

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.03.017

基于 SBAS-InSAR 的黄藏寺水利枢纽 近坝边坡形变监测分析

罗丹, 葛星

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 为分析高海拔地区合成孔径干涉雷达测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)形变监测能力,以黄藏寺水利枢纽近坝边坡为研究对象,通过对区域36景 Sentinel-1 升轨数据做短基线集 InSAR (Small Baseline Subsets InSAR, SBAS-InSAR) 分析,结合同期 Sentinel-1 降轨数据进行解算分析。结果表明:通过短基线集 InSAR 成功获取区域边坡 LOS 向形变速率,识别出近坝边坡2处滑坡变形体;获得边坡水平向和垂直向形变速率和局部特征点的二维向累计形变值,2处滑坡均做向东方向沉降运动;BXT5 前缘形变速率较后缘大,H10 后缘形变速率较中前部大。结合无人机影像及实际勘察结果,InSAR 监测岸坡形变位置和规律与实际情况符合,该技术在高海拔地区近坝边坡形变监测方面具有较好的应用前景。

关键词: 合成孔径雷达干涉测量技术;形变监测;近坝边坡;黄藏寺

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)03-0121-06

Deformation Monitoring and Analysis of Huangzangsi Water Conservancy Near Dam Slope Based on SBAS-InSAR

LUO Dan, GE Xing

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: To analyze the InSAR deformation monitoring capability in high-altitude areas, this paper takes the slope near the Huangzangsi Hub as the research object. Through SBAS-InSAR analysis of 36 Sentinel-1 ascending data, the LOS deformation rate of the regional slope was obtained, and two landslides near the dam slope were identified. To analyze the two-dimensional deformation law of landslides, the descending trajectory data of Sentinel-1 during the contract period were calculated in two dimensions to obtain the horizontal and vertical deformation rates of two landslides. The results show that BXT5 and H10 are moving eastward and downward. Through profile analysis, the front edge deformation rate of BXT5 is higher than that of the rear edge. The rear edge deformation rate of H10 is higher than that of the front and middle parts. Based on drone imagery and actual survey results, the InSAR deformation pattern is in good agreement with the actual situation. This technology has good application prospects in monitoring the deformation of near dam slopes in high-altitude areas.

Keywords: InSAR; deformation monitoring; slope nearing dam; Huangzangsi

水利工程边坡的稳定性对水库安全具有重要意义,边坡变形体失稳会直接影响工程安全,需有效手段对其进行长期监测,以便事先采取防治措施、减轻

灾害。边坡变形监测主要通过人工水准测量、GNSS 监测设备数据采集等,通常可获得较高精度的形变监测结果^[1-2];但对于高海拔、地形陡峭的边坡,初

收稿日期:2024-12-28

修稿日期:2025-02-21

基金项目:黄河勘测规划设计研究院有限公司自主研发项目(2023ky027; 2023ky028)

作者简介:罗丹(1997—),女,硕士,工程师,主要从事工程地质信息化工作。E-mail:r_ld112@126.com

通讯作者:葛星(1994—),女,硕士,工程师,主要从事工程地质信息化工作。E-mail:gxingstar@163.com

期监测对象普查工作量和难度较大,遇到极端天气监测和测量工作无法进行,难以实现边坡早期形变识别和大规模区域的持续监测。

合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)^[3-4]能够实现不接触目标地物的情况下获取地表微小变形,其不受天气、光照等影响,具有全天候、全天时、大范围持续监测的特点。目前已有许多学者通过InSAR技术实现对滑坡等灾害隐患识别和监测。廖明生等^[5]使用 TerraSAR-X 数据对三峡工程滑坡形变进行监测并分析滑坡形变规律;张路等^[6]通过时间序列 InSAR 分析方法对大渡河上游丹巴县滑坡隐患识别,验证了该方法在滑坡大范围普查监测方面的应用;徐文正等^[7]使用 Sentinel-1A 升轨数据,验证三峡库区滑坡变形迹象与 InSAR 结果具有较好的一致性;陈兴芳等^[8]基于时序 InSAR 技术实现了粤东西北丘陵区的滑坡隐患识别;余华芬等^[9]使用 Sentinel-1 数据,改进分析方法,获取研究区地质灾害潜在风险靶区并分析验证,其结果对灾害防控提供支撑。

