

# 基于多源时序 InSAR 的三峡坝区形变监测分析

明祖涛, 金源, 史绪国, 张绍成, 吴云龙

(中国地质大学 地理与信息工程学院, 湖北, 武汉 430078)

**摘要:** 自 2003 年三峡库区蓄水以来, 水位的大幅上升和周期性变化, 给三峡大坝及其周边环境的稳定性造成威胁, 三峡坝区的形变监测一直备受关注. 随着 InSAR 技术的不断发展, 其在基础设施与地质灾害形变监测领域发挥着越来越大的作用. 采用时序 InSAR 技术对获取的 2015 年—2019 年 L 波段 ALOS2 PALSAR2 数据集和 2015 年—2022 年 C 波段 Sentinel-1 数据集进行处理分析, 发现三峡大坝与茅坪溪大坝存在与蓄水相关的周期性形变, 振幅约为 1.1 mm 和 3.2 mm, 茅坪溪大坝左岸护坡、关门洞地区与银杏沱填埋区分别存在 28、40、40 mm/a 的显著形变. 采用指数衰减模型对银杏沱填埋区形变过程进行拟合, 结果表明填埋区可在 2040 年达到稳定状态. 研究表明, InSAR 技术有助于加深对地表形变的认识理解, 为地质灾害治理与决策提供依据.

**关键词:** 时序 InSAR; 三峡坝区; 水位变化; 指数衰减模型

中图分类号: P236 文献标志码: A 文章编号: 1001-0645(2023)11-1125-10

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.042

## Displacement Monitoring and Analysis of the Three Gorges Dam Area with Multi-Source Time-Series InSAR Technology

MING Zutao, JIN Yuan, SHI Xuguo, ZHANG Shaocheng, WU Yunlong

(School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430078, China)

**Abstract:** Since the impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR) in 2003, the stabilities of the dam and bank slopes threaten by the significant increases and periodic fluctuation of water levels had drawn great attentions. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) with advantages of wide-coverage and high accuracy displacement detection ability had played important role in infrastructure and geological hazard monitoring. In this paper, the displacement of the Three Gorges dam and its surrounding areas was mapped and analyzed with L-band ALOS2 PALSAR2 (2015–2019) dataset and C-band Sentinel-1 (2015–2022) images based on time-series InSAR technique. Results from both datasets agreed well. The analysis results show that there are periodic displacements at the Three Gorges Dam and Maopingxi Dam with amplitudes of 1.1 and 3.2 mm related with water level fluctuation. There is also an obvious displacement at the left bank of Maopingxi, Guanmendong and Yinxingtuo areas with displacement rate of 28, 40 and 40 mm/a, respectively. It was found that the displacement in the Yinxingtuo area was related with consolidation, thus an exponential decay model was employed to model the time series displacement. The model results indicated the displacement of Yinxingtuo area would reach a steady state around 2040. The results show the InSAR technology can clearly us capture the ground displacement and enrich the understanding of ground process, provide bases for controlling and judging of geological disaster.

**Key words:** time-series InSAR; the Three Gorges Dam area; water level change; exponential decay model

大坝作为重要的水利设施, 在电力和水资源供应、农业灌溉以及防洪调控等方面发挥着重要的作

收稿日期: 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42174043; 41974096)

作者简介: 明祖涛(1969—), 男, 副教授, E-mail: mingzt@cug.edu.cn.

通信作者: 金源(1999—), 男, 硕士生, E-mail: jyuan@cug.edu.cn.

用<sup>[1]</sup>. 同时, 大坝库区的周期性蓄水也会对周边的自然与地质环境产生重要影响, 甚至会触发灾难性地质灾害, 给大坝本身及周边区域带来严重安全威胁. 1963 年, 意大利瓦伊昂水库左岸发生巨型滑坡, 涌浪越过大坝, 摧毁数个村庄, 最终导致 2 000 余人丧生<sup>[2]</sup>. 2018 年, 老挝桑片—桑南内大坝在第二阶段蓄水之后发生显著形变, 并最终溃坝, 导致 71 人死亡<sup>[3]</sup>. 2020 年 5 月 1 日, 由于长期的库水侵蚀导致乌兹别克斯坦萨尔多巴水库决堤, 造成 6 人死亡<sup>[4]</sup>. 研究发现事发前两年半萨尔多巴水库决堤处存在明显的差异沉降, 如处理得当, 可以避免悲剧发生<sup>[4]</sup>. 我国青海拉西瓦水电站蓄水导致上游果卜滑坡一直处于快速形变状态, 给拉西瓦水电站的安全运营造成威胁<sup>[2, 5]</sup>. 因此, 对大坝及周边区域进行稳定性监测对灾害防控具有重要意义.

自三峡大坝 2003 年运行以来, 三峡大坝以及库区滑坡的稳定性一直备受关注. 蓄水后, 大坝上游水位大幅提高, 已编目的 2 600 余处滑坡中, 超过 600 个陆续复活, 其中 8 个已经失稳<sup>[6]</sup>. 随着库区周期性蓄水活动、人类活动以及自然因素的持续影响, 库区有可能出现新的地质灾害<sup>[7]</sup>. 目前, 多种大地测量手段, 如全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS)、水准测量和合成孔径雷达干涉测量 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 等, 已经三峡大坝及库区滑坡稳定性监测中得到广泛应用<sup>[8-9]</sup>. 其中 InSAR 技术凭借全天候全天时地获取大范围地表信息的特点, 可以周期性地对同一地区重复观测, 在广域地质灾害识别与监测中发挥着越来越重要的作用<sup>[10-12]</sup>.

2000 年后, XIA 等<sup>[13-14]</sup>在三峡链子崖危岩体、新滩滑坡和树坪滑坡等布设角反射器, 开展了国内最早的滑坡监测差分干涉测量实验. 由于三峡地区植被茂密, ERS-1/2 和 Envisat ASAR 等卫星重访周期较长, 形变监测效果受时空去相干影响严重. 随着时序 InSAR 技术与新一代 SAR 卫星的发展, InSAR 技术在三峡地区地质灾害监测中得到了进一步推广<sup>[15-18]</sup>. 作为重点关注对象, 三峡大坝及其周围重点设施的稳定性一直是研究的重点. 2011 年, WANG 等<sup>[19]</sup>利用准永久散射体技术 (quasi permanent scatterer, QPS) InSAR 对 2003 年—2008 年的 40 景 Envisat ASAR 影像进行处理, 发现三峡大坝处于稳定状态, 茅坪溪大坝存在 10 mm/a 的形变, 但未对大坝周边环境进行分析; 2012 年, WANG 等<sup>[20]</sup>通过对 2011 年

2 月—8 月的 68 景高分辨率 Cosmo SkyMed 数据处理分析, 发现三峡大坝西南侧的关门洞地区存在 60 mm/a 形变, 并识别到大坝周边多处形变, 但未进行时序形变分析; 2017 年, 杨潇潇等<sup>[21]</sup>采用临时相干点 (temporarily coherent points, TCP) InSAR 技术处理 2015 年—2016 年间的 18 景 Sentinel-1 数据, 分析发现三峡大坝在观测期间最大累积形变量达到 30 mm, 并指出形变与上游水位变化相关, 不过监测时间跨度较短; 2021 年, 李伟学<sup>[22]</sup>通过处理 2018 年—2020 年的 66 景 Sentinel-1 数据, 发现三峡大坝坝体处于稳定状态, 探测到关门洞地区和银杏沱两处形变区域, 未对银杏沱等形变区域的形变特征进行分析. 综上, 现有研究获取的数据集单一, 对银杏沱等大坝周边区域的形变特征缺少深入分析.

