

基于InSAR技术的黄河源多年冻土区形变估计及驱动因素分析

张正加¹, 靳庆光², 张绍阳¹, 梁朋^{3,4}, 方宇¹, 冯天旭¹,
王猛猛¹, 刘修国¹

1. 中国地质大学(武汉) 地理与信息工程学院, 武汉 430078;

2. 天津市测绘院有限公司, 天津市 300381;

3. 中国地震局地震预测重点实验室 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;

4. 地震预测与风险评估应急管理部重点实验室, 北京 1000364

摘要: 多年冻土长时序和季节性形变准确估计及其驱动因素分析对于评估活动层厚度变化和冻土退化具有重要的意义。在本文中, 提出了一种联合InSAR、RobustSTL和地理探测器的多年冻土季节性形变提取和驱动因素分析框架。首先, 利用时序InSAR技术提取多年冻土地表的时序形变; 在此基础上, 利用RobustSTL算法实现多年冻土季节性形变提取, 并分析多年冻土季节性形变的变化特征; 最后, 基于地理探测器探索多年冻土季节性形变的驱动因素变化。本研究收集了黄河源地区2017年—2021年的Sentinel-1数据进行应用。结果显示, 黄河源地区形变速率分布在-30—20 mm/a之间, 季节性形变变化范围在2—30 mm之间变化。通过地理探测器分析发现, NDVI、MAGT和坡度是影响地表形变较为显著的因素。不同因子对形变的影响之间并非独立的关系, 共同影响地表形变的分布。

关键词: 多年冻土, InSAR, 黄河源, 形变, 驱动因素, 年平均地温, 降雨

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 张正加, 靳庆光, 张绍阳, 梁朋, 方宇, 冯天旭, 王猛猛, 刘修国. 2026. 基于InSAR技术的黄河源多年冻土区形变估计及驱动因素分析. 遥感学报, 30(4): 1166–1181

Zhang Z J, Jin Q G, Zhang S Y, Liang P, Fang Y, Feng T X, Wang M M and Liu X G. 2026. InSAR-based estimation of deformation and analysis of the driving factors of permafrost in the Yellow River's Source Region. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 1166–1181 [DOI: 10.11834/jrs.20265367]

1 引言

多年冻土是指温度连续两年或两年以上保持在0°C或以下的土壤或岩石, 是冰冻圈的重要组成部分(彭小清等, 2023; 罗栋梁等, 2012)。位于多年冻土上层的活动层是多年冻土与大气能量交换最为频繁、活跃的区域, 直接影响冻土区的水文过程和植被生态环境(闫庆凯等, 2025)。近年来, 随着全球气候变暖加剧, 多年冻土退化严重, 主要表现为多年冻土面积减少, 活动层厚度增加(程国栋等, 2019; Wu和Zhang, 2010)。多年冻土地表周期性的抬升和沉降信号可以直接用

于评估活动层厚度的变化, 监测活动层厚度及变化有助于评估多年冻土区气候条件的变化和对水文过程的影响(陈玉兴等, 2019; 蔡红艳等, 2020; Zhang等, 2022)。因此, 对多年冻土季节性形变进行提取对于深入研究多年冻土区域地表形变机理及其驱动机制具有重要意义。

传统的冻土区地表形变监测手段, 如水准测量、GNSS (Global Navigation Satellite System), 受限于高海拔、恶劣环境的影响, 难以实现大范围连续观测。合成孔径雷达干涉测量InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术凭借

收稿日期: 2025-09-11; 预印本: 2025-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41801348)

第一作者简介: 张正加, 研究方向为雷达遥感干涉测量及地质灾害、冻土环境监测应用。E-mail: zhangzj@cug.edu.cn

通信作者简介: 靳庆光, 研究方向为合成孔径雷达干涉测量算法研究及其应用。E-mail: jinjq@cug.edu.cn

其全天候、高精度、空间连续覆盖的优势，已成为地表形变监测的有效监测手段一直，已成功在地表形变、矿区沉降、滑坡监测、基础设施检测等领域应用（郑冠峰等，2025；廖明生等，2021；叶勇超等，2022）。近年来，国内外学者利用时序InSAR技术已在北极圈、阿拉斯基和青藏高原等冻土区形变监测方面取得重要进展，并开展了热融滑塌识别、季节冻融等典型形变应用（Chen等，2013；Zhao等，2016），极大促进了对多年冻土退化过程的认识。

在多年冻土形变建模方面，目前多数研究依赖于基于数学函数或半经验模型的分解方法，如Chen等（2012）针对冻土季节性形变，提出了三次方形变模型描述冻土形变，对青藏高原北麓河区域冻土形变进行研究，结果显示研究区域的冻土形变速率在 -20 — 20 mm/a变化，三次函数有周期变化趋势，符合多年冻土地表变化。Liu等（2012）获得了阿拉斯加北坡多年冻土的地表形变，并引入解冻天数借鉴Stefan公式的平方根关系建立形变模型，将形变分为长时间形变和季节性形变。Wang等（2018）对覆盖北麓河的TerraSAR-X影像进行了长时序（2014年—2016年）的处理，并结合融解和冻结天数建立函数从时序形变中提取季节性形变，结果显示在北麓河地区的季节性形变幅度为 20 — 90 mm。Chen等（2022）进一步引入线性趋势项改进分段高程模型，并联合MODIS温度数据重建季节性与长期形变。尽管这些模型在特定区域表现出较好的拟合效果，但其本质上仍依赖于预设数学形式，未能充分融合冻土变形物理机制，对复杂环境驱动下的形变响应刻画仍显不足，尤其缺乏对分解结果的系统性评估与验证。

在冻土变形驱动机制研究方面，已有成果表明其受温度、降水、地温、积雪、植被、土壤属性等多因子共同作用（Chen等，2024），且存在显著的区域异质性。近年来，机器学习方法被广泛应用于解析因子贡献度，能够捕捉变量间的非线性关系。相关研究指出在极端气候事件（如热浪）发生时，地形与植被的常规作用可能被暂时掩盖，说明冻土变形响应具有条件依赖性（Chen等，2024）。因此，构建能够融合多源环境因子、兼顾时空异质性的驱动分析框架，仍是当前研究的

难点。

本研究以黄河源区为研究对象，基于多源时序InSAR观测数据反演地表形变时空特征，构建涵盖地形、气候、植被等9个关键环境因子的综合评价体系。通过地理探测器模型量化多因子对地表形变的驱动贡献度，解析因子间的交互增强效应，并利用机器学习可解释方法验证驱动机制的科学性。本研究旨在深化对黄河源冻土变形过程及其主导机制的理解，为该区域冻土环境保护、灾害风险防控和重大工程运维提供科学依据。

2 研究区概况与数据

2.1 研究区概况

黄河源位于中国青海省玉树藏族自治州，是黄河的重要发源地之一。黄河源总面积约为 2.9×10^4 km²。地势高峻，平均海拔超过4000 m，区域内地势呈现南北高，中部低的特征，分布着众多崎岖的山脉、丘陵、河谷和湖泊（Jin等，2009）。该区域被冻土覆盖，主要为多年冻土地区，零星分布着季节性冻土地表，这些冻土对地下水的储存和流动、土地稳定性以及生态系统的健康产生着深刻的影响。研究区地理位置如图1所示，其中冻土分布地图来自Zou等（2017）发布的数据。

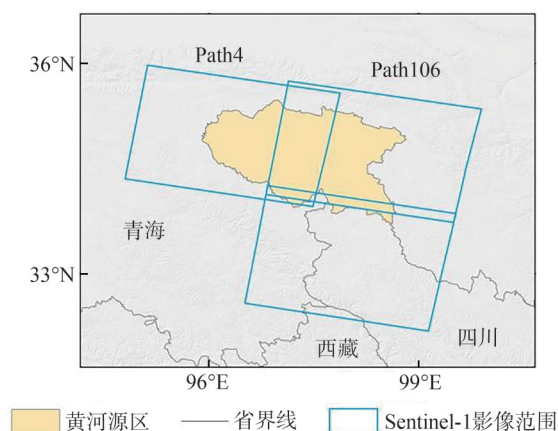


图1 本文研究区

Fig. 1 The study area of this paper

根据图2所示的光学影像图和地表覆盖图，黄河源地区的地表覆盖主要分为草地、裸地、水体和湿地4类。草地类型占主导地位，包括高山草甸

和草原，广泛分布于该地区；岩石裸露的高山裸地主要分布在地区的西北部和中南部山地；湿地主要分布在相对平坦的区域和湖泊、河流附近；这些发现通过图像直观呈现了黄河源地区丰富而多样的地表覆盖类型，为冻土地表形变监测提供

