

基于改进切线角理论的桃源县沉积岩滑坡预警阈值研究

王思思^{1,2}

¹中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津

²湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年8月30日; 录用日期: 2025年10月20日; 发布日期: 2025年10月28日

摘 要

桃源县西部以及西南部主要为山地丘陵地貌, 地形起伏较大, 以碳酸盐类为主, 山地滑坡灾害频发。为了减小区内滑坡灾害, 实现滑坡灾害的准确预警, 基于改进切线角理论, 结合累计加速度, 选取多个区域内已发生且预报成功的滑坡的多类型监测数据。通过绘制改进切线角图形、累计加速度 - 时间曲线, 研究得出桃源县碳酸盐类滑坡蠕滑阶段的综合划分结果。确定临滑预警阈值判据为: $T-t$ 曲线切线角大于等于 80° 、加速度绝对值大于0, 并且能够持续较大波动的状态。此研究对于桃源县碳酸盐类滑坡的监测预警工作带来了较大的便利, 同时为通过岩性建立预警模型提供了极大的参考价值。

关键词

滑坡, 改进切线角, 预警阈值, 变形速率

Study on the Early Warning Threshold of Sedimentary Rock Landslide in Taoyuan County Based on Improved Tangent Angle Theory

Sisi Wang^{1,2}

¹China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Tianjing

²Institute of Earth Sciences and Space Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: August 30, 2025; accepted: October 20, 2025; published: October 28, 2025

Abstract

The western and southwestern parts of Taoyuan County are mainly mountainous and hilly landscapes, with large topographic undulations, dominated by carbonates, and frequent occurrence of landslide disasters in the mountainous areas. In order to reduce the hazards of landslide disasters and to achieve accurate early warning of landslide disasters, based on the theory of improved tangent angle, combined with the cumulative acceleration, multiple types of monitoring data of landslides that have occurred in the area and have been successfully forecasted are selected. By plotting the graph of improved tangent angle and cumulative acceleration-time curve, the study results in the comprehensive division of creep-slip stage of carbonate landslides in Taoyuan County. The critical slip warning threshold is determined as a state in which the tangent angle of the $T-t$ curve is greater than or equal to 80° , the absolute value of acceleration is greater than 0, and large fluctuations can be sustained. This study brings greater convenience to the monitoring and early warning of carbonate landslides in Taoyuan County, and provides a great reference value for the establishment of early warning models through lithology.

Keywords

Landslides, Improved Tangent Angle, Warning Threshold, Deformation Rate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滑坡是地质灾害中灾害发生频率最高的灾害,对人民的生命财产和生活造成极大的危害[1]-[4]。桃源县望阳山周边地区一般由冷家溪群、板溪群和震旦系等浅变质岩系组成,桃源县钟家铺至景龙桥以北广大地区一般是由碳酸盐岩构成。地形结构复杂、地层岩性多变,西北部山地丘陵成群,东部为冲积平原。

从已存在且有一定影响的研究结果中显示,日本斋藤学者[5]将滑坡主要分为三个阶段,分别是初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段。后面许强等[6]对不同变形阶段的不同变形特点统一分析尺度,提出了一种纵横坐标量纲化的改进切线角模型,并且进一步细分加速变形阶段为三个变形阶段,分别为初加速变形、中加速变形以及加加速变形阶段。朱智超等[7]对十堰市变质岩斜坡进行研究,利用各类型位移监测数据绘制 $T-t$ 等曲线进行分析,最终得到十堰市变质岩滑坡蠕滑阶段的综合划分结果。

目前湖南省已部署近 4000 处地质灾害专业监测点,以普适型设备为主,构建了“人防 + 技防”监测预警体系[8]。自 2020 年以来,全省已出现了近 40 起成功预警和有效预警的案例,为保障人民生命财产提供了宝贵经验和理论依据。然而目前对于桃源县沉积岩滑坡蠕滑阶段的划分研究还尚未展开。

桃源县目前的滑坡灾害主要集中在南部地区,其南部区域主要是以板岩和砂岩为主的沉积岩区。本文基于改进切线角理论,结合加速度,以改进切线角数值和加速度为指标提出了桃源县沉积岩类滑坡蠕滑变形阶段的综合划分及预警阈值。

