

时序 InSAR 方法城市地面沉降监测应用与实践

廖明生¹, 王寒梅^{2,3,4,5}, 王茹¹, 龚志强¹, 吴建中^{2,3,4,5}, 董杰⁶,
来尚婧¹, 林金鑫^{2,3,4,5}

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430079;
2. 上海市自然资源调查利用研究院, 上海 200072;
3. 自然资源部地面沉降监测与防治重点实验室, 上海 200072;
4. 中国地质调查局地面沉降研究中心, 上海 200072;
5. 上海地面沉降控制工程技术研究中心, 上海 200072;
6. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘要: 地面沉降是城市发展过程中不可忽视的重要地质安全问题, 对城市地面沉降进行持续监测与研究尤为必要。合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术在城市地面沉降监测中的应用, 经历了从数据获取、处理方法、精度验证到实际应用等多方面的长足发展。本文基于二十多年来作者团队在上海市开展的时序 InSAR 监测从应用探索到工程实践的积累, 系统总结了城市地面沉降监测的发展历程, 包括初期的实验验证阶段、基于小数据集的监测方法探索阶段、高分辨率数据支持下的基础设施监测、到多尺度多源 InSAR 监测的拓展阶段。在上海地区研究的基础上, 作者团队进一步在北京平原地区开展了地面沉降监测研究。目前, 上海市地面沉降防治工作处于微量可控状态, 年沉降量控制在 6 mm 以内, 对微小沉降量的监测提出了很高的要求。展望未来, 城市地区密集高层建筑物的高精度形变监测、城市复杂场景下雷达散射机制的理解与建模、多因素耦合作用下的城市形变机制的科学解释、人工智能支持下的形变信息挖掘与早期预警等研究将进一步推动 InSAR 技术的发展与应用。

关键词: 城市地面沉降, 合成孔径雷达, 雷达干涉测量, 时间序列 InSAR, 小数据集方法, 高分辨率 SAR, 基础设施监测, 多尺度多源监测

中图分类号: P228/P2

引用格式: 廖明生, 王寒梅, 王茹, 龚志强, 吴建中, 董杰, 来尚婧, 林金鑫. 2026. 时序 InSAR 方法城市地面沉降监测应用与实践. 遥感学报, 30(4): 760-776

Liao M S, Wang H M, Wang R, Gong Z Q, Wu J Z, Dong J, Lai S J and Lin J X. 2026. Monitoring urban land subsidence with time-series InSAR: Applications and practices. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 760-776 [DOI: 10.11834/jrs.20255368]

1 引言

随着城市规模的不断扩展, 城市地面沉降已发展成为全球众多大都市共同面临的地质灾害之一。城市地面沉降指由自然或人为因素引起的地表下沉现象。城市发展中伴随的地下水过度抽取、深基坑与地下空间工程建设、密集建筑与基础设施的荷载等因素, 都会加剧地面沉降现象, 进而导致基础设施损坏、引发城市内涝及安全隐患等

一系列问题。而城市人口的快速增长与基础设施的高度集成, 地面沉降对城市发展与居民生活的影响愈加显著。

近年来, 随着遥感技术的发展, 特别是合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术的兴起, 城市地面沉降监测在地面水准与全球导航卫星系统 GNSS (Global Navigation Satellite System) 测量提供的点一线控制基础上进一步获取面域尺度信息, 形成互为补充

收稿日期: 2025-09-11; 预印本: 2025-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42504033); 上海市地质学会科研课题(编号:Dzxh202513)

第一作者简介: 廖明生, 研究方向为雷达遥感。E-mail: liao@whu.edu.cn

通信作者简介: 王茹, 研究方向为 InSAR 城市监测。E-mail: wangr2017@whu.edu.cn

的综合监测体系 (Elliott 等, 2026)。Gabriel 等 (1989) 首次利用差分 InSAR (Differential InSAR, D-InSAR) 技术在美国加州的 Imperial Valley 地区成功进行地表形变研究, 论证了 D-InSAR 技术形变监测精度可达到厘米级。随后 D-InSAR 技术用于监测 Landers 地震形变并成功恢复了同震形变场, 开启了 D-InSAR 地表形变监测研究的新篇章 (Massonnet 等, 1993)。与此同时, 普遍存在的时空失相干和大气效应造成的误差限制了微小形变的高精度反演, 尚未满足城市沉降监测的精度要求。

在 D-InSAR 技术基础上发展而来的时间序列 InSAR 技术, 通过覆盖同一区域的两/多景合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 影像的相位差, 经过一系列相关计算与误差去除进而反演得到高精度地表微小形变, 为城市大范围、高密度、低成本的沉降监测提供了有效手段 (李德仁等, 2004; 廖明生 等, 2020)。

上海市作为中国城市地面沉降的典型区域, 最早受到研究人员的关注。中欧合作的“龙计划”项目“地形量测”课题首次成功利用时间序列 SAR 数据获取了上海地区 1992 年—2000 年的地面沉降速率场, 这一技术在上海沉降监测方面初步获得成功, 同时也证明了时间序列 InSAR 技术在城市沉降监测方面的能力 (Li 等, 2005; Liao 等, 2006)。一系列相关研究在上海实验区相继展开 (王艳 等, 2007; 罗小军, 2007; Lu 等, 2008; Perissin 等, 2012; Jiang 等, 2016; Wu 和 Hu, 2017; Qin 等, 2018; Yang 等, 2018; Zhao 等, 2019; Chai 等, 2024)。这些研究在沉降时间序列提取、时空分布特征识别及城市基础设施安全评估等方面取得了积极进展, 为揭示上海地区地面沉降演化规律与影响提供了重要支撑。鉴于上海市地面沉降问题的代表性, 系统总结基于 InSAR 方法的上海市地面沉降监测应用与实践, 有助于深化对沉降演化规律的认识, 并为其他城市地面沉降监测提供借鉴。

本文立足作者团队长期以来开展的 InSAR 地面沉降监测应用及实践, 归纳典型成果与技术经验, 并揭示地面沉降时空演化特征及其对城市基础设施安全的影响, 为深入推进 InSAR 城市地面沉降研究提供重要参考。首先, 梳理上海市 InSAR 地面沉降监测发展阶段, 包括实验验证阶段、短

时间序列监测方法探索阶段、高分辨率数据支持下的基础设施细节监测、到多尺度多源 InSAR 形变监测的拓展阶段, 并概括上海地面沉降的时空分布格局与演化特征, 进一步将相关技术推广应用至北京平原地面沉降监测应用。最后, 展望时序 InSAR 方法在城市地面沉降监测中的新课题与新挑战。本文旨在为超大城市地面沉降研究与 InSAR 监测应用提供参考与借鉴。

2 城市地面沉降监测常用时序 InSAR 方法

地面沉降 InSAR 监测方法已经从早期的 D-InSAR 发展为以永久散射体雷达干涉测量 PS-InSAR (Persistent Scatter Interferometric Synthetic Aperture Radar) 与小基线集雷达干涉测量 SBAS-InSAR (Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar) 为代表的时序 InSAR 方法。已有的各类时序 InSAR 方法在相干点选取、基线配置、相位解缠、形变模型等环节各有侧重 (Crosetto 等, 2016; 林琿 等, 2017), 其中 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 为经典且应用最广的框架。

2.1 PS-InSAR 方法

米兰理工大学学者 Ferretti 等 (2000, 2001) 首次提出 PS-InSAR 技术, 利用覆盖同一地区的多景 SAR 影像, 通过提取稳定可靠的永久散射体 PS (Persistent Scatter) 作为观测对象, 在 PS 点基础上提取形变信息 (李德仁 等, 2004)。根据振幅离差和相位标准差统计特性上的关系, 在高信噪比条件下相位标准差近似等于振幅离差, 从而通过振幅离差值筛选出 PS 点。PS 在城市区域很可能对应实际地物中的建筑物、各类设施以及形成的二面角/三面角等。PS-InSAR 技术克服了 D-InSAR 技术面临的时空失相干、大气延迟等问题, 可以获得毫米级地面形变信息, 极大推动了 InSAR 技术的发展和應用。与其他各类地面沉降监测方法相比, 如表 1 所示, PS-InSAR 方法能够在兼顾空间密集采样率与测量精度的同时有效控制成本, 在地面沉降监测领域展现出突出的性价比与应用潜力。

PS-InSAR 技术在城市地面沉降监测中广泛应用, 对研究沉降机制具有重要意义。然而, 该方法首先需要积累一定数量的可用影像 (一般需 ≥ 25 景) 以保证选取到可靠 PS 点, 同时比较适用于 PS

点相对密集的城市区域,对于缺乏PS点的植被覆盖等研究区可能存在点密度不足的限制,另外观测区域的形变相位通常建模为缓慢线性模型。

PS-InSAR方法在实际应用中存在自身的条件和场合限制。

表1 各种地面沉降监测方法比较

Table 1 Comparison of various ground subsidence monitoring techniques

方法	测量方式	精度/m	空间采样率/(个/次)	时间采样率(观测频次)	成本
精细测量/基岩标和分层标	点	10^{-5} — 10^{-4}	1	月	高
水准测量	网络	10^{-3} — 10^{-2}	10—100	月	高
GNSS	网络	10^{-3} — 10^{-2}	10—100	连续	高
D-InSAR	面	10^{-2}	10^5 — 10^7	卫星重访周期/d	低
PS-InSAR	网络	10^{-3}	$>10^4$	卫星重访周期/d	低

2.2 小数据集方法

PS-InSAR方法中通过振幅离差指数进行PS点的选取,通常需要一定数量的影像(一般要求 ≥ 25 景),这在一定程度上限制了小数据集的应用。而基于小数据集影像进行及时处理提取形变信息也具有迫切的应用需求, Lu等(2008)提出小数据集方法,对干涉图的数量没有限制,达到提取稳定相干点的结果。

小数据集方法与PS-InSAR方法的主要区别在于相干点的选取,包括子孔径影像生成、子孔径影像相干系数图生成、以及相干点目标的判别。首先将SAR影像方位向频域分成多个子孔径,分别对应子孔径图像(Schneider等, 2006)。将频域图像沿方位向除以权重函数,并将子孔径分别乘以权重函数,以此消除子孔径图像的旁瓣影响。这里将SAR影像分为前视和后视两个子视,并求得两子视影像的相干系数图。考虑到影像幅度值也是区分相干点目标与分布式目标的重要指标,采用共轭内积作为子孔径影像相干性的测度。

$$\gamma_{1,2} = |\langle S_1 \cdot S_2^* \rangle| \quad (1)$$

式中, S_1 、 S_2 表示任意两幅子孔径影像, $*$ 表示复数共轭, $\langle \cdot \rangle$ 表示邻域平均。

扩展到时间序列影像上,首先计算时序上子孔径影像相干系数图的平均值,分别计算子孔径影像平均相干系数图的均值 μ 和标准差 σ ,用于相干点识别的阈值经验值为 $T = n \sqrt{\sigma/\mu} \cdot \mu = n \sqrt{\mu\sigma}$,其中 n 为大于1的整数, n 值越大提取的点目标越准确。

