

利用多种技术手段对InSAR监测成果进行精度验证的研究

庞宇, 姜华

辽宁省自然资源卫星应用技术中心, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2024年3月15日; 录用日期: 2024年4月10日; 发布日期: 2024年4月17日

摘要

针对基于InSAR技术大面积地表沉降监测成果精度验证困难的问题, 本文主要研究利用邻近点法与升降轨融合技术相结合的方式对InSAR监测成果进行精度验证, 邻近点法可有效检验局部区域成果精度, 升降轨融合技术可对不同组SAR数据处理结果进行相对校验, 两种方法相结合有效解决了水准点、GNSS监测点少而导致验证不完整的问题。

关键词

升降轨融合, 邻近点法, 精度检验

Research on Accuracy Verification of InSAR Monitoring Results by Using Various Technologies

Yu Pang, Hua Jiang

Liaoning Natural Resources Satellite Application Technology Center, Shenyang Liaoning

Received: Mar. 15th, 2024; accepted: Apr. 10th, 2024; published: Apr. 17th, 2024

Abstract

In view of the difficulty in verifying the accuracy of large-scale ground subsidence monitoring results based on InSAR technology, this paper mainly studies the method of combining the adjacent point method with the lifting rail fusion technology to verify the accuracy of InSAR monitoring results. The adjacent point method can effectively verify the accuracy of local results, and the lifting

rail fusion technology can relatively verify the processing results of different groups of SAR data. The combination of the two methods effectively solves the problem of incomplete verification caused by a few leveling points and GNSS test points.

Keywords

Lifting Rail Fusion, Adjacent Point Method, Accuracy Test

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

近年来, 由于合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)技术能够全天时、全天候地获取毫米级的地表形变, 被认为是开展大范围、高精度地表形变的最有潜力的手段[1]。PS-InSAR、SBAS-InSAR 分别是在国内外被应用范围最广泛、最基本成熟的两种形变时序分析技术。PS-InSAR 技术建立在相干性很高的永久散射体上, 分析 PS 点目标, 将 InSAR 技术扩展到多时相的数据, 能很好地估计并去除大气效应, 其结果与线性形变相关; SBAS-InSAR 技术连接由长基线造成的相互独立的 SAR 影像, 形成短基线 SAR 影像集合, 以增加数据获取的采样率, 从而可在已有的 SAR 影像数据集中形成若干小集合[2] [3] [4] [5]。但当进行大面积监测时, 测区无均匀覆盖的水准点、GNSS 监测站, 无法对两种技术监测成果精度的可靠性进行有效检验。本文主要研究利用升降轨融合技术对不同组 SAR 数据的监测成果进行整体检验, 并在有水准点、GNSS 监测点区域采用邻近点法进行精度检验, 达到对时序 InSAR 监测成果进行整体验证的目的[6] [7] [8] [9] [10]。通过对辽河平原 3.8 万平方公里的沉降监测项目的精度进行检验, 充分证明了在水准点及 GNSS 点有限的情况下, 升降轨融合技术与邻近点法相结合的方式可获得较好的精度检验效果。

2. 利用升降轨融合技术对 InSAR 监测成果进行精度检验

2.1. 升降轨融合技术原理

根据合成孔径雷达侧视成像原理, InSAR 技术可以探测到地面目标沿雷达视线向上的距离变化, 其获取的视线方向形变量是地表发生的形变在雷达视线方向上的投影, 即地表东西、南北和垂直向三个方向在雷达视线向上的投影。对于已知垂向形变占据主要的地区, 可简单忽略水平形变的贡献分量, 根据雷达入成像几何特征将一维视线向结果后处理为垂直向形变信号。因此我们可以根据不同组 SAR 数据源, 利用其升轨与降轨监测出的成果的重叠部分, 转换成垂直方向, 进行对比分析。

图 1 是雷达视线形变三维矢量分解图, InSAR 视线向形变与地表三维形变之间的关系如式如下所示:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta - \sin \theta \cos \alpha \sin \theta \sin \alpha \\ \sin \theta \sin \alpha \\ \sin \theta \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_U \\ D_E \\ D_N \end{bmatrix} = [\Delta R] \quad (1)$$

公式中 θ 为雷达入射角, α 为 SAR 卫星方位角, D_U 是形变中的垂直分量, D_E 是形变中的东西向形变分量, D_N 是南北向形变分量, ΔR 是雷达视线向形变。

