

doi: 10.12029/gc20221215001

全云霄, 杨俊泉, 王雪, 谭琨. 2024. 基于时序 InSAR 的山西大同煤田地表沉降监测及时空演化分析[J]. 中国地质, 51(1): 170–183.

Tong Yunxiao, Yang Junquan, Wang Xue, Tan Kun. 2024. Land subsidence monitoring and spatiotemporal evolution characteristics analysis of Datong coalfield, Shanxi Province based on time series InSAR[J]. Geology in China, 51(1): 170–183(in Chinese with English abstract).

基于时序 InSAR 的山西大同煤田地表 沉降监测及时空演化分析

全云霄^{1,2}, 杨俊泉^{1,2}, 王雪^{3,4}, 谭琨^{3,4}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170; 3. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 4. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要:【研究目的】地表沉降作为煤矿区主要地质灾害之一, 严重影响矿区经济的可持续发展和居民生活的安全稳定, 有必要对矿区地表沉降进行快速高效监测。【研究方法】以大同煤田为例, 研究使用 2020 年 1 月至 2021 年 12 月共 31 景 Sentinel-1 影像, 基于短基线集干涉测量技术(Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)对地表沉降进行监测, 获取大同煤田地表沉降速率和累计沉降结果, 使用已有研究成果对监测结果的可靠性进行验证, 并分析了沉降时空变化特征及演化规律。【研究结果】大同煤田地表沉降分布较广, 沉降总体分布趋势与大同煤田矿业管理数据的走向基本一致。沉降主要分布在大同市南郊区西部以及大同市、怀仁市和山阴县交界处, 其中塔山矿地表沉降最为严重, 大同煤田最大沉降速率为 168.03 mm/a, 最大累计沉降量为 329.12 mm, 总沉降面积为 270.95 km², 且沉降呈现持续增加的趋势, 根据沉降趋势推断需要较长时间才能实现地表活动相对稳定。【结论】研究表明了 InSAR 技术在煤矿区沉降监测的可行性, 可为矿产资源管理工作提供新的技术方法, 研究结果可为煤矿区沉降监测预警、灾害防控及资源合理开发利用提供科学依据。

关键词: 大同煤田; SBAS-InSAR; 矿区沉降; 地表形变监测; 时空演化; 环境地质调查工程

创新点: 本文基于 SBAS-InSAR 技术对矿区地表沉降进行长时序监测, 揭示了大同煤田地表沉降时空变化特征及演化规律, 证实了 InSAR 技术在矿产资源管理工作的可行性, 对矿区沉降监测研究及自然资源合理管理有一定的促进作用。

中图分类号: P237; P642.26 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0170-14

Land subsidence monitoring and spatiotemporal evolution characteristics analysis of Datong coalfield, Shanxi Province based on time series InSAR

TONG Yunxiao^{1,2}, YANG Junquan^{1,2}, WANG Xue^{3,4}, TAN Kun^{3,4}

(1. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China; 3. School of Geographic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 4. Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

收稿日期: 2022-12-15; 改回日期: 2023-02-28

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20211388)资助。

作者简介: 全云霄, 男, 1994 年生, 硕士, 工程师, 主要从事 InSAR 形变监测和自然资源调查监测研究; E-mail: tyunxiao@126.com。

通讯作者: 杨俊泉, 男, 1980 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩石学和自然资源调查监测研究; E-mail: dap-yangjunquan@163.com。

[Objective] Land subsidence is one of the main geological hazards in coal mine area, which seriously affects the sustainable development of mining economy and the safety and stability of residents' life. It is necessary to conduct rapid and efficient monitoring of land subsidence in the mining area. **[Methods]** Taking Datong coalfield as an example, the 31 scenes Sentinel-1 images acquired from January 2020 to December 2021 were used to monitor the land subsidence based on Small Baseline Subset InSAR (SBAS-InSAR) technology. The land subsidence rate and cumulative subsidence results of Datong coalfield were obtained. Moreover, the reliability of the monitoring results was verified using existing research results, and the spatiotemporal variation characteristics and evolution laws of subsidence were analyzed. **[Results]** The results indicate that the land subsidence in the Datong coalfield is extensively distributed, and its overall distribution of subsidence is basically consistent with the trend of mining management data. The subsidence is mainly distributed in the west of Nanjiao County of Datong City and the junction of Datong City, Huairan City and Shanyin County, among which the land subsidence of Tashan mine is the most severe. The subsidence characteristics of Datong coalfield mainly include the maximum subsidence rate of 168.03 mm/a, the maximum cumulative subsidence amount of 329.12 mm, and the total subsidence area of 270.95 km². Overall, there is a continuous increase in subsidence, and it takes a significant amount of time to achieve relative stability in surface activities in accordance with this trend. **[Conclusions]** This study shows the feasibility of InSAR technology in subsidence monitoring in coal mine area, which can provide a new technical for mineral resources management work, and the research results can provide scientific basis for subsidence monitoring and warning, disaster prevention and control, and rational development and utilization of resources in coal mine area.

Key words: Datong coalfield; SBAS-InSAR; subsidence of mining area; land deformation monitoring; spatiotemporal evolution; environmental geological survey engineering

Highlights: This paper utilizes SBAS-InSAR technology to conduct a long-term monitoring of land subsidence in Datong mining areas, highlights the spatiotemporal variation characteristics and evolution laws of subsidence in coal mine areas, and confirms the feasibility of InSAR technology in mineral resources management work, hoping to promote the subsidence monitoring research and reasonable management of natural resources.

About the first author: TONG Yunxiao, male, born in 1994, master, engineer, mainly engaged in the research of InSAR deformation monitoring and natural resources survey monitoring; E-mail: tyunxiao@126.com.

About the corresponding author: YANG Junquan, male, born in 1980, doctor, senior engineer, mainly engaged in the research of petrology and natural resources survey monitoring; E-mail: dap-yangjunquan@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey "Dynamic Monitoring and Risk Assessment of Natural Resources in North China" (No. DD20211388).

1 引 言

我国是“富煤、贫油、少气”的国家,这一特点决定了煤炭资源在我国能源结构中占有绝对优势地位,煤炭在我国的工业现代化和社会经济发展中发挥举足轻重的作用(Wang et al., 2013),但煤炭的大规模开发利用也引发了一些生态环境问题,煤矿区频发沉降漏斗、塌陷坑、地裂缝、滑坡、泥石流等地质灾害(Chaussard et al., 2014; Dai et al., 2016),严重破坏矿区建筑物、农田、交通道路、管线等基础设施,加剧水土流失和土地沙漠化盐碱化,对区域经济的可持续发展和居民生活的安全稳定造成威胁(全云霄等, 2020; 王涛等, 2021)。因此,及时准确获取矿区形变信息,掌握地表运移规律,了解矿区地表损坏情况,对矿区灾害预警及生态环境修复治

理具有重要意义(赵峰等, 2016)。

水准测量和全球导航卫星系统测量(Global Navigation Satellite System, GNSS)等传统方法成熟可靠、单点定位精度高,在形变监测方面发挥了重要作用(杨建图等, 2006),但仍有诸多不足:工作量大、周期长、效率低、安全性低、成本高(Xia et al., 2018);空间分辨率低,监测面积有限、数据量少(Liu et al., 2012)。近年来,合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)发展成为一种重要的空间对地观测手段(Yang et al., 2016)。差分干涉测量技术(Different InSAR, D-InSAR)在 InSAR 基础上发展而来,具有穿透能力强、监测范围大、全天候全天时、连续空间覆盖等特点(Du et al., 2016),弥补了传统方法的不足,监测精度理论上可达到厘米级甚至毫米级,但受时空

失相干、大气延迟、轨道残余误差、相位解缠误差等干扰较大(全云霄, 2020), 不适用于较大梯度、长时间序列的形变监测(Zhao et al., 2014)。

为了解决 D-InSAR 的缺陷, 诸多学者相继提出了永久散射体干涉测量技术(Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)(Ferretti et al., 2000)、短基线集干涉测量技术(Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)(Berardino et al., 2002)、相干点目标分析法(Interferometric Point Target Analysis, IPTA)(Werner et al., 2003)、时域相干点目标方法(Temporarily Coherent Point InSAR, TCP-InSAR)(Zhang et al., 2012)等时序 InSAR 方法(Multi-Temporal InSAR, MT-InSAR)。MT-InSAR 技术对多景 SAR 影像进行时间序列分析, 提取长时间范围内相位和幅度变化较小、后向散射特性比较稳定的高相干点, 基于高相干点的时序相位信息减弱大气延迟效应及 DEM 误差等, 提高了形变监测的精度和可靠性(朱建军等, 2017), 在形变监测领域具有很大潜力(Chen et al., 2020), 被广泛用于监测开采沉陷(Jiang et al., 2011; Ou et al., 2018)、火山活动(Pavez et al., 2006; Chen et al., 2017)、滑坡灾害(Dong et al., 2018; Zhao et al., 2018)、地震形变(Lee et al., 2017; Wang et al., 2018)、城市形变(Chen et al., 2019; Lu et al., 2019)和冰川表面移动(Li et al., 2018; Lippl et al., 2018)等。

