

doi: [10.12097/gbc.2023.08.036](https://doi.org/10.12097/gbc.2023.08.036)

基于深部位移的滑坡预警预报方法 ——以云南某水电站库区特大型滑坡为例

郭延辉¹, 黄友鹏¹, 张亮², 国铁霖¹, 李玉¹, 矫文琦¹

GUO Yanhui¹, HUANG Youpeng¹, ZHANG Liang², GUO Tielin¹, LI Yu¹, JIAO Wenqi¹

1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093;

2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051

1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, Yunnan, China

摘要:【研究目的】水电站库区特大型滑坡形成机理极其复杂, 现有预警预报方法很难准确预测滑坡变形阶段。【研究方法】为了更准确地对其进行预警预报研究, 采用钻孔深部位移监测法, 结合测斜仪监测原理, 对现有的预警方法加以改进, 提出针对测斜仪的动能、动能变化率预警指标。在此基础上, 依据 DH 特大型滑坡的深部位移监测数据, 对累积合位移-深度曲线、变形速率、变形加速度、动能及动能变化率的趋势和时间界限值进行分析, 确立了辨识滑坡变形演化阶段的方法。【研究结果】研究表明, 滑坡在不同的分区存在多个滑动面, 滑动面以上呈现整体滑动趋势; 滑坡由匀速变形阶段进入加速变形阶段, 动能变化率有明显的增加且会大幅度波动。【结论】建立的基于深部位移动能和动能变化率预警指标的滑坡变形演化阶段辨识方法对每个阶段的划分和预警时间的辨识相较于速率和加速度曲线更加准确, 能更好地识别出水电站库区特大型滑坡所处的变形阶段, 为判断此类滑坡所处变形阶段提供参考依据。

关键词: 水电站库区; 特大型滑坡; 深部位移; 预警指标; 变形阶段识别

创新点: 提出了一种基于测斜孔技术的改进预警方法。

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)05-0825-12

Guo Y H, Huang Y P, Zhang L, Guo T L, Li Y, Jiao W Q. Method of landslide early warning and prediction based on deep displacement: A case study of a super large landslide in the reservoir area of a hydropower station in Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(5): 825–836

Abstract: [Objective] The mechanism of super large landslides in hydropower station reservoir areas is extremely complex. It is difficult to accurately predict the deformation stage of landslides using existing early warning and prediction methods. [Methods] In order to conduct more accurate early warning and prediction research on it, this article adopts the borehole deep displacement monitoring method. An improved early warning indicator of kinetic energy and kinetic energy change rate for inclinometers was proposed, which based on the monitoring principle of inclinometers. On the basis of deep displacement monitoring data of the DH super large landslide, the trend and time limit values of cumulated displacement depth curve, deformation rate, deformation acceleration, kinetic energy and its variation rate were analyzed. A method was established to identify the stages of landslide deformation evolution. [Results] The research results indicate that landslides have multiple sliding surfaces in different zones, and there

收稿日期: 2023-08-25; 修订日期: 2024-01-08

资助项目: 云南省基础研究计划重点项目(编号: 202501AS070107)、云南省基础研究计划面上项目(编号: 202301AT070454)、云南省兴滇英才支持计划青年人才专项项目(编号: KKXX202467043)、昆明理工大学省级人才培养基金项目(编号: KKZ3202367014)、国家大学生创新创业训练计划项目(编号: 2021106740085, 2021106740086)

作者简介: 郭延辉(1985-), 男, 博士, 副教授, 从事地质灾害与监测预警方面的研究。E-mail: guoyanhui0818@kust.edu.cn

is an overall sliding trend above the landslide sliding surface. During the process of landslide from uniform deformation stage to accelerated deformation stage, the rate of kinetic energy change significantly increases and fluctuates significantly. The identification method for landslide deformation evolution stages based on deep displacement kinetic energy and kinetic energy change rate warning indicators is established. **[Conclusions]** This method is more accurate in dividing each stage and identifying warning time compared to the rate and acceleration curves. Not only can it better identify the deformation stage of super large landslides in hydropower station reservoir areas, but it can also provide a reference basis for determining the deformation stage of such landslides.

Key words: hydropower station reservoir area; super large landslide; deep displacement; early warning indicators; identification of deformation stage

Highlights: An improved landslide early-warning method based on survey hole technique is proposed.

随着全球环境恶化, 各国地质灾害频发, 如 2014 年阿富汗巴达赫尚省阿巴里克村的特大山体滑坡、2021 年的喜马拉雅山洪等, 给各国造成很大的影响。在中国, 几乎每年都会经历近千起地质灾害, 其中滑坡是影响最严重的地质灾害之一, 也是水电站库区突出的常见灾害, 会对交通、矿山、建筑、水利工程等造成严重影响, 尤其是特大型滑坡及其伴生灾害导致的经济损失和人员伤亡日益增加(张玉芳等, 2023; 刘吉鑫等, 2024)。因此需要及时监测滑坡的情况(戴粤等, 2022), 根据监测数据建立合理的预警预报方法, 进而准确地辨识滑坡所处的变形阶段(许强等, 2009), 对滑坡灾害信息进行预报, 并采取应急处置措施。这对保证工程安全运行、减少人员伤亡和财产损失具有重大意义(王自高等, 2012; Tan et al., 2021; 汪美华等, 2023)。

近年来, 深部位移监测技术在滑坡机理研究和滑坡稳定性监测方面扮演着重要的角色(陈贺等, 2019)。相较于传统的地表监测方法, 深部位移监测不仅可以深入边坡内部, 感知坡体内部不同位置变形情况, 还能对数据进行及时捕捉(王凯等, 2015)。基于深部监测技术, 可以更直观地得到滑面深度、滑动方向等重要信息。何满潮(2009)的研究表明, 根据深部位移监测数据可以对滑坡的滑动面进行确定, 实现较准确的预测预报。现阶段用于滑坡深部位移监测的仪器主要有测斜仪(冯振等, 2011)、光纤光栅深部位移计(郭永兴, 2014; Acharya et al., 2023)、同轴电缆时间域反射仪(谭捍华等, 2010; Chung et al., 2022, 2023), 通过这些仪器的监测数据能得到预警参数, 但在各种工程实践中, 由于地质条件的冗杂性、施工工艺的复杂性、测斜仪埋设方法及技术人员的不确定性等外在原因, 深部位移监测数据往往存在误读或误判的情况。

对滑坡的变形演化阶段进行准确识别并建立预

警指标, 达到对滑坡自动化监测预警的目标, 具有重要的理论和实践意义。自日本学者 Satio 在 20 世纪 60 年代确立了基于岩土体蠕变变形曲线的滑坡预报经验公式之后, 其他国内外学者也构建了 10 多种辨识滑坡变形阶段的预警预报方法。何满潮(2009)基于摄动力的动态变化进行监测, 研制了针对滑坡的远程监测预报系统, 实现了边坡的实时监控和预测预报; Uwihirwe et al.(2022)考虑到滑坡发生前的长期存在条件, 将现有的经验统计滑坡阈值模型与特定区域水文特征结合, 改进了对滑坡的预测; 唐晓松等(2013)通过对水库型滑坡在不同工况下数值模拟的研究, 确定了以水平位移陡升段和水平方向的夹角为判断依据的水库滑坡预测预报方法; Emanuele et al.(2012)根据裂缝和降雨量的特征和规律, 预测了意大利 Torgiovannetto 滑坡的变形演化过程; Thapa et al.(2023)将低成本生物工程技术与早期的预警系统结合, 开发出一种集位移、雨量及土壤湿度的三合一全自动预警系统; 李聪等(2016)对大量滑坡的变形阶段与各类影响因素之间的关系进行了研究, 利用统计分析法构建了数据库, 确定了以不同阶段变形程度与影响因素的相关性程度为依据的滑坡预测预报方法; 许强等(2009, 2012)通过分析研究累积变形加速度的变化特征, 建立了临滑阶段预警指标, 指出了每个变形阶段加速度的变化趋势; 张振华等(2009)结合设计安全系数和破坏模式, 提出了边坡开挖过程动态变形监测预警指标的研究思路和方法。此外, 还有一些学者根据声发射参数、变形曲线切线角、塑形应变率等对滑坡进行预警预报。然而, 由于水电站库区地理环境和地质条件过于复杂特殊, 导致该区域内的滑坡有很强的特征性, 针对水电站库区特大型滑坡的研究鲜有报道, 且现有的滑坡预警判别方法难以准确地对此类滑坡的变形特征及滑坡灾害发生时间进行预报。

