

文章编号: 1004-2954(2026)05-0042-08

基于 InSAR 和光学影像的高速铁路差异沉降成因溯源方法研究

李广宇¹, 周文明¹, 高至飞², 甘俊¹

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308; 2. 中国铁路广州局集团有限公司, 广州 510088)

摘要:【目的】高速铁路差异沉降成因与邻近地面沉降、地表覆盖等周边环境之间的关系对铁路建设和运维整治至关重要,而常规监测手段无法实现路基及周边历史地面沉降和地表覆盖时空连续演化及影响关系的监测分析。【方法】为开展高速铁路差异沉降成因溯源研究,根据 2018—2020 年某铁路运营监测数据确定路基差异沉降段作为试验区,联合卫星 PS-InSAR 和光学影像目视解译分析铁路路基差异沉降成因与地面沉降、地表覆盖变化之间的关系,利用克里金内插、断面提取等 GIS 方法获取铁路线上及邻近地面沉降和地表覆盖变化的时空对比专题成果,通过不同目标结果的多维验证揭示了该段铁路路基差异沉降成因。【结果】试验结果显示:(1)线位周边的新建和高密度居民区共 9 处,与线位左右侧 4 处不均匀沉降中心区的空间位置重叠,2018—2020 年最大沉降速率分别为 69, 50, 35 mm/a; (2)路基线上不同断面位置存在 38, 24 mm/a 和 11 mm/a 的差异沉降,且相同断面的历年地面差异沉降方向基本一致; (3)时空演化分析揭示了路基邻近地面沉降中心演化与邻近地面施工状态(横断面 2 和 3)、高密度居住区(横断面 1 和 4)的时空变化特征契合。【结论】联合卫星 InSAR 和光学影像开展路基及周边地面沉降与地表覆盖变化监测分析,能够揭示路基线上差异沉降成因与周边环境影响因素的关系,并为铁路路基差异沉降成因溯源提供可行的方法参考。

关键词: 高速铁路; InSAR; 光学影像; 沉降; 周边环境; 影响因素**中图分类号:** U238; U213.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13238/j.issn.1004-2954.202407200001

Research on Traceability Method for Causes of Differential Settlement in High-Speed Railway Based on InSAR and Optical Images

LI Guangyu¹, ZHOU Wenming¹, GAO Zhifei², GAN Jun¹

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China; 2. China Railway Guangzhou Group Co., Ltd., Guangzhou 510088, China)

Abstract: [Objective] The causes of differential settlement of high-speed railway subgrades and their relationships with adjacent ground settlement, surface coverage, and other surrounding environmental factors are crucial for railway construction, operation, and maintenance management. However, conventional monitoring methods cannot monitor and analyze the spatiotemporal continuous evolution of historical ground settlement and surface coverage, nor their influence relationships in the surrounding area of the subgrade. [Methods] To investigate the traceability of causes of differential settlement in high-speed railway subgrades, a study area with differential settlement was identified based on the operational monitoring data of a certain railway from 2018 to 2020. The causes of differential settlement of the high-speed railway subgrade and their relationships with ground settlement and surface coverage changes were analyzed by integrating satellite PS-InSAR data and visual interpretation of optical imagery.

GIS methods such as Kriging interpolation and cross-section extraction were used to obtain thematic spatiotemporal comparative results of ground settlement and surface coverage changes along the railway line and its vicinity.

收稿日期: 2024-07-20; 修回日期: 2024-10-16; 网络首发日期: 2025-03-06

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司重点课题(P2022X001); 中国铁路设计集团有限公司重点课题(2023A0240101)

作者简介: 李广宇(1992—), 男, 工程师, 2018年毕业于西南交通大学测绘科学与技术专业, 工学硕士, 主要从事铁路测绘工作, E-mail: liguangyu@crdc.com。

Multidimensional validation of multiple analysis results revealed the causes of differential settlement in this railway section. [Results] The results showed: (1) there were nine newly developed and high-density residential areas around the railway alignment, spatially overlapping with four centers of uneven settlement zones on both sides of the line. The maximum settlement rates from 2018 to 2020 were 69 mm/a, 50 mm/a, and 35 mm/a, respectively. (2) Differential settlements of 38 mm/a, 24 mm/a, and 11 mm/a were observed at different cross-section positions along the subgrade, and the direction of differential ground settlement at the same cross-section remained generally consistent over the years. (3) The spatiotemporal evolution analysis revealed that the evolution of the ground settlement centers near the subgrade corresponded well with the spatiotemporal change characteristics of the nearby ground construction status (cross-sections 2 and 3) and high-density residential areas (cross-sections 1 and 4). [Conclusion] The integration of satellite InSAR and optical imagery for monitoring and analyzing ground settlement and surface coverage changes around the subgrade can reveal the relationship between the causes of differential settlement on the subgrade line and the influencing factors of the surrounding environment, providing a feasible methodological reference for tracing the causes of differential settlement in railway subgrade.

