引文格式：徐誉维,张熠斌,徐思瑜,等. 利用时序InSAR技术的地面沉降监测及时空演化态势分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):23-28. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.08.005

利用时序InSAR技术的地面沉降监测及时空演化态势分析
——以白山市辖区浑江煤田为例

徐誉维[1]，张熠斌[1*]，徐思瑜[1]，王浩浩[2]，杨　爽[3]，王　雪[4]
（1. 吉林省地质环境监测总站（吉林省地质灾害应急技术指导中心），吉林 长春 130061；2. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心，河北 廊坊 065000；3. 中共锦州市委党校，辽宁 锦州 121000；4. 咸阳师范学院，陕西 咸阳 712099）

摘　要：随着习近平生态文明思想的全面深入推进和山水林田湖草沙一体化统筹治理的提出，以生态文明为指导思想的煤炭采空区矿山生态修复与保护工作越来越重要，对采煤区的地表形变进行时序监测在地质灾害防灾减灾和矿山生态修复工作中具有重要意义。以白山市辖区（浑江区、江源区）浑江煤田作为研究对象，获取2017年1月18日—2021年12月11日共131景C波段Sentinel-1B降轨数据，采用小基线集（SBAS-InSAR）技术方法对研究区地面沉降进行时序监测，分析地面沉降速率和沉降量的发展规律，并用光学遥感影像和实地调查验证监测结果的可靠性。结果表明，监测期间研究区内形成5处明显的地面沉降区，沉降区总面积8.96 km^2。其中，浑江研究区地面沉降最为严重，最大沉降速率为-163.45 mm·a^{-1}，最大累积沉降量为-770.90 mm，且沉降呈持续增加的趋势。5个沉降区地面沉降程度为重度、极重度的区域占沉降区总面积的19.64%，这说明监测期间沉降区内只有少部分区域地面沉降较严重，未来需对地面沉降程度为重度、极重度区域重点关注。

关键词：SBAS-InSAR；地面沉降；浑江煤田；白山市辖区；浑江区；江源区
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0023-06

Surface Subsidence Monitoring and Spatio-temporal Evolution Situation Analysis Based on Time Series InSAR Technology: A Case Study of Hunjiang Coalfield in Baishan City

XU Yuwei[1], ZHANG Yibin[1], XU Siyu[1], WANG Haohao[2], YANG Shuang[3], WANG Xue[4]
(1. Jilin Geological Environment Monitoring Station (Jilin Geological Disaster Emergency Technical Guidance Center), Changchun 130061, China;
2. Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065000, China;
3. Party School of Jinzhou Committee of C.P.C, Jinzhou 121000, China;
4. Xianyang Normal University, Xianyang 712099, China)

Abstract: Ecological restoration and protection in coal mining areas with ecological civilization as the guiding ideology is becoming more and more important. The time series monitoring of surface deformation in coal mining areas is of great significance in geological disaster prevention and reduction and mine ecological restoration. Taking Hunjiang coal field in Baishan District (Hunjiang District and Jiangyuan District) as the research object, we obtained a total of 131 C-band Sentinel-1B descending orbit data from January 18, 2017 to December 11, 2021. We used small baseline set (SBAS-InSAR) technology to monitor the surface subsidence in the study area in time series, analyzed the development law of surface subsidence rate and amount, and verified the reliability of monitoring results by optical remote sensing image and field investigation. The results show that there are 5 obvious surface subsidence areas in the study area during the monitoring period, and the total subsidence area is 8.96 km^2. Among them, the surface subsidence in Hunjiang research area is the most serious, the maximum subsidence rate is −163.45 mm/a, the maximum cumulative settlement is −770.90 mm, and the settlement shows a trend of continuous increase. The areas with severe and extremely severe surface subsidence accounted for 19.64% of the total area of subsidence area, indicating that only a few areas in the subsidence area had serious land subsidence during the monitoring period, and the areas with severe and extremely severe surface subsidence should be focused on in the future.

