

吉林大学学报(地球科学版)
Journal of Jilin University(Earth Science Edition)
ISSN 1671-5888,CN 22-1343/P

《吉林大学学报(地球科学版)》网络首发论文

题目: 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
作者: 程蕊, 朱琳, 周佳慧, 郭高轩, 郭琳, 李蕙君, 陈蓓蓓
DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200047
收稿日期: 2020-04-28
网络首发日期: 2021-06-09
引用格式: 程蕊, 朱琳, 周佳慧, 郭高轩, 郭琳, 李蕙君, 陈蓓蓓. 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/OL]. 吉林大学学报(地球科学版). <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20200047>



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。

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.吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4):1-11. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200047.

Cheng Rui, Zhu Lin, Zhou Jiahui, et al. Spatio-Temporal heterogeneity and Driving Factors of Land Subsidence in Middle-Lower Part of the Chaobai River Alluvial Fan. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4):1-11. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200047.

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

程蕊^{1,2,3,4}, 朱琳^{1,2,3,4}, 周佳慧^{1,2,3,4}, 郭高轩⁵, 郭琳^{1,2,3,4},
李蕙君^{1,2,3,4}, 陈蓓蓓^{1,2,3,4}

1.首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048

2.首都师范大学水资源安全北京实验室,北京 100048

3.地面沉降机理与防控教育部重点实验室(首都师范大学),北京 100048

4.首都师范大学城市环境过程和数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048

5.北京市水文地质工程地质大队,北京 100037

摘要:为了研究地面沉降的时空分布模式、机理机制,选择北京典型沉降区——潮白河冲洪积扇为研究区,采用PS-InSAR技术、莫兰指数及地理探测器,分析了研究区地面沉降的空间异质性特征,探测了不同特征下的地面沉降的主要驱动因素。结果表明:2017-01—2019-01研究区内最大累积沉降量为261 mm,极严重、严重等级地面沉降主要分布在中游顺义的后沙峪及中下游交界地带的潞城镇;不同地区地面沉降呈现不同的空间异质性特征,即不均匀地面沉降分布特征明显,中游、下游均表现为低—低集聚;不同分布特征下地面沉降主要驱动因素不同,中游地区主要驱动因素为可压缩层厚度和第二承压水水位变化,下游为第一承压水水位变化和可压缩层厚度。莫兰指数能够有效分析地面沉降空间异质性、识别集聚特征;地理探测器可以探明沉降空间异质性成因,获得其主要驱动因素。本研究能够为不同水文地质单元的地面沉降防控提供数据支持和借鉴性参考。

关键词:地面沉降;空间异质性;莫兰指数;地理探测器;驱动因素;潮白河

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200047

中图分类号:P642.26

文献标志码:A

收稿日期:2020-04-28

作者简介:程蕊(1993—),女,硕士研究生,主要从事地理信息系统在地面沉降及信息水文地质应用方面的研究,E-mail: cheng1115rui@126.com

通信作者:朱琳(1980—),女,教授,博士生导师,主要从事水循环、地质灾害过程和 risk 评价等研究,E-mail: lin.zhu@cnu.edu.cn

基金项目:北京市自然科学基金项目(8202008);北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201910028032);科技创新服务能力建设-基本科研业务费(01119530050175);北京市教育委员会科技计划一般项目(KM202010028011)

Supported by the Beijing Natural Science Foundation(8202008), the Beijing Outstanding Young Scientist Program(BJJWZYJH01201910028032), the Scientific and Technological Innovation Service Capacity Building-Basic Scientific Research Business Cost(0119530050175) and the General Project of Science and Technology Plan of Beijing Municipal Commission of Education(KM202010028011)

Spatio-Temporal heterogeneity and Driving Factors of Land Subsidence in Middle-Lower Part of Chaobai River Alluvial Fan

Cheng Rui^{1,2,3,4}, Zhu Lin^{1,2,3,4}, Zhou Jiahui^{1,2,3,4}, Guo Gaoxuan⁵, Guo Lin^{1,2,3,4},
Li Huijun^{1,2,3,4}, Chen Beibei^{1,2,3,4}

1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China

3. Key Laboratory of Land Subsidence Mechanism, Prevention and Control (Capital Normal University), Ministry of Education, Beijing 100048, China

4. Laboratory Cultivation Base of Environment Process and Digital Simulation, Beijing 100048, China

5. Beijing Institute of Geological Engineering, Beijing 100037, China

Abstract: To study the spatio-temporal distribution pattern and mechanism of land subsidence, the Chaobai River alluvial fan, a typical subsidence area in Beijing, was selected as the study area, and the spatial heterogeneity and the driving factors of land subsidence were analyzed by using PS-InSAR, global and local moran indices, and geographic detectors. The results showed that the land subsidence occurred from January 2017 to January 2019, with the maximum cumulative subsidence of 261 mm. The areas with extremely severe and severe land subsidence mainly occurred in Houshayu of Shunyi and the Lucheng town at the junction of the middle and lower part. Land subsidence in different areas presents different spatial heterogeneity characteristics, that is, the distribution characteristics of uneven land subsidence are obvious. The middle part shows low-low agglomeration and the lower part also shows low-low agglomeration characteristics. Different driving factors of land subsidence under different distribution characteristics. The main driving factors in the middle part are the thickness of the compressible layers and the change of the groundwater level in the second confined aquifers, while the driving factors in the lower part are the groundwater level change in the first confined aquifers and the thickness of the compressible layers. Moran index can effectively analyze the spatial heterogeneity of land subsidence and identify the characteristics of agglomeration. Geographic detector can find out the causes of spatial heterogeneity of land subsidence and obtain the main driving factors. This study provides data support and reference for the prevention and control of land subsidence in different hydrogeological units.