大同煤田作为中国最大的优质动力煤供应基地, 面临着地表沉降灾害的严重影响。王鹏辉等(2017)基于 D-InSAR 技术获取大同矿区 2016 年地表形变信息, 为矿区治理提供了数据支撑; 刘童谣(2019)使用 Sentinel-1A 影像监测大同矿区地表形变, 从 D-InSAR 和 SBAS-InSAR 两种方法进行了研究, 结合实测水准数据验证了监测结果的可靠性; 张玮(2021)基于 SBAS-InSAR 技术处理了大同煤田的 ALOS-1 和 RADARSAT-2 影像, 对比分析发现两种数据的形变速率具有较好的一致性, 证实了 InSAR 在矿区沉降监测的可行性。本研究以山西省大同煤田为研究区, 采用 SBAS-InSAR 方法快速、动态监测矿区大范围沉降, 及时准确获取沉降信息, 揭示矿区长时间序列沉降时空发展规律, 可为合理开发利用矿产资源、有效预警与合理控制沉降提供决策依据, 对于恢复与保护矿区生态环境系

统、保障矿区可持续发展具有重要的指导作用。

2 SBAS-InSAR 地表形变监测原理

SBAS-InSAR 技术是由 Berardino 和 Lanari 等首先提出来的(Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2004), 该方法对获取的 SAR 影像根据合适的时间基线和空间基线阈值组成若干个小数据集, 在数据集内 SAR 影像对的时空基线较小, 确保生成的影像对没有孤立的集群, 而数据集之间时空基线较大, 然后采用最小二乘准则和奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法求得最小范数准则下的最小二乘解, 进而获取研究区的形变速率和时间序列形变信息。

2.1 SBAS-InSAR 原理及数据处理

获取研究区 $N+1$ 景 SAR 影像, 选择其中一景影像为超级主影像, 其他所有辅影像与超级主影像精确配准, 设定合适的时间和空间基线阈值进行干涉, 得到 M 个干涉图, 设 N 为奇数, 则有(Casu et al., 2006):

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2} \quad (1)$$

将 t_0 作为起始时刻, 设在 t_a 、 t_b ($t_b > t_a$) 两个时刻的 SAR 影像生成了第 i 个干涉图, 除去平地相位和地形相位后, 在像元 (x, r) 处的差分干涉相位为:

$$\Delta\varphi_i(x, r) = \varphi(t_b, x, r) - \varphi(t_a, x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_b, x, r) - d(t_a, x, r)] \quad (2)$$

公式(2)中, λ 为雷达工作波长, $d(t_b, x, r)$ 和 $d(t_a, x, r)$ 分别为相对于起始时刻 t_0 的雷达视线方向上累积形变量, $\varphi(t_b, x, r)$ 和 $\varphi(t_a, x, r)$ 分别为由形变量 $d(t_b, x, r)$ 和 $d(t_a, x, r)$ 引起的变化相位。将上式处理为矩阵形式:

$$A\delta = \Delta\delta \quad (3)$$

公式(3)中, A 为 $M \times N$ 的系数矩阵, 每一行对应一幅干涉图, 每一列对应一个时刻上的 SAR 影像, 主影像所在列为+1, 辅影像所在列为-1, 其余为 0; δ 为待求点在 N 个时刻 SAR 影像上形变相位组成的矩阵; $\Delta\delta$ 为 M 幅差分干涉图相位组成的矩阵。当 $M \geq N$ 时, 系数矩阵 A 的秩为 N , 利用最小二乘准则求解; 当 $M < N$ 时, 方程有无数个解, 为了解决这个问题, 利用奇异值分解方法求解形变速率矢量的最

小范数解。最后, 根据 SAR 影像的时间区间, 求解出的形变速率, 进而获取整个观测时间段的形变量, 主要流程如下(图 1)(张文哲, 2020):

(1)数据预处理: 由于原始数据量较大, 为了提高数据处理速率和效率, 对所有原始的 Sentinel-1A 影像数据进行预处理, 并裁剪得到本研究区范围。

(2)估算基线生成连接像对: 综合考虑时间基线、空间基线和多普勒质心频率基线等因素, 选取 2021 年 1 月 4 日获取的影像为超级主影像, 其他影像均为辅影像, 影像对的垂直基线参数见表 1。经过多次实验, 最终将时间基线阈值设置为 180 d, 空间基线阈值设置为临界基线的 2%, 共生成 167 个小基线干涉像对, 用于后续差分干涉处理, 像对组合连接情况如图 2 所示。其中黑色菱形表示 SAR 影像, 线段表示干涉对, 发现所有像对空间基线均小于 120 m, 时间基线均不超过 168 d, 时空相干性较好, 避免由单一主影像引起的时空失相干误差。

(3)数据集干涉处理: ①采用多级配准方式完成主辅影像的精确配准; ②将配准的主辅影像复共轭相乘处理得到干涉图; ③使用精确轨道数据模拟出平地相位, 将其从干涉图中去除; ④采用自适应滤波方法来消除或减弱噪声, 生成相干系数图, 为相位解缠做准备; ⑤相位解缠: 使用最小费用流 (Minimum Cost Flow, MCF) 将干涉图中的相位值解

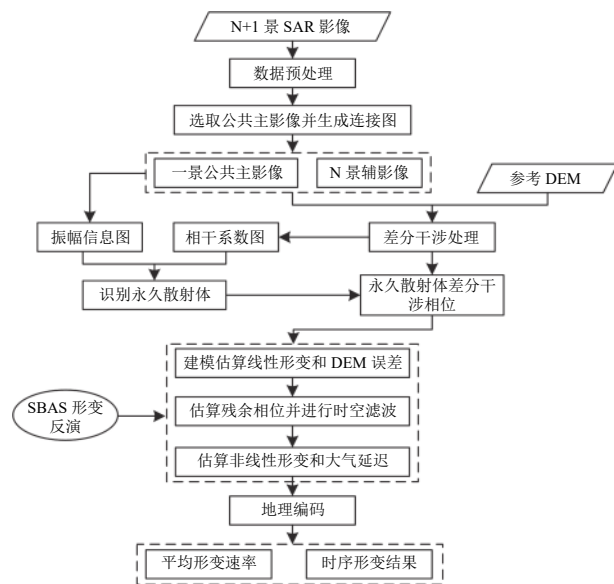


图 1 SBAS-InSAR 数据处理流程
Fig.1 Flow-process diagram of SBAS-InSAR

表 1 数据集垂直基线参数

Table 1 Vertical baseline parameter of SBAS-InSAR dataset

序号	获取时间	垂直基线/m	序号	获取时间	垂直基线/m
1	20200110	81.01	17	20210128	56.44
2	20200203	17.97	18	20210221	10.91
3	20200227	54.95	19	20210317	44.84
4	20200322	-20.27	20	20210410	-43.06
5	20200415	-67.80	21	20210504	49.24
6	20200509	33.78	22	20210528	30.21
7	20200602	46.57	23	20210621	-11.01
8	20200626	-13.75	24	20210715	-43.03
9	20200720	31.49	25	20210808	51.07
10	20200813	-108.54	26	20210901	-50.18
11	20200906	-20.88	27	20210925	-20.89
12	20200930	45.56	28	20211019	31.34
13	20201024	-61.09	29	20211112	-56.42
14	20201117	12.63	30	20211206	12.82
15	20201211	34.42	31	20211230	106.02
16	20210104	0.00			

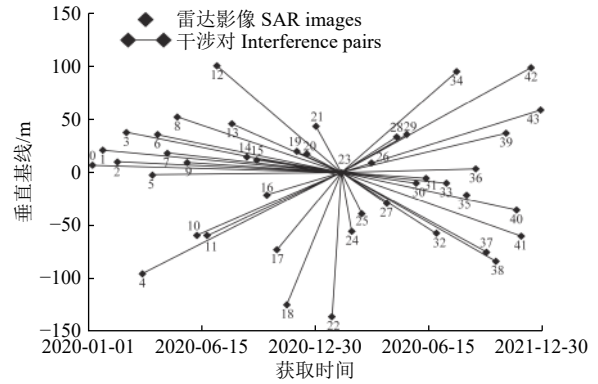


图 2 SBAS-InSAR 干涉对时空基线分布
Fig.2 Spatiotemporal baseline distributions of SBAS-InSAR

