

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.03.008

基于有效降雨量的“阶跃型”滑坡递进式预警模型研究

贲琰棋^{1,2}, 易武^{1,2*}, 黄晓虎^{1,2}, 魏兆亨^{1,2}, 肖宇煌³, 邓欣雨⁴

BEN Yan-Qi^{1,2}, YI Wu^{1,2*}, HUANG Xiao-Hu^{1,2}, WEI Zhao-Heng^{1,2}, XIAO Yu-Huang³, DENG Xin-Yu⁴

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. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430034; 4. 三峡大学科技学院, 湖北 宜昌 442002

1. National Field Observation and Research Station of Landslide in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Three Gorges University School of Civil Engineering and Architecture, Yichang 443002, Hubei, China;
3. Hubei Provincial Geological Environment Station, Wuhan 430034, Hubei, China; 4. College of Science and Technology of China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China

摘要:湖北省郧西县枣树洼滑坡是一处典型的降雨诱发型堆积层滑坡,在降雨作用下位移变形呈现出“阶跃型”的动态演化特征,其变形破坏严重影响着当地交通和居民的生命财产安全。本文初步探讨了“降雨阶跃型”滑坡的变形曲线特征,选取有效降雨量判据建立滑坡临灾预警线,进而探讨滑坡递进式预警原理,以期实现早期预警。通过分析滑坡活动对降雨的响应关系,并结合滑坡变形发展的规律,建立了滑坡的递进式综合预警模型。结果表明:①枣树洼滑坡变形与季节性降雨具较好的一致性,目前处于间歇性蠕变状态,整体呈现台阶状变形特征;②滑坡的前期有效降雨期为8 d,前期有效降雨量和当期降雨量分别为38 mm、29 mm;③基于前期有效降雨量和当期降雨量达到阈值时为Ⅲ级黄色预警中心线,将有效降雨量阈值和过程预警判据有机结合,即可构建枣树洼滑坡的分级递进式综合预警模型。

关键词:降雨型滑坡;有效降雨量;阈值;预警模型;监测预警

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2023)03-0492-10

Ben Y Q, Yi W, Huang X H, Wei Z H, Xiao Y H and Deng X Y. 2023. Progressive Warning Model for "Step-like" Landslides Based on Effective Rainfall. *South China Geology*, 39(3): 492–501.

Abstract: The Zaoshuwa landslide in Yunxi County, Hubei Province is a typical rainfall-induced accumulation landslide, which exhibits a "step-like" dynamic evolution of displacement and deformation under the action of rainfall, and its deformation damage seriously affects the local traffic and safety of residents' lives and properties. To achieve early warning of landslides, this paper initially discusses the deformation curve characteristics of "rainfall step-like" landslides, selects the effective rainfall criterion to establish the early warning line of landslides, and then explores the principle of progressive landslide warning. By analysing the response of landslide activity to rainfall and combining the law of landslide deformation development, a comprehensive progressive warning model for landslides has been established. The results show that: ① the deformation of the Zaoshuwa landslide has good consistency with the seasonal rainfall, and is currently in the state of in-

收稿日期:2023-4-30;修回日期:2023-5-22

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(42007237);十堰市自然资源和规划局项目(HBDX21-008)

第一作者:贲琰棋(1998—),男,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,博士,教授,主要从事边坡稳定性及其预测预报方面研究,E-mail:397745802@qq.com

termittent creep, with the overall step-like deformation characteristics; ② the early stage rainfall period of the landslide is 8 d, and the thresholds of the effective rainfall in the early stage and current stage are 38 mm and 29 mm respectively; ③ Setting the III yellow warning centerline at when effective rainfall in the early stage and current stage reaches the threshold, combined with the effective rainfall threshold and the process of early warning criteria, a hierarchical progressive integrated early warning model of the Zaoshuwa landslide could be constructed.

Key words: rainfall landslide; effective rainfall; threshold; Early Warning Model; monitoring and early warning

滑坡是指斜坡上的土体或者岩体,受地下水活动、雨水浸泡及人工切坡等因素影响,在重力作用下,沿着一定的软弱面或者软弱带,整体地或者分散地顺坡向下滑动的自然现象。从细观力学机制分析,岩土体细观尺度下颗粒“流动”与“微破裂”现象是斜坡出现宏观变形破坏特征的内在原因(许强, 2012; 闫国强等, 2019)。根据中国地质环境信息网2016~2020年的全国地质灾害通报进行统计分析,这5年共发生34218起地质灾害,其中滑坡23589起,占比最大,为68.94%,直接经济损失达160.2亿元。我国滑坡发生与降雨因素密切相关,几乎所有的滑坡在发展演变过程中都受水文条件控制,二者在时间上具有很好的一致性或滞后性(张友谊等, 2007; 尚敏等, 2022)。针对降雨诱发型滑坡,如何为滑坡区域的危害对象提供早期的优质预警服务,对于减小滑坡灾害造成的损失和人员伤亡具有重要意义。

降雨作为滑坡的主要触发因素,是滑坡预警的关键指标(陈洪凯等, 2012)。国际上对于降雨型滑坡最常用的方法为阈值预警法(许强, 2020),其研究方法主要包括两种(Lee D H et al., 2013; Ma T H et al., 2015; 郜泽郑, 2019):(1)基于滑坡过程机理和物理数学模型着手数学公式推导的物理性降雨阈值;(2)基于宏观滑坡降雨数据和统计学分析的经验性降雨阈值。Borga et al. (2002)选择浅层滑坡为研究对象,基于水文条件、地形条件、地层岩性及地质环境等要素,进行浅层滑坡的稳定性评议,确定意大利阿尔卑斯山区域滑坡失稳时的临界降雨阈值。Casadei et al. (2003)通过分析地质和降雨资料,基于地下径流与无限边坡模型,构建浅层滑坡临界降雨量模型,并利用此模型对过去45年间暴雨型滑坡进行反演验证。向小龙等(2020)总结分析

