



引文格式:杜玉玲,闫世勇,张豪磊,等.融合区域生长的DS-InSAR相位优化与应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(2):216-224.DOI:10.13203/j.whugis20210365

Citation:DU Yuling, YAN Shiyong, ZHANG Haolei, et al. Research and Application of DS-InSAR Phase Optimization Based on Regional Growth[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(2): 216-224. DOI: 10.13203/j. whugis20210365

# 融合区域生长的DS-InSAR相位优化与应用

杜玉玲<sup>1,2,3</sup> 闫世勇<sup>1,2</sup> 张豪磊<sup>1,2</sup> 赵峰<sup>1,2</sup> 仇春平<sup>1,2</sup>

1 自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室,江苏 徐州,221116

2 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

3 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院,甘肃 兰州,730050

**摘要:**常规时序合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术应用于矿区地表形变监测时存在监测点少且分布不均等不足,难以全面反映采空区地表变形特征,而分布式目标受时空失相干等因素的影响相位稳定性较差,因此开展分布式目标相位优化是融合分布式目标时序InSAR形变监测的关键步骤。针对当前分布式目标相位优化中存在的空间连续性约束不足问题,提出了融合区域生长的分布式目标相位优化方法,开展时间和空间联合约束下的分布式目标相位优化,实现复杂地表环境下的精细化地表形变信息获取,并以潘安湖区域为例对分布式目标相位的优化效果进行了定性和定量分析。在此基础上,以该方法和Sentinel-1数据开展了徐州市废弃矿区2018-05—2020-05的地表形变监测,并利用连续运行参考站和裸露基岩验证了该方法的精度和可靠性。结果表明,分布式目标相位时空二维优化方法能够有效减小相位噪声影响,有助于城市废弃矿区地表形变监测。

**关键词:**区域生长;合成孔径雷达干涉测量;分布式目标;相位优化;废弃矿区;地表形变

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2021-11-10

DOI:10.13203/j.whugis20210365

文章编号:1671-8860(2024)02-0216-09

## Research and Application of DS-InSAR Phase Optimization Based on Regional Growth

DU Yuling<sup>1,2,3</sup> YAN Shiyong<sup>1,2</sup> ZHANG Haolei<sup>1,2</sup> ZHAO Feng<sup>1,2</sup> QIU Chunping<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, Ministry of Natural Resources, Xuzhou 221116, China

2 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

3 The Third Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730050, China

**Abstract:** Objectives: When the conventional time-series interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology is applied to the surface deformation monitoring of mining areas, it is difficult to fully reflect the surface deformation characteristics of the goaf due to the uneven distribution and small number of monitoring points. In addition, distributed scatterers are seriously affected by the temporal and spatial incoherence. Thus the corresponding phase optimizing operation is a key step in fusing distributed scatterers (DS) points into time-series InSAR analysis. The current constraints of phase space continuity in the phase optimization of distributed targets are insufficient. Methods: A phase optimization method based on the region growing algorithm is proposed. The detailed surface deformation information in complex environment could be obtained by optimizing phase in both time and spatial domain. The optimized phase of distributed scatter is evaluated qualitatively and quantitatively in Pan'an Lake area. Results: The proposed method and Sentinel-1 data are used to investigate the surface deformation of abandoned mining areas around Xuzhou

**基金项目:**国家自然科学基金(41876226,42004011);江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX21\_2301);中国矿业大学“未来杰出人才助力计划”(2021WLJCRCZL141);国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2022YFE0102600)。

**第一作者:**杜玉玲,硕士,主要从事时序InSAR技术与应用研究。duuling@126.com

**通讯作者:**闫世勇,博士,副教授。yanshiyong@cumt.edu.cn

from May 2018 to May 2020. Besides, the accuracy and reliability of this method are proved by continuously operating reference stations results and bedrock-exposed area. **Conclusions:** The result indicates that the method gives a good performance on reducing phase noise by two-dimensional phase optimization of distributed scatterers, which would be good for obtaining the surface deformation information in the abandoned mining areas.

**Key words:** regional growth; interferometric synthetic aperture radar (InSAR); distributed scatterers; phase optimization; abandoned mining area; surface deformation

随着城镇一体化建设的快速推进,为缓解城市建设用地日益紧张的问题,大量工矿废弃地有待开发再利用。早期地下煤炭开采不可避免地形成了大规模分布的采空区<sup>[1]</sup>,而采空区上覆岩层的稳定性需要经过15~20 a的时间才能得到保障<sup>[2]</sup>,由其带来的历史遗留问题对地表当前和未来稳定性构成了潜在威胁。因此,长期连续的地表沉降监测有助于预防开采沉陷危害,为区域可持续发展提供宏观决策支持,对矿区转型升级发展有着深刻的指导意义。

永久散射体(persistent scatterer, PS)合成孔径雷达干涉测量<sup>[3]</sup>(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)和小基线集合成孔径雷达干涉测量<sup>[4]</sup>(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)等时序 InSAR 形变监测技术被广泛应用在地质灾害监测、识别和预测研究中,并取得了良好的效果<sup>[5-7]</sup>。近几年发展起来的 SqueeSAR 等技术充分利用分布式散射体(distributed scatterer, DS)点,与 PS 进行联合形变监测,一定程度上克服了传统时序 InSAR 方法低相干区监测点的不足,在非城市区域地表形变监测中受到了广泛关注<sup>[8-10]</sup>。而分布式目标受时空失相干等多种因素影响,相位时序稳定性较低,且矿区地表分布式目标覆盖较多,现有的相位优化方法主要有最大似然估计方法<sup>[11]</sup>、同质点相位自适应滤波<sup>[9]</sup>、协方差/相干矩阵特征值分解<sup>[12]</sup>等,上述技术在相位时空优化的过程中忽略了噪声等导致的空间域不连续性对形变监测结果的影响,因此需要在分布式目标相位优化过程中增加空间连续性约束,实现矿区复杂地表环境下的精细化形变信息提取。

