https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.287

基于机器学习的重庆市万州区滑坡灾害降雨阈值与分区预警

蒋宏伟[1,2,3],李世豪[1],薛盛元[1],吴佳易[1],刘健鹏[1],李小双[1*]

1. 常州大学城市建设学院,江苏常州 213164
2. 河南理工大学能源科学与工程学院,河南焦作 454003
3. 金属矿山开采安全与灾害防治全国重点实验室,安徽马鞍山 243000

摘 要: 三峡库区滑坡受降雨入渗与库水位涨落共同影响,统一降雨阈值难以反映不同水库影响条件下的响应差异.以重庆市万州区为研究区,基于滑坡事件、逐日降雨、库水位、DEM和水系等数据构建综合数据库,按水库影响区与非水库影响区及水库运行前、≤145 m和145~175 m三个阶段划分6类样本,采用E-I模型和梯度提升分位数回归模型识别降雨阈值.滑坡主要集中于5~9月,传统统计阈值显示,水库影响区降雨阈值在水库运行后整体降低;GBQR模型的Q90阈值在水库影响区3个阶段分别为80.26、64.55和60.44 mm,明显低于非水库影响区的122.36、117.00和108.80 mm,表明水库影响区具有较明显的低阈值响应特征.类似库岸地区滑坡预警应考虑空间分区与库水位阶段,采用分区、分阶段的降雨阈值设置方法.

关键词: 滑坡;降雨阈值;库水位变化;梯度提升分位数回归;工程地质.

中图分类号: P642.22 **文章编号:** 1000-2383(2026)10-3879-16 **收稿日期:** 2026-06-18

Identification of Landslide Rainfall Thresholds and Zonal Early Warning in Wanzhou District, Chongqing, Based on Machine Learning

Jiang Hongwei[1,2,3], Li Shihao[1], Xue Shengyuan[1], Wu Jiayi[1], Liu Jianpeng[1], Li Xiaoshuang[1*]

1. *School of Urban Construction, Changzhou University, Changzhou* 213164, *China*
2. *School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo* 454003, *China*
3. *State Key Laboratory of Safety and Disaster Prevention on Metal Mines, Ma'anshan* 243000, *China*

Abstract: Landslides in the Three Gorges Reservoir area are jointly affected by rainfall infiltration and reservoir water-level fluctuations, and a uniform rainfall threshold cannot adequately reflect differences in landslide responses under different reservoir-affected conditions. Taking Wanzhou District, Chongqing, as the study area, a comprehensive database was constructed based on landslide events, daily rainfall, reservoir water-level, DEM, and river system data. The landslide samples were divided into six

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(Nos. 52404113,42477142);湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站开放基金项目(No.BNORSG-202408)和江苏省中青年学术带头人项目(No. SCZ2509200010);金属矿山开采安全与灾害防治全国重点实验室开放课题(No. 2025-JSKSSYS-06).

作者简介: 蒋宏伟(1992-),男,讲师,博士,研究方向为地质灾害监测预警. ORCID: 0000-0003-3374-6549. E-mail: jianghongwei@cczu.edu.cn

* **通讯作者:** 李小双(1983-),男,教授,博士,研究方向为矿山露天开采与边坡工程、矿山安全与资源高效开发. ORCID: 0000-0001-7469-8390. E-mail: xsli2011@cczu.edu.cn

引用格式: 蒋宏伟,李世豪,薛盛元,吴佳易,刘健鹏,李小双,2026.基于机器学习的重庆市万州区滑坡灾害降雨阈值与分区预警.地球科学,51(10):3879-3894.

Citation: Jiang Hongwei, Li Shihao, Xue Shengyuan, Wu Jiayi, Liu Jianpeng, Li Xiaoshuang, 2026. Identification of Landslide Rainfall Thresholds and Zonal Early Warning in Wanzhou District, Chongqing, Based on Machine Learning. *Earth Science*, 51(10): 3879-3894.

groups according to the reservoir-affected and non-reservoir-affected areas and three reservoir water-level stages, namely the pre-reservoir operation stage, the ≤145 m stage, and the 145−175 m stage. The E-I model and gradient boosting quantile regression (GBQR) model were employed to identify rainfall thresholds. Landslide events were mainly concentrated from May to September. Traditional statistical rainfall thresholds in the reservoir-affected area showed an overall decrease after reservoir operation. The Q90 thresholds of GBQR model in the reservoir-affected area during the three stages were 80.26, 64.55, and 60.44 mm, respectively, which were markedly lower than the corresponding values of 122.36, 117.00, and 108.80 mm in the non-reservoir-affected area, indicating a distinct low-threshold response in the reservoir-affected area. Landslide early warning in similar reservoir-bank areas should consider spatial zoning and reservoir water-level stages and adopt zone- and stage-specific rainfall threshold settings.

Key words: landslide; rainfall threshold; reservoir water-level fluctuation; gradient boosting quantile regression; engineering geology.

0 引言

降雨是诱发滑坡灾害的重要外部因素之一,降雨阈值识别是区域滑坡预警研究中的核心内容.已有研究通常从降雨强度、累计降雨量、降雨历时和前期降雨等角度构建经验阈值模型,用于刻画降雨过程与滑坡发生之间的统计关系(吴益平等,2014).Gonzalez *et al.*(2024)对降雨滑坡阈值研究进行了系统总结,指出降雨阈值仍是区域滑坡预警中应用最广泛的方法之一.I-D、E-I和I-D-R等阈值模型能够较直观地反映降雨强度、累计降雨量和降雨历时对滑坡触发的影响,已被广泛用于不同区域的降雨型滑坡预警研究(Melillo *et al.*, 2016;Peruccacci *et al.*, 2017).针对不同地貌和气候背景,Giannecchini *et al.*(2024)进一步比较了多种统计方法下的降雨阈值差异,表明阈值结果受区域环境和统计方法影响明显.

滑坡发生往往并非仅受当日降雨控制,前期降雨累积效应会影响坡体含水状态、地下水位和孔隙水压力变化.盛逸凡等(2019)将有效降雨强度与逻辑回归相结合,构建了降雨型滑坡预测模型.赵海燕等(2020)基于有效降雨阈值分析了区域滑坡灾害危险性,说明前期降雨指标对阈值识别具有重要意义.Chinkulkijniwat *et al.*(2025)从触发与非触发降雨事件角度评价了累计降雨和降雨历时阈值,进一步强调了前期降雨过程的作用.Zhao *et al.*(2025)将有效历时阈值与土壤湿度耦合,用于提高降雨型滑坡概率识别能力.Mirus *et al.*(2025)指出,将水文信息纳入滑坡预警系统,是提升下一代滑坡预警能力的重要方向.

近年来,机器学习方法逐渐应用于降雨型滑坡阈值识别和预警建模,可用于刻画降雨、地形地质和水文条件之间的非线性关系.Marjanović *et al.*(2018)较早将决策树方法用于降雨型滑坡时间预测,为数据驱动模型在滑坡阈值研究中的应用提供了思路.Kang *et al.*(2024)基于机器学习方法开展了区域降雨型滑坡预警研究,表明机器学习模型能够增强多因子预测能力.Zheng *et al.*(2024)从系统构建角度讨论了机器学习在降雨型滑坡预警中的应用.Shao *et al.*(2025)采用可解释机器学习方法识别降雨型滑坡阈值,强调了模型解释性在阈值研究中的重要性.Zhu *et al.*(2025)进一步利用人工智能方法量化斜坡降雨敏感性,为区域滑坡阈值细化提供了新的技术路径.陈铭熙等(2026)将物理机制与机器学习方法相结合开展库岸谷幅变形预测,为复杂库岸环境下多因素驱动的智能预测提供了新的思路.

三峡库区是我国滑坡灾害发育较为典型的区域之一,库岸斜坡除受降雨入渗影响外,还受到库水位周期性涨落的长期作用.库水位升降可改变库岸斜坡地下水补给、排泄和渗流条件,进而影响坡体稳定性和滑坡降雨响应特征(Zhu *et al.*, 2024).周剑等(2022)针对重庆市滑坡建立了降雨阈值预警模型,说明区域尺度阈值对重庆地区滑坡预警具有应用价值.易武等(2023)以三峡库区堆积层滑坡为例,探讨了降雨阈值及预警模型构建问题.Peng and Wu(2024)针对三峡库区日尺度滑坡预警阈值开展了优化研究.Liang *et al.*(2025)以万州区为例,指出引入有效前期降雨有助于提高降雨阈值的预警效果.吴润泽等(2025)基于三峡库区多源地质灾害资料构建了滑坡监测预警系统,进一步体现了多源信息融合在库区滑坡监测预警中的应用价值.Luo *et al.*(2024)基于三峡库区790处滑坡的统计分析指出,水库诱发滑坡具有显著的区域和亚区域空

间差异,且大量滑坡集中发生于初期3个蓄水阶段及其后的2~3个库水运行循环.

总体来看,已有研究为降雨型滑坡阈值识别和预警提供了重要基础,但三峡库区滑坡受降雨和库水位涨落共同影响,统一降雨阈值难以充分反映不同水库影响条件下的响应差异.基于上述研究现状,本文重点关注两个层面的阈值差异:一是水库影响区与非水库影响区之间的滑坡降雨阈值差异;二是不同库水位阶段下滑坡降雨阈值的变化特征.围绕上述问题,本文以重庆市万州区为研究对象,构建滑坡-降雨-库水位综合数据库,划分水库影响区与非水库影响区,并结合三峡库水位变化过程将滑坡事件划分为不同库水位阶段.在此基础上,采用 E-I 降雨阈值模型和梯度提升分位数回归模型识别不同空间分区和不同库水位阶段下的滑坡降雨阈值差异,重点分析水库影响区滑坡的低阈值响应特征及其对分区预警的启示.