缠为真实值, 使之与线性变化的形变信息对应, 解缠相干系数阈值设为 0.2。

(4)轨道精炼与重去平: 相位解缠后仍存在残余的恒定相位和相位坡道, 在没有残余地形条纹、相位跃变及远离形变条纹的区域选择合适数量的 GCP 点, 通过 GCP 点将上述残余相位去除。

(5)形变反演: ①第一步反演是核心, 使用线性模型估算形变速率和残余地形相位, 此步需要进行二次相位解缠, 解缠方法仍使用最小费用流; ②第二步在第一步反演的形变速率基础上进行空间域低通和时间域高通滤波处理, 估算和去除大气延迟相位, 得到更加准确可靠的形变结果。

(6)地理编码: 对形变结果由 SAR 坐标系编码到地理坐标系, 该结果表示目标在雷达视线方向上

的形变信息。

2.2 SBAS-InSAR 技术优势

相较于 D-InSAR 与 PS-InSAR, SBAS-InSAR 有如下优势(张文哲, 2020):

(1)与 D-InSAR 相比, SBAS-InSAR 以较短的时间和空间基线阈值组合大量 SAR 影像, 形成若干个小基线集, 很大程度消除时空失相干引起的误差; 基于大气延迟相位的时空分布特性, 使用高通与低通滤波方法减弱大气延迟误差; 能够获取更高精度和可靠性的长时间序列形变信息。

(2)与 PS-InSAR 相比, SBAS-InSAR 克服了 PS-InSAR 因选取单一影像作为公共主影像而引起的部分干涉图相干性较差的缺陷, 同时降低了对 SAR 数据的需求量, 运算效率较高; PS-InSAR 基于高相干 PS 点进行解算, 适用于城市区域, 在非城市区域获取的 PS 点较少, 而 SBAS-InSAR 基于分布式目标进行探测, 利用更多的影像对获取更加密集的形变监测结果, 提高了空间分辨率; PS-InSAR 基于有限的 PS 点来估计和去除大气延迟相位, 而 SBAS-InSAR 基于所有相干像元并通过滤波方法去除, 大气延迟去除效果更好, 获取形变结果更加精确可靠。

3 研究区概况及数据源

大同市位于山西省最北部, 地处黄土高原东北边缘, 是山西省第二大城市, 也是中国最大的煤炭能源基地之一。大同煤田是山西省六大煤田之一, 中国华北聚煤区北部的多纪煤田, 跨大同、怀仁、山阴、左云、右玉等市县, 地理位置为 $112^{\circ}30'E\sim 113^{\circ}15'E$ 和 $39^{\circ}35'N\sim 40^{\circ}12'N$, 主要产优质动力煤(张堯, 2020)。大同煤田煤炭资源量约 420 亿 t, 煤炭探明储量达 350 亿 t(屈晓荣, 2019), 包含早侏罗世煤系和石炭纪—二叠纪煤系两套煤系, 上部为早侏罗世煤系, 煤炭探明储量约 70 亿 t, 煤层属中厚和厚煤层, 埋藏浅、倾角平缓、断层少, 煤种为著名的优质动力用煤; 石炭纪—二叠纪煤系包括上石炭统下部本溪组、上石炭统上部太原组及下二叠统山西组, 煤炭探明储量约 280 亿 t, 煤种为气煤和气肥煤(潘良云等, 2023)。

大同地区属温带大陆性季风气候, 受季风影响, 四季分明, 冬季漫长且寒冷干燥, 夏季短暂且温

热多雨, 春秋凉爽, 温差较大(齐香玲, 2007)。受燕山运动和喜马拉雅运动的影响, 具有复杂多样的地貌轮廓, 平川区位于东南部, 山地、丘陵主要集中于西、北及东北部地区, 构成了西北高、东南低的地形特征, 海拔在 1000~1500 m(王冬辰, 2007; 薛生升等, 2021)。

Sentinel-1A 卫星于 2014 年 4 月发射升空, 是欧洲空间局哥白尼计划发射的地球观测卫星, 运行在近极地太阳同步轨道, 轨道高度约 693 km, 由 A、B 卫星组成, 重返周期 6 d 或 12 d, 搭载 C 波段合成孔径雷达。有单极化和多极化等极化方式, 具有条带模式 SM(Strip Map)、干涉宽幅模式 IW(Interferometric Wide)、超宽幅模式 EW(Extra-Wide Swath)和波谱模式(Wave)4 种成像模式(杨魁, 2015), 其中 IW 和 EW 模式采用循序扫描地形观测技术(Terrain Observation with Progressive Scans in azimuth, TOPS), 依次对各个测绘带进行扫描, 通过牺牲部分方位向分辨率来提高测绘带宽, 压缩了波束方向图并抑制了成像时造成的扇贝效应, 具有传统的条带模式无法比拟的优势, 单景影像幅宽达 250 km(陈祺, 2013)。本研究获取了 2020 年 1 月至 2021 年 12 月共 31 景 Sentinel-1A 影像, 所用数据均为宽幅干涉模式获取的单视复数影像(Single Look Complex, SLC), 极化方式均为垂直极化(Vertical-Vertical, VV), 空间分辨率为 $5\text{ m}\times 20\text{ m}$ 。选用覆盖大同煤田的 SRTM1 数据模拟地形相位, 去除地形相位和平地效应的影响。研究区地理位置及影像主要参数分别如图 3 和表 2 所示。

4 结果分析

4.1 大同煤田沉降总体情况分析

基于 SBAS-InSAR 技术对大同煤田的 31 景升轨 Sentinel-1A 影像进行整体处理, 获取大同煤田 2020 年 1 月至 2021 年 12 月长时序地表沉降速率分布图(图 4), 正值表示地表抬升, 即地面目标朝向卫星运动, 负值表示地表沉降, 即地面目标远离卫星运动, 红色越深表示地表沉降程度越大。InSAR 监测结果显示, 2020 年 1 月至 2021 年 12 月大同煤田范围内多处发生了地表沉降, 沉降分布较广, 而且空间分布不均, 沉降主要分布在大同市南郊区西部以及大同市、怀仁市和山阴县交界处, 其中大同

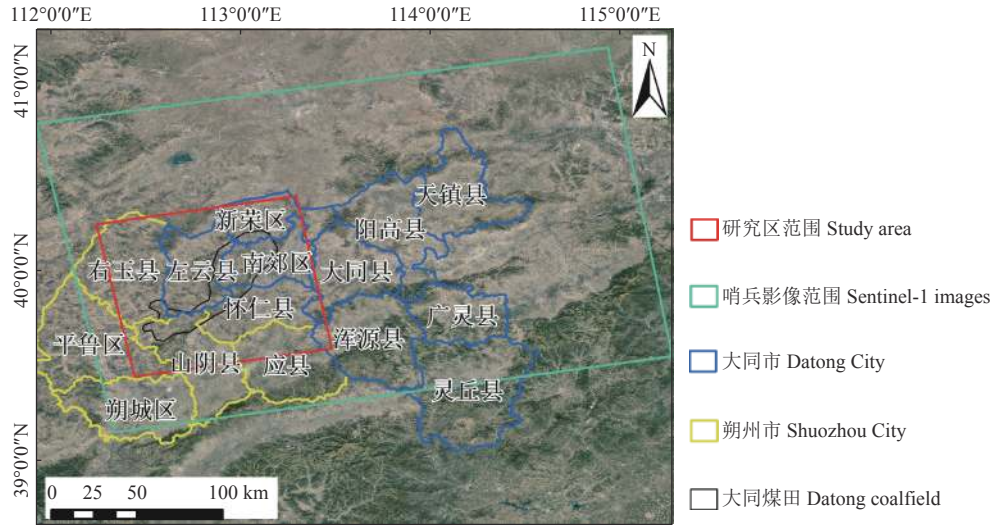


图 3 研究区地理位置
Fig.3 Geographical location in research area

表 2 研究区 Sentinel-1 影像主要参数
Table 2 Main parameters of Sentinel-1 images in the study area

序号	参数	Sentinel-1
1	时间范围	20200110—20211230
2	幅宽/km	250×170 (地距向×方位向)
3	工作模式	干涉宽幅模式
4	空间分辨率/m	5×20 (地距向×方位向)
5	实际像元大小/m	2.3×13.9 (斜距向×方位向)
6	过境方式	升轨
7	重访周期/d	12或24
8	极化方式	VV
9	入射角	33.8°
10	轨道数	40
11	工作波段/cm	C-band 5.6

市南郊区西部沉降最为严重, 呈现多个沉降区连片扩张的趋势, 该区域最大沉降速率为 168.03 mm/a 最大累计沉降量为 329.12 mm。

将大同煤田的矿业管理数据与形变监测结果相叠加, 来判断 SBAS-InSAR 技术识别采煤区地表沉降的能力, 发现沉降总体分布趋势与大同煤田矿业管理数据的走向基本一致, 大部分沉降区都在大同煤田已确定的矿业管理数据范围内, 仅有左云县中部和南部约 6 个沉降区域不在范围内, 推断可能由无证开采或越界开采等矿产资源违法行为导致

