

# 基于 PySide 的时序 InSAR 处理可视化及形变监测实验

于志刚,张光辉,张晨晰,张卓普,王清标

(山东科技大学 资源学院,山东 泰安 271000)

**摘要:**基于 PySide 等 Python 开源扩展包设计了时序 InSAR 处理可视化软件,用于实验教学。软件集成了影像搜索、像对组合、干涉解缠、时序处理、结果展示等功能。以山东省菏泽市鄄城县城区地表沉降监测为例,进行实验处理,并与 PSDS-InSAR 方法进行精度对比。相较于传统命令行操作方式,该可视化软件极大地简化了数据处理的复杂性,软件处理结果与 PSDS-InSAR 所得结果的相关性为 0.9866。软件提高实验效率,降低实验难度,改善了实验效果,结果精度表明该软件也可直接应用于工程实践。

**关键词:**可视化;时序 InSAR;形变监测;实验教学

中图分类号:P237;TP311.1

文献标识码:A

文章编号:1006-7949(2024)06-0041-08

## PySide-based Time-Series InSAR processing visualization and experimental application for deformation monitoring

YU Zhigang, ZHANG Guanghui, ZHANG Chenxi, ZHANG Zhuopu, WANG Qingbiao

(College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271000, China)

**Abstract:** Based on PySide and other Python open source extension packages, the Time-Series InSAR processing visualisation software was designed for experimental teaching. The software integrates the functions of image searching, image pair combining, interference and phase unwrapping, Time-Series processing, and result display. As an example, the surface settlement monitoring in the urban area of Yuncheng County, Heze City, Shandong Province, was processed experimentally and compared with the accuracy of PSDS-InSAR method. The results show that the visualisation software effectively reduces the complexity of the traditional command line method of data processing, and the correlation between the results of the software processing and the results obtained by PSDS-InSAR is 0.9866. The software improves the experimental efficiency, reduces the experimental difficulty and improves the experimental effect, and the resultant accuracy indicates that the software can also be directly applied to engineering practice.

**Key words:** visualization; Time-Series InSAR; deformation monitoring; experimental teaching

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)对地观测技术是高校测绘类、防灾减灾类等专业的专业课程,该课程的主要目的是使学生掌握 InSAR 技术的理论基础、数据处理以及成果的分析应用等<sup>[1-4]</sup>。InSAR 数据处理的实验教学是整个课程教学当中的重要组成部分,是帮助学生将理论知识应用于实际项目中的关键环节。通过实验操作,学生可以掌握 InSAR 技术的基本原理和操作方法,提高数据处理和数据解译

的能力,并更好地理解 InSAR 技术在地质灾害监测和风险评估等领域的应用<sup>[5-7]</sup>。传统的 InSAR 技术主要用于获取地表形变的静态信息,即某一特定时段的地表形变情况。时序 InSAR 技术则通过多幅 InSAR 影像的时间序列分析以提升形变监测精度,并能够提供地表形变的时空演变信息,包括地表的周期性变化、趋势性变化等<sup>[8]</sup>。然而,时序 InSAR 处理面临诸多挑战,譬如庞大的数据量会消耗大量的计算机资源、繁琐的处理流程使得初学者难以上手、数据处理效果高度依赖操作者的处理经验等问题。

当前 InSAR 处理常用的开源软件有 ISCE、GMTSAR、StaMPS 和 LiCSBAS 等,这些软件需要在 Linux 系统环境下以命令行形式来操作<sup>[9-12]</sup>。时

收稿日期:2024-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278359);泰安市科技创新发展项目(2022GX087)

第一作者简介:于志刚(1980—),男,讲师,博士

通信作者简介:张光辉(1999—),男,硕士研究生。

序 InSAR 处理涉及到多个环节,通常需要结合多个软件来完成。对于 InSAR 初学者而言,掌握复杂的命令行语句并能够联合使用多个软件进行处理是相当困难的。这通常会使学生花费大量时间在学习这些软件的操作上,而非专注于 InSAR 的核心概念和应用。因此,针对 InSAR 初学者,简化软件操作流程和提供用户友好的图形化界面则十分必要。通过开发可视化操作界面,学生可以更专注于理解 InSAR 的基本原理、数据处理流程和结果解译,而不必过多关注复杂的命令行操作。这种方式能够加速学生对 InSAR 技术的掌握,并引导更多人参与到这一领域的研究和应用中。

## 1 软件设计

### 1.1 需求分析

为降低时序 InSAR 处理的学习门槛,基于 PySide(Qt for Python)等开源扩展包开发一款处理流程明晰、操作简易的可视化处理软件,并命名为快速时序 InSAR 处理(ESIS)软件。确立主要需求如下:①设计直观的图形可视化操作界面,使学习者能够轻松理解软件的功能和操作流程;②实现自动化的处理流程,减少用户的手动干预;③提供明确引导和提示,引导用户逐步完成处理流程;④在保证结果准确性的前提下,设置合理的默认参数,使初学者能够直接使用软件获得可靠的结果,并提供灵活的参数调整选项供用户选择;⑤能够使用户在处理过程中实时预览数据变化,并提供直观的可视化结果;⑥实现处理出错的提示功能,向用户提供清晰的错误信息,以使用户能够迅速发现并纠正处理过程中出现的问题;⑦提供详细的操作文档和样例材料,以帮助使用者更好地了解软件的使用方法。此外,鉴于当前 InSAR 开源软件在安装与环境配置方面较为繁琐<sup>[13]</sup>,且通常需要依赖 Linux 系统,ESIS 软件应实现在 Windows 系统上一键安装、开箱即用的功能。

