

王 楚,丁瑞力,陈 蜜,等.京沪高速公路北京—天津段地面沉降时序 InSAR 监测与影响因素[J].地球科学与环境学报,2024,46(2):269-284.

WANG Chu,DING Rui-li,CHEN Mi,et al. Time Series InSAR Monitoring and Influencing Factors of Land Subsidence Along the Beijing-Tianjin Section of Beijing-Shanghai Expressway,China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2024,46(2):269-284.

DOI:10.19814/j.jese.2023.08007

## 京沪高速公路北京—天津段地面沉降 时序 InSAR 监测与影响因素

王 楚<sup>1,2,3</sup>,丁瑞力<sup>1,2,3,4,5\*</sup>,陈 蜜<sup>1,2,3†</sup>,张丹丹<sup>6</sup>,葛鹏飞<sup>1,2,3</sup>,  
成 曦<sup>1,2,3</sup>,范凯伦<sup>1,2,3</sup>

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院,北京 100048; 2. 首都师范大学  
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; 3. 首都师范大学  
水资源安全北京实验室,北京 100048; 4. 自然资源部矿业城市自然资源调查监测与保护重点实验室,  
山西 晋中 030600; 5. 山西省煤炭地质物探测绘院有限公司 资源环境与灾害监测山西省重点实验室,  
山西 晋中 030600; 6. 自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京 100048)

**摘 要:**地面沉降作为平原区主要的地质灾害之一,对高速公路安全运行产生了潜在的影响。为了探究京沪高速公路北京—天津段的地面沉降情况,选取 2017 年 1 月至 2020 年 3 月 70 景 Sentinel-1B 卫星影像,利用 SBAS-InSAR 技术对该路段沿线地面沉降展开监测,并采用外部水准观测方法对 InSAR 监测结果进行精度评定;在此基础上,结合 3 类 9 个影响因子数据对沿线地面沉降进行空间模拟,通过对比普通最小二乘(OLS)模型、地理加权回归(GWR)模型和多尺度地理加权回归(MGWR)模型的模拟效果,最后选取相对最优模型对各种影响因子进行量化研究。结果表明:京沪高速公路北京—天津段表现出不均匀沉降特征,最大年均沉降速率超过 $-90\text{ mm}\cdot\text{年}^{-1}$ ;研究区主要分布有 6 个明显的沉降中心,京沪高速公路北京—天津段经过其中 3 个;采用模拟效果相对最优的多尺度地理加权回归模型进行定量分析可知,第四系沉积厚度和地下水位变化对沉降的影响较大,而地形环境因子的影响较小。

**关键词:**地面沉降;SBAS-InSAR 技术;时序分析;地理加权回归模型;影响因素;京沪高速公路  
**中图分类号:**P237;P642.26 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2024)02-0269-16

### Time Series InSAR Monitoring and Influencing Factors of Land Subsidence Along the Beijing-Tianjin Section of Beijing-Shanghai Expressway, China

WANG Chu<sup>1,2,3</sup>, DING Rui-li<sup>1,2,3,4,5\*</sup>, CHEN Mi<sup>1,2,3†</sup>, ZHANG Dan-dan<sup>6</sup>, GE Peng-fei<sup>1,2,3</sup>,  
CHENG Xi<sup>1,2,3</sup>, FAN Kai-lun<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Base of

收稿日期:2023-08-04;修回日期:2023-12-05 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0503803);国家自然科学基金项目(41201419,U2344225);

教育部产学合作协同育人项目(220902313270248)

作者简介:王 楚(1998-),女,河北石家庄人,理学硕士研究生,E-mail:wangchu\_student@163.com。

\* 通信作者:丁瑞力(1997-),女,山西侯马人,山西省煤炭地质物探测绘院有限公司助理工程师,E-mail:18735120806@163.com。

† 通信作者:陈 蜜(1978-),女,广西南宁人,副教授,工学博士,E-mail:miere@163.com。

the State Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modelling, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4. Key Laboratory of Monitoring and Protection of Natural Resources in Mining Cities, Ministry of Natural Resources, Jinzhong 030600, Shanxi, China; 5. Shanxi Provincial Key Lab of Resources, Environment and Disaster Monitoring, Coal Geological Geophysical Exploration Surveying & Mapping Institute of Shanxi Province, Jinzhong 030600, Shanxi, China; 6. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Land subsidence, as one of the main geological hazards in the plain area, has a potential impact on the safe operation of the expressway. In order to explore the land subsidence of the Beijing-Tianjin section of Beijing-Shanghai expressway, 70 Sentinel-1B satellite images from January 2017 to March 2020 were selected, and SBAS-InSAR technology was used to monitor the land subsidence along the section. The accuracy of InSAR monitoring result was evaluated by external level observation. On this basis, nine factors were divided into three categories to conduct spatial simulation of the settlement amount. By comparing the simulation effects of OLS, GWR and MGWR models, the relative optimal model was selected to conduct quantitative research on various influencing factors. The results show that the Beijing-Tianjin section of Beijing-Shanghai expressway exhibits uneven settlement characteristics, with a maximum annual sedimentation rate exceeding  $-90 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ . There are mainly six obvious severe settlement centers distributed in the study area, with three of them passing through by Beijing-Shanghai expressway. The quantitative analysis of MGWR model, which has the best simulation effect, shows that the deposition thickness of Quaternary system and groundwater level changes have greater influence on the settlement, while the topographical environmental factors have less influence.

**Key words:** land subsidence; SBAS-InSAR technology; time series analysis; GWR model; impact factor; Beijing-Shanghai expressway

## 0 引言

地面沉降是指在自然和人为因素作用下,地球表面在某个区域某段时间内标高降低的一种环境地质现象<sup>[1]</sup>。引起沉降的自然因素和人为因素包括新构造活动、沉积欠固结土层的压密、长期超量开采地下水、地表工程活动和地下空间的开发利用等<sup>[2-3]</sup>。地面沉降发育严重会威胁人类生命财产安全<sup>[4-7]</sup>,因此对区域地面沉降进行长期持续监测并及时采取有效的防治措施尤为重要。

高速公路由于行车速度快、高效方便等优势为群众出行提供了便利。车辆的高速行驶对高速公路路基的平顺性和坡度等有严格要求,而区域不均匀沉降将会造成路基坡度、桥梁等设施的损坏,对高速公路安全运行产生潜在影响。传统监测高速公路沿线沉降的方法包括 GPS、全站仪、经纬仪、水准仪等<sup>[8-9]</sup>,但是这些方法只能监测到高速公路沿线稀疏点的沉降信息,难以获得大范围的沉降。而合成孔

径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术具有全天时全天候、高分辨率、广覆盖、低成本等优势,被广泛应用于城市地面沉降和重大线性工程沉降的监测中,且取得了良好的效果<sup>[10-13]</sup>。高速公路覆盖范围广,沿线地理环境复杂,利用时序 InSAR 技术可以精确获取大范围的地面沉降信息并掌握其沉降特征趋势。刘冰等采用高分辨率 TerraSAR-X 数据,基于多主影像相干目标小基线干涉技术,提取并分析了北京市 12 条高速公路及 1 条快速公路的沉降现状<sup>[14]</sup>;张学东等采用永久散射体干涉测量(Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PS-InSAR)技术识别了京沪高速公路北京—河北段沿线 9 个沉降中心<sup>[15]</sup>。同时,也有很多学者结合影响因子分析公路沿线或路基的沉降成因。姜乃齐利用 PS-InSAR 技术和短基线集干涉测量(Small Baseline Subsets Interferometric Synthetic Aperture Radar, SBAS-InSAR)技术对云南省昆明市、玉溪市和曲靖市的高速

公路及其沿线进行了沉降监测,同时叠加降雨量、地下水水位数据分析沉降原因,采用支持向量机模型对高速公路沉降进行了预测<sup>[8]</sup>;Lazecky 等利用 1995~1999 年的 ERS 数据和 2005~2010 年的 Envisat 数据监测了布拉格和布尔诺之间的捷克 D1 公路形变,同时观察到公路形变是由桥梁的纵向热膨胀引起的<sup>[16]</sup>;Dai 等以 G214 国道青海省共和—玉树高速公路为例,提出了一种临时散射体叠加 InSAR 方法,提取了高速公路沿线的沉降信息,并结合 DEM 数据和气象观测站的地温数据发现了冻融现象是造成高速公路失稳的主要原因<sup>[17]</sup>。

普通最小二乘(Ordinary Least Square, OLS)模型是最常用的回归方法之一,通过生成唯一的回归方程匹配所有变量<sup>[18]</sup>。地理加权回归(Geographical Weighted Regression, GWR)模型是一种空间变系数的回归分析工具,主要在普通最小二乘模型基础上加入空间位置信息来反映样点的地理相似性,用于探索因变量和解释变量的空间非平稳性关系<sup>[19-21]</sup>。但是地理加权回归模型假设所有的影响因子都在相同空间尺度上运行,不足以解释不同空间尺度上的差异性<sup>[22]</sup>。而多尺度地理加权回归(Multi-scale Geographical Weighted Regression, MGWR)模型则可通过设置不同带宽展示每个影响因子的空间异质性。目前,在时序 InSAR 监测基础上,对地面沉降影响因素的量化分析多采用地理加权回归模型和机器学习模型,而考虑空间尺度的多尺度地理加权回归模型则较少应用在地质灾害监测领域。

京沪高速公路穿越了华北平原多个沉降中心,随着南水北调工程的开展和沿线城市建设的快速发展,京沪高速公路沿线的地面沉降监测和影响因素分析需要进行持续深入的研究。因此,本文采用 SBAS-InSAR 技术,结合 Sentinel-1B 卫星数据,对京沪高速公路北京—天津段地面沉降展开监测并获取沿线沉降规律;同时引入多尺度地理加权回归模型,结合水文地质因子、地形环境因子和人为因子等来量化京沪高速公路北京—天津段沿线地面沉降的影响程度,为高速公路的常规维护及安全运营提供支撑。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于华北平原海河流域,纬度范围为 38°58′59″N~40°3′35″N,经度范围为 116°10′28″E~

