

时序 InSAR 若尔盖高寒冻融泥炭地形变监测与分析

于冰¹, 王金日¹, 刘国祥², 尹高飞², 张瑞², 戴可人³,
王晓文², 张波⁴, 蔡嘉伦⁵

1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 成都 610500;

2. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756;

3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

4. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610213;

5. 西南科技大学 环境与资源学院, 绵阳 621010

摘要: 若尔盖湿地分布有欧亚大陆最大的高寒冻融泥炭地, 具有重要生态碳汇功能。冻融和碳循环过程均会导致地表形变, 开展形变监测与分析可为研究冻融和碳循环过程提供重要依据, 但当前对该区域地表形变的研究较为缺乏。本文首次以若尔盖高寒冻融泥炭地为研究区域, 先期利用 2020 年 1 月—2022 年 12 月间的升降轨 Sentinel-1 SAR 影像及 SBAS-InSAR 方法获取其地表形变, 结合形变分量建模、趋势检验和地表覆盖类型深入探讨其时空特征、变化趋势及泥炭地健康状况。研究表明, 该区域垂直向和东西向形变速率分别在 $-45\sim 45$ mm/a 和 $-25\sim 25$ mm/a, 呈现出沉降与抬升、线性累积与季节性变化以及垂直与水平形变并存的复杂特征, 与冻融、碳循环、地温、降雨等因素密切相关, 且不同地类形变趋势差异显著, 主要与驱动因素的差异相关。本文首次揭示了若尔盖高寒泥炭地的复杂形变特征、变化趋势及影响因素, 可为该区域生态功能与脆弱性评估提供科学参考, 同时验证了 SBAS-InSAR 技术在大尺度冻融泥炭地地表形变监测中的有效性。

关键词: SBAS-InSAR, 冻融泥炭地, 形变监测, 形变时空特征, 季节性变化, 形变驱动因素, 泥炭地健康状况评估
中图分类号: P236/P2

引用格式: 于冰, 王金日, 刘国祥, 尹高飞, 张瑞, 戴可人, 王晓文, 张波, 蔡嘉伦. 2026. 时序 InSAR 若尔盖高寒冻融泥炭地形变监测与分析. 遥感学报, 30(4): 1084-1101

Yu B, Wang J R, Liu G X, Yin G F, Zhang R, Dai K R, Wang X W, Zhang B and Cai J L. 2026. Deformation monitoring and analysis of Zoige Alpine Freeze-Thaw Peatlands using time-series InSAR. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 1084-1101 [DOI: 10.11834/jrs.20254580]

1 引言

泥炭地是全球最大的天然碳库, 被誉为“固碳海绵” (Hrysiwicz 等, 2023)。然而, 气候变化与人类活动导致地表温度升高和地下水位下降, 加速土壤有机质的氧化分解, 使泥炭地转变为碳源, 产生碳排放并引发地表形变, 对全球生态系统和气候产生深远影响 (Glaser 等, 2004; Hoyt 等, 2020; Khodaei 等, 2023)。中国青藏高原东北边缘的若尔盖湿地分布有欧亚大陆最大的高寒冻融泥炭地, 且因其生物多样性丰富被联合国教

科文组织列为“国际重要湿地” (Hou 等, 2022), 在碳循环和水循环中均发挥着重要作用 (张子谦等, 2020)。然而, 过去数十年间受气候变化和人类活动影响, 该地区泥炭地面积退化高达 77%, 湿地整体缩小了 30% 以上 (Zhang 等, 2011; Guo 等, 2013a, 2013b; 郎芹等, 2021)。这种退化加剧了区域生态恶化和气候变化。

泥炭的分解排放与吸收固化会引起明显的地表累积性形变, 有效获取泥炭地区域地表形变可以直观反映碳物质的动态变化过程 (Khodaei 等, 2023)。然而, 高寒泥炭地的地表形变不仅受碳循

收稿日期: 2025-01-01; 预印本: 2025-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42471489);四川省自然科学基金(编号:2023NSFSC0265);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室基金(编号:SKLGP2023K019);天津市轨道交通导航定位及时空大数据技术重点实验室开放课题基金(编号:TKL2024B09);油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金(西南石油大学)(编号:PLN201815);四川省自然科学基金(编号:2022NSFS1113)

第一作者简介:于冰,研究方向为合成孔径雷达干涉测量与形变监测、高分辨率遥感自然和人文环境监测。E-mail:rs_ingsar_bingyu@163.com

环过程的影响, 还受到冻土冻融过程的干扰。但是, 若尔盖泥炭地全域为季节性冻土, 其冻融过程主要引起周期性的地表冻胀与融沉, 而不会导致长期累积性形变。即使发生冻土退化现象, 也主要表现为冻结深度的减小和冻涨融沉周期性形变幅度的变化, 而非不可逆的累积形变 (Wang 等, 2020; Zhang 等, 2023b; Guo 等, 2013b)。这一特性使得冻融引起的周期性形变与泥炭地碳循环驱动的累积性形变在时序上具有可区分性, 因此可通过地表形变监测与分析评估若尔盖泥炭地的健康状况与碳汇功能。

若尔盖泥炭地分布范围广, 地表状态变化快, 传统的形变监测方法在效率、成本和分辨率上受限, 而合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 遥感技术提供了新思路 (Lanari 等, 2007; 陈晓等, 2023)。近年来, 许多学者成功应用合成孔径雷达干涉 InSAR (SAR Interferometry) 技术至多个泥炭地。例如, Hoyt 等学者利用小基线集成孔径雷达干涉 SBAS-InSAR (Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术监测了东南亚地区超 270 万 ha 的泥炭地地表形变, 揭示了东南亚泥炭地的沉降趋势并以此反演了碳损失 (Hoyt 等, 2020)。Tampuu 等 (2020, 2021) 利用差分合成孔径雷达干涉 DInSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术研究了爱沙尼亚保护区泥炭沼泽的季节性形变, 并描述了其与地下水位的关系, 分析了 DInSAR 技术监测泥炭沼泽垂直形变的潜力。De La Barreda-Bautista 等 (2024) 基于间断性小基线子集干涉 ASPIS-InSAR (Advanced Pixel System using the Intermittent SBAS) 技术揭示了亚北极泥炭地中多年冻土的退化现象, 论述了使用 InSAR 技术监测大面积冻土退化现象的可行性。

目前, 针对若尔盖泥炭地地表形变的相关研究仍然匮乏, 该泥炭地作为全球重要的高原泥炭沼泽, 其地表形变特征及驱动机制尚未得到充分研究。值得指出的是, 2020 年 1 月—2022 年 12 月期间国家通过了《湿地保护法》, 四川省提出创建若尔盖国家公园, 若尔盖地区的湿地保护和生态恢复工作加速推进, 对该时期的地表形变进行监测和分析有助于评估湿地保护和修复效果。鉴于此, 本文先期利用该时期的升降轨 Sentinel-1 SAR 影像及 SBAS-InSAR 技术获取若尔盖泥炭地时序二维地表形变数据, 结合形变分量建模、趋势分析

和地表覆盖类型深入探讨形变时空特征、变化趋势与影响因素, 并根据形变监测与分析结果评估泥炭地健康状况。本文研究结果不仅有助于填补若尔盖泥炭地地表形变监测研究的空白, 也可为湿地保护、碳汇功能评估及生态保护策略的制定及效果评估提供科学依据。

2 研究区域与数据集

2.1 研究区域概况

若尔盖泥炭地位于青藏高原东北部, 地理范围为 $32^{\circ}59'N$ — $34^{\circ}48'N$ 、 $101^{\circ}56'E$ — $103^{\circ}16'E$, 面积约为 3500 km^2 (Zhang 等, 2011; Xiang 等, 2009; Yang 等, 2014), 海拔在 3400 — 3700 m (Li 和 Gao, 2020; Qu 等, 2022)。该地区是典型的高寒草原沼泽生态系统, 生物多样性显著, 是重要的国家级自然保护区 (Wu 等, 2018)。若尔盖泥炭地大约在一万年前开始形成, 最初以渗透泥炭为主, 后转变为地表流动泥炭, 泥炭深度在 0.3 — 10 m , 固碳量约 5.54 Pg , 占中国土壤有机碳的 6.2% , 是欧亚大陆最大的高原泥炭沼泽。

若尔盖地区气候类型为高原寒温带湿润季风气候, 年均气温在 0.7 — $3.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 存在显著年际温差和季节性冻融循环。区域年降水量约为 493 — 836 mm , 主要集中在 4 — 10 月, 受气候变暖影响, 该地区自 1970 年以来气温每十年上升 $0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 但降水量逐渐减少 (Hou 等, 2022; Zhou 等, 2021)。当地人口以藏族牧民为主, 密度约 $3.4 \text{ 人}/\text{km}^2$ (Bian 等, 2010)。区域内植被包括适应高寒湿润气候的草本植物及湿地植物, 对泥炭地的形成和维护起着重要作用。此外, 区域内还有少量林地和建筑用地。研究区域的地理位置、高程分布及泥炭地分布 (Xu 等, 2018) 如图 1 所示。

2.2 数据集

本文以 2020 年 1 月至 2022 年 12 月间获取的 172 景 Sentinel-1A SAR 影像为数据源, 其中升轨 89 景、降轨 83 景, 且成像日期一致。表 1 列出了所使用影像的主要参数。

本文利用精密定轨数据提供轨道参数以便削弱轨道误差。数字高程模型采用先进陆地观测卫星 ALOS (Advanced Land Observing Satellite) 30 m 分辨率数字表面模型, 用于进行差分干涉数据处

理。为削弱大气延迟效应,采用通用大气校正在线服务 GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service) 对差分干涉图进行大气校正 (Yu等, 2017, 2018a, 2018b)。地表温度和降雨数据采用欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 的 ERA5-Land 再分析数据集,用于形变及成因分析。

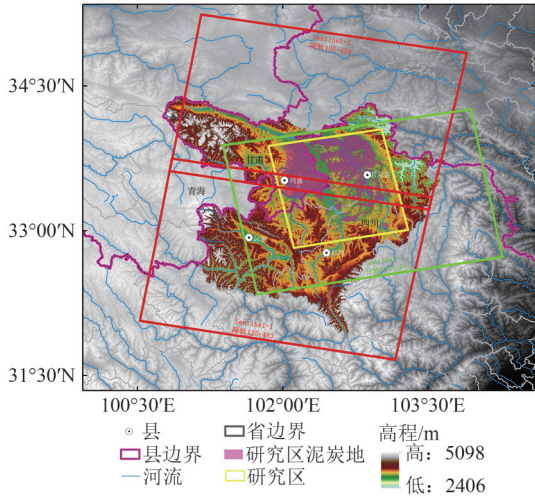


图1 研究区概况(紫色填充表示泥炭地分布(Xu等,2018))

Fig. 1 Overview of the research area (The purple fillings indicate the distribution of peatlands (Xu et al., 2018))

表1 Sentinel-1数据的主要参数

Table 1 Key parameters of Sentinel-1 data

观测时间	升轨影像数量	降轨影像数量	升轨轨道号	降轨轨道号	极化方式	干涉宽幅模式原始分辨率
2020	31	30				
2021	29	29	128	135	VV	3.79 m*13.95 m
2022	29	24				

3 研究方法

3.1 SBAS-InSAR

SBAS-InSAR通过设置时空基线阈值获取短时空基线差分干涉图,可以有效提高干涉图集的整体相干性 (Zhang等, 2023a),更适用于湿地和冻土区等失相干相对明显的区域。SBAS-InSAR差分干涉相位由高程误差、地表形变、大气延迟、轨道误差和噪声相位组成,具体可表达为

$$\varphi_i(r, x) = \varphi_{\text{top}}(r, x) + \varphi_{\text{def}}(r, x) + \varphi_{\text{atm}}(r, x) + \varphi_{\text{orb}}(r, x) + \varphi_{\text{noi}}(r, x) \quad (1)$$

