

引用格式: 李凌婧, 姚鑫, 周振凯, 等, 2022. Sentinel-1 数据在西南山区水库变形斜坡 InSAR 监测中的适用性评价: 以溪洛渡水库为例 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 281–293. DOI: 10.12090/j.issn.1006–6616.2021109

Citation: LI L J, YAO X, ZHOU Z K, et al., 2022. The applicability assessment of Sentinel-1 data in InSAR monitoring of the deformed slopes of reservoir in the mountains of southwest China: A case study in the Xiluodu Reservoir [J]. Journal of Geomechanics, 28 (2): 281–293. DOI: 10.12090/j.issn.1006–6616.2021109

Sentinel-1 数据在西南山区水库变形斜坡 InSAR 监测中的适用性评价: 以溪洛渡水库为例

李凌婧^{1,2,3,4}, 姚鑫^{1,3,4}, 周振凯⁵, 王德富⁶
LI Lingjing^{1,2,3,4}, YAO Xin^{1,3,4}, ZHOU Zhenkai⁵, WANG Defu⁶

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
 2. 中国地质大学 (北京) 水资源与环境学院, 北京 100083;
 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
 4. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;
 5. 中国地质大学 (北京) 工程技术学院, 北京 100083;
 6. 自然资源部第三地理信息制图院, 四川 成都 610000
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
 2. *School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*
 3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
 4. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
 5. *College of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*
 6. *The Third Geoinformation Mapping Institute of Ministry of Natural Resource, Chengdu 610000, Sichuan, China*

The applicability assessment of Sentinel-1 data in InSAR monitoring of the deformed slopes of reservoir in the mountains of southwest China: A case study in the Xiluodu Reservoir

Abstract: Sentinel satellite is widely used in deformed slope identification and monitoring due to its high resolution, stable orbit system, large coverage capacity, short repetition time, and free data download. Since the 1963 catastrophic landslide of Vaian in Italy, the geologic hazard on bank slopes has been one of the main problems of the reservoir in the mountainous area. Taking the Xiluodu reservoir in the upper reaches of the Jinsha River as the study area, the applicability of the Sentinel-1 SAR data in InSAR monitoring of deformed slopes of reservoir in mountainous areas was evaluated by combining PALSAR-2 and TerraSAR-X data. The results were used to evaluate whether Sentinel-1 data could replace other commercial SAR data under certain conditions. It provides a reference for future applications in related researches. The results show that: About 200 deformed slopes were interpreted by the Sentinel-1 data in the study area, including landslide, rockfall, and bank collapse. According to field investigations, the minimum projected area of deformed slope based on the Sentinel-1 data is about 2400 m², a size of 35 m (length) × 77 m (width), gathered by 16 high-value raster pixels. Overlapping mask shadow phenomenon is severe in the alpine valley area. By comparing SAR data in common satellite radar observation modes, the effective observation area is 70.3% of the ascending Sentinel-1 orbit, 68.9% of the descending Sentinel-1 orbit, 70.4% of the ascending PALSAR-2 orbit, 67.6% of the descending PALSAR-2 orbit,

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (41807299); 中国地质调查局工作项目 (DD20221738-2); 三峡集团公司项目 (YMJ (XLD) / (19) 110)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41807299), the Chinese Geological Survey Project (Grant No. DD20221738-2) and the Three Gorges Corporation Project (Grant No. YMJ (XLD) / (19) 110)

第一作者简介: 李凌婧 (1988—), 女, 在读博士, 助研, 主要从事遥感地质, 地质灾害相关研究. E-mail: lilingjing123_123@163.com

收稿日期: 2021-08-19; **修回日期:** 2022-01-20; **责任编辑:** 吴芳

and 52.5% of the descending TerraSAR-X orbit in the intersection area of all SAR data used. Without considering the resolution, it can be concluded that the Sentinel-1 data in the reservoir area has an equal or more excellent observation ability than the other two SAR data. The water level rises from June to early November, and the surrounding vegetation develops well, resulting in poor data coherence. Since 2017, the amount of SAR data acquired by Sentinel-1A (1B) has increased, and high-frequency observations can improve the coherence. Therefore, the SAR data can be used to effectively identify the development and change of regional deformed slopes during the water fluctuation cycle. When the SAR data is lacking for a long time, the deformation measured by some pixels between the nearest pair of SAR data could exceed the maximum InSAR measurement range, and the phase period will be lost during the unwrapping. Sentinel-1 SAR data is more suitable for trend identification of continuous small deformations due to its good continuity.

Key words: Sentinel-1; PALSAR-2; TerraSAR-X; deformed slopes of reservoir; monitoring capacity

摘 要: Sentinel 卫星凭借其超高的辐射分辨率、稳定的轨道系统、较大的覆盖能力、较短的重返时间、可免费下载的数据,在斜坡灾害识别监测方向上有广泛的应用。自 1963 年意大利瓦伊昂特大滑坡发生以来,岸坡地质灾害一直是峡谷区水库关注的主要问题之一。以金沙江上游溪洛渡水库区为例,结合 PALSAR-2、TerraSAR-X 数据,评价 Sentinel-1 SAR 数据在西南山区水库变形斜坡 InSAR 监测中的适用性,以理论结合实际结果分析 Sentinel-1 数据是否可以在一定条件下替代其他商业数据,为今后相关行业应用提供参考。结果显示: Sentinel-1 数据在研究区可解译的变形斜坡约 200 处,类型有滑坡、危岩体和塌岸;经现场核查, Sentinel-1 数据解译的最小变形斜坡投影面积约为 2400 m²,约 35 m (长) × 77 m (宽) 大小,共 16 个变形像元聚集。高山峡谷区叠掩、阴影现象严重,通过对雷达常用观测模式下的 SAR 数据的比较,在 SAR 数据交集区域,有效观测面积为 Sentinel-1 升轨 70.3%, Sentinel-1 降轨 68.9%, PALSAR-2 升轨 70.4%, PALSAR-2 降轨 67.6%, TerraSAR-X 降轨 52.5%,在不考虑分辨率的情况下,在库区 Sentinel-1 数据与其他两种 SAR 数据观测能力相比持平或更优秀。6 月至 11 月初是溪洛渡水库的水位上升期,周边植被发育较好,造成数据相干性较差,2017 年后 Sentinel-1A (1B) 双星拍摄获取的 SAR 数据量增加,高频观测可使相干性提高,利用 2017 年后该卫星数据可有效识别水库蓄—排水周期内的区域性变形斜坡发育变化情况。当长时间缺失 SAR 数据时,会造成最近一对 SAR 数据间的某些像元测量的变形超过其 InSAR 最大量程,解缠时丢失相位周期。 Sentinel-1 数据由于连续性较好,监测斜坡的变形趋势较为连续,因此更适合连续小变形的趋势识别。

关键词: Sentinel-1; PALSAR-2; TerraSAR-X; 水库变形斜坡; 监测能力

中图分类号: P694; P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 02-0281-13

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021109

0 引言

自 1963 年意大利瓦伊昂特大滑坡 (the Vaiont Landslide) 发生以来,岸坡地质灾害一直是峡谷区水库关注的主要问题之一 (Hendron and Patton, 1987; 郑嘉豪等, 2020; 李滨等, 2020), 库区斜坡活动性大小主要受地质条件、地震活动、降水及库水位波动等影响 (中村浩之, 1990; 唐晓松等, 2013; 张森等, 2014)。近年来,合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 技术在斜坡地质灾害形变识别、监测等方面有广泛应用 (李晓恩等, 2021), 作为一种主动式微波传感器,具有全天候、全天时成像的特点,尤其适用于水库区

这样的多云多雨地区 (廖明生等, 2012)。随着国内三峡水库区、金沙江四个梯级电站的相继建成及运行, InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达干涉) 技术在水库区斜坡变形识别、结合库水位变化的时序变形监测等方面都有成功的应用 (王桂杰等, 2011; 廖明生等, 2012; Shi et al., 2016)。2001 年美国阿拉斯加大学地球物理研究所与中国地震局地震研究所使用欧洲空间局的 ERS (European Remote Sensing Satellite) 数据,利用 D-InSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达差分干涉) 技术监测三峡地区蓄水引起的地表形变 (游新兆等, 2001), 展示了 InSAR 技术在国内水库建设中的应用前景。在此之后, Gao and

