

山西大同矿区地表沉降涪城一号SAR卫星监测与性能对比

唐光民^{1,2}, 史先琳³, 戴可人^{1,3,4}, 王昊⁵, 董平³, 王麒翔^{3,6,7},
陈立福⁸, 任维佳⁵, 冉伟杰⁵, 殷慧⁵

1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 成都 610059;
2. 成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059;
3. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059;
4. 国网西南电力研究院, 成都 610095;
5. 长沙天仪空间科技研究院有限公司, 长沙 410205;
6. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400039;
7. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039;
8. 长沙理工大学 人工智能学院, 长沙 410114

摘要: 涪城一号是中国首颗具备干涉测量能力的高分辨率C波段商业SAR卫星, 但其在矿区沉降监测中的监测性能尚缺乏对比性系统评估。本研究以山西大同煤田为研究区, 采用小基线子集合成孔径雷达干涉技术SBAS-InSAR (Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar) 对11景涪城一号进行时序解算, 并与Sentinel-1、陆探一号卫星结果对比。结果表明: 在时序InSAR测量方面, 涪城一号共识别出57处沉降区, 能够全面揭示矿区沉降分布特征; 针对小范围形变区 (<0.1 km²) 的识别, 涪城一号探测到8处, 而Sentinel-1未能识别, 显示其高分辨率成像在小范围矿区沉降识别上的优势。此外, 从形变速度对比来看, 针对较低速率形变区, 两类数据识别结果能保持良好一致性; 而针对较高速率形变区, 涪城一号凭借更高分辨率和更大的可探测形变梯度, 能够捕捉到更准确的形变信号, 特别是针对小范围快速形变, 涪城一号测量精准度更高。多组卫星差分InSAR对比结果显示: 涪城一号监测到的形变量始终大于Sentinel-1, 并在一处小形变量区比陆探一号多捕捉约23 mm, 表明其相对较低分辨率的Sentinel-1能探测更大形变量级, 相较L波段的陆探一号则对小形变量更敏感。在相干性方面, 涪城一号在相干性0.6—1.0的像素点占比达12.53%, 高于Sentinel-1的7.19%, 显示其同波段条件下相干性表现更优; 但低于更长L波段陆探一号的22.43%。综上, 涪城一号在矿区沉降监测中展现出对小范围形变的灵敏探测优势, 并兼具较大形变量级监测与小形变量响应能力, 本研究可为未来国产SAR卫星在矿区沉降监测的业务化应用提供参考。

关键词: 涪城一号, 高分辨率商业SAR卫星, 差分InSAR, 时序InSAR, 监测性能评估, 矿区沉降监测

中图分类号: P208.8/P2

引用格式: 唐光民, 史先琳, 戴可人, 王昊, 董平, 王麒翔, 陈立福, 任维佳, 冉伟杰, 殷慧. 2026. 山西大同矿区地表沉降涪城一号SAR卫星监测与性能对比. 遥感学报, 30(4): 1182–1197

Tang G M, Shi X L, Dai K R, Wang H, Dong P, Wang Q X, Chen L F, Ren W J, Ran W J and Yin H. 2026. Surface subsidence monitoring and performance comparison of Fucheng-1 SAR satellite in the Datong mining area, Shanxi. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 1182–1197 [DOI: 10.11834/jrs.20265389]

收稿日期: 2025-09-25; 预印本: 2026-01-01

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42371462); 四川省杰出青年科学基金(编号:2023NSFSC1909); 四川省测绘地理信息学会科技开放基金(编号:CCX202403); 湖南省教育厅重点项目(编号:24A0247); 国家自然科学基金(编号:42574060)

第一作者简介: 唐光民, 研究方向为基于InSAR技术的地质灾害监测与预警。E-mail: tangguangmin1@stu.cdut.edu.cn

通信作者简介: 史先琳, 研究方向为多源遥感地质灾害监测与地学空间信息智能服务。E-mail: shixianlin@cdut.edu.cn

1 引言

近年来，全球在轨合成孔径雷达（SAR）卫星数量快速增长（Villano等，2022），为地球物理过程研究（Fan等，2025；Ren等，2024）和地质灾害监测（戴可人等，2020；李振洪等，2019；许强等，2019）等提供了坚实的硬件支撑。国外陆续涌现出Capella Space、Synspective（StriX）和Maxar等商业SAR系统，其高分辨率卫星已广泛应用于城市形变监测、资源评估和应急响应等领域。与此同时，中国商业SAR卫星发展亦加速推进，星逻、四维图新和中国四维等代表性企业已在地质灾害监测、海洋环境监测、城市安全、水资源管理和农业观测等方面展现出应用潜力（Kadı和Yılmaz，2024；Polat等，2022）。然而，目前国产高分辨率干涉SAR卫星大多仍处于验证或测试阶段，基于国产卫星开展InSAR形变监测的案例也相对有限。

涪城一号是中国首颗具备干涉测量能力的商业C波段SAR（合成孔径雷达）卫星，于2023年6月7日由长沙天仪研究院（Spacety）成功发射，标志着“绵阳星座”的首次部署。这一发射不仅填补了中国商业SAR遥感领域的空白，也代表着国内商业航天向高端雷达遥感技术迈出的重要一步。涪城一号具备11 d重访周期，支持左右视成像，可在聚束、条带、扫描等多种模式下实现高分辨率与宽幅成像。其影像幅宽覆盖范围达7—170 km，空间分辨率在1—20 m，最高可达1.0 m × 0.5 m。这一设计使卫星在获取细节与覆盖范围之间达到平衡，能够根据不同应用需求实现精细监测或大区域快速扫描。凭借左右视成像能力，涪城一号对同一目标区域可以进行升轨、降轨结合的多视角观测，大大提高了成像几何的多样性和观测频率。自发射以来，涪城一号凭借其优异的性能，已引起相关领域的广泛关注。

InSAR及时序合成孔径雷达干涉技术TS-InSAR（Time-Series Interferometric Synthetic Aperture Radar）是评估SAR卫星干涉成像性能的关键指标，也是当前雷达遥感技术中最具挑战性和应用价值的前沿方向之一（Dai等，2020；Tang等，2025）。InSAR利用卫星不同时刻重复轨道观测的相位差进行干涉，可精确测量地表细微形变；TS-InSAR则进一步利用长时间序列影像，在毫米级精度上提取地

表形变的演化过程。该技术已广泛应用于地表沉降监测、地质灾害预警和城市基础设施安全评估等领域，由于对卫星数据相干性和轨道稳定性的要求极高，因而被视为衡量干涉测量可靠性的核心标准（Qin等，2025）。对于新近发射的涪城一号卫星而言，时序InSAR分析能够削弱单次干涉中大气延迟等误差影响，获取更稳定可靠的形变信息，从而全面评估其在长期监测中的稳定性和精度。同时，矿区地表沉降等应用场景对监测的时效性和连续性要求很高，涪城一号所具备的高重访率和高分辨率特性，有望提供更灵敏的形变监测手段，满足此类应用需求。然而，现有研究多集中于涪城一号在矿区沉降（Feng等，2024）和滑坡监测（陈博等，2025）等方面的初步应用，方法上主要依赖差分干涉合成孔径雷达技术D-InSAR（Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar），并尝试通过大气改正提升精度（Han等，2025），整体上仍局限于两景干涉（肖儒雅等，2025），矿区沉降监测中的监测性能尚缺乏全面对比性系统评估。针对这一不足，开展涪城一号监测性能的对比性系统评估，将有助于揭示其在长时间序列形变监测中的潜在优势，并为矿区地质灾害防治与资源管理提供更加精细、可靠的遥感支撑。

本文针对涪城一号SAR卫星在矿区沉降监测中的监测性能缺乏系统评估的问题，以山西大同煤田为研究区，结合Sentinel-1和陆探一号数据，采用对比性系统评估方法，全面分析涪城一号的矿区监测性能。研究首先采用SBAS-InSAR方法对矿区形变进行时序监测，并识别矿区沉降区域。在时序监测性能评估方面，本文将涪城一号与同期Sentinel-1的时序InSAR结果进行对比，重点从形变区识别差异、形变速率的相关性分析以及时序形变的对比3个方面，系统评估涪城一号的时序监测性能。在干涉测量性能评估方面，通过与Sentinel-1和陆探一号的对比分析，分别从形变探测能力和相干性表现两个方面，对涪城一号的干涉性能进行评估。本研究为未来国产SAR卫星在矿区沉降监测的应用提供了宝贵的参考。

2 研究区概况与数据

2.1 研究区域

研究区位于山西省北部的大同煤田（Xiuming等，2008；Xu等，2022），总面积约1828 km²，已

探明煤层最大埋深300 m，地下煤矿开采活动广泛。区内地貌差异明显，大同盆地处于鄂尔多斯地块与华北地块的构造边界带：东南部为盆地，海拔一般950—1050 m；西北部为山地，海拔主要1500—2100 m。大同煤田位于大同市西北部，范围涵盖大同、怀仁、山阴、左云和右玉等县见图1。该煤田为多期成煤区，包括石炭—二叠纪煤田（1739 km²）和侏罗纪煤田（772 km²）。作为大同市的重要经济支柱，煤炭产业在推动区域经济快速发展的同时，长期采矿也引发了地表沉降、滑坡和地裂缝等地质灾害，对周边居民和基础设施造成了严重威胁。

