



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405935

引用格式:葛畅,石云,龚文瑜,等.基于PS-InSAR技术的北京平原区地面沉降与影响因素[J].科学技术与工程,2025,25(18):7502-7510.

Ge Chang, Shi Yun, Gong Wenyu, et al. Analysis of land subsidence and influencing factors in the Beijing plain area based on PS-InSAR technology[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(18): 7502-7510.

基于PS-InSAR技术的北京平原区地面沉降与影响因素

葛畅^{1,2}, 石云^{1,2,3,4*}, 龚文瑜^{2,3}, 廖欣^{1,4}, 张国宏^{2,3}

(1. 防灾科技学院地球科学学院, 廊坊 065201; 2. 中国地震局地质研究所地壳形变研究室, 北京 100029;
3. 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 4. 资源环境灾变机理及风险监控重点实验室, 廊坊 065201)

摘要 采取系列防治措施后北京平原区的地面沉降发展趋势如何变化尚待深入分析。基于2017—2022年Sentinel-1A影像数据,采用PS-InSAR技术评估北京平原区地面沉降现状,利用地理探测器分析影响地面沉降的主要影响因素及其交互作用。结果表明:北京平原区地面沉降分布不均匀,最大沉降速率达到90 mm/a,非漏斗区的沉降速率自2020—2021年表现出一定程度的减缓趋势,漏斗区的沉降速率的减缓趋势则较不明显。地面沉降的主要影响因素首先是地下水,其次是可压缩层厚度。所有影响因素交互作用后均表现为因子增强关系,其中地下水与地铁交互作用对地面沉降的影响最为显著,反映出地下水开采和城市建设共同驱动北京平原区的地面沉降。研究结果可为北京平原区地面沉降的全面评估、准确预测与综合防治提供科学依据。

关键词 北京平原区; 地面沉降; 影响因素; PS-InSAR; 地理探测器

中图法分类号 P237;

文献标志码 A

Analysis of Land Subsidence and Influencing Factors in the Beijing Plain Area Based on PS-InSAR Technology

GE Chang^{1,2}, SHI Yun^{1,2,3,4*}, GONG Wen-yu^{2,3}, LIAO Xin^{1,4}, ZHANG Guo-hong^{2,3}

(1. Institute of Disaster Prevention, Faculty of Earth Sciences, Langfang 065201, China;

2. Laboratory of Crustal Deformation, Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China;

3. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Beijing 100029, China;

4. Key Laboratory of Resource and Environmental Disaster Mechanism and Risk Monitoring, Langfang 065201, China)

[Abstract] Further analysis is needed to comprehend how the trend of land subsidence in the Beijing plain area evolves following the implementation of a series of prevention and control measures. Based on the Sentinel-1A image data from 2017 to 2022, the PS-InSAR technique was employed to assess the current situation of land subsidence in the plain area of Beijing, and the geographical detector was utilized to analyze the main influencing factors of land subsidence and their interaction effects. The findings reveal the following: The main conclusions were as follows. The distribution of land subsidence in Beijing plain is uneven, and the maximum subsidence rate reaches 90 mm/a. The subsidence rate of non-funnel area shows a certain degree of slowing trend from 2020 to 2021, while the slowing trend of subsidence rate in funnel area is not obvious. Groundwater as the primary influencing factor of land subsidence, with the thickness of the compressible layer closely following. The interaction among all influencing factors demonstrates a factor enhancement relationship, with the interaction between groundwater and subway infrastructure exerting the most significant impact on land subsidence. This highlights that groundwater and urban construction jointly propel land subsidence in the Beijing plain area. These research findings provide a scientific foundation for the comprehensive assessment, precise prediction, and integrated prevention and control of land subsidence in the Beijing plain.

[Keywords] Beijing plain area; land subsidence; influencing factors; PS-InSAR; geographic detector

收稿日期: 2024-08-07 修订日期: 2025-04-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费研究生科技创新基金(ZY20240306); 地震动力学国家重点实验室开放基金(LED2022B06); 地震科技星火项目(XH23063A); 国家自然科学基金(41602274)

第一作者: 葛畅(2000—), 女, 汉族, 山东德州人, 硕士研究生。研究方向: 地震动力学与地球探测技术。E-mail: gechang2924@163.com。

* 通信作者: 石云(1981—), 女, 汉族, 湖南湘潭人, 博士研究生, 副教授。研究方向: 地壳形变与地震流体关系。E-mail: 444739691@qq.com。

地面沉降是一种不可逆转的环境和资源损失,其形成时间长,治理难度大,容易引发一系列的地质灾害^[1]。地面沉降的不均匀性不仅会导致地面发生坍塌和建筑物墙体出现裂缝,还会给交通基础设施带来诸多负面影响,对人类的生命安全和社会的经济发展造成了严重威胁^[2]。作为中国地面沉降严重的城市,北京采取了包括划定地下水禁采区和限采区范围、实施京版“水十条”、南水北调入京等一系列防治政策和措施之后,地面沉降趋势是否得到有效缓解甚至遏制,这个问题值得深入探讨。

监测地面沉降的传统大地测量技术包括水准测量、基岩和分层标记测量、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)等,这些技术偏重定点测量,虽具备较高测量精度和精细监测能力,但监测范围小,实地测量人力成本高,且无法连续实时监测地面沉降变化^[3]。为了研究北京平原区大范围和长时段连续的地面沉降,应用永久散射体合成孔径雷达干涉测量(permanent scatterer interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR),该技术通过提取具有稳定特性的 PS 点,不仅可以进行长时间序列的监测,而且可以降低时空失相干的影响,在长期监测城市地面缓慢沉降方面具有明显优势^[4]。

