

## 基于SBAS-InSAR技术的白鹤滩水电站库岸潜在滑坡变形分析

杨正荣, 喜文飞, 史正涛, 肖波, 周定义

### Deformation analysis in the bank slopes in the reservoir area of Baihetan Hydropower Station based on SBAS-InSAR technology

YANG Zhengrong, XI Wenfei, SHI Zhengtao, XIAO Bo, and ZHOU Dingyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202056>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测

Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection

潘建平, 邓福江, 徐正宣, 向淇文, 涂文丽, 付占宝 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 98-104

#### 国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用

Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area

郭延辉, 杨溢, 杨志全, 高才坤, 田卫明, 何玉童 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 66-72

#### 白鹤滩水电站地下厂房层状节理岩体变形机理分析

$\${suggestArticle.titleEn}$

刘思杰, 王凯 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(1): 85-92

#### 基于MSBAS技术的金沙江上游色拉滑坡形变分析

Deformation analysis of Sela landslide in the upper reaches of Jinsha River based on MSBAS technology

熊国华, 杨成生, 朱赛楠, 董继红, 张勤 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 1-9

#### “空-天-地”一体化技术在滑坡隐患早期识别中的应用——以兰州普兰太公司滑坡为例

Application of “Air-Space-Ground” integrated technology in early identification of landslide hidden danger: taking Lanzhou Pulantai Company Landslide as an example

侯燕军, 周小龙, 石鹏卿, 郭富 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 12-20

#### 土质滑坡地表倾斜变形特征与基于MEMS的倾斜变形监测技术初探

Evolution of deformation and monitoring techniques of surface tilt for soil landslides using MEMS technique

刘晓宇, 樊智勇, 吴疆 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 69-77



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202056

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.

YANG Zhengrong, XI Wenfei, SHI Zhengtao, *et al.* Deformation analysis in the bank slopes in the reservoir area of Baihetan Hydropower Station based on SBAS-InSAR technology[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 83-92.

## 基于 SBAS-InSAR 技术的白鹤滩水电站库岸 潜在滑坡变形分析

杨正荣<sup>1</sup>, 喜文飞<sup>1,2</sup>, 史正涛<sup>1</sup>, 肖波<sup>3,4</sup>, 周定义<sup>3</sup>

(1. 云南师范大学地理学部, 云南昆明 650500; 2. 云南省高校高烈度地震山区交通走廊工程地质病害早期快速判识与防控重点实验室, 云南昆明 650093; 3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093; 4. 云南交通职业技术学院公路与建筑工程学院, 云南昆明 650500)

**摘要:** 库岸潜在滑坡变形分析是保障国家水利水电设施安全运行的重要环节, 针对仅利用单一轨道 SAR 数据对库岸潜在滑坡变形监测不准确的问题, 采用 SBAS-InSAR 技术, 联合升降轨 Sentinel-1 SAR 数据构建研究区 2019 年 7 月至 2021 年 7 月的雷达视线方向形变时间序列, 并结合无人机野外调查, 分析白鹤滩水电站库岸典型潜在滑坡的变形特征。结果表明: (1) 受蓄水因素影响, 白鹤滩水电站库岸潜在滑坡形变平均增速达 10 mm/a 以上, 库岸稳定性受到破坏; (2) 蓄水量变化是当前库岸滑坡发育的关键性诱因, 在蓄水和降雨等因素共同作用下, 白鹤滩水电站库岸潜在滑坡存在失稳风险; (3) 升降轨 SAR 数据结合的方式能有效克服单一轨道导致的几何畸变等问题, 使水电站库岸潜在滑坡变形监测更加准确、全面。研究结果有助于了解库区蓄水对库岸潜在滑坡变形趋势的影响, 可为区域尺度防灾应急管理提供科学支持。

**关键词:** SBAS-InSAR 技术; 滑坡灾害; 地表形变; 变形分析; 白鹤滩水电站

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)05-0083-10

## Deformation analysis in the bank slopes in the reservoir area of Baihetan Hydropower Station based on SBAS-InSAR technology

YANG Zhengrong<sup>1</sup>, XI Wenfei<sup>1,2</sup>, SHI Zhengtao<sup>1</sup>, XIAO Bo<sup>3,4</sup>, ZHOU Dingyi<sup>3</sup>

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Key Laboratory of Early Rapid Identification, Prevention and Control of Geological Diseases in Traffic Corridor of High Intensity Earthquake Mountainous Area of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650093, China; 3. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, 650093, China.; 4. School of Highway and Architectural Engineering, Yunnan Communications Vocational and Technical College, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** The analysis of potential landslide deformation on the reservoir bank is an important link to ensure the safe operation of national water conservancy and hydropower facilities. In response to the problem of inaccurate monitoring of potential landslide deformation on the reservoir bank using single-track SAR data only, this paper uses SBAS-InSAR technology to

收稿日期: 2022-02-26; 修订日期: 2022-09-07

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 云南省科技厅面上项目(202001AT070059); 云南省自然科学基金重点项目(202101AS070019)

第一作者: 杨正荣(1997-), 男, 云南楚雄人, 硕士研究生, 主要从事 InSAR 地面沉降灾害监测研究。E-mail: 248585642@qq.com

通讯作者: 喜文飞(1984-), 男, 河南平顶山人, 副教授, 主要从事无人机图像处理、三维模型构建、变形监测等研究。

E-mail: xiwenfei911@163.com

construct the radar line-of-sight directional deformation of the study area from July 2019 to July 2021 by combining elevated-track Sentinel-1 SAR data time series, and unmanned aircraft field surveys were combined to analyse the deformation characteristics of typical potential landslides on the reservoir bank of Baihetan hydropower station. The results show that: (1) under the influence of water storage factors, the average growth rate of potential landslide deformation on the reservoir bank of Baihetan hydropower station reaches more than 10 mm/a. Reservoir bank stability is undermined; (2) water storage changes are the key causal factor in the development of reservoir bank potential landslides at present. The potential landslides on the reservoir bank of Baihetan Hydropower Station are at risk of instability with the joint effect factors such as water storage and rainfall; (3) the method which combined lift-track SAR data can effectively overcome the problems such as geometric distortion caused by a single track, and make the monitoring of potential landslide deformation on the reservoir bank of hydropower station more accurate and comprehensive. The research result can help to understand the impact of reservoir storage on the deformation trend of reservoir bank potential landslides, and can provide scientific support for regional-scale disaster prevention and emergency management.

