引文格式：杨馨,李益敏,冯玥雯,等. 基于PS-InSAR技术的昆明地铁4号线沿线地面沉降监测研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(8): 107-110. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.08.024

基于PS-InSAR技术的昆明地铁4号线沿线地面沉降监测研究

杨　馨[1]，李益敏[1,2*]，冯玥雯[1]，段明坤[1]，杨羽彤[1]，计培琨[1]
（1. 云南大学 地球科学学院，云南 昆明 650500；2. 云南省高校国产高分卫星遥感地质工程研究中心，云南 昆明 650500）

摘　要：随着城市化进程加快，地表形变问题日益严重，逐渐威胁到城市基础设施的安全和健康发展。永久散射体合成孔径雷达干涉技术（persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar，PS-InSAR）在监测城市基础设施地表形变领域有着独特的优势。针对地铁运营中引发的地面沉降，本研究基于30景Sentinel-1A卫星影像数据，利用PS-InSAR技术对昆明4号地铁线进行地表形变监测，并用地理加权回归对沉降结果进行插值处理，得到连续的沉降速率。研究结果表明，地铁4号线运营以后，研究区内的抬升速率由53 mm/a提升到85 mm/a；沉降速率由74 mm/a提升到137 mm/a，4号线运营后年累计沉降值约为运营前的两倍，最大累计沉降值高达171 mm，最大累计抬升量为106 mm。研究发现监测区的地表形变均与形变区的地质条件和工程施工有关。

关键词：PS-InSAR；昆明地铁4号线；地面沉降；地理加权回归
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）08-0107-04

Land Subsidence Monitoring Along the Kunming Metro Line 4 Based on PS-InSAR Technology

YANG Xin[1], LI Yimin[1,2], FENG Yuewen[1], DUAN Mingkun[1], YANG Yutong[1], JI Peikun[1]
(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China;
2. Yunnan Province University Domestic High-resolution Satellite Remote Sensing Geological Engineering Research Center, Kunming 650500, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, the problem of land surface deformation is becoming more and more serious, which gradually threatens the safe and healthy development of urban infrastructure. Time-series InSAR technology has unique advantages in monitoring urban infrastructure surface deformation. Aiming at the land subsidence caused by subway construction, based on 30 Sentinel-1A satellite image data, we used PS-InSAR technology to monitor the land surface deformation of Kunming metro line 4, and interpolated the settlement results by geographical weighted regression to obtain a continuous subsidence rate. The results show that after the opening of subway line 4, the lift rate in the study area increases from 53 mm/a to 85 mm/a. The subsidence rate increases from 74 mm/a to 137 mm/a. The annual cumulative subsidence value after the opening of subway line 4 is about twice that before the opening, the maximum cumulative subsidence value is as high as 171 mm, and the maximum cumulative lift value is 106 mm. It is found that the surface deformation in the monitoring area is related to the geological conditions and engineering construction of the deformation area.

Key words: PS-InSAR, Kunming metro line 4, land subsidence, geographical weighted regression

沉降监测是有效监管地面沉降的必要手段之一，相较于传统监测和全球定位系统（global positioning system，GPS）监测，合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar，InSAR）是一种全天时、全天候、高精度、高效率、大区域的对地观测技术[1-4]。永久散射体合成孔径雷达干涉测量（PS-InSAR）的出现，将InSAR技术带入了时间序列研究阶段[5]，在地表形变监测和反演中发挥着重要作用。

周吕[6]等利用PS-InSAR技术，获取了上海市2018—2020年3条地铁线路的年平均沉降速率和沉积量，证明了时序PS-InSAR在地铁沉降监测中的可行性；刘凯斯[7]等对TerraSAR影像进行永久散射体干涉处理，结果表明北京地铁6号线自西向东沉降速率增大。为了获得连续的形变数据，叶永超[8]等对PS点数

收稿日期：2023-04-10。
项目来源：教育部产学合作育人项目（202102245027）；云南大学面向多地学学科交叉融合的遥感课程群教学团队资助项目；云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目（2019FY003017）；中国地质调查局资助项目（DD20221824）。
第一作者简介：杨馨（2001—），本科，研究方向3S技术在城市自然灾害中的应用，E-mail：15288652001@163.com。
通信作者：李益敏（1965—），本科，研究员，研究方向为3S技术在山地环境与地质灾害中的应用，E-mail：liyimin1965@163.com。

