引文格式：杨磊,罗惠恒,姜鹏,等. 利用时序InSAR技术的大型水电站库岸滑坡监测与应用[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):13-17. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.06.003

利用时序InSAR技术的大型水电站库岸滑坡监测与应用

杨　磊[1]，罗惠恒[1]，姜　鹏[1]，李林泽[1*]，范进勇[2]，廖海生[2]，安日辉[1]，
涂　晶[1]，陈　舰[2]，闫　斌[3]，江利明[3]，周志伟[3]
（1. 中国长江三峡集团有限公司武汉科创园，湖北 武汉 430014；2. 中国长江电力股份有限公司，湖北 武汉 430014；
3. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院，湖北 武汉 430077）

摘　要：大型水电站通常发挥着发电、改善航道、防洪拦沙等重要作用，对于地处高山峡谷地区、地理环境复杂的水电站，库岸滑坡等地质灾害的频发，对水电站运行和库岸居民的生命财产安全产生重大威胁。为查明某大型水电站库首区库岸滑坡数量与分布等情况，利用时序InSAR技术处理了2021年4月—2023年12月共计77景升轨Sentinel-1A单视复数影像。结果表明，该研究区内存在四处较为严重的形变区域，其最大形变速率达到-65.66 mm·a^{-1}，最大累计沉降量达143.51 mm。结合库区水位对上游三处进行时空沉降特征分析，发现涉水滑坡主要受到库区水位变化影响，水位上涨、稳定时形变较为缓慢，水位下降时形变加速；而非涉水滑坡受水位变化影响较小。最后结合实地验证重点分析弃渣场的形态、物质组成、形变特征，进一步证明了时序InSAR技术在形变监测与滑坡监测方面的技术优势，为滑坡灾害的预警与防治提供重要的决策依据。

关键词：大型水电站；库岸滑坡；时序InSAR；形变监测
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0013-05

Monitoring and Application of Large Hydropower Station Bank Landslide Based on Time-series InSAR Technology

YANG Lei[1], LUO Huiheng[1], JIANG Peng[1], LI Linze[1], FAN Jinyong[2], LIAO Haisheng[2], AN Rihui[1],
TU Jing[1], CHEN Jian[2], YAN Bin[3], JIANG Liming[3], ZHOU Zhiwei[3]
(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Wuhan 430014, China;
2. CTG Wuhan Science and Technology Innovation Park, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China;
3. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract: Large hydropower stations typically play crucial roles in electricity generation, improving waterways, and flood control. In the context of hydropower stations located in mountainous gorges with complex geographies, frequent geological disasters such as landslides pose significant threats to both the operation of these power stations and the safety and property of residents living along the reservoir banks. In order to investigate the number, distribution, and characteristics of landslides around a large hydropower station's headwater area, we utilized time-series InSAR technology to process 77 ascending Sentinel-1A single complex images from April 2021 to December 2023. The results reveal that the study area contains four serious deformation zones with a maximum strain rate of -65.66 mm/a and a maximum cumulative subsidence of 143.51 mm. The spatio-temporal subsidence characteristic of three upstream locations in combination with the water level in the reservoir area reveals that water-related landslides are mainly affected by the changes of water level in the reservoir area, with the deformation slowing down during the rising and stabilizing of water level and accelerating during the declining of water level, while the non-water-related landslides are less affected by the changes of water level. Combined with the field verification, we focused on analyzing the morphology, material composition and deformation characteristics of the disposal site, to further prove the technical advantages of time-series InSAR technology in deformation and landslide monitoring, and provide an important decision-making basis for the early warning and prevention of landslide disasters.

Key words: large hydropower station, bank landslide, time-series InSAR, deformation monitoring

合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar，InSAR）技术能够在大范围内进行高密度的地表形变监测，还具备全天候、全天时、非接触式测量等优点[1]，适合广域的滑坡监测与评估。近年来，许多研究学者利用InSAR技术对滑坡进行识别和监测，并获得了一定的研究成果。周定义等[2]基于

项目来源：长江电力股份有限公司资助项目（Z532302026）。
第一作者简介：杨磊（1983—），硕士研究生，高级工程师，研究方向为地质灾害监测、大数据挖掘与流域要素体系构建，E-mail：yang_lei12@ctg.com.cn。
通信作者：李林泽（1993—），博士研究生，工程师，研究方向为地质灾害监测，E-mail：li_linze1@ctg.com.cn。

