

时序 InSAR 郑州地铁沿线地面沉降分析

叶勇超¹, 闫超德^{1,2}, 罗先学³, 张瑞峰¹, 袁观杰¹

1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 郑州 450001;

2. 郑州大学 黄河生态保护与区域协调发展研究院, 郑州 450001;

3. 郑州市规划勘测设计研究院, 郑州 450052

摘要: 针对郑州市地铁网络缺少长时间序列的地面沉降研究, 本文基于永久散射体合成孔径雷达干涉测量 PS-InSAR (Persistent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术生成的长周期地面沉降数据分析了郑州市地铁沿线地面沉降的时空特征, 并通过反距离内插等距化处理, 基于长短期记忆网络 LSTM (Long Short-Term Memory) 模型对典型地铁站点地面沉降进行了预测与分析。研究结果表明: 空间上, 沉降路段主要集中在 1 号线和 5 号线的东段, 最大沉降速率超过 20 mm/a, 且 1 号线沿线不均匀形变较为突出; 时间上, 不同区域 PS 点在时间序列上的变化有较大不同, 沉降槽中心处沉降呈逐年扩大趋势。实验表明 LSTM 模型具有较高的预测精度, 预测发现 1 号线市体育中心站南边河南省档案馆新馆北侧未来两年里仍将以大约 0.5 mm/月的速率继续沉降, 有必要对该站及其附近继续监测。

关键词: 郑州地铁, 地面沉降, PS-InSAR, LSTM, 预测分析

引用格式: 叶勇超, 闫超德, 罗先学, 张瑞峰, 袁观杰. 2022. 时序 InSAR 郑州地铁沿线地面沉降分析. 遥感学报, 26(7): 1342-1353
Ye Y C, Yan C D, Luo X X, Zhang R F and Yuan G J. 2022. Analysis of ground subsidence along Zhengzhou metro based on time series InSAR. National Remote Sensing Bulletin, 26(7): 1342-1353[DOI: 10.11834/jrs.20211246]

1 引言

郑州作为新兴的国家中心城市、重要的国家综合交通枢纽, 近年来经济发展迅速, 城市规模不断扩大, 道路交通面临着巨大压力, 地铁建设成为推动城市发展的重要手段。然而, 郑州地处伏牛山脉东北翼向黄淮平原过渡的交接地带(王义梅等, 2019), 脆弱的水文地质条件导致地铁在修建与运营过程中地面沉降等地质灾害的发生(秦晓琼等, 2016; 白书建, 2017), 监测和分析郑州地铁沿线地面沉降成为地铁安全运营的重要保障。

以永久散射体干涉测量(Ferretti等, 2000, 2001)为代表的时序 InSAR 技术具有获取成本低、覆盖范围广、监测周期长等优点(林琿等, 2017; Wu等, 2020), 克服了传统地面沉降监测方式的不足, 为地铁沿线地面沉降监测提供了强有力的

工具。Perissin等(2012)基于 PS-InSAR 技术, 研究了上海地铁沿线地面沉降; 祝秀星等(2018)采用时序 InSAR 技术分析了北京地铁网络沿线地面沉降时空演变规律。刘琦等(2019)基于改进的 PS-InSAR 技术探讨了佛山地铁沿线沉降的空间分布特征, 并利用 logistic 模型重点分析了地铁沿线地面沉降在时间上的变化特征。前期研究表明基于时序 InSAR 技术监测城市地铁沉降是可行的。但是由于水文、地质以及地铁修建方式等的差别, 不同城市地铁沿线地面沉降特点有所不同。目前缺少对郑州市地铁网络地面沉降的系统研究, 对郑州市地铁沿线地面沉降规律认识不足。

对于地铁沿线地面沉降更要防患于未然, 某些地铁路段存在继续沉降的可能, 因此需要对典型地铁站点附近地面沉降进行预测与分析, 为提前发现地面沉降安全隐患, 保障地铁安全运营提供技术支撑。智能算法, 作为一种高效的仿生算

收稿日期: 2021-04-29; 预印本: 2021-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41671455); 中国工程院重大咨询研究项目(编号:2021-149-1)

第一作者简介: 叶勇超, 研究方向为地理空间分析。E-mail: 769420720@qq.com

通信作者简介: 闫超德, 研究方向为地理空间分析。E-mail: ycd@zzu.edu.cn

法, 在沉降预测中, 其不受研究区水文地质等复杂物理参数获取的限制, 同时具有非常高的计算效率和预测精度, 近些年来在沉降预测研究领域得到了广泛应用(范泽琳和张永红, 2019)。李红霞等(2009)通过遗传算法优化BP神经网络的初始权重, 建立了地面沉降预测模型; 王述红和朱宝强(2021)将灰狼优化算法和在线贯序极限学习机模型相结合, 提出了一种洞口段地表沉降动态预测方法; 郗刘涛(2020)采用长短期记忆网络LSTM(Long Short-Term Memory)对覆岩变形监测数据进行了预测。上述研究仍然与传统监测方法相结合, 无法对观测点密度较大的大样本地面沉降进行预测。

针对上述问题, 本文基于PS-InSAR技术, 获取了郑州市长时间序列的地表形变信息; 在此基础上, 利用统计分析、剖面分析、叠置分析等方法对郑州市地铁沿线地面沉降时空特征进行了系统分析, 并基于等距化以后的地面沉降时序数据, 利用LSTM构建多点地面沉降预测模型对典型地铁站点附近的地面沉降进行了预测与分析。

2 研究区及数据处理情况

2.1 研究区及地铁线路概况

郑州市位于中国华北平原南部、黄河下游、河南省中部偏北, 介于 $34^{\circ}16'N-34^{\circ}58'N$, $112^{\circ}42'E-114^{\circ}14'E$ 。郑州市处于中国第二级地貌台阶与第三级地貌台阶的交接过渡地带, 总体地势为西南高、东北低, 呈阶梯状下降。地层主要由第四系松散状粉土、粉质黏土和砂砾石层组成。

截至到2019年5月, 郑州地铁运营线路共有4条, 分别为1、2、5号线和城郊线, 运营线路总长136.1 km。郑州市地铁仍在不断扩建中, 至2024年, 郑州市将形成总长约326.54 km的轨道交通网络, 郑州市地铁修建时间如表1所示。

2.2 数据源

主要数据包括35景2005年2月5日—2010年10月2日Envisat ASAR降轨影像, 极化方式“VV”, 距离向×方位向分辨率为 $9\text{ m}\times 6\text{ m}$, 以及44景2015年7月16日—2019年5月20日Sentinel-1A升轨影像, 极化方式“VV”, 距离向×方位向分辨率为 $5\text{ m}\times 20\text{ m}$ 。辅助数据包括30 m分辨率SRTM DEM及精密轨道

