

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

岳书平¹, 闫业超¹, 张树文², 杨久春², 王文娟³

(1. 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 3. 河南财经政法大学资源与环境学院, 郑州 450046)

摘要: 土壤冻融交替是陆地表层极其重要的物理过程, 土壤冻融状态的频繁变化对地气能量交换、地表径流、植被生长、生态系统及土壤碳氮循环等均具有重要的影响。本文基于1981—2019年ERA5-LAND逐小时土壤温度数据, 借助GIS空间分析功能, 利用Python编程处理分析了中国东北地区近地表土壤冻融状态的时空变化特征。结果表明: 从不同冻融状态起始日期的空间分布来看, 近地表不同阶段的起始日期主要受纬度和地形的影响, 具有明显的纬度地带性和垂直地带性。春季冻融过渡期和完全融化期的起始日期由东南向西北均呈逐渐推迟趋势, 而秋季冻融过渡期与完全冻结期起始日期则由东南向西北随纬度升高越来越早。就不同冻融状态发生天数的空间分布而言, 研究区南部春季冻融过渡期发生天数多于北部, 西部多于东部, 年均发生天数均在30 d以内; 秋季发生冻融的天数空间差异不大, 研究区一半以上的地区年均发生天数在10 d以内。完全融化期发生天数最多, 从东南向西北呈逐渐减少趋势, 年均发生天数主要介于150~240 d之间; 完全冻结期发生天数则由南向北日益增多, 其空间分布表现为一向南开口的簸箕形, 各地年均发生天数集中于90~180 d之间。从时间变化趋势来看, 近年来春季冻融过渡期起始日期以提前趋势为主, 而秋季冻融过渡期起始日期总体表现为延后, 致使完全融化期发生天数以增加趋势为主, 年均变化速度高达0.2 d/a; 大兴安岭以西、呼伦贝尔高原以北地区及辽河平原春季冻融过渡期发生天数呈减少趋势, 其他地区为增加趋势; 大兴安岭以西地区、呼伦贝尔高原以北地区完全融化期起始日期明显提前; 松嫩平原和长白山区秋季冻融过渡期起始日期推迟显著, 发生天数的变化趋势呈北增南减的空间分异特征; 不同地区完全冻结期起始日期的变化趋势差异显著, 中部广大的平原区呈不显著的推迟趋势, 而大、小兴安岭、长白山、辽东半岛和辽西丘陵则提前进入完全冻结状态; 研究区完全冻结期发生天数呈减少趋势, 研究区中部的季节冻土区完全冻结期明显变短, 年均减少速度大于0.2 d/a。

关键词: ERA5-LAND; 土壤冻融状态; 冻土; 时空变化; 东北地区

DOI: 10.11821/dlxb202111012

1 引言

土壤冻融循环是一个非常复杂的过程, 是指由于季节或昼夜气温的变化引起土壤温度在0℃左右上下波动而反复出现冻结和融化的交替, 它伴随着水分、热量的传输, 水分相变和盐分的积聚^[1-3]。土壤冻融过程主要发生在温度较低的高海拔或高纬度地区, 北半

收稿日期: 2020-07-14; 修订日期: 2021-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901355); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA2003020103); 国家重点研发计划(2017YFC0504202) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41901355; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA2003020103; National Key R&D Program of China, No.2017YFC0504202]

作者简介: 岳书平(1979-), 女, 山东德州人, 博士, 讲师, 主要从事GIS在土壤侵蚀中的应用及大数据分析GIS应用研究。
E-mail: yueshuping@nuist.edu.cn

球陆地表层每年约有 $55 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的范围会经历冻融转换过程^[4], 中国冻土面积占国土总面积的 90% 左右, 其中多年冻土与季节冻土分别占国土面积的 21.5% 和 53.5%^[5-6]。土壤冻融交替是陆地表层极其重要的物理过程, 土壤冻融状态的频繁变化对地气能量交换、地表径流、植被生长、生态系统及土壤碳氮循环等均具有重要的影响^[7-13]。

目前, 关于土壤冻融循环的研究主要基于站点监测、数值模拟及遥感反演。赵林等^[14]基于 1996 年 6 月—1998 年 5 月五道梁观测场的地温资料, 依据活动层中温度变化过程和水热的传输特征, 把活动层的冻融过程划分成四个阶段, 并对不同阶段的水热变化进行了分析。杨梅学等^[7]根据青藏高原中部 BJ 观测点 2002 年 8 月—2004 年 4 月表层土壤 0~20 cm 的观测数据, 研究了该点土壤的日冻融循环, 对不同土壤状态的日数变化进行了分析。胡国杰等^[15]利用多年冻土区唐古拉监测站 2007—2008 年活动层和气象站观测数据, 对多年冻土区冻融期间水分和温度运移机理进行分析。Wang 等^[16]应用 636 个气象站的观测资料, 对中国 1956—2006 年间近地表的土壤冻融状态进行了研究。Peng 等^[17]根据中国 839 个气象站的逐日气温及地表温度数据, 运用 Stefan 经验公式研究了 1950—2010 年间季节冻结深度对气候变化的响应。杨淑华等^[18-19]利用青藏高原 87 个气象站的逐日地表温度, 分析了 1980—2015 年近地表土壤冻融状态的时空差异, 并探讨了不同土壤冻融状态与气温、海拔及纬度的关系。上述研究主要是依据站点的实测数据进行的, 由于站点数量较少, 分布不够均匀且观测时间不连续等原因, 对土壤冻融状态的研究主要局限于小区域或近地表土壤, 只能在有限的区域尺度上以点带面进行模拟。因此, 模拟的可靠程度有所降低, 缺乏代表性^[20]。

为了获取研究区土壤冻融状态的空间分布情况, 王澄海等^[21]运用陆面过程模式 CoLM 对青藏高原西部冻融期陆面过程进行模拟, 发现土壤感潜热通量的变化与降水及土壤表层频繁的冻结—消融相联系。罗斯琼等^[22]在改进 CoLM 模式冻融参数化方案的基础上, 利用该模式对青藏高原玛曲地区的土壤冻结过程进行了数值模拟。夏坤等^[23]使用陆面过程模式 CLM3.0 对青藏高原东北部季节冻土区各层土壤的冻融变化趋势进行模拟, 研究发现: 模式对冻结过程的模拟好于对融化过程的模拟, 对靠近表层的土壤模拟好于深层。Guo 等^[24]将 CLM4.0 模式与高分辨率的气象数据结合起来, 分析了青藏高原 1981—2010 年近地表土壤冻融循环对气候变暖的响应。刘火霖等^[25]利用那曲观测站冻融期 (2013 年 3 月—6 月) 的气象和土壤观测资料, 通过陆面模式 CoLM 对那曲地区土壤冻融过程进行了数值模拟。基于数值模式的研究, 虽然可以更好地展示土壤冻融状态的空间特征, 但是由于模式参数较多, 不同参数的选择会直接影响模拟的结果, 而且模式的多样性和不确定性也会影响土壤冻融研究的精度^[22-23]。

近年来, 随着遥感技术的不断发展, 利用遥感反演获得地表温度成为解决观测资料不足的重要途径^[6,26]。相对于稀疏的单点地面观测, 遥感手段在地表冻融状态监测方面具有显著优势, 使得连续监测陆地或区域尺度土壤冻融循环成为可能^[27]。Zhang 等^[4]针对 SSM/I 数据提出了一种算法, 对美国近地表无雪区和没有雪覆盖地区的土壤冻融循环进行调查。Jin 等^[28]基于 SMMR 和 SSM/I 亮温数据, 研究了中国 1978—2008 年间地表土壤冻融循环的时空变化。邹德富等^[29]研究发现: MODIS LST 产品与 TM、ETM+ 反演的地表温度具有较好的一致性, 是研究多年冻土地表热状况的非常好的数据源。Zhao 等^[30]将 AMSR-E 亮温数据与 MODIS LST 数据结合起来, 充分利用微波和热红外遥感数据的优势分析近地表冻融状态的变化。但是, 在利用遥感产品模拟冻土相关参数变化时, 由于遥感观测的地表温度 (或热红外遥感陆面温度) 与近地表气温及地面温度是 3 个不同的量, 因此利用遥感方法反演得到的地表温度数据, 往往需要大量的地面实测数据进行验

