

李超瑞, 汤明高, 周剑, 等. 乌东德水电站库区滑坡发育分布及蓄水响应规律[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 35-51. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.004

LI Chaorui, TANG Mingao, ZHOU Jian, et al. Distribution and impoundment response law of landslides in the reservoir area of Wudongde Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 35-51. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.004

乌东德水电站库区滑坡发育分布及蓄水响应规律

李超瑞^{1,2}, 汤明高^{1,2}, 周剑^{1,2}, 张乔峰^{1,2}, 李扬^{1,2}

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:【目的】乌东德水电站蓄水运行导致大量滑坡变形, 为了查明滑坡发育特征及蓄水变形响应规律【方法】采取 SBAS-InSAR、光学遥感解译、现场调查、数理统计与理论分析等方法, 调查研究了乌东德水电站蓄水诱发滑坡的数量、发育特征、变形规律及趋势。【结果】结果显示: 乌东德水库沿岸发育滑坡 62 处、其中涉水滑坡 39 处。滑坡集中分布在侏罗系、白垩系红层及元古界浅变质岩区域。滑坡的坡度为 10°~40°, 前后缘高差 200~800 m, 坡向为西或东, 斜坡类型多为凸型顺向岸坡, 滑面形态以直线或折线型为主。初次蓄水以来 39 处涉水滑坡共发生 114 次明显变形, 最大变形速率为 63.72 mm/a; 现阶段滑坡变形次数和变形速率呈逐年增长趋势, 处于活跃阶段; 滑坡变形趋势分为加速变形、匀速变形和减速趋稳变形, 其中加速变形滑坡占比 61.54%, 以顺向直线型、涉水程度较高的滑坡为主, 其蓄水响应显著、变形量大; 库水位下降对滑坡的影响程度大于库水位上升。【结论】揭示了乌东德水库滑坡变形规律, 为水库滑坡灾害预测与防治提供了科学依据。

关键词: 乌东德水电站; 滑坡; 发育分布; 变形规律; 发展趋势; 地质灾害; 影响因素; 水库蓄水

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.004

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0035-17



Distribution and impoundment response law of landslides in the reservoir area of Wudongde Hydropower Station

LI Chaorui^{1,2}, TANG Mingao^{1,2}, ZHOU Jian^{1,2}, ZHANG Qiaofeng^{1,2}, LI Yang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. College of Environment & Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] The impoundment operation of the Wudongde Hydropower Station has caused significant landslide deformation. In order to find out the development characteristics of landslide and the water storage response law of wading landslide deformation, [Methods] SBAS-InSAR, optical remote sensing interpretation, field surveys, mathematical statistics and

收稿日期: 2024-04-29; 修回日期: 2024-07-25; 录用日期: 2024-07-29; 网络出版日期: 2024-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977255)

作者简介: 李超瑞(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事地质灾害评价与预测研究。E-mail: 1443705441@qq.com

通信作者: 汤明高(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事地质灾害机理、评价预测及防治研究。E-mail: tmg@cdut.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

theoretical analysis were used to study the number, development characteristics, deformation patterns and trend of landslides induced by the impoundment of the Wudongde Hydropower Station. [Results] The result show that there are 62 landslides along the coast of Wudongde Reservoir, including 39 water-related landslides. These landslides are concentrated in Jurassic, Cretaceous red beds and Proterozoic shallow metamorphic rock areas. The slope of the landslide is $10^{\circ} \sim 40^{\circ}$, the height difference between the front and rear edges is 200~800 m, the slope types are mostly convex forward-facing slopes, with linear or fold line sliding surfaces being predominant. A total of 114 obvious deformations have occurred in 39 water-related landslides since the initial impoundment, and the maximum deformation rate is 63.72 mm/a. Currently, the number of landslide deformation and deformation rate are increasing year by year, which is in the active stage. The deformation trend of landslide is categorized into accelerated deformation, uniform deformation, and deceleration stabilization deformation. Among them, the accelerated deformation landslide accounts for 61.54%, which is dominated by the landslide with a straight line and a high degree of wading. Its water storage response is significant and the deformation is large. The influence of reservoir water level decline on landslide is greater than that of reservoir water level rise. [Conclusion] The deformation law of Wudongde reservoir landslide is revealed, which provides a scientific basis for the prediction and prevention of reservoir landslide disaster.

Keywords: Wudongde Hydropower Station; landslide; development and distribution; deformation law; development trend; geological hazards; influencing factors; reservoir storage

0 引言

大型水电站蓄水运行易诱发库岸变形失稳, 水库诱发的灾难性滑坡将威胁周边地区居民生命财产安全和水电工程的稳定运行, 例如, 三峡库区的千将坪滑坡、树坪滑坡、白水河滑坡等^[1-2], 溪洛渡库区的黄坪滑坡、青杠坪滑坡等^[3], 白鹤滩库区的王家山滑坡等^[4-5], 造成大量的人员伤亡或巨大的财产损失。

光学遥感和合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)具有覆盖范围广、高精度和低成本等明显优势, 常用于区域滑坡发育分布规律的研究^[6-7]。例如, 金沙江下游永善段^[8]、金沙江白格滑坡上下游^[9]、白鹤滩库区葫芦口镇至象鼻岭段^[3]等滑坡识别与变形监测研究, 普遍认为地形地貌、地层岩性和地质构造等是控制滑坡发育和分布的关键因素, 地震、降雨、人类工程活动以及水库蓄水等是滑坡产生的重要影响因素^[8-10]。部分学者曾经对乌东德库区滑坡发育分布规律进行了相关研究, 但是以个案或局部区域为主, 缺乏对整个乌东德库区滑坡的系统调查分析^[11-12]。

水库蓄水运行诱发滑坡变形机理及规律较为复杂, 库水位的周期性变化会影响地下水位, 改变坡体渗流场和受力状态, 从而造成滑坡的稳定性降低^[13]。JONES^[14]调查分析了Roosevel湖附近地区1941—1953年发生的滑坡, 其中有49%发生在蓄水初期, 30%发生在水位骤降10~20 m的情况下。Grand Coulee水库在1941年建成蓄水后的12年内先后共发生滑坡500起, 其中49%发生在蓄水后2年内^[14]。日本水库滑坡约40%发生在水位上升时期、包括初

期蓄水时期, 约60%的发生在库水位骤降时期^[15]。RIEMER^[16]统计了60个水库滑坡实例, 得出85%的滑坡发生在建设或蓄水期, 或工程完工2年内。ICOLD^[17]对6个国家50座水库的105个滑坡事件进行了统计, 发现75%的滑坡为既有滑坡在水库蓄水运行后产生复活。王士天等^[18]对我国水库岸坡破坏时间进行了统计, 结果表明40%~49%库岸失稳破坏发生在库水位上升阶段, 30%发生在水位下降阶段, 库水急剧下降阶段对大型库岸滑坡的破坏尤为严重。三峡库区在国家的六五和七五期间开展了大量的滑坡勘察和研究, 对建坝蓄水前后一些大型滑坡体进行了分析和评价, 认为稳定性较差和正在变形的较厚的松散堆积层滑坡在蓄水后产生剧烈变形^[1-2]。李永康^[16]统计了三峡库区滑坡复活变形对不同蓄水高程的响应, 结果表明135 m蓄水高程滑坡响应数量多, 响应程度小; 156 m蓄水高程滑坡响应数量少, 响应程度大; 175 m试验性蓄水及175 m正常调度运行滑坡响应数量少, 响应程度小。李松林等^[15]统计分析了三峡库区593处滑坡, 库水位升降作用是诱发滑坡复活变形的主导因素, 在蓄水初期滑坡数量增加尤为明显, 弧形和直线形滑坡主要在库水位下降阶段发生变形, 尤其是首次蓄水至历史最高水位后的下降期, 靠椅型和折线型滑坡变形集中在首次135 m和175 m蓄水的水位上升阶段, 部分直线形滑坡对库水位下降的响应滞后, 在低水位运行期发生变形。汤明高和杨何等^[1-19]统计了三峡库区674处滑坡, 分析表明三峡库区滑坡活动与水库蓄水过程具有显著的相关性, 在分阶段蓄水期的滑坡变形主要发生在库水位上升及稳

定阶段, 占比 64.1%, 在运行期的滑坡变形主要发生在库水位下降及稳定阶段, 占比 75.7%, 随后库水位“上升—下降”循环中, 滑坡数量逐年减少。可见, 水库蓄水运行诱发滑坡的变形规律, 具有一定的共性、也存在明显差异。

乌东德水电站是中国第四、世界第七的水电站, 于 2020 年 5 月开始蓄水, 由于地质环境复杂, 岸坡高陡, 堆积层发育, 水库蓄水运行导致大量滑坡复活变形。目前大多针对单体滑坡进行了变形破坏特征和机理分析, 例如, 小汉头滑坡、必油照滑坡和新村滑坡等^[11-12], 而对于整个库区滑坡变形的蓄水响应规律缺乏认识。为此, 本文通过查阅资料、SBAS-InSAR 融合光学遥感和野外调查, 较系统的分析查明了乌东德库区滑坡数量、发育分布特征及变形演化规律, 特别是 39 处涉水滑坡的蓄水响应规律。可为乌东德库区滑坡灾害防治提供科技支撑, 对水库滑坡灾害防治具有现实意义。

1 研究区概况

乌东德水电站是金沙江下游巨型梯级水库(攀枝花市至宜宾市)的龙头电站, 坝址所处河段右岸隶属云南省禄劝县, 左岸隶属四川省会东县。电站于

2020 年 1 月开始第一阶段下闸蓄水, 水库正常蓄水位 975 m, 汛限制水位 952 m, 死水位 945 m, 总库容 74.08 亿 m³。

库区从坝址至雅砻江河口段, 跨云南、四川两省七县一市, 干流长达 206.7 km, 汇集雅砻江、龙川江、勐果河、尘河、鲡鱼河等支流, 流域内降雨集中在 6—10 月, 月均降雨量达 600~800 mm, 地质构造以川滇南北构造带为主体, 断裂明显, 褶皱次之, 出露地层包含下元古界康定群、中元古界会理群变质岩系, 震旦系的砂砾岩和碳酸盐岩, 三迭系、侏罗系和白垩系的碎屑岩类以及不同侵入时期的岩浆岩, 地表新生界第四系堆积物较多(见图 1)。

2 数据和方法

2.1 数据来源

数据来源于欧空局 (<https://dataspace.copernicus.eu/>) 和美国航天局 (<https://search.asf.alaska.edu/>), 涵盖了研究区 2019 年 1 月—2023 年 7 月 Sentinel-1 卫星 53 景升轨数据和 56 景降轨数据, 基本参数如表 1 所列。此外, 利用 ALOS 12.5 m 精度的 DEM 数据和精密轨道文件对 SAR 数据进行预处理, 以消除 SAR 数据本身的系统误差, 下载

