

引用格式:徐马强,庞文龙,张震,刘春霖,张乐乐.三江源地区近地表土壤冻融时空变化[J].山地学报,2024,42(3):347-358.

XU Maqiang, PANG Wenlong, ZHANG Zhen, LIU Chunlin, ZHANG Lele. Spatio-temporal variation of freezing-thawing state of near surface soil in the Three-Rivers Headwater region of Tibetan Plateau, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(3): 347-358.

三江源地区近地表土壤冻融时空变化

徐马强¹, 庞文龙^{1*}, 张震¹, 刘春霖¹, 张乐乐^{2,3}

(1. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 西宁 810000; 2. 青海师范大学 a. 地理科学学院;
b. 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008; 3. 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008)

摘要:近地表土壤冻融过程影响土壤和大气之间的水分与能量交换,研究其动态变化对揭示多年冻土退化过程具有重要意义。受限于高海拔地区地表观测数据的获取,过去多关注多年冻土区土壤冻融水热运移特征,缺乏对土壤冻融长期变化趋势及其时空变化特征的研究。青海三江源地区是青藏高原多年冻土分布区,是全球气候变化的敏感区和关键带。本文基于野外观测数据评估 ERA5-Land 地温数据的精度,分析 1980—2021 年三江源地区近地表土壤冻融时空变化特征。结果表明:(1) ERA5-Land 表层土壤温度数据与国家气象局 23 个站点观测数据的相关系数均值为 0.94,均方根误差均值为 4.49 °C;与 6 个活动层站点观测数据的相关系数均值为 0.96,均方根误差均值为 2.57 °C,能够满足三江源地区土壤冻融时空变化研究要求。(2) 三江源地区地表土壤温度年均值、春季、夏季、秋季和冬季空间分布均表现为东部高、西部低;近地表土壤温度夏季增幅最大,秋季增幅最小,春季、夏季增幅整体高于秋季、冬季。(3) 1980—2021 年三江源地区冻结天数和冻结持续时间呈现显著减少趋势,减小幅度分别为 4.99 d/10a 和 6.77 d/10a;冻结起始时间推迟,变化幅度为 3.43 d/10a;冻结结束时间提前,变化幅度为 3.35 d/10a。(4) 三江源地区西部高海拔地区植被覆盖度远低于东部低海拔区,这可能是造成三江源地区低海拔区域冻结天数减小幅度明显低于高海拔区域的一个重要原因。本研究利用 ERA5-Land 数据填补了三江源地区土壤冻融时空变化的宏观认识,可为进一步准确认识三江源地区多年冻土空间退化特征提供参考。

关键词:三江源;ERA5-Land;土壤冻融;时空变化

中图分类号: K903

文献标志码: A

三江源位于青藏高原腹地,是长江、黄河、澜沧江的发源地,也是中国西部重要的生态屏障,对维持中国乃至亚洲的生态安全具有重要意义^[1-2]。三江源地区海拔高、气候寒冷,是青藏高原多年冻土分布区^[3]。高原寒区地表是多年冻土和大气交换的接触面,全球气候变化影响冻融循环,改变地表与大气的能量与水分交换过程,影响区域生态水文、冻土退化等过程。三江源地区土壤冻融变化及其生态环境

效应一直是国内外关注的热点问题之一。

研究表明^[4],三江源地区年平均气温倾向率为 0.36 °C/10a。基于地面站点观测数据,国内学者分析了三江源季节冻土区土壤冻融状态时空变化及影响因素^[5-6]。然而,由于地面观测站点主要分布于低海拔季节冻土区,而在高海拔多年冻土区站点稀疏且布设较晚,导致前期研究集中于多年冻土区土壤冻融期间水热运移特征的分析^[7-8],缺乏对长期

收稿日期(Received date): 2022-09-13; 改回日期(Accepted date): 2024-01-19

基金项目(Foundation item): 中国地质调查局地质调查项目(ZD20220223)。[Project of China Geological Survey(ZD20220223)]

作者简介(Biography): 徐马强(1994-),男,甘肃陇南人,本科,工程师,主要研究方向:环境遥感。[XU Maqiang(1994-), male, born in Longnan, Gansu province, B.S., engineer, research on natural resource survey] E-mail: 651110732@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 庞文龙(1989-),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:生态修复、自然资源综合观测。[PANG Wenlong(1989-), M. Sc. candidate, male, senior engineer, research on ecological restoration and natural resource survey] E-mail: pwl01306320@126.com

变化趋势的研究。利用遥感、再分析数据和模型方法,近年来学者利用 CYGNSS-GNSS-R 数据、MERRA2 再分析数据和 CLM4.5 陆面过程模型分析了青藏高原地区近地表土壤冻融循环特征^[9-11],但上述数据成果分辨率不高、适用性低。

ERA5-Land 是欧洲中期天气预报中心发布的第五代陆面再分析数据集,分辨率大幅度提升^[12]。已有学者基于 ERA5-Land 数据在中国东北和河西走廊地区开展了地表土壤冻融方面的研究^[13-14],但有关三江源地区的研究至今未见报道。

本研究基于 ERA5-Land 地表温度数据,计算了三江源地区 1980—2021 年冻结起始时间、冻结结束时间、冻结持续时间和冻结天数,并基于这些参数分析了三江源地区近地表土壤冻融时空变化特征。研究结果填补了三江源地区地表冻融变化的研究空白,也为分析三江源地区多年冻土退化成因提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江源地区位于中国青海省南部,是长江、黄河、澜沧江的发源地和中国淡水资源的重要补给地,也是亚洲、北半球乃至全球气候变化的敏感区和重要启动区。研究区范围为 89°40′~102°20′E 和 31°35′~37°13′N(图 1),总面积约 $36.93 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔范围为 1982~6481 m,地形整体西高东低。

1.2 数据来源

1.2.1 观测数据

在研究区内,中国气象局共布设站点 23 个,分别为共和、贵德、五道梁、兴海、贵南、同德、尖扎、泽

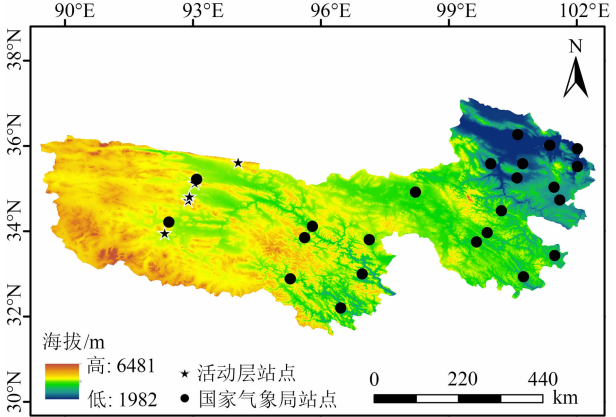


图 1 三江源地理位置及观测站点

Fig. 1 Geographic location and observation stations of the Three-Rivers Headwater region, China

库、同仁、沱沱河、治多、杂多、曲麻莱、玉树、玛多、清水河、玛沁、甘德、达日、河南、久治、囊谦和班玛。观测项目包含 10 cm 深度处的日平均地温,本研究获取的地温观测数据时间为 2011—2020 年。此外,南京信息工程大学和中国科学院西北生态环境资源研究院在青藏高原布设有 12 个冻土活动层观测站点^[15-16],其中在三江源地区的站点有 6 个,分别为 Ch01、Ch06、QT01、QT03、QT05 和 QT08。活动层站点的观测项目包含 10 cm 深度处的日平均地温,观测数据可在国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>)下载,详细内容见表 1。

