

基于SBAS-InSAR技术的内蒙古高家梁矿区采空地地面塌陷动态特征研究

薛鑫磊, 王志乾, 乔港介, 李光柱, 白小军, 范军富, 籍进柱

Study of dynamic characteristics of ground collapse caused by mining in Gaojialiang coal mine, Inner Mongolia, using SBAS-InSAR technology

XUE Xinlei, WANG Zhiqian, QIAO Gangjie, LI Guangzhu, BAI Xiaojun, FAN Junfu, and JI Jinzhu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202402011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

SBAS-InSAR技术在河北三河市地面沉降演化特征及成因分析中的应用

Application of SBAS-InSAR technology to analyze the evolution characteristics and cause of ground subsidence in Sanhe City, Hebei Province

高启凤, 张磊, 赵萌阳, 李峰, 李海君, 湛华, 李小华, 周萌 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 97-107

基于SBAS-InSAR技术的安徽亳州市地面沉降时空分布特征与影响因素分析

Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of land subsidence in Bozhou City, Anhui Province based on SBAS-InSAR technology

何清, 魏路, 肖永红 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 81-90

时间序列InSAR技术在矿区地表形变监测中的应用

Application of time series InSAR technology in monitoring ground deformation of mining area: A case study at Huolinhe open pit mining area in Inner Mongolia

王洪明, 李如仁, 覃怡婷, 刘竹青, 顾骏 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(2): 71-78

SBAS-InSAR和PS-InSAR技术在鲁西南某线性工程沿线地面沉降成因分析中的应用

Application of SBAS-InSAR and PS-InSAR technologies in analysis of landslide subsidence along a linear infrastructure in Southwestern Shandong

张凯翔, 张占荣, 于宪煜 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 65-76

基于SBAS-InSAR技术的白鹤滩水电站库岸潜在滑坡变形分析

Deformation analysis in the bank slopes in the reservoir area of Baihetan Hydropower Station based on SBAS-InSAR technology

杨正荣, 喜文飞, 史正涛, 肖波, 周定义 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(5): 83-92

SBAS-InSAR技术在西藏江达县金沙江流域典型巨型滑坡变形监测中的应用

Application of SBAS-InSAR technology in monitoring of ground deformation of representative giant landslides in Jinsha river basin, Jiangda County, Tibet

杨成业, 张涛, 高贵, 卜崇阳, 吴华 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(3): 94-105



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202402011

薛鑫磊, 王志乾, 乔港介, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的内蒙古高家梁矿区采空地面塌陷动态特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(3): 84-94.

XUE Xinlei, WANG Zhiqian, QIAO Gangjie, et al. Study of dynamic characteristics of ground collapse caused by mining in Gaojialiang coal mine, Inner Mongolia, using SBAS-InSAR technology[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(3): 84-94.

基于 SBAS-InSAR 技术的内蒙古高家梁矿区采空地面 塌陷动态特征研究

薛鑫磊¹, 王志乾², 乔港介², 李光柱², 白小军², 范军富¹, 籍进柱^{1,3}

(1. 内蒙古工业大学资源与环境工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051; 2. 鄂尔多斯市昊华精煤有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 101700; 3. 沙旱区地质灾害与岩土工程防御自治区高等学校重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要: 采空造成的地面塌陷是井工矿开采中最常见的问题, 若不及时监测治理可能会影响到整体环境和周围建筑。针对传统沉降监测方法难以在地表高低起伏、沟谷纵横的丘陵地貌矿区开展的问题, 文章以内蒙古高家梁煤矿 203 盘区的 20314、20313 和 20312 工作面为研究对象, 收集 2018 年 4 月至 2020 年 12 月期间 12 景 Sentinel-1 雷达影像, 用短基线集差分干涉测量技术 (small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR) 进行处理, 获取采空地面塌陷平均形变速度、时序形变量等数据, 进而分析研究区动态特征。结果表明: 研究区采空地面塌陷整体平均形变速度呈现出“北部快, 南部慢”的特征, 最大形变速度为 -17.2 mm/a , 位于 20313 工作面的北部三分之一处; 采空地面塌陷时序形变量整体呈现出“由南向北, 由西向东”的特征, 符合实际工作面开采方向和顺序, 主要沉降区分布在 20314 和 20313 工作面的北部, 最大形变量达到了 -106 mm 。实践表明: SBAS-InSAR 技术在丘陵地貌的矿区开展采空地面塌陷监测具有较强的技术优势且效果良好, 为矿区采空地面塌陷监测提供方法支持。

关键词: 高家梁矿区; 丘陵地貌; SBAS-InSAR; 地面塌陷; 特征分析

中图分类号: TD325; P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)03-0084-11

Study of dynamic characteristics of ground collapse caused by mining in Gaojialiang coal mine, Inner Mongolia, using SBAS-InSAR technology

XUE Xinlei¹, WANG Zhiqian², QIAO Gangjie², LI Guangzhu², BAI Xiaojun², FAN Junfu¹, JI Jinzhu^{1,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China; 2. Ordos Haohua Cleaned Coal Co. Ltd., Ordos, Inner Mongolia 101700, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards and Geotechnical Engineering Defense in Sandy and Drought Regions at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: Ground collapse due to mining activities is a prevalent issue in underground coal mining processes. Without timely

收稿日期: 2024-02-26; 修订日期: 2024-05-10

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 矿山地质环境和灾害监测预警关键技术研究技术服务项目 (PH2023000056); 内蒙古工业大学博士科研启动项目 (BS2020024); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2024MS04025)

第一作者: 薛鑫磊 (2000—), 男, 山东烟台人, 地质工程专业, 硕士研究生, 主要从事矿山地质环境研究。E-mail: 2521188202@qq.com

通讯作者: 籍进柱 (1989—), 男, 壮族, 河北邯郸人, 地球化学专业, 博士, 副教授, 研究方向为遥感地质与矿山地质环境。

E-mail: jjjinzhu@imut.edu.cn

monitoring and control, it can adversely affect the surrounding structures and the environment. Addressing the challenges of traditional subsidence monitoring methods in the mining areas with uneven hilly terrain, this study focuses on the 20314, 20313, and 20312 working faces within the 203 panel of Gaojialiang coal mine area, Inner Mongolia. It employs 12 images of Sentinel-1 radar from April 2018 to December 2020 processed using the small baseline subset differential interferometry InSAR (SBAS-InSAR) technique to derive average displacement velocities and temporal subsidence data in the study area. The study analyzes the dynamic characteristics of subsidence in the area. The results show that the overall subsidence rate is higher in the northern part of the study area compared to the south, with the maximum subsidence rate of approximately -17.2 mm/a observed in the northern third of the 20313 working face. The subsidence pattern generally progresses from south to north and from west to east, corresponding to the actual mining sequence. Major subsidence areas are concentrated in the northern portions of the 20314 and 20313 working faces, with maximum subsidence reaching about -106 mm. The application shows that SBAS-InSAR technology has effective results and significantly technical advantages in monitoring land subsidence in hilly mining areas, thereby providing certain method support for land subsidence monitoring in mining areas.