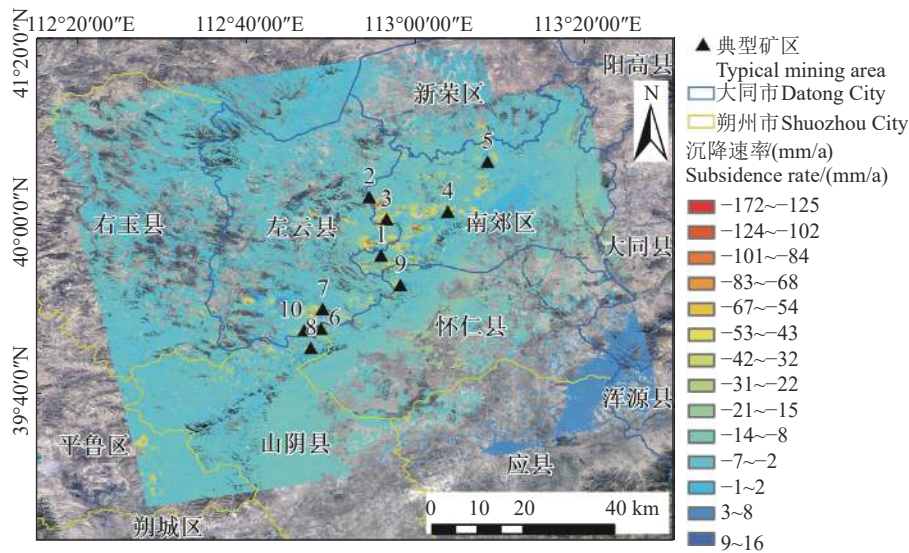


图 4 大同煤田在 2020-01 至 2021-12 期间地表形变速率
Fig.4 Land deformation rate of Datong coalfield from 2020-01 to 2021-12

矿业管理数据范围外出现了地表沉降灾害,结果表明 InSAR 可快速抓取无证开采、越界开采等疑似矿产资源违法行为,可为矿产资源管理工作提供新的遥感技术方法,有助于推进矿产资源的有效保护和合理利用(刘欢等,2021)。

图5为大同煤田不同时间段的累计沉降分布图,分别为20200110(起始时间)至20200322(间隔72 d)、20200626(间隔168 d)、20200930(间隔264 d)、20210104(间隔360 d)、20210410(间隔456 d)、20210715(间隔552 d)、20211019(间隔648 d)和20211230(间隔720 d)时间序列形变图,可以发现,随着时间的累积,大同煤田矿区煤炭资源开采的强度不断增强,导致沉降区域范围整体呈现扩张趋势,而且沉降强度也不断增大,累计沉降量持续增加。

对大同煤田沉降面积进行统计分析,获取各形变速率等级的累计沉降面积,如表3所示。参照已有研究成果(张玮,2021),本研究将形变速率为 -10 mm/a 作为阈值,形变速率小于该值的区域确定为沉降区。依据形变速率将大同煤田地表沉降程度分为4个等级:轻度($10\sim 40\text{ mm/a}$)、中度($40\sim 60\text{ mm/a}$)、重度($60\sim 100\text{ mm/a}$)及极重度($100\sim 170\text{ mm/a}$)。2020年1月至2021年12月大同煤田沉降区域的总面积为 323.29 km^2 ,其中沉降速率在 $10\sim 40\text{ mm/a}$ 的区域面积为 285.49 km^2 ,面积占比88.31%;沉降速率在 $40\sim 60\text{ mm/a}$ 的区域面积为 23.60 km^2 ,面积占比7.30%;沉降速率在 $60\sim 100\text{ mm/a}$ 的区域面积为 12.10 km^2 ,面积占比3.74%;沉降速率在 $100\sim 170\text{ mm/a}$ 的区域面积为 2.10 km^2 ,面积占比0.65%。可以发现,轻度沉降的区域占总沉

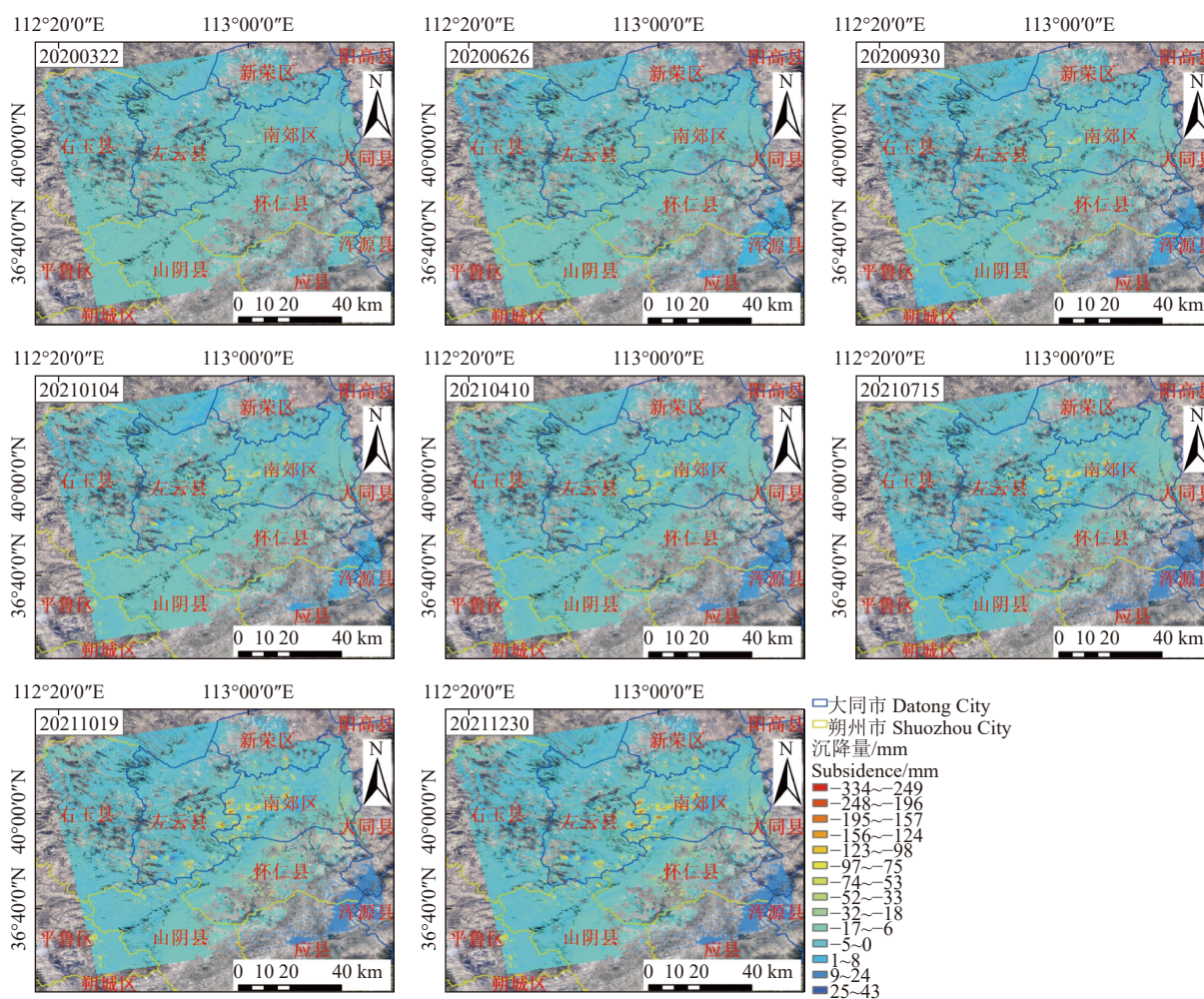


图5 大同煤田时间序列沉降结果
Fig.5 Results of time series land subsidence in Datong coalfield

表 3 大同煤田地表沉降面积统计

Table 3 Statistics of surface subsidence area in Datong coalfield

序号	沉降速率/(mm/a)	沉降程度等级	沉降面积/km ²	面积占比
1	-10~-20	轻度	199.88	61.83%
2	-20~-40	轻度	85.6	26.48%
3	-40~-60	中度	23.6	7.30%
4	-60~-80	重度	8.92	2.76%
5	-80~-100	重度	3.18	0.98%
6	-100~-120	极重度	1.47	0.45%
7	-120~-140	极重度	0.49	0.15%
8	-140~-170	极重度	0.13	0.04%

降面积的 88.31%, 重度和极重度的区域占总沉降面积的 4.39%, 说明在监测期间大同煤田整体发生了较为缓慢的地表沉降, 少部分区域沉降较为严重, 需重点监测沉降剧烈的区域, 获取地表沉降信息, 掌握地表运移规律, 了解矿区地表损坏情况, 对矿区地质灾害做出预警, 减少人员伤亡和财产损失。