证和改良才能更好的使用^[31-32]。除此之外, 遥感数据中的空间尺度差异及混合像元的影响也会对其反演的地表温度数据的精度存在一定的影响^[29]。

综上所述, 站点监测、数值模拟及遥感反演3种方法各有其优缺点, 只有充分利用三者的优势, 才能在土壤冻融研究中取得更好的研究效果。众所周知, 大气再分析数据是采用最先进的全球资料同化系统和数据库, 对各种来源的观测资料(卫星、地面观测、飞机、船舶、无线电探空及测风气球等)进行质量控制和同化处理得到的, 具有时间序列长、分辨率高等优点。不仅可用于天气与气候的诊断分析, 还可用于土壤冻融的相关研究中^[33]。已有研究表明: CFSv2、ERA-Interim、GLDAS-Noah及ERA5等再分析数据均可以反映出土壤温度的变化动态^[34], 在非多年冻土区ERA5-LAND的土壤温度数据与实地观测数据的吻合度更高^[35]。因此, 本文选择中国东北地区作为研究区, 采用1981—2019年ERA5-LAND再分析数据, 对近地表土壤冻融状态的时空变化进行研究, 深入分析近地表土壤冻融状态的变化, 以期研究该区土壤冻融对气候变化的响应提供理论依据。

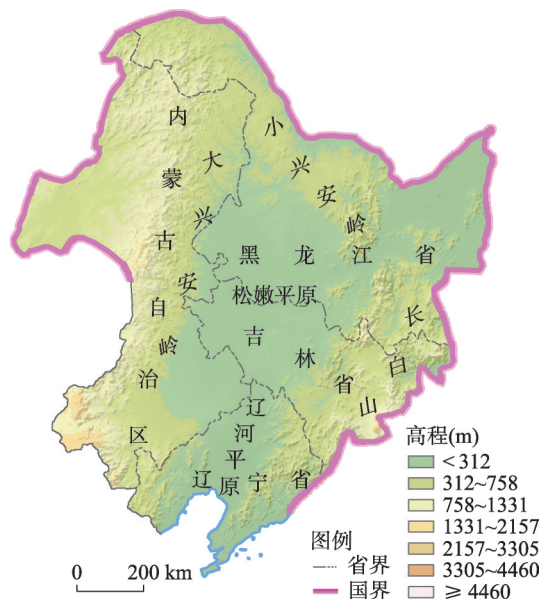
2 研究区与研究方法

2.1 研究区概况

东北地区介于 $38^{\circ}43'15''\text{N}$ ~ $53^{\circ}33'39''\text{N}$ 、 $115^{\circ}27'23''\text{E}$ ~ $134^{\circ}46'26''\text{E}$ 之间, 包括黑龙江、吉林、辽宁三省及内蒙古的呼伦贝尔、兴安、通辽和赤峰四盟, 总面积为124.3万 km^2 。该区地处欧亚大陆东端, 北与寒冷的西伯利亚相邻, 南接渤、黄海, 西、北、东三面环列大、小兴安岭和长白山山地, 中部则为广阔的松辽大平原(图1)。东北地区属于温带季风气候, 自南向北跨中温带与寒温带, 四季分明, 夏季温热多雨, 冬季寒冷干燥。年均气温在 0°C 以下, 气温年较差高达 49.3°C ; 年均降水量介于430.4~678.72 mm之间, 降水量时空变化大, 自东南向西北年降水量从1000 mm降至300 mm以下, 从湿润区、半湿润区过渡到半干旱区^[36-37]。东北地区近百年表现为明显的增温趋势, 年降水则呈减少趋势。气候变率大、气象灾害频发, 是典型的气候脆弱区和受气候变暖影响最为敏感的地区, 也是中国最大的商品粮基地和农业生产最具发展潜力的地区之一^[38-39]。

2.2 数据来源与处理

本文所用数据包括地表温度数据和基础地理数据。文中所用的地表温度数据源自欧洲中期天气预报中心(European Centre For Medium-Range Weather Forecasts, ECWMF)提供的ERA5-LAND再分析数据集, 它是以ECWMF第五代再分析产品ERA5模拟的陆地场大气变量作为强迫, 采用修正的陆面水文模式



注: 基于自然资源部标准地图服务网审图号为GS(2016)1600号的标准地图制作, 底图边界无修改。

图1 研究区位置图

Fig. 1 Location of Northeast China

HTESSEL、CY45R1 模拟得到的^[40]。虽然没有进行数据同化,但是观测数据间接影响其模拟结果。与ERA5相比,ERA5-LAND具有更高的空间分辨率,其水平分辨率可达 0.1° (9 km),时间分辨率为 1 h ^[41]。由于当前可获取的数据只能追溯到1981年1月1日,故文中采用中国东北地区1981年1月1日—2019年12月31日ERA5-LAND逐小时地表温度数据。鉴于ERA5-LAND提供的地表温度代表的是土壤、雪、冰等陆地上表面和大气交界处的温度,并不是 0 cm 地表温度。因此,本文参考单帅等人^[42]的研究方法,选取与 0 cm 地表温度数据相差不大的浅表层($0\sim 7\text{ cm}$)土壤温度数据,用于进行近地表土壤冻融状态的研究。该数据代表的是 $0\sim 7\text{ cm}$ 土层中间部分的温度,该表层土壤的日平均温度与逐日 0 cm 地温数据基本一致,二者具有可比较性。根据NetCDF格式的逐小时 $0\sim 7\text{ cm}$ 土壤温度数据,通过Python编程统计得到1981—2019年间逐日地表温度数据。然后,将上述数据进行投影转换及数据裁切,统一采用WGS1984大地坐标系,Albers等面积割圆锥投影,中央经线为 110°E ,双标准纬线为 25°N 和 47°N 。

2.3 研究方法

2.3.1 土壤冻融阈值的确定 关于土壤冻融状态的界定,主要根据地表或土壤日最低温度和日最高温度判断。有些学者将地表或土壤日最低温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为判断土壤呈现冻结状态的依据^[14, 16, 18-19, 43];也有学者以地表或土壤日最低温度连续 2 d ^[43]或 3 d ^[44]低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为标准来界定土壤的冻结状态^[13, 45-46]。如果不考虑土壤颗粒表面能和盐分对土壤冻结温度的影响,一般情况下,若某一深度的土壤温度日最大值大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而且日最小值小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,则该层土壤会发生日冻融循环现象,即昼融夜冻^[7, 47]。因此,本文将土壤温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为判定土壤冻融的阈值。

2.3.2 土壤冻融阶段的划分 对于土壤冻融阶段的划分,赵林等^[14]根据在年冻结融化过程中整个活动层水热状况的不同特征,把整个活动层的年变化过程划分成夏季融化过程、秋季冻结过程、冬季降温过程和春季升温过程4个阶段;根据土壤温度的日最大值和日最小值,杨梅学等^[7]将近地表土壤的冻融过程分为完全冻结阶段、日冻融循环阶段和完全融化阶段;谢燕梅等^[48]在日内地表冻融循环分类基础上,将年冻融循环周期划分为稳定冻结期、稳定融化期、春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期。林笠等^[13]根据滑动平均后土壤日温的最大最小值,将土壤冻融循环过程分为完全冻结期、无冻结期、秋冬始冻期和冬春解冻期。参考上述相关研究成果,本文利用逐日地表温度数据,将近地表土壤冻融循环过程划分为春季冻融过渡期(Freeze-thaw Transition Period in Spring, SFTTP)、完全融化期(Complete Thawed Period, CTP)、秋季冻融过渡期(Freeze-thaw Transition Period in Autumn, AFTTP)及完全冻结期(Complete Frozen Period, CFP)4个阶段。

