引文格式：陈薇,王盼,张丽,等. 利用多时相Sentinel-1数据监测根拉公路冻融形变特征[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 11-16. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.07.003

利用多时相 Sentinel-1 数据监测根拉公路冻融形变特征

陈　薇[1]，王　盼[1]，张　丽[2]，史绪国[1*]
（1. 中国地质大学（武汉） 地理与信息工程学院，湖北 武汉 430074；2. 中国自然资源航空物探遥感中心，北京 100083）

摘　要：由于根河—拉布大林公路（根拉公路）穿越东北高纬度多年冻土区，受冻融循环影响严重，其稳定性监测对公路的安全运营和日常养护至关重要。首先利用多时相InSAR技术分析了2016—2020年覆盖根拉公路的 Sentinel-1 数据，提取了公路及其沿线地区的线性位移速率和季节性位移振幅；然后开展区域线性形变和季节性形变的热点分析，并通过小波变换定量研究地表形变与温度的相关性。结果表明，研究区最大线性位移速率为69.97 mm/a，最大季节性位移振幅为26.34 mm；根拉公路整体路基稳定，但部分路段存在不均匀变形，且受明显的冻融灾害影响；地表形变与温度的共同周期约为374 d，地表形变滞后于温度约38 d。

关键词：季节性冻土；冻融循环；时序InSAR；高速公路
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0011-06

Freeze-thaw Deformation Characteristics Monitoring of the Gen-La Highway Based on Multi-temporal Sentinel-1 Images

CHEN Wei[1], WANG Pan[1], ZHANG Li[2], SHI Xuguo[1]
(1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The Genhe-Labulin Highway (Gen-La Highway) passes through the high-latitude permafrost region in Northeast China and is significantly affected by freeze-thaw cycles. Therefore, its stability monitoring is crucial for ensuring safe operation and routine maintenance. We used multi-temporal InSAR technology to analyze Sentinel-1 data from 2016 to 2020 covering the Gen-La Highway, and extracted the linear displacement speed and seasonal displacement amplitude of the Gen-La Highway and its surrounding areas at first. Then, we conducted a hotspot analysis of regional linear and seasonal deformation, and used wavelet transform to quantitatively investigate the correlation between surface deformation and temperature. The results show that the maximum linear displacement speed in the study area reaches 69.97 mm/a, while the maximum seasonal displacement amplitude is 26.34 mm. The overall roadbed of the Gen-La Highway remains stable, but some sections experience uneven deformation and significant freeze-thaw damage. The common period of surface deformation and temperature is approximately 374 days, with surface deformation lagging behind temperature by about 38 days.

Key words: seasonal permafrost, freeze-thaw cycle, time series InSAR, highway

东北地区是我国唯一的高纬度多年冻土区，也是全国第二大多年冻土区，具有低海拔、高纬度和不稳定的特征。20世纪以来，受全球气候变暖影响，东北地区年均气温显著上升，同时农业开发、森林砍伐、城市扩张和基础设施建设等人类活动加剧，导致多年冻土大规模退化[1]，具体表现为冻土南界逐渐北移、原有冻土岛不断消失、冻土的融化深度持续增加等[2]。冻土退化不仅会对气候、生态系统和地表过程产生不利影响，还增加了自然灾害风险，威胁道路、建筑物、管道和机场等基础设施。据估计，北半球冻土区至少有12万座建筑、4万km道路和9 500 km管道可能受到相关自然灾害的影响[3-4]。随着国家对东北振兴战略和一系列基础设施建设的加速推进，公路作为连接城市、促进经济发展的重要纽带，地位愈发重要。冻土退化引发的路基沉降和冻胀等灾害严重威胁东北地区公路的稳定性，因此监测多年冻土区基础设施的稳定性对交通安全和区域经济发展至关重要。合成孔径雷达干涉（InSAR）技术凭借高精度、全天候、全天时和广覆盖等优势，已成为冻土地表变形监测的重要手段[5]。然而，我国东北多年冻土区植被覆

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42474061）。
第一作者简介：陈薇（2000—），硕士研究生，研究方向为星载雷达干涉测量方法与应用，E-mail：chenwei@cug.edu.cn。
通信作者：史绪国（1988—），博士，副教授，研究方向为星载雷达干涉测量方法与地学应用，E-mail：shixg@cug.edu.cn。

