

基于斜率模型的突发型黄土滑坡失稳时间预测

方汕澳, 许强, 修德皓, 赵宽耀, 李志刚, 蒲枫

A study of the predicted instability time of sudden loess landslides based on the SLO model

FANG Shan'ao, XU Qiang, XIU Dehao, ZHAO Kuanyao, LI Zhigang, and PU Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009012>

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

基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型

An early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression

方然可, 刘艳辉, 苏永超, 黄志全 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 181-187

基于等速线模型的一维黄土动荷载响应分析

Dynamic load response analysis of 1-D loess based on the equal speed line model

王文丽, 王兰民 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 113-119

基于滑坡分类的西宁市滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment in Xining based on landslide classification

孙长明, 马润勇, 尚合欣, 谢文波, 李焱, 刘义, 王彪, 王思源 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 173-181

基于非线性损伤理论的改进CVISC模型及其在FLAC3D中实现

A non-linear damage rheological constitutive model and its application to a giant slow-moving landslide

蒋树, 文宝萍, 蒋秀姿, 李瑞冬, 赵成 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 56-56

考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在地震滑坡风险评估中的应用

Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment

冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 陈新建 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 154-160



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009012](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009012)

基于斜率模型的突发型黄土滑坡失稳时间预测

方汕澳, 许强, 修德皓, 赵宽耀, 李志刚, 蒲枫

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 突发型黄土滑坡灾前变形量小, 加速阶段历时短, 预警预报难度大。为探究该类滑坡失稳时间预测的新途径, 降低滑坡造成的经济损失和人员伤亡, 以 2019 年甘肃黑方台地区发生的 4 起滑坡为研究对象, 基于改进的切线角模型确定滑坡变形阶段, 提出以改进切线角为指标的简化累计计算方法; 采用斜率模型(SLO 模型)从滑坡各变形阶段起算进行失稳时间预测, 从速度倒数变化趋势、滑坡成灾模式等方面分析预测结果差异。研究发现: (1)斜率模型在突发型黄土滑坡失稳时间预测方面具有一定的可行性, 从 80° 切线角起算得到的预测精度最高; (2)以切线角为划分指标进行简化累计计算能降低数据波动对预测结果的影响, 反映预测寿命变化趋势, 提高预测精度; (3)速度倒数变化趋势呈“凹”型时提前预测概率大, 速度倒数变化趋势呈“凸”型时滞后预测概率大, 速度倒数变化趋势呈线性时模型预测精度较高; (4)该模型在黄土滑移崩塌型滑坡中的预测效果要优于静态液化型滑坡。

关键词: 黄土滑坡; 突发型滑坡; 时间预测; 斜率模型; 切线角

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0169-11

A study of the predicted instability time of sudden loess landslides based on the SLO model

FANG Shan'ao, XU Qiang, XIU Dehao, ZHAO Kuanyao, LI Zhigang, PU Feng

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The deformation and displacement of sudden loess landslides are small and the time of duration is short, which make early warning and forecast of landslides difficult. In order to explore a new way to predict the instability time of these landslides and reduce economic losses and casualties, four landslides in the Heifangtai area of Gansu Province in 2019 are taken as the research objects, and the deformation stage of landslide is determined with the improved tangent angle mode. A simplified cumulative calculation method based on the improved tangent angle is proposed. The SLO model is used to predict the instability time. The difference in the predicted results is analyzed from the speed change trend and disaster-causing mode. The results show that (1) the SLO model is of a certain feasibility in predicting the instability time of sudden loess landslides, and the predicted accuracy obtained from the tangent angle of 80° is the highest. (2) The simplified accumulative calculation performance using the tangent angle as the dividing index reduces the impact of data fluctuations on the predicted results and improves the predicted accuracy. (3) When the inverse velocity change trend is “concave”, the probability of early prediction is large. When the inverse velocity change trend is “convex”, the probability of early prediction is small. And when the inverse velocity change trend is linear, the prediction accuracy is relatively high.

收稿日期: 2020-09-03; 修订日期: 2020-11-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630640); 国家自然科学基金重大项目(41790445)

第一作者: 方汕澳(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害机理及防治方面研究。E-mail: 1026049600@qq.com

通讯作者: 许强(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害预测评价及防治处理方面的教学与研究工作。E-mail: xq@cudt.edu.cn

(4) The prediction effect of this model in loess fall landslides is better than that of loess flow landslides.

Keywords: loess landslide; sudden landslide; time prediction; SLO model; tangent angle

我国西北黄土地区降水稀少、气候干旱,临河地区多采用提水漫灌等灌溉方式,导致地下水位逐渐升高,滑坡等地质灾害频发^[1]。由灌溉诱发的滑坡加速阶段历时短、突发性强、危害性大^[2],因此,开展针对此类突发型黄土滑坡的监测预警预报工作对减少人员伤亡和降低经济损失具有重要意义。

已有多位学者针对突发型黄土滑坡监测预警预报展开了研究。亓星等^[3]通过研发具有智能变频功能的滑坡位移计成功获取了黑方台地区突发型黄土滑坡完整变形数据;赵超英等^[4]、史绪国等^[5]多位学者利用 InSAR 技术实现了黄土滑坡的早期识别和时序监测,提出黄土滑坡监测新方法;亓星等^[6-7]先后通过速度倒数法和改进的 Saito 模型,对突发型黄土滑坡失稳时间预测进行了研究;许强等^[8]通过建立以变形速率阈值和改进切线角为预警指标的四级预警判据,成功实现了对甘肃黑方台突发型黄土滑坡的预警,为解决突发型黄土滑坡“什么时间发生”的难题提供了有效途径。

失稳时间预测是监测预警预报工作的重要组成部分^[9],先后经历了现象预测^[10-11]、确定性预测、统计分析预测^[12-15]、非线性预测^[16-18]、确定性预测^[19]等几个阶段。确定性预测主要是基于滑坡运动参数,通过物理或数学方法将室内试验数据或滑坡监测数据进行推导,并不断总结改进得到的预测方法,能够反映滑坡的物理实质^[19]。Saito 等^[20]率先通过大量室内试验总结出理想状态下土质边坡失稳时间预测经验公式,并提出了基于蠕变第三阶段的图解法;Fukuzono^[21]在室内试验的基础上进一步总结出恒定荷载作用下滑坡临滑阶段位移速度倒数与时间的关系,提出速度倒数法预测模型;Mufundirwa 等^[22]在前人研究的基础上提出斜率模型(又称 SLOPE 模型、SLO 模型)来表示岩石蠕变末期应变发散特征,并应用到滑坡实例和岩石蠕变试验中。在这之后有多位学者^[23-24]基于以上预测模型进行了总结改进。