1.2.2 ERA5-Land 再分析数据

ERA5-Land 是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的全球再分析数据集^[12, 17]。该数据集通过将 ERA5 气候再分析数据的陆地场大气变量作为驱动,采用修正的 HTESSEL、CY45R 陆面水文模式模拟得到^[13]。与以往再分析资料相比,ERA5-Land 分

表 1 三江源地区冻土活动层观测站点信息

Tab. 1 Observation station information of the frozen soil active layer in the Three-Rivers Headwater region

站点	经度/(°)	纬度/(°)	地温观测深度/cm	观测时间	地表覆被
Ch01	34.73	92.89	10、50、100、160	2003-01—2014-09	高寒草甸
Ch06	35.62	94.06	10、50、100、180	2005-01—2018-12	高寒草原
QT01	35.14	93.04	10、50、100、180	2004-01—2013-12	高寒草甸
QT03	34.82	92.92	10、50、90、200、240	2004-01—2014-12	高寒草甸
QT05	33.96	92.34	10、50、90、210、315	2004-01—2013-12	高寒草甸
QT08	35.22	93.08	10、40、120、200、240	2010-01—2018-12	高寒荒漠

分辨率更高,其空间分辨率可达到 9 km,时间分辨率可达到 1 h。ERA5-Land 观测项目包括地表温度,但当有积雪覆盖时,其代表的是雪表温度,并非 0 cm 地温。ERA5-Land 的第一层(0~7 cm)土壤温度与 0 cm 土壤温度数据相差不大,因此以往研究普遍采用该层温度来研究近地表土壤冻融状况^[18]。

1.3 数据分析方法

1.3.1 土壤冻融判定方法

土壤冻融的判定方法较多,在青藏高原地区普遍采用的方法是将日最低地表温度低于 0 °C 认定为冻结状态^[19],本研究也采用该方案。每年地表开始冻结之后首次出现日最低地表温度低于 0 °C 的日数为冻结起始时间,冻结末期最后一次出现日最低地表温度低于 0 °C 的日数为冻结结束时间。从冻结起始时间到冻结结束时间经历的天数就是冻结持续时间,冻结天数则是日最低地表温度低于 0 °C 的天数。由于冻结前期和末期会出现日最低地表温度高于 0 °C 的现象,因此冻结天数一般小于冻结持续时间。

1.3.2 ERA5-Land 数据精度评价方法

ERA5-Land 作为一种间接获取地表温度数据的产品,需要对其精度进行评估。将国家气象信息中

心 23 个站点和南京信息工程大学、中国科学院西北生态环境资源研究院 6 个活动层观测站 10 cm 地温数据作为参考,提取 ERA5-Land 数据中对应格点的时间序列,并选用相关系数(r)和均方根误差(RMSE)评估 ERA5-Land 数据的精度。 r 和 RMSE 的计算公式可以在以往研究中获取^[17, 20]。

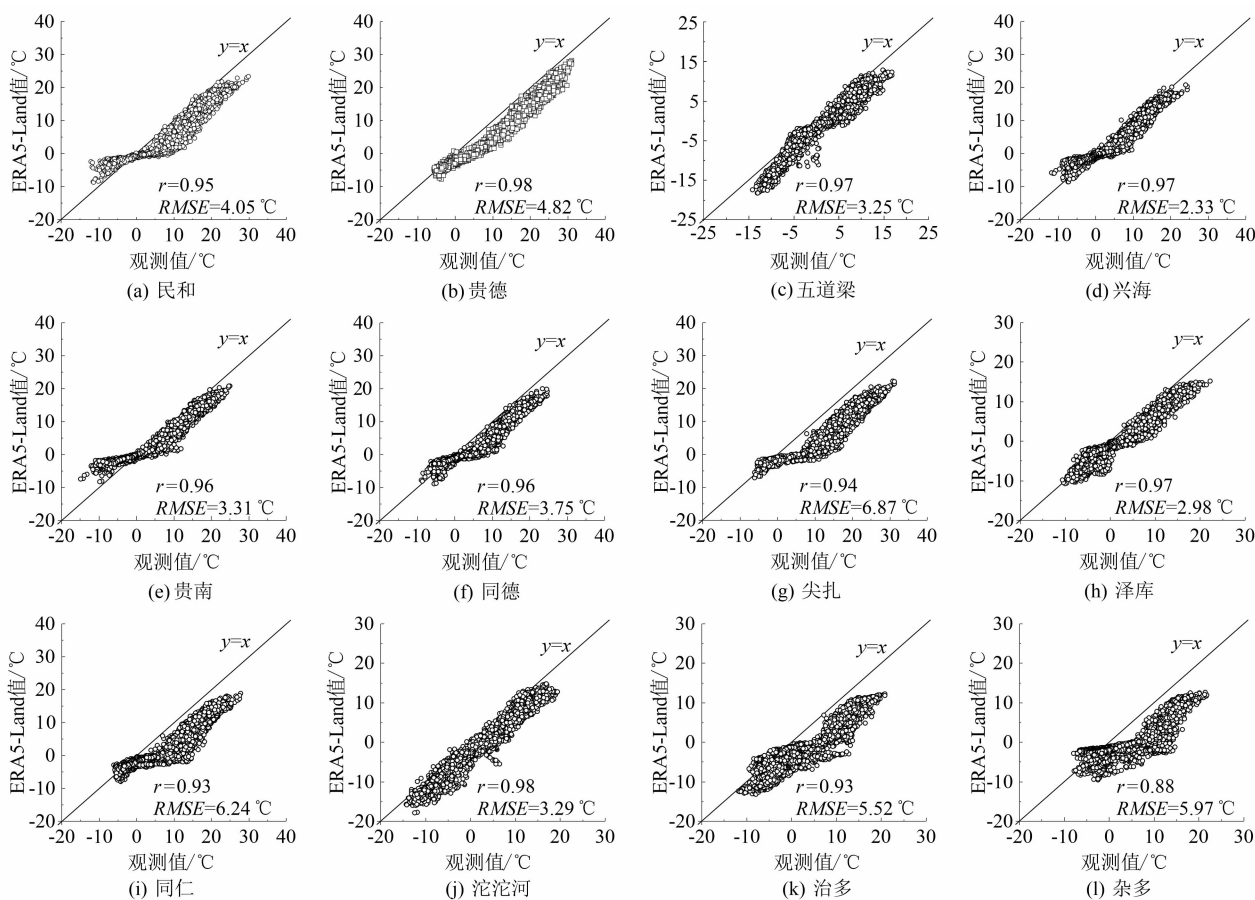
1.3.3 变化趋势分析

本研究采用一元线性回归分析地表温度、冻结起始时间、冻结结束时间、冻结持续时间和冻结天数的变化特征。当斜率为正值时,则代表为上升趋势;当为负值时则代表下降趋势。Mann-Kendall 趋势检验方法用于判定变化趋势的显著性,该方法是一种非参数检验方法,最早由 Mann^[21] 等于 1945 年提出,目前已经被广泛应用于气象、水文、生态等时间序列变化研究^[22-24]。

