**引文格式**:金源,史绪国,吴云龙,等.利用多时相Sentinel-1数据监测2015—2021年唐山南部地区沉降特征[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1648-1656.DOI:10.13203/j.whugis20250012

**Citation**: JIN Yuan, SHI Xuguo, WU Yunlong, et al. Monitoring Subsidence Characteristics in Southern Tangshan from 2015—2021 Using Multi-temporal Sentinel-1 Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(8):1648-1656. DOI:10.13203/j.whugis20250012

# 利用多时相Sentinel-1数据监测2015—2021年唐山南部地区沉降特征

金 源[1] 史绪国[2] 吴云龙[2] 葛大庆[3] 唐 伟[4] 张 丽[3]
张绍成[2] 张 毅[2]

1 安徽省第二测绘院,安徽 合肥,230601
2 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074
3 中国自然资源航空物探遥感中心,北京,100083
4 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京,100083

**摘 要**:华北平原是中国最重要的农业和工业区之一,然而长期的地下水过度开采导致该区域面临严重的地面沉降问题。唐山市作为该地区的典型代表,其南部地区因经济快速发展和人口增长导致地下水过度开采,从而引发了显著的地面沉降现象。为了有效监测地表形变并分析其与地下水波动之间的关系,利用Sentinel-1多时相合成孔径雷达数据,采用小基线集合成孔径雷达干涉测量技术监测地表形变。并结合主成分分析提取时空变形特征,研究了2015—2021年间的唐山市南部地区的时空变形特征。研究结果显示,地面累积沉降量最大达到800 mm,研究区地面沉降与地下水开采呈显著相关性,存在地下水过度开采导致的长期线性形变特征,以及水位周期变化导致的季节性波动特征:春季干旱期因灌溉需求导致地下水抽取量增加,沉降速率加快;夏季降水补给则使沉降速率部分减缓,沉降相对于地下水位滞后15天左右。此外,研究还观测到了由人类活动,如采矿和城市扩展引发的局部沉降现象。该研究对城市地面形变监测和城市发展治理具有重要意义。

**关键词**:InSAR;地下水位;主成分分析;华北平原

**中图分类号**:P236 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-02

**DOI**:10.13203/j.whugis20250012 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1648-09

# Monitoring Subsidence Characteristics in Southern Tangshan from 2015—2021 Using Multi-temporal Sentinel-1 Data

*JIN Yuan*[1] *SHI Xuguo*[2] *WU Yunlong*[2] *GE Daqing*[3] *TANG Wei*[4] *ZHANG Li*[3]
*ZHANG Shaocheng*[2] *ZHANG Yi*[2]

1 The Second Surveying and Mapping Institute of Anhui Province, Hefei 230601, China
2 School of Geography and Information Engineering, China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, China
3 China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China
4 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract**: **Objectives**: The North China Plain is one of the most important agricultural and industrial areas in China, however, long-term over-exploitation of groundwater has led to serious ground subsidence problems in the region. Tangshan City, as a typical representative of the region, has experienced significant surface subsidence due to over-exploitation of groundwater in the southern part of the city as a result of rapid economic development and population growth. The objective of this paper is to effectively monitor surface deformation and analyze its relationship with groundwater fluctuations. **Methods**: Sentinel-1 multi-tempo-

**基金项目**:国家自然科学基金(42474061)。

**第一作者**:金源,硕士,助理工程师,主要从事InSAR地表形变监测。jyuan@cug.edu.cn

**通信作者**:史绪国,博士,副教授。shixg@cug.edu.cn

ral synthetic aperture radar (SAR) data were utilised for monitoring using the small baseline subset interferometric SAR technique. The main deformation modes of the southern part of Tangshan City between 2015 and 2021 were isolated by principal components analysis (PCA). **Results:** Spatial and temporal deformation characteristics of the southern part of Tangshan City were obtained. There are large-scale subsidence signals in coastal areas, mainly distributed in Ninghe-Hangu, Tanghai-Laoting, and Laoting-East, which coincide with the location of deep groundwater funnels. The maximum cumulative ground subsidence reaches 800 mm, PCA shows that there is a significant correlation between ground subsidence and groundwater exploitation in the study area. Overexploitation of groundwater leads to long-term linear deformation characteristics, with the explanatory components of linear deformation and its disturbance accounting for 95.88% and 1.91%, respectively. Periodic changes in water level lead to seasonal fluctuations, with the explanatory component accounting for 0.61%. The seasonal fluctuations are as follows: During the spring drought period, the amount of groundwater extraction increases due to irrigation demand, and the subsidence rate accelerates; The summer precipitation replenishment partially slows down the subsidence rate. And the analysis shows that there is a certain lag response of ground subsidence to groundwater level, with an interval of about 15 days. In addition, the study observed localised subsidence triggered by human activities such as mining and urban expansion. **Conclusions:** The study is important for urban ground deformation monitoring and urban development governance.

