

台风暴雨型滑坡滞后效应分析

栗倩倩, 王伟, 黄亮, 柴波, 高乐

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

LI Qianqian, WANG Wei, HUANG Liang, CHAI Bo, and GAO Le

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202110018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

季节性冻土区滑坡防治工程的冻融效应分析

Analysis on the effect of freeze-thaw on landslide prevention projects in seasonal frozen soil area

杨栋, 王全成, 姜昭群 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 82-89

台风强降雨及雨后泥石流对广东高州水库生态环境的影响

§{suggestArticle.titleEn}

周文婷, 邵瑞华, 张雅洲, 马千里, 胡艳芳, 冼宪恒, 苟婷, 许振成, 赵学敏 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(3): 60-69

基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53

甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123



DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202110018

栗倩倩, 王伟, 黄亮, 等. 台风暴雨型滑坡滞后效应分析——以浙江青田县“利奇马”台风为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 10-19.

LI Qianqian, WANG Wei, HUANG Liang, *et al.* Analysis on lag effect of typhoon-induced landslide: A case study of typhoon “Lekima” in Qingtian County, Zhejiang Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 10-19.

台风暴雨型滑坡滞后效应分析 ——以浙江青田县“利奇马”台风为例

栗倩倩¹, 王伟¹, 黄亮², 柴波¹, 高乐³

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中南勘察基础工程有限公司, 湖北 武汉 430081; 3. 中化地质矿山总局浙江地质勘查院, 浙江 杭州 310002)

摘要:我国东南沿海地区台风登陆频繁, 伴生暴雨诱发的台风型滑坡造成了严重的经济损失和人员伤亡。已有研究在单峰型、多峰型台风暴雨的斜坡水文响应过程及稳定性分析方面取得了一定成果, 但缺乏对台风暴雨型滑坡滞后效应的研究和机理分析。为此, 以台风“利奇马”在浙江青田县的登陆为例, 基于对台风型滑坡发生数量与降雨量的统计, 构建 16 组不同结构组合的斜坡模型, 模拟在台风登陆过程中不同降雨工况条件下斜坡的渗流—稳定性变化。结果表明, 台风“利奇马”离陆后青田县内仍有 26.4% 的滑坡发生, 存在一定滞后; 不同结构组合斜坡稳定性在离陆后最低, 相较于台风登陆前稳定性系数降低了 13.82%; 在台风登陆暴雨作用下, 青田县斜坡稳定性结构影响参数中坡度最为敏感; 讨论认为在台风不同登陆阶段的降雨会导致边坡的入渗特征差异, 从而形成滞后效应。研究结论对于该区域的台风型滑坡早期识别具有一定指导意义。

关键词:台风; “利奇马”; 台风型滑坡; 滞后效应; 青田

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)06-0010-10

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

LI Qianqian¹, WANG Wei¹, HUANG Liang², CHAI Bo¹, GAO Le³

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Central South Exploration & Foundation Engineering Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430081, China; 3. Zhejiang Geological Prospecting Institute of CCGMB, Hangzhou, Zhejiang 310002, China)

Abstract: Typhoon landing is frequent in the southeast coastal areas of China, and the typhoon-induced landslide caused by associated rainstorms has caused serious economic losses and casualties. Some studies have made some achievements in the slope hydrological response process and stability analysis of single-peak and multi-peaks typhoon rainstorms, but research on mechanism analysis on the hysteresis effect of typhoon-induced landslide is lacked. Therefore, taking “Lekima” in Qingtian county, Zhejiang Province as an example, based on the statistics of the number and rainfall of typhoon-type landslides, this

收稿日期: 2021-10-21; 修订日期: 2022-02-13

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702304); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUG2106304)

第一作者: 栗倩倩(1998-), 女, 云南大理人, 环境科学与工程专业, 硕士研究生, 主要从事岩土-水文-生态耦合过程及作用机制研究工作。E-mail: qianli@cug.edu.cn

通讯作者: 柴波(1981-), 男, 内蒙古赤峰人, 地质工程专业, 博士, 教授, 主要从事岩土工程和环境地质方面的教学与研究工作。

E-mail: chaibo@cug.edu.cn

paper constructs 16 groups of slope models with different structural combinations to simulate the seepage-stability changes of slopes under different rainfall conditions during the landing of a typhoon. The results show that there are still 26.4% landslides in Qingtian county after typhoon “Lekima” left the land, which is lagging. The stability of slopes with different structural combinations is the lowest after landing, which is 13.82% lower than that before typhoon landing. Under the action of typhoon landing rainstorm, the slope is the most sensitive among the influencing parameters of slope stability structure in Qingtian county. It is considered that rainfall at different landing stages of the typhoon will lead to the difference of infiltration characteristics of the slope, thus forming a hysteresis effect. The conclusion has a certain guiding significance for the early identification of typhoon-induced landslides in this area.

Keywords: typhoon; “Lekima”; typhoon-induced landslide; lag effect; Qingtian

0 引言

台风,一种热带气旋,是仅次于地震的高危高频自然灾害^[1-3]。强台风携带着巨大能量,登陆时常引发一系列气象-水文-地质灾害事件,造成严重社会经济损失和人员伤亡^[4]。我国位于太平洋西岸,大陆海岸线总长 1.84 万 Km,据中国台风网资料统计分析,在 1949—2019 年,我国平均每年有 9 次台风登陆^[5],浙江、福建、上海、江苏等省份既是沿海经济带、海上丝绸之路关键带,也是台风登陆影响的主要地带。

