



引文格式: 褚洪义, 杨博, 魏东琦, 等. 多年冻土 InSAR 地表变形监测与土壤水热过程研究[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 244–254. DOI: 10.12401/j.nwg.2024001

Citation: CHU Hongyi, YANG Bo, WEI Dongqi, et al. Research on InSAR Surface Deformation and Soil Hydrothermal Process in Permafrost[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 244–254. DOI: 10.12401/j.nwg.2024001

多年冻土 InSAR 地表变形监测与 土壤水热过程研究

褚洪义¹, 杨博¹, 魏东琦¹, 李汶洪¹, 黄兆欢², 张茗爽¹, 乔冈¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要: 地表变形是反映活动层冻融过程的重要特征。为研究地表变形与活动层水热过程的相关性, 采用 SBAS-InSAR 技术对祁连山地区野牛沟多年冻土区近 5a 的地表变形进行长期连续监测, 并基于野外观测数据研究了地表变形与土壤水热过程的关系。结果表明, 冻融过程与水力侵蚀作用引起的地表变形最为显著, 地表变形表现出明显的季节性特征。冻融过程引起的地表累积变形较小, 年际冻胀、融沉幅度约为 10~20 mm; 水力侵蚀引起的地表累积变形较大, 年际地表变形幅度超过 50 mm。野外观测数据表明活动层土壤温度具有轻微的下降趋势, 负温等温线下探深度增加、历时加长, 冻结锋面交汇日逐渐提前。地表变形与土壤温度、土壤湿度具有较好的相关性, 在土壤水分富集区相关性更强, 相关系数分别为 -0.522、-0.415 ($P < 0.001$)。土壤水分富集区土壤含水量的变化对地表冻胀、融沉幅度变化的影响也更显著, 两者具有良好的线性关系。笔者定量描述了活动层地表变形与土壤水热过程的关系, 对大范围活动层冻融参数的监测研究具有参考意义。

关键词: InSAR; 地表变形; 多年冻土; 活动层; 水热过程

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)06-0244-11

Research on InSAR Surface Deformation and Soil Hydrothermal Process in Permafrost

CHU Hongyi¹, YANG Bo¹, WEI Dongqi¹, LI Wenhong¹, HUANG Zhaohuan², ZHANG Mingshuang¹, QIAO Gang¹

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract: Surface deformation is an important feature reflecting the freeze-thaw process of active layer. To

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2024-01-03; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“地质调查智能技术与通用工具研发推广(西安地调中心)”(DD20230605), “云平台地质调查西安地调中心节点运行维护与网络安全保障”(DD20230708), 中央科研院所基本科研业务费项目“基于 InSAR-GRACE 技术的华北平原典型城市地下水与地面沉降耦合分析”(KY202302)和陕西省重点研发计划“黄河流域(陕西段)生态安全格局构建、评价与风险管控关键技术研究”(2021ZDLSF05-01)联合资助。

作者简介: 褚洪义(1995-), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事 InSAR 理论与应用研究。E-mail: chuhongyi@mail.cgs.gov.cn.

study the correlation between surface deformation and active layer hydrothermal processes, SBAS-InSAR technique was used to continuously monitor the surface deformation in the permafrost area of Yeniugou in Qilian Mountains in recent 5a, and the relationship between surface deformation and soil hydrothermal process was studied based on field observation data. The results indicate that the surface deformation caused by freeze-thaw process and hydraulic erosion is the most significant, and the surface deformation exhibits obvious seasonal characteristics. The cumulative surface deformation caused by freeze-thaw process is relatively small, and the interannual amplitude of frost heave and melt subsidence is about 10~20 mm; The cumulative surface deformation caused by hydraulic erosion is relatively large, with an interannual surface deformation exceeding 50 mm. Field observation data shows a slight downward trend in soil temperature in the active layer, with an increase in depth and duration of the negative temperature isotherm, and a gradual advance in the freezing front intersection date. The surface deformation has a good correlation with soil temperature and soil moisture, in areas where soil moisture enriched, the correlation is stronger, with correlation coefficients of -0.522 and -0.415 ($P < 0.001$), respectively. The changes in soil moisture content in soil moisture rich areas also have a more significant impact on the amplitude of surface frost heave and thaw settlement, and there is a good linear relationship. This article quantitatively describes the relationship between surface deformation of active layers and soil hydrothermal processes, which has reference significance for monitoring and studying the freeze-thaw parameters of large-scale active layers.

Keywords: InSAR; surface deformation; permafrost; active layer; hydrothermal process

多年冻土是影响寒区生态环境最活跃的因素。在全球变暖的背景下,世界范围内的多年冻土发生了不同程度的退化,主要表现为多年冻土面积减少、厚度减薄、活动层厚度增加、多年冻土温度升高等。青藏高原是世界上中低纬度面积最大、海拔最高的多年冻土区(Zhao et al., 2020; 吴青柏等, 2021),对气候变化更敏感(Peng et al., 2018),变暖速率是全球平均水平的两倍(Zhang et al., 2019; You et al., 2021),多年冻土面积减少速率约为 $1.15 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ (Gao et al., 2023)。多年冻土会直接或间接影响区域生态水文过程、碳循环乃至工程建设的稳定性,活动层热融和冻胀的特性也会改变地表形态,形成冻胀丘、热融滑塌、冻土沼泽等不良地质现象。为此许多国际科学机构将多年冻土作为重要监测和研究内容,包括极地系统科学计划(ARCSS)、环极地活动层监测计划(CALM)、多年冻土热状态计划(TSP)等。

传统的监测手段依赖大量的野外作业,然而受限于恶劣的自然环境,野外作业具有成本高、覆盖范围小等缺点,往往集中在青藏公路沿线、黑河流域等重点区域。卫星遥感和大地测量技术的迅速发展,为大范围多年冻土观测提供了新手段。合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)

