

基于台风路径追踪的滑坡概率分析

林若昂, 简文彬, 聂 闻

Probability analysis of landslide based on typhoon track

LIN Ruoang, JIAN Wenbin, and NIE Wen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202011036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于失效概率的边坡降雨阈值曲面探讨

Investigation on slope rainfall threshold surface based on failure probability

邓夕胜, 张元, 唐煜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 70-75

基于PFC^{3D}的鱼鳅坡滑坡运动过程分析

Analysis of Yuqiupo landslide motion process based on PFC^{3D}

张家勇, 邹银先, 杨大山 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 33-39

基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China

周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

基于机器学习的区域滑坡危险性评价方法综述

A review of the methods of regional landslide hazard assessment based on machine learning

方然可, 刘艳辉, 黄志全 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 1-8

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

基于贡献率权重模型的川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划

Hazard zonation of large-scale landslides along Sichuan-Tibet Railway based on contributing weights model

边江豪, 李秀珍, 徐瑞池, 王栋 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 84-93



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202011036

林若昂, 简文彬, 聂闻. 基于台风路径追踪的滑坡概率分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 18-27.

LIN Ruoang, JIAN Wenbin, NIE Wen. Probability analysis of landslide based on typhoon track [J].

The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 18-27.

基于台风路径追踪的滑坡概率分析

林若昂^{1,2,3}, 简文彬^{1,2,3}, 聂闻^{1,2,3}

(1. 福州大学岩土与地质工程系, 福建福州 350116; 2. 福建省地质灾害重点实验室, 福建福州 350003; 3. 中国科学院海西研究院泉州装备制造研究所, 福建泉州 362200)

摘要: 台风暴雨是我国东南丘陵山地滑坡的主要诱发因素, 揭示台风路径与滑坡发生的相关关系对东南丘陵山地台风暴雨型土质滑坡监测预警具有重要的理论及实际意义。本文基于 2015—2019 年直接过境福建省或间接对福建省造成影响的台风数据以及与这些台风事件发生期间的降雨量数据和台风暴雨滑坡数据, 运用 ArcGIS 软件中的克里金插值法将台风路径、降雨量数据及台风暴雨滑坡数据进行耦合。再运用 Logistic 回归方法, 通过 SPSS 软件得到泉州市基于台风路径追踪的滑坡发生概率模型。并运用克里金插值法和 Logistic 回归方法, 以台风杜鹃期间的滑坡为实例对所得模型进行验证, 其对实际雨量站测得降雨数据引发滑坡与否的判对概率为 77%, 对实际发生滑坡的判对概率为 100%, 依据实际降雨量计算数据, 其误报率为 21%, 但实际滑坡发生的误报率为 0, 符合安全性。预报效果较为满意, 因此模型可作为在台风经过泉州市时的台风暴雨型滑坡发生概率的预测。

关键词: 台风路径; 克里金插值法; Logistic 回归; 概率模型

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)04-0018-10

Probability analysis of landslide based on typhoon track

LIN Ruoang^{1,2,3}, JIAN Wenbin^{1,2,3}, NIE Wen^{1,2,3}

(1. Department of Geotechnical and Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Geological Hazards, Fuzhou, Fujian 350003, China; 3. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing Haixi Institute, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou, Fujian 362200, China)

Abstract: Typhoon rainstorm is the main inducing factor of landslides in southeast hills and mountains in our country. Revealing the correlation between typhoon path and landslides has important theoretical and practical significance for monitoring and early warning of typhoon-rainstorm soil landslides in southeast hills and mountains. In this paper, based on the typhoon data directly passing through Fujian Province or indirectly affecting Fujian Province from 2015 to 2019, as well as the rainfall data and typhoon-rainstorm landslide data during these typhoon events, the Kriging interpolation method in ArcGIS software is used to couple the typhoon path, rainfall data and typhoon-rainstorm landslide data. Through the logistic regression method in SPSS software, the landslide probability model based on typhoon track in Quanzhou City is obtained. Using Kriging interpolation method and logistic regression method, we take the landslide occurred during typhoon Dujuan as an example to verify the model. The correct probability of landslide caused by rainfall data measured by actual rainfall station is 77%, and the correct probability of actual landslide is 100% with a satisfactory prediction effect. Based on the actual rainfall calculation data, the false alarm rate is 21%, but the actual landslide false alarm rate is 0, which is in line with the safety. Therefore, the model

收稿日期: 2020-11-26; 修订日期: 2020-12-25 投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41861134011; U20052053)

第一作者: 林若昂(1995-), 男, 福建闽侯人, 硕士, 主要从事地质灾害及其防治研究。E-mail: 624376072@qq.com

通讯作者: 简文彬(1963-), 男, 福建永定人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害及其防治研究。E-mail: jwb@fzu.edu.cn

can be used to predict the occurrence probability of typhoon-rainstorm landslides under the influence of typhoon passing through Quanzhou City.

Keywords: typhoon path; Kriging interpolation; logistic regression method; probability model

0 引言

福建省属于典型的台风暴雨影响区域,台风是福建省常见的地质灾害诱发因素之一。福建省山多地少,台风登陆次数多,引起的降雨有雨量大、降雨集中等特点,易造成崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害。其中滑坡灾害为最主要的地质灾害,其特点是灾害地点多、分布广、规模小、以土质滑坡为主。据不完全统计,全省的滑坡灾害点高达千余处,而土质滑坡约占滑坡总数的95%以上^[1]。台风带来的降雨有雨强大、路径性强等特点,在台风登陆当天或过后短时期内,路径范围内易发生群发性小型崩滑塌^[2]。