**Keywords:** SBAS-InSAR technology; landslide disaster; the surface deformation; deformation analysis; baihetan hydropower station

## 0 引言

库岸滑坡是深切割高山峡谷型库岸常见的破坏形式,多集中分布于我国西南山区<sup>[1-2]</sup>。库岸滑坡由地表内外营力相互作用而形成,人类工程建设及库区水位变化则使其演化特征更为突出,通常表现为库区蓄水之后库岸下缘坡体岩层软化,从而引起上部库岸的形变破坏<sup>[3-4]</sup>。库岸滑坡受多方面因素影响,具有成因复杂、类型多样和危害巨大等特点<sup>[5-7]</sup>。在水电站库区,蓄水和泄洪等因素导致的水位变化直接影响库岸滑坡的稳定性,库岸滑坡一旦失稳会诱发一系列次生灾害,破坏区域生态系统,毁坏库区坝体和发电设施<sup>[8]</sup>,严重威胁库区上下游居民生命财产安全。因此,对水电站库岸滑坡进行变形监测具有重要意义。

常规监测手段已难以识别和监测大面积的库岸滑坡形变,相对传统的精密水准测量、全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)和光学遥感技术,合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术因其大范围、全天时、全天候、高精度和高分辨率等特点,已成功应用于库岸滑坡灾害识别监测分析中<sup>[9-11]</sup>。国内外学者利用 InSAR 技术在库岸滑坡灾害的应用方面做了大量研究,康亚等<sup>[8]</sup>利用三类 InSAR 产品和 DEM 数据对金沙江流域乌东德水电站段进行滑坡早期识别,成功探测到多处未知和已知的滑坡体;徐帅等利用墨兰指数对 SBAS-InSAR 技术获取的形变点进行空间域异常值分析和聚类处理,成功识别出三峡库区巫山—奉节段高概率潜在滑坡范围<sup>[12]</sup>;王振林等<sup>[13]</sup>利用 SBAS-InSAR 技术提取雅砻江流

域锦屏一级水电站库区左岸边坡的形变特征信息,推断出大幅水位上升是诱发滑坡复活的主要因素;朱同同等<sup>[14]</sup>结合时序 InSAR 技术和 GPS 观测值分析了降雨和蓄水对三峡库区树坪滑坡变形的影响;史绪国等<sup>[15]</sup>联合分布式目标与点目标的时序 InSAR 技术对三峡库区藕塘滑坡进行稳定性监测;Tantianuparp 等<sup>[16]</sup>联合多种 SAR 数据和 PS-InSAR 技术对三峡巴东进行滑坡探测,并将 PS 点时序形变与水位时间变化进行初步相关性分析;Zhou 等<sup>[17]</sup>利用时序 InSAR 技术发现三峡库区木鱼堡滑坡变形主要发生在水库涨落期和高水位期;Liu 等<sup>[18]</sup>利用 SBAS-InSAR 技术对三峡巴东地区进行滑坡探测并分析季节性滑坡运动与水位变化之间的相关性,上述研究证明了时序 InSAR 技术在库岸滑坡监测中的可靠性,可以对水电站库岸滑坡变形进行有效分析。白鹤滩水电站地处四川和云南交界,自 2021 年 4 月开始蓄水,库区水位由 660 m 升至 825 m,上升幅度达 165 m;水电站运行期间最低水位 765 m,最高水位 825 m,升降水位差 60 m,最大库容达  $256 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[19-20]</sup>。库区地形起伏较大、断裂构造发育,加之蓄水引起的水位变化直接影响库岸潜在滑坡的变形趋势,对水电站基础设施和上下游居民生命财产安全造成潜在威胁<sup>[21-22]</sup>。因此,亟需对白鹤滩水电站库岸潜在滑坡进行变形分析。

文章联合 2019 年 7 月 3 日至 2021 年 7 月 28 日的 150 景升降轨 Sentinel-1 SAR 数据集,采用 SBAS-InSAR 技术获取白鹤滩水电站库区雷达视线方向(Line of sight, LOS)形变时间序列,在分析地表形变时间演化规律和空间分布特征的基础上,结合无人机野外调查,分析白

鹤滩水电站库岸潜在滑坡的变形特征, 重点研究蓄水因素对库岸潜在滑坡变形趋势的影响。

## 1 SBAS-InSAR 技术

小基线集 InSAR (Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR) 技术最早由 Bernardino 和 Lanari 等<sup>[23]</sup>提出, 该方法通过组合数据的方式获得一系列短空间基线差分干涉图, 这些差分干涉图能较好地克服空间失相关现象。SBAS-InSAR 技术利用奇异值分解 (SVD) 法求解形变速率, 将被较大空间基线分开的孤立 SAR 数据进行连接, 进一步提高观测数据的时间采样率<sup>[23]</sup>。该方法可以有效减弱大气效应, 降低相位噪声和误差<sup>[24]</sup>, 其基本原理及流程如下:

假定已获取覆盖同一区域的按时间序列排序的  $N+1$  幅 SAR 影像:

$$T = [T_0, T_1, \dots, T_N]^T \quad (1)$$

根据干涉组合规则, 生成  $M$  幅干涉图且  $M$  应当满足:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2} \quad (2)$$

假设以  $t_0$  作为影像获取起始时刻且  $t_0$  时刻影像覆盖区域位移为 0, 则在去除轨道误差、平地效应及地形相位的影响后, 第  $i$  ( $1 \leq i \leq M$ ) 幅影像某像素的干涉相位可表示为:

$$\Delta\varphi_i = \varphi_{t_1} - \varphi_{t_2} \approx \Delta\varphi_{i_{\text{def}}} + \Delta\varphi_{i_{\text{topo}}} + \Delta\varphi_{i_{\text{atm}}} + \Delta\varphi_{i_{\text{noise}}} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{i_{\text{def}}}(x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_2) - d(t_1)], i = 1, 2, \dots, m \\ \Delta\varphi_{i_{\text{topo}}}(x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp} \Delta h}{r \sin \theta} \\ \Delta\varphi_{i_{\text{atm}}}(x, r) = \varphi_{\text{atm}}(t_2) - \varphi(t_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta\varphi_{i_{\text{def}}}$  ——斜距向形变产生的相位;