Keywords: Gaojialiang mining area; hilly topography; SBAS-InSAR; ground collapse; characteristic analysis

0 引言

我国进入新发展阶段后,对煤炭资源仍有较大需求,采空地面塌陷问题随着煤矿的开采逐渐严重^[1],地面裂缝等地质灾害也随之发生,严重影响着矿区的安全生产^[2]。若在采空地面塌陷前期实施有效及时的措施进行监测和治理,不仅能预防大型事故,也能保护矿区生态环境的可持续发展^[3]。

水准测量、全站仪测量和 GPS 测量等作为采空地面塌陷传统的监测方式,由于受天气变化影响较大、对人力物力消耗较多、对监测环境要求较高及监测点不易维护等缺陷^[4-8],难以进行长时间、大跨度的监测^[9-11]。另外,上述监测方式的结果都是基于离散点的稀疏数据^[12],难以精确地反映区域整体的采空地面塌陷情况^[13]。

近年来,合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)迅速发展^[14-15],在采空地面塌陷监测等方面具备低成本、高精度、大范围 and 全天候等优势^[16-19],相较于传统的监测方式,该技术明显提升了监测工作效率^[20-22]。差分干涉测量技术(differential InSAR, D-InSAR)是传统 InSAR 技术的延伸^[23],该技术可基于 2 景 SAR 影像获取地表形变的空间分布特征,但是监测结果会受到各种大气等误差的影响,精度有限。为了突破 D-InSAR 技术的限制,采用连续多幅影像进行时间序列分析处理的永久散射体(persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)技术和短基线集(SBAS-InSAR)技术^[24],二者均有监测精度高、抗相位误差干扰和揭示监测目标时序形变规律等优点。但是,PS-InSAR 技术需要选取散射特性稳定、回波信号较强的 PS 点^[25],且不适合大范围地区高分辨率的沉降监测,因而在城市重点设施的形变监测方面有着较多应用^[26]。SBAS-InSAR

技术则更适合在缺少 PS 点的矿区进行监测^[27-28],近几年 SBAS-InSAR 被广泛应用在采空地面塌陷信息提取和动态特征分析等方面^[29],其监测结果的可靠性也逐渐被验证,何清等^[30]将 SBAS-InSAR 结果与同时期水准点测量值对比,结果显示,两者误差值在 1 mm 以内,其中最精确的监测值与实际值的误差仅为 5.5%,这表明 SBAS-InSAR 技术监测采空地面塌陷的结果有较强可信度。

高家梁矿区虽仅有十几年开采历史,但是采空地面塌陷问题逐渐严重,地表草地、林地、耕地及房屋建筑受到影响。同时,高家梁矿区地表多为山地丘陵,地面高低起伏、沟谷纵横,在丘陵山地中难以使用传统的采空地面塌陷监测方式,因此矿区采空地面塌陷分布位置以及形变量等具体情况的调查较少,这对矿区安全生产和环境保护存在潜在隐患。因此,本文基于哨兵一号(Sentinel-1)卫星雷达影像数据,通过 SBAS-InSAR 技术,对高家梁矿区开展采空地面塌陷监测,并对 20314、20313 和 20312 这 3 个工作面的采空地面塌陷动态特征进行研究,为高家梁矿区的地质灾害防治工作提供数据、方法支持和措施建议。

1 研究区概况

高家梁矿区处于内蒙古自治区鄂尔多斯市东北部,矿区范围为一近似规则的长方形(图 1),东西宽约 4.56 km,南北长约 10.55 km,面积 47.01 km²,开采标高 1 330 ~ 1 040 m,开采方式为井工开采,采用长壁后退式采煤方法,综合机械化采煤工艺,全部垮落法顶板管理。工作面采用后退式回采,开采面积约为 47.01 km²。

矿区气候特征属于冬寒夏凉、日照雨少的干旱半干旱的温带高原大陆性气候。土地利用类型以耕地、林地和草地为主,分别占矿区总面积的 4.28%、14.52%

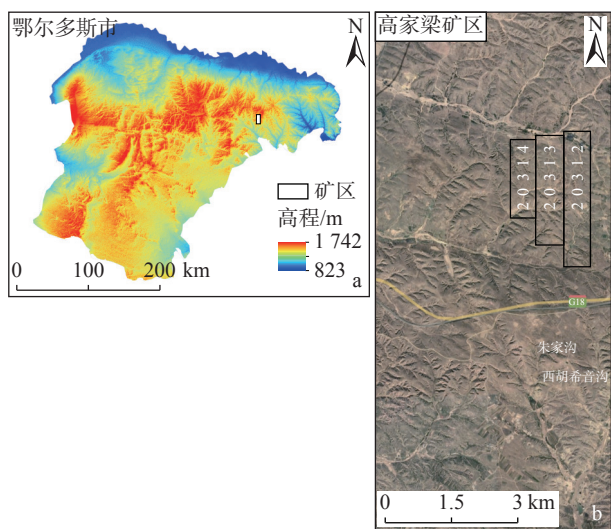


图 1 高家梁矿区位置

Fig. 1 Location of Gaojialiang mining area

和 74.27%, 其余土地利用类型为房屋建筑。井田处于东胜煤田的东缘, 区域地层属于华北地层区鄂尔多斯分区, 地层倾角小于 5° , 区域构造总体为一向南西倾斜的近水平产状的单斜构造, 由于新生代地质应力作用强

烈, 因此研究区地貌属构造剥蚀丘陵区, 地形起伏较大, 沟谷发育, 呈树枝状分布。

矿区煤层顶底板岩性主要为砂质泥岩、粉砂岩和细粒砂岩等软质岩, 地质构造为泥质结构和碎裂结构。经过十几年的开采, 采空区引发了一定程度的地面塌陷伴生地裂缝, 无明显塌陷坑, 引发地面塌陷及沉陷地质灾害面积 6.73 km^2 。裂缝宽度 $10 \sim 30 \text{ cm}$, 局部可达 50 cm , 裂缝间距约 $15 \sim 40 \text{ m}$, 裂缝可见深度 $0.50 \sim 2.00 \text{ m}$, 长度 $100 \sim 200 \text{ m}$, 局部塌陷裂缝较为严重, 呈离层错动台阶状, 台阶落差一般为 $0.5 \sim 1.5 \text{ m}$ 。矿区目前形成 36 处采空区, 面积共计 12.41 km^2 , 其中就包含了位于矿区东部的 20314、20313 和 20312 工作面。

本文选高家梁矿区 203 盘区的 3 个工作面为研究对象(图 1), 开采顺序依次为 20314、20313、20312, 走向为南北走向。各工作面的开、停采时间、开采深度、开采厚度、采深采厚比和工作面长、宽等详细情况见表 1。由于获取的研究区 SAR 数据最早时间为 2018 年 4 月, 为了较为完整监测 3 个工作面的沉降情况, 本文选取 2018 年 4 月到 2020 年 12 月作为监测时间段。

