

诱发台风暴雨型滑坡的降雨阈值研究

孙 强, 刘明军, 张泰丽, 伍剑波, 朱延辉, 史洪峰, 常晓军

Rainfall thresholds of typhoon rainstorm induce landslides: A case study over Taishun County

SUN Qiang, LIU Mingjun, ZHANG Taili, WU Jianbo, ZHU Yanhui, SHI Hongfeng, and CHANG Xiaojun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于有效降雨强度和逻辑回归的降雨型 滑坡预测模型

Prediction of rainfall-type landslides based on effective rainfall intensity and logistic regression

盛逸凡, 李远耀, 徐勇, 吴吉明, 林巍 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 156–156

四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨

A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan

张勇, 温智, 程英建 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 178–182

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42–50

水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型

Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide

汤明高, 吴川, 吴辉隆, 杨何 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 115–125

西南岩溶山区复合水动力场滑坡影响模式——以关岭县大寨滑坡为例

Impact model of landslide with complex hydrodynamic field in karst mountain areas of southwest China: a case study of the Dazhai landslide in Guanling County

易连兴 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 43–50

湘西陈溪峪滑坡变形机理及稳定性评价

A study of deformation mechanism and stability evaluation of the Chenxiyu landslide in western Hunan

刘磊, 徐勇, 李远耀, 连志鹏, 王宁涛, 董仲岳 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 21–21



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212041

孙强, 刘明军, 张泰丽, 等. 诱发台风暴雨型滑坡的降雨阈值研究——以泰顺县为例 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 197-205.

SUN Qiang, LIU Mingjun, ZHANG Taili, et al. Rainfall thresholds of typhoon rainstorm induce landslides: A case study over Taishun County[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 197-205.

诱发台风暴雨型滑坡的降雨阈值研究 ——以泰顺县为例

孙 强¹, 刘明军², 张泰丽¹, 伍剑波¹, 朱延辉¹, 史洪峰¹, 常晓军¹

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 泰顺县自然资源和规划局, 浙江 温州 325500)

摘要: 在我国东南沿海地区, 台风暴雨诱发了大量山体滑坡。建立诱发台风暴雨型滑坡的降雨阈值模型, 可为该地区的滑坡预警提供参考依据。基于浙江省泰顺县 2007—2022 年以来发生的滑坡信息和日降雨量数据, 进行了诱发滑坡的台风暴雨事件编目, 初步揭示了台风暴雨型滑坡的发育规律和触发降雨特征, 通过降雨强度(I)、降雨历时(D)的幂律关系构建了滑坡临界降雨阈值模型, 并开展了不同台风降雨雨型的阈值模型对比。结果表明: 台风暴雨型滑坡大量发生在与台风登陆方向接近的迎风坡, 坡表植被多为乔木和竹林; 诱发滑坡的台风降雨一般持续 2~3 d, 且降雨过程集中, 降雨雨型以单峰型为主, 总降雨量一般在 200 mm 以上; 台风暴雨诱发滑坡的降雨阈值显著高于一般性的降雨, 这种差异与台风降雨模式及大尺度气候环境有关; 雨型也会显著影响降雨阈值, 随着降雨峰值的后移, 阈值逐渐降低, 表明台风暴雨型滑坡对长时间降雨后出现的强降雨事件更加敏感。通过降雨阈值模型对 9 次台风降雨事件是否诱发滑坡进行了预测, 预测结果与实际情况比较吻合, 证明该模型及研究思路对台汛期东南沿海的滑坡监测预警有较强的参考价值。

关键词: 台风暴雨; 滑坡; 降雨阈值; 雨型; 聚类分析

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0197-09

Rainfall thresholds of typhoon rainstorm induce landslides: A case study over Taishun County

SUN Qiang¹, LIU Mingjun², ZHANG Taili¹, WU Jianbo¹, ZHU Yanhui¹,

SHI Hongfeng¹, CHANG Xiaojun¹

(1. Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. Taishun Bureau of Natural Resources and Planning, Wenzhou, Zhejiang 325500, China)

Abstract: In the southeast coast of China, typhoon rainstorms resulted in lots of landslides. Investigating rainfall thresholds and patterns of typhoons is of great importance for the early warning of landslides. In this study, the landslide information obtained from multiple sources and typhoon rainstorm data were used to analyze landslide and rainfall characteristics in Taishun 2007 to 2022; the rainfall threshold of typhoon rainstorm-induce landslides was defined for Taishun area based on the rainfall intensity-duration (I - D) model. It finds that a large number of

收稿日期: 2022-12-29; 修订日期: 2023-05-16

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42277126); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221742)

第一作者: 孙强(1983—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地质工程及地质灾害研究工作。E-mail: huiqiangsun@foxmail.com

通讯作者: 史洪峰(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害研究工作。E-mail: shihongfeng_cgs@163.com

typhoon rainstorm landslides occur at the windward slope close to the landing direction of the typhoon, where the main vegetation types of the landslide are arbors and herbs with tall trunks and shallow roots. The duration of rainfall events inducing landslides is usually 2 ~ 3 days, with concentrated rainfall and total rainfall more than 200 mm. The threshold of typhoon rainstorm-induced landslides is significantly higher than that of rainfall-induced landslides in other regions. With the backward position of rainfall peak in rainfall process, the thresholds become lower and steeper, indicating that more rainfall is needed to trigger landslides when the rainfall peak appears earlier than when it is late. Typhoon rainstorm-induced landslides are more sensitive to the heavy rainfall event after a long rainfall. The threshold model established in this study is consistent with the observation, indicating that it is effective for landslide monitoring during the typhoon season.