4.2 大同煤田典型区域沉降分析

为了进一步分析煤炭资源开采导致的地表沉降情况及其演化过程, 对大同煤田沉降严重的 10 个典型矿区进行定性和定量精细化分析(图 4), 统计了典型矿区的最大累计沉降量、平均沉降速率、沉降面积及面积占比等信息(表 4)。由表可知, 2020 年至 2021 年 10 个典型矿区的最大累计沉降量均超过 110 mm, 其中塔山矿、马脊梁矿、同忻矿、燕子山矿最大累计沉降量均超过 250 mm, 说明这几个矿区采煤中心发生了严重的地表沉降; 所选取的 10 个典型矿区平均沉降速率均超过 16 mm/a, 其中塔山矿、马脊梁矿、同忻矿、铺龙湾煤矿平均

表 4 大同煤田典型矿区沉降信息统计

Table 4 Subsidence information statistics of typical mining area in Datong coalfield

序号	矿山名称	最大累计沉降量/mm	平均沉降速率/(mm/a)	沉降面积/km ²	面积占比
1	塔山矿	-329.12	-23.57	69.89	21.62%
2	燕子山矿	-262.74	-20.71	6.16	1.90%
3	马脊梁矿	-255.65	-29.97	21.49	6.61%
4	同忻矿	-251.29	-27.52	32.82	10.06%
5	晋华宫煤矿	-194.23	-20.18	17.50	5.35%
6	峙峰山煤矿	-190.77	-22.20	6.25	1.90%
7	铺龙湾煤矿	-170.06	-23.91	2.04	0.62%
8	中煤顺通辛安煤矿	-154.80	-22.34	3.26	0.99%
9	联顺玺达柴沟煤矿	-148.01	-16.81	7.79	2.35%
10	李家窑煤矿	-113.35	-18.44	4.16	1.25%

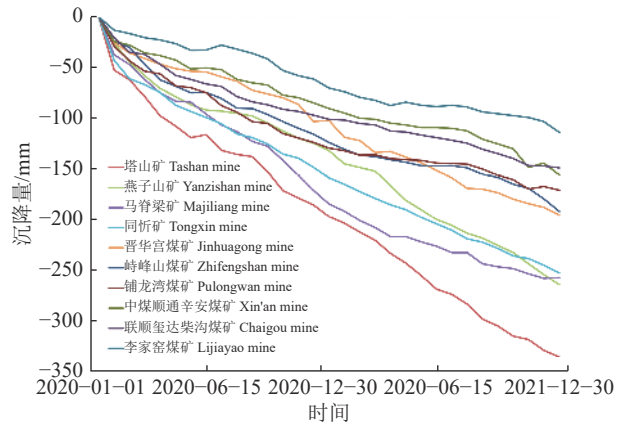


图 6 典型矿区特征点的时间序列图

Fig.6 Time series diagram of characteristic points in typical mining area

沉降速率均超过 23 mm/a, 说明这几个矿区整体上发生了较强烈的地表沉降; 所研究的 10 个典型矿区总沉降面积为 171.36 km², 占大同煤田总沉降面积(323.29 km²)的 53.01%, 说明大同煤田发生地表沉降的区域有超过一半分布于这 10 个典型矿区附近, 其中塔山矿的沉降面积最大, 达到了 69.89 km², 约占大同煤田总沉降面积的五分之一, 同忻矿和晋华宫煤, 沉降面积均在 20 km² 左右, 其他煤矿区的沉降面积均小于 20 km²。

为了研究大同煤田 2020 年至 2021 年地表沉降长时间序列特征及其发展趋势, 选取上述 10 个典型煤矿区的最大沉降量所在位置为特征点, 获取特征点的累计沉降量随时间变化折线图(图 6)。由图可知, 10 个特征点均呈现不同速率的非线性地表沉降, 个别沉降有起伏, 从总体看均呈现累计沉降量随着时间的推移而不断增加的趋势。其中塔山矿出现了最大地表沉降, 最大累计沉降量为-329.12 mm, 最大沉降速率为 168.03 mm/a; 李家窑煤业发生了最小地表沉降, 最大累计沉降量为-113.35 mm, 最大沉降速率为 57.46 mm/a, 此矿区沉降速率较为缓慢。大同煤田 10 个典型矿区 2020 年至 2021 年呈现持续增加的沉降趋势, 且直到 2021 年底沉降没有出现明显的减缓趋势, 可以推断大同煤田各煤矿区仍在持续大规模开采矿产资源, 后期沉降可能会继续加剧, 需要较长时间才能实现地表活动相对稳定。综合考虑最大累计沉降量、平均沉降速率、沉降面积、特征点沉降趋势等信息, 可以发现塔山矿沉降最为严重, 需引起地质环境等相关部门的

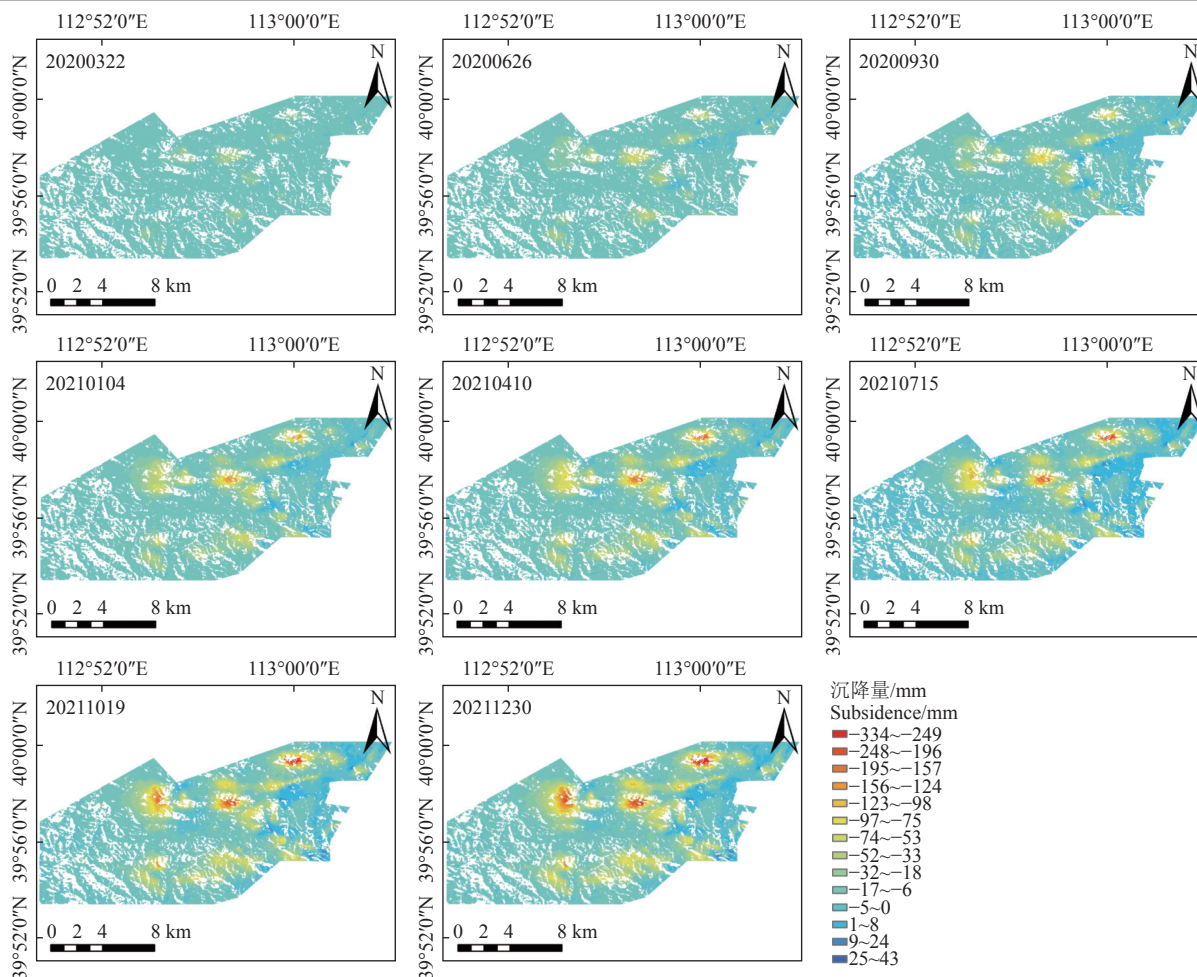


图7 塔山矿时间序列沉降结果

Fig.7 Results of time series surface subsidence in Tashan coal mine

高度重视,采取有效措施,做好沉降防治工作。

为了揭示大同煤田地表沉降空间变化特征及演化规律,以2020年1月10日为起始时间,2021年12月30日为截止时间,时间间隔约为3个月,选取4个典型煤矿区的8幅地表沉降结果组成形变时间序列图(图7),研究沉降空间分布演化特征。由图7可知,2020年1月至6月,塔山矿区地表处于沉降萌芽发展阶段,局部区域出现了较大沉降,最大累计沉降量为115.53 mm,沉降面积约为44.75 km²;2020年7月至2021年4月,塔山矿区地表处于沉降快速累计阶段,沉降区域(红色图斑)面积迅速增加,其中累计沉降量在100~200 mm的区域增加更加明显,最大累计沉降量为231.96 mm,沉降面积约为54.46 km²;2021年5月至2021年12月,塔山矿区地表处于沉降持续急剧累计阶段,累计沉降量在200~300 mm的区域增加较为显著,最大累

