

黄河上游沱沱河盆地多年冻土 InSAR 形变监测与稳定性分析

刘辉¹, 朱梦源^{1,3}, 苗长伟², 刘文锴¹, 曹斌¹, 王俊卿²

(1. 华北水利水电大学 数字孪生水文学高等研究院, 河南 郑州 450046; 2. 中核勘察设计研究有限公司, 河南 郑州 450003; 3. 信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450001)

摘要:【目的】冻土的水—冰相变交替过程会造成水文环境与地表工程的破坏, 从而导致路基塌陷、山体滑坡、洪水暴发以及冰川溃决等灾害, 智能感知潜在风险对保护冻土区工程建筑具有重要意义。【方法】采用2017年1月—2023年4月194景 Sentinel-1A 影像, 利用 SBAS-InSAR 技术获取了黄河上游沱沱河盆地冻土区形变结果, 结合近7年沱沱河盆地 GNSS 监测数据验证了 InSAR 结果的可靠性, 并引入降水和气温数据分析环境因素与人类活动对形变的影响。【结果】冻土地表形变明显且空间分布不均匀, 监测时间段内最大形变速率可达 13 mm/年, 冻土区青藏铁路路基形变呈现“冻胀融沉”的季节性变化, 暖季匀速沉降, 冷季缓慢抬升, 在气候变暖背景下, 暖季逐渐长于冷季; InSAR 与 GNSS 监测结果的变化趋势一致, RMSE 和 R^2 分别为 4.33 mm 和 0.9; 引入降水和气温因素后发现, 冻土区形变具有显著聚集特征, 在人类活动频繁地区存在较大形变。【结论】该研究对冻土防灾减灾、保障人民生命财产安全具有重要意义, 为高纬度冻土工程建设提供参考。

关键词: 多年冻土; SBAS-InSAR; 形变监测; 卫片建模; 冰冻圈

中图分类号: P236

文献标识码: A

文章编号: 2096-6792(2025)05-0014-09

中国是世界上冻土面积最大的国家之一, 占国土面积的 22.3%^[1]。冻土安全已成为全球众多寒区工程建筑中备受瞩目的重要议题, 尤其对横亘于世界屋脊之上的青藏高原, 探索冻土地表时空演变规律, 智能感知冻土潜在风险对寒区工程建筑安全运营有着重要意义。特别在汛期, 对于高原地区的工程建筑, 如果不能做到“万无一失”, 则可能“一失万无”^[2-3]。

冻土形变存在发育隐蔽、难以探查等特点, 传统冻土形变监测以人工水准测量、埋设传感器监测等方法为主^[4]。这些方法仅靠少数测量点的高程差值反映冻土形变状况, 难以覆盖大面积区域, 存在观测周期长、空间采样密度低和人工成本高等缺点。而合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技术相较于传统测量方式, 在冻土形变观测中具有测量精度高、穿透力

强和不受云雨天气影响的优势^[5-6]。该技术已被广泛应用于水利工程安全监测^[7-10]、山体滑坡^[11-12]、冰川运动^[13]和地震反演^[14-15]等方面。

沱沱河盆地位于青藏高原腹地, 被认为是世界上最理想、最有特色的生态环境变化研究区之一^[16]。近年来, 由于全球气温上升、冰川消融和水土流失, 沱沱河盆地多年冻土退化日益严重, 其冻土稳定性监测长期以来受到国内外学者重点关注^[17]。最初, 由于自然环境恶劣, 人工难以抵达, 研究者大多基于冻土理论研究得到了多年冻土温度变化和退化特征^[18]。随着科技的发展, 研究者开始进入沱沱河盆地, 通过钻探、坑探、物探和遥感等多种综合技术手段, 在沱沱河盆地建立了多种监测站, 为冻土形变监测研究提供了坚实基础^[19]。近年来, InSAR 技术在冻土形变监测中逐渐被广泛应用, 研究者利用 PS-InSAR (Permanent Scatterers

收稿日期/Received: 2024-06-12

修回日期/Revised: 2024-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41901411); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2021GGJS073); 河南省科技攻关项目 (212102310052); 中央引导地方科技发展资金资助项目 (2025ZYDF033)。

第一作者: 刘辉 (1986—), 男, 副教授, 硕导, 博士, 从事 InSAR 和阵列 SAR 等方面的研究。E-mail: lh860801@163.com。

通信作者: 朱梦源 (1999—), 男, 博士研究生, 从事 InSAR 和深度学习等方面的研究。E-mail: zmy0615@stu.ncwu.edu.cn。

InSAR)技术成功获取了沱沱河盆地地表位移速率,该速率主要集中在 $-20\sim 20\text{ mm/年}$ 范围内^[20]。目前,尚未结合环境因子分析对寒区工程的影响,缺乏对寒区工程形变规律的探索。

本研究利用 SBAS-InSAR (Small Baseline Subset InSAR) 技术获取沱沱河盆地长时序形变状况;基于研究区“卫星遥感”三维建模结果设立关键监测点位,分辨冻土路基详细形变情况;联合全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 基准站与 InSAR 监测结果进行精度对比;引入降雨、气温、路基加固等关键环境因子和人为因素分析路基冻胀融沉对冻土路基稳定性的影响。该技术可为冻土形变时空演变探测提供新的技术手段,这些成果为重大冻土区建设工程的风险评估和其基础区形变的早期预防提供依据。

1 研究数据与方法

沱沱河盆地位于黄河上游,羌塘地块北部,是青藏高原腹地较大的新生代沉积盆地,为山前冲积平原,海拔 4 560 m 左右,地形相对平坦,地面冲沟较发育,地表及局部有积水洼地,多为热融湖塘,局部地段发育半固定沙丘、沙地。沱沱河网状(辫状)水系十分发育,地层表层主要由吸水性强、松软土组成,盆地内路段受冻土影响有显著季节性形变特征。

