引文格式：肖燕武,陈雄乐,吴文清,等. 升降轨InSAR后向散射优化青藏工程走廊冻土形变监测[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 121-127. doi: 10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.05.024

升降轨InSAR后向散射优化青藏工程走廊冻土形变监测

肖燕武[1]，陈雄乐[2]，吴文清[3]，刘仁鹏[3]，向炳兰[3]，马小乐[3]
（1. 广州城市职业学院，广东 广州 510405；2. 广东工业大学，广东 广州 510006；
3. 中冶武勘工程技术有限公司，湖北 武汉 430000）

摘　要：青藏高原冻土退化严重威胁基础设施稳定性。基于2017—2021年Sentinel-1A升降轨影像，采用时序合成孔径雷达干涉测量（TS-InSAR）技术监测青藏工程走廊冻土形变。针对复杂地形和气候，采用小基线集策略与后向散射模型优化，结合K-means聚类算法提升精度。通过GNSS数据进行验证，形变速率为-28~18 mm/a，与GNSS数据高度一致（R=0.837）。时间序列分析显示，冻土形变与季节性温度变化密切相关，以垂直形变为主。研究区中工程条件较差区域（如北麓河盆地）的年均形变速率为-8 mm/a，良好区域形变速率较低。边坡破坏与冻融循环直接相关，部分点沉降达-100 mm。该方法可有效捕捉冻土时空形变特征，为工程稳定性评估和灾害防治提供科学依据。

关键词：TS-InSAR；冻土形变；后向散射；季节
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0121-07

Permafrost Deformation Monitoring in Qinghai-Tibet Engineering Corridor Using Ascending-descending Orbit InSAR with Backscatter Optimization

XIAO Yanwu[1], CHEN Xiongle[2], WU Wenqing[3], LIU Renpeng[3], XIANG Binglan[3], MA Xiaole[3]
(1. Guangzhou City Polytechnic, Guangzhou 510405, China;
2. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
3. MCC Wukan Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: The degradation of permafrost in the Qinghai-Tibet Plateau poses a severe threat to the stability of infrastructure. Based on the ascending-descending orbit images of Sentinel-1A from 2017 to 2021, we employed time series synthetic aperture radar interferometry (TS-InSAR) technology to monitor permafrost deformation along the Qinghai-Tibet engineering corridor. Addressing the complex terrain and climate, we utilized a small baseline subset strategy, backscatter model optimization and K-means clustering algorithm to improve accuracy. We integrated ascending-descending orbit data and GNSS to validate this method. The deformation rates from −28 to 18 mm/a, showing a high degree of consistency with GNSS data (R =0.837). Time series analysis reveals that permafrost deformation is closely related to seasonal temperature variations, with vertical deformation being predominant. The sections with poorer engineering conditions (such as the Beiluhe Basin) experience annual deformation rates of up to -8 mm/a, while rates are lower in areas with better conditions. Slope failures are directly associated with freeze-thaw cycles, with some monitoring points experiencing settlements of up to -100 mm. This method can effectively capture the spatio-temporal deformation characteristics of permafrost, providing a scientific basis for engineering stability assessments and disaster prevention.

Key words: TS-InSAR, permafrost deformation, backscatter, season

青藏高原冻土因低纬度与高海拔叠加作用，空间异质性显著且热稳定性较差。研究表明，近年青藏高原冻土退化呈加速趋势，年均地温升高0.3~0.5℃，导致活动层厚度增加10%~15%[1]。2010年永久冻土面积已退化至1.06×10^6 km^2，预计未来50年退化范围将进一步扩大[2]。冻土环境的剧变不仅威胁基础设施稳定性[3]，还与工程扰动产生协同效应，加剧边坡失稳与热融灾害[4]。时序合成孔径雷达干涉测量（TS-InSAR）技术因其高精度与大范围监测能力，成为冻土形变研究[5]的核心手段。然而，现有研究对工程走廊复杂地形下冻土形变的多维度特征（如垂直与水平耦合形变）仍缺乏系统分析，亟待结合多轨道InSAR与物理模型深入探索。

青藏工程走廊（QTEC）沿线复杂多样的地貌景观，季节性冻土和永久冻土交替，使得传统监测方法研究冻土的效率低且昂贵[6]。InSAR技术具有高分辨率和高精度的特点，能进行大面积的地表形变观测[7-8]。为了缓解季节性影响，本文采用小基线集（SBAS）策

项目来源：多维度空天地一体化自动监测及数据融合技术的研究（2024920015）。
第一作者简介：肖燕武（1976—），硕士，教授，研究方向为工程测量、精密测量，E-mail：xyw@gcp.edu.cn。

略生成干涉对组合。针对研究区域缺乏地表特征先验信息的问题，基于后向散射模型提出了一种面向控制点选择的残差相位估计方法。由于雷达成像几何形状的局限性，单轨道InSAR技术只能得到沿雷达视线（LOS）的形变结果，难以真实反映地表形变特性，因此本文利用2017年10月—2021年5月110景覆盖QTEC（从风火山到沱沱河）的Sentinel-1A升降轨影像估算LOS形变结果。结合SAR系统的几何参数，计算了冻土的二维形变结果。利用来自青藏公路试验段（QHTT）参考站的GNSS数据进行验证，结果表明位移率和时间序列具有良好的一致性。