台风降雨持续时间短、雨强大,因此台风降雨所诱发灾害常呈现出“即雨即滑”的特点^[3]。台风暴雨对滑坡的影响研究是当下的热点,有许多学者对此进行总结和分析^[4-9],涉及台风暴雨条件下的渗流稳定分析、滑坡影响因子分析、降雨对非饱和土稳定性研究等多方面,积累了较为丰富的研究成果。而对于台风暴雨型滑坡的预警研究虽也取得了一定的成果,但还存在预警的准确率低、漏报率高等问题。常见的预警方法有构建降雨与滑坡之间关系的降雨阈值法^[10-12]、基于滑坡检测数据与滑坡勘测数据的数值模拟法^[13-15]以及根据滑坡和降雨历时数据的统计分析法^[16]。开拓新的预警思路,提高预警的效率和准确率对台风暴雨型滑坡的预警研究尤为重要。

文中以泉州市的台风暴雨滑坡为例,结合研究区域2015—2019年的台风数据信息、降雨量数据及滑坡灾害数据进行统计分析。基于2015—2019年间直接登陆或间接对福建省造成影响的台风,追踪其行进路径与降雨的关系,采用ArcGIS软件中的克里金插值法对降雨量进行插值分析。再采用逻辑回归模型计算出泉州市与台风降雨时间上的相关性,对不相关降雨量进行剔除后得到逻辑回归模型。通过此模型来判定台风发生期间由台风降雨所引起滑坡灾害发生的概率,并对台风行进路线中的灾害易发区的滑坡灾害进行预警。

1 滑坡相关数据收集与处理

1.1 研究区台风事件

为了能够得到尽量准确的滑坡降雨资料,文中通过福建省地质灾害防治信息网(<http://112.5.189.8:9300/>

fjdzzh/Business_MvcDzzh/DisasterSiteHomePage/IndexZ)提供的滑坡资料,筛选出2015—2019年直接登陆福建省或者间接对福建省造成影响的台风事件共8起,记录台风相关数据(表1)及台风路径示意图(图1)。同样在该网站收集相关台风所对应引起的灾害数据(图2),剔除掉崩塌、泥石流等非滑坡灾害,剩余共489例台风暴雨型滑坡灾害,将台风路径数据与台风暴雨型滑坡灾害数据导入ArcGIS软件(图3)。

在2015—2019年福建省因台风暴雨引起的486起

表1 台风数据统计表(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Table 1 Statistical Table of typhoon data (Data from Fujian Geological Disaster Prevention and Control Information Network)

台风名称	中心气压/hPa	风速/(m·s ⁻¹)	等级	期间泉州市最大小时降雨量/mm
201508苏迪罗	970	38	13	9
20160709尼伯特	990	25	10	28
20160914莫兰蒂	935	50	15	43
20160929鲶鱼	975	33	12	18
20170730海棠	990	18	8	17
20170731纳沙	975	33	12	21
20180711玛莉亚	960	42	14	8
20190826白鹿	985	25	10	4
201509029杜鹃	971	35	12	45

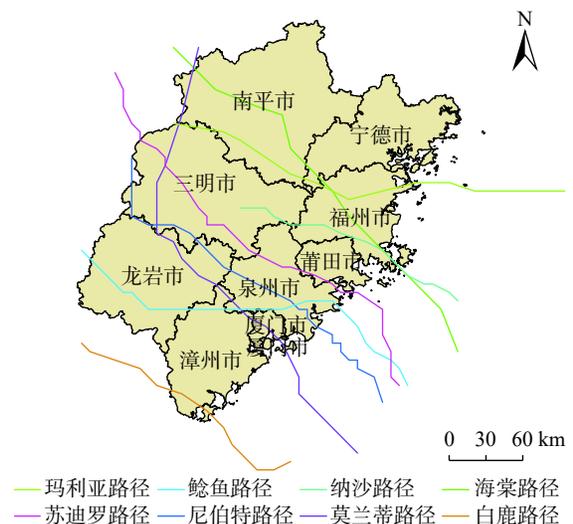


图1 台风路径示意图(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Fig. 1 Schematic diagram of typhoon path (Data from Fujian Geological Disaster Prevention and Control Information Network)

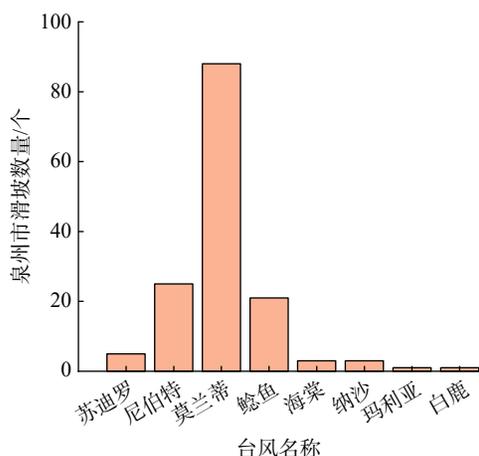


图 2 台风所对应的滑坡数量直方图(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Fig. 2 Histogram of landslides corresponding to typhoon (Data from Fujian Geological Disaster Prevention and Control Information Network)

滑坡灾害中泉州、福州、宁德地区为台风暴雨灾害主要频发地区。其中泉州地区,在所研究的台风发生期间,台风暴雨滑坡灾害发生数量大、发生地区集中、易反复等特点。

1.2 研究区地质环境条件

泉州市地处福建省东南沿海中部,陆域面积 10 866 km²,人口稠密,降雨充沛,暴雨频发。区域内地貌复杂多样,多以山地为主,境内五分之四以上的面积分布为中生代火山岩系和侵入岩,两者出露面积约各占一半,从西北往东南侵入岩分布面积增多成为主体。泉州市处于地质灾害易发区,也是福建省受地质灾害影响最严重的城市之一。

