引文格式：曾羚,唐伟. 介休—宋古地下水漏斗区地面沉降 InSAR 监测与成因分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 6-10. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.002

介休—宋古地下水漏斗区地面沉降 InSAR 监测与成因分析

曾　羚[1]，唐　伟[1*]
（1. 中国矿业大学（北京）　地球科学与测绘工程学院，北京　100083）

摘　要：为长期有效监测介休—宋古地下水漏斗区的地面沉降，采用 SBAS-InSAR 技术处理了 139 景 Sentinel-1A TOPS 影像数据，获得了 2017 年 3 月—2021 年 12 月介休—宋古地下水漏斗区的地面沉降速率与累积沉降量；并采用同期 GNSS 测量结果对比验证了监测结果的可靠性。结果表明：①监测期间介休—宋古地下水漏斗区的地面沉降明显，范围不断扩大，最大地面沉降速率达到 90 mm/a，累积沉降量达到 340 mm；②地面沉降主要分布在耕地和建设用地上，主要驱动因素为地下水超采引发的地下水位下降，地面沉降空间分布与地下水位下降漏斗等值线吻合；③三泉、东阳和洪山—范村断裂带两侧均存在差异性沉降，断裂带对地面沉降的分布具有一定控制作用。

关键词：SBAS-InSAR；地面沉降；介休—宋古地下水漏斗区；Sentinel-1A；驱动因素
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0006-05

InSAR Monitoring and Cause Analysis of Surface Subsidence in the Jiexiu-Songgu Groundwater Funnel Area

ZENG Ling[1], TANG Wei[1]
(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to monitor long-term surface subsidence in Jiexiu-Songgu groundwater funnel area, we used SBAS-InSAR technique to process 139 Sentinel-1A TOPS images, and obtained the surface subsidence speed and cumulative subsidence amount in the Jiexiu-Songgu groundwater funnel area from March 2017 to December 2021. We verified the reliability of monitoring results by comparing the GNSS measurement results of the same period. The findings showed that ①during the monitoring period, the surface subsidence in the Jiexiu-Songgu groundwater funnel area was obvious, and the range continued to expand. The maximum surface subsidence speed reached 90 mm/a, and the cumulative subsidence amount reached 340 mm. ②Surface subsidence was mainly distributed on cultivated land and construction land. The main driving factor was the decline of groundwater level caused by excessive exploitation of groundwater. The spatial distribution of surface subsidence was consistent with the contour lines of groundwater level decline funnel. ③Differential subsidence existed on both sides of the Sanquan, Dongyang and Hongshan-Fancun fault zones, suggesting fault influence on subsidence distribution.

Key words: SBAS-InSAR, surface subsidence, Jiexiu-Songgu groundwater funnel area, Sentinel-1A, driving factor

地面沉降是指地壳表层未固结土体压缩变形而引起的区域性地面标高下降的地质现象，由自然和人为因素共同作用引起，对社会经济的可持续发展造成显著负面影响。我国的汾渭地堑形成了大同、太原、西安 3 个严重的地面沉降区域，其中大同、太原、榆次、临汾、运城等盆地已出现地面沉降[1-4]。常规的地面沉降监测手段存在成本高昂、监测网络维护困难、观测点分布分散以及响应时间受限等问题[5-6]。合成孔径雷达干涉（InSAR）技术具有覆盖范围广、全天候工作等特性，可高精度快速获取地面沉降信息[7-10]。目前已有部分学者[11-12]利用 InSAR 技术对山西省太原盆地相关区域的地面沉降进行了研究；但对于介休—宋古地下水漏斗区的地面沉降监测主要依赖于传统方法，难以反映整个区域地面沉降的动态演变过程和空间分布特征。因此，本文基于 139 景 2017 年 3 月—2021 年 12 月的 Sentinel-1A TOPS 影像数据，利用 SBAS-InSAR 技术对介休—宋古地下水漏斗区进行了监测和分析，提取了地区地表形变速率图；并结合地下水位数据、土地利用数据等分析了沉降空间分布特征与驱动因素，为灾害防治和地下水可持续管理提供

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42374023）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2024ZKPYDC06）。
第一作者简介：曾羚（2002—），在读硕士研究生，研究方向为 InSAR 技术与应用，E-mail：2428945616@qq.com。
通信作者：唐伟（1987—），博士，副教授，研究方向为空间大地测量与遥感技术（SAR/InSAR/GNSS）及其应用，E-mail：weitang@cumtb.edu.cn。