据进行克里金插值，用于分析郑州市地铁沿线地面沉降的时空特征，并重点分析和预测了典型站点的地面沉降。地理加权回归（geographically weighted regression，GWR）是对传统回归方法的有效扩展，被广泛用于空间非平稳性探测，可用于处理地面沉降数据[9]。昆明市于2008年开始地铁建设，4号线于2020年9月通车运营，是目前昆明地铁最长路线。本文基于30景Sentinel-1A数据，利用PS-InSAR技术，获取2019年7月—2021年12月昆明地铁4号线及周边区域的地表沉降信息，通过GWR插值得到连续的沉降速率，探究地面沉降的空间分布特征，并分析沉降原因，为4号线沿线地面沉降的预防和防治提供数据基础，为城市发展与区域规划发挥积极作用，具有重要的现实意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况与数据源

截至2022年6月，昆明已有6条地铁线路开通运营，加密了昆明中心区核心交通网络，加强了昆明主城区与呈贡新区、空港经济区等重点区域的交通基础设施配套建设。与此同时，泥炭质土层在昆明地铁4号线周围分布非常广泛，在该类地质层上快速发展交通会导致更大范围的地表形变和沉降漏斗。

昆明地铁4号线长43.422 km，起于昆明市五华区的金川路站，达呈贡区的昆明南火车站，设有29个车站，穿过9处河流、10处桥梁、近600栋建筑物，是昆明地铁里程最长、换乘线路最多、线网规模最大的线路，与此前各线交错成网，开启昆明地铁的“米”字型路网时代。在昆明地铁4号线小菜园站至火车北站区间，地铁2号线隧道和4号线隧道呈现出仅相距3.5 m的上下重叠布局，在大树营站和菊华站与地铁3号线和6号线交汇。对易受扰动触变、易坍塌特殊区域地层进行地表沉降监测，有利于防范人为地质灾害，为昆明地铁4号线运营维护提供参考。

本文以30景升轨Sentinel-1A卫星250 km干涉宽幅影像为数据源，基于中等分辨率应用模式（Wide-swath mode），并结合其轨道数据与覆盖整个昆明地铁4号线沿线DEM(Digital Elevation Model)数据，研究昆明地铁4号线运营前后30个月，即2019年7月（运营前15个月）至2021年12月（运营后15个月）的地表沉降情况，并分析了沉降原因。

1.2 研究方法

1.2.1 PS-InSAR技术原理

为克服传统InSAR技术存在的时空失相干和大气延迟相位问题，Ferretti[10]等于2000年提出了PS-InSAR技术。PS-InSAR是一种基于点目标的算法，能长时间保持稳定散射的点被称为永久性散射体（PS）[5]，该方法通过研究覆盖同一地区的多景雷达干涉影像PS点的相位变化，提取时间序列上的地表形变信息[11]。其核心思想是：从$N+1$幅影像中选取一景为主影像，并与剩余的辅影像进行配准和干涉处理，获得N幅干涉影像对，差分干涉相位可表示为[12]：

$$\phi_{i,j}=\phi_{\text{def}}+\phi_{\text{DEM}}+\phi_{\text{orbit}}+\phi_{\text{atm}}+\phi_{\text{noise}} \tag{1}$$

式中，$\phi_{i,j}$为差分干涉相位；ϕ_{def}为形变相位；ϕ_{DEM}为地形起伏造成的相位差；ϕ_{atm}为大气延迟产生的相位差；ϕ_{noise}为噪声引起的相位。通常情况下，平地、几何和地形相位可以通过精密轨道数据和DEM去除[13]。