文件。地铁站点及线路数据是从百度地图上经坐标转换以及矢量化得到。

表1 郑州地铁修建时间表

Table 1 Construction schedule of Zhengzhou metro

地铁线路		起止日期
1号线	I	2009-06-06—2013-12-28
	II	2014-08-24—2017-01-12
2号线	I	2010-12-28—2016-08-19
	II	2016-12-21—2019-12-28
城郊线		2014-03-28—2017-01-12
5号线		2014-09-30—2019-05-20
14号线	I	2017-01-15—2019-09-19
4号线		2015-10-31—2020-12-26
3号线	I	2016-12-15—2020-12-26
10号线		2017-07-21—
6号线		2017-12-26—
17号线		2017-12-26—
12号线	I	2020-03-10—
8号线	I	2020-05-01—
7号线	I	2020-06-15—

2.3 数据处理

PS-InSAR处理流程如图1所示, 主要包括主影像选取、干涉、PS反演等步骤。

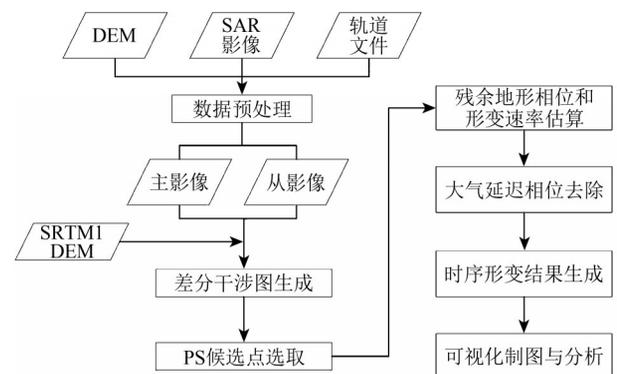


图1 PS-InSAR技术处理流程

Fig. 1 PS-InSAR processing workflow

(1) 数据预处理: 将原始SAR影像进行数据导入、镶嵌以及裁剪等操作后, 得到研究区SLC数据。

(2) 主影像选取: 综合考虑时空基线距及多普勒质心频率差的影响, ASAR数据选取2009年1月10日的影像作为主影像, Sentinel-1数据选取2017年9月3日的影像作为主影像。

(3) 干涉处理: 结合外部DEM, 将从影像与主影像进行配准, 并进行干涉处理, 生成差分干涉图。

(4) PS点选取: 结合振幅离差阈值法和相干系数阈值法进行PS点选取。

(5) PS反演: 利用线性模型进行残余高程信息和形变速率的估算。由于大气相位在时间上低相关、在空间上高相关, 因此利用时间域上的高通滤波(365 d)和空间域上的低通滤波(1200 m)分离出非线性形变相位。将其和线性形变相位叠加获得最终沿视线向的形变时序结果。

(6) 地理编码: 将所有PS相关结果转换到地理坐标系下, 主要包括PS点矢量文件、年均形变

速率图以及每期形变量图等(ASAR结果空间分辨率约为25 m、Sentinel-1A结果空间分辨率约为20 m)。

2.4 PS-InSAR 监测结果及验证

基于PS-InSAR技术, 获取了研究区2005年2月—2010年10月以及2015年7月—2019年5月年均形变速率, 如图2所示。2005年—2010年, 地面沉降主要集中在郑州市的北部, 最大沉降速率为67 mm/a。2015年—2019年, 地面沉降主要集中在郑州市的东部以及北部, 最大沉降速率超过30 mm/a。相比于2005年—2010年, 2015年—2019年郑州市地面沉降有所减缓, 且中心城区有明显的抬升现象。

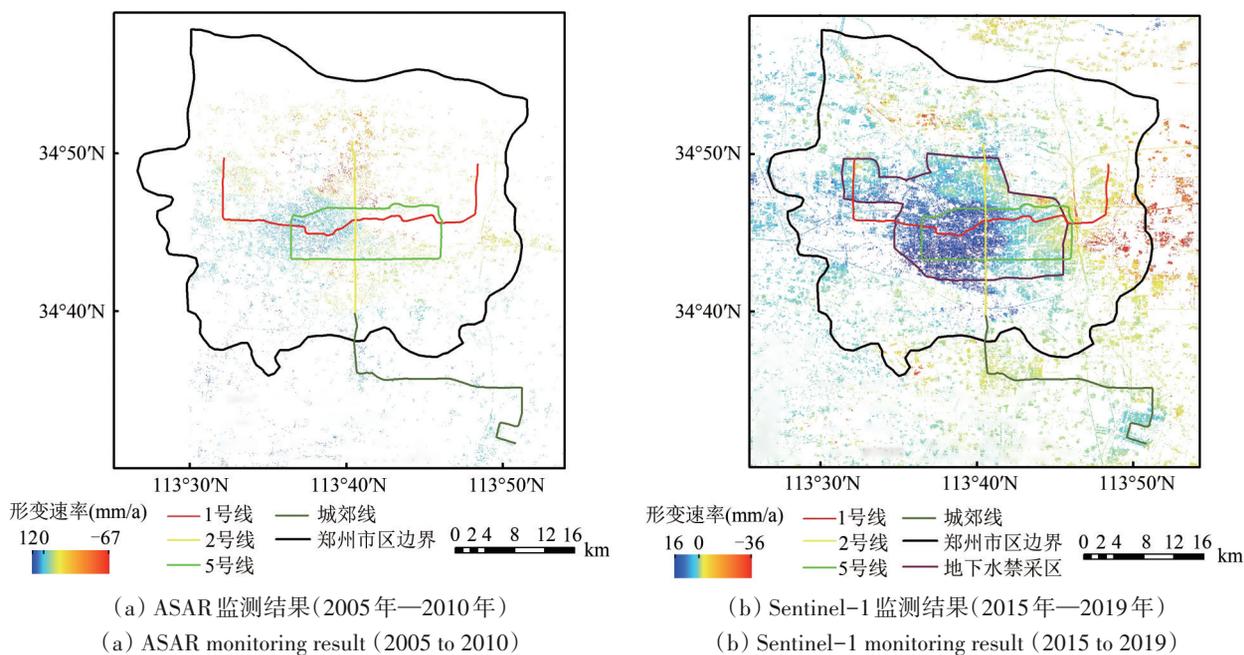


图2 研究区年均形变速率图

Fig. 2 Annual average deformation rate of the study area

采用水准数据、与其他研究成果对比以及实地走访调查的方式验证PS-InSAR结果的准确性。水准数据为郑大科技园站C口断面沉降监测数据, 水准数据监测结果显示, 2016年3月13日—2016年4月8日该区域平均沉降量为3.66 mm, 平均沉降速率0.14 mm/d, PS-InSAR监测结果显示, 与该断面最邻近像素2016年3月12日至2016年4月29日的垂直向沉降量为5.25 mm, 平均沉降速率0.11 mm/d, 二者较为一致。其他研究成果包括管力等(2019)、