了前人降雨阈值模型成果,引用气象预警中降雨概率分布理论,建立并计算出盐津县降雨诱发型滑坡失效概率模型和不同降雨强度下滑坡的失稳概率。物理性降雨阈值的研究受限于物质条件和研究水准的影响,研究结果与实际情况可能会有较大差异。相比之下,经验性降雨阈值数据易获取,数学推演方式简便,成为目前广泛应用的研究手段。Chen C Y et al. (2005)通过综合考虑降雨持时、前期降雨累积降雨量、降雨强度等不同降雨指标,建立了降雨诱发台湾地区滑坡和泥石流下限的I-D降雨阈值曲线。Guidicini and Iwasa (1977)统计分析巴西多个区域的宏观滑坡事件和降雨数据之间的关系,建立了这些研究区的单次降雨量阈值统计模型。雷德鑫和易武(2018)以三峡库区王家坡滑坡为研究对象,获取滑坡位移曲线类突变拐点不同时段下前期累积降雨量斜率值K。黄晓虎等(2019a)从滑坡变形曲线特征出发,建立了王家坡滑坡的临灾预警系统。贺小黑(2018)基于误差最小原则,将非线性拟合的方法应用到Verhulst反函数模型的参数求取中,且预报的时间多稍早于滑坡实际发生时间。

降雨诱发滑坡的机制十分复杂,孔隙水压力则被认为是最主要控制因素,降雨导致斜坡岩土体内孔隙水压力的增加促使潜在滑移面剪应力增大,有效应力和抗剪强度降低,从而诱发滑坡整体失稳变形(Yin Y P et al., 2011; Xu Q et al., 2016)。林鸿州等(2009)、李秀珍等(2015)、蔡国庆等(2018)、邵龙潭等(2019)和饶鸿等(2021)尝试从降雨入渗机制出发,构建滑坡稳定性状态对地下水的响应方程。通过国内外学者对降雨入渗理论的分析研究,为解决降雨入渗问题提供了夯实的理论基础。虽然各种研究方法得到的结果有所差异,但总体规律却相差无几,在各种研究方法的前提假设条件下,降雨入

渗理论更接近实际,并逐步形成了一些经验公式和简化的数学模型,如Green-Ampt入渗模型、Richard入渗模型与无限边坡稳定性耦合模型等。这些模型更好地揭示了滑坡变形破坏的内在机理,不断推动降雨入渗理论的发展进步,对灾害预警具有一定的参考价值。

近年来,相关部门每年投资上百亿元,不断推进各省份综防体系的快速建设,实施地质灾害专业监测预警工程。从工程实用、早期预警的意义上考虑,滑坡的预警应注重对各种监测数据的整理分析,研究和建立地质灾害预警判据和模型(黄晓虎等,2019b;许强等,2019,2020)。鉴于此,本文以枣树洼滑坡为例,利用滑坡监测系统采集的实时监测数据,开展累积位移-时间-降雨关系曲线的分析,初步揭示降雨作用下滑坡变形响应规律,并结合滑坡的地质结构及宏观变形特征,选取有效降雨量为主要指标,建立滑坡的分级预警模型,可为区域同类型滑坡的监测预警提供技术理论支撑和模型示范。

1 “降雨阶跃型”滑坡变形曲线特征

降雨型滑坡在变形演化过程中,无可避免地会受到外界降雨因素的持续干扰,导致位移变形-时间曲线在微观和局部表现为“阶跃”特征(谭淋耘等,2020;刘传正,2021)。“降雨阶跃型”滑坡活动发展的结果有两种:一种是在降雨因素退化作用下,滑坡变形曲线平缓段或减速阶段明显变长,滑坡由演进上升趋势转化为缓变趋势;另一种是周期性的变形对岩土体造成持续性损伤,导致后面的阶跃幅度越来越高,平缓段越来越短,最终进入加速变形阶段而发生失稳破坏,或某一时段降雨因素骤增而使变形急速演进导致滑坡失稳破坏,即阶跃型转化为失稳(突发型),而突发型滑坡具有破坏性强和不可逆转的特性,人工提前干预的难度较大、成本高昂。因此,确定诱发滑坡阶跃变形的降雨阈值,建立一套提供预警等级的模型,是阻止滑坡从趋稳型向阶跃型甚至突发型转变,服务滑坡灾害监测预警的关键。

降雨阶跃型滑坡在降雨因素持续激发下,滑坡变形曲线会出现多级高度不一的阶梯状台阶,而每

一个不规则的台阶,又可进一步分为“前等速阶段、加速阶段和后等速阶段”(图1)。

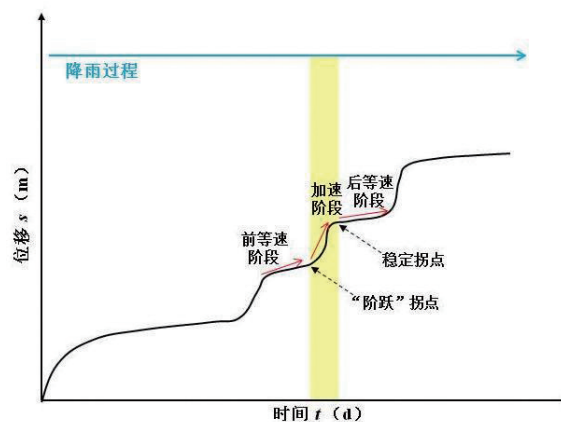


图1 “降雨阶跃型”滑坡变形曲线划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the deformation curve of a "rainfall step-like" landslide

