

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2020341

引用格式: 史珉,宫辉力,陈蓓蓓,等. Sentinel - 1A 京津冀平原区 2016—2018 年地面沉降 InSAR 监测[J]. 自然资源遥感, 2021,33(4):55 - 63. ( Shi M,Gong H L,Chen B B. Monitoring of land subsidence in Beijing - Tianjin - Hebei plain during 2016—2018 based on InSAR and Sentinel - 1A data[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(4):55 - 63. )

# Sentinel - 1A 京津冀平原区 2016—2018 年 地面沉降 InSAR 监测

史 珉<sup>1,2,3,4</sup>, 宫辉力<sup>1,2,3,4</sup>, 陈蓓蓓<sup>1,2,3,4</sup>, 高明亮<sup>1,2,3,4</sup>, 张舜康<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 首都师范大学地面沉降机理与防控教育部重点实验室,北京 100048; 2. 首都师范大学水  
资源安全北京实验室,北京 100048; 3. 首都师范大学北京市城市环境过程与数  
字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048; 4. 首都师范大学  
三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100048)

**摘要:** 京津冀地区是我国地面沉降发展最迅速,影响面积最大的地区。地面沉降已成为京津冀协同发展中不容忽视的地质问题。文章利用多时相合成孔径雷达干涉测量(multi - temporal interferometric synthetic aperture Radar, MT - InSAR)技术对 2016 年 1 月—2018 年 10 月覆盖京津冀地区的多轨 Sentinel - 1A 数据进行处理,经水准数据验证和相邻轨道数据结果交叉验证后,对多轨 SAR 数据结果进行融合获取了京津冀平原 2016—2018 年间的地面沉降结果。InSAR 监测结果表明,监测时段内京津冀平原最大沉降速率达 164 mm/a,研究区内地面沉降分布广泛,且空间分布不均。对京津冀地区地面沉降时空变化特征进行分析发现,2016—2018 年间唐山—秦皇岛地区地面沉降呈不断加剧趋势;其余地区地面沉降发展较为稳定。研究表明了 InSAR 技术在大区域地面沉降监测中的可靠性,研究结果为区域沉降防治提供重要依据,为京津冀特大城市群建设提供科学保障。

**关键词:** 地面沉降; 京津冀平原区; InSAR; Sentinel - 1A

**中图法分类号:** TP 79   **文献标志码:** A   **文章编号:** 2097 - 034X(2021)04 - 0055 - 09

## 0 引言

地面沉降是一种地表高程下降的环境地质现象,其发生发展增加了城市内涝、海水倒灌等风险,并可以诱发地面塌陷、地裂缝等系列环境灾害,形成灾害链。区域地面沉降不仅对城市基础设施、高速铁路等重大工程产生潜在威胁,还影响着城市地下空间资源利用效率,成为制约区域可持续发展的重大问题。

京津冀地区所处的华北平原是我国沉降速率最大、影响面积最大的地区<sup>[1]</sup>。自 1923 年首次在天津发现地面沉降以来<sup>[2]</sup>,华北平原地面沉降按期发展过程可分为 4 个阶段:局部孕育阶段(1954 年之前)、加速发展阶段(1955—1974 年)、急速扩张阶段

(1975—1984 年)和控制减缓阶段(1985 年至今)<sup>[3]</sup>。截至 2012 年,华北平原沉降速率大于 20 mm/a 的区域面积约占其总面积的 12.5%,其中 90% 的沉降区位于北京、天津、河北三地,局部地区累计沉降量超过 3.4 m<sup>[4]</sup>。京津冀协同发展地质调查中将地面沉降列为京津冀一体化进程中需要关注的重大地质问题之一。对其地面沉降进行监测,认识其分布规律、演化特征,对京津冀城市和重大工程规划建设,为实现京津冀协同发展的重大国家战略提供地质环境保障。

合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)已被广泛应用于地表形变监测中。与水准测量、分层标、全球定位系统(global positioning system, GPS)测量技术相比, InSAR 技术具备大范围、全天时全天候获取高时空分

收稿日期: 2020 - 10 - 28; 修订日期: 2021 - 07 - 02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“京津冀典型区地下空间演化与地面沉降响应机理研究”(编号: 41930109/D010702)、国家自然科学基金面上项目“南水进京背景下地面沉降演化机理”(编号: 41771455/D010702)、北京卓越青年科学家项目(编号: BJJWZYJH01201910028032)、北京市优秀青年拔尖项目和北京市自然科学基金面上项目“新水情背景下京津高铁沿线地面沉降演化机制及调控方法”(编号: 8182013)共同资助。

第一作者: 史 珉(1989 - ),女,博士研究生,主要从事地面沉降演化机理方面的研究。Email: Minshi\_cnu@ 126. com。

通信作者: 宫辉力(1956 - ),男,博士生导师,主要从事地理信息系统和遥感的教学与应用研究。Email: gonghl\_1956@ 126. com。

分辨率地表形变的能力。多时相 InSAR (multi-temporal InSAR, MT-InSAR) 技术的发展 (如永久散射体干涉 (persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)、小基线 (small baseline subsets, SBAS) 等) 更是克服了大气延迟、时空失相干对传统 InSAR 方法的影响<sup>[5-6]</sup>。目前, MT-InSAR 技术已被广泛应用于京津冀地面沉降研究中, 但这类研究多关注北京<sup>[7-11]</sup>、天津<sup>[12-15]</sup>、沧州<sup>[16-18]</sup>和廊坊<sup>[19-20]</sup>等城市区域, 通过多源 SAR 数据获取其地面沉降信息, 而对京津冀平原地面沉降的分布、范围及沉降程度缺乏整体性认识。针对单轨 SAR 数据源幅宽对区域地面沉降监测范围的限制问题, 本研究基于多轨 SAR 数据融合技术, 获取了 2016—2018 年京津冀平原地面沉降信息; 为保证 InSAR 监测结果的可靠性, 选用同时期水准测量数据对 InSAR 结果进行精度验证, 并对相邻轨道结果进行一致性检验; 并结合 GIS 空间分析、剖面分析等方法, 获取 InSAR 监测时段内京津冀平原区地面沉降演化特征。