Key words: SBAS-InSAR, surface subsidence, Hunjiang coalfield, Baishan City district, Hunjiang District, Jiangyuan District

随着习近平生态文明思想的全面深入推进和山水林田湖草沙一体化的统筹治理，矿山生态修复工作显得愈益紧迫和必要。以生态文明为指导思想，把绿色发展理念贯穿于矿产资源保护与利用的全过程，扎实推进矿山生态修复的可持续发展工作。努力把绿水青山建得更美，把金山银山做得更大，使绿色成为“白

项目来源：陕西省科学技术厅基金资助项目（2021JQ-819）。
第一作者简介：徐誉维（1994—），硕士，工程师，主要从事水工环遥感应用与土地管理等工作，E-mail：392415060@qq.com。
通信作者：张熠斌（1983—），硕士，正高级工程师，主要从事水工环遥感与地质环境信息化等工作，E-mail：14345427@qq.com。

山黑水”最美的发展底色。因此，对煤炭采空区进行地表形变监测，掌握地表形变时序变化特征和规律，对地质灾害防灾减灾和矿山生态修复具有重要意义。

近年来，InSAR技术以其覆盖范围广、精度高、全天时、全天候等技术优势，已成功应用于地面沉降、不稳定斜坡等地质灾害的识别和监测[1-2]。差分合成孔径雷达干涉测量（differential interferometric synthetic aperture Rader，D-InSAR）技术可以通过两期数据快速获取研究区域形变信息，具有大范围监测、全天时全天候、覆盖面广的特点，但是受时空失相干、大气延迟等因素影响，在长时序地面形变监测应用中受限[3-4]。随着永久散射体（permanent scatters InSAR，PS-InSAR）[5]和小基线集（small baseline subset InSAR，SBAS-InSAR）[6-9]为代表的时序InSAR的技术不断地发展，弥补了D-InSAR技术的不足，测量精度也得以提高。尤其是小基线集（SBAS-InSAR）通过较短的时空基线组合方式进行干涉处理，减弱时间和空间失相干给形变结果带来的干扰，其形变结果更加明显和直观[10]，是目前对大范围、长时序地面沉降等地质灾害识别与监测的有效方法之一[11-18]。

吉林省白山地区的浑江煤田开采历史悠久，是吉林省重要采煤区之一[19]。目前未见有学者对吉林省白山市浑江煤田进行SBAS-InSAR监测并分析地面沉降的演化特征。因此，本文将白山市辖区（浑江区、江源区）浑江煤田作为研究区，并获取了研究区范围内2017年1月18日—2021年12月11日的131景C波段Sentinel-1B降轨数据，采用SBAS-InSAR方法对研究区内地表形变进行时序监测，分析地表形变特征，结合光学影像和实地调查验证监测结果的可靠性，为研究区开发利用煤炭资源、地质灾害防灾减灾和矿山生态修复工作提供参考。

1 SBAS-InSAR技术原理

小基线集（SBAS-InSAR）技术是Berardino等[20]提出的时间序列分析的新方法，该方法通过提取短时空基线进行差分InSAR干涉，能降低相位噪声和误差，较好的克服空间失相干。

假定已获得时间序列为 $t_0, t_1, \cdots, t_N$ 的 $N+1$ 幅SAR影像，将每一幅影像均与其他影像相连组成干涉像对，不存在孤立影像。所有符合条件的影像进行连接组合，对所有像对进行干涉处理，最终生成 K 组差分干涉图，K 满足条件如式（1）所示：

$$\frac{N+1}{2} \leqslant K \leqslant \frac{(N+1)N}{2} \tag{1}$$

设 t_a、t_b 为形变监测期间任意两景影像成像时间，对两景影像进行差分干涉处理生成差分干涉图 j，则消除平地相位信息的干涉图 j 上任意一点的相位信息可以表示为：

$$\Delta\varphi_j = \varphi_{t_a} - \varphi_{t_b} \approx \frac{4\pi}{\lambda}\left(d_{t_a} - d_{t_b}\right) + \Delta\varphi_{j_{\text{top}}} + \Delta\varphi_{j_{\text{atm}}} + \Delta\varphi_{j_{\text{noise}}} \tag{2}$$