Keywords: typhoon rainstorm; landslide; rainfall thresholds; rainfall patterns; cluster analysis

降雨是滑坡的主要触发因素之一,一般认为降雨入渗导致土体重量和孔隙水压力变化,降低滑面的抗剪强度^[1],同时引起地下水位抬升,对滑体产生浮托力、侧向推力等作用^[2]。随着全球气候的暖湿化,降雨事件的强度不断增加,引发大量的滑坡灾害,因此研究诱发滑坡的降雨阈值对滑坡预警有重要意义。

国内外学者对诱发滑坡的降雨阈值开展了大量研究,一类是基于确定性的物理力学模型^[3],通过解析分析或数值模拟研究降雨入渗过程及其对滑坡岩土体力学强度、含水率、地下水位等参数变化的影响,定量分析滑坡的稳定性,分析结果适合单体的滑坡监测预警;另一类是采用数学统计模型,分析降雨的累计降雨量(E)、平均降雨强度(I)、降雨历时(D)等参数与滑坡发生的相关性,建立的模型主要有 I - D 模型^[4]、 E - D 模型^[5]等。数学统计模型比较适合区域性的滑坡监测预警,并已成为开展区域性滑坡监测预警研究的主流方法^[6]。

我国东南沿海地区的大量滑坡与台风期间暴雨事件有显著关系^[7],常称之为台风暴雨型滑坡。台风引起的暴雨历时短、雨量集中,降雨范围受台风路径影响明显,与非台风降雨存在显著差异^[8],台风暴雨型滑坡的降雨阈值也显著高于其他类型的滑坡,其临界降雨阈值模型的参数与其他滑坡也大不相同^[9]。

目前,一般在研究东南沿海区域诱发滑坡的降雨阈值时,未对台风暴雨型滑坡做严格区分。将台风暴雨型滑坡与梅雨或一般性降雨引发的滑坡进行混合研究,很难得到合适有效的降雨阈值。浙江省泰顺县位于东南沿海地区,台风袭扰频繁,台风暴雨是区域滑坡的主要诱发因素^[10]。据统计,泰顺县近 80% 的滑坡发生在台风降雨期间,现存的滑坡和降雨资料丰富,是研究诱发台风暴雨型滑坡降雨阈值的理想区域。通过对泰顺县多年来诱发滑坡的台风降雨特征

进行总结,基于 Ward 聚类算法对台风降雨进行雨型划分,研究建立诱发台风暴雨型滑坡的降雨雨强-降雨历时(I - D)阈值模型,分析不同雨型条件下阈值的变化规律,以为台风期滑坡灾害预警预报提供参考。

1 泰顺县地质环境特征

泰顺县位于浙江省最南端,温州市西南部,县境内山脉延绵,地形切割强烈,山脉大体上呈 NE-SW 走向,属于中低山侵蚀地貌,其西北部的白云尖海拔 1 611 m,为温州市最高峰(图 1)。区域内主要构造为泰顺—黄岩大断裂,穿越区域中部。

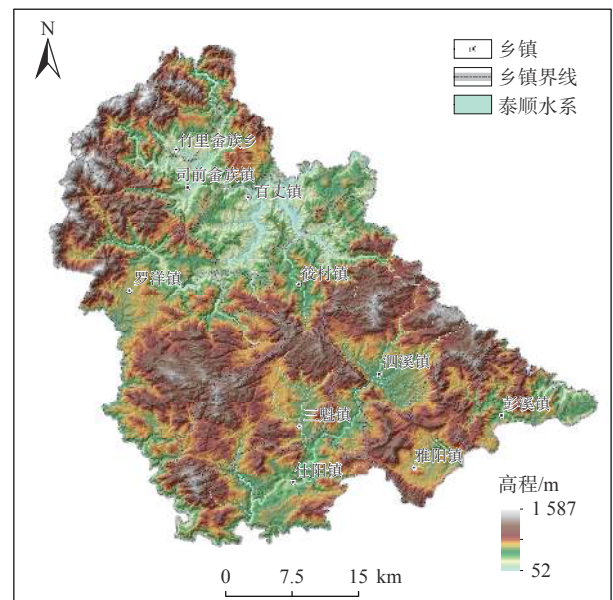


图 1 泰顺县地形地貌

Fig. 1 Geomorphology of Taishun

区内地层以中生代晚侏罗世至早白垩世形成的火山碎屑岩、侵入岩和沉积岩为主,岩性为流纹岩、凝灰岩、花岗岩、凝灰质粉砂岩、粉砂质泥岩等。该区域属于亚热带海洋型季风气候,县域距离最近的海

岸线仅 36 km,夏秋两季有台风登陆,年均 2~3 次,常形成极端降雨等灾害性天气。2015—2020 年间遭受了 12 次台风袭扰,引发了大量的滑坡,造成严重经济损失和人员伤亡^[11-12]。

泰顺县是浙江省地质灾害防治重点县(市、区)之一,也是台风暴雨型滑坡发育具有代表性的区域。滑坡多位于房前屋后、道路沿线等切坡区域和地形转折端,“切滑伴生”关系明显,滑坡规模基本为小型,大部分体积小于 1 000 m³。滑坡类型主要为残积土、坡积层为物源的土质(类土质)滑坡,常有一次台风降雨诱发大量滑坡的事件,群发性特征明显。2015 年“苏迪罗”台风期间,一次降雨事件诱发滑坡 90 余处。

2 台风暴雨型滑坡发育规律及诱发降雨特征

2.1 台风暴雨型滑坡编目

泰顺县的滑坡包括非降雨事件引起滑坡、降雨(非台风降雨)引起的滑坡和台风暴雨型滑坡。

为建立台风暴雨型滑坡降雨事件目录,本文系统收集了泰顺县 2007—2022 年有时间记录的 471 起滑坡事件,包括在册管理、汛期应急排查及由于工程治理和搬迁避让等原因已核销的滑坡数据,并建立了以下滑坡编目规则:①滑坡发生时有关台风影响泰顺县,且有降雨事件;②滑坡具有明确的地理位置和经纬度信息;③无记录表明滑坡是由降雨以外的诱因导致的。按照以上原则,对 471 起滑坡进行了筛选,其中 447 处滑坡与降雨事件相关,176 处滑坡是由一般降雨引起的,271 处是由台风降雨引起的(图 2)。