1.3 研究区台风路径与滑坡

泉州地区常年降雨量 1 300 ~ 2 100 mm,每年均有台风登陆或对其造成影响,多发生在 6—9 月份。由于自然地理、地质和气候条件,以及人类频繁的活动^[17],泉州地质灾害频发,尤其是滑坡灾害,对当地的居民造成十分重大的影响,防治形式十分严峻。因此,文中以泉州市与台风暴雨相关的滑坡为主要研究对象,由于降雨诱发滑坡的数据只能精确到日,因此设在某日 0 ~ 24 h 的时间段内发生的滑坡,降雨数据也取该时间段内相对的降雨数据,滑坡发生位置可以精确到各个行政村,则将当日记为一次 P=1 的台风暴雨型滑坡事件(表 2)。

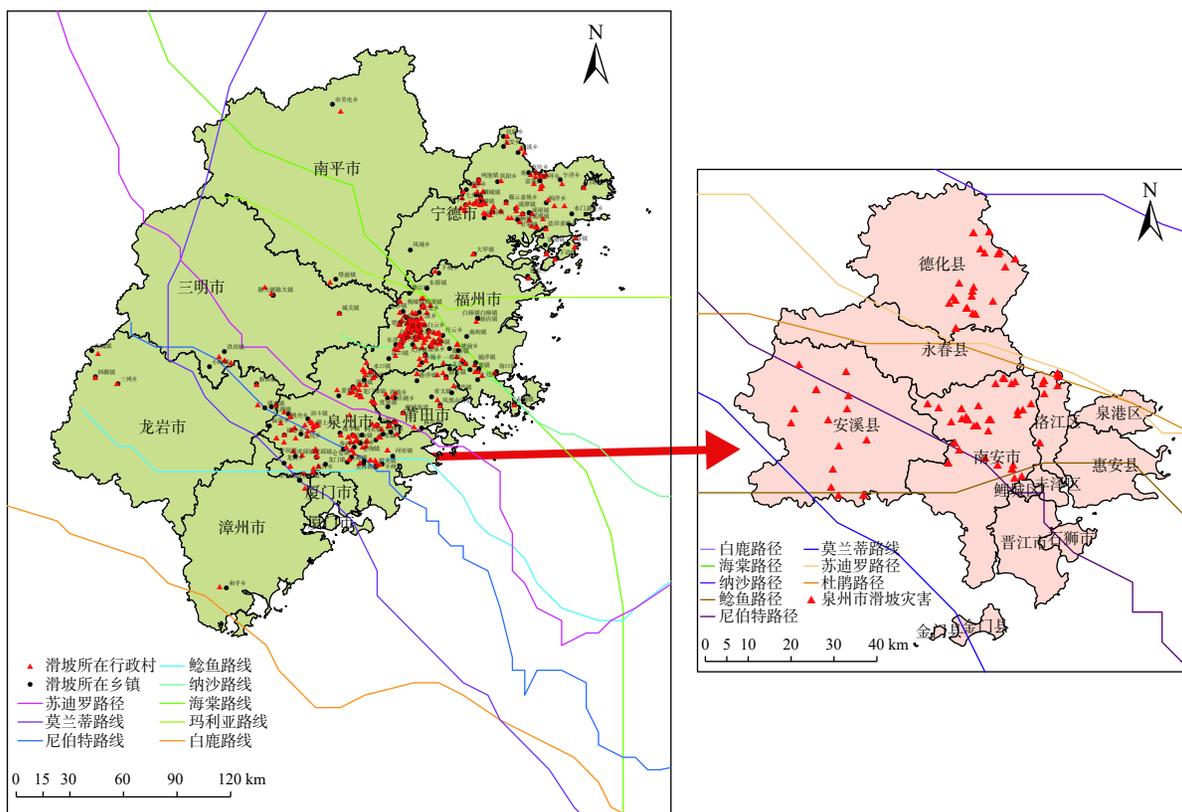


图 3 福建省与泉州市滑坡灾害分布与台风路径关系图(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Fig. 3 Relationship between landslide hazard distribution and typhoon path in Quanzhou and Fujian Province (Data from Fujian Geological Disaster Prevention and Control Information Network)

表 2 泉州市滑坡灾害部分数据(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Table 2 Partial data of landslide disaster in Quanzhou City (Data from Fujian Geological Disaster Prevention and Control Information Network)

序号	滑坡发生地点	发生年月	滑坡个数	滑坡概率
1	泉州市德化县盖德乡	2018年8月	2	$P=1$
2	泉州市安溪湖上乡	2015年9月	17	$P=1$
3	泉州市安溪大坪乡	2016年7月	6	$P=1$
4	泉州市德化县水口镇	2016年7月	2	$P=1$
5	泉州市安溪参内乡	2016年9月	24	$P=1$
6	泉州市德化县雷峰镇	2016年9月	33	$P=1$
7	泉州市洛江区河市镇	2016年9月	13	$P=1$
8	泉州市南安市金淘镇	2016年9月	47	$P=1$
9	泉州市安溪桃州乡	2017年8月	1	$P=1$
10	泉州市洛江区罗溪镇	2017年8月	1	$P=1$

2 基于克里金差值法的降雨量与滑坡的关系分析

2.1 数据整理

通过 Python 获取福建省水力信息网上福建省雨量站的经纬度信息共 2 278 例,与福建省地质灾害防治信息网上下载的泉州市雨量站降雨数据进行配对。剔除泉州市以外的数据和表述模糊的站点信息,最终获得 492 例泉州市雨量站所记录的降雨信息及对应精确坐标。为了使得降雨量精度更高,表达更直观,本文用 ArcGIS 软件中的克里金插值法对每场台风的降雨量数据进行插值分析,再导入台风路径数据与台风暴雨型滑坡位置信息,基于台风移动路径对其沿路的降雨量和滑坡灾害进行分析。

2.2 克里金插值法

克里金插值法主要通过搜索插值降水站点和已知降水站点的空间距离来进行插值计算^[18],计算方程为:

$$Z(S_0) = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^{-P_i}(S_i)}{\sum_{i=1}^N d_i^{-P}} \quad (1)$$

式中: $Z(S_0)$ ——降雨量计算值;