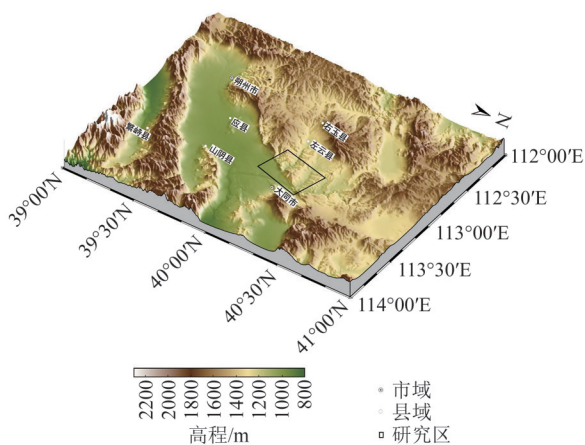


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2.2 数据使用情况

本文使用的3组干涉SAR数据分别来自国产商业卫星涪城一号（肖儒雅等，2025）、国产陆探一号（Hu等，2024）以及欧洲航天局的Sentinel-1

（戴可人等，2020；唐光民等，2023），其主要参数对比如表1所示，其中，涪城一号和陆探一号采用降轨观测，Sentinel-1采用升轨观测。根据InSAR视线向形变与三维形变之间的几何关系可知（Wright等，2004），在“以垂直沉降为主、水平形变可以忽略”的前提下，升轨和降轨在垂直分量上的敏感度基本一致，轨道方向差异主要体现在东西向位移符号的变化，而对垂直沉降的贡献形式相同。因此，鉴于本研究区为典型矿区且形变以垂直沉降为主，在该区域开展升降轨数据的对比分析具有明确的物理合理性，涪城一号卫星重量约300 kg，轨道周期为11 d，采用条带式成像模式，成像幅宽25 km，方位向分辨率1.67 m，距离向分辨率1.25 m，入射角约37.05°。该卫星为中国新一代高分辨率商业SAR星，可提供米级空间分辨率数据，在城市基础设施监测、地质灾害预警以及矿区沉降分析等方面具备较高的精度与可靠性。Sentinel-1卫星重量约2280 kg，轨道周期12 d，采用TOPS模式，单景成像幅宽高达250 km，方位向分辨率约13.94 m，距离向分辨率2.33 m，入射角约33.66°。该卫星具备全球覆盖能力和长期数据积累优势，适用于大范围地表形变与环境变化监测，但其成像几何和扫描方式对配准精度要求较高。陆探一号卫星重量约3600 kg，轨道周期8 d，同样采用条带式成像模式，成像幅宽50 km，方位向分辨率1.73 m，距离向分辨率1.66 m，入射角约39.08°。该卫星工作于L波段，相较于C波段卫星（如涪城一号与Sentinel-1），具备更强的地表穿透能力，在地形起伏大或植被覆盖密集的区域中具有更突出的优势。

表1 干涉SAR卫星参数对比

Table 1 Comparison of interferometric SAR satellite parameters

卫星	轨道	重量/kg	干涉重访周期/d	主要成像模式	成像幅宽/km	方位向分辨率/m	距离向分辨率/m	数据使用情况	入射角/(°)	景数	数据获取
涪城一号	降轨	300	11	条带	25	1.67	1.25	2024-01-02—2024-05-13	37.05	11	商业
Sentinel-1	升轨	2280	12	TOPS	250	13.94	2.33	2023-12-20—2024-05-12	33.66	12	全球免费
陆探一号	降轨	3600	8	条带	50	1.73	1.66	2024-04-09、2024-05-07	39.08	2	业务单位共享

需要说明的是，3颗卫星的入射角相近：涪城一号约37.05°、Sentinel-1为33.66°、陆探一号约39.08°，最大差值不超过5.50°（其中涪城一号与Sentinel-1仅相差3.39°）。研究区地势总体平坦、起伏较小，形变以垂直分量为主。综合这些因素，不

同传感器获取的LOS向形变结果具有良好的可比性。

3 研究方法

3.1 技术路线

涪城一号是中国首颗具备干涉测量能力的高

分辨率c波段商业SAR卫星，但目前对其在矿区沉降监测中的监测性能尚缺乏对比性系统评估。为此，本文以山西大同矿区为研究区，综合利用涪城一号、Sentinel-1和陆探一号数据开展对比分

析，以全面评价涪城一号在矿区的监测性能。如图2所示，本研究由3个核心模块组成：(a) 数据收集；(b) 时序处理；(c) 矿区监测性能评估。

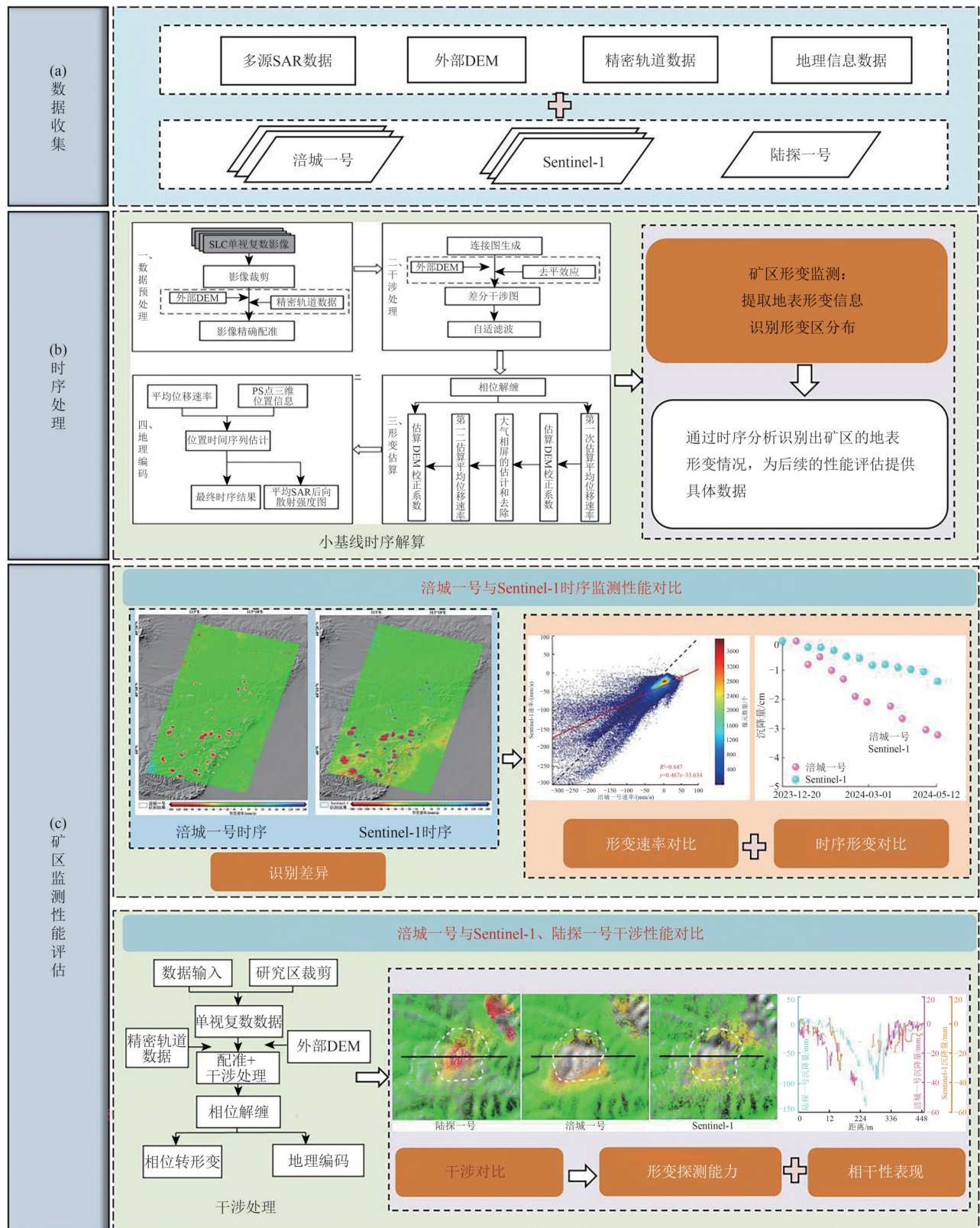


图2 研究路线
Fig. 2 Research route

在数据收集阶段,本研究获取了多源合成孔径雷达(SAR)数据,包括来自涪城一号、Sentinel-1和陆探一号卫星的影像,并收集了外部数字高程模型(DEM)数据、精密轨道数据以及相关地理信息数据。

在时序处理阶段,采用小基线集干涉合成孔径雷达(SBAS-InSAR)(Berardino等,2002)方法对SAR数据进行时序分析,获取了基于涪城一号数据的矿区地表形变监测结果,并开展矿区形变区识别。

在矿区监测性能评估阶段,本文将工作划分为时序InSAR监测评估和干涉性能对比分析两部分。在时序性能评估方面,涪城一号共采用2024-01-02—2024-05-13日期间的数据,Sentinel-1采用2023年12月20日—2024年5月12日期间的数据。两者时间覆盖基本一致,保证了时间跨度上的同步性与结果的可比性。时序性能评估主要通过对比两者识别的形变区识别差异、形变速率对比及其时序形变对比,探讨涪城一号在矿区地表形变监测中的时序特征与稳定性。在干涉性能对比分析方面,为系统评估涪城一号的干涉精度与相干性表现,本文选取了同期的Sentinel-1和陆探一号数据进行比对。具体而言,涪城一号选取2024年4月10日与5月2日2景,陆探一号选取2024年4月9日与5月7日2景,Sentinel-1选取2024年4月6日与5月12日2景。3组数据覆盖相同的研究区域与形变时段,在几何与时间条件上保持良好对应性。干涉性能评估从形变探测能力和相干性表现两个方面入手,对涪城一号的干涉性能进行了系统性评估。

