

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

DAI Ke-ren, WU Ming-tang, ZHUO Guan-chen, et al. Review on InSAR Early Identification and Monitoring of Reservoir Landslides for Large Hydropower Engineering Projects in Southwest Mountainous Area of China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(3): 559-577.

DOI:10.19814/j.jese.2022.12080

·《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑·

西南山区大型水电工程库岸滑坡 InSAR 早期识别与监测研究进展

戴可人^{1,2,3}, 吴明堂⁴, 卓冠晨^{1,2}, 居安华^{1,2}, 温柠玲^{1,2}, 冯文凯^{1*}, 许强¹

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 3. 长安大学 地质工程与测绘学院,
陕西 西安 710054; 4. 浙江华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要:我国西南山区大型水电工程大量建设于金沙江、澜沧江、雅砻江流域,但是这些流域复杂的地层、岩性、构造、水文等地质条件导致水电工程库岸滑坡灾害分布广泛,多发频发。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术凭借其覆盖范围广、监测精度高、不受云雾遮挡等特点为水电工程库岸滑坡早期识别与监测带来了新的机遇,在近年来得到水电工程建设及库岸地质灾害防治相关领域的极大重视。基于此,对西南山区大型水电工程库岸滑坡 InSAR 早期识别与监测的应用概况进行了梳理,从研究时间、研究内容、研究对象等多角度进行了分析;对水电工程库岸滑坡 InSAR 早期识别与监测技术的研究现状、研究热点进行了归纳与总结,揭示了以白鹤滩水电站为里程碑,水电工程库岸滑坡早期识别与监测目前已开始进入 InSAR 技术应用与研究的爆发阶段;最后,探讨了水电工程全生命周期(蓄水前阶段、蓄水阶段、蓄水后阶段)对 InSAR 技术的不同应用需求与算法适用性。随着 SAR 数据质量提升与算法进步,InSAR 技术必将常规化地参与到水电工程全生命周期库岸滑坡的识别与监测工作中,为水电工程库岸滑坡的早期识别、监测预警、触发机理研究及灾害防治等提供重要支撑,提升我国水电工程库岸滑坡地质灾害防治能力。

关键词:InSAR 技术;早期识别;形变监测;库岸滑坡;水电工程;金沙江;澜沧江;西南山区

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2023)03-0559-19

Review on InSAR Early Identification and Monitoring of Reservoir Landslides for Large Hydropower Engineering Projects in Southwest Mountainous Area of China

DAI Ke-ren^{1,2,3}, WU Ming-tang⁴, ZHUO Guan-chen^{1,2}, JU An-hua^{1,2},
WEN Ning-ling^{1,2}, FENG Wen-kai^{1*}, XU Qiang¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of

收稿日期:2022-12-31;修回日期:2023-03-02 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3901403);国家自然科学基金项目(41801391,41941019);

中国博士后科学基金项目(2020M673322);四川省自然科学基金杰出青年科学基金项目(2023NSFSC1909)

作者简介:戴可人(1989-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:daiker17@cdut.edu.cn。

* 通讯作者:冯文凯(1974-),男,河南原阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:fengwenkai@cdut.edu.cn。

Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Zhejiang Huadong Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310030, Zhejiang, China)

Abstract: Lots of large hydropower engineering projects have been built in Jinsha River, Lancang River and Yalong River basins in the southwest mountainous areas of China. But the complicated stratum, lithology, structure, hydrology and other geological conditions of these river basins cause widespread, large number and high frequency of reservoir landslide for large hydropower engineering projects. Synthetic aperture radar interferometry (InSAR) technology with the advantages of wide coverage, high monitoring accuracy, and unblocked by clouds, brings new opportunities for early identification and monitoring of reservoir landslide. Especially in recent years, great attention has been paid to the construction of hydropower engineering projects and the reservoir geohazard prevention. The application of InSAR early identification and monitoring of reservoir landslide for large hydropower engineering projects in southwest mountainous area of China was sorted out, and the overall change analysis was carried out from the perspectives of research time, research content and research object. By summarizing the research status and hotspots of InSAR early identification and monitoring of reservoir landslides in southwest mountainous area, it is revealed that Baihetan hydropower engineering project is a milestone and nowadays has entered the outbreak stage of InSAR technology application and research on reservoir landslide. Meanwhile, the different application requirements of InSAR technology and the applicability of InSAR algorithm in the whole life cycle of hydropower engineering project (including the stage before impoundment, impoundment stage and the stage after impoundment) were discussed. In future, with the improvement of SAR data quality and algorithm, InSAR technology will be routinely involved in the identification and monitoring of reservoir landslides throughout the life cycle of hydropower engineering projects. It can provide important support for the early identification, monitoring and early warning, and trigger mechanism research and geohazard prevention of reservoir landslide, so as to enhance the ability of the reservoir geohazard prevention in China.

Key words: InSAR technology; early identification; deformation monitoring; reservoir landslide; hydropower engineering project; Jinsha River; Lancang River; southwest mountainous area of China

0 引言

西南山区水电工程在我国经济社会发展中发挥着举足轻重、不可替代的作用,素有“世界水电看中国,中国水电看西南”的说法。据 2021 年全国水利发电数据^[1],四川省发电量($3\ 531 \times 10^8$ kW·h)与云南省发电量($2\ 716 \times 10^8$ kW·h)不仅远超第三名湖北省发电量($1\ 531 \times 10^8$ kW·h),同时两省发电量之和占比达到全国水电总发电量的 52.8%。2014 年,国务院办公厅印发的《能源发展战略行动计划(2014~2020 年)》也提出:大力发展可再生能源,积极开发水电站;在做好生态环境保护和移民安置的前提下,以西南地区金沙江、雅砻江、大渡河、澜

沧江等河流为重点,积极有序推进大型水电基地建设^[2]。在此背景下,近 10 年来西南地区规划与兴建了诸多水电站,金沙江、雅砻江、澜沧江干流规划建设水电站数量总和超过 50 座^[3-6],包括排名第二的总装机容量 $1\ 600 \times 10^4$ kW 的白鹤滩水电站、排名世界第四的总装机容量 $1\ 386 \times 10^4$ kW 的溪洛渡水电站等特大水电工程。

另外,青藏高原持续的隆升与金沙江、雅砻江、澜沧江等河流深切成谷作用,造就了西南地区具有地形高陡、地貌复杂、活动断裂广布、地震高强频发、地表剥蚀强烈、风化卸荷强烈的特点。复杂的地层、岩性、构造、水文等地质条件导致了西南山区水电工程库岸滑坡广泛分布^[7-9]。例如,金沙江溪洛渡水电

站库岸存在滑坡 433 处^[10],金沙江白鹤滩水电站库岸查明滑坡 257 处^[11],雅砻江两江口等水电站所处的中游发育有滑坡 606 处^[12]。库岸滑坡会对水电工程的建设与安全运营造成严重的影响。例如,1961 年,中国湖南省安化县资水河柘溪水库在施工阶段发生一起重大库岸滑坡,激起的涌浪漫过尚未建成的大坝泄向下游,造成 40 人死亡^[13];1963 年,意大利瓦依昂(Vajont)大坝库岸发生大滑坡,冲毁了坝内和地下厂房内的大部分设施,并造成下游 2 400 余人死亡^[14];2003 年,中国三峡库区库岸的千将坪滑坡造成 10 人死亡,14 人失踪,摧毁 129 间民房以及 4 个工厂,导致 1 200 人无家可归^[15]。因此,如何早期识别与监测库岸滑坡从而进行有效防灾减灾是西南山区大力发展水电工程过程中亟待解决的重要问题。

合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术可以基于星载 SAR 影像,对广域坡体形变进行精准识别与监测,具有精度高、无需现场实测、覆盖范围广、不受云雾遮挡等优点,已被广泛应用于滑坡等地质灾害识别与监测中^[16-19],特别是在三峡库区等水电工程库岸滑坡中已取得不少成功应用^[20-22]。西南山区大型水电工程库岸滑坡 InSAR 早期识别与监测应用最初始于 2012 年,谢谟文等在金沙江乌东德水电站库岸开展了 D-InSAR 广域岩土体形变监测研究^[23],随后的应用与研究主要集中于西南山区三条大江(即金沙江、澜沧江与雅砻江)上的大型水电工程库岸。表 1 梳理了西南山区大型水电工程中与 InSAR 早期识别、监测研究相关的成果。从表 1 可以看出,已

有 10 多座水电站引入 InSAR 技术对库岸滑坡开展了相关识别与监测,其中以金沙江流域的研究成果最多、研究时间跨度最长。广域早期识别研究集中于金沙江乌东德水电站库岸^[24-26]、白鹤滩水电站库岸等^[27-28],单体监测则聚焦于各水电站库区的重点典型库岸滑坡(如白鹤滩水电站王家山滑坡^[29-30]等)。随着卫星影像与自身算法精度的提升,InSAR 技术已成为水电工程库岸滑坡监测的重要手段,水电工程库岸地质灾害防治相关部门也对其高度重视并展现出较高需求。明确西南山区大型水电工程库岸滑坡 InSAR 早期识别与监测的应用与研究现状、总结其经验与启示,对于大型水电工程库岸地质灾害防治中的 InSAR 技术工程化使用具有重要意义。

本文对西南山区大型水电工程的建设概况及其库岸滑坡 InSAR 识别与监测的总体应用现状进行梳理与回顾,并针对大范围的库岸滑坡 InSAR 早期识别与单体滑坡的 InSAR 监测具体应用情况及研究热点进行了总结,最后探讨了未来水电工程全生命周期中 InSAR 技术的应用需求以及技术、数据需求,并对未来的研究进行了展望。

1 研究区域概况及总体研究现状

1.1 研究区域概况

西南地区作为我国水资源最丰富的地区,是中国及东南亚地区许多大江大河的发源地。西南地区包括青藏高原、云贵高原、四川盆地,这三者在海拔高度上逐渐下降,在西南地区孕育的河流长度长、流量大、流域覆盖广。这些大江大河多从青藏高原发源,向南流经云贵高原后,或再向南流出国境、或转

表 1 西南山区大型水电工程库岸滑坡 InSAR 早期识别与监测研究概况

Table 1 Overview of InSAR Early Identification and Monitoring of Reservoir Landslide for Large Hydropower Engineering Projects in Southwest Mountainous Area

流域	大型水电工程名称	建成投产状态	装机容量	相关研究文献
金沙江	阿海水电站	2012 年建成投产	2 000 MW	[31]~[33]
	溪洛渡水电站	2015 年建成投产	13 860 MW	[34]~[39]
	梨园水电站	2015 年建成投产	2 400 MW	[31]
	毛儿盖水电站	2012 年建成投产	420 MW	[40]
	乌东德水电站	2021 年建成投产	10 200 MW	[23]~[26],[41]~[44]
	白鹤滩水电站	2022 年建成投产	16 000 MW	[11],[27]~[30],[45]~[51]
澜沧江	小湾水电站	2010 年建成投产	4 200 MW	[52]~[54]
	黄登水电站	2016 年建成投产	1 900 MW	[55]
	大华桥水电站	2018 年建成投产	920 MW	[52],[53],[56]和[57]
	古水水电站	在建	2 600 MW	[58]和[59]
雅砻江	两河口水电站	2021 年建成投产	3 000 MW	[60]
	卡拉水电站	在建	1 020 MW	[61]