因此, 本文介绍了一种基于深部位移的动能和动能变化率预警判别方法, 应用于水电站库区特大型滑坡。提出针对测斜孔的改进动能计算方法, 以及对预警指标归一化处理的方法, 系统分析滑坡不同变形演化阶段速率、加速度、动能和动能变化率的特征规律, 提出根据动能和动能变化率辨别滑坡变形演化阶段的方法, 对此类滑坡预警具有重要的理论和实践意义。

1 深部位移监测原理及其预警指标

1.1 深部位移监测原理

深部位移监测在滑坡监测中有举足轻重的作用, 根据钻孔的监测数据可以获取岩土体内部的位移信息, 基于位移信息可以进一步得到滑坡的滑动量、滑动速度-滑动面的位置信息等, 且与地表变形监测、应力监测等构成了滑坡的预警体系。时域反射技术、钻孔倾斜仪、阵列式位移计等是现在主要的深部位移监测方法。

本次结合滑动式测斜仪对深部位移的监测原理进行说明。测斜仪的主要组成部分为监测孔、内壁带十字形导向槽的测斜管、带导向轮的探测器及带长度刻度电缆线的测斜仪(图 1)。监测时依次沿着 A0 和 B0 放下探测器, 自下而上采集数据, 但部分测斜仪工作量较大, 需要进行 4 个方向(A0、A180、B0 及 B180)的数据采集。对于固定式测斜仪和阵列式位移计的监测方法, 不需要滑动式测斜仪的人工滑动探测器步骤, 每次都可以直接采集不同深度的传感器倾角数据, 其他原理基本相同。如图 1 所示, 根据传感器和竖直方向的倾角即可利用空间几何关系求出 A、B 两个方向的水平位移量。

某深度处 A 向或 B 向相对于铅垂线的偏移量可

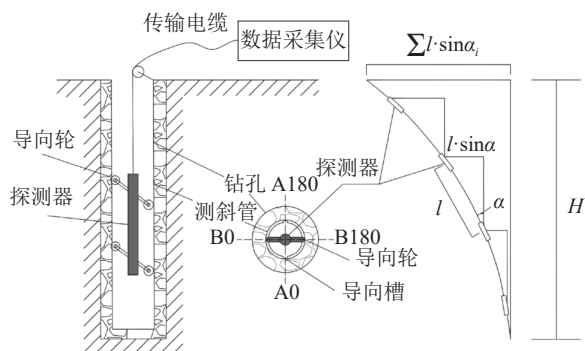


图 1 测斜仪组成和原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the composition and principle of the inclinometer

通过以下公式进行计算:

$$d_i = \sum_{i=1}^n l \cdot \sin \alpha_i \quad (1)$$

式中, d_i 为某深度处测斜管相较于铅垂方向的位移量; l 为相邻监测位置的中心间距, 一般为 500 mm 或 1000 mm; α_i 为第 i 段测斜管与铅垂线的夹角。

根据公式(1), 求出测斜仪不同深度处 2 个方向的偏移量, 经过长期监测, 可以获得不同深度 2 个方向的位移状况, 结合这 2 个方向的位移数据, 通过公式(2)可以求出测斜管某深度处的合位移大小。对合位移数据进一步处理, 得到深度-位移曲线和位移-时间曲线, 基于这 2 种曲线可以分析滑坡体的变形特征、滑动面和变形速率。

$$L = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

式中, L 为某深度处的合成水平位移量; x 、 y 代表某深度处 2 个方向的位移量。

1.2 累积位移-深度曲线预警指标

靳晓光等(2001)、孙志彬等(2010)将各时刻累积位移-深度关系曲线划分为“V”、“钟摆”、“复合”、“D”、“B”、“r”六类。实践经验显示, 与匀速、加速或临滑变形阶段对应的是“D”型、“B”型、“r”型, 这 3 种曲线特征说明, 滑坡内部滑动面已经形成且稳定性差; “V”型、“钟摆”型、“复合”型曲线形态显示, 滑坡正处于蠕动阶段, 并与初始变形阶段或匀速变形阶段对应, 坡体内部尚未形成显著的滑动面。所以, 依据不同时刻累积位移-深度曲线形态, 可以对滑坡所处变形阶段进行初步判定, 并将其作为以深部位移为基础的滑坡监测预警标志之一。但是, 在实际工程中, 由于外界环境干扰因素较多, 观测数据具有一定波动性, 且这些波动可能会随着时间发生变化, 对最终预测结果产生影响。因此, 需要结合速率、加速度、动能和动能变化率综合分析, 大幅降低外界因素的干扰, 得出更准确的滑坡预警预报结果。

1.3 动能及动能变化率预警指标

从能量角度分析, 滑坡整体变形过程中, 本质上是势能、变形能及外力功持续向动能、碎屑能及阻力功转化的过程; 在不同变形阶段, 滑坡体所处的力学状态各不相同, 动能也应有截然不同的特征。在此基础上选择动能变化特征对滑坡演化各阶段进行辨识, 并将其作为滑坡监测预警的新方法。

陈贺等(2015)的研究中, 将监测孔按照数据采

集距离分为 n 段, 得出的监测孔动能 E 可以用公式 (3) 表示。该式中速度表示此深度处的单位时间位移变化量(许强等, 2008, 2009)。

$$E = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} m_i v_{ci}^2 + \frac{1}{2} J_c \left(\frac{|v_{1i}| - |v_{2i}|}{l_i} \right)^2 \right] \quad (3)$$

本次针对测斜仪监测的特点(图 2), 将 m_i 分为两部分, 分别为第 i 段岩土体的质量和第 i 段填充物的质量, 得出更适用于测斜仪的动能计算公式(公式 (4)), 使其计算出的动能更精细准确, 更有利于分析滑坡变形演化规律。

$$E = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} (m_{si} + m_{fi}) v_{ci}^2 + \frac{1}{2} J_c \left(\frac{|v_{1i}| - |v_{2i}|}{l_i} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中, m_{si} 为第 i 段岩土体的质量; m_{fi} 为第 i 段填充物的质量; v_{1i} 和 v_{2i} 表示第 i 段圆柱体的两端速度; v_{ci} 是第 i 段圆柱体的中心速度; l_i 为第 i 段圆柱体的长度; J_c 为第 i 段圆柱体的转动惯量, 可通过公式(5)计算得到。

$$J_c = \frac{1}{12} (m_{si} + m_{fi}) (3R^2 + l_i^2) \quad (5)$$

式中, R 为监测孔直径。

再对公式(3)求出的动能进行时间求导可得到动能变化率, 如公式(6):