获取相干点目标集合后,基于相干点集的时

间序列分析与PS-InSAR相似,最后获得基于小数据集的时间序列InSAR沉降速率分布结果,小数据集方法流程图如图1所示。

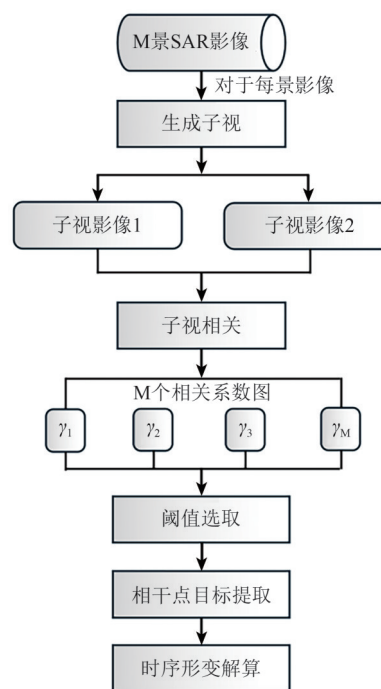


图1 小数据集方法流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed method for small dataset

另外,小数据集方法不局限于上述一种相干点提取方法,在小数据集基础上发展的各种相干点提取方法都可最终实现短时间序列InSAR形变的提取(裴媛媛, 2012)。

2.3 SBAS-InSAR方法

小基线集雷达干涉测量(SBAS-InSAR)方法是另一代表性时间序列InSAR方法(Berardino等,

2002)。SBAS-InSAR 通过设定时空基线阈值选择相干性较高的短基线干涉对, 采用多主影像网络进行时序形变信息提取。SBAS 通过构建覆盖区域多主影像的子集网络, 弱化 PS-InSAR 方法中选主影像带来的相干性不足, 同时对数据需求量更低, 具有较高的计算效率。其处理流程包括: 首先计算所有影像的时间和空间基线, 并根据阈值筛选出合适的干涉对; 对这些干涉对进行差分干涉处理和相位解缠; 然后将所有差分相位方程联立, 采用最小二乘或奇异值分解方法求解全时序形变参数。为提取毫米级变形, 通常还需对大气延迟等低频噪声进行时空滤波, 分离出非线性地表形变。SBAS-InSAR 通用流程图如图 2 所示。

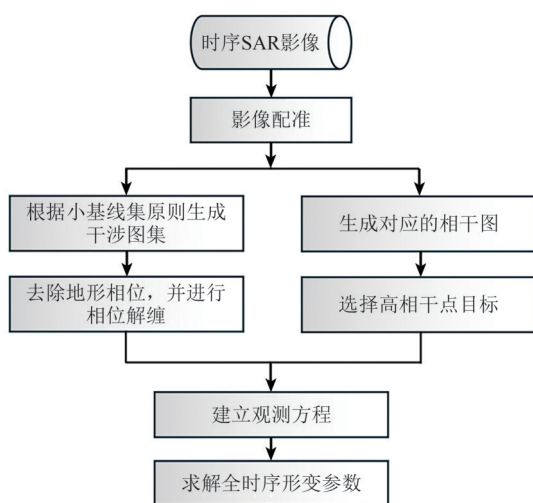


图2 SBAS-InSAR 方法流程图

Fig. 2 Flowchart of the small baseline subset Interferometric Synthetic Aperture Radar method

2.4 时序 InSAR 方法城市地面沉降监测应用现状

上述常用时序 InSAR 方法为本文典型案例所采用的方法。除此之外, 为了最大限度增加 InSAR 观测点密度, 混合型时序 InSAR 方法, 如 StaMPS (Hooper, 2008) 和 SqueeSAR (Ferretti 等, 2011), 也是地面沉降监测中常用时序 InSAR 方法, 尤其适用于相干性相对较低的区域。

国内外专家学者围绕时序 InSAR 方法城市地面沉降监测已开展了诸多案例研究与应用。正因 SAR 影像的广域覆盖特性, 已有基于时序 InSAR 方法的城地面沉降监测集中于大范围的城市地表沉降监测, 包括区域地面沉降信息的提取 (Zhao 等, 2019; Cigna 和 Tapete, 2021)、各类地

面沉降影响因素的分析 (Wang 等, 2022)、局部沉降的智能探测 (Anantrasirichai 等, 2021) 等。与此同时, 随着 Sentinel-1 提供的大范围双极化 (VV/VH) 时序影像日益充足, 极化时序 InSAR 方法在城市地面沉降监测中受到越来越多关注 (Zhao 等, 2022; Luo 等, 2023; Ng 等, 2023; Zhang 等, 2025)。通过联合利用多极化通道信息, 极化时序 InSAR 方法通常能够提升干涉图的相位质量和监测点密度, 相较于仅利用单极化通道的时序 InSAR 技术具有特有优势 (Zhao 等, 2019, 2023b)。

基于时序 InSAR 技术的城市地面沉降监测已在墨西哥城 (Osmanoğlu 等, 2011; Castellazzi 等, 2016; Cigna 和 Tapete, 2021)、雅加达 (Ng 等, 2012; Harintaka 等, 2024)、中国长三角 (Liao 等, 2006; 廖明生 等, 2012; 杨梦诗 等, 2017; Zhao 等, 2019; Wang 等, 2022)、京津冀 (范景辉 等, 2008; Zhang 等, 2016; 刘利敏 等, 2016; 李广宇 等, 2018; Dong 等, 2023; Lai 等, 2024)、大湾区 (Wu 等, 2023; Lin 等, 2025)、西安 (Wang 等, 2021; Zhao 等, 2023a)、太原 (Tang 等, 2022)、武汉 (Zhou 等, 2017; Han 等, 2020) 等地取得成效。

从时序 InSAR 方法原理出发, 经典的 InSAR 广域形变提取方法在城市应用中存在明显局限, 这些监测往往未能充分考虑高层建筑区普遍存在的叠掩、顶底倒置等几何畸变现象。基于 TomoSAR 技术的分析, 通过对雷达视线向 LOS (Line of Sight) 的高程维进行分辨, 可以有效分离因高层建筑叠掩而混叠在同一像元内的不同散射信号 (Zhu 和 Bamler, 2010, 2012; 廖明生 等, 2015; Ma 和 Lin, 2016; Zhao 等, 2025)。然而, TomoSAR 方法对数据基线要求较高、参数求解过程复杂, 限制了其在实际城市监测中的大规模应用。近年来随着人工智能的迅速发展, 基于深度学习模型改进的 TomoSAR 技术用于大范围建筑场景的精细监测研究相继出现 (Duan 等, 2025), 同时, 基于机载 SAR 平台的 TomoSAR 技术也在推动着高程建筑场景下 InSAR 监测的发展 (Wang 等, 2025)。

表 2 归纳总结了文中提及的常用时序 InSAR 方法在城市地面沉降监测中的主要应用特点、优势、适用条件及主要局限性。

表2 各种常用 InSAR 城市地面沉降监测方法比较
Table 2 Comparison of various InSAR techniques for ground subsidence monitoring

方法	应用特点	优势	适用条件	限制与不足	相关文献
PS-InSAR	以永久散射体为基础,基于单主多时相干涉图进行相位时序分析与形变反演	精度高	高相干城区	线性沉降模型;需要积累一定数量的可用影像(一般需≥25景);对稳定散射点依赖性强	(Ferretti 等, 2000, 2001)
小数据集方法	基于少量干涉图的时序分析方法,用于数据不足或时间序列不完整情况下的快速形变估计	对数据量要求低	观测时间短或数据获取受限区域	对噪声与大气误差的抑制能力相对弱	(Lu 等, 2008)
SBAS-InSAR	设定时空基线阈值选择相干性较高的短基线干涉对,采用多主干涉图网络进行时序反演,获取连续形变场	减弱失相干造成的影响;形变场连续性好;可实现区域尺度监测	大范围地面沉降	干涉图数量大、计算和数据管理量大;一般多视处理降低空间分辨率	(Berardino 等, 2002)
SqueeSAR	联合永久散射体与分布式散射体,估计形变以提高观测点密度	观测点密度高、适用范围广	相对于 PS-InSAR 在低相干区(如郊区、植被区)具有更好的适用性	算法复杂度高,对数据量和计算资源要求较高	(Ferretti 等, 2011)
极化时序 InSAR 方法	结合多极化通道(VV、VH 等)信息,通过极化优化提升干涉相位质量与监测点密度	提高相位质量与观测点密度	双极化或全极化 SAR 数据可用区域	对数据量与算法要求较高	(Zhao 等, 2022; Ng 等, 2023)
TomoSAR	基于多基线三维成像原理,分离叠掩散射体并实现三维定位与形变估计	可分辨叠掩散射体;重建城区建筑物三维结构	高层建筑区、山地或叠掩严重区域	数据需求量大、处理流程复杂、计算成本高	(Zhu 和 Bamler, 2010, 2012; Zhao 等, 2025)

3 时序 InSAR 方法监测上海地区地面沉降研究

上海市位于长江与黄浦江入海口,是长三角冲积平原的一部分。上海市整体地势平缓,平均海拔为 4 m 左右。上海地区浅土层普遍分布着饱和淤泥质粘性土,分布着典型的软土地基(龚士良, 2002),易诱发地面沉降等环境地质问题。从 20 世纪初以来,地面沉降在上海地区开始发育,先后经历了地面沉降期(1921 年—1965 年,包括初始阶段、加速阶段、严重阶段与缓和阶段)与控制沉降期(1966 年至今,包括微量回弹阶段、微沉阶段、增长阶段、平稳阶段)等。当前上海地面沉降处于全域总体可控、不均匀沉降仍然存在的态势(Wang 等, 2022)。

地面沉降是关系上海城市安全及高质量发展的重要因素,时序 InSAR 技术为沉降场的连续观测与趋势研判提供了重要支撑。随着 SAR 数据源方面经历了从 ERS-1/2、ENVISAT/ASAR 到高分辨率 TerraSAR-X 数据的发展,进一步到高时效全球覆盖的 Sentinel-1 等阶段,作者团队关于时序 InSAR 方法在上海地面沉降监测中的发展对应归纳为以下 4 个阶段,如图 3 所示。

3.1 第 1 阶段:基于 PS-InSAR 方法的监测实验与验证

上海市开展基于时间序列 InSAR 方法的地面沉降监测工作,最早可追溯至 21 世纪初。早期的研究与应用主要围绕 PS-InSAR 方法展开,重点聚焦于城市地面沉降场的提取与结果验证。

