

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

# 基于InSAR技术的夏藏滩滑坡区地表变形监测与分析

岳 磊,刘昌义,丛晓明,唐彬元,付江涛,邢光延,雷浩川,赵吉美,吕伟涛,胡夏嵩

Surficial deformation monitoring and analyzing to the Xiazangtan landslides based on InSAR method

YUE Lei, LIU Changyi, CONG Xiaoming, TANG Binyuan, FU Jiangtao, XING Guangyan, LEI Haochuan, ZHAO Jimei, LYU Weitao, and HU Xiasong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307049

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

# 基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究

A study of deformation mode and formation mechanism of abedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology

姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 李凌婧, 任开, 刘星洪 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 135-146

# 金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析

Developmental characteristics and damming river risk of the Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River 吴瑞安,马海善,张俊才,杨志华,李雪,倪嘉伟,钟宁 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 120–128

# 基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析

An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR 葛伟丽, 李元杰, 张春明, 张红霞, 王志超, 杨红磊 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 198-206

# 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制

Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 李滨, 贺凯, 唐俊刚, 张天贵 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 73-81

# 舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究

A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu county 韩旭东, 付杰, 李严严, 王高峰, 曹琛 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 180–186

# 基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测

Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method 褚宏亮, 邢顾莲, 李昆仲, 王国利, 段奇三 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 124–132



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307049

岳磊, 刘昌义, 丛晓明, 等. 基于 InSAR 技术的夏藏滩滑坡区地表变形监测与分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 158-170. YUE Lei, LIU Changyi, CONG Xiaoming, et al. Surficial deformation monitoring and analyzing to the Xiazangtan landslides based on InSAR method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 158-170.

# 基于 InSAR 技术的夏藏滩滑坡区地表变形 监测与分析

岳 磊<sup>1</sup>,刘昌义<sup>1</sup>,丛晓明<sup>2</sup>,唐彬元<sup>2</sup>,付江涛<sup>3</sup>,邢光延<sup>4</sup>,雷浩川<sup>1</sup>,赵吉美<sup>4</sup>,吕伟涛<sup>1</sup>,胡夏嵩<sup>1</sup>
(1. 青海大学地质工程学院,青海 西宁 810016;2. 青海省地质测绘地理信息院,青海 西宁 810001;
3. 青海大学农林科学院,青海 西宁 810016;4. 青海大学农牧学院,青海 西宁 810016)

摘要:黄河上游两岸巨型滑坡发育,对以龙羊峡水电工程为代表的黄河上游梯级电站以及当地居民生产生活和生命财产 安全等带来一定影响和潜在危害。为研究黄河上游巨型滑坡分布区地表形变特征,以位于青海尖扎境内的黄河上游右岸 夏藏滩滑坡分布区为研究区,利用升轨、降轨 Sentinel-1A 影像数据,采用 InSAR 技术对滑坡体地表形变信息进行提取和分 析,并通过实地调查对基于 InSAR 技术监测结果进行现场验证。结果表明:采用升轨、降轨 Sentinel-1A 影像数据所获得的 区内滑坡体地表最大形变速率分别为 24 mm/a 和 21 mm/a,最大累计变形量分别为 133 mm 和 128 mm; 2017—2022 年监测周 期内,随着监测时间增加,位于夏藏滩滑坡前缘的次级滑坡特征点 A 和 B 累计位移量呈逐渐增加的变化趋势;基于 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 两种方法所得到的滑坡体地表累计变形量具有一致性特征,该结果表明 InSAR 技术适用于黄河上游 拉干峡一寺沟峡流域巨型滑坡体地表变形的监测。该研究结果不仅为开展黄河上游巨型滑坡地表变形监测提供有效方 法,而且为该流域有效防治古滑坡复活提供数据支撑和实际指导。

关键词:黄河上游;拉干峡一寺沟峡流域;夏藏滩巨型滑坡;InSAR 技术;地表变形监测 中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2024)03-0158-13

# Surficial deformation monitoring and analyzing to the Xiazangtan landslides based on InSAR method

YUE Lei<sup>1</sup>, LIU Changyi<sup>1</sup>, CONG Xiaoming<sup>2</sup>, TANG Binyuan<sup>2</sup>, FU Jiangtao<sup>3</sup>, XING Guangyan<sup>4</sup>, LEI Haochuan<sup>1</sup>, ZHAO Jimei<sup>4</sup>, LYU Weitao<sup>1</sup>, HU Xiasong<sup>1</sup>

School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. Qinghai Institute of Geological Surveying and Mapping Geographic Information, Xining, Qinghai 810001, China; 3. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 4. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: The development of super large scale landslides on the upper reaches of the Yellow River has brought certain impacts and potential hazards to the cascade power stations in the upper reaches of the Yellow River

收稿日期: 2023-07-30; 修订日期: 2024-01-22 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42041006);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905);青海省自然科学基金项目(2020-ZJ-906)

第一作者: 岳磊(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感技术应用等方面的研究工作。E-mail: yuelei0102@163.com

通讯作者: 付江涛(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事地质工程与环境地质等方面的研究工作。E-mail: fujiangtao865@sina.com

represented by the Longyang Gorge Hydropower Project, as well as the production, life, and property safety of residents. To analyze the surface deformation characteristics in the distribution area of super large scsle landslides in the upper reaches of the Yellow River. This study used InSAR to extract and analyze the surface deformation information of landslide by using Sentinel-1A image data of ascending and descending orbit in the Xiazangtan landslide area in the upper right bank of the Yellow River in Jianzha County, Qinghai Province. The monitoring results based on the InSAR method were then verified on site through field investigation. The results show that the maximum deformation rates of the landslide surface in the area obtained from the ascending and descending Sentinel-1A image data are 24 mm/a and 21 mm/a, respectively, with the maximum cumulative deformation of 133 mm and 128 mm. During the monitoring period from 2017 to 2022, with the increase in monitoring time, the cumulative displacement of secondary landslide feature points A and B located at the landslide front of Xiazangtan showed a gradual increase trend. The cumulative deformations of landslide surface obtained based on PS-InSAR and SBAS-InSAR methods have consistent characteristics, and the results show that the InSAR method is suitable for monitoring the surface deformation of super large scale landslide from Lagan Gorge to Sigou Gorge in the upper reaches of the Yellow River. This study not only provides an effective method for monitoring the surface deformation of super large scale landslides in the upper reaches of the Yellow River, but also provides data support and practical guidance for the effective prevention and treatment of ancient landslide resurrection in the basin.