式中, (r, x) 表示像元位置, $\varphi_i(r, x)$ 为第*i*幅差分

干涉图中像元 (r, x) 处的差分干涉相位, $\varphi_{\text{top}}(r, x)$ 和 $\varphi_{\text{def}}(r, x)$ 分别表示与垂直基线相关的高程误差相位和与时间基线相关的形变相位,后3个相位分量分别为大气延迟相位、轨道误差相位和噪声相位,均为时间维高频信号。

为削弱大气延迟对形变监测精度的影响,本文采用GACOS对差分干涉图集进行大气延迟相位校正。对于 t_i 和 t_j 时刻的两幅SAR影像所形成的差分干涉图,像元 (r, x) 处的大气校正相位可表示为 (Wang等, 2019b)

$$\delta f(r, x) = f_{\text{GACOS},j}(r, x) - f_{\text{GACOS},i}(r, x) \quad (2)$$

式中, $f_{\text{GACOS},j}(r, x)$ 和 $f_{\text{GACOS},i}(r, x)$ 分别表示 t_j 和 t_i 时刻的大气延迟相位, $\delta f(r, x)$ 表示与干涉对相对应的大气延迟相位。将该相位转换为复数后,可通过共轭相乘从SBAS-InSAR差分干涉相位图集中扣除,得到大气延迟校正后的差分干涉相位。

在进行大气延迟校正后,对地表低频形变和高程误差进行建模和估算 (Berardino等, 2002), SBAS-InSAR采用的低频多项式形变模型为 (Berardino等, 2002)

$$\varphi(t_n) = \bar{v}(t_n - t_0) + \frac{1}{2}\bar{a}(t_n - t_0)^2 + \frac{1}{6}\Delta\bar{a}(t_n - t_0)^3 \quad (3)$$

式中, $\varphi(t_n)$ 表示 t_n 时刻对应的形变相位, \bar{v} 、 \bar{a} 和 $\Delta\bar{a}$ 分别代表监测时段内平均地表形变速率、形变加速度和形变加速度的变化率, t_0 为第一幅SAR影像的获取时刻(即起始时刻), t_n 为第 $n+1$ 幅SAR影像的获取时刻。

在得到低频形变和高程误差相位后,从原始缠绕的差分干涉图中扣除这两部分分量得到残余差分干涉相位图,对残余相位图进行解缠后,仅将低频形变相位加回(排除了高程误差相位)得到更新后的解缠相位图 (Berardino等, 2002)。然后,可对相邻两幅SAR影像获取时刻间的相位变化速率进行建模和求解,并通过时间维积分获得与SAR影像获取时刻对应的时序相位 (Berardino等, 2002)。从时序相位中扣除通过式(3)解算的低频形变并对残差相位进行时空域滤波可分离出轨道误差、大气延迟和噪声相位 (Berardino等, 2002)。从时序相位中扣除轨道误差、大气延迟和噪声相位分量可得到时序形变相位,并通过相位到形变的转换得到时序形变 (Berardino等, 2002)。

在时序形变的基础上, 可利用最小二乘拟合得到形变速率。

在实际的数据处理中, 由于本文研究区域为泥炭地, 地表状态变化较快, 为保障干涉图集具有较好的相干性, 干涉对的空间基线阈值设为 110 m, 时间基线阈值为 36 d。由于时空基线限制较为严格, 且降轨 SAR 数据存在两个月的缺失, 导致部分时间段出现干涉图集不连续的现象。为了确保干涉时空基线网络的连续性, 本文在整体时间基线阈值保持为 36 d 的基础上, 单独把数据缺失时段的时间基线阈值延长至 72 d, 以此将断开位置的前后影像相连接。相比于将整体时间基线阈值设置为 72 d, 这种以 36 d 为整体时间基线阈值而仅在数据断开的位置单独设置 72 d 时间基线阈值的操作可在保持干涉网络稳定性的同时避免因引入过多时间基线较长、相干性较差的干涉对而影响整体干涉图集相干性。本文中干涉时空基线分布如图 2 所示。在根据上述干涉组合得到差分干涉图后, 采用 GACOS 数据进行大气延迟校正, 然后进行 Goldstein 滤波, 并应用最小费用流 MCF (Minimum Cost Flow) 方法获取解缠相位图集。最后, 基于前述 SBAS-InSAR 方法获取形变时间序列和年均形变速率。

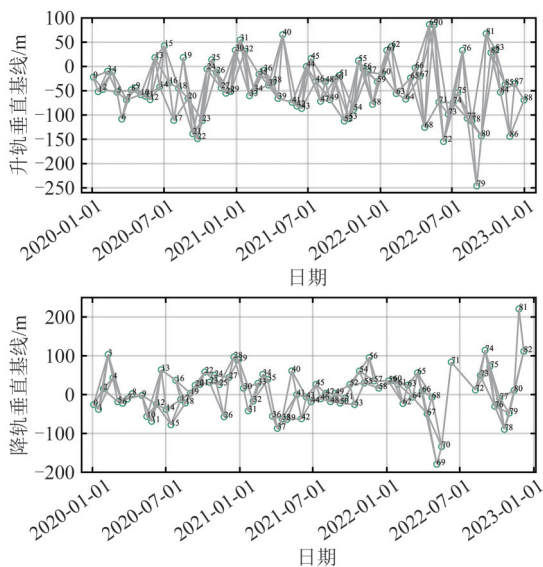


图2 时空基线分布

Fig. 2 Distribution of the spatial and temporal baselines

3.2 融合升降轨结果的时序二维形变解算方法

冻融和碳循环引起的地表形变主要为垂直向的沉降或抬升, 然而单个轨道的 SAR 数据仅能获取雷达视线 LOS (Line of Sight) 向的形变。因此,

需要通过融合升降轨 LOS 向形变提取垂直向形变。根据现有研究, SAR 卫星沿近似南北向飞行, 观测方向与飞行方向垂直, 故而无法有效捕捉南北向形变。因此, LOS 向形变观测值主要为垂直向和东西向形变的贡献, 可表示为 (Samieie-Esfahany 等, 2009)

$$\begin{bmatrix} d_{asc} \\ d_{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_{asc} \cos \alpha_{asc} \cos \theta_{asc} \\ -\sin \theta_{des} \cos \alpha_{des} \cos \theta_{des} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_E \\ d_U \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, d_{asc} 和 d_{des} 为升轨和降轨在某一时刻的 LOS 向形变观测值, θ 和 α 为卫星入射角和航向角, d_E 和 d_U 为对应的东西向和垂直向形变待估值。基于式 (4) 可解算每个点在每个 SAR 影像获取时刻的垂直向和东西向形变时间序列。基于垂直向形变结果可对冻土和碳循环所引起地表形变进行更精准的分析 and 评估。

3.3 形变分析方法

3.3.1 时序形变结果建模与分量提取

季节性冻融泥炭地地表形变主要表现为线性形变和季节性周期形变的叠加, 线性形变缓慢而持续, 季节性周期形变则受温度、降水等周期性环境因素的影响, 呈现出周期性沉降与抬升的变化规律 (明义森等, 2023; 陈玉兴等, 2019)。由于 SBAS-InSAR 获取的地表时序形变是多种形变分量叠加的结果, 为了便于更详实地研究形变特征, 特别是针对若尔盖泥炭地地表的季节性波动强度进行探究, 本文采用线性和正余弦模型对该时序形变结果进行分解 (Xu 等, 2022), 以获取季节性形变信息。通过该方法, 地表时序形变结果可分解为线性形变和季节性周期形变, 模型表达式为 (Xu 等, 2022)

$$S(t) = a \times t + b \times \sin\left(\frac{2\pi}{T} \times t\right) + c \times \cos\left(\frac{2\pi}{T} \times t\right) + d \quad (5)$$

式中, t 为相对于第一幅影像成像时间 (起始时间) 所累积的天数, T 代表 365 d 的季节性振荡周期, a 为线性形变分量、 b 和 c 为周期性形变模型系数, d 为残差项。根据已有研究 (Xu 等, 2022), 可以采用两个三角函数正交分量的合成振幅 $\sqrt{b^2 + c^2}$ 表征季节性形变的振幅 (即波段幅度), 该变量反映了季节性形变的最大幅度, 是季节性形变的有效指征参数。

3.3.2 形变趋势分析与预测方法

(1) 历史形变趋势分析方法

历史形变趋势是指监测时段内形变的变化趋势，可以表征形变的复杂性特征。本文采用 Mann-Kendall 趋势检验和 Theil-Sen 估计方法获取历史形变趋势。前者是一种非参数统计方法，用于分析时间序列是否存在显著趋势 (Liu 等, 2020)。原假设为时间序列无明显上升或下降趋势，对立假设为存在趋势，公式如下：

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (6)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n}{18}(n-1)(2n+5) - \frac{1}{18} \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \quad (8)$$

式中， x_j 和 x_k 为时间序列地表形变量， S 为检验的统计量， $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数， Z 为标准正态分布统计量， n 为时间序列长度， t_p 为时间序列中第 i 个符号连续出现的次数， g 为结组数，表示时间序列中相同形变结果的组数。本文采用 0.05 置信水平，临界值 $Z_{1-\alpha/2}$ 为 ± 1.96 ，当 $|Z|$ 大于 1.65、1.96 和 2.58 时，趋势分别通过了 90%、95% 和 99% 的显著性检验。

上述方法可以判断地表形变是否存在趋势，Theil-Sen 估算方法可用于衡量趋势方向，其在处理不规则、非线性的时间序列时具有较高鲁棒性 (Zhou 和 Serfling, 2008)，其公式为

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{d_j - d_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (9)$$

式中， d_i 和 d_j 为同一形变点在 t_i 和 t_j 时刻的累积形变量， $\text{Median}(\cdot)$ 为取中位数运算， β 为趋势估计

参数。该公式通过计算形变点时间序列中任意两个时刻间形变的变化率的中位数来估计趋势。基于上述两种方法可综合判断时序形变的趋势特征 (表 2)。Mann-Kendall 检验和 Theil-Sen 估算方法都关注形变趋势而非形变大小，且对异常值不敏感，能稳健分析时序形变的趋势特征。

表 2 基于 Mann-Kendall 趋势检验和 Theil-Sen 估算方法的形变趋势特征分类

Table 2 Classification of deformation trend features based on Mann-Kendall trend test and Theil-Sen estimation method

标准正态分布统计量的绝对值 $ Z $ (Liu 等, 2020)	趋势估计参数 β	形变趋势特征
(2.58, ∞)	$\beta > 0$	显著抬升
(1.96, 2.58]		明显抬升
(1.65, 1.96]		轻微抬升
[0, 1.65]	$\beta = 0$	微小抬升
[0, 1.65]		无变化
[0, 1.65]		微小沉降
(1.65, 1.96]	$\beta < 0$	轻微沉降
(1.96, 2.58]		明显沉降
(2.58, ∞)		显著沉降