盖率较高，给 InSAR 技术的应用带来巨大挑战[6]。近年来，时序 InSAR 技术在一定程度上克服了传统 DInSAR 受空间失相干和大气延迟影响的局限性，通过分析 SAR 数据中保持相干或短时间内保持相干的像素准确分离 InSAR 数据中的大气扰动、地形误差和形变信号，实现高精度变形监测[7]，已成功应用于我国东北多年冻土区的基础设施形变监测[8-11]。尽管时序 InSAR 技术已取得了一定进展，但现有研究主要侧重于稳定性分析，因此本文进一步引入核密度热点分析和小波分析，突出对基础设施构成威胁的变形信号，精确刻画冻融过程的周期性形变特征，从而为高纬度冻土区基础设施的稳定性评估提供技术支撑。

根拉公路是连接根河市与拉布大林镇的重要交通干线，其稳定性监测对公路安全运营和风险防控具有重要意义。本文利用 SBAS-InSAR 技术分析了 2016 年 5 月—2020 年 4 月获取的升轨 Sentinel-1 影像，获取了根拉公路沿线区域的线性位移速率和季节性位移振幅，并生成相应的热点图；然后对典型区域的线性形变和季节性形变进行分析，并采用小波变换方法定量分析了地表形变与地表温度的相关性。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

东北多年冻土区的北部和东部与俄罗斯接壤，西部和东南部分别与蒙古国和朝鲜毗邻[12]。区域内地势中心低、四周高，地形复杂，北部和南部分布着大兴安岭、小兴安岭和长白山脉。根拉公路位于内蒙古自治区呼伦贝尔市，地理范围大致为 50°~51°18′N、120°~121°30′E，属于大兴安岭西坡丘陵岛状冻土区，全长 125.76 km，其中多年冻土分布长度为 32.66 km，占路线总长的 25.97%；海拔约为 700~1 000 m，是内蒙古自治区公路网“三横九纵”布局中重要的纵向通道[13]；属寒温带湿润型森林气候，主要覆盖森林和草地；多年平均气温为-3~-5℃，冻土地温较高；地形相对平缓。

根拉公路所在的岛状多年冻土区对气候变化极为敏感，尤其是在全球变暖背景下，其退化速度和影响范围比连续冻土区更大[14]，因此成为研究冻土对气候变化响应的重要区域。由于冻土与非冻土区域交替分布，岛状多年冻土区的水热平衡较复杂，冻融过程中地表径流、地下水补给以及土壤温湿度等参数波动较大，呈现显著的季节性和周期性特征[15]。该区域冻土厚度普遍较薄，通常为 1~3 m，且呈岛状分布，导致地基条件极不均匀，对交通基础设施和建筑工程的稳定性构成威胁。因此，研究根拉公路的时空形变特征，有助于深入理解冻土区形变机制，为基础设施建设和维护提供科学依据。

1.2 数据来源

Sentinel-1 卫星是欧洲空间局哥白尼计划的重要组成部分，主要用于海洋与陆地监测以及应急响应[7]。Sentinel-1B 卫星搭载 C 波段 SAR，提供全天候雷达影像，于 2016 年 4 月 25 日发射，但由于电力系统故障，2021 年 12 月 23 日停止工作。Sentinel-1B 的常规操作模式为宽幅干涉，方位向和距离向分辨率为 5 m×20 m，覆盖范围可达 250 km。本文获取 2016 年 5 月—2020 年 4 月的 Sentinel-1B 数据进行时序 InSAR 分析。时间序列干涉组合见图 1。生成干涉图时采用多视处理，方位向和距离向的多视系数分别为 4 和 1，以提高干涉图的信噪比。此外，本文还利用 30 m 分辨率的 AW3D DSM 进行高精度配准、差分干涉和地理编码等处理。