2 结果分析

2.1 ERA5-Land 与观测地表温度对比

基于观测数据,本研究首先对 ERA5-Land 地表温度数据在三江源地区的准确度进行评价。图 2 为



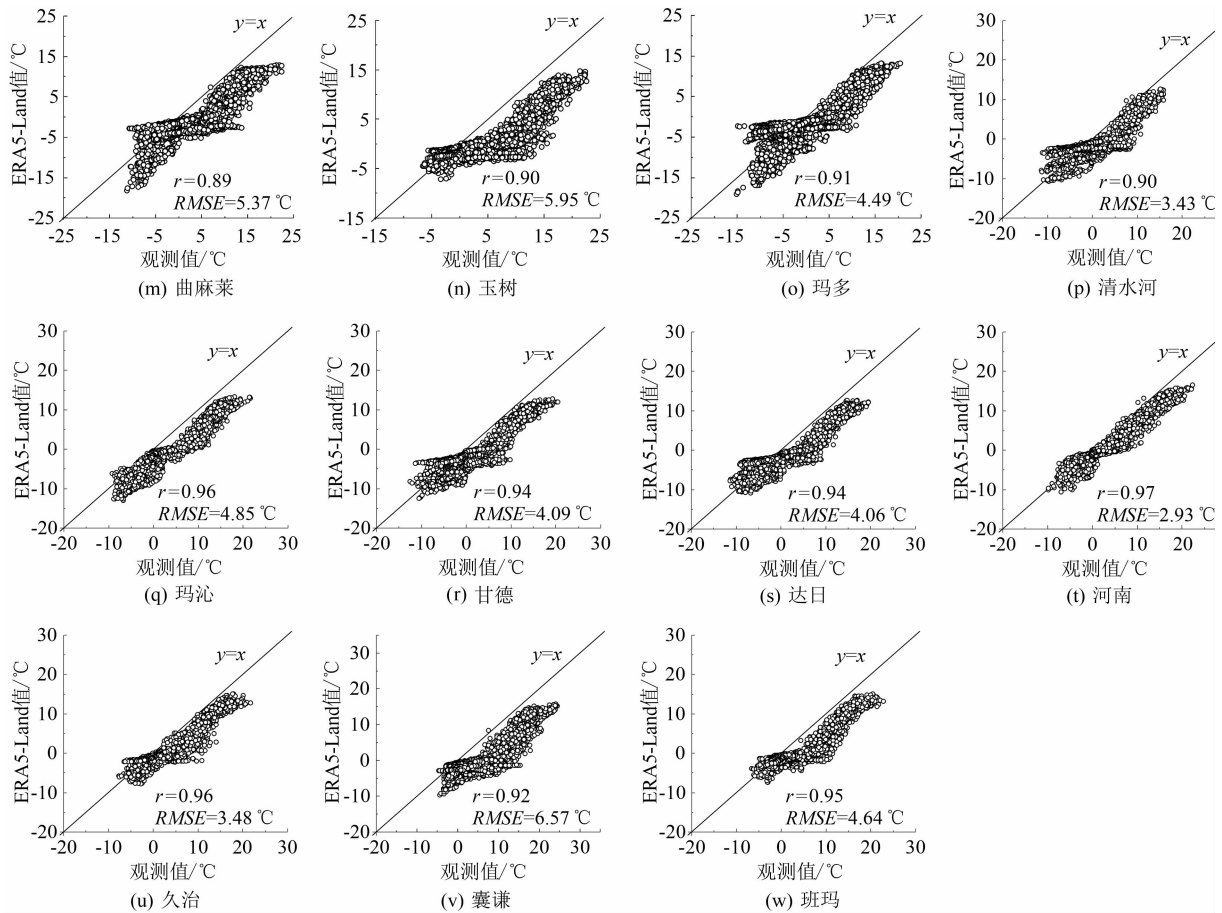


图2 ERA5-Land 与国家气象局站点观测日平均地表温度散点图

Fig. 2 Scatter plots of the daily average surface temperature from ERA5-Land dataset and China Meteorological Administration

ERA5-Land 与 23 个国家气象信息中心站点观测日平均地表温度散点图。ERA5-Land 日平均地表温度与国家气象局站点观测数据的相关系数均值为 0.94,除玉树和曲麻莱站的相关系数为 0.88 和 0.89 外,其他站点的相关系数都在 0.9 以上。ERA5-Land 日平均地表温度与观测值的 RMSE 为 $2.33^{\circ}\text{C} \sim 6.87^{\circ}\text{C}$,平均值为 4.49°C 。图 3 为 ERA5-Land 与 6 个活动层站点日平均地表温度散点图。通过计算数据精度指标,得出 Ch01、Ch06、QT01、QT03、QT05 和 QT08 站点 ERA5-Land 与观测数据的 r 值分别为 0.97、0.94、0.97、0.97、0.96 和 0.97,平均值为 0.96; RMSE 值分别为 2.06°C 、 3.64°C 、 2.02°C 、 2.55°C 、 3.08°C 和 2.07°C ,平均值为 2.57°C 。考虑到 ERA5-Land 格点与国家气象站和冻土活动层站点观测数据空间尺度的差异性,认为 ERA5-Land 表层土壤温度数据能够满足三江源地区土壤冻融时空变化研究要求。

2.2 近地表土壤温度时空变化特征

基于 ERA5-Land 数据,获得三江源地区 1980—2021 年年平均、春、夏、秋和冬季近地表土壤温度空间分布(图 4)。三江源地区年平均、春季、夏季、秋季和冬季地表土壤温度分别为 -0.57°C 、 -2.60°C 、 7.65°C 、 0.51°C 和 -7.97°C ,季节变化表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。从空间分布来看,三江源地区年均值、春季、夏季、秋季和冬季地表土壤温度具有一致性,均表现为东部高、西部低。三江源地区海拔西高东低,是造成近地表土壤温度东高西低的主要原因。图 5 进一步给出了三江源地区 1980—2021 年近地表土壤温度时间序列变化趋势,整体上年平均、春、夏、秋和冬季近地表土壤温度均表现为上升趋势,并且均通过了 Mann-Kendall 趋势检验。从变化率来看,年平均近地表土壤温度变化率为 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。从季节变化来看,夏季近地表土壤温度增幅最大,达到了 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;秋季增幅最

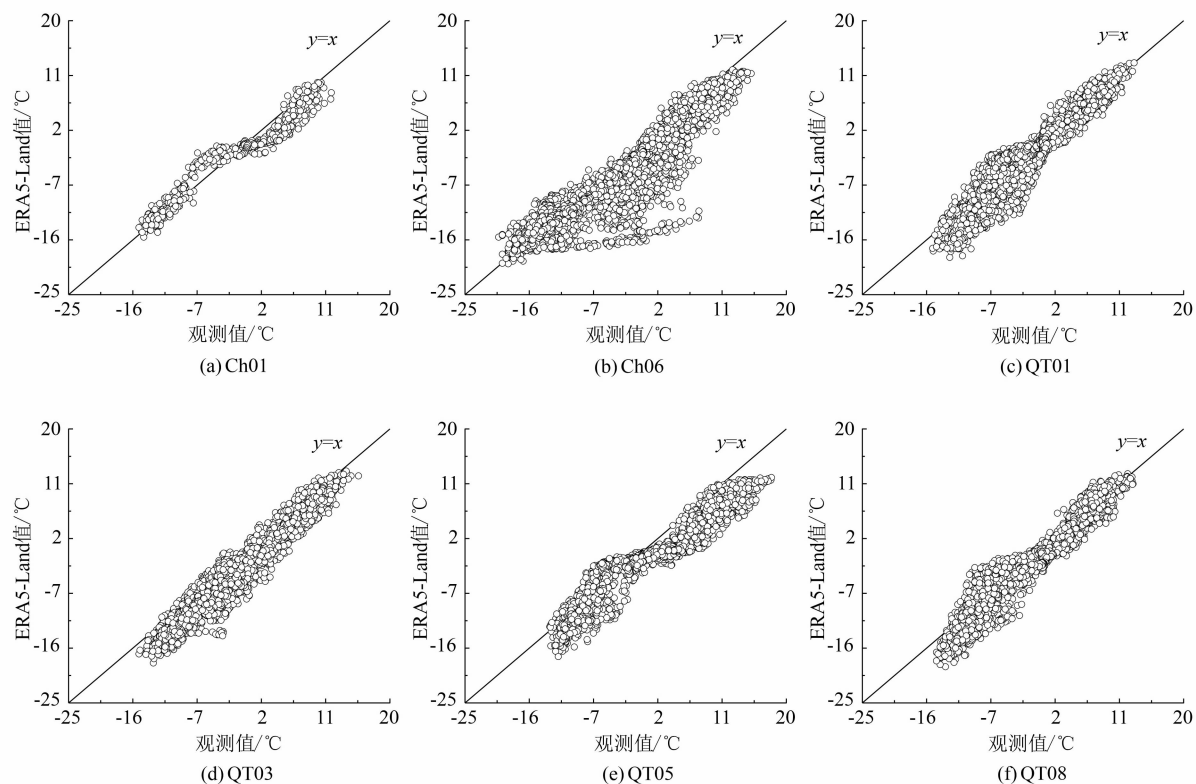


图3 ERA5-Land 与 6 个活动层站点日平均地温散点图

Fig. 3 Scatter plots of the daily average surface temperature from ERA5-Land dataset and six active layer stations

