

基于降雨指数的台风暴雨型滑坡预警阈值研究

王 浩, 傅奕萱, 郭朝旭, 黄瑛瑛, 柳 侃

Research on the early warning threshold for typhoon rainstorm-induced landslides based on rainfall index: A case study of Yongtai County, Fuzhou

WANG Hao, FU Yixuan, GUO Chaoxu, HUANG Yingying, and LIU Kan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广东珠海市降雨型崩塌滑坡预警阈值研究

Study on warning rainfall threshold for rainfall-induced collapses and landslide geological hazards in Zhuhai City, Guangdong Province

曾新雄, 刘佳, 赖波, 赵风顺, 江山 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 141-150

广东省暴雨型浅层滑坡灾害动力预警模型与气象风险预警研究

Research on risk early warning for rainfall-induced shallow landslides in Guangdong Province based on a dynamic slope instability model

魏平新, 郑志文, 周志华, 李秀娟, 廖忠滨, 刘任鸿 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 30-39

基于“阶跃”变形特征的降雨型滑坡预警判据探讨

Preliminary analysis on rainfall thresholds for early warning of the rainfall induced landslides based on “step” deformation characteristics

贾琰棋, 易武, 李华兵, 黄晓虎, 刘伟, 肖宇煌 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 30-38

台风暴雨型滑坡滞后效应分析

Analysis on lag effect of typhoon-induced landslide: A case study of typhoon “Lekima” in Qingtian County, Zhejiang Province

栗倩倩, 王伟, 黄亮, 柴波, 高乐 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 10-19

乔灌木对台风暴雨型滑坡稳定性影响

Influence of trees and shrubs on the stability of landslides induced by typhoon rainstorm

于鑫, 聂闻, 简文彬, 谢伟, 芦松, 叶春阳 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(1): 17-29

基于台风路径追踪的滑坡概率分析

Probability analysis of landslide based on typhoon track

林若昂, 简文彬, 聂闻 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 18-27



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412029

王浩, 傅奕萱, 郭朝旭, 等. 基于降雨指数的台风暴雨型滑坡预警阈值研究——以福州市永泰县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 43-53.

WANG Hao, FU Yixuan, GUO Chaoxu, et al. Research on the early warning threshold for typhoon rainstorm-induced landslides based on rainfall index: A case study of Yongtai County, Fuzhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 43-53.

基于降雨指数的台风暴雨型滑坡预警阈值研究 ——以福州市永泰县为例

王 浩^{1,2,3}, 傅奕萱¹, 郭朝旭^{2,3,4}, 黄瑛瑛^{2,3,4}, 柳 侃^{2,3,4}

(1. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002; 3. 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室, 福建 福州 350002; 4. 福建省地质工程勘察院, 福建 福州 350002)

摘要:我国东南丘陵地区极端降雨频繁, 滑坡灾害多发、突发、群发, 确定滑坡降雨预警阈值是区域防灾减灾工作的关键。基于前期有效降雨量和激发降雨量构建的经验性统计指标——降雨指数(R'), 已被成功应用于日本广岛地区滑坡灾害的预警预报。福建沿海丘陵地区与日本广岛地区的孕灾环境十分相似, 因此, 以福州市永泰县为研究区, 借鉴广岛的经验开展类似的研究具有重要的应用意义。通过统计分析“海葵”“尼伯特”典型台风暴雨型滑坡事件的历史降雨及灾情数据, 确定降雨指数(R')模型的关键参数, 开展典型降雨过程和滑坡灾害点反演验证, 提出适用于永泰县的降雨预警阈值。结果表明: (1) 确定了前期有效降雨量基准值 $R_1=120$ mm、激发降雨量基准值 $r_1=135$ mm、降雨权重因子 $\alpha=2.5$ 及有效降雨折减系数 $\alpha=0.85$ 等 R' 模型的关键参数值; (2) 提出 $R'=156$ mm为永泰县台风暴雨型滑坡降雨预警阈值, 该阈值可实现“尼伯特”台风降雨诱发滑坡的完全预警, 也能对单点滑坡提前预警, 推荐的提前预警时间为 30 min。基于降雨指数(R')模型及其确定的降雨阈值在永泰县台风暴雨型滑坡预警中显示出良好的适用性, 该方法可供我国东南沿海类似地区的地质灾害气象预警借鉴。

关键词: 台风暴雨型滑坡; 预警模型; 降雨指数; 降雨阈值; 气象预警

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)02-0043-11

Research on the early warning threshold for typhoon rainstorm-induced landslides based on rainfall index: A case study of Yongtai County, Fuzhou

WANG Hao^{1,2,3}, FU Yixuan¹, GUO Chaoxu^{2,3,4}, HUANG Yingying^{2,3,4}, LIU Kan^{2,3,4}

(1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards in Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources, Fuzhou, Fujian, Fujian 350002, China; 4. Geological Engineering Survey in Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350002, China)

收稿日期: 2024-12-19; 修订日期: 2025-03-11

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42477165; U2005205); 福建省科技厅项目(2022Y4002; 2024Y0042); 福建省自然资源科技创新项目(KY-070000-04-2024-028)

第一作者: 王 浩(1978—), 男, 江苏盐城人, 岩土工程、地质工程专业, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治方面的研究。

E-mail: h_wang@126.com

通讯作者: 郭朝旭(1987—)男, 河南南阳人, 岩土工程专业, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治方面的研究。

E-mail: guochaoxu177@163.com

Abstract: In the southeastern hilly regions of China, extreme rainfall frequently triggers landslide disasters, characterized by their rapid occurrence and clustering. Establishing effective rainfall thresholds for early warning systems is crucial for regional disaster prevention and mitigation. The empirical rainfall index R' , which is based on antecedent effective rainfall and triggering rainfall, has been successfully utilized for early warnings and forecasting of landslide disasters in Hiroshima, Japan. Considering the strong similarities in disaster-prone environments between the coastal-hilly areas of Fujian Province and Hiroshima Prefecture, applying this methodology in Yongtai County, Fuzhou, is of significant practical value. This study involved statistical analysis of historical rainfall and disaster data from typical typhoon-induced rainstorm events, such as the Typhoons Haikui and Nepartak. Key parameters of the R' model were established, and typical rainfall processes and landslide disaster points were analyzed for inverse verification, to propose a rainfall warning threshold suitable for Yongtai County. The results show that: 1) key parameters for the R' model are determined, including the baseline values for antecedent rainfall (R_1)=120 mm, triggering rainfall (r_1)=135 mm, a rainfall weight factor (α)=2.5, and an effective rainfall reduction coefficient (α)=0.85. 2) a rainfall warning threshold of $R'=156$ mm was proposed for typhoon rainstorm-induced landslides in Yongtai County. This threshold has proven effective in fully predicting landslides triggered by Typhoon Nepartak, and it can also provide early warning for isolated landslide events, with a recommended lead time of 30 minutes. The rainfall index R' model and its established threshold demonstrate excellent applicability for early warnings of typhoon rainstorm-induced landslides in Yongtai County, serving as a valuable reference for meteorological early warnings of geological disasters in similar coastal areas across southeastern China.