N ——计算采用雨量站点的数量;

d_i ——降雨量插值的雨量站与已知雨量站间的空间距离/km;

P ——计算参数。

$$Z = \sum_{i=1}^N A_i d_i \lg d_i + a + bx + cy \quad (2)$$

式中: $A_i d_i \lg d_i$ ——插值拟合函数的表达式;

$a+bx+cy$ ——插值势函数的表达方程。

2.3 基于台风路径的降雨量与滑坡灾害的位置关系分析

限于篇幅,本文从所研究的台风中选出 3 场比较有代表性的台风进行说明。由于每场台风的历时各不相同,无法对台风历时的降雨量进行统一,因此按各个台风的历时将每场台风以时间尺度均分为台风登陆泉州前、中、后三个时段。

文中选取的三场台风分别为 20160929 号台风鲶鱼、20170930 号台风纳沙以及 20190826 号台风白鹿,分别代表了台风在泉州沿海登陆且路径贯穿泉州市并在泉州市造成大面积强降雨的一类台风、台风登陆地点在福建省其它地区但之后路径刚好与泉州市相切的一类的台风以及台风登陆地点在福建省其它地区且其路径在途径福建省的整个过程中离泉州市较远的一类台风。

20160909 号台风鲶鱼对福建省造成的影响时间约 12 h,将其以 4 h 为分界点划分为台风登陆前、中、后三个阶段。台风鲶鱼登陆泉州市的时候中心气压 975 hPa,风速 33 m/s,为 12 级台风,给泉州市带来大面积强降雨,引发了 7 起台风暴雨滑坡灾害。期间最大地区降雨量为 80 mm/4 h,将 0~80 mm 的降雨量划分为 8 个等级,通过克里金插值法得降雨量划分与滑坡发生位置关系(图 4)。

20170930 号台风纳沙对福建省造成的影响时间约 15 h,将其以 5 h 为分界点划分为台风登陆前、中、后三个阶段。登陆泉州市时台风纳沙中心气压 975 hPa,风速 33 m/s,为 12 级台风,登陆地点为福建省福清市,在登录福建省 7 h 后其路径与泉州市德化县相切,引起以德化县为中心按距离递减的降雨量,引发了 3 起台风暴雨滑坡灾害。期间最大地区降雨量为 60 mm/5 h,将 0~60 mm 的降雨量分为 7 个等级,通过克里金插值法得降雨量划分与滑坡发生位置关系(图 5)。

20190826 台风白鹿对福建省造成的影响时间约 18 h,将其以 6 h 为分界点划分为台风登陆前、中、后三个阶段。台风纳沙中心气压 988 hPa,风速 25 m/s,为 10 级台风,登陆地点为漳州市东山县,途径诏安县、云霄县后离开福建省,台风路径离泉州市较远,只给泉州市的小部分地区带来较小的降雨量,降雨量均低于 10 mm/6 h(图 6)。而台风路径经过的漳州市的降雨量就较为显著,最大累计降雨量为 75 mm/6 h。

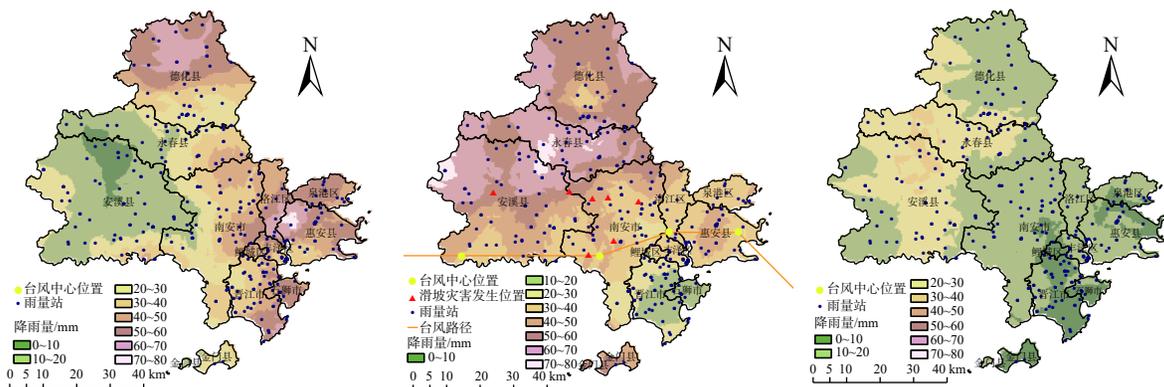


图 4 台风鲛鱼路径经过时泉州地区时 4 h 累计降雨量形成的降雨带与滑坡发生关系(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Fig. 4 The relationship between the precipitation zone formed by the accumulated rainfall in 4 hours in Quanzhou during the passage of Typhoon Megi and the occurrence of landslide (data from the Geological Disaster Prevention information Network of Fujian Province)

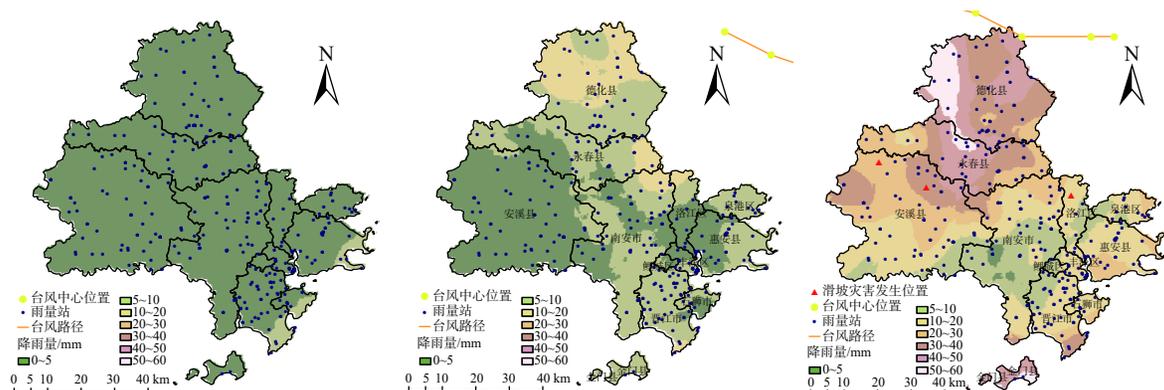


图 5 台风纳沙路径经过时泉州地区时 5 h 累计降雨量形成的降雨带与滑坡发生关系(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Fig. 5 The relationship between the precipitation zone formed by the accumulated rainfall in 5 hours in Quanzhou area during the passage of Typhoon Nesat and the occurrence of landslide (data from the Geological Disaster Prevention and Control Information Network of Fujian Province)