三峡地区人类活动日益加剧, 房屋建设与河湾填埋等一般有相应固结过程. 对于填埋区域的固结形变过程, 可以采用沉降模型进行拟合, 常用的模型有指数衰减模型<sup>[23]</sup>、对数模型<sup>[24]</sup>、双曲线模型<sup>[25]</sup>和 Asaoka 法<sup>[26]</sup>等. 其中对数模型需要大量实测地质参数, 较难实现推广应用; 双曲线法根据不同的填土高度和时间测得相应的沉降量, 将沉降开始的时刻作为荷载稳定期, 仅适用一级加荷的情况; Asaoka 法对最终沉降量的预测值过分依赖于时间间隔的划分<sup>[27]</sup>. 指数衰减模型对沉降后期拟合程度较好, 适合对长时序的地表沉降过程进行拟合及预测<sup>[27-29]</sup>.

本文获取了 2015 年—2019 年的 10 景 L 波段 ALOS2 PALSAR2 数据和 2015 年—2022 年的 172 景 Sentinel-1 数据进行时序 InSAR 分析, 获取三峡坝区形变速率, 对两种数据结果进行比对验证, 并对长时序形变过程进行分析. 根据水动力固结理论, 采用指数衰减模型对银杏沱填埋区的时序形变进行拟合和预测, 对形变特征和影响因素进行分析.

## 1 实验区与数据

本文研究区域是包括三峡工程及周边环境在内的三峡坝区. 三峡工程是当今世界最大的水利枢纽工程, 地处湖北省宜昌市三斗坪镇, 位于长江中游, 控制流域面积约为 100 万平方千米, 地理位置和周边的地貌环境如图 1(a) 所示. 图 1(b) 展示了三峡工程的主要组成, 其中三峡大坝为混凝土重力坝, 全长约 2 335 m, 坝顶高程 185 m, 右岸的茅坪溪大坝为土石坝, 与三峡大坝同期建设, 共同拦蓄三峡库水, 关门洞地区位于两座大坝之间. 三峡工程于 1994 年 12 月

正式开工建设, 2006 年 6 月全线建成, 经过 3 次蓄水, 上游水位由 64 m 最终上升到最高 175 m, 并在 145 ~ 175 m 之间交替变化. 蓄水后, 上游江面大幅拓宽, 水位呈周期性波动, 对边坡的稳定性造成严重威胁<sup>[30]</sup>.

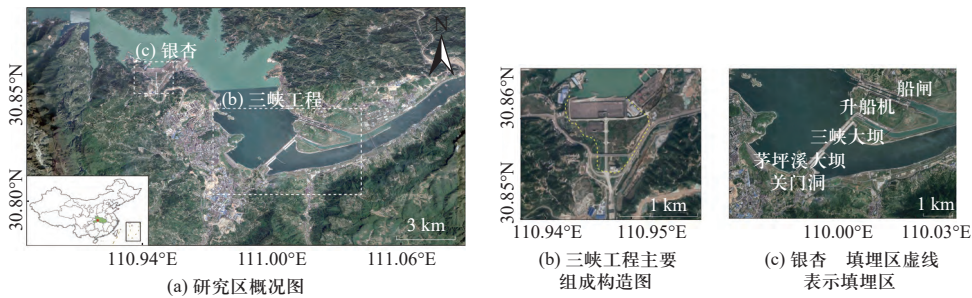


图 1 研究区图  
Fig. 1 Map of the study area

三峡水库的蓄水导致 120 万移民搬迁至地势更高的地方, 两岸的人为活动加剧<sup>[31]</sup>. 其中图 1(c) 中银杏沱位于三峡大坝上游 6 km 处, 该处的历史光学影像如图 2 所示. 三峡工程建设期间, 银杏沱作为一处移民安置地点, 地貌发生了较大的变化, 在 2010 年-2012 年间, 原本的河湾被填埋, 2018 年前后在原有填埋基础上, 修建道路以及船只装卸码头. 填埋区域本身的地质条件、后续的人为活动以及水库水位的周期性波动, 都对该区域的稳定性造成一定影响.

