

# 滑坡失稳时间预测方法研究综述

武鑫<sup>1,2</sup>, 郑东健<sup>1,2</sup>, 刘永涛<sup>1,2</sup>, 左君谣<sup>1,2</sup>, 王丽蓉<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**综述了滑坡失稳时间预报的研究现状,将目前滑坡时间预测方法归纳为基于蠕变经验公式建立的回归模型和基于数学理论的回归模型;简要分析了各模型和方法的适用性以及相关预报判据和预警阈值。为了得出更加准确的结果,必须在对滑坡类型、地质特征、变形特点和形成因素的深入研究基础上,结合合适的预报判据和预警阈值,建立能够描述滑坡发展演化过程以及变形破坏机理的预报模型或方法。

**关键词:**滑坡;失稳时间;预测方法;预报模型

**中图分类号:**P642.22

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2021)04-0089-06

**A review of temporal prediction methods for landslide failure**//WU Xin<sup>1,2</sup>, ZHENG Dongjian<sup>1,2</sup>, LIU Yongtao<sup>1,2</sup>, ZUO Junyao<sup>1,2</sup>, WANG Lirong<sup>1,2</sup>(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** The research status associated with landslide time prediction was comprehensively reviewed. The current approach employed in the time of slope failure prediction were generalized as regression models based on empirical formula and mathematical theory respectively. In addition, the applicability of each model and method as well as the relevant prediction criterion and warning threshold were briefly analyzed. In order to acquire more accurate results, it is indispensable to establish an approach that can describe the evolution process of landslide and the mechanism of failure on the basis of in-depth study of landslide types, geological characteristics, and deformation characteristics combined with appropriate criteria and early warning threshold.

**Key words:** landslide; time of failure; prediction method; forecasting model

滑坡是世界上最具有危害性的自然灾害之一,仅次于地震灾害,其主要发生在山地丘陵地带,具有突发性的特点。我国地域辽阔,平均每年发生滑坡2万余起,由此造成的伤亡人数达1000余人、受灾人口90多万人,经济损失达20亿~60亿元<sup>[1]</sup>。截至2015年底,全国已查明约有14万处滑坡地质灾害隐患点,直接威胁到人民生命和财产安全<sup>[2]</sup>。水利水电工程施工期和运行期也时有滑坡等灾害发生,其中较为典型的包括1963年意大利Vajont水库滑坡,国内1961年的柘溪水库塘岩光滑坡、1983年三峡库区的黄蜡石滑坡、1985年的新滩滑坡、2003年的千江坪滑坡等,这些失事滑坡都造成了巨大的生命财产损失,因此,开展滑坡的预测预报对防止或

减轻灾害具有重要意义。

滑坡预测预报广义上包括滑坡时间、滑坡体量强度、滑坡空间范围以及滑坡影响等方面的预测预报,滑坡时间预报是其核心内容之一。自20世纪60年代Saito<sup>[3]</sup>率先提出滑坡时间预报方法并成功应用于实际案例后,国内外许多学者针对滑坡时间预报开展了大量研究,对许多边坡的失稳时间进行了较准确的预报;Xu等<sup>[4]</sup>通过实时监测与预报系统成功实现了对中国黑方台黄土滑坡的事前预报;Fujisawa等<sup>[5]</sup>对日本Otomura县附近的潜在滑坡建立了预警系统并提前约6h获得了准确的滑坡失稳时间;Loew等<sup>[6-7]</sup>分别对瑞士Preonzo和意大利Gallivaggio附近的不稳定岩土体进行监测并有效控

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508603);国家自然科学基金(51739003,51579085)

作者简介:武鑫(1998—),男,硕士研究生,主要从事水工结构研究。E-mail: wuxin@hhu.edu.cn

通信作者:郑东健(1965—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail: zhengdj@hhu.edu.cn

制了滑坡失稳造成的损失。但由于滑坡的形成涉及诸多内、外部复杂环境因素,如地形地貌、地质构造、岩土体材料分布组成、触发因素等,目前滑坡时间的预测尚存在许多不确定性。