为了提取阶跃区间信息,沿着监测序列,第*i*天提取的累积位移坐标(t_i, s_i),得出第*i*天对应的斜率 k_i :

$$k_i = \frac{s_i - s_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (1)$$

显然, $t_i - t_{i-1} = 1$,可得:

$$k_i = s_i - s_{i-1} \quad (2)$$

由此可获取切线角 α 表达式:

$$\alpha_i = \arctan(s_i - s_{i-1}) \quad (3)$$

依据切线角(许强等,2009)或位移加速度(许强和曾裕平,2009)各变形演化阶段的判据阈值,即可获取滑坡阶跃区间加速阶段的起止地质拐点。

2 “降雨阶跃型”滑坡预警原理

2.1 位移速率比判据

正确判定斜坡的变形阶段是滑坡准确预警的前提。位移速率比在一定程度上可以表征滑坡各个区域的变形状态,表达式如下:

$$\varepsilon_t = \frac{V_t}{\bar{V}} \quad (4)$$

式中: ε_t 为位移速率比, V_t 为位移速率, $\bar{V}$ 为等速变形阶段的速率。 V_t 与滑坡体上各监测点任一时刻位移变化曲线的斜率成正比; $\bar{V}$ 与位移变形曲线等速变形阶段的似线性曲线的斜率成正比。

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 $\bar{v}$:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (5)$$

式中: v_i 为滑坡等速变形阶段不同阶跃变形区间的变形速率; n 为监测次数。

根据位移速率比判据定义,将其作为重要预警指标,对滑坡各监测点空间变形状态进行判定划分(王立伟等,2014),如表1所示:

表1 滑坡位移速率比变形状态判定标准表
Table 1 Landslide displacement rate over deformation state classification table

变形阶段		位移速率比
初始变形阶段		/
等速变形阶段		$0 \leq \varepsilon_i \leq 2$
加速变形阶段	初加速阶段	$2 < \varepsilon_i \leq 6$
	中加速阶段	$6 < \varepsilon_i \leq 8$
	加加速阶段(临滑)	$\varepsilon_i > 8$

2.2 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(1986)提出,其将降雨过程划分为“前期降雨+当期降雨”模式,用于计算有效降雨量,其公式如下:

$$R_c = R_0 + \alpha R_1 + \alpha^2 R_2 + \alpha^3 R_3 + \cdots + \alpha^t R_t \quad (6)$$

式中: R_c 为有效降雨总量(mm); R_0 为当日降雨量(mm); R_t 为前 t 日有效降雨量(mm); α 为衰减系数,取0.8(殷坤龙,2004); t 为前期降雨有效天数(d)。

本文采用皮尔逊相关性分析法对滑坡典型监测点的日降雨量与日位移之间的相关性进行定量分析,确定滑坡前期降雨的有效天数。

皮尔逊相关性分析是一种度量两个变量(x 和 y)之间的线性相关性水平,相关系数定义为两个变量之间的协方差除以各自标准差的乘积,可表示为:

$$r = \frac{\delta_{xy}}{\delta_x \delta_y} = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: r 为相关系数; δ_{xy} 为两个变量 x 、 y 之间的协方差; δ_x 为变量 x 的标准差; δ_y 为变量 y 的标准差。

利用两变量 x 、 y 的皮尔逊相关系数 r 的绝对值,对照表2,可判定两者之间的相关程度。此处以每日为时间单位前移整个日降雨量时间序列,计算 $t = (0, 1, \cdots, n)$ 天后的日降雨量时间序列和日位移时间序列之间的相关性系数。当 $|r| < 0.2$ 时,说明两个变量之间的相关性极弱,基本不相关(陈述云,1994),降雨有效天数记为0; $|r| > 0.2$ 出现的次数则代表前期降雨的有效天数。

表2 皮尔逊相关系数及相关程度参照表
Table 2 Pearson's correlation coefficient and degree of correlation reference table

相关系数值($ r $)	相关程度
(0.8, 1]	极强相关
(0.6~0.8]	强相关
(0.4~0.6]	中度相关
[0.2, 0.4]	弱相关
(0.0, 0.2)	极弱相关甚至不相关

2.3 递进式分级预警模型

根据实时监测数据分析和上述判据算法,在确定滑坡当期降雨、前期有效降雨量的基础上,设定滑坡灾害发生的临界预警中心线。

假设某一监测预警时刻,监测获取的某一次当期降雨和前期有效降雨量为 (x_a, y_a) ,则 (x_a, y_a) 与坐标原点构成的方程为:

$$y = \frac{y_a}{x_a} x \quad (8)$$

选取当期降雨量阈值为横坐标,设为 $(x_b, 0)$,选取前期有效降雨量阈值为纵坐标,设为 $(0, y_c)$,建立滑坡灾害发生的Ⅲ级黄色预警中心线,则其方程为:

$$y = y_c - \frac{y_c}{x_b} x \quad (9)$$

其中,方程(8)与(9)的交点坐标设定为 (x_d, y_d) ,同时联立两方程,即可得交点表达式:

$$x_d = \frac{y_c x_a x_b}{y_a x_b + y_c x_a}, y_d = \frac{y_c y_a x_b}{y_a x_b + y_c x_a} \quad (10)$$

