

基于 SBAS-InSAR 的天津市地表形变对地下水位响应研究

曹永强¹, 张宁月^{1,2}, 么嘉棋¹, 常奂宇¹, 刘子华¹

(1. 天津师范大学京津冀生态文明发展研究院, 天津 300387; 2. 天津市规划编制研究中心, 天津 300201)

摘要:为定量分析天津市地表形变对地下水位的响应特征,通过小基线集成孔径雷达干涉测量 (SBAS-InSAR) 技术获取地表形变监测数据,运用季节性分解算法对 2018—2022 年地表形变与地下水位数据进行信号分解,在此基础上采用随机森林算法计算地下水位各分量对地表形变的相对重要性,并分别采用动态时间规整算法 (DTW)、交叉小波变换和 Copula 函数分析了地表形变各分量对地下水位的响应。结果表明:天津市地表形变基本形成了位于天津市西南部、中部和东部的 5 处沉降漏斗,地下水位趋势分量、季节分量和残差分量对地表形变的综合特征重要性分别为 0.595、0.172、0.233;地表形变与地下水位趋势分量的相似度较高,综合 DTW 距离为 10.59;地表形变与地下水位季节分量存在 1 a 左右的主共振周期,地表形变相对于地下水位季节性变化的滞后时间为 93~132 d;地表形变与地下水位残差分量边缘分布函数值均为 0.8 时的联合分布概率不小于 0.75,二者具有较强的相关性。

关键词:地表形变;地下水;SBAS-InSAR;季节性分解;随机森林算法;Copula 函数;天津市

中图分类号:P641.8

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)05-0238-09

Research on the response of surface deformation to groundwater level in Tianjin based on SBAS-InSAR//CAO Yongqiang¹, ZHANG Ningyue^{1,2}, YAO Jiaqi¹, CHANG Huanyu¹, LIU Zihua¹ (1. Academy of Eco-Civilization Development for Jing-Jin-Ji Megalopolis, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Urban Planning Compilation and Research Center, Tianjin 300201, China)

Abstract: In order to quantitatively analyze the response characteristics of ground surface deformation to groundwater level in Tianjin, the ground surface deformation monitoring data was obtained through small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) technology. The seasonal decomposition algorithm was applied to decompose the signal of ground surface deformation and groundwater level data 2018 to 2022. On this basis, the relative importance of each component of the groundwater level to the ground surface deformation was calculated by random forest algorithm, and the response of each component of the ground surface deformation to the groundwater level was analyzed by using dynamic time warping (DTW), cross wavelet transform and Copula function analysis, respectively. The results show that the surface deformation in Tianjin has basically formed five subsidence funnels in the southwest, central and eastern regions of Tianjin. The relative importance of the groundwater level trend component, seasonal component, and residual components to the comprehensive characteristics of surface deformation were 0.595, 0.172, and 0.233, respectively. The similarity between the surface deformation and the trend component of the groundwater level is relatively high, with a comprehensive DTW distance of 10.59. A dominant resonance period of approximately 1 year was identified between the seasonal components of surface deformation and groundwater level, with a lag time of 93 to 132 days for surface deformation relative to seasonal groundwater fluctuations. The joint distribution probability was not less than 0.75 when the probability value of the marginal cumulative distribution function of surface deformation and the residual component of groundwater level were both set to 0.8, indicating that there was a strong correlation between the two.

Key words: surface deformation; groundwater; SBAS-InSAR; seasonal decomposition; random forest algorithm; Copula function; Tianjin

地表形变是地表形态发生变化的一种地质现象,其产生机制复杂,由自然因素和人为活动共同驱

动。其中,地下水变化是地表形变的重要驱动因素之一^[1-2],地表形变与地下水资源管理和城市可持续

发展密切相关^[3-5],在联合国提出的 17 项可持续发展目标中,核心是“可持续城市与社区”^[6]。我国面临着严峻的地下水资源超采治理挑战^[7-9],在此背景下,深入研究地表形变对地下水变化的响应机制,对于提升地下水管理水平、促进环境保护和推动城市可持续发展具有重要意义。

已有研究围绕地表形变的监测技术与演化规律开展了大量探索研究,合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术可利用合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星获取区域长时序且高精度的细微形变信息^[10],小基线集 InSAR(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)技术克服了差分 InSAR(differential InSAR, D-InSAR)技术时间和空间失相干问题,且较之永久散射体 InSAR(persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)技术所获取到的形变序列更为连续^[11],SBAS-InSAR 在一定程度上优化了大气延迟以及 DEM 等造成的误差,能够获取高精度、大范围的形变结果,被广泛用于火山、滑坡、地震等自然因素^[12-13]和采矿、城市开发等人为活动^[14-15]引发的地表形变监测,可以精准描绘沉降漏斗的空间分布特征。地下水位时序数据也日益丰富,使得 InSAR 观测结果与地下水位变化的响应关系成为研究热点^[1]。然而,目前多数研究仍聚焦于地表形变趋势与地下水位整体变化的相关性分析,缺乏从趋势、季节和残差分量视角对地表形变与地下水位响应关系的细致刻画,难以揭示两者之间的精细耦合机制。

天津市地处华北平原东部,是地表形变和地下水超采发生、发展及治理的代表城市之一^[16]。长期以来面临严峻的地下水资源超采与地面沉降双重压力。近年来,天津市持续加强地下水压采与地质灾害监测工作,但地表形变与地下水变化的耦合机制仍不明确。鉴于此,本文运用 2016—2023 年的 Sentinel-1A 数据,对天津市地表形变进行时序监测,结合地下水位数据,探讨地表形变对地下水位变化的响应机制,以期为区域地下水资源调控和地质灾害防控提供参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