Key words: land subsidence; spatial heterogeneity; Moran's index; geographical detector; driving factor; Chaobai River

0 引言

地面沉降是指在自然因素和人为活动影响下,松散地层压缩导致的地面高程降低的地质现象,其会导致永久性的环境和资源损失,诱发一系列环境灾害,具有演变缓慢持续时间长、成因机制复杂等特点^[1-2]。截至 2015 年底,华北平原累积沉降量大于 200 mm 的区域面积达到 6.4 万 km²^[1],北京地面沉降超过 500 mm 的区域面积达到 1 492 km²,年最大沉降量超过 150 mm。地面沉降已对城市基础设

施、线性轨道交通等造成严重威胁且制约了区域可持续发展。

目前,国内外专家学者针对地面沉降时空演化规律以及其成因机理等方面开展了相关研究,葛大庆等^[2]、赵超英等^[3]、Zhu 等^[4]、张永红等^[5]、Galloway 等^[6]、陈蓓蓓等^[7]、Chen 等^[8]、刘凯斯等^[9]、许军强等^[10]学者结合 InSAR、GIS 技术和常规时序统计方法定性分析了上海、西安、北京、天津、豫北平原等地区地面沉降的时空分布特征;部分学者^[11-14]利用标准离差椭圆、Mann-Kendall 突变检

验、小波、马尔科夫以及信息熵理论等方法对地面沉降的空间发展方向、周期性、趋势进行了研究,但并未深入揭示地面沉降呈现的空间异质性特征。已有研究为揭示地面沉降时空分布奠定了良好的基础,但针对不同水文地质单元地面沉降空间异质性特征的研究尚有不足。

一些学者针对多种因素(地下水开采、地层岩性、土地利用类型等)作用下的地面沉降响应开展了研究^[15-21]。何庆成等^[15]发现华北平原地质环境是地面沉降的控制因素;宫辉力等^[16]指出北京平原地面沉降的主要因素是超量开采地下水,探索了地层岩性及含水层系统分布与地面沉降的相关关系;Dang等^[17]指出越南河内地区的地面沉降主要由地下水开采、大规模住房建设引发;Castellazzi等^[18]发现墨西哥中部城市沉降速率与地下水位降落速率在空间分布上有高度一致性;何亚乐等^[19]发现首都国际机场地面动静载荷的不均匀分布是发生不均匀沉降的原因之一;Zhou等^[20]引入随机森林方法分析了地面沉降影响因素的贡献率。以上研究在一定程度上揭示了地面沉降与影响因素的相关关系,发现沉降的主要影响因素是可压缩层厚度和地下水水位变化,但缺乏进一步刻画不同层位地下水水位变化对沉降影响的研究,且没有研究不同因素驱动力大小及交互作用对沉降的影响。

针对上述研究存在的不足,本文以北京潮白河冲洪积扇为研究对象,利用 PS-InSAR 技术获取 2017—2019 年研究区地表形变信息,采用莫兰指数分析不同水文地质单元地面沉降空间异质性特征;同时,利用地理探测器探究不同层位地下水水位及可压缩层厚度对地面沉降的驱动力大小,及驱动因素交互作用对地面沉降的影响,以探究不同因素及其交互作用对地面沉降的影响。通过以上研究,以为不同水文地质单元的地面沉降防控提供参考。

1 研究区概况

潮白河冲洪积扇位于 $116^{\circ}25'E-116^{\circ}55'E$, $39^{\circ}37'N-40^{\circ}30'N$,地处北京平原东部,总面积约为 $1\,853\text{ km}^2$ 。地跨怀柔、顺义、密云、通州四区,西接朝阳、昌平,北与西山相连,东临河北省。研究区概况如图 1 所示。

研究区属温带大陆性半湿润季风气候,雨热同期。多年(1978—2015 年)平均降水量为 544 mm ,平均气温为 $12.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[22]。降水量季节分布不均,主

要集中在 6—9 月,约占全年总降水量的 85% ^[1]。整体呈南北长条形延展分布,东南低、西北高,属冲洪积平原地形。研究区内主要的第四纪活动断裂为北北东向的黄庄—高丽营断裂、顺义断裂、南苑—通县断裂、夏垫—马坊断裂,北西向的南口—孙河断裂和西北东南走向的二十里长山断裂带^[9],这些断裂构造影响着近代地表河流沉积过程。区内第四系地层厚度空间差异明显,在马驹桥、台湖、永顺一带小于 300 m ,向东及东南逐渐加厚,最厚处可大于 600 m 。按水文地质条件研究区由北到南划分为 3 个次区:河南寨次区(上游)、怀柔次区(中游)、西集次区(下游)^[22-23]。区内扇区顶部至下部,地层颗粒由粗变细,含水层系统结构逐渐由单层过渡到多层^[23-24](图 2)。根据地下水开发利用情况以及水文地质条件,将研究区第四系含水层地下水系统在垂向上概化为浅层地下水(潜水)、深层地下水(由上至下第一、第二承压水)^[25-26]。

2 数据与方法

2.1 数据源

根据有效应力原理,地下水水位下降,孔隙水压力降低,有效应力增加,导致含水层压密、固结,产生地面沉降。地质构造运动使得该地区形成一系列凹陷地带,决定了可压缩层厚度的分布^[27]。可压缩层主要由粉土、黏土等细颗粒物组成,当有效应力增加时,细颗粒的排列情况发生改变,可压缩层厚度越大,越容易发生地面沉降。本次研究收集了覆盖研究区中游和下游地区不同含水层系统的地下水水位和可压缩层厚度数据。其中地下水水位数据时间为 2016-01—2018-12,包含不同深度的地下水水位等值线(第一、二、三层含水层底板埋深分别在 $0\sim 50$ 、 $50\sim 100$ 、 $100\sim 180\text{ m}$)。利用 GIS 技术空间计算功能获取不同深度的地下水水位变化信息。

遥感影像数据为 2017-01—2019-01 的 17 景 RADARSAT-2 影像。采用 PS-InSAR^[28] 技术获取了区内地表形变信息。外部 DEM 为 SRTM (shuttle radar topography mission) 数据,空间分辨率为 90 m 。PS-InSAR 技术主要包括选取主影像、影像配准、差分干涉、误差分离以及获取 PS (permanent scatterer) 点形变信息等主要步骤,数据处理流程参照文献[4,29]。利用高精度水准数据校正 InSAR 监测结果,从而获取 LOS (line of sight) 向形变信息,并利用 27.75° 入射角转为垂向的形变信息。