计沉降量为-329.12 mm,沉降面积约为69.89 km²。监测期间,塔山矿区地表沉降呈现持续扩张趋势,沉降分布总面积不断增加,矿区范围内出现了3个明显的沉降漏斗(红色图斑),沉降漏斗面积变化更加明显,累计沉降量增加迅速,沉降漏斗最大累计沉降量均超过260 mm。

由图8可知,2020年1月至6月,燕子山矿和马脊梁矿地表处于沉降缓慢发展阶段,局部区域出现了沉降,最大累计沉降量为95.45 mm,沉降面积约为14.61 km²;2020年7月至2021年4月,燕子山矿和马脊梁矿地表处于沉降快速累计阶段,累计沉降量在100~200 mm的区域增加尤为显著,最大累计沉降量为215.59 mm,沉降面积约为21.52 km²;2021年5月至2021年12月,燕子山矿和马脊梁矿地表处于沉降持续累计阶段,但沉降速率有所放缓,最大累计沉降量为262.74 mm,沉降面积约为

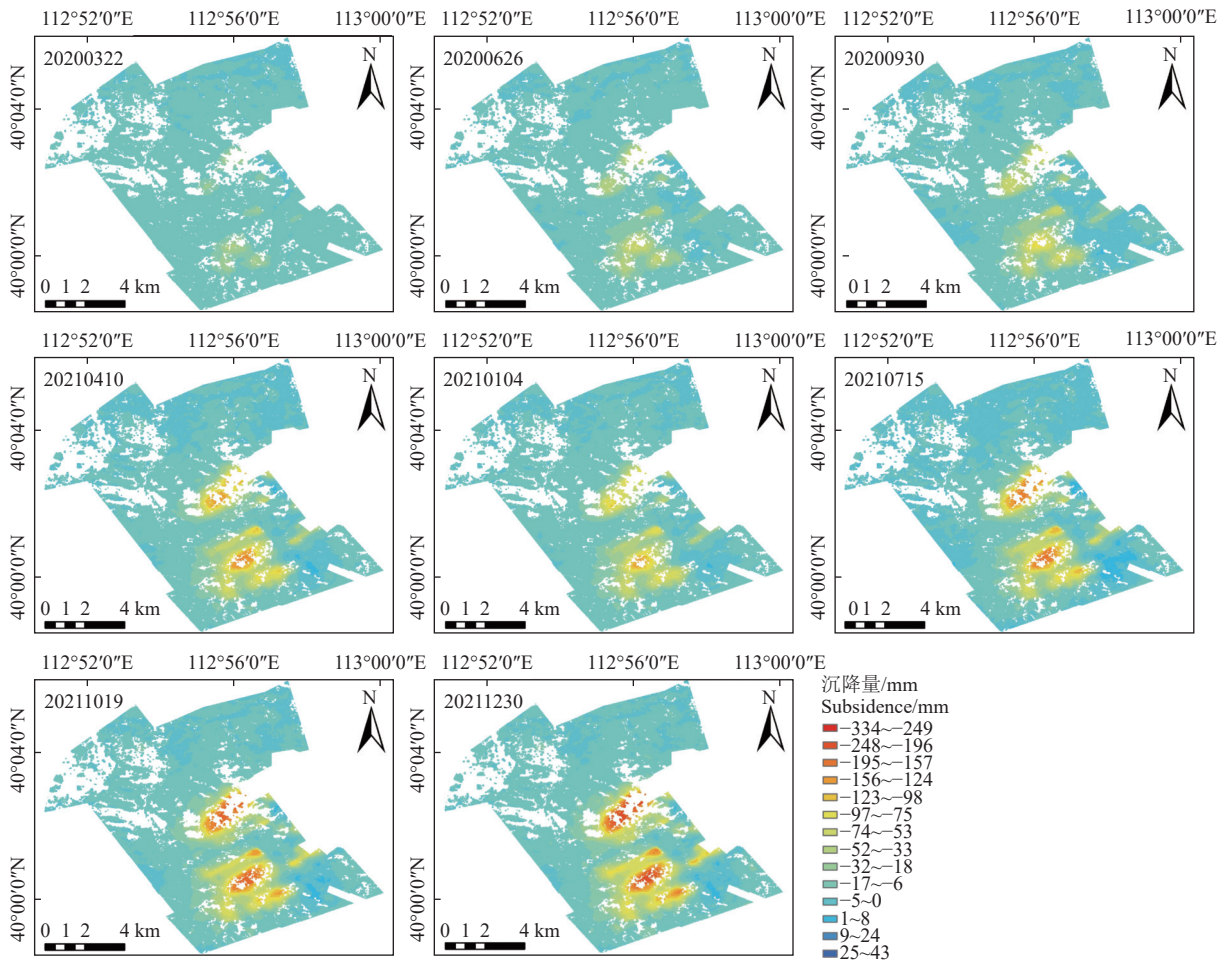


图 8 燕子山矿和马脊梁矿时间序列沉降结果

Fig.8 Results of time series surface subsidence in Yanzishan and Majiliang coal mine

28.36 km²。监测期间,燕子山矿和马脊梁矿相交的边界区域出现了一个明显的沉降漏斗,随着时间的推移,沉降漏斗的强度和范围不断扩张,马脊梁矿区中央出现了多个沉降区域,并有连成一片形成一个巨大沉降漏斗的趋势。在两个沉降漏斗中均存在空值区域(空白部分),这是因为煤炭资源开采引起的地面沉降超出了 C 波段 InSAR 技术的监测能力,导致了失相干现象,沉降漏斗中空值区域的实际沉降程度强于周围非空值区域,可通过使用波段更长的 SAR 影像(例如 L 波段)或者使用重访周期更短的数据来抑制失相干的影响,提高 InSAR 技术获取大梯度形变的能力。

由图 9 可知,2020 年 1 月至 6 月,晋华宫煤矿地表处于沉降缓慢蠕动阶段,局部区域出现了略微沉降,最大累计沉降量为 53.97 mm,沉降面积约为 4.01 km²;2020 年 7 月至 2021 年 4 月,晋华宫煤矿

地表处于沉降累计阶段,最大累计沉降量为 131.90 mm,沉降面积约为 13.05 km²;2021 年 5 月至 2021 年 12 月,晋华宫煤矿地表处于沉降持续累计阶段,最大累计沉降量为 194.23 mm,沉降面积约为 17.50 km²。监测期间,晋华宫煤矿范围内出现了 6 个形变程度不同的沉降漏斗,随着时间的推移,位于矿区范围内北部的几个沉降漏斗几乎要连片形成一个大的沉降区。

4.3 SBAS-InSAR 结果可靠性分析

由于未获取到大同煤田地表高精度实测数据,考虑利用内符合精度(刘琦等,2019)以及前人对大同煤田的研究成果来对比验证本文监测结果的精度和可靠性。结果显示,不同时间 SAR 影像测量得到的形变速率标准差大部分均小于 2 mm/a,而且本文获取的地表沉降空间分布及形变量级与前人监测结果(张堯,2020)基本一致,表明本文的监测结