$\Delta\varphi_{i_{\text{topo}}}$  ——地形相位;

$\Delta\varphi_{i_{\text{atm}}}$  ——大气延迟引起的相位;

$\Delta\varphi_{i_{\text{noise}}}$  ——相干噪声造成的相位。

利用最小二乘或者奇异值分解 (SVD) 对  $m$  个解缠相位进行三维时空相位解缠即可获得不同 SAR 时刻对应的时序形变速率。

## 2 研究区概况和研究数据

本文以四川省与云南省交界白鹤滩水电站库区作为研究区域, 如图 1 所示。研究区长约 30.38 km, 宽约 11.65 km, 总面积 353.93 km<sup>2</sup>, 地处横断山脉东北部、青藏高原东南边缘, 区域内断裂构造发育, 构造运动强烈,



图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

河谷深切, 山体陡峻, 地震频发<sup>[25-27]</sup>。最高海拔 3 556 m, 最低海拔 520 m, 高差达 3 036 m, 地势陡峭, 致使该区存在大量滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害隐患。

形变监测数据选用从欧州航天局 (European Space Agency, ESA) 免费下载的 150 景 C 波段 Sentinel-1 雷达影像 (其中升轨数据 50 景, 降轨数据 100 景并在每个时间点上两景拼接), 升降轨数据覆盖区域如图 2 所示。时间跨度为 2019 年 7 月 3 日至 2021 年 7 月 28 日, 极化方式为 VV, 成像方式为 IW, 数据参数如表 1 所示。为提高影像轨道精度, 引入 POD 精密定轨星历数

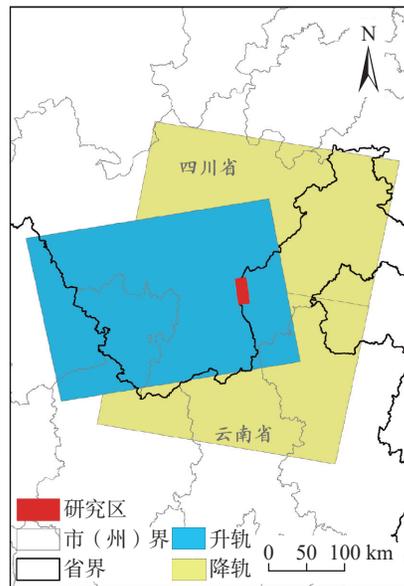


图 2 SAR 卫星影像覆盖范围

Fig. 2 SAR satellite image coverage

据。使用日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)发布的ALOS WORLD 3D 30 m 空间分辨率的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),用于去除地形相位影响,如图3所示。

表 1 Sentinel-1A 数据参数  
Table 1 Sentinel-1A data parameters

轨道方向	成像模式	极化方式	波长	波段	入射角/(°)
升轨	IW	VV	5.63	C	39.44
降轨	IW	VV	5.63	C	39.28

### 3 SBAS-InSAR 技术数据处理

采用 SBAS-InSAR 技术,选取经镶嵌、配准和裁剪后的 100 景 Sentinel-1A 斜距单视复数(Single Look Complex, SLC)影像(升降轨数据各 50 景),根据时间基线和垂直基线最优原则,升轨和降轨数据分别以日期为 20 191 216 和 20 200 204 的影像作为超级主影像。设置时间基线阈值 180d,空间基线为临界基线阈值的 50%,共生成 654 和 888 对干涉像对。为抑制斑点噪声,设置多视数为 1 : 4,采用 Minimum Cost Flow 解缠

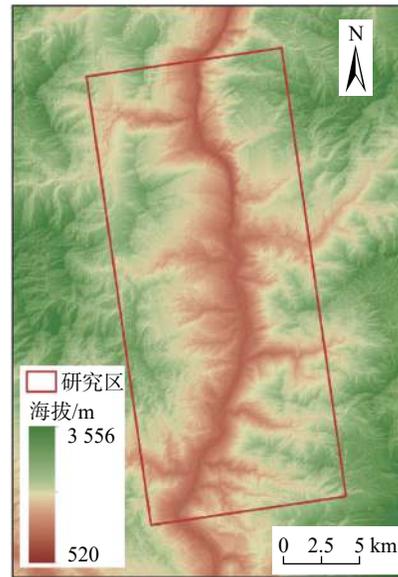


图 3 研究区 DEM

Fig. 3 Digital elevation model of study area

方法和 Goldstein 滤波方法进行干涉处理,将组合干涉对经过配准,调整删除不理想的数据后生成干涉图,研究区部分较理想的干涉图如图 4 所示。

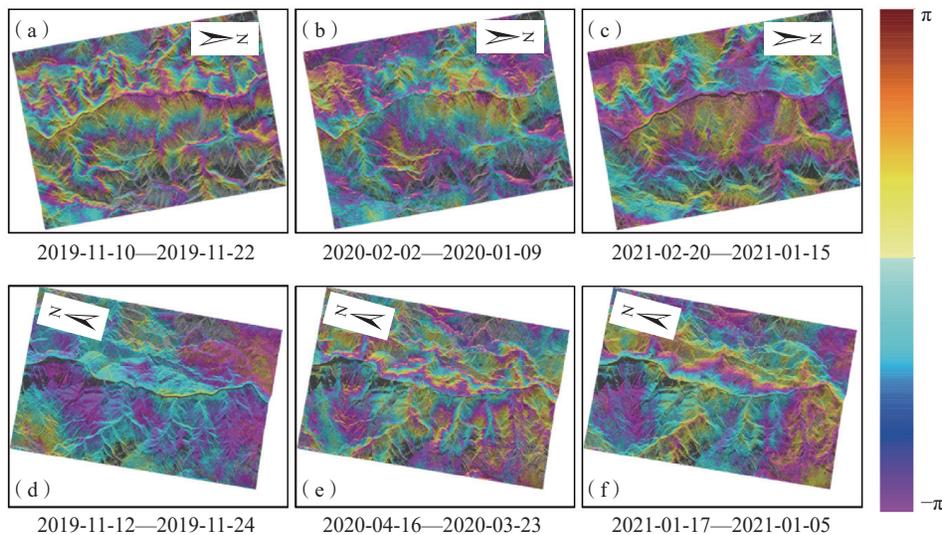


图 4 研究区部分较理想的干涉图

Fig. 4 Ideal interference patterns in the study area

注: (a)、(b)、(c)为升轨数据干涉图, (d)、(e)、(f)为降轨数据干涉图

经过轨道精炼和重去平,利用最小二乘法和奇异值矩阵分解进行形变反演,然后估算和去除大气相位,得到研究区时间序列形变信息,对时序信息地理编码后获取研究区 2019 年 7 月 3 日至 2021 年 7 月 28 日 LOS 方向的形变结果。如图 5 所示,形变速率为正值表示靠近卫星,负值表示远离卫星。对比图 5(a)、(b)研究区形