1.2.2 PS-InSAR技术实现

1）依据时间基线、空间基线以及多普勒质心频率最小原则，从不同时段Sentinel-1A影像中，选取时间和空间基线居中的一景为主影像，剩余为辅影像。

2）以主影像为基准，对辅影像进行配准及重采样，配准精度应优于0.5个像元，计算配准多项式的同名点应在整景影像上均匀分布。

3）用昆明市DEM去除地形相位，精密轨道数据去除平地效应[5]，得到差分干涉图。

4）常用的PS点选取方法有相干系数阈值法、振幅离差阈值法和相位离差阈值法[14]。本文采用振幅离差指数法，识别区域内的稳定散射目标，再通过Delaunay三角网法建立PS网络。

5）利用邻近PS点的相位差分关系，采用区域网最小二乘平差法计算PS网格中每条基线的线性形变速率增量和高程误差，然后利用时间域的高通滤波和时空域的低通滤波分离残余DEM误差和大气延迟干扰[15]，利用自适应滤波去除随机噪声相位[16]。

6）利用线性形变和高程误差模型分析PS点雷达视线向(line of sight, LOS）形变速率，再将形变速率内插到整个区域，最后利用公式$d_v=d_{\text{LOS}}/\cos\theta$将LOS形变量转换为垂直向形变速率$d_v$[17]。

7）地理编码是一个建立给定地址与实际地理位置坐标一致性的过程，将SAR数据从斜距坐标系转到地理坐标系，即可用于制图或空间分析[18]。

1.2.3 形变数据统计分析

当自变量存在空间自相关关系，GWR模型可以直接模拟某些不平稳的数据，实现用局部参数估计[19]。为了直观反映地面沉降的空间分布趋势，使用

GWR模型对监测结果进行空间插值，得到整个研究区的地面沉降空间分布图。

2　结果分析

2.1　地铁运营前研究区沉降特征分析

本研究以昆明市地铁4号线为中心线，设置2 km缓冲区来评估建设地铁对路面沉降的影响。由地铁运营前LOS向沉降情况（图1）可得，研究区每月最大沉降量达28 mm，每月最大抬升量为24 mm，大部分区域的月沉降量集中在3~6 mm之间，说明在没有强烈人为干扰的情况下，4号线地表沉降相对稳定，仅局部有沉降区和抬升区，其中玉缘路站和广卫站为沉降集中区；大树营站到和甸营站为抬升集中区。

2.2　地铁运营后研究区沉降特征分析

4号线地铁运营后，研究区内的LOS向沉降和抬升情况加剧（图2），每月最大沉降量达39 mm，最大抬升量达33 mm，绝大多数分散形变抬升点的变化量为6~8 mm。区域内新增沉降区一个、抬升区2个。以牛头山站和联大街站中部为起点，到昆明南火车站为新增沉降区，羊甫头和玉缘路站的地面沉降速率增大了20 mm/a。原有的玉缘路站到广卫站的沉降区沉降更为明显，最大沉降点沉降量由每月28 mm变为每月38 mm，并且逐渐向地铁主干道靠近，最大抬升点每月抬升量由24 mm变为33 mm。大河梗站到海屯路站、斗南站到梅子村站的地铁主干道的西南区域，形成新抬升区，大树营站到和甸营站的抬升集中区也向地铁主干线靠近。整体上看，绝大部分地表的沉降情况不再像地铁运营前一样均匀分布，而是形成了不同的沉降区和抬升区，其余地区形成分散抬升点包围沉降区、分散沉降点包围抬升区的环绕型分布特征。