台风衍生灾害台风型滑坡是造成建筑损害和人员伤亡的主要原因,1996 年 7 月,台风“Herb”在台湾触发滑坡 1 315 处,致使 600 余人伤亡,经济损失超 10 亿美元^[6];2005 年 8 月,台风“苏迪罗”诱发滑坡造成浙江省直接经济损失 2 838.1 万元,威胁人口 4 616 人^[7];2009 年,台风“莫拉克”浙江泰顺县诱发了 18 000 m³ 滑坡,冲毁下方 7 间民房,伤亡 6 人^[8]。台风暴雨是诱发台风型滑坡的关键因素^[9],其具有历时短、路径性强、雨量集中的特点^[10],与普通降雨具有显著区别。以往研究认为降雨特征的不同是造成普通降雨型滑坡和台风型滑坡两者差异的主要原因。

近年来,相关专家学者就台风暴雨与滑坡灾害发生之间展开了深入的研究调查,包括台风暴雨诱发滑坡灾害成因机制^[11]、台风型滑坡临界降雨量^[12]、台风暴雨条件下滑坡稳定性影响因素^[13]、台风型滑坡预警模型^[14]等方面。沈佳等^[15]将室内相似物理实验模型和数值模拟分析结合,把台风暴雨型滑坡演化过程总结概括为 3 个阶段;唐新华^[12]通过对福建省历史台风特征统计调查,分析了台风型滑坡发生的外在因素规律性;张泰丽等^[16]通过室内滑坡物理力学模型,归纳总结了台风暴雨条件下滑坡的变形破坏特征,发现台风暴雨渗流特征与滑坡的失稳密切相关;Lo 等^[17]利用三维离散元程序 PFC^{3D},重现了小林村台风型滑坡的运动破坏过程;Yu

等^[18]根据台风“百合”在台北市引起的 427 处滑坡事件,提出了一种基于降雨-地貌-地质特征的台风型滑坡分区方法;刘艳辉等^[19]提出了基于“命中率、漏报率和空报率”三指标的台风型滑坡预警校验法,验证精度较高。研究成果涉及领域较广,但却缺乏对台风型滑坡发生时间的系统性深入讨论研究。

2019 年 8 月 10 日 1 时,0919 号台风“利奇马”在浙江温岭登陆,导致多省市 1 400 万人口受灾,直接经济损失约 653 亿元^[20]。基于统计发现,在此次台风暴雨影响作用下,所诱发的滑坡发生存在一定时间滞后,为此文章通过构建不同结构组合的斜坡模型,模拟台风登陆过程中不同降雨工况条件,得出斜坡的稳定性系数变化情况,研究该区域台风型滑坡的滞后效应,讨论分析相关成因机理,对台风型滑坡开展早期识别及预警预报有一定的参考意义。

1 研究区域概况

1.1 区域背景

青田县位于浙江省东南部,属中亚热带季风气候带,年平均气温 18.5 °C,多年平均降雨量为 1 956 mm。河流多属山区性河流,河床坡降大,水位涨落迅速,冲刷力强,每遇暴雨,水位陡涨陡落,在强降雨时易形成洪水,属台风严重影响区。

总体地势西高东低,以切割强烈的流水侵蚀地貌为主;地层发育简单,主要出露侏罗系、白垩系、第四系地层和燕山早晚两期侵入岩;构造形迹以断裂为主,褶皱不发育,对地形地貌格局起着重要的控制作用;地下水以大气降水垂向入渗补给为主,以及线状地表间歇性溪流、沟谷流水的补给。

1.2 地质灾害现状

受山高坡陡、残积物多、地形地貌条件复杂、地质构造发育、环境条件脆弱等多方不良因素影响,青田县地质灾害易发区面积达 98.85%,近年来地质灾害发生

数量持续增长,且具有点多面广、突发性强、危害性大的特点。

滑坡是青田县最主要的地质灾害,统计 2009—2019 年青田县滑坡发生数量和降雨数据,发现滑坡的发生与降雨季节性、台风汛期具有一致性(图 1)。1996 年 8 月第 8 号台风期间共发生滑坡灾害 17 处^[21];2015 年 8 月 8 日,1513 号台风“苏迪罗”期间引发多地泥石流和山体塌方;2015 年 9 月 23 日,1521 号台风“杜鹃”特大暴雨诱发滑坡灾害 10 余处。

2 台风概况

2.1 0919 号台风“利奇马”

如图 2 所示,2019 年 8 月 4 日 17 时台风“利奇马”在太平洋洋面上生成^[22],10 日 1 时在我国浙江省温岭城南镇沿海登陆,最大风力达 16 级;11 日 20 时在山东

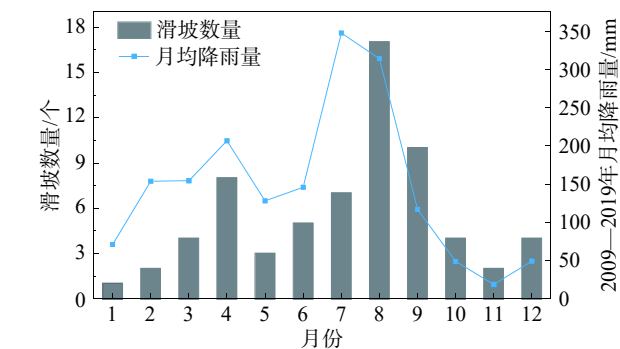


图 1 2009—2019 年月均降雨量与滑坡发生数量

Fig. 1 The average monthly rainfall and the number of landslides during the year 2009 to 2019