表 1 工作面详细情况

Table 1 Details of working faces

工作面	长/m	宽/m	开采时间	停采时间	开采深度/m	煤层厚度/m	采深采厚比
20314	1 600	280	2017年	2018年初	171.30 ~ 186.76	3.98 ~ 3.99	42.9 ~ 46.9
20313	2 000	290	2018年初	2019年初	178.69 ~ 189.98	4.20 ~ 4.24	42.5 ~ 44.8
20312	2 600	290	2019年初	2019年末	140.45 ~ 205.07	3.78 ~ 4.24	33.1 ~ 54.3

2 数据和方法

2.1 数据

2.1.1 SAR 数据

选取 2018 年 4 月—2020 年 12 月期间 12 景同轨多时相的 C 波段的 Sentinel-1 升轨宽幅单视复数(single look complex, SLC)雷达影像为数据源, 极化方式为 VV 极化, 所选 SAR 影像区域位置图见图 2(a)。本次研究所用的 SAR 影像的编号、轨道号、日期、成像模式、极化方式和飞行方式等详细信息见表 2。

2.1.2 DEM 数据

所用外部数字高程模型(digital elevation model, DEM)是美国国家航空航天局(NASA)向公众发放的 30 m 空间分辨率的 SRTM DEM 数据, 见图 2(b), 在 SBAS-InSAR 处理中用于去除平地效应和地形相位。

2.2 研究方法

2.2.1 SBAS-InSAR 技术原理

SBAS-InSAR 技术原理可简述为选取等时间间隔

的 $N+1$ 景 SAR 影像, 依据设定的时间与空间基线参数, 自动选取最符合条件的 1 景影像作为公共主影像, 剩下的 N 景作为辅影像与公共主影像配准。得到若干个短基线组合, 然后差分干涉处理每个组合内的像对, 假设 t_c 为公共主影像对应时刻, t_a 和 t_b 时刻相对于 t_c 时刻所获

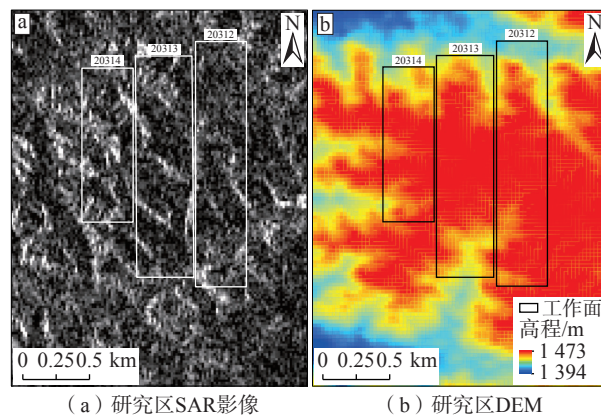


图 2 研究区 SAR 影像和 DEM

Fig. 2 SAR image and DEM of the study area

表 2 SAR 数据参数表
Table 2 Parameters of SAR data

编号	轨道号	日期	成像模式	极化方式	飞行方式	入射角/(°)
1	026158	2018-04-12	IW	VV	升轨	42.02
2	026683	2018-07-05	IW	VV	升轨	42.02
3	027208	2018-10-09	IW	VV	升轨	42.02
4	027558	2018-12-08	IW	VV	升轨	42.02
5	028083	2019-03-02	IW	VV	升轨	42.02
6	028433	2019-06-06	IW	VV	升轨	42.02
7	028958	2019-09-10	IW	VV	升轨	42.02
8	029308	2019-11-21	IW	VV	升轨	42.02
9	029833	2020-02-13	IW	VV	升轨	42.02
10	030008	2020-04-25	IW	VV	升轨	42.02
11	030183	2020-09-04	IW	VV	升轨	42.02
12	030708	2020-11-15	IW	VV	升轨	42.02

取的第*i*幅差分干涉图的任意像元(*x*,*y*)的差分干涉相位可表示为:

$$\delta\varphi_i(x,y)=\varphi(t_b,x,y)-\varphi(t_a,x,y)=\frac{4\pi}{\lambda}[\mathrm{d}(t_b,x,y)-\mathrm{d}(t_a,x,y)]+\Delta\varphi_i^{\mathrm{topo}}+\Delta\varphi_i^{\mathrm{atm}}+\Delta\varphi_i^{\mathrm{noi}}$$

式中: $\varphi(t_b,x,y)$ —— t_b 时刻对应的相位值;
 $\varphi(t_a,x,y)$ —— t_a 时刻对应的相位值;

λ ——雷达波长;
 $\mathrm{d}(t_b,x,y)$ —— t_b 时刻相对于参考影像在雷达视线方向形变量;
 $\mathrm{d}(t_a,x,y)$ —— t_a 时刻相对于参考影像在雷达视线方向的形变量;
 $\Delta\varphi_i^{\mathrm{topo}}$ 、 $\Delta\varphi_i^{\mathrm{atm}}$ 、 $\Delta\varphi_i^{\mathrm{noi}}$ ——地形残差相位、大气延迟相位、噪声相位。

后续通过建立多项式去除地形残差,再经过相位解缠估算形变速度,进而对速度进行时间域上积分得到形变量。

2.2.2 SBAS-InSAR 关键步骤

- (1)生成连接图:设置空间基线阈值和时间基线阈值分别为临界基线长度的 45% 和 72 d,共生成若干组干涉像对,其中配准时的公共主影像成像时间为 2019 年 9 月 10 日。图 3 为干涉像对的时空基线具体连接方式,黄色节点和绿色节点分别表示公共主影像和其他时间的影像,连接节点的线段为一个干涉像对。
- (2)干涉 workflow:差分干涉处理上述(1)步骤中生成的干涉对,包括干涉图的去地形、去平、滤波和解缠等具体操作。经过不断调试,选取金斯坦滤波去除时空失相干噪声,解缠算法选择最小费用流法。