### 1 研究区概况及其 SAR 数据源

京津冀地区 (N36°05′~42°37′, E113°11′~119°45′) 位于我国华北地区, 包含北京、天津和河北省的 11 个地级市, 属暖温带大陆性季风型气候, 降水多集中在 7—8 月。该地区地形条件复杂, 总体地势为西北高、东南低, 自西北向东南依次分布坝上高原、燕山—太行山山地和东南部平原<sup>[21]</sup>。京津冀地区

存在多种环境地质问题, 其中以地面沉降等为例的缓变性地质主要发生在平原区。京津冀平原区是华北平原的重要组成部分, 自山麓到海岸, 按成因和形态特征可分为第四纪山前冲积、洪积倾斜平原 (山前平原), 中部冲积、湖积多层叠加平原 (中部平原) 和东部冲积、湖积夹海积的滨海平原 (滨海平原)<sup>[22]</sup>。截至 2015 年, 京津冀平原区累积沉降量大于 200 mm 的面积约为 6.4 万 km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>, 约占平原区面积的 73%, 沉降速率大于 50 mm/a 的严重沉降区面积占全国严重沉降区面积的 92% (<http://www.tianjin.cgs.gov.cn>)。

Sentinel-1A 卫星是欧洲空间局于 2014 年发射的重访周期为 12 d 的 C 波段对地观测卫星。该卫星使用近极地太阳同步轨道, 轨道高度、倾角和周期分别为 693 km, 98.18°和 99 min, 具多种成像模式和极化方式 (<https://sentinel.esa.int/>)。单轨 SAR 影像受其幅宽限制, 监测范围有限, 为获取京津冀平原区的地面沉降信息, 本次研究共选用了 3 轨时间跨度为 2016—2018 年的 Sentinel-1A 数据 (Track 40, Track 142 和 Track 69)。所用 3 轨 Sentinel-1A 数据均为宽幅干涉模式 (interferometric wide, IW) 获取的单视复数 (single look complex, SLC) 升轨存档影像, 其极化方式均为垂直极化 (vertical-vertical, VV), 空间分辨率为 5 m × 20 m, 单幅幅宽达 250 km。影像覆盖范围及主要参数分别如图 1 和表 1 所示。

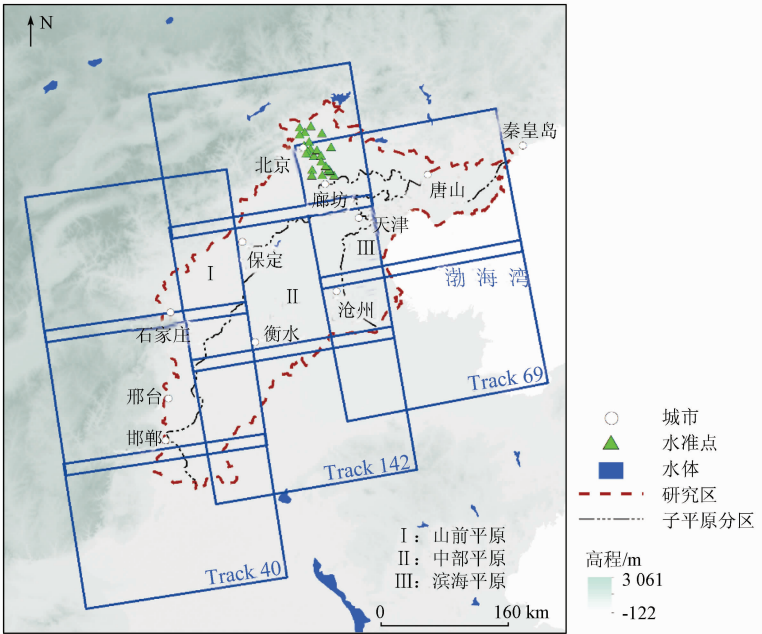


图 1 研究区概况示意图  
Fig.1 Location of study area

表 1 Sentinel-1A 影像信息

Tab.1 Satellite information for the data used in this study

| 卫星          | Track | 数量<br>/幅 | 时间<br>范围          | 升(降)极化<br>轨方式 | 成像<br>模式 |
|-------------|-------|----------|-------------------|---------------|----------|
| Sentinel-1A | 40    | 165      | 20160107—20181128 |               |          |
|             | 142   | 141      | 20160114—20181018 | 升轨            | VV IW    |
|             | 69    | 98       | 20160109—20181001 |               |          |

2 研究方法

2.1 MT-InSAR 处理过程

通过 SARPROZ 软件( <https://www.sarproz.com/>)对 3 轨 Sentinel-1A 影像分别进行 PS-InSAR 处理,以获取每轨 SAR 影像范围内时序地面沉降信息。处理过程包括以下几个主要步骤:主影像选取,数据集配准及重采样,基线建立,数字高程模型(digital elevation model,DEM)模拟,生成差分干涉图,选取 PS 候选点,相位解缠,大气相位估计和去除,重新选取 PS 点和估计 PS 点形变速率<sup>[23-24]</sup>。由前人研究成果已知,京津冀地区水平向形变值约为 1~3 mm/a<sup>[25-28]</sup>,因此在本次研究中忽略水平向形变结果,通过式(1)将视线向(line-of-sight,LOS)InSAR 形变结果转为垂向,并将经过处理后的垂向结果用于与水准结果的精度验证和后续的 SAR 影像结果拼接中,即