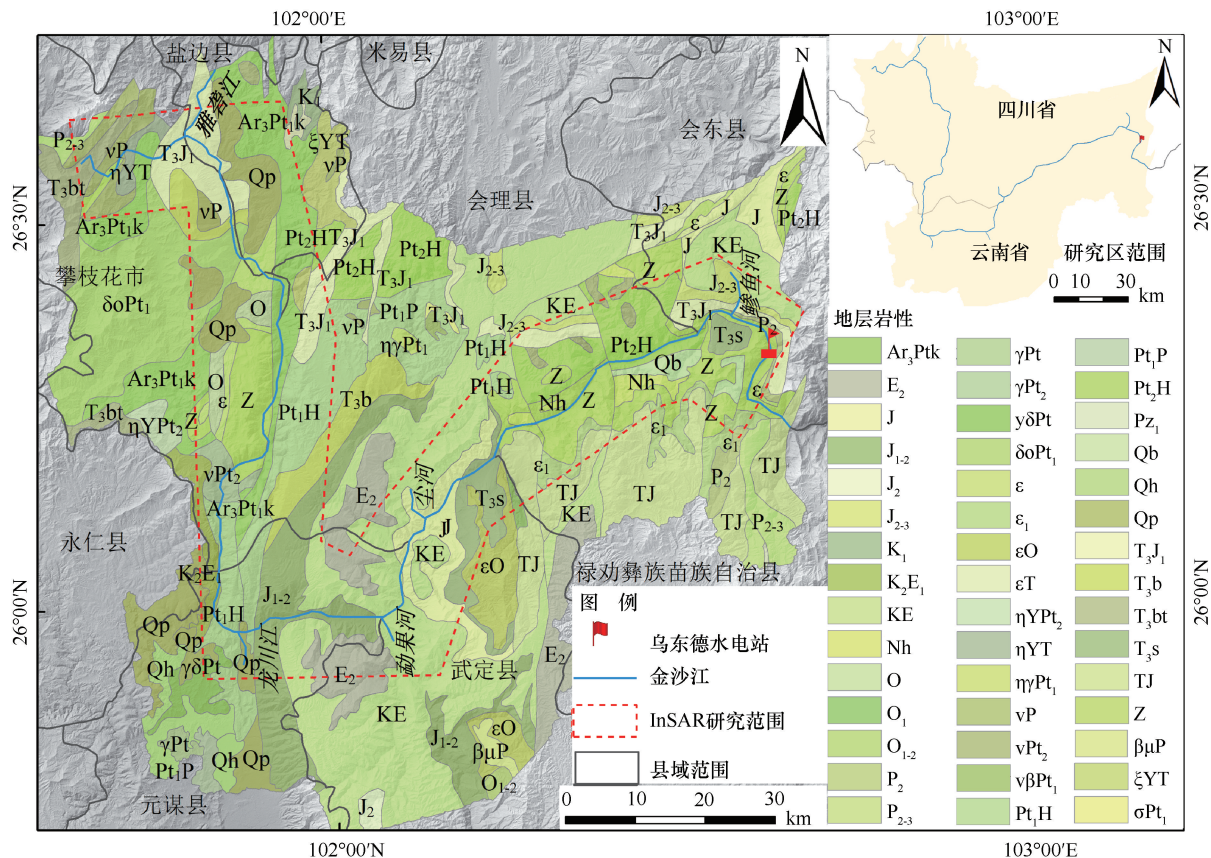


图 1 研究区地形及岩性

Fig. 1 Topography and lithology map of the study area

表 1 Sentinel-1 影像基本参数

Table 1 Basic parameters of Sentinel-1 images

卫星	成像模式	产品格式	波段	地面分辨率	轨道方向	极化方式	影像数量	时间覆盖
Sentinel-1	IW	SLC	C	5×20	升轨	VV	53	2019年1月—2023年5月
Sentinel-1	IW	SLC	C	5×20	降轨	VV	56	2019年1月—2023年7月

Sentinel-2 多光谱影像和 Google earth 高精度遥感影像, 解译滑坡基本信息。

2.2 研究方法

首先应用 SBAS-InSAR 技术对滑坡进行形变分析, 结合 Sentinel-2(10 m 分辨率)与 Google earth 高精度遥感影像对滑坡进行解译识别。其次采用无人机测量和人工调查核查滑坡, 利用 GIS 软件提取滑坡形变数据, 统计建立乌东德库区滑坡数据库。最后分析库区滑坡分布特征和蓄水变形响应规律。技术路线如图 2 所示。

2.2.1 SBAS-InSAR 技术

乌东德库区位于高山峡谷区, 地形复杂, 滑坡灾害较为隐蔽, 单一的人工调查手段难以识别。SBAS-InSAR 技术具有时空优势、数据精度高, 适用于高山峡谷区广域滑坡识别。通过对 SAR 影像进行处理, 生成干涉图集合, 进而增加单个主影像条件下的干涉

图数量, 降低时空失相干对干涉图质量的影响^[9], 分析提取地表形变、识别滑坡隐患。处理流程如图 2 所示。

2.2.2 光学遥感影像解译方法

通过 Sentinel-2 多光谱影像和 Google earth 高分辨率影像, 对乌东德库区潜在滑坡进行人工目视解译。解译中的滑坡特征包括: (1) 滑坡区域局部垮塌滑落, 垮塌部分颜色呈灰白色较周围颜色浅; (2) 滑坡两侧边界常以明显冲沟为界, 后缘拉裂缝明显; (3) 与周围斜坡有差异, 坡体呈平缓或凹地形; (4) 滑坡区域纹理粗糙, 表面凹凸不平^[8](见图 3), 同时现场进行无人机摄影测量和人工调查核实。

