

基于SBAS-InSAR技术的安徽亳州市地面沉降时空分布特征与影响因素分析

何清, 魏路, 肖永红

Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of land subsidence in Bozhou City, Anhui Province based on SBAS-InSAR technology

HE Qing, WEI Lu, and XIAO Yonghong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202304004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测

Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection

潘建平, 邓福江, 徐正宣, 向淇文, 涂文丽, 付占宝 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 98-104

广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律

Characteristics and spatial-temporal distribution law of karst collapse in Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City, Guangdong Province

韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 131-139

应用地理探测器改进地面沉降危险性评估模型的研究

\${suggestArticle.titleEn}

石鹏远, 余洁, 朱琳, 王彦兵 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(3): 101-112

基于SBAS-InSAR的山东济阳矿区沉降监测与分析

\${suggestArticle.titleEn}

潘光永, 陶秋香, 陈洋, 王珂 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 100-106+120

基于灰色Verhulst模型的山西太原地面沉降趋势分析

\${suggestArticle.titleEn}

周艳萍 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(2): 94-99

安徽阜阳中心城区地面沉降灾害风险评价

\${suggestArticle.titleEn}

王齐鑫, 王龙平, 王泽宇 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(4): 32-39



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202304004](https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202304004)

何清, 魏路, 肖永红. 基于 SBAS-InSAR 技术的安徽亳州市地面沉降时空分布特征与影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(5): 81-90.

HE Qing, WEI Lu, XIAO Yonghong. Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of land subsidence in Bozhou City, Anhui Province based on SBAS-InSAR technology[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(5): 81-90.

基于 SBAS-InSAR 技术的安徽亳州市地面沉降时空分布特征与影响因素分析

何 清, 魏 路, 肖永红

(安徽省地质环境监测总站, 安徽 合肥 230001)

摘要:近年来皖北平原地区地面沉降问题相对突出, 区域地面沉降驱动力的量化研究尚且匮乏。为深入研究沉降灾害的发育特征, 文章以亳州市为例, 基于 62 景 Sentinel-1 数据, 利用 SBAS-InSAR 技术获取 2021 年 10 月至 2022 年 10 月期间地面沉降的时空分布特征, 并结合地理加权回归模型对亳州市地面沉降主要驱动力进行探讨。研究结果表明: (1) 亳州市主体沉降速率为 5~30 mm/a, 平均沉降速率为 5.7 mm/a。 (2) 最严重沉降区位于涡阳县公吉寺镇北侧, 幅值为 84.3 mm/a, 沉降主要受煤矿开采所致; 非采煤沉降区, 最大沉降速率为 25.8 mm/a, 位于谯城区东北侧。 (3) 各驱动力因素对地面沉降的贡献度从大到小排序为深层水位变幅、中深层水位变幅、中深层地下水埋深、深层地下水埋深、单位面积 GDP、松散层厚度、道路密度、人口密度。研究结果可为地质灾害防治提供基础数据支撑。

关键词:亳州市; 地面沉降; SBAS-InSAR; 地理加权回归模型; 形变驱动力

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)05-0081-10

Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of land subsidence in Bozhou City, Anhui Province based on SBAS-InSAR technology

HE Qing, WEI Lu, XIAO Yonghong

(Anhui Institute of Geo-Environment Monitoring, Hefei, Anhui 230001, China)

Abstract: In recent years, land subsidence issues have become relatively prominent in the northern plain area of Anhui province, and there is lack of quantitative research on the driving forces of regional land subsidence. In order to further investigate the developmental characteristics of subsidence disasters and provide scientific, this paper takes Bozhou City as an example. Based on 62 scenes of Sentinel-1 data, SBAS-InSAR technology is employed to obtain the spatial-temporal distribution characteristics of land subsidence from October 2021 to October 2022. Additionally, a geographic weighted regression model is applied to explore the main driving factors of land subsidence in Bozhou city. The research results indicate: (1) The main subsidence rate in Bozhou City ranges from 5 to 30 mm/year, with an average subsidence rate of 5.7 mm/year.

收稿日期: 2023-04-07; 修订日期: 2023-07-12

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

第一作者: 何 清(1967-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事地质环境监测、地质测绘等技术工作。E-mail: heq@mail.ahdkj.gov.cn

通讯作者: 魏 路(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质及环境地质调查与研究工作。

E-mail: weilu101@126.com

(2) The most serious subsidence area is located north of Gongji Temple Town in Woyang County, with an amplitude of 84.3 mm/year, mainly caused by coal mining. In non-coal mining subsidence areas, the maximum subsidence rate is 25.8 mm/year, located in the northeast of Qiaocheng District. (3) The contribution order of various driving factors to ground subsidence is as follows: fluctuation of deep water level, fluctuation of middle-deep water level, burial depth of middle-deep groundwater, burial depth of deep groundwater, GDP per unit area, thickness of loose layer, road density, and population density. The study results can provide basic data support for geological disaster prevention and control.

Keywords: Bozhou city; ground subsidence; SBAS-InSAR; Geographic Weighted Regression model; deformation driving force

0 引言

地面沉降又称地面下降或地陷,是指在自然环境和人类建设活动影响下,由于地下松散土层及岩层压缩固结,导致地表标高损失的一种地质现象^[1]。造成该现象的自然因素和社会经济因素被认为是地面沉降的驱动力,主要包括水文地质条件、矿产资源开发及地下水开采状况等^[2-3]。地面沉降形成原因复杂,防护与治理难度较高^[4-6],对人民的生命财产安全造成较大的损害。为深入探索沉降机制及其变化规律,国内外学者对沉降监测方法和驱动力因素进行研究,并不断发展新理论技术^[7-10]。