科学依据。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

介休—宋古地下水漏斗区位于山西省中部的太原盆地南部，涵盖介休市西北部和孝义市东部，地理范围为36°58′~37°13′N、111°45′~112°2′E；属典型的温带大陆性季风气候，年均降雨量约为450 mm，降雨集中在6—9月，占全年降雨量的60%以上；地形以冲积和洪积平原为主，地下水资源丰富，主要为第四纪松散岩类孔隙水[13]。介休—宋古地下水漏斗区初步形成于20世纪70年代；1985年720 m等水位线闭合圈在介休市境内的面积达到91.15 km^2，并已扩散至孝义市境内；2000年漏斗区中心移动至宋古村，水位为677.30 m，总面积扩大到230.52 km^2；2010年漏斗区面积增至279.93 km^2，宋古中心水位降至651.54 m；2019年宋古中心水位已降至640 m以下[14]。

1.2　数据来源

本文采用2017-03-19—2021-12-23共139景Sentinel-1A卫星干涉宽幅模式升轨影像数据（Path 113 Frame116）进行SBAS-InSAR处理，获取介休—宋古地下水漏斗区形变速率和时序形变量；采用精密星历数据消除轨道误差，并利用空间分辨率为30 m的SRTM DEM消除地形相位和地理编码。此外，本文利用山西省测绘地理信息院提供的GNSS站点测量数据进行精度验证。地下水位数据来源于山西省水文水资源勘测总站，土地利用类型数据来源于美国环境系统研究所公司对外公布的全球10 m土地覆盖数据（https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/）。

2　InSAR时序数据处理提取地表形变

SBAS-InSAR技术将所有SAR影像分成若干个集合，基于小基线数据对生成合适的组合差分干涉图以限制空间去相干现象；再通过奇异值分解方法对多个小基线集联合求解，从而提高观测时间的采样率。处理后数据中提供的空间和时间信息可用于识别和过滤大气相位，从而更准确地得到研究区整个时间段的累积形变量和平均沉降速率[15-16]。

本文采用Sentinel-1A卫星影像数据进行地表形变提取，并利用GMTSAR对影像数据进行时序处理。GMTSAR是一款基于GMT绘图软件开发的开源InSAR数据处理软件[17]。在卫星精密轨道数据支持下，GMTSAR采用增强谱分集配准方法进行SAR影像配准，以满足TOPS模式下SAR影像方位向配准精度为0.001像素的要求。为抑制时空去相干影响，设置时间基线阈值为50 d、空间基线阈值为100 m，生成干涉对组合。将2019-06-25的影像作为超级主影像，其余影像均配准到该影像上，共生成427对干涉对。干涉处理过程中利用卫星轨道数据、SRTM 30 m分辨率DEM数据以及几何校正模型去除参考椭球面相位和地形相位；为保证形变信息提取的有效性，还需对其进行多视和滤波处理。采用Goldstein滤波去除噪声相位，并在方位向和距离向上进行8×2的多视处理，进一步提高信噪比。利用Snaphu软件对干涉相位进行解缠，其执行时间取决于干涉图的难度。为提高计算速率和解缠精度，选取0.12的相干系数阈值对低相干区域进行掩膜。基于解缠的干涉相位，通过相干点建立线性模型，估算残余地形残余相位和像元形变速率；再利用奇异值分解法和最小二乘法得到线性形变相位。对于非线性形变相位的提取，采用时间高通滤波器和空间低通滤波器去除残余噪声相位和部分大气延迟相位。最终得到整个研究区域的地面沉降时空分布图。

3　研究结果与分析

3.1　研究区沉降总体情况分析

基于SBAS-InSAR技术的数据处理，得到介休—宋古地下水漏斗区2017-03-19—2021-12-23的地表形变速率（图1），可以看出，研究区平均沉降速率高达90 mm/a，存在多个沉降区域，主要集中在介休—宋古—孝义中部地带，沉降速率较大，西南地区部分沉降严重，周边地区相对稳定。为揭示研究区地面沉降的时空变化特征，以2017-03-19为起始时间，2021-12-23为截止时间，选取每间隔4个月的累积沉降结果组成形变时间序列图（图2），可以看出，2017-03-31—2018-07-24研究区沉降量缓慢增加，大部分在0~30 mm范围内；2018-11-21开始中部地区累积沉降量达到30~60 mm；2020-11-22地面沉降现象加剧，中部地区逐渐形成沉降漏斗，累积量达到60~170 mm；2021-12-23最大累积沉降量达到340 mm。在空间分布上，地面沉降最初出现在孝义南端的小部分地区，后扩散至介休—宋古一带，并向东北蔓延，