2.3.3 地表温度数据的处理 首先,根据研究区逐小时 $0\sim 7\text{ cm}$ 土壤温度数据,通过Python编程统计得到1981—2019年逐日最高土壤温度、最低土壤温度数据的最大最小值。然后,将历年近地表日温最低值大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的第1天和最后1天之间的时间归为完全融化期,近地表日温最高值小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的第1天和最后1天之间的时间归为完全冻结期,近地表日温最高值大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并且最低值小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间属于冻融过渡期,如果日冻融循环出现在8月份之前,则为春季冻融过渡期,反之则为秋季冻融过渡期。虽然在第一次出现日冻融循环后可能还会出现完全融化的情况,但是由于地表对于气候变化异常敏感,所以第一次出现日冻融循环的时间对于农事活动来说具有非常重要的意义。因此,本文将第一次出现日冻融循环的时间作为冻融过渡期的开始。为了方便表示,文中将不同冻融阶段的开始日期用该日在一年中日序来表示,1月1日为第0天,1月2日为第1天,以此类推,12月31日为第365天(考虑了闰年在内)。为了分析研究区近地表不同冻融阶段

的平均状态, 文中先统计出研究区 1981—2019 年的多年平均逐日最高及最低温度; 之后, 鉴于中国常以 5 d 为“一候”用于指导农事活动, 故对多年平均逐日地表温度数据进行五天滑动平均, 得到多年平均逐日最高及最低地表温度; 最后, 参照上述不同冻融阶段的划分标准, 得到研究区 1981—2019 年近地表不同冻融阶段的起止时间。

2.3.4 M-K 趋势分析法 Mann-Kendall 是一种非参数统计检验法, 广泛应用于气象、水文等领域的要素时间序列趋势分析中^[49-52]。该方法不需要样本遵从一定分布, 也不受少数异常值的干扰, 特别适合对呈非正态分布的数据进行分析。因此, 本文采用 M-K 趋势分析法研究中国东北地区 1981—2019 年近地表冻融状态的变化趋势, 分析不同冻融阶段开始日期及发生天数的时间变化特征。该方法的基本原理与计算公式现有文献已有详细的介绍^[53], 故文中不再重复。

3 结果与分析

3.1 不同土壤冻融状态起始日期的空间分异特征分析

从图 2a 可以看出, 近地表层土壤春季冻融过渡期开始日期主要在 3—4 月, 冻融开始日期由东南向西北逐渐推迟, 辽东半岛部分地区 2 月底就开始出现冻融交替, 而中国最北端漠河则到 4 月中旬 (第 110 天) 才进入春季冻融过渡期。除了受纬度影响之外, 该时期起始日期的空间分布亦受地形地貌的控制。由于东北地区三面环山, 中间为凹陷的东北平原, 故同一纬度上中部平原区优先进入春季冻融过渡期。由图 2b 可知, 中国东北地区近地表层进入完全融化期的起始日期亦受纬度和地形的影响。研究区近地表层最早在 3 月中上旬进入完全融化期, 这些地区主要位于辽河平原、辽西丘陵和辽东半岛的南端, 而长白山、松嫩平原及三江平原会在 4 月中上旬 (第 90~105 天) 结束春季冻融过渡期, 大兴安岭西侧、呼伦贝尔高原以北的地区近地表层则到 5 月中上旬 (第 120~135 天) 才会开始完全融化。如图 2c 所示, 对于近地表层而言, 秋季冻融过渡期的起始日期空间差异显著, 表现为从西北向东南起始日期越来越晚。呼伦贝尔高原以北、大兴安岭西北侧 10 月中上旬 (第 277~288 天) 开始出现昼融夜冻现象, 大、小兴安岭及呼伦贝尔高原会推迟到 10 月中下旬 (第 288~304 天), 广大的东北平原及长白山地区秋季冻融过渡期则会继续推迟半个月左右, 到 11 月份 (第 304~319 天) 以后才会开始, 最晚出现秋季冻融交替现象的是研究区东南端的辽东半岛及辽西丘陵地区。与秋季冻融过渡期类似, 近地表层进入完全冻结期的起始日期由东南向西北随纬度升高越来越早 (图 2d)。研究区大

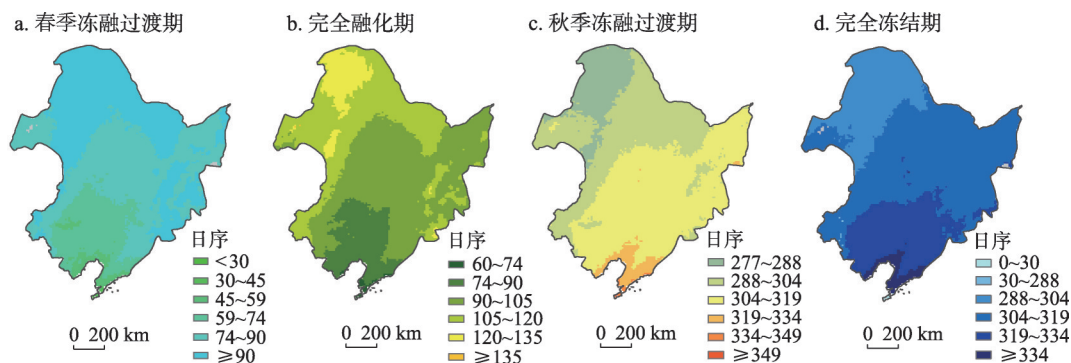


图2 中国东北地区不同冻融阶段起始日期分布

Fig. 2 Spatial distribution of the start dates for different freeze-thaw periods in Northeast China

部分地区完全冻结期开始日期主要出现在10月下旬(第288~304天)—11月中下旬(第319~334天),位于大兴安岭西北部地区近地表土壤温度首先稳定在0℃以下,其次是大、小兴安岭、长白山、松嫩平原及三江平原进入完全冻结状态,之后是辽河平原,而辽东湾周边地区是最迟出现完全冻结现象的地区,近地表层完全冻结最晚会出现在翌年1月份。

3.2 不同土壤冻融状态发生天数的空间分异特征分析

如图3所示,中国东北地区近地表土壤冻融阶段以完全融化期发生天数最多,年均发生天数均在145 d以上;其次是完全冻结期,全区一半以上的地区年均发生天数超过120 d;春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期发生天数相对较少,绝大部分地区年均发生天数均在30天以内,且春季冻融过渡期发生天数明显多于秋季冻融过渡期。如图3a所示,研究区南部的春季冻融过渡期发生天数多于北部,西部多于东部地区。发生天数较少的地区位于小兴安岭—张广才岭—长白山一带,该区也是进入春季冻融过渡期较晚的区域;发生天数较多的地区则是较早出现春季冻融现象的辽西丘陵和辽东半岛,该区发生天数均在30 d左右。从图3b可以看出,近地表土壤完全融化期发生天数的空间分布具有明显的纬度地带性和垂直地带性,总体表现为从东南向西北逐渐减少的趋势。近地表土壤完全融化期天数主要集中于150~240 d,受海拔高度的影响,位于大兴安岭西北部的地区发生完全融化的天数最少,其次是研究区中部的山地丘陵区,发生天数最多的则是三面被山地丘陵所包围的广阔平原区。从发生冻融的天数来看,不同地区近地表土壤秋季发生冻融的天数空间分异不大(图3c)。研究区内一半以上的地区发生天数在10 d以内,大兴安岭、呼伦贝尔高原、辽河平原及辽东半岛地区年均发生天数也仅为10~15 d之间,所以秋季出现冻融交替现象的频率整体较少。受纬度和地形的影响,东北地区完全冻结期发生天数由南向北日益增多,其空间分布表现为一向南开口的簸箕形。随着纬度和海拔升高,气温逐渐降低,土壤进入完全冻结状态越来越早,而结束时间越来越晚,因此完全冻结期持续时间逐渐增加(图3d)。近地表土壤发生完全冻结的天数主要集中于90~180 d,发生天数的低值区位于研究区南端的辽西丘陵和辽东半岛,年发生天数仅为60~90 d之间,处于研究区东北端的大兴安岭北端属于高值区,完全冻结期发生天数高达180 d以上。