1 研究区概况和数据来源

本文选取的研究区是由沱沱河盆地、乌丽山地区、乌丽盆地、尺曲谷、风火山地区和北麓河盆地组成的季节性冻土和永久冻土交替分布的地形地貌；位于亚热带干旱气候区，具有极端的大陆性气候特征，寒冷季节与温暖季节交替，雨季与旱季不同。全球变暖影响了青藏高原的冰冻土壤环境，导致永久冻土分布逐渐减少和上方活动层的剧烈运动。

本文采用Sentinel-1A C波段（波长5.6 cm）干涉宽幅模式数据，空间分辨率为5 m×20 m，入射角范围为29.1~46.0°，极化方式为VV。升降轨数据覆盖周期为12 d，适用于高精度时序形变监测。针对研究区复杂的地形和气候变化，选取2017年10月—2021年5月110景覆盖QTEC（从风火山到沱沱河）的Sentinel-1A升降影像（图1）。为分析TS-InSAR技术在研究区冻土形变监测中的适用性，采用来自QHTT参考站GNSS的每日地表形变监测数据进行结果验证。冻土形变监测的验证数据包括冻土分布数据[9]、活动层厚度模拟结果[10]、地表温度反演数据[11]和QTEC沿线冻融灾害分布资料。

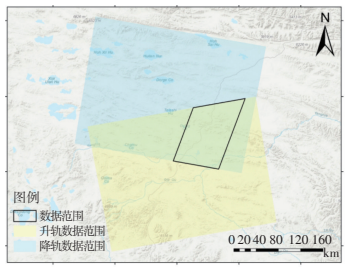


图1 Sentinel-1A升降轨影像覆盖范围

审图号：GS(2024)0568

2 技术方法和数据处理

2.1 技术方法

冻土的冻融循环导致冻土地表周期性地上升和下沉。为减弱季节性效应的影响，采用SBAS策略生成干涉对，并对具有高相干性的干涉对进行筛选。由于研究区地形起伏大、海拔高，不利于选择稳定的地面控制点（GCP），在缺乏先验信息的情况下，采用后向散射模型选择GCP，从而进行残差相位估计和形变反演。后向散射模型的预处理主要包括图像配准、滤波、地理编码和辐射校准。采用De Grandi多时相滤波来降低散斑噪声的影响。雷达后向散射系数包括雷达亮度系数、后向散射系数和由入射角余弦值归一化的后向散射系数（γ^0）。研究表明，在后向散射测量[12]过程中，γ^0能更好地捕捉地形波动较大区域的信号，因此本文通过γ^0筛选GCP。根据预处理后雷达图像的灰度值计算后向散射系数，即

$$\gamma(i,j)=\lg\left[DN_{ij}^2/A^2\right] \tag{1}$$

式中，DN_{ij}为灰度值；A为校准参数。

聚类算法是一种广泛应用于图像处理的无监督学习算法[13]。QTEC地形复杂，缺乏对该地区地理环境的先验知识。聚类算法具有高度自动化的优点，无需先验知识，适用于对该区域SAR图像的后向散射特征进行分类。K-means算法是一种硬聚类算法，通过计算像素与像素中心的相似度并重复迭代来实现聚类分割。目标函数可表示为：

$$J=\sum_{j=1}^{K}\sum_{i,i\in c_j}d_{ij}(x_i,c_j) \tag{2}$$

式中，x_i为样本；c_j为聚类中心；$d_{ij}(x_i,c_j)$为样本与其对应中心的距离；K为类别数。

该算法适用于中小型数据集[14]，本文采用聚类算法分析后向散射特征，从升轨和降轨预处理后的SAR图像中分别选择54个和60个GCP；再将所选GCP转换为雷达坐标，消除斜率相位，并利用三次轨道细化多项式估计轨道误差和相位偏移量。后向散射模型与传统的人工选择方法之间的差异可通过GCP的绝对残差值来评估。由表1可知，与人工选择方法相比，后向散射模型筛选GCP的绝对残差均值降低了82.6%（升轨）和81.4%（降轨），标准差减少了94.4%（升轨）和96.8%（降轨）。

表1 采用反向散射模型和人工选择方法选择GCP的结果

数据集	方法	绝对残差值				数量/个
		最大值	最小值	均值	方差	
升轨	人工选择方法	1.126	0.001	0.593	0.126	82
	后向散射模型	0.244	0.001	0.103	0.007	54
降轨	人工选择方法	0.965	0.001	0.602	0.249	82
	后向散射模型	0.251	0.001	0.112	0.008	60

由于InSAR只能测量斜距方向的变化，对其他方向的形变不敏感，因此对于任何三维形变，将特征向上、东、北移动的形变值定义为正，地表沿LOS方向的形变可表示为：

$$D_{\mathrm{LOS}}=D_v\cos\theta-D_e\cos\alpha\sin\theta+D_n\sin\alpha\sin\theta \quad (3)$$