了有益先验信息。另外，研究团队对黄河源地区进行野外调研发现了大量的不稳定边坡和热融湖塘（如图2（c）和（d）），主要是由于气候变化引发的冻土退化导致。

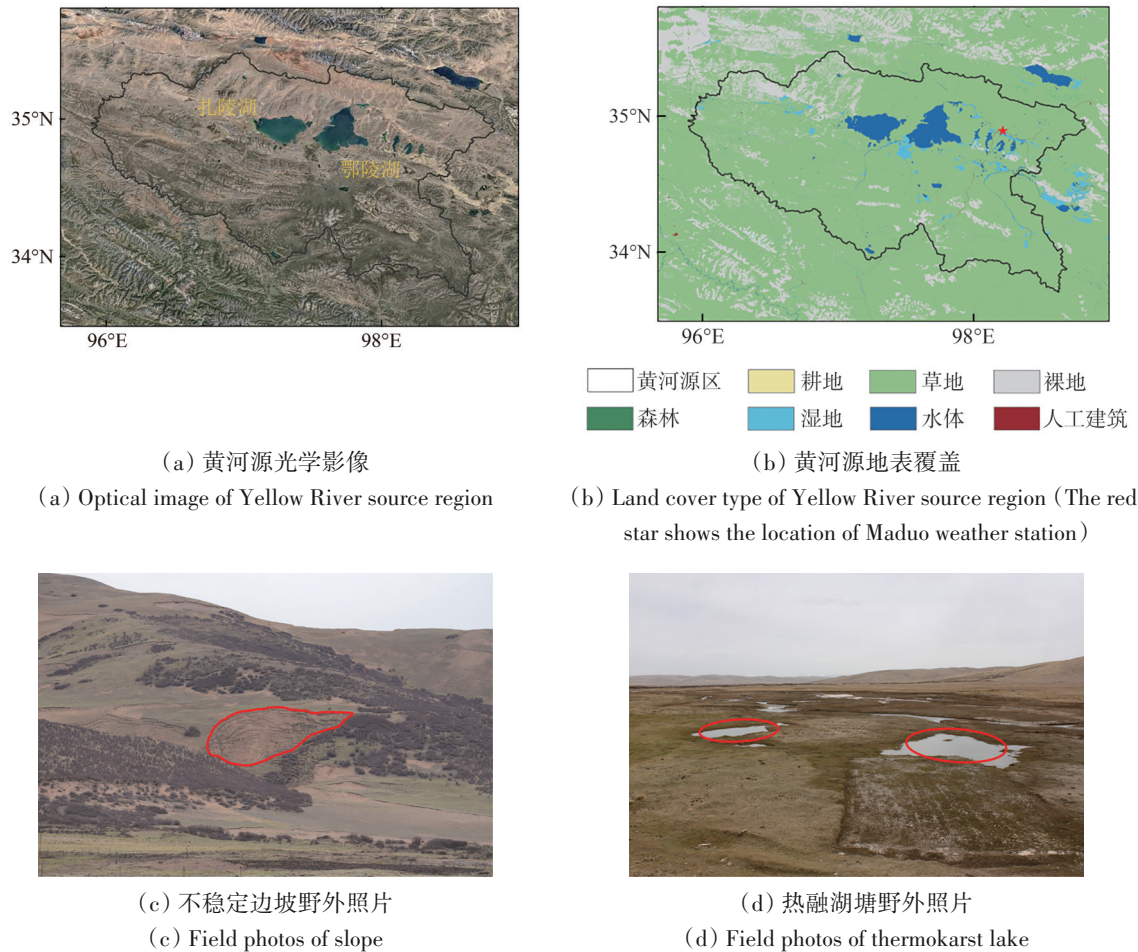


图2 研究区地表冻土环境

Fig. 2 The permafrost environment of the study area

黄河源区的气候属于半干旱和高寒气候类型，具有典型的内陆高原气候特征。本研究收集了玛多气象站的温度和降雨数据（位置位于图2（b）中的五角星），如图3所示。在研究的时间范围内，黄河源地区的年平均温度表现出了先下降后上升的趋势。2019年该地区的年平均温度达到了最低值，为-2.86 °C。降水方面，黄河源地区的降水主要集中在每年的冬季，日降水量的最大值可达89.9 mm。年平均降水量呈现出先增加后减少的趋势，在2018年达到最大值，为7.34 mm。

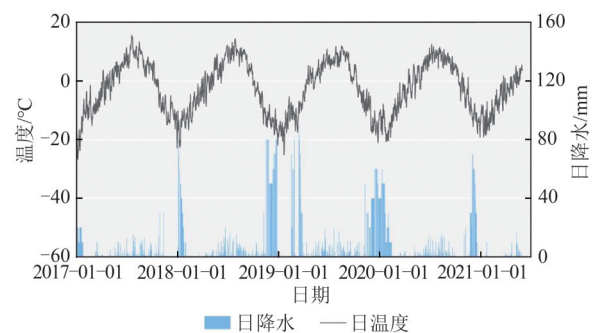


图3 黄河源研究区日降水和日温度数据
Fig. 3 Daily rainfall and temperature of Yellow River source region

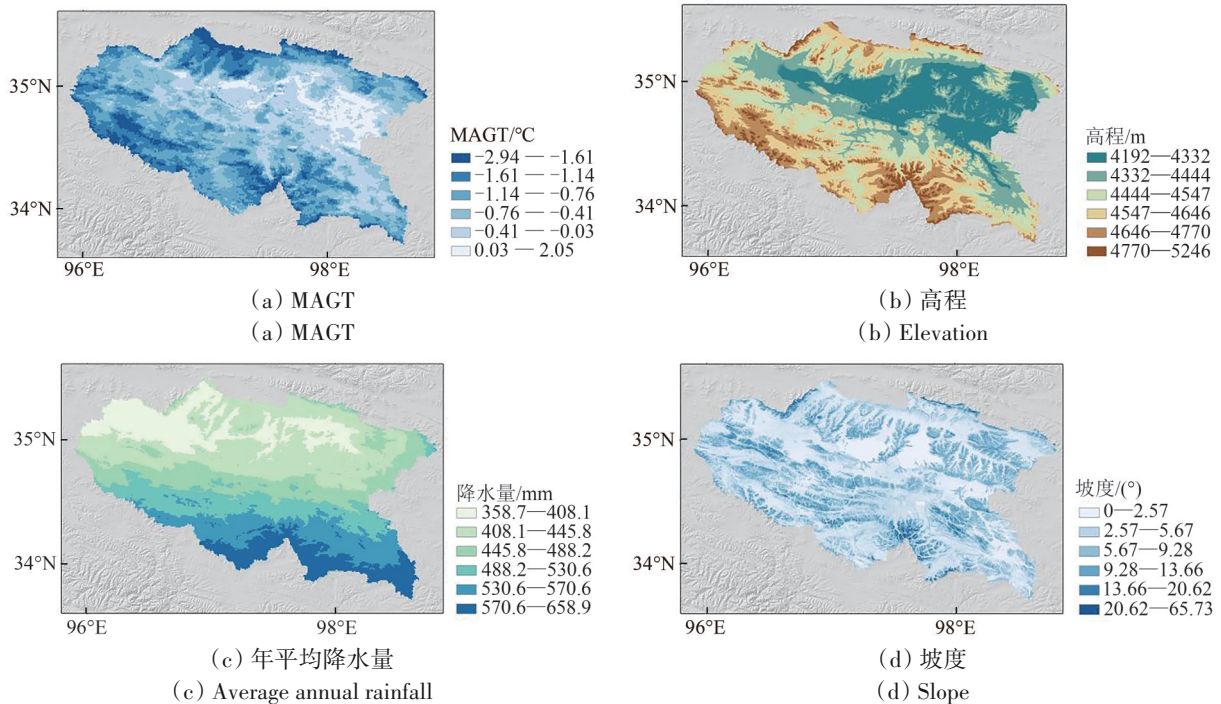
2.2 SAR 数据

本文使用覆盖黄河源地区的左右两个轨道的 Sentinel-1A 单视复数 SLC (Single Look Complex) 降轨数据以获取研究区地表形变, 影像覆盖范围如图 1 (b) 所示。右侧轨道 (轨道号 106) 的时间跨度为 2017 年 2 月—2021 年 5 月, 共获取 125 景数据; 左侧轨道 (轨道号 4) 的时间跨度为 2017 年 3 月—2021 年 5 月, 共获取 113 景数据。此外, 本文还收集了黄河源地区 30 m 分辨率的 SRTM DEM 数据, 以供后续的 InSAR 处理中去除地形相位和形变结果的相关分析。

2.3 多源环境因子

黄河源区的环境复杂多样, 其冻土地表形变在空间上存在着明显的差异, 关于多个环境因子在黄河源区形变影响方面的综合分析研究相对较少。大量研究表明, 形变的分布与诸如高程、植被覆盖和降水等因素密切相关 (贾诗超 等, 2021)。因此, 一共确定了潜在影响形变空间分布的 9 个环境因子, 包括高程、坡度、坡向、年平均降水量、年平均地温 MAGT (Mean Annual Ground

Temperature)、归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、到水域的距离、经度和纬度。高程数据源自 30 m 分辨率 SRTM DEM; 坡度和坡向数据是基于 SRTM DEM 计算得出的; 降水量数据取自 Peng 等 (2019) 发布的中国 1 km 分辨率逐月降水量数据, 通过对 2017 年—2021 年间的的历史数据, 每年求和得到年降水量, 再对年降水量取均值得到年平均降水量; MAGT 数据来自 Ran 等 (2021) 发布的青藏高原多年冻土 MAGT 数据集; NDVI 数据是采用 MODIS 传感器中的 MOD13Q1 数据计算 2017 年—2021 年的平均值得到, 空间分辨率为 250 m; 至于到水域的距离, 代表着水域对周边环境的影响程度, 通过研究区不同位置到湖泊或河流的距离远近, 可以量化水域这一环境因子在研究区内的影响分布。距离的计算采用了最小欧氏距离的方法, 为水域对地表特征的影响提供了定量分析数据。湖泊和河流的矢量数据源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—湖泊一流域分中心 (<http://lake.geodata.cn>[2025-09-11])。各个环境因子的具体分布如图 4 所示。