**Keywords**: upper reaches in the Yellow River; Lagan gorge to Sigou gorge; Xiazangtan super large scale landslide; InSAR technology; surface deformation monitoring

黄河上游地区处于我国一级、二级阶梯的过渡 带,其中拉干峡一寺沟峡段属地质灾害的高易发区<sup>11</sup>, 该区域内特大型古滑坡发育众多且危害重大<sup>12</sup>。已有 研究表明,在自然<sup>13</sup>(降雨、冻融循环等)和人类活动<sup>12,4</sup> (斜坡开挖、灌溉等)的多重因素影响下,古滑坡复活 的可能性增大,而古滑坡的复活,不仅会威胁当地水 电工程的安全运行,还会对当地居民生命财产安全和 经济建设构成严重威胁<sup>15</sup>。研究古滑坡的形变分布特 征、形变速率以及形变规律,可为古滑坡复活的早期 识别、失稳模式和机理分析、危险范围和风险等级确 定以及提前预警提供重要支撑<sup>16</sup>。因此,开展该区域 内地表形变监测,以及对次级滑坡、崩塌、地面沉降 等灾害进行危险性评价,对于黄河上游地区生态地质 安全具有重要意义。

国内对古滑坡变形监测采用的方法主要有宏观 地质监测法<sup>[7]</sup>、大地精密测量法<sup>[8]</sup>、GPS 监测<sup>[8]</sup>、近景 摄影测量<sup>[9]</sup>等传统监测手段以及以及包括 InSAR<sup>[10]</sup>在 内的遥感技术等。其中, InSAR(合成孔径雷达干涉测 量)技术具有分辨率高、覆盖范围广、观测周期短、植 被穿透性强、不受天气影响、对地表形变高度敏感等 特点,其测量精度可至毫米级,已广泛应用于地表形 变监测和滑坡变形监测中<sup>[11-14]</sup>。目前,国内外学者利 用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术在滑坡监测方面开 展了大量研究<sup>[15]</sup>。张永双等<sup>[16]</sup>采用 PS-InSAR 和 D-InSAR 技术对大渡河流域部分古滑坡复活进行早期识别,指出与 D-InSAR 技术相比, PS-InSAR 技术更适用于古滑坡稳定性的监测; Guo等<sup>[17]</sup>采用 SBAS-InSAR 技术对西藏雄巴古滑坡地表变形特征进行提取和分析,指出该古滑坡正处于持续蠕滑状态,且部分区域变形速度呈加快趋势,可能导致雄巴古滑坡大规模复活; 王溢禧等<sup>[3]</sup>通过野外调查并基于 SBAS-InSAR 技术对席芨滩巨型古滑坡前缘次级滑坡变形特征开展研究,认为该滑坡可能处于蠕滑变形阶段。Yan 等<sup>[18]</sup>采用 SBAS-InSAR 技术分析了 2018 年 6 月 至 2021 年 8 月四川丹巴县甲居古滑坡发育特征,结果表明该滑坡最大变形速率较显著, 雷达视线、坡度和垂直方向最大形变速度分别为-179, -211, -67 mm/a。

目前已有针对黄河上游巨型滑坡的研究主要集中在古滑坡形成机理<sup>[19-20]</sup>、空间形态<sup>[21]</sup>、滑坡年代测定<sup>[22]</sup>等方面,有关滑坡区地表形变提取和监测等方面的相关研究相对较为缺乏,尤其是采用 InSAR 技术对黄河上游滑坡分布区地表形变方面开展的研究相对较为有限。基于此,本研究利用升轨、降轨的 Sentinel-1A影像数据,使用 PS-InSAR 技术和结合 PS 特征点的 SBAS-InSAR 技术对黄河右岸的夏藏滩滑坡分布 区 2017—2022 年间发生的地表形变信息进行提取和 分类,探讨该滑坡分布区地表形变分布空间特征和滑 坡复活状况,并对该滑坡前缘具有潜在危害性的次级 滑坡形变规律进行时序分析。

# 1 研究区概况

夏藏滩滑坡位于青藏高原东北缘黄河上游流域, 主体部分位于黄河右岸,残留滑体在黄河左岸滩心村 附近亦有分布,距离尖扎县城约5km,海拔高度约为 2 500 m。选取位于黄河右岸的夏藏滩滑坡分布区作为研究区,其地理位置和分布区范围如图 1 所示。研究区处于青藏高原寒区、西北干旱区和东部季风湿润区交汇带,同时受东南季风、西风环流和西南季风的影响,属高原大陆性半干旱气候;多年平均降水量为378.44 mm,主要集中在夏季,其他月份较少;多年平均蒸发量为 1 689 mm,多年平均气温为 8.1 ℃<sup>[23]</sup>。







