引文格式：王鼎,郭际明,张春宇,等. 基于时序InSAR的南水北调中线暗埋段地表沉降分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 27-30. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.006

基于时序InSAR的南水北调中线暗埋段地表沉降分析

王　鼎[1]，郭际明[1*]，张春宇[2]，许　毅[1]，史俊波[1]
（1. 武汉大学 测绘学院，湖北 武汉 430079；2. 重庆市测绘科学技术研究院，重庆 401120）

摘　要：利用合成孔径雷达干涉（InSAR）技术研究南水北调保定至天津暗埋段的地表沉降。基于Sentinel-1数据，采用Stacking-InSAR、SBAS-InSAR、DS-InSAR三种算法获取该区域的形变结果；并通过比较各算法结果分析了其特点，证明了InSAR用于南水北调中线暗埋段地表沉降监测的效果。分析研究区形变特征发现两个明显的沉降漏斗段和一个短暂的地表抬升段，其中形变漏斗与地下水过度开采和建筑物导致土壤压实有关，而地表抬升则与当地降水量突增有关。

关键词：时序InSAR；南水北调工程；地表沉降；形变分析
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0027-04

Surface Subsidence Analysis of Buried Section of Middle Line of the South-to-North Water Transfer Project Based on Time Series InSAR

WANG Ding[1], GUO Jiming[1], ZHANG Chunyu[2], XU Yi[1], SHI Junbo[1]
(1. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Chongqing Institute of Surveying and Mapping Science and Technology, Chongqing 401120, China)

Abstract: In this paper, we used the interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology to study the surface subsidence of buried section from Baoding to Tianjin of the South-to-North Water Transfer Project. Based on Sentinel-1 data, we used three algorithms, such as Stacking-InSAR, SBAS-InSAR, DS-InSAR to obtain the deformation results of study area. Then, we analyzed the characteristics by comparing the results of three algorithms, which could prove the effect of InSAR in the surface subsidence monitoring of buried section of the South-to-North Water Transfer Project. By analyzing the deformation characteristics of study area, we found two obvious subsidence funnel sections and one transient surface uplift section. The deformation funnels were related to groundwater overexploitation and soil compaction caused by buildings, while the surface uplift was related to the sudden increase in local precipitation.

Key words: time series InSAR, the South-to-North Water Transfer Project, surface subsidence, deformation analysis

南水北调工程是我国优化水资源配置、促进区域协调发展的基础性工程，于2014年12月12日正式通水；分为西、中、东3条线路，其中中线工程涵盖了河南、河北、北京、天津4个省市，线路约有1/3穿过膨胀土区域，易导致沿线边坡失稳，因此需对南水北调中线工程沿线区域进行形变监测和特征分析。1898年Gabriel等[1]首次利用差分干涉测量技术大面积获取了美国加利福尼亚州的农田地表形变；随后相关领域学者们针对时空相干性差、大气延迟、地形相位不准确等数据处理过程中存在的问题，开发了Stacking- InSAR[2]、PS-InSAR[3]、SBAS-InSAR[4]、MAI[5]、SqueeSAR[6]等一系列时序InSAR算法。InSAR算法被用于地震[7]、滑坡[8-9]、地表沉降[10]等的形变测量中，并取得了有效的成果[11]。部分学者[12-16]对南水北调中线工程线路进行了InSAR形变监测，结果表明该段地表稳定性差，存在不均匀沉降，且沉降还在持续，将对其输水设施产生影响。因此，本文选取保定至天津段作为研究区，在已有研究的基础上进一步对其2023年的形变进行监测，分析其形变特征和形变原因。首先简要介绍了3种较适用于研究区的时序InSAR算法；再通过对研究区进行时序InSAR处理，分析了不同时序InSAR算法的适用情况和形变监测效果；最后讨论了该区域形变发生的原因，并结合降雨量进行相关性分析。