上述预测方法多应用于室内试验或岩质滑坡,关于自然条件下的黄土滑坡的研究很少,特别是突发型黄土滑坡。本文以 2019 年黑方台发生的突发型黄土滑坡为研究对象,通过改进的切线角预警模型确定滑坡变形阶段,基于斜率模型提出以切线角为指标的简化计算方法进行滑坡失稳时间预测研究,以期对突发型黄土滑坡的监测预警和应急管理提供一定的建议。

1 研究区概况

黑方台地区位于甘肃省临夏州永靖县内,地貌以黄土台塬、河谷地貌为主。整个台塬由黑台和方台组成,长 7.7 km,宽 2.5 km,面积为 13.7 km²,地势西高东低^[25-26]。受常年大水漫灌影响,台塬地下水位以 0.3 m/a 左右的速率上升,塬边滑坡频发^[8]。

据调查统计,黑方台地区发育滑坡多达 77 处,按发生位置的不同可将该区域滑坡划分为新塬段、党川段、黄茨段、焦家崖段、焦家段和陈家段共六个区段(图 1)。从滑坡成灾模式来看,黑方台地区发生的滑坡可划分为黄土基岩型、黄土泥流型、滑移崩塌型和静态液化型滑坡等 4 类,其中滑移崩塌型和静态液化型滑坡具有明显的突发性特征^[27]。2019 年成功预警了 4 起突发型滑坡,主要分布在北侧陈家段和南侧党川段,其中滑移崩塌型滑坡有陈家 6#、党川 6#和党川 7#,静态液化型滑坡有党川 4#,具体滑坡预警信息如表 1 所示。

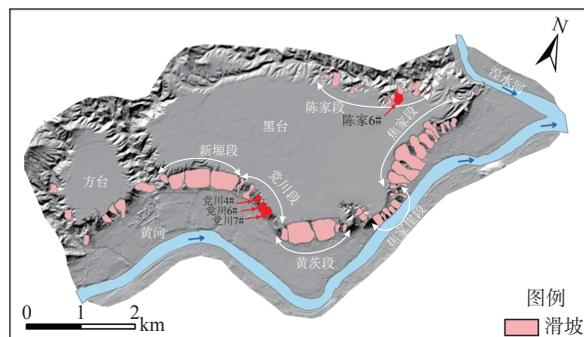


图 1 黑方台滑坡分布

Fig. 1 Location of the Heifangtai landslides

表 1 2019 年成功预警的滑坡

Table 1 Basic characteristics of landslides predicted in 2019				
编号	滑坡	发生时间	滑坡类型	提前预警时间
1	陈家6#	2019-03-04	滑移崩塌型	2 h
2	党川6#	2019-03-26	滑移崩塌型	40 min
3	党川4#	2019-04-19	静态液化型	18 min
4	党川7#	2019-10-05	滑移崩塌型	32 h

2 研究方法

2.1 监测数据的获取与处理

本文采用具有智能变频功能的滑坡位移计进行位移监测,该仪器能获取突发型黄土滑坡完整变形数

据。结合黑方台突发型黄土滑坡的发育规律和特征进行监测仪器的布设(图2):对于静态液化型滑坡,监测仪器布设在地下水渗水强烈的滑坡后缘附近;对于滑移崩塌型滑坡,监测仪器主要集中在多级裂缝发育的滑坡后缘附近。多次成功预警的案例也验证了上述布设原则的可行性^[8]。许强^[28]认为当滑坡进入加速

变形阶段,滑坡区会以滑动块体形式整体滑动,各监测点的位移矢量方向将趋于一致,选取加速变形阶段不同监测点的监测数据进行预警预报的差别不大。斜率模型是基于加速变形阶段的监测数据进行预测计算,故本文所选取的监测数据能够反映滑坡变形趋势,达到有效预警预报的目的。



图2 滑坡监测点布设示意图

Fig. 2 Monitoring systems of the landslides

采用移动平均法对监测数据进行滤波处理,以降低仪器噪声和周围环境对监测数据的影响,反映滑坡变形趋势。计算公式如下:

$$\bar{S}_i = \frac{1}{N} [S_i + S_{i-1} + \dots + S_{i-(N-1)}] \quad (1)$$

式中: S_i —— i 时刻滑坡的累计位移/mm;

N ——移动平均项数;

\bar{S}_i ——移动平均处理后的位移/mm。

处理后的数据预测标准误差大小与 N 的取值呈正线性相关, N 的取值越小误差越小, 在这里 N 取 24^[8]。

2.2 滑坡变形阶段确定

通过坐标变化进行无量纲处理得到的改进切线角模型能够使滑坡变形曲线在相同切线角特征下进行比较^[29], 因此, 采用该模型确定滑坡变形阶段, 计算公式如下:

$$T_i = \frac{S_i}{\bar{v}} \quad (2)$$

$$\alpha_i = \arctan \frac{T_i - T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (3)$$

式中: S_i —— i 时刻滑坡的累计位移/mm;

T_i 、 T_{i-1} ——变换后与时间相同量纲的纵坐标值, 两者相差一个监测周期, 如 1 天、1 周等;

\bar{v} ——滑坡等速变形阶段的速率/(mm·d⁻¹);

α_i ——改进切线角/(°);

t_i 、 t_{i-1} ——监测时刻, 两者相差一个监测周期。

当切线角大于 45°时, 可认为滑坡进入初加速变形阶段; 当切线角大于 80°时, 滑坡进入中加速阶段; 当切线角大于 85°时, 滑坡进入加加速阶段; 切线角越接近 90°, 滑坡越接近发生。突发型黄土滑坡前期变形缓慢且不稳定, 切线角存在较大幅度的波动, 通过计算发现, 当切线角达到 60°后, 波动性减小且变化趋势较明显, 元星等^[7]也指出在滑坡初加速变形阶段(45°~80°)的前期, 距离滑坡实际发生时间还较长, 较小的波动都会导致预测结果产生较大的差异。故本