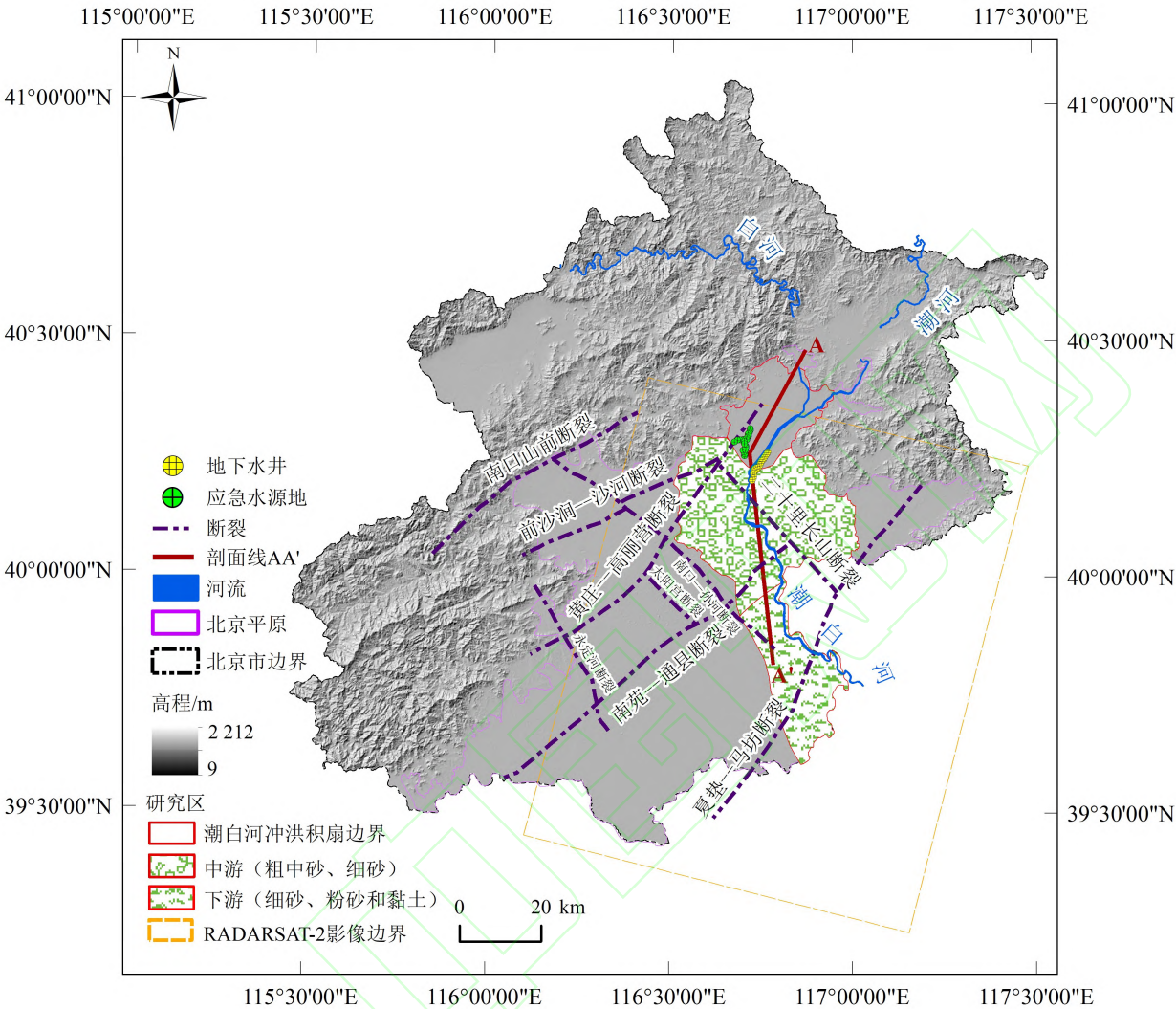


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Location of the study area

2.2 研究方法

2.2.1 空间自相关分析

地理数据受空间相互作用影响,彼此之间可能存在一定的相关性。空间自相关分析是研究空间变量在某空间单元及其周围单元是否相关以及相关程度的一种空间数据分析方法。空间自相关统计量能够充分衡量空间变量在不同位置上的相互依赖程度。目前,空间自相关分析已被应用到人口、大气、资源环境等多个学科领域,证明了其度量变量空间分布特征的科学性与可用性^[30-31]。本文使用地理统计学科中使用最为广泛的全局莫兰指数探究地面沉降的全局空间自相关性,使用局部莫兰指数挖掘局部单元地面沉降的分布特征,对空间异质性特征进行识别。

1)全局莫兰指数(global Moran's index)

全局莫兰指数由 Moran 于 1948 年提出^[29],用于分析空间变量的整体分布状况,判断变量是否有集聚特征,探明该变量是否存在显著的空间分布模式。本文采用全局莫兰指数,计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{W}_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{W}_{ij}) \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: I 为全局莫兰指数; n 为空间单元(本文为乡镇单元)的数量; x_i 和 x_j 分别为单元 i 、 j 的变量值,本研究中为地面沉降年均沉降速率; $\bar{x}$ 为所有单元的平均值; $\mathbf{W}_{ij}$ 为单元 i 、 j 的空间权重矩阵。