水电站,该水电站是仅次于三峡水电站的我国第二大水电站。

澜沧江发源于青海省唐古拉山东北部,干流全长 2 161 km,纵贯横断山脉,是世界上最典型的 SN 向河流且水位落差、水量大,因此具有水电站开发的有利条件。澜沧江水电站基地共规划有 15 座水电站,其中上游规划 7 座水电站,中下游规划 8 座水电站,包括小湾水电站(装机容量 420×10^4 kW)、糯扎渡水电站(585×10^4 kW)等。

雅砻江发源于青海省玉树藏族自治州巴颜喀拉山南麓,干流长 1 571 km,为金沙江第一大支流,并且雅砻江流域为中国十三大水电基地之一,全流域水能理论蕴藏量为 38 400 MW。雅砻江上、中、下游共规划有 21 座水电站,其中包括中游的两河口水电站(装机容量 300×10^4 kW)与下游的锦屏一级水电站(360×10^4 kW)、锦屏二级水电站(480×10^4 kW)、二滩水电站(330×10^4 kW)等。

1.2 总体研究现状

为了厘清 InSAR 技术在库岸滑坡方向的研究趋势以及发展方向,本文利用 Web of Science 核心合集数据库及中国知网数据库,限定检索关键词为“InSAR”、“Reservoir Landslide”、“库岸滑坡”,对已发表的以大型水电工程库岸滑坡 InSAR 技术应用为主题的相关论文进行检索,检索结果如图 2(a)所示。国内外关于 InSAR 技术在库岸滑坡方向的研究总体呈增长趋势,而西南地区作为我国水电站建设的重点区域,发文量与总体发文量的增长趋势大致相同。从图 2(a)可以看出:在 2014 年哨兵一号(Sentinel-1)卫星发射之前,国内外关于 InSAR 技术在库岸滑坡方向的研究数量较少;而在 2014 年之后,有了较好的 SAR 数据积累后,相关研究的总体发文量有所增加,而全世界总体发文量与西南地区的相关研究发文量均从 2021 年开始迎来较大幅度的增长,揭示了最近两年水电工程领域对 InSAR 技术的逐渐重视。

具体来讲,在西南地区三大流域建设的众多水电站中,InSAR 技术在库岸滑坡的研究中共涉及到其中的 12 座水电站,如图 2(b)所示。从文献发表时间来看,2012 年谢谟文等在乌东德水电站库岸首次开展了广域岩土体 D-InSAR 形变监测研究^[23],是 InSAR 技术在西南地区库岸滑坡研究中的首次应用。此外,Wang 等利用 D-InSAR 技术对乌东德水电站大范围滑坡进行了定位和监测,并结合 GPS 数据对单点误差进行了改正^[24]。这个阶段的 In-

SAR 技术受制于数据数量与质量,只能依靠 D-InSAR 技术开展厘米级形变监测,总体精度不高。随着 2014 年 Sentinel-1 卫星发射与数据积累,2016~2019 年发表的相关研究成果逐渐丰富起来。近两年来,随着西南地区水电站的陆续建成以及 InSAR 技术受到越来越多的关注,相关研究在 2022 年达到前所未有的热度。目前,InSAR 技术在库岸滑坡方面的相关研究主要集中在金沙江下游建设的 3 座世界级巨型梯级水电站。其中,乌东德水电站相关研究时间最早,溪洛渡水电站相关研究数量较多,白鹤滩水电站相关研究数量增长速度最快。

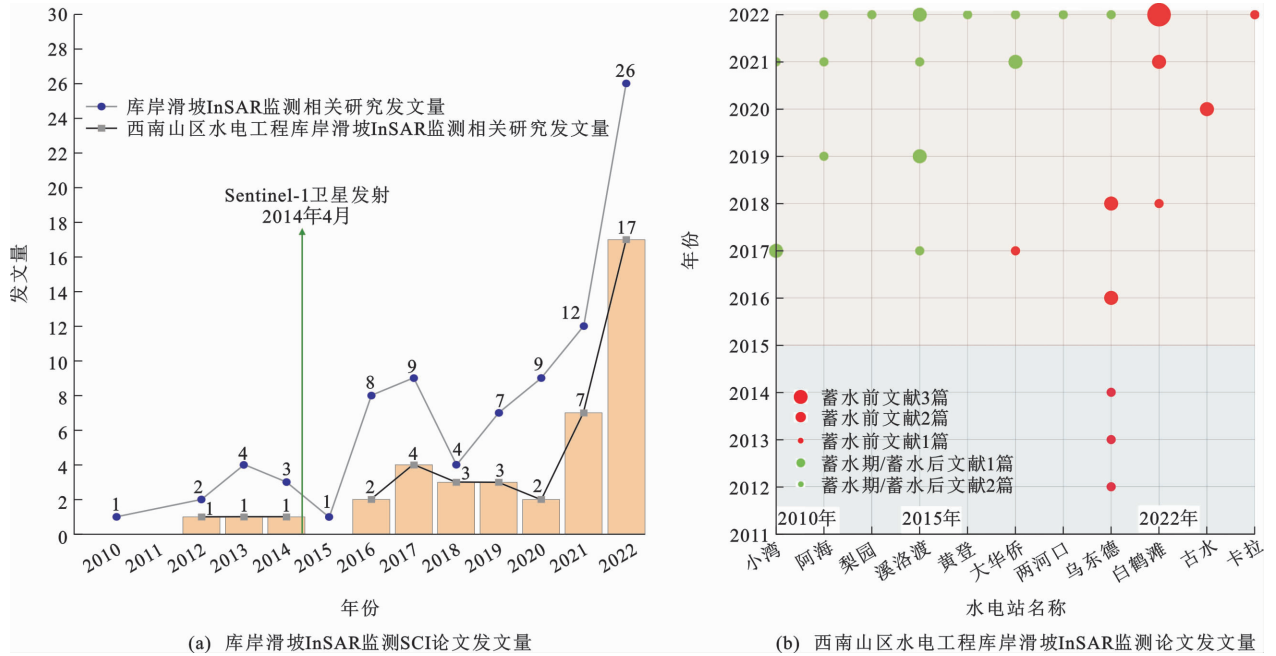
从研究内容来看,早期的库岸滑坡 InSAR 相关监测大多在水电站蓄水阶段或蓄水后阶段开展[图 2(b)中绿色圆点],缺少对水库库区整体大范围系统性的调查与蓄水前阶段早期识别工作。随着 SAR 数据积累与 InSAR 技术软硬件的成熟,在新近建设的水电工程库岸滑坡灾害调查中(特别是以乌东德水电站、白鹤滩水电站为代表),InSAR 技术已从水电站蓄水前阶段就参与其中[图 2(b)中红色圆点],预示着未来 InSAR 技术将会参与到水电工程全生命周期的库岸地质灾害防治工作中。

2 滑坡 InSAR 广域早期识别

2.1 总体应用与研究现状

大型水电工程建设会对周边环境带来极大影响,且影响范围极广,主库多达上百千米。水库水位的周期性变化会对当地的地质水文条件产生巨大影响,从而催生出许多新生滑坡并导致古滑坡体的复活^[62]。因此,库岸滑坡作为水库库区地质灾害最主要的一种,其广泛分布在河道两侧山体上,对其数量以及位置进行广域识别与排查是大型水电工程水库库区地质灾害防治的重要工作之一。

传统地质调查方法受制于库岸地形地貌条件和广域范围,而 InSAR 技术凭借其覆盖范围广、无需现场实测的特点成为了滑坡广域早期识别的重要手段。乌东德水电站是最早利用 InSAR 技术开展库岸滑坡广域识别的西南地区水电站。2012 年,谢谟文等在乌东德水电站库岸率先开展了广域岩土体 D-InSAR 形变监测研究^[23];2016 年,康亚利用 Stacking-InSAR 技术对乌东德水电站库岸进行大范围滑坡识别,有效识别出 10 处滑坡^[43][图 3(a)];2018 年,Zhao 等利用干涉点目标分析(Interferometric Point Target Analysis, IPTA)算法,基于 L 波段 SAR 数据对乌东德水电站库岸潜在滑坡进行



图(b)中,横坐标上的2010年、2015年、2020年指示水电站的建成时间;横坐标按照水电站建成投产时间先后依次排序,纵坐标为相关文献的发表年份;圆点越大代表文献数量越多,绿色圆点代表研究对象为水电站蓄水阶段以及蓄水后阶段的相关文献,红色圆点代表研究对象为水电站蓄水前阶段的相关文献

图2 水电工程库岸滑坡InSAR监测相关研究论文统计结果

Fig. 2 Statistical Results of Papers Related to InSAR Monitoring of Reservoir Landslides for Hydropower Engineering Projects

广域识别,在面积超过 $2\ 500\ \text{km}^2$ 的范围内发现并绘制了22处活动性滑坡^[26][图3(b)]。乌东德水电站库岸滑坡研究为InSAR技术在西南地区大型水电工程库岸滑坡地质灾害的广域识别提供了许多可借鉴的经验。