Keywords: typhoon rainstorm-induced landslide; early warning model; rainfall index; rainfall threshold; meteorological warning

0 引言

随着气候变化的加剧,极端降雨诱发地质灾害事件呈现明显上升趋势。根据自然资源部的统计数据^[1-3],2014—2022年中,全国84.3%的地质灾害是由降雨为主的自然因素所致,其中滑坡灾害数量占地质灾害总数的67.8%,是最主要的灾害形式。台风暴雨型滑坡作为中国东南丘陵地区典型的地质灾害,具有突发、群发和过程短暂剧烈的特点^[4-5],严重危害人民生命与财产安全。台风暴雨型滑坡的形成与降雨的强度、持续时间以及区域地质条件等因素密切相关。因此,研究台风暴雨型滑坡的预警阈值具有重要的理论意义和实践价值。

在区域地质灾害预测模型与预警阈值的研究方面,国内外常见的研究方法主要分为两类。一类是采用基于物理、水文模型及灾害机理的确定性降雨阈值模型,这种方法需要获取岩土体的物理力学参数,但是地质体空间分布上的差异性导致获取全面而精确的参数十分困难,因此应用受限^[6]。另一类是基于研究区域降雨与滑坡关联性的经验性统计降雨阈值模型。由于历史降雨和灾害数据的获取相对简单,使得经验性统计方法研究降雨阈值被广泛应用。Caine^[7]在1980年首次系统性提出降雨阈值的概念,通过分析全球范围内的滑坡和泥石流事件,建立了经验性的降雨强度-历时($I-D$)阈值模

型以预测滑坡发生。在此基础上,各国学者针对不同地区的降雨特征和地质条件,进一步改进和丰富了降雨阈值模型的研究。戴丛蕊等^[8]针对云南地区的研究,构建了具有2种降水特征的 $I-D$ 阈值曲线;Peruccacci等^[9]、胡磊等^[10]、龚泉冰等^[11]也开展了累计降雨量-历时($E-D$)阈值模型、累计降雨量-降雨强度($E-I$)阈值模型的相关研究与应用。由于降雨强度、累计降雨量、降雨历时3个指标在一定程度上反映的是降雨过程的整体均值,但无法准确表征特殊降雨过程;在后续研究中,刘谢攀等^[6]基于 $I-D$ 模型,引入滑坡当日降雨量(R)作为第三个维度指标,建立 $I-D-R$ 三指标耦合的降雨阈值模型,将二维呈现的降雨阈值拟合曲线转化为三维的降雨阈值空间“箱体”模型。Nakai等^[12]、吴益平等^[13]、黄发明等^[14]考虑降雨入渗机理对灾害发生造成的影响,引入了前期有效雨量指标建立降雨阈值模型;其中Nakai等^[12]提出考虑前期有效降雨量和激发降雨量构建降雨型滑坡预警模型,可以更精细化描述台风暴雨型滑坡的发生机理。

日本学者Nakai等^[12]基于前人工作^[15],针对日本广岛地区开展相关研究,构建了衡量降雨量的新指标——降雨指数(R')。 R' 量化了前期降雨量与激发降雨量,降雨阈值可以通过降雨指数(R')的数值直观表征,起到综

合评价前期降雨与激发降雨在台风暴雨型滑坡成灾过程中的协同机理的效果,使降雨预警阈值化繁为简,可以直接、高效、灵活地获取潜在受灾点的预警动态。

福州市永泰县与日本广岛县在地形地质、气象水文及台风暴雨型滑坡的特征规律均较为相似,可以开展类比研究。本文基于 Nakai 等^[12]提出的滑坡预警降雨指数模型,根据福州市永泰县台风暴雨型滑坡的历史灾情统计数据,反演分析确定该模型的关键参数,并进行典型灾害事件的验证分析,提出适用于福州市永泰县的台风暴雨型滑坡降雨预警阈值。研究成果可为滑坡灾害预警预报提供新思路,为福州地区台风暴雨型滑坡的

精细化预警以及我国东南降雨群发型滑坡的防灾减灾提供借鉴。

1 研究区与参考区类比分析

1.1 孕灾环境对比分析

研究区永泰县位于福建省中部,是福州市西南部下辖县(图 1),总面积为 2 229.86 km²;参考区广岛县位于日本本州岛西部,毗邻濠户内海,总面积 8 479.06 km²。永泰与广岛具有相似的孕灾环境,造成两地多发台风暴雨型滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,依据文献资料^[16-20],整理得到永泰和广岛的孕灾环境特征对比结果见表 1。

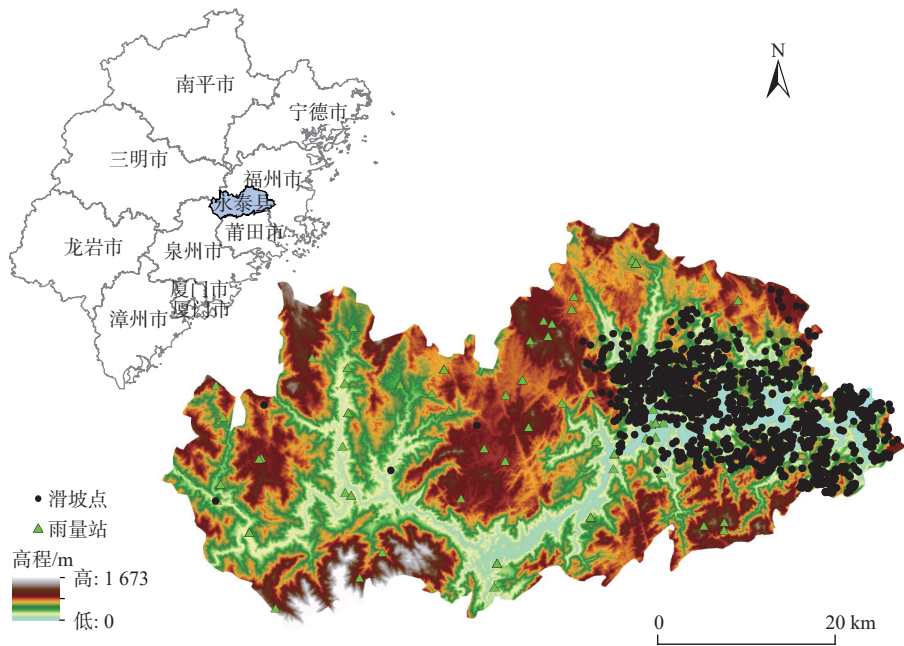


图 1 永泰县地理位置及“海葵”台风灾害点分布

Fig. 1 Geographical location of Yongtai County and distribution of disaster points triggered by Typhoon Haikui