省青岛黄岛区再次登陆,强度逐渐减弱;15 日已完全消散。

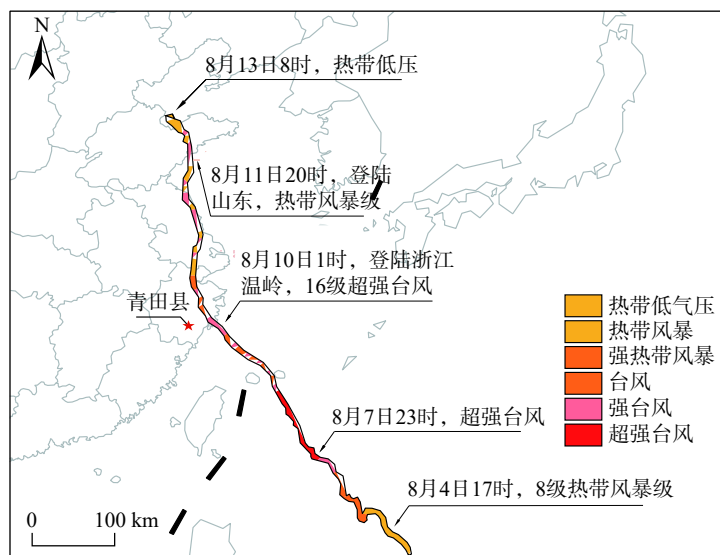


图 2 台风“利奇马”路径

Fig. 2 Path of typhoon “Lekima”

2.2 降雨特征

台风“利奇马”具有陆上滞留时间长、影响范围广、持续降雨时间长、降雨过程强度大、灾害损失严重等特点^[20]。据台风灾害风险评估模型统计显示,其风雨综合强度指数为 1961 年以来最高^[23]。受其影响,浙江省内多地破历史台风过程雨量历史纪录,降雨强度超百年一遇,是一次典型的台风大暴雨过程(图 3),主体降雨时间为登陆 1 d 内^[24]。台风“利奇马”诱发了多处洪涝和山体滑坡灾害,据不完全统计^[20],台风“利奇马”共造成 1 400 万人口受灾,70 人死亡失踪,直接经济损失 515 亿元。

2.3 台风诱发滑坡特征

台风“利奇马”登陆前期青田县一直处于连续降雨阶段,随着台风登陆时伴随的暴雨,共引发了县内 15 处滑坡灾害,滑坡分布如图 4 所示。所引发滑坡点及所在自然斜坡面多为低山丘陵,少量侵蚀堆积,地形坡度较陡;主要出露第四系残坡积层(含碎石粉质粘土)及白垩系下西山头组(K_1x)凝灰岩;无显著地表水系分布;滑坡体积均在 250 m^3 及其以下,属小规模滑坡,影响程度、范围小;斜坡坡度集中于 $30^\circ \sim 40^\circ$,以人工切坡为主。

在台风“利奇马”离陆后仍有 4 处坡体发生滑动,占本次台风降雨型滑坡发生总数的 26.4%(表 1)。可认为

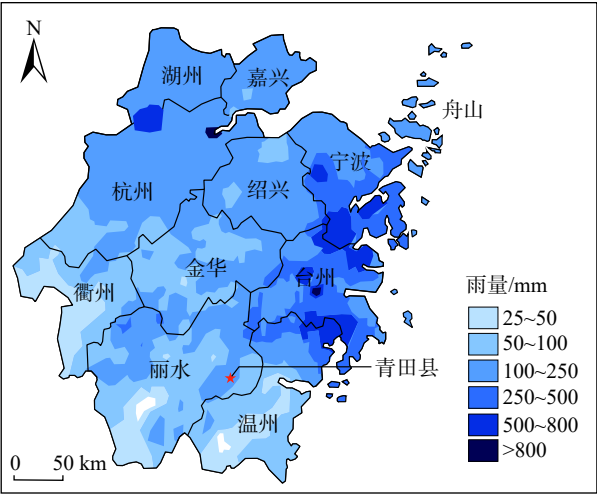


图3 台风“利奇马”雨量分布

Fig. 3 Rainfall distribution of typhoon “Lekima”

青田县内滑坡灾害在台风暴雨条件下存在一定程度的滞后效应。进一步对登陆期间滑坡斜坡结构和规模的统计(表2), 在台风登陆前所发生滑坡的体积在2~250 m³, 坡度40°~70°; 而离陆后方量集中分布于30~100 m³, 坡度在30°~45°, 规模均属小型, 坡度和第四系残坡积物层厚存在显著差异。

3 台风型滑坡滞后效应模拟分析

根据青田县内由于台风“利奇马”降雨诱发滑坡灾害的野外调查情况, 结合历史降雨和滑坡资料, 设计台风登陆的完整降雨过程, 模拟分析其中不同降雨工况下的斜坡稳定性状态。针对青田县台风型滑坡的滞后效应展开研究, 讨论该区域内台风型滑坡滞后效应的成因机理。

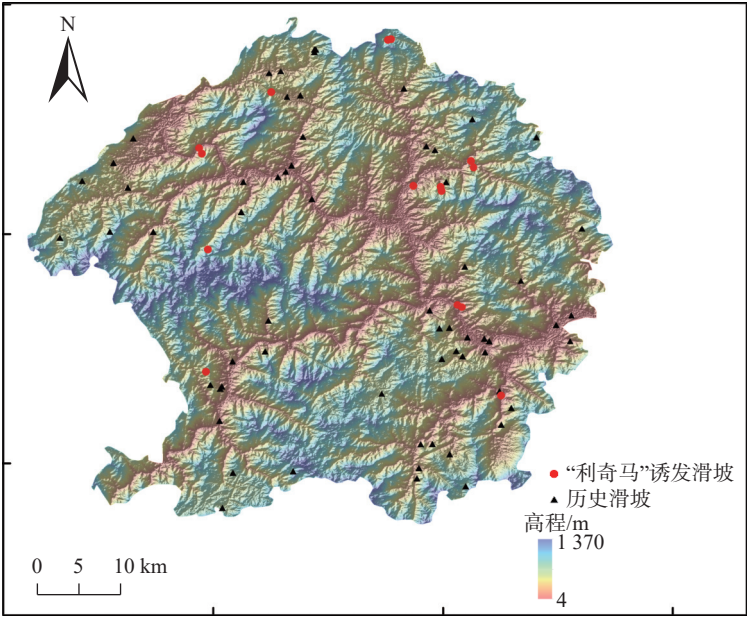


图4 浙江青田县台风“利奇马”诱发滑坡分布图

Fig. 4 Distribution map of typhoon “Lekima” induced landslides in Qingtian County, Zhejiang Province

