引文格式：黄昊龙,史绪国,李梓龙. 利用SBAS-InSAR分析武汉地铁沿线地表形变特征[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 35-40. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.07.008

利用SBAS-InSAR分析武汉地铁沿线地表形变特征

黄昊龙[1]，史绪国[2*]，李梓龙[2]
（1. 中国地质大学（武汉）李四光学院，湖北 武汉 430074；2. 中国地质大学（武汉） 地理与信息工程学院，湖北 武汉 430078）

摘　要：轨道交通安全运行需要全线路高精度的形变监测技术支持。采用小基线数据集干涉合成孔径雷达（SBAS-InSAR）技术对2015—2023年231景Sentinel-1数据进行分析，获取了武汉市主要地铁沿线区域的长时序地面沉降形变信息，并结合地理加权回归（GWR）模型等地理分析方法分析了沉降的时空特征。结果表明，地表沉降和地铁建设运营存在一定的时空关联性，在空间上地铁6、7、8号线沿线均存在不同程度的沉降漏斗，沉降速率极值高于25 mm/a；在时间上不同区域地铁沿线的监测点均受到地铁施工建设的显著影响，2015—2017年高速沉降。研究结果体现了SBAS-InSAR技术在保障基础设施安全方面的有效性，可为地铁长期运营与维护提供理论依据与技术支持。

关键词：武汉地铁；SBAS-InSAR；形变监测；地铁沉降；GWR模型
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0035-06

Surface Deformation Characteristic Analysis Method Along Wuhan Subway Lines Using SBAS-InSAR Technology

HUANG Haolong[1], SHI Xuguo[2], LI Zilong[2]
(1. S.K.Lee Honors College, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
2. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China)

Abstract: Safe operation of rail transit requires the support of high-precision deformation monitoring technology across the entire line. In this paper, we used the small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) technique to analyze 231 scenes of Sentinel-1 data from 2015 to 2023, and obtained long-term surface deformation information along the main subway lines in Wuhan City. Combined with geographical analysis methods such as the geographically weighted regression (GWR) model, we analyzed the spatio-temporal characteristics of surface subsidence. The results show that there is a certain spatio-temporal correlation between surface subsidence and subway construction and operation. Spatially, varying degrees of subsidence funnels exist along the subway lines 6, 7 and 8, with extreme subsidence speed exceeding 25 mm/a. Temporally, monitoring points along subway lines in different areas are significantly affected by subway construction, exhibiting rapid subsidence from 2015 to 2017. This result demonstrates the effectiveness of SBAS-InSAR technology in ensuring infrastructure safety, and provides a theoretical basis and technical support for the long-term operation and maintenance of subways.

Key words: Wuhan subway, SBAS-InSAR, deformation monitoring, subway subsidence, GWR model

城市轨道交通是城市经济活动与民生事业的重要基础设施，其安全运营是城市建设中不可或缺的基石。武汉市作为国家确定的中部中心城市，近年来发展迅速，但其地铁线路却长期面临沉降威胁[1]。例如，2023年8月8日武汉市江岸区轨道交通12号线兴业路站北侧基坑发生渗漏水险情，导致局部地面沉降，突显了对轨道交通进行地质安全风险监测与预警的紧迫性。随着永久散射体合成孔径雷达干涉（PS-InSAR）[2]和小基线数据集（SBAS）[3]InSAR等技术的发展，利用SAR影像中的稳定散射目标实现毫米级地表形变监测成为可能。结合地理加权回归（GWR）等地理空间统计学方法能对城镇区域形变模式和关联因素进行具体分析，有助于形变灾害的分区管理[4]。近年来，部分学者利用InSAR技术对武汉市地表沉降进行了观测与研究[5]，并利用多种方法[6-10]分析了导致沉降的原因；但缺乏针对地铁线路的精细化沉降时空分析。鉴于此，本文利用SBAS-InSAR技术分析了覆盖武汉市核心城区的231景Sentinel-1影像，提取了2015—2023年武汉市地表的时序形变数据；并从空间与时间维度深入分析了武汉地铁6、7、8号线

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42474061）。
第一作者简介：黄昊龙（2004—），本科，研究方向为遥感科学与技术，E-mail：haolong.huang@cug.edu.cn。
通信作者：史绪国（1988—），博士，副教授，研究方向为雷达干涉测量技术及其应用，E-mail：xgshi@cug.edu.cn。