针对上述问题,本文在原有分布式目标相位优化的基础上,基于区域生长算法<sup>[13]</sup>的图像分割思想,利用相邻像素相位差值设定生长条件得到空间域滤波窗口,实现时空融合的相位二维优化改进算法,以期在保持干涉相位边缘信息的同时实现对相位噪声的抑制,并以徐州地区废弃矿区为例,对该区域 2018-05—2020-05 的地表形变展

开验证与分析。

## 1 基于区域生长的 DS 相位优化

### 1.1 DS-InSAR 时序分析

不同于传统基于高相干点目标的时序 InSAR 技术,分布式目标的融合应用可以显著提升时序 InSAR 技术相干目标的空间密度。将分布式目标融合到现有的时序 InSAR 技术的过程中,分布式目标备选点(distributed scatterers candidate, DSC)的识别和永久散射体备选点(permanent scatterers candidate, PSC)的选取过程是相互独立的,其中 DSC 的识别主要包括同质样本选取和分布式目标相位优化两个步骤<sup>[8,14]</sup>。

同质样本的选取是以样本后向散射信息为基础,利用假设检验方法选取与参考像元具有相同或相似散射特性的像元集合。本文利用改进的快速同质点选取方法<sup>[15]</sup>选择同质像元(statistically homogeneous pixel, SHP)数量大于 20 的像元作为分布式目标备选点,并在此基础上,采用基于特征值分解(eigenvalue decomposition, EVD)的优化方法,从同质样本集合相应的相干矩阵中估计出一组满足相位一致性条件的相位值作为分布式目标的优化相位。

设定时间相干性阈值选用质量较高的像素点作为 DSC 点,通过对 DSC 目标与 PSC 目标点信息的融合处理得到高相干点目标集合,进而利用传统时序 InSAR 技术进行时序分析处理获取研究区地表形变信息。

### 1.2 融合区域生长的相位优化滤波算法

为兼顾优化相位的空间连续性,本文利用区域生长算法实现分布式目标相位自适应滤波。将相邻像素的相位差作为滤波窗口选择的指标,通过设定阈值作为生长条件,得到形状、大小灵活的自适应滤波窗口,进而实现基于时空约束的分布式目标相位优化改进,削弱传统时序相位优化后存在的空间不规则噪声,提升优化后分布式目标相位的空间连续性。

该方法选用滤波模板的中心像素作为该像素滤波窗口的初始种子点,将种子点与周围八邻域内像素的相位差阈值作为生长准则的评判标准,实现逐像元的自适应滤波窗口选取<sup>[16]</sup>。本文选用 $15 \times 15$ 像素的滤波模板, $G(i,j)$ 表示点坐标为 $(i,j)$ 的像素相位值,给每个像素设定标量 $F_{i,j}$ ,将不满足生长条件的点 $(i,j)$ 表示为 $F_{i,j}=0$ ,将符合生长条件的点表示为 $F_{i,j}=1$ 。如果像素点 $(i,j)$ 满足 $S(G(i,j), G(i,j)_{(8)}) \leq T$ ,则 $F_{i,j}=1$ ,其中点 $(i,j)_{(8)}$ 表示点 $(i,j)$ 八邻域内的像素点, $S(G(i,j), G(i,j)_{(8)})$ 表示八邻域像素点与种子点

之间的相位差, $T$ 代表相应的相位差阈值。由于在高程起伏不大且形变相对较小的城市废弃矿区,干涉相位在某一邻域内是连续变化的,一般认为相邻像素相位差不超过 $\pi/4$ ,因此本文中将 $T$ 设置为 $\pi/4$ ,故相位优化后滤波窗口的生长准则 $R$ 可表示为 $R: |G(i,j) - G(i,j)_{(8)}| \leq T$ 。并以新标记为 $F_{i,j}=1$ 的像素点为新的种子点判断窗口是否继续生长,当滤波模板生长结束,则将全部 $F_{i,j}=1$ 的像素点组成的矩阵作为滤波窗口,以对应像素相干性值作为权值进行加权平均,实现初始种子点(即中心像素点)的相位优化后滤波。