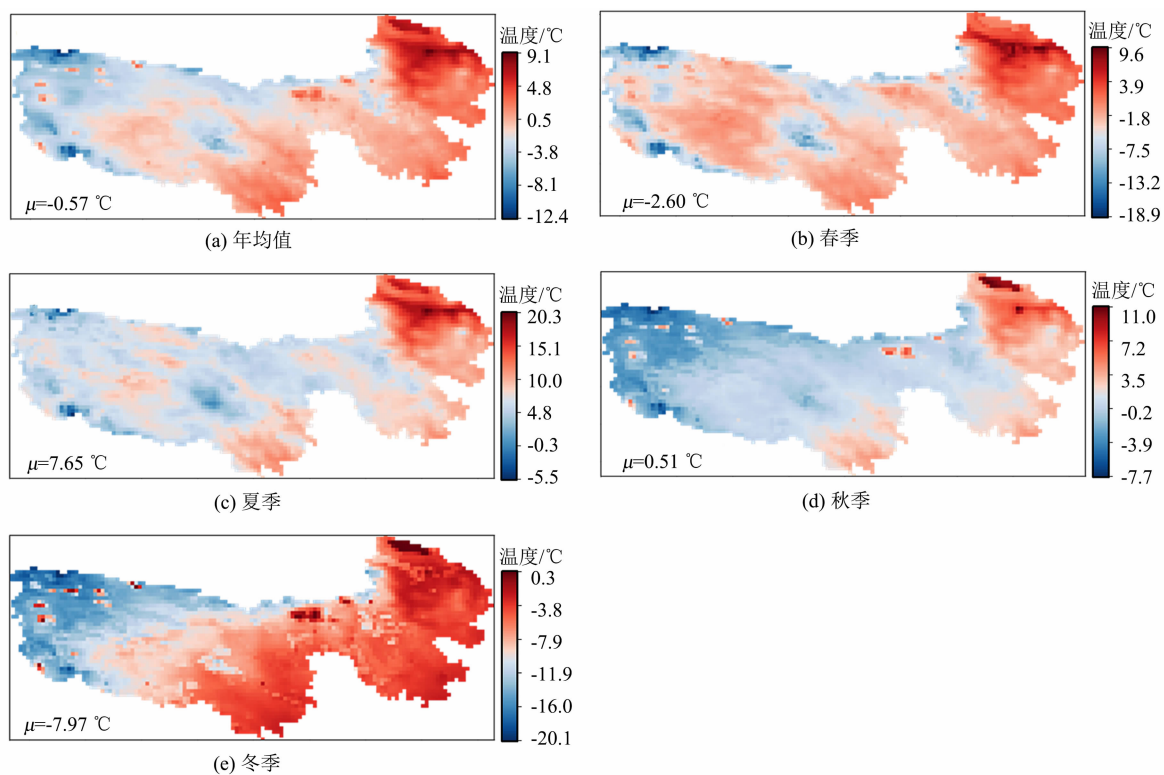


图4 三江源地区 1980—2021 年平均近地表土壤温度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the average near surface soil temperature in the Three-Rivers Headwater region from 1980 to 2021

小,为 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;春、夏季的近地表土壤温度增幅整体上高于秋、冬季。

2.3 近地表土壤冻融状况时空变化特征

图 6 为三江源地区 1980—2021 年平均冻结天数、冻结持续时间、冻结起始时间和冻结结束时间

的空间分布。冻结天数和冻结持续时间的空间分布具有较好的一致性,表现为西部高、东部低,冻结持续时间整体上略大于冻结天数。冻结起始时间和冻结结束时间的空间分布相反,西部冻结起始时间早于东部,而冻结结束时间晚于东部,这也

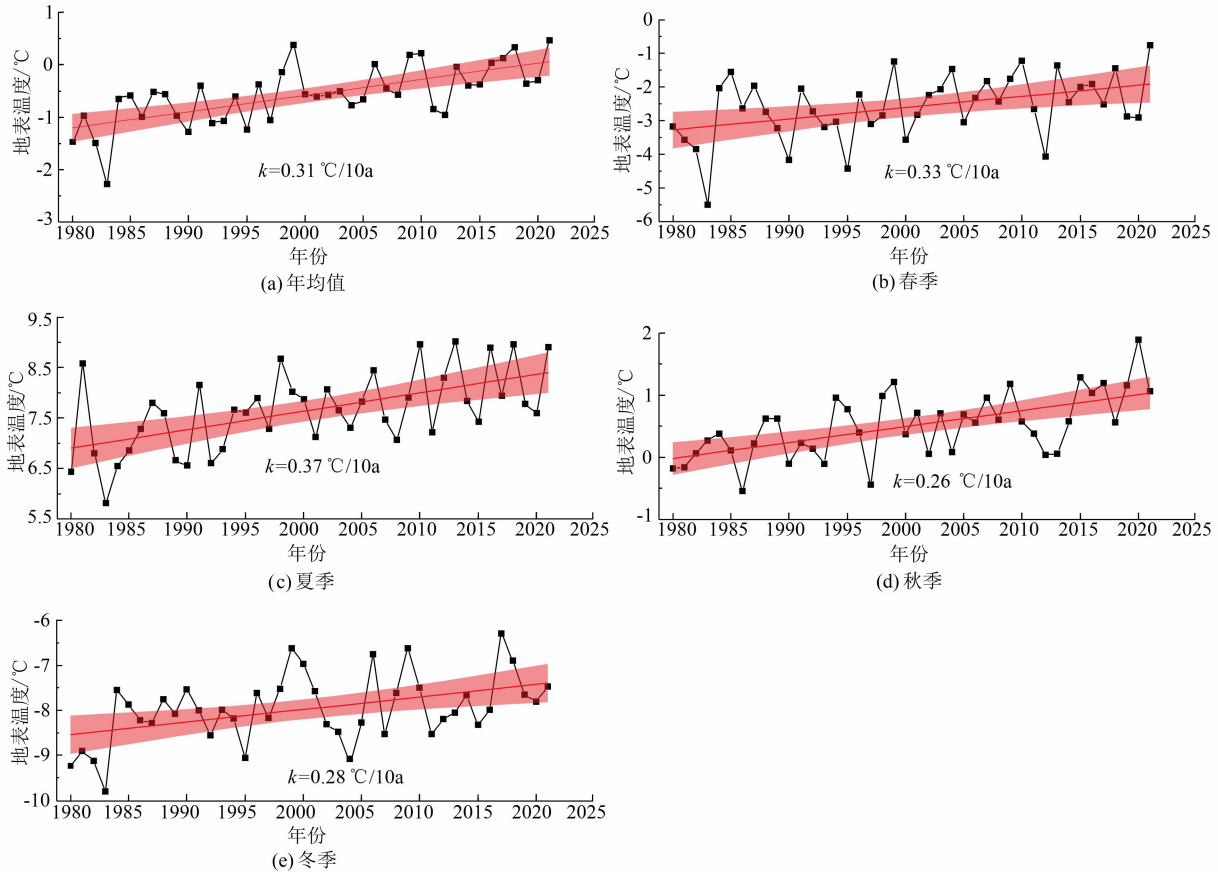


图 5 三江源地区 1980—2021 年平均近地表土壤温度变化趋势

Fig. 5 Change trend of the average near surface soil temperature in the Three-Rivers Headwater region from 1980 to 2021

