的任何位置都离其所属隐患点最近^[48]。依据地理学第一定律^[49],假定同一泰森多边形内具有最相近的地理环境和降雨特征,即区域内滑坡灾害危险性具有较高的空间同质性,不同区块间具有空间异质性。由此实现了基于隐患点潜在滑坡次数的空间危险性区划(图4)。

结合2021年实际发生的滑坡灾害分布,对基于最佳阈值曲线的危险性区划预测效果进行验证(表2)。结果显示,中高及高危险性等级区域(4级和5级)内的实际滑坡灾害点占比为51.46%,中至高危险性等级区域(3级至5级)内的灾害点占比达91.23%。此结果表明最佳阈值曲线在分析秦巴山区滑坡灾害隐患点时具有实际应用价值和空间预测准确性。在雨季来临时,可根据隐患点历史同期或

表2 最佳阈值曲线的危险性区划预测效果验证

Tab. 2 Validation of the hazard zonation prediction effectiveness of the optimal threshold curve

危险性等级	面积/km ²	面积占比/%	灾害数量	灾害占比/%
1(低)	5767.28	9.32	1	0.58
2(中低)	11 023.37	17.82	14	8.19
3(中)	20 248.67	32.74	68	39.77
4(中高)	12 688.14	20.51	40	23.39
5(高)	12 128.83	19.61	48	28.07
总计	61 856.31	100.00	171	100.00

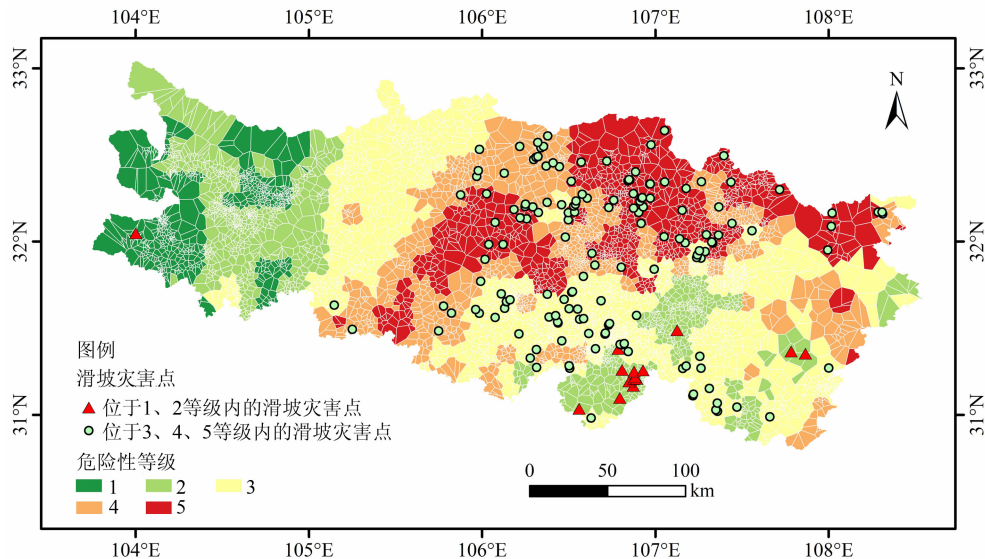


图4 秦巴山区2021年滑坡灾害危险性区划及地质灾害点分布

Fig. 4 Landslide hazard zonation and distribution of landslide sites in the Qinba Mountains area in 2021

近期降雨数据,开展基于最佳阈值曲线的滑坡危险性区划,从而加强高危险性区域的滑坡防治与监测,提升滑坡灾害预警和预防的准确度。

4 讨论

4.1 *I-D* 阈值曲线的有效性 with 局限性

过去40年间,局地至全球尺度上的应用表明,*I-D* 阈值在滑坡灾害预测方面展现出显著的有效性。然而,高误报和漏报问题依然是制约精度的主要因素。误报削弱了公众对灾害的防御敏感度,漏报则导致了错误的安全感,增大了伤亡风险^[50]。本研究综合考虑多项技能得分并进行加权统计,在误报和漏报之间取得了平衡。尽管最佳阈值曲线在验证集中表现良好,但仍有12.28%的灾害点未被准确识别。这反映出当前模型尚未全面考虑滑坡灾害影响因素。