I 的取值一般在 $[-1,1]$ 之间,大于 0 表示变量分布呈正空间自相关,其值越大表明变量的空间集

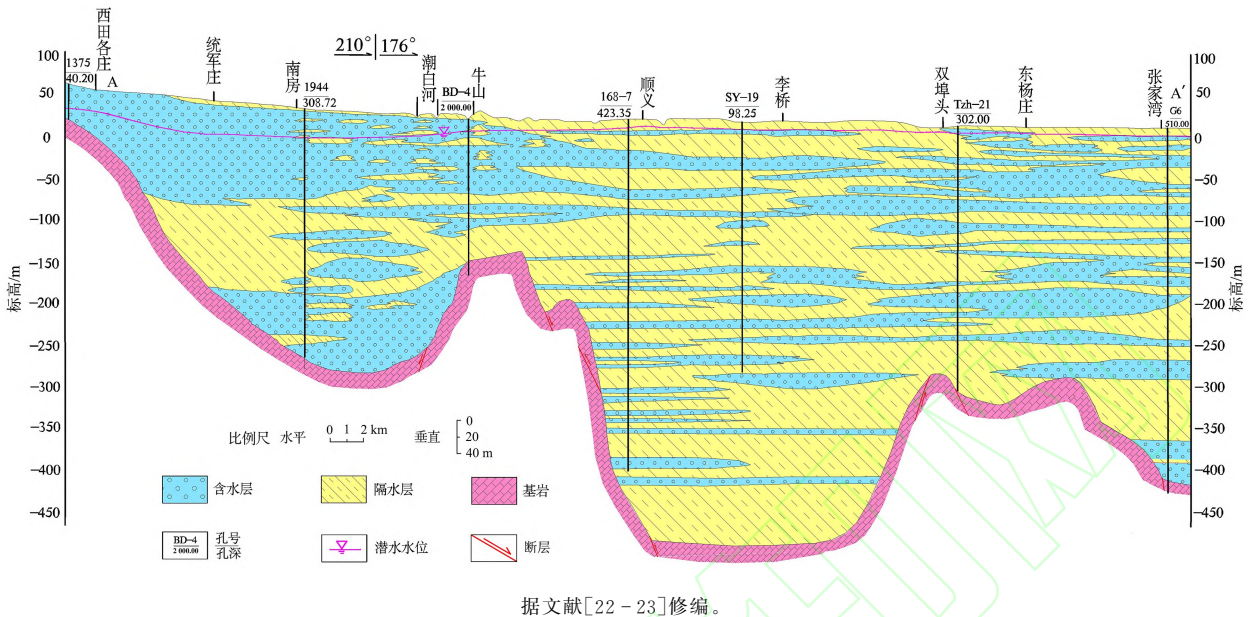


图 2 潮白河冲洪积扇密云太子务—通州张家湾 AA'水文地质剖面图
Fig. 2 Hydrogeological profile of Chaobai River alluvial proluvial fan AA'

聚性越强;小于 0 表示空间变量分布呈负相关,其值越小表明变量的空间离散性越强。通常使用标准化统计量 $Z(I)$ 来检验全局莫兰指数结果的显著性:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{V(I)}} \quad (2)$$

式中: $E(I)$ 、 $V(I)$ 分别为全局莫兰指数的期望和方差。

2)局部莫兰指数(local Moran's index)

局部莫兰指数由 Luc Anselin 教授在 1995 年提出^[30],用于分析局部地区空间单元与邻近单元就空间变量的相关程度能够揭示局部空间单元与其邻近单元变量值之间的关联性或相似性。公式如下:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) ; \quad (3)$$

$$\text{其中 } S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{x})^2}{n - 1} - \bar{x}^2 \quad (4)$$

式中, I_i 为局部莫兰指数。

根据公式(3)识别四类空间集聚特征:高一高(LL)集聚,表明该单元与邻近单元变量呈数值上的高值集聚,即“热点”;低—低(LL)集聚,表明该单元与邻近单元呈数值上的低值集聚,即“冷点”;高一低(HL)集聚,表明高值单元被低值单元围绕;低—高(LH)集聚,表明低值单元被高值单元围绕。

2.2.2 地理探测器

地理探测器是王劲峰等^[32]提出的一种统计方

法,用于探测地理要素的驱动因子^[32-33],其核心思想基于“如果某个自变量对因变量有重要影响,那么二者的空间分布应该具有相似性”的假设,探究自变量对因变量的影响大小。目前为止,已经被应用于环境健康、地面沉降风险评估、人口分布格局等自然环境与人文经济的机理分析中^[34-35]。本次采用因子探测器识别不同驱动因素对地面沉降空间分布形成的驱动作用大小。考虑到地理探测器还可以探测驱动因素两两之间的交互作用影响大小。本次采用交互作用探测器识别不同驱动因素交互作用对地面沉降的影响。

1)因子探测器

因子探测器用来分析自变量(不同驱动因素 X)对因变量(Y)空间分布形成的影响程度,识别不同驱动因素对因变量空间分布的驱动力大小(q 值度量),表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: h 为驱动因素 X 的分层数, $h=1, 2, \dots, L$; N 和 σ^2 分别为全区的单元数和 Y 值的方差; N_h 和 σ_h^2 分别为层 h 的单元数和 Y 值的方差; q 为驱动力度量值,值域为 $[0, 1]$, q 值越大表示驱动因素 X 对因变量 Y 的驱动力越强,反之则越弱。

2)交互作用探测器

交互作用探测器用来识别不同驱动因素 X 间

的交互作用,即判断不同驱动因素共同作用时,是否会增大或减弱对因变量 Y 空间分布的驱动力大小。分别计算单个驱动因素的 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 值及两因子图层叠加后的 $q(X_1 \cap X_2)$ 值,对比三者数值大小判断两因子是否存在交互作用及其强弱、作用类型。

两两驱动因素对因变量交互作用分别为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强。当 $q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$ 时,两驱动因素交互的类型为非线性减弱,表明两因素交互对变量 Y 的作用小于两因素中任一因素对 Y 的作用;当 $\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$ 时,类型为单因子非线性减弱,表明两因素交互对 Y 的作用介于两因素单独对 Y 的作用之间;当 $q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$ 时,类型为双因子增强,表明两因素交互对 Y 的作用要大于两者任一因素的单独作用; $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$ 时,类型为独立,表明两因素交互与否不会影响其对 Y 的作用; $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ 时,类型为非线性增强,表明两因素交互大于两因素单独对 Y 作用的和^[30]。

3 结果与讨论

3.1 地面沉降监测结果校正及精度验证

2017-01—2019-01 研究区地面沉降速率最大值为 -133 mm/a ,最小值为 3 mm/a ,最大累积沉降量为 261 mm 。其中,中游、下游地区的空白地区属于没有获取稳定 PS 点的地区。利用 2017-04—2018-12 高精度 GPS 站点数据对校正后的 InSAR 结果进行验证, GPS 监测数据与 InSAR 监测的形变信息相关性为 0.95。