夏藏滩滑坡为新近系泥岩滑坡<sup>[24]</sup>,岩土体类型是 由砂砾岩、砂岩、泥岩组成的层状软弱碎屑岩[25]。该 滑坡顶部表层主要为上更新统风积(Qp<sub>3</sub><sup>eol</sup>)黄土,中部 主要为上更新统风积(Qp<sup>ed</sup>)黄土和全新统湖相纹泥层, 前缘坡脚为黄河冲积扇和河漫滩,主要由全新统冲积 (Qh<sup>al</sup>)黄土状粉土和卵石组成。夏藏滩滑坡体右岸残 留滑体呈"圈椅型",两侧以冲沟为界,东西长4356m、 南北宽 3 126 m, 平均厚 104 m, 面积为 10.5×106 m2, 体 积为14.56×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。该滑坡主要分为2期滑动,其中 I期为整体滑动,约发生在5万年前,造成该滑坡体 后缓前陡,中部地势平坦且曾积水成湖;Ⅱ期滑坡为 I期滑坡前缘的解体形成的滑坡,滑体长约1.31 km, 两个次级滑坡体宽约 2.4 km<sup>[24]</sup>。相关研究表明, 在全 球气候变暖、极端气候现象激增和该区复杂地质条件 背景下,夏藏滩滑坡分布区极易发生次级滑坡、泥石 流和陡坡崩塌等地质灾害<sup>[26]</sup>。

根据课题组野外调查结果,区内所存在的地表变 形迹象主要有次级滑坡、陡坡崩塌、地面沉降以及拉 裂缝等。其中夏藏滩滑坡体后缘和前缘位置处以发 育次级滑坡为主,在次级滑坡体表面拉裂缝较为明 显,且主要分布在滑坡体后缘和前缘。

# 2 实验数据与研究方法

#### 2.1 数据来源

欧空局 Sentinel-1A 数据免费开放、可连续性获 取,被广泛应用于地学分析领域<sup>[27]</sup>。故采用欧空局升 轨 71 景、降轨 68 景,合计共 139 景 Sentinel-1A 单视 复数影像(Single Look Complex, SLC)为研究数据。为 实现将 SAR 影像和干涉产品像素与地理位置之间对 应的目的,采用 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 数字高 程模型(ASTER GDEM 数据获取网站为地理数据空间 云),作为外部地形数据对 SAR 影像进行地形校正投 影转换。

2.2 基于 PS-InSAR 技术和 SBAS-InSAR 技术提取夏 藏滩滑坡区地表形变

PS-InSAR(Permanent Scatterers-InSAR)技术是利

用建筑物或者岩石等永久散射体的相位变化特征来获得时间序列上的地表形变<sup>[28]</sup>。SBAS-InSAR(Small Baseline Subset-InSAR)技术是将所有的 SAR 影像组成若干个小基线集合,并利用最小二乘法得到每个小基线集合的地表形变,然后利用奇异值分解(SVD)方法对多个小基线集合进行联合求解,最后采用估算和去除大气相位的方法,以获取目标在时间序列上的形变信息<sup>[29]</sup>。

在 SBAS-InSAR 轨道精炼环节和重去平的处理过 程中,需要采用人工选择地面控制点(ground control point, GCP)方式用以提高结果的准确性。结合已有相 关研究<sup>[30-32]</sup>,选择 GCP 的具体做法为:首先基于 Sentinel-1A 影像数据,使用 PS-InSAR 技术对滑坡体地表形变 信息进行提取,得到夏藏滩滑坡分布区基于 PS-InSAR 技术所提取的干涉点的形变速率;在此基础上,从位 于该滑坡分布区域内形变速率小于 0.1 mm/a 的干涉 点中选择 25 个点作为 GCP,其位置分布如图 2 所示。



图 2 研究区地面控制点与特征点位置示意图 Fig. 2 Position of ground control point and feature points in the study area

# 3 地表形变结果及分析

3.1 基于 InSAR 技术的夏藏滩滑坡区地表形变结果

图 3 为基于 PS-InSAR 技术所获取的研究区雷达 视线(LOS)方向形变结果,图中累计变形量和形变速 率的负值表示地表形变点向着远离雷达天线的方向 运动,正值则表示地表形变点向着靠近雷达天线的方向 向运动。由图可知,绝大部分的 PS 点累计变形量均 为-10~10 mm,形变速率为-5~5 mm/a。因此,需要 对研究区内潜在的不稳定区域进行持续的监测与分 析,以便更准确地揭示其分布格局和变形特征。

图 4 为基于 SBAS-InSAR 技术提取到的雷达视线 (LOS)方向上夏藏滩滑坡体地表形变的形变速率和累 计变形量结果。由图可知,采用基于升轨数据所提取 到的滑坡体地表形变速率为-24~7 mm/a,累计变形 量为-133~42 mm;基于降轨数据所提取到的该滑坡 体地表形变其形变速率为-21~11 mm/a,累计变形量 为-128~47 mm。此外,由 SBAS-InSAR 技术得到的 地表形变结果表明,在夏藏滩滑坡后缘和前缘均存在 明显的形变区(Q1 和 Q2 区域),以及在滑坡中部居民 生活区亦存在相对显著的形变现象。

## 3.2 基于两种技术的地表形变结果

由于 PS-InSAR 技术和 SABA-InSAR 技术在干涉 叠加处理上存在差异,故两者的干涉结果也会存在一 定差异性。为准确分析基于同一轨道数据条件下, PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术干涉结果在形变量级 上的差异,首先基于升轨、降轨数据结果分别选择 10个位于区内形变量较大的特征点;然后,计算由 PS-InSAR 技术和 SBAS-InSAR 技术分别提取的 10 个特 征点累计变形量的差值,并以差值绝对值来表示2种 方法结果的差异性,即该差值绝对值愈小则说明采用 2种方法获得结果间的差异亦愈小,反之差异则愈 大。图 5 为区内 20 个特征点分布位置示意图, 表 1 为20个特征点累计变形量及变化量之间的差值。通 过分析可知,特征点t3的累计变形量差值绝对值为 10.5 mm, 大于 10 mm; 类似地, 特征点 T5、T6、T8 和 t10的累计变形量差值绝对值为 5~10 mm, 分别为 9.3, 8.1, 5.6, 7.5 mm; T1、T2 和 t1 等其余 15 个特征点 的累计变形量差值绝对值小于5mm。差值绝对值小 于 5 mm 的特征点占总数的 75%, 差值绝对值处于区 间 5~10 mm 的特征点占总数的 20%, 差值绝对值大 于 10 mm 的特征点占总数的 5%。通过进一步计算可 知,各特征点差值绝对值的平均值均小于 5 mm。说 明采用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 2 种方法开展区内 地表变形量大小的提取方面表现出一致性较高的特 点<sup>[33]</sup>。

