

长春市InSAR地表沉降与交通基础设施形变监测分析

孙涛¹, 刘国祥^{1,2}, 桑明智³, 陈坤¹, 钱昆¹, 张瑞^{1,2*}

¹西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都

²西南交通大学高速铁路安全空间信息技术联合工程实验室, 四川 成都

³中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京

收稿日期: 2022年3月3日; 录用日期: 2022年4月6日; 发布日期: 2022年4月12日

摘要

城市发展过程中的大规模建筑施工和地下工程易造成地表沉降, 甚至引发地下空洞和路面坍塌等严重问题, 对交通基础设施的威胁极为显著。针对近年来新兴发展城市的地表沉降监测与交通基础设施稳定性分析, 以长春市为典型研究区域, 基于Sentinel-1B卫星2017年~2021年间的109景C波段SAR影像, 基于NPS-InSAR技术开展了长春市近4年来的地表形变监测及演化状况分析。针对长春市交通网络沿线的差异性形变分布特征, 依据交通基础设施的类型开展了归因性讨论。实验表明: 长春市中西部区域整体较为稳定, 城市的外围区域存在差异性形变。相关研究数据可为城市交通基础设施运营维护与区域性工程监测提供参考。

关键词

长春市, 地表沉降, 合成孔径雷达干涉, 交通基础设施, 形变监测

InSAR Ground Subsidence Monitoring in Changchun City and Deformation Analysis of Traffic Infrastructure

Tao Sun¹, Guoxiang Liu^{1,2}, Mingzhi Sang³, Kun Chen¹, Kun Qian¹, Rui Zhang^{1,2*}

¹Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Rail Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

³China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing

*通讯作者。

文章引用: 孙涛, 刘国祥, 桑明智, 陈坤, 钱昆, 张瑞. 长春市 InSAR 地表沉降与交通基础设施形变监测分析[J]. 测绘科学技术, 2022, 10(2): 51-60. DOI: 10.12677/gst.2022.102006

Abstract

Large-scale construction and underground engineering in the process of urban development tend to cause surface settlement, and even lead to serious problems such as underground cavity and road collapse, which pose a very significant threat to transportation infrastructure. In this paper, the surface subsidence monitoring and transportation infrastructure stability analysis of newly developed cities in recent years are analyzed. Changchun city is taken as a typical research area, and 109 C-band SAR images of sentinel-1B satellite from 2017 to 2021 are obtained. Based on the NPS-InSAR technology, the surface deformation monitoring and evolution of Changchun city in recent 4 years were carried out. On the basis of this, attribution discussion is carried out according to the types of transportation infrastructure according to the distribution characteristics of differential settlement along the transportation network in Changchun. The experimental results show that the central and eastern regions of Changchun are relatively stable as a whole, and there is differential subsidence in the peripheral areas of the city. Relevant research data can provide reference for transportation infrastructure operation and maintenance and regional engineering monitoring.

Keywords

Changchun City, Ground Subsidence, InSAR, Transportation Infrastructure, Deformation Monitoring

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

交通网作为城市日常运行的重要动脉,承担着促进城市快速发展和经济繁荣的重大任务。其中城市的轨道交通和主要道路凭借其便捷快速和超大运量,日渐成为一个城市迈向区域经济、政治和文化中心的重要基础设施。长春市是我国东北地区中心城市之一,交通基础设施的建设取得了重大成就,基础设施体系不断完善。截止到2020年,全市高速公路里程达467.6公里,普通干线公路里程达1315.1公里。目前,长春市轨道交通网络由5条线路组成,全长100.17公里,日均客运量56万人次[1]。

在城市建设中,不均匀的地表沉降会对地面上的交通基础设施的安全产生严重威胁。而在已有的研究中发现,地表沉降往往多发生在经济高速发展的地区,且多与过量开采地下水等人为因素有关[2]。随着长春市提出将在2025年前建设成为人口超千万,经济破万亿的特大城市目标,今后将会进行更多的工程建设和地下水的抽取等影响地面稳定的活动。为保障城市交通基础设施的安全和健康运营,掌握其沉降特征就显得十分重要。

常规的监测方法如水准测量、全球定位系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)和全站仪测量等,获得的往往是离散的数据,不能很好的反映大范围、长时间、整体性的形变规律。而城市的交通基础设施覆盖整个城市区域,因此常规的监测手段不能很好的满足监测需求。合成孔径雷达差分干涉测量技术(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR)可以在短时间内获取大范围的形变信

