

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-09

# 基于失效概率的边坡降雨阈值曲面探讨

邓夕胜<sup>1</sup>, 张元<sup>1,2</sup>, 唐煜<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川成都 610500; 2. 中国铁建大桥工程局集团第五工程有限公司, 四川成都 610500)

**摘要:**降雨是诱发边坡变形失稳的主要因素,而针对降雨型边坡的预警预报也一直是工程领域的核心问题。本文将蒙特卡罗方法引入降雨型滑坡的预警预报,首先基于正态分布的岩土体物理力学参数,建立了边坡的有限元数值计算模型,并分析了 9 种不同型式降雨下边坡稳定性系数的变化情况。结果显示递增型降雨对边坡的稳定性尤为不利,均匀型降雨次之,递减型降雨影响最小。其次,将降雨过程划分为前期降雨+当期降雨,并确定了前期降雨对于当期降雨的有效时间为 6 d。最后,论文结合可靠度理论,选取失效概率  $P_f=10\%$  作为预警指标,通过把前期降雨引入降雨强度-降雨历时关系曲线并作为第三坐标轴,最终将该曲线扩展成为前期降雨(A)-当期降雨(I)-降雨历时(D)曲面(A-I-D 阈值曲面),研究结果对于降雨型边坡的预警预报具有一定的指导意义。

**关键词:**降雨型边坡; 预警预报; 失效概率; 阈值曲面

中图分类号: P642;U213.1+3

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0070-06

## Investigation on slope rainfall threshold surface based on failure probability

DENG Xisheng<sup>1</sup>, ZHANG Yuan<sup>1,2</sup>, TANG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group 5St Engineering Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** Rainfall is the main factor inducing slope deformation and instability, and the early warning and prediction of rainfall-triggered landslide has always been the core issue in the field of engineering. In this paper, the Monte Carlo method is introduced into the early warning and prediction of rainfall-triggered landslide. Firstly, based on the physical and mechanical parameters of rock and soil mass with normal distribution, the finite element numerical calculation model of slope is established, and the variation of slope stability coefficient under 9 different types of rainfall is analyzed. The results show that the incremental rainfall is particularly unfavorable to the stability of the slope, the uniform rainfall is the second, and the decreasing rainfall is the least. Secondly, the rainfall process is divided into antecedent and current rainfall, and the effective time of antecedent rainfall for current rainfall is 6 days. Finally, combined with the reliability theory, the failure probability  $P_f=10\%$  is selected as the early warning index. By introducing the previous rainfall into the rainfall intensity-rainfall duration relation curve and taking it as the third coordinate axis, the curve is finally extended to the antecedent rainfall (A) - current rainfall (I) - rainfall duration (D) surface (A-I-D threshold surface). The research results have a certain guiding significance for the early warning and prediction of rainfall type slope.

**Keywords:** rainfall type slope; early warning and prediction; failure probability; threshold surface

收稿日期: 2020-08-09; 修订日期: 2020-09-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51808470)

第一作者: 邓夕胜(1977-),男,四川南部人,硕士,副教授,主要从事结构工程与防灾减灾研究。E-mail: dxish@swpu.edu.cn

通讯作者: 张元(1993-),男,四川成都人,土木工程专业,硕士,工程师,主要从事土木工程施工方面的工作。E-mail: djyazhang@163.com

## 0 引言

在全球范围内,滑坡由于其发生的广度和频度均高于地震,已经成为仅次于地震的第二大地质灾害,每年由于滑坡造成的经济损失更是难以估量,因此,开展滑坡预警与防治已成为学术界研究的热点课题<sup>[1-2]</sup>。