1　时序InSAR算法

时序InSAR算法目前已有较完备的理论基础，结

项目来源：自然资源部地质灾害智能监测与风险预警工程技术创新中心开放基金资助项目（TICGM-2023-06）。
第一作者简介：王鼎（1999—），硕士研究生，研究方向为InSAR数据处理与应用，E-mail：461003611@qq.com。
通信简介：郭际明（1965—），博士，教授，研究方向为卫星定位理论与技术、精密工程测量与形变监测、测量控制网数据处理，E-mail：jmguo@sgg.whu.edu.cn。

合研究区特点，本文选取Stacking-InSAR、SBAS-InSAR、DS-InSAR三种算法进行数据处理。

1）Stacking-InSAR为早期时序InSAR算法，于1998年由Sandwell等[2]提出。该算法通过加权平均相位图，得到输入时间序列内的平均形变速率。

$$\bar{\varphi}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\varphi_i}{\Delta t_i}\times\Delta t_i^2\right)}{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i^2}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\varphi_i\times\Delta t_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i^2} \tag{1}$$

式中，$\bar{\varphi}$为相位平均变化速率；φ_i、Δt_i分别为差分干涉图i解缠后的相位和时间间隔；n为参与计算的干涉图数量。

将相位变化速率的加权平均值转换为雷达视线向的平均形变速率值$\bar{d}$，即

$$\bar{d}=\frac{\lambda\times\bar{\varphi}}{4\pi} \tag{2}$$

式中，λ为波长。

2）SBAS-InSAR于2002年由Berardino等[4]提出，在干涉时选择了小基线集策略，即选取时间基线和空间基线均小于某个阈值的干涉对进行组合。对于N景影像，形成M组干涉对。

$$\frac{N-1}{2}\leqslant M\leqslant\frac{N(N-1)}{2} \tag{3}$$

对M组干涉对进行相位解缠和滤波后，提取每组干涉对中相干系数高于某个阈值的像素点，得到K个高相干点；再计算时序相位。其数学模型为：

$$\underset{M\times N}{\boldsymbol{A}}\ \underset{N\times 1}{\boldsymbol{\Phi}}=\underset{M\times 1}{\boldsymbol{\delta\Phi}} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{A}$为数值只含有1、0、-1的矩阵；$\boldsymbol{\Phi}$为N景影像的真实相位，即待求参数；$\boldsymbol{\delta\Phi}$为M组干涉对的差分相位。

$$\hat{\boldsymbol{\Phi}}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\delta\Phi} \tag{5}$$

由于SBAS-InSAR对无法保证$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$为可逆矩阵，因此需对$\boldsymbol{A}$进行SVD分解，再求解$\boldsymbol{\Phi}$。对$\boldsymbol{\Phi}$进行转换即可得到每个时间段的形变速率，即

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix}V_1=\dfrac{\Phi_1}{t_1-t_0}\\ \cdots\\ V_N=\dfrac{\Phi_N-\Phi_{N-1}}{t_N-t_{N-1}}\end{bmatrix} \tag{6}$$

3）DS-InSAR于2011年由Ferretti等[6]提出。该方法放弃了永久散射体（PS）的单主影像干涉策略[3]，将所有SAR影像都进行两两干涉，且从干涉图中选取的稳定点是分布式散射体（DS）。DS点信号不强，但在一定范围内与周围相邻目标服从相同的统计分布，其回波信号散射统计模型满足高斯分布。该算法的选点思路为时序InSAR的发展提供了新方向，因此越来越多的学者[17-19]开始研究如何选取DS点。本文采用的DS-InSAR方法是利用修正的参数统计算法[20]选择像素点代替SBAS中的高相干点，其余的处理步骤与SBAS-InSAR算法一致。

2 研究区概况与数据来源

本文选取从河北省保定市经廊坊市至天津市西部的南水北调工程线路流经区域作为研究区。本文采用的Sentinel-1单视复数影像，波束模式为IW，极化方式为VV，飞行方向为升轨，图幅号为Path142，Frame121，时段为2023-01-01—2023-12-03，共29期影像。通过影像裁剪将29景图幅号相同的影像裁剪为研究区大小，分别进行Stacking-InSAR、SBAS-InSAR、DS-InSAR处理，得到研究区2023年的形变速率图和每月累积形变图。此外，本文还收集了研究区降雨量作为形变原因分析的重要因素。