$$d_v = d_{LOS}/\cos\theta \quad (1)$$

式中:  $d_v$  为垂向形变结果,mm;  $d_{LOS}$  为 LOS 向形变结果,mm;  $\theta$  为雷达 LOS 向与垂向的夹角。

2.2 多轨 SAR 数据拼接

为了获取大区域的地面形变信息,需对上文所得单轨 SAR 影像结果进行拼接。首先对各轨 SAR 影像垂向形变结果进行了一致性检验和精度验证,在保证数据精度可靠的情况下,对相邻轨道数据进行融合。在相邻轨道沉降速率融合中,Ge 等<sup>[29]</sup>通过引入与参考点距离权重的关系进行整体平差;孙赫<sup>[30]</sup>通过影像重叠区内 PS 点形变量差值众数对相邻轨道数据结果进行校正;熊思婷等<sup>[31]</sup>比较了区块法和插值法在求解异轨重叠区的形变差中的应用;张永红等<sup>[32]</sup>通过大量的水准观测数据对 SAR 数据结果进行了平差控制。本次实验中,依据重叠区内同名高相干点的形变速率一致准则<sup>[32-33]</sup>,计算平差权重。

由于受不同轨道卫星成像几何差异,不同轨道 SAR 数据所得 LOS 向地表形变结果间存在系统性偏差。为消除不同视角投影的影响,首先依据式(1)将 InSAR 监测所得各轨 LOS 向形变值转为垂向

形变值。如图 1 所示,Track 142 与 Track 69 和 40 间都具有重叠区,因此在多轨 SAR 数据融合时,将 Track 142 形变结果作为基准。Track 142 与 Track 40 影像重叠区域内,雷达 LOS 向与垂向的夹角分别为 33.72°和 43.75°;Track 142 与 Track 69 影像重叠区内 LOS 向与垂向夹角分别为 43.77°和 33.67°。根据上述  $\theta$  值,将重叠区域内每轨影像的各 PS 点 LOS 向结果依据式(1)分别投影到垂直向上,选取的 PS 点的相干性均在 0.9 以上。之后,选用最邻近法对重叠区内各轨 PS 点进行同名点匹配。最后,采用最小二乘法(least square method,LSM)构建相邻轨道重叠区域的平差方程,并分别对 Track 40 和 Track 69 垂向形变结果进行偏移量补偿。该方法是通过实际观测值与模型计算值的误差的平方和最小来寻找最优的匹配函数。假设相邻轨道分别为  $x$  和  $y$ ,其中  $x$  为参考基准, $y$  为需要进行平差的数据,相邻轨道之间存在  $n$  个重合点,基于 LSM 的原理,则

$$\delta = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 \quad (2)$$

此时,通过对  $\delta$  求极限,即可求得  $a$  和  $b$  的值。最终,获得多轨 SAR 数据融合结果。

3 结果及精度验证

3.1 京津冀 2016—2018 年地面沉降监测结果分析

为获取京津冀平原区地面沉降信息,基于 MT-InSAR 技术分别获取了 3 轨 Sentinel-1A 数据源地面沉降信息,后对相邻轨道数据进行融合获取了京津冀平原区内 2016—2018 年地面沉降速率(图 2)。为了显示清晰,对结果进行了栅格化处理,像元大小为 1 km。InSAR 监测结果显示,2016—2018 年间京津冀平原区内最大沉降速率达 164 mm/a,分布在北京朝阳—通州沉降区和廊坊—天津沉降区内。研究区内沉降分布范围广,且空间分布不均,在北京、天津及河北省各地级市均有不同程度的地面沉降问题,且三地沉降区有连片趋势。其中北京平原区沉降较为严重的地区主要分布在北京东南部朝阳、通州等地,且北京东南部沉降区已扩张到廊坊三河市界内。天津、廊坊两地沉降较为严重的区域分布在两地交界处。河北平原沉降较为严重的区域主要分布在其中东部地区,且该地区沉降区呈南北贯通趋势。研究区内共获得了 1 426 967 个 PS 点,其中 2016—2018 年沉降速率大于 20, 50, 100 mm/a 的点数分别占总点数的 53.9%, 23.9% 和 3.6%。沉降速率大于 20, 50, 100 mm/a 的面积

分别为 3.3 万, 1.4 万和 0.14 万 km<sup>2</sup>。据统计, 2016 年沉降速率大于 20, 50, 100 mm/a 的点数分别占总点数的 53.8%, 23.7% 和 3.6%; 到 2017 年沉降速率大于 20 和 50 mm/a 的点数略有增长, 分别占总点数的 54.4% 和 23.8%, 沉降速率大于 100 mm/a

的点数占比则降至 3.5%。2018 年沉降速率大于 20 和 50 mm/a 的 PS 点数与 2017 年比有所增长, 占比达 57.2% 和 24.0%, 沉降速率大于 100 mm/a 的点数与 2017 年相比保持稳定。

