

基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析

葛伟丽, 李元杰, 张春明, 张红霞, 王志超, 杨红磊

An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR

GE Weili, LI Yuanjie, ZHANG Chunming, ZHANG Hongxia, WANG Zhichao, and YANG Honglei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望

Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain

郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 陈晔, 臧西胜, 王云龙, 朱菊艳, 卞跃跃 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 162-171

基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统

Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings

何健辉, 张进才, 陈勇, 闫星光, 施斌, 魏广庆, 贾立翔, 刘苏平 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 146-153

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity

刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 陆垂裕, 孙青言, 严聆嘉, 彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-47

三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 10-17

基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究

A study of deformation mode and formation mechanism of abedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology

姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 李凌婧, 任开, 刘星洪 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 135-146

地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展

Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone

刘鑫, 左锐, 王金生, 何柱锟, 李桥 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 27-36



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106022

葛伟丽, 李元杰, 张春明, 等. 基于 InSAR 技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 198-206.

GE Weili, LI Yuanjie, ZHANG Chunming, *et al.* An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 198-206.

基于 InSAR 技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析

葛伟丽¹, 李元杰¹, 张春明², 张红霞³, 王志超¹, 杨红磊⁴

(1. 内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古呼和浩特 010020; 2. 内蒙古煤炭建设生态环境研究院有限责任公司, 内蒙古呼和浩特 010020; 3. 内蒙古自治区测绘地理信息中心, 内蒙古呼和浩特 010020; 4. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

摘要: 巴彦淖尔市位于内蒙古自治区西部, 区内第四系松散沉积层厚度大, 具有发育地面沉降的基础条件。为填补该地区地面沉降研究的空白, 利用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术分别对巴彦淖尔市 2007—2011 年 (ALOS PALSAR 数据, 98 景) 和 2015—2016 年 (Radarsat-2 数据, 10 景) 的地面沉降情况进行定量分析, 并现场实地调查验证了 InSAR 技术监测结果的可靠性, 以分析探讨该区域地面沉降成因及发展趋势。研究结果表明: (1) 巴彦淖尔市地面沉降属于缓慢性沉降, 沉降严重程度为低级, 处于发生阶段; (2) 2007—2011 年沉降速率主要集中在 0~10 mm/a, 存在 3 处地面沉降集中区, 即杭锦后旗沉降区 (A)、临河区沉降区 (B)、开发区水源地及北部沉降区 (C); (3) 2015—2016 年沉降速率主要集中在 0~2.6 mm/a, 存在 1 处地面沉降区, 即临河区及北部沉降区 (D), 该沉降区是在 B 区的基础上继续向周边及北部扩展形成的; (4) 巴彦淖尔市地面沉降的主要影响因素为地下水开发利用引起的地下水位下降, 沉积层固结压实是重要因素, 地表荷载的增加也产生了一定推动作用。

关键词: PS-InSAR; SBAS-InSAR; 巴彦淖尔市; 地面沉降; 地下水位下降

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0198-09

An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR

GE Weili¹, LI Yuanjie¹, ZHANG Chunming², ZHANG Hongxia³, WANG Zhichao¹, YANG Honglei⁴

(1. Inner Mongolia Geological Survey and Research Institute, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China;

2. Inner Mongolia Coal Construction and Ecological Environment Research Institute, Hohhot, Inner

Mongolia 010020, China; 3. Inner Mongolia Surveying and Mapping Geographic Information Center,

Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 4. College of Land Science and Technology,

China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The thickness of Quaternary loose sediments in the city of Bayannur in the west of Inner Mongolia Autonomous Region is large, which provides basic conditions for the development of land subsidence. ALOS

收稿日期: 2021-06-07; 修订日期: 2021-11-29

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 内蒙古自治区财政建设项目 ([2016]495)

第一作者: 葛伟丽 (1988-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事地面沉降调查及地下水监测相关研究。E-mail: 1147523461@qq.com

通讯作者: 李元杰 (1983-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事水文地质环境地质调查。E-mail: lyjieoucc@163.com

PALSAR (98 frames from 2007 to 2011) and RADARSAT-2 (10 frames from 2015 to 2016) are extracted to quantitatively analyze the land subsidence in the city of Bayannur, respectively, by using the PS-InSAR and SBAS-InSAR method for the first time, and field investigation is carried out to verify the reliability of InSAR monitoring results. The causes and development trend of land subsidence in this area are further analyzed, and important technical support for land subsidence disaster prevention and reduction are provided. The results indicate that (1) the land subsidence in the city of Bayannur exhibits a slow trend. The severity of subsidence is low and belongs to the stage of occurrence. (2) The subsidence rate was mainly concentrated in 0–10 mm/a from 2007 to 2011, and three concentrated land subsidence areas were observed: the Hanggin Rear Banner subsidence area (A), Linhe district subsidence area (B), and the water source area of development zone subsidence area (C). (3) From 2015 to 2016, the subsidence rate was mainly concentrated in 0–2.6 mm/a, and one concentrated land subsidence area was detected, that is, the Linhe district and north subsidence area (D), where the land subsidence is based on the Linhe district subsidence area (B), and continues to expand to the surrounding areas and the north. (4) The main influencing factor of land subsidence in the city of Bayannur is the groundwater level drop caused by the development and utilization of groundwater. Besides, the consolidation and compaction of the sediments is also an essential factor for the land subsidence in this area, and the increase in surface load has a certain promoting effect on the land subsidence.