本文在综述国内外相关文献的基础上,对目前滑坡时间预测方法进行归类,分析了各类方法特点与主要进展,给出了经典方法的主要思路并讨论了其适用条件,此外也对相关预报判据以及预警阈值的选取进行了分析,这对促进滑坡时间预测理论和方法的发展、进一步提高滑坡灾害的应急能力有参考和借鉴意义。

## 1 蠕变经验模型

根据岩土材料的蠕变规律,通常将滑坡变形(位移)-时间曲线过程划分为3个阶段,即初始蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段。滑坡时间预测的蠕变经验模型重点是在加速蠕变阶段的预测。蠕变经验模型以 Voight 提出的材料失效基本理论为基础<sup>[8]</sup>:

$$\dot{\eta}^{-\alpha}\ddot{\eta} - A = 0 \quad (1)$$

式中: $\eta$  为描述材料失效行为的特征量,如大地测量值等; $\dot{\eta}$ 、 $\ddot{\eta}$  分别为对应特征量的一阶和二阶导数; $\alpha$ 、 $A$  为模型参数。

Voight<sup>[8]</sup>通过对黏塑性材料在恒载和恒温条件下的剪切破坏试验,指出式(1)可以描述岩石、土壤、金属、塑料、混凝土和冰等多种材料的失效行为。对于滑坡时间预测, $\eta$  为边坡失事行为监测特征量,如表面变形、断层滑移、应变或裂缝张开位移等,其中  $\alpha$  一般为 1.7~2.2。有学者指出参数  $A$ 、 $\alpha$  存在线性关系<sup>[9]</sup>,其值与材料类型、超固结比以及饱和度有关<sup>[10]</sup>。

实际上在 Voight 提出式(1)式之前,在滑坡时间预测方面已有类似的经验方法。如 Saito<sup>[11]</sup>基于三轴加载试验中土体加速蠕变阶段的应变率数据,提出了预测失效时间的经验公式;随后,将该公式进一步扩展以描述滑坡加速蠕变阶段的变形量并提出三点作图法对日本 Ooigawa 铁路线上的滑坡进行了成功预报,预测时间比实际发生时间提前 1 d<sup>[3]</sup>。Yamaguchi<sup>[12]</sup>在此基础上提出了广义的 Saito 公式,认为可以得到更准确的预报结果:

$$(t_f - t)\dot{\eta}^\beta = B \quad (2)$$

式中: $t$  为监测时间; $t_f$  为破坏时间; $\dot{\eta}$  为变形速率; $B$ 、 $\beta$  为模型参数,对于 Saito 公式  $\beta=1$ 。

Hayashi 等<sup>[13]</sup>通过室内滑坡试验以及两处滑坡案例分析,采用作图法将加速蠕变过程分为速率与位移的线性关系阶段和速率的对数与位移的线性关

系阶段,并指出第一阶段持时更长,第二阶段更加符合式(2)的规律,认为该方法会得到比 Saito 公式更安全的预测结果。

通过对壤土与砂土两种材料的边坡模型的人工降雨破坏试验研究,Fukuzono<sup>[14]</sup>发现边坡破坏前的变形速率  $\dot{\eta}$  的对数与加速度  $\ddot{\eta}$  的对数成正比,即式(1),并提出一种通过绘制速率倒数曲线与时间轴的交点来预测失效时间的逆速度(inverse velocity, INV)法,如式(3)所示。有学者指出在临近失稳时采用线性外推( $\alpha=2$ )即可得到可信度较高的预报结果,因此该方法得到了广泛应用<sup>[15-18]</sup>。

$$\frac{1}{\dot{\eta}} = [A(\alpha - 1)(t_f - t) + \dot{\eta}_f^{1-\alpha}]^{1/(\alpha-1)} \quad (\alpha > 1) \quad (3)$$