沿线区域的沉降特性，旨在为武汉市地铁精细化沉降防控提供基础数据支持，为城市基础设施的灾害风险管理提供科学依据和实践指导。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

武汉市地处长江中游、江汉平原东部，地理范围为29°58′~31°22′N、113°41′~115°05′E。从地质角度来看，武汉市主城区位于长江一级阶地上的湖沼相沉积区，长江、汉江两岸和湖泊周边广泛分布新近纪—第四纪松散层，且厚度较大，层中富含类孔隙水[1]。武汉市正处于城市建设与轨道交通建设的高峰阶段（表1），截至2023年12月，武汉市拥有12条地铁运营线路，总里程为487.77 km，车站300座。本文选取的研究区见图1，覆盖江岸区、江汉区、汉阳区、硚口区、武昌区、青山区等中心城区。

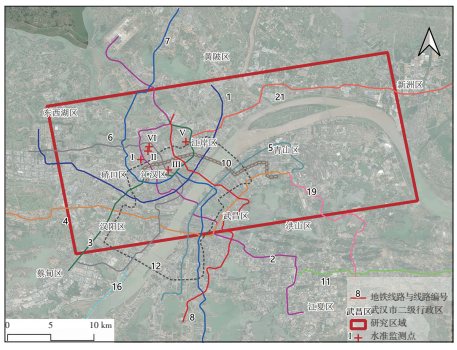


图1 武汉市地铁线路与研究区

审图号：GS(2024)0650

表1 地铁建设时间表（部分）

地铁线路	开工时间	通车时间
6号线	2013-08-07	2016-12-28（1期）
7号线	2013-12-28	2018-10-01
8号线	2014-10-26	2017-12-26（金梨段） 2021-01-02（梨野段）
5号线	2015-12-23	2021-12-26
12号线	2017-12-18	建设至今

1.2 数据来源

本文共获取2015年4月—2023年9月的231景IW模式Sentinel-1升轨影像用于时序InSAR数据处理，卫星航向角为-12.72°、视角为38.05°、波长为5.6 cm，采用VV极化方式，参考影像日期为2018-12-27。同时，利用30 m分辨率哥白尼DEM进行数据配准、差分干涉图生成和地理编码。由于本文关注的地铁沿线区域主要位于汉口区域，因此获取2016年8月—2012年12月的二等水准监测点高程数据用于精度评估，位置如图1中I~VI所示。

2 研究方法

2.1 InSAR数据处理

由于Sentinel-1卫星在TOPS成像模式下因天线摆动导致每个Burst内部多普勒参数变化较大，需要配准精度达到0.001像素[11]，因此本文在几何配准的基础上，引入了增强谱分析方法，以实现Burst间的高精度配准[12]。完成配准后，将待配准影像重采样至参考影像空间。为提升数据处理效率，本文将每景SAR数据与时间最邻近的两幅SAR数据进行组合，形成干涉组合（图2），并利用哥白尼DEM去除地形相位。

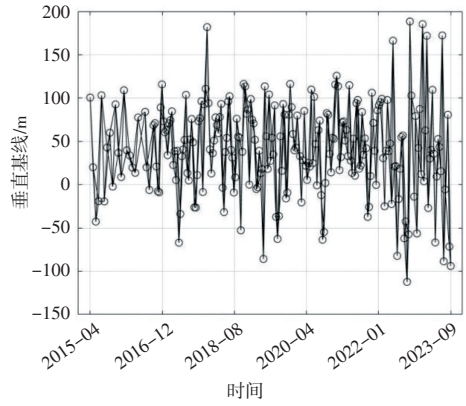


图2 Sentinel-1数据时空基线分布

为选出稳定的目标点，本文采用振幅离差阈值（<0.6）和时间相干性阈值（<0.3）筛选像素。首先对选中的像素构建不规则三角网；再采用全对最短路径方法优化网络，以排除低相干性路径；最后采用最小费用流方法获取解缠相位。在时间维度上，为纠正可能存在的解缠误差，本文通过冗余观测的相位闭合信息进行修正[13]。像素的解缠相位由轨道误差、地形残差、地表变形、大气延迟和噪声引起的相位分量组成。由于地形残差与垂直基线线性相关，其相位分量可通过线性回归方法估计。大气延迟分量则可通过时域高通滤波和空域低通滤波的方法消除。去除上述误差后，采用最小二乘法计算时序形变信息。