$$E^{\&} = \frac{dE}{dt} \quad (6)$$

式中, $E^{\&}$ 为监测孔的动能变化率。

本次基于测斜仪深部监测原理对动能计算方法

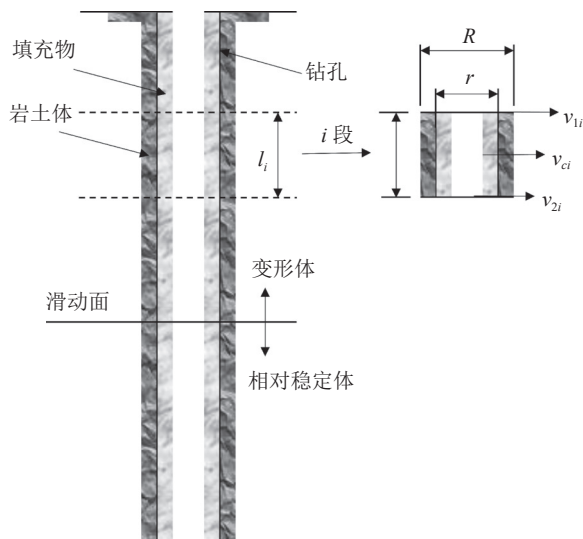


图 2 动能计算简图

Fig. 2 Schematic diagram of kinetic energy calculation

进行针对性改进, 监测孔动能和动能变化率辨识滑坡演化阶段和滑坡预警指标, 结合原有的速率和加速度判据综合分析, 区分滑坡不同时刻的变形演化阶段, 并对滑坡灾害进行及时的预警预报。

2 特大型滑坡深部位移监测技术应用实例

2.1 工程地质条件及区域概况

某水电站采用的是堤坝式开发, 坐落于云南省境内, 属于梯级开发的六级水电站。其右岸有兰坪至六库的公路, 兰坪到昆明市有省级公路连通。DH 滑坡距离坝址最近约为 5.1 km, 整个 DH 滑坡的体积约为 $4840 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属于典型的特大型滑坡, 其后缘至前缘长度约 1000 m, 高程分布范围为 1410~1870 m, 顺河流向宽度 1060 m 左右, 滑坡周围均为基岩陡壁, 造就了后缘及上下游侧缘被基岩陡坡围限、前缘临空的态势, 整体呈现明显的“圈椅”状, 属于典型的纵横等长式滑坡。目前该滑坡前缘和澜沧江边缘相接, 澜沧江枯水期水位为 1410~1411 m, 滑坡在水库正常蓄水位时(正常蓄水位 1477 m)前缘约有 67 m 的深度位于水位以下, DH 滑坡体全貌及分区如图 3 所示。

I 区滑坡位于滑坡上部, 地面高程为 1650~1860 m, 呈弧形长舌状展布, 坡体平均宽度为 960 m, 坡体斜长约 390 m, 平均厚度 40 m, 体积约 $1420 \times 10^4 \text{ m}^3$, 滑坡区地势西(后缘)高东(前缘)低, 区内早期错台明显, 呈阶梯状斜坡地貌。中下部到前缘地形较平缓, 形成一个平台, 但是中上部到后缘的地形较陡, 坡度为 $27^\circ \sim 29^\circ$ 。

II 区坡体位于滑坡体内下游的较高部位, 地面高程为 1580~1810 m, 坡体呈舌状展布, 坡体平均宽度约为 240 m, 坡体斜长约 440 m, 平均厚度约 60 m, 体积约 $639 \times 10^4 \text{ m}^3$, 坡体区地势西(后缘)高东(前缘)低, 前缘陡坎坡度约 25° , 前缘和上下游侧缘有长约 15 m 的陡坎将该区和其他区分开。

III 区坡体位于滑坡体内下游低处, 坡体呈喇叭状展布, 平均宽度约 490 m, 斜长约 335 m, 面积约 $16.4 \times 10^4 \text{ m}^2$, 平均厚度约 50 m, 体积约 $820 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中水上体积 $515 \times 10^4 \text{ m}^3$, 水下体积 $305 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。坡区地势西(后缘)高东(前缘)低。该区总体坡度 26° 左右, 前缘为陡岸坡, 高程为 1410~1450 m, 坡度为 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。

IV 区滑坡位于滑坡体中后部, 滑坡体呈扇形展

布。坡体平均宽度约 540 m, 斜长约 520 m, 面积 $34.5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 平均厚度约 42 m, 体积约 $1450 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中水上体积 $1220 \times 10^4 \text{ m}^3$, 水下体积 $230 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。地面高程为 1410~1450 m, 坡度为 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。

V 区滑坡位于 DH 滑坡体内的上游下部, 滑坡体呈长舌状展布, 平均宽度约 230 m, 斜长约 490 m, 面积约 $14.4 \times 10^4 \text{ m}^2$, 平均厚度 30 m, 体积约 $430 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中水上体积 $330 \times 10^4 \text{ m}^3$, 水下体积 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。地面高程为 1410~1670 m, 主滑方向近 EW 向, 与澜沧江流向大致垂直。滑坡区内地势西(后缘)高东(前缘)低, 在前缘形成明显的缓坡地貌。该区地形明显低于 IV 区坡体, 形成凹槽。滑坡前缘为陡岸坡, 高程为 1410~1450 m; 中部为缓斜坡, 高程为 1450~1520 m, 形成一个明显的滑坡平台; 其后缘坡度为 $35^\circ \sim 45^\circ$, 中部岸坡坡度为 $15^\circ \sim 20^\circ$, 中前缘岸坡坡度为 $50^\circ \sim 60^\circ$, 总体上呈上陡中缓下陡的地貌形态。该区中部缓坡多种植水稻, 后缘坡度陡, 多为旱田。

DH 滑坡体是一个古滑坡堆积体, 其形成过程主要为: 由于澜沧江的侧蚀作用, 右岸形成高陡岸坡, 岩层不断倾倒, 经长期地质演变、坡面冲刷, 形成负地形, 局部产生失稳滑移, 顶部逐渐被坡崩积层覆盖。前缘临江地带不断被澜沧江水冲蚀, 产生蠕滑, 后缘产生拉裂缝(图 4), 周而复始, 形成目前的古滑坡堆积地貌。DH 滑坡在历史上经受了降雨、地震等不利因素的影响, 从现场勘察地质情况看, 目前不具备发生大规模整体快速失稳滑动的条件, 整体基本

处于蠕滑状态。结合 DH 滑坡的整体分区情况, 本次在滑坡上共布置了 11 个测斜仪, 根据现场调查及监测需要, 将 11 个测斜仪分布在 4 个剖面上, 具体分布情况见图 4。

2.2 监测方案

结合现场调查和地勘资料, 对滑动面进行预估, 鉴于剖面 2-2 和 3-3 所在区域的监测孔因堵塞、区域变形特征不明显等导致采集的数据较少, 因此选取该滑坡的 1-1 和 4-4 剖面作为监测剖面, 每个监测孔都采取测斜仪人工现场监测(图 5)。

在 1-1 剖面的高程为 1498.8 m、1618.8 m 和 1703.8 m 处钻取监测孔, 深度分别为 48.8 m、73.8 m 和 88.8 m; 4-4 剖面区域的高程为 1498.3 m、1575.8 m 和 1603.3 m 处钻取监测孔, 深度分别为 63.3 m、95.8 m 和 93.3 m。图 5 为测斜仪数据采集的现场图及测斜仪孔口进行保护的装置图, 图 6 和图 7 分别表示选取的 2 个变形区对应的剖面图。