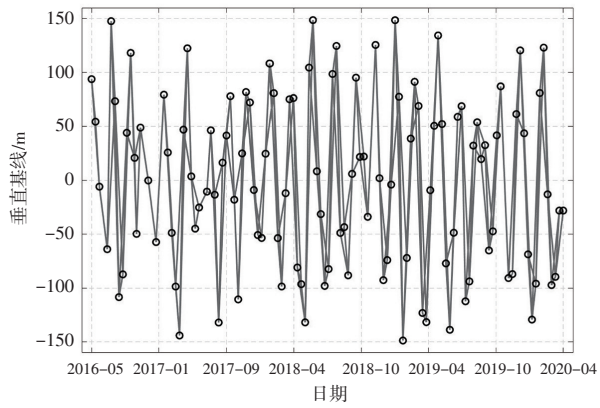


图 1 时间序列干涉组合

2 研究方法

2.1 时序 InSAR 数据分析

InSAR 干涉图中的像素可分为点目标和分布式目标。点目标通常不受失相干噪声的影响，在 SAR 影像中始终保持高相干性[16]，是时序 InSAR 分析的首选；分布式目标则易受时间失相干的影响，相位稳定性较差，需通过滤波提高其信噪比。然而，在东北多年冻土区，点目标分布较稀疏。传统窗口滤波方法未考虑像素特征的差异化处理，难以满足精确分析的要求。在 SAR 影像中，局部区域内具有相似特征的地物目标通常会表现出相似的回波特性，其数学分布也趋于一致。这类具有统计相似性的像素被称为同质点。在自然场景中，点目标像素的分布较稀疏，且同质点的数量较少；而分布式目标像素的同质点则较多。为提高分布式目标的稳定性，本文在生成差分干涉图后，采

用快速同质点选取方法[17]对分布式目标进行同质点滤波分析，以提高分布式散射体相位的稳定性。

本文通过联合振幅离差阈值（<0.6）和时间相干系数阈值（<0.3）确定目标点集。对于选定的像素，基于不规则三角网构建相位解缠网络，并采用最短路径算法排除低相干边，以优化网络结构[18]；再通过最小费用流方法获取解缠后的相位值。与此同时，时间维上可能存在相位解缠误差，本文通过冗余观测的闭合相位信息进行改正[19]。在时间维上，给定像素的解缠相位三角形闭合环可表示为[20]：

$$\boldsymbol{C}\left(\Delta\varnothing+2\pi\boldsymbol{U}\right)=0 \tag{1}$$

式中，$\Delta\varnothing$ 为 n 个解缠相位；$\boldsymbol{U}$ 为待求解的整周数校正向量，大小为 $n\times1$；$\boldsymbol{C}$ 为包含所有可能闭合环的矩阵。

若不存在解缠错误，则 $\boldsymbol{U}=0$；若存在解缠错误，则可通过基于枝切法的整数线性规划估计 $\boldsymbol{U}$。改正后每个像素的解缠相位为：

$$\varphi=\varphi_{\mathrm{orb}}+\varphi_{\mathrm{topo}}+\varphi_{\mathrm{disp}}+\varphi_{\mathrm{atm}}+\varphi_{\mathrm{n}} \tag{2}$$

式中，φ_{orb}、φ_{topo}、φ_{disp}、φ_{atm} 和 φ_{n} 分别为轨道误差、地形误差、地表变形、大气延迟和噪声的相位分量。

通过双线性多项式估计并去除轨道误差相位分量，可较准确地消除轨道效应；再利用最小二乘法和垂直基线与地形误差之间的线性关系移除地形误差相关的相位分量。为去除与高程相关的大气效应，本文先采用高程与相位的线性拟合方法，再通过时空滤波进一步消除大气残差。移除上述相位分量后，利用最小二乘法求解地表形变速率和时序累积形变。多年冻土区的土壤因季节性冻结与融化形成周期性地表形变，为形变监测提供了独特的时空特征。获得的时间序列形变信号中包含年际形变速率和季节形变振幅。为更好地描述长期形变趋势，可采用线性模型进行拟合，而年内冻胀融沉周期性形变则通过正弦曲线来模拟[21]。

$$d_{\mathrm{LOS}}=-\frac{\lambda}{4\pi}\times\varphi_{\mathrm{disp}} \tag{3}$$

$$d_{\mathrm{LOS}}=v\times t+\beta_1\sin\left(\frac{2\pi}{P}t\right)+\beta_2\cos\left(\frac{2\pi}{P}t\right) \tag{4}$$

$$\delta_{\mathrm{LOS}}=\sqrt{\beta_1^2+\beta_2^2} \tag{5}$$

式中，d_{LOS} 为地表累积形变；v 为长期线性位移速率；β_1、β_2 为季节性位移正弦、余弦项的振幅；P 为冻融循环周期，本文将周期设为1年；δ_{LOS}为季节性位移振幅。