1.1 研究数据

沱沱河盆地概况如图 1 所示,图中橙色矩形区域为影像覆盖范围,红色矩形区域为重点研究区位置。

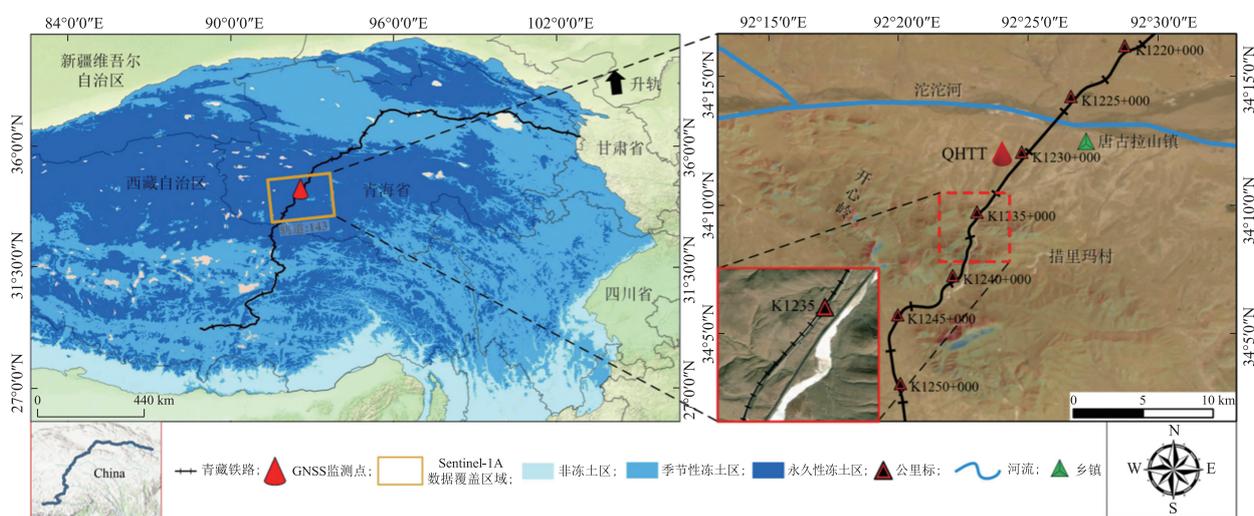


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the research area

为了精确捕捉青藏铁路沿线形变并从多尺度构建三维模型评估冻土铁路稳定性,本文使用了 3 类历史数据。

第 1 类为欧洲航天局提供的 2017 年 2 月—2023 年 9 月 IW 模式 194 景 Sentinel-1A 卫星影像,以及 SRTM-1 (Shuttle Radar Topography Mission) DEM 和 POD 精密定轨数据,被用于探索黄河上游沱沱河盆地地形变状态。

第 2 类为具备三立体成像能力的北京三号 (Beijing 3, BJ-3) 0.3 m 分辨率 (全色) 卫星影像,被用于构建沱沱河盆地立体模型,了解区域地理特征、地貌、水文等情况。

第 3 类为综合地表数据集 (全球) (<https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day>) 提供的沱沱河盆地气象站记录的逐日降水量

和气温数据,被用于分析气温、降水与铁路形变的关系。从国家地震科学数据中心 (<https://data.earthquake.cn/index.html>) 获取了中国大陆构造环境监测网络 (陆态网络) 布设的沱沱河盆地 GNSS 基准站长时序监测数据,用于评价监测结果质量。

1.2 SBAS-InSAR 技术

SBAS-InSAR 技术最早由意大利学者 Berardino 提出并开展地表形变监测^[21]。该技术避免了时空基线过长导致的失相干现象,同时缓解了大气效应以及地形对差分的影响,对大范围非城市区域监测更有优势,其流程如图 2 所示。

图 2 中流程主要分为 3 部分^[22]: ①数据预处理。输入多幅 SAR 影像,通过对大量 SAR 数据时间和空间基线筛选后,随机选取像对进行组合,每个小子集中质量最好的图像被选为主影像,其他图