前人围绕城市地面沉降的影响机制开展了系列研究,提出了地下水开采是北京、天津、上海等地区地面沉降的决定性因素^[5],同时也指出地面沉降与其他多种影响因素之间存在联系,例如在上海地区,地面沉降与地下水开采、降水量和城市化进程之间存在一定的空间相关性^[6],天津地区的沉降与地下水过度开采、地面载荷增加以及地质构造密切相关^[7],北京地区的沉降受到地下水位变化、地质构造和人口密度等因素的共同影响^[8]。目前在城市地面沉降监测和影响因素研究方面已经取得了丰硕的成果,但是大部分定量研究侧重从单因子角度分析影响机制,对于多个影响因素的交互综合作用讨论不足。因此,本文研究选取北京平原区作为研究区域,定量开展了多因素对地面沉降的影响及机制分析。

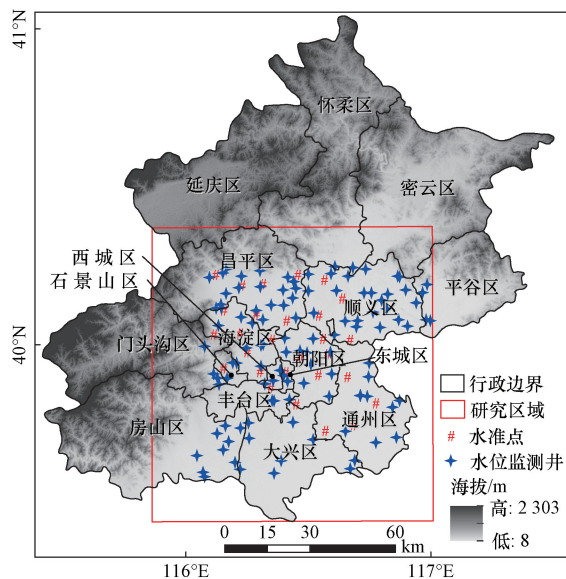
考虑到早期 Sentinel-1 卫星数据质量稳定性和标准分幅的调整,现以 2017—2022 年 Sentinel-1A 影像为数据源,基于 PS-InSAR 技术获取北京平原区地面沉降现状,采用外部水准观测方法对 InSAR 监测结果进行精度评定,并利用地理探测器模型揭示研究区地面沉降的主要影响因素及因素间的交互作用。以期为深入认识北京平原区地面沉降的影响机制,为进一步采取有效的防范措施提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区与数据来源

北京位于华北平原,地势西北高,东南低,北部、东北部山地地形为燕山山脉西段支脉,西部山地地形为太行山脉的东北余脉,东南部为永定河、潮白河、北运河、拒马河等水系共同作用下形成的冲积扇平原。北京地区气候以暖温带半湿润大陆季风气候为主,是为数不多的以地下水为主要水源的特大城市。北京平原区第四系是在永定河、潮白河、温榆河、大石河等极大河流的冲、洪(湖)积作用下形成的,沉积环境复杂^[9]。在西北部的山前地带和河流冲积扇的中上部,第四系厚度为 20~40 m,为单一的砂、卵砾石层或砂、卵砾石顶部覆盖薄层黏性土^[10]。作为高速发展的城市中心区,北京平原区的地面沉降问题给城市可持续健康发展带来严重威胁。本研究区的范围如图 1 所示。

本文数据主要包括获取沉降数据的 Sentinel-1A 数据和沉降影响因子数据。Sentinel-1A 于 2014 年 4 月发射成功,同一区域单颗卫星的重访周期为 12 d^[11],该卫星搭载 C 波段雷达成像系统,具有 4 种成像模式。由于研究范围为北京平原区域,考虑到数据处理的效率,参照《时间序列 InSAR 地表形变监测数据处理规范》^[12],每季度获取一景影像,选用 2017 年 7 月—2022 年 10 月共 22 景 Sentinel-1A 影像进行处理,成像模式为干涉宽幅(interferometric wide swath, IW)成像模式,空间分辨率为 5 m × 20 m。另外,地面沉降的演变受到人为因素和自然因素的共同作用,在选取地面沉降的影响因素时,基



审图号: GS(2024)0650 号

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

于前人研究成果^[13],考虑到数据可获取性,本文研究筛选出7种主要影响因素,包括距离铁路的距离、距离断层的距离、距离地铁的距离、高程、地下水标高、可压缩层厚度、土地利用,所用数据来源如表1所示。

表1 研究区数据来源

Table 1 Data source of the study area

| 名称 | 时间 | 来源(网站) |
|----------------|-------------|--|
| Sentinel-1A 数据 | 2017—2022 年 | 美国航天航空局 (https://search.asf.alaska.edu/) |
| 卫星精密轨道数据 | 2017—2022 年 | 欧空局哥白尼数据中心 (https://scihub.copernicus.eu/gnss) |
| 水准数据 | 2018—2019 年 | 中国测绘科学院 (http://www.casm.ac.cn/) |
| 铁路、地铁线路图 | 2022 年 | 地理国情监测中心 (https://ngcc.cn) |
| 断层数据 | 2003 年 | 中国地理空间数据集 (https://github.com/gmt-china/) |
| 30 m 分辨率数字高程模型 | 2014 年 | 美国地质勘探局 (https://earthExplorer.usgs.gov) |
| 地下水数据 | 2017—2022 年 | 中国地质环境监测院 (http://www.cigem.cgs.gov.cn/) |
| 可压缩层厚度图 | 2010 年 | 地质云平台 (https://cgs.gov.cn) |
| 10 m 土地利用 | 2017—2022 年 | 欧洲航天局 (https://viewer.esa-worldcover.org) |