变结果可知,降轨数据集探测的形变信息较为丰富,主要集中在库区西岸,最大 LOS 向形变速率-61.425 mm/a;升轨数据集仅在库区东岸部分区域形变较为明显,最大 LOS 向形变速率为 91.426 mm/a。升降轨数据集形变信息不一致的原因是白鹤滩水电站库区两岸地形起伏较大,山势陡峭险峻,而升轨数据飞行方向大致沿东

南向西北, 雷达视线方向位于右侧, 降轨数据则与之相反, 故利用 InSAR 探测形变过程中阴影、叠掩和透视收

缩等几何畸变现象严重。

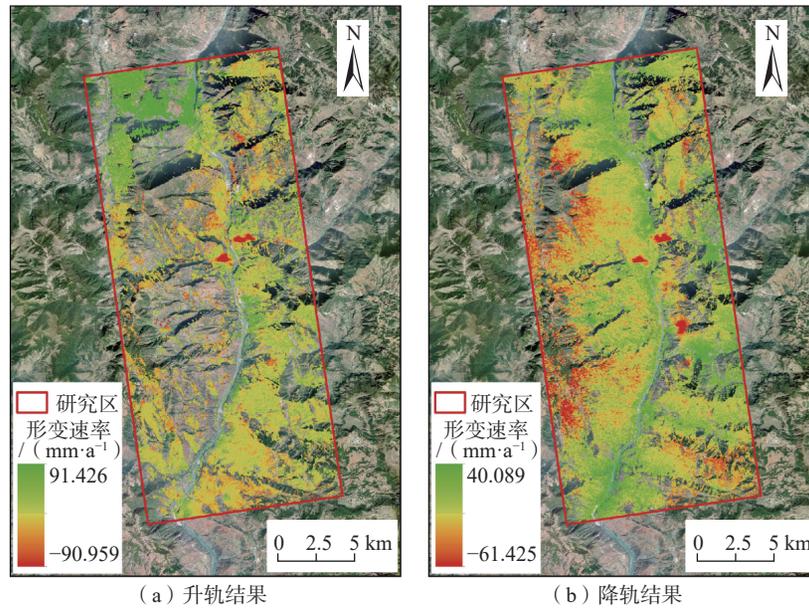


图 5 研究区视线向形变速率

Fig. 5 Line-of-sight deformation rate of the study area

### 4 试验结果与分析

#### 4.1 研究区库岸典型潜在滑坡选取

对升轨和降轨数据获取的研究区形变结果进行综

合解译, 升轨数据库岸形变区域解译结果如图 6 所示, 共选取库岸形变较大区域 4 处。结合无人机野外调查结果, 发现典型潜在滑坡 2 处, 分别用 H1 和 H2 表示; 非滑坡形变区 2 处, 分别用 X1 和 X2 表示, 升轨数据详

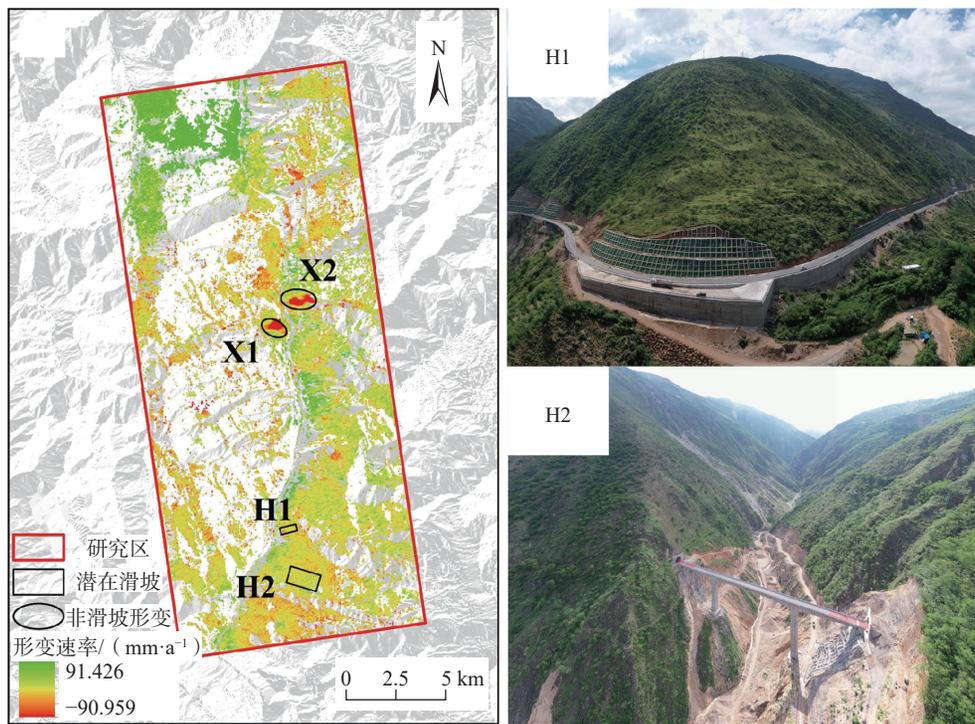


图 6 升轨潜在滑坡解译及实地考察结果

Fig. 6 Interpretation and field investigation results of potential landslide in ascending orbit

表 2 升轨数据库岸形变区域解译结果列表

Table 2 List of interpretation results of shore deformation region in orbit lifting database