式中，D_v 为垂直形变；D_e 为东西形变；D_n 为南北形变；θ 为入射角；α 为方位角。

由于地壳运动等因素，仅对LOS方向的单个轨道外推结果进行长期形变监测，很难获得实际的垂直形变。因此，本文利用同一区域的升轨和降轨SAR影像，得到垂直方向和东西方向的形变，即

$$\begin{bmatrix}D_{\mathrm{LOS\,A}}\\D_{\mathrm{LOS\,D}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta_{\mathrm{A}} & -\cos\alpha_{\mathrm{A}}\sin\theta_{\mathrm{A}}\\\cos\theta_{\mathrm{D}} & -\cos\alpha_{\mathrm{D}}\sin\theta_{\mathrm{D}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}D_v\\D_e\end{bmatrix} \quad (4)$$

式中，θ_{A}、θ_{D} 为升轨、降轨卫星的入射角；α_{A}、α_{D} 为卫星的升轨角和降轨角。

将升轨和降轨影像得到的形变结果重新采样到相同的分辨率；再通过方位角和入射角求解方程，得到垂直方向上的表面形变。对于寒冷地区的工程，季节性的温度变化将导致基土的周期性冻结和融化，随着温度的下降，土壤冻结、土壤体积增加，导致地面不均匀的上升；而随着温度的升高，冻土融化、土壤体积减少，导致地面沉降。为描述冻土与时间的关系，建立了一个基于局部加权回归的时间序列分解模型黄土季节和趋势分解（STL）。除传统线性回归模型外，STL模型凭借其非参数估计能力，可检测长期趋势和季节信号，还可减弱滤波过程中异常值和缺失值的影响[15-16]。利用STL模型将地表时间序列形变结果分解为长期趋势分量、季节分量和剩余项[17]，得到的季节分量能反映冻土的周期性变化，有助于识别研究区域内冻土的冻融周期。

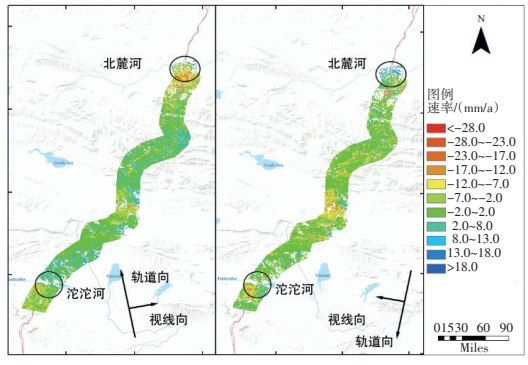
2.2　数据处理流程

具体数据处理流程为：①采用SBAS策略，设置时空基线阈值以平衡干涉对数量与质量，并通过精密轨道数据校正卫星轨道误差，利用SRTM 30 m DEM去除地形相位，生成差分干涉图；②利用自适应Goldstein滤波，根据局部相干性动态调整滤波强度（α=0.8），抑制噪声并保留形变信号；③采用最小费用流算法对差分干涉图进行相位解缠，设置解缠窗口为64像素×64像素，迭代优化残余相位；④利用ERA5再分析数据提取大气湿度与温度参数，结合高程分层模型估计大气延迟相位，并通过空间高通滤波（窗口半径为1 km）分离湍流大气效应，时间低通滤波（周期大于30 d）去除季节性大气影响；⑤基于后向散射模型GCP的三次多项式模型，估计并校正残余轨道误差，分别优化升轨与降轨数据；⑥采用奇异值分解算法解算时序形变速率与残余相位，迭代收敛条件设置为相位残差均方根小于0.8 rad；⑦联合升轨与降轨LOS方向形变结果，构建观测矩阵，求解垂直方向与东西方向的二维形变分量，并采用加权最小二乘法优化解算结果。

3　研究结果与分析

本文方法得到的形变结果见图2，可以看出，升轨结果在LOS方向的年平均形变速率在−26~16 mm/a之间，平均形变速率为−1 mm/a；降轨结果在LOS方向的年平均形变速率在−28~19 mm/a之间，平均形变速率为−1 mm/a，说明北麓河与沱沱河流域因土壤含水量较高而导致干涉图相干性显著下降，造成该区域形变反演精度降低。本文从升降轨道影像的形变结果中提取651个观察点，按正相关和负相关分为两组进行Pearson相关性分析，两组R值分别为0.869和−0.826（图3）。根据SAR的成像原理，Sentinel-1A卫星在近极、太阳同步（黎明—黄昏）轨道上飞行，右观测地球，使得在垂直和水平方向[18]的形变监测存在差异。若研究区域在垂直方向有形变，升降影像的形变结果将呈正相关的形变趋势；若在水平方向有形变，则将呈负相关的形变趋势。寒冷地区的冻土受气候季节变化影响强烈，形变主要发生在垂直方向，但由于地形、地质条件等因素，局部地区易发生水平形变位移。对升降影像LOS方向的形变结果进行联合处理，得到垂直方向的形变图（图4），年平均形变速率在−29~17 mm/a之间，平均形变速率为−1 mm/a，标准偏差为6 mm/a。