**Key words:** InSAR; groundwater level; principal components analysis; North China Plain

华北平原作为中国人口最密集、经济最活跃的区域之一，却面临严重的资源性缺水问题，是全球地下水危机最突出的地区之一[1]。自 20 世纪 60 年代中期以来，为支撑农业灌溉、工业扩张和城市生活用水需求，该地区长期依赖地下水超采[2-4]。1980—2005 年间，平原区水力水头急剧下降（年均 3～4 m），尤以中东部为甚，被列为全球地下水枯竭速率最快的区域之一[5]。这种不可持续的开发模式直接导致了大规模地下水漏斗的形成，并引发连锁性生态地质灾害，包括含水层疏干、地裂缝发育、海水入侵及区域性地面沉降[1]。监测数据表明，自 20 世纪 50 年代起，华北平原主要城市（如北京、天津、沧州、衡水及唐山）累积沉降量已超过 1 m[5-8]。尽管近年来通过南水北调工程调水补给和开采限令等政策干预[9]，部分区域沉降速率有所减缓，但历史累积变形与含水层压缩的不可逆性仍对城市基础设施安全构成长期威胁。

唐山市作为环渤海经济圈的核心城市，其快速的城市化进程与经济发展导致了对地下水资源的过度依赖[10-12]。长期超采已引发严重的水文地质效应：1980—2015 年间，区域水力水头最大降幅达 30 m，形成显著的地下水位漏斗[1]。自 2002 年起，唐山市陆续出现宁河-汉沽、唐海-乐亭、乐亭东及丰南-唐海等多个地下水漏斗区[13]，反映出区域地下水系统的持续退化。具体表现为：1983—2013 年期间，23.56 $km^2$ 的区域沉降超过 1 000 mm，506.21 $km^2$ 沉降在 500～1 000 mm 之间，577.32 $km^2$ 沉降在 300～500 mm 之间[14]。

水准测量、全球导航卫星系统和合成孔径雷达（synthetic aperture radar，SAR）干涉测量（interferometric SAR，InSAR）等多源大地测量手段被广泛应用于地表形变时空特征监测[10-13]。其中，InSAR 技术以其全天时、全天候、覆盖广、精度高的地表监测能力在广域地表形变监测中越来越受到重视[15-20]。随着时序 InSAR 技术的快速发展及多源 SAR 数据的日益丰富，InSAR 技术在监测地下水位变化相关的地表变形监测中得到了广泛应用。文献[21]基于小基线数据集（small baseline subset，SBAS）InSAR 技术对地表沉降进行监测，获取天津地区沉降速率和累积沉降量，分析发现，天津地区沉降与地下水过度开采等密切有关。文献[7]利用 2015—2020 年的 Sentinel-1 SAR 图像绘制了天津-廊坊地区的地面沉降图，并分析了地下水位变化与地表形变之间的关系。对于唐山地区，文献[12]利用永久散射体 InSAR 方法对 2012—2014 年 RADARSAT-2 数据集进行了分析，获取了唐山南部的地面沉降时空沉降特征，发现其分布与地下水沉降漏斗分布高度相关。文献[11-12]进一步对 2009—2014 年的高分辨率 TerraSAR-X 数据集分析发现，曹妃甸地区的地面沉降尺度小，主要是人类活动导致。2014 年起，河北省政府已将唐山的部分地区（如汉沽、丰南、唐海、乐亭）划定为深层地下水的限制开采

区和禁采区,但唐山南部的地下水过度开采和地面沉降问题仍然严峻[12]。地下水开采格局的变化和地面沉降在政策和人类活动的联合影响下表现出复杂的时空响应,如何从复杂的沉降时序结果中挖掘地面沉降的深层时空演变规律,值得进一步研究。

为了掌握唐山南部地区地面沉降的时空特征及其对地下水波动的响应,本文利用SBAS-InSAR技术分析了2015—2021年的Sentinel-1数据集。通过主成分分析(principal component analysis,PCA)分离出唐山南部地区的主要变形特征,并结合水文资料对形变特征进行探讨。

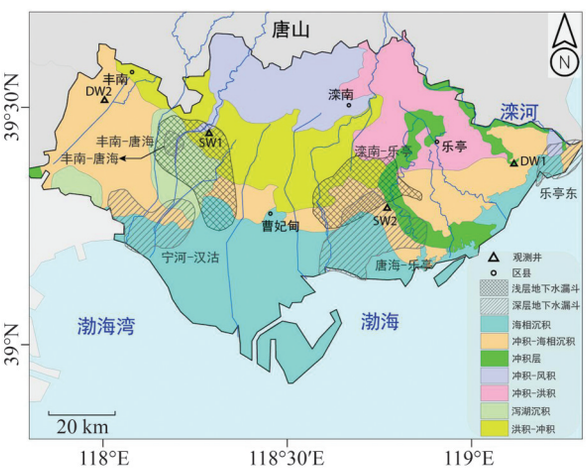
## 1 实验区域与实验数据

### 1.1 实验区域

唐山位于滦河三角洲,其地质构造主要由厚层冲积扇、三角洲沉积物和淤泥质海岸沉积组成(见图1)。第四纪沉积层厚度呈现明显的空间分异性:北部唐山市区厚度约数十米,而南部沿海地区最大厚度可达450 m[12]。这种沉积厚度的梯度变化为区域地面沉降的差异性发展提供了地质基础。在唐山沿海地区,第四纪含水层可以分为4个含水组,由一系列厚度为20~40 m的弱透水层分隔开。最上方的含水组中主要为潜水和弱承压地下水,厚度为20~60 m,主要分布在研究区域的东北部[22]。该含水组的补给源包括大气降水、侧向径流和地表水渗漏。第二含水组位于120~170 m处,主要为咸水层。第三和第四含水组为承压含水层,分别位于250~350 m和350~550 m的深度[22]。地下水主要从第三和第四含水层中抽取,井的深度一般为220~450 m[11]。在唐山南部形成了丰南-唐海和滦南-乐亭2个浅层地下水漏斗和宁河-汉沽、唐海-乐亭、乐亭东和丰南-唐海4个深层地下水漏斗[13](图1)。在丰南-唐海地区,浅层和深层地下水漏斗有重叠区域。研究区属温带大陆性季风气候,四季分明:春季干旱少雨,夏季炎热多雨,秋季凉爽湿润,冬季寒冷多风。年降水量的70%~80%集中在6月—8月。