我国西部地区海拔较高、地形条件复杂,水利工程施工难度较大,边坡监测的设备布设困难且监测范围有限。针对这一问题,本文以黄藏寺水利枢纽工程近坝边坡为例,拟收集该区域 2021 年 5 月至 2023 年 8 月的 Sentinel-1A 升降轨数据,采用 SBAS-InSAR 技术对区域不稳定边坡进行识别,分析典型滑坡和变形体的形变特征,对分析结果进行现场验证,并讨论该技术在西北山区地质灾害监测方面的适用性,以期为工程区边坡变形体识别和监测提供借鉴。

1 工程区概况

黑河黄藏寺水利枢纽工程坝址位于青海省祁连山县(黄藏寺村下游 11 km 处)境内,黑河上游峡谷进口段,河水面高程 2 520 m~2 530 m。

区域地处青藏高原东北部的祁连山脉,地势南高北低,地形起伏大,两岸山顶高程 3 121 m~3 924 m;位于北祁连优地槽褶皱带,主要大断层有肃南-祁连断裂东段,受新近纪以来大幅度、间歇性挤压隆起和相对沉降运动的影响,断层节理发育,山体侵蚀切割强烈,山脉和盆地多呈 NW—SW 展布。地层分区属于祁连地层区的北祁连山地层分区,古生界最为发育,不同时代地层均为不整合接触^[10]。库区沟谷纵横,库岸两侧直流较发育,多呈近东西向,以近直角汇入干流,构成树枝状水系。受地理位置及地

形影响,属于典型的高原大陆性气候,降水多集中在 7—9 月;植被覆盖较差,岸坡陡峻,天然坡度约为 40°~70°,表层岩体风化卸荷强烈,易出现地质灾害。



图 1 黄藏寺水利枢纽位置

(图片为工作人员现场无人机航拍数据处理结果)

2 SAR 数据获取与处理流程

2.1 数据选取

本文使用雷达卫星数据为欧空局发射的 Sentinel-1A(哨兵 1 号)卫星数据^[11],时间跨度从 2021 年 05 月至 2023 年 05 月,共 36 景影像,成像时间如表 1 所示;雷达数据成像模式为干涉宽幅(IW),影像幅宽 250 km,分辨率为 5×20 m,极化方式为 VV。为提高轨道精度,采用与影像时间对应的 AUX_POEORB 精密轨道数据文件用于校正轨道误差;使用 Aster GDEM 30 m 地形数据去除地形相位。坝址区影像为无人机航测影像,分辨率为 0.05 m。

2.2 数据处理

短基线集合成孔径雷达干涉测量(SBAS-InSAR)^[12-13]是通过时间和空间基线均小于给定临界阈值的干涉相对构成多个差分干涉图集,对相干像元的差分相位序列进行时序分析,以获取相干像元形变量时序的干涉测量方法。相较于其他 InSAR 分析方法,该方法受时空相关和大气效应影响较小,减小由长基线导致的失相干,且更适用于山区形变监测。SBAS-InSAR 主要处理过程如下:

(1) 主影像选择与影像组合:选择 2022 年 3 月 23 日影像为主影像,时间基线阈值设置为 120 d,空间基线阈值设置为 2%,共生成 124 组小基线干涉像对。

表 1 Sentinel-1A 数据成像时间

序号	日期	序号	日期
1	2021-05-15	19	2022-06-15
2	2021-06-08	20	2022-07-09
3	2021-07-02	21	2022-07-21
4	2021-07-26	22	2022-08-02
5	2021-08-19	23	2022-08-14
6	2021-09-12	24	2022-08-26
7	2021-10-30	25	2022-09-07
8	2021-11-23	26	2022-09-19
9	2021-12-05	27	2022-10-01
10	2021-12-29	28	2022-10-13
11	2022-01-22	29	2022-10-25
12	2022-02-15	30	2022-11-06
13	2022-03-23	31	2022-12-24
14	2022-04-16	32	2023-01-17
15	2022-04-28	33	2023-02-10
16	2022-05-10	34	2023-03-18
17	2022-05-22	35	2023-04-11
18	2022-06-03	36	2023-05-17

