



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 南水进京后升降轨 InSAR 解译北京地面沉降发展态势  
作者: 张双成, 张雅斐, 司锦钊, 罗勇, 余静, 雷坤超, 许强  
DOI: 10.13203/j.whugis20210554  
收稿日期: 2022-06-20  
网络首发日期: 2022-07-19  
引用格式: 张双成, 张雅斐, 司锦钊, 罗勇, 余静, 雷坤超, 许强. 南水进京后升降轨 InSAR 解译北京地面沉降发展态势[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210554>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210554

引用格式：

张双成, 张雅斐, 司锦钊, 等. 南水进京后升降轨InSAR解译北京地面沉降发展态势[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210554 (ZHANG Shuangcheng, ZHANG Yafei, SI Jinzhao, et al. Interpretation after the Start of the South to North Water Transfer in the Beijing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210554)

## 南水进京后升降轨 InSAR 解译北京地面沉降发展态势

张双成<sup>1,2</sup> 张雅斐<sup>1</sup> 司锦钊<sup>1</sup> 罗勇<sup>3</sup> 余静<sup>1</sup> 雷坤超<sup>3,4</sup> 许强<sup>1</sup>

1 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054

2 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安, 710054

3 北京市水文地质工程地质大队, 北京市西四环北路 123 号, 100195

4 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京市北土城西路 19 号, 100029

**摘要：**地下水长期超量开采引发的地面沉降是北京市面临的一个重大问题。我国南水北调中线工程通水以来, 极大地缓解了北京市水资源短缺问题。针对南水北调中线工程对北京地面沉降影响的问题, 本文利用升降轨时序合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 分析 2014 年 12 月至 2020 年 12 月南水北调中线工程通水后北京地面沉降发展态势。研究结果表明, 北京市沉降分布不均匀, 升轨形变速率及累计形变量最大分别为-134mm/a 和 -697mm, 降轨形变速率及累计形变量最大分别为-135mm/a 和 -734mm。对比地下水位数据和抗差最小二乘拟合法融合的 InSAR 形变结果发现, 北京地区的沉降速率随着地下水位的上升而逐渐减小, 也即南水北调中线工程在一定程度上极大地缓解了北京的地面沉降扩张趋势。

**关键词：**地面沉降; 时序合成孔径雷达干涉测量; 升降轨; 抗差最小二乘拟合; 内部互检

**中国分类号：**P237 **文献标志码：**A

2014 年 12 月, 南水北调中线工程开始运营, 北京市开始逐步对水资源利用的结构设施和相关政策进行完善与调整<sup>[1]</sup>。南水北调中线工程的运行, 使京津冀地区用水变得更为便利, 在一定程度上缓解了京津冀地区缺水的状况, 同时进一步促进了北京市的社会经济稳定以及保障了居民的生活用水安全, 而且对于水资源的合理利用和促进区域协调发展等起着必不可少的作用<sup>[2-3]</sup>。

在南水北调中线工程开始实施之前, 北京市的居民用水主要来自于地下水<sup>[4]</sup>。上世纪 80 年代初, 北京市工业发展突飞猛进, 导致工业用水的需求大大增加, 地下水超采造成的问题日益凸显出来。根据已有资料显示, 北京平原地区的地面沉降较为严重, 其中位于北京市的朝阳、顺义、通州、昌平、海淀等区域发生地面沉降的频率较高且危害程度较大, 北京平原区受到地面沉降影响的区域超过了北京市平原区的一大半以上, 北京地区近年来也出现了较为明显的地裂缝<sup>[5]</sup>。北京市已成为我国地面沉降灾害发生的严重地区之一, 对城市的建设发展带来了严重的影响<sup>[6]</sup>。因

**收稿日期：**2022-06-20

**第一作者：**张双成, 博士, 副教授。主要研究方向包括卫星导航、遥感及其在地质灾害中的应用。电子邮件: shuangcheng369@chd.edu.cn

**通讯作者：**张雅斐, 研究生。电子邮件: 2020126037@chd.edu.cn

**基金资助：**国家重点研究开发项目 (2019YFC1509802、2020YFC1512000); 国家自然科学基金 (4207404141731066); 地理信息工程国家重点实验室 (SKLGIE2019-Z-2-1); 陕西省自然科学基金计划 (2020JM-227)。

此,为了有效缓解北京市地面沉降、保障城市可持续发展,相关科研人员提出了科学合理的地下水资源开发和有效预防地面沉降地质灾害的方法,如通过多元回归模型和计算地下水位的控制阈值,进而为预防地面沉降提供依据<sup>[7]</sup>;适当提高土地利用效率,增加深部地下水开采量等<sup>[8]</sup>。对于地面沉降的监测,传统测量方法虽然可以获取较高测量精度的形变量,但是却难以监测大范围的区域性形变<sup>[9]</sup>。近年来,具有大范围、高精度、低成本、全天候、全天时特点的合成孔径雷达干涉测量逐渐成为地面沉降监测的有效手段<sup>[10-12]</sup>。永久散射体技术(Persistent Scatterer, PS)、小基线集技术(Small Baseline Subset, SBAS)以及采用角反射器(Corner Reflector, CR)等时序合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术,使形变监测精度能够达到 cm 至 mm 级<sup>[13-15]</sup>。近些年来这些时序技术已广泛应用于各种区域,如采用短基线集时序方法<sup>[16-18]</sup>、带大气估计模型的时序 InSAR 技术<sup>[9]</sup>获取北京地区的地表沉降信息。

虽然北京市政府已经采取措施使地下水开采得到了一定控制,但地下水深度的加深和新的集中开采区的出现,使得地面沉降分布出现了新的特征,因此对北京市进行地表沉降监测变得尤为重要。同时,由于不同轨道数据的成像几何不同,导致无法获取完整的地表形变信息。鉴于此,本文获取了覆盖北京地区的 Sentinel-1 升降轨数据,首先利用升降轨时序 InSAR 技术获取了升降轨模式下北京地区 2015 年 1 月至 2020 年 12 月 LOS 向的年平均形变速率及沉降分布情况,进行地表形变特征分析,在此基础上采用抗差最小二乘拟合法对北京地区的升降轨形变结果进行融合,同时对升降轨形变结果进行内部互检,并采用 GPS 数据对抗差最小二乘拟合法融合的结果进行验证,最后结合北京市水务局提供的地下水数据对北京地区的地面沉降趋势进行分析。

## 1 研究区概况和数据来源

### 1.1 研究区域

北京市位于北部平原地带,地形起伏较小,平均海拔为 43.5m,是中国的政治、经济和文化中心。近几十年,由于地下水的超量开采导致地下水位降低,北京平原地区出现了不同程度的地面沉降,研究区地理位置如图 1 所示。在采用时序 InSAR 技术进行北京平原地区大面积地表沉降监测时,由于升降轨入射角度的不同,从而使其监测同一位置的形变情况有所不同,且仅凭单个轨道无法获取完整的地表沉降形变信息。因此,需要结合升降轨数据对北京地区地面沉降进行监测。