息。但受限于时空失相干和大气效应的负面影响, DInSAR 的精度很难突破厘米级[3]。新世纪以来, 研究人员提出了永久散射体干涉测量技术(Permanent Scatterer InSAR, PS-InSAR)、小基线集时序干涉(Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)等时序 InSAR 技术, 通过引入大量时序观测数据极大地克服了上述局限, 使得观测精度在理论上达到了毫米级[4], 展现出在形变监测领域中的巨大应用潜力。

大量研究表明, 应用时序 InSAR 技术监测地表沉降是一种有效的测量手段, 例如邱志伟等利用 ALOS 数据对南京地区进行了短基线集技术的试验, 并通过对比实测水准数据, 表明该技术能够准确地反演出地表形变情况[5]。范军等利用 Sentinel-1A 数据以昆明主城区为例进行沉降监测, 通过 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术进行交叉验证, 监测结果一致, 证明了时序 InSAR 技术用于地表沉降监测的可靠性[6]。刘国祥等对天津区域利用网络化永久散射体雷达干涉测量(Networked Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, NPS-InSAR)方法, 通过对永久散射体的自由构网进行解算和信息提取, 实验表明该算法在长时序地表形变监测当中, 得到的结果具有更好的精度和可靠性[7] [8]。

本文基于 NPS-InSAR 方法, 选取长春市地区的 Sentinel-1B 影像为数据源, 探测城市地表及其交通基础设施形变特征的空间分布格局, 并对存在明显形变特征的路段及其形变原因进行分析讨论。结果表明本文引入的 NPS-InSAR 方法有效提高了提取城市地表形变的精度和可靠性, 并且该方法可为其他地区的地表形变监测提供参考。

2. 研究区域与数据源

长春市位于我国东北平原腹地, 位于东北亚经济圈的几何中心, 市区处于东北地区交通枢纽, 吉林省内的绝大多数高速公路都交汇于此, 与东北各大城市紧密相连。研究区东南部低山丘陵向中西部台地平原过渡地带, 地势相对平缓, 气候属于中温带大陆性亚湿润季风气候[9]。长春市总体上看地质状况良好, 但水资源短缺, 属于我国严重缺水的城市之一[10], 受地下水采伐和局部区域基坑降水的影响, 城市地表形变问题日益显著。同时, 由于车辆动载荷的扰动和长春市季节性冻土的冻胀融沉现象的存在, 导致城市交通网络的运营面临着巨大的压力与挑战。

实验区域及采用的 Sentinel-1B 影像覆盖范围如图 1 所示(红框代表 Sentinel-1B 影像覆盖范围, 黄框代表本文研究区范围)。实验选取了 109 景 C 波段中分辨率的 Sentinel-1B 影像, 所获取的 SAR 影像时间跨度为 2017 年 4 月 5 日至 2021 年 4 月 8 日(具体成像时间如表 1 所示)。SAR 影像数据的原始幅宽为 250 km, 卫星入射角范围在 26.1°至 46.0°之间。此外, 为消除地形对最终结果的影响, 本文采用 2015 年发布的高精度全球数字地表模型数据(AW3D), 其水平分辨率为 30 米, 高程精度为 5 米, 是目前精度最高的公开地形数据产品之一。

Table 1. Imaging time

表 1. 影像成像时间

成像日期	成像日期	成像日期	成像日期	成像日期	成像日期	成像日期	成像日期	成像日期	成像日期
2017/4/5	2017/9/20	2018/2/11	2018/7/17	2018/11/26	2019/4/7	2019/9/22	2020/2/25	2020/8/11	2020/12/21
2017/4/29	2017/10/2	2018/2/23	2018/7/29	2018/12/8	2019/4/19	2019/10/4	2020/3/20	2020/8/23	2021/1/2
2017/5/23	2017/10/14	2018/3/19	2018/8/10	2018/12/20	2019/5/1	2019/10/16	2020/4/1	2020/9/4	2021/1/14
2017/6/4	2017/10/26	2018/3/31	2018/8/22	2019/1/1	2019/5/13	2019/11/9	2020/4/13	2020/9/16	2021/1/26
2017/6/16	2017/11/19	2018/4/12	2018/9/3	2019/1/13	2019/5/25	2019/11/21	2020/4/25	2020/9/28	2021/2/7
2017/6/28	2017/12/1	2018/4/24	2018/9/15	2019/1/25	2019/6/6	2019/12/3	2020/5/7	2020/10/10	2021/2/19
2017/7/10	2017/12/13	2018/5/6	2018/9/27	2019/2/6	2019/6/18	2019/12/15	2020/5/19	2020/10/22	2021/3/3