传统的地面沉降监测手段主要为水准测量和 GNSS,这种局部单点测量的技术不仅成本高而且空间分辨率低,难以识别和监测大面积的地表形变^[11]。时序合成孔径雷达干涉测量(time-series interferometric synthetic aperture radar, TS-InSAR)技术不仅周期短、精度高,还能够全天时、全天候地对大范围的地表形变进行监测,极大地弥补了传统监测手段的不足^[12]。其中永久散射体雷达干涉^[13](permanent scatterer interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR)和小基线集雷达干涉^[14](small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)最具代表性。PS-InSAR 方法能够有效获取高相干目标(如建筑、桥梁及裸岩等)的时序形变信息,但在植被茂盛、稳定散射体稀少的区域,无法取得足量的稳定目标点,易使得形变解算结果产生偏差^[15]。而 SBAS-InSAR 方法是利用慢失相关滤波相位像素点获取地表形变信息,该类点能够在短时段内保持较强的相干性,且普遍存在于自然界中(如草地、裸土等)。因此 SBAS-InSAR 方法比 PS-InSAR 方法更适用于大范围区域的形变监测^[16-17]。

皖北地区的地面沉降问题历来较为突出,亳州市作为安徽省重要的新兴产业基地,其城市地质灾害监测一直受到政府及相关管理部门广泛关注。以往对该区域

地面沉降的研究更侧重于观测数据的处理方法以及成因的简单分析^[18-19],对于其驱动力的量化研究尚且不足。探求地面沉降的主要驱动因素,能够为地质灾害防治和城市建设提供科学指导。本文以亳州市为研究区,选取 2021 年 10 月至 2022 年 10 月共 62 景 Sentinel-1 数据,利用 SBAS-InSAR 技术对亳州市地面沉降进行监测,分析亳州市地面沉降的时空分布特征,并基于地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型,从地质环境、水文地质条件、人类工程活动和经济发展状况等方面对亳州市地面沉降的空间分异进行分析,探究亳州市地面沉降的主要驱动因素。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

亳州市位于黄淮海平原南端,皖、豫两省交界,全市下辖一区三县,总面积约 8 522.58 km²(图 1)。亳州市地处中朝准地台的淮河台坳二级构造单元,主要发育有褶皱、断裂构造。该地区地形起伏较小,地势西北高、东南低,辖境与黄河决口扇形地相连,总体呈典型的黄淮堆积型地貌^[20]。地层属华北地层大区徐淮地层分区,第四系覆盖区内大部分基岩,第四系及新近系松散地层厚度在 800 ~ 1 000 m。亳州市煤炭资源丰富,根据《亳州市矿产资源总体规划(2021—2025 年)》,区内现有煤产地 17 处,主要分布在涡阳、蒙城等地,保有资源储量 43.50 亿吨,占全省煤炭资源储量 17.17%。主要含煤层为石炭、二叠系地层,煤层埋深 600 ~ 1 000 m。

亳州市地下水类型可划分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水和基岩裂隙水三种类型。按照含水层的埋藏条件,可进一步划分为浅层孔隙含水层组(50 m 以浅)、中深层孔隙含水层组(50 ~ 165 m)、深层孔隙含水层组(165 ~ 660 m)、超深层孔隙含水层组(660 ~ 900 m)。根据《2021 年亳州市水资源公报》,亳州市地下水资源总量约为 15.67×10⁸ m³,浅层地下水供水量 4.59×10⁸ m³,中深层地下水供水量为 1.47×10⁸ m³。全市域内

已形成 9 个超采区,总面积约 980.9 km²,其中浅层地下水超采区开采量约 0.4×10⁸ m³/a,中深层地下水超采区开采量约 1.38×10⁸ m³/a。

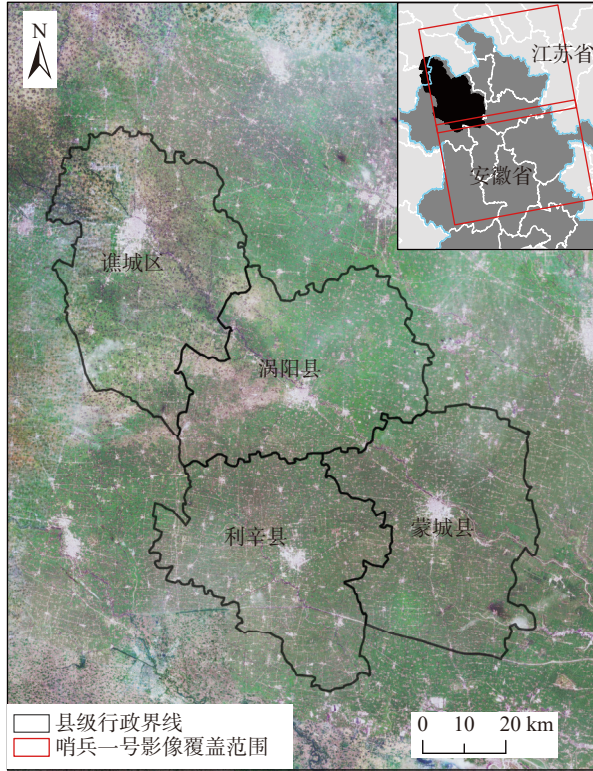


图 1 研究区范围

Fig. 1 Study area scope

1.2 数据

1.2.1 Sentinel-1

Sentinel-1 卫星是欧洲航天局发射的地球观测卫星,重访周期为 12 天,具有干涉宽幅(IW)、超宽幅(EW)、波(WV)和带状图(SM)四种工作模式。本文选取 2021 年 10 月至 2022 年 10 月间,共 62 景升轨 Sentinel-1 干涉宽幅(IW)模式的 SLC 影像用于形变监测,数据的基本参数见表 1。

表 1 Sentinel-1 卫星数据参数表

Table 1 Parameters of Sentinel-1 satellite data

参数	数值	监测日期
轨道高度/km	700	2021-10-02、2021-10-14、2021-10-26、 2021-11-07、2021-11-19、2021-12-01、 2021-12-13、2022-01-06、2022-01-18、
重访周期/d	12	2022-01-30、2022-02-11、2022-02-23、 2022-03-07、2022-03-19、2022-03-31、
入射角/(°)	29~46	2022-04-12、2022-04-24、2022-05-06、 2022-05-18、2022-05-30、2022-06-11、
分辨率/m	5×20	2022-06-23、2022-07-05、2022-07-17、 2022-07-29、2022-08-10、2022-08-22、
幅宽/m	250	2022-09-03、2022-09-15、2022-09-27、 2022-10-09
极化方式	VV	
轨道号	142,101 / 142,106	