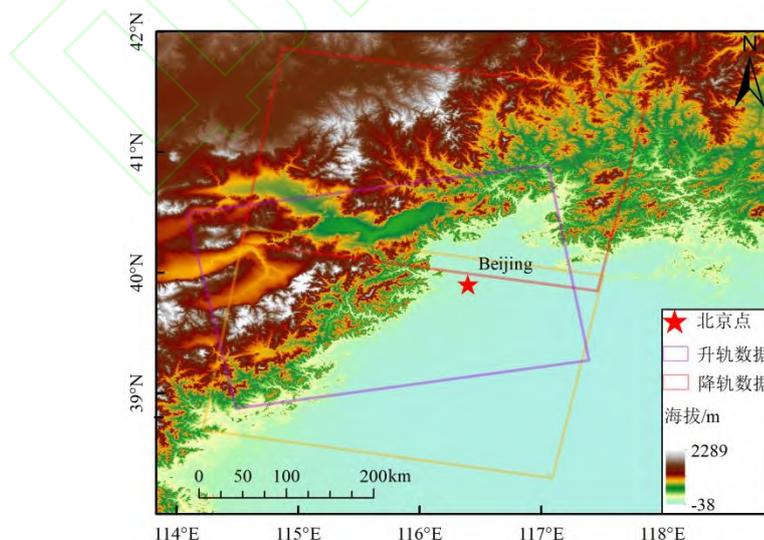


图 1 研究区地理位置及数据覆盖范围

Fig.1 Location of the Study Area and data coverage

## 1.2 实验数据来源

Sentinel-1 卫星是由欧空局在 2014 年发射的主动式雷达成像卫星, 本实验采用的是覆盖北京区域的升降轨 Sentinel-1 数据, 其成像模式为干涉宽幅 (Interferometric Wide Swath, IW) 模式, 极化方式 VV 为极化, 重访周期为 12 天。采用的 Sentinel-1 影像共有 259 景, 其中升轨影像有 139 景, 降轨影像有 120 景, 时间跨度为 2015 年 1 月 24 日至 2020 年 11 月 23 日。

本实验选取的数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 是由美国航空航天局提供的 30 米分辨率 SRTM DEM 高程数据, 用于进行地理编码和去除地形相位误差。Sentinel 目前最常用的轨道数据是 POD 精密定轨星历数据, 根据升降轨数据下载了对应时间定位精度优于 5cm 的高精度轨道数据。与此同时获取了北京地区 35 个 GPS 监测点数据, 用于和抗差最小二乘拟合法融合升降轨的形变结果进行验证。

## 2 研究方法及数据处理流程

### 2.1 研究方法

小基线集技术 (SBAS-InSAR) 是基于多个主影像, 通过选定阈值, 利用时空基线较短的干涉对, 并采用奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 法来获取空间上更加连续的地表形变信息。本文利用小基线集技术获取了北京地区地面沉降的时空分布特征, 由于升降轨数据的轨道存在差异, 导致二者的入射角不一样, 从而使 SBAS-InSAR 技术获取的视线方向的形变量也存在差异。对于升降轨融合, 可将 LOS 向的形变量转化到垂直方向上, 从而进行垂直方向上的升降轨形变融合。北京地区的地表形变主要以垂向为主, 而南北方向和水平方向的形变速率极为微小<sup>[20]</sup>, 因此可忽略南北向和东西向的形变。在进行升降轨融合时, 需要使观测值的参考基准保持一致。即本文以降轨模式下获取的形变结果为准, 对升轨模式下获取的形变结果采用插值方法提取与降轨形变结果相同位置的形变量, 从而获取升轨和降轨同名点形变结果之间的偏差, 同时采用二次曲面方程对升降轨同名点的形变偏差进行二次拟合, 设二次曲面函数为:

$$Z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (1)$$

式中:  $Z$  为降轨与升轨同名点的差值;  $x, y$  为降轨对应的坐标值;  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  为待求系数。

根据观测数据列出误差方程矩阵形式, 其误差方程矩阵形式为:

$$V = MK - Z \quad (2)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}; Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_ny_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $V$  为观测值的残差向量,  $K$  为待求系数矩阵;  $M$  为设计矩阵,  $Z$  为观测向量。按  $V^T P V = \min$  的原则, 可得到  $K$  的值:

$$K = (M^T P M)^{-1} M^T P Z \quad (5)$$

抗差最小二乘拟合法是通过等价权的方法将抗差估计的原理和最小二乘结合起来, 其主体是最小二乘拟合。当得到的偏差数据中含有偏离正确值的粗差时, 使用初始的单位矩阵作为权值, 则会使拟合的曲面产生弯曲, 从而在一定程度上影响拟合的精度<sup>[21-22]</sup>。为了剔除粗差, 提高数据的精度, 本文利用抗差估计理论, 采用 IGGIII 权函数法<sup>[23]</sup>得到的等价权形式为:

$$\bar{P}_{ij} = \begin{cases} P_i, & |V_j/\sigma| < K_0 \\ P_{ij} \frac{K_0}{|V_j/\sigma|} \left( \frac{K_1 - |V_j/\sigma|}{K_1 - K_0} \right)^2, & K_0 \leq |V_j/\sigma| \leq K_1 \\ 0, & K_1 < |V_j/\sigma| \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{V^T P V}{n-m}} \quad (7)$$

式中， $\sigma$ 为单位权中误差， $n$ 为观测值个数； $t$ 为必要观测值个数； $K_0$ 的值取 1.0~1.5； $K_1$ 的值取 2.5~3。

## 2.2 数据处理流程

为了分析南水进京后对北京地面沉降的影响，本文利用瑞士 GAMMA Remote Sensing AG 公司研发的全功能 SAR 数据处理软件，采用升降轨时序 InSAR 技术对 2015 年 1 月至 2020 年 12 月期间获取的覆盖北京区域的升降轨 Sentinel-1 数据进行处理。具体步骤如下：（1）利用外部的 DEM 数据和精密轨道数据对覆盖北京区域的升降轨 Sentinel-1 数据进行数据配准、多视和去除多普勒效应等预处理；（2）设定时间基线和空间基线阈值进行干涉对组合，生成小基线集干涉对；（3）使用 Goldstein 滤波方法实现干涉图信噪比优化，并根据相干性系数图，选择高相干点(GCP)采用最小费用流方法(MCF)进行相位解缠；（4）从多普勒坐标中，估算未包裹相位和 DEM 的精确基线，以生成改进的基线估计；（5）使用精确基线进行二次差分干涉，再次进行滤波和相位解缠；（6）剔除质量较差的干涉对；（7）通过奇异值分解的方法(SVD)解算基于最小二乘准则的地表形变，并通过地理编码获得北京地区 LOS 向的形变结果；（8）通过 Kriging 插值和抗差最小二乘拟合法获取了北京地区升降轨融合的形变结果。数据处理流程如图 2 所示。