滑坡灾害触发机制极为复杂,降雨仅是其中一个关键因素。地质条件、气候变化、水文特征、人类活动等均在滑坡灾害的诱发过程中起着重要作用。特别是地震活动,不仅能够直接触发滑坡,而且导致的地质结构变化还会与降雨相互作用,从而改变滑坡的触发阈值。这种复杂的相互作用增加了滑坡灾害预测和预警中的不确定性,也使得不同地区的降雨阈值之间存在显著差异。因此,深入研究这些未被正确识别的异常点,将有助于更全面地理解

滑坡灾害的触发机制,并对模型进行针对性的改进和优化。

4.2 数据质量与分区分析

本文提出的阈值依赖于对降雨和滑坡灾害数据的分析,因此数据质量对结果的准确性至关重要。获取更精细和更详细的数据成为提高阈值精度的关键手段。考虑到研究区内不同地区之间的地质、气象和环境条件差异,采用分区分析可能更能精确地反映各区域的滑坡危险性。然而,由于当前的灾害数量有限,分区后各区域内灾害点数量过少,限制了有效分析的可能。未来研究将探索合理的分区策略,收集更详实的数据,以提高分区分析的可行性和准确性。

4.3 综合风险与多学科模型

滑坡灾害的发生具有随机性和不可预测性,加上地质和气象条件的时空异质性,这强调了在未来研究中考虑多元风险因素的必要性,如开展与地质地貌、岩性构造、土壤、植被等环境因素的深入勘查与分析,将有助于识别诱发滑坡灾害的其他主导原因。人类活动的影响,如土地利用变化、城市化进程以及工程建设等因素也应纳入考虑的范围。同时,通过定期更新数据、优化模型,以及利用先进的地理信息系统和遥感技术提高数据收集和效率,可以显著提高预测的准确性和适用性。此外,建立和完善多学科交叉的地质灾害预测模型,整合气象

学、地质学、水文学和工程学等领域的知识,对于完善滑坡灾害预报体系、预防和应对滑坡灾害、保护人员和财产免受滑坡影响具有重要作用。

5 结论

(1) 最佳降雨阈值曲线的建立

基于四川省秦巴山区 2000—2020 年历史降雨和滑坡灾害数据,建立了诱发滑坡灾害的最佳降雨阈值曲线 $T_{6,5}$ 。该曲线综合考虑误报率、漏报率和技能得分,显示出高预测准确性。随着降雨持续时间的增加,诱发滑坡灾害所需的平均降雨强度逐渐降低。

(2) 2021 年滑坡灾害的验证

将 $T_{6,5}$ 阈值曲线应用于 2021 年滑坡灾害数据,该曲线对滑坡的预测正确率达 87.72%,显著优于现行滑坡灾害预警系统。该阈值曲线能够根据不同的降雨时长计算出相应阈值,提高了预警的准确性和灵活性。

(3) 空间维度上的预测能力

结合滑坡灾害隐患点数据,验证了最佳阈值曲线 $T_{6,5}$ 在空间预测上的有效性。中高及高危险性区域(4 级和 5 级)的滑坡灾害点占比 51.46%,中至高危险性区域(3 级至 5 级)的灾害点占比 91.23%。这证实基于最佳阈值曲线的滑坡灾害危险性区划在空间预测方面的有效性,能够为已识别的隐患提供区域化的气象监测和预警。同时,也表明了中至高危险区域应成为防治与监测的重点,投入更多的关注与资源。基于隐患点潜在发灾次数的危险性区划方法将有助于优化滑坡灾害的防治策略、资源配置以及应急响应,为未来滑坡灾害预警体系的完善和优化提供重要的参考。

参考文献 (References)