Keywords: PS-InSAR; SBAS-InSAR; Bayannur; land subsidence; groundwater level drop

地面沉降是指由于自然因素或人类工程活动引发的松散层固结压缩并导致一定区域范围内地面高程降低的地质现象,是一种不可补偿的永久性环境和资源损失^[1-2]。地震、采矿、石油、天然气或地下水的过度开采以及构造运动等各种因素都可能导致地面沉降^[3-4]。长期地下水超采导致松散沉积物中颗粒间孔隙流体压力降低从而引发的地面沉降,已是世界范围内各大城市面临的主要地质环境问题之一^[5-7]。

在地面沉降测量方面,传统的水准测量手段和 GPS 监测更适合离散点的监测,对于地域范围跨度较大、沉降变化较为缓慢且时间较长的城市地面沉降监测,这两种方法都具有其局限性^[8]。合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar-technique, InSAR)以其全天候、全天时、精度高、覆盖范围大的优点被广泛应用^[9-10],其中永久散射体干涉法(Permanent Scatterer Intervention Method, PS-InSAR)和小基线集方法(Small Baseline Set Method, SBAS-InSAR)作为先进的 InSAR 技术方法,可以克服大气延迟和时空非相干性等缺陷,获得高精度的沉降反演结果,已被许多国家用于城市地面沉降监测^[11-12]。此外,高分辨率 SAR 图像也得到广泛应用,如搭载相控阵型 L 波段合成孔径雷达(PALSAR)传感器的 ALOS 卫星(ALOS-PALSAR)和搭载 C 波段传感器的 Radarsat-2 卫星的 SAR 图像^[13-14]。

巴彦淖尔市位于内蒙古自治区西部,近年来随着

人口激增和城市建设加快,地下水降落漏斗范围不断扩大,且该地区固有的第四系粉砂层具有发育广、厚度大的特点,易产生不均匀地面沉降,且沉降持续时间较长^[15],因此巴彦淖尔市具备地面沉降产生的基础条件,然而目前该市地面沉降的区域性研究尚未开展,已有的水平面测点近年来也遭到严重破坏。因此,本文利用 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术首次对巴彦淖尔市 2007—2011 年和 2015—2016 年的地面沉降演化特征进行定量研究分析,通过现场实地调查验证 InSAR 技术监测结果的可靠性,并进一步分析研究区地面沉降成因及发展趋势,以期对地面沉降防灾减灾提供技术支撑。

1 研究区概况

巴彦淖尔市位于黄河冲积平原上,总面积 65 139 km²,地面开阔平坦,海拔 1 045 ~ 1 209 m,地势由西南向东北倾斜。地表出露多为第四系全新统冲积砂及砂质粉土,厚 6 ~ 51 m。第四系厚约 1 000 m,推测最大厚度为 1 200 ~ 1 500 m。第四系沉积层厚度大、含水率高、固结程度差,在重力等作用下,易发生地层自然压实、固结。构造上属于河套盆地,西界为郎山前缘断裂,北界为色尔腾山断裂,南界为鄂尔多斯北缘断裂。总体而言,区域地壳处于相对稳定状态。研究区内有 2 条断裂带:1 条分布在东北方向,从晨光村到高峰村;另 1 条分布在民丰村—友谊村—扶丰村,沿东

西方向分布。区内浅层地下水分布普遍,为主要开采层^[16]。含水层埋藏厚度受构造控制明显,盆地边缘较薄,深拗陷带较厚,临河区一般为 55~60 m,粉砂层

厚度自东向西、自南向北逐渐增加,埋深相应加深。粉砂层厚度在北部杭锦后旗地区最大,达 280 m^[17](图 1—2)。

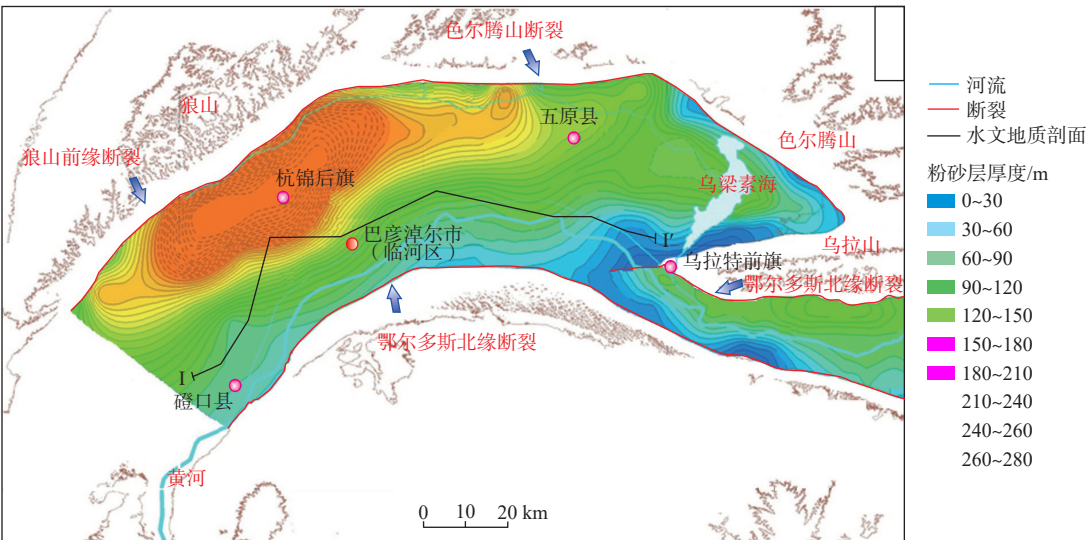


图 1 研究区地理位置及第四系粉砂层厚度图

Fig. 1 Geographical location of the study area and depth of the Quaternary silt strata