像为从影像。②差分干涉计算。主要包括生成干涉图、相位解缠和轨道精炼等步骤。③形变计算。在去除平地相位后,经过相位展开,使用奇异值分

解和最小二乘法估计形变参数,根据残差估计大气相位,计算得到最终形变结果。

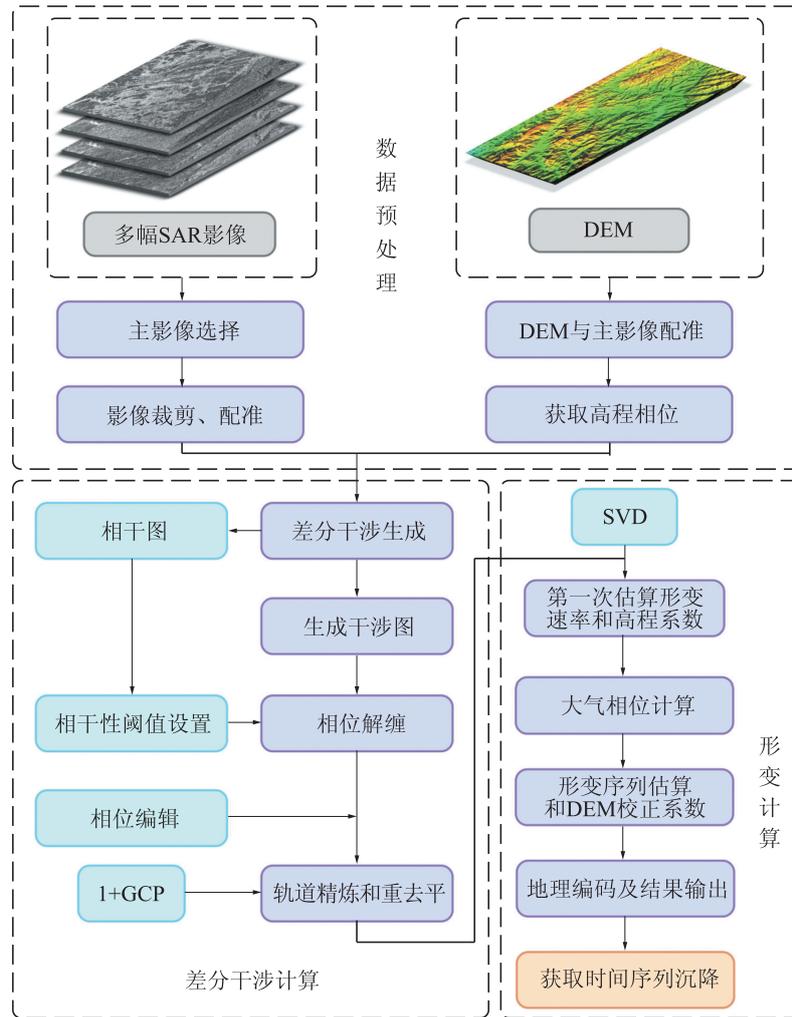


图2 SBAS-InSAR 流程

Fig. 2 SBAS-InSAR workflow

假设有覆盖同一研究区的 $N+1$ 景 SAR 影像, 获取的时间分别为 t_0, t_1, \dots, t_N , 待配准、生成干涉图后可获得 M 个干涉组合。 M 满足:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2}. \quad (1)$$

以 t_0 为参考时刻, 任意时刻 t_i 相对于 t_0 时刻的差分干涉相位为未知量, 数据处理过程中所获取的差分干涉相位为观测量。第 i 幅差分干涉图的干涉相位值为:

$$\delta\varphi_i = \varphi_b - \varphi_a \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d_b - d_a). \quad (2)$$

式中: λ 为雷达波长; d_b, d_a 和 φ_b, φ_a 分别为像元在时刻 t_b, t_a 沿雷达视线向的累计形变量和 SAR 影像上的相位值, 在 t_0 时刻 $d_0 = 0$; $\delta\varphi_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 为相对于解缠参考点的相位值。

主影像 (IM)、辅影像 (IS) 对应的时间序列分别为:

$$IS = [IS_1, IS_2, \dots, IS_m], \quad (3)$$

$$IM = [IM_1, IM_2, \dots, IM_m]. \quad (4)$$

差分干涉图中相位表示如下:

$$\delta\varphi_j = \varphi(t_{IM_j}) - \varphi(t_{IS_j}) (j = 1, 2, \dots, M). \quad (5)$$

将线性模型(4)用矩阵表达可得:

$$\delta\varphi_j = \mathbf{A}\varphi_j. \quad (6)$$

式中: \mathbf{A} 为 $M \times N$ 阶系数矩阵; $\delta\varphi_j$ 为各差分干涉图对应的解缠相位值; φ_j 为第 j 幅 SAR 影像对应的相位值, 若基线集合中仅包含一个子基线集, 则矩阵 \mathbf{A} 的秩为 N , 采用最小二乘法求解可得:

$$\varphi_j = \delta\varphi_j (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T. \quad (7)$$

反之, 若基线集合含有多个子集时, 矩阵 \mathbf{A} 亏秩, 矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 为奇异阵, 可用奇异值分解法求其值, 最终

可得形变相位信息。

2 结果与分析

2.1 SBAS-InSAR 监测结果分析

以纵穿沱沱河盆地的青藏铁路途经区域为重点区域,给出了沱沱河盆地分时段形变监测结果,如图 3 所示(图中时间格式为:年/月)。图 3 中显示:从 2017 年 2 月开始到青藏铁路边坡出现形变大约经历 16 个月;2020 年 10 月,该铁路处边坡明显抬升,并一直加剧,该地区最大累计形变量达到 77 mm,该铁路路基长年遭受冻土形变影响。

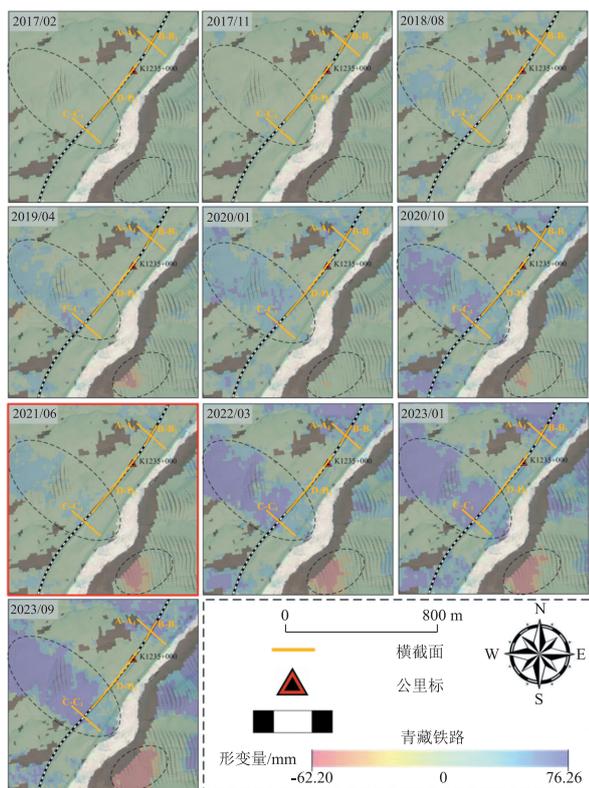
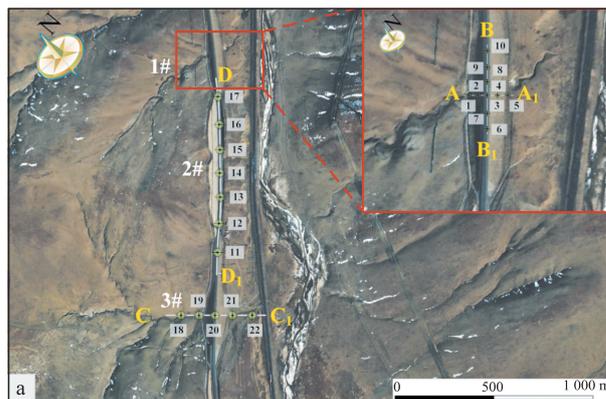


