

基于“阶跃”变形特征的降雨型滑坡预警判据探讨

贲琰棋, 易武, 李华兵, 黄晓虎, 刘伟, 肖宇煌

Preliminary analysis on rainfall thresholds for early warning of the rainfall induced landslides based on “step” deformation characteristics

BEN Yanqi, YI Wu, LI Huabing, HUANG Xiaohu, LIU Wei, and XIAO Yuhuang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202208008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于位移监测的“降雨阶跃型”滑坡预警系统

黄晓虎, 夏俊宝, 雷德鑫

中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(6): 68-76

滑坡变形高精度智能化监测预警技术研究与实践

Research and practice of high-precision intelligent monitoring and early warning technology for landslide deformation

李星宇 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 21-29

基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53

四川宝轮服务区降雨型滑坡活动过程分析

郭斌, 贾燕, 梁纪志

中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 45-51

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123

基于集成学习的阶跃型滑坡阶跃点判别分析

杨光辉, 简文星, 张树坡, 付智勇

中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(4): 1-8



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202208008

贲琰棋, 易武, 李华兵, 等. 基于“阶跃”变形特征的降雨型滑坡预警判据探讨 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 30-38.

BEN Yanqi, YI Wu, LI Huabing, et al. Preliminary analysis on rainfall thresholds for early warning of the rainfall induced landslides based on “step” deformation characteristics[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 30-38.

基于“阶跃”变形特征的降雨型滑坡预警判据探讨

贲琰棋¹, 易武¹, 李华兵¹, 黄晓虎¹, 刘伟², 肖宇煌³

(1. 三峡大学湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北宜昌 443002;

2. 十堰市自然资源和规划局地质勘查与灾害防治科(地灾防治中心), 湖北十堰 442000;

3. 湖北省地质环境总站, 湖北武汉 430034)

摘要: 由于滑坡灾害的发生具有随机性和复杂性, 经常给人们生活造成严重的经济损失, 甚至威胁生命安全, 故建立滑坡预警判据及模型是减小损失的重要手段。文章首先确定了有效降雨量-变形速率-改进切线角为降雨型阶跃滑坡的预警关键判据。然后运用斜率单变点法确定滑坡“阶跃”变形曲线上的“破坏拐点”和“稳定拐点”并提取变形加速区间的详细信息, 以此求解有效降雨量-变形速率-改进切线角综合预警判据阈值。最后, 结合麻池村 1 号滑坡各发展阶段宏观变形特征, 将时空演化规律有机结合, 建立了 4 级递进式综合判据分级预警模型。结果表明: 麻池村 1 号滑坡的运移形式为牵引式, 在降雨因素的激发下, 累计位移曲线呈典型的“阶跃”变形特征; 麻池村 1 号滑坡变形受前期降雨影响, 前期降雨与当期降雨组成一个降雨过程的时间间隔阈值为 10 d, “前期+当期降雨”模式下对应的降雨阈值分别为 24 mm、32 mm; 基于监测数据精细化分析以及改进切线角法获取的麻池村 1 号滑坡的位移速率阈值为 12 mm/d。研究可为此类型滑坡灾害的预警提供理论基础和技术指导。

关键词: 降雨型滑坡; 阶跃变形; 前期降雨; 阈值; 预警模型

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)04-0030-09

Preliminary analysis on rainfall thresholds for early warning of the rainfall induced landslides based on “step” deformation characteristics

BEN Yanqi¹, YI Wu¹, LI Huabing¹, HUANG Xiaohu¹, LIU Wei², XIAO Yuhuang³

(1. National Field Observation and Research Station of Landslide in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Shiyan Natural Resources and Planning Bureau Geological Exploration and Disaster Prevention

Section (Geological Disaster Prevention and Control Center), Shiyan, Hubei 442000, China; 3. Hubei Provincial

Geological Environment Station, Wuhan, Hubei 430034, China)

Abstract: Since the occurrence of landslide disasters is random and complex, which often causes serious economic losses to people's lives and even threatens life safety, establishing landslide early warning criteria and models is an important means to reduce losses. In this paper, the effective rainfall-deformation rate-improved tangent angle is determined as the key criterion for

收稿日期: 2022-08-03; 修订日期: 2022-11-08

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42007237); 十堰市滑坡地质灾害精细化预警模型及预警阈值研究(HBDX21-008)

第一作者: 贲琰棋(1998-), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事滑坡监测预警工作。E-mail: 70341652@qq.com

通讯作者: 易武(1966-), 男, 湖北黄冈人, 地质资源与地质工程专业, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事边坡稳定性及其预测预报方面研究。E-mail: 397745802@qq.com

the early warning of rainfall-type step landslide. Then, the slope single-variable point method is applied to determine the “damage inflection point” and “stability inflection point” on the landslide “step” deformation curve to extract detailed information of the deformation acceleration interval, so as to solve the effective The threshold value of rainfall-deformation rate-improved tangent angle integrated warning criterion. Finally, a 4-stage progressive integrated warning model was established by combining the macroscopic deformation characteristics of the landslide at each stage of development and the spatial and temporal evolution laws. The results show that the transport form of landslide No. 1 in Machi Village is traction type, and the cumulative displacement curve shows typical “step” deformation characteristics under the excitation of rainfall factors. The deformation of landslide No. 1 in Machi village is affected by the early rainfall, and the time interval threshold between the early rainfall and the current rainfall is 10 d, and the corresponding rainfall thresholds in the “early + current rainfall” mode are 24 mm and 32 mm respectively. The study can provide theoretical basis and technical guidance for early warning of this type of landslide hazard.