**3.3** 基于 SBAS-InSAR 技术夏藏滩滑坡区地表形变 分布空间特征

分别采用 PS-InSAR 技术和 SBAS-InSAR 技术对 夏藏滩滑坡区地表形变信息进行提取,有效避免了采 用 SBAS-InSAR 技术提取区内地表形变信息过程中大 气延迟和时空失相干的影响,进而提高了 SBAS-InSAR 技术提取地表形变信息的准确性<sup>[34]</sup>。需要指出



(c)基于降轨数据形变速率(2017年2月-2022年12月)

(d)基于降轨数据累计变形量(2017年2月—2022年12月)

图 3 基于 PS-InSAR 技术的研究区地表形变提取结果



的是,采用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术对夏藏滩滑坡区地表形变进行提取,所识别出的明显地表形变区域均为局部性的。由于夏藏滩滑坡目前处于整体稳定的状态<sup>[2]</sup>,为进一步明确夏藏滩滑坡区地表形变分布空间特征,结合相关研究<sup>[17,35]</sup>,采用 5 mm/a 的形变速率作为划分区内地表形变强弱的阈值,即将夏藏滩滑坡分布区地表形变划分为稳定区( $V_{LOS} < 5$  mm/a)和形变区( $V_{LOS} > 5$  mm/a),图 6 为基于 SBAS-InSAR 技术提取的夏藏滩滑坡区地表形变区分布示意图。由该图可知,基于升轨数据获得的地表形变区形变速率为-23~7 mm/a,最大为-23 mm/a;采用基于降轨数据获得的地表形变区形变速率为-21~11 mm/a,最大为

-21 mm/a。由此可知,2种轨道数据所得到的该滑坡 地表形变速率较为接近。此外,通过目视解译可知, 滑坡体分布区地表形变均表现为远离雷达天线的方 向运动即沉降变形<sup>[36]</sup>,该特征与滑坡运动的基本规律 相一致<sup>[15]</sup>,即赵蓓蓓等<sup>[15]</sup>采用 SBAS-InSAR 对三峡库 区木鱼包滑坡的形变特征进行提取与分析,得出 InSAR 结果显示该滑坡变形区域主要表现为沉降,与 滑坡向下变形的基本规律一致的结论。

# 3.4 夏藏滩滑坡复活状况分析

相关研究表明,区内降水主要分布在 5—9月,占 到全年总降水的 86%<sup>[23]</sup>,且集中降雨是诱发区内滑坡 体变形增大的关键因素<sup>[3]</sup>。为了进一步研究夏藏滩滑



(c)基于降轨数据形变速率(2017年2月-2022年12月)

(d)基于降轨数据累计变形量(2017年2月—2022年12月)

图 4 基于 SBAS-InSAR 技术的研究区地表形变提取结果



坡体复活状况,在该滑坡后缘、中部和前缘分别选择 G1、G2和G3等3个特征点(图2),通过采用SBAS-InSAR 技术提取的区内累计变形量信息,分别基于升轨、降 轨影像数据绘制各特征点 2017—2022年的累计位移 量与时间关系曲线,如图7所示。

通过分析图 7 可知,基于升轨、降轨数据所获得 G1 点累计变形量分别为 38.2,19.3 mm,G2 点累计变 形量分别为 6.1,1.7 mm,G3 点累计变形量分别为 1.2, 6.7 mm。G1 点变形量相对较大,形变速率超过 5 mm/a, 而 G2 和 G3 点未出现明显的变形。

3.5 夏藏滩滑坡体前缘次级滑坡形变时序分析 根据实地调查发现,夏藏滩滑坡体前缘发育次级 滑坡(为便于叙述下文将该次级滑称为1#滑坡),图8(a) 为夏藏滩滑坡分布区前缘1#滑坡分布位置,图8(c) (d)(e)为野外现场调查结果。由图可见,该次级滑坡 东西长约200m,南北宽约112m,在1#滑坡体后缘发 育数条裂缝,最大的裂缝长约50m,最宽处约40cm, 且上部地面表现出呈台阶状错落分布特征。若1# 滑坡发生失稳,将会导致位于该滑坡前缘位置的公 路、水渠、农田以及滑坡体上的输电线路受到影响和 破坏。

为了对 1#滑坡在时间序列上表现出的变形特征 进行分析,在 1#滑坡体不同位置处选择 A 点和 B 点 2 个变形特征点,如图 8(b)所示,得到 A、B 点的累计



图 5 黄河右岸夏藏滩滑坡分布区地表特征点位置示意图 Fig. 5 Location of surface feature points in the Xiazangtan landslide distribution area on the right bank of Yellow River

位移量与时间关系曲线(图9)。由图9可知,基于升 轨数据所获得的特征点A累计变形量为-76.9 mm,年 均形变速率为-12.8 mm/a,特征点B累计变形量为 103.2 mm,年均形变速率为-17.2 mm/a;基于降轨数据 所获得的特征点A累计变形量为-23.3 mm,年均形变 速率为-3.9 mm/a;特征点B累计变形量为-47.8 mm, 年均形变速率为-7.9 mm/a。