SBAS技术使用Sentinel-1数据对东川小江流域进行监测，共识别出18处潜在滑坡区，分析了Sentinel-1数据在西南高山峡谷区域适用情况；廖明生等[3]重点分析雷达遥感应用于滑坡监测的可行性，并以三峡库区为例识别30处活动性滑坡，为库区地质灾害防治提供参考；朱同同等[4]利用Sentinel-1数据对三峡库区树坪滑坡进行监测，分析发现多处滑坡稳定性受到库区水位和降雨影响，同时与GPS数据对比，验证InSAR结果可靠性；杨正荣等[5]基于SBAS技术，使用2019年7月—2021年7月Sentinel-1数据对白鹤滩水电站库区进行监测，发现蓄水量变化是库岸滑坡发育的关键诱因；顿佳伟等[6]运用2007—2020年间不同波段SAR卫星基于SBAS技术监测白鹤滩库区葫芦口-象鼻岭段进行检测共有27处活动性滑坡，通过野外复核验证确定23处活动性滑坡；戴可人等[7]使用2014—2020年间Sentinel-1升降轨数据联合InSAR技术和无人机航测最终确认32个地质灾害隐患点，为水电站安全运行提供支撑。

当前，对大型水电站的研究集中在蓄水前，对库首区蓄水期的研究较少，分析蓄水期库岸滑坡时空形变特征对水电站安全运行具有重大意义。因此，本文基于2021年4月—2023年12月共计77景升轨Sentinel-1A单视复数影像（single look complex，SLC），应用SBAS-InSAR（small baseline subset，SBAS）技术获取某大型水电站库首区蓄水期高精度地表形变信息，提取分析其形变分布与大小，结合库区水位分析形变严重区域的时空形变特征，最后结合实地验证InSAR形变监测结果的可靠性。

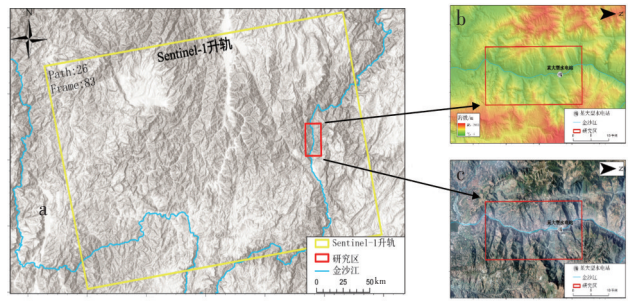
1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

本文选择中国西南某大型水电站库首区作为研究区域（图1）。该大型水电站作为一项重大工程，建设规模巨大，坝体高，控制流域广，发挥着发电、防洪、防沙、改善航运条件等重要作用。另外该水电站库首区地形是典型高山峡谷地貌，高差达3 900余米，旱季雨季分明，降雨集中在5—11月，受地质构造复杂、水位升降变化、旱雨季交替作用的影响，库岸两侧分布着大量潜在失稳边坡[8]，迫切需要进行形变监测。

1.2 数据来源

本文采用欧洲航天局（european space agency，ESA）提供的中分辨率Sentinel-1A SAR影像，共收集了2021年4月—2023年12月期间覆盖研究区域的77景



a Sentinel-1升轨数据空间覆盖范围 b 研究区DEM c 研究区光学影像

图1 研究区域概况图

升轨SAR影像，其轨道号为26，重访周期为12 d。Sentinel-1A卫星搭载着C波段合成孔径雷达，是ESA“哥白尼计划”的首颗卫星，该计划目标是完成全球高质量大范围对地观测任务，为灾害监测、环境保护等领域提供数据支持。Sentinel-1A卫星有条带成像模式、干涉宽幅模式、超宽幅模式以及波浪模式共4种不同成像模式[9]，可实现单极化、双极化等不同极化方式。本文采用的数据产品类型为升轨SLC，成像模式为干涉宽幅模式，距离向分辨率为5 m，方位向分辨率为20 m。本文在数据处理过程中时间基线阈值设置为[0,100] d，空间基线阈值设置为[-100,100] m，共计生成393个干涉像对，时空基线连接分布见图2。