3.2 InSAR数据及处理

鉴于本研究的目标是全面评估涪城一号卫星在矿区沉降监测中的干涉监测性能,在时序处理方面,采用了小基线集(SBAS-InSAR)。该方法在理论上已十分成熟并经过广泛验证。该方法最早由Berardino等(2002)在2002年提出。与分布式散射体(DS)(Ferretti等,2011)、永久散射体(PS)(Ferretti等,2001)以及StaMPS(Hooper,2008)等其他InSAR方法相比,选择SBAS-InSAR的原因如下:

(1) 标准化处理流程和更强的可比性。

SBAS-InSAR拥有完善且被广泛采用的处理流程,而DS方法则高度依赖于算法设计、软件实现和操作人员经验。本研究旨在涪城一号卫星当前成

像与数据条件下评估其监测性能。因此,为避免更复杂的处理方法可能人为提高结果的情况,特意选择了SBAS-InSAR以确保评估能够真实反映其在实际应用条件下的性能。

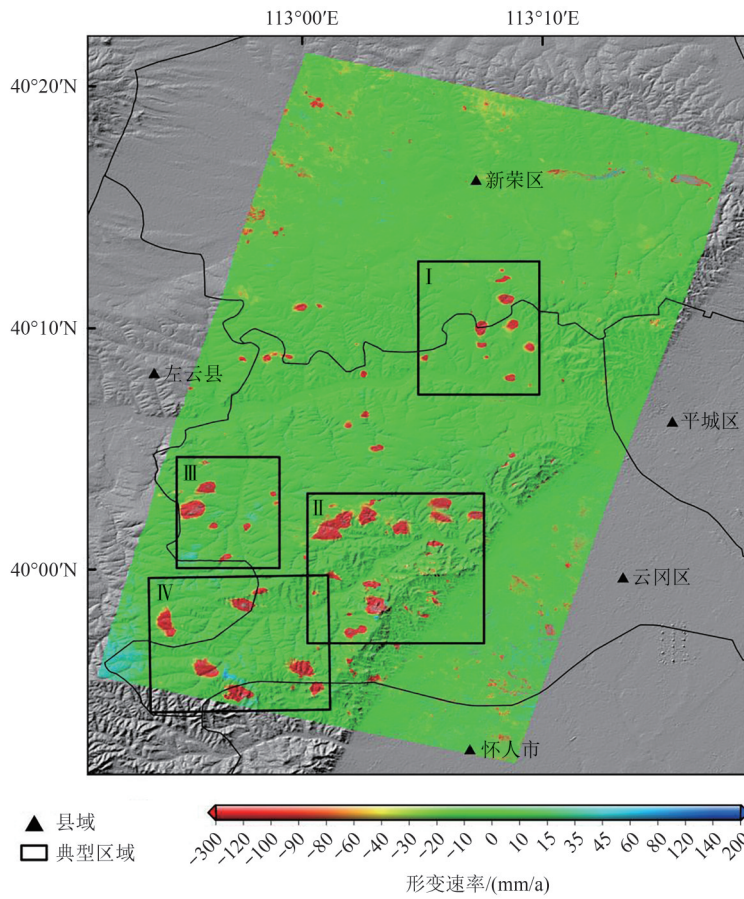
(2) 适用于大范围非均匀沉陷的监测。

在矿区,地表沉陷通常具有非均匀性、非线性和空间连续性的特征。与依赖有限稳定点目标的PS-InSAR方法相比,SBAS-InSAR通过约束时间和空间基线,能够在保持较好相干性的同时,保留沉陷场的空间连续性,更有利于揭示矿区大范围形变区的整体演化过程。

为确保多源数据处理过程中参数的一致性,所有数据集均进行了几何配准(Sansosti等,2006),配准精度优于1/8像素。多视因子设置为:涪城一号和陆探一号均为3:3,Sentinel-1为4:1。滤波环节采用阈值0.4、窗口大小64的条件下进行两次迭代滤波(Goldstein和Werner,1998)。相位解缠采用最小费用流算法(Costantini,1998;Pepe和Lanari,2006),解缠阈值设为0.4。在时序解算过程中,针对涪城一号和Sentinel-1数据,综合考虑大气延迟在时间域上表现为高通特征、在空间域上表现为低通特征的规律,结合实际形变场的时空尺度特征,对干涉图序列分别进行时间高通与空间低通滤波处理,从而有效抑制大气相位延迟的影响。在涪城一号干涉性能评估方面,本研究选取了两景陆探一号数据进行对比分析。由于研究期间电离层活动较弱且时间基线较短,从数据的干涉结果来看,未发现明显的大气或电离层条纹,表明该数据具备较好的可比性,可用于涪城一号干涉性能的对比分析。整个处理流程采用GAMMA软件完成。

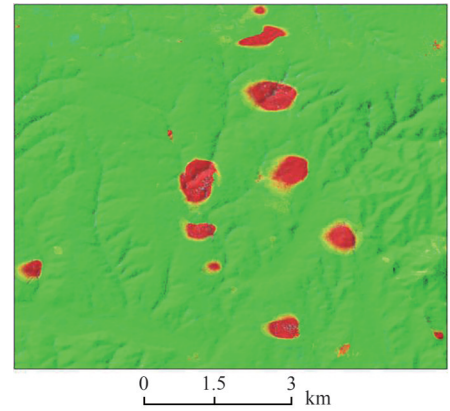
4 矿区时序InSAR监测结果

基于11景涪城一号数据,本研究采用SBAS-InSAR方法进行形变解算。整体时序形变结果如图3所示。得益于矿区显著的形变特征及良好的雷达回波信号,在本研究的处理框架下有效减弱了长波长相位和噪声的影响。通过较强滤波与中等阈值解缠,矿区开采引发的形变区得以清晰显现,共识别出57处沉降区,最大LOS向形变速率达到-300 mm/a。此外,选取了4个典型区域进行放大展示(图3(b)—(e))。可见:矿区开采导致的沉降特征十分显著,形变信号清晰可辨,证明了涪城一号在矿区形变监测中的有效性与应用潜力。



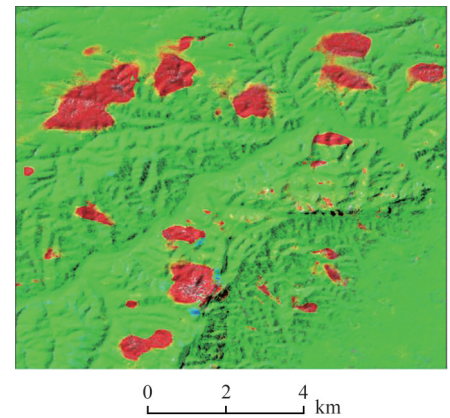
(a) 涪城一号矿区时序监测结果图

(a) Time series monitoring results of the Fucheng-1 mining area



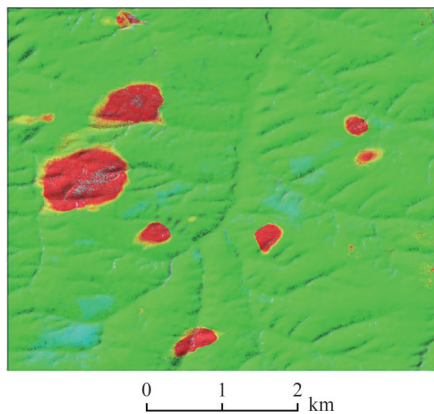
(b) (a)图中 I 区域的域放大图

(b) Zoomed-in map of area I in Fig. (a)



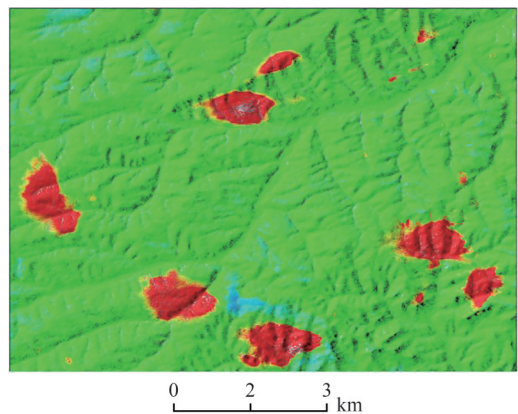
(c) (a)图中 II 区域的域放大图

(c) Zoomed-in map of area II in Fig. (a)



(d) (a)图中 III 区域的域放大图

(d) Zoomed-in map of area III in Fig. (a)



(e) (a)图中 IV 区域的域放大图

(e) Zoomed-in map of area IV in Fig. (a)

图3 涪城一号矿区地表沉降时序 InSAR 监测结果

Fig. 3 Time series InSAR monitoring results of surface subsidence in the Fucheng-1 mining area