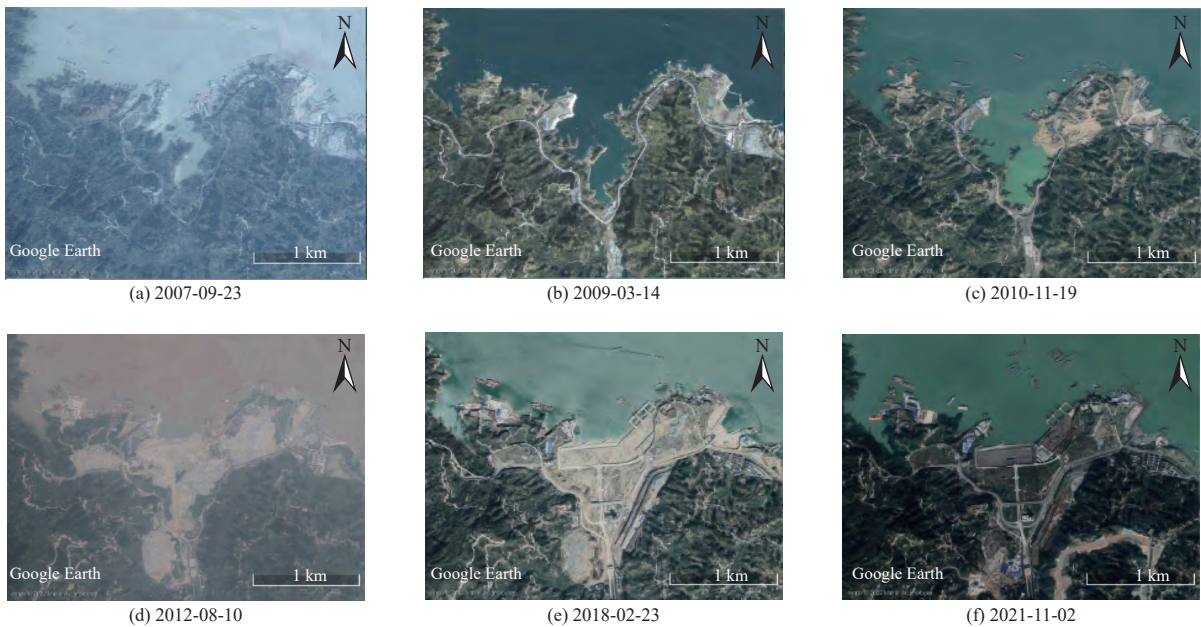


图 2 银杏沱历史光学影像  
Fig. 2 Historical optical images of Yinxingtu

本文收集了 10 景 ALOS2 PALSAR2 影像和 172 景 Sentinel-1 影像, 两个数据集观测几何类似, 详细信息见表 1. ALOS2 PALSAR2 数据集采用条带模式获取, 观测时间为 2015 年 7 月-2019 年 7 月, 获取时间间隔较长, 本文将时空基线阈值设置为 400 d 和 500 m, 共组成 18 幅干涉图(图 3(a)). Sentinel-1 数据集采用 TOPS(terrain observation with progressive scanning)模式获取, 观测时间间隔为 12 d, 时间跨度为

表 1 SAR 数据基本信息		
Tab. 1 Basic information about SAR data		
卫星	ALOS2 PALSAR2	Sentinel-1
波段	L	C
轨道方向	升轨	升轨
方位角/(°)	-12.4	-12.8
入射角/(°)	33.2	31.7
分辨率/m(方位向×距离向)	3×3	20×5



续表 1

卫星	ALOS2 PALSAR2	Sentinel-1
观测模式	条带式	TOPS
时间跨度	2015-07-20–2019-07-15	2015-04-04–2022-02-26
参考影像日期	2016-12-05	2019-12-27

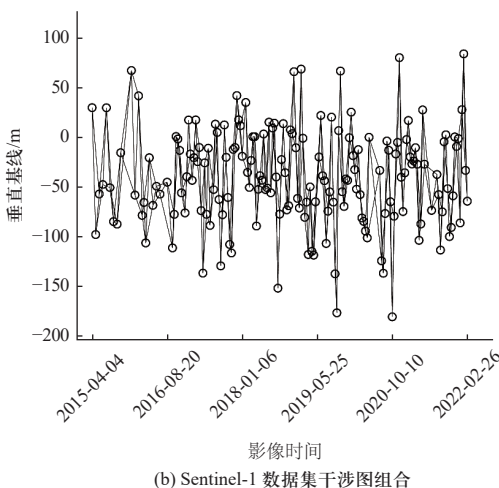
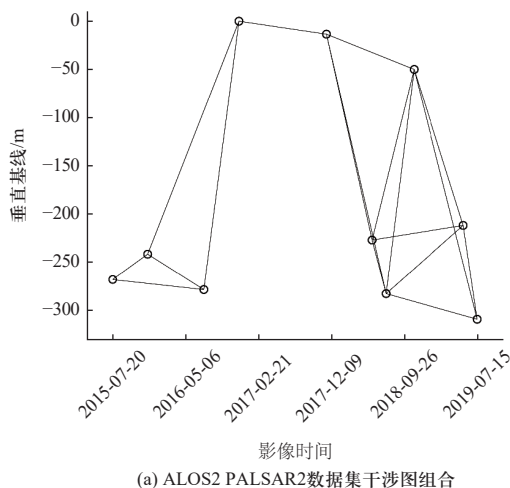


图 3 干涉图组合

Fig. 3 Interferometric combinations

## 2 实验方法简介

### 2.1 时序 InSAR 处理

对于 ALOS2 PALSAR2 数据集, 本文采用 AW3D DSM 和精密轨道结合的几何配准算法, 将所有数据配准至表 1 中对应的参考影像. 由于 Sentinel-1 数据获取过程中的天线摆动导致每个 burst 内部多普勒参数<sup>[32]</sup>变化较大, 需要在 burst 之间达到约 0.001 像素的配准精度<sup>[33]</sup>. 因此, 对 Sentinel-1 数据集在几何配准的基础上采用增强谱分析的方法实现 burst 间的高精度配准. 将配准之后的数据按照图 3 给出的干涉组合分别生成短时空基线干涉图.

由于实验区植被覆盖较多, 植被覆盖区失相干严重, 相位稳定性差, 进而影响地表形变监测精度. 本文采用了基于同质点的自适应滤波算法, 提高低相干区的相位稳定性<sup>[34]</sup>, 然后通过振幅离差和相位稳定性方法筛选出稳定相干点, 通过最小费用流方法进行相位解缠<sup>[35]</sup>. 每个目标点解缠相位的分量可以表示为

$$\Delta\phi = \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{orb}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{n}} \quad (1)$$

式中:  $\phi_{\text{topo}}$ 、 $\phi_{\text{disp}}$ 、 $\phi_{\text{orb}}$ 、 $\phi_{\text{atm}}$  和  $\phi_{\text{n}}$  分别代表由地形误差、地表形变、轨道误差、大气和噪声引起的相位分量. 轨道误差通过双线性多项式拟合从每个干涉图中估

2015 年 4 月–2022 年 2 月, 为降低时间去相干影响, 本文将时间基线小于 30 d 的数据对进行组合形成干涉图(图 3b). 本文采用了日本宇宙研发机构提供的 30 m 分辨率 AW3D DSM( ALOS world 3D digital surface model)数据进行差分干涉图生成以及地理编码.

计移除. 地形误差与垂直基线线性相关, 可以通过线性回归方式估计. 本文采用公共影像相位堆叠方法估计大气延迟<sup>[36]</sup>. 假设已经获取 3 个不同日期  $t_1$ 、 $t_2$  (公共影像) 和  $t_3$  的 SAR 影像, 在移除轨道和地形误差之后, 差分相位可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{t_1,t_2} &= \Delta\phi_{\text{disp},t_1,t_2} + \phi_{\text{atm},t_2} - \phi_{\text{atm},t_1} + \varepsilon_{12} \\ \Delta\phi_{t_2,t_3} &= \Delta\phi_{\text{disp},t_2,t_3} + \phi_{\text{atm},t_3} - \phi_{\text{atm},t_2} + \varepsilon_{23} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\phi_{\text{atm},t_i}$  表示数据观测日期  $t_i$  对应的大气延迟相位;  $\Delta\phi_{\text{disp},t_i,t_{i+1}}$  表示由于地表形变而引起的相位;  $\varepsilon$  为误差项. 对  $\Delta\phi_{t_1,t_2}$  和  $\Delta\phi_{t_2,t_3}$  做差可以估计公共影像  $\phi_{\text{atm},t_2}$  的大气延迟相位. 大气延迟在时间上一般不相关, 可进一步结合多幅影像以提高大气延迟估计精度. 如式 (3) 所示, 可以用  $M$  个最接近的日期的观测估算  $t_i$  的大气延迟.