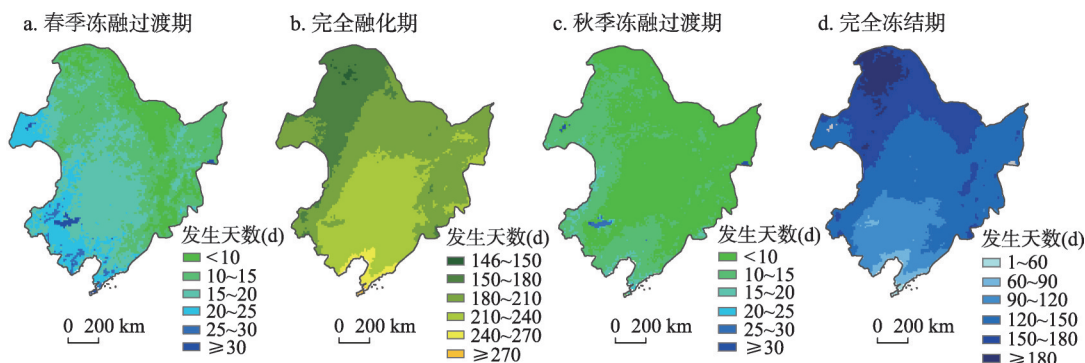


图3 中国东北地区不同冻融阶段发生天数分布

Fig. 3 Spatial distribution of the annual number of days for different freeze-thaw periods in Northeast China

3.3 不同土壤冻融状态起始日期的时间变化趋势分析

从时间变化趋势来看,绝大部分地区春季冻融过渡期和完全融化期的起始日期提前,秋季冻融过渡期起始日期表现为北部提前南部延后,不同地区完全冻结期起始日期

的时间变化趋势差异显著，这主要是受全球变暖的影响所导致的^[54-55]。如图4a和图5a所示，中国东北地区春季冻融过渡期起始日期普遍提前，显著提前（90%以上的置信水平）的地区主要集中于松嫩平原、大兴安岭南端及辽东湾附近地区，该区变化速率均在-0.2 d/a以上。从图4b和图5b可以看出，除三江平原外，东北其他地区进入完全融化期的起始日期也呈提前发展趋势，特别是大兴安岭以西、呼伦贝尔高原以北的地区，绝大部分都通过0.05水平的显著性检验，1981—2019年完全融化期起始日期提前了8 d以上。这是由近年来东北地区夏季气温明显偏高，特别是20世纪90年代以后增暖十分显著造成^[56]。与春季冻融过渡期和完全融化期相反，研究区南部地区秋季冻融过渡期起始日期以向后推迟为主，推迟趋势尤以松嫩平原和长白山区最为显著，年均变化速率均在0.1 d/a以上（图4c、图5c），部分地区在0.2~0.5 d/a之间，这是由该区明显的增温现象造成的；研究区东南部的辽东半岛和辽河平原以及东北角的三江平原，受近年来全球增暖的影响^[57]，进入秋季冻融过渡期的时间表现为不显著的推迟趋势。与南部地区不同，位于研究区北部的大兴安岭以西和小兴安岭地区则呈提前趋势，这是由于该区寒潮发生的频次明显高于南部地区，特别是降温幅度最小的一般寒潮发生于秋季的频次较高^[57]，再加上这些寒潮影响范围有限，因此会出现秋季北部地区提前进入冻融状态的情况。对于完全冻结期而言，不同地区起始日期的变化差异显著，总体以不显著的推迟趋势为主，特别是中部广大的平原区表现为推迟进入完全冻结期，而大、小兴安岭、长白山、辽东半岛和辽西丘陵则会提前进入完全冻结状态（图4d）。已有研究表明：近年来东北地区冬季

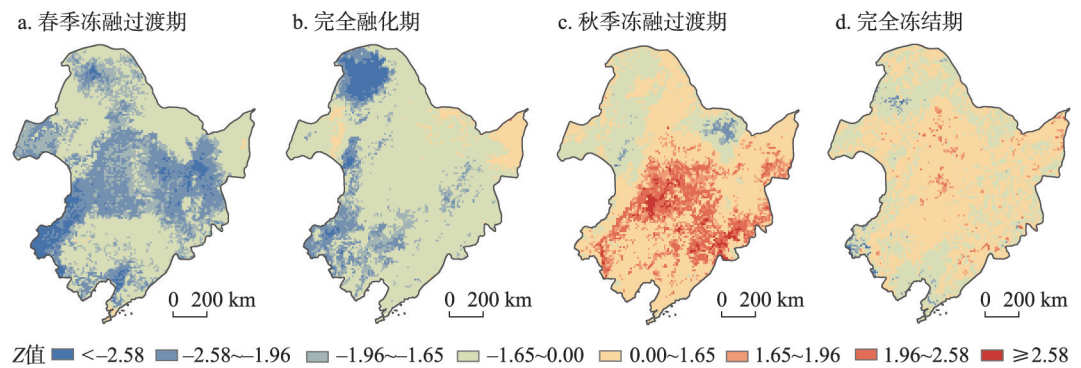


图4 中国东北地区不同冻融阶段起始日期变化趋势分布

Fig. 4 Trends of temporal variation of the start dates for different freeze-thaw periods in Northeast China

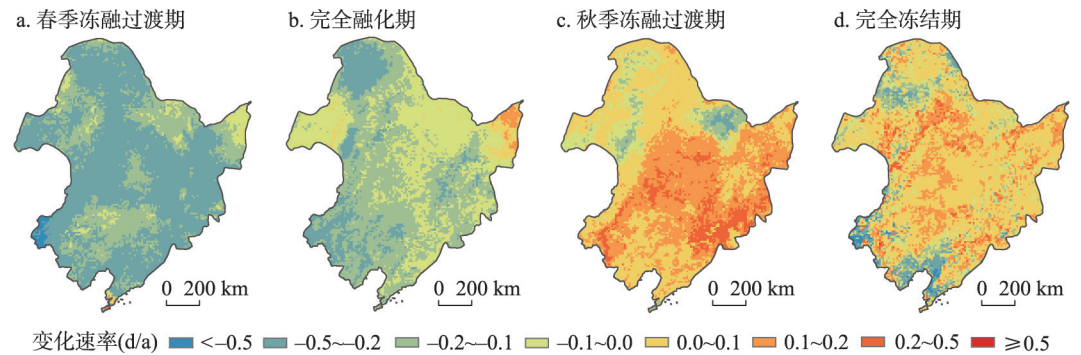


图5 中国东北地区不同冻融阶段起始日期变化速率分布

Fig. 5 Temporal variation rates of the start dates for different freeze-thaw periods in Northeast China

气温增幅最大,而且最低气温的增速快于最高气温^[58]。最低气温的显著上升致使大部分地区进入完全冻结期的起始日期推迟,部分地区年均推迟速度在 0.1 d/a 以上(图 5d)。但是,冬季气温在全区一致性增暖的趋势之外,还存在南北反相的模式,即当东北地区南部气温升高时,北部地区的气温则会降低^[59]。正是基于此,大、小兴安岭以北的地区完全冻结期起始日期的变化才会出现提前的趋势。

3.4 不同土壤冻融状态发生天数的时间变化趋势分析

根据不同土壤冻融状态的发生条件,本文统计得到中国东北地区不同冻融阶段的发生天数,并采用 M-K 趋势分析法研究了 1981—2019 年不同冻融阶段发生天数的时间变化特征。如图 6a 所示,近年来大兴安岭以西、呼伦贝尔高原以北地区及辽河平原春季冻融过渡期发生天数呈减少趋势,其他地区则为增加趋势,松嫩平原、三江平原及小兴安岭和长白山部分地区增加趋势显著,年均增长速度均在 0.1 d/a 以上(图 7a)。由图 4 可知,受全球变暖的影响,大兴安岭以西、呼伦贝尔高原以北地区虽然春季冻融过渡期开始时间稍有提前,但是结束时间显著提前,因此该区春季发生冻融交替现象的天数减少;其他地区进入春季冻融过渡期的开始时间有所提前,但结束时间并未明显提前,部分地区(例如:三江平原)甚至出现了推迟进入完全融化期的时间,所以该区春季发生冻融交替的天数呈增加趋势。从完全融化期的发生天数来看(图 6b),近年来全区基本以增加趋势为主,除呼伦贝尔高原、大兴安岭北段、小兴安岭、长白山南端及三江平原外,其他地区发生完全融化的天数呈显著增加趋势,年均变化速度高达 0.2 d/a,这与东北地区较大幅度的增温现象密切相关(图 7b)。与春季冻融过渡期恰恰相反,近年来东北地区秋