1.2 历史灾情对比分析

根据福建省地质灾害重点实验室提供的永泰县境内 89 个气象雨量站点位的降雨数据和台风暴雨型滑坡灾害遥感影像资料,通过遥感影像解译,可以得到 2023 年“海葵”台风共诱发 1 382 个滑坡灾害(图 1、图 2),2016 年“尼伯特”台风共诱发 4 069 个滑坡灾害(图 3、图 4),是近几年 2 次典型的降雨群发型滑坡事件。对比福州市永泰县 2023 年 9 月“海葵”台风灾后遥感影像(图 2),短时极端降雨导致永泰地区出现了大范围群发性滑坡、泥石流灾害。2016 年 7 月“尼伯特”台风总体降雨强度比“海葵”更加剧烈,图 3、图 4 显示,该次强降雨诱发的灾害滑坡点位更多、点状分布更为密集、灾情更严重。2 次降雨触发的滑坡灾害分布密度高,平面形

态多呈现长条形,规模整体较小,与台风暴雨型滑坡一般发育特征相吻合^[4]。

通过对福州市永泰县和日本广岛县的历史灾情资料统计分析^[21-23],得出两地在灾害成因、灾害形式、峰值雨强等灾情特征方面具有较高的相似性(表 2)。因此可以认为,适用于广岛的降雨阈值模型对永泰县亦具有适用性,但是模型的关键参数需要结合永泰县的孕灾环境特征综合研判确定,并进一步开展模型验证与参数优化。

2 台风暴雨型滑坡预警模型及参数确定方法

2.1 基于降雨指数的台风暴雨型滑坡预警模型

Nakai 等^[12]对历史灾害点的有效雨量(RE)和有效雨量强度(IE)进行统计分析,并绘制出灾害点的 RE -

表 1 福州市永泰县与日本广岛县孕灾环境对比

Table 1 Comparison of disaster-prone environments between Yongtai County, Fuzhou and Hiroshima Prefecture, Japan

地区	福州市永泰县	日本广岛县
地质历史	寒武纪到第四纪	前寒武纪到第四纪
构造特征	地处华南构造板块的边缘, 构造板块活动相对缓和, 地震、火山活动少	地处环太平洋地震带, 构造板块活动多而剧烈, 地震、火山活动多发
岩石类型	以凝灰岩和玄武岩为主的长英质火山岩与中酸性花岗岩分布广泛, 花岗岩在该地区的岩石类型中占主导	以玄武岩、安山岩和流纹岩为主的长英质火山岩与中酸性花岗岩分布广泛, 大部分地区都覆盖着严重风化的花岗岩
土体特性	丘陵和低山地区广泛分布红壤, 具有较强的风化性, 排水性较好, 但遇强降雨时易受侵蚀; 部分丘陵地带分布黄壤, 其水分保持能力强, 稳定性较差; 河谷地带和沿河区域, 冲积土和砂土较为常见, 该土粒度较大, 渗透性较强, 暴雨后易发生水土流失; 土层厚度一般在40~90 cm	在低山丘陵地带, 尤其是靠近河流、湖泊的地区, 常见黏土沉积; 在沿海及河流流域, 基岩顶部常见有1~2 m厚的砂土和砾石沉积物, 其具有较好的排水性, 但遇强降雨易发水土流失和滑坡; 山区岩石风化层较为发育, 风化土层一般较松散
地形地貌	以丘陵和山地为主; 西南部山脉连绵起伏, 东北部地势相对平缓, 县内以中低山区为主; 没有海岸线地貌	以丘陵和山地为主; 西部和北部山脉纵深, 中部有较低丘陵地区, 平原带多位于东南部的濠户内海沿岸; 海岸地貌错综复杂, 地形变化更加剧烈
植被特征	森林植被覆盖率76.8%; 境内主要植被为马尾松、杉木、国外松等常绿针叶林, 辅以壳斗科、樟科、山茶科、木兰科和杜英科等常绿阔叶树种	森林植被覆盖率73%, 境内主要分布为栎树、竹柏等常绿阔叶林; 桦树、红枫等落叶阔叶林; 以及杉树、松树等针叶林
气候特征	亚热带季风气候, 7—9月台风活跃	温带季风气候, 7—9月台风活跃
降水特征	降水丰富, 年降水量1 400~2 000 mm, 春夏季节雨量集中, 台风多伴随短时极端强降雨	降水丰富, 年降水量1 500~2 000 mm, 夏秋季降水集中, 台风暴雨更为频繁且强烈

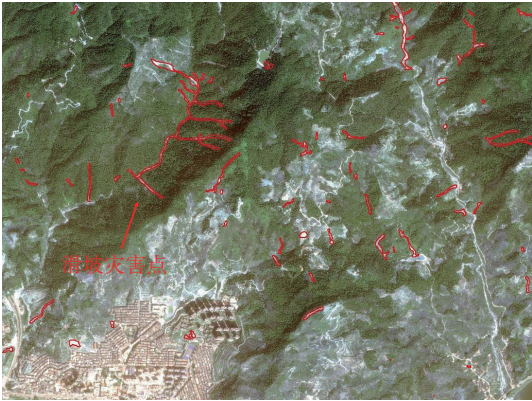


图 2 “海葵”台风灾后遥感影像

Fig. 2 Post-disaster remote sensing imagery of Typhoon Haikui

IE 关系, 发现不同灾害程度的点均会落在以不同极限

降雨量曲线划分的领域内, 并采用近似的圆弧系数来表征曲线。Nakai 等^[12]基于 Sasaki 等^[15]所做研究, 改进并建立了基于降雨指数(R')的经验性统计降雨阈值模型, 其中关键指标(R')的计算公式如下:

$$R_{fw} = \sqrt{(R_1 - R_w)^2 + a^2(r_1 - r_w)^2} \quad (1)$$

$$R' = R_{fw0} - R_{fw} \quad (2)$$

式中: R_w ——前期有效降雨量;
 r_w ——激发降雨量;
 R_1 ——前期有效降雨量基准值;
 r_1 ——激发降雨量基准值;
 a ——降雨权重因子;
 R_{fw} 、 R_{fw0} ——降雨指数的中间参量。