2.2 诱发滑坡的台风降雨事件编目

通过收集泰顺县境内的 37 个雨量站(图 3)2007—2022 年的日降雨量数据,以期精确分析诱发滑坡的台风降雨特征,重建每个滑坡的台风降雨历史。

大部分降雨阈值研究都是将滑坡与最近的雨量站点进行关联。但对台风降雨而言,不能仅仅按照距离进行关联。有研究指出,台风带来的降雨雨云高度较低,对流云团往往在山前发展,过山减弱,地形的抬升作用和拖曳效应显著,极大地影响降雨过程^[13]。泰顺县境内有海拔 1 000 m 以上的山峰 179 座,受地形地貌影响,一次台风不同区域的降雨量有明显的差异。如 2016 年台风“莫兰蒂”(第 14 号超强台风)过境,县境内天开尖山脉南部(泗溪站)最大日降雨量是北部(新浦站)的 1.87 倍,过程降雨量多出 135 mm(图 4)。

因此在考虑台风主要路径方向的基础上,以东南

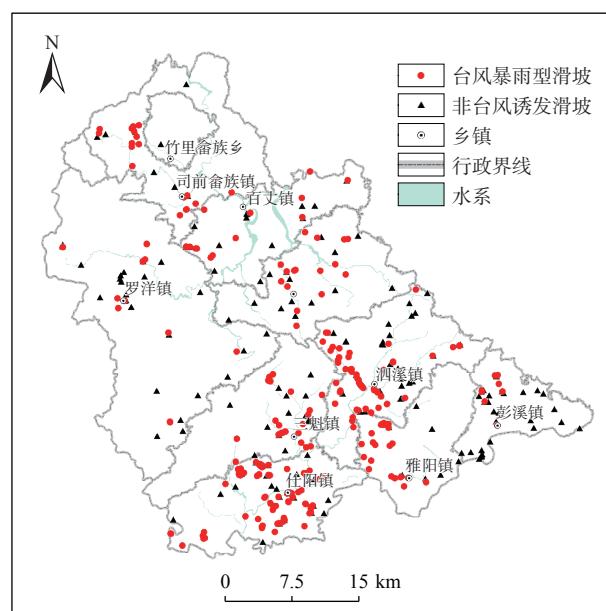


图 2 泰顺县台风暴雨型滑坡与其他滑坡

Fig. 2 Typhoon rainstorm-induced landslides and other landslides in Taishun

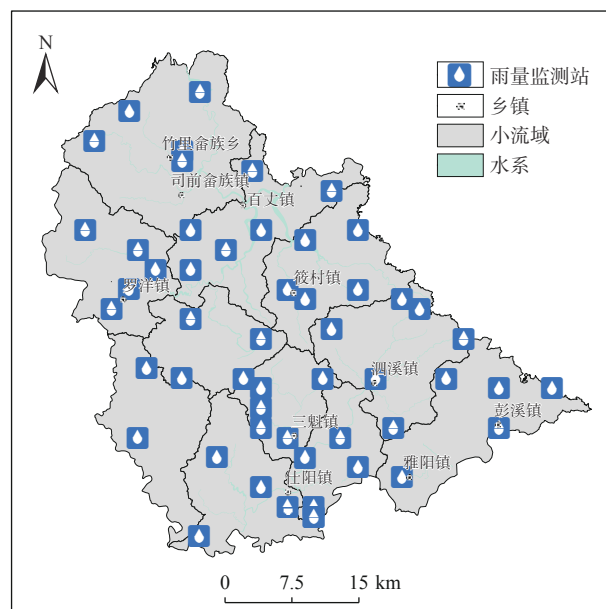


图 3 泰顺县小流域划分与雨量站点分布

Fig. 3 Watershed division and rain gauges distribution in Taishun

向与南西向山脉为主体边界,将泰顺县划分为 11 个小流域,根据滑坡与降雨量站点的流域、高程、距离等要素关系,建立滑坡与降雨事件的关联规则:①滑坡与雨量站是否位于同一流域;②滑坡与雨量站之间的距离;③雨量站与滑坡的高程差异。建立关联之后,区域滑坡与所关联的雨量站点的距离 80% 在 3 km 以内,与雨量站最大距离 13.6 km,最小距离 0.3 km,最

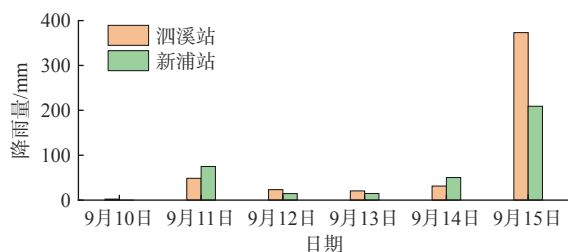


图4 天开尖山脉两侧降雨量差异

Fig. 4 Rainfall on different sides of Tiankaijian mountain

大限度地保证雨量站点监测量值能够代表滑坡发生时的降雨量。

最终统计得到有诱发滑坡记录的台风降雨事件共计 15 次, 一般一年 1~2 次, 主要发生在 7—10 月份。不同年份台风降雨诱发的滑坡数量如表 1 所示, 近年来诱发群发性滑坡的主要有 2015 年的“苏迪罗”台风、2016 年的“莫兰蒂”和“鲇鱼”台风。

表 1 泰顺县 2007—2020 年台风暴雨诱发滑坡数量

Table 1 Typhoon rainstorm-induced landslides in Taishun from 2007 to 2020

年份	台风	诱发滑坡/处	累计降雨量/mm
2007	罗莎	2	348.0
	圣帕	13	511.8
	蝴蝶	1	98.7
2009	莫拉克	6	1 240.7
2010	南川	1	88.6
2011	南玛都	1	575.7
2012	苏拉	2	154.5
2013	菲特	7	372.9
2015	苏迪罗	90	780.3
2016	莫兰蒂	82	390.1
	鲇鱼	54	575.3
2017	纳沙	3	202.1
	海棠	2	232.1
2018	玛莉亚	2	236.4
2020	黑格比	3	132.1