### 1.2 软件架构

根据软件需求,利用 PySide 实现软件界面框架的设计,同时整合其它 Python 扩展包以完成整个软件的开发,ESIS 软件架构如图 1 所示。在显示方面,以 PySide 为界面框架,辅以 Folium、Plotly 等地图及图表扩展包,实现界面交互功能。在数据方面,实现 SAR 卫星数据、DEM 数据、轨道数据等常用数据的下载功能。在处理方面,实现时序 InSAR 数据的筛选功能、影像对的组合功能,并利用 HyP3 进行干涉解缠处理<sup>[14]</sup>,利用 MintPy 进行时序处

理<sup>[15]</sup>。建立完整连贯的时序 InSAR 处理流程,实现从原始数据到最终结果之间各流程的数据传递与互通。

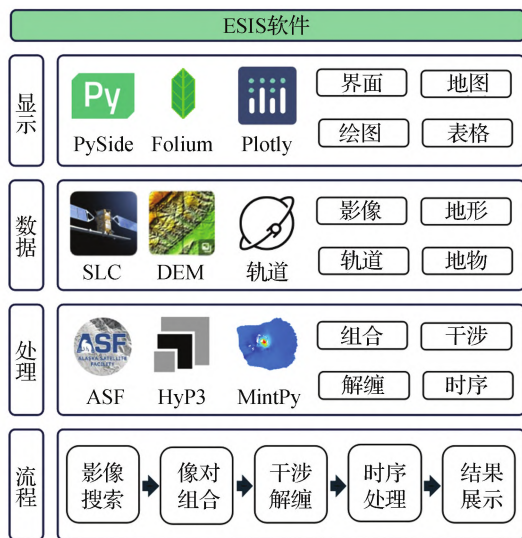


图1 软件架构

### 1.3 软件功能

软件实现时序 InSAR 处理所用到的方法为小基线集时序 InSAR (SBAS-InSAR) 方法。SBAS-InSAR 方法通过选择具有较短空间基线与较短时间基线的影像进行差分干涉处理,通过多视处理、相位滤波以减弱噪声,通过相位解缠以获得两影像日期期间的形变信息,最后将所有干涉对的解缠结果归化到某一特定参考点后,进行时序处理。

假设共选择  $N+1$  景影像,经过像对组合生成  $M$  个像对,则  $M$  的取值范围见式(1)所示。

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq N \left( \frac{N+1}{2} \right). \quad (1)$$

将像对进行干涉处理,则干涉相位中所包含的相位类型见式(2)所示<sup>[6]</sup>。

$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atom}} + \varphi_{\text{noise}}. \quad (2)$$

式中: $\varphi_{\text{int}}$  为干涉相位; $\varphi_{\text{def}}$  为形变相位,即表达地表形变信息的相位; $\varphi_{\text{flat}}$  为平地相位; $\varphi_{\text{topo}}$  为地形相位; $\varphi_{\text{atom}}$  为大气相位; $\varphi_{\text{noise}}$  为噪声相位。

干涉相位中的地形相位由真实 DEM 数据模拟并进行剔除,平地相位则利用轨道参数等来进行剔除,噪声相位则采用多视及滤波的方式进行减弱,大气相位则在后续时序处理中被减弱。

时序处理时利用最小二乘法进行求解,且考虑到小基线集的连接方式使得数据集中含有多个子集,存在秩亏,导致存在多解的情况,通过利用奇异值分解(SVD)以解求唯一解,最终得到时序形变结果。

软件功能主要分为影像搜索、像对组合、干涉解缠、时序处理、结果展示 5 个模块,依次运行各个模块,能够完成完整的时序 InSAR 处理流程。下面分别介绍 5 个模块的主要功能。

1)影像搜索模块实现了 Sentinel-1 卫星影像的搜索功能,通过坐标位置搜索影像并进行分组,将同一轨道且具有公共区域的影像分为一组,并将影像空间范围与公共区域展绘于地图窗口上。使用者可设置卫星类型以及起始和终止时间以筛选影像,并可手动剔除偏离研究区域的影像。

2)像对组合模块接收影像搜索模块所筛选的影像序列,并依据使用者给定的时间基线阈值和空间基线阈值进行像对的连接并自动绘制时空基线连接图。使用者可手动进行特定像对的添加与剔除操作,以优化时空基线的连接。