是一种基于微波观测地表变形的技术,具有全天候、精度高、范围广等优势(冯旻譞等, 2023),可以很好地观测冻融过程由水冰相变引起的地表周期性变形(张廷军, 2012; Wang et al., 2020),在区域尺度多年冻土调查中的应用日趋成熟。Daout等(2017)利用 InSAR 技术反演了 2003 至 2011 年青藏高原区域大范围的季节形变量,并对季节性形变延迟进行了探讨; Zhang 等(2019)、王志伟等(2021)探讨了不同下垫面以及土壤孔隙度等因素对地表变形分布特征的影响; 范鹏等(2021)、逯中香等(2022)通过 InSAR 技术研究了地表冻胀融沉作用对青藏工程设施稳定性的影响; Liu 等(2012)、Wang 等(2018)基于水质量守恒建立了 InSAR 地表变形与活动层厚度的函数关系来反演活动层厚度。目前采用 InSAR 技术对多年冻土的研究主要聚焦多年冻土地表变形空间分布特征、对工程稳定性的影响、多年冻土参数反演等方面,针对地表冻胀融沉与活动层水热过程定量关系的研究较少。为此,笔者采用时序 InSAR 技术对祁连山地区野牛沟地表变形进行 5 年的连续观测,分析野牛沟地表变形的成因; 结合气象站观测数据,通过相关分析等方法研究地表变形与土壤水热动态变化的关系,对研究长时序、大范围多年冻土变化具有参考意义。

1 研究区概况

野牛沟位于青海省祁连县,地处青藏高原东北部祁连山地区(图1),地形地貌主要由新生代构造活动形成,野牛沟南北两侧山脉呈NW—SE走向,地貌类型复杂,第四季冰川和冰碛堆积地貌大量发育(郭怀军,2017)。河谷内部是黑河上游西支冲积平原,地势较为平坦。野牛沟受青藏高原和大陆性气候影响,为

高原(亚)高寒带半干旱气候,年降雨量约400 mm,多年平均气温约为-4℃(王庆锋等,2016)。研究区土壤质地粗糙,有机物含量少,主要为砂质土、黏土、亚粘土(陈玉兴等,2019),植被类型为高寒草甸、高寒沼泽草甸(Cao et al., 2018; 马素辉等, 2018)。野牛沟属阿尔金-祁连山高寒带高山冻土区,多年冻土十分发育,多年冻土下界约为3650~3700 m,活动层厚度为1~4.9 m,平均厚度约为2.7 m(Cao et al., 2017; Han et al., 2022)。

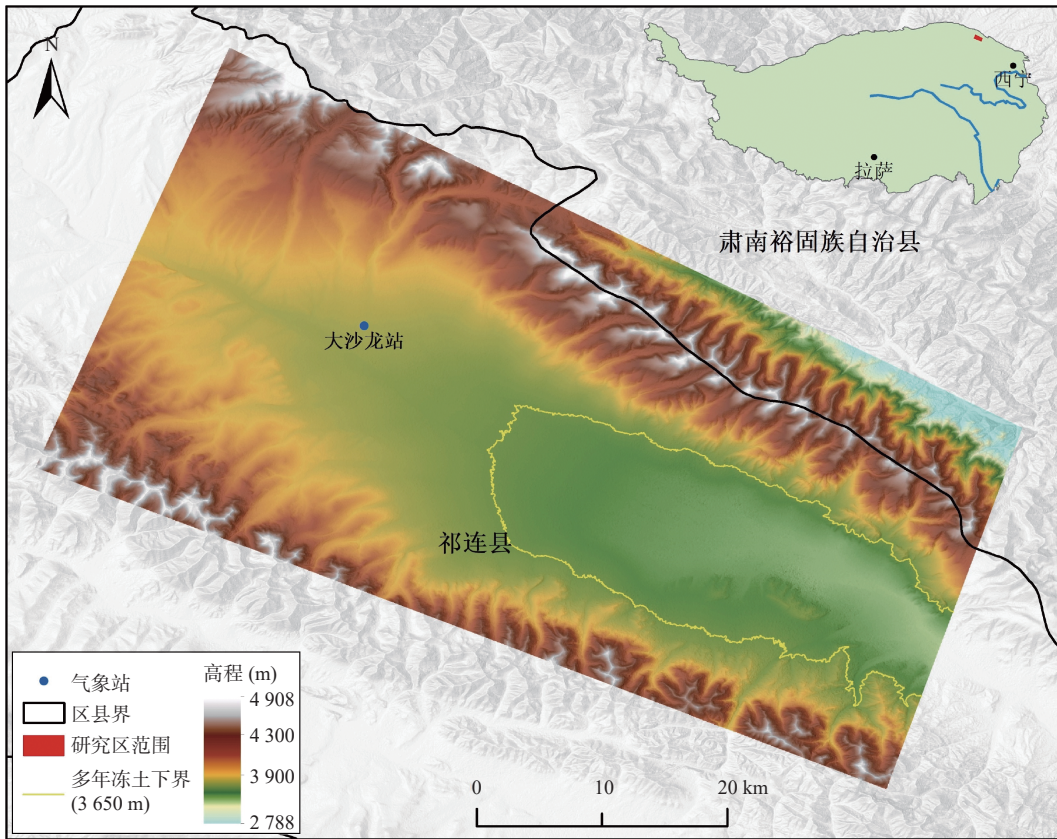


图1 研究区位置图

Fig. 1 Map showing the study area

2 数据与方法

2.1 数据

(1) SAR 数据

SAR数据采用 Sentinel-1A 卫星降轨单视复数(single look complex, SLC)影像,时间跨度为2017年10月至2022年10月,共152期,设置最大时间基线为60 d,数据时空基线分布及干涉像对组合见图2。

(2) 土壤温湿度数据

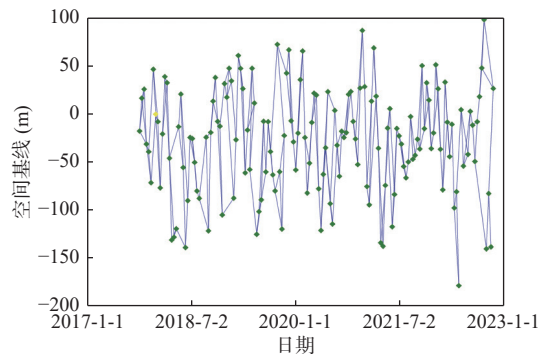


图2 干涉像对时空基线分布

Fig. 2 Spatial-temporal baselines of interferograms

通过国家青藏高原科学数据中心(<https://doi.org/10.11888/Atmos.tpd.300628>)黑河流域地表过程综合观测网, 收集大沙龙气象站 2017~2022 年不同深度的土壤温度、土壤含水量数据(Liu et al., 2018; Che et al., 2019; Liu et al., 2021), 研究活动层水热过程。

