

doi: 10.6046/zrzyg.2022171

引用格式: 高晨, 马栋, 屈曼, 等. 基于 PS-InSAR 的怀来地震台钻孔体应变异常机理研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(3): 153-159. (Gao C, Ma D, Qu M, et al. Exploring the anomaly mechanism of borehole strain at the Huailai seismic station based on PS-InSAR[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 153-159.)

基于 PS-InSAR 的怀来地震台 钻孔体应变异常机理研究

高晨^{1,2}, 马栋^{1,2}, 屈曼^{1,2}, 钱建国³, 尹海权⁴, 侯晓真^{1,2}

(1. 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 邢台 054000; 2. 河北省地震局, 石家庄 050021;
3. 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123000; 4. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 钻孔体应变仪是地震前兆观测与研究的主要仪器, 该仪器优点是基于点的观测、观测精度高和直接观测浅层地壳应力应变信息; 缺点是难以获得空间连续形变信息和易受抽水等场地环境等因素干扰。PS-InSAR 方法结果为空间连续形变场和时序形变量, 累计形变量与地下水位变化具有一致性。为弥补钻孔体应变监测地表形变缺陷和准确分析其观测数据中的异常信息, 以怀来地震台为例, 基于 Sentinel-1 影像, 使用 PS-InSAR 方法对研究区地表进行沉降分析并研究 2020—2021 年钻孔体应变观测数据拉张异常机理。结果表明: 怀来地震台附近区域的形变中心位于义合堡村东侧抽水井处; 区域沉降发生时间和钻孔体应变观测异常时间与义合堡村用于供热的抽水井供暖期抽水时间相同; 怀来地震台钻孔体应变观测数据拉张异常机理与附近用于供热的抽水井抽水引起的地表变化机制相一致。因此, 怀来地震台钻孔体应变拉张异常变化是由义合堡村用于供热的抽水井抽水引起, 同时诠释了在受地下水抽水较为明显地区内, PS-InSAR 在地震前兆观测仪器观测异常机理研究的应用示范作用。

关键词: PS-InSAR; 钻孔体应变; 异常; 地面沉降; 抽水

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0153-07

0 引言

钻孔体应变仪作为地震前兆观测和研究的主要仪器, 基于点观测能够连续监测地壳形变并记录到丰富的小空间尺度上的浅层地壳应力应变信息, 对于认识和研究地震孕育过程中的动力学过程具有重要意义^[1-2]。钻孔体应变观测仪器探头通常被安装在钻孔下数十米的基岩(或土层)中, 因此能够显著降低地面人类活动及降雨等非构造因素的影响, 有助于获取高质量的观测结果^[3-4]。由于钻孔体应变观测分辨率可达到 $10^{-9} \sim 10^{-11}$, 地面荷载(河流、水库和人工建筑物等)变化、气象因素(气压、降雨和温度)的变化和地下水位等可以对其产生明显干扰, 因此钻孔体应变仪的观测数据既包含来自震源的前兆信息, 也同时包括干扰信息^[5-6]。所以, 深入研究体应变观测异常变化机理是准确识别观测数据

中地震前兆异常信号并做出准确地震预报的重要基础。

由于体应变是基于点的观测, 测点分布稀疏, 对于大范围地表形变监测往往难以获得空间连续形变场; 同时部分研究区内地质构造复杂, 环境干扰因素较多, 异常原因调查较为困难。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)技术是近些年来发展起来的一种新型大地测量手段, 与传统的监测技术相比, 具有全天候、全天时、覆盖广、空间分辨率高和测量精度高等优势, 能够获得空间连续的地表形变场^[7-8]。永久散射体干涉测量技术(permanent scatterer-InSAR, PS-InSAR)是在 InSAR 技术基础上继续发展和创新的结果, 该技术通过选取那些自身散射特性较强并且相位信息较为稳定的地面目标点作为地表形变信息的表征, 利用长时间序列影像从稳定的 PS 点上获得高空间分辨率、毫米级的地表连续形变场, 被广泛用于

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-12-22

基金项目: 中国地震局震情跟踪定向工作任务“基于 InSAR 的张家口伸缩仪 NS 向构造异常特征分析”(编号: 2022010210)、河北地震科技星火计划项目“基于 GPS 和 InSAR 的阳原盆地主要断裂活动特性研究”(编号: DZ202108100002)和“GPS 和 PS-InSAR 联网监测张家口—渤海断裂带西段断层活动性研究”(编号: DZ20190424079)共同资助。