Keywords: rainfall landslide; step deformation; pre-rainfall; threshold; early warning model

0 引言

滑坡的破坏性极强,经常造成严重的经济损失和人员伤亡,其危害性和破坏性在众多地质灾害中位居首位^[1]。其中,降雨是滑坡失稳破坏的最常见和最活跃的诱发因素^[2]。如何识别这些滑坡变形失稳的诱发因素,并尽可能早的预测滑坡的稳定性,以及建立合理精准的预警预报模型,是避免出现重大损失的前提和重要手段^[3]。

目前,对降雨型滑坡的预警预报研究主要有以下几类^[4-5]:(1)基于物理模型及水文模型的确定性方法,利用概化模型来研究滑坡变形规律为滑坡预测预报提供依据。此类方法需要获取岩土体的参数,因地质条件与地质环境存在差异性,且降雨过程中岩土参数的变化过程也较为复杂,因此降雨诱发滑坡的影响很难进行量化;(2)通过建立滑坡事件与累计降雨量之间的关系来建立经验性降雨阈值^[6],但因受降雨形式、降雨强度的选择、地区性限制等问题的影响,导致诱发滑坡降雨阈值的选择客观准确性不强;(3)基于某些确定性模型,来预测滑坡的失稳时间^[7]。由于该类模型预先假定了变形-时间关系满足某种特定的模型,难以表述实际滑坡演化中存在的不确定性、突变性等特点。因此,预测精度相对有限。由于滑坡地质环境、影响因素、致灾机制复杂多变,仅依靠单一预警指标,难以准确描述滑坡致灾趋势提供合理预警信息。从工程实际、临灾预警的意义上考虑,滑坡的预警应注重短期、临灾预警判据的研究和模型的建立。故针对阶跃型滑坡的变形监测数据进行精细分析而建立预警系统具有重要的意义。

本文以麻池村 1 号滑坡为例,基于降雨诱发滑坡

“阶跃”变形的特征,建立定量分析与定性判断有机结合的多指标综合预警判据阈值及分级预警模型,以提高滑坡预警工作的准确性,为相关职能部门防灾减灾工作提供参考。

1 “阶跃型”滑坡预警原理

阶梯阶阶段是“阶跃型”滑坡位移—时间曲线的典型特征,一次阶跃过程则可细分为前等速阶段、加速阶段和后等速阶段,前等速阶段与加速阶段之间存在明显的“破坏拐点”;加速阶段与后等速阶段之间又存在明显的“稳定拐点”,确定两点的发生时刻,即可确定变形区间(图 1)。

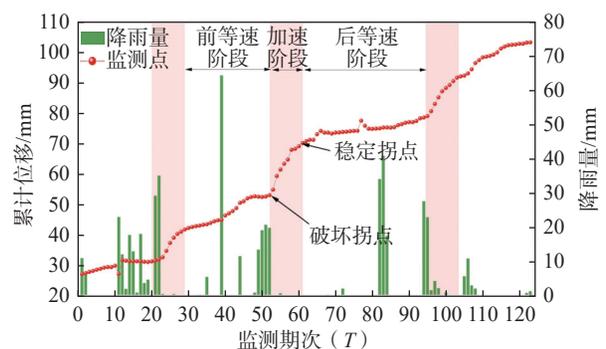


图 1 “阶跃型”滑坡位移曲线变形阶段划分

Fig. 1 Classification of deformation stages for “step-like” landslide displacement curve

滑坡成功预警的关键是选取具有良好普适性的预警判据。为此,在充分考虑现有判据的优点和不足的基础上^[8],本文选取有效降雨量-位移速率-改进切线角作为定量分析的关键预警判据,可有效避免单指标判据的不充分性。

“阶跃型”滑坡的核心预警思想为,当滑坡即将进入“破坏拐点”时,则发出预警信息,持续一段时间后,若滑坡变形趋势减缓,位移曲线恢复平缓状态,各预警阈值开始逐渐回落,则解除预警。若滑坡变形持续增加,说明滑坡进入不可逆的失稳阶段,则持续发出预警信息,直至滑坡发生。

1.1 破坏拐点

采用斜率单变点法^[9]进行分析,以天(d)为等时间间隔,相邻两侧斜率之差做一阶差分,但此“转折点”并非斜率变化最大点,而是曲线局部加(减)速变化最大点,继而进行二阶差分来反映曲线斜率变化的加(减)速度,通过寻找其局部极大值则可确定变形区间,具体如下:

加权平均数:

$$\bar{b}_j(t)_i = \frac{1}{2^2 + 3^2 + 4^2} [2^2 b_j^{(2)}(t_i) + 3^2 b_j^{(3)}(t_i) + 4^2 b_j^{(4)}(t_i)], \quad (j = 1, r) \quad (1)$$

一阶差分:

$$\Delta S(t_i) = \bar{b}_r(t_i) - \bar{b}_l(t_i) \quad (2)$$

二阶差分:

$$\Delta^2 S(t_i) = \Delta S(t_i) - \Delta S(t_{i-1}) \quad (3)$$

斜率变点:

$$t^* = t_{i-1} + \frac{\Delta^2 S(t_i) - \Delta^2 S(t_{i-1})}{[\Delta^2 S(t_i) - \Delta^2 S(t_{i-1})] + [\Delta^2 S(t_i) - \Delta^2 S(t_{i+1})]} \times (t_i - t_{i-1}) \quad (4)$$

利用上式仅可确定“破坏拐点”发生时刻,此时仅需将二阶差分改为: $\Delta^2 S(t_i) = \Delta S(t_{i-1}) - \Delta S(t_i)$, 继续求解斜率变点的精确值 t^* , 即为“稳定拐点”发生时刻。

