引文格式:李晨程,江利明,吴宇轩,等.基于时序InSAR技术的武汉大型垃圾填埋场形变监测与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1694-1704.DOI:10.13203/j.whugis20240335

Citation:LI Chencheng,JIANG Liming,WU Yuxuan,et al.Monitoring Ground Displacement of Large-Scale Landfills in Wuhan Using Time-Series InSAR Technology[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1694-1704.DOI:10.13203/j.whugis20240335

基于时序InSAR技术的武汉大型垃圾填埋场形变监测与分析

李晨程[1,2] 江利明[1,3] 吴宇轩[1] 史绪国[2] 赖振炎[2] 金 源[2]

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

2 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

3 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京,100049

摘 要:随着城市化进程加快,填埋场已成为一种安全经济处理固体废弃物的主要方式,其稳定性监测对于保障城市居民生命财产安全具有重要意义。以湖北省武汉市陈家冲和长山口生活垃圾填埋场为例,基于Sentinel-1两个相邻轨(Path 113和Path 40)合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)影像,采用小基线集SAR干涉测量(interferometric SAR,InSAR)技术获取了包含这两个大型垃圾填埋场在内的武汉部分城区2017—2024年间地表形变信息,并利用多通道奇异谱(multichannel singular spectrum analysis,MSSA)方法重建了地表形变和欧洲中期天气预报中心气温降雨的季节性。结果表明,研究区85%的区域相对稳定,Path 113和Path 40的视线向(line of sight,LOS)形变速率范围分别为−55.3~39.6 mm/a、−47.3~22.7 mm/a;长山口填埋场LOS向最大沉降速率(40.0 mm/a)位于边坡区域,陈家冲填埋场LOS向最大沉降速率(55.3 mm/a)位于中部堆积体区域;垃圾填埋场的沉降主要受垃圾堆体的机械压缩、生化效应、气温和降雨影响,沉降相对于降雨迟滞100 d左右,迟滞相关性为0.76,相对于气温迟滞60 d左右,迟滞相关性为0.93;2019-06-21的暴雨加速了垃圾填埋场的沉降。研究证实,InSAR技术能够有效监测垃圾填埋场地表沉降,可为垃圾填埋场安全管理和环境保护提供技术支撑。

关键词:垃圾填埋场;时序InSAR;形变监测;多通道奇异谱方法;武汉市区

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-09-09

DOI:10.13203/j.whugis20240335 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1694-11

Monitoring Ground Displacement of Large-Scale Landfills in Wuhan Using Time-Series InSAR Technology

LI Chencheng[1,2] *JIANG Liming*[1,3] *WU Yuxuan*[1] *SHI Xuguo*[2] *LAI Zhenyan*[2] *JIN Yuan*[2]

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 School of Geography and Information Engineering, China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, China

3 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: **Objectives**: With the acceleration of urbanization, landfills have become a primary and economically viable solution for the safe disposal of solid waste. The stability monitoring of them is of great significance for ensuring the safety of urban residents' lives and property. **Methods**: Taking the Chenjiachong and Changshankou municipal solid waste landfills in Wuhan as examples, based on Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) images from two adjacent tracks (Path 113 and Path 40), this paper obtains ground deformation information of two large landfill sites in Wuhan urban areas using small baseline subset interferometry SAR (InSAR) technology, from 2017 to 2024. To further analyze the seasonal, multichannel singu-

基金项目:湖北省自然科学基金创新群体项目(2021CFA028);国家自然科学基金(42174046)。

第一作者:李晨程,硕士生,主要从事InSAR基础设施监测与数值模拟研究。lichencheng@apm.ac.cn

通信作者:江利明,研究员。jlm@apm.ac.cn

lar spectrum analysis was used to reconstruct surface deformation and the fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis-derived temperature and rainfall patterns. **Results**: The results indicate that approximately 85% of the study area remained relatively stable, with line-of-sight (LOS) deformation rates ranging from −55.3 to 39.6 mm/a for Path 113 and −47.3 to 22.7 mm/a for Path 40. The maximum LOS subsidence rate at the Changshankou landfill (40.0 mm/a) was observed in the slope area. While the maximum LOS subsidence rate (55.3 mm/a) was located in the central accumulation area at the Chenjiachong landfill. Subsidence at these landfills is primarily influenced by the mechanical compression of the waste body, biochemical processes, temperature, and rainfall, with a lag of approximately 100 days relative to rainfall (correlation of 0.76) and 60 days relative to temperature (correlation of 0.93). The heavy rainfall on June 21, 2019, further accelerated landfill subsidence. **Conclusions**: This study confirms that InSAR technology can effectively monitor surface subsidence at landfills, offering technical support for landfill safety management and environmental protection.

Key words: landfill; time-series InSAR; deformation monitoring; multichannel singular spectrum analysis; Wuhan urban area

垃圾填埋场是现代废物管理体系中的关键环节,通过将固体废弃物埋入地下,解决了大量垃圾的处理和储存问题,是当前应对垃圾增长的主要方式之一[1-2]。垃圾填埋场的运行不仅涉及废物的简单掩埋,还隐藏着复杂的环境和工程问题[3]。在填埋过程中,垃圾的分解会产生甲烷等温室气体,若泄漏到环境中,可能导致空气污染,甚至带来爆炸风险[4]。此外,降水渗透到填埋场中,可能与垃圾中的有害物质混合形成渗滤液。若得不到有效控制,将污染地下水和土壤,对周边生态系统及水资源构成威胁[5]。