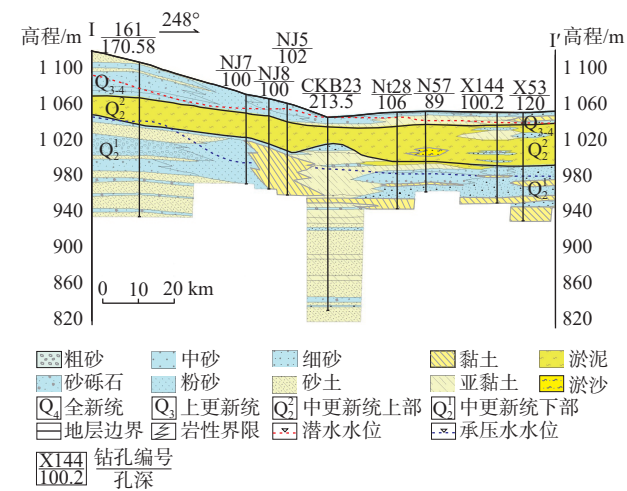


图 2 I—I'水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological profile of section I—I'

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究采用 ALOS PALSAR(2007-01-13—2011-03-11, 98 景)和 Radarsat-2(2015-06-28—2016-12-31, 10 景)图像。ALOS PALSAR 数据较丰富,数据采样较均匀,L 波段数据波长较长、穿透性较好,在非建筑区仍有相干性。目前在轨卫星有 Radarsat-2、TerraSAR-X、COSMO-SkyMed 和 Sentinel-1,其中 Radarsat-2 从 2015 年开始,

在研究区有拍摄数据,TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 在研究区无存档数据。综合对比已有数据情况、数据幅宽和波长等指标,最终选用 ALOS PALSAR 和 Radarsat-2 数据分别对巴彦淖尔市 2007—2011 年和 2015—2016 年的地面历史沉降情况进行分析研究。采集参数如表 1 所示。

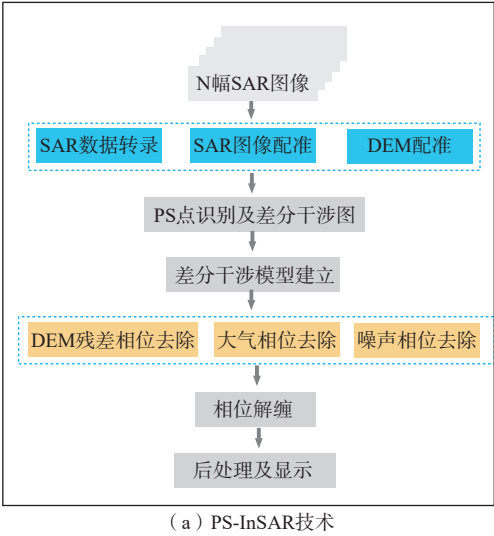
表 1 巴彦淖尔市 ALOS PALSAR 和 Radarsat-2 数据参数
Table 1 Parameters of ALOS PALSAR data and Radarsat-2 SAR data in the city of Bayannur

传感器	ALOS PALSAR	Radarsat-2
卫星高度/km	691.65	798
波段(波长/cm)	L(23.6)	C(5.6)
空间分辨率/m	4.684(FBS)/9.368(FBD)	5
图幅范围/km	30×70	125×125
影像数/景	98	10
时间跨度	2007-01-13—2011-03-11	2015-06-02—2016-12-31

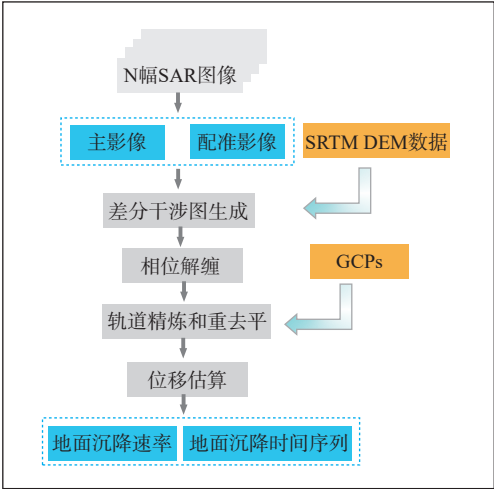
2.2 研究方法

采用 PS-InSAR 方法对 2007-01-13—2011-03-11 期间巴彦淖尔市的地面沉降进行识别。PS-InSAR 技术本质上属于雷达差分干涉法,将测量区域的序列 SAR 图像对应的地面目标分为永久散射(Permanent Scatterer, PS)点和非永久散射点两类,然后提取 PS 点,采用差分干涉法和建模方法实现信号相位的分离,最后提取 PS 变形信息并进行插值得到研究区域的地面形

变情况^[18], 如图 3(a)所示。选取 2009 年 9 月 22 日的图像为主影像, 与其他影像组合 24 个干涉像对, 得到地表形变信息。采用 10 景 Radarsat-2 数据对 2015-06-02—2016-12-31 期间巴彦淖尔市的地面沉降情况进行简单研究, 而 PS-InSAR 方法要求 SAR 数据量大于 25 景, 因此采用 SBAS-InSAR 方法研究 2015-06-02—2016-12-31 期间的地面沉降情况。以时间基线不超过 350 d、空间基线不长于 560 m 为原则, 组成干涉对, 得到该地区的地表沉降速率, 具体处理过程如图 3(b)所示。