- [1] FROUDE M J, PETLEY D N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016 [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, **18**(8): 2161–2181. DOI: 10.5194/nhess-18-2161-2018
- [2] DOWLING C A, SANTI P M. Debris flows and their toll on human life: A global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011 [J]. *Natural Hazards*, 2014, **71**(1): 203–227. DOI: 10.1007/s11069-013-0907-4
- [3] LI Changjiang, MA Tuhua, ZHU Xingsheng, et al. The power-law relationship between landslide occurrence and rainfall level [J]. *Geomorphology*, 2011, **130**(3–4): 221–219. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.03.018
- [4] GARCIA-URQUIA E. Establishing rainfall frequency contour lines as thresholds for rainfall-induced landslides in Tegucigalpa, Honduras, 1980–2005 [J]. *Natural Hazards*, 2016, **82**(3): 2107–2132. DOI: 10.1007/s11069-016-2297-x
- [5] ZHOU Wenqi, QIU Haijun, WANG Luyao, et al. Combining rainfall-induced shallow landslides and subsequent debris flows for hazard chain prediction [J]. *Catena*, 2022, **213**: 106199. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106199
- [6] GUZZETTI F, GARIANO S L, PERUCCACCI S, et al. Geographical landslide early warning systems [J]. *Earth Science Reviews*, 2020, **200**: 102973. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102973
- [7] GARIANO S L, GUZZETTI F. Landslides in a changing climate [J]. *Earth Science Reviews*, 2016, **162**: 227–252. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.08.011
- [8] WICKI A, LEHMANN P, HAUCK C, et al. Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning [J]. *Landslides*, 2020, **17**(8): 1881–1896. DOI: 10.1007/s10346-020-01400-y
- [9] 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
- [10] 闵颖, 胡娟, 李超, 等. 云南省滑坡泥石流灾害预报预警模型研究 [J]. *灾害学*, 2013, **28**(4): 216–220. [MIN Ying, HU Juan, LI Chao, et al. Prediction model about landslide and debris flow in Yunnan province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, **28**(4): 216–220] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2013.04.038
- [11] CAMPBELL R H. Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California [M]. Washington, D. C.: U S Government Printing Office, 1975: 51.
- [12] CANNON S H. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California [J]. *Geology*, 1985, **38**(12): 267–272. DOI: 10.3133/ofr8310
- [13] BRAND E W, PREMCHITT J, PHILLIPSON H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides. Toronto: Canadian Geotechnical Society, 1984: 276–284.
- [14] SEGONI S, ROSI A, ROSSI G, et al. Analysing the relationship between rainfalls and landslides to define a mosaic of triggering thresholds for regional-scale warning systems [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, **14**(9): 2637–2648. DOI: 10.5194/nhess-14-2637-2014
- [15] JAKOB M, OWEN T, SIMPSON T. A regional real-time debris-flow warning system for the District of North Vancouver, Canada