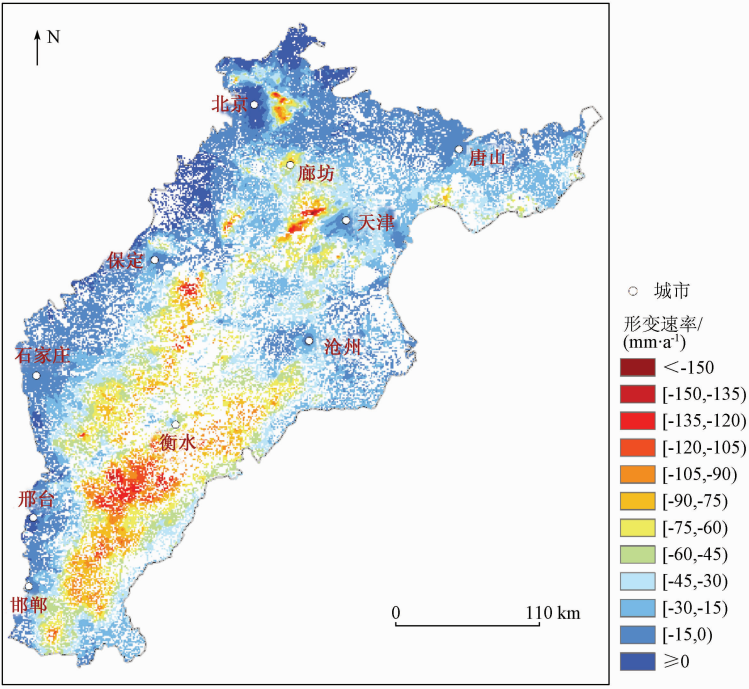


图 2 2016—2018 年京津冀平原区 PS-InSAR 地表形变速率  
Fig. 2 Mean displacement velocities throughout the Beijing - Tianjin - Hebei derived from the Sentinel - 1A data by using PS-InSAR from 2016 to 2018

研究区内地面沉降大于 50 mm 的区域主要分布在北京东南部, 廊坊北部, 廊坊东部到天津西部, 天津南部, 保定东部到廊坊西部, 保定西部, 唐山—秦皇岛沿海区域, 以及河北平原东南部区域。对监测时段内研究区各子平原内沉降速率大于 50 mm/a 的严重沉降区面积进行统计发现, 山前冲积洪积平原沉降量大于 50 mm 的面积有轻微增长 (2016—2018 年), 由 2 937 km<sup>2</sup> 变为 2 982 km<sup>2</sup>, 涨幅为 1.5%。

2016—2018 年中部平原沉降量大于 50 mm 的面积涨幅为 0.3%, 基本维持稳定。2016—2018 年, 严重沉降区的面积分别为 10 547 km<sup>2</sup>, 10 574 km<sup>2</sup> 和 10 577 km<sup>2</sup>。与 2016 年相比, 滨海平原严重沉降区的面积在 2018 年增长较为明显, 由 382 km<sup>2</sup> 变为 577 km<sup>2</sup>, 涨幅达 33.8%。其中唐山—秦皇岛沿海沉降区范围明显扩大 (如图 3 所示)。为进一步分析研究时段内地面沉降发展过程, 对沉降较严重区

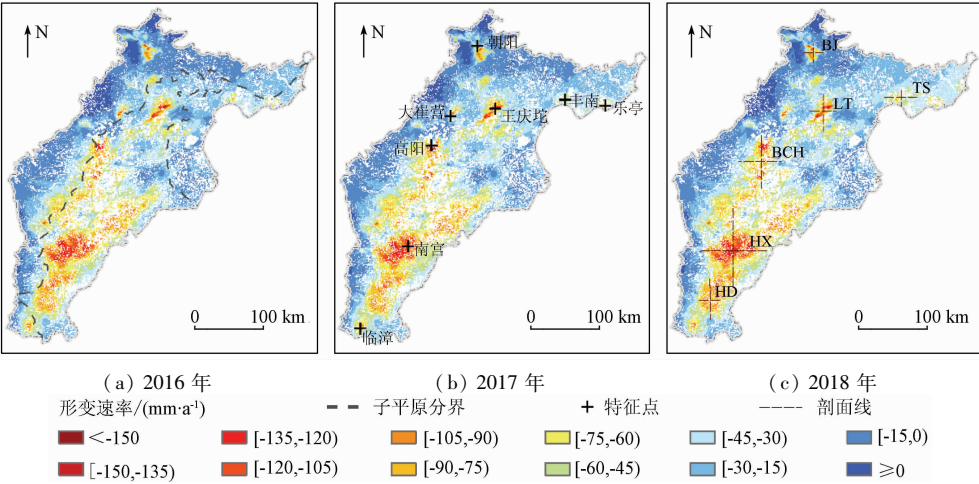


图 3 2016—2018 年各年度 InSAR 平均形变速率  
Fig. 3 Mean displacement velocities derived by InSAR between 2016 and 2018

域沿东西、南北方向分别进行剖面分析,剖面线位置如图 3(c)中虚线所示。2016—2018 年,不同地面沉降区的沉降空间演化存在显著差异(如图 4 所示)。其中位于唐山沉降区的 TS 剖面线处(图 4(e)和(f)所示)的沉降速率在监测时段呈增长趋势。而位于北京、廊坊—天津、保定—沧州—衡水、

衡水—邢台、邯郸沉降区的 BJ,LT,BCH,HX 和 HD 剖面处 2016—2018 年沉降速率基本保持一致,沉降中心发育较为稳定。综上,InSAR 监测时段内山前平原和中部平原地面沉降发展相对稳定,滨海平原地面沉降范围及沉降速率在监测时段内增长明显,尤其是唐山沿海地区,沉降速率涨幅最为明显。