117°12′25″E,海拔高度为-43~678 m,坡度范围为 0°~58°,2019 年降雨量为 300~527 mm,东南方向降雨量较少,西北方向降雨量较多。研究区包括的地质构造断裂带有南苑—通县断裂带、安定断裂、礼贤断裂、海河断裂、宁河—宝坻断裂等。研究区内京沪高速公路北京—天津段长约 112 km,始于北京东南部十八里店桥,在北京市内长约 35 km;中间经过河北廊坊与天津市相连,其中在廊坊市内长约 7 km,在天津段经过武清区、西青区等,长约 70 km。研究区范围及京沪高速公路北京—天津段位置如图 1 所示。

### 1.2 数据来源

Sentinel-1 卫星包括 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 两颗极轨卫星,载有 C 波段合成孔径雷达,中心波长为 5.6 cm,可以拍摄全天和各种天气的连续图像。卫星轨道高度为 693 km,为太阳同步轨道,具有 12 d 的重访周期和 4 种成像模式,距离向分辨率和方位向分辨率分别为 5 和 20 m。该卫星主要用于监测地面沉降、海洋环境、北极环境与海冰等<sup>[23]</sup>。为了对京沪高速公路北京—天津段沿线进行地面沉降监测,本文选择欧洲航天局(European Space Agency, ESA)2017 年 1 月至 2020 年 3 月共 70 景 Sentinel-1B 卫星数据作为雷达观测影像,数据均采用 VV 极化方式,Path 号为 47,Frame 号为 461。

本文选择 30 m 分辨率的 SRTM DEM 数据来去除地形相位,采用欧洲航天局提供的轨道定位精度在 5 cm 之内的精密轨道数据(Precise Orbit Ephemerides, POD)以消除轨道误差的影响,保证数据处理时基线估计的准确性。为进行 InSAR 监测结果的精度验证及地面沉降的影响因素分析,本文收集了研究区内的水准测量数据、第四系沉积厚度数据及地下水水位数据(<https://geocloud.cgs.gov.cn/>)、断裂带数据(<https://www.eq-igl.ac.cn/>)、哥白尼全球土地服务的土地利用类型数据(<https://land.copernicus.eu/>)和 OpenStreetMap 网站的交通道路网数据(<https://www.openstreetmap.org/>)。地形湿度指数(Topographic Wetness Index, TWI)和径流强度指数(Stream Power Index, SPI)在 SAGA GIS 软件中基于 DEM 数据提取。

## 2 分析方法

本文使用 SBAS-InSAR 技术获取京沪高速公

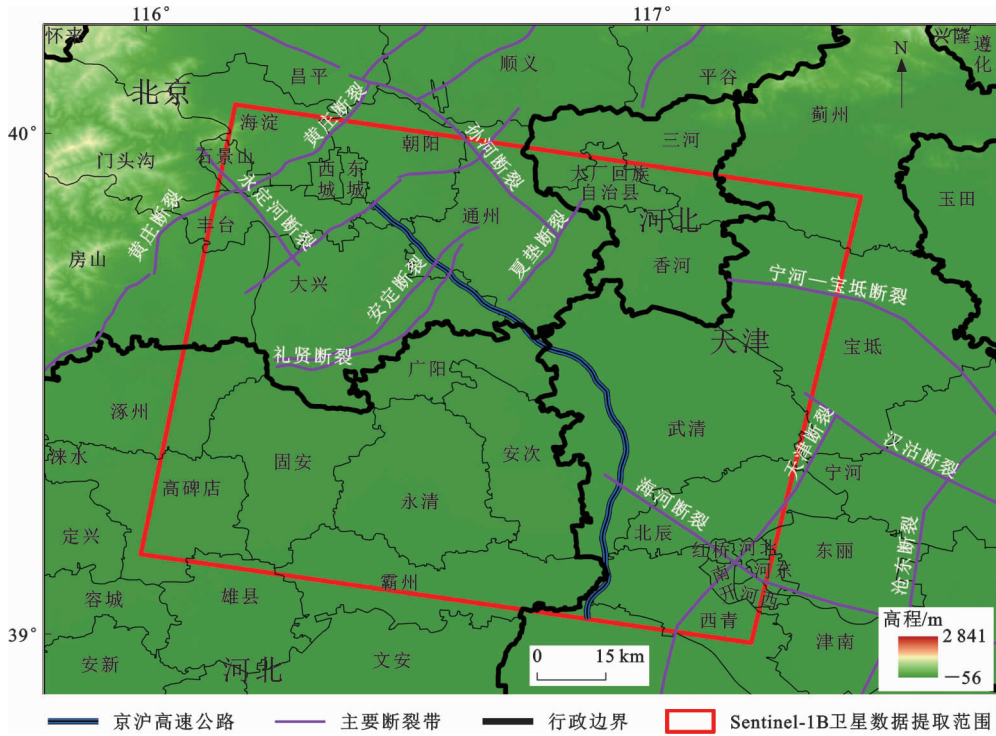


图1 研究区范围及京沪高速公路北京—天津段位置及 Sentinel-1B 卫星数据提取范围

Fig. 1 Location of the Beijing-Tianjin Section of Beijing-Shanghai Expressway and Data Extraction Range of Sentinel-1B Satellite

路北京—天津段沿线沉降信息,结合水文地质因子、地形环境因子和人为因子等数据,利用普通最小二乘模型、地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型对沿线沉降进行空间模拟,量化不同因子对京沪高速公路北京—天津段沿线地面沉降的影响程度。时序 InSAR 监测分析技术路线如图 2 所示。

2.1 SBAS-InSAR 技术

SBAS-InSAR 技术根据集合内基线距小、集合间基线距大的原则,将所获得的 SAR 影像组成若干集合,随后再利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法将多个小基线集联合起来求解,最终获取地表的微小形变[24-25]。

假设在时间  $t_A$  和  $t_B$  获取影像生成第  $j$  幅差分干涉图,且像元在方位向和距离向的坐标为  $(x, r)$ ,则生成的干涉相位为

$$\delta\varphi_j(x, r) = \varphi(t_B, x, r) - \varphi(t_A, x, r) \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)) \quad (1)$$

式中: $\delta\varphi_j(x, r)$ 为第  $j$  幅差分干涉图中像元  $(x, r)$  的干涉相位; $\lambda$  为雷达信号波长; $t_A$  对应的相位为  $\varphi(t_A, x, r)$ ; $t_B$  对应的相位为  $\varphi(t_B, x, r)$ ; $d(t_A, x, r)$  和  $d(t_B, x, r)$  分别为对应时间  $t_A$ 、 $t_B$  相对  $d(t_0, x, r) = 0$  时的累计沉降量; $d(t_0, x, r)$  为初始时

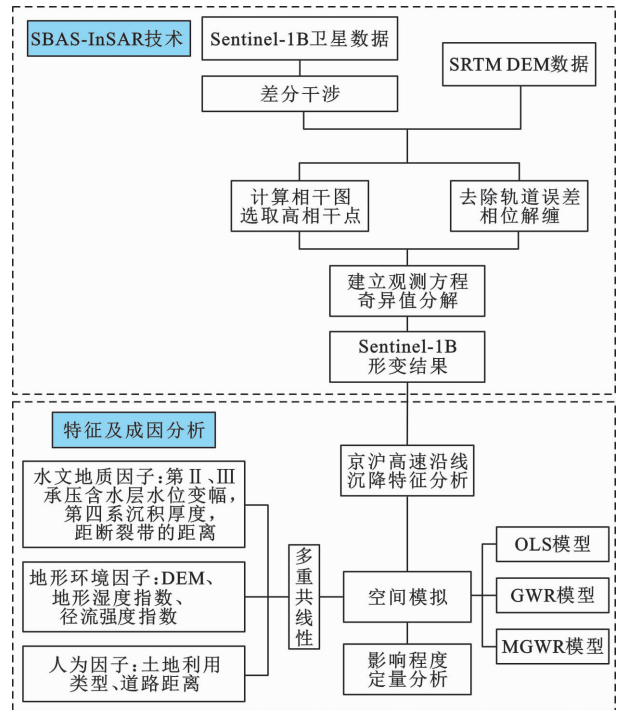


图2 时序 InSAR 监测分析技术路线

Fig. 2 Technology Roadmap of Time Series InSAR Monitoring and Analysis

间  $t_0$  的沉降量。

$t_{k-1}$  和  $t_k$  两个时刻获取影像对应的相位分别为  $\varphi_{k-1}$  和  $\varphi_k$ ,则两个时间段的平均速率( $V_k$ )为

$$V_k = \frac{\varphi_k - \varphi_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \quad (2)$$

式中:  $k$  为时刻计数。

第  $j$  幅差分干涉图的相位值( $\delta\varphi_j$ )计算公式为

$$\sum_{k=t_{A+1}}^{t_B} (t_k - t_{k-1})V_k = \delta\varphi_j \quad (3)$$

式中:  $t_{A+1}$  表示时刻  $t_A$  的下一个时刻。

将式(3)转化成矩阵形式可得

$$\mathbf{B}\mathbf{V} = \delta\varphi \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{V}$  为待求平均速率;  $\delta\varphi$  为差分干涉相位;  $\mathbf{B}$  是  $M \times N$  的矩阵, 其中覆盖同一地区的 SAR 影像数量为  $N+1$ ,  $M$  为差分干涉图的个数。

当  $M < N$  时, 会产生秩亏矩阵。  $\mathbf{B}$  的广义逆矩阵采用奇异值分解联合多个短基线集求解, 进而得到地面沉降速率, 获得区域沉降时间序列信息。

### 2.2 普通最小二乘模型

普通最小二乘模型是普通线性回归模型中最常见和最基本的估计方法。其计算公式为

$$y_m = \beta_0 + \sum_{n=1}^K \beta_n x_{nm} + \epsilon_m \quad (5)$$

式中:  $\beta_0$  为截距;  $\beta_n$  为根据样本点估计出来的模型拟合系数;  $\epsilon_m$  为模型回归残差;  $y_m$  为第  $m$  个样本点的估计值;  $x_{nm}$  为第  $m$  个样本点的第  $n$  个影响因子;  $K$  为影响因子数。

### 2.3 地理加权回归模型

地理加权回归模型通过对数据集中的各要素建立回归分析模型并进行解算, 得到空间回归系数, 用参数估计表征空间关系异质性特征, 在地理学领域应用广泛<sup>[22]</sup>。地理加权回归模型计算公式为

$$y_m = \beta_0(u_m, v_m) + \sum_{n=1}^K \beta_n(u_m, v_m)x_{nm} + \epsilon_m \quad (6)$$

