



蠕变型滑坡阈值确定方法及工程应用

周小平^{1*}, 叶腾¹, 黄小城^{2*}

1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044;

2. 湖南科技大学土木工程学院, 湘潭 411201

* E-mail: xiao_ping_zhou@126.com; xchuang@cqu.edu.cn

收稿日期: 2021-11-22; 接受日期: 2022-01-27; 网络版发表日期: 2022-08-23

国家自然科学基金(批准号: 51839009, 51909087)资助项目

摘要 准确的阈值设定对滑坡监测预警至关重要, 然而现有滑坡阈值判据存在精确性不足和适用性有限等问题。本文基于边坡变形位移、速度和加速度三个无量纲参数, 对80多个边坡变形监测实例进行统计分析, 利用概率统计理论, 确立了二级无量纲滑坡失稳阈值。最后应用无量纲阈值对江西某铜矿#2滑坡进行预警分析, 结果表明: (1) “双样本异方差t检验”法检验发现, 破坏案例中的无量纲参数显著性大于未破坏案例对应的无量纲参数; (2) 无量纲阈值可以消除矢量参数的方向性影响, 在物理意义上更有普适性; (3) 通过“ROC曲线”法验证了无量纲阈值模型的可靠性和精确性, 并从理论上说明了加速度无量纲阈值的预测精度最高; (4) 三个无量纲阈值在案例中对应的预警时间并不相同, 加速度二级无量纲阈值的预警时间最早。

关键词 滑坡, 阈值, 预警, 无量纲参数, 显著性检验

1 引言

中国是一个多山国家, 近10年全国发生的地质灾害多达26余万起, 其中滑坡灾害占地质灾害总数的73.81%, 直接经济损失达430多亿元。开展滑坡的预测预报可有效防治滑坡, 因而如何准确对滑坡进行预警至关重要^[1-3]。

20世纪60年代Saito^[4]提出采用画图法来预测边坡破坏时间, 该模型根据边坡加速变形阶段的不同加速特征实现滑坡临滑预测。此后Stevenson^[5]和Federico等人^[6,7]对模型进行了修正和改进。后来陆续出现了灰色预报模型^[8]、黄金分割预报法模型^[9]和突变模型等^[10], 但准确性依赖于区间取值。研究表明: 滑坡的成功预报

与阈值的确定存在很大关联, 滑坡阈值确定方法主要有: 工程类比法阈值、加速度阈值、降雨量阈值和切向角阈值。在工程类比法阈值方面, 李聪等人^[11]通过建立岩质滑坡数据库, 开发了滑坡实例推理系统, 用11个特征值表示边坡的6大特征属性, 修正得到合理边坡预警阈值; 郭璐等人^[12]认为斜坡失稳是个多维度问题, 基于滑坡全息论, 提出了垂直位移方向率协调性参数, 以加速度阈值对水库型堆积层边坡失稳变形进行判据; 李德营等人^[13]通过统计滑坡在加速破坏阶段的位移曲线, 并结合实例研究发现速度倒数法可以在直线型和波动型滑坡中进行应用。陈贺等人^[14]针对蠕滑型边坡, 提出用动能、动能变化率两个滑坡预警指标, 对深部位移与动能、动能变化率相关特征和规

引用格式: 周小平, 叶腾, 黄小城. 蠕变型滑坡阈值确定方法及工程应用. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1802~1818
Zhou X P, Ye T, Huang X C. Determinations of the early warning threshold for creep landslides and their applications (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1802~1818, doi: [10.1360/SST-2021-0503](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0503)

律进行了总结, 以加速度阈值对蠕滑型滑坡的变形阶段进行识别。降雨是诱发滑坡的主要因素, 杨宗信等人^[15]结合5个水文年震后滑坡的实时监测数据, 提出了基于降雨强度-概率、基质吸力等五参数指标预警方法体系, 该方法以降雨阈值为识别基础, 在银洞子沟实现两次成功预警。许强等人^[16,17]提出了一种定量描述位移-时间曲线切向角的方法, 并提出了切向角阈值判据方法, 将加速阶段划分为: 初加速、加速和加加速三个阶段。董秀军等人^[18]为解决预报理论缺乏数据支撑的问题, 通过室内模型试验, 得到了众多不同受力状态下的斜坡破坏时间-位移曲线, 为实际应用提供了参考; 后期又提出了基于时间序列的人工蜂群算法(ABC)与支持向量回归机(SVR)相结合等的多种滑坡位移预测方法^[19-21]。

通过对比发现, 阈值的确定多通过对特定边坡或特定区域的边坡监测数据分析得到, 所以得到的结论一般仅限于同类边坡。Federico等人^[22]对30个滑坡案例统计数据进行分析, 发现在近破坏时的速度峰值 v_p 和加速度峰值 a_p 之间存在如下关系: $a_p = 0.052v_p^{1.5}$ 。Carlà等人^[23]对某露天矿的5个边坡破坏案例和4个变形较大但未破坏的边坡案例进行研究, 进一步确定了边坡加速变形阶段的峰值加速度和速度之间存在对数关系。事实上, 变形参数是矢量, 很多边坡监测数据的变形矢量数据(位移、速度和加速度)与边坡的倾角以及监测方法有关, 由此得到的变形参数阈值并不具有普适性。特别是降雨阈值、工程类比阈值都需要综合考虑各种因素, 从而得到相应的阈值。在实际应用中, 相关的影响因素需要进行对比分析。因此, 为提高阈值确立方法的普适性, 本文提出了无量纲变形参数, 包括无量纲位移参数 d_w 、速度参数 v_w 和加速度参数 a_w 。根据已有监测数据库, 分别进行了显著性检验, 并分析了三个参数在80个案例中的分布情况, 基于准确预警(尽量减少误报)和安全预警(避免发生边坡破坏但未达到阈值条件的情况)的原则, 按 d_w 、 v_w 和 a_w 的数值大小不同, 分别给出了两个级别阈值的大小, 并采用“ROC曲线”法验证其精确性和可靠性。

2 无量纲参数阈值确定方法

位移是衡量边坡变形程度的最直接参数。一般变

形加速度和速度较大的边坡, 破坏可能性越大, 因此, 速度和加速度也可作为一种边坡破坏可能性判据。针对已有研究多是基于单个滑坡或者特定区域滑坡, 并不一定适用于其他滑坡, 且边坡破坏时加速度和速度的数值有很大差异的问题, 分别对边坡变形的位移、速度和加速度进行了统计分析, 提出了基于位移、速度和加速度的无量纲阈值, 以推广应用于不同变形监测情况的边坡。

若匀速变形阶段的起始点位移为 d_0 , 加速阶段的起始点位移为 d_1 , 加速阶段最大的位移为 d_m , 设定其无量纲参数 d_w 为

$$d_w = \frac{d_m - d_1}{d_1 - d_0} \quad (1)$$

边坡破坏过程中变形一般会经历三个阶段(图1), d_0 为边坡匀速变形阶段起始点 t_0 时刻对应的位移, d_1 为边坡加速变形阶段起始点 t_1 时刻对应的位移, d_m 为边坡加速变形阶段末 t_m 时刻对应的位移。

对加速阶段, 若对起始点变形速度 v_1 和加速阶段最大的变形速度 v_m 进行计算, 设定其基于变形速度的无量纲参数 v_w 为

$$v_w = \frac{v_m}{v_1} \quad (2)$$

式中, v_1 为边坡加速变形阶段起始点 t_1 时刻对应的速度, v_m 为边坡加速变形阶段末 t_m 时刻对应的速度。

若加速阶段的起始点变形加速度为 a_1 , 加速阶段最大的变形加速度为 a_m , 则基于变形加速度的无量纲

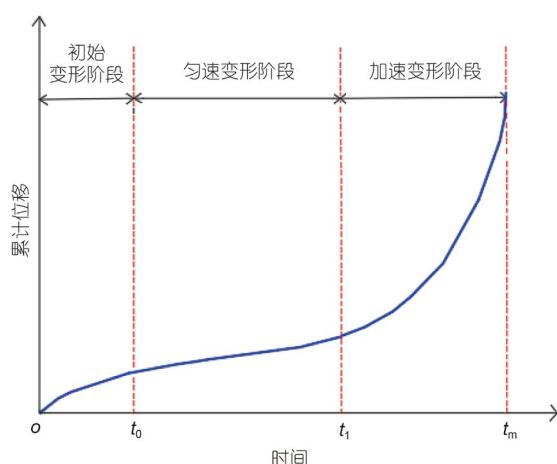


图 1 (网络版彩图)边坡变形三阶段示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of three stages of slope deformation.

参数 a_w 设为

$$a_w = \frac{a_m}{a_1}, \quad (3)$$

式中, a_1 为边坡位移加速阶段起始点 t_1 时刻对应的加速度, a_m 为边坡加速变形阶段末 t_m 时刻对应的加速度.

设定后的无量纲位移参数 d_w 、无量纲速度参数 v_w 和无量纲加速度参数 a_w 可以将不同情况下的数据进行比较分析. 另外, 通过设定无量纲阈值, 可很好避免由于边坡的倾角、监测手段不同, 从而得到的位移矢量数据方向会不同的问题. 因此, 这种无量纲参数在物理意义上具有良好的普适性.

3 案例统计分析

3.1 显著性统计检验方法

为了分析边坡破坏的阈值, 分别对发生破坏案例和未发生破坏案例的变形参数进行了统计, 并计算了对应的无量纲参数. 为了判断未破坏案例和破坏案例的无量纲参数是否有差异, 选用了“双样本异方差t检验”法对两组数据进行显著性检验. 若破坏案例和非破坏案例对应的无量纲参数有显著差别, 突显设置破坏阈值的意义.

依据相关文献中的实际工程案例边坡的变形参数(位移、速度和加速度)进行统计分析. 利用图像数字化技术提取了80个有蠕变阶段的工程实例监测数据, 其中包括40个滑坡和40个有加速变形行为但未发生整体破坏的边坡, 如表1所示^[3,24~79], 表中序号1~40为发生整体破坏的滑坡, 而序号41~80为当时未发生整体破坏的滑坡, 提取了其中具有初加速或加速特征的位移数据.