1.2 有效降雨量判据

一场降雨存在多种降雨模式,经过地表径流和蒸发之后对滑坡的滑移起作用的部分降雨,即为有效降雨。该概念由 Crozier 提出,其将降雨划分为前期降雨和当期降雨模式,用于建立降雨阈值模型,其计算公式如下:

$$R_c = R_0 + \alpha R_1 + \alpha^2 R_2 + \alpha^3 R_3 + \dots + \alpha^t R_t \quad (5)$$

其中衰减系数可采用式(6)^[10]计算:

$$\alpha^t = e^{-\frac{t}{4.34}} \quad (6)$$

式中: R_c ——有效降雨总量/mm;

R_0 ——当日降雨量/mm;

R_t ——前 t 日有效降雨量/mm;

α ——衰减系数;

t ——前期天数/d。

1.3 改进切线角判据

许强等^[11]根据滑坡变形阶段中等速变形阶段时,滑坡变形速率为一恒定值 v ,通过纵坐标累计位移 S 除以恒定变形速度 v ,将原累计位移-时间($S-t$)曲线转变为统一时间量纲($T-t$)曲线,定义公式(7)如下:

$$T_i = \frac{\Delta S_i}{v} \quad (7)$$

式中: T_i ——转变后与时间相同量纲的纵坐标值;

ΔS_i ——某个监测周期内的累计位移量(一般为一个监测周期,取值如 1 天、1 周等);

v ——等速变形阶段的位移速率/(mm·d⁻¹)。

然后,可得到改进之后的切线角 α_i 的表达式:

$$\alpha_i = \arctan \frac{T_i - T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (8)$$

式中: α_i ——表示改进切线角/(°);

t_i ——某一监测时刻;

ΔT ——单位时间段内(T_i)的变化量;

Δt ——与计算 S 时对应的单位时间段。

将等速变形阶段各变形区间的变形速率做算术平均,即可得到等速变形阶段的速率 v :

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (9)$$

式中: v_i ——等速变形阶段不同变形区间的变形速率;

n ——监测次数。

基于改进切线角计算,经过推导可得到滑坡某一时刻的变形速率 v_i 和等速变形阶段变形速率恒定值 v 的关系式,计算公式如下:

$$\alpha_i = \arctan \frac{(t_i - t_{i-1})v_i}{(t_i - t_{i-1})v} = \arctan \frac{v_i}{v} \quad (10)$$

$$v_i = v \tan \alpha \quad (11)$$

2 麻池村 1 号滑坡概况

麻池村 1 号滑坡位于堵河左岸,滑体空间形态总体呈波浪状,以中后部滑体厚度较大,前缘略薄为特点,前缘剪出口均位于最高水位以上。滑体斜长约 650 m,宽约 150 m,面积约 $9.75 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均厚约 11 m,体积约 $1.07 \times 10^4 \text{ m}^3$,属中层大型土质滑坡(图 2、图 3)。

滑坡滑体物质主要是由含碎石粉质黏土和碎块石组成,可塑-硬塑状,块石岩性主要为强-中风化绢云母石英片岩,土石比 8:2~6:4,碎块石土主要分布于 1 号滑坡后缘。滑坡体整体蠕滑变形现象明显,滑带已基



图 2 麻池村 1 号滑坡全貌图(镜向 235°)
Fig. 2 Full view of landslide No.1 in Machi Village (lens direction at 235°)

本形成,厚度一般在 30~70 cm。滑床基岩为元古界武当群姚坪组(Pt₂y)中厚-薄层状绢云石英片岩,片理产状 300°~75°∠2°~45°,局部裂隙较发育(图 4)。

目前,滑坡主要由基准点、G4、G5 和 G6 三个监测点组成以实现实时自动化监测网络,于 2019 年 6 月 1 日开始监测。监测数据表明:滑坡一直处于间歇性蠕变状态,位移曲线有两个明显的阶跃变形区段,整个变形曲线呈现出与每年汛期降雨相对应的周期性阶梯状演化特征。且每年“阶跃期”和集中降雨期存在滞后效应,即滑坡位移的变化不仅受到当期降雨作用的影响,还受到了前期降雨作用的影响。因此,麻池村 1 号滑坡