在降雨阈值研究中, 确定前期有效降雨量, 分割独立的降雨事件是建立模型的关键。大量学者通过经验模型^[14]、统计模型^[4]、确定性模型^[15]等计算诱发滑坡的有效降雨量和降雨时长。前期研究成果显示, 台风降雨对滑坡稳定性影响的滞后期为 2 d 天^[16]。因此以间隔 2 d 为条件, 对降雨过程进行分割, 即连续 2 d 无降雨后, 再发生的降雨视为另一个降雨事件。271 处滑坡中有多处滑坡的发生时间相同, 关联的是同一个降雨事件, 这一类多滑坡降雨事件按照单个数据样本统计, 最后获得由不同雨量站点监测到的不同台风降雨事件样本为 45 个(图 5)。

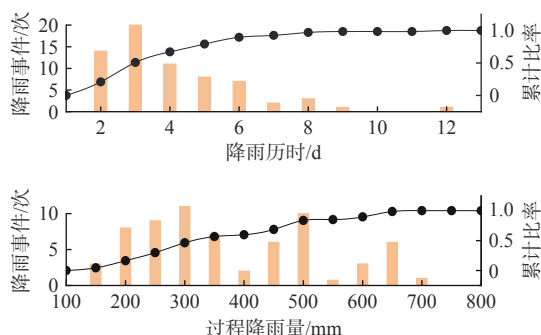


图5 台风降雨事件的历时和降雨量频数

Fig. 5 Duration and rainfall frequency of typhoon events

2.3 台风暴雨型滑坡发育规律及诱发降雨特征

对比一般降雨诱发的滑坡, 台风暴雨型滑坡发育特征与台风、暴雨作用关系密切。统计 271 处台风暴雨型滑坡的坡向和近 10 年来台风行进方向数据, 结果显示滑坡坡向与台风登陆方向基本符合正态分布。滑坡方向均值为 178°, 样本的均方差为 77°, 而近 10 年来台风登陆方向的均值为 147°, 均方差 42.5°, 滑坡坡向与台风登陆方向之间较为接近(图 6)。

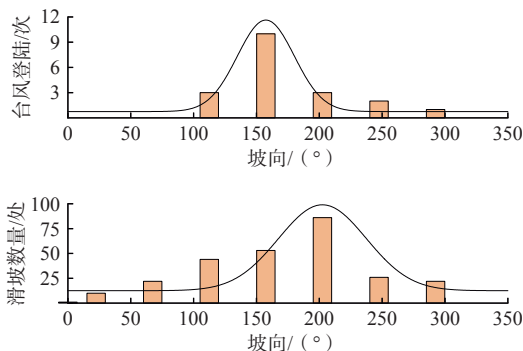


图6 台风暴雨型滑坡滑向与台风登陆方向

Fig. 6 Direction of typhoon and induced landslides

台风引起的降雨过程非常集中, 台风暴雨型滑坡对集中降雨反应迅速, 有“即雨即滑”的特征。以近年来诱发滑坡最多的“苏迪罗”台风降雨为例, 2015 年 8 月 7 日 7 时降雨开始, 整个降雨过程持续约 72 h, 累计降雨量 780.3 mm(万排站), 但 80% 的降雨基本集中在 8 日 8 时至 9 日 8 时之间(降雨量 646.9 mm)。受台风降雨诱发的滑坡也基本发生于这一时段, 滑坡发生数量峰值滞后于降雨量峰值 4~5 h(图 7)。

台风期间发生的滑坡坡表植被种类多为以柳杉、松树为主的乔木, 占比约 46%, 其次为毛竹, 占比 28%, 灌木占 13%, 裸露及耕地占 13%。

这种现象与台风-植被系统的根掘作用有关, 乔木和毛竹较高, 在台风作用下, 会使根部岩土体发生破坏, 并附加下滑力, 导致滑坡更加容易失稳^[17]。

泰顺县受台风降雨的影响一般 2~3 d, 绝大部分降雨事件在 6 d 内结束, 诱发滑坡的台风降雨累计降雨量多在 200 mm 以上。

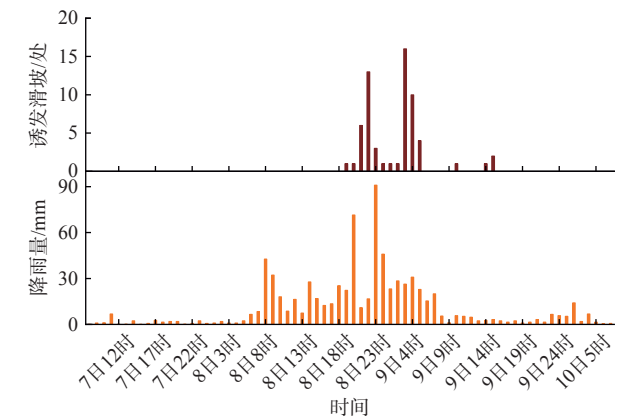


图 7 “苏迪罗”台风降雨量及诱发滑坡数量
Fig. 7 Rainfall and landslides induced by Typhoon Soudelor

3 台风暴雨型滑坡降雨阈值模型研究

3.1 台风暴雨型滑坡降雨阈值模型确定方法与结果
国内外基于统计学建立的诱发浅层滑坡和泥石流降雨阈值模型多采用 Caine^[18] 在 1980 年建立的降雨强度(I)与降雨历时(D)关系函数, 该函数假设诱发滑坡的降雨强度和降雨历时关系为幂律关系。这种幂律关系, 根据不同的可接受程度, 可以拟合不同超越概率下的阈值曲线方程:

$$I = (\alpha \pm \Delta\alpha) \times D^{(\gamma \pm \Delta\gamma)} \tag{1}$$

式中: I ——滑坡发生时平均降雨强度/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$);
 D ——降雨事件的持续时间/d;
 α ——幂律曲线的截距;
 γ ——幂律曲线的斜率;
 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\gamma$ ——拟合参数的标准差。