汪宝存等(2020)以及张介山和刘凯(2021)对郑州市地面沉降的研究, 验证方式包括对比主要沉降区分布以及典型区域的形变速率大小。经对比发现, 本研究得到的结果与其他研究成果基本一致, 例如在沙门地铁站附近形变速率差值仅为2 mm/a。最后对地铁沿线地面沉降严重的区域进行实地走访调查, 在龙子湖地铁站、沙门地铁站附近发现了明显的地裂缝, 如图3所示。上述验证在一定程度上反映了PS-InSAR结果的准确性。



(a) 龙子湖 (a) Longzihu (b) 沙门 (b) Shamen

图3 地铁站点附近地裂缝

Fig. 3 Ground fissures near metro stations

3 地铁沿线地面沉降时空特征分析

3.1 地铁沿线地面沉降空间特征分析

3.1.1 地铁沿线主要沉降区域

ASAR数据得到的PS点数据相对稀疏，例如在1号线燕庄站—河南大学新区站、5号线金水东路站—省骨科医院站以及城郊线等路段很难得

到有效的形变数据（出现这种变化的原因主要是2005年这些区域城市建设还未起步，周围仍分布大量农田，导致这些区域相干性差，形成的PS点的数量少），且由于郑州地铁多修建于2010年之后，因此主要以Sentinel-1监测结果来分析地铁沿线地面沉降。

根据收集到的地铁线路信息，以线路为中心建立600 m缓冲区，提取缓冲区范围内PS点目标，得到郑州地铁沿线整体的形变速率分布格局，如图4所示，郑州地铁沿线整体表现出不同程度的形变。

当地铁沿线地面沉降值大于安全警戒值后会危及周围建筑物、市政道路及地下管线等。参照《地质灾害危险性评估规范》制定地铁沿线地面沉降危险性分级指标，如表2所示，下面结合每条线路进行具体分析。

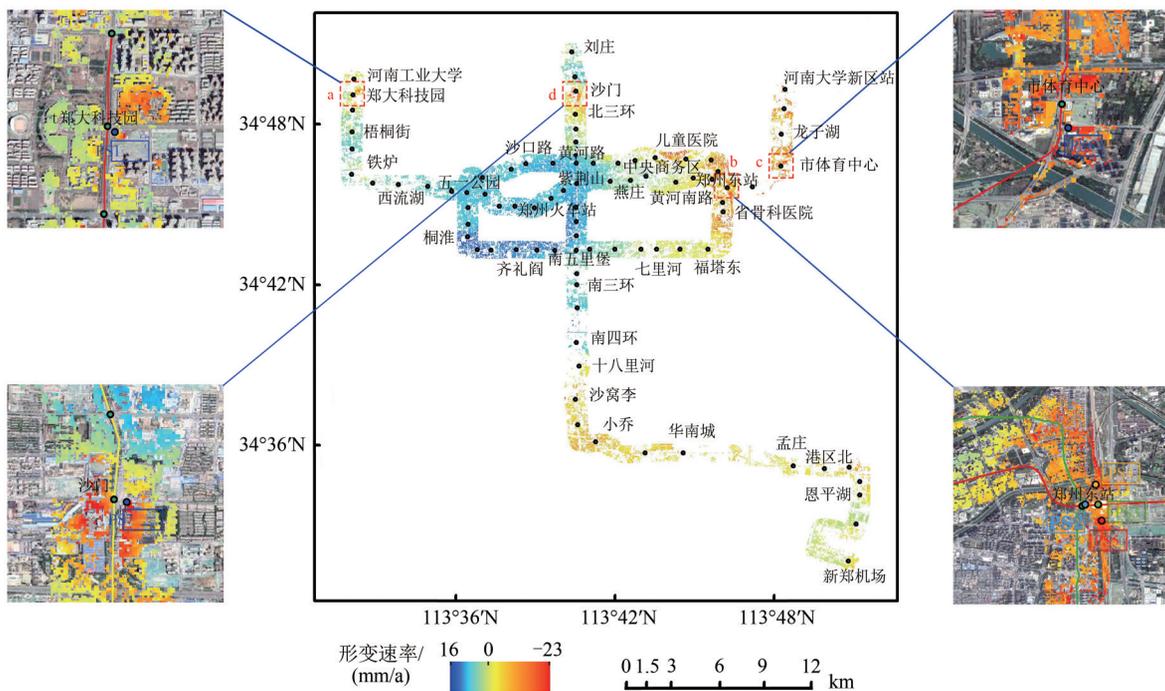


图4 郑州市地铁沿线600 m范围内形变速率图

Fig. 4 Deformation rate within 600 m along Zhengzhou metro

表2 地铁沿线地面沉降危险性评价

Table 2 Risk assessment of ground subsidence along metro

编号	危险性分区	沉降速率/(mm/a)
I	轻微区	≤10
II	中等区	10—30
III	严重区	≥30

1号线沿线地表形变空间变化特征可以分为3段来分析。第一段为河南工业大学站至西流湖站，该路段总体来说较为稳定。沉降集中在郑大科技园东侧的盛和苑附近，最大沉降速率达12 mm/a，属于危险性中等区；第二段为西流湖站至黄河南路站，该路段有明显的抬升现象，分析出现这种

变化的原因主要与地下水限采禁采的相关政策的实施有关, 2015年河南省政府下发了《关于公布全省地下水禁采区和限采区范围的通知》(豫政[2015] 1号), 划定了郑州市地下水禁采区范围, 其边界如图2(b)所示, 可以发现禁采区范围内大部分地区形变速率为正, 即处于地面抬升状态; 第三段为黄河南路站至河南大学新区站, 大部分路段区间属于危险性轻微区, 在市体育中心站东南侧的河南省档案馆新馆附近出现较严重的沉降, 最大沉降速率达20 mm/a。

2号线沿线地面沉降集中分布在沙门地铁站附近, 最大沉降速率达11 mm/a, 属于危险性中等区。根据ASAR监测结果, 该区域2005年—2010年最大沉降速率达47 mm/a, 累积沉降量超过200 mm, 说明在地铁修建之前, 该区域就已存在严重的地面沉降现象。根据郑州市城中村演变情况(刘梦珂, 2014; 汪宝存等, 2020), 发现2005年—2010年该区域存在大规模的城中村, 生活用水主要由地下水补给, 严重的地下水开采导致该区域成为郑州市地面沉降最为严重的地区之一。

5号线沿线地表形变呈现明显的东西两侧分化态势。如果连接黄河路站与南五里堡站, 得到一条南北直线。可以发现, 地铁沿线地面沉降集中分布在该线东侧, 其中在中央商务区站至儿童医院站北侧、郑州东站以及省骨科医院站附近等区域沉降较为严重, 属于危险性中等区, 最大年均沉降速率达17 mm/a。

城郊线一期沿线基本保持稳定。其中十八里河站至港区北站(建设中)路段采用高架设计, 是郑州已建成地铁网中唯一运行在地上的路段, 该路段出现小幅沉降, 形变速率集中分布在-4—0 mm/a, 属于危险性轻微区。