Continued

2017/7/22	2017/12/25	2018/5/18	2018/10/9	2019/2/18	2019/7/12	2019/12/27	2020/6/12	2020/11/3	2021/3/15
2017/8/15	2018/1/6	2018/5/30	2018/10/21	2019/3/2	2019/8/5	2020/1/20	2020/6/24	2020/11/15	2021/3/27
2017/8/27	2018/1/18	2018/6/11	2018/11/2	2019/3/14	2019/8/29	2020/2/1	2020/7/6	2020/11/27	2021/4/8
2017/9/8	2018/1/30	2018/6/23	2018/11/14	2019/3/26	2019/9/10	2020/2/13	2020/7/30	2020/12/9	

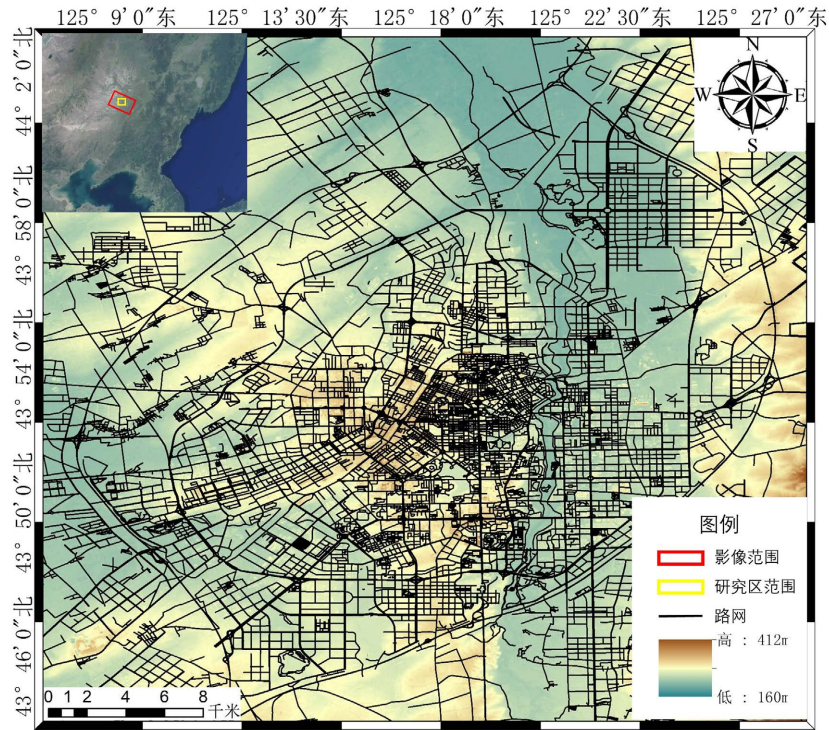


Figure 1. Test area and image coverage
图 1. 试验区域及影像覆盖范围

3. 时序干涉数据处理与地表形变速率场

3.1. 数据处理流程与方法

为更好的反映交通基础设施的稳定性，并且针对在长春地区夏季温热多雨，冬季寒冷漫长的特殊气候条件下，极易产生在长时间的雨雪天气中由于分辨单元内电学性质的改变而引起的失相关现象。本文先通过历史天气记录，从 SAR 数据集中剔除在雨雪等恶劣天气状况下的成像，以提高后续生成的干涉图的质量。然后引入 NPS-InSAR 方法，采用振幅离差法筛选 SAR 数据集中相位稳定，信噪比高的散射体点。

相对于参考时刻 t_0 ，假设在 t_A ， t_B 时刻获取到了 SAR 影像图，则根据这两幅 SAR 影像获取的第 j 幅干涉图中的雷达坐标系中的某一像元 (x, r) 的解缠相位为：

$$\begin{aligned} \delta\phi_j(x, r) &= \phi(t_B, x, r) - \phi(t_A, x, r) \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp j} \Delta z}{r \sin \theta} \\ &\quad + [\phi_{\text{atm}}(t_B, x, r) - \phi_{\text{atm}}(t_A, x, r)] + \Delta n_j \end{aligned} \quad (1)$$

$\forall j=1, \dots, M$ 式中, λ 为雷达入射波波长, $d(t_B, x, r)$, $d(t_A, x, r)$ 为相对于参考时刻 t_0 的沿 LOS 向的累积形变量, $B_{\perp j}$ 为垂直基线, Δz 为高程改正量, r 为雷达传感器到目标点的斜距, θ 为雷达入射角, Δn_j 为噪声。

利用 NPS-InSAR 技术可获得了更为可靠的 PS 点, 例如建筑物, 构筑物, 路灯等硬目标反射体。实际处理过程中, 通过设置的欧几里德距离阈值, 对任意两永久散射体(Persistent Scatterer, PS)点自由连接生成的基线进行筛选, 选取小于该阈值的基线参与构建 PS 自由网, 如式(2)所示。

$$S(x_p, y_p; x_q, y_q) = \sqrt{[f_r(x_q - x_p)]^2 + [f_a(y_q - y_p)]^2} \leq S_0 \quad (2)$$