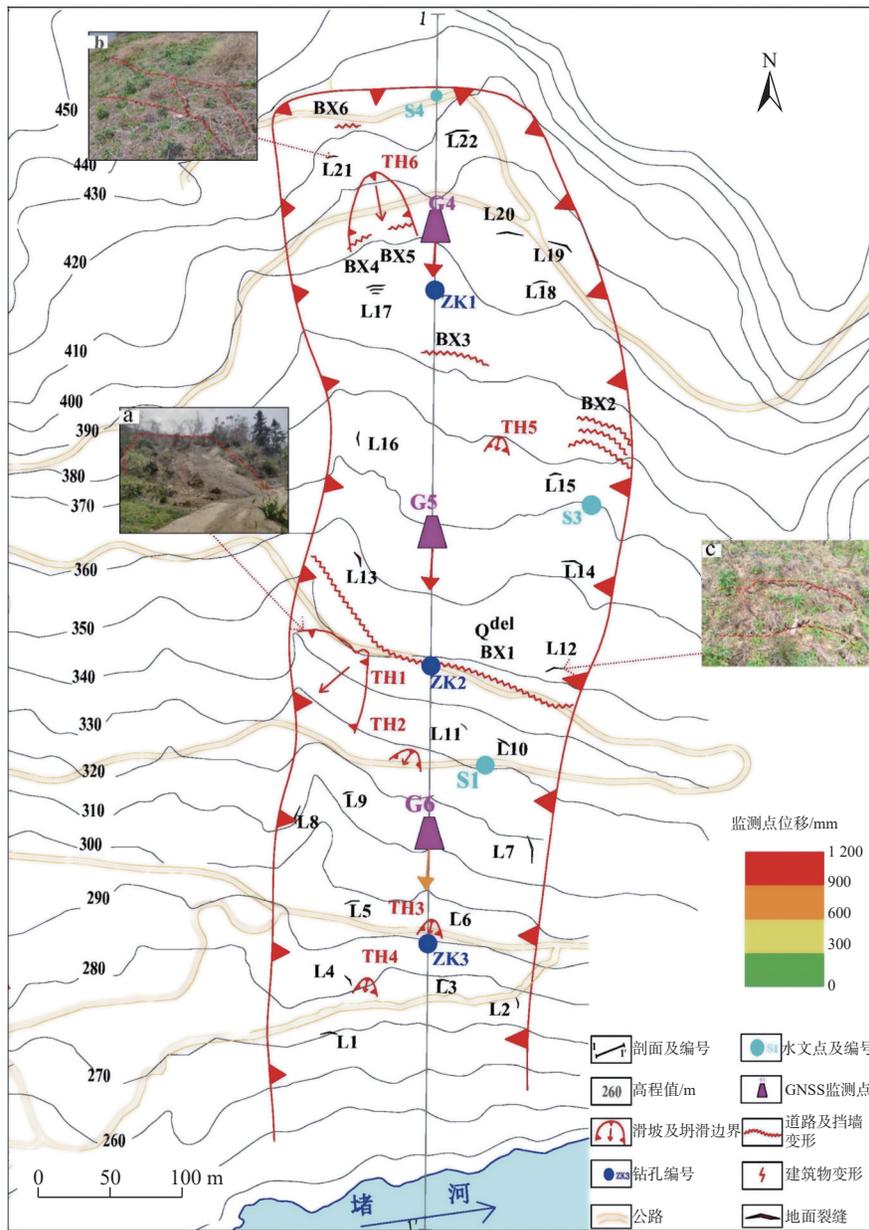


图 3 麻池村 1 号滑坡工程地质平面图
Fig. 3 Geological plan of the landslide project No.1 in Machi Village

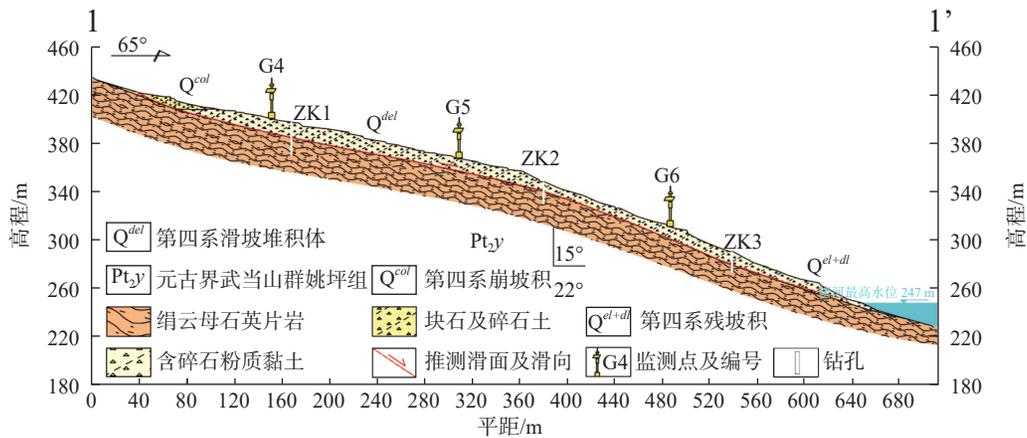


图 4 麻池村 1 号滑坡 1-1'剖面布置图

Fig. 4 Landslide section layout profile 1-1' of landslide No.1 in Machi Village

属于典型的降雨型滑坡。滑坡变形位移表现为：前缘 >中部>后缘，坡体横向裂缝密集，正向着两侧不断延伸，运移形式为牵引式(图 5)。

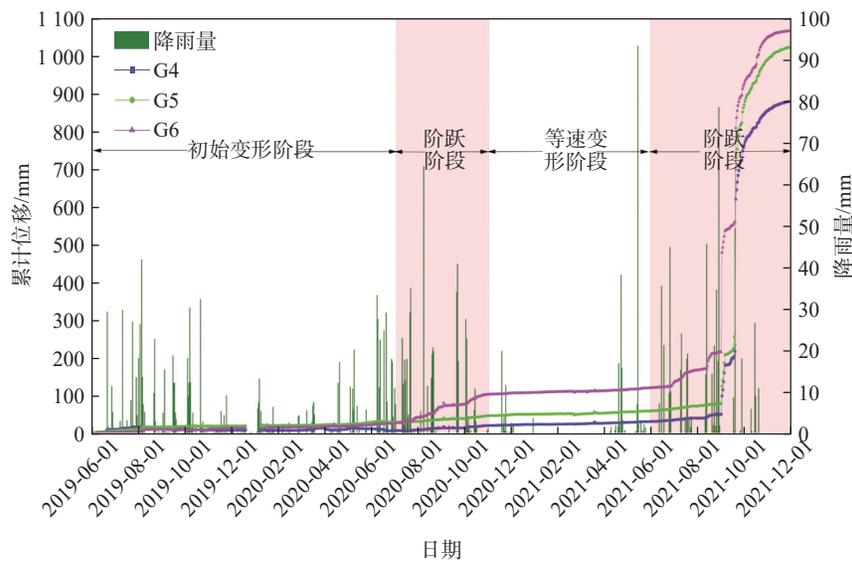


图 5 麻池村 1 号滑坡累计位移-降雨量-时间关系图

Fig. 5 Cumulative displacement-rainfall-time relationship of landslide No.1 in Machi Village