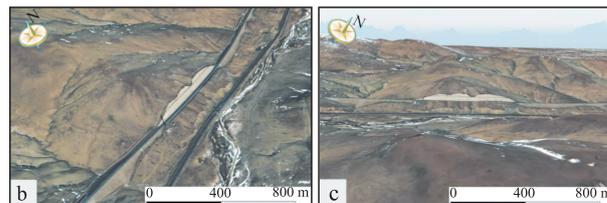
图 3 沱沱河盆地分时段形变量

Fig. 3 Deformation variables of Tuotuo River basin in different periods

青藏高原冻土区整体呈面积和厚度逐渐缩小、气温逐渐升高的趋势,但研究区呈现出相反的趋势。主要是因为:①根据 GRACE 重力卫星反演地下水储量结果可知,随着昆仑山脉等高原冰川融水加剧,沱沱河盆地地下水储量近 20 年呈缓慢增加趋势,年均增加速率达 3.5 cm/年^[23],源源不断的地下水补给导致研究区活动层增厚,出现大面积地势抬升现象。②青藏铁路沿线地势呈两侧高山、中间低谷的深“V”状。由图 4 知,地势抬升区主要为山体坡面,受坡度影响,地表水流向地势低洼处,加上当地土体松软且吸水性强、当地年平均气温-4.2℃等因素,导致研究区地势出现缓慢抬升现象。



(a) 1—22号关键监测点



(b) 45°影像图

(c) 侧视影像图

图 4 三维模型横、纵截面和关键点分布

Fig. 4 Cross section, longitudinal section and key point distribution of three-dimensional model

值得注意的是,2021 年 6 月的监测结果相比前一年的表现出明显的形变退化,这是冻土“冻胀融沉”的结果。当时正处夏季,活动层冻土融解,导致该地区整体沉降,图 3 右下方虚线椭圆处形变状态也可证明此点。

2.2 典型冻土区路基形变精细化分析

为探究沱沱河盆地冻土失稳形变状态,利用 BJ-3 卫星立体像对建立了该区域的三维模型。在 K1235+200 桩号附近提取 4 个路基截面(A-A₁、B-B₁、C-C₁、D-D₁),并设置 1—22 号关键监测点,从北至南依次划分为 1#、2#和 3#研究区,如图 4 所示,用于监测河流穿越青藏铁路地区和边坡脆弱地区冻土路基的安全状况。研究区横纵断面形变如图 5 所示,为分析 1#研究区横、纵两断面形变情况,设置 1—10 号关键监测点。

由图 5 可知,1#研究区近 7 年冻土路基每年的形变量在 60 mm 以内,整体呈规律性波动的抬升趋势。

由图 5(a)可知,2017—2019 年该研究区路基处于快速形变阶段,2020—2023 年处于缓慢形变阶段,这两阶段年均形变速率分别达 10、5 mm/年。造成这种现象的原因是,横断面下方为冰川融水产生的季节性冻结溪道,随着气温逐渐升高,冰川融水现象加剧,冰川解冻导致活动层冻土退化,形变速率放缓^[24]。