2. 滑坡概况

2.1. 成灾地质背景条件

桃源县位于湖南常德西南部,地处中亚热带向北亚热带过渡的季风性湿润气候区,冬季寒冷少雨,

夏季炎热多雨。桃源县西南部直插安化多雨区，近年来年平均降水量在 1600 mm 以上。桃源县西部及西南为中、低山侵蚀构造地形，桃源县主要以丘陵地形为主，地形切割强烈，V 形谷发育，地形坡度陡峻，海拔最高 2099 m，一般 500 m~1000 m，相对高差 500m~1200 m。

沉积岩、变质岩是桃源县最主要的岩石，其中包括厚层状板岩和浅变质砂岩，还包括小部分的层状砂砾岩。且桃源县南部是整个县城滑坡、崩塌以及泥石流灾害主要发生的地区。

2.2. 沉积岩滑坡破坏特征

桃源县沉积岩滑坡灾害主要为中小型浅表层土质滑坡，在运动形式上，主要表现为牵引式。其平面形态通常呈现出舌状、不规则及半圆形，而坡面的形态则以直线型和阶梯型为主，凹形和凸形次之。

研究区内滑坡多在雨季频发，雨季雨水从拉张裂缝中向下渗透，对下部土层有软化作用，并对土体内部产生潜蚀作用，形成软弱带，一旦强降雨等不利外界不利因素介入，将会导致土体不稳定，易发生滑坡。

3. 基于滑坡变形特征的预警阈值研究方法

3.1. 时序变形曲线拟合方法

根据湖南省地质灾害防治综合应用系统，可以实时监测研究区域内的各个设备，并且这些设备的在线率一直处于 70%以上。由于设备自身具有仪器误差，会在一定范围内产生抖动，造成监测数据的有较低的准确性和时效性。如图 1 所示，监测仪器自身的误差以及外界人为活动的干扰导致曲线呈抖动状。

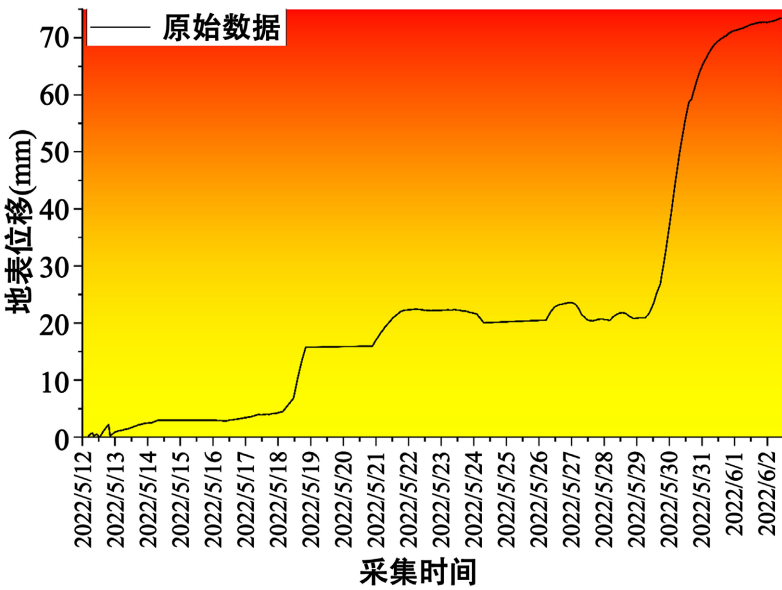


Figure 1. Guandoushan landslide, Taoyuan County
图 1. 桃源县关斗山滑坡

在发生滑坡的整个过程当中，位移监测曲线是呈一个曲线型变化，在目前的研究成果中，最小二乘法仍为一个主要的曲线平滑方法[9]，但是最小二乘法存在局限性，最小二乘法通常假设数据点之间存在线性关系，因此更适合于线性模型。但是根据三段式蠕变理论，进入加速变形阶段后斜坡会出现加速变形，此时最小二乘法处理数据将会导致出现误报信息[10]。因此相对于最小二乘法平滑方法，Lowess(局