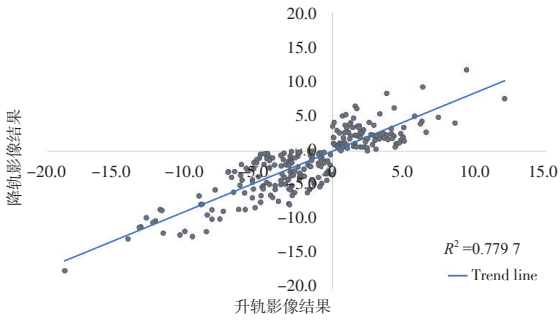
中国地震局GNSS原始数据集来源于中国大陆构造环境监测网参考站，利用国际高精度数据处理软件对原始GNSS数据集进行处理和分析，得到GNSS数据集。本文采用Pearson相关性分析法，检验了QHTT参考站数据集与TS-InSAR在垂直方向的升降轨影像联合结果之间的相关性。结果表明（图5），TS-InSAR形变结果与GNSS数据集呈正相关（R=0.837）。两组形变监测结果的差异可从两个方面分析：GNSS数据是基于点的，而TS-InSAR形变结果是基于地表的，分辨率为5 m×20 m，二者反演精度不在一个数量级



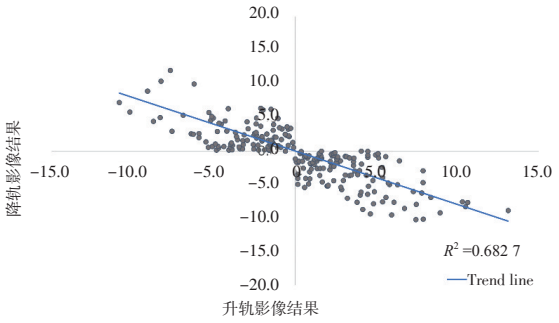
a 升轨影像　　b 降轨影像

图2　TS-InSAR结果

审图号：GS(2024)0568



a 正相关



b 负相关

图3 TS-InSAR升降轨影像结果的相关分析

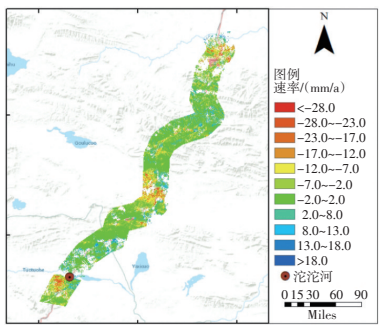


图4 垂直方向的升降轨影像联合结果

审图号：GS(2024)0568

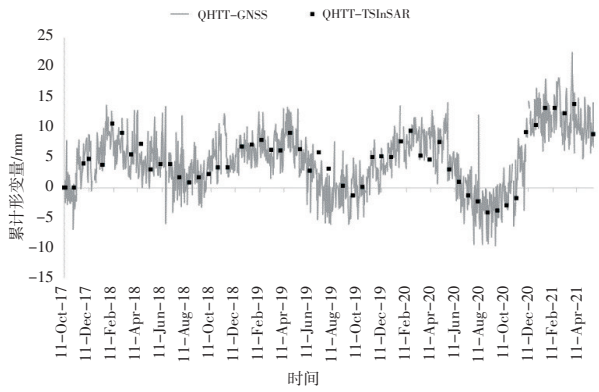
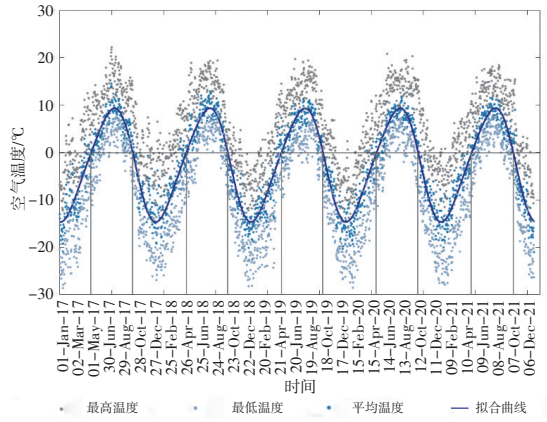


图5 QHTT参考站GNSS结果与TS-InSAR结果的时间序列

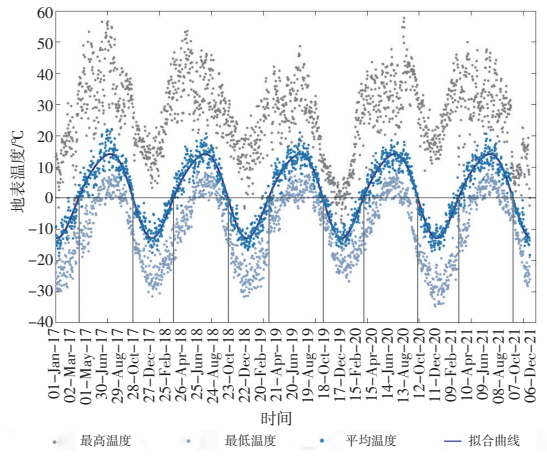
内；GNSS数据存在明显的跳变，而TS-InSAR技术利用精确的轨道确定参数校正和滤波，可在一定程度上减轻由轨道和大气误差引起的测量误差。