3.2 位移无量纲阈值

由于位移受到监测参照时间的影响, 对于同一个边坡, 监测的时间窗口越长, 一般累计位移越大, 因此监测得到的位移往往都是一段时间内的相对位移. 为了反映一个加速度阶段内的变形程度, 如式(1)所示, 将加速阶段的累计位移 d_m-d_1 , 除以匀速变形阶段的累计位移 d_1-d_0 , 得到无量纲的位移 d_w , 可以解决此问题. 因为, 对于同一个边坡加速阶段的累计位移和匀速变形阶段的累计位移, 往往都是确定的, 和监测时间没有关系. 那么, 此无量纲位移参数就反映了加速度阶段

的变形程度, 且与其正相关.

利用图像数字化技术分别对表1中描述的80个边坡位移数据进行提取, 并且计算了无量纲参数 d_w (表2). 表2中的序号所对应参数来自表1中相同序号所对应的边坡实例. 由于文献中, 部分边坡的原始数据只有速度和加速度参数, 故无法统计对应的位移, 此种情况在表2中用-表示.

(1) 显著性检验

表2中发生整体破坏的40个滑坡中, 共有22个无量纲的有效数据. 未发生破坏的40个边坡中, 共得到了24个无量纲的有效数据. 利用“双样本异方差t检验”法, 取显著性水平 $\alpha=0.01$, 对计算所得破坏案例 d_w 值和未破坏案例 d_w 值进行显著性检验(表3). 表3中“t Stat为3.1325”表示统计检验量t的样本值是3.1325, “t双尾临界2.7787”表示显著性水平是0.01, 用双尾检验时拒绝域的临界值是2.1448; “P(T≤t)双尾0.0043”表示t的样本值是3.1325时, 双尾检验的P值为0.0043. 由于 $t=3.1325>2.7787$, 或 $P=0.0021<0.01$, 所以, 检验结果为拒绝假设, 即可以认为破坏案例 d_w 值大于未破坏案例 d_w 值, 且具有高度显著性.

(2) 阈值设定

从整体分布情况看, 未破坏案例无量纲参数 d_w 显著性大于破坏案例无量纲参数 d_w . 因此, 可以通过概率分析找到合适的值作为相应边坡破坏阈值, 以实现对边坡破坏报警, 同时减少误报率. 图2显示了这46个有效数据的箱线图和散点分布图. 从图2中可以看出, 破坏案例的 d_w 值明显大于未破坏案例对应的值, 未破坏案例的 d_w 值相对更集中, 基本在0.45~2.8范围内. 而 $d_w=1.99$ 是两种情况的临界点, 大多数未破坏案例 d_w 值都小于此值, 而大多数破坏案例 d_w 值都大于此值. 根据图2中的分布, 设定二级阈值如下.

(a) 一级阈值: $d_w=0.35$, 表明此时边坡变形较大, 已表现出一定的增加趋势. 应该对边坡的位移监测持续关注.

(b) 二级阈值: $d_w=1.99$, 表明边坡变形已经很大, 发生滑坡可能性较大, 此时应该结合现场情况做出判断.

对于边坡破坏风险评估不能仅以位移作为标准, 在通过位移变化发现边坡有加速趋势时, 还需要同时关注速度和加速度曲线. 因为以位移作为判据有可能带来误判, 且一般的监测仪器对变形参数监测都有变

表 1 80个边坡变形监测案例情况**Table 1** 80 slopes with deformation monitoring

| 序号 | 案例名称 | 地区 | 诱发因素 | 参考文献 | 序号 | 案例名称 | 地区 | 诱发因素 | 参考文献 |
|----|-------------------------|------|---------|------|----|------------------------------|-------|--------|------|
| 1 | 党川#4 | 中国 | 地下水 | [24] | 41 | Badong | 中国 | 地下水 | [48] |
| 2 | Daye | 中国 | 降雨 | [25] | 42 | Badu | 中国 | 降雨 | [49] |
| 3 | Baishi | 中国 | 地震、降雨 | [25] | 43 | Baijiabao | 中国 | 地下水、降雨 | [50] |
| 4 | Jiminsi | 中国 | 降雨 | [25] | 44 | Baishuihe | 中国 | 地下水、降雨 | [51] |
| 5 | Huanglongxicun | 中国 | 降雨、工程活动 | [26] | 45 | Huanglianshu | 中国 | 地下水、降雨 | [52] |
| 6 | Maoxian | 中国 | 地震、降雨 | [27] | 46 | Kualiangzi (gps01) | 中国 | 地下水、降雨 | [53] |
| 7 | 攀枝花 | 中国 | 降雨 | [28] | 47 | Kualiangzi (gps02) | 中国 | 地下水、降雨 | [53] |
| 8 | Saleshan | 中国 | 降雨、雪融 | [29] | 48 | Laxiwa | 中国 | 地下水 | [54] |
| 9 | 某露天煤矿 | 中国 | 采矿活动 | [3] | 49 | Longjingwan | 中国 | 降雨 | [55] |
| 10 | Wangxia | 中国 | 采矿活动、降雨 | [30] | 50 | Loudi-xinhua highway | 中国 | 降雨 | [56] |
| 11 | Xintan | 中国 | 降雨 | [37] | 51 | Majiagou | 中国 | 地下水、降雨 | [57] |
| 12 | 秘鲁某铜矿 | 秘鲁 | 采矿爆破 | [31] | 52 | Shiliushubao | 中国 | 地下水、降雨 | [58] |
| 13 | Amyntaion mine | 希腊 | 采矿、降雨 | [32] | 53 | Shuping | 中国 | 地下水、降雨 | [59] |
| 14 | 智利某露天矿 | 智利 | 降雨 | [25] | 54 | West Open-Pit mine in Fushun | 中国 | 开挖 | [60] |
| 15 | Anguran mine | 伊朗 | 降雨 | [33] | 55 | Woshaxi | 中国 | 地下水、降雨 | [61] |
| 16 | Betze-post矿区西南部 | 美国 | 降雨 | [34] | 56 | Wu gorge | 中国 | 地下水 | [62] |
| 17 | Betze-post矿区东南部 | 美国 | 地下水 | [34] | 57 | Wushan town | 中国 | 地下水 | [63] |
| 18 | Liberty pit mine | 美国 | 采矿活动 | [34] | 58 | 10-mile slide | 加拿大 | 冰蚀 | [64] |
| 19 | Nameless landside | 美国 | 采矿活动 | [79] | 59 | Ripley | 加拿大 | 地下水 | [65] |
| 20 | Cadia gold mine | 澳大利亚 | 采矿活动 | [35] | 60 | Ampflwang | 奥地利 | 降雨 | [66] |
| 21 | West angelas centre pit | 澳大利亚 | 采矿活动 | [36] | 61 | An open pit mine in Greece | 希腊 | 降雨 | [33] |
| 22 | North deposit pit | 澳大利亚 | 采矿活动 | [36] | 62 | Mavropigi | 希腊 | 降雨 | [67] |
| 23 | Cavallerizzo | 意大利 | 降雨、降雪 | [37] | 63 | Banjarnevara | 印度尼西亚 | 降雨 | [68] |
| 24 | Gallivaggio sanctuary | 意大利 | 风化作用、降雨 | [38] | 64 | Betze-Post (northeast) | 美国 | 采矿活动 | [79] |
| 25 | La saxe | 意大利 | 雪融 | [39] | 65 | Washington park reservoir | 美国 | 降雨 | [69] |
| 26 | #1滑坡 | 意大利 | 降雨 | [40] | 66 | Büyükçekmece | 土耳其 | 降雨、地震 | [70] |
| 27 | #6滑坡 | 意大利 | 降雨 | [40] | 67 | Collölar mine | 土耳其 | 降雨、雪融 | [71] |
| 28 | #10滑坡 | 意大利 | 降雨 | [40] | 68 | Castelrotto | 意大利 | 降雨 | [72] |
| 29 | Mt. Beni | 意大利 | 降雪 | [41] | 69 | Cortemilia | 意大利 | 降雪 | [73] |
| 30 | Stromboli volcano | 意大利 | 火山喷发 | [42] | 70 | Creda | 意大利 | 降雨 | [74] |
| 31 | Volterra | 意大利 | 地下水 | [42] | 71 | La borra | 意大利 | 降雨 | [74] |
| 32 | Vajont (benchmark 5) | 意大利 | 地下水 | [43] | 72 | Monte Ombraro | 意大利 | 降雨 | [74] |
| 33 | Vajont (benchmark 50) | 意大利 | 地下水 | [43] | 73 | Palagano | 意大利 | 降雨 | [74] |
| 34 | Vajont (benchmark63) | 意大利 | 地下水 | [43] | 74 | Landslide A | 意大利 | 降雨 | [75] |
| 35 | Vajont (benchmark 67) | 意大利 | 地下水 | [43] | 75 | Landslide B | 意大利 | 地震 | [75] |
| 36 | 某铁矿 | 墨西哥 | 地下水 | [32] | 76 | La Clapière | 法国 | 地下水、降雨 | [76] |
| 37 | Kagemori quarry | 日本 | 采矿活动 | [44] | 77 | Super-sauze | 法国 | 降雨 | [76] |
| 38 | Ohto | 日本 | 降雨 | [45] | 78 | Taihape | 新西兰 | 降雨 | [77] |
| 39 | Nevis bluff | 新西兰 | 工程开挖 | [46] | 79 | Utiku | 新西兰 | 降雨 | [77] |
| 40 | Preonzo | 瑞士 | 降雨 | [47] | 80 | Kashio | 日本 | 降雨 | [78] |