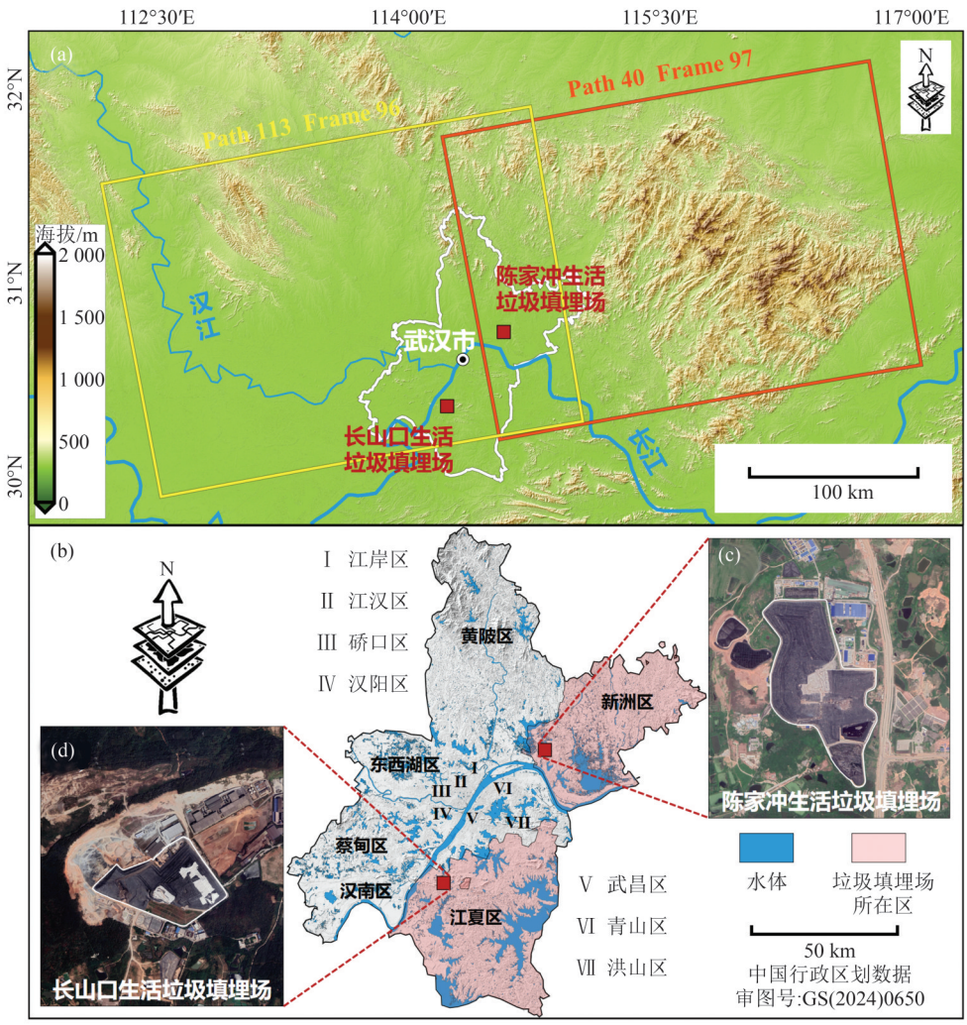
通常,垃圾填埋场会采取多层防渗衬垫和渗滤液收集系统等工程措施,以降低潜在的环境污染风险[6]。然而,上述风险往往难以完全消除,填埋场的长期稳定性和安全性仍需持续监测。传统监测方法往往局限于特定区域,难以全面掌握填埋场长期稳定性和安全性的动态变化。近年来,越来越多的研究和工程实践开始尝试使用合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)干涉测量(interferometric SAR,InSAR)技术[7]。相较于传统方法,InSAR在精度、监测范围、时空分辨率和全天候工作方面具有显著优势。随着多种InSAR技术的快速发展,这些技术已被广泛应用于滑坡[8]、地震[9]、火山活动[10]、地面沉降[11]和冻土形变[12]等地表运动的监测与预报。这种非接触、高精度的监测工具能够实现对地表微小变形的大范围、持续监测,有助于识别填埋场地基沉降、填埋体压缩、堆积物移动等可能存在的稳定性问题[13]。通过持续监控这些变化,管理者可及时发现潜在问题并采取相应措施,预防环境污染和工程事故的发生。因此,InSAR技术有望成为一种垃圾填埋场长期安全监测关键工具,为填埋场管理和环境保护提供有力支持。

本文以湖北省武汉市陈家冲和长山口两大生活垃圾填埋场为研究对象,运用小基线集(small baseline subset,SBAS)InSAR[14]技术对2017年3月至2024年6月期间两条轨道的Sentinel-1数据进行处理(见图1(a)),获取垃圾填埋场区域的地表形变速率及其时序变化,识别并监测填埋场内部潜在的形变区域。此外,本文采用多通道奇异谱分析[15-16]方法,将地表形变数据与第五代大气再分析(the fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis,ERA5)气温和降雨数据进行分解,重构出季节性信号。结合季节性气温和降雨特征,对填埋场形变原因进行分析,为垃圾填埋场的长期稳定性、安全性评估和潜在风险防控提供科学依据。

1　研究区与数据

1.1　研究区概况

陈家冲生活垃圾填埋场位于武汉市新洲区阳逻街(见图1(b)、1(c)),坐标为114.55°E、30.73°N,占地面积约为32.05万m^2;长山口生活垃圾填埋场位于武汉市江夏区(见图1(b)、1(d)),坐标为114.21°E、30.35°N,占地面积约55.2万m^2,设计库容为1 833万m^3。图1(a)、1(b)底图行政区划由审图号为[GS(2024)0650]的中国行政区划矢量图所绘。这两个填埋场是武汉市的两大生活垃圾卫生填埋场,现场调查照片如图2所示。研究区位于北亚热带季风性湿润气候带,四季变化明显。年均气温在15.8～17.5 ℃之间,其中1月最



(a)SAR影像覆盖范围;(b)武汉市区划图;(c)陈家冲生活垃圾填埋场;(d)长山口生活垃圾填埋场

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Study Area

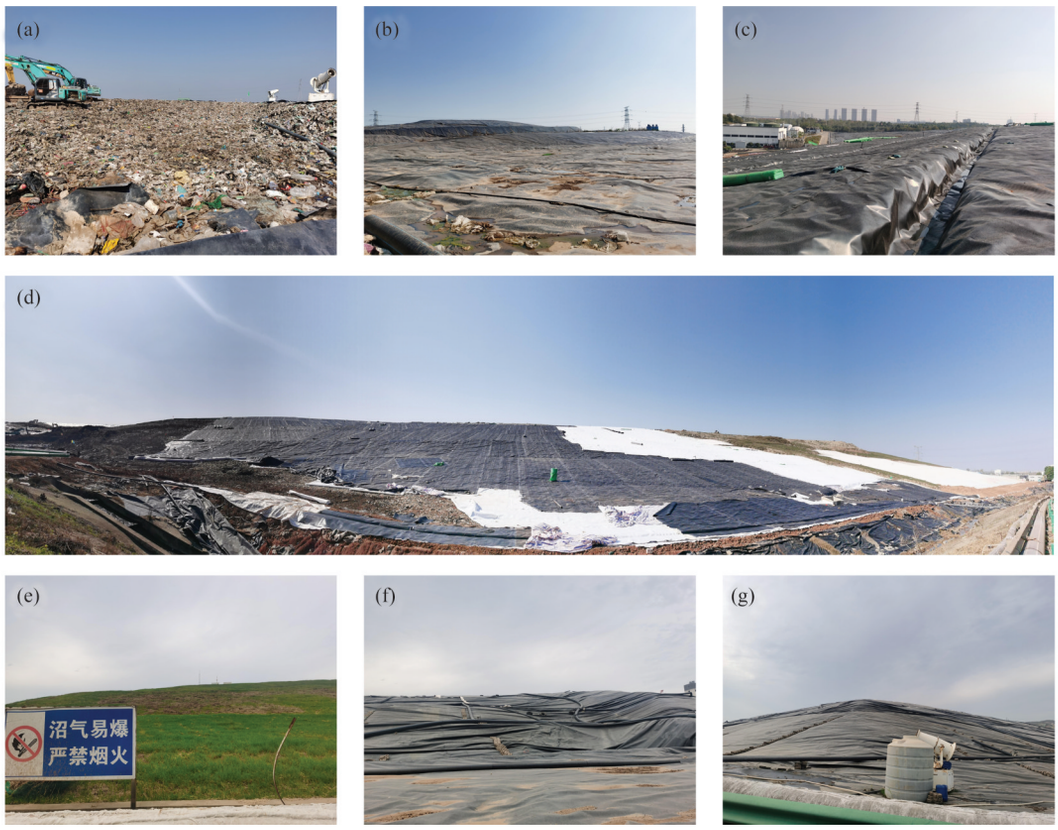
冷,平均气温约为0.4 ℃;7月和8月最热,平均气温为28.7 ℃。夏季气温经常超过37 ℃,极端高温可达44.5 ℃,夏季持续时间长达135 d。由于地处30°N,太阳高度角可达38°,加之地形盆地效应,使得该地区夏季闷热难耐。初夏的梅雨季节降水集中,年降水量约为1 100 mm,年积温约为5 150 ℃,无霜期在240天左右,年日照总时数约为2 000 h。