(2) 形变趋势预测方法

为进一步研究地表形变的未来发展情况，本文采用 Hurst 指数估算形变的未来变化趋势。Hurst 指数用于描述时间序列的长期相关性或自相似性，本文采用重标度极差方法计算 Hurst 指数，根据其大小预测地表形变趋势，公式可表达为 (Hurst, 1951)

$$R/S = k(n)^H \quad (10)$$

$$\log(R/S)_n = H \log(n) + \log(k) \quad (11)$$

式中， R 为累积偏差， S 为标准差， k 为与每个点对应的常数 (每个点上 k 的取值与数据集的尺度相关，在回归分析过程中通过拟合得来 (Hurst, 1951))， n 为时间序列的长度， H 为待估的 Hurst 指数， $\log(\cdot)$ 为对数运算。Hurst 指数取值范围在 0—1，根据不同取值范围可预测地表形变趋势，如表 3 所示。

表 3 Hurst 指数解译

Table 3 Interpretation of Hurst exponent

Hurst 指数	[0, 0.2)	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.5)	0.5	(0.5, 0.6)	[0.6, 0.8)	[0.8, 1]
趋势特征	显著反持续性	明显反持续性	轻微反持续性	随机波动	轻微持续性	明显持续性	显著持续性

本文技术路线图如图 3 所示，包括以下 4 个环节：在数据准备及预处理阶段，选用 Sentinel-1A

SAR 影像数据、ALOS 30 m 数字表面模型以及用于大气校正的 GACOS 数据，为后续分析提供基础。

SBAS-InSAR 数据处理阶段旨在获取升降轨 LOS 向时序地表形变结果。然后在泥炭地地表形变时空分布特征分析阶段，完成时序二维形变解算和季节性形变建模及解算，揭示地表形变的时空分布特征，为后续演化规律分析奠定基础。在泥

炭地地表演化规律分析环节，结合季节性形变分析、特征点时序形变分析、历史趋势分析及未来趋势预测，进一步探索泥炭地地表形变的趋势变化规律，最终为泥炭地状态评估和保护预测提供科学依据。

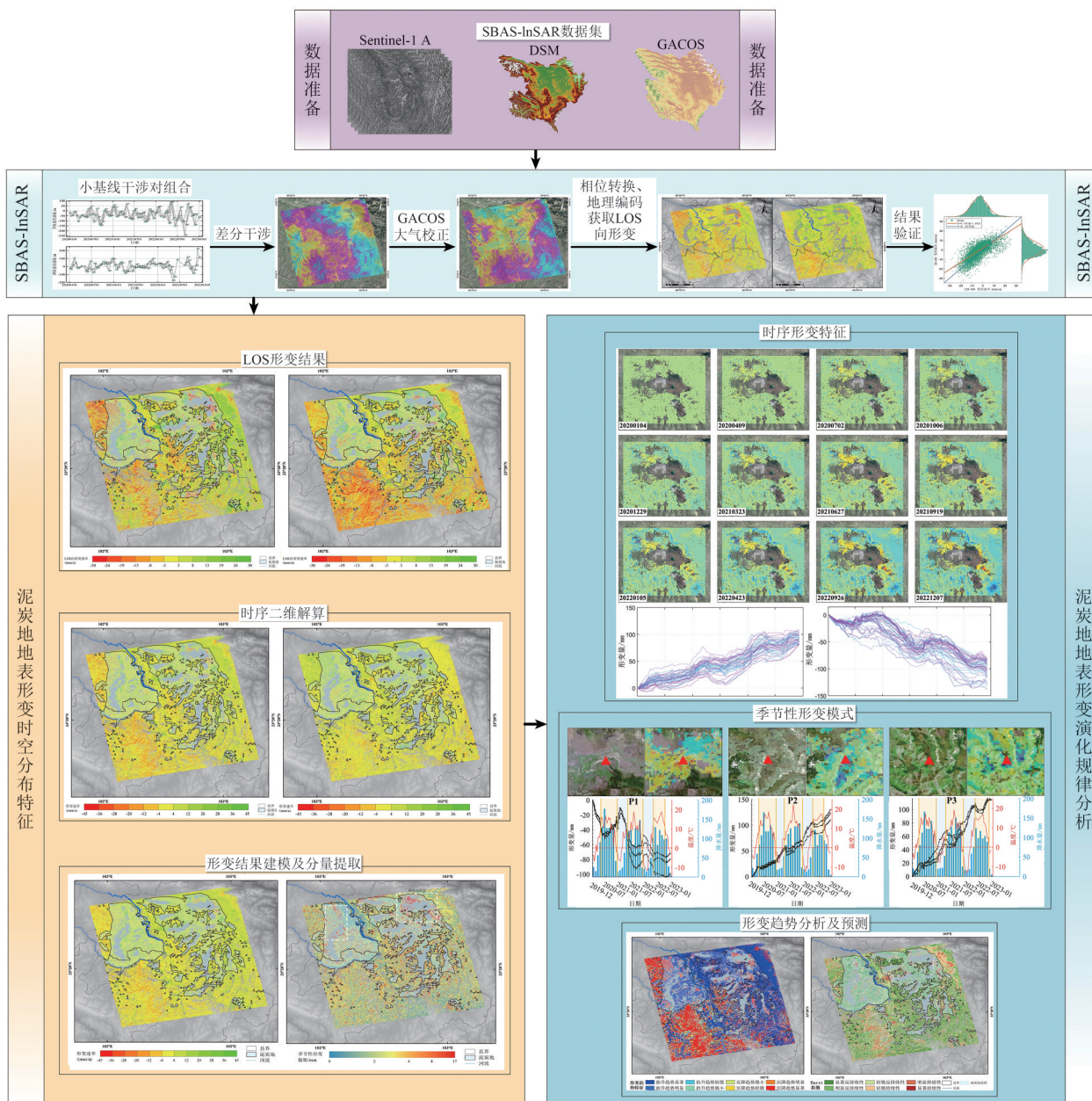


图3 形变监测与分析技术流程

Fig. 3 Flow chart of deformation monitoring and analysis technology

4 结果

4.1 升降轨 LOS 向形变结果

利用 SBAS-InSAR 方法获取的升轨和降轨 LOS 向地表形变速率结果如图 4 所示（图中黑色框线

所示为泥炭地覆盖区域），其中负值表示地表向着远离卫星的方向运动，正值反之。研究区 LOS 向形变速率范围为 -30—30 mm/a。在泥炭地地区，较大量级的地表形变主要分布在水体和湿地周围，且正值和负值均有分布。在研究区中部、西南和

西北部的非泥炭地区域,形变以负值为主。统计数据显示,升轨形变速率在 $[-4 \text{ mm/a}, 4 \text{ mm/a}]$ 区间的比例为 56.7%,降轨形变速率在同一区间内的占比为 45.4%,表明大部分地区较为稳定。升轨和降轨 LOS 向形变结果的差异主要源于二者不同

的成像几何。同时,如果地表存在明显的水平形变,两轨道在不同视线方向捕捉的形变信号也会有所差异,因此融合升降轨的结果以获取垂直和水平向的时序二维形变是必要的。

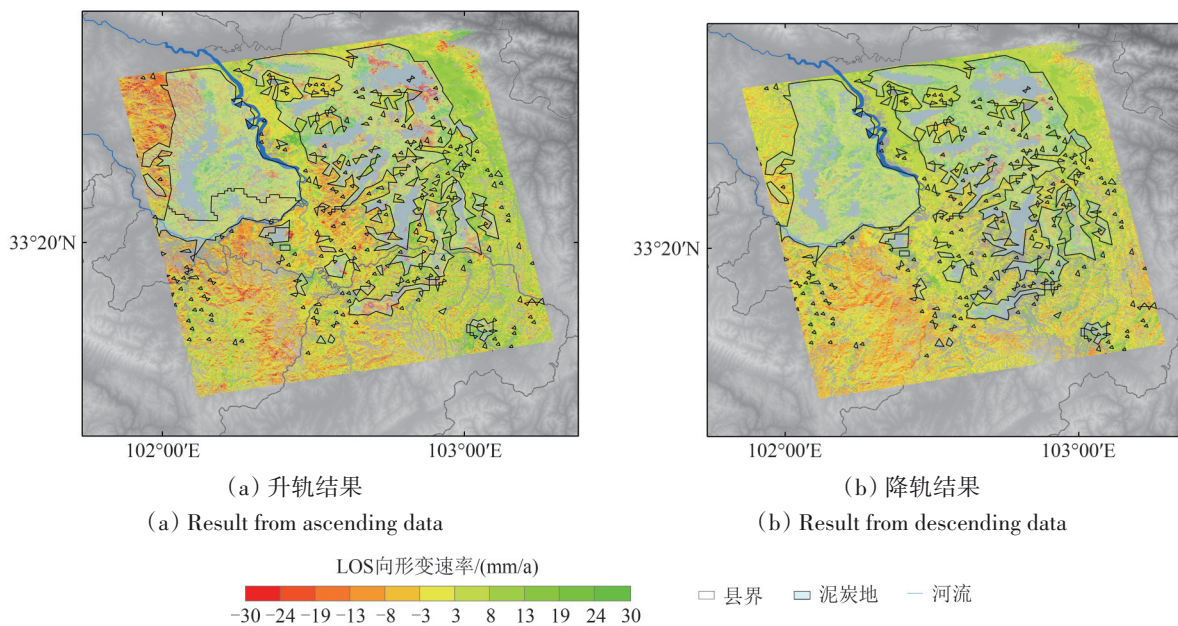


图4 LOS向地表形变速率

Fig. 4 LOS surface deformation rate

4.2 临轨重叠区域形变结果交叉验证

为验证形变监测结果的可靠性,本文额外获取了与升轨影像轨道相邻的另一升轨(Path 26 Frame 103)的影像数据集,对重叠区域的影像进行3.1节所述的数据处理,并在数据处理过程中统一了参考基准,获取了相同侧视方向下临轨的形变结果,用于进行形变的交叉验证。本文计算了临轨重叠区域内同名点形变速率的Pearson相关系数和均方根误差RMSE(Root Mean Square Error)。如图5所示,形变结果间的相关系数为0.74,均方根误差为0.55,这表明二者具有较好的一致性,从而验证了本文获取的地表形变结果的可靠性。

4.3 二维形变结果

本文融合升降轨LOS向形变结果,并利用式(4)进行解算得到了研究区垂直向和东西向的形变结果。如图6所示为垂直向和东西向形变速率,垂直向负值表示沉降,正值表示抬升,东西向负值表示向西运动,正值表示向东运动。垂直向形变主

要分布在泥炭分布区和西部高海拔区,速率范围为 -45 — 45 mm/a ,但相比之下泥炭地形变量级更大,尤其在湿地和水体周围形成了多个独立的显著形变区。东西向形变相比垂直向而言量级较小,湿地和水体周围的泥炭区形变量级相对较大。非泥炭地大部分区域不存在明显的东西向形变,仅在研究区西北部出现了较大范围的东向形变。结合Spearman相关系数和地理探测器(王劲峰和徐成东,2017)两种方法进行成因分析,结果如图7所示。两种方法的结果均表明此处形变主要和高程、坡度、坡向及降雨相关。同时,由图1中高程分布可知,该区域高程自西向东递减,整体上坡面朝东,因此地表形变主要表现为向东运动。

总的来说,垂直向形变主要分布在泥炭地和西部高海拔区域,形变幅度较大。泥炭地区域垂直向形变集中分布在湿地和水体周围。区域内东西向形变整体较小,西北部非泥炭地出现了明显受高程和坡向影响的东向形变。时序二维形变结果将在后续部分给出。