基于中欧“龙计划”合作项目“地形量测”课题,武汉大学、米兰理工大学以及上海市自然资源调查利用研究院(原上海市地质调查研究院)从 2003 年开始在上海开展 PS-InSAR 技术的实验性研究,验证该方法的适用性和数据处理结果的精度(Li 等, 2005; Liao 等, 2006)。数据集采用欧洲航天局提供的 ERS-1/2 共 26 景,平均后向散射系数如图 4 所示,时间覆盖范围从 1993 年—2000 年。基于该数据集提取到的地面沉降速率图如图 5 所示,1990s 时期上海市地面沉降在主城区仍然比较明显,最大沉降速率达到-40 mm/a(负值为下沉、正值为抬升)。PS-InSAR 反演得到的沉降形变场与同期地面测量的累积沉降量的空间分布基本一致(张阿根 等, 2002)。经与地面水准测量对比验证,采用最近邻插值与克里金插值法两种方法对永久散射点形变量进行对比,结果显示标准偏差均小于 2 mm/a,可满足长期形变监测的需求(Li 等, 2005)。

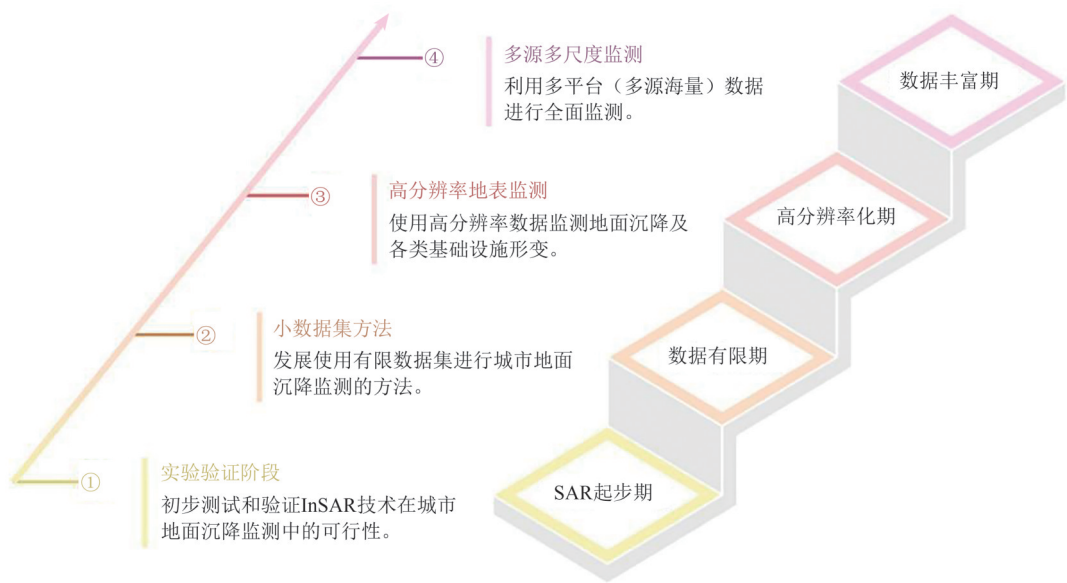


图3 上海市 InSAR 地面沉降监测发展框架图

Fig. 3 Development framework diagram for InSAR-based land subsidence monitoring in Shanghai

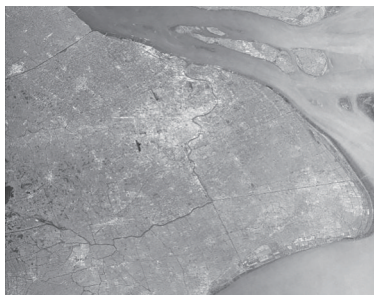
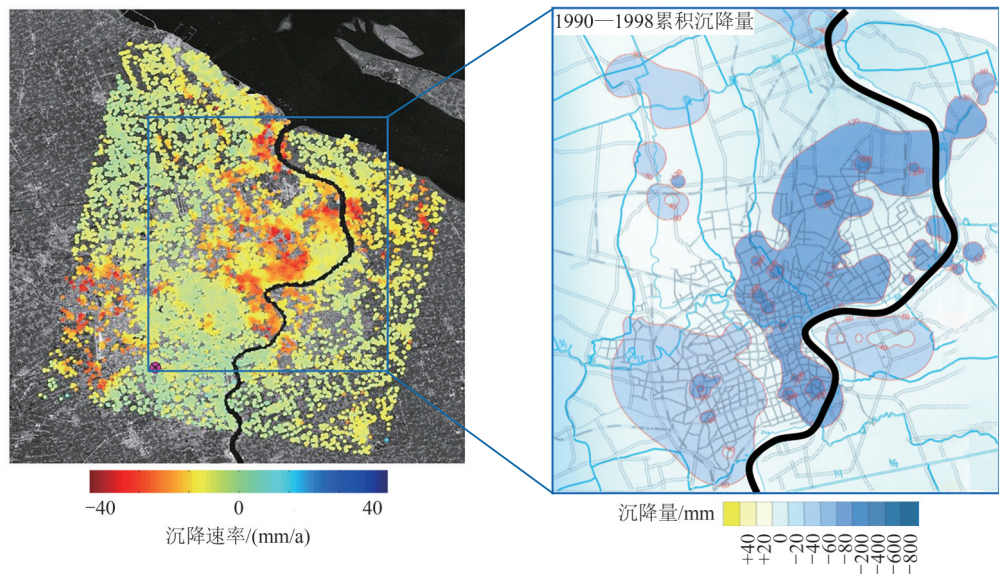


图4 上海地区 ERS-1/2 后向散射系数图

Fig. 4 Backscattering amplitude of ERS-1/2 covering Shanghai

在 PS-InSAR 上海试验区的应用中，主要从两个方面评估其能力。多数 PS 点为具有较强后向散射的反射体，例如混凝土或金属目标。另一方面，应用 PS-InSAR 技术时还需考虑后向散射的稳定性。在上海地区，PS 点在中心城区分布较为密集，而在新开发区域（如 1990 s 起城市建设活跃的浦东新区）则相对稀疏。在此情形下，SAR 数据的获取是开展长期形变监测的关键。



(a) PS-InSAR 沉降速率分布图

(b) 地面沉降量等值线图 (张阿根 等, 2002)

(a) Deformation velocity distribution from PS-InSAR

(b) Deformation contour map (Zhang et al., 2002)

图5 上海中心城区 PS-InSAR 与地面水准测量沉降结果对比 (Li 等, 2005; Perissin 等, 2007)

Fig. 5 Comparison of land subsidence between PS-InSAR and leveling measurements in Shanghai central area (Li et al., 2005; Perissin et al., 2007)

PS-InSAR反演得到的沉降形变场与基于地面水准测量得到的沉降等值线图反映的沉降趋势基本一致。第一阶段的工作不仅验证了时序InSAR技术在城市地面沉降监测中的可行性,也为后续高精度、大范围的沉降监测业务化应用奠定了坚实基础。

3.2 第2阶段:短时间序列InSAR城市形变监测

实验数据采用2008年8月—2009年11月的共

13景ENVISAT/ASAR影像,数据覆盖了上海市大部分范围,覆盖面积约为 $100\times 90\text{ km}^2$ 。基于2.2节讨论的短时间序列SAR数据提取得到的地面沉降速率图如图6所示。与前期沉降格局相比,一方面中心城区的杨浦区西部和虹口区东南部依然存在着显著的沉降,另一方面,浦东新区等地出现了新的沉降区。总体来说,该时期沉降范围向西部和北部有所扩大。

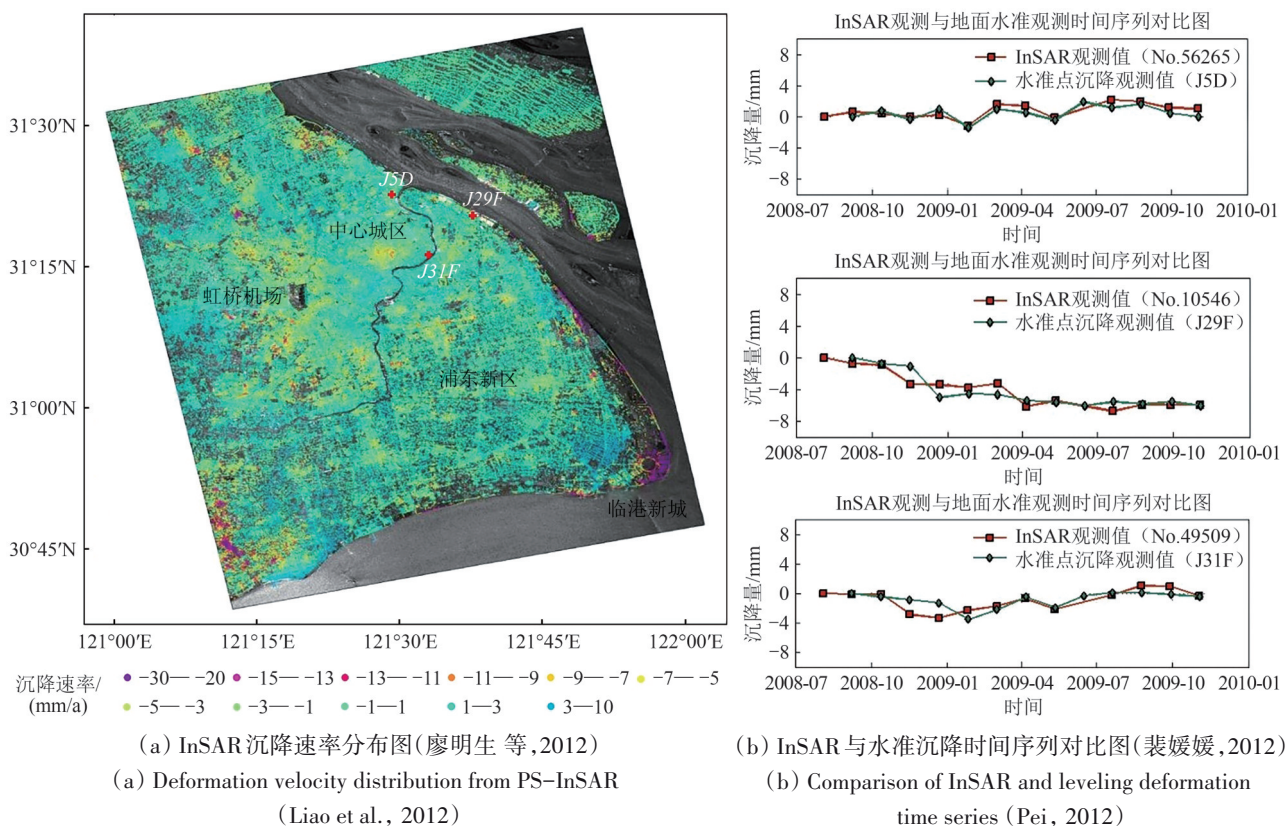


图6 基于ENVISAT/ASAR小数据集方法的上海地面沉降监测结果
Fig. 6 Land subsidence monitoring results across Shanghai based on the ENVISAT/ASAR small dataset method