式中: $\dot{\eta}_f$  为边坡失稳时刻速率。若假设  $\dot{\eta}_f \rightarrow \infty$ ,则 Saito 公式即为式(3)的特殊情况( $\alpha=2$ )。

Crosta 等<sup>[19]</sup>认为 INV 法不适用于长期监测数据,而采用滑坡加速变形阶段监测数据进行分析,可以有效避免周期性变形导致的预测精度下降。但由于复杂的地质条件,即使进入加速变形阶段后,边坡速率也会出现较大波动,从而使加速度出现负值。对此,Iwata 等<sup>[20]</sup>通过提取滑坡变形加速度为正的实测数据并采用 INV 法计算失稳时间,得到了比采用全部数据更稳定且精度更高的预测结果。考虑到 INV 法采用速率倒数会放大原始监测数据波动以及噪音产生的误差,Carlà 等<sup>[21]</sup>通过对变形测值进行长、短距平滑处理,提高了失稳时刻预测精度,并采用 4 个滑坡案例进行了验证。Bozzano<sup>[22]</sup>在此研究基础上提出了关于 INV 法分析起始点的 3 条识别准则。除采用传统回归方法进行失稳预报模型拟合外,也有学者采用 Bootstrap 方法<sup>[23-24]</sup>进行不确定性建模去估计失稳预报模型参数(失稳时间),这些方法可以给出预报结果的概率分布而非对模型参数的点估计,抗噪性较线性回归方法得到了很大提升。另外,鉴于速率数据采用差商计算,受监测间隔时间影响大,也可直接采用变形量对 Fukuzono 公式进行拟合<sup>[25]</sup>。

Mufundirwa 等<sup>[26-27]</sup>基于描述岩石加速蠕变阶段应变趋势的经验公式,推导出斜率法,即采用  $t\dot{\eta}$  和  $t$  数据线性拟合得到的斜率作为失稳时间,见式(4),分析结果表明斜率法比 INV 法可提供更安全的预测结果(预测失稳时间在实际失稳时间之前),且实时跟踪预报结果误差小。

$$t\dot{\eta} = t_f\dot{\eta} - B \quad (4)$$

Hao 等<sup>[28]</sup>基于 Voight 材料失效准则(式(1))并假设  $\dot{\eta}_f \rightarrow \infty$ ,推导出式(5),加速蠕变阶段  $\dot{\eta}\ddot{\eta}^{-1}$  和

$t$  的拟合直线与时间轴交点即为滑坡失稳时刻。该方法在实际应用中较 Voight、Fukuzono 公式的优点在于只有一个待拟合参数  $\alpha$ , 这使得其应用更加简便。但目前该方法仅进行了室内岩样破坏的预测, 尚未应用于滑坡失稳预报<sup>[29]</sup>。

$$\ddot{\eta}\eta^{-1}=(\alpha-1)(t_f-t) \quad (\alpha>1) \quad (5)$$

此外, 也有学者基于监测资料和室内流变试验数据, 给出了其他描述岩土体加速蠕变的微分方程<sup>[30]</sup>。应指出, 上述方法一般较适用于滑坡加速蠕变阶段的预报预测。

## 2 其他模型

除了经验预报模型外, 也可根据滑坡变形失稳曲线形状, 运用相关数学模型描述滑坡演化规律, 并根据所建模型预报滑坡灾害发生的时间。目前常用的失稳预报模型包括灰理论模型、生物生长模型、协同模型等。