其中, x, y 为像素的像空间坐标; f_r 和 f_a 分别为距离向和方位向像空间距离转换为地面几何距离的比例因子; S_0 为距离阈值, 根据空间域内的大气变化梯度确定, 设置为 1 km。

利用参数 γ 判断 PS 网络中的基线质量, 当 γ 达到最大化时所得的模型最优解 $(\Delta v, \Delta \varepsilon)$,

$$\gamma = \left| \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\cos \Delta \omega_i + j \sin \Delta \omega_i) \right| = \max \quad (3)$$

其中: γ 为基线模型相关系数; $j = \sqrt{-1}$; $\Delta \omega_i$ 表示观测值与拟合值之差, 即:

$$\Delta \omega_i = \Delta \phi_i - \frac{4\pi \bar{B}_{\perp i} \Delta \varepsilon}{\lambda \bar{R} \sin \bar{\theta}} - \frac{4\pi T_i \Delta v}{\lambda} \quad (4)$$

其中, $\bar{B}_{\perp i}$, \bar{R} 和 $\bar{\theta}$ 为两点对应参数的平均值; $\Delta \varepsilon$ 和 Δv 分别为两点间高程误差增量和形变速率增量。扣除不符合条件的基线, 仍存在大量冗余弧段的观测, 在此基础上, 通过最小二乘平差解算可以提取各 PS 点的高程改正的最或然值和线性形变速率, 利用该算法有效提高了形变速率提取的精度和可靠性[11]。

3.2. 长春市地表形变速度场

近年来, 随着城市的向外扩张和快速发展, 多数一二线城市均受到局部不均匀形变的影响, 导致较为显著的区域性地表形变。对于长春市而言, 远离市中心的城市周边区域更为明显, 如西部绿园区的同心街道(图 2(a)), 位于城市北部的北湖科技开发区(图 2(b))、以及位于城市南部的净月开发区(图 2(c))等。总的来看, 长春市三环路内未发现大规模形变漏斗的存在, 但在城市周边, 如四环路周围, 存在局部的差异性形变。

结合长春市地表形变速度场分析表明, 截止到 2021 年, 长春市整体呈现差异性形变, 在三环路内城市区域形变速率较小, 形变速率大约在 $-4 \text{ mm/a} \sim 2 \text{ mm/a}$, 在城市周边的经济开发区的形变较明显, 例如图 2(c)区域的形变速率大约在 $-15 \text{ mm/a} \sim -10 \text{ mm/a}$ 。城市区域产生形变的原因可能是相对密集的建筑物对地面产生的荷载, 地下水的开采和建筑物的施工影响等。而环城周边的经济开发区存在的大量工程建设, 大规模的地面基坑施工, 导致的人工降低地下水位, 以及工程竣工后大量大型建筑物和车流量对地面产生的动静荷载, 都是导致这些地区形变相对较大的重要原因。基于长春市总体形变格局, 本文对不同类型交通网络的时空形变信息进行探讨分析。

4. 交通基础设施网络形变监测与演化态势

4.1. 不同建设类型的交通网络基础设施形变空间分布

城市交通网络遍布市区, 城市地表不均匀的形变会对交通网络产生一定程度上的影响。根据不同的建设类型, 交通网络划分为轨道交通网络和公路网络。如图 2 所示, 城市交通网络覆盖了整个研究区域, 其在市中心分布较为密集, 同时呈现出向城市周边延伸的趋势。