# 4 讨论

# 4.1 采用 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 技术所提取的地 表形变点空间分布差异性分析

为进一步明确 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 所提取的形变点在空间分布上的差异, 对图 3 和图 4 反映的

地表形变点分布做了对比。结果表明相较于 PS-InSAR 技术,采用 SBAS-InSAR 技术所获得的形变区域相对 更为全面,且在空间分布上更为连续,而 PS-InSAR 监 测结果所获的形变区域分布则相对较为离散,基本呈 点状分布。产生以上差异的主要原因在于,采用 PS-InSAR 技术在提取地表形变时受到区内多山地的地形 条件等因素限制<sup>[37]</sup>;加之,研究区内居民生活区种植 农作物等地表活动频繁,其结果使得区内永久散射体 分布较少所导致。此外,相类似的研究有,鲁魏等<sup>[38]</sup> 采用 SBAS-InSAR 技术和 PS-InSAR 技术对西南科技 大学青义校区地表形变进行了提取和分析,结果表明 在形变空间分布上相比较于 PS-InSAR 技术的监测结 果,SBAS-InSAR 监测结果连续性相对更好。

**4.2** 基于 SBAS-InSAR 技术利用升轨、降轨影像所提取的形变点差异性及原因

对比分析利用 SBAS-InSAR 技术从升轨和降轨影 像数据中提取的地表形变点的差异。结果表明,分别 使用升轨和降轨影像数据所提取到的夏藏滩滑坡体 地表形变点,在空间分布和形变量级方面均表现出不 同的特征。例如在滑坡后缘 Q1 区域,基于升轨影像 数据所得到的结果主要表现为沉降运动,而基于降 轨影像所获得的结果则表现为抬升运动。这是由于 SAR 卫星固有的侧视成像模式,在进行区内地表形变 信息提取的过程中,使用单一轨道影像对形变点进行 提取时易受 SAR 影像几何畸变的影响,因此采用 SBAS-InSAR 技术得到的形变点空间分布上存在较大 差异性。相类似的研究结论有,涂宽等<sup>[39]</sup>利用 InSAR 技术获得的宁夏隆德县升轨和降轨地表形变速率,指 出不仅高形变区的分布存在差异,而且不同轨道数据 所提取的最大形变速率差值为 22 mm/a。此外,上述

```
表 1 基于 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术的研究区地表特征点累计变形量对比
```

Table 1	Comparison of cumulative	deformation of surface	feature points in the	e study area based on	PS-InSAR and SBAS-InSAR
---------	--------------------------	------------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------------

特征点编号	SBAS累计变形量/mm	PS累计变形量/mm	差值绝对值	特征点编号	SBAS累计变形量/mm	PS累计变形量/mm	差值绝对值
T1	22.3	22.1	0.2	t1	23.9	28.3	4.4
T2	30.5	27.8	2.7	t2	-20.6	-20.4	0.2
Т3	22.9	25.3	2.4	t3	-25.9	-36.4	10.5
T4	-57.6	-62.3	4.7	t4	26.6	29.3	2.7
T5	35.2	25.9	9.3	t5	-38.6	-41.1	2.5
T6	26.5	34.6	8.1	t6	24.1	23.3	0.8
Τ7	17.6	18.4	0.8	t7	21.8	26.5	4.7
T8	17.1	22.7	5.6	t8	-24.1	-27.4	3.3
Т9	-23.6	-28.4	4.8	t9	-21.6	-22.5	0.9
T10	17.6	20.3	2.7	t10	-28.4	-35.9	7.5

注:表中T1-T10为基于升轨结果选取的特征点;t1-t10为基于降轨结果所选取的特征点。



(a)采用升轨影像数据所提取形变分布

(b)采用降轨影像数据所提取形变分布







结论,进一步说明使用升轨、降轨数据提取区内滑坡 体地表变形信息的必要性<sup>[26,40]</sup>。

4.3 基于 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术所提取的累 计变形量对比分析

为进一步分析同一数据源条件下,采用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术所提取的累计变形量的差异性。选择 20 个形变特征点,并计算这 20 个特征点基于 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术所提取的累计变形量 的差值,结果表明所选择的 20 个特征点均保持了相同的形变趋势,且 75% 的特征点的差值绝对值小于 5 mm。进一步验证了采用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术应用于区内夏藏滩滑坡体地表变形监测结果的 可靠性。相类似的研究有,付波霖等<sup>[41]</sup>利用 PS-InSAR

和 SBAS-InSAR 技术提取西藏江达县波罗乡白格滑坡 的形变信息,通过选择 4个特征点对比 PS-InSAR 等 2 种方法所提取的 4 个特征点累计变形量差异,得到 2 种方法结果基本相一致的结论,进一步验证了 2 种 时序 InSAR 技术应用于滑坡监测中的可靠性。

4.4 夏藏滩滑坡体不同位置变形量对比及原因分析

在 3.4节已述及位于滑坡体不同位置处的 G1、 G2和G3等3个点最大累计变形量分别为 38.2, 6.1, 6.7 mm,其中G1点累计变形量相对最大。根据实地 调查结果可知,变形点G1点位于夏藏滩滑坡体后缘 所处边坡坡度较大,且在该位置处修筑有简易盘山公 路,过往车辆相对较为频繁,对边坡扰动程度相对强 烈,其结果造成G1处的变形大于G2和G3处。由



(a)1#滑坡分布位置



(b)1#滑坡特征点A、B位置示意



(c)1#滑坡后缘裂缝调查



# (e)1#滑坡后缘裂缝调查







G1、G2和G3地表累计变形量对比结果反映出夏藏滩 滑坡整体稳定性较好,且该结论与周保<sup>[2]</sup>的研究结论 相一致。此外,在野外实地调查中观察到位于G1点 位置处地表植被发育较差并且有落水洞发育,据此可 判断降雨是导致 G1 处变形增大的主要因素,即雨水 通过坡体表面的裂隙进入岩土体内部,在一定深度土 体内聚力降低,导致岩土体抗剪强度降低,坡体稳定 性下降<sup>[56]</sup>。与此同时,王溢禧等<sup>[3]</sup>通过对黄河上游席 芨滩巨型滑坡前缘次级滑坡复活机理分析,指出集中 降雨是诱发滑坡复活的关键因素。