表 2 位移数据计算结果**Table 2** The calculated results of displacement

| 序号 | d_0 (mm) | d_1 (mm) | d_m (mm) | d_w | 序号 | d_0 (mm) | d_1 (mm) | d_m (mm) | d_w |
|----|------------|------------|------------|-------|----|------------|------------|------------|-------|
| 1 | 224 | 312 | 574 | 2.98 | 41 | — | — | — | — |
| 2 | 1046 | 1172 | 1597 | 3.37 | 42 | 12 | 25 | 33 | 0.62 |
| 3 | 11786 | 41736 | 52345 | 0.35 | 43 | 4 | 14 | 29 | 1.50 |
| 4 | 51 | 68 | 324 | 15.06 | 44 | 167 | 378 | 472 | 0.45 |
| 5 | 24 | 312 | 415 | 0.36 | 45 | — | — | — | — |
| 6 | 37.2 | 58.2 | 99.6 | 1.97 | 46 | — | — | — | — |
| 7 | 212 | 584 | 1584 | 2.69 | 47 | — | — | — | — |
| 8 | 82 | 241 | 762 | 3.28 | 48 | 0 | 2200 | 4950 | 1.25 |
| 9 | 92.1 | 127.4 | 391.8 | 7.49 | 49 | — | — | — | — |
| 10 | 227 | 364 | 635 | 1.98 | 50 | 18 | 70 | 130 | 1.15 |
| 11 | — | — | — | — | 51 | 121 | 171 | 268 | 1.94 |
| 12 | — | — | — | — | 52 | 786 | 1123 | 1985 | 2.56 |
| 13 | — | — | — | — | 53 | 115 | 516 | 1505 | 2.47 |
| 14 | 371 | 768 | 5911 | 12.95 | 54 | 8 | 53 | 97 | 0.98 |
| 15 | — | — | — | — | 55 | 1815 | 3233 | 4448 | 0.86 |
| 16 | — | — | — | — | 56 | 32 | 48 | 62 | 0.88 |
| 17 | — | — | — | — | 57 | 950 | 1550 | 2950 | 2.33 |
| 18 | — | — | — | — | 58 | 1225 | 3345 | 6094 | 1.30 |
| 19 | — | — | — | — | 59 | — | — | — | — |
| 20 | 14 | 27 | 73 | 3.54 | 60 | 5 | 8 | 12 | 1.33 |
| 21 | — | — | — | — | 61 | 2400 | 3500 | 4600 | 1.00 |
| 22 | — | — | — | — | 62 | — | — | — | — |
| 23 | — | — | — | — | 63 | — | — | — | — |
| 24 | 9 | 18 | 236 | 24.22 | 64 | — | — | — | — |
| 25 | 51 | 58 | 65 | 1.00 | 65 | — | — | — | — |
| 26 | 9 | 18 | 154 | 15.11 | 66 | — | — | — | — |
| 27 | 11 | 24 | 65 | 3.15 | 67 | — | — | — | — |
| 28 | 6 | 38 | 155 | 3.66 | 68 | 9 | 28 | 47 | 1.00 |
| 29 | 247 | 549 | 2573 | 6.70 | 69 | 8 | 10 | 14 | 2.00 |
| 30 | — | — | — | — | 70 | — | — | — | — |
| 31 | — | — | — | — | 71 | — | — | — | — |
| 32 | — | — | — | — | 72 | — | — | — | — |
| 33 | — | — | — | — | 73 | — | — | — | — |
| 34 | — | — | — | — | 74 | 38 | 197 | 342 | 0.91 |
| 35 | — | — | — | — | 75 | 23 | 67 | 154 | 1.98 |
| 36 | — | — | — | — | 76 | 98 | 3894 | 14670 | 2.84 |
| 37 | 52 | 92 | 350 | 6.45 | 77 | 147 | 623 | 987 | 0.76 |
| 38 | 23 | 64 | 268 | 4.98 | 78 | 5980 | 8670 | 12230 | 1.32 |
| 39 | 42 | 108 | 279 | 2.59 | 79 | 151 | 175 | 196 | 0.88 |
| 40 | 401 | 453 | 1454 | 19.25 | 80 | 0 | 2 | 27 | 12.50 |

表 3 d_w 异方差 *t* 检验法计算结果**Table 3** The calculated results of d_w heteroscedasticity *t* test

| 参数 | 破坏案例的 d_w | 未破坏案例的 d_w |
|------------------|-------------|--------------|
| 平均值 | 6.5059 | 1.8671 |
| 方差 | 43.1445 | 5.5651 |
| 观测值 | 22 | 24 |
| 假设平均差 | 0 | |
| 自由度 df | 26 | |
| <i>t</i> Stat | 3.1325 | |
| $P(T \leq t)$ 单尾 | 0.0021 | |
| <i>t</i> 单尾临界 | 2.4786 | |
| $P(T \leq t)$ 双尾 | 0.0043 | |
| <i>t</i> 双尾临界 | 2.7787 | |

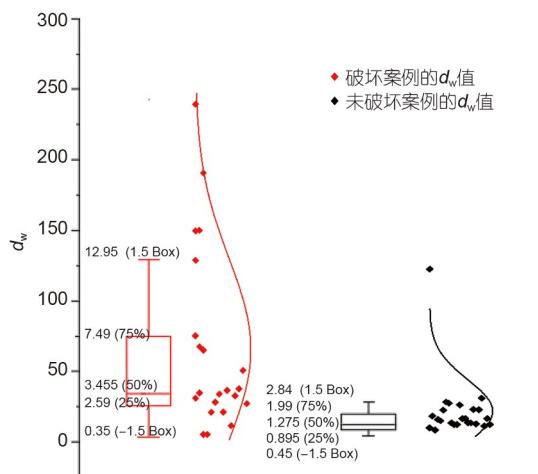
**图 2** (网络版彩图) 46个边坡案例 d_w 的箱线图和正态曲线图

Figure 2 (Color online) The boxplot and normal curve of d_w of the 46 slopes.

形速度选项。

3.3 速度无量纲阈值

表4为80个案例中加速起始点对应速度 v_1 和加速阶段对应最大速度 v_m , 并计算了对应的无量纲速度 v_w 。表4中序号所对应的参数来自表1中相同序号所对应的边坡实例。其中, 多数案例中的速度矢量的方向为水平或者竖直方向, 还有些则与案例的边坡角相关。因此, v_1 和 v_m 对于不同的案例, 不一定具有可比性。但是, 所有案例中的 v_1 和 v_m 对应方向都是相同的, 因而得到的

无量纲速度可以进行比较分析。

(1) 显著性检验

利用“双样本异方差 *t* 检验”法, 取显著性水平 $\alpha=0.01$, 对表4中计算所得破坏案例与未破坏案例的 v_w 值进行显著性检验(表5)。根据计算结果, 由于 $t=4.5513>2.7012$, 或 $P=0.00002<0.01$, 所以, 检验结果为拒绝原假设, 即可认为破坏案例 v_w 值大于未破坏案例 v_w 值, 且具有高度显著性。

(2) 阈值设定

从整体分布情况看, 未破坏案例无量纲参数 v_w 显著性大于破坏案例无量纲参数 v_w 。因此, 可以通过概率分析找到合适的值作为相应边坡破坏阈值, 以实现对边坡破坏报警, 同时减少误报率。图3为表4中80个案例对应的无量纲速度 v_w 的箱线图和散点分布图。从图3中可以看出, 在2.75~14.30这个范围内, 两种案例的 v_w 值有一定的重合。因此, 当阈值较小时可能会存在一定的误差, 所以同样需要设置多级预警。而 $v_w=14.30$ 是两种情况的临界点, 绝大多数的未破坏案例都小于此值。根据图3中的分布, 设定两级阈值如下。

(a) 一级阈值: $v_w=3.33$, 表明此时边坡的速度较大, 已经表现出一定的加速趋势, 应该对边坡位移持续关注。

(b) 二级阈值: $v_w=14.30$, 表明边坡的变形速度已经很大, 有较大的可能性发生滑坡, 此时结合现场情况做出判断, 必要的时候可以尽快撤出危险区域的人员和设备。

3.4 加速度无量纲阈值

表6列出了80个案例加速起始点对应的加速度 a_1 和加速阶段对应的最大加速度 a_m , 并计算了对应的无量纲加速度 a_w 。表6中序号所对应的参数来自表1中相同序号所对应边坡实例。其中, 加速度矢量方向和表6中对应的速度方向相同。同样, 不同边坡加速度的原始监测数据方向是不同的, 因此不同边坡的原始加速度数据比较意义不大。而无量纲加速度 a_w 则可以解决此问题。

(1) 显著性检验

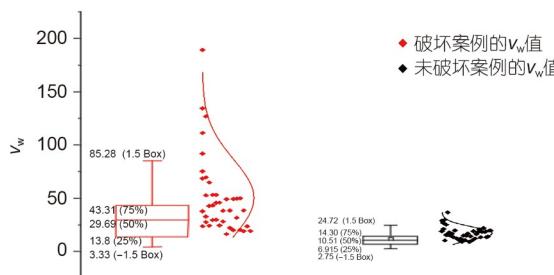
利用“双样本异方差 *t* 检验”法, 取显著性水平 $\alpha=0.01$, 对表6中计算所得破坏案例 a_w 值和未破坏案例 a_w 值进行显著性检验(表7)。根据计算结果, 由于 $t^*=3.1675>2.7079$, 或 $p=0.0015<0.01$, 所以, 检验结果