3 滑坡发育分布特征

3.1 滑坡空间分布特征

基于 SBAS-InSAR 技术, 分别获得升轨和降轨的形变速率(见图 4 和图 5), 结合光学遥感影像及无

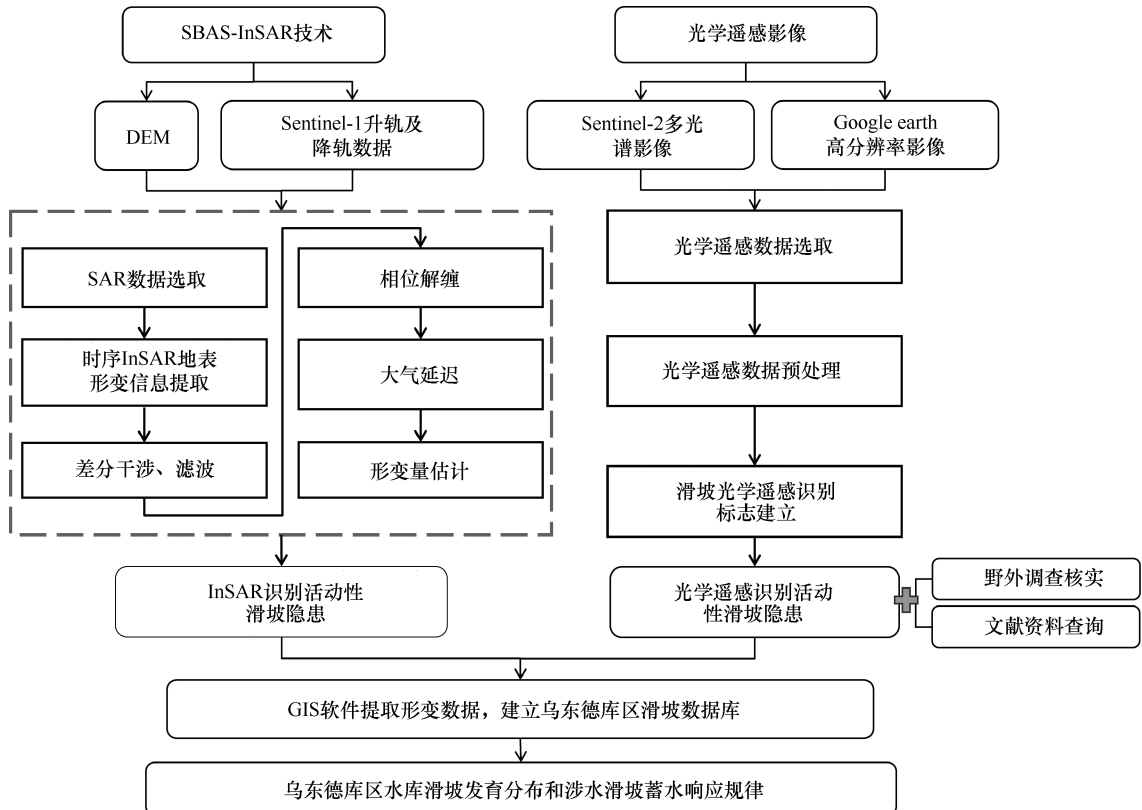


图 2 技术路线

Fig. 2 Technical route

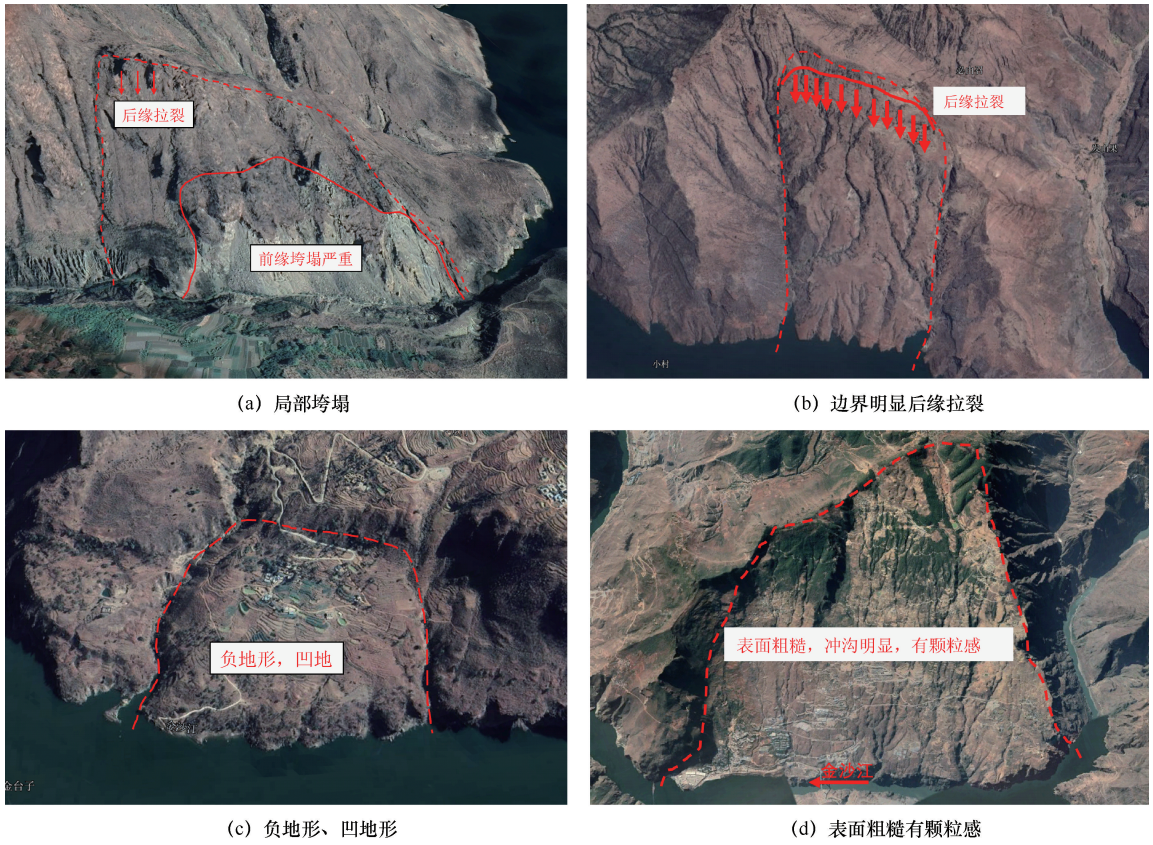


图3 滑坡识别标志

Fig. 3 Landslide identification signs

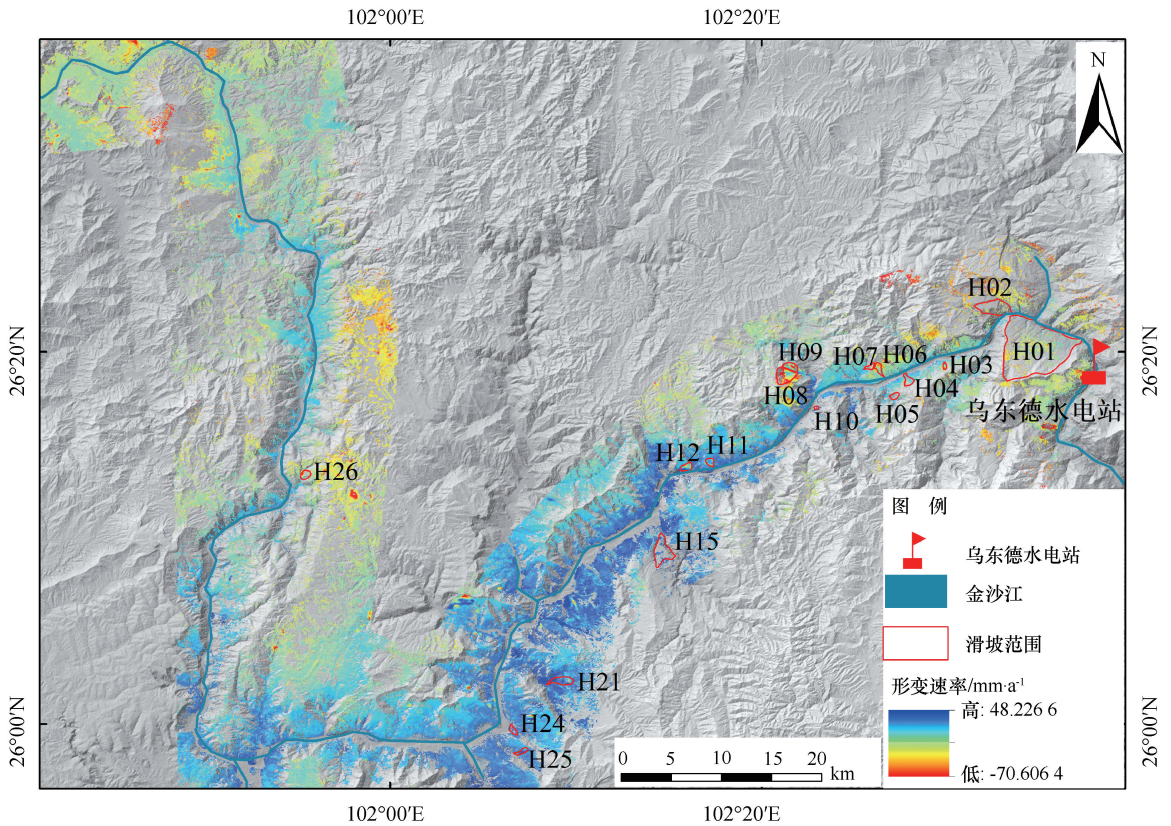


图4 升轨 InSAR 识别结果

Fig. 4 Identification results of de-orbiting InSAR

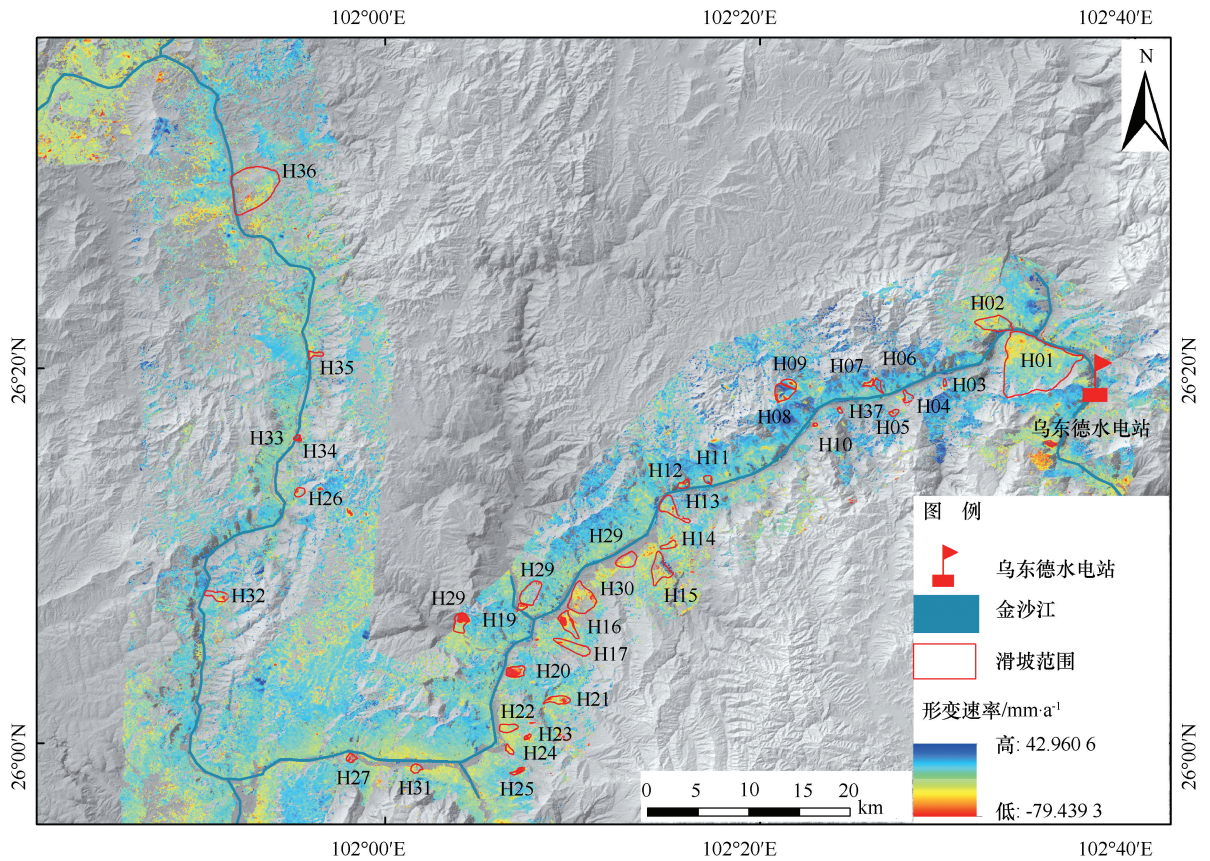


图5 降轨 InSAR 识别结果

Fig. 5 Identification results of ascending InSAR

人机摄影测量, 剔除受人类工程活动影响的形变区, 识别出 37 处滑坡 (H01 ~ H37), 其中 Sentinel-1 升轨卫星识别出 17 处滑坡, Sentinel-1 降轨卫星识别 37 处滑坡。采用 GoogleEarth 三维卫星影像, 结合高分辨率遥感影像叠加分析, 最终圈定 62 处滑坡 (见图 6), 其中 37 处滑坡与 InSAR 结果相吻合。

滑坡分布距离坝址最近为 6.31 km, 最远为 79.75 km。滑坡在库首—中武山村段和黄家村西沟—白马口村段集中发育, 龙川江—雅砻江段河流右岸不发育, 其他地段零散稀疏分布。滑坡总面积 11 642 万 m^2 , 其中新村滑坡的面积最大、为 2 700 万 m^2 。滑坡的最大形变速率为 63.72 mm/a , 变形特征显著, 有的滑坡前缘强烈变形、甚至滑塌, 有的滑坡后缘拉裂、下错陡坎, 导致道路塌方和房屋倒塌。

3.2 滑坡控制和影响因素

3.2.1 地形地貌

选取前后缘高程差、坡度、坡向、岸坡结构类型、坡面形态和滑面形态等因素, 统计分析了滑坡的发育特征。滑坡前后缘高程差集中在 200 ~ 800 m 范围, 共 44 处, 占比 70.97%; 参考前人对坡度划

分^[20-21], 滑坡发育的优势坡度为 $10^\circ \sim 40^\circ$, 其中 $20^\circ \sim 30^\circ$ 集中分布, 占比 40.68%; 库区范围内河床段主要呈南北走向, 滑坡沿岸分布, 坡向以 W 和 E 向为主; 岸坡结构分为顺向坡、斜向坡、横向坡和逆向坡, 其中顺向坡中滑坡数量最多, 共 26 处, 占比 41.94%; 滑坡按坡面形态分为直线型坡、凹型坡、凸型坡和阶梯型坡^[22], 其中凸型坡面的滑坡数量最多, 共 21 处, 占比 33.8%, 阶梯型滑坡虽最少, 但平均累计位移最大; 滑坡按滑面形态分为弧线型、靠椅型、折线型和直线型^[23], 主要发育折线型和直线型滑坡, 靠椅型滑坡尽管数量少, 但平均累计位移最大 (见图 7)。总体来看, 乌东德水库滑坡主要分布于坡度 $10^\circ \sim 40^\circ$ 、坡向为西或东、相对高差 200 ~ 800 m、滑面形态为直线或折线型的凸型顺向岸坡。

3.2.2 地层岩性

参照《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)^[24], 将乌东德库区划分为 5 类岩组: 坚硬岩组、较坚硬岩组、较软弱岩组、软弱岩组、松散岩组 (见图 8)。库区滑坡发育受地层岩性控制, 较软弱

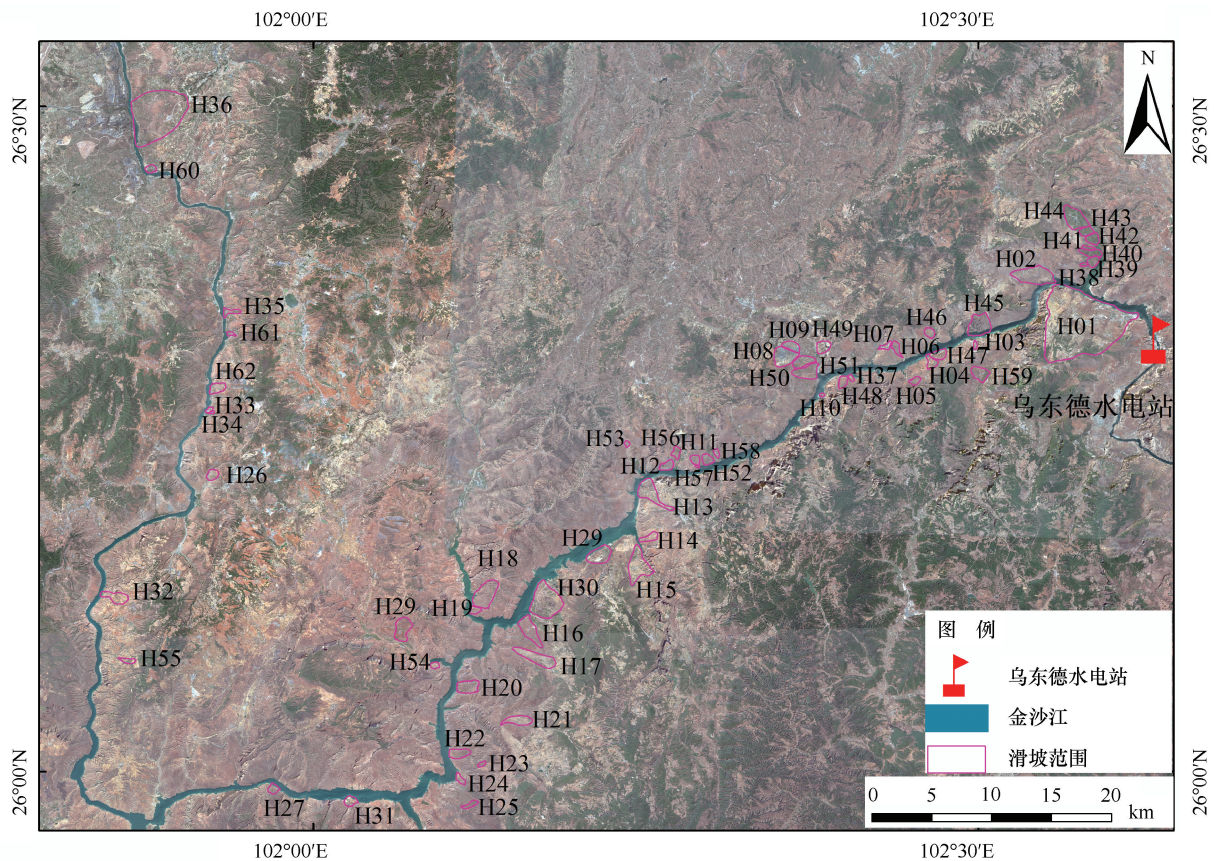


图6 光学遥感识别结果

Fig. 6 Optical remote sensing recognition results

岩组(侏罗系和白垩系构成的红层)和软弱岩组(元古界浅变质岩)主要分布于鲮鱼河支流段、志力新村-龙川江段及龙川江以上库段左岸,其中共发育滑坡数量49处,占比79.03%;龙川江以上库段右岸以坚硬岩组(晋宁期花岗岩、石英闪长岩)为主,无滑坡发育。