$$\phi_{\text{atm},t_i} = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M} \sum_{j=0}^{M-1} [\Delta\phi_{t_i-j,t_i-j-1} - \Delta\phi_{t_i+j,t_i+j}] \quad (3)$$

### 2.2 指数衰减模型

填埋区域在地面压实的作用下发生形变, 根据水动力固结理论, 形变过程通常可以采用指数衰减模型进行拟合<sup>[28–29,37]</sup>, 其关系式为

$$d(t) = a(e^{bt} - 1) \quad (4)$$

式中:  $d(t)$  为累积形变量,  $t$  代表以年为单位的累积时间;  $a$  为表征形变大小的振幅系数;  $b$  为形变衰减系

数, 区间为  $(-1, 0)$ , 当  $b$  趋近于  $-1$  时, 形变衰减较快, 当  $b$  趋近于  $0$  时, 衰减速度缓慢, 形变接近于线性。

本文利用最小二乘方法对银杏沱填埋区的形变进行拟合, 获取每个观测点的振幅系数  $a$  和形变衰减系数  $b$ , 进一步获取观测点达到稳定状态所需要的时间, 即特征时间尺度  $t_s$ , 特征时间尺度可由式 (5) 求得

$$t_s = \left| \ln \left| \frac{\gamma \bar{v}}{ab^2} \right| / b \right| \quad (5)$$

式中:  $\bar{v}$  为目标点当前的形变速率;  $\gamma$  为标量, 用来对当前的形变速率进行限定, 获取稳定状态的形变速率。根据已有研究<sup>[38-39]</sup>, 当  $\gamma$  处于  $5\% \sim 10\%$  之间, 即形变速率达到当前的  $5\% \sim 10\%$ , 认为目标点处于稳定状态。HU 等<sup>[28]</sup> 和 SHI 等<sup>[29]</sup> 的研究表明,  $\gamma$  为  $5\%$  时能够可靠地获取特征时间尺度  $t_s$ 。本文中设定  $\gamma$  为  $5\%$ , 即形变速率为当前速率  $\bar{v}$  的  $5\%$  时, 目标点达到了相对稳定的状态。

### 3 实验结果分析与讨论

#### 3.1 形变速率

图 4 给出了利用 ALOS2 PALSAR2 数据集和 Sentinel-1 数据集获取的视线向形变速率。ALOS2 PALSAR2 数据集共探测到 365 978 个点目标, 点密度为  $1\,416$  个/ $\text{km}^2$ , Sentinel-1 数据集探测到 555 632 个点目标, 点密度为  $2\,150$  个/ $\text{km}^2$ 。通常情况下, L 波段的 ALOS2 PALSAR2 数据分辨率高, 穿透性强, 探测到的点密度应高于 Sentinel-1 数据集。但本文获取的 ALOS2 PALSAR2 数据集观测时间间隔长 (时间基线最短为  $56\text{ d}$ , 最长为  $364\text{ d}$ ), 受三峡地区茂密的植被覆盖影响, 造成了严重的失相干<sup>[40-41]</sup>, 因此探测到的点密度要低于 Sentinel-1 数据集。两种数据结果都显示三峡大坝坝体处于稳定状态, 与之前的研究结果一致<sup>[19, 22]</sup>。两个数据集都识别到了关门洞地区和银杏沱填埋区的形变, 形变速率达到了  $40\text{ mm/a}$ 。

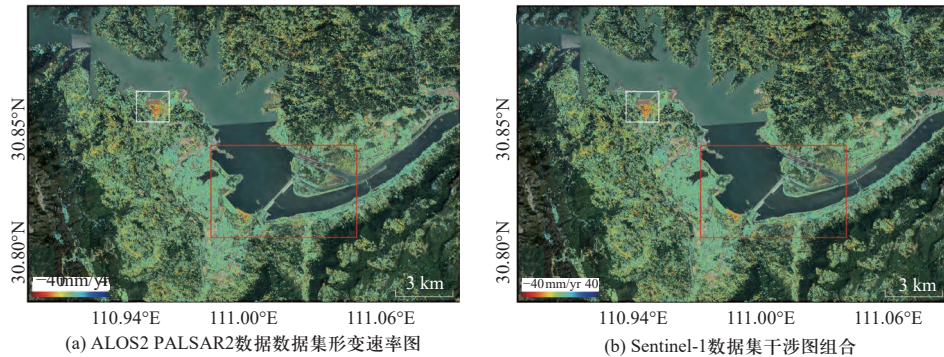


图 4 研究区形变速率图

Fig. 4 Mean displacement rate of our study area

#### 3.2 三峡工程区域时序形变分析

图 5 给出了三峡大坝及其周边主体设施的形变速率图, 其中形变主要集中在茅坪溪大坝左岸护坡

(点  $P_1$ ) 和关门洞地区 (点  $P_2$ ), 形变速率分别达到  $28\text{ mm/a}$  和  $40\text{ mm/a}$ 。茅坪溪大坝和三峡大坝形变速率较小, 趋于稳定。