Key words: high-speed railway; InSAR; optical imagery; settlement; surrounding environment; influencing factors

引言

高速铁路路基差异沉降是影响列车运行平稳性的重要因素,也是运维安全的重大隐患,通常解决方法是利用轨道精调施工来保证轨道的高平顺性^[1-2]。然而,轨道平顺性的整治工程对于高铁长期安全运维是治标不治本,且存在允许调整限值等问题,地面沉降、地表覆盖变化等线上差异沉降溯源和源头整治是从根本上解决这一问题的关键^[3-6]。水准监测、北斗、静力水准等传统沉降监测手段多是以点形式的小区域监测为主,提供监测点位或者结构体形变量值,并没有联合地面沉降和地表覆盖时空变化分析彼此间的影响关系,不能为线上差异沉降溯源分析提供有效、丰富、直观、可靠的时空数据支撑。因此,在点监测手段的基础上,需借助 InSAR 和光学影像解译等技术研究分析高速铁路基线上差异沉降成因与邻近地面沉降、地表覆盖变化之间的关系,为路基线上差异沉降成因溯源提供佐证^[7-9]。

目前,时序 InSAR 技术和光学影像解译已经成为获取区域地面沉降和沉降成因分析的常用技术手段^[10-12],但结合具体铁路工点的工程实践仍然缺乏应用深度和可行的技术思路。2018 年,李广宇等^[13]研究基于 Sentinel-1A 数据的京津冀大区域时序 InSAR 形变监测方法,并结合光学影像地物信息对大范围区域沉降成因进行分析,但对光学影像和 InSAR 技术融合的工程化应用深度不够;2019 年,刘桂卫等^[14]研究光学判释、InSAR 等遥感技术在既有铁路沿线广域地

灾筛查中的工作,以及各种技术的优劣势;2020 年,杨斌等^[15]结合时序 InSAR 监测地面沉降、地下水动态变化及人类活动相关资料,研究分析京津冀区域高铁沿线地表沉降时序演化态势,确定沿线沉降与人类活动、地下水开采相关;2023 年和 2024 年,王战卫和胡涛等^[16-17]分别研究基于 SAR 和光学影像在矿区地表塌陷和滑坡等小区域地灾的监测应用,为地灾形成原因和机理提供了方法;2023 年,王凌霄等^[18]研究一种适用于地下水位变化诱发的地基沉降计算方法,结合现场监测数据对比获取路基因地下水位变化导致变形的机制。结合近几年高速铁路基线上差异沉降^[1-3]和沿线区域沉降^[4,11-12]相关研究文献可知路基线上差异沉降与地面沉降之间关系分析的研究必要性,以及 InSAR 和光学影像综合遥感技术在滑坡形变、开采沉降等机理分析和形变成因溯源方面的优势,但鲜有在高速铁路基差异沉降成因溯源方面的应用研究和案例。

通过分析 2018—2020 年某高铁运营监测数据,确定路基线上差异沉降段落作为研究区。基于 2018—2020 年的 Sentinel-1A 卫星和光学影像,采用 PS-InSAR 方法和光学影像人工解译方法获取该区域的年际地面沉降和地物变化监测结果,通过克里金空间插值等 GIS 方法^[19]分别制作地面沉降等值线、等值面和横断面时空对比分析专题图。结合基础地理信息数据,解译和制作历年铁路沿线邻近施工、居住人口密度等地表覆盖变化时空对比专题图。综上,融合不同空间目标的地面沉降和地表地物覆盖变化进行多维时空演化对比分析,获取线上差异沉降、不均匀地面沉降和

线下施工、人口密度等地表覆盖变化之间的关系,成功溯源因施工和人口密度增加引起的线上差异沉降,为高铁结构差异沉降周边环境影响因素溯源和工程防治提供丰富、可靠的时空数据支撑。

1 研究方法

1.1 PS-InSAR 方法

PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR) 技术是基于永久散射体的差分干涉相位,进行网络邻域差分及线性形变和高程误差参数建模与解算,并采用时空滤波方法分离非线性形变、大气延迟、基线误差和噪声等相位,获取高精度时序形变信息的 InSAR 测量技术。假设某区域获取了 N 景 SAR 影像,通过数据处理,组成了 M 个干涉对,第 K 个干涉相位数学模型^[10-12]为

$$\varphi_{\text{int},k}(x,y;T_k) = \varphi_k^h(x,y) + \varphi_k^f(x,y) + \varphi_k^{\text{def}}(x,y) + \varphi_k^{\text{ndef}}(x,y) + \varphi_k^{\text{atm}}(x,y) + \varphi_k^{\text{noi}}(x,y) \quad (1)$$

式中, $\varphi_k^h(x,y)$ 为地形相位; $\varphi_k^f(x,y)$ 为参考椭球面相位; $\varphi_k^{\text{def}}(x,y)$ 为线性形变相位; $\varphi_k^{\text{ndef}}(x,y)$ 为非线性形变相位; $\varphi_k^{\text{atm}}(x,y)$ 为大气相位; $\varphi_k^{\text{noi}}(x,y)$ 为随机噪声相位。

网络邻域差分模型为

$$\varphi_{\text{diff},k}(x_i,y_i;x_j,y_j;T_k) = \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B_k^\perp \Delta h(x_i,y_i;x_j,y_j) + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T_k \cdot \Delta v(x_i,y_i;x_j,y_j) + \Delta \varphi_k^{\text{res}}(x_i,y_i;x_j,y_j) \quad (2)$$