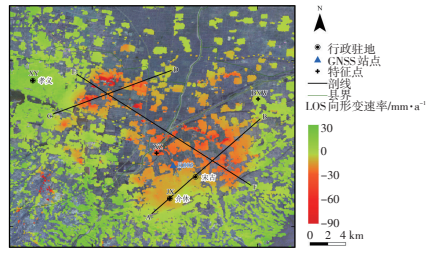


图1　介休—宋古地下水漏斗区平均形变速率

中部地区沉降最大，形成明显的沉降漏斗。

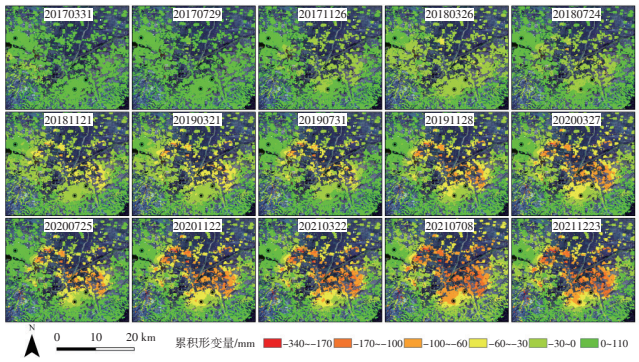
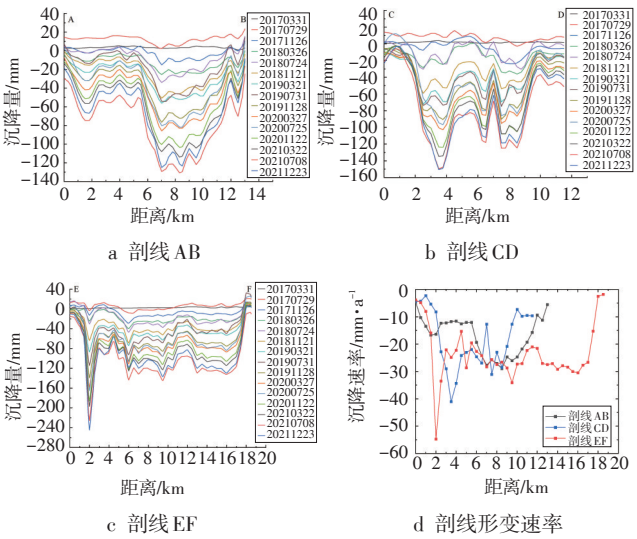


图2　研究区时序累积形变量

3.2　研究区重点区域沉降分析

为全面了解这些区域的沉降特征和变化趋势，本文进一步选取贯穿沉降区的3条剖线和4个特征点（图1）进行分析。剖线的沉降量和沉降速率见图3，可以看出，剖线AB在介休市的宋古村周围和东北方向沉降量较大，最大沉降量达129.49 mm，最大沉降速率为28.91 mm/a，均值为16.92 mm/a；剖线CD在中部地区沉降量较大，最大沉降量达150.54 mm，最大沉降速率为28.91 mm/a，均值为16.92 mm/a；剖线EF在靠近剖线端点E的地区沉降量最大，达到244.67 mm，最大沉降速率为54.70 mm/a，均值为23.46 mm/a，结果表明3条剖线上的形变速率总体较高，且呈漏斗状分布，某些特定地区的地面沉降问题尤为严重。



a 剖线AB　b 剖线CD

c 剖线EF　d 剖线形变速率

图3　研究区内剖线时序沉降量与沉降速率

特征点的累积沉降量特征见图4，可以看出，4个特征点的累积沉降量随时间推移逐渐增大，呈非线性增加趋势；沉降曲线呈现一定的季节性变化，表明气候因素对地面沉降具有一定影响；特征点XZ位于沉降漏斗中心附近，沉降量较大，最大累积沉降量达到138 mm；特征点XY位于沉降漏斗边缘，累积沉降量较小且处于平稳状态，最大累积沉降量为4 mm，结果表明靠近漏斗中心地区的地面沉降较严重，漏斗边缘区域较缓和、受影响程度较低。