3.1 冻土形变与气候变化的关系

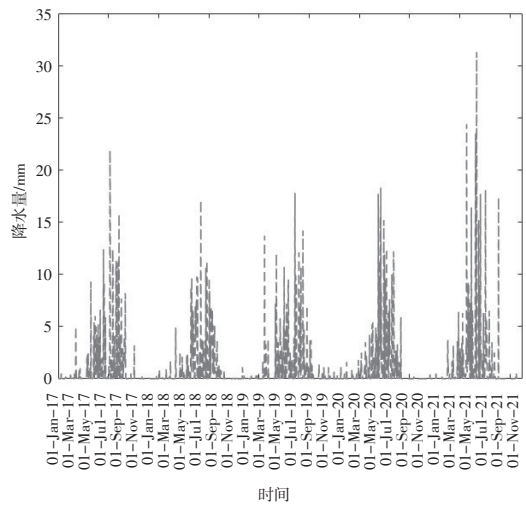
本文根据2017—2021年沱沱河气象站的日度气温、地表温度和降水数据，分析了冻土形变与气候变化的关系（图6）。利用二阶傅里叶相关函数拟合日平均空气温度和平均地表温度，以冻结温度0℃为分界点，4月中旬气温升至0℃，10月初降至0℃，12月—次年1月降至谷底。地表温度受太阳辐射、岩性等因素影响，与空气温度变化有所不同，沱沱河地区的地表温度4月初升至0℃，10月底延迟降至0℃。每年降



a 日度气温



b 地表温度



c 降水量

图6 2017—2021年QHTT气象站的日度气温、地表温度和降水量

水主要集中在5—10月，综合分析表明雨季和高温季节同时发生。受季节温度变化影响的冻土呈现周期性形变，可分为夏季融化、秋季冻结、冬季降温、春季加热4个过程。为描述冻土随时间的变化，利用时间序列分解模型提取了QHTT参考站在垂直方向上GNSS和TS-InSAR结果的季节成分，并与日气候变化数据进行比较。结果表明（图7），GNSS和TS-InSAR形变监测结果的季节信号与现有气候变化规律一致，可反映冻土的冻融循环，其中蓝色线表示冻土融化过程的开始时间（2月），橙色线表示冻土冻结过程的开始时间（9月）。沱沱河盆地地势低，地下水位高，季节性永久冻土对温度变化响应迅速，使得冻土的冻融过程早于地表温度的0℃。降水对冻土形变的影响可分为两个过程：3—4月青藏高原永久冻土地表温度小于0℃，降水增加了冻土含水量，冻水导致地表抬升；4—10月沱沱河盆地地表温度高于0℃，降水产生的地表径流对冻土产生热侵蚀，促进冻土冻结过程。

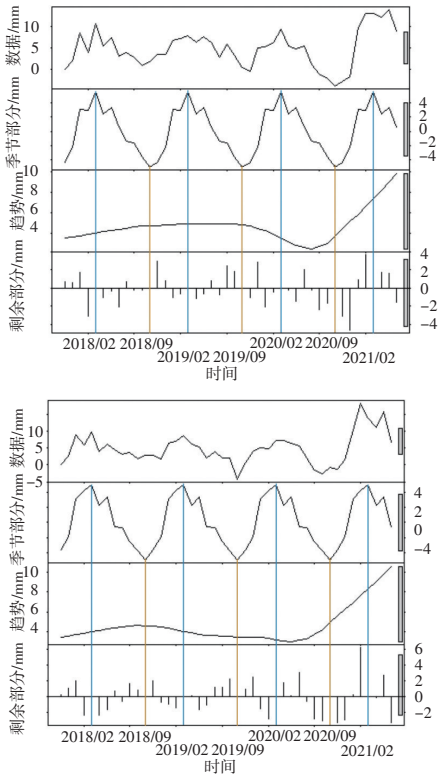


图7　TS-InSAR和GNSS时间序列结果的季节信号和变化趋势

3.2　地质特征对工程稳定性的影响

冻土具有较高的空间异质性且稳定性差，明显受高程、坡度、地表温度、冻土类型、活性冻土层厚度等因素影响（图8）[19-20]。研究区由盆地、山谷、平原、山脉和不同水系统组成[21]，将其划分为6个区域分别分析冻土形变的空间分布特征，即沱沱河盆地（K1209+356-K1233+661）、乌丽山地区（K1194+166-K1209 + 356）、乌丽盆地（K116-K1184 + 866-K1194+166）、尺曲谷（K1157+42-K1184+866）、风火山地区（K1137+272-K1157+42）和北麓河盆地（K1116+282-K1137+272）。