2.2 GWR模型构建

为探究地面沉降与地铁施工活动之间的相关性，便于后续分区防控，本文采用GWR模型[14]对观测点的沉降速率与其距离地铁站的关系进行建模分析。GWR模型允许模型参数随地点变化，从而捕捉空间数据的局部特征，并识别其空间特性[15]。模型表达式为：

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{k=1}^{p}\beta_k(u_i,v_i)x_{ik}+\varepsilon_i \quad (1)$$

$$\hat{\beta}(u_i,v_i)=(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(u_i,v_i)\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(u_i,v_i)\boldsymbol{Y} \quad (2)$$

式中，ε_i为观测点误差；(u_i,v_i)为观测点i的地理坐

标，表示回归系数是某变量地理坐标的函数；$\beta_k(u_i, v_i)$ 为空间地理函数，反映地理位置与地理空间权重的关系；$\boldsymbol{W}(u_i, v_i)$ 为对角权重矩阵。

权重通过空间核函数 W_{i,i^*} 确定，通常选用高斯距离递减函数，计算公式为：

$$W_{i,i^*}=\exp\{-\frac{1}{2}(\frac{d(i,i^*)}{h})^2\} \tag{3}$$

式中，$d(i,i^*)$ 为观测点 i 与 i^* 的距离，通常为欧氏距离；h 为核函数的带宽，决定核函数的作用范围。

本文以每个形变点与其最近地铁站的地理距离为自变量，以形变量为因变量，为简化计算，以高斯函数为空间权重模型，并固定带宽为30 m。在SAGA-GIS软件中完成GWR计算，生成分辨率为300 m×300 m的网格模型。

3　研究结果与分析

3.1　InSAR形变结果与精度评估

2015—2023年的研究区地表形变速率见图3，可以看出，武汉市年均形变速率稳定在±5 mm/a的区间内；但在江岸区塔子湖街道、江汉区王家墩中央商务区、武昌沙湖（图3中A、B、C区域）沉降速率显著偏高，部分区域观测点速率达到10~15 mm/a，峰值超过25 mm/a，这些区域有多条在建或建成地铁线路通过，2010年后城市发展十分迅猛，其地面沉降情况不容忽视[16]。

将监测点位二等水准监测数据与周边10 m邻域平均后的InSAR形变数据进行对比分析发现（表2），2016年8—12月水准数据与InSAR数据计算得到的累积形变量的相对误差均在3 mm以内，均方根误差为1.97 mm，表明SBAS-InSAR技术能在武汉市地面沉降反演中提供可靠的精度。

表2　2016年8—12月InSAR与水准监测地表累积沉降结果对比/mm

点号	水准数据	InSAR数据	差值
P1	1.00	3.65	−2.65
P2	6.00	6.45	−0.45
P3	−5.00	−6.90	1.90
P4	−3.00	−4.61	1.61
P5	−4.00	−1.55	−2.45

3.2　地铁沿线地面沉降时空分布特征分析

本文选取研究区内2018—2022年最新建成的3条地铁线路——武汉地铁6、7、8号线进行沉降数据的时空格局分析。6号线贯穿汉阳区、硚口区、江岸区和江汉区（图4a），唐家墩—杨汊湖区间存在明显的沉降漏斗区域，长度约为3 km，中心沉降速率超过20 mm/a。该区间内的石桥地铁站周边区域（和祥里社区、汉兴街社区等）分布大量高密度沉降点，速率达到12 mm/a。以石桥地铁站外典型沉降点PS-1为例，2015—2016年的累积沉降达60 mm（图5a），2017—2023年阶梯式沉降约60 mm。此外，苗栗路—香港路—三眼桥区间也出现了较明显的沉降漏斗，形变速率达10 mm/a。值得注意的是，在6号线硚口区线路段，观测到以站点为中心的沉降漏斗，武胜路、汉正街、六渡桥3站中心点周围的沉降速率均达10 mm。结合表1，对图5所绘的监测点进行时序沉降对比分析发现，PS-1在6号线施工中后期短时间内快速沉降，表明该区域的施工可能存在短期地下水控制失效的情况；而PS-2（香港路—苗栗路区间中点附近）在观测时间内呈现线性均匀缓慢下降特征，基本排除地铁建设的影响；2016—2017年PS-3（汉正街地铁站附近）沉降了30 mm随后趋于稳定，推测是由地铁周边物业的基坑开挖造成的。