根据坐标系内两点间的距离公式,可得到监测点 (x_a, y_a) 到坐标原点的距离 l_a 为:

$$l_a = \sqrt{x_a^2 + y_a^2} \quad (11)$$

同理,交点 (x_d,y_d) 到坐标原点的距离 l_c 为:

$$l_c=\sqrt{x_c^2+y_c^2}$$

(12)

联立方程(11)与(12),即可得到两者的比例 β ,表达为:

$$\beta=\frac{l_a}{l_d}$$

(13)

根据 β 系数,即可快速判断滑坡发生的预警等级。

3 枣树洼滑坡概况及监测信息

3.1 滑坡概况

枣树洼滑坡位于湖北省郧西县涧池乡瓦屋场村四组东坪,距涧池乡直线距离约 5.4 km,滑坡中心坐标: 32°50′45″ N, 110°17′4.5″E。研究区水系分布及滑坡地理位置如图 2 所示。

枣树洼滑坡发育于两条山脊间的冲沟内,平面形态呈长舌形,中部宽,前后缘窄,地势北高南低,后缘高程约 707 m,前缘高程约 576 m,相对高差 131 m,总体坡度约 21°,剖面形态呈迭坎折线形。滑坡主滑方向 207°,纵长 340 m,宽 45 ~ 81 m,滑坡体平均厚度约 12 m,面积约 $2.26\times 10^4\text{ m}^2$,体积约

$20.34\times 10^4\text{ m}^3$,属中型滑坡。

根据地面测绘及钻孔揭露(图 3),枣树洼滑坡为典型的堆积层滑坡。滑体物质来源于第四系堆积物,为碎块石土,滑带主要成分为碎石土,土的粘粒含量较高,呈软塑状,湿时滑腻感强,滑床为震旦系陡山沱组(Z₂d)绢云石英片岩,裂隙较发育。

3.2 滑坡监测系统布设

为系统掌握枣树洼滑坡的动态变形发展特征,沿主滑方向布置 1 条纵向监测剖面,沿滑坡中部公路以下布置 1 条横向监测剖面。纵剖面布设 4 个 GNSS 监测点,另一处 GNSS 监测点布设于滑坡后缘右侧临近公路的位置,配以滑坡外围的 GNSS 基准点与雨量站,形成自动化综合监测网络。于 2020 年 5 月 30 日开始采集数据。监测系统具体布设情况详见图 4,主剖线上各监测点的具体信息见表 3。