4.5 1#滑坡坡面特征点形变监测数据差异性分析

为进一步明确区内1#滑坡A、B两个特征点关于 形变方向和形变量的准确性,对A、B两个特征点的 形变方向和变形量进行了对比分析。由 3.5 小节已述 及的升轨、降数据的特征点 A 和特征点 B 的累计位 移量-时间关系曲线可知, A、B两点在形变方向上均 为远离雷达视线方向。该结果在一定程度上反映出 采用 InSAR 技术所提取的该滑坡体地表形变的可靠 性。需要说明的是,采用 InSAR 技术所得到的地表形 变均为实际形变在雷达视线方向上的投影,受实际变 形方向和雷达入射角度的影响以及单一轨道的影像 数据对部分形变方向不敏感[42-43],分别采用升轨、降 轨数据所提取的特征点的形变速率与累计变形量均 存在差异。为了获得更为准确的1#滑坡关于形变方 向和形变速率等形变信息,后续研究需引入基于高精 度 GNSS 技术获取监测数据, 以实现对 1#滑坡形变情 况的精确监测。

# 5 结论

(1)多种 SAR 影像数据所提取的区内滑坡体地 表其最大累计变形量为 133 mm,最大形变速率为 -24 mm/a。

(2)在选用同种轨道 SAR 影像数据前提下,采用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 2 种方法所获得的滑坡体地 表 20 个特征点中 15 个特征点的差值绝对值小于 5 mm, 说明 2 种方法在形变量级上具有较高的一致性。

(3)采用升轨、降轨 SAR 影像数据提取的滑坡体 形变区在形变方向上基本相一致,即滑坡体形变区运 动方向均为远离雷达视线方向,说明采用 InSAR 提取 黄河上游滑坡体地表形变信息具有一定的可靠性。

(4)位于夏藏滩滑坡体前缘位置的次级滑坡体处 于缓慢变形阶段,需要针对该滑坡开展持续变形监测。

# 参考文献(References):

 [1] 殷志强,魏刚,祁小博,等.黄河上游寺沟峡一拉干峡 段滑坡时空特征及对气候变化的响应研究[J].工程 地质学报,2013,21(1):129-137.[YIN Zhiqiang, WEI Gang, QI Xiaobo, et al. Spatial and temporal characteristics of landslides and there response to climatic change from Sigou to Lagan gorges in upper reaches of Yellow River[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 129 – 137. (in Chinese with English abstract) ]

- [2] 周保.黄河上游(拉干峡一寺沟峡段)特大型滑坡发 育特征与群发机理研究 [D].西安:长安大学,2010.
   [ZHOU Bao. Research on development characteristic and mass mechanism of super large landslide in the upper Yellow River[D]. Xi'an: Changan University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王溢禧,赵俊彦,朱兴华,等.贵德盆地席芨滩巨型滑坡前缘次级滑坡特征及其复活机理分析 [J/OL].中国地质灾害与防治学报,(2023-09-13) [2023-12-25].
  [WANG Yixi, ZHAO Junyan, ZHU Xinghua, et al. Analysis on characteristics and reactivition mechanism of secondary landslides in the front part of the Xijitan Giant Landslide, Guide Basin[J/OL]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023 (2023-09-13) [2023-12-25]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2852.P. 20230913.1035.002.html. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 史立群,魏刚,殷志强,等.青海尖扎盆地寺门村滑坡 发育特征及成因分析 [J].中国地质灾害与防治学 报,2020,31(5):15-21. [SHI Liqun, WEI Gang, YIN Zhiqiang, et al. Characteristics and formation of Simencun Landslides in Jianzha Baisn of Qinghai Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5):15-21. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 曾琳.黄河上游龙羊峡—公伯峡两岸雷达遥感滑坡隐 患识别 [D].成都:成都理工大学,2021. [ZENG Lin. Radar remote sensing landslide hidden hazard identification on Longyang Gorge—Gongbo Gorge, Upper Yellow River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈宝林,李为乐,陆会燕,等.基于 SBAS-InSAR 的黄河 干流军功古滑坡形变分析 [J/OL].武汉:武汉大学学 报(信息科学版),(2023-01-17) [2024-01-16]. [CHEN Baolin, LI Weile, LU Huiyan, et al. Deformation Analysis of Jungong Ancient Landslide Based on SBAS-InSAR Technology in the Yellow River Mainstream [J/OL]. Wuhan: Geomatics and Information Science of Wuhan University, (2023-01-17) [2024-01-16]. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 许威,李鹏辉,盛玉兴,等. 滑坡监测方法综述与展望
   [J]. 安徽建筑, 2020, 27(8): 92 94. [XU Wei, LI Penghui, SHENG Yuxing, et al. Summary and prospect of landslide monitoring methods[J]. TAnhui Architecture,

2020, 27 (8): 92 – 94.(in Chinese)]