大量研究表明,90%以上的滑坡与降雨有着密切的关系,且降雨型滑坡预警预报的关键是确定诱发滑坡变形乃至失稳的降雨阈值。目前研究手段主要包括统计学、力学机制、室内试验以及数值分析等<sup>[3]</sup>。首先,基于统计学思想求取的降雨阈值为经验性降雨阈值,由CAINE<sup>[4]</sup>依据滑坡和泥石流案例建立的降雨强度-降雨历时关系曲线得到了学术界广泛认同,此后学者<sup>[5-6]</sup>在此基础上发展了前期日降雨量模型、前期土体含水状态等多种经验性阈值。由于经验性降雨阈值模型是基于统计学建立的,因此,模型本身忽略了滑坡岩土体的物理力学性质,由此导致其在滑坡预警预报方面的应用限制很大。针对经验性降雨阈值的缺陷,国内外学者从地下水与滑坡岩土体的相互作用机理入手分析,从力学机制方面解释滑坡的破坏机理<sup>[7]</sup>。目前,降雨入渗诱发斜坡失稳的物理力学模型主要包括Slip模型<sup>[8]</sup>、Iverson模型<sup>[9]</sup>、Shalstab模型<sup>[10]</sup>等。由于物理力学模型不仅可以分析降雨入渗的饱和、非饱和行为,也可以考虑降雨持续时间的动态因素,有利于结合降雨资料对滑坡发展演化状态做出定量评价,因此,降雨型滑坡的物理力学模型已成为学术界领域研究的热点。但由于每种物理力学模型均是在一定的假设条件下提出来的,导致其在工程应用中存在一定的适用条件。其次,大型室内模型试验为探讨降雨作用下的滑坡发展演化提供了一条新思路。沈佳等<sup>[11]</sup>通过室内相似物理模型探讨了不同降雨工况条件下岩土体含水率和边坡位移的发展规律,并结合数值分析技术进行验证,总结概括了台风暴雨型土质边坡的演化规律。虽然室内模型试验实现了滑坡由变形乃至破坏的全过程可视化模拟,但由于材料的相似比、实际边坡岩土体的非线性与不均匀性、以及实际地形地貌的复杂多变,使得室内模型试验很难还原现场的实际情况。近年来,随着计算机技术的飞速发展,大型岩土仿真软件为处理岩土体问题提供了新的方法。刘春等<sup>[12]</sup>基于高性能离散元软件MatDEM建立了大规模滑坡的三维离散元模型,模拟滑坡演化的全过程。由于数值模拟在处理岩土体的非线性特征上显示出强大的计算能力,有助于了解岩土体的发展演化的影响因素、机制以及可能造成的灾害等,因而得到了广泛的应用。

本文基于正态分布的岩土体物理力学参数,首先分析了9种不同降雨型式对边坡稳定性系数的影响。其次,通过将降雨过程划分为前期降雨+当期降雨模式,求取前期降雨对于当期降雨的有效作用时间。最后,将前期降雨引入降雨强度和降雨历时关系曲线,并结合可靠度理论,建立了一定失效概率条件下边坡的降雨阈值曲面,研究结果可以为降雨型边坡的预警预报提供一定的借鉴意义。

## 1 可靠度分析的基本原理

蒙特卡罗方法又称为随机抽样技巧或统计实验方法,其基本原理如下<sup>[13]</sup>:由概率的定义可知,某事件的概率可以用大量试验中该事件发生的频率来估算,当样本容量足够大时,该事件发生的频率即为概率。因此,对影响滑坡可靠度的随机变量进行大量抽样,并代入功能函数式,即可建立稳定性状态函数(1):

$$F = g(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (1)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_m$ 为控制滑坡稳定性的随机变量,即可由式(1)得到滑坡的稳定性系数 $F_i$ ,如此重复 $N$ 次,便可得到 $N$ 个相对独立的稳定性系数样本值 $F_1, F_2, \dots, F_N$ ,若定义 $\{F < 1\}$ 为滑坡失效事件,且在 $N$ 次抽样中出现 $M$ 次。