3.3 监测结果分析

根据枣树洼区域监测信息,获取各监测点累积位移-降雨量-时间关系曲线(图 5)。

由图 5 可知,枣树洼滑坡属于典型的降雨诱发堆积层滑坡,滑坡的发展演化过程与季节性降雨呈高度相关性,滑坡在强降雨的连续作用下,其累积

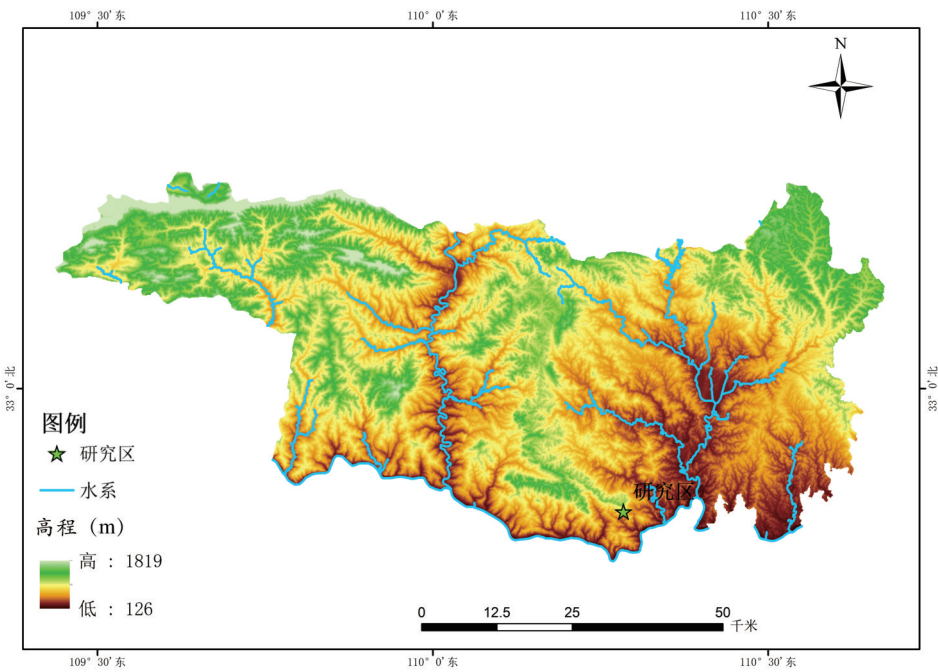


图2 郧西县水系分布及滑坡地理位置图

Fig. 2 Utopia County Water System Distribution and Landslide Location Map

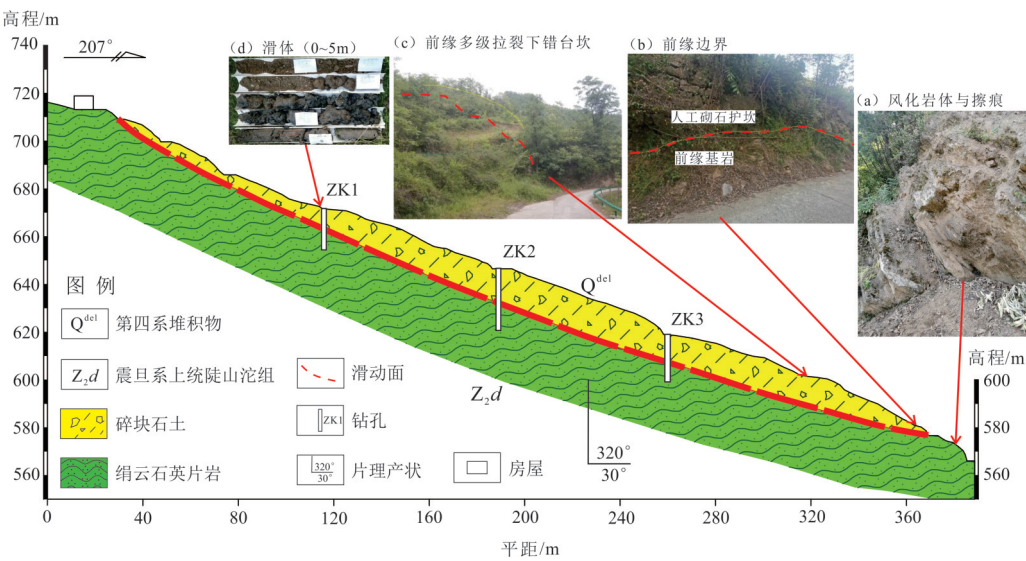


图3 枣树洼滑坡 I - I '地质剖面图

Fig. 3 Zaoshuwa landslide I - I 'geological profile

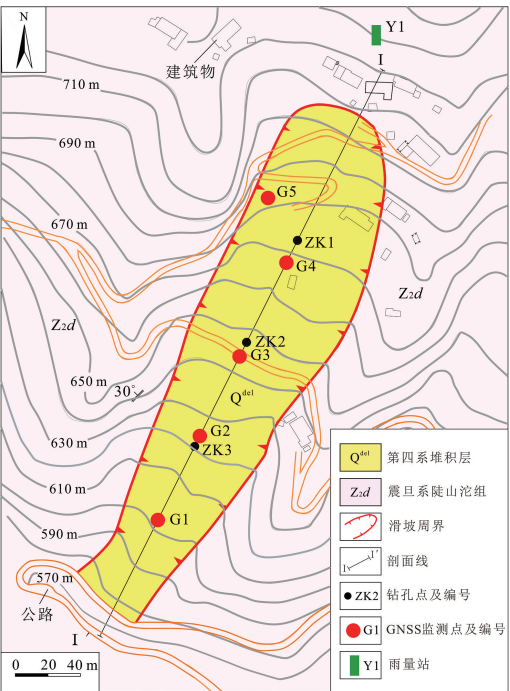


图4 枣树洼滑坡监测网点布设图

Fig. 4 Layout of the date palm pits landslide monitoring network

位移-时间曲线呈现阶跃型演化特征。同时,根据滑坡变形与降雨的响应规律,可将变形具体划分为4个阶段,即“汛期阶跃变形阶段→非汛期基本稳定阶段→汛期阶跃变形阶段→汛期后基本稳定阶段”。

以变形最强烈的G2监测点为例,通过前文阐述的公式(1)-(3),分析滑坡变形曲线的起止地质历

表3 枣树洼滑坡监测点信息表

Table 3 Date Pits Landslide Monitoring Site Information Sheet

编号	监测周期	累积水平位移 (mm)	日平均水平位移 速率(mm/d)
G1		297.49	0.34
G2	2020/5/30-	319.15	0.36
G3	2022/10/31	261.96	0.30
G4		151.99	0.17