第一作者: 高晨(1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事 InSAR 形变监测与地球动力学研究。Email: gaoch_simlab@163.com。

通信作者: 钱建国(1976-), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事大地测量学与测量数据误差理论研究。Email: fyglngd@163.com。

高精度的地表形变监测和地下水开采监测^[6,9-10]。

因此,为了弥补体应变观测缺陷和诠释 PS-InSAR 方法在体应变仪器观测异常机理研究的应用示范作用。由于怀来地震台(以下简称怀来台)位于晋冀蒙交界年度地震危险区,同时台站所在区域地震活动水平较高;同时台站周围存在较为明显的人为干扰,因此本文以怀来台为例,基于 Sentinel-1A 影像使用 PS-InSAR 技术揭示怀来台及其周边区域的地表形变,确定形变空间范围和形变原因,进而对怀来台体应变观测异常机理进行深入分析,对于此后该台再次出现类似观测异常进行准确识别,以及对于环首都圈和晋冀蒙交界地区的地震危险性判断具有一定参考意义。

1 研究区概况与数据源

1.1 怀来台及研究区概况

怀来台地处山西断陷系北部晋冀蒙盆岭构造区最东端与张家口—渤海断裂带交汇部位的怀涿盆地^[11]。怀涿盆地沿北东向展布,构造应力场以 NNW-SSE 向的拉张为主要特征^[11];在区域构造

应力的作用下,盆地新构造运动强烈,地质结构复杂,活动断层发育,主要发育着北东向、北西向和近东西向 3 组活动断裂,包括延矾盆地北缘断裂、怀涿盆地北缘断裂、黄土窑—土木断裂和桑干河断裂^[12](图 1(a))。该盆地地震活动水平较高,最近发生的地震为 2002 年 8 月 3 日怀来 M_L4.4 级地震(图 1(a))。怀来台位于河北省怀来县义合堡村南的太山西麓,周围岩性为太古宇桑干群混合岩化花岗片麻岩,体应变探头深埋于怀来台地面以下 83 m 处,2022 年 1 月 1 日标定重复精度为 2.836% (标准为 < ±3%),仪器运行正常。怀来台周围视野开阔,为村庄和农田,无大型工矿企业,观测条件良好。怀来台附近主要的人为干扰源包括:第一,农田机井抽水灌溉,灌溉时间主要集中于每年 4 月、7—8 月;第二,怀来台西北方向距离约 0.7 km 和 1.1 km 的 5 口供热抽水井,义合堡村 2017 年 11 月 1 日正式投入使用集中式供热系统,该系统利用当地地热能,在供暖期(每年 11 月 1 日—次年 3 月 31 日)不断通过从位于义合堡村西侧 1 口和村东侧 4 口深度约 150~160 m 的抽水井中抽取地下水进入供热循环系统(图 1(b))。

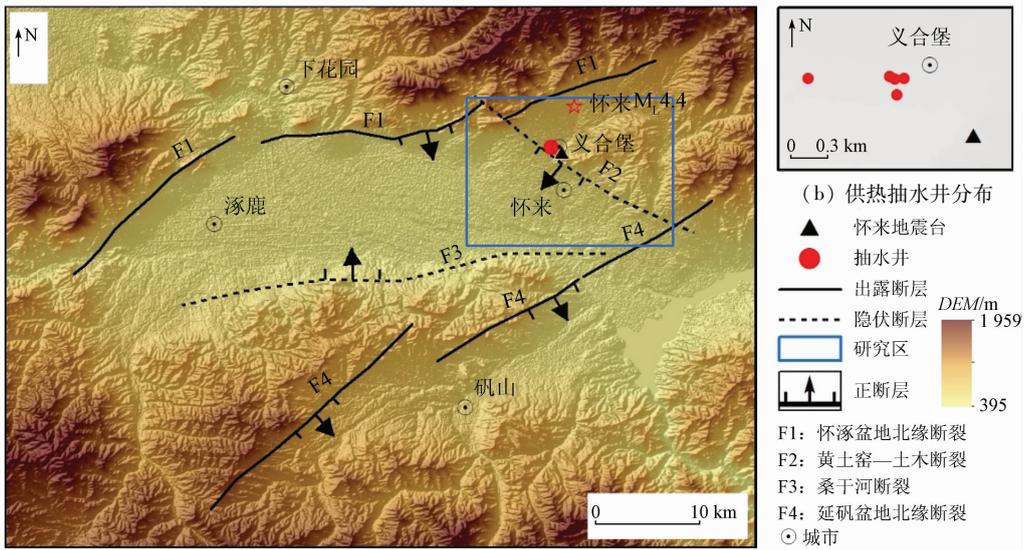


图 1 怀来台附近构造背景和供热抽水井分布

Fig.1 Structural background and distribution of heat pumping wells near Huailai seismic station