本文按照《地质灾害危险性评估规范》^[36]对地面沉降速率划分等级,探明不同地区地面沉降发展程度及空间分布情况(图 3)。由图 3 可知:研究区以一般沉降(沉降速率 $-30 \sim -10 \text{ mm/a}$)为主,其广泛分布于研究区中游北部及下游东南部大部分地区,该区可压缩层厚度小,地处二十里长山断裂、顺义断裂、黄庄—高丽营断裂控制范围内;较严重沉降(沉降速率 $-50 \sim -30 \text{ mm/a}$)主要分布在研究区中南部的高丽营、后沙峪、北务镇北部等地区;严重沉降(沉降速率 $-80 \sim -50 \text{ mm/a}$)则主要分布顺义地区西南部及通州北部,该区地处南口—孙河断裂、顺义断裂、黄庄—高丽营断裂和二十里长山断裂所围

区域,属顺义凹陷地带;极严重沉降区(沉降速率 $< -80 \text{ mm/a}$)主要分布在中下游交界处的徐辛庄镇及潞城镇附近,面积较小,该地区处于中游和下游的过渡地带,最大可压缩地层厚度达 210 m ,地处南苑—通县断裂、南口—孙河断裂所围区域。研究区总体以一般沉降为主,呈北部轻微、中部较严重、南部较轻沉降的分布状态。

3.2 地面沉降空间异质性特征

考虑上游地区地面沉降相对较小,本文统计中游、下游地区内各乡镇 2017-01—2019-01 沉降速率均值,对统计数据建立空间权重矩阵,计算出置信度 99.9% ($P < 0.01$) 和 90% ($P < 0.10$) 地面沉降空间分布的全局莫兰指数(式(1))和 $Z(I)$ 值(表 1)。由表 1 可知,潮白河中游地区全局莫兰指数为 0.52, $Z(I)$ 值为 4.19,大于临界值 2.58,表明该区地面沉降分布呈明显正空间自相关关系;下游地区全局莫兰指数为 0.26, $Z(I)$ 值为 1.71,大于临界值 1.65,表明下游地面沉降分布呈正空间自相关,且地面沉降空间异质性相比于中游地区更大。

基于全局莫兰指数结果,利用局部莫兰指数进一步分析研究区局部地区地面沉降空间分布的集聚特征(式(3)),结果如图 4 所示。其中,灰色渲染区表示该地区未呈现出显著的局部空间自相关,没有呈现集聚/离散特征。

中游地区,主要在南法信、后沙峪、天竺等地区,地面沉降表现为低—低(LL)集聚,表明该地区与邻近地区地面沉降速率均相对较大,后沙峪及附近地区沉降呈严重、较严重等级,靠近北部地下水开采区,属顺义凹陷地带、含水层呈多层结构,形成局部的低—低(LL)集聚特征。下游地区地面沉降同样也表现为低—低(LL)集聚,分布在宋庄镇、永顺镇及梨园镇等地。该区靠近通州摇不动水源地,属中下游过渡地带,区域性地面沉降严重,因此形成了低—低(LL)集聚特征。

3.3 地面沉降主要驱动因素结果及分析

本研究以 2017-01—2019-01 地面沉降速率为因变量 Y ,浅层、第一承压水、第二承压水水位变化及可压缩层厚度为自变量 X ,按照公式(5)计算研究区中游和下游地区地面沉降驱动力结果如表 2 所示。

潮白河中游地区,2017—2019 年 q 值由大到小依次为可压缩层厚度、第二承压水水位变化、浅层地下水水位变化、第一承压水水位变化,表明:可压缩

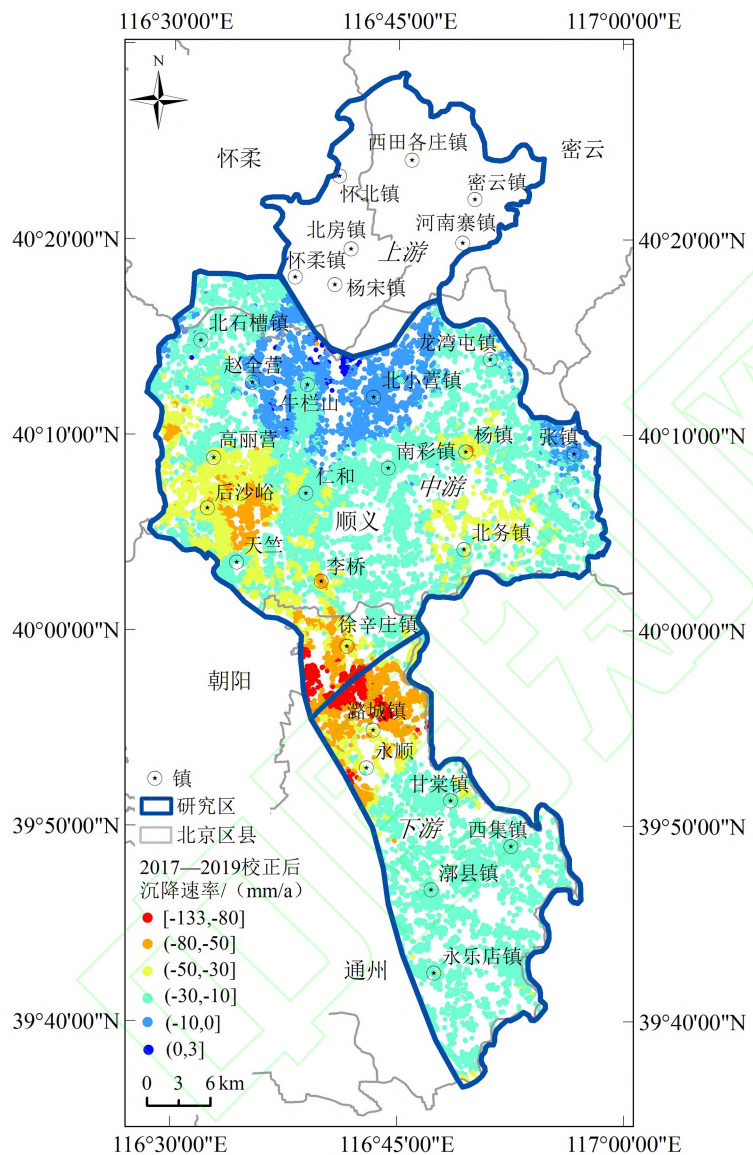


图 3 基于 PS-InSAR 技术监测的 2017-01—2019-01 研究区沉降速率分布结果

Fig.3 Monitoring results of land subsidence rate in the study area from January 2017 to January 2019