5 涪城一号矿区时序 InSAR 监测评估

5.1 形变区识别差异

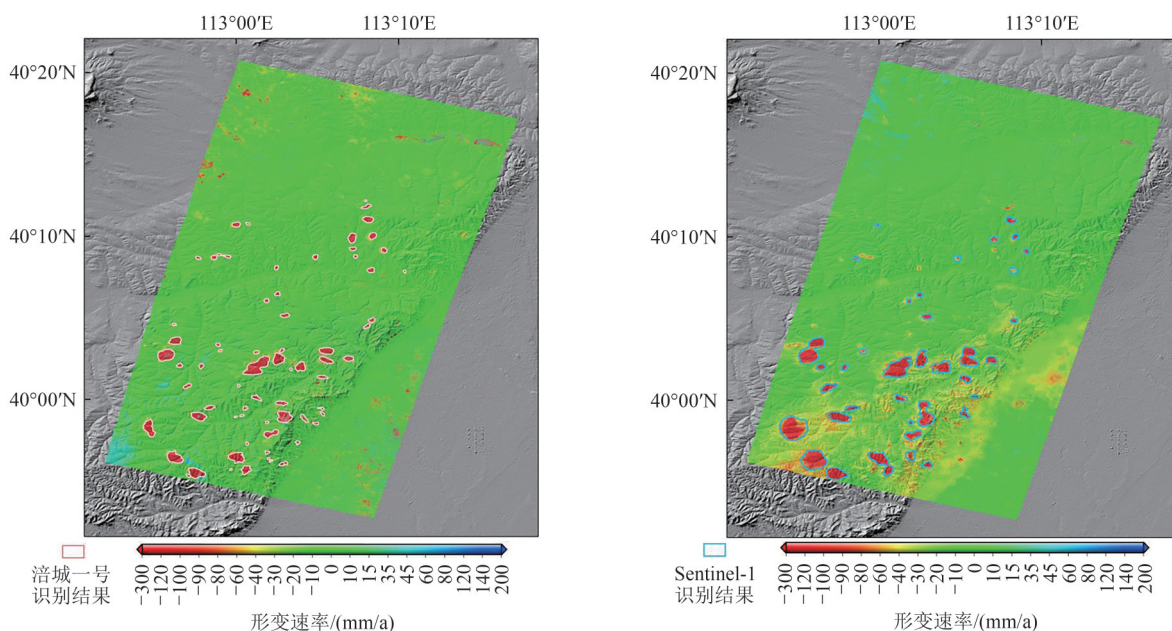
为全面评估涪城一号在矿区沉降监测中的干涉监测性能，本研究首先从形变区识别的角度展

开分析。在统一的处理框架下，分别解算了同期涪城一号与 Sentinel-1 卫星的时序 InSAR 结果，并将识别到的形变区按面积大小划分为 3 类：小范围形变区 ($<0.1 \text{ km}^2$)、中等范围形变区 ($0.1\text{--}0.3 \text{ km}^2$) 和大范围形变区 ($>0.3 \text{ km}^2$)，识别结果如表 2 和图 4 所示。

表2 涪城一号与 Sentinel-1 在矿区形变区识别数量上的对比

Table 2 Comparison of the number of deformation areas identified in mining regions by Fucheng-1 and Sentinel-1

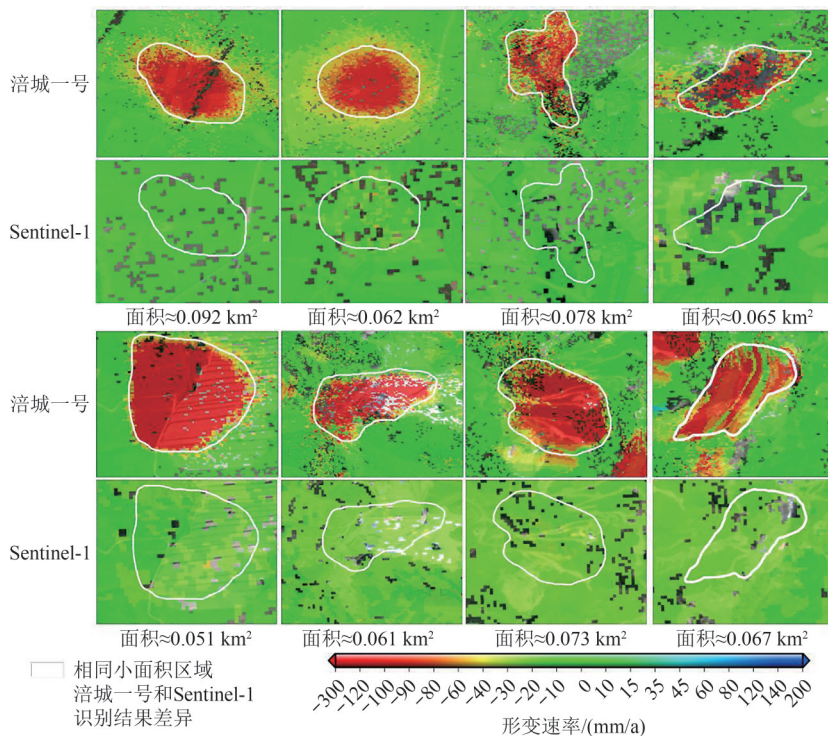
面积大小/km ²	涪城一号识别数量	Sentinel-1 识别数量
小范围形变区(<0.1)	8	0
中等范围形变区(0.1—0.3)	20	9
大范围形变区(>0.3)	29	28



(a) 涪城一号时序 InSAR 识别结果

(b) Sentinel-1 时序 InSAR 识别结果

(a) Mining subsidence detected by Fucheng-1 time-series InSAR (b) Mining subsidence detected by Sentinel-1 time-series InSAR



(c) 相同小面积沉降区涪城一号与 Sentinel-1 识别差异图

(c) Subsidence comparison map showing the differences between Fucheng-1 and Sentinel-1 in the same small area

图4 涪城一号与 Sentinel-1 时序 InSAR 矿区沉降识别对比

Fig. 4 Comparison of mining subsidence detection from time-series InSAR between Fucheng-1 and Sentinel-1

在小范围形变区 ($<0.1 \text{ km}^2$) 中, 涪城一号共识别出 8 处形变区, 面积范围为 $0.051\text{—}0.091 \text{ km}^2$, 最大形变速率超过 -100 mm/a , 而 Sentinel-1 未能识别出任何此类区域。该差异凸显了涪城一号在识别小范围形变区方面的能力。

在中等范围形变区 ($0.1\text{—}0.3 \text{ km}^2$), 涪城一号共识别出 20 处, Sentinel-1 仅识别出 9 处, 差值达 11 处, 显示出明显优势; 在大范围形变区 ($>0.3 \text{ km}^2$), 涪城一号与 Sentinel-1 分别识别出 29 和 28 处, 差值缩小至 1 处。整体上, 两者在大范围形变的分布特征基本一致。结果表明, 涪城一号的优势并不限于小范围形变区, 而是在中等范围形变区上同样具备更强的解析和识别能力, 只是随着形变尺度的增大, 其优势幅度逐渐缩小。

涪城一号在小范围形变区识别中的突出表现主要得益于其高分辨率 (方位向 \times 距离向: $1.68 \text{ m}\times 1.36 \text{ m}$)。高的分辨率的特点使其能够有效区分局部细微形变与周围未变形区域, 避免信号被平滑或淹没, 从而确保小范围形变区在影像中清晰呈现。相比之下, Sentinel-1 的较低分辨率 (方位向 \times 距离向: $13.95 \text{ m}\times 2.32 \text{ m}$) 易导致局部小范围形变区信号与邻近像元的地表回波混合, 因而难以实现有效识别。

5.2 时序 InSAR 速率差异

随后, 本研究选取了 4 处典型形变区 (图 5), 对同期涪城一号与 Sentinel-1 的时序 InSAR 结果进行了对比分析。从形变边界来看, 在相同的处理框架下, Sentinel-1 的结果整体呈现更大范围的形变区, 但边界相对模糊。这主要源于较强滤波作用, 使得周围地物与形变信号被平滑, 造成边界扩展和不清晰。相比之下, 涪城一号凭借更高的空间分辨率, 能够更清晰地刻画形变边界, 保持其完整性与细节特征。

在形变速率方面, 由于不同区域的速率值存在差异, 为了更好地比较涪城一号与 Sentinel-1 对不同尺度形变的响应能力, 本研究以涪城一号的速率结果作为标准值, 并通过计算涪城一号和 Sentinel-1 的速率差值在标准值中的占比来评价两者的速率响应程度。结果显示, 在大范围形变区 (典型区域 A 为 2.1 km^2 、典型区域 B 为 3.2 km^2), 涪城一号的速率中位数分别约为 -160 mm/a (图 5 (a)) 和 -150 mm/a (图 5 (b)), 而 Sentinel-1 分别为