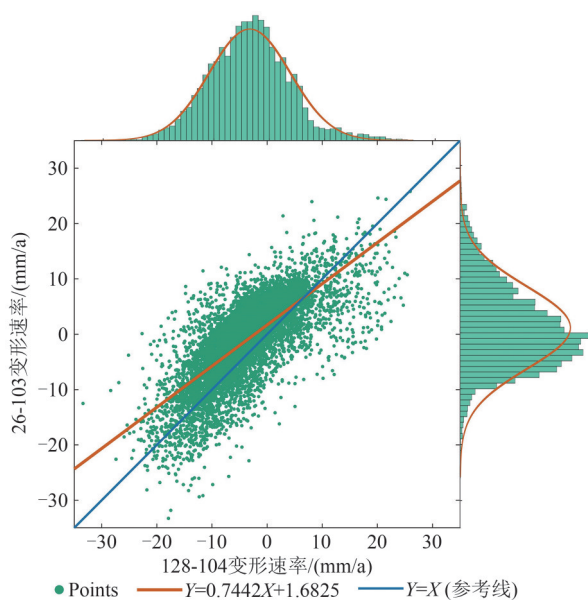


图5 相邻轨道重叠区域形变结果的交叉验证

Fig. 5 Cross validation of deformation results in overlapping areas of adjacent tracks

4.4 形变分量提取结果

本文以垂直向时序形变为基础，通过式 (5) 提取了长期线性形变速率和季节性形变振幅，结果

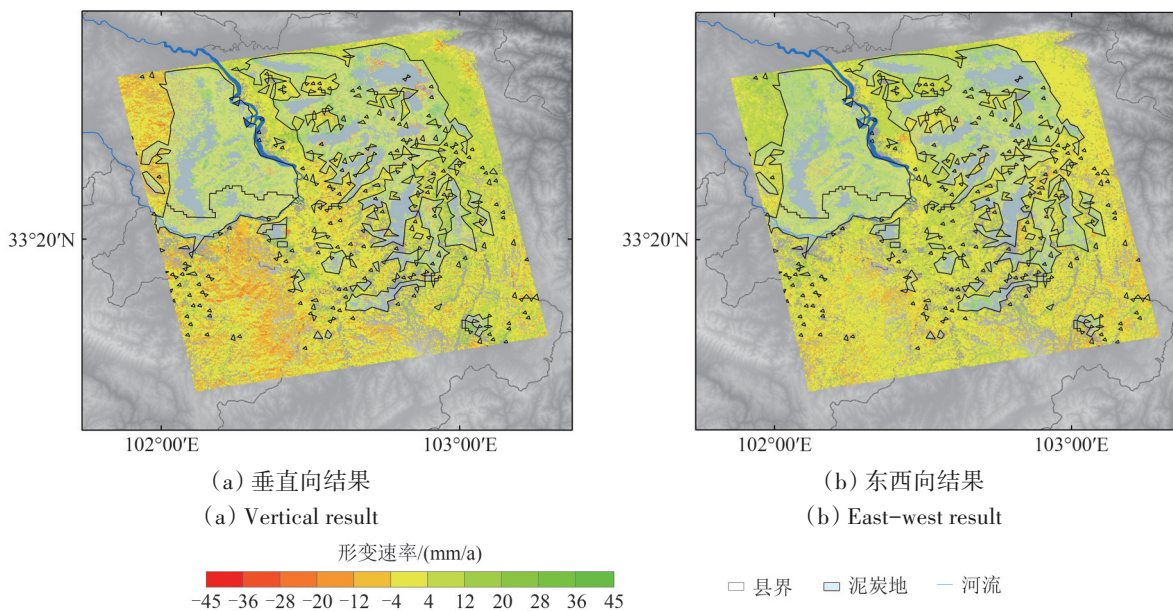


图6 二维分解形变速率

Fig. 6 Two-dimensional decomposition deformation rate

图9 (b) 展示了基于重标极差方法计算的Hurst指数分布，75.72%的区域未来可能呈现与历史形变相反的变化，24.28%的区域可能保持当前趋势，即速率维持甚至加速。尽管季节性波动可能影响重标极差方法的准确性，但该方法在线性形变显

如图8所示。垂直向线性形变速率在-45—45 mm/a之间，与图6所示垂直形变相似，集中于湿地和水体周围，存在多处明显的地表抬升。季节性形变多集中于泥炭地，在东北部的错热洼坚湖和西北部的曼日码乡周围最为显著，最大振幅为16.9 mm。

4.5 形变趋势与前景分析结果

为了分析形变趋势，本文通过 Mann-Kendall 趋势检验和Theil-Sen 估算方法，结合表2的分类策略，获得了地表形变趋势的标准正态分布统计量和趋势参数，最终分类结果见图9 (a)。图中显示研究区地表形变趋势显著区域占比最大，泥炭地区以“抬升趋势显著”为主，研究区西部高海拔非泥炭地区则以“沉降趋势显著”为主，部分非泥炭地沿河流出现小范围“抬升趋势显著”。统计显示，抬升和沉降趋势显著的区域分别占总面积的51.95%和26.10%，其余抬升趋势区域和沉降趋势区域分别占8.38%和5.88%。Mann-Kendall 检验和Theil-Sen 估算揭示了若尔盖泥炭地的复杂形变特征，表明多种趋势并存，凸显了地表形变的复杂性。

著的高形变区仍能有效预测趋势。

5 分析与讨论

5.1 全局形变时空特征

为了揭示若尔盖泥炭地地表的全局形变特征，

首先分析该区域的地表形变空间分布。从二维分解后的形变速率(图6)可以看出,西南和西北的高海拔区域地表表现为明显的沉降,结合图9可见这些区域沉降显著且持续;而泥炭地形变类型则更为复杂,呈现出沉降与抬升、垂直向与东西向形变并存的特点,剧烈形变区以曼日码乡和错热洼湖周边为代表。此外,小量级形变广泛分布于泥炭地,且抬升现象更为普遍。如图10所示为基于Landsat 8多光谱数据和神经网络监督分类方

法得到的研究区内地物分类结果,该分类结果总体精度为99.21%,Kappa系数为0.9884。其中,草地和湿地(对应于泥炭地)占研究区总面积的96.56%。结合形变结果来看,虽然草地覆盖广泛,但地表形变主要围绕湿地(泥炭地)分布,且较为显著。总的来说,地表形变主要分布在湿地区域,尤其是水体周边的泥炭地区域内地表形变量级更为显著。

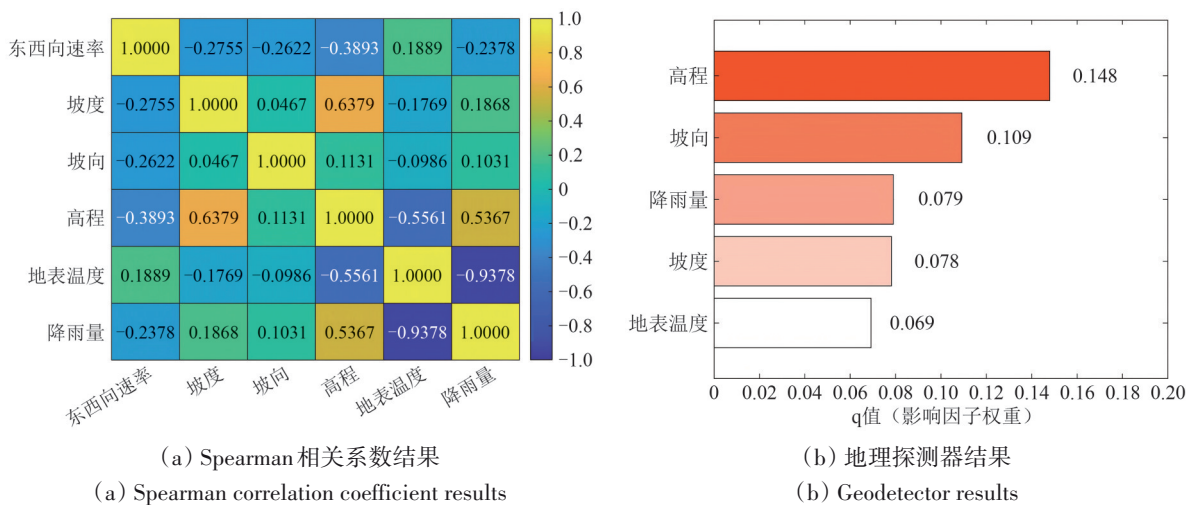


图7 西北部非泥炭区域东西向形变影响因素分析
Fig. 7 Analysis of the affecting factors for east-west deformations in the northwest part of non-petland areas

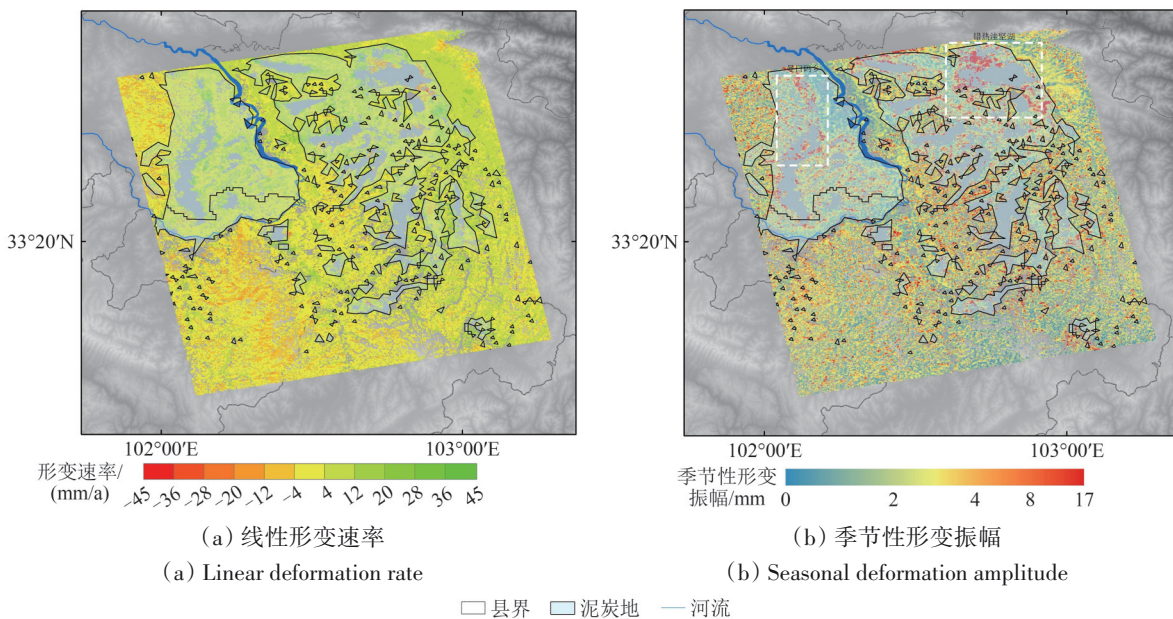


图8 形变分量建模提取结果
Fig. 8 The modeling and extraction results of deformation components