式中:  $(u_m, v_m)$  为第  $m$  个样本点的空间地理坐标;  $\beta_0(u_m, v_m)$  为位置  $(u_m, v_m)$  处的常数项;  $\beta_n(u_m, v_m)$  为连续函数  $\beta_n(u, v)$  在第  $m$  个样本点的值。

### 2.4 多尺度地理加权回归模型

地理加权回归模型虽然在全局回归模型的基础上实现了重大突破, 但是忽略了各个影响因素在不同空间尺度的不同作用。针对地理加权回归模型的限制性, Fotheringham 等提出了多尺度地理加权回归模型<sup>[26]</sup>。该模型基于局部回归过程, 以地理加权回归模型估计的带宽数为初始值, 获得不同的带宽设置。通过更新参数估计值, 观察系数迭代是否收敛, 从而找到最优带宽<sup>[27]</sup>。其计算公式为

$$y_m = \beta_0(u_m, v_m) + \sum_{n=1}^K \beta_{b_w, n}(u_m, v_m)x_{nm} + \epsilon_m \quad (7)$$

式中:  $\beta_{b_w, n}$  为第  $n$  个因子的局部回归系数;  $b_w$  为因子的带宽。

## 3 结果分析

### 3.1 地表形变速率及其精度验证

#### 3.1.1 地表形变速率

对覆盖研究区的 70 景 Sentinel-1B 卫星数据进行影像裁剪、配准、干涉图生成、去除地形相位、相位解缠、形变反演以及地理编码等一系列数据处理操作。其中, 对裁剪后的数据以 2018 年 10 月 17 日影像为主影像进行干涉像对的配对, 共生成 406 对干涉对, 数据集连接情况如图 3 所示。

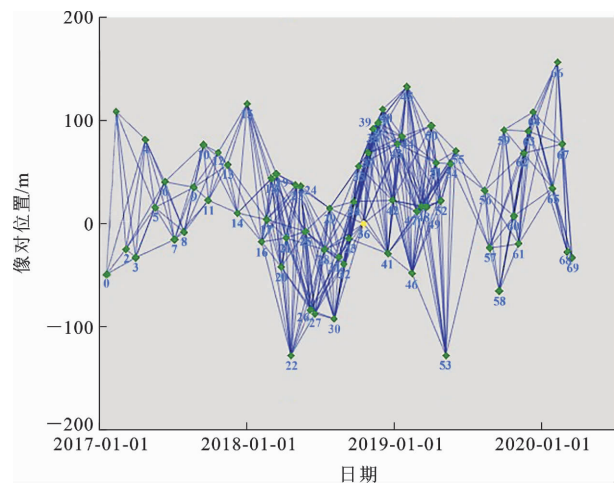


图 3 Sentinel-1B 卫星数据集时间-像对位置分布  
Fig. 3 Time-image Pair Location Distribution of Sentinel-1B Satellite Datasets

采用 Sentinel-1B 卫星数据基于 SBAS-InSAR 技术得到研究区雷达视线向 2017 年 1 月至 2020 年 3 月平均沉降速率结果(图 4), 参考点选在多年以来沉降较为稳定的区域<sup>[28-29]</sup>。其中, 负值代表地面沉降, 正值代表地面抬升。研究区内, 计算得到高相干性点 2 084 360 个, 平均约  $192 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$ , 整个研究区呈现不均匀沉降, 最大沉降速率超过  $-90 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ 。在空间分布上, 严重沉降区域成面状分布, 研究区出现多个明显的严重沉降区域。面积最大的沉降中心位于天津市北辰区、武清区和河北省的交界处(武清—西青沉降中心), 最大沉降速率为  $-124 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ , 沉降速率大于  $-40 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$  的面积多达  $821.64 \text{ km}^2$ ; 其次是北京市通州区和朝阳区交界处(朝阳—通州沉降中心), 最大沉降速率达到  $-97 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ , 沉降速率超过  $-40 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$  的面积为  $232.47 \text{ km}^2$ 。在张永红等的研究<sup>[29]</sup>中, 2012~2014 年朝阳—通州、武清—西青两个沉降中

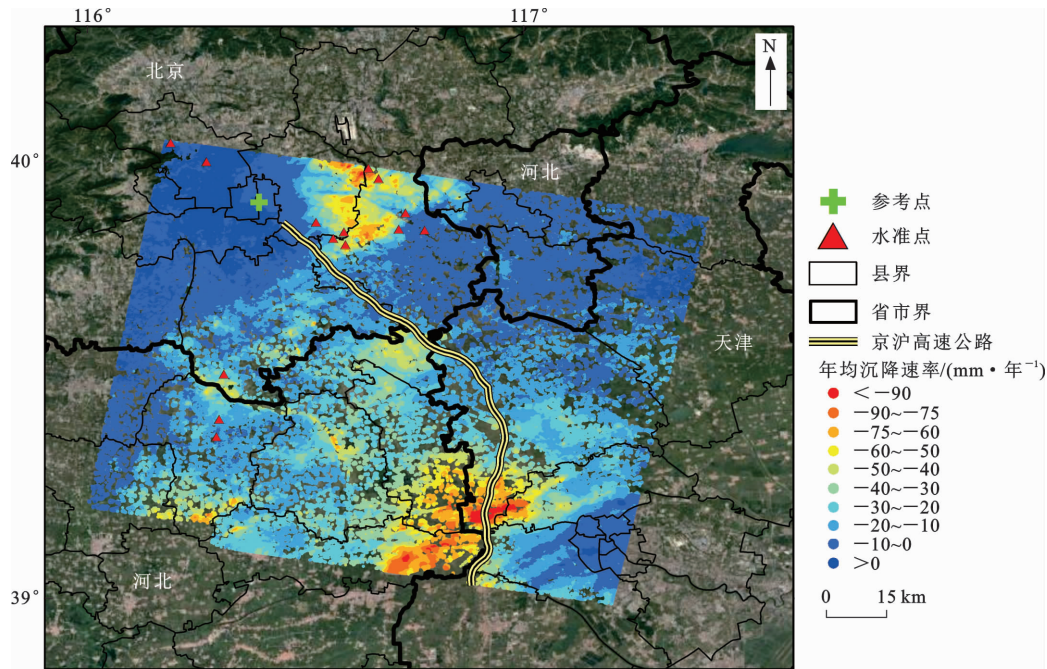


图4 Sentinel-1B卫星监测的研究区2017年1月至2020年3月平均沉降速率

Fig. 4 Average Settlement Rate of Study Area Monitored by Sentinel-1B Satellite from January 2017 to March 2020

心的最大年均沉降速率分别达到 $-152 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ 和 $-153 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ ,后续李广宇等发现朝阳—通州、武清—西青这两个沉降中心在2015~2016年最大年均沉降速率约为 $-159 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ 和 $-224 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ [30]。值得注意的是,研究区这两个区域的最大年均沉降速率在2017~2020年有明显减缓的趋势。

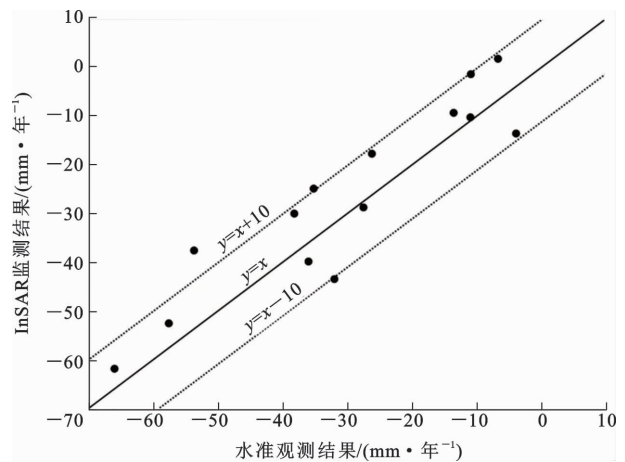
### 3.1.2 外部水准点验证

为了验证 Sentinel-1B 时序 InSAR 监测结果的可靠性,本文使用研究区内 2017 年至 2019 年间收集的 14 个水准观测点进行验证。水准观测点的位置如图 4 所示。将从 InSAR 监测结果提取的雷达视线向沉降量转换为垂向沉降量,针对每个水准点生成 100 m 的缓冲区,并选取缓冲区内距离每个水准点最近的 PS 点进行对比验证。

Sentinel-1B 沉降速率与水准观测对比结果的中误差为  $4.25 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ ,平均误差为  $7.22 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ ,标准差为  $4.09 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ ,同时拟合判定系数( $R^2$ )为 0.843 7(图 5),证实了 InSAR 监测结果的可靠性[31]。

## 3.2 研究区沉降特征

为了获取研究区地面沉降随时间的演变过程,本文以 2017 年 1 月 19 日影像为参考,计算每隔 3 个月的时序累计沉降值,并进行反距离权重(Inverse Distance Weighted, IDW)插值,结果如图 6 所示。由图 6 可知,随着时间的推移,研究区 6 个明显



$y$  为 InSAR 监测结果;  $x$  为水准观测结果

图5 水准观测结果与 Sentinel-1B 卫星 InSAR 监测结果对比散点图

Fig. 5 Comparison Scatter Plot of Leveling Observation Results and InSAR Monitoring Results of Sentinel-1B Satellite

的沉降中心(P1~P6)逐步显现,累计沉降量和沉降范围都在逐步增大。从 2017 年 1 月至 2020 年 3 月,研究区最大累计沉降量达到 $-380 \text{ mm}$ ,主要分布在武清—西青沉降中心(P6)。

为进一步比较 6 个沉降中心的时序沉降规律,在每个沉降中心随机选择 1 个 PS 点绘制时序累计沉降量折线图(图 7)。由图 7 可知,P1~P6 沉降中心的地表累计沉降量随着时间的推移均表现出非线性变化特征,P1 和 P6 沉降中心的累计沉降量明显