(2) 干涉处理:计算多个 SAR 影像之间的相位差异,采用自适应滤波方法对干涉图差分相位滤波,获取相位缠绕的差分干涉图。

(3) 相位解缠^[14]:干涉相位以 2π 为模,相位变化超过 2π ,会重新开始和循环。本文采用 MCF 最小费用流算法进行相位解缠,解决 2π 模糊问题;解缠相干系数阈值为 0.3。

(4) 第一次反演:第一次估计位移速率和残余地形,并进行二次解缠和精炼,对合成的干涉图进行去平,生成优化的结果;解缠使用 MCF 最小费用流算法,相干稀疏阈值为 0.3。

(5) 第二次反演:计算时间序列上的位移,在第一次反演得到的形变速率基础上,通过 SVD 奇异值分解方法得到时间序列上的位移结果。

(6) 地理编码:进行坐标转换,将 SAR 坐标转换为 WGS-1984 坐标,并获取各位置的形变速率等信息。

2.3 二维形变计算

SBAS-InSAR 分析结果为 LOS 向形变,即地表至传感器方向形变,难以说明边坡的实际运动情况,需对 LOS 向形变结果进行二维向形变解算。通过升轨和降轨 SBAS-InSAR 的分析结果,能够获取研究区垂直方向和东西方向的水平运动,通过垂直向和水平向形变特征对边坡做进一步分析,为提出更有针对性的监测方案做参考。且由于卫星飞行方向

为南北向,以一定大小的入射角自动详细扫描地面,对南北向形变感知较为微弱,在此将其忽略。则东西向形变速率 V_{EW} 和垂直向形变速率 V_v 的计算公式^[15]如下:

$$V_{EW} = \frac{V_a \cos \lambda_d - V_d \cos \lambda_a}{\cos(2\pi - \theta_d) \sin \lambda_d \cos \lambda_a - \cos(2\pi - \theta_a) \sin \lambda_a \cos \lambda_d} \quad (1)$$

$$V_v = \frac{V_a - V_{EW} \cos(2\pi - \theta_a) \sin \lambda_a}{\cos \lambda_a} \quad (2)$$

式中: V_a 和 V_d 分别为同一位置的升轨和降轨数据 LOS 向的形变速率; λ_a 和 λ_d 分别为升轨和降轨 SAR 卫星的入射角; θ_a 和 θ_d 分别为升轨和降轨卫星的飞行方位角。

3 结果分析

3.1 LOS 向形变分析

为避免误判,剔除植被及坝址施工区内的分析结果,黄藏寺坝址区边坡 2021 年 05 月至 2023 年 05 月升轨数据处理结果见图 2。

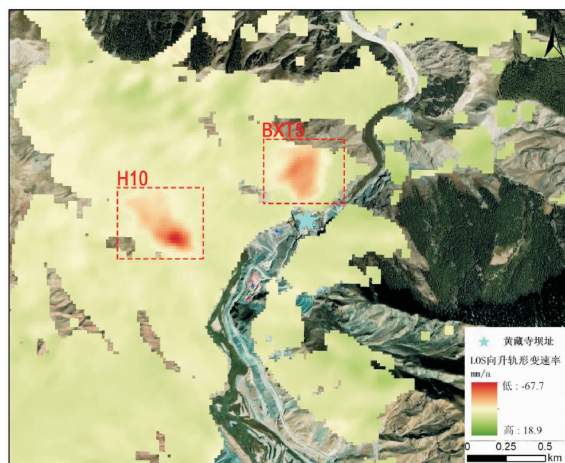


图 2 黄藏寺近坝边坡升轨数据 LOS 向地表形变速率

地表 LOS 向形变速率 V_{LOS} 表示, $V_{LOS} < 0$ 表示该点位在时间段内远离传感器方向的形变; $V_{LOS} > 0$ 表示该点位做朝向传感器方向的形变; $V_{LOS} = 0$ 表示该点位在时间段内无变化。由区域 LOS 向升轨形变速率分布结果,黄藏寺近坝边坡存在两处明显形变区域,北侧变形区为 BXT5,位于坝址左岸泄洪沟附近,距坝址约 140 m,大致呈弧形分布,其形变速率约为 $-50.7 \text{ mm/a} \sim 10.1 \text{ mm/a}$;南侧变形区为 H10,距坝址约 810 m,呈西北—东南向分布,LOS 向形变速率约为 $-67.7 \text{ mm/a} \sim 7.01 \text{ mm/a}$ 。

