引文格式：张超伟,刘运才,左世诚,等. 利用时序InSAR技术开展大型调水工程变形监测[J]. 地理空间信息, 2024, 22(7): 76-79. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.07.017

利用时序InSAR技术开展大型调水工程变形监测

张超伟[1]，刘运才[2]，左世诚[3*]，李思慧[4]，来尚婧[3]，董　杰[3,4]，廖明生[3]
（1. 中国南水北调集团中线有限公司，北京 100036；2. 中国南水北调集团中线有限公司天津分公司，天津 300380；3. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室，湖北 武汉 430079；4. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：为解决水资源空间分布不均问题，我国建设实施了南水北调等一系列调水工程项目。为确保调水工程的安全运行，有必要对调水工程基础设施进行变形监测。基于2016—2022年Sentinel-1数据，利用时序InSAR技术对华北平原某大型调水工程进行变形监测，提取其沿线和周边地表形变信息，识别潜在变形区域，分析时空演化趋势，并讨论沿线输水建筑物的稳定性。结果表明，该调水工程穿过两个沉降漏斗，沉降整体减缓，局部地区沉降趋于稳定，甚至小部分区域出现轻微抬升。研究结果证明了InSAR技术在大型调水工程变形监测中的作用和优势，可为调水工程安全运行提供可靠的技术保障。

关键词：InSAR；变形监测；调水工程；地表形变
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）07-0076-04

Deformation Monitoring of Large-scale Water Diversion Project Using Time Series InSAR Technology

ZHANG Chaowei[1], LIU Yuncai[2], ZUO Shicheng[3], LI Sihui[4], LAI Shangjing[3], DONG Jie[3,4], LIAO Mingsheng[3]
(1. China South-to-North Water Diversion Middle Route Co., Ltd., Beijing 100036, China;
2. Tianjin Brunch of China South-to-North Water Diversion Middle Route Co., Ltd., Tianjin 300380, China;
3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
4. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to solve the problem of uneven spatial distribution, a series of water diversion projects were constructed, such as south-to-north water diversion project. In order to ensure the safe operation of water diversion projects, it is necessary to conduct deformation monitoring on the infrastructure of water diversion projects regularly. In this paper, based on the Sentinel-1 data from 2016 to 2022, we used the time series InSAR technology to monitor the deformation of a large water diversion project in the North China plain, extracted the surface deformation information along and around the project, identified potential deformation areas, analyzed the spatio-temporal evolution trend, and discussed the stability of water diversion structures along the project. The results show that the water diversion project passes through the two settlement funnels, the settlement slows down overall and stops in some areas, and even a small part of the area appears slight uplift. The result can prove the role and advantage of InSAR technology in deformation monitoring of large-scale water diversion project, which can provide reliable technical support for safe operation.

Key words: InSAR, deformation monitoring, water diversion project, surface deformation

受季风气候的影响，我国降水的季节分配和地区分布不均匀，而地区分布不均匀可通过跨流域调水的方式来解决[1]。调水工程是指水资源级区或独立流域之间的跨流域调水工程[2]，可有效解决降水地区分布不均的问题[3]。然而，在跨流域调水过程中，由于地质情况复杂、地质理论不够完善、人为因素等，其沿线和周边往往会产生不同程度的地表形变[4]，导致周边建筑物存在安全隐患[5]、投资成本增加等[6]诸多不利影响，因此调水工程中的形变监测工作极其重要。

传统测量地表形变的方法通常只能获得地面离散点的地表形变信息，无法进行大范围地区的动态监测[7]。合成孔径雷达干涉测量技术（InSAR）具有大范围覆盖、全天时全天候观测、测量精度高、成本低等特点[8]，已成功应用于地震[9]、矿区沉降[10]、滑坡[11]、火山监测[12]等领域。利用InSAR技术探测地表形变，可进行大范围监测，减少作业量，节约探测成本和缩

收稿日期：2023-04-05。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41904001）；四川省软科学研究计划资助项目（2021JDR0394）。
第一作者简介：张超伟（1979—），本科，高级工程师，主要研究方向为水利水电工程技术、引调水工程技术，E-mail：32093188@qq.com。
通信作者：左世诚（1999—），本科，主要研究方向为InSAR地表沉降，E-mail：2409637129@qq.com。