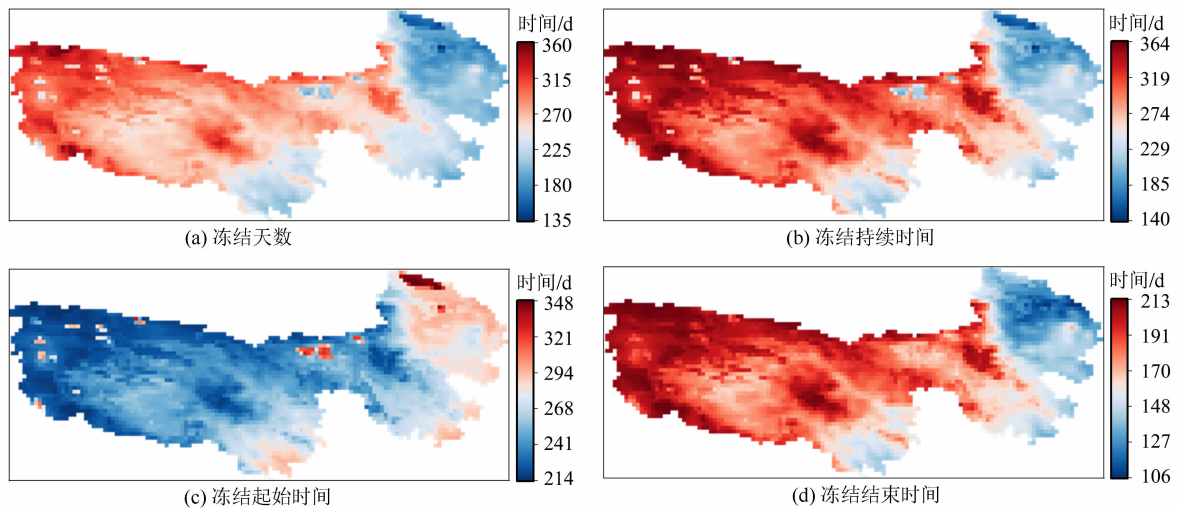


图 6 三江源地区 1980—2021 年平均冻融指标空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the average freeze-thaw indexes in the Three-Rivers Headwater region from 1980 to 2021

是冻结天数和冻结持续时间西部高于东部的直接原因。

从时间序列的变化趋势来看(图7),1980—2021年三江源地区平均冻结天数和冻结持续时间减小幅度分别为4.99 d/10a和6.77 d/10a,且均通过了Mann-Kendall趋势检验,说明该区域冻结期整体呈现显著减少趋势。冻结起始时间推迟,变化幅度为3.43 d/10a;冻结结束时间提前,变化幅度为3.35 d/10a。在以往研究中,基于ERA5-Land数据的分析结果表明,东北地区冻结期天数减少速度大于2 d/10a^[13],三江源地区近地表土壤冻融受气候变化的影响幅度整体上大于中国东北地区。在青藏高原地区,基于观测数据的研究结果表明,1980—2016年该区域冻结起始时间增加幅度为7.2 d/10a,冻结结束时间的减小幅度为4 d/10a,冻结持续时间的减小幅度为11.3 d/10a,冻结天数的减小幅度为9.3 d/10a^[19]。从这个结果来看,三江源地区虽位于青藏高原腹地,其冻结起始时间、冻结结束时间、冻结持续时间和冻结天数的变化幅度整体上均小于整个青藏高原。

为了进一步分析变化幅度的空间差异性,利用线性斜率和Mann-Kendall趋势分析ERA5-Land数据所有格点1980—2021年平均冻结天数、冻结持续时间、冻结起始时间和冻结结束时间的变化趋势(图8)。结果表明,研究区域内平均冻结天数和冻

结持续时间显著减小的区域分别占到了99.6%和99.3%,冻结起始时间显著推迟的区域占84.0%,冻结结束时间显著提前的区域占75.2%。

3 讨论

本文基于ERA5-Land地表温度数据对三江源地区地表冻融参数的时空变化特征进行了分析。研究发现,三江源地区地表冻结期天数减少速度远大于中国东北地区。气候变化是影响地表冻融变化的主要因子,基于观测数据得到的结果表明,三江源地区气温变化幅度为0.38 °C/10a^[25],东北地区为0.28 °C/10a^[26]。三江源地区更高的增温速率是地表冻结期天数减少速度偏高的主要原因。

以往研究表明,地表温度变化在不同海拔存在较大的空间差异性^[27-29]。本研究基于格点尺度获取的海拔和冻结天数变化率,分析了三江源地区不同海拔高度近地表土壤冻融的差异性(图9)。海拔在4000 m以下的区域冻结天数减小幅度明显低于4000 m以上的区域。气温的变化是影响地表冻融的一个重要因素,本研究基于ERA5-Land气温数据计算了三江源地区1980—2021年平均气温变化量,分析了不同海拔高度气温变化率的差异(图9a)。结果表明,随着海拔的升高,气温变化率整体呈现出增加趋势,这是三江源高海拔地区冻结天数减小幅

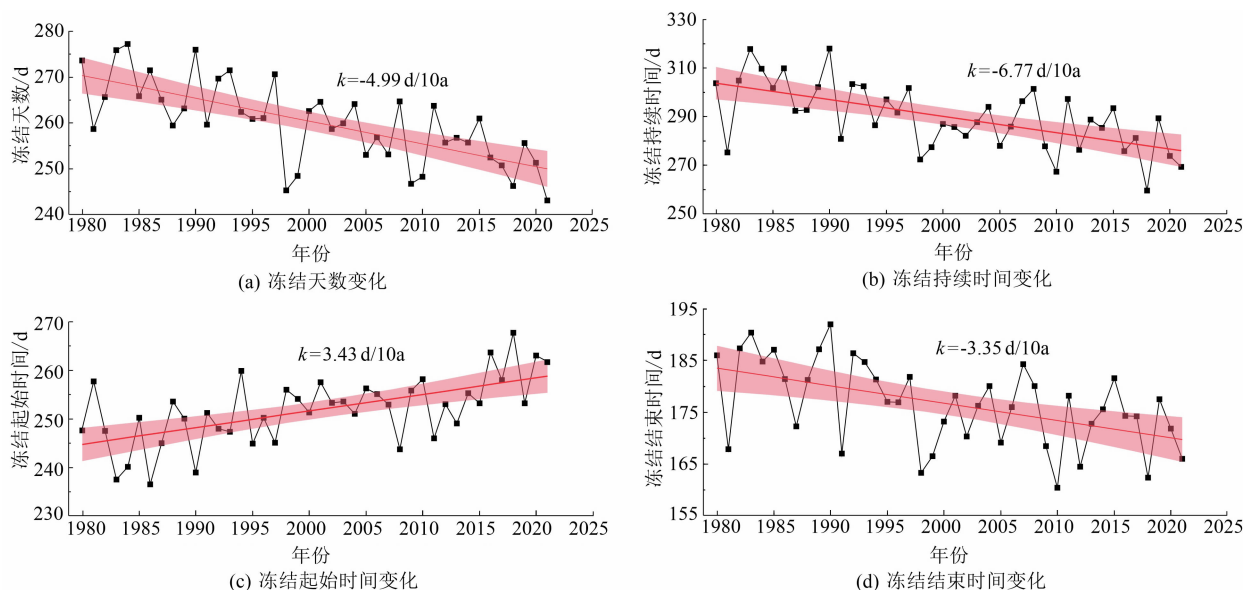


图7 三江源地区1980—2021年平均冻融指标变化趋势

Fig. 7 Trends of the average freeze-thaw indexes in the Three-Rivers Headwater region from 1980 to 2021