式中，λ 为雷达波长；d_{t_a} 和 d_{t_b} 分别为观测点从 t_0 时刻到 t_a 和 t_b 时刻在雷达视线方向上的累积形变；$\Delta\varphi_{j_{\text{top}}}$、$\Delta\varphi_{j_{\text{atm}}}$、$\Delta\varphi_{j_{\text{noise}}}$ 分别为成像间隔内由于高程误差、大气延迟以及其他噪声影响产生的相位差，其中 $\Delta\varphi_{j_{\text{top}}}$ 如式（3）所示：

$$\Delta\varphi_{j_{\text{top}}} = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_\perp}{R\sin\theta}\Delta h \tag{3}$$

式中，R 为主影像成像时的斜距；$B_\perp$ 为垂直基线；θ 为主影像成像时的入射角。除去干涉相位信息中包含的上述3种误差影响造成的相位差之后，干涉相位信息可表示为：

$$\Delta\varphi_j = \varphi_{t_a} - \varphi_{t_b} \approx \frac{4\pi}{\lambda}\left(d_{t_a} - d_{t_b}\right) \tag{4}$$

令 $V_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{t_1 - t_0}$，$V_N = \frac{\varphi_N - \varphi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}}$，则将该点的干涉相位信息转换为每一对干涉像对的平均相位速度可表示为：

$$V^T = \left[V_1, V_2 \ldots V_N\right] \tag{5}$$

则可以求出干涉图 j 的形变相位值，如式（6）所示：

$$\delta_{\varphi_j} = \sum_{k=t_b, j+1}^{t_a, j} \left(t_k - t_{k-1}\right)V_k \tag{6}$$

对差分干涉图 j 的干涉相位进行解缠处理，并将相同处理后的各对差分干涉图相位信息组合成矩阵形式，如式（7）所示：

$$\boldsymbol{B}V = \delta_\varphi \tag{7}$$

将（7）式中 $M \times N$ 矩阵 $\boldsymbol{B}$ 进行奇异值分解，最终可以获取地面形变速率及形变时序信息。

2 研究区概况及数据源

2.1 研究区概况

浑江煤田位于吉林省东南部，地理坐标介于126°00′~127°20′E、41°30′~42°30′N之间，浑江煤田含煤地层为太原组C_3t和山西组P_1s。白山市是国家重点生态功能区和中国十大生态屏障之一，为保证煤炭开采