式中, λ 、 R 和 θ 分别为星载雷达传感器波长、斜距和入射角参数; $B_k^\perp$ 、 T_k 分别为第 K 个干涉对中两景 SAR 影像成像时的空间垂直基线和时间基线; $\Delta h(x_i,y_i;x_j,y_j)$ 为地形残差增量; $\Delta v(x_i,y_i;x_j,y_j)$ 为线性形变速率增量; $\Delta \varphi_k^{\text{res}}(x_i,y_i;x_j,y_j)$ 为残余相位之差。

假定相邻 PS 点 $\Delta \varphi_k^{\text{res}}(x_i,y_i;x_j,y_j)$ 在空间上具有一定的相关性,即 $\Delta \varphi_k^{\text{res}}(x_i,y_i;x_j,y_j) < \pi$,根据二维周期图解算方法求解 Δh 和 Δv ,再基于时间维 M 个干涉相位,采用最小二乘方法求解线性形变速率和高程相位^[10]。

根据相关研究^[10-13,20-24]可知,PS-InSAR 已经广泛应用于铁路工程地面沉降及构筑物形变监测,《DI-SAR 铁路沉降监测技术及应用》^[11]、T/CECS 1530—2024《轨道交通工程 InSAR 形变监测标准》的监测精度可达到毫米级。根据 T/CECS 1530—2024 和文献^[25]可知,基于 Sentinel-1 SAR 数据的时序 InSAR 平原区域形变监测精度在 5 mm 的精度范围内。

1.2 普通克里金插值方法

Kriging 方法又称空间局部插值法,是以半变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内利用 N 个已

知属性值的离散点对区域化未知属性变量进行无偏最优估计的一种方法,目前存在简单克里金、普通克里金、泛克里金等诸多克里金方法,这些方法的主要区别在于假设条件不同。本文采用基于球状模型的普通克里金方法,该方法的假设条件是空间属性 z 是均一的,即对于空间任意一点 (x,y) ,都有相同的期望 e 和方差 σ^2 ^[19]。克里金插值公式为

$$\hat{z}(x_0,y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i,y_i) \quad (3)$$

式中, $\hat{z}(x_0,y_0)$ 为待估未知 (x_0,y_0) 的属性; $z(x_i,y_i)$ 为已知 (x_i,y_i) 的属性; λ_i 为权重系数。

不同克里金方法的主要区别在于假设条件的不同,普通克里金方法的假设条件是,权重系数 λ_i 需要满足待估值 $\hat{z}(x_0,y_0)$ 与真实值 $z(x_0,y_0)$ 之差最小的最优系数和无偏估计的条件,公式为

$$\min_{\lambda_i} \text{Var}(\hat{z}(x_0,y_0) - z(x_0,y_0)) \quad (4)$$

$$E(\hat{z}(x_0,y_0) - z(x_0,y_0)) = 0 \Rightarrow \sum_{i=0}^n \lambda_i = 1 \quad (5)$$

根据无偏估计条件,结合式(3)和式(5)推导可知,权重系数需要满足 $\sum_{i=0}^n \lambda_i = 1$;根据方差最小原则,结合式(4)和式(5)推导可知权重系数 λ_i 为

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, γ_{ij} 为半方差函数,又称半变异函数。

基于前文中普通克里金的假设条件,半变异函数的定义为

$$\gamma_{ij} = \sigma^2 - \text{Cov}[z(x_i,y_i), z(x_j,y_j)] = \frac{1}{2} E[(z(x_i,y_i) - z(x_j,y_j))^2] \quad (7)$$

式中, $\text{Cov}[\]$ 为点 $z(x_i,y_i)$ 和 $z(x_j,y_j)$ 的协方差; σ^2 为方差; $E[\]$ 为点 $z(x_i,y_i)$ 和 $z(x_j,y_j)$ 差值平方的期望值。

因此,结合半变异函数定义,根据空间上属性相近的地理学第一定律可知:空间相似度可以用距离 d 表达,半变异函数 γ_{ij} 和 d_{ij} 之间存在一定的函数关系,函数关系包括线性模型、球状模型、高斯模型、指数模型等。本文采用球状模型,其公式为

$$\gamma_{ij}(d_{ij}) = \begin{cases} 0 & d_{ij} = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{d_{ij}}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{d_{ij}^3}{a^3} \right) & 0 < d_{ij} \leq a \\ C_0 + C & d_{ij} > a \end{cases} \quad (8)$$

1.3 基于 InSAR 和光学影像解译的高铁差异沉降综合遥感溯源技术方法

高铁线上差异沉降溯源问题一直是难点,而高铁运营沉降监测可以确定线上沉降,但无法判断与地面不均匀沉降、地表覆盖变化之间的关系,无法为成因溯源提供监测数据支撑。为此,本文结合过往工程实际应用经验和既有监测方法,形成一种基于 InSAR 和光学影像的高铁差异沉降综合遥感溯源技术方法,如图 1 所示。其基本思想是:基于高铁运营监测数据或者时序 InSAR 区域地表沉降普查数据确定有可能的线上或线下差异沉降段落。对重点关注区域,利用光学影像解译高铁邻近地表覆盖时空演化规律,利用高精度时序 InSAR 方法获取该段落的年际沉降速率或者时间序列结果。进而,基于 GIS 制图和时空统计分析方法制作不同空间目标的地面沉降和地表覆盖变化时空对比专题成果,实现融合 InSAR 技术和光学影像的时空大数据优势。通过不同目标结果的多维验证和规律总结,探明高速铁路基线上差异沉降成因与邻近地面沉降、邻近地表覆盖变化之间的关系,确定高铁差异沉降形成原因。