天津市位于华北平原,地势平坦但相对低洼(图 1)。天津市第四纪沉积物包括湖相沉积、河流沉积和海相沉积,可分为 5 个含水层组,第一至第五含水层组底界埋深分别为 60~90、160~180、270~290、370~430、550~650 m。其中第一含水层组为浅层含水层组,包含潜水含水层和微承压含水层,其余

含水层中的地下水为深层承压水^[17]。

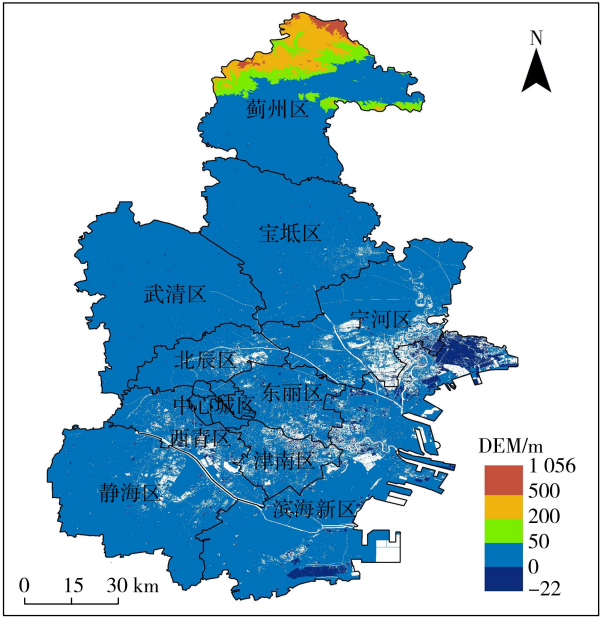


图 1 研究区地形

Fig. 1 Terrain of the study area

1.2 数据来源

a. Sentinel-1A 数据。选取 Sentinel-1A 数据中覆盖研究区的两条升轨轨道,分别为路径号 69、框架号 124 和路径号 69、框架号 129,极化方式均为 VV+VH。共获取并筛选了 2016 年 1 月至 2023 年 8 月的 352 景影像(每条轨道各 176 景),运用 ISCE 软件通过 SBAS-InSAR 技术获取地表形变特征。

b. 地下水位数据。根据 2018—2022 年《中国地质环境监测地下水位年鉴》,整理研究区地下水位观测点长时间序列数据。1983 年之前天津市对第二含水层组进行了大规模开采,之后逐步限制开采,第二含水层组地下水位有所回升。由于第一含水层组底部距离第二含水层组较近,受第二含水层组大幅度水位降低影响较大,而当第二含水层组水位严重下降时地面沉降速率也大幅度提升^[17]。因此,为减少含水层埋深不同导致的水位波动差异,确保分析的可比性,同时基于数据的可获取性,本文选取天津市第二含水层组数据连续的 4 个地下水位观测点进行分析。

2 研究方法

本文以 2016—2023 年 Sentinel-1A 数据和 2018—2022 年《中国地质环境监测地下水位年鉴》中地下水位数据为基础数据,实测数据来源于项目合作单位 2016—2022 年 10 月的测量数据。通过计算分析,得到天津市地表形变数据并对地表形变与地下水位的时序数据进行信号分解,分析地下水位各分

量对地表形变的相对重要性;利用动态时间规整算法(dynamic time warping, DTW)分析地表形变与地下水位趋势分量之间的相似性;通过交叉小波变换揭示地表形变与地下水位季节性变化的主周期及滞后关系;基于 Copula 函数分析两者残差分量的联合分布特征,以探讨地表形变对地下水开采的精细化响应机制。研究技术路线如图 2 所示。

a. SBAS-InSAR 技术。假设有 $N+1$ 幅研究区域的 SAR 卫星影像,选择其中一景影像为超级主影像,其他所有辅影像与超级主影像进行精确配准和差分干涉处理,得到 M 个差分干涉图,其中 M 的范围为 $(N+1)/2 \sim N(N+1)/2$ ^[11]。在此基础上,通过对干涉图中相位信息进行解缠、滤波及误差校正,估算各时间段内的地表形变量。进一步采用时间序列反演方法,计算不同时间点的地表形变速率与累积形变量,从而获取具有时间连续性的地表形变演化信息^[18]。

b. 季节性分解。统计 2018 年 1 月至 2022 年 12 月每月地表形变与地下水位数据,建立时间序列并进行季节性分解:

$$y_i = x_{ti} + x_{si} + x_{ri} \tag{1}$$

式中: y_i 为原始序列; x_{ti} 为趋势分量,反映长期趋势; x_{si} 为季节分量,反映季节效应; x_{ri} 为残差分量,反映随机波动。

c. 随机森林重要性分析。随机森林算法已成功应用于处理小样本和高维特征空间问题^[19]。作为一种基于决策树的集成学习算法,随机森林算法可度量每个变量对全局变量的重要性,故本文通过随机森林算法,运用地下水位数据各分量对模型性能的贡献度来确定其对地表形变的相对重要性^[20]。

d. DTW。DTW 通过逐步拉伸或压缩两个时间序列中的元素计算累积距离,并最终得到一个累积距离矩阵,该矩阵中的最小值表示两个时间序列之间的相似度^[21]。

e. 交叉小波变换分析。交叉小波变换分析是将小波变换与交叉谱分析结合,从多时间尺度来研究两时序在时频域中的相关关系。通过对地表形变与地下水位数据分别进行小波变换,并计算其交叉小波功率谱,可以识别两者在不同周期范围内的共振特征和相位延迟关系^[22]。

f. Copula 函数。基于反映数据随机特征的地表形变与地下水位残差分量数据,运用 Copula 函数计算对应的单变量分布函数和多变量分布函数评估二者的相关性。本文采用常见的单变量分布函数,如 Weibull、Gamma、Normal、Exponential 和 Lognormal 等 Copula 函数,估算参数采用极大似然法^[23]。多变量联合分布函数采用常用于水资源评价的 Archimedean 分布族,主要包括 Frank、Gumbel 和