可持续发展和资源的战略安全，需进一步探明研究区地面沉降的分布和动态形变特征。研究区SAR数据监测范围如图1所示。

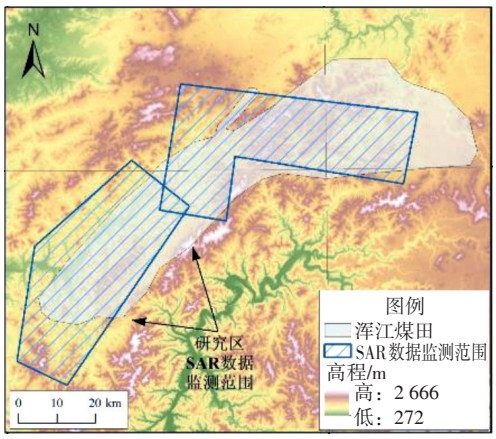


图1　研究区SAR数据监测范围

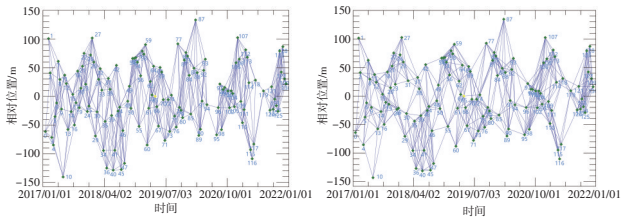
审图号：GS(2024)0650号

2.2　数据源

选取欧空局Sentinel-1B卫星降轨C波段SAR影像数据，时间跨度为2017年1月18日—2021年12月11日，共131景。该卫星轨道高度693 km，重访周期12 d，覆盖范围达到42 500 km^2。为保证Sentinel-1B卫星影像在研究区地面沉降形变监测中保持较好的相干性，故各影像之间时间间隔选择12 d，极化方式为VV，成像模式为宽幅干涉模式，距离向分辨率为5 m，方位向分辨率为20 m。在数据导入时使用欧空局的POD精密定轨星历数据文件，可以减少InSAR处理时由轨道误差引入的相位误差。本文所用SAR数据为欧空局提供的Sentinel-1B降轨单视复数（single look complex，SLC）影像，数据下载自美国国家航空航天局（https://search.asf.alaska.edu）。本文使用的DEM数据为30 m分辨率的SRTM数据，DEM用于SAR影像配准、平地效应去除、形变结果地理编码等步骤，数据下载自美国地质勘探局（https://earthexplorer.usgs.gov）。数据处理基于ENVI 5.6.2 SARscape平台。

3　数据处理

①数据预处理。由于SAR影像较大，将$N+1$景SAR数据进行裁剪，得到浑江区和江源区的SAR数据监测范围。②生成连接图。使用SARscape3.6.2软件中Connection Graph工具将131景sentinel-1B斜距单视复数（single look complex，SLC）降轨影像分别进行配对生成干涉像对。浑江研究区选择最大时间基线长度为90 d，江源研究区选择最大时间基线长度为120 d；空间基线阈值均设置为2%，分别生成618个对干涉影像对，其中浑江、江源研究区超级主影像日期均为2019年4月14日，如图2所示。其中，绿点为每期影像，线段为干涉对，黄点为超级主影像。③干涉工作流。采用Minimum Cost Flow相位解缠方法和Goldstein滤波方法进行干涉处理。④进行轨道精炼与重去平。估算和去除残余的恒定相位和解缠后还存在的相位坡道。⑤进行2次反演处理，得到更加准确可靠的形变结果。⑥地理编码。对序列信息进行地理编码获得研究区2017年1月18日—2021年12月11日雷达垂直方向（VD）上地表形变数据。由于研究区SAR数据监测范围较大，下文仅对监测期间浑江及江源研究区内存在地面沉降的区域进行分析和阐述。



a 浑江研究区　　b 江源研究区

图2　研究区干涉对连接图

4　地面沉降结果分析

4.1　监测精度评估

依据《地质灾害InSAR监测技术指南：T/CAGHP013-2018》对地表形变监测结果精度进行评估，通过SBAS-InSAR地表形变监测结果获取平均沉降速率标准差。浑江及江源研究区内监测到的目标点年平均速率标准差范围分别为0.12~4.78 mm·a^{-1}和0.19~4.49 mm·a^{-1}，平均沉降速率标准差平均值分别为2.17 mm·a^{-1}和3.46 mm·a^{-1}，研究区内100%的目标点平均速率标准差均低于5 mm·a^{-1}，符合《地质灾害InSAR监测技术指南：T/CAGHP013-2018》精度参考标准。因此，基于SBAS-InSAR技术对研究区地面沉降监测的结果具有较高的可靠性。

4.2　研究区地面沉降整体情况分析

通过时序InSAR监测结果获取2017年1月18日—2021年12月11日期间研究区域垂直地面方向的年均沉降速率和空间分布图，如图3所示。其中正值（绿色）代表地面抬升，即地面目标朝卫星运动；负值（红色）则表示地面沉降，即地面目标远离卫星运动。监测期间，浑江研究区最大沉降速率为-163.45 mm·a^{-1}，最大抬升速率为50.16 mm·a^{-1}，平均形变速率为-9.63 mm·a^{-1}；江源研究区最大沉降速率为-122.11 mm·a^{-1}，最大抬升速率为49.70 mm·a^{-1}，平均形变速率为-4.63 mm·a^{-1}。

从平均形变速率来看，研究区整体表现出沉降特征，区域内共形成5处明显的地面沉降区，即沉降区A、B、C、D、E。其中，沉降区A和B分布在浑江区境内，沉降区C、D、E分布在江源区境内。