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

重庆市万州区位于三峡库区腹地,地处重庆市东北部,长江干流自西南向东北贯穿研究区,是三峡库区典型的库岸滑坡发育区.研究区地形起伏明显,河谷切割强烈,沿长江干流及其支流两岸发育较多库岸斜坡和沟谷斜坡,滑坡灾害形成环境较为复杂.研究区降雨具有明显的季节性特征,汛期降雨较为集中,连续降雨和短时强降雨过程较为常见.受河谷切割和复杂斜坡地形影响,降雨入渗与地表汇流过程对斜坡水文状态具有较明显影响,为研究区滑坡的集中发育提供了相应的水文地形背景.三峡水库蓄水运行后,库水位周期性涨落改变了库岸斜坡地下水补给、排泄和渗流条件,使该区滑坡灾害表现出降雨、库水位和地形地质条件共同作用的特征.因此,选择万州区作为研究对象,有利于分析三峡库区滑坡降雨阈值在不同水库影响条件下的差异.研究区位置、地形起伏及滑坡点空间分布如图1所示.

1.2　数据来源与预处理

本文所用数据主要包括滑坡点数据、逐日降雨数据、三峡库水位数据、数字高程模型(DEM)、水系面数据、水系线数据和研究区边界数据.滑坡点数据主要基于已有调查资料,并结合网络公开信息爬取整理获得;逐日降雨数据来源于中国气象数据网;三峡库水位数据来源于中国长江三峡集团有限公司;DEM、水系面及研究区边界数据来源于全国地理信息资源目录服务系统.各类数据来源及主要用途见表1.

在数据预处理过程中,首先对DEM、水系、研究区边界和滑坡点等空间数据进行坐标系统一和空间裁剪,保证各类数据在同一空间参考框架下进行叠加分析.其次,对滑坡点属性字段进行检查,剔

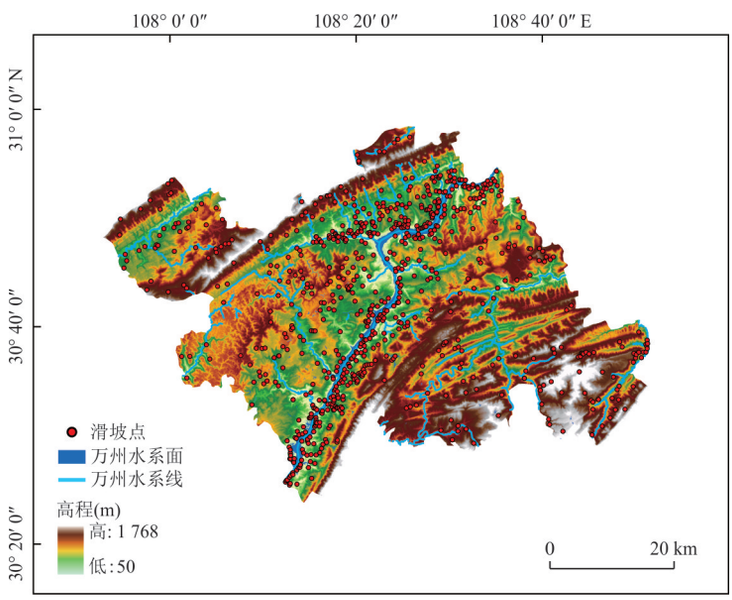

图1　研究区位置及滑坡点分布

Fig.1　Location of the study area and distribution of landslide points

表1 数据来源与用途

Table 1 Data sources and their applications

数据类型	数据来源	主要用途
滑坡点数据	已有调查资料及网络公开信息爬取整理	滑坡事件识别、空间分布分析和样本筛选
逐日降雨数据	中国气象数据网	构建降雨指标,识别降雨阈值
库水位数据	中国长江三峡集团有限公司	划分库水位阶段,构建水位变化指标
DEM数据	全国地理信息资源目录服务系统	研究区地形分析和水库影响区辅助判定
水系数据	全国地理信息资源目录服务系统	水库影响区划分与空间关系修正
研究区边界	全国地理信息资源目录服务系统	空间裁剪和研究范围限定

除空间位置异常、属性缺失严重或无法确定发生时间的记录.对于降雨和库水位时间序列数据,统一日期格式,并以滑坡发生日期为时间基准,提取滑坡发生当日及前1~10 d的降雨量和库水位数据.最后,将滑坡事件、降雨指标、库水位指标和空间分区属性进行匹配,形成后续阈值识别和模型分析所需的综合数据库.

1.3 滑坡样本筛选与分组

原始滑坡点数据共包含819条记录.考虑到降雨阈值识别需要明确的滑坡发生时间和对应的水雨情条件,本文首先对原始样本进行筛选,剔除缺少明确发生日期、空间位置异常、无法与逐日降雨或库水位数据匹配的记录,得到146条初始水雨情匹配样本.该样本能够满足滑坡事件与降雨、库水位数据的基本匹配要求,但在水库影响区部分水位阶段样本数量较少,不利于开展不同水位阶段下滑坡降雨响应差异分析.总体上,样本筛选主要考虑滑坡发生时间是否明确、空间位置是否能够判定,以及是否能够与逐日降雨和库水位数据进行有效匹配.补充样本采用与原始样本一致的时间匹配、空间判定和分组标准,经筛选核对后统一纳入综合分析样本库.

为提高水库影响区样本的代表性,本文在保持空间分区和水位阶段分类标准一致的基础上,进一步通过公开资料、政府信息、媒体报道和相关文献等渠道补充具有明确时间和位置记录的滑坡事件.补充样本需同时满足以下条件:一是滑坡事件发生地点位于万州区范围内;二是具有明确或可核定的发生日期;三是能够与逐日降雨和三峡库水位数据进行时间匹配;四是空间位置能够判定其是否属于水库影响区.经过筛选与核对后,最终建立包含198条记录的综合分析样本库.样本补充主要集中于水库影响区,其中水库运行前阶段、≤145 m阶段和145~175 m阶段分别增加5、18和30条;非水库影响区水库运行前阶段样本数量由61条调整为60条,其余两组样本数量未发生变化,最终形成198条综合分析样本,具体见表2.

表2 综合分析样本6类分组数量统计

Table 2 Number of landslide samples in six groups

6类分组	初始匹配样本	综合分析样本
水库影响区:水库运行前阶段	16	21
水库影响区:≤145 m阶段	3	21
水库影响区:145~175 m阶段	1	31
非水库影响区:水库运行前阶段	61	60
非水库影响区:≤145 m阶段	41	41
非水库影响区:145~175 m阶段	24	24
合计	146	198

根据滑坡点空间位置与水库影响区的关系,将样本划分为水库影响区和非水库影响区两类.其中,位于水库影响区内的滑坡点赋值为reservoir=1,位于非水库影响区的滑坡点赋值为reservoir=0.进一步根据滑坡发生时对应的库水位阶段,将样本划分为水库运行前阶段、≤145 m阶段和145~175 m阶段.由此形成"空间分区-库水位阶段"组合下的6类滑坡事件样本,为后续比较不同水库影响条件下的降雨阈值差异提供基础.

6类样本分别对应2类空间分区与3个库水位阶段的组合.后续阈值识别中,一方面在相同库水位阶段下比较水库影响区与非水库影响区的阈值差异,另一方面在同一空间分区内比较水库运行前阶段、≤145 m阶段和145~175 m阶段的阈值变化,以分析不同水库影响条件下滑坡降雨阈值的差异.

2 研究方法

本文围绕万州区滑坡降雨阈值识别及水库影响差异分析开展研究,整体技术流程如图2所示.首先,对滑坡点、降雨、库水位、DEM、水系和研究区边

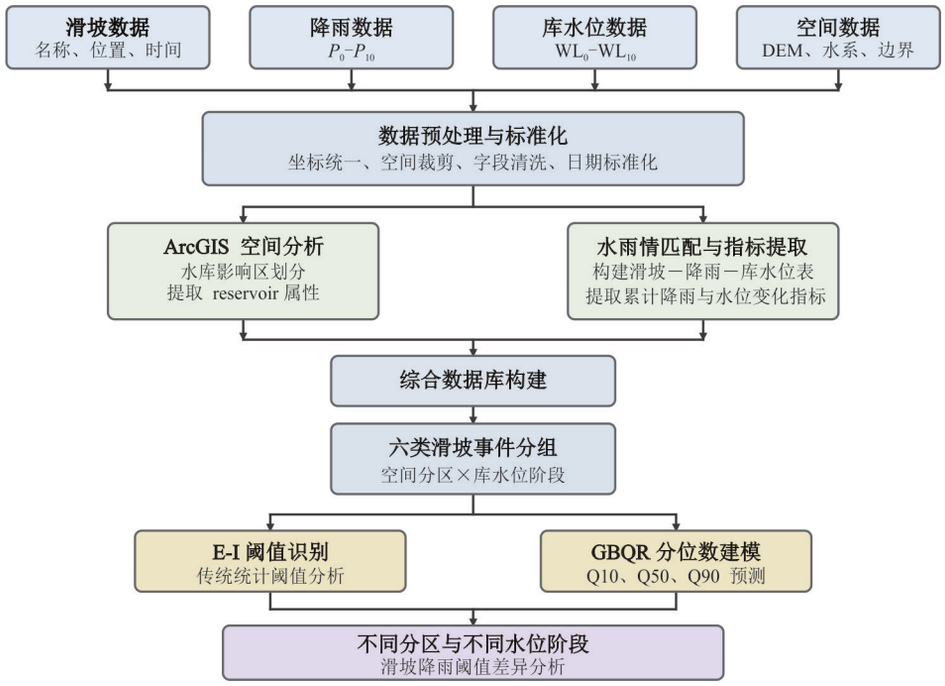

图 2　研究方法流程

Fig.2　Flowchart of the research methodology

界等数据进行坐标统一、空间裁剪、字段清洗和日期标准化处理;其次,基于水系分布、地形条件和库岸连通关系划分水库影响区与非水库影响区,并提取滑坡点空间分区属性;然后,以滑坡发生日期为基准,匹配当日及前 1～10 d 降雨量和库水位数据,构建滑坡－降雨－库水位综合数据库;最后,采用 *E-I* 降雨阈值模型和梯度提升分位数回归模型识别不同空间分区和不同库水位阶段下的滑坡降雨阈值差异.