1.2.2 SRTM DEM

SRTM 数据由美国国家航空航天局(NASA)和美国国家地理空间情报局(NGA)生产并面向全球用户免费发布,该数据覆盖了全球约五分之四的陆地表面,分辨率为 30 m,高程精度为±16 m。本文中用于去除干涉测量过程中由地形起伏因素导致的地形相位。

1.2.3 其它数据

驱动力因子的选择主要依据研究区地质环境、水文地质条件、人类工程活动和经济发展状况四方面的综合影响,共选取 8 个指标,分别为松散层厚度、中深层地下水埋深、深层地下水埋深、中深层水位变幅、深层水位变幅、道路密度、人口密度和单位面积 GDP。

2 方法原理与数据处理

2.1 地面沉降监测

2.1.1 SBAS-InSAR 原理

将覆盖研究区的 $N+1$ 幅影像进行配准后,参照一定的阈值组成 M 个干涉对^[21],则有:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2} \quad (1)$$

假设第 $i(i \in 1, 2, \dots, M)$ 个干涉对的主辅影像获取时间为 t_a 和 t_b (其中 t_b 在 t_a 之后),并且其干涉相位中除去形变相位的部分已被剔除,则该干涉对的相位可以表示为:

$$\Delta\phi_j^{(t_a, t_b)} = \phi^{t_b} - \phi^{t_a} \quad (2)$$

那么 M 个干涉对的形变相位可以表示为如下矩阵形式:

$$\Delta\phi = [\Delta\phi_1, \Delta\phi_2, \Delta\phi_3, \dots, \Delta\phi_M]^T \quad (3)$$

每个干涉都可以产生一个观测方程,结合式(2)(3),可以组成具有 M 个观测方程的方程组,其中有 N 个待求未知数,矩阵形式方程组如下:

$$A\phi = \Delta\phi \quad (4)$$

式中: A —— $M \times N$ 的系数矩阵。

若矩阵 A 的秩 $r(A)$ 大于 N ,则可以通过最小二乘法求解式(4),公式如下:

$$\phi = (A^T A)^{-1} A^T \Delta\phi \quad (5)$$

但在实际计算中, $r(A)$ 通常小于 N ,无法求得 $A^T A$ 矩阵的逆矩阵,此时则对矩阵 A 进行奇异值分解,分解形式如下:

$$A = USV^T \quad (6)$$

式中: U —— $M \times M$ 阶正交矩阵,由 AA^T 的特征向量组成;

S —— M 阶对角矩阵;

V ——由 $A^T A$ 的特征向量组成的 $N \times M$ 阶正交矩阵。

$$A^+ = VS^+U^T \quad (7)$$

$$\varphi = A^+ \Delta\varphi \quad (8)$$

式中: U^T —— U 的转置矩阵;

A^+ 、 S^+ ——矩阵 A 、矩阵 S 的广义逆矩阵。

将求解出时序形变量 φ , 除以形变所对应的时间间隔, 即可求解出对应的形变速率。

2.1.2 数据处理流程

SBAS-InSAR 技术路线如图 2 所示, 获取地面形变信息的流程主要包括两部分: 数据预处理和 SBAS-InSAR 工作流。本研究使用 ENVI 平台的 SARscape 对 Sentinel-1 数据进行处理, SARscape 是由 sarmap 公司开发的一款专业的雷达影像处理软件, 已被广泛应用于处理 ERS-1/2、RADARSAT-1/2、ENVISAT ASAR、ALOS PALSAR 以及 Sentinel-1(哨兵)等一系列星载雷达数据^[22-25]。