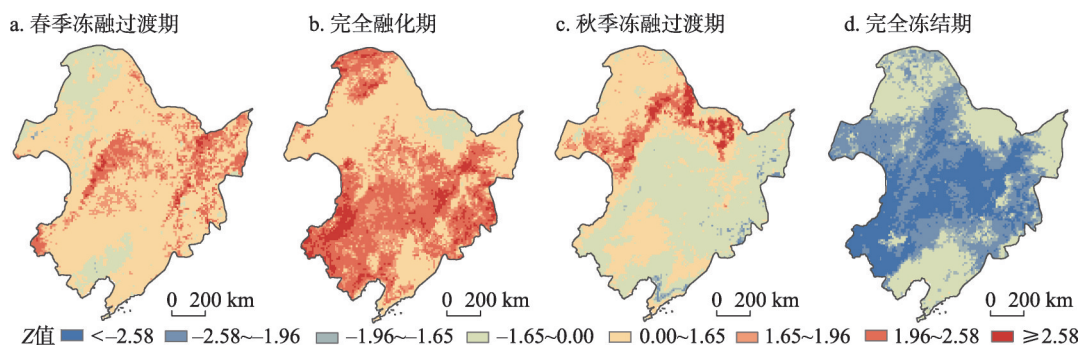


图 6 中国东北地区不同冻融阶段发生天数变化趋势分布

Fig. 6 Trends of temporal variation of annual number of days for different freeze-thaw periods in Northeast China

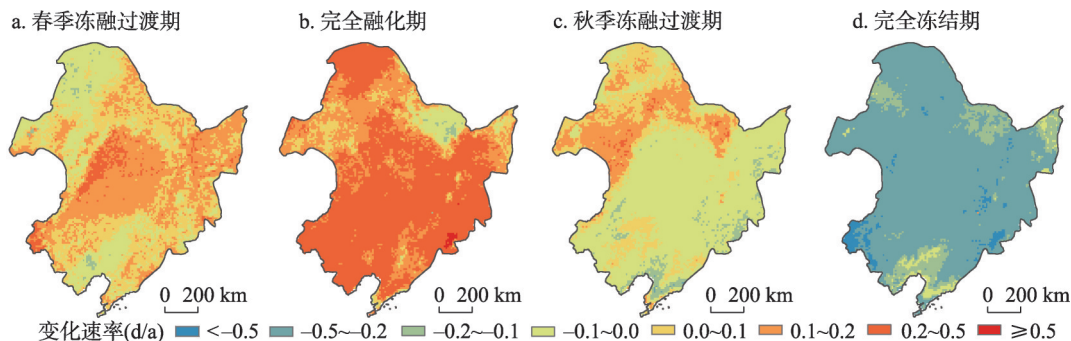


图 7 中国东北地区不同冻融阶段发生天数变化速率分布

Fig. 7 Temporal variation rates of annual number of days for different freeze-thaw periods in Northeast China

季冻融过渡期的发生天数呈北增南减的空间分异特征(图6c)。呼伦贝尔高原、大、小兴安岭及长白山南端秋季出现夜冻昼融现象的天数增加,特别是大兴安岭北段和小兴安岭部分地区表现为显著增加趋势,年增加速度达0.1 d/a;松嫩平原、三江平原、辽河平原、长白山北段及辽东半岛则为减少趋势,部分地区发生天数以0.1 d/a的速度减少(图7c)。由于东北地区最低气温增幅显著,所以北部的多年冻土区活动层厚度变大^[54,60],秋季冻融交替发生天数增加;南部地区开始秋季冻融过渡期的时间明显推迟,但结束时间推迟幅度较小(图4),因此该区发生天数以减少趋势为主。由图6d可以看出,近年来研究区完全冻结期的发生天数呈减少趋势,占全区2/3的地区发生天数明显减少,通过了90%的显著性检验。受全球变暖影响,东北地区增温幅度位居中国前列,因此研究区中部的季节冻土区完全冻结期明显变短,年均减少速度均在0.2 d/a以上(图7d)。

4 讨论

由上述研究可知,东北地区秋季冻融过渡期起始日期由北向南依次推迟,黑龙江省东北部在10月上旬就开始出现冻融现象,中部地区的初冻日集中于10月中下旬,西南部地区则会推迟到11月份才会进入冻融过渡期,该研究与晁华等^[54]及赵博宇等^[61]的研究结果一致。吉林省绝大部分地区秋季初冻日分布在11月上中旬,其中:长春的初冻日序为311天,与李倩等^[62]研究结果(10月底)相比推迟1周左右,这可能与研究时段和研究数据不同有关。本文的研究结果是以1981—2019年的逐小时土壤温度数据为基础得到的,而李倩等^[62]采用1962—2011年的冻土深度数据进行分析,受全球变暖影响,东北地区冻土初日呈现稳定推迟趋势,因此研究开始时段越早,平均冻结初日越早。辽宁省绝大部分地区初冻日出现于11月份,南部辽东湾附近地区晚于东部和北部地区,该研究结果与晁华等^[63]的结论基本一致。从完全融化期的起始时间来看,辽宁大部分地区从3月份就开始出现冻土消融,主要集中于3月中下旬,辽宁东北部地区和吉林绝大部分地区则会推迟到4月中上旬,该研究结果与晁华等^[54]的冻土消融日一致。但是,黑龙江南部和中部地区完全融化期起始时间集中于4月份,东北部地区要到5月份,而已有研究则认为冻土消融日主要出现在5~6月份。之所以造成如此大的差异,原因主要有两个方面:一是由于ERA5-LAND数据在高纬地区对地温的估计存在高估现象^[35],致使以此为基础得到的冻土消融日存在提前现象;二是受积雪的影响,在消融期其对土壤保温效果好,但对后期土壤融冻不利,增温延迟^[64]。雪盖对地温具有保温与冷却双向作用,致使冻土消融日推迟。已有研究表明:最大雪深增加1 m,ERA5-LAND对地温模拟的平均误差会增加0.77℃^[35]。虽然ERA5-LAND数据对雪参数化方案进行了改进,但在多年冻土区对地温的模拟精度仍然低于非多年冻土区,这或许也是造成高纬度地区高估地温的原因之一。因此,今后应加强积雪对ERA5-LAND数据的影响研究。

近年来受全球气候变暖的影响,东北地区多年冻土南界北移,冻土厚度减薄,活动层厚度增加,冻土面积减少^[65-66]。冻土是巨大的固态水库,冻土退化导致季节融化深度增大,地下冰融化,地下水位下降^[67],土壤冻融循环过程改变了地表水和地下水的运移规律,进而影响其水源涵养功能。另外,地下水位的降低使某些寒区植被无法有效利用赖以生存的土壤水分,造成植被的退化、萎缩甚至消亡,进而导致原本就脆弱的高寒生态系统受到更大的威胁^[68]。因此,冻土地下水系统在寒区水文循环中具有至关重要的作用。除此之外,受全球变暖影响,东北地区多年冻土区出现大面积退化,季节性冻土区

冻结期缩短而融化期延长,将会导致更频繁的冻融交替过程,再加上季节性雪盖减少,可能会加剧土壤冻结时的深度与严重程度。已有研究表明:冻融作用通过破坏土壤结构,改变土壤的含水量、容重、抗剪强度和团聚体稳定性等理化性质,增加土壤可蚀性^[69],从而影响土壤风蚀和水蚀的发生及过程,导致侵蚀强度增大,表层土壤腐殖质和有机质含量流失^[70]。作为中国最大的商品粮生产基地和国家粮食的“压舱石”,东北地区尤其是黑土区土壤冻融格局的改变,必然会加剧该区的土壤侵蚀状况,进而对中国的粮食安全产生影响。因此,土壤冻融状态的变化对粮食产量的影响研究也是今后的研究重点之一。