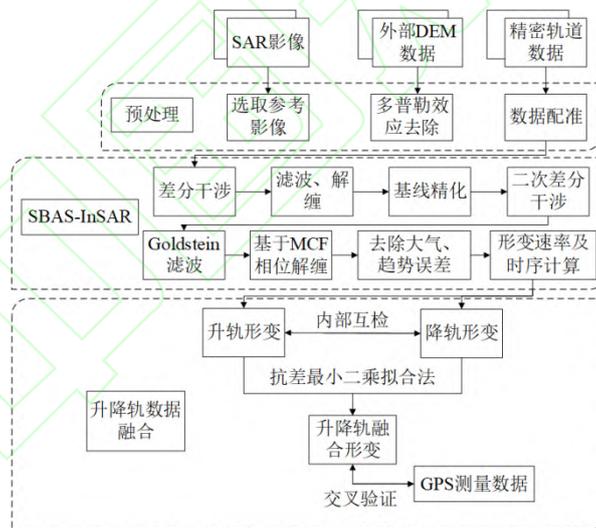


图 2 时序 InSAR 数据处理流程

Fig.2 Flowchart of time series InSAR Data processing

## 3 北京地面沉降分布特征及精度验证

### 3.1 北京地面沉降分布特征

采用时序 InSAR 技术获取了北京地区 2015 年 1 月至 2020 年 12 月的升降轨年平均速率图及累计形变图，如图 3 所示，图 3（d）中编号为 P1~P6 的小圆圈为提取的时序特征点。图 3 中，形变速率为正值，则表示地物朝着靠近卫星方向运动；形变速率为负值，则表示地物朝着远离卫星方向运动。

从图 3 地表形变特征信息上可以看出, 2015 年至 2020 年期间, 北京地区的沉降主要发生在昌平(简称 CP)、海淀(简称 HD)、顺义(简称 SY)、朝阳(简称 CY)、通州(简称 TZ)等区域。北京地区最大升轨年平均形变速率为-134 mm/a, 最大的累计形变量为-697mm; 最大降轨年平均形变速率为-135mm/a, 形变速率范围在-135mm/a 与 12mm/a 之间, 最大的累计形变量为-734mm; 为了能够更好地探究北京地区地面沉降的时空变化, 本文对 2015—2020 年升降轨数据的形变速率进行了统计, 统计结果如图 4 (a) 所示。

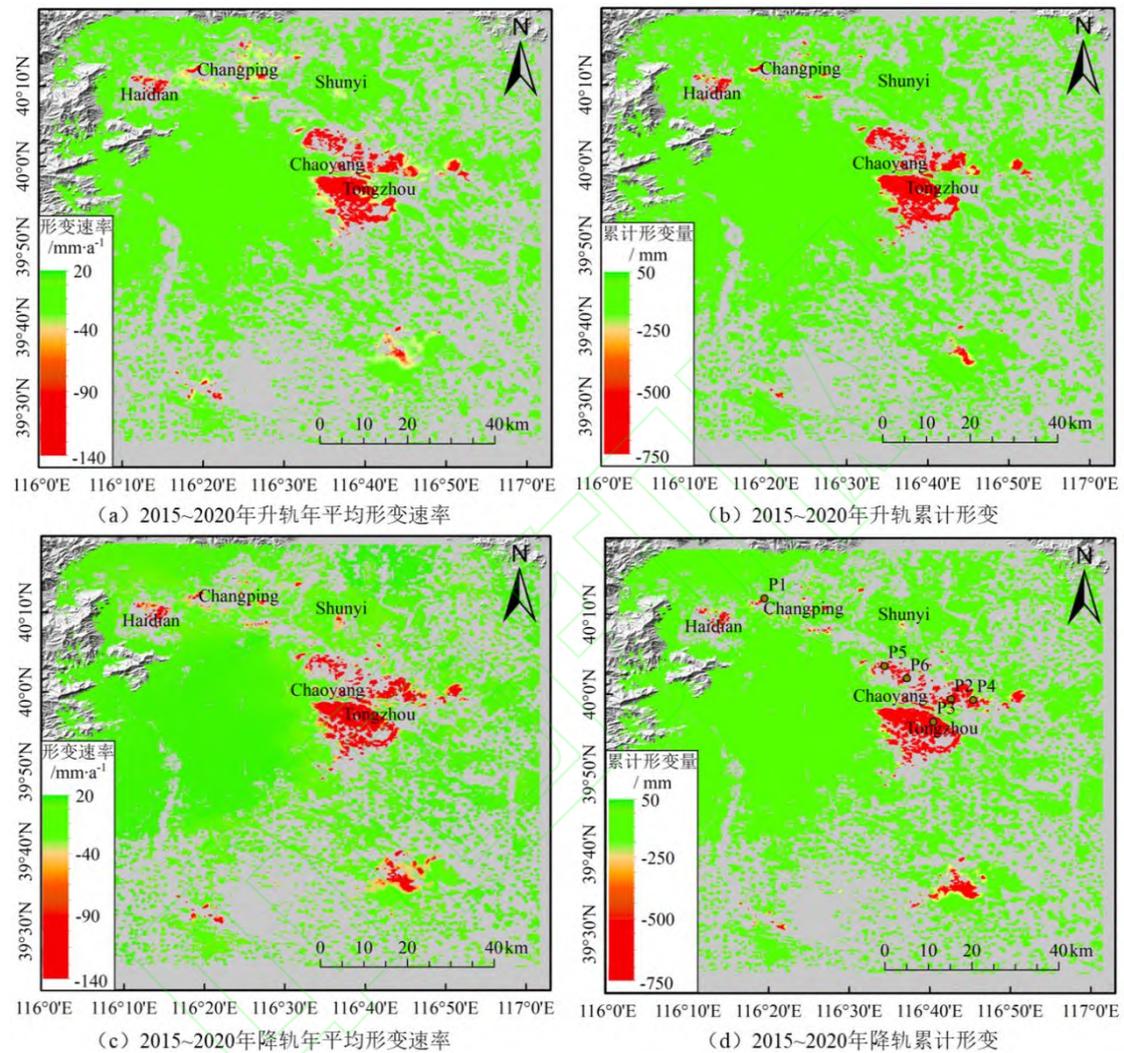


图 3 2015 年 1 月至 2020 年 12 月北京地面沉降形变结果  
**Fig.3** Deformation from January 2015 to January 2020 in Beijing