文以 60°切线角为起点, 每 5°为间隔, 将滑坡加速阶段后期划分为 60°~ 65°、65°~ 70°、70°~ 75°、75°~ 80°、80°~ 85°、85°~ 90°共 6 个变形阶段。

2.3 斜率模型介绍

SLO 失稳时间预测模型源于 Fukui 等^[30] 根据“加速蠕变理论”总结出的岩石加速蠕变阶段应变与时间关系, 见式(4):

$$\varepsilon = -A \log(t_f - t) + B \quad (4)$$

式中: ε ——应变;

t ——时间/d;

t_f ——失稳时间/d;

A 、 B ——常数。

Mufundirwa 等^[22] 在式(4)的基础上令滑坡累计位移 s 代替应变 ε , 同时式(4)两侧对时间 t 进行微分, 得到式(5), 重新整理后得到式(6)。

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{A}{t_f - t} \quad (5)$$

$$vt = vt_f - A \quad (6)$$

式中: v ——滑坡位移速度/(mm·d⁻¹)。

将式(6)中的 $v \cdot t$ 视作 y , v 视作 x , t_f 视作斜率, 则式(6)转化为以 t_f 为斜率的线性方程, 求失稳时间 t_f 也转变为求该方程的斜率 k , 即求该线性方程的斜率 (SLOPE), 即 SLO 预测模型。该模型实质上是速度倒数模型在线性条件下的变形, 前提假设为滑坡加速阶段的速度倒数变化符合线性趋势。与其他预测模型相比, 该模型将预测失稳时间转化为斜率进行求解, 不需要进行复杂的拟合和参数求解, 在进行突发型黄土滑坡失稳时间预测方面具有一定的优势。

2.4 预测计算数据选取

斜率模型是基于滑坡加速蠕变阶段提出的, 为保证模型适应性和预测结果可靠性, 计算数据应从加速变形阶段选取。计算截点的选择对及时判断滑坡危险性意义重大, 计算截点过早可能会导致时间预报偏差过大, 过晚可能会导致应急处理时间不足。大量成功预警的滑坡案例表明, 当切线角达到 85°时, 滑坡进入临滑阶段, 失稳概率极大, 此时发布预警预报信息能够有效地指导灾情应急处理工作, 降低滑坡造成的经济损失和人员伤亡。因此, 为了更好地评估预测结果, 本文在进行滑坡失稳时间预测计算时, 以各加速变形阶段第一组数据为计算起点, 以切线角达到 85°为计算截点, 采用累计计算的方式进行预测计算 (图 3)。

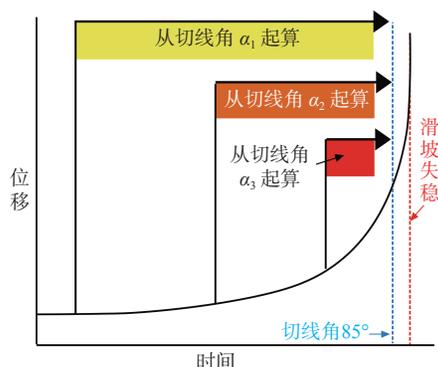


图 3 累计计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cumulative calculation

但研究发现, 由于测量误差、环境变化、滑坡局部滑动和数据处理手段的局限性等多种因素影响, 通过监测仪器获得的滑坡变形曲线并不稳定, 新数据的增加会对预测结果产生较大的影响, 所以本文在累计计算的基础上提取关键变形阶段的数据进行简化计算, 只选取滑坡切线角在 60°、65°、70°、75°、80°、85°时对应的监测数据进行累计计算, 这既能保证计算数据能反映滑坡变形趋势, 又能降低变形波动对预测结果的影响。

2.5 预测结果评价

本文主要采用预测寿命图和预测结果均方根误差 (RMSE) 从定性和定量的角度进行模型预测结果评价。

预测寿命指的是预测失稳时间与当前预测时间节点的差值, 即 $t_f - t_m$ 。预测寿命图以预测寿命为 y 轴, 时间为 x 轴, 能够反映预测结果提前预测、滞后预测、预测失效和预测寿命稳定性等情况 (图 4)。

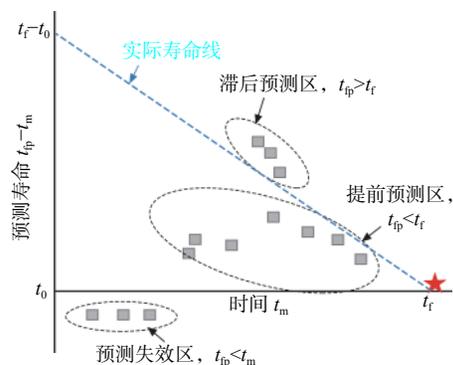


图 4 预测寿命图 (据文献 [22], 有删改)

Fig. 4 Predicted life expectancy (modified from Ref. [22])

采用均方根误差 (RMSE) 用来评价模型预测精度, RMSE 的值越小, 预测精度越高, 其表达式如下:

$$y_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (7)$$

式中: y_{MSE} ——均方根误差值;
 x_i ——滑坡实际寿命/h;
 \hat{x}_i ——滑坡预测寿命/h;
 N ——预测总数。

3 研究结果

3.1 滑移崩塌型滑坡

滑移崩塌型滑坡从发育到发生历时较短, 具有明显的突发性特征, 但其运动距离和体积较小。滑坡发育与灌溉水关系不大, 发育过程主要是坡体在自重和降雨条件下向临空面发生不均匀沉降和变形, 在坡体后缘发育有多级裂缝和错台。以党川 6# 滑坡的预测结果为例进行分析。该滑坡失稳时间为 2019 年 3 月 26 日凌晨 5 点。通过改进的切线角模型得到滑坡变形曲线(图 5), 切线角在凌晨 4 点 20 分达到 85°, 进入加速阶段, 此时距滑坡失稳还有 40 min。