则失效概率 $P_f$ 可通过下式(2)求得:

$$P_f = P(F < 1) = \frac{M}{N} \quad (2)$$

式(2)即为基于蒙特卡罗随机抽样方法计算出的滑坡失效概率,其均值 $\mu_F$ 和标准差 $\sigma_F$ 见式(3)和式(4):

$$\mu_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (3)$$

$$\sigma_F = \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_i - \mu_F)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

假设滑坡的临界稳定系数为 $\bar{\mu}$ ,用 $\beta$ 表示可靠度指标,则 $\beta$ 可以表示为式(5):

$$\beta = \frac{\mu_F - \bar{\mu}}{\sigma_F} \quad (5)$$

岩土工程中假定当稳定系数 $F_s=1$ 时边坡处于临界状态,则称相对于 $F_s=1$ 时可靠度指标称为绝对可靠度指标,则 $\beta$ 可以表示为式(6):

$$\beta = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \quad (6)$$

则失效概率 $P_f$ 可通过式(7)求取:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (7)$$

式中： $\Phi$ ——失效概率分布函数。

## 2 边坡模型及材料参数

基岩型边坡坡高为 15 m, 坡度为 1 : 1, 基岩面与边坡平行, 坡面覆土厚为 6.9 m。在地下水方面, 假设前缘水头高程 20 m, 后缘水头高程 35 m, 地下水位线平行于坡面。为了减小模型边界的影响, 在模型坡顶和坡底均进行了一定程度的延长(图 1)。论文采用 Geostudio 软件 SEEP/W 和 SLOPE/W 两个模块, 模型采用三角形单元, 共计 1 075 个节点, 2 009 个单元, 模型尺寸及网格剖分见图 2。

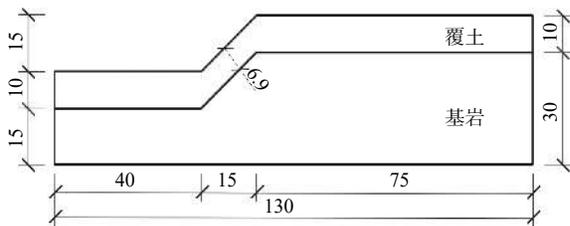


图 1 边坡模型尺寸参数 (单位: m)

Fig. 1 Dimension parameters of model slope (unit:m)

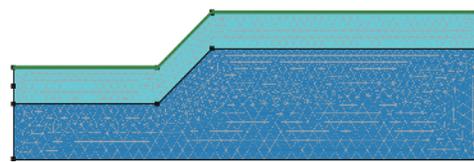


图 2 网格剖分图

Fig. 2 Model of finite element mesh

地层中物理力学参数的变异性是客观存在的, 其直接结果表现为岩土体力学性质、力学响应的空间变异性, 而在实际工程应用中, 往往根据室内试验取均值作为其岩土体参数的代表值, 由此得到的定量结论往往并不可靠<sup>[14]</sup>。研究表明, 自然界的许多数据集都符合钟形分布, 本文考虑岩土体参数的离散型, 建立正态分布的岩土体物理力学参数模型, 具体如表 1 所示。其中,  $C$  为黏聚力,  $\phi$  为内摩擦角,  $\gamma$  为重度,  $k_{sat}$  为饱和渗透系数(图 3)。

表 1 岩土体物理力学参数  
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

覆土参数	$C/kPa$	$\phi/(\circ)$	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$k_{sat}/(m \cdot d^{-1})$
均值	20	22	18	
最小值	15	17	13	0.65
最大值	25	27	23	