2.1　水库影响区划分与库水位阶段识别

三峡库区滑坡灾害受降雨入渗和库水位涨落共同影响.为分析库水位变化对万州区滑坡降雨阈值的影响,本文从空间分区和时间阶段两个方面构建分类框架:一方面,根据滑坡点与库区水体、连通水系及河谷地形之间的空间关系,将研究区划分为水库影响区和非水库影响区;另一方面,根据滑坡发生日期对应的三峡库水位状态,对滑坡事件进行库水位阶段识别.

水库影响区划分基于 ArcGIS 平台完成.首先,将研究区边界、DEM、水系面、水系线和滑坡点数据统一至同一坐标系统,并裁剪至万州区范围.其次,利用水系面数据提取长江干流及主要库湾水域范围,结合水系线数据识别与长江干流相连的主要支流和沟谷水系.再次,结合 DEM 数据对河谷低位地形、库岸带以及与库区水体连通性较强的区域进行辅助判定,剔除与库区水体缺乏地形连通关系的高海拔或孤立区域,形成水库影响区空间范围.最后,以万州区行政边界为约束,将研究区内未划入水库影响区的部分定义为非水库影响区.

本文所划分的水库影响区主要指与长江干流、库湾及主要连通水系具有较强空间联系,库水位涨落可能对斜坡水文条件产生直接或间接影响的区域;非水库影响区则主要指远离库区水体或与其水力联系相对较弱的区域.该分区并非严格意义上的地下水动力边界,而是服务于区域尺度滑坡样本分类和阈值比较的空间分区,用于分析不同库水位影响条件下滑坡降雨阈值是否存在差异.

在完成水库影响区和非水库影响区划分后,采用空间叠加方法提取滑坡点的分区属性.对于位于水库影响区范围内的滑坡点,将其 reservoir 字段赋值为 1;对于位于非水库影响区范围内的滑坡点,将其 reservoir 字段赋值为 0.该字段用于表征滑坡事件是否可能受到库水位变化的直接或间接影响,并作为后续阈值分组分析和模型建模的重要分类变量.水库影响区与非水库影响区滑坡点分布如图 3 所示.由图 3 可见,两类滑坡点在空间位置上存在一定差异,其中水库影响区滑坡点主要分布于长江干流、库湾及主要支流附近,非水库影响区滑坡点则

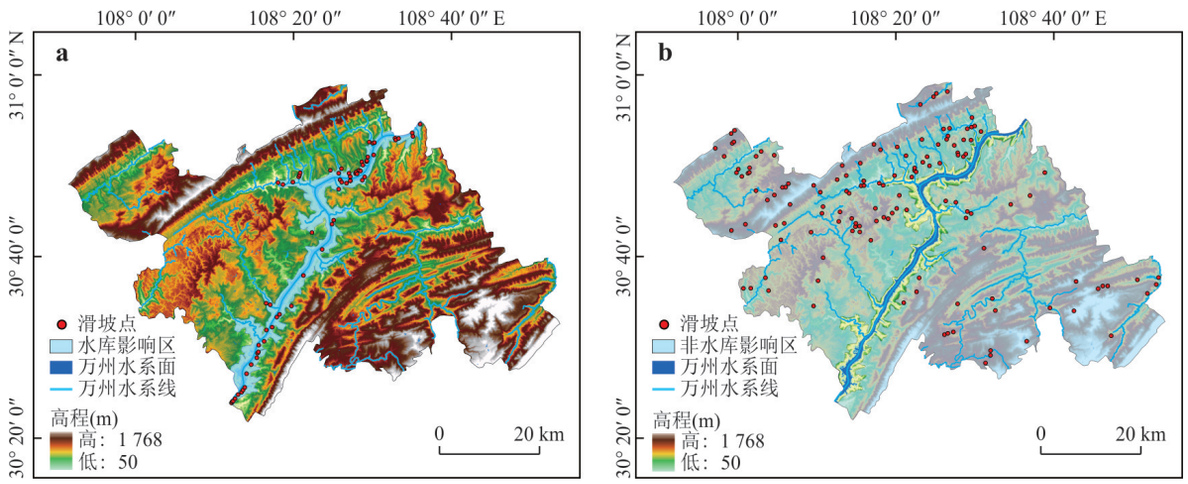

图 3 水库影响区与非水库影响区滑坡点分布

Fig.3 Distribution of landslide points in different zones

a.水库影响区;b.非水库影响区

主要分布于远离库岸的山地和沟谷区域.

库水位阶段识别以三峡库区逐日水位数据为基础.结合三峡水库运行过程及研究区滑坡事件的时间分布特征,本文将滑坡事件对应的库水位状态划分为3个阶段:水库运行前阶段、≤145 m 阶段和145～175 m 阶段.其中,水库运行前阶段表示三峡水库尚未形成稳定调蓄影响的时期;≤145 m 阶段表示水库运行过程中库水位不高于145 m 的阶段;145～175 m 阶段表示三峡水库进入较高水位调度运行后的阶段.

不同运行阶段的库水位变化过程如图4所示.图4a显示,2003—2006年库水位整体处于较低水平,基本低于145 m,水位波动幅度相对较小;图4b显示,2007—2020年库水位主要在145～175 m范围内呈周期性涨落,表明三峡水库进入常态化调度运行后,库水位变化幅度和周期性特征更加明显.上述阶段划分为后续比较不同库水位条件下滑坡降雨阈值差异提供了分组依据.

2.2 降雨－库水位指标构建

为分析万州区滑坡事件对降雨和库水位变化的响应特征,本文以滑坡发生日期为时间基准,分别提取滑坡发生当日及前1～10 d的逐日降雨量和库水位数据,并在此基础上构建降雨指标、库水位指标和空间分区指标.设滑坡发生日期为第0 d,滑坡发生当日降雨量记为P_0,滑坡发生前第i d的降雨量记为P_i(i=1,2,…,10);滑坡发生当日库水位记为WL_0,滑坡发生前第i d的库水位记为WL_i(i=1,2,…,10).

降雨指标主要包括单日降雨量、前期累计降雨量和平均降雨强度.单日降雨量用于表征滑坡发生当日或前期某一日降雨对坡体稳定性的直接影响;前期累计降雨量用于反映滑坡发生前连续降雨对坡体含水状态和地下水条件的累积作用.本文计算滑坡发生当日及前n d的累计降雨量,记为R_{0-n},其表达式为:

$$R_{0-n}=\sum_{i=0}^{n}P_i,\quad n=1,2,\cdots,10\ , \tag{1}$$

式中:R_{0-n}为滑坡发生当日及前n d累计降雨量,单位为mm;P_0为滑坡发生当日降雨量,P_i为滑坡发生前第i d的日降雨量,单位均为mm;n取1～10.当n=10时,R_{0-10}表示滑坡发生当日及前10 d(共11 d)的累计降雨量,后续阈值识别主要采用R_{0-10}表征短期前期降雨累积条件.本文主要比较统一日尺度累计降雨条件下不同空间分区和库水位阶段的阈值差异,因此采用未加权的简单累计方式,未引入时间衰减系数,R_{0-10}表示累计降雨量,而非考虑时间衰减的有效降雨量.

对于E-I降雨阈值分析,本文进一步构建累计降雨量E和平均降雨强度I两个指标.其中,E表示滑坡发生前一定时间窗口内的累计降雨量;I表示该降雨过程的平均降雨强度,可由累计降雨量与降雨历时计算得到:

$$I=\frac{E}{D}\ , \tag{2}$$

式中:I为平均降雨强度,单位为mm/d;E为降雨过程累计降雨量,单位为mm;D为降雨历时,单位为d.E-I指标可用于刻画滑坡事件在累计降雨量和降

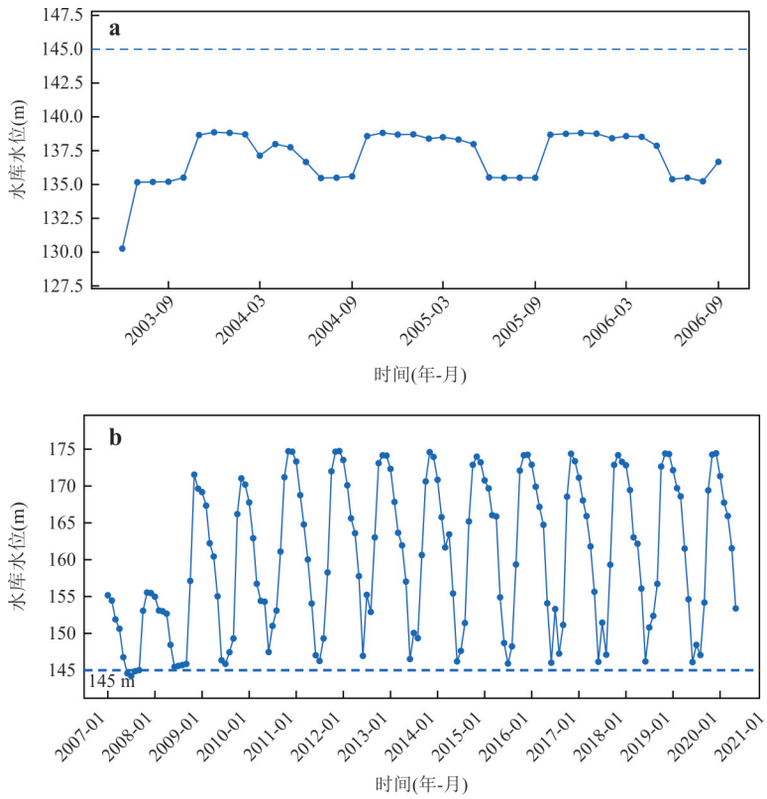

图 4　不同库水位阶段下三峡水库水位变化过程

Fig.4　Water-level variations of the Three Gorges Reservoir under different stages

a.≤145 m 阶段(2003-09～2006-09);b. 145～175 m 阶段(2007-01～2020-05)

雨强度共同作用下的分布特征,并作为传统统计阈值识别方法与GBQR模型结果进行对比.