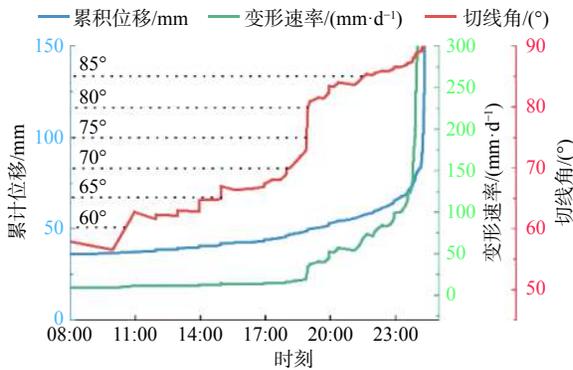
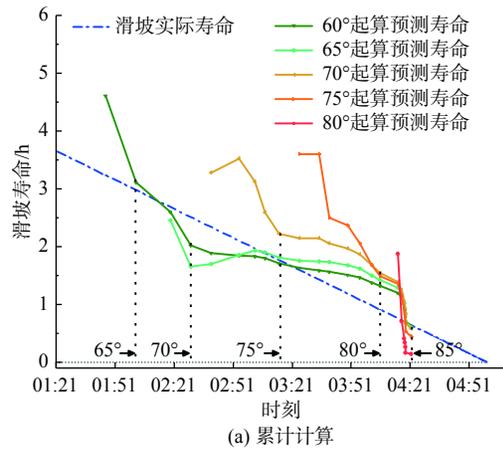


图 5 党川 6# 滑坡变形曲线

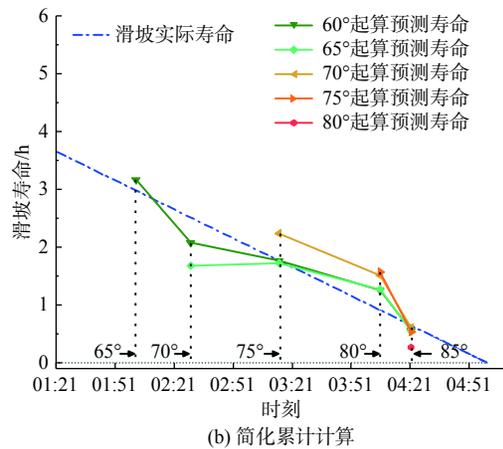
Fig. 5 Deformation curve of the Dangchuan 6# landslide

党川 6# 滑坡各变形阶段的预测寿命如图 6 所示, 简化累计计算得到的各变形阶段预测寿命波动性较小, 变化趋势较平稳, 且与实际寿命线变化趋势相近。而累计计算得到的各变形阶段预测寿命波动性较大, 在切线角达到 80°后, 预测寿命变化趋势才趋于平稳。通过计算两种方式得到的滑坡各变形阶段预测结果均方根误差(表 2)可以看出, 简化累计计算得到各变形阶段预测结果均方根误差均小于 0.5 h, 预测精度较高。

通过对比另外两起滑移崩塌型滑坡(陈家 6# 和党川 7#)的预测结果也可以看出(图 7)。两种计算方式得到滑坡各变形阶段的预测寿命变化趋势相近, 累计



(a) 累计计算



(b) 简化累计计算

图 6 党川 6# 滑坡预测寿命

Fig. 6 Predicted life of the Dangchuan 6# landslide

表 2 党川 6# 滑坡预测结果均方根误差
 Table 2 RMSE of the predicted results of the Dangchuan 6# landslide

起算角度	累计计算/h	简化累计计算/h
60°起算	0.40	0.26
65°起算	0.40	0.45
70°起算	0.70	0.44
75°起算	1.00	0.47
80°起算	0.56	0.38

计算得到的各变形阶段预测寿命波动性较大, 在切线角达到 80°后才趋于稳定; 而简化累计计算得到的各变形阶段预测寿命波动性较小, 变化趋势较平稳, 相应的预测结果均方根误差也明显小于累计计算方式, 预测精度较高(表 3)。其中, 党川 7# 滑坡的预测结果的均方根误差较大, 但考虑到预测失稳时间多早于实际失稳时间, 且随着起算角度的增加, 预测误差逐渐减小, 所以斜率模型在党川 7# 滑坡的预测结果较“安全”。总体来看, 斜率模型在滑移崩塌型滑坡中的预测效果较好。