2.2　小波变换分析

连续小波变换（CWT）能将时间序列扩展到时频域，并生成频谱功率图，以展现信号在时间和频率上的变化情况。小波功率是时间（或日期）与时间序列周期（或频率）的函数[22]。通过小波功率图可直观识别高小波功率的日期及其对应的周期。本文以 Morlet 小波为 CWT 的母小波，计算公式为：

$$\varphi_0(\eta)=\pi^{-1/4}e^{i\omega_0\eta}e^{-\frac{1}{2}\eta^2} \tag{6}$$

式中，φ_0 为无量纲频率；η 为无量纲时间。

交叉小波变换（XWT）是CWT的扩展，可用于识别时间—频率空间中两个不同时间序列周期性强度一致的区域，从而定量评估它们的相关性和时间滞后关系[23]。XWT分别对两个时间序列进行小波变换，并将结果相乘，获得复数值的交叉小波谱。谱的幅值反映了两个序列在不同时间和频率上的相关强度。假设 X_n、Y_n（$n=1,\cdots,N$）为两个离散时间序列，则它们之间的小波变换定义为：

$$W_n^{XY}(a)=W_n^{X}(a)\times W_n^{Y*}(a) \tag{7}$$

$$W_n^{XY}(a)=|W_n^{XY}(a)|e^{i}\phi_j(a) \tag{8}$$

式中，$W_n^{X}(a)$ 为 X_n 在频率范围 a 上的CWT；$W_n^{Y*}(a)$ 为 Y_n 的CWT的复共轭；$|W_n^{XY}(a)|$ 为交叉小波功率谱，表示两个时间序列在不同频率和时间点上的相关强度；$\phi_j(a)$ 为相位延迟，表示两个时序信号之间的相位差，通过二者的共振周期 T，可将相位差转换为对应的时间延迟量，即

$$\Delta t=\frac{\phi_j(a)\times T}{2\pi} \tag{9}$$

不同频率分量之间的相位关系可反映两个时间序列在共振周期下的同步性与滞后性，从而提供更精细的相关性分析。为了更准确地评估低功率频率区域的相关性，本文引入了小波相干（WTC）作为归一化度量。WTC 解决了交叉小波在低能量区难以识别序列间相关关系的局限性[24]，可揭示两个时间序列在不同时间和频率上的局部相关性，计算公式为：

$$R_n^{XY}=\left|\frac{\varsigma[W_n^{XY}]}{\sqrt{\varsigma[W_n^{X}]\varsigma[W_n^{Y}]}}\right| \tag{10}$$

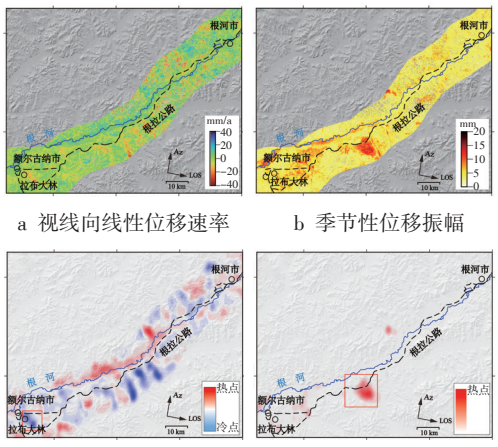
式中，W_n^{XY} 为相应的XWT；ς 为平滑因子；R_n^{XY} 为时间序列的WTC；R_n^{XY}的取值范围为(0,1)，越接近于1，表示两个时间序列的相关性越强。

3　根拉公路形变结果与分析

3.1　根拉公路沿线区域线性位移和季节性变形

根拉公路沿线10 km范围内的视线向线性位移速率、季节性变形振幅及其对应的热点图见图2，其中正值（冷点）表示朝向卫星运动，负值（热点）表示远离卫星运动。研究区的线性位移速率最高可达69.97 mm/a，季节性形变的最大振幅达到26.34 mm。在平坦地区（根河附近），观测到明显的季节性形变，其振幅普遍大于10 mm。根拉公路经过的多年冻