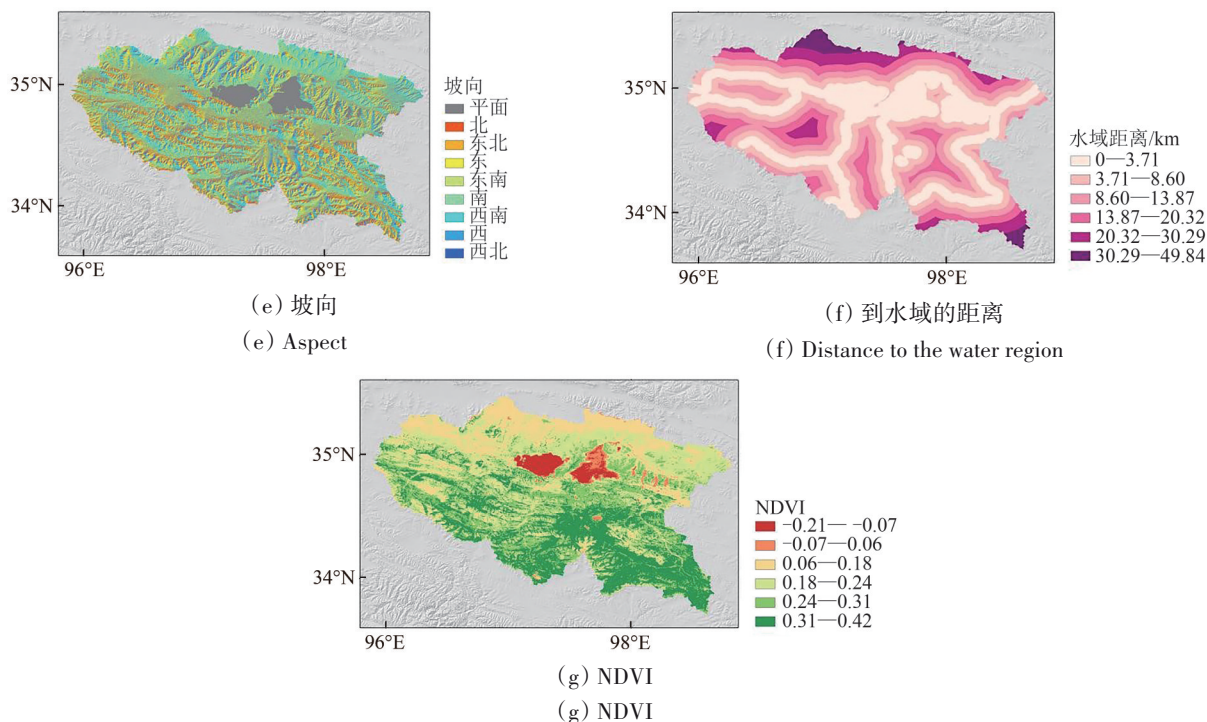


图4 研究区环境因子

Fig. 4 Environment factors of study area

3 方法

本研究的方法框架主要包括3部分：首先，利用SBAS-InSAR方法获取黄河源地区的地表时序形变结果。然后，利用RobustSTL方法，提取各形变点的季节性形变和长期形变趋势。最后，利用地理探测器方法定量分析环境因子与趋势项形变和季节性形变的关系，并利用XGBoost机器学习模型对地理探测器驱动因子的准确性进行验证分析。本研究具体流程如图5所示。

3.1 SBAS-InSAR技术

在青藏高原多年冻土区，由于年际地表变化剧烈极易导致干涉去相干，影响干涉处理的效果。为了抑制干涉去相干的影响，本文利用SBAS-InSAR方法进行地表形变估计，该方法已经在多年冻土区进行了较好的应用（Chen等，2013）。SBAS-InSAR方法的主要流程包括：图像配准、干涉组合、干涉图生成、相位滤波、相位解缠、形变参数估计、大气相位去除、时序形变解算等。有关SBA-InSAR处理更多技术细节信息，请参见Berardino等（2002）。

在具体SAR数据干涉处理中，设置时间基线阈值为60 d，空间基线阈值为150 m。轨道号为4的SAR数据集生成了415对干涉对，轨道号为106的SAR数据集生成了451对干涉对。在进行干涉图生成时进行了距离向8像素和方位向2像素的多视处理以抑制干涉噪声。采用了自适应干涉图滤波算法，对干涉图进行滤波处理。在多年冻土环境中，由于大气延迟的存在，地表形变信号的解释和分析变得更加困难。为了减小大气延迟的影响，在获得干涉条纹图之后利用GACOS（Generic Atmospheric Correction Online Service）数据来进行数据处理和解译，以消除或减少黄河源区大气延迟引起的相位变化，以获取更准确的地表形变信息。使用最小费用流MCF（Minimum Cost Flow）算法进行相位解缠。本文使用平均相干系数法进行高相干点选取，研究区内平均相干系数值大于0.7的点选取为高相干点。在此基础上，利用SVD方法估计形变速率，并计算时间序列形变，得到视线方向的地表变形序列结果。随后，在空间域进行低通滤波，在时间域进行高通滤波，得到时序形变结果。

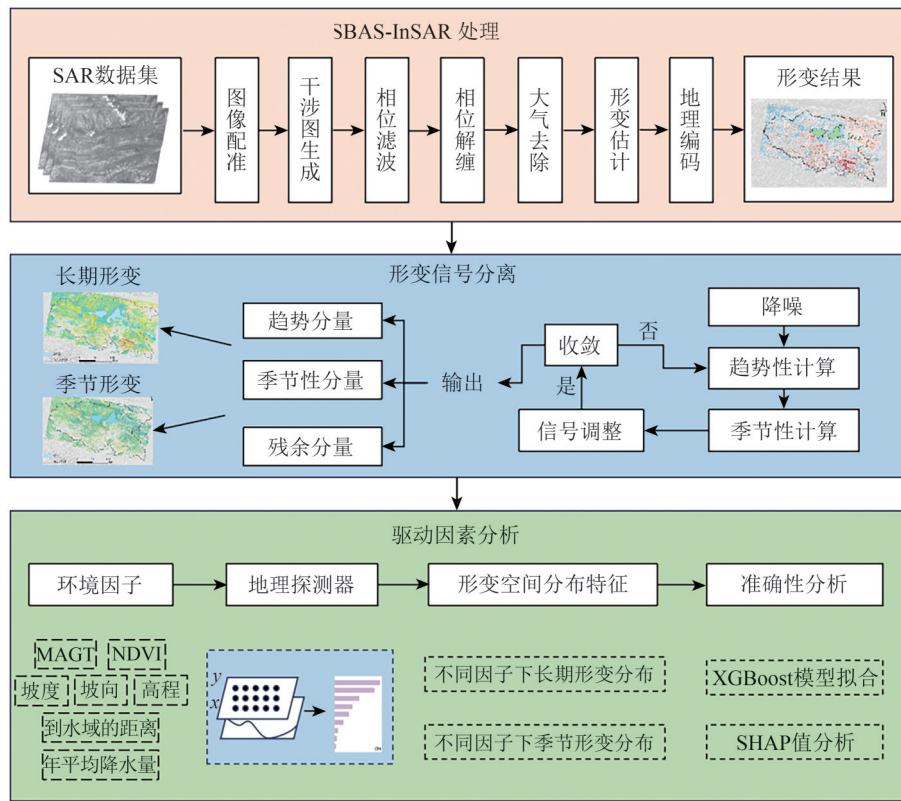


图5 方法技术流程图

Fig. 5 Flow chat of the method

3.2 RobustSTL分解算法

RobustSTL (A Robust Seasonal-Trend Decomposition Algorithm for Long Time Series) 是一种稳健并且通用的时间序列分解算法，该方法能够准确有效地从季节性周期长、噪声大的数据中提取出季节性特征 (Wen 等, 2009)。在团队的前期研究已经证实 (Zhang 等, 2025a, 2025b), RobustSTL 对于多年冻土季节性形变提取具有较好的效果，因此在本文主要使用 RobustSTL 方法提取季节性形变。RobustSTL 算法主要流程如下：

(1) 降噪。使用双边滤波器对输入的时间序列数据进行降噪，这是一种在图像处理中常用的边缘保留技术。该方法有效地保留了时序中的突变和峰值，保持了重要的结构。其主要公式如下：

$$w_j^t = \frac{1}{z} e^{-\frac{|j-t|^2}{2\delta_a^2}} e^{-\frac{|y_j - y_t|^2}{2\delta_s^2}}, \quad y_t' = \sum_{j \in J} w_j^t y_j \quad (1)$$

式中， w_j^t 代表滤波器权重的高斯函数； y_t' 是滤波后的时间序列数据； δ_a^2 和 δ_s^2 是两个参数，用来控制输出时间序列的平滑程度。

(2) 趋势性计算。趋势提取被构建为一个优化问题，该问题通过最小化一个加权和目标函

数来实现，其中包括一阶和二阶差分操作符的约束。在目标函数中使用 LAD (Least Absolute Deviations) 增强了对异常值的鲁棒性。

$$\nabla \tilde{\tau} = \operatorname{argmin} \nabla \tau \|P \nabla \tau - q\|_1 \quad (2)$$

$$\tilde{\tau}_t' = \begin{cases} 0, & t = 1 \\ \sum_{i=2}^t \nabla \tilde{\tau}_i, & t \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

$$y_t'' = y_t' - \tilde{\tau}_t' \quad (4)$$

式中， $\nabla \tilde{\tau}$ 是使 1 阶范数达到最小值时的趋势信号一阶差分； $\tilde{\tau}_t'$ 是相对趋势分量； y_t'' 是趋势性信号。

(3) 季节性计算。使用非局部季节性滤波获取季节性信号分量。与仅考虑子序列来估计季节性的传统方法不同，该方法利用以各种点为中心的 K 个邻域。分配给这些邻域的权重是基于时间距离和季节性相似性的，使得该算法对异常值和季节性变化更为鲁棒。

$$w_{(t',j)}^t = \frac{1}{z} e^{-\frac{|j-t'|^2}{2\delta_a^2}} e^{-\frac{|y_j'' - y_t''|^2}{2\delta_s^2}} \quad (5)$$

$$\tilde{s}_t = \sum_{(t',j) \in \Omega} w_{(t',j)}^t y_j'' \quad (6)$$

式中， $w_{(t',j)}^t$ 代表季节性滤波器权重的高斯函数； \tilde{s}_t

是季节性信号。

(4) 调整趋势和季节信号。通过调整，以确保一个周期内所有季节性分量的总和为零。这种调整通过去除均值来实现，对应于趋势点的估计。该算法通过迭代地改进趋势、季节性和剩余分量的估计，以提高准确性。

$$\hat{\tau}_1 = \frac{1}{T \lfloor N/T \rfloor} \sum_{t=1}^{T \lfloor N/T \rfloor} \tilde{s}_t \quad (7)$$

$$\hat{\tau}_t = \tilde{\tau}_t + \hat{\tau}_1, \hat{s}_t = \tilde{s}_t - \hat{\tau}_1, \hat{r}_t = y_t - \hat{s}_t - \hat{\tau}_t \quad (8)$$