垃圾填埋场面临着武汉高温、强降雨等气候条件带来的潜在影响。高温加速垃圾的分解[17],导致释放出更多的甲烷等温室气体,这不仅对空气质量造成威胁,而且带来爆炸的风险。此外,长时间的高温可能影响填埋体的稳定性,加剧形变问题。强降雨则可能导致渗滤液的大量产生并积累,增加渗透风险,从而对地下水和土壤构成污染威胁[18]。这些气候因素共同作用,可能会影响填埋场的长期稳定性和周边环境安全。

1.2 研究数据

本文使用的SAR影像来源于Sentinel-1卫星的干涉宽幅模式,数据类型为单视复数。图1(a)显示了影像的覆盖范围,影像使用C波段VV极化,成像时间跨度为2017年3月至2024年6月,重访周期为12 d,共计433景影像,其中Path 113包含217景,Path 40包含216景。影像参数详见表1。

研究过程中,利用与SAR数据同期的精密星历去除轨道误差,并采用德国航空航天中心提供的30 m分辨率TanDEM-X数字高程模型(digital elevation model, DEM)进行地形相位补偿及地理编码。为探讨垃圾填埋场的形变原因,本文还获取了与SAR影像同期的ERA5气温和降雨数据。



陈家冲垃圾填埋场:(a)垃圾堆积区(覆土工膜前);(b)垃圾堆积区(覆土工膜后);(c)雨水收集渠;(d)垃圾堆积边坡与污水污泥收集渠;长山口垃圾填埋场:(e)复绿区;(f)污水收集管道;(g)垃圾堆积边坡

图 2　陈家冲垃圾填埋场((a)～(d))和长山口垃圾填埋场((e)～(g))现场踏勘调查

Fig. 2　On-Site Survey of Chenjia Chong Landfill((a)-(d)) and Changshankou Landfill((e)-(g))

表 1　SAR 影像参数

Table 1　SAR Image Parameters

卫星	轨道号	轨道方向	航向角/(°)	影像中心入射角/(°)	时间跨度	分辨率(距离向 × 方位向)	主影像	影像数/景
Sentinel-1A	113	升轨	−12.7	33.7	2017 年 3 月至 2024 年 6 月	2.33 m×13.96 m	2020-11-10	217
	40		−12.8	43.8			2020-11-05	216

2　研究方法

2.1　SBAS-InSAR 方法

Path 113 和 Path 40 分别选取时空基线二维中心 2020-11-10 和 2020-11-05 作为主影像,利用 GAMMA 软件将其余影像与主影像进行配准,即通过确定同名点的像素坐标偏移量,根据待配准影像与主影像之间的坐标映射关系,对待配准影像进行坐标转换、插值和重采样,直至偏移量迭代至小于 0.000 5 像素。将空间基线小于 250 m 且时空基线小于 50 d 的影像组合成干涉对,时空基线分布如图 3 所示,最终采用距离向 4 个和方位向 1 个的多视因子生成差分干涉图。

使用 GAMMA 软件中的自适应滤波[19]方法有效抑制相位噪声。首先,将 Path 113 和 Path 40 两个轨道滤波前相干性均值高于 0.3 且标准差介于 0～0.3 之间的点识别为高相干点,并从中选择稳定性较高的点作为解缠点,然后应用最小费用流算法[20]进行相位解缠并用于后续分析。对于相干性低于 0.3 的点,进行掩膜处理以排除其对解算结果的干扰。通过这种处理方法确保了数据精度,同时削减了低相干区域对 InSAR 结果的影响。基于地面控制点对基线进行优化后,重复执行差分干涉、自适应滤波和最小费用流解缠过程。通过时间高通滤波和空间低通滤波的方法分离并剔除大气延迟相位,最终得到形变相位,具体表达式如下:

$$\varphi_{\mathrm{def}} = \varphi_{\mathrm{int}} - \varphi_{\mathrm{flat}} - \varphi_{\mathrm{topo}} - \varphi_{\mathrm{atmo}} - \varphi_{\mathrm{noise}} \quad (1)$$

式中,φ_{def} 为形变相位;φ_{int} 为干涉相位;φ_{flat} 为平地相位;φ_{topo} 为地形相位;φ_{atmo} 为大气相位;φ_{noise} 为噪声相位。

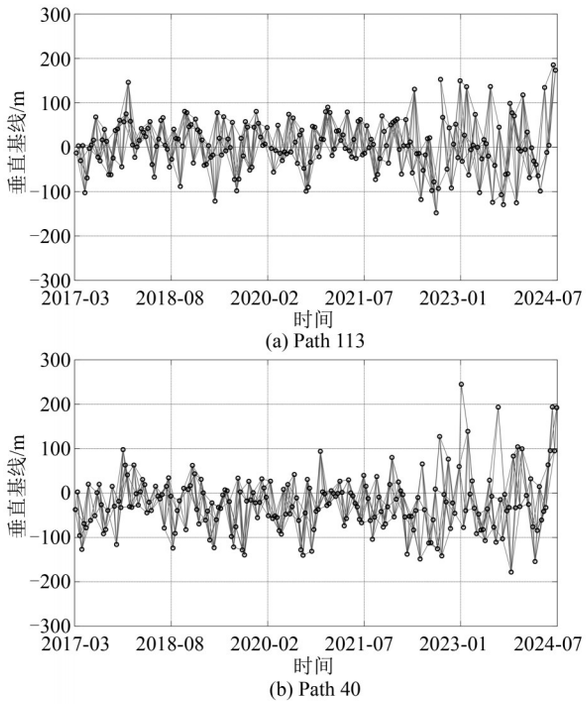


图3 时空基线图

Fig. 3 Spatiotemporal Baseline Diagram

剔除解缠过程中产生跳变等质量较差的干涉对,采用奇异值分解(singular value decomposition,SVD)[21-22]法对高质量的干涉对进行联合求解,以获得视线(line of sight,LOS)向的形变时间序列。具体表达式如下:

$$\Delta r=\frac{\lambda}{4\pi}\cdot\varphi_{\mathrm{def}} \tag{2}$$

式中,Δr为所求解地面目标点的LOS向形变信息;λ为雷达波长。

2.2 多通道奇异谱(multichannel singular spectrum analysis,MSSA)方法

MSSA是一种扩展的奇异谱分析方法,用于从多维时间序列数据中提取共同的周期性和季节性成分。其优势在于能够同时分析多通道(多个相关变量)的数据,帮助识别和分离出多个序列中的共同信号和特定模式。