土区主要由第四系冲洪积粉质黏土组成，表层土壤含水量丰富，地下水发育[25]，因而受冻融作用影响显著。分析线性位移速率和季节性振幅有助于区分不同的形变机制。热点和冷点的分布受坡向影响，具体表现为面向观测方向的坡面为冷点，背向观测方向的坡面为热点。结合形变与冷热点分布分析发现，根拉公路的路基整体形变较稳定，相较于自然地表，公路路基能抵御部分冻融循环引起的形变破坏，这与多年冻土区特殊的路基施工技术有关；但在部分区域仍检测到显著的线性或季节性位移。此外，公路北段的线性位移速率和季节性位移振幅均小于南段。通过分析热点图发现，在公路下段和中段存在较大范围的线性形变聚类区域和季节性形变聚类区域（图2中红框）。



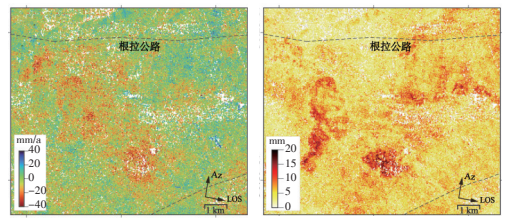
a 视线向线性位移速率　b 季节性位移振幅

c 位移速率热点图　d 位移振幅热点图

图2 视线向线性位移速率和季节性位移振幅及其相应的热点图

3.2 线性位移分析

线性位移热点图中红框所示区域的估计线性位移速率和季节性位移振幅见图3，该区域的最大季节性位移振幅为22 mm，但95%的季节性位移振幅小于9.9 mm。由热点图可知，该区域存在明显且集中的线性位移，最大值达到–79.39 mm/a，主要分布于城市区域（拉布大林镇）和农牧场区域（拉布大林农牧场生产队）。线性位移速率与季节性位移振幅的空间分布特征存在显著差异，说明不同的变形模式受不同驱动因素影响。在多年冻土区，季节性冻融循环可能导致土壤结构长期变化，从而引发持续的线性形变。城市区域中城市建设和基础设施的重量可能使松软的粉质黏土压实，进而加剧地面沉降；农牧场区域中耕作、施肥等农业活动可能改变土壤的物理性质，增加压实程度，从而导致地面形变。此外，研究区发达的地下水系统通过水位变化（抽水或补给）影响土壤的承载能力，进一步加剧线性形变。随着气候的变化，植被覆盖减少和土地利用方式改变也可能改变土壤的物理特性和压实程度，进一步加剧冻融作用引发的地表形变。

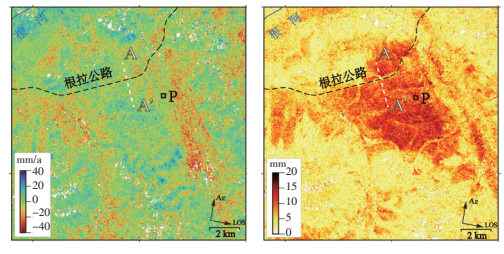


a 线性位移速率　b 季节性位移振幅

图3 拉布大林镇线性位移速率和季节性位移振幅

3.3 季节性形变时序分析

季节性形变热点图中红框所示区域的估计线性位移速率和季节性位移幅度见图4，该区域的线性位移速率为–69.82~55.18 mm/a，正负值主要受坡向影响。然而，本文发现该区域存在明显且集中的季节性振幅，最大振幅达22.04 mm，尤其在农田区域表现突出。农业活动对土壤的影响进一步放大了冻融循环的效应，导致更显著的季节性形变。具体而言，耕作和施肥活动改变了土壤的压实程度，降低了土壤结构的稳定性；而灌溉则显著增加了土壤含水量，提升了热传导性和热容量，从而改变了土壤的热物理性质。此外，人类活动引入的地表扰动可能改变土壤温度分布和地下水动态，进一步增强冻融循环的强度和频率。这种复杂的耦合机制加速了冻土的退化，对区域内基础设施、生态系统和农业活动构成了潜在威胁。值得注意的是，尽管周边区域的季节性形变幅度普遍超过10 mm，但根拉公路的季节性形变幅度保持在0~5 mm，体现出其较强的抗季节性形变能力，主要归因于路基的良好设计和构造，在一定程度上减缓了冻融循环对地基的破坏作用。此外，这种较低的形变幅度不仅反映了公路沿线地质条件的相对优势，而且可能与道路建设过程中采用的工程措施（路基加固、排水系统优化）密切相关。根拉公路的抗形变能力为其他冻土区基础设施的设计和维护提供了重要的参考价值。