主要的沉降区域出现在:(1)上海中心城区的杨浦区西部和虹口区东南部存在着显著的沉降漏斗,沉降速率超过 -10 mm/a 。与2000年前的沉降监测结果相比(王艳等,2007),该区域虽然发生持续性沉降,但沉降速率趋缓。(2)北部的宝山区存在着沉降漏斗,最大沉降速率超过 -15 mm/a 。北部的嘉定区靠近江苏省太仓市的娄塘镇也存在着沉降漏斗,并有向南部呈条带状发展的趋势。(3)西部闵行区靠近虹桥机场的几个相对较小的沉降漏斗已经连成一片,形成了较大的沉降区域,包括了嘉定区的黄渡镇、闵行区部分城镇、长宁区的北新泾镇及松江区,最大沉降速率超过 -10 mm/a 。(4)西南郊则存在一个条带

状沉降,自北向南连接,其中沉降最为严重的区域分布在浙江省内。(5)东部的浦东新区存在若干小的沉降漏斗,主要分布在建物密集的区域。(6)东南临海区域沉降显著,特别是临港新城,其沉降速率远远高于内陆地区,平均沉降速率接近 -30 mm/a 。

短时间序列InSAR形变监测方法为应对城市区域重访周期较长导致的数据集有限或历史影像稀少区域的沉降监测提供了可能。总体来看,本阶段研究集中在方法探索,力图在数据成本较低的情况下仍能获得可靠的沉降信息。关于小数据集方法更全面的讨论与分析可参考文献(Lu等,2008)。

3.3 第3阶段: 高分辨率 InSAR 城市形变监测

以 TerraSAR-X 为代表的高分辨率 SAR 数据的出现, 为城市地面沉降监测带来了新的机遇与挑战。一方面, 更高的空间分辨率显著提升了 SAR 卫星观测与识别目标细节的能力, 使得对城市各类基础设施 (如海塘、防汛墙、高架道路、轨道交通等) 的毫米级形变进行监测成为可能, 极大地促进了大范围城市基础设施安全精细化评估。另一方面, 高分辨率数据对应的影像幅宽通常较小, 单幅 SAR 影像覆盖区域相对有限, 为实现对整个城市区域的有效监测, 往往需要融合多景/多轨数据 (Qin 等, 2017), 各类拼接方法也相继被提出 (熊思婷 等, 2014; Chang 等, 2017; Wang 等, 2024; Gong 等, 2025)。

根据 2013 年 4 月—2024 年 9 月期间共 237 景 TerraSAR-X 数据, 基于 SBAS-InSAR 方法得到上海市地面沉降速率结果, 如图 7 所示。近些年上海市通过开展有效的地面沉降防治工作, 地面沉降趋势得到显著遏制, 地面沉降整体处于相对稳定状态, InSAR 沉降点平均沉降速率为 -1.1 mm/a , 控制在 6 mm/a 的防控目标之内。部分区域分布着局部不均匀沉降, 比如闵行区、奉贤区、浦东新区、沿海堤坝区域。在此基础上, 基于 TerraSAR-X 数据对上海市各类基础设施进行全线监测也投入到监测实践中 (蒋亚楠 等, 2013; Jiang 等, 2016; 秦晓琼 等, 2017; 王茹 等, 2018; Yang 等, 2022)。图 8 与图 9 展示了基于高分辨率 TerraSAR-X 数据得到的上海海塘与黄浦江防汛墙沿线年度沉降速率分布情况, 高分辨率数据促进了对基础设施的沉降细节进行探测和分析。

上海海塘是保障上海抵御风暴潮灾害的第一道防线, 担负着保护上海市人民生命财产安全和工农业生产的重任。根据图 8 展示的上上海海塘 2013 年—2024 年期间年度形变速率可以看出, 横沙岛南部沿线沉降一直相对严重, 沉降速率超过 -15 mm/a , 而在 2023 年—2024 年前后得到缓和。浦东机场往南部分的海塘在 2016 年及之前的年度沉降速率均较严重, 在 2018 年及之后的年度形变速率得到平缓。

与海塘发挥的功能相似, 黄浦江防汛墙是指上海市市区范围内黄浦江沿岸建设的、具有挡洪防潮能力的城市堤防设施。然而, 由于上海地区

河岸的地基一般由含水率较高的软黏土组成, 不仅强度较低, 而且具有流变特征, 即在载荷作用下土体会发生随时间而缓慢发展的变形, 由此引起防汛墙墙体发生垂直沉降、水平位移、倾斜及墙后地面沉降等后果。因此, 定期对上海这一水灾防治的生命线工程进行沉降监测和安全性预警具有十分重要的意义。由图 9 可见, 2013 年—2024 年期间黄浦江防汛墙的年度形变速率总体可控而局部存在不均匀沉降, 沉降速率主要集中于 $-10 \sim 10 \text{ mm/a}$, 沿线未发现某一特定区段呈现持续性的逐年加剧趋势。对黄浦江防汛墙年度检测出的沉降区段仍需实施针对性的维护与加固措施。

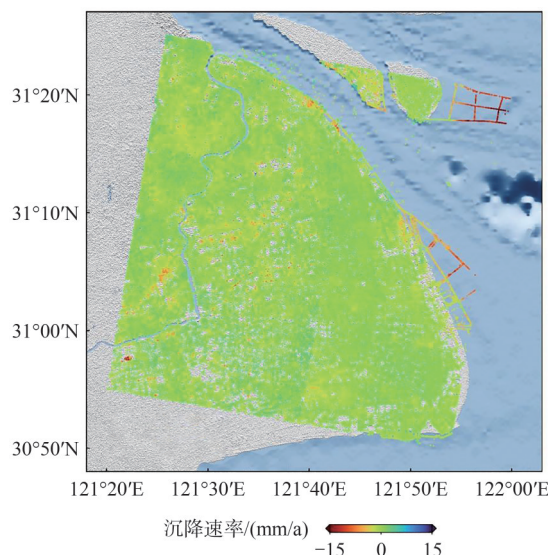


图 7 基于 TerraSAR-X 数据集的上海市时序 InSAR 地面沉降速率分布图 (2013 年—2024 年)

Fig. 7 Map of ground deformation velocity across Shanghai derived from the TerraSAR-X dataset from 2013 to 2024

基于高分辨率 InSAR 观测的研究与实践丰富了上海各类基础设施沉降特征的细节认知, 为多尺度综合监测奠定了技术基础。

3.4 第4阶段: 多尺度多源 InSAR 形变监测

近年来, 随着不同分辨率不同波长的 SAR 卫星/星座的出现, 多尺度多源数据融合监测成为研究与应用热点。其中, 欧洲航天局哨兵一号 (Sentinel-1) 卫星数据全球对外免费开放, 显著提升了 SAR 数据的可获得性与覆盖度, 由此支撑上海地面沉降监测向多源、多尺度的 InSAR 形变监测方向发展。

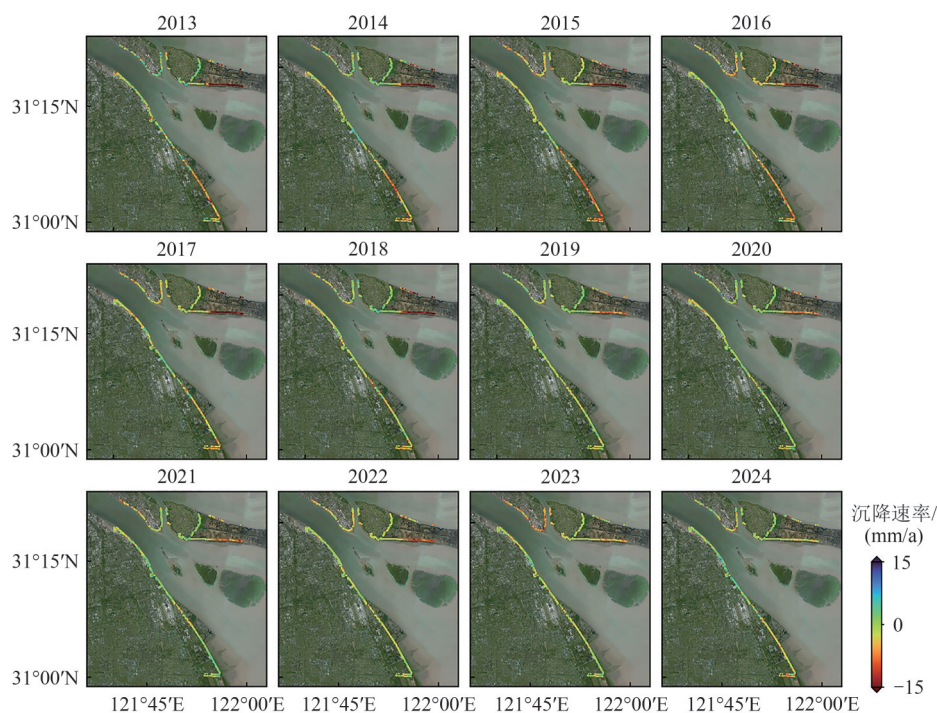


图8 上海海塘2013年—2024期间年度平均沉降速率

Fig. 8 Annual average deformation velocity along the Shanghai seawall from 2013 to 2024

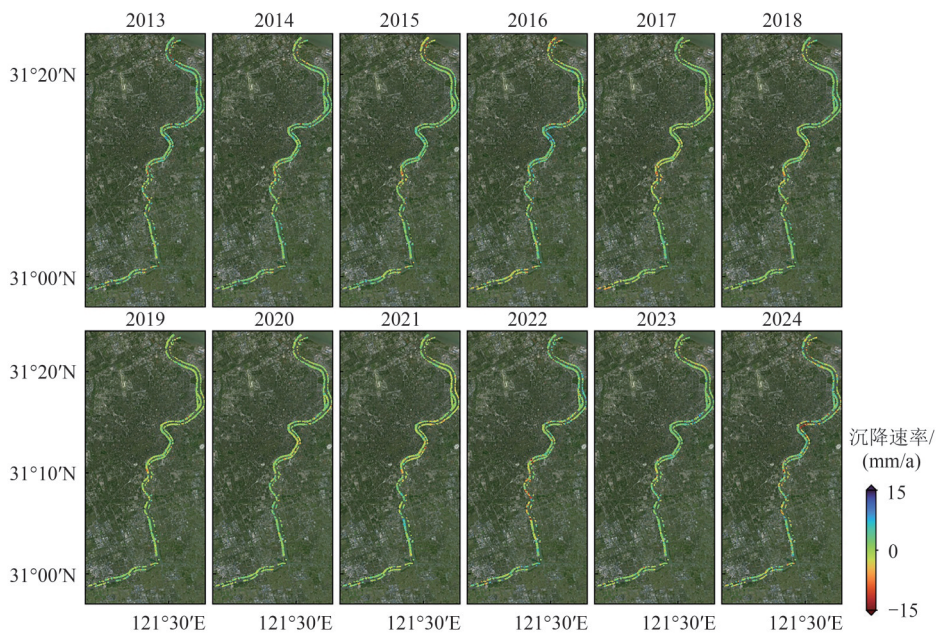


图9 黄浦江防汛墙2013年—2024期间年度平均沉降速率

Fig. 9 Annual average deformation velocity along the Huangpu River from 2013 to 2024