对于多通道时间序列$X=\{x_1,x_2,\cdots,x_k\}$,每个通道x_i代表一个时间序列,MSSA将每个通道的数据嵌入到更高维空间中。由于Sentinel-1的重访周期为12 d,所以设定的窗口长度$L=30$,将每个通道的时间序列展开为多个包含L个连续观测值的向量。这些向量用于构建一个轨迹矩阵$\boldsymbol{X}$,其中包含所有通道的时间嵌入向量。构建的轨迹矩阵形状为$L\times K$,其中K是展开后的列数,包含所有通道的延迟信息。将所有通道的轨迹矩阵拼接在一起形成扩展轨迹矩阵,其形状为$L\times(K\times M)$,其中M是通道数,这样可以在单个矩阵中表示多通道的嵌入信息。

对扩展轨迹矩阵进行SVD,分解为左奇异向量、奇异值和右奇异向量。奇异值分解能够将数据中的不同成分(例如趋势、周期性和噪声)分离出来。分解公式如下:

$$\boldsymbol{X}=\sum_{i=1}^{L}\sigma_i\boldsymbol{U}_i\boldsymbol{V}_i^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中,σ_i为奇异值;$\boldsymbol{U}_i$和$\boldsymbol{V}_i$分别为对应的左、右奇异向量。

奇异值代表了不同成分的重要性,较大的奇异值通常对应主要的信号成分(如趋势或季节性成分),较小的奇异值对应噪声成分。根据奇异值的大小和分布,可以将奇异向量进行分组,以分离出特定成分,其中趋势成分通常与最大的奇异值关联,代表着长期变化趋势;季节性成分对应中等大小的奇异值,代表着周期或季节性波动;噪声成分对应最小的奇异值。在分组之后,选定季节性成分,同时滤除噪声,再对选定的奇异向量进行重构,将季节性成分恢复成时间序列,达到季节性分离的效果。

3 研究结果

3.1 InSAR形变结果

通过使用SBAS-InSAR技术处理Sentinel-1卫星的217景Path 113和216景Path 40的SAR数据,获得了2017年3月至2024年6月期间的LOS向形变速率,如图4(a)、4(b)所示。其中,Path 113的影像框幅覆盖了陈家冲生活垃圾填埋场$A1$和长山口垃圾填埋场$A2$,而Path 40的影像框幅仅涵盖了陈家冲生活垃圾填埋场$A1$(见图4(c)、4(d))。结果表明,约85%的区域形变速率在±5 mm/a以内,表明武汉市大部分区域较为稳定。

具体而言,Path 113的形变速率在−55.3~39.6 mm/a之间,而Path 40的形变速率在−47.3~22.7 mm/a之间。2017—2024年期间,武汉市主要存在两个地表沉降区域,分别位于青菱-张家湾街道(见图4(e))和北湖周边(见图4(f))。相比2015—2020年间的武汉市地面沉降分布结果[23],后湖街道和红钢城-新沟桥街道区域的地表变形减缓而逐渐趋于稳定,但青菱-张家湾和北湖周边的沉降依然严重,总体上与本文武汉区域形变较为一致。

为评估InSAR结果的准确性,对Path 113和Path 40的形变速率进行统计分析,结果见图5,Path

113的形变速率平均值(Mean)为−0.61 mm/a,标准差(Std)为3.53 mm/a(见图5(a));Path 40的形变速率平均值为−0.38 mm/a,标准差为3.45 mm/a(见图5(b))。这表明两个轨道的形变速率估计具有较高的精度。两个轨道之间速率差值的平均值为−0.27 mm/a,标准差为4.83 mm/a,差值小于5 mm/a