点,可确定滑坡的6个阶跃区间,详细信息见表4。

4 递进式预警模型的建立

4.1 位移速率比阈值

由上可知,降雨作用下枣树洼滑坡的时间演化规律主要划分为4个阶段。对4个阶段的空间变形状态开展定量分析,即可整体上判断滑坡的变形状态。

结合表4和公式(5)计算可得,等速变形阶段的变形速率阈值为3.14 mm/d,并运用公式(4)分析获取滑坡整个监测序列的分阶段位移速率比阈值(图6)。

由图6可知,B、D两个阶段期间的位移速率比全部在0~2之间,即处在等速变形阶段,表明非汛

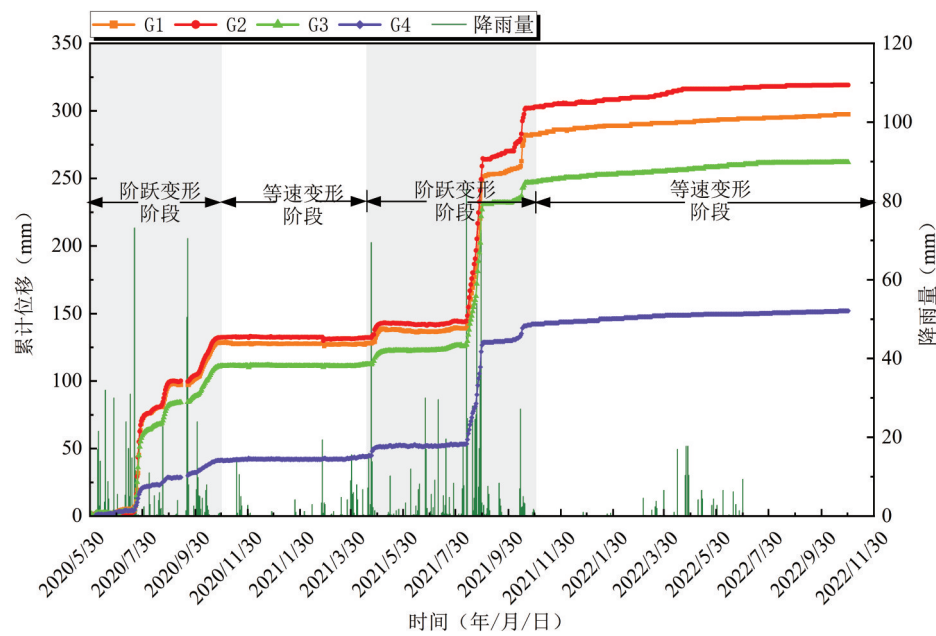


图5 滑坡累计位移-降雨量-时间关系曲线图

Fig. 5 Landslide cumulative displacement - rainfall - time relationship graph

表4 G2监测点不同阶跃区间信息表

Table 4 Table of information on the different step-like intervals at monitoring site G2

序号	起始时间(年/月/日)	结束时间(年/月/日)	水平位移增量(mm)	阶跃区间(d)	位移速率(mm/d)
①	2020/7/21	2020/7/31	68.62	(53,63)	6.24
②	2020/8/21	2020/8/29	17.05	(144,152)	1.89
③	2020/10/5	2020/10/19	20.41	(189,203)	1.36
④	2021/4/23	2021/4/29	8.23	(388,394)	1.18
⑤	2021/8/12	2021/8/31	120.20	(499,519)	6.01
⑥	2021/10/6	2021/10/20	31.94	(555,570)	2.13

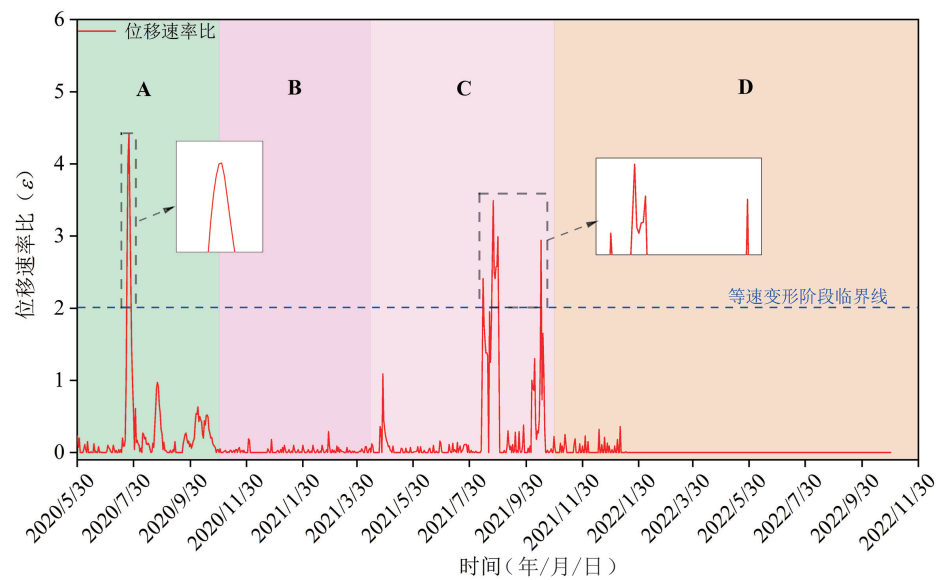


图6 滑坡G2监测点4阶段位移速率比-时间分布曲线

Fig. 6 4-stage displacement rate ratio - time distribution curve at landslide G2 monitoring site

期时段滑坡变形缓慢,中前部的滑动变形速率全部小于其等速变形速率 $\bar{v}$ 。A、C 两个阶段期间的位移速率比大部分区段仍处在 0~2 范围内,即长期处在等速变形阶段。当到达汛期雨季峰值期时,位移速率比短期急速加剧,出现了 3 个位移速率比高于 2 的突变时段,最高达到 4.41,理论上进入了位移速率比为 2~6 区域的初始加速变形阶段。但结合现场巡查时地表裂缝体系的分期配套变形特征来看,滑坡的裂缝体系还未完全出露,滑坡边界的裂缝体系也未有初步闭合的趋势,从空间演化的角度判断,滑坡并未真正的进入初加速阶段。整体而言,滑坡目前仍处于等速变形阶段。

4.2 有效降雨量阈值

4.2.1 前期降雨有效天数

利用公式(7),将 G2 监测点日降雨量和日位移量的相关性系数结果统计于表 5,表中 A=0 代表滑坡当天的位移与当天降雨量的相关系数;A=1 代表滑坡当天的位移与前第 1 d 的日降雨量的相关系数;A=2 代表滑坡当天的位移与前第 2 d 的日降雨量的相关系数,依次类推。

表 5 G2 监测点日降雨量与日位移的相关性系数表

Table 5 Table of correlation coefficients between daily rainfall and daily displacement at monitoring point G2

前移期数 A (d)	相关性系数 ($ r $)	前移期数 A (d)	相关性系数 ($ r $)
0	0.323	6	0.295
1	0.382	7	0.251
2	0.523	8	0.225
3	0.464	9	0.197
4	0.409	10	0.181
5	0.347		

分析表 5 可知,当 A=0~8 时,滑坡 G2 监测点的日位移量与降雨的相关系数具有一致的变化规律,即相关系数随着日降雨量时间序列的前推表现出先增大而后减小的趋势,总体呈现出中度一弱相关;当 A>8 d 时,相关系数均小于 0.2,呈现出弱相关甚至不相关,即滑坡的当日位移与前 8 d 的降雨量具有显著的相关性。因此,枣树洼滑坡前期降雨的有效期为 8 d。