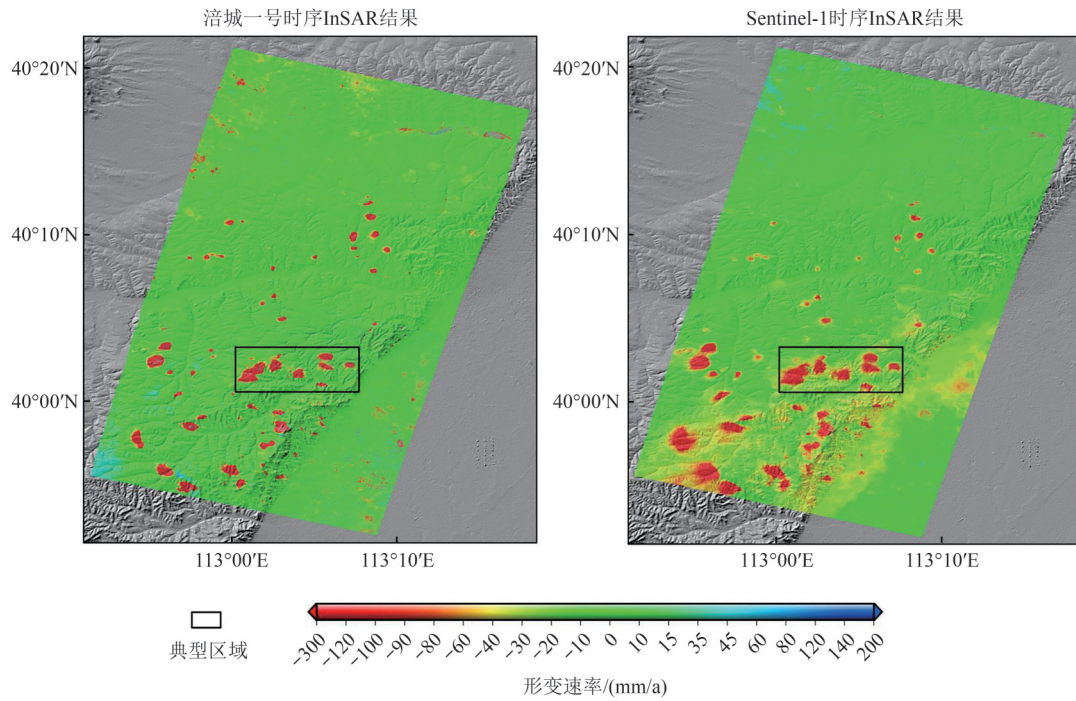
-120 mm/a 和 -110 mm/a , 两处差值占标准值的比例约为 25%。在小范围形变区 (典型区域 C 为 0.1 km^2 、典型区域 D 为 0.08 km^2), 涪城一号的速率中位值约为 -100 mm/a (图 5 (c)) 和 -55 mm/a (图 5 (d)), 而 Sentinel-1 分别为 -50 mm/a 和 -30 mm/a , 差值占比显著增加至约 50%。这一结果表明, 涪城一号在形变速率监测中的信号响应能力显著优于 Sentinel-1, 能够在相同条件下探测到更强烈的形变速率。受益于更高的空间分辨率 (方位向 \times 距离向: $1.64 \text{ m}\times 1.25 \text{ m}$, 相较于 $13.94 \text{ m}\times 9.32 \text{ m}$) 和更大的可探测形变梯度 (23 mm/m 相较于 12 mm/m , Dai 等, 2023), 涪城一号能够实现更精细的像元解析, 对形变信号更为敏感, 从而捕捉到更大的速率幅值。值得注意的是, 这一优势在小范围形变区表现得尤为突出: 速率差值占比由大范围形变区的约 25% 提升至小范围形变区的约 50%, 说明随着形变范围减小, 涪城一号相较于 Sentinel-1 的优势更加明显。

在时序 InSAR 测量方面, 4 处典型区域 (图 5) 的结果显示, 涪城一号与 Sentinel-1 的沉降变化趋势总体一致, 验证了涪城一号监测结果的可靠性。然而, 涪城一号提取的沉降量整体上高于 Sentinel-1。鉴于矿区地表存在显著的大形变特征, 当形变量超过系统的最大可探测形变梯度时, InSAR 信号可能发生相位饱和 (Wempen 和 McCarter, 2017), 从而导致沉降低估。得益于更高空间分辨率所带来的最大可探测形变梯度 (涪城一号为 23 mm/m , 而 Sentinel-1 为 12 mm/m)。相较于 Sentinel-1, 涪城一号在大形变量条件下仍能保持信号完整性, 有效捕捉更强的沉降过程; 相比之下, Sentinel-1 易受相位饱和限制。该结果表明, 涪城一号在大形变监测中相较于 Sentinel-1 具备更强的适应性与显著优势。

需要说明的是, 本研究对涪城一号性能的评价主要基于与 Sentinel-1 及陆探一号的对比分析, 尚未引入 GNSS 与水准观测等独立地面实测数据对 InSAR 结果进行外部精度验证。因此, 目前结果和结论更多反映的是不同传感器之间的相对对比性能, 对形变量的绝对精度、系统偏差及误差来源的认识仍存在一定局限性。后续有必要结合 GNSS 连续站和精密水准测量开展多源联合验证, 以进一步提升涪城一号形变监测能力评估的全面性与稳健性。

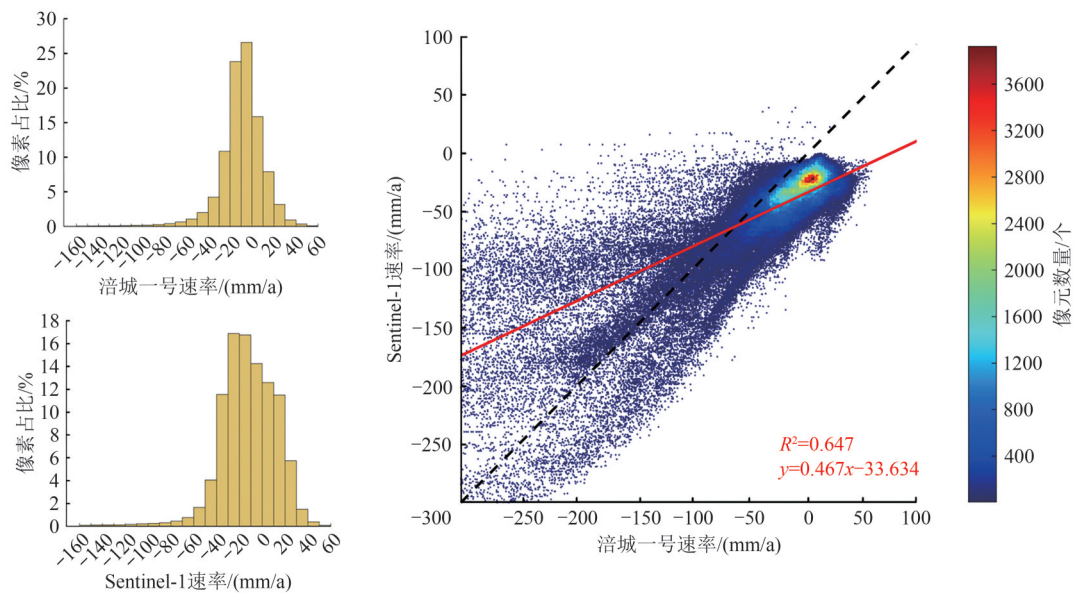
为深入揭示涪城一号在时序监测中的表现, 本研究首先统计了同期涪城一号 (图 6 (a)) 和 Sentinel-1 的时序 InSAR 速率结果。并选取一处典型区域统计速率直方图, 从整体标准差来看, 涪城一号为 20.42 mm/a, Sentinel-1 为 28.11 mm/a,

表明涪城一号的速率结果更加集中、偏差更小, 反映出其结果更为稳定。这得益于涪城一号的高分辨率特性, 使其在研究区能够获取更多高质量观测点, 从而保证了 InSAR 时序速率反演的稳定性。



(a) 涪城一号与 Sentinel-1 典型区域示意图

(a) Illustration of typical regions for Fucheng-1 and Sentinel-1



(b) 涪城一号与 Sentinel-1 典型区域速率直方图及相关性热点图

(b) Velocity histograms and correlation heatmap for typical regions of Fucheng-1 and Sentinel-1

图 6 同期涪城一号和哨兵一号时序 InSAR 速率结果对比图

Fig. 6 Comparison of time-series InSAR deformation rates between Fucheng-1 and Sentinel-1 over the same period

进一步地探讨两者结果间的差异, 将涪城一号的时序结果(图6(a)代表性区域)重采样至与同期同区域的Sentinel-1相同空间分辨率, 并对两者进行相关性分析, 如图6(b)所示, 可得到线性拟合关系为 $y=0.467x-33.634$, 决定系数 $R^2=0.647$, 表明两种数据的形变速率具有较好的线性相关性。然而, R^2 未达到接近于1的高度相关, 意味着两套数据仍存在差异。

从图6(b)散点分布来看, 在 $-50\sim 50$ mm/a, 特别是 0 mm/a附近, 聚焦大部分像素点在黑色虚线(理想 $1:1$ 线)的附近, 表明对于较低速率形变区, 两套数据保持了良好的对应关系。值得注意的是, 随着形变速率的增大, 两套数据监测到的形变速率分布明显离散, 说明随着速率增加, 两者之间的速率差异越发显著, 以Sentinel-1速率为 y 轴、涪城一号速率为 x 轴进行线性拟合, 结果为 $y=0.467x-33.634$, 直线的斜率仅为 0.467 , 明显 <1 , 且截距为 33.634 , 斜率远低于 1 , 表示Sentinel-1对形变的响应幅度整体低于涪城一号。换言之, 在相同位置, 当涪城一号观测到较大形变速率时, Sentinel-1往往给出更低的速率。该差异主要归因于涪城一号具备更高的空间分辨率和更大的可探测形变梯度, 能够对像元进行更精细的解析, 从而在高速率形变区表现出更强的探测能力。