短探测周期，提高探测效率[13]。因此，本文采用InSAR技术进行大型调水工程变形监测，提取调水工程沿线区域的地表形变，识别受形变影响的输水渠段，并分析重点输水建筑物的稳定性。

1　研究区概况

本文以华北平原某调水工程为例，工程全长155 km，采用钢筋混凝土箱涵方式（图1）。这种工程对基底承载力的要求较高，会在地基不均匀、温度和湿度等因素的影响下出现变形，进而对工程运行安全造成不利影响，因此对其沿线形变进行有效监测尤为重要。

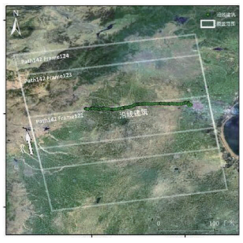


图1　华北平原某调水工程线路示意图

目前形变监测工作主要分为垂直位移观测和水平位移观测，垂直位移采用点式监测，通过布设水准网进行观测平差后提取地面微小的地表形变变化值。该方法具有很高的监测精度，但野外工作劳动强度大、周期长。本文旨在利用InSAR技术的大范围覆盖、高精度形变测量和低成本优势来开展该调水工程的变形监测[14]，并对周边区域地表形变进行普查，分析其对输水线路的影响。

2　时序InSAR形变监测与数据来源

2.1　时序InSAR技术

Hooper A[15]等提出了StaMPS-SBAS技术，通过设置时空基线阈值来获取基于不同主影像的差分干涉图子集，并在此基础上解算相干点的形变序列[16]。StaMPS-SBAS技术结合振幅差分离差指数和相位稳定性选取相干点，即缓慢去相关滤波相位（SDFP），基本流程见图2。

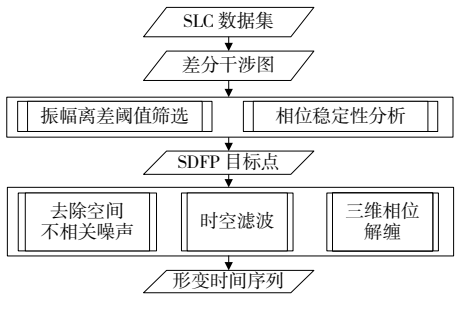


图2　StaMPS-SBAS技术基本流程图

1）基于振幅差分离差指数提取相干目标候选点[15]。

$$D_{\Delta A}=\frac{\delta_{\Delta A}}{\mu_A} \tag{1}$$

式中，$D_{\Delta A}$为n个干涉对相对于主辅影像振幅强度的标准差，较合理的先验阈值为0.5~0.6；μ_A为相应的振幅强度均值。

2）基于相位稳定性提取相干目标候选点。差分干涉图中的相位值可表示为：

$$\varphi_{\text{diff}}=\varphi_{\text{def}}+\varphi_{\text{atm}}+\varphi_{\text{dem}}+\varphi_{\text{orb}}+\varphi_{\text{noise}} \tag{2}$$

式中，φ_{def}、φ_{atm}、φ_{dem}、φ_{orb}、φ_{noise}分别为地表形变相位、大气延迟、DEM残余误差、轨道误差和随机噪声。不同相位成分具有各自的时空域特征，依据特征即可分离各相位成分。

采用空间滤波方法将差分相位分为空间相关部分和空间不相关部分，其中空间相关部分包括地表形变相位、轨道误差、空间相关大气相位和空间相关DEM误差，可通过组合的空间低通滤波获得；空间不相关部分包括空间不相关的DEM误差，可基于垂直基线与地形之间的线性关系，通过最小二乘法获取。在差分相位中去除上述两部分相位后，残余的噪声相位可用来估计相位的稳定性：

$$\gamma=\frac{1}{N}\left|\sum_{i=1}^{N}\text{esp}\left\{\sqrt{-1}\left(\varphi-\tilde{\varphi}-\hat{\varphi}^{u}\right)\right\}\right| \tag{3}$$