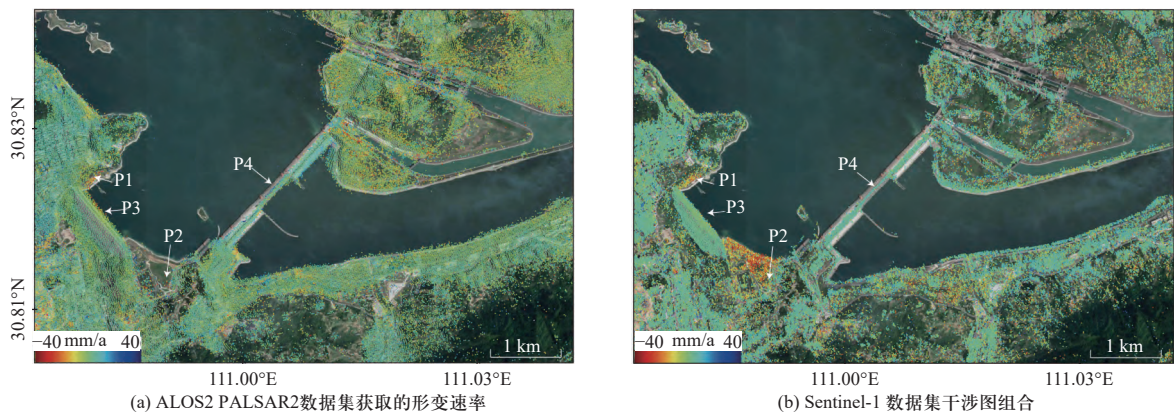


图 5 三峡工程区域形变速率图

Fig. 5 Mean displacement rate of Three Gorges Project area

图 6(a) 给出了点  $P_1$  和点  $P_2$  在 2015 年–2022 年的时序形变, 最大累积形变量分别为 80 mm 和 140 mm. 点  $P_1$  和点  $P_2$  在水位下降时期形变呈现明显的加速趋势, 这是由于长江水位的快速变化导致边坡内部水位和长江水位之间存在差异, 产生内外水压差, 进而加剧了边坡的形变<sup>[42]</sup>. 具体表现为: 库水位上升阶段, 库水缓慢渗入边坡, 坡体外的水压大于坡体内的水压, 形成向内的水压差, 有助于坡体的稳定, 时序形变上表现为减缓下滑或呈现略微抬升趋势; 库水位快速下降阶段, 坡体内水位下降比库水位下降要慢, 导致产生向外的水压差, 破坏坡体的稳定. 在图 6(a) 中红色柱体表示的水位快速下降时期, 时序形变表现为加速.

图 6(b) 给出了茅坪溪大坝 (点  $P_3$ ) 和三峡大坝 (点  $P_4$ ) 的时序形变, 两处总体趋于稳定, 时序形变随水位变化呈现出周期性波动. 但由于两座大坝坝体

类型不同, 波动幅度存在差别, 茅坪溪大坝是土石坝, 坝身强度要弱于三峡大坝, 受到的库水渗透作用较强, 茅坪溪大坝 (点  $P_3$ ) 的时序形变波动幅度更大, 振幅约为 3.2 mm, 而三峡大坝 (点  $P_4$ ) 的振幅仅为 1.1 mm. 点  $P_3$  和点  $P_4$  的时序形变波动在趋势上保持一致, 但两座大坝有着不同的走向, 受到不同的库水作用, 因此形变特征存在差异. 以图 6(b) 中的一个水位变化周期  $T$  为例, 在水位上升阶段, 点  $P_3$  和点  $P_4$  都靠近卫星方向运动, 其中茅坪溪大坝 (点  $P_3$ ) 受到库水渗透作用, 坝体表现为朝向下游的位移; 对于重力坝的三峡大坝 (点  $P_4$ ), 水位快速上升, 对上游河床的压力增大, 坝基受到向下游的推力, 坝体朝向上游产生少量位移, 与已有的研究结果相吻合<sup>[21]</sup>. 在水位下降阶段, 茅坪溪大坝 (点  $P_3$ ) 受内外水压力差, 产生朝向上游的位移; 三峡大坝 (点  $P_4$ ) 受水压力作用朝向下游移动.

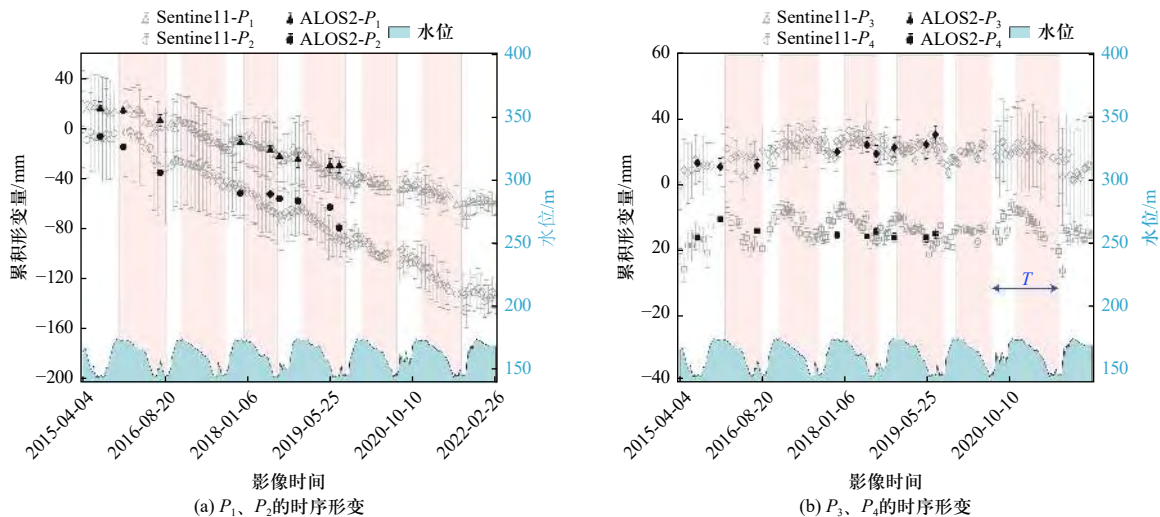


图 6 点  $P_1 \sim P_4$  的时序形变和三峡水库上游水位数据

Fig. 6 Time-series displacement of  $P_1 \sim P_4$  and water level data in the upper stream of Three Gorges Reservoir

### 3.3 银杏沱填埋区稳定性分析

由于 ALOS2 PALSAR2 数据集在银杏沱填埋区探测到的点目标稀疏且时间采样较少, 因此本文只采用了 Sentinel-1 数据集的观测结果进行指数衰减模型拟合. 图 7(a) 中给出了利用 Sentinel-1 数据集获取的银杏沱填埋区形变速率, 形变区域集中在填埋区内, 形变主要由填埋后土地的压实造成. 图 7(b)、(c) 和 (d) 分别给出了点  $P_5$ 、点  $P_6$ 、点  $P_7$  的时序形变与指数衰减模型的拟合结果, 拟合后的均方根误差分别为 5.2 mm、8.56 mm 和 8.17 mm. 点  $P_5$  形变趋近于线性, 最大累积形变量达到 171 mm. 点  $P_6$  和点  $P_7$

靠近码头和港口建设区, 受到人类活动干扰和库水位变化的影响, 均方根误差略大于点  $P_5$ . 点  $P_6$  最大累积形变量为 145 mm, 受港口建设影响, 在 2018 年之后, 累积形变量增长大幅减缓. 点  $P_7$  靠近江边, 最大累积形变量为 168 mm, 在库水位下降期形变速率加快, 在库水位上升期形变减缓, 呈现与点  $P_1$  和点  $P_2$  相同的周期性变化.

为了增强指数衰减模型的可靠性, 本文只考虑均方根误差 RMSE 小于 30 mm 且振幅系数  $a$  绝对值小于 10 000 mm 的拟合结果<sup>[36]</sup>. 图 8 给出了振幅系数和衰减系数以及反演得到的相关系数和均方根误差.