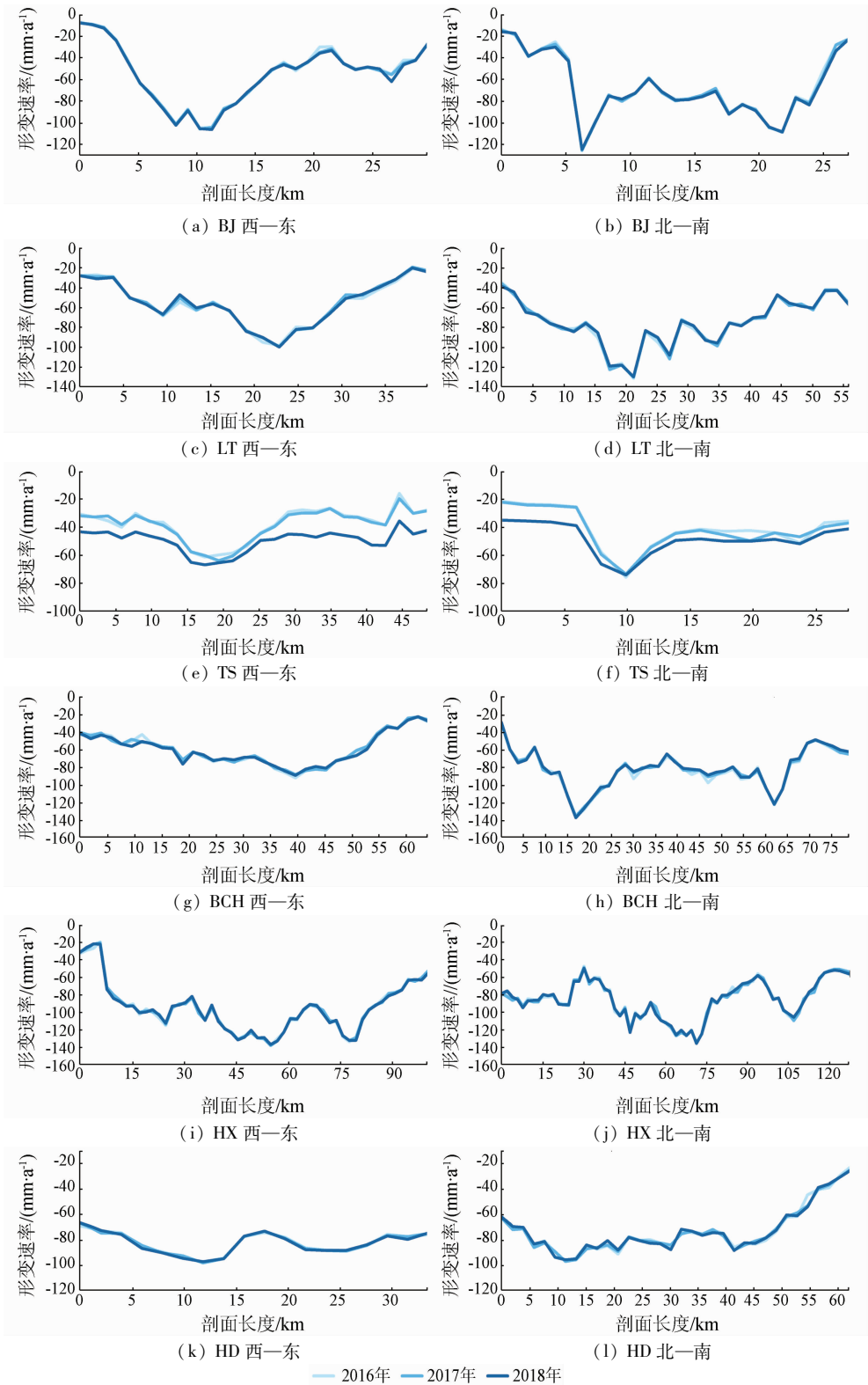


图 4 剖面时间序列 InSAR 形变速率结果  
Fig.4 Profiles of the InSAR displacement velocities

为了获取 2016—2018 年研究区内地面沉降时序特征,选取了 8 个不同位置上的沉降特征点,各沉降点的位置如图 3(b)所示,其对应时序特征如图 5 所示。北京朝阳金盏、天津王庆坨、保定大崔营、保定高阳、邢台南宫和邯郸临漳等沉降区,形变特征以线性下沉为主,最大累积沉降量超过 300 mm。在唐

山丰南、乐亭沉降区,区域时序沉降具有明显的季节性特征,在 2016—2018 年沉降呈下降趋势,如图 5 (g)和(h)所示,但在 2016 年 9 月—2017 年 1 月和 2017 年 9 月—2018 年 1 月沉降减缓甚至出现回弹现象,之后地表继续下沉,至 2018 年 10 月地面累计沉降量达 180 ~ 254 mm。

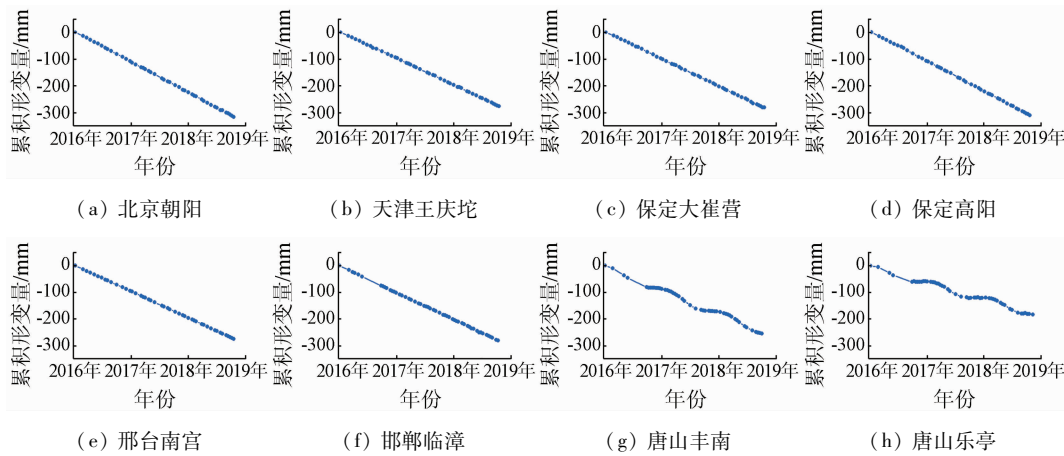


图 5 研究区内沉降特征点对应时序特征  
Fig. 5 Accumulative time – series deformation revealed by the InSAR technique