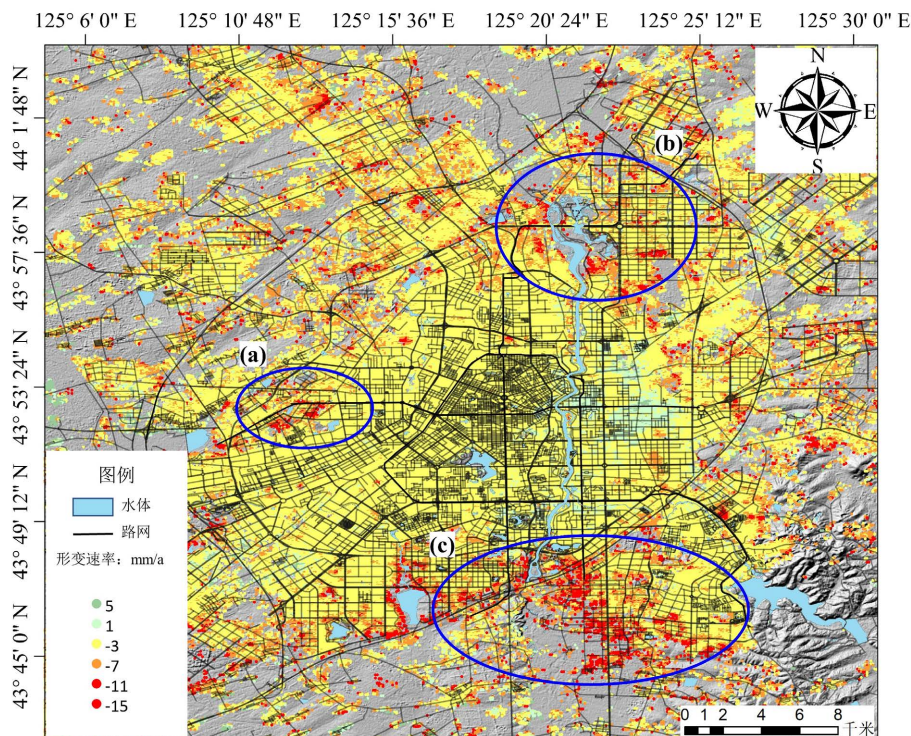


Figure 2. Velocity field of surface deformation in Changchun
图 2. 长春市地表形变速度场

轨道交通网络的整体形变格局如图 3 所示, 大部分区间处于较为稳定的状态, 形变范围大约在 -10 mm/a \sim -5 mm/a。基于城市形变的总体格局, 对轨道交通进行具体分析。

轨道交通 1 号线, 如图 3(a)所示, 整体呈现形变趋势, 形变速率大约在 -5 mm/a 左右, 在解放大路地铁站附近和线路末端形变量相对较大, 由于交通线路交汇, 车流量等动荷载大和受到大规模的工程建设的影响。

轨道交通 2 号线, 如图 3(b)所示, 开通于 2018 年 8 月, 连接了长春市的東西两端, 跨越了主城区和城市周边的区域, 具有明显的形变变化特征, 呈现出在人民大街西侧路段的不均匀形变大于人民大街东侧路段的分布特征。造成该分布特征的原因主要在于: 轨道交通 2 号线西侧和中部存在大量的建筑群, 受施工作业的扰动, 呈现出不均匀形变的趋势。

轨道交通 3, 4 号线是城市轻轨列车, 建成时间较早。如图 3(c)和图 3(d)所示, 由于轨道交通 3 号, 4 号线整体途径长春市大部分地区, 因此形变分布特征与城市的总体形变格局类似。在亚泰大街以西的轨道交通 3 号线路段, 呈现出差异性形变的形变特征, 形变速率在 -5 mm/a 左右, 随着线路的向东延伸, 逐渐趋于稳定, 直到延伸到城市的东部快速路附近时开始出现显著的形变特征。而轨道交通 4 号线除位于南端线路有明显的形变特征外, 总体上较为稳定, 形变速率在 -2 mm/a \sim 2 mm/a 左右。

轨道交通 8 号线, 于 2018 年 10 月开通。如图 3(e)所示, 轨道交通 8 号线路段沿线存在显著形变, 平均形变速率大约在 -10 mm/a \sim -3 mm/a 之间。该路段整体处于稳定状态, 但存在部分形变明显区域。

城市中主要公路网形变图 4 所示, 主城区公路网平均形变速率大约在 -10 mm/a \sim -2 mm/a 左右, 位于城市周边的经济开发区内的公路网显示出有较大的形变特征。这表明, 新兴开发区的大规模建设对区域性形变及交通网络的形变存在负面影响。因此, 在快速城市化的同时需注意防范地面形变对城市交通网络的负面影响, 保障城市的安全健康地运营。