2 研究结果及分析

2.1 区域概况

根据 2018—2020 年铁路运营监测数据分析,确定某运营铁路的不均匀沉降段落作为研究对象结果。根据收集资料分析,该区域周边存在诸多居民区、施工区、学校和企事业单位等,人口较多,地下水和地热资源丰富,但无地表水可用,过往人口生活用水和工农业生产全部开采地下水,造成地下水多年来一直处于超采状态,并形成诸多因地下水开采导致的区域沉降漏斗。近几年,对地下水使用控采和回灌的防治措施,地面沉降得到缓解。

2.2 光学影像目视解译

根据研究对象的运营监测周期需求,对 2018 年、



(a) 2018年



(b) 2019年



(c) 2020年

图 2 沉降区历年光学卫星影像解译结果

Fig. 2 Interpretation results of optical satellite imagery over multiple years for subsidence area

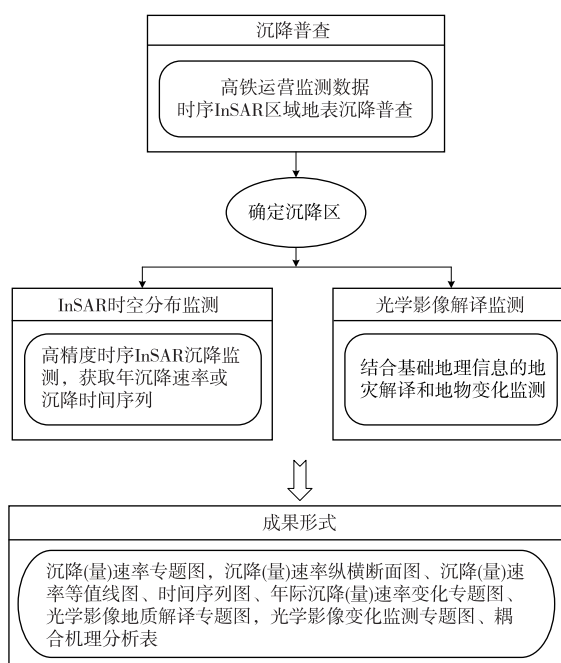


图 1 基于 InSAR 和光学影像的高铁差异沉降综合遥感溯源技术方法

Fig. 1 Comprehensive remote sensing traceability method for causes of differential settlement in high-speed railways based on InSAR and optical images

2019 年、2020 年三期光学卫星影像进行人工解译,获取线路邻近区域地表覆盖物状态、地表覆盖物属性的历年变化,如图 2 所示。通过分析可知,面向线位大里程,线路右侧新建居住区 7 处,处于施工状态的居住区有 3 处,这 3 处新建居住区在 2019 年和 2020 年逐步完成施工,并有居民陆续入住;线路左侧存在 1 处以企业、学校为主的高密度永久居住区和 1 处新建小区,新建小区在 2020 年施工基本完成,高密度永久居住区和新建小区施工会造成地下水位变化,进而影响地面沉降。

2.3 PS-InSAR 形变监测和时空对比分析

采用覆盖 2018—2020 年的 94 景 Sentinel-1A SAR 数据,空间分辨率为 $15\text{ m} \times 3\text{ m}$,利用 PS-InSAR