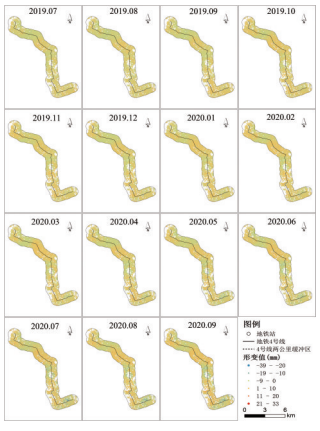


图1　昆明地铁4号线运营前单月沉降量

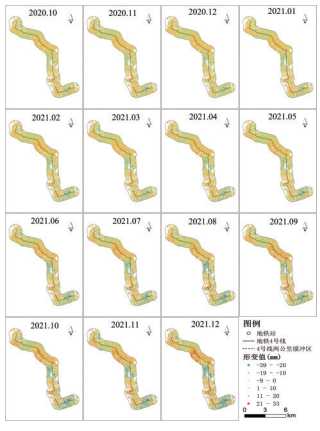


图2　昆明地铁4号线运营后单月沉降量

2.3　地铁运营前后对比分析

对PS-InSAR得到的地表沉降结果进行地理加权（图3、4），可以看出很多地表稳定的区域在地铁修建后形变程度加剧，形成地表沉降或抬升集中区。4号线运营后，研究区地表抬升速率由53 mm/a提升到85 mm/a，沉降速率由74 mm/a提升到137 mm/a；年累计沉降值约为运营前的两倍，最大累计沉降值由运营前的92 mm变为171 mm，最大累计抬升量由53 mm变为85 mm。对地铁运营前后单月形变值进行统计（图5），可得地铁运营后单月地表形变量增大，形变速率加快，沉降值和抬升量均显著增加。

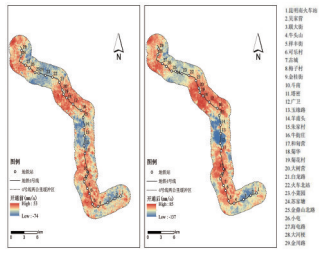


图3　地铁4号线运营前后形变速率对比

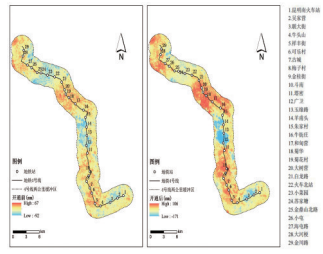


图4　地铁4号线运营前后累计沉降值对比

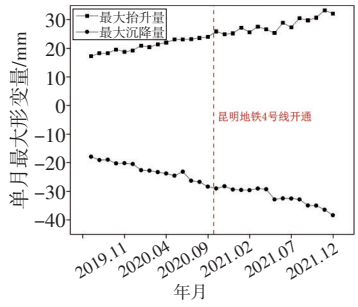


图5　单月最大形变量曲线

地铁施工过程需要深基坑开挖，土体开挖造成的土体移动、深基坑维护结构变形以及地下结构整体下沉均会导致地面沉降[2]。除了地质因素，城市建设和交通流量荷载也会引发地面沉降。在官渡区，朱家村至杨甫头左侧及玉缘路至广卫村形成椭圆形沉降区，呈南北走向且沉降最为严重，周围的晓东村、子君村、雨龙村等都有不同程度的沉降。新螺蛳湾扩建改造完成，使常住人口增加，建筑用地不断扩大，地下水开采增加，加之该区域主要是软土土层，高层建筑加压使软土的水被挤出，土层被压紧实，随着水位降低，更多的土层参与了固结压缩，大大增加了地表载荷，导致沉降速率加快[20]。在呈贡区，联大街至昆明南火车站形成西南-东北走向的沉降面，该区包括众多产业园区及居民区，近几年来，以信息产业园区为核心的呈贡区飞速发展，基础设施建设成为该地区地面沉降的主要原因之一。此外，南火车站附近车流量大，在地

面频繁负载、交通荷载增加的长期作用下，软土地基上的路面和轨道产生不均匀沉降。由于本身地表地质稳定性存在差异，4号线沿线西南部地区更不稳定，更容易受到人为建设因素干扰而导致沉降或抬升。

2.4 结果验证

由于水准测量数据具有保密性，无法采用同期水准测量数据进行结果验证。因此，本文首先采用同期升轨数据的VV极化方式和VH极化方式进行对比验证，选取同名点进行趋势分析，发现2种极化方式下的同名点具有相同的形变趋势，VV极化方式的形变相较于VH极化方式更为显著。此外，本文与相关文献资料进行对比分析，发现与已有文献结果具有相同变化趋势，李洋洋[21]等研究发现羊甫头–玉缘路附近地表形变趋势为沉降，地铁运营后沉降速率增大。