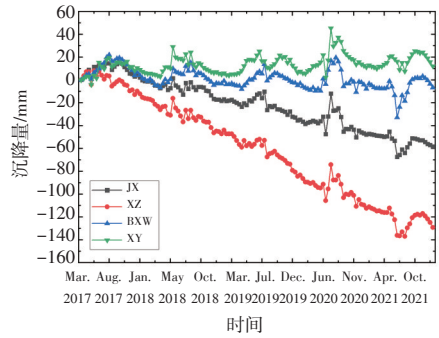


图4　特征点沉降量特征

3.3　SBAS-InSAR结果的可靠性分析

本文提取2017-03-19—2021-12-23的GNSS和SBAS-InSAR地面沉降数据进行对比分析。GNSS观测数据的处理步骤包括：①获取GNSS观测站的位置信息和时间序列数据，并对E、N、U方向的位移数据进行阶跃探测与修复；②通过拟合方法去除E、N方向上的长期趋势；③为进一步提高数据质量，利用粗差剔除去除明显的异常观测值；④统一采用公历纪年，以保证其时间序列与SBAS-InSAR地面沉降数据之间的精确对应；⑤将GNSS观测站E、N、U方向上的位移数据转换为LOS方向的形变序列，并将二者的形变结果进行对比。分析结果见图5，虽然GNSS数据有部分缺失，但二者的形变量趋势吻合较好，沉降量均随时间逐渐增加，二者结果的均方根误差为11.85 mm，表明基于SBAS-InSAR技术获得的沉降结果精度高、可靠性强。

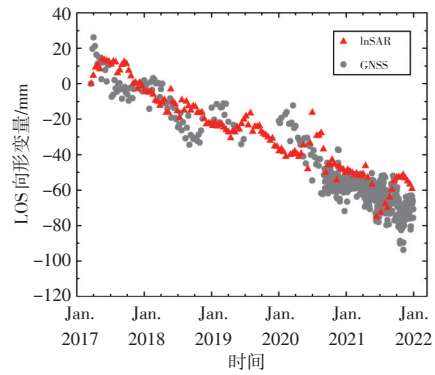


图5　InSAR地表形变与GNSS观测站数据对比图

3.4　地面沉降成因分析

3.4.1　地质因素对研究区地面沉降的影响

介休—宋古地下水漏斗区位于太原盆地南端，分布有东阳断裂、三泉断裂和洪山—范村断裂[18-19]。为探讨地质构造对介休—宋古地下水漏斗区地面沉降的影响，本文将通过SBAS-InSAR技术获取的研究区监测时段内平均形变速率与断裂带进行叠加。断裂带位置分布见图6，三泉断裂（F1）、东阳断裂（F2）和洪山—范村断裂（F3）均对地面沉降有一定影响，断裂

带附近的沉降速率较大，且在断层两侧存在差异性沉降。为深入了解沉降差异程度，在断裂带两侧绘制了GH、IJ、KL和MN四条剖线，沉降速率见图7，F1剖线GH的平均沉降速率为16.57 mm/a、最大值为63.10 mm/a，剖线IJ的平均沉降速率为16.04 mm/a、最大值为29.99 mm/a，均表现为断层倾向侧沉降速率大于背向侧；F2剖线KL的平均沉降速率为25.61 mm/a，最大值为33.92 mm/a，倾向侧沉降速率大于背向侧；F3剖线MN的平均沉降速率为11.72 mm/a，最大值为34.85 mm/a，倾向侧沉降速率也大于背向侧。综上所述，断裂带对地面沉降有一定的影响，断层两侧沉降速率的差异显著，F1剖线GH的两侧沉降差异尤为明显。

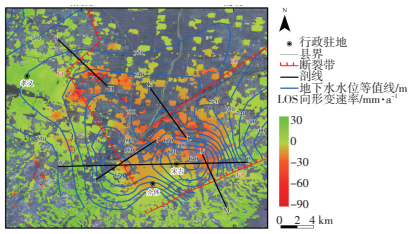
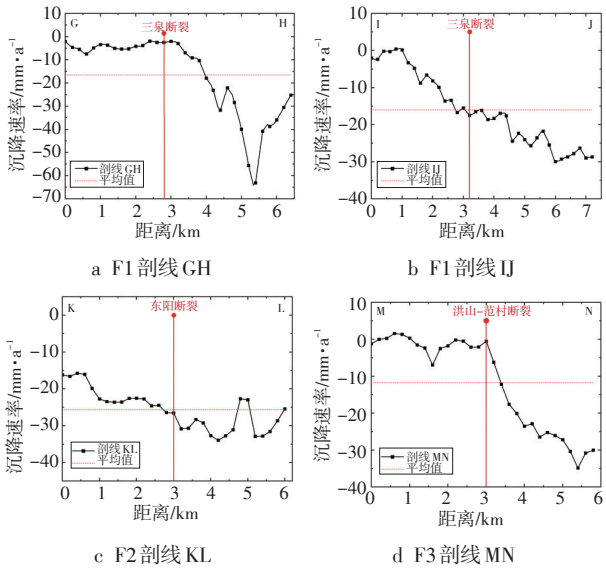