(a) PS-InSAR技术



(b) SBAS-InSAR技术

图 3 数据处理流程

Fig. 3 Workflow of InSAR data processing

注: DEM 为数字高程模型(Digital Elevation Model); SRTM 为航天飞机机载干涉雷达测地任务(Shuttle Radar Topography Mission); GCPs 为选取地面控制点(Ground Control Point Selection)。

3 研究结果

对 2007—2011 年 98 幅 ALOS PALSAR 数据的 SAR

图像进行干涉处理, 最终获取 PS 点。巴彦淖尔市的地面沉降主要表现为缓慢性沉降, 沉降速率集中在 0~10 mm/a。所有 PS 点中最大沉降速率达 23.7 mm/a, 位于临河区乔和圪旦的空地上。以 InSAR 影像解译结果为基础, 选择 InSAR 解译成果沉降速率较大的 PS 点集中分布区, 结合城市地下水开采情况、区域地下水水位动态变化特征、地下水降落漏斗形态特征、第四系粉砂层发育特征等条件, 并进行野外验证, 综合确定地面沉降区的位置及范围。结果表明 2007—2011 年巴彦淖尔市存在 3 处地面沉降集中区, 即杭锦后旗沉降区(A)、临河区沉降区(B)、开发区水源地及北部沉降区(C), 如表 2 和图 4(a)所示。2015—2016 年巴彦淖尔市的沉降也为缓慢性沉降, 沉降速率集中在 0~2.6 mm/a; 沉降速率最大值为 5.634 mm/a, 位于临河区光明村中央路口以北 0.3 km 处; 且存在 1 处地面沉降区, 即临河区及北部沉降区(D), 如表 2 和图 4(b)所示。巴彦淖尔市地面沉降整体表现为缓慢性沉降, 按《地面沉降干涉雷达数据处理技术规程》(DD 2014—11)中地面沉降严重程度分级标准, 巴彦淖尔市地面沉降严重程度属于低级。

表 2 巴彦淖尔市地面沉降集中区特征
Table 2 Characteristics of land subsidence concentration area in the city of Bayannur

编号	地面沉降区	最大沉降速率/(mm·a ⁻¹)	沉降区面积/km ²	时间段
A	杭锦后旗	7.285	33.04	2007—2011
B	临河区	8.336	139.98	2007—2011
C	开发区水源地及北部	4.615	51.51	2007—2011
D	临河区及北部	5.634	221.43	2015—2016

实地调查发现, 在杭锦后旗陕坝镇西二街村房屋东墙发现多处裂缝, 该点距离杭锦后旗地下水超采区约 1 km; 同时, 在第一水源地 4 号水源井、第二水源地 6 号水源井发现井管相对抬升、井周存在辐射状裂缝, 其他地区未见明显地面沉降明显迹象(图 5)。这是由于巴彦淖尔市地面沉降尚处于初步发生阶段, 地面沉降严重程度属于低级, 地面沉降发展较缓, 因此未出现较大范围的区域性地面沉降迹象。

InSAR 解译影像显示, 部分地区存在地面抬升现象, 本研究在野外核查工作中有针对性地对地面抬升特征区域进行了实地核查, 核查点分布情况见图 4(a)。结果表明, 除 BN1 调查点位于临河区团结路万丰小区外, 其余调查点均位于农田、林地、草地、芦苇地, 受作物种类、长势影响, 对 InSAR 解译成果造成一定干扰。而 BN1 调查点处的万丰小区始建于 2010 年, 当

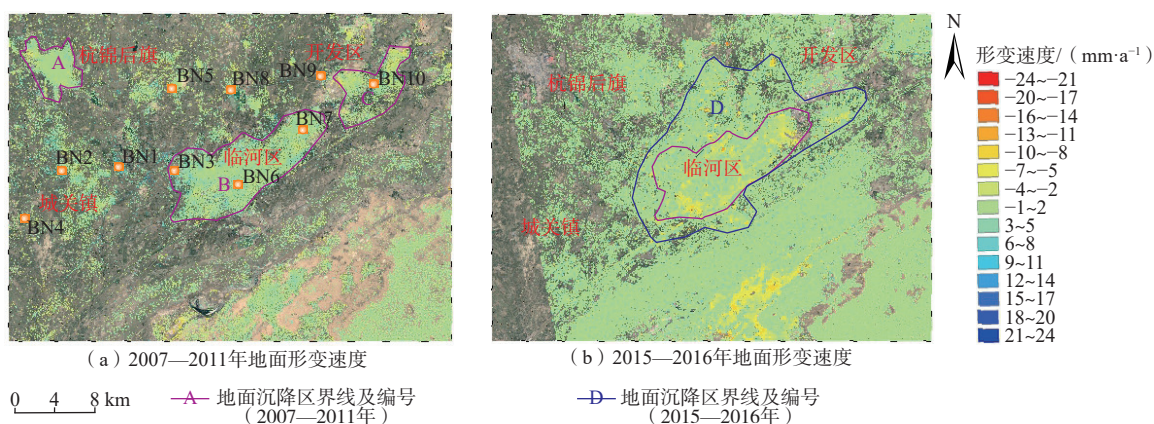


图 4 巴彦淖尔市地面形变速度

Fig. 4 Ground deformation velocity in the city of Bayannur

注: 形变速度正值表示地面抬升, 负值表示地面沉降; 点 BN1—BN10 分别为 10 个 PS 点, 用于对地面抬升点的野外验证分析。



图 5 巴彦淖尔市地面沉降特征野外调查照片

Fig. 5 Field survey photos of land subsidence characteristics in the city of Bayannur