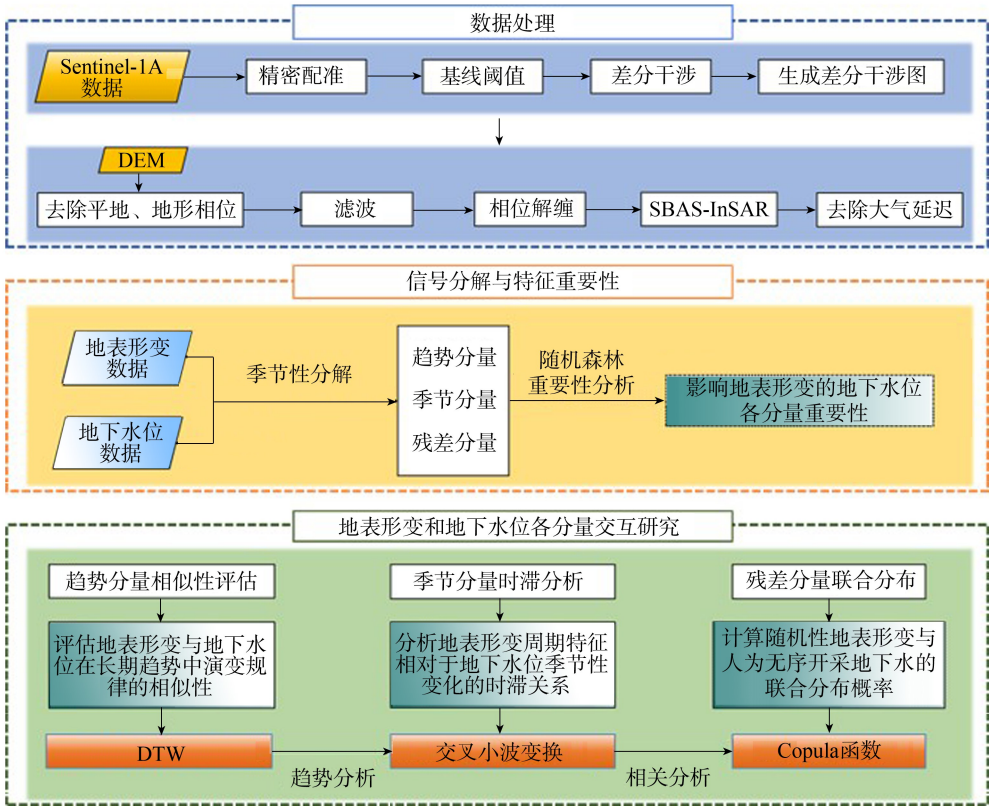


图 2 技术路线

Fig. 2 Technical route

Clayton 等 Copula 函数。构建地表形变与地下水位的二维联合分布函数,确定最优拟合函数并计算联合分布概率。本文采用 AIC、BIC 法确立最优的边缘分布函数,并进行多变量联合分布函数模型检验,AIC、BIC 值越小则函数的拟合程度越高^[24]。

3 结果与分析

3.1 地表形变反演精度验证与结果分析

利用天津市实测水准点的地表形变数据,以 2016 年为时间基准,对 SBAS-InSAR 技术获取的 2017—2022 年地表形变数据进行逐年精度验证(图 3)。选择以实测水准点(J1 坐标为(39.1940°N,117.0967°E),J2 坐标为(39.5426°N,117.3496°E),J3 坐标为(39.3810°N,117.5907°E),J4 坐标为(38.7808°N,117.1187°E))为圆心,0.05°为半径,每个实测点至少对应 1 个目标 SBAS-InSAR 点

(图 4(a))。二者误差均小于 20 mm,相关系数均大于 0.85, P 值均小于 0.05,说明 SBAS-InSAR 技术获取的地表形变数据是可靠的。

将天津市地表形变的等级按沉降量划分为严重沉降区(>200 mm)、较严重沉降区(100~200 mm)和一般沉降区(<100 mm)3 级。天津市的严重沉降区主要集中在分布在环城四区、滨海新区、宁河区、武清区、静海区等区域,其中沉降漏斗有 5 处,分别位于天津市西南部、中部和东部(图 4(b))。

2014 年天津市正式颁布实施了《天津市控制地面沉降管理办法》,同年《天津市地下水压采方案》获批,天津市大力压采地下水,地表沉降趋势得以控制,稳中向好。2016 年天津市逐步将控沉指标纳入市政府对区政府的绩效考核评价体系中,地下水压采和控沉力度逐步加大。2017 年起天津市地表沉降趋势明显减缓,至 2023 年严重沉降区、较严重沉

