引文格式：周小龙,石鹏卿,张娟,等. 基于SBAS-InSAR技术的平川矿区形变监测与分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(6): 53-56. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.06.012

基于SBAS-InSAR技术的平川矿区形变监测与分析

周小龙[1]，石鹏卿[1*]，张　娟[1]，高子雁[1]，郭富赟[1]
（1. 甘肃省地质环境监测院 地质环境信息中心，甘肃 兰州 730050）

摘　要：以平川矿区为例，采用SBAS-InSAR技术对该区域升降轨哨兵数据进行解算，并获取了该区域准三维地表形变场，结合夜光遥感数据对地表形变监测结果的可靠性进行验证，通过标准差椭圆方法分析区域形变时空演化特征。结果表明：①研究区准三维地表形变场垂直向最大年沉降平均速率为-16.75 cm×a^{-1}，均以地面沉降为主；②平川矿区形变中心空间上主要分布在平川区中部及西北部地区；③矿区夜光值增加区与加速形变区具有“追随”特点；④区内共识别出12处明显形变区，均具有沉降漏斗特性；⑤2020年1月至2020年8月地表累积形变在西北-东南方向形变加剧，2020年8月至2021年4月地表累积形变在不同方向变化较缓慢，累积地表形变空间演化表现为主轴逆时针旋转。

关键词：SBAS-InSAR；平川矿区；形变监测
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）06-0053-04

Surface Deformation Monitoring and Analysis of Pingchuan Mining Area Based on SBAS-InSAR Technology

ZHOU Xiaolong[1], SHI Pengqing[1], ZHANG Juan[1], GAO Ziyan[1], GUO Fuyun[1]
(1. Geological Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Geological Environment Information Center, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking Pingchuan mining area in Baiyin City as an example, we used SBAS-InSAR technology to solve the sentinel-1 data of the lift track in this area for two years, and obtained the quasi 3D surface deformation field in this area. Combined with nighttime light remote sensing data, we verified the reliability of surface deformation monitoring results, and used standard deviation ellipse method to analyze the spatio-temporal evolution characteristics of regional deformation. The results show that ①the average rate of maximum vertical annual settlement of quasi 3D surface deformation field in the study area is -16.75 cm·a^{-1}, which is dominated by land subsidence. ②The deformation centers of Pingchuan mining area are mainly distributed in the middle and northwest of Pingchuan District. ③The increasing area of nighttime light value and the accelerating deformation area in the mining area have the characteristics of “following”. ④A total of 12 obvious deformation areas are identified in the area, all of which have the characteristics of settlement funnel. ⑤From January 2020 to August 2020, the cumulative surface deformation intensifies in the northwest southeast direction. From August 2020 to April 2021, the cumulative surface deformation changes slowly in different directions. The spatial evolution of cumulative surface deformation shows that the main axis rotates counterclockwise.

Key words: SBAS-InSAR, Pingchuan mining area, deformation monitoring

目前，合成孔径干涉雷达测量技术（interferometric synthetic apeture rader，InSAR）在区域地表形变监测中广泛应用[1-4]，相比于传统的区域监测手段，其具有监测范围广、监测精度高、监测成本低、影响因素小的特点，其中短基线集差分干涉测量方法（small baseline subsets interferometric synthetic aperture radar，SBAS-InSAR）在2002年被Berardino[5]等提出，通过设定时空基线阈值组成干涉对并建模，有效的减弱了时空相位和大气效应对形变结果的影响[6]，更适应于矿区地表形变监测。

近年来，SBAS-InSAR技术在矿区地表形变监测中不断应用，并取得了大量研究成果，文献[7-14]以采矿区为研究对象，利用SBAS-InSAR技术获取矿区时序形变监测结果，证明了因采矿活动而导致矿区地表形变，致使地质灾害的发生，并且表明矿区的开采对周围地区也会产生一定影响。基于SBAS-InSAR技术矿区地表形变监测具有极大的应用潜力，结合夜光遥感数据能够进一步挖掘监测结果所含的空间信息，

收稿日期：2022-07-13。
项目来源：甘肃省科技重大专项资助项目（19ZD2FA002）。
第一作者简介：周小龙（1995—），工程师，从事遥感技术地质灾害防治工作，E-mail：zhoulong_giser@163.com。
通信作者：石鹏卿（1988—），硕士，从事地质灾害早期识别、监测预警工作，E-mail：shipengqing2011@163.com。

利用标准差椭圆方法能够有效的对地表形变的空间演化特征进行分析，但是对于矿区的形变监测和分析，综合利用夜光遥感数据及标准差椭圆法的研究较少。

因此，本文以白银市平川区为研究对象，获取了该区域2020—2022年Sentinel-1A卫星雷达数据，利用SBAS-InSAR技术对该区域地表形变进行监测，提取了沿雷达视线方向升降轨形变结果，联合升降轨形变结果解算得到准三维向形变，再结合夜光遥感NPP/VIIRS数据分析形变结果的可靠性，最后利用标准差椭圆法分析矿区空间演化规律，可为白银市平川矿区地质灾害防治、矿区规划和治理、区域地下水水资源开发利用提供科学支撑。