4.2.2 降雨阈值

在确定滑坡变形阶跃区间后,分析计算变形阶跃区间内及其附近的降雨信息,结合表 4 和公式(6)确定枣树洼滑坡当期降雨之前的降雨量(表 6)。

分析表 4 和表 6 可知,处在变形阶跃区间内的阶跃变形明显受当期降雨和前期降雨的影响。因此,采用算术平均可确定前期有效降雨量为 37.6 mm,取整值为 38.0 mm;当期降雨量为 28.4 mm,取整值为 29.0 mm,则滑坡 9 d 内的有效降雨量为 67.0 mm。

表 6 枣树洼滑坡变形阶跃区间对应的降雨信息统计表

Table 6 Statistical table of rainfall information corresponding to the deformation step interval of Zaoshuwa landslide

阶跃区间 (d)	降雨时间	当期降雨量 (mm)	前期有效降雨量 (mm)
[53,62]	2020/7/21	75	23.5
	2020/7/22	29.5	78.6
	2020/7/23	7.5	84.2
[144,152]	2020/8/21	16	37.7
	2020/8/23	22.8	35.4
	2020/8/24	7	46.5
[189,203]	2020/10/5	5.5	25.1
	2020/10/6	4.5	24.5
	2020/10/14	9.0	12.3
[388,394]	2021/4/23	69.5	12.4
	2021/4/24	25	65.5
[499,519]	2021/8/12	83	33.4
	2021/8/13	43	93.1
	2021/8/16	13	68.7
	2021/8/20	15	36.1
	2021/8/23	40	26.0
	2021/8/26	18	31.5
	2021/8/29	81.8	25.5
	2021/10/6	14	10.8
	2021/10/7	13.5	16.64
[555,569]	2021/10/8	12.5	24.1
	2021/10/14	27.2	19.1
	2021/10/15	22	35.2

4.3 递进式分级预警模型

以当期降雨量 29.0 mm 和前期有效降雨量 38.0 mm,设置滑坡的Ⅲ级黄色预警中心线,再结合

公式(8)~(13),即可建立基于预警中心线之比值的定量评价有机结合,建立枣树洼滑坡的递进式分级预警模型(表7),并绘制枣树洼滑坡基于有效降雨量的分级预警示意图(图7)。

表7 基于有效降雨量阈值和变形过程的递进式预警模型					
Table 7 Progressive warning model based on effective rainfall thresholds and deformation processes					
变形阶段	预警级别	β	预警方程	位移速率比 ε_t	现场宏观变形迹象
初始变形阶段	注意级别(I)	(0~0.4)	原点 $\sim y = -1.31x + 15.2$	/	/
等速变形阶段	注意级别(II)	[0.4~0.8]	$y = -1.31x + 15.2 \sim y = -1.31x + 30.4$	$0 \leq \varepsilon_t \leq 2$	裂缝开始产生
加速变形阶段	初加速阶段	警示级别(III)	$y = -1.31x + 30.4 \sim y = -1.31x + 45.6$	$2 < \varepsilon_t \leq 6$	裂缝进一步延伸扩展
	中加速阶段	警戒级别(IV)	$y = -1.31x + 45.6 \sim y = -1.31x + 60.8$	$6 < \varepsilon_t \leq 8$	裂缝之间相互连接贯通
	加加速阶段(临滑)	警报级别(V)	$y = -1.31x + 60.8$ 线以上	$\varepsilon_t > 8$	通,并趋于闭合

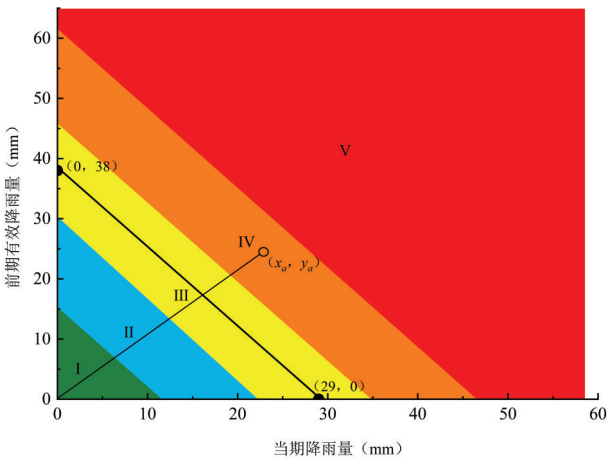


图7 枣树洼滑坡递进式分级预警示意图

Fig. 7 Diagram of the progressive graded warning for Zaoshuwa landslide

5 结论

(1)湖北省郧西县枣树洼滑坡是典型的降雨诱发的阶跃型堆积层滑坡。滑坡位移变化与区域内降雨时期具有较好的一致性,即主要集中在每年的4~10月份,在滑坡累计位移曲线每一次发生“抬升”之前,累计降雨曲线均会出现一定幅度的增加。

(2)利用皮尔逊相关性分析法对滑坡位移与降雨展开定量分析发现,当期降雨与前移8 d的降雨量存在显著的相关性。以此为基础,获取了

滑坡的前期有效降雨量、当期降雨量分别为38 mm、29 mm。

(3)枣树洼滑坡的时空演化特征并不完全具有一致性。即使部分时刻位移速率比位于2~6之间的初加速阶段,但结合野外宏观调查发现裂缝体系并未有进一步延伸扩展的趋势,滑坡整体仍处于等速蠕变阶段,表明滑坡的预警应将定性分析和定量评价有机结合起来,综合判定。

(4)以有效降雨量为主要预警指标,设计了滑坡黄色临界预警中心线,并充分考虑滑坡的宏观变形信息和监测资料,进而建立了5级递进式分级预警模型,提高了滑坡预测的精度和可靠性。

参考文献:

蔡国庆,王亚南,周安楠,赵成刚.2018.考虑微观孔隙结构的非饱和土水-力耦合本构模型[J].岩土工程学报,40(4): 618-624.