在 BXT5 及 H10 分别绘制 2 条剖面线用以分析变形体形变规律,如图 3 所示。剖面线分布位置如

图 3(a)和图 3(d),剖面图横坐标为剖面线上的点距起点的距离。由图 3(b)与图 3(c)可知,变形体 BXT5 东西向剖面线呈“V”字形,南北向剖面线呈明显的下降趋势,说明变形体东西两侧边缘形变速率相对较小,前缘及中部变形速率较后缘大,中部形变

速率较为均匀,越往后缘变形速率越小。由图 3(e)与图 3(f)可知,滑坡 H10 两条剖面线均呈“V”字形,说明该滑坡后缘形变速率大于中前部,东南侧变形最大,西北侧形变速率较小且平缓。

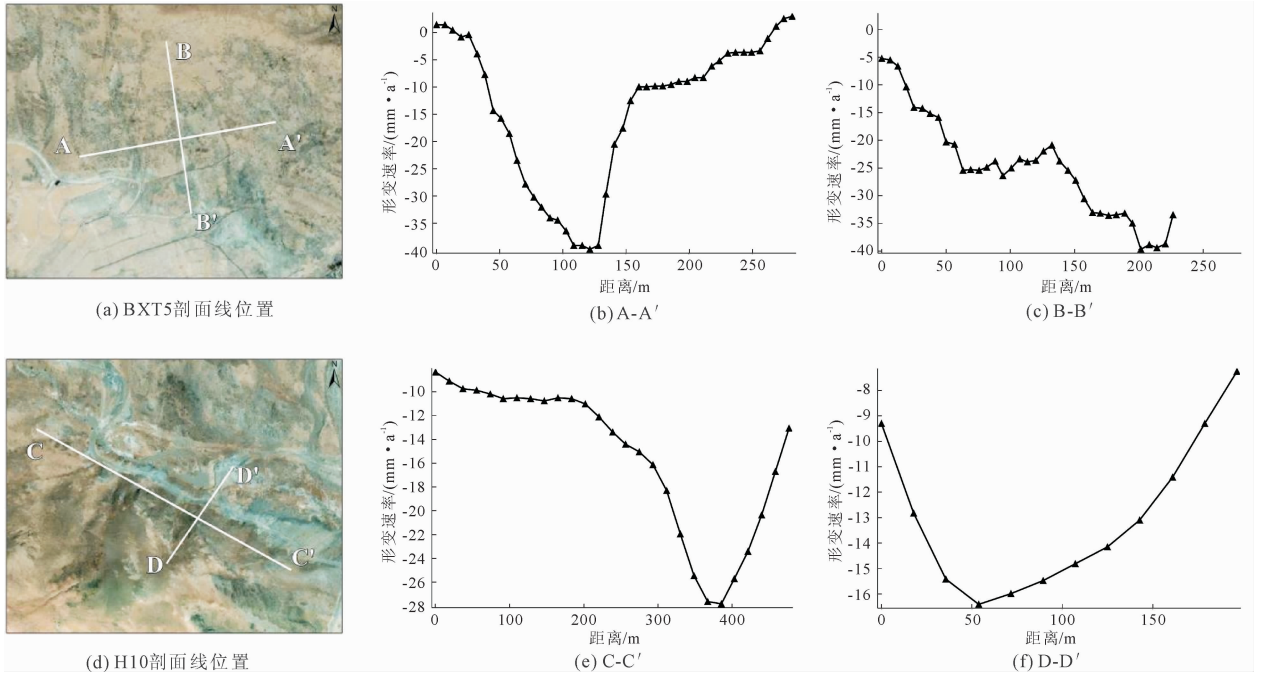


图 3 滑坡不同位置形变情况

3.2 二维形变分析

根据二维形变计算公式对区域水平向和垂直向形变速率进行解算,二维向形变速率分布情况如图 4 所示。

水平向形变速率为正说明该位置做向东方向位

移,为负说明该位置做向西方向位移;垂直向形变速率为正说明该位置做抬升运动,为负说明该位置做沉降运动。并对 2 个滑体分别取 5 个特征点,计算其累计形变量,分析滑坡累计形变规律,5 个特征点二维向累计形变量曲线如图 5 所示。