由图 5(b)可知,在平行于路基方向上,8 号、9

号和10号点位随着时间变化表现出较大的抬升,10号点位相比6号点位多抬升了31.9 mm。这是由于8号、9号和10号点位离山坡近,土壤含水量

较大,土体长期高含水量促使活动层冻土厚度增加,从而出现更大形变。在铁路运行过程中这种现象会导致铁路路基错位隆起,危及铁路运行安全。

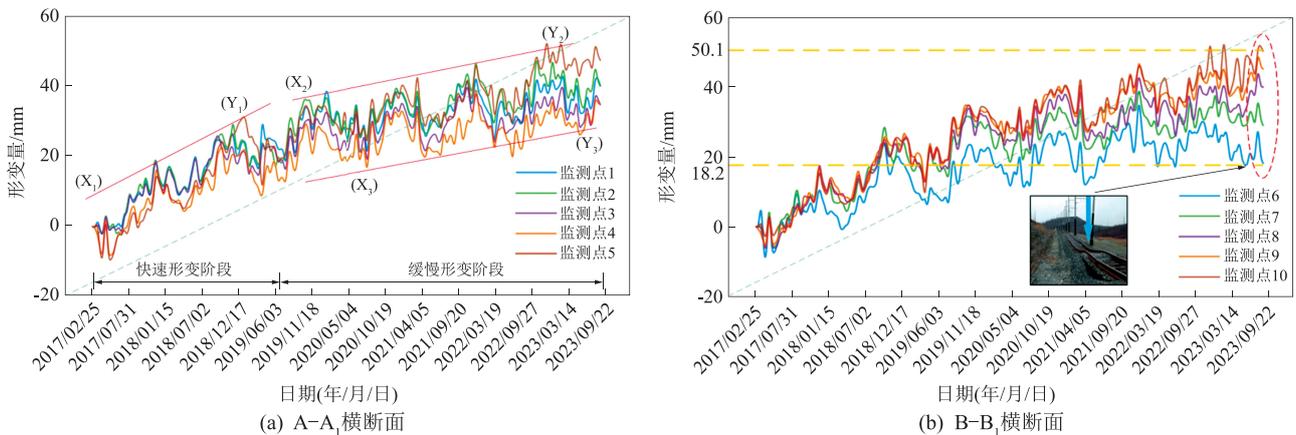


图5 研究区横纵断面形变

Fig. 5 Deformation of transverse and longitudinal sections in the north of Tuotuo River basin

2#研究区断面 D-D₁ 上各监测点的形变结果如图6所示。由图6可知,该处的形变结果是两端大(分别在点 M₀₁、M₀₃ 处)、中间小(在点 M₀₂ 处);最大形变(51.7 mm)和最小形变(9.8 mm)差值超过 40.0 mm,这会形成差异性形变,导致路面塌陷和列车脱轨等严重事故。2021年10月,铁路在图

6(b)中红色虚线椭圆所示位置突然抬升后形变放缓,放缓原因与路基加固有关。桥梁和隧道受到更多自然因素影响,易出现较大形变,在日常维护过程中应着重关注桥梁、隧道和“路-桥”连接处的形变状况。

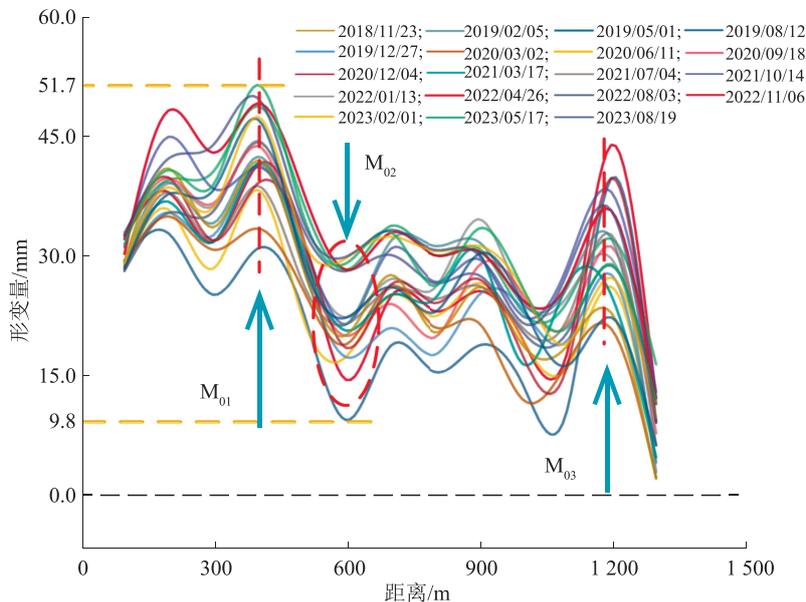


图6 D-D₁ 断面形变图

Fig. 6 Deformation diagram of D-D₁ section

3#研究区(C-C₁ 断面)形变情况及冷暖季变化如图7所示。由图7可知,3#研究区近7年形变量达到50.0 mm,青藏铁路路基呈整体抬升趋势并存在明显季节性形变规律,每年5月份左右达到阶段性沉降最大,1月份达到抬升最大。图中红色椭圆区点 N₀₁ 处发生异常形变。根据沱沱河气象站

监测结果,2019年5月,该地气温突破历史极值(16.3℃),连续高温天气导致路基出现严重沉降,影响铁路运营安全。图7右下示意图示出了铁路路基沉降带来的潜在后果。

以每年形变最小处和形变最大处划分冷暖两季(红色箭头代表暖季,蓝色箭头代表冷季)。由

图 7 可以发现,随着时间变化,暖季时间逐渐增长,年均增幅达 3.4%,冷季逐渐缩短。图 7 中红色虚线箭头代表总体形变趋势,结合图 8 给出的环境因子信息可知,相较于降水量递增的 2017—2019 年,降水量递减的 2020—2023 年形变速率放缓,这是

由于降水补给了地表水流量,地表水通过向下渗透提高了土体含水量,加之沱沱河盆地气温常年处于 0℃ 以下,导致活动层“冻胀”量大于“融沉”量,地表出现抬升。随着降水量的递减,研究区抬升放缓。

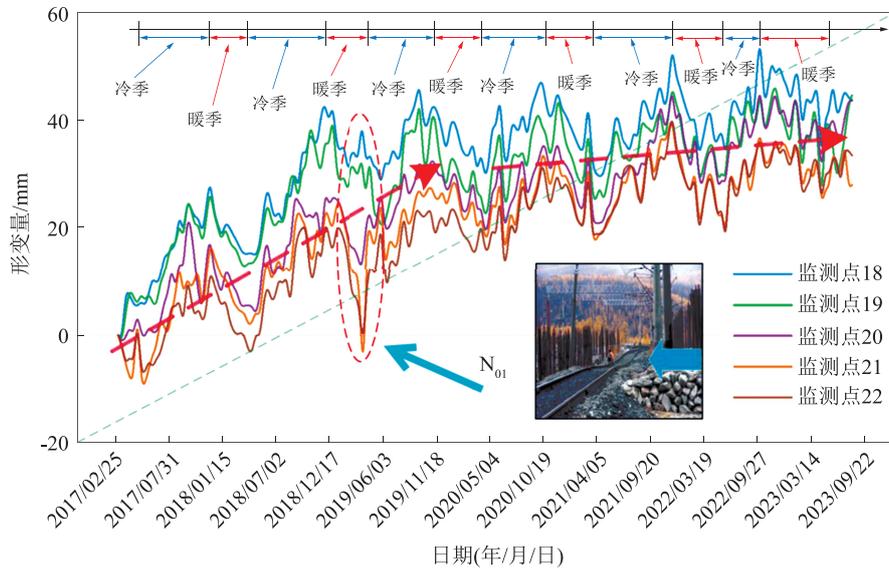


图 7 3#研究区 (C-C₁ 断面) 形变情况及冷暖季变化

Fig. 7 Deformation and changes in cold and warm seasons in the 3# area (C-C₁ cross section)