库水位指标主要用于表征滑坡发生前后库区水位状态及其变化过程.本文提取滑坡发生当日及前1～10 d的逐日库水位,并计算不同时间窗口内的水位变化量和绝对水位变化量.水位变化量用于反映库水位升降方向,绝对水位变化量用于表征水位波动幅度,其表达式分别为:

$$\Delta WL_n = WL_0 - WL_n , \tag{3}$$

$$|\Delta WL_n| = |WL_0 - WL_n| , \tag{4}$$

式中:ΔWL_n为滑坡发生当日相对于前n d的库水位变化量,单位为m;$|\Delta WL_n|$为对应时间窗口内的绝对水位变化量,单位为m;WL_0为滑坡发生当日库水位,WL_n为滑坡发生前第n d的库水位,单位均为m.结合前文库水位阶段划分结果,本文将库水位阶段和水位变化量共同作为表征库水位影响的重要指标.为便于后续阈值识别和模型分析,本文对主要降雨－库水位指标进行统一整理,具体见表3.

通过上述指标构建,可将滑坡事件的发生时间、空间分区、降雨过程和库水位变化过程统一到同一数据表中,为后续不同分区和不同库水位阶段下的降雨阈值识别提供基础.需要指出的是,降雨指标主要反映滑坡触发的外部水文条件,库水位指标主要反映库岸斜坡可能受到的水动力扰动;二者共同用于分析万州区滑坡的降雨－库水位复合响应特征.

2.3　*E*-*I*降雨阈值模型

E-*I*降雨阈值模型是区域降雨型滑坡阈值研究中常用的经验统计模型,其中E表示降雨过程累计降雨量,I表示平均降雨强度.与单一降雨量指标相比,*E*-*I*模型能够同时反映降雨累积效应和降雨强度对滑坡发生的影响,适用于分析滑坡事件在不同降雨条件下的分布特征.Giannecchini *et al.*(2024)指出,不同统计方法会影响降雨阈值曲线的拟合结果,因此在阈值识别中需要结合研究区样本特征选择适当模型.Roman Quintero *et al.*(2025)在区域尺度滑坡危险性评价中强调,水文气象信息对滑坡阈值识别具有重要意义.国内相关研究也表明,区域降雨阈值模型可为滑坡预警提供定量依据(卢操等,2025).王智昊等(2024)针对四川秦巴山区降雨型滑坡开展阈值研究,进一步说明了分区降雨阈值

表 3 降雨－库水位指标说明

Table 3 Rainfall and reservoir water-level indicators

指标类型	指标名称	符号	含义
降雨指标	当日降雨量	P_0	滑坡发生当日降雨量
降雨指标	前期日降雨量	P_i	滑坡发生前第 i d 降雨量
降雨指标	前期累计降雨量	R_{0-n}	滑坡发生当日及前 n d 累计降雨量
降雨指标	累计降雨量	E	E-I 阈值模型中的累计降雨量
降雨指标	平均降雨强度	I	单次降雨过程累计降雨量与降雨历时之比
降雨指标	降雨历时	D	降雨过程持续时间
库水位指标	当日库水位	WL_0	滑坡发生当日三峡库水位
库水位指标	前期库水位	WL_i	滑坡发生前第 i d 库水位
库水位指标	水位变化量	ΔWL_n	滑坡发生当日与前 n d 库水位差值
库水位指标	绝对水位变化量	$\lvert\Delta WL_n\rvert$	n d 时间窗口内库水位变化幅度
分区指标	水库影响区属性	reservoir	水库影响区为 1，非水库影响区为 0
阶段指标	库水位阶段	stage	水库运行前阶段、≤145 m 阶段、145～175 m 阶段

在复杂山区的适用性.

基于滑坡事件对应的降雨过程，本文以平均降雨强度 I 为横坐标、累计降雨量 E 为纵坐标，构建 E-I 散点分布.E-I 样本点以单个滑坡事件为基本分析单元.对于每个滑坡事件，根据其发生时间对应的降雨过程计算累计降雨量 E 和降雨历时 D，并由 E 与 D 的比值计算平均降雨强度 I.由此，每个滑坡事件对应形成一个 (I,E) 样本点，用于后续不同分位水平下阈值曲线的拟合.在此基础上，采用幂函数形式拟合降雨阈值曲线，其表达式为：

$$E_q = \alpha_q I^{\beta_q}, \tag{5}$$

式中，E_q 为第 q 分位数对应的累计降雨阈值，单位为 mm；I 为平均降雨强度，单位为 mm/d；α_q 为尺度参数，反映阈值曲线的整体高低；β_q 为形状参数，反映累计降雨阈值随降雨强度变化的趋势；q 表示分位水平.本文选取 10%、50% 和 90% 三个分位水平，分别用于表征低分位、中位和高分位降雨阈值条件.

为便于参数拟合和阈值曲线表达，对公式(5)进行对数转换，可得到：

$$\ln E_q = \ln \alpha_q + \beta_q \ln I, \tag{6}$$

式中：各参数含义及单位与公式(5)相同.通过对 E-I 样本点进行拟合，可得到不同分位水平下的降雨阈值曲线.其中，10% 分位阈值可作为较低累计降雨条件下滑坡发生的参考边界，50% 分位阈值可反映样本中较为典型的降雨条件，90% 分位阈值则可用于表征高累计降雨或强降雨条件下的阈值水平.

需要指出的是，E-I 模型主要从降雨强度和累计降雨量两个角度刻画滑坡触发条件，能够反映研究区滑坡事件与降雨过程之间的总体统计关系.但该模型未直接引入水库影响区属性、库水位阶段和水位变化过程，因此难以充分揭示库水位涨落对滑坡降雨阈值的影响.基于此，本文进一步采用 GBQR 分位数回归模型，将空间分区和库水位变化指标纳入阈值识别过程，以分析不同水库影响条件下滑坡降雨阈值的差异.

2.4 梯度提升分位数回归模型

传统 E-I 降雨阈值模型主要基于累计降雨量和平均降雨强度识别滑坡触发条件，难以同时考虑水库影响区属性、库水位阶段和水位变化过程对降雨阈值的影响.近年来，机器学习方法逐渐用于降雨型滑坡阈值识别、易发性评价和预警建模，能够较好地刻画多源变量之间的非线性关系.Kang *et al.*(2024)基于机器学习方法开展了区域降雨型滑坡预警研究，表明机器学习模型能够提高区域预警模型的灵活性.Zheng *et al.*(2024)从预警系统角度讨论了机器学习方法在降雨型滑坡预警中的应用.Shao *et al.*(2025)采用可解释机器学习方法识别降雨型滑坡阈值，强调了模型解释性对阈值结果理解的重要性.Zhu *et al.*(2025)进一步利用人工智能方法量化斜坡降雨敏感性，为区域阈值细化提供了新的技术思路.

GBQR 模型是在梯度提升决策树基础上引入分位数损失函数的非参数回归方法.与普通回归模型估计条件均值不同，分位数回归能够估计目标变量在给定自变量条件下的不同分位水平，从而反映阈值分布的下限、中位和上限特征.本文以滑坡发生当日及前 10 d 累计降雨量 R_{0-10} 作为目标变量，以

水库影响区属性、库水位阶段和不同时间窗口内的库水位变化指标作为输入变量,分别构建 10%、50% 和 90% 分位水平下的GBQR模型.

模型的分位数损失函数可表示为:

$$L_q(y,\hat{y})=\sum_{i=1}^{n}\rho_q(y_i-\hat{y}_i), \tag{7}$$

$$\rho_q(u)=\begin{cases}qu, & u\geqslant 0\\(q-1)u, & u<0\end{cases}, \tag{8}$$

式中:y为实际累计降雨量,$\hat{y}$为模型预测的累计降雨量,单位均为mm;q为分位水平,无量纲;$\rho_q(u)$为分位数损失函数.当q分别取 0.10、0.50 和 0.90 时,模型可分别得到 Q10、Q50 和 Q90 三类条件分位数阈值.其中,Q10表征较低累计降雨条件下的阈值水平,Q50表征样本中较为典型的阈值水平,Q90表征较高累计降雨条件下的阈值水平.