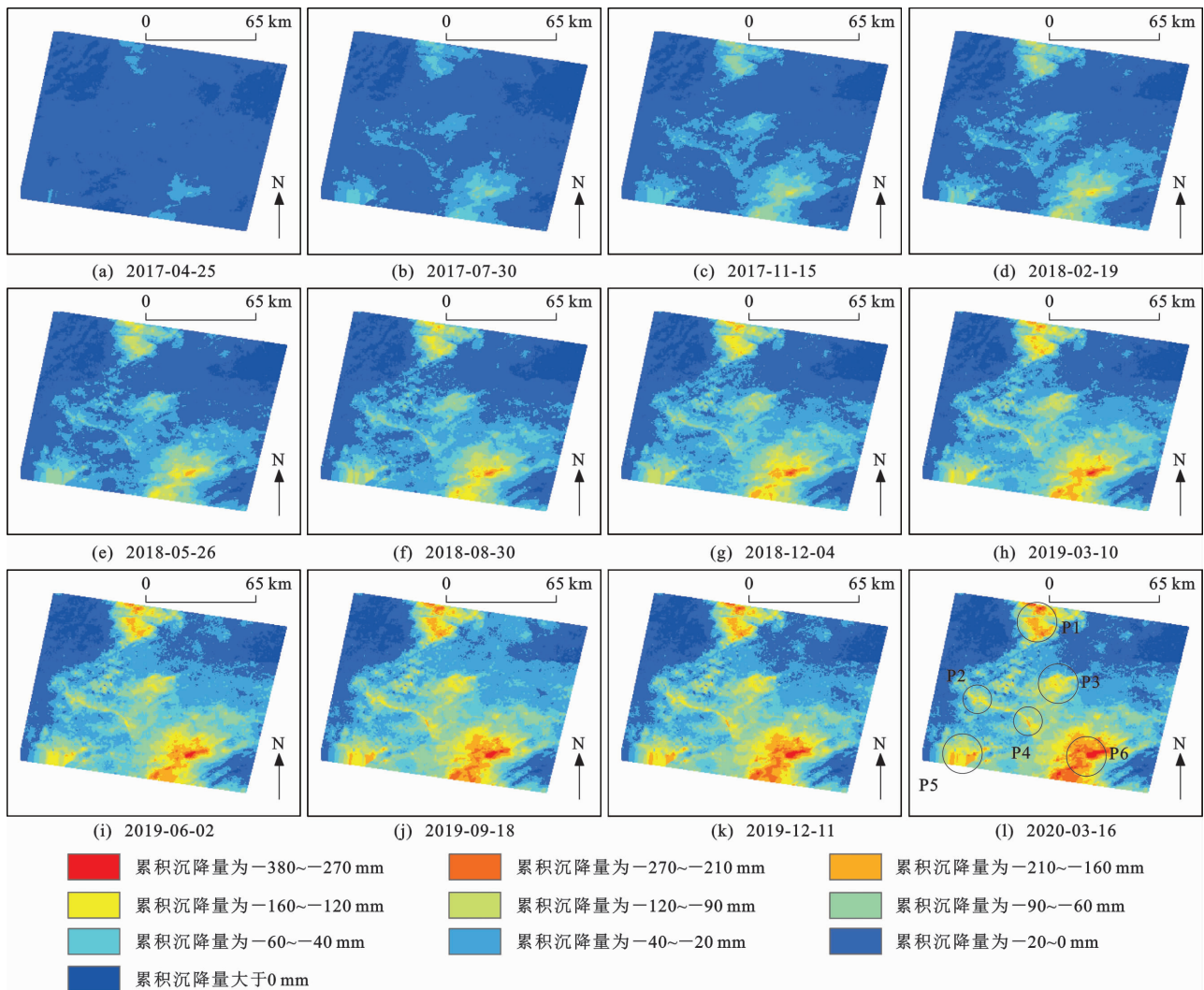


图 6 时序累计沉降量插值图

Fig. 6 Interpolation Maps of Time Series Cumulative Settlement

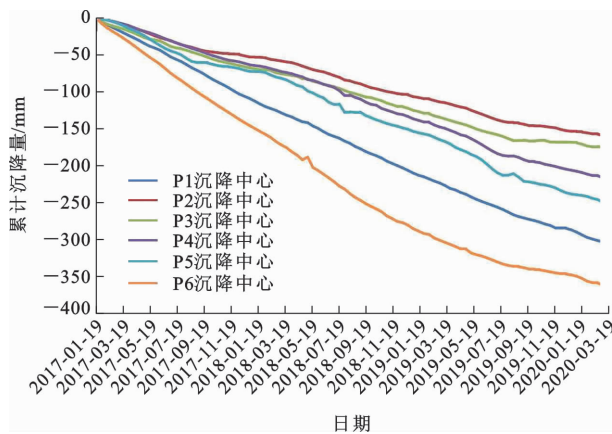


图 7 P1~P6 沉降中心时序累计沉降量折线图

Fig. 7 Line Charts of Time Series Cumulative Settlement of Subsidence Centers P1-P6

呈现出逐年增长的趋势,其中累计沉降量最大的是 P6 沉降中心,累计沉降量超过 -350 mm,其余依次为 P1、P5、P4、P3 和 P2 沉降中心,累计沉降量分别

为 -302、-249、-215、-175、-158 mm,都出现了较为明显的沉降。此外,P3、P4 和 P6 沉降中心的累计沉降量在 2017 年 1 月至 2019 年 8 月呈波动增加趋势,而在 2019 年 8 月以后呈减缓趋势。

为进一步研究每个沉降中心的季节性沉降特征,分别统计春季、夏季、秋季和冬季的沉降量。本文定义春季为 3 月至 5 月,夏季为 6 月至 8 月,秋季为 9 月至 11 月,冬季为 12 月至次年 2 月。统计结果如图 8 所示,其中每个时间段的沉降量是相对于该季节第一天的累计沉降量,每条线表示该季节的时序沉降特征和最大沉降量,每个点表示时序 InSAR 沉降序列中对应该季节的累计沉降量。由图 8 可知,每个沉降中心的季节性沉降特征并不相同,但是 P2、P5 和 P6 沉降中心,2019 年的 P1 沉降中心,2017 和 2019 年的 P3 和 P4 沉降中心都出现了春季、夏季沉降量较大,秋季、冬季沉降量较小的现象。

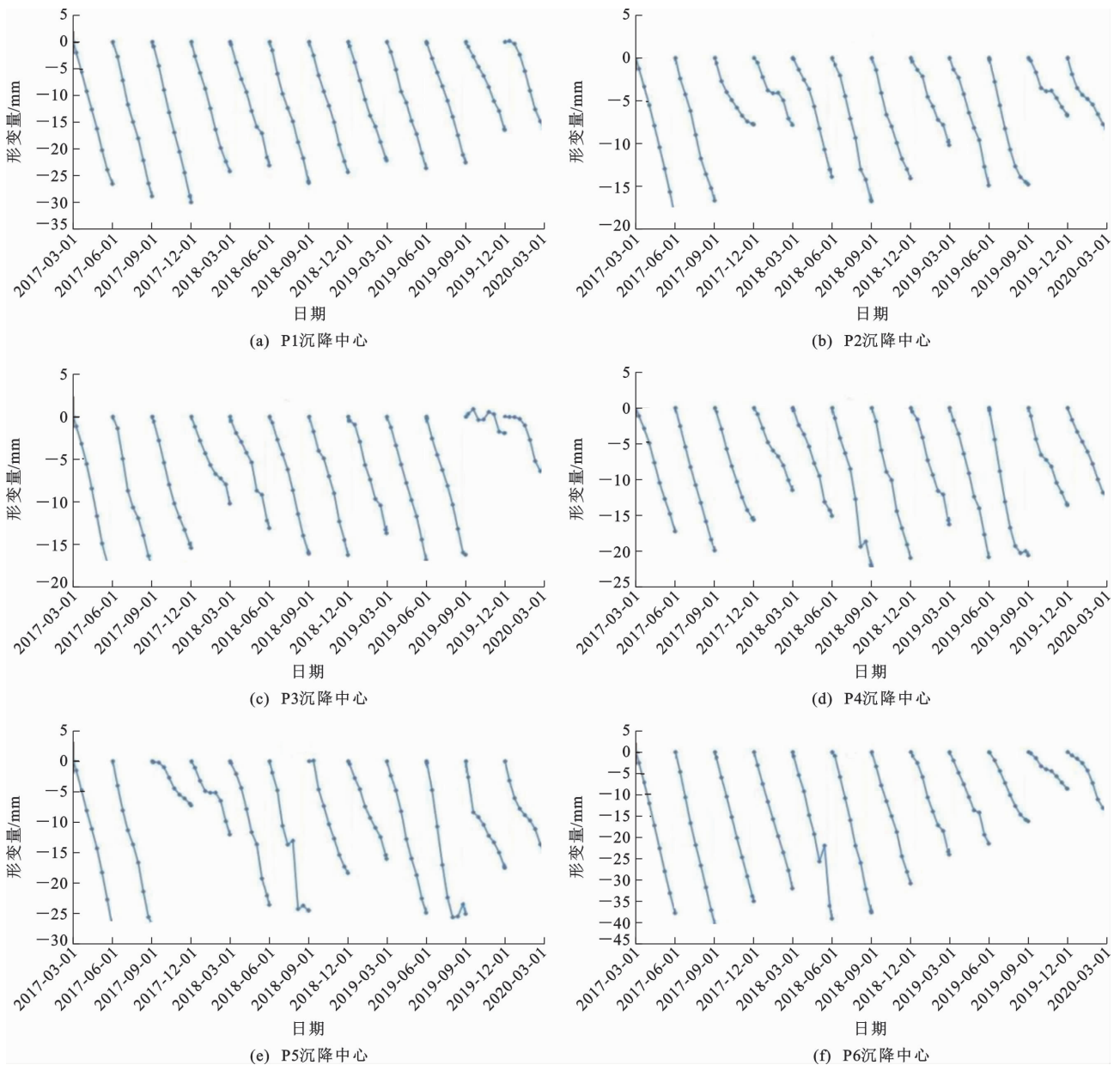


图8 P1~P6 沉降中心季节性地面沉降特征

Fig. 8 Seasonal Land Subsidence Characteristics of Subsidence Centers P1—P6

整体来看, P2、P5、P6 等 3 个沉降中心的季节性沉降特征更加明显, 推测这一现象与农作物的季节性灌溉有较为密切的联系<sup>[30]</sup>。

### 3.3 京沪高速公路北京—天津段沿线沉降特征

2017~2019 年京沪高速公路北京—天津段沿线呈现不均匀沉降特征, 明显的沉降中心主要有 3 个(图 9)。首先是 P1 沉降中心(朝阳—通州)附近, 公路经过了沉降漏斗南部, 最大沉降速率达  $-67.46 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ ; 其次是 P3 沉降中心(廊坊)附近, 最大沉降速率为  $-60.12 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ ; 最后是 P6 沉降中心(武清—西青)附近, 此处发生大面积的沉降。京沪高速公路北京—天津段穿过沉降中心, 对公路的