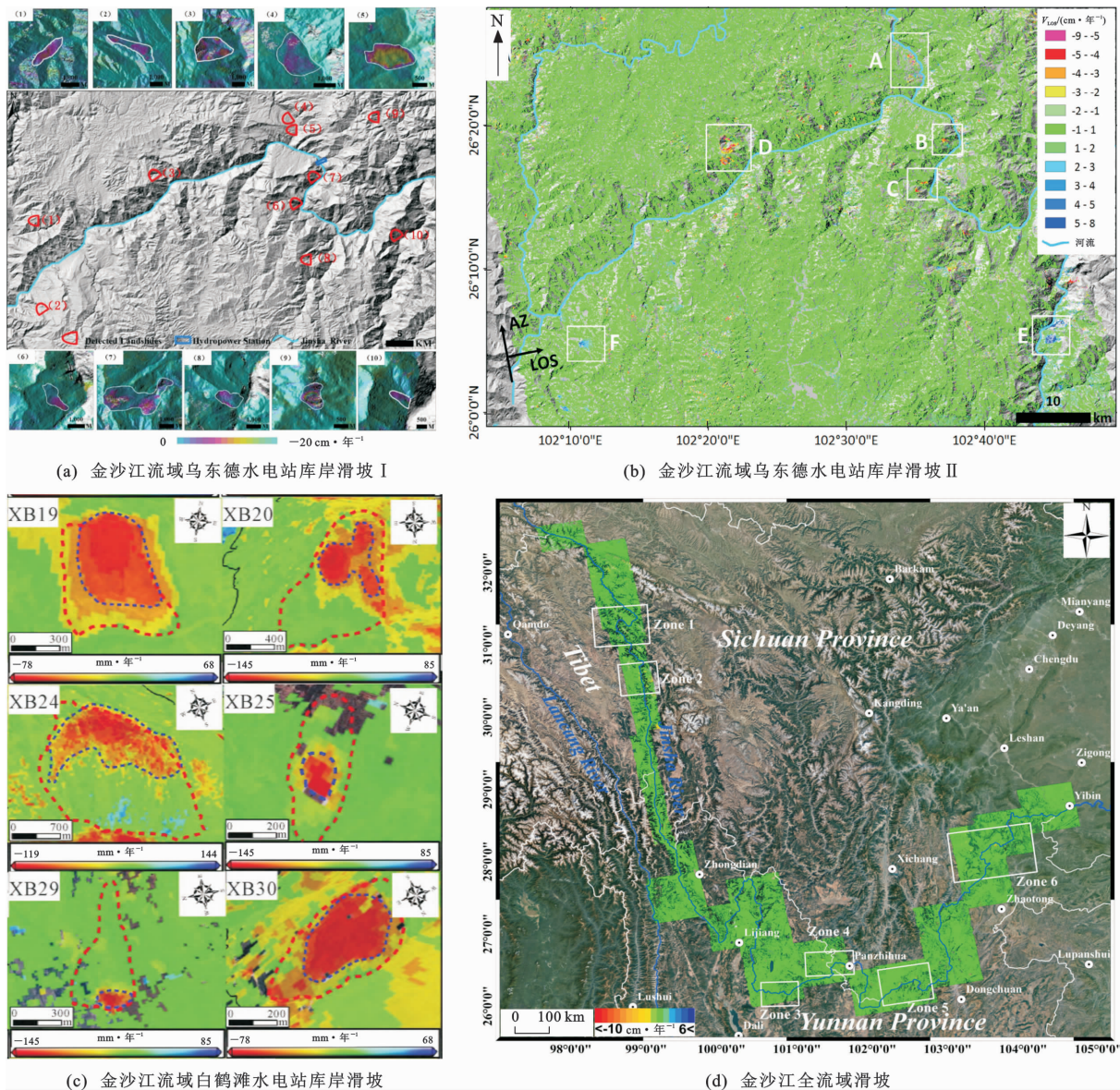
2021年,西南地区最大的水电站——白鹤滩水电站开始蓄水,而库岸滑坡问题也伴随着水电站的整个建设过程。白鹤滩水电站库区古滑坡及堆积体众多,水库蓄水必将导致古滑坡复活和现有不稳定岸坡变形破坏,对广域地质灾害识别提出了较高要求。2018年,周振凯利用D-InSAR、Stacking-InSAR、IPTA-InSAR技术组合并结合光学遥感解译和野外地质调查,揭示了白鹤滩水电站库区地质灾害类型以及分布^[11];吴明堂等采用InSAR技术和无人机光学遥感技术对白鹤滩水电站库区象鼻岭—野猪塘段崩滑库岸地质灾害进行了综合遥感识别^[48];2021年,Dun等基于SAR几何畸变分析,采用SBAS-InSAR技术对白鹤滩水电站库区活动性滑坡进行了识别,并从地层岩性的角度分析其内在控制因素^[27]。2022年,戴可人等结合InSAR技术与无人机技术对白鹤滩水电站蓄水前阶段地质灾害开展了广域识别,并探讨了InSAR技术与无人机技术如何高效结合开展地质灾害广域识别[图3

(c)]^[50]。值得一提的是,白鹤滩水电站库岸滑坡从蓄水前阶段即已全面开展,并且在蓄水阶段持续进行中。近年来,SAR数据的逐渐丰富、InSAR技术的创新改进以及计算机算力的提升,都极大地推动了水电工程库岸滑坡广域识别的相关研究与应用,将使得水电站蓄水前阶段系统性开展库岸滑坡广域早期识别工作变得常规化。如图3(d)所示^[63],融合多源数据的水电工程库岸滑坡广域识别研究势必会成为未来的发展趋势。

2.2 研究热点

2.2.1 几何畸变

SAR卫星采用的是侧视成像,导致SAR影像在地形起伏较大区域产生几何畸变现象(如叠掩、透视收缩、阴影等),将会对滑坡InSAR形变识别的适宜范围与精度造成严重影响^[64-69]。西南山区大江大河多发源于青藏高原,自北向南流淌,且途径西南高山峡谷区,地形十分陡峭复杂,导致在西南山区大型水电工程库岸开展滑坡InSAR早期识别受到的几何畸变影响会较为严重。因此,众多学者在开展滑坡早期识别工作中对西南山区白鹤滩水电站库岸、古水水电站库岸、乌东德水电站库岸、溪洛渡水电站库岸等开展了几何畸变研究,结果如图4所示。例如,2014年王立伟率先在乌东德水电站库岸对RA-



图(a)和图(b)引自文献[26]、[43];图(c)引自文献[50];图(d)引自文献[63]

图3 库岸滑坡 InSAR 广域早期识别案例

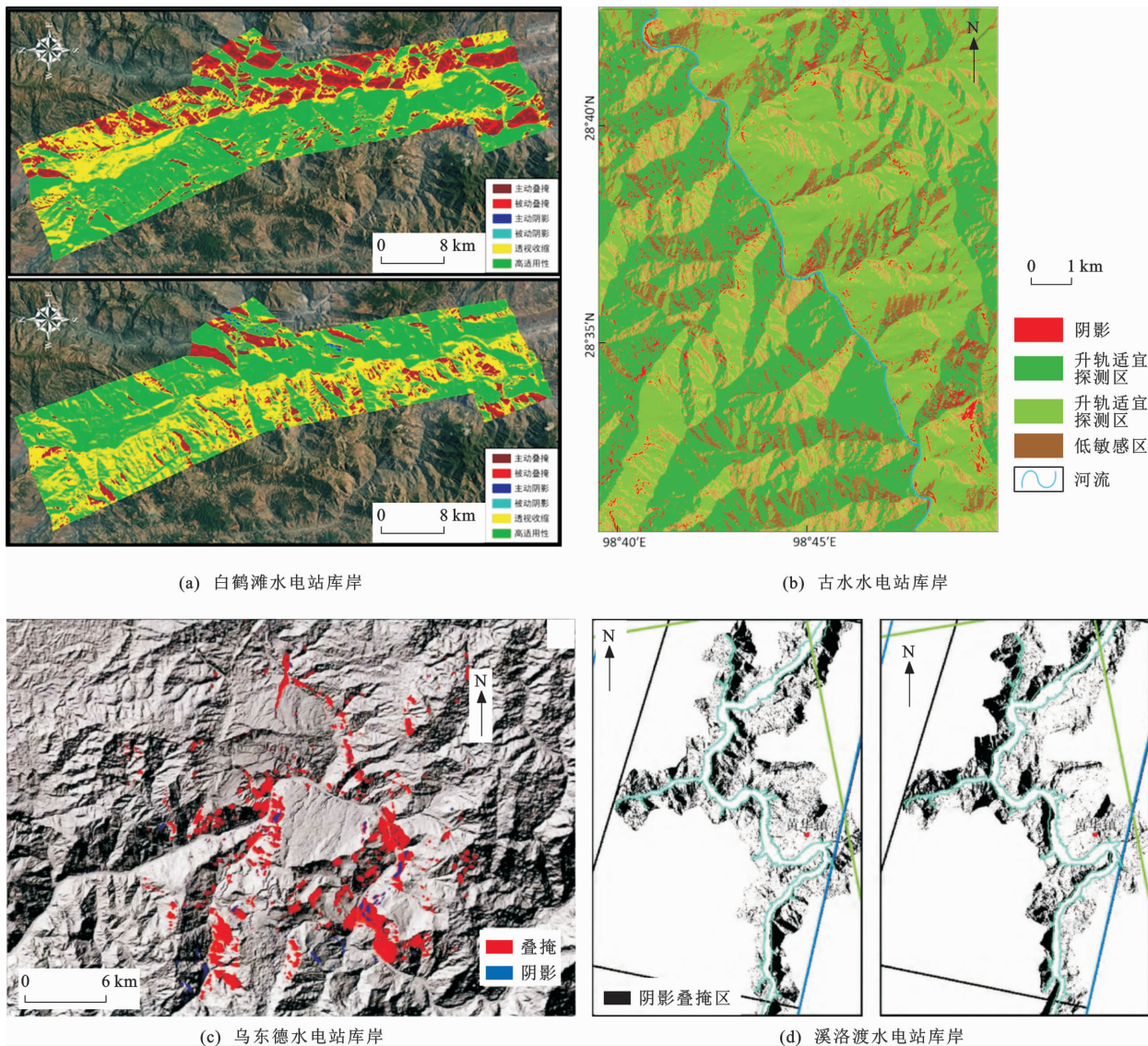
Fig. 3 Cases of InSAR Wide-area Early Identification of Reservoir Landslides

DARSAT-2 影像开展了几何畸变识别研究^[42]; 2022 年李凌婧等在溪洛渡水电站库岸对 Sentinel-1 升降轨数据、ALOS-2 升降轨数据与 TerraSAR-X 降轨数据的几何畸变分布进行了识别,发现上述数据的几何畸变十分严重,占比 30%~47%^[38]。上述成果揭示了背向卫星视线方向的库岸(即升轨影像朝东向库岸,降轨影像朝西向库岸)不易受到 SAR 几何畸变影响,处于较好的观测条件。目前,已有局部入射角识别法^[68]、最小二乘蒙特卡罗(Least-squares Monte Carlo, LSM)法^[64]、R 指数法^[69]、SAR 信号统计特性法^[70]、GIS 模型法^[71]、光谱法^[72]用于消除几何畸变,也有相关研究开展了不同几何畸变类型对形变监测精度的影响分析^[73]。未来应

尽可能采用多平台、多轨道、不同入射角的 SAR 影像,从不同的观测角度对库岸滑坡的形变进行广域早期识别。

2.2.2 大气延迟

SAR 卫星的电磁波信号穿过大气层时会产生大气延迟,严重影响 InSAR 形变监测的精度^[74-78]。大气延迟主要包括电离层延迟与对流层延迟。电离层延迟与大气电离层的电子活跃程度有关,在赤道和两极地区相对显著;对流层延迟主要由对流层中水汽含量、温度及气压的时空变化引起,在极端天气与地形剧烈起伏的区域尤为严重^[75,77-79]。西南山区大型水电工程库岸具备复杂的地形条件与多云多雨的气象条件,因此,大气延迟对于 InSAR 形变监测



图(b)引自文献[58];图(c)引自文献[42];图(d)引自文献[38]