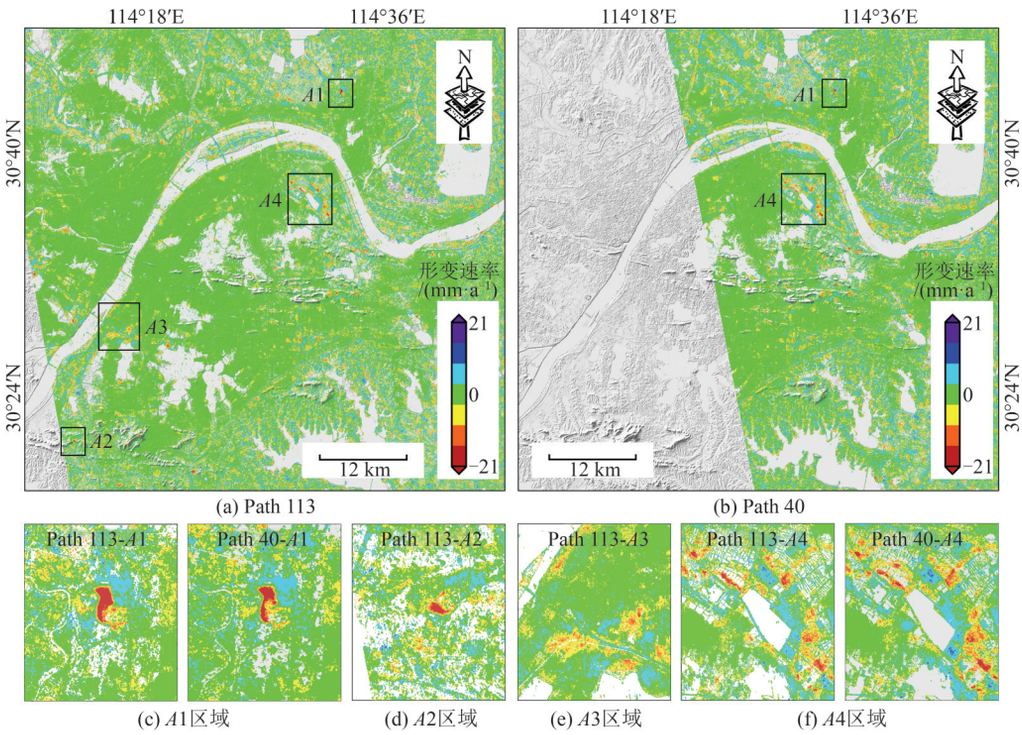


图4　LOS向形变速率

Fig. 4　Deformation Rate in the LOS Direction

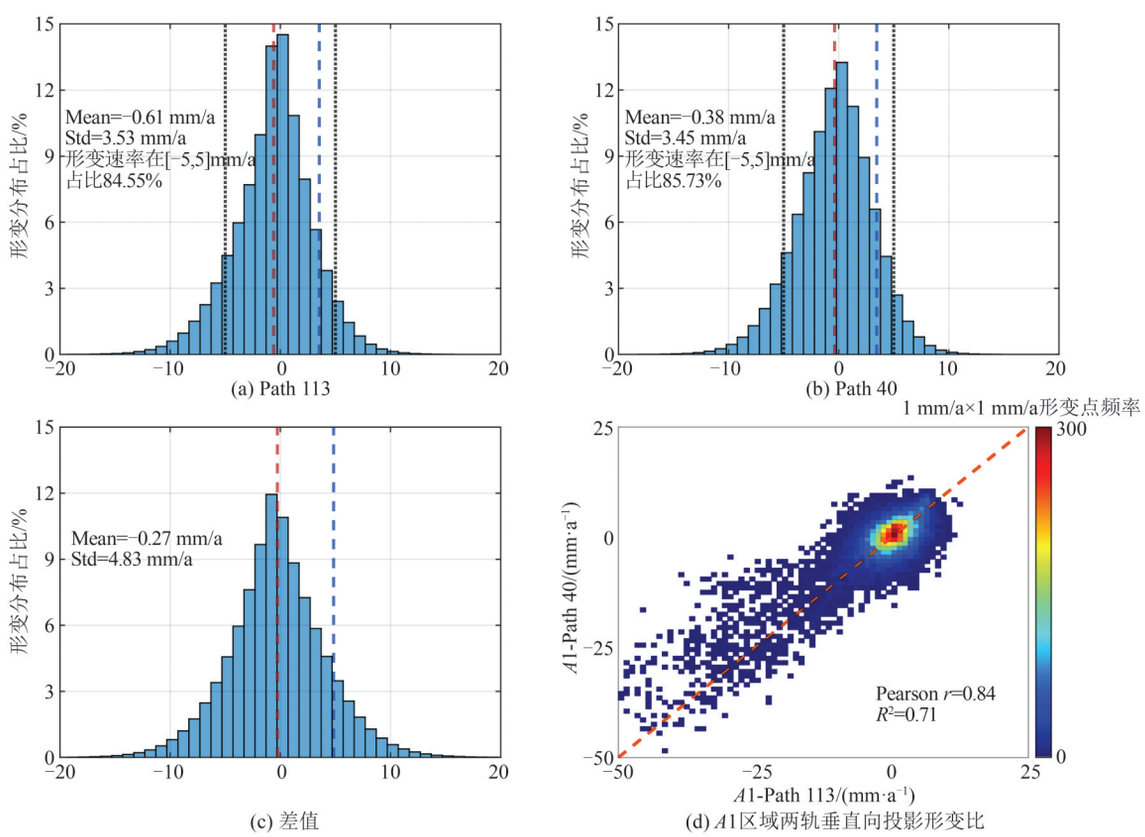


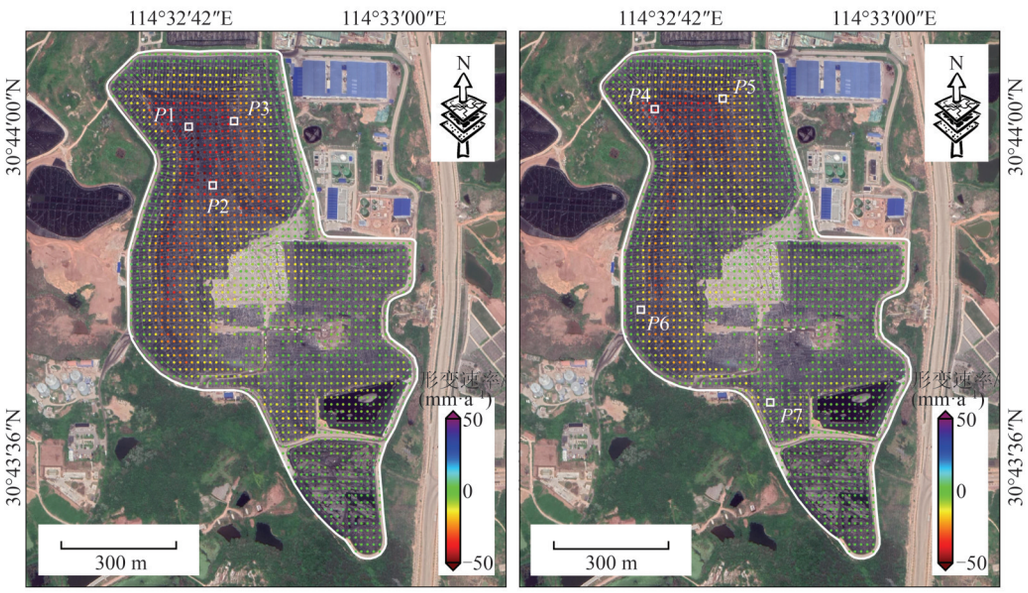
图5　精度验证

Fig. 5　Accuracy Verification

(见图5(c)),表明两个轨道的形变结果具有较好的一致性,这从侧面验证了InSAR形变速率估计的可靠性。因此,InSAR结果能够有效地反映该区域的地表形变特征,为垃圾填埋场的形变监测和分析提供了可靠的数据支持。

3.2 陈家冲生活垃圾填埋场

陈家冲生活垃圾填埋场位于武汉市新洲区阳逻街,占地约32.05万m^2。图6(a)、6(b)展示了填埋场堆体区域及其周边的LOS向形变速率。在2017年3月至2024年6月期间,Path 113的LOS向最大形变速率为−55.3 mm/a,而Path 40的最大形变速率为−40.0 mm/a。Path 113的形变速率普遍高于Path 40,这种差异主要是由于入射角的不同所致。



(a) Path 113 (b) Path 40

图6 陈家冲生活垃圾填埋场LOS向形变速率

Fig. 6 LOS Deformation Velocity Rate of Chenjiachong Domestic Waste Landfill

为了验证InSAR监测结果的准确性,将LOS向形变速率投影到垂直方向,并将两个轨道数据集的投影值进行比较(见图5(d))。将Path 113的形变量与其半径10 m范围内的Path 40形变量进行平均匹配。两个数据集的皮尔逊相关系数(r)和相关系数(R^2)分别为0.84、0.71,表明它们之间有较强的相关性。

研究阶段内,中部堆积体区域的形变最为严重(见图6),代表点$P1$、$P2$和$P3$的LOS向形变分别为−350.3 mm、−282.3 mm和−264.4 mm(见图7),北侧边坡代表点$P4$和$P5$的LOS向形变分别为−257.6 mm和−173.4 mm(见图8),南侧边坡的代表点$P6$和$P7$的LOS向形变分别为−107.9 mm和−178.2 mm(见图8),总体而言,中部堆积体区域形变最为显著,北侧边坡形变次之,南侧边坡形变相对最小。

陈家冲垃圾填埋场各区域代表点$P1$~$P7$在2019年6月前半年沉降较为缓慢,在2019年6月暴雨过后沉降出现不同程度的加速现象(表2),并且在每年5月—9月期间存在轻微加速沉降的现象(图9(a))。其中代表点$P2$在每年的5月—9月