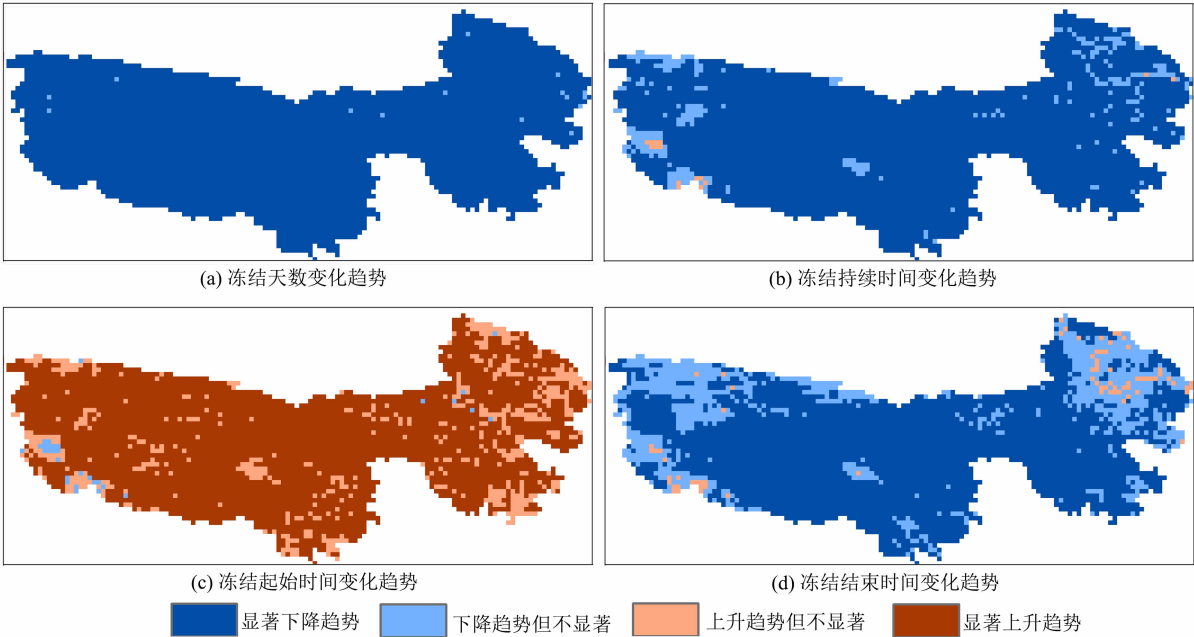


图 8 三江源地区 1980—2021 年冻融指标变化趋势空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the variation trends of the freeze-thaw indexes in the Three-Rivers Headwater region from 1980 to 2021

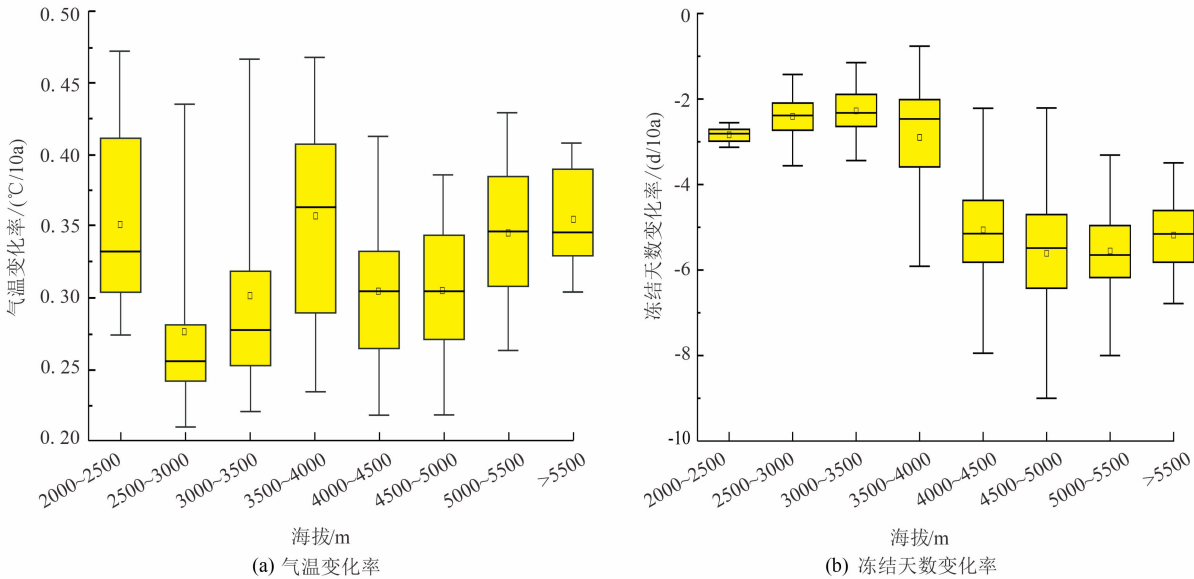


图 9 不同海拔高度下气温和冻结天数变化率

Fig. 9 Change rate of the temperature and freezing days at different altitudes

度偏高的原因。另外,需要注意的是,海拔 2000 ~ 2500 m 和 3500 ~ 4000 m 的区域气温增幅高于高海拔区,但冻结天数减大幅度依然小于 4000 m 以上的高海拔区域。因此,气温并不是决定三江源地区冻融变化空间差异性的唯一因素。地表植被覆盖是影响地气能量交换的一个重要因素,植被覆盖的遮阴效应以及本身的热量传输过程可以控制土壤与大气

之间的能量交换^[30]。导致植被覆盖度高的区域地表温度对气候变化相应的敏感度低于植被覆盖度低的区域^[31],从而影响地表的冻融过程。从三江源地区植被覆盖的空间格局来看,西部高海拔地区植被覆盖度远低于东部低海拔区^[32],导致东部低海拔地区冻融过程对气候变化的敏感度低于西部高海拔地区,这可能是造成三江源地区低海拔区域冻结天数

减小幅度明显低于高海拔区域的另一个重要原因。

三江源是多年冻土的重要分布区,冻土顶部温度模型模拟结果显示,三江源多年冻土区面积为 $22.98 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占研究区总面积的 62%^[33]。钻孔资料研究结果表明,三江源多年冻土主要分布在海拔 4400 m 以上的区域^[34]。地表温度一直是模拟多年冻土分布和活动层厚度上边界条件,地表土壤冻融是地表温度变化的直接表现。本研究显示,气候变化背景下三江源高海拔地区近地表土壤冻融过程响应更为明显,冻结天数减小幅度更大。三江源高海拔地区冻结天数更高的幅度减小,将会进一步加剧三江源地区多年冻土的退化。