重复以上步骤，直到 \hat{r}_t 收敛，输出趋势分量 $\hat{\tau}_t$ 、季节性分量 \hat{s}_t 和残余分量 \hat{r}_t 。

3.3 地理探测器模型

地理探测器是一组统计方法，旨在探测空间异质性并揭示其背后的驱动力。其主要思想是将研究空间根据变量划分为多个子区域，然后比较每个子区域内以及不同子区域之间的空间方差，从而评估潜在解释变量的决定力 (Wang 等, 2010)。

(1) 分异及因子探测。分异及因子探测基于 q 统计量量化某因子 X 对形变空间分异产生的解释力大小，它的表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (9)$$

式中， q 是某一个因子对形变的解释力，其值介于 0 和 1 之间， q 值越大表示该因子对形变的解释力越强，反之则越弱； h 为因子的分层，即分类或划分的类别数； N_h 和 N 分别代表类别 h 和整个区域的样本数量； σ^2 和 σ 分别代表类别 h 和整个区域的方差。

(2) 交互作用探测。交互作用探测用于计算任意两个因子之间的交互作用，即评估因素 $X1$ 和 $X2$ 共同作用时对因变量 (形变) 的解释力是否增强或减弱。首先，计算因子 $X1$ 和 $X2$ 对形变的 q 统计量，并标记为 $q(X1)$ 和 $q(X2)$ 。然后，计算因子 $X1$ 和因子 $X2$ 的交互 q 统计量，并标记为 $q(X1 \cap X2)$ 。通过比较两个因素的交互 q 统计量和两个因素各自的 q 统计量，可以将交互关系分为 5 种类型，表 1 详细描述了这 5 种类型。

最后，为验证地理探测器驱动因子影响力排序的准确性，本文使用机器学习 XGBoost 模型分别对长期形变速率和季节形变进行了回归拟合，并

利用 SHAP 来解释环境因子的影响程度，通过比较 SHAP 值排序和地理探测器模型的 q 值排序，验证影响形变的驱动因子重要性的准确程度。

表 1 交互作用的交互类型及关系

判据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \text{Min}(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\text{Min}(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \text{Max}(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

4 结果与分析

4.1 黄河源时序形变结果分析

通过 SBAS-InSAR 方法处理，得到了 SAR 影像覆盖范围内的地表形变速率数据，并将左右两个轨道的结果进行合并，形成了如图 6 所示的黄河源整个地区的地表形变速率图。整体而言，结果图覆盖面较为全面，但在黄河源东北部和中南部的一些小区域存在失相干导致的数据缺失。整个研究区形变速率的范围从最小值 -74 mm/a 到最大值 65 mm/a 不等，呈现了一定的变化。通过形变速率结果及其直方图的展示，可知研究区几乎所有地表形变速率都分布在 -30—20 mm/a 之间。其中，抬升的区域占比较多，尽管抬升量较小；相反，沉降的区域占比相对较少，但部分区域沉降量较大。在湖泊和河谷附近，大多数地区发生了轻微的抬升趋势；而在研究区东南部的一些山区，沉降速率达到每年 30 mm 以上。

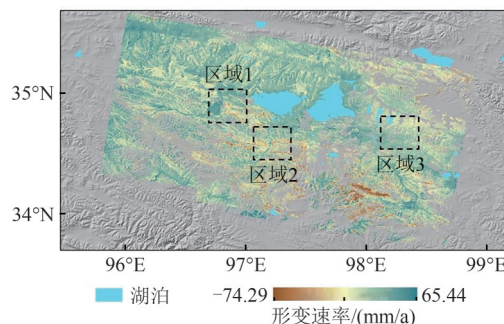


图 6 黄河源地区地表年平均形变速率
Fig. 6 The mean deformation rate of Yellow River source region

为深入研究黄河源不同区域的时序形变特征，选择了3个小区域，并提取了各区域内形变特征点的时序形变曲线，以观测形变特征，如图7所示。扎陵湖和鄂陵湖作为黄河源内的两个主要湖泊，湖泊的水体对周边土壤温度和湿度具有调节作用，湖水在吸热和释热的过程中可以缓冲周边土壤的温度变化，影响着冻土的形成和融化过程。在区域1内选择了两个形变特征点 A1 和 A2，他们的形变速率分别为 -24.36 mm/a 、 -26.48 mm/a ，并且这种沉降趋势在观测期间一直持续。在区域2，选择了两个形变特征点 B1 和 B2，位于河道附近。根据

观察，两个点在观测周期内的形变速率分别达到了 -23.03 mm/a 、 -27.25 mm/a 。在区域3，两个形变特征点 C1 和 C2 的形变速率分别达到了 -26.09 mm/a 和 -26.76 mm/a 。通过遥感图像观测和实地调查，在区域3范围内发育有大量的热融湖塘（图2（d）），主要是由于多年冻土退化而形成的（Qin 等，2023），因此在区域3内部大部分区域表现出比较明显的沉降。此外，进一步观察6个形变点的时序形变曲线呈现出一定的周期性，主要是由活动层中土壤水分周期性的冻结和融合引起的（Liu 等，2012）。

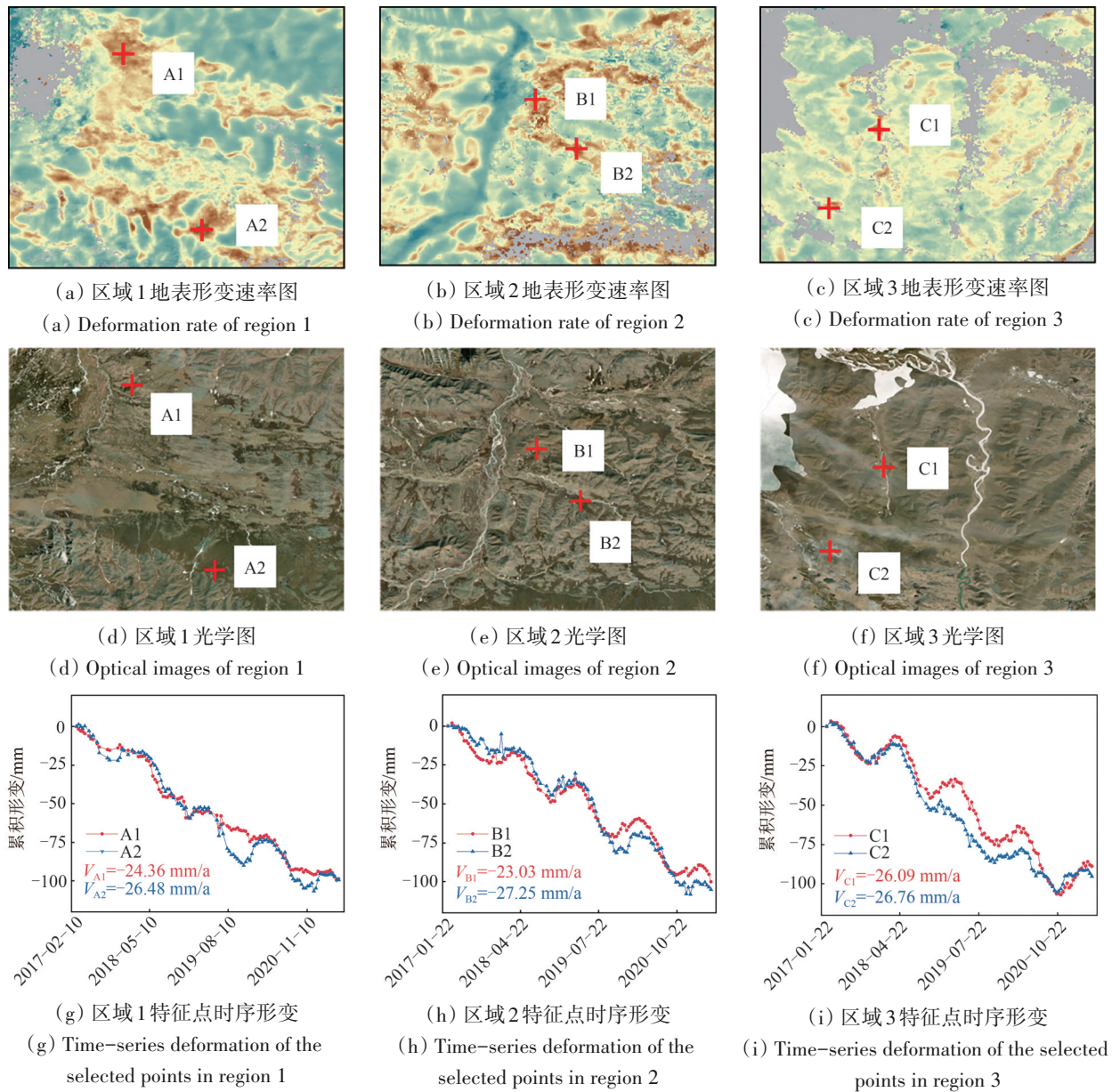


图7 子区域形变特征

Fig. 7 Deformation feature of the sub-regions

由于在研究区没有测量数据,无法对 InSAR 结果进行直接验证。一方面,本文将两个轨道重叠部分的形变结果进行交叉对比,发现两个结果之间具有较好的一致性,绝大多数速率差值都位于 ± 3 mm/a 的范围内,表明形变结果的有效性。另一方面,Wang 等(2025)等利用 InSAR 技术对黄河源地区的 2017 年—2021 年的地形形变进行监测,形变范围在 -40 — 15 mm/a,并且黄河源的南