3 多指标预警判据阈值

3.1 滑坡变形区间选取

通过斜率单变点方法，在两个大阶跃变形区间内，可确定 7 个累计位移突变明显的区段(图 6)，以此为基础，即可求取相关预警阈值。由前文分析可知，G6 监测点变形最为典型，故以此测点为分析研究对象，确定“破坏拐点”和“稳定拐点”时间，详见表 1。

3.2 阈值分析

3.2.1 有效降雨量阈值

麻池村 1 号滑坡变形发展中，存在多次的降雨过

程，由多次降雨组成的前期降雨是诱发滑坡变形的主要因素。如何确定前期降雨与当期降雨之间的时间间隔 T ，是建立合理有效降雨量阈值的关键。

本文基于监测数据，探索一次独立降雨停止后，滑坡位移速率回落到后等速阶段的时间，此过程的持续时间即可定义为前期降雨与当期降雨的时间间隔阈值 T ，详见表 2。

表 2 显示，由一次独立降雨诱发滑坡位移速率跳跃而又回落的时间有一定的差异性，最长的回落时间为 11 d，最短的回落时间为 9 d。因此，为了减小一次独立

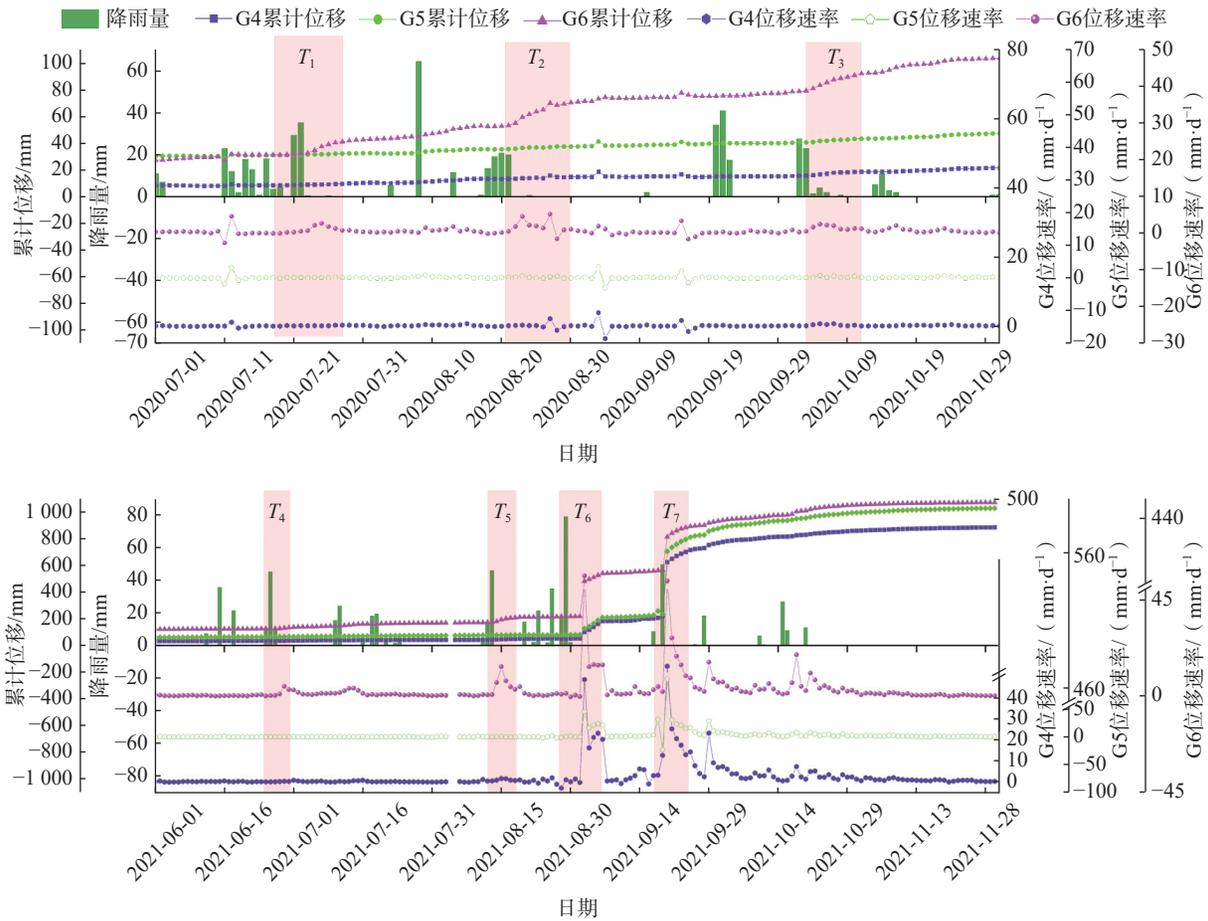


图 6 麻池村 1 号滑坡 7 次阶跃变形区间图

Fig. 6 Interval graph of 7-step deformation of landslide No. 1 in Machi Village

表 1 G6 监测点破坏拐点与稳定拐点详细信息表

Table 1 Detailed information table on the damage inflection point and stable inflection point of monitoring point G6