基于2015年11月—2024年8月期间共236景Sentinel-1影像, 同样利用SBAS-InSAR方法得到上海全域沉降速率分布结果, 如图10所示。尽管在时间覆盖范围、卫星入射角、雷达波长、空间分辨率等方面存在差异, 图10所揭示的地面沉降情况与图7反应的整体格局基本一致, 沉降点平均沉降速率为 -1.3 mm/a , 局部沉降发生在闵

行区、浦东区以及沿海堤坝区域。此外, 图10显示在长兴岛北岸和崇明岛东滩地区, 同样分布着明显的沉降信号, 速率大于 -10 mm/a 。Sentinel-1和TerraSAR-X监测结果呈现出良好的一致性, 采用规则格网分别对两观测结果进行采样并计算速率差, 统计速率差平均值为 -0.1 mm/a , 标准差为 1.6 mm/a , 相互验证了沉降分布的可靠性。

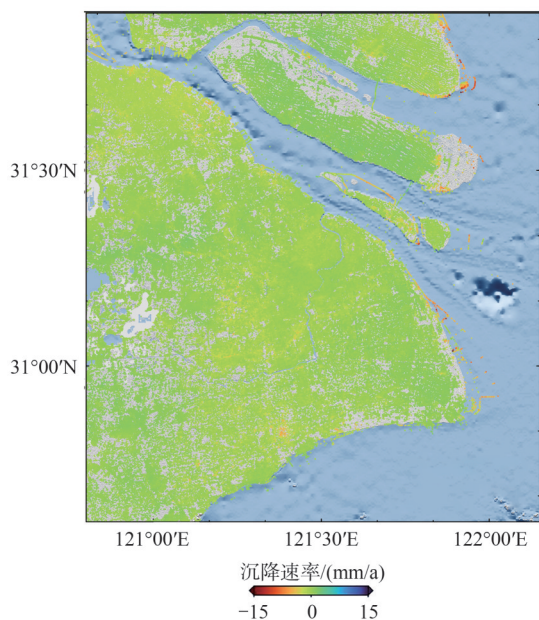


图 10 基于 Sentinel-1 数据集的上海市全域时序 InSAR 地面沉降速率分布图(2015 年—2024 年)

Fig. 10 Map of ground deformation velocity across Shanghai derived from the Sentinel-1 dataset from 2015 to 2024

选择 Sentinel-1 与 TerraSAR-X 相同覆盖时间与空间范围的部分数据集 (2016 年—2020 年) 进行融合分析, 同时依据 Zhao 等 (2019) 的研究, 上海地区南北向水平形变的影响可忽略, 根据式 (2) 得到

东西水平方向与垂直向形变速率图, 如图 11 所示。

$$\begin{pmatrix} d_{\text{LOS}}^A \\ d_{\text{LOS}}^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos \alpha_1 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \cos \alpha_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_v \\ d_e \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, d_{LOS}^A 和 d_{LOS}^B 分别表示升降轨 LOS 向形变值, d_v 和 d_e 分别表示垂直向、东西水平向形变值, α_1 和 α_2 为升降轨卫星航向角, θ_1 和 θ_2 表示升降轨卫星入射角。

上海地区地表形变整体上表现为垂直方向的地面沉降, 分布在闵行区、奉贤区、浦东新区等局部区域。尽管东部沿海堤坝区域因长期地表变化导致时间失相干, 难以获取高密度的相干点, 但该区域的沉降现象始终较为显著。

多尺度形变分析可以进一步系统提取不同尺度的形变信号, 往往对应着不同影响因素下的地面沉降分布, 对于在空间上存在叠置分布的沉降信号, 可以通过独立成分分析 ICA (Independent Component Analysis) 等方法进行分解提取 (Lai 等, 2024)。Wang 等 (2022) 基于对上海地区不同尺度沉降信号的分析, 揭示了人类工程建设活动是影响上海市近些年地面沉降的重要原因之一。工程建设活动造成了土层加荷压缩变形, 上海市地面沉降的发生、发育和发展范围与城区建设拓展以及城区工程建筑有着密切的联系。

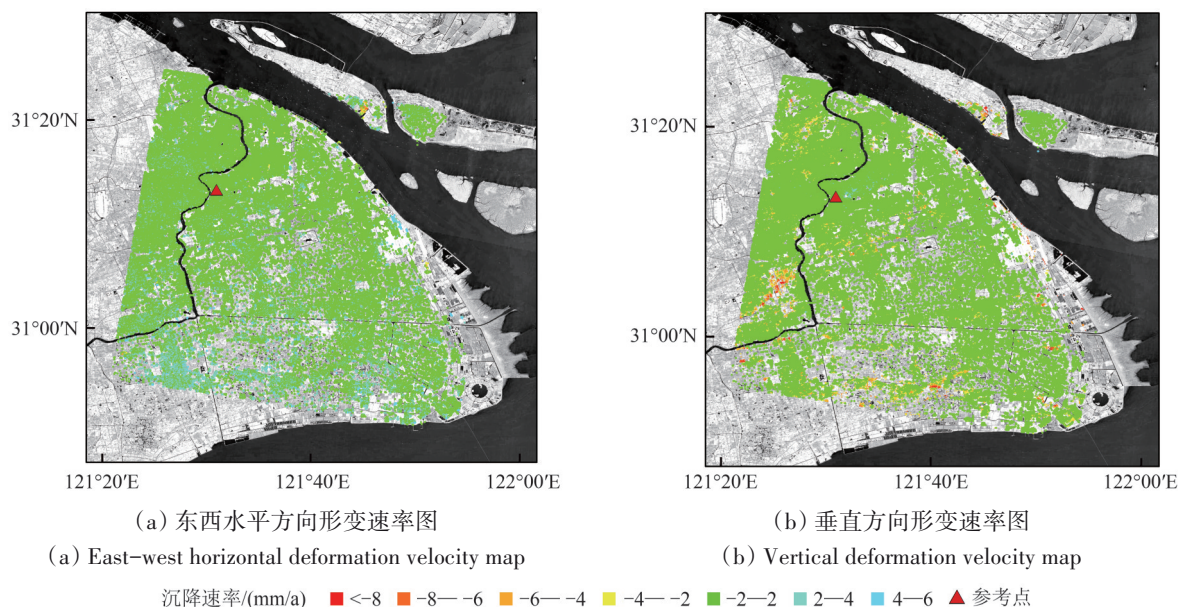


图 11 基于 Sentinel-1 与 TerraSAR-X 数据集的上海市地面沉降速率分布图(2016 年—2020 年)(Wang 等, 2022)

Fig. 11 Map of ground deformation velocity across Shanghai from Sentinel-1 and TerraSAR-X datasets from 2016 to 2020 (Wang et al., 2022)

综合上述4个阶段的研究结果来看,上海沉降中心由20世纪末的中心城区向东部沿海和南部工业区迁移,驱动因素也由早期以自然地质水文过程为主(地下水开采、压缩层厚度等贡献显著)转变为近年各类工程建设和地下水调控因素占主导。通过多尺度多源 InSAR 数据综合分析,反映了上海近30年沉降演化的时空特征和成因演变。

4 北京平原30年长时序地面沉降监测与分析

基于上海 InSAR 地面沉降监测的成功应用与成效评价,研究区进一步向北京平原拓展,以检验该项技术在典型北方平原区的工程适用性。北京平原是中国另一地面沉降发育较为严重的地区之一,长期以来都是地面沉降监测热点区域。历

史上过度开采地下水是引发地面沉降的主要影响因素,随着城市化建设和工业发展,地面沉降逐步扩大和发展。在近年来的新水情背景下,北京平原地区受地下水开采限制、引调水和生态补水等政策的影响,地下水位整体性回升,部分区域甚至出现地表回弹等现象。

联合多颗C波段SAR卫星,作者团队利用时序InSAR技术对北京平原1992年—2022年30年间地面沉降量进行有效量测,结果如图12所示。近30年的累计沉降量分布图揭示了3大沉降漏斗SF(Subsidence Funnel),SF1位于朝阳区和通州区,最大沉降量达到 -1.98 m ;SF2位于海淀区和昌平区,最大沉降量为 -1.40 m ;SF3分布在顺义区,沉降漏斗面积相对较小,最大沉降量监测值为 -0.94 m 。