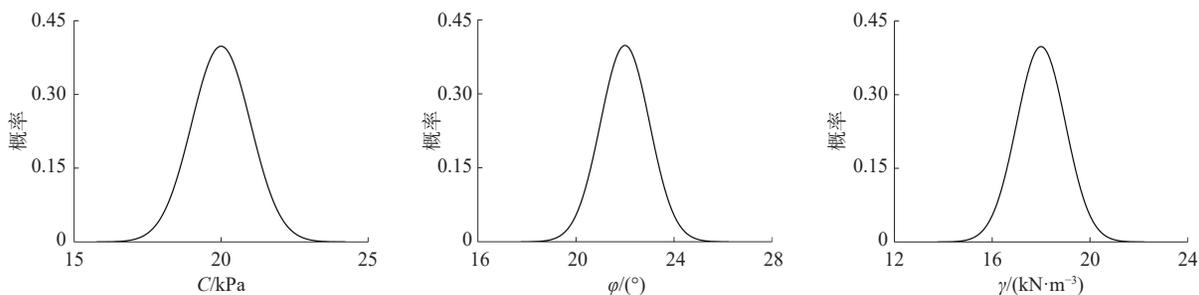


图 3 黏聚力  $C$ 、内摩擦角  $\phi$ 、重度  $\gamma$  分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of unit cohesion  $C$ , internal friction angle  $\phi$  and weight  $\gamma$

## 3 I-D 阈值曲线的改进

$I-D$  阈值曲线是基于统计学基础建立的反应降雨强度和降雨历时的关系曲线。其中, 曲线纵坐标表示平均降雨强度  $I$ , 横坐标表示降雨历时  $D$ , 由于采用了全局平均的概念, 未考虑实际的降雨分布, 因此, 曲线本身不能反应不同降雨型式的差别<sup>[15]</sup>。此外, 由于传统  $I-D$  阈值曲线具有很强的地域性特征, 忽略了地质因素的控制性作用, 导致其在预警预报领域的应用受到的限制很大。

针对以上缺陷或者不足, 本文首先分析了不同降雨型式对滑坡稳定性的影响, 由于实际降雨情况非常复杂, 本文将实际降雨情况假设为直线型、正弦型、余弦

型、圆弧型, 并进一步划分为递增和递减两种情况, 再加上平均型降雨, 共 9 种工况。假设降雨持时为 10 d, 降雨总量为 250 mm, 计算结果见表 2。由表 2 可知, 余弦递增条件下稳定性系数最小, 圆弧递减条件下稳定性系数最大。此外, 递增型降雨对滑坡的稳定性尤为不利, 均匀性降雨次之, 递减型降雨影响最小, 造成这种现象的原因为: 岩土体材料渗透系数对其的影响, 当雨型为递增型降雨时, 即初始降雨强度较小, 有利于雨水的缓慢下渗, 因此边坡稳定性系数衰减较快, 而当雨型为递减型降雨时, 即初始降雨强度较大, 不利于雨水的渗透, 并多以地表径流的方式排泄, 对滑坡的稳定性有利。以上分析表明, 降雨型式对边坡稳定性影响较大,

而采用平均降雨强度描述降雨特征时,其预警结果偏于保守,不足以反应实际降雨情况对其稳定性的影响,这也正是对传统  $I-D$  阈值曲线改进的基础。

表 2 不同降雨型式下边坡的稳定性系数变化

Table 2 Variation of slope stability coefficient under different rainfall types

降雨类型	初始稳定性系数	非均匀降雨稳定性系数	均匀降雨稳定性系数
直线递增	1.091	1.021	1.038
正弦递增	1.091	1.024	1.038
余弦递增	1.091	1.015	1.038
圆弧递增	1.091	1.020	1.038
直线递减	1.091	1.052	1.038
正弦递减	1.091	1.056	1.038
余弦递减	1.091	1.048	1.038
圆弧递减	1.091	1.059	1.038

其次,国内外学者从降雨过程进行研究,并引入前期降雨量这一参量对降雨特征进行全面描述,由此可以把降雨过程分为两个时段,即前期降雨量+1 d(或者数小时)强降雨,而无论是前期降雨量或者是 1 d(或者数小时)强降雨信息极易提取,适应性更强,因而也获得了广泛的应用。