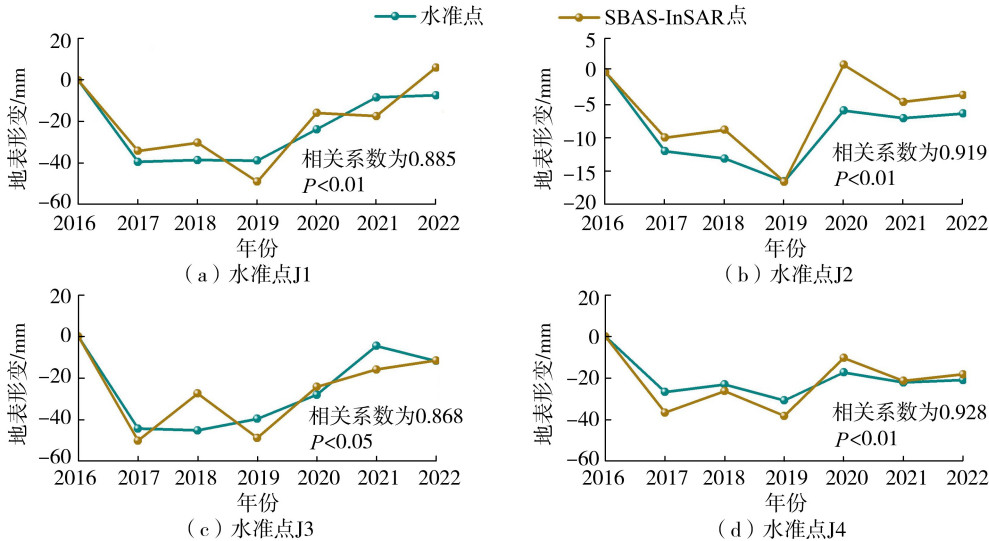


图 3 SBAS-InSAR 地表形变数据精度验证

Fig. 3 Accuracy verification of SBAS-InSAR surface deformation datas

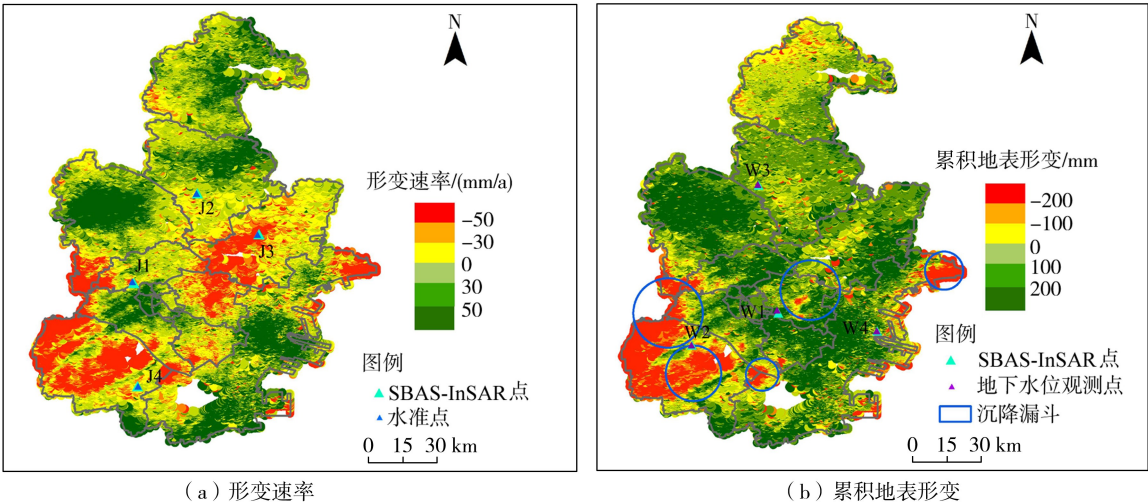


图 4 2016—2023 年形变速率和累积地表形变

Fig. 4 Surface deformation velocity and cumulative surface deformation from 2016 to 2023

降区、一般沉降区面积占比分别为 0.1%、3.2%和 96.7%,沉降严重区和较严重沉降区面积占比不到 5%,沉降严重区和较严重沉降区得到了显著遏制,但东丽区北部、武清区东北部和宁河区西南部等新一代沉降区也在逐步显现^[15]。因此,系统分析地表形变对地下水的响应关系,对精准预测沉降趋势具有重要的科学价值和现实意义。

3.2 地表形变与地下水位时序数据信号分解

水循环是一个复杂且多变的过程,地下水位的变化受到自然和人为双重因素的影响,具有周期性和随机性^[25]。将 2018—2022 年逐月地表形变与地下水位数据建立时间序列并进行季节性分解,得到 2018 年 7 月至 2022 年 6 月分解结果。总体来看,地表形变与地下水位时序数据各分量的动态变化规律基本一致。自 2017 年起,天津市地表沉降趋势减缓,控制措施成效显著^[15],故分离出的趋势分量均较为平稳。受温带季风气候和季节性农业灌溉影响,4 个地下水位观测点的地表形变与地下水位的季节分量均呈现出 1 a 左右的主周期,且地表形变相对于地下水位的变化存在着一定的滞后效应。而反映二者随机性的残差分量也表现出明显的同步特征,说明两个随机事件同时发生的概率较大。天津市第二含水层组主要岩性为粉土和粉砂,渗透系数为 2~5 m/d,属于中等透水性岩层,故该层地下水的区域连通性较强,天津市地表形变对地下水位变化的响应规律在不同观测点具有相对一致性。

为定量分析地下水位趋势分量、季节分量和残差分量对地表形变的贡献度,基于随机森林算法引入基尼系数对天津市地表形变进行地下水位各分量的特征重要性分析,以地表形变的时序数据作为因变量,地下水位趋势分量、季节分量和残差分量作为自变量进行拟合,结果见表 1。天津市 4 个地下水位观测点拟合性能良好,决定系数(R^2)均超过 0.8,说明影响因子(地下水位各分量)对因变量(地表形变)具有较好的解释力;均方根误差(RMSE)均小于

表 1 地下水位各分量对地表形变的特征重要性及拟合性能检验

Table 1 The importance characteristics and fitting performance test of each component of groundwater level to the surface deformation						
观测点	R^2	RMSE/m	MSE/m ²	特征重要性		
				趋势分量	季节分量	残差分量
W1	0.940 6	0.022 2	0.000 5	0.818	0.111	0.071
W2	0.861 3	0.015 9	0.000 3	0.522	0.194	0.284
W3	0.818 1	0.023 7	0.000 6	0.446	0.258	0.296
W4	0.866 0	0.045 4	0.000 2	0.595	0.126	0.279