2.3 降水、气温与形变相关性分析

选取沱沱河盆地与 SBAS-InSAR 重点监测点相同位置的气象站点数据进行分析,结果如图 8 所示。由图 8 可看出:该区域冻土有显著的周期性变化特征,具体表现为融沉过程始于每年 1 月,冻胀过程始于每年 9 月;随着气温不断变化,监测点呈

现与气温变化周期趋势相反的情况,表明气温对地表形变起着至关重要的作用。沱沱河盆地属于季节性冻土区,地势低,地下水位高,对气温变化响应迟钝。因此,冻土冻胀和融沉过程的开始时间会晚于地表气温降至 0℃ 的时刻。

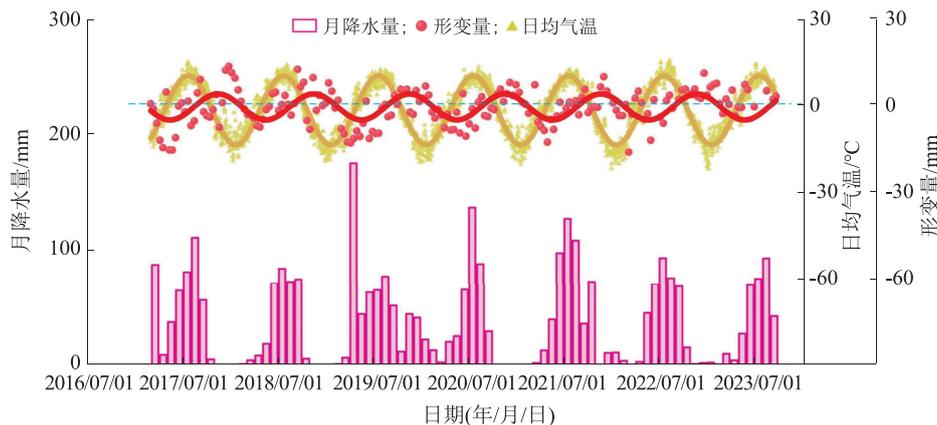


图 8 沱沱河盆地降水和气温与形变关系

Fig. 8 Relationship between precipitation, temperature and deformation in Tuotuo River basin

沱沱河盆地 60%~90% 的降水集中在 6—9 月。每年夏季,受气温升高和降水量增加的共同作用,冻土层的融化过程持续加速,不断补充地表水,容易引起短期内冻土活动层快速融化,加上脆弱的地质条件,增加了山体洪涝灾害发生的风险。

表 1 中给出了穿越冻土区的桩号 K1047+100—K1519+300 约 500 km 长的铁路范围内形变结果。由表 1 可看出:多年冻土地表季节形变主要集中在降水量大或人类活动较多的公路、铁路沿线地区。靠近铁路的区域(0~500 m),由于人类活动频繁、土

壤水分含量高且地势平坦,导致地面形变区域数量最多,形变量较大。随着离铁路距离的增加,地面形变区域数量逐渐减少。在高山、荒漠等地区,受海拔影

响,高原山区的气温和降水往往低于平原(如>1 000 m的高山区域),冻土层较浅或相对稳定,形变现象相对较少。大面积形变普查对冻土保护十分必要。

表 1 形变区域信息统计

Tab. 1 Information statistics of deformation area

距铁路距离/m	形变区域数量/个	平均形变速率/(mm/年)	主要地形地貌
<500 m	28	-8.5	河谷平原,铁路沿线
[500,1 000] m	13	-6.8	缓坡丘陵,邻近铁路
>1 000 m	9	-7.4	高原山地,远离铁路

2.4 InSAR 结果的精度分析

选取沱沱河盆地气象站(代码为 QHTT,经度为 $92^{\circ} 26'$ 、纬度为 $34^{\circ} 13'$)的 GNSS 基准站数据,基于日地表垂直形变监测结果,利用快速傅里叶变换滤波器对垂直于地表的 GNSS 数据分量进行平滑。将 InSAR 反演的雷达视线(Line of Sight, LOS)向形变投影至垂直地表方向,与平滑后的 GNSS 数据拟合,选择均方根误差(Root Mean Squared Error,

RMSE)、 R^2 用于回归模型拟合优度评价,使用频率直方图对数值规律进行探索。

GNSS 监测数据与 InSAR 反演结果拟合情况如图 9 所示。图 9 中的结果表明,InSAR 监测结果与 GNSS 结果形变趋势一致,相关度较高。从图 9 左侧频率分布直方图中可以发现,GNSS 与 InSAR 结果分布重合度高,且 75%以上形变监测值分布于 0~20 m 范围内, RMSE 和 R^2 分别为 4.33 mm、0.90。