时地表人工开挖扰动较大, 因此 2007—2011 年 InSAR 解译影像显示的地表回升现象与此有关。此外, 2015—2016 年黄河西南地区遥感解译影像显示, 研究区出现大面积的地面沉降集中点; 随后野外验证表明, 该区域位于库布齐沙漠, 地表变形易受水土风蚀等自然因素的影响, 因此, 推测这些沉降点为地面沉降干扰点; 而且由于该区域隶属于鄂尔多斯市, 不在本研究区范围内, 因此未进行详细分析研究。

4 地面沉降成因及趋势分析

4.1 地面沉降成因分析

4.1.1 自然因素

研究表明地面沉降量主要来自含水层顶板自身

的固结压缩^[19]。2007—2011 年巴彦淖尔市 A、B、C 等 3 处地面沉降集中区沉降面积较大, 其中 B 沉降面积达 139.98 km^2 ; 2015—2016 年该沉降区继续向周边及北部扩展, 沉降面积增至 221.43 km^2 。由于上述地面沉降区均位于研究区粉砂层厚度较大的区域, 因此认为巴彦淖尔市沉积物的固结压实是导致该地区地面沉降的重要因素。为了进一步探讨巴彦淖尔市沉积物固结压实对地面沉降的影响, 本研究比较分析了 2007—2011 年 3 个地面沉降区平均沉降速率与相应粉砂层厚度的相关性。结果表明, 粉砂层厚度最薄的 C 区沉降速率最低, 为 4.615 mm/a ; 中等粉砂层厚度的 B 区沉降速率最高, 为 8.336 mm/a ; 而 A 区粉砂层厚度最大, 达 $260 \sim 280 \text{ m}$, 沉降速率却较小。这说明沉积物固结是引发该区地面沉降的原因之一, 地面沉降是多种因素共同作用的结果。在本研究中, 巴彦淖尔市两条断裂两侧未见明显差异变形, 断裂两侧也未见地面沉降的带状分布。此外, 由构造活动引起的地表高程差异发生在漫长的历史时期, 速度极慢, 影响很小^[20]。因此, 不考虑构造活动对研究区的影响。

4.1.2 人为因素

2007—2011 年巴彦淖尔市存在的 3 个地面沉降集中区中, A 区位于陕坝镇水源地的东北方向, 该区地面沉降呈小范围小幅度均匀沉降, 沉降中心与杭锦后旗地下水超采区及陕坝镇水源地在区域上较为接近, 呈现出与地下开采较为相关的特性; B 区内有第一水厂、第二水厂、铁路水厂, 企事业单位自备井较多, 目前区内已形成临河区小型孔隙浅层地下水超采区, 该沉降区位于城区地下水降落漏斗中部, 区内地面沉降呈大范围小幅度均匀沉降, 地面沉降中心与地下水降

落漏斗中心在空间分布上具有较高的一致性,但沉降中心与地下水漏斗中心并非完全吻合,沉降漏斗有向东北偏移的趋势,如图 6(a)所示。其主要原因可能是软土层固结速度滞后于地下水水头变化,并且不同地区的软土层厚度对该区域地面沉降的发生、发展也有显著影响^[21-22]。2004—2015 年地下水降落漏斗范围不断扩大,可能导致地面沉降范围逐步扩大,本次对巴彦淖尔市 2015—2016 年的地面沉降调查也恰好验证了这一发展趋势: B 区在原有沉降基础上继续向周边扩展,特别是东北部,北至白虎高圪旦,东到长丰村,沉降区面积达 221.43 km²,如图 6(b)所示; C 区东南紧邻开发区水源地,由于 2010 年后开发区工业产值增加较快,导致区内企业用水增多,地下水位下降相

对较快,因此 C 区地面沉降速率相对较高,选取巴彦淖尔市 2007—2011 年两个具有完整水位监测数据的形变特征点,观测其地面形变速度和地下水位,并对二者的相关性进行回归分析。两个特征点分别位于临河区城关镇五十四社村和临河区联邦制药(内蒙古)有限公司,对应的水位监测点分别为 B120 和 B128-1,具体位置如图 6(a)所示。结果表明,地下水位与地面形变速度具有一定的相关性,水位下降时地面沉降,水位上升时地面抬升,地面形变与地下水位变化密切相关,各点两者的相关系数均大于 0.8(图 7)。因此,地下水开采是巴彦淖尔市地面沉降的主要影响因素。