平稳运行造成威胁, 因此, 加强对这些路段的重点监测分析至关重要。

本文绘制了 2017~2019 年京沪高速公路北京—天津段的逐年沉降速率和累计沉降量纵向剖面图(图 10), 并统计了各年均沉降速率的最大值、平均值、标准差(表 1)。由图 10 可以看出, 全线沉降速率不均匀特征明显, 2017~2019 年年均沉降速率在不断减小, 沉降的空间分布基本一致, 且沉降趋势相同, 年均沉降速率大于  $-20 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$  的线路长度从 62.95 km 减小至 40.62 km。因此, 工程沿线地面沉降速率总体呈逐步减小的趋势, 推测这可能与南水北调中线工程开通后引起的华北平原部分区域

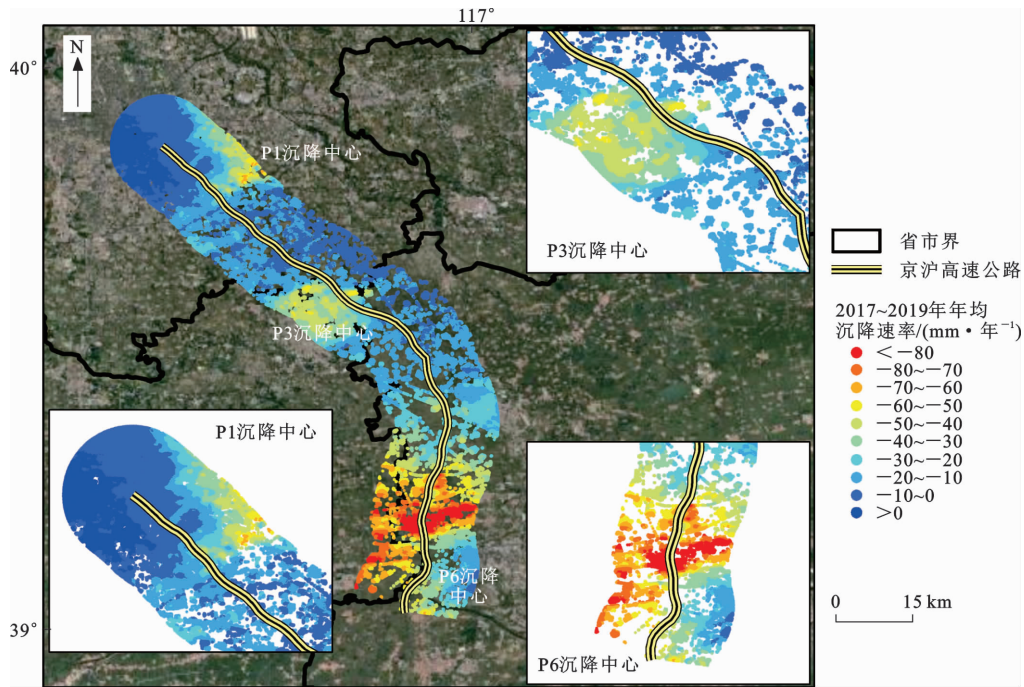


图 9 高速公路沿线 10 km 缓冲区沉降速率

Fig. 9 Settlement Rate of 10-km Buffer Zone Along the Expressway

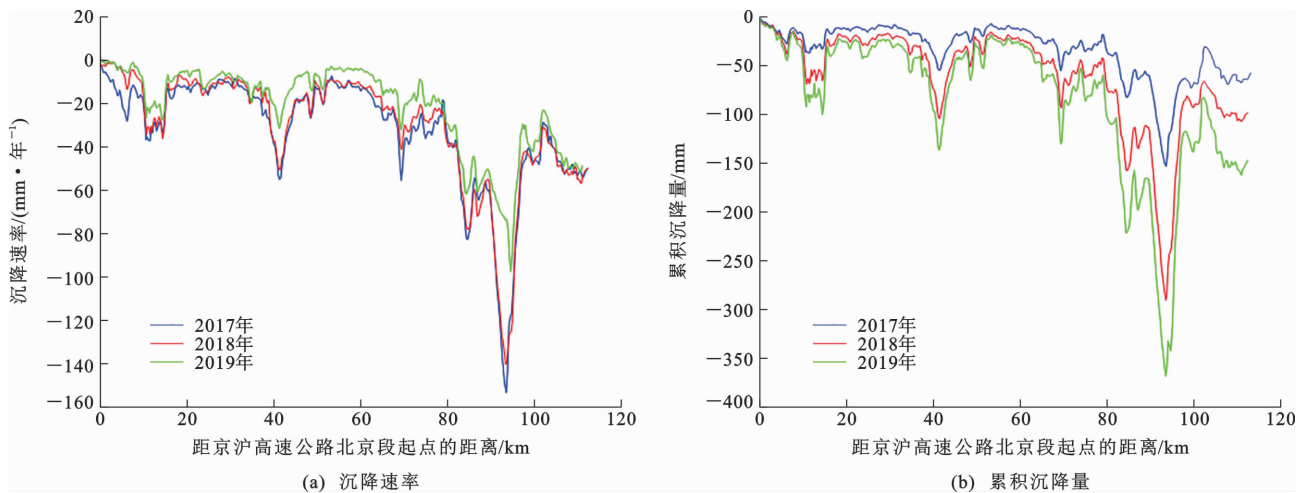


图 10 高速公路各年沉降速率及累计沉降量变化

Fig. 10 Changes of Annual Settlement Rate and Cumulative Settlement Along the Expressway

表 1 高速公路沿线各年沉降速率统计结果

Table 1 Statistical Results of Annual Settlement Rates Along the Expressway

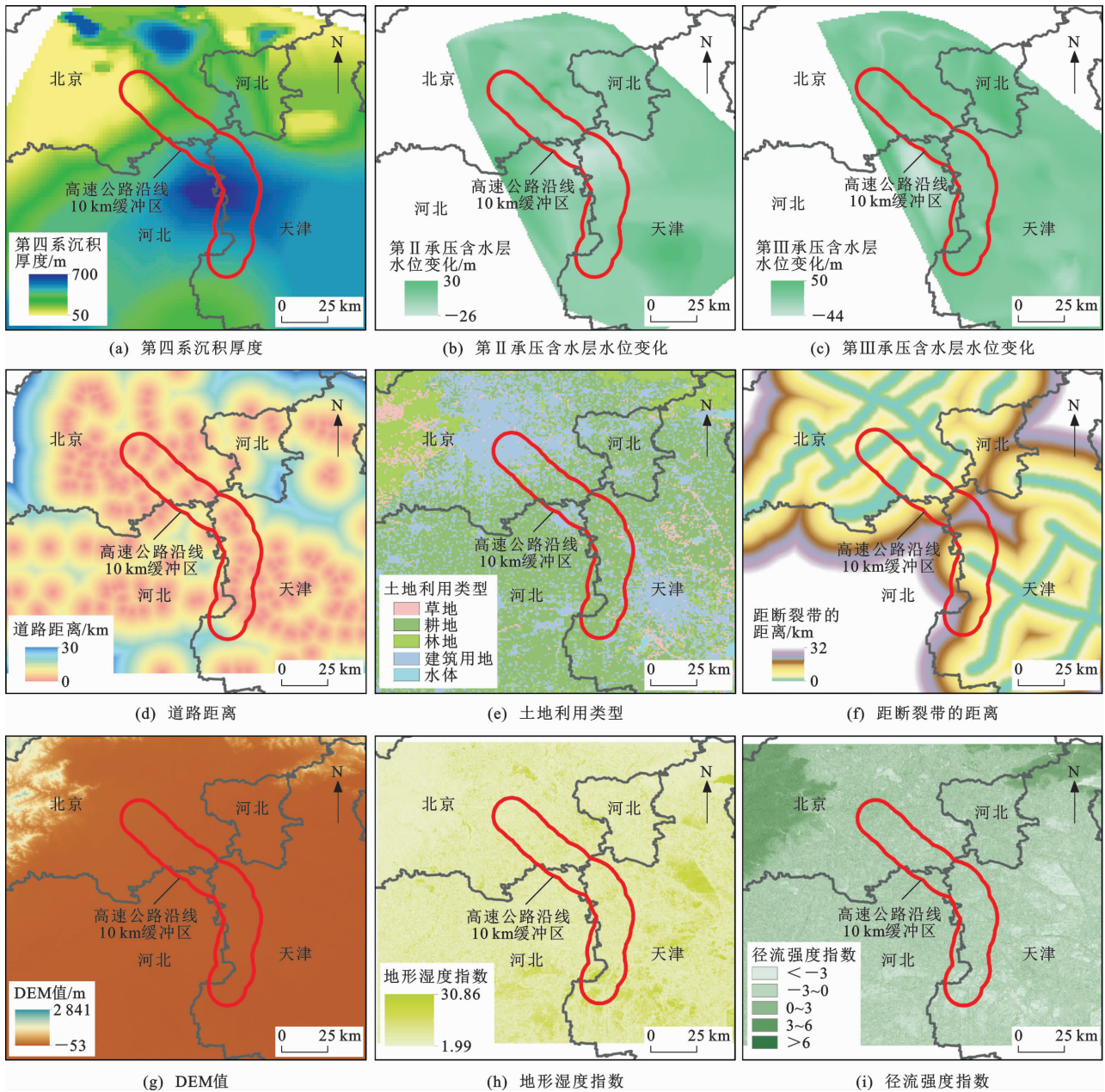
年份	沉降速率最大值/ (mm·年 <sup>-1</sup> )	沉降速率平均值/ (mm·年 <sup>-1</sup> )	沉降速率标准差/ (mm·年 <sup>-1</sup> )
2017 年	-153.31	-31.67	25.19
2018 年	-140.31	-29.51	26.06
2019 年	-97.26	-20.95	19.56