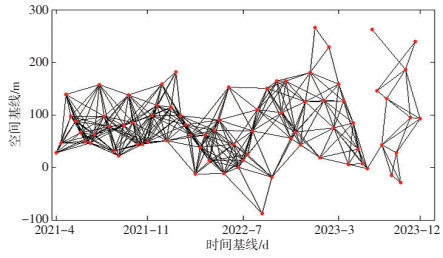


图2 时空基线分布图

2 研究方法

本研究采用SBAS-InSAR技术，该技术相较于其他时序InSAR技术优势在于通过确定合适的时空基线阈值，依靠多主影像组合干涉对，大大减少时空失相干以及大气延迟的影响。该技术基本原理如下：同一研究区域有 $N+1$ 幅SAR影像，影像的成像时间分别为：t_0，t_1，t_2，…，t_{N-1}，t_N。首先对所有影像进行配准后进行干涉处理，接着根据影像成像时间序列确定适当的时间基线与空间基线以保证良好的相干性，共计组成 M 组干涉对，干涉对数量 M 与影像数量 N 关系为：

$$\frac{(N+1)/2 \leqslant M \leqslant N\times(N+1)}{2} \quad (1)$$

对任意一组干涉对，2幅SAR影像获取时刻分别为 t_A 和 t_B，假设此时已经将大气延迟相位、噪声相位等全部从原始相位中去除，仅保留形变相位。干涉图当中任意一个像元（x，r）的相位可以表示如下[10]：

$$\delta\phi(x,r)=\varphi(t_A,x,r)-\varphi(t_B,x,r)\approx\frac{4\pi}{\lambda}[d(t_A,x,r)-d(t_B,x,r)] \quad (2)$$

式中，λ 为雷达波长；$d(t_A,x,r)$ 和 $d(t_B,x,r)$ 分别为该像元 (x,r) 在 t_A 和 t_B 时刻相对于 t_0 时刻在雷达视线方向的累计形变量。

共有 M 个差分干涉相位观测量即有 M 个方程，相较于 t_0 时刻有 N 个差分相位即有 N 个待求量，将方程组简化表达为：

$$\delta\phi=\boldsymbol{A}\varphi \quad (3)$$

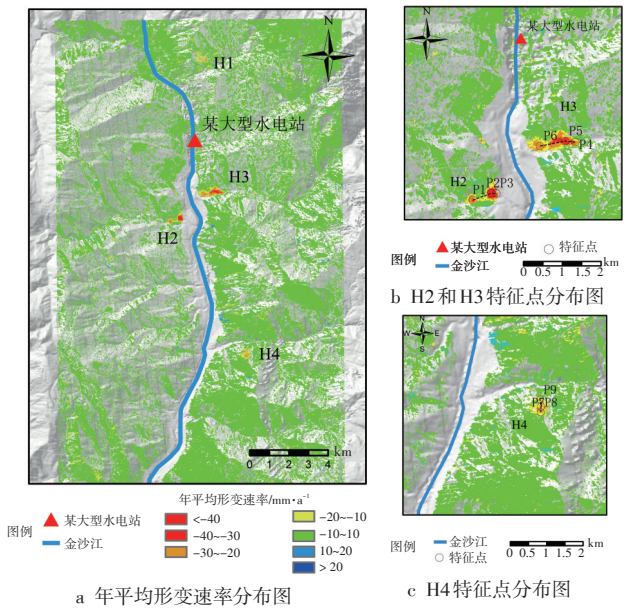
式中，系数矩阵 $\boldsymbol{A}_{M\times N}$ 每一行对应着一组干涉对、每一列对应着一幅SAR影像。通常可用数据集包含多个子集，系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 秩亏，根据最小二乘无法得到唯一解。SBAS-InSAR使用奇异值分解（Singular Value Decomposition，SVD）得到变化速率矢量的最小范数解，最后通过积分得到时间序列形变。