Zeng (2007) 利用 2003 ~ 2005 年 11 景万州地区 ASAR 数据进行时序 InSAR 处理,认为数据量和大气效应是限制 InSAR 数据在该地区应用的主要原因。随着高分辨率、短重访周期的 SAR 卫星相继升空,库区 InSAR 滑坡监测有了进一步发展。廖明生等 (2012) 将 TerraSAR-X 数据应用于三峡库区滑坡和泥石流等地质灾害的监测和预警工作中,取得了一定成效。

现有 SAR 系统有星载 SAR (Kankaku et al., 2014)、机载 SAR (Scott et al., 2016) 和地基 SAR (Herrera et al., 2009) 3 种,但由于机载 SAR 系统获取数据不稳定和地基 SAR 设备的高花费,使得星载 SAR 的应用更为普及。截至 2021 年,根据地质灾害 InSAR 监测技术指南附录 C (中国地质灾害防治工程行业协会, 2018) 中所示,可用的星载 SAR 卫星数据可达 10 种。随着 2014 年 4 月 Sentinel 卫星的发射,其超高的辐射分辨率、稳定的轨道系统、较大的覆盖能力、较短的重访时间、可免费下载的数据,使 InSAR 技术在斜坡灾害识别、监测、预警的应用上又迈进了一步 (欧阳伦曦等, 2017; 徐帅等, 2020)。但是,由于雷达卫星的重访时间、观测角度、分辨率、波长等因素的不同,对于地质条件复杂的山区滑坡识别,在数量和重合度上均有差异 (刘星洪等, 2018),因此,分析不同 SAR 数据在山区滑坡识别监测方面的适用性,具有重要意义。适用性是相对的,当变形斜坡所处的地质环境条件出现较大的改变时,彼处的适用可能就变成了此处的不适用,所以,适用性的分析是一个理论结合实际的过程。

文章以金沙江上游溪洛渡水库区变形斜坡 (主要为滑坡、部分危岩体) 为例,基于 Sentinel-1、PALSAR-2 和 TerraSAR-X 卫星 SAR 数据,采用 D-InSAR、SBAS-InSAR 方法提取变形斜坡信息,结合研究区的地质条件和库水位波动数据,评价 Sentinel-1 卫星 SAR 数据在山区水库变形斜坡 InSAR 监测中的适用性,以理论结合实际结果分析 Sentinel-1 数据是否可以在一定条件下替代其他两种商业数据,为相关的行业应用提供参考。

1 地质背景

1.1 地形地貌

溪洛渡水库位于四川省雷波县和云南省永善

县接壤的金沙江峡谷段,正常蓄水位 600 m,死水位 540 m,库尾距坝里程约 196 km。库区地处云贵高原和四川盆地两大地貌单元过渡地段,属强侵蚀高山、中山地貌类型,河谷狭窄,岸坡坡度 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$,最大可达 80° 。地势西高东低,山脉走向与构造线大体一致,以近南北及北东向为主,主要活动断裂有峨边-金阳断裂、金阳断裂及五莲峰断裂 (图 1a、1b)。

Sentinel-1 搭载 C 波段 SAR 传感器,具有 4 种工作模式,其中,干涉宽幅模式 (Interferometric Wide Swath, IW) 数据可用于差分干涉,数据幅宽 250 km,在溪洛渡库区需南、北 2 景拼接处理,其他星载 SAR 数据均需要 2~3 景才可全面覆盖。库区整体走向大致与卫星升轨方位向垂直,与降轨方位向平行,单一轨道无法满足两岸的识别。

1.2 灾害发育情况

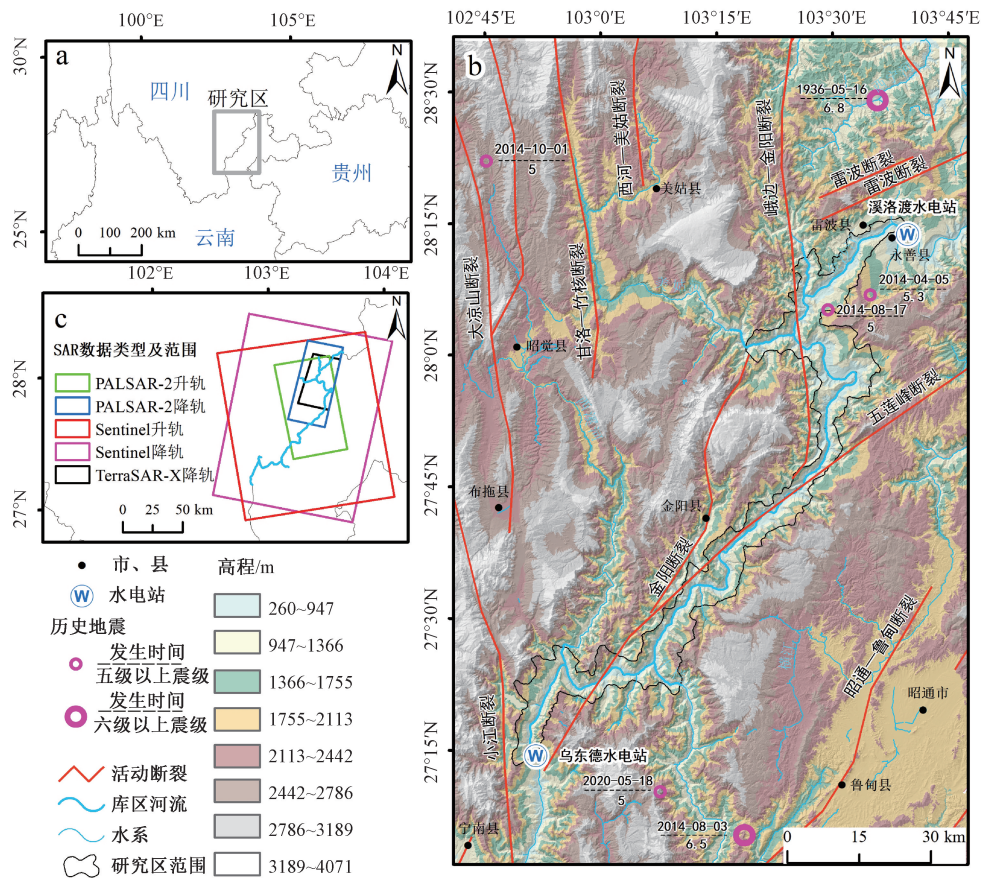
在地层上,除石炭系、泥盆系、古近系及新近系外,库区地层从元古界到第四系均有出露,其中碎屑岩及碳酸盐岩地层出露较广,坝区、近坝段出露的主要地层为二叠系的阳新灰岩及峨眉山玄武岩,河谷、支沟两侧的山间谷地内零星分布第四系的冲洪积、崩坡积等 (邓宏艳和王成华, 2011)。蓄水前灾害主要发育在这些碎屑岩及碳酸盐岩中,大型古滑坡堆积体变形则受软岩控制 (高改萍和杨建宏, 2003)。2013 年 5 月水库蓄水后,陈廷照和戴福初 (2018) 利用光学遥感数据圈定了库区主河道及支流范围内共计 213 处滑坡点,其中特大型及大型滑坡占比 74%;在涉水滑坡中,按照滑坡类型,基岩顺层滑坡和堆积层顺基覆界面滑坡占比最大。库区大型及以上灾害较为发育的特点,使得大多数星载 SAR 数据分辨率均满足一定的探测条件。

此次研究所用 SAR 数据范围如图 1c 所示 (仅标识原始数据拼接裁剪后的实际处理范围)。

2 数据与方法

2.1 基础数据

针对覆盖研究区的存档 SAR 数据,选取了 3 种不同波长的 SAR 数据源,分别是 Sentinel-1 (C 波段)、ALOS PALSAR-2 (L 波段) 及 TerraSAR-X (X 波段),详细参数见表 1。此次 InSAR 处理, Sentinel-1 多视数为 9×1 ,多视后的分辨率为距离



a—研究区地理位置；b—溪洛渡水库区高程及活动断裂；c—SAR 数据类型及拼接裁剪后的实际处理范围

图 1 研究区地理位置、地质背景及 SAR 数据范围

Fig. 1 The location and the geological background of the study area, and the SAR data ranges
(a) The location of the study area; (b) The elevation and active faults; (c) The SAR data types, and InSAR processing ranges after images being spliced and clipped