部加权回归平滑方法: Locally weighted scatterplot smoothing)更适合非线性和局部特征的分析[11]。

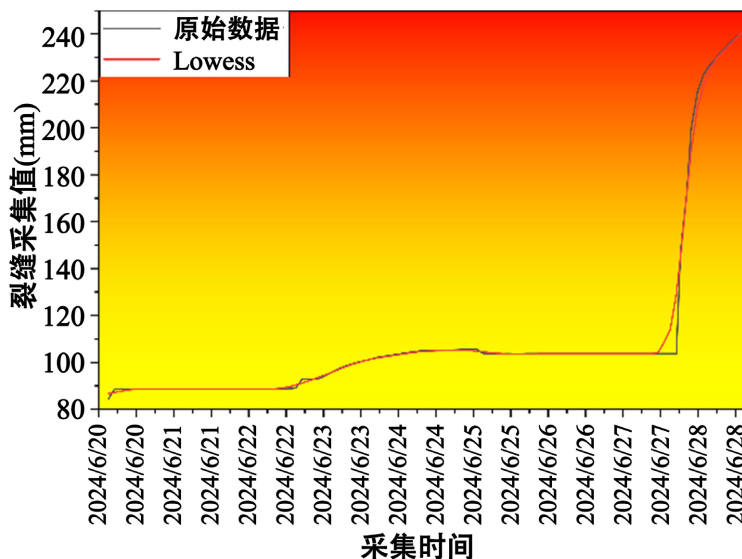


Figure 2. Laijiapo landslide, Taoyuan County
图 2. 桃源县赖家坡滑坡

如图 2 所示, 原始裂缝计位移监测曲线中存在局部小的误差, 无法很好地判断滑坡的变化趋势, 使用 Lowess 方法平滑的红色曲线能够更加直观的判断滑坡的变形趋势。因此本研究主要采取的是 Lowess, 又称改进最小二乘法, 对于数据进行拟合平滑, 帮助项目研究更好地判断滑坡变化趋势。

3.2. 改进切线角 $T-t$ 曲线

这一阶段中斜坡变形速率基本保持恒定, 位移 S 与时间 t 之间呈线性变化关系, 因此可以将等速变形阶段的平均速率作为统一 $S-t$ 曲线量纲的参考值, 将其转换成 $T-t$ 曲线[12]。其转换公式如下所示:

$$T(i) = \frac{\Delta S(i)}{v} \quad (1)$$

公式中: $\Delta S(i)$ 为一段监测时间内滑坡位移变化量; v 为等速变形阶段的位移平均速率; $T(i)$ 为变化量纲后的纵坐标。

由滑坡 $T-t$ 曲线可以推导出改进的切线角公式

$$\alpha_i = \arctan \frac{T_i - T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: α_i ——改进切线角;

t_i ——某一监测时刻;

Δt ——对应 ΔS 的单位时间段(一般采用一个监测周期, 如 1 天、1 周等);

ΔT ——单位时间段内 T_i 的变化量。

$T-t$ 曲线变换的核心是滑坡等速变形阶段, 等速变形速率 v 是通过将等速变形阶段各检测周的变形速率去平均值得到[12], 其表达式为

$$v = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i \quad (3)$$

式中： v_i 为等速变形阶段内各监测周期的变形速率； m 为监测次数。

由滑坡 $T-t$ 曲线可以推导出改进的切线角公式(如图 3 所示)。

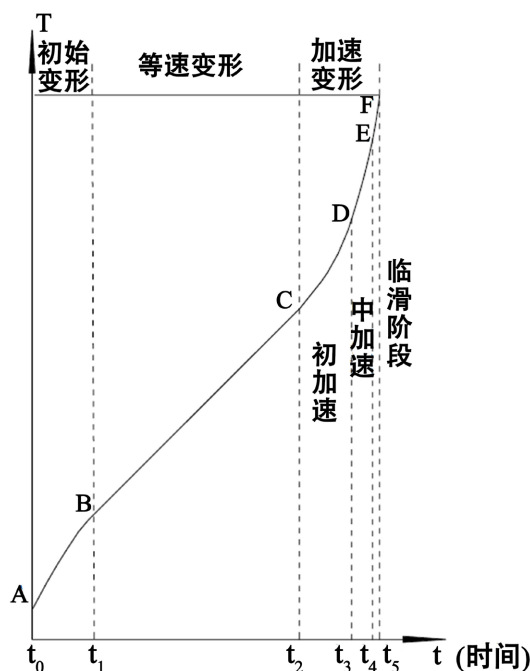


Figure 3. Landslide $T-t$ curves after the same magnitude [12]

图 3. 同一量纲后的滑坡 $T-t$ 曲线[12]