2.2 小基线子集

小基线子集(small baseline subsets, SBAS)-InSAR 方法采用多主影像组合, 通过设置较短的时间和空间基线生成干涉像对, 保证干涉图具有较高的相干性。与永久散射体(persistent scatters, PS)-InSAR 方法相比, SBAS 方法更关注分布式特征, 在缺少高相干点的区域依然可以获取较可靠的结果, 更适用于自然特征(张林梵, 2023)。野牛沟地表主要为高寒草甸等自然地表, 人工建筑等高相干点十分稀少, 因此笔者选择 SBAS-InSAR 技术作为地表变形监测的技术手段。

假设有 $N+1$ 幅 SAR 影像, 通过设置合适的时空基线得到 M 幅差分干涉图, M 满足:

$$(N + 1)/2 \leq M \leq N(N + 1)/2 \quad (1)$$

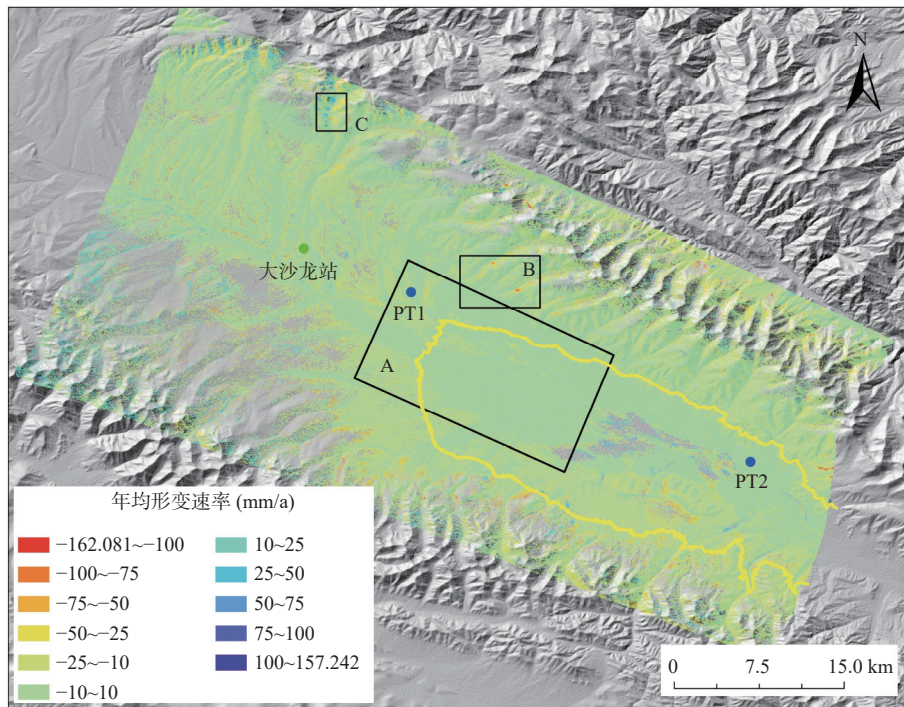
用 v_i 表示相邻某一时段的平均相位速率, 第 i 幅和第 j 幅干涉对差分相位 $\Delta\phi_{i,j}$ 可以表示为该时段平均相位速率在时间间隔内的和:

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi_{12} \\ \Delta\phi_{13} \\ \Delta\phi_{23} \\ \dots \\ \dots \\ \Delta\phi_{mj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 - t_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ t_2 - t_1 & t_3 - t_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & t_3 - t_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & t_j - t_{j-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \dots \\ \dots \\ v_{M-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)系数矩阵可用 B 表示。在解算地表形变时, 对于小基线子集内部, $N \geq M$ 可以使用最小二乘法求解, 当各子集间 $N < M$, 矩阵 B 容易产生秩亏, 因此采用奇异值分解方法(SVD)得到速率的最小范数解, 从而获得某一时间段的形变相位和地形等噪声相位。

3 野牛沟地表变形特征与成因

本研究提及的 InSAR 地表变形方向均为降轨 LOS(line of sight)向, InSAR 解算野牛沟地表变形见图 3, 受地形地貌、积雪等因素影响, 南北两侧山脉失相干较严重。河谷内部地势较平坦, 植被类型主要为高寒草甸, 地表变形主要受冻融作用影响, 年均形变速率较小, 为 $-10 \sim 10$ mm/a; 南北两侧山脉部分沟谷、边坡受融水侵蚀作用, 年均形变速率较大, 最大可达 -162 mm/a。



A、B、C: 地表变形空间特征研究区; PT1、PT2: 地表变形时间特征研究区

图3 野牛沟地表年均形变速率

Fig. 3 Average annual deformation of Yenuigou

3.1 冻融作用

为探究野牛沟地区冻融过程,采用季节-趋势分解法(Seasonal-Trend decomposition using LOESS, STL)对A区域2021年时序变形进行季节性分解见图4。A区域位于河谷内部山前平原(图3),植被类型为高寒草甸(Wang et al., 2017),西、北区域海拔位于多年冻土下界以上,东南区域位于多年冻土下界以下。该区域地表变形表现出明显的季节性特征,

4~5月随着温度升高地表开始出现融沉,季节变形量逐渐增大并持续至9~10月,东南部季节冻土区融沉量更大。分别在多年冻土区与季节冻土区选择典型点PT1和PT2进行长时间序列地表变形分析如图5所示,季节冻土区与多年冻土区地表变形呈现相同的季节性特征,受局地因素影响,地表冻融变形量级有较大差异,年际地表冻胀、融沉幅度约为10~20 mm。