3)干涉解缠模块对所选像对进行干涉解缠处理,并对所有结果进行地理编码。本模块利用 HyP3 进行云处理,降低本地计算机的性能和存储需求。使用者可设置影像多视处理参数、相位数据滤波参数以及是否进行水体掩膜等。此外,该模块还提供了通过地图视图来框选研究区域范围的功能,使用户能够方便地进行裁剪操作,精确定位感兴趣的地理区域。

4)时序处理模块对裁剪后的干涉解缠影像序列进行处理,以生成最终的时间序列形变结果。时序处理功能通过调用 MintPy 完成,默认自动在高相干区域选择时序处理的参考点,用户也可以通过手动输入坐标的方式进行参考点的选择。时序处理过程生成平均相干系数图、相位序列图等。处理完成后,自动将最终时序结果转化为 ArcGIS、QGIS 等 GIS 软件可读的 SHP 数据。

5)结果展示模块用于可视化展示时序形变结果,并提供交互功能<sup>[16-17]</sup>。使用者可在地理坐标系下以在线光学影像为底图进行结果的预览与查询,软件自动生成所查询位置的时序形变图表。

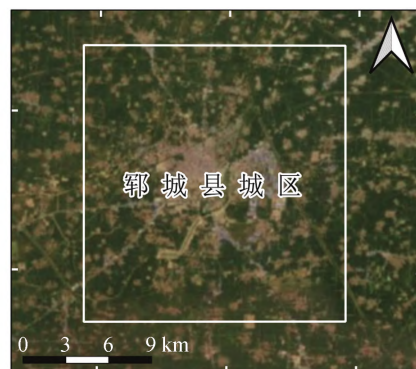


图2 郓城县城位置

一种主流处理方法进行对比。在 ESIS 软件中,仅需在 Windows 系统下按照软件内的流程引导进行操作,即可完成全部数据处理工作。ISCE 与 StaMPS 的数据处理则需基于 Linux 系统的命令行操作,其中 ISCE 的运行需要依赖 Python 环境、StaMPS 的处理需要依赖 matlab 环境、处理结果的展示需要配置 R 环境,且在将数据传递给不同软件之前,需要将其转换为特定的数据格式。对于初学者而言,同时掌握 Linux 下的 Shell 命令、Python 语言、matlab 语言及 R 语言则十分困难。相较于目前常用的 ISCE 与 StaMPS 组合的处理流程,使用 ESIS 软件无需掌握任何编程语言且无需在各步骤间进行数据格式转换,极大降低了时序 InSAR 处理的学习难度。

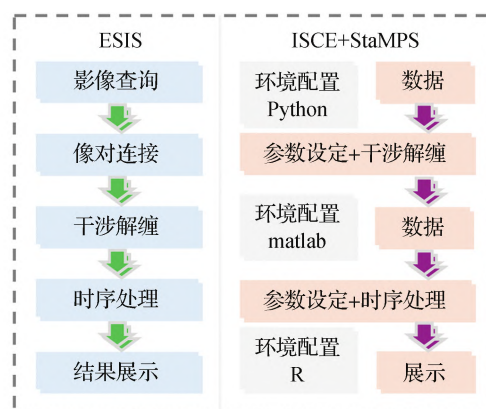


图3 处理流程图

## 2 实验应用

### 2.1 研究区域

选择山东省菏泽市郓城县城作为时序 InSAR 处理实验的研究区域,郓城县城位置如图 2 所示。由于受到煤矿开采的影响,菏泽市郓城县存在大面积的地表下沉现象<sup>[18]</sup>,这为时序 InSAR 处理实验提供了良好的基础条件。

### 2.2 处理流程

图 3 展示了 ESIS 软件的处理流程,并将其与

利用开发的 ESIS 软件对 2020 年至 2022 年覆盖研究区域的 Sentinel-1 卫星影像数据进行处理。首先,使用影像搜索模块进行影像检索,通过输入研究区域的中心坐标以搜索覆盖此位置的全部影像。搜索完成后,手动选择覆盖研究区域的一组时序影像,并将时间范围限定为 2020 年 1 月 1 日至 2023 年 1 月 1 日。在此步骤中,共筛选出 91 景影像,所选择影像序列及影像范围如图 4 所示。