图4 大型水电工程库岸几何畸变识别案例

Fig. 4 Cases of Geometric Distortion Identification of Reservoir Bank for Large Hydropower Engineering Projects

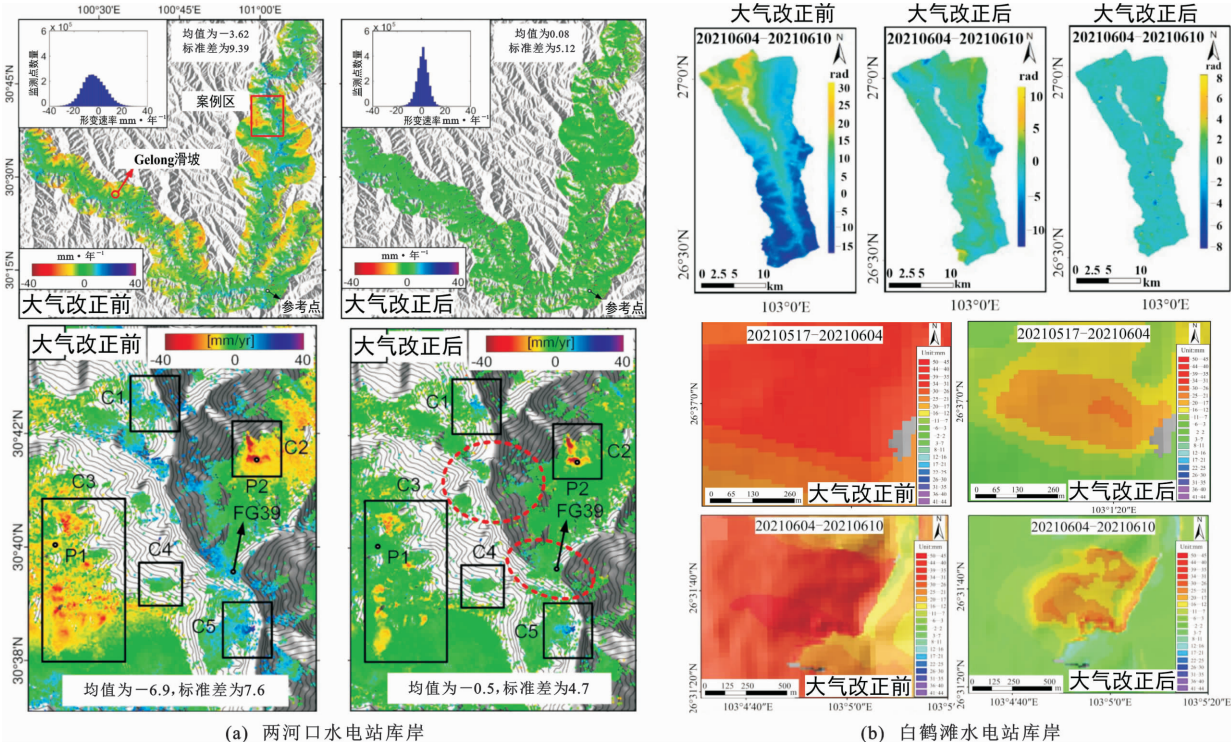
的影响较为严重。众多学者也在西南山区水电工程库岸滑坡研究中开展了针对大气延迟的相关研究。如图5所示,Wang等提出了一种多时间移动窗口线性模型(Multi-temporal Moving-window Linear Model, MMLM)的大气改正方法,以修正两河口水电站库岸滑坡 InSAR 广域识别中严重的对流层大气延迟,相较传统方法取得了更好的效果^[60];Chen等针对西南山区水电工程库岸与地形相关的大气延迟,提出了一种基于多层感知器(Multi-layer Perceptron, MLP)神经网络模型对白鹤滩水电站库岸与地形相关的大气延迟进行改正,显著提升了滑坡 InSAR 监测的精度^[28]。未来在西南山区水电工程库岸滑坡 InSAR 广域早期识别中,可充分使用外部数据、大气模型及人工智能等多种方法开展大气延

迟的准确估计,特别是考虑水电工程库岸复杂地形条件,搜集相关高精度气象信息,进一步提升水电工程库岸滑坡 InSAR 早期识别的精度与可靠性。

3 典型滑坡 InSAR 监测

3.1 总体应用与研究现状

相较于传统的形变监测方式,InSAR 技术在对重点滑坡的监测中具备大范围、面观测、高精度、全天时、全天候等显著优势,且能够借助于存档影像,追溯历史形变,挖掘时序形变规律,在西南山区大型水电工程库岸单体滑坡的监测中得到大量应用。2014年,王立伟利用 D-InSAR 技术对乌东德水电站库岸的金坪子滑坡与托支座滑坡进行了监测,探讨了 InSAR 技术的应用潜力^[42]。2018年,Zhao等



图(a)引自文献[60];图(b)引自文献[28]

图 5 InSAR 大气改正前后结果案例

Fig. 5 Cases of Results Before and After InSAR Atmospheric Correction

将时序 InSAR 技术应用于乌东德水电站库岸的金坪子滑坡时序形变监测中,并将 InSAR 形变监测结果与原位测地机器人的监测结果进行比较,发现两者误差小于 $1.3 \text{ cm} \cdot \text{年}^{-1}$ [26]。2022 年,戴可人等联合 InSAR 技术与无人机航测,对白鹤滩水电站库岸的王家山滑坡与三家村滑坡进行了监测[50]。

将 InSAR 监测作为一种方法,联合多源手段开展水电工程库岸单体滑坡精准监测与综合分析是目前较为常用的方式。例如,Guo 等将 InSAR 技术获取的黄登水电站库岸的车邑坪滑坡浅表形变与钻孔斜侧仪获取的滑坡深部形变测量结果相结合,通过形变反分析确定了水电工程库岸滑坡岩土体的力学参数,揭示了流变变形引起的岩体抗剪强度下降和水库水位变化是导致滑坡过度变形的内部和外部因素[55]。Yi 等结合星载 InSAR、无人机摄影测量、GNSS 形变测量、钻孔测斜仪、微型桩对白鹤滩水电站库岸的王家山滑坡首次蓄水前后的形变特征进行了多源多场观测,详细分析了王家山滑坡在初始蓄水阶段的形变特征和滑坡复活机理[29]。西南山区水电工程库区蓄水引发的岸坡浮力减重[29]、倾倒变形[35]、深层重力斜坡变形[41]等活动性特征与机制被多源监测成功探测与揭示。这种多源监测方式正符合滑坡“空-天-地”协同监测技术体系[80-81]的内涵,

也是未来发展趋势。表 2 罗列了目前常用在单体滑坡中的协同监测手段。未来针对西南山区水电工程重点库岸滑坡,运用“空-天-地”协同监测技术有助于探明其演化过程与机制,为滑坡的监测预警、防治等研究提供精准的数据支撑。

表 2 滑坡“空-天-地”协同监测技术体系

Table 2 Space-air-ground Cooperated Monitoring System for Landslide

平台	技术手段/设备	优缺点
天	星载 InSAR	大范围,面观测滑坡浅表变形量级
天	光学遥感	大范围,面观测滑坡浅表变形迹象
空	LiDAR	不受植被影像,面观测滑坡浅表变形迹象
空	无人机摄影测量	数据时效性强,面观测滑坡浅表变形迹象
地	地基 SAR	高频率、面观测滑坡浅表变形量级
地	GNSS 监测	高频率、点观测滑坡浅表变形量级
地	斜测仪	高频率、线观测滑坡内部变形量级
地	微芯桩	高频率、点观测滑坡浅表变形量级

3.2 研究热点

3.2.1 三维形变解算

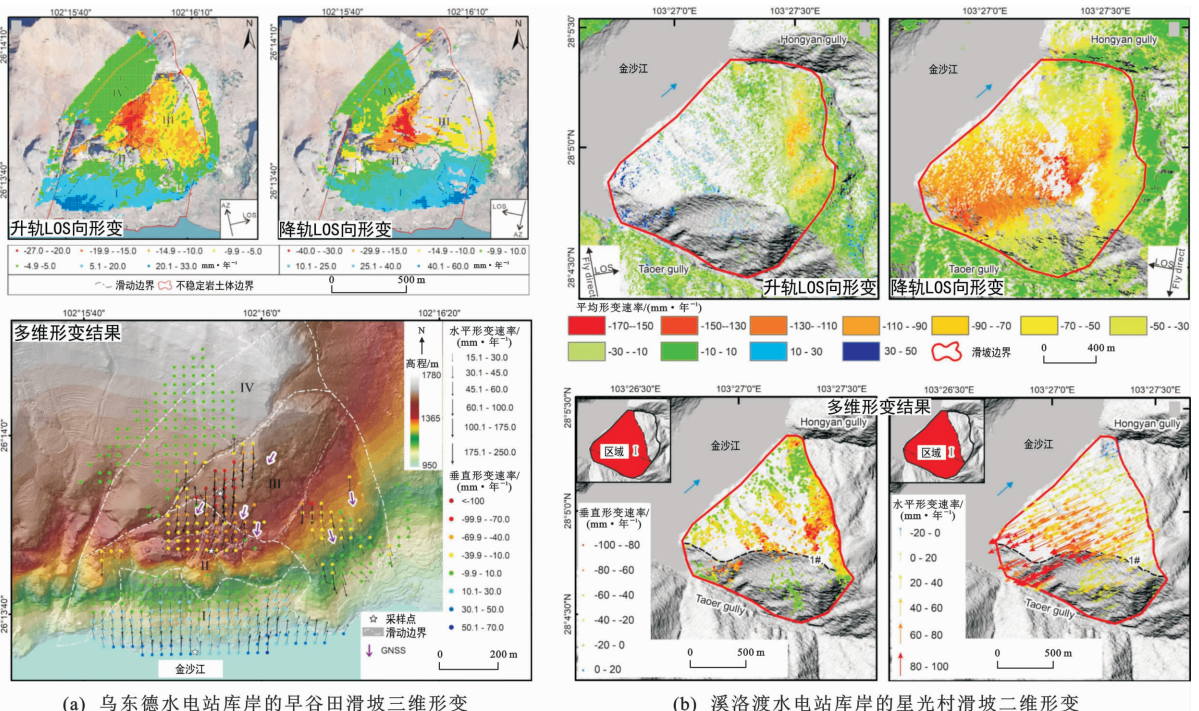
InSAR 技术获取的是卫星雷达视线向(Line of Sight, LOS)的一维形变信息,仅利用单一轨道卫星观测数据难以精确描述水电工程库岸滑坡真实的形变特征,也难以精准揭示水电工程库岸滑坡的演化规律。因此,针对水电工程库岸滑坡的多维形变解