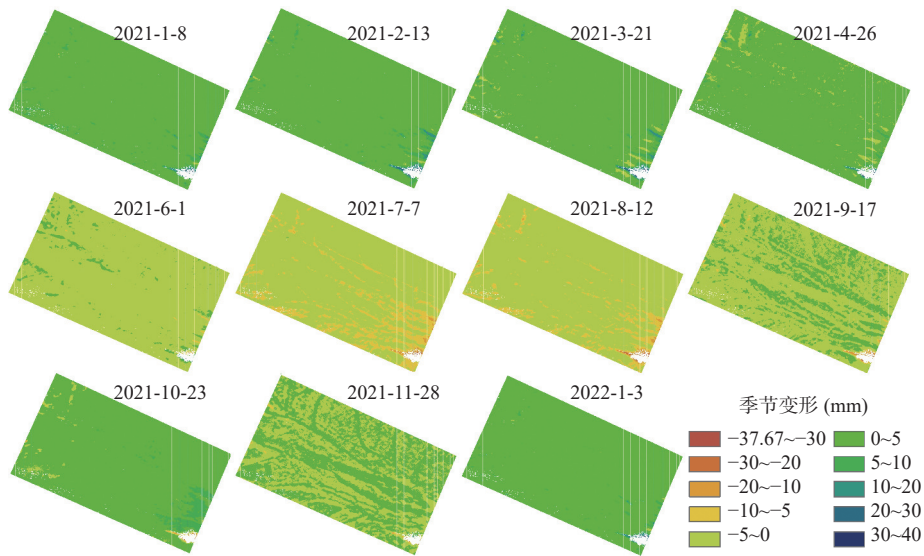


图4 A区域季节变形特征

Fig. 4 Seasonal deformation characteristics of region A

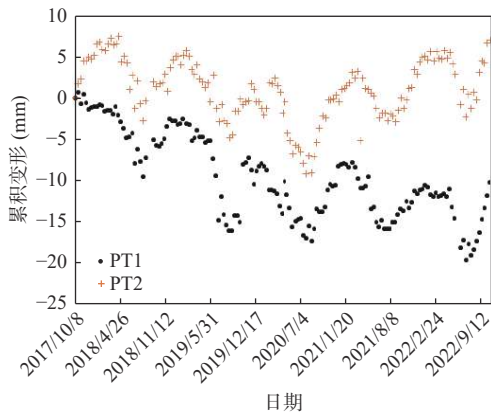


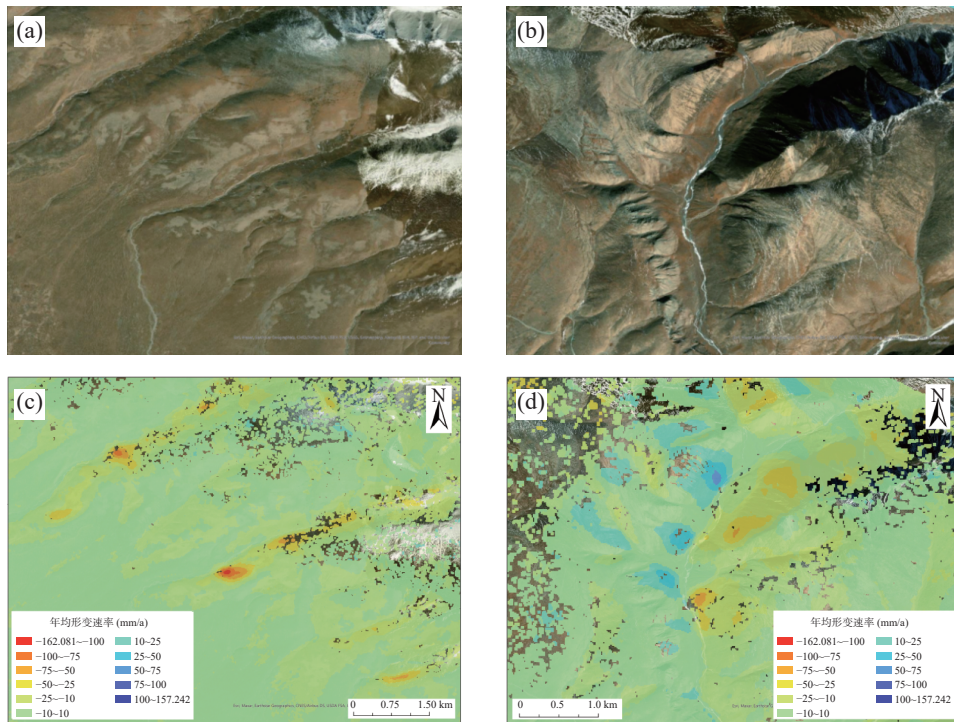
图5 PT1与PT2冻融过程地表变形-时间序列

Fig. 5 Time series deformation characteristics caused by freeze-thaw process of PT1 and PT2

3.2 水力侵蚀作用

水力侵蚀主要表现为冰川积雪融水对坡体的侵蚀和河流对边坡的侵蚀作用。由于靠近冰川积雪区域失相干较为严重,笔者仅对河流边坡侵蚀变形进行分析。图6所示为图3中B、C两区域河流侵蚀边坡

变形空间特征。B区域两条河流边坡均出现明显变形且只发生在一侧,形变速率约为50 mm/a(图6c); C区域两侧坡体均有变形分布,呈现漏斗状特征,漏斗中心变形速率可达80~100 mm/a,两侧边坡形变信号一正一负是坡向与雷达视角原因所致(王燕燕等, 2019)(图6d)。受青藏高原和大陆性气候影响,野牛沟属高原(亚)高寒带半干旱气候,年降水量少且集中,河流补给主要来源于冰川和积雪融水(Cheng et al., 2014)。夏季温度升高时,冰雪融水补给河流,河流流量增加对地表侵蚀作用增强导致边坡形变速率较大;而冬季冰雪以固态形式存在,河流流量减少,对边坡的侵蚀作用减弱,地表基本处于平稳状态。因此河流边坡地表变形曲线呈现明显的季节性特征(图7)。其中C区域地表变形在冬季出现了小幅度的反弹,可能与地表水位较浅、坡体局部区域含水量较高有关,降温时地表首先冻结阻碍了地下水的流动,使得地下水在此区域进一步富集冻结,导致地表出现冻胀抬升(吴吉春等, 2007)。