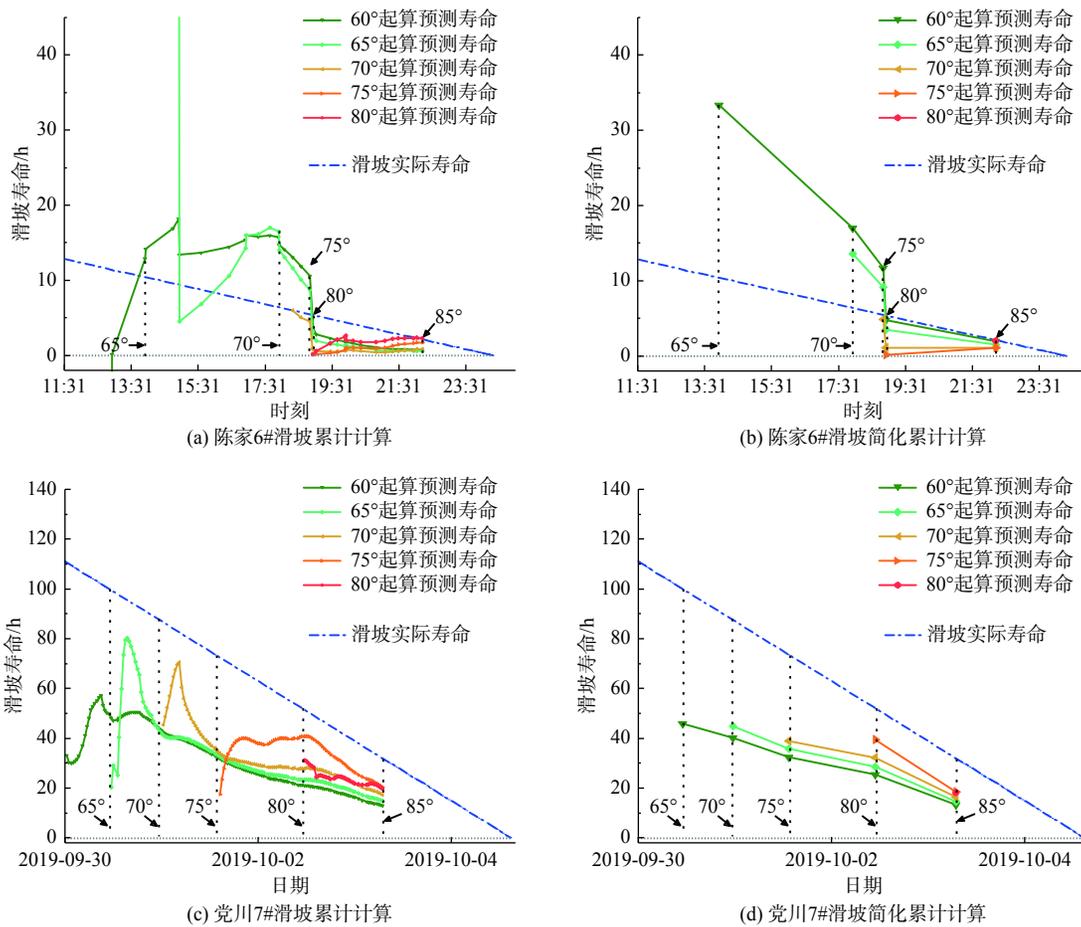


图 7 陈家 6#和党川 7#滑坡预测寿命

Fig. 7 Predicted life expectancy of Chenjia 6# and Dangchuan 7#

表 3 陈家 6#和党川 7#滑坡预测结果的均方根误差

Table 3 RMSE of the predicted results of the Chenjia 6# and Dangchuan 7# landslides

滑坡	起算角度	累计计算/h	简化累计计算/h
陈家6#	60°起算	10.54	5.22
	65°起算	20.64	2.08
	70°起算	3.15	1.49
	75°起算	3.29	2.68
	80°起算	2.36	0.07
党川7#	60°起算	41.49	39.74
	65°起算	35.27	31.95
	70°起算	28.71	24.72
	75°起算	23.51	12.97
	80°起算	18.23	9.74

3.2 静态液化型滑坡

静态液化型滑坡整体呈座椅状,凹向台塬内部,底部有大量地下水渗出,后壁陡峭。滑坡的发育一方面是由于该地区黄土颗粒以粉粒为主,黏粒含量较少,拥有易于产生静态液化的颗粒级配;另一方面,该地区多年大水漫灌的灌溉方式导致地下水位不断抬

升,由于黄土层底部粉质黏土层的隔水性,塬边黄土层底部易形成饱水层,形成软基效应,这成为静态液化产生的先决条件^[31]。滑后弧形凹槽地貌产生的汇水作用和坡脚滑坡体堆积造成的地下水雍高也容易导致该类滑坡呈渐进后退式发育。党川 4#滑坡就是一起典型的静态液化型滑坡,滑坡变形曲线如图 8 所示。滑坡前期变形缓慢且不明显,位移和变形速率没有明显变化,切线角在失稳前 18 min 才达到 85°,突发性极强。

从党川 4#滑坡各变形阶段的预测寿命图(图 9)可以看出,两种计算方式得到的各变形阶段预测寿命变化趋势相近,且预测寿命多大于实际滑坡寿命,说明预测失稳时间多晚于实际失稳时间。在切线角达到 80°后,预测寿命开始向实际寿命线收敛。

对比两模型得到的各变形阶段预测结果均方根误差(表 4)可以看出,简化累计计算方式的预测精度略高于累计计算方式,但两种计算方式的预测误差均较大。从 80°切线角起算得到的预测结果均方根误差

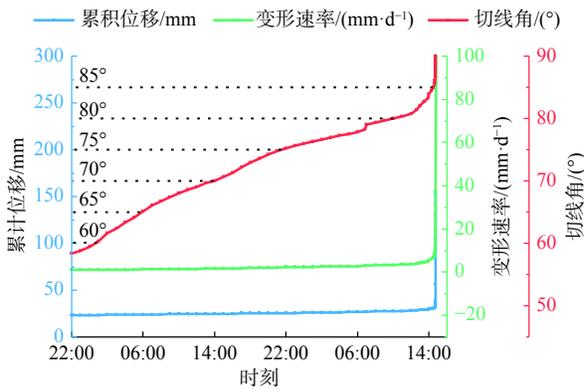
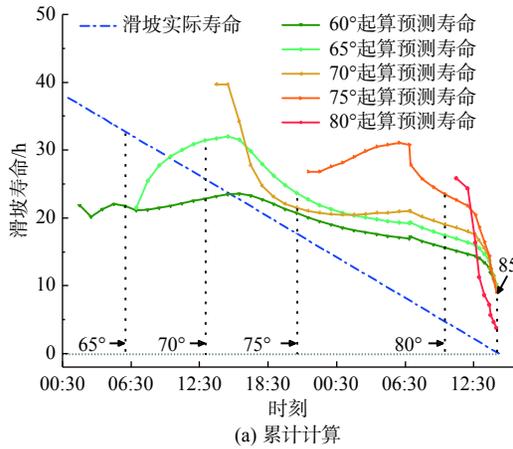
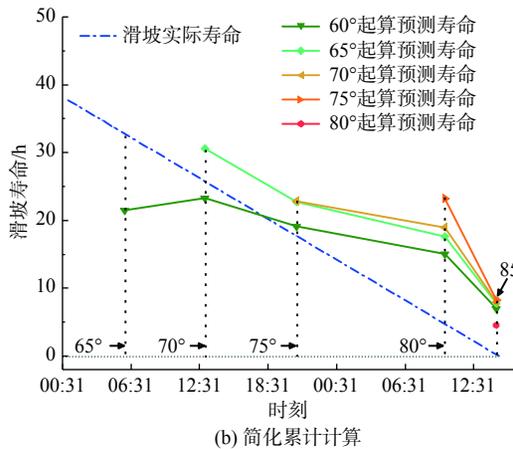


图8 党川4#滑坡变形曲线

Fig. 8 Deformation curve of the Dangchuan 4# landslide



(a) 累计计算



(b) 简化累计计算

图9 党川4#滑坡预测寿命

Fig. 9 Predicted life expectancy of the Dangchuan 4# landslide

较小,在切线角达到80°之后,各变形阶段的预测寿命开始向实际寿命线收敛。总体来看,斜率模型在静态液化型滑坡中的预测效果较差。

3.3 预测结果分析

3.3.1 速度倒数变化趋势的影响

各变形阶段预测结果提前或滞后预测概率的大小与速度倒数曲线的凹凸性有关。以党川4#和党川

表4 党川4#滑坡预测结果均方根误差

Table 4 Predicted RMSE of the Dangchuan 4# landslide

起算角度	累计算/h	简化累计算/h
60°起算	8.77	7.57
65°起算	9.41	8.24
70°起算	11.24	9.80
75°起算	16.93	14.22
80°起算	12.48	4.28