地下水位回升有关。从空间分布来看,P1、P3 和 P6 沉降中心分别位于京沪高速公路北京—天津段 DK10-15、DK37-45、DK80-97 处,最大年均沉降速率依次为 -32、-45 和 -122 mm·年<sup>-1</sup>。

### 3.4 地面沉降影响因子特征

#### 3.4.1 影响因子与多重共线性检验结果

区域水文、土壤、地形、地貌和地质等众多因素都会导致地面沉降的发生<sup>[32]</sup>。根据现有文献资料<sup>[32-38]</sup>和研究区特征,为保证影响因素的全面性(直接或间接影响),本文对水文地质因子、地形环境因子和人为因子三大类(图 11)进行分析。其中,水文地质因子包括第Ⅱ、Ⅲ层承压含水层水位变幅,距断裂带的距离,第四系沉积厚度;地形环境因子包括 DEM、地形湿度指数、径流强度指数;人为因子包括道路距离和土地利用类型。



图中红色线条圈定部分为研究区域

图 11 地面沉降影响因素

Fig. 11 Impact Factors of Land Subsidence

影响因素间的非独立性会影响模型判断,降低计算精度,因此首先需要对影响因素进行多重共线性检验,选用方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)、容差两个指标来判断地面沉降影响因素的多重共线性<sup>[39]</sup>。本文以 2019 年沉降量为例,叠加 9 个影响因素,得到 DEM 和第四系沉积厚度的容差均在 0.2 左右,方差膨胀因子接近 5。根据文献<sup>[40]</sup>和<sup>[41]</sup>的方法可以判定这两个影响因素之间存在相关性。通过去掉影响因素 DEM,对剩余影响因素重新进行共线性计算,结果如表 2 所示。由表

2 可知,这 8 个影响因素的容差均大于 0.2,方差膨胀因子均小于 5,表明通过了共线性检验<sup>[39,42]</sup>,不再存在冗余。

### 3.4.2 地面沉降模拟结果

多尺度地理加权回归模型通过设置不同带宽可以展示每个影响因素的空间异质性。本文采用 MGWR 软件构建多尺度地理加权回归模型,选择带宽方式为自适应二次带宽,同时以改进的赤池信息量准则(Corrected Akaike Information Criterion, AIC)作为带宽选择的准则,共迭代 200 次达到收敛

表 2 去掉 DEM 后影响因子多重共线性检验结果

Table 2 Multicollinearity Test Results of Influence Factors After Removing DEM

影响因子	变量	容差	方差膨胀因子
水文地质因子	第Ⅱ承压含水层水位变化	0.578	1.732
	第Ⅲ承压含水层水位变化	0.805	1.243
	距断裂带的距离	0.489	2.045
	第四系沉积厚度	0.701	1.426
地形环境因子	地形湿度指数	0.975	1.026
	径流强度指数	0.974	1.027
人为因子	土地利用类型	0.987	1.013
	道路距离	0.932	1.073

标准。地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型均选用 Gaussian 核函数,且对所有变量进行标准化处理。表 3 为地理加权回归模型与多尺度地理加权回归模型指标对比情况。从表 3 可以看出,多尺度地理加权回归模型的各项指标均优于地理加权回归模型。

表 3 地理加权回归模型与多尺度地理加权回归模型指标对比

Table 3 Indicators Comparison of GWR and MGWR Models

模型指标	地理加权回归模型	多尺度地理加权回归模型
拟合优度判定系数	0.969	0.971
改进的赤池信息量准则	-65.324	-938.687
残差平方和	79.510	75.706

表 4 为地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型的带宽计算结果。地理加权回归模型的拟合带宽为 58,每个影响因子具有的空间尺度相同,占整体 PS 点总数的 2.2%;多尺度地理加权回归模型允许因子带宽的作用尺度存在差异,在多尺度地理加权回归模型下径流强度指数的带宽最大(2 604)。根据带宽占总样本的比例,径流强度指数为相对全局尺度的因子,即在计算时需要借用周围更多的采样点,空间异质性较小;其次是土地利用类型和地形湿度指数,带宽数量居中,分别为 407 和 270,占总样本的 15.6%和 10.4%;其他 5 个变量的带宽均为 43,说明这些因子在相对微观的空间尺度上影响地面沉降,存在较大的空间异质性。

本文进一步采用普通最小二乘模型、地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型对京沪高速公路北京—天津段沿线地面沉降进行回归模拟,探讨多尺度地理加权回归模型在模拟地面沉降中的适用性。如图 12 所示,每个模型在回归分析时表现出的

表 4 地理加权回归模型与多尺度地理加权

回归模型的带宽计算结果

Table 4 Bandwidths Calculation Results of GWR and MGWR Models

影响因子	变量	地理加权回归模型带宽	多尺度地理加权回归模型带宽
水文地质因子	第Ⅱ承压含水层水位变化	58	43
	第Ⅲ承压含水层水位变化	58	43
	距断裂带的距离	58	43
	第四系沉积厚度	58	43
地形环境因子	地形湿度指数	58	270
	径流强度指数	58	2 604
人为因子	土地利用类型	58	407
	道路距离	58	43

空间细节特征不尽相同,普通最小二乘模型对沉降较小的区域模拟效果较好,但在 3 个沉降中心未能准确地识别到沉降中心的边界和数值;地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型回归结果在空间上比较连贯,呈面状分布,沉降量更接近于 InSAR 监测结果,也比较准确地模拟出了 3 个沉降中心的位置和沉降量。此外,地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型的模拟结果较为相似,但多尺度地理加权回归模型由于采用较为优化的带宽,在沉降较大的区域内取得了更好的模拟效果,这种情况在 P6 沉降中心较为明显。

综合均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percent Error, MAPE)、受试者工作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线和判定系数对模拟结果进行评价。普通最小二乘模型、地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型得到的受试者工作特征曲线如图 13 所示,误差指标如表 5 所示。其中,多尺度地理加权回归模型在 4 个指标中均表现

表 5 普通最小二乘模型、地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型的模拟对比误差结果

Table 5 Simulation Comparison Error Results of OLS, GWR and MGWR Models

模型	判定系数	平均绝对百分比误差	均方根误差	AUC 值
普通最小二乘模型	0.500 2	0.444 0	14.371 9	0.935 3
地理加权回归模型	0.969 7	-0.124 0	3.546 0	0.992 1
多尺度地理加权回归模型	0.970 7	-0.085 1	3.488 0	0.993 9

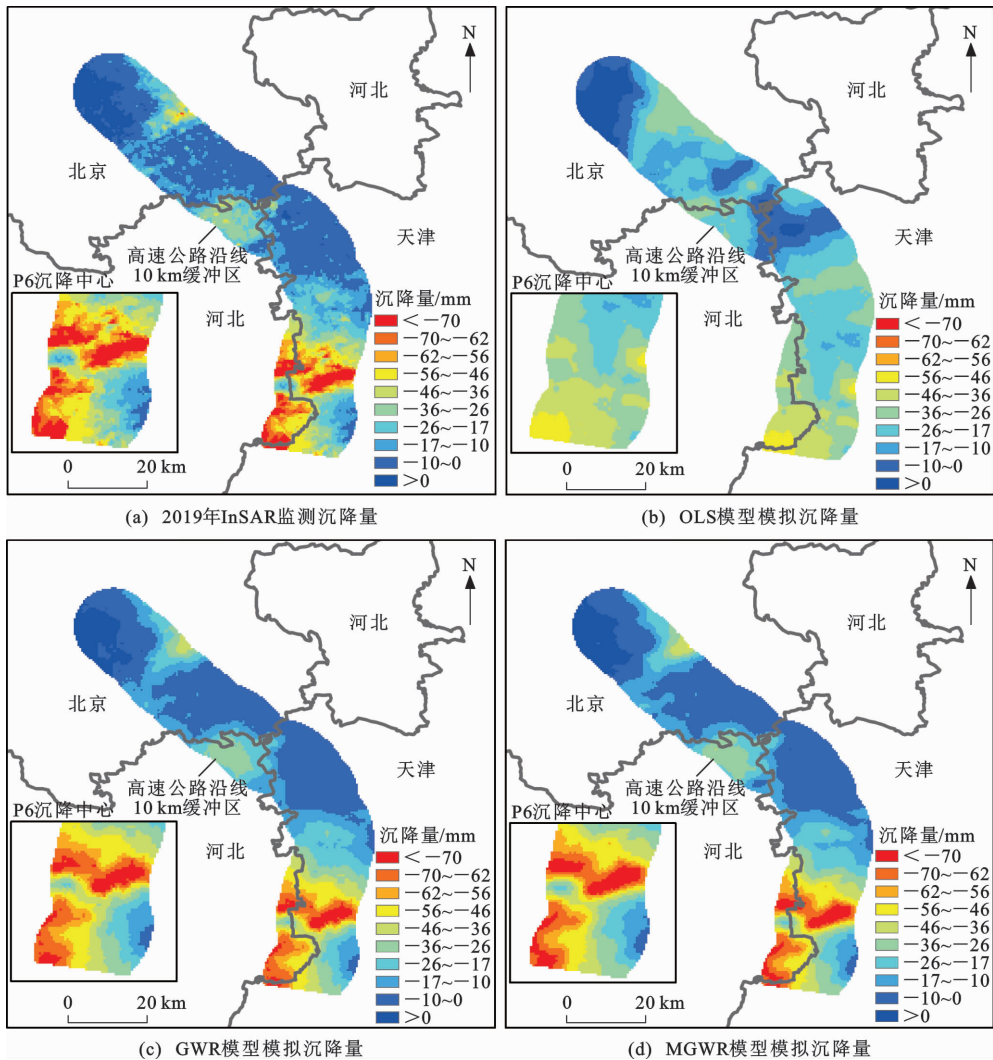


图 12 2019 年 InSAR 监测沉降量以及普通最小二乘模型、地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型空间模拟结果

Fig. 12 Settlement Monitored by InSAR in 2019 and Spatial Simulation Results of OLS, GWR and MGWR Models