式中，N为干涉图数量；φ为原始差分相位；$\tilde{\varphi}$为空间相关相位；$\hat{\varphi}^{u}$为空间不相关相位。设定γ阈值即可选定相位稳定点。

3）相位解缠与形变信息提取。基于选取的相干点目标对形变相位进行空间和时间域相结合的三维相位解缠，并采用最小二乘法获取时间序列形变信息。

2.2　SAR数据

Sentinel-1星座由两颗卫星组成，载有C波段SAR，单颗卫星的最短重访周期为12 d，双星串联飞行最短重访周期为6 d[17]。Sentinel-1卫星采取全球业务化运行模式，向全球用户免费开放所有数据；具有条带、干涉宽幅、超宽幅和波普[18]等多种成像模式，亦可实现单双极化方式，其中干涉宽幅模式为默认对地观测模式，采用TOPS成像技术，扫描幅宽为250 km，方位向和距离向的分辨率分别为20 m和5 m。Sentinel-1卫星在研究区内有升轨数据，可覆盖整个输水干线。本文收集2016年1月—2022年11月共191景影像，并选取图1中包含3个Frame的升轨数据。

3　调水工程形变监测

3.1　时序InSAR数据处理

数据处理过程中，本文以20190110影像为主影

像，共组合379个干涉对。干涉影像对时间基线和垂直基线分布见图3。所有干涉对的空间基线不超过300 m，时间基线最长为72 d。首先对选择的小基线干涉对组合进行干涉处理，并去除地形相位影响，得到差分干涉图；再提取相干点目标，进行相位解缠，得到解缠相位图；最后对解缠相位进行模型求解，去除地形误差、大气延迟等因素的影响，并选取参考点。由于水平形变很小，几乎可以忽略，因此根据入射角将雷达视线向形变速率转换到垂直向[19]。

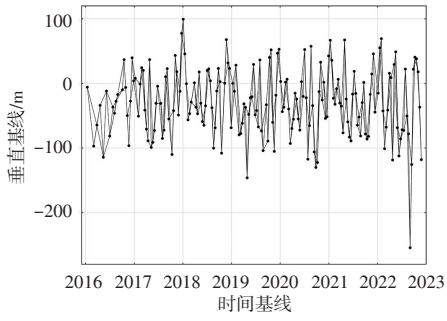


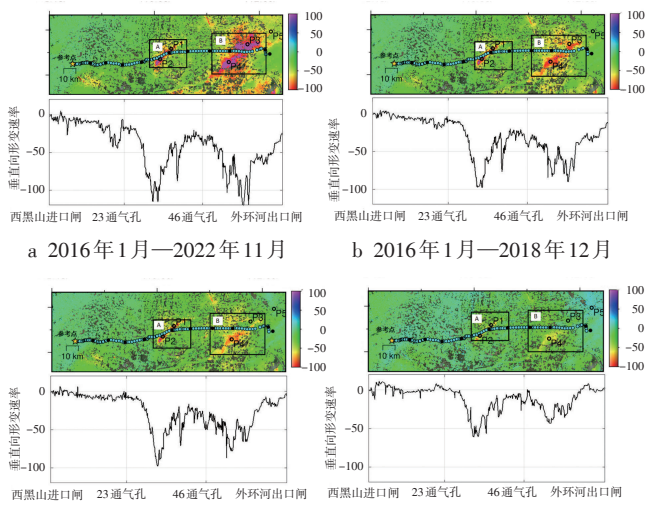
图3 Sentinel-1升轨数据各干涉对时空基线分布

由于InSAR技术获取的形变结果是相对值，需要选取参考点。参考点通常应选取在稳定区域，防止对最终形变结果产生影响，可借助水准测量、GNSS测量等外部数据或先验知识来确定稳定区域，再选取参考点[20]。本文采取GNSS测量方法，综合先验知识，将参考点选择在西黑山进口闸附近。