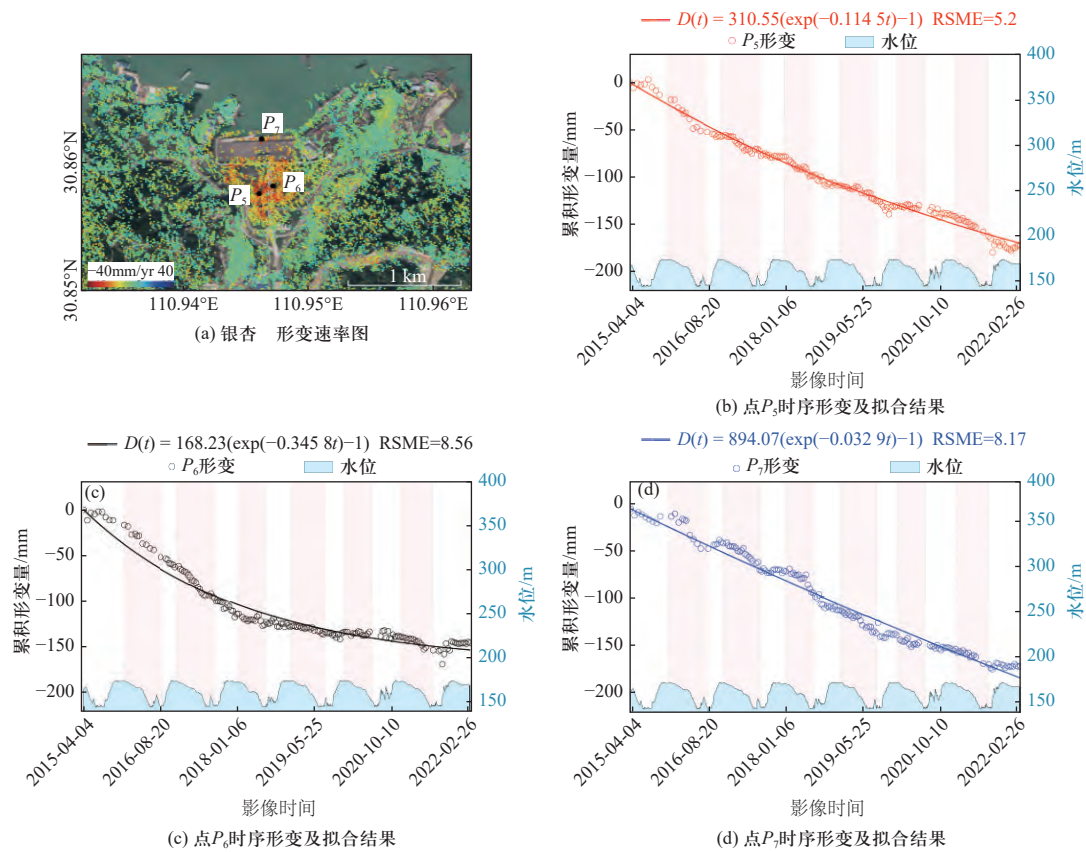


图 7 银杏沱填埋区形变速率图和点  $P_5$ 、点  $P_6$ 、点  $P_7$  的时序形变结果

Fig. 7 Displacement rates map of Yinxingtu landfill area and time series displacement of  $P_5$ ,  $P_6$ ,  $P_7$

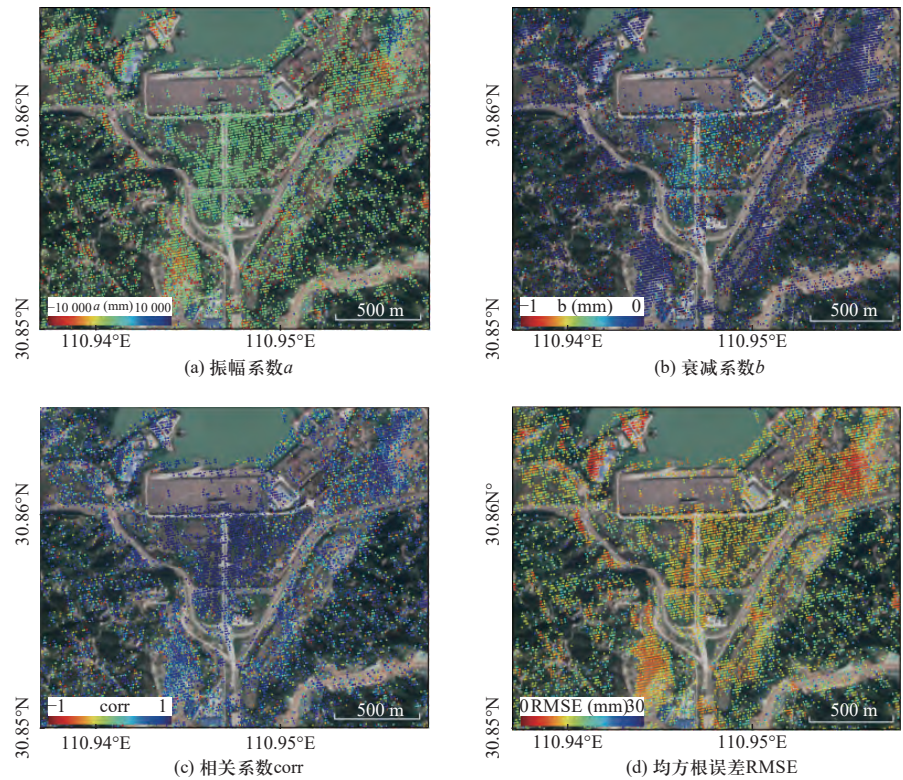


图 8 指数衰减模型拟合结果

Fig. 8 Fitting results of the exponential decay model

由图 7(a), 银杏沱填埋区以外区域形变速率较小, 基本处于稳定状态, 因此只对填埋区内的结果进行分析. 填埋区内振幅系数主要集中在  $0 \sim 500$  mm, 衰减系数主要集中在  $-0.6 \sim 0$ , 表明填埋区形变处于快速衰减状态; 相关系数在  $0.6 \sim 1$ , 均方根误差集中在  $0 \sim 20$  mm, 表明指数衰减模型的拟合结果较好.

通过式 (5) 求得填埋区域目标点的特征时间尺度  $t_s$ . 在该形变区域中, 形变速率达到了  $40$  mm/a,  $\gamma$  为  $5\%$ , 设定稳定状态的形变速率阈值为  $2$  mm/a. 根

据填埋范围对数据进行裁剪, 同时剔除形变缓慢或处于稳定状态(形变速率小于  $2$  mm/a)的目标点, 得到的特征时间尺度  $t_s$  在地理位置上和数值上的分布分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示. 在地理位置上, 西侧的特征时间尺度  $t_s$  数值略微偏大. 在数值分布上, 特征时间尺度  $t_s$  主要集中在  $7 \sim 10$  年, 占比达到  $44\%$ , 小于  $18$  年的占比达到  $99\%$ , 推断银杏沱填埋区域在  $18$  年后, 即  $2040$  年基本达到稳定的状态.