表1 台风“利奇马”登陆期间降雨量和滑坡数量

Table 1 Distribution of rainfall and landslides during the landing processes of typhoon “Lekima”

登陆期	滑坡数量	占总滑坡发生数/%	总降雨量/%
登陆时	8	53.3	51.81
离陆后	4	26.4	28.53

3.1 模型设计

通过对历史滑坡灾害资料统计显示, 青田县滑坡发育的内在条件主要有地形地貌、地层岩性、岩土结构、坡体地下水位、植被覆盖度; 外部诱发因素为人类工程活动及降雨。综合比对分析, 选取坡度、地层岩性-表层

第四系残坡积物厚度、地下水位高度作为主要影响参数。

据表2统计, 台风离陆后发生的滑坡坡度主要在30°~45°, 以5°等间距划分; 滑体表层的第四系残坡积物厚度范围1.0~3.5 m, 按1 m、2 m、3 m划分; 由于滑体岩土层、地表水系差异引起的地下水位高度不同, 将起始地下水位按照坡体高度的1/3、1/2、2/3划分(表3)。结合青田县台风“利奇马”的登陆、降雨特征, 通过影响因素的正交设计分组(表4), 组合建立16组不同斜坡结构模型, 模拟一次为期10 d的台风登陆过程(图5)。雨量值基于台风“利奇马”期间的青田县实时降雨数据, 同时为减少模拟过程中出现误差, 优化完善了10 d

表 2 台风“利奇马”登陆期间滑坡地貌和结构

Table 2 Landslide landform and structure during the landing of typhoon “Lekima”

序号	登陆期	发生日期	位置	体积/m ³	主滑方向/(°)	滑坡坡度/(°)	第四系残坡积物层厚/m
1	登陆时	2019-08-10	祯埠镇兆庄村	30	260	70	0.3~2.5
2		2019-08-10	季宅乡潘山村	2	51	55	0.5~3
3		2019-08-10	季宅乡潘山村	40	182	70	3~4
4		2019-08-10	鹤城街道北岸村	250	209	40	2~5
5		2019-08-10	东源镇红光村	40	205	70	3~5
6		2019-08-10	祯埠镇锦水村	200	136	65	1~3
7		2019-08-10	东源镇后降村	15	120	55	0.5
8		2019-08-10	东源镇平桥村	20	115	60	0.5~1
9	离陆后	2019-08-12	山口镇板石小区	30	100	30	1~2
10		2019-08-13	鹤城街道北岸村	50	150	45	1.5~3
11		2019-08-14	祯埠镇锦水村	100	65	40	1~3
12		2019-08-14	东源镇平桥村	80	209	45	3

台风登陆中的雨量值,其主体呈单峰型,前期无降雨,第 1 天时开始 20 mm/h 低强度降雨 48 h, 100 mm/h 峰值降雨 1 h,随后雨量快速减弱,在第 7 天时降雨停止至第 10 天。选取前期无降雨工况 1 作为样本组,登陆前期开始低强度降雨 1 h 和持续 48 h、登陆时的暴雨 1 h、离陆暴雨后 48 h 四种降雨工况作为工况 2-5 对比组,模拟得出五种不同降雨工况下斜坡的稳定性系数(F_s)。

表 3 影响因素划分

Table 3 Influencing factors and their divisions

影响因素	A		B		C	
	坡度/(°)		地下水位线		第四系残坡积物层厚/m	
设计数量	4		3		3	
设计值	A1	30	B1	1/3	C1	1
	A2	35	B2	1/2	C2	2
	A3	40	B3	2/3	C3	3
	A4	45				

表 4 影响因素正交设计表

Table 4 Table of orthogonal design for different influencing factors

组号	A	B	C	组号	A	B	C	组号	A	B	C	组号	A	B	C
1	A1	B1	C1	5	A2	B1	C1	9	A3	B1	C1	13	A4	B1	C1
2	A1	B1	C3	6	A2	B1	C2	10	A3	B1	C2	14	A4	B1	C3
3	A1	B2	C1	7	A2	B2	C1	11	A3	B2	C3	15	A4	B2	C2
4	A1	B3	C2	8	A2	B3	C3	12	A3	B3	C1	16	A4	B3	C1

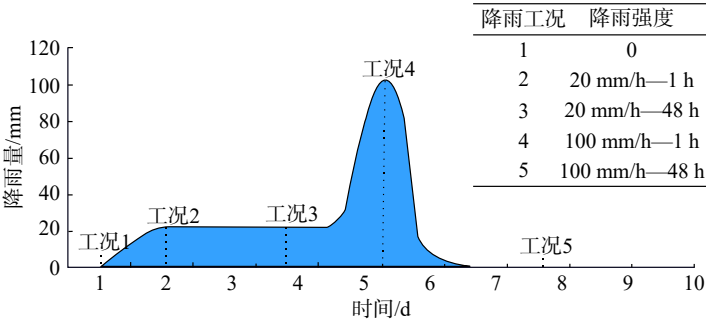


图 5 台风模拟降雨过程

Fig. 5 The simulated typhoon rainfall process

3.2 模型建立

滑坡岩体结构与基本参数选取参考了润嘉小区项目的基坑边坡岩体(表 5),利用 Van Genuchten 经验模

型输入基本水土特征参数(饱和渗透系数 K_s 、饱和含水量 w),估算第四系残坡积物的土水特征曲线,土水特征曲线及渗透函数见图 6。

表 5 润嘉小区项目基坑边坡岩体参数
Table 5 Physical and mechanical parameters of the Rock mass of a foundation pit slope in Runjia community project