总体而言, 两种卫星数据的对比结果呈现出“总体一致、局部差异”的特征: 在低速率形变区域, 两者的散点分布接近理想拟合线, 相关性良好, 表明涪城一号的监测结果与国际通用的Sentinel-1数据保持一致。而在高速率形变区域, 受分辨率差异影响, 涪城一号(方位向 \times 距离向: $1.68\text{ m}\times 1.36\text{ m}$)相较于Sentinel-1($13.95\text{ m}\times 2.32\text{ m}$)能够提供更精细的像元解析能力。同时, 根据InSAR最大可探测形变梯度公式(Dai等, 2023), 涪城一号的最大可探测形变梯度为 23 mm/m , 而Sentinel-1为 12 mm/m , 前者约为后者的两倍, 这

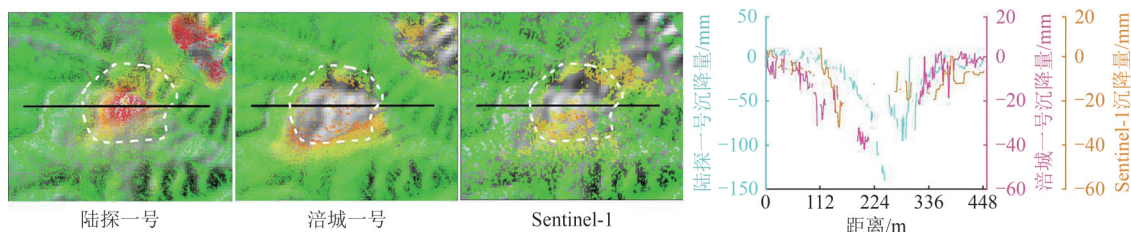
意味着涪城一号能够在形变速率较高的区域保持更强的探测能力, 捕捉到更大的形变信号, 从而导致两者结果出现一定偏差。这一差异反映出涪城一号在高速率形变监测方面相较于Sentinel-1的优势。

6 矿区沉降不同卫星DInSAR对比分析

6.1 矿区大梯度形变探测能力评估

为评估涪城一号在矿区的干涉性能, 本研究选取同期、同区域的Sentinel-1和陆探一号数据进行对比分析。具体而言, 涪城一号选取2024年4月10日和2024年5月2日两景; 陆探一号选取2024年4月9日和2024年5月7日两景, Sentinel-1选取2024年4月6日和2024年5月12日两景作为对比。为保证结果可比性, 3颗星的数据均采用相同的滤波阈值(0.4)与窗口大小(64)处理, 并选取一致的解缠参考点, 采用最小费用流方法进行相位解缠, 最终统一转换为LOS向沉降量。

从4处典型沉降区的剖面线结果显示, 陆探一号在沉降中心捕捉到超过 200 mm 的最大形变量级, 凸显出L波段在大形变监测中的显著优势。当形变量过大时, 涪城一号和Sentinel-1出现失相干, 难以识别沉降漏斗, 而陆探一号仍能清晰刻画沉降中心。这主要得益于L波段波长更长, 单条干涉条纹对应的形变量更大。另一方面, 在小形变量区域(如图7(d)), 涪城一号捕捉到约 -6 mm 的沉降, 而陆探一号仅约 -33 mm , 多探测约 27 mm , 表明涪城一号在小形变量探测方面更为敏感。这是由于C波段波长较短、相位响应更灵敏, 相较于L波段更适合监测微小形变。从图7(a)、(c)和(d)的对比结果看, 在同为C波段系统中, 涪城一号探测到的形变量级始终大于Sentinel-1, 体现出其对形变信号更强的捕捉能力。这表明, 涪城一号在大形变量区域具有更大的可探测形变梯度, 而在小形变量区域则凭借更高的空间分辨率, 实现了更精细的像元解析, 对微小形变的响应更为敏感。



(a) 典型区域1
(a) Typical region 1

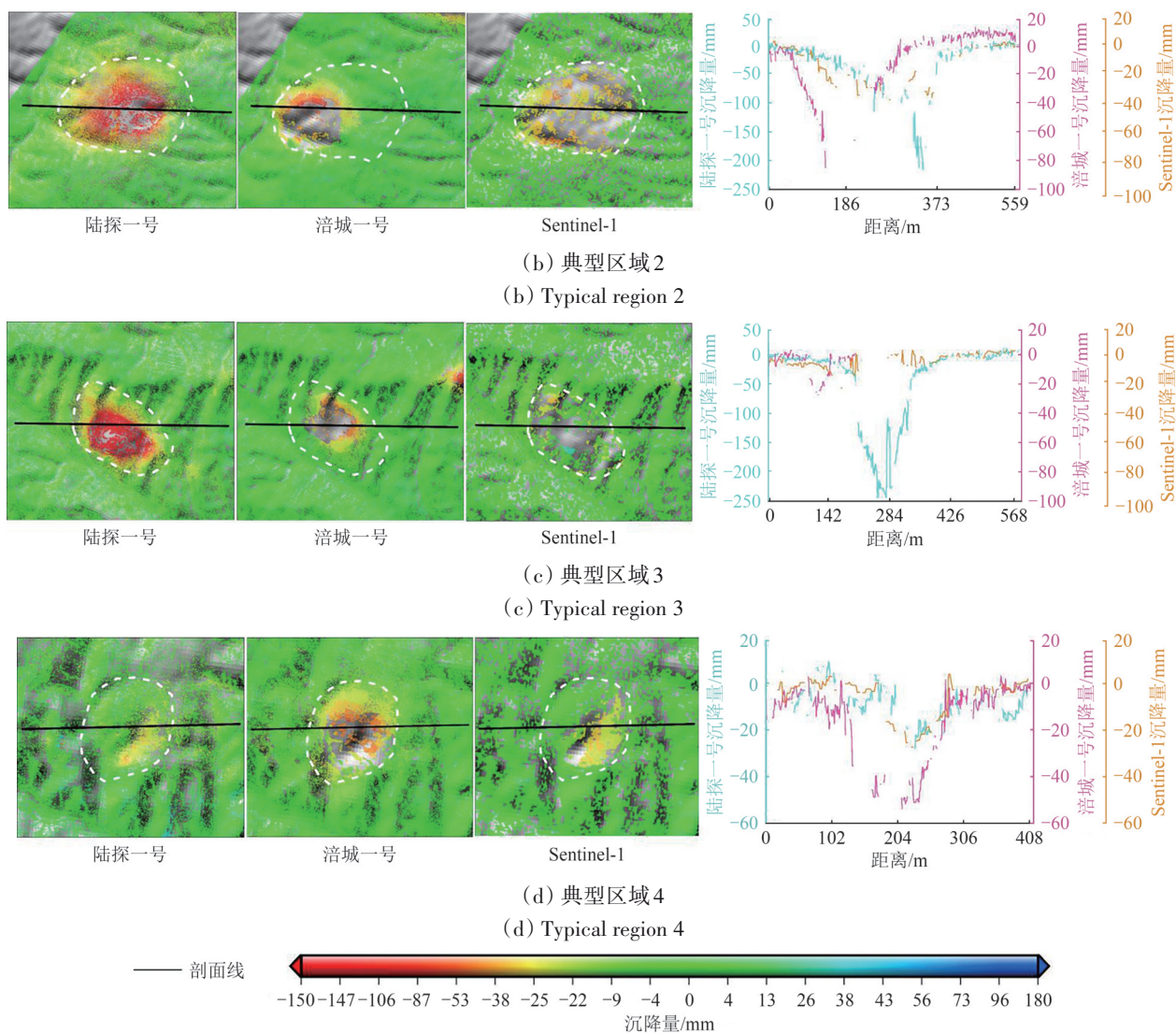


图7 三组卫星同期差分InSAR形变结果对比图

Fig. 7 Comparison of differential InSAR deformation results from three satellites over the same period

总体而言，在矿区沉降监测中，陆探一号采用L波段，在大形变量探测方面具有显著优势；而涪城一号采用C波段，其波长较短、相位变化响应更敏锐，因此相较于L波段的陆探一号，对小形变量更为敏感，能够更精细地刻画微小形变特征。依托更高的空间分辨率，涪城一号相较于同为C波段的Sentinel-1，表现出更强的形变信号捕捉能力。结果表明，涪城一号凭借更大的最大可探测形变梯度，可探测到比Sentinel-1更大的形变量级；同时，在小形变量区域，其高空间分辨率带来更精细的像元解析能力，使其对微小形变的响应更加敏感。

6.2 矿区相干性评估

InSAR相干性是评估干涉图质量的重要指标，可反映干涉图中相位误差的程度。本研究计算了

Sentinel-1在2024年4月6日—5月12日期间的相干性结果（图8（a）），并引入了同期的对比数据：即涪城一号在2024年4月10日—5月2日期间的相干性结果（图8（b）），以及陆探一号在2024年4月9日—5月7日期间的相干性结果（图8（c））。在处理过程中，3颗星的数据均采用 5×5 窗口遍历的方法，对未滤波的原始差分干涉对进行相干性估算，确保了结果的可比性。

从综合对比结果（图8（d））可以看出，在低相干性区间（0.0—0.2），3颗卫星的占比均接近45%，这是未滤波InSAR数据的普遍现象，反映出在噪声影响下低相干像元占比较高。在中等相干性区间（0.2—0.6），Sentinel-1（42.63%）与涪城一号（42.56%）占比较大，说明二者在部分地物