部出现了严重的沉降,与本文的结构一致,进一步证实了本文结果的准确性。

4.2 黄河源地表形变速率和季节形变提取

本文利用 RobustSTL 算法对整个研究区地表形变进行了分解,将原始时间序列形变分为了长期性形变、季节性形变和残差 3 个部分,并根据分解结果计算了长期形变速率、季节形变量和 RMSE,如图 8 所示。

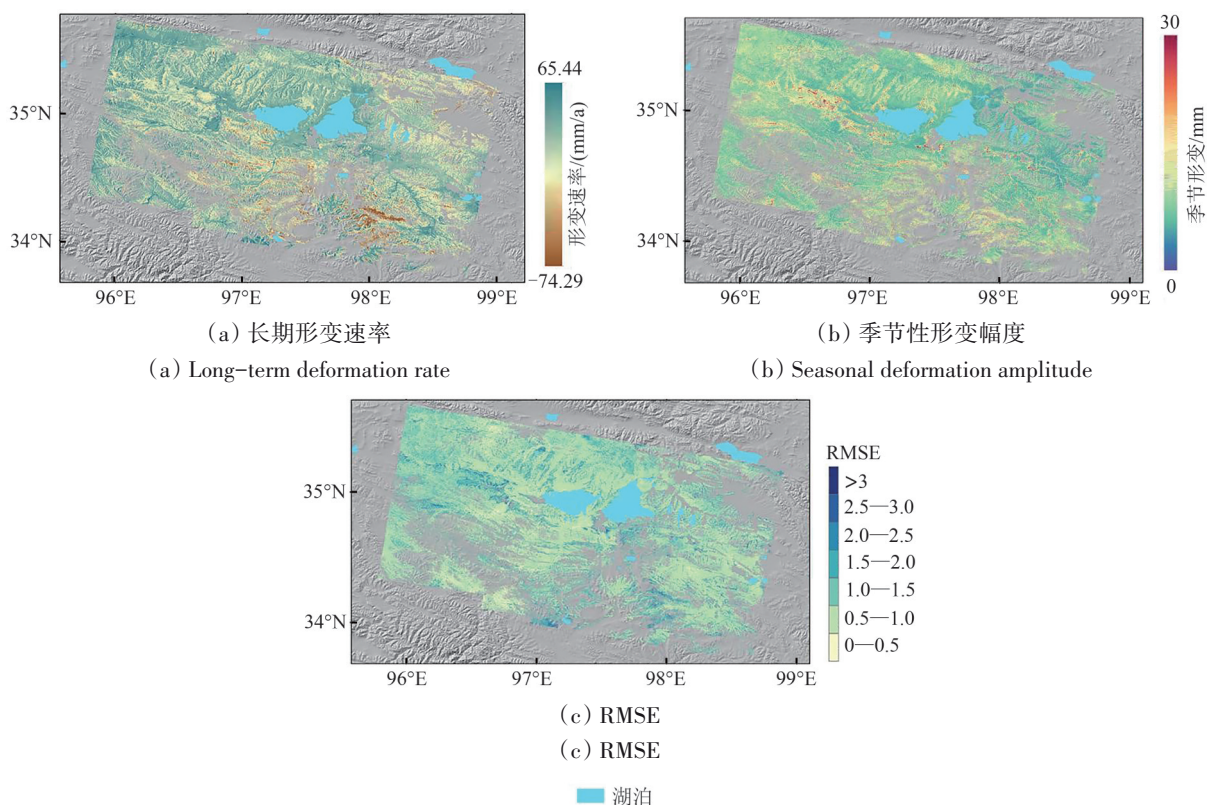


图 8 研究区形变特征

Fig. 8 Deformation feature of study area

黄河源地区长期形变速率如图 8 (a) 所示,得到的长期形变速率位置分布和范围与原始 InSAR 时序形变速率较为一致。长期最大沉降速率为 74 mm/a,长期最大抬升速率为 45 mm/a,研究区绝大多数地表长期形变速率分布在 -30 — 20 mm/a 之间。发生抬升的区域占比大于发生沉降的区域占比,但是抬升区域的平均速率却小于沉降区域的平均速率。与前文分析相同,抬升趋势主要集中在湖泊和河道附近,除了受地下水的迁移以及水体温度影响之外,积雪的融化和冰川的移动可能会将物质从山脉带到地面,造成物质堆积,这些物质也会影响地表形变,造成抬升趋势(Li 等,

2021)。

图 8 (b) 展示了研究区的季节形变量,其中最小值为 1.47 mm,最大值为 53 mm,大部分分布在 2—30 mm 之间,季节形变平均值为 8.83 mm。季节形变量较大的区域主要分布在研究区的中部,即地形较为平坦的区域,尤其是黄河源西部平原和鄂陵湖西南湿地附近。这些平坦区域表现出较大的季节形变,这可能是由地下水流动和流域排水的影响引起的。图 8 (c) 展示了研究区域 RMSE 值的分布情况, RMSE 值主要分布在 0—3 之间,其中大约 60% 的 RMSE 小于 1。这表明所采用的算法在分解过程中取得了较高的精度,使得残差值

相对较小。RMSE 较大的区域主要包括研究区西部的平坦地区、鄂陵湖南部和研究区东南部山区。RMSE 分布特征与季节形变分布的特征相似，即季节形变较大的区域也表现出相对较大的 RMSE 值，这表明季节形变较大的地区对分解精度产生一定影响，导致分解后的残差值稍微偏大。

4.3 基于地理探测器的形变空间分异驱动分析

4.3.1 单因子驱动结果

研究区的地形、气候和植被等自然因素相互交织，导致长期变形和季节变形受到多种因素的影响。通过对选取的环境因子进行地理探测器分析，分别得到了各因子对长期形变和季节形变的相对贡献，如图 9 所示。其中， q 值大小表示各因子对黄河源区形变影响力的强弱，分析结果都通过了显著性检验。

对于黄河源区长期形变的探测结果显示，不同因子对长期形变的解释能力依次为：NDVI>MAGT>纬度>坡度>高程>降水量>经度>坡向>水域距离。这说明 NDVI 是驱动研究区长期形变空间格局的主要因素，此外 MAGT、纬度和坡度对长期形变也产生了较强的影响。而在季节形变方面，不同因子对季节形变的解释能力依次为：坡度>NDVI>MAGT>纬度>降水量>经度>水域距离>高程>坡向。这表明坡度是驱动研究区季节形变空间格局的主要因素，同时 NDVI 和 MAGT 对季节形变也产生了一定的影响。综合来看，NDVI、MAGT 和坡度对形变的空间分布产生了较大的影响，而坡向和到水域的距离对形变的空间分布影响并不明显。NDVI 作为植被覆盖指数，直接反映了区域植被的状况和生长状况，在长期变形和季节变形中起着至关重要的作用。

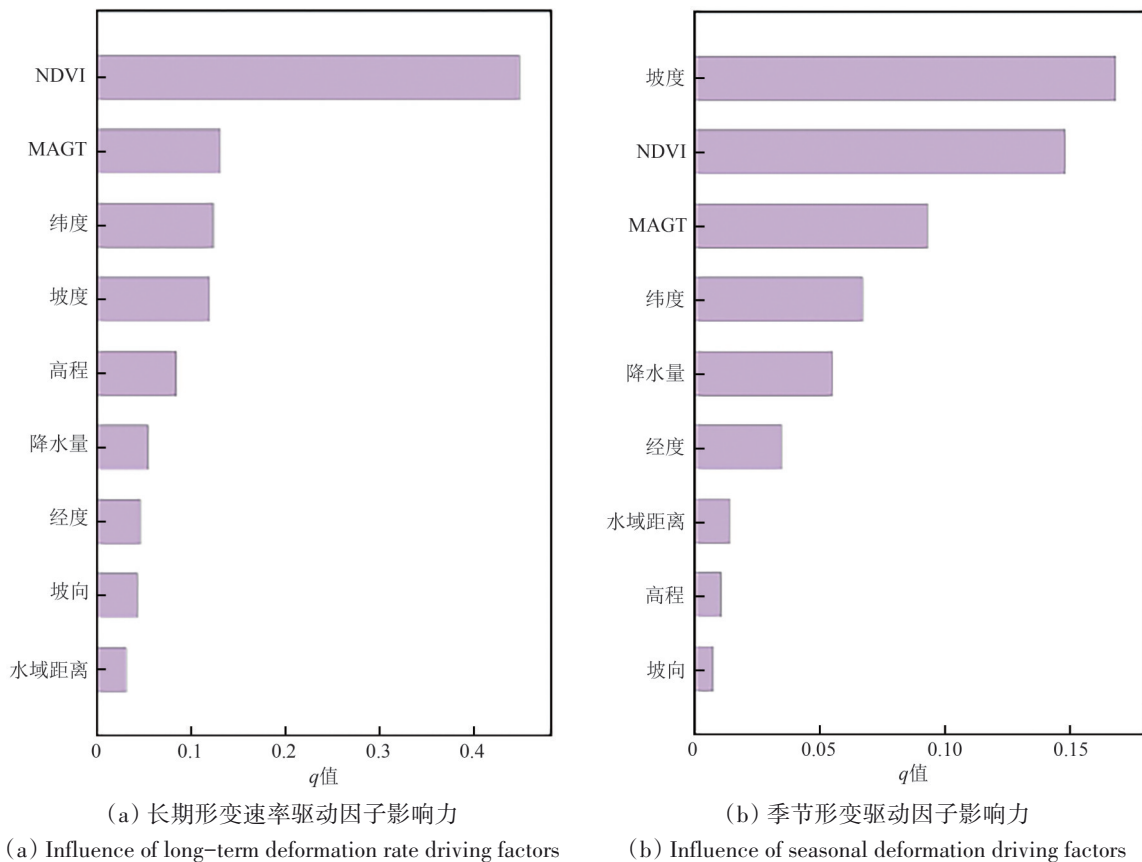


图 9 形变驱动力分析

Fig. 9 Deformation rate driving factors

4.3.2 因子交互作用分析

长期形变驱动因子交互作用结果如图 10 所示，各驱动因子对黄河源地区长期形变的交互作用 q

值均高于单个因子单独作用时的 q 值。通过统计数值发现，所有交互结果都呈现出双因子增强和非线性增强的特征。这表明，任意两个因子在空

间上的共同影响大于单一因子的影响力。这进一步说明了长期形变受多重环境因子共同影响。在交互作用中，NDVI与经度的交互作用表现出最强的影响力 ($q=0.645$)，表明这两个因子对长期形变的综合影响最为显著。此外，NDVI与所有因子进行交互作用的结果都展现出较强的影响力。除了NDVI之外，经度和纬度 ($q=0.48$)、MAGT和经度 ($q=0.402$)、高程和纬度 ($q=0.375$) 以及高程和MAGT ($q=0.355$) 这几组因子的交互影响也较为明显。