1.2 研究方法

1.2.1 PS-InSAR 技术

2000年,意大利学者 Ferretti 等^[14]提出了 PS-InSAR 技术。假设有 $N + 1$ 景覆盖同一地区的单视复数(single look complex, SLC)影像,通过分析这些影像的时空基线和多普勒质心频率差异,可以选择一张最佳的主影像,然后将其余 N 张副影像配准到主影像的坐标系下,利用精密轨道数据、成像几何模型和外部数字高程模型,对这些配准后的影像进行差分处理,以消除平地 and 地形相位的影响,得到 N 个差分干涉对^[29]。此时干涉对 $\psi_{i,j}$ 的差分相位为

$$\psi_{i,j} = \psi_{\text{def},i,j} + \psi_{\text{topo},i,j} + \psi_{\text{atm},i,j} + \psi_{\text{orbit},i,j} + \psi_{\text{noise},i,j} \quad (1)$$

式(1)中: $\psi_{\text{def},i,j}$ 为雷达视线(line of sight, LOS)向的形变相位; $\psi_{\text{topo},i,j}$ 为残余轨道误差; $\psi_{\text{atm},i,j}$ 为大气不均匀所产生的延迟相位; $\psi_{\text{orbit},i,j}$ 为引入 DEM 不精确导致的残余地形相位误差; $\psi_{\text{noise},i,j}$ 为随机噪声相位^[15]。

$$\psi_{\text{def},i,j} = -\frac{4\pi}{\lambda}vT^k \quad (2)$$

$$\psi_{\text{topo},i,j} = -\frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_{\perp}^k}{R\sin\theta}\sigma_h \quad (3)$$

式中: v 为线性形变相位速率; λ 为雷达传感器波长; T^k 为第 K 个干涉对的时间跨度; B_{\perp}^k 为第 K 个干涉对的垂直基线; R 为地面点目标与 SAR 传感器的距离; σ_h 为引入的 DEM 的自身精度; θ 为卫星入射角。

然后,移除大气延迟相位、残余轨道误差、DEM 残余地形相位误差,结合相干系数(coherence coefficient, CC)阈值和振幅离散指数(amplitude dispersion index, ADI)阈值精选出 PS 点,最后通过一定的积分方法获取 PS 点 LOS 向的形变时间序列^[16]。

1.2.2 地理探测器模型

2017年,王劲峰等^[17]提出了地理探测器模型,旨在探测空间分异性及其背后的驱动因素。因子探测的关键在于通过衡量环境因子和地理事物的空间变化模式,来识别出主导和影响地理事物分布的关键环境因素。这种一致性分析为揭示自然环境与人文地理过程之间的相互作用关系提供了重要依据^[17]。交互探测是通过分析多个影响因素之间的耦合关系,探讨不同因素之间的相互作用机制,从而更全面地揭示事物发展的内在规律^[17]。探测结果用 q 值来度量,其计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (4)$$

式(4)中: h 为发生风险指标的分层, $h = 1, 2, \dots, L$,其中 L 为分层的个数; N_h 和 N 分别为层 h 的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 的方差; q 的范围为 $[0, 1]$, q 越接近0,表示因子 X 对地面沉降分布的空间格局影响力越弱。

为保证分析结论的可信度,用 p 值表征 q 的统计量显著性,在一般情形下,如果 p 低于预定的显著性水平,则认为结果在这个设定程度上存在着统计学显著性,如 $p < 0.01$ 表示通过 99% 的显著性检验^[17],交互作用探测判断方式如表2所示。

表2 交互作用探测判断^[17]

Table 2 Interaction detection judgment^[17]

| 判断标准 | 作用类型 |
|--|----------|
| $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ | 非线性增强 |
| $q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$ 且 $q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) + q(X_2)$ | 双因子增强 |
| $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$ | 非线性减弱 |
| $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$ | 单因子非线性减弱 |
| $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$ | 相互独立 |

2 结果分析

2.1 研究区沉降时空分布特征分析

本文研究基于 PS-InSAR 技术,通过 SARscape 软件对 2017—2022 年的 22 景 Sentinel-1A 影像数据进行处理,获取了 2017—2022 年北京平原区年平均沉降速率图,如图 2 所示。结果发现:北京平原区沉降速率呈现出空间不均匀分布,其中最大年平均沉降速率达到 91 mm/a,最大累计沉降量达到 467 mm,主要沉降区分布在海淀西北部、昌平东南部、朝阳东部、通州西部和大兴南部地区。本研究区的沉降区空间分布特征与 Dong 等^[18]的研究结果一致。其中,位于海淀西北部沉降区的沉降面积约为 111 km²,年平均沉降速率为 45 mm/a;位于昌平东南部沉降区的沉降面积约为 167 km²,年平均沉降速率为 78 mm/a;位于朝阳区东部和的沉降面积约为 283 km²,年平均沉降速率为 91 mm/a;位于通州区西部沉降区的沉降面积约为 243 km²,年平均沉降速率为 89 mm/a;位于大兴南部沉降区的沉降面积约为 337 km²,年平均沉降速率超过 73 mm/a。