怀来台体应变观测数据长时间序列曲线结果显示,2017—2020 年 10 月,每年 11 月 1 日—次年 3 月 31 日期间,观测数据曲线变化基本一致,总体形态均呈现上升(挤压)形态(图 2)。但是在 2020 年 11 月—2021 年 3 月和 2021 年 11 月—2022 年 3 月 2 个时段,观测曲线形态与以往历年同期相比出现趋势转折,呈下降(拉张)异常变化(图 2),反映出该

区域出现局部区域应力场变化,河北省地震局对怀来台体应变观测异常进行核实分析,排除了异常时段内观测系统、气象因素、农用灌溉井抽水和建筑荷载等因素对仪器观测异常的影响,分析可能与位于怀来台西北方向用于供热的抽水井在冬季供暖期抽地下水有关,或者是区域构造应变异常所引起。

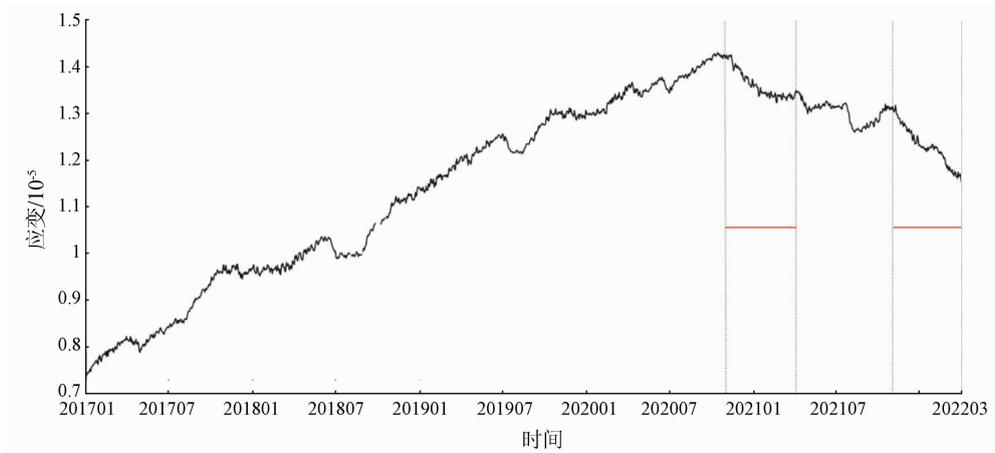


图2 怀来台体应变观测日均值曲线

Fig.2 Observation curve of daily average value of borehole strain in Huailai seismic station

1.2 数据源

本文使用欧洲航天局提供的24景 Sentinel-1 C波段 SAR 影像,时间跨度从2020年1月—2021年12月,成像模式为干涉宽幅模式(IW),影像覆盖范围如图3所示。数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据采用美国航空航天局提供的空间分辨率为30 m × 30 m的SRTM DEM数据。

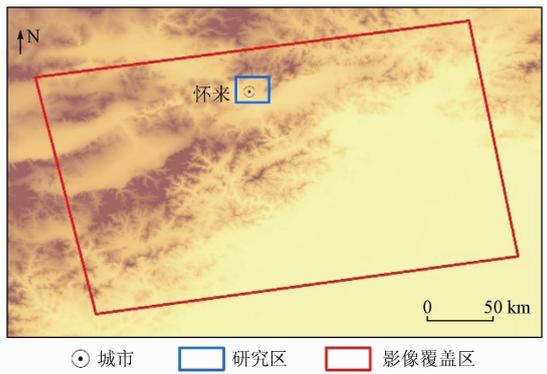


图3 Sentinel-1A 影像覆盖范围

Fig.3 Sentinel-1A image coverage

2 研究方法 with 数据处理

2.1 PS-InSAR 方法

PS-InSAR 方法的基本原理是利用覆盖同一地区的多景 SAR 影像进行差分干涉处理,形成时间序列干涉影像对,提取出不受时空基线失相关和大气延迟影响的永久散射体点(PS点),通过分离并解算出这些 PS 点上的地形相位来提取研究区地面形变信息。