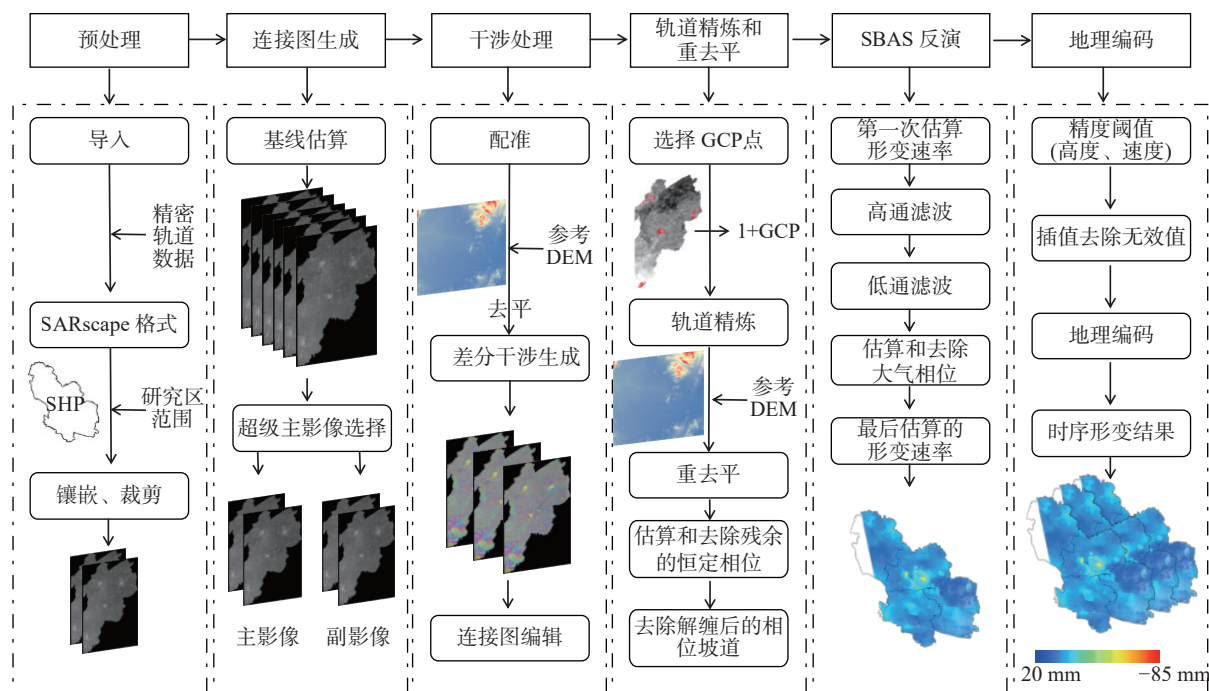


图 2 SBAS-InSAR 技术路线

Fig. 2 SBAS-InSAR technical workflow

Sentinel-1 数据预处理步骤如下: ①将数据导入为 SARscape 的标准格式; ②对同一时期两景 SAR 影像进行镶嵌; ③按照研究区范围对数据进行裁剪。对预处理后的影像进行 SBAS-InSAR 处理, 主要流程包括: ①对输入数据以最优的组合方式配对; ②配对后的像对进行干涉处理; ③利用控制点对所有数据重去平; ④去除大气相位并估算形变速率; ⑤地理编码, 将形变结果投影到地理坐标系上。

2.2 地理加权回归模型

空间关系具有异质性和非平稳性规律, 为了对空间数据进行精确局部描述, Fotheringham 基于局部光滑的思想提出了地理加权回归模型 (geographical weighted regression, GWR)^[26]。GWR 实质上是一种空间变系数回归模型^[27], 可以根据空间数据的位置信息生成对应的局部回归系数, 从而对变量的局部空间关系与空间异质

性进行合理的解释^[28]。

2.2.1 模型构建

运用 GWR 模型进行回归分析时, 考虑到因子间的多重共线性问题会影响模型的可靠性, 因此本文首先计算各因子的方差膨胀因子 (VIF)。结果显示 (表 2), 各因子的 VIF 均处于 0 到 10 之间^[29], 表明因子间不存在多重共线性。

在此基础上, 对亳州市地面沉降建立 GWR 模型如下:

$$y_i = \sum_{j=1}^p \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: y_i ——响应变量;

$\beta_j(u_p, v_i)$ ——第 i 个样本点在 (u_p, v_i) 处的第 j 个回归参数;

x_{ij} ——影响因素;

ε_i ——随机误差项。

采用赤池信息准则最优带宽策略, 构建不同运行模式下的活动强度 GWR 模型^[27], 结果如表 3 所示。地面沉降 GWR 模型的可决系数(R^2)为 0.394 583, 表明自变量与因变量之间具有相关性。校正可决系数(adjusted R^2)是 0.373 125, 说明可解释因变量在模型中具有较高比例。

表 2 模型多重共线性检验
Table 2 Model multicollinearity test

因子	VIF	因子	VIF
中深层地下水埋深	1.234 526	松散层厚度	1.519 002
中深层水位变幅	1.625 721	人口密度	1.116 396
深层水位变幅	1.681 352	道路密度	1.053 348
深层地下水埋深	2.087 465	单位面积GDP	2.481 104

表 3 2022 年地面沉降 GWR 回归模型参数
Table 3 Ground subsidence GWR regression model parameters for 2022

监测年份	带宽	赤池信息准则	可决系数	校正可决系数
2022年	824	11 850.657 545	0.394 583	0.373 125

3 结果

3.1 精度验证

为验证本文中研究区地面沉降数据的可靠性, 选取

谯城区周围 3 个同期水准点测量值与 SBAS-InSAR 监测结果进行对比。结果(表 4)显示, SBAS-InSAR 结果与水准测量值的误差在 1 mm 以内, 说明监测结果具有较高的可信度。

表 4 SBAS-InSAR 监测结果与水准数据对比
Table 4 Comparison between SBAS-InSAR monitoring results and leveling data

点名	实测形变量/mm	SBAS-InSAR监测的形变量/mm	差值/mm
BJ01	3	3.83	0.83
BJ02	-1	-0.54	-0.46
BXJ08	-4	-3.78	-0.22

监测结果与实测数据间存在一定误差, 主要是因为 SAR 影像在干涉过程中受到大气延迟、地形起伏和失相干等多种因素影响产生的误差。此外, 水准测量获取的是单个监测点的高程变化, 而 SBAS-InSAR 结果则是一个单元格网(面状)的平均形变量, 二者不一定完全对应。

3.2 地面沉降时空分布特征

通过 SBAS-InSAR 处理, 得到 2021 年 10 月至 2022 年 10 月内亳州市地表形变速率(图 3)。亳州市整体沉降速率为 5~30 mm/a, 平均沉降速率为 5.7 mm/a。地面沉降主要分布于谯城区东北部、涡阳县城、利辛县城以及蒙城县的部分地区; 沉降最严重区域位于涡阳县公吉寺镇以北, 受煤矿开采影响, 沉降速率幅值达到