本文方法的主要流程如图1所示。

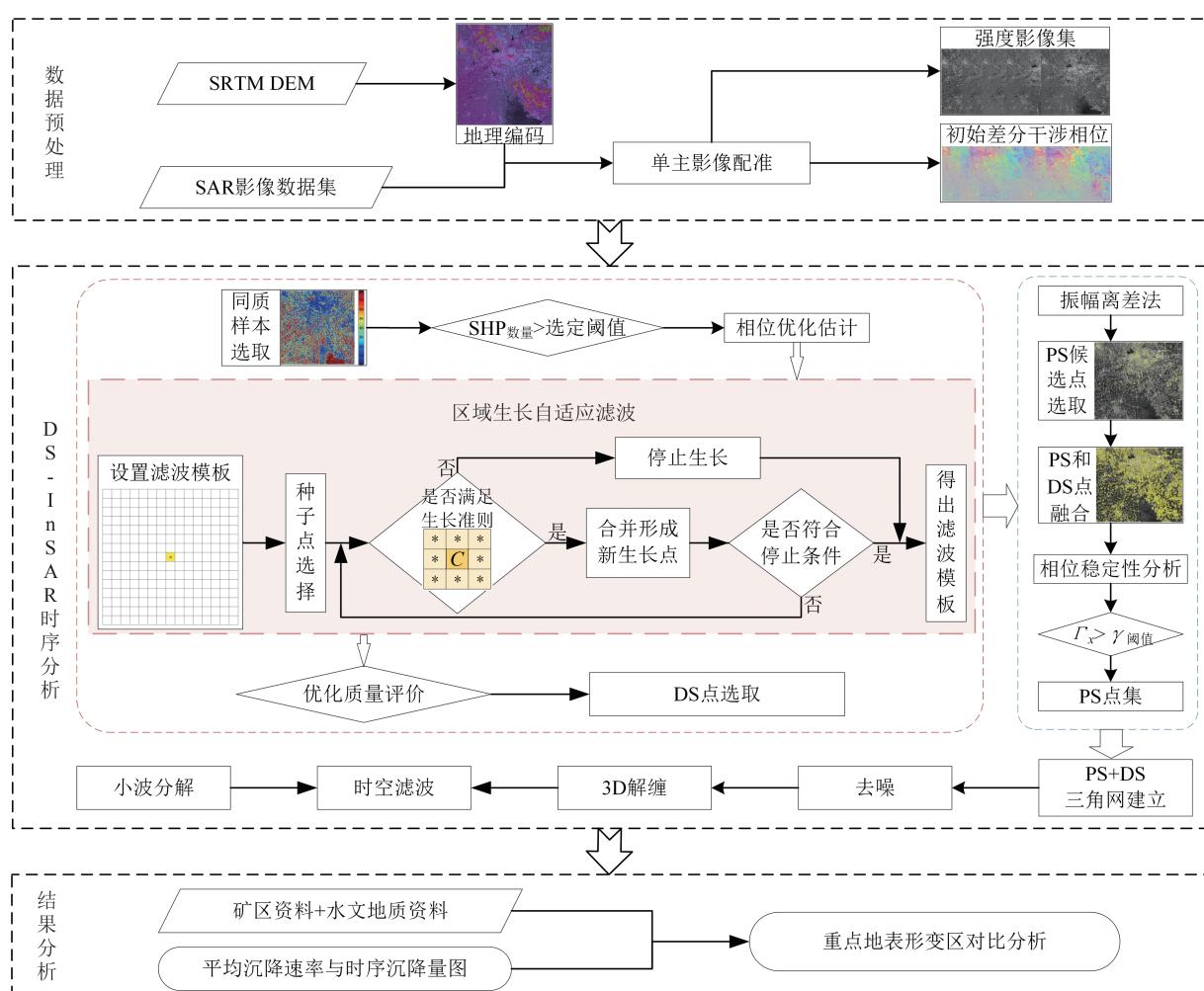


图1 本文方法主要流程示意图

Fig. 1 Flowchart of the Proposed Method

### 1.3 实验与分析

本文以徐州地区潘安湖区域数据作为实验数据( $700 \times 600$ 像素),其幅度信息和相干系数分别如图2(a)和图2(b)所示,可见人工建筑区的相干性较高,裸地、低矮植被区等分布式目标区域相干性较低,且实验区域广泛分布有大量分布式

目标,因此选用该区域进行相位优化对比实验具有一定的代表性。以空间基线最长的干涉对20190416\_20181123为例,原始干涉相位图如图2(c)所示,自适应滤波(adaptive filter, ADF)<sup>[17]</sup>结果如图2(d)所示,EVD优化后相位如图2(e)所示,基于区域生长的再优化相位如图2(f)所

示。其中,ADF 滤波算法是将干涉图分割为相互重叠的滑动窗口,通过二维傅里叶变换计算每个滑动窗口相位的功率谱,并对该功率谱进行平滑,本文实验中将二维快速傅里叶变化(fast Fourier transform,FFT)窗口设置为  $32 \times 32$  像素,频域函数的幂指数设置为 0.4;EVD 算法是依据同

质样本识别结果,通过计算相干矩阵最大特征值对应的特征向量并以此作为分布式目标优化后的相位值;而本文提出方法是在传统 EVD 算法的基础上,融合区域生长算法对优化相位信息增加空间优化约束条件,实现对分布式目标的时空二维相位优化。