3 形变特征分析

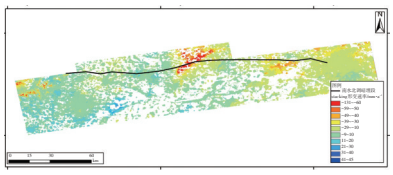
3.1 InSAR算法适用性分析

本文对研究区数据分别进行Stacking-InSAR、SBAS-InSAR、DS-InSAR处理，得到的形变速率见图1，可以看出，3种算法均显示该区域存在两个明显的沉降漏斗，相互印证了形变结果的可靠性。由于Stacking-InSAR只能计算形变速率，而SBAS-InSAR和DS-InSAR还能计算时间序列形变量，因此SBAS-InSAR处理的结果包含的信息量最丰富。从形变量级真实性来看，SBAS-InSAR、Stacking-InSAR、DS-InSAR的形变速率范围分别为-113~54、-112~123、-117~45 mm/a。3种算法的最大地表沉降速率基本一致，而Stacking-InSAR的最大地表抬升速率远高于其他两种算法；结合地表抬升的一般规律和其他文献对该区域历史形变速率的描述（最大地表抬升形变速率约为20 mm/a[14]）可知，SBAS-InSAR和DS-InSAR算法的结果更可靠。综上所述，SBAS-InSAR算法更适用于本文研究区域，如无特殊说明后续分析均采用SBAS-InSAR算法的结果。

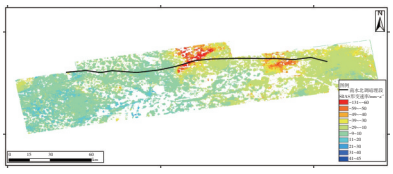
3.2 InSAR结果形变特征分析

从空间上来看，研究区存在两个明显的沉降漏斗（图2），分别位于廊坊市西侧（沉降漏斗#1）和东侧（沉降漏斗#2）；从时间上来看（图3），以1月为参考，2、3月均无明显形变迹象，4月开始两个沉降漏斗初显雏形，随后逐渐加深扩张，12月已能明显看出全貌。除此之外，保定市东侧容城县6月存在大面积抬

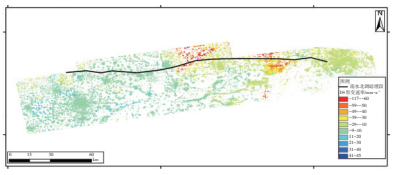
升迹象（图3中6月的蓝色区域），而7月该现象消失。



a Stacking-InSAR结果



b SBAS-InSAR结果



c DS-InSAR结果

图1　3种算法获得的研究区2023年形变速率图

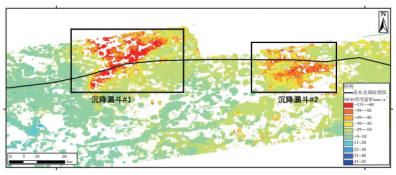


图2　沉降漏斗示意图

4　形变原因分析

受温度和降雨量影响，地面物质膨胀收缩会导致地表形变；人类活动（地下水抽取等）频繁也会导致地表形变。本文将从地质条件、温度与降水量等方面分析研究区地表形变形成的原因。

4.1　沉降漏斗成因分析

由以光学影像为底图的形变速率图（图4）可知，两个沉降漏斗位于农田和建筑物密集区。河北省是近年来地下水开采量较大的省份[21]，农田灌溉尤其需要抽取大量地下水，从而导致地下水位下降，使得其附近土壤中的孔隙空间出现空洞或挤压，进而造成周围地表陷落或沉降。除此之外，沉降漏斗#2区域的建筑物密集，建筑物重量会使地基下方的土壤发生压实，导致地基周围的地表出现沉降，这种沉降往往是逐渐发生的，并可能会在一段时间内造成相当大的影响。本文通过时序InSAR算法分析发现，研究区两个沉降漏斗均在持续加深，因此对两个沉降漏斗进行大面积持续性的形变监测尤为重要。