在模型训练过程中,本文对198条综合分析样本进行统一建模,并在总体样本层面按约6∶2∶2的比例划分为训练集、验证集和测试集,样本数分别为118、40和40,并非对6类分组分别进行数据集划分.训练集用于模型参数学习,验证集用于参数选择,测试集用于评价模型的预测效果.模型主要参数包括树的数量、学习率、树深度和叶节点最小样本数等,通过3组候选参数进行比较,并以验证集MAE作为参数选择依据.

模型分别针对Q10、Q50和Q90三个分位水平进行训练,分位水平设置为0.10、0.50和0.90,并采用相应的分位数损失函数作为优化目标.模型训练过程中,树数量、学习率、树深度等主要参数结合验证集表现进行调整,在保证模型拟合能力的同时控制过拟合.不同分位水平采用一致的参数确定流程,以保证各分位阈值结果之间的可比性.

为避免目标泄露,本文在以$R_{0\text{-}10}$作为目标变量进行建模时,未将$R_{0\text{-}10}$及其直接组成项作为输入特征,而是重点选取水库影响区属性、库水位阶段、水位变化量和绝对水位变化量等指标作为解释变量.

通过GBQR模型,可以获得不同空间分区和不同库水位阶段下的条件降雨阈值.与传统E-I阈值模型相比,该方法能够在非线性条件下刻画库水位变化对滑坡降雨阈值的影响,更适合分析三峡库区滑坡在降雨－库水位复合作用下的阈值差异.

2.5　阈值确定与结果表达

本文采用的E-I阈值模型与GBQR模型具有不同的分析侧重点.E-I模型以累计降雨量E和平均降雨强度I的关系为基础,用于刻画滑坡事件对应降雨过程的经验阈值特征;GBQR模型则以$R_{0\text{-}10}$为目标变量,引入水库影响区属性、库水位阶段及水位变化指标,识别不同水库影响条件下的条件分位数降雨阈值.两类模型分别从降雨过程特征和水库影响条件两个角度开展阈值分析,结果用于相互补充和对比.

本文选取Q10、Q50和Q90三个分位水平表征不同水库影响条件下累计降雨阈值的分布特征.其中,Q10、Q50和Q90分别表示在给定水库影响区属性、库水位阶段及水位变化条件下$R_{0\text{-}10}$条件分布的第10%、50%和90%分位水平.Q10主要反映较低累计降雨条件下的阈值特征,Q50表示样本中较为典型的累计降雨水平,Q90则表征较高累计降雨条件下的阈值特征.后续结果分析分别利用3个分位水平比较不同空间分区和库水位阶段下的阈值差异.需要说明的是,上述分位数阈值反映的是累计降雨量的条件分位水平,并不表示滑坡发生概率.

为分析水库影响条件对滑坡降雨阈值的影响,本文按照“水库影响区－库水位阶段”组合对滑坡样本进行分组,分别获得水库影响区水库运行前阶段、水库影响区≤145 m 阶段、水库影响区 145～175 m 阶段、非水库影响区水库运行前阶段、非水库影响区≤145 m 阶段和非水库影响区 145～175 m 阶段的降雨阈值.后续结果部分将通过表格和图件对不同分组阈值进行展示,并重点比较水库影响区与非水库影响区在不同库水位阶段下的阈值变化差异.

3　结果与分析

基于前文构建的滑坡－降雨－库水位综合数据库,本文从滑坡事件时间分布、不同水库影响条件下降雨响应差异、传统统计阈值识别结果和GBQR分位数阈值结果等方面开展分析.首先,统计研究区滑坡事件的月尺度分布特征,揭示滑坡发生与汛期降雨之间的对应关系;其次,对比水库影响区和非水库影响区在不同库水位阶段下的滑坡降雨响应差异;最后,结合E-I模型和GBQR模型结果,分析库水位变化对滑坡降雨阈值的影响.

3.1　滑坡事件月尺度分布特征

为初步揭示万州区滑坡事件与降雨过程之间的时间对应关系,本文统计了滑坡事件发生月份及对应月份平均当日降雨量,结果如图5所示.由图5可见,研究区滑坡事件主要集中于5～9月,其中6月

滑坡数量最多，7～9月仍保持较高水平．该时期与万州区汛期降雨集中期基本一致，说明滑坡事件发生与季节性降雨过程具有较明显的时间对应关系．

从平均当日降雨量看，5～9月降雨量整体较高，与滑坡事件集中发生时段基本吻合，表明强降雨和汛期持续降雨是诱发研究区滑坡的重要外部因素．但滑坡数量与平均当日降雨量并非完全同步，说明滑坡发生不仅受当日降雨控制，还可能受到前期累计降雨、库水位变化和空间环境条件等因素的共同影响．因此，仅依据单日降雨量难以充分解释万州区滑坡事件的发生特征，有必要进一步结合前期降雨过程和库水位变化开展阈值识别．

3.2 不同分区滑坡降雨响应特征

在滑坡事件月尺度分布分析的基础上，本文进一步比较水库影响区与非水库影响区在不同库水位阶段下的降雨响应差异．由于水库影响区滑坡可能同时受到降雨入渗和库水位涨落的共同作用，而非水库影响区滑坡主要受降雨及地形地质条件控制，因此不同空间分区下滑坡事件对应的累计降雨条件可能存在差异．

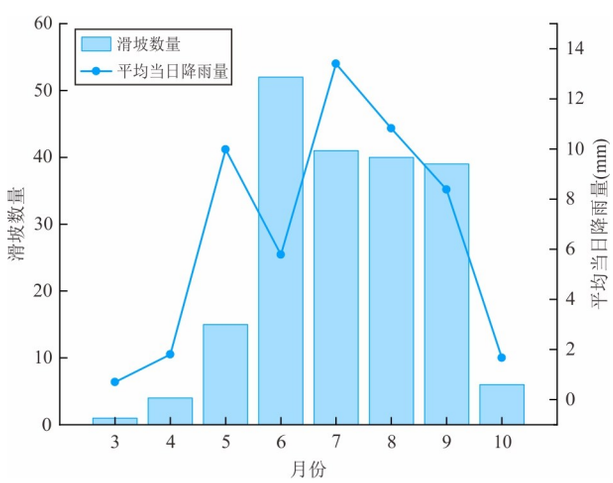

图5 万州区滑坡事件月分布及平均当日降雨量

Fig.5 Monthly distribution of landslide events and mean event-day rainfall in Wanzhou District

根据“水库影响区－库水位阶段”组合分组结果可知，不同分区和不同库水位阶段下滑坡样本数量及累计降雨条件存在一定差异．水库影响区在水库运行后仍有部分滑坡事件出现在相对较低累计降雨条件下，表明其降雨响应特征发生一定变化，该差异可能与库水位涨落及局地地形地质条件等因素共同有关．相比之下，非水库影响区滑坡事件对前期累计降雨的依赖相对更明显，部分事件往往对应较高的累计降雨条件．

从库水位阶段看，水库运行前阶段、≤145 m 阶段和145～175 m 阶段下滑坡事件的降雨响应并不完全一致．水库运行前阶段，滑坡触发条件主要体现为降雨累积作用；水库运行后，库水位升降过程可能通过改变库岸斜坡地下水补排条件和坡体含水状态，影响滑坡发生所需的降雨条件．因此，在识别万州区滑坡降雨阈值时，仅采用统一的降雨阈值难以反映不同水库影响条件下的响应差异，有必要进一步开展分区、分阶段阈值识别．

3.3 *E*-*I* 降雨阈值识别结果

基于滑坡事件对应的累计降雨量 E 和平均降雨强度 I，本文构建 E-I 散点关系，并分别拟合 10%、50% 和 90% 分位阈值曲线，结果如图6所示．由图6可见，滑坡事件在 E-I 空间中整体呈现随平均降雨强度增大而累计降雨量增大的分布特征，不同分位阈值曲线能够较好地刻画滑坡样本的降雨边界条件．其中，10% 分位阈值可作为低阈值响应边界，50% 分位阈值反映样本中位降雨阈值水平，90% 分位阈值则表征较高累计降雨条件下的阈值边界．

为进一步比较不同空间分区和库水位阶段下的滑坡降雨阈值差异，本文将传统统计阈值与GBQR分位数阈值进行对比，结果见表4．

由表4可见，不同空间分区和库水位阶段下的传统统计阈值存在一定差异．从阶段变化看，水库

表4 6类分组传统统计阈值与GBQR分位数阈值结果

Table 4 Traditional statistical thresholds and GBQR quantile thresholds for six landslide groups

六类分组	样本数量	传统统计阈值(mm)	GBQR Q10(mm)	GBQR Q50(mm)	GBQR Q90(mm)
水库影响区：水库运行前阶段	21	56.60	26.01	57.84	80.26
水库影响区：≤145 m 阶段	21	51.50	33.49	42.69	64.55
水库影响区：145～175 m 阶段	31	51.20	27.94	51.19	60.44
非水库影响区：水库运行前阶段	60	62.55	3.09	58.59	122.36
非水库影响区：≤145 m 阶段	41	51.30	3.09	58.59	117.00
非水库影响区：145～175 m 阶段	24	56.95	5.02	48.47	108.80

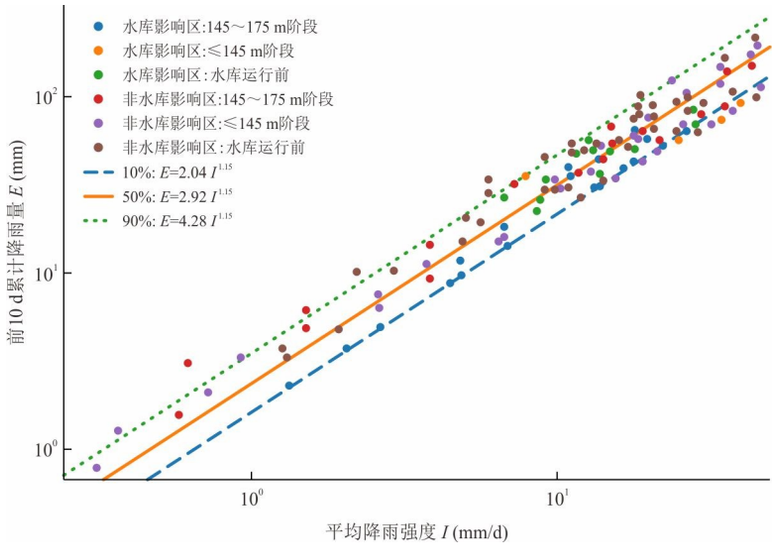

图 6　万州区滑坡事件 E-I 散点分布及分位数阈值曲线

Fig.6　E-I scatter distribution and quantile threshold curves of landslide events in Wanzhou District

影响区阈值由水库运行前阶段的 56.60 mm 降至≤145 m 阶段的 51.50 mm 和 145～175 m 阶段的 51.20 mm,水库运行后整体维持在较低水平;非水库影响区则由 62.55 mm 降至 51.30 mm 后回升至 56.95 mm,未呈现与水库影响区相同的持续降低特征.