2.3 监测结果

2015 年 7 月 8 日、6 月 20 日和 6 月 22 日分别完成了 IN1-1、IN1-2 和 IN1-3 的监测设备安装和调试工作并开始监测, 但在监测过程中 IN1-1 测斜孔在 2016 年 7 月份观测时探头放到 37.2 m 处被卡, 无法继续观测; IN1-2 测斜孔在 2016 年 8 月份观测时探头放到 18.2 m 处被卡, 无法继续观测。因此, 对 IN1-3 进行持续监测, 得到滑动方向的累积合位移和监测孔深度之间的关系如图 8 所示。从图 8 可以看出, 位于滑坡后缘 IN1-3 孔的深部位移在 61 m 之前

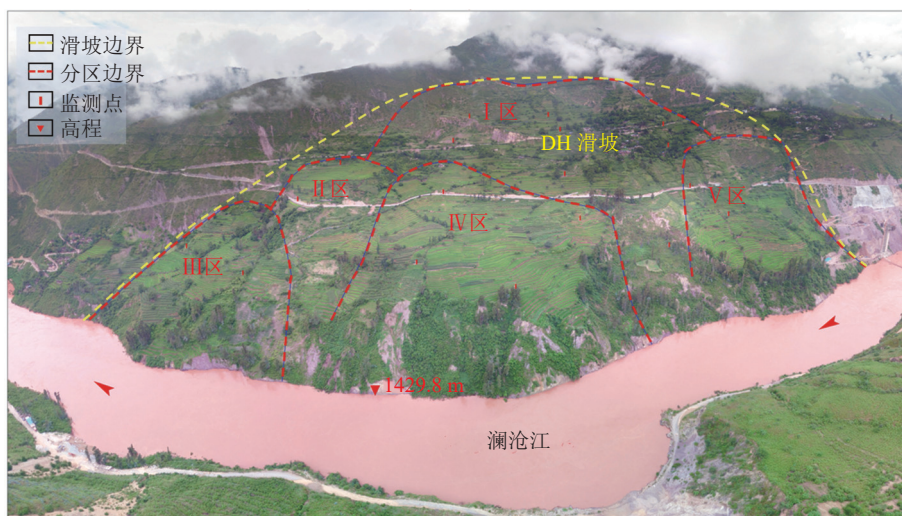


图3 DH 滑坡全貌及分区示意图

Fig. 3 Overview and zoning diagram of DH landslide

基本不变,保持在一个相对恒定的值,但该数值较大,直到 61~62 m 处位移突然减小,之后在 62~88.8 m 范围内持续减小至零点处,孔深 58 m 处位移最大;IN1-3 孔的位移随时间增加,在 5—8 月的增加幅度比 8 月后的增加幅度更大;结合监测结果和累积位移深度关系曲线分类,IN1-3 属于典型的“D”型曲线,有一个明显的滑动面,该滑动面的高程位于 1641.8~1642.8 m 范围内。

2015 年 8 月 14 日、7 月 15 日和 10 月 23 日分别完成了 IN4-1、IN4-2 和 IN4-3 的监测设备安装和调试工作并开始观测,在观测过程中 IN4-2 测斜孔没

有明显变形趋势,有待进一步观测;IN4-3 测斜孔沿孔深没有明显的位移,需要继续观测。因此,选择对 IN4-1 进行持续监测并对其监测结果进行分析(图 9)。

从图 9 可以看出,在 2016 年 8 月 13 日滑动面位移突然增大,在 8 月 13 日之前位移增加的幅度较小,8 月 13 日之后整个曲线在 30.0~31.5 m 以上稳定在一个较小的范围内,呈现出整体滑动的态势,说明此处形成了一个明显的滑动面,滑动面高程在 1466.8~1468.3 m 范围内;在 31.5 m 处有一个突变,整体呈现出“D”型曲线的发展趋势;IN4-1 孔的位移随时间增加的变化趋势与 IN1-3 相似,在 5—8 月范围内增加