变形区间	破坏拐点	稳定拐点	变形期次	区间天数/d	起始位移/mm	结束位移/mm	位移增量/mm	位移速率/(mm·d ⁻¹)
T ₁	2020-07-20	2020-07-30	[416,426]	11	31.28	42.26	10.98	1.00
T ₂	2020-08-21	2020-08-30	[448,456]	10	53.11	70.30	17.19	1.72
T ₃	2020-10-03	2020-10-11	[490,498]	9	79.20	92.55	13.36	1.48
T ₄	2021-06-25	2021-06-30	[756,761]	6	124.59	133.23	8.64	1.44
T ₅	2021-08-13	2021-08-20	[805,812]	8	172.65	211.82	39.17	4.90
T ₆	2021-08-26	2021-09-06	[818,829]	12	213.47	538.06	324.59	27.05
T ₇	2021-09-19	2021-09-25	[842,848]	7	561.99	889.01	327.02	46.72

表 2 一次独立降雨位移回落时间

Table 2 Summary for single independent rainfall-induced displacement pullback time

降雨日期	降雨量/mm	回落时间/d
2021-08-13	45.8	9
2021-09-28	18.1	10
2021-10-15	26.7	11

降雨过程位移回落时间的误差,取三个位移回落时间的平均值,以此作为前期降雨对当期降雨的有效降雨天数阈值,即 $T=10$ d。

在确定有效降雨天数的基础上,进一步分析 7 个累计位移突变区段的降雨信息。根据前文阐述的式 (5)(6) 计算求取前期有效降雨量,详见表 3。

由表 1 和表 3 显示,滑坡变形明显受“前期降雨+当期降雨”模式影响。因此,采用数学统计方法对数据算术平均,前期有效降雨阈值为 23.50 mm,取整值为 24 mm;当期降雨阈值为 31.72 mm,取整值为 32 mm,即当有效降雨量超过 56 mm 时,滑坡则会发生阶跃变形。

表 3 G6 监测点“前期降雨+当期降雨”模式详细信息表

Table 3 Detailed information table on the “pre-rainfall + current rainfall” pattern details table for monitoring point G6

变形期次	降雨日期	当期降雨/mm	前期降雨/mm
$T_1=[416,426]$	2020-07-21	29.2	23.41
	2020-07-22	35.1	41.44
$T_2=[448,456]$	2020-08-21	19.8	37.42
$T_3=[490,498]$	2020-10-03	22.9	21.92
	2021-06-25	9.8	7.80
$T_4=[756,761]$	2021-06-26	45.0	11.15
	2021-06-27	10.1	44.59
$T_5=[805,812]$	2021-08-13	45.8	13.50
	2021-08-20	14.4	11.82
	2021-08-26	34.7	16.46
$T_6=[818,829]$	2021-08-28	17.4	32.67
	2021-08-29	78.7	37.55
$T_7=[842,848]$	2021-09-19	49.5	5.82

3.2.2 位移速率阈值

由表 1 可知,以 G6 测点等速变形阶段内每次阶跃区间为依据,按上述式(9)通过算术平均求取各阶跃区间的位移速率平均值,分析可得,等速变形阶段位移速率为 11.29 mm/d,这表明当位移曲线出现“阶梯状”台阶时,其时段内位移速率保持在 11.29 mm/d 之上。因此,取整值,位移速率阈值为 12.00 mm/d。

3.2.3 改进切线角阈值

根据改进切线角定义,将滑坡变形划分为三阶段,以 $\alpha \approx 45^\circ$ 时为等速变形阶段,则 $\alpha < 45^\circ$ 为初始变形阶段,

$\alpha > 45^\circ$ 为加速变形阶段,加速变形阶段又可继续细化为三个阶段:初加速阶段、中加速阶段和加加速阶段。运用上述求取的变形速率阈值 v ,结合前文阐述的式(7)–(11),计算出各变形阶段的位移速率阈值。以此可将滑坡变形划分为 4 级预警级别,具体划分如表 4 所示。

表 4 改进切线角—变形速率(G6)阈值及变形过程综合预警判据统计表

Table 4 Statistical table of the threshold for improved tangent angle-deformation rate (G6) and comprehensive early warning criteria for deformation process

变形阶段	改进切线角阈值/ $^\circ$	位移速率/(mm·d ⁻¹)	预警级别	
初始变形阶段	$\alpha < 45$	$v < 12$		
等速变形阶段	$\alpha \approx 45$	$v \approx 12$	注意级别(I)	
加速变形阶段	初加速阶段	$45 < \alpha < 80$	$12 < v < 68.06$	警示级别(II)
	中加速阶段	$80 \leq \alpha < 85$	$68.06 \leq v < 137.16$	警戒级别(III)
	加加速阶段(临滑)	$85 \leq \alpha \leq 90$	$v \geq 137.16$	警报级别(IV)

3.3 综合判据验证分析

现将各预警判据算法运用于整个监测周期,对滑坡预警工作做出整体性评价(图 7)。由降雨判据分析可知,将诱发滑坡变形破坏的降雨分为“前期降雨+当期降雨”模式,并做阈值分界线“24 mm+32 mm”和 56 mm,在阈值线以上则会诱发滑坡变形;同理,做“改进切线