张军胜等<sup>[31]</sup>以各时段的割线角作为原始序列建立灰色模型, 以切线角趋于 90° 作为理论失稳时刻。李晓红等<sup>[32]</sup>通过工程实例分析, 认为边坡加速蠕变阶段灰色模型的变形曲线切向角范围为 89.0° ~ 89.5°。但由于边坡监测时序量纲以及范围的差异性, 这些学者给出的位移曲线切线角预报阈值并不具有普适性。考虑到边坡失稳破坏的发展历时曲线类似于描述生物生长规律的 S 形曲线, 因此可将 Verhulst 和 Pearl 生长模型应用于滑坡预报<sup>[33]</sup>。Miao 等<sup>[33]</sup>基于灰色理论建立了 Verhulst 模型的一阶白化微分方程(式(6)), 并以  $dx/dt$  达到极值  $a/2b$  的时间作为滑坡失稳点。但临滑时刻剩余下滑力还在逐渐增大从而使加速度不断增大, 以速率最大值作为失稳判据并不可靠。贺小黑等<sup>[34]</sup>以加速度最大值和加速度增长率最大值点分别给出了预报上、下限, 实例分析表明实际失稳时间均落在预报范围内。

$$\frac{dx_1}{dt}=ax_1-bx_1^2 \quad (6)$$

式中:  $x_1$  为位移等距监测值  $x_0$  的一次累加值;  $t$  为时间序数;  $a$ 、 $b$  为系数, 采用灰色理论计算。

考虑到描述滑坡演化过程的蠕变曲线呈反 S 形, 李天斌等<sup>[35]</sup>采用 Verhulst 反函数模型描述加速蠕变过程, 以变形曲线奇点  $t=a/b$  作为失稳时刻, 并通过了实例分析验证, 预测精度较高。孙景恒等<sup>[36]</sup>建立了 Pearl 滑坡预报模型, 并以曲线中上部拐点作为失稳点, 预测结果与实际滑坡时间基本吻合。但从描述蠕变曲线规律角度来看, 将灰色理论生长模型的初始时间序数限制在  $[1, n]$  内并不合理。应指出, Verhuslt 反函数模型适用于等时距、波

动小且有明显上升趋势的序列, 因此对边坡变形监测数据有较高要求且只适用于加速变形时期的失稳预报。

滑坡失稳是由平衡态演化至远离平衡态的过程, 而协同学具有处理非线性系统非平衡相变问题的能力, 可采用协同学相关理论建立滑坡的短临预报模型。贺小黑等<sup>[37]</sup>由协同学理论的二维系统演化方程推导得到描述坡体发展演化方程为

$$\frac{dy}{dt}=cy-dy^3 \quad (7)$$

式中:  $y$  为协同学中的慢变量, 可用位移、声发射等状态变量代替;  $c$ 、 $d$  为待定协同系数。

## 3 预报判据与预警阈值

将速度曲线奇点或变形极值点作为滑坡失稳点的方法时常与实际不相符, 许多学者希望直接给出相关失稳指标的阈值<sup>[37-39]</sup>, 但这些建议值波动较大且往往只适用于特定类型滑坡。研究边坡临近破坏时的一般行为特征, 可以避开特定阈值的选取。秦四清等<sup>[40]</sup>考虑到外界环境因素会加速或减缓坡体破坏过程, 导致失稳时间并非定值, 通过分析多个滑坡案例, 提出失稳破坏临界位移准则:

$$\eta_l=2.59^k\eta_c \quad (8)$$

$$\eta_l=1.48^k\eta_c \quad (9)$$

式中:  $\eta_l$ 、 $\eta_c$  分别为蠕变破坏和脆性破坏临界位移;  $k$  为锁固段个数;  $\eta_c$  为加速蠕变起始点位移。Cará 等<sup>[41]</sup>基于某露天矿边坡数据库发现失稳前 3 h 内与 24 h 内平均加速度之比约为 7, 拟合得到了“失稳线”, 边坡运动状态愈接近失稳线, 意味着愈接近失稳临界点。但该失稳线会受到地质条件和地形特点等因素的影响, 对于不同类型滑坡的比例系数难以确定。Federico 等<sup>[42]</sup>通过 33 处典型滑坡的监测资料拟合得出最后时刻速度与加速度满足关系:

$$\ddot{\eta}_l=0.048\eta_l^{1.54} \quad (10)$$

在没有长期监测资料时, 建议可以仅根据当前少数几个监测值采用上述关系进行快速评估。

Segalinia 等<sup>[43]</sup>利用滑坡数据库采用 Fukuzono 方法计算了 26 个失事边坡在加速蠕变阶段的模型参数, 并对速率曲线进行规范化处理, 获得了无量纲化变形速率-时间曲线, 建议根据滑坡的  $\alpha$  值寻找对应的无量纲速率曲线, 确定紧急情况下的警报参考阈值。Crosta 等<sup>[44]</sup>应用 Fukuzono 公式得到了 Ruinon 滑坡变形速率特征曲线, 给出了失稳前几个时间点的速率阈值以为应急管理提供依据。Nie 等<sup>[45]</sup>根据某露天矿滑坡的监测数据, 提出了滑坡多项式预报模型, 并以累计位移曲线切向角达到 82°



的时间作为滑坡失稳时间。由于变量存在单位差异且不同滑坡监测时序的范围也不一致,直接采用变形曲线切向角作为预报判据的灰模型以及上述滑坡多项式预报模型并没有普适性。对此,Xu 等<sup>[46]</sup>对因变量进行变换,建立  $T-t$  曲线以获得无量纲斜率:

$$T_i = s_i/v_s \tag{11}$$

式中: $T_i$  为实际监测时间  $t_i$  对应的相对时间; $s_i$  为  $t_i$  时刻的累计位移; $v_s$  为稳定蠕变阶段的平均速率。但该方法需要已知  $v_s$ ,即较完整变形监测数据的获取以及蠕变分界点的确定。

4 存在问题与研究展望

上述滑坡时间预报方法的提出大都基于表面变形监测数据,并未考虑边坡岩土体的力学行为,且滑坡演化过程会受到各种不确定的和随机的参量影响,目前所提出的相关理论及预测方法还存在不足,滑坡预报仍是国内外研究的难点问题。

a. 蠕变经验模型较为实用简单,但由于该方法基于蠕变规律,因此只适用于延性破坏的岩土体,对于以脆性破坏为主的岩质滑坡,位移序列会呈现阶梯状,即出现短期突跳以及长期稳定趋势,此时蠕变经验模型预报方法并不适用。

b. GM(1,1)预报模型类似于 MsTPLP 方法,都是采用变形曲线的切向角阈值判断失稳点,但此阈值的确定除引入无量纲斜率外,尚未有较好的方法。

c. 基于蠕变曲线的预报方法都只适用于加速蠕变阶段的失稳预测,但边坡会受到降雨或水位等因素影响而产生周期性变形,这些方法应用的前提在于确定加速蠕变阶段的起始时刻,然而目前还未有通用的方法能够直接给出稳定蠕变和加速蠕变的分界点。

d. 无论采用哪种方法进行滑坡预测,其预测结果的精度依赖于监测数据的质量,包括监测时距、监测精度和监测的连续性等。

e. 随着数据驱动方法的发展,可以考虑将实际滑坡失事案例、相关工程的数值模型以及室内滑坡模型试验的测值序列结合起来作为学习样本,通过归类等方式,从坡体失稳过程的相似性角度,建立失稳预报模型,例如可通过迁移学习,将已训练好的坡体失稳预报模型应用到新的研究对象上。也可将地形地貌、地质构造和岩土材料组成等因素纳入到模型的构建之中,同时考虑降雨、水位、地震等环境荷载的触发作用影响,以更好地反映不同坡体的失稳特征,提高预报模型的预测精度。

参考文献:

[ 1 ] 桑凯. 近 60 年中国滑坡灾害数据统计与分析[J]. 科技

传播,2013,5(10):129. (SANG Kai. Statistics and analysis of landslide disaster data in China in recent 60 years [ J ]. Public Communication of Science & Technology, 2013,5(10):129. (in Chinese))

[ 2 ] 国土资源部. 全国地质灾害防治“十三五”规划[EB/OL]. (2016-12-28). [http://www.mnr.gov.cn/gk/gghj/201811/t20181101\\_2324932.html](http://www.mnr.gov.cn/gk/gghj/201811/t20181101_2324932.html)

[ 3 ] SAITO M. Forecasting time of slope failure by tertiary creep[C]//Proceedings 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: IEEE,1969: 677-683.