表 4 变形速度数据计算结果**Table 4** The calculated results of velocity

| 序号 | v_l (mm/d) | v_m (mm/d) | v_w | 序号 | v_l (mm/d) | v_m (mm/d) | v_w |
|----|--------------|--------------|--------|----|--------------|--------------|-------|
| 1 | 2.67 | 70.84 | 26.53 | 41 | 0.29 | 7.17 | 24.72 |
| 2 | 0.45 | 26.98 | 59.96 | 42 | 0.12 | 1.64 | 13.67 |
| 3 | 95.17 | 8115.84 | 85.28 | 43 | 0.41 | 6.55 | 15.98 |
| 4 | 0.079 | 15.09 | 191.01 | 44 | 2.18 | 8.91 | 4.09 |
| 5 | 7 | 300 | 42.86 | 45 | 3.31 | 73.88 | 22.32 |
| 6 | 0.069 | 0.78 | 11.30 | 46 | 2.45 | 23.95 | 9.78 |
| 7 | 3.12 | 48.4 | 15.51 | 47 | 2.43 | 24.67 | 10.15 |
| 8 | 0.71 | 8.43 | 11.87 | 48 | 7.45 | 92.32 | 12.39 |
| 9 | 78.09 | 1380.16 | 17.67 | 49 | 0.02 | 0.18 | 9.00 |
| 10 | 11.1 | 235.27 | 21.20 | 50 | 2.19 | 24.57 | 11.22 |
| 11 | 3.73 | 67.28 | 18.04 | 51 | 0.14 | 1.04 | 7.43 |
| 12 | 20.56 | 1385.28 | 67.38 | 52 | 13.32 | 192.87 | 14.48 |
| 13 | 26.1 | 833.33 | 31.93 | 53 | 1.24 | 7.94 | 6.40 |
| 14 | 2.04 | 114.13 | 55.95 | 54 | 1.56 | 8.73 | 5.60 |
| 15 | 1.85 | 60.23 | 32.56 | 55 | 20.8 | 91.1 | 4.38 |
| 16 | 41.37 | 500 | 12.09 | 56 | 0.05 | 0.29 | 5.80 |
| 17 | 14.7 | 235.24 | 16.00 | 57 | 0.0034 | 0.087 | 25.59 |
| 18 | 5.44 | 191.42 | 35.19 | 58 | 4.55 | 12.56 | 2.76 |
| 19 | 0.54 | 19.14 | 35.44 | 59 | 0.0012 | 0.011 | 9.17 |
| 20 | 0.062 | 1.68 | 27.10 | 60 | 1.01 | 20.63 | 20.43 |
| 21 | 0.15 | 0.5 | 3.33 | 61 | 5.97 | 25.7 | 4.30 |
| 22 | 0.92 | 8.98 | 9.76 | 62 | 12.89 | 115.41 | 8.95 |
| 23 | 8.12 | 59.57 | 7.34 | 63 | 0.6 | 6.68 | 11.13 |
| 24 | 32.72 | 1270.51 | 38.83 | 64 | 13.32 | 36.61 | 2.75 |
| 25 | 0.48 | 20.82 | 43.38 | 65 | 0.29 | 2.46 | 8.48 |
| 26 | 20.57 | 409.68 | 19.92 | 66 | 0.58 | 2.32 | 4.00 |
| 27 | 9.32 | 255.12 | 27.37 | 67 | 4.63 | 153.8 | 33.22 |
| 28 | 39.41 | 1537.13 | 39.00 | 68 | 0.0059 | 0.081 | 13.73 |
| 29 | 2.18 | 85.76 | 39.34 | 69 | 0.23 | 1.39 | 6.04 |
| 30 | 3.52 | 26.72 | 7.59 | 70 | 0.15 | 1.63 | 10.87 |
| 31 | 1.76 | 11.04 | 6.27 | 71 | 0.078 | 0.99 | 12.69 |
| 32 | 4.71 | 203.67 | 43.24 | 72 | 0.09 | 1.4 | 15.56 |
| 33 | 1.7 | 19 | 11.18 | 73 | 0.12 | 0.9 | 7.50 |
| 34 | 4.87 | 193.58 | 39.75 | 74 | 0.42 | 5.49 | 13.07 |
| 35 | 3.15 | 86.47 | 27.45 | 75 | 0.13 | 2.19 | 16.85 |
| 36 | 1.17 | 124.42 | 106.34 | 76 | 7.01 | 89.61 | 12.78 |
| 37 | 0.11 | 14.47 | 131.55 | 77 | 4.71 | 35.48 | 7.53 |
| 38 | 0.64 | 78.96 | 123.38 | 78 | 0.016 | 0.13 | 8.13 |
| 39 | 0.12 | 7.32 | 61.00 | 79 | 1.33 | 18.97 | 14.26 |
| 40 | 1.54 | 9.99 | 6.49 | 80 | 0.97 | 13.92 | 14.35 |

表 5 v_w 的异方差 t 检验法的计算结果**Table 5** The calculated results of v_w heteroscedasticity t test

| 参数 | 破坏案例的 v_w | 未破坏案例的 v_w |
|------------------|-------------|--------------|
| 平均 | 40.1845 | 11.5388 |
| v_w 方差 | 1540.2042 | 44.3524 |
| 观测值 | 40 | 4 |
| 假设平均差 | 0 | |
| df | 41 | |
| t Stat | 4.5513 | |
| $P(T \leq t)$ 单尾 | 0.00002 | |
| t 单尾临界 | 2.4208 | |
| $P(T \leq t)$ 双尾 | 0.0000 | |
| t 双尾临界 | 2.7012 | |

**图 3** (网络版彩图) 80个边坡案例 v_w 的箱线图和正态曲线图**Figure 3** (Color online) The boxplot and normal curve of v_w of the 80 slopes.

为拒绝原假设, 即可以认为破坏案例 a_w 值大于未破坏案例 a_w 值, 且具有高度显著性。

(2) 阈值设定

将表6中破坏案例的 a_w 和未破坏案例的 a_w 数据分别作箱线图和正态曲线图(图4和5). 由于表6中的 $a_w=4166.36$ 和 $a_w=2734.20$ 的两个数据点明显偏大, 视为异常值. 图4中删去了该两个点, 剩下的38个数据点作图. 同样将表6中的 $a_w=101.32$ 数据点去除, 将其余的39个数据点作图. 从图4中可以分析出, 破坏案例 a_w 值总体明显大于未破坏案例 a_w 值.

从图4和5中可以看出, 破坏案例 a_w 最小值约为3.18, 达到此数值时边坡已有破坏风险. 当 $a_w=14.29$ 时, 已经可以区分破坏案例和未破坏案例. 未破坏案例中, 只有约25%的案例 a_w 超过此值, 而破坏案例中, 约有90%的案例中 a_w 超过此值.

根据准确预警和安全预警的原则, 按 a_w 的数值大小, 可以设置两个级别阈值.

(a) 一级阈值: $a_w=3.18$, 表示边坡已经呈现一定程度的加速变形趋势, 应持续关注.

(b) 二级阈值: $a_w=14.29$, 表示边坡已有较快的加速变形, 有一定可能发生破坏, 应结合现场的情况做出判断, 必要的时候可以尽快撤出危险区域的人员和设备.

3.5 无量纲阈值的ROC评估

受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)用于评估边坡破坏阈值模型的可靠性, 该方法被广泛应用于滑坡敏感性模型可靠性评估. 如图6所示, 根据Staley等人^[80]利用ROC分析方法和度量标准作为滑坡敏感性分析的定义, 对滑坡阈值模型进行可靠性分析. ROC曲线法是通过ROC曲线下面积(area under curve, AUC)来表示和比较模型的评价预测精度. AUC值越高, 表示模型的精度越好. $0.5 < AUC \leq 0.7$ 时, 模型的精度为较差; $0.7 < AUC \leq 0.8$ 时, 模型的精度为中等; $0.8 < AUC \leq 0.9$ 时, 模型的精度为较好; $0.9 < AUC \leq 1.0$ 时, 模型的精度为非常好.

图7分别显示了无量纲阈值 d_w , v_w 和 a_w 的ROC曲线和AUC值, 可用来表示三种阈值预测的可靠性和精确性. 其中三种阈值的 TP_{rate} 和 FP_{rate} 分别按式(4)和(5)计算.

$$TP_{rate} = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (4)$$

式中, TP_{rate} 为真正类率, TP 为 TP 事件(大于阈值, 且边坡破坏)个数, FN 为 FN 事件(小于阈值, 但边坡破坏)个数.

$$FP_{rate} = \frac{FP}{FP+TN}, \quad (5)$$

式中, FP_{rate} 为假正类率, FP 为 FP 事件(大于阈值, 但边坡未破坏)个数, TN 为 TN 事件(小于阈值, 且边坡未破坏)个数.

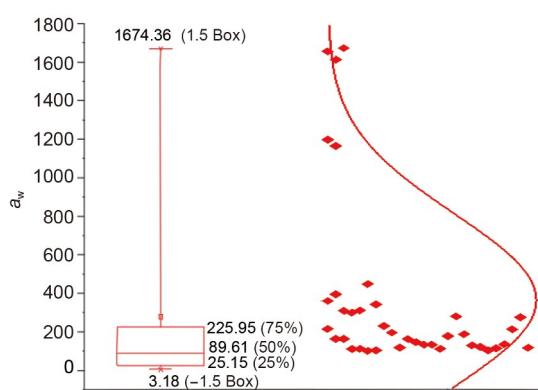
对于 d_w , TP_{rate} 和 FP_{rate} 分别为 0.86 和 0.25; 对于 v_w , TP_{rate} 和 FP_{rate} 分别为 0.73 和 0.25; 对于 a_w , TP_{rate} 和 FP_{rate} 分别为 0.89 和 0.25. 图7中 A_d , A_v 和 A_a 的横坐标和纵坐标对应的值分别为 d_w , v_w 和 a_w 的 TP_{rate} 和 FP_{rate} . 其中, 越接近左上角点(0, 1)的模型预测精度越高. 如图7所示, B