$\Delta\alpha$ 和 $\Delta\gamma$ 分别表示样本数据围绕拟合趋势线的变化, 其大小主要取决于超越概率、样本数据点的数量和分布。

以 2007—2016 年间诱发滑坡的台风降雨事件为样本, 以 90% 置信区间拟合的曲线方程为:

$$I = (190.65 \pm 12.47) \times D^{(-0.58 \pm 0.05)} \tag{2}$$

曲线拟合优度 R^2 为 0.83。为了提高预警阈值的捕获率, 以拟合标准误差下限为阈值曲线参数, 则泰顺县诱发台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线(图 8)为:

$$I = 178.18 \times D^{-0.63} \tag{3}$$

阈值曲线的置信区间、预测区间如图 9 所示。

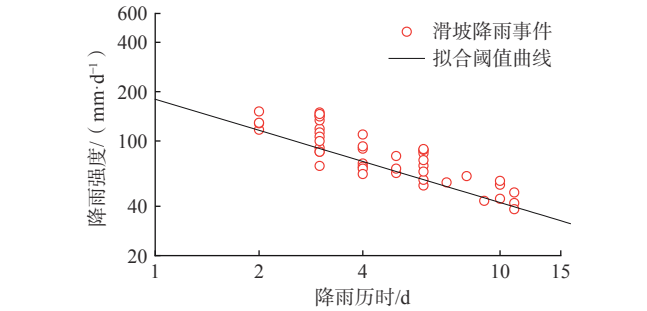


图 8 台风暴雨型滑坡 I - D 阈值曲线
Fig. 8 Rainfall I - D thresholds for the typhoon rainstorm-induced landslides

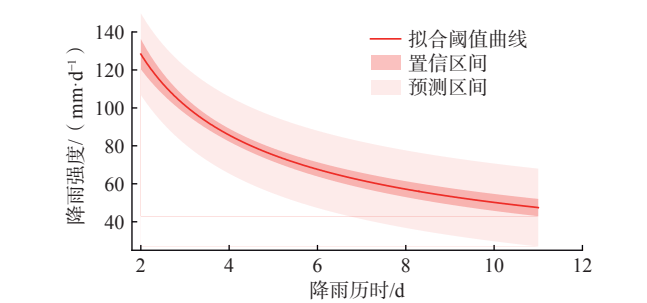


图 9 拟合阈值曲线的置信区间与预测区间
Fig. 9 Uncertainty of rainfall I - D threshold

3.2 台风暴雨型滑坡与其他地区滑坡的诱发降雨阈值的比较

对比不同区域诱发滑坡的降雨阈值, 可以发现台风暴雨型滑坡诱发降雨阈值方程的对数截距显著大于其他地区的滑坡, 泰顺、福建南平等东南沿海地区诱发滑坡的降雨阈值均高于内地。将滑坡与台风降雨事件进行严格关联和筛选后, 诱发滑坡的降雨阈值进一步升高约 48.7%(表 2)。这种现象与台风降雨的模式以及大尺度气候环境有关。如前文所述的“苏迪罗”台风降雨, 80% 的降雨量发生在 24 h 内, 降雨强度高达 652 mm/d。台风带来的降雨降雨量大, 但降雨非常集中, 有效入渗量有限, 诱发滑坡的降雨阈值更高^[9]。另外年均降雨量大的区域诱发滑坡的降雨阈值曲线对数截距更高、对数斜率更陡^[5], 更强的降雨才能诱发滑坡。泰顺县年均降雨量超过 2 000 mm, 不仅常

表 2 不同地区诱发滑坡降雨阈值 Table 2 Rainfall I - D thresholds for landslides in different areas		
地区	阈值方程	适用范围
福建南平 ^[19]	$I = 120.91 \times D^{-0.65}$	$1 < D < 15$
东南沿海 ^[15]	$I = 105.24 \times D^{-0.908}$	$1 < D < 5$
湖南桑植 ^[4]	最大截距、斜率: $I = 95.855 \times D^{-0.985}$ $I = 90.678 \times D^{-1.616}$	$1 < D < 4$
浙江泰顺	$I = 178.19 \times D^{-0.63}$	$1 < D < 11$

年受台风侵袭,4—6 月份的梅汛期降雨强度也非常大,遇见强降雨事件的频率较高,因此与其他地区相比,诱发滑坡的降雨阈值更高,滑坡对强降雨敏感性相对较低。

3.3 不同雨型降雨诱发滑坡的阈值比较分析

许多学者研究指出^[20],诱发滑坡的降雨阈值除了与降雨强度、降雨历时有关,还与雨型或降雨模式有密切关系,递增型和单峰型降雨诱发滑坡的临界阈值更低。

台风暴雨属于短历时暴雨,在气象学领域对这一类暴雨有多种雨型划分方式,比较常见的有 7 种经典雨型模式^[21],如图 10 所示。为了客观得到泰顺县台风降雨的雨型特征,通过 K-means 聚类算法对影响该区域的台风降雨雨型进行划分。其计算原理是将雨型的分类转化为多维空间上的点聚类进行研究,聚类算法步骤如下。