3.2 精度验证

为保证 InSAR 数据结果的准确性,选用了 26 个 2017 年 9 月—2018 年 9 月的水准观测值对 Sentinel – 1A 数据所得垂向形变速率进行精度验证。水准数据位置如图 1 所示,位于 Track 142 和 Track 69 影像

覆盖范围内,因此通过水准测量数据对这 2 轨影像所得形变结果进行验证。在验证过程中,以水准点为圆心,100 m 为半径建立缓冲区,将缓冲区内所有 PS 点的平均值视为该水准点对应的 InSAR 结果。验证结果如图 6 和表 2 所示。

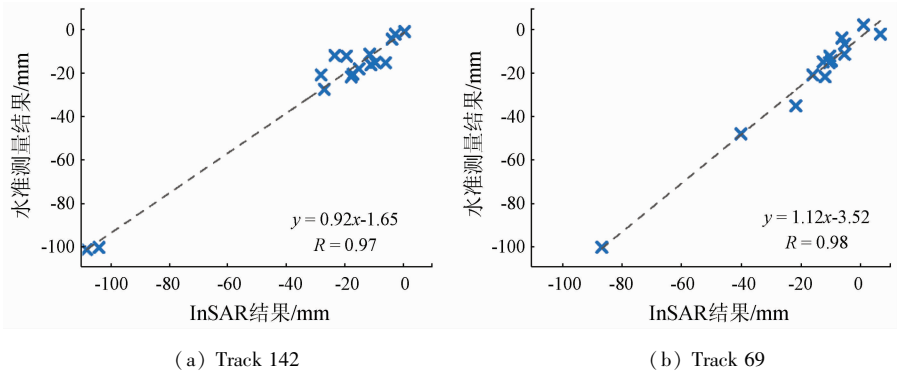


图 6 InSAR 结果与水准测量结果精度验证  
Fig. 6 Comparison between the InSAR measurements and levelling data

| 表 2 InSAR 所得形变信息与水准测量结果比对                                                                     |                                 |                                |                                |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|
| Tab. 2 Comparison of the mean subsidence rate between the Sentinel – 1A PS and levelling data |                                 |                                |                                |      |
| Sentinel – 1A                                                                                 | 均方根误差/<br>(mm·a <sup>-1</sup> ) | 最大误差/<br>(mm·a <sup>-1</sup> ) | 最小误差/<br>(mm·a <sup>-1</sup> ) | R    |
| Track 142                                                                                     | 5.5                             | 11.6                           | 0.2                            | 0.97 |
| Track 69                                                                                      | 7.2                             | 13.5                           | 1.0                            | 0.98 |

其中 Track 142 所得研究区内垂向形变结果与水准测量结果相比,误差最大值为 11.6 mm/a,最小值为 0.2 mm/a,均方根误差为 5.5 mm/a。对 2 组数据进行线性回归分析,R 达 0.97。Track 69 所得研

究区内垂向形变结果与水准测量结果相比,误差最大值为 13.5 mm/a,最小值为 1.0 mm/a,均方根误差为 7.2 mm/a,R 达 0.98。验证结果表明 InSAR 监测结果与水准测量结果在同时间内具有较好的吻合度,表明 InSAR 结果的可靠性。

为进一步验证不同轨 SAR 影像结果的准确性,对其进行了交叉验证。由于 Track 142 的影像与其他 2 轨影像之间都具有重叠区,将其他 2 轨数据所得地表形变结果分别于 Track 142 所得结果进行比对。结果如图 7 所示,由 Track 142 与 Track 69 所得

形变结果之间的相关性达 0.96,由 Track 142 与 Track 40 所得形变结果之间的相关性为 0.97。多轨

SAR 自相关验证结果表明了本次研究所用多轨 InSAR 数据结果的可靠性。

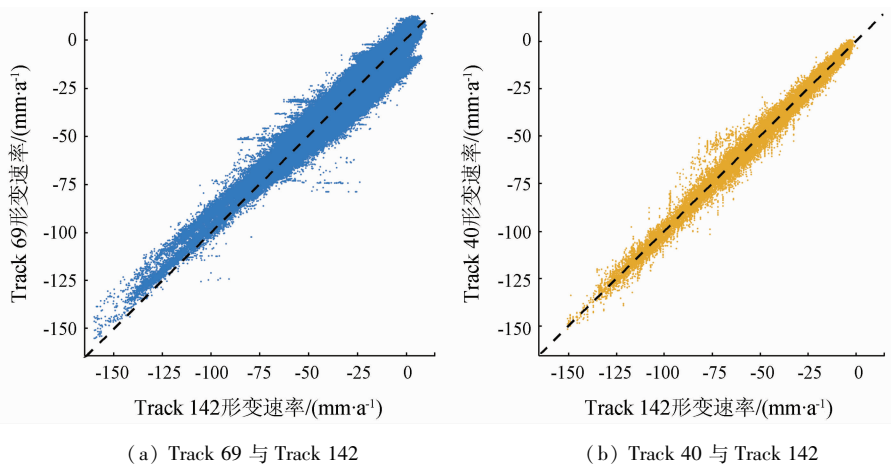


图 7 多轨 SAR 影像形变速率交叉验证结果  
Fig.7 Consistency between the vertical displacement rates derived from different datasets

4 结论

本研究基于多轨 SAR 数据融合技术,获取了 2016—2018 年京津冀平原区地表形变信息。不同轨 SAR 数据集交叉验证和水准验证结果均表明本次研究 InSAR 测量所得地面沉降信息的可靠性,满足地面沉降监测及其演化规律的研究。