算也是西南山区水电工程库岸滑坡 InSAR 监测研究热点。图 6 展示了由多轨道雷达视线向形变转换为多维形变的两个成功案例。Ren 等基于滑坡平行于坡面位移的假设,利用 Sentinel-1 升降轨数据获取了乌东德水电站库岸的早谷田滑坡三维形变信息,以分析蓄水引发的深层重力斜坡变形机理与风险[图 6(a)]^[41];Zhu 等将 Sentinel-1 升降轨数据获取的形变结果联合分解为垂直方向与水平方向的形变,得到了溪洛渡水电站库岸的星光村滑坡二维形变信息,用以分析该滑坡倾倒变形的形变特征与机理[图 6(b)]^[35]。现阶段,滑坡 InSAR 多维形变解算方法主要有 4 种:第一种是通过获取多个不同雷达视线向的 InSAR 形变结果,直接求解三维形变^[82-84];第二种是利用 SAR 像素偏移量追踪(Pixel Offset Tracking, POT)技术与多孔径 InSAR (Multi-aperture InSAR, MAI) 技术^[85-86]等,进一步与 D-InSAR、时序 InSAR 技术结合可解算三维形变;第三种是将 InSAR 形变监测结果与 GNSS 形变结果^[87]、无人机形变结果^[88]、地基 SAR 形变结果^[89]等相融合,以解算三维形变;第四种是根据先验信息假设,开展多维形变估算。例如,由于 InSAR 数据对于 SN 向形变不敏感,针对 SN 向形变不显著的滑坡可以考虑忽略 SN 向形变进行二维形

变计算;由于浅表滑坡在重力的作用下发生的形变往往是平行于坡面的,因此可以假设滑坡平行于坡面位移,以估算三维形变。随着越来越多的 SAR 数据可被使用,InSAR 多维形变解算将推进 InSAR 监测结果辅助下的水电工程库岸滑坡形变特征与机理研究。水电工程库岸滑坡形变特征与机理研究的深入,也能够为滑坡多维形变解算提供更多的先验模型,从而促进 InSAR 多维形变的研究。

3.2.2 坡体稳定性与库水位升降关联性分析

库水位的升降波动使水电工程库岸边坡内渗流场与孔隙水压力场不断变化,对水电工程库岸滑坡具有较强的触发作用,是影响水电工程库岸区域稳定性的一个重要影响因素^[90-91]。研究与揭示水电工程库岸滑坡活动性与库水位波动因素之间的关系,对摸清水电工程库岸滑坡触发机制、保障水电工程安全运营等具有重大意义。2018 年,Zhao 等对乌东德水电站库岸坡体稳定性进行了探测,并就水位波动对该区域滑坡运动的影响程度进行了探讨[图 7(a)]^[26]。2019 年,王振林通过锦屏水电站稳定性探测和提取的水位数据,发现水位的急剧变化是影响形变速率周期性变化的重要因素,且形变速率与水位变化的滞后有一致性[图 7(b)]^[92]。2022 年,Zhu 等得到溪洛渡水电站的位移特征,联合影响因



图(a)引自文献[41];图(b)引自文献[35]

图 6 库岸滑坡 InSAR 多维形变解算案例

Fig. 6 Cases of InSAR Multi-dimensional Deformation Calculation of Reservoir Landslide

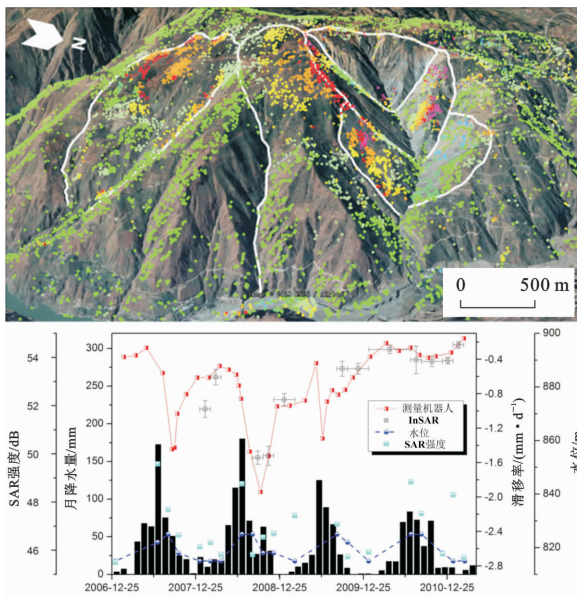
素分析得出蓄水引起的地层软化和水位波动引起的压力差会降低斜坡的稳定性^[35]。目前已有多种方法解释水电工程库岸坡体稳定性和库水位升降之间的关系。在定性分析基础上,理论解析^[93-94]与室内实验模拟或物理模型^[95-96]是较为常用的方法。在定量确定坡体稳定性和影响因素关系研究中,已有学者借助于 InSAR 监测,利用互相关系数、小波变换^[21]等开展时序关系分析,有效摸清了有关因素之间的定量相关性。目前,坡体活动性加剧与水位下降的滞后性已被广泛揭示,但对于广域范围内的各影响因素联合作用还需要进一步研究。

4 水电工程全生命周期 InSAR 技术应用需求探讨

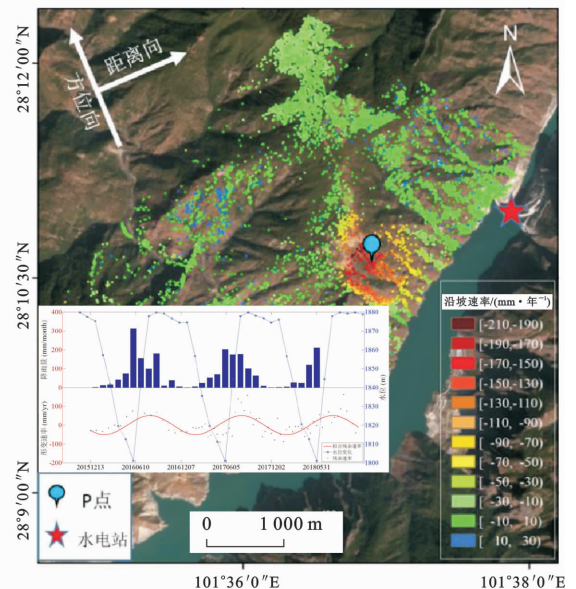
InSAR 技术作为一项新兴的测绘技术,正在为

大型水电工程库岸滑坡的早期识别与监测带来新的机遇。正在修建的白鹤滩水电站是 InSAR 技术全方位应用于水电工程的范例,具有里程碑意义,因为它是首次真正意义实现从蓄水前阶段、蓄水阶段便有大量 InSAR 技术全程应用其中,开展了深入、广域、系统的大型水电工程蓄水前阶段库岸滑坡的测绘和调查研究。在未来的水电工程建设中,InSAR 技术将毫无疑问地在其全生命周期中涉及,不同生命周期(蓄水前阶段、蓄水阶段、蓄水后阶段)库岸滑坡灾害类型与特点及对技术的需求有所差异,对 InSAR 技术算法、数据的选用也带来了不同的要求(表 3)。

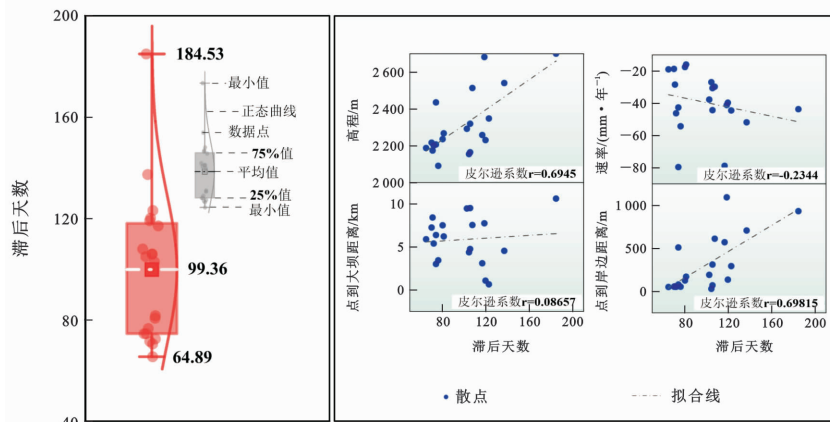
对于蓄水前阶段,首要开展的是水电工程库岸滑坡 InSAR 广域早期识别,以明确水电工程库岸滑坡(或潜在滑坡)的分布情况。蓄水前阶段持续获取



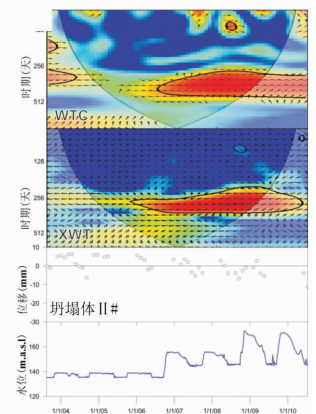
(a) 乌东德水电站库岸



(b) 锦屏水电站库岸



(c) 库岸稳定性与库水位的关系



(d) 坡体变形与库水位的滞后性

图(a)引自文献[26];图(b)引自文献[92];图(c)引自文献[97];图(d)引自文献[21]

图 7 库岸稳定性与库水位升降的关系

Fig. 7 Relationships Between Stability of Reservoir Bank and Fluctuation of Reservoir Water Level

表3 大型水电工程库岸滑坡 InSAR 早期识别与监测需求

Table 3 InSAR Early Identification and Monitoring Requirements of Reservoir Landslides for Large Hydropower Engineering Projects

阶段	总体需求	InSAR 技术需求	SAR 数据需求	方法联合应用
蓄水前阶段	广域识别,充分验证,摸清家底	时序 InSAR 技术(追溯历史形变)	追溯 2~5 年历史 SAR 数据	野外地质调查、无人机测绘
蓄水阶段	快速识别近期形变变化,自动化运算对比与监测,对比分析新增/加速的形变	D-InSAR/Stacking-InSAR、像素偏移量追踪、序贯平差时序 InSAR、自动运算/识别技术	快速获取高重访周期 SAR 数据,持续获取蓄水阶段 SAR 数据	快速响应的野外调查,无人机测绘,裂缝计等重要地面仪器
蓄水后阶段	对已识别的重点滑坡进行持续性地监测,分析水位对坡体活动性影响,同时继续识别潜在新生滑坡	时序 InSAR、Stacking-InSAR 技术	持续获取一定数量的 SAR 数据	针对重点坡体开展“空-天-地”协同监测

一定的存档数据,利用时序 InSAR 技术开展形变追溯分析,可满足此阶段的需求。在该阶段可充分选用时序 InSAR 技术与充足的 SAR 数据(如 50 景以上),以达到解算的最高精度。同时,可以结合无人机摄影测量、野外调查等技术手段,验证 InSAR 技术识别出的水电工程库岸滑坡,以确保识别结果的准确性。同时,对识别出的蓄水前阶段活动性坡体进行建库统计,方便后续对比与研究。白鹤滩水电站在蓄水前阶段已开展了大量类似工作^[27,48,50]。