为了进一步明确地面沉降的速率变化特征,结合北京平原区的沉降信息,选择 5 个沉降漏斗的特征点和 5 个非沉降漏斗的特征点进行分析,分别为海淀区苏家坨和大牛坊(A₁、A₂)、昌平区史各庄和小汤山(B₁、B₂)、朝阳区金盏乡和青年路汽配城(C₁、C₂)、通州区新华小区和东小营(D₁、D₂)、大兴区安定镇和庞各庄(E₁、E₂)地区,特征点的具体位置如图 2 所示,并绘制其 2017—2022 年累积形变序列图,如图 3 所示。结果显示,在研究时段内,在沉降漏斗区选取的特征点 A₁、B₁、C₁、D₁、E₁ 的沉降速率较快(不低于 71 mm/a),累计沉降量分别为 -397、-369、-387、-449、-357 mm;在非沉降漏

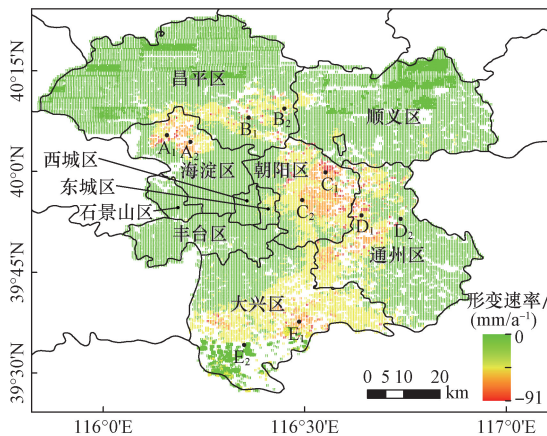


图 2 2017—2022 年年平均形变速率图

Fig. 2 Annual average deformation rate map from 2017 to 2022

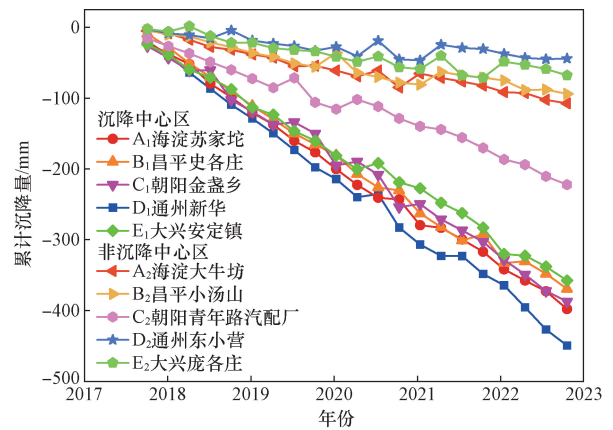


图 3 特征点累积形变序列图

Fig. 3 Cumulative deformation map of feature points

斗区选取的特征点中,C₂点的沉降速率中等(达到 44 mm/a),从 2020 年开始沉降速率有所减缓,累计沉降量为 -222 mm;在非沉降漏斗区选取的特征点中,A₂、B₂、D₂、E₂点的沉降速率较缓(不高于 19 mm/a),从 2021 年开始沉降速率有所减缓,累计沉降量分别为 -96、-94、-66、-44 mm。由此表明,在 2017—2022 年间,在非沉降漏斗区,地面沉降速率表现出一定程度的减缓趋势;在沉降漏斗区,沉降速率减缓趋势较不明显。

2.2 地面沉降速率及其精度验证

为定量评定 PS-InSAR 技术的监测精度,利用 2019—2020 年的 26 个水准监测数据与 PS-InSAR 监测的相同时间段内的 PS 数据进行单点精度检验,由于水准数据为垂向数据,需要将 PS-InSAR 获取的视线向形变转换为垂直形变后进行比较,精度验证结果如图 4 所示。结果发现:PS-InSAR 数据和水准数据表现出相同的形变特征,两者呈现出显著的线性相关性,相关系数(R²)达到 0.94。由此表明,PS-InSAR 监测的数据结果质量较好,能够较为准确地展示研究区的地面沉降现状。

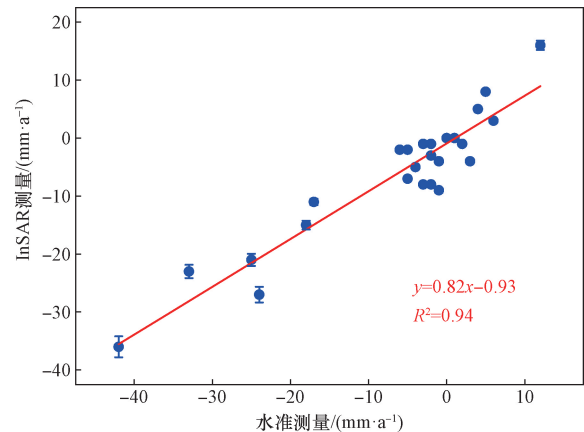


图 4 InSAR 与水准数据验证

Fig. 4 InSAR and leveling data validation

2.3 地面沉降影响因素分析

2.3.1 主要影响因素

基于 PS-InSAR 技术获取的北京平原区的地面沉降速率,发现研究区内地面沉降呈现出空间分异现象,因此本文研究利用地理探测器模型对地面沉降的影响因子进行定量分析。因变量 Y 为 PS-InSAR 获取的研究区的年平均沉降速率,自变量 X 为地面沉降影响因素,其中,距离铁路的距离为 X_1 ,距离断层的距离为 X_2 ,距离地铁的距离为 X_3 ,高程数据为 X_4 ,地下水位标高为 X_5 ,可压缩层厚度为 X_6 ,土地利用为 X_7 。地理探测器模型处理的变量为离散型数据,本文研究采用自然间断法对地面沉降数据和影响因素数据进行离散化处理^[17],然后依据时序处理时的 PS 点建立研究区的采样点,对数据进行重采样,生成地理探测器处理所需的数据。