经上分析可以发现, 郑州市地铁沿线无地面沉降危险性严重区。危险性中等区主要分布在1、5号线的东部路段, 该区域地表土层主要由全新统冲积粉土、粉质黏土、含淤泥质的粉土组成, 属于中软土类型, 且浅层地下水位埋深较浅, 基坑建设和盾构施工需大量抽排地下水以及造成土壤固结压缩, 导致这些路段出现了比较严重的地面沉降现象。

3.1.2 1号线沿线不均匀沉降分析

为了在剖面上获得连续的形变数据, 对缓冲

区范围内的PS点数据进行克里金插值处理, 插值结果及剖面分布如图5所示。以地铁1号线线路为纵剖面线, 方向以河南工业大学站为起点至终点河南大学新区站, 得到地铁1号线沿线沉降速率剖面图, 如图6所示。整条线路的沉降速率波动明显, 整体形变趋势类似一条抛物线, 即中间路段有明显的抬升现象, 沉降集中在线路的两端, 在市体育中心站附近沉降速率达到峰值, 沉降速率达8 mm/a。在河南工业大学站至郑大科技园站、铁炉站至市民中心站、博学路站至市体育中心站等路段区间, 形成多个形变槽, 呈现明显的陡坡, 形变速率变化极快, 不均匀形变突出。这些路段区间我们应该尤为注意, 因为在地铁高速运行的情况下, 轨道的竖向变形会增加地铁车辆的振动幅度, 连续长时间的振动也会产生大量的噪声(贾煦等, 2014; 段光耀等, 2017)。且如果任由不均匀地面沉降长期快速的发展下去, 不均匀沉降的积累势必突破地铁交通工程的变形安全限值, 引起破坏, 威胁地铁安全运营(姜德才等, 2017)。

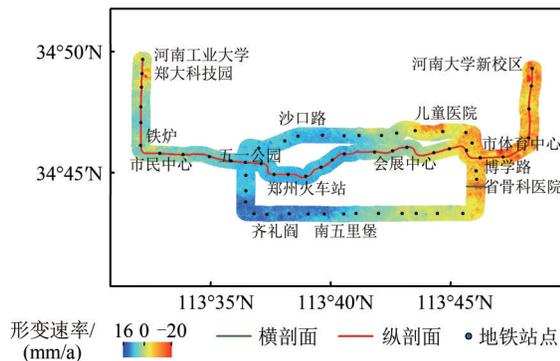


图5 克里金插值结果及剖面分布

Fig. 5 Kriging interpolation result and sections distribution

3.2 地铁沿线地面沉降时间特征分析

3.2.1 典型区域PS点时序特征分析

选取各条线路上沉降严重区域的PS点进行时间序列分析, 结果如图7所示。总体来看, 不同位置PS点的历史形变曲线有较大不同。

PS1位于郑大科技园站A口附近, 在监测时间段内, 其年均形变速率为-3.5 mm/a, 形变历史大致可以划分为3个时间段。2015年7月—2015年9月该点先急剧沉降后猛烈抬升, 形变差达22 mm, 根据地铁施工信息(刘浩然, 2016), 这段时间正是郑