0.05 m,均方误差(MSE)均低于 0.000 7 m²,表明特征重要性评估具有可靠性。

尽管 4 个地下水位观测点的地理位置不同,但地下水各分量对相应地点地表形变的重要性大致相同:趋势分量的特征重要性普遍最高,季节分量与残差分量的特征重要性相近。通过对 4 个地下水位观测点特征重要性求平均值,得到地下水位趋势分量、季节分量与残差分量对地表形变的综合特征重要性分别为 0.595、0.172、0.233。

地下水位变化主要受补排条件的影响,含水层补给量大于排泄量,水位上升,反之则水位下降^[25]。由表 1 可知,地下水位各分量中,对地表形变影响最大的为趋势分量,2018 年 7 月至 2022 年 6 月天津市地表形变与地下水位趋势分量的演变规律基本一致,二者的下降与回升均显示出同步的趋势。综合特征重要性排名第二的为残差分量,影响地下水位变化的自然因素主要是地质构造和大气降水^[25],由于天津市在 2018—2022 年并无重大地质灾害和极端干旱天气,故可以推测,在残差分量中,除灌溉、抬田、水利工程等局部或短期自然因素影响外,人为无序开采地下水可能是影响地下水位随机变化的主要因素之一。季节分量的特征重要性最低,二者均表现出下降—回升的可恢复性周期规律。

3.3 地表形变对地下水位时序数据各分量的响应

3.3.1 地表形变与地下水位趋势分量的相似度

趋势分量反映地表形变与地下水位的长期发展方向,天津市地表形变与地下水位变化趋势基本一致,但二者存在一定的时滞关系,为更准确地量化二者趋势的相似程度,采用 DTW,通过动态调整寻找二者之间的最优映射,并计算最优映射之间的 DTW 距离,来判断二者之间的相似度。

4 个地下水位观测点的地表形变与地下水位趋势分量之间的 DTW 距离均小于 20,分别为 1.16、18.18、6.43 和 16.58,反映出二者在不同区域内的趋势均较为相似。从整体来看,4 个地下水位观测点的综合 DTW 距离为 10.59,进一步表明天津市地表形变与地下水位在趋势分量上具有相似的演变规律。这一结果不仅定量化地支持了趋势相似性,还表明地表形变与地下水位的变化在长期趋势上具有较强的关联性,地下水位的趋势分量是地表形变影响因素中最重要地下水位特征因素。

3.3.2 地表形变与地下水位季节分量的时滞关系

季节分量体现地表形变与地下水位的周期性变化规律,为进一步探求二者在时间序列上的共振关系与响应时间,运用交叉小波变换定量研究二者时序数据的季节分量,分析二者季节分量的时滞效应。

图 5 为天津市 4 个地下水位观测点的地表形变与地下水位之间的交叉小波功率谱,根据交叉小波功率谱箭头方向可定量分析 4 个地下水位观测点的地表形变与地下水位时序数据季节分量之间的时滞关系。其中,箭头向左表示二者反相,向右表示二者同相,向下表示地表形变滞后地下水位 0.25 a,向上则相反。

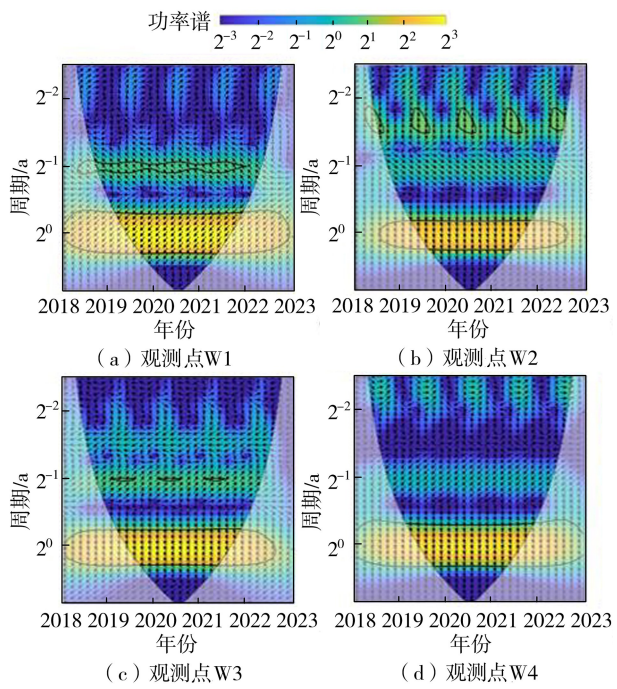


图 5 地表形变与地下水位季节分量的交叉小波功率谱
Fig. 5 Cross wavelet power spectrum between seasonal component of surface deformation and groundwater level

由图 5 可知,4 个地下水位观测点的地表形变与地下水位时序数据季节分量均呈现约 1 a 的主共振周期,这说明二者具有 1 a 的共有周期。地表形变的周期特征伴随着地下水位的季节性波动而发生波动和变化,共振关系显著。由表 2 可知,4 个地下水位观测点 2018—2022 年大部分变换时段都通过了 95%红噪声检验,说明地表形变周期特征和地下水位季节性变化之间确有时滞关系,4 个地下水位观测点处地表形变周期特征相对于地下水位季节性变化的滞后时间为 93~132 d,即 3~4 月。由于降水与地表水难以直接对深层地下水进行补给,这也说

表 2 地表形变与地下水位季节分量的交叉小波变换统计
Table 2 Statistics of cross wavelet transform of seasonal component of surface deformation and groundwater level