进一步分析形变分量空间分布(图8)发现,线性形变速率的空间分布与垂直向形变(图6)基

本一致,季节性形变的振幅呈现出显著的空间聚集性,特别是东北部的错热洼湖以及西北部的

曼日玛乡周边区域，季节性形变振幅超过了 10 mm。此外，其他湿地（泥炭地）区域的季节性振幅量和分布面积均大于其他地物类型区域，表明土

壤水分对季节性形变具有重要影响，为后续形变机制的探讨提供了依据。

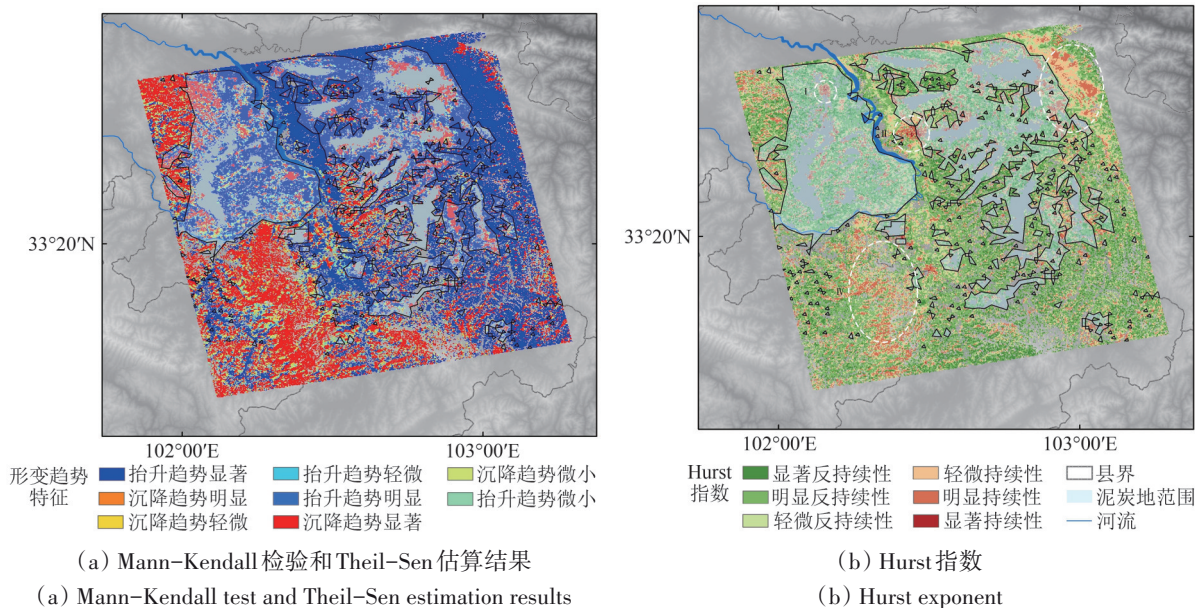


图9 形变趋势与预测结果

Fig. 9 Deformation trend and prediction results

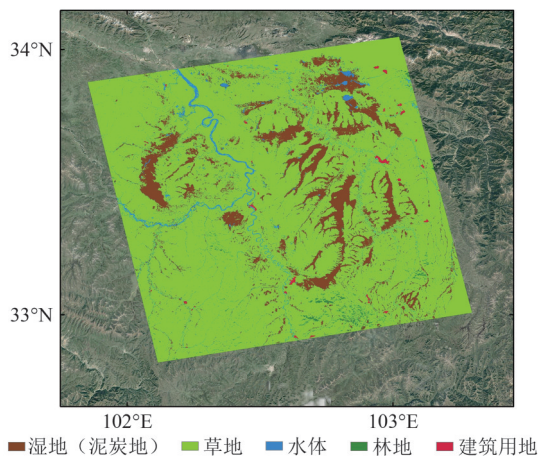


图10 基于Landsat 8数据的神经网络监督分类结果

Fig. 10 Neural network supervised classification results based on Landsat 8 data

为了分析若尔盖泥炭地地表形变的时序变化特征，图11展示了两个典型区域全时期跨度的形变时间序列。从图11中可以看出地表存在显著的持续性形变，同时在形变剧烈的区域存在季节性变化，具体表现为进入冷季（地表温度低于 0°C ）后沉降减缓、抬升加剧，进入暖季（地表温度高于 0°C ）后沉降加剧、抬升减缓。该季节性形变特征与冻融循环密切相关，冷季时冻土水分冻结，

体积膨胀导致抬升，形成冻胀；暖季时冻土层融化，沉降加剧，表现为融沉，这一规律在泥炭地区域尤为明显。同时，不同区域泥炭的分解排放和吸收固化亦会导致地表沉降和抬升现象，上述两种作用共同导致了复杂的形变时空特征。

为了进一步验证泥炭地区域形变的时间变化特征，本文分别在泥炭地的抬升和沉降区随机（采用随机函数生成点位）选取特征点，并绘制其形变时间序列，结果如图12所示。其中，图12(a)和(b)分别展示了抬升和沉降特征点的空间分布。图12(c)和(d)为对应的时序形变量，图12(e)和(f)为时序形变平均值。结果同样表明泥炭地地表形变具有明显的季节性：冷季冻胀，表现为抬升加速、沉降减缓；暖季融沉，表现为抬升减缓、沉降加速。

总的来说，若尔盖泥炭地地表形变主要分布在低海拔湿地（泥炭地）区域，沉降和抬升均有分布，且量级较为显著，而高海拔地区则以持续性沉降为主。在时间序列上，泥炭地的形变具有明显的季节性，与冻融循环密切相关，冷季表现为冻胀，暖季则为融沉。

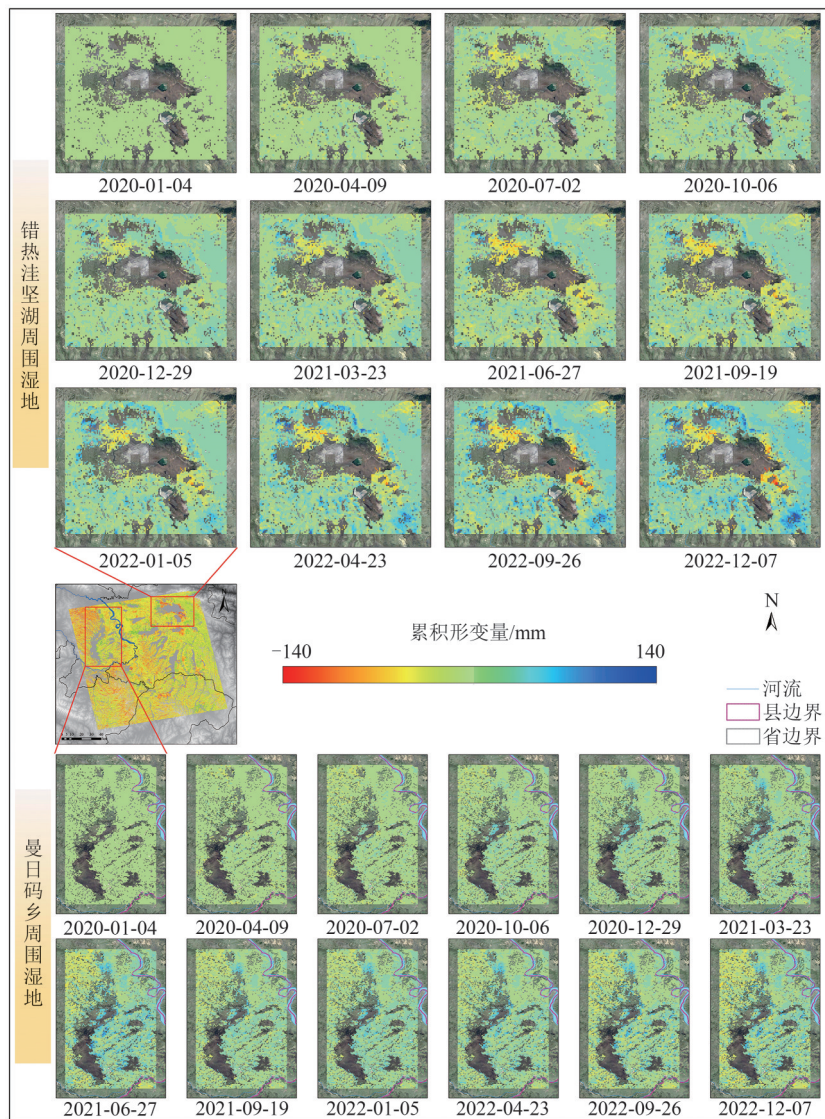


图 11 两个形变显著区域的地表垂直向时序形变

Fig. 11 Vertical temporal deformations of two areas with significant deformations

5.2 泥炭地和非泥炭地形变时序特征

5.2.1 泥炭地形变时序特征

在若尔盖泥炭地区域，季节性形变主要由季节性冻土的冻融循环所致 (Xu 等, 2022)，即使冻土发生一定程度的退化 (监测周期较长的情况下) 也主要引起冻结深度的减小和冻涨融沉幅度的变化，而非持续的累积性形变 (Wang 等, 2020; Zhang 等, 2023b; Guo 等, 2013b)。该区域内累积性地表形变主要由碳物质循环引起 (Khodaei 等, 2023)。碳源的分解和排放导致含碳层物质减少，土层压实而导致地表出现沉降 (Glaser 等, 2004; Hoyt 等, 2020; Khodaei 等, 2023)。固碳作用则促使含碳层物质增加，土层膨胀和增厚导致地表

出现抬升 (Khodaei 等, 2023)。为进一步分析若尔盖泥炭地地表形变的时序变化特征，并揭示其季节性波动和长时间持续性的形变趋势，本节将对泥炭地特征点的时序形变进行更为详细的讨论，其中泥炭地与非泥炭地的区分参考了 Xu 等 (2018) 提供的全球泥炭分布结果。图 13 展示了泥炭地特征点的时序形变结果，其中特征点具体点位如形变速率图上蓝色三角形 (每个点旁边注记了其高程值) 和光学影像上红色三角形所示，各子图中黑线表示各特征点的形变时间序列，红线代表地表温度变化，蓝色柱状图表示每月总降雨量，黄色竖线代表冷季与暖季的交替时间点，红色虚横线标示了 0 °C 的位置。整体来看，泥炭地特征点在时序上均表现出持续的线性形变并叠加有明显的

季节性波动。从具体趋势来看, 2020年1—4月初抬升特征点(P2、P3、P4、P6)表现出剧烈的抬升, 随后至10月中旬抬升减缓, 甚至出现短暂的沉降, 自10月中旬至2021年4月地表再次剧烈抬升。2020年1—4月初沉降特征点(P1、P5、P7、P8、P9)表现出明显沉降, 4月初至10月中旬沉降快速减缓, 甚至出现抬升。P5、P7、P8和P9点在10月中旬至次年4月地表再次明显沉降, 但1月初至4月初沉降轻微减缓, 然后4月初至10月中旬

沉降快速减缓并出现抬升。P1点与上述4点稍有差异, 在10月中旬至次年1月下旬抬升稍有加剧, 然后自1月下旬至4月初开始沉降, 并在4月中旬左右至5月末沉降出现加剧, 随后出现沉降减缓并逐渐出现抬升, 后续阶段表现出类似的变化趋势。总的来说, 泥炭地地表形变的季节性波动具有年际变化特征, 由季节性冻土的冻融循环引起, 而长期的累积沉降和抬升是由于泥炭的排放和固化所引起, 二者共同驱动了泥炭地的地表形变。