表 1 星载 SAR 传感器基本参数及特征表

Table 1 Basic parameters and characteristics of Spaceborne SAR sensors

星载 SAR 系统	所属国家/机构	发射时间	波段 (波长/cm)	入射角/(°)	多视数, 分辨率 (距离向×方位向) / m×m	所用模式	重访周期/ 天	主要优点	主要缺点
Sentinel-1	欧空局	2014 年 4 月	C (5.6)	37.74	9×1, 10.48×13.99	干涉宽幅模式	12 (双星 6)	免费、覆盖范围广、重复周期短、存档数据多	干涉用模式分辨率低, 一般不接受编程预定
PALSAR-2	日本	2014 年 5 月	L (25)	升轨: 39.66 降轨: 38.74	2×2, 2.86×4.43	聚束模式	14	覆盖范围广、重复周期短、波段长	需购买, 编程数据经常因卫星执行其他任务拍不到
TerraSAR-X	德国	2017 年 6 月	X (3.1)	26.58	3×3, 2.73×5.89	聚束模式	11	轨道精度高、数据质量好、重返周期短	需购买, 存档数据较少

向×方位向 = 10.48 m×13.99 m; PALSAR-2 多视数为 2×2, 分辨率为 2.86 m×4.43 m; TerraSAR-X 多视数为 3×3, 分辨率为 2.73 m×5.89 m。

利用 InSAR 方法计算的形变结果是 SAR 影像坐标系, 需要投影到地理坐标系统才利于分析, 一般需利用外部数字高程模型 (Digital elevation

model, DEM) 数据配合投影转换 (刘国祥等, 2019)。文章利用的 DEM 数据分辨率为 6 m, 为 SPOT-7 卫星立体像对制作, 其分辨率优于 Sentinel-1, 与 PALSAR-2 和 TerraSAR-X 基本持平, 在重采样过程中可基本还原位置。

Sentinel 系列是欧洲全球环境与安全监测系统项目——“哥白尼计划”的成员, 其于 2014 年 4 月 3 日发射首颗卫星 Sentinel-1A, 每 12 天覆盖全球一次, 2016 年 4 月 25 日 Sentinel-1B 发射成功, 双星重访周期缩短至 6 天 (欧阳伦曦等, 2017)。PALSAR-2 重访周期为 14 天, TerraSAR-X 为 11 天。除 Sentinel-1 为免费数据外, 其他两种 SAR 数据均为商业数据, 需编程采购, 因卫星执行任务、经费等原因, 在数据连续性上较差, 因此, 从数据选取方面, Sentinel-1 性价比更高。

2.2 分析流程

以往分析主要是根据 SAR 卫星本身的参数 (王志勇和张金芝, 2013; Hu et al., 2014) 或技术本身的误差 (大气、植被等; Xu et al., 2011; 廖明生和王腾, 2014; 占文俊等, 2015) 进行的, 此次研究基于影响地质灾害 InSAR 识别的相关因素进行分析, 分析流程图见图 2。采用从整体到局部的评价方法, 区域识别上主要是时间 (相干性、重访周期、数据量情况) 和空间 (理论及实际的有效识别结果), 单体识别上主要为灾害单体特征, 如范围、形变和准确度。

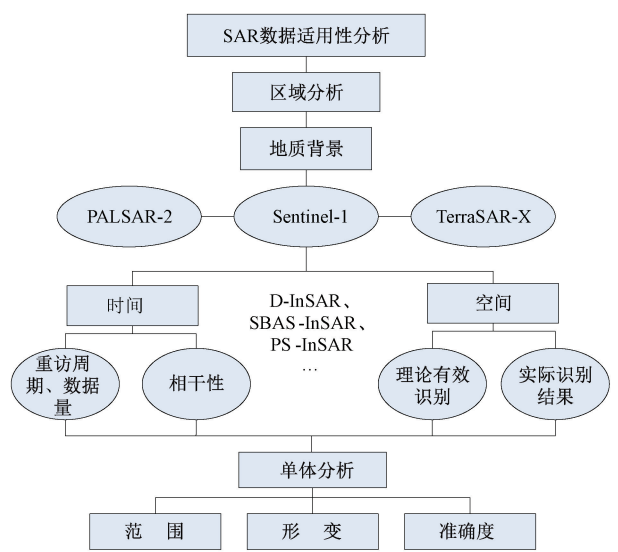


图 2 分析流程图
Fig. 2 Analysis flow chart

3 区域性水库变形斜坡识别适用性评价

3.1 时序识别应用

与其他的在轨观测雷达卫星相比, Sentinel 卫星最大的特点是具有优良的覆盖性能和重访性能, 适合与库水位变化相关性极强的水库滑坡的监测工作。为了开展评价分析, 在研究区编程购买了 PALSAR-2 及 TerraSAR-X 数据, 但是, 由于 PALSAR-2 卫星经常执行突发任务, 使得编程拍摄一度中断, 造成数据不连续, 而 TerraSAR-X 数据由于波长较短, 在植被较茂盛的夏季干涉效果很差, 性价比低。因此, 在实际应用过程中, 如不考虑编程 SAR 数据, 在只用存档数据的前提下, Sentinel 是最优选择。

基于 Sentinel 丰富且连续的存档 SAR 数据 (2014 年 10 月至 2021 年 2 月), 使得区域性的变形斜坡时序识别成为可能, 此次在研究区成功解译的变形斜坡约 200 处, 类型有滑坡、危岩体和塌岸 3 种。

溪洛渡水库水位在每个水文年内的 6 月份至 10 月末为水位上升阶段, 于次年 6 月再降至 540 m 左右 (陈廷照和戴福初, 2018), 仅针对大的蓄—排水周期, 不考虑水位的小范围波动, 结合 Sentinel-1 存档数据情况, 将 SAR 数据分为 6 个完整的水位上升 (下降) 周期, 每个阶段的 SAR 数据数量在图 3 和图 4 的括号中标示。2020 年 10 月至开展此文工作时未满足一个水位下降期。

由于季节、植被等因素的影响, 相干性无法保证每一个像对 D-InSAR 结果都具有可识别性。在溪洛渡水库区, 每年 6 月至 11 月初的水位上升期, 周边植被发育较好, 数据相干性较差。因此, 为了最大化利用 SAR 数据, 并获取水位上升 (下降) 周期的变形斜坡分布情况, 将同期内 D-InSAR 数据做并集, 提取水位上升 (下降) 周期内变形斜坡形变最大范围, 以揭示整个周期内灾害发育情况。随着双星的运行, 2017 年后数据量逐渐增多, 即 2016 年“水位下降 3”之前的数据较少 (图 3), 会引入较大的误差, 因此只针对该期以后的数据进行分析。

由于人工圈定范围的不确定性, 按水位周期解释时采用“点”的方式, 分为“变形”或“非变形”点。此次研究规定, 边坡表面发生变化的

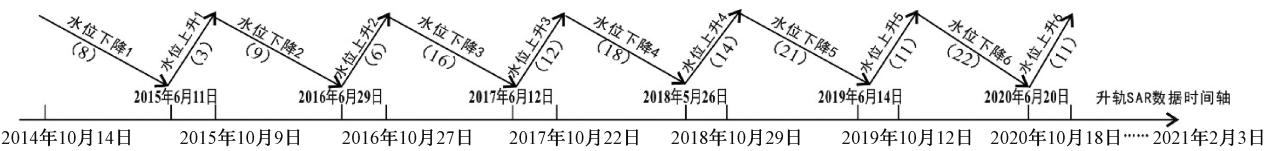


图 3 水位上升(下降)周期内升轨 Sentinel-1 数据存档情况(括号内数字为存档 SAR 数据数量)

Fig. 3 Archiving of the Sentinel-1 data from the ascending orbit in periods of rising (falling) water level (The numbers in brackets are the amount of archived SAR data)