观测点	变换时段	通过 95%红噪声检验时段	时滞/d
W1	2018-01—2022-12	2018-01—2022-12	132. 46
W2	2018-01—2022-12	2018-07—2022-08	92. 93
W3	2018-01—2022-12	2018-01—2022-08	108. 84
W4	2018-01—2022-12	2018-01—2022-12	103. 69

明研究区地表水补充进入地下含水层需要 3~4 月^[26]。

3.3.3 地表形变与地下水位残差分量的联合分布概率

残差分量反映数据非趋势和非周期性的随机变化。除用于农业灌溉、日常生活等季节性、有序的地下水开采外,人类还存在着无序开采地下水的随机行为,这有可能是引发随机性地表形变现象的主要因素之一。为量化地表形变与地下水位随机事件发生的相关性,将二者的残差分量进行归一化和非负平移,并运用二维 Copula 函数分析联合分布概率,探究二者的相关性^[24]。4 个地下水位观测点的地表形变与地下水位残差分量适合的单变量 Copula 函数不完全一致,除观测点 W2 地下水位数据的残差分量表现为 Weibull Copula 拟合最优外,观测点 W2 的地表形变数据残差分量和其他观测点的两组数据均表现为 Normal Copula 拟合最优,联合分布均表现为 Frank Copula 拟合最优(表 3)。

表 3 Copula 函数参数值及拟合优度检验

Table 3 Copula function parameter values and goodness of fit test				
观测点	Copula 函数	Copula 函数参数	AIC	BIC
W1	Frank	-0. 028	1. 999	3. 871
	Gumbel	1. 000	2×10 ⁹	2×10 ⁹
	Clayton	1. 000	2×10 ⁹	2×10 ⁹
W2	Frank	1. 128	0. 502	2. 374
	Gumbel	1. 070	1. 608	3. 479
	Clayton	0. 118	1. 149	3. 021
W3	Frank	-0. 245	1. 917	3. 788
	Gumbel	1. 000	2×10 ⁹	2×10 ⁹
	Clayton	1. 000	2×10 ⁹	2×10 ⁹
W4	Frank	0. 248	1. 919	3. 790
	Gumbel	1. 006	1. 997	3. 868
	Clayton	0. 000	2. 000	3. 871

由图 6 可以看出,基于 Copula 函数构建的联合分布模型中,4 个地下水位观测点的地表形变与地下水位残差分量联合分布的理论频率与经验频率都均匀分布在 45°对角线附近,这表明 Frank Copula 函数能够较好地拟合两者之间的联合分布特征。

图 7 为 4 个地下水位观测点地表形变与地下水位残差分量联合分布概率等值线图,结果显示,当地下水位残差分量的边缘分布函数值为 0. 8 时,地表形变残差分量的边缘分布函数值越大,其与地下水位残差分量同时处于高值的联合分布概率也越大,表明两者具有较强的相关性和联动性。

为进一步验证联合概率特征,表 4 给出了 4 个地下水位观测点在地表形变与地下水位残差分量边缘分布函数值均为 0. 8 时的联合分布概率,分别为

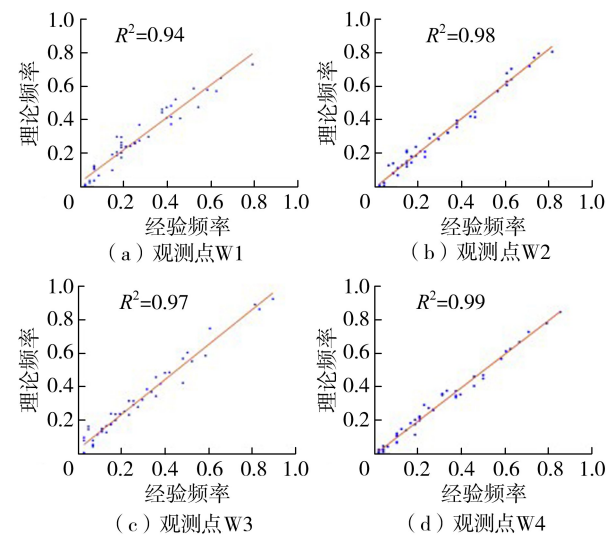


图 6 联合分布的理论频率和经验频率

Fig. 6 Theoretical and empirical frequency of joint distribution

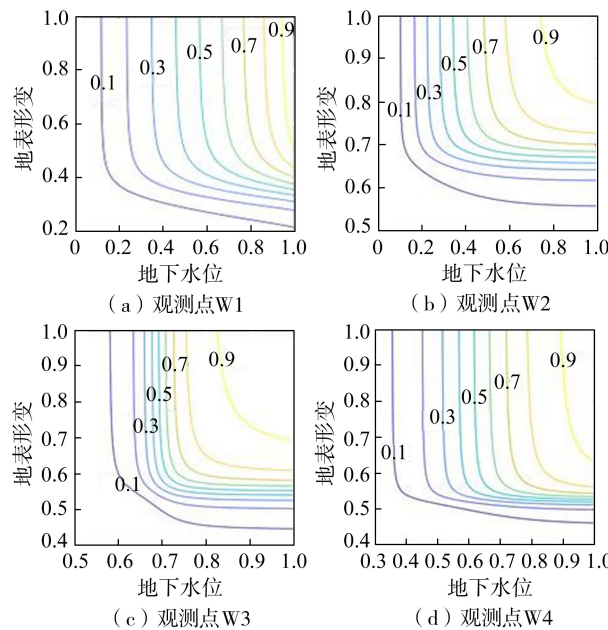


图 7 地表形变与地下水位残差分量联合分布概率等值线

Fig. 7 The contour line of the joint distribution probability of residual component of surface deformation and groundwater level