编号	形变区域名称	最大形变速率/(mm·a <sup>-1</sup> )	形变区域类别
H1	观音岩	19.846	潜在滑坡
H2	鱼坝	18.537	潜在滑坡
X1	六城村	76.259	非滑坡形变
X2	半坡	55.947	非滑坡形变

细解译结果如表 2 所示。

降轨数据库岸形变区域解译结果如图 7 所示,共选取库岸形变较大区域 6 处。结合无人机野外调查结果,发现典型潜在滑坡 4 处,分别用 H3 至 H6 编号;非滑坡形变区 2 处,分别用 X3 和 X4 表示,降轨数据详细解译结果如表 3 所示。

对比升轨和降轨数据解译结果可以看出,非滑坡形变区 X1、X2 与 X3、X4 分别相同,潜在滑坡 H1、H2 与 H3、H5 相互对应。另外,降轨数据还解译出除上述区

表 3 降轨数据库岸形变区域解译结果列表

Table 3 List of interpretation results of shore deformation region in orbit descent database

编号	形变区域名称	最大形变速率/(mm·a <sup>-1</sup> )	形变区域类别
H3	观音岩	10.726	潜在滑坡
H4	清水沟	17.605	潜在滑坡
H5	鱼坝	19.326	潜在滑坡
H6	大湾子	15.888	潜在滑坡
X3	六城村	48.871	非滑坡形变
X4	半坡	61.425	非滑坡形变

域以外的潜在滑坡 H4 和 H6,同一时间段不同轨道 SAR 数据集探测的形变结果能够相互对应,从侧面验证了本文 InSAR 结果的准确性,但受时间、空间失相干因素和几何畸变影响,升降轨形变信息有所差异,说明升降轨结合的方式能够有效弥补仅利用单一轨道识别结果不全面、不准确的缺陷,提升库岸潜在滑坡灾害识别和监测的准确性和有效性。

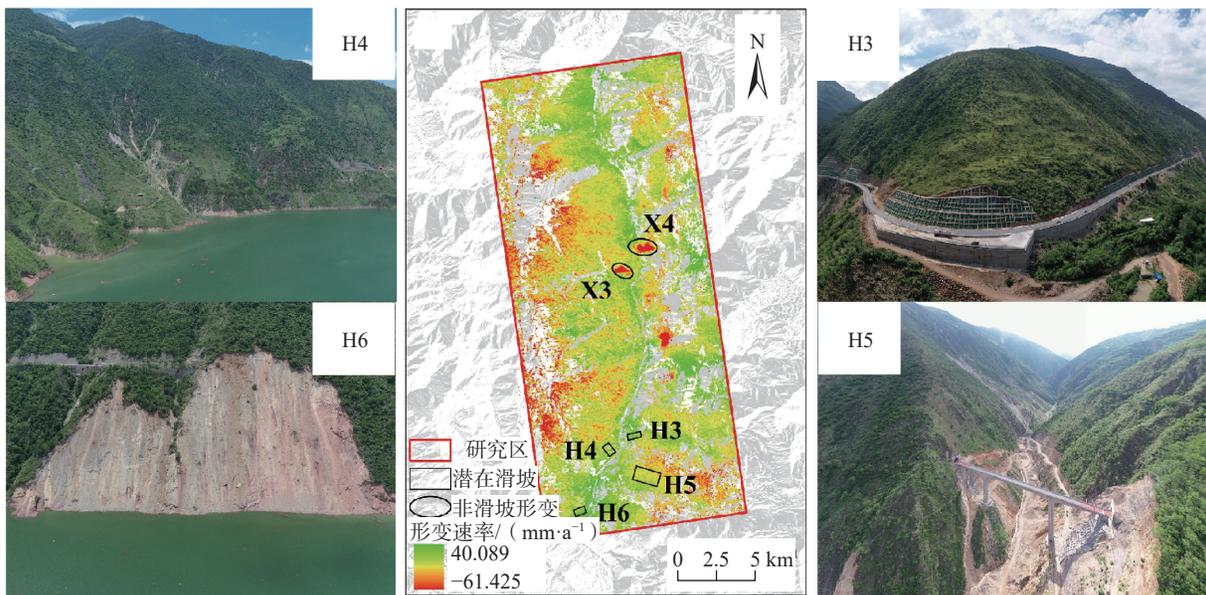


图 7 降轨潜在滑坡解译及实地考察结果

Fig. 7 Interpretation and field investigation results of potential landslide in descending orbit

### 4.2 库岸典型潜在滑坡变形分析

结合 4.1 节升降轨数据集库岸潜在滑坡解译结果,本文选取 H1、H2、H4 和 H6 四处典型潜在滑坡进行变形分析,分别在各滑坡形变结果中选取特征点,引入研究区降雨数据,绘制特征点在蓄水前后的时序形变曲线,并结合无人机野外调查结果分析库岸典型潜在滑坡的变形特征。

H1 滑坡地处观音岩,位于沿江公路东岸,滑坡形变速率如图 8(a)所示。滑坡整体形变速率范围为

-10.726 ~ 15.433 mm/a,分别选取滑坡体上缘和下缘特征点 A、B 与降雨数据构建时序形变曲线如图 8(b)所示,特征点 A 和 B 时序形变速率波动趋势大致相同,每年雨季形变速率较旱季明显增加。2019 年 10 月—2020 年 5 月形变速率减小,2021 年 4 月后形变速率增大,同比增加约 16 mm/a。

经实地考察,该滑坡坡体上缘为自然坡体,坡体下缘已进行边坡加固,故在 2019 年 10 月至 2020 年 5 月间 B 点较 A 点形变速率变化相对稳定。受降雨因素影