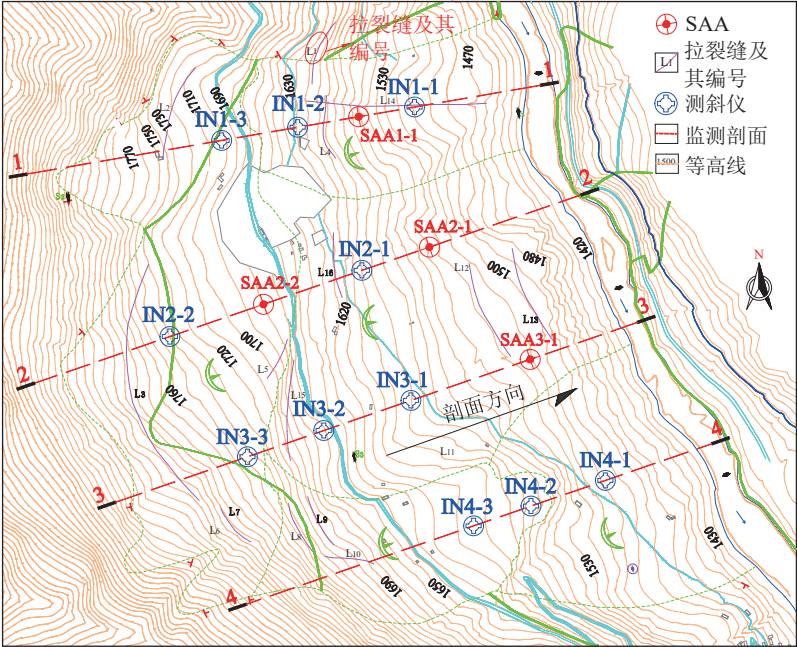


图 4 DH 滑坡整体平面图

Fig. 4 Plan view of DH Landslide

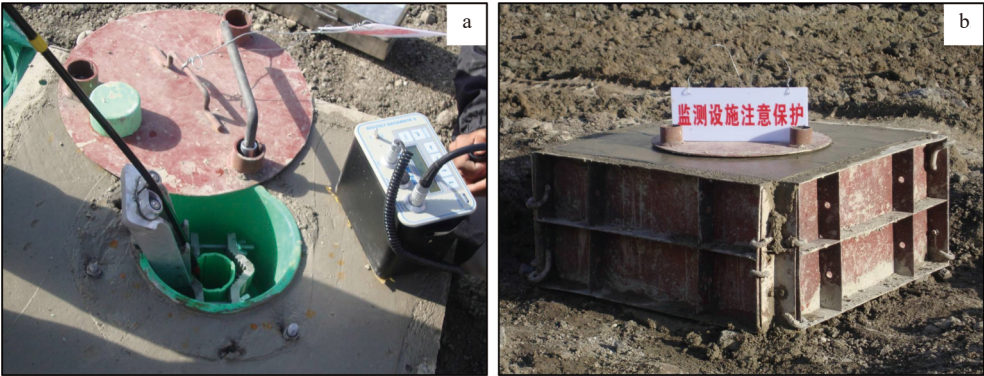


图 5 测斜仪数据的现场采集及孔口保护装置

Fig. 5 On site collection of inclinometer data and orifice protection device

a—测斜仪数据的现场采集情况;b—测斜仪管口保护装置

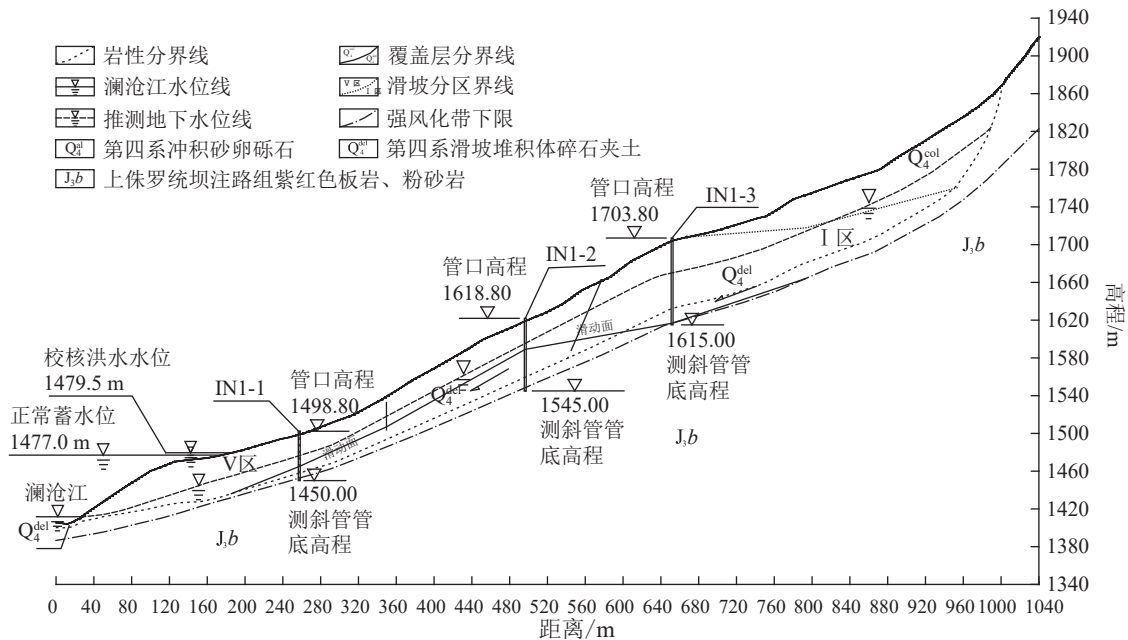


图 6 1-1 监测剖面示意图

Fig. 6 Monitoring profile diagram of 1-1

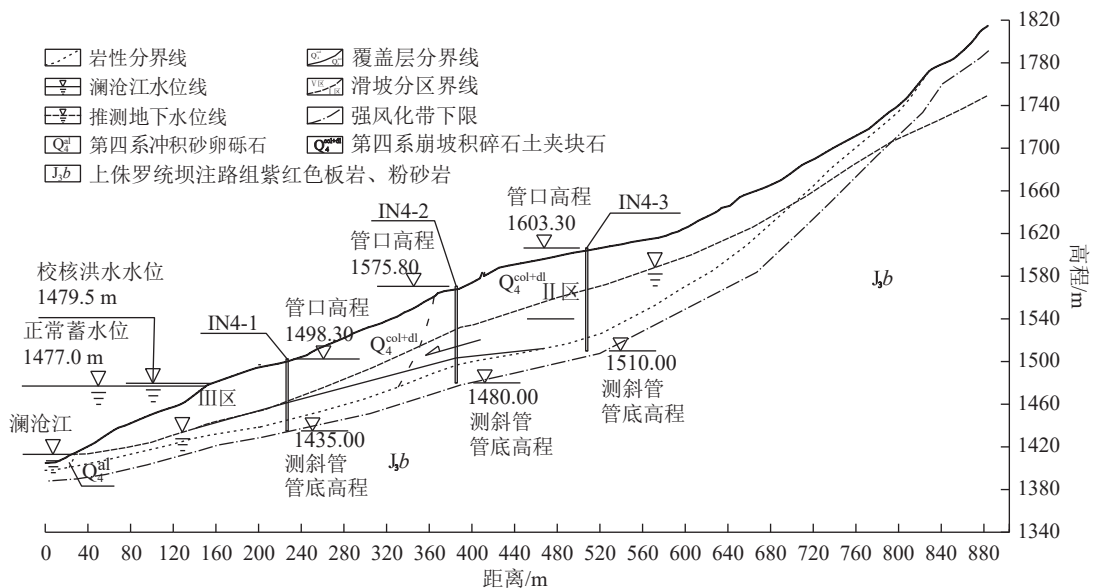


图 7 4-4 监测剖面示意图

Fig. 7 Monitoring profile diagram of 4-4

的幅度远大于 8 月后的增加幅度; 结合破坏以前孔 IN4-2 和孔 IN4-3 的数据, 分析得出, 4-4 监测剖面中下部有一滑动面, 上部目前还没有出现滑动面。

从图 8 和图 9 的分析结果可以初步判断, 2 个监测区域处于匀速或加速变形阶段。结合兰坪的气象数据(滑坡区域的雨季在 5—10 月, 最集中的降雨在 7—9 月)及滑坡区域周边地理环境可知, 由于人类活

动如开挖、种植等, 对坡上的植被产生了破坏, 使坡脚的支撑力减弱, 加之雨季期间降雨量较大, 下渗的雨水增加了滑坡体的重力, 削弱了结构面的抗剪强度, 同时库区中的水不断侵蚀斜坡坡脚, 坡脚应力集中现象开始显现, 逐渐形成饱和层, 导致监测孔的位移突增; 另外, 在浅层区域位移出现小幅振荡可能来自于测斜管的安装和人工测量误差。因此, 通过对

监测位移数据进一步分析处理,结合处理得到的预警指标对滑坡进行预警预报,可以大幅减小这些外在因素引起的误差。

3 演化阶段划分及预警预报

根据滑坡变形演化阶段的划分(许强等,2009;陈贺等,2019),滑坡从变形启动到整体失稳破坏要经历4个阶段:初始变形阶段、匀速变形阶段、加速变形阶段和临滑变形阶段。为了证实监测孔动能和动能变化率对滑坡变形阶段划分的合理性,对比分析许强等(2012)、李聪等(2016)提出的经过多次验

证的位移速率和加速度预警预测指标。

从图8可以看出,IN1-3监测孔的最大位移量在孔深61 m处,且出现了陡降;从图9可以看出,31 m处IN4-1监测孔的位移量最大,且随着时间的变化,IN4-1的位移数值变化会有所不同,但是整体的趋势相似,因此选取IN1-3孔的61 m处位移和IN4-1孔的31 m处位移对时间1次求导和2次求导得到速率和加速度,根据求得的速率结合公式(3)可以计算出动能,最后对动能进行1次求导得到动能变化率(图10、图11)。图10-a、图11-a为实际计算值的过程变化曲线,鉴于实际计算值数量级相差过大不

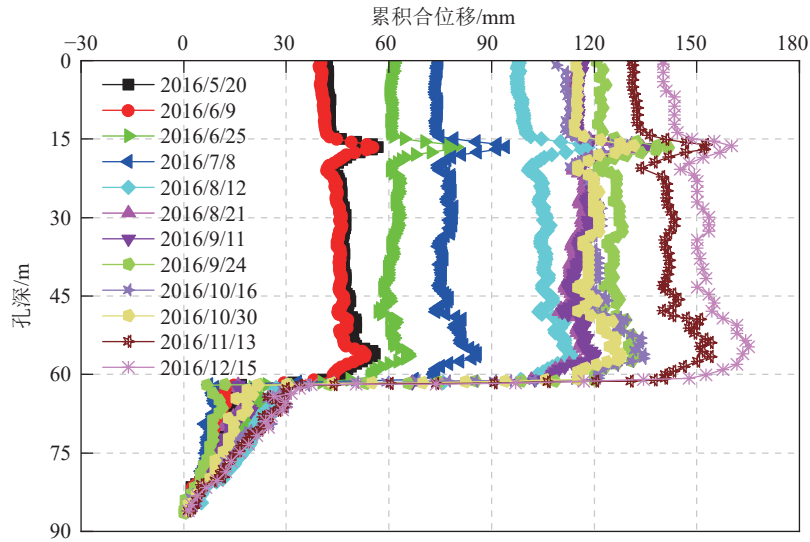


图8 IN1-3 累积合位移与孔深关系图

Fig. 8 Relationship between cumulative displacement and hole depth of holes IN1-3