(a). B 区域遥感影像; (b). C 区域遥感影像; (c). B 区域年均形变速率; (d). C 区域年均形变速率

图6 河流侵蚀边坡变形分布

Fig. 6 Surface deformation caused by hydraulic erosion

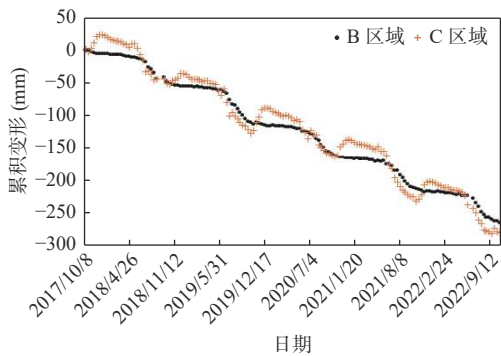


图7 河流侵蚀边坡变形-时间序列

Fig. 7 Time series deformation characteristics caused by hydraulic erosion

4 地表变形与土壤水热过程

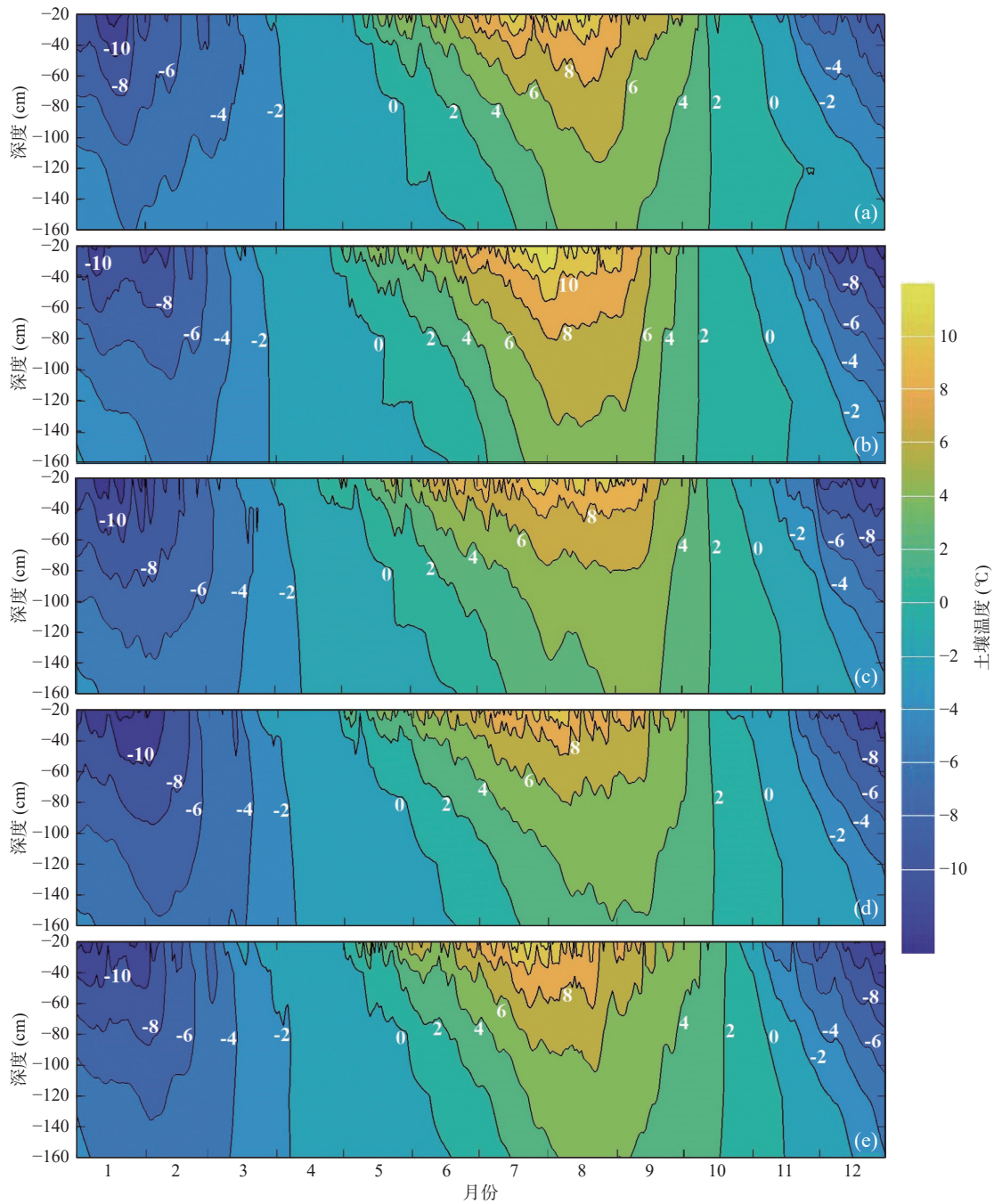
4.1 土壤冻融过程

大沙龙站位于祁连县西侧沙龙滩地区,海拔 3 739 m,下垫面为沼泽化高寒草甸。大沙龙站在 0 cm、-4 cm、-10 cm、-20 cm、-40 cm、-80 cm、-120 cm、-160 cm 处记录土壤温度和土壤含水量,观测间隔 10 min,数据周期为 2017 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日。为方便对比,笔者根据 SAR 成像时间对气象观测数据进

行了筛选。

由于浅层土壤温度的日变化十分活跃,难以反映季节特征,仅对-20 cm 深度及以下的土壤温度进行分析。图 8 为 2017~2021 年大沙龙站不同深度土壤温度随时间的变化过程(2022 年数据缺失较为严重)。以 2017 年为例,从季节冻融过程来看,5 月 6 日深度-20 cm 处开始融化,随着时间的推移融化锋面逐渐下移,该过程土体处于吸热状态,融化过程是自上而下的,6 月 25 日融化深度超过-160 cm,至此观测深度的土体全部处于负温状态,历时 50 d。11 月 1 日深度-20 cm 处开始冻结,在-160 cm 深度冻结始日则为 11 月 16 日,冻结过程是自上而下和自下而上的双向过程,土体处于上下温度低、中部温度高的状态(王庆锋等, 2016; 马晶晶等, 2022),冻结锋面交汇于深度约-120 cm 处。值得注意的是,由于温度向下传输需要一定的过程(Li et al., 2015),因此地表冻融始日较-20 cm 处应有所提前。

其他年份冻融过程与 2017 年类似,差异主要体现在冻融过程的时间节点和不同深度的温度分布。从历年数据对比来看,以-4℃等温线为例,其下探深度逐年增加、历时变长。从冻结锋面来看,每年交汇深度基本不变,而交汇时间逐渐提前,分别为 2017 年



a. 2017年; b. 2018年; c. 2019年; d. 2020年; e. 2021年

图8 大沙龙站活动层土壤温度分层变化过程

Fig. 8 Stratified change process of soil temperature in the active layer at the Dashalong

11月30日、2018年11月20日、2019年11月15日、2020年11月15日、2021年11月15日。以上数据表明,大沙龙站具有较小的降温趋势,与Sun等(2022)在野牛沟的研究结论一致。

4.2 地表变形与土壤水热过程

大沙龙站 InSAR 地表变形与土壤温湿度分层数据随时间变化的关系见图9,地表融沉变形始日大约

在4月底至5月初,冻胀变形始日在10月初,较深度-20 cm处0℃等温线出现始日有所提前,原因已在前文述及;各层土壤温度在2017和2021年略高,2018年与2019年略低,土壤含水量则呈现明显的降低趋势。地表冻胀、融沉幅度与土壤含水量变化过程一致,呈逐年降低的趋势。从表1地表变形与土壤水热过程的相关性来看,地表变形与不同深度的土壤温度均