表 1 2017-01—2019-01 地面沉降全局空间自相关值

Table 1 Global spatial autocorrelation value of land subsidence from January 2017 to January 2019

指标	潮白河中游地区	潮白河下游地区
全局莫兰指数	0.52	0.26
$Z(I)$	4.19	1.71
$P(I)$	0.01	0.10

层厚度对地面沉降的驱动作用最大,该地区细颗粒沉积物组成的地层累计厚度最大可达 210 m,易于地面沉降的发生;埋深为 50~100 m 的第二承压含水层地下水位变化(开采、回灌、越流作用下产生)对

地面沉降的驱动作用也相对显著;浅层地下水水位变化和第一承压水水位变化的驱动作用不显著。

潮白河下游地区,第一承压水水位变化的 q 值最大,为 0.60,表明 2017—2019 年第一承压水水位变化对潮白河下游地面沉降分布的控制作用最强;其次依次为可压缩层厚度和浅层地下水水位变化,其 q 值分别为 0.33、0.25,表明了二者对地面沉降的分布有一定影响,但相对第一承压水水位变化影响较小;第二承压水水位变化 q 值为 0.18,影响最小。

综上可知,不同沉降分布特征的主要驱动因素不同;可压缩层厚度对中游地区的地面沉降分布的驱动力最大,其次为第二承压水水位,在可压缩层厚

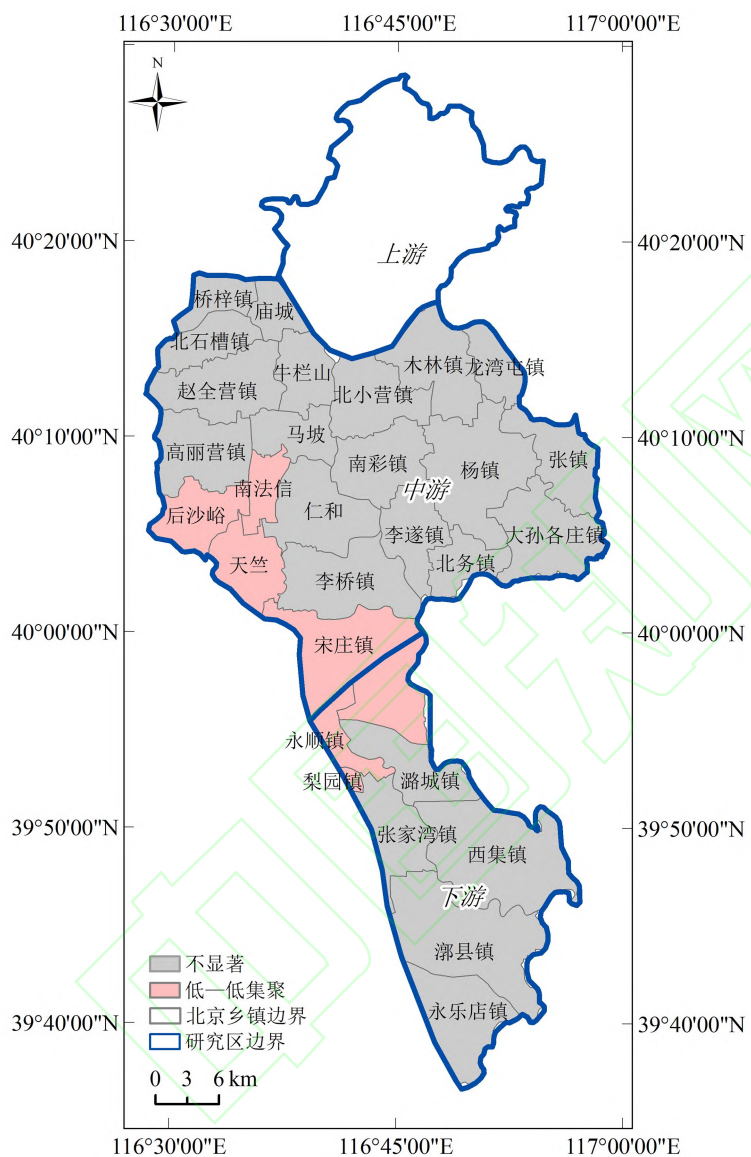


图 4 2017-01—2019-01 地面沉降局部空间自相关分析

Fig.4 Local spatial autocorrelation analysis of land subsidence from January 2017 to January 2019

表 2 2017-01—2019-01 地面沉降驱动力(q)探测结果
Table 2 Results of driving force (q) of land subsidence from January 2017 to January 2019

地区	浅层地 下水水 位变化	第一承 压水水 位变化	第二承 压水水 位变化	可压缩 层厚度
潮白河中游	0.25	0.08	0.39	0.48
潮白河下游	0.25	0.60	0.18	0.33

度一定的情况下,开采第二承压含水层会进一步诱发严重的区域性地面沉降;下游地区,第一承压水水位变化对地面沉降分布的控制作用最强。

3.4 地面沉降驱动因素交互作用探测结果及分析

本文选取浅层地下水水位变化(X_1)、第一承压水水位变化(X_2)、第二承压水水位变化(X_3)、可压缩层厚度(X_4)为驱动因素,探测了不同驱动因素两两之间交互作用对地面沉降的影响大小。结果如表 3 所示。