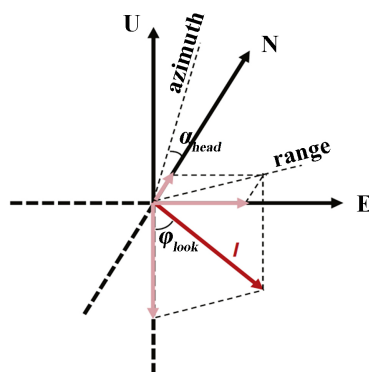


Figure 1. Three dimensional vector decomposition diagram of radar line of sight deformation

图 1. 雷达视线形变三维矢量分解图

根据公式中各个方向位移系数可知, 雷达视线向形变对地表三维形变的敏感度有所不同, 各方向敏感度因子如下式所示。

$$\left| \frac{\delta d_{los}}{\delta d_N} \right| = |\sin \theta \sin \alpha|; \left| \frac{\delta d_{los}}{\delta d_E} \right| = |\sin \theta \cos \alpha|; \left| \frac{\delta d_{los}}{\delta d_U} \right| = |\cos \theta|; \quad (2)$$

以 RADARSAT-2 数据为例, XF 模式降轨数据的中心方位角约为 193°, 中心入射角约为 27.9°, 则其南北向形变敏感度为 0.105, 东西向形变敏感度为 0.456, 垂直向形变敏感度为 0.884。可见单一降轨 RADARSAT-2 数据开展 InSAR 形变监测对垂直向形变更为敏感, 东西向形变次之, 对南北向形变最不敏感。

当前, 国内外使用 InSAR 技术探测地表多维形变场的研究中, 多见使用升降轨 SAR 数据融合提取东西向和垂直向形变。对于升降轨 SAR 数据, 利用 InSAR 技术可以识别到垂直向相近的形变场和东西向相反的形变场。当不考虑南北向形变贡献时, 可以使用融合升降轨的 InSAR 监测的方法提取地表二维形变场, 分解公式如下。

$$\begin{bmatrix} -\sin \varphi_{look1} \cos \alpha_{head1} \cos \varphi_{look1} \\ -\sin \varphi_{look2} \cos \alpha_{head2} \cos \varphi_{look2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_E \\ d_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{los1} \\ d_{los2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 φ_{look1} 和 φ_{look2} 为升降轨数据的入射角; α_{head1} 和 α_{head2} 为升降轨数据的方位角; d_E 和 d_U 分别为东西向形变和南北向形变, d_{los1} 和 d_{los2} 分别为升降轨数据观测到的雷达视线向形变结果。

2.2. 利用升降轨融合技术进行精度验证的结果分析

本文以 RADARSAT-2 (降轨)与 Sentinel-1 (升轨)为例, 对利用两种数据源做的时序 InSAR 监测成果进行对比分析。为了能够对升降轨的观测数据进行统计比较检验与互作检验, 以 RADARSAT-2 (降轨)为主轨道, 利用从该轨道覆盖范围区域内各相干观测目标提取对应的 Sentinel-1 升轨下的 InSAR 观测值 (沉降速率), 共计能取到 25,024 个相干点并用于统计比较。由于获取的 25,024 个相干点的沉降值是视线方向的, 按照合成孔径雷达侧视成像原理, 垂向形变占据主要的地区, 因此根据雷达侧式角度, 将 RADARSAT-2 (降轨)与 Sentinel-1 (升轨)的形变量转换到垂直方向上进行对比分析。考虑到不同载荷成像参数反映地面目标特征差异化, 对 RADARSAT-2 降轨 InSAR 观测数据升尺度采样至 Sentinel-1 相同分辨率。对升降轨道共有样本点提取的 2 组数据进行直方图统计, 如图 2 所示。