5 结论

随着全球气候变暖加剧,土壤冻融状态也随之发生显著变化,进而影响地气能量平衡、水循环及土壤碳循环。因此,研究土壤冻融状态的变化具有重要意义。本文基于1981—2019年ERA5-LAND逐小时0~7 cm土壤温度数据,借助GIS空间分析功能,通过Python编程处理分析了中国东北地区近地表土壤冻融状态的时空变化特征,主要得出以下结论:

(1) 从不同冻融状态起始日期的空间分布来看,近地表不同冻融阶段的起始日期主要受纬度和地形的影响,具有明显的纬度地带性和垂直地带性。春季冻融过渡期和完全融化期的起始日期由东南向西北均呈逐渐推迟趋势,而秋季冻融过渡期与完全冻结期起始日期则由东南向西北随纬度升高越来越早。春季冻融过渡期开始时间主要在3—4月,同一纬度上中部平原区优先进入春季冻融过渡期。进入完全融化期最早在3月中上旬,最晚则会推迟到5月中上旬。研究区绝大部分地区秋季冻融过渡期主要出现于10月中上旬—11月中上旬,完全冻结期开始时间主要集中于10月下旬—11月中下旬。

(2) 就不同冻融状态发生天数的空间分布而言,春季冻融过渡期空间差异较大,研究区南部的发生天数多于北部,西部多于东部,年均发生天数在30 d以内;秋季发生冻融的天数空间分异不大,发生天数明显少于春季,研究区内一半以上的地区发生天数在10 d以内。完全融化期发生天数具有明显的纬度地带性和垂直地带性,总体表现为从东南向西北逐渐减少的趋势,年均发生天数最多,主要介于150~240 d之间。受纬度和地形的影响,完全冻结期发生天数由南向北日益增多,其空间分布表现为一向南开口的簸箕形,年均发生天数主要集中于90~180 d。

(3) 从时间变化趋势来看,绝大部分地区春季冻融过渡期和完全融化期的起始日期提前,秋季冻融过渡期起始日期表现为北部提前南部延后,不同地区完全冻结期起始日期的时间变化趋势差异显著,这主要是受全球变暖的影响所导致的。春季冻融过渡期起始日期显著提前的地区主要位于松嫩平原、大兴安岭南端及辽东湾附近地区,年均变化速率在-0.2 d/a以上。大兴安岭以西、呼伦贝尔高原以北的地区,完全融化期起始日期1981—2019年提前了8 d以上。松嫩平原和长白山区秋季冻融过渡期起始日期推迟趋势尤为显著,部分地区年均变化速率在0.2~0.5 d/a之间。对于完全冻结期而言,中部广大的平原区呈不显著的推迟趋势,而大、小兴安岭、长白山、辽东半岛和辽西丘陵则会提前进入完全冻结状态。

(4) 从不同冻融状态发生天数的时间变化来看,近年来大兴安岭以西、呼伦贝尔高原以北地区及辽河平原春季冻融过渡期发生天数呈减少趋势,其他地区则为增加趋势。与春季冻融过渡期恰恰相反,东北地区秋季冻融过渡期的发生天数呈北增南减的空间分

异特征。受大幅增温现象影响, 全区完全融化期发生天数基本以增加趋势为主, 年均变化速度高达0.2 d/a。完全冻结期的发生天数则呈减少趋势, 占全区2/3的地区发生天数明显减少, 研究区中部的季节冻土区完全冻结期明显变短, 年均减少速度均在0.2 d/a以上。

参考文献(References)

- [1] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic health tundra mesocosms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(4): 641-654.
- [2] Wang Lianfeng, Cai Yanjiang, Xie Hongtu. Relationships of soil physical and microbial properties with nitrous oxide emission under effects of freezing-thawing cycle. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10): 2361-2366. [王连峰, 蔡延江, 解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2361-2366.]
- [3] Li Ruiping, Shi Haibin, Takeo Akae, et al. Characteristics of air temperature and water-salt transfer during freezing and thawing period. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(4): 70-74. [李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 冻融期气温与土壤水盐运移特征研究. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 70-74.]
- [4] Zhang T, Armstrong R L, Smith J. Investigation of the near-surface soil freeze-thaw cycle in the contiguous United States: Algorithm development and validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D22): 8860. DOI: 10.1029/2003JD003530.
- [5] Chen Bo, Li Jianping. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short-term frozen soil in China in recent 50 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(3): 432-443. [陈博, 李建平. 近50年来中国季节性冻土与短时冻土的时空变化特征. *大气科学*, 2008, 32(3): 432-443.]
- [6] Ma Wei, Wang Dayan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(4): 625-640. [马巍, 王大雁. 中国冻土力学研究50a回顾与展望. *岩土工程学报*, 2012, 34(4): 625-640.]
- [7] Yang Meixue, Yao Tandong, Hirose N, et al. Diurnal freeze/thaw cycles of the ground surface on the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 1974-1976. [杨梅学, 姚檀栋, Hirose Nozomu, 等. 青藏高原表层土壤的日冻融循环. *科学通报*, 2006, 51(16): 1974-1976.]
- [8] Zimov S A, Schuur E A G, Chapin F S III. Permafrost and the global carbon budget. *Nature*, 2006, 312: 1612-1613.
- [9] Cheng G D, Wu T H. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F2): 93-104.
- [10] Zhang Lixin, Jiang Lingmei, Chai Linna, et al. Research advances in passive microwave remote sensing of freeze-thaw processes over complex landscapes. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(10): 1023-1029. [张立新, 蒋玲梅, 柴琳娜, 等. 地表冻融过程被动微波遥感机理研究进展. *地球科学进展*, 2011, 26(10): 1023-1029.]
- [11] Zhang Tingjun, Jin Rui, Gao Feng. Overview of the satellite remote sensing of frozen ground: Visible-thermal infrared and radar sensor. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(9): 963-972. [张廷军, 晋锐, 高峰. 冻土遥感研究进展: 可见光、红外及主动微波卫星遥感方法. *地球科学进展*, 2009, 24(9): 963-972.]
- [12] Urakawa R, Shibata H, Kuroiwa M, et al. Effects of freeze thaw cycles resulting from winter climate change on soil nitrogen cycling in ten temperate forest ecosystems throughout the Japanese Archipelago. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 74: 82-94.
- [13] Lin Li, Wang Qibing, Zhang Zhenhua, et al. Warming enhances soil freezing and thawing circles in the non-growing season in a Tibetan alpine grassland. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(1): 171-178. [林笠, 王其兵, 张振华, 等. 温暖化加剧青藏高原高寒草甸土非生长季冻融循环. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 171-178.]
- [14] Zhao Lin, Cheng Guodong, Li Shuxun, et al. Thawing and freezing processes of active layer in Wudaoliang region of Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1205-1211. [赵林, 程国栋, 李述训, 等. 青藏高原五道梁附近多年冻土活动层冻结和融化过程. *科学通报*, 2000, 45(11): 1205-1211.]
- [15] Hu Guojie, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristics of hydro-thermal transfer during freezing and thawing period in permafrost regions. *Soils*, 2014, 46(2): 355-360. [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. *土壤*, 2014, 46(2): 355-360.]
- [16] Wang K, Zhang T, Zhong X H, et al. Changes in the timing and duration of the near-surface soil freeze /thaw status from