经过差分干涉处理后,每个 PS 点干涉相位的组分为:

$$\varphi_{\text{InSAR}} = \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{orbit}} + \varphi_{\text{noise}}, \quad (1)$$

式中: φ_{InSAR} 为每个像素的干涉相位; φ_{def} 为雷达视

线向(line of sight, LOS)形变相位; φ_{topo} 为地形相位; φ_{atm} 为大气延迟相位; φ_{orbit} 为轨道误差相位; φ_{noise} 为噪声相位。

PS 点的选取是 PS-InSAR 方法的关键技术之一,即在 $N+1$ 幅影像中挑选出那些散射特性较强并且较为稳定的像素,例如人工建筑物、人工布设的角反射器和裸露的岩石等。本文采用 Hooper 等提出的一种新的 PS 点识别及相位组分分析的方法 StaMPS,先采用振幅离差阈值法选择 PS 候选点,再根据干涉相位空间相关性筛选出最终的 PS 点^[13]。

2.2 数据处理流程

本文利用 SNAP 软件对覆盖研究区的升轨 SAR 影像进行处理,根据时空基线最优原则选取 20201218 采集到的 SAR 影像作为公共主影像,将配准后的主、辅影像形成 23 幅差分干涉对,每幅干涉对的垂直基线距在 $-52.31 \sim 125.58$ m 的区间范围内,具体如图4所示。利用 Sentinel-1 精密轨道数据和 SRTM DEM 数据消除干涉图中地球椭球效应和地形效应;然后,基于 StaMPS 平台对经过 SNAP

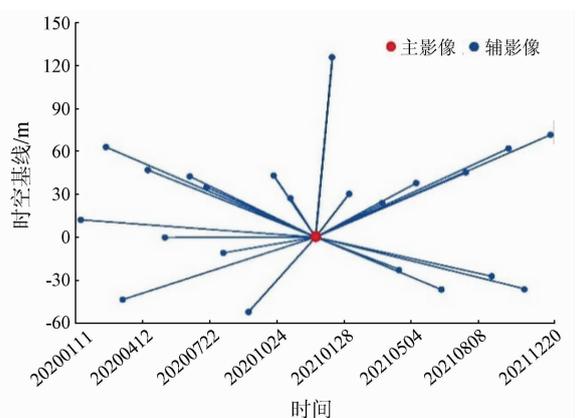


图4 干涉对时空基线分布

Fig.4 Spatio-temporal baseline distribution of interferograms

软件处理得到的干涉对进行时序干涉叠加处理,设置振幅离差阈值为 0.4,利用 StaMPS 方法来提取 PS 点,研究区内共探测出 53 442 个 PS 点;最后,基于选定的 PS 点进行滤波处理,依次去除残余地形和使用从 GACOS 得到的高分辨率对流层延迟干涉图去除大气相位等影响,解算出各点的时间序列上的形变量和形变速率,并进行地理编码。

3 精度评定

为了验证基于 Sentinel-1 升轨数据采用 PS-InSAR 方法得到的监测结果,收集研究区内水准点(小水峪和土木)数据,比较实测水准点得到的年均沉降速率与邻近 PS 点监测值的差异来评估 InSAR 沉降监测的精度。将 PS 点在 LOS 向形变速率投影

到垂向,对比分析 2 种数据结果可知,小水峪点位差值为 0.21 mm,土木点位差值为 0.53 mm,结果表明 PS-InSAR 监测结果具有一定的可靠性。

4 形变监测结果分析

基于 Sentinel-1 升轨 SAR 数据,采用 PS-InSAR 时序分析方法,对怀来台及周边区域地面进行了形变监测研究,得到该区域 2020 年 1 月—2021 年 12 月的地面沉降监测结果(图 5(a))。由于地质构造运动引起的地面形变通常表现为断层两端,且一般是大范围并在空间上可能不连续,图 5(a)显示怀来台附近活动断层两侧区域不存在大范围的面形变,因此排除区域构造活动导致的怀来台体应变观测异常^[14]。