从沉降场演变过程来看,2016—2018 年京津冀平原区内沉降速率大于 20 mm/a 和 50 mm/a 的 PS 点数占总点数的比例均呈增长趋势,沉降速率大于 100 mm/a 的点数占总点数的比例基本维持不变(3.6%,3.5%,3.5%)。InSAR 监测时段内,滨海平原范围内地面沉降发展较为迅速,其中 2016—2018 年,该区域地面沉降严重区(年沉降量 >50 mm)面积增长 195 km<sup>2</sup>,涨幅达 33.8%。沉降区时序剖面结果显示,唐山沉降区呈加速发展趋势,其余沉降区发展较为稳定。InSAR 所得地面沉降时序结果表明,研究时段内,京津冀平原区内地面沉降时序特征以线性下降为主,且唐山等沿海地区沉降区内地面沉降时序具有明显的季节性波动特征。

研究成果一定程度上填补了京津冀平原区地面沉降整体演化特征研究较少的空缺,为京津冀地区地面沉降防治、调控,城市地下空间安全等提供科学依据。

参考文献 (References):

[1] 郭海朋,白晋斌,张有全,等. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. 中国地质,2017,44(6):1115-1127.  
Guo H P, Bai J B, Zhang Y Q, et al. The evolution characteristics

and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. Geology in China, 2017, 44(6):1115-1127.  
[2] 吕潇文,宋利,邵兴,等. 天津市地面沉降监测技术应用及发展建议[J]. 上海国土资源,2017,38(2):26-30.  
Lyu X W, Song L, Shao X, et al. The suggestion and application of land subsidence monitoring in Tianjin[J]. Shanghai Land and Resources, 2017, 38(2):26-30.  
[3] 李海君,张耀文,孟健,等. 华北平原地面沉降新构造运动影响特征[J]. 能源与环保,2017,39(6):57-62.  
Li H J, Zhang Y W, Meng J, et al. Characteristics on land subsidence in North China Plain within effect of neotectonic movement[J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(6):57-62.  
[4] 杨艳. 京津冀区域地面沉降灾害防治思考[J]. 城市地质, 2015(1):1-7.  
Yang Y. Land subsidence disaster prevention and cure in Beijing-Tianjin-Hebei area, China[J]. Urban Geology, 2015(1):1-7.  
[5] 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.  
Zhu J J, Li Z W, Hu J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1717-1733.  
[6] 林琤,马培峰,王伟玺. 监测城市基础设施健康的星载 MT-InSAR 方法介绍[J]. 测绘学报,2017,46(10):1421-1433.  
Lin H, Ma P F, Wang W X. Urban infrastructure health monitoring with spaceborne multi-temporal synthetic aperture Radar interferometry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1421-1433.  
[7] Hu B, Wang H S, Sun Y L, et al. Long-term land subsidence monitoring of Beijing (China) using the small baseline subset (SBAS) technique[J]. Remote Sensing, 2014, 6(5):3648-3661.  
[8] Du Z Y, Ge L L, Ng A, et al. Mapping land subsidence over the eastern Beijing City using satellite Radar interferometry[J]. International Journal of Digital Earth, 2018, 11(5):504-519.  
[9] Gao M L, Gong H L, Chen B B, et al. Regional land subsidence