a 线性位移速率　b 季节性位移振幅

图4 线性位移速率和季节性位移振幅

为进一步分析该路段的变形特征，AA’剖面的视线向累积位移和非线性位移见图5，可以看出，在2016年5月—2020年4月AA’剖面的最大累积位移超过50 mm，整体线性趋势不显著；去除线性位移趋势后，该区域呈现出最大振幅约为40 mm的季节性冻

融模式。该区域形变分布不均匀，可能与冻融灾害的空间分布差异密切相关。冻土的冻融分布不均匀将导致路基的温度场分布不均匀，进而引发公路不均匀的形变[26-27]。尽管根拉公路的路基比自然地表的稳定性更高，但坡度效应可能导致地下水向低洼处聚集，从而增加这些区域路基的含水量。较高的含水量使土壤对温度波动更为敏感，在冻结和融化过程中，由于体积变化引发显著的地表形变，进一步增强了冻融循环的强度，加剧了路基形变的不均匀性。不均匀的路基形变可能引发路面开裂、沉陷、起伏等问题，导致路面整体结构受损，影响车辆行驶的平稳性和安全性。特别是在地质条件复杂的冻土区，不均匀的路基形变将增加公路塌陷的风险，对公路的长期稳定性和安全性提出挑战。因此，在未来的公路维护和改造中，需重点关注冻融循环对路基的不均匀影响，并结合监测数据优化工程设计，以提高公路的抗变形能力和使用寿命。

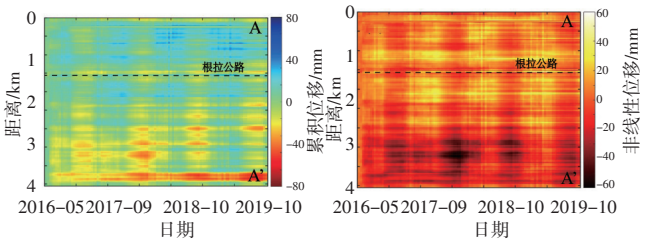


图 5　AA'剖面累积位移和非线性位移

图 4 中 P 点的位移时间序列以及该区域的平均地表温度变化见图 6，可以看出，P 点的累积形变量整体呈上升趋势，线性位移速率为24.36 mm/a；且P 点的位移表现出明显的季节性周期变化，振幅为 15.78 mm；位移的周期性变化与地表温度变化密切相关，其原因在于地表温度的季节性变化影响地温梯度，进而引发冻胀和融沉，导致位移的周期性变化。该过程与非线性位移中红黄颜色变化对应，表明季节性冻融循环是该区域地表形变的重要驱动因素。此外，P 点的位移模式进一步验证了冻土区地表形变的时间动态特征，对理解冻融作用下的地表响应机制具有重要意义。