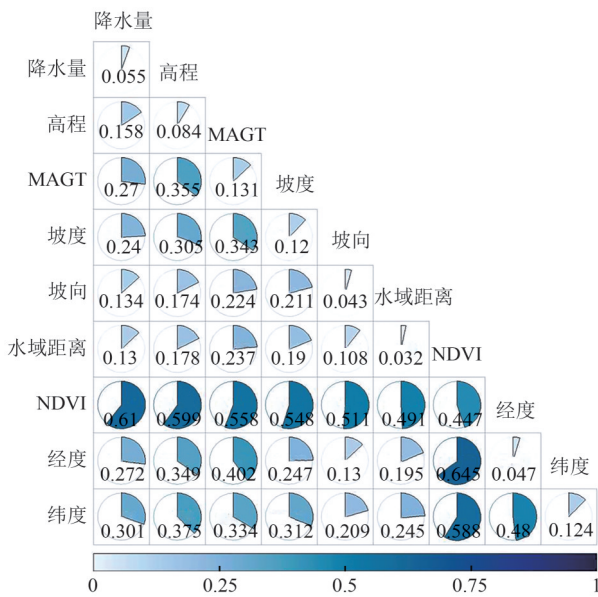


图10 长期形变驱动因子交互作用关系

Fig. 10 Interaction relationships among long-term deformation driving factors

季节形变驱动因子交互作用结果如图11所示。与长期形变交互作用结果相似，任意两个因子在空间上的共同影响大于单一因子的影响力，说明季节形变也受到多个因子共同作用的影响。根据 q 值可知，尽管经度和纬度的单因子驱动结果影响力较小，但是当它们相互作用时，其影响力显著增强 ($q=0.326$)。相比之下，即使由NDVI和坡度这两个单因子驱动影响力排名前两位组成的交互作用 ($q=0.314$) 影响力较大，但与经纬度的交互作用相比，后者仍然具有更高的影响力。这种情况的出现可能是因为经度和纬度不仅代表着地理位置，还代表着一些未被纳入考虑的环境因子或地理特征。这些因素可能与经度和纬度有一定的空间关联性，并且对季节形变的分布有一定的影响力。

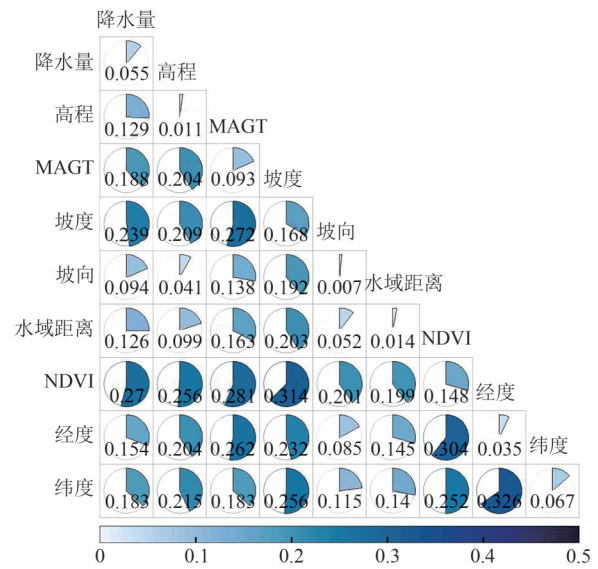


图11 季节形变驱动因子交互作用关系

Fig. 11 Interaction relationships among seasonal deformation driving factors

4.4 不同环境因子下形变分布特征

4.4.1 长期形变分布特征

根据因子驱动结果的分析，已确认NDVI和MAGT对长期形变速率有着较强的影响力。现在进一步分析在这两种环境因子下长期形变速率的分布情况。图12(a)展示了不同NDVI条件下长期形变速率的分布情况。从图中可以观察到，在NDVI值介于0—0.25之间时，长期形变速率数值分布较为集中，形变速率的平均值都维持在0.5—1.5 mm/a之间。然而，当NDVI值大于0.25时，随着NDVI的增加，长期形变速率的分布范围逐渐扩大，并且速率平均值从1.21 mm/a降至-8.7 mm/a。NDVI反映了地表的植被覆盖程度，根据图中的分布情况可以推断出，研究区域中没有植被覆盖或植被覆盖较少的地区，地表形变相对稳定；而地表形变明显抬升或沉降的地区多位于植被覆盖较高的区域。通常，植被覆盖度高的区域通常土壤水分含量高，土壤水分又影响着地下冰的形成和演化，地下冰的不断加积和释放会导致地表产生较明显长期的抬升或沉降。

图12(b)展示了在不同的MAGT下长期形变速率的分布。根据分布结果显示，随着MAGT的增加，长期形变速率呈现先下降后上升的趋势，并且形变速率数值范围也相应的扩大和集中。在

MAGT为 -1.4°C 到 -0.8°C 之间时，形变速率平均值达到了最低值 (-1.6 mm/a)，此时形变速率的分布最为广泛；在MAGT为 0.6 — 2.1°C 之间时，形变速率平均值达到了最高值 (2.27 mm/a)，其形变速率

分布相对集中。MAGT主要通过影响冰水之间的转化来影响长期形变速率，在土壤冰水相变最易发生的温度范围内，冻土形变会呈现出比较剧烈的状态，从而导致了地表的显著抬升和沉降现象。

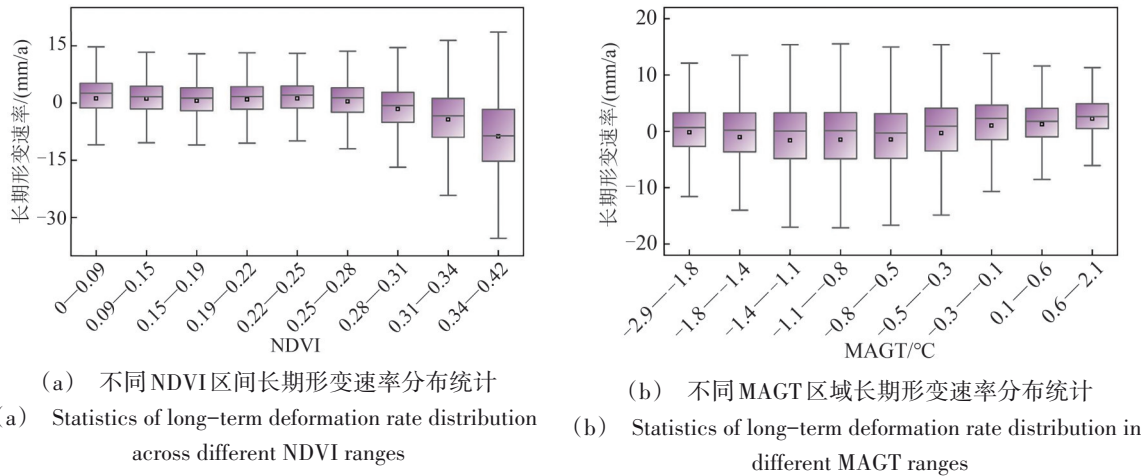


图12 长期形变速率与环境因子

Fig. 12 Long-term deformation rate and environment factors

4.4.2 季节形变分布特征

根据因子驱动结果的分析，已确认坡度和NDVI对季节形变有较强的影响力。图13 (a)展示了不同坡度情况下季节形变的分布特征。可以观察到，坡度在 0° — 12.4° 之间时，随着坡度的增加，季节形变量逐渐减小，其平均值从 10.4 mm 减

小到了 7.03 mm 。在坡度超过 12.4° 之后，季节形变量趋于稳定的状态，形变平均值在 7 mm 左右波动。这表明在一定坡度范围内，坡度和季节形变呈负相关。而在坡度超过一定数值时，季节形变不再受到坡度的显著影响。