岩性	天然重度 (/kN·m ⁻³)	黏聚力 (/kPa)	内摩擦角 (/°)	饱和渗透系数 (/m·d ⁻¹)	饱和含水量 (/%)
第四系残坡积物	16.22	19.1	12.6	4 ³	0.4
凝灰岩	19	15	30	6.9×10 ⁻⁶	0.18

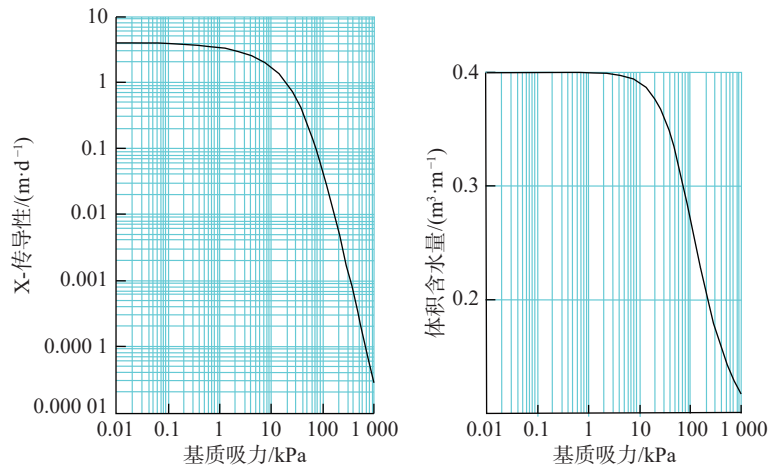


图 6 Van Genuchten 经验模型估算第四系残坡积物土水特征曲线
Fig. 6 Estimation of soil-water characteristic of the Quaternary residual deposit by Van Genuchten Empirical Model

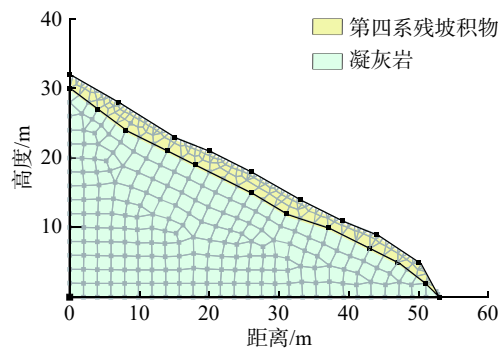


图 7 斜坡概化模型 A1-B2-C2
Fig. 7 The generalized model for slope A1-B2-C2

曲线。工况 1 时斜坡均保持稳定;随着登陆前期的低强度降雨影响,稳定性系数逐步下降,斜坡处于基本稳定-欠稳定状态;在台风暴雨作用下,斜坡稳定性系数急剧降低至 1.0 以下。在工况 1 下,第 16 组斜坡最为稳定,工况 2—3 下的 F_s 均大于工况 4—5,降雨是诱发该区域滑坡发生的主要因素,且其中台风暴雨的效果尤为显著。

在图 9 台风降雨过程斜坡稳定性变化中,部分结构斜坡稳定性系数在台风离陆后达最低值,甚有第 14 组结构(A4-B1-C3)斜坡相较于台风登陆当天降低 14%。相较于工况 1 下的 16 组斜坡稳定性系数(F_s),在工况

利用 Geo-Studio 软件中的 SLOPE/W 和 SEEP/W 模块,将模型左侧、底部和滑面边界设置为零流量边界条件,坡面则是设定以不同降雨强度为准的流量边界条件,并在坡脚处设置了地下水溢出面(图 7)。

3.3 稳定性分析

图 8 为在五种降雨工况下 16 组不同斜坡 F_s 的变化

2—5 下,分别下降了 2.03%、5.94%、13.45%、13.82%,斜坡在台风离陆暴雨停止后的稳定性系数达到最低,部分斜坡处于不稳定状态。综上可认为所构建的斜坡模型存在滞后效应,其滞后程度与降雨强度、降雨时间有关,滞后程度随着降雨强度、降雨时间的增大而增大,其中受台风登陆过程中的持续降雨-单峰型暴雨影响显著。

3.4 参数敏感性

根据不同斜坡结构 F_s 的变化,对其进行极差、方差分析,探究滑坡结构模型在不同工况下各影响因素显著值(sig 值)的差异。当 sig 值<0.05,说明该工况下的影响因素对于斜坡的稳定性具有显著影响。经计算比对发现(表 6),五种不同工况下坡度的 sig 值均小于 0.01,其对于滑坡稳定性具有显著影响,不同坡度对于降雨的入渗和地表径流存在导向作用,从而影响滑坡的稳定性;其次是第四系残坡积物层厚对于斜坡稳定性的影响作用,主要是由于青田县内发生滑坡物源以表层的第四系残坡积物为主,少数夹带下层部分强-中风化凝灰岩;起始地下水位高度在五种工况中均无明显影响。综合认为,在台风降雨过程中,各影响参数敏感性强弱为坡度>第四系残坡积物层厚>起始地下水位。