表 6 变形加速度数据计算结果**Table 6** The calculated results of acceleration

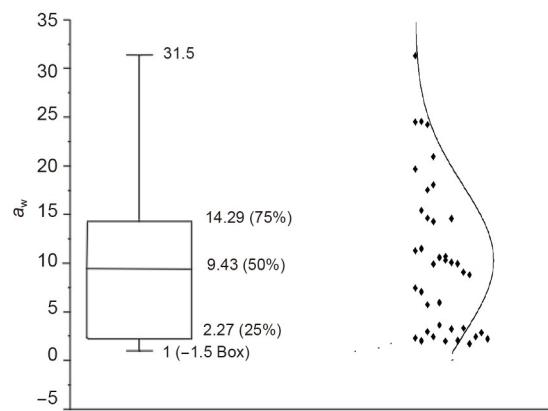
| 序号 | a_l (mm/d ²) | a_m (mm/d ²) | a_w | 序号 | a_l (mm/d ²) | a_m (mm/d ²) | a_w |
|----|----------------------------|----------------------------|---------|----|----------------------------|----------------------------|--------|
| 1 | 0.011 | 45.83 | 4166.36 | 41 | 0.016 | 0.11 | 6.88 |
| 2 | 0.023 | 2.87 | 124.78 | 42 | 0.017 | 0.11 | 6.47 |
| 3 | 89.02 | 6204.27 | 69.70 | 43 | 0.97 | 1.55 | 1.60 |
| 4 | 16.95 | 189.98 | 69.70 | 44 | 0.10 | 0.13 | 1.30 |
| 5 | 8.00 | 108.00 | 13.50 | 45 | 2.39 | 58.46 | 24.46 |
| 6 | 0.0042 | 0.060 | 14.29 | 46 | 0.45 | 8.76 | 19.47 |
| 7 | 0.39 | 1.24 | 3.18 | 47 | 0.40 | 6.04 | 15.10 |
| 8 | 0.016 | 0.09 | 5.63 | 48 | 1.67 | 3.79 | 2.27 |
| 9 | 8.61 | 23541.43 | 2734.20 | 49 | 0.00034 | 0.00059 | 1.74 |
| 10 | 0.46 | 64.10 | 139.35 | 50 | 2.91 | 14.89 | 5.12 |
| 11 | 0.00073 | 0.076 | 104.11 | 51 | 0.0012 | 0.013 | 10.83 |
| 12 | 2.29 | 638.83 | 278.97 | 52 | 4.87 | 14.43 | 2.96 |
| 13 | 17.70 | 382.65 | 21.62 | 53 | 0.087 | 0.11 | 1.26 |
| 14 | 0.17 | 53.72 | 316.00 | 54 | 0.011 | 0.19 | 17.27 |
| 15 | 0.032 | 7.18 | 224.38 | 55 | 1.03 | 2.64 | 2.56 |
| 16 | 29.19 | 2012.76 | 68.95 | 56 | 0.00023 | 0.0041 | 17.83 |
| 17 | 0.72 | 37.12 | 51.56 | 57 | 0.00037 | 0.0041 | 11.08 |
| 18 | 1.59 | 60.29 | 37.92 | 58 | 0.20 | 0.27 | 1.35 |
| 19 | 0.16 | 6.03 | 37.69 | 59 | 3.83E-07 | 3.61E-06 | 9.43 |
| 20 | 0.00022 | 0.047 | 213.64 | 60 | 7.94 | 194.63 | 24.51 |
| 21 | 0.011 | 0.16 | 14.55 | 61 | 0.62 | 14.99 | 24.18 |
| 22 | 0.030 | 2.52 | 84.00 | 62 | 1.36 | 42.84 | 31.50 |
| 23 | 0.42 | 94.90 | 225.95 | 63 | 0.050 | 1.04 | 20.80 |
| 24 | 244.43 | 47305.64 | 193.53 | 64 | 0.28 | 0.74 | 2.64 |
| 25 | 0.81 | 1340.73 | 1655.22 | 65 | 0.045 | 0.045 | 1.00 |
| 26 | 17.24 | 1641.60 | 95.22 | 66 | 0.007 | 0.10 | 14.29 |
| 27 | 37.80 | 1296.00 | 34.29 | 67 | 0.86 | 101.32 | 117.81 |
| 28 | 960.70 | 24165.39 | 25.15 | 68 | 0.0028 | 0.015 | 5.36 |
| 29 | 0.0052 | 8.37 | 1609.62 | 69 | 0.060 | 0.59 | 9.83 |
| 30 | 0.85 | 5.66 | 6.66 | 70 | 0.00026 | 0.0025 | 9.62 |
| 31 | 0.45 | 7.92 | 17.60 | 71 | 0.000033 | 0.00046 | 13.94 |
| 32 | 0.064 | 74.83 | 1169.22 | 72 | 0.00019 | 0.0018 | 9.47 |
| 33 | 0.024 | 8.93 | 372.08 | 73 | 0.00014 | 0.0012 | 8.57 |
| 34 | 0.039 | 65.30 | 1674.36 | 74 | 0.010 | 0.083 | 8.30 |
| 35 | 0.023 | 26.08 | 1133.91 | 75 | 0.026 | 0.045 | 1.73 |
| 36 | 0.21 | 54.35 | 258.81 | 76 | 0.000092 | 0.00093 | 10.11 |
| 37 | 0.028 | 1.09 | 38.93 | 77 | 5.47 | 11.88 | 2.17 |
| 38 | 0.34 | 41.75 | 122.79 | 78 | 0.000079 | 0.00012 | 1.52 |
| 39 | 0.0033 | 0.62 | 187.88 | 79 | 0.69 | 7.07 | 10.25 |
| 40 | 0.13 | 2.65 | 20.38 | 80 | 0.97 | 13.82 | 14.25 |

表 7 a_w 的异方差 t 检验法的计算结果**Table 7** The calculated results of a_w heteroscedasticity t test

| 参数 | 破坏案例的 a_w | 未破坏案例的 a_w |
|------------------|-------------|--------------|
| 平均 | 440.8920 | 12.5208 |
| 方差 | 732077.6937 | 353.6561 |
| 观测值 | 40 | 40 |
| 假设平均差 | | 0 |
| df | | 39 |
| t Stat | | 3.1657 |
| $P(T \leq t)$ 单尾 | | 0.0015 |
| t 单尾临界 | | 2.4258 |
| $P(T \leq t)$ 双尾 | | 0.0030 |
| t 双尾临界 | | 2.7079 |

**图 4** (网络版彩图) 40个破坏案例的 a_w 的箱线图和正态曲线图**Figure 4** (Color online) The boxplot and normal curve of a_w of 40 landslides.

点代表一个完美的预测模型, E点代表一个随机预测模型, C点代表一个误报率(达到阈值水平但边坡未破坏的概率)低但漏报率(低于阈值水平但边坡破坏的概率)高的预测模型, D点代表一个比随机预测的效果更差的模型。对于本文提出的无量纲阈值, d_w , v_w 和 a_w 三者都有较低的假正类率(0.25)和较高的真正类率(0.86, 0.73 和 0.89)。AUC的值分别为0.80, 0.74 和 0.82, 都有较高的水平, 证明了无量纲阈值模型是可行的, 其准确性优于Ju等人^[81], Chen和Jiang^[82]提出的统计阈值模型, 其模型对应的AUC值为0.62。但无量纲阈值模型的滑坡预报准确性和可靠性还可以进一步改进和提高。

**图 5** 40个未破坏案例的 a_w 的箱线图和正态曲线图**Figure 5** The boxplot and normal curve of a_w of 40 non-failures.

| 边坡破坏 | | 边坡未破坏 | |
|------|--------------------|--------------|---------------------|
| 大于阈值 | True positive (TP) | 大于阈值 | False positive (FP) |
| 小于阈值 | 大于阈值, 且边坡破坏 | 大于阈值, 但边坡未破坏 | True negative (TN) |
| 小于阈值 | 小于阈值, 但边坡破坏 | 小于阈值, 且边坡未破坏 | |

图 6 ROC滑坡阈值分析矩阵**Figure 6** ROC analysis matrix of landslide threshold.

4 工程应用

某露天铜矿位于江西省, 已经有超过60年的开采历史。铜矿所处地貌为低山丘陵地貌, 属构造剥蚀地形。整体的地形为北东高、南西低, 根据钻探及地质调查结果, 边坡范围内所分布的地层岩性自上而下依次有第四系残坡积层和滑坡堆积层、双桥山群东坑组千枚岩和燕山期花岗闪长斑岩体。花岗闪长斑岩构成滑坡区表层地层, 单轴抗压强度约为45.26~93.17 MPa。目前, 该矿的边坡由MSR400型雷达监测系统监测。#2滑坡发生于2020年3月13日18:25。选取3月13日的 $t_0=15:23$ 为匀速变形起始点, $t_i=16:19$ 作为加速变形起始点, 边坡的最后一次监测数据对应的时刻视为加速

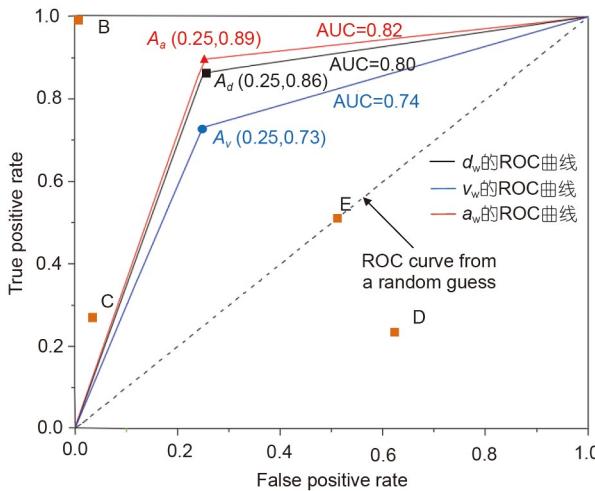


图 7 (网络版彩图) ROC 滑坡阈值分析曲线

Figure 7 (Color online) ROC analysis curve of landslide threshold.

变形终止点 $t_m=18:11$.