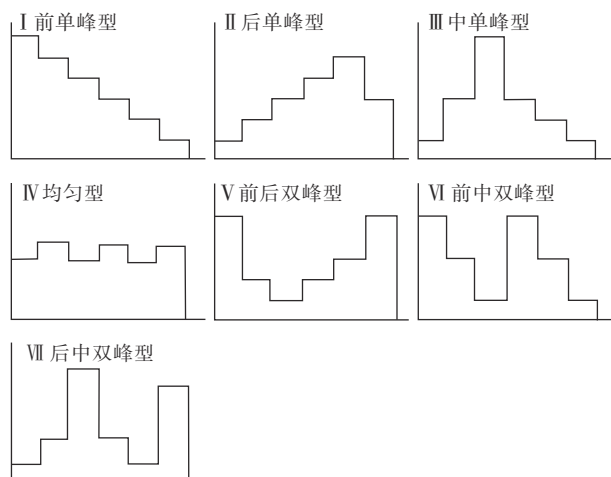


图 10 经典雨型模式示意图

Fig. 10 Seven typical temporal patterns of rainstorms

(1)对降雨事件进行归一化处理,以剔除降雨强度、历时差异对雨型的影响。对每次降雨事件的历时进行 n 等份划分,计算每个时间段内雨量占总降雨量的比率。

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in}\} \quad (4)$$

x_{ij} 是分别为第 i 个降雨事件第 j 个时段雨量占降雨事件总雨量的比率, $i=\{1, 2, 3, \dots, m\}$, $j=\{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。

(2)以 7 种经典雨型模式为初始聚类中心, $Z_1(1)$, $Z_2(1)$, $\dots$, $Z_7(1)$, 括号内的序号为寻找聚类中心的迭代运算次序号。将每个降雨事件视为一个 n 维向量,向量值为归一化后不同时段降雨的比率。

(3)逐个计算降雨事件 $\{X_i\}$ 与 7 个聚类中心间的欧

式距离 L ,按最小距离原则分配给 7 个聚类中心中的某一个 $Z_k(1)$, $k=\{1, 2, 3, \dots, 7\}$ 。

$$D_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - Z_{kj})^2} \quad (5)$$

当 $D_i(k) = \min\{D_{ik}\}$ 时,则 $x_i \in Z_k$ 。

(4)计算各个聚类中心的新的向量值:

$$Z_k(p+1) = \frac{1}{M_k} \sum_{x_i \in Z_k} X_i \quad (6)$$

式中: M_k ——第 p 次聚类,属于聚类中心 $Z_k(p)$ 的降雨事件数量。

(5)如果 $Z_k(p+1) \neq Z_k(p)$,则重新返回(3),对降雨事件进行重新分类,如 $Z_k(p+1) = Z_k(p)$,表示重新计算的聚类中心位置无变化,迭代收敛,算法终止。

由于台风引起的降雨事件不一定完全覆盖 7 种经典雨型,当出现初始的聚类中心距离迭代收敛时的聚类中心差异较大时或两个初始聚类中心被聚为一类,则对初始聚类中心的向量值进行调整,以求得合理的雨型初始聚类中心。最后迭代收敛的聚类中心,就是泰顺县台风暴雨经常出现的雨型。

2007—2016 年,泰顺县降雨量大于 200 mm 的台风降雨共有 11 个,从各雨量站获取的降雨雨型样本共 63 个(有 20 个降雨样本无诱发滑坡记录),降雨过程曲线如图 11 所示。

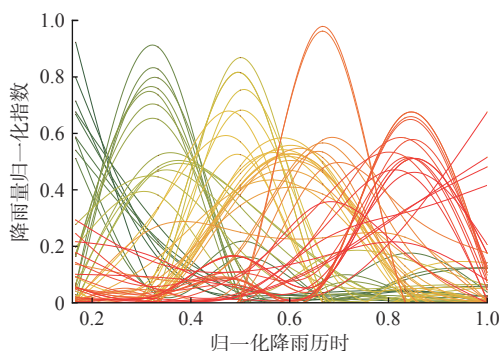


图 11 台风降雨过程曲线

Fig. 11 Rain pattern of rainfall duration

按照 K-means 聚类算法最终分为单峰型和双峰型两大类 5 个亚类,无均匀型降雨。

各亚类中前单峰型 20 个,中单峰型 24 个,后单峰型 15 个,后中双峰型 2 个,前中双峰型 2 个,无前后双峰型降雨(图 12)。对各大类雨型降雨诱发的滑坡数量进行统计,结果显示滑坡绝大部分由单峰型台风降雨诱发,触发滑坡比例高达 96.6%,其中后单峰型触发滑坡数量所占比例为 47.50%。

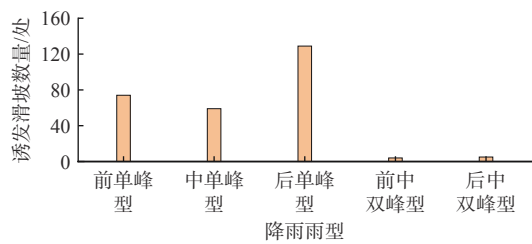


图 12 不同雨型诱发的滑坡数量

Fig. 12 Number of landslides induced by different rain patterns

由于双峰型降雨事件数量较少,单独进行统计分析无意义,按照前单峰型、中单峰型、后单峰型台风降雨分别进行阈值曲线的重建,同样以 90% 置信区间拟合曲线方程,以拟合标准误差下限为阈值曲线参数,得到不同雨型的阈值函数。

以拟合标准误差下限为阈值曲线参数,前单峰型阈值方程为: $I = 190.31 \times D^{-0.57}$, 曲线拟合优度 R^2 为 0.91; 中单峰型阈值方程为: $I = 179.74 \times D^{-0.59}$, 曲线拟合优度 R^2 为 0.97; 后单峰型阈值方程为: $I = 156.25 \times D^{-0.63}$, 曲线拟合优度 R^2 为 0.96, 如图 13 所示。阈值曲线置信区间、预测区间如图 14 所示。