同时结合 3.3 节中的斜坡稳定系数参考分析,坡度、

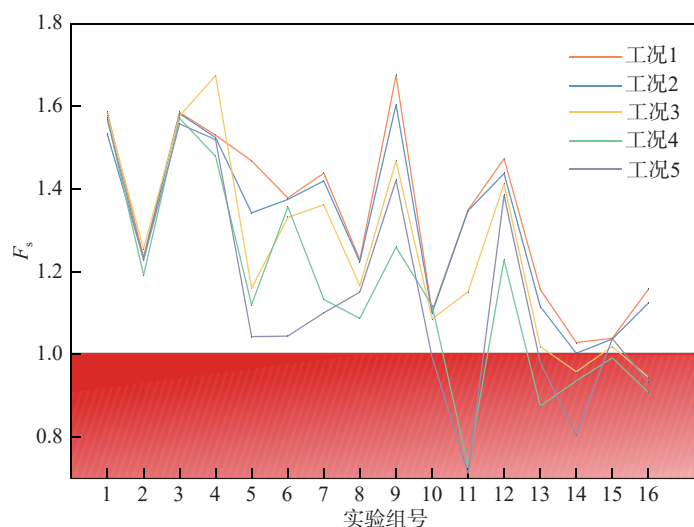
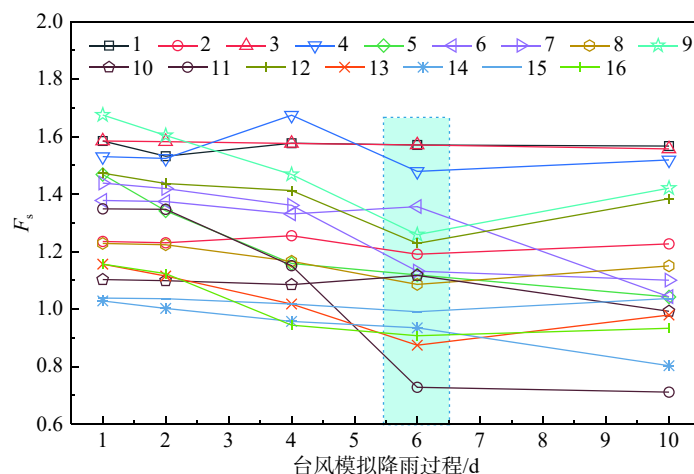
图 8 正交实验各组 F_s 变化Fig. 8 Variation of F_s of each group in orthogonal experiment图 9 台风降雨过程斜坡 F_s 变化

Fig. 9 Variation of slope stability during typhoon rainfall

表 6 各影响因素 sig 值

Table 6 Sig values of all influencing factors

sig 值	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
A 坡度	0.006	0.003	0.003	0.005	0.005
B 起始地下水位	0.682	0.630	0.630	0.815	0.176
C 第四系残坡积物层厚	0.017	0.122	0.122	0.062	0.022

地下水位高度、第四系残坡积物层厚参数影响着斜坡的稳定性和滞后效应程度。其中坡度影响最显著,当坡度 $<35^\circ$ 时,斜坡均处于基本稳定状态,不同降雨时间内的 F_s 差值较小,滑坡滞后效应不明显;当坡度 $>40^\circ$ 时,工况 4—5 下滑坡均处于不稳定状态,不同降雨时间内的稳定系数差值增大,滑坡滞后效应表现显著;当坡度相同时,第四系残坡积物层厚主要决定了滑坡的稳定性和

滞后效应程度,厚度越大,稳定性越低,滞后效应程度越明显。

3.5 滞后原因讨论

降雨是导致滑坡发生的关键因素^[25-26],而降雨诱发滑坡形成的实质是水—岩相互作用^[27]。一般来说,降雨的入渗降低了土体的有效应力,同时降低了滑体强度参数,导致抗剪强度降低;另一方面,降雨导致的地下水渗流增加了坡体的下滑力,在二者的共同作用下,诱发了滑坡的形成和发展^[28]。

对于青田县内的台风型滑坡,不同登陆期的降雨特征形成了不同的斜坡体入渗特征(图 10),根据对概化模型的模拟分析和台风降雨特征,设降雨后主要存在坡体下渗 i 和地表径流 d 两种形式。在登陆前期的持续性

低强度降雨,使得斜坡表层松散堆积体逐渐达到的平衡饱和状态^[22],此时以坡体下渗 i 为主;登陆时的单峰型强降雨,其中一部分雨水下渗破坏了表层松散堆积体饱和的临界状态^[23],另一部分沿坡面发生径流,且由于坡脚溢流面排水作用和岩土分界面渗透能力的差异性,同时县内多数斜坡受人工切坡开挖,大量地表水和地下水易

在坡脚处大面积汇聚^[29],坡体下渗 i 和地表径流 d 共同作用;随着台风离陆后时间的推移,坡体内形成强大的动水压应力空间,未排泄雨水持续侵蚀斜坡前缘、坡脚,斜坡自重加大,影响斜坡体内渗流结构,不稳定结构面土体改变,最终失稳发生滑动(图 11)。