[ 4 ] XU Q, PENG D, ZHANG S, et al. Successful implementations of a real-time and intelligent early warning system for loess landslides on the Heifangtai terrace, China [ J ]. Engineering Geology, 2020, 278: 105817.

[ 5 ] FUJISAWA K, MARCATO G, NOMURA Y, et al. Management of a typhoon-induced landslide in Otomura (Japan) [ J ]. Geomorphology, 2010, 124 (3/4): 150-156.

[ 6 ] LOEW S, GSCHWIND S, GISCHIG V, et al. Monitoring and early warning of the 2012 Preonzo catastrophic rockslope failure [ J ]. Landslides, 2017, 14 (1): 141-154.

[ 7 ] CARLÁ T, NOLESINI T, SOLARI L, et al. Rockfall forecasting and risk management along a major transportation corridor in the Alps through ground-based radar interferometry [ J ]. Landslides, 2019, 16 (8): 1425-1435.

[ 8 ] VOIGHT B. A method for prediction of volcanic eruptions [ J ]. Nature, 1988, 332(6160):125-130.

[ 9 ] MINAMITANI T. An experimental study on the parameter affecting tertiary creep deformation of soils [ D ]. Kyoto: Kyoto University, 2007.

[10] DOK A, FUKUOKA H, KATSUMI T, et al. Tertiary creep reproduction in back-pressure-controlled ring shear test to understand the mechanism and final failure time of rainfall-induced landslides [ J ]. Disaster Prevention Research Institute Annuals, 2011, 54:263-270.

[11] SAITO M. Research on forecasting the time of occurrence of slope failure[J]. 土と基礎, 1969,17:29-38.

[12] YAMAGUCHI S. Some notices of countermeasure for landslide and slope failure[J]. Landslides Prevention and Slope Stability, 1978(1): 14-24.

[13] HAYASHI S, KOMAMURA F, PARK B W. On the forecast of time to failure of slope[J]. Landslides, 1988, 24(4): 11-18.

[14] FUKUZONO T. A method to predict the time of slope failure caused by rainfall using the inverse number of velocity of surface displacement [ J ]. Landslides, 1985, 22(2): 8-13.