3.2.3 地质构造

库区断裂带呈南北向分布,其中龙川江—雅砻江段,昔格达断裂带呈南北向贯穿,断裂两侧滑坡分布均匀,其他河段无断裂贯穿,断裂对其滑坡发育无明显控制(见图9)。

3.2.4 涉水情况

水库滑坡的发育分布与其涉水情况息息相关。按照滑坡前缘是否与最高库水位接触,将其分为未涉水滑坡和涉水滑坡两类,采用高程淹没比 P 来表征滑坡涉水程度,其计算公式为

$$P = \frac{h_{\max} - h_1}{h_2 - h_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, h_1 为前缘高程(m); h_2 为后缘高程(m); h_{\max} 为最高库水(m)。

如图10和图11所示,研究区涉水滑坡共39处,占比62.9%,其中84.62%涉水滑坡的高程淹没比在1/4滑坡高度以下,可见库区涉水滑坡以坡体前部涉水为主;涉水滑坡淹没程度与滑坡累计变形位移呈正相关,可见前缘受库水的冲刷、浸泡,以及库水位升降引起的静、动水压力等作用,滑坡前缘抗滑力下降而产生变形,滑坡稳定性随涉水程度的增加而降低^[25-26]。

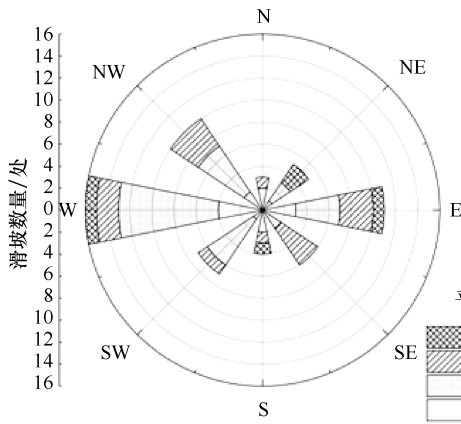
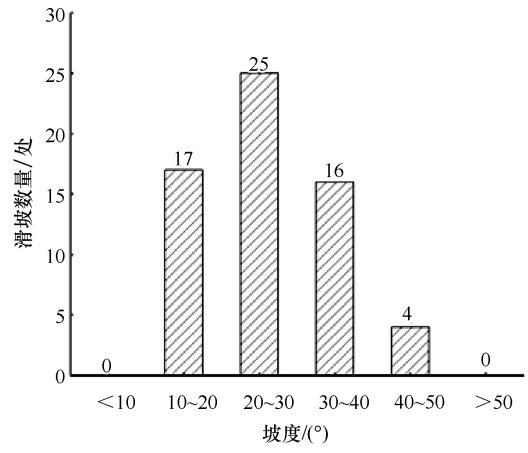
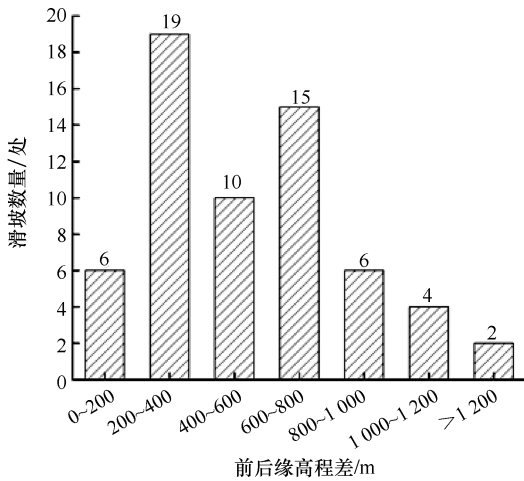
4 涉水滑坡变形蓄水响应规律

4.1 涉水滑坡变形状态分类

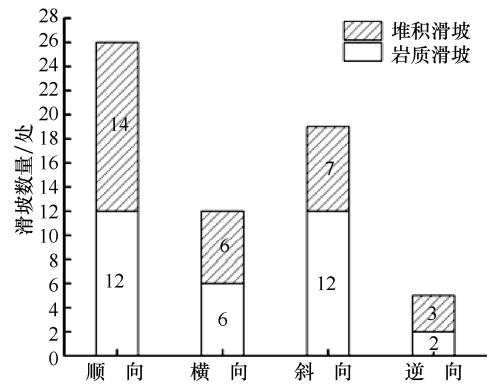
根据乌东德库区39处涉水滑坡的累计位移曲线分析,滑坡变形状态及趋势分为如下3种类型。

4.1.1 加速变形状态

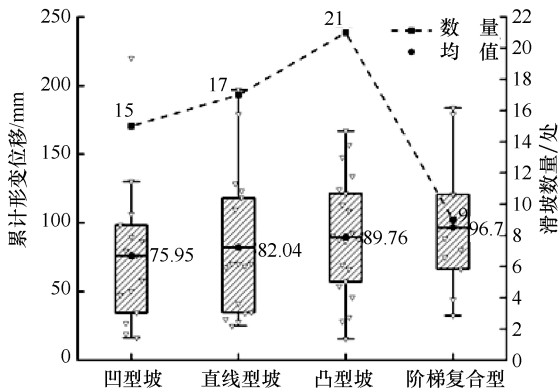
这类滑坡在水库蓄水前表现为缓慢变形或趋于稳定状态,蓄水后复活或变形加剧。累计位移曲线具有明显转折点。根据转折点出现的时间又分为蓄水初期变形响应和正常运行期变形响应。蓄水初期的典型代表例如必油照滑坡,其累计位移曲线转折点出现在初次蓄水期内,经历首次蓄水后,曲线斜率突增,变形快速响应,在后续库水位下降阶段,滑坡加速变形,



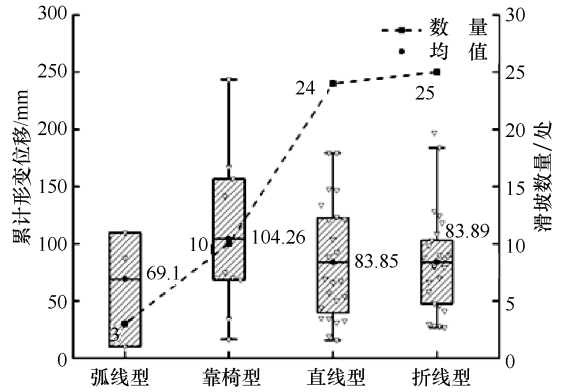
(c) 滑坡与坡向关系



(d) 滑坡与斜坡结构类型关系



(e) 滑坡与坡面形态关系



(f) 滑坡与滑面形态关系

图7 滑坡与地形地貌影响因素关系

Fig. 7 Relationship between landslide and topography influencing factors

库水位上升阶段, 滑坡变形放缓, 曲线呈“周期阶跃型”(见图12和图13)。正常运行期的典型代表例如新村滑坡, 其累计位移曲线转折点出现在水库正常运行期内, 在初次蓄水后曲线斜率无明显变化, 而在初次蓄水后第三个水文周年水位上升阶

段, 曲线斜率激增, 滑坡呈现显著变形(见图14和图15)。

4.1.2 匀速变形状态

这类滑坡累计形变位移曲线无明显转折点, 曲线斜率基本无变化。典型代表案例如羊咕嘟村滑坡-1,

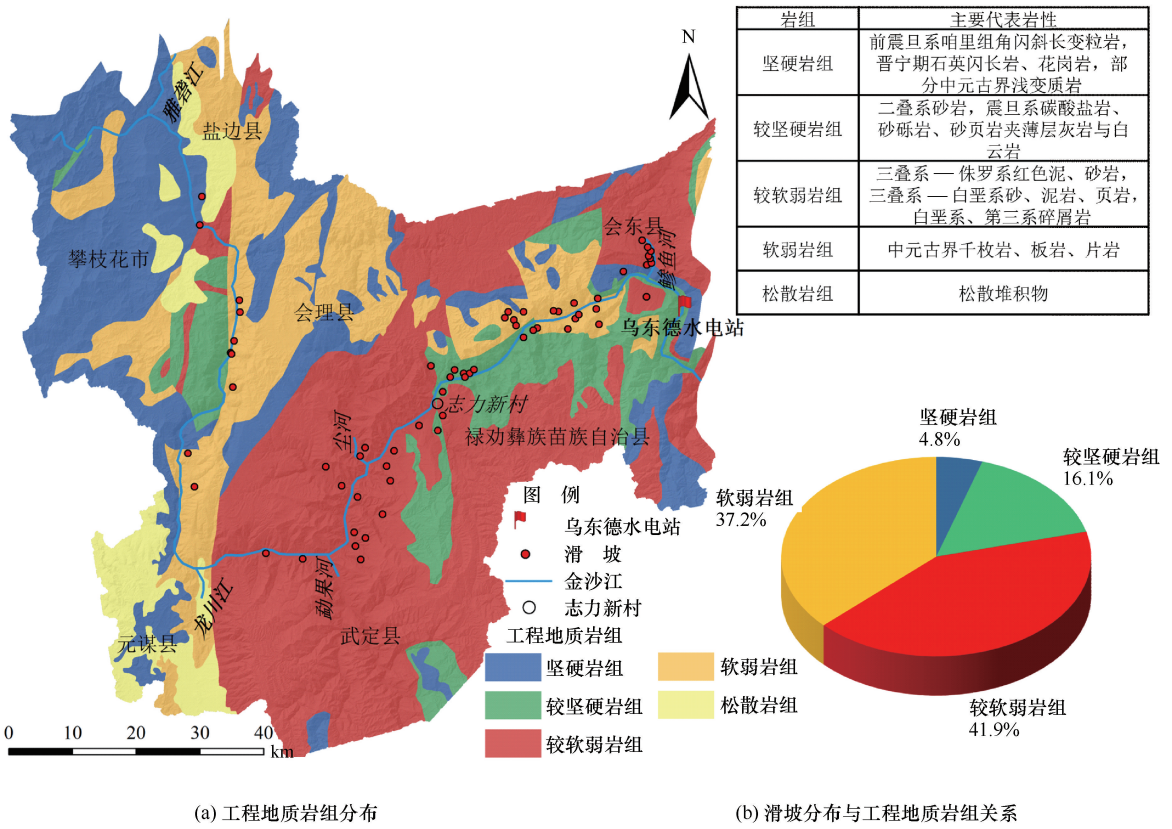


图 8 乌东德库区工程地质岩组分布

Fig. 8 Distribution map of engineering geological rock groups in Wudongde reservoir area