大科技园站—郑州大学站左线路段盾构施工阶段，对周围环境影响较大；2015年9月—2016年12月，这段时间内该点有明显的下降趋势，累积沉降量

为25 mm；截止到2016年底，该点附近施工已基本完成，从2017年1月至监测结束，该点在波动中呈下降趋势，但较上一时段下降趋势有所变缓。

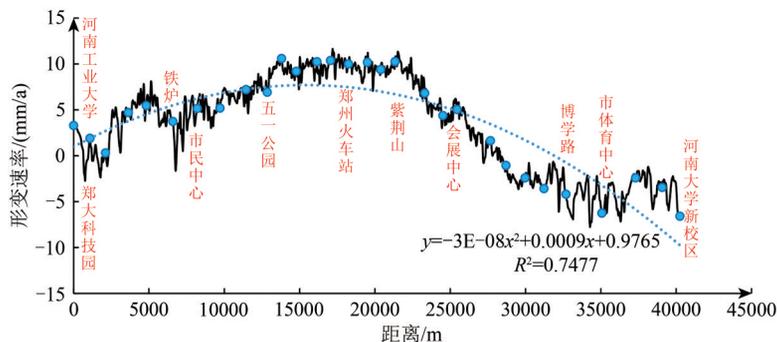


图6 地铁1号线沿线形变速率剖面图

Fig. 6 Section map of deformation rate along metro line 1

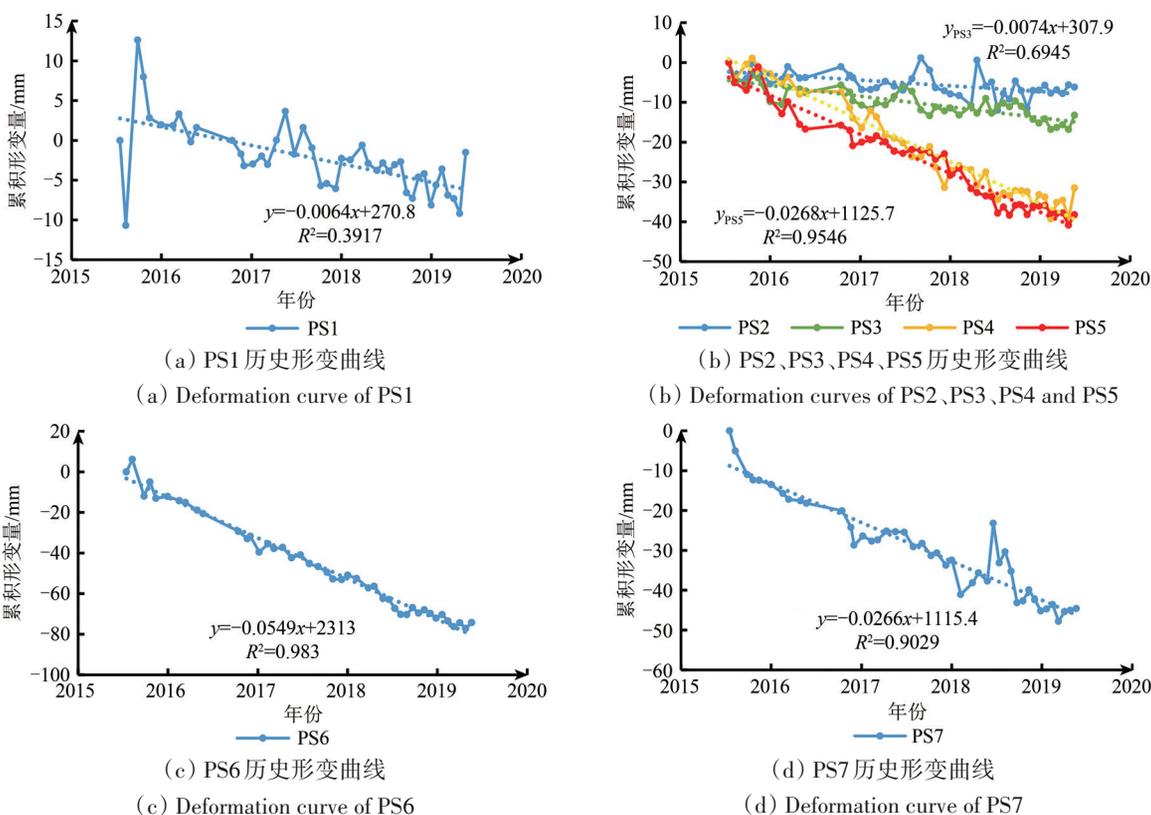


图7 地铁沿线典型区域PS点历史形变曲线

Fig. 7 Historical deformation curves of PS points in typical areas along metro

PS2、PS3、PS4、PS5分别位于郑州东站地铁站附近、高铁站建筑物上以及高铁站南北两侧的铁路轨道上。总体来看，4个PS点都具有一定的沉降趋势，沉降趋势地铁站<高铁站<铁路轨道。需要注意的是铁路轨道具有较大的沉降量，累积沉降量超过40 mm，易与车站间形成沉降差，威胁高铁运营安全。

PS6位于市体育中心站的东南侧，该点是1号线沿线沉降量最大的点，累积沉降量约为75 mm，在监测时间段内，该区域正在建设河南省档案馆新馆，推断沉降主要是由建筑施工造成。

PS7位于沙门站东侧，2号线沿线地面沉降主要集中在该区域。该点沉降趋势明显，其中2015年7月—2015年10月沉降较大，累积沉降量超过

12 mm。但在2018年2月—2018年6月有抬升趋势。虽然2号线在2016年已经开通运营，但在监测时间段内，4号线和国基路在该区域处于施工状态，推断该点在时间序列上的形变特征是多处施工共同作用的结果。

3.2.2 沉降槽在时间序列上的变化

选择位于5号线省骨科医院站附近的剖面来分析地铁修建对线路两侧的影响，在该区域选择剖面的原因是：(1) 该区域沉降较为严重，(2) 5号线的修建时间与 Sentinel-1A 数据覆盖时间基本重合。得到的结果如图8所示，线路两侧沉降影响范围基本对称，沉降槽半径大约为160 m。基于 InSAR 获取的沿线沉降与工程开挖模拟预计得到的结论基本相同（葛大庆等，2014；Wang等，2017）。2015年—2019年该剖面上的沉降呈现扩大趋势，中心处沉降量从2015年5 mm增加到2019年的61 mm。虽然与2016年5月相比，2017年1月的沉降量有所减小，但中心处的沉降并没有收敛的趋势。相关研究表明，地铁沿线地面沉降在地铁修建运营后3—5年会趋于稳定（刘琦等，2019），而郑州地铁5号线在2019年5月20日才开通运营，所以该区域存在继续沉降的可能，因此对该区域进行持续的地表形变监测是非常有必要的。

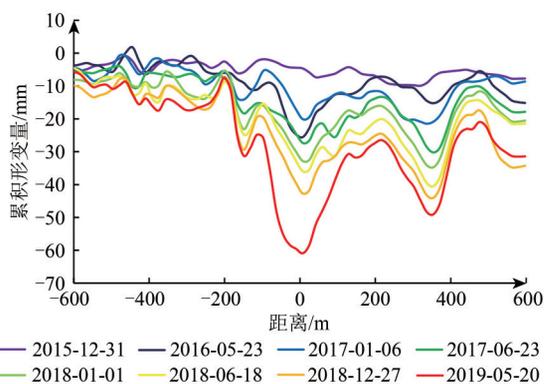


图8 沉降槽在时间上的变化

Fig. 8 The change of subsidence trough in time

4 典型站点地面沉降预测与分析

4.1 地面沉降数据等距化

由于系统原因，Sentinel-1A在2015年、2016年并没有严格按照规定的访问周期对研究区进行成像，部分影像缺失，导致影像数据的时间间隔并不完全一致。为了削弱时间上某些“异常值”对

整个形变趋势的影响且方便后面的沉降预测，本文基于反距离权重插值思想，提出了一种非等间距时序数据等距化处理的方法，具体算法步骤如下：

(1) 计算地面沉降时序数据的平均时间间隔

$$\Delta t = \frac{1}{n-1} (t_n - t_1) \quad (1)$$

(2) 计算等距处理以后的时间序列

$$t'_k = t_1 + z(k-1)\Delta t \quad (2)$$

式中， $k=1, 2, \dots, z$ 为缩放尺度，本实验中需要对时间间隔进行放大处理，所以取 z 为大于1的正整数。

(3) 计算重构以后等间距时间序列的值

$$d(t'_k) = w_{1k}d_{1k} + w_{2k}d_{2k} + \dots + w_{zk}d_{zk} \quad (3)$$

式中， $d_{1k}, d_{2k}, \dots, d_{zk}$ 为原始数据中距离 t'_k 最邻近的 z 个元素， $w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{zk}$ 为权重，与 t'_k 距离越近权重越大。其设置参考反距离加权法 IDW (Inverse Distance Weighted)，目的在于强化近期数据的作用，弱化远期数据的影响（王怀清和李三妹，2013）。

$$w_{ik} = \frac{h_{ik}^{-p}}{\sum_{j=1}^z h_{jk}^{-p}} \quad (4)$$

式中， p 是一个任意正实数，通常 $p=2$ ， h_{ik}, h_{jk} 为原始数据到新生成数据的时间间隔。

选取地铁1号线市体育中心站附近400条地面沉降数据，设置 $z=3$ 进行等距化处理，得到新序列的时间间隔为96 d，新数据集中每个PS点包括16期地面沉降数据。随机选择20个PS点绘制其等距化前后的历史形变曲线，得到的结果如图9所示。可以发现小范围区域内地面沉降趋势具有一定的相似性，等距化后的数据比原数据更加平滑，更能反映地面沉降在时间序列上的变化趋势。

4.2 基于LSTM的地面沉降预测模型结构设计

LSTM模型（Hochreiter和Schmidhuber，1997）具有很强的数据适应性，可以实现对观测点密度较大的大样本地面沉降进行预测。地面沉降预测问题可以表述为：根据前 t 个沉降观测值，对后面 n 个时间步后的沉降量进行预测。本文根据多次实验最终将LSTM神经网络的结构确定为4层，即一个输入层、两个隐藏层和一个输出层，如图10所示。在此基础上进行模型超参数的选择，参数的具体设置如表3所示。