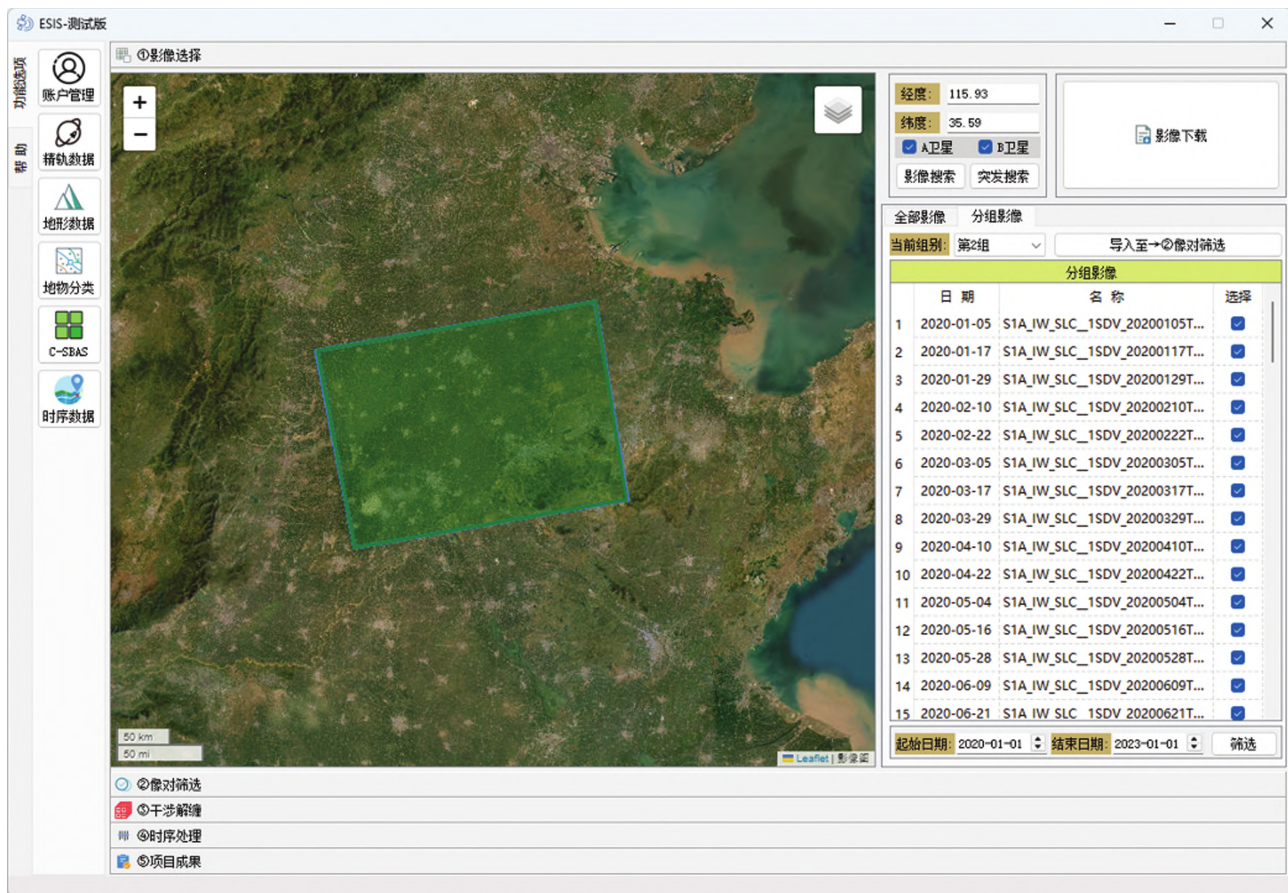


图4 影像搜索与筛选界面

将影像搜索模块所获取的影像序列导入至像对筛选模块,并设定时间基线阈值为60 d、空间基线阈值为200 m,共形成427个像对,像对连接状况见图5所示。在所设置的时空基线阈值下,像对连接状况良好,未出现孤立、断开的情况,不再手动增删像对。

将像对筛选结果导入干涉解缠模块,使用软件默认处理参数进行处理,即设置相位滤波强度为0.6、多视处理参数为 $10 \times 2$ (距离向 $\times$ 方位向),并应用水体掩膜。待干涉解缠处理完成后,输入研究区域的坐标范围以对干涉解缠影像进行裁剪。最后,选择参考点,并使用裁剪后的影像进行时序处理。干涉解缠、裁剪、参考点的参数设置如图6所示。

时序处理完成后,即可进入结果展示模块以查询各位置的形变状况。最终生成的形变结果分辨率为40 m,形变监测点总数约为11万个。由图7可知,2020年至2022年,郓城县城存在大面积的地表下沉现象,最大形变速率绝对值每年达14 cm,城区中心存在明显的线性形变。

### 2.3 结果分析与验证

郓城县城在2020—2022年3年间的累积形

变状况见图8所示。城区周边存在大面积的农田,由于农作物的生长变化以及土地翻耕等现象,使得这些区域的干涉相干性较差,因而导致形变结果的缺失。城区内部及城区周边的村庄区域则具有较高的相干性,这些区域获得了近乎完整的形变结果。从整体来看,郓城县城的形变状况表现为城区周边至城区中心的下沉量逐渐增大,形变分布大致呈漏斗状。从局部来看,城区周边存在多个大梯度、小区域的沉降漏斗,这些沉降漏斗的出现很可能是由于相应位置在监测周期内进行的地下采煤活动而引起的。

为评估和对比ESIS软件的时序InSAR处理效果,引入永久散射体联合分布式散射体的时序InSAR方法以对ESIS软件所选的影像进行二次处理,这里将该方法简称为PSDS-InSAR方法。PSDS-InSAR方法不进行多视处理,并采用同质点选取及相位链接的方式对相位进行优化,利用复杂耗时的运算以提高最终结果的密度和精度<sup>[19-20]</sup>。在PSDS-InSAR方法的处理中,选用ISCE进行数据的配准与干涉处理<sup>[9]</sup>,使用SNAPHU进行相位解缠<sup>[21]</sup>,使用MiaplPy进行相位优化<sup>[22]</sup>,像对连接方