- [15] ROSE N D, HUNGR O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(2):308-320.
- [16] CARLÁ T, INTRIERI E, RASPINI F, et al. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 18773.
- [17] JU N, HUANG J, HE C, et al. Landslide early warning, case studies from Southwest China [J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105917.
- [18] LI M, ZHANG L, DING C, et al. Retrieval of historical surface displacements of the Baige landslide from time-series SAR observations for retrospective analysis of the collapse event [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 240: 111695.
- [19] CROSTA G B, AGLIARDI F. Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements [J]. Canadian Geotech Journal, 2003, 40(1): 176-191.
- [20] IWATA N, SASAHARA K, WATANABE S. Improvement of Fukuzono's model for time prediction of an onset of a rainfall-induced landslide [C]// Workshop on World Landslide Forum. Cham, Switzerland: Springer, 2017: 8-15.
- [21] CARLÁ T, INTRIERI E, TRAGLIA D F, et al. Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses [J]. Landslides, 2017, 14(2): 517-534.
- [22] BOZZANO F, MAZZANTI P, MORETTO S. Discussion to: 'Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses' by T. Carlà, E. Intrieri, F. Di Traglia, T. Nolesini, G. Gigli and N. Casagli [J]. Landslides, 2018, 15(7): 1437-1441.
- [23] MANCONI A, GIORDAN D. Landslide failure forecast in near-real-time [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(2): 639-648.
- [24] O'DOWD N M, MADARSHAHIAN R, LEUNG M S H, et al. A probabilistic estimation approach for the failure forecast method using Bayesian inference [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 142: 105943.
- [25] BORSETTO M, FRASSONI A, BARBERA L G, et al. An application of voight empirical model for the prediction of soil and rock instabilities [C]//International Symposium on Landslides. Christchurch: ISSMFE, 1992: 335-341.
- [26] MUFUNDIRWA A, FUJII Y, KODAMA J. A new practical method for prediction of geomechanical failure-time [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(7): 1079-1090.
- [27] FUKUI K, OKUBO S. Life expectancy and tertiary creep for rock [C]//Proceedings of the Fall Meeting Mining and Minerals Processing Institute of Japan. Tokyo: Mining and Materials Processing Institute (MMIJ), 1997: 91-94.
- [28] HAO S, LIU C, LU C, et al. A relation to predict the failure of materials and potential application to volcanic eruptions and landslides [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 27877.
- [29] HAO S, YANG H, ELSWORTH D. An accelerating precursor to predict "time-to-failure" in creep and volcanic eruptions [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2017, 343: 252-262.
- [30] 苏爱军, 冯宗礼. 滑坡预报方法探讨 [J]. 水文地质工程地质, 1990(5): 50-51. (SU Aijun, FENG Zongli. Discussion on methodology of landslide prognosis [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1990(5): 50-51. (in Chinese))
- [31] 张军胜, 薛烨, 陶纪南. 巷道和边坡的稳定位移与突发失稳时间预测 [J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 39-45. (ZHANG Junsheng, XUE Ye, TAO Nan. Prediction of stability displacement and sudden instability time of roadways and slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 39-45. (in Chinese))
- [32] 李晓红, 靳晓光, 亢会明, 等. GM(1, 1) 优化模型在滑坡预测预报中的应用 [J]. 山地学报, 2001, 19(3): 265-269. (LI Xiaohong, JIN Xiaoguang, KANG Huiming, et al. Application of GM(1, 1) optimization model in landslide prediction and prediction [J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(3): 265-269. (in Chinese))
- [33] MIAO S, HAO X, GUO X, et al. Displacement and landslide forecast based on an improved version of Saito's method together with the verhulst-grey model [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(3): 53.
- [34] 贺小黑, 王思敬, 肖锐铎, 等. Verhulst 滑坡预测预报模型的改进及其应用 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 355-364. (HE Xiaohai, WANG Sijing, XIAO Ruihu, et al. Improvement of Verhulst forecast model of landslide and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup1): 355-364. (in Chinese))
- [35] 李天斌, 陈明东. 滑坡时间预报的费尔哈斯反函数模型法 [J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(3): 13-17. (LI Tianbin, CHEN Mingdong. Time prediction of landslide using verhulst inverse-function model [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(3): 13-17. (in Chinese))
- [36] 孙景恒, 李振明, 苏万益. Pearl 模型在边坡失稳时间预报中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1993(2): 38-43. (SUN Jingheng, LI Zhenming, SU Wanyi. Application of pearl model to the forecast of slope failure time [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993(2): 38-43. (in Chinese))