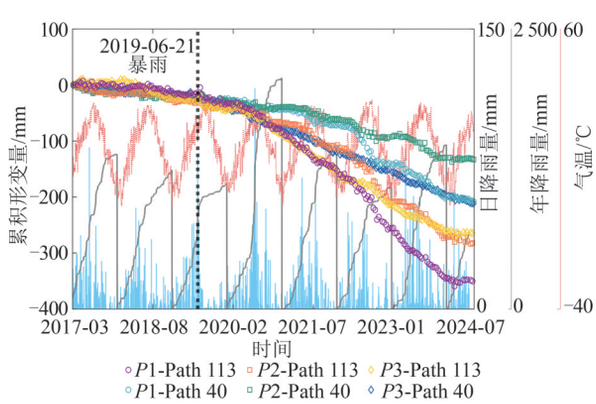


图7 陈家冲生活垃圾填埋场内部代表点$P1$、$P2$和$P3$的时序形变

Fig. 7 Time Series Deformation of Representative Points $P1$, $P2$ and $P3$ Inside Chenjiachong Domestic Waste Landfill

期间出现加速沉降的现象,提取点$P2$的季节性形变、降雨和气温(图9(a))进行比对,在季节性降雨增加和气温升高的时期,点$P2$伴随出现季节性沉降(图9(b)、9(c)),沉降相对于降雨迟滞100 d左右,相关性为0.76(图9(d));沉降相对于气温迟滞60 d左右,相关性为0.93(图9(d))。

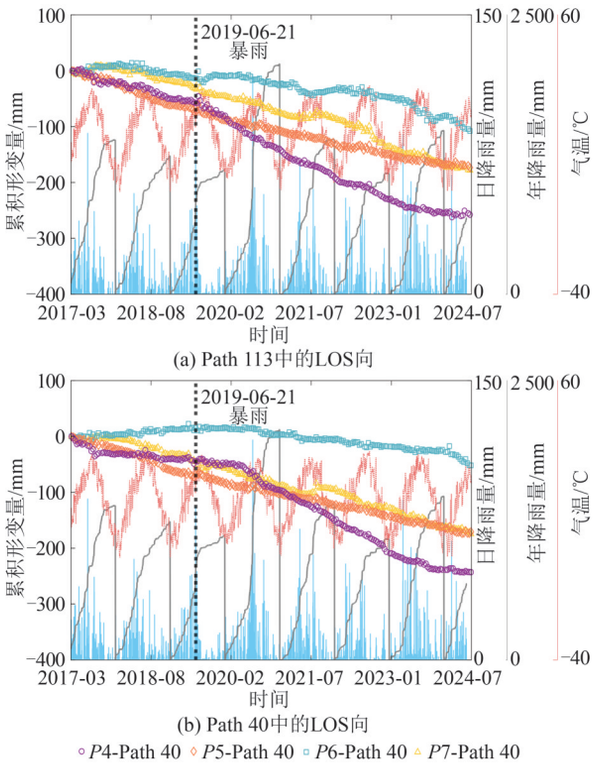


图 8　陈家冲生活垃圾填埋场北侧边坡代表点 *P*4、*P*5 与南侧边坡代表点 *P*6、*P*7 时序形变

Fig. 8　Time Series Deformation of Representative Points *P*4 and *P*5 on the North Side Slope and *P*6 and *P*7 on the South Side Slope of Chenjiachong Domestic Waste Landfill

表 2　陈家冲垃圾填埋场 2019 年暴雨前后 LOS 向形变速率(Path 113)对比/(mm·a^{-1})

Table 2　Comparison of LOS Deformation Velocity Rate (Path 113) of Chenjiachong Landfill Before and After the Heavy Rain in 2019/(mm·a^{-1})

点号	暴雨前形变速率	暴雨后形变速率	变化
*P*1	−6.75	−24.94	−18.19
*P*2	−11.54	−37.66	−26.12
*P*3	−26.06	−64.56	−38.50
*P*4	−14.47	−50.07	35.60
*P*5	−28.75	−45.05	16.30
*P*6	−2.45	−10.06	7.61
*P*7	−9.248	−16.31	7.06

3.3　长山口生活垃圾填埋场

长山口生活垃圾填埋场位于武汉市江夏区,占地面积约为 5 502 万 m^2。该填埋场堆体区域及其周边的 LOS 向形变速率见图 10。在 2017 年 3 月至 2024 年 6 月期间,Path 113 的 LOS 向最大形变速率为 −40.0 mm/a,主要集中在南侧边坡区域,其中代表点 *P*8 和 *P*9 的 LOS 向形变分别达到了 −408.1 mm 和 −348.3 mm(见图 11);东侧边坡代表点 *P*10 和 *P*11 及中部堆积体代表点 *P*12 和 *P*13 的 LOS 向形变分别为 −112.8 mm、−144.4 mm、−60.8 mm 和 −48.9 mm(见图 11)。总体而言,南侧边坡区域的形变最为严重,其次是东侧边坡区域,而中部堆积体区域的形变相对较小。

南侧边坡区域代表点 *P*8 和 *P*9 在 2018 年 10 月之前一直存在严重沉降,在之后 8 个月时间段内沉降放缓,但在 2019 年 6 月暴雨过后又出现了较为严重的加速沉降现象(图 11 和表 3);2019 年 6 月之前,中部堆积体和东侧边坡区域点 *P*10～*P*13 保持着轻微沉降,暴雨过后,出现了轻微加速沉降(见图 11)。

4　讨　论

4.1　垃圾填埋场形变影响因素

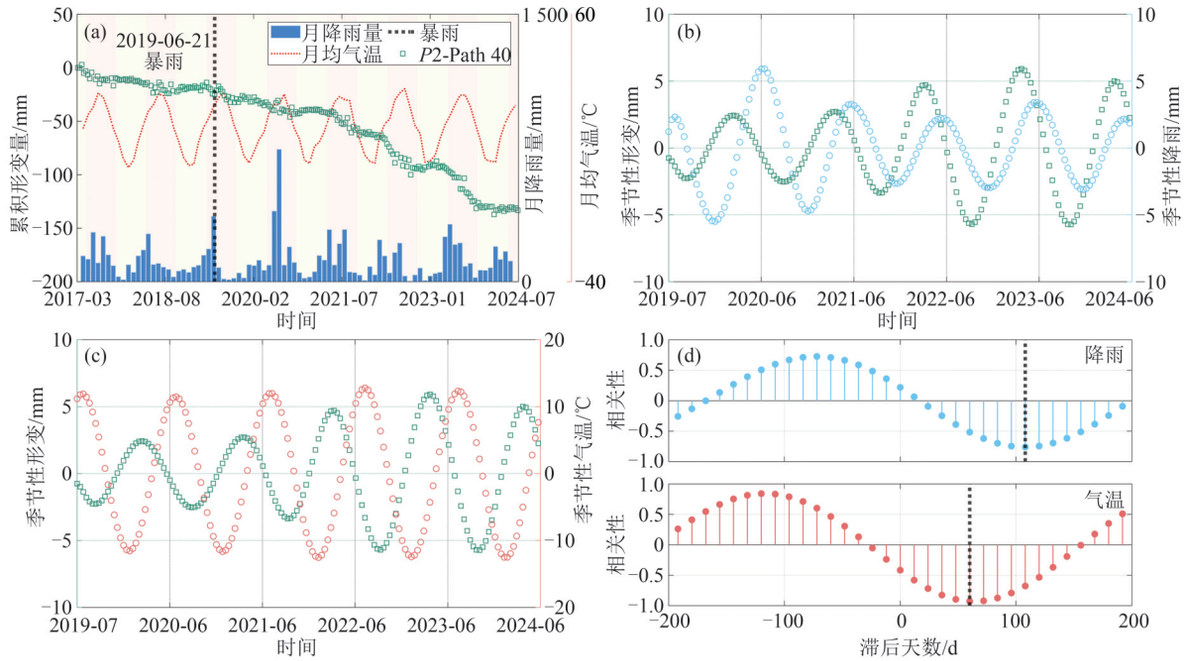
垃圾填埋场地面形变主要由垃圾堆体的机械压缩和生化效应引起。机械压缩源于垃圾堆体的自重应力及外部施加的载荷,导致垃圾体积缩小、密度增加,同时内部的气体和水分也会受到压缩和移动[24]。生化效应涉及物质相转化过程,其中可降解固体废物会转化为液相互的渗滤液和气相的垃圾填埋气体。这些形变现象是固、液、气三相耦合作用的结果,具有复杂性、长期性、随机性等特点[25]。