1 研究方法

本文基于SBAS-InSAR技术，以Sentinel-1A雷达卫星影像作为数据源，提取矿区时序形变，结合夜光遥感数据分析形变结果的可靠性，并利用标准差椭圆方法开展矿区地表形变时空演化特征分析。

1.1 SBAS-InSAR技术

SBAS-InSAR技术是通过限定雷达影像时空基线阈值来控制时空相干性，从而获取研究区小基线集数据，并对小基线集数据差分干涉，利用奇异值（SVD）分解小基线集干涉对抑制时空失相干及大气延迟相位带来的影响，得到研究区地表形变时间序列成果。具体步骤为：①对SLC雷达数据进行及对应精密轨道数据进行处理得到统一数据类型，再进行数据配准、区域裁剪和多视处理，设定时空阈值生成小基线集，差分干涉得到小基线集差分干涉成果；②在相干性图像中选取高相干点作为参考点，然后对小基线集差分干涉成果数据进行相位解缠处理；③以外部输入地形数据辅助地形相位改正，时空域滤波处理去除残差相位；④奇异值（SVD）分解法分解解缠相位求得未知参数的最小二乘解，对单主影像转换，估计非线性形变和大气相位并去除；⑤地理编码生成矿区年形变速率和时序形变量成果。

1.2 夜光遥感技术

夜光遥感技术是利用卫星遥感技术在夜间获取区域光源性质的特性，来获取观测区域的夜间光辐射分布状况，主要反映人类活动空间分布，揭示区域社会经济演化规律。

1.3 标准差椭圆方法

标准差椭圆法（standard deviation ellipse，SDE）是一种基于空间统计学来揭示空间地理要素分布特征及其时空演化的有效方法，在1926年被Lefever[15]等提出。标准差椭圆几何中心表示地理空间要素分布的重心，其长轴表示地理空间要素分布的主要方向，短轴表示地理空间要素分布偏离重心的程度[16]。公式为：

$$EX=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{X})}{n}},\quad EY=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{Y})}{n}} \tag{1}$$

$$\tan\theta=\frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i^2-\sum_{i=1}^{n}\tilde{y}_i^2\right)+\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i^2-\sum_{i=1}^{n}\tilde{y}_i^2\right)^2+4\left(\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i\tilde{y}_i\right)^2}}{2\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i\tilde{y}_i} \tag{2}$$

$$\sigma_x=\sqrt{\frac{2\sum_{i=1}^{n}(\tilde{x}_i\cos\theta-\tilde{y}_i\cos\theta)^2}{n}} \tag{3}$$

$$\sigma_y=\sqrt{\frac{2\sum_{i=1}^{n}(\tilde{x}_i\cos\theta+\tilde{y}_i\cos\theta)^2}{n}} \tag{4}$$

式中，（EX，EY）为标准差椭圆中心；x_i与y_i为空间地理要素的位置坐标；$\overline{X}$与$\overline{Y}$为空间地理要素的平均中心；n为空间地理要素数量；$\tan\theta$为空间地理要素方位角的正切值；σ_x和σ_y为沿X轴和Y轴方向的标准差。本文以矿区地表形变量值为权重，采用标准差椭圆的圆心、面积、长短轴以及方位角来研究矿区地表形变中心、范围、演变主方向、偏离中心程度及发展趋势。

2 研究区概况与数据处理

2.1 研究区概况

平川区位于甘肃省白银市中北部、黄河上游，南距白银市93 km，距兰州185 km，西北至东南狭长倾斜地带分布，地形东南高、西北低，平均海拔1 540 m，交通便利[17]。平川区是典型的煤矿资源型区域，经过多年的地下开采，造成矿区地表沉陷严重，表现为以地表裂缝和塌陷为主的非连续性破坏，主要集中在红会、王家山、宝积山、魏家地和大水头5个煤矿区，导致地表耕地、地下水、地面建筑物及基础设施严重破坏，给当地人民群众生产生活造成极

大困扰。

2.2　数据处理

2.2.1　SBAS-InSAR数据处理

根据数据可用性情况，按升轨2020年1月至2021年4月、升轨2021年5月至2022年2月、降轨2020年1月至2021年4月分段进行SBAS-InSAR处理，参考韩守富[18]等基于升降轨InSAR技术的三维地表形变提取方法，提取2020年1月至2021年4月的研究区垂直向地表形变结果。