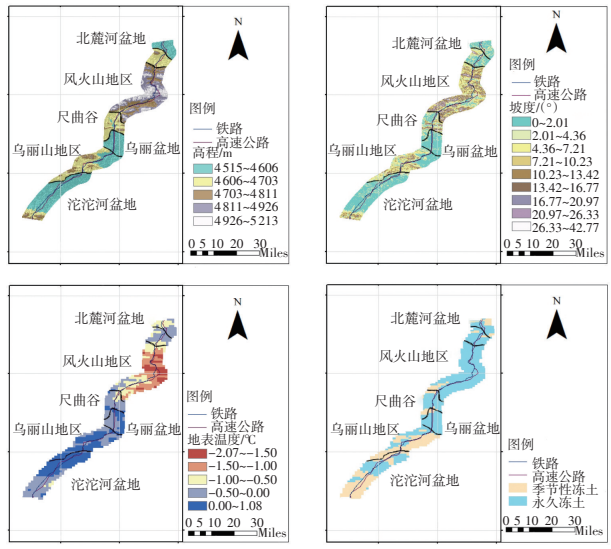


图8　研究区域的高程、坡度、地表温度和冻土类型分布图

沱沱河盆地的季节性冻土和永久冻土交替分布，永久冻土区的平均形变速率为-1 mm/a，超过50%的区域的形变速率在-3~3 mm/a之间，说明该地区地形平稳。由冻土分布图、活动层厚度模拟数据和青藏高原冻土平均表面温度可知，活动层厚度为2.556~3.121 m，平均地表温度为-0.791~-0.346°C。沱沱河盆地永久冻土区的土颗粒以砂岩和块状岩为主，永久冻土组成主要为贫冰冻土，可定义为工程条件较好的地段。季节性冻土区的年平均地表形变速率为-8 mm/a，受温度变化的影响很大，因此季节性冻土区可定义为工程条件较差的地段。乌丽山地区的年平均形变速率为-2 mm/a，50%以上的地表形变速率在-4~1 mm/a之间，该地区的海拔高度为4 606~4 811 m，坡度为7~10°。冻土主要为季节性冻土，具有明显的冻胀、融土沉降，因此乌丽山地区的工程条件较差。乌丽盆地的年平均形变速率为-5 mm/a，超过50%的区域的形变速率在-11~1 mm/a之间。乌丽盆地是一个平缓起伏的地形区域，广泛分布于多年生永久冻土层中，活性层厚度为2.98~3.12 m，平均地表温度为-0.381~-0.205℃，土壤颗粒以风积砂为主，因此可定义为工程条件较差的地段。尺曲谷的年平均形变速率为-1mm/a，超过20%的区域的形变速率在-2~2 mm/a之间。尺曲谷的主要特点是粗粒土壤，持水能力较差。永久冻土分布以贫冰的冻土为主，因此尺曲谷属于工程条件较好的地段。风火山地区的年平均形变速率为-1 mm/a，超过50%的区域的地表形变速率在-3~2 mm/a之间。该地区相对陡峭，海拔为4 703~5 213 m，

大部分地区的坡度大于10°；包括大量多年生的永久冻土层，活动层厚度为1.691~2.315 m。山上部主要覆盖砾石次粘土层，中下部主要为含砾石次粘土，因此风火山地区包含工程条件良好和一般地段。北麓河盆地的年平均形变速率为−8 mm/a，超过50%的区域的形变速率在−12~−2 mm/a之间。该地区持水能力强的风成粉砂分布广泛。贝鲁河盆地多年生冻土富含冰，工程条件较差。结合相关研究资料与冻土影响因素，本文将上述地段大致分为不良工程条件段（乌丽山地区、乌丽盆地、北麓河盆地、沱沱河盆地季节性冻土区）、一般工程条件段（风火山地区）和良好工程条件段（沱沱河盆地永久冻土区、尺曲谷、风火山地区）。对比分析发现，TS-InSAR形变结果与各断面的定性分析结果基本一致，工程条件较好的断面形变速率较小，其余断面形变速率较大。

基于城市农户搬迁意愿调查数据，在村、镇尺度引入农户资源、资源禀赋、产业规模、经济发展、人居设施多层次因素，构建分层线性模型，分析农户搬迁意愿的影响因素，并揭示因素间的多层次性。

1）人居设施、产业规模是促使农户提高搬迁意愿的两大类原因。村级尺度中离散居民点个数、粮食生产功能，镇级尺度中一产产值比例、居民点离散距离是影响农户搬迁意愿的主要因素。

2）农户搬迁意愿影响因素在村、镇尺度上具有层级结构。零模型结果表明，农户搬迁意愿影响因素具有多层次特征；单变量随机效应回归模型可分析村级尺度因素影响差异特征，多元随机效应回归模型可解释村级尺度因素相互作用后的影响程度；完整模型引入镇级尺度因素进行修正，村级因素离散居民点个数的显著性提升，进一步验证了采用分层线性模型的合理性、有效性。