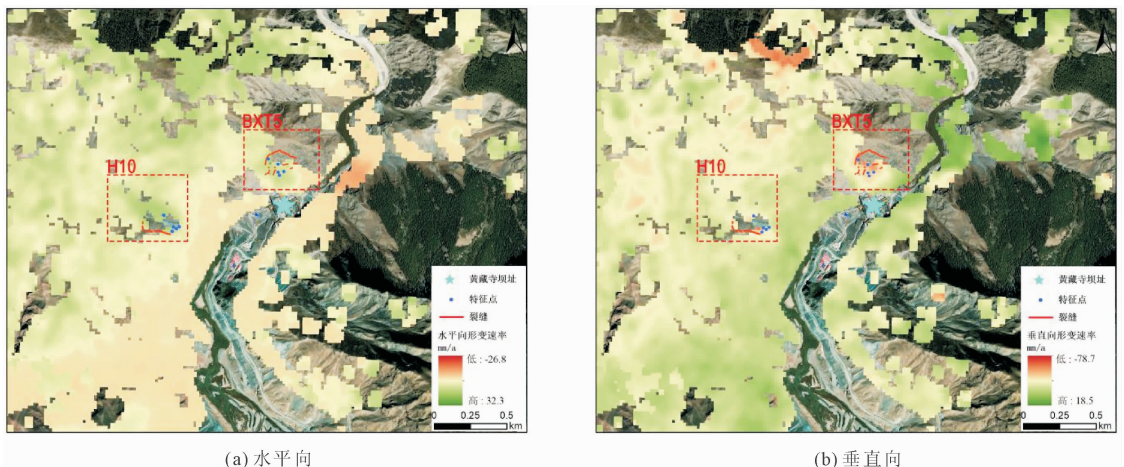


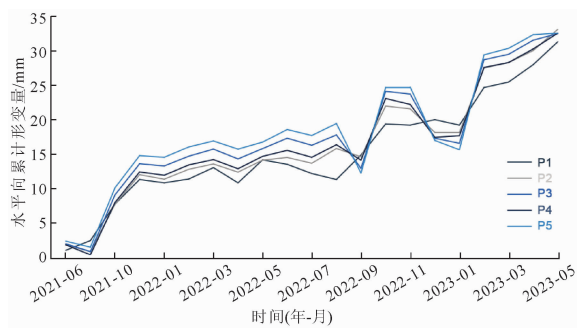
图 4 黄藏寺近坝边坡二维向形变速率

根据二维形变速率分布图,变形体 BXT5 整体向东方向变形,形变速率为 $0.6 \text{ mm/a} \sim 24.9 \text{ mm/a}$,

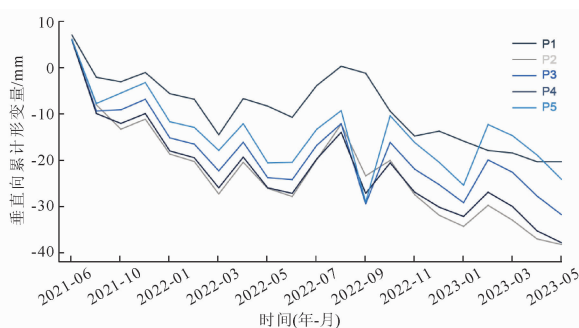
垂直向形变速率为 $-72.3 \text{ mm/a} \sim -6.8 \text{ mm/a}$ 。从累计形变量曲线图 5 可以看出,在 2022 年 7—10 月