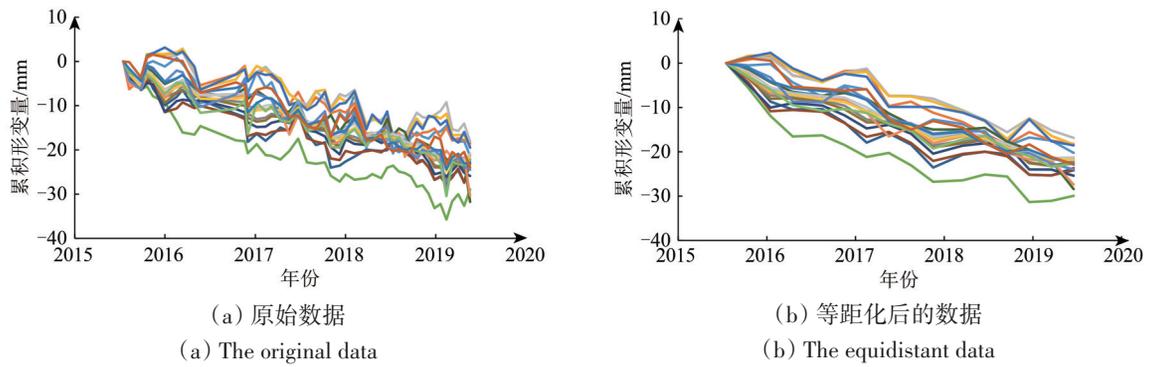


图9 地面沉降时序数据示例
Fig. 9 Examples of ground subsidence time series data

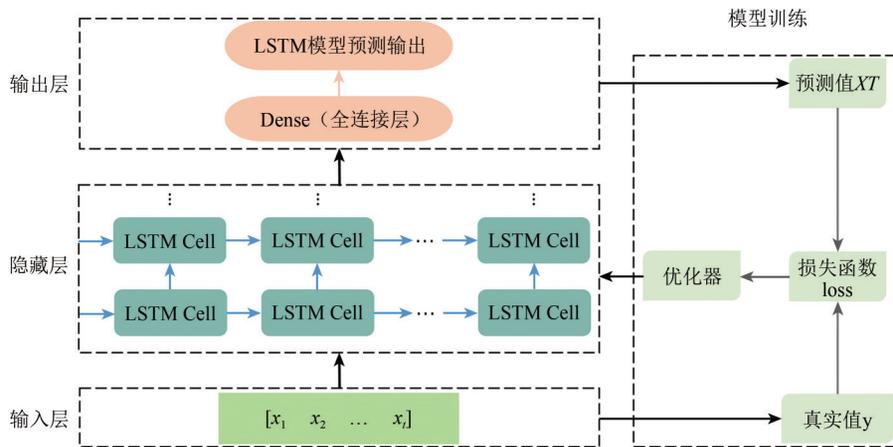


图10 地面沉降预测模型结构
Fig. 10 Structure of ground subsidence prediction model

表3 模型参数设置

Table 3 Model parameters setting

模型参数	参数设置
输入序列长度	4
输出序列长度	1
隐藏层层数	2
隐藏层神经元个数	16
迭代次数(epochs)	100
损失函数(loss)	MSE
激活函数(activation)	Tanh
优化器(optimizer)	Adam
批量大小(batch_size)	32
神经元失活比例(dropout)	0.2

4.3 地面沉降预测与对比分析

在等距化的数据集中选择350个PS点的前12期数据作为训练集，50个PS点作为测试集。在训练集中同时选取20%的数据作为验证集用来观察训练过程中该模型的泛化能力(郝刘涛, 2020)。训

练过程中模型的验证损失与训练损失如图11所示，随着迭代次数的不断增加，模型的验证损失和训练损失分别稳定在0.0085和0.0063左右，二者差值较小，表明模型具有较好的拟合和泛化能力。在未来缺少已知值的情况下，通过把预测值作为真实值不断地构造输入序列Test_X，进而实现对未来地面沉降的预测。

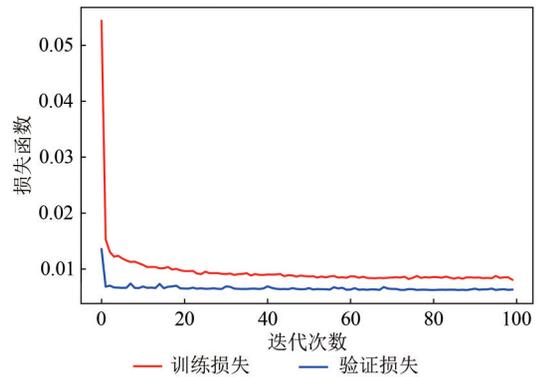


图11 训练过程中的训练损失与验证损失

Fig. 11 Training loss and verification loss in training process

选择A、B、C、D共4个点对市体育中心站附近地面沉降趋势进行分析，A、B、C、D共4个点的位置如图12所示，LSTM模型预测结果如图13所示。为了对比分析LSTM模型的预测精度，利用A、B、C、D共4个点建立多点灰色预测模型，灰色模型的预测结果如图14所示。选用均方根误差RMSE (Root Mean Square Error) 和平均绝对误差百分比MAPE (Mean Absolute Percent Error) 两个指标对A、B、C、D共4个点的整体拟合、预测精度进行评价，结果如表4所示。整体来看，LSTM模型的RMSE和MAPE普遍小于灰色模型的，证明LSTM模型的预测精度要优于灰色模型。



图12 A、B、C、D共4个点位置
Fig. 12 The location of A, B, C and D



图13 LSTM模型拟合及预测结果
Fig. 13 LSTM model fitting and prediction results

从图13中可以看出，D点在时间序列上具有较大的沉降，形变监测结果显示该点2015年—2019年累积沉降量约为75 mm。该点与河南省档案馆新馆建设项目临近，该工程于2016年6月1日

正式开工，与形变监测时间较为一致，推断该点沉降主要是由建筑施工造成。LSTM预测结果显示该点累积沉降量从2019年9月29日的76.04 mm增加到2021年8月1日的85.98 mm。虽然预测结果显示该点的沉降速率比原来有所减缓，但仍然以大约0.5 mm/月的速率在沉降，且该点距离地铁线路仅仅为60 m。所以有必要对该区域进行持续的地面沉降监测，并采取相应的措施，以保障地铁运营的安全。A、B、C共3个点与D点距离越远，累积沉降量越小。A点与D点相距大约150 m，距离地铁线路约为50 m。LSTM模型预测结果显示，2019年9月—2021年8月该点仅仅约以0.13 mm/月的速率在沉降，几乎可以忽略不计。

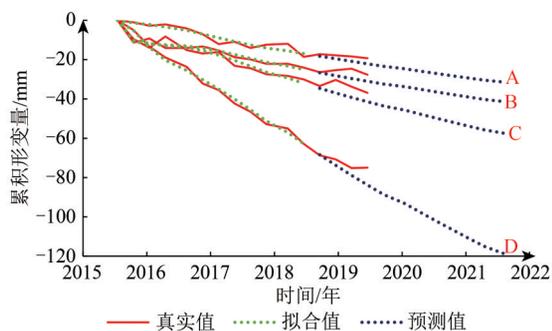


图14 灰色模型拟合及预测结果
Fig. 14 Gray model fitting and prediction results

表4 地面沉降预测模型精度对比

Table 4 Accuracy comparison of ground subsidence prediction models

点号	LSTM模型		灰色模型	
	RMSE	MAPE/%	RMSE	MAPE/%
A	2.22	15.31	1.82	17.61
B	1.54	6.61	1.95	7.88
C	2.27	8.69	2.99	11.73
D	2.49	4.54	2.79	4.13