图6　断层与地下水水位等值线分布



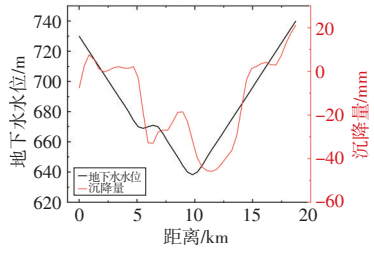
a F1剖线GH　　b F1剖线IJ

c F2剖线KL　　d F3剖线MN

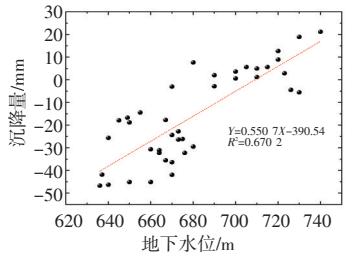
图7　断裂带剖线沉降速率

3.4.2　地下水水位变化对研究区地面沉降的影响

为进一步分析地下水对介休—宋古地下水漏斗区地面沉降的影响，将2019年的地下水水位等值线数据与沉降速率图进行叠加分析发现，研究区地面沉降基本发生在720 m地下水水位等值线内，且在地下水水位较低的介休—宋古一带，地面沉降也较严重。为量化地面沉降与地下水的关系，在地下水水位等值线处做剖线OP，沿OP提取其2019年地下水水位和地表形变值，并绘制了地下水水位与地面沉降的关系图（图8），可以看出，地下水水位与地面沉降量呈正相关关系，在地下水水位较低的地区，沉降量也较大，其相关系数R=0.82，说明过量开采地下水是介休—宋古地下水漏斗区地面沉降产生的重要原因。



a 剖线OP地下水水位和沉降量

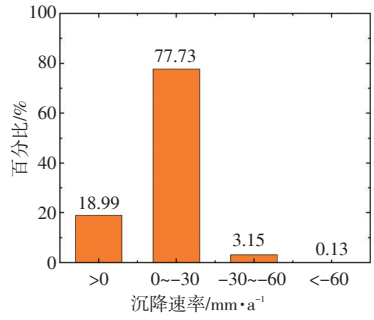


b 剖线OP地下水水位与沉降量的相关关系

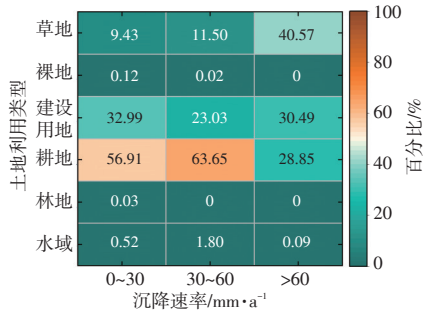
图8　地下水水位变化对地面沉降的影响

3.4.3　土地利用对研究区地面沉降的影响

对研究区土地覆盖数据进行重分类，分为水域、林地、耕地、建筑区、裸地和草地6类。为深入分析土地利用类型与地面沉降之间的关系，将分类结果与沉降速率进行对比分析，结果表明沉降区主要分布在耕地和建设用地区域上。为量化展示不同沉降速率的各土地利用类型的占比，对研究区的沉降速率进行重分类，分为大于0 mm/a、0~−30 mm/a、−30~−60 mm/a、小于−60 mm/a四个区间。各区间占比见图9a，同时提取各区间的土地利用类型，统计其占比，结果见



a 研究区沉降速率占比



b 不同沉降速率区间的地类占比

图9　土地利用对研究区地面沉降的影响分析

图9b，可以看出，0~−30 mm/a区间的占比最高；耕地和建设用地是沉降速率占比较大的地类，在0~30 mm/a区间占比分别为56.91%、32.99%，在30~60 mm/a区间占比分别为63.65%和23.03%。沉降速率大于60 mm/a的占比极低，不计入土地利用类型占比。综上所述，耕地和建设用地对地面沉降的影响显著。