- [8] 赵永红, 王航, 张琼, 等. 滑坡位移监测方法综述 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2606 - 2612. [ZHAO Yonghong, WANG Hang, ZHANG Qiong, et al. Overview of landslide displacement monitoring methods[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(6): 2606 -2612. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 项鑫, 王艳利. 近景摄影测量在边坡变形监测中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(6): 66-69. [XIANG Xin, WANG Yanli. Application of close-range photogrammetry in slope deformation monitoring[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(6): 66 69. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王立伟. 基于 D-InSAR 数据分析的高山峡谷区域滑 坡位移识别 [D]. 北京: 北京科技大学, 2015. [WANG Liwei. Identification of Landslide Displacement in Alpine Valley Region Based on D-InSAR Data Analysis[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 杨曦璃,陈谦,任光明,等. InSAR应用于地质灾害早期识别的研究现状及趋势[J].人民长江,2019,50(增刊2):80 84. [YANG Xili, CHEN Qian, REN Guangming, et al. Research status and trend of InSAR applied to early identification of geological disasters [J]. Yangtze River, 2019, 50(Sup 2):80 84. (in Chinese)]
- [12] 姚佳明,姚鑫,陈剑,等.基于 InSAR 技术的缓倾煤 层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究 [J].水文地 质工程地质, 2020, 47(3): 135 - 146. [YAO Jiaming, YAO Xin, CHEN Jian, et al. A study of deformation mode and formation mechanism of a bedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 135 - 146. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王洪明,李如仁,覃怡婷,等.时间序列 InSAR 技术在 矿区地表形变监测中的应用——以内蒙古霍林河露 天矿区为例 [J].中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2):71-78. [WANG Hongming, LI Ruren, QIN Yiting, et al. Application of time series InSAR technology in monitoring ground deformation of mining area: a case study at Huolinhe open pit mining area in Inner Mongolia[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2):71-78. (in Chinese with English abstract)]

[14] 雷坤超,陈蓓蓓,宫辉力,等.基于 PS-InSAR 技术的

天津地面沉降研究 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 106 - 111. [LEI Kunchao, CHEN Beibei, GONG Huili, et al. Detection of land subsidence in Tianjin based on PS-InSAR technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 106 - 111. (in Chinese with English abstract)]

- [15] 赵蓓蓓,黄海峰,邓永煌,等.基于 Sentinel-1A 的三峡库 区范家坪滑坡 InSAR 监测分析 [J]. 人民长江, 2022, 53(10): 103 - 107. [ZHAO Beibei, HUANG Haifeng, DENG Yonghuang, et al. InSAR monitoring analysis on Fanjiaping landslide in Three Gorges Reservoir Area based on Sentinel-1A[J]. Yangtze River, 2022, 53(10): 103 -107. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张永双,刘筱怡,姚鑫. 基于 InSAR 技术的古滑坡复活早期识别方法研究——以大渡河流域为例 [J]. 水利 学报, 2020, 51(5): 545 555. [ZHANG Yongshuang, LIU Xiaoyi, YAO Xin. InSAR-based method for early recognition of ancient landslide reactivation in Dadu River, China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(5): 545 555. (in Chinese with English abstract)]
- [17] GUO Changbao, YAN Yiqiu, ZHANG Yongshuang, et al. Study on the creep-sliding mechanism of the giant xiongba ancient landslide based on the SBAS-InSAR method, Tibetan Plateau, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(17): 3365.
- [18] YAN Yiqiu, GUO Changbao, LI Caihong, et al. The creep-sliding deformation mechanism of the Jiaju ancient landslide in the upstream of Dadu River, Tibetan Plateau, China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 592.
- [19] 魏刚,殷志强,罗银飞,等.黄河上游康杨滑坡堆积体特征及形成机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(2):1-8.[WEI Gang,YIN Zhiqiang,LUO Yinfei, et al. Analysis on the accumulation deposits characteristics and formation mechanism of Kangyang landslide in the upper reaches of Yellow River[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2):1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李小林,郭小花,李万花.黄河上游龙羊峡-刘家峡河 段巨型滑坡形成机理分析 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 516 - 529. [LI Xiaolin, GUO Xiaohua, LI Wanhua. Mechanism of giant landslides from Longyangxia valley to Liujiaxia valley along upper Yellow River[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 516 - 529. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 殷志强,秦小光,赵无忌,等.基于多元遥感影像数据的黄河上游滑坡发育特征研究[J].工程地质学报,

2013, 21(5): 779 – 787. [YIN Zhiqiang, QIN Xiaoguang, ZHAO Wuji, et al. Characteristics of landslides in upper reaches of Yellow River with multiple data of remote sensing [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 779 – 787. (in Chinese with English abstract)]

- [22] 赵瑞欣,周保,李滨.黄河上游龙羊峡至积石峡段巨型滑坡 OSL 测年 [J].地质通报, 2013, 32(12): 1943 1951. [ZHAO Ruixin, ZHOU Bao, LI Bin. The application of optical stimulate luminescence dating to the study of clustered landslides activity[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(12): 1943 1951. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 罗越.黄河上游尖扎河段泥石流危险性评价研究
  [D].成都:成都理工大学,2021. [LUO Yue. Risk assessment study of debris flow in the Jianzha section of the upper Yellow River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 殷志强,许强,赵无忌,等.黄河上游夏藏滩巨型滑坡 演化过程及形成机制 [J].第四纪研究,2016,36(2): 474-483. [YIN Zhiqiang, XU Qiang, ZHAO Wuji, et al. Study on the developmental characteristic, evolution processes and forming mechanism of xiazangtan super large scale landslide of the upper reaches of Yellow River[J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(2): 474-483. (in Chinese)]
- [25] 马小红,李冬玲,王磊. IRS-P6 遥感数据在尖扎县马克唐镇夏藏滩滑坡调查中的应用 [J].青海国土经略,2008,(2):41-43. [MA Xiaohong, LI Dongling, WANG Lei. Application of IRS-P6 remote sensing data in landslide survey of Xiacangtan, Maketang Town, Jianzha County[J]. Management & Strategy of Qinghai Land & Resources, 2008, (2):41-43.(in Chinese)]
- [26] 马国珍,张丰雄,刘世宝,等.青海省尖扎县夏藏滩移民安置区环境地质问题初析 [J].青海国土经略, 2010(3):25-26. [MA Guozhen, ZHANG Fengxiong, LIU Shibao, et al. Preliminary analysis of environmental geological problems in Xiacangtan resettlement area in Jianzha County, Qinghai Province[J]. Management & Strategy of Qinghai Land & Resources, 2010(3):25-26. (in Chinese)]
- [27] 周全, 蒋亚楠, 吕鹏, 等. 联合 Sentinel-1A 升降轨数据 的滑坡多维形变反演 [J/OL]. 地球物理学进展, (2023-11-13). [ZHOU Quan, JIANG Yanan, LYU Peng, et al. Multi-dimensional deformation inversion of landslides

using combined sentinel-1A ascending and descending orbit data[J/OL]. Progress in Geophysics, (2023-11-13) [2024-01-08]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P. 20231110.1120.014.html. (in Chinese with English abstract)]