7#滑坡为例进行分析,在切线角达到70°之后,党川4#滑坡各变形阶段得到的预测失稳时间多晚于实际失稳时间,而党川7#各变形阶段得到的预测失稳时间均早于实际失稳时间。对比70°切线角之后两滑坡各变形阶段速度倒数曲线图(图10)可以看出,党川4#滑坡速度倒数曲线呈“凸”型,党川7#滑坡速度倒数曲线呈“凹”型,由于斜率模型是速度倒数法在线性条件下的变形,前提假设为滑坡加速阶段的速度倒数变化符合线性趋势,即速度倒数曲线为一条直线,该直线与时间轴的交点即为失稳时间点^[9]。对于党川4#这类速度倒数图像呈“凸”型的滑坡,其前期速度倒数变化符合线性趋势,但临滑阶段速度迅速增加,速度倒数迅速向时间轴收敛,偏离了前期线性趋势,前期线性趋势线与时间轴的交点多滞后于实际失稳点,故滞后预测概率大。而对于党川7#这类速度倒数图像呈“凹”型的滑坡,其前期速度倒数的线性趋势与时间轴的交点多早于实际失稳点,故提前预测概率大。

3.3.2 滑坡成灾模式的影响

滑坡成灾模式不同是造成不同滑坡预测结果差异的根本原因。静态液化型滑坡前期变形缓慢且不明显,主要表现为下伏软基在重力和地下水作用下向临空方向缓慢蠕动,变形量大于1 mm/d,坡体后缘发育有裂缝,宽度大于3 mm,坡脚局部渗水;随着变形不断发展,上覆黄土裂缝向坡体内部发育,形成潜在滑动面,下伏饱和土体结构发生改变,坡脚有大量地下水渗出,且有颗粒物被带出,存在地下水局部雍高现象;当滑坡进入临滑阶段,由变形产生的孔隙水压力来不及消散,逐渐增大,并形成超孔隙水压力,底部饱和黄土层产生液化,坡体发生整体溃散,移动速度骤升^[32-33]。滑坡成灾模式如图11所示。所以,受静态液化的影响,该类滑坡临滑阶段速度骤升,速度倒数图像近乎与时间轴垂直,严重偏离了前期线性变形趋势,导致其预测结果偏差大,模型预测精度偏低。

而滑坡崩塌型滑坡的变形过程受地下水影响小,滑坡变形主要是坡体在自重作用下向临空面发生移

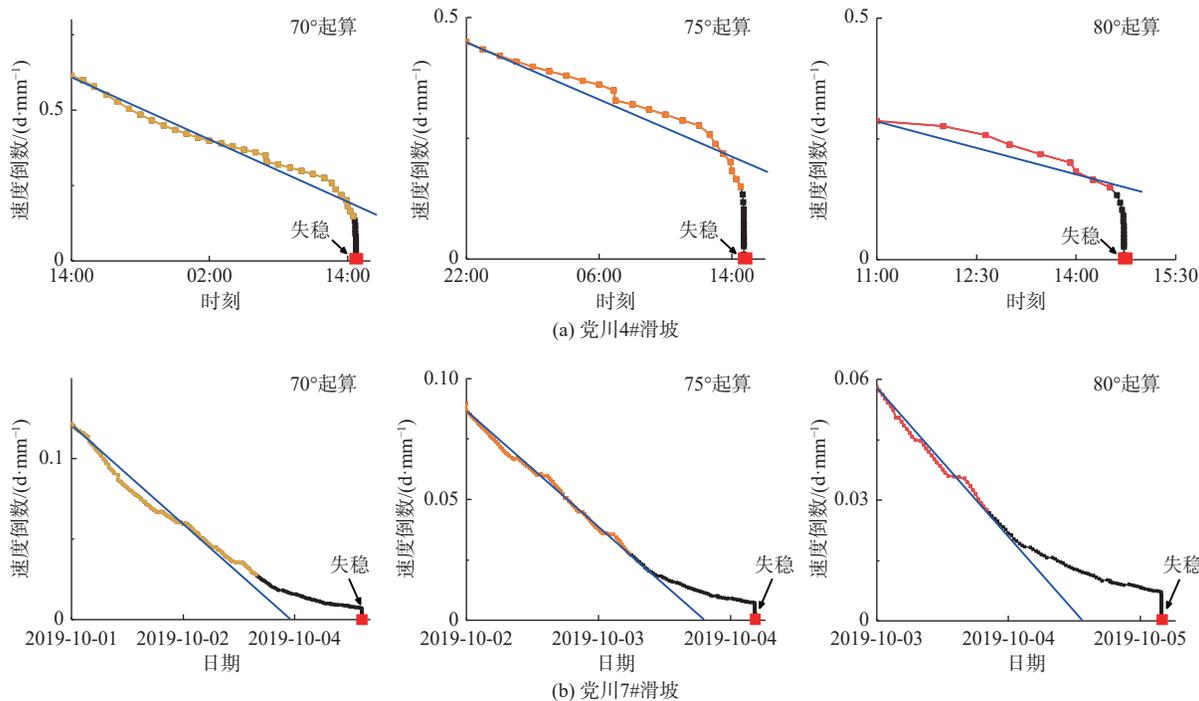


图 10 滑坡速度倒数曲线图

Fig. 10 Inverse velocity of landslides

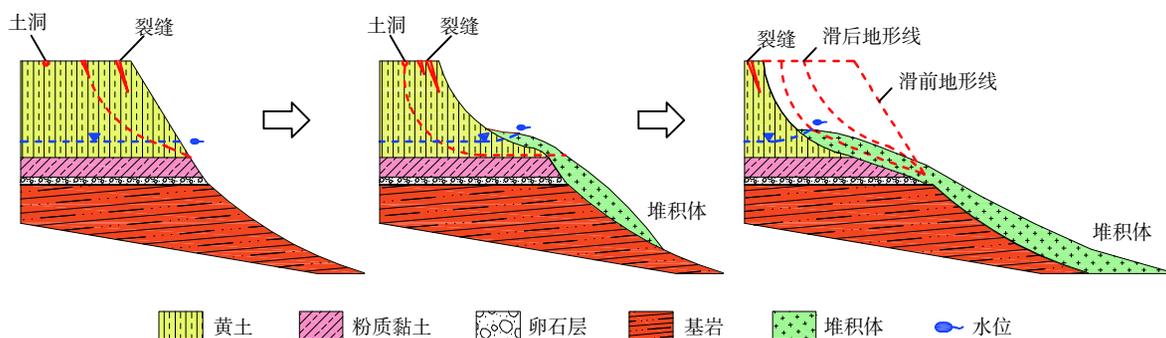


图 11 静态液化型滑坡成灾模式图 (据文献 [27], 有删改)