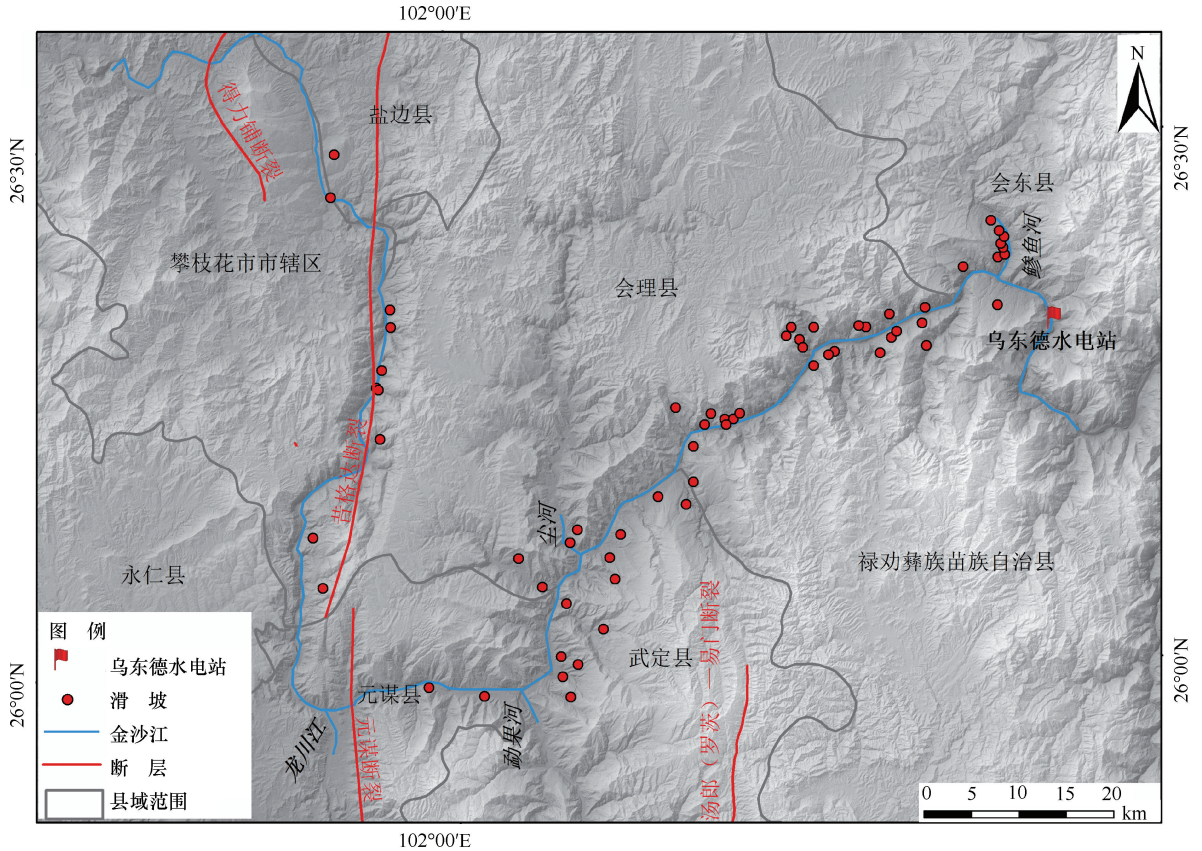


图 9 研究区断裂与滑坡位置分布

Fig. 9 Location distribution of faults and landslides in the study area

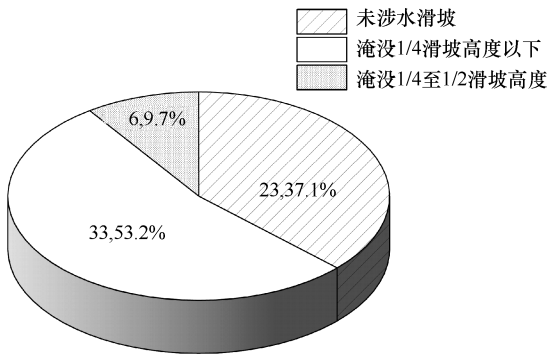


图 10 滑坡涉水情况

Fig. 10 Landslide wading situation

其在蓄水前后形变速率相对稳定, 无明显波动, 滑坡整体或局部范围呈匀速变形(见图 16 和图 17)。

4.1.3 减速趋稳变形状态

这类滑坡在蓄水前存在多次明显变形, 蓄水后随着库水位升降未出现新的变形或变形趋缓, 累计位移曲线表现为快速收敛。典型代表案例如下村滑坡(见图 18 和图 19)。

4.2 涉水滑坡对库水位波动的响应规律

4.2.1 变形状态响应特征

通过涉水滑坡变形状态及趋势的统计分析,

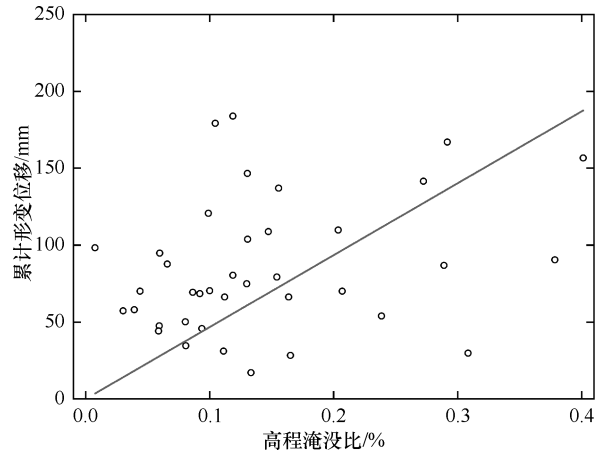


图 11 累计变形位移与高程淹没比关系

Fig. 11 Relationship between elevation submergence ratio and cumulative deformation

24处滑坡在蓄水后进入复活加速变形状态, 占比 61.54%; 8处保持匀速变形, 占比 20.51%; 7处呈现减速趋稳变形状态, 占比 17.95%。大多数涉水滑坡受水库蓄水的影响, 表现出变形加剧特征。复活加速变形滑坡中, 直线型滑面滑坡为主, 共 10处, 占比 41.67%; 其次是折线型, 共 7处, 占比 29.17%。相比之下, 匀速变形滑坡和减速趋稳变形滑坡多呈

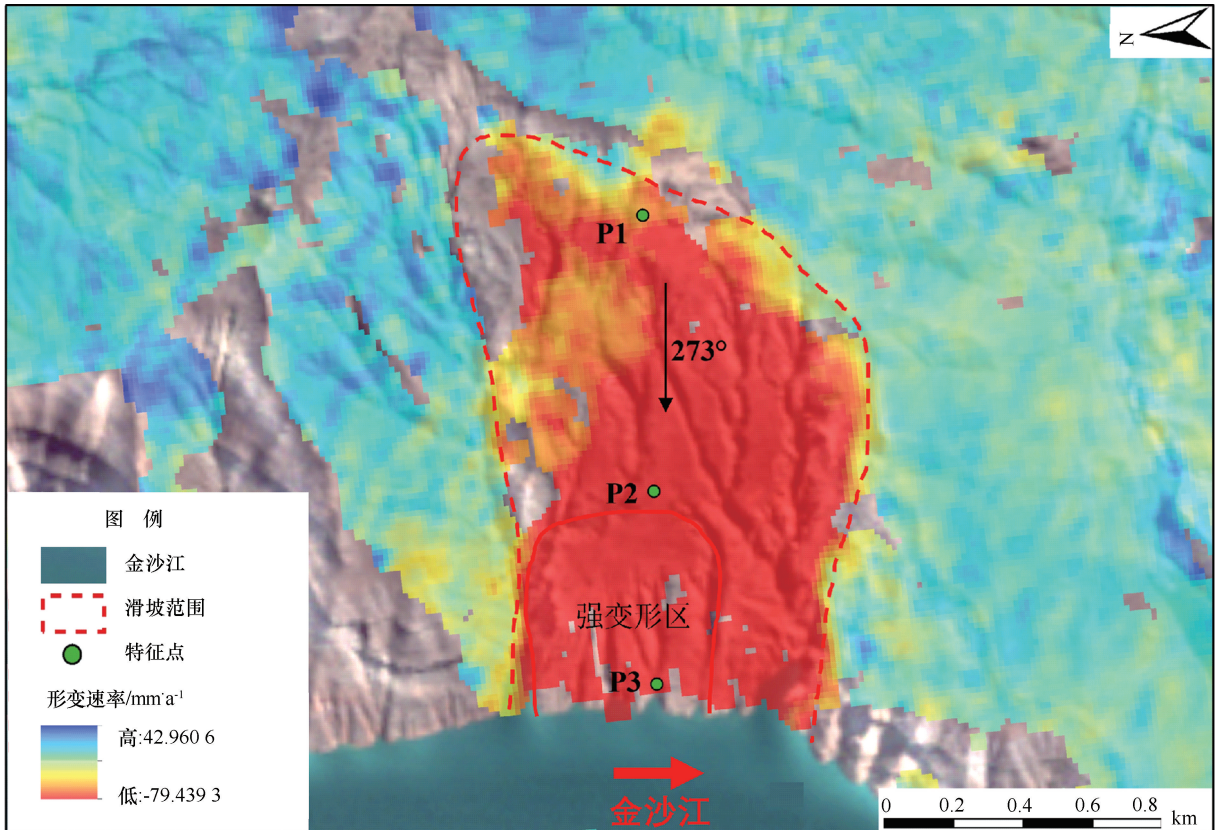


图 12 必油照滑坡形变速率

Fig. 12 Biyouzhao landslide deformation rate diagram

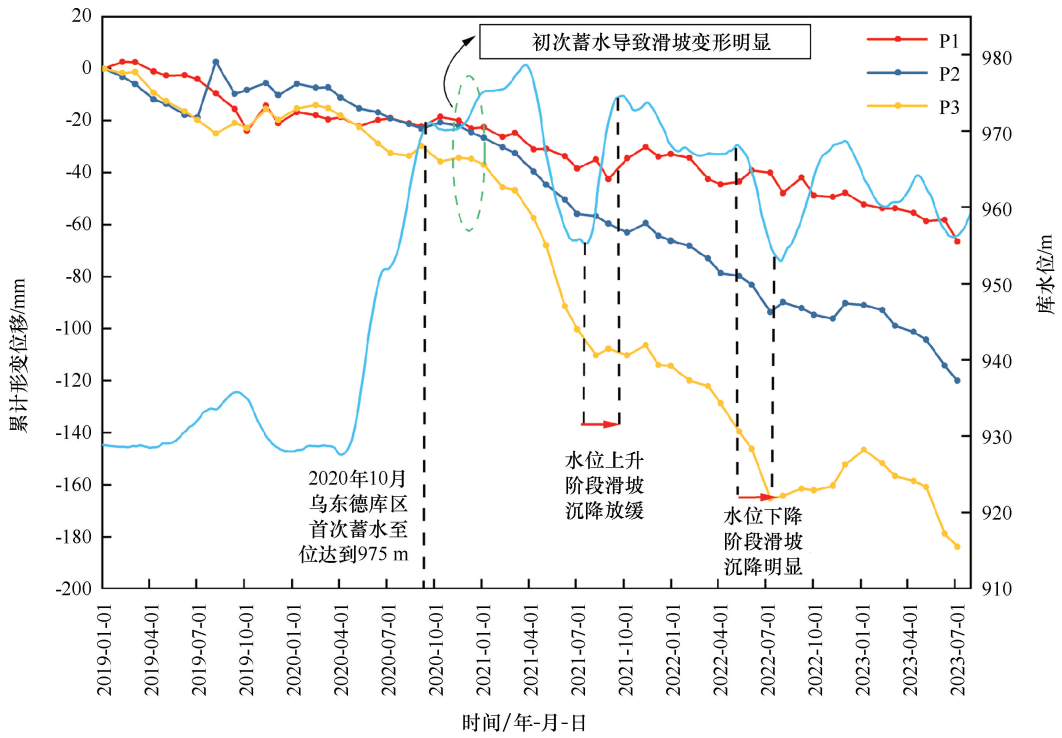


图 13 必油照滑坡累积位移曲线与水库蓄水关系

Fig. 13 Relationship between cumulative displacement curve of Biyouzhao landslide and reservoir water storage