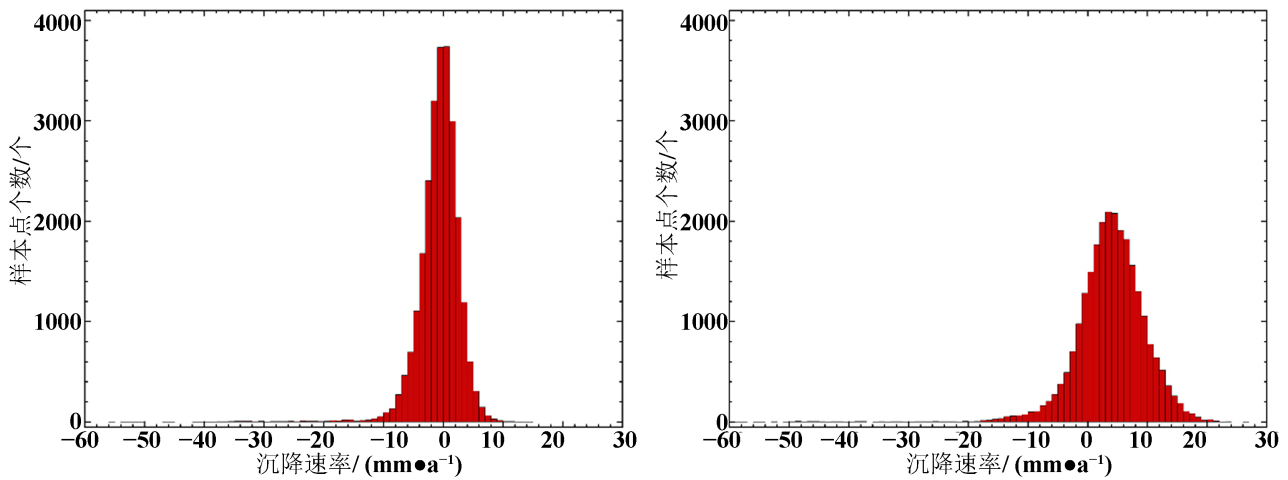


Figure 2. Histograms of ground subsidence rates under descending orbit (left, RADARSAT-2) and ascending orbit (right, Sentinel-1)
图 2. 降轨(左, RADARSAT-2)和升轨(右, Sentinel-1)下地面沉降速率统计直方图

图 3 为升降轨 InSAR 观测沉降速率的相关统计散点分布图。根据对比结果, 两组观测数据结果间的相关性较好。

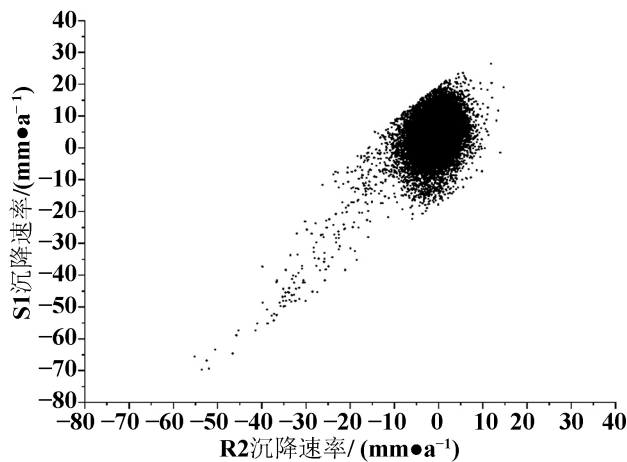


Figure 3. Correlation statistics of ground subsidence rates between RADARSAT-2 and Sentinel-1 modes
图 3. 降轨(RADARSAT-2)和升轨(Sentinel-1)模式地面沉降速率相关性统计

从图 2、图 3 沉降速率直方图和散点图可以看出, 检验一致性较高, 监测出的沉降值基本都在一个固定区间内, 不同组 SAR 数据时序 InSAR 处理结果基本一致, 进一步说明升降轨融合技术可有效对不同组的 SAR 数据进行精度验证, 以保障大范围监测成果的可靠性。

3. 利用邻近点法对 InSAR 监测成果进行精度检验

3.1. 邻近点法精度检验原理

邻近点法也是对时序 InSAR 地面沉降监测成果精度评估检验最常用的测量方法, 该方法是将时序 InSAR 监测结果与测区内水准成果或 GNSS 监测成果进行对比, 利用误差平均值和中误差两个参数对其精度进行评价。如果监测区内相干性较差, 获得的监测点成果少, 则需要通过空间插值算法对监测出的

相干点进行拟合处理, 形成拟合面, 并根据水准点及 GNSS 监测点的位置, 在拟合面内提取对应位置的相干目标沉降值, 将拟合面内的相干目标沉降值与水准点及 GNSS 监测点监测的沉降值进行对比分析, 可达到精度检验的目的。如果监测区相干性比较好, 则可直接采用最邻近点法搜索水准点及 GNSS 监测点数据附近最邻近相干目标点, 组成验证数据组, 进行精度验证, 其搜索应在 5 个像元以内。