Fig. 11 The disaster-causing mode of loess flow landslides (modified from Ref. [27])

动,上覆黄土体发生不均匀沉降和变形,随着变形的不断发展,裂缝继续向黄土内部扩展延伸,形成潜在滑动面,错台沿平行临空面方向多级发育,其成灾模式如图 12 所示。受上覆黄土不均匀沉降和裂缝间歇错动的影响,滑移崩塌型滑坡在变形过程中也会出现速度的波动,预测寿命也会随速度变化出现相应的波动。

4 讨论

本文以 2019 年黑方台地区发生的 4 起突发型黄土滑坡为例,验证了斜率模型在该类滑坡失稳时间预测方面的可行性,但模型预测准确性和适应性还需进行验证总结。对于加速阶段历时极短的黄土滑坡,例如静态液化型滑坡,该模型还是有很大的局限性,仅

依靠位移一项监测指标很难实现滑坡失稳临界点的准确预测。有关这类强突发性滑坡的预警预报工作应在考虑滑坡成因机制的基础上,结合位移、倾角、地下水位等多种指标进行综合预警预测。本文提出了以切线角为指标的简化累计计算,降低了数据波动对预测精度的影响,根据滑坡不同变形阶段的变形趋势选择更优的数据处理方法也是今后预警预测工作开展的重点。

5 结论

(1)SLO 失稳时间预测模型参数少,无需进行复杂的拟合,计算效率高。通过 2019 年黑方台发生的滑坡实例验证了该模型在突发型黄土滑坡失稳时间预

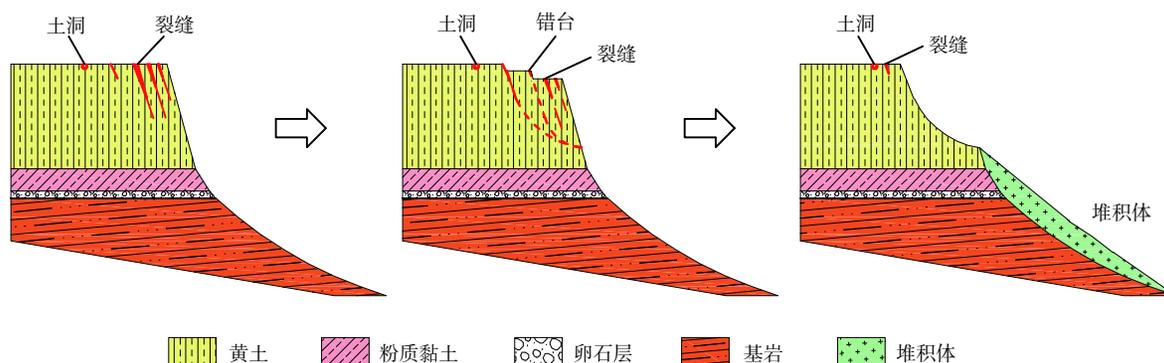


图 12 滑移崩塌型滑坡成灾模式图 (据文献 [27], 有删改)

Fig. 12 Disaster-causing mode of loess fall landslides (modified from Ref. [27])

测方面具有一定的可行性。

(2) 由于观测不确定性和处理方法局限性的影响, 将所有的监测数据进行累计计算并不一定能取得很好预测效果。本文在累计计算的基础上提出以切线角为划分指标的简化累计计算, 选取指定切线角对应的监测数据进行简化累计计算有助于提高模型预测精度。

(3) 简化累计计算得到的滑坡各变形阶段预测寿命变化趋势较稳定, 而累计计算方式得到的滑坡各变形阶段预测寿命的变化趋势波动较大, 在切线角达到 80° 后才趋于稳定。简化累计计算得到的滑坡各变形阶段预测结果均方根误差小, 预测精度高, 从切线角 80° 起算得到的预测精度最高。

(4) 预测结果提前或滞后预测概率的大小与速度倒数曲线的凹凸性有关。速度倒数变化趋势呈“凹”型, 预测时间多早于实际失稳时间; 速度倒数变化趋势呈“凸”型, 预测时间多晚于实际失稳时间; 速度倒数变化趋势符合线性变化趋势时, 模型预测精度较高。

(5) 滑坡成灾模式不同是影响各滑坡预测结果不同的根本原因, 静态液化型滑坡能在极短时间内迅速失稳, 速度变化严重偏离了前期变形趋势, 模型预测结果偏差大。滑移崩塌型滑坡变形趋势相对较稳定, 但也会因速度波动产生预测偏差。

参考文献 (References) :

[1] 张茂省. 引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术——以黄河三峡库区甘肃黑方台移民灌区为例[J]. 地质通报, 2013, 32(6): 833 – 839. [ZHANG Maosheng. Formation mechanism as well as prevention and controlling techniques of loess geo-hazards in irrigated areas: A case study of Heifangtai immigration area in the Three Gorges Reservoir of the Yellow River[J].

Geological Bulletin of China, 2013, 32(6): 833 – 839. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684 – 691. [PENG Jianbing, LIN Hungzhou, WANG Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(4): 684 – 691. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 元星, 朱星, 修德皓, 等. 智能变频位移计在突发性黄土滑坡中的应用——以甘肃黑方台黄土滑坡为例[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 190 – 195. [QI Xing, ZHU Xing, XIU Dehao, et al. Application of intelligent variable frequency displacement meter to sudden loess landslide—a case of Heifangtai Loess Landslide[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(5): 190 – 195. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 赵超英, 刘晓杰, 张勤, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测与失稳模式研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 996 – 1007. [ZHAO Chaoying, LIU Xiaojie, ZHANG Qin, et al. Research on loess landslide identification, monitoring and failure mode with InSAR technique in Heifangtai, Gansu[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 996 – 1007. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 史绪国, 张路, 许强, 等. 黄土台塬滑坡变形的时序 InSAR 监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1027 – 1034. [SHI Xuguo, ZHANG Lu, XU Qiang, et al. Monitoring slope displacements of loess terrace using time series InSAR analysis technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1027 – 1034. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 元星. 突发性黄土滑坡监测预警研究——以甘肃黑