本研究使用GAMMA软件完成SBAS-InSAR技术的数据处理，主要包括SAR影像预处理、影像差分干涉、时间序列分析3个主要步骤。其中SAR影像预处理中以时间序列中间的影像为超级主影像，进行配准、组合干涉像对，以保证时间基线和最小，最大程度提高影像相干性及配准质量[11]；影像差分干涉通过计算两幅影像之间的相位差，生成干涉图像，使用最小费用流方法（Minimum-Cost Flow Algorithm）进行相位解缠以恢复真实相位；使用与地形相关的大气模型去除大气延迟误差，通过奇异值分解解算时序形变信息。为消除地表相位的影响，本研究在满足精度要求的前提下选择TanSAR-X DEM作为外部DEM数据[12]。使用的精轨数据为POD（Precise Orbit Ephemerides）精密定轨星历数据（AUX_POEORB），用以更新SAR数据的状态矢量从而减少轨道误差引起的相位误差[13]。

3　结果与分析

3.1　形变速率结果

应用SBAS-InSAR技术得到研究区域2021年4月—2023年12月年平均形变速率，年平均形变速率图（见图3a），红色为负值，表示地物沿着雷达视线（line of sight，LOS）方向远离卫星运动；蓝色为正值，表示地物沿着LOS方向靠近卫星运动。在研究区域内，沿LOS方向远离卫星年平均最大速率为-65.66 mm.a^{-1}，沿LOS方向靠近卫星年平均最大速率为23.61 mm.a^{-1}。统计得，形变速率在-10~10 mm.a^{-1}间约占研究区总面积96.48%，表示研究区内绝大部分区域处于稳定状态；形变速率小于-20 mm.a^{-1}或大于20 mm.a^{-1}约占研究区域总面积0.81%，这些区域存在严重沉降，滑坡、崩塌等地质灾害发生几率较高，在监测过程中应当重点关注这些区域。



a　年平均形变速率分布图　　b　H2和H3特征点分布图　　c　H4特征点分布图

图3　严重形变区域位置分布图

通过分析形变速率图，在研究区域内共发现4处严重形变区域，其中3处位于该大型水电站上游，分别为H2、H3、H4（图3b和图3c），最大形变速率出现在H2，达到-65.66 mm.a^{-1}；仅H1一处位于水电站下游。

3.2　重点滑坡形变分析

为深入了解形变严重区域的地表时空形变特征，分别在上游3个形变区域内各选择3个特征点，特征点分布如图3b和图3c所示，将其累计形变量绘制成图以分析形变随时间变化情况，特征点时序形变图如图4、5、6所示。

形变区H2位于该大型水电站坝址上游约4.5 km处的左岸，该形变区域为涉水滑坡，平均坡度约为23°，坡向为东南向。经现场调研得知水电站库区蓄放水时间，再依据H2特征点时序形变图进行分析，在蓄水前期水位持续上涨，形变较为缓慢；在2021年11月左右开始，库区放水导致水位波动下降，P1、P2和P3出现明显沉降趋势，P2点速率明显大于P1和P3；2022年9月—2023年1月中旬期间，库区重新蓄水，水位上涨并保持稳定，所有点沉降趋势变缓，趋

于稳定；2023年1月中旬至2023年8月，库区水位下降，所有点持续沉降，P2点沉降形变速率依然比P1和P3点大；2023年8月—2023年12月期间，水位上涨，所有点重新趋于稳定。在H2区域内，P2点沉降速率最大，年平均形变速率达到−65.66 mm·a^{-1}，相对于初始时间累计沉降量143.51 mm；P1点年平均速率为−30.23 mm·a^{-1}，累计沉降量达72.46 mm；P3点年平均形变速率为−29.93 mm·a^{-1}，累计沉降量达70.92 mm。