3.3. 加速度

滑坡的变形是由于滑坡在受到外力的影响，或是由于潜在滑面的弱化，使得滑面上的土体抗剪强度降低，从而造成了滑坡力的平衡被破坏，其外在表现就是滑坡的变形破坏[7]。

滑坡体在初始变形阶段，下滑力大于抗滑力，两者的差值呈逐渐减小，慢慢处于一个动态平衡的状态，加速度 α 逐渐趋于 0。

在滑坡体的等速变形阶段，下滑力与抗滑力达到了动态平衡，此时滑坡体保持一个匀速运动的状态，且其加速度 α 为 0。但是在此次过程中仍会遭受到自然因素和人为因素的影响，会在等速变形阶段出现上下波动，但是总体上处于动态平衡的状态。但是当趋近于加速变形阶段时，下滑力逐渐大于抗滑力。

4. 桃源县沉积岩滑坡预警阈值研究结果

4.1. 滑坡变形监测数据收集及处理

本文收集了桃源县沉积岩地区 2 处已发生滑坡灾害的监测点唯一变形监测数据(包含 GNSS 地表变形监测、裂缝计)。首先对于位移监测数据的收集位移取 X、Y、Z 三轴的合成位移。首先对合成位移数据利用拉依达准则[13]进行粗差数据剔除处理。拉依达准则(PauTa Criterion)即 3σ 准则，其原理是测量值 x_i 与平均值 μ 的绝对差值大于三倍标准偏差 σ ，则认为该测量值属于粗大误差，需要剔除。

$$|x_i - \mu| > 3\sigma \quad (4)$$

1) 桃源县浔阳街道梅溪桥村关斗山组 Y 滑坡

滑坡点处位于剥蚀、侵蚀丘陵红层地貌，微地貌地形属缓坡，斜坡坡度 26° ，相对高差为 71 米，植

被发育一般,覆盖率约 65%,以山茶树为主,上覆第四系残坡积层,土层为紫红色、灰黄色细砂土为主,密实程度为松散,平均厚度为 2.5 m,下覆基岩为厚-巨厚层状泥质砂岩,为较软层。如图 4 所示是滑坡整体情况,图 5 为滑坡剖面图。



Figure 4. Distribution of monitoring points of Y landslide of Guandoushan Formation
图 4. 关斗山组 Y 滑坡监测点分布图

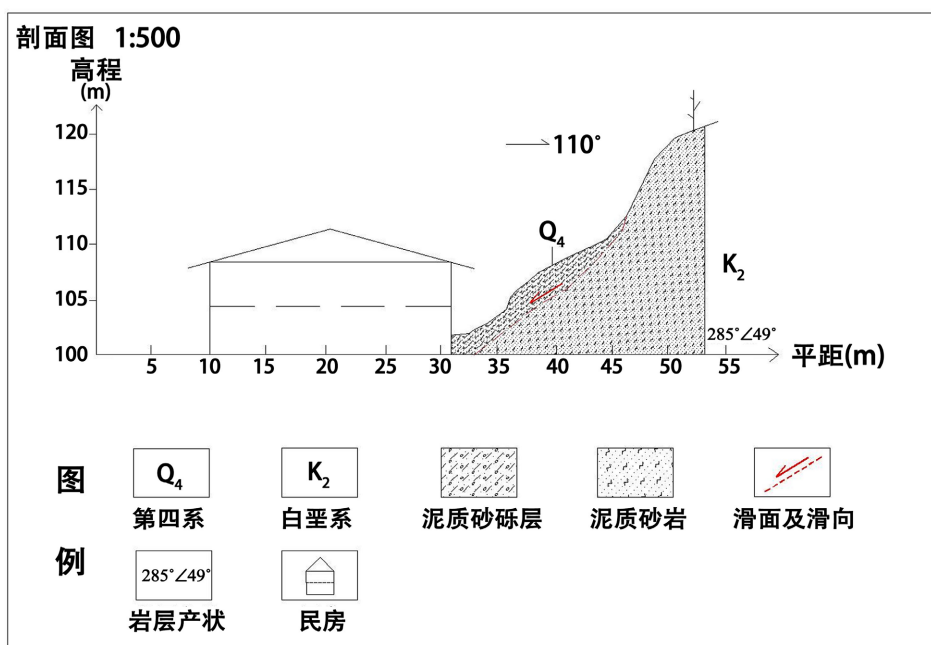


Figure 5. Y landslide profile of the Guandoushan Formation
图 5. 关斗山组 Y 滑坡剖面图

2022 年 6 月 2 日 22 时,预警设备周边出现小规模滑坡,本文统计了关斗山 Y 滑坡于 2022 年 5 月 12 日 16 时~2022 年 6 月 2 日 22 时的滑坡位移监测数据,GNSS 地表位移监测出地表位移变化值约为 1 m,其中水平方向上的位移变化约为 0.9147 m,而垂直方向上的位移变化值约为 0.379 m。此次滑坡的 $S-t$ 滑坡、 $\alpha-t$ 曲线如图 6 所示。