间,BXT5上特征点的累计水平和垂直向形变曲线均有加速形变趋势,与当地降水量增多具有一致性;整体水平向形变量和垂直向累计沉降量呈增长趋势,需对变形体加强核查和持续关注。结合高分辨率无人机影像(图1)及地形数据,BXT5植被稀少,地形较陡,坡度约 $50^{\circ} \sim 55^{\circ}$,局部陡峭超 70° ;前缘分布高程2 670 m~2 686 m,宽约147 m,后缘高程约2 768 m。对变形体进行实地勘察,发现前后缘裂

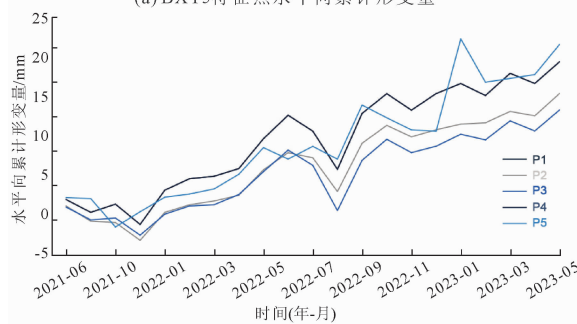
缝发育,整体延伸较长,上游裂缝往泄洪沟延伸,下游侧裂缝沿土石分界线往坡下延伸,位置如图4所示;裂缝宽约2 cm~10 cm,深5 cm~20 cm,局部裂缝被堆积碎块石充填。结合垂直向形变速率分布情况,裂缝所在位置形变速率较周围高;除裂缝所在位置外,BXT5附近实际形变范围较大,裂缝上方形变速率较小,BXT5表面裂缝分布如图6所示。



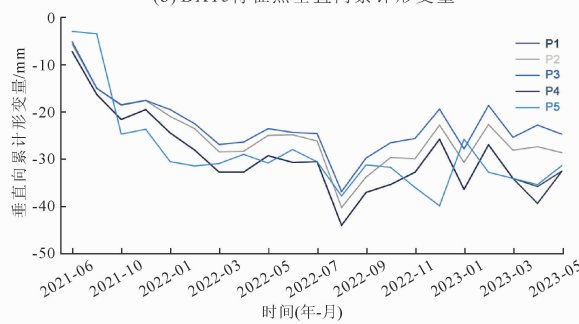
(a) BXT5特征点水平向累计形变量



(b) BXT5特征点垂直向累计形变量



(c) H10特征点水平向累计形变量



(d) H10特征点垂直向累计形变量

图5 黄藏寺近坝边坡特征点二维向累计形变量曲线



图6 BXT5表面裂缝分布

H10整体向东方向变形,形变速率为 $7.1 \text{ mm/a} \sim 31 \text{ mm/a}$,垂直向形变主要发生在东南侧,形变速率为 $-44.7 \text{ mm/a} \sim -0.5 \text{ mm/a}$,西北侧垂直方向形变较小。从累计形变量曲线图,2022年7—9月间滑坡上特征点的累计水平和垂直向形变曲线均有较大变化,与当地降水量增多时期具有一致性;整体水平向形变量和垂直向沉降量呈增长趋势。结合高分辨率无人机影像(图1)及地形数据,该边坡植被

稀少,坡度约 $30^{\circ} \sim 55^{\circ}$;根据影像解译出该滑坡裂缝整体分布情况(见图4),局部区域如东南侧坡面后缘裂缝发育,宽约2 cm~30 cm,西北侧无裂缝发育,整体裂缝分布位置与InSAR分析结果垂直向形变速率较大区域的位置具有一致性,H10表面裂缝分布如图7所示。