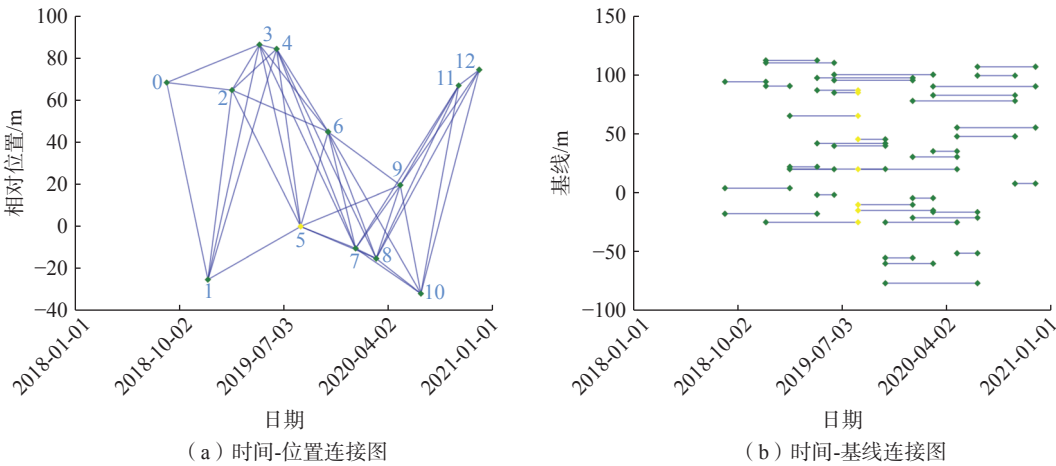


图 3 时间-位置和时间-基线连接图
Fig. 3 Time-position and time-baseline plot

- (3)轨道精炼和重去平:选取形变区远处的形变量较小的稳定的地面控制点(ground control points, GCP)用于重去平,利用卫星精密轨道(precise orbit ephemerides, POD)数据来进行轨道精炼,进行去除残余地形相位等操作。
- (4)反演:用多项式模型估算残余地形和地面形变速度,进而去除大气相位,对相干性在 0.2 以上的像元执行相位解缠,反演出平均形变速度和累计形变量。

- (5)地理编码:将 SBAS-InSAR 结果由 SAR 坐标系系统转换为地理坐标系。

2.2.3 技术路线

通过 SBAS-InSAR 技术处理 Sentinel-1 雷达影像,获取研究区采空地地面塌陷时间序列以及平均形变速度数据,并对采空地地面塌陷动态特征分析,具体的技术路线见图 4。

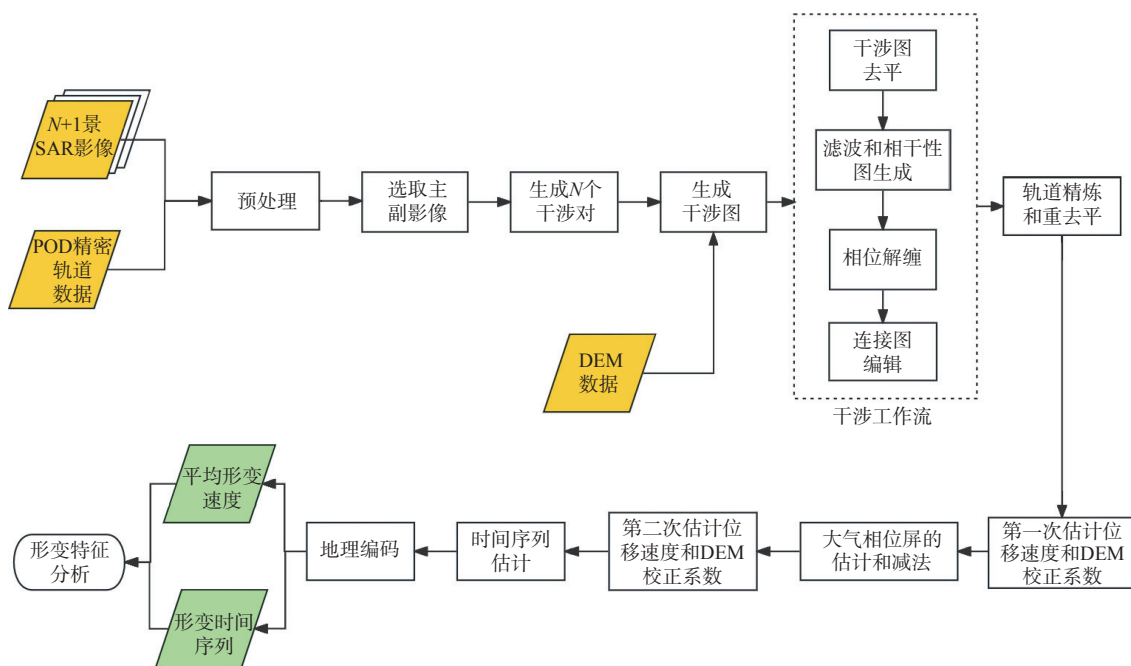


图 4 技术路线图

Fig. 4 Technology roadmap

3 结果

3.1 采空地面塌陷平均形变速度

经 SBAS-InSAR 处理, 获取 3 个工作面的平均形变

速度(图 5)(形变速度为负值时表示沉降), 其中由暖色到冷色分别代表了形变速度由慢到快, 白色区域是由于地形因素导致的失相干地区。SBAS-InSAR 技术所获取的地面形变是雷达视线(LOS)方向, 需据 SAR 成像

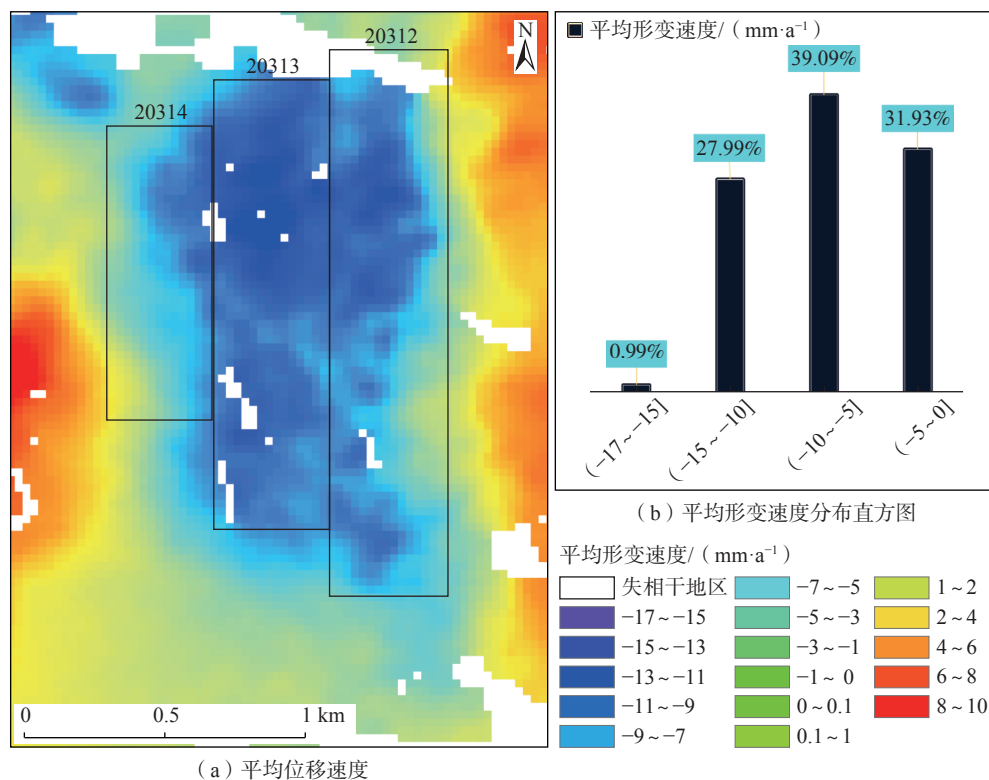


图 5 研究区平均形变速度及分布直方图

Fig. 5 Average displacement rate and distribution histogram of the study area

的几何参数将视线方向转换成垂直方向: 设 LOS 入射角为 θ , 则视线方向的沉降值是 ΔLOS , 垂直向的沉降值 $\Delta h = \Delta\text{LOS}/\cos\theta$ 。