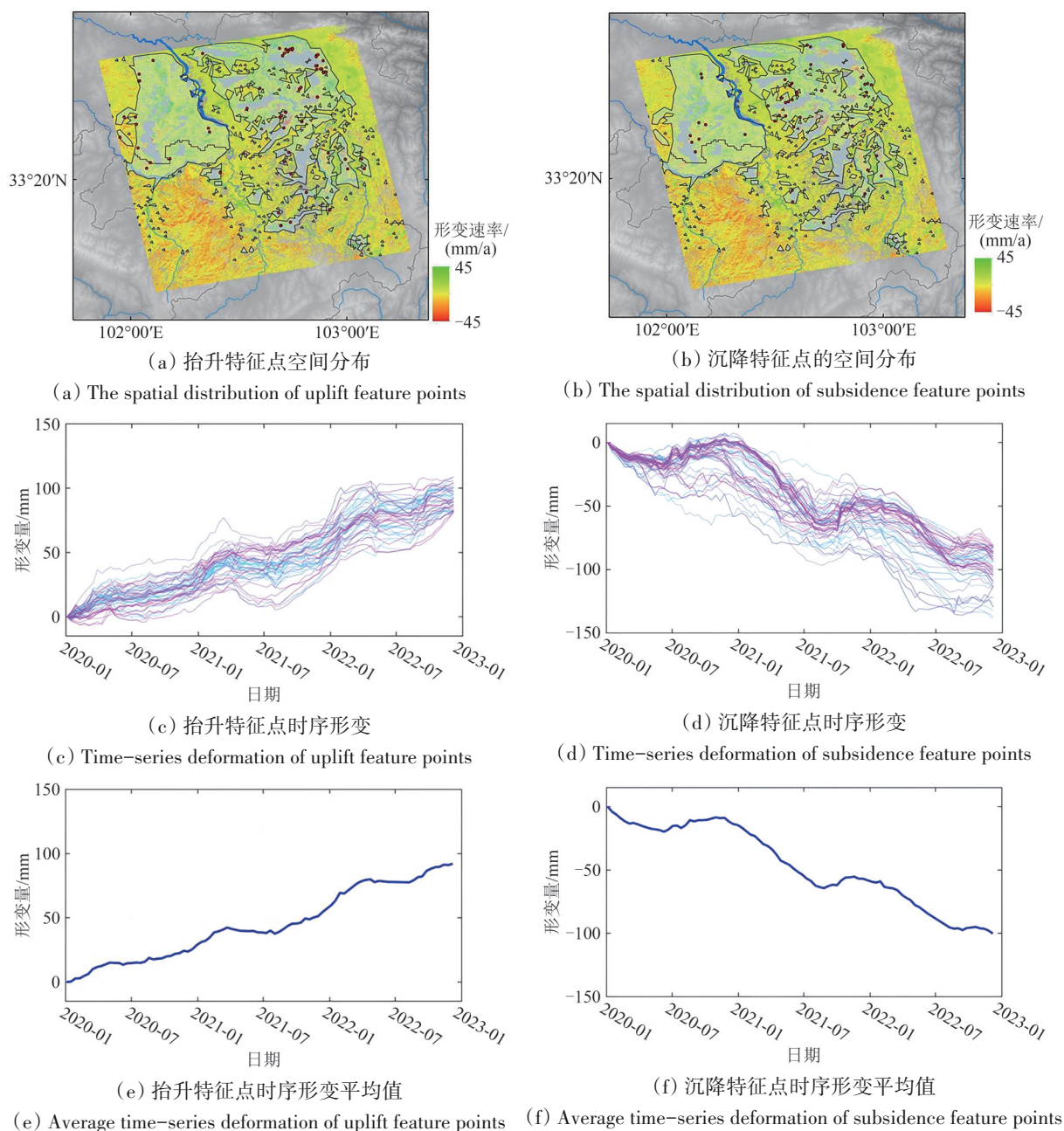


图 12 随机特征点时序形变与相应的时序均值

Fig. 12 The temporal deformations and corresponding means of the randomly selected feature points

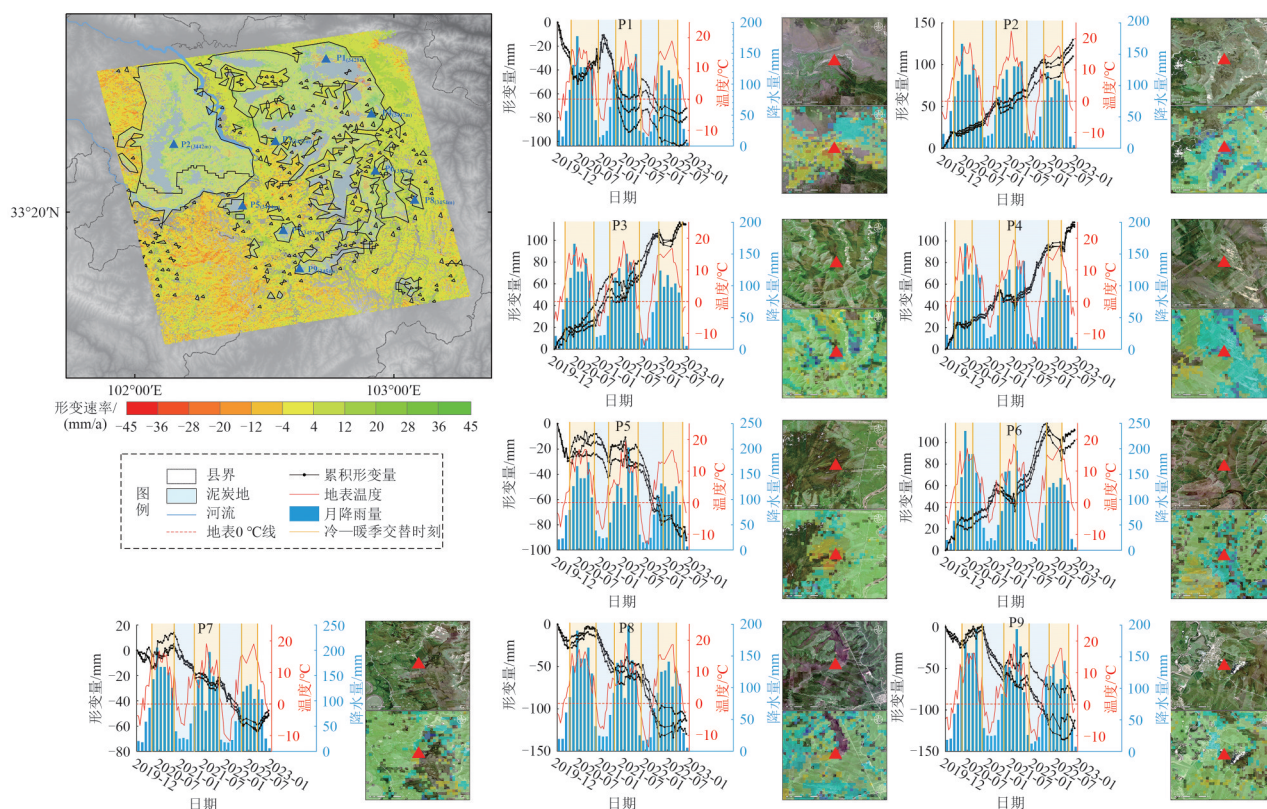


图13 泥炭地特征点时序形变及影响因素

Fig. 13 Temporal deformation of feature points in peatlands and the affecting factors

进一步地, 结合地表温度与降雨数据对形变成因进行分析。对于抬升特征点, 10月中旬地表温度降至 0°C , 水分开始冻结膨胀, 水分含量较高的区域出现明显冻胀, 导致地表抬升加剧。当水分完全结冰后不再继续膨胀, 抬升速度减缓。4月初温度回升至 0°C 以上, 进入暖季, 土壤冰开始融化导致地表抬升减缓, 并出现沉降, 叠加固碳导致的持续抬升现象形成上述形变趋势。沉降特征点的波动与抬升点相似, 但趋势相反。对于P1点, 由于其地势低, 含水量高, 随着每年暖季到来, 温度开始上升, 冻土解冻沉降加速, 当解冻结束后沉降减缓, 且由于降雨量增加土壤吸水膨胀产生短时间的抬升现象。冷季时随着温度下降冻土开始冻胀抬升, 缓解了碳排放所致整体的沉降趋势。但对于P5、P7、P8和P9点, 由于地势相对较高, 水分易流失, 含水量低, 冻胀作用没有P1点明显, 加之降雨减少和水分流失导致土壤压实, 因此在冷季并未出现明显抬升, 而是表现出沉降先加剧后减缓的趋势。

由此可见, 泥炭地区域的地表形变趋势和特征较为复杂, 形变的波动大多出现于地表温度波峰或

波谷附近和降雨量显著波动时, 表明地表温度和降雨量变化是泥炭地季节性形变的重要驱动因素。

5.2.2 非泥炭地形变时序特征

为与泥炭地形成对照, 本文在非泥炭地区域选取了相应的特征点, 其形变时间序列如图14所示。图中点和线条含义与图13相同。研究区内非泥炭地主要由蒿草和羊茅等适应高寒湿润气候的草本植物覆盖。与泥炭地相比, 非泥炭地的形变量较小, 尤其是在距泥炭地较远的区域, 形变均在 5 mm/a 以下, 但时间序列上仍表现出显著的季节性变化。由于研究区内非泥炭地的平均高程为 3552 m , 高于泥炭地的 3422 m , 且泥炭地位于若尔盖盆地中心水分易于积累, 而非泥炭地分布于边缘和较高区域, 土壤含水量相对较低, 导致冻土的冻融循环作用较弱, 难以成为主导性形变驱动因素。因此, 非泥炭地区域的季节性形变主要与植被根系生长周期和土壤含水量变化相关 (Wang等, 2019a; Ding等, 2023)。具体而言, 在温暖多雨季节, 非泥炭地植被进入生长期, 根系发育使土壤松散而体积增加, 导致地表抬升; 寒冷季节, 植被休眠, 根系固土作用减弱, 水分流失和土壤

压实导致地表沉降。这一周期性形变特征在多个研究中也都有所发现，例如在其他冻土区的草地环境中，也观测到类似的形变模式（Wang等，

2019a; Ding等，2023）。总体而言，气象因素和植被活性的共同作用促使非泥炭地随季节变化发生周期性地表形变。

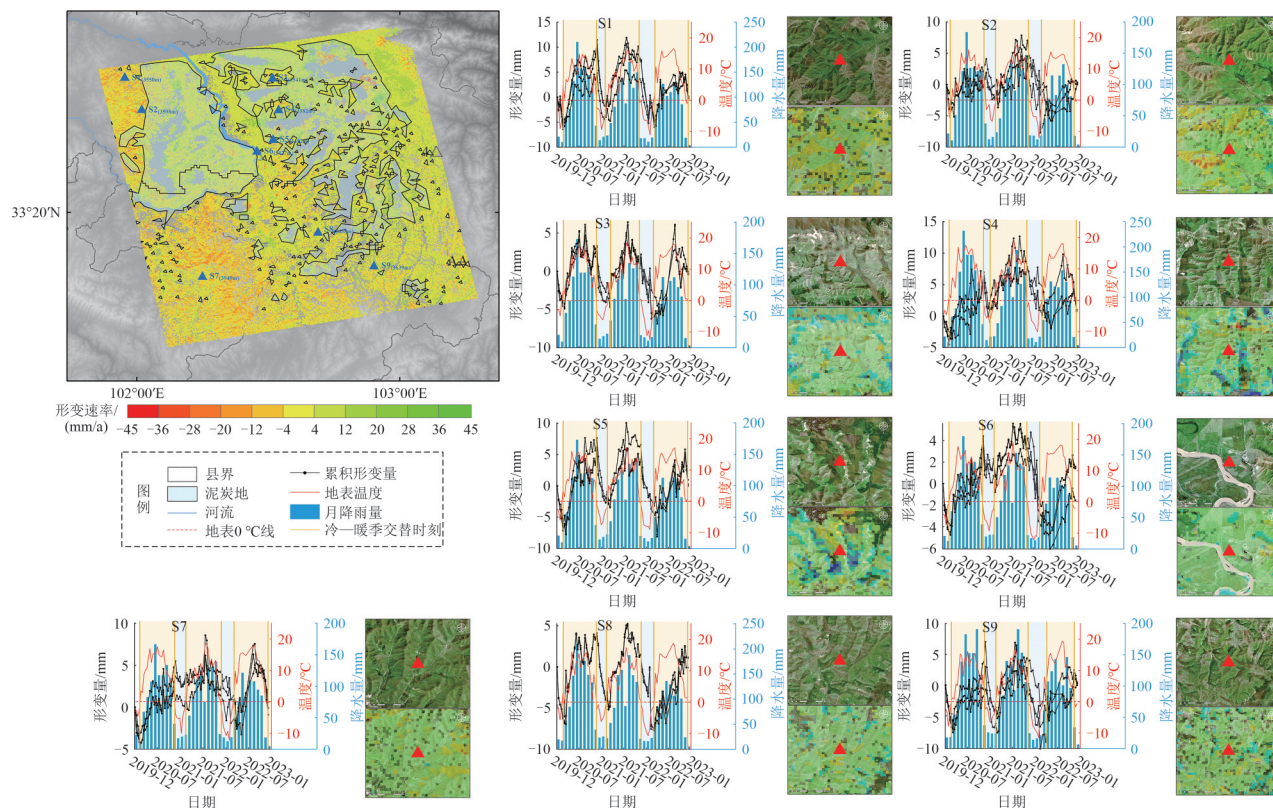


图14 非泥炭地特征点时序形变及影响因素

Fig. 14 Temporal deformation of non-peatland feature points and the affecting factors