- [28] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8 – 20.
- [29] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 张棫. SBAS-InSAR 数据处理的自动化方法研究 [D].
  南京:南京师范大学, 2016. [ZHANG Yu. Research on Automatic Method of SBAS-InSAR Data Processing [D].
  Nanjing: Nanjing Normal University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 聂运菊,熊佳诚,程朋根,等.结合 PS特征点的 SBAS 地表形变监测 [J]. 测绘通报, 2020(4):91-95.
  [NIE Yunju, XIONG Jiacheng, CHENG Penggen, et al. SBAS surface deformation monitoring with PS feature points[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(4): 91-95. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 王舜瑶, 卢小平, 刘晓帮, 等. 一种顾及永久散射体的 SBAS InSAR 时序地表沉降提取方法 [J]. 测绘通报, 2019(2): 58-62. [WANG Shunyao, LU Xiaoping, LIU Xiaobang, et al. A SBAS InSAR time series ground deformation extraction approach considering permanent scatterers [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(2): 58-62. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 侯安业,张景发,刘斌,等. PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 监测地表沉降的比较研究 [J]. 大地测量与地球动力 学, 2012, 32(4): 125 - 128. [HOU Anye, ZHANG Jingfa, LIU Bin, et al. Comparative study on monitoring surface subsidence with PS-InSAR and SBAS-InSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(4): 125 - 128. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 逯中香, 樊彦国, 李国胜. 利用时序 InSAR 技术监测 青藏铁路沿线地表形变 [J]. 测绘通报, 2022(3):
  138-142. [LU Zhongxiang, FAN Yanguo, LI Guosheng. Monitoring of surface deformation along the Qinghai-

Tibet Railway with the time series InSAR technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(3): 138 – 142. (in Chinese with English abstract)]

- [35] 冯文凯,顿佳伟,易小宇,等.基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析 [J].工程地质学报,2020,28(2):384-393. [FENG Wenkai, DUN Jiawei, YI Xiaoyu, et al. Deformation analysis of Woda village old landslide in Jinsha River basin using SBAS-InSAR technology[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 384 393. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 赵淑芬,曾润强,张宗林,等.黄河上游潜在滑坡早期 识别及影响因素 [J].山地学报,2022,40(2):249-264. [ZHAO Shufen, ZENG Runqiang, ZHANG Zonglin, et al. Early identification and influencing factors of potential landslides in the upper reaches of the Yellow River, China[J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 249-264. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 康亚. InSAR 技术在西南山区滑坡探测与监测的应用[D]. 西安:长安大学, 2016. [KANG Ya. Application of InSAR technology in landslide detection and monitoring in southwest mountainous areas[D]. Xi'an: Changan University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 鲁魏,杨斌,杨坤.基于时序 InSAR 的西南科技大学 地表形变监测与分析 [J].中国地质灾害与防治学 报,2023,34(2):61-72. [LU Wei,YANG Bin, YANG Kun. Surface deformation monitoring and analysis of Southwest University of Science and Technology based on time series InSAR[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2):61-72. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 涂宽,王文龙,谌华,等.联合升降轨 InSAR 与高分辨 率光学遥感的滑坡隐患早期识别——以宁夏隆德为 例[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(6):72-81. [TU Kuan, WANG Wenlong, CHEN Hua, et al. Early identification of hidden dangers of lanslides based

on the combination of ascending and descending orbits InSAR and high spatial resolution optical remote sensing: a case study of landslides in Longde County, southern Ningxia[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 72 - 81. (in Chinese with English abstract)]

- [40] 俞文轩,李益敏,计培琨,等.基于升降轨 SAR 数据的 兰坪县黄登水电站上游时间序列地表形变研究
  [J/OL]. 自然资源遥感,(2023-11-27)[2024-01-12].
  [YU Wenxuan, LI Yimin, JI Peikun, et al. Time series surface deformation study of the upstream area of Huangdeng hydropower station in Lanping County based on ascending and descending SAR data[J/OL]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023: 1 - 12. (2023-11-27). https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.P.20231124.
  1317.008.html. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 付波霖, 解淑毓, 李涛, 等. 基于 SBAS/PS-InSAR 技术的滑坡遥感监测对比研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(4): 392 397. [FU Bolin, XIE Shuyu, LI Tao, et al. Comparative study of landslide remote sensing monitoring based on SBAS/PS-InSAR technology[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(4): 392 397. (in Chinese with English abstract)]
- [42] DIAO Xinpeng, WU Kan, HU Dahe, et al. Combining differential SAR interferometry and the probability integral method for three-dimensional deformation monitoring of mining areas[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(21): 5196 – 5212.
- [43] 刘星洪,姚鑫,周振凯,等. 滑坡灾害 InSAR 应急排查 技术方法研究 [J]. 地质力学学报, 2018, 24(2): 229 –
  237. [LIU Xinghong, YAO Xin, ZHOU Zhenkai, et al. Study of the technique for landslide rapid recognition by InSAR[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(2): 229 –
  237. (in Chinese with English abstract)]

编辑:王支农