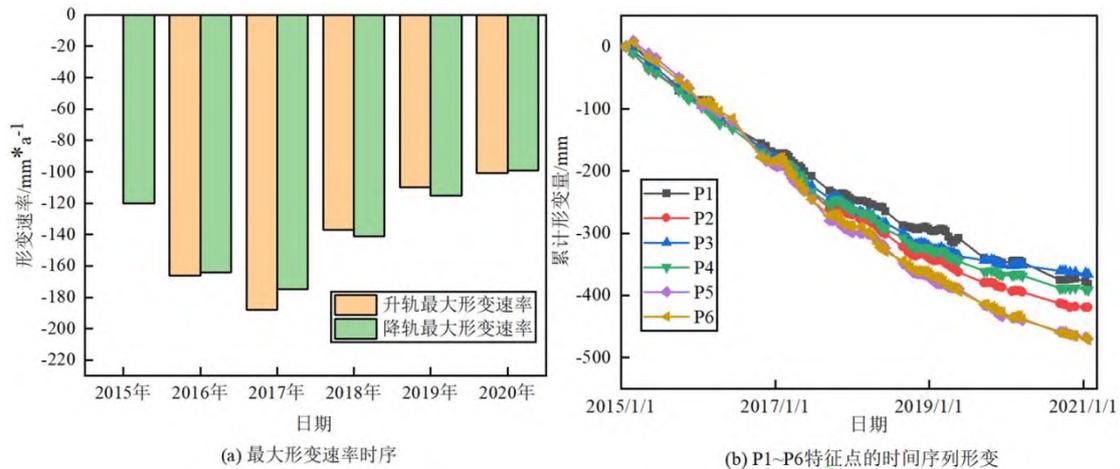


图 4 2015—2020 年北京地面沉降形变特征

Fig.4 Deformation characteristic from January 2015 to January 2020 in Beijing

通过分析 2015—2020 年北京地区形变特征信息，可以发现，虽然 2015—2017 年最大升降轨形变速率均在增加，然而从整体上来看，随着南水北调中线工程供水量的不断增加，2015—2020 年最大升轨形变速率和最大降轨形变速率均在下降，最大升轨形变速率由  $-166\text{mm/a}$  下降到了  $-101\text{mm/a}$ ；2015—2020 年最大降轨形变速率由  $-120\text{mm/a}$  下降到了  $-99\text{mm/a}$ 。对比北京地区出现的五处沉降区，其中，昌平（简称 CP）及海淀（简称 HD）沉降区位于北京地区北部，其 2019 年最大降轨沉降量分别为  $-94\text{mm}$ 、 $-74\text{mm}$ ，通州（简称 TZ）、顺义（简称 SY）和朝阳（简称 CY）这三个沉降区位于北京地区东部，其 2019 年最大降轨沉降量分别为  $-81\text{mm}$ 、 $-38\text{mm}$ 、 $-105\text{mm}$ 。昌平（简称 CP）、朝阳（简称 CY）、通州（简称 TZ）这三个地区均出现了一处较为明显的沉降漏斗，在五处沉降区域中分别提取 6 个特征点 P1—P6 进行时序分析，P1—P6 特征点的点位位置分布如图 3（d）所示。根据 P1—P6 特征点的点位时序信息图 4（b）可以看出，2015—2020 年北京地区地面沉降在持续增加，其中朝阳地区（简称 CY）的沉降最为严重，最大累计形变量达到了  $-472\text{mm}$ ，但是 2015—2020 年北京地区的沉降总体上呈现减缓的趋势。

### 3.2 升降轨解译形变速率融合

根据相关理论和现有的资料显示，北京地区的水平位移较小，主要以垂向为主，因此将 InSAR 形变结果简单的根据入射角公式由视线向投影到垂直方向是可取的。将升轨获取的形变结果采用 Kriging 插值，从而得到与降轨模式下的解算结果对应同名点的垂直形变速率，同时利用均值法对升降轨中同名点的形变速率进行处理，得到升降轨垂直形变速率的平均偏差，并对升轨解算结果进行校正，从而实现升降轨解算结果的数据融合。

图 5（a）为 2019 年采用均值法融合升降轨获取的年平均形变速率图，图中的小三角形为 GPS 监测点。从图 5（a）中升降轨融合方法获取的北京地区形变结果可以看出，北京地区的沉降区大多处于研究区的北部以及东部，这与升降轨解算的形变结果均一致。然而，通过 kriging 插值和均值法融合升降轨的形变结果可能会存在偶然误差以及粗差，为了减弱偶然误差和剔除粗差，本文使用 matlab 软件采用抗差最小二乘拟合法，获取了升轨和降轨融合后的形变结果，如图 5（b）所示。将抗差最小二乘拟合法融合的结果与均值法融合的形变结果进行对比，发现两种融合方法获取的形变结果较为相似。同时在均值法和抗差最小二乘拟合法获取的形变结果中选取了 165 对同名点，对两种融合方法获取的形变结果进行比较，如图 6 所示。