方法分别获取 2018 年、2019 年、2020 年 3 个年度的地面沉降监测结果,如图 3 所示。

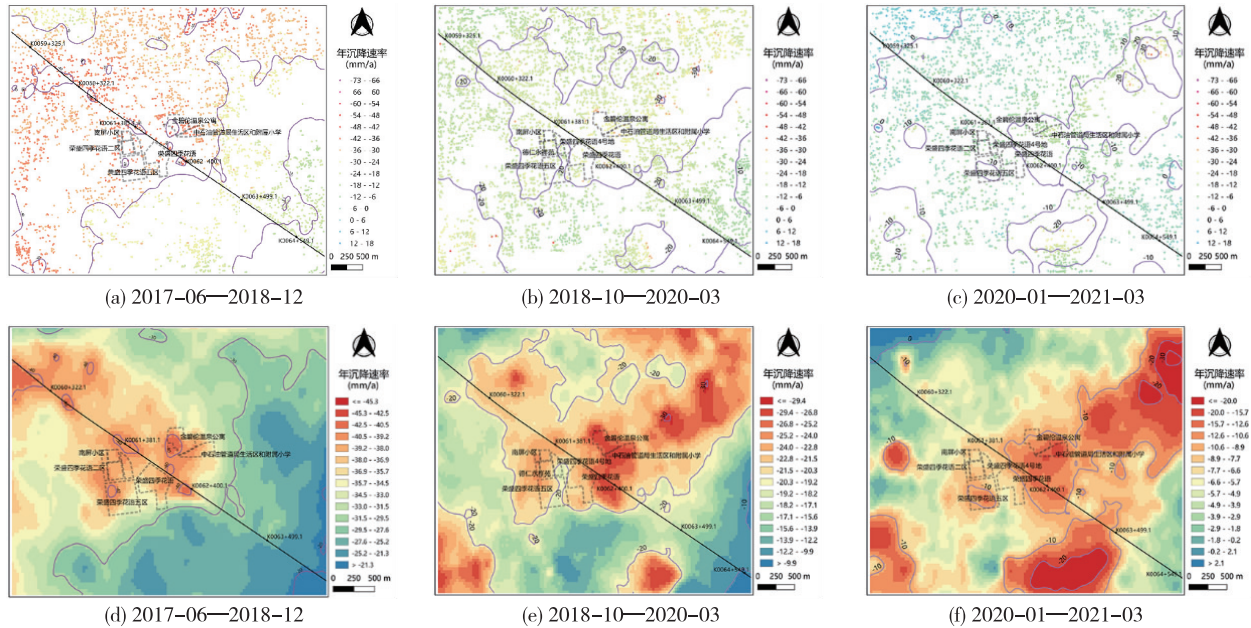


图 3 历年 K61+420~K62+000 沉降速率和区域沉降分布

Fig. 3 Settlement velocities and regional settlement distribution over multiple years from K61+420 to K62+000

根据 PS-InSAR 区域沉降监测结果,利用克里金内插方法,叠加图 2 所示新建居住小区和永久居住区信息,制作该区域的等值线图 and 沉降分布图,如图 3 所示。假定 PS-InSAR 解算参考点较为稳定,本文沉降速率是相对于参考点沉降速率为 0 mm/a 解算而来,正值代表相对于解算参考点地面隆起,负值代表相对于解算参考点地面沉降,统一表述为地面沉降速率。对比分析可知,里程 K61+420 至 K62+000 线位两侧存在较为明显的不均匀沉降区,且 2017 年 6 月至 2018 年 12 月,该区域相对沉降速率在 +18 ~ -69 mm/a,存在 4 个不均匀沉降中心区;2018 年 10 月至 2020 年 3 月,该区域沉降速率在 +10 ~ -50 mm/a,存在 4 个不均匀沉降中心区;2020 年 01 月至 2021 年 3 月,该区域沉降速率在 +11 ~ -35 mm/a,存在 3 个不均匀沉降中心区。综合判断,该区域存在 2 处较大沉降区,且年沉降速率呈现逐年减小的态势。结合历年光学卫星影像解译结果分析可知,线位两侧不均匀沉降区和周围新建小区施工、居住人工密度增加、高密度永久居住区等有一定关系,且红色沉降中心与矢量范围在空间维度存在一定重叠。但该段落线位两侧地面沉降明显不一致,线位左侧地面沉降高于线位右侧,这也说明该里程段落线上差异沉降和线位左右侧的不均匀沉降有一定关系。

为了进一步确定线上差异沉降和线位左右两侧不均匀地面沉降分布的关系,制作如图 4 所示横断面成果时空对比,其中十字交叉处是线位中心位置,横断面

横轴是面向线位大里程从右向左的距离(m),即十字丝左侧为线位右侧,十字丝右侧为线位左侧,纵轴是沉降速率(mm/a),横断面时空对比图纵向是相同时间不同空间位置处的横断面成果,横向是不同时间同一空间位置处的横断面成果。

通过纵向分析结果可知,相同时段内,不同断面的路基及邻近区域均存在一定程度的地面差异沉降。通过横向分析结果可知,在 2018 年、2019 年和 2020 年,相同断面路基线上位置分别存在 38,24,11 mm/a 的差异沉降,且相同断面的历年地面差异沉降方向基本一致,揭示了路基线上差异沉降与地面沉降之间存在关系。

其中,在 2018—2020 年的时间范围内,横断面 2 和横断面 3 线位右侧(对应横断面图十字线左侧)沉降曲线变化较为明显,线位附近曲线相同距离的差异沉降量呈加剧趋势。结合图 2 沉降区历年光学卫星影像解译结果可知,这与线位右侧新建小区施工和居住人口密度增加有一定关系。同时,横断面 1 和横断面 4 显示的沉降中心和曲线形状变化相对较小,说明永久高密度居住区对地面沉降存在影响但较为稳定。

2.4 地面沉降和邻近地表覆盖时空演化分析

结合图 2~图 4 综合分析可知,邻近线下不均匀地面沉降和地表覆盖变化存在一定关系,路基线上沉降与地面沉降存在一定关系。为了进一步明确路基线上沉降原因,提炼路基差异沉降、邻近地面沉降和地表覆盖变化时空演化分析,如表 1 所示,横断面路基线上位