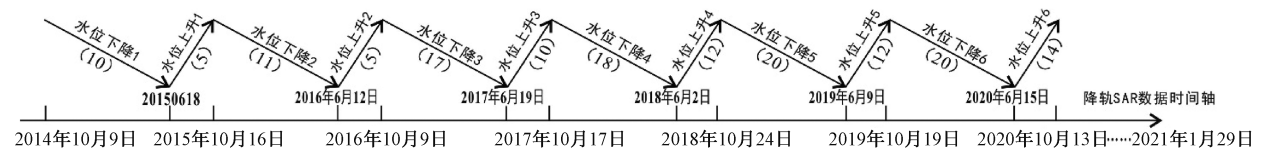


图 4 水位上升(下降)周期内降轨 Sentinel-1 数据存档情况(括号内数字为存档 SAR 数据数量)

Fig. 4 Archive of the Sentinel-1 data from the descending orbit in periods of rising (falling) water level (The numbers in brackets are the amount of archived SAR data)

面积小于解译斜坡最大边界的 10% 时, 这种变化不足以反映边坡的整体变形, 边坡被视为不变形。由于解释方法的局限性, 不能排除人工解译中的漏识。研究区时序解译滑坡点位解译标准示意图如图 5 所示。图 5a 所示 InSAR 结果为边坡的最大

变形范围如图 5a 所示的 InSAR 变形区, 红色线为最大变形边界线。从图 5b—5h 可以看出, 后续边坡的变形量均没有图 5a 所示大, 变形减小。在图 5f 和 5h 中, 红色形变像元占比为 3% 和 4%, 不满足此次设定的 10%, 因此为该滑坡的未变形时期。

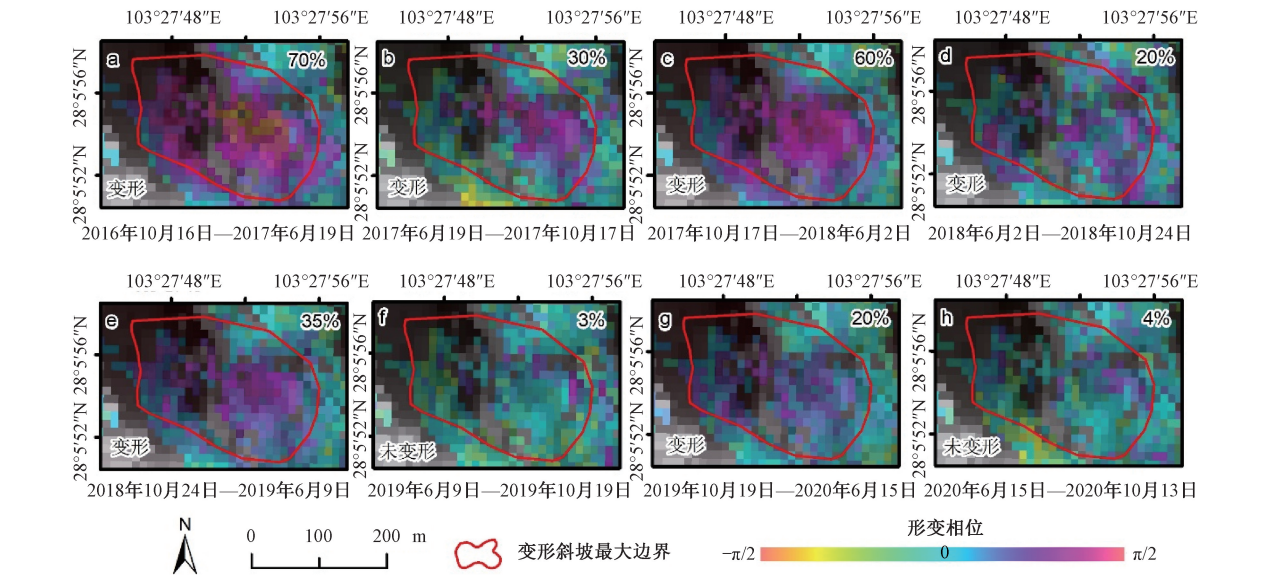


图 5 研究区变形斜坡不同时段干涉相位图及斜坡变形情况

Fig. 5 Interferometric phase of the deformed slope at different periods in the study area and the deformation status

综上, 根据利用 Sentinel-1 数据解译了不同蓄—排水周期内变形斜坡的发育变化情况(图 6), 可以得到: ①水位下降期变形斜坡数量较水位上升期更多; ②2017~2020 年 4 年间变形斜坡的整体数量呈递减趋势; ③2020 年 10 月至 2021 年 2 月不完整水位下降期内数据解译情况显示, 变形斜坡

数量小幅度回升。

3.2 空间识别可行性

由于雷达成像是根据微波回波返回时间长短记录的, 因此为侧视系统, 而星载 SAR 一般为右侧视。现有 SAR 卫星为近极地轨道, 绕地球南北飞行, 由于地球自转, 卫星在同一地表位置的上

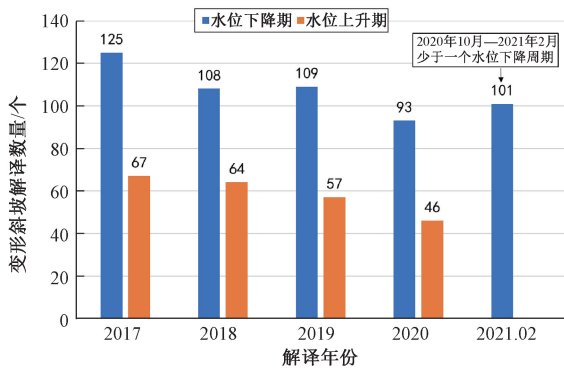


图6 变形岸坡数量时序解译情况示意图

Fig. 6 The annual interpretations of deformed slopes

空会有两种方式经过,即升轨(由南向北飞行)和降轨(由北向南飞行)。由于雷达为侧视观测,当地面对着微波方向的坡度过大时,回波会反射到同一成像单元,相应的 SAR 图像会出现叠掩现象;当地面背着微波方向的坡度过大时,较高地区会对背波的区域形成遮挡,雷达接收不到地表反射, SAR 图像会出现阴影现象(任云, 2013; 张芳, 2018)。阴影叠掩范围的影响因素主要为卫星入射角与地形之间的关系(张同同等, 2019)。

溪洛渡水库区为高山峡谷区,叠掩、阴影现象更为严重。选取3种 SAR 数据升轨、降轨的交集区域,计算 Sentinel-1 升降轨、PALSAR-2 升降轨及 TerraSAR-X 降轨数据在该地区的有效观测情况,计算结果见图7。雷达入射角为: Sentinel-1 升轨 35.26° , Sentinel-1 降轨 37.75° , PALSAR-2 升轨 39.66° , PALSAR-2 降轨 38.74° , TerraSAR-X 降轨 26.58° (叠掩最严重)。它们的有效观测比例如图7a—7e 左下黑字所示,分别为: 70.3%、68.9%、70.4%、67.6%和 52.5%。在不考虑分辨率的情况下,仅对比有效观测面积,通过对雷达常用观测模式下的 SAR 数据比较可以看出,在库区 Sentinel-1 数据(图7a、7b)与其他两种 SAR 数据观测能力相比持平(图7c、7d)或更优秀(图7e)。

对于实际解译情况,选取3种降轨数据,范围为它们的交集,分别进行变形斜坡解译,解译情况如图8所示, Sentinel-1 解译 58 个点, PALSAR-2 解译 48 个点, TerraSAR-X 解译 37 个点。由于数据获取时间、分辨率、波长、入射角等因素影响,解译的位置不能完全一一对应,所识别的岸坡变形情况也不同,因此,不能片面的认为 Sentinel-1 更准确。但分辨率较低的 Sentinel-1 之所以能解译

更多的点,主要原因在于其 12 天重访高频观测的特点,较好的连续性可提高干涉像对的相干性。但是,对于面积较小的变形斜坡,则需要高分辨率的 SAR 数据来补充。因此,如需全面获得库区的岸坡形变位置,需要多种 SAR 数据联合解译。