4 结 语

介休—宋古地下水漏斗区的地面沉降问题突出。本文首先利用SBAS-InSAR技术，通过2017年3月—2021年12月的Sentinel-1A影像获取了沉降速率和累积沉降量数据；再与GNSS观测结果进行对比验证，分析了研究区地面沉降时空演变规律；最后结合资料详细分析了地面沉降与自然、人为因素之间的关系。

1）介休地下水漏斗区的SBAS-InSAR数据处理结果与GNSS观测数据结果的相关系数为0.97，证明了利用SBAS-InSAR技术获得的沉降结果的可靠性。研究期间介休—宋古地下水漏斗区的最大沉降速率为90 mm/a，沉降主要集中在介休—宋古—孝义的中部地区，并随时间逐渐增加形成沉降漏斗，最大沉降量达340 mm。

2）介休—宋古地下水漏斗区地面沉降的主要驱动因素包括地质、水资源变化和土地利用类型。研究区内三泉断裂带与东阳断裂带附近沉降明显，且断裂带两侧沉降速率差异明显。降雨量与地面沉降之间存在一定的相关性，降雨量的增加能略微减缓沉降速率。地下水位与沉降量呈正相关关系，相关系数为0.82，地面沉降发生区通常也是地下水位漏斗区。监测期间地面沉降主要发生在耕地和建设用地上，大部分沉降速率在0~30 mm/a区间内，其中耕地和建设用地的占比为56.91%和32.99%。

本文通过SBAS-InSAR技术揭示了介休—宋古地下水漏斗区地面沉降的时空演变规律及其驱动因素，以期为该地区的地面沉降防治工作提供理论依据，有助于制定有效的策略，减轻对社会经济环境的影响。

参考文献

[1] 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

[2] 刘毅. 地面沉降研究的新进展与面临的新问题[J]. 地学前缘,2001,8(2):273-278

[3] 郑铣鑫,武强,侯艳声,等. 关于城市地面沉降研究的几个前沿问题[J]. 地球学报,2002,23(3):279-282

[4] 孙晓涵,彭建兵,崔向美,等. 山西太原盆地地裂缝与地下水开采、地面沉降关系分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):91-98

[5] 高伟,徐绍铨,李英冰. 用GPS监测城市地面沉降的可行性研究[J]. 大地测量与地球动力学,2004,24(1):105-110

[6] 杨建图,姜衍祥,周俊,等. GPS测量地面沉降的可靠性及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(1):70-75

[7] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 717-1 733

[8] 王超,杨清友. 干涉雷达在地学研究中的应用[J]. 遥感技术与应用,1997,12(4):37-46

[9] Tang W, Yuan P, Liao M, et al. Investigation of Ground Deformation in Taiyuan Basin, China from 2003 to 2010, with Atmosphere-corrected Time Series InSAR[J]. Remote Sensing,2018,10(9):1 499

[10] Chaussard E, Wdowinski S, Cabral-Cano E, et al. Land Subsidence in Central Mexico Detected by ALOS InSAR Time-series [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140:94-106

[11] Zhu W,Zhang Q,Ding X,et al. Recent Ground Deformation of Taiyuan Basin (China) Investigated with C- , L- , and X-bands SAR Images[J]. Journal of Geodynamics,2013,70:28-35

[12] 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):2 352-2 369

[13] 翟小艳. 介休市城镇饮用水水源安全评价及建设研究[D]. 太原:太原理工大学,2020

[14] 翟小艳. 介休市城区—宋古漏斗区演变及成因分析[J]. 水资源开发与管理,2021(11):56-61

[15] 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

[16] 杨红磊,彭军还,康志忠,等. InSAR技术原理及实践[M]. 北京:科学出版社,2021

[17] Sandwell D, Mellors R, Tong X, et al. Open Radar Interferometry Software for Mapping Surface Deformation[J]. Eos Transactions American Geophysical Union , 2011 , 92(28):234

[18] 孙振锋. 地裂缝发育程度与地震活动强度相关性研究:以汾渭盆地为例[D]. 西安:长安大学,2015

[19] 臧明东. 太原盆地地裂缝危险性区划研究[D]. 西安:长安大学,2016