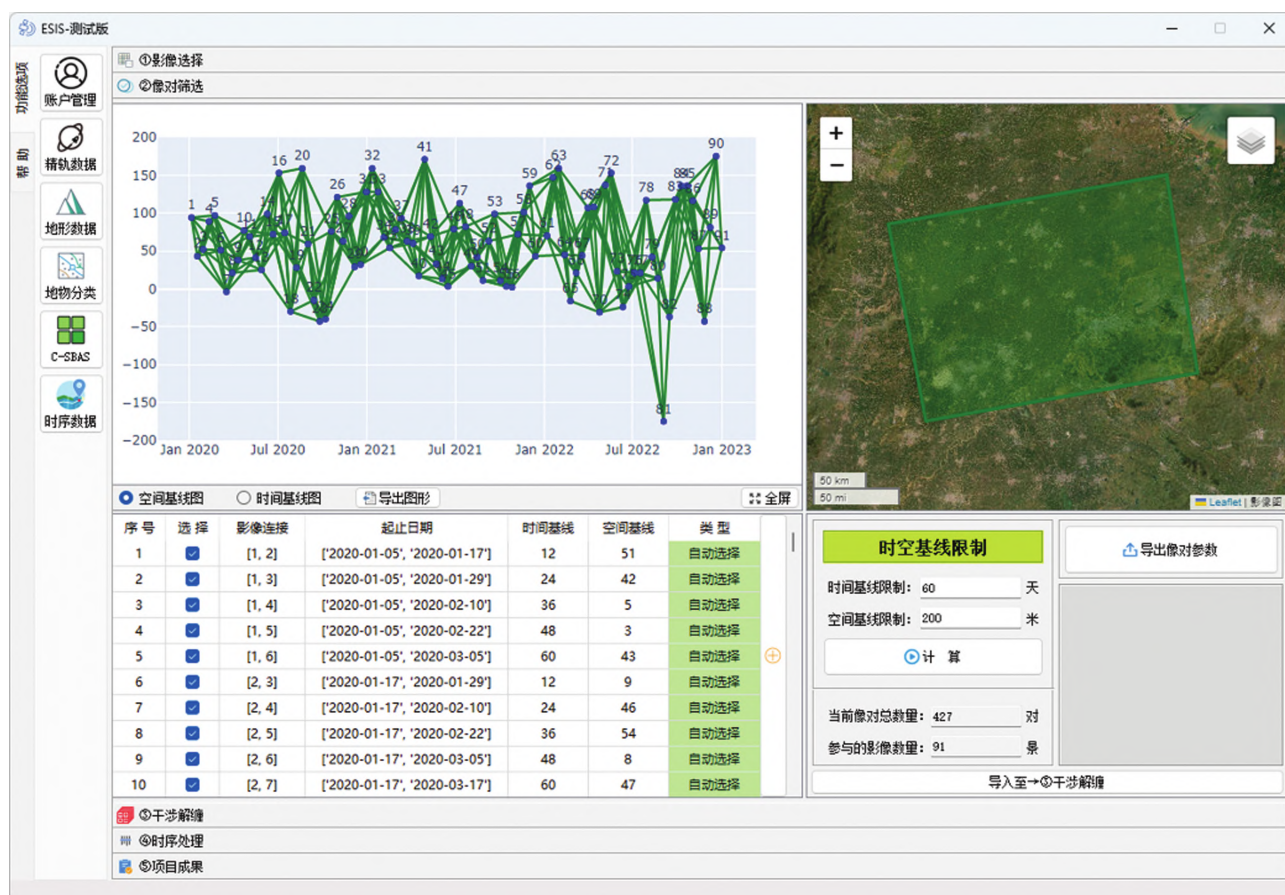


图 5 像对连接与筛选界面

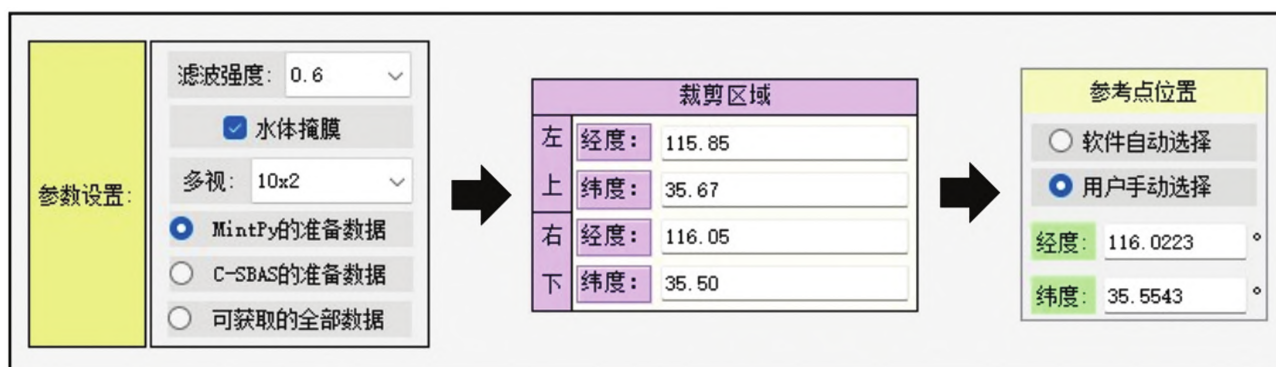


图 6 参数设置

式为连接各影像在时间维度上最近的 5 景影像。PSDS-InSAR 方法的处理结果如图 9 所示,对比图 7 中的 ESIS 软件处理结果,可以看出两者形变区域分布高度一致。