利用地理探测器模型计算了地面沉降影响因素的影响力(q),结果如表 3 所示,影响力值由大到小分别为:地下水位标高 X_5 ($q = 0.300$, $p = 0.000$)、可压缩层厚度 X_6 ($q = 0.182$, $p = 0.000$)、距离地铁的距离 X_3 ($q = 0.090$, $p = 0.000$)、土地利用 X_7 ($q = 0.021$, $p = 0.000$)、距离铁路的距离 X_1 ($q = 0.016$, $p = 0.000$)、高程数据 X_4 ($q = 0.014$, $p = 0.000$) 和距离断层的距离 X_2 ($q = 0.006$, $p = 0.000$)。所有的因子 q 均大于 0.001,说明这些因子均对地面沉降的空间分异具有显著的解释力^[17]。结果表明,以地下水位标高代表的地下水位下降是导致北京地面沉降的主要原因,这一结论与过往研究一致^[19]。由于地下水位和可压缩层厚度的影响力比较大($q > 0.1$),下面进一步对这两个主要影响因素进行深入分析。

随着北京地区开展自备井置换、南水进京、地下水禁、限采以及地下水回补等一系列措施,地下水位得以有效回升。根据本文研究选取的 10 个地面沉降特征点,分析了地面沉降量与地下水位的相关性,结果如图 5 所示。结果发现,地下水位回升与地面沉降速率减缓存在明显不同步现象。其中,在地面沉降漏斗区域(A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1),虽然地下水

位呈现回升趋势,但是地面沉降速率并未表现出明显减缓趋势。由此可见,地下水位的回升尚未有效遏制沉降漏斗的持续发展趋势;在非沉降漏斗区域(A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 、 E_2),随着地下水位的回升,地面沉降速率有所减缓,在研究时间段内均表现出不同程度的减缓现象,如 B_2 的沉降速率从 19 mm/a 减缓到 12 mm/a。总之,在研究时段内,相较地下水位的普遍呈现明显回升趋势,地面沉降速率的减缓效果并不十分显著,这意味着地下水位回升对地面沉降的遏制一方面是一个长期缓慢的作用过程^[20],另一方面仅依靠地下水位回升来治理地面沉降的效果可能相对有限,这进一步凸显了地面沉降是多种因素综合作用的结果。

可压缩层厚度作为导致地面沉降的重要地质条件因素,其影响程度不可忽视。本文基于北京平原区第四纪可压缩沉积物的厚度分布[如图 6(a)]和 PS-InSAR 技术获取的累计沉降数据,将研究区内的可压缩沉积物的厚度分为 5 类,通过 ArcGIS 软件计算了 2017—2022 年各可压缩沉积厚度的累计沉降量,发现不同压缩层的沉降量存在一定差异。如图 6(b)所示,最大累积变形主要发生在可压缩沉积厚度为 90~210 m 的区域,其次为 210~250 m 的区域。据此推测,研究区地面沉降变形主要发生在厚度超过 90 m 的可压缩沉积物中。这暗示着,在平原和盆地等具有较厚可压缩层地质条件的地区,开展城市建设可能面临更高的地面沉降风险。

随着人口增长和城市建设的飞速发展,社会对水资源的需求不断增加,导致地下水被大量开采,进而引起地下水位下降,导致地层结构失衡,从而在地表出现沉降现象。地层中存在一些由黏土、泥炭等细粒土组成的可压缩性强的土层,在荷载作用下易发生压缩变形,从而导致地面下沉。基于上述影响因素分析认为,在北京平原区,地下水开采引起的水位下降是地面沉降形成的关键外在因素,可压缩层厚度则是地面沉降的关键内在因素。然而,地面沉降是由多种因素共同作用而造成,因此,需要进一步分析这些因素之间的交互作用,以综合评估它们对地面沉降的影响。

2.3.2 影响因子交互作用分析与讨论

交互探测能够揭示不同影响因素之间的相互作用关系,并评估这种相互作用是否会增强或减弱对分析变量的解释力^[17]。为进一步揭示影响因素之间的交互作用机制,将影响因素进行交互探测,结果如图 7 所示。结果表明,交互作用对地面沉降影响最大的因素为地下水和地铁,影响力达到 0.388;其次为地下水位和可压缩层厚度,影响力为

表 3 地面沉降影响因子探测

Table 3 Detection of land subsidence impact factors

| 指标 | q | p |
|----------------|-------|-------|
| 地下水位标高 X_5 | 0.300 | 0.000 |
| 可压缩层厚度 X_6 | 0.182 | 0.000 |
| 距离地铁的距离为 X_3 | 0.090 | 0.000 |
| 土地利用 X_7 | 0.021 | 0.000 |
| 距离铁路的距离 X_1 | 0.016 | 0.000 |
| 高程数据为 X_4 | 0.014 | 0.000 |
| 距离断层的距离为 X_2 | 0.006 | 0.000 |