### 1.2 实验数据

本文收集了2014-11-27—2021-11-26期间获取的Sentinel-1数据集用于唐山市南部的时空变形特征研究。Sentinel-1数据集包含194幅升轨SAR图像,采用干涉宽幅模式获取,其方位向和距离向分辨率分别为5 m和20 m。同时还获取了覆盖实验区的30 m分辨率Copernicus数字表面模型产品进行辅助配准、移除地形相位和地理编码。为了探讨地表形变与地下水之间的关系,获取了图1中用三角形标记的浅层地下水(SW1和SW2)和深层地下水(DW1和DW2)观测数据,时间跨度为2017年8月至2021年12月。此外,还收集了2014-11-02—2021-12-31期间乐亭站记录的每日降水量数据。




审图号:[GS(2024)0650]

图1 研究区地质图

Fig. 1 Geological Map of the Study Area

## 2 研究方法

本文选取2018-01-10获取的影像为参考数据,采用GAMMA软件将其余Sentinel-1数据配准至参考数据[23],将配准后影像的方位向与距离向的多视系数设置为4:1,图2为生成的小基线干涉对[24]。采用振幅离差和时间相干性组合的方式获取用于时序分析的相干点,进行三维数据相位解缠,并通过闭合相位信息校正时间维上可能存在的相位解缠误差[25]。在利用解缠相位中各分量的不同特点移除轨道误差、高程误差和大气误差后,通过最小二乘法获取视线方向(line of sight,LOS)上的形变速率与时序累积变形,并忽略水平方向形变的贡献,根据LOS向上的形变速率$V_{\mathrm{LOS}}$以及入射角$\theta$,通过$V_{\mathrm{LOS}}/\cos\theta$直接获取对应位置垂直方向形变。

PCA是一种基于正交变换的多元统计方法,其核心目标是通过线性降维提取数据的主要特征。该方法通过计算协方差矩阵的特征向量,确定数据方差最大的正交方向(主成分),将原始高维数据投影到低维空间,在保留主要信息的同时实现数据简化[26]。本文利用PCA从长期InSAR观测数据中分离不同来源的变形信号[27]。数据矩阵的维度为$m\times n$,$m$表示相干点数量,$n$表示每个相干点的观测时间次数,矩阵中的元素为地表

变形。假设源信号是不相关的，通过 PCA 对变形信号的分解将产生唯一解。InSAR 观测数据 PCA 可分为 3 个步骤：(1)数据标准化，(2)通过 PCA 进行数据降维，(3)主成分选择。步骤(1)的目的是为了确保每个像素的形变数据具有可比性，需对矩阵进行标准化处理，使每个时间步的数据均值为零，方差为 1。步骤(2)使用奇异值分解进行线性降维，将数据投影到解释最大方差的正交成分上。为了实现步骤(3)，采用累积方差贡献率是选择主成分数量的依据，确保选取的主成分能捕捉数据的主要变形特征。

## 3　结果分析

### 3.1　时序形变结果分析

基于 2015—2021 年 Sentinel-1 数据获取唐山南部地表垂直形变速率结果如图 3 所示，选取相对稳定的唐山乐亭新寨镇作为 InSAR 时序解算的参考点，如图 3(a)中红色五角星所示。同时，为评估 InSAR 结果的准确性，对形变速率进行了统计分析，直方图结果如图 3(b)所示，形变速率的平均值为－0.31 mm/a，标准差为 11.89 mm/a，表明形变速率结果估计具有较高的精度。形变结果的空间分布显示，沿海地区存在大范围沉降信号，与宁河-汉沽、唐海-乐亭和乐亭东部深层地下水漏斗的位置吻合[11]。同时，丰南-唐海深层地下水漏斗和两个浅层地下水漏斗的沉降速率相对较小，速率低于每年 20 mm。宁河-汉沽地下水漏斗的最大累积沉降超过 800 mm，唐海-乐亭地下水漏斗的沉降超过 600 mm，乐亭东部深层地下水漏斗的沉降超过 500 mm。与此同时，本文也观测到了此前研究中由曹妃甸新区建设活动和北部丰南区矿区开采相关的沉降信号[11, 28]。