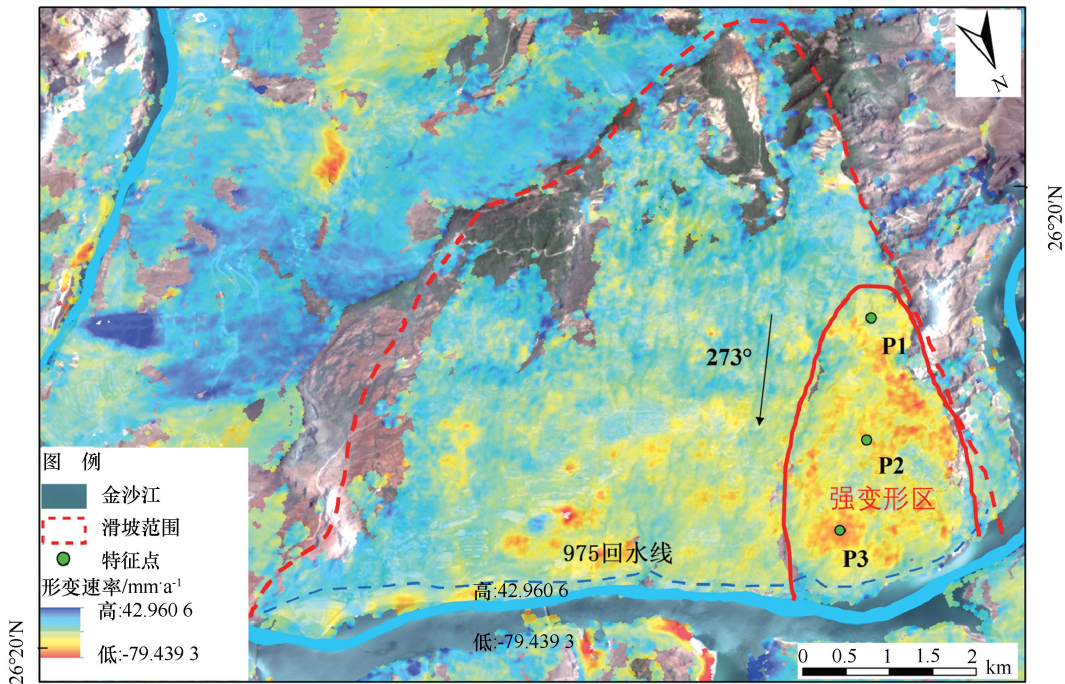


图 14 新村滑坡形变速率

Fig. 14 Xincun landslide deformation rate map

现折线型滑动面。此外, 复活加速变形滑坡主要发育于顺向斜坡中, 共 16 处, 占比 66.7%; 而逆向斜坡中发育最少, 共 3 处, 占比 12.5%; 匀速变形滑坡和

减速趋稳变形滑坡则多发育于斜向斜坡(见图 20 和图 21)。

可见, 不同的滑面形态和斜坡结构对库水作用的

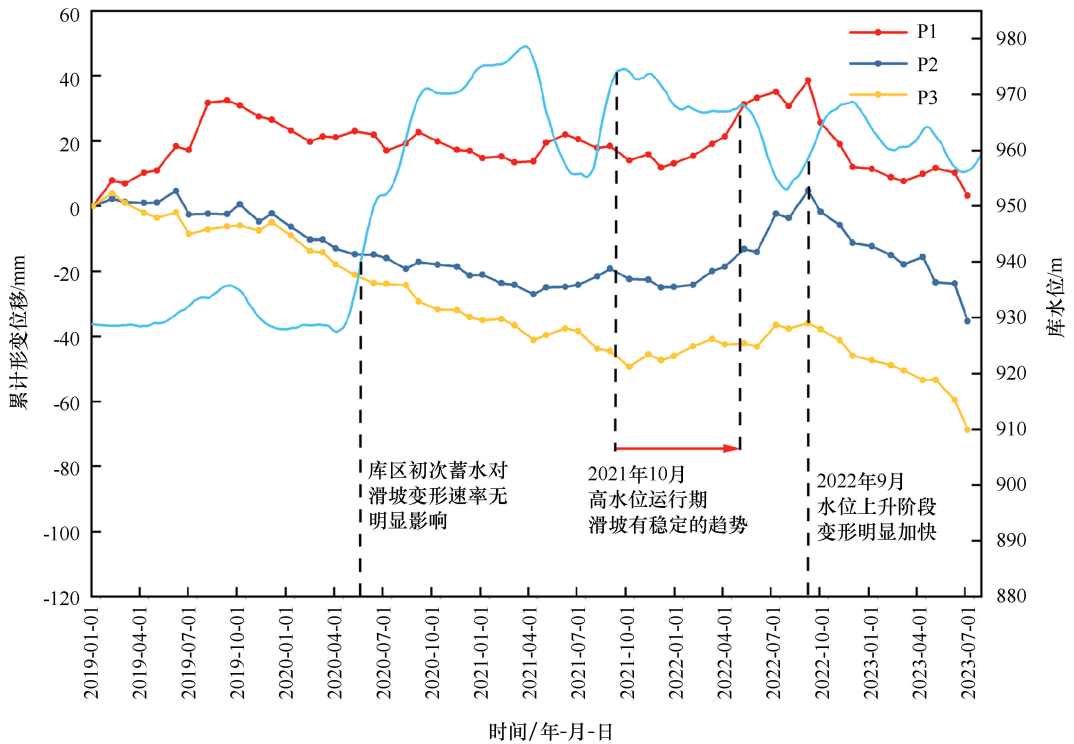


图 15 新村滑坡累积位移曲线与水库蓄水关系

Fig. 15 Relationship between Xincun landslide cumulative displacement curve and reservoir water storage

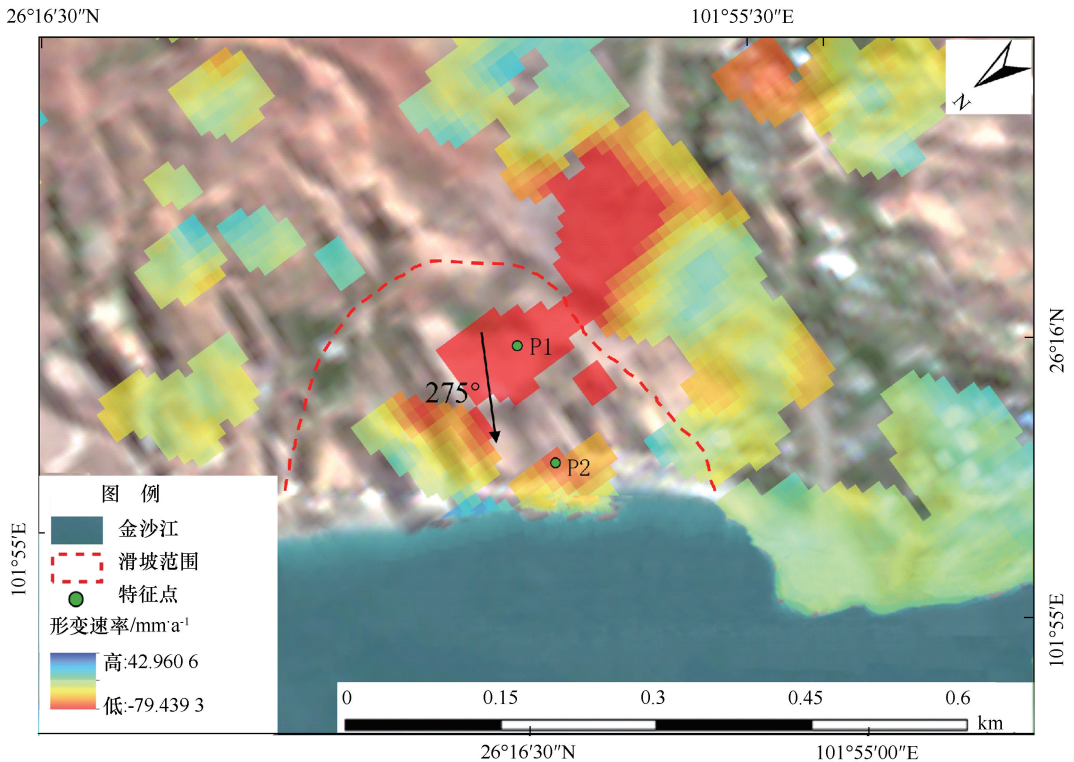


图 16 羊咕嘟村滑坡-1 形变速率

Fig. 16 Deformation rate diagram of Yanggudu Village Landslide-1

敏感性不同。顺向直线型滑坡受蓄水响应尤为显著, 这是因为顺向直线型滑坡的潜在滑动方向与地层倾向

一致, 滑面形态平直连续, 无明显抗滑段, 对库水升降影响敏感, 降低滑坡稳定性^[25-26]。

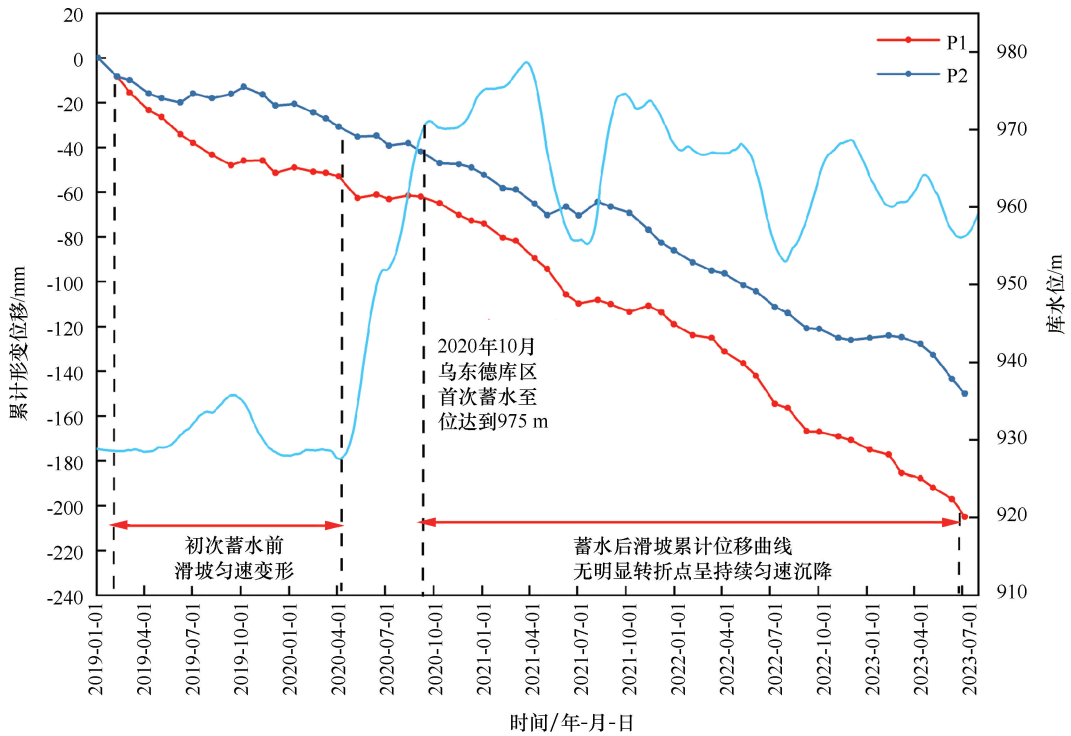


图 17 羊咕嘟村滑坡-1 累积位移曲线与水库蓄水关系

Fig. 17 The relationship between the cumulative displacement curve of Yanggudu Village Landslide-1 and the reservoir water storage