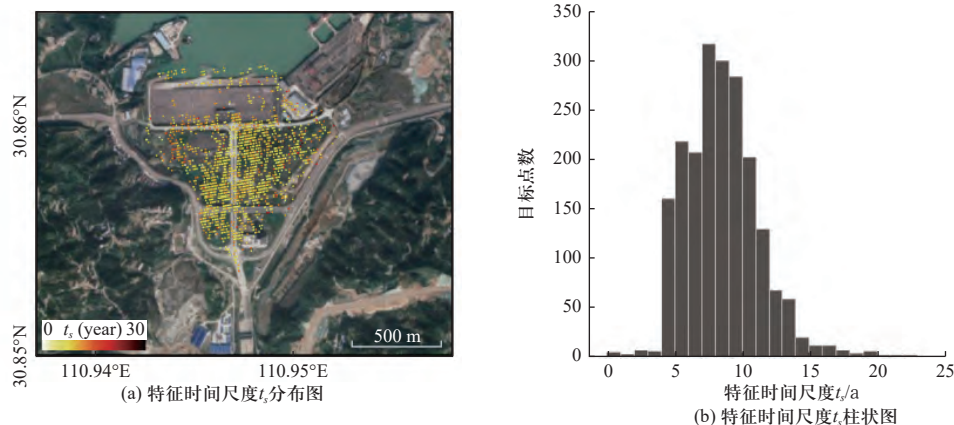


图 9 特征时间尺度结果

Fig. 9 Results for the characteristic time scale

## 4 结束语

本文利用时序 InSAR 方法对 2015 年–2019 年的 ALOS2 PALSAR2 数据和 2015 年–2022 年的 Sentinel-1 数据进行处理, 获取了三峡坝区形变结果, 研究发现三峡大坝和茅坪溪大坝处于稳定状态, 但是分别存在幅度约  $1.1$  mm 和  $3.2$  mm 的与水位变化相关的形变. 茅坪溪大坝左岸护坡和关门洞地区形变速率分别达到了  $28$  mm/a 和  $40$  mm/a, 时序分析显示与水位变化密切相关. 通过分析光学影像和 InSAR 结果, 发现银杏沱形变主要由填埋造成, 最大形变速率为  $40$  mm/a, 其时序形变特征可以通过指数衰减模型表征, 拟合结果显示银杏沱填埋区将在  $2040$  年基本达到稳定状态. 实验结果表明, 时序 InSAR 技术可以对三峡大坝及周围范围区域进行长期形变监测, 并对形变区域做稳定性分析. 随着 SAR 数据的不断丰富以及不断更新, 时序 InSAR 技术可以对包含重要建筑的大范围区域进行跟踪监测, 探测潜在危害, 为灾害调查与防控提供依据. 特别是我国陆探卫星的持续运转, 获取的数据将为三峡等植被茂密地区地灾监测提供有力支撑.

**致谢:** 本文所采用的 Sentinel-1 数据由欧洲空间局

免费提供. ALOS2 PALSAR2 数据(编号: ER2A2N106 和 ER3A2N037)由日本宇宙航空研究开发机构提供.

## 参考文献:

- [1] BAYIK C, ABDIKAN S, ARIKAN M. Long term displacement observation of the Atatürk Dam, Turkey by multi-temporal InSAR analysis[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 189: 483–491.
- [2] SHI X, HU X, SITAR N, et al. Hydrological control shift from river level to rainfall in the reactivated Guobu slope besides the Laxiwa hydropower station in China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 265: 112664.
- [3] XIE L, XU W, DING X. Precursory motion and deformation mechanism of the 2018 Xe Pian-Xe Namnoy dam Collapse, Laos: Insights from satellite radar interferometry[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 109: 102797.
- [4] XIAO R, JIANG M, LI Z, et al. New insights into the 2020 Sardoba dam failure in Uzbekistan from Earth observation[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 107: 102705.
- [5] LI M, ZHANG L, SHI X, et al. 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*, 2019, 221: 80 – 93.
- [ 6 ] TANG M, XU Q, YANG H, et al. Activity law and hydraulics mechanism of landslides with different sliding surface and permeability in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Engineering Geology*, 2019, 260: 105212.
- [ 7 ] 史绪国, 徐金虎, 蒋厚军, 等. 时序 InSAR 技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与状态更新 [J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 4284 – 4292.
- SHI Xuguo, XU Jinhu, JIANG Houjun, et al. Stability monitoring and analysis of the Shuping landslide in the Three Gorges Area with Sentinel-1 images from 2016 to 2020[J]. *Earth Science*, 2019, 44(12): 4284 – 4292. (in Chinese)
- [ 8 ] 刘根友, 薛怀平, 郝晓光, 等. 三峡库区秭归 GPS 滑坡监测网数据分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29(3): 70 – 73.
- LIU Genyou, XUE Huaiping, HAO Xiaoguang, et al. Date analysis of GPS slide monitoring network in ZiGui zone of Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(3): 70 – 73. (in Chinese)
- [ 9 ] 朱同同, 史绪国, 周超, 等. 利用 2016—2020 年 Sentinel-1 数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2021, 46(10): 1560 – 1568.
- ZHU Tongtong, SHI Xuguo, ZHOU Chao, et al. Stability monitoring and analysis of the Shuping landslide in the Three Gorges Area with Sentinel-1 Images from 2016 to 2020[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1560 – 1568. (in Chinese)
- [ 10 ] SU Y, YANG H, PENG J, et al. A novel near-real-time GB-InSAR slope deformation monitoring method[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5585.
- [ 11 ] XIANG W, LIU G, ZHANG R, et al. Modeling saline mudflat and aquifer deformation synthesizing environmental and hydrogeological factors using time-series InSAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 11134 – 11147.
- [ 12 ] LIAO M, ZHANG R, LV J, et al. Subsidence monitoring of fill area in yan'an new district based on Sentinel-1A time series imagery[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(15): 3044.
- [ 13 ] XIA Y, KAUFMANN H, GUO X. Differential SAR interferometry using corner reflectors[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, Canada: IEEE, 2002: 1243 – 1246.
- [ 14 ] XIA Y, 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.
- [ 15 ] LIAO M, TANG J, WANG T, et al. Landslide monitoring with high-resolution SAR data in the Three Gorges region[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(4): 590 – 601.
- [ 16 ] SHI X, ZHANG L, LIAO M, et al. Deformation monitoring of slow-moving landslide with L- and C-band SAR interferometry[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(11): 951 – 960.
- [ 17 ] SHI X, LIAO M, LI M, et al. Wide-area landslide deformation mapping with multi-path ALOS PALSAR data stacks: a case study of Three Gorges Area, China[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 136.
- [ 18 ] ZHOU C, CAO Y, YIN K, et al. Landslide characterization applying Sentinel-1 images and InSAR technique: The Muyubao Landslide in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3385.
- [ 19 ] WANG T, PERISSIN D, ROCCA F, et al. Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(5): 720 – 732.
- [ 20 ] WANG Z, PERISSIN D. Cosmo SkyMed AO projects-3D reconstruction and stability monitoring of the Three Gorges Dam[C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE, 2012: 3831 – 3834.
- [ 21 ] 杨潇潇, 赵超英. 基于 TCP-InSAR 技术的三峡大坝形变监测 [J]. *测绘技术装备*, 2017(1): 76 – 79.
- YANG Xiaoxiao, ZHAO Chaoying. Deformation monitoring of Three Gorges Dam based on TCP-InSAR technology[J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2017(1): 76 – 79. (in Chinese)
- [ 22 ] 李伟学. 基于时序 InSAR 技术的三峡大坝及周边地区形变监测 [J]. *水力发电*, 2021, 47(3): 62 – 65.
- LI Weixue. Deformation monitoring of Three Gorges Dam and surrounding areas based on time series InSAR technology[J]. *Water Power*, 2021, 47(3): 62 – 65. (in Chinese)
- [ 23 ] 王军, 李鑫, 郭毕钧, 等. 高铁隧道穿越巨型溶洞超厚回填体沉降模型试验研究 [J]. *中国铁道科学*, 2022, 43(4): 84 – 95.
- WANG Jun, LI Xin, GUO Bijun, et al. Test study on settlement model of ultra thick backfill in high speed railway tunnel through giant karst cave[J]. *China Railway Science*, 2022, 43(4): 84 – 95. (in Chinese)
- [ 24 ] 刘宏, 李攀峰, 张倬元. 九寨黄龙机场高填方地基工后沉降预测 [J]. *岩土工程学报*, 2005(1): 90 – 93.
- LIU Hong, LI Panfeng, ZHANG Zhuoyuan. Prediction of the post-construction settlement of the high embankment of Jiuzhai-Huanglong airport[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005(1): 90 – 93. (in Chinese)
- [ 25 ] 潘林有, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降 [J]. *岩土力学*, 2004(7): 1053 – 1058.
- PAN Linyou, XIE Xinyu. Observational settlement prediction by curve fitting methods[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004(7): 1053 – 1058. (in Chinese)
- [ 26 ] 张甲振. 基于 Asaoka 法的非饱和土地基沉降预测分析 [J].