4 单体滑坡识别适用性评价

4.1 范围

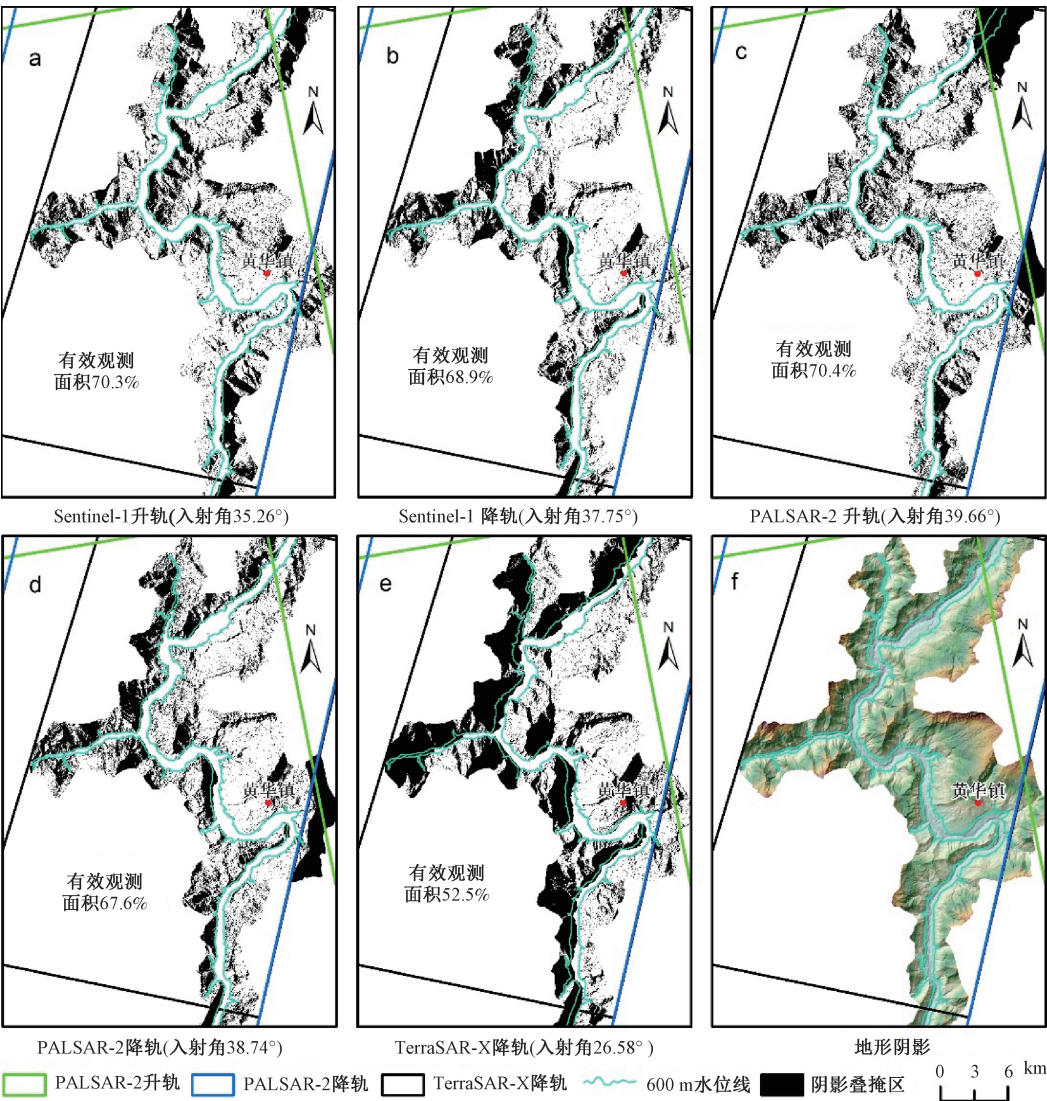
此次处理的 Sentinel-1 数据分辨率为距离向 $\times$ 方位向 = $10.48\text{ m} \times 13.99\text{ m}$,在变形范围识别上,变形斜坡大小需在地表形变空间尺度超过一定数量的分辨率单元。但由于地质条件复杂,变形干扰因素较多,解译过程中还需要针对变形地质体特征进行人机交互与现场校核。结合现场踏勘结果,研究区3种 SAR 数据解译的最小变形斜坡投影面积约为 1300 m^2 ,其中, Sentinel-1 数据解译的最小变形斜坡投影面积约 2400 m^2 ,是约 35 m (长) $\times 77\text{ m}$ (宽)大小的圈椅状斜坡单元,共有 16 个变形像元聚集。

4.2 形变

水库运行期间,岸坡破坏表现为缓动型和剧动型两类(陈洪凯和周晓涵, 2016)。在变形斜坡 InSAR 监测应用上,由于技术本身的特点,主要是针对缓动型(李晓恩等, 2021)。这里的缓动型变形斜坡,指的是滑坡失稳前,其加速趋势可以被大于 2 期的 SAR 数据捕捉到(Dong et al., 2018; Intrieri et al., 2018)。理论上,当差分干涉图中一个分辨率单元内发生沿雷达视线向超过二分之一波长的形变时, D-InSAR 就无法监测到这种形变(Massonnet and Feigl, 1998)。进一步,数据处理时的多视数和相干性也对监测效果影响显著(蒋弥等, 2009)。因此,当变形量过大时,应选取雷达波长更长的 SAR 数据,或以缩短重访周期、增加空间分辨率等方式改进。根据搜集的 GNSS (Global Navigation Satellite System, 全球导航卫星系统)资料,溪洛渡水库区部分滑坡形变最大可达 1 m/月 ,且不会溃决入库,如此大的变形量,使得传统 InSAR 技术无法准确测量其实际变形量,只能监测其相对变形趋势。以上问题,也是 InSAR 技术在滑坡监测与预警上一直无法大面积应用的原因。

4.3 典型滑坡分析

在对整个库区的变形斜坡识别基础上,选取



a—Sentinel-1 升轨数据有效观测面积；b—Sentinel-1 降轨数据有效观测面积；c—PALSAR-2 升轨数据有效观测面积；d—PALSAR-2 降轨数据有效观测面积；e—TerraSAR-X 降轨数据有效观测面积；f—SAR 数据交集区域地形阴影

图 7 研究区不同 SAR 卫星在 SAR 数据交集区域的有效观测比例

Fig. 7 Proportion of effective observations by different SAR satellites in the intersection area of SAR data

(a) The effective observation area of the Sentinel-1 ascending image; (b) The effective observation area of the Sentinel-1 descending image; (c) The effective observation area of the PALSAR-2 ascending image; (d) The effective observation area of the PALSAR-2 descending image; (e) The effective observation area of the TerraSAR-X descending image; (f) The hill shade

升轨、降轨数据均可识别的罍子村滑坡（滑向西—西南）进行单体适用性评价分析。全景照片见图 9a，红色虚线为 InSAR 识别的实际变形区。

4.3.1 基本情况

罍子村滑坡处于金沙江右岸，该滑坡位于巨型古滑坡堆积体前缘，为一个次级堆积层滑坡，水库蓄水前已有变形（Li et al., 2019a）。坡面形态较复杂，陡坎发育，总体上坡体后缘稍陡，中部相对平缓。位于该区段的道路开裂、房屋变形（图 9b）。滑坡体中已形成连贯的滑动面，因此该

滑坡常年变形。

4.3.2 多源 SAR 数据 D-InSAR 结果

用 Sentinel-1 升轨、降轨及 PALSAR-2 升轨、降轨相似时间段的 D-InSAR 处理结果，和 2017 年相似时间段 TerraSAR-X 降轨 D-InSAR 结果（TerraSAR-X 升轨在同期未编程购买数据）进行对比分析。为使图像获得最佳细节展示，采用 $0 \sim \pi$ 周期进行出图，图例已根据不同数据的波长进行实际变形大小的转换，见图 10。Sentinel-1 数据升降轨 D-InSAR 结果见图 10a、10b，PALSAR-2 数据