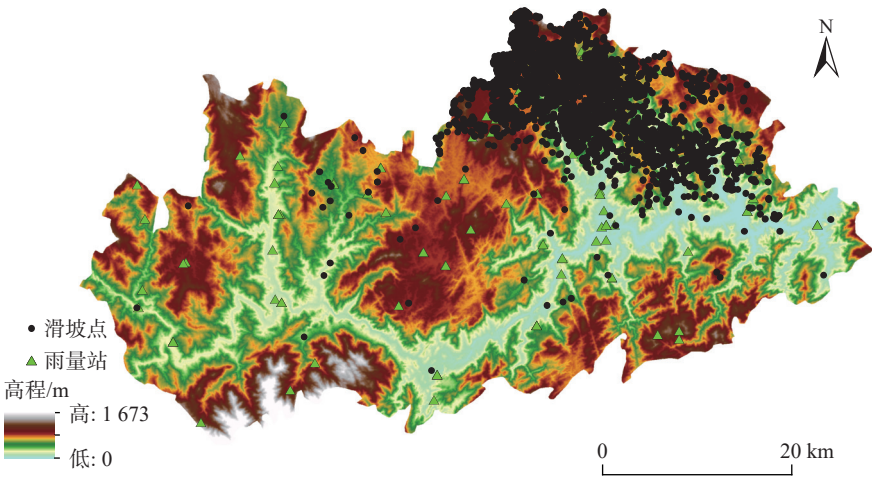


图 3 “尼伯特”台风灾害点分布

Fig. 3 Distribution of disaster points triggered by Typhoon Nepartak

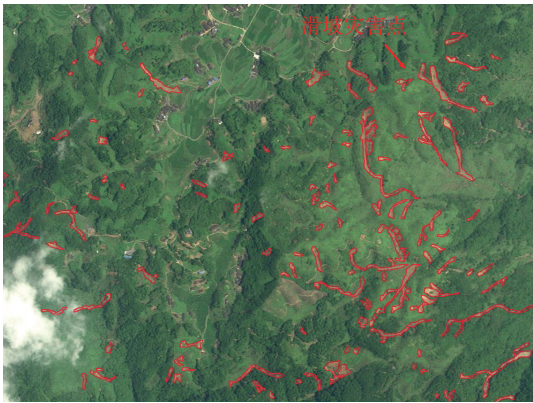


图 4 “尼伯特”台风灾后遥感影像

Fig. 4 Post-disaster remote sensing imagery of Typhoon Nepartak

表 2 福州市永泰县与日本广岛县历史灾情对比

Table 2 Comparison of historical disaster data between Yongtai County, Fuzhou and Hiroshima Prefecture, Japan

地区	永泰县		广岛县	
灾害时间	2016年7月	2023年9月	2014年8月	2018年7月
灾害成因	台风暴雨	台风暴雨	台风暴雨	台风暴雨
灾害形式	滑坡、 泥石流	滑坡、 泥石流	泥石流、 边坡崩塌	泥石流、 边坡坍塌
峰值雨强/(mm·h ⁻¹)	100	88	126	70

图 5 表示了该公式的建立过程。基准点 B 与研究区历史最大降雨量相关,其坐标值 R_1 和 r_1 分别对应前期有效降雨量和激发降雨量的基准;将任意的降雨事件绘制在 R_w - r_w 平面上, R_{fw} 表示从基准点 B(R_1, r_1)到任意降雨事件点 A(R_w, r_w)的距离, R_{fw0} 为原点到基准点 B(R_1, r_1)的距离。因此, R' 值在一定程度上描述了任意降雨事件的点 A(R_w, r_w)与基准点 B(R_1, r_1)之间的距离。若事件 A 中 R_w 或 r_w 逼近基准值,降雨指数(R')随之增大,表明滑坡灾害风险上升。

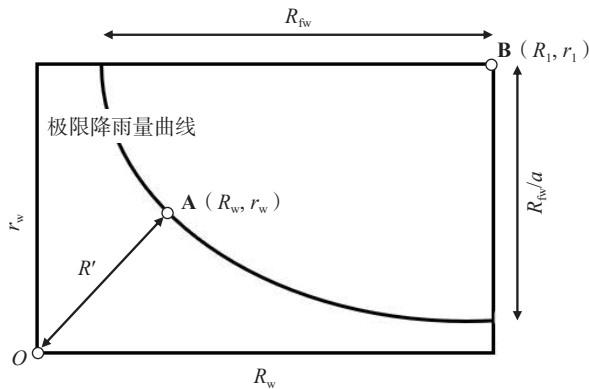


图 5 降雨指数(R')的定义

Fig. 5 Definition of the rainfall index R'

综上所述,降雨指数(R')的构建从滑坡成灾机理出发,量化了前期有效降雨量与激发降雨量,将其从 2 个

变量统一为单个数值指标,并综合反映了触发滑坡灾害的降雨量,为滑坡发生的时空预测提供了定量依据,奠定了其在阈值模型中应用的可行性。数据的统计分析和预警模型参数优化是区域地质灾害气象预警实践应用的关键。

2.2 模型关键参数确定方法

2.2.1 降雨过程的定义

降雨过程的定义是区域地质灾害气象预警研究的核心基础,其对数据处理方法的确定及地质灾害气象预警的区域适用性起着至关重要的作用。统计分析永泰县历年滑坡灾害的降雨过程主要有龙舟雨和台风暴雨 2 种雨型,龙舟雨一般始于 5 月初、终于 6 月中旬,通常是时间跨度相当长的连续降雨;台风暴雨集中出现在 7—9 月,通常表现为短时极端降雨。2 种降雨可能会单独诱发滑坡灾害,也可能相互影响协同致灾。因此需要对降雨过程进行更加精确的刻画。

在 2016 年“尼伯特”以及 2023 年“海葵”台风期间,永泰普降特大暴雨,先后有多处区域出现了大范围群发性地质灾害。因此,本文针对福州市永泰县的台风暴雨型滑坡进行研究。台风暴雨诱发滑坡发生的演化过程主要可以分为前期降雨和短期降雨 2 个阶段:在前期降雨阶段,雨水除了地表径流,还会向土体内部渗透。随着土体的含水量逐步提高,直至达到饱和状态,其有效应力和抗剪强度逐渐被削弱,坡体转变为不稳定的临界状态^[24];短期降雨阶段中,降雨具有时间短、强度大的特点。特别是灾害发生前 1—2 h 的降雨,快速打破土体的临界平衡状态,促使岩土体稳定系数迅速下降直至失稳破坏^[25]。因此,这段时间内的降雨被视为激发降雨,对滑坡灾害的发生起到了直接的触发作用。

每次降雨过程中,经过地表径流和蒸发损失后,仅有部分降雨量实际参与土壤水分补给、植被吸收或地下水补给,对滑坡的触发具有实质性作用。Crozier^[26]将有效降雨量定义为能够直接贡献于土壤水分增加并影响斜坡稳定性的那部分降雨量。与传统的降雨量概念不同,有效降雨量更关注降雨对土壤水分动态变化的影响,特别是对滑坡触发机制的作用。因此,在考虑降雨时间分布和衰减效应的情况下,对前期降雨量的统计采用一段时间内的累计降雨量是不合适的。为此,可以引入前期有效雨量,来表征滑坡灾害发生前期的降雨影响。Crozier^[26]提出的有效降雨量计算公式为:

$$R_w = R_0 + \alpha R_1 + \alpha^2 R_2 + \cdots + \alpha^n R_n \tag{3}$$

式中: R_w ——前期有效降雨量;

α ——有效降雨折减系数;

R_0 ——当日降雨量;

R_n ——前 n 日降雨量。

综上所述,前期有效降雨和短期激发降雨共同作用是台风暴雨型滑坡的诱发因素。因此本文以 2023 年 9 月“海葵”台风的降雨过程为例,将一次降雨过程定义为滑坡发生前 n 天的前期有效降雨和滑坡发生前 t 小时的激发降雨(图 6)。