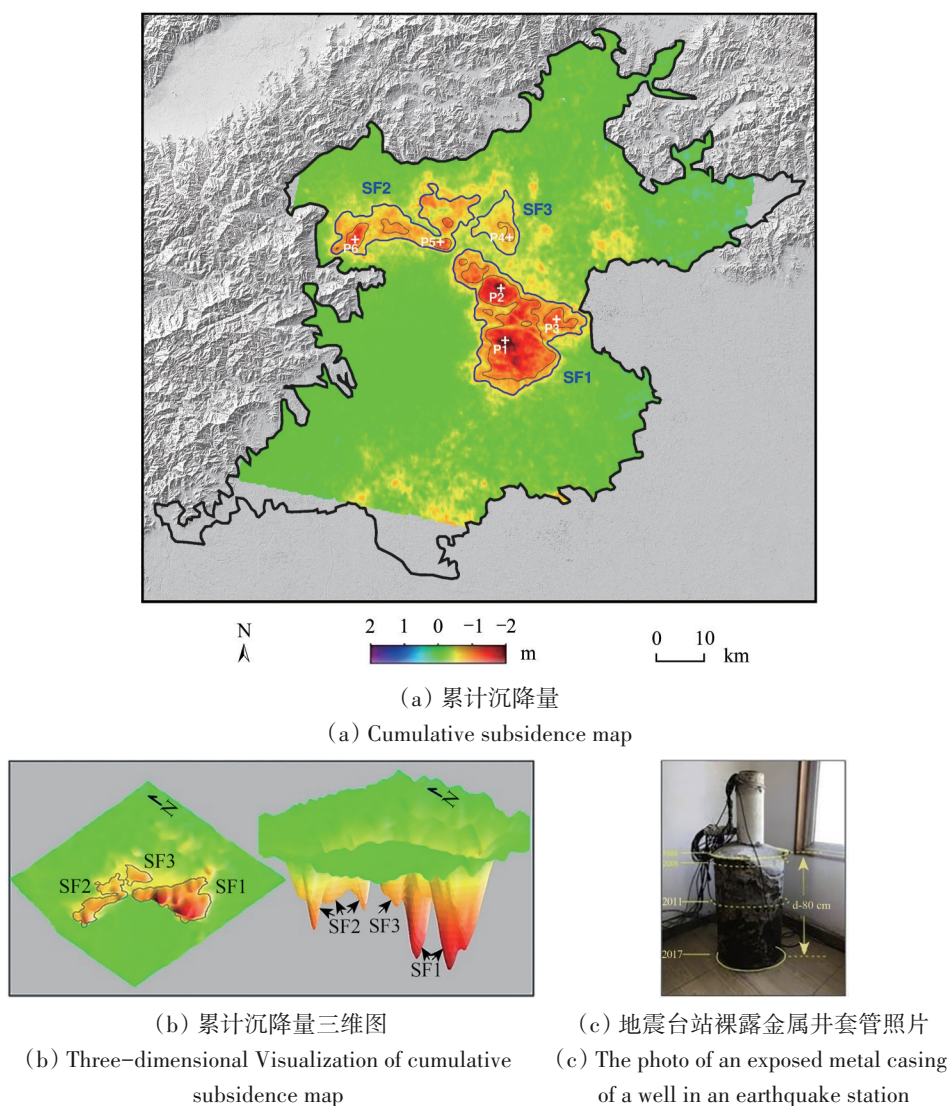


图12 北京平原30年累计沉降量分布图(1992年—2022年)(Dong等, 2023)

Fig. 12 Thirty-year cumulative subsidence map of the Beijing Plain (1992—2022) (Dong et al., 2023)

而新水情背景下,北京平原地面形变表现出显著的时空异质性。Lai 等(2024)利用 InSAR 观测并结合 ICA 方法,识别并解析了地面形变的叠置模式,揭示了其影响因素。实验结果发现北京平原的地表形变由 4 种主要模式叠加而成,分别为近似线性沉降、近似线性抬升、减速沉降和周期性形变。这些模式不仅反映了地层形变特征,还揭示了其叠加的状态。近似线性沉降模式与可压缩层厚度密切相关,抬升模式主要集中在生态补水受水区中调蓄条件适宜且历史上地面沉降显著的区域。周期性形变模式反映地下水位对降水与灌溉抽水的响应,其时间滞后受区域水文地质条件的调节。此研究深化了对地面形变机制的认识,为理解新水情下的地面形变响应提供了科学依据。

5 时序 InSAR 方法监测城市地面沉降:新课题与新挑战

随着城市管理和安全监测要求更加精细, SAR 数据时/空分辨率的提升也带来了诸多挑战,包括数据处理计算量急剧增加、密集建筑群带来的几何畸变与叠掩效应加剧、以及对散射机制建模和形变机制解译的要求进一步提高。时序 InSAR 方法在城市地面沉降监测中的应用既面临着一系列新课题和新挑战,同时也蕴含着推动城市安全 InSAR 监测发展的新机遇。

(1) 密集高层建筑物的高精度形变监测。密集高层建筑物在 SAR 侧视成像系统下几何畸变严重、叠掩现象普遍存在,建筑体之间相互遮挡也导致存在许多阴影区域,这些现象严重影响了建筑物形变相位的有效提取。建筑区高程误差显著,高程相位的精确提取也直接影响形变监测的精度(Ma 等, 2022)。除此之外,高层建筑的大气分层效应导致大气延迟相位显著(林琿等, 2017),以及存在的热胀冷缩效应都直接影响着高精度形变相位的有效提取(Qin 等, 2018)。在城市建筑密集区域,高层建筑的形变监测对数据空间分辨率和算法精度都提出了极高要求。

TomoSAR 技术在解决建筑物叠掩问题方面展现出独特优势(Zhu 和 Bamler, 2010, 2012; 廖明生等, 2015; Ma 和 Lin, 2016),其对多时相多基线 SAR 数据及计算复杂度方面要求较高。如何实现密集高层建筑物的高精度形变监测仍然是现有城市形变监测中面临的挑战之一。时序 InSAR 需

克服几何畸变、叠掩效应、各类误差相位等带来的问题,实现毫米级的建筑形变提取,从而保障高层建筑和城市基础设施的安全稳定。

(2) 城市复杂场景下雷达散射机制的理解与建模。城市复杂场景下各类结构复杂,包含建筑物、交通基础设施、各类构件、绿地等多种地物类型,天然形成的二面角、三面角等结构众多,雷达回波信号受多次散射、体散射等效应影响显著。要准确反演地表形变,必须深入理解不同地物在雷达影像中的散射特性,并建立更精确的散射模型,以改善散射体与实际地物/结构的对应关系与形变监测可靠性(杨梦诗等, 2023)。

(3) 多因素耦合作用下的城市形变机制研究。城市地面沉降的成因错综复杂,包括地下水开采与地面沉降的关系、深井回灌引起的地表形变、地下空间开发和地下工程活动的影响、各类荷载作用对沉降的影响、以及新城陆地区的沉降等因素。在多因素耦合作用下,利用时序 InSAR 技术开展城市地面沉降的监测与研究,需要发展更为科学的方法、模型等以揭示多因素相互作用下的形变机理,为城市风险评估与管控提供科学依据(Wang 等, 2022; Lai 等, 2024)。

(4) 基于人工智能的形变信息挖掘与早期预警框架。面向城市地面沉降灾害预警,单纯依赖 InSAR 提取的形变信息仍难以形成稳定可靠的风险判识,需在水文、工程、气象及地质等领域专家知识的指导下开展信息挖掘,将 GNSS、地面水准、传感器监测、地下水位与抽采量等与 InSAR 时序在统一的时空框架中融合。随着人工智能,尤其是深度学习方法的广泛应用,结合物理先验与数据驱动的混合范式有望实现时变形变模式与异常的识别、归因与预测,从而面向地面沉降与基础设施风险开展早期预警(Zuo 等, 2025; Yang 等, 2025)。

6 结 论

时序 InSAR 技术经过二十余年的发展,已成为城市地面沉降监测的重要手段之一。本文系统回顾了作者团队利用时序 InSAR 方法在城市地面沉降监测中的发展历程与应用实践,通过梳理二十余年的技术演进和工程应用,得出以下主要结论。以上海市为代表的城市地面沉降监测实践表明,时序 InSAR 技术已从早期的实验验证发展为

成熟的工程应用工具。通过持续监测,从区域监测到精细化管控,上海市地面沉降防治工作取得显著成效,年沉降量控制在6 mm以内。同时,时序InSAR技术在城市复杂环境下的应用能力不断增强,从初期的区域性监测发展为能够实现基础设施精细化监测。高分辨率SAR数据的应用使得建筑物、桥梁、堤坝等城市关键基础设施的形变监测成为可能,为城市安全管理提供了重要的技术支撑。进一步地,该技术在成功应用,揭示了最大沉降量分别达到-1.98 m、-1.40 m与-0.94 m的3大沉降漏斗,证明了其广泛的适用性和实用价值。

通过长期监测实践,对城市地面沉降的机理认识不断深化。时序InSAR技术不仅提供了高精度的形变监测结果,还为揭示地面沉降的时空演化规律、驱动机制以及人类活动的关联性提供了重要科学依据。与此同时,与水准测量和GNSS等技术相结合,形成时空特性互补的天地一体化的监测体系,将为制定有效的沉降防治策略奠定坚实的科学基础。当前,面对城市环境日益复杂化的挑战,需要继续深化相关科学问题的研究,推动该技术向更高精度、更广适用性的方向发展。

展望未来,时序InSAR技术在城市地面沉降监测中的发展将主要聚焦于密集高层建筑物的高精度形变监测,以适应城市化进程中建筑密度不断增加的需求;研究城市复杂场景下雷达散射机制的深入理解与精确建模,以提升监测精度和可靠性;探究多因素耦合作用下城市形变机制的科学解释,以增强对复杂环境下地表形变过程的理解能力;以及海量感知数据支持下基于人工智能技术进行信息挖掘与早期预警框架搭建,以有效服务于城市地质灾害的预防与管理。

志 谢 本文研究中使用的ERS-1/2、ENVISAT/ASAR、Sentinel-1数据由欧洲航天局(ESA)提供,TerraSAR-X数据由德国空中客车公司(AIRBUS)和德国宇航局(DLR),在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

Anantrasirichai N, Biggs J, Kelevitz K, Sadeghi Z, Wright T, Thompson J, Achim A M and Bull D. 2021. Detecting ground deformation in the built environment using sparse satellite InSAR data

with a convolutional neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(4): 2940-2950 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3018315]

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]

Castellazzi P, Arroyo-Domínguez N, Martel R, Calderhead A I, Normand J C L, Gárfias J and Rivera A. 2016. Land subsidence in major cities of Central Mexico: interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47: 102-111 [DOI: 10.1016/j.jag.2015.12.002]

Chai L, Xie X Y, Wang C, Tang G J and Song Z. 2024. Ground subsidence risk assessment method using PS-InSAR and LightGBM: a case study of Shanghai metro network. *International Journal of Digital Earth*, 17(1): 2297842 [DOI: 10.1080/17538947.2023.2297842]

Chang L, Dollevoet R P B J and Hanssen R F. 2017. Nationwide railway monitoring using satellite SAR interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2): 596-604 [DOI: 10.1109/Jstars.2016.2584783]

Cigna F and Tapete D. 2021. Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014-2020 Sentinel-1 IW InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 253: 112161 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112161]

Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthery N and Crippa B. 2016. Persistent scatterer interferometry: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 78-89 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011]

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]

Duan H X, Liu Y Z, Zhang H, Ma P F, Shi Z Q, Guo Z H, Tang Y X, Wu F and Wang C. 2025. Large-area urban TomoSAR method with limited a priori knowledge and a complex deep learning model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 139: 104521 [DOI: 10.1016/j.jag.2025.104521]

Elliott J R, Fang J, Lazecky M, Maghsoudi Y, Ou Q, Payne J, Rollins C, Wang D H, Hooper A and Wright T J. 2026. Deformation, strains and velocities for the Alpine Himalayan Belt from transcontinental Sentinel-1 InSAR & GNSS. *Remote Sensing of Environment*, 338: 115320 [DOI: 10.1016/j.rse.2026.115320]