从相同库水位阶段的横向比较看,水库运行前和 145～175 m 阶段水库影响区阈值均低于非水库影响区,而≤145 m 阶段两类分区阈值较为接近.总体上,两类空间分区在不同库水位阶段表现出不同的阈值变化特征,水库影响区在水库运行后的低阈值响应相对更为稳定.

总体来看,传统统计阈值能够初步揭示不同分区滑坡降雨响应的差异,但其主要依据样本累计降雨量分布进行统计,难以进一步刻画水库影响区属性、库水位阶段和水位变化过程之间的非线性作用.因此,仍需结合 GBQR 分位数回归模型进一步分析不同分位水平下的阈值变化特征.

3.4　GBQR 分位数阈值识别结果

在传统统计阈值分析的基础上,本文进一步采用 GBQR 模型识别不同分位水平下的滑坡降雨阈值.为直观比较 6 类分组在不同分位水平下的阈值差异,根据表 4 绘制 GBQR 分位数阈值对比图,结果如图 7 所示.

由表 4 和图 7 可见,不同分组的 GBQR 阈值在 Q10、Q50 和 Q90 三个分位水平下均表现出明显差异.其中,Q10 主要表征较低累计降雨条件下的低分位阈值水平,与反映典型降雨条件的 Q50 和较高累计降雨条件的 Q90 具有不同的统计含义.部分非水库影响区分组的 Q10 值较低,表明低分位结果对样本分布下部特征较为敏感.因此,Q10 主要用于表征低阈值响应边界,不与 Q50 和 Q90 作简单等同比较.

从 Q50 结果看,水库影响区水库运行前阶段、≤145 m 阶段和 145～175 m 阶段的阈值分别为 57.84 mm、42.69 mm 和 51.19 mm;非水库影响区对应阶段的 Q50 阈值分别为 58.59 mm、58.59 mm 和 48.47 mm.整体来看,Q50 阈值能够反映各分组样本的中位降雨响应水平,但不同阶段之间的差异并不完全呈单调变化,说明中位阈值受样本分布和阶段样本量影响较大.

相比之下,Q90 阈值对不同水库影响条件下的差异反映更加明显.水库影响区水库运行前阶段、≤145 m 阶段和 145～175 m 阶段的 Q90 阈值分别为 80.26 mm、64.55 mm 和 60.44 mm,表现出水库运行后阈值降低的趋势;非水库影响区对应阶段的 Q90 阈值分别为 122.36 mm、117.00 mm 和 108.80 mm,整体明显高于水库影响区.该结果表明,在较高分位水平下,水库影响区滑坡表现出较明显的低阈值响应特征,该差异可能与库水位涨落及局地地形地质条件等因素共同有关.

综合 Q10、Q50 和 Q90 结果可知,GBQR 模型能够揭示传统统计阈值难以体现的条件分位差异.其中,Q90 对水库影响区与非水库影响区之间的阈值

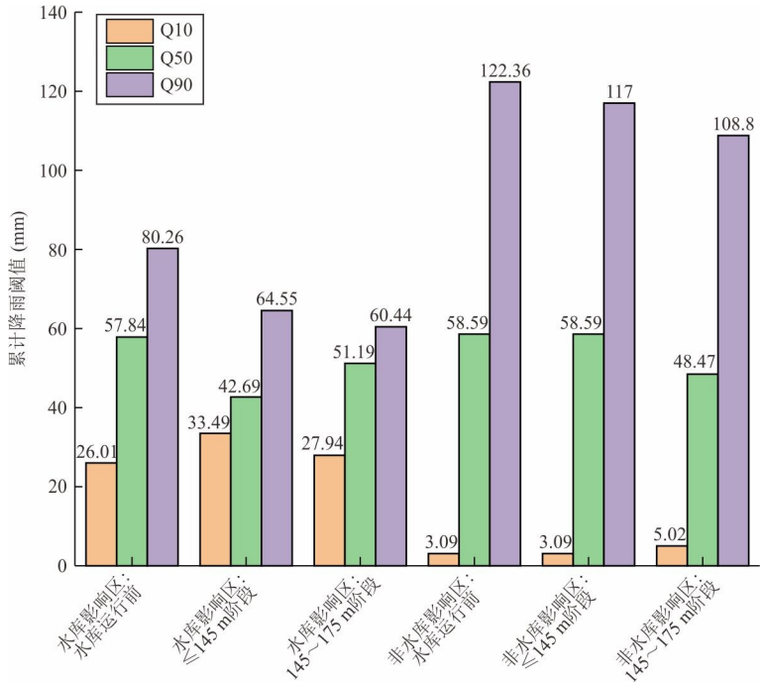

图 7 不同分区与库水位阶段下 GBQR 分位数降雨阈值对比

Fig.7 Comparison of GBQR quantile rainfall thresholds under different zones and reservoir water-level stages

差异表征更为清晰,可作为分析库水位影响下滑坡降雨阈值变化的重要参考.需要注意的是,Q10、Q50 和 Q90 均表示累计降雨量的条件分位水平,并不代表滑坡发生概率;其意义在于从不同分位层次刻画滑坡事件对应的降雨阈值范围.

3.5 Q90 分位数阈值差异分析

综合 Q10、Q50 和 Q90 三个分位水平的结果,Q10 主要反映低分位累计降雨条件,部分组别受样本分布下部特征影响较明显;Q50 能够表征较为典型的累计降雨水平,但不同库水位阶段之间的变化并不完全一致.相比之下,在 Q90 分位水平下,水库影响区与非水库影响区之间的阈值差异更为清晰,且水库影响区 Q90 阈值在水库运行后呈现较明确的降低趋势.因此,本文进一步选取 Q90 阈值进行重点比较分析.

由表 4 可见,水库影响区水库运行前阶段、≤145 m 阶段和 145～175 m 阶段的 Q90 阈值分别为 80.26 mm、64.55 mm 和 60.44 mm;非水库影响区对应阶段的 Q90 阈值分别为 122.36 mm、117.00 mm 和 108.80 mm.整体来看,水库影响区 Q90 阈值明显低于非水库影响区,表明在较高分位水平下,水库影响区滑坡表现出较明显的低阈值响应特征.

从阶段变化看,水库影响区 Q90 阈值由水库运行前阶段的 80.26 mm 降至≤145 m 阶段的 64.55 mm,并进一步降至 145～175 m 阶段的 60.44 mm,表现出水库运行后阈值降低的趋势.相比之下,非水库影响区 Q90 阈值虽也存在一定阶段差异,但整体维持在较高水平.该结果表明,水库运行后水库影响区的 Q90 阈值总体降低,其变化可能与库水位涨落及区域地形地质条件等因素共同有关.

因此,Q90 分位数阈值能够较好地揭示水库影响区与非水库影响区之间的降雨阈值差异.相较于传统统计阈值,GBQR 分位数阈值能够进一步体现不同水库影响条件下滑坡降雨响应的非线性差异,为分区、分阶段滑坡预警阈值设置提供参考.

4 讨论

前文结果表明,万州区滑坡降雨阈值在水库影响区与非水库影响区之间存在明显差异,且不同库水位阶段下阈值变化特征并不完全一致.传统统计阈值能够初步反映不同分组之间的降雨触发条件差异,而 GBQR 分位数阈值进一步揭示了水库影响区在较高分位水平下表现出的低阈值响应特征.尤其是 Q90 阈值结果显示,水库影响区滑坡对应的累计降雨阈值整体低于非水库影响区,表现出较明显的低阈值响应特征,该差异可能与库水位涨落及区

域地形地质条件等因素有关.基于上述结果,本文从水库影响区低阈值响应、库水位变化作用机制、分区预警应用以及研究不确定性等方面进行讨论.

4.1　水库影响区滑坡低阈值响应特征

由表4和图7可见,水库影响区滑坡在GBQR Q90分位水平下的降雨阈值整体低于非水库影响区.水库影响区水库运行前阶段、≤145 m阶段和145～175 m阶段的Q90阈值分别为80.26 mm、64.55 mm和60.44 mm,而非水库影响区对应阶段的Q90阈值分别为122.36 mm、117.00 mm和108.80 mm.该结果表明,在较高分位水平下,水库影响区滑坡发生所需的累计降雨条件明显低于非水库影响区,表现出较为突出的低阈值响应特征.