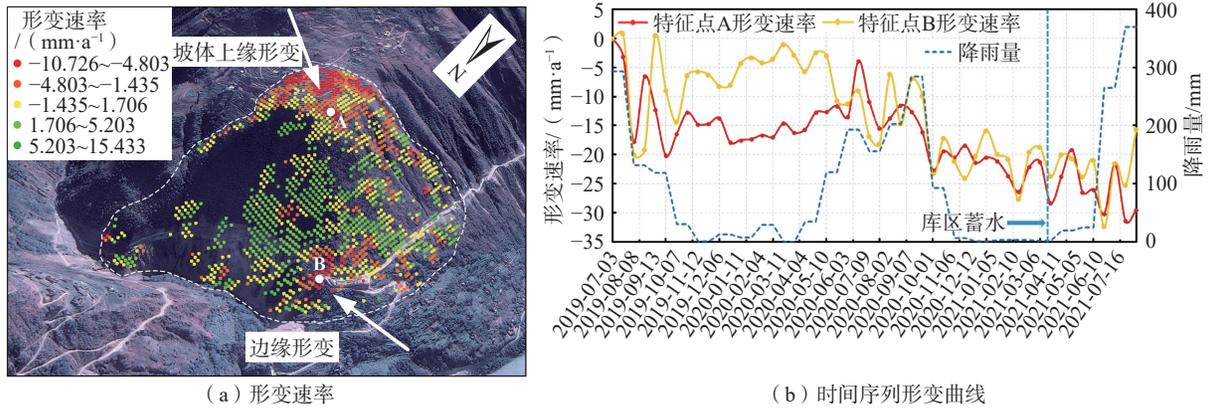


图 8 H1 潜在滑坡变形特征

Fig. 8 H1 potential landslide deformation characteristics

响, 坡体在雨季滑动速率增大。2021 年 4 月至 5 月, 降雨量几乎为零, 水电站蓄水导致库区水位上升, 库岸下缘受到江水侵蚀改变坡体上下缘间的平衡关系, 使该滑坡体形变量增大。

H2 滑坡地处鱼坝村, 金沙江支流末端。滑坡形变速率如图 9(a) 所示, 形变较大值处于坡体中上部, 形变范围在  $-19.326 \sim 8.254$  mm/a。在坡体两侧分别选择特

征点 C、D 结合降雨数据构建时序形变曲线见图 9(b), 特征点 C 和 D 形变速率变化趋势基本一致, 与降雨数据呈现一定相关性, 雨旱两季形变速率差异较小。2020 年 1 月至 10 月间, 形变速率逐渐减小, 2021 年 1 月后形变速率振荡变化, 2021 年 4 月之后, 形变速率增加值超过 10 mm/a。

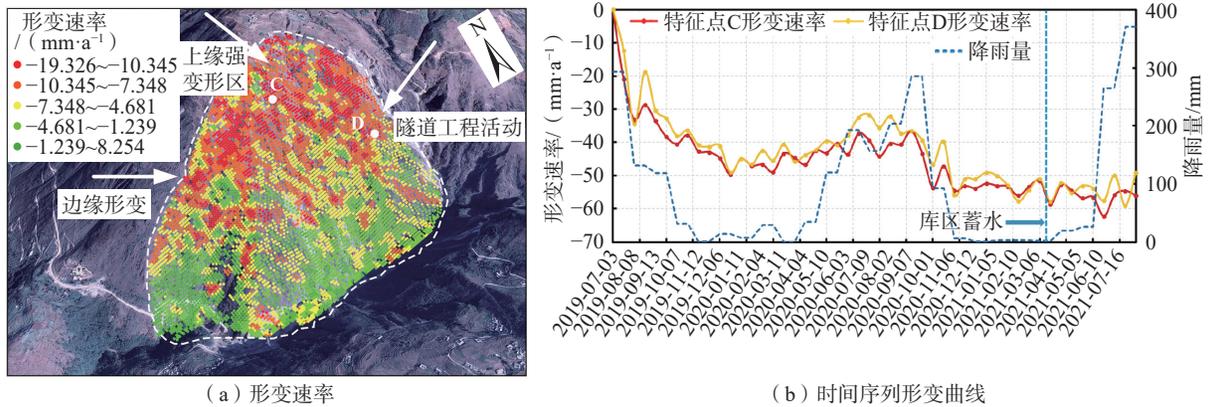


图 9 H2 潜在滑坡变形特征

Fig. 9 H2 potential landslide deformation characteristics

经野外实地调查, H2 滑坡滑面自上而下呈倒“V”字形。由于隧道工程尚未完工, 附近仍伴有部分工程活动, 故在 2020 年雨季坡体滑动速率对降雨因素响应较弱, 表现为形变速率逐渐减小。从图 9(b) 可以看出, 2021 年 4 月以后, 特征点 C 和 D 形变速率相对之前有所增加, 此时降雨量较小, 说明蓄水导致的库区水位抬升也对远离河道的坡体产生影响。

H4 滑坡体地处清水沟, 位于库区西岸。滑坡形变速率如图 10(a) 所示, 滑坡整体形变范围为  $-17.605 \sim 9.012$  mm/a, 形变速率较大区域位于坡体中部。由图 10(b)

特征点与降雨数据构建的时序形变曲线可知, 特征点 E 呈振荡变化趋势, 雨旱两季形变速率差异明显。2020 年 8 月后形变速率急剧增大, 2021 年 4 月之后形变速率相比同期增加约 17 mm/a。

通过野外调查可知, H4 滑坡属于临江大型冲沟, 沟面呈褶皱形态, 目前尚未发育为真正意义的滑坡。图 10(b) 时序形变曲线在 2020 年雨季呈梯度下降趋势, 主要原因是降水冲刷沟壑表面使冲沟坡面向下滑动。2021 年 4 月之后相比同期形变速率明显增加, 此时受降雨影响微弱, 说明该滑坡体对水位变化有较强响