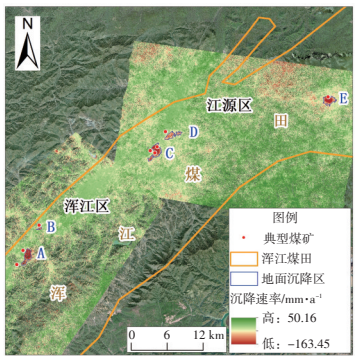


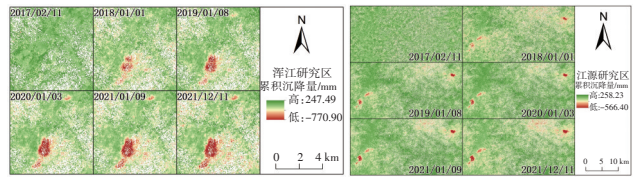
图3　研究区垂直地面方向年均形变速率和空间分布图（2017–2021年）

审图号：GS(2024)0650号

5个沉降区总面积为8.96 km²，平均沉降速率为–40.84 mm·a⁻¹。其中，沉降区C面积为2.82 km²，是研究区中沉降面积最大的区域；沉降区A最大沉降速率为–163.45 mm·a⁻¹，平均沉降速率为–58.80 mm·a⁻¹，是研究区中沉降速率最大的区域。在沉降区A、B、C、D、E周边有几处历史悠久的老煤矿，如浑江区原道清煤矿、江源区原砟子煤矿、江源区原湾沟煤矿等都是从上个世纪50年代左右就开始煤炭开采工作。目前，沉降区A和B附近的典型煤矿有道清煤矿北斜井、佳和煤矿和联谊煤矿等；沉降区C、D、E附近的典型煤矿有西二井、财源煤矿、佳德煤矿、江源煤业、吉坤煤矿等。多年以来，各矿区的煤炭采空区都有不同程度的地面沉降发生，地面沉降一般为近椭圆形或近圆形，深度从内到外，由大变小。严重的地面沉降会对地面建（构）筑物、农田和人民生命财产安全造成严重危害。2017—2021年研究区形成的地面沉降区与周边煤矿位置基本吻合，如图3所示。

4.3　研究区地面沉降时空演化特征

为进一步对研究区地面沉降时空演化态势进行分析，从2017年1月18日—2021年12月11日共计131景累积形变量中选取6景形变量图进行时序分析，以2017年2月11日为起始日期，每隔4 a时间间隔选取一景形变量图，形成2017—2021年研究区地面累积沉降量时空演化图，如图4所示。监测期间，浑江研究区内最大累积沉降为–770.90 mm，最大累积抬升为247.49 mm，平均累积形变–45.61 mm；江源研究区内最大累积沉降为–566.40 mm，最大累积抬升为258.23 mm，平均累积形变–6.64 mm。从平均累积形变来看，研究区整体表现出沉降特征，并且随着时间的推移累积沉降量均在不断增大，呈现持续增加趋势。



a 浑江研究区　　b 江源研究区

图4　研究区地面累积沉降量时空演化图（2017—2021年）

为进一步研究5个沉降区A、B、C、D、E在2017—2021年间的地面沉降趋势，统计分析了5个沉降区的时序平均累积形变量，监测期间5个沉降区均处于持续沉降状态，如图5所示。5个沉降区均表现出持续沉降的趋势，其中，沉降区A的沉降趋势最大，且曲线图波动最小，呈明显的线性沉降特征。从沉降趋势上看可划分几个特殊沉降期，在2020年3月—2021年8月期间，沉降区A的沉降趋势持续增加，而沉降区B的沉降趋势明显减弱，其中，在2020年3月—2020年7月和2021年4月—2021年8月2个时间段内，沉降区B处于地表形变的稳定状态，沉降量无明显增加，而沉降区A在此时间段呈明显的线性沉降特征；在2020年3月—2020年7月期间，沉降区C、D、E均表现出明显的线性沉降特征；在2021年4月—2021年9月期间，沉降区C的沉降趋势明显减弱，沉降区D、E均出现先抬升后沉降的特征。