4.1 位移阈值预警分析

图8为滑坡的分级位移阈值和对应的预警时间。可以看出,在边坡破坏之前,累计位移先后都达到了阈值水平,即触发了边坡破坏预警。一级预警触发时间 $t=16:37$,距边坡的破坏时间为108 min,二级预警触发时间 $t=17:31$,距边坡的破坏时间为54 min。

但是,由于监测的数据更新并不是连续的,此案例中二级预警的实际触发时间应该 $t=17:39$,因为这是位移超过阈值后的第一次数据更新。因此,实际二级预警的触发时间距最终的破坏时间仅有46 min。同理,实际一级预警的触发时间 $t=16:43$,距最终的破坏时间有102 min。

4.2 速度阈值预警分析

图9为滑坡的分级速度阈值和对应的预警时间。可以发现,在边坡破坏之前,速度先后都达到了阈值水平,即触发了边坡破坏预警。一级预警的触发时间 $t=17:33$,距边坡的破坏时间为52 min,二级预警的触发时间 $t=18:06$,距边坡的破坏时间为19 min。

但由于监测的数据更新并不是连续的,此案例中二级预警的实际触发时间应该为 $t=18:11$,因为这是速度超过阈值后的第一次数据更新。因此,实际二级预警的触发时间距最终的破坏时间仅有14 min。同理,实

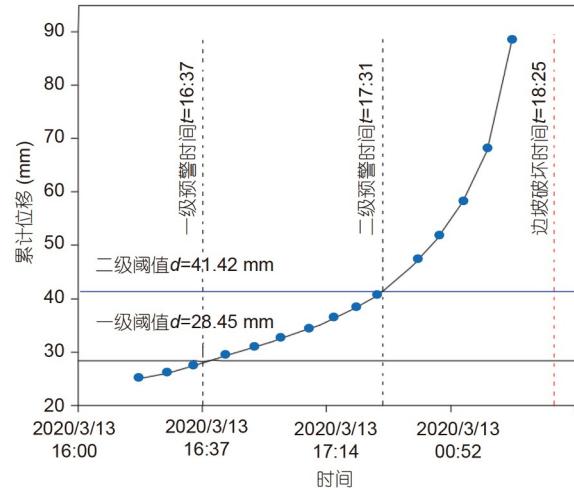


图 8 (网络版彩图) #2 滑坡位移阈值和预警触发时间

Figure 8 (Color online) The displacement threshold and warning triggering time of landslide #2.

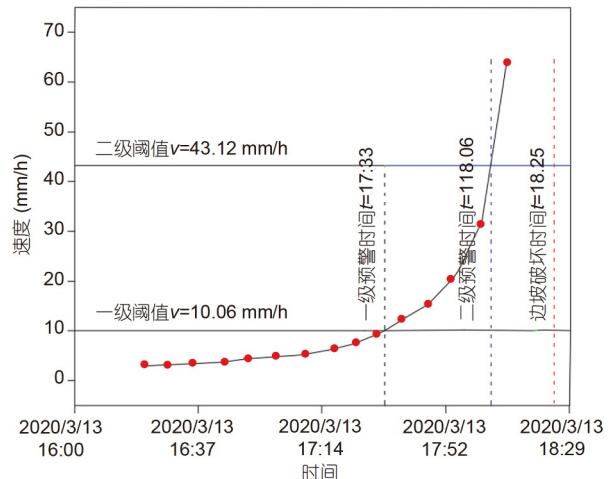


图 9 (网络版彩图) #2 滑坡速度阈值和预警触发时间

Figure 9 (Color online) The velocity threshold and warning triggering time of landslide #2.

际一级预警的触发时间 $t=17:39$,距最终的破坏时间还有46 min。

4.3 加速度阈值预警分析

图10显示了滑坡的分级加速度阈值和对应的预警时间。可以看出,在边坡破坏之前,加速度先后都达到了阈值水平,即触发了边坡破坏预警。一级预警触发时间 $t=17:03$,距边坡的破坏时间为82 min,二级预警触发时间 $t=17:32$,距边坡的破坏时间为53 min。

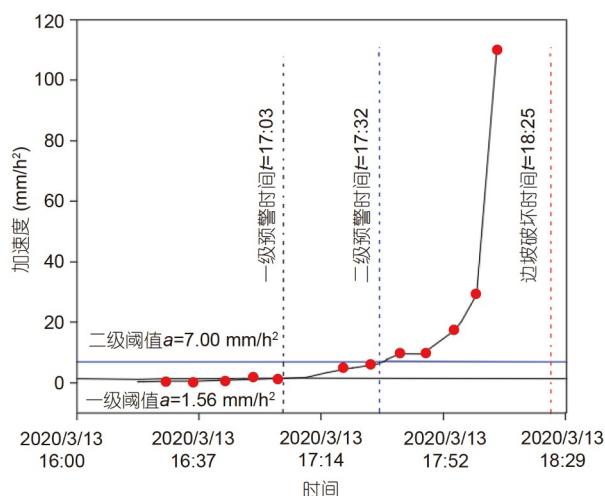


图 10 (网络版彩图) #2 滑坡加速度阈值和预警触发时间
Figure 10 (Color online) The acceleration threshold and warning triggering time of landslide #2.

但是,由于监测的数据更新并不是连续的,此案例中二级预警的实际触发时间应该为 $t=17:39$, 因为这是加速度超过阈值后的第一次数据更新。因此, 实际二

级预警的触发时间距最终的破坏时间仅有 46 min。同理, 实际一级预警的触发时间 $t=17:07$, 距最终的破坏时间还有 78 min。

4.4 预警系统流程

滑坡预警系统(landslide early warning system, LEWS)已经越来越多地应用到边坡破坏风险管理中, 其最关键的目标就是实现对边坡破坏时间的准确预测和边坡破坏的安全预警。整合提出的预警程序-无量纲阈值, 基于对边坡的变形监测, 形成了适用于蠕变型边坡的边坡预警系统, 其框架如图11所示。

模块一为破坏时间预测, 通过将计算得到的理论破坏加速度代入到加速度平方根倒数的最小二乘法拟合中, 从而计算边坡的预测破坏时间。同时, 随着监测数据的更新不断重复这个过程, 实现边坡破坏时间的动态预测。此类型的边坡变形一般是针对前缘不受阻的“重力型”边坡, 其变形可由降雨、地震等因素触发。相对速度倒数法而言, 此方法可以适用于变形加速度减小但速度增大类型边坡的识别, 从而避免产生错误

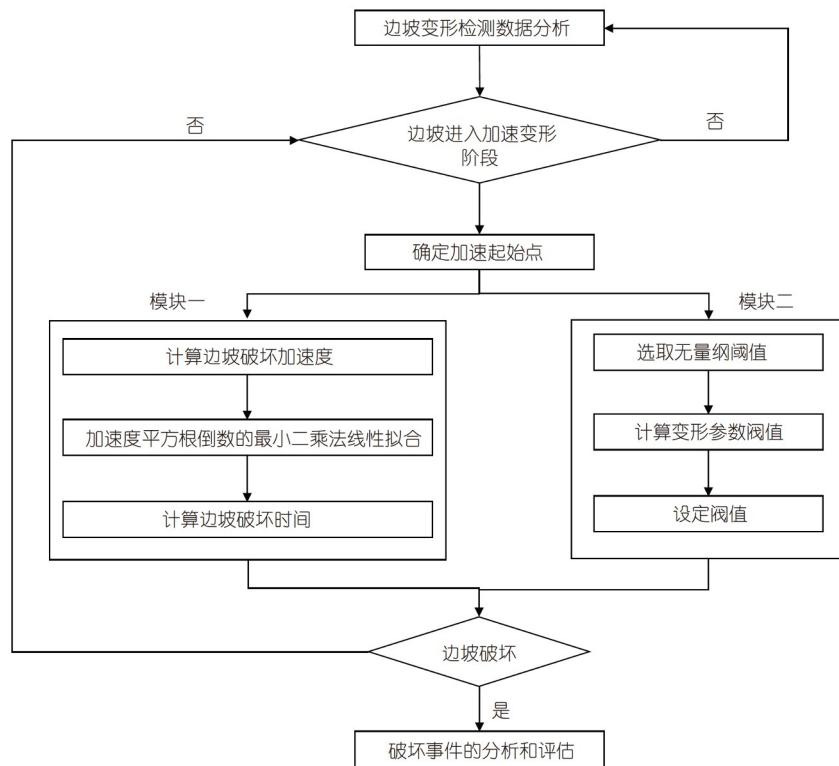


图 11 预警系统流程图
Figure 11 Flowchart for the early warning system.

预测结果。

模块二为破坏阈值的设定, 可根据变形监测的类型(位移、速度和加速度)选取对应的无量纲参数, 利用无量纲参数和临界点的参数计算对应破坏阈值(位移、速度和加速度), 然后再结合监测系统设置阈值, 从而实现自动预警预报的功能。无量纲阈值是由多个监测案例的数据统计分析得到的, 理论上适用于具有蠕变特点的边坡的破坏阈值设定, 且可以识别出加速度起始点OOA(onset of acceleration)。另外, 需要有相应的较为准确的变形-时间监测数据, 包括变形位移、速度和加速度。

5 讨论

通过对比三种无量纲阈值预警可以发现: 采用位移阈值确定的一级和二级预警触发时间距边坡破坏时间差分别为102和46 min; 采用速度阈值确定的一级和二级预警触发时间距边坡破坏时间差分别为46和14 min; 而采用加速度阈值确定的一级和二级预警触发时间距边坡的破坏时间差分别为78和46 min。三种变形阈值对应的预警时间并不相同, 一级预警触发时间最早为位移阈值确定的时间; 位移阈值和加速度阈值确定的二级预警触发时间一致; 但三种方法都能在破坏之前的一段时间发出安全预警。考虑到蠕变滑坡多样性, 在实际滑坡预警分析时, 为了安全起见, 可以将这三个阈值结合起来使用。即无论哪个类型的阈值触发安全预警, 都应引

