

基于 SBAS-InSAR 技术的城市区域地面沉降监测及时空特征分析

王 达 马占锋 赵若雯

河北省地质测绘院（河北省地质矿产勘查开发局空间信息技术应用研究中心） 河北 廊坊 065000

摘 要：河北平原因长期地下水超采引发了大范围地面沉降，传统水准与 GNSS 监测在覆盖范围和时序连续性上均有不足。本文基于 2017—2024 年 Sentinel-1 时序影像，采用 SBAS-InSAR 技术开展区域地面沉降监测，对干涉组合与相位解缠参数进行了优化，并结合多源实测数据完成精度验证。在此基础上分析了研究区地面沉降的空间分异、时序演变及典型片区发育特征，探讨了自然地质条件与人为活动的耦合驱动机制。研究结果可为华北平原沉降灾害防控与城市安全建设提供数据支撑和技术参考。

关键词：基于 SBAS-InSAR 技术；城市区域；地面沉降监测；时空特征

引言：河北平原地处华北腹地，是重要的粮食生产基地和城镇化发展区域。受第四系松散地层发育与深层地下水长期超采的影响，区域内形成了多处大型沉降漏斗，地面沉降灾害持续发展，威胁交通基建、城市建设和生态环境安全。传统监测手段难以满足大范围、高精度、长时序动态监测的需求。本文基于 SBAS-InSAR 时序监测技术，分析区域地面沉降的时空特征，厘清沉降发育规律与主要驱动因素，以期为区域地质灾害防治与水资源管理提供参考。

1 研究区概况与数据预处理

1.1 研究区概况

研究区位于河北省中东部平原，地处华北平原腹地，地势西高东低，海拔多低于 50 m，自山麓向滨海依次为山前倾斜平原、中部平原和滨海低平原。属暖温带大陆性季风气候，年均气温 0~13℃，降水时空分布不均。区域位于华北克拉通东部，第四系松散堆积层厚度大，利于地面沉降发生。

河北平原为国家粮食主产区，属资源型严重缺水地区。地下水长期超采使京津以南平原区形成几乎覆盖整个平原的巨型复合漏斗。京津冀一体化推进下城市化加速，建筑密度与地下工程建设规模持续扩大，深层地下水作为饮用水源已被限制开采，但历史过度开采引发的沉降仍在持续。

河北平原已形成沧州、保定、衡水、任丘、南宫、霸州、大城等 9 个主要沉降区。沧州沉降中心累计沉降量超 2.5 m，廊坊市累积沉降近 800 mm，邢台最大平均

沉降速率约 85 mm/a，雄县和高阳最大速率达 99 mm/a。现有监测以水准测量和 GNSS 为主，大范围、高精度、连续性的时空监测仍存不足。

1.2 实验数据来源与选取

SAR 影像数据：采用欧洲空间局 Sentinel-1A/B 卫星 C 波段影像，空间分辨率 5 m×20 m，重访周期 12 天。成像时段 2017—2024 年，按相干性、时间基线和空间基线约束筛选高质量影像用于时序 InSAR 处理^[1]。

辅助验证数据：水准数据来自河北省高等级控制网一等/二等水准测量成果；GNSS 数据来自华北平原地面沉降 GPS 监测网；区域地质资料引自《河北平原地面沉降监测与防控》（河北省地质环境监测院，2019）；土地利用数据来自河北省地理信息公共服务平台。

驱动因子数据：地下水位数据取自河北省地下水监测井长期观测资料；工程建设分布数据源于城市规划与施工记录；地形高程数据采用 SRTM 3"（90 m）DEM 及河北省 30 m 分辨率 DEM 产品；岩土类型数据引自河北省 1:50 000 地表基质调查成果。

1.3 SAR 数据预处理流程

对原始 Sentinel-1 SLC 影像进行辐射定标，消除系统辐射误差；基于精密轨道星历数据完成轨道校正；利用 SRTM DEM 消除地形畸变引起的几何形变，统一影像空间坐标系为 WGS-84/UTM 投影。

在方位向和距离向进行多视处理以抑制相干斑噪声，采用自适应 Goldstein 滤波提升干涉条纹清晰度，在抑制斑点噪声的同时保留地表形变细节信息。

对 SRTM DEM 数据进行裁剪、重采样至与 SAR 影像一致的空间分辨率,利用 DEM 模拟地形相位并从干涉相位中去除,生成差分干涉图,供后续时序 InSAR 形变反演使用。