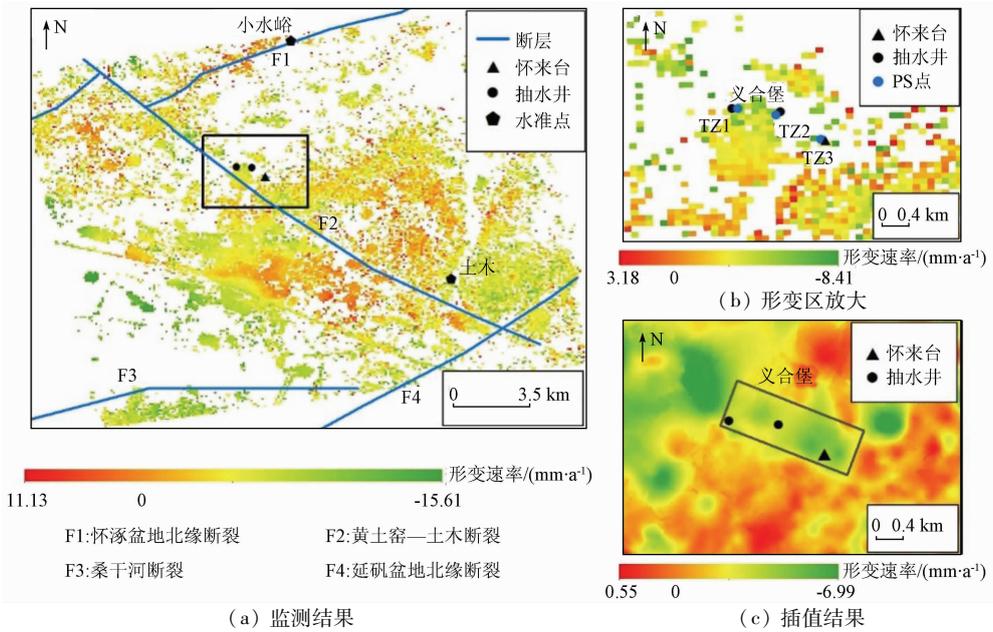


图 5 LOS 向年平均形变速率场

Fig. 5 Annual average deformation rate field in LOS direction

通过对怀来台和供水水井周围区域(图 5(a)中黑框区域)的形变场进行放大(图 5(b)),并通过使用普通克里金插值方法将区域内 PS 点上的形变速率进行内插^[15](图 5(c)),沉降监测结果显示,怀来台西北方向距离约 0.7 km 和 1.1 km 的义合堡村东侧 4 口和西侧 1 口用于供热的抽水井附近区域存在一定程度的沉降,且村东侧 4 口抽水井位于形变中心,空间分布上以该点为中心的形变场呈小范围近似长方形分布,形成研究区范围内较为明显的沉降漏斗,沿 LOS 向沉降速率最大为 6.99 mm/a,沉降区域范围沿长方形长边方向约为 1.4 km,沿宽边方向约 0.6 km,怀来台位于沉降区域边缘(图 5(c))。分别在义合堡村东、西测抽水井附近以及怀来台附

近共计选取 3 个 PS 点(图 5(b)),得到沉降时间序列结果(图 6)。图 6 显示,怀来台与义合堡村东、西侧的抽水井所在位置地表基本保持同步形变,2020 年 1 月—2020 年 4 月、2020 年 7 月—2021 年 4 月、2021 年 6—8 月和 2021 年 10 月—2021 年 12 月 4 个时间段均为整个区域的沉降期;2020 年 5—7 月、2021 年 7—10 月 2 个时间段为整个区域明显的抬升期。根据已有研究结果,地下水的抽取和回灌引起的地面形变通常呈现空间连续性且范围较小,这与怀来台附近以用于供热抽水井为中心的沉降区域空间分布特征基本一致,目前怀来台附近缺乏井水位观测数据,但是已有研究结果表明 PS-InSAR 形变结果与地下水水位变化具有较好的一致性,因此