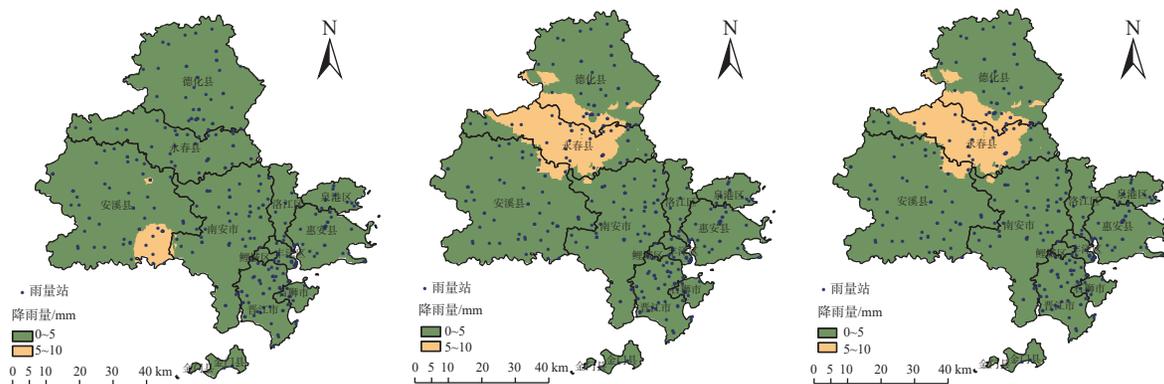


图 6 台风白鹿路径经过时泉州地区时 6 h 累计降雨量形成的降雨带与滑坡发生关系(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Fig. 6 The relationship between the precipitation zone formed by the accumulated rainfall in 6 hours in Quanzhou during the passage of Typhoon White Deer and the occurrence of landslide (data from the Geological Disaster Prevention and Control Information Network of Fujian Province)

2.4 结果分析

台风的路径、中心气压、风速都对降雨量大小有显

著的影响,在中心气压及风速相差不大的情况,降雨有随着台风路径移动的趋势。台风路径影响范围内会出

现大范围的强降雨,且降雨强度有随着距离增加而减弱的趋势。这种跟随台风路径发生的降雨往往有短历时、高强度的特点,容易引发多山地区中浅层边坡的滑塌。

根据对 2015—2019 年登陆福建省的台风路径与台风降雨、台风暴雨型滑坡关系的研究,泉州市的此类滑坡大都发生在台风路径经过泉州地区时,发生的数量与降雨量正相关。当降雨量超过 8.6 mm/h 时有滑坡发生,降雨量超过 17 mm/h 时滑坡灾害发生频率大幅度增加,文中研究区域最大小时降雨量为 41 mm/h,发生在台风莫兰蒂期间,该台风造成了 88 起滑坡。泉州地区滑坡大多集中在安溪县、德化县、南安市等地,具有一地多发、一地频发、易反复的特点。因此,在台风形成的过程中,根据气象部门提供的台风路径、台风中心气压及台风风速等信息,对其路径直接经过的滑坡灾害易发区进行提前防护尤为重要。

3 基于逻辑回归模型的台风暴雨滑坡概率分析

3.1 逻辑回归模型

Logistic 回归模型是一个结合了统计模型和确定性模型的完整模型^[19]。将台风暴雨当日降雨量及滑坡前的降雨量作为自变量,台风暴雨滑坡为因变量建立回归模型,来讨论在台风路径的影响下台风暴雨滑坡的发生概率。

假设在台风降雨自变量影响下发生暴雨型滑坡灾害的概率为 1,不发生的概率为 0。 P 为预测滑坡发生概率,取值范围 $[0,1]$,则 $(1-P)$ 即为预测在台风路径影响下不发生暴雨型滑坡灾害的概率。 $P/(1-P)$ 为滑坡 Logistic 发生比,取其自然对数 $\ln P/(1-P)$ ^[20]。自变量为

X_1, X_2, \dots, X_k , 因变量为 P , 则 Logistic 线性回归函数可以表示为:

$$\ln \frac{P}{1-P} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (3)$$

式中: $\beta_i (i=0, 1, 2, \dots, k)$ 为回归系数。

根据式子,可得:

$$P = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k)} \quad (4)$$

利用式(4)可以预测在台风登陆前后引发的台风暴雨条件下滑坡发生的概率。

3.2 数据处理

将所收集的数据中的崩塌泥石流等灾害进行剔除后,最终筛选出泉州区域内具有确切发生时间、发生地点的暴雨型滑坡个例,共 147 例。经统计,所得到的 147 例滑坡事件中大多数的滑坡均为中浅层滑坡。在筛选出的 8 条台风路径中,直接登陆泉州市的台风 6 起,间接对泉州市产生影响的 2 起。

为了使逻辑回归模型更合理,更好的判定台风降雨与滑坡发生概率的关系,还需摘录 147 例已发生台风暴雨滑坡事件所对应的乡镇在另外 2 起路径未经过泉州市的台风发生时的降雨量形成对照组,同样得到 147 例在台风经过泉州时未在泉州市内引发台风暴雨型滑坡 ($P=0$) 的降雨事件,从而将台风降雨数据扩增至 294 例,使得逻辑回归分析所得的结果更准确。