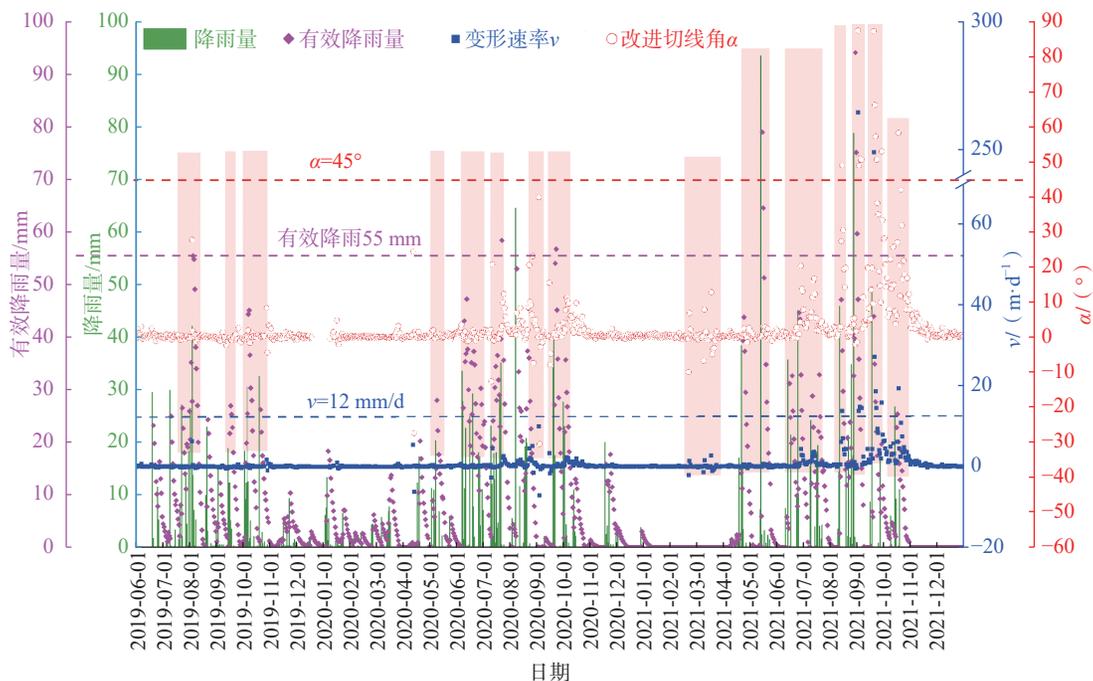


图 7 有效降雨—改进切线角—位移速率判据曲线变化特征图

Fig. 7 Characteristics variation of the criterion curve for effective rainfall-improved tangent angle-displacement rate

角-位移速率”阈值分界线, 即“ $\alpha=45^\circ-v=12 \text{ mm/d}$ ”, 发现两者曲线变形均较为平缓, 仅在阶跃时发生突变, 表明滑坡目前处于等速变形阶段。

通过对比分析三种判据在图中所给出的预警区间可知, 2021 年 8 月与 9 月三种判据都达到临界预警阈值, 即该阶段滑坡临滑失稳破坏风险较大, 为重点预警阶段。而其他时刻只有单一判据或双判据达到临界预警阈值, 代表滑坡短期内稳定性降低, 在外界不利因素减弱、消退后, 将转向稳定状态。因此, 仅依靠单一的预警判据, 难以准确反映滑坡的演化过程, 只有将多指标判据用于滑坡预警工作, 更具临灾预警意义。

4 综合判据分级预警模型

时间上, 斜坡变形一般要经历初始变形、等速变形、加速变形 3 个阶段, 加速变形阶段又可细分为 3 个亚阶段, 正确判断斜坡的变形演化阶段是滑坡准确预警的基础; 空间上, 滑坡的地表裂缝会随着变形的不断增加逐渐形成完整配套的裂缝体系。将时间-空间演化规律有机结合、综合分析, 是进行滑坡准确预警预报的重要保证^[12]。因此, 将上述多判据指标和麻池村 1 号滑坡各变形阶段的宏观变形特征, 结合滑坡灾害预警 4 级递进式机制, 建立合理的综合分级预警模型, 是处理阶跃型滑坡的重要手段(图 8)。