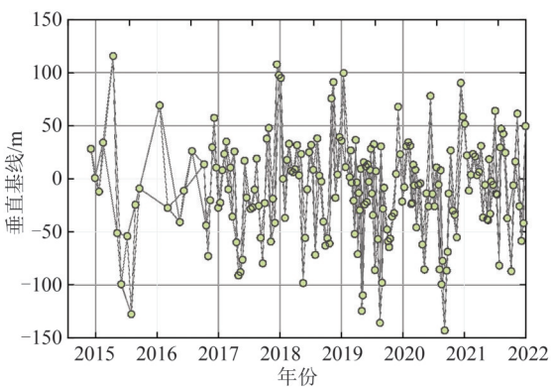
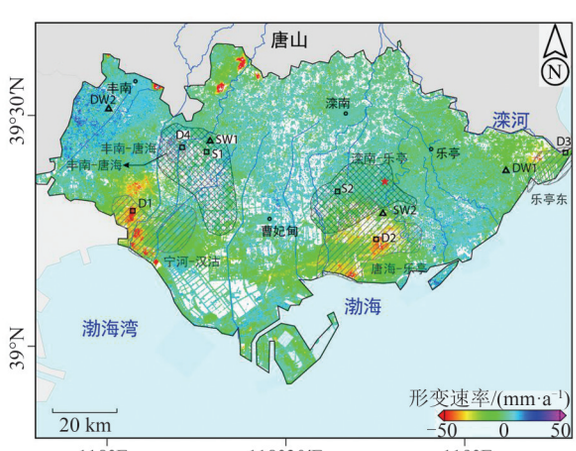
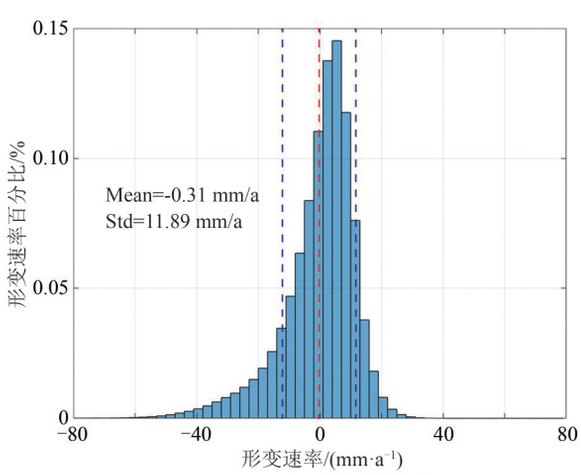



图 2　小基线数据集干涉组合

Fig. 2　Interference Combinations for Small Baseline Datasets




(a) 地表垂直形变速率结果




(b) 形变速率直方图结果

审图号：[GS(2024)0650]

图 3　唐山南部 2015—2021 年地表垂直形变速率

Fig. 3　Vertical Deformation Velocity Rate Maps During 2015—2021 in Sourthern Tangshan

为了分析地下水漏斗处的形变，在深层地下水漏斗和浅层地下水漏斗分别选取了 $D1$、$D2$、$D3$、$D4$ 和 $S1$、$S2$ 共 6 个特征点，特征点的位置用黑色矩形在图 3 中进行了标注。图 4 给出了 $D1$～$D4$、$S1$、$S2$ 的时序形变，时序形变结果为特征点 20 m 范围内 InSAR 点的形变均值，同时获取了对应的标准差，在图 4 中以误差棒的形式进行了标注。时序形变结果显示了地下水漏斗内存在持续性形变以及明显的季节性变化。其中深层地下水漏斗内 4 个特征点展现了持续的线性形变，主要与地下水位长期持续性下降或抬升有关。$D1$～$D3$ 的时序形变反映了由于地下水长期开采导致地面的长期沉降且不可恢复的过程，累积沉降量分别达到 481 mm、452 mm 和 147 mm，

同时注意到,长期线性形变的速率呈现减缓趋势,这可能与监测时间内实施的限采、禁采地下水政策有关。*D*4点位于丰南-唐海深层地下水漏斗,并未检测到沉降迹象,呈现略微的地表抬升,可能与地下水位的缓慢恢复有关。除了长期线性形变,特征点的时序形变还呈现出以1 a为周期的季节性波动,比较明显的有深层特征点*D*2与浅层特征点*S*1和*S*2,主要与季节性的开采地下水有关,春季干旱期间大量抽取地下水导致地面发生沉降;相反,夏季集中的降雨和灌溉的减少促使含水层得到补给,进而含水层缓慢恢复,沉降逐渐减缓并缓慢抬升。