对 ESIS 软件和 PSDS-InSAR 方法所得形变速率进行量化评价。将 ESIS 软件处理结果与 PSDS-InSAR 结果进行重采样,利用 40 m 间隔的网格点提取两组数据的形变速率值,并剔除无数据的点位,提取两者的交集,共计 40 071 个点。求得两组

数据差值的均方根每年为 3.91 mm,两者的形变速率对比如图 10 所示,计算皮尔逊相关系数为 0.986 6,表明两组数据之间具有极高的一致性。

在研究区域内选取 4 个形变较为明显的位置,用于分析 ESIS 软件和 PSDS-InSAR 处理得到的时序形变结果的差异。所选点位见图 9 中的标注所示,依次命名为  $P_1 \sim P_4$ 。图 11 展示了两种方法所得的各点时序形变结果,计算得到两者间的皮尔逊相关系数均高于 0.99,同样也表明了两种处理方法



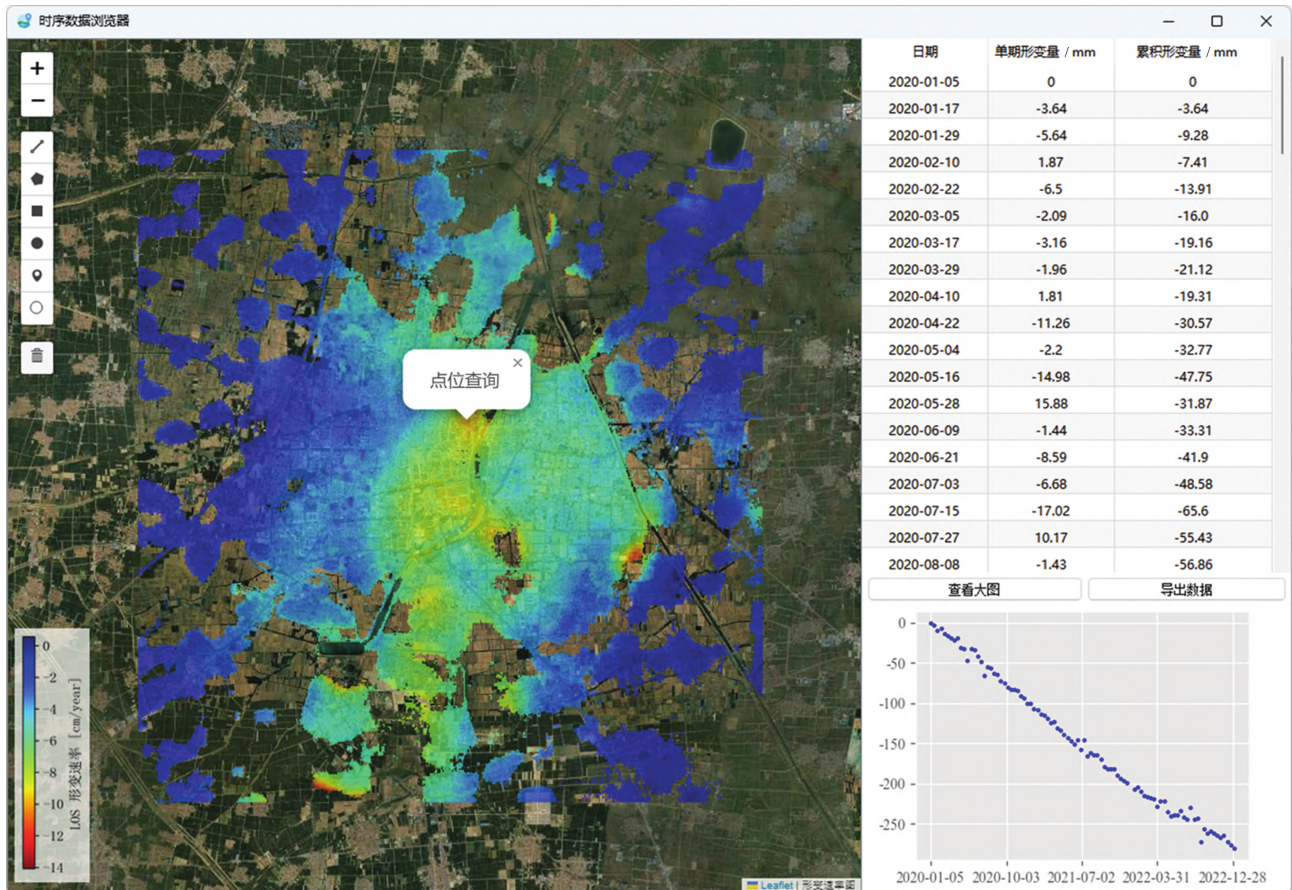


图 7 时序形变结果展示

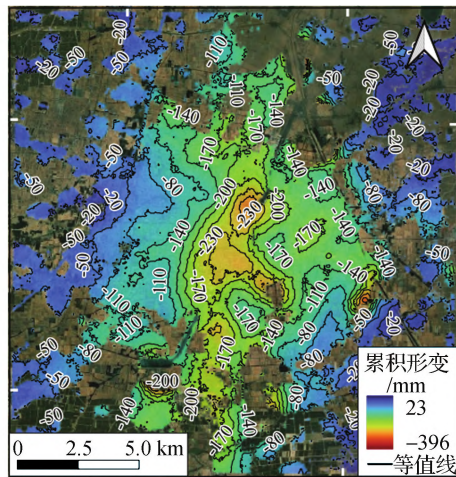


图 8 累积形变及等值线