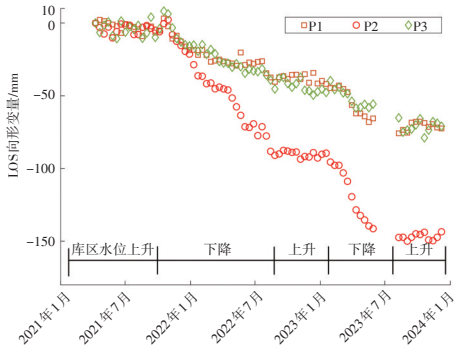


图4　H2特征点时序形变图

H3位于该大型水电站坝址上游约3.1 km处的右岸，该区域为涉水滑坡，平均坡度约为20°，坡向为西南向，该区域主要建筑为厂房。依据H3特征点时序形变图，结合水电站库区蓄放水和时间方面分析，该区域同H2时间变化特征极为相似，在2021年4月—2021年11月、2022年9月—2023年1月、2023年8月—2023年12月3个时间段，库区蓄水导致水位上涨，形变较为缓慢；2021年11月—2022年8月、2023年1月—2023年9月2个时间段库区放水导致水位下降，形变加速，P4、P5和P6出现明显沉降趋势，P5点速率明显大于P4和P6。从空间上进行分析，H3内P5点沉降速率最大，年平均形变速率达到−45.8 mm·a^{-1}，相对于初始时间累计沉降131.561 mm；P4点年平均速率为−23.725 mm·a^{-1}，累计沉降量达51.864 mm；P6点年平均形变速率为−28.12 mm·a^{-1}，累进沉降量达58.81 mm。

H4位于该大型水电站坝址上游约11.5 km处的右岸。该区域为非涉水滑坡，平均坡度约为35°，坡向为西南向，该区域主要为裸土、杂草为主。依据特征点时序形变图，从时间上分析，整个监测时间段内一直处于持续缓慢沉降状态，P9点速率明显大于P7和P8；从空间上分析，山脊区域相较该区域内其他点沉降速率较大。该区域内P9点沉降速率最大，年平均形变速率达到−27.75 mm·a^{-1}，沿LOS向累计沉降量达79.303 mm；P7点年平均速率为−24.69 mm·a^{-1}，累计沉降

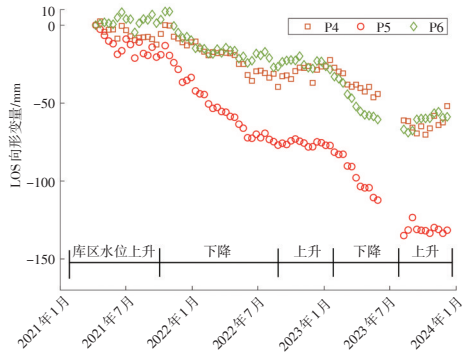


图5　H3特征点时序形变图

量达65.59 mm；P8点年平均形变速率为−18.57 mm·a^{-1}，累进沉降量达44.09 mm。

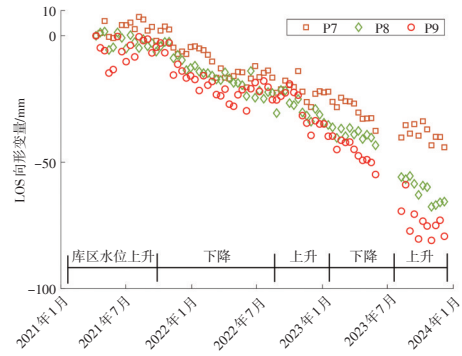


图6　H4东北特征点时序形变图

综上所述，将库岸滑坡按照地理位置分为涉水滑坡和非涉水滑坡，库区水位变化是涉水滑坡形变的主要影响因素，水位下降时，库岸滑坡形变发生明显加速，水位上涨、稳定时，形变表现较为缓慢，呈现出阶跃特征；而非涉水滑坡，如H4区域，由于该处位于水电站坝址上游且距离水电站坝址较远，在监测时段表现为持续缓慢沉降，受库区水位变化影响较小。

3.3　实地验证

本文通过实地考察进一步验证InSAR形变监测结果的可靠性。以H2为例，从形态、物质组成、形变特征等方面进行分析。水库蓄水前，对该滑坡体前缘采取了堆渣压坡的处理措施，即弃渣场，现场考察图片（见图7）。

形态特征：滑坡区总体为斜坡地形，前缘地形较陡，地形坡度15～25°，非常接近金沙江；后缘地形坡度10～20°，其高程约1 250 m，前后缘高差650余m。滑坡滑动方向长约2 630 m，宽480～820 m，最大厚度240 m，总体积约2.63×108 m^3，属于巨型滑坡。同时，滑坡体内主要发育了两条深切得“V”字型冲沟以及众多小冲沟[14]。物质组成特征：地层岩性对滑坡的发育起着重要的作用[15]，该滑坡体基岩主要为三叠系下统飞仙关组、上统须家河组、白垩系小坝组粉砂岩、砂岩、泥质粉砂岩。水库蓄水后，水位上升会增