- [J]. Landslides, 2012, **9**(2): 165 – 178. DOI: 10.1007/s10346-011-0282-8
- [16] ORTIGAO J A R, JUSTI M G, D'ORSI R, et al. Rio – Watch 2001: the Rio de Janeiro landslide alarm system [C]//HO K K S, LI K S. Proceedings of the 14th Southeast Asian Geotechnical Conference. Hong Kong: Balkema, 2001: 237 – 241.
- [17] LIAO Zonghu, HONG Yang, WANG Jun, et al. Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets [J]. Landslides, 2010, **7**(3): 317 – 324. DOI: 10.1007/s10346-010-0219-7
- [18] 狄靖月, 许凤雯, 李宇梅, 等. 东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析[J]. 灾害学, 2019, **34**(1): 62 – 67 + 93. [DI Jingyue, XU Fengwen, LI Yumei, et al. Precipitation type and threshold analysis of geological disasters in southeast [J]. Journal of Catastrophology, 2019, **34**(1): 62 – 67 + 93] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.013
- [19] 张添锋, 郭朝旭. 福建山区泥石流临界降雨阈值[J]. 山地学报, 2021, **39**(5): 701 – 709. [ZHANG Tianfeng, GUO Chaoxu. Rainfall threshold of debris flow in Fujian mountainous area, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(5): 701 – 709] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000631
- [20] 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
- [21] 孙鹏, 胡磊, 胡玉乾, 等. 横断山区汶川县滑坡泥石流降雨致灾阈值研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, **59**(2): 187 – 195. [SUN Peng, HU Lei, HU Yuqian, et al. On disaster threshold of landslide and debris flow rainfall in Wenchuan county [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023, **59**(2): 187 – 195] DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021302
- [22] 徐继维, 于国强, 张茂省, 等. 舟曲地区泥石流降雨临界阈值[J]. 山地学报, 2017, **35**(1): 39 – 47. [XU Jiwei, YU Guoqiang, ZHANG Maosheng, et al. Critical rainfall thresholds for debris flows in Zhouqu, China [J]. Mountain Research, 2017, **35**(1): 39 – 47] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000194
- [23] 胡磊, 胡玉乾, 孙鹏, 等. 藏东南地区降雨型滑坡致灾阈值及滑坡危险性量化分析[J]. 灾害学, 2021, **36**(4): 194 – 199. [HU Lei, HU Yuqian, SUN Peng, et al. A quantitative analysis of disaster threshold and landslide risk of rainfall-type landslide in Southeast Tibet [J]. Journal of Catastrophology, 2021, **36**(4): 194 – 199] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.032
- [24] 吴杰, 陈冠, 孟兴民, 等. 白龙江流域滑坡降雨临界值[J]. 山地学报, 2022, **40**(6): 875 – 886. [WU Jie, CHEN Guan, MENG Xingmin, et al. Rainfall threshold of landslides in the Bailong River basin, China [J]. Mountain Research, 2022, **40**(6): 875 – 886] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000720
- [25] FLORIS M, BOZZANO F. Evaluation of landslide reactivation: A modified rainfall threshold model based on historical records of rainfall and landslides [J]. Geomorphology, 2008, **94**(1 – 2): 40 – 57. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.04.009
- [26] 铁永波, 周洪福, 倪化勇. 西南山区短时强降雨雨诱发型低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例[J]. 灾害学, 2013, **28**(4): 110 – 113. [TIE Yongbo, ZHOU Hongfu, NI Huayong. Formation of low frequency debris flow induced by short-time heavy rainfall in mountain area of Southwest China: Take Lengmu debris flow as an example, Baoxing, Sichuan province [J]. Journal of Catastrophology, 2013, **28**(4): 110 – 113] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2013.04.020
- [27] MARQUES R, ZEZERE J, TRIGO R, et al. Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoacao County (Sao Miguel Island, Azores): Relationships with the North Atlantic Oscillation [J]. Hydrological Processes, 2008, **22**(4): 478 – 494. DOI: 10.1002/hyp.6879
- [28] TONG Bin, LI Yuan, YANG Xudong, et al. The development and application of China national landslide database and information system [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, **14**: 448. DOI: 10.1007/s12517-021-06825-w
- [29] 李媛, 杨旭东, 尹春荣, 等. 中国地质灾害时空分布及防灾减灾[M]. 北京: 地质出版社, 2020: 146 – 166. [LI Yuan, YANG Xudong, YIN Chunrong, et al. Spatial-temporal distribution and disaster prevention and mitigation of geological disasters in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020: 146 – 166]
- [30] MUÑOZ SABATER J. ERA5-Land hourly data from 1981 to present [J]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019, **10**: 24381. DOI: 10.24381/cds.e2161bac
- [31] XU Jintao, MA Ziqiang, YAN Songkun, et al. Do ERA5 and ERA5-land precipitation estimates outperform satellite-based precipitation products? A comprehensive comparison between state-of-the-art model-based and satellite-based precipitation products over mainland China [J]. Journal of Hydrology, 2022, **605**: 127353. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127353
- [32] SHEN Liucheng, WEN Jiahong, ZHANG Yuqing, et al. Performance evaluation of ERA5 extreme precipitation in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmosphere, 2022, **13**(9): 1416. DOI: 10.3390/atmos13091416
- [33] FANG Kun, TANG Huiming, LI Changdong, et al. Centrifuge modelling of landslides and landslide hazard mitigation: A review [J]. Geoscience Frontiers, 2023, **14**(1): 101493. DOI: 10.1016/j.gsf.2022.101493
- [34] GUMBEL E J. Statistics of extremes [M]. New York: Columbia University Press, 1958: 375 – 376.