从理论上而言,前一个时段内的降雨构成第二个时段内的前期降雨。从作用机制分析,降雨影响边坡稳定性的原因主要是降雨入渗使得岩土体含水量增大,基质吸力减小,最终使滑动面附近的基质吸力完全丧失,导致边坡沿最危险滑动面发生整体破坏。因此,在降雨过程中的任意时刻,该时刻前的降雨入渗都会引起边坡基质吸力发生改变<sup>[16]</sup>,由此前期降雨与边坡的稳定性具有明显的相关关系,可以定义前期降雨为:在给定初始条件下引起边坡最危险滑动面到坡面之间土体吸力分布发生变化的降雨<sup>[17-21]</sup>。前期降雨持时的定义式如式(8)所示:

$$D_A = \frac{\alpha d_s}{\beta k_{\text{sat}}} \quad (8)$$

式中:  $D_A$ ——前期降雨历时;

$\alpha$ ——经验系数,反应了降雨过程中最危险滑动面的上移;

$d_s$ ——降雨前最危险滑动面的最大深度,由于降雨过程中最危险滑动面会有上移趋势,需要用系数对其修正;

$\beta$ ——经验系数,反应前期降雨的平均入渗速度;

$k_{\text{sat}}$ ——饱和渗透系数。

初始最危险滑动面与基岩面相切,最大深度即为覆

土厚度,即 6.9 m,经验系数  $\alpha$  取 0.5,  $\beta$  取 1,代入式(8)可得:

$$D_A = \frac{0.5 \times 6.9}{1 \times 0.65} = 5.3 \text{d} \quad (9)$$

对计算结果取整,前期降雨时长为 6 d。

最后,以前期降雨结束后的边坡应力状态作为当期降雨的边界条件,并给定不同的当期降雨强度使边坡直至失稳,而边坡失稳时所对应的当期降雨强度  $I$  和降雨历时  $D$  即为在前期降雨  $A$  影响下的阈值点,由此可以得到一簇不同的前期降雨条件下对应的  $I-D$  阈值曲线,将前期降雨  $A$  作为第三个坐标轴,即可将  $I-D$  阈值曲线扩展成为  $A-I-D$  阈值曲面。在失稳指标选择上,传统方法往往以边坡稳定性系数等于 1 作为边坡的临界状态,而岩土体的随机性与不确定性导致边坡在超出临界状态时仍有可能处于欠稳定状态而未发生破坏,有鉴于此,本文结合可靠度理论选取失效概率作为衡量边坡状态的阈值指标。具体做法如下:由于前期降雨时长较长,结合前文研究并考虑最不利工况,选取前期降雨时长条件下的雨型为余弦递增型,而由于当期降雨时长较短,因此,取均匀型降雨作为当期降雨雨型。对前期降雨  $A$  进行 20 mm 间隔取值,从  $A=0$  mm 到  $A=100$  mm 共 6 组,对当期降雨  $I$  进行 5 mm/d 间隔取值,从  $I=60$  mm/d 到  $I=80$  mm/d 共 5 组,以前期降雨结束后的应力状态作为当期降雨的边界条件,结合可靠度理论,求取边坡失效概率  $P_f=10\%$  条件下所对应的  $A-I-D$  阈值曲面,具体如图 4 所示,其  $A-I-D$  等值线图如图 5 所示。此阈值曲面直接反应了降雨型边坡阈值点的空间分布特征,据此可在降雨条件下直观地获取边坡失效概率的分布范围,有利于指导边坡的预警预报。