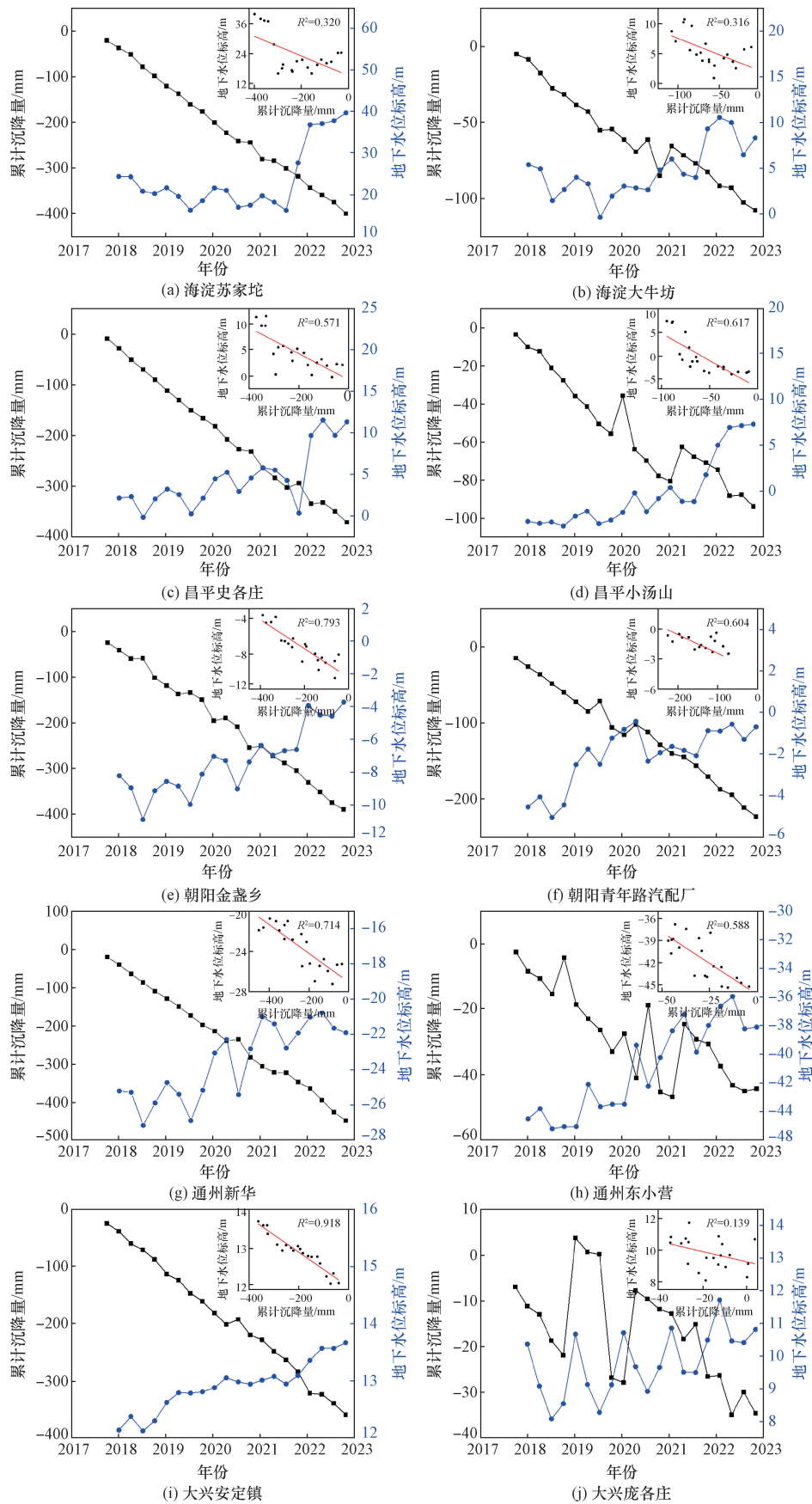


图5 地面沉降与地下水位变幅关系

Fig. 5 Relationship between land subsidence and groundwater level fluctuation

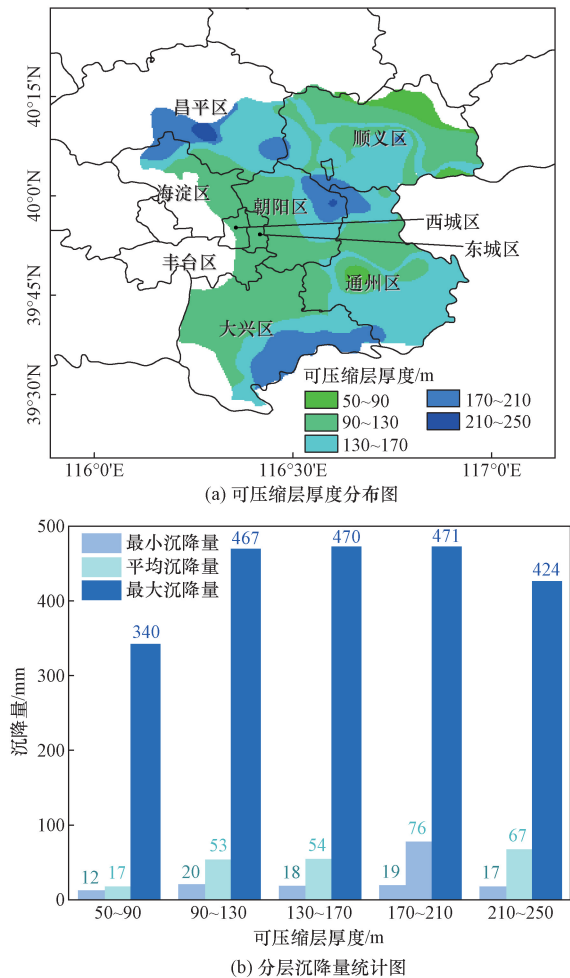


图 6 地面沉降与可压缩层厚度关系图
Fig. 6 Relationship between land subsidence and compressible layer thickness