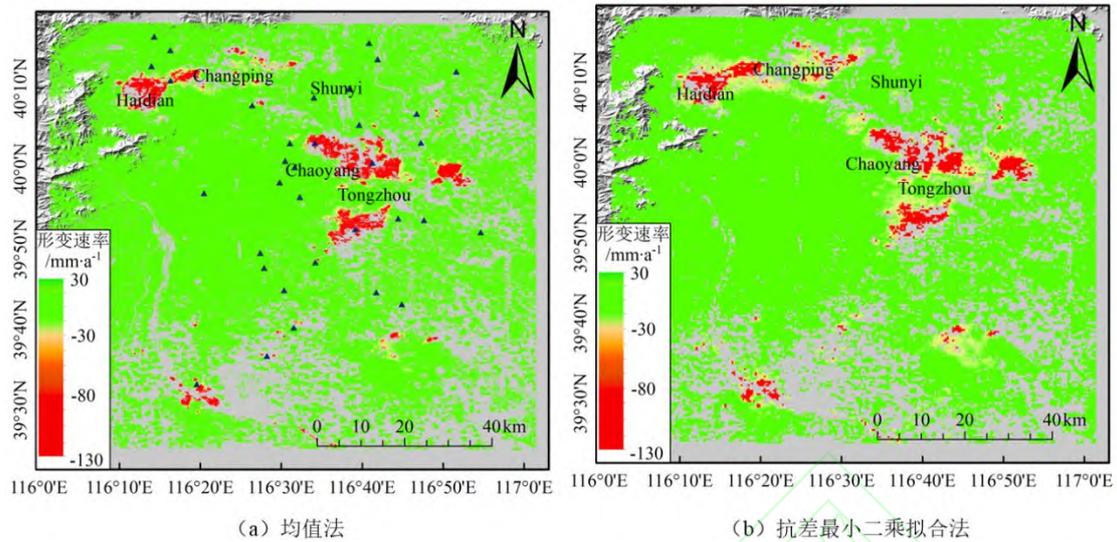


图 5 2019 年融合升降轨年平均速率

Fig.5 Average Deformation Rate of Ascending and Descending fusion in 2019

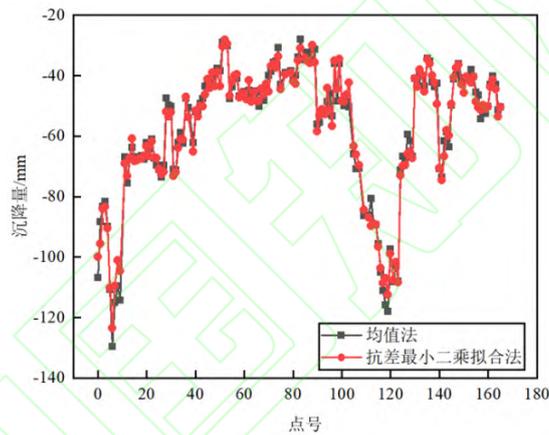


图 6 升降轨融合方法对比

Fig.6 Comparison of deformation between two fusion methods

通过对比可以发现,采用抗差最小二乘法与均值法这两种融合方法获取的形变结果之间存在差异,但二者形变结果的互差均在 10mm 以内,差异不大。相较于均值法,抗差最小二乘法可以降低偶然误差,剔除粗差,融合的效果更好,故后期采用抗差最小二乘法进行升降轨数据的融合。

### 3.3 升降轨 SBAS 形变结果内部互检

为了评价 SBAS-InSAR 技术获取升降轨形变速率的可靠性,本文通过对升轨和降轨获取的形变结果进行对比。由于升降轨轨道的不同,导致二者入射角存在一定的差异,因此需要将升降轨模式下获得的 LOS 向形变速率转换为垂向上的形变速率,获取了 2019 年垂直方向上的升降轨形变速率,结果如图 7 所示。

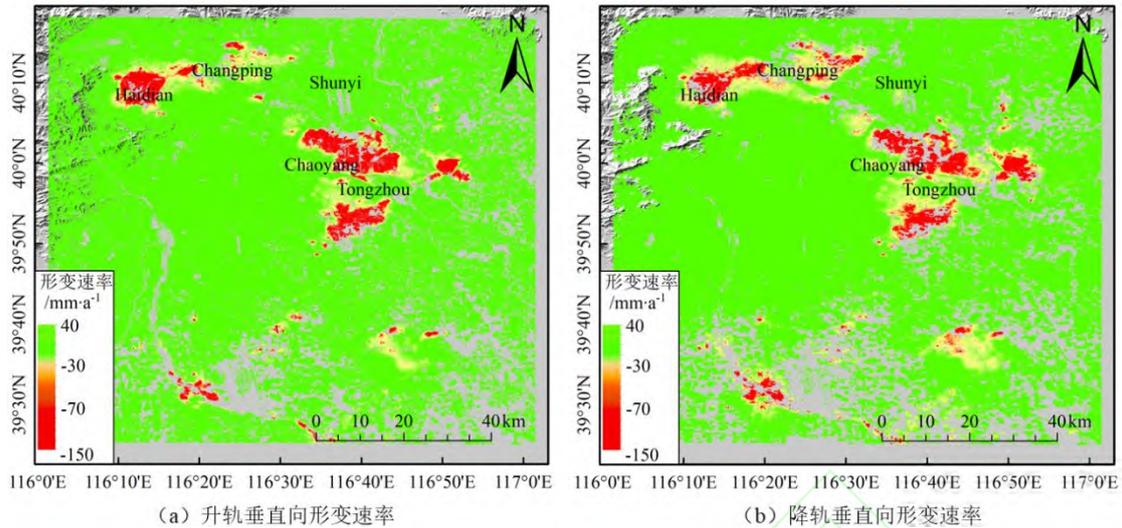


图 7 2019 年垂直向形变速率

Fig.7 Vertical deformation Velocity in 2019

图 7 是 2019 年垂直方向上的升降轨形变速率，通过目视解译可以看出，升轨形变速率与降轨形变速率的沉降区域都集中在昌平（简称 CP）、海淀（简称 HD）、朝阳（简称 CY）、通州（简称 TZ）、这四个地区，两种轨道获取的形变具有较好的一致性。此外，为实现升降轨解算结果互检，本文还在升轨模式下的垂直形变速率中提取了能够表达该地区地面沉降情况的 865 个沉降点，并在降轨模式下的垂直形变结果中提取出相应的同名点进行对比分析。升降轨垂直形变结果的关系图如图 8 所示。升轨与降轨结果之间的相关系数为 0.93，表明 SBAS-InSAR 技术获取的升降轨形变结果的相关性较好，即 SBAS-InSAR 技术获取的升降轨形变结果较为可靠。

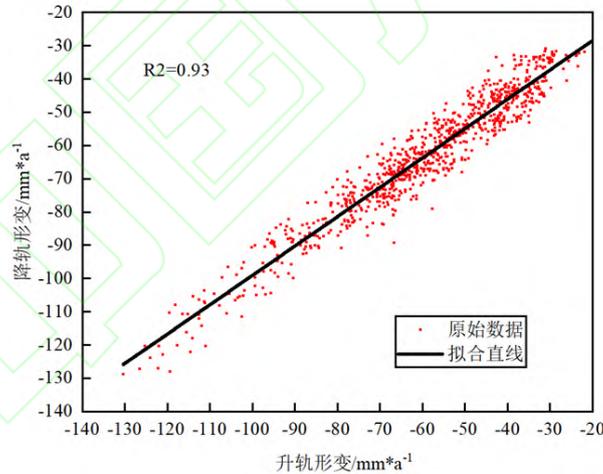


图 8 升降轨形变结果相关性

Fig.8 Correlation of Ascending and Descending deformation results

### 3.4 GPS 验证抗差最小二次拟合升降轨精度

通过查阅资料，获取了 2019 年度北京市地面沉降 GPS 监测网中的 35 个 GPS 测量点。这些 GPS 地面沉降监测点分布在顺义、海淀、大兴、通州、朝阳、西城、与昌平等七个区域，基本上覆盖了北京市整个平原地区。每个 GPS 监测点均建为永久性混凝土观测墩，观测墩顶部安置不锈钢强制对中装置，用于消除天线对中误差的影响。