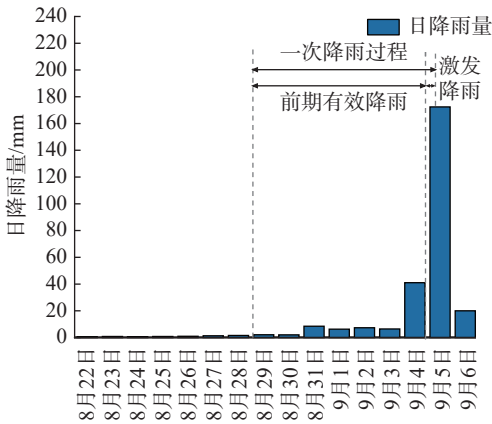


图 6 一次降雨过程划分示意图
Fig. 6 Schematic diagram of a single rainfall event division

厘清台风暴雨具体何时触发滑坡十分困难,台风暴雨型滑坡历史统计数据表明,一般主体降雨达到峰值雨量时滑坡开始群发^[4],在降雨过程中,可能出现一个或多个峰值^[27],但已有统计数据仅能精确至小时,考虑到小时降雨量预警的滞后效应,本文取滑坡发生前 2 h 的降雨量为激发降雨量,通过扩大数据的时间范围来平滑降雨数据波动,减少后期峰值雨量对整体趋势的干扰,使预测结果更稳定,误差更小。

对福建山区地质灾害发生当日及前期 30 d 的降雨数据进行统计分析,结果表明福建山区 95% 的地质灾

害发生在降雨后 8 d 内^[28]。结合永泰县历史降雨数据分析,滑坡发生前 6 d 已无明显降雨,可以得出滑坡的触发通常是在降雨后 6~7 d 的时段内,更早降雨的持续影响已逐渐衰减。因此,本文选择滑坡灾害发生前 7 d 为前期降雨日数,覆盖了降雨影响的临界时段,这样既能避免考虑时间过长导致的数据冗余,也能精准捕捉到降雨对滑坡发生的直接影响。

2.2.2 有效降雨折减系数(α)

由于土壤吸水能力、蒸发、径流等因素的作用,降雨量的有效性会随着时间推移逐渐衰减。有效降雨折减系数(α)对累计降雨量的修正可以反映这一衰减效应。因此,除了前期降雨日数, α 的取值也显著影响着前期有效降雨量的结果。

根据既有研究与应用,该折减系数取值通常在 0.6~0.9^[24]。从 89 个雨量站中抽取 20 个与 2023 年“海葵”台风灾害点地理关联性高的雨量站点,将归一化后的雨量站 3 km 范围内发生滑坡灾害个数数据记为变量 X ,将不同有效降雨折减系数下的有效雨量记为变量 Y ,采用 Pearson 相关性分析方法,对不同取值的有效降雨折减系数(α)与滑坡发生之间的相关性进行讨论, Pearson 相关系数公式如下:

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

式中: X_i ——归一化后雨量站 i 周围的发生滑坡个数;

Y_i ——有效降雨折减系数为 i 的有效降雨量;

$\bar{X}$ ——发生滑坡个数均值;

$\bar{Y}$ ——有效降雨量均值。

相关性分析结果如表 3 所示,当福州市永泰县有效降雨折减系数取 0.85 时,与滑坡灾害发生的相关性最高。

表 3 有效降雨折减系数与滑坡发生的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between the effective rainfall reduction coefficient and landslide occurrence

有效降雨折减系数(α)	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
相关系数(r)	0.615 9	0.606 5	0.603 7	0.596 8	0.588 8	0.618 1	0.584 7	0.556 2

2.2.3 降雨量基准值(R_1, r_1)

降雨量基准值(R_1, r_1)是基于历史数据的经验值,取值要大于研究区的历史最大降雨量。因此,其代表了经验上被认为可能引发地质灾害的降雨量阈值,当实际降雨量接近或超过基准值时,滑坡风险显著增加。对永泰县历史降雨数据进行统计,得到当地历史最高前期有效雨量为 110.28 mm,最高激发雨量为 130.97 mm,本文

取前期有效降雨量基准值 $R_1=120$ mm,激发降雨量基准值 $r_1=135$ mm。基于 2023 年“海葵”台风灾害数据,绘制出灾害点所对应的 R_w-r_w 关系(图 7)。

2.2.4 降雨权重因子(a)

降雨权重因子(a)的存在调节着前期降雨和激发降雨在降雨指数中的权重, a 的取值控制着极限降雨量曲线的形态以及对滑坡灾害点的包络程度。在参数优化

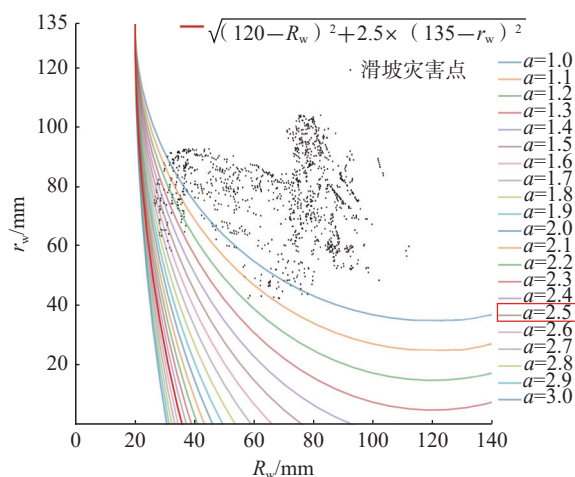


图7 灾害点 R_w - r_w 关系图与极限降雨量曲线变化图
(2023 年“海葵”台风)

Fig. 7 R_w - r_w relationship of disaster points and threshold rainfall curve change (Typhoon Haikui, 2023)

中,通过调整降雨权重因子,针对不同的地理环境或研究需求,赋予前期降雨和激发降雨不同的重要性。

将 2.2.3 节所得基准值(R_1 , r_1)代入式(2),绘制在 R_w - r_w 平面上(图 7)。极限降雨量曲线代表了滑坡发生的边界情况,观测点离基准点越近,则与曲线的偏离程度越大,潜在的灾害风险等级越高。

因此,降雨权重因子 a 的取值应确保所得到的曲线能够包络数据集中的所有滑坡灾害点,以准确反映灾害发生的临界条件。如图 7 所示,当降雨权重因子 $a \geq 1.9$ 时,曲线可以包络所有滑坡灾害点,根据不同权重因子(a)所构建的阈值模型,会得到不同的降雨预警阈值,并导致不同的预警效果。本文对降雨权重因子取中间值 2.5(图 7),该值代表了在假设条件下,预警效果的期望值最大化,从而有效降低误报率与漏报率,减少防灾资源浪费和财产损失的风险。

3 研究结果及分析

3.1 降雨预警阈值分析验证

前文基于福州市永泰县台风暴雨型滑坡的历史降雨及灾情统计数据,通过反演分析确定该模型的关键参数,本节首先初步提出基于降雨指数(R')的降雨预警阈值,采用典型滑坡灾害与其他降雨过程进行验证,最后提出适用于永泰的台风暴雨型滑坡降雨预警阈值,流程如图 8 所示。