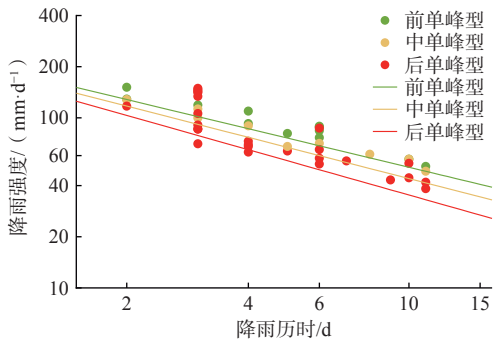


图 13 不同雨型的 I-D 阈值曲线

Fig. 13 Rainfall I-D thresholds of different rain patterns

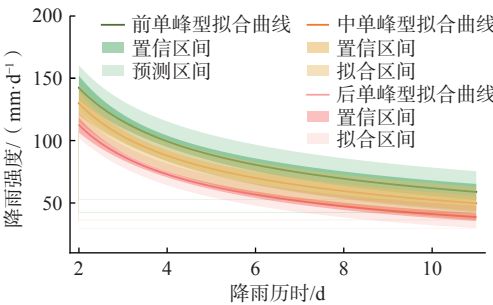


图 14 不同雨型拟合阈值曲线的置信区间和预测区间

Fig. 14 Uncertainty of rainfall I-D thresholds of different rain patterns

从不同雨型的降雨历时、降雨强度、滑坡数量统计关系(表 3)来看,台风暴雨型滑坡灾害与 2~6 d 的强

降雨有很大关系,诱发滑坡的降雨历时最长可达 11 d (即 11 d 内降雨间断不超过 1 d)。

表 3 不同雨型降雨阈值的拟合曲线方程

Table 3 Rainfall I-D thresholds of different rain patterns

雨型	滑坡数量	I/(mm·d ⁻¹)			D/d		
		最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值
前单峰	74	76.5	109.7	154.4	2	4.2	6
中单峰	55	48.5	93.9	142.9	2	4.8	11
后单峰	124	38.3	68.0	117.1	2	6.1	11
拟合曲线方程							
前单峰		$I = (203.89 \pm 13.58) \times D^{(-0.52 \pm 0.05)}$					
中单峰		$I = (189.24 \pm 9.50) \times D^{(-0.55 \pm 0.04)}$					
后单峰		$I = (165.53 \pm 9.08) \times D^{(-0.59 \pm 0.04)}$					

按照雨型聚类,重建阈值模型后,不同雨型降雨诱发滑坡的阈值曲线方程参数与不区分雨型相比,有明显的变化,但参数的标准误差保持在原有水平,方程拟合优度有明显提高,最高可以达到 0.97。说明台风降雨雨型与诱发滑坡的阈值有密切关系,按照雨型分类建立降雨阈值模型可以更加精准地预测可能引起滑坡的台风降雨事件。降雨峰值位于降雨过程的不同位置,降雨特征和阈值曲线参数表现出明显的规律性。前单峰型台风降雨具有历时偏短,累计降雨量偏大的特征,阈值曲线具有较高的对数截距和较低的对数斜率。随着降雨峰值的后移,降雨历时增长,累计降雨量降低,降雨阈值也逐渐降低。表明泰顺地区的台风暴雨型滑坡对突发性、短历时强降雨敏感性相对较低,对前期有长期低强度降雨,再发生极端降雨的事件非常敏感。

这种现象可能与该区域滑坡主要为浅层土质滑坡有关,滑坡土体在长历时降雨作用下含水率上升,抗剪强度下降,再受强降雨激发容易发生流变现象,导致滑坡失稳。因此该地区在遭受长历时的降雨后,如再次出现强降雨事件需要特别引起关注。

为了验证式阈值模型的准确性和实用性,选取泰顺县 2017 以来的诱发滑坡的 4 次台风降雨事件及未诱发滑坡的 5 次台风降雨事件进行验证。将台风降雨历时代入不同雨型的阈值模型,结果见表 4。通过不同雨型的阈值模型预测了 9 次台风降雨事件是否诱发滑坡,成功 8 次,其中滑坡降雨事件预测成功率 75%,非滑坡降雨事件成功率 100%,预测结果与实际情况较为吻合,表明该模型的可靠性较好,模型可以用于泰顺地区的台风暴雨型滑坡预测预警,该阈值研究思路可为其他台风暴雨区提供借鉴意义。

表 4 阈值模型预测情况
Table 4 Rainfall *I-D* thresholds prediction

年份	台风	诱发滑坡	<i>D/d</i>	<i>I</i> /(mm·d ⁻¹)	雨型	模型阈值/(mm·d ⁻¹)	预测滑坡
2017	纳沙	是	5	63.82	中单峰	69.54	否
2017	海棠	是	3	112.70	中单峰	94.00	是
2018	玛莉亚	是	6	87.10	后单峰	50.53	是
2018	山竹	否	2	60.70	中单峰	100.97	否
2019	利奇马	否	1	98.77	中单峰	179.74	否
2020	黑格比	是	3	85.87	后单峰	78.20	是
2021	烟花	否	5	36.22	中单峰	69.54	否
2022	轩岚诺	否	5	62.90	中单峰	69.54	否
2022	梅花	否	3	75.22	后单峰	94.00	否

4 结论

(1) 台风暴雨型滑坡发育特征与台风、暴雨作用关系密切, 滑坡大量发生在迎风坡, 坡向与台风登陆方向接近, 坡表植被类型多为柳杉、松树、毛竹等树高根浅的乔木和草本植物, 而灌木分布区滑坡发生相对较少, 显示台风荷载对滑坡的不良作用。

(2) 泰顺县受台风降雨的影响一般 2~3 d, 大部分降雨事件在 6 d 内结束, 诱发滑坡的台风降雨过程降雨量多在 200 mm 以上, 且降雨过程非常集中, 而滑坡在降雨集中期同步发生, 一般滞后降雨极值 4~5 h。

(3) 通过对泰顺县降雨量 200 mm 以上的台风降雨进行雨型聚类分析, 雨型可以分为单峰型、双峰型 2 个大类 5 个亚类, 96.7% 的滑坡由单峰型降雨诱发, 其中 47.6% 的滑坡由后单峰型降雨诱发。

(4) 诱发台风暴雨型滑坡的降雨阈值显著高于无台风暴雨影响的地区, 将滑坡与台风降雨事件进行严格筛选后, 诱发滑坡的降雨阈值升高约 48.7%。不同雨型的台风降雨诱发滑坡的阈值存在一定的差异, 随着降雨峰值的后移, 阈值也逐渐降低。说明该地区滑坡对长历时降雨后出现的强降雨事件更加敏感。