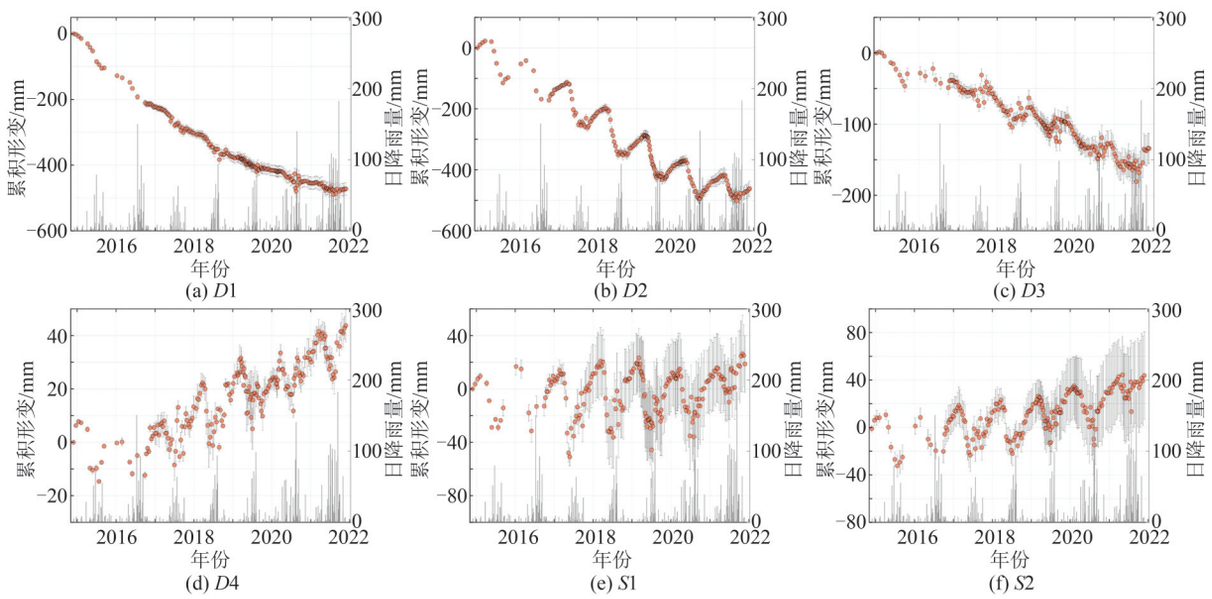



图4 浅层与深层地下水特征点累积形变图

Fig. 4 Cumulative Deformation Maps of Shallow and Deep Groundwater Feature Points

### 3.2 PCA结果

本文使用PCA来减少InSAR测量数据的维度,从而捕捉最大解释方差量,描述整体的时空变形模式。PCA前10个主成分的方差解释量中,前3个分量PC1、PC2和PC3分别解释了95.88%、1.91%和0.61%的数据方差,方差占比超过98%,PC4~PC10等主成分分量方差占比均不超过0.5%,对时空形变解释贡献占比较低,因此选择前3个分量PC1、PC2和PC3分析时空变形模式。

唐山南部的时空变形模式分别展示在图5和图6中,图5中的特征向量表征了各个主成分在时间上的变化趋势,而图6中的特征值则表征了主成分在空间上的分布,两者共同表征了研究区内的时空形变模型,当空间特征与时间特征乘积为负时,则对应着沉降形变。第一个主成分PC1方差占比最大,解释了数据集95.88%的特征。图5中PC1的时间特征表明,研究区域在监测时间内几乎呈线性的形变趋势,在旱季有加速现象。图6(a)中PC1的空间特征与时间特征呈负相关的区域,主要包含宁河-汉沽、唐海-乐亭和乐亭东部等区域,与图3中沉降速率明显的区域基本吻合,这表明了PC1是2015—2021年间唐山南部地面沉降的主要原因。文献[12]研究结果表明,唐山南部过度抽取深层承压水导致地下水位持续下降,水力水头压力降低,这部分损失的水头承担的上覆压力仍继续转加于含水层骨架之上,引发了含水层的塑性变形,最终导致长期的地面沉降。因此认为PC1揭示了因地下水过度开采引起的沉降。

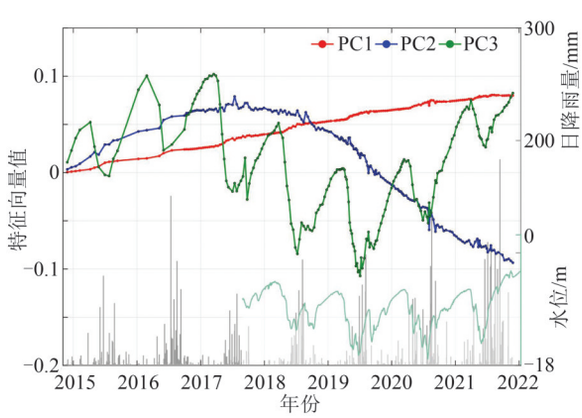
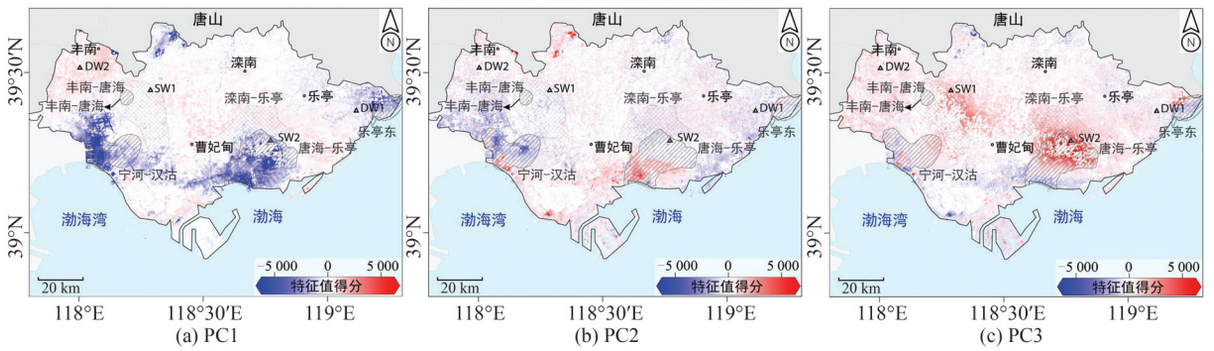



图5 特征向量时间变化

Fig. 5 Eigenvector Time Change

第二个主成分PC2解释了数据集1.91%的特征,图5中PC2的时间特征向量表明,在监测时




审图号:[GS(2024)0650]