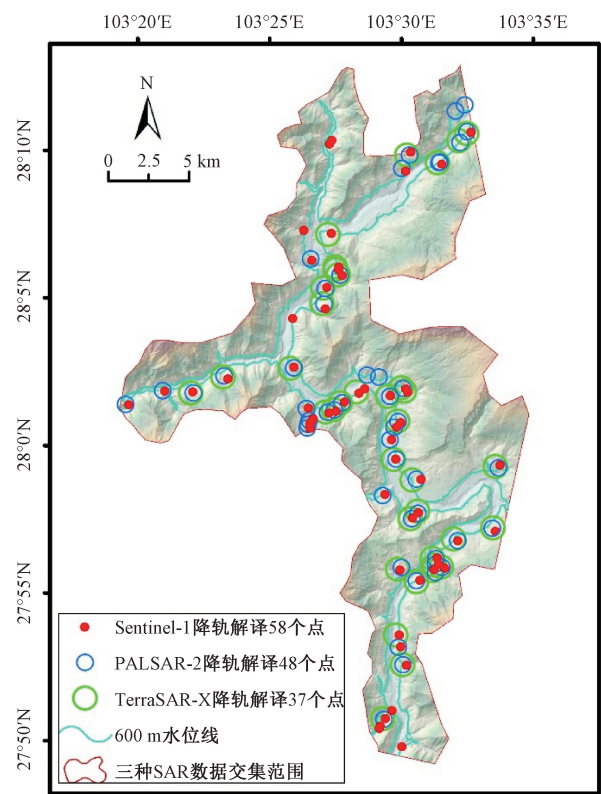
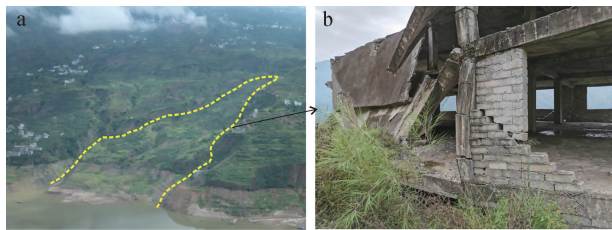


图8 三种 SAR 卫星降轨数据在同一地区的变形斜坡解译情况示意图

Fig. 8 Schematic diagram of deformed slope interpretations of three satellite SAR data on descending orbits in the same area



a—全景图（镜向北西）；b—废弃房屋开裂照片

图9 库区翌子村滑坡现场照片

Fig. 9 Field photos of the Yizicun landslide
(a) Panoramic view of the landslide (towards NW); (b) Photo of a abandoned house

升降轨 D-InSAR 结果见图 10c、10d, TerraSAR-X 数据降轨 D-InSAR 结果见图 10e。光学遥感影像显示的滑坡边界, 与 InSAR 识别的实际变形区有较大差别 (图 10f)。在相似时间段, 分辨率高的 SAR 数据 (PALSAR-2 约 4 m, TerraSAR-X 约 6 m; 表 1) D-InSAR 结果显示出了形变的详细细节, 如图 10c、10e 识别出了翌子村滑体中部的三段滑坡台阶 (Li et al., 2019a), 结合现场调查, 与

InSAR 识别情况相符。

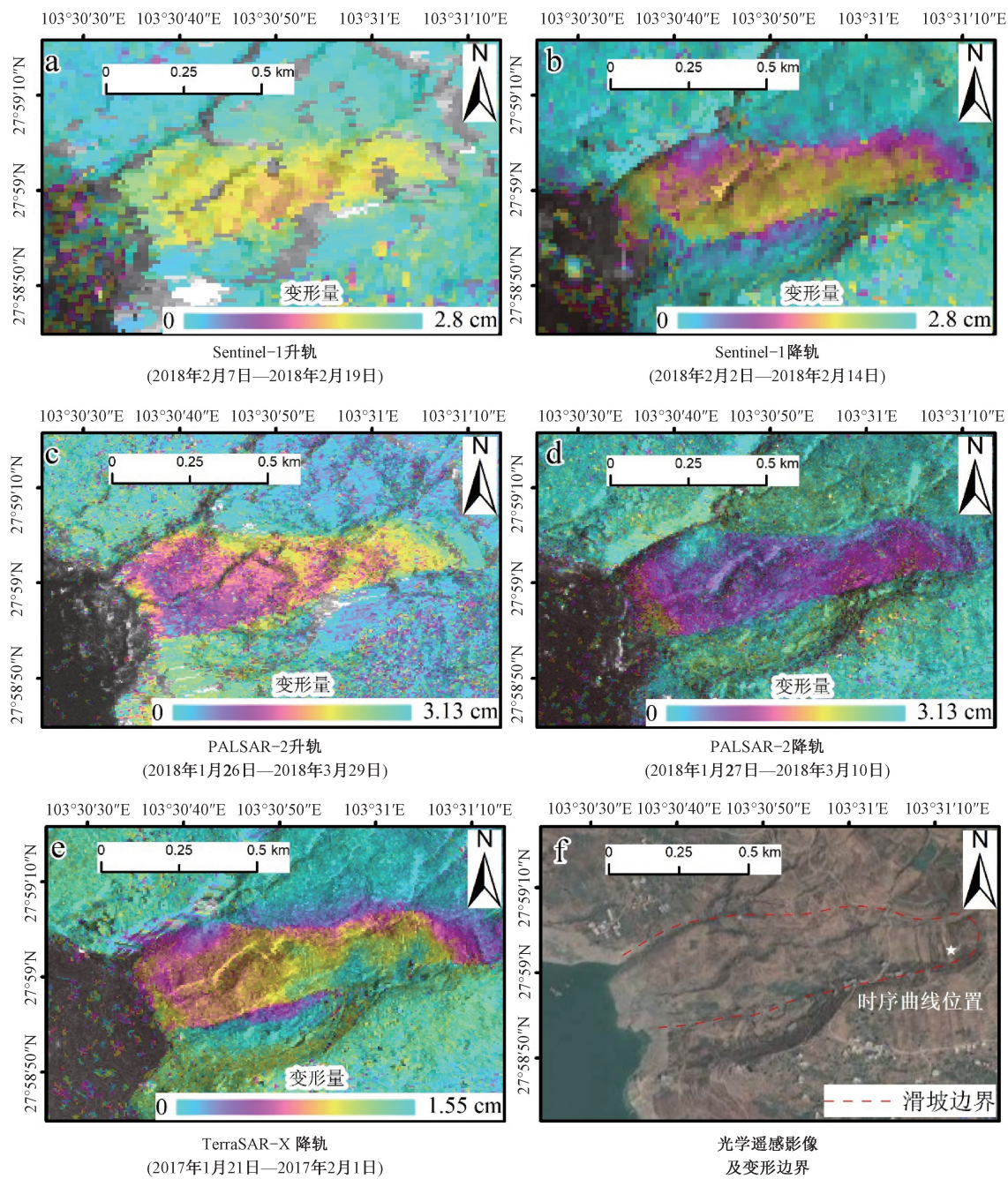
4.3.3 多源 SAR 数据 PS-InSAR 结果

由于翌子村滑坡没有 GNSS 数据, 通过对比 Sentinel-1 降轨、PALSAR-2 降轨的 PS-InSAR 时序曲线, 来分析 Sentinel 在该滑坡的监测适用性。方法是通过相同位置一定区域内 (15 m 直径) 变形点差值, 分析得到两种卫星识别的变形规律是否一致。由于变形较大的前部位置 Sentinel-1 时序结果数据缺失, 因此选取对比区域位置在后缘 (位置见图 10f)。变形曲线见图 11, 图中十字点为 PALSAR-2 数据的 PS-InSAR 时序曲线, 实心圆点为 Sentinel-1 时序曲线, 他们的趋势线由 2 周期移动平均方法合成。PALSAR-2 趋势线上标注的 A、B、C 三个线段, 数据连续性较差 (即无 SAR 数据)。

(1) 监测面积。翌子村滑坡地面农耕植被较多, Sentinel-1 时序监测结果在坡体大变形部位 (中部、前部) 结果丢失。PALSAR-2 由于其波长较长, 更适合植被密集区的大面积的时序变形的监测, 在翌子村滑坡大范围监测上的适用性更高。

(2) 趋势识别。如图 11 所示, 由于 PALSAR-2 在 A、B、C 三个区域, 数据连续性较差 (无数据), 因此该时间段内的变形趋势无法有效识别。与此同时, 由于长时间的数据缺失, 会造成最近一对 SAR 数据间的变形超过其 InSAR 最大量程, 解缠时丢失相位周期。因此, 从图 11 两种 SAR 数据的变形趋势上, 每当 PALSAR-2 长时间缺失数据时, 后期两种变形结果的差值就越大。而 Sentinel-1 由于连续性较好, 变形趋势较为连续。因此 Sentinel-1 更适合连续小变形的趋势识别。