起重视。

无量纲阈值模型虽有一定的普适性和可靠性, 但本文数据仅80个边坡, 若有边坡监测大数据共享平台, 还可以通过更多的案例分析进一步改善, 以更好提高模型可靠性。

6 结论

本文提出了无量变形参数, 包括无量纲的位移参数 d_w 、无量纲速度参数 v_w 和无量纲加速度参数 a_w 。再通过三个参数在80个案例中的分布情况, 基于准确预警(尽量减少误报)和安全预警(避免发生边坡破坏但未达到阈值条件的情况)的原则, 按 d_w , v_w 和 a_w 的数值大小不同, 分别给出了两个级别阈值的大小, 并采用“ROC曲线分析法”证明了其具有较好的精确性和可靠性, 同时也利用无量纲阈值对江西某铜矿的#2滑坡进行成功预警。主要结论如下。

(1) 对国内外40个边坡破坏案例的监测数据, 以及40个未破坏边坡的监测数据, 分别进行了显著性检验, 证明了三个无量纲参数在破坏的边坡案例中要显著地大于未破坏案例对应的值。

(2) 阈值无量纲, 可以消除变形矢量参数的方向导致的影响, 可以实现定量预警, 且可以通过设定不同级别实现多级预警。

(3) 三个无量纲阈值在案例中对应的预警时间并不相同, 位移阈值和加速度阈值确定的二级预警触发时间一致。

参考文献

- 1 Emergency Management Department. Emergency Management Department announces the top ten natural disasters in China in 2020 (in Chinese). Safety Health, 2021, 1: 42–43, 46 [应急管理部救灾和物资保障司. 应急管理部公布2020年全国十大自然灾害. 安全与健康, 2021, 1: 42–43, 46]
- 2 Li Y, Meng H, Dong Y, et al. Types and characteristics of geological disasters in China—Analysis based on the results of national geological disaster investigation in counties and cities (in Chinese). Chin J Geol Hazard Control, 2004, 2: 32–37 [李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 2: 32–37]
- 3 Zhou X P, Liu L J, Xu C. A modified inverse-velocity method for predicting the failure time of landslides. Eng Geol, 2020, 268: 105521
- 4 Saito M. Forecasting time of slope failure by tertiary creep. In: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969. 677–683
- 5 Stevenson P C. An empirical method for the evaluation of relative landslip risk. Bull Int Assoc Eng Geol, 1977, 16: 69–72
- 6 Federico A, Popescu M, Fidelibus C, et al. On the prediction of the time of occurrence of a slope failure: A review. In: Landslides: Evaluation and Stabilization/Glissement de Terrain: Evaluation et Stabilisation, Set of 2 Volumes. London: Rio de Janerio, Taylor and Francis, 2004. 979–983

- 7 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. *Arab J Geosci*, 2017, 10: 53
- 8 Chen M D, Wang L S. Grey prediction method of slope deformation and failure (in Chinese). In: Proceedings of the Third National Engineering Geological Conference. Beijing: Science Press, 1988 [陈明东, 王兰生. 边坡变形破坏的灰色预报方法. 见: 全国第3次工程地质大会论文集. 北京: 科学出版社, 1988]
- 9 Zhang Z Y, Huang R Q. "Golden section number" method for prediction of linear and nonlinear states and failure time of rock mass system before instability (in Chinese). In: Selected Papers of the Third National Engineering Geology Conference. Beijing: Science Press, 1988 [张倬元, 黄润秋. 岩体失稳前系统的线性和非线性状态及破坏时间预报的“黄金分割数”法. 见: 全国第3次工程地质大会论文选集. 北京: 科学出版社, 1988]
- 10 Qin S Q, Zhang Z Y, Wang S T, et al. The future of engineering geology—Nonlinear engineering geology (in Chinese). *Geol Hazards Environ Prot*, 1993, 2: 11–14 [秦四清, 张倬元, 王士天, 等. 工程地质学的未来——非线性工程地质学. 地质灾害与环境保护, 1993, 2: 11–14]
- 11 Li C, Jiang Q H, Zhou C B, et al. Study on landslide early warning criteria based on case-based reasoning (in Chinese). *Geotech Mech*, 2011, 32: 1069–1076 [李聪, 姜清辉, 周创兵, 等. 基于实例推理系统的滑坡预警判据研究. 岩土力学, 2011, 32: 1069–1076]
- 12 Guo L, He K Q, Jia Y Y. Study on displacement direction coordination parameters and instability criteria of reservoir accumulation (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2018, 49: 1532–1540 [郭璐, 贺可强, 贾玉跃. 水库型堆积层滑坡位移方向协调性参数及其失稳判据研究. 水利学报, 2018, 49: 1532–1540]
- 13 Li D Y, Yin K L. Application of GM (1,1)-BP model based on influence factors in deformation prediction of Bazikou (in Chinese). *J Changjiang Acad Sci*, 2013, 30: 6–11 [李德营, 殷坤龙. 基于影响因子的GM(1,1)-BP模型在八字口滑坡变形预测中的应用. 长江科学院院报, 2013, 30: 6–11]
- 14 Chen H, Tang H, Ge X R, et al. Study on early warning index and early warning prediction of creep landslide based on deep (in Chinese). *J Rock Mech Eng*, 2019, 38: 3015–3024 [陈贺, 汤华, 葛修润, 等. 基于深部位移的蠕滑型滑坡预警指标及预警预报研究. 岩石力学与工程学报, 2019, 38: 3015–3024]
- 15 Yang Z J, Wang L Y, Shi L L, et al. Study on multi index monitoring and early warning method of rainfall (in Chinese). *J Rock Mech Eng*, 2020, 39: 272–285 [杨宗佶, 王礼勇, 石莉莉, 等. 降雨滑坡多指标监测预警方法研究. 岩石力学与工程学报, 2020, 39: 272–285]
- 16 Xu Q, Zeng Y P. Study on acceleration variation characteristics and critical sliding early warning index of landslide with creep (in Chinese). *J Rock Mech Eng*, 2009, 28: 1099–1106 [许强, 曾裕平. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究. 岩石力学与工程学报, 2009, 28: 1099–1106]
- 17 Xu Q, Zeng Y P, Qian J P, et al. An improved tangent angle and corresponding landslide early warning (in Chinese). *Geol Bull*, 2009, 28: 501–505 [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. 地质通报, 2009, 28: 501–505]
- 18 Dong X J, Xu Q, Tang C, et al. Physical simulation test study on the characteristics of landslide displacement time (in Chinese). *J Eng Geol*, 2015, 23: 401–407 [董秀军, 许强, 唐川, 等. 滑坡位移-时间曲线特征的物理模拟试验研究. 工程地质学报, 2015, 23: 401–407]
- 19 Yang F, Xu Q, Fan X M, et al. Study on landslide displacement prediction based on time series and artificial bee colony support vector (in Chinese). *J Eng Geol*, 2019, 27: 880–889 [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. 工程地质学报, 2019, 27: 880–889]
- 20 Xu Q. Understanding and thinking on problems related to early identification of hidden dangers of geological (in Chinese). *J Wuhan Univ (Inf Sci Ed)*, 2020, 45: 4–12 [许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45: 4–12]
- 21 Fan X, Xu Q, Liu J, et al. Successful early warning and emergency response of a disastrous rockslide in Guizhou province, China. *Landslides*, 2019, 16: 2445–2457
- 22 Federico A, Popescu M, Elia G, et al. Prediction of time to slope failure: A general framework. *Environ Earth Sci*, 2012, 66: 245–256
- 23 Carla T, Farina P, Intrieri E, et al. On the monitoring and early-warning of brittle slope failures in hard rock masses: Examples from an open-pit mine. *Eng Geol*, 2017, 228: 71–81
- 24 Qi X, Zhu X, Xu Q, et al. Improvement and application of landslide critical sliding time prediction method based on Saito (in Chinese). *J Eng Geol*, 2020, 28: 832–839 [亓星, 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. 工程地质学报, 2020, 28: 832–839]
- 25 Xu Q, Yuan Y, Zeng Y P, et al. Some new pre-warning criteria for creep slope failure. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 210–220
- 26 Li X, Kong J, Wang Z. Landslide displacement prediction based on combining method with optimal weight. *Nat Hazards*, 2012, 61: 635–646
- 27 Intrieri E, Raspini F, Fumagalli A, et al. The Maoxian landslide as seen from space: Detecting precursors of failure with Sentinel-1 data.