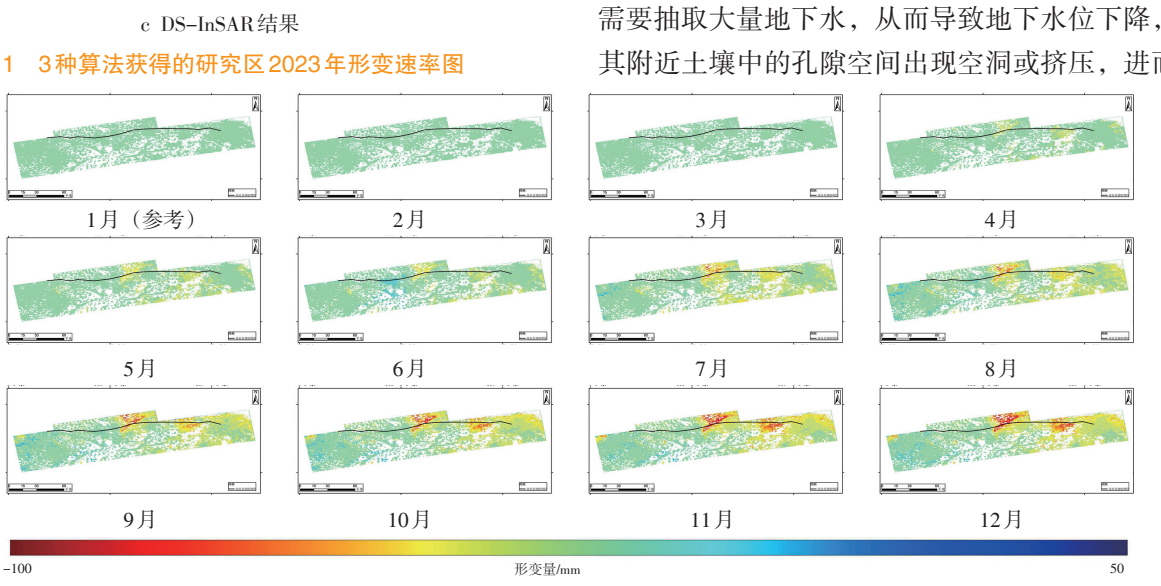


图3　2023年1—12月累积形变量

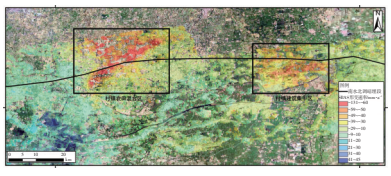


图4　以光学影像为底图的形变速率图

4.2　地表形变与降雨量相关性分析

本文获取研究区2023年各月度的总降雨量，并与每月（相较于1月）的形变量进行相关性分析。本文选取3个点作为3种形变类型区域的代表点进行分析（图5），其中点1代表形变稳定区域，点2代表6月产生地表抬升的区域，点3代表持续沉降区域，为保证3个点的形变量不受地质条件影响，根据光学遥感影像将3个点均选在农田区域。将3个点的形变量分别与降水量进行相关性分析，以判断形变和降雨量之间的关联。点1、2、3形变量与降雨量的相关系数分别为0.2、0.34、−0.05；相较于稳定区域，地表抬升区

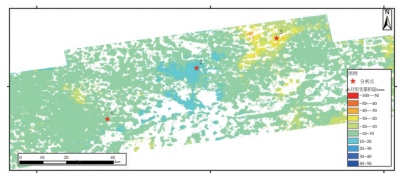
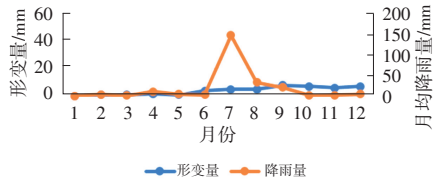
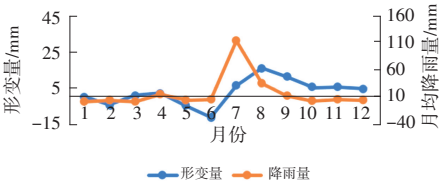