Fan J H, Guo H D, Guo X F, Liu G, Ge D Q and Liu S W. 2008. Monitoring subsidence in Tianjin area using interferogram stacking based on coherent targets. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 12(1): 111-118 (范景辉, 郭华东, 郭小方, 刘广, 葛大庆, 刘圣伟. 2008. 基于相干目标的干涉图叠加方法监测天津地区地面沉降. *遥感学报*, 12(1): 111-118) [DOI: 10.11834/jrs.20080115]

- 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. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212 [DOI: 10.1109/36.868878]
- 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]
- Gabriel A K, Goldstein R M and Zebker H A. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7): 9183-9191 [DOI: 10.1029/JB094iB07p09183]
- Gong S L. 2002. The microscopic characteristics of Shanghai soft clay and its effect on soil mass deformation and land subsidence. *Journal of Engineering Geology*, 10(4): 378-384 (龚士良. 2002. 上海软粘土微观特性及在土体变形与地面沉降中的作用研究. *工程地质学报*, 10(4): 378-384) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2002.04.006]
- Gong Z Q, Liao M S, Dong J, Lan Q Y, Wang R and Lai S J. 2025. Wide-area coastal deformation extraction using multi-path/frame InSAR: a case study of the Bohai Rim. *Remote Sensing of Environment*, 330: 114988 [DOI: 10.1016/j.rse.2025.114988]
- Han Y K, Zou J G, Lu Z, Qu F F, Kang Y and Li J W. 2020. Ground deformation of Wuhan, China, revealed by multi-temporal InSAR analysis. *Remote Sensing*, 12(22): 3788 [DOI: 10.3390/rs12223788]
- Harintaka H, Suhadha A G, Syetianaw A, Ardha M and Sarasati A. 2024. Current land subsidence in Jakarta: a multi-track SBAS InSAR analysis during 2017-2022 using C-band SAR data. *Geocarto International*, 39(1): 2364726 [DOI: 10.1080/10106049.2024.2364726]
- 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]
- Jiang Y N, Liao M S, Wang H M, Zhang L and Balz T. 2016. Deformation monitoring and analysis of the geological environment of pudong international airport with persistent scatterer SAR interferometry. *Remote Sensing*, 8(12): 1021 [DOI: 10.3390/rs8121021]
- Jiang Y N, Yang M S, Liao M S, Wang H M. 2013. Deformation monitoring of the Shanghai Maglev system based on the time-series analysis of InSAR data. *Shanghai Land & Resources*, 34(4): 17-20 (蒋亚楠, 杨梦诗, 廖明生, 王寒梅. 2013. 应用时间序列 InSAR 技术监测上海磁悬浮列车专线形变. *上海国土资源*, 34(4): 17-20) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1329.2013.04.005]
- Lai S J, Lin J X, Dong J, Wu J Z, Huang X L and Liao M S. 2024. Investigating overlapping deformation patterns of the Beijing Plain by independent component analysis of InSAR observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 135: 104279 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.104279]
- Li D R, Liao M S and Wang Y. 2004. Progress of permanent scatterer interferometry. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 29(8): 664-668 (李德仁, 廖明生, 王艳. 2004. 永久散射体雷达干涉测量技术. *武汉大学学报(信息科学版)*, 29(8): 664-668) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-8860.2004.08.002]
- Li D R, Liao M S, Wang Y, Lu L J, Fang Z, Wei Z X, Wang H M, Yang L J, Liu Y, Rocca F and Ferretti A. 2005. Validation of the result from permanent scatterer InSAR in Shanghai//Proceedings of the 2005 Dragon Symposium "Mid-Term Results". Santorini. ESA SP-611.
- Li G Y, Zhang R, Liu G X, Yu B, Zhang B, Dai K R, Bao J W and Wei B W. 2018. Land subsidence detection and analysis over Beijing-Tianjin-Hebei area based on Sentinel-1A TS-DInSAR. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(4): 633-646 (李广宇, 张瑞, 刘国祥, 于冰, 张波, 戴可人, 包佳文, 韦博文. 2018. Sentinel-1A TS-DInSAR 京津冀地区沉降监测与分析. *遥感学报*, 22(4): 633-646) [DOI: 10.11834/jrs.20187196]
- Liao M S, Pei Y Y, Wang H M, Fang Z L, Wei L H. 2012. Subsidence monitoring in Shanghai using the PSInSAR technique. *Shanghai Land & Resources*, 33(3): 5-10 (廖明生, 裴媛媛, 王寒梅, 方志雷, 魏恋欢. 2012. 永久散射体雷达干涉技术监测上海地面沉降. *上海国土资源*, 33(3): 5-10) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1329.2012.03.004]
- Liao M S, Wang Y, Lu L J, Li D R, Fang Z and Wei Z X. 2006. Result evaluation of coherent target model product with long-term InSAR data set in Shanghai//Proceedings of the Fringe 2005 Workshop. Frascati. ESA SP-610.
- Liao M S, Wang R, Yang M S, Wang N, Qin X Q and Yang T L. 2020. Techniques and applications of spaceborne time-series InSAR in urban dynamic monitoring. *Journal of Radars*, 9(3): 409-424 (廖明生, 王茹, 杨梦诗, 王楠, 秦晓琼, 杨天亮. 2020. 城市目标动态监测中的时序 InSAR 分析方法及应用. *雷达学报*, 9(3): 409-424) [DOI: 10.12000/jr20022]
- Liao M S, Wei L H, Wang Z Y, Balz T and Zhang L. 2015. Compressive sensing in high-resolution 3D SAR tomography of urban scenarios. *Journal of Radars*, 4(2): 123-129 (廖明生, 魏恋欢, 汪紫芸, Balz T, 张路. 2015. 压缩感知在城区高分辨率 SAR 层析成像中的应用. *雷达学报*, 4(2): 123-129) [DOI: 10.12000/JR15031]
- Lin C Q, Chen K J, Liang C R, Zhu H, Cui W F, Chai H S, Li M J, Xue C H, Zheng Z W and Qing Z. 2025. Subsidence detection in southwest Guangdong—Hong Kong—Macao Greater Bay Area using InSAR with GNSS corrected tropospheric delays. *Advances in Space Research*, 75(1): 190-204 [DOI: 10.1016/j.asr.2024.09.018]
- Lin H, Ma P F and Wang W X. 2017. Urban infrastructure health monitoring with spaceborne multi-temporal synthetic aperture radar interferometry. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1421-1433 (林珏, 马培峰, 王伟玺. 2017. 监测城市基础设施健康的星载 MT-InSAR 方法介绍. *测绘学报*, 46(10): 1421-1433) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170339]
- Liu L M, Gong H L, Yu J, Li X J and Ke Y H. 2016. Stable pointwise target detection method and small baseline subset INSAR used in beijing subsidence monitoring. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(4): 643-652 (刘利敏, 宫辉力, 余洁, 李小娟, 柯樱海. 2016. 短基线 INSAR 相干点探测及应用. *遥感学报*, 20(4): 643-652) [DOI: 10.11834/jrs.20165134]
- Lu L J, Liao M S, Wang C C, Tian X, Li D R, Fang Z, Wang H M,

- Yang L J and Fang Z L. 2008. A new method of identification of stable pointwise target in small SAR dataset//Proceedings of the Dragon I Programme Final Results 2004-2007. Beijing. ESA SP-655.
- Luo J Y, Lopez-Sanchez J M and De Zan F. 2023. Analysis of the performance of polarimetric PSI over distributed scatterers with Sentinel-1 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125: 103581 [DOI: 10.1016/j.jag.2023.103581]
- Luo X J. 2007. Theory of Differential SAR Interferometry Baded on Permanent Scatterers and Applications to Shanghai's Surface Subsidence Detection. Chengdu: Southwest Jiaotong University (罗小军. 2007. 永久散射体雷达差分干涉理论及在上海地面沉降监测中的应用. 成都: 西南交通大学)
- Ma P F and Lin H. 2016. Robust detection of single and double persistent scatterers in urban built environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4): 2124-2139 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2496193]
- Ma P F, Lin H, Wang W X, Yu H W, Chen F L, Jiang L M, Zhou L F, Zhang Z J, Shi G Q and Wang J L. 2022. Toward Fine Surveillance: a review of multitemporal interferometric synthetic aperture radar for infrastructure health monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 10(1): 207-230 [DOI: 10.1109/MGRS.2021.3098182]
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, Adragna F, Peltzer G, Feigl K and Rabaute T. 1993. The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433): 138-142 [DOI: 10.1038/364138a0]
- Ng A H M, Ge L L, Li X J, Abidin H Z, Andreas H and Zhang K. 2012. Mapping land subsidence in Jakarta, Indonesia using persistent scatterer interferometry (PSI) technique with ALOS PAL-SAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 232-242 [DOI: 10.1016/j.jag.2012.01.018]
- Ng A H M, Liu Z Y, Du Z Y, Huang H W, Wang H and Ge L L. 2023. A novel framework for combining polarimetric Sentinel-1 InSAR time series in subsidence monitoring - a case study of Sydney. *Remote Sensing of Environment*, 295: 113694 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113694]
- Osmanoğlu B, Dixon T H, Wdowski S, Cabral-Cano E and Jiang Y. 2011. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1): 1-12 [DOI: 10.1016/j.jag.2010.05.009]
- Pei Y Y. 2012. Monitoring Deformation in Urban Area with Time Series InSAR Analysis. Wuhan: Wuhan University (裴媛媛. 2012. 基于时间序列 InSAR 技术的城市地区形变监测研究. 武汉: 武汉大学)
- Perissin D, Prati C, Rocca F, Li D R, Liao M S. 2007. Multi-track PS analysis in Shanghai//Proceedings of the Envisat Symposium 2007. Montreux. ESA SP-636.
- Perissin D, Wang Z Y and Lin H. 2012. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73: 58-67 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002]
- Qin X Q, Yang M S, Liao M S, Wang H M and Yang T L. 2017. Exploring temporal-spatial characteristics of shanghai road networks settlement with multi-temporal PSInSAR technique. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(2): 170-177 (秦晓琼, 杨梦诗, 廖明生, 王寒梅, 杨天亮. 2017. 应用 PSInSAR 技术分析上海道路网沉降时空特性. 武汉大学学报(信息科学版), 42(2): 170-177) [DOI: 10.13203/j.whugis20150430]
- Qin X Q, Yang M S, Zhang L, Yang T L and Liao M S. 2017. Health diagnosis of major transportation infrastructures in Shanghai metropolis using high-resolution persistent scatterer interferometry. *Sensors*, 17(12): 2770 [DOI: 10.3390/s17122770]
- Qin X Q, Zhang L, Yang M S, Luo H, Liao M S and Ding X L. 2018. Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 216: 71-90 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.032]
- Schneider R Z, Papathanassiou K P, Hajnsek I and Moreira A. 2006. Polarimetric and interferometric characterization of coherent scatterers in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(4): 971-984 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.860950]
- Tang W, Zhao X J, Motagh M, Bi G, Li J, Chen M J, Chen H and Liao M S. 2022. Land subsidence and rebound in the Taiyuan basin, northern China, in the context of inter-basin water transfer and groundwater management. *Remote Sensing of Environment*, 269: 112792 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112792]
- Wang B H, Zhao C Y, Zhang Q, Lu Z and Pepe A. 2021. Long-term continuously updated deformation time series from multisensor InSAR in Xi'an, China from 2007 to 2021. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 7297-7309 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3096996]
- Wang M H, Gao S L, Qiu X L and Zhang Z. 2025. A novel phase error estimation method for TomoSAR imaging based on adaptive momentum optimizer and joint criterion. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18: 2042-2051 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3506852]
- Wang R, Yang M S, Yang T L, Lin J X and Liao M S. 2022. Decomposing and mapping different scales of land subsidence over Shanghai with X- and C-Band SAR data stacks. *International Journal of Digital Earth*, 15(1): 478-502 [DOI: 10.1080/17538947.2022.2036835]
- Wang R, Yang T L, Yang M S, Liao M S, Lin J X and Zhang L. 2018. Attribution analysis on deformation feature of the Shanghai elevated highway by persistent scatterer SAR interferometry. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 2050-2057 (王茹, 杨天亮, 杨梦诗, 廖明生, 林金鑫, 张路. 2018. PS-InSAR 技术对上海高架路的沉降监测与归因分析. 武汉大学学报(信息科学版), 43(12): 2050-2057) [DOI: 10.13203/j.whugis20180150]
- Wang Y, Liao M S, Li D R, Wei Z X and Fang Z. 2007. Subsidence velocity retrieval from long-term coherent targets in radar interferometric stacks. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(2): 598-604 (王艳, 廖明生, 李德仁, 魏子新, 方正. 2007. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场. 地球物理学报, 50(2): 598-604)
- Wang Y D, Feng G C, Li Z W, Yang Z F, Wang B, Wang Y X, Du Y N, Wang Y M, He L J and Zhu J J. 2024. A multi-frame deformation