整体来看, 203 盘区平均形变速度较快的区域位于盘区的中北部, 最大速度约为 -17.2 mm/a 。每个工作面的平均形变速度特征各不相同, 20314 工作面北部平均形变速度较快, 大多为 $-10 \sim -15\text{ mm/a}$, 而南半部分形变速度较慢, 为 $-1 \sim -5\text{ mm/a}$; 20313 工作面是整体形变速度最大的工作面, 形变速度的最大值区域也处于该工作面; 20312 工作面也呈现出北部快, 南部慢的特征, 形变速度较大。

为了进一步分析 203 盘区的平均形变速度特征, 统计得到速度分布直方图(图 5), 由图 5 可知, 速度在 $(-10, 0]\text{ mm/a}$ 的区域占塌陷总面积的 71%, 速度大于 -10 mm/a 的区域占比为 29%。

3.2 采空地面塌陷时序形变量

通过 SBAS-InSAR 技术, 获取了监测时间段内各时期的采空地面塌陷相对累计形变量(图 6), 研究区采空地面塌陷范围和形变量随时间不断扩张和增大, 塌陷情况整体呈现出“由南向北, 由西向东”的特征, 与工作面实际开采方向和顺序一致。

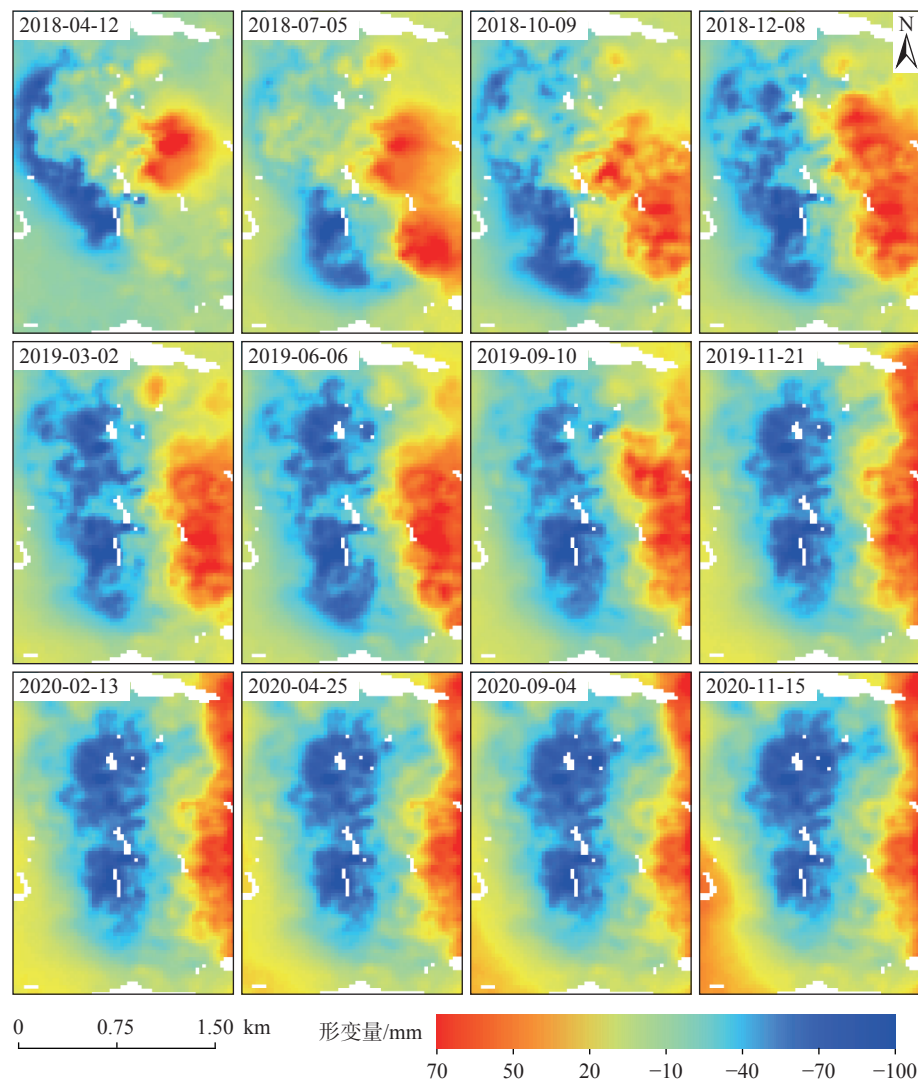


图 6 研究区采空塌陷时序图

Fig. 6 The collapse sequence in the study area

截至 2020 年末, 203 盘区的 3 个工作面相对的累计形变量如图 7 所示, 采空地面塌陷都比较严重, 主要塌陷区分布在 20314 和 20313 工作面的北部, 最大形变量