5.3 形变趋势演化规律

为了进一步理解若尔盖地区地表形变的长期演变规律及未来可能的变化，本文结合 Mann-Kendall趋势检验、Theil-Sen斜率估计方法和 Hurst 指数分析进一步以揭示该地区的形变趋势及其持续性。图9(a)显示，研究区大部分区域表现为抬升趋势较为显著，尤其是在泥炭地区域。西部高海拔和中部丘陵区则表现出沉降趋势显著。此外，在错热洼湖及周边区域也出现了局部沉降趋势显著区域。从统计数据来看形变趋势显著区域占78.05%，其中抬升占比51.95%，沉降占比26.10%。形变趋势微小区域占14.20%，抬升和沉降分别占比7.09%和7.11%。形变趋势明显和轻微的区域占7.75%。

图9(b) Hurst指数分布结果表明，75.72%的区域可能出现与历史形变趋势相反的变化，24.28%的区域可能保持当前趋势，详细结果如表4

所示。反持续性区域广泛分布于形变速率较小的区域，这些区域的形变受短期或季节性因素影响，难以维持长期趋势。持续性区域在泥炭地和非泥炭地均有聚集性分布（如图9(b)区域I、II、III、IV），这些较高的Hurst指数表明未来将继续发生显著地表形变，并维持原趋势。综合Hurst指数分布、Mann-Kendall趋势检验和Theil-Sen斜率估计结果（图9(a)）以及形变速率分布（图6）可以预测，III右侧远离水体区域、I区域和II区域未来将持续抬升，III左侧靠近水体区域和IV区域将继续沉降。基于上述分析结果可初步确定III左侧靠近水体的区域是若尔盖泥炭地未来治理工作的重点关注区域，其沉降趋势显著特征表明未来具有更高的退化风险。此外，高Hurst指数区域与线性形变速率较大区域空间分布高度一致，表明该指数在识别长期显著形变趋势方面具有较高的敏感性，无论是抬升还是沉降，都能够准确反映形变趋势的持续性。

表4 Hurst指数解译结果

Table 4 Interpretation results of Hurst exponent

Hurst 指数	[0, 0.2)	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.5)	0.5	(0.5, 0.6)	[0.6, 0.8)	[0.8, 1]
趋势特征	显著反持续性	明显反持续性	轻微反持续性	随机波动	轻微持续性	明显持续性	显著持续性
占比/%	13.72	42.49	19.51		14.24	9.83	0.21

5.4 冻融泥炭地健康状况分析

在泥炭地的碳循环过程中，地表形变与碳的吸收和排放过程紧密相关 (Glaser等, 2004; Hoyt等, 2020; Khodaei等, 2023)。具体而言，当泥炭地过度排水或退化时土壤保水能力下降，水位也随之降低，土壤中的有机碳被暴露在空气中，经过氧化过程转化为二氧化碳，从而成为碳源被排放并引发地表沉降 (Khodaei等, 2023)。相反地，当泥炭地生态状况良好，植被覆盖度较高时，根系不断生长的同时土壤有机质得以逐渐积累，进而导致地表抬升 (Khodaei等, 2023)。同时，水位上升有助于减少泥炭的氧化过程，从而促进碳的积累。因此，监测泥炭地的地表形变可以为评估泥炭地的碳吸收与排放情况提供重要的数据支持和参考依据。

垂直向形变数据统计结果显示，地表形变速率在 $[-3 \text{ mm/a}, 3 \text{ mm/a}]$ 范围内的区域面积占比为 38%，在 $[-8 \text{ mm/a}, 8 \text{ mm/a}]$ 范围内的区域面积占比达到了 77%，表明若尔盖泥炭地的形变整体稳定。值得注意的是地表抬升区域的面积占比为 69%，远大于沉降区域面积，这意味着泥炭地在持续吸收固化大气中的碳物质，并通过土壤有机物的积累保持着净碳汇 (固碳) 的特征。这些数据显示若尔盖泥炭地目前固碳功能强大，且土壤生态系统整体健康，目前不存在大规模退化现象。因此，整体而言，若尔盖泥炭地整体健康状况稳中向好，大部分区域地表形变呈现持续抬升趋势，反映出生态恢复的积极态势。这一趋势与引言中所提到的湿地保护政策和若尔盖生态恢复工程的实施预期效果相一致，也印证了推进湿地保护和恢复工程的效果及其重要性。

然而，需要注意的是错热洼湖周边等区域出现局部明显沉降现象，且伴随较高的 Hurst 指数，表明这些区域的沉降具有显著持续性，存在潜在的退化风险。尽管目前潜在的局部退化现象尚未对泥炭地整体的生态系统健康造成显著影响，但若不及时采取有效的管控和修复措施，退化可

能再次出现并加剧，对泥炭地的长期碳汇功能及生态系统稳定性产生负面影响。因此，需要加强对这些区域的监测，并采取针对性的保护措施，防止退化现象进一步蔓延。

6 结论

若尔盖泥炭地是欧亚大陆最大的高原泥炭沼泽，是重要的碳汇功能生态区。对该区域进行地表形变监测与影响因素分析可为其生态功能与脆弱性评估提供科学依据。由于目前缺少针对该区域的研究，本文先期以 2020 年 1 月—2022 年 12 月的升降轨 Sentinel-1 SAR 影像为数据源，采用 SBAS-InSAR 技术和时序二维解算方法获取了若尔盖高寒冻融泥炭地的二维时序形变，并分析和评估了其形变时空特征、变化趋势与影响因素以及泥炭地的健康状况。

研究表明，若尔盖泥炭地存在显著地表形变，且呈现出沉降与抬升、线性累积与季节性变化以及垂直与水平形变并存的复杂特征，是冻融循环、碳循环、地温变化和降雨等因素共同作用的结果。区域内垂直向形变速率在 $-45 \sim 45 \text{ mm/a}$ 之间，东西向为 $-25 \sim 25 \text{ mm/a}$ ，主要分布在泥炭地区域，尤其是水体周边地表形变最为显著。结合地物分类结果进行分析表明，不同地类形变趋势差异显著，主要与驱动因素的差异相关。值得指出的是，长期累积性形变主要与泥炭地碳分解排放及固碳过程密切相关，而季节性形变主要与冻土冻融过程相关，且主要围绕水体分布，最大振幅达 16.9 mm。同时，地表形变结果中抬升面积大于沉降面积，表明其处于正向固碳的健康状态，反映了若尔盖泥炭地强大的碳汇能力，这有助于减少大气中温室气体的含量，也证明了我国在生态湿地保护方面成效显著。鉴于该泥炭地在欧亚大陆乃至全球的重要地位，其持续的固碳过程对于全球碳循环和物质平衡具有显著的生态学意义。

本文研究表明，Sentinel-1A SAR 数据与 SBAS-InSAR 方法在监测大范围高寒冻融泥炭地形变方面

具有较好的可行性, 为研究冻融泥炭地形变特征、机制以及碳循环过程提供了全新的视角。更为重要的是, 该研究结果可为评估高寒冻融泥炭地生态系统及其变化趋势提供科学依据, 为生态保护和环境治理提供数据支持。同时, 对该区域开展持续形变监测与分析评估具有重要的科学价值与实际意义, 后续将针对该区域开展长时序地表形变监测与解译。

参考文献 (References)

- Berardino P, Fornaro G, Lanari R and 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]
- Bian J H, Li A N and Deng W. 2010. Estimation and analysis of net primary productivity of Ruoergai wetland in China for the recent 10 years based on remote sensing. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 288-301 [DOI: 10.1016/j.proenv.2010.10.035]
- Chen X, Li G, Chen Z Q, Ju Q, Zheng L and Cheng X. 2023. A backscatter coefficient normalization method to incidence angle based on ascending and descending Sentinel-1 SAR imagery at the Greenland. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(9): 2072-2084 (陈晓, 李刚, 陈卓奇, 鞠琦, 郑雷, 程晓. 2023. 基于升降轨 Sentinel-1 影像的格陵兰后向散射系数入射角归一化方法. *遥感学报*, 27(9): 2072-2084) [DOI: 10.11834/irs.20211243]
- 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]
- De La Barrera-Bautista B, Ledger M J, Sjögersten S, Gee D, Sowter A, Cole B, Page S E, Large D J, Evans C D, Tansey K J, Evers S and Boyd D S. 2024. Exploring spatial patterns of tropical peatland subsidence in Selangor, Malaysia using the APSIS-DInSAR technique. *Remote Sensing*, 16(12): 2249 [DOI: 10.3390/rs16122249]
- Ding Q, Wang F Y, Huang X L, Wang M C and Wang Q. 2023. Monitoring and analysis of surface deformation in Songyuan city, Jilin province based on time series insar. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(11): 2167-2185 [DOI: 10.1007/s12524-023-01746-5]
- Glaser P H, Chanton J P, Morin P, Rosenberry D O, Siegel D I, Ruud O, Chasar L I and Reeve A S. 2004. Surface deformations as indicators of deep ebullition fluxes in a large northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(1): GB1003 [DOI: 10.1029/2003GB002069]
- Guo D L and Wang H J. 2013a. Simulation of permafrost and seasonally frozen ground conditions on the Tibetan Plateau, 1981-2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11): 5216-5230 [DOI: 10.1002/jgrd.50457]
- Guo X J, Du W, Wang X and Yang Z F. 2013b. Degradation and structure change of humic acids corresponding to water decline in Zoige peatland, Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 445-446: 231-236 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.12.048]
- Hou P, Zhai J, Jin D D, Zhou Y, Chen Y and Gao H F. 2022. Assessment of changes in key ecosystem factors and water conservation with remote sensing in the Zoige. *Diversity*, 14(7): 552 [DOI: 10.3390/d14070552]
- Hoyt A M, Chaussard E, Seppäläinen S S and Harvey C F. 2020. Widespread subsidence and carbon emissions across Southeast Asian peatlands. *Nature Geoscience*, 13(6): 435-440 [DOI: 10.1038/s41561-020-0575-4]
- Hrysiewicz A, Holohan E P, Donohue S and Cushnan H. 2023. SAR and InSAR data linked to soil moisture changes on a temperate raised peatland subjected to a wildfire. *Remote Sensing of Environment*, 291: 113516 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113516]
- Hurst H E. 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116(1): 770-799 [DOI: 10.1061/TACEAT.0006518]
- Khodaei B, Hashemi H, Salimi S and Berndtsson R. 2023. Substantial carbon sequestration by peatlands in temperate areas revealed by InSAR. *Environmental Research Letters*, 18(4): 044012 [DOI: 10.1088/1748-9326/acc194]
- Lanari R, Casu F, Manzo M, Zeni G, Berardino P, Manunta M and Pepe A. 2007. An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis. *Pure and Applied Geophysics*, 164(4): 637-661 [DOI: 10.1007/s00024-007-0192-9]
- Lang Q, Niu Z G, Hong X Q and Yang X Y. 2021. Remote sensing monitoring and change analysis of wetlands in the Tibetan Plateau. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(2): 230-237 (郎芹, 牛振国, 洪孝琪, 杨鑫莹. 2021. 青藏高原湿地遥感监测与变化分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 46(2): 230-237) [DOI: 10.13203/j.whugis20180277]
- Li Z W and Gao P. 2020. Characterizing spatially variable water table depths in a disturbed Zoige peatland watershed. *Journal of Hydro-Environment Research*, 29: 70-79 [DOI: 10.1016/j.jher.2020.01.004]
- Liu Z Z, Wang H, Li N, Zhu J, Pan Z W and Qin F. 2020. Spatial and temporal characteristics and driving forces of vegetation changes in the Huaihe river basin from 2003 to 2018. *Sustainability*, 12(6): 2198 [DOI: 10.3390/su12062198]
- Ming Y S, Liu Q H, Bai H and Huang C. 2023. Classification and change detection of vegetation in the Ruoergai Wetland using optical and SAR remote sensing data. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(6): 1414-1425 (明义森, 刘启航, 柏荷, 黄昌. 2023. 利用光学和 SAR 遥感数据的若尔盖湿地植被分类与变化监测. *遥感学报*, 27(6): 1414-1425) [DOI: 10.11834/jrs.20221767]
- Qu R, He L, He Z W, Wang B, Lyu P Y, Wang J X, Kang G C and Bai