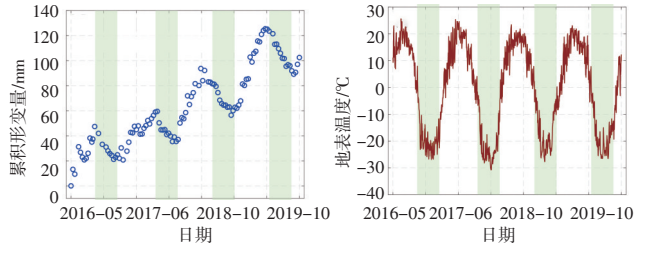


图 6　P 点累积位移时间序列和研究区的平均地表温度

对 P 点的累积形变量和研究区的平均地表温度进行小波变换分析，研究二者之间的相互关系。小波变换的结果以二维图像的形式呈现（图 7），可以看出，P 点形变与地表温度均具有约 1 a 的主共振周期，表明二者在时间动态变化上基本一致；3 个黑色粗实线封闭区域可能反映了局部气候变化或极端天气事件引发的短周期温度波动。为进一步揭示形变和地表温度之间的共有周期以及二者的时间响应关系，进行了 XWT，可以看出，二者的能量密度峰值在相应频段内呈现连续且稳定的特征，表明周期形变的波动显著受温度变化的驱动；二者之间存在明确的共振关系，共有周期约为 374 d；箭头指向右下方，表示变形对地表温度的响应存在时间滞后，且呈正相关关系，地表形变滞后于地表温度约 38 d。通过小波相干分析结果可进一步验证二者的相关性。在周期为 1~200 d 的范围内，箭头较少且能量普遍较低，表明温度与形变之间的关系较弱，或可能受到其他因素的干扰；而在周期为 50~100 d 的区间内，出现了显著的高能量区域，并伴随右下指向的箭头，该时期温度与变形的相关性较强，特别是在冻融循环的过程中，土壤膨胀和收缩与温度变化产生了紧密联系。除此之外，降水、降雪、土壤湿度的变化以及地下水系统的波动等因素也可能在较长时间尺度上影响地表形变，这些因素的叠加作用可能进一步强化了温度与形变之间的相关性。

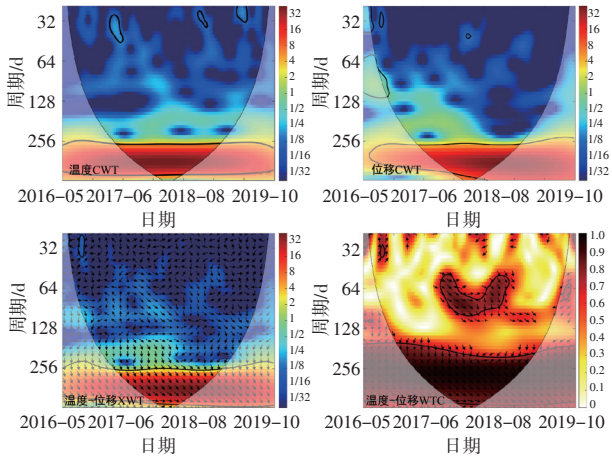


图 7　温度与地表形变的 CWT、XWT、小波相关变换结果

4　结　语

本文利用2016年5月—2020年4月采集的Sentinel-1B数据绘制了根拉公路及其沿线区域的线性位移速率和季节性位移幅度，结果表明虽然根拉公路整体稳定，但部分区域存在最大 69.97 mm/a 的线性形变速率和最大 26.34 mm 的季节性位移。对地表线性、季节性形变速率进行热点分析发现，季节性位移与冻土的冻融循环显著相关，通过 XWT 分析发现地表形变与地表温度的共同周期约为 374 d，且存在正相关关系，地表形变对地表温度的响应表现出约 38 d 的时间滞后。受

限于成本、技术手段和监测范围，研究区历史地面监测数据稀缺且分布稀疏。InSAR观测有助于数据匮乏区域的长期动态过程刻画。然而，冻土区的公路形变受季节性冻融、地质条件变化和气候波动等多种因素影响，呈现长期且复杂的动态演化特征。现有研究未能全面揭示冻土区公路在不同季节和气候条件下的形变规律及其对公路稳定性的影响。未来将结合陆探一号和Sentinel-1卫星数据，进一步分析根拉公路区域的形变动态，这将有助于揭示冻土区公路在不同环境条件下的长期形变趋势，为公路维护和管理提供科学依据。通过增强形变过程的监测和分析，可为冻土区和其他类似区域的基础设施规划、设计与维护提供精准数据支持，提高公路工程的可持续性和安全性。

参考文献

[1] 张昊琛. 内蒙古冻土环境时空变化及其对气候变化的响应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2023

[2] 何瑞霞,金会军,常晓丽,等. 东北北部多年冻土的退化现状及原因分析[J]. 冰川冻土,2009,31(5):829-834

[3] Hjort J, Karjalainen O, Aalto J, et al. Degrading Permafrost Puts Arctic Infrastructure at Risk by Mid-century[J]. Nature Communications,2018,9(1):5 147

[4] Nelson F E, Anisimov O A, Shiklomanov N I. Subsidence Risk from Thawing Permafrost[J]. Nature,2001,410(6 831):889-890