在降雨因子的选取上,本文选取的降雨因子除了当日的降雨 D_0 外,还需考虑滑坡发生前第 1 日 (D_1)、第 2 日 (D_2)。由于篇幅有限,截取部分数据(表 3)。

表 3 泉州地区部分台风暴雨诱发滑坡数据(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Table 3 Data of typhoon-induced landslides in Quanzhou district (data from the Geological Disaster Prevention and Control Information Network of Fujian Province)

滑坡发生位置	滑坡发生日期	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	滑坡发生概率
德化县盖德乡仙岭村	2015年8月9日	80	167	19.5	0	7.5	27.5	1
德化县南埕镇塔兜村	2015年8月9日	100	122.5	13	0	3	0	1
安溪县湖上乡飞新村	2015年9月29日	106.5	57.5	0.5	1	4	30	1
安溪县虎丘镇福井村	2015年9月29日	126.5	55	0.5	1	22	3	1
德化县盖德乡仙岭村	2019年8月19日	35	12	0	10	5	0	0
德化县南埕镇塔兜村	2019年8月19日	22	0	12.5	0	0	0	0
安溪县湖上乡飞新村	2019年8月19日	10.5	5	1	0	0	1	0
安溪县虎丘镇福井村	2019年8月19日	16	0	0	1	0	0	0

3.3 结果分析

将台风降雨资料导入 SPSS 26.0 软件进行 Logistic

回归分析(表 4)。回归系数越大,表明台风当日的降雨对滑坡的影响越显著,回归系数随距滑坡发生日期数降

低。回归系数小于 0, 说明该日之后的降雨变量对滑坡的影响可以忽略不计。Wald 检验值可以进一步说明降雨因子对台风暴雨滑坡的影响, Wald 检验值越大, 则影响越显著, Wald 检验值大于 3.84 表示拒绝变量不显著的假设, 表明 D_0 、 D_1 、 D_2 的降雨因子对于台风暴雨滑

坡具有一定的影响, 影响程度递减, 而 D_3 、 D_4 、 D_5 的降雨因子对于台风暴雨滑坡的影响不显著, 可以剔除, 从而使得逻辑回归分析更准确。将剔除后的数据再进行一次逻辑回归分析(表 5), 得到更加符合泉州市基于台风路径的滑坡灾害概率预警模型。

表 4 逻辑回归方程相关统计量(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Table 4 Correlation statistics of logistic regression equation (data from the Geological Disaster Prevention and Control Information Network of Fujian Province)

降雨变量	回归系数	标准误差	Wald 检验值	自由度	显著性水平	期望值
D_0	0.142	0.025	32.394	1	0.000	1.152
D_1	0.032	0.032	11.006	1	0.316	1.033
D_2	0.222	0.081	7.591	1	0.006	1.249
D_3	-0.3735	0.413	0.816	1	0.366	0.689
D_4	-0.71	0.078	0.840	1	0.359	0.931
D_5	0.113	0.067	2.876	1	0.090	1.119
常量	-12.082	2.261	28.558	1	0.000	0.000

表 5 筛除不相关数据后的逻辑回归方程相关统计量(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Table 5 Logistic regression equation correlation statistics after filtering out irrelevant data (data from the Geological Disaster Prevention and Control Information Network of Fujian Province)

降雨变量	回归系数	标准误差	Wald 检验值	自由度	显著性水平	期望值
D_0	0.217	0.058	13.832	1	0.000	1.242
D_1	0.039	0.027	3.137	1	0.077	1.040
D_2	0.149	0.026	33.493	1	0.000	1.161
常量	-12.856	2.292	31.451	1	0.000	0.000

对 Logistic 回归模型效果进行评价, 分析其准确性。设概率 $P=0.8$ 为预测模型滑坡发生与否的临界点, 将降雨自变量数据代入预测模型, 所得预测值大于 0.8 便认为在此降雨工况中会发生滑坡, 小于 0.8 则认为不发生。将样本计算出的结果与实际发生滑坡与否的数据进行比较(表 6)。

表 6 模型预测分类表(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Table 6 Model prediction classification table (data from the Geological Disaster Prevention and Control Information Network of Fujian Province)

实际滑坡数据	预测值			百分比矫正/%
	滑坡是否发生			
	0	1		
滑坡是否发生	0	124	23	84.4
	1	5	142	96.6
总百分比				90.5

经过检验, 当降雨量因子组合为 D_0 、 D_1 和 D_2 时, 实际发生的 147 个台风降雨引起的台风暴雨滑坡组合中

通过逻辑回归方法判断成功了 142 个, 失败了 5 个, 判对率 96.6%; 没有发生滑坡的判对率是 84.4%, 整个模型的综合判对率为 90.5%。考虑到此次逻辑回归模型是针对整个泉州市, 地质跨越相对较大, 因此可认为本次预测模型相对准确。

将表 4 中降雨因子 D_0 、 D_1 、 D_2 的逻辑回归系数及常数项数据回代到式(4)中, 得到在台风路径范围内基于 Logistic 回归模型的泉州地区台风暴雨条件下的台风暴雨型滑坡发生概率模型。

$$P = \frac{\exp(0.217D_0 + 0.039D_1 + 0.149D_2 - 12.856)}{1 + \exp(0.217D_0 + 0.039D_1 + 0.149D_2 - 12.856)} \quad (5)$$

式中: P ——预测滑坡发生概率;

D_0 ——当日降雨量;

$D(i=1,2)$ ——据滑坡发生前第 1, 2 天的降雨量。

由公式(5)可知, 在泉州市地质环境条件下, 当日降雨 D_0 的相关系数最大为 0.217, 可见台风登陆当天的降雨对滑坡的影响最为显著, 前期降雨 D_1 、 D_2 对滑坡也有