图 6　特征值空间分布

Fig. 6　Eigenvalues Spatial Distribution

间内,特征向量值首先为正,随后在剩余时间内逐渐变为负值。PC2时间特征的变化可能反映了PC1在时间特征中的偏差,例如在分析特征点$D1$~$D3$的时序形变时,发现线性形变趋势存在减缓趋势。PC2的空间特征值在宁河-汉沽和乐亭东部的深层地下水漏斗处为负,而在唐海-乐亭地下水漏斗处得分为正(图6(b))。这可能与不同地区地下水开采的法规密切相关,目前河北省政府已将宁河-汉沽地下水漏斗的黑沿子镇和南堡镇,以及乐亭东地下水漏斗的几个城镇(如马头营镇和古河镇)划为禁采区,同时,唐海-乐亭地下水漏斗的若干城镇被划为限采区。PC1和PC2的主成分的空间特征值分布与图3中明显形变区域的范围一致,这些区域与深层地下水过度开采区域相对应。

第三个主成分PC3方差占比较小,只解释了数据集0.61%的特征,然而在分析特征点$D2$、$D4$、$S1$和$S2$时发现,除了长期的线性形变外,研究区内还存在与季节性相关的周期性形变,同时参考已有类似研究中对主成分的选取和分析,本次研究选取了PC3对周期性形变进行分析。由图5可知,PC3识别出了具有1 a周期的季节性变形信号。由图6(c)可知,PC3中的明显季节性信号分布在丰南-唐海、滦南-乐亭以及唐海-乐亭北部等地下水漏斗中,这与PC1和PC2的空间模式有所不同,PC3特征值的空间分布结果中,明显的季节性信号集中分布在内陆,区域广泛分布农场耕地,受农业用水需求量变化影响较大,因此存在着较明显的季节性信号。

结合地下水位长期监测数据,分析PC3表征的时间变化特征,获取季节性信号明显区域内的浅层含水层井SW1的水位数据,SW1所在区域的PC3空间特征值分布为正,PC3时间特征向量的正负就分别对应着地表抬升和沉降,通过分析PC3的时间特征向量,进而分析季节性形变的时间变化特点。如图5中PC3的时间特征向量变化所示,4月—6月农业用水需求量增加,降雨量不足,蒸发量较大;耕地区域地下水开采量增加,SW1水位持续下降,地面沉降加剧;6月后,农业用水减采、停采,地下水开采量减少;7月—8月降雨不断增加,浅层地下水得到补充,地下水位不断提升,地面沉降开始减缓,并随着水位提升逐渐转为抬升。同时,时间特征向量分析表明,地面沉降对地下水位存在一定的滞后响应,间隔在15 d左右。

### 3.3　地下水位与地表变形关联分析

图7给出了两处深层含水层井DW1和DW2和两处浅层含水层井SW1和SW2的时序形变结果及其标准差,以及对应井的水位变化和监测时间内的日降雨数据。图7(a)中DW1处,随着地下水水位不断下降,地表沉降不断增大,这表明部分由过度开采地下水引起的形变可能是不可逆的,同时,随着地下水限制开采和禁采区的设置,地下水位逐步回升,如图7(b)中DW2,研究区域地面则缓慢回弹。

图7还展示了唐山地区的形变结果对降雨和水位变化的季节性响应。与上文PC3的时间特征分析一致,唐山地区的地下水位从4月—6月下降,主要是由于春季干旱和广泛的农业灌溉抽取,7月—10月,农业抽取减少,由于集中降雨,地下水位上升,导致渗透补给增加。研究观察到浅层含水层地下水位(图7(c)和7(d)中的井SW1和SW2)对水位季节性变化的响应随着地下水位的不断波动,浅层含水层井SW1和SW2地面形变呈现较大幅度的波动变化,这与非承压含水层较大的水力传导率有关。然而,图7(a)和7(b)中的深层地下水井DW1和DW2随着水位变化仅显示出较小的地面形变波动,这与弱透水层较低的水力传导率相一致,导致水位平衡较慢[12]。