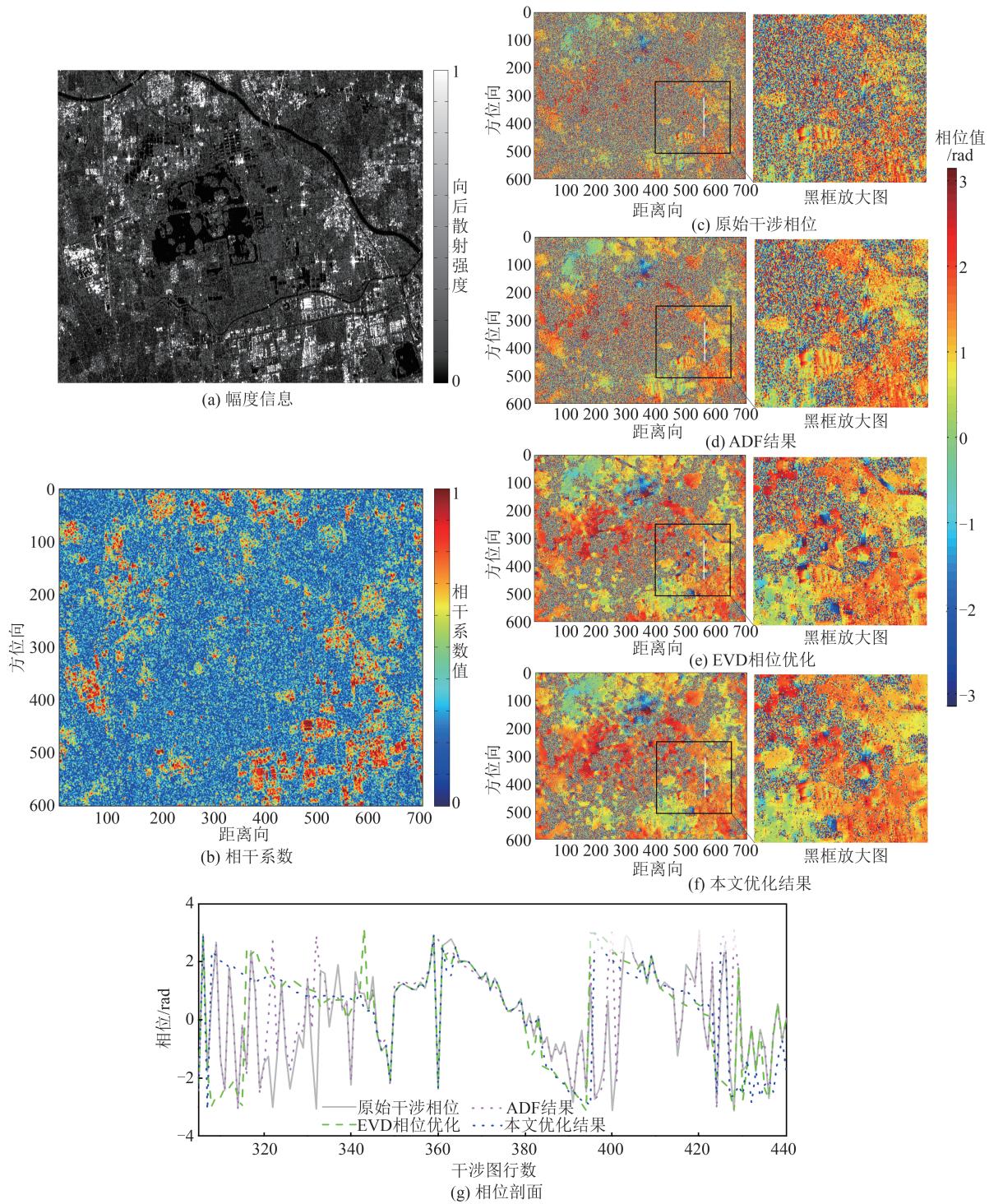


图 2 重点过程图对比展示相位优化算法评估结果

Fig. 2 Comparison and Display of Key Process Charts Evaluation Results of Phase Optimization Algorithm

图 2(c)~(f) 右图展示了将图 2(c)~(f) 左图黑色框中的相位图放大的相位信息,对比可知,

3 种滤波方法得到的优化相位均能一定程度地提高干涉图整体相干性,使干涉相位的轨道信息更

为清晰,有效抑制低相干区域的去相干噪声,且EVD和本文方法对低相干区域干涉相位相干性提高更为显著。此外,不同的滤波优化方法均能够一定程度地抑制噪声相位影响,增强空间域相位的连续性,不同的是ADF滤波对低相干区域的干涉相位优化仍存在一定的不足,EVD相位优化方法虽然能够弥补传统滤波算法的不足,但因为在空间域缺少对相邻像元的约束,易受到噪声影响,本文方法利用区域生长算法对相邻像元进行预判,能够在保留相位边缘信息的同时顾及到传统相位优化算法中忽略的相邻相位连续性特性,实现对分布式目标相位融合时空维的优化。

为分析干涉相位优化前后的空间分布情况,沿图2(c)~(f)左图中的白线绘制了相应的相位剖面,可以看出,原始干涉相位受失相干影响较为严重,ADF滤波抑制相位噪声的能力在失相干

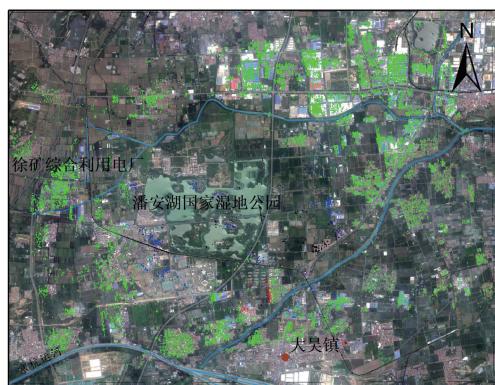
较为严重的区域仍存在一定的不足;在利用EVD方法和本文方法对其进行相位优化后,相位失相干噪声得到了有效抑制,干涉相位更加平稳,且本文方法能够在抑制失相干噪声的同时更好地平滑相邻像素之间的相位值,说明本文方法对相位优化的效果优于其他两种对比方法。