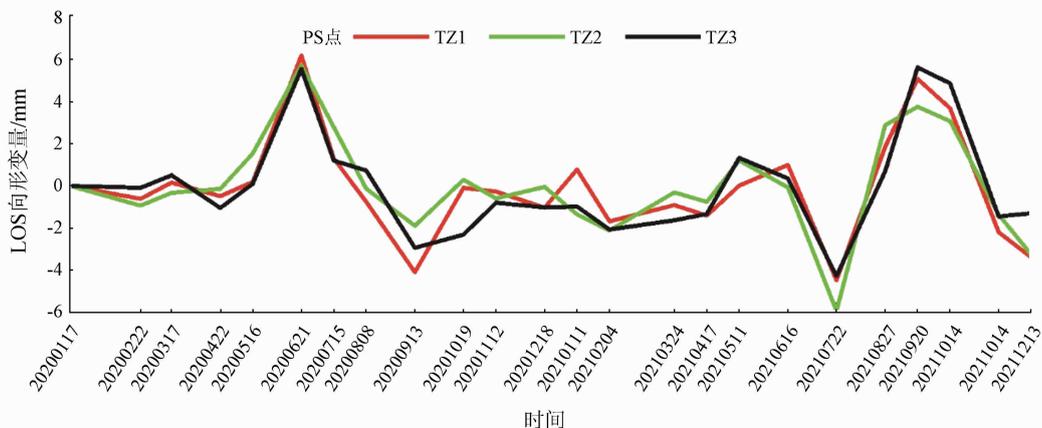


图6 PS点形变时间序列曲线(LOS向)

Fig. 6 Deformation time series curves of the PS points(LOS)

本文使用PS点沉降时间序列结果可以间接反映地下水水位变化情况^[14]。同时,深井抽水可以引起附近区域地下水水位降低,进而导致土壤的孔隙压力变大和地层压缩,应变类仪器观测会呈拉张变化^[16]。怀来台周围区域内共分布有18口灌溉用水机井,每年4月和7—8月为当地集中抽水高峰期,因此第一组沉降期内2020年7—9月和2021年6—8月期间,怀来台附近地面沉降为灌溉用水机井抽水所致,且体应变观测曲线在该时间同时出现挤压趋势消失和拉张趋势明显^[17](图2)。第二组沉降期为2020年1—4月、2020年10月—2021年4月和2021年11—12月,沉降时间与体应变拉张异常发生时间具有较高的同步性;第二组沉降期恰为怀来县冬季供暖期,期间灌溉用水机井停止抽水,经过实地调查,义合堡村2017年11月1日正式投入使用集中式供热系统,该系统虽然投入使用时间是2017年11月,但是由于推广速度慢,该套供热系统基本处于停滞状态,从2020年11月1日以后才被义合堡村及附近居民正式广泛使用。位于怀来台西北方向直线距离分别约为0.7 km和1.1 km的4口和1口义合堡村用于供热的抽水井开始抽地下水,并经过供热循环系统后回灌至井中,由于循环过程中出现水量损耗且抽水活动导致附近区域地下水水位突然降低,进而导致地面沉降和土壤的孔隙压力变大,体应变仪器能够记录到小空间尺度上的浅层地壳应力应变信息,因此观测数据曲线与2020年之前变化趋势相反,呈拉张变化。为进一步研究用于供热的抽水井抽水与怀来台体应变拉张异常变化的关系,本文分别计算体应变2020年11月—2021年3月和2021年11—12月期间的观测数据与同时段义合堡村东、西两侧抽水井附近PS点累计形变量的相关系数,计算结果如表1所示。计算结果表明,体应变观测数据与附近地面沉降之间相关性较高,间

接反映了体应变拉张异常变化受抽水井抽水影响。因此可以判断义合堡村供热井抽水是引起怀来台体应变拉张变化观测异常的主要原因。

表1 体应变观测数据与累计形变量相关系数

Tab.1 Correlation coefficients between borehole body observation data and cumulative deformation value

体应变观测值	与TZ1 累计形变 相关系数	与TZ2 累计形变 相关系数
2020年11月—2021年3月	0.510	0.669
2021年11—12月	0.593	0.673

图6形变点时间序列曲线结果显示,怀来台和供热井附近地表在2020年5—7月、2021年7—10月2个时间段内出现明显抬升。怀涿盆地为位于华北平原内部的断陷盆地,内部变形特征较弱,且以沉降运动为主,地表出现明显抬升与区域地表形变背景不同^[18]。由于Sentinel-1卫星携带C波段SAR,研究区地表在以上时段内出现明显抬升可能由于PS-InSAR处理过程中PS点相位中包含的大气效应和噪声等多种相位误差未完全消除^[18]。

5 结论

本文基于Sentinel-1的SAR数据利用PS-InSAR方法监测怀来台及周围区域2020年1月—2021年12月间地面沉降状况,并将监测结果示范性地应用于怀来台体应变异常机理研究。研究结果表明:

1) 怀来台附近沉降区域范围空间分布形态上呈现沿西北方向和东南方向分别约为1.4 km和0.6 km的近似长方形,沉降区域中心位于怀来台东北方向距离约为0.7 km的义合堡村东侧4口抽水井所在位置,且沉降速率沿LOS向最大约为6.99 mm/a,怀来台位于沉降区域边缘。怀来台与义合堡村东、