为了验证抗差最小二乘拟合法获取形变结果的可靠性和准确性，本文选取了覆盖北京市的 35 个 GPS 测量数据进行验证。由于 InSAR 获取的是一维视线方向上的形变<sup>[24]</sup>，因此在与 GPS 测量信息进行对比时，需将 InSAR 视线向的形变转换到垂向上。GPS 测量值与 InSAR 形变结果

对比验证的方法有三种，分别是点与点验证、点与面验证、以及点与线验证。为了定量评定抗差最小二乘拟合法和 GPS 两种手段获取的垂向形变监测精度，本文采用点与点验证的方式进行精度验证，在由时序 InSAR 技术和抗差最小二乘拟合法获取的 2019 年升降轨融合形变速率图上，选取了 35 个 GPS 点进行验证，GPS 点位分布图如图 5 (a) 所示。由于大部分的 GPS 点是基岩点，因此本文以 GPS 点为中心选取 50m 作为最邻近点选择距离生成缓冲区，用该缓冲区数据从抗差最小二乘拟合法融合升降轨的形变结果中裁剪出缓冲区范围内的形变点并取均值。根据 GPS 点 LOS 向的形变数据，在抗差最小二乘拟合法融合升降轨的形变结果中获取同名点的形变速率，对二者进行相关性分析，如图 9 所示。

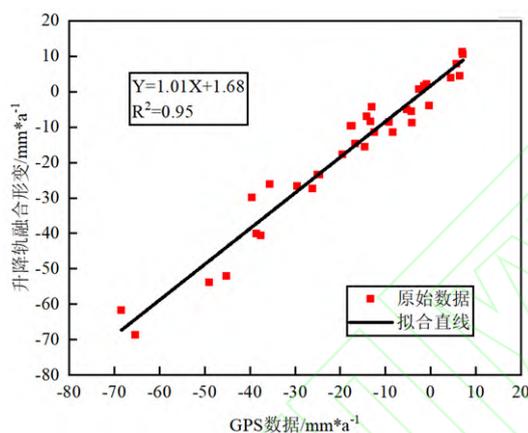


图 9 GPS 与抗差最小二乘拟合法融合形变对比

Fig.9 Comparison Between GPS and robust least squares fitting method

图 9 是 GPS 获取的形变结果与抗差最小二乘拟合法融合升降轨的形变结果之间的对比图，经过对比分析发现：两者的互差在 10mm/a 以内，均方根误差为 4.6mm/a，抗差最小二乘拟合法融合升降轨的形变结果与 GPS 的测量结果吻合程度较高，具有显著的线性相关性，且相关系数达到了 0.95，说明抗差最小二乘拟合法获取的形变速率结果具有极大的参考价值。

## 4 北京地面沉降监测结果态势分析

### 4.1 北京沉降监测结果

基于时序 InSAR 技术和抗差最小二乘拟合法获取了北京 2015 年至 2020 年长时间序列的地表形变特征信息，如图 10 所示。

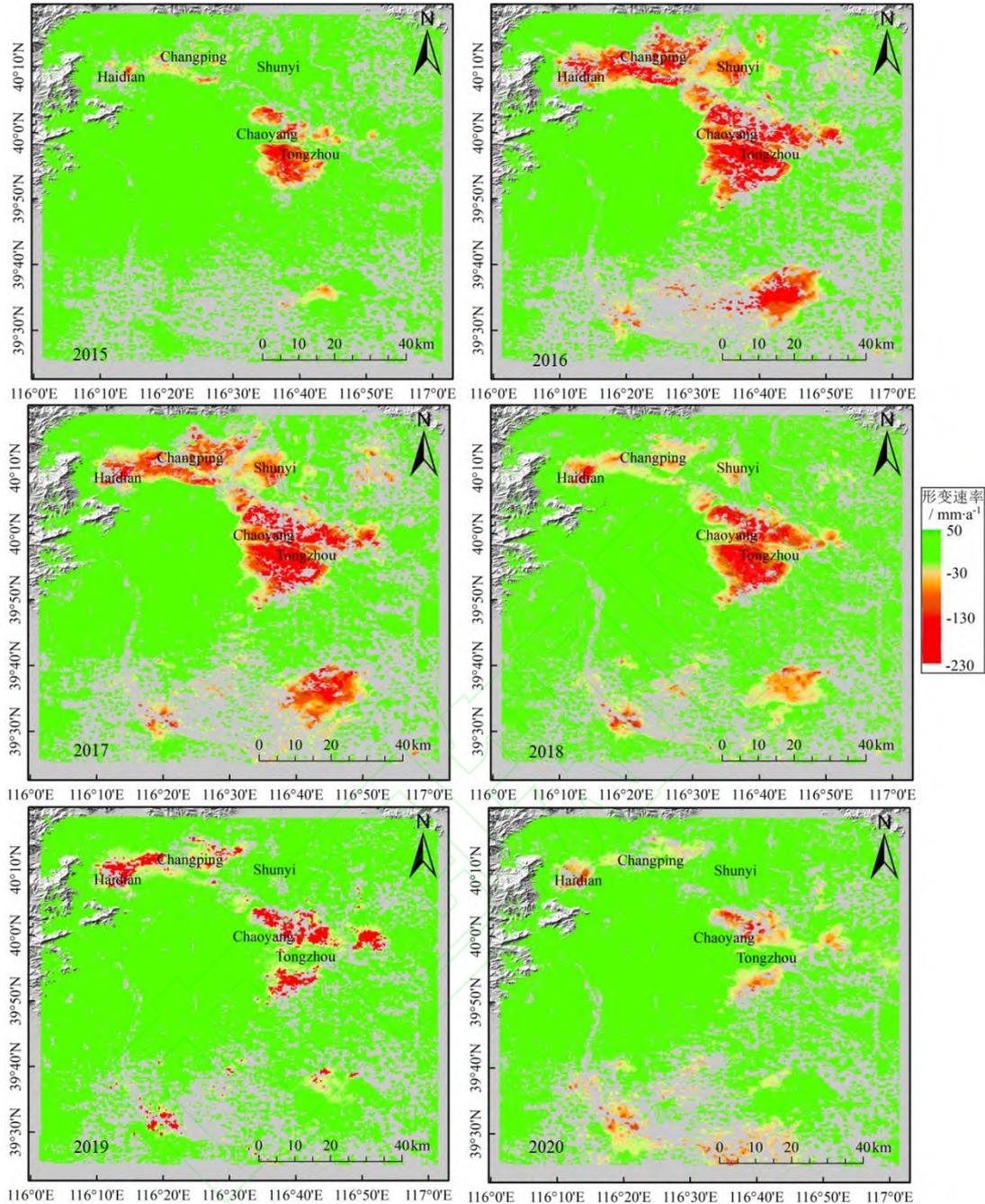


图 10 2015—2020 年长时间序列升降轨融合形变

**Fig.10** 2015-2020 Lifting rail fusion Deformation Velocity of long time series

图 10 是该区域升降轨融合地表沉降监测结果，由图中融合升降轨垂直向形变速率图可以看出，北京地区沉降分布较不均匀，研究区域的中部及西部为较为稳定的区域，东部和北部发生了大规模的沉降，其中沉降主要集中在昌平（简称 CP）、海淀（简称 HD）、顺义（简称 SY）、朝阳（简称 CY）、通州（简称 TZ）五个地区。整体上看，北京地区 2015—2020 年的沉降区空间分布具有较高的一致性。然而从沉降区范围的大小来看，2016 年和 2017 年北京地区沉降范围较大，而在 2018 年北京地区沉降开始大幅度减缓，地面沉降现象有了明显的改善，产生这种现象的原因应该是南水北调中线工程的影响。