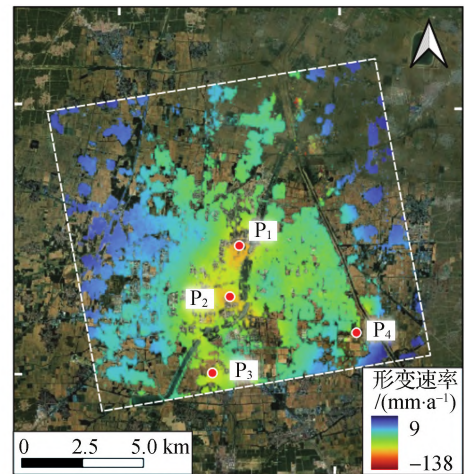


图 9 PSDS-InSAR 方法处理结果

在本研究区域内得到的结果具有极高的一致性。

通过引入 PSDS-InSAR 方法对 ESIS 软件的时序 InSAR 处理效果进行验证,结果显示 ESIS 软件的处理结果具有较高的精度,这表明该软件能够满足实验教学的需求。此外,可靠的处理结果使其同样适用于实际变形监测项目。软件的高可靠性意味着用户可以信赖其输出,这对于确保实验教学的

准确性以及在实际工程应用场景中做出准确分析与决策都起着至关重要的作用。

### 3 结束语

为简化时序 InSAR 处理流程,以提高处理效率、降低处理的学习门槛,基于 PySide 等开源 Python 扩展包开发了一款用于时序 InSAR 处理的

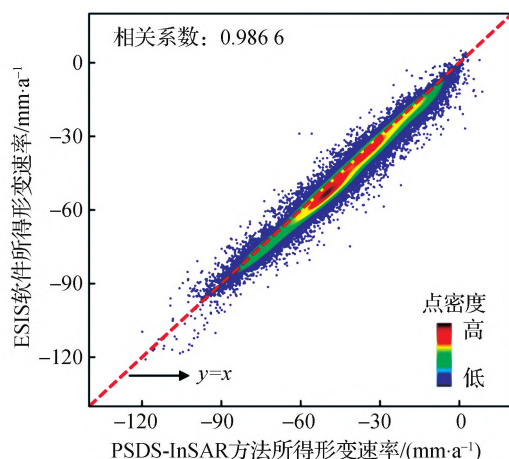
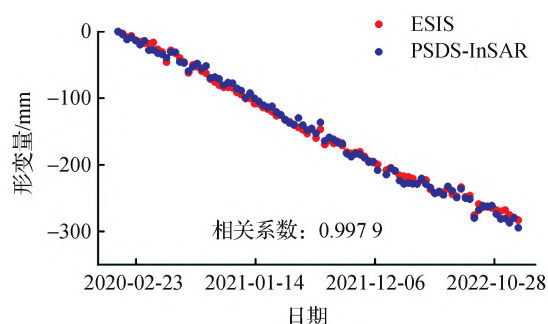
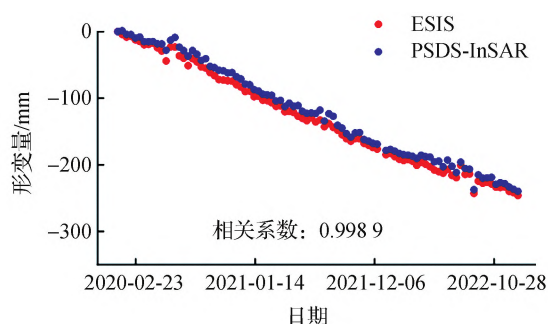