水库影响区低阈值响应可能与库水位涨落改变库岸斜坡水文地质条件有关.库水位波动可通过改变库岸斜坡地下水位、渗流条件和坡体含水状态影响斜坡变形与稳定性(Zhu *et al.*, 2024).三峡水库运行后,库岸斜坡长期受到周期性蓄水和消落影响,坡体地下水补给、排泄条件发生改变.当库水位升高时,库水可向坡体内部补给,增加坡体含水量;当库水位下降时,坡体内部水分排泄可能滞后于库水位下降过程,从而形成不利的渗流条件.已有研究指出,在三峡库区降雨阈值识别中引入前期有效降雨信息,有助于提高阈值模型的预警性能(Liang *et al.*, 2025).Peng and Wu(2024)也指出,针对三峡库区滑坡预警阈值进行优化,有助于提升日尺度预警判别能力.因此,在降雨入渗与库水位变化共同作用下,部分库岸滑坡可能在相对较低累计降雨条件下发生响应.

需要注意的是,水库影响区低阈值响应并不意味着所有库岸滑坡均会在低降雨条件下发生,而是表明在相同分位水平下,水库影响区滑坡对应的累计降雨阈值整体低于非水库影响区.因此,在开展区域滑坡降雨阈值识别时,不宜将水库影响区和非水库影响区统一采用同一阈值标准,而应根据水库影响区属性和库水位阶段进行分区、分阶段阈值划分.

4.2　库水位变化对降雨阈值的影响机制

由前文分析可知,水库影响区在水库运行后表现出较低的Q90降雨阈值,且整体低于非水库影响区.这表明万州区库岸滑坡的降雨响应并非仅受降雨过程控制,还可能受到库水位涨落过程的共同影响.Mirus *et al.*(2025)指出,将水文信息纳入滑坡预警系统,是提高降雨阈值模型解释能力和预警能力的重要方向.对于三峡库区库岸斜坡而言,库水位变化通过改变坡体边界水力条件和地下水响应过程,可能影响滑坡发生所需的降雨阈值.

当库水位上升时,库水可能向坡体内部补给,提高坡体含水量并抬升地下水位,使坡体处于较高含水状态.在此条件下,后续降雨入渗更容易增加孔隙水压力,降低土体抗剪强度,从而使滑坡发生所需的累计降雨量降低.当库水位下降时,库岸坡体内部地下水排泄可能滞后于库水位下降过程,坡体内外水头差增大,也可能形成不利渗流条件,削弱坡体稳定性.

库水位变化对降雨阈值的影响并不是孤立发生的,而是与降雨过程共同作用.降雨为坡体提供直接入渗补给,库水位变化则改变坡体边界水力条件和初始含水状态.二者叠加时,可能导致库岸斜坡在相对较低累计降雨条件下达到临界稳定状态.叶霄等(2026)以渣口石滑坡为例发现,库水位骤降与强降雨的协同作用是滑坡失稳的重要触发机制,进一步说明了库水位变化与降雨共同作用对库岸滑坡变形响应的重要影响.这也是水库影响区滑坡降雨阈值整体低于非水库影响区的重要原因之一.同时,水库影响区与非水库影响区在地形地貌、地层岩性及人类工程活动等方面也可能存在空间差异,因此本文识别的分区阈值差异反映的是不同水库影响背景下的综合统计特征,不能完全归因于库水位变化.

需要指出的是,本文基于区域尺度滑坡样本和统计模型分析库水位变化对降雨阈值的影响,所得机制解释主要反映统计关系和可能的物理过程.由于缺少坡体内部地下水位、孔隙水压力和位移监测资料,库水位变化对单体滑坡稳定性的具体作用机制仍需结合现场监测和物理力学模型进一步验证.

4.3　分区预警应用启示

本文结果表明,万州区滑坡降雨阈值在水库影响区与非水库影响区之间存在明显差异,且水库影响区在水库运行后表现出较低的降雨阈值水平.因此,在开展区域滑坡预警时,不宜采用单一统一阈值,而应根据水库影响区属性和库水位阶段进行分区、分阶段阈值设置.具体而言,水库影响区的预警阈值设置应结合库水位阶段进行调整,对水库运行后较低累计降雨条件下的滑坡响应予以关注;非水库影响区则应根据其对应的降雨阈值特征设置相

应的预警参考值.由此,不同空间分区和库水位阶段对应的阈值结果可分别作为区域分区、分阶段预警阈值设置的参考.Huang *et al.*(2022)将滑坡易发性制图与临界降雨阈值相结合,说明空间环境条件与降雨阈值联合应用能够提高区域预警的针对性.Shu *et al.*(2024)进一步将降雨阈值与滑坡易发性结合,用于黄土高原沟壑区滑坡预警构建,表明分区预警能够增强模型的空间适用性.

对于水库影响区,预警过程中应重点关注降雨过程与库水位变化的叠加影响.由于水库影响区Q90阈值明显低于非水库影响区,因此该区域除考虑当日降雨和前期累计降雨外,还应结合库水位阶段和近期库水位涨落过程进行综合判断.对于非水库影响区,滑坡预警可更多关注降雨累积效应,并结合地形地貌、地层岩性和工程扰动等空间环境因素进行判定.Dou *et al.*(2024)在区域动态预警模型研究中强调,预警阈值需要结合区域差异进行动态调整.Liu *et al.*(2024)基于重庆地区坡单元构建了区域滑坡预警模型,也说明了空间单元划分对区域预警的重要性.

GBQR模型输出的Q10、Q50和Q90可为不同预警等级设置提供参考.其中,Q10可作为低阈值响应边界,Q50可反映较为典型的阈值水平,Q90可用于表征较高累计降雨条件下的阈值特征.需要说明的是,Q10、Q50和Q90表示不同分位水平下的累计降雨阈值,并不代表滑坡发生概率,实际预警应用仍需结合实时降雨监测、库水位调度信息和现场巡查结果进行综合判断.

4.4 不确定性与局限性

本文基于滑坡事件、降雨数据、库水位数据和空间分区信息,识别了万州区不同水库影响条件下的滑坡降雨阈值,并分析了库水位变化对阈值差异的影响.但受数据精度、样本数量和模型方法限制,研究结果仍存在一定不确定性.此外,6类分组之间的样本数量存在一定差异,部分组别样本量相对有限,可能对阈值识别结果产生一定影响.

首先,滑坡样本的时间和空间精度会影响阈值识别结果.部分历史滑坡事件来源于调查资料和公开信息,其发生时间和空间位置可能存在一定误差,从而影响对应降雨量、前期累计降雨量和库水位变化指标的提取精度.其次,本文采用逐日降雨和逐日库水位数据开展分析,能够反映区域尺度水雨情变化,但难以刻画小时尺度强降雨过程、局地降雨空间差异以及单体斜坡内部地下水位、渗流条件和孔隙水压力变化.

此外,本文划定的水库影响区主要服务于区域尺度统计分析和阈值分组建模,并不等同于严格的地下水动力边界.GBQR模型虽然能够揭示降雨阈值与库水位变化指标之间的非线性关系,但其结果仍受到样本数量、变量选择和参数设置的影响.同时,相近时期或空间邻近的滑坡事件可能具有一定相关性,现有样本划分方式难以完全排除此类时空相关性对模型泛化评价的影响.因此,本文所得Q10、Q50和Q90阈值应理解为区域尺度条件分位阈值,而不宜直接等同于确定性的预警标准.后续研究可结合更高时空分辨率降雨数据、库岸地下水位监测和斜坡位移资料,进一步验证降雨－库水位共同作用下的滑坡阈值变化机制.

5 结论

本文以三峡库区万州区为研究对象,围绕不同水库影响条件下滑坡降雨阈值差异开展分析,主要结论如下:

(1)万州区滑坡事件具有明显的汛期集中性,滑坡主要发生在5～9月,与研究区降雨集中期基本一致.不同空间分区和库水位阶段的滑坡样本表现出一定差异,为分区、分阶段阈值识别提供了基础.

(2)传统统计阈值和GBQR分位数阈值结果均表明,水库影响区与非水库影响区滑坡降雨阈值存在明显差异.水库影响区在水库运行后传统统计阈值整体降低;GBQR Q90结果进一步显示,水库影响区水库运行前阶段、≤145 m阶段和145～175 m阶段的Q90阈值分别为80.26 mm、64.55 mm和60.44 mm,明显低于非水库影响区对应阶段的122.36 mm、117.00 mm和108.80 mm,说明水库影响区滑坡在较高分位水平下表现出低阈值响应特征.

(3)水库影响区滑坡低阈值响应可能与库水位涨落及区域地形地质背景等因素共同有关.三峡水库运行后,库水位周期性升降可能改变库岸斜坡地下水补给、排泄和坡体含水状态,从而对滑坡降雨响应产生一定影响.因此,万州区及三峡库区类似地区开展滑坡降雨阈值识别和预警时,应充分考虑水库影响区属性和库水位阶段,采用分区、分阶段的阈值设置方法.本文结果主要反映现有滑坡事件样本及日尺度水雨情条件下的区域阈值特征,其适

用性可能受到样本数量、数据时间尺度以及地下水位和斜坡变形等监测资料不足的影响,实际应用时应结合当地水雨情和监测条件进行综合判断.

References

Chen, M. X., Lin, P. H., Jiang, S., et al., 2026. Research on Physics-Guided Intelligent Prediction Model for Valley Contraction Deformation of Reservoir Bank Slopes. *Earth Science*, 51(2): 560－577 (in Chinese with English abstract).