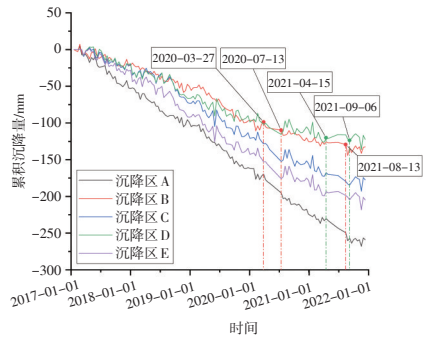


图5　沉降区平均累积沉降量时序变化图

监测期间5个沉降区中最大累积沉降量为–770.90 mm，平均累积沉降量为–179.35 mm。其中，沉降区A累积沉降量范围为–770.90~–9.40 mm，平均累积沉降量为–259.20 mm，是累积沉降量最大的区域；沉降区B累积沉降量范围为–258.50~–41.20 mm，平均累积沉降量为–132.30 mm；沉降区C累积沉降量范围为–441.20~–11.00 mm,平均累积沉降量为–177.70 mm；沉降区D累积沉降量范围为–258.00~–15.50 mm，平均累积沉降量为–122.55 mm；沉降区E累积沉降量范围为–566.40~–10.10 mm，平均累积沉降量为–205.00 mm。

4.4　沉降区特征点与实地调查验证

4.4.1　沉降区特征点验证分析

为了验证研究区地面沉降监测结果的可靠性，采用2017年和2021年两期高分遥感影像进行目视判读，结合野外现场调查和SBAS-InSAR地表形变监测结果，在5个沉降区分别选取累积沉降量最大的点作为特征点，共选取5个特征点进行地面沉降时序分析，选取的特征点均在建筑物、道路等地，地表环境均无巨大变化，都具有较好的相干性，如图6所示。

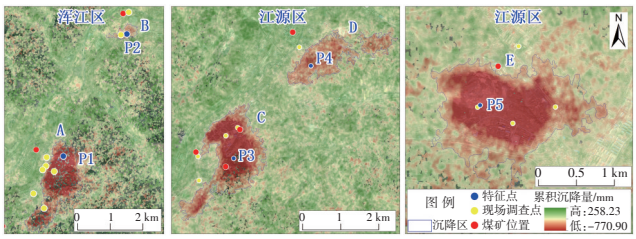


图6　沉降区特征点与调查点位

图7为沉降区5个特征点在2017年和2021年高分遥感影像对比图，通过影像比对可以验证监测结果的可靠性。从2017年和2021年的对比图可知，沉降区A的特征点P1均位于农田上，周边地物无巨大变化，特征点P1是研究区中累积沉降量最大的点；沉降区B的特征点P2均位于道路旁，是高相干点，经影像比对和现场野外调查发现调查点P2东侧房屋已经拆除，拆除房屋的地表已完成土地平整，并复耕种植了玉米作物，这与近年来当地采空区搬迁整治工程有关，说明研究区的地面沉降监测结果与实际情况相符合；沉降区C的特征点P3均位于农村道路上，周边地物无巨大变化，是高相干点；沉降区D的特征点P4均位于农田上，周边地物无巨大变化；沉降区E的特征点P5均位于矿区的房屋上，是高相干点。因此，特征点P1、P3、P4、P5在5 a间无巨大变化，可以证明该地区的地面沉降与人为挖掘或建设工程无关，监测结果具有较高可靠性；特征点P2周边出现居民搬迁，可以证明6 a间的地面沉降监测结果与当地实际情况相符合。