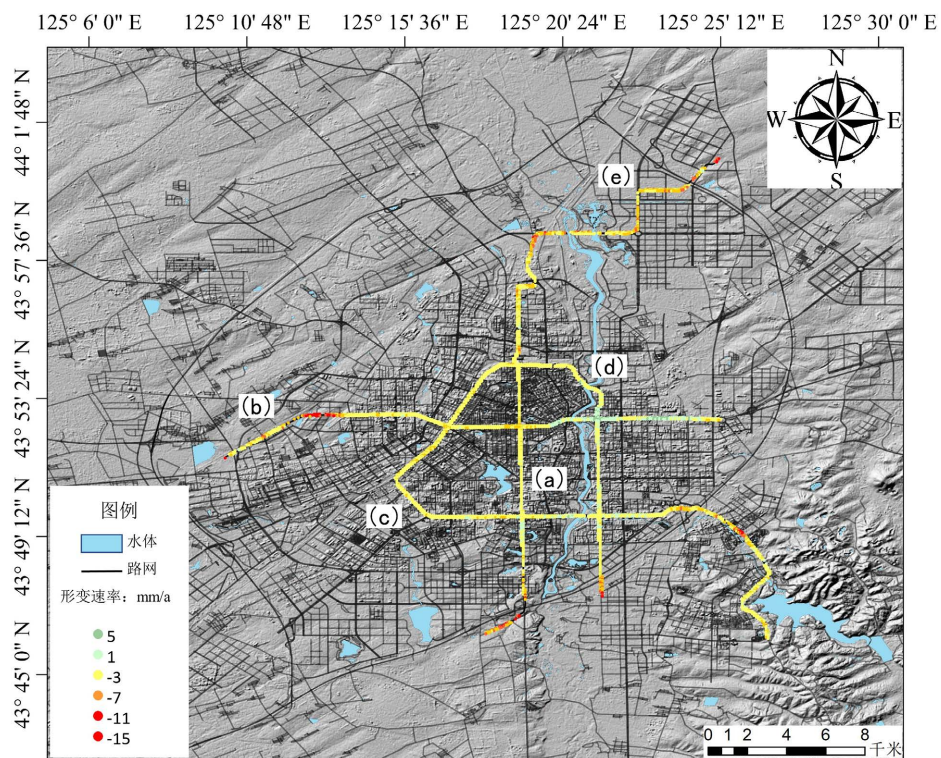


Figure 3. The distribution of general deformation characteristics of rail transit
图 3. 轨道交通总体形变特征分布

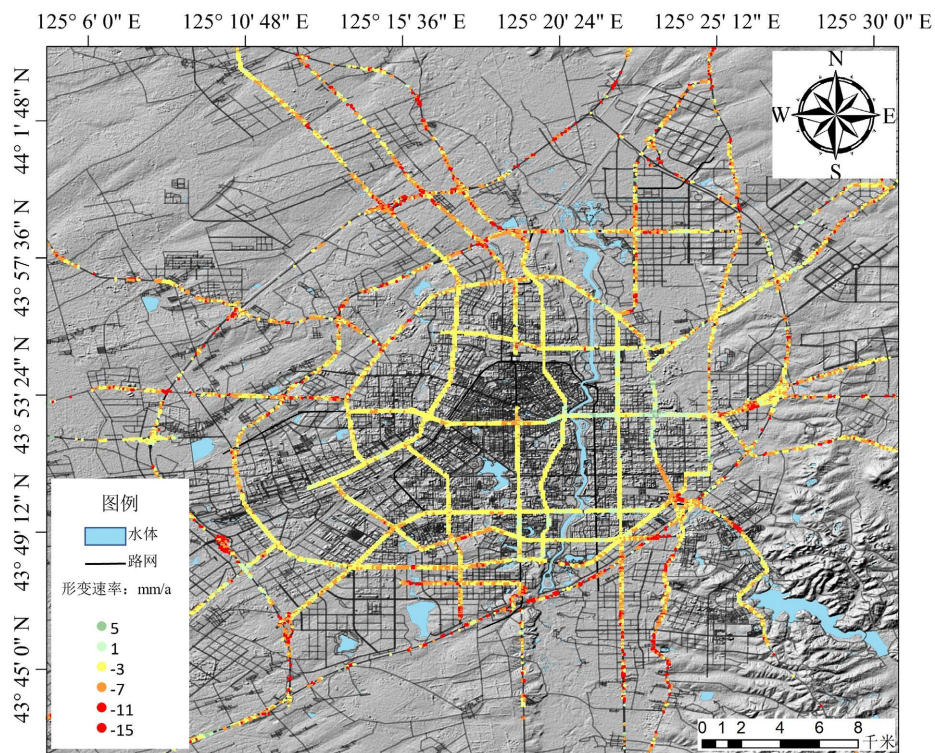


Figure 4. The distribution of deformation characteristics of highway network
图 4. 公路网总体形变特征分布

4.2. 交通基础设施及周边区域形变演化态势分析

净月开发区由于近年来工程建设频繁, 建筑物数量逐渐增多, 因此该区域的形变逐渐明显。以该区域内的地铁 4 号线南延区段为例, 地铁 4 号线南延区段位于临河街下方, 近年来的两侧的建筑施工较为频繁, 基坑降水和地下水的采伐以及该区域的季节性冻土的冻胀融沉现象可能会对地铁 4 号线的稳定造成影响。研究表明, 在天工路站至十里堡站的地铁区段附近区域存在明显形变区域, 该区域的年平均形变速率为 -10 mm/a 左右。福祉大路与临河街交汇处的形变点 A 的形变时间序列如图 5 所示, 最大形变量达 -53 mm 。由形变点 A 的累计形变量的时间序列可知, 该区域形变趋势逐年增加, 但在不同季节形变量变化程度不同。例如, 每年 10 月份到次年 4 月份期间无明显形变趋势, 这可能是冬季冻土膨胀抵消了部分地面形变的结果。相应的, 每年 4 月份到 7 月份, 随着气温的回升, 冻土消融加剧了地面形变, 致使该时间段内的形变变化较为明显。