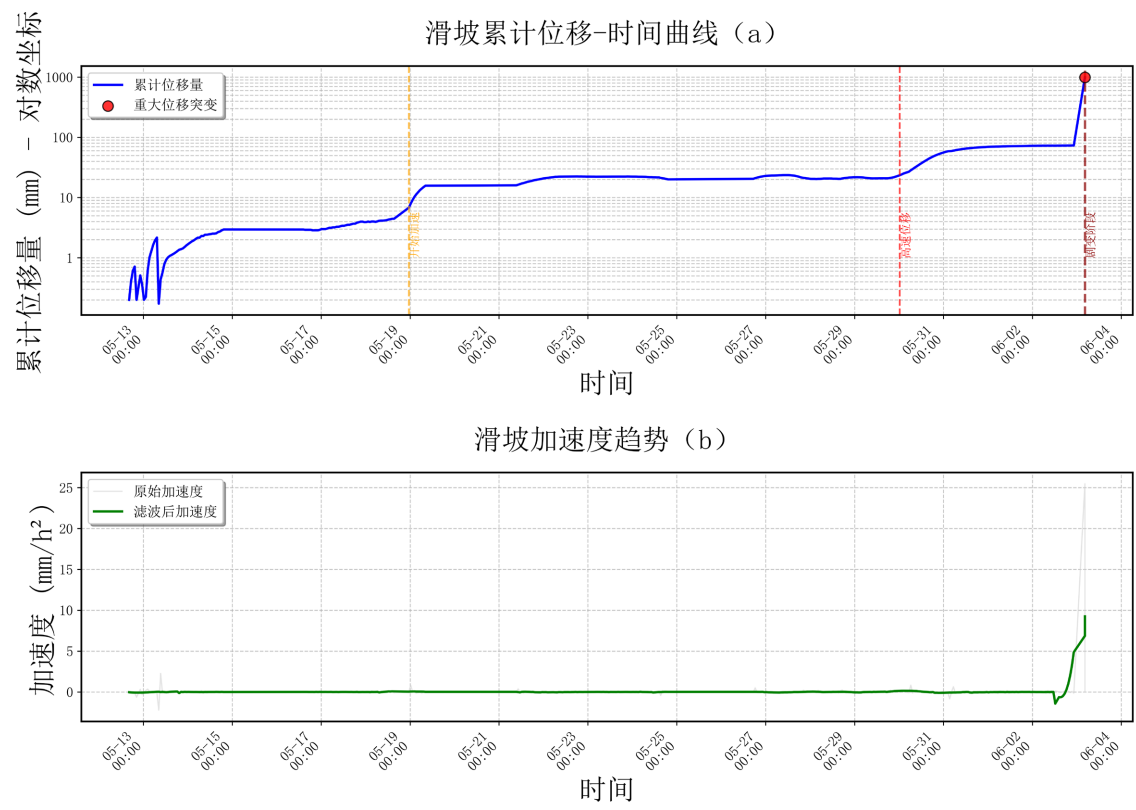


Figure6. *S-t* curve and $\alpha-t$ curve diagram of Guanduoshan Y landslide
图 6. 关斗山 Y 滑坡 *S-t* 曲线和 $\alpha-t$ 曲线

2) 桃源县理公港城关村赖家坡组 D 滑坡

该滑坡为一牵引式岩土质混合型滑坡，上覆残坡积层粉质粘土，土层厚约 2.5 m；下伏基岩为寒武系牛蹄塘组硅质岩，斜坡结构类型为顺向。滑体长约 80 m，前缘坡宽约 120 m，厚约 5 m，方量 48,000 m³，平面上呈半圆形，主滑方向约为 10°。2022 年 7 月 6 日，坡体后缘见拉张裂缝 1 条，长约 10 m，宽约 0.2~0.3 m，可见深度 0.1 m，裂缝走向 130°。如图 7 所示是滑坡整体情况，图 8 为滑坡剖面图。