达到了 -106 mm 左右。

统计得到形变量分布直方图(图 7), 呈正态分布, 研究区绝大部分区域形变量处于 $-20 \sim -90\text{ mm}$, 占研究

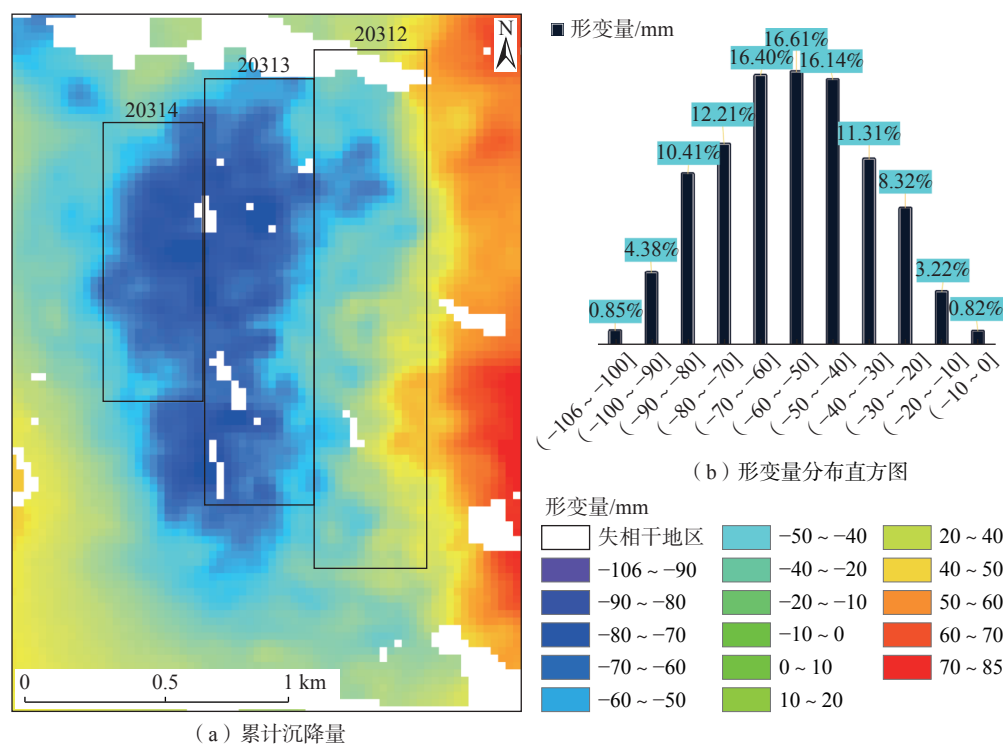


图 7 研究区累计形变量及分布直方图

Fig. 7 Cumulative subsidence and distribution histogram of the study area

区沉降区域的 90.73%; 形变量处于 $-90 \sim -106$ mm 的沉降较大区域, 占比 5.23%; 形变量处于 $0 \sim -20$ mm 的沉降较小区域最少, 仅占比 4.04%。

为进一步分析 3 个工作面的采空地面塌陷特征, 分别沿着平行于 3 个工作面的开采方向和垂直于开采方向分别选取 4 条剖面观测线, 其中南北向的观测线分别命名为 Z1、Z2 和 Z3, 东西向的观测线命名为 Q1(图 8),

分别绘制各测线累计形变量曲线。

由南北向剖面线累计沉降曲线(图 9)可知, 随着时间的推移, 20312 和 20314 工作面剖面线的形变量由南向北不断增大, 20313 工作面剖面线的形变量由北向南不断增大, 与实际开采状况一致。20314 工作面已于 2018 年 4 月之前停采, 因此该工作面于观测时间段的沉降情况主要受到临近的工作面开采活动的影响。2018 年 4 月 12 日至 2018 年 12 月 8 日是 20313 工作面的开采时间段, 从沉降曲线来看, 曲线间隔明显增大, 反映了工作面沉降剧烈, 沉降中心由北向南移动, 形成了明显的漏斗形状的沉降盆地, 这说明此时 20313 工作面的开采活动已经影响到了上覆地面, 该工作面的开采沉降也影响到了临近工作面, 在 20314 和 20312 工作面相应时段的沉降曲线间隔也都明显变大。2019 年 3 月 2 日至 2019 年 11 月 21 日是 20312 工作面的开采时间段, 沉降中心由南向北移动, 最终在工作面北半部分形成了明显的漏斗形状的沉降盆地, 20314 和 20313 工作面沉降曲线上的间隔增大也正是因为受到 20312 工作面开采沉降的影响。在 2019 年 11 月 21 日之后, 附近再无开采活动的影响, 203 盘区处于沉降缓慢阶段, 直至 2020 年 11 月 27 日, 工作面沉降趋于稳定, 20314、20313 和 20312 工作面剖面线最大形变累计量分别为 -32 、 -70 、 -76 mm, 分别位于工作面的北边界和由北向

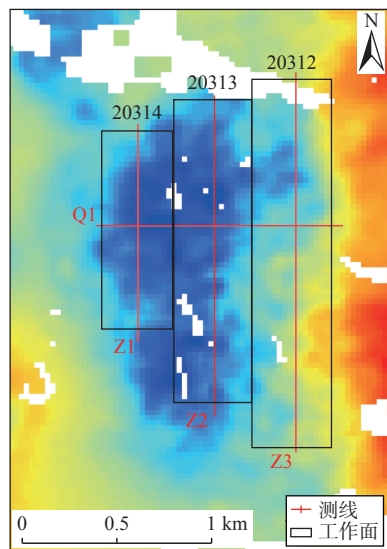


Fig. 8 Survey line layout map

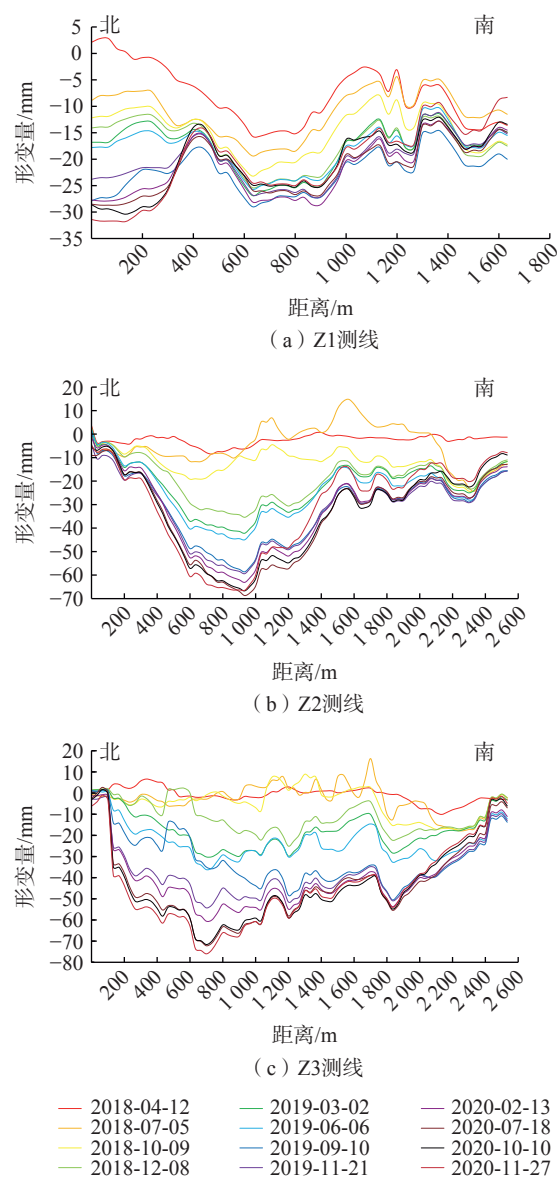


图 9 20314、20313 和 20312 工作面南北向测线(Z1—Z3)累计沉降曲线图

Fig. 9 Cumulative subsidence curve chart of north-south survey lines (Z1, Z2, Z3) for working faces 20314, 20313 and 20312

南三分之一处。

由东西向测线(Q1)累计沉降曲线(图 10)可知, 东西方向上, 整体时序曲线成“V”字型, 呈现出沉降盆地的明显特征, 图中两次沉降曲线间隔较大的剧烈沉降期发生在 2018 年 4 月 12 日—2019 年 3 月 2 日和 2019 年 6 月 6 日—2019 年 11 月 21 日分别与 20313 和 20312 工作面开采停采时间吻合。其中, 20314 工作面下沉量很小, 下沉不明显; 20313 工作面下沉量最大, 明显大于两侧, 处于沉降中心, 最大值达到了 60 mm; 20312 工作面下沉量较小, 处于塌陷盆地的边缘位置, 下沉曲线陡峭, 下沉量变化快。