(3) 形变测量。该时序分析的点位区域靠近滑坡后缘, 水位对其的影响减弱, 降雨对其的影响增强。对于变形较大的区域, Sentinel-1 数据也会有相位丢失的现象, 造成实际的监测值较小。同时, SAR 数据的分辨率会影响实际形变的测量, 多视处理后的一个像元内的形变会被平均, 一些高值点会被弱化。像素偏移追踪测量的方法 (Pixel Offset Tracking, POT) 对于分米至米级的大变形的监测较为合适 (Strozzi et al., 2002; Singleton et al., 2014), 但监测精度会有所降低 (Shi et al., 2015; Li et al., 2019b; Jia et al., 2020)。



a—Sentinel-1 升轨干涉图；b—Sentinel-1 降轨干涉图；c—PALSAR-2 升轨干涉图；d—PALSAR-2 降轨干涉图；e—TerraSAR-X 降轨干涉图；f—光学遥感影像及变形边界

图 10 库区歪子村滑坡多源 SAR 数据 D-InSAR 结果对比

Fig. 10 Comparison of D-InSAR results based on the multi-source SAR data of the Yizicun landslide in the reservoir

(a) The interference figure of the Sentinel-1 ascending image; (b) The interference figure of the Sentinel-1 descending image; (c) The interference figure of the PALSAR-2 ascending image; (d) The interference figure of the PALSAR-2 descending image; (e) The interference figure of the TerraSAR-X descending image; (f) The optical image and the deformation boundary

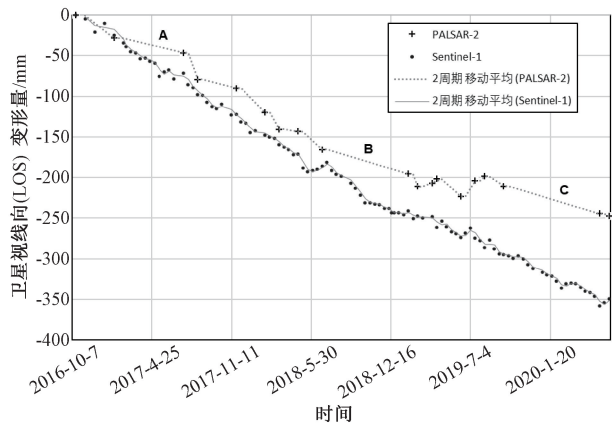


图 11 库区翌子村滑坡多源 SAR 数据 PS-InSAR 时序变形曲线结果对比

Fig. 11 Comparison of PS-InSAR time-series deformation results based on the multi-source SAR data of the Yizicun landslide in the reservoir

5 结论

造成 InSAR 测量结果与实际变形之间的差异的主要原因, 主要有 InSAR 技术的视线向测量特点、波长对可测最大变形量的限制、分辨率控制的像元区域内形变被平均、夏季植被造成的失相干、SAR 数据时序不连续造成的失相干等。文章以金沙江上游溪洛渡水库区为研究区, 以上述影响因素为切入点, 基于 Sentinel-1、PALSAR-2、TerraSAR-X 数据, 采用 D-InSAR、PS-InSAR 方法, 分析评价 Sentinel-1 数据在西南山区水库变形斜坡 InSAR 监测中的适用性, 结论如下。

(1) Sentinel-1 数据在研究区可解译的变形斜坡约 200 处, 类型有滑坡、危岩体和塌岸; 经现场核查, Sentinel-1 数据解译的最小变形斜坡体投影面积约为 2400 m², 为一个约 35 m (长) × 77 m (宽) 大小, 16 个变形像元聚集的斜坡单元。

(2) 高山峡谷区叠掩、阴影现象严重, 通过对常用雷达观测模式下的 SAR 数据的比较, 在 SAR 数据交集区域, 有效观测面积为 Sentinel-1 升轨 70.3%, Sentinel-1 降轨 68.9%, PALSAR-2 升轨 70.4%, PALSAR-2 降轨 67.6%, TerraSAR-X 降轨 52.5%, 在不考虑分辨率的情况下, 在溪洛渡水库区 Sentinel-1 数据与其他 2 种 SAR 数据相比观测能力持平或更优秀。

(3) 溪洛渡水库区在 6 月至 11 月初的水位上升期, 周边植被发育较好, 数据相干性也较差,

2017 年后 Sentinel-1A (1B) 双星拍摄获取 SAR 数据量增加, 高频观测使相干性提高, 利用 2017 年后该卫星数据可有效识别水库蓄—排水周期内的区域性变形斜坡发育变化情况。

(4) 当长时间缺失 SAR 数据时, 会造成最近一对 SAR 数据间的变形超过其 InSAR 最大量程, 解缠时丢失相位周期, Sentinel-1 由于连续性较好, 变形趋势较为连续, 因此 Sentinel-1 更适合连续小变形的趋势识别。

致谢: 感谢评审专家在文章内容、结构及结论组织上提出的宝贵意见。感谢编辑的审阅, 使本文在语言表述方面有了较大的改进。

References

CHEN H K, ZHOU X H, 2016. Study on Identification Method on Failure Mode of Reservoir Landslide: Taking Qingshi Landslide in Three Gorges Reservoir as an Example [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 33 (5): 37-41. (in Chinese with English abstract)

CHEN T Z, DAI F C, 2018. Exploring the Landslide Deformation Regular Based After the Impoundment in the Xiluodu Reservoir [J]. Industrial Construction, 48 (Sup): 634-639. (in Chinese with English abstract)

China Geological Disaster Prevention Engineering Industry Association, 2018. Guideline of InSAR Monitoring for Geo-hazard, T/CAGHP 013-2018 [S]. Beijing: China University of Geosciences Press. (in Chinese)

DENG H Y, WANG C H, 2011. Engineering Geological Characteristics and Genetic Mechanism of Old Landslide of Reservoir Bank of Xiluodu Reservoir Areas [J]. Soil and Water Conservation in China, (5): 59-62. (in Chinese)

DONG J, ZHANG L, LI M H, et al., 2018. Measuring precursory movements of the recent Xinmo landslide in Mao county, China with sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 datasets [J]. Landslides, 15 (1): 135-144.

GAO G P, YANG J H. 2003. Application of GIS in geologic disaster research [J]. Yangtze River, 34 (6): 32-33. (in Chinese)

GAO L, ZENG QM, 2007. Terrain deformation monitoring in Three Gorges Area using Permanent Scatterers SAR Interferometry [C] // ScanGIS' 2007-Proceedings of the 11th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science, s, Norway, 5-7 September 2007: 261-267.

INTRIERI E, RASPINI F, FUMAGALLI A, et al., 2018. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data [J]. Landslides, 15 (1): 123-133.

JIANG M, LI Z W, DING X L, et al., 2009. A study on the maximum and minimum detectable deformation gradients resolved by InSAR [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52 (7): 1715-1724. (in Chinese with English abstract)