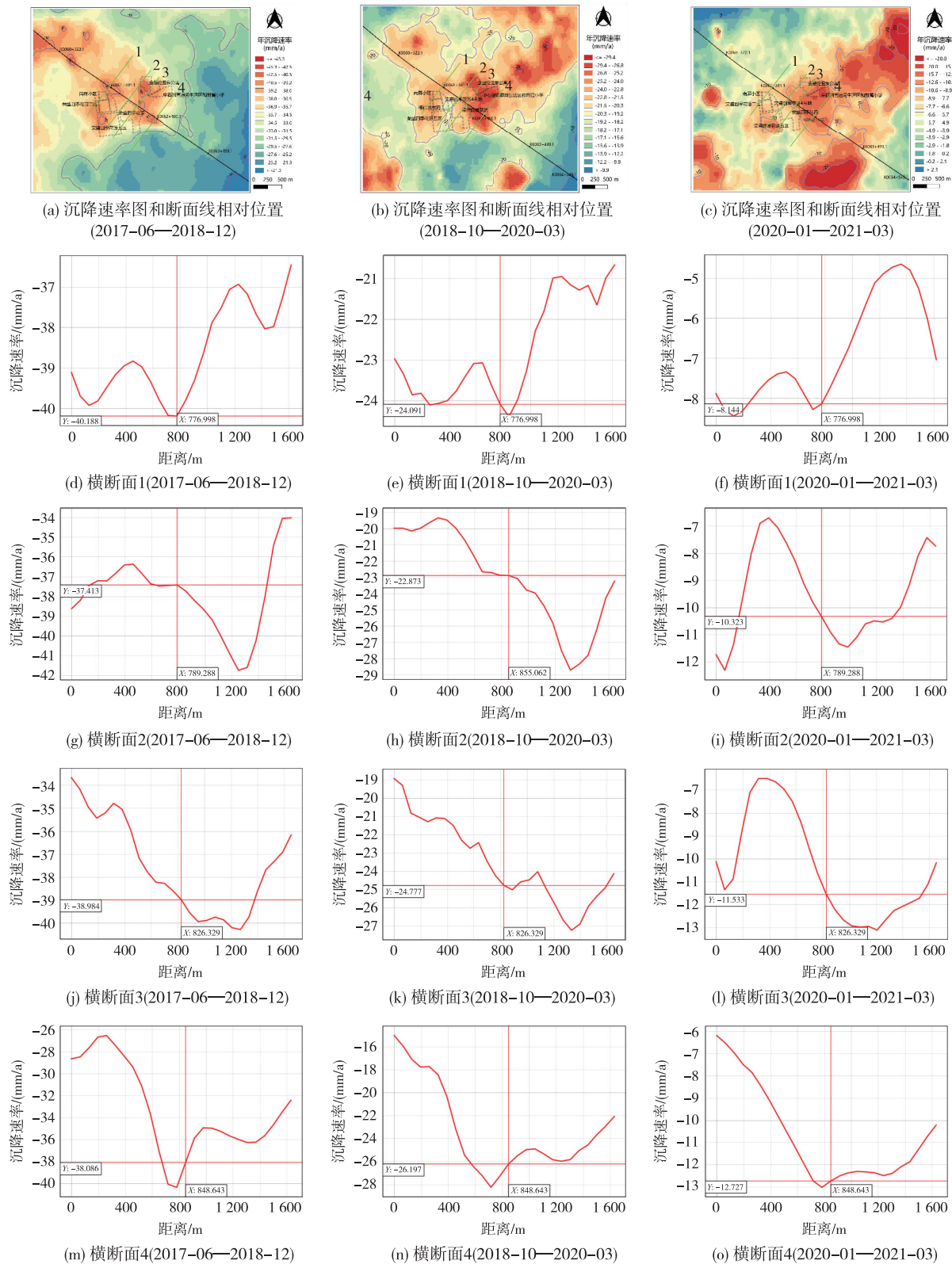


图4 K61+420~K62+000 线位左右两侧横断面时空对比

Fig. 4 Spatiotemporal comparison of cross-sections on both sides of railway alignment from K61+420 to K62+000

置处均存在差异沉降,对应的邻近地面沉降与地表覆盖变化一直存在且变化。通过多维时空对比验证,邻近地面沉降与地表覆盖变化之间的关系主要有两种,一是地面沉降中心空间位置变化随着施工区和居住人

口密度变化,二是地面沉降中心空间位置在高密度永久居住区较为稳定。

结合图4和表1分析可知,针对地面沉降中心空间位置变化会随着施工区和居住人口密度变化这种情

表 1 地面沉降和地表覆盖时空演化分析

Tab. 1 Spatiotemporal evolution analysis of ground subsidence and surface coverage

对象 时间/状态	2018 年		2019 年		2020 年	
	地物状态	沉降状态	地物状态	沉降状态	地物状态	沉降状态
荣盛四季花语五区(线位右侧、横断面 2 和 3)	施工	沉降中心区域	施工完成	沉降中心区域边缘	施工完成/居住	沉降中心区域
荣盛四季花语(线位右侧、横断面 2 和 3)	施工	沉降中心区域	施工	沉降中心区域边缘	施工完成	沉降中心区域边缘
金碧伦温泉公寓(线位左侧、横断面 2)	施工(刚开始)	沉降中心区域边缘	施工	沉降中心区域	施工完成	沉降中心区域边缘
南屏、德仁、荣盛二区和 4 号地(线位右侧、横断面 1)	密集居住区	沉降中心区域	密集居住区	沉降中心区域	密集居住区	沉降中心区域
中石油管道局生活区和附属小学(线位左侧、横断面 1)	高密度永久居住区	沉降中心区域	高密度永久居住区	沉降中心区域	高密度永久居住区	沉降中心区域