- velocity splicing method for wide-area InSAR measurement based on uncontrolled block adjustment: a case study of long-term deformation monitoring in Guangdong, China. *Remote Sensing of Environment*, 301: 113929 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113929]
- Wu J C and Hu F M. 2017. Monitoring ground subsidence along the Shanghai Maglev zone using TerraSAR-X images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(1): 117-121 [DOI: 10.1109/Lgrs.2016.2628867]
- Wu Z R, Zhang X Y, Cai J N, Kwan M P, Lin H and Ma P F. 2023. Understanding spatially nonstationary effects of natural and human-induced factors on land subsidence based on multi-temporal InSAR and multi-source geospatial data: a case study in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *International Journal of Digital Earth*, 16(2): 4404-4427 [DOI: 10.1080/17538947.2023.2271882]
- Xiong S T, Zeng Q M, Jiao J and Zhang X J. 2014. Research on connecting PS-InSAR results from adjacent tracks for land subsidence monitoring. *Journal of Geo-information Science*, 16(5): 797-805 (熊思婷, 曾琪明, 焦健, 章晓洁. 2014. 邻轨 PS-InSAR 地面沉降结果拼接处理方法与实验. *地球信息科学学报*, 16(5): 797-805) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2014.00797]
- Yang M S, Liao M S, Chang L and Hanssen R F. 2023. Interpretation of multi-epoch InSAR deformation for urban scenes: a problem analysis and literature review. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(10): 1643-1660 (杨梦诗, 廖明生, 常玲, Hanssen R F. 2023. 城市市场景时序 InSAR 形变解译: 问题分析与研究进展. *武汉大学学报(信息科学版)*, 48(10): 1643-1660) [DOI: 10.13203/j.whugis20230289]
- Yang M S, Liao M S, Qin X Q and Shi X G. 2017. Analysis of capabilities of C-and L-band SAR data to detect newly-reclaimed area. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(9): 1300-1305 (杨梦诗, 廖明生, 秦晓琼, 史绪国. 2017. C 和 L 波段 SAR 数据在填海新区的应用及特性分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 42(9): 1300-1305) [DOI: 10.13203/j.whugis20150356]
- Yang M S, Wang R, Li M H and Liao M S. 2022. A PSI targets characterization approach to interpreting surface displacement signals: a case study of the Shanghai metro tunnels. *Remote Sensing of Environment*, 280: 113150 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113150]
- Yang M S, Yang T L, Zhang L, Lin J X, Qin X Q and Liao M S. 2018. Spatio-temporal characterization of a reclamation settlement in the Shanghai coastal area with time series analyses of X-, C-, and L-Band SAR datasets. *Remote Sensing*, 10(2): 329 [DOI: 10.3390/rs10020329]
- Yang S P, Gao H, Li Y, Guo Y Q, Fan L M and Liao M S. 2025. Sentinel-1-Based analysis of the 2024 Tuanzhouyuan dike breach disaster in Dongting lake and regional risk assessment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18: 17449-17459 [DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3586897]
- Zhang A G, Luo D Y, Shen X G, Lü L A, Chen H W, Wei Z X, Yan X X, Fang Z and Shi Y Q. 2002. *Shanghai Geological Environmental Atlas*. Beijing: Geology Press (张阿根, 罗定一, 沈新国, 阎联安, 陈华文, 魏子新, 严学新, 方正, 施玉麒. 2002. *上海市地质环境图集*. 北京: 地质出版社)
- Zhang L X, Zhao F, Wang Y J, Mallorqui J J, Wang T, Zhang Y X, Hu Z B, Du S and Fernández J. 2025. Adaptive polarimetric optimization for ground deformation monitoring using multi-temporal InSAR with dual-polarization sentinel-1. *International Journal of Digital Earth*, 18(1): 2447335 [DOI: 10.1080/17538947.2024.2447335]
- Zhang Y H, Wu H, Kang Y H and Zhu C G. 2016. Ground subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1992 to 2014 revealed by multiple SAR stacks. *Remote Sensing*, 8(8): 675 [DOI: 10.3390/rs8080675]
- Zhao F and Mallorqui J J. 2019. SMF-POLOPT: an adaptive multitemporal Pol(DIn)SAR filtering and phase optimization algorithm for PSI applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(9): 7135-7147 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2911670]
- Zhao F, Wang T, Zhang L X, Feng H, Yan S Y, Fan H D, Xu D B and Wang Y J. 2022. Polarimetric persistent scatterer interferometry for ground deformation monitoring with VV-VH Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 14(2): 309 [DOI: 10.3390/rs14020309]
- Zhao F, Zhang L X, Wang T, Zhang Y X, Yan S Y and Wang Y J. 2023b. An efficient polarimetric persistent scatterer interferometry algorithm for Dual-Pol Sentinel-1 data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16: 3336-3352 [DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3260850]
- Zhao F M, Gong W P, Tang H M, Pudasaini S P, Ren T H and Cheng Z. 2023a. An integrated approach for risk assessment of land subsidence in Xi'an, China using optical and radar satellite images. *Engineering Geology*, 314: 106983 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106983]
- Zhao Q, Ma G Y, Wang Q, Yang T L, Liu M, Gao W, Falabella F, Mastro P and Pepe A. 2019. Generation of long-term InSAR ground displacement time-series through a novel multi-sensor data merging technique: the case study of the Shanghai coastal area. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 154: 10-27 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.05.005]
- Zhao X, Dong J, Yu Y H, Liao M S, Zhang L and Gong J Y. 2025. A review of SAR tomography. *Geo-Spatial Information Science*, 28(5): 2019-2062 [DOI: 10.1080/10095020.2025.2510365]
- Zhou L, Guo J M, Hu J Y, Li J W, Xu Y F, Pan Y J and Shi M. 2017. Wuhan surface subsidence analysis in 2015-2016 based on Sentinel-1A data by SBAS-InSAR. *Remote Sensing*, 9(10): 982 [DOI: 10.3390/rs9100982]
- Zhu X X and Bamler R. 2010. Very high resolution spaceborne SAR tomography in urban environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(12): 4296-4308 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2050487]
- Zhu X X and Bamler R. 2012. Demonstration of super-resolution for tomographic SAR imaging in urban environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(8): 3150-3157 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2177843]
- Zuo S C, Liao M S, Dong J, Wang R, Guo S K, Lin F K, Wang N and Zhang D X. 2025. Risk assessment of building and infrastructure using InSAR-derived deformation gradients and pattern variations in the Beijing plain, China. *International Journal of Digital Earth*, 18(1): 2528629 [DOI: 10.1080/17538947.2025.2528629]

Monitoring urban land subsidence with time-series InSAR : Applications and practices

LIAO Mingsheng¹, WANG Hanmei^{2,3,4,5}, WANG Ru¹, GONG Zhiqiang¹, WU Jianzhong^{2,3,4,5},
DONG Jie⁶, LAI Shangjing¹, LIN Jinxin^{2,3,4,5}

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University,
Wuhan 430079, China;

2. Shanghai Institute of Natural Resources Investigation and Utilization, Shanghai 200072, China;

3. Key Laboratory of Land Subsidence Monitoring and Prevention, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200072, China;

4. Center for Land Subsidence of China Geological Survey, Shanghai 200072, China;

5. Shanghai Engineering Research Center of Land Subsidence, Shanghai 200072, China;

6. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Land subsidence is one of the significant geohazards for urban development, and continuous monitoring and research are essential. The application of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) to urban land subsidence monitoring has advanced markedly across data acquisition, methodologies, accuracy validation, and various applications. This study systematically reviews the development trajectory of urban subsidence monitoring by building on more than 2 decades of the authors' time-series InSAR work in Shanghai—from exploratory application to engineering practice. The reviewed development trajectory covers (i) the initial experimental verification stage, (ii) a method development stage based on limited datasets, (iii) infrastructure monitoring enabled by high-resolution SAR data, and (iv) the subsequent expansion toward multisource, multiscale InSAR monitoring. On the basis of the research conducted in Shanghai, the group has extended the study to monitor land subsidence in other regions, such as the Beijing Plain. At present, urban land subsidence in Shanghai remains minor and manageable, with annual subsidence kept within 6 mm. This situation places rigorous demands on the detection of small magnitude deformation. In the future, several research directions are expected to advance InSAR's development and application further in urban settings, including high-precision deformation monitoring in dense high-rise buildings, improved understanding and modeling of radar scattering mechanisms in complex urban environments, scientific interpretation of deformation under multifactor coupling, and Artificial Intelligence-supported information mining and early-warning frameworks.

Key words: urban land subsidence, SAR, InSAR, time series InSAR, small dataset method, high-resolution SAR, infrastructure monitoring, multi-scale and multi-sensor monitoring

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42504033); Research Project of Shanghai Geological Society (No. Dzxx202513)