陈洪凯,魏来,谭玲.2012.降雨型滑坡经验性降雨阈值研究综述[J].重庆交通大学学报(自然科学版),31(5): 990-996.

陈述云.1994.论经济变量相关分析的统计方法[J].上海统计, (6):15-17.

部泽郑.2019.镇江地区降雨诱发滑坡机制与降雨阈值研究[D].南京大学硕士学位论文.

贺小黑.2018.Verhulst反函数滑坡预测预报模型的改进[J].华南地质与矿产, 34(4):289-293.

- 黄晓虎,雷德鑫,郭飞,易武.2019a.基于变形监测的运动型滑坡临灾预警系统研究[J].防灾减灾工程学报,39(5): 802-808.
- 黄晓虎,雷德鑫,夏俊宝,易武,张鹏.2019b.降雨诱发滑坡阶跃型变形的预测分析及应用[J].岩土力学,40(9): 3585-3592+3602.
- 雷德鑫,易武.2018.三峡库区王家坡滑坡降雨阈值分析[J].中国地质灾害与防治学报,29(5):95-101.
- 李秀珍,何思明,王震宇,朱鲜花.2015.降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型适用性分析[J].灾害学,30(1):34-38.
- 林鸿州,于玉贞,李广信,彭建兵.2009.降雨特性对土质边坡失稳的影响[J].岩石力学与工程学报,28(1):198-204.
- 刘传正.2021.累积变形曲线类型与滑坡预测预报[J].工程地质学报,29(1):86-95.
- 饶鸿,王金淑,赵志明,吴光,冯涛.2021.基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析[J].水文地质工程地质,48(1):154-162.
- 尚敏,张惠强,廖芬,熊德兵,赵国飞.2022.考虑降雨滞后效应的八字门滑坡位移预测研究[J].自然灾害学报,31(3): 242-250.
- 邵龙潭,温天德,郭晓霞.2019.非饱和土渗透系数的一种测量方法和预测公式[J].岩土工程学报,41(5):806-812.
- 谭淋耘,黄润秋,冯晓亮,裴向军,张程锦.2020.三峡重庆库区典型滑坡监测特征与诱发机制[J].地质论评,66(S1): 171-174.
- 王立伟,谢谟文,柴小庆.2014.滑坡变形空间评价的位移速率比方法研究[J].岩土力学,35(2):519-528.
- 向小龙,孙炜锋,谭成轩,侯春堂,任汉锋,刘明军.2020.降雨型滑坡失稳概率计算方法[J].地质通报,39(7):1115-1120.
- 许强,董秀军,李为乐.2019.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报(信息科学版),44(7):957-966.
- 许强,彭大雷,何朝阳,亓星,赵宽耀,修德皓.2020.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,28(1):111-121.
- 许强,曾裕平,钱江澎,王承俊,何成江.2009.一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据[J].地质通报,28(4):501-505.
- 许强,曾裕平.2009.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[J].岩石力学与工程学报,28(6): 1099-1106.
- 许强.2012.滑坡的变形破坏行为与内在机理[J].工程地质学报,20(2):145-151.
- 许强.2020.对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J].工程地质学报,28(2):360-374.
- 闫国强,殷跃平,黄波林,张枝华,代贞伟.2019.三峡库区巫山金鸡岭滑坡成因机制与变形特征[J].岩土力学,40(S1): 329-340.
- 殷坤龙.2004.滑坡灾害预测预报[M].武汉:中国地质大学出版社,91-183.
- 张友谊,胡卸文,朱海勇.2007.滑坡与降雨关系研究展望[J].自然灾害学报,16(1):104-108.
- Borga M, Fontana G D, Gregoretti C, Marchi L. 2002. Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability[J]. Hydrological Processes, 16(14): 2833-2851.
- Casadei M, Dietrich W E, Miller N L. 2003. Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 28(9):925-950.
- Chen C Y, Chen T C, Yu F C, Yu W H, Tseng C C. 2005. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring[J]. Environmental Geology, 47(5): 715-724.
- Crozier M J. 1986. Landslides: Causes, Consequences and Environment[M]. London: Croom Helm, 185-189.
- Guidicini G, Iwasa O Y. 1977. Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 16(1): 13-20.
- Lee D H, Lai M H, Wu J H, Chi Y Y, Ko W T, Lee B L. 2013. Slope management criteria for Alishan highway based on database of heavy rainfall-induced slope failures[J]. Engineering Geology, 162: 97-107.
- Ma T H, Li C J, Lu Z M, Bao Q Y. 2015. Rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of landslides in Zhejiang Province, China[J]. Geomorphology, 245:193-206.
- Xu Q, Liu H X, Ran J X, Li W H, Sun X. 2016. Field monitoring of groundwater responses to heavy rainfalls and the early warning of the Kualiangzi landslide in Sichuan Basin, southwestern China[J]. Landslides, 13: 1555-1570.
- Yin Y P, Sun P, Zhang M, Li B. 2011. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China[J]. Landslides, 8:49-65.