图5　分析点位置图（底图为6月相对1月的累积形变）

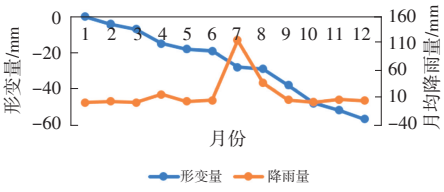
域的相关性增加0.1，说明降雨量与形变量之间有较弱的正相关关系。由3个点的月均形变量与降雨量的时间序列折线图（图6）可知，月总降水量在7月突增、8月回归正常，这与其地表形变的变化规律高度相似（图6b），由此可以推断，降雨量突增是导致容城县地表产生短暂抬升的原因之一。



a 点1（不变区）



b 点2（抬升区）



c 点3（沉降区）

图6 地表形变与降雨时间序列折线图

5 结 语

本文采用南水北调中线工程保定至河北段29景Sentinel-1影像数据进行了时序InSAR算法处理，获取的形变结果验证了时序InSAR算法在形变识别上的可行性；通过对比分析发现，在Stacking-InSAR、SBAS-InSAR、DS-InSAR算法中，SBAS-InSAR算法在该地区更具可靠性。本文利用时序InSAR算法处理结果分析形变特征并分析形变原因。由形变速率图可知，该区域存在两个明显的沉降漏斗，且沉降漏斗呈持续沉降且有扩张趋势。与光学遥感图像对比发现，沉降漏斗极有可能是地下水过度开采以及密集建筑物压实土壤所致，未来需持续关注该地区的地下水使用情况和建筑物的稳定性。6月容城县出现了短暂的地表抬升现象，经与当地降雨量进行相关性分析发现，抬升现象与降雨量突增有关。

参考文献

[1] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B7):9 183-9 191

[2] Sandwell D T, Price E J. Phase Gradient Approach to Stacking Interferograms[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B12):30 183-30 204

[3] Alessandro F C P F R. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1):8-20

[4] 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):2 375-2 383

[5] Bechor N B D, Zebker H A. Measuring Two-dimensional Movements Using a Single InSAR Pair[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(16):L16311

[6] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-stacks: SqueeSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9):3 460-3 470

[7] 李振洪，韩炳权，刘振江，等. InSAR数据约束下2016年和2022年青海门源地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(6):887-897

[8] 朱建军，胡俊，李志伟，等. InSAR滑坡监测研究进展[J]. 测绘学报，2022，51(10):2 001-2 019

[9] 张春宇，郭际明，王鼎，等. 基于Stacking-InSAR的澜沧江营盘镇—苗尾段滑坡隐患识别[J]. 地理空间信息，2023，21(9):93-97

[10] Jiang X, Min X, Ye T, et al. Monitoring the Subsidence at Different Periods in High Underground Water Level Coal Mine Areas Using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) [J]. Geocarto International, 2023, 38(1):1-11

[11] 李振洪，朱武，余琛，等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望[J]. 测绘学报，2022，51(7):1 485-1 519

[12] Zhang Y, Wu H A, Kang Y, et al. Ground Subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1992 to 2014 Revealed by Multiple SAR Stacks[J]. Remote Sensing, 2016, 8(8): 675

[13] Dong J, Lai S, Wang N, et al. Multi-scale Deformation Monitoring with Sentinel-1 InSAR Analysis Along the Middle Route of the South-North Water Diversion Project in China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 100:102 324

[14] 张双成，余静，宋明鑫，等. 南水北调中线区域地面沉降SBAS-InSAR监测研究[J]. 大地测量与地球动力学，2022，42(12):1 300-1 306

[15] 朱武，窦昊，殷那政，等. 联合InSAR和SSA的膨胀土边坡

（下转第40页）