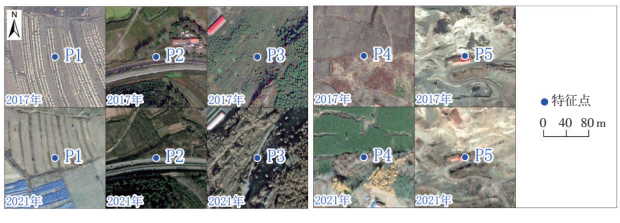


图7　沉降区特征点2017年、2021年高分遥感影像对比图

图8为上述5个特征点的累积沉降量时序变化曲线图，在2017—2021年的5 a间，5个特征点均处于持续沉降状态。5 a间特征点P1、P2、P3、P4、P5的累积沉降量分别为−770.90、−258.50、−441.20、−258.00、−566.40 mm。监测期间，特征点P1的沉降趋势最大，整体呈明显的线性沉降特征，特征点P5和P3的沉降趋势较明显，特征点P2和P4的沉降趋势最小。在2020年3月和2021年4月2个时间点之后，5个特征点均发生了明显的线性形变趋势，且持续了一段时间。其中，特征点P1、P5表现为持续的线性沉降特征，特征点P3表现为先沉降后抬升，呈现出波段式沉降特征；特征点P2、P4表现为沉降趋势减弱的特征。整体来看，5个特征点均在2020年3月和2021年4月2个时间点后出现明显的线性形变趋势，这与图4沉降区在2017—2021年平均累积形变量的线性形变期相一致。

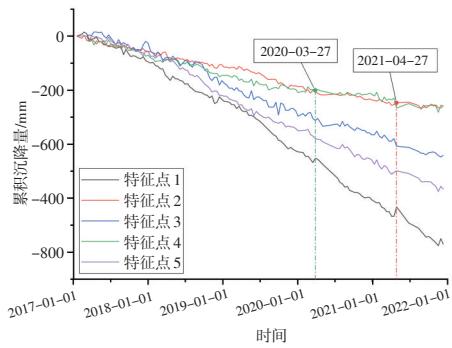


图8　沉降区特征点累积沉降量时序变化曲线图

4.4.2　典型沉降区验证分析

为了更好地对研究区地面沉降漏斗的形变特征进行分析，在研究区内选取沉降区E作为典型沉降区进行分析。沉降区E形状近椭圆形或近圆形，沉降深度从内到外，由大变小，是典型的沉降漏斗特征。在沉降区E中选取4个特征点（E1~E4）从西向东排列分布进行累积沉降量时序分析。

从图9可看出，在2017—2021年5 a间，沉降区E的4个特征点均处于持续沉降状态，特征点E1、E2、E3、E4的累积沉降量分别为−118.20、−566.40、−326.00、−163.50 mm。特征点在沉降区E中从西向东依次排列，其累积沉降量表现出由小变大再变小的规律，证明了沉降区E是累积沉降量由外到里逐渐变大的漏斗式沉降区域。特征点E2位于沉降区E的中部，监测期间一直呈线性沉降特征，是江源研究区和沉降区E中地面沉降最严重的地方；2018年4月后，特征点E1表现出先抬升后缓慢沉降的趋势特征；特征点E2表现出加速下沉趋势；特征点E3和E4基本保持线性匀速沉降趋势。

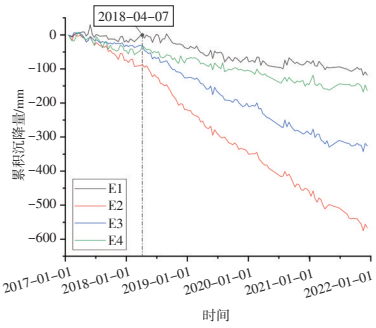


图9 沉降区E特征点累积沉降量时序变化曲线图

4.4.3 沉降区实地调查验证分析

通过实地调查可以进一步验证SBAS-InSAR监测结果的准确性和可靠性。调查发现，在5个沉降区周边有多家煤矿企业工业广场或办公区域，有明显的煤矸石堆、排土场等；沉降区附近有多处地面塌陷地质灾害警示牌，调查未见明显的塌陷坑和积水坑；在5个沉降区内都存在明显的搬迁撤离和房屋拆除痕迹，已拆除的房屋地表大多已改种玉米作物，未拆除的房屋均出现严重的开裂。在煤矿矿区附近的居民都基本搬迁，房屋空闲废弃，经调查发现仍有居民未搬迁撤离，这些未搬迁的居民在地面沉降区范围内生活存在危险。因此，研究区内的地面沉降时序监测对于防灾减灾以及保护人民生命和财产安全有重要意义和作用。