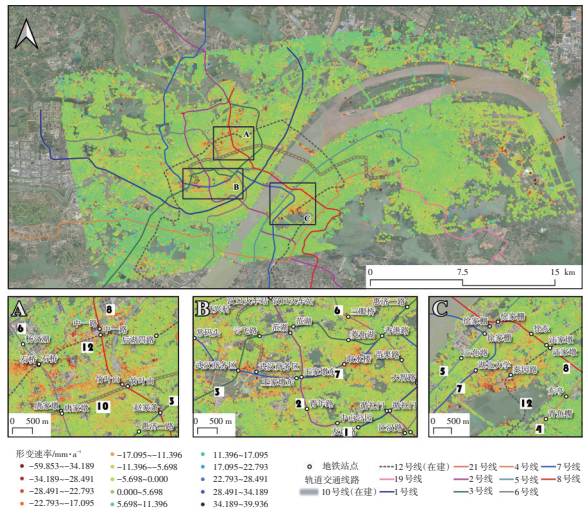
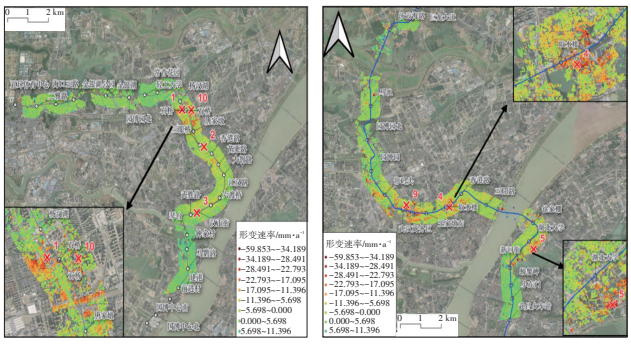


图3　武汉市地铁分布与沉降速率图

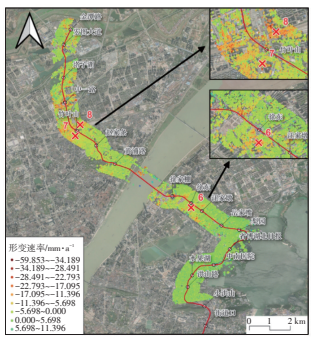
审图号：GS(2024)0650

7号线横跨长江两岸，途经武昌区、江岸区、江汉区（图4b）。与6、8号线相比，7号线的不均匀沉降最严重，缓冲区内标准差为6.32 mm/a，其中江汉区武汉商务区—王家墩东—香港路区间形成了一个明显的W形沉降漏斗，最大沉降速率超过20 mm/a，长度超过5 km。该区域是武汉市中央商务区，日均客流量预计超过40万人，周边还有2、3、6号地铁线路同时穿过，未来将建成10、12号线，沉降问题对地铁运营与乘客安全构成了严重威胁。此外，武昌区沙湖东北侧的徐家棚—湖北大学—新河街区间也存在较明显的不均匀沉降，湖北大学站东南侧沉降速率超过25 mm/a。

2016—2017年取水楼站附近的PS-4和湖北大学站附近的PS-5沉降均超过50 mm（图5b）；随后PS-4趋于稳定，PS-5则以小于5 mm/a的速度缓慢沉降。由于两个监测点沉降时间基本重合，且处于7号线建设中期，可推测其沉降是由地铁盾构掘进等隧道施工活动造成的。



a 6号线 b 7号线



c 8号线

图4 武汉市地铁6、7、8号线沿线600 m范围内沉降速率分布

审图号：GS(2024)0650

8号线连接长江两岸的武昌区和江岸区（图4c），主要沉降区间包括汪家墩—徐东—徐家棚区间和竹叶山—中一路—塔子湖区间，年均沉降速率在10~20 mm/a之间。虽然8号线沿线区域高速沉降点的聚集现象不明显，但沿轨道方向高速沉降点和低速沉降点交替分布的特点表明，有可能存在更严重的不均匀形变。结合时序形变曲线（图5c）综合分析，在8号线通车前，2016年全年徐东站西南侧的PS-6沉降约100 mm，且通车后2018—2019年又沉降了约40 mm；但距离其约200 m的监测点沉降速率大多仅为5 mm/a，该类沉降最有可能是由地铁完工后周边地块零散分布的建设活动造成的[17]。类似的现象还出现在竹叶山站区域，其南北两侧监测点（PS-7、PS-8）的累积沉降差值在同一时刻超过40 mm。该类较难发现的不均匀沉降应引起运营单位的重视，轨道形变会增加车辆运行的振动，产生大量噪声，给地铁的机电系统带来不可逆的损伤[18]。