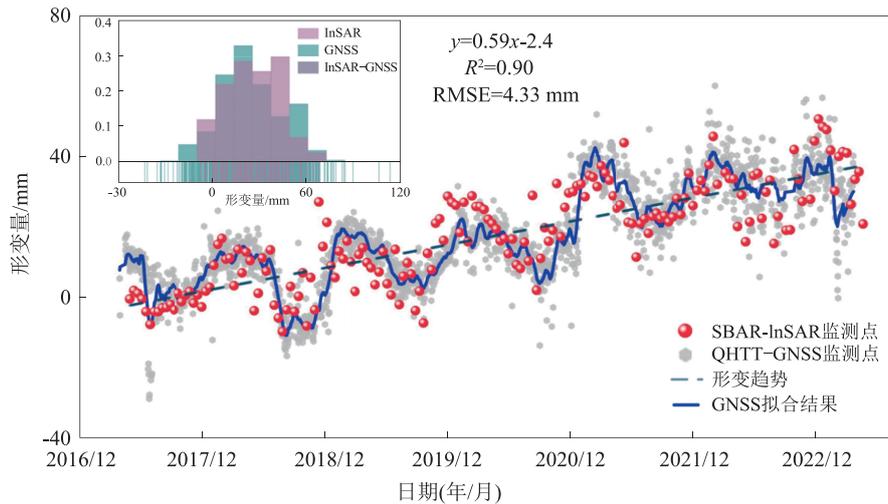


图 9 GNSS 监测数据与 InSAR 反演结果拟合情况

Fig. 9 Fitting of GNSS monitoring data with InSAR inversion results

根据 RMSE 值越小结果越可靠, R^2 越接近 1 拟合程度越好的原则,认为 SBAS-InSAR 反演结果与 GNSS 监测结果在沱沱河盆地冻土区表现出良好的一致性,证明了 InSAR 技术在高海拔、复杂地形区域的形变监测中具有较高的精度和可靠性,可用于冻土异常形变普查工作。

3 结论

本研究以黄河上游沱沱河盆地为研究区,以纵穿青藏铁路途经区域为重点研究区,监测和分析 2017—2023 年冻土路基的形变情况,主要结论如下:

1) 采用 SBAS-InSAR 技术获取了 2017—2023

年黄河上游沱沱河盆地铁路沿线的冻土路基形变序列,最大形变速率可达 13 mm/年。结合卫星影像三维模型挖掘了形变特征,发现桥梁和隧道的形变比地表铁路的大,研究区 2017—2019 年的形变速率为 2020—2023 年的两倍。

2) 结合降水和气温等环境因素分析发现,降水量对地表形变有显著影响,铁路沿线冻土地区表现出典型的季节性“冻胀融沉”特征。随着气候变暖,暖季持续时间延长,冻土冻胀和融沉过程的开始时间会晚于地表气温降至 0°C 的时刻。

3) 通过对青藏铁路沿线不同区域进行详细分析发现,地表形变呈现显著的空间分布特征:紧邻铁路区域地表形变活跃,远离铁路区域地表形变相

对稳定,形变分布受区域降水和气温变化的综合影响。

4)将 GNSS 监测数据与 InSAR 反演结果进行对比,结果显示,二者在监测形变趋势上高度一致, RMSE 和 R^2 分别为 4.33 mm 和 0.90,表明 SBAS-InSAR 技术在环境因素复杂的地区具有较高的监测精度,能胜任对冻土形变的监测。

未来,可联合升降轨卫星数据、GNSS 数据和地下水文数据,获取高精度的三维形变,从而得到更准确的冻土形变规律。

参 考 文 献

- [1] 吴青柏,牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. 科学通报,2013,58(2):115-130. [WU Q B, NIU F J. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Science Bulletin,2013,58(2):115-130.]
- [2] 王京. 基于多源 SAR 数据青藏高原冻土冻融过程及时空分布研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院),2021. [WANG J. Freeze-thaw process and temporal-spatial distribution of permafrost based on multi-source SAR data over the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences,2021.]
- [3] 石刚强. 严寒地区高速铁路路基冻胀和工程对策研究[D]. 兰州:兰州大学,2014. [SHI G Q. Research on frost heave in subgrade of high-speed railway in cold regions and its engineering countermeasures[D]. Lanzhou:Lanzhou University,2014.]
- [4] 靳国旺,徐青,张红敏. 合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:国防工业出版社,2014. [JIN G W, XU Q, ZHANG H M. Synthetic Aperture Radar Interferometry[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2014.]
- [5] LIU H, ZHU M Y, ZHU W, et al. Soil and rockfill dams safety assessment for Henan Province: monitoring, analysis and prediction[J]. Remote Sensing,2023,15(17):4293.
- [6] 刘辉. MIMO 稀疏阵列 SAR 天线设计与三维成像技术研究[D]. 郑州:中国人民解放军网络空间部队信息工程大学,2017. [LIU H. Research on antennas design and three-dimensional imaging techniques for MIMO sparse array SAR [D]. Zhengzhou: Information Engineering University,2017.]
- [7] BIGGS J, WRIGHT T J. How satellite InSAR has grown from opportunistic science to routine monitoring over the last decade[J]. Nature Communications,2020,11(1):3863.
- [8] 刘辉,靳国旺,张红敏,等. DEM 辅助的 InSAR 零中频处理基线估计方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(3):79-84. [LIU H, JIN G W, ZHANG H M, et al. DEM assisted zero intermediate frequency baseline estimation method of InSAR[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition),2017,45(3):79-84.]
- [9] LIU H, ZHOU B C, MIAO C W, et al. Refinement analysis of real dihedral and trihedral CR-InSAR based on TerraSAR-X and sentinel-1A images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2024,17:18739-18750.
- [10] 刘文锴,刘辉,宋志敏,等. 国产内陆水 InSAR 卫星星座迭代建设策略及应用探讨[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(4):1-10. [LIU W K, LIU H, SONG Z M, et al. Discussion on iterative construction strategy and application of domestic inland water in SAR satellite constellation[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2022,43(4):1-10.]
- [11] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报,2020,28(2):360-374. [XU Q. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues[J]. Journal of Engineering Geology,2020,28(2):360-374.]
- [12] HE Y, ZHAO Z A, ZHU Q, et al. An integrated neural network method for landslide susceptibility assessment based on time-series InSAR deformation dynamic features[J]. International Journal of Digital Earth,2024,17(1):2295408.
- [13] 柳林,江利明,高斌斌,等. 山地冰川运动地基 InSAR 监测试验[J]. 测绘通报,2016(4):54-57,63. [LIU L, JIANG L M, GAO B B, et al. Measuring mountain glacier flow velocity by means of Ground-based InSAR[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2016(4):54-57,63.]
- [14] 刘辉,靳国旺,张红敏,等. DEM 辅助的山区 InSAR 相位解缠[J]. 测绘科学技术学报,2017,34(2):215-220. [LIU H, JIN G W, ZHANG H M, et al. Phase unwrapping assisted by DEM of InSAR for mountainous terrain [J]. Journal of Geomatics Science and Technology,2017,34(2):215-220.]
- [15] 吕明哲,陈克杰,柴海山,等. 联合 InSAR 和 高频 GNSS 位移波形反演 2022 年青海门源 M6.9 地震同震破裂过程[J]. 地球物理学报,2022,65(12):4725-4738. [LV M Z, CHEN K J, CHAI H S, et al. Joint inversion of InSAR and high-rate GNSS displacement waveforms for the rupture process of the 2022 Qinghai Menyuan M6.9 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics,2022,65(12):4725-4738.]
- [16] 程国栋,赵林,李韧,等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报,2019,64(27):2783-2795. [CHENG G D, ZHAO L, LI R, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Science Bulletin,2019,64(27):2783-2795.]
- [17] CHEN J, WU T H, ZOU D F, et al. Magnitudes and patterns of large-scale permafrost ground deformation revealed by Sentinel-1 InSAR on the central Qinghai-Tibet Plateau[J].