我们把水准点及 GNSS 监测点的测量结果当作真值, 时序 InSAR 技术所监测出的沉降值结果作为实际观测值, 以水准点及 GNSS 监测点测量值与 InSAR 测量值互差中误差 m_0 的无偏估计为指标, 检验 InSAR 测量精度。中误差计算公式为:

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \tag{4}$$

$$[vv] = \sum_{i=1}^n (dl_i - dL_i)^2 \tag{5}$$

式中: N 为样本数; dl_i 值和 dL_i 值依次代表样本点 i 所相应的水准观测量(或 GNSS 观测量)和 InSAR 观测量。

3.2. 利用邻近点法的 InSAR 与 GNSS 监测精度对比验证结果

Table 1. Comparison of GNSS and InSAR monitoring results

表 1. GNSS 与 InSAR 监测结果对比

监测站	监测日期	GNSS 监测值(mm)	InSAR 监测值(mm)	监测差值(mm)	监测中误差(mm)
1	2021-10-20	0	0	0	3.56
	2021-12-07	1.31	0.06	1.25	
	2022-01-24	-3.25	-0.06	-3.19	
	2022-05-24	-5.83	-0.95	-4.88	
	2022-07-11	-7.21	-0.90	-6.31	
	2022-08-28	-9.41	-0.64	-8.77	
	2022-10-15	-6.11	-0.34	-5.77	
2	2021-10-20	0	0	0	3.51
	2021-12-07	1.22	0.17	1.05	
	2022-01-24	3.57	0.55	3.02	
	2022-05-24	-4.55	1.83	-6.38	
	2022-07-11	-2.11	1.83	-3.94	
	2022-08-28	-0.26	1.63	-1.89	
	2022-10-15	4.22	1.41	2.81	
3	2021-10-20	0	0	0	1.53
	2021-12-07	-1.91	0.20	-2.11	
	2022-01-24	-1.13	0.30	-1.43	
	2022-05-24	-3.97	-0.13	-3.84	
	2022-07-11	-2.39	-0.22	-2.17	
	2022-08-28	-4.78	-0.21	-4.57	
	2022-10-15	-3.20	-0.18	-3.02	

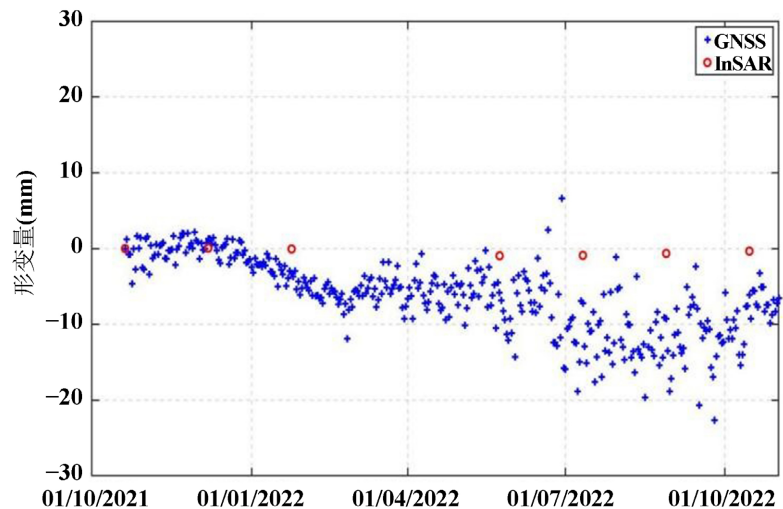


Figure 4. Comparison of GNSS monitoring point 1 and InSAR results
图 4. GNSS 监测点 1 与 InSAR 结果对比

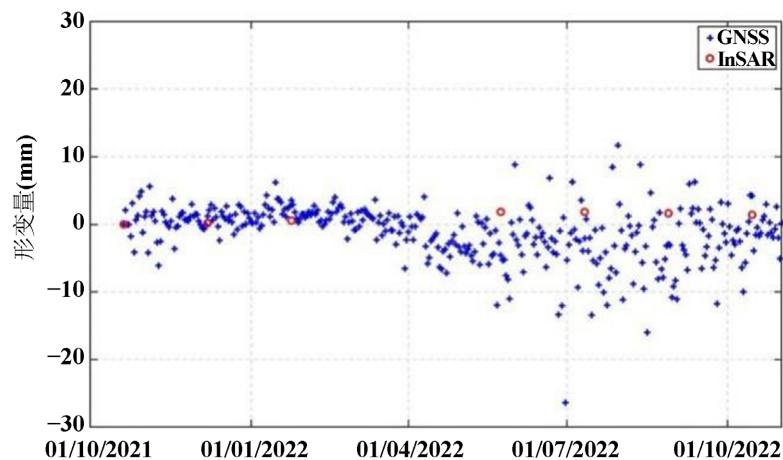


Figure 5. Comparison of GNSS monitoring point 2 and InSAR results
图 5. GNSS 监测点 2 与 InSAR 结果对比