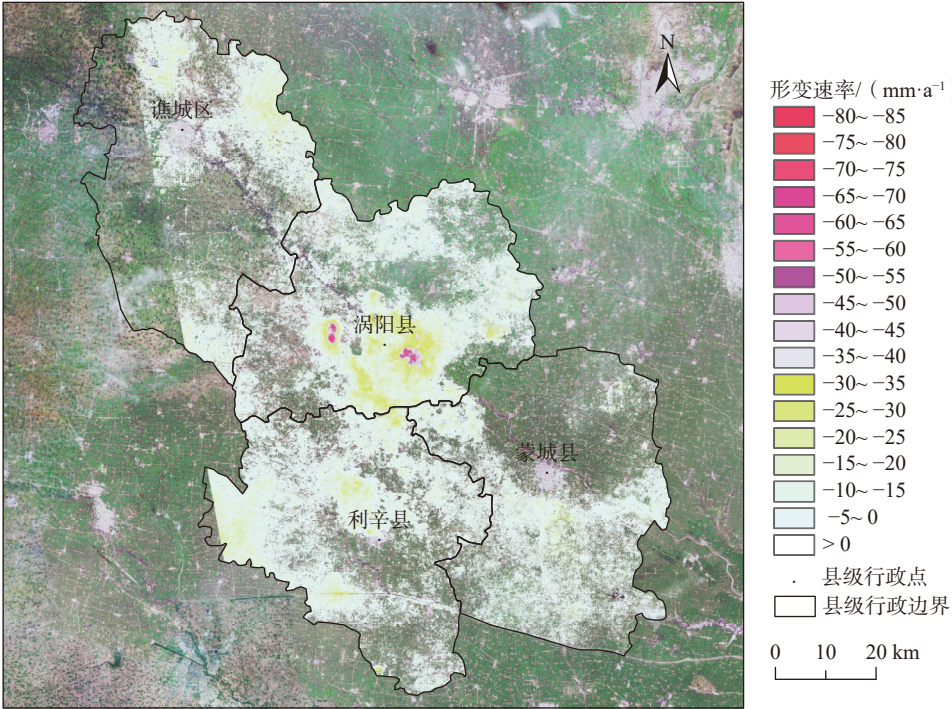


图 3 亳州市 2021 年 10 月至 2022 年 10 月形变速率分布图

Fig. 3 Distribution map of the subsiding rate of Bozhou from October 2021 to October 2022

84.3 mm/a; 谯城区东北侧的地面沉降幅值为 25.8 mm/a; 在利辛县城及蒙城县的部分地区内, 大多数区域地面沉降速率幅度小于 10 mm/a 水平, 局部区域地面沉降幅度达到 20 mm/a 水平。

监测时段内沿雷达视线向(Line of Sight, LOS)的时序累计形变量如图 4 所示。在涡阳县中部、谯城区东

北部、利辛县西部以及蒙城县中部, 均监测到明显形变, 形变量随时间推移逐渐增大。截至观测结束, 涡阳县受煤矿开采影响区域, 累积沉降量幅值达到 83.4 mm, 其余地区最大累计沉降量为 27.3 mm; 亳州市大部分区域地表累计沉降量处于 5~30 mm 水平, 平均累计沉降量为 7.3 mm 左右。

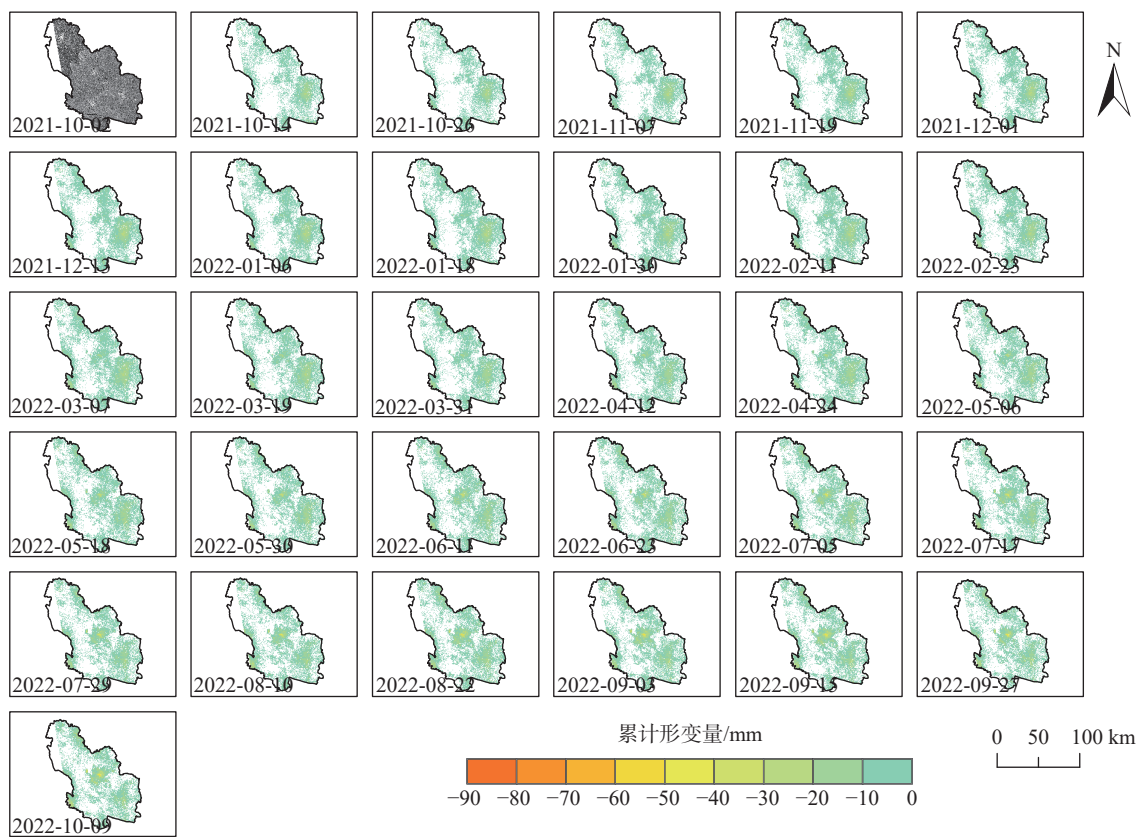


图 4 亳州市 2021 年 10 月至 2022 年 10 月时序累计形变量图

Fig. 4 Time-series accumulated deformation map in Bozhou City from October 2021 to October 2022

3.3 地理加权回归模型构建结果

为了能够有效地掌握建模数据的分布情况, 本文使用最小值、中值、最大值及平均值对模型运算结果进行叙述性统计。各建模变量拟合系数如表 5 所示, 当系数

为正时, 自变量与因变量呈正相关关系; 当系数为负时, 自变量与因变量呈负相关关系, 且拟合系数的绝对值越大, 相关性越强。因此, 各因素对地面沉降的贡献度排序依次为深层水位变幅、中深层水位变幅、中深层地下水埋深、深层地下水埋深、单位面积 GDP、松散层厚度、道路密度、人口密度。