4 结论

本研究基于 ERA5-Land 数据分析了青海三江源地区近地表土壤冻融状况的时空变化特征,主要结论如下。

(1) ERA5-Land 表层土壤温度数据与观测数据一致性很高,说明 ERA5-Land 表层土壤温度数据能够满足三江源地区土壤冻融时空变化研究要求。

(2) 三江源地区年、春季、夏季、秋季和冬季平均地表土壤温度分别为 $-0.57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-2.60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $7.65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.51 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-7.97 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 空间分布表现为东部高、西部低。1980—2021 年年平均、春季、夏季、秋季和冬季近地表土壤温度均表现为上升趋势,变化率分别为 $0.31 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.33 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.37 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.26 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.28 \text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

(3) 冻结天数和冻结持续时间的空间分布均表现为西部高、东部低,冻结起始时间和冻结结束时间的空间分布相反,西部冻结起始时间早于东部,而冻结结束时间晚于东部。1980—2021 年三江源地区平均冻结天数、冻结持续时间、冻结起始时间、冻结结束时间变化幅度分别为 $-4.99 \text{ d}/10\text{a}$ 、 $-6.77 \text{ d}/10\text{a}$ 、 $3.43 \text{ d}/10\text{a}$ 和 $-3.35 \text{ d}/10\text{a}$ 。

(4) 三江源西部地区冻结天数减小幅度明显高于东部地区,其中一个重要原因是西部植被覆盖度远低于东部。

参考文献 (References)

[1] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报, 2011, **31**

(19): 5495 – 5504. [LI Huixia, LIU Guohua, FU Bojie. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(19): 5495 – 5504]

[2] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J]. 地理学报, 2016, **71**(1): 3 – 20. [SHAO Quancin, FAN Jiangwen, LIU Jiyan, et al. Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(1): 3 – 20] DOI: 10.11821/dlxb201601001

[3] 赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, **34**(11): 1233 – 1246. [ZHAO Lin, HU Guojie, ZOU Defu, et al. Permafrost changes and its effects on hydrological processes on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, **34**(11): 1233 – 1246] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.006

[4] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 等. 青海三江源地区近 50 年来的气温变化[J]. 地理学报, 2011, **66**(11): 1451 – 1465. [YI Xiangsheng, YIN Yanyu, LI Guosheng, et al. Temperature variation in recent 50 years in the Three-River Headwaters region of Qinghai province [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, **66**(11): 1451 – 1465] DOI: 10.11821/xb201111002

[5] 李万志, 马海玲, 庞昕玮, 等. 气候变暖背景下青海三江源区季节冻土冻融特征研究[J]. 冰川冻土, 2023, **45**(4): 1233 – 1241. [LI Wanzhi, MA Hailing, PANG Xinwei, et al. Study on the characteristics of freezing and thawing of the seasonally frozen ground in the Three-River Source Region of Qinghai under warming climate [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, **45**(4): 1233 – 1241] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0094

[6] 梁奔奔, 李晓东, 张东, 等. 1961—2019 年三江源地区季节冻土冻融状态时空变化及影响因素研究[J]. 冰川冻土, 2023, **45**(2): 382 – 394. [LIANG Benben, LI Xiaodong, ZHANG Dong, et al. Study on spatiotemporal changes of the freeze-thaw status of seasonally frozen ground and influencing factors in the Three Rivers Source Region from 1961 to 2019 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, **45**(2): 382 – 394] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0029

[7] 胡国杰, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土区土壤冻融期间水热运移特征分析[J]. 土壤, 2014, **46**(2): 355 – 360. [HU Guojie, ZHAO Lin, LI Ren, et al. Characteristics of hydro-thermal transfer during freezing and thawing period in permafrost regions [J]. Soils, 2014, **46**(2): 355 – 360] DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2014.02.026

[8] 焦永亮, 李韧, 赵林, 等. 多年冻土区活动层冻融状况及土壤水分运移特征[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(2): 237 – 247. [JIAO Yongliang, LI Ren, ZHAO Lin, et al. Processes of soil thawing-freezing and features of soil moisture migration in the permafrost active layer [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, **36**(2): 237 – 247] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0030

- [9] WU Xuerui, DONG Zhounan, JIN Shuanggen, et al. First measurement of soil freeze/thaw cycles in the Tibetan Plateau using CYGNSS GNSS-R data [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12** (15): 2361. DOI: 10.3390/rs12152361
- [10] QIN Yanhui, WU Tonghua, ZHANG Peng, et al. Spatiotemporal freeze-thaw variations over the Qinghai-Tibet Plateau 1981–2017 from reanalysis [J]. *International Journal of Climatology*, 2021, **41** (2): 1438–1454. DOI: 10.1002/joc.6849
- [11] GUO Donglin, WANG Anhui, LI Duo, et al. Simulation of changes in the near-surface soil freeze/thaw cycle using clm4.5 with four atmospheric forcing datasets [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123** (5): 2509–2523. DOI: 10.1002/2017JD028097
- [12] MUNOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTI-PANAREDA A, et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13** (9): 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021
- [13] 岳书平, 闫业超, 张树文, 等. 基于 ERA5-LAND 的中国东北地区近地表土壤冻融状态时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2021, **76** (11): 2765–2779. [YUE Shuping, YAN Yechao, ZHANG Shuwen, et al. Spatiotemporal variations of soil freeze-thaw state in northeast China based on the ERA5-LAND dataset [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76** (11): 2765–2779] DOI: 10.11821/dlxb202111012
- [14] 薛华柱, 金磊, 董国涛, 等. 河西走廊近 40 年地表土壤冻融状态变化特征 [J]. *水土保持学报*, 2023, **37** (6): 65–73+82. [XUE Huazhu, JIN Lei, DONG Guotao, et al. Analysis of spatiotemporal variations of freeze-thaw state of surface soil in Hexi Corridor in recent 40 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, **37** (6): 65–73+82] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.06.009
- [15] 赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土综合监测数据集 (2002—2018) [DB/OL]. <http://data.tpdc.ac.cn>, 2021. [ZHAO Lin, HU Guojie, ZOU Defu, et al. A synthesis dataset of permafrost for the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China (2002–2018) [DB/OL]. <http://data.tpdc.ac.cn>, 2021] DOI: 10.11888/Geocry.tpdc.271107
- [16] ZHAO Lin, ZOU Defu, HU Guojie, et al. A synthesis dataset of permafrost thermal state for the Qinghai-Tibet (Xizang) Plateau, China [J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13** (8): 4207–4218. DOI: 10.5194/essd-13-4207-2021
- [17] ZHANG Lele, GAO Liming, CHEN Ji, et al. Comprehensive evaluation of mainstream gridded precipitation datasets in the cold season across the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, **43**: 101186. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101186
- [18] 单帅, 沈润平, 师春香, 等. 中国北部积雪区冬季地表温度和 2m 气温再分析数据评估 [J]. *高原气象*, 2020, **39** (1): 37–47. [SHAN Shuai, SHEN Runping, SHI Chunxiang, et al. Evaluation of land surface temperature and 2 m air temperature from five reanalyses datasets across north China in winter [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, **39** (1): 37–47] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00003
- [19] 杨淑华, 吴通华, 李韧, 等. 青藏高原近地表土壤冻融状况的时空变化特征 [J]. *高原气象*, 2018, **37** (1): 43–53. [YANG Shuhua, WU Tonghua, LI Ren, et al. Spatial-temporal changes of the near-surface soil freeze-thaw status over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2018, **37** (1): 43–53] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00043
- [20] 高黎明, 张乐乐, 沈永平, 等. ERA-Interim 和 CMFD 气象驱动数据在新疆额尔齐斯河流域的适用性评价 [J]. *冰川冻土*, 2022, **44** (1): 179–187. [GAO Liming, ZHANG Lele, SHEN Yongping, et al. Evaluation of applicability of ERA-Interim and CMFD meteorological forcing data in the Irtysh River basin, Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, **44** (1): 179–187] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0029
- [21] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, **13** (3): 245–259. DOI: 10.2307/1907187
- [22] ZHANG Lele, GAO Liming. Drought and wetness variability and the respective contribution of temperature and precipitation in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Advances in Meteorology*, 2021, **2021**: 7378196. DOI: 10.1155/2021/7378196
- [23] 张璐, 朱仲元, 席小康, 等. 基于 SPEI 的锡林河流域干旱演化特征分析 [J]. *干旱区研究*, 2020, **37** (4): 819–829. [ZHANG Lu, ZHU Zhongyuan, XI Xiaokang, et al. Analysis of drought evolution in the Xilin River Basin based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [J]. *Arid Zone Research*, 2020, **37** (4): 819–829] DOI: 10.13866/j.azr.2020.04.02
- [24] 张乐乐, 高黎明, 赵林, 等. 基于 ITPCAS 数据的青藏高原太阳总辐射时空变化特征 [J]. *太阳能学报*, 2019, **40** (9): 2521–2529. [ZHANG Lele, GAO Liming, ZHAO Lin, et al. Spatial and temporal characteristics of global solar radiation over Qinghai-Tibetan plateau based on ITPCAS dataset [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2019, **40** (9): 2521–2529] DOI: 10.19912/j.0254-0096.2019.09.017
- [25] 李红梅, 颜亮东, 温婷婷, 等. 三江源地区气候变化特征及其影响评估 [J]. *高原气象*, 2022, **41** (2): 306–316. [LI Hongmei, YAN Liangdong, WEN Tingting, et al. Characteristics of climate change and its impact assessment in the Three-River Regions [J]. *Plateau Meteorology*, 2022, **41** (2): 306–316] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00101
- [26] 穆岑, 石莹, 黄月如. 东北地区近 60 年气温变化规律探讨 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2022, **45** (3): 64–67. [MU Cen, SHI Ying, HUANG Yueru. Temperature variation in northeast China in the past 60 years [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2022, **45** (3): 64–67]
- [27] KHANDELWAL S, GOYAL R, KAUL N, et al. Assessment of