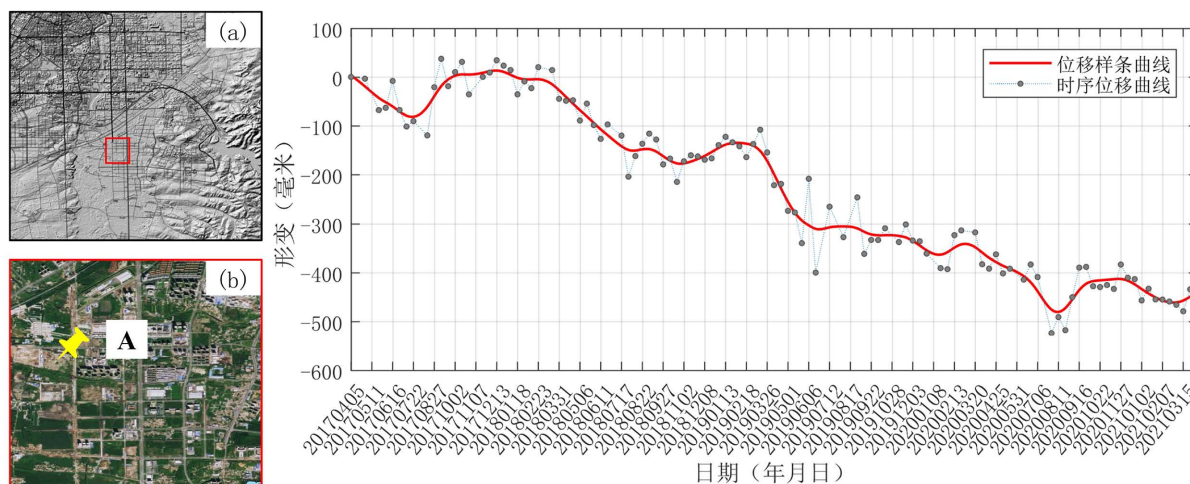


Figure 5. (a) General map of point location, (b) field location of settlement point A, and (c) accumulated settlement amount of settlement point A

图 5. (a) 点位概况图, (b) 形变点 A 的实地位置, (c) 形变点 A 累计形变量

同心街区内兴隆堡站至西环城路站区段地处地铁 2 号线西侧的区域, 建筑物较为密集且存在建筑施工, 区域内局部形变较为显著。实验结果表明该区域内的年平均形变速率达到了 -11 mm/a 。以兴隆堡站的附近区域为例, 形变特征点 B 的形变时间序列如图 6 所示, 该点累计形变量以达到了 -40 mm 。整体上看, 近 4 年来的形变逐渐加大, 但在部分时间段内形变较为稳定, 甚至有一定的反弹, 例如每年的 8 月份左右, 这可能是由于夏季降水频繁从而使得地下水得到补充, 因此这一时期的地面较为稳定, 没有明显形变现象的出现。而在 2019 年底到 2020 年 4 月, 形变量突然增大, 这可能是由于该区域人口众多, 建筑物密集且当时处于疫情隔离的特殊期间, 因而导致地下水开采过量, 从而导致了一定程度的形变现象的发生。总体而言, 该区域 2020 年 4 月以前地表形变较为明显, 2020 年 4 月以后形变速率渐趋平缓, 但仍需持续关注。

5. 结论

在城市交通网络形变监测中应用 NPS-InSAR 技术, 能够高效精准地获取地表形变信息。本文利用中分辨率 Sentinel-1B 影像针对长春市开展了为期四年的长时序地表形变监测, 提取了交通网络沿线的地表形变信息, 并针对不同类型的交通网络开展了归纳与比较分析, 就形变明显区域的形变特征和原因进行

了探讨。针对长春市交通网络的总体监测结果表明,在城市中心的交通网沿线区域较为稳定,形变速率大约在 $-4\text{ mm/a}\sim 2\text{ mm/a}$ 。位于城市周边经济开发区的交通网络沿线的形变现象较为明显,形变速率大约在 $-15\text{ mm/a}\sim -10\text{ mm/a}$ 。