Chinkulkijniwat, A., Salee, R., Yubonchit, S., et al., 2025. Evaluation of Cumulative Rainfall and Rainfall Event-Duration Threshold Based on Triggering and Non-Triggering Rainfalls: Northern Thailand Case. *Open Geosciences*, 17: 20220747. https://doi. org/10.1515/geo-2022-0747

Dou, H. Q., Chen, Y. D., Sun, Y. X., et al., 2024. Regional Dynamic Early Warning Model for Rainfall-Induced Landslide in Fujian, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1): 2435510. https://doi. org/10.1080/19475705.2024.2435510

Giannecchini, R., Zanon, A., Barsanti, M., 2024. An Update on Rainfall Thresholds for Rainfall-Induced Landslides in the Southern Apuan Alps (Tuscany, Italy) Using Different Statistical Methods. *Water*, 16(5): 624. https://doi.org/10.3390/w16050624

Gonzalez, F. C. G., do Carmo Reis Cavacanti, M., Nahas Ribeiro, W., et al., 2024. A Systematic Review on Rainfall Thresholds for Landslides Occurrence. *Heliyon*, 10(1): e23247. https://doi. org/10.1016/j. heliyon.2023.e23247

Huang, F. M., Chen, J. W., Liu, W. P., et al., 2022. Regional Rainfall-Induced Landslide Hazard Warning Based on Landslide Susceptibility Mapping and a Critical Rainfall Threshold. *Geomorphology*, 408: 108236. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108236

Kang, J., Wan, B. C., Gao, Z. Q., et al., 2024. Research on Machine Learning Forecasting and Early Warning Model for Rainfall-Induced Landslides in Yunnan Province. *Scientific Reports*, 14: 14049. https://doi. org/10.1038/s41598-024-64679-0

Liang, X., Segoni, S., Fan, W., et al., 2025. Integration of Effective Antecedent Rainfall to Improve the Performance of Rainfall Thresholds for Landslide Early Warning in Wanzhou District, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 119: 105317. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105317

Liu, S. H., Du, J., Yin, K. L., et al., 2024. Regional Early Warning Model for Rainfall Induced Landslide Based on Slope Unit in Chongqing, China. *Engineering Geology*, 333: 107464. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2024.107464

Lu, C., Yan, E. C., Chen, X. T., et al., 2025. Research on the I-D-M Threshold Model for Regional Rainfall-Induced Landslide Hazard Early Warning at a Regional Scale. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(6): 157－165 (in Chinese with English abstract).

Luo, S. L., Huang, D., Peng, J. B., et al., 2024. Insights into Reservoir-Triggered Landslides Development and Its Influence Factors in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Journal of Earth Science*, 35(6): 1979－1997. https://doi.org/10.1007/s12583-024-0024-1

Marjanović, M., Krautblatter, M., Abolmasov, B., et al., 2018. The Rainfall-Induced Landsliding in Western Serbia: A Temporal Prediction Approach Using Decision Tree Technique. *Engineering Geology*, 232: 147－159. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.021

Melillo, M., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., et al., 2016. Rainfall Thresholds for the Possible Landslide Occurrence in Sicily (Southern Italy) Based on the Automatic Reconstruction of Rainfall Events. *Landslides*, 13(1): 165－172. https://doi.org/10.1007/s10346-015-0630-1

Mirus, B. B., Bogaard, T., Greco, R., et al., 2025. Invited Perspectives: Integrating Hydrologic Information into the Next Generation of Landslide Early Warning Systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(1): 169－182. https://doi. org/10.5194/nhess-25-169-2025

Peng, B., Wu, X. L., 2024. Optimizing Rainfall-Triggered Landslide Thresholds for Daily Landslide Hazard Warning in the Three Gorges Reservoir Area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(11): 3991－4013. https://doi.org/10.5194/nhess-24-3991-2024

Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Gariano, S. L., et al., 2017. Rainfall Thresholds for Possible Landslide Occurrence in Italy. *Geomorphology*, 290: 39－57. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.031

Roman Quintero, D. C., Marino, P., Abdullah, A., et al., 2025. Large-Scale Assessment of Rainfall-Induced Landslide Hazard Based on Hydrometeorological Information: Application to Partenio Massif (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(8): 2679－2698. https://doi.org/10.5194/nhess-25-2679-2025

Shao, X. Y., Yan, W. J., Yan, C. Y., et al., 2025. Explainable Machine Learning for Mapping Rainfall-Induced

Landslide Thresholds in Italy. *Applied Sciences*, 15(14): 7937. https://doi.org/10.3390/app15147937

Sheng, Y. F., Li, Y. Y., Xu, Y., et al., 2019. Prediction of Rainfall-Type Landslides Based on Effective Rainfall Intensity and Logistic Regression. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46(1): 156－162, 172 (in Chinese with English abstract).

Shu, H. P., He, J. L., Zhang, F. Y., et al., 2024. Construction of Landslide Warning by Combining Rainfall Threshold and Landslide Susceptibility in the Gully Region of the Loess Plateau: A Case of Lanzhou City, China. *Journal of Hydrology*, 645: 132148. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132148

Wang, Z. H., Yang, S. N., Yao, K. Z., et al., 2024. Precipitation Threshold for Rainfall-Type Landslides in the Qinba Mountains Area, Sichuan Province, China. *Mountain Research*, 42(2): 238－248 (in Chinese with English abstract).

Wu, R. Z., Li, H., Mei, H. B., et al., 2025. A Landslide Monitoring and Early Warning System with Retrieval-Augmented Generation Enhanced by Knowledge Graph. *Earth Science*, 50(10): 4125－4136 (in Chinese with English abstract).

Wu, Y. P., Zhang, Q. X., Tang, H. M., et al., 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity. *Earth Science*, 39(7): 889－895 (in Chinese with English abstract).

Ye, X., Shen, L. X., Yu, Y. Q., et al., 2026. Linking Landslide Deformation to Triggering Factors *via* Isotonic Constraints of Displacement Measurements. *China Safety Science Journal*, 36(3): 121－129 (in Chinese with English abstract).

Yi, W., Wei, Z. H., Huang, X. H., et al., 2023. Research on Rainfall Threshold and Early Warning Model for Rainfall Type Mounded Landslide: A Case Study of Wangjiapo Landslide. *Journal of China Three Gorges University* (*Natural Sciences*), 45(6): 36－43 (in Chinese with English abstract).

Zhao, H. Y., Yin, K. L., Chen, L. X., et al., 2020. Landslide Hazard Analysis of Liyuan Town Based on Effective Rainfall Threshold. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(4): 85－93 (in Chinese with English abstract).

Zhao, K. L., Qiu, H. J., Liu, Y., et al., 2025. Probability of Rainfall-Induced Landslides Coupled with Effective-Duration Threshold and Soil Moisture. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57: 102112. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102112

Zheng, Z. Z., Zhang, K., Wang, N., et al., 2024. Machine Learning-Based Systems for Early Warning of Rainfall-Induced Landslide. *Natural Hazards Review*, 25(4): 04024027. https://doi.org/10.1061/nhrefo.nheng-1993

Zhou, J., Tang, M. G., Xu, Q., et al., 2022. Early Warning Model of Rainfall-Induced Landslide in Chongqing of China Based on Rainfall Threshold. *Mountain Research*, 40(6): 847－858 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Y. H., Yin, K. L., Li, Y., et al., 2025. Leveraging Artificial Intelligence to Quantify Slope Rainfall Sensitivity for Refining Regional Landslide Rainfall Thresholds. *Engineering Geology*, 355: 108260. https://doi. org/10.1016/j.enggeo.2025.108260

Zhu, Y. R., Qiu, H. J., Liu, Z. J., et al., 2024. Rainfall and Water Level Fluctuations Dominated the Landslide Deformation at Baihetan Reservoir, China. *Journal of Hydrology*, 642: 131871. https://doi. org/10.1016/j. jhydrol.2024.131871

中文参考文献

陈铭熙, 林朋辉, 蒋舒, 等, 2026. 物理引导的库岸谷幅变形智能预测模型. 地球科学, 51(2): 560－577.

卢操, 晏鄂川, 陈侠廷, 等, 2025. 区域滑坡灾害降雨预警的I-D-M阈值模型研究. 地质科技通报, 44(6): 157－165.

盛逸凡, 李远耀, 徐勇, 等, 2019. 基于有效降雨强度和逻辑回归的降雨型滑坡预测模型. 水文地质工程地质, 46(1): 156－162, 172.

王智昊, 杨赛霓, 姚可桢, 等, 2024. 四川秦巴山区降雨型滑坡灾害降雨阈值. 山地学报, 42(2): 238－248.

吴润泽, 李浩, 梅红波, 等, 2025. 基于知识图谱检索增强生成的滑坡监测预警系统. 地球科学, 50(10): 4125－4136.

吴益平,张秋霞,唐辉明,等,2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警. 地球科学,39(7): 889－895.

叶霄, 沈琳轩, 余以强, 等, 2026. 基于保序回归的滑坡变形与诱发因素关联分析. 中国安全科学学报, 36(3): 121－129.

易武, 魏兆亨, 黄晓虎, 等, 2023. 降雨型堆积层滑坡降雨阈值及预警模型研究: 以王家坡滑坡为例. 三峡大学学报(自然科学版), 45(6): 36－43.

赵海燕, 殷坤龙, 陈丽霞, 等, 2020. 基于有效降雨阈值的澧源镇滑坡灾害危险性分析. 地质科技通报, 39(4): 85－93.

周剑, 汤明高, 许强, 等, 2022. 重庆市滑坡降雨阈值预警模型. 山地学报, 40(6): 847－858.