4.5 研究区地面沉降程度分级

依据监测结果的形变速率将整个研究区地面沉降程度分为4个等级：轻度[-10~-40）mm·a^{-1}、中度[-40~-60）mm·a^{-1}、重度[-60~-100）mm·a^{-1}及极重度（<-100）mm·a^{-1}，2017-2021年研究区地面沉降总面积为8.96 km^2，其中沉降速率在-10~-40 mm·a^{-1}的区域面积为5.59 km^2，占沉降区总面积的62.39%；沉降速率在-40~-60 mm·a^{-1}的区域面积为1.61 km^2，占沉降区总面积的17.97%；沉降速率在-60~-100 mm·a^{-1}的区域面积为1.42 km^2，占沉降区总面积的15.85%；沉降速率在＜-100 mm·a^{-1}的区域面积为0.34 km^2，占沉降区总面积的3.79%。浑江研究区地面沉降程度为重度和极重度的区域面积为0.69 km^2，面积占比7.70%；江源研究区地面沉降程度为重度和极重度的区域面积为1.27 km^2，面积占比11.94%。浑江和江源研究区内地面沉降程度为重度和极重度的区域面积合计占沉降区总面积的19.64%。整体来看，在监测期间浑江和江源研究区局部地区均发生了较为严重的地面沉降，对于地面沉降程度为重度和极重度的区域应重点持续关注。

5 结 语

基于SBAS-InSAR技术，利用2017-2021年Sentinel-1B降轨C波段SAR数据，对吉林省白山市浑江区与江源区地面沉降进行监测。研究共识别出5个地面沉降区，总面积8.96 km^2。其中浑江区分布2个（2.47 km^2，占总沉降区27.57%），江源区3个（6.49 km^2，占72.43%），后者为沉降面积最大区域。沉降区空间分布与煤矿企业位置高度一致，集中于浑江区六道镇、江源区碎子镇和湾沟镇。监测显示，浑江区沉降最为显著，最大沉降速率达-163.45 mm·a^{-1}，最大累积沉降量-770.90 mm，重度和极重度沉降区占比7.70%；江源区最大速率-122.11 mm·a^{-1}，累积沉降量-566.40 mm，重度和极重度区占比11.94%。尽管当地已实施矿山生态修复工程，但沉降持续发生，表明矿区地质环境破坏与生态修复尚未平衡。建议加强地表形变动态监测，推进煤炭资源集约化开发，优化矿山生态修复策略，以实现绿色产业发展与生态文明建设的协同，为区域地质灾害防治和生态治理提供科学依据。

参考文献

[1] Wasowski J,Bovenga F. Investigating landslides and Unstable Slopes with Satellite Multi-temporal Interferometry: Current Issues and Future Perspectives[J]. Engineering Geology,2014,103-138

[2] 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):2 202-2 212

[3] 姚丹丹,吴侃,何强. 基于D-InSAR技术的煤矿区沉陷监测[J]. 金属矿山,2014,43(11):151-155

[4] 张熠斌,宋金红,徐誉维,等. 基于时序InSAR的吉林省煤炭采空区地表形变监测及时空演化态势分析[J]. 水文地质工程地质,2025,52(1):202-213

[5] 孔祥如,罗勇,刘贺,等. PS-InSAR技术在北京通州区地面沉降监测中的应用[J]. 城市地质,2021,16(1):25-31

[6] 潘光永,陶秋香,陈洋,等. 基于SBAS-InSAR的山东济阳矿区沉降监测与分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):100-106

[7] 冉培廉,李少达,杨晓霞,等. 基于SBAS-InSAR技术的西安市地面沉降监测[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(3):66-74

[8] 徐思瑜,张熠斌,徐誉维,等. 基于时序InSAR的吉林蛟河

（下转第132页）