覆盖区域仍能保持一定干涉信息；其中，涪城一号在 0.4—0.6 占比 (21.09%) 高于 Sentinel-1 (18.91%)，表明其相干性分布更为集中。在较高相干性区间 (0.6—0.8)，陆探一号的占比 (15.90%) 明显高于涪城一号 (10.91%) 和 Sentinel-1 (8.35%)，体现出更强的相干性保持能力。在极高相干性区间 (0.8—1.0)，陆探一号占比 (6.34%) 同样优于涪城一号 (1.62%) 和 Sentinel-1 (1.13%)，

这主要得益于其 L 波段更强的地物穿透力和更稳定的回波信号，因此在高相干性区域整体优于 C 波段卫星。而同 C 波段的对比中，涪城一号凭借更高分辨率，带来更细致的像元解析，相干性表现优于 Sentinel-1。这一优势主要源于其更高的空间分辨率，使地物特征得以更细致地刻画，从而产生更多高相干性的像素点，有效提升了干涉测量的精度与稳定性。

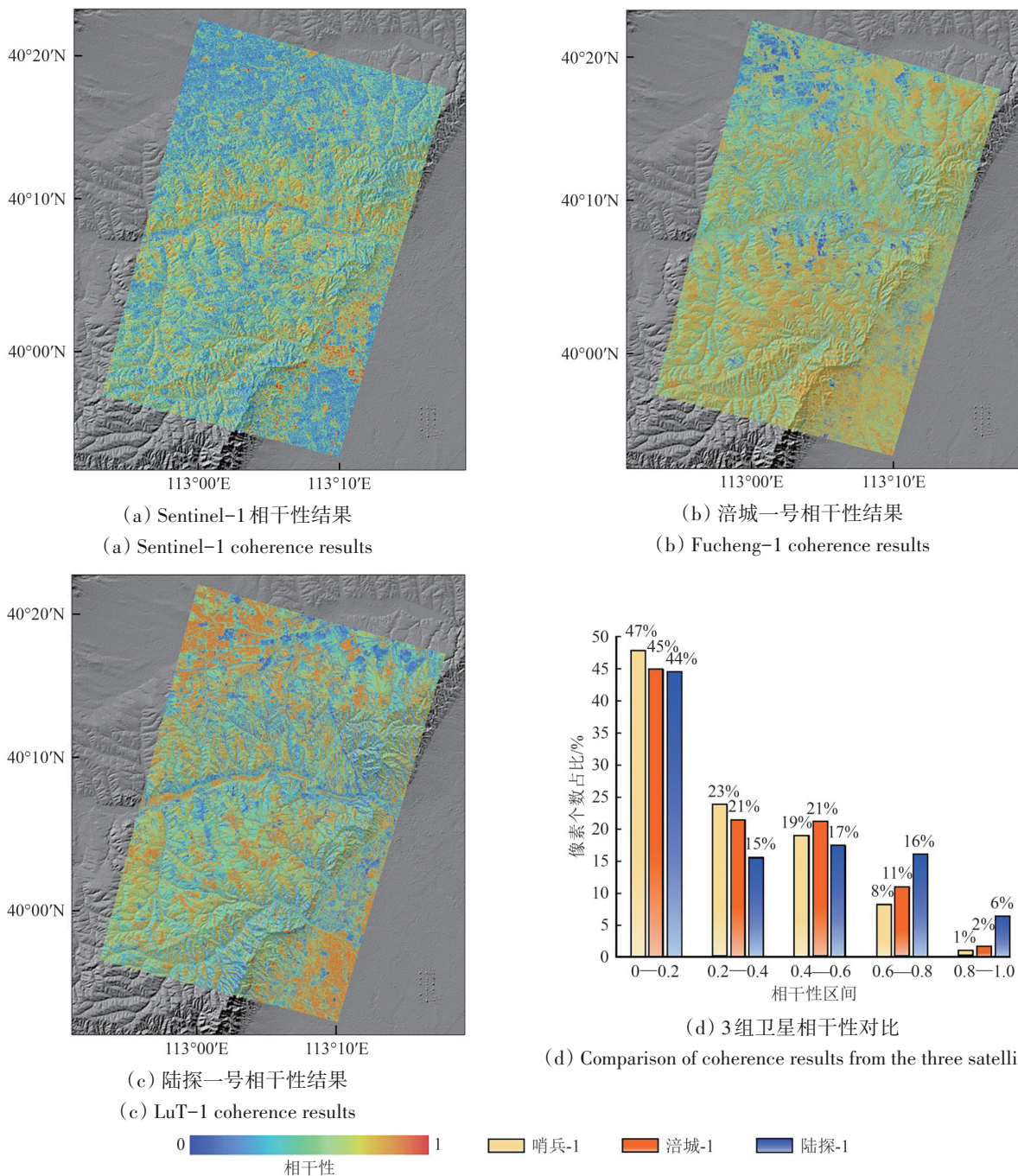


图8 3组卫星同期相干性对比图

Fig. 8 Comparison of contemporaneous coherence results from three satellites

7 讨论与结论

本研究针对涪城一号SAR卫星在矿区沉降监测中的监测性能缺乏系统评估的问题,以山西大同煤田为研究区,结合Sentinel-1和陆探一号数据,采用系统对比评估方法,全面评估涪城一号的矿区监测能力。研究表明,涪城一号共识别出57处沉降区,表现出良好的矿区沉降监测能力。时序监测性能评估方面,与同期Sentinel-1的时序InSAR结果对比,显示涪城一号在小范围形变区($<0.1\text{ km}^2$)的识别能力明显优于Sentinel-1,识别出8处形变区,而Sentinel-1未识别任何形变区。在形变速率监测方面,涪城一号整体速率探测能力高于Sentinel-1,尤其在小范围形变区,涪城一号的速率探测优势更为显著。相关性分析表明,在低速率形变区,涪城一号与Sentinel-1的散点分布接近理想拟合线,保持良好的一致性;但在高速率形变区,由于涪城一号具有更高的空间分辨率,其像元解析能力更强,从而能够更精准地探测形变速率。干涉性能评估方面,与同期Sentinel-1和陆探一号对比分析,结果显示,涪城一号在小形变区域比陆探一号多探测约27 mm,表明C波段相较L波段在微小形变探测上具有更高的灵敏度,且涪城一号在沉降量探测上始终高于Sentinel-1,得益于其更高的分辨率,能够捕捉到更强烈的形变信号。在相干性表现方面,涪城一号在高相干性区间的占比为12.53%,显著高于Sentinel-1的7.19%,显示其在C波段下具备更强的相干保持能力。综上,涪城一号在矿区沉降监测中展现出对小范围形变的灵敏探测优势,并兼具较大形变量级监测与小形变量响应能力,本研究可为未来国产SAR卫星在矿区沉降监测的业务化应用提供参考。未来,基于涪城一号、Sentinel-1和陆探一号多源数据的融合,可以实现时空分辨率与波段特性的优势互补,为矿区地质灾害防治和精细化监测提供更加可靠的数据支持。

参考文献(References)

Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792]

- Chen B, Song C, Li Z H, Li Y S, Liu H H, Yu C, Li S J, Liu M, Chen Y, Zhang L and Peng J B. 2025. Pre-failure deformation mechanism and geomorphological change of the Jinpingcun landslide, Junlian, Sichuan. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(11): 2154-2162 (陈博, 宋闯, 李振洪, 李永生, 刘海辉, 余琛, 李素菊, 刘明, 陈毅, 张林, 彭建兵. 2025. 四川筠连县金坪村滑坡灾前地貌变化和形变特征研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(11): 2154-2162) [DOI: 10.13203/j.whugis.20250036]
- Costantini M. 1998. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 813-821 [DOI: 10.1109/36.673674]
- Dai K R, Chen Y D, Xu Q, Hancock C, Jiang M, Deng J and Zhuo G C. 2023. A functional model for determining maximum detectable deformation gradients of InSAR considering the topography in mountainous areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 5211211 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3287590]
- Dai K R, Li Z H, Xu Q, Burgmann R, Milledge D G, Tomas R, Fan X M, Zhao C Y, Liu X J, Peng J B, Zhang Q, Wang Z, Qu T T, He C Y, Li D R and Liu J N. 2020. Entering the era of earth observation-based landslide warning systems: a novel and exciting framework. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8(1): 136-153 [DOI: 10.1109/MGRS.2019.2954395]
- Dai K R, Tie Y B, Xu Q, Feng Y, Zhuo G C and Shi X L. 2020. Early identification of potential landslide Geohazards in alpine-canyon terrain based on SAR interferometry—a case study of the middle section of Yalong River. *Journal of Radars*, 9(3): 554-568 (戴可人, 铁永波, 许强, 冯也, 卓冠晨, 史先琳. 2020. 高山峡谷区滑坡灾害隐患InSAR早期识别——以雅砻江中段为例. *雷达学报*, 9(3): 554-568) [DOI: 10.12000/JR20012]
- Dai K R, Wu M T, Zhuo G C, Ju A H, Wen N L, Feng W K and Xu Q. 2023. Review on InSAR early identification and monitoring of reservoir landslides for large hydropower engineering projects in Southwest Mountainous Area of China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 45(3): 559-577 (戴可人, 吴明堂, 卓冠晨, 居安华, 温柠玲, 冯文凯, 许强. 2023. 西南山区大型水电工程库岸滑坡InSAR早期识别与监测研究进展. *地球科学与环境学报*, 45(3): 559-577) [DOI: 10.19814/j.jese.2022.12080]
- Dong J, Guo S K, Wang N, Zhang L, Ge D Q, Liao M S and Gong J Y. 2023. Tri-decadal evolution of land subsidence in the Beijing Plain revealed by multi-epoch satellite InSAR observations. *Remote Sensing of Environment*, 286: 113446 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113446]
- Fan W Z, Wang T, Barbot S, Fang D, Ran J J and Luo H. 2025. Weak asthenosphere beneath the Eurasian interior inferred from Aral Sea desiccation. *Nature Geoscience*, 18(4): 351-357 [DOI: 10.1038/s41561-025-01664-w]
- Feng S M, Dai K R, Sun T G, Deng J, Tang G M, Han Y K, Ren W J, Sang X R, Zhang C W and Wang H. 2024. Mini-Satellite Fucheng 1 SAR: interferometry to monitor mining-induced subsidence and comparative analysis with Sentinel-1. *Remote Sensing*, 16(18): 3457 [DOI: 10.3390/rs16183457]
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F and Rucci A. 2011.