表 5 模型运算结果叙述性统计

Table 5 Descriptive statistics of model calculation results

变量	最小值	中值	最大值	平均值
深层水位变幅	-1.487	0.938	7.769	3.141
中深层水位变幅	-1.482	0.602	2.674	0.596
中深层地下水埋深	-0.747	-0.311	0.065	-0.341
深层地下水埋深	-0.293	-0.050	0.085	-0.104
单位面积GDP	-0.003	0.000	0.001	-0.001
松散层厚度	-0.014	0.000	0.013	-0.000 5
道路密度	-0.000	0.000	0.001	0.000 5
人口密度	-0.001	0.000	0.001	0.000

4 讨论

4.1 采煤区地面沉降影响因素

亳州市煤矿资源主要分布在涡阳、蒙城两县, 其中涡阳县现有矿产地 13 处, 是区内主要的采煤区。结合驱动力因子回归结果与煤炭实际开采情况可知, 采煤区沉降受地下水抽取与煤矿开采共同影响, 而煤矿开采是沉降严重区域形变的主导因素。驱动力因子回归系数

显示,采煤区地面沉降与中深层水位变幅,见图 5(c)、深层水位变幅,见图 5(d)呈显著正相关,说明地下水水位变化对地面沉降具有一定贡献。而该地区沉降最严重区域位于涡阳县公吉寺镇以北的信湖煤矿,最大沉降达 83.4 mm。信湖煤矿于 2021 年 9 月 16 日正式投产,随着采矿活动的进行,矿区沉降速率持续加快。煤炭被

采出后,形成采空区,随着采空区范围不断扩张,采空区上部覆岩和周围岩体的应力平衡遭到破坏,覆岩受到的重力作用逐渐增加,当压力超过临界值后,煤层顶板及周围岩体发生弯曲、断裂和垮落,导致整个上覆岩层的变形和移动,最终在地表形成大范围塌陷坑^[30]。

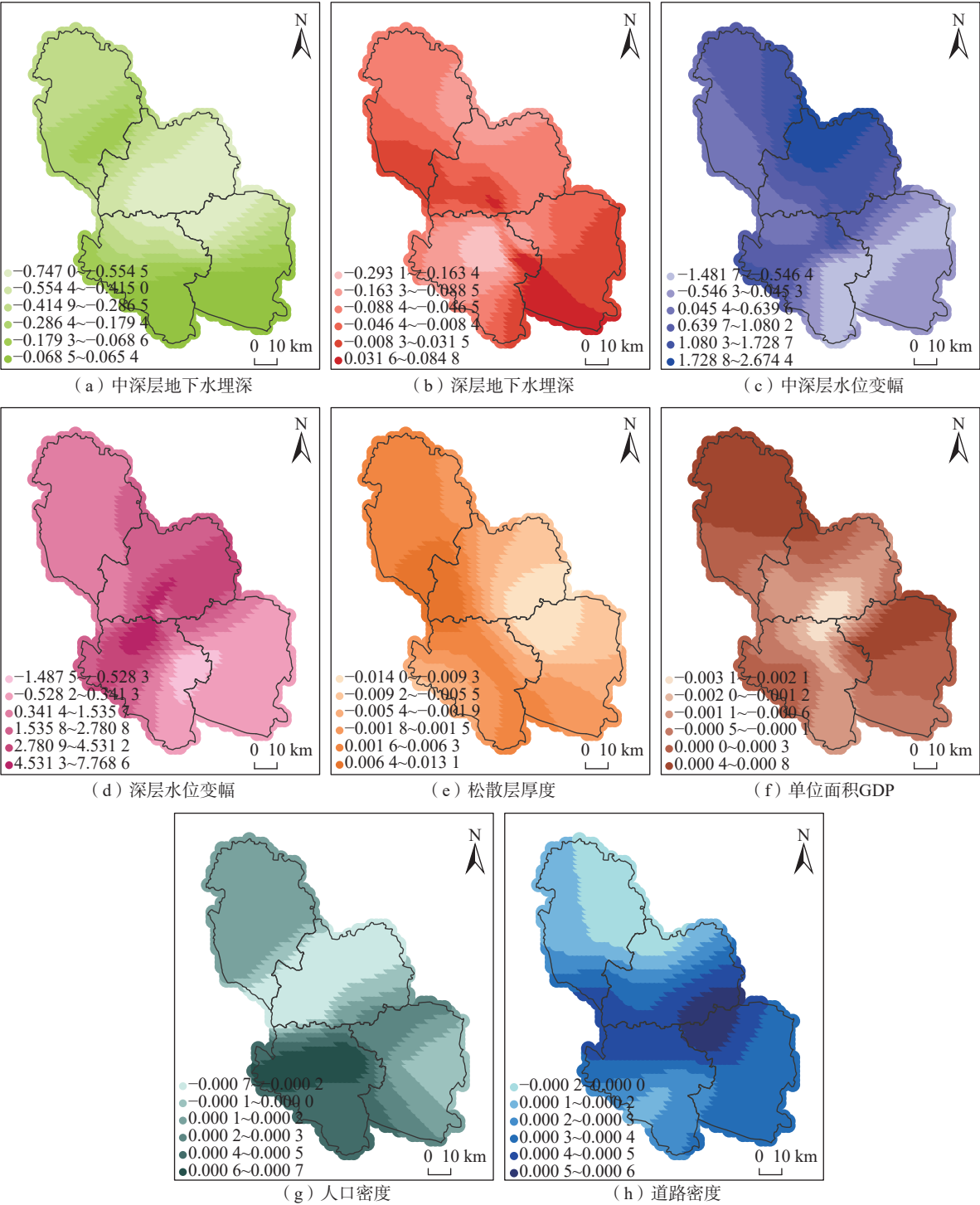


图 5 各因子对地面沉降影响的回归系数图

Fig. 5 Regression coefficients of different factors influencing ground subsidence