- 1956 to 2006 across China. *The Cryosphere*, 2015, 9(3): 1321-1331.
- [17] Peng X Q, Frauenfeld O W, Cao B, et al. Response of changes in seasonal soil freeze/thaw state to climate change from 1950 to 2010 across China. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2016, 121: 1984-2000.
- [18] Yang Shuhua, Wu Tonghua, Li Ren, et al. Spatial-temporal changes of the near-surface soil freeze-thaw status over the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(1): 43-53. [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. *高原气象*, 2018, 37(1): 43-53.]
- [19] Yang Shuhua, Li Ren, Wu Tonghua, et al. The variation characteristics of different freeze thaw status in the near surface and the relationship with temperature over the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1377-1387. [杨淑华, 李韧, 吴通华, 等. 青藏高原近地表土壤不同冻融状态的变化特征及其与气温的关系. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1377-1387.]
- [20] Shao Wanwan. Spatiotemporal variations of the near-surface soil freeze/thaw status in the northern hemisphere detected by using passive microwave remote sensing data [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. [邵婉婉. 基于被动微波遥感的北半球近地表土壤冻融时空分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.]
- [21] Wang Chenghai, Shi Rui, Zuo Hongchao. Analysis on simulation of characteristic of land surface in western Qinghai-Tibet Plateau during frozen and thawing. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(2): 239-248. [王澄海, 师锐, 左洪超. 青藏高原西部冻融期陆面过程的模拟分析. *高原气象*, 2008, 27(2): 239-248.]
- [22] Luo Siqiong, Lü Shihua, Zhang Yu, et al. Simulation analysis on land surface process of BJ site of central Tibetan Plateau using CoLM. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(2): 259-271. [罗斯琼, 吕世华, 张宇, 等. CoLM 模式对青藏高原中部 BJ 站陆面过程的数值模拟. *高原气象*, 2008, 27(2): 259-271.]
- [23] Xia Kun, Luo Yong, Li Weiping. Simulation of freezing and melting of soil on the northeast Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(22): 1828-1838. [夏坤, 罗勇, 李伟平. 青藏高原东北部土壤冻融过程的数值模拟. *科学通报*, 2011, 56(22): 1828-1838.]
- [24] Guo D L, Wang H J. Simulated change in the near surface soil freeze/thaw cycle on the Tibetan Plateau from 1981 to 2010. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(20): 2439-2448.
- [25] Liu Huolin, Hu Zeyong, Yang Yaoxian, et al. Simulation of the freezing-thawing processes at Nagqu area over Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2015, 34(3): 676-683. [刘火霖, 胡泽勇, 杨耀先, 等. 青藏高原那曲地区冻融过程的数值模拟研究. *高原气象*, 2015, 34(3): 676-683.]
- [26] Wang Zhixia, Nan Zhuotong, Zhao Lin. The applicability of MODIS land surface temperature products to simulating the permafrost distribution over the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 132-143. [王之夏, 南卓铜, 赵林. MODIS 地表温度产品在青藏高原冻土模拟中的适用性评价. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 132-143.]
- [27] Wang Baogang, Jin Rui, Zhao Zebin, et al. Recently research progresses in detecting surface soil freeze-thaw cycles with passive microwave remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(2): 193-201. [王宝刚, 晋锐, 赵泽斌, 等. 被动微波遥感在地表冻融监测中的应用研究进展. *遥感技术与应用*, 2018, 33(2): 193-201.]
- [28] Jin R, Zhang T J, Li X, et al. Mapping surface soil freeze thaw cycles in China based on SMMR and SSM/I brightness temperatures from 1978 to 2008. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2015, 47(2): 213-229.
- [29] Zou Defu, Zhao Lin, Wu Tonghua, et al. Assessing the applicability of MODIS land surface temperature products in continuous permafrost regions in the central Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 308-317. [邹德富, 赵林, 吴通华, 等. MODIS 地表温度产品在青藏高原连续多年冻土区的适用性分析. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 308-317.]
- [30] Zhao T J, Shi J C, Hu T X, et al. Estimation of high-resolution near surface freeze/thaw state by the integration of microwave and thermal infrared remote sensing data on the Tibetan Plateau. *Earth and Space Science*, 2017, 4: 472-484.
- [31] Luo D L, Jin H J, Marchenko S S, et al. Difference between near-surface air, land surface and ground surface temperatures and their influences on the frozen ground on the Qinghai-Tibet Plateau. *Geoderma*, 2018, 312: 74-85.
- [32] Hachem S, Duguay C R, Allard M. Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with ground surface and air temperature measurements in continuous permafrost terrain. *The Cryosphere*, 2012, 6(1): 51-69.
- [33] Meng Xiangui, Guo Junjian, Han Yongqing. Preliminary assessment of ERA5 reanalysis data. *Journal of Marine Meteorology*, 2018, 38(1): 91-99. [孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5 再分析数据适用性初步评估. *海洋气象学报*, 2018, 38(1): 91-99.]
- [34] Yang S H, Li R, Wu T H, et al. Evaluation of reanalysis soil temperature and soil moisture products in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Geoderma*, 2020, 377: 114583. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114583.

- [35] Cao B, Gruber S, Zheng D H, et al. The ERA5-Land soil temperature bias in permafrost regions. *The Cryosphere*, 2020, 14(8): 2581-2595.
- [36] Fu Changchao, Liu Jiping, Liu Zhiming. Spacial and temporal differentiation rule of the climate change in Northeast China in about 60 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(12): 60-65. [付长超, 刘吉平, 刘志明. 近 60 年东北地区气候变化时空分异规律的研究. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(12): 60-65.]
- [37] He Wei, Bu Rencang, Xiong Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in northeastern China from 1961 to 2005. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 519-531. [贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势. *生态学报*, 2013, 33(2): 519-531.]
- [38] Sun Fenghua, Li Liguang, Zhang Yaocun. Key zone, key period and key factor influencing climate in Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 911-916. [孙凤华, 李丽光, 张耀存. 影响中国东北地区气候的关键区、关键时段和关键因子. *地理科学*, 2011, 31(8): 911-916.]
- [39] Liu Dandan, Liang Feng, Wang Wanzhao, et al. Spatial and temporal variations of precipitation in Northeast China from 1901 to 2010 based on GPCC data. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 124-131. [刘丹丹, 梁丰, 王婉昭, 等. 基于 GPCC 数据的 1901—2010 年东北地区降水时空变化. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 124-131.]
- [40] Copernicus Climate Change Service (C3S). C3S ERA5-Land reanalysis. Copernicus Climate Change Service, date of access. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>, 2019.
- [41] ECMWF. ERA5- Land: data documentation. <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5-Land%3A+data+documentation>. Webpage last modified on Jun 12, 2020.
- [42] Shan Shuai, Shen Rungping, Shi Chunxiang, et al. Evaluation of land surface temperature and 2 m air temperature from five reanalyses datasets across North China in Winter. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(1): 37-47. [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. *高原气象*, 2020, 39(1): 37-47.]
- [43] Anandhi A, Perumal S, Gowda P H, et al. Long-term spatial and temporal trends in frost indices in Kansas, USA. *Climatic Change*, 2013, 120(1): 169-181.
- [44] Li X, Jin R, Pan X D, et al. Changes in the near-surface soil freeze-thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 33-42.
- [45] Jin R, Li X, Che T. A decision tree algorithm for surface soil freeze/thaw classification over China using SSM/I brightness temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2651-2660.
- [46] Wang Y, Liu H, Chung H, et al. Non-growing season soil respiration is controlled by freezing and thawing processes in the summer monsoon-dominated Tibetan alpine grassland. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2014, 28(10): 1081-1095.
- [47] Jiao Yongliang, Li Ren, Zhao Lin, et al. Processes of soil thawing freezing and features of soil moisture migration in the permafrost active layer. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 237-247. [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. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 237-247.]
- [48] Xie Yanmei, Jin Rui, Yang Xingguo. Algorithm development of monitoring daily near surface freeze/thaw cycles using AMSR-E brightness temperatures. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(2): 182-191. [谢燕梅, 晋锐, 杨兴国. AMSR-E 亮温监测中国近地表冻融循环算法研究. *遥感技术与应用*, 2013, 28(2): 182-191.]
- [49] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 2008, 349: 350-363.
- [50] Tian Haifeng, Qin Yaochen, Li Guodong, et al. Multi-time scales analysis of temperature variation based on wavelet and M-K methods in Yudong during 1951 to 2011. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35): 329-338. [田海峰, 秦耀辰, 李国栋, 等. 基于小波和 M-K 的豫东农区近 60 年气温变化的多时间尺度分析. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 329-338.]
- [51] Lu Wenxiu, Liu Bingjun, Chen Junfan, et al. Variation trend of precipitation in the Pearl River Basin in recent 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(1): 80-90. [陆文秀, 刘丙军, 陈俊凡, 等. 近 50a 来珠江流域降水变化趋势分析. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 80-90.]
- [52] Zhang Tianfeng, Wang Weitai, Jiang Huifeng, et al. Characteristics of abnormal warm winter climate events on Longdong Loess Plateau in Gansu. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(12): 81-88. [张天峰, 王位泰, 姜惠峰, 等. 甘肃陇东黄土高原暖冬异常气候事件特征分析. *中国农学通报*, 2019, 35(12): 81-88.]
- [53] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho test for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002, 259: 254-271.
- [54] Chao Hua, Wang Dang, Gong Qiang, et al. Temporal and spatial variation characteristics of frozen soil in Northeast