况,以荣盛四季花语五区(线位右侧、横断面 2 和横断面 3)、荣盛四季花语(线位右侧、横断面 2 和横断面 3)和金碧伦温泉公寓(线位左侧、横断面 2)为例,随着地物状态(施工、居住)的变化,沉降状态的变化呈现了一定的规律性,即通过施工阶段的变化和居住人口的增多,地面沉降中心空间位置一直在变化,随着施工的进行、完成和居住状态变化,地面沉降中心位置与施工区、居住区的空间位置之间大致经历了重合、偏离和重合的空间移动变化,阐释了地面沉降中心和邻近地表覆盖变化(施工区、居住人口增加)之间存在因果关系。针对地面沉降中心空间位置在高密度永久居住区较为稳定这种情况,以南屏、德仁、荣盛二区及 4 号地(线位右侧、横断面 1)以及中石油管道局生活区和附属小学(线位左侧、横断面 1)等两个居住区为例,南屏、德仁、荣盛二区及 4 号地这块居住区是以新建居住区为主的新人口聚集场所,沉降中心区域由德仁永祥苑逐渐转移到以荣盛四季花语二区及 4 号地,再转移到新建高人口密度的荣盛四季花语五区。中石油管道局生活区和附属小学是一个高密度永久居住区,人口密度较大,因此,地面沉降中心空间位置一直位于该区域,阐释了不均匀地面沉降中心和邻近地表变化(高密度永久居住区)之间存在因果关系。

通过对不同目标的地面沉降、地表覆盖时空演化分析可知,路基邻近地面沉降中心演化与邻近地面施工状态(横断面 2 和横断面 3)、高密度居住区(横断面 1 和横断面 4)的时空变化特征契合,尤其是铁路沿线施工对于地面不均匀沉降的影响较为明显。

3 结论

根据 2018—2020 年某高铁运营监测数据确定路基差异沉降段落作为研究区,基于 2018—2020 年的 Sentinel-1A 卫星和光学影像,采用 PS-InSAR 方法和光学影像目视解译方法获取该区域的年际地面沉降和地表覆盖变化监测结果,利用克里金插值等 GIS 方法,解译和制作路基及邻近地面沉降、邻近地表覆盖变化时空对比专题图。通过不同目标的时空对比分析,主要结论如下。

(1)通过沉降区历年光学卫星影像解译结果和地

面沉降速率监测结果时空维对比分析可知,线位周边新建和高密集居民区共 9 处,与线位左右侧 4 处不均匀沉降中心区的空间位置重叠,2018—2020 年最大沉降速率量分别为 69,50,35 mm/a。

(2)通过横断面时空对比分析可知,2018—2020 年,路基线上不同断面位置存在 38,24 mm/a 和 11 mm/a 的差异沉降,且相同断面的历年地面差异沉降方向基本一致,揭示了路基线上差异沉降与地面沉降之间存在关系。

(3)通过时空演化分析可知,路基邻近地面沉降中心演化与邻近地面施工状态(横断面 2 和横断面 3)、高密度居住区(横断面 1 和横断面 4)的时空变化特征契合,尤其是铁路沿线施工对于地面不均匀沉降的影响较为明显。

综上,根据高铁线上差异沉降监测和溯源分析的需求,基于 PS-InSAR 和光学影像地物变化解译方法,先后通过路基及邻近区域历年地面沉降和地表覆盖分析、路基及邻近线下地面沉降横断面时空对比分析、不同空间目标地面沉降和地表覆盖时空演化分析进行时空对比分析,总结一致规律,验证结果可靠性,形成一种可用于高铁路基差异沉降成因溯源的综合遥感监测分析方法,揭示了线上差异沉降成因与地面沉降、线下地表覆盖变化之间的关系,为高铁结构差异沉降周边环境影响因素溯源提供直观的时空数据佐证。

参考文献:

[1] 赵文辉,韩峰,王瑞琦,等.黄土地区铁路近接路基变形分析及监测研究[J].铁道学报,2023,45(10):127-134.
ZHAO Wenhui, HAN Feng, WANG Ruiqi, et al. Analysis and Monitoring of Deformation of Adjacent Railway Subgrade in Loess Region [J]. Journal of the China Railway Society, 2023,45(10):127-134.

[2] 杜元浩.高速铁路运营线路沉降监测技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022.
DU Yuanhao. Research on Settlement Monitoring Technology of High-speed Railway Operating Line[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.

[3] 王凌霄,沈宇鹏,石天奇,等.地下水位变化条件下高速铁路路基变形机制分析[J].铁道标准设计,2023,67(11):53-60.
WANG Lingxiao, SHEN Yupeng, SHI Tianqi, et al. Analysis of Deformation Mechanism of High-speed Railway Subgrade under the Change of Groundwater Level[J]. Railway Standard Design, 2023,