- land surface temperature variation due to change in elevation of area surrounding Jaipur, India [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2018, **21**(1): 87–94. DOI: 10.1016/j.ejrs.2017.01.005
- [28] AGUILAR-LOME J, ESPINOZA-VILLAR R, ESPINOZA J C, et al. Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000–2017) [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, **77**: 119–128. DOI: 10.1016/j.jag.2018.12.013
- [29] HE Juelin, ZHAO Wei, LI Ainong, et al. The impact of the terrain effect on land surface temperature variation based on Landsat-8 observations in mountainous areas [J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, **40**(5–6): 1808–1827. DOI: 10.1080/01431161.2018.1466082
- [30] 施婷婷, 郑兴波, 张丽波, 等. 植被对土壤热扩散特征的影响——以长白山阔叶红松林为例[J]. 生态学报, 2015, **35**(12): 3970–3978. [SHI Tingting, ZHENG Xingbo, ZHANG Libo, et al. The influence of vegetation on soil thermal properties: A case study of broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(12): 3970–3978] DOI: 10.5846/stxb201308172098
- [31] 闫文辉, 赵晶. 兴安盟 2016—2020 年地表覆被和地表温度的相关性分析[J]. 环境影响评价, 2023, **45**(1): 84–87+124. [YAN Wenhui, ZHAO Jing. The correlation analysis of fractional vegetation coverage and land surface temperature in Hinggan League from 2016 to 2020 [J]. Environmental Impact Assessment, 2023, **45**(1): 84–87+124] DOI: 10.14068/j.ceia.2023.01.017
- [32] 谢绮丽, 杨鑫, 郝利娜. 2001—2020 年三江源区植被覆盖时空变化特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2022, **42**(5): 202–212. [XIE Qili, YANG Xin, HAO Lina. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its driving factors in Three-River Headwaters Region during 2001—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, **42**(5): 202–212] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20221017.001
- [33] ZOU Defu, ZHAO Lin, SHENG Yu, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau [J]. The Cryosphere, 2017, **11**(6): 2527–2542. DOI: 10.5194/tc–11–2527–2017
- [34] JIN Huijun, HE Ruixia, CHENG Guodong, et al. Changes in frozen ground in the source area of the Yellow River on the Qinghai–Tibet Plateau, China, and their eco-environmental impacts [J]. Environmental Research Letters, 2009, **4**(4): 045206. DOI: 10.1088/1748–9326/4/4/045206

Spatio-Temporal Variation of Freezing-Thawing State of Near Surface Soil in the Three-Rivers Headwater Region of Tibetan Plateau, China

XU Maqiang¹, PANG Wenlong^{1*}, ZHANG Zhen¹, LIU Chunlin¹, ZHANG Lele^{2,3}

(1. Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Xining 810000, China;

2. a. College of Geographical Science; b. Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810008, China)

Abstract: Freezing-thawing process of near-surface soil comprises the exchange of moisture and energy between soil and atmosphere, whose dynamic change could be used for scientific interpretation of degradation in permafrost. Possibly restricted by the acquisition of surface observation data in high-altitude plateau areas of China, more scientific efforts were made to reveal the characteristics of soil thermal-hydrological transporting in the midst of freezing-thawing in permafrost, but attentionally neglected the long-term change trend of soil freezing-thawing and associated spatio-temporal change.

The Three-Rivers Headwater Region in the Tibetan Plateau of China was extensively occupied by perennial permafrost, which is a climate-sensitive area and critical zone for global climate change.

In this study, it collected field observations at 23 national meteorological stations in the Three-Rivers Headwater Region and at other 6 stations set in active layer of permafrost for examination of the accuracy of ERA5-

Land ground temperature data; then it analyzed the change of soil freezing-thawing from 1980 to 2021 and associated spatio-temporal change.

(1) The average value of correlation coefficient between ERA5-Land surface soil temperature data and the observed data by 23 meteorological stations was 0.94, with a mean value of the mean-root-square error was 4.49 °C. The average value of correlation coefficient between ERA5-Land surface soil temperature data and the data collected at other 6 stations set in active layer of permafrost was 0.96, with a mean value of the mean-root-square error was 2.57 °C. The data from ERA5-Land could meet research requirements for evaluating of soil freezing-thawing changes in the Three-Rivers Headwater region.

(2) The spatial distribution of annual mean temperatures of surface soil over a year was high in the east and low in the west in the Three-Rivers Headwater region; near-surface soil temperatures increased the most in the summer and the least in the fall, with overall higher increases in the spring and summer than in the fall and winter.

(3) From 1980 to 2021, the number of freezing days and freezing duration in the Three-Rivers Headwater region had a significant decreasing trend, with a rate of 4.99 d/10a and 6.77 d/10a, respectively. The start of freezing was delayed, with a rate of 3.43 d/10a; the end of freezing was advanced, with a rate of 3.35 d/10a.

(4) The vegetation coverage in the western high-altitude area of the Three-Rivers Headwater region was much lower than that in the eastern low-altitude area, which may be an key reason for the decrease of freezing days in the low-altitude area was lower than that in the high-altitude area.

This study introduced a general knowledge of the spatio-temporal changes of topsoil freezing-thawing in the Three-Rivers Headwater region by application of ERA5-Land data, which provides an insight into the spatial degradation characteristics of permafrost in the Tibetan Plateau.

Key words: the Three-Rivers Headwater region; ERA5-Land; soil freezing-thawing; spatio-temporal change

(责任编辑 李嵘)