#### 4.2 形变结果与地下水位分析

根据北京市水务局提供的《水资源公报》，本文获取了 2015 年至 2020 年的地下水资料数据，

并结合形变量及用水量进行分析<sup>[25]</sup>。

随着北京地区用水情况的缓解，开采地下水逐渐减少，从而使地下水水位逐渐上升，如图 11 所示，2015 年起，北京平原区地下水埋深情况总体呈现上升的趋势，年用水量情况逐渐减少。例如，2015 年北京地下水位深达-25.75 米，2021 年则达到了-22.03 米，相比于 2015 年上升了 3.45 米。与 2015 至 2020 年的形变速率对比，可以明显发现，北京地区的沉降速率随着地下水位的上升而逐渐减小，在一定程度上进一步验证了形变结果的准确性，从而也说明了南水北调中线工程对北京地面沉降的缓解起了很大的作用。



图 11 2015—2020 年地下水埋深和形变结果的演化趋势

Fig.11 2015-2020 Evolution trend of groundwater depth and deformation results

## 5 结语

本文采用升降轨时序 InSAR 技术获取北京区域 2015 年 1 月至 2020 年 12 月的 InSAR 年形变平均速率图及累计形变图，并基于抗差最小二乘拟合法这种融合方法对北京地区的沉降状况进行研究。结果表明：（1）北京地区的沉降呈现不均匀分布，其中部及西部为较为稳定的区域，东部和北部发生了大规模的沉降，2015 年至 2020 年沉降范围逐渐减缓。（2）抗差最小二乘拟合法比平均值法融合升降轨形变的结果更好。（3）北京地区的沉降速率随着地下水位的上升而逐渐减小，南水北调中线工程缓解了北京地区的地面沉降。（4）GPS 监测结果与抗差最小二乘拟合法融合升降轨的形变结果的相关性为 0.95，保证了使用抗差最小二乘拟合法进行升降轨融合的可靠性。

基于上述的研究工作，本文目前还有一些不足及需要进一步研究的地方。由于本文使用的数据均为 Sentinel-1 数据，数据来源比较单一，同时采用地面沉降的影响因素较少，只分析了地下水数据对南水北调中线工程后北京地区地面沉降的影响。因此为了更好的研究南水进京前后地面沉降的发展态势，下一步的研究将采用不同卫星的 SAR 数据进行地面沉降监测，探究建筑物面积、土地利用类型等影响因子与地面沉降之间的关系，从而更好地解译南水进京前后北京地面沉降的发展规律。

**致谢：**感谢美国欧空局提供的 Sentinel-1 数据、航空航天局提供的 SRTM DEM 高程数据以及北京水务局提供的地下水数据。

## 参考文献

[1] Cheng Lingpeng, Wang Xinhui, Zhang Qiwei, et al. Influence of Transferring Yangtze River Water into

- Beijing on Ground Subsidence and Trend Analysis[J]. *Yellow River*, 2018, 40(5): 93-97 (程凌鹏, 王新惠, 张琦伟, 等. 南水进京对北京地面沉降的影响及趋势分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(5): 93-97)
- [2] Mu Chenbo. Analysis of the Influence of South to North Water Transfer on Land Subsidence in Beijing[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2017, 40(6): 22-27 (穆晨波. 南水北调对北京市地面沉降影响分析[J]. 河北地质大学学报, 2017, 40(6): 22-27)
- [3] Xu Huashan, Zhao Lei, Sun Haosu, et al. Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4): 1357-1365 (徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 等. 南水北调中线北京段水质状况分析[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1357-1365)
- [4] Lei Kunchao, Luo Yong, Chen Beibei, et al. Distribution Characteristics and Influence Factors of Land Subsidence in Beijing Area[J]. *Geology in China*, 2016, 43(6): 2216-2228 (雷坤超, 罗勇, 陈蓓蓓, 等. 北京平原区地面沉降分布特征及影响因素[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2216-2228)
- [5] Yang Yan, Jia Sanman, Wang Haigang, et al. Analysis on Impact of Land Subsidence on Planned New Cities in Beijing[J]. *City Planning Review*, 2013, 37(11): 67-71 (杨艳, 贾三满, 王海刚, 等. 北京规划新城地面沉降影响分析[J]. 城市规划, 2013, 37(11): 67-71)
- [6] Jia Sanman, Wang Haigang, Luo Yong, et al. The Impacts of Land Subsidence on City Build of Beijing[J]. *City Geology*, 2006, 1(2): 13-18 (贾三满, 王海刚, 罗勇, 等. 北京市地面沉降发展及对城市建设的影响[J]. 城市地质, 2006, 1(2): 13-18)
- [7] Jiang Yuan, Tian Fang, Luo Yong, et al. Groundwater Control Target under Different Threshold of Land Subsidence in Beijing[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(1): 37-42 (姜媛, 田芳, 罗勇, 等. 北京地区基于不同地面沉降阈值的地下水位控制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 37-42)
- [8] YI Lixin, Hou Jianwei, YAO Genmin. Land subsidence disaster and city sustainable development in Langfang [J].*Journal of Engineering Geology*,2005, 13(S1):30-33(易立新,侯建伟,要根明.廊坊市地面沉降灾害与城市可持续发展对策[J].工程地质学报,2005,13(S1):30-33)
- [9] Poland M, Bürgmann R, Dzurisin D, et al. Constraints on the Mechanism of Long-Term, Steady Subsidence at Medicine Lake Volcano, Northern California, from GPS, Leveling, and InSAR[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, 150(1/2/3): 55-78
- [10] Li Zhenhong, Liu Jingnan, Xu Caijun. Error Analysis in InSAR Data Processing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(1): 72-76 (李振洪, 刘经南, 许才军. InSAR 数据处理中的误差分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(1): 72-76)
- [11] Wang Yan, Liao Mingsheng, Li Deren, et al. Subsidence Velocity Retrieval from Long-Term Coherent Targets in Radar Interferometric Stacks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 598-604 (王艳, 廖明生, 李德仁, 等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 598-604)
- [12] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202-2212
- [13] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20
- [14] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383
- [15] Liao Mingsheng, Wang Teng. *Time series InSAR technology and its application*[M]. Beijing: Science Press, 2014 (廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014)[LinkOut]
- [16] Zhou Lü, Guo Jiming, Li Xin, et al. Monitoring and Analyzing on Ground Settlement in Beijing Area Based on SBAS-InSAR[J].*Journal of Geodesy and Geodynamics*,2016,36(9):793-797 (周吕,郭际明,李昕,等.基于 SBAS-InSAR 的北京地区地表沉降监测与分析[J].大地测量与地球动力学,2016,36(9):793-797)
- [17] Li Yongsheng, Zhang Jingfa, Li Zhenhong, et al. Land Subsidence in Beijing City from InSAR Time