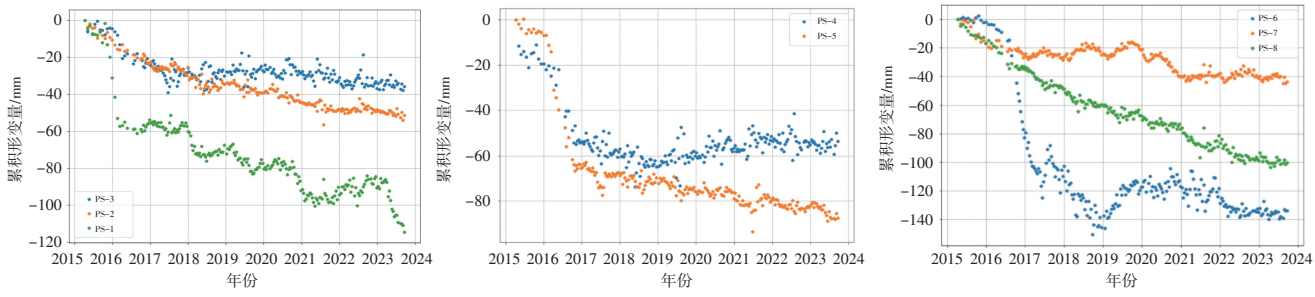
总体而言，武汉地铁6、7、8号线路经过武汉市地表沉降高发的多个区域，在地铁建设期普遍出现了沉降现象；沿线多个监测点的年均沉降速率超过15 mm/a，形成了多个沉降漏斗，具有一定的典型性，后续需进行持续监测以预防地铁沿线地质灾害的发生，保障地铁安全运行。

3.3 地铁沿线沉降原因分析

地铁是长期运营的公共工程，对其周边的时序形变数据进行地理统计分析能发掘形变产生的规律，为阐明形变的发生机理提供重要的观测依据。本文通过GWR模型分析形变速率与地铁站距离的空间关联特征（图6）。模型平均拟合精度为0.4，后湖、沙湖等局部区域高达0.8，验证了空间建模的有效性。回归得到的斜率系数表明，研究区内既存在正斜率区（0.14~+0.14），其形变速率随地铁站距离的增加而衰减，也存在负斜率区（−0.14~−0.14），表明沉降梯度变化存在明显的空间异质性，非地铁工程因素可能叠加影响沉降漏斗中心的具体分布情况。截距系数表明，后湖、武汉商务区等区域的工程扰动强度较大，地铁站周边存在显著的沉降集聚，其网格回归截距系数小于−50。

进一步结合历史形变数据与水文地质资料发现，地铁沿线沉降的本质是短期工程扰动、自然地理条件与长期人为干扰的动态耦合过程。具体体现在：

1）工程建设直接驱动短期的剧烈形变。在地铁建设阶段，车站和隧道施工使得地质结构被扰动，从



a 6号线 b 7号线 c 8号线

图5 地铁6、7、8号线沿线典型监测点时序形变图

而发生沉降[19]；在地铁运营阶段，地铁周边的地下空间开发与地面荷载加重也会成为地表沉降发生的诱因[20]。例如，PS-1、PS-4、PS-5、PS-6在地铁建设期间快速沉降，可能是由地铁基坑开挖进行管井降水造成的[21-22]；而PS-3的阶梯式沉降则可归因于地铁建成后周边区域的开发建设。

2）自然地理条件影响局部点位沉降特性。7号线石桥站东侧的PS-9、6号线武汉商务区站旁的PS-10的历史形变曲线与汉口江汉关水文观测站的历史水面位置曲线见图7，可以看出，PS-9、PS-10位于汉口长江一级阶地，其形变与长江水位涨落的季节性相位同步变化，说明长江能通过与长江一级阶地承压含水层的水力联系影响表层沉积物，造成地面的沉降或抬升[23-24]。枯水期承压水外流导致软弱土层在地面荷载作用下固结沉降，丰水期渗透回灌引发地面回弹[10,24]。