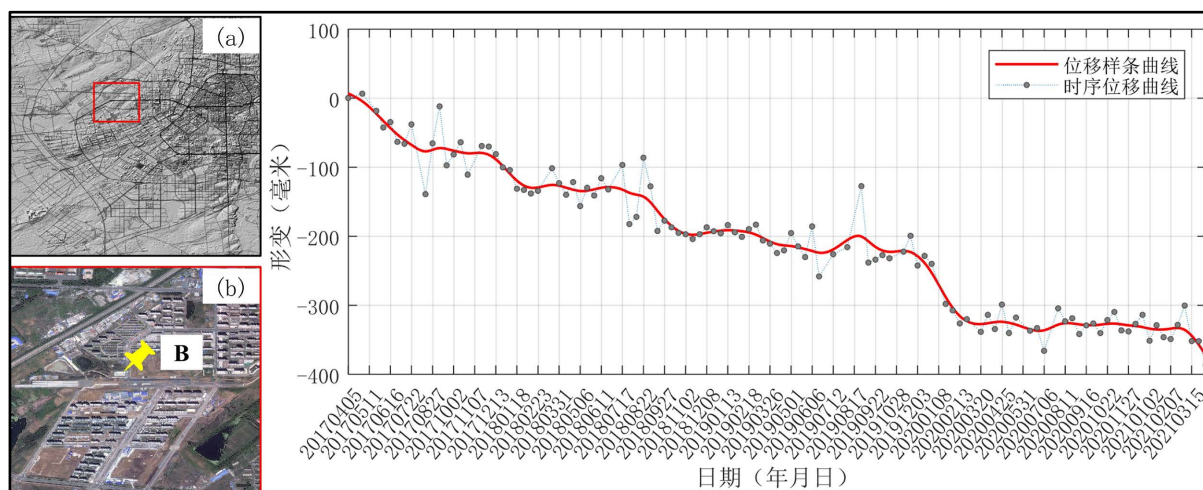


Figure 6. (a) General plot of point, (b) field location of settlement point B, and (c) accumulated settlement amount of settlement point B

图 6. (a) 点位概况图, (b) 形变点 B 的实地位置, (c) 形变点 B 累计形变量

通过研究发现,城市交通网络沿线的形变与经济开发区的大规模的基础建设有关。快速的城市化进程带来的大规模的工程建设,新建的大型建筑物和众多的居民区,以及逐渐增多的车流量等因素,导致了城市化地区的地表土层压缩固结,进而引起该区域交通网络沿线的形变趋势,同时由于研究区域存在季节性冻土,也会对交通基础设施的造成一定的影响。因此在快速城市化的进程中,建议对在城市中有大量工程建设的经济开发区进行特别关注,防止因地表沉降导致交通网络出现破坏,引发事故的发生,从而避免重大经济损失的出现。同时由于城市建筑材料大体相同,因此可以通过 NPS-InSAR 方法获取 PS 点,进而实现利用 NPS-InSAR 方法为其它地区地表形变监测提供参考。

基金项目

国家自然科学基金项目(42071410);四川省科技计划项目(2018JY0564, 2019ZDZX0042, 2020JDTD0003, 2020YJ0322);中国铁建科技重大专项(2019-A02)。

参考文献

- [1] 长春市交通运输局. 长春市交通运输行业现状[EB/OL]. http://ccsjtysj.changchun.gov.cn/zwgk/jtgk/201912/t20191204_2051365.html, 2020-04-21.
- [2] 薛禹群, 张云, 叶淑君, 等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究, 2003(6): 585-593.
- [3] Zebker, H.A., Rosen, P.A. and Hensley, S. (1997) Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 7547-7563. <https://doi.org/10.1029/96JB03804>
- [4] Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., et al. (2001) Comparing GPS, Optical Leveling and Permanent Scatterers. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, **6**.
- [5] 邱志伟, 岳建平, 汪学琴, 等. 基于短基线集技术的城市地表沉降监测研究[J]. 测绘通报, 2016(7): 25-29.
- [6] 范军, 左小清, 李涛, 等. PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术对昆明主城区地面沉降监测的对比分析[J]. 测绘工程, 2018, 27(6): 50-58.

- [7] Zhang, R., Liu, G.X. and Tao, L. (2014) An Integrated Model for Extracting Surface Deformation Components by PSI Time Series. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **11**, 544-548. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2274474>
- [8] Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., *et al.* (2007) Application of the SBAS-DInSAR Technique to Fault Creep: A Case Study of the Hayward Fault, California. *Remote Sensing of Environment*, **109**, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.003>
- [9] 朱光明. 长春市土地利用结构变化及优化研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2012.
- [10] 吕海臣. 长春市地下水开发环境问题研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2000(3): 268-270+273.
- [11] 刘国祥, 陈强, 罗小军, 等. *InSAR 原理与应用*[M]. 北京: 科学出版社, 2019.