- JIA H Y, WANG Y J, GE D Q, et al., 2020. Improved offset tracking for predisaster deformation monitoring of the 2018 Jinsha River landslide (Tibet, China) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111899.
- HENDRON JR A J, PATTON F D., 1987. The Vaiont slide. a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface [J]. *Engineering Geology*, 24 (1-4): 475-491.
- HERRERA G, FERNÁNDEZ-MERODO J A, et al., 2009. A landslide forecasting model using ground based SAR data: the portalet case study [J]. *Engineering Geology*, 105 (3-4): 220-230.
- HU J, LI Z W, DING X L, et al., 2014. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 133: 1-17.
- KANKAKU Y, SAGISAKA M, Suzuki S. (2014). PALSAR-2 launch and early orbit status [C] // *Proceedings of 2014 IEEE geoscience and remote sensing symposium*. Quebec City, QC, Canada: IEEE: 3410-3412.
- LIAO M S, TANG J, WANG T, et al., 2012. Landslide monitoring with high-resolution SAR data in the Three Gorges region [J]. *Sci China Earth Sci*, 42 (22): 217-229. (in Chinese with English abstract)
- LIAO M S, WANG T, 2014. Time series InSAR technology and application [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LIU G X, CHEN Q, LUO X J, et al., 2019. Principle and application of InSAR [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LIU X H, YAO X, ZHOU Z K, et al, 2018. Study of the technique for landslide rapid recognition by InSAR [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (2): 229-237. (in Chinese with English abstract)
- LI B, ZHANG Q, WANG W P, et al, 2020. Geohazard monitoring and risk management of high-steep slope in the Wudongde dam area [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (4): 556-564. (in Chinese with English abstract)
- LI L J, YAO X, Yao J M, et al., 2019a. Analysis of deformation characteristics for a reservoir landslide before and after impoundment by multiple D-InSAR observations at Jinshajiang River, China [J]. *Natural Hazards*, 98 (2): 719-733.
- LI M H, ZHANG L, SHI X G, et al., 2019b. Monitoring active motion of the Guobu landslide near the Laxiwa Hydropower Station in China by time-series point-like targets offset tracking [J]. *Remote Sensing of Environment*, 221: 80-93.
- LI X E, ZHOU L, SU F Z, et al., 2021. Application of InSAR technology in landslide hazard: Progress and prospects [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 25 (2): 614-629. (in Chinese with English abstract)
- MASSONNET D, FEIGL K L, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface [J]. *Reviews of Geophysics*, 36 (4): 441-500.
- OUYANG L X, LI X Q, HUI F M, et al., 2017. Sentinel-1A Data Products Characteristics and the Potential Applications [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 29 (2): 286-295. (in Chinese with English abstract)
- REN Y, 2013. Research on Layover and Shadow Detecting in InSAR [D]. Changsha National University of Defense Technology. (in Chinese with English abstract)
- STROZZI T, LUCKMAN A, MURRAY T, et al., 2002. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (11): 2384-2391.
- SINGLETON A, LI Z, HOEY T et al., 2014. Evaluating sub-pixel offset techniques as an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain [J]. *Remote Sensing of Environment*, 147: 133-144.
- SHI X G, ZHANG L, BALZ T, et al., 2015. Landslide deformation monitoring using point-like target offset tracking with multi-mode high-resolution TerraSAR-X data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105: 128-140.
- SHI X G, LIAO M S, LI M H, et al., 2016. Wide-Area Landslide Deformation Mapping with Multi-Path ALOS PALSAR Data Stacks: A Case Study of Three Gorges Area, China [J]. *Remote Sensing*, 8 (2): 136.
- SCOTT H, ROLAND B, BRENT D, et al., 2016. Three-dimensional surface deformation derived from airborne interferometric uavsar: application to the slumgullion landslide [J]. *Journal of geophysical research*. Solid earth: JGR, 121 (5): 3951-3977.
- TANG X S, ZHENG Y R, TANG H M, et al., 2013. Numerical researches on deformation characteristics and prediction of reservoir landslides [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35 (5): 940-947. (in Chinese with English abstract)
- WANG G J, XIE M W, QIU C, et al., 2011. Experiment research of D-InSAR technique on identifying landslide moving in a wide area [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 33 (2): 131-141. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z Y, ZHANG J Z, 2013. Landslides Monitoring Based on InSAR Technique [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 33 (3): 87-91. (in Chinese with English abstract)
- XU S, WANG S X, NIU R Q, 2020. Identification of the Potential Landslide in Wushan—Fengjie in the Three Gorges Reservoir Area Based on InSAR Technology [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 27 (1): 32-38. (in Chinese with English abstract)
- XU W B, LI Z W, DING X L, et al., 2011. Interpolating atmospheric water vapor delay by incorporating terrain elevation information [J]. *Journal of Geodesy*, 85 (9): 555-564.
- YOU X Z, LI S S, YANG S M, et al., 2001. InSAR Investigation in the Early Stage of the Three Gorges Project on the Yangtze River [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 21 (4): 58-66. (in Chinese with English abstract)
- ZHONGCUN H Z, 1990. Discussion on reservoir landslide [J]. WANG G X, trans. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 10 (1): 53-64. (in Chinese)
- ZHANG M, ZHANG C S, YANG W M, et al, 2014. The formation conditions and stability of Chahandusi Reservoir landslide in Xunhua Country, Qinghai Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 20 (3): 274-284. (in Chinese with English abstract)
- ZHAN W J, LI Z W, WEI J C, et al., 2015. A strategy for modeling and estimating atmospheric phase of SAR interferogram [J]. *Chinese*

Journal of Geophysics, 58 (7): 2320-2329. (in Chinese with English abstract)

ZHANG F, 2018. Study and Engineering Implementation on Problem Areas Detection Technology for Spaceborne InSAR [D]. Xi'an: Xidian University. (in Chinese with English abstract)

ZHANG T T, YANG H L, LI D M, et al., 2019. Identification of layover and shadows regions in SAR images: taking Badong as an example [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (11): 85-88. (in Chinese with English abstract)

ZHENG J H, HUANG B L, ZHANG Q, et al, 2020. Study on the surge induced by the collapse of dangerous rock mass in Longmen Village in Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 533-543. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈洪凯, 周晓涵, 2016. 库岸滑坡破坏模式识别方法研究—以三峡水库青石滑坡为例 [J]. 重庆师范大学学报 (自然科学版), 33 (5): 37-41.

陈廷照, 戴福初, 2018. 溪洛渡库区蓄水后滑坡时空分布特征分析 [J]. 工业建筑, 48 (Sup): 634-639.

邓宏艳, 王成华, 2011. 溪洛渡库区库岸老滑坡工程地质特征及成因机制分析 [J]. 中国水土保持, (5): 59-62.

高改萍, 杨建宏, 2003. GIS 在地质灾害研究中的应用 [J]. 人民长江, 34 (6): 32-33.

蒋弥, 李志伟, 丁晓利, 等, 2009. InSAR 可检测的最大最小变形梯度的函数模型研究 [J]. 地球物理学报, 52 (7): 1715-1724.

廖明生, 唐婧, 王腾, 等, 2012. 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, 42 (2): 217-229.

廖明生, 王腾, 2014. 时间序列 InSAR 技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社.

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

刘星洪, 姚鑫, 周振凯, 等, 2018. 滑坡灾害 InSAR 应急排查技术方法研究 [J]. 地质力学学报, 24 (2): 229-237.

李滨, 张青, 王文沛, 等, 2020. 金沙江乌东德水电站坝区高陡边

坡地质灾害监测预警研究 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 556-564.

李晓恩, 周亮, 苏奋振, 等, 2021. InSAR 技术在滑坡灾害中的应用研究进展 [J]. 遥感学报, 25 (2): 614-629.

欧阳伦曦, 李新情, 惠凤鸣, 等, 2017. 哨兵卫星 Sentinel-1A 数据特性及应用潜力分析 [J]. 极地研究, 29 (2): 286-295.

任云, 2013. InSAR 叠掩与阴影检测技术 [D]. 长沙: 国防科学技术大学.

唐晓松, 郑颖人, 唐辉明, 等, 2013. 水库滑坡变形特征和预测预报的数值研究 [J]. 岩土工程学报, 35 (5): 940-947.

王桂杰, 谢谟文, 邱骋, 等, 2011. 差分干涉合成孔径雷达技术在广域滑坡动态辨识上的实验研究 [J]. 北京科技大学学报, 33 (2): 131-141.

王志勇, 张金芝, 2013. 基于 InSAR 技术的滑坡灾害监测 [J]. 大地测量与地球动力学, 33 (3): 87-91.

徐帅, 王尚晓, 牛瑞卿, 2020. 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, 27 (1): 32-38.

游新兆, 李澍荪, 杨少敏, 等, 2001. 长江三峡工程库首区 InSAR 测量的初步研究 [J]. 地壳形变与地震, 21 (4): 58-66.

中村浩之, 1990. 论水库滑坡 [J]. 王恭先, 译, 水土保持通报, 10 (1): 53-64.

张淼, 张春山, 杨为民, 等, 2014. 青海循化县查汗都斯水库滑坡形成条件与稳定性分析 [J]. 地质力学学报, 20 (3): 274-284.

占文俊, 李志伟, 韦建超, 等, 2015. 一种 InSAR 大气相位建模与估计方法 [J]. 地球物理学报, 58 (7): 2320-2329.

张芳, 2018. 星载 InSAR 问题区域检测技术研究以及工程化实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学.

中国地质灾害防治工程行业协会, 2018. 地质灾害 InSAR 监测技术指南: T / CAGHP 013-2018 [S]. 北京: 中国地质大学出版社.

张同同, 杨红磊, 李东明, 等, 2019. SAR 影像中叠掩与阴影区域的识别—以湖北巴东为例 [J]. 测绘通报, (11): 85-88.

郑嘉豪, 黄波林, 张全, 等, 2020. 三峡库区龙门寨危岩体崩塌产生涌浪研究 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 533-543.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