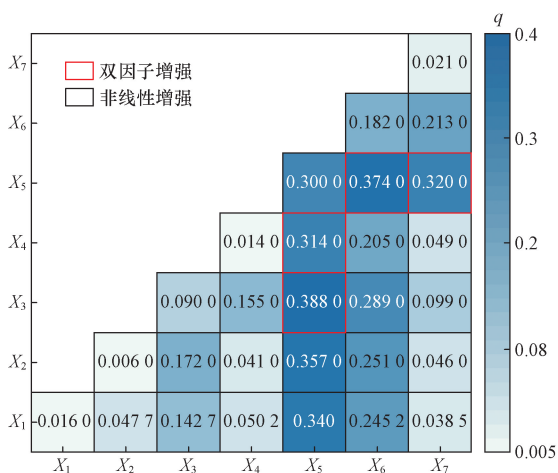


图 7 影响因素交互探测结果
Fig. 7 Interactive detection results of influence factors

0.374。影响因素交互作用后均表现为因子增强的关系,其中大多数表现为非线性增强,即双因子综合作用大于单因子累加作用,少数表现为双因子增

强,即双因子综合作用大于单因子作用。这就意味着必须采取综合防治措施,才能实现对地面沉降的有效遏制。

对于地下水和地铁交互作用后对地面沉降的贡献最大,推测认为,地铁沿线路段通常采用不透水材料作为地表覆盖,限制了地表降水的渗透补给能力,一定程度减少了地下水的自然补给^[21],同时地铁运行期间,反复的动荷载和振动导致周边土层压实,可能导致沉降^[22]。此外,长期运行的地铁沿线附近,往往城市建筑密度高,巨大的建筑重量增加了地面承载负荷,将进一步加剧地面沉降^[23]。因此,地下水和地铁这两个因素交互作用的综合效果更加显著,可以更大程度加剧地面沉降的发生。然而,单影响力最大的地下水位和可压缩层厚度,交互作用后影响力并不是最大,推测认为,随着地下水位的下降,可压缩层内孔隙水被排出,土壤的有效应力增加,引发可压缩层变形,从而加剧地面沉降的发生^[24];而可压缩层厚度越小,其孔隙中存储的地下水越少,在开采相同水量情况下,地下水下降速率越快,最终导致地面沉降率越快^[25]。两个因素之间存在明显的相互影响关系,因此,两者的综合作用反而小于两者作用的简单累加。

3 结论

本文研究区为北京平原,以 2017 年 7 月—2022 年 10 月的 22 景 Sentinel-1A 影像为数据源,基于 PS-InSAR 技术获取研究区地面沉降现状,采用外部水准观测方法对 InSAR 监测结果进行精度评定,并通过地理探测器模型分析地面沉降的主要影响因素及影响因素之间的交互作用,得出如下结论。

(1)北京平原区地面沉降空间分布不均匀,在非沉降漏斗区,沉降速率在 2020—2021 年间开始有所减缓;在沉降漏斗区,沉降速率的减缓趋缓并不明显。这意味着在沉降漏斗区,可能还需要更长时间或者采取更加综合的措施来遏制地面沉降的持续下降。

(2)影响因素分析表明,地下水位和可压缩层厚度是北京平原区地面沉降的两大主导因素。截至 2022 年 10 月,尽管已实施系列措施促使地下水位普遍呈回升,但地面沉降速率的减缓趋势并不同步。地面沉降变形主要发生在厚度超过 90 m 的可压缩沉积物中,因此在具备这类地质条件的区域开展城市建设时,需要更加重视地面沉降风险。

(3)影响因素交互作用后均为因子增强关系,其中地下水位与地铁的交互作用对地面沉降的影响力最大,地铁作为现代城市交通的重要组成部分

分,随着城市建设而迅速发展,因此,地下水开采和城市建设共同驱动着北京平原区的地面沉降。

总之,在未来北京平原区地面沉降的防治中,全面把握地面沉降的成因机制,不仅要考虑可压缩层厚度等自然条件,还需要考虑地下水开采和地铁运行等城市建设活动的相互影响和协同效应,采取综合性的防治措施,才能为北京平原区的健康可持续发展提供有力保障。