- China. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(18):144-147, 153. [晁华, 王当, 龚强, 等. 东北地区冻土的时空变化特征. 现代农业科技, 2019(18):144-147, 153.]
- [55] Liu Xiu. Effects of climate change on permafrost and hydrological processes in northeast China [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019. [刘秀. 气候变化对东北冻土及水文过程的影响[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.]
- [56] Li Ji, Jiao Min, Hu Chunli, et al. Characteristics of summer temperature and its impact factors in Northeast China from 1951 to 2012. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(5):74-83. [李辑, 焦敏, 胡春丽, 等. 1951—2012年东北地区夏季气温及其影响因子变化特征. 气象与环境学报, 2016, 32(5): 74-83.]
- [57] Qiao Xuemei, Liu Puxing. The temporal and spatial characteristics and genesis of cold wave in northern China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 357-367. [乔雪梅, 刘普幸. 中国北方地区寒潮时空特征及其成因分析. 冰川冻土, 2020, 42(2): 357-367.]
- [58] Lin Changwei, Zhu Yanli, Chang Xiaoli. Study on the changing trend of temperature in the four seasons of northeast China. Territory & Natural Resources Study, 2018(4): 68-72. [林长伟, 朱艳丽, 常晓丽. 东北地区四季气温变化趋势研究. 国土与自然资源研究, 2018(4): 68-72.]
- [59] Xu Di, Ren Baohua, Zheng Jianqiu, et al. Analysis of trend pattern and seesaw pattern of winter temperature in Northeast China. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(1): 127-133. [徐迪, 任保华, 郑建秋, 等. 中国东北地区冬季气温趋势及反相模态分析. 气象科学, 2017, 37(1): 127-133.]
- [60] Jin H J, Yu Q H, Lv L, et al. Degradation of permafrost in the Xing'anling Mountains, northeastern China. Permafrost and Periglacial Processes, 2007, 18(3): 245-258.
- [61] Zhao Boyu. The change trend and influence factor analysis of frozen soil in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2018. [赵博宇. 黑龙江省冻土地温变化趋势及影响因子分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2018.]
- [62] Li Qian. Permafrost change characteristics and atmospheric circulation background analysis in Changchun City from 1962 to 2011. Meteorology of Jilin, 2012, 19(4): 17-21. [李倩. 1962—2011年长春市冻土变化特征及其大气环流背景分析. 吉林气象, 2012, 19(4): 17-21.]
- [63] Chao Hua, Xu Hong, Wang Dang, et al. Characteristics of spatial and temporal variation of frozen soil in Liaoning Province in recent 50 years. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(1): 115-120. [晁华, 徐红, 王当, 等. 近50a来辽宁省冻土的时空变化特征. 气象科技, 2017, 45(1): 115-120.]
- [64] Ren Xizhen. Study on the effect of snow melt on the soil water content and temperature [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2010. [任喜珍. 积雪消融对土壤水热状况的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.]
- [65] He Ruixia, Jin Huijun, Lv Lanzhi, et al. Recent changes of permafrost and cold regions environments in the northern part of Northeastern China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 525-531. [何瑞霞, 金会军, 吕兰芝, 等. 东北北部冻土退化与寒区生态环境变化. 冰川冻土, 2009, 31(3): 525-531.]
- [66] He Ruixia, Jin Huijun, Chang Xiaoli, et al. Degradation of permafrost in the northern part of northeastern China: Present state and causal analysis. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(5): 829-834. [何瑞霞, 金会军, 常晓丽, 等. 东北北部多年冻土的退化现状及原因分析. 冰川冻土, 2009, 31(5): 829-834.]
- [67] Cao Wei, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. Review and outlook on hill-slope hydrological process affected by permafrost degradation. Journal of China Hydrology, 2020, 40(2): 1-6. [曹伟, 盛煜, 吴吉春, 等. 冻土退化影响下坡面水文过程研究进展及趋势展望. 水文, 2020, 40(2): 1-6.]
- [68] Ye Renzheng, Chang Juan. Study of ground water in permafrost regions of China: Status and process. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(1): 183-196. [叶仁政, 常娟. 中国冻土地下水研究现状与进展综述. 冰川冻土, 2019, 41(1): 183-196.]
- [69] Sun Baoyang, Li Zhanbin, Xiao Junbo, et al. Research progress on the effects of freeze-thaw on soil physical and chemical properties and wind and water erosion. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1): 337-347. [孙宝洋, 李占斌, 肖俊波, 等. 冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展. 应用生态学报, 2019, 30(1): 337-347.]
- [70] Cheng Y T, Li P, Xu G C, et al. The effect of soil water content and erodibility on losses of available nitrogen and phosphorus in simulated freeze-thaw conditions. CATENA, 2018, 166: 21-33.

Spatiotemporal variations of soil freeze-thaw state in Northeast China based on the ERA5-LAND dataset

YUE Shuping¹, YAN Yechao¹, ZHANG Shuwen², YANG Jiuchun², WANG Wenjuan³

(1. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130102, China; 3. College of Resources and Environment, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The soil freeze-thaw cycle plays an important role in land surface processes. Repeated freeze-thaw cycles can have profound effects on land-atmosphere energy exchange, surface runoff, plant growth, ecosystems and soil carbon & nitrogen cycles. Using spatial analysis functions of geographical information system and python programming language, this paper analyzed the spatial distributions and temporal variations of soil freeze-thaw state in Northeast China based on the ERA5-LAND hourly soil temperature dataset for the period 1981-2019. The results suggest that the start dates of the four soil freeze-thaw periods for the near-surface layer are mainly determined by latitude and topography. The start dates of freeze-thaw transition period in spring (SFTTP) and complete thawing period (CTP) show a southeast-northwest gradient with later starts in the northwest part, while the start dates of freeze-thaw transition period in autumn (AFTTP) and complete freezing period (CFP) exhibit a latitudinal pattern with earlier starts in the north. For most parts of the study area, the average annual number of days for SFTTP is less than 30, with higher values in the south and west compared to the north and east. The number of days for AFTTP, however, is below 10 per year for most parts of the region, with just a slight difference in the study area. The CTP is the longest compared to the other three periods, varying from 150 days in the northwest to 240 days in the southeast. The CFP, which comes next, ranges from 90 to 180 days per year, presenting a dustpan-shaped spatial pattern with higher values in the north and lower values in the south. Trend analysis shows that with the advance of start date for SFTTP and the delay of start date for AFTTP, the number of days for CTP has increased with a rate of 0.2 d/a. The number of days for SFTTP in the Liaohe Plain, the western part of the Da Hinggan Mountains and the northern part of Hulun Buir Plateau shows a decreasing trend, while in other regions an increasing trend is observed. In the western part of the Da Hinggan Mountains and the northern part of the Hulun Buir Plateau, the CTP starts earlier. The start date of AFTTP is significantly delayed in the Songnen Plain and Changbai Mountains, and the trend for the number of days varies substantially with an increase in the north and a decrease in the south. The start date for CFP occurs later in the vast area of the Northeast China Plain and occurs earlier in the Da Hinggan Mountains, Xiao Hinggan Mountains, Changbai Mountains, Eastern Liaoning Peninsula and Western Liaoning Hills. The number of days for CFP shows a declining trend throughout the study area, especially in the seasonally frozen area located in the central part with an annual decreasing rate of more than 0.2 d/a.

Keywords: ERA5- LAND; soil freeze- thaw state; frozen soil; spatio- temporal variations; Northeast China