4.2 非采煤区地面沉降影响因素

非采煤沉降区主要位于谯城区东北部与利辛县西部, 累计沉降量幅值为 27.3 mm。驱动力因子回归系数显示, 地下水状况与非采煤区地面沉降相关性较强, 中深层水位变幅, 见图 5(c) 和深层水位变幅, 见图 5(d) 与地面沉降呈现正相关。自 20 世纪 80 年代以来, 亳州市城市经济持续发展, 人口迅速增长, 对地下水资源的需求量也逐年增加。据有关资料估测^[20], 亳州市目前地下水日开采量在 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 左右, 深层地下水开采量在 $1.9 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。对深层地下水的过度开采, 诱使承压水头持续降低, 降落漏斗面积不断扩大。当水头压力差作用于下伏黏性土层时, 黏性土层的中低压缩性, 会导致其越流或者压密释水, 引起自身测压水头下降, 使土体被纵向压缩; 而砂性含水层受水头减小的影响, 会释放出—部分储存的水, 使得含水层内部的应力状态发生变化。原本承压水头支撑的上覆载荷被转移至含水层砂砾间, 致使砂砾间的有效压力增加, 含水层被垂直压缩。在地表上监测到的沉降量, 即为降落漏斗范围内黏性土层与含水砂性土层的压缩量之和^[31]。

4.3 地质因素对地面沉降的影响

松散层厚度与地面沉降的关系如图 5(e) 所示, 在亳州市中部和西南部回归系数为负, 对地面沉降起抑制作用; 在北部和南部回归系数为正, 对地面沉降起促进作用。亳州市地处淮北平原, 地下发育有第四系和新近系松散沉积物^[20], 构成了地面沉降的物质基础。城市公共设施建设快速发展, 城市建筑物的荷载不断增加, 导致松散层被压实, 进而引发地面沉降^[22]; 另一方面, 松散层中不同土层持水性具有的很大差异, 过度开采地下水, 使得土层颗粒间的有效应力增大, 孔隙体积被压缩, 导致地面沉降。

5 结论

本文利用 2021 年 10 月至 2022 年 10 月期间 62 景 Sentinel-1 卫星 SAR 影像, 采用 SBAS-InSAR 技术获取了亳州市该时段内的地面形变速率及累计形变量, 并对地面沉降的时空格局以及驱动力因素进行了分析, 结果如下:

(1) 亳州市全域地面基本稳定, 但局部地区存在明显的地面沉降现象。2021 年 10 月至 2022 年 10 月期间, 亳州市地面沉降最严重区域位于涡阳县公吉寺镇以北, 幅值为 84.3 mm/a, 主要受煤矿开采影响所致。其他因采水导致地面沉降最大速率为 25.8 mm/a, 位于谯城区东北侧。

(2) 监测时段内, 涡阳县中部、谯城区东北部、利辛县西部以及蒙城县中部均监测到明显形变, 并且形变量随时间推移逐渐增大, 亳州市整体平均累计沉降量为 7.3 mm 左右, 采煤沉降区累计沉降量幅值为 83.4 mm, 非采煤沉降区累计沉降量幅值为 27.3 mm。

(3) 各驱动力因素对地面沉降的贡献度排序为深层水位变幅、中深层水位变幅、中深层地下水埋深、深层地下水埋深、单位面积 GDP、松散层厚度、道路密度、人口密度。

参考文献(References):

- [1] 曹群, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 基于 SBAS 和 IPTA 技术的京津冀地区地面沉降监测 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(3): 381–391. [CAO Qun, CHEN Beibei, GONG Huili, et al. Monitoring of land subsidence in Beijing-Tianjin-Hebei Urban by combination of SBAS and IPTA [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2019, 55(3): 381–391. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 杨魁, 闫利, 黄国满, 等. InSAR 和地表覆盖的地表沉降驱动力分析 [J]. 测绘科学, 2019, 44(1): 42–47. [YANG Kui, YAN Li, HUANG Guoman, et al. Research on the change of urban subsidence based on InSAR and land cover of national geographic conditions [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(1): 42–47. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 朱邦彦, 唐超, 任志忠, 等. 基于 PS-InSAR 技术的珠海市地表形变监测与驱动力分析 [J]. 测绘通报, 2022(6): 108–113. [ZHU Bangyan, TANG Chao, REN Zhizhong, et al. Surface deformation monitoring and driving force analysis in Zhuhai city based on PS-InSAR technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(6): 108–113. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 尹承深, 刘全明, 王福强. 基于 Sentinel-1A SAR 数据的呼和浩特城区地表形变分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 73–81. [YIN Chengshen, LIU Quanming, WANG Fuqiang. Surface deformation analysis of Hohhot urban area based on SAR data from Sentinel-1A [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 73–81. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 戴真印, 刘岳霖, 张丽平, 等. 基于改进时序 InSAR 技术的东莞地面沉降时空演变特征 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 58–67. [DAI Zhenyin, LIU Yuelin, ZHANG Liping, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of land subsidence in Dongguan City based on improved InSAR technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 58–67. (in Chinese with English abstract)]