- [37] 贺小黑,王思敬,肖锐铨,等. 协同滑坡预测预报模型的改进及其应用[J]. 岩土工程学报,2013,35(10):1839-1848. (HE Xiaohai, WANG Sijing, XIAO Ruihao, et al. Improvement and application of synergetic forecast model for landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013, 35(10):1839-1848. (in Chinese))
- [38] WYLLIE D C, MUNN F J. The use of movement monitoring to minimize production losses due to pit slope failures[C]//Proceedings 1st International Symposium on Stability in Coal Mining. Vancouver: Miller Freeman Publications, 1979: 75-94.
- [39] FERRO V, CAROLLO F G, SERIO M A. Establishing a threshold for rainfall-induced landslides by a kinetic energy-duration relationship[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(16): 3571-3581.
- [40] 秦四清,王媛媛,马平. 崩滑灾害临界位移演化的指数律[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):873-880. (QIN Siqing, WANG Yuanyuan, MA Ping. Exponential laws of critical displacement evolution for landslides and avalanches [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(5):873-880. (in Chinese))
- [41] CARLÁ T, INTRIERI E, FARINA P, et al. A new method to identify impending failure in rock slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2017, 93: 76-81
- [42] FEDERICO A, POPESCU M, MURIANNI A. Temporal prediction of landslide occurrence: a possibility or a challenge [J]. Italian Journal Engineering Geology Environment, 2014(1): 41-60.
- [43] SEGALINIA A, VALLETTAB A, CARRI A. Landslide time-of-failure forecast and alert threshold assessment: a generalized criterion [J]. Engineering Geology, 2018, 248:72-80.
- [44] CROSTA G B and AGLIARDI F. How to obtain alert velocity thresholds for large rockslides[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002,27:1557-1565.
- [45] NIE Lei, LI Zechuang, LYU Yan, et al. A new prediction model for rock slope failure time: a case study in West Open-Pit mine, Fushun, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(3): 975-988.
- [46] XU Qiang, YUAN Yong, ZENG Yuping, et al. Some new pre-warning criteria for creep slope failure[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(1): 210-220.
- (收稿日期:2019-12-07 编辑:郑孝宇)

(上接第39页)

- [15] 李希胜,翟存林. 模糊数学围岩分类方法及其在隧道中的应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2006, 30(3):55-58. (LI Xisheng, ZHAI Cunlin. Fuzzy theory application in surrounding rock classification and in highway tunnel [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2006,30(3):55-58. (in Chinese))
- [16] 唐建新,李欣怡. 基于模糊数学的地铁深基坑稳定性评价[J]. 安全与环境学报,2018,18(6):2135-2140. (TANG Jianxin, LI Xinyi. On the stability evaluation of the deep subway foundation pit based on the fuzzy mathematical theory [J]. Journal of Safety and Environment,2018,18(6):2135-2140. (in Chinese))
- [17] 黄磊. 模糊数学评价方法在深基坑安全评价中的应用[J]. 人民珠江,2019,40(3):153-159. (HUANG Lei . Application of fuzzy mathematics evaluation method in safety evaluation of deep foundation pit[J]. Pearl River, 2019,40(3):153-159. (in Chinese))
- [18] 王忠文,马永欣,于峰. 钢筋混凝土结构可靠性模糊综合评估[J]. 交通科技与经济,2008,10(1):1-3. (WANG Zhongwen, MA Yongxin, YU Feng. Fuzzy comprehensive evaluation of the reliability of reinforced concrete structures [J]. Traffic science, technology and economy,2008,10(1):1-3. (in Chinese))
- [19] 顾昊,曹文翰,汪程,等. 混凝土坝服役性态监测效应量安全监控指标拟定方法[J]. 水利水电科技进展,2021, 41(1):30-34. (GU Hao, CAO Wenhan, WANG Cheng, et al. Safety monitoring index determination for monitoring effect quantity of concrete dams in service[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(1):30-34. (in Chinese))
- [20] 刘娟娟. 粉土的触变性室内试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2015.
- [21] 张目极,殷建凤,王巍,等. 湛江组结构性黏土物理力学特性对其触变性的影响[J]. 工程地质学报,2019(5):30. (ZHANG Muji, YIN Jianfeng, WANG Wei, et al. Influence of physico-mechanical parameters of Zhangjiang group structural clay on its thixotropy [J]. Journal of Engineering Geology, 2019(5):30. (in Chinese))
- [22] 楼康明,高彦斌. 上海地区饱和软黏土触变特性试验研究[J]. 价值工程,2020,39(22):239-241. (LOU Kangming, GAO Yanbin. Laboratory studies on thixotropy of saturated soft clay in Shanghai[J]. Value Engineering, 2020,39(22):239-241. (in Chinese))
- [23] 沈建华. 湛江组结构性粘土空间展布规律及工程特性研究[D]. 北京:中国科学院大学,2012.
- (收稿日期:2020-08-11 编辑:郑孝宇)