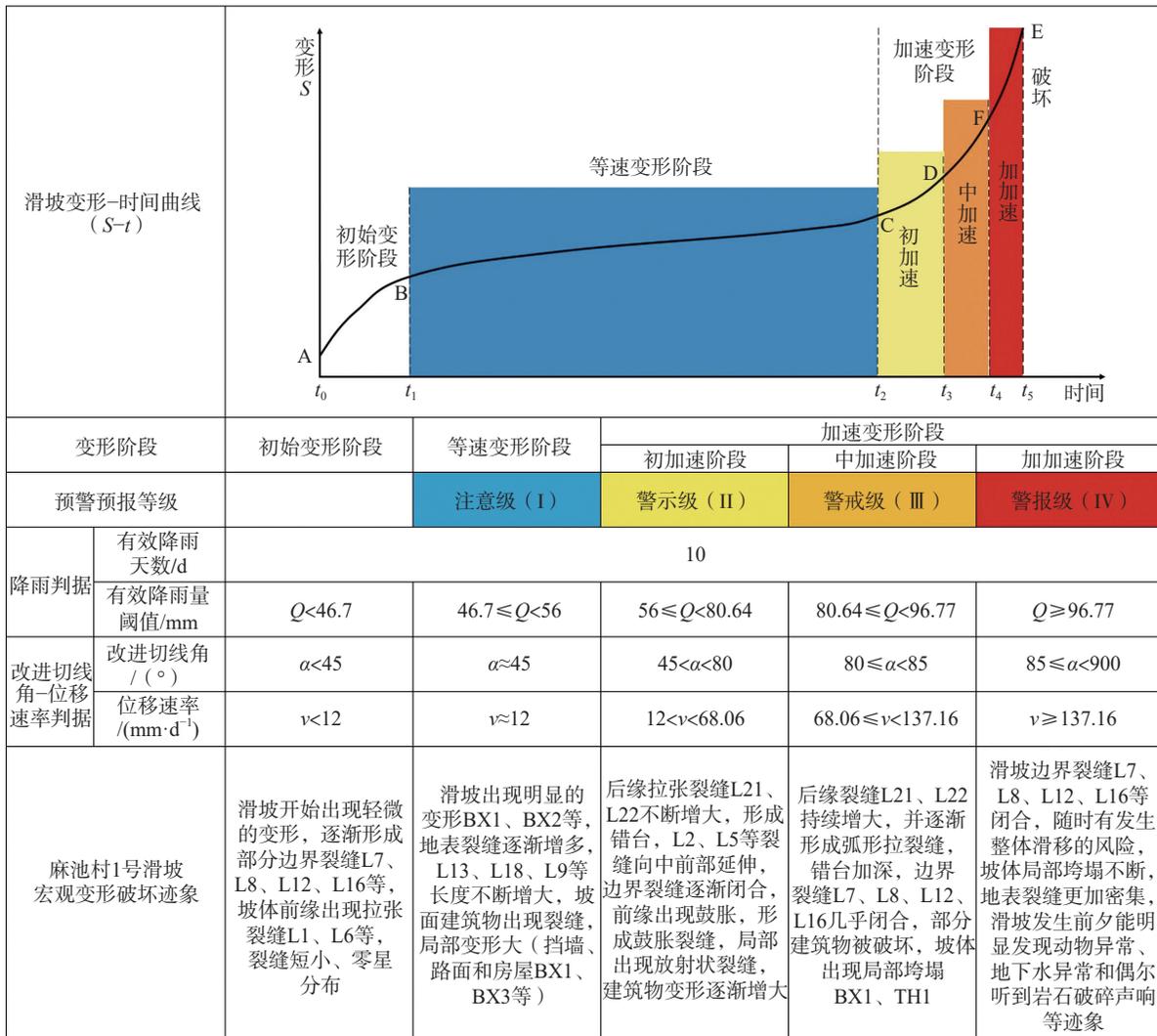


图 8 滑坡综合预警判据分级模型

Fig. 8 Landslide integrated early warning criteria grading model

5 结论

本文以麻池村 1 号滑坡为例, 基于降雨诱发滑坡

“阶跃”变形的监测数据精细分析, 建立定量分析与定性判断有机结合的多指标综合预警判据分级预警模型, 主要取得了以下结论:

(1)麻池村 1 号滑坡的力学机制为典型的牵引式, 累计位移曲线“阶跃”现象发生在每年降雨集中时期, 滑坡变形受前期降雨的影响, 由前期降雨与当期降雨组成的一个完整降雨过程的时间间隔为 10 d。

(2)运用斜率单变点法, 确定麻池村 1 号滑坡累计位移曲线“阶跃”变形加速区间的“破坏拐点”和“稳定拐点”信息。以此求取的“前期+当期降雨”模式下的滑坡降雨阈值分别为 24 mm、32 mm。通过改进切线角方法获取的位移速率阈值为 12 mm/d。

(3)基于麻池村 1 号滑坡监测数据的定量分析, 以有效降雨量—改进切线角—位移速率综合预警判据和滑坡各演化阶段的宏观变形迹象, 建立 4 级递进式综合判据分级预警模型。此模型突显了相应判据达到不同阈值时滑坡失稳破坏的危险性, 使得预警更具有针对性, 从而提高了滑坡监测预警的准确性和精度。

参考文献(References):

- [1] 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等. 三峡库区巫山县塔坪 H1 滑坡变形机制 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 73–81. [WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 73–81. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 胡爱国, 周伟. 地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 27–34. [HU Aiguo, ZHOU Wei. Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluvium landslide under earthquake and heavy rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 27–34. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 黄晓虎, 雷德鑫, 夏俊宝, 等. 降雨诱发滑坡阶跃型变形的预测分析及应用 [J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3585–3592. [HUANG Xiaohu, LEI Dexin, XIA Junbao, et al. Forecast analysis and application of stepwise deformation of landslide induced by rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3585–3592. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈春利, 方志伟. 福建省地质灾害气象预警有效降雨模型研究 [J]. 地质力学学报, 2023, 29(1): 99–110. [CHEN Chunli, FANG Zhiwei. Research on an effective rainfall model for geological disaster early warning in Fujian Province, China [J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(1): 99–110. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 胡华, 吴轩, 张越. 基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 92–97. [HU Hua, WU Xuan, ZHANG Yue. Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 92–97. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 邓夕胜, 张元, 唐煜. 基于失效概率的边坡降雨阈值曲面探讨 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 70–75. [DENG Xisheng, ZHANG Yuan, TANG Yu. Investigation on slope rainfall threshold surface based on failure probability [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 70–75. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 方然可, 刘艳辉, 苏永超, 等. 基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 181–187. [FANG Ranke, LIU Yanhui, SU Yongchao, et al. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 181–187. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李秀珍, 许强, 黄润秋, 等. 滑坡预报判据研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 5–11. [LI Xiuzhen, XU Qiang, HUANG Runqiu, et al. Research on prediction criterion for temporary prediction of landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(4): 5–11. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈志强, 王亮清, 刘顺昌. 基于斜率阈值法的滑坡预报分析 [J]. 人民长江, 2010, 41(10): 38–41. [CHEN Zhiqiang, WANG Liangqing, LI Shunchang. Research on landslide prediction based on slope threshold of rainfall [J]. Yangtze River, 2010, 41(10): 38–41. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王涛, 刘甲美, 栗泽桐, 等. 中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究 [J]. 中国地质, 2021, 48(1): 21–39. [WANG Tao, LIU Jiamei, LI Zetong, et al. Seismic landslide hazard assessment of China and its impact on national territory spatial planning [J]. Geology in China, 2021, 48(1): 21–39. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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 an improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(4): 501–505. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104–1112. [XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1104–1112. (in Chinese with English abstract)]