对于蓄水阶段,水位的快速涨落可能会触发大量新的潜在滑坡。对新增变形坡体的识别中,高时效性是重要需求之一。在获取了最新一期 SAR 影像后如何快速解算与反映近期形变变化,是 InSAR 解算中重点需要考虑的。此时,D-InSAR 技术及可解算大变形的像素偏移量追踪技术可较好地满足此阶段的需求。这两项技术虽然精度上略低于时序 InSAR 技术,但均只需两景 SAR 影像便可以开展,能满足快速解算需求。同时,从时序 InSAR 技术发展起来的序贯平差时序 InSAR 技术^[98-100]也可在一定程度上对新获取 SAR 影像进行快速解算,达到快速获取最新形变结果的目的。在水位快速变动的情况下,自动化的运算、监测与结果解译也成为了一项重要需求。基于相位梯度或人工智能的快速自动识别算法已取得相关研究进展^[101-102]。另一方面,对变形坡体通过对比其蓄水前状态,判别其是新增或加速等情况及推断其演化状态,也是蓄水阶段一项重要工作。相关研究可通过 InSAR 解算蓄水阶段与蓄水前阶段形变对比分析展开^[29,34];如何及时评价快速变化的水位对水电工程库岸滑坡易发性的动态影响,也值得进一步关注与研究^[51]。

在蓄水后阶段,对蓄水前阶段与蓄水阶段识别的水电工程库岸滑坡开展持续地监测以掌握重点滑

坡的发育情况,为此阶段的需求重点。宜采用时序 InSAR 技术对持续获取的一定 SAR 数据进行解算,并提供有效数据支撑;同时,针对重点坡体开展“空-天-地”协同监测也是必不可少的。另外,需要注意采集准确的水位信息、降雨量信息等数据,开展水位波动对水电工程库岸坡体活动性关联性分析与研究,查明坡体周期性活动特征或激发因素,摸清滑坡成灾机制,服务于水电工程库区地质灾害监测预警与防灾减灾。

表 4 总结了 D-InSAR、时序 InSAR、Stacking-InSAR 技术的优劣势。以 SBAS-InSAR 技术为代表的时序 InSAR 技术凭借其较高的监测精度以及对小量级形变坡体准确的识别能力成为了目前最为常用的 InSAR 技术。D-InSAR 技术虽然容易受到轨道误差、大气误差、失相干等因素的影响导致精度有限,但其对数据量要求较低,只需两景影像即可简单快速开展,可以对具有一定面积的厘米级变形坡体进行有效监测。在滑坡广域识别中,运算速度更快的 Stacking-InSAR 技术也得到了广泛的应用,虽然

表 4 D-InSAR、时序 InSAR、Stacking-InSAR 技术优劣势对比

Table 4 Comparison of Advantages and Disadvantages of D-InSAR, Time Series InSAR and Stacking-InSAR Technologies

优劣势	D-InSAR 技术	时序 InSAR 技术	Stacking-InSAR 技术
优势	算法简单,处理速度快,对数据量要求较小	测量精度高,可对各项误差建模排除,可追溯历史形变	计算效率高,可高精度开展定性识别
劣势	精度较低,难以长期连续监测,易受时空失相干和大气延迟效应制约	需要长期多景数据,处理速度相对较慢	定量精度不够高,对量级较小形变识别能力有限

其定量识别精度稍低,但是对相干性较差的滑坡具有一定识别能力。不同 InSAR 技术在滑坡识别中的特点对比研究已陆续开展^[103],充分了解各类 InSAR 技术的适用性将有助于 InSAR 技术高效准确地参与到水电工程全生命周期库岸滑坡识别与监测中。

5 结论与展望

5.1 结论

本文梳理了西南山区金沙江、澜沧江、雅砻江流域大型水电工程库岸滑坡 InSAR 技术应用研究总体概况;围绕西南山区大型水电工程库岸滑坡 InSAR 早期识别、典型坡体 InSAR 监测,对其总体研究现状及研究热点进行了分析,并对水电工程全生命周期 InSAR 技术应用需求进行了总结与探讨。得到的主要结论如下:

(1)InSAR 技术近 10 年已陆续全面参与到西南山区大型水电工程库岸滑坡识别与监测工作中,从 2021 年开始已进入高速增长期。

(2)InSAR 技术在水电工程库岸滑坡监测中存在的几何畸变、大气延迟、三维形变等问题正在被逐渐揭示清楚。InSAR 技术会进一步参与到水位关联性分析、滑坡易发性评价^[51]等更多领域。

(3)以白鹤滩水电站为代表,InSAR 技术已全面参与到蓄水前阶段的水电工程库岸滑坡系统调查工作中,未来必定会应用到水电工程全生命周期中,值得全面推广。

5.2 展望

随着我国对清洁能源的需求与日俱增,西南地区的水电工程建设会继续积极推进。根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》,西南山区后续将以金沙江下游、澜沧江中下游大型水电工程基地为建设重点,开工建设旭龙、岗托、奔子栏、孟底沟、牙根二级、丹巴等水电站,兴建水电站的态势将会持续。与此同时,随着陆地探测一号(LT-1)、NASA-ISROSAR(NISAR)、ALOS-4 等新一代 SAR 卫星提供更高质量的数据,势必会进一步推动 InSAR 技术研究的进步。在数据与方法共同提升下,InSAR 技术势必能够进一步突破限制,在西南山区水电工程库岸实现超大范围(数万平方千米)的滑坡广域识别、超高精度(毫米级)的滑坡形变监测。InSAR 技术也将会常规化地参与到水电工程全生命周期库岸滑坡的识别与监测工作中,进一步推动对滑坡演化过程与

触发机制的理解与研究,为滑坡的监测预警提供支撑,提升我国水电工程库岸滑坡地质灾害防治能力。

主编彭建兵院士亲笔签名落款的沉甸甸约稿函悄然而至,本人以最饱满的热情、最全情的投入完成了此文,以共贺《地球科学与环境学报》更名二十周年!诚挚感谢主编彭建兵院士的约稿!《地球科学与环境学报》不仅聚焦基础地质、沉积地质等基础领域,又涉及工程地质与环境灾害、遥感与地学大数据等前沿领域,及时报道地学领域最新研究成果与创新发现,重点反映地学前缘及交叉学科的高水平科技成果,为我国从事地学研究工作的科技人员、专家、院校师生等相关人员提供了最新学术前沿与进展信息,为相关领域发展做出了重要贡献,也彰显了期刊学术影响力!祝愿贵刊在稿件质量、论文规模、学术影响力上更进一步,继往开来,再铸辉煌!

参考文献:

References:

- [1] 网易新闻. 2021 年全国各省水力发电量排行[EB/OL]. (2022-08-06)[2022-12-15]. <https://www.163.com/dy/article/HFCA52150553CGLS.html>. NetEase News. Ranked by 2021 Hydropower Generation of Each Province in China[EB/OL]. (2022-08-06)[2022-12-15]. <https://www.163.com/dy/article/HFCA52150553CGLS.html>.
- [2] 国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014~2020年)[R]. 北京: 国务院办公厅, 2014. General Office of the State Council. Energy Development Strategy Action Plan(2014-2020)[R]. Beijing: General Office of the State Council, 2014.
- [3] 雅砻江流域水电开发有限公司. 雅砻江流域概况[EB/OL]. (2022-05-10)[2022-12-15]. https://www.ylhdc.com.cn/gtylj/gsyw/lykf/lygk/A37020-201index_1.htm. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd. Watershed Overview of Yalong River[EB/OL]. (2022-05-10)[2022-12-15]. https://www.ylhdc.com.cn/gtylj/gsyw/lykf/lygk/A37020201index_1.htm.
- [4] 肖星平. 世界前十二大水电站五座在中国[N]. 株洲晚报, 2021-07-01(A14). XIAO Xing-ping. Five of the World's Top 12 Hydropower Stations in China[N]. Zhuzhou Evening Newspaper, 2021-07-01(A14).
- [5] 贾泽辉. 水电建设将迎来黄金发展期[J]. 建筑机械化, 2012, 33(3): 19-21. JIA Ze-hui. Hydropower Construction Will Usher in the Golden Period of Development[J]. Construction

- Mechanization, 2012, 33(3):19-21.
- [6] 水利部. 2020年全国水利发展统计公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
Ministry of Water Resources. 2020 Statistic Bulletin on China Water Activities[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2021.
- [7] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8):1525-1544.
HUANG Run-qiu. Geodynamical Process and Stability Control of High Rock Slope Development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8):1525-1544.
- [8] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3):292-297.
HUANG Run-qiu. Main Characteristics of High Rock Slopes in Southwestern China and Their Dynamic Evolution[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3):292-297.
- [9] 张世殊, 胡新丽, 章广成, 等. 西部水电工程重大滑坡灾变演化及控制技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
ZHANG Shi-shu, HU Xin-li, ZHANG Guang-cheng, et al. Catastrophic Evolution and Control Technology of Major Landslides in Western Hydropower Project[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018.
- [10] 唐凤娇, 祁生文, 郭松峰, 等. 金沙江溪洛渡库区水库诱发滑坡时空分布规律及易发性研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(3):609-620.
TANG Feng-jiao, QI Sheng-wen, GUO Song-feng, et al. Spatio-temporal Distribution Pattern and Susceptibility of Reservoir-induced Landslides in Xiluodu Hydropower Station[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3):609-620.
- [11] 周振凯. 基于 InSAR 技术的白鹤滩水电站库区地质灾害调查研究[D]. 北京: 中国地质科学院研究生院, 2018.
ZHOU Zhen-kai. Study of Geo-hazards Investigation for Baihetan Reservoir Bank by InSAR Technology[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, 2018.
- [12] 冉涛, 徐如阁, 周洪福, 等. 雅砻江流域深切河谷区滑坡类型、成因及分布规律: 以子拖西—麻郎错河段为例[J]. 中国地质, 2022, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220822.1358.014.html>.
RAN Tao, XU Ru-ge, ZHOU Hong-fu, et al. Type, Formation Mechanism and Distribution Regularity of Landslides in the Deeply-incised Valley Area of Yalong River Basin: A Case Study of Zituoqi-Malangcuo River Section[J]. Geology in China, 2022, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220822.1358.014.html>.
- [13] 金德镰, 王耕夫. 柘溪水库塘岩光滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
JIN De-lian, WANG Geng-fu. Tangyanguang Landslide in Zhexi Reservoir[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [14] MÜLLER-SALZBURG L. The Vajont Catastrophe: A Personal Review[J]. Engineering Geology, 1987, 24(1/2/3/4):423-444.
- [15] XIAO S R. Study on High Speed Slide Mechanism of Qianjiangping Landslide in China Three Gorges Reservoir[C] // ARMA. 44th U. S. Rock Mechanics Symposium and 5th U. S.-Canada Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City: ARMA, 2010: ARMA-10-166.
- [16] DAI K R, LI Z H, XU Q, et al. Entering the Era of Earth Observation-based Landslide Warning Systems: A Novel and Exciting Framework[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2020, 8(1):136-153.
- [17] 戴可人, 铁永波, 许强, 等. 高山峡谷区滑坡灾害隐患 InSAR 早期识别: 以雅砻江中段为例[J]. 雷达学报, 2020, 9(3):554-568.
DAI Ke-ren, TIE Yong-bo, XU Qiang, et al. Early Identification of Potential Landslide Geohazards in Alpine-canyon Terrain Based on SAR Interferometry: A Case Study of the Middle Section of Yalong River[J]. Journal of Radars, 2020, 9(3):554-568.
- [18] MONDINI A C, GUZZETTI F, CHANG K T, et al. Landslide Failures Detection and Mapping Using Synthetic Aperture Radar: Past, Present and Future[J]. Earth-science Reviews, 2021, 216:103574.
- [19] 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 Ming-sheng, DONG Jie, LI Meng-hua, et al. Radar Remote Sensing for Potential Landslides Detection and Deformation Monitoring[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1):332-341.
- [20] YE X, KAUFMANN H, GUO X F. Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using D-InSAR and Corner Reflectors[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(10):1167-1172.
- [21] TOMÁS R, LI Z, LOPEZ-SANCHEZ J M, et al. Using Wavelet Tools to Analyse Seasonal Variations from InSAR Time-series Data: A Case Study of the Huangtupo Landslide[J]. Landslides, 2016, 13(3):437-450.