参 考 文 献

- [1] 蒋凤,薛东剑,姚鸿,等. 采用时序 InSAR 技术的广汉市地面沉降监测及影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(15): 6146-6153.
Jiang Feng, Xue Dongjian, Yao Hong, et al. Land subsidence monitoring and influencing factors analysis in Guanghan City using time-series InSAR technology[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(15): 6146-6153.
- [2] 李晓影. 城市地面沉降监测技术方法与应用[J]. 北京测绘, 2022, 36(8): 1102-1107.
Li Xiaoying. Urban land subsidence monitoring technology method and application[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2022, 36(8): 1102-1107.
- [3] 樊昱初,吕义清,杨娜. 基于 SABS-InSAR 的保德矿区地表形变监测与分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 941-951.
Fan Yuchu, Lü Yiqing, Yang Na. Monitoring and analysis of surface deformation in Baode mining area based on SABS-InSAR[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(3): 941-951.
- [4] Matteo R, Daniela P, Emanuela T, et al. Detection and monitoring of tunneling induced ground movements using sentinel-1 SAR interferometry[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 639-653.
- [5] 赵龙,蒋小伟,李玉梅,等. 近 10 年北京平原区地下水水位变化及与地面沉降的关系研究[J]. 地质学报, 2024, 98(3): 1-15.
Zhao Long, Jiang Xiaowei, Li Yumei, et al. Groundwater level changes and its impact on land subsidence in the Beijing Plain during the recent 10 years[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(3): 1-15.
- [6] Li M G, Chen J J, Xu Y S, et al. Effects of groundwater exploitation and recharge on land subsidence and infrastructure settlement patterns in Shanghai[J]. Engineering Geology, 2021, 282(5): 105995-105607.
- [7] Li X Y, Zhang D L, Hou Y J. Analysis of shield tunnel ground deformation characteristics and affecting factors in water-rich soft stratum: a case study on the section tunnel of Tianjin Metro Line 6[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 6208-6308.
- [8] 程蕊,朱琳,周佳慧,等. 北京潮白河冲洪积扇地面沉降时空异质性特征及驱动因素分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1182-1192.
Cheng Rui, Zhu Lin, Zhou Jiahui, et al. Spatio temporal heterogeneity and driving factors of land subsidence in middle-lower part of Chaobai River alluvial fan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1182-1192.
- [9] 张铁勤,何祺胜,荆琛琳,等. 基于 InSAR 的北京市平原区地下水动态监测[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(12): 16-22.
Zhang Tieqin, He Qisheng, Jing Chenlin, et al. Dynamic monitoring of groundwater in the plain area of Beijing based on InSAR[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(12): 16-22.
- [10] 雷坤超,马凤山,罗勇,等. 北京平原区现阶段主要沉降层位与土层变形特征[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 442-458.
Lei Kunchao, Ma Fengshan, Luo Yong, et al. Main subsidence layers and deformation characteristics in Beijing plain at present[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 442-458.
- [11] 杨魁,杨建兵,江冰茹. Sentinel-1 卫星综述[J]. 城市勘测, 2015, 4(2): 24-27.
Yang Kui, Yang Jianbing, Jiang Bingru. Sentinel-1 satellite overview[J]. Urban Geotechnical Investigation & Survey, 2015, 4(2): 24-27.
- [12] CH/T 6006—2018《时间序列 InSAR 地表形变监测数据处理规范》概述[J]. 测绘标准化, 2019, 35(2): 24.
CH/T 6006—2018 ‘Specification of time series InSAR data processing for ground deformation monitoring’ overview[J]. Standardization of Surveying and Mapping, 2019, 35(2): 24.
- [13] 肖巍峰,杨文涛,李朝奎,等. 基于 PS-InSAR 数据的北京市地面沉降影响因素及其交互作用探测[J]. 地理信息世界, 2020, 27(6): 7-13.
Xiao Weifeng, Yang Wentao, Li Chaokui, et al. Detection of influence factors and their interaction of land subsidence in Beijing based on PS-InSAR[J]. Geomatics World, 2020, 27(6): 7-13.
- [14] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(4): 8-20.
- [15] Zhou C F, Gong H L, Chen B B, et al. Quantifying the contribution of multiple factors to land subsidence in the Beijing Plain, China with machine learning technology[J]. Geomorphology, 2019, 335: 48-61.
- [16] 晏霞,刘媛媛,赵振宇. 利用时序 InSAR 技术监测南水进京后北京平原地区的地面沉降[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(6): 2351-2361.
Yan Xia, Liu YuanYuan, Zhao Zhenyu. Land subsidence monitoring after the start of the South to North Water Transfer in the Beijing plain based on multi-temporal InSAR[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(6): 2351-2361.
- [17] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [18] Dong J F, Guo S K, Wang N, et al. Tri-decadal evolution of land subsidence in the Beijing plain revealed by multi-epoch satellite InSAR observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 286(1): 113446-113453.
- [19] Zhao D N, Chen B B, Gong H L, et al. Unraveling the deformation and Water Storage characteristics of different aquifer groups by integrating PS-InSAR technology and a spatial correlation model[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17(9): 2501-2515.
- [20] 罗跃,叶淑君,吴吉春,等. 上海市地下水位大幅抬升条件下土层变形特征分析[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 243-254.
Luo Yue, Ye Shujun, Wu Jichun, et al. Characterization of land subsidence during recovery of groundwater levels in Shanghai[J].

- Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 243-254.
- [21] 鲁朝朝, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 南水北调前后京津城际铁路北京段地面沉降演化特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1959-1968.
- Lu Zhaozhao, Chen Beibei, Gong Huili, et al. Evolution characteristics of land subsidence in Beijing section of Beijing-Tianjin intercity railway before and after the South-to-North Water Diversion Project[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(12): 1959-1968.
- [22] Yang Q, Ke Y H, Zhang D Y, et al. Multi-scale analysis of the relationship between land subsidence and buildings: a case study in an eastern Beijing Urban Area using the PS-InSAR technique [J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 1006-1006.
- [23] Cui Z D, Yang J Q, Li Y. Land subsidence caused by the interaction of high-rise buildings in soft soil areas[J]. Natural Hazards, 2015, 79(2): 1199-1217.
- [24] 雷坤超, 马凤山, 罗勇, 等. 北京平原区现阶段主要沉降层位与土层变形特征[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 442-458.
- Lei Kunchao, Ma Fengshan, Luo Yong, et al. Main subsidence layers and deformation characteristics in Beijing Plain at present [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 442-458.
- [25] 刘池, 于潇, 随红全, 等. 承压水地层管廊基坑开挖变形特征及抗突涌稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15617-15626.
- Liu Chi, Yu Xiao, Sui Hongquan, et al. Analysis of deformation characteristics and stability against water inrush during excavation of foundation pit for utility tunnel in confined water stratum[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15617-15626.