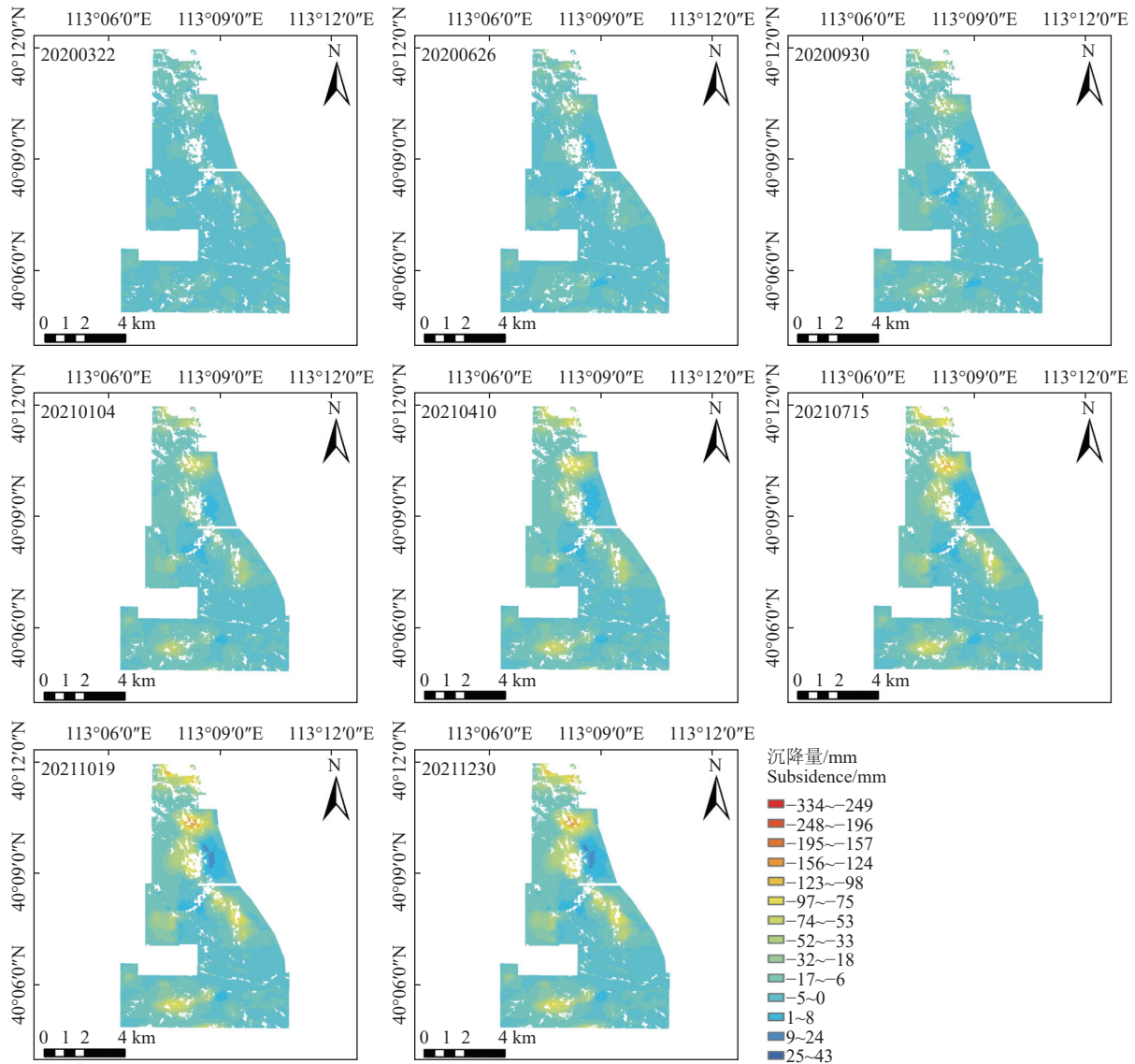


图9 晋华宫煤矿时间序列沉降结果
 Fig.9 Results of time series surface subsidence in Jinhuangong coal mine

果可靠。

5 结论

大同煤田作为我国最大的优质动力煤供应基地之一,为国家能源发展和经济建设做出了突出贡献,但也导致了地表沉降等灾害。本研究基于SBAS-InSAR技术处理覆盖大同煤田的31景Sentinel-1A影像,获取大同煤田2020年1月至2021年12月的地表沉降信息,分析了地表沉降时空变化特征及演化规律,主要结论如下:

(1)大同煤田地表沉降分布较广,沉降总体分布

趋势与大同煤田矿业管理数据的走向基本一致,沉降主要分布在大同市南郊区西部以及大同市、怀仁市和山阴县交界处,其中大同市南郊区西部沉降最为严重,最大沉降速率为168.03 mm/a,最大累计沉降量为329.12 mm,总沉降面积为270.95 km²,重度和极重度的区域占总沉降面积的4.39%,需重点监测重度和极重度的沉降区域。

(2)对10个沉降严重的典型矿区精细化分析,发现最大累计沉降量均超过110 mm,沉降面积为171.36 km²,占大同煤田总沉降面积的53.01%,沉降超过一半位于这10个典型矿区附近。对10个典

型矿区的最大沉降量进行时序分析,发现呈现持续增加的沉降趋势,推断仍在大规模开采矿产资源,后期沉降可能持续加剧,需要较长时间才能实现地表相对稳定。

(3)选取 4 个典型煤矿区的 8 幅沉降结果组成时序图,研究沉降空间演化特征,发现均出现了不同程度的沉降漏斗,随着时间的推移,沉降的强度和范围在不断扩张,沉降面积持续增大。综合考虑最大累计沉降量、平均沉降速率、沉降面积、特征点趋势等信息,发现塔山矿沉降最为严重,需引起地质环境等相关部门的高度重视,采取有效措施,做好沉降防治工作。