- Series Analysis with Small Baseline Subset[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(11): 1374-1377 (李永生, 张景发, 李振洪, 等. 利用短基线集干涉测量时序分析方法监测北京市地面沉降[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(11): 1374-1377)
- [18] Xu Qiang, Pu Chuanhao, Zhao Kuanyao, et al. Time Series InSAR Monitoring and Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics of Land Subsidence in Yan'an New District[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 957-969 (许强, 蒲川豪, 赵宽耀, 等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(7): 957-969)
- [19] Zhou Xu, Xu Caijun, Wen Yangmao. Land Subsidence Monitoring of Beijing and Langfang of Hebei Prounce by Time Series InSAR[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(7): 89-93 (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)
- [20] Wang Yan, Ge Daqing, Zhang Ling, et al. Inter-Comparison and Time Series Fusion of Ascending and Descending PSInSAR Data for Land Subsidence Monitoring[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(4): 125-130 (王艳, 葛大庆, 张玲, 等. 升降轨 PSInSAR 地面沉降监测结果的互检验与时序融合[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 125-130)
- [21] Zhao Ang, Yang Yuanxi, Xu Yangyin, et al. A Method of Protection Level Reconstruction Based on Robust Estimation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 96-102 (赵昂, 杨元喜, 许扬胤, 等. 一种使用抗差估计的保护水平重构方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(1): 96-102)
- [22] Xiao Yanfeng. *Quality Inspection and Accuracy Evaluation for DEM*[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008 (肖雁峰. DEM 质量检查与精度评定研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008)
- [23] Yang Y. Robust Estimation of Geodetic Datum Transformation[J]. *Journal of Geodesy*, 1999, 73(5): 268-274
- [24] Dai Keren, Zhuo Guanchen, Xu Qiang, et al. Tracing the Pre-Failure Two-Dimensional Surface Displacements of Nanyu Landslide, Gansu Province with Radar Interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1778-1786 (戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(12): 1778-1786)
- [25] Beijing Water Authority. Beijing Water Resources Bulletin[Z] (北京市水务局.北京市水资源公报[Z])

# Land Subsidence Situation by Ascending and Descending InSAR Interpretation after the Start of the South to North Water Transfer in the Beijing

ZHANG Shuangcheng<sup>1,2</sup> ZHANG Yafei<sup>1</sup> SI Jinzhao<sup>1</sup> LUO Yong<sup>3</sup> YU Jing<sup>1</sup>  
LEI Kunchao<sup>3,4</sup> XU Qiang<sup>1</sup>

1 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China

3 Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, 123 North West Fourth Ring Road,  
Beijing 100195, China

4 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 19 Beitucheng West Road,  
Beijing 100029, China

**Abstract: Objectives:** A major problem in Beijing is land subsidence caused by long-term over-exploitation of groundwater. Since the opening of the south-to-North Water Diversion Project, the problem of water shortage in Beijing has been greatly alleviated. The south-to-north Water Diversion Project alleviates the land subsidence in Beijing to a certain extent. **Methods:** In order to analyze the development trend of land subsidence after the start of the South to North Water Transfer in the Beijing, ascending and descending time series interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique is used to monitor land subsidence in Beijing. Firstly, the mean deformation velocity and cumulative deformation in line of sight (LOS) in Beijing district from January 2015 to December 2020 obtained by the small baseline subset InSAR (SBAS-InSAR). Secondly, The Robust least square fitting method were used to fuse the deformation results of the lifting rail and compare the global positioning system (GPS) monitoring datas and the fusion results of lifting rail. Finally, analyze the variation trend between the deformation results by the Robust least quadratic fitting and groundwater. **Results:** The deformation results show that the center of Beijing is basically stable and the deformation distribution is not uniform. The maximum ascending annual deformation velocity and the maximum ascending cumulative deformation amount reach -134mm/year and -697mm, the maximum descending annual deformation velocity and the maximum descending cumulative deformation amount reach -135mm/year and -734mm. And the fusion results obtained by the least square fitting method have certain reliability and accuracy. **Conclusions:** The subsidence rate in Beijing district shows a decreasing trend with the gradual increase of groundwater level. In general, the middle route of South-to-North Water Transfer Project has greatly alleviated the expansion trend of land subsidence in Beijing to a certain extent.

**Key words:** Land subsidence; time-series interferometric synthetic aperture radar; ascending and descending; robust least squares fitting method; internal inspection

**First author:** ZHANG Shuangcheng, PhD, associate professor. His main research interests include

satellite navigation, remote sensing and their applications to geological hazards. E-mail: shuangcheng369@chd.edu.cn

**Corresponding author:** ZHANG Yafei, postgraduate. E-mail:2020126037@chd.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China (2019YFC1509802, 2020YFC1512000); the National Natural Science Foundation of China (42074041,41731066); State Key Laboratory of Geo-Information Engineering (SKLGIE2019-Z-2-1); Shaanxi Natural Science Research Program (2020JM-227).

**网络首发:**

**标题:** 南水进京后升降轨InSAR解译北京地面沉降发展态势

**作者:** 张双成, 张雅斐, 司锦钊, 罗勇, 余静, 雷坤超, 许强

**DOI:** 10.13203/j.whugis20210554

**收稿日期:** 2022-06-20

**引用格式:**

张双成, 张雅斐, 司锦钊, 等. 南水进京后升降轨InSAR解译北京地面沉降发展态势[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210554 (ZHANG Shuangcheng, ZHANG Yafei, SI Jinzhao, et al. Interpretation after the Start of the South to North Water Transfer in the Beijing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210554)

**网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!**

---

**您感兴趣的其他相关论文:**

**延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析**

许强, 蒲川豪, 赵宽耀, 何攀, 张含悦, 刘佳良

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(7): 957-969

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200146>