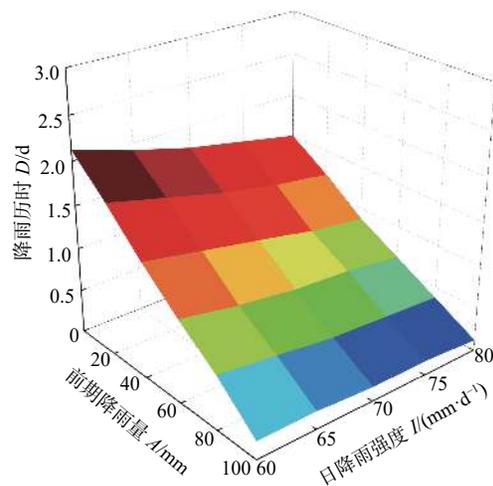


图 4  $A-I-D$  阈值曲面 (失效概率  $P_f=10\%$ )

Fig. 4  $A-I-D$  threshold surface (failure probability  $P_f=10\%$ )

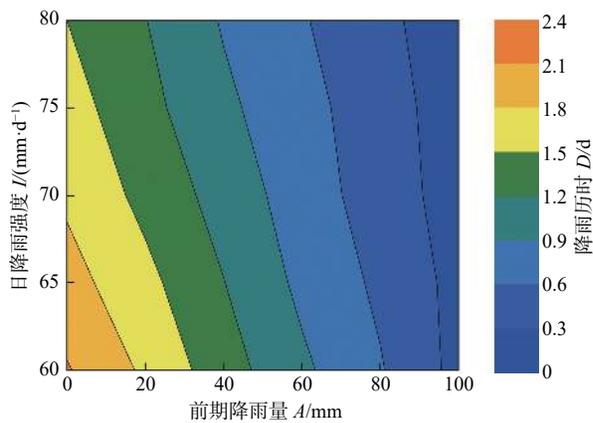


图 5  $A-I-D$  等值线图 (失效概率  $P_f=10\%$ )

Fig. 5  $A-I-D$  contour map (failure probability  $P_f=10\%$ )

#### 4 结论

本文基于可靠度理论分析了 9 种不同雨型对边坡稳定性的影响,通过划分降雨过程建立了一定失效概率条件下边坡的  $A-I-D$  阈值曲面,主要取得了以下结论:

(1)降雨型式对边坡的稳定性影响较大,不同降雨型式下递增型降雨对滑坡的稳定性尤为不利,均匀性降雨次之,递减型降雨影响最小;

(2)前期降雨对于当期降雨主要影响是改变了坡体内布的基质吸力,通过计算前期降雨对于当期降雨的有效时长为 6 d;

(3)通过将前期降雨  $A$  引入  $I-D$  阈值曲线,并结合可靠度理论,求取失效概率  $P_f=10\%$  条件下边坡的  $A-I-D$  阈值曲面,对于降雨型边坡的预警预报具有一定的指导意义。

#### 参考文献 (References):

- [1] 冯雪莲. 基于光纤应力传感的斜倾厚层山体滑坡预警研究 [J]. 灾害学, 2020, 35(2): 13-17. [FENG Xuelian. Study on early warning of landslide in inclined thick layer based on fiber optic stress sensing [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 13-17. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈忠源, 戴自航. 降雨条件下建筑边坡稳定性的云模型评价方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 50-56. [CHEN Zhongyuan, DAI Zihang. Cloud model evaluation method for building slope stability under rainfall [J]. Chinese Journal of geological hazards and prevention, 2020, 31(2): 50-56. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 雷德鑫. 三峡库区王家坡滑坡降雨阈值及预警预报研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2019. [LEI Dexin. Study on rainfall threshold and early warning and prediction of Wangjiapo

landslide in Three Gorges Reservoir Area[D]. Yichang: Three Gorges University, 2019. (in Chinese)]