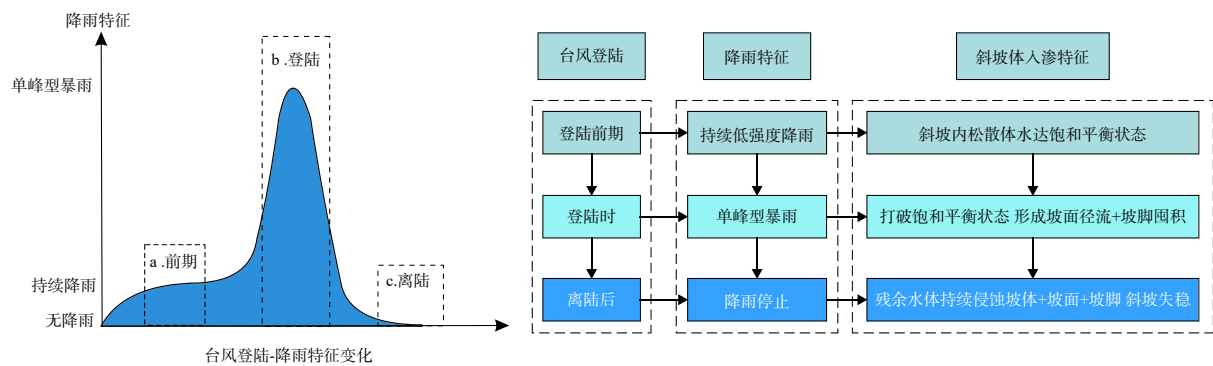


图 10 台风降雨特征

Fig. 10 Typhoon rainfall characteristics

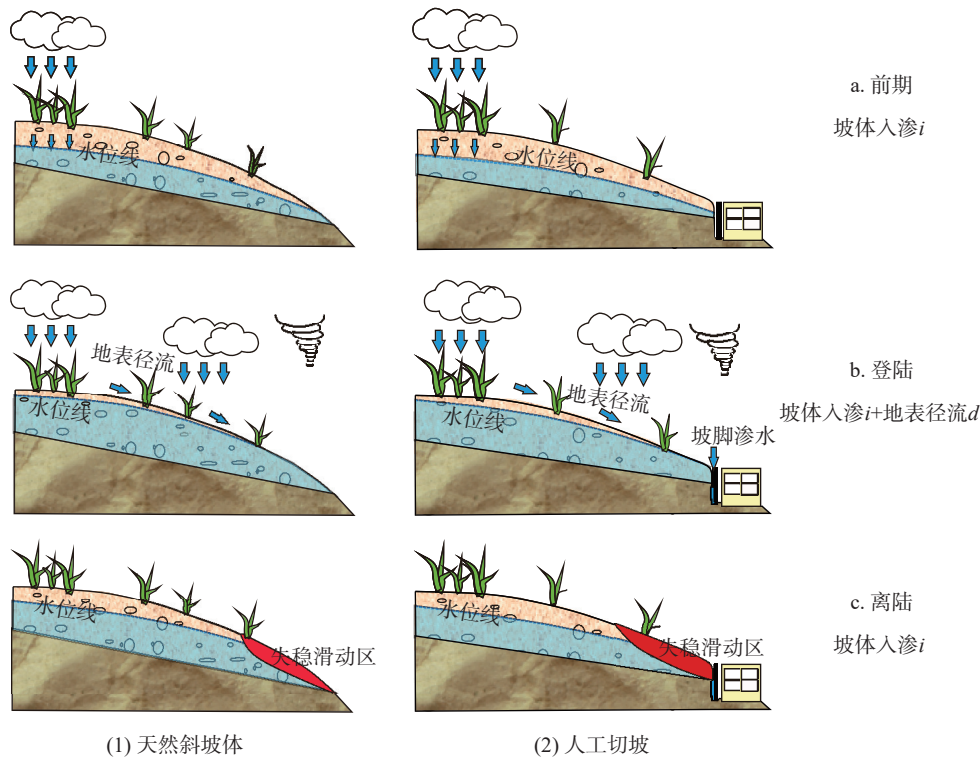


图 11 台风型滑坡机理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of typhoon-induced landslide mechanism

综合考虑,由于台风暴雨作用边坡时入渗、侵蚀程度的差异性,滑坡发生失稳的时间也有所不同,可认为是滑坡滞后效应的客观表现,滞后效应是发生结果对致灾因子的响应,也是滑坡对于降雨影响的发生时间差。

4 结论

基于 0919 号台风“利奇马”在浙江省青田县所诱发台风型滑坡数据统计,建立不同结构组合的斜坡渗流-

稳定概化模型,模拟台风登陆不同降雨工况,比对 16 组不同斜坡结构在各降雨工况下稳定性系数 F_s 的变化情况,讨论分析该区域台风型滑坡的滞后效应及其成因,得出以下结论:

(1)台风“利奇马”登陆后青田县内仍有 4 处坡体发生滑动,占已发滑坡 26.4%,该区域滑坡的发生在台风暴雨条件下存在一定程度的滞后效应。

(2)台风登陆暴雨作用下,影响青田县斜坡稳定性的结构参数敏感程度依次为坡度>第四系残坡积物层厚>起始地下水位高度。

(3)台风登陆过程降雨工况模拟中,斜坡稳定性在登陆后达到最低,相较于台风登陆前稳定性系数降低了 13.82%。

(4)讨论认为由于边坡的入渗排泄差异性,台风暴雨易在坡脚汇聚持续侵蚀坡体,影响坡体渗流结构,从而延缓斜坡失稳时间,形成滞后效应。

参考文献(References):