- [35] TE CHOW V, MAIDMENT D R, MAY S L W. Applied hydrology [M]. New York: McGraw-Hill, 1988: 380 – 389.
- [36] 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
- [37] DAHAL R K, HASEGAWA S. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya [J]. Geomorphology, 2008, **100**(3–4): 429–443. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.01.014
- [38] 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**: 239–267. DOI: 10.1007/s00703-007-0262-7
- [39] 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. DOI: 10.5194/nhess-10-447-2010
- [40] HANSEN A W, KUIPERS W J A. On the relationship between the frequency of rain and various meteorological parameters: With reference to the problem of objective forecasting [M]. De Bilt: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 1965: 2–15.
- [41] MCBRIDE J L, EBERT E E. Verification of quantitative precipitation forecasts from operational numerical weather prediction models over Australia [J]. Weather and Forecasting, 2000, **15**(1): 103–121. DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0103:V>2.0.CO;2
- [42] GARIANO S L, BRUNETTI M T, IOVINE G, et al. Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy [J]. Geomorphology, 2015, **228**: 653–665. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.10.019
- [43] ZHOU Chang, AI Dong, HUANG Wei, et al. Emergency survey and stability analysis of a rainfall-induced soil-rock mixture landslide at Chongqing city, China [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, **9**: 774200. DOI: 10.3389/feart.2021.774200
- [44] ALSUBAL S, BIN SAPARI N, HARAHAP I S H, et al. A review on mechanism of rainwater in triggering landslide [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2019, **513**(1): 012009.
- [45] SU Yan, LAN Simei, XU Li, et al. Simulation of progressive failure process in rainfall-induced landslides [J]. Advanced Materials Research, 2015, **1065–1069**: 63–66. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.63
- [46] MONTGOMERY D R, DIETRICH W E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding [J]. Water Resources Research, 1994, **30**(4): 1153–1171. DOI: 10.1029/93WR02979
- [47] MONTRASIO L, VALENTINO R. A model for triggering mechanisms of shallow landslides [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, **8**(5): 1149–1159. DOI: 10.5194/nhess-8-1149-2008
- [48] YAO Kezhen, YANG Saini, WU Shengnan, et al. Landslide susceptibility assessment considering spatial agglomeration and dispersion characteristics: A case study of Bijie city in Guizhou province, China [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2022, **11**(5): 269. DOI: 10.3390/ijgi11050269
- [49] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region [J]. Economic Geography, 1970, **46**(sup1): 234–240. DOI: 10.2307/143141
- [50] STALEY D M, KEAN J W, CANNON S H, et al. Objective definition of rainfall intensity – duration thresholds for the initiation of post-fire debris flows in southern California [J]. Landslides, 2013, **10**: 547–562. DOI: 10.1007/s10346-012-0341-9

Precipitation Threshold for Rainfall-Type Landslides in the Qinba Mountains Area, Sichuan Province, China

WANG Zhihao^{1a,1b,1c,1d}, YANG Saini^{1a,1b*}, YAO Kezhen^{1a,1b,1c,1d}, TONG Bin², TANG Desheng³

(1. *a. Joint International Research Laboratory of Catastrophe Simulation and Systemic Risk Governance, Zhuhai 519087, Guangdong, China; b. School of National Safety and Emergency Management; c. Faculty of Geographical Science;*

d. Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. China Institute of Geoenvironment Monitoring, Beijing 100081, China;

3. Sichuan Institute of Land Space Ecological Restoration and Geological Disaster Prevention, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The Qinba Mountains area in Sichuan province, China, has been known for high incidences of landslides partly due to complex local terrain and frequent microclimate extremes, but precipitation is certainly one

of the main natural factors causing landslides. Although the existing regional landslide warning system provides regular monitoring services, there is still room for improvement in its accuracy.

In this study, 1850 landslide events and simultaneous hourly precipitation data from 2000—2020 were collected and regressively analyzed to identify the key rainfall patterns governing landslide occurrences; an optimal threshold curve of precipitation was determined using combined indicators such as confusion matrix and skill scores.

(1) The optimal precipitation threshold curve for inducing landslides in the Qinba Mountains area was determined by fitting, and validated by the case of landslide forecast in 2021, with a prediction accuracy of 87.72%.

(2) By applying the optimal precipitation threshold curve to landslide hazard mapping through catalog data of field survey, it was found that 51.46% of landslides were in high-risk zones (classes 4 and 5) and 91.23% were in medium to high-risk zones (classes 3 to 5), justifying the effectiveness of the threshold curve for spatial prediction.

This study provides important scientific references for the optimization of the current landslide early warning system, improving the efficiency of disaster management, and supporting landslide disaster prevention and mitigation.

Key words: rainfall-induced landslide; precipitation threshold; landslide early warning; the Qinba Mountains area

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)