由表 3 可知,地面沉降驱动因素两两之间交互作用分别为双因子增强和非线性增强,表明两驱动因素交互对地面沉降速率的影响比任一因素单独对沉降速率的影响均要大。

潮白河中游地区,第二承压水水位变化和可压缩层厚度的交互值为0.72,表明其交互作用时对地

表 3 地面沉降影响因子交互作用

Table 3 Interaction table of land subsidence influencing factors

潮白河中游地区				潮白河下游地区		
交互因子	交互值	对比值	交互结果	交互值	对比值	交互结果
$X_1 \cap X_2$	0.47	$>X_1 + X_2$	非线性增强	0.79	$>\max(X_1, X_2)$	双因子增强
$X_1 \cap X_3$	0.53	$>\max(X_1, X_3)$	双因子增强	0.37	$>\max(X_1, X_3)$	双因子增强
$X_1 \cap X_4$	0.60	$>\max(X_1, X_4)$	双因子增强	0.74	$>X_1 + X_4$	非线性增强
$X_2 \cap X_3$	0.56	$>X_2 + X_3$	非线性增强	0.71	$>\max(X_2, X_3)$	双因子增强
$X_2 \cap X_4$	0.60	$>X_2 + X_4$	非线性增强	0.76	$>\max(X_2, X_4)$	双因子增强
$X_3 \cap X_4$	0.72	$>\max(X_3, X_4)$	双因子增强	0.70	$>X_3 + X_4$	非线性增强

面沉降空间分布影响最大。浅层、第一承压水水位变化与可压缩层厚度交互值均为 0.60,交互作用次之。其中:浅层地下水水位变化和可压缩层厚度交互作用为双因子增强,表明“两两交互对沉降速率的作用”大于“任一因素单独对沉降速率产生的作用”;第一承压水水位变化和可压缩层厚度交互作用为非线性增强,表明“两两交互对沉降速率的作用”大于“两因素分别对沉降速率产生作用的和”,即在两因素交互作用下地面沉降速率呈现非线性递增。

潮白河下游地区,浅层、第一承压水水位变化交互值为 0.79,表明其交互作用时对下游地区地面沉降分布影响力最大。

不同水文地质单元,可压缩层厚度与不同含水层层位的地下水水位变化交互作用均为较强的增强关系,说明可压缩层厚度为地面沉降的发生提供了有利的地质条件。对比中、下游地区不同因素交互值及交互作用的差异发现,除 $X_1 \cap X_3$ 及 $X_3 \cap X_4$ 的交互值分别由中游的 0.53、0.72 减小为 0.37、0.70 以外,其余驱动因素两两之间的交互值均在下游地区增大;这在一定程度上说明中游地区地面沉降的发展受到以上两种交互作用更大。

4 结论

1)时空分布特征以一般沉降为主,呈北部轻微、中部较严重、南部较轻的分布状态,沉降速率为 $[-133,3]$ mm/a,最大累积沉降量为 261 mm。

2)空间异质性特征方面,中游和下游地区沉降均呈正空间自相关且空间集聚特征明显,但中游全局莫兰指数大于下游,表明下游沉降的空间异质性较大。两水文地质单元呈不同的集聚特征,中游、下游均表现为低—低集聚,其空间异质性特征主要受水文地质条件及地下水开采的影响。

3)不同沉降分布特征的主要驱动因素不同。中游地区可压缩层厚度与第二承压水位变化的交互值最大,表明其对该区域地面沉降分布特征的驱动力最大。下游地区第一承压水水位变化与可压缩层厚度的交互值最大,表明其对该区域地面沉降分布特征的控制作用最强。驱动因素两两之间交互作用均为增强关系,表明驱动因素两两之间交互均会增大对地面沉降的影响,且下游地区因素的两两交互对地面沉降分布特征的影响更为严重。

参考文献(References):

[1] Chen M, Tomás R, Li Z, et al. Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry [J]. Remote Sensing, 2016, 8(6):468.

[2] 葛大庆,张玲,王艳,等. 上海地铁 10 号线建设与运营过程中地面沉降效应的高分辨率 InSAR 监测及分析[J]. 上海国土资源, 2014(4):62-67.

Ge Daqing, Zhang Ling, Wang Yan, et al. Monitoring Subsidence on Shanghai Metro Line 10 During Construction and Operation Using High-Resolution InSAR [J]. Shanghai Land and Resources, 2014 (4): 62-67.

[3] 赵超英,张勤,丁晓利,等. 基于 InSAR 的西安地面沉降与地裂缝发育特征研究[J]. 工程地质学报, 2009,17(3):103-107.

Zhao Chaoying, Zhang Qin, Ding Xiaoli, et al. InSAR Based Evaluation of Land Subsidence and Ground Fissure Evolution at Xi'an [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (3): 103-107.

[4] Zhu L, Gong H L, Teatini P, et al. Land Subsidence due to Groundwater Withdrawal in the Northern Beijing Plain, China[J]. Engineering Geology, 2015, 193:243-255.