Figure 7. Map of landslide monitoring sites in D
图 7. D 滑坡监测点分布

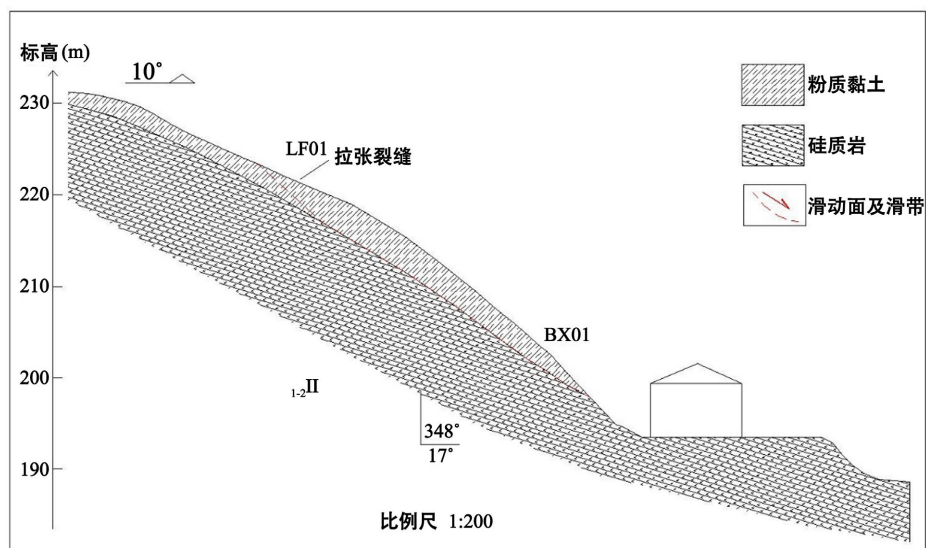


Figure 8. D Landslide profile

图 8. D 滑坡剖面图

2024 年 6 月 29 日 6 时，滑坡的后缘裂缝拉伸，紧急转移一户人口。在本文统计的相关数据中，裂缝计所统计的拉伸位移值达到了 0.3 m，实际上整个滑坡过程的位移值统计远不止这些。直至 2024 年 6 月 30 日 17 时，滑坡体才趋于稳定(图 9)。