- [22] 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 Xu-guo, XU Jin-hu, JIANG Hou-jun, 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.
- [23] 谢谟文,黄洁慧,王增幅,等. 广域岩土体变化监测研究[J]. 中国水土保持科学,2012,10(1):59-64.
XIE Mo-wen, HUANG Jie-hui, WANG Zeng-fu, et al. Study on Monitoring of Rock and Soil Change in a Large Area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1): 59-64.
- [24] WANG G J, XIE M W, CHAI X Q, et al. D-InSAR-based Landslide Location and Monitoring at Wudongde Hydropower Reservoir in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(8): 2763-2777.
- [25] XIE M W, HUANG J X, WANG L W, et al. Early Landslide Detection Based on D-InSAR Technique at the Wudongde Hydropower Reservoir [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 717.
- [26] ZHAO C Y, KANG Y, ZHANG Q, et al. Landslide Identification and Monitoring Along the Jinsha River Catchment(Wudongde Reservoir Area), China, Using the InSAR Method[J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 993.
- [27] DUN J W, FENG W K, YI X Y, et al. Detection and Mapping of Active Landslides Before Impoundment in the Baihetan Reservoir Area (China) Based on the Time-series InSAR Method [J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3213.
- [28] CHEN C, DAI K R, TANG X C, et al. Removing InSAR Topography-dependent Atmospheric Effect Based on Deep Learning[J]. Remote Sensing, 2022, 14 (17): 4171.
- [29] YI X Y, FENG W K, WU M T, et al. The Initial Impoundment of the Baihetan Reservoir Region(China) Exacerbated the Deformation of the Wangjiashan Landslide; Characteristics and Mechanism [J]. Landslides, 2022, 19(8): 1897-1912.
- [30] WU M T, YI X Y, DUN J W, et al. Understanding the Slow Motion of the Wangjiashan Landslide in the Baihetan Reservoir Area (China) from Space-borne Radar Observations[J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022: 1766038.
- [31] MA Y Y, LI F, WANG Z M, et al. Landslide Assessment and Monitoring Along the Jinsha River, Southwest China, by Combining InSAR and GPS Techniques[J]. Journal of Sensors, 2022, 2022: 9572937.
- [32] 吕加颖. 基于时序 InSAR 技术的阿海库区滑坡体监测应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2021.
LYU Jia-ying. Research on Application of Landslide Monitoring in Ahai Reservoir Area Based on Time Series InSAR Technology[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [33] 麻源源. 基于星载 InSAR 的地面沉降及山体滑坡监测[D]. 昆明:昆明理工大学, 2019.
MA Yuan-yuan. Land Subsidence and Landslide Monitoring Based on Spaceborne InSAR [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [34] LI L J, YAO X, YAO J M, et al. Analysis of Deformation Characteristics for a Reservoir Landslide Before and After Impoundment by Multiple D-InSAR Observations at Jinshajiang River, China [J]. Natural Hazards, 2019, 98(2): 719-733.
- [35] ZHU Y F, YAO X, YAO L H, et al. Identifying the Mechanism of Toppling Deformation by InSAR: A Case Study in Xiluodu Reservoir, Jinsha River [J]. Landslides, 2022, 19(10): 2311-2327.
- [36] 李凌婧,姚鑫,周振凯,等. 溪洛渡库区某大型滑坡蓄水前后变形特征 InSAR 分析[C]//中国地质学会. 2017 年全国工程地质学术年会论文集. 北京:中国地质学会, 2017: 466-470.
LI Ling-jing, YAO Xin, ZHOU Zhen-kai, et al. The Deformation Characteristics of a Large Landslide Before and After Impoundment in the Xiluodu Reservoir Area Based on InSAR Technology [C] // Geological Society of China. Proceedings of 2017 National Engineering Geology Annual Conference. Beijing: Geological Society of China, 2017: 466-470.
- [37] 周强. 库水作用下青杠坪巨型滑坡复活机理研究[D]. 成都:成都理工大学, 2019.
ZHOU Qiang. Study on the Resurrection Mechanism of Qinggangping Giant Landslide Under the Action of Reservoir Water [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [38] 李凌婧,姚鑫,周振凯,等. 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, 2022, 28(2): 281-293.
LI Ling-jing, YAO Xin, ZHOU Zhen-kai, et al. 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*, 2022, 28(2): 281-293.
- [39] 裴芳歌. 溪洛渡水电工程库区涉水滑坡变形规律及趋势预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
PEI Fang-ge. Study on Deformation Law and Trend Prediction of Soaked Landslides in Xiluodu Hydro-power Project Reservoir Area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [40] 周玉龙. 融入时序 InSAR 形变的毛尔盖库区滑坡易发性评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
ZHOU Yu-long. Evaluation of Landslide Susceptibility in Maoergai Reservoir Area with Time Series InSAR Deformation[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [41] REN K Y, YAO X, LI R J, et al. 3D Displacement and Deformation Mechanism of Deep-seated Gravitational Slope Deformation Revealed by InSAR: A Case Study in Wudongde Reservoir, Jinsha River[J]. *Landslides*, 2022, 19(9): 2159-2175.
- [42] 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, 2014.
WANG Li-wei. Identification of Landslide Displacement in Alpine Valley Region Based on D-InSAR Data Analysis[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2014.
- [43] 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. Landslide Detection and Monitoring over Southwestern Mountainous Area with InSAR [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [44] 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 Chao-ying, 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.
- [45] 顿佳伟. 白鹤滩库区蓄水前活动性滑坡 InSAR 早期识别与形变监测[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
DUN Jia-wei. Early Identification and Deformation Monitoring of Active Landslides Before Water Storage in Baihetan Reservoir Area by InSAR [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [46] 顿佳伟, 冯文凯, 易小宇, 等. 白鹤滩库区蓄水前活动性滑坡 InSAR 早期识别研究: 以葫芦口镇至象鼻岭段为例[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(2): 479-492.
DUN Jia-wei, FENG Wen-kai, YI Xiao-yu, et al. Early InSAR Identification of Active Landslide Before Impoundment in Baihetan Reservoir Area: A Case Study of Hulukou Town Xiangbiling Section[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(2): 479-492.
- [47] 王启贵, 吴忠明, 王 毅, 等. 基于分期 SBAS-InSAR 策略的一次白鹤滩库岸滑坡成功预警[C]// 中国建筑学会. 第十四届全国边坡工程技术大会论文集. 北京: 中国建筑学会, 2022: 205-209.
WANG Qi-gui, WU Zhong-ming, WANG Yi, et al. A Staging SBAS-InSAR-based Successful Landslide Early Warning at Baihetan Reservoir[C]// The Architectural Society of China. Proceedings of the 14th National Technical Conference on Slope Engineering. Beijing: The Architectural Society of China, 2022: 205-209.
- [48] 吴明堂, 崔振华, 易小宇, 等. 白鹤滩库区象鼻岭—野猪塘段地质灾害综合遥感识别[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(4): 155-163.
WU Ming-tang, CUI Zhen-hua, YI Xiao-yu, et al. Identification of Geohazards in Xiangbiling-Yezhutang Section of Baihetan Reservoir Area Using Multi-source Remote Sensing Data[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, 40(4): 155-163.
- [49] 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 Zheng-rong, XI Wen-fei, SHI Zheng-tao, 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 Hazards and Control*, 2022, 33(5): 83-92.
- [50] 戴可人, 沈 月, 吴明堂, 等. 联合 InSAR 与无人机航测的白鹤滩库区蓄水前地质灾害隐患广域识别[J]. *测绘学报*, 2022, 51(10): 2069-2082.
DAI Ke-ren, SHEN Yue, WU Ming-tang, et al. Identification of Potential Landslides in Baihetan Dam Area Before the Impoundment by Combining InSAR and UAV Survey[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2069-2082.
- [51] DAI K R, CHEN C, SHI X L, et al. Dynamic Landslides Susceptibility Evaluation in Baihetan Dam Area During Extensive Impoundment by Integrating Geological Model and InSAR Observations[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 116: 103157.
- [52] GUO Y H, YANG Z Q, YANG Y, et al. Experimental Study on Deformation Monitoring of Large Landslide