西抽水井所在位置地面基本保持同步沉降。

2) 怀来台附近的沉降区域范围较小且空间连续,没有经过断层,且距离断层较远,形变范围不受断层控制,体应变观测异常与断层构造活动没有显著的因果关系;怀来台体应变仪器观测异常发生在2020年11月—2021年3月和2021年11月—2022年3月,这与以义合堡村东侧4口抽水井为中心的沉降区域的供暖期间沉降期和用于供热的抽水井地下水活动时间完全一致;同时,怀来台体应变观测数据异常显示附近区域地层呈拉张变化,这与深井抽水导致的区域应力呈拉张变化趋势相吻合。通过计算体应变在异常发生时间的观测数据与同时段义合堡村东、西两侧抽水井附近PS点累计形变量的相关系数,体应变观测数据与附近地面沉降之间相关性较高。由此可以判断怀来台体应变出现拉张观测异常变化是由义合堡村用于供热的抽水井抽水引起的。

3) PS-InSAR方法在受周围地下水开采干扰较为显著区域且该因素导致的体应变仪器观测异常机理研究中具备较好的应用性,该技术可以推广到地震监测台站用于地震前兆定点形变观测仪器异常原因识别与研究中。

参考文献 (References):

- [1] 苏维刚,马茹莹,马震,等. 钻孔应变的干扰源及其干扰机制的多方法分析[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(8):871-876.
Su W G, Ma R Y, Ma Z, et al. The multi-method analysis of interference source and interference mechanism of borehole strain[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(8): 871-876.
- [2] 茅远哲,曹筠,高晨,等. 京西北地区地应变观测与小震震源机制解一致性研究[J]. 中国地震,2019,35(4):709-717.
Mao Y Z, Cao J, Gao C, et al. Consistency of ground strain observation and source mechanism solution of small earthquakes in north-west Beijing[J]. Earthquake Research in China, 2019, 35(4): 709-717.
- [3] 李海亮,李宏. 钻孔应变观测现状与展望[J]. 地质学报,2010,84(6):895-900.
Li H L, Li H. Status and developments of borehole strain observation in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(6): 895-900.
- [4] 牛安福,张凌空,闫伟,等. 中国钻孔应变观测能力及在地震预报中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2011,31(2):48-52.
Niu A F, Zhang L K, Yan W, et al. Borehole strain measurement and application to earthquake prediction in China[J]. Journal of Geodesy Geodynamics, 2011, 31(2): 48-52.
- [5] 马栋,陈建国,郑爽,等. 荷载对钻孔应变观测影响的实例分析[J]. 地震研究,2014,37(1):79-85.
Ma D, Chen J G, Zheng S, et al. Example analysis of influence of load on the borehole strain observation[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(1): 79-85.
- [6] 李杰,刘敏,邹钟毅. 数字化钻孔体应变干扰机理及异常分析[J]. 地震研究,2003,26(3):230-238.
Li J, Liu M, Zou Z Y. Analysis of disturbance mechanism and abnormality of digital observation data of borehole body strain meters[J]. Journal of Seismological Research, 2003, 26(3): 230-238.
- [7] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法于研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(1):1717-1733.
Zhu J J, Li Z W, Hu J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [8] 季灵运,朱良玉,刘传金. InSAR同震形变场及其在震源参数确定中的应用研究进展[J]. 地球科学与环境学报,2021,43(3):604-620.
Ji L Y, Zhu L Y, Liu C J. Review on InSAR-derived coseismic deformation and the determination of earthquake source parameters[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(3): 604-620.
- [9] 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]. 水文地质与工程地质,2013,40(6):106-111.
Lei K C, Chen B B, Gong H L, et al. Progress of permanent scatter interferometry[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(6): 106-111.
- [10] 李德仁,廖明生,王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(8):664-668.
Li D R, Liao M S, Wang Y. Progress of permanent scatter interferometry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(8): 664-668.
- [11] 谢富仁,张红艳,崔效峰,等. 延怀盆地活动断裂运动与现代构造应力场[J]. 地震地质,2007,29(4):693-703.
Xie F R, Zhang H Y, Cui X F, et al. Active fault movement and recent tectonic stress field in Yanhuai basin[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(4): 693-703.
- [12] 陈阜超,郭良迁,郑智江. 基于GPS观测的张家口-渤海断裂带活动性[J]. 地震地质,2020,42(1):95-108.
Chen F C, Guo L Q, Zheng Z J. Research on activity of Zhangjiakou-Bohai fault zone based on GPS observations[J]. Seismology and Geology, 2020, 42(1): 95-108.
- [13] 董雅竹,谭颖,张朋辉,等. 利用PS-InSAR研究合肥地区活动构造变形[J]. 地球物理学进展,2021,36(5):1822-1833.
Dong Y Z, Tan Y, Zhang P H, et al. Using PS-InSAR to study active tectonic deformation in Hefei area[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 1822-1833.
- [14] 许文斌,李志伟,丁晓利,等. 利用InSAR短基线技术估计洛杉矶地区的地表时序形变和含水层参数[J]. 地球物理学报,2012,55(2):452-461.
Xu W B, Li Z W, Ding X L, et al. Application of small baseline subsets D-InSAR technology to estimate the time series land deformation and aquifer storage coefficients of Los Angeles area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 452-461.
- [15] 姚荣景,王中元,梁宁. 利用改进最小二乘法优化的Kriging综合模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(10):1159-1163.
Yao R J, Wang Z Y, Liang N. Kriging comprehensive model optimized by improved least square method[J]. Journal of Liaoning