5 结论

本文利用PS-InSAR监测技术，研究了长时间序列下郑州市地铁沿线地面沉降时空特征。并基于LSTM构建多点模型对典型站点附近地面沉降进行了预测与分析，研究结果表明：

(1) 空间上，郑州市地铁沿线无地面沉降危险性严重区，危险性中等区主要集中在1号线和5号线的东段，最大沉降速率超过20 mm/a，最大累积沉降量达80 mm。尤其是1号线沿线不均匀形变较为突出，整体形变趋势类似一条抛物线，在

河南工业大学站至郑大科技园站、铁炉站至市民中心站、博学路站至市体育中心站等路段区间, 形成多个形变槽。

(2) 时间上, 不同区域PS点在时间序列上的变化有较大不同, 5号线省骨科医院附近沉降槽中心处沉降呈逐年扩大趋势, 中心处沉降量从2015年5 mm增加到2019年的61 mm。

(3) 基于反距离权重插值后的数据更能反映地面沉降在时间序列上的变化趋势。经对比评价, LSTM模型比灰色模型具有更高的拟合预测精度, 四个点RMSE和MAPE分别低于2.5 mm和16%。LSTM模型预测结果显示, 1号线市体育中心站南边河南省档案馆新馆北侧未来两年里仍将以大约0.5 mm/月的速率继续沉降, 有必要对该区域进行持续的地面沉降监测。

后续研究会结合水准测量、GNSS等监测手段, 与时序InSAR技术在时空上形成互补, 并互相验证, 形成多角度的地铁沿线地面沉降监测体系。

志 谢 感谢欧洲空间局提供的ENVISAT ASAR数据、Sentinel-1A数据以及相应的精密轨道文件, 感谢郭晓帅师兄提供的水准测量监测数据。

参考文献(References)

Bai S J. 2017. Application of InSAR Technology in Deformation Monitoring Along Subway. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-2 (白书建. 2017. InSAR技术在地铁沿线形变监测中的应用研究. 北京: 中国地质大学(北京): 1-2)

Duan G Y, Liu H H, Gong H L and Chen B B. 2017. Evolution characteristics of uneven land subsidence along Beijing-Tianjin intercity railway. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(12): 1847-1853 (段光耀, 刘欢欢, 宫辉力, 陈蓓蓓. 2017. 京津城际铁路沿线不均匀地面沉降演化特征. *武汉大学学报(信息科学版)*, 42(12): 1847-1853) [DOI: 10.13203/j.whugis20150537]

Fan Z L and Zhang Y H. 2019. Research progress on intelligent algorithms based ground subsidence prediction. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 42(5): 183-188 (范泽琳, 张永红. 2019. 智能算法在地面沉降预测中的应用综述. *测绘与空间地理信息*, 42(5): 183-188) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2019.05.054]

Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212 [DOI: 10.1109/36.868878]

Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]

Ge D Q, Zhang L, Wang Y, Li M and Liu B. 2014. Monitoring subsidence on Shanghai metro line 10 during construction and operation using high-resolution InSAR. *Shanghai Land and Resources*, 35(4): 62-67 (葛大庆, 张玲, 王艳, 李曼, 刘斌. 2014. 上海地铁10号线建设与运营过程中地面沉降效应的高分辨率InSAR监测及分析. *上海国土资源*, 35(4): 62-67) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1329.2014.04.014]

Guan L, Tang W, Dai H Y and Jia Z H. 2019. Monitoring ground subsidence in Zhengzhou city based on SBAS-InSAR technology. *Beijing Surveying and Mapping*, 33(4): 462-467 (管力, 唐伟, 戴华阳, 贾智慧. 2019. 采用SBAS-InSAR技术监测郑州城区地面沉降. *北京测绘*, 33(4): 462-467) [DOI: 10.19580/j.cnki.1007-3000.2019.04.021]

Hochreiter S and Schmidhuber J. 1997. Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8): 1735-1780 [DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735]

Jia X, Gong H L, Chen B B and Duan G Y. 2014. Impact of uneven land subsidence on operation of Beijing subway line 15. *Remote Sensing Information*, 29(6): 58-63 (贾煦, 宫辉力, 陈蓓蓓, 段光耀. 2014. 不均匀地面沉降对北京地铁15号线运营的影响分析. *遥感信息*, 29(6): 58-63) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2014.06.012]

Jiang D C, Zhang Y H, Zhang J X, Wu H A and Kang Y H. 2017. Uneven land subsidence along Tianjin subway lines monitored by InSAR technology. *Remote Sensing Information*, 32(6): 27-32 (姜德才, 张永红, 张继贤, 吴宏安, 康永辉. 2017. 天津市地铁线不均匀地表沉降InSAR监测. *遥感信息*, 32(6): 27-32) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2017.06.005]

Li H X, Zhao X H, Chi H Y and Zhang J J. 2009. Prediction and analysis of land subsidence based on improved BP neural network model. *Journal of Tianjin University*, 42(1): 60-64 (李红霞, 赵新华, 迟海燕, 张建军. 2009. 基于改进BP神经网络模型的地面沉降预测及分析. *天津大学学报*, 42(1): 60-64) [DOI: 10.3969/j.issn.0493-2137.2009.01.010]

Lin H, Ma P F and Wang W X. 2017. Urban infrastructure health monitoring with spaceborne multi-temporal synthetic aperture radar interferometry. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1421-1433 (林珏, 马培峰, 王伟玺. 2017. 监测城市基础设施健康的星载MT-InSAR方法介绍. *测绘学报*, 46(10): 1421-1433) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170339]

Liu H R. 2016. Study on the Influence Applied to Surrounding Environment Induced by the Shield Construction of Zhengzhou Metro. Zhengzhou: Henan University of Technology: 28-45 (刘浩然. 2016. 郑州地铁一号线盾构施工对周边环境的影响研究. 郑州: 河南工业大学: 28-45)