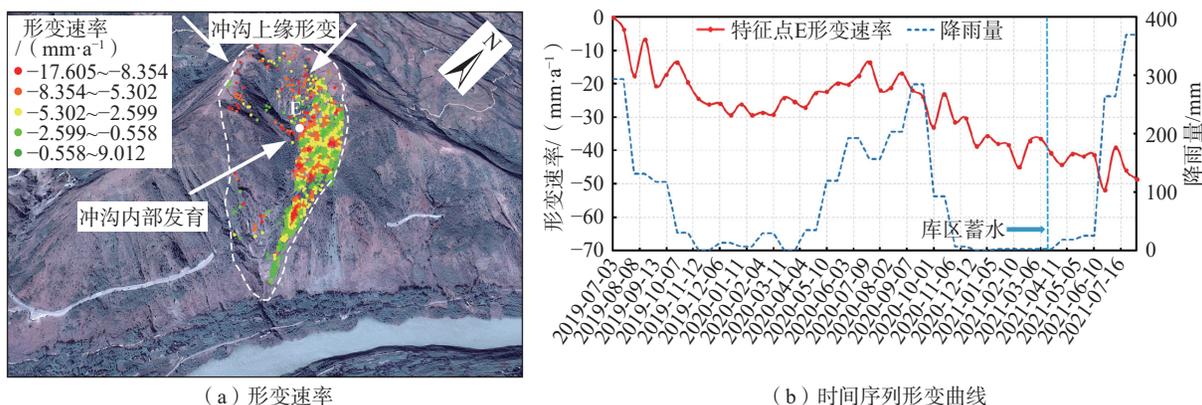


图 10 H4 潜在滑坡形变特征

Fig. 10 H4 potential landslide deformation characteristics

应,原本裸露的坡体下缘遭受江水侵蚀,下缘坡体在动水压力作用下土壤结构趋向松散状态,上缘冲沟体失稳,自然产生向下形变。

H6 滑坡位于库区西岸大湾子隧道,滑动面处于隧道临江一侧,其形变速率如图 11 所示,整体形变速率为

-15.888 ~ 16.326 mm/a,选取滑坡体中部特征点 F 与降雨数据建立时序形变曲线(图 11),特征点 F 形变速率整体呈波动趋势,在 2020 年雨季形变速率较旱季增速明显。2021 年 4 月之后,形变速率缓慢增大,较同期增加约 16 mm/a。

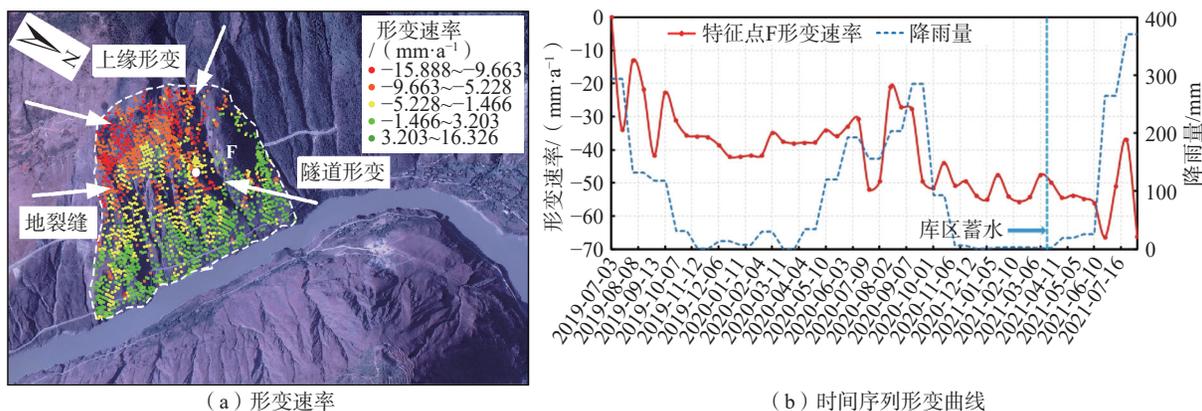


图 11 H6 潜在滑坡形变特征

Fig. 11 H6 potential landslide deformation characteristics

经野外实地考察,发现 H6 滑坡已发育且有部分滑动痕迹,在坡体顶端还发育有一定程度的裂缝(图 11),所以在雨季降水冲刷坡面且沿裂缝渗入坡体改变其土体应力结构,使坡体产生较大形变。由图 11 可以看出,2021 年 4—5 月间,降雨量几乎为零,但形变速率变化明显,说明该坡体对水位抬升具有较强响应,降水沿裂缝进入坡体内部,促进了破裂面的贯通,而水位抬升致使坡体下缘和滑动面软化,降低其抗剪强度,降雨和水位抬升的共同作用可能使 H6 滑坡进一步发育,后续应当对该滑坡进行重点监测。

5 结论

本文联合升降轨 Sentinel-1 SAR 数据,采用 SBAS-

InSAR 技术并结合无人机野外调查数据,分析白鹤滩水电站库岸潜在滑坡的变形特征,得到以下结论:

- (1) 白鹤滩水电站库区 LOS 方向形变速率为 -90.959 ~ 91.426 mm/a,受蓄水因素影响,各库岸典型潜在滑坡形变速率明显加快,蓄水前后形变平均增速达 10 mm/a 以上;
- (2) 白鹤滩水电站库岸潜在滑坡对水位变化具有较强响应,蓄水量增加是当前库岸潜在滑坡发育的关键性诱因,水位抬升之后潜在滑坡形变速率变化明显,在降雨和蓄水等因素共同作用下,白鹤滩水电站库岸潜在滑坡存在失稳风险;
- (3) 降轨数据集探测的形变信息较为丰富,主要集中在库区西岸,而升轨数据集仅在库区东岸部分区域形