3 结 论

本研究基于昆明地铁4号线建设前后30个月的30景Sentinel–1A数据，利用PS–InSAR技术开展地铁4号线地表形变动态监测研究，通过对沉降量统计对比，确定了4号线运营前后地表形变点的位置、范围、速率以及形变严重程度，并分析了沉降原因，得出结论：地面沉降与地铁建设有关，地铁施工过程中的土体开挖以及相应的地下结构工程措施均会导致地面沉降。城市区域中频繁开展的线状地下工程建设通常需要穿越居民区域和重要构筑物等高价值的地面目标，必然会对地面造成扰动，造成地表形变。除地质因素外，沉降还受城市建设的影响，各种产业园区和大型建筑物的建设，使得周围常住人口增加，地下水开采随之增加，软土土层固结压缩，地表载荷增大，导致沉降速率加快。此外，交通流量增大、地面频繁负载亦会使路面和轨道产生不均匀沉降。

参考文献

[1] 葛鹏飞，刘辉，陈蜜，等. 时序InSAR监测京雄城际铁路河北段地面沉降[J]. 测绘通报，2022(7):64-70

[2] 麻源源，陈云波，左小清，等. Sentinel-1A数据及短基线集的昆明地面沉降分析[J]. 测绘科学，2019，44(11):59-66，95

[3] 李红慧，侯占东，李书建. 基于时序InSAR的常州市地面沉降时空演变规律及成因分析[J]. 大地测量与地球动力学，2022，42(1):54-58，87

[4] 黄静，王芳，张运. 基于PSI技术的芜湖市地面沉降时空特征分析[J]. 遥感技术与应用，2019，34(4):829-838

[5] 张荐铭，甘淑，袁希平，等. PS-InSAR技术的昆明地表沉降特征提取与分析[J]. 测绘科学，2019，44(1):53-59，89

[6] 周吕，李佳豪，王成，等. 基于时序InSAR的上海地区2018－2020地铁沿线沉降监测分析[J]. 大地测量与地球动力学，2021，41(11):1 177-1 182

[7] 刘凯斯，宫辉力，陈蓓蓓. 基于地面沉降监测的地铁运营危险性评价:以北京地铁6号线为例[J]. 地理与地理信息科学，2018，34(3):68-73

[8] 叶勇超，闫超德，罗先学，等. 时序InSAR郑州地铁沿线地面沉降分析[J]. 遥感学报，2022，26(7):1 342-1 353

[9] 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)，2020，49(9):1 356-1 366

[10] Ferretti A，Prati C，Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2000，38(5):2 202-2 212

[11] Ferretti C，Prat F，Rocca. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2001，39(1):8-20

[12] 李佳豪，周吕，马俊，等. 利用PS-InSAR技术进行城市地铁沿线形变监测与机理分析[J]. 测绘通报，2022(4):20-25

[13] Costantini M. Falco S，Malvarosa F，et al. Persistent Scatterer Pair Interferometry:Approach Andapplication to Cosmo Sky Med SAR Data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing，2014，7(7):2 869-2 879

[14] 韩守富，赵宝强，殷宗敏，等. 基于PS InSAR技术的黄土高原地质灾害隐患识别[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2020，63(1):1-7

[15] 卢欣奇，李学峰，张勤斌，等. 基于PS-InSAR技术的老采空区地表沉陷监测与分析[J]. 中国矿业，2019，28(4):104-110，114

[16] 王新田，狄桂栓. 基于PS-InSAR的聊城东部地表沉降监测与分析[J]. 测绘通报，2019(增刊):149-153

[17] 曹淑敏，肖恭伟，辛锴. 基于PS-InSAR和SBAS-InSAR技术的北京地区地面沉降对比分析[J]. 测绘与空间地理信息，2016，38(10):40-42

[18] 王琪. 基于城市资源信息共享交换的地理编码库建设:以太原市为例[J]. 测绘通报，2016 (6):98-100

[19] 张金芝，黄海军，刘艳霞，等 基于PSInSAR技术的现代黄河三角洲地面沉降监测与分析[J]. 地理科学，2013，33(7):831-836

[20] 郭世鹏，张王菲，康伟，等. 融合PS、SBAS、DS InSAR技术的昆明地面沉降研究[J]. 遥感技术与应用，2022，37(2):460-473

[21] 李洋洋，左小清，肖波，等. 利用InSAR和网络模型的昆明地铁沿线形变预测[J]. 测绘科学，2023，48(1):100- 109