Liu M K. 2014. The Research of Urban Village Reconstruction in

- Zhengzhou City. Wuhan: Central China Normal University: 11-28 (刘梦珂. 2014. 郑州市“城中村”问题研究. 武汉: 华中师范大学: 11-28)
- Liu Q, Yue G S, Ding X B, Yang K, Feng G C and Xiong Z Q. 2019. Temporal and spatial characteristics analysis of deformation along Foshan subway using time series InSAR. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 1099-1106 (刘琦, 岳国森, 丁孝兵, 杨坤, 冯光财, 熊志强. 2019. 佛山地铁沿线时序 InSAR 形变时空特征分析. 武汉大学学报(信息科学版), 44(7): 1099-1106) [DOI: 10.13203/j.whugis20190025]
- Perissin D, Wang Z Y and Lin H. 2012. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73: 58-67 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002]
- Qin X Q, Yang M S, Wang H M, Yang T L, Lin J X and Liao M S. 2016. Application of high-resolution PS-InSAR in deformation characteristics probe of urban rail transit. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(6): 713-721 (秦晓琼, 杨梦诗, 王寒梅, 杨天亮, 林金鑫, 廖明生. 2016. 高分辨率 PS-InSAR 在轨道交通形变特征探测中的应用. 测绘学报, 45(6): 713-721) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150440]
- Wang B C, Zhu L, Pan D, Guo L F and Peng P. 2020. Research on temporal and spatial evolution law of land subsidence in Zhengzhou. *Remote Sensing for Land and Resources*, 32(3): 143-148 (汪宝存, 朱琳, 潘登, 郭凌飞, 彭鹏. 2020. 郑州市地面沉降时空演变规律研究. 国土资源遥感, 32(3): 143-148) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2020.03.19]
- Wang H Q, Feng G C, Xu B, Yu Y P, Li Z W, Du Y N and Zhu J J. 2017. Deriving spatio-temporal development of ground subsidence due to subway construction and operation in delta regions with PS-InSAR data: a case study in Guangzhou, China. *Remote Sensing*, 9(10): 1004 [DOI: 10.3390/rs9101004]
- Wang H Q and Li S M. 2013. Estimating of sunshine percentage using the cloud classification data from FY-2C. *Journal of Remote Sensing*, 17(5): 1295-1310 (王怀清, 李三妹. 2013. FY-2C 云分类资料估算日照百分率. 遥感学报, 17(5): 1295-1310) [DOI: 10.11834/jrs.20132125]
- Wang S H and Zhu B Q. 2021. Time series prediction for ground settlement in portal section of mountain tunnels. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 43(5): 813-821 (王述红, 朱宝强. 2021. 山岭隧道洞口段地表沉降时序预测研究. 岩土工程学报, 43(5): 813-821) [DOI: 10.11779/CJGE202105004]
- Wang Y M, Luo X J, Yu B, Hao R C and Zhang S J. 2019. Monitoring ground subsidence in Zhengzhou with InSAR. *Science of Surveying and Mapping*, 44(9): 100-106 (王义梅, 罗小军, 于冰, 郝瑞琛, 张帅娟. 2019. 郑州市地面沉降 InSAR 监测. 测绘科学, 44(9): 100-106) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2019.09.014]
- Wu S B, Le Y Y, Zhang L and Ding X L. 2020. Multi-temporal InSAR for urban deformation monitoring: progress and challenges. *Journal of Radars*, 9(2): 277-294 [DOI: 10.12000/JR20037]
- Xi L T. 2020. Research on Monitoring Data Forecasting Method of Mining-Induced Overburden Deformation Based on LSTM. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology: 26-52 (郗刘涛. 2020. 基于 LSTM 的采动覆岩变形监测数据预测方法研究. 西安: 西安科技大学: 26-52) [DOI: 10.27397/d.cnki.gxaku.2020.000544]
- Zhang J S and Liu K. 2021. Land subsidence monitoring in Zhengzhou based on sentinel-1 A data. *Shanxi Architecture*, 47(6): 72-75 (张介山, 刘凯. 2021. 基于 Sentinel-1A 卫星数据的郑州地面沉降监测. 山西建筑, 47(6): 72-75) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-6825.2021.06.024]
- Zhu X X, Chen M, Gong H L, Li X J, Yu J, Zhu L, Zhou Y Y and Li Y. 2018. The subsidence monitoring along Beijing subway network based on MT-InSAR. *Journal of Geo-Information Science*, 20(12): 1810-1819 (祝秀星, 陈蜜, 宫辉力, 李小娟, 余洁, 朱琳, 周玉营, 李昱. 2018. 采用时序 InSAR 技术监测北京地铁网络沿线地面沉降. 地球信息科学学报, 20(12): 1810-1819) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180322]

Analysis of ground subsidence along Zhengzhou metro based on time series InSAR

YE Yongchao¹, YAN Chaode^{1,2}, LUO Xianxue³, ZHANG Ruifeng¹, YUAN Guanjie¹

1.School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2.Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordination Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3.Zhengzhou Urban Planning Design & Survey Research Institute, Zhengzhou 450052, China

Abstract: As a mega city in central China, Zhengzhou is in a period of large-scale metro construction. The problem of ground subsidence along metro lines occurs during metro construction and operation. Thus, monitoring and analysis of ground subsidence along metro lines are important to ensure the safety of metro operation. However, the researches on long-time-series ground subsidence in the Zhengzhou metro

network are lacking. Permanent scatterers – interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) technology overcomes many shortcomings of traditional ground subsidence monitoring methods, such as high cost, limited monitoring range and points, and difficulties in long-term monitoring. Therefore, PS-InSAR technology is used to monitor the subsidence of the Zhengzhou metro network in this study.

35 Envisat ASAR images and 44 Sentinel-1 images are employed to obtain the surface deformation information of Zhengzhou City from February 2005 to October 2010 and from July 2015 to May 2019 via PS-InSAR technology. By extracting PS points in a certain range on both sides of the metro lines, the temporal and spatial characteristics of ground subsidence along Zhengzhou metro are subjected to statistical, profile, and overlay analyses. To address the unequal time interval of ground subsidence time series data caused by SAR image discontinuity, an equidistant processing method based on inverse distance interpolation is proposed, and the subsidence of a typical metro station is predicted and analyzed using the Long Short-Term Memory (LSTM) model.

Results show that the subsidence sections are mainly concentrated in the east of Lines 1 and 5, the maximum subsidence rate is more than 20 mm/a, and the maximum cumulative subsidence is about 80 mm. The overall deformation trend of Line 1 is similar to a parabola, and the uneven deformation is prominent. The changes in PS points in the time series differ in various regions. The subsidence trough near the Henan Orthopedic Hospital Station of Line 5 is basically symmetrical in space, and the subsidence at the center is expanding yearly. Experiments show that the LSTM model has high prediction accuracy, and the prediction results reveal that the north of the New Archives of Henan Province located in the south of Zhengzhou Sports Center Station will continue to settle at a rate of about 0.5 mm/month in the next two years. Hence, the station and its vicinity must be continuously monitored. This study confirms that PS-InSAR technology can meet the application needs of large-scale urban ground subsidence monitoring, and the results provide a scientific basis for the continuous dynamic monitoring of ground subsidence along Zhengzhou metro network and metro maintenance.

Key words: Zhengzhou metro, ground subsidence, PS-InSAR, LSTM, prediction analysis

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41671455); The Major Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (No.2021-149-1)