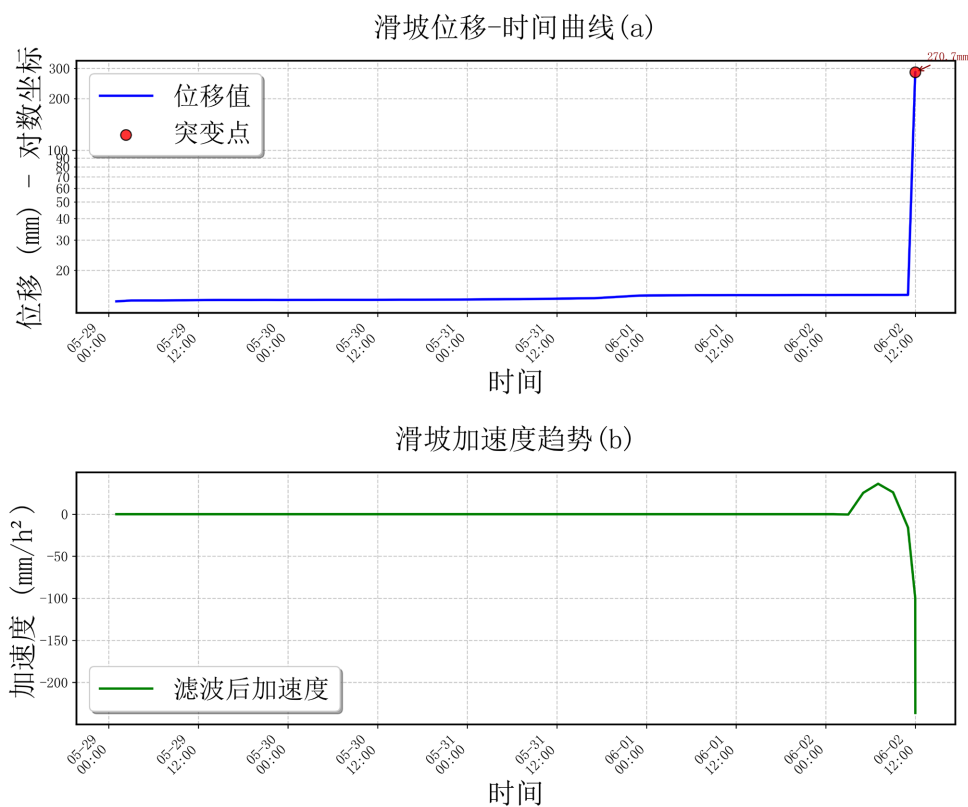


Figure 9. S - t curve and a - t curve of Laijiapo D Landslide

图 9. 赖家坡 D 滑坡 S - t 曲线和 a - t 曲线

本文选取了关斗山 Y 滑坡 2022 年 5 月 12 日至 2022 年 6 月 3 日的 GNSS 地表位移监测数据、赖家坡 D 滑坡 2024 年 19 日至 2024 年 6 月 29 日 12 时的裂缝位移监测数据。当两个 2 个滑坡处于等速变形阶段，将等速变形阶段位移得到等速变形阶段 v ，再将 v 代入式(1)将上述 2 个滑坡的 $S-t$ 曲线转换为无量纲的 $T-t$ 曲线，如图 10 所示。

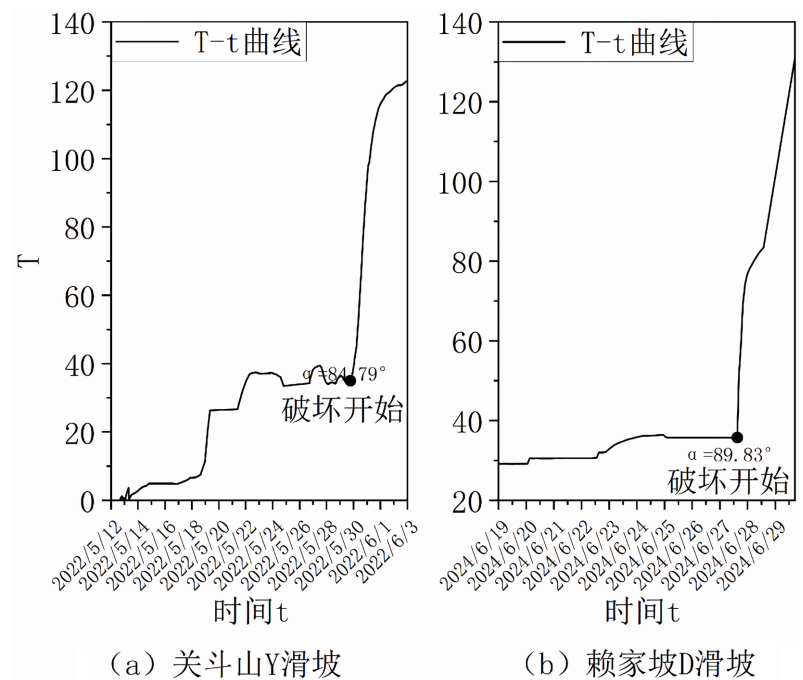


Figure 10. $T-t$ curves of 2 landslides in Taoyuan
图 10. 桃源 2 个滑坡的 $T-t$ 曲线

4.2. 滑坡变形监测数据结果

桃源县的沉积岩滑坡的发生过程可以分为 3 个阶段：初始变形阶段、等速变形阶段、加速变形阶段。其中等速变形阶段时沉积岩滑坡演化过程中经历时间最长，预警意义最大的阶段。

通过对上述两个滑坡的 $T-t$ 曲线进行比较分析，可以得出以下结论：在滑坡的发展过程中，当滑坡达到约 85° 时，破坏现象基本上就已经开始出现；而当滑坡的切线角超过 80° 时，变形速度会迅速加快，此时距离急剧下滑的时间非常短暂，时间基本上控制在 1 小时左右。两个滑坡的破坏开始时的切线角与 80° 切线角到破坏开始经历的时间如下表所示。

Table 1. Time elapsed between the tangent angle of 80° and the onset of damage
表 1. 切线角为 80° 至破坏开始时所经历的时间

滑坡名称	关斗山 Y 滑坡	赖家坡 D 滑坡
破坏开始切线角/ $^\circ$	84.79 $^\circ$	89.83 $^\circ$
80° 切线角到破坏开始经历的实际时间/h	1 h	1 h