变较为明显,故联合升降轨 SAR 数据能有效克服仅利用单一轨道导致的几何畸变等问题,使水电站库岸潜在滑坡变形监测更加准确、全面。

#### 参考文献(References):

- [1] 代贞伟,殷跃平,魏云杰,等.三峡库区藕塘滑坡特征、成因及形成机制研究[J].水文地质工程地质,2015,42(6):145-153. [DAI Zhenwei, YIN Yueping, WEI Yunjie, et al. Characteristics, origin and formation mechanism of the Outang landslide in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 145-153. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张鹏,张森林,黄波林,等.岸坡消落带岩体劣化的新生型滑坡(崩塌)隐患演化模式研究[J].工程地质学报,2021,29(5):1416-1426. [ZHANG Peng, ZHANG Senlin, HUANG Bolin, et al. Study on the evolution model of neogenic landslide (collapse) hazards in rock mass of hydro-fluctuation belt [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1416-1426. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 裴小龙,杨瀚文,宋东阳,等.雅砻江中游楞古水电站夏日滑坡发育特征及稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(1):75-82. [PEI Xiaolong, YANG Hanwen, SONG Dongyang, et al. Characteristics and stability analysis of Xiari landslide at Lenggu hydropower station in the middle reach of the Yalong river [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 75-82. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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 Songlin, XU Qiang, TANG Minggao, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 何少其,刘元雪,杨骏堂,等.库岸堆积层滑坡位移的分量响应模式及多因子模型[J].岩土力学,2020,41(8):2773-2784. [HE Shaoqi, LI Yuanxue, YANG Juntang, et al. A component response mode and multi-factor model for accumulation landslide displacement induced by reservoir [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2773-2784. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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. [LIAO Mingsheng, DONG Jie, LI Menghua, et al. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 332-341. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 解明礼,巨能攀,刘蕴琨,等.崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究[J].水文地质工程地质,2021,48(5):184-192. [XIE Mingli, JU Nengpan, LIU Yunkun, et al. A study of the risk ranking method of landslides and collapses full text replacement [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 184-192. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 康亚,赵超英,张勤,等.InSAR滑坡探测技术研究——以金沙江乌东德水电站段为例[J].大地测量与地球动力学,2018,38(10):1053-1057. [KANG Ya, ZHAO Chaoying, ZHANG Qin, et al. Research on the InSAR technique of landslide detection: A case study of wudongde hydropower station section, Jinshajiang [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(10): 1053-1057. (in Chinese with English abstract)]
- [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 Huiyan, LI Weile, XU Qiang, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 闫怡秋,郭长宝,张永双,等.基于SBAS-InSAR技术的西藏雄巴古滑坡变形特征[J].地质学报,2021,95(11):3556-3570. [YAN Yiqiu, GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, et al. Study of the deformation characteristics of the Xiongba ancient landslide based on SBAS-InSAR method, Tibet, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(11): 3556-3570. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 苏晓军,张毅,贾俊,等.基于InSAR技术的秦岭南部略阳县潜在滑坡灾害识别研究[J].山地学报,2021,39(1):59-70. [SU Xiaojun, ZHANG Yi, JIA Jun, et al. InSAR-based monitoring and identification of potential landslides in Lueyang County, the southern Qinling Mountains, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(1): 59-70. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 徐帅,王尚晓,牛瑞卿.基于InSAR技术的三峡库区巫山—奉节段潜在滑坡识别[J].安全与环境工程,2020,27(1):32-38. [XU Shuai, WANG Shangxiao, NIU Ruiqing. Identification of the potential landslide in Wushan: Fengjie in the Three Gorges Reservoir area based on InSAR technology [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(1): 32-38. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王振林,廖明生,张路,等.基于时序Sentinel-1数据的锦屏水电站左岸边坡形变探测与特征分析[J].国土资源遥感,2019,31(2):204-209. [WANG Zhenlin, LIAO Mingsheng, ZHANG Lu, et al. Detecting and characterizing deformations of the left bank slope near the Jinping hydropower

- station with time series Sentinel-1 data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2019, 31(2): 204–209. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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): 1560–1568. [ZHU Tongtong, SHI Xuguo, ZHOU Chao, et al. Stability monitoring and analysis of the shuping landslide in the Three Gorges area with Sentinel-1 images from 2016 to 2020 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1560–1568. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 史绪国, 徐金虎, 蒋厚军, 等. 时序 InSAR 技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与状态更新 [J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 4284–4292. [SHI Xuguo, XU Jinhu, JIANG Houjun, et al. Slope stability state monitoring and updating of the outang landslide, Three Gorges area with time series InSAR analysis [J]. *Earth Science*, 2019, 44(12): 4284–4292. (in Chinese with English abstract)]
- [16] LIAO M S, BALZ T, ZHANG L, et al. Characterization of landslide deformations in Three Gorges area using multiple InSAR data stacks [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6): 2704–2719.
- [17] ZHOU C, CAO Y, YIN K L, et al. Landslide characterization applying sentinel-1 images and InSAR technique: The muyubao landslide in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 3385.
- [18] LIU P, LI Z H, HOEY T, et al. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges Region, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 253–264.
- [19] 余雅文, 付广裕, 赵倩, 等. 白鹤滩水电站蓄水引起重力与库仑应力变化的模拟研究 [J]. *地球物理学报*, 2021, 64(6): 1925–1936. [SHE Yawen, FU Guangyu, ZHAO Qian, et al. Simulating changes of gravity and Coulomb stress caused by the impoundment of the Baihetan hydropower station [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(6): 1925–1936. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 冯文凯, 易小宇, 白慧林, 等. 白鹤滩水库初次蓄水对双河段岸坡稳定性的影响预测分析 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(1): 346–352. [FENG Wenkai, YI Xiaoyu, BAI Huilin, et al. Prediction and analysis of influence of the first impoundment of Baihetan Reservoir on the bank slope stability of Shuanghe river section [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(1): 346–352. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王哲, 赵超英, 刘晓杰, 等. 西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与 InSAR 形变监测 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2021, 46(10): 1569–1578. [WANG Zhe, ZHAO Chaoying, LIU Xiaojie, et al. Evolution analysis and deformation monitoring of yigong landslide in Tibet with optical remote sensing and InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1569–1578. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 黄观文, 王家兴, 杜源, 等. 顾及降雨及库水位因素的滑坡时滞分析与预测——以三峡库区新铺滑坡为例 [J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(3): 621–631. [HUANG Guanwen, WANG Jiaying, DU Yuan, et al. Time-delay analysis and prediction of landslide considering precipitation and reservoir water level: A case study of Xinpu landslide in Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(3): 621–631. (in Chinese with English abstract)]
- [23] HUANG H N, ZHANG X B, LI Z R, et al. Stability evaluation at Xishan Loess landslide using InSAR technique applying ascending and descending SAR data [C] //2021: 034519.
- [24] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375–2383.
- [25] DAI F, JIANG P, XU N W, et al. Focal mechanism determination for microseismic events and its application to the left bank slope of the Baihetan hydropower station in China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(7): 268.
- [26] 喜文飞. 滇东北山区无人机遥感影像预处理方法及滑坡特征识别研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2019. [XI Wenfei. Study on remote sensing image preprocessing method and landslide feature identification of UAV in northeast Yunnan Mountain area [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 张欣, 王运生. 白鹤滩水电站库区小江断裂带活动性研究 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25(2): 531–540. [ZHANG Xin, WANG Yunsheng. Activities of Xiaojiang fault zone in Baihetan hydropower station reservoir [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(2): 531–540. (in Chinese with English abstract)]