首先对获取的数据进行预处理，包括精轨数据修正、雷达图像配准、研究区裁剪；利用小基线集时空阈值获取了2020-01—2021-04升轨数据71个小基线差分干涉对，2021-05—2022-02升轨数据39个小基线差分干涉对，另外获取了2020-01—2021-04月降轨数据76个小基线差分干涉对，然后进行多视和干涉处理并相位解缠，对时空相位滤波去相干处理；最后利用奇异值分解的方法得到沿视线方向的形变速率，联合同时段升降轨形变速率成果得到垂直向形变速率。

2.2.2　夜光遥感NPP/VIIRS数据

利用NPP/VIIRS夜光遥感技术对研究区夜光空间分布进行研究。VIIRS传感器搭载于Suomi-NPP卫星，于2011年10月发射，夜间探测光源信息的波长范围在0.5~0.9 um，空间分辨率为750 m，本文选用月度合成数据，该数据是去除了杂光、闪电、月光反射、云层散射光影响的数据，空间分辨率为500 m。本文获取了2020年1月、2021年4月和2022年2月NPP/VIIRS夜光遥感月度数据，得到研究区范围3期夜光遥感数据。

3　结果分析

3.1　SBAS-InSAR监测结果

平川矿区地表形变监测采用SBAS-InSAR干涉测量技术，提取2020—2022年年均形变速率成果显示，①升轨数据2020年1月至2021年4月形变速率，最大年均形变速率达-14.78 cm×a^{-1}；②升轨数据2021年5月至2022年2月形变速率，最大年均形变速率达-23.26 cm×a^{-1}；③2020年1月至2021年4月升降轨数据垂直方向形变速率，最大年均形变速率达-16.75 cm×a^{-1}；④降轨数据2020年1月至2021年4月形变速率，最大年均形变速率达-18.54 cm×a^{-1}，均以地表沉降为主。

3.2　地表形变空间分布特征及验证

对SBAS-InSAR监测地表形变速率单像元值分段频数占比统计，分类区段A为<-150 mm×a^{-1}，区段B为[-150 ~ -50 mm×a^{-1}]，区段C为[-50~50 mm×a^{-1}]，区段D为[50 ~ 150 mm×a^{-1}]，如图1所示，1a表示升轨数据2020年1月至2021年4月形变速率频数占比分布情况，形变速率在B、C、D3个区段均有分布，其中C区段频数分布占比达99.75%，B区段频数分布占比达0.248%，D区段频数分布占比达0.002%；1b表示升轨数据2021年5月至2022年2月形变速率频数占比分布情况，形变速率在A、B、C3个区段分布，其中C区段频数分布占比达99.59%，B区段频数分布占比达0.403%，A区段频数分布占比达0.007%；1c表示2020年1月—2021年4月升降轨数据垂直方向形变速率频数占比分布情况，形变速率在A、B、C3个区段分布，其中C区段频数分布占比达99.565%，B区段频数分布占比达0.434%，A区段频数分布占比达0.001%；1d表示降轨数据2020年1月至2021年4月形变速率频数占比分布情况，形变速率在A、B、C3个区段分布，其中C区段频数分布占比达99.634%，B区段频数分布占比达0.365%，A区段频数分布占比达0.001%。综上，对于监测区域形变速率频数占比统计情况来看，雷达上升轨道数据与雷达下降轨道数据形变速率频数分布基本一致，较稳定区段主要分布在C，占比总体大于99.5%，较大变形区段主要分布在A和B 2个区段，占比在小于0.5%范围内，区域形变总体表现为沉降。

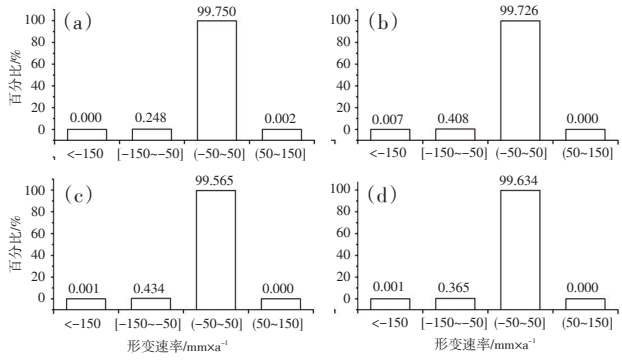


图1　研究区形变速率频数占比分布

雷达上升轨道形变速率成果显示，形变速率较为明显区域共12处，其中6处范围较大区域主要分布在煤田区，这与雷达下降轨道形变速率成果明显形变区空间分布上吻合度较好，形变中心空间上主要分布在平川区中部及西北部地区，联合升降轨数据得到垂直方向形变速率，形变速率较为明显区域呈现边缘形变速率小、中心形变速率大的沉降漏斗特征。

夜光遥感月度数据显示，2020年1月夜光像元最大*DN*值为36.75，2021年4月夜光像元最大*DN*值为38.11，2022年2月夜光像元最大*DN*值为75.96，其中