2 SBAS-InSAR 技术原理与沉降监测模型构建

2.1 SBAS-InSAR 核心技术原理

主流时序 InSAR 技术包括 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 两类。PS-InSAR 通过识别相位稳定的永久散射体获取形变信息,适用于城市建成区等人工地物密集区域;SBAS-InSAR 基于短时空基线组合干涉对,可克服 PS-InSAR 因单幅公共主影像导致部分干涉对相干性较差的问题。柳新强等以雄安新区为研究区的对比结果表明,两种技术获取的形变速率相关性较高 ($R^2 = 0.87$)。两种技术的主要差异见表 1。

表 1 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 技术主要对比

对比维度	PS-InSAR	SBAS-InSAR
核心原理	识别永久散射体目标	短时空基线子集组合
适用场景	城市建成区等人工地物密集区域	非城区、大范围地表形变监测
形变提取精度	8.07 mm	5.21 mm

SBAS-InSAR 技术由 Berardino 等 (2002) 提出,核心是按空间和时间基线阈值将 SAR 数据划分为若干小基线子集。具体流程:计算覆盖研究区的多景 SAR 影像的时间基线和空间基线;按设定阈值筛选干涉对;对选取的干涉对进行差分干涉处理并完成相位解缠;对所有干涉图组成的相位方程采用最小二乘法或奇异值分解估计形变参数^[2]。

SBAS-InSAR 在 D-InSAR 基础上发展而来。对筛选出的干涉对进行差分干涉处理,获得包含地形、形变、大气延迟等分量的干涉相位;利用外部 DEM 去除地形相位;对差分干涉相位进行空间滤波,基于平均空间相干性识别慢失相关滤波像素点;通过相位解缠获取真实差分干涉相位;采用时空滤波估计并去除大气延迟相位,分离非线性形变;将低频形变与非线性形变叠加,得到研究区的完整形变信息。

2.2 沉降反演模型构建与参数优化

基于河北平原第四系松散层厚、地表覆盖多样的特点,在 SBAS-InSAR 框架下优化时空基线阈值。参考已有研究 (伦玉鹏利用 52 景影像、Li 等利用 166 景 Sentinel-1A 数据对河北平原进行 SBAS 监测),结合研究区地表覆盖与相干性条件,设置空间基线阈值不超过临界基线的 1/3、时间基线阈值不超过 36 个月,筛选高

相干性干涉对^[3]。

采用三维空间相位解缠方法处理差分干涉图。针对大面积农田区相干性中等的情况,引入多级配准与长短基线迭代组合解缠策略,抑制失相干和相位解缠误差传播。解缠后基于干涉对时序关系构建相位方程矩阵,采用最小二乘或 SVD 方法整体解算,重构各相干目标点的时序形变相位序列。

在时序形变相位序列基础上构建形变模型,连通子集用最小二乘法求解,存在多个独立子集时用 SVD 方法获取最小范数解。通过时空滤波分离大气延迟与非线形变,解算各监测点的年均沉降速率与累积形变量。已有研究显示,河北平原雄县和高阳沉降区最大沉降速率可达 99 mm/a。

2.3 监测结果精度验证

将 SBAS-InSAR 获取的各监测点累积形变量与同位置水准、GNSS 实测数据进行逐点对比。文献报道 SBAS-InSAR 形变提取精度约 5.21 mm;Li 等在河北平原的研究中将 SBAS-InSAR 结果与水准测量及基岩基准点验证,精度达 9 mm/a。

从空间分布角度分析 SBAS-InSAR 形变场的整体合理性与可靠性。通过交叉对比相邻轨道监测结果验证形变场空间连续性,同时将监测结果与区域地质构造背景、地下水位漏斗分布、土地利用类型等进行空间关联分析,判断形变场空间分布的地质合理性。

SBAS-InSAR 监测精度受多种误差制约。大气延迟为主要误差源;轨道误差可通过精密轨道星历校正;地形残余误差源于 DEM 精度不足;时空失相干以短基线约束策略抑制。后续需针对上述误差源采取相应校正与优化措施^[4]。

3 基于 SBAS-InSAR 技术的城市区域地面沉降时空特征分析

3.1 地面沉降空间分布特征

基于 SBAS-InSAR 获取的研究区地表年均沉降速率,按 < 10 mm/a 为稳定区、 $10 \sim 30$ mm/a 为轻微沉降区、 $30 \sim 50$ mm/a 为中度沉降区、 > 50 mm/a 为严重沉降区划分。伦玉鹏利用 52 景 SAR 影像对河北省中部平原区的监测表明,雄县和高阳县两大沉降区最大沉降速率达 99 mm/a。Li 等利用 166 景 Sentinel-1A 数据 (覆盖 45 000 km²) 在高阳县观测到超过 -79 mm/a 的平均年沉降速率。京雄城际铁路河北段沿线沉降南北差异明显,北部年均速率小于 10 mm/a,南部最大达 -105.6 mm/a。