- A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9): 3460-3470 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]
- Goldstein R M and Werner C L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21): 4035-4038 [DOI: 10.1029/1998GL900033]
- Han Y K, Dai K R, Deng J, Wen N L, Ren W J, Chen X F, Du J and Wang H. 2025. Fucheng-1, high-resolution Chinese interferometric SAR: first DInSAR result for landslides monitoring. *Measurement*, 247: 116876 [DOI: 10.1016/j.measurement.2025.116876]
- Hooper A. 2008. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16): L16302 [DOI: 10.1029/2008GL034654]
- Hu L R, Tang X M, Tomás R, Li T, Zhang X, Li Z W, Yao J Q and Lu J. 2024. Monitoring surface deformation dynamics in the mining subsidence area using LT-1 InSAR interferometry: a case study of Datong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 131: 103936 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.103936]
- Kadı F and Yılmaz O S. 2024. Determination of alternative forest road routes using produced landslide susceptibility maps: a case study of Tonya (Trabzon), Türkiye. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(2): 147-164 [DOI: 10.26833/ijeg.1355615]
- Li Z H, Song C, Yu C, Xiao R Y, Chen L F, Luo H, Dai K R, Ge D Q, Ding Y, Zhang Y X and Zhang Q. 2019. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: challenges and solutions. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 967-979 (李振洪, 宋闯, 余琛, 肖儒雅, 陈立福, 罗慧, 戴可人, 葛大庆, 丁一, 张宇星, 张勤. 2019. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(7): 967-979) [DOI: 10.13203/j.whugis20190098]
- Pepe A and Lanari R. 2006. On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9): 2374-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.873207]
- Polat A B, Şanlı F B and Akçay Ö. 2022. Analyzing rice farming between sowing and harvest time with Sentinel-1 SAR data. *Advanced Remote Sensing Journal*, 2(1): 34-39
- Qin Y X, Zhang Q J, Hong W, Han B, Li F F and Shen J X. 2025. GaoFen-3 mission for InSAR time series analysis: a quantitative evaluation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18: 11428-11450 [DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3552672]
- Ren C M, Wang Z X, Taymaz T, Hu N, Luo H, Zhao Z Y, Yue H, Song X D, Shen Z K, Xu H Y, Geng J H, Zhang W, Wang T, Ge Z X, Irmak T S, Erman C, Zhou Y J, Li Z, Xu H, Cao B N and Ding H Y. 2024. Supershear triggering and cascading fault ruptures of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake doublet. *Science*, 383(6680): 305-311 [DOI: 10.1126/science.adi1519]
- Sansosti E, Berardino P, Manunta M, Serafino F and Fornaro G. 2006. Geometrical SAR image registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(10): 2861-2870 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.875787]
- Tang G M, Dai K R, Deng J, Liu X J, Liu C, Liu T X, Guo C W and Fan X M. 2025. An enhanced neighborhood differential method for potential landslide identification from stacking-InSAR results. *Measurement*, 242: 115921 [DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115921]
- Tang G M, Dai K R, Zhuo G C, Shen Y, Chen C and Xu Q. 2023. Rapid identification of potential landslides in the Maoergai reservoir based on InSAR phase gradient stacking. *China Earthquake Engineering Journal*, 45(5): 1096-1105 (唐光民, 戴可人, 卓冠晨, 沈月, 陈晨, 许强. 2023. 基于InSAR相位梯度叠加的毛尔盖库岸滑坡隐患快速识别. *地震工程学报*, 45(5): 1096-1105) [DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230529006]
- Villano M, Márquez-Martínez J, Moller D and Younis M. 2022. Overview of Newspace synthetic aperture radar instrument activities// IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Kuala Lumpur: IEEE: 4130-4132 [DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883128]
- Wempen J M and McCarter M K. 2017. Comparison of L-band and X-band differential interferometric synthetic aperture radar for mine subsidence monitoring in central Utah. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(1): 159-163 [DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.11.012]
- Wright T J, Parsons B E and Lu Z. 2004. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical Research Letters*, 31(1): L01607 [DOI: 10.1029/2003GL018827]
- Xiao R Y, Wang X, Sun J Y, Li T, Tian X, He X F. 2025. Comparisons of differential interferometry of Chinese SAR satellites in ground deformation monitoring. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(8): 1517-1526 (肖儒雅, 王迅, 孙静怡, 李涛, 田馨, 何秀凤. 2025. 国产 SAR 卫星差分干涉测量地表形变监测比较. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(8): 1517-1526) [DOI: 10.13203/j.whugis20240468]
- Xiuming J, Chao M and Anyuan Z. 2008. Environmental investigation and evaluation of land subsidence in the Datong Coalfield based on InSAR technology. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 82(5): 1035-1044 [DOI: 10.1111/j.1755-6724.2008.tb00660.X]
- Xu Q, Dong X J and Li W L. 2019. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 957-966 (许强, 董秀军, 李为乐. 2019. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(7): 957-966) [DOI: 10.13203/j.whugis20190088]
- Xu Y Z, Li T, Tang X M, Zhang X, Fan H D and Wang Y W. 2022. Research on the applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for mining region subsidence detection in the Datong Coalfield. *Remote Sensing*, 14(14): 3314 [DOI: 10.3390/rs14143314]

Surface subsidence monitoring and performance comparison of Fucheng-1 SAR satellite in the Datong mining area, Shanxi

TANG Guangmin^{1,2}, SHI Xianlin³, DAI Keren^{1,3,4}, WANG Hao⁵, DONG Ping³, WANG Qixiang^{3,6,7}, CHEN Lifu⁸, REN Weijia⁵, RAN Weijie⁵, YIN Hui⁵

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

4. State Grid Southwest Electric Power Research Institute, Chengdu 610095, China;

5. Tianyi Space Science and Technology Research Institute Co., Ltd, Changsha 410205, China;

6. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400039, China;

7. Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400039, China;

8. School of Artificial Intelligence, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

Abstract: Fucheng-1 is China's first commercial SAR satellite with high-resolution C-band capability for interferometric measurement, but its performance in mining subsidence monitoring lacks a comprehensive comparative evaluation. This study uses the Shanxi Datong Coalfield as the research area and employs Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) technology to process time-series data from 11 scenes of Fucheng-1, comparing the results with those from Sentinel-1 and LuanTan-1 satellites. The results show that, in terms of time-series InSAR measurement, Fucheng-1 identified 57 subsidence areas, providing a comprehensive depiction of the mining subsidence distribution. For the detection of small-scale deformation areas (<0.1 km²), Fucheng-1 detected 8, whereas Sentinel-1 failed to identify them, demonstrating its advantage in small-scale mining subsidence detection due to its high-resolution imaging. Moreover, when comparing deformation velocities, both data sets showed good consistency in low velocity deformation areas. However, for high velocity deformation areas, Fucheng-1, with its higher resolution and larger detectable deformation gradient, captured more accurate deformation signals, especially for small-scale rapid deformations, where Fucheng-1 demonstrated superior measurement accuracy. Multi-satellite differential InSAR comparison results revealed that Fucheng-1 consistently detected larger deformation values than Sentinel-1 and captured approximately 23 mm more deformation in a small deformation area compared to LuanTan-1, indicating that Fucheng-1, with its higher resolution, can detect larger deformation levels, while L-band LuanTan-1 is more sensitive to small deformation values. In terms of coherence, Fucheng-1 achieved 12.53% of pixels with coherence values between 0.6 and 1.0, higher than Sentinel-1's 7.19%, showing better coherence performance under the same C-band conditions, but lower than LuanTan-1's 22.43% with its longer L-band. In conclusion, Fucheng-1 exhibits a sensitive detection advantage for small-scale deformation in mining subsidence monitoring, with the ability to monitor both large deformation levels and small deformations. This study provides a reference for the future operational applications of domestic SAR satellites in mining subsidence monitoring.

Key words: Fucheng-1, high-resolution commercial SAR satellite, differential InSAR (DInSAR), time-series InSAR, monitoring performance evaluation, subsidence monitoring

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42371462); Sichuan Province Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 2023NSFSC1909); Sichuan Society of Surveying Mapping and Geoinformation (No. CCX202403); Key Project of Hunan Provincial Department of Education (No. 24A0247), National Natural Science Foundation of China General Program (No. 42574060)