一点的影响,但影响较小。泉州地区的台风暴雨型滑坡多为在前期降雨 D_1 、 D_2 影响后,在当日降雨 D_0 发生时段发生。

4 实例检验

为了进一步研究台风路径、台风降雨及台风暴雨型滑坡之间的关系,也为了验证公式(5)的实用性和预报准确性,文中留用 20150929 号台风杜鹃作为检验对

象,其对福建省造成影响的时间约为 12 h,以 4 h 为分界点划分为台风登陆前、中、后三个阶段。台风杜鹃登陆泉州市时中心气压 971 hPa,风速 35 m/s,为 12 级台风,在泉州市带来大面积强降雨,引发了 17 起台风暴雨滑坡灾害。期间最大地区降雨量 45 mm/4 h,以 0~45 mm 的降雨量分为 9 个阶级,通过克里金插值法得降雨量划分与滑坡发生位置关系(图 7)。

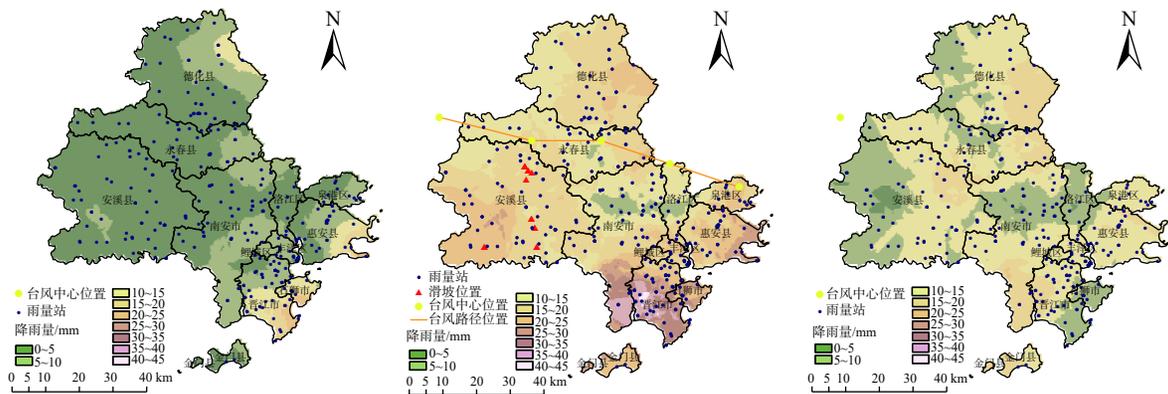


图 7 台风杜鹃路径经过时泉州地区时 4 小时累计降雨量形成的降雨带与滑坡发生关系(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Fig. 7 The relationship between the precipitation zone formed by the cumulative rainfall of 4 hours in Quanzhou during the passage of Typhoon Dujuan and the occurrence of landslide (data from the Geological Disaster Prevention and Control Information Network of Fujian Province)

在台风杜鹃路径进入泉州市前,泉州市大部分地区未发生降雨,靠近台风中心位置的边缘区域如晋江市、惠安县等先开始降雨。当台风杜鹃路径贯穿泉州市时,泉州各地区发生大面积的降雨。晋江市、德化县、安溪县降雨作用较为显著。安溪县作为泉州市滑坡灾害易发区,在台风路径登陆期间最高降雨量为 32 mm/4 h,引发了 16 起滑坡事件。可见,例如安溪县这样的滑坡敏感区域,在台风路径经过并引起大面积降雨期间,极易发生滑坡灾害,滑坡灾害集中分布在湖上乡、虎邱镇、龙涓乡与龙门镇,发生地点集中,发生频率快,易反复。

以 $P>0.8$ 作为判定滑坡发生与否的分界线对实测的 745 个雨量站的降雨量数据进行判定,筛除滑坡发生地点附近的雨量站的数据共 36 个,剩余 709 个实际降雨数据。 $P>0.8$ 的降雨事件有 165 个, $P\leq 0.8$ 的降雨事件有 544 个,对滑坡不发生的概率的正确率为 77%。对于已发生滑坡的预测率为 100%(表 7)。依据实际降雨量计算数据,其误报率为 21%,但实际滑坡发生的误报率为 0,符合安全性。因此,可以认为基于式(5)对台风

路径沿路的滑坡进行概率预警有一定的准确性和实用性。

表 7 台风杜鹃滑坡预测分类表(资料来源于福建省地质灾害防治信息网)

Table 7 Typhoon Dujuan landslide forecast classification table (data from the Geological Disaster Prevention and Control Information Network of Fujian Province)

	总数	$P\leq 0.8$	$P>0.8$	计算准确率/%
依据实际雨量计算	709	544	165	77
实际发生滑坡数量	17	0	17	100
预测发生滑坡数	165	0	165	-
预测滑坡涉及乡镇	25	0	25	68

5 结论

(1)通过整理 2015—2019 年路径直接经过或间接影响泉州市的台风,将台风路径数据、降雨量数据及台风暴雨型滑坡灾害数据导入到 ArcGIS 10.6 软件中,利用克里金插值法对三者关系进行分析。由分析可得,台风暴雨引发滑坡与台风路径降雨的大小和与台风沿路的距离有直接关系。台风路径沿线台风暴雨型滑坡灾

害发生的概率更大,且与台风沿路的距离越近,发生滑坡灾害的概率越大;台风暴雨型滑坡发生的概率随降雨量的增加而增大。

(2)运用 Logistic 回归方法,通过 SPSS 26.0 软件获得基于 Logistic 回归的泉州地区台风暴雨型滑坡的预测模型。泉州市台风暴雨滑坡与降雨因子 D_0 、 D_1 、 D_2 有关,将降雨因子带入逻辑回归公式得到基于台风路径的滑坡预警概率模型。