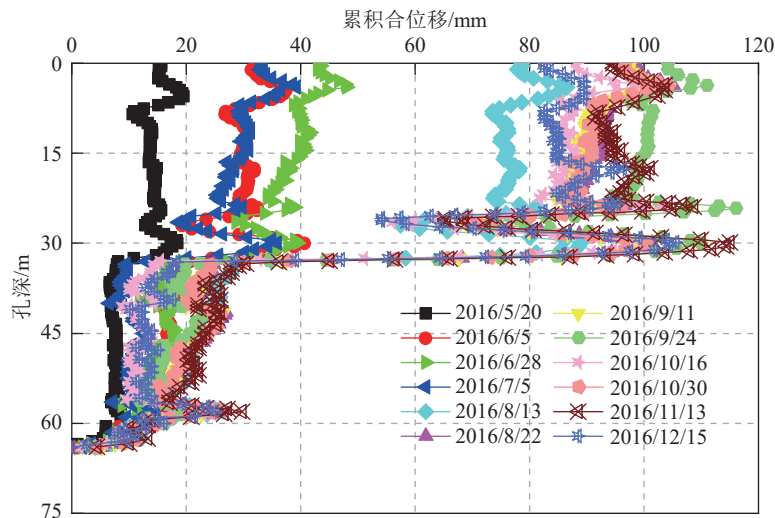


图9 IN4-1 累积合位移与孔深关系图

Fig. 9 Relationship between cumulative displacement and hole depth of holes IN4-1

便于分析规律和趋势,通过对4种指标进行归一化处理得到图10-b、图11-b的百分数曲线,归一化处理不影响对整体趋势的分析,且能大幅降低实际值数量级差距带来的误导性。

如图10所示,在初始变形阶段,由于人类活动等外界因素对边坡的干扰和影响,变形突然启动,下滑力与抗滑力相等的平衡状态被打破,导致变形速率、加速度、动能和动能变化率突然增大。但是,随着时间的变化,这些外界因素的影响逐渐减小,速率、加速度、动能和动能变化率均减小并在一定范围内波动,此时滑坡体的下滑力和抗滑力处于动态平

衡状态,表明进入匀速变形阶段,动能和动能变化率呈现在零点附近小范围波动的特性。滑坡的动态平衡保持一段时间后,由于在匀速变形阶段,滑带中的岩土体局部锁固段不断突破、剪切破坏,再加上雨水的入渗软化作用,导致滑带部分抗剪能力逐渐减弱,最终整个滑体的下滑力超过滑带岩土体的最大抗滑力,下滑力与抗滑力之差形成的盈余下滑力使滑坡向加速变形阶段发展。此时变形速率、加速度、动能和动能变化率突然增加,且随着时间的增加出现大幅度的上下振动,但由于外界因素的减少及蠕滑型滑坡岩土体的可塑性,滑坡体的剩余滑力会逐渐消