- 公路, 2021, 66(8): 316 – 318.
- ZHANG Jiazhen. Settlement prediction analysis of unsaturated ground based on Asaoka method[J]. Highway, 2021, 66(8): 316 – 318. (in Chinese)
- [ 27 ] 朱彦鹏, 蔡文霄, 杨校辉. 高填方路堤沉降模型现场试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(1): 84 – 90.
- ZHU Yanpeng, CAI Wenxiao, YANG Xiaohui. Field test of high embankment settlement model[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(1): 84 – 90. (in Chinese)
- [ 28 ] HU X, XUE L, YU Y, et al. Remote sensing characterization of mountain excavation and city construction in Loess Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(21): e2021G – e95230G.
- [ 29 ] SHI G, MA P, HU X, et al. Surface response and subsurface features during the restriction of groundwater exploitation in Suzhou (China) inferred from decadal SAR interferometry[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 256: 112327.
- [ 30 ] 李松林, 许强, 汤明高, 等. 三峡库区滑坡空间发育规律及其关键影响因子 [J]. 地球科学, 2020, 45(1): 341 – 354.
- LI Songlin, XU Qiang, TANG Minggao, et al. Study on spatial distribution and key Influencing factors of landslides in Three Gorges Reservoir Area[J]. Earth Science, 2020, 45(1): 341 – 354. (in Chinese)
- [ 31 ] 殷跃平. 三峡工程库区移民迁建区地质灾害与防治 [J]. 地质通报, 2002(12): 876 – 880.
- YIN Yueping. Geohazards and their prevention in resettlement areas of emigrants from the reservoir region of the Three Gorges project[J]. Geological Bulletin of China, 2002(12): 876 – 880. (in Chinese)
- [ 32 ] 杨文付, 曾涛, 丁泽刚. 基于星历数据的 SAR 多普勒参数计算 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(10): 1221 – 1225.
- YANG Wenfu, ZENG Tao, DING Zegang. Doppler parameters calculation of SAR based on satellite ephemeris[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(10): 1221 – 1225. (in Chinese)
- [ 33 ] JIANG M. Sentinel-1 TOPS co-registration over low-coherence areas and its application to velocity estimation using the all pairs shortest path algorithm[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(10): 95.
- [ 34 ] JIANG M, DING X, HANSEN R F, et al. Fast statistically homogeneous pixel selection for covariance matrix estimation for multitemporal InSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3): 1213 – 1224.
- [ 35 ] SHI X, WANG J, JIANG M, et al. Extreme rainfall-related accelerations in landslides in Danba County, Sichuan Province, as detected by InSAR[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 115: 103109.
- [ 36 ] TYMOFYEYEV E, FIALKO Y. Mitigation of atmospheric phase delays in InSAR data, with application to the eastern California shear zone[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(8): 5952 – 5963.
- [ 37 ] SHI X, ZHU T, TANG W, et al. Inferring decelerated land subsidence and groundwater storage dynamics in Tianjin–Langfang using Sentinel-1 InSAR[J]. International Journal of Digital Earth, 2022, 15(1): 1526 – 1546.
- [ 38 ] SHI X, FANG R, WU J, et al. Sustainable development and utilization of groundwater resources considering land subsidence in Suzhou, China[J]. Engineering Geology, 2012, 124: 77 – 89.
- [ 39 ] HUANG Y, ZHOU Z. Effect analysis after prohibition of pumping groundwater in Su-Xi-Chang area of China[C]//2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Hohhot, China: IEEE, 2011: 7326 – 7329.
- [ 40 ] 葛仕奇, 陈亮, 丁泽刚, 等. 相位误差对 InSAR 相对测高精度影响 [J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(2): 179 – 183.
- GE Shiqi, CHEN Liang, DING Zegang, et al. Effects of phase error on the relative height accuracy in interferometric synthetic aperture radar[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(2): 179 – 183. (in Chinese)
- [ 41 ] 宁超, 吕鸣, 高超, 等. 基于干涉合成孔径雷达测高原理的雷达散射截面测试杂波抑制方法 [J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(8): 878 – 885.
- NING Chao, LÜ Ming, GAO Chao, et al. Clutter reduction method for radar cross section (RCS) measurement based on InSAR principle[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(8): 878 – 885. (in Chinese)
- [ 42 ] SHI X, ZHANG L, BALZ T, et al. 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, 2015, 105: 128 – 140.

(责任编辑: 刘芳)