3.2 区域性地面地表形变分布

采用StaMPS-SBAS技术获取2016年1月—2022年11月的整体平均形变速率，并提取2016年1月—2018年12月、2019年1月—2021年12月、2022年1—11月的平均形变速率，再沿调水工程沿线绘制垂直向形变速率剖面图（图4），此处形变速率已转换为垂直向，正值代表地面抬升，负值代表地面沉降。由图4a可知，调水工程沿线地区经过了A、B两个沉降漏斗区域，沉降漏斗A大致位于白沟镇以东至霸州市，覆盖该调水工程沿线长度约35 km，最大垂直沉降速率为−98 mm/a；沉降漏斗B大致位于胜芳镇至王庆坨镇，覆盖调水工程沿线长度约50 km，最大垂直沉降速率为−90 mm/a。

从分阶段的平均形变速率分布来看，2016年1月—2018年12月的沉降比2016年1月—2022年11月整体情况更加严重，沉降漏斗A的最大垂直沉降速率达到了−115 mm/a，而沉降漏斗B最大垂直沉降速率则超过了−120 mm/a；2019年1月—2021年12月沉降漏斗A的沉降速率略有减缓，最大垂直沉降速率接近−100 mm/a，但大部分区域垂直沉降速率小于−80 mm/a，



a 2016年1月—2022年11月 b 2016年1月—2018年12月

c 2019年1月—2021年12月 d 2022年1—11月

图4 调水工程沿线形变速率分布图/(mm/a)

沉降漏斗B的范围缩小，且沉降速率大大减缓，绝大部分区域垂直沉降速率降至−80 mm/a以下；2022年1—11月沉降漏斗A范围缩小，且沉降速率减缓，最大垂直沉降速率已小于−60 mm/a，沉降漏斗B的最大沉降速率降至约−40 mm/a，且部分区域的地面沉降已经停止，开始趋于稳定，小部分区域甚至出现了轻微抬升。

本文选择形变速率分布图中的P_1~P_5显示其形变时间序列（图5），其中P_1和P_2位于沉降漏斗A内，在2016—2020年快速沉降，2021—2022年沉降速率逐渐减缓，与沉降漏斗A的形变演化趋势一致；P_3和P_4位于沉降漏斗B内，P_3区域在2016—2019年发生沉降但速率逐渐减缓，2020—2022年基本保持稳定，P_4区域与P_2区域的演化趋势一致；P_5位于沉降漏斗B附近，在2016—2020年发生沉降，2021—2022年又逐渐出现抬升。

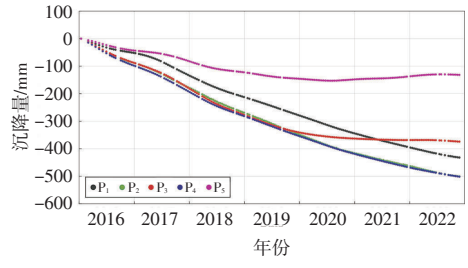


图5 P_1~P_5形变时间序列

地下水开采是造成该地区地面沉降的主要原因[21]，近年来国家陆续出台了许多地面沉降防治政策和地下水控制政策，该调水工程沿线的区域性地面沉降减缓也得益于此。近年来部分学者分析了该地区的地表沉降状况，如李文鹏[22]等分析我国地面沉降的发展历史和治理效果发现，随着地下水超采治理的推

进，地面沉降防治效果初见成效，北京、天津、河北大中城市地下水位下降趋势有所减缓，地面沉降趋势得到有效遏制，但农村和郊区新城仍存在地下水开采状况，地面沉降情况依然很严重；杨会峰[23]等对华北平原近40年来的地下水位变化特征进行系统分析发现，华北平原部分地区的地下水位有所回升，其认为河湖生态补水、地下水超采治理、农业节水等防治措施初见成效，以城区为主的地下水位已趋于稳定或小幅回升。这些研究成果验证了沿线地面沉降减缓结论的可靠性。