[5] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 717-1 733

[6] Shan W, Wang C J, Hu Q. Expressway and Road Area Deformation Monitoring Research Based on InSAR Technology in Isolated Permafrost Area[C]. IEEE 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering,2012:1-5

[7] 吴启琛,于瑞鹏,王丽,等. 利用Sentinel-1的山东枣庄高新区地面沉降监测与分析[J]. 地理空间信息,2024,22(6):80-83

[8] Shi X, Liao M, Wang T, et al. Expressway Deformation Mapping Using High-resolution TerraSAR-X Images[J]. Remote Sensing Letters,2014,5(2):194-203

[9] Qu T, Xu Q, Shan W, et al. Deformation Monitoring of High-latitude Permafrost Region of Northeastern China with Time Series InSAR Technique[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2019,42:1 777-1 780

[10] Wang W, Jin X, Jin H, et al. Evaluation of Ground Surface Deformation in Discontinuous Permafrost Regions Along the China-Russia Crude Oil Pipelines in Northeast China Using InSAR and Ground Surveys[J]. Engineering Geology, 2023,323:107 227

[11] Shi X, Niu F, Qu T, et al. Stability Analysis of Shiwei-Labudalin Highway in Inner Mongolia, Northeastern China Using Sentinel-1 InSAR[J]. Cold Regions Science and Technology,2022,202:103 647

[12] 宝乐尔其木格,张秋良,郝帅. 1974—2020年大兴安岭北部多年冻土区积雪变化及其与地面、空气温度的关系[J]. 地理科学,2024,44(1):159-167

[13] 袁培,王飞杰. 国道332线拉布大林互通立交方案设计[J]. 建材世界,2017,38(4):121-123

[14] Zhang Z Q, Wu Q B, Hou M T, et al. Permafrost Change in Northeast China in the 1950s-2010s[J]. Advances in Climate Change Research,2021,12(1):18-28

[15] Shan W, Zhang C, Guo Y, et al. Mapping the Thermal State of Permafrost in Northeast China Based on the Surface Frost Number Model[J]. Remote Sensing,2022,14(13):3 185

[16] 李益敏,计培琨,杨雪,等. 基于PS-InSAR技术的地表形变监测与驱动力分析[J]. 地理空间信息,2024,22(9):61-66

[17] 蒋弥,丁晓利,何秀凤,等. 基于快速分布式目标探测的时序雷达干涉测量方法:以Lost Hills油藏区为例[J]. 地球物理学报,2016,59(10):3 592-3 603

[18] Jiang M. Sentinel-1 TOPS Co-registration over Low-coherence Areas and Its Application to Velocity Estimation Using the All Pairs Shortest Path Algorithm[J]. Journal of Geodesy,2020,94(10):1-15

[19] Zhang Y, Heresh F, Falk A. Small Baseline InSAR Time Series Analysis: Unwrapping Error Correction and Noise Reduction[J]. Computers and Geosciences,2019,133:104 331

[20] Jiang M, Zhao X, Shi X. Kinematic Behavior Analysis of the Wadi Landslide from Time-series Sentinel-1 Data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2022,15:127-135

[21] 李成烨. 黄河源区多年冻土地表形变InSAR监测研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2023

[22] Tomás R, Pastor J L, Béjar-Pizarro M, et al. Wavelet Analysis of Land Subsidence Time-series: Madrid Tertiary Aquifer Case Study[C]//Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences,2020:353-359

[23] 唐伟,赵祥君,康彩琴,等. 太原盆地地面沉降时序InSAR监测与季节性变形小波分析[J]. 地球物理学报,2023,66(6):2 352-2 369

[24] 曹青,刘康龙,郝振纯. 松花江流域干旱突变特征及其遥相关因子分析[J]. 人民长江,2023,54(12):89-95

[25] 宋欢欢,柳长生. 根河至拉布大林一级公路岛状多年冻土特征及处理措施[J]. 甘肃科技,2012,28(7):115-116

[26] 吴金权,辛洋洋,徐文玺,等. 热棒在根拉公路岛状多年冻土路基工程中的应用研究[J]. 冰川冻土,2018,40(5):943-950

[27] 李金平. 高原冻土区既有公路病害特征和融沉变形分析[J]. 路基工程,2016(4):11-16