3）在村级尺度中，离散居民点个数、粮食生产功能均呈显著正相关关系；镇级尺度中一产产值比例呈显著正相关关系，居民点离散距离则呈显著负相关关系。因此，应建立村镇良性互动机制，提高农户搬迁意愿，促进农村居民点整治，从居民点分布格局、资源利用程度、产业发展规模等方面进行政策优化。

3.3 边坡破坏对工程稳定性的影响

在寒冷地区工程项目的建设和维护过程中，不可避免地要挖掘冻土，清除植被，造成各类冻土不同程度的退化，甚至导致边坡破坏、热滑坡、解冻湖泊形成或荒漠化等次生灾害。青藏高原地区的温升高于全球温度变暖的平均水平，导致该地区冻土的稳定性较差。2014年实地调查中发现的5个边坡失效情况见图9，5个斜坡断裂均位于QTH脚下的北麓河盆地，被认为是由1992年建造QTH导致的。在道路建设过程中，挖掘出斜坡底部的土壤，使活动层下的冰暴露在表面上，冻结的土壤可以融化。地下冰形成了一个滑动的表面，使得饱和的粘土在冰的润滑下自然形成滑坡。由2021年10月13日图像可知，斜坡失效轮廓以红色线表示，5次坡面均为舌形，后缘水平方向不均匀，地表土壤裸露，基本无植被覆盖，可判断为牵引滑动型融滑坡；还可观察到沉降范围进一步扩大到公路东侧，主要原因是解冻在水平方向的热传导。监测点P1~P5在垂直方向上的时间序列形变见图10，用于分

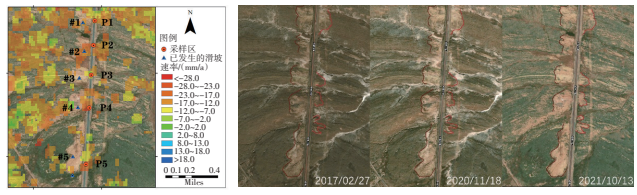


图9 P1~P5监测点分布和斜坡失效分布图

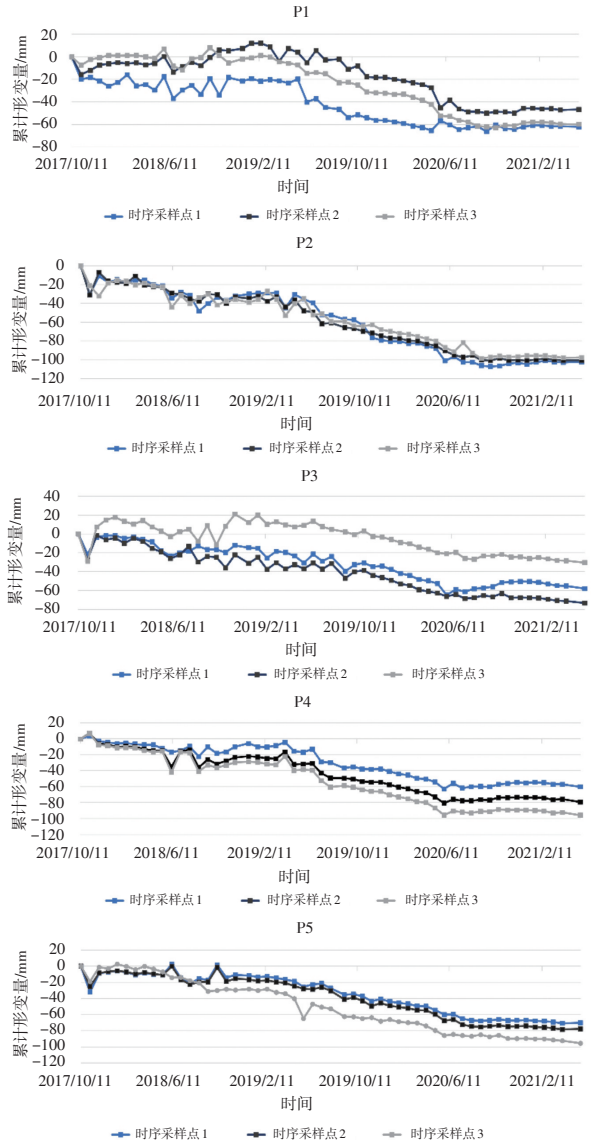


图10 P1~P5监测点时间序列图

析和监测熔融沉降对QTH稳定性的影响。5个监测点均有一定程度的沉降，其中P1、P3在过去3年的位移较小，年平均形变速率在−17~−23 mm/a之间，P2、P4、P5的沉降更显著；垂直方向的年平均形变速率为−23~−28 mm/a，最大沉降可达−100 mm。结果表明，不断发展的斜坡破坏对道路的稳定性影响更大，需采取干预措施。

4 结 论

本文引入了TS-InSAR方法，利用升降轨SAR数据来监测沿QTEC的表面形变。2017年10月11日—2021年5月23日研究区存在下沉趋势，主要在−28~18 mm/a之间。利用沱沱河参考站GNSS结果的时间序列进行验证，并利用时间序列分解模型分析了冻土形变与气候变化的关系。结果表明，该方法具有较高的监测精度，并能反映冻土的实际变化规律。