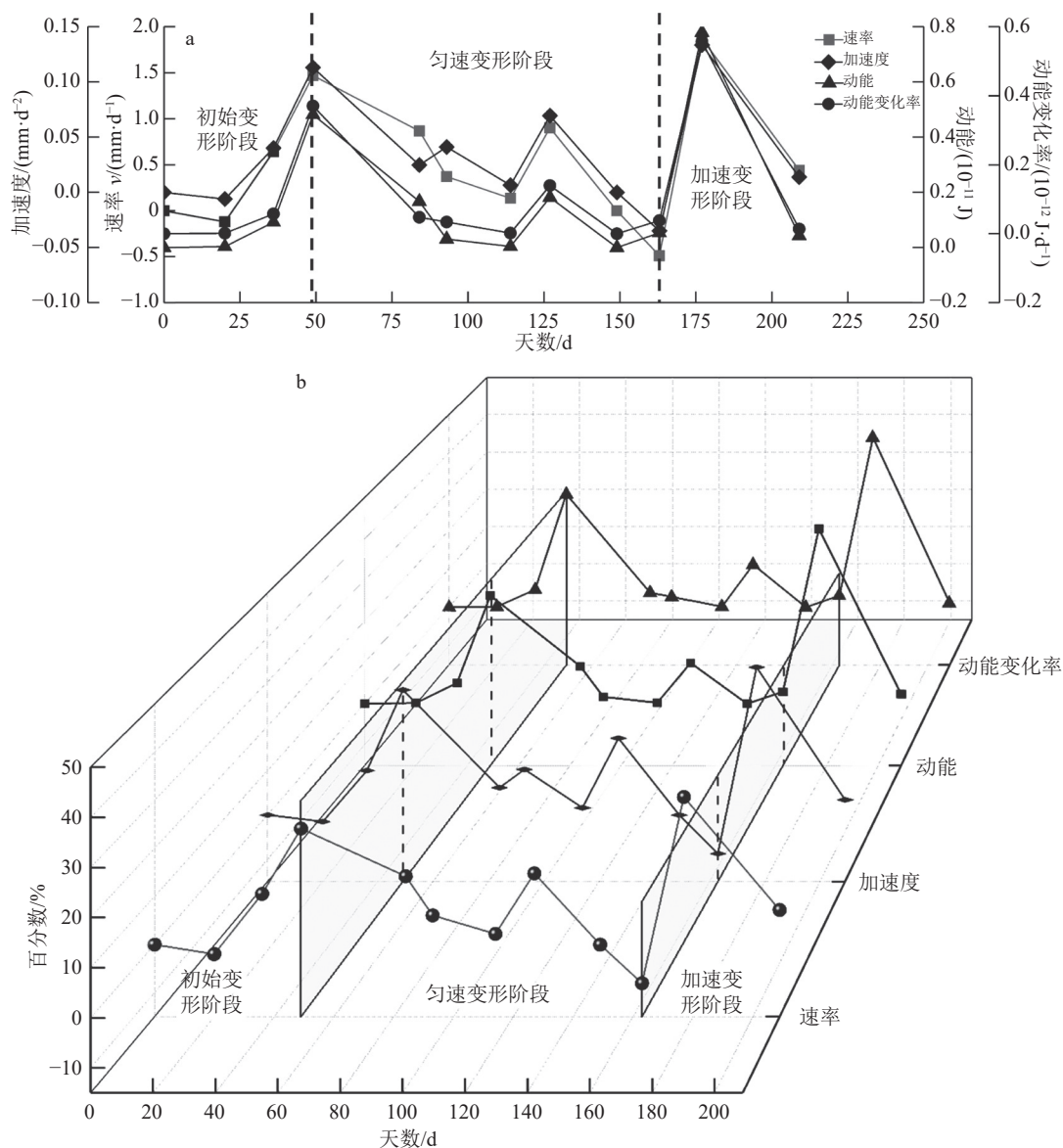


图10 IN1-3监测孔变形特征曲线

Fig. 10 Deformation characteristic curves of IN1-3 monitoring hole

a—实际计算值的变形特征曲线; b—归一化的百分数变形特征曲线

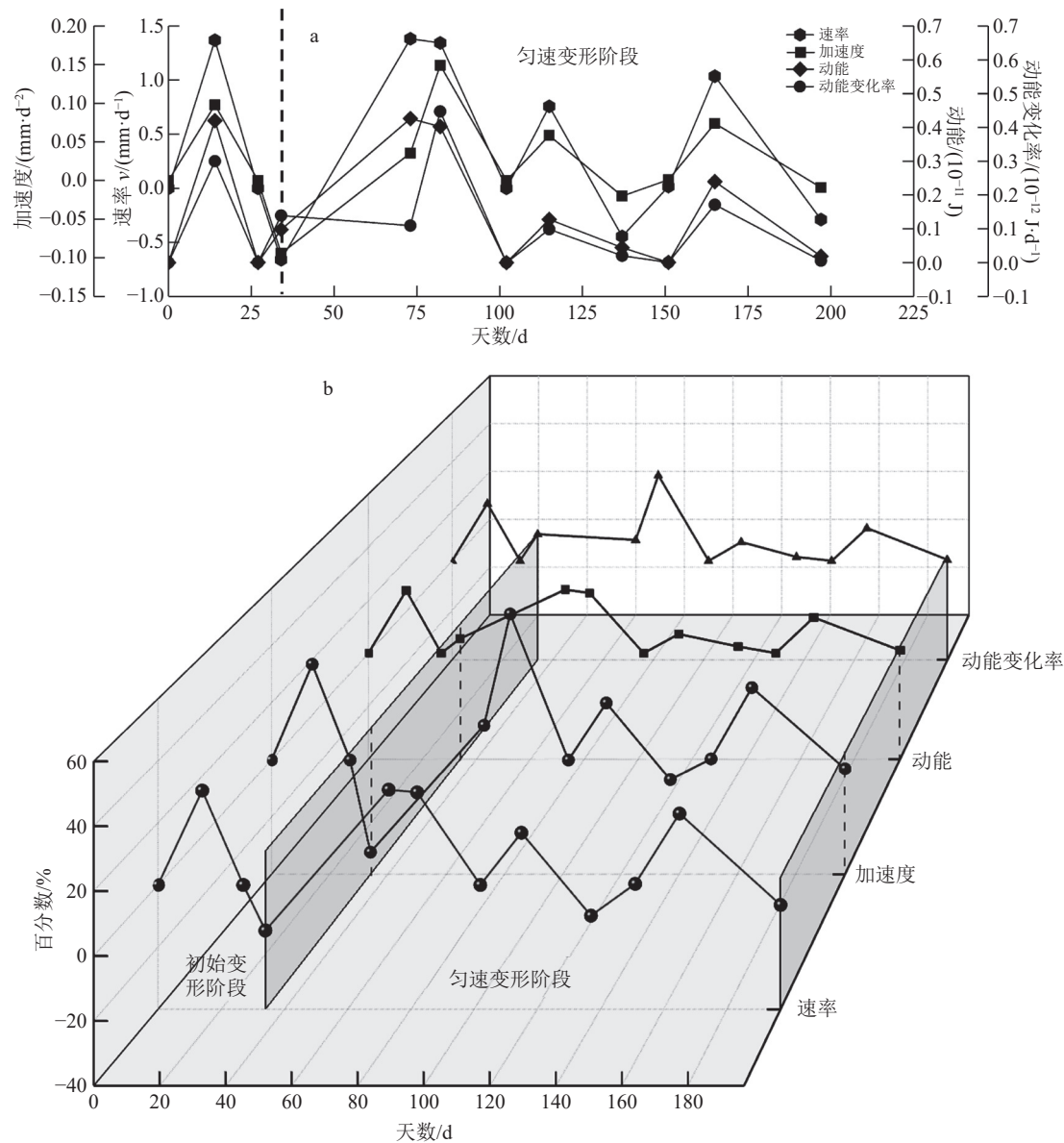


图 11 IN4-1 监测孔变形特征曲线

Fig. 11 Deformation characteristic curves of IN4-1 monitoring hole
a—实际计算值的变形特征曲线; b—归一化的百分数变形特征曲线

耗殆尽,最终滑坡整体趋于稳定。

由图 10 可以看出,初始变形阶段持续到 49 d,匀速变形阶段持续到 163 d。对 IN1-3 孔的监测是从 2016 年 5 月 20 日开始的,这个时间是滑坡区雨季的开始,因此 4 种指标均出现了增加的趋势,此时对应初始变形阶段;从第 49 d 到第 163 d,是雨季持续期,此期间滑坡处于动态平衡,对应匀速变形阶段;随着雨季的结束,在雨季累积的剩余滑力发展出加速变形阶段,后续随着剩余滑力的消耗殆尽滑坡体又趋于稳定。

由图 11 可知,孔 IN4-1 主要所处的变形阶段为

初始变形阶段和匀速变形阶段。受人为活动、降雨等外在因素的影响,从 5 月 20 日开始监测到 7 月 5 日处于初始变形阶段;7 月 5 日之后直到 12 月 15 日均处于匀速变形阶段。孔 IN4-1 和孔 IN1-3 整体变形阶段趋势不同是因为 IN4-1 处的坡度、岩土体构造及初始状态与 IN1-3 不同。从图 8 和图 9 可以看出,IN4-1 处是在 8 月 13 日监测后才发现明确的滑动面,而 IN1-3 处是监测开始就已经存在明显的滑动面,因此在相同外界因素影响下 IN4-1 处的坡体因为坡度、构造、初始状态等原因相较于 IN1-3 的

坡体更趋于稳定,最终导致同一个滑坡区域的2处监测孔变形阶段却不相同。

综合图10-a和图11-a可以看出,动能和动能变化率在匀速变形阶段的波动范围相较于速率和加速度的波动范围更小且更明显,因此通过动能和动能变化率可以大大降低对滑坡所处变形阶段和演化规律的误判。对比图10和图11的2种曲线,由于纵坐标相同,归一化的百分数变形特征曲线(图10-b、图11-b)相较于实际计算值的变形特征曲线(图10-a、图11-a)在对比分析时对滑坡变形阶段的区分更加清晰和快捷,尤其是在匀速变形阶段,图10-b、图11-b中的动能和动能变化率表现出来的均匀稳定性比图10-a、图11-a中表现得 clearer 和直观,因此对指标进行归一化的处理可以更清晰地展现其规律,且更易区分变形演化阶段。

4 结 论

本文介绍了一种将动能和动能变化率作为基于深部位移滑坡预警指标的方法,并应用于水电站库区的特大型滑坡研究中,根据DH滑坡的深部位移监测数据,对比分析了累积位移-深度曲线、变形速率、动能和动能变化率的趋势和演化特征,提出了根据深部位移的滑坡演化阶段识别方法,得出以下结论。

(1)根据位移和深度关系曲线,可以看出滑坡在人工活动、降雨或水位等外界因素的影响下整体的变形较小,呈现蠕变特征,但是在不同的区域已经形成或正在形成滑动面。

(2)针对测斜仪对原有公式加以改进计算出的动能和动能变化率曲线与变形速率和加速度曲线在变化特征上较不同,但在滑坡各个变形演化阶段的时间界限点较一致,表明了该动能和动能变化率指标在划分滑坡不同变形阶段及预警预报方面的可行性和有效性。

(3)结合4种预警曲线及勘察资料综合分析,该滑坡区域变形演化规律主要受雨水活动的影响,整体处于初始变形阶段到加速变形阶段之间;动能和动能变化率相较于原有的速率和加速度在突变区域变化相近,但在匀速阶段前者相较于后者更平缓 and 稳定,有利于精细地识别滑坡变形规律,可以降低对滑坡变形阶段的误判性。

(4)通过对这4种曲线进行归一化处理统一纵坐标,可以更清晰地识别出滑坡不同变形阶段的特

征,根据这些明显的特征和变化规律,更利于区分滑坡的变形演化阶段,进而达到预警预报的目的。

致谢: 本文的完成得到了中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司和华能澜沧江水电股份有限公司的大力支持,感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见和建议,谨此表达诚挚的感谢。