研究区已形成多个核心沉降漏斗。沧州平原呈现肃宁—河间、献县、南皮—东光三大沉降中心,最大年均沉降速率达 100 mm/a。三河市地面沉降空间上西部严重、东部较缓,主要有燕郊镇(含 3 个漏斗)和段甲岭镇(含 1 个漏斗)两个重点沉降区。

河北平原地面沉降均分布于地下水集中开采区,分布范围与地下水位降落漏斗基本一致。沉降漏斗与深层地下水漏斗、建筑密集区、工业区及断裂带在空间上具有较高相关性。

3.2 地面沉降时间演变特征

从年度尺度看,河北平原沉降速率呈阶段性加剧。1970—2003 年平均沉降速率 10.73 mm/a, 2003—2014 年升至 24.69 mm/a; 2016—2017 年平原区平均沉降速率由-21.6 mm/a 增至-38.2 mm/a。河北省中部平原区 2015—2022 年间沉降范围持续扩大,趋势未减。

季节层面,邯郸平原区水头季节性变化引起明显形变,幅度可达 25 mm,峰值出现在 1—3 月。沧州平原沉降信号可分解为与深层承压水长期下降相关的近线性不可逆形变、与政策响应和自然补给相关的非线性形变,以及与季节性水文变化相关的弹性形变^[5]。

突变特征方面,地面沉降对承压含水层组水位变化的响应存在数周滞后。南水北调工程实施后,部分区域地下水位虽有所回升,但沉降持续发展的异常现象依然存在。

3.3 典型区域沉降精细化特征分析

京雄城际铁路河北段沿线南部沉降较为严重,最大年均沉降速率达-105.6 mm/a,沿线西部年均沉降速率高于东部。雄安新区大部分区域较稳定,沉降主要集中在该区南部和北部,速率分别达 90 mm/a 和 80 mm/a。

沧州地区青县、沧县东部、南皮县西部、东光县等区域沉降量较大,东光县何庄村累计下沉量 47 mm。邯郸平原区最大沉降速率达 14 cm/a。地面沉降量与地下水埋深呈正相关,埋深大的区域沉降量也较高。

京雄城际铁路河北段北部年均沉降速率小于 10 mm/a,与南部严重沉降区(-105.6 mm/a)对比明显。三河市 2018—2020 年地面沉降总体呈减缓趋势。

3.4 地面沉降成因机制初探

河北平原第四系松散堆积层厚度大,粘性土层为地面沉降提供了物质基础。气候干旱减少了地下水补给量,同时推高了开采强度,是重要的间接驱动因素。

深层地下水过量开采是造成河北平原地面沉降的主因。超采已形成 43 915 km² 的深层地下水降落漏斗。沉降的发生发展与地下水开采历史密切相关,主要压缩贡献层随开采层位的变化而改变。

地面沉降是自然背景与人为活动共同作用的结果。地下水超采引发的含水层系统压缩释水是核心驱动;工程建设、地表荷载增加等加剧了局部沉降速率;地质构造条件则控制着沉降的空间分布与发育程度。

结束语

本文利用 SBAS-InSAR 技术完成了河北平原 2017—2024 年地面沉降监测,揭示了沉降在空间分布上的差异化特征,以及阶段性加剧与季节性波动的时序规律。地下水超采是主导人为诱因,松散地层为沉降提供了地质基础,工程建设则对局部沉降起加剧作用。该技术在平原大范围沉降监测中表现出良好的实用性和精度。后续可优化误差校正方法、量化多因子耦合强度、构建沉降演化预测模型,为区域沉降常态化监测与综合治理提供支撑。

参考文献

- [1] 皮鹏程. 基于 SBAS-InSAR 的珠江口城市软土地面沉降时空特征与演化机理 [J]. 中国地质调查, 2025, 12(06): 105-116.
- [2] 李超, 田静. 引入 EEMD 时序分解的 SBAS-InSAR 城市地面沉降时空特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(06): 107-118.
- [3] 陈雨薇. 山地城市地面沉降 SBAS-InSAR 监测及时空差异性分析 [J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35(02): 76-82.
- [4] 赵阳. 城镇化进程中地面沉降时空演化及 SBAS-InSAR 监测精度优化 [J]. 地理空间信息, 2023, 21(11): 98-102.
- [5] 王浩宇. 基于 SBAS-InSAR 技术的城市地面沉降监测及时空演变特征研究 [J]. 测绘通报, 2025, 13(07): 89-94.