垃圾填埋场形变与区域气候环境变化密切相关,气温和降雨是其中的关键因素[26]。气温直接影响填埋场内部微生物活性,进而影响垃圾的降解速度。较高的气温会增加微生物活性,导致垃圾降解速度加快,垃圾填埋体体积缩小,产生更显著的形变。降雨对填埋场的影响主要体现在以下几个方面:(1)降雨增加垃圾堆体的重量,进而增大超载应力,导致垃圾颗粒的重新排列或扭曲;(2)降雨引起填埋场内孔隙流体的压缩,改变填埋场的渗透性和稳定性;(3)垃圾堆体水分含量增加,会加快有机物分解,促进甲烷的生成,影响填埋场内部的化学和生物场状态。

代表点 *P*1～*P*13 在夏季高温和强降雨期间表现出加速形变的趋势,尤其是在 2019-06-21 暴雨和高温之后,形变显著加快(图 7、图 8 和图 11)。总体而言,气温和降雨等环境因素对垃圾填埋场形变的变化趋势具有重要影响。

4.2　局限性

目前研究仅考虑了 LOS 向形变,这可能导致对填埋场边坡形变分析不够全面,进而影响潜在风险的识别精度。今后可结合多源 SAR 卫星



(a)*P*2-Path 40时序形变与月度气温降雨比对,红色背景为每年5月—9月;(b)*P*2季节性形变与季节性降雨比对;(c)*P*2季节性形变与季节性气温比对;(d)沉降对降雨和气温的时滞相关性

图9 形变与气温、降雨比对

Fig. 9 Comparison of Deformation and Temperature, and Rainfall

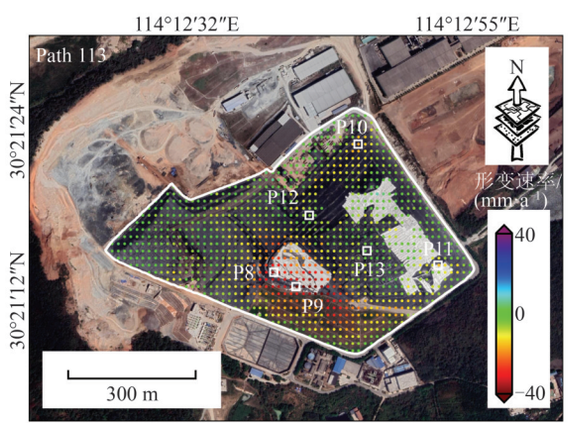


图10 长山口生活垃圾填埋场Path 113形变速率

Fig. 10 Deformation Velocity Rate of Path 113 in Changshankou Municipal Solid Waste Landfill

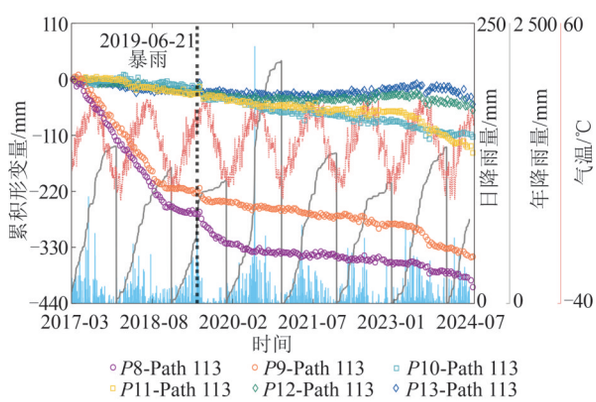


图11 长山口生活垃圾填埋场特征点LOS向时序形变

Fig. 11 Time Series Deformation of LOS Direction of Characteristic Points of Changshankou Domestic Waste Landfill

数据集反演填埋场三维形变,更加精确地分析垃圾填埋场边坡的变形过程,提升潜在风险识别的准确性。

在垃圾填埋场形变分析中,本文仅从垃圾堆体的机械压缩和生化效应两个方面入手,结合气温和降雨对形变进行定性分析。然而,这种分析方法难以准确量化各因素对填埋场形变的影响,导致无法有效识别主要的影响因素,从而影响防护措施的制定。为了更准确地判断填埋场形变的关键因素,后续将收集填埋场的实际信息和环境数据,采用数值模拟方法模拟其物理化学过程,进一步分析各因素对形变的影响,为制定更有效的防护措施提供依据。

表3 长山口垃圾填埋场2019年暴雨前后LOS向形变速率(Path 113)对比/(mm·a^{-1})

Table 3 Comparison of LOS Deformation Velocity Rate (Path 113) of Changshankou Landfill Before and After the Heavy Rain in 2019/(mm·a^{-1})

点号	暴雨前形变速率	暴雨后形变速率	变化
*P*8	−25.27	−113.15	−87.88
*P*9	−20.82	−34.44	−13.62
*P*10	−25.04	−34.85	−9.81
*P*11	−11.7	−12.28	−0.58
*P*12	−16.61	−18.85	−2.24
*P*13	−0.09	−8.73	−8.64

5　结　语

本文利用覆盖武汉两大生活垃圾填埋场的 Sentinel-1A SAR 数据（217 景 Path 113 和 216 景 Path 40），获取了陈家冲和长山口生活垃圾填埋场区域从 2017 年 3 月至 2024 年 6 月的 LOS 向年平均形变速率和累积形变量。基于这些数据，本文得到了武汉两个大型垃圾填埋场的时序形变及其时空分布特征，进一步分析了填埋场各部分特征点的形变历史演化及其影响因素。研究结果表明：

1）2017 年 3 月至 2024 年 6 月期间，武汉大部分区域处于稳定状态，约 85% 的区域形变速率在 ±5 mm/a 之间。Path 113 数据的 LOS 向形变速率范围在 −55.3～39.6 mm/a 之间，Path 40 数据的形变速率范围在 −47.3～22.7 mm/a 之间。两个轨道的形变速率差值平均为 −0.27 mm/a，标准差为 4.83 mm/a，表明两个轨道的形变区域分布较为一致。