2007—2011 年,巴彦淖尔市城市建设进入快速增长阶段,新增建筑物较多。地基建设往往需要在开挖

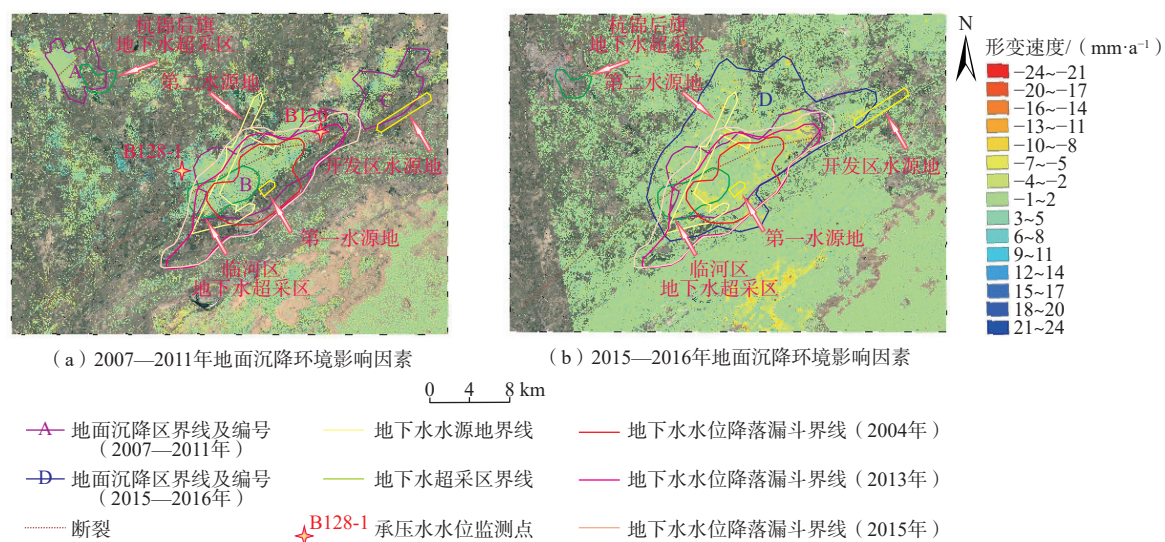


图 6 地面沉降环境影响因素图

Fig. 6 Diagram showing the environmental influencing factors in land subsidence areas

注: 形变速度正值表示地面抬升, 负值表示地面沉降; 地下水源地边界、地下水超采区边界、地下水水位降落漏斗边界(2004—2015 年)、承压水水位监测点、断裂叠加在地质图上, 用于地面沉降影响因素分析。

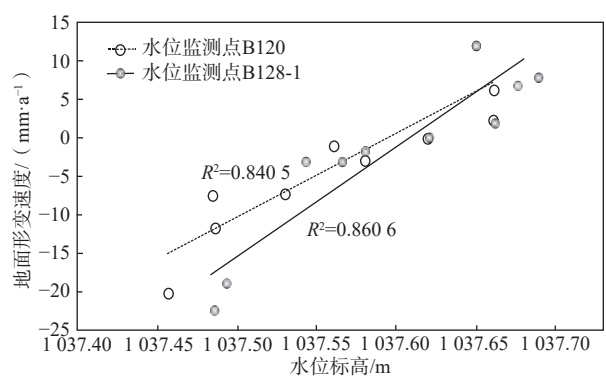


图 7 地面形变速度与承压水水位相关性

Fig. 7 Correlation of the ground deformation velocity and artesian groundwater level elevation

过程中抽取地下水,造成地基下沉。本研究查明的几个地面沉降集中区,不仅是地下水开发利用程度较高的区域,同样为居民聚居区(如 A 区和 B 区)或新增建筑较多区域(如 C 区)。分别在 3 个地面沉降集中区选取沉降点 M1、M2、M3,基于历史卫星图像,分析 2007—2011 年沉降点及沉降点周围建筑物变化情况(图 8)。结果表明,3 个典型的地面沉降点及周围均为新增建筑物较多的地区,因此地表荷载增加也是巴彦淖尔市地面沉降的影响因素之一。