经高分辨率影像和实地勘察验证,对比InSAR地表变形监测与实地勘察结果,发现BXT5和H10

表面裂缝分布位置与 InSAR 识别的滑坡位置具有一致性;且根据两地质灾害的安全监测月报, BXT5 及 H10 前后缘的变形特征与监测结果一致, 一定程

度上反映出该技术的准确性。InSAR 检验出的变形范围较地表裂缝分布范围较大, 需要后期持续观测, 减少灾害突发造成的危害和损失。

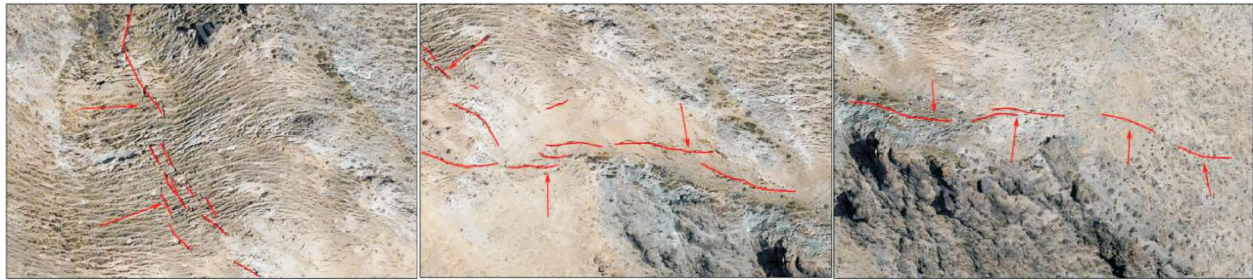


图 7 H10 表面裂缝分布

4 结 论

本文配合使用 Sentinel-1A 的升降轨数据, 通过时序 InSAR 技术实现黄藏寺水利枢纽工程近坝边坡两滑坡体的识别和滑坡变形特征及二维向形变规律分析, 得到以下结论:

(1) 黄藏寺近坝边坡识别两处明显滑坡变形体, BXT5 与 H10 的前后缘、东西向滑动速率存在差异, 结合高分辨率无人机影像和实地勘察验证了分析结果的准确性。

(2) 该技术能较为准确地获取边坡形变位置及形变规律, 减少勘察人员地质调查的工作难度和强度, 对水利工程边坡早期地质灾害隐患识别和形变监测提供技术保证。

本文基于影像及实地勘察对 InSAR 分析结果进行验证, 缺少同期连续的边坡测量数据, 后续可获取测量数据做进一步验证分析。

参考文献:

- [1] 董建军, 梅 媛, 李 昕, 等. 高海拔排土场边坡安全稳定性 SBAS-InSAR 监测[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 92-101.
- [2] 范雪婷, 潘九宝. 连云港防波堤时序 InSAR 沉降监测研究[J]. 地理空间信息, 2021, 19(10): 55-59, 150.
- [3] Andrew Hooper, Howard Zebker, Paul Segall, et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: 1-5.
- [4] 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): 1342-1355.
- [5] 廖明生, 唐 婧, 王 腾, 等. 高分辨率 SAR 数据在三

峡库区滑坡监测中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(2): 217-229.

- [6] 张 路, 廖明生, 董 杰, 等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2039-2049.
- [7] 徐文正, 卢书强. 基于 SBAS-InSAR 技术的三峡库区大块田滑坡形变监测分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(9): 147-150.
- [8] 陈兴芳, 张福存, 王晓东, 等. 基于时序 InSAR 技术的山体滑坡灾害监测研究[J]. 测绘工程, 2020, 29(5): 45-49.
- [9] 余华芬, 吴 迪, 汪建光, 等. 基于 InSAR 的地质灾害早期识别与监测技术研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(3): 44-48.
- [10] 罗延婷, 刘振红, 魏 杰, 等. 黄藏寺水利枢纽坝前 H8 堆积体稳定性分析[J]. 人民长江, 2018, 49(9): 55-60.
- [11] 欧阳伦曦, 李新情, 惠凤鸣, 等. 哨兵卫星 Sentinel-1A 数据特性及应用潜力分析[J]. 极地研究, 2017, 29(2): 286-295.
- [12] 张亚迪, 李煜东, 董 杰, 等. 时序 InSAR 技术探测芒康地区滑坡灾害隐患[J]. 遥感学报, 2019, 23(5): 987-996.
- [13] 麻源源, 左小清, 麻卫峰, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术对昆明机场高边坡沉降监测研究[J]. 工程勘察, 2018, 46(7): 22-27, 39.
- [14] 王志勇, 孟庆颖. InSAR 相位解缠算法在矿区沉降监测中的对比与分析[J]. 遥感信息, 2014, 29(6): 47-51, 57.
- [15] 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形形变研究[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 282-294.