为进一步定量评价不同滤波优化方法的相位质量,表1给出了不同滤波方法优化后干涉相位图的各类常见评价指标参数<sup>[18-21]</sup>,对比可知,本文方法对干涉图相干性的提升更为显著,且从标准差、梯度、等效视数、残差点等方面均能体现出本文方法在相位噪声抑制中的优势,综合评价指标能够说明在噪声抑制和图像边缘保持中的优势。综上,在不同的干涉图质量评价指标下,本文方法均优于其他对比算法。潘安湖区域形变监测不同优化结果对比如图3所示。

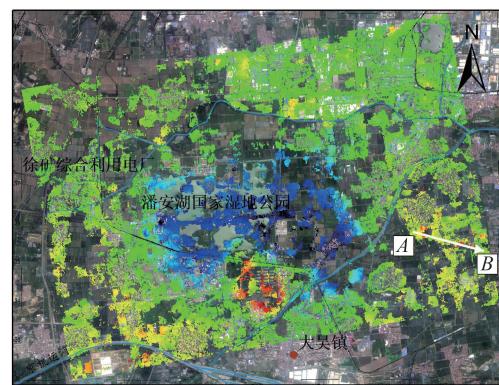
表1 相位优化算法评估结果

Tab. 1 Evaluation Results of Phase Optimization Algorithm

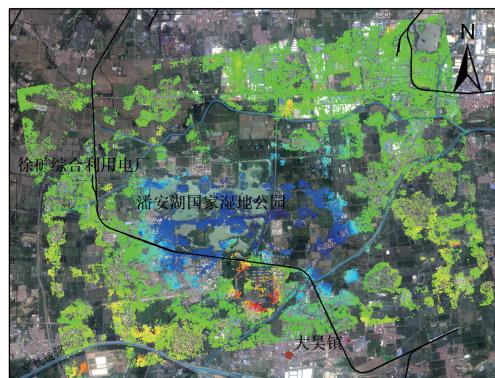
方法	相干性均值	相位标准偏差均值/rad	相位梯度均值/rad	等效视数	相位残差点比例/%	综合评价指标
原始干涉图	0.364 4	1.714 3	0.936 2	0.024 4	39.66	—
ADF	0.422 5	1.648 7	0.848 5	0.052 2	35.72	1.022 8
EVD	0.527 1	1.542 3	0.679 8	0.126 1	28.59	1.004 9
本文方法	0.559 4	1.486 7	0.629 4	0.154 7	27.56	1.003 2



(a) ADF形变结果



(b) EVD优化形变结果



(c) 本文方法形变结果

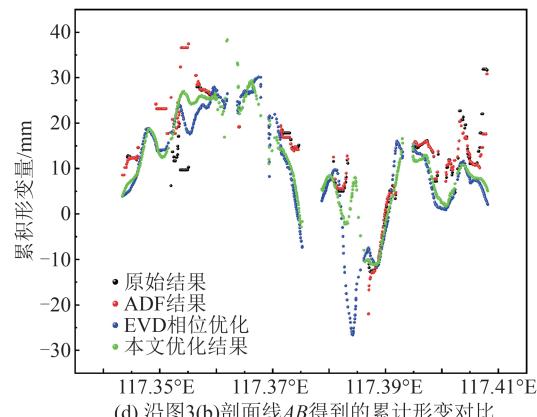


图3 潘安湖区域形变监测不同优化结果对比

Fig. 3 Comparison of Different Optimization Results of Deformation Monitoring in Pan'an Lake

对比优化前后及不同优化方法对潘安湖区域的形变监测结果可知,3个结果所呈现出的主要形变区域趋于一致,不同的是ADF滤波结果在矿区地表环境下获取到的测量点数量难以有效全面反映地表形变特征,而对分布式目标进行相位优化后,能够显著提高测量点数目,本文方法能够在提高测量点数量和分布密度的同时兼顾相邻像素之间相位连续性,获取到更为完整的形变信息,实现矿区地表形变的精细化监测。

## 2 徐州废弃矿区形变结果与讨论

### 2.1 研究区概况与数据源

徐州地处华北平原东南部、江苏省西北部,地形以平原为主,中部和东部存在少数丘陵山地,大地构造上属于华北断块区的南部,地质条件及地质构造复杂性较弱,煤炭资源储量丰富,具有130 a的煤炭开采历史。研究区内包括张小楼煤矿、旗山煤矿、卧牛山煤矿、新河煤矿、权台煤矿等20个矿,面积约270 km<sup>2</sup>,截止2016-12,徐州市区各矿井全部关闭。随着城市转型发展,采空区已经逐步被城市建成区包围(见图4),因此开展废弃矿区采空区土地资源的开发和利用工作已经迫在眉睫<sup>[22]</sup>。

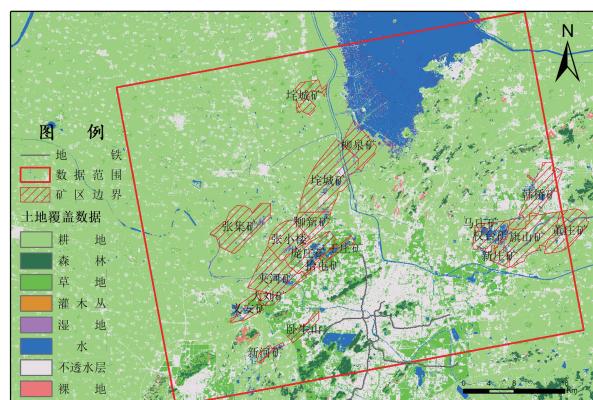


图4 研究区概况图

Fig. 4 Overview Map of Study Area

本文选取2018-05—2020-05共52景Sentinel-1A卫星干涉宽带模式下获取的C波段合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像,并利用卫星精密轨道数据进行轨道参数修正。根据时空基线最优原则,选取2019-04-16的SAR数据为主影像,最长空间基线为110 m。此外,借助30 m分辨率的SRTM数字地形高程模型(digital elevation model, DEM)数据进行地理编码及地形相位模拟与补偿。