2）2017 年 3 月至 2024 年 6 月期间，陈家冲生活垃圾填埋场的最大形变量位于中部堆积体区域，LOS 向形变达到 −350.3 mm，边坡出现了不同程度的水平向形变。长山口生活垃圾填埋场的最大形变量位于南侧边坡区域，LOS 向形变达到 −408.1 mm，其内部堆积体表现为缓慢沉降。

3）垃圾填埋场的形变主要受到垃圾堆体的机械压缩、生化效应、气温和降雨的影响，特别是 2019-06-21 的暴雨加速了垃圾填埋场的沉降。垃圾填埋场的形变机理涉及固、液、气相变的复杂转化过程，这些过程需要进一步的研究。

以上研究结果验证了时序 InSAR 技术监测城市垃圾填埋场形变的可行性，表明其适用于填埋场的长期稳定性、安全性监测和风险预警。

致谢：感谢欧洲空间局提供的 Sentinel-1 数据，德国航空航天中心提供的 TanDEM-X 高程数据以及欧洲中期天气预报中心提供的气温和降雨数据；感谢陈家冲和长山口生活垃圾填埋场领导的支持，特别感谢余梦迪等人在现场踏勘调查中的带领和细致讲解。

参　考　文　献

[1] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1-46.
CHEN Yunmin. A Fundamental Theory of Environmental Geotechnics and Its Application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(1): 1-46.

[2] 王伟, 袁光钰. 我国的固体废物处理处置现状与发展[J]. 环境科学, 1997, 18(2): 87-90.
WANG Wei, YUAN Guangyu. The Status and Development of Solid Waste Treatment and Disposal in China[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(2): 87-90.

[3] 冯世进, 邓英军. 考虑固体颗粒压缩变形的城市固体废弃物本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4360-4365.
FENG Shijin, DENG Yingjun. Constitutive Model for Municipal Solid Waste Considering the Deformation of Compressible Solid[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 4360-4365.

[4] KAMARUDIN S, OBEID A A A, TOHIR M Z M. Fire Risk and Health Impact Assessment of a Malaysian Landfill Fire[J]. *PERINTIS eJournal*, 2020, 10(2): 68-83.

[5] NANDA S, BERRUTI F. Municipal Solid Waste Management and Landfilling Technologies: A Review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(2): 1433-1456.

[6] MA S J, ZHOU C B, PAN J J, et al. Leachate from Municipal Solid Waste Landfills in a Global Perspective: Characteristics, Influential Factors and Environmental Risks[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 333: 130234.

[7] QIN X Q, LIAO M S, ZHANG L, et al. Structural Health and Stability Assessment of High-Speed Railways *via* Thermal Dilation Mapping with Time-Series InSAR Analysis[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(6): 2999-3010.

[8] DONG J, LIAO M S, XU Q, et al. Detection and Displacement Characterization of Landslides Using Multi-temporal Satellite SAR Interferometry: A Case Study of Danba County in the Dadu River Basin[J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95-109.

[9] 能懿菡, 韩炳权, 刘振江, 等. InSAR 观测揭示的 2024 年新疆乌什 Mw 7.0 地震地表形变及发震断层模型[J]. 武汉大学学报（信息科学版）, 2025, 50(2): 368-376.
NAI Yihan, HAN Bingquan, LIU Zhenjiang, et al. Coseismic Surface Displacements and Source Model of the 2024 Mw 7.0 Wushi (Xinjiang, China) Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 368-376.

[10] 许文斌, 罗兴军, 朱建军, 等. InSAR 火山形变监

测与参数反演研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1632-1642.
XU Wenbin, LUO Xingjun, ZHU Jianjun, et al. Review of Volcano Deformation Monitoring and Modeling with InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1632-1642.

[11] JIANG L M, LIN H. Integrated Analysis of SAR Interferometric and Geological Data for Investigating Long-Term Reclamation Settlement of Chek Lap Kok Airport, Hong Kong[J]. *Engineering Geology*, 2010, 110(3/4): 77-92.

[12] SHI X G, NIU F J, QU T T, et al. Stability Analysis of Shiwei-Labudalin Highway in Inner Mongolia, Northeastern China Using Sentinel-1 InSAR[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 202: 103647.

[13] ZHANG S, LÜ Y H, YANG H B, et al. Monitoring and Quantitative Human Risk Assessment of Municipal Solid Waste Landfill Using Integrated Satellite - UAV - Ground Survey Approach[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(22): 4496.

[14] 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): 2375-2383.

[15] WALWER D, CALAIS E, GHIL M. Data-Adaptive Detection of Transient Deformation in Geodetic Networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(3): 2129-2152.

[16] CHEN Q, VAN DAM T, SNEEUW N, et al. Singular Spectrum Analysis for Modeling Seasonal Signals from GPS Time Series[J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 72: 25-35.

[17] 夏向利, 唐和清, 杨子陆, 等. 高温微生物菌剂加速垃圾填埋场好氧稳定化进程的研究[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 2003-2008.
XIA Xiangli, TANG Heqing, YANG Zilu, et al. Study on Acceleration of Stabilization of Municipal Solid Waste Landfill by Using Aerobic Microbial Bioreagents[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(4): 2003-2008.

[18] 邱战洪, 何春木, 朱兵见, 等. 不同降雨模式下山谷型垃圾填埋场水分运移及其稳定性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3151-3155.
QIU Zhanhong, HE Chunmu, ZHU Bingjian, et al. Investigations of Water Transport in Valley-Type MSW Landfills and Their Stabilities Subjected to Various Rainfall Patterns[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(10): 3151-3155.

[19] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035-4038.

[20] COSTANTINI M. A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 813-821.

[21] LAY D C, LAY S R, McDonald J J. Linear Algebra and Its Applications[M]. India: Pearson Education, 2003.

[22] GOLUB G H, VAN LOAN C F. Matrix Computations[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2013.

[23] 潘超. 2015—2020年武汉市地表形变SBAS-InSAR监测与分析[D]. 北京:中国科学院大学,2021.
PAN Chao. Monitoring and Analysis of Surface Deformation in Wuhan from 2015 to 2020 Using SBAS-InSAR[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.

[24] REN Y B, ZHANG Z Y, HUANG M. A Review on Settlement Models of Municipal Solid Waste Landfills[J]. *Waste Management*, 2022, 149: 79-95.

[25] 薛强, 刘磊, 梁冰, 等. 垃圾填埋场沉降变形条件下气-水-固耦合动力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3473-3478.
XUE Qiang, LIU Lei, LIANG Bing, et al. A Gas-Hydraulic-Solid Coupling Dynamics Model Under Landfill Settlement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S1): 3473-3478.

[26] BAZIENE K, VASAREVICIUS S, BALTRENAS P, et al. Influence of Total Precipitation and Air Temperature on the Composition of Municipal Landfill Leachate[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2013, 12(1): 175-182.