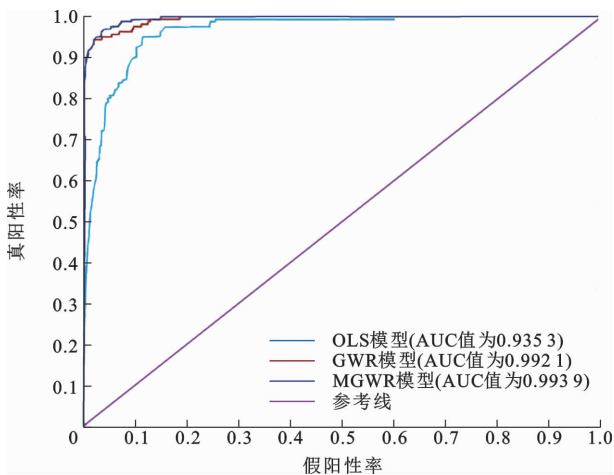


图 13 普通最小二乘模型、地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型的受试者工作特征曲线

Fig. 13 ROC Curves of OLS, GWR and MGWR Models

最优,判定系数达到 0.970 7,AUC 值为 0.993 9,表明有 99.39%的样本被正确模拟。实验证明:多尺

度地理加权回归模型比地理加权回归模型、普通最小二乘模型更适合对因变量进行模拟分析。

3.4.3 地面沉降影响因素

京沪高速公路北京—天津段沿线地面沉降的空间模拟结果显示,多尺度地理加权回归模型具有相对最优的精度和效果,因此可应用多尺度地理加权回归模型计算各个因子的影响程度。

系数绝对值可以看出每个影响因子对沉降的影响程度。通过统计京沪高速公路北京—天津段沿线 8 个影响因子对 2019 年沉降量的影响程度(表 6)可知,第四系沉积厚度是影响高速公路沿线地面沉降最大的因子,其次是第 II 承压含水层水位变化、第 III 承压含水层水位变化、道路距离、径流强度指数、距断裂带的距离、地形湿度指数、土地利用类型。图 14 对比了第四系沉积厚度的空间分布与京沪高速公路北京—天津段沿线 2019 年沉降量。从图 14 可

表 6 多尺度地理加权回归模型回归系数统计描述

Table 6 Statistical Descriptions of Regression Coefficients of MGWR Model

变量	平均值	标准差	最小值	中位数	最大值
第Ⅱ承压含水层水位变化	0.137	0.406	-0.648	0.006	1.834
第Ⅲ承压含水层水位变化	-0.132	0.202	-1.190	-0.059	0.653
第四系沉积厚度	-0.679	0.667	-2.851	-0.589	1.202
道路距离	-0.035	0.182	-0.858	-0.019	0.658
距断裂带的距离	0.004	0.266	-1.038	-0.000	1.082
径流强度指数	-0.005	0.002	-0.008	-0.005	-0.003
地形湿度指数	-0.003	0.016	-0.074	-0.002	0.027
土地利用类型	0.001	0.031	-0.056	-0.001	0.088

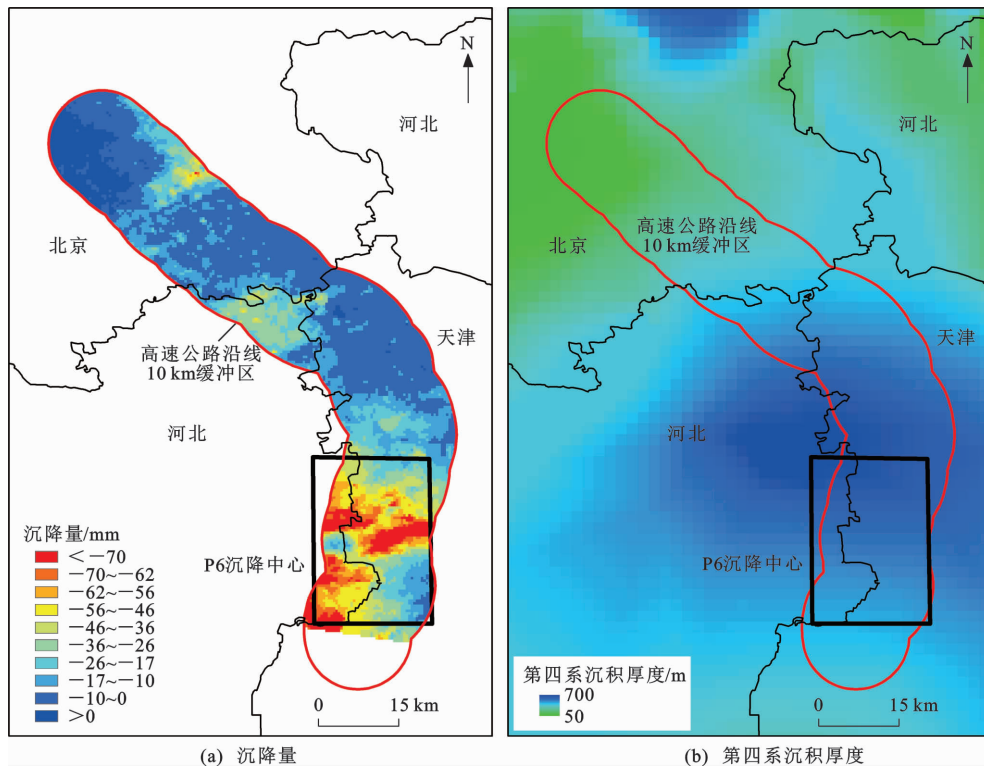


图 14 高速公路沿线 2019 年沉降量和第四系沉积厚度空间分布对比

Fig. 14 Spatial Distribution Comparison Between Settlement Along the Expressway in 2019 and Deposition Thickness of Quaternary

以看出,在武清—西青沉降中心(P6)附近,第四系沉积厚度与沉降量大的区域存在一致性,使得计算结果中的第四系沉积厚度成为影响最大的因子。整体来看,地下水因子影响程度也较大,说明研究区地面沉降也受地下水位变化的影响。在研究时间范围内,沉降速率大面积减小是不同层地下水位得到了一定程度的补给造成的。在地下水因子中,第Ⅱ承压含水层水位变化比第Ⅲ承压含水层水位变化的影响程度更大,这与田秀秀等的研究结果<sup>[20,43]</sup>一致。地形环境因子(地形湿度指数、径流强度指数)的影响程度较小,主要是因为研究区地处平原区,地形起伏本身不大。

### 4 结 语

(1)本文通过对 2017 年 1 月到 2020 年 3 月京沪高速公路北京—天津段沿线的 Sentinel-1B 卫星数据基于 SBAS-InSAR 技术进行地面沉降监测,得到研究区的地面沉降信息,并利用外部水准观测方法对 InSAR 监测结果进行评价,得到拟合判定系数为 0.843 7,验证了时序 InSAR 技术分析监测沉降的可靠性。

(2)研究区存在 6 个明显的沉降中心,京沪高速公路北京—天津段穿越了其中 3 个,分别为朝阳—通州沉降中心、廊坊沉降中心、武清—西青沉降中

心。全线沉降速率呈现明显的不均匀特征。通过收集研究区9个地面沉降影响因子,引入普通最小二乘模型、地理加权回归模型和多尺度地理加权回归模型对2019年沉降量进行空间模拟,结果显示多尺度地理加权回归模型具有更好的模拟能力,并且第四系沉积厚度和地下水位变化是影响地面沉降比较显著的因子。

(3)基于时序InSAR技术能够实现对京沪高速公路北京—天津段的全面持续沉降监测。将多尺度地理加权回归模型用于分析地面沉降影响因子的作用规律,能够为高速公路平稳安全运营提供保障,为沿线自然资源的开采、人类活动及城市规划提供科学依据。但是,本文选取的地面沉降影响因子有限,且高速公路的平稳运行还受到岩土体本身结构、复杂的地质条件、实际车流量和周围道路车流量等的影响,在未来研究中可开展更加深入的探讨。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 崔振东,唐益群. 国内外地面沉降现状与研究[J]. 西北地震学报,2007,29(3):275-278.  
CUI Zhen-dong, TANG Yi-qun. Domestic and International Recent Situation and Research of Land Subsidence Disasters [J]. Northwestern Seismological Journal,2007,29(3):275-278.
- [2] 张莉萍,曹建军,冯寿兆,等. 城市地面沉降及其防治措施综述[J]. 广东科技,2009(12):296-297.  
ZHANG Li-ping, CAO Jian-jun, FENG Shou-zhao, et al. Summary of Urban Land Subsidence and Its Prevention and Control Measures [J]. Guangdong Science & Technology,2009(12):296-297.
- [3] 贾三满,田芳,齐干. 城市“慢性病”:地面沉降成因及综合防控对策[J]. 城市与减灾,2019(3):22-27.  
JIA San-man, TIAN Fang, QI Gan. Urban “Chronic Disease”: The Origin and Comprehensive Control Countermeasures of Land Subsidence [J]. City and Disaster Reduction,2019(3):22-27.
- [4] 洪志涛. 嘉定新城主城区地面沉降影响因素及其调控措施综合分析[D]. 大连:辽宁师范大学,2023.  
HONG Zhi-tao. Comprehensive Analysis of Influencing Factors and Control Measures of Land Subsidence in the Main Urban Areas of Jiading New City [D]. Dalian:Liaoning Normal University,2023.
- [5] 武燕. 基于DS-InSAR方法的黄土区域高速铁路沿线沉降监测[D]. 成都:西南交通大学,2019.  
WU Yan. Subsidence Monitoring Along High Speed Railway in Loess Area Based on DS-InSAR Method [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.
- [6] 贾洪果. 高分辨率永久散射体雷达干涉及其应用于高速铁路沉降监测[D]. 成都:西南交通大学,2012.  
JIA Hong-guo. High-resolution Persistent Scatterer Radar Interferometry and Its Application to Monitoring Subsidence of High Speed Railway [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2012.
- [7] 于海若,宫辉力,陈蓓蓓,等. 京津冀地区地面沉降研究进展与思考[J]. 测绘科学,2020,45(4):125-133.  
YU Hai-ruo, GONG Hui-li, CHEN Bei-bei, et al. The Advance and Consideration of Land Subsidence in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Science of Surveying and Mapping,2020,45(4):125-133.
- [8] 姜乃齐. 基于InSAR技术的高速公路沿线沉降监测研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.  
JIANG Nai-qi. Research on Settlement Monitoring Along Freeways Based on InSAR Technology [D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2021.
- [9] 朱宝. 基于时序InSAR技术的成都道路形变监测分析与应用[D]. 成都:电子科技大学,2020.  
ZHU Bao. Analysis and Application of Road Surface Deformation Monitoring in Chengdu Using Time-series InSAR Technique [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2020.
- [10] 陈玉倩,伍吉仓,宋瑞庆,等. 利用哨兵卫星SAR影像数据监测西安地铁沿线地面沉降[J]. 工程勘察,2023,51(4):48-51,78.  
CHEN Yu-qian, WU Ji-cang, SONG Rui-qing, et al. Monitoring Ground Subsidence Along Xi'an Metro Line Using Sentinel Satellite SAR Images [J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2023,51(4):48-51,78.
- [11] 李洋洋,左小清,肖波,等. 利用InSAR和网络模型的昆明地铁沿线形变预测[J]. 测绘科学,2023,48(1):100-109,126.  
LI Yang-yang, ZUO Xiao-qing, XIAO Bo, et al. Using InSAR and Network Models to Predict the Deformation of Kunming Metro Line [J]. Science of Surveying and Mapping,2023,48(1):100-109,126.
- [12] 张新伟,马静,侯祖行,等. 北京大兴国际机场及周边交通干道形变时序InSAR监测[J]. 地球科学与环境学报,2023,45(1):131-142.  
ZHANG Xin-wei, MA Jing, HOU Zu-hang, et al. InSAR Monitoring on Deformation Time Series of Beijing Daxing International Airport and Its Surrounding Traffic Arteries, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2023,45(1):131-142.