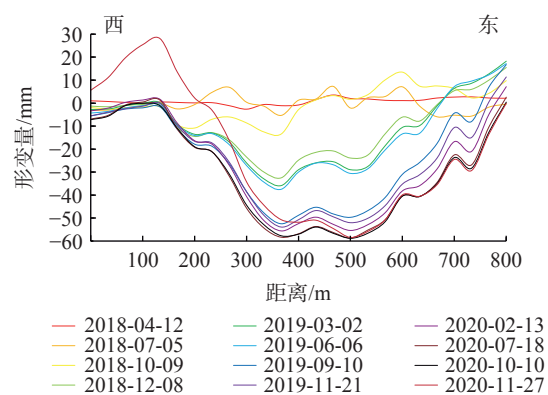
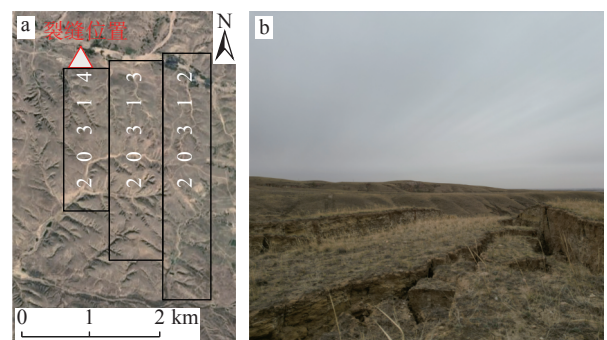


图 10 东西向测线(Q1)累计沉降曲线图

Fig. 10 Cumulative subsidence curve chart of east-west survey line (Q1)

3.3 采空区地面验证

为了对 SBAS-InSAR 结果进行验证, 前往高家梁矿区 203 盘区的沉降情况进行实地探查。从上述累计沉降曲线图可知, 采空区的沉降呈现为漏斗状, 实地探查过后发现, 大部分区域地表沉降肉眼无法分辨, 但是在沉降漏斗边缘的形变量变化较大的区域发现了明显的沉降裂缝。本次探查到的典型地表裂缝位于 20314 工作面北边界附近, 见图 11(a), 与上述剖面沉降分析中 20314 工作面的最大沉降位置吻合。从现场拍摄的沉降裂缝照片来看, 见图 11(b), 裂缝规模较大, 沉降区地面标高下降明显, 对地表的草地造成了严重破坏, 对附近房屋及地面人员存在着安全隐患。



(a) 研究区典型裂缝位置 (b) 典型裂缝照片

图 11 研究区典型裂缝位置和典型裂缝照片

Fig. 11 Location of typical cracks in the study area and photo of typical cracks

4 讨论

总体来说, 监测期内高家梁矿区 203 盘区整体地质情况相对稳定, 采空区地面塌陷以缓慢沉降为主, 局部地区有较快的沉降, 煤矿开采是造成采空地面塌陷的主

导因素,井工开采形成的采空区,使得煤层上覆地层岩体受重力作用发生弯曲、断裂和垮落,进而影响到地表,形成采空地面塌陷。然而,203 盘区呈现出采空地面塌陷不均匀,这是因为煤层上覆地层岩性是强度低、易破碎的砂质泥岩和粉砂岩等软质岩,随着顶底板的掉落,围岩发生指向采空区的变形,最终在地表形成裂缝和塌陷坑等不连续变形。

每个工作面的采空地面塌陷特征都不尽相同。20314 工作面作为最早开采的工作面,开采时间为 2017 年,而监测时间是 2018 年 4 月开始,这使得 20314 工作面从开采到 2018 年 4 月这段时间的采空地面塌陷情况未能监测,由于 20314 工作面是由南向北开采,因此这段时间的地面塌陷主要发生在工作面南部,这也解释了 20314 工作面的平均形变速度为何呈现“北部快,南部慢”的特征,以及剖面形变量曲线呈现出沉降漏斗不明显且北部形变量大的特征。20313 工作面位于其余两工作面之间,会受到其余两个工作面采空地面塌陷的叠加影响,因此 20313 工作面既是平均形变速度最快的工作面,又是累计形变量最大的工作面。20312 工作面的采空地面塌陷也被完整监测,因此平均形变速度较快且形变量较大,与 203 盘区整体采空地面塌陷形变量特征一致,呈现出“北部大,南部小”的特征。

203 盘区的塌陷中心位于距离北部边界约 900 m、距离东部边界约 300 m 处,沉降漏斗形成的盆地呈现近似椭圆形,范围是距 203 盘区北边界 200 ~ 1500 m、距东边界 100 ~ 600 m,实地验证发现的典型的裂缝就是在 203 盘区北部边界附近,可以预计未来的裂缝等地质灾害的发生也很有可能在这范围内,矿区应对此范围内的地质灾害进行细致排查和治理,同时加强监测,谨防地质灾害的发生。

5 结论

(1)203 盘区平均形变速度呈现出“北部快,南部慢”的特征,速度在 $(-10, 0]$ mm/a 的区域占盘区总面积的 71%,速度在 -10 mm/a 以上的区域占盘区总面积的 29%,研究区在监测时段的采空地面塌陷以缓慢沉降为主,局部地区有较快的沉降,最大形变速度约为 -17.2 mm/a,位于 20313 工作面北部三分之一区域。

(2)研究区沉降范围和形变量随时间不断扩张和增大,沉降情况整体呈现出“由南向北,由西向东”的特征,与实际的工作面开采方向和顺序一致,主要沉降区分布在 20314、20313 盘区北部,最大形变量达到了 106 mm 左右,应当作为矿区后续灾害治理的重点关注区域,谨

防地裂缝或者地面塌陷等地质灾害的产生。

(3)在对试验结果进行实地验证后,发现 203 盘区产生裂缝的实际位置与试验结果基本吻合,表明了 SBAS-InSAR 技术也可以良好地适用于地表高低起伏、沟谷纵横的丘陵地貌的矿区,且具备较强的技术优势,可以给同类型矿区采空地面塌陷监测提供技术支持。

参考文献(References):