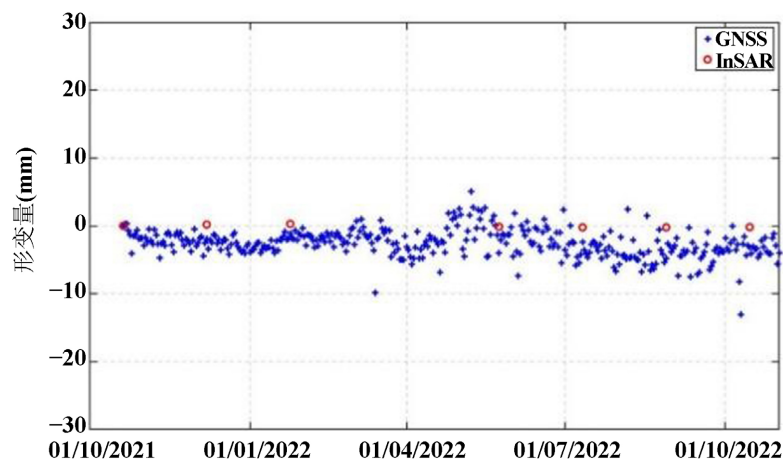


Figure 6. Comparison of GNSS monitoring point 3 and InSAR results
图 6. GNSS 监测点 3 与 InSAR 结果对比

利用 SBAS-InSAR 监测成果与各 GNSS 监测站的成果进行对比, 作业区内共布设了 3 个 GNSS 监测站, 以此 3 个 GNSS 监测站观测数据作为真值, 采用邻近点法分别将 SBAS-InSAR 监测结果与各个监测站成果数据进行了对比分析。

图 4~6 是 3 个 GNSS 站点与 InSAR 时序形变监测结果对比, 从图中不难发现, GNSS 监测点 2 与 GNSS 监测点 3 的沉降变化发展趋势与 InSAR 时序形变监测结果基本一致, 偏差基本不大, 符合精度要求。监测点 1 在前期基本与 InSAR 监测成果保持一致, 但在 2022 年初出现较大误差。

以 2021 年 10 月 20 日为监测基准时间, 在该日期 GNSS 与 InSAR 的监测值同步归零。GNSS 与 InSAR 在同一监测时间点的差值及监测中误差如表 1 所示, 发现大多数监测时间内 GNSS 与 InSAR 的监测差值保持在 ± 5 mm 以内, 3 个监测站点的测量中误差分别为 3.56 mm、3.51 mm 和 1.53 mm。此外 1、2 两个站点在个别监测日期内出现超过 ± 5 mm 的监测差值, 这可能与 GNSS 本身的测量误差有关。综上所述, GNSS 与 InSAR 两种监测精度具有一致性, 验证了 InSAR 监测精度的可靠性。

3.3. 利用邻近点法的 InSAR 与水准测量精度对比验证结果

本文将 InSAR 监测成果与测区内布设的多个水准点的二等水准成果利用邻近点法进行对比分析, 将水准点成果作为真值, 通过 InSAR 监测点与对应水准点的高程差进行对比验证, 来评价时序 InSAR 监测成果的精度。水准点基本覆盖到整个沉降区, 图 7 为二者对比图, 具体对比结果列于表 2 中。