- Remote Sensing of Environment, 2022, 268: 112778.
- [18] 朱兆荣, 李勇, 薛春晓, 等. 1976—2010年青藏铁路沿线多年冻土区降水变化特征[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 846–850. [ZHU Z R, LI Y, XUE C X, et al. Changing tendency of precipitation in permafrost regions along Qinghai-Tibet Railway during last thirty years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 846–850.]
- [19] WU Q B, LIU Y Z. Ground temperature monitoring and its recent change in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 85–92.
- [20] 洪兆阳, 金双根. 利用时序 PS-InSAR 监测青藏高原冻土区地表现形变[J]. 测绘通报, 2021(1): 35–40. [HONG Z Y, JIN S G. Permafrost deformation in Qinghai-Tibet Plateau time-series PS-InSAR[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(1): 35–40.]
- [21] 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.
- [22] 刘辉, 李世环, 苗长伟, 等. 南水北调河南长葛段多平台 InSAR 三维形变监测 [J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 1–12. [2025-08-09]. <https://link.cnki.net/urlid/41.1432.tv.20240905.1314.002>.
- [23] XIANG L W, WANG H S, STEFFEN H, et al. Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 449: 228–239.
- [24] 刘小妮, 莫李娟, 辛昱昊, 等. 青藏高原地区积雪与雪线高度时空变化研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 48–58. [LIU X N, MO L J, XIN Y H, et al. Research on the temporal and spatial variations of snow cover and snowline altitude in the Tibetan Plateau Region[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 48–58.]

InSAR Deformation Monitoring and Stability Analysis of Permafrost in Tuotuo River Basin, in the Upper Yellow River

LIU Hui¹, ZHU Mengyuan^{1,3}, MIAO Changwei², LIU Wenkai¹, CAO Bin¹, WANG Junqing²

(1. Advanced Research Institute for Digital-Twin Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. China Nuclear Industry Survey Design & Research Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: **[Objective]** The alternating process of water-ice phase transition in permafrost damages hydrological environments and surface engineering, leading to hazards such as roadbed collapse, landslides, floods, and glacial lake outbursts. Intelligent perception of potential risks is crucial for protecting infrastructure in permafrost regions. **[Methods]** Using 194 Sentinel-1A images (January 2017 – April 2023), SBAS-InSAR technology was applied to obtain deformation results in the permafrost area of the Tuotuo River Basin in the upper Yellow River. GNSS monitoring data from the past seven years validated the reliability of InSAR results. Precipitation and temperature data were incorporated to analyze impacts of environmental factors and human activities on deformation. **[Results]** Permafrost surface deformation was significant and spatially heterogeneous, with a maximum deformation rate of 13 mm/year during the monitoring period. The Qinghai-Tibet Railway roadbed exhibited seasonal "frost heave and thaw settlement" patterns: uniform subsidence during warm seasons and slow uplift during cold seasons. Under climate warming, warm seasons gradually lengthen relative to cold seasons. InSAR and GNSS results showed consistent trends, RMSE and R2 were 4.33 mm and 0.9, respectively. After incorporating precipitation and temperature factors, deformation displayed significant clustering characteristics, with pronounced deformation in areas of intensive human activity. **[Conclusion]** This study provides critical insights for permafrost disaster prevention and mitigation, protection of people's lives and property, and infrastructure safety, offering references for engineering construction in high-latitude permafrost regions.

Keywords: permafrost; SBAS-InSAR; deformation monitoring; satellite image modeling; cryosphere

(编辑:杜明侠)