- [1] 王毅,黄同新,汪宝存,等.巨野矿区 Sentinel-1A 雷达影像 PS-InSAR 地面形变监测[J].自动化与仪器仪表,2019(7): 120 - 123. [WANG Yi, HUANG Tongxin, WANG Baocun, et al. Surface deformation monitoring of PS-InSAR in Juye mining based on Sentinel-1A radar images[J]. Automation & Instrumentation, 2019(7): 120 - 123. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 范立民,吴群英,彭捷,等.黄河中游大型煤炭基地地质环境监测思路和方法[J].煤炭学报,2021,46(5): 1417 - 1427. [FAN Limin, WU Qunying, PENG Jie, et al. Thoughts and methods of geological environment monitoring for large coal bases in the middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1417 - 1427. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 黄翌,汪云甲,王猛,等.黄土高原山地采煤沉降对土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(1): 228 - 235. [HUANG Yi, WANG Yunjia, WANG Meng, et al. Effect of mining subsidence on soil erosion in mountainous area of the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 228 - 235. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 马飞.矿区沉降 InSAR 监测与预测方法研究[D].西安:长安大学,2020. [MA Fei. Research on in sar monitoring and prediction method of mine subsidence[D]. Xi'an: Changan University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 牛敏杰,师芸,张童康,等.基于 SBAS-InSAR 技术的多工作面矿区地表形变特征[J].中国科技论文,2022,17(5): 581 - 588. [NIU Minjie, SHI Yun, ZHANG Tongkang, et al. Surface deformation characteristics of multiples working faces mining area based on SBAS-InSAR technology[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(5): 581 - 588. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 滕超群.基于 InSAR 技术的形变灾害监测预测方法及其应用研究[D].淮南:安徽理工大学,2021. [TENG Chaoqun. Research on deformation disaster monitoring and prediction method based on InSAR and its application[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]

- [7] 齐麟. 基于时序 InSAR 技术的北京平原区地面沉降监测与分析 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020. [QI Lin. Ground subsidence monitoring and analysis in Beijing Plain area based on time series InSAR technique [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘文涛. 基于时序 InSAR 技术的矿区地面沉降监测与分析 [D]. 西安: 西安科技大学, 2020. [LIU Wentao. Monitoring and analysis of land subsidence in mining area based on time series InSAR technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘国祥. InSAR 原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2019. [LIU Guoxiang. Principle and application of InSAR [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)]
- [10] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202 – 2212.
- [11] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375 – 2383.
- [12] 马顶. 基于 SBAS-InSAR 的山西省西山煤田地面沉降监测及对地表状况的影响 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022. [MA Ding. Ground subsidence monitoring based on SBAS-InSAR technology in Xishan coalfield, Shanxi Province and its influence on surface condition [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 汪磊. 基于 SAR 技术的矿区大梯度变形时序监测 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017. [WANG Lei. Time-series monitoring of large gradient mining subsidence based on SAR technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张椿雨, 于冰, 荆创利, 等. SBAS-InSAR 及其应用于准噶尔盆地独山子地区地表形变监测 [J]. 测绘, 2022, 45(6): 247 – 252. [ZHANG Chunyu, YU Bing, JING Chuangli, et al. SBAS-InSAR and its application for surface deformation monitoring in Dushanzi area of Junggar Basin [J]. Surveying and Mapping, 2022, 45(6): 247 – 252. (in Chinese with English abstract)]
- [15] ZEBKER H A, ROSEN P. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake [C]. //Proceedings of IGARSS '94 - 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena, CA, USA. IEEE, 1994: 286 – 288.
- [16] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. *Nat*, 1993, 364(6433): 138 – 142.
- [17] 鲁魏, 杨斌, 杨坤. 基于时序 InSAR 的西南科技大学地表形变监测与分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 61 – 72. [LU Wei, YANG Bin, YANG Kun. Surface deformation monitoring and analysis of southwest university of science and technology based on time series InSAR [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 61 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 朱琳, 宫辉力, 李小娟, 等. 区域地面塌陷研究进展与展望 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 167 – 177. [ZHU Lin, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Research progress and prospect of land subsidence [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 167 – 177. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 葛伟丽, 李元杰, 张春明, 等. 基于 InSAR 技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降化特征及成因分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 198 – 206. [GE Weili, LI Yuanjie, ZHANG Chunming, et al. An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 198 – 206. (in Chinese with English abstract)]
- [20] NATSUAKI R, NAGAI H, MOTOHKA T, et al. SAR interferometry using ALOS-2 PALSAR-2 data for the *M*_w 7.8 Gorkha, Nepal earthquake [J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, 68(1): 15.
- [21] GLENN N F, CARR J R. The use of geostatistics in relating soil moisture to RADARSAT-1 SAR data obtained over the Great Basin, Nevada, USA [J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(5): 577 – 586.
- [22] 李新新, 沈震. 基于 GM(1, 1) 模型的矿山开采沉陷预测 [J]. 北京测绘, 2015(6): 62 – 64. [LI Xinxin, SHEN Zhen. Forecast of mining subsidence based on GM(1, 1) model [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2015(6): 62 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717 – 1733. [ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717 – 1733. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 朱建军, 杨泽发, 李志伟. InSAR 矿区地表三维形变监测与预计研究进展 [J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 135 – 144. [ZHU Jianjun, YANG Zefa, LI Zhiwei. Recent progress in

- retrieving and predicting mining-induced 3D displacements using InSAR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(2): 135 – 144. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 尹承深, 刘全明, 王福强. 基于 Sentinel-1A SAR 数据的呼和浩特城区地表形变分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 73 – 81. [YIN Chengshen, LIU Quanming, WANG Fuqiang. Surface deformation analysis of Hohhot urban area based on SAR data from Sentinel-1A [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(2): 73 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 莫莉, 王贤能. 基于 PS-InSAR 技术的后海深槽地面及建筑物形变监测分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 68 – 74. [MO Li, WANG Xianneng. Monitoring and analysis of ground and building settlement of deep trough in Houhai based on PS-InSAR technology [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(1): 68 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 胡凤鸣, 伍吉仓. 时序合成孔径雷达干涉测量的多级化解算 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 1817 – 1824. [HU Fengming, WU Jicang. A multi-level approach for multi-temporal interferometric synthetic aperture radar [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(12): 1817 – 1824. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 熊文秀, 冯光财, 李志伟, 等. 顾及时空特性的 SBAS 高质量点选取算法 [J]. 测绘学报, 2015, 44(11): 1246 – 1254. [XIONG Wenxiu, FENG Guangcai, LI Zhiwei, et al. High quality targets selection in SBAS-InSAR technique by considering temporal and spatial characteristic [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(11): 1246 – 1254. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 张童康, 师芸, 王剑辉, 等. InSAR 和改进支持向量机的沉陷预测模型分析 [J]. 测绘科学, 2021, 46(11): 63 – 70. [ZHANG Tongkang, SHI Yun, WANG Jianhui, et al. Analysis of subsidence prediction model based on InSAR and improved support vector machine [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(11): 63 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 何清, 魏路, 肖永红. 基于 SBAS-InSAR 技术的安徽亳州市采空地面塌陷时空分布特征与影响因素分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(5): 81 – 90. [HE Qing, WEI Lu, XIAO Yonghong. Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of land subsidence in Bozhou City, Anhui Province based on SBAS-InSAR technology [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(5): 81 – 90. (in Chinese with English abstract)]