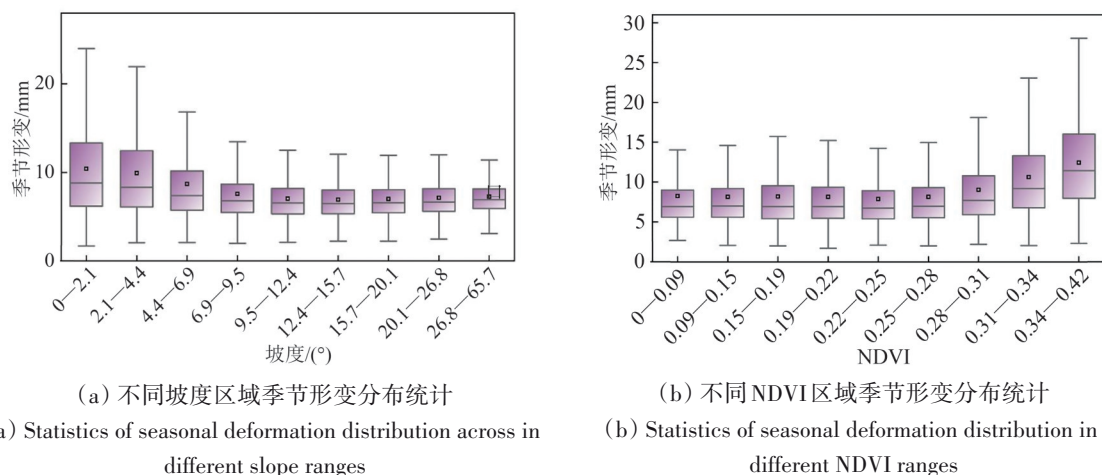


图13 季节性形变与环境因子

Fig. 13 Seasonal deformation and environment factors

图13 (b)展示了不同NDVI情况下季节形变的分布特征。结果显示当NDVI在 0 — 0.25 之间时，季节形变分布集中而且形变值较小，平均值约为

8 mm 。然而，当NDVI值超过 0.25 后，季节形变随着NDVI的增加而增加，从平均 8.14 mm 上升至平均 12.44 mm 。这与NDVI对长期形变速率的影响结

果高度一致。在NDVI值较低的区域，即植被覆盖较少或者为裸地岩石地区，地表相对稳定。NDVI值超过一定阈值，表明植被覆盖程度达到一定水平后，地表形变更加剧烈，显示了植被覆盖对InSAR形变结果带来的不确定性。

4.5 形变驱动力准确性分析

图 14 分别展示了长期形变速率环境因子重要性排序和季节形变量环境因子重要性排序。对于

长期形变速率，不同因子的重要性排序为：NDVI>MAGT>坡度>经度>坡向>纬度>高程>降水量>水域距离。对于季节形变，不同因子的重要性排序为：坡度>NDVI>MAGT>经度>降水量>高程>纬度>水域距离>坡向。可以看出，基于SHAP值和地理探测器两种方法得到的重要性排名前两位是一致的，进一步验证了NDVI和MAGT对长期形变的主要影响以及坡度和NDVI对季节形变的主要影响。

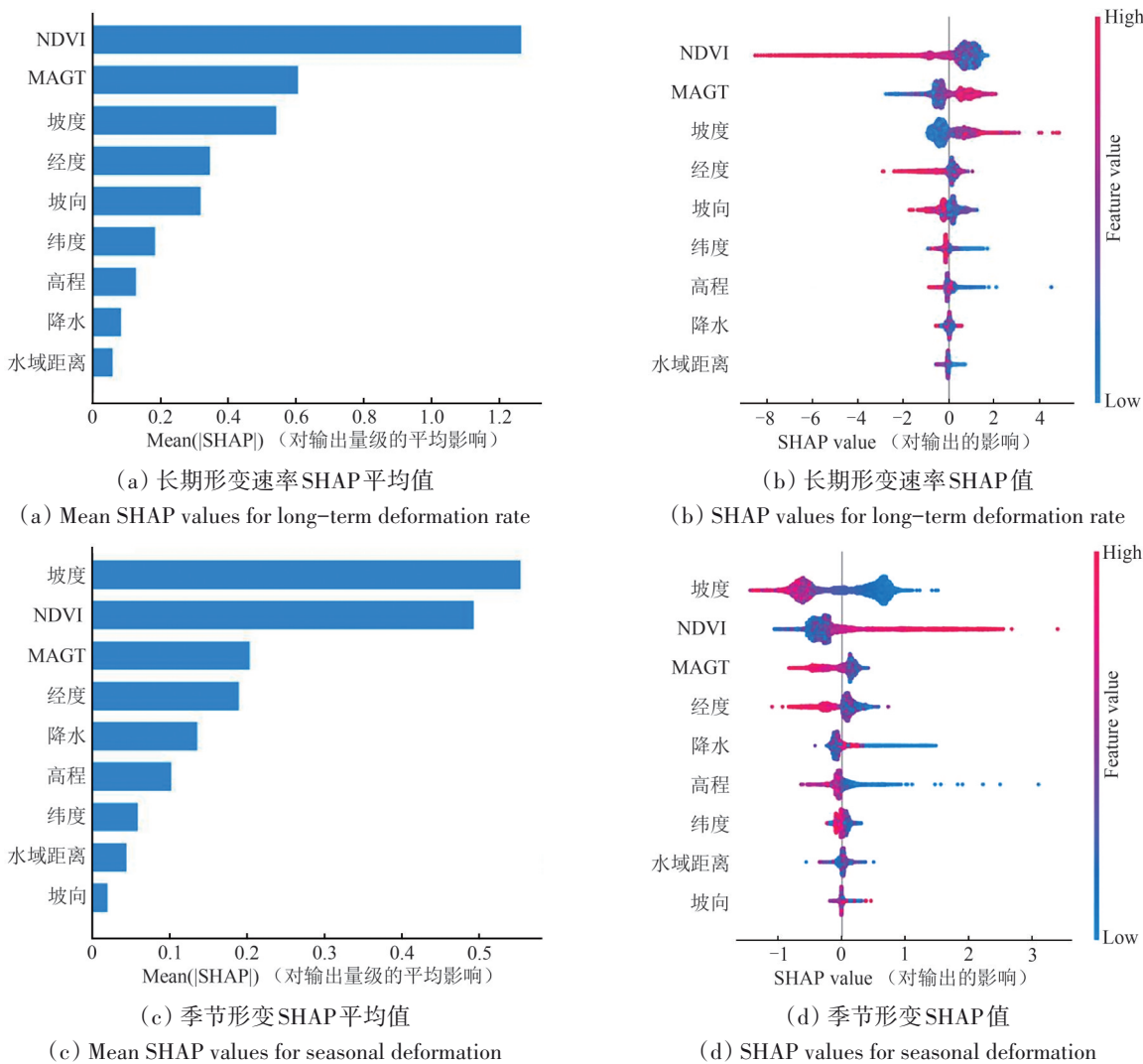


图 14 SHAP值分析

Fig. 14 Analysis of SHAP value

5 结论

本文主要以青藏高原黄河源区为研究对象，利用了时序分解算法提取多年冻土区长期形变和季节形变，在此基础上，运用地理探测器模型对长期形变和季节形变的空间分异驱动因素进行分

析，以探究冻土形变规律及其影响因素。本文的主要研究成果如下：

(1) SBAS-InSAR 监测结果显示黄河源区绝大多数地表形变速率分布在-30—20 mm/a 之间，其中抬升的区域多于沉降的区域，但沉降区域的形变量较大，较为明显的区域沉降出现在黄河源东

南山地处, 沉降量每年可达30 mm以上。

(2) 基于RobustSTL算法获取了黄河源地区的长期形变速率和季节形变量, 长期形变速率分布与原始InSAR形变速率较为一致, 季节形变量基本分布在2—30 mm之间, 季节形变量较大的区域主要集中在地形较为平坦的区域。

(3) 通过利用地理探测器分析了9种环境因子, 结果表明NDVI、MAGT和坡度是影响地表形变较为显著的因素。其中, NDVI对长期形变的影响力最为显著 ($q=0.44$), 坡度对季节形变的影响最为显著 ($q=0.17$)。不同因子对形变的影响之间并非独立的关系, 而是复杂的非线性关系, 共同影响地表形变的分布。

参考文献 (References)

- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792]
- Cai H Y, Han D R, Yang L S, Chen M L and Yang X H. 2020. Spatio-temporal change in permafrost active layer thickness in the Pan-Arctic region. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(8): 1045-1059 (蔡红艳, 韩冬锐, 杨林生, 陈慕琳, 杨小唤. 2020. 泛北极地区多年冻土活动层厚度演变. *遥感学报*, 24(8): 1045-1059) [DOI: 10.11834/jrs.20208469]
- Chen F, Lin H, Li Z, Chen Q and Zhou J. 2012. Interaction between permafrost and infrastructure along the Qinghai - Tibet Railway detected via jointly analysis of C-and L-band small baseline SAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 123: 532-540
- Chen F L, Lin H, Zhou W, Hong T H and Wang G. 2013. Surface deformation detected by ALOS PALSAR small baseline SAR interferometry over permafrost environment of Beiluhe section, Tibet Plateau, China. *Remote Sensing of Environment*, 138: 10-18 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.006]
- Chen J, Lin X C, Wu T H, Hao J M, Wu X D, Zou D F, Zhu X F, Hu G J, Qiao Y P, Wang D, Yang S Z and Zhang L N. 2024. Predicting seasonal deformation using InSAR and machine learning in the permafrost regions of the Yangtze River source region. *Water Resources Research*, 60(9): e2023WR036700 [DOI: 10.1029/2023WR036700]
- Chen J, Wu T H, Zou D F, Liu L, Wu X D, Gong W Y, Zhu X F, Li R, Hao J M, Hu G J, Pang Q Q, Zhang J and Yang S Z. 2022. Magnitudes and patterns of large-scale permafrost ground deformation revealed by Sentinel-1 InSAR on the central Qinghai-Tibet Plateau. *Remote Sensing of Environment*, 268: 112778 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112778]
- Chen Y X, Jiang L M, Liang L L and Zhou Z W. 2019. Monitoring permafrost deformation in the upstream Heihe River, Qilian Mountain by using multi-temporal Sentinel-1 InSAR dataset. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(7): 2441-2454 (陈玉兴, 江利明, 梁林林, 周志伟. 2019. 基于 Sentinel-1 SAR 数据的黑河上游冻土形变时序 InSAR 监测. *地球物理学报*, 62(7): 2441-2454) [DOI: 10.6038/cjg2019M0255]
- Cheng G D, Zhao L, Li R, Wu X D, Sheng Y, Hu G J, Zou D F, Jin H J, Li X and Wu Q B. 2019. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 64(27): 2783-2795 (程国栋, 赵林, 李韧, 吴晓东, 盛煜, 胡国杰, 邹德富, 金会军, 李新, 吴青柏. 2019. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响. *科学通报*, 64(27): 2783-2795) [DOI: 10.1360/TB-2019-0191]
- Jia S C, Zhang T J, Fan C Y, Liu L and Shao W W. 2021. Research progress of InSAR technology in permafrost. *Advances in Earth Science*, 36(7): 694-711 (贾诗超, 张廷军, 范成彦, 刘琳, 邵婉婉. 2021. InSAR 技术多年冻土研究进展. *地球科学进展*, 36(7): 694-711) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.055]
- Jin H J, He R X, Cheng G D, Wu Q B, Wang S L, Lü L Z and Chang X L. 2009. Changes in frozen ground in the Source Area of the Yellow River on the Qinghai - Tibet Plateau, China, and their eco-environmental impacts. *Environmental Research Letters*, 4(4): 045206 [DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045206]
- Li R, Li Z, Han J, Lu P, Qiao G, Meng X and Zhou F. 2021. Monitoring surface deformation of permafrost in Wudaoliang Region, Qinghai-Tibet Plateau with ENVISAT ASAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104: 102527
- Liao M S, Dong J, Li M H, Ao M, Zhang L and Shi X G. 2021. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 332-341 (廖明生, 董杰, 李梦华, 敖萌, 张路, 史绪国. 2021. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测. *遥感学报*, 25(1): 332-341) [DOI: 10.11834/jrs.20210162]
- Liu L, Schaefer K, Zhang T J and Wahr J. 2012. Estimating 1992-2000 average active layer thickness on the Alaskan North Slope from remotely sensed surface subsidence. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1): F01005 [DOI: 10.1029/2011JF002041]
- Luo D L, Jin H J, Lin L, He R X, Yang S Z and Chang X L. 2012. New progress on permafrost temperature and thickness in the source area of the Huanghe River. *Scientia Geographica Sinica*, 32(7): 898-904 (罗栋梁, 金会军, 林琳, 何瑞霞, 杨思忠, 常晓丽. 2012. 黄河源区多年冻土温度及厚度研究新进展. *地理科学*, 32(7): 898-904) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.07.898]
- Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z and Li Z. 2019. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 11(4): 1931-1946 [DOI: 10.5194/essd-11-

- 1931-2019]
- Peng X Q, Tina W W, Li X J, Yang G S, Zhao Y H, Chen C, Jin H D, Luo J, Li Y X, Sun W, Wang Q F, Frauenfeld O W and Mu C C. 2023. Research progress on changes in frozen ground on the Qinghai-Tibet Plateau and in the circum-Arctic region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 45(2): 521-534 (彭小清, 田伟伟, 李璇佳, 杨光尚, 赵耀华, 陈聪, 金浩东, 罗京, 李宇星, 孙文, 王庆锋, Frauenfeld O W, 牟翠翠. 2023. 青藏高原和环北极冻土变化研究进展. *冰川冻土*, 45(2): 521-534) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0040]
- Qin Y, Lu P, Han J, Wang Q, Li Z, Wu J and Li R. 2023. Responses of thermokarst lake dynamics to permafrost degradation on the central Tibetan Plateau. *Catena*, 231: 107309
- Ran Y H, Li X, Cheng G D, Nan Z T, Che J X, Sheng Y, Wu Q B, Jin H J, Luo D L, Tang Z G and Wu X B. 2021. Mapping the permafrost stability on the Tibetan Plateau for 2005-2015. *Science China Earth Sciences*, 64(1): 62-79 [DOI: 10.1007/s11430-020-9685-3]
- Wang C, Zhang Z, Zhang H, Zhang B, Tang Y and Wu Q. 2018 Active layer thickness retrieval of Qinghai - Tibet permafrost using the TerraSAR-X InSAR technique. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(11): 4403-4413
- Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T N, Gu X and Zheng X Y. 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(1): 107-127 [DOI: 10.1080/13658810802443457]
- Wang X Y, Zhao L, Wang L X, Liu S B, Chen W, Li Z B, Liu G Y, Wang M and Li Y J. 2025. Accelerated permafrost thawing in the source region of the Yellow River revealed by ALOS-1 and Sentinel-1 InSAR monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18: 12786-12802 [DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3568482]
- Wen Q S, Gao J K, Song X M, Sun L, Xu H and Zhu S H. 2019. RobustSTL: a robust seasonal-trend decomposition algorithm for long time series//Proceedings of the Thirty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence. Honolulu: AAAI Press: 5409-5416 [DOI: 10.1609/aaai.v33i01.33015409]
- Wu Q and Zhang T. 2010. Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D9)
- Yan Q K, Zhang Z, Li X L, Sun J X, Andrei Z and Zhang S R. 2025. Analysis of spatial and temporal variations and drivers of climate characteristics in the Arctic city of Tiksi. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 47(1): 57-70 (闫庆凯, 张泽, 李向龙, 孙继欣, Andrei Z, 张圣嵘. 2025. 北极季克西地表热环境时空变化及驱动力分析. *冰川冻土*, 47(1): 57-70) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2025.0005]
- Ye Y C, Yan C D, Luo X X, Zhang R F and Yuan G J. 2022. Analysis of ground subsidence along Zhengzhou metro based on time series InSAR. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(7): 1342-1353 (叶勇超, 闫超德, 罗先学, 张瑞峰, 袁观杰. 2022. 时序InSAR郑州地铁沿线地面沉降分析. *遥感学报*, 26(7): 1342-1353) [DOI: 10.11834/jrs.20211246]
- Zhang Z J, Jin Q G, Liu L, Wang M M and Zhang X F. 2025a. Improved ALT retrieval in the Yellow River source region using time-series InSAR and multilayer soil moisture modeling. *Journal of Hydrology*, 654: 132847 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.132847]
- Zhang Z J, Lin H, Wang M M, Liu X G, Chen Q H, Wang C and Zhang H. 2022. A review of satellite synthetic aperture radar interferometry applications in permafrost regions: current status, challenges, and trends. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 10(3): 93-114 [DOI: 10.1109/MGRS.2022.3170350]
- Zhang Z J, Wang Q X, Jin Q G and Wang M M. 2025b. Exploring ground ice dynamics in central Qinghai - Tibet Plateau permafrost region using SAR interferometry, Landsat, and ICESat-2 data. *Journal of Climate*, 38(12): 2719-2737 [DOI: 10.1175/JCLI-D-24-0382.1]
- Zhao R, Li Z W, Feng G C, Wang Q J and Hu J. 2016. Monitoring surface deformation over permafrost with an improved SBAS-InSAR algorithm: with emphasis on climatic factors modeling. *Remote Sensing of Environment*, 184: 276-287 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.019]
- Zheng G F, Xing X M, Shen S L, Hu Y F, Ao Z Y, Zhu J, Long J J and Wang J H. 2025. InSAR time-series deformation estimation and spatiotemporal analysis of the bank area of Baihetan hydropower station: a case study of the Dawanzi-Qiluogou section. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(7): 2413-2428 (郑冠峰, 邢学敏, 沈绍罗, 胡勇峰, 敖志勇, 朱珺, 龙京建, 王家豪. 2025. 白鹤滩水电站库岸边坡InSAR形变估计及时空变形规律分析——以大弯子-骑骡沟段为例. *遥感学报*, 29(7): 2413-2428) [DOI: 10.11834/jrs.20243511]
- Zou D F, Zhao L, Sheng Y, Chen J, Hu G J, Wu T H, Wu J C, Xie C W, Wu X D, Pang Q Q, Wang W, Du E J, Li W P, Liu G Y, Li J, Qin Y H, Qiao Y P, Wang Z W, Shi J Z and Cheng G D. 2017. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau. *The Cryosphere*, 11(6): 2527-2542 [DOI: 10.5194/tc-11-2527-2017]

InSAR-based estimation of deformation and analysis of the driving factors of permafrost in the Yellow River's Source Region

ZHANG Zhengjia¹, JIN Qingguang², ZHANG Shaoyang¹, LIANG Peng^{3,4}, FANG Yu¹, FENG Tianxu¹,
WANG Mengmeng¹, LIU Xiuguo¹

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Tianjin Institute of Surveying and Mapping Co., Ltd., Tianjin 300381, China;

3. Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;

4. Key Laboratory of Earthquake Prediction and Risk Assessment, Ministry of Emergency Management, Beijing 100034, China

Abstract: Accurately estimating long-term and seasonal deformation in permafrost regions and analyzing its driving factors are of great importance for assessing changes in active layer thickness and permafrost degradation. This work proposes a framework integrating InSAR, RobustSTL, and geographical detectors for extracting the seasonal deformation of permafrost and analyzing its driving factors. First, time-series InSAR technology is utilized to derive surface deformation over permafrost areas. Subsequently, the RobustSTL algorithm is employed to extract seasonal deformation and analyze its variation characteristics. Finally, geographical detectors are applied to explore the driving factors behind the seasonal deformation of permafrost. Sentinel-1 data from 2017 to 2021 in the source region of the Yellow River were collected for this study. Experimental results demonstrate that the surface deformation rate in the Yellow River's source region ranges from -30 mm/a to 20 mm/a, with seasonal deformation varying between 2 and 30 mm. Analysis using geographical detectors indicates that NDVI, MAGT, and slope are significant factors influencing surface deformation. The effects of different factors on deformation are not independent but instead interact to influence the distribution of surface deformation jointly.

Key words: permafrost, InSAR, Yellow River Source region, deformation, driving factors, mean annual ground temperature, precipitation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41801348)