表 4 地表形变与地下水位残差分量联合分布概率

Table 4 Joint distribution probability of residual component of surface deformation and groundwater level

观测点	残差分量边缘分布函数值		联合分布概率
	地下水位	地表形变	
W1	0.8	0.8	0.75
W2	0.8	0.8	0.87
W3	0.8	0.8	0.86
W4	0.8	0.8	0.82

0.75、0.87、0.86 和 0.82,进一步印证了二者之间的高度相关性。随机性地表形变的主要影响因素之一

是人为无序开采地下水。地下水的无序开采往往伴随着不规则的抽取周期和抽取量,这会导致地表形变的时间曲线出现非线性、波动性特征,表现出随机的变化趋势。

4 结 论

a. 天津市地表严重沉降区主要集中在环城四区、滨海新区、宁河区、武清区、静海区等地,5 处沉降漏斗分别位于天津市西南部、中部和东部。地下水位趋势分量、季节分量和残差分量对于地表形变的综合特征重要性分别为 0.595、0.172 和 0.233。

b. 地表形变与地下水位趋势分量之间的综合 DTW 距离为 10.59,表明天津市地表形变与地下水位的趋势分量具有相似的演变规律,且二者在长期趋势上具有较强的关联性,地下水位的趋势分量是地表形变影响因素中最重要的地下水位特征因素。

c. 地表形变与地下水位时序数据的季节分量呈现约 1 a 的主共振周期。地表形变的周期特征随地下水位的季节性波动而发生变化,且二者存在时滞关系,地表形变周期特征相对于地下水位季节性变化的滞后时间为 93~132 d,即 3~4 月。

d. 当地表形变与地下水位残差分量边缘分布函数值均为 0.8 时的联合分布概率不小于 0.75,二者有较强的相关性。地下水位变化程度一定时,随地表形变程度的增大二者同时发生的概率增大,随机性地表形变的主要影响因素之一是人为无序开采地下水。

参考文献:

[1] 唐伟,赵祥君,康彩琴,等. 太原盆地地面沉降时序 InSAR 监测与季节性变形小波分析[J]. 地球物理学报, 2023, 66 (6) : 2352-2369. (TANG Wei, ZHAO Xiangjun, KANG Caiqin, et al. Monitoring land subsidence by time series InSAR and wavelet analysis of seasonal deformation in Taiyuan Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(6) : 2352-2369. (in Chinese))

[2] HA Da, ZHENG Gang, LOÁICIGA H A, et al. Long-term groundwater level changes and land subsidence in Tianjin, China[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(4) : 1303-1314.

[3] 徐腾,王以鹏,叶逾,等. 地下水超采管控体系及水量水位双控体系研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(4) : 27-35. (XU Teng, WANG Yipeng, YE Yu, et al. Research progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4) : 27-35. (in Chinese))

[4] 张赛亚,张珂,晁丽君,等. 考虑地形与理化性质的土壤

- 关键水力特性多种模型构建与比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 42-50. (ZHANG Saiya, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Development and comparison of multiple models for estimating key soil hydraulic properties considering terrain and soil physiochemical properties[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 42-50. (in Chinese))
- [5] 张文静, 张振, 黄剑, 等. 基于图像语义分割的水位智能监测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 24-30. (ZHANG Wenjing, ZHANG Zhen, HUANG Jian, et al. Intelligent water-level monitoring method based on image semantic segmentation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 24-30. (in Chinese))
- [6] ACUTO M, PARNELL S, SETO K C. Building a global urban science[J]. Nature Sustainability, 2018, 1(1): 2-4.
- [7] 徐丽丽, 束龙仓, 李伟, 等. 2000—2020 年中国地下水开采时空演变特征[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 79-85. (XU Lili, SHU Longcang, LI Wei, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 79-85. (in Chinese))
- [8] 宋子奕, 鲁程鹏, 吴成城, 等. 2009—2019 年河西走廊地下水水位时空分布及演变趋势[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 160-167. (SONG Ziyi, LU Chengpeng, WU Chengcheng, et al. Spatiotemporal distribution and evolution trend of ground water level in Hexi Corridor from 2009 to 2019 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 160-167. (in Chinese))
- [9] 张婧, 马贵宏, 高雅, 等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 21-28. (ZHANG Jing, MA Guihong, GAO Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 21-28. (in Chinese))
- [10] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.
- [11] HU Bo, WANG Hansheng, SUN Yongling, et al. Long-term land subsidence monitoring of Beijing (China) using the small baseline subset (SBAS) technique [J]. Remote Sensing, 2014, 6(5): 3648-3661.
- [12] TIZZANI P, BERARDINO P, CASU F, et al. Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(3): 277-289.
- [13] CHANG Ming, SUN Wenjing, XU Hengzhi, et al. Identification and deformation analysis of potential landslides after the Jiuzhaigou earthquake by SBAS-InSAR [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(13): 39093-39106.
- [14] CHEN Yang, YU Shengwen, TAO Qiuxiang, et al. Accuracy verification and correction of D-InSAR and SBAS-InSAR in monitoring mining surface subsidence [J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4365.
- [15] 张宁月, 徐方, 曹永强, 等. 基于 PS-InSAR 的天津市建设用地演变对地表沉降影响研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(5): 477-490. (ZHANG Ningyue, XU Fang, CAO Yongqiang, et al. Study on the impact of construction land evolution on land subsidence in Tianjin based on PS-InSAR[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(5): 477-490. (in Chinese))
- [16] 李佳琦, 徐佳, 刘杰, 等. 天津地面沉降严重区分布特征及变化规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 53-60. (LI Jiaqi, XU Jia, LIU Jie, et al. Distribution characteristics and evolution trend of severe land subsidence areas in Tianjin City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 53-60. (in Chinese))
- [17] 郑刚, 栗晴瀚, 哈达, 等. 天津市承压层应力状态及减压引发沉降规律研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊2): 285-294. (ZHENG Gang, LI Qinghan, HA Da, et al. Study of stress state and settlement induced by pressure relief of confined aquifers in Tianjin [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup2): 285-294. (in Chinese))
- [18] 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.
- [19] NICODEMUS K K. Letter to the editor: on the stability and ranking of predictors from random forest variable importance measures [J]. Briefings in Bioinformatics, 2011, 12(4): 369-373.
- [20] 刘俸铭. 基于随机森林回归模型的上市公司定向增发折价率影响因素分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古财经大学, 2024.
- [21] 张欣宇, 邱国鹏. 融合改进 LM 算法及动态时间规整算法的人体动作捕捉研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(5): 175-185. (ZHANG Xinyu, QIU Guopeng. Research on human motion capture by integrating improved LM algorithm and dynamic time regularity algorithm [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2024, 46(5): 175-185. (in Chinese))
- [22] GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. Nonlinear Processes in