(3)运用所得模型对 20150929 号台风杜鹃进行实例验证,将其台风路径数据、降雨量数据及滑坡数据导入至 ArcGIS10.6。台风发生期间,在大面积的强降雨作用下,极易引起台风路径周边的滑坡灾害易发区发生滑坡事件,且滑坡事件具有发生地点集中,发生频率快的特点。用 SPSS 26.0 软件以 $P>0.8$ 作为判定滑坡发生与否的分界线对实测的 745 个降雨量进行判定,对滑坡不发生的判对概率为 77%,对滑坡发生的判对概率为 100%。

(4)由于客观因素的限制,例如可获取的资料有限,只能在网站上摘录 2015 年以后的降雨量数据,所以文中只能对 2015—2019 年的台风降雨数据进行分析;有些雨量站点的名称不全面,导致无法取得与其相对应的具体坐标;文中主要针对泉州市台风暴雨型滑坡的概率进行预测,在模型的使用上具有一定的局限性和偏差,需要进一步收集大量大台风暴雨数据与滑坡灾害数据对模型试验加以修正与完善。

参考文献(References):

- [1] 何永金.福建省主要地质灾害的特点、成因及其对策[J].福建地质,1995,14(4):263-271. [HE Yongjin. Characteristics and mechanism of major geological hazards in Fujian Province and protection and controlling method against them [J]. Geology of Fujian, 1995, 14(4): 263-271. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 池永翔.福建省台风暴雨条件下滑坡规律性研究[J].地质学刊,2015,39(4):697-701. [CHI Yongxiang. Regularities of landslides under typhoon rainstorm conditions in Fujian Province [J]. Journal of Geology, 2015, 39(4): 697-701. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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)]
- [4] 林兴旺,简文彬,董岩松,等.台风暴雨条件下福建某滑坡体的渗流稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(5):66-72. [LIN Xingwang, JIAN Wenbin, DONG Yansong, et al. Analysis of seepage stability of a landslide in Fujian under typhoon storm condition [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(5): 66-72. (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] 黄晓虎,夏俊宝,雷德鑫.一种基于位移监测的“降雨阶跃型”滑坡预警系统[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(6):68-76. [HUANG Xiaohu, XIA Junbao, LEI Dexin. An early warning system for rainfall stepwise landslide based on deformation monitoring [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(6): 68-76. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 薛源,赵其华.温州地区台风引发地质灾害影响因子分析[J].灾害学,2014,29(2):72-76. [XUE Yuan, ZHAO Qihua. Analysis on factors of geological hazard induced by typhoon in Wenzhou [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 72-76. (in Chinese with English abstract)]
- [8] CHEN C Y, WILLETT S D, WEST A J, et al. The impact of storm-triggered landslides on sediment dynamics and catchment-wide denudation rates in the southern Central Range of Taiwan following the extreme rainfall event of Typhoon Morakot [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(3): 548-564.
- [9] 张玉,徐卫亚,邹丽芳,等.降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(3):833-841. [ZHANG Yu, XU Weiya, ZOU Lifang, et al. Analysis of seepage stability of large-scale landslide under rainfall condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 833-841. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 胡涛,樊鑫,李获,等.贵州省思南县降雨型滑坡危险性预警研究[J].安全与环境工程,2020,27(3):74-81. [HU Tao, FAN Xin, LI Di, et al. Rainfall-induced landslide hazard warning study in Sinan County of Guizhou Province [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(3): 74-81. (in Chinese with English abstract)]
- [11] MENDONÇA M B, GONZALEZ F C G, SILVA COELHO G V. Likelihood of landslide occurrences for definition of rainfall thresholds applied to the Quitandinha River basin, Petrópolis,

- Brazil [J]. *Landslides*, 2021, 18(2): 583 – 593.
- [12] 向小龙,孙炜锋,谭成轩,等.降雨型滑坡失稳概率计算方法 [J]. *地质通报*, 2020, 39(7): 1115 – 1120. [XIANG Xiaolong, SUN Weifeng, TAN Chengxuan, et al. A discussion on the calculation method of instability probability of landslide due to rainfall [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(7): 1115 – 1120. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 卓万生.雨强对安溪县尧山村滑坡地下水渗流系统及稳定性的影响研究 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1311 – 1318. [ZHUO Wansheng. Influence on groundwater seepage system and stability of landslide under rainfall in Yaoshan Village, Anxi County [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1311 – 1318. (in Chinese with English abstract)]
- [14] CHEN P, LU N, FORMETTA G, et al. Tropical storm-induced landslide potential using combined field monitoring and numerical modeling [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(11): 05018002.
- [15] 朱元甲,贺拿,钟卫,等.间歇型降雨作用下缓倾滑坡稳定性数值模拟 [J]. *灾害学*, 2020, 35(3): 208 – 212. [ZHU Yuanjia, HE Na, ZHONG Wei, et al. Numerical simulation of the stability of gently landslides under intermittent rainfall [J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(3): 208 – 212. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 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)]
- [17] 陈佳松.泉州市地质灾害现状分析与防治建议 [J]. *福建地质*, 2010, 29(增刊1): 111 – 114. [CHENJiasong. Analysis of geologic hazard and cure measures in the Quanzhou City [J]. *Geology of Fujian*, 2010, 29(Sup 1): 111 – 114. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 田晓璐.太行山地形影响下的新乡市夏季降水分布特征 [J]. *农业与技术*, 2017, 37(14): 217 – 218. [TIAN Xiaolu. Distribution characteristics of summer precipitation in Xinxiang City under the influence of topography of Taihang mountain [J]. *Agriculture and Technology*, 2017, 37(14): 217 – 218. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 唐红梅,魏来,高阳华,等.基于逻辑回归的重庆地区降雨型滑坡预报模型 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(3): 32 – 37. [TANG Hongmei, WEI Lai, GAO Yanghua, et al. A prediction model for rainfall-induced landslide based on logistic regression in Chongqing area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(3): 32 – 37. (in Chinese with English abstract)]