以 2023 年“海葵”台风期间的降雨事件为训练集,对 1382 例降雨事件进行计算,可以得到各滑坡灾害点发生时刻的降雨指数(R')的计算结果(图 9)。结果可



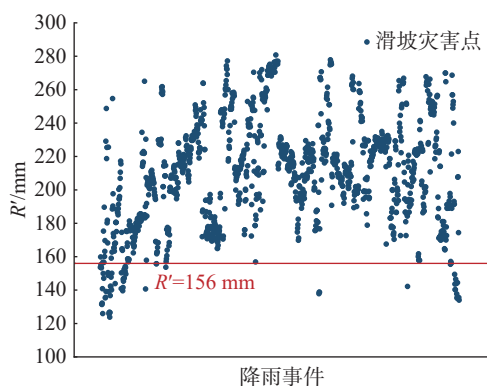
图8 降雨预警阈值分析验证流程图

Fig. 8 Flowchart of the rainfall warning threshold analysis and validation process

知,在该阈值模型下,降雨指数最小值为 $R'=123.76$ mm,最大值为 $R'=280.78$ mm。通过对计算结果进行百分位数分析,得到 95% 的滑坡灾害点的降雨指数 $R' \geq 156.57$ mm,意味着在滑坡发生时,降雨指数的真实值有 95% 的概率落在这一范围内。因此,本文提出降雨指数 $R'=156$ mm 为适用于永泰县的台风暴雨型滑坡灾害降雨预警阈值,表示当永泰县某观测点的降雨指数 $R' \geq 156$ mm 时,滑坡灾害发生的潜在风险显著增加。该阈值是适当舍弃 5% 的极小值干扰,基于历史数据的统计分布特点,在高置信度下确定的,为福州市永泰县地质灾害气象预警提供了有力的科学依据。

3.2 典型滑坡灾害点验证

前期有效降雨量和激发降雨量可以通过持续记录的降雨数据在时间上连续计算而无需划分时间段,因此,降雨指数(R')也可以连续计算,除了区域滑坡预警

图 9 降雨指数(R')计算结果(2023 年“海葵”台风)Fig. 9 Calculation results of the rainfall index R' (Typhoon Haikui, 2023)

以外,对单点滑坡还能够起到提前预报的效果,在降雨过程中进行实时动态监测预警。

以 2025 年“海葵”台风期间典型滑坡——永泰县清凉镇苦竹坪 3-1 号黄国平滑坡为案例进行分析,开展降雨指数在单点滑坡动态监测预警方面的应用验证。

现场调查显示(图 10),3-1 号滑坡属于浅表层崩塌滑坡,坡度约 23° ,高度 92 m,滑动面水平距离约 220 m,上部有岩石裸露,滑坡堆积物体量整体不大。图 11 揭示了该滑坡点的降雨指数 R' 的动态变化情况,前期降雨指数一直处于较低水平,随着极端降雨的开始,降雨指数(R')值迅速上升,在灾害发生前约 30 min 已经达到本文提出的降雨预警阈值 $R'=156$ mm,标志着滑坡发生的潜在风险已经显现,最终在灾害发生时刻达到 197.72 mm,超过了预警阈值。

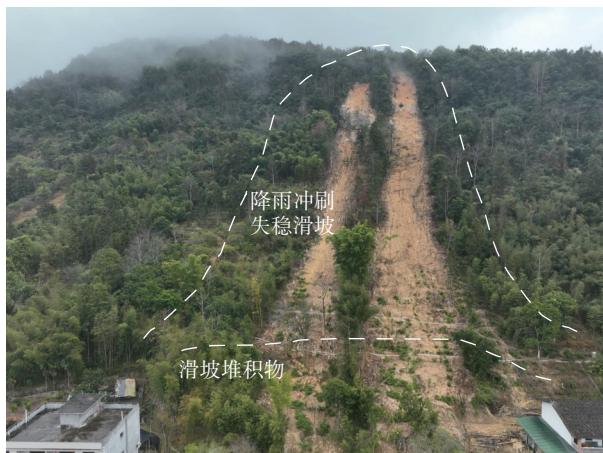
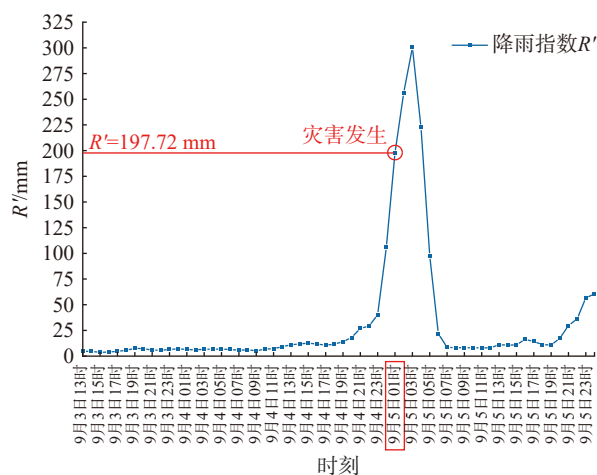


图 10 永泰县清凉镇苦竹坪 3-1 号滑坡现场照片

Fig. 10 Site photograph of Kuzuping landslide No. 3-1 in Qingliang Town, Yongtai County

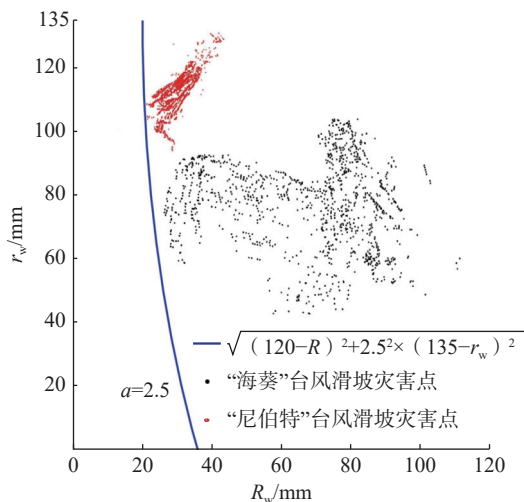
结果表明,降雨指数(R')能够在降雨过程中实时反映降雨强度的变化,具有较强的工程应用价值。因此,

图 11 永泰县清凉镇 3-1 号滑坡的降雨指数(R')动态变化Fig. 11 Dynamic changes in the rainfall index R' for landslide No. 3-1 in Qingliang Town, Yongtai County

本文提出将 R' 作为警戒、避难时的雨量指标,暂考虑 30 min 为提前预报滑坡发生的时间界限,后续可以通过开展大量监测预警的实践进一步优化该预警指标值和提前预警时间值。

3.3 “尼伯特”台风降雨过程验证

以 2016 年“尼伯特”台风期间的 4 069 例降雨事件作为验证集进行该阈值模型的验证性计算,得到滑坡灾害点与极限降雨量曲线的包围情况(图 12)与降雨指数(R')的计算结果(图 13)。对图 12 分析可知, $a=2.5$ 的极限降雨量曲线可以完全包络“尼伯特”台风触发的所有滑坡灾害点,在参数 $a=2.5$ 条件下计算的降雨指数(R'),可以正确有效反馈“尼伯特”实际灾害的发生情况。图 13 可知,计算的降雨指数(R')在 220 ~ 280 mm 范围内稳定

图 12 灾害点 R_w-r_w 关系图(2016 年“尼伯特”台风)Fig. 12 R_w-r_w relationship of disaster points (Typhoon Nepartak, 2016)