(5) 通过模型预测了 9 次台风降雨事件是否诱发滑坡, 预测结果与实际情况比较吻合, 模型可以用于泰顺地区的台风暴雨型滑坡预测预警。

参考文献 (References) :

[1] 宋琨, 陈伦怡, 刘艺梁, 等. 降雨诱发深层老滑坡复活变形的动态作用机制 [J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3665 - 3676. [SONG Kun, CHEN Lunyi, LIU Yiliang, et al. Dynamic mechanism of rain infiltration in deep-seated landslide reactivate deformation[J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3665 - 3676. (in Chinese with English abstract)]

[2] 代贞伟, 李滨, 陈云霞, 等. 三峡大树场镇堆积层滑坡暴雨失稳机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 149 - 156. [DAI Zhenwei, LI Bin, CHEN Yunxia, et al. A study of the failure mechanism of rainfall-induced accumulation landslide in the Three Gorges Reservoir Region[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 149 - 156. (in Chinese with English abstract)]

[3] 孙强, 张泰丽, 伍剑波, 等. SHALSTAB 模型在浙南林流域滑坡预测中的应用 [J]. 华东地质, 2021, 42(4): 383 - 389. [SUN Qiang, ZHANG Taili, WU Jianbo, et al. Application of shallow landslide stability model to landslide prediction in the Linxi River Basin of southern Zhejiang[J]. East China Geology, 2021, 42(4): 383 - 389. (in Chinese with English abstract)]

[4] 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)]

[5] PERUCCACCI S, BRUNETTI M T, GARIANO S L, et al. Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy[J]. *Geomorphology*, 2017, 290: 39 - 57.

[6] CHANG J M, CHEN H, JOU B J D, et al. Characteristics of rainfall intensity, duration, and kinetic energy for landslide triggering in Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2017, 231: 81 - 87.

[7] 张泰丽, 周爱国, 孙强, 等. 台风暴雨条件下滑坡地下水渗流特征及成因机制 [J]. 地球科学, 2017, 42(12): 2354 - 2362. [ZHANG Taili, ZHOU Aiguo, SUN Qiang, et al. Characteristics of the groundwater seepage and failure mechanisms of landslide induced by typhoon

- rainstorm[J]. *Earth Science*, 2017, 42(12): 2354 – 2362. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘艳辉,温铭生,苏永超,等.台风暴雨型地质灾害时空特征及预警效果分析[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(5): 119 – 126. [LIU Yanhui, WEN Mingsheng, SU Yongchao, et al. Characteristics of geo-hazards induced by typhoon rainstorm and evaluation of geo-hazards early warning[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(5): 119 – 126. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 栗倩倩,史绪山,柴波,等.台风-非台风降雨型滑坡的多时段临界雨量值预测模型[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(2): 267 – 273. [LI Qianqian, SHI Xushan, CHAI Bo, et al. Multiduration critical rainfall prediction model for typhoons and non-typhoon rainfall landslides[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(2): 267 – 273. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘明军,王邦贤.浙江省泰顺县地质灾害成因及分布特征浅析[J]. *地下水*, 2017, 39(1): 148 – 150. [LIU Mingjun, WANG Bangxian. Analysis on the causes and distribution characteristics of geological disasters in Taishun County, Zhejiang Province[J]. *Ground Water*, 2017, 39(1): 148 – 150. (in Chinese)]
- [11] 姜建丰,余霖枫,戴益斌.泰顺县台风灾害统计分析[J]. *山西农经*, 2019(12): 112. [JIANG Jianfeng, YU Linfeng, DAI Yibin. Statistical analysis of typhoon disaster in Taishun County[J]. *Shanxi Agricultural Economy*, 2019(12): 112. (in Chinese)]
- [12] 赵阳,倪化勇,伍剑波,等.基于AHP-CF模型的地质灾害易发性评价——以泰顺县仕阳镇为例[J]. *华东地质*, 2021, 42(1): 66 – 75. [ZHAO Yang, NI Huayong, WU Jianbo, et al. Evaluation of geological hazard vulnerability based on AHP-CF model: take Shiyang Town of Taishun County as an example[J]. *East China Geology*, 2021, 42(1): 66 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王凯,齐铎,高丽,等.浙东地形对台风“利奇马”极端降水的影响分析[J]. *气象科学*, 2021, 41(2): 162 – 171. [WANG Kai, QI Duo, GAO Li, et al. Analysis of the effects of the topography of eastern Zhejiang on the extreme precipitation of typhoon “Lekima”[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2021, 41(2): 162 – 171. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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): 1059 – 1079.
- [15] 刘艳辉,刘丽楠.基于诱发机理的降雨型滑坡预警研究——以花岗岩风化壳二元结构斜坡为例[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(4): 542 – 549. [LIU Yanhui, LIU Linan. Rainfall-induced mechanism based early warning model for slopes of dualistic layers in weathered granitic area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(4): 542 – 549. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 孙强,张泰丽,张沙沙,等.基于ARDL模型的滑坡地下水水位预测[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(2): 147 – 152. [SUN Qiang, ZHANG Taili, ZHANG Shasha, et al. Prediction of the landslide water table based on ARDL model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 147 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [17] SUN Q, WU J B, ZHANG T L, et al. Promoting effect of vegetation on the initiation of landslides induced by typhoon rainstorms[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 861(6): 062005.
- [18] 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.
- [19] 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)]
- [20] 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 the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 178 – 182. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 刘樱,杨明,徐集云.杭州市城市暴雨雨型分析研究[J]. *科技通报*, 2021, 37(4): 15 – 22. [LIU Ying, YANG Ming, XU Jiyun. Analysis and study of rainstorm pattern in Hangzhou[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2021, 37(4): 15 – 22. (in Chinese with English abstract)]

编辑:王支农