- analysis in eastern Beijing Plain by InSAR time series and wavelet transforms[J]. Remote Sensing, 2018, 10(3): 365.
- [10] Hu L Y, Dai K R, Xing C Q, et al. Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel - 1 InSAR observations[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 82: 101886.
- [11] Lyu M Y, Ke Y H, Guo L, et al. Change in regional land subsidence in Beijing after south - to - north water diversion project observed using satellite Radar interferometry[J]. GIScience Remote Sensing, 2019, 57: 140 - 156.
- [12] 雷坤超, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 基于 PS - InSAR 技术的天津地面沉降研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 106 - 111.
- Lei K C, Chen B B, Gong H L, et al. Detection of land subsidence in Tianjin based on PS - InSAR technology[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(6): 106 - 111.
- [13] Luo Q L, Perissin D, Zhang Y Z, et al. L - and X - band multi - temporal InSAR analysis of Tianjin subsidence[J]. Remote Sensing, 2014, 6(9): 7933 - 7951.
- [14] Liu P, Li Q Q, Li Z H, et al. Anatomy of subsidence in Tianjin from time series InSAR[J]. Remote Sensing, 2016, 8(3): 266.
- [15] Zhang T X, Shen W B, Wu W H, et al. Recent surface deformation in the Tianjin area revealed by Sentinel - 1A Data[J]. Remote Sensing, 2019, 11(2): 130.
- [16] 张玲, 葛大庆, 郭小方, 等. 近十年来沧州地区地面沉降演化状况[J]. 上海国土资源, 2014, 35(4): 72 - 76, 80.
- Zhang L, Ge D Q, Guo X F, et al. Land subsidence in Cangzhou over the last decade based on interferometric time series analysis[J]. Shanghai Land and Resources, 2014, 35(4): 72 - 76, 80.
- [17] Liu X X, Wang Y J, Yan S Y. Ground deformation associated with exploitation of deep groundwater in Cangzhou City measured by multi - sensor synthetic aperture Radar images[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(1): 6.
- [18] 周洪月, 汪云甲, 闫世勇, 等. 沧州地区地面沉降现状 Sentinel - 1A/B 时序 InSAR 监测与分析[J]. 测绘通报, 2017(7): 89 - 93.
- Zhou H Y, Wang Y J, Yan S Y, et al. Land subsidence monitoring and analyzing of Cangzhou area Sentinel - 1A/B based time series InSAR[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(7): 89 - 93.
- [19] 周旭, 许才军, 温扬茂. 利用时序 InSAR 技术分析北京及河北廊坊地面沉降[J]. 测绘科学, 2017, 42(7): 89 - 93.
- Zhou X, Xu C J, Wen Y M. Land subsidence monitoring of Beijing and Langfang of Hebei Province by time series InSAR[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(7): 89 - 93.
- [20] 李海君, 张耀文, 杨月巧, 等. 廊坊北三县地区地面沉降时空分布特征与成因分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(11): 23 - 30.
- Li H J, Zhang Y W, Yang Y Q, et al. Spatial - temporal distribution characteristics and causation analysis of land subsidence in three northern counties area of Langfang[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(11): 23 - 30.
- [21] 马震. 京津冀地区国土资源环境地质条件分析[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 857 - 873.
- Ma Z. The environmental geological conditions of land resources in the Beijing - Tianjin - Hebei region[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 857 - 873.
- [22] 郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 等. 华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 162 - 171.
- Guo H P, Li W P, Wang L Y, et al. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(3): 162 - 171.
- [23] 白泽朝. 天津地区 Sentinel - 1A 雷达影像 PSInSAR 地面沉降监测[J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(3): 283 - 288.
- Bai Z C. Subsidence monitoring of Tianjin using PSInSAR technique with Sentinel - 1A[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(3): 283 - 288.
- [24] Perissin D, Wang Z, Lin H. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo - SkyMed persistent scatterers[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 73: 58 - 67.
- [25] 郭良迁, 薄万举, 杨国华. 华北地区断裂带的现代形变特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(2): 29 - 36.
- Guo L Q, Bo W J, Yang G H. Characteristics of current deformation of fault belts in North China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(2): 29 - 36.
- [26] 张进才, 褚立峰, 肖震, 等. 河北平原地面沉降调查与监测主要进展及成果[J]. 中国地质调查, 2014, 1(2): 45 - 50.
- Zhang J C, Chu L F, Xiao Z, et al. Main progress and achievements of land subsidence survey and monitoring in Hebei Plain[J]. Geological Survey of China, 2014, 1(2): 45 - 50.
- [27] 郑玉萍, 韩晔, 王巍, 等. 自然因素对天津市地面沉降影响分析[J]. 中国煤炭地质, 2014(4): 36 - 40.
- Zheng Y P, Han Y, Wang W, et al. Analysis of impacts on surface from natural factors in Tianjin Municipality[J]. Coal Geology of China, 2014(4): 36 - 40.
- [28] 何庆成, 刘文波, 李志明. 华北平原地面沉降调查与监测[J]. 高校地质学报, 2006, 12(2): 195 - 209.
- He Q C, Liu W B, Li Z M. Land subsidence survey and monitoring in the North China Plain[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(2): 195 - 209.
- [29] Ge D, Zhang L, Wang Y, et al. Merging multi - track PSI result for land subsidence mapping over very extended area[C]// 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2010.
- [30] 孙赫. 基于 PS - InSAR 技术的大范围多轨道数据地面沉降监测研究[D]. 西安: 长安大学学位论文, 2015.
- Sun H. Monitoring large area subsidence with PS - InSAR technique based on multi - track data[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [31] 熊思婷, 曾琪明, 焦健, 等. 邻轨 PS - InSAR 地面沉降结果拼接处理方法与实验[J]. 地球信息科学学报, 2014(5): 797 - 805.
- Xiong S T, Zeng Q M, Jiao J, et al. Research on connecting PS - InSAR from adjacent tracks for land subsidence monitoring[J]. Journal of Geo - Information Science, 2014(5): 797 - 805.
- [32] 张永红, 吴安宏, 康永辉. 京津冀地区 1992—2014 年三阶段地面沉降 InSAR 监测[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1050 - 1058.
- Zhang Y H, Wu H A, Kang Y H. Ground subsidence over Beijing - Tianjin - Hebei region during three periods of 1992 to 2014 monitoring

tored by interferometric SAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2016,45(9):1050-1058.

[33] 张学东,葛大庆,肖 斌,等. 多轨道集成 PS-InSAR 监测高速公路沿线地面沉降研究——以京沪高速公路(北京—河北)为例[J]. 测绘通报,2014(10):67-69.

Zhang X D,Ge D Q,Xiao B,et al. Study on multi-track integration PS-InSAR monitoring the land:Taking Jinghu highway (Beijing-Hebei) as an example[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2014(10):67-69.

Monitoring of land subsidence in Beijing-Tianjin-Hebei plain during 2016—2018 based on InSAR and Sentinel-1A data

SHI Min<sup>1,2,3,4</sup>, GONG Huili<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Beibei<sup>1,2,3,4</sup>, GAO Mingliang<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Shunkang<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. Key Laboratory of Mechanism, Prevention and Mitigation of Land Subsidence, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Base of the State Key
- Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
4. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The land subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region has developed the most rapidly and affects the largest area in China and it has become an unnegligible geological problem in the coordinated development of the BTH region. In this study, the multi-track Sentinel-1A data from January 2016 to October 2018 that cover the whole BTH plain was processed using the multi-temporal InSAR (MT-InSAR) technique. After the verification using leveling data and the cross-validation using the data from adjacent tracks, the land subsidence in the BTH region during 2016—2018 were obtained by integrating multi-track SAR data results. The InSAR monitoring results show that the maximum subsidence rate in the BTH region reached 164 mm/a and the land subsidence was widely and unevenly distributed in space in the study area during the monitoring period. According to the analysis of the spatial-temporal change characteristics of the land subsidence in the BTH region, the land subsidence showed an increasing trend in the Tangshan-Qinhuangdao area but stably developed in the remaining areas in the BTH region during 2016—2018. This paper demonstrates that the reliability of the InSAR technique in the monitoring of land subsidence in large regions. The results of this study will provide an important basis for the prevention and mitigation of regional subsidence and will provide a scientific guarantee for the construction of the BTH urban agglomeration.

**Keywords:** land subsidence; Beijing-Tianjin-Hebei plain; InSAR; Sentinel-1A

(责任编辑: 陈 理)