波动,其中,7.5%的滑坡的降雨指数在 $R'=228 \sim 240$ mm; 14.7%的滑坡在 $R'=240 \sim 250$ mm; 41.9%的滑坡在 $R'=250 \sim 260$ mm; 30.6%的滑坡在 $R'=260 \sim 270$ mm; 5.4%的滑坡在 $R'=270 \sim 282$ mm。此外,100%滑坡的降雨指数超过本文提出的 $R'=156$ mm的降雨预警阈值,意味着基于本预警阈值,滑坡发生前已触发滑坡预警,可以实现完全预报。此外,计算结果未表现出明显的异常极端值,这表明在“尼伯特”台风期间,降雨指数(R')的变化符合预期,并且该阈值模型在实际降雨事件中表现出较好的稳定性和准确性。

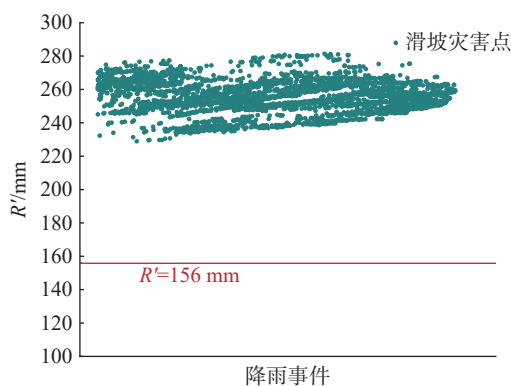


图 13 降雨指数(R')计算结果(2016 年“尼伯特”台风)
Fig. 13 Calculation results of the rainfall index R' (Typhoon Nipartak, 2016)

以“海葵”台风事件中区域滑坡 15%、30%、60%、85% 的发生比例建立降雨预警阈值,各比例下确定的降雨阈值分别为 $R'_{15\%}=175.52$ mm, $R'_{30\%}=194.62$ mm, $R'_{60\%}=219.87$ mm, $R'_{85\%}=229.45$ mm。 $R'_{15\%}$ 、 $R'_{30\%}$ 与 $R'_{60\%}$ 对“尼伯特”台风的滑坡灾害均能起到完全预报的效果,而仅有一个滑坡的降雨指数低于 $R'_{85\%}=229.45$ mm。因此,降雨预警阈值 $R'=156$ mm 对 2 次典型台风事件的综合预测评价效果最佳,进一步验证了该阈值的合理性与可行性。

基于 3.2 节提出的考虑 30 min 为提前预报滑坡发生的时间界限,对“尼伯特”台风进行验证,计算“尼伯特”各灾害点降雨指数到达预警阈值 $R'=156$ mm 的时间范围。统计得到,仅有 0.18% 的滑坡未能实现提前 30 min 预警,99.8% 的滑坡在灾害发生前 30 min 到达降雨预警阈值。其中,11.29% 的滑坡实现提前预警时间接近 30 min, 79% 的滑坡提前预警时间在 1 h 至 30 min 范围内, 9.5% 的滑坡提前预警时间超 1 h。

由此,进一步验证了该降雨预警阈值模型在永泰县的适用性和可行性。

3.4 降雨阈值的影响因素分析

从滑坡的预测机理上来说,降雨预警阈值需通过

地形条件、物源条件和植被覆盖条件综合分析才能更为精确^[4, 24]。3.3 节结果表明,“尼伯特”台风灾害点计算出的降雨指数普遍高于“海葵”台风,且与 3.1 节给出的降雨预警阈值存在偏差,可见现有方法仍存在一定局限性。

图 1 与图 3 对比可知,2 次台风暴雨事件灾害点分布区域不同,“尼伯特”台风灾害点多分布于山区,所在区域普遍地势较高,相较于低海拔地区,高海拔地区的降水集中和滞留现象往往较少,因此需要更大的综合降雨量才能触发灾害。如图 14 所示,2 次台风暴雨事件灾害点存在重叠区域。对该区域的滑坡事件进一步分析,选取的“海葵”台风 14 个滑坡点计算的降雨指数(R')在 221.59 ~ 227 mm 小范围内波动,而选取的“尼伯特”台风 11 个滑坡点计算的降雨指数(R')在 254.07 ~ 259.66 mm (图 15)。从这一结果看,局部地形相近的前提下,计算的降雨指数偏差范围能够进一步缩小。由此可见,不同地区的地质条件、气候反映出来的降雨阈值不同,且局部的地形因子影响着降雨预警阈值的取值。因此,在后续研究中应针对不同的地区、地形做相应的调整,将地形因子、物源因子、植被因子等孕灾环境因子纳入参数优化考虑范畴,进而提出不同孕灾环境因子下精细化分类的降雨预警阈值。

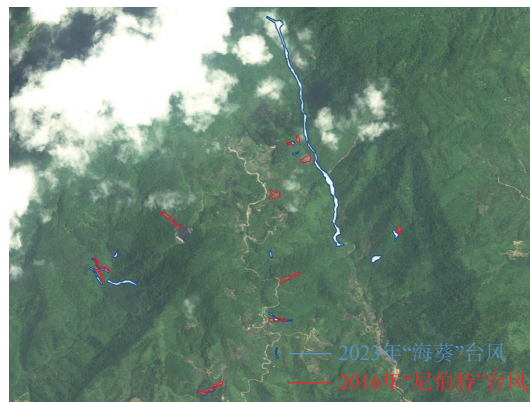


图 14 灾害点重叠区的滑坡示意图
Fig. 14 Landslides of disaster points in the overlap zone

4 结论

(1)通过对福州市永泰县和日本广岛县的孕灾环境与历史灾情类比研究,提出基于降雨指数(R')的降雨阈值模型适用于福州市永泰县台风暴雨型滑坡的气象预警;

(2)基于“海葵”“尼伯特”2 次典型台风暴雨型滑坡灾害事件的统计分析,确定了几个关键参数:前期降雨日数为 7 d,激发降雨量日数为 2 h,有效降雨折减系数

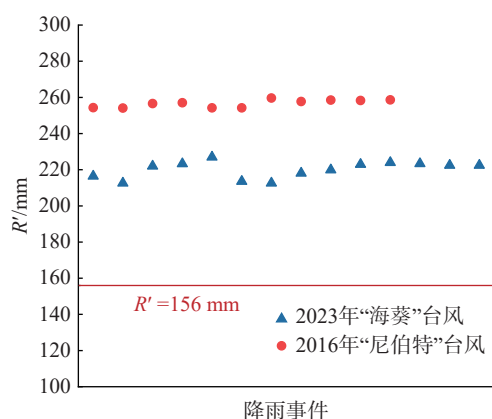


图 15 灾害点重叠区滑坡的降雨指数(R')计算结果

Fig. 15 Calculation results of the rainfall index R' for landslide in the disaster points overlap zone

$\alpha=0.85$, 降雨权重因子 $\alpha=2.5$;

(3)采用百分位数分析方法,以“海葵”台风诱发的降雨事件为研究对象,在 95% 的数据分布范围内,确定适用于永泰县的台风暴雨型滑坡降雨预警阈值为 $R'=156$ mm;