由表 1 可知，这两处滑坡从切线角为 80° 的时刻到破坏开始，间隔时间特别短。基于这两处滑坡案例，初步发现当滑坡体的切线角达到 80° 时，这标志着滑坡正趋近于临滑状态，故在此切线角下的预警意义较为显著，适宜作为滑坡预警及预报的重要判断依据。

5. 讨论

本文基于改进切线角理论,结合加速度数据,对桃源县沉积岩滑坡的蠕滑变形阶段进行了综合划分,并提出了预警阈值。在滑坡灾害研究中,准确预警是减少灾害损失的关键,而切线角作为滑坡监测预警模型中的重要判据,其准确性和时效性至关重要。

本文采用了 Lowess 方法对监测数据进行平滑处理,相较于传统的最小二乘法,Lowess 更适合非线性和局部特征的分析,从而能够更准确地判断滑坡的变形趋势。这为后续切线角的计算和预警阈值的确定提供了更为可靠的数据基础。

通过引入改进切线角 $T-t$ 曲线,本文将位移-时间曲线($S-t$ 曲线)转换为无量纲的 $T-t$ 曲线,避免了传统切线角因坐标尺度改变而发生变化的问题。同时,结合加速度数据,本文进一步细化了滑坡的蠕滑变形阶段,为滑坡预警提供了更为精确的判断依据。

在研究过程中,我们发现当滑坡体的切线角达到 80° 时,滑坡的变形处于急剧变化的状态,此时距离急速下滑的时间很短。这一发现与许强等人在不同地质条件下的研究结果相一致,表明改进切线角理论在不同类型的滑坡预警中均具有较高的适用性。

6. 结论

1) 在这两处滑坡中,关斗山 Y 滑坡是下覆泥质砂岩的土质滑坡,而赖家坡 D 滑坡是 2 下伏硅质岩的沿途混合滑坡。前者以 GNSS 地表位移监测,后者为裂缝计监测为监测手段。基于改进切线角理论初步研究得出,尽管两处滑坡在岩性、规模和监测方式上存在差异,但 80° 切线角且 α 持续动荡变化均能有效指示临滑状态。

2) 根据桃源县沉积岩滑坡蠕滑阶段划分结果,初步得出了桃源县沉积岩滑坡的临滑预警阈值判据:切线角大于等于 80° 且 α 持续动荡变化。

3) 本文基于改进切线角理论的桃源县沉积岩滑坡预警阈值研究,为滑坡预警提供了新的思路和方法。然而,滑坡预警研究仍是一个不断探索和完善的过程,需要我们在未来的工作中继续深入研究和实践,以更好地服务于防灾减灾工作。

基金项目

湖南省自然科学基金项目(2021JJ30240)。

参考文献

- [1] 邓李政,袁宏永,张鸣之,等. 滑坡变形监测预警技术研究进展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(6): 849-864.
- [2] 汤罗圣,殷坤龙,杜鹃. 阶跃型位移特征滑坡时间预测预报研究[J]. 地质科技情报, 2012, 31(4): 106-110.
- [3] 唐亚明,张茂省,薛强,等. 滑坡监测预警国内外研究现状及评述[J]. 地质论评, 2012, 58(3): 533-541.
- [4] 许强,黄润秋,李秀珍. 滑坡时间预测预报研究[C]//中国灾害防御协会.全国突发性地质灾害应急处置与灾害防治技术高级研讨会论文集. 成都: 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 2010: 180-186.
- [5] Saito, M. (1969) Research on Forecasting the Time of Occurrence of Slope Failure. Quarterly Report of RTRI, 10.
- [6] 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.
- [7] 朱智超,曾斌,何文武,等. 基于改进切线角理论的十堰市变质岩滑坡预警阈值研究[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(3): 167-177.
- [8] 陈全明,黄炜敏,李姣. 基于改进切线角和变形速率的滑坡预警——以湖南省石门县雷家山滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 133-140.

-
- [9] 元星, 修德皓, 程关文, 等. 滑坡变形监测数据的实时过滤方法及应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(7): 129-138.
 - [10] 何朝阳. 滑坡实时监测预警系统关键技术及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020.
 - [11] Cleveland, W.S. (1979) Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, **74**, 829-836. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481038>
 - [12] 曾裕平. 重大突发性滑坡灾害预测预报研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2009.
 - [13] 朱海, 高胜峰, 蔡鹏, 等. 基于拉依达准则的自适应小波阈值选取方法[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(4): 50-54.