- W Q. 2022. A study of carbon stock changes in the alpine grassland ecosystem of Zoigê, China, 2000-2020. *Land*, 11(8): 1232 [DOI: 10.3390/land11081232]
- Samiee-Esfahany S, Hanssen R F, Van Thienen-Visser K and Munten-dam-Bos A. 2009. On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates//Proceedings of the "Fringe 2009 Workshop". Frascati: ESA Publications [DOI:http://dx.doi.org/]
- Tampuu T, Praks J and Kull A. 2020. InSAR coherence for monitoring water table fluctuations in northern peatlands//2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE: 4738-4741 [DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323709]
- Tampuu T, Praks J, Kull A, Uiboupin R, Tamm T and Voormansik K. 2021. Detecting peat extraction related activity with multi-temporal Sentinel-1 InSAR coherence time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 98: 102309 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102309]
- Wang C H, Zhao W and Cui Y. 2020. Changes in the seasonally frozen ground over the eastern Qinghai-Tibet Plateau in the past 60 years. *Frontiers in Earth Science*, 8: 270 [DOI: 10.3389/feart.2020.00270]
- Wang F Y, Ding Q, Zhang L, Wang M C and Wang Q. 2019a. Analysis of land surface deformation in Chagan Lake Region using TCPInSAR. *Sustainability*, 11(18): 5090 [DOI: 10.3390/su11185090]
- Wang J F and Xu C D. 2017. Geodetector: principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116-134 (王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 72(1): 116-134) [DOI: 10.11821/dlxb201701010]
- Wang Q J, Yu W Y, Xu B and Wei G G. 2019b. Assessing the use of GACOS products for SBAS-InSAR deformation monitoring: a case in Southern California. *Sensors*, 19(18): 3894 [DOI: 10.3390/s19183894]
- Zhou W H, Serfling R. 2008. Multivariate spatial U-quantiles: A Bahadur-Kiefer representation, a Theil-Sen estimator for multiple regression, and a robust dispersion estimator. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 138(6): 1660-1678. [DOI:10.1016/j.jspi.2007.05.043]
- Wu C Y, Chen W, Cao C X, Tian R, Liu D and Bao D M. 2018. Diagnosis of wetland ecosystem health in the Zoige Wetland, Sichuan of China. *Wetlands*, 38(3): 469-484 [DOI: 10.1007/s13157-018-0992-y]
- Xiang S, Guo R Q, Wu N and Sun S C. 2009. Current status and future prospects of Zoige marsh in eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering*, 35(4): 553-562 [DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.02.016]
- Xu J R, Morris P J, Liu J G and Holden J. 2018. PEATMAP: refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. *CATENA*, 160: 134-140 [DOI: 10.1016/j.catena.2017.09.010]
- Xu Z D, Jiang L M, Niu F J, Guo R, Huang R G, Zhou Z W and Jiao Z P. 2022. Monitoring regional-scale surface deformation of the continuous permafrost in the Qinghai - Tibet plateau with time-series InSAR analysis. *Remote Sensing*, 14(13): 2987 [DOI: 10.3390/rs14132987]
- Yang G, Chen H, Wu N, Tian J Q, Peng C H, Zhu Q A, Zhu D, He Y X, Zheng Q Y and Zhang C B. 2014. Effects of soil warming, rainfall reduction and water table level on CH₄ emissions from the Zoige peatland in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 78: 83-89 [DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.07.013]
- Yu C, Li Z H and Penna N T. 2018a. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model. *Remote Sensing of Environment*, 204: 109-121 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.038]
- Yu C, Li Z H, Penna N T and Crippa P. 2018b. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10): 9202-9222 [DOI: 10.1029/2017jb015305]
- Yu C, Penna N T and Li Z H. 2017. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3): 2008-2025 [DOI: 10.1002/2016jd025753]
- Zhang X H, Liu H Y and Xing Z S. 2011. Challenges and solutions for sustainable land use in ruoergai-the highest altitude peatland in Qinhai-Tibetan plateau, China. *Energy Procedia*, 5: 1019-1025 [DOI: 10.1016/j.egypro.2011.03.180]
- Zhang Z H, Hu C T, Wu Z H, Zhang Z, Yang S W and Yang W. 2023a. Monitoring and analysis of ground subsidence in Shanghai based on PS-InSAR and SBAS-InSAR technologies. *Scientific Reports*, 13(1): 8031 [DOI: 10.1038/s41598-023-35152-1]
- Zhang Z Q, Li M, Wen Z, Yin Z Q, Tang Y F, Gao S R and Wu Q B. 2023b. Degraded frozen soil and reduced frost heave in China due to climate warming. *Science of the Total Environment*, 893: 164914 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164914]
- Zhang Z Q, Zhao T J, Shi J C, Li Y L, Ran Y H, Chen Y Y, Zhao S J, Wang J, Ning Z Y, Yang H L and Han D. 2020. Near-surface freeze/thaw state mapping over Tibetan Plateau. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(7): 904-916 (张子谦, 赵天杰, 施建成, 李玉霖, 冉有华, 陈莹莹, 赵少杰, 王健, 宁志英, 杨红玲, 韩丹. 2020. 青藏高原地区近地表冻融状态判别算法研究. *遥感学报*, 24(7): 904-916) [DOI: 10.11834/jrs.20209293]
- Zhou W C, Cui L J, Wang Y F, Li W and Kang X M. 2021. Carbon emission flux and storage in the degraded peatlands of the Zoige alpine area in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Soil Use and Management*, 37(1): 72-82 [DOI: 10.1111/sum.12660]

Deformation monitoring and analysis of Zoige Alpine Freeze–Thaw Peatlands using time–series InSAR

YU Bing¹, WANG Jinri¹, LIU Guoxiang², YIN Gaofei², ZHANG Rui², DAI Keren³,
WANG Xiaowen², ZHANG Bo⁴, CAI Jialun⁵

1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China;

4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China;

5. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract: The Zoige Wetland, which has an important ecological carbon sink function, covers the largest alpine permafrost peatland in Eurasia. Both the freeze-thaw process of permafrost and the carbon cycle of peatlands can cause surface deformation. Monitoring and analyzing deformation can provide important evidence for studying the freeze–thaw and carbon cycle processes. However, current research on surface deformation in this area is relatively scarce. This study is the first to take the Zoige peatland as a research area. The deformation in this area was monitored using the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR). The spatiotemporal characteristics, evolution trends, and driving factors of the deformation were comprehensively studied. The health status of peatlands was evaluated by considering the deformation distribution and evolution trend.

This study obtained 89 ascending and 83 descending Sentinel-1 SAR images from January 2020 to December 2022. The radar Line-Of-Sight (LOS) deformation in the peatland area was extracted by SBAS-InSAR. This deformation was verified by comparing it with the deformation results from the adjacent orbits. The vertical and east-west deformation were obtained by LOS deformation decomposition. The vertical linear cumulative deformation and the seasonal amplitude were extracted through deformation component modeling. Moreover, the historical deformation trend was obtained using the Mann-Kendall trend test and Theil-Sen estimation methods, whereas the future deformation trend was estimated based on the Hurst index. The spatial and temporal characteristics, change trends of the deformations, and health status of the peatland were explored in depth by combining diverse information, such as land cover type, surface temperature, and precipitation.

The correlation coefficient of the LOS velocity of the overlapping areas between adjacent orbits reaches 0.74, and the root mean square error is ± 0.55 mm/a. Vertical and east-west velocities in the study area range from -45 mm/a to 45 mm/a and from -25 mm/a to 25 mm/a, respectively. The vertical deformation is mainly distributed in the peat areas, particularly around the wetlands, water bodies, and the western high-altitude area. The nonpeat area in the northwest has relatively evident eastward deformation affected by elevation and aspect. Seasonal deformation, with a maximum amplitude of 16.9 mm, is mostly concentrated in the peat areas, particularly around the Cuorewajian Lake and the Manrima Township. The trend test results demonstrate that the areas with significant uplift and subsidence trends account for 51.95% and 26.10% of the total area, respectively, whereas the remaining areas with uplift and subsidence trends account for 8.38% and 5.88% , respectively. Moreover, 75.72% of the area may show an anticontinuity trend in the future, and 24.28% of the area may maintain the current trend.

The deformation of the Zoige peatland exhibits complex characteristics and distribution patterns of subsidence and uplift, linear accumulation, and seasonal changes, as well as vertical and horizontal components coexisting. This deformation is mainly related to factors such as the freeze-thaw process, carbon cycle, land surface temperature, and precipitation. Moreover, the deformation trends of different land types vary significantly, mainly because of the differences in driving factors. Overall, the uplift area of the Zoige peatland is larger than the subsidence area, thereby indicating a good carbon sink function. However, local significant subsidence phenomena occur in areas such as the Cuorewajian Lake surroundings and are accompanied by a high Hurst index. This observation indicates a significant subsidence persistence. Thus, the peatland in these areas may face degradation risks. This study is the first to reveal the complex deformation characteristics, change trends, and influencing factors of the alpine permafrost peatland in Zoige, thereby providing scientific reference for the assessment of ecological functions and vulnerability in this region. It also verifies the effectiveness of the SBAS-InSAR technology in monitoring the surface deformation of large-scale permafrost peatlands.

Key words: SBAS-InSAR, Freeze-thaw Peatland, deformation monitoring, spatiotemporal deformation characteristics, seasonal variation, driving factors of deformation, Assessment of Peatland Health Status

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42471489); Natural Science Foundation of Sichuan (General Program) (No. 2023NSFSC0265); Opening Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology) (No. SKLGP2023K019); Opening Fund of Tianjin Key Laboratory of Rail Transit Navigation Positioning and Spatio-temporal Big Data Technology (No. TKL2024B09); Open Fund of State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University (No. PLN201815); Natural Science Foundation of Sichuan (No. 2022NSFSC1113)