### 2.2 监测结果与讨论

图5显示了徐州市地表2018-05—2020-05的地表形变监测结果。

由图5可知,基于区域生长的DS相位优化算法能够修正噪声导致的相邻像素相位不连续及其对形变监测结果的影响,增强了监测结果空间维的连续性约束,实现复杂环境下城市废弃矿区精细化地表形变信息获取。结果显示,徐州市主城区在监测时段内整体区域稳定,形变主要发生在市区周边区域,包括采空区引起的形变和城市建设引起的形变。采空区形变主要发生在徐州西部煤矿采空区、东部贾汪矿区及徐州西侧萧县李集地区,矿区外主要有徐州市区内北二环形变区和徐州西北部郑黄集形变区两个形变中心。

郑黄集形变区主要分布在河道两侧,黄集镇的形变较小,郑集镇形变区主要集中在镇北部的居民区。通过提取形变累积形变量(图5(c)),该区域地表已逐步趋于稳定,经查阅资料可知,该地区于2018-10启动了河道输水扩大工程,其形变可能与河道施工有关。张小楼-夹河矿区群由于开采范围和闭矿时间的不同,不同矿区所呈现的形变趋势有一定差异,证实了在形变较为复杂的环境下本文方法能够在不损失细节信息的同时得到空间上更为平滑的监测结果。张小楼矿区(图5(d))地表持续性下沉现象可能与闭矿后未填充采掘区域有关。而张集矿、夹河矿和庄矿主要呈现抬升趋势,结合相关资料分析,其主要与废弃采空区内地下水位回弹相关。潘安湖区域在权台矿与韩桥矿、旗山矿形成了一个倒“凹”型的抬升区,其抬升半径约3.4 km;新庄矿在矿区东北部有小的沉降现象发生,沉降面积约1.6 km<sup>2</sup>。由累积形变量曲线可知,新庄矿(图5(e))呈现出先降后抬的特点,而权台矿(图5(f))、韩桥矿和旗山矿的抬升速率逐渐增大,主要与矿区关闭后地下水位回升有关。

综上可知,本文提出的基于区域生长的DS相位优化方法在废弃矿区复杂地表环境下,显著提高了监测点数量及空间分布密度,且通过时空联合约束,削弱了时空失相干现象的影响,同时能够减小空间域不规则噪声的影响,进而得到了更精细的地表形变监测结果。