Geophysics,2004,11(5/6):561-566.

[23] LI Wei,JIANG Shan,ZHAO Yong,et al. A copula-based security risk evaluation and probability calculation for water-energy-food nexus [J]. Science of the Total Environment,2023,856(2):159236.

[24] 张向明. 基于 Copulas 函数的黑河流域多变量水文干旱研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[25] 齐跃明. 矿区岩溶地下水动态的随机模拟及应用研究 [D]. 徐州:中国矿业大学,2009.

+++++

(上接第 237 页)

[17] 窦明,于璐,靳梦,等. 淮河流域水系盒维数与连通度相关性研究[J]. 水利学报,2019,50(6):670-678. (DOU Ming, YU Lu, JIN Meng, et al. Study on relationship between box dimension and connectivity of river system in Huaihe River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(6):670-678. (in Chinese))

[18] ZHANG Xianqi, QIAO Wenbao, LU Yaohui, et al. Construction and application of urban water system connectivity evaluation index system based on PSR-AHP-Fuzzy evaluation method coupling [J]. Ecological Indicators,2023,153:110421.

[19] 韩龙飞,许有鹏,邵玉龙,等. 城市化对水系结构及其连通性的影响:以秦淮河中、下游为例[J]. 湖泊科学,2013,25(3):335-341. (HAN Longfei, XU Youpeng, SHAO Yulong, et al. Effect of urbanization on the stream structure and connectivity: a case study in the midlower reaches of the Qinhuai River [J]. Journal of Lake Sciences,2013,25(3):335-341. (in Chinese))

[20] 徐光来,许有鹏,王柳艳. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展,2012,23(6):776-781. (XU Guanglai, XU Youpeng, WANG Liuyan. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory[J]. Advances in Water Science,2012,23(6):776-781. (in Chinese))

[21] SHAO Xiaojing, FANG Yu, CUI Baoshan. A model to evaluate spatiotemporal variations of hydrological connectivity on a basin-scale complex river network with intensive human activity [J]. Science of the Total Environment,2020,723:138051.

[22] 傅春,裴伍涵,肖昆. 闸坝对抚河流域连通性的影响研究[J]. 中国农村水利水电,2020(8):66-70. (FU Chun, PEI Wuhan, XIAO Kun. Research on the influence of gate dams on the connectivity of Fuhe River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(8):66-70. (in Chinese))

[23] COTE D, KEHLER D G, BOURNE C, et al. A new measure of longitudinal connectivity for stream networks [J]. Landscape Ecology,2009,24(1):101-113.

[24] FRÉMION F,BORDAS F,MOURIER B,et al. Influence of dams on sediment continuity: a study case of a natural metallic contamination [J]. Science of the Total Environment,2016,547:282-294.

[25] 闵克祥,何琴,刘建龙,等. 秦淮河流域水利治理现状分析[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(12):101-105. (MIN Kexiang, HE Qin, LIU Jianlong, et al. Current situation analysis of water management in Qinhuai River Basin in Nanjing City[J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(12):101-105. (in Chinese))

[26] DENG Xiaojun, XU Youpeng, HAN Longfei. Impacts of human activities on the structural and functional connectivity of a river network in the Taihu Plain[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(8):2575-2588.

[27] 张轩,张行南,江唯佳,等. 秦淮河流域东电站水位预报研究[J]. 水资源保护,2020,36(2):41-46. (ZHANG Xuan, ZHANG Xingnan, JIANG Weijia, et al. Study on water level forecast of Dongshan Station in Qinhuai River Basin[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):41-46. (in Chinese))

[28] LEHNER B, VERDIN K, JARVIS A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2008, 89(10):93-94.

[29] 刘赛艳,解阳阳,黄强,等. 流域水文年及丰枯水期划分方法[J]. 水文,2017,37(5):49-53. (LIU Saiyan, XIE Yangyang, HUANG Qiang, et al. Method of partitioning water year, wet season and dry season of river basin[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5):49-53. (in Chinese))

[30] 方少文,王仕刚,欧阳千林. 鄱阳湖丰、平、枯水期界定标准探讨[J]. 水文,2022,42(1):11-15. (FANG Shaowen, WANG Shigang, OUYANG Qianlin. Discussion on the definition standard of the wet season, normal season and dry season in Poyang Lake [J]. Journal of China Hydrology,2022,42(1):11-15. (in Chinese))

[31] 王建群,季晓翠,杜开莲,等. 基于气象模式的赤山湖流域洪水预报与调度[M]. 南京:河海大学出版社,2020:17-18.

(收稿日期:2025 - 03 - 31 编辑:熊水斌)