- in Reservoir Area of Hydropower Station Based on GB-InSAR[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021:5586340.
- [53] 姜春生,汪 剑,何玉童.地基合成孔径雷达在大坝安全监测中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 28(2):146-149.
JIANG Chun-sheng, WANG Jian, HE Yu-tong. Application of Ground Synthetic Aperture Radar in Dam Safety Monitoring[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(2):146-149.
- [54] 杨潇潇. 时序 InSAR 技术用于大坝形变监测与变形模式研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
YANG Xiao-xiao. Deformation Monitoring and Analysis of Dams with Time Series InSAR Technology[D]. Xi'an:Chang'an University, 2017.
- [55] GUO C Q, MA G, XIAO H B, et al. Displacement Back Analysis of Reservoir Landslide Based on Multi-source Monitoring Data: A Case Study of the Cheyiping Landslide in the Lancang River Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(11):2683.
- [56] 施友丽. 基于时序 InSAR 库区滑坡监测识别与易发性评价研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2021.
SHI You-li. Study on Monitoring, Identification and Vulnerability Assessment of Landslide in Reservoir Area Based on Time Series InSAR [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [57] 周志伟,程 翔,周 伟,等. 基于时序 InSAR 的水电站库岸滑坡形变监测分析[J]. *人民长江*, 2022, 53(8):112-116.
ZHOU Zhi-wei, CHENG Xiang, ZHOU Wei, et al. Deformation Monitoring on Reservoir Bank Landslide of a Hydropower Station Based on InSAR Time Series [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(8):112-116.
- [58] GUO R, LI S M, CHEN Y N, et al. Identification and Monitoring Landslides in Longitudinal Range-Gorge Region with InSAR Fusion Integrated Visibility Analysis[J]. *Landslides*, 2021, 18(2):551-568.
- [59] 李长冬,龙晶晶,姜茜慧,等. 水库滑坡成因机制研究进展与展望[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1):67-77.
LI Chang-dong, LONG Jing-jing, JIANG Qian-hui, et al. Advance and Prospect of Formation Mechanism for Reservoir Landslides [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(1):67-77.
- [60] WANG Y, DONG J, ZHANG L, et al. Refined InSAR Tropospheric Delay Correction for Wide-area Landslide Identification and Monitoring[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 275:113013.
- [61] 陈志欣,黄其欢,吴忠明,等. 考虑可视性的双轨 SAR 库岸滑坡识别与监测[J]. *水力发电*, 2023, 49(1):30-34, 52.
CHEN Zhi-xin, HUANG Qi-huan, WU Zhong-ming, et al. Recognition and Monitoring of Reservoir Bank Landslides with Dual-track SAR Considering Visibility[J]. *Water Power*, 2023, 49(1):30-34, 52.
- [62] ZHOU C, CAO Y, YIN K L, et al. Characteristic Comparison of Seepage-driven and Buoyancy-driven Landslides in Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Engineering Geology*, 2022, 301:106590.
- [63] LIU X J, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Integration of Sentinel-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR Datasets for Mapping Active Landslides Along the Jinsha River Corridor, China[J]. *Engineering Geology*, 2021, 284:106033.
- [64] KROPATSCH W G, STROBL D. The Generation of SAR Layover and Shadow Maps from Digital Elevation Models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(1):98-107.
- [65] GELAUTZ M, FRICK H, RAGGAM J, et al. SAR Image Simulation and Analysis of Alpine Terrain[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, 53(1):17-38.
- [66] COLESANTI C, WASOWSKI J. Investigating Landslides with Space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry [J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(3/4):173-199.
- [67] NOTTI D, DAVALILLO J C, HERRERA G, et al. Assessment of the Performance of X-band Satellite Radar Data for Landslide Mapping and Monitoring: Upper Tena Valley Case Study[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(9):1865-1875.
- [68] 戴可人,张乐乐,宋 闯,等. 川藏铁路沿线 Sentinel-1 影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(10):1450-1460.
DAI Ke-ren, ZHANG Le-le, SONG Chuang, et al. Quantitative Analysis of Sentinel-1 Imagery Geometric Distortion and Their Suitability Along Sichuan-Tibet Railway[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10):1450-1460.
- [69] NOTTI D, HERRERA G, BIANCHINI S, et al. A Methodology for Improving Landslide PSI Data Analysis [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(6):2186-2214.
- [70] WILKINSON A J. Synthetic Aperture Radar Interferometry: A Statistical Model for Layover Areas[C]// IEEE. *IEEE 1999 International Geoscience and Re-*

- remote Sensing Symposium. Hamburg: IEEE, 1999: 2392-2394.
- [71] PLANK S, SINGER J, THURO K, et al. The Suitability of the Differential Radar Interferometry Method for Deformation Monitoring of Landslides: A New GIS Based Evaluation Tool[C]// IAEG, Geologically Active: Proceedings of the 11th IAEG Congress. Auckland: IAEG, 2010: 2345-2352.
- [72] GINI F, LOMBARDINI F, MONTANARI M. Lay-over Solution in Multibaseline SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1344-1356.
- [73] 卓冠晨, 戴可人, 周福军, 等. 川藏交通廊道典型工点 InSAR 监测及几何畸变精细判识[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 2031-2047.
ZHUO Guan-chen, DAI Ke-ren, ZHOU Fu-jun, et al. Monitoring Typical Construction Sites of Sichuan-Tibet Traffic Corridor by InSAR and Intensive Distortion Analysis[J]. Earth Science, 2022, 47(6): 2031-2047.
- [74] ZEBKER H A, ROSEN P A, HENSLEY S. Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B4): 7547-7563.
- [75] 李振洪, 宋 闯, 余 琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967-979.
LI Zhen-hong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 967-979.
- [76] 李振洪, 朱 武, 余 琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1485-1519.
LI Zhen-hong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar for Deformation Mapping: Opportunities, Challenges and the Outlook[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1485-1519.
- [77] 朱建军, 胡 俊, 李志伟, 等. InSAR 滑坡监测研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2001-2019.
ZHU Jian-jun, HU Jun, LI Zhi-wei, et al. Recent Progress in Landslide Monitoring with InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2001-2019.
- [78] HANSEN R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis[M]. Dordrecht: Kluwer, 2001.
- [79] JOLIVET R, AGRAM P S, LIN N Y, et al. Improving InSAR Geodesy Using Global Atmospheric Models[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119(3): 2324-2341.
- [80] 许 强, 朱 星, 李为乐, 等. “天-空-地”协同滑坡监测技术进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1416-1436.
XU Qiang, ZHU Xing, LI Wei-le, et al. Technical Progress of Space-air-ground Collaborative Monitoring of Landslide[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1416-1436.
- [81] 许 强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.
XU Qiang, DONG Xiu-jun, LI Wei-le. Integrated Space-air-ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966.
- [82] JOUGHIN I R, KWOK R, FAHNESTOCK M A. Interferometric Estimation of Three-dimensional Ice-flow Using Ascending and Descending Passes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(1): 25-37.
- [83] WRIGHT T J, PARSONS B E, LU Z. Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(1): 2003GL018827.
- [84] GRAY L. Using Multiple RADARSAT InSAR Pairs to Estimate a Full Three-dimensional Solution for Glacial Ice Movement[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(5): 2010GL046484.
- [85] MICHEL R, AVOUAC J P, TABOURY J. Measuring Ground Displacements from SAR Amplitude Images: Application to the Landers Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(7): 875-878.
- [86] BECHOR N B D, ZEBKER H A. Measuring Two-dimensional Movements Using a Single InSAR Pair[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(16): 2006GL026883.
- [87] GUDMUNDSSON S, SIGMUNDSSON F, CARSTENSEN J M. Three-dimensional Surface Motion Maps Estimated from Combined Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS Data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B10): 2001JB000283.
- [88] FIELDING E J, HANDWERGER A L, BURGMANN

- R, et al. Slow, Fast, and Post-collapse Displacements of the Mud Creek Landslide in California from UAVSAR and Satellite SAR Analysis[C]// AGU. AGU Fall Meeting Abstracts, 2017. New Orleans: AGU, 2017;NH42A-02.
- [89] 蔡建伟. 星载和地基干涉雷达联合获取填海区三维形变[D]. 北京:中国地质大学, 2018.
CAI Jian-wei. Joint Acquisition of Three-dimensional Deformation of Reclamation Area by Spaceborne and Ground-based Interferometric Radar [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [90] 张文杰, 詹良通, 凌道盛, 等. 水位升降对库区非饱和土质岸坡稳定性的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(8): 1365-1370.
ZHANG Wen-jie, ZHAN Liang-tong, LING Dao-sheng, et al. Influence of Reservoir Water Level Fluctuations on Stability of Unsaturated Soil Banks[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(8): 1365-1370.
- [91] 罗红明, 唐辉明, 章广成, 等. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学, 2008, 33(5): 687-692.
LUO Hong-ming, TANG Hui-ming, ZHANG Guang-cheng, et al. The Influence of Water Level Fluctuation on the Bank Landslide Stability[J]. Earth Science, 2008, 33(5): 687-692.
- [92] 王振林. 基于小基线集 InSAR 技术的锦屏水电站边坡形变探测与特征分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
WANG Zhen-lin. Detecting and Characterizing Deformation of the Bank Slope near the Jinping Hydropower Station Using SBAS-InSAR Analyses[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [93] 缪海波, 殷坤龙. 库岸深层老滑坡复活对诱发因素的滞后响应机制[J]. 地质科技情报, 2014, 33(5): 188-192.
MIAO Hai-bo, YIN Kun-long. Delayed Response Mechanism of the Ancient Landslide Reactivation of Deep-seated Reservoir to the Inducing Factors[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(5): 188-192.
- [94] 高连通, 易夏玮, 李喜, 等. 三峡库区典型滑坡变形与高水位涨落关系研究[J]. 地质科技情报, 2011, 30(4): 132-136.
GAO Lian-tong, YI Xia-wei, LI Xi, et al. Case Study of Relationship Between Typical Landslide Distortion and Water Changes in Three Gorges Area[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(4): 132-136.
- [95] 石爱红, 牛瑞卿. 库水位响应滞后影响下的滑坡位移预测模型研究[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(1): 26-29.
SHI Ai-hong, NIU Rui-qing. Research on the Displacement Prediction Model of Landslide Under the Influence of the Response Hysteresis of Reservoir Water Level[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(1): 26-29.
- [96] 罗晓红, 李进元. 水库蓄水对库岸滑坡影响分析[J]. 水电站设计, 2003, 19(3): 61-64.
LUO Xiao-hong, LI Jin-yuan. Impact Analysis of Reservoir Impoundment on Reservoir Bank Landslide [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2003, 19(3): 61-64.
- [97] WEN N L, DAI K R, TOMÁS R, et al. Revealing the Time Lag Between Slope Stability and Reservoir Water Fluctuation from InSAR Observations and Wavelet Tools: A Case Study in Mao'ergai Reservoir(China) [J]. GIScience & Remote Sensing, 2023, 60(1): 217-0125.
- [98] ANSARI H, DE ZAN F, BAMLER R. Sequential Estimator: Toward Efficient InSAR Time Series Analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(10): 5637-5652.
- [99] WANG B H, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Sequential Estimation of Dynamic Deformation Parameters for SBAS-InSAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(6): 1017-1021.
- [100] 王辉, 曾琪明, 焦健, 等. 结合序贯平差方法监测地表形变的 InSAR 时序分析技术[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 241-249.
WANG Hui, ZENG Qi-ming, JIAO Jian, et al. InSAR Time Series Analysis Technique Combined with Sequential Adjustment Method for Monitoring of Surface Deformation [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(2): 241-249.
- [101] SHEN Y, DAI K R, WU M T, et al. Rapid and Automatic Detection of New Potential Landslide Based on Phase-gradient DInSAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 4514205.
- [102] FU L, ZHANG Q, WANG T, et al. Detecting Slow-moving Landslides Using InSAR Phase-gradient Stacking and Deep-learning Network[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 963322.
- [103] ZHANG L L, DAI K R, DENG J, et al. Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR [J]. Remote Sensing, 2021, 13(18): 3662.