[5] 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 Yonghong, Wu Hong'an, Kang Yonghui. 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.
- [6] Galloway D L, Leake S A. Regional Land Subsidence Caused by the Compaction of Susceptible Aquifer Systems Accompanying Groundwater Extraction[M]. [L.n.]: McGraw-Hill Education, 2016.
- [7] 陈蓓蓓, 宫辉力, 李小娟, 等. 北京地下水系统演化与地面沉降过程[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012 (增刊 1):373-379.
- Chen Beibei, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. Groundwater System Evolution and Land Subsidence Process in Beijing [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012 (Sup.1): 373-379.
- [8] Chen B B, Gong H L, Li X J, et al. Spatial-Temporal Characteristics of Land Subsidence Corresponding to Dynamic Groundwater Funnel in Beijing Municipality, China[J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21(6): 753-764.
- [9] 刘凯斯, 宫辉力, 陈蓓蓓. 基于地面沉降监测的地铁运营危险性评价: 以北京地铁 6 号线为例[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(3):68-73.
- Liu Kaisi, Gong Huili, Chen Beibei. Assessing the Subway Operational Risk Based on Land Subsidence Monitoring: Taking Beijing Metro Line 6 as an Example [J]. Geography and Geographic Information Science, 2018, 34 (3): 68-73.
- [10] 许军强, 马涛, 卢意恺, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的豫北平原地面沉降监测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(4):1182-1191.
- Xu Junqiang, Ma Tao, Lu Yikai, et al. Land Subsidence Monitoring in North Henan Plain Based on SBAS-InSAR Technology [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49 (4): 1182-1191.
- [11] 周超凡, 宫辉力, 陈蓓蓓, 等. 北京地面沉降时空分布特征研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(2): 205-215.
- Zhou Chaofan, Gong Huili, Chen Beibei, et al. Study of Temporal and Spatial Characteristics of Land Subsidence in Beijing [J]. Journal of Earth Information Science, 2017, 19 (2): 205-215.
- [12] Guo L, Gong H L, Zhu F, et al. Analysis of the Spatiotemporal Variation in Land Subsidence on the Beijing Plain, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11: 1170.
- [13] 王洁, 宫辉力, 陈蓓蓓, 等. 基于 Morlet 小波技术的北京平原地面沉降周期性分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(3):836-845.
- Wang Jie, Gong Huili, Chen Beibei, et al. Periodical Analysis of Land Subsidence in Beijing Plain Based on Morlet Wavelet Technology [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48 (3): 836-845.
- [14] 颜晋荣, 宫辉力, 陈蓓蓓, 等. 基于马尔科夫和信息熵的北京平原地面沉降空间结构演化分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2015, 36(6):87-91.
- Xie Jinrong, Gong Huili, Chen Beibei, et al. Analyze About the Evolution of Deformation Structure in Beijing Plain [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2015, 36 (6): 87-91.
- [15] 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 Qingcheng, Liu Wenbo, Li Zhiming. Land Subsidence Survey and Monitoring in the North China Plain [J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12 (2): 195-209.
- [16] 宫辉力, 张有全, 李小娟, 等. 基于永久散射体雷达干涉测量技术的北京市地面沉降研究[J]. 自然科学进展, 2009, 19(11):1261-1266.
- Gong Huili, Zhang Youquan, Li Xiaojuan, et al. Land Subsidence Research in Beijing Based on Radar Interferometry of Permanent Scatterers [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19 (11): 1261-1266.
- [17] Dang V K, Doubre C, Weber C, et al. Recent Land Subsidence Caused by the Rapid Urban Development in the Hanoi Urban Region (Vietnam) Using ALOS InSAR Sata[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences Discussions, 2014, 14:657-674
- [18] Castellazzi P, Martel R, Rivera A, et al. Groundwater Depletion in Central Mexico: Use of GRACE and InSAR to Support Water Resources Management[J]. Water Resources Research, 2016, 52(8): 5985-6003.
- [19] 何亚乐, 朱琳, 宫辉力, 等. TerraSAR 的首都机场形变特征分析[J]. 测绘科学, 2016, 41(12):14-18.
- He Yale, Zhu Lin, Gong Huili, et al. Analysis of Land Subsidence Features Based on TerraSAR Images in Beijing-Capital International Airport [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41 (12): 14-18.
- [20] Zhou CF, 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.
- [21] Zhu L, Franceschini A, Gong H, et al. The 3 - D Facies and Geomechanical Modeling of Land Subsidence in the Chaobai Plain, Beijing[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56 (3). Doi: 10.1029/2019WR027026.
- [22] 郭高轩, 侯泉林, 许亮, 等.北京潮白河冲洪积扇地下水水化学的分层分带特征[J]. *地球学报*, 2014, 35 (2): 204–210.
- Guo Gaoxuan, Hou Quanlin, Xu Liang, et al. Delamination and Zoning Characteristics of Quaternary Groundwater in Chaobai Alluvial-Proluvial Fan, Beijing, Based on Hydrochemical Analysis[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35 (2): 204–210.
- [23] 蔡向民, 郭高轩, 栾英波, 等.北京山前平原区第四系三维结构调查方法研究[J]. *地质学报*, 2009, 83 (7):1047–1057.
- Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, Luan Yingbo, et al. Quaternary Geological Features of Beijing Piedmont Plain Using 3 - D Structural Method [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (7): 1047–1057.
- [24] 刘予, 叶超, 贾三满. 北京市平原地面沉降区含水岩组和可压缩层划分[J]. *城市地质*, 2007, 2(1):10–15.
- Liu Yu, Ye Chao, Jia Sanman. Division of Water-Bearing Zones and Compressible Layers in Beijing's Land Subsidence Areas [J]. *Urban Geology*, 2007, 2 (1): 10–15.
- [25] Chen B B, Gong H L, Lei K C, et al. Land Subsidence Lagging Quantification in the Main Exploration Aquifer Layers in Beijing Plain, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 75:54–67.
- [26] Haghighi M H, Motagh M. Ground Surface Response to Continuous Compaction of Aquifer System in Tehran, Iran: Results from a Long-Term Multi-Sensor InSAR Analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221:534–550.
- [27] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. *Proc Igarss*, 2001, 39(1): 8–20.
- [28] Gao M L, Gong H L, Li X J, et al. Land Subsidence and Ground Fissures in Beijing Capital International Airport (BCIA): Evidence from Quasi-PS InSAR Analysis[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12):1466.
- [29] Moran P A P. The Interpretation of Statistical Maps [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 1948, 10(2): 243–251.
- [30] Anselin L. 空间关联的局部指示器:LISA[J]. *地理分析*, 1995, 27(2):93–115.
- Anselin L. Local Indicator of Spatial Association:Lisa [J]. *Geographic Analysis*, 1995, 27(2):93–115.
- [31] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical Detectors-Based Health Risk Assessment and Its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107–127.
- [32] 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.
- [33] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000–2011年中国PM_{2.5}时空演化特征及驱动因素解析[J]. *地理学报*, 2017, 72(11):2079–2092.
- Zhou Liang, Zhou Chenghu, Yang Fan, et al. Spatio-Temporal Evolution and the Influencing Factors of PM_{2.5} in China Between 2000 and 2011 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (11): 2079–2092.
- [34] 石鹏远, 余洁, 朱琳, 等. 应用地理探测器改进地面沉降危险性评估模型的研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3):101–112.
- Shi Pengyuan, Yu Jie, Zhu Lin, et al. Hazard Assessment Model of Land Subsidence Based on Geographical Detector [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 101–112.
- [35] 李佳洺, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 148–160.
- Li Jiaming, Lu Dadao, Xu Chengdong, et al. Spatial Heterogeneity and Its Changes of Population on the Two Sides of Hu Line[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1):148–160.
- [36] 地质灾害危险性评估规范: DZT 0286—2015 [S]. 北京:地质出版社, 2015.
- Specification of Risk Assessment for Geological Hazard: DZT 0286—2015 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.