3）历史人为干扰的长期效应叠加。相关文献显示，在地铁开工建设前（2010—2015年），后湖、沙湖、王家墩区域已出现地下水位下降、地面沉降的情况[25-26]。后湖区域PS-2、PS-8的沉降，较有可能是在2003年三峡水库蓄水以来长江枯水期补给减少的背景下[27]，叠加高强度城市开发，总体地下水位下降的结果，是一种普遍性沉降，而与地铁施工无关。

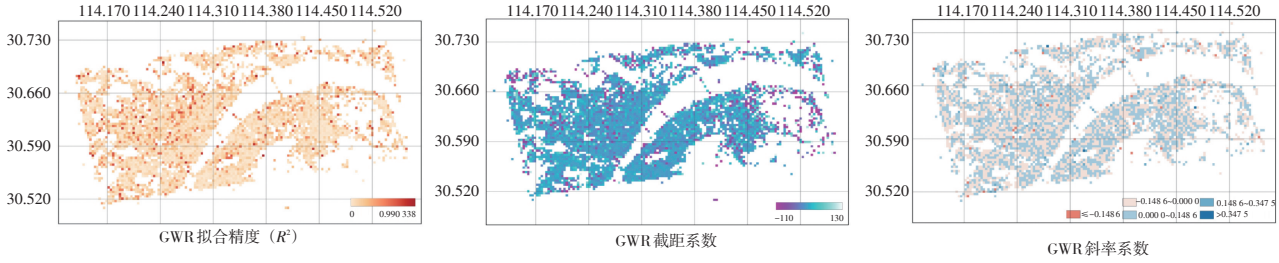


图6　以形变量为因变量的GWR建模结果

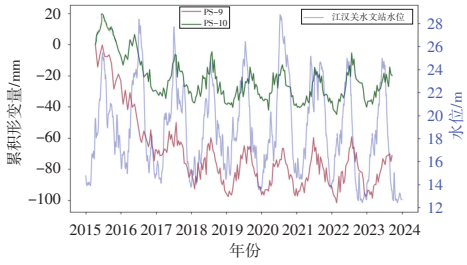


图7　6、7号线沿线典型监测点历史形变曲线与长江水位数据对比图

4　结　语

本文利用SBAS-InSAR技术获取了2015—2023年武汉市地铁沿线区域的时序地表形变数据，深入分析了6、7、8号线的沉降时空特征；并结合GWR模型和水文地质资料对地铁沿线的沉降原因进行了初步推断，得出的主要结论为：①在空间上，武汉市地铁沿线区域地表不均匀沉降较严重，江汉区石桥、建设大道沿线、武昌区沙湖等区域沉降明显，年均沉降量超过10 mm/a，且有多条地铁线路穿过，地表形变造成的沉降漏斗严重危害地铁运营安全；②在时间上，2015—2017年是武汉地铁快速扩张期，地铁建设活动导致沿线区域，特别是地铁站周边地表形变加剧，部分区域年沉降量超过50 mm，尽管大部分站点在地铁建成后沉降速率趋于稳定，但后湖区域的部分监测点仍呈现持续沉降趋势，风险尚未完全消除，需长期监控并加强防治；③武汉市地铁沿线地表沉降与地铁建设活动在时空上高度相关，地铁站周边区域沉降较严重，地铁沿线沉降具有一定的历史与自然背景，其原因既包括地铁建设因素，也包括其他工程建设、水文地质环境变化等自然与人为因素。

研究结果表明，武汉地铁沿线的沉降问题涉及的线路多、分布范围广、时空机制复杂，其潜在安全风险需高度重视，值得进一步发展相关的监测与防治手段；同时证明了利用SBAS-InSAR技术和空间分析技术对地铁线路地表形变态势进行精细分析评价的可行性，为城市地铁的全线路沉降治理提供重要支持。

参考文献

[1] 武汉测绘研究院. 武汉城市地质[M]. 北京:中国地质大学出版社,2018

[2] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geo-science and Remote Sensing,2001,39(1):8-20

[3] 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

[4] Zhang J, Gao J, Yang S, et al. Evaluation of the Impact of Urbanization Factors on Land Subsidence by GWR[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,

2023:3 659-3 662

[5] 魏以宽,闵天,邹崇尧,等. 基于InSAR的武汉地区2016—2021年地面沉降监测[J]. 地理空间信息,2023,21(10):69-72

[6] Han Y K, Zou J G, Lu Z, et al. Ground Deformation of Wuhan, China, Revealed by Multi-temporal InSAR Analysis[J]. Remote Sensing,2020,12(22):3 788