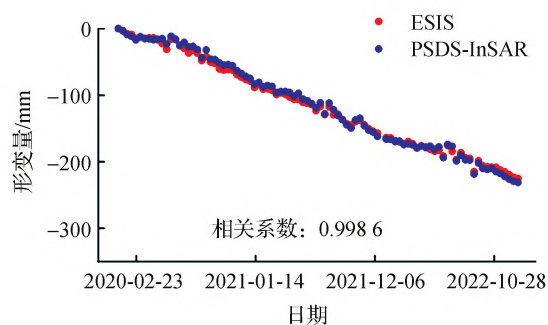
图10 形变速率对比



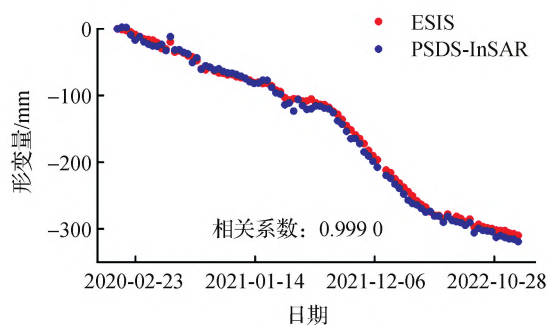
(a) P1点时序形变



(b) P2点时序形变



(c) P3点时序形变



(d) P4点时序形变

图11 各点时序形变结果对比

需继续改进和扩展该可视化处理软件,以满足不同用户的需求,推动 InSAR 对地观测技术在变形监测领域的广泛应用。

## 参考文献:

- [1] 温扬茂,许才军,刘洋. 测绘工程专业“雷达干涉测量”课程教学探讨[J]. 测绘工程,2018,27(11):77-80.
- [2] 蒋弥,陈赛楠. InSAR 技术与应用课程教学探索与改革[J]. 实验室研究与探索,2021,45(9):168-172.
- [3] 范洪冬,郝明,张宏贞,等.“合成孔径雷达干涉测量”课程思政建设与实践[J]. 测绘工程,2023,32(1):76-80.

- [4] 王帅,王彬. 融合测绘类核心课程的雷达干涉测量教学研究[J]. 山西建筑,2023,49(21):191-195.
- [5] 李晓恩,周亮,苏奋振,等. InSAR 技术在滑坡灾害中的应用研究进展[J]. 遥感学报,2021,25(2):614-629.
- [6] 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.
- [7] 朱建军,胡俊,李志伟,等. InSAR 滑坡监测研究进展[J]. 测绘学报,2022,51(10):2001-2019.
- [8] 白林,李振洪,宋莎,等. 利用时序 InSAR 技术反演邯郸平原区地表形变与含水层参数[J]. 地球物理学报,2022,65(9):3351-3362.
- [9] ROSEN P A, GURROLA E, SACCO G F, et al. The



- InSAR scientific computing environment[C]. EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. VDE, 2012: 730-733.
- [10] 罗毅,田云锋,冯万鹏,等. 基于开源软件 GMTSAR 与 iGPS 的时序形变自动化处理工具研发及应用[J]. 地球与行星物理论评(中英文),2023,54(6):653-666.
- [11] MORISHITA Y, LAZECKY M, WRIGHT T J, et al. LiCSBAS: an open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor [J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 424.
- [12] DELGADOBLASCO J M, FOUMELIS M, STEWART C, et al. Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry [J]. Remote Sensing, 2019, 11(2): 129.
- [13] HRYSIEWICZ A, WANG X, HOLOHAN E P. EZ-InSAR: an easy-to-use open-source toolbox for mapping ground surface deformation using satellite interferometric synthetic aperture radar[J]. Earth Science Informatics, 2023, 16(2): 1929-1945.
- [14] AGAPIOU A, LYSANDROU V. Detecting displacements within archaeological sites in Cyprus after a 5.6 magnitude scale earthquake event through the hybrid pluggable processing pipeline (HyP3) cloud-based system and sentinel-1 interferometric synthetic aperture radar (InSAR) analysis[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020(13): 6115-6123.
- [15] YUNJUN Z, FATTAHI H, AMELUNG F. Small baseline InSAR time series analysis: unwrapping error correction and noise reduction[J]. Computers & Geosciences, 2019, 133: 104331.
- [16] 郭绍琨,董杰,张路,等. 海量 InSAR 点云在线可视化与解译平台[J]. 遥感学报,2023,27(7):1744-1753.
- [17] 杨仕仙,沈涛,许靖,等. 一种矢量瓦片的时序 InSAR 形变可视化方法[J]. 测绘科学,2021,46(9):102-108.
- [18] 张亚凤,刘国林,牛冲,等. 利用 SBAS-InSAR 技术监测菏泽市地面沉降[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(11):1184-1190.
- [19] 曹建涛,郑翔元,范洪冬,等. 利用 DS-InSAR 技术监测黄河三角洲地表形变[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(11):1177-1183.
- [20] 夏小裕,王哲奇. PS-InSAR 与 DS-InSAR 监测城市地面沉降的精度检验与分析[J]. 海洋测绘,2020,40(4): 65-67,71.
- [21] CHEN C W, ZEBKER H A. Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1709-1719.
- [22] MIRZAEI S, AMELUNG F, FATTAHI H. Non-linear phase linking using joined distributed and persistent scatterers[J]. Computers & Geosciences, 2023, 171:105291.

[责任编辑:赵晓明]