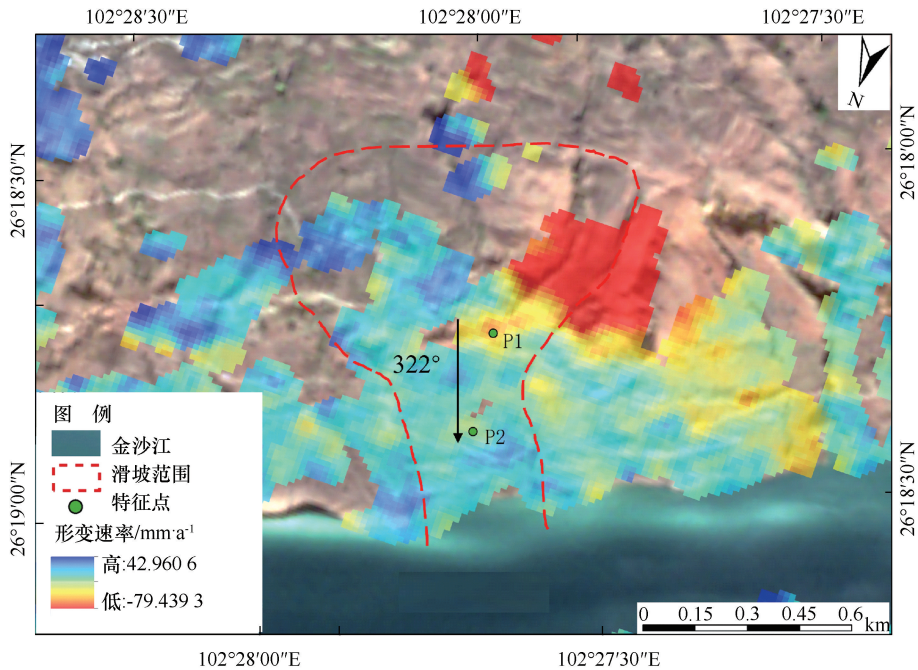


图 18 下村滑坡形变速率

Fig. 18 Deformation rate diagram of Xiaocun landslide

4.2.2 变形速率和变形次数响应特征

根据乌东德水库水位升降规律分为三个水文周年：2020年5月—2021年7月（首次蓄水至975 m高程），2021年7月—2022年8月和2022年8月—

2023年7月。每个水文周年包含上升阶段、高水位运行期、下降阶段和低水位运行期。通过统计39处涉水滑坡各阶段的形变速率，将速率超过 15×10^{-2} mm/d的形变定义为明显变形，共计114次明显变形。以形变

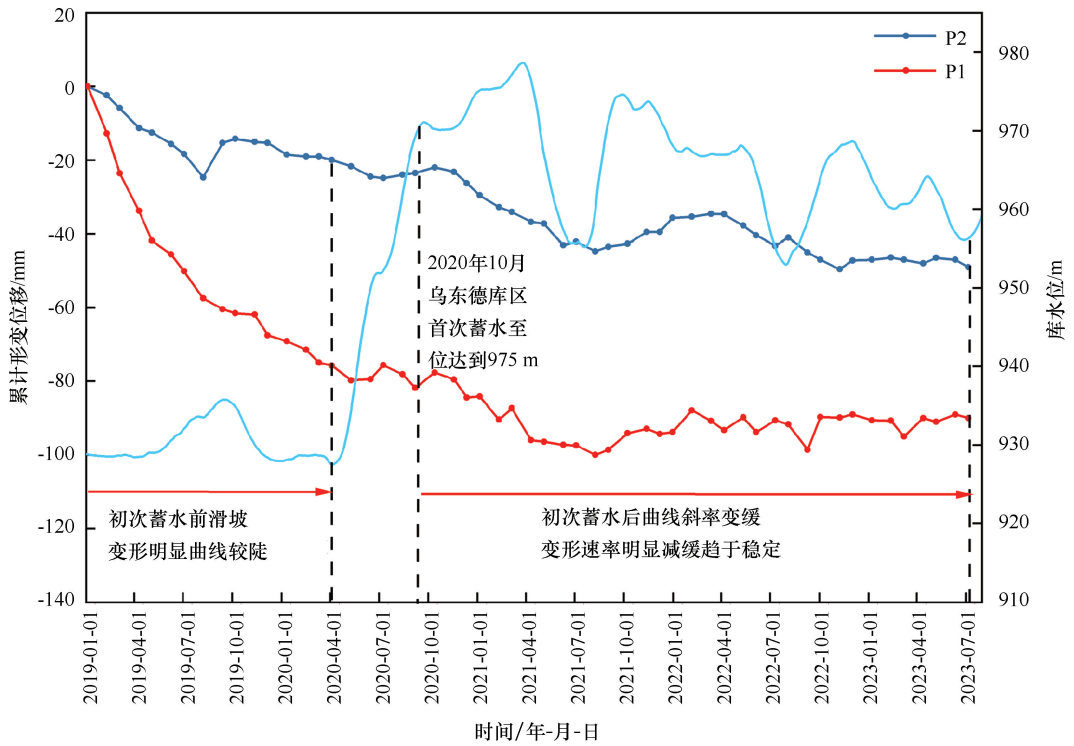


图 19 下村滑坡累积位移曲线与水库蓄水相关关系

Fig. 19 Correlation between Xiaocun landslide cumulative displacement curve and reservoir water storage

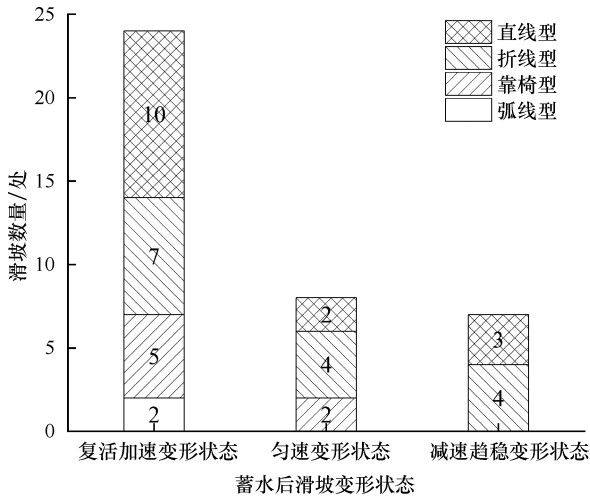


图 20 滑坡变形状态与滑面形态关系

Fig. 20 Relationship between landslide deformation state and slip surface morphology

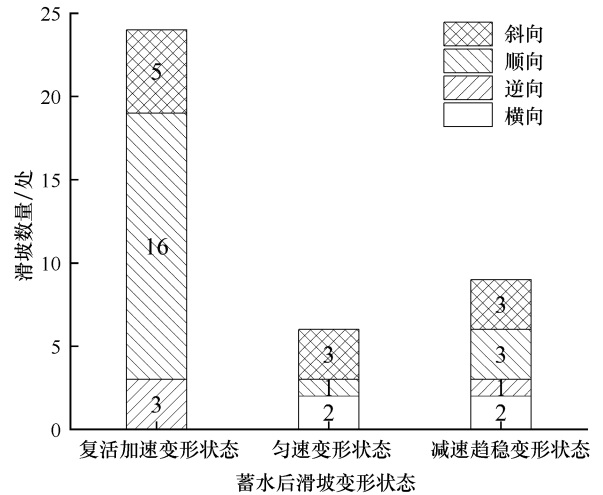


图 21 滑坡变形状态与斜坡结构关系

Fig. 21 Relationship between landslide deformation state and slope structure

速率和变形次数作为库区涉水滑坡活动的直观指标, 反映滑坡活动的强度和频率, 分析得出以下结果。

如图 22 和图 23 所示, 前两个水文周年中, 滑坡平均形变速率顺序为: 下降阶段>低水位运行期>上升阶段>高水位运行期。第三个水文周年中, 速率顺序变为: 下降阶段>上升阶段>低水位运行期>高水位运行期。滑坡各阶段的平均形变速率逐年增加, 三

次水文周期中均呈现滑坡在库水位下降时平均形变速率最大, 第三次水文周期的平均形变速率达到 $32.365 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$ 。滑坡平均形变速率大小关系为: 下降阶段 ($32.365 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$) > 上升阶段 ($27.262 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$) > 低水位运行期 ($26.532 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$) > 高水位运行期 ($19.588 \times 10^{-2} \text{ mm/d}$), 说明滑坡活动强度受库水位下降影响最大。当库水迅速下降时, 边坡

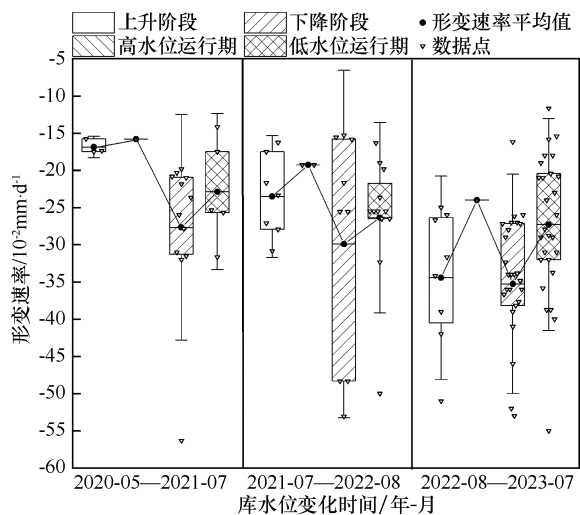


图 22 滑坡形变速率与库水文周年的关系

Fig. 22 Relationship between landslide deformation rate and hydrological anniversary

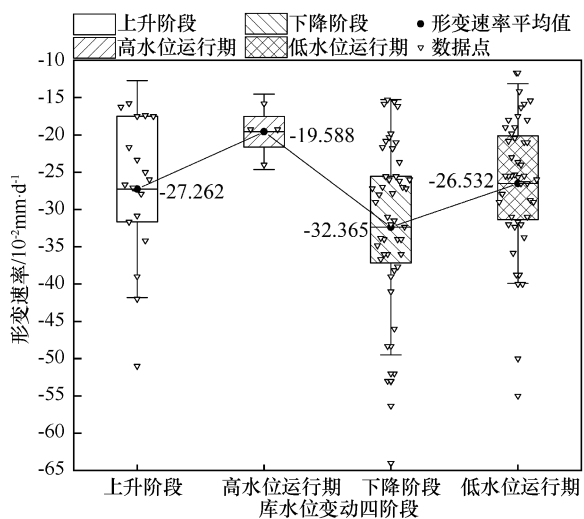


图 23 滑坡形变速率与库水位循环四阶段的关系

Fig. 23 The relationship between landslide deformation rate and the four stages of water level cycle

内部渗透压力无法迅速释放, 从而形成朝向坡外的渗透压力, 造成库岸边坡变形失稳^[27-28]。

如图 24 和图 25 所示, 明显变形的频次逐年增长, 尤其在第三个水文周年的库水位下降及低水位运行期显著增加, 而库水位上升及高水位运行期间的变形次数波动不大。水位下降阶段发生明显变形 49 次, 占比 42.98%; 低水位运行期 43 次, 占比 37.72%; 上升阶段 18 次, 占比 15.79%; 高水位运行期 4 次, 占比 3.51%。

综合考虑形变速率和变形次数两个指标, 得出库区滑坡活动强度和频率逐年增长, 目前处于活跃期。

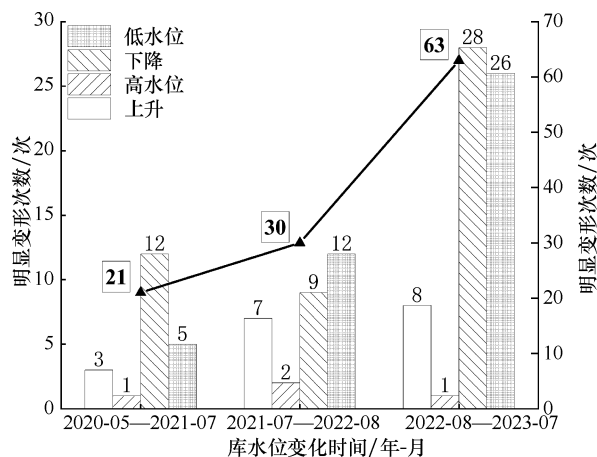


图 24 滑坡变形次数与库水文周年循环的关系

Fig. 24 The relationship between the number of landslide deformations and the hydrological cycle