- 67(11):53-60.
- [4] 李国和,黄大中,高文峰.雅万高铁沿线地面沉降分析及主要防治对策[J].铁道标准设计,2019,63(2):1-8.
LI Guohe, HUANG Dazhong, GAO Wenfeng. The Analysis of Ground Subsidence along Jakarta-Bandung High-speed Railway and Main Control Measures[J]. Railway Standard Design, 2019,63(2):1-8.
- [5] 沈科.区域地面沉降对(京沪)高速铁路路基的影响及对策研究[D].成都:西南交通大学,2013.
SHEN Ke. Impacts and Solutions of the Regional Land Subsidence to the Subgrade of (Beijing-Shanghai) High-speed Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [6] 周萌,宫全美,王炳龙,等.路基不均匀沉降值对板式轨道动力响应的影响[J].铁道标准设计,2010,54(10):1-4.
ZHOU Meng, GONG Quanmei, WANG Binglong, et al. Influence of Uneven Sedimentation Value of Subgrade on Dynamic Response of Slab Tracks[J]. Railway Standard Design, 2010,54(10):1-4.
- [7] CHEN B B, GONG H L, CHEN Y, et al. Investigating Land Subsidence and Its Causes along Beijing High-speed Railway Using Multi-platform InSAR and a Maximum Entropy Model[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021,96:102284.
- [8] ZHANG R, ZHANG B, LIU G X. Uneven Ground Subsidence Monitoring in Mining Area Based on MT-InSAR Technique[C]//EOEC-GIT4NDM2019 Conference, Chengdu, 2019:24-26.
- [9] QIU D W, TONG Y C, WANG Y Z, et al. Land Subsidence Analysis along High-speed Railway Based on EEMD-prophet Method[J]. Scientific Reports, 2024,14:732.
- [10] 刘国祥,陈强,罗小军,等. InSAR 原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2019:220-232.
- [11] 高文峰,王长进,甘俊. DInSAR 铁路沉降监测技术及应用[M]. 北京:中国铁道出版社,2020:169-171.
- [12] 李广宇,张云龙. 北斗-InSAR 融合的铁路沉降监测[J]. 测绘通报,2022(S2):1-7.
LI Guangyu, ZHANG Yunlong. Railway Settlement Monitoring Based on BDS-InSAR Fusion[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(S2):1-7.
- [13] 李广宇,张瑞,刘国祥,等. Sentinel-1A TS-DInSAR 京津冀地区沉降监测与分析[J]. 遥感学报,2018,22(4):633-646.
LI Guangyu, ZHANG Rui, LIU Guoxiang, et al. Land Subsidence Detection and Analysis over Beijing-Tianjin-Hebei Area Based on Sentinel-1A TS-DInSAR[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(4):633-646.
- [14] 刘桂卫,王长进,李国和,等. 遥感技术在既有铁路地灾防治中应用方法研究[J]. 铁道工程学报,2019,36(6):23-27.
LIU Guiwei, WANG Changjin, LI Guohe, et al. Application Research on the Remote Sensing Technology in Geological Disaster Prevention and Control of Existing Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019,36(6):23-27.
- [15] 杨斌,刘国祥,姚京川,等. 京津冀地区高速铁路沿线区域地表沉降监测及时序演化态势分析[J]. 中国铁道科学,2020,41(1):1-9.
YANG Bin, LIU Guoxiang, YAO Jingchuan, et al. Ground Settlement Monitoring and Time-series Evolution Situation Analyzing along High Speed Railway in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. China Railway Science, 2020,41(1):1-9.
- [16] 王战卫,安黎明,张斌,等. 结合 SBAS-InSAR 与光学遥感的矿区地表塌陷监测[J]. 科学技术与工程,2023,23(17):7239-7246.
WANG Zhanwei, AN Liming, ZHANG Bin, et al. Surface Subsidence Monitoring in Mining Areas Combined with SBAS-InSAR and Optical Remote Sensing[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(17):7239-7246.
- [17] 胡涛,杨成生,侯祖行,等. 基于光学与 SAR 数据的贵州发耳镇尖山营滑坡监测研究[J]. 大地测量与地球动力学,2024,44(1):82-88.
HU Tao, YANG Chengsheng, HOU Zuhang, et al. Monitoring of Jianshanying Landslide in Fa'er Town, Guizhou Province Based on Optical and SAR Data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2024,44(1):82-88.
- [18] YU B, LIU G X, ZHANG R, et al. Mapping and Interpreting of Subsidence in West Tianjin with High Spatiotemporal X-band Persistent Scatterer SAR Interferometry[C]//2012 Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications. Shanghai, China. IEEE, 2012:144-148.
- [19] 汤国安,杨昕,张海平,等. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2021:184-234.
- [20] JIA H L, YU B, ZHANG R, et al. Land Subsidence Detection by PSInSARTM Based on TerraSAR-X Images[J]. Advanced Materials Research, 2011,301/302/303:641-645.
- [21] ZHANG R, LIU G X, LI T, et al. An Integrated Model for Extracting Surface Deformation Components by PSI Time Series[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014,11(2):544-548.
- [22] ZHANG R, LIU G X, LI Z L, et al. A Hierarchical Approach to Persistent Scatterer Network Construction and Deformation Time Series Estimation[J]. Remote Sensing, 2014,7(1):211-228.
- [23] 宿宝忠. TS-InSAR 技术在郑济高铁区域沉降时空动态分析中的应用[J]. 铁道勘察,2022,48(3):32-38.
SU Baozhong. Application of TS-InSAR Technology in Temporal and Spatial Dynamic Analysis of Interannual Regional Subsidence of Zhengzhou-Ji'nan High-speed Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022,48(3):32-38.
- [24] 甘俊. 融合星载/地基 InSAR 的铁路施工滑移监测分析研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(4):11-15,78.
GAN Jun. Analysis Study of the Monitoring Slip-deformation in Railway Construction through the Fusion of Spaceborne/Ground-based SAR Interferometry[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021,38(4):11-15,78.
- [25] 李广宇,甘俊,周文明,等. TS-DInSAR 大区域多尺度沉降监测与精度评定[J]. 铁道勘察,2020,46(4):9-16.
LI Guangyu, GAN Jun, ZHOU Wenming, et al. Multi-scale Subsidence of Wide Area Monitoring and Precision Assessment Based on TS-DInSAR[J]. Railway Investigation and Surveying, 2020,46(4):9-16.

(编辑:邓帅)