References

- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 40(11): 2375–2383.
- Casu F, Manzo M, Lanari R. 2006. A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 102(3/4): 195–210.
- Chaussard E, Wdowinski S, Cabral-Cano E, Amelung F. 2014. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 140: 94–106.
- Chen Qi. 2013. Research on the Imaging Technology of Spaceborne Multimode Synthetic Aperture Radar Research on Rspaceborne Multimode Synthetic Aperture Radar Imaging Technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1–158 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y, Remy D, Froger J L, Peltier A, Villeneuve N, Darrozes J, Bonvalot S. 2017. Long-term ground displacement observations using InSAR and GNSS at Pitondela Fournaise volcano between 2009 and 2014[J]. *Remote Sensing of Environment*, 194: 230–247.
- Chen Y, Tan K, Yan S, Zhang K, Zhang H, Liu X, Sun Y. 2019. Monitoring land surface displacement over Xuzhou (China) in 2015–2018 through PCA-based correction applied to SAR interferometry[J]. *Remote Sensing*, 11(12): 1494.
- Chen Y, Tong Y, Tan K. 2020. Coal mining deformation monitoring using SBAS-InSAR and offset tracking: A case study of Yu County, China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 6077–6087.
- Dai K, Li Z, Tomás R, Liu G, Yu B, Wang X, Stockamp J. 2016. Monitoring activity at the Daguangbao mega-landslide (China) using Sentinel-1 TOPS time series interferometry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 186: 501–513.
- Dong J, Zhang L, Tang M, Liao, M, Xu Q, Gong J, Ao M. 2018. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiayu landslide in Danba, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 205: 180–198.
- Du Y, Zhang L, Feng G, Lu Z, Sun Q. 2016. On the accuracy of topographic residuals retrieved by MTInSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(2): 1053–1065.
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 38(5): 1685–1701.
- Jiang L, Lin H, Ma J, Ma J, Kong B, Wang Y. 2011. Potential of small-baseline SAR interferometry for monitoring land subsidence related to underground coal fires: Wuda (Northern China) case study[J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 257–268.
- Lanari R, Mora O, Manunta M, Mallorquí J J, Berardino P, Sansosti E. 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms[J]. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 42(7): 1377–1386.
- Lee W J, Lu Z, Jung H S, Ji L. 2017. Measurement of small co-seismic deformation field from multi-temporal SAR interferometry: Application to the 19 September 2004 Huntoon Valley earthquake[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2): 1241–1257.
- Li G, Lin H, Ye Q. 2018. Heterogeneous decadal glacier downwasting at the Mt. Everest (Qomolangma) from 2000 to~ 2012 based on multi-baseline bistatic SAR interferometry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 206: 336–349.
- Lippl S, Vijay S, Braun M. 2018. Automatic delineation of debris-covered glaciers using InSAR coherence derived from X-, C- and L-band radar data: A case study of Yazgyl Glacier[J]. *Journal of Glaciology*, 64(247): 811–821.
- Liu C, Zhou F, Gao J, Wang J. 2012. Some problems of GPS RTK technique application to mining subsidence monitoring[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(2): 223–228.
- Liu Huan, Zhang Yun, Huang Xuhong, Chen Donglei, Yang Junquan, Gao Xuesheng. 2021. Application of remote sensing technology in mining monitoring in midwest major mining area of Inner Mongolia[J]. *North China Geology*, 44(4): 55–60 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qi, Yue Guosen, Ding Xiaobing, Yang Kun, Feng Guangcai, Xiong Zhiqiang. 2019. Temporal and spatial characteristics analysis of deformation along foshan subway using time series InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University (Information Science Edition)*, 44(7): 1099–1106 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tongyao. 2019. Research on Ground Subsidence Monitoring in Mining Area Based on SBAS-DInSAR Technology [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 1–65 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Lu Y Y, Ke C Q, Jiang H J, Chen D L. 2019. Monitoring urban land surface deformation (2004–2010) from InSAR, groundwater and levelling data: A case study of Changzhou city, China[J]. *Journal of Earth System Science*, 128(6): 1–15.
- Ou D, Tan K, Du Q, Chen Y, Ding J. 2018. Decision fusion of D–InSAR and pixel offset tracking for coal mining deformation monitoring[J]. *Remote Sensing*, 10(7): 1055.
- Pan Liangyun, Meng Lingjian, Sun Fuli, Yang Wenjun, Zhang Wei, Ren Lu, Xue Hui, Zhou Bo, Yang Hui. 2023. Geothermal geological characteristics and resource potential in the north of Datong Basin, Shanxi Province[J]. *Geology in China*, 50(6): 1632–1645 (in Chinese with English abstract).
- Pavez A, Remy D, Bonvalot S, Diament M, Gabalda G, Froger J L, Moisset D. 2006. Insight into ground deformations at Lascar volcano (Chile) from SAR interferometry, photogrammetry and GPS data: Implications on volcano dynamics and future space monitoring[J]. *Remote Sensing of Environment*, 100(3): 307–320.
- Qi Xiahng. 2007. The Application of RS in Shanxi Datong Coalfield Geologic Hazard Investigation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 1–69 (in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaorong. 2019. Distribution characteristics of associated elements in Middle Jurassic coal in the north of Datong coalfield and their geological significance[J]. *Coal Field Geology and Exploration*, 47(1): 64–72 (in Chinese with English abstract).
- Tong Yunxiao, Huang Yan, Chen Yu, Tan Kun, Ou Depin, Han Fushun. 2020. Surface subsidence monitoring and spatio–temporal analysis in mining area based on D–InSAR monitoring and space–time analysis of surface subsidence in D–InSAR mining area[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 45(3): 67–73 (in Chinese with English abstract).
- Tong Yunxiao. 2020. Study on Surface Deformation Monitoring in Mining Area and Multi–model Atmospheric Delay Correction of InSAR[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1–85 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongchen. 2015. Analyzing and Evaluating the Changes of Land Cover and Eco–environment of Datong City by Remote Sensing Images City [D]. Nanjing: Nanjing University, 1–84 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Feng L, Davidsson S, Höök, M. 2013. Chinese coal supply and future production outlooks[J]. *Energy*, 60: 204–214.
- Wang Penghui, Xu Yan, Jiao Minglian. 2017. Application of three track method D–InSAR technology in mine settlement monitoring[J]. *Mine Surveying*, 45(6): 12–14, 18 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Liu Jiamei, Li Zetong, Xin Peng, Shi Jusong, Wu Shuren. 2021. Seismic landslide hazard assessment of China and its impact on national territory spatial planning[J]. *Geology in China*, 48(1): 21–39 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z, Zhang R, Wang X, Liu G. 2018. Retrieving three–dimensional co–seismic deformation of the 2017 MW7.3 Iraq earthquake by multi–sensor SAR images[J]. *Remote Sensing*, 10(6): 857.
- Werner C, Wegmuller U, Strozzi T, Wiesmann A. 2003. Interferometric point target analysis for deformation mapping[C]// *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*. IEEE, 7: 4362–4364.
- Xia Y, Wang Y, Du S, Liu X, Zhou H. 2018. Integration of D–InSAR and GIS technology for identifying illegal underground mining in Yangquan District, Shanxi Province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 77: 1–19.
- Xue Shengsheng, Lin Wei, Liu Hongzhe, Zhang Lu, Zhou Xinpeng, Yin Daojin, Zhang Shuangkui. 2021. Geological characteristics and significance of sandstone–shale copper deposits in the northern section of Taihang Mountain [J]. *North China Geology*, 44(4): 15–22(in Chinese with English abstract).
- Yang Jiantu, Jiang Yanxiang, Zhou Jun, Huang Liren, Lu Xu. 2006. Analysis on reliability and accuracy of subsidence measurement with GPS technique[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, (1): 70–75 (in Chinese with English abstract).
- Yang Kui, Yang Jianbing, Jiang Bingru. 2015. Sentinel–1 satellite overview[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, (2): 24–27 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z F, Li Z W, Zhu J J, Hu J, Wang Y J, Chen G L. 2016. InSAR–based model parameter estimation of probability integral method and its application for predicting mining–induced horizontal and vertical displacements[J]. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 54(8): 4818–4832.
- Zhang L, Lu Z, Ding X, Jung H S, Feng G, Lee C W. 2012. Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin[J]. *Remote Sensing of Environment*, 117: 429–439.
- Zhang Wei. 2021. A Research on Time–Series InSAR Method for Monitoring Land Subsidence in Mining Areas [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–70 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenzhe. 2020. Research on Surface Subsidence Monitoring of Tianjin Based on SBAS–InSAR Technology[D]. Changchun: Jilin University, 1–50 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yao. 2020. Monitoring and Recognition of Datong Coalfield Subsidence Area Based on InSAR Technology [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) , 1–66(in Chinese with English abstract).
- Zhao C, Lu Z, Zhang Q, Yang C, Zhu W. 2014. Mining collapse monitoring with SAR imagery data: A case study of Datong mine, China[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 083574.
- Zhao F, Mallorqui J, Iglesias R, Gili J A, Corominas J. 2018. Landslide monitoring using multi–temporal SAR interferometry with advanced persistent scatterers identification methods and super high–spatial resolution TerraSAR–X images[J]. *Remote Sensing*, 10(6): 921.

- Zhao Feng. 2016. Study on the Method of Multi-platform SAR Datasets and MTInSAR Technique Based Ground Deformation Monitoring[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1-83 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jianjun, Li Zhiwei, Hu Jun. 2017. InSAR deformation monitoring methods and research progress[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 46(10): 1717-1733 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈祺. 2013. 星载多模式合成孔径雷达成像技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 1-158.
- 刘欢, 张云, 黄旭红, 陈东磊, 杨俊泉, 高学生. 2021. 遥感技术在内蒙古自治区中西部重点矿区开采监测中的应用[J]. 华北地质, 44(4): 55-60.
- 刘琦, 岳国森, 丁孝兵, 杨坤, 冯光财, 熊志强. 2019. 佛山地铁沿线时序 InSAR 形变时空特征分析[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 44(7): 1099-1106.
- 刘童谣. 2019. 基于 SBAS-DInSAR 技术的煤矿地表沉降监测研究[D]. 太原: 太原理工大学, 1-65.
- 潘良云, 孟令箭, 孙福利, 杨文军, 张玮, 任路, 薛慧, 周博, 杨慧. 2023. 山西大同盆地北部地热地质特征及资源潜力[J]. 中国地质, 50(6): 1632-1645.
- 齐香玲. 2007. 遥感在山西大同煤田地质灾害调查中的应用[D]. 太原: 太原理工大学, 1-69.
- 屈晓荣. 2019. 大同煤田北部中侏罗统煤中伴生元素分布特征及其地质意义[J]. 煤田地质与勘探, 47(1): 64-72.
- 全云霄, 黄岩, 陈宇, 谭琨, 欧德品, 韩福顺. 2020. D-InSAR 矿区地表沉降监测及时空分析[J]. 测绘科学, 45(3): 67-73.
- 全云霄. 2020. InSAR 矿区地表形变监测及大气延迟校正研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1-85.
- 王冬辰. 2015. 大同市土地覆盖与生态环境变化遥感分析与评价[D]. 南京: 南京大学, 1-84.
- 王鹏辉, 徐妍, 焦明连. 2017. 三轨法 D-InSAR 技术在矿区沉降监测中的应用[J]. 矿山测量, 45(6): 12-14, 18.
- 王涛, 刘甲美, 栗泽桐, 辛鹏, 石菊松, 吴树仁. 2021. 中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究[J]. 中国地质, 48(1): 21-39.
- 薛生升, 林伟, 刘宏哲, 张璐, 周新鹏, 尹道瑾, 张双奎. 2021. 太行山北段砂页岩型铜矿地质特征及其意义[J]. 华北地质, 44(4): 15-22.
- 杨建图, 姜衍祥, 周俊, 黄立人, 路旭. 2006. GPS 测量地面沉降的可靠性及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, (1): 70-75.
- 杨魁, 杨建兵, 江冰茹. 2015. Sentinel-1 卫星综述[J]. 城市勘测, (2): 24-27.
- 张玮. 2021. 时序 InSAR 方法监测矿区地面沉降的研究[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 1-70.
- 张文哲. 2020. 基于 SBAS-InSAR 技术的天津市地表沉降监测研究[D]. 长春: 吉林大学, 1-50.
- 张堯. 2020. 基于 InSAR 技术大同煤田沉陷区的监测与识别[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 1-66.
- 赵峰. 2016. 多平台时序 InSAR 技术的地表形变联合监测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1-83.
- 朱建军, 李志伟, 胡俊. 2017. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 46(10): 1717-1733.