4.2 地面沉降发展趋势分析

2007—2011 年和 2015—2016 年巴彦淖尔市地面

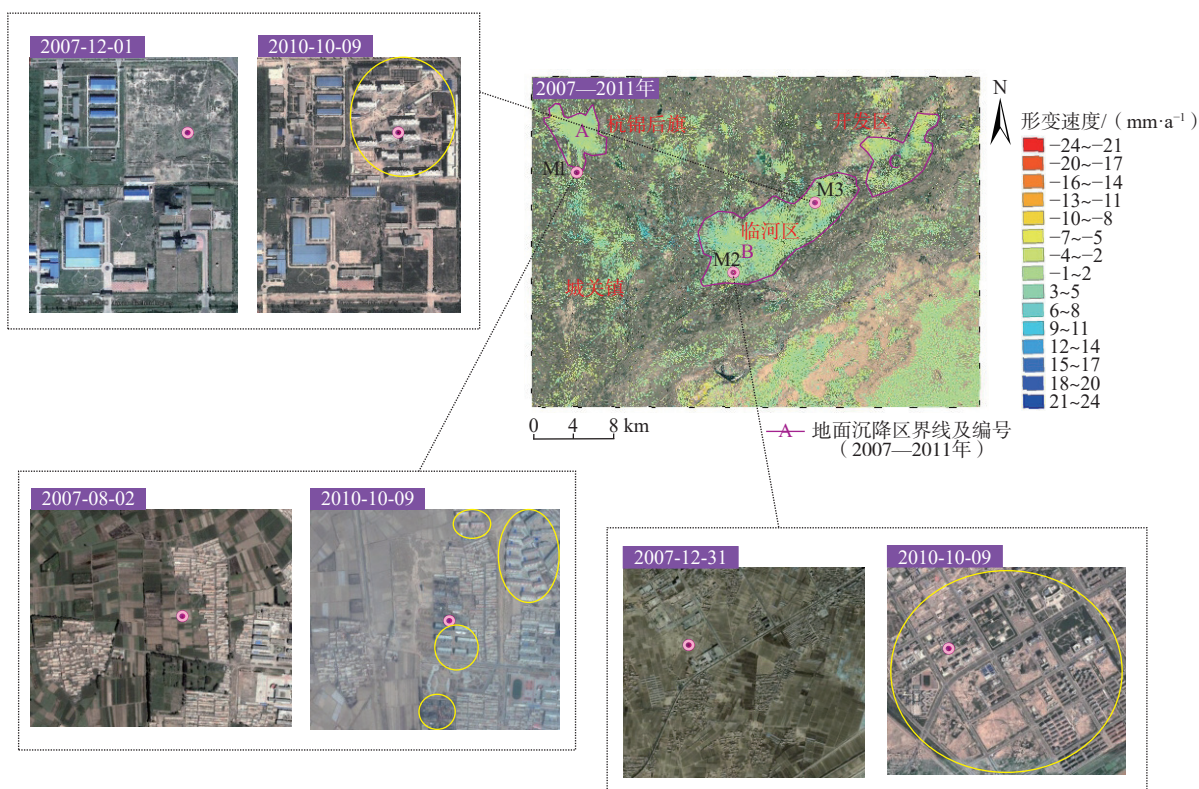


图 8 各沉降区研究期始末历史卫星影像

Fig. 8 Historical satellite images at the beginning and the end of the study period in each land subsidence area

沉降速率分别集中在 $0 \sim 10 \text{ mm/a}$ 和 $0 \sim 2.6 \text{ mm/a}$ 。由地面沉降阶段性预测标准^[23]可知巴彦淖尔市地面沉降尚属于发生阶段。尽管本次调查显示 2015—2016 年 A 区没有继续扩展或加重的趋势, 但据《巴彦淖尔市城市总体规划(2011—2030 年)》, 陕坝镇规划保留现状自来水厂, 并新建二水厂, 因此若不合理开采地下水, 未来该沉降区很有可能向东南部扩展至陕坝镇水源保护区。B 区内设有第一水厂、第二水厂、铁路水厂, 企事业单位自备井较多, 据《巴彦淖尔市城市总体规划(2011—2030)》, 中心城区保留现状一水厂、二水厂、三水厂及铁路水厂, 并在规划期末达到设计供水规模, 新建四水厂; 未来随着地下水开采强度增加, 中心城区降落漏斗可能继续扩大, 致使该沉降区向东部扩展至第三水厂, 沉降速率有所加快。C 区东南紧邻第三水厂, 近年由于临河东部巴彦淖尔经济开发区建设和开发区最大企业“联邦(内蒙古)制药公司”的入驻, 开发区已新建水源地(35 眼井)和联邦制药自备水源地(58 眼井), 未来区内企事业单位新增用水量仍会增加, 且已有研究表明, 随着建筑荷载的增大沉降范围也会增大, 当建筑荷载足够大且建筑物间距过小时, 地面沉降漏斗可能连成一片。因此, 未来

随着地下水用水量增加及开发区大规模城镇建设, 该沉降区可能呈辐射状向周边扩展, 西南部与临河区沉降区相连通, 沉降速率也有所增加。

5 结论及建议

(1) 巴彦淖尔市地面沉降呈缓慢性沉降。2007—2011 年沉降速率集中在 $0 \sim 10 \text{ mm/a}$, 存在 3 处地面沉降集中区, 即杭锦后旗沉降区、临河区沉降区、开发区水源地及北部沉降区; 2015—2016 年, 沉降速率主要是集中在 $0 \sim 2.6 \text{ mm/a}$, 且存在 1 处地面沉降区, 即临河区及北部沉降区, 该沉降区是在 2007—2011 年形成的临河区沉降区基础上继续向周边及北部扩展形成的。

(2) 巴彦淖尔市缓慢性地面沉降的主要影响因素为地下水的开发利用引发的地下水水位下降, 沉积固结压实也是该地区地面沉降产生的重要因素, 地表荷载增加也产生了一定推动作用。

(3) 巴彦淖尔市地面沉降属于发生阶段。未来杭锦后旗沉降区在原有沉降基础上, 有可能向东南方向扩展至陕坝镇水源保护区。此外, 临河区沉降区可能呈现出向东部扩展至第三水厂, 沉降速率有加快的

趋势。开发区水源地及北部沉降区可能呈辐射状向周边扩展,西南部与临河区沉降区相连通,沉降速率也会有所增加。

建议将巴彦淖尔市地面沉降的下一步研究重点放在长时间序列自然因素与短时间序列人为因素各自影响的区分分析上,并建立地面沉降监测系统,开发区域地面沉降预测模型,为地质环境保护、城市基础设施建设、城市发展规划、重要工程选址提供地质环境依据和参考。

参考文献 (References) :