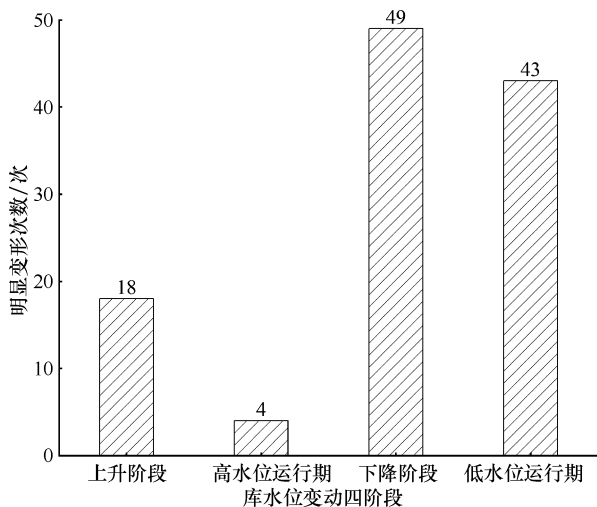


图 25 滑坡变形次数与库水位循环四阶段的关系

Fig. 25 The relationship between the amount of landslide deformation and the four stages of water level cycle

库水位升降对滑坡稳定性的影响程度依次为: 下降阶段>低水位运行期>上升阶段>高水位运行期。

5 讨论

不同的技术手段和方法, 在识别滑坡方面均具有优缺点。传统的滑坡调查方式耗时耗力, 难以发现微小形变和隐蔽的高位滑坡隐患点^[3]。高分辨率光学遥感解译可以有效识别出特征明显的滑坡, 但对于隐蔽性强的潜在滑坡不易识别。SBAS-InSAR 技术具有覆盖范围广、精度高、不受云雾天气影响等优势, 能够有效识别具有形变的滑坡^[29]。综合采取 SBAS-InSAR、光学遥感和野外调查方法, 能够系统查明滑坡数量、特征和形变, 为建立乌东德库区滑坡数据

库、统计分析滑坡发育特征及蓄水变形响应规律提供技术支持。

乌东德水库与三峡水库的水位调度均为 30 m, 蓄水初期滑坡的活动强度和频率、滑坡蓄水变形响应规律与三峡库区基本一致, 均表现为涉水滑坡变形与库水位变动过程具有明显相关性, 库水位下降及低水位运行期对滑坡稳定性影响最大^[30-31]。前人的研究显示, 三峡水库蓄水后 3~5 a 是库岸滑坡变形最严重的时期, 但在长期的库水循环变动作用下, 滑坡变形数量及程度逐年减少并趋于稳定, 呈现自适应状态^[1,15]。而乌东德水库目前的蓄水年限尚短, 现阶段滑坡变形次数和变形速率呈逐年增长的趋势, 处于活跃阶段, 预测后续可能会逐渐减弱。

6 结 论

(1) 采取 SBAS-InSAR、光学遥感解译、现场调查相结合的技术方法, 能够有效而且较为系统的查明水库区滑坡数量、特征和变形。

(2) 乌东德水电站库区共发育 62 处滑坡, 其中涉水滑坡 39 处。滑坡集中分布在侏罗系、白垩系红层及元古界浅变质岩区域。滑坡的坡度 10°~40°, 前后缘高差 200~800 m, 坡向为西或东, 斜坡类型多为凸型顺向岸坡, 滑面形态以直线或折线型为主。

(3) 初次蓄水以来 39 处涉水滑坡共发生 114 次明显变形, 最大变形速率为 63.72 mm/a; 现阶段滑坡变形次数和变形速率呈逐年增长趋势, 处于活跃阶段; 滑坡变形趋势分为加速变形、匀速变形和减速趋稳变形, 其中加速变形滑坡占比 61.54%, 以顺向直线型、涉水程度较高的滑坡为主, 其蓄水响应显著、变形量大; 蓄水对滑坡稳定性的影响程度由大到小依次为: 水位下降阶段>低水位运行期>水位上升阶段>高水位运行期。

(4) 现阶段建议密切关注库区滑坡动态, 必要时及时采取防范措施。

参考文献 (References):

[1] TANG M G, XU Q, YANG H, et al. Activity law and hydraulics mechanism of landslides with different sliding surface and permeability in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Engineering Geology*, 2019, 260: 105212.

[2] YIN Y P, HUANG B L, WANG W P, et al. Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Projecton Yangtze River, China[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(5): 577-595.

[3] 顿佳伟, 冯文凯, 易小宇, 等. 白鹤滩库区蓄水前活动性滑坡 InSAR 早期识别研究: 以葫芦口镇至象鼻岭段为例[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(2): 479-492.

DUN J W, FENG W K, YI X Y et al. Early InSAR identification of active landslide before impoundment in Baihetan reservoir area: a case study of Hulukou town Xiangbiling section[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(2): 479-492.

[4] YI X, FENG W, WU M, et al. The initial impoundment of the Baihetan reservoir region (China) exacerbated the deformation of the Wangjiashan landslide: Characteristics and mechanism [J]. *Landslides*, 2022, 19(8): 1897-1912.

[5] 刘星洪, 姚鑫, 杨波, 等. 川西高原活动性滑坡识别与空间分布特征研究[J]. *地质力学学报*, 2023, 29(1): 111-126.

LIU X H, YAO X, YANG B, et al. InSAR-based identification and spatial distribution analysis of active landslides in the Western Sichuan Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 2023, 29(1): 111-126.

[6] LIU X Y, YANG Z H, GUO C B, et al. Study of slow-moving landslide characteristics based on the SBAS-InSAR in the Xianshuihe fault zone[J]. *Geoscience*, 2017, 31(5): 965-977.

[7] LI Y X, ZHANG Y, SU X J, et al. Early identification and characteristics of potential landslides in the Bailong River Basin using InSAR technique[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(2): 677-690.

[8] 孙永彬, 张恩, 李启亮, 等. 金沙江下游永善段隐蔽性滑坡隐患综合遥感识别[J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(1): 171-183.

SUN Y B, ZHANG E, LI Q L, et al. Comprehensive remote sensing identification of hidden landslides in Yongshan Section of lower Jinsha River[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(1): 171-183.

[9] 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2019, 44(9): 1342-1354.

LU H Y, LI W L, XU Q, et al. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the baige landslide, the Jinsha river based on optical remote sensing and InSAR technologies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1342-1354.

[10] CHEN M L, LYU P F, ZHANG S L, et al. Time evolution and spatial accumulation of progressive failure for Xin-hua slope in the Dagangshan reservoir, Southwest China[J]. *Landslides*, 2018, 15(3): 565-580.

[11] SHAO X, XU C, LI L, et al. Spatial analysis and hazard assessment of Large-scale ancient landslides around the reservoir area of Wudongde Hydropower Station, China[J]. *Natural Hazards*, 2024, 120(1): 87-105.

[12] ZHAO C, KANG Y, ZHANG Q, et al. Landslide identification and monitoring along the Jinsha River Catchment (Wudongde Reservoir Area), China, using the InSAR method[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 993.

[13] 周家文, 陈明亮, 瞿靖昆, 等. 水库滑坡灾害致灾机理及防控

- 技术研究与发展[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 110-128.
- ZHOU J W, CHEN M L, QU J K, et al. Research and prospect on disaster-causing mechanism and prevention-control technology of reservoir landslides[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(1): 110-128.
- [14] 李松林, 许强, 汤明高, 等. 库水位升降作用下不同滑面形态老滑坡响应规律[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 841-852.
- LI S L, XU Q, TANG M G, et al. Response patterns of old landslides with different slip-surface shapes triggered by fluctuation of reservoir water level[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(3): 841-852.
- [15] 贺骥, 陈佳川, 李贻家. 三峡枢纽工程运行安全风险预警指标体系构建研究[J]. 水利发展研究, 2023, 23(11): 45-51.
- HE Ji, CHEN Jiachuan, LI Kuangjia. Research of risk fore warning indicators for operaion safety management of Three Gorges Project [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(11): 45-51.
- [16] 李永康. 三峡库区滑坡复活变形对库水位变动响应与成因机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- LI Y K. The response characteristics to changing water level and themechanism of the reactive landslide in Three Gorges Reservoir Area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [17] 杨何, 汤明高, 许强, 等. 长江三峡库区滑坡变形统计特征研究[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 37-42.
- YANG H, TANG M G, X Q, et al. Research of Statistical Characteristics of Deformation of Landslides in the Three Gorges Reservoir Area of the Yangtze River[J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(2): 37-42.
- [18] 王士天, 刘汉超, 张俅元, 等. 大型水域水岩相互作用及其环境效应研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997(1): 70-90.
- WANG S T, LIU H C, ZHANG Z Y, et al. Water-rock interaction and its environmental effects in large waters[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1997(1): 70-90.
- [19] YANG H, TANG M G, XIAO X X, et al. Physical model test of deformation self-adaptive mechanism of landslide mass[J]. *Water*, 2024, 16(12): 1720.
- [20] 李松林, 许强, 汤明高, 等. 三峡库区滑坡空间发育规律及其关键影响因子[J]. 地球科学, 2020, 45(1): 341-354.
- LI S L, XU Q, TANG M G, et al. Study on spatial distribution and key influencing factors of landslides in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Earth Science*, 2020, 45(1): 341-354.
- [21] 杨忠平, 李绪勇, 赵茜, 等. 关键影响因子作用下三峡库区堆积层滑坡分布规律及变形破坏响应特征[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 617-627.
- YANG Z P, LI X Y, ZHAO Q, et al. Key influencing factors based distribution regularity and deformation and failure response of colluvial landslides in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 617-627.
- [22] 卢坤林, 朱大勇. 坡面形态对边坡稳定性影响的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 35-42.
- LU K L, ZHU D Y. Theoretical and experimental study of slope topography on its stability [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 35-42.
- [23] LI S L, XU Q, TANG M G, et al. Characterizing the spatial distribution and fundamental controls of landslides in the Three Gorges Reservoir area, China [J] *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(6): 4275-4290.
- [24] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- National Standard Writing Group of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2015[S]. Beijing: the People's Republic of China, 2014.
- [25] XU Q, YANG H, TANG M G, et al. Variability of permeability and seepage characteristics in soil landslides; A test case in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Water Supply*, 2019, 19(8): 2453-2463.
- [26] CHEN M L, QI S C, LV P F, et al. Hydraulic response and stability of a reservoir slope with landslide potential under the combined effect of rainfall and water level fluctuation [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(1): 1-19.
- [27] LIAO K, WU Y P, MIAO F S, et al. Time-varying reliability analysis of Majiagou landslide based on weakening of hydro-fluctuation belt under wetting-drying cycles [J]. *Landslides*, 2021, 18(1): 267-280.
- [28] ZANG Y, ZHU S, TAN J, et al. The influence of water level fluctuation on the stability of landslide in the Three Gorges Reservoir [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(17): 1-10.
- [29] LIU H, YUAN M, LI M, et al. An efficient and fully refined deformation extraction method for deriving mining-induced subsidence by the joint of probability integral method and SBAS-InSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-17.
- [30] JIANG Z H, WANG H L, XIE W. Deformation mechanism of deposit landslide induced by fluctuations of reservoir water level based on physical model tests [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(11): 1-13.
- [31] LUO S L, HUANG D. Deformation characteristics and reactivation mechanisms of the Outang ancient landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(8): 3943-3958.

(责任编辑 王海锋)