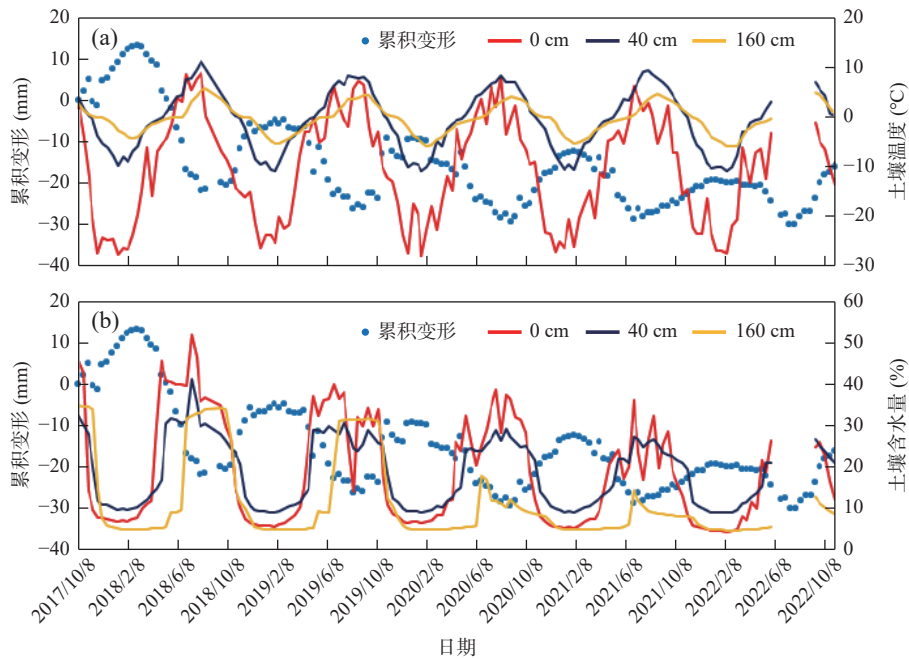


图9 形变与土壤温湿度 (a) 和土壤含水量 (b) 时间序列

Fig. 9 (a)Time series of surface deformation with soil temperature and (b)humidity, respectively

表 1 地表形变与土壤温湿度相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient between surface deformation with soil temperature and humidity, respectively

深度 (cm)	0	4	10	20	40	80	120	160
土壤温度	-0.479	-0.455	-0.493	-0.513	-0.522	-0.517	-0.492	-0.471
土壤含水量	/	-0.293	-0.415	-0.396	-0.409	-0.240	-0.209	-0.186

表现出较高的负相关性, 在-40 cm 处相关性最显著 ($R=-0.513, P<0.001$); 与不同深度的土壤含水量相关性差异较大, 在-10~-40 cm 处相关性最显著 ($R=-0.415, P<0.001$)。

土壤水分在热量传输过程中发挥着重要作用(杜冉等, 2022), 季节变形幅度与土壤含水量有密不可分的关系。假设地表冻胀、融沉主要是水冰相变体积差异导致的, 理想状态下季节融沉量 d_{season} 与单位体积水 z_{water} 的关系可以表示为:

$$\Delta d_{season} = \frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_i} z_{water} \approx 0.09 z_{water} dh \quad (3)$$

其中: ρ_w 和 ρ_i 分别为水和冰的密度, 即 100 mm 的水柱冻结为冰将产生约 9 mm 的体积变化(Chen et al., 2020)。考虑到土壤孔隙度等因素, 并非所有水分的冻融过程均会对地表冻胀融沉产生贡献, 因此采用极差表示年内水分完全冻结和完全融化的量以及由此产生的冻胀融沉量并研究两者的关系(Chen et al., 2022a)。2018~2021 年 4 个完整观测年的地表变形极

差与-40 cm 土壤含水量极差具有良好的线性关系(图 10), 地表季节变形幅度与活动层土壤含水量满足式(3)正比关系, 即土壤含水量越高的年份, 水和冰转换所产生的体积变化更大, 进而导致地表冻胀、融沉幅度更大(陈玉兴等, 2019)。Chen 等(2022b)在对青藏公路沿线 InSAR 地表变形监测中发现, 土壤含水量少的区域季节融沉幅度较小, 而在土壤含水量明显饱

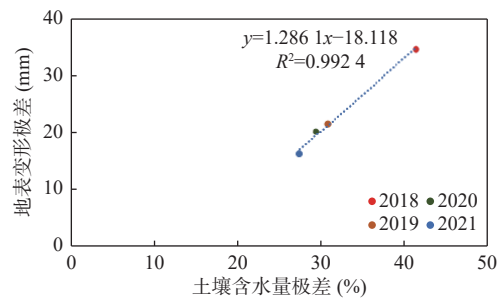
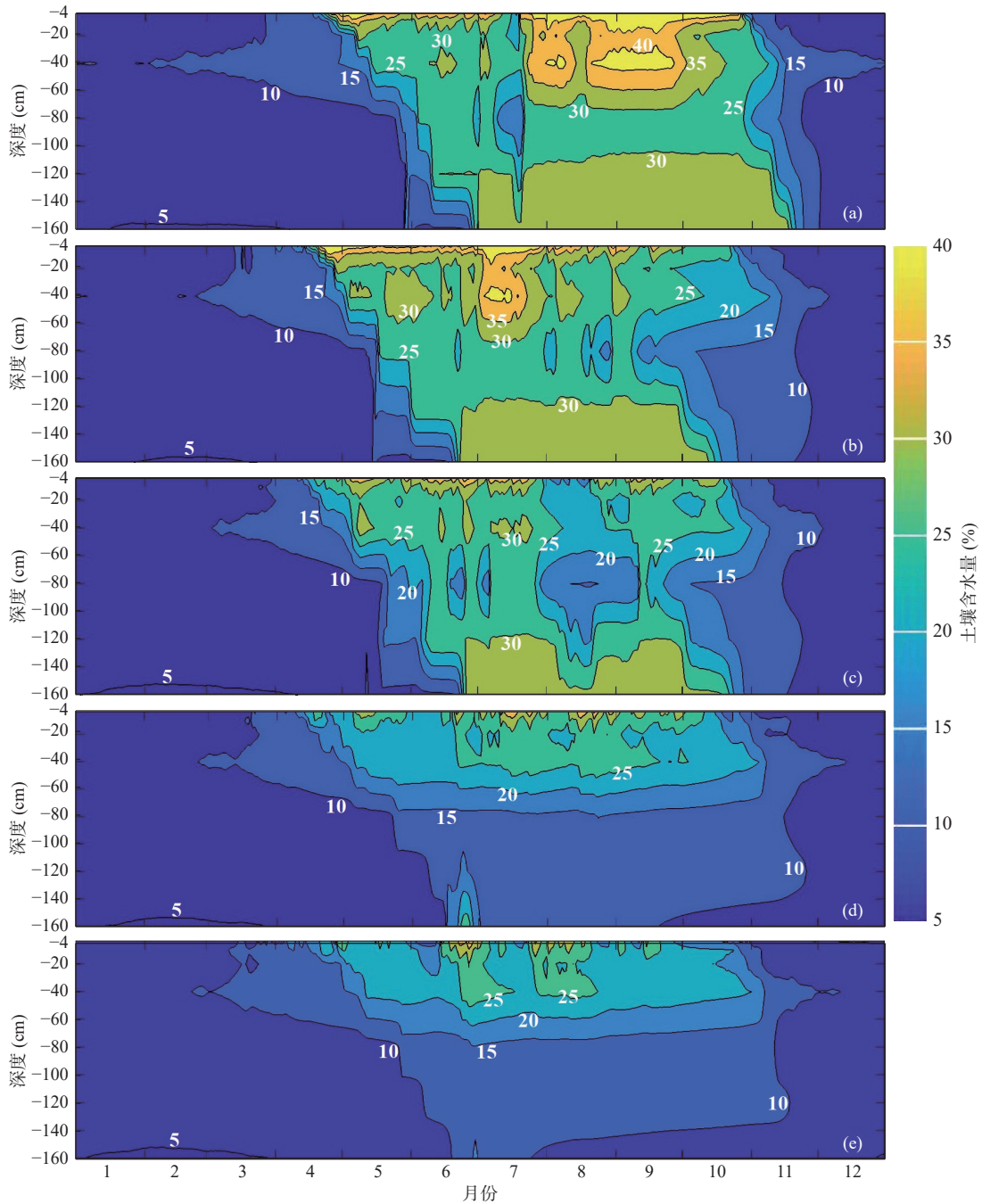