- 方台黄土滑坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2017. [QI Xing. Sudden loess landslide monitoring and early warning research—a case study of Gansu landslide in Heifangtai Loess[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 元星, 朱星, 许强, 等. 基于斋藤模型的滑坡临滑时间预报方法改进及应用[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 832 – 839. [QI Xing, ZHU Xing, XU Qiang, et al. Improvement and application of landslide proximity time prediction method based on Saito model[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(4): 832 – 839. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 许强, 彭大雷, 何朝阳, 等. 突发型黄土滑坡监测预警理论方法研究——以甘肃黑方台为例[J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 111 – 121. [XU Qiang, PENG Dalei, HE Chaoyang, et al. Theory and method of monitoring and early warning for sudden loess landslide—a case study at Heifangtai terrace[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 111 – 121. (in Chinese with English abstract)]
- [9] EMANUELE I, CARLA T, GIGLI G. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 193: 333 – 349.
- [10] 田尤, 杨为民, 李浩. 黄土滑坡发育特征参数的幂律相依性研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 131 – 137. [TIAN You, YANG Weimin, LI Hao. Power law correlations between feature parameters of loess landslides[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(3): 131 – 137. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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)]
- [12] 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)]
- [13] 晏同珍, 殷坤龙, 伍法权, 等. 滑坡定量预测研究的进展[J]. 水文地质工程地质, 1988, 15(6): 8 – 14. [YAN Tongzhen, YIN Kunlong, WU Faquan, et al. Progress in research on quantitative prediction of landslides[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1988, 15(6): 8 – 14. (in Chinese)]
- [14] 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 with English abstract)]
- [15] 黄健敏, 赵国红, 廖芸婧, 等. 基于Logistic回归的降雨诱发区域地质灾害易发性区划及预报模型建立——以安徽歙县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3): 98 – 105. [HUANG Jianmin, ZHAO Guohong, LIAO Yunjing, et al. Research on rainfall induced regional geo-hazard forecast model based on the logistic regression[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(3): 98 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杨背背, 殷坤龙, 杜娟. 基于时间序列与长短时记忆网络的滑坡位移动态预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2334 – 2343. [YANG Beibei, YIN Kunlong, DU Juan. A model for predicting landslide displacement based on time series and long and short term memory neural network[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2334 – 2343. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 杨帆, 许强, 范宣梅, 等. 基于时间序列与人工蜂群支持向量机的滑坡位移预测研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 880 – 889. [YANG Fan, XU Qiang, FAN Xuanmei, et al. Prediction of landslide displacement time series based on support vector regression machine with artificial bee colony algorithm[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(4): 880 – 889. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 朱晓霞, 张力, 杨树文. 降雨引发的兰州黄土滑坡时空规律分析和临界降雨量预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 24 – 31. [ZHU Xiaoxia, ZHANG Li, YANG Shuwen. Characteristics of rainfall-induced loess landslides and their threshold rainfall in Lanzhou[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(4): 24 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 许强, 黄润秋, 李秀珍. 滑坡时间预测预报研究进展[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(3): 478 – 483. [XU

- Qiang, HUANG Runqiu, LI Xiuzhen. Research progress in time forecast and prediction of landslides[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(3): 478 – 483. (in Chinese with English abstract)]
- [20] SAITO M. Forecasting time of slope failure by tertiary creep[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: [s. n.], 1969: 677-683.
- [21] FUKUZONO T. A new method for predicting the failure time of a slope[C]//Proceedings of the 4th International Conference and Field Workshop on Landslides. Tokyo: Tokyo University Press, 1985: 145-150.
- [22] 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.
- [23] VOIGHT B. A method for prediction of volcanic eruptions[J]. *Nature*, 1988, 332: 125 – 130.
- [24] 黄建, 姚仰平. 高填方边坡失稳时间预测的实用模型 [J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4057 – 4064. [HUANG Jian, YAO Yangping. A practical model for predicting the failure time of high fill slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 4057 – 4064. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 周飞, 许强, 巨袁臻, 等. 黑方台黄土斜坡变形破坏机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(1): 157 – 163. [ZHOU Fei, XU Qiang, JU Yuanzhen, et al. A study of the deformation and failure mechanism of the Heifangtai loess slope[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(1): 157 – 163. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李骅锦, 许强, 何雨森, 等. 甘肃黑方台滑坡滑距参数的BP神经网络模型 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 141 – 146. [LI Huajin, XU Qiang, HE Yusen, et al. BP neural network model for analyzing the impact factors of the travel distance of the Heifangtai landslide in Gansu[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 141 – 146. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 彭大雷. 黄土滑坡潜在隐患早期识别研究——以甘肃黑方台为例 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [PENG Dalei. Study on early recognition for potentially loess landslide—a case study at Heifangtai terrace, Gansu Province, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360 – 374. [XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 360 – 374. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 许强, 曾裕平, 钱江澎, 等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据 [J]. 地质通报, 2009, 28(4): 501 – 505. [XU Qiang, ZENG Yuping, QIAN Jiangpeng, et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide prewarning criteria[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(4): 501 – 505. (in Chinese with English abstract)]
- [30] FUKUI K, OKUBO S. Life expectancy and tertiary creep for rock[C]//Proceedings of the Fall Meeting Mining and Minerals Processing Institute of Japan. [S.l.]: Mining and Minerals Processing Institute of Japan, 1997: 91–94.
- [31] 张一希. 黄土静态液化影响因素的试验研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [ZHANG Yixi. Experimental study on influencing factors of static liquefaction of the loess[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 许强, 魏勇, 彭大雷, 等. 泾阳南塬蒋刘4#滑坡特征及成因机制 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 123 – 130. [XU Qiang, WEI Yong, PENG Dalei, et al. Characteristics and failure mechanism of the Jiangliu 4# landslide in the southern tableland in Jingyang County[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 123 – 130. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 许强, 彭大雷, 元星, 等. 2015年4.29甘肃黑方台党川2#滑坡基本特征与成因机理研究 [J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 167 – 180. [XU Qiang, PENG Dalei, QI Xing, et al. Dangchuan 2# landslide of April 29, 2015 in Heifangtai area of Gansu Province: Characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(2): 167 – 180. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华