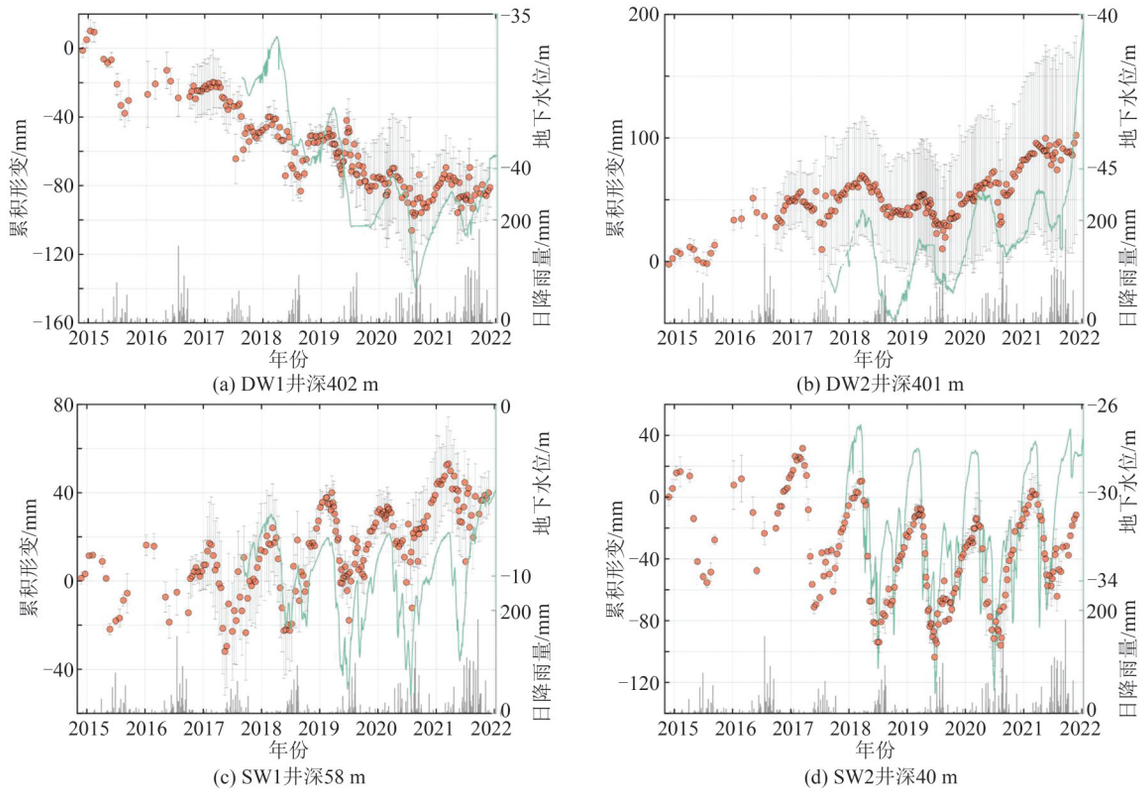



图7 观测井地面形变及水位变化

Fig. 7 Deformation of the Ground Surface and Water Level Changes in Observation Wells

## 4 结 语

本文通过SBAS-InSAR技术结合PCA方法对2015—2021年唐山市南部的地面沉降进行了监测与分析。研究结果表明,地下水过度开采与地面沉降之间存在显著的相关性,尤其是在深层地下水漏斗区域,地面沉降速率较为明显。尽管近年来通过政策限制地下水的过度开采,部分区域的沉降速率有所减缓,但整体形变仍然明显,尤其是在丰南-唐海和乐亭东地区。此外,观测到的季节性形变与地下水位的变化密切相关,春季干旱和夏季降雨对地面沉降有显著影响。结合InSAR技术和水文数据的分析表明,针对地下水的科学管理和可持续利用政策至关重要,以减缓和控制地面沉降的进一步发展。

## 参 考 文 献

[1] 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 等. 近40年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1142-1155.
YANG Huifeng, CAO Wengeng, ZHI Chuanshun, et al. Evolution of Groundwater Level in the North China Plain in the Past 40 Years and Suggestions on Its Overexploitation Treatment[J]. *Geology in China*, 2021, 48(4): 1142-1155.

[2] 薛禹群, 张云, 叶淑君, 等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 585-593.
XUE Yuqun, ZHANG Yun, YE Shujun, et al. Land Subsidence in China and Its Problems[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 585-593.

[3] 陈宗宇, 王莹, 刘君, 等. 近50年来我国北方典型区域地下水演化特征[J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 115-126.
CHEN Zongyu, WANG Ying, LIU Jun, et al. Groundwater Changes of Selected Groundwater Systems in Northern China in Recent Fifty Years[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 115-126.

[4] 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.

[5] 郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 等. 华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 162-171.
GUO Haipeng, LI Wenpeng, WANG Liya, et al. Present Situation and Research Prospects of the Land Subsidence Driven by Groundwater Levels in the North China Plain[J]. *Hydrogeology & Engi-*

*neering Geology*, 2021, 48(3): 162-171.

[6] BAI L, JIANG L M, ZHAO Y, et al. Quantifying the Influence of Long-Term Overexploitation on Deep Groundwater Resources Across Cangzhou in the North China Plain Using InSAR Measurements [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127368.

[7] SHI X G, ZHU T T, TANG W, et al. Inferring Decelerated Land Subsidence and Groundwater Storage Dynamics in Tianjin - Langfang Using Sentinel-1 InSAR [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 1526-1546.

[8] DONG J, 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: 113446.

[9] DONG J, LAI S J, WANG N, et al. Multi-scale Deformation Monitoring with Sentinel-1 InSAR Analyses Along the Middle Route of the South-North Water Diversion Project in China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 100: 102324.

[10] 张玲, 刘斌, 葛大庆, 等. 基于多源 SAR 数据唐山城区活动断裂微小差异形变探测[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 114-120.
ZHANG Ling, LIU Bin, GE Daqing, et al. Detecting Tiny Differential Deformation of Tangshan Urban Active Fault Using Multi-source SAR Data[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2020, 32(3): 114-120.

[11] 李曼, 葛大庆, 张玲, 等. 基于 PSInSAR 技术的曹妃甸新区地面沉降发育特征及其影响因素分析[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(4): 119-126.
LI Man, GE Daqing, ZHANG Ling, et al. Characteristics and Influencing Factors of Land Subsidence in Caofeidian Newly-Developed Area Based on PSInSAR Technique[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2016, 28(4): 119-126.

[12] 李曼, 葛大庆, 张玲, 等. 基于 PSInSAR 技术的唐山南部沿海地区地面沉降研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 704-712.
LI Man, GE Daqing, ZHANG Ling, et al. Land Subsidence of Coastal Area in Southern Tangshan Using PSInSAR Technique [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(4): 704-712.

[13] CHEN S M, LIU F T, ZHANG Z, et al. Changes of Groundwater Flow Field of Luanhe River Delta Under the Human Activities and Its Impact on the Ecological Environment in the Past 30 Years [J]. *China Geology*, 2021, 4(3): 455-462.

[14] 肖震. 唐山沿海地面沉降与地质环境因素分析[J]. 地下水, 2014, 36(3): 76-77.
XIAO Zhen. Analysis of Land Subsidence and Geological Environment Factors in Tangshan Coastal Area [J]. *Ground Water*, 2014, 36(3): 76-77.