图10 -40 cm 处土壤含水量极差与地表变形极差回归分析
Fig. 10 Regression analysis of inter-annual difference of soil moisture content and surface deformation at the depth of -40 cm

和的区域更大。深度-10~-40 cm(尤其是-40 cm)是该区域土壤水分富集区(图 11),是地表变形与土壤温湿度在-40 cm处相关性更显著的主要原因。同时,

图 11 融化期深度-40 cm 土壤含水量呈现较大幅度的逐年降低趋势,这也是图 9 地表冻胀、融沉幅度逐年减小的主要成因。



a. 2017年; b. 2018年; c. 2019年; d. 2020年; e. 2021年

图 11 大沙龙站活动层土壤含水量分层变化过程

Fig. 11 Stratified change process of soil moisture content in the active layer at the Dashalong

5 结论

(1)SBAS-InSAR 技术较好地揭露了野牛沟的地

表变形特征。结合遥感影像与地表时序变形,发现由冻融过程和水力侵蚀过程引起的地表变形最为显著,地表变形呈现明显的季节性特征,冻融作用引起的年际地表冻胀、融沉幅度为 10~20 mm;水力侵蚀引起

的年际地表变形通常超过 50 mm。

(2) 野外观测数据表明大沙龙站具有降温趋势, 2017~2021 年活动层负温等温线下探深度逐渐增加、历时加长, 地表冻结始日和活动层冻结锋面交汇日期逐渐提前。

(3) 地表变形与土壤温度、土壤水分具有较好的相关性, 在土壤水分富集区(-40 cm 处)更显著, 相关系数分别为-0.522、-0.415($P < 0.001$)。土壤水分的变化对地表冻胀、融沉幅度变化的影响更显著, 2018~2021 年 4 个完整观测年的地表冻胀、融沉幅度与-40 cm 土壤含水量极差具有良好的线性关系。

致谢: 大沙龙站观测数据数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn), 在此一并致谢。

参考文献(References):

- 陈玉兴, 江利明, 梁林林, 等. 基于 Sentinel-1 SAR 数据的黑河上游冻土形变时序 InSAR 监测[J]. 地球物理学报, 2019, 62(7): 2441-2454.
- CHEN Yuxing, JIANG Liming, LIANG Linlin, et al. Monitoring permafrost deformation in the upstream Heihe River, Qilian Mountain by using multi-temporal Sentinel-1 InSAR dataset[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(7): 2441-2454.
- 杜冉, 彭小清, 金浩东, 等. 祁连山俄博岭地区热融洼地与冻胀草丘活动层融化深度差异性对比研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 188-202.
- DU Ran, PENG Xiaoqing, JIN Haodong, et al. Comparative study on active layer depth differences between hummocks and thermokarst depressions in the Eboling area of the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1): 188-202.
- 范鹏, 王硕, 张正加, 等. 高分辨率时序 InSAR 技术在青藏输电杆塔精细形变监测中的应用[J]. 测绘通报, 2021(3): 118-122.
- FAN Peng, WANG Shuo, ZHANG Zhengjia, et al. Deformation monitoring of Qinghai-Tibet transmission tower using high resolution time-series InSAR technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(3): 118-122.
- 冯曼隰, 齐琦, 董英, 等. 利用 Sentinel-1A 数据监测大西安 2019~2022 年大西安地表形变[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 178-185.
- FENG Minxuan, QI Qi, DONG Ying, et al. Monitoring Surface Deformation in Xi'an City from 2019 to 2022 Based on Sentinel-1A Data[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 178-185.
- 郭怀军. 祁连山及邻区第四纪地质与地貌研究[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- GUO Huaijun. An investigation on Quaternary geology and geomorphology of Qilian Mountains and its adjacent areas[D]. Xi'an: North West University, 2017.
- 逯中香, 樊彦国, 李国胜. 利用时序 InSAR 技术监测青藏铁路沿线地表形变[J]. 测绘通报, 2022(3): 138-142+156.
- LU Zhongxiang, FAN Yanguo, LI Guosheng. Monitoring of surface deformation along the Qinghai-Tibet Railway with the time series InSAR technology[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2022(3): 138-142+156.
- 马晶晶, 王佩, 邓钰婧, 等. 青海湖流域高寒草甸季节冻土土壤温湿变化特征[J]. 土壤, 2022, 54(3): 619-628.
- MA Jingjing, WANG Pei, DENG Yujing, et al. Characteristics of Seasonal Frozen Soil Temperature and Moisture Changes in Alpine Meadow in Qinghai Lake Watershed[J]. Soils, 2022, 54(3): 619-628.
- 马素辉, 牟翠翠, 郭红, 等. 祁连山黑河上游多年冻土区不同植被类型土壤有机碳密度分布特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 426-433.
- MA Suhui, MU Cuicui, GUO Hong, et al. Distribution features of permafrost organic carbon density on different vegetation types in the upper reaches of Heihe River, Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 426-433.
- 王庆锋, 金会军, 张廷军, 等. 祁连山区黑河上游高山多年冻土区活动层季节冻融过程及其影响因素[J]. 科学通报, 2016, 61(24): 2742-2756.
- WANG Qingfeng, JIN Huijun, ZHANG Tingjun, et al. Active layer seasonal freeze-thaw processes and influencing factors in the alpine permafrost regions in the upper reaches of the Heihe River in Qilian Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(24): 2742-2756.
- 王燕燕, 于海洋. 九寨沟 M_S7.0 级地震三维同震形变场提取[J]. 测绘科学, 2019, 44(5): 8-13.
- WANG Yanyan, YU Haiyang. Extraction of 3D coseismic deformation field of Jiuzhaigou MS7.0 earthquake[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(5): 8-13.
- 王志伟, 岳广阳, 吴晓东. 青藏高原多年冻土区不同高寒草地类型地表形变特征[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2398-2407.
- WANG Zhiwei, YUE Guangyang, WU Xiaodong. Ground surface deformation characteristics of different alpine-grassland types in the permafrost zones of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2398-2407.
- 吴吉春, 盛煜, 于晖, 等. 祁连山中东部的冻土特征(I): 多年冻土分布[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 418-425.
- WU Jichun, SHENG Yu, YU Hui, et al. Permafrost in the Middle-East Section of Qilian Mountains(I): Distribution of permafrost[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 418-425.
- 吴青柏, 张中琼, 刘戈. 青藏高原气候转暖与冻土工程的关系[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 342-352.
- WU Qingbai, ZHANG Zhongqiong, LIU Ge. Relationships between