References

- Acharya A, Kogure T. 2023. Application of novel distributed fibre-optic sensing for slope deformation monitoring: A comprehensive review[J]. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 20: 8217–8240.
- Chung C C, Tran V, Azhar M. 2022. Guidelines from direct shear modeling in centrifuge for TDR landslide monitoring[J]. *Engineering Geology*, 310: 106870.
- Chen H, Li Y J, Fang R, et al. 2015. A novel technique for monitoring deep displacement and early-warning of landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(Supp.2): 4063–4070 (in Chinese with English abstract).
- Chen H, Tang H, Ge X R, et al. 2019. Research on early warning of creep landslide by early-warning indicators based on deep displacements[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(S1): 3015–3024 (in Chinese with English abstract).
- Chung C C, Wei S K, Tang H T. 2023. Optimal time domain reflectometry penetrometer design for soil water content and electrical conductivity profiling[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 46(1): 168–189.
- Dai Y, Dai W J, Yu W K. 2022. A landslide multi-objective weighted displacement back analysis method synthesizing ground and underground displacement monitoring data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(10): 2149–2159 (in Chinese with English abstract).
- Emanuele I, Giocanni G, Francesco M, et al. 2012. Design and implementation of a landslide early warning system[J]. *Engineering Geology*, 10(147/148): 124–136.
- Feng Z, Jin F X, Gong Y F. 2011. Monitoring and deformation failure analysis of red sandstone bedding slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(Suppl.2): 4078–4086 (in Chinese with English abstract).
- Guo Y X. 2014. Research on monitoring technology and application of high-steep slope and rockfall based on fiber bragg grating[D]. PhD Dissertation of Wuhan University of Technology (in Chinese with English abstract).
- He M C. 2009. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(6): 1081–1090 (in Chinese with English abstract).
- Jin X G, Wang L S, Li X H. 2001. Determination and advanced forecasting on slide plane position for landslide[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, (1): 14–16 (in Chinese with English abstract).
- Li C, Zhu J B, Wang B, et al. 2016. Critical deformation velocity of

- landslides in different deformation phases[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 35(7): 1407–1414 (in Chinese with English abstract).
- Liu J X, Guo C B, Wu R A, et al. 2024. Creeping deformation characteristics and stability analysis of Guilu large deep-seated landslide in Jiangda, Xizang[J]. Geological Bulletin of China, 43(10): 1855–1868 (in Chinese with English abstract).
- Sun Z B, Yang X L. 2010. Sliding characteristics analysis of land slide based on the deep displacement[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 7(2): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- Tan H H, Fu H L. 2010. Testing study of application of time domain reflectometry to highway slope monitoring[J]. Rock and Soil Mechanics, 31(4): 1331–1336 (in Chinese with English abstract).
- Tang X S, Zheng Y R, Tang H M, et al. 2013. Numerical researches on deformation characteristics and prediction of reservoir landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 35(5): 940–947 (in Chinese with English abstract).
- Tan Q L, Bai M Z, Zhou P G, et al. 2021. Geological hazard risk assessment of line landslide based on remotely sensed data and GIS[J]. Measurement, 169: 108370.
- Thapa P S, Adhikari B R, Shaw R, et al. 2023. Geomorphological analysis and early warning systems for landslide risk mitigation in Nepalese mid-hills[J]. Nat Hazards, 117: 1793–1812.
- Uwihirwe J, Hrachowitz M, Bogaard T, et al. 2022. Integration of observed and model-derived groundwater levels in landslide threshold models in Rwanda[J]. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22: 1723–1742.
- Wang Z G, He W, Wang K. 2012. Geological hazard prevention and environment protection for water conservancy and hydropower engineering[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 23(2): 70–74 (in Chinese with English abstract).
- Wang K, Zhang W Y, Ma F, et al. 2015. Monitoring Methods of Landslide Deep Deformation and Discussion on Their Application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 11(1): 204–209 (in Chinese with English abstract).
- Wang M H, Li Y, Pei Y Q. 2023. Disaster characteristics and stability evaluation of the Hanjin Beishan landslide group in Linxia Basin, Gansu Province[J]. Geological Bulletin of China, 42(2/3): 460–468 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Tang M G, Xu K X, et al. 2008. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(6): 1104–1112 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Zeng Y P. 2009. Research on acceleration variation characteristics of creep landslide and early-warning prediction indicator of critical sliding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(6): 1099–1106 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Yuan Y, Zeng Y P, et al. 2011. Some new pre-warning criteria for creep slope failure[J]. Science China-Technological Sciences, 54(Supp.1): 210–220.
- Xu Q. 2012. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data[J]. Journal of Engineering Geology, 20(2): 145–151 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Feng X T, Zhou H, et al. 2009. Research on dynamic early warning method of slope deformation monitoring during excavation based on designed safety factor and failure mode[J]. Rock and Soil Mechanics, 30(3): 603–612 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y F, Fan J W, Yuan K. 2023. Disaster-induced mechanisms and prevention and control new technologies of major landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 42(8): 1910–1927 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈贺, 李亚军, 房锐, 等. 2015. 滑坡深部位移监测新技术及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 34(增 2): 4063–4070.
- 陈贺, 汤华, 葛修润, 等. 2019. 基于深部位移的蠕滑型滑坡预警指标及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 38(S1): 3015–3024.
- 戴粤, 戴吾蛟, 余文坤. 2022. 综合地表与深部位移监测数据的滑坡多目标加权位移反分析方法[J]. 测绘学报, 51(10): 2149–2159.
- 冯振, 金福喜, 龚裔芳. 2011. 红砂岩顺层边坡监测及变形破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 30(增 2): 4078–4086.
- 郭永兴. 2014. 基于光纤光栅的高陡边坡及危岩落石监测技术与应用研究[D]. 武汉理工大学博士学位论文.
- 何满潮. 2009. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 28(6): 1081–1090.
- 靳晓光, 王兰生, 李晓红. 2001. 滑坡滑动面位置的确定及超前预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001(1): 14–16.
- 李聪, 朱杰兵, 汪斌, 等. 2016. 滑坡不同变形阶段演化规律与变形速率预警判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 35(7): 1407–1414.
- 刘吉鑫, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 2024. 西藏江达圭利大型深层滑坡蠕滑变形特征与稳定性分析[J]. 地质通报, 43(10): 1855–1868.
- 孙志彬, 杨小礼. 2010. 基于深部位移的边坡特征分析[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 7(2): 43–47.
- 谭捍华, 傅鹤林. 2010. TDR 技术在公路边坡监测中的应用实验[J]. 岩土力学, 31(4): 1331–1336.
- 唐晓松, 郑颖人, 唐辉明, 等. 2013. 水库滑坡变形特征和预测预报的数值研究[J]. 岩土工程学报, 35(5): 940–947.
- 王自高, 何伟, 王昆. 2012. 水利水电工程中地质灾害预防与地质环境保护对策探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 23(2): 70–74.
- 王凯, 张伟毅, 马飞, 等. 2015. 滑坡深部变形监测方法与应用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 11(1): 204–209.
- 汪美华, 李勇, 裴叶青. 2023. 甘肃临夏盆地韩集北山滑坡群致灾特征与稳定性评价[J]. 地质通报, 42(2/3): 460–468.
- 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 2008. 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, 27(6): 1104–1112.
- 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.
- 张振华, 冯夏庭, 周辉, 等. 2009. 基于设计安全系数及破坏模式的边坡开挖过程动态变形监测预警方法研究[J]. 岩土力学, 30(3): 603–612.
- 张玉芳, 范家玮, 袁坤. 2023. 重大滑坡灾变机制与防治新技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 42(8): 1910–1927.