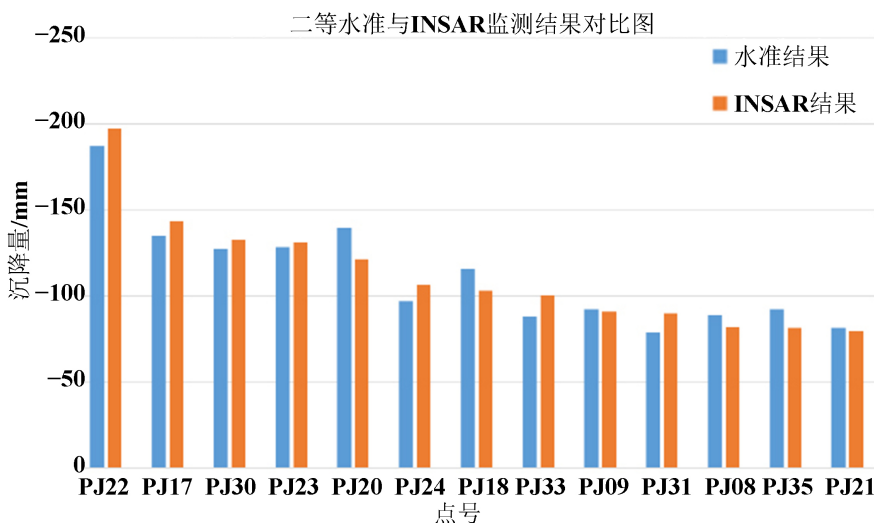


Figure 7. Comparison of second order leveling and InSAR results

图 7. 二等水准与 InSAR 结果对比图

Table 2. Comparison between level and InSAR measurement data results

表 2. 水准与 InSAR 测量数据结果对比表

点号	水准总沉降量(mm)	InSAR 总沉降量(mm)	点号	水准总沉降量(mm)	InSAR 总沉降量(mm)
PJ01	0.000	0.502	PJ11	-2.500	-4.872
PJ02	-4.000	-7.635	PJ12	-5.500	-7.142
PJ03	-40.000	-32.780	PJ13	-0.500	-2.274
PJ04	-11.000	-14.940	PJ14	2.500	3.524
PJ05	-1.000	-3.136	PJ15	-5.000	-11.357

续表

PJ06	-16.500	-13.563	PJ16	-4.500	-8.949
PJ07	-3.000	-5.752	PJ17	-135.000	-143.473
PJ08	-89.000	-81.758	PJ18	-116.000	-103.249
PJ09	-92.500	-91.095	PJ20	-139.500	-121.564
PJ10	-1.500	-6.740	PJ21	-81.500	-79.623
中误差	7.1				

将沉降区内的水准数据与 InSAR 监测成果进行对比分析, 并计算其中误差结果为 7.1 毫米, 完全满足 10 毫米的设计精度要求。

4. 结论

本文利用升降轨融合技术与邻近点法相结合的方式, 对辽河平原沉降监测项目的成果进行了精度验证。通过实例数据对比分析, 得出在利用时序 InSAR 技术进行大面积地表沉降监测时, 在水准点及 GNSS 监测点不足的情况下, 两种方法的结合可有效检验沉降监测成果的可靠性。其中, 升降轨融合技术可检验不同组 SAR 数据处理结果的相对精度, 检验整体成果的一致性, 邻近点法结合水准点及 GNSS 点则可检验整体监测结果的绝对精度。

参考文献

- [1] 徐秀杰, 陈冬. 基于 DS-InSAR 技术的西宁市地表沉降监测[J]. 新乡学院学报, 2023, 40(12): 57-61.
- [2] 闫斌, 董建军, 梅媛, 等. 高海拔石灰石排土场汛期潜在滑移区域的 D-InSAR 评价研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(6): 162-168.
- [3] 奎达敏, 喜文飞, 杨正荣, 等. 基于 D-InSAR 技术的不同裁剪尺度下沉降监测精度对比分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(11): 39-41.
- [4] 杨春宇, 文艺, 潘星, 等. 基于 SBAS-InSAR 的山体滑坡形变监测分析[J]. 测绘通报, 2023(11): 12-17.
- [5] 黄友菊, 覃怡婷, 吴慧, 等. 多时间基线集时序 InSAR 形变监测: 以平寨水库为例[J]. 测绘通报, 2023(11): 139-144.
- [6] 张浩. 超分辨率永久散射体干涉测量技术研究[J]. 测绘学报, 2023, 52(11): 后插 8.
- [7] 何丽, 吴先谭, 陈欣, 等. 基于 SBAS-InSAR 的西宁市滑坡识别和形变监测分析[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(6): 812-823.
- [8] 刘金霖, 谭志祥, 范洪冬. 融合 DS-InSAR 与 PIM 的煤矿开采影响范围确定方法[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(6): 96-104.
- [9] 欧阳梓铭, 左小清, 李勇发, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的阿海电站滑坡形变监测可靠性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(11): 1117-1122.
- [10] 徐文正, 卢书强. 基于 SBAS-InSAR 技术的三峡库区大块田滑坡形变监测分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(9): 147-150.