- climate warming and engineering stability of permafrost on Qinghai-Tibet plateau[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 342–352.
- 张林梵. 基于时序 InSAR 的黄土滑坡隐患早期识别以白鹿塬西南区为例[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 250–257.
- ZHANG Linfan. Early Identification of Hidden Dangers of Loess Landslide Based on Time Series InSAR: A Case Study of Southwest Bailuyuan[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 250–257.
- 张廷军. 全球多年冻土与气候变化研究进展[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(1): 27–38.
- ZHANG Tingjun. Progress in global permafrost and climate change studies[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(1): 27–38.
- Cao B, Gruber S, Zhang T, et al. Spatial variability of active layer thickness detected by ground-penetrating radar in the Qilian Mountains, Western China[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, 122(3): 574–591.
- Cao B, Zhang T J, Peng X Q, et al. Thermal characteristics and recent changes of permafrost in the upper reaches of the Heihe River Basin, Western China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(15): 7935–7949.
- Che T, Li X, Liu S, et al. Integrated hydrometeorological, snow and frozen-ground observations in the alpine region of the Heihe River Basin, China[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11: 1483–1499.
- Chen J, Wu Y, O'Connor M, et al. Active layer freeze-thaw and water storage dynamics in permafrost environments inferred from InSAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 112007.
- Chen J, Wu T, Liu L, et al. Increased water content in the active layer revealed by regional-scale InSAR and independent component analysis on the central Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022a, 49(15).
- Chen J, Wu T, Zou D, 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*, 2022b, 268: 112778.
- Cheng G, Li X, Zhao W, et al. Integrated study of the water-ecosystem-economy in the Heihe River Basin[J]. *National Science Review*, 2014, 1(3): 413–428.
- Daout S, Doin M P, Peltzer G, et al. Large-scale InSAR monitoring of permafrost freeze-thaw cycles on the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(2): 901–909.
- Gao X, Lin K, Liu M, et al. Dynamic changes in permafrost distribution over China and their potential influencing factors under climate warming[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 874: 162624.
- Han P, Huang C, Liang S, et al. Variation characteristics and quantitative study of permafrost degradation in the upper reaches of Heihe River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127942.
- Liu Lin, Schaefer K, Zhang Tingjun, et al. Estimating 1992–2000 average active layer thickness on the Alaskan North Slope from remotely sensed surface subsidence[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117(F1): F01005.
- Liu S, Li X, Xu Z, et al. The Heihe Integrated Observatory Network: A basin-scale land surface processes observatory in China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17: 180072.
- Liu S, Che T, Xu Z, et al. Qilian Mountains integrated observatory network: Dataset of Heihe integrated observatory network (automatic weather station of Dashalong station, 2020)[DB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, 2021.
- Li Z, Zhao R, Hu J, et al. InSAR analysis of surface deformation over permafrost to estimate active layer thickness based on one-dimensional heat transfer model of soils[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15542.
- Peng X, Zhang T, Frauenfeld, et al. Spatiotemporal changes in active layer thickness under contemporary and projected climate in the Northern Hemisphere[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(1): 251–266.
- Sun W, Zhang T, Gary, et al. Observed permafrost thawing and disappearance near the altitudinal limit of permafrost in the Qilian Mountains[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13: 642–650.
- Wang Chao, Zhang Zhengjia, Zhang Hong, et al. Active Layer Thickness Retrieval of Qinghai-Tibet Permafrost Using the TerraSAR-X InSAR Technique[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(11): 4403–4413.
- Wang Q, Zhang T, Jin H, et al. Observational study on the active layer freeze-thaw cycle in the upper reaches of the Heihe River of the north-eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Quaternary International*, 2017, 440: 13–22.
- Wang L, Philip Marzahn, Monique Bernier, et al. Sentinel-1 InSAR measurements of deformation over discontinuous permafrost terrain, Northern Quebec, Canada[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 111965.
- You Q, Cai Z, Pepin N, et al. Warming amplification over the Arctic Pole and Third Pole: trends, mechanisms and consequences[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 217: 103625.
- Zhao L, Zou D, Hu G, et al. Changing climate and the permafrost environment on the Qinghai-Tibet(Xizang) Plateau[J]. *Permafrost Periglacial Process*, 2020, 31: 396–405.
- Zhang Xuefei, Zhang Hong, Wang Chao, et al. Time-series InSAR monitoring of permafrost freeze-thaw seasonal displacement over Qinghai-Tibetan Plateau using Sentinel-1 data[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 1000.