2020年1月与2021年4月夜光遥感月度数据最大*DN*值相差较小，2022年2月较2020年1月与2021年4月夜光遥感月度数据最大*DN*值有所增加。结合升降轨形变速率分布情况，矿区夜光值增加区域在研究时段并未有较大的形变现象，而在该区域外侧较大范围表现为升降轨加速形变，呈现出小区域夜光值增加区“追随”大范围加速形变区的特点。这是由于矿产开采区与加工生产区之间存在一定距离，该区域矿产开采区范围大，人类活动密度小或在地下开采，夜间光源信息较弱，而生产加工区域人类活动强烈，周边设施建设完善，夜间光源信息更强，也间接证明了该区域矿产开发方式为地下开采。结合InSAR形变数据，2020年1月至2021年4月较2021年5月至2022年2月最大年均形变速率偏小，夜光量值2020年1月至2021年4月最大值差值小于2021年4月至2022年2月最大值差值，表明地表变形与夜光量值在研究时段变化趋势较为一致，另外去除不在变形区范围内或边缘影响区的夜光值增加区，矿区形变速率较为明显区域与夜光值增加区在研究区空间分布上又呈现出一定的相似性，所以从夜光数据的分析结果可知矿区形变监测结果具有较好的可靠性。

3.3 累积地表形变空间演化特征分析

2020年1月至2021年4月间隔2月为周期的不同时段的垂向累积形变量为权重，采用标准差椭圆方法（SDE）分析研究区时序空间演化特征，本文从标准差椭圆的长半轴变化、短半轴变化、面积变化、方位角变化以及相较第一期椭圆中心距离来分析累积形变的空间演化特征，具体参数见表1。

表1 2020年1月–2021年4月垂直向累积形变标准差椭圆参数

日期	长半轴/km	短半轴/km	短轴/长轴	方位角/(°)	面积/km²	中心距离/m
2020/01/23	13.24	5.29	0.40	150.41	220.17	0
2020/03/11	12.87	5.18	0.40	144.55	209.63	324.45
2020/05/10	15.84	6.24	0.39	141.2	310.54	1 426.13
2020/08/14	29.76	7.8	0.26	126.94	728.88	1 389.46
2020/10/13	25.14	8.16	0.32	129.06	644.68	4 595.98
2020/12/12	23.95	7.9	0.33	130.52	594.47	4 791.37
2021/02/10	22.64	7.83	0.35	130.76	556.95	3 733.41
2021/04/23	25.17	7.85	0.31	129.89	620.68	3 138.6

在研究时段内，垂向累积形变像元总体分布方向为西北–东南方向，空间分布走向大体一致，垂直向累积形变标准差椭圆中心向东南方向移动，形变中心向东南方向移动3 138.6 m。由表1标准差椭圆在各时段参数可知，2020年1—8月，标准差椭圆的长半轴、短半轴、面积变化呈增加趋势，而2020年8月—2021年4月，标准差椭圆的长半轴、短半轴、面积变化呈减弱趋势，这说明在研究时段内2020年8月研究区形变范围最广，2020年1—5月研究区形变范围略有扩大，2020年10至2021年4月研究区形变范围变化较小。计算标准差椭圆短半轴与长半轴之比，在0.2~0.4之间变化，表明研究区地表形变具有方向性分布特征，2020年1月至2020年8月标准差椭圆比值逐渐减小，长轴值逐渐变大，表明地表累积形变在西北–东南方向形变加剧，2020年8月—2021年4月标准差椭圆比值逐渐增加，而2020年10月—2021年4月标准差椭圆比值变化趋于平缓，表明自2020年10月后研究区地表累积形变在不同方向变化较缓慢。2020年1月至2021年4月标准差椭圆方位角由150.41°减小至129.89°，因此矿区地表形变空间演化表现为主轴逆时针旋转，反映了垂向累积形变在研究区内空间分布的主要趋势方向近东–西向增加，垂向累积形变沿着标准差椭圆主轴方向呈主导分布，同时自2020年8月后标准差椭圆方位角变化接近平稳趋势，多期统计数据直观体现了研究区垂向累积形变像元的空间分布特征。

4 结 论

本文基于SBAS–InSAR技术利用升降轨哨兵数据，获取了研究区地表形变场，识别出研究区明显形变区，结合同期夜光遥感数据进行分析验证，通过不同时段累积形变数据分析了该区域形变时空演化特征，为平川矿区地质灾害防治提供了方向。

参考文献

[1] 刘智学, 薛东剑. 基于Sentinel-1A数据的地表形变监测[J]. 地理空间信息,2021,19(11): 92-95

[2] 熊威, 孙志杰, 张必昌. 升降轨时序InSAR技术监测天津市地面沉降[J]. 地理空间信息,2021,19(12): 45-49

（下转第60页）