[7] Shi X, Zhang S, Jiang M, et al. Spatial and Temporal Subsidence Characteristics in Wuhan (China), During 2015-2019, Inferred from Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2021,21(8):2 285-2 297

[8] Hu J, Motagh M, Guo J, et al. Inferring Subsidence Characteristics in Wuhan (China) Through Multi-temporal InSAR and Hydrogeological Analysis[J]. Engineering Geology,2022,297:106 530

[9] 张扬,刘艳芳,刘莹,等. 武汉市地面沉降时空分异特征及地理探测机制[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(9):1 486-1 497

[10] 刘艳敏. 武汉临江地区承压水水位特征及深基坑地下水控制研究[D]. 武汉:中国地质大学,2022

[11] Yagüe-Martínez N, Prats-Iraola P, Gonzalez F R, et al. Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2016,54(4):2 220-2 234

[12] 吴文豪,周志伟,李陶,等. 精密轨道支持下的哨兵卫星TOPS模式干涉处理[J]. 测绘学报,2017,46(9):1 156-1 164

[13] Shi X, Wang J, Jiang M, et al. Extreme Rainfall-related Accelerations in Landslides in Danba County, Sichuan Province, as Detected by InSAR[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2022,115:103 109

[14] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity[J]. Geographical Analysis, Wiley,1996,28(4):281-298

[15] 卢宾宾,葛咏,秦昆,等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(9):1 356-1 366

[16] 安庆,况小驰,李方. 武汉后湖地区地面沉降监测系统实现[J]. 地理空间信息,2017,15(6):96-98

[17] 柯洋,代帅,李谋思. 武汉软土地区地铁隧道长期沉降规律及原因分析[J]. 城市勘测,2024(3):204-208

[18] 贾煦,宫辉力,陈蓓蓓,等. 不均匀地面沉降对北京地铁15号线运营的影响分析[J]. 遥感信息,2014,29(6):58-63

[19] Wang S, Chen Z, Zhang G, et al. Overview and Analysis of Ground Subsidence Along China's Urban Subway Network Based on Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Remote Sensing,2024,16(9):1 548

[20] Zhang J, Ke C, Shen X, et al. Monitoring Land Subsidence Along the Subways in Shanghai on the Basis of Time-series InSAR[J]. Remote Sensing,2023,15(4):908

[21] 施成华,彭立敏. 基坑开挖及降水引起的地表沉降预测[J]. 土木工程学报,2006,39(5):117-121

[22] 唐传政,彭晓秋,熊秋梅,等. 武汉地铁3号线一期工程车站基坑施工风险控制分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(增刊1):415-418

[23] 范士凯,杨育文. 长江一级阶地基坑地下水控制方法和实践[J]. 岩土工程学报,2010,32(增刊1):63-68

[24] 江门市勘察设计协会. 我会举办岩土工程与水文地质学术讲座[EB/OL]. (2024-12-24)[2024-12-31]. http://www.jmkcsj.com/article.aspx?aid=52

[25] 肖志勇,王胜杰,方志文. 地下水位下降对武汉城市地质环境影响分析[J]. 云南水力发电,2023,39(4):16-21

[26] 白林,江利明,汪汉胜. 利用高分辨率TerraSAR-X数据监测武汉地区2013—2015年地面沉降[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(8):832-836

[27] 韩剑桥,孙昭华,杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征[J]. 湖泊科学,2017,29(5):1 217-1 226

(上接第30页)

形变特征分析:以南水北调工程为例[J]. 测绘学报,2022,51(10):2 083-2 092

[16] Yu X, Wang G, Hu X, et al. Land Subsidence in Tianjin, China: Before and After the South-to-North Water Diversion[J]. Remote Sensing,2023,15(6):1 647

[17] Jiang M, Ding X, Tian X, et al. A Hybrid Method for Optimization of the Adaptive Goldstein Filter[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2014,98:29-43

[18] Jiang M, Hooper A, Tian X, et al. Delineation of Built-up Land Change from SAR Stack by Analysing the Coefficient of Variation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2020,169:93-108

[19] Jiang M. Sentinel-1 TOPS Co-registration over Low-coherence Areas and Its Application to Velocity Estimation Using the All Pairs Shortest Path Algorithm[J]. Journal of Geodesy,2020,94(10):95

[20] 蒋弥,丁晓利,李志伟. 时序InSAR同质样本选取算法研究[J]. 地球物理学报,2018,61(12):4 767-4 776

[21] 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