- [1] DU Z Y, GE L L, NG A H, et al. Correlating the subsidence pattern and land use in Bandung, Indonesia with both Sentinel-1/2 and Alos-2 satellite images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 67: 54 – 68.
- [2] LIU Y Y, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Complex surface deformation monitoring and mechanism inversion over Qingxu-Jiaocheng, China with multi-sensor SAR images[J]. *Journal of Geodynamics*, 2018, 114: 41 – 52.
- [3] KIM S W, WADOWINSKI S, DIXON T H, et al. InSAR-based mapping of surface subsidence in Mokpo City, Korea, using JERS-1 and ENVISAT SAR data[J]. *Earth, Planets and Space*, 2008, 60(5): 453 – 461.
- [4] KARIMZADEH S. Characterization of land subsidence in Tabriz Basin (NW Iran) using InSAR and watershed analyses[J]. *Acta Geodaetica Et Geophysica*, 2016, 51(2): 181 – 195.
- [5] 殷跃平, 张作辰, 张开军. 我国地面沉降现状及防治对策研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(2): 1 – 8. [YIN Yueping, ZHANG Zuochen, ZHANG Kaijun. Land subsidence and countermeasures for its prevention in China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(2): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [6] BELL J W, AMELUNG F, FERRETTI A, et al. Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(2): W02407.
- [7] 房浩, 何庆成, 徐斌, 等. 沧州地区地面沉降灾害风险评价研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4): 159 – 164. [FANG Hao, HE Qingcheng, XU Bin, et al. A study of risk assessment of the land subsidence in Cangzhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 159 – 164. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张剑, 柯宝贵, 刘同木, 等. 利用时序InSAR监测兰州市中心城区地面沉降[J]. *测绘科学*, 2021, 46(1): 99 – 107. [ZHANG Jian, KE Baogui, LIU Tongmu, et al. Surface subsidence monitoring of Lanzhou downtown area based on time series InSAR technology[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(1): 99 – 107. (in Chinese with English abstract)]
- [9] ZHAO C Y, ZHANG Q, YANG C S, et al. Integration of MODIS data and short baseline subset (SBAS) technique for land subsidence monitoring in Datong, China[J]. *Journal of Geodynamics*, 2011, 52(1): 16 – 23.
- [10] ZHU W, ZHANG Q, DING X L, et al. Recent ground deformation of Taiyuan Basin (China) investigated with C-, L-, and X-bands SAR images[J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 70: 28 – 35.
- [11] NIKOS S, LOANNIS P, CONSTANTINOS L, et al. Land subsidence rebound detected via multi-temporal InSAR and ground truth data in Kalochori and Sindos regions, Northern Greece[J]. *Engineering Geology*, 2016, 209: 175 – 186.
- [12] 刘一霖, 黄海军, 刘艳霞, 等. 短基线集InSAR技术用于黄河三角洲地面沉降监测与人为因素影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 173 – 180. [LIU Yilin, HUANG Haijun, LIU Yanxia, et al. Monitoring of land subsidence and impacts of human activities in the Yellow River Delta using the small baseline subset method[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 173 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [13] CASTELLAZZI P, ARROYO-DOMÍNGUEZ N, MARTEL R, et al. Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 47: 102 – 111.
- [14] AIMAITI Y, YAMAZAKI F, LIU W. Multi-sensor InSAR analysis of progressive land subsidence over the Coastal City of Urayasu, Japan[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1304.
- [15] 杨志岩, 孙标, 李元杰, 等. 内蒙古临河区地下水补径排特征及动态变化规律[J]. *中国地质调查*, 2016, 3(6): 63 – 67. [YANG Zhiyan, SUN Biao, LI Yuanjie, et al. Characterization of groundwater recharge, runoff and drainage and their dynamic changes in Linhe, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey of China*, 2016, 3(6):

- 63 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李元杰, 杨志岩, 丁慧君. 内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区地下水资源综合评价(1 : 50 000) [R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区地质环境监测院, 2014. [LI Yuanjie, YANG Zhiyan, DING Huijun. Comprehensive evaluation of groundwater resources in Langhe District, Bayannur City, Inner Mongolia Autonomous Region (1 : 50 000) [R]. Huhhot: Inner Mongolia Geological Environmental Monitoring Institute, 2014. (in Chinese)]
- [17] 石建省, 张翼龙, 刘银虎. 河套平原地下水资源及其环境问题调查评价 [R]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究, 2013. [SHI Jiansheng, ZHANG Yilong, LIU Yinhu. Investigation and evaluation of groundwater resources and environmental problems in Hetao Plain [R]. Shijiazhuang: Research of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2013. (in Chinese)]
- [18] 张金芝, 黄海军, 刘艳霞, 等. 基于PSInSAR技术的现代黄河三角洲地面沉降监测与分析 [J]. 地理科学, 2013, 33(7): 831 – 836. [ZHANG Jinzhi, HUANG Haijun, LIU Yanxia, et al. Monitoring and analysis of ground subsidence in the modern Yellow River Delta area based on PSInSAR technique [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(7): 831 – 836. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王彩会, 陈杰, 朱锦旗. 开采浅层地下水对地面沉降影响的探讨 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(4): 79 – 81. [WANG Caihui, CHEN Jie, ZHU Jinqi. Inquiring into the influence of shallow groundwater exploitation on land subsidence in Suzhou, Wuxi and Changzhou area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(4): 79 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 池永翔. 福州温泉区地面沉降特点及影响因素分析 [J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 131 – 133. [CHI Yongxiang. Analysis of influence factors for land subsidence in Fuzhou [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6): 131 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈崇希, 裴顺平. 地下水开采-地面沉降模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(2): 5 – 8. [CHEN Chongxi, PEI Shunping. Research on groundwater exploitation-land subsidence model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 28(2): 5 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 雷坤超, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 基于PS-InSAR技术的天津地面沉降研究 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 106 – 111. [LEI Kunchao, CHEN Beibei, GONG Huili, et al. Detection of land subsidence in Tianjin based on PS-InSAR technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 106 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 全国国土资源标准化技术委员会. 地面沉降调查监测规范: DZ/T0283—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 16 – 17. [National Technical Committee of Land and Resources Standardization. Code for investigation and monitoring of land subsidence: DZ/T0283—2015 [S]. Beijing: China Standards Press, 2015: 16 – 17. (in Chinese)]

编辑: 汪美华

实习编辑: 刘真真