Technical University (Natural Science), 2016, 35 (10): 1159 - 1163.

- [16] 王迎霞,赵超英,刘媛媛,等. 基于 Sentinel-1 数据监测临汾盆地地表形变[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(7): 734 - 737.

Wang Y X, Zhao C Y, Liu Y Y, et al. Surface deformation monitoring of Linfen basin with Sentinel-1 data[J]. Journal of Geodesy Geodynamics, 2018, 38(7): 734 - 737.

- [17] 王曰风,张秀萍,张珊珊,等. 怀来地震台定点形变观测转折异常的调查与分析[J]. 山西地震, 2021(1): 30 - 33.

Wang Y F, Zhang X P, Zhang S S, et al. Investigation and analysis of turning anomalies in fixed-point deformation at Huailai seismic station[J]. Earthquake Research in Shanxi, 2021(1): 30 - 33.

- [18] 罗三明,单新建,朱文武,等. 多轨 PSInSAR 监测华北平原地表垂直形变[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3129 - 3139.

Luo S M, Shan X J, Zhu W W, et al. Monitoring vertical ground deformation in the north China plain using the multitrack PSInSAR technique[J]. Progress in Geophysics, 2014, 57(10): 3129 - 3139.

Exploring the anomaly mechanism of borehole strain at the Huailai seismic station based on PS - InSAR

GAO Chen^{1,2}, MA Dong^{1,2}, QU Man^{1,2}, QIAN Jianguo³, YIN Haiquan⁴, HOU Xiaozhen^{1,2}

- (1. Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Xingtai 054000, China; 2. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China; 3. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 4. The First Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract: As a principal instrument for observing and researching earthquake precursors, a borehole strain meter allows for point-based observation, high-accuracy observation, and the direct observation of shallow crustal stress-strain information. However, it fails to obtain information on spatial continuous deformation and is susceptible to interference by site environments such as pumping. The persistent scatterer interferometric synthetic aperture Radar (PS - InSAR) method can derive spatial continuous deformation fields and time-series deformation, with the cumulative deformation consistent with groundwater level changes. Using the PS - InSAR method, this study analyzed the land subsidence near the Huailai seismic station based on Sentinel-1 images, aiming to counteract surface deformation in the monitoring of borehole strain and to accurately analyze the anomalous information in the observational data. This study also investigated the mechanism of extension anomalies in the 2020—2021 observational data of the borehole strain. The results are as follows: The deformation center in the area near the Huailai seismic station was situated at the pumping well east of Yihebu Village. The time of the regional subsidence and that of the observed borehole strain anomalies were consistent with the pumping time of the pumping wells for heating in Yihebu Village. The extension anomalies in the borehole strain observational data of the Huailai seismic station shared consistent mechanisms with the surface changes caused by the pumping of the nearby pumping wells for heating. Therefore, the extension anomalies of borehole strain at the Huailai seismic station resulted from pumping the pumping wells for heating in Yihebu Village. This study shows that, in areas significantly affected by groundwater pumping, PS - InSAR plays a role of application demonstration in research on the anomaly mechanism through observation using observation instruments for earthquake precursors.

Keywords: PS - InSAR; borehole strain; anomaly; land subsidence; pumping

(责任编辑: 李瑜)