### 2.3 可靠性分析

不同监测结果对比如图6所示。为验证地表形变结果的可靠性,通过对比稳定山体裸露基岩区域(图6(a)和(b))的形变结果可知,裸岩区域

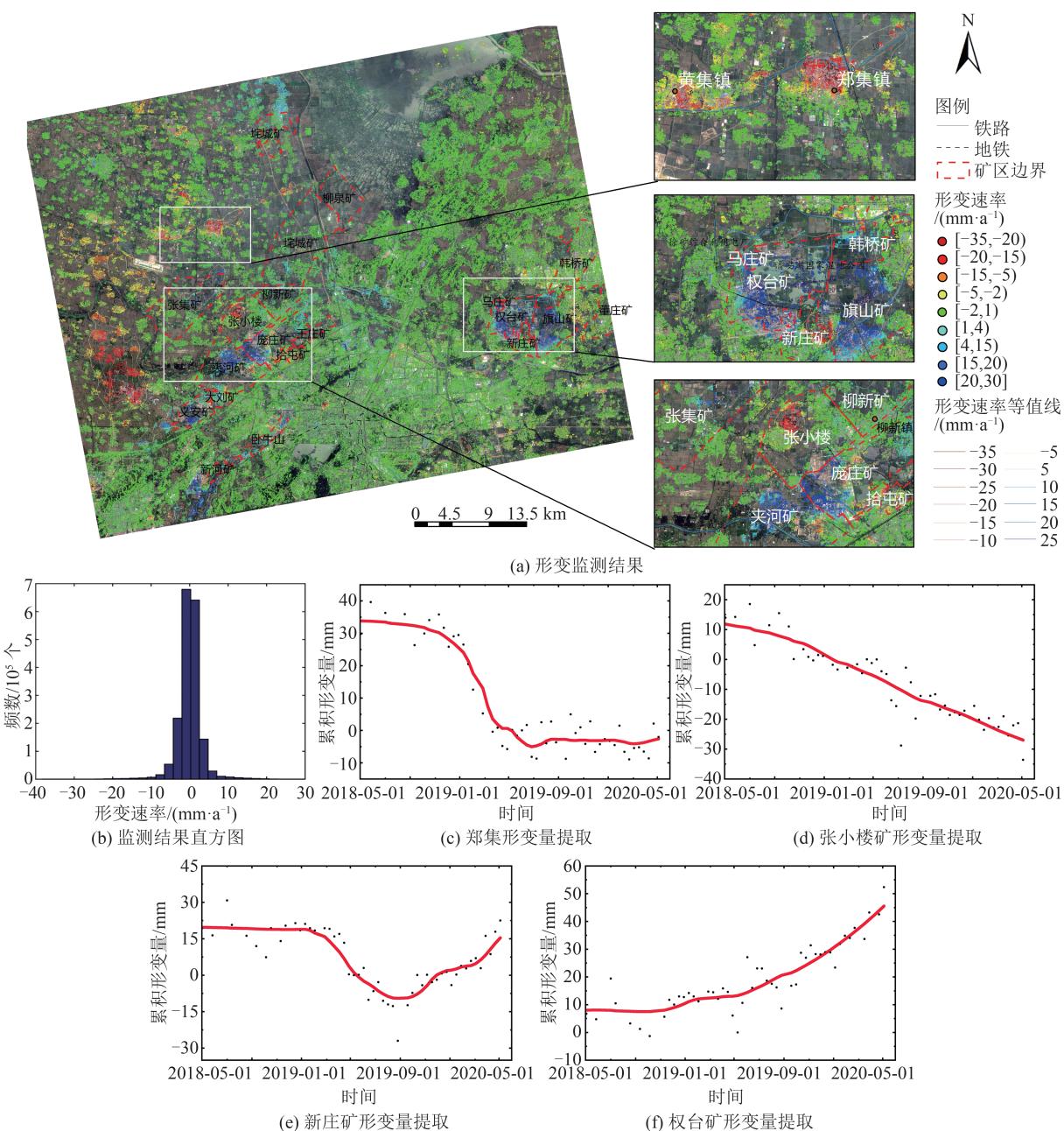


图5 徐州地表形变分布

Fig. 5 Distribution of Surface Deformation in Xuzhou

利用不同监测方法得到的地表形变趋势一致性较好,均能体现裸露基岩区域的地表稳定性;此外,通过研究区范围内的连续运行参考站(continuously operating reference stations,CORS)监测点结果与DS-InSAR时序监测结果作对比可知(图6(c)和(d)),两种监测结果趋势一致且平均误差为5.6 mm,进一步佐证了本文地表形变监测的准确度和可靠性。

### 3 结语

分布式目标相位优化是提取DS目标和开展低相干区时序InSAR地表形变研究的关键。本

文基于区域生长法提出的DS-InSAR相位优化改进算法,能有效提升相位的质量,减少噪声影响,并以潘安湖区域为例开展了实验验证与对比分析,利用该方法对徐州废弃矿区的地表形变情况展开监测分析,得出以下结论:

- 1) 基于区域生长的相位优化改进算法能够弥补传统相位优化算法在空间域优化中的不足,实现时空融合的相位二维优化改进。
- 2) 基于区域生长的相位优化改进算法相较于ADF滤波和EVD优化,能够显著提高测量点数量和分布密度,且能够在保持边缘信息的同时削弱不规则噪声对监测结果的影响。

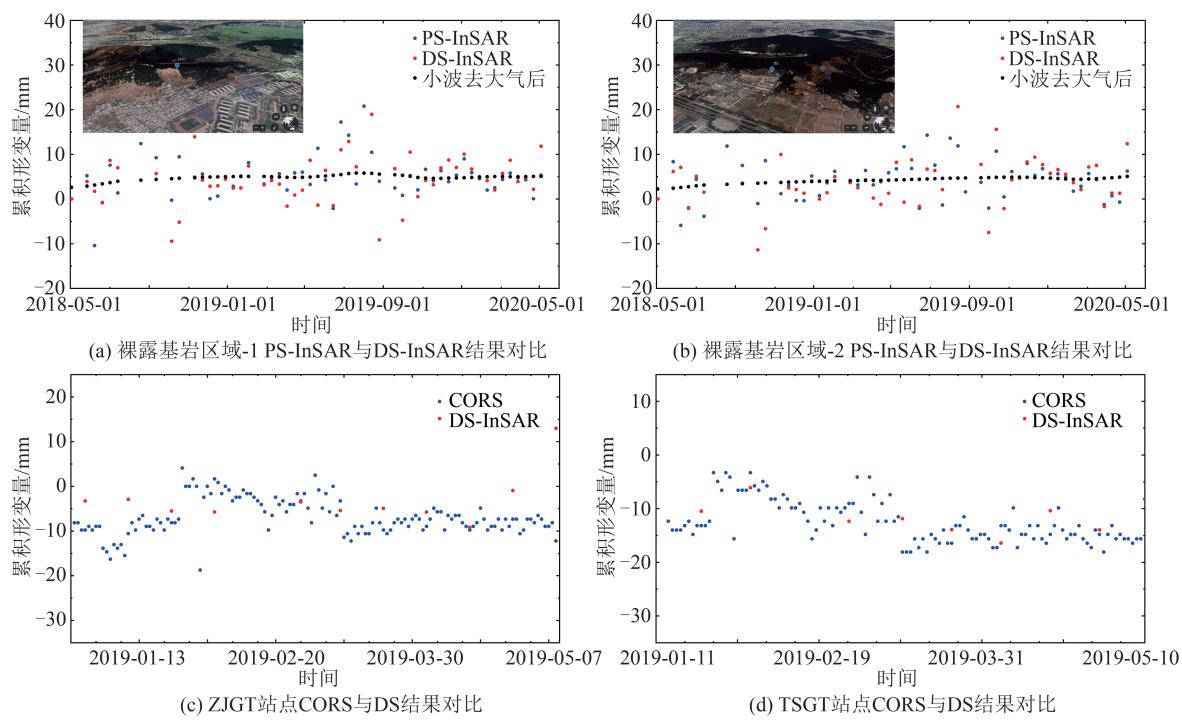


图6 不同监测结果对比图

Fig. 6 Comparison of Different Monitoring Results

3)徐州废弃矿区地表在2018-05—2020-05内地表基本保持稳定,除张双楼煤矿仍处于持续下沉外,其余矿区地表则处于稳定或缓慢回弹状态,且裸露基岩区和CORS监测结果对比表明,本文结果具有较高的精度和可靠性。