图7　现场考察照片

加岩体内部水压，水的浸润作用会使得岩体结构强度下降，大大减弱岩体稳定性[16]。滑带物质主要为粉土质砾、含砾粘土，滑带厚度一般为2～8 m。形变特征：结合InSAR解算的形变信息，建设厂房部分整体形变趋势为前缘形变速率大于后缘形变速率大于中部形变速率，前缘形变速率最大可达到–65.66 mm·a^{-1}，在研究时间段内累计沉降量达到–143.51 mm；中部相对稳定，年平均形变速率小于±10 mm·a^{-1}，通过实地考察验证InSAR结果的可靠性。滑坡在演化过程中会经历初始变形、等速变形、加速变形3个阶段[17]，形变速率能够直观地反映出坡体稳定性，在后续监测过程中应重点关注坡体的形变特征。

4　结　语

本文基于2021年4月—2023年12月期间内77景Sentinel 1A SAR数据，采用SBAS–InSAR技术，得到大型水电站库首区高精度地表形变结果。经分析，该研究区内96%以上区域处于稳定状态，存在4处（H1、H2、H3、H4）较为严重的形变区域，其最大形变速率达到–65.66 mm·a^{-1}，最大形变量达143.5 mm。结合库区水位对上游3处（H2、H3、H4）提取特征点进行时空形变特征分析，结果显示，涉水滑坡主要受到库区水位变化影响，水位上涨、稳定时形变较为缓慢，水位下降时形变加速；而非涉水滑坡受水位变化影响较小。通过实地踏勘验证重点分析弃渣场形态、物质组成、形变特征，其属于基岩古滑坡，建设厂房部分整体形变趋势为前缘形变速率大于后缘形变速率大于中部形变速率，验证了InSAR形变监测结果的可靠性与准确性。利用时序InSAR技术可以获取到目标区域长时间跨度下的毫米级形变监测结果，可进一步进行滑坡体识别、了解严重形变区域时空形变特征，为滑坡灾害的预警与防治提供重要的决策依据。

参考文献

[1] Howard A, Zebker R M, Goldstein. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986,91(B5):4 993-4 999

[2] 周定义,左小清,喜文飞,等. 基于SBAS-InSAR技术的深切割高山峡谷区滑坡灾害早期识别[J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(2):16-24

[3] 廖明生,董杰,李梦华,等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. 遥感学报,2021,25(1):332-341

[4] 朱同同,史绪国,周超,等. 利用2016—2020年Sentinel-1数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1 560-1 568

[5] 杨正荣,喜文飞,史正涛,等. 基于SBAS-InSAR技术的白鹤滩水电站库岸潜在滑坡变形分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(5):83-92

[6] 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

[7] 戴可人,沈月,吴明堂,等. 联合InSAR与无人机航测的白鹤滩库区蓄水前地灾隐患广域识别[J]. 测绘学报,2022,51(10):2 069-2 082

[8] 戴可人,吴明堂,卓冠晨,等. 西南山区大型水电工程库岸滑坡InSAR早期识别与监测研究进展[J]. 地球科学与环境学报,2023,45(3):559-577

[9] 杨魁,杨建兵,江冰茹. Sentinel-1卫星综述[J]. 城市勘测,2015(2):24-27

[10] 刘国祥,陈强,罗小军,等. InSAR原理与应用[M]. 北京:北京:科学出版社,2019

[11] 程存付,赵盟,侯岳. SBAS-InSAR主影像选取方法研究与探讨[J]. 河南科技,2018,36(26):14-15

[12] 管李义,陈斯飏,邹思远,等. 几种全球开放DEM数据集的对比分析[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(10):21-23

[13] 杨红磊,彭军还,张丁轩,等. 轨道误差对InSAR数据处理的影响[J]. 测绘科学技术学报,2012,29(2):118-121,126

[14] 胥良. 金沙江白鹤滩水电站金江滑坡成因机制及稳定性研究[D]. 成都:成都理工大学,2004

[15] 张俊,殷坤龙,王佳佳,等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(2):284-296

[16] 徐腾. 水库蓄水引发的地质灾害影响研究:以白鹤滩水电站下游库区会东县段为例[J]. 云南冶金,2024,53(5):22-27

[17] 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,2008,26(6):1 104-1 112