1）后向散射模型通过γ^0系数筛选GCP，与传统人工方法相比，其绝对残差均值降低82.6%（升轨）和81.4%（降轨），标准差减少94.4%（升轨）和96.8%（降轨）。通过聚类算法可知，该方法在复杂地形中可显著提升GCP的轨道优化质量，验证了其有效性。

2）本文对冻土区形变的影响因素进行了定性分析。将6个地段（按地理区域划分）分为工程条件差、工程条件一般、工程条件良好地段。对比分析发现，TS-InSAR的形变结果与各断面的定性分析结果一致，工程条件良好的断面形变速率较小，其他断面形变速率较大。

3）青藏工程项目基础设施建设和维护过程中边坡的切割和干扰，造成了许多边坡破坏（浅层滑坡和融滑坡）。本文分析具有代表性的滑坡发现，沉降范围仍在扩大，部分甚至延伸到QTH的另一边，严重危及青藏工程项目的稳定性。本文结果能反映QTEC中地表形变的时空特征，为寒冷地区的环境管理和灾害评估提供科学依据。未来将融合高时空分辨率SAR数据与多源环境参数，深化复杂冻土区季节性形变机理的定量解析。

参考文献

[1] 李林,冯辉,陈坤. 青藏铁路多年冻土区路桥过渡段工程病害成因分析与应对[J]. 冰川冻土土,2025,47(1):199-212

[2] 朱寒江,王卫光. 2000—2020年青藏高原冻土活动层厚度变化规律[J]. 水电能源科学,2022,40(4):175-178

[3] 牛富俊,董晟,林战举,等. 青藏公路沿线热喀斯特湖分布特征及其热效应研究[J]. 地球科学进展,2013,28(6):695-702

[4] 罗炳楠,刘文惠,谢昌卫,等. 青藏高原热融滑塌研究进展综述[J]. 冰川冻土,2024,46(4):1135-1155

[5] 张德龙,魏冠军. 考虑土壤水热变化的冻土活动层厚度反演模型构建及应用[J]. 地球信息科学学报,2025,27(3):750-765

[6] 袁塑,章金钊,朱东鹏. 深上限—退化型多年冻土路基形变特征分析[J]. 岩土力学,2013,34(12):3543-3548

[7] 高茂宁,魏冠军,雷传金,等. 顾及时序InSAR的海东市辖区滑坡敏感性评价[J]. 地理空间信息,2024,22(5):97-101

[8] 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

[9] Zou D, Zhao L, Sheng Y, et al. A New Map of Permafrost Distribution on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Pharmaceutical Affairs,1997,11:1-28

[10] 杨沙,王琪洁,李佳晨,等. 顾及土壤热传导—对流效应的InSAR冻土活动层厚度估计[J]. 地球物理学报,2024,67(7):2568-2581

[11] 胡佳怡,赵林,王翀,等. CLDAS地表温度产品在青藏高原多年冻土区的适用性评估与校正[J]. 气候变化研究进展,2024,20(1):10-25

[12] 薛东剑,何政伟,贾诗超,等. 星载SAR遥感影像地形辐射校正:以ALOS PALSAR为例[J]. 遥感信息,2018,33(3):13-16

[13] 王志社,杨风暴,纪利娥,等. 基于聚类分割和形态学的可见光与SAR图像配准[J]. 光学学报,2014,34(2):184-190

[14] 邢涛,黄友红,胡庆荣,等. 基于动态K均值聚类算法的SAR图像分割[J]. 中国科学院大学学报,2016,33(5):674-678

[15] Ming F, Yang Y X, Zeng A M, et al. Analysis of Seasonal Signals and Long-term Trends in the Height Time Series of IGS Sites in China[J]. Science China(Earth Sciences), 2016,59(6):1283-1291

[16] Hassan A A, Jin S. Lake Level Change and Total Water Discharge in East Africa Rift Valley from Satellite-based Observations[J]. Global & Planetary Change,2014,117:79-90

[17] 唐伟,赵祥君,康彩琴,等. 太原盆地地面沉降时序InSAR监测与季节性形变小波分析[J]. 地球物理学报,2023,66(6):2352-2369

[18] 陈立权,赵超英,高源. InSAR技术用于甘孜-玉树与鲜水河断裂带三维运动研究[J]. 大地测量与地球动力学,2024,44(10):1022-1027

[19] 董昶宏,赵相卿. 青藏铁路多年冻土区路基形变特征及影响因素分析[J]. 铁道标准设计,2013,57(6):5-8

[20] 刘明浩,孙志忠,牛富俊,等. 气候变化背景下青藏铁路沿线多年冻土变化特征研究[J]. 冰川冻土,2014,36(5):1122-1130

[21] 李晓民,张兴,辛荣芳,等. 国产高分数据在青海地区遥感解译泉点浅探[J]. 地理空间信息,2021,19(2):60-63