分布式目标相位优化提高了相干点目标选取的可靠性,有助于提升时序InSAR技术在废弃矿区复杂地表环境下的形变监测精度,对揭示矿区地表形变的时空演变特征具有重要意义,可为矿区采煤沉陷区稳定性评估与生态环境治理提供技术和数据支撑。

致谢:本文采用的Sentinel-1A卫星数据由欧洲航天局提供;CORS数据的获取和处理得到了徐州市国土资源局和北斗数据处理与分析中心的大力支持,在此表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- [1] Tong Liyuan, Liu Songyu, Fang Lei. Engineering Geological Hazards of Road Construction in Xuzhou Mining Subsidence Area and Their Controlling Measures [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13(2): 164-168. (童立元, 刘松玉, 方磊. 徐州矿区采空塌陷区公路工程地质灾害与防治对策分析 [J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 164-168.)
- [2] Tang Heming. Stability Evaluation of Large and Gently-Inclined Goaf [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2019, 33(4): 202-207. (唐鹤鸣. 大型缓倾煤矿采空区稳定性评价研究 [J]. 岩土工程技术, 2019, 33(4): 202-207.)
- [3] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 2002.
- [4] 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.
- [5] Xu Qiang. Understanding and Consideration of Related Issues in Early Identification of Potential Geohazards [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1651-1659. (许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651-1659.)
- [6] Pu Chuanhao, Xu Qiang, Jiang Yanan, et al. Analysis of Land Subsidence Distribution and Influencing Factors in Yan'an New District Based on Time Series InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1728-1738. (蒲川豪, 许强, 蒋亚楠, 等. 延安新区地面沉降分布及影响因素的时序InSAR监测分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1728-1738.)
- [7] Liu Bin, Ge Daqing, Wang Shanshan, et al. Com-

- bining Application of TOPS and ScanSAR InSAR in Large-Scale Geohazards Identification [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1756–1762. (刘斌, 葛大庆, 王珊珊, 等. TOPS 和 ScanSAR 模式 InSAR 在广域地灾隐患识别中的联合应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1756–1762.)
- [8] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data–Stacks: SqueeSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3460–3470.
- [9] Goel K, Adam N. An Advanced Algorithm for Deformation Estimation in Non-Urban Areas [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73: 100–110.
- [10] Dwivedi R, Narayan A B, Tiwari A, et al. Optimal Estimation of Interferometric Phase for Measuring Surface Deformation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(5): 1339–1349.
- [11] Guarnieri A M, Tebaldini S. On the Exploitation of Target Statistics for SAR Interferometry Applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3436–3443.
- [12] Fornaro G, Verde S, Reale D, et al. CAESAR: An Approach Based on Covariance Matrix Decomposition to Improve Multibaseline–Multitemporal Interferometric SAR Processing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 2050–2065.
- [13] Levine M D, Nazif A M. Dynamic Measurement of Computer Generated Image Segmentations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1985, 7(2): 155–164.
- [14] Jiang M, Ding X L, Hanssen R F, et al. Fast Statistically Homogeneous Pixel Selection for Covariance Matrix Estimation for Multitemporal InSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1213–1224.
- [15] Jiang Mi, Ding Xiaoli, Li Zhiwei. Homogeneous Pixel Selection Algorithm for Multitemporal InSAR [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(12): 4767–4776. (蒋弥, 丁晓利, 李志伟. 时序 InSAR 同质样本选取算法研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4767–4776.)
- [16] Li Peng, Li Qiang, Ma Weimin, et al. Pavement Crack Segmentation Based on  $k$ -Means Clustering [J]. *Computer Engineering and Design*, 2020, 41(11): 3143–3147. (李鹏, 李强, 马味敏, 等. 基于  $k$ -Means 聚类的路面裂缝分割算法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(11): 3143–3147.)
- [17] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035–4038.
- [18] Wang Xingwang. Research on Phase Filtering Method of Synthetic Aperture Radar Interferogram [D]. Changsha: Central South University, 2008. (王兴旺. 合成孔径雷达干涉图相位滤波方法的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.)
- [19] Zhao Yi, Jiang Mi, Yang Chuan, et al. Comparision Between Filtering Methods for InSAR Interferogram [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(6): 149–154. (赵诣, 蒋弥, 杨川, 等. InSAR 干涉图滤波方法对比[J]. 测绘科学, 2017, 42(6): 149–154.)
- [20] Feng Liyuan, Nie Xiangfei, Zhang Yue, et al. Phase Filtering Algorithm of InSAR Interferogram [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2020, 34(12): 1804–1809. (冯丽源, 聂祥飞, 张月, 等. 地基 InSAR 干涉图像相位滤波算法[J]. 北京测绘, 2020, 34(12): 1804–1809.)
- [21] Zhang Jie, Wang Bin, Bai Wenyong, et al. Stability Study of the Double-Arch Structure Formed by Short-Distance Discontinuous Mining in Shallow Strata [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(3): 598–605. (张杰, 王斌, 白文勇, 等. 浅埋近距间隔式采空区顶板“双拱桥”结构稳定性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 598–605.)