- [1] EMANUEL K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686–688.
- [2] 韩晖. 近 50 年中国台风暴雨研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2005. [HAN Hui. A study on typhoon torrential rain over China during the last about 50 years [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2005. (in Chinese with English abstract)]
- [3] LIU D F, PANG L, XIE B T. Typhoon disaster in China: prediction, prevention, and mitigation [J]. *Natural Hazards*, 2009, 49(3): 421–436.
- [4] 陈光平. 台风引发温州市斜坡地质灾害的发育分布及影响因素研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011. [CHEN Guangping. Study on distribution characteristics and influencing factors of slope geological hazard induced by typhoon in Wenzhou [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 宿海良, 袁雷武, 王猛, 等. 1949—2019 年登陆中国的热带气旋特征及致灾分析 [J]. *应用海洋学报*, 2021, 40(3): 382–387. [SU Hailiang, YUAN Leiwu, WANG Meng, et al. Characteristics and disaster analysis of tropical cyclones landing in China in 1949–2019 [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(3): 382–387. (in Chinese with English abstract)]
- [6] LIN M L, JENG F S. Characteristics of hazards induced by extremely heavy rainfall in Central Taiwan—typhoon Herb [J]. *Engineering Geology*, 2000, 58(2): 191–207.
- [7] 许鹏飞. “苏迪罗”台风引发浙江温州地质灾害类型与特征研究 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2017, 28(2): 40–47. [XU Pengfei. Study on the types and characteristics of geological disasters caused by typhoon soudelor in Wenzhou, Zhejiang Province [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2017, 28(2): 40–47. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 崔星, 袁丽侠, 陆彦俊. 台风诱发滑坡灾害的机理 [J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(2): 80–84. [CUI Xing, YUAN Lixia, LU Yanjun. Mechanism of typhoon-induced landslide hazards [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(2): 80–84. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孔维伟, 赵其华, 韩俊, 等. 台风滑坡变形破坏机制模型试验研究 [J]. *工程地质学报*, 2013, 21(2): 297–303. [KONG Weiwei, ZHAO Qihua, HAN Jun, et al. Model experiments for deformation and failure mechanism of typhoon induced landslide [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(2): 297–303. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 池永翔, 陈凡. 台风暴雨条件下滑坡稳定性影响因素分析 [J]. *地质学刊*, 2017, 41(2): 297–304. [CHI Yongxiang, CHEN Fan. Influencing factor analysis of landslide stability in typhoon rainstorm [J]. *Journal of Geology*, 2017, 41(2): 297–304. (in Chinese with English abstract)]
- [11] HIRATA Y, CHIGIRA M. Landslides associated with spheroidally weathered mantle of granite porphyry induced by 2011 Typhoon Talas in the Kii Peninsula, Japan [J]. *Engineering Geology*, 2019, 260: 105217.
- [12] 唐新华. 台风暴雨条件下地质灾害的成因研究 [J]. *福建建筑*, 2011(2): 64–66. [TANG Xinhua. Research on the geology disaster origin under typhoon rainstorm condition [J]. *Fujian Architecture & Construction*, 2011(2): 64–66. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 万金红, 张葆蔚, 杨向权, 等. 海南省台风灾害特征分析 [J]. *人民珠江*, 2016, 37(1): 45–48. [WAN Jinhong, ZHANG Baowei, YANG Xiangquan, et al. Characteristics of typhoon disaster in Hainan Province [J]. *Pearl River*, 2016, 37(1): 45–48. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 程立渤, 刘君秀, 林修栋. 台风“利奇马”预报分析 [J]. *绿色科技*, 2019(20): 50–51. [CHENG Libo, LIU Junxiu, LIN Xiudong. Forecast analysis of typhoon lichima [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019(20): 50–51. (in Chinese)]
- [15] 沈佳, 董岩松, 简文彬, 等. 台风暴雨型土质滑坡演化过程研究 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1290–1299. [SHEN Jia, DONG Yansong, JIAN Wenbin, et al. Study on evolution process of landslides triggered by typhoon rainstorm [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1290–1299. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张泰丽, 周爱国, 施斌, 等. 台风暴雨条件下滑坡变形特征物理试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6):

- 127–132. [ZHANG Taili, ZHOU Aiguo, SHI Bin, et al. Physical experiment research on landslide deformation characteristics under the condition of the typhoon heavy rain [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 127–132. (in Chinese with English abstract)]
- [17] LO C M, LIN M L, TANG C L, et al. A kinematic model of the Hsiaolin landslide calibrated to the morphology of the landslide deposit [J]. *Engineering Geology*, 2011, 123(1/2): 22–39.
- [18] YU F C, CHEN T C, LIN M L, et al. Landslides and rainfall characteristics analysis in Taipei City during the typhoon nari event [J]. *Natural Hazards*, 2006, 37(1): 153–167.
- [19] 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)]
- [20] 何立富, 陈双, 郭云谦. 台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因 [J]. *应用气象学报*, 2020, 31(5): 513–526. [HE Lifu, CHEN Shuang, GUO Yunqian. Observation characteristics and synoptic mechanisms of typhoon lekima extreme rainfall in 2019 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2020, 31(5): 513–526. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张义顺, 吴雪琴, 张达政, 等. 浙江青田县地质灾害现状及成因分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(3): 114–117. [ZHANG Yishun, WU Xueqin, ZHANG Dazheng, et al. Geo-hazards and their formation analysis in Qingtian County, Zhejiang Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(3): 114–117. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 彭敏瑞, 付成伟. 台风“利奇马”防御实践及思考 [J]. *中国防汛抗旱*, 2019, 29(11): 4–8. [PENG Minrui, FU Chengwei. Practices and thinking on the defense of Typhoon Lekima No. 201909 [J]. *China Flood & Drought Management*, 2019, 29(11): 4–8. (in Chinese)]
- [23] 郭云谦, 王毅, 沈越婷, 等. 台风“利奇马”不同区域降水极端性特征及成因分析 [J]. *气象科学*, 2020, 40(1): 65–77. [GUO Yunqian, WANG Yi, SHEN Yueting, et al. Analysis on characteristics of the extreme precipitation of typhoon “Lekima” [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2020, 40(1): 65–77. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 刘晓汝, 谢作威. 2019年超强台风“利奇马”引发浙江特大暴雨过程分析 [J]. *气象科学*, 2020, 40(1): 89–96. [LIU Xiaoru, XIE Zuwei. Analysis of rainstorm caused by super typhoon “Lekima” in Zhejiang Province of 2019 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2020, 40(1): 89–96. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 邓夕胜, 张元, 唐煜. 基于失效概率的边坡降雨阈值曲面探讨 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(3): 70–75. [DENG Xisheng, ZHANG Yuan, TANG Yu. Investigation on slope rainfall threshold surface based on failure probablolity [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 70–75. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李绍红, 朱建东, 王少阳, 等. 考虑降雨类型的基岩型浅层边坡稳定性分析方法 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 131–135. [LI Shaohong, ZHU Jiandong, WANG Shaoyang, et al. Stability analysis methods for the bedrock shallow slope considering rainfall types [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 131–135. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 郭俊英, 朱红雷. 浙江省小流域降雨型滑坡特点及机理研究 [J]. *浙江水利科技*, 2014, 42(3): 7–10. [GUO Junying, ZHU Honglei. Study on characteristics and mechanism of rainfall-induced landslides in small watersheds of Zhejiang Province [J]. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2014, 42(3): 7–10. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 池永翔. 台风暴雨条件下滑坡水文响应过程及稳定性分析 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(19): 176–180. [CHI Yongxiang. Study on the process of hydrological response and stability analysis of landslide body in typhoon rainstorm [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(19): 176–180. (in Chinese with English abstract)]
- [29] DAI F C, LEE C F, WANG S J. Characterization of rainfall-induced landslides [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(23): 4817–4834.