- Landslides*, 2018, 15: 123–133
- 28 Huang J, Yao Y P. Practical model for predicting instability time of high fill (in Chinese). *Geotech Mech*, 2019, 40: 4057–4064 [黄建, 姚仰平. 高填方边坡失稳时间预测的实用模型. 岩土力学, 2019, 40: 4057–4064]
- 29 Qing S Q, Wang S J. A homomorphic model for identifying abrupt abnormalities of landslide forerunners. *Eng Geol*, 2000, 57: 163–168
- 30 Feng Z, Li B, Yin Y P, et al. Rockslides on limestone cliffs with subhorizontal bedding in the southwestern calcareous area of China. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2014, 14: 4299–4330
- 31 Ryan T M, Call R D. Applications of rock mass monitoring for stability assessment of pit slope failure. In: Tillerson J R, Wawersik W R, eds. The 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Santa Fe, 1992. 221–229
- 32 Shoaei Z, Karamsoltani K. Application of monitoring data for the prediction of the time to failure and risk management. In: *Landslide Science and Practice*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. 543–547
- 33 Kavvadas M, Roumpos C, Schilizzi P. Stability of deep excavation slopes in continuous surface lignite mining systems. *Geotech Geol Eng*, 2020, 38: 791–812
- 34 Carlà T, Intrieri E, Raspini F, et al. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Sci Rep*, 2019, 9: 14137
- 35 Venter J, Kuzmanovic A, Wessels S D. An evaluation of the CUSUM and inverse velocity methods of failure prediction based on two open pit instabilities in the Pilbara. In: *Proceedings of Slope Stability 2013*, Australian Centre for Geomechanics. Brisbane, 2013. 1061–1076
- 36 Iovine G, Petrucci O, Rizzo V. The March 7th 2005 Cavallerizzo (Cerzeto) Landslide in Calabria—Southern Italy. *Engineering Geology for Tomorrow’s Cities—The 10th IAEG Congress*, Nottingham (UK), The Geological Society of London, 2006. 785
- 37 Carlà 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. *Landslides*, 2019, 16: 1425–1435
- 38 Macchiotta R, Hendry M, Martin C D. Developing an early warning system for a very slow landslide based on displacement monitoring. *Nat Hazards*, 2016, 81: 887–907
- 39 Bozzano F, Cipriani I, Mazzanti P, et al. A field experiment for calibrating landslide time-of-failure prediction functions. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2014, 67: 69–77
- 40 Gigli G, Fanti R, Canuti P, et al. Integration of advanced monitoring and numerical modeling techniques for the complete risk scenario analysis of rockslides: The case of Mt. Beni (Florence, Italy). *Eng Geol*, 2011, 120: 48–59
- 41 Carlà T, Intrieri E, Di Traglia F, et al. Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses. *Landslides*, 2017, 14: 517–534
- 42 Helmstetter A, Sornette D, Grasso J R, et al. Slider block friction model for landslides: Application to Vajont and La Clapière landslides. *J Geophys Res*, 2004, 109: B02409
- 43 Yamaguchi U, Shimotani T. 10. A case study of slope failure in a limestone quarry. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstracts*, 1986, 23: 95–104
- 44 Suwa H, Mizuno T, Ishii T. Prediction of a landslide and analysis of slide motion with reference to the 2004 Ohto slide in Nara, Japan. *Geomorphology*, 2010, 124: 157–163
- 45 Brown I, Hittinger M, Goodman R. Finite element study of the Nevis bluff (New Zealand) rock slope failure. *Rock Mech*, 1980, 12: 231–245
- 46 Sättle M, Krautblatter M, Bründl M, et al. Forecasting rock slope failure: How reliable and effective are warning systems? *Landslides*, 2016, 13: 737–750
- 47 Zhang Y, Zhu S, Zhang W, et al. Analysis of deformation characteristics and stability mechanisms of typical landslide mass based on the field monitoring in the Three Gorges Reservoir, China. *J Earth Syst Sci*, 2019, 128: 9
- 48 Xue D, Li T, Wei Y, et al. Mechanism of reactivated Badu landslide in the Badu Mountain area, Southwest China. *Environ Earth Sci*, 2015, 73: 4305–4312
- 49 Yao W, Li C, Zuo Q, et al. Spatiotemporal deformation characteristics and triggering factors of Baijiabao landslide in Three Gorges Reservoir region, China. *Geomorphology*, 2019, 343: 34–47
- 50 Li D, Yin K, Leo C. Analysis of Baishuihe landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall. *Environ Earth Sci*, 2010, 60: 677–687
- 51 Guo Z, Yin K, Gui L, et al. Regional rainfall warning system for landslides with creep deformation in Three Gorges using a statistical black box model. *Sci Rep*, 2019, 9: 8962

- 52 Xu Q, Liu H, Ran J, et al. Field monitoring of groundwater responses to heavy rainfalls and the early warning of the Kualiangzi landslide in Sichuan Basin, southwestern China. *Landslides*, 2016, 13: 1555–1570
- 53 Lin P, Liu X, Hu S, et al. Large deformation analysis of a high steep slope relating to the Laxiwa reservoir, China. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49: 2253–2276
- 54 Ju N, Huang J, Huang R, et al. A real-time monitoring and early warning system for landslides in Southwest China. *J Mt Sci*, 2015, 12: 1219–1228
- 55 Zhang Y, Li H, Sheng Q, et al. Real time remote monitoring and pre-warning system for Highway landslide in mountain area. *J Environ Sci*, 2011, 23: S100–S105
- 56 Zhang Y, Hu X, Tannant D D, et al. Field monitoring and deformation characteristics of a landslide with piles in the Three Gorges Reservoir area. *Landslides*, 2018, 15: 581–592
- 57 Xia M, Ren G M, Ma X L. Deformation and mechanism of landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall, Three Gorges, China. *Nat Hazards*, 2013, 68: 467–482
- 58 Wang Y, Tang H, Wen T, et al. A hybrid intelligent approach for constructing landslide displacement prediction intervals. *Appl Soft Comput*, 2019, 81: 105506
- 59 Nie L, Li Z, Zhang M, et al. Deformation characteristics and mechanism of the landslide in West Open-Pit Mine, Fushun, China. *Arab J Geosci*, 2015, 8: 4457–4468
- 60 Wang H, Sun Y, Tan Y, et al. Deformation characteristics and stability evolution behavior of Woshaxi landslide during the initial impoundment period of the Three Gorges Reservoir. *Environ Earth Sci*, 2019, 78: 592
- 61 Huang D, Gu D M. Influence of filling-drawdown cycles of the Three Gorges Reservoir on deformation and failure behaviors of anacinal rock slopes in the Wu Gorge. *Geomorphology*, 2017, 295: 489–506
- 62 Yin Y, Wang H, Gao Y, et al. Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China. *Landslides*, 2010, 7: 339–349
- 63 Carlà T, Macciotta R, Hendry M, et al. Displacement of a landslide retaining wall and application of an enhanced failure forecasting approach. *Landslides*, 2018, 15: 489–505
- 64 Manconi A, Giordan D. Landslide failure forecast in near-real-time. *Geomat Nat Hazards Risk*, 2016, 7: 639–648
- 65 Supper R, Ottowitz D, Jochum B, et al. Geoelectrical monitoring: An innovative method to supplement landslide surveillance and early warning. *Near Surf Geophys*, 2014, 12: 133–150
- 66 Steiakakis C, Agiotantis Z, Apostolou E, et al. Integrating weather and geotechnical monitoring data for assessing the stability of large scale surface mining operations. *Open Geosci*, 2016, 8: 694–699
- 67 Fathani T F, Karnawati D, Legono D, et al. Development of early warning system for rainfall-induced landslide in Indonesia. In: The 2nd International Workshop on Multimodal Sediment Disaster: Asian Cloud Network on Disaster Research. Taiwan, China, 2011. 103–113
- 68 Huvaj-Sarihan N. Evaluation of the rate of movement of a reactivated landslide. In: 61st Canadian Geotechnical Conference, GeoEdmonton 2008. Edmonton, 2009. 1171–1178
- 69 Martino S, Lenti L, Bourdeau C. Composite mechanism of the Büyüçekmece (Turkey) landslide as conditioning factor for earthquake-induced mobility. *Geomorphology*, 2018, 308: 64–77
- 70 Farina P, Coli N, Yön R, et al. Efficient real time stability monitoring of mine walls: The Çöllolar mine case study. In: 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey. Antalya, 2013. 111–117
- 71 Simeoni L, Mongiovì L. Inclinometer monitoring of the Castelrotto landslide in Italy. *J Geotech Geoenvir Eng*, 2007, 133: 653–666
- 72 Tiranti D, Rabuffetti D, Salandin A, et al. Development of a new translational and rotational slides prediction model in Langhe hills (north-western Italy) and its application to the 2011 March landslide event. *Landslides*, 2013, 10: 121–138
- 73 Bayer B, Simoni A, Mulas M, et al. Deformation responses of slow moving landslides to seasonal rainfall in the Northern Apennines, measured by InSAR. *Geomorphology*, 2018, 308: 293–306
- 74 Rosone M, Zuccarelli M, Ferrari A, et al. On the reactivation of a large landslide induced by rainfall in highly fissured clays. *Eng Geol*, 2018, 235: 20–38
- 75 Sornette D, Helmstetter A, Andersen J V, et al. Towards landslide predictions: Two case studies. *Physica A*, 2004, 338: 605–632
- 76 Bernardie S, Desramaut N, Malet J P, et al. Prediction of changes in landslide rates induced by rainfall. *Landslides*, 2015, 12: 481–494

- 77 Massey C I, Petley D N, McSaveney M J. Patterns of movement in reactivated landslides. *Eng Geol*, 2013, 159: 1–19
- 78 Hong Y, Hiura H, Shino K, et al. The influence of intense rainfall on the activity of large-scale crystalline schist landslides in Shikoku Island, Japan. *Landslides*, 2005, 2: 97–105
- 79 Rose N D, Hungr O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2006, 44: 308–320
- 80 Staley D M, Kean J W, Cannon S H, et al. Objective definition of rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of post-fire debris flows in southern California. *Landslides*, 2013, 10: 547–562
- 81 Ju N, Huang J, He C, et al. Landslide early warning, case studies from Southwest China. *Eng Geol*, 2020, 279: 105917
- 82 Chen M X, Jiang Q H. An early warning system integrating time-of-failure analysis and alert procedure for slope failures. *Eng Geol*, 2020, 272: 105629

Determinations of the early warning threshold for creep landslides and their applications

ZHOU XiaoPing¹, YE Teng¹ & HUANG XiaoCheng²

¹ School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

² School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

The accuracy of the threshold is very important for early warning of slopes. However, the existing slope failure threshold criteria are insufficiently accurate and have limited applicability. This paper proposes three dimensionless parameters based on slope deformation displacement, velocity, and acceleration and statistically analyzes 80 slope deformation monitoring examples. The second-order dimensionless failure threshold is obtained using probability and statistics theory. The dimensionless threshold is applied in the early warning analysis of landslide #2 in Jiangxi Province's copper mine. The results show that (1) the “two-sample heteroscedasticity t-test” method shows that the dimensionless parameters in the failure case are significantly greater than the dimensionless parameters in the non-failure case; (2) a dimensionless threshold can eliminate the influence of vector parameters, which are physical in nature; (3) the “ROC curve” approach is used to validate the reliability and accuracy of the dimensionless threshold model, and it is theoretically explained that the prediction accuracy of the dimensionless threshold of acceleration is relatively the highest; (4) in this situation, the corresponding warning time of the three dimensionless thresholds is not the same, with the secondary dimensionless threshold of acceleration having the earliest time.

landslide, threshold, early warning, dimensionless parameters, significance test

doi: [10.1360/SST-2021-0503](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0503)