- [4] 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.
- [5] 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)]
- [6] 李媛. 区域降雨型滑坡预报预警方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005. [LI Yuan. Method for the warning of precipitation-induced landslides[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005. (in Chinese)]
- [7] 李秀珍, 何思明, 王震宇, 等. 降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型适用性分析 [J]. 灾害学, 2015, 30(1): 34-38. [LI Xiuzhen, HE Siming, WANG Zhenyu, et al. Applicability analysis on physical models of slope instability induced by rainfall infiltration [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(1): 34-38. (in Chinese with English abstract)]
- [8] MONTRASIO L, VALENTINO R. A model for triggering mechanisms of shallow landslides [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, 8(5): 1149-1159.
- [9] IVERSON R M. Landslide triggering by rain infiltration [J]. *Water Resources Research*, 2000: 36.
- [10] MONTGOMERY D R, DIETRICH W E, TORRES R, et al. Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(1): 91-109.
- [11] 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)]
- [12] 刘春, 范宣梅, 朱晨光, 等. 三维大规模滑坡离散元建模与模拟研究——以茂县新磨村滑坡为例 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1362-1370. [LIU Chun, FAN Xuanmei, ZHU Chenguang, et al. Discrete element modeling and simulation of 3-dimensional large-scale landslide-taking xinmocun landslide as an example [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1362-1370. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 雷德鑫, 易武, 柳青, 等. 三峡库区卧沙溪滑坡稳定性的可靠度及敏感性分析 [J]. 安全与环境工, 2018,

- 25(1): 23–28. [ LEI Dexin, YI Wu, LIU Qing, et al. Reliability and sensitivity analysis of Woshaxi landslide stability in Three Gorges Reservoir Area [ J ] . Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(1): 23–28. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 郭重阳,李典庆,曹子君,等.考虑空间变异性条件下的边坡稳定可靠度高效敏感性分析 [ J ] . 岩土力学, 2018, 39(6): 2203–2210. [ GUO Chongyang, LI Dianqing, CAO Zijun, et al. Efficient reliability sensitivity analysis for slope stability in spatially variable soils [ J ] . Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2203–2210. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 杨攀.基于力学模型的非饱和土边坡滑坡预警降雨阈值研究[D].北京:清华大学,2014. [ YANG Pan. Research on rainfall thresholds for forecasting unsaturated soil slope failure based on mechanical model[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 黄晓虎,雷德鑫,夏俊宝,等.降雨诱发滑坡阶跃型变形的预测分析及应用 [ J ] . 岩土力学, 2019, 40(9): 3585–3592. [ HUANG Xiaohu, LEI Dexin, XIA Junbao, et al. Forecast analysis and application of stepwise deformation of landslide induced by rainfall [ J ] . Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3585–3592. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 杨攀,杨军.考虑前期降雨的边坡稳定降雨阈值曲面 [ J ] . 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 169–174. [ YANG Pan, YANG Jun. Rainfall threshold surface for slopes stability considering antecedent rainfall [ J ] . Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup1): 169–174. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 郭斌,贾燕,梁彧,等.四川宝轮服务区降雨型滑坡活动过程分析 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 45–51. [ GUO Bin, JIA Yan, LIANG Yu, et al. Analysis on process of rainfall-induced landslide in Baolun service area, Sichuan Province [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 45–51. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 饶鸿,王金淑,赵志明,等.基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析 [ J ] . 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 154–162. [ RAO Hong, WANG Jinshu, ZHAO Zhiming, et al. An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model [ J ] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 154–162. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 邬凯,杨雪莲,王军.山区公路降雨型滑坡区域预警研究 [ J ] . 公路工程, 2018, 43(6): 127–133. [ WU Kai, YANG Xuelian, WANG Jun. Research on regional warning of rainfall induced landslides [ J ] . Highway Engineering, 2018, 43(6): 127–133. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 王志强,马晓亮.持续降雨环境下高速公路边坡稳定性影响的数值模拟分析 [ J ] . 公路工程, 2018, 43(5): 310–315. [ WANG Zhiqiang, MA Xiaoliang. Numerical simulation analysis on the stability of highway slope under continuous rainfall environment [ J ] . Highway Engineering, 2018, 43(5): 310–315. (in Chinese with English abstract) ]