[15] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. 测绘学报, 2023, 52(11): 1805-1834.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Development Status and Trends of Imaging Geodesy[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(11): 1805-1834.

[16] 廖明生, 董杰, 李梦华, 等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 332-341.
LIAO Mingsheng, DONG Jie, LI Menghua, et al. Radar Remote Sensing for Potential Landslides Detection and Deformation Monitoring [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 332-341.

[17] 杨梦诗, 廖明生, 常玲, 等. 城市场景时序 InSAR 形变解译：问题分析与研究进展 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48 (10): 1643-1660.
YANG Mengshi, LIAO Mingsheng, CHANG Ling, et al. Interpretation of Multi-epoch InSAR Deformation for Urban Scenes: A Problem Analysis and Literature Review [J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1643-1660.

[18] 李梦华, 张路, 董杰, 等. 四川茂县岷江河谷区段滑坡隐患雷达遥感识别与形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1529-1537.
LI Menghua, ZHANG Lu, DONG Jie, et al. Detection and Monitoring of Potential Landslides Along Minjiang River Valley in Maoxian County, Sichuan Using Radar Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1529-1537.

[19] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 949-956.
GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early Identification of Serious Geological Hazards with Integrated Remote Sensing Technologies: Thoughts and Recommendations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 949-956.

[20] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用：挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967-979.
LI Zhenhong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions [J]. *Geomatics and Information Science of*

*Wuhan University*, 2019, 44(7): 967-979.

[21] 仝云霄,胡晓佳,杨俊泉,等. 基于SBAS-InSAR技术的天津地区地表沉降监测研究[J]. 地球学报, 2024, DOI: 10.3975/cagsb.2024.091901.
TONG Yunxiao, HU Xiaojia, YANG Junquan, et al. Research on Surface Subsidence Monitoring in Tianjin Area Using SBAS-InSAR Technology [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2024, DOI: 10.3975/cagsb.2024.091901.

[22] MA F S, WEI A H, DENG Q H, et al. Hydrochemical Characteristics and the Suitability of Groundwater in the Coastal Region of Tangshan, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(6): 1067-1075.

[23] WEGMÜLLER U, WERNER C, STROZZI T, et al. Sentinel-1 IWS Mode Support in the GAMMA Software[C]// IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Singapore, 2015.

[24] 史绪国, 张路, 许强, 等. 黄土台塬滑坡变形的时序InSAR监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1027-1034.
SHI Xuguo, ZHANG Lu, XU Qiang, et al. Monitoring Slope Displacements of Loess Terrace Using Time Series InSAR Analysis Technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1027-1034.

[25] ZHANG Y J, FATTAHI H, AMELUNG F. Small Baseline InSAR Time Series Analysis: Unwrapping Error Correction and Noise Reduction[J]. *Computers & Geosciences*, 2019, 133: 104331.

[26] MAĆKIEWICZ A, RATAJCZAK W. Principal Components Analysis (PCA)[J]. *Computers & Geosciences*, 1993, 19(3): 303-342.

[27] CHAUSSARD E, BÜRGMANN R, SHIRZAEI M, et al. Predictability of Hydraulic Head Changes and Characterization of Aquifer-System and Fault Properties from InSAR-Derived Ground Deformation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(8): 6572-6590.

[28] 张学东, 葛大庆, 吴立新, 等. 基于相干目标短基线InSAR的矿业城市地面沉降监测研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1606-1611.
ZHANG Xuedong, GE Daqing, WU Lixin, et al. Study on Monitoring Land Subsidence in Mining City Based on Coherent Target Small-Baseline InSAR[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(10): 1606-1611.

(上接第1638页)

[20] WANG R, SCHURR B, MILKEREIT C, et al. An Improved Automatic Scheme for Empirical Baseline Correction of Digital Strong-Motion Records [J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101(5): 2029-2044.

[21] WANG R, PAROLAI S, GE M, et al. The 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of GPS and Strong-Motion Data [J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 103(2B): 1336-1347.

[22] LUO H, WANG T, WEI S J. Systematic Comparison of InSAR and Seismic Source Models for Moderate-Size Earthquakes in Western China: Implication to the Seismogenic Capacity of the Shallow Crust[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(10): e2022JB024794.

[23] TOZER B, SANDWELL D T, SMITH W H F, et al. Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec: SRTM15+ [J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(10): 1847-1864.

[24] 温扬茂, 许才军, 刘洋, 等. 升降轨InSAR数据约束下的2007年阿里地震反演分析[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 649-654.
WEN Yangmao, XU Caijun, LIU Yang, et al. The 2007 Ali Earthquake Inversion from Ascending and Descending InSAR Observations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 649-654.

[25] 杨九元,温扬茂,许才军. InSAR观测揭示的2024年西藏尼玛Mw 6.0地震同震破裂行为[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI:10.13203/j.whugis20240243.
YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun. Coseismic Rupture Behavior of the 2024 Nima(Tibet)Mw 6.0 Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240243.

[26] 毛鸿飞,谢磊,江坤,等. 青藏高原中强地震InSAR震源参数反演及其与地震目录的比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240124.
MAO Hongfei, XIE Lei, JIANG Kun, et al. Source Parameter Inversion of Moderate to Strong Earthquakes and Its Comparison with Earthquake Catalogs in Tibetan Plateau Based on InSAR Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240124.