(4)采用“海葵”台风典型滑坡灾害点验证该阈值可以提前 30 min 有效预报灾害的发生。进一步采用降雨强度更高、灾情更严重的“尼伯特”台风验证,结果表明可以实现完全预警,体现了该模型及预警阈值的适用性;

(5)影响降雨阈值的还有地形地貌因素,在今后的研究中,可以考虑其他因子,结合不同地区做相应的调整优化,以达到精确预警的效果。

参考文献(References):

- [1] 自然资源部. 中国国土资源公报 [EB]. 北京: 自然资源部, 2014 - 2017. [Ministry of Natural Resources. China land and resources bulletin [EB]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2014 - 2017. (in Chinese)]
- [2] 自然资源部. 地质勘查和地质灾害防治活动监督检查情况的通报 [EB]. 北京: 自然资源部, 2020 - 2022. [Ministry of Natural Resources. Inspection report on the supervision of geological exploration and geological disaster prevention activities [EB]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2020 - 2022. (in Chinese)]
- [3] 自然资源部. 中国自然资源统计公报 [EB]. 北京: 自然资源部, 2022. [Ministry of Natural Resources. China natural resources statistical bulletin [EB]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2022. (in Chinese)]
- [4] 豆红强, 简文彬, 王浩, 等. 高植被覆盖区台风暴雨型滑坡成灾机制及预警模型研究综述 [J]. 自然灾害学报, 2023, 32(2): 1 - 15. [DOU Hongqiang, JIAN Wenbin, WANG Hao, et al. Review of failure mechanism and early warning model of landslides induced by typhoon and associated rainstorm in high vegetation coverage area [J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(2): 1 - 15. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 伍宇明, 兰恒星, 高星, 等. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究——以福建地区为例 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 255 - 262. [WU Yuming, LAN Hengxing, GAO Xing, et al. Rainfall threshold of storm-induced landslides in typhoon areas: A case study of Fujian Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(2): 255 - 262. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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.
- [8] 戴丛蕊, 黄玮, 李蒙, 等. 云南降雨型滑坡县级预警雨量阈值分析 [J]. 气象科技, 2015, 43(4): 675 - 680. [DAI Congrui, HUANG Wei, LI Meng, et al. County-level rainfall warning thresholds for rainfall-induced landslides in Yunnan [J]. Meteorological Science and Technology, 2015, 43(4): 675 - 680. (in Chinese with English abstract)]
- [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] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [12] NAKAI S, SASAKI Y, KAIBORI M, et al. Rainfall index for warning and evacuation against sediment-related disaster: Reexamination of rainfall index R_f , and proposal of R' [J].

- Soils and Foundations*, 2006, 46(4): 465 – 475.
- [13] 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, 2014, 39(7): 889 – 895. [WU Yiping, ZHANG Qiuxia, TANG Huiming, et al. Landslide hazard warning based on effective rainfall intensity [J]. *Earth Science*, 2014, 39(7): 889 – 895. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 黄发明, 曹中山, 姚池, 等. 基于决策树和有效降雨强度的滑坡危险性预警 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(3): 472 – 482. [HUANG Faming, CAO Zhongshan, YAO Chi, et al. Landslides hazard warning based on decision tree and effective rainfall intensity [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(3): 472 – 482. (in Chinese with English abstract)]
- [15] SASAKI Y, MORIWAKI T, KANO S, et al. Characteristics of precipitation induced slope failure disaster in Hiroshima Prefecture of June 29, 1999 and rainfall index for warning against slope failure disaster [J]. *Soils Found*, 2001, 49(7): 16 – 18 (in Japanese).
- [16] 李玉娟. 福建永泰晚白垩世早期辉石闪长岩年代学与岩石地球化学特征及其地质意义 [J]. 福建地质, 2023, 42(4): 251 – 260. [LI Yujuan. Chronology, geochemical characteristics and geological significance of early pyroxene diorite from the Late Cretaceous of Yongtai County, Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 2023, 42(4): 251 – 260. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李良林, 周汉文, 陈植华, 等. 福建沿海晚中生代花岗质岩石成因及其地质意义 [J]. 地质通报, 2013, 32(7): 1047 – 1062. [LI Lianglin, ZHOU Hanwen, CHEN Zhihua, et al. Petrogenesis of the Late Mesozoic granitic rocks in southeast coastal areas of Fujian Province and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(7): 1047 – 1062. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 林祥钿, 李文曲, 金庆志. 福州—永泰区域地质构造及其对热田控制作用的初步探讨 [J]. 福建地质, 1988, 7(3): 221 – 228. [LIN Xiangdian, LI Wenqu, JIN Qingzhi. A prelim discussion on the regional geological structure in Fuzhou—Yongtai area and its control to geothermal fields [J]. *Geology of Fujian*, 1988, 7(3): 221 – 228. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 叶龙珍, 柳侃, 黄国平, 等. 福建重大地质灾害特征及其影响因素 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 98 – 102. [YE Longzhen, LIU Kan, HUANG Guoping, et al. The characteristics and influence factors of catastrophic geological disaster in Fujian Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(1): 98 – 102. (in Chinese with English abstract)]
- [20] WAKITA K. Geology and tectonics of Japanese Islands: A review—the key to understanding the geology of Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72: 75 – 87.
- [21] WATAKABE T, MATSUSHI Y. Lithological controls on hydrological processes that trigger shallow landslides: Observations from granite and hornfels hillslopes in Hiroshima, Japan [J]. *Catena*, 2019, 180: 55 – 68.
- [22] TSUCHIDA T, MORIWAKI T, NAKAI S, et al. Investigation and consideration on landslide zoning of multiple slope failures and debris flows of 2014 disaster in Hiroshima, Japan [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(4): 1085 – 1102.
- [23] HASHIMOTO R, TSUCHIDA T, MORIWAKI T, et al. Hiroshima prefecture geo-disasters due to western Japan torrential rainfall in July 2018 [J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(1): 283 – 299.
- [24] 盛逸凡, 李远耀, 徐勇, 等. 基于有效降雨强度和逻辑回归的降雨型滑坡预测模型 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 156 – 162. [SHENG Yifan, LI Yuanyao, XU Yong, et al. Prediction of rainfall-type landslides based on effective rainfall intensity and logistic regression [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(1): 156 – 162. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [26] CROZIER M J. Landslides: Causes, consequences and environment [M]. London: Croom Helm, 1986: 185 – 189.
- [27] 潘华利, 欧国强, 黄江成, 等. 缺资料地区泥石流预警雨量阈值研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2122 – 2126. [PAN Huali, OU Guoqiang, HUANG Jiangcheng, et al. Study of rainfall threshold of debris flow forewarning in data lack areas [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(7): 2122 – 2126. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 高珊, 刘爱鸣, 黄志刚, 等. 福建省强降水诱发地质灾害特征分析 [J]. 福建地质, 2010, 29(增刊 1): 64 – 71. [GAO Shan, LIU Aiming, HUANG Zhigang, et al. The character analysis on heavy rainfall inducing geological hazards in Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 2010, 29(Sup 1): 64 – 71. (in Chinese)]