3.3　调水工程沿线重点建筑物变形监测

本文对该调水工程沿线的重点建筑物形变速率和时间序列进行了分析，结果见图6，东黑山村东检修闸、曲水河倒虹吸进口检修孔等建筑在2021—2022年出现了5~10 mm/a的抬升；大清河倒虹吸上游检修孔、大清河倒虹吸下游检修孔、高碑店市白沟分水口等建筑在2021—2022年出现了轻微抬升，抬升速率不超过10 mm/a，基本保持稳定；郑村排干西保水堰、郑村排干倒虹吸上游检修孔等建筑沉降速率仍超过-30 mm/a，在2021—2022年均持续沉降，但与2016—2020年相比，其沉降速率明显减缓；渠头村北保水堰等建筑在2021—2022年的沉降速率大幅减缓，沉降速率均小于-10 mm/a；王庆坨连接井等建筑2022年的沉降速率已小于-20 mm/a，2021—2022年沉降速率明显减缓；子牙河分流井、子牙河倒虹吸检修闸等建筑在2021—2022年基本保持稳定。

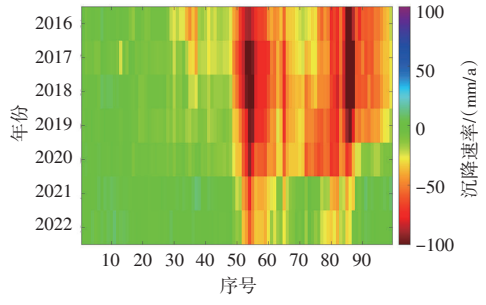


图6　调水工程重要输水建筑物年度平均形变速率

4　结　语

本文基于Sentinel-1数据，采用时序InSAR技术对某调水工程进行变形监测，证明了InSAR技术在输水线路形变监测中的适用性。结果表明，2016年1月—2022年11月调水工程沿线经过了A、B两个沉降漏斗区域；2021—2022年调水工程沿线及其周边的两处沉降漏斗形变量级明显减缓，局部地区甚至出现了轻微抬升现象。沉降漏斗A的范围缩小，最大垂直沉降速率降至约-80 mm/a，且大部分区域垂直沉降速率小于-60 mm/a，其中包含的大部分输水建筑物在2021—2022年的沉降速率明显减缓。沉降漏斗B的最大沉降速率降至-50 mm/a，且部分区域的地面沉降已停止，开始趋于稳定，小部分区域甚至出现了轻微抬升。初步分析表明，沉降减缓的主要原因是地下水恢复显著。本文研究结果可为该地区后续形变监测工作提供有价值的参考，建议对已有InSAR技术监测数据进行延续处理与分析，充分利用InSAR技术和已有的InSAR可视化解译平台[24]，持续关注该地区两处大范围沉降的发展情况。

参考文献

[1] 娄广艳,周孝德,韩娜娜. 调水工程的发展及趋势[J]. 水利发展研究,2004,4(9):43-45

[2] 张爱峰. 引调水工程施工技术的应用[J]. 黑龙江水利科技,2012,40(2):121-122

[3] 高媛媛,姚建文,陈桂芳,等. 我国调水工程的现状与展望[J]. 中国水利,2018(4):49-51

[4] 张志华,胡长涛,张镇,等. 基于PS-InSAR上海地区地表沉降监测与分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(3):106-111

[5] 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

[6] 聂运菊,刘国祥,石金峰,等. 基于PSI技术监测上海市2009—2010年区域地表沉降[J]. 遥感信息,2013,28(2):56-61

[7] 刘泽洲,卢才武,章赛,等. 基于多阈值目标提取的时序InSAR矿区地表沉降监测研究[J]. 中国矿业,2022,31(8):79-85

[8] 屈春燕,单新建,张国宏,等. 时序InSAR断层活动性观测研究进展及若干问题探讨[J]. 地震地质,2014,36(3):731-748

[9] Papadopoulos G A, Agalos A, Karavias A, et al. Seismic and Geodetic Imaging (DInSAR) Investigation of the March 2021 Strong Earthquake Sequence in Thessaly, Central Greece[J]. Geosciences,2021,11(8):311

[10] Wempen J M. Application of DInSAR for Short Period Monitoring of Initial Subsidence Due to Longwall Mining in the Mountain West United States[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020,30:33-37

[11] Dini B, Manconi A, Loew S. Investigation of Slope Instabilities in NW Bhutan as Derived from Systematic DInSAR Analyses[J]. Engineering Geology, 2019(259):105 111

（下转第124页）