- [6] 董少春, 种亚辉, 胡欢, 等. 基于时序InSAR的常州市2015—2018年地面沉降监测 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(3): 370–380. [DONG Shaochun, CHONG Yahui, HU Huan, et al. Ground subsidence monitoring during 2015–2018 in Changzhou based on time series InSAR method [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2019, 55(3): 370–380. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郭世鹏, 张王菲, 康伟, 等. 融合PS、SBAS、DS InSAR技术的昆明地面沉降研究 [J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(2): 460–473. [GUO Shipeng, ZHANG Wangfei, KANG Wei, et al. The study on land subsidence in Kunming by integrating PS, SBAS and DS InSAR [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(2): 460–473. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈毅, 何毅, 张立峰, 等. 长短时记忆网络TS-InSAR地表形变预测 [J]. 遥感学报, 2022, 26(7): 1326–1341. [CHEN Yi, HE Yi, ZHANG Lifeng, et al. Surface deformation prediction based on TS-InSAR technology and long short-term memory networks [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(7): 1326–1341. (in Chinese with English abstract)]
- [9] ZHANG Peng, GUO Zihao, GUO Shuangfeng, et al. Land subsidence monitoring method in regions of variable radar reflection characteristics by integrating PS-InSAR and SBAS-InSAR techniques [J]. Remote Sensing, 2022, 14(14): 3265.
- [10] 张凯翔, 张占荣, 于宪煜. SBAS-InSAR和PS-InSAR技术在鲁西南某线性工程沿线地面沉降成因分析中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 65–76. [ZHANG Kaixiang, ZHANG Zhanrong, YU Xianyu. Application of SBAS-InSAR and PS-InSAR technologies in analysis of landslide subsidence along a linear infrastructure in Southwestern Shandong [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 65–76. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 何秀凤, 高壮, 肖儒雅, 等. InSAR与北斗/GNSS综合方法监测地表形变研究现状与展望 [J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1338–1355. [HE Xiufeng, GAO Zhuang, XIAO Ruya, et al. Application and prospect of the integration of InSAR and BDS/GNSS for land surface deformation monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1338–1355. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李志伟, 许文斌, 胡俊, 等. InSAR部分地学参数反演 [J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1458–1475. [LI Zhiwei, XU Wenbin, HU Jun, et al. Partial geoscience parameters inversion from InSAR observation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1458–1475. (in Chinese with English abstract)]
- [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] 高胜, 曾琪明, 焦健, 等. 永久散射体雷达干涉研究综述 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 86–94. [GAO Sheng, ZENG Qiming, JIAO Jian, et al. A review on persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 86–94. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717–1733. [ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717–1733. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 潘建平, 邓福江, 徐正宣, 等. 基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 98–104. [PAN Jianping, DENG Fujian, XU Zhengxuan, et al. Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 98–104. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王守沛, 胡留洋. 基于D-InSAR技术在亳州市地面沉降分析 [J]. 西部探矿工程, 2020, 32(7): 114–116. [WANG Shoupei, HU Liuyang. Analysis of land subsidence in Bozhou city based on D-InSAR technology [J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(7): 114–116. (in Chinese)]
- [19] 彭鹏. 基于SBAS技术的亳州市地面沉降遥感监测应用研究 [J]. 西部资源, 2016(4): 152–155. [PENG Peng. Bozhou city ground subsidence monitoring based on SBAS [J]. Western Resources, 2016(4): 152–155. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 辛洪光, 朱虎, 辛翌龙. 亳州市地面沉降成因分析与防治对策 [J]. 城市与减灾, 2021(3): 34–38. [XIN Hongguang, ZHU Hu, XIN Yilong. Cause analysis and controlling countermeasures of surface subsidence in Bozhou City, Anhui Province [J]. City and Disaster Reduction, 2021(3): 34–38. (in Chinese)]
- [21] 潘光永, 陶秋香, 陈洋, 等. 基于SBAS-InSAR的山东济阳矿区沉降监测与分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 100–106. [PAN Guangyong, TAO Qiuxiang, CHEN Yang, et al. Monitoring and analysis of sedimentation in Jiyang mining area of Shandong Province based on SBAS-InSAR [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and

- Control, 2020, 31(4): 100 – 106. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 莫莉, 王贤能. 基于PS-InSAR技术的后海深槽地面及建筑物形变监测分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 68 – 74. [MO Li, WANG Xianneng. Monitoring and analysis of ground and building settlement of deep trough in Houhai based on PS-InSAR technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 68 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 杨正荣, 喜文飞, 史正涛, 等. 基于SBAS-InSAR技术的白鹤滩水电站库岸潜在滑坡变形分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 83 – 92. [YANG Zhengrong, XI Wenfei, SHI Zhengtao, et al. Deformation analysis in the bank slopes in the reservoir area of Baihetan Hydropower Station based on SBAS-InSAR technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 83 – 92. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 蒲川豪, 许强, 蒋亚楠, 等. 延安新区地面沉降分布及影响因素的时序InSAR监测分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1728 – 1738. [PU Chuanhao, XU Qiang, JIANG Yanan, et al. Analysis of land subsidence distribution and influencing factors in Yan'an new district based on time series InSAR [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1728 – 1738. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 叶勇超, 闫超德, 罗先学, 等. 时序InSAR郑州地铁沿线地面沉降分析 [J]. 遥感学报, 2022, 26(7): 1342 – 1353. [YE Yongchao, YAN Chaode, LUO Xianxue, et al. Analysis of ground subsidence along Zhengzhou metro based on time series InSAR [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(7): 1342 – 1353. (in Chinese with English abstract)]
- [26] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity [J]. Geographical Analysis, 2010, 28(4): 281 – 298.
- [27] 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, 2019. [ZHANG Yang. Spatial-temporal patterns, driving forces and hydrological effects of land subsidence: A case study of Wuhan City, China [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张琦, 曹蔚宁, 延书宁. 旅游发展对城乡收入差距影响的空间异质性——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR) [J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2022, 22(5): 112 – 123. [ZHANG Qi, CAO Weining, YAN Shuning. Spatial heterogeneity of the impact of tourism development on urban-rural income gap in china—based on multi-scale geographically weighted regression model(MGWR) [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2022, 22(5): 112 – 123. (in Chinese with English abstract)]
- [29] JI Yanjie, MA Xinwei, YANG Mingyuan, et al. Exploring spatially varying influences on metro-bikeshare transfer: A geographically weighted Poisson regression approach [J]. Sustainability, 2018, 10(5): 1526.
- [30] 梁勇旗, 杜守华. 浅谈煤矿采空区的塌陷机理及发展因素 [J]. 岩土工程界, 2008(8): 35 – 37. [LIANG Yongqi, DU Shouhua. Discussion on collapse mechanism and development factors of coal mine goaf [J]. Geotechnical Engineering World, 2008(8): 35 – 37. (in Chinese)]
- [31] 黄多成, 王守沛. 亳州市城市环境地质问题及防治对策浅析 [J]. 地下水, 2020, 42(4): 126 – 128. [HUANG Duo Cheng, WANG Shoupei. A brief analysis of Bozhou City environmental geological problems and countermeasures [J]. Ground Water, 2020, 42(4): 126 – 128. (in Chinese with English abstract)]