- [13] 张永红,刘 冰,吴宏安,等.雄安新区2012~2016年地面沉降 InSAR 监测[J].地球科学与环境学报,2018,40(5):652-662.  
ZHANG Yong-hong, LIU Bing, WU Hong-an, et al. Ground Subsidence in Xiong'an New Area from 2012 to 2016 Monitored by InSAR Technique[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(5): 652-662.
- [14] 刘 冰,张永红,吴宏安,等.时间序列 InSAR 技术辅助下的北京市高速公路网沉降监测应用[J].测绘通报,2018(2):120-125.  
LIU Bing, ZHANG Yong-hong, WU Hong-an, et al. Subsidence Monitoring for Expressway Network in Beijing Based on Time-series InSAR Technique[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(2): 120-125.
- [15] 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 Xue-dong, GE Da-qing, XIAO Bin, et al. Study on Multi-track Integration PS-InSAR Monitoring the Land Subsidence Along the Highway: Taking Jinghu Highway (Beijing-Hebei) as an Example[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(10): 67-69.
- [16] LAZECKY M, RAPANT P, PERISSIN D, et al. Deformations of Highway over Undermined Ostrava-Svinov Area Monitored by InSAR Using Limited Set of SAR Images[J]. Procedia Technology, 2014, 16: 414-421.
- [17] DAI K R, LIU G X, LI Z H, et al. Monitoring Highway Stability in Permafrost Regions with X-band Temporary Scatterers Stacking InSAR[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1876.
- [18] DOBSON A J. An Introduction to Generalized Linear Models[M]. London: Chapman & Hall, 2001.
- [19] 孙才志,马奇飞,赵良仕.基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J].地理学报,2020,75(5): 1022-1035.  
SUN Cai-zhi, MA Qi-fei, ZHAO Liang-shi. Analysis of Driving Mechanism Based on a GWR Model of Green Efficiency of Water Resources in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1022-1035.
- [20] 田秀秀,王彦兵,杨翠玉,等.基于 GWR 模型的地下水超采对地面沉降影响分析[J].地理与地理信息科学,2021,37(3):97-102.  
TIAN Xiu-xiu, WANG Yan-bing, YANG Cui-yu, et al. Influence Analysis of Groundwater Withdrawal on Land Subsidence Based on Geographical Weighted Regression Model[J]. Geography and Geo-information Science, 2021, 37(3): 97-102.
- [21] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.
- [22] 卢宾宾,葛 咏,秦 昆,等.地理加权回归分析技术综述[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(9): 1356-1366.  
LU Bin-bin, GE Yong, QIN Kun, et al. A Review on Geographically Weighted Regression [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1356-1366.
- [23] 王 莉,王志明,杨 莹.基于 PS-InSAR 技术的哈大高铁扶余至德惠段地表形变监测[J].世界地质,2020,39(4):921-928.  
WANG Li, WANG Zhi-ming, YANG Ying. Monitoring on Surface Deformation from Fuyu to Dehui Section of Harbin-Dalian High-speed Railway Using PS-InSAR Method[J]. World Geology, 2020, 39(4): 921-928.
- [24] 张 天.基于 SBAS-InSAR 城市地表沉降的预测建模及原因分析[D].北京:北京建筑大学,2020.  
ZHANG Tian. Prediction Modeling and Analysis of Urban Land Subsidence Based on SBAS-InSAR[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [25] 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.
- [26] FOTHERINGHAM A S, YANG W B, KANG W. Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) [J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, 107(6): 1247-1265.
- [27] 祝新明,宋小宁,冷 佩,等.多尺度地理加权回归的地表温度降尺度研究[J].遥感学报,2021,25(8): 1749-1766.  
ZHU Xin-ming, SONG Xiao-ning, LENG Pei, et al. Spatial Downscaling of Land Surface Temperature with the Multi-scale Geographically Weighted Regression [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(8): 1749-1766.
- [28] 廖明杰.北京近30年 InSAR 地表沉降观测与演化态势分析[D].成都:西南交通大学,2022.  
LIAO Ming-jie. InSAR Surface Subsidence Observation in Beijing for the Past 30 Years and Evolutionary Trend Analysis [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong

- University, 2022.
- [29] 张永红, 吴宏安, 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 Yong-hong, WU Hong-an, KANG Yong-hui. Ground Subsidence over Beijing-Tianjin-Hebei Region During Three Periods of 1992 to 2014 Monitored by Interferometric SAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9): 1050-1058.
- [30] 李广宇, 张 瑞, 刘国祥, 等. Sentinel-1A TS-DInSAR 京津冀地区沉降监测与分析[J]. 遥感学报, 2018, 22(4): 633-646.  
LI Guang-yu, ZHANG Rui, LIU Guo-xiang, et al. Land Subsidence Detection and Analysis over Beijing-Tianjin-Hebei Area Based on Sentinel-1A TS-DInSAR[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2018, 22(4): 633-646.
- [31] 刘科伟, 李 俊, 郑光明. 区域地面沉降场 InSAR 精度验证[J]. 中国水运, 2021, 21(9): 142-144.  
LIU Ke-wei, LI Jun, ZHENG Gang-ming. Verification of InSAR Accuracy for Regional Ground Subsidence Field[J]. China Water Transport, 2021, 21(9): 142-144.
- [32] 杨 霄. 菏泽市地面沉降因子识别体系与预测评估模型研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.  
YANG Xiao. Research on the Identification System and Prediction Evaluation Model of Land Subsidence Factors in Heze City[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [33] 王海刚. 天津市地面沉降现状及预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.  
WANG Hai-gang. Current Situation and Tendency of Land Subsidence in Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- [34] 李海君. 华北平原地表形变演化特征与影响因素分析研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.  
LI Hai-jun. Analysis and Research on Evolution Characteristics and Influencing Factors of Ground Deformation in North China Plain[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021.
- [35] 张 扬. 武汉市地面沉降时空格局、驱动因子及水文效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.  
ZHANG Yang. Spatial-temporal Patterns, Driving Forces and Hydrological Effects of Land Subsidence: A Case Study of Wuhan City, China[D]. Wuhan: Wuhan University, 2021.
- [36] POURGHASEMI H R, BEHESHTIRAD M. Assessment of a Data-driven Evidential Belief Function Model and GIS for Groundwater Potential Mapping in the Koohrang Watershed, Iran[J]. Geocarto International, 2015, 30(6): 662-685.
- [37] ARABAMERI A, SAHA S, ROY J, et al. A Novel Ensemble Computational Intelligence Approach for the Spatial Prediction of Land Subsidence Susceptibility [J]. Science of the Total Environment, 2020, 726: 138595.
- [38] 张 勤, 赵超英, 陈雪蓉. 多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 885-896.  
ZHANG Qin, ZHAO Chao-ying, CHEN Xue-rong. Technical Progress and Development Trend of Geological Hazard Identification with Multi-source Remote Sensing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 885-896.
- [39] 蒋万钰, 陈 冠, 孟兴民, 等. 基于卷积神经网络模型的区域滑坡敏感性评价: 以川藏铁路沿线为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 203-211.  
JIANG Wan-yu, CHEN Guan, MENG Xing-min, et al. Evaluation of Regional Landslide Susceptibility Based on the Convolution Neural Network Model: A Case Study Along the Sichuan Tibet Railway[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(2): 203-211.
- [40] 杨 梅, 肖 静, 蔡 辉. 多元分析中的多重共线性及其处理方法[J]. 中国卫生统计, 2012, 29(4): 620-624.  
YANG Mei, XIAO Jing, CAI Hui. Multicollinearity in Multivariate Analysis and Its Processing Methods [J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2012, 29(4): 620-624.
- [41] 林石莲. 多重共线性修正方法的比较与应用研究[D]. 广州: 广东财经大学, 2017.  
LIN Shi-lian. Comparison and Application of the Correction Method of Multi-collinearity[D]. Guangzhou: Guangdong University of Finance & Economics, 2017.
- [42] 马雄威. 线性回归方程中多重共线性诊断方法及其实证分析[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2008(2): 78-81, 85.  
MA Xiong-wei. Diagnosis and Empirical Analysis on Multicollinearity in Linear Regression Model [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2008(2): 78-81, 85.
- [43] SHI L Y, GONG H L, CHEN B B, et al. Land Subsidence Prediction Induced by Multiple Factors Using Machine Learning Method[J]. Remote Sensing, 2020, 12(24): 4044.