

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.010; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.010.

田鑫, 萨楚拉, 孟凡浩, 等. 近 40 年内蒙古近地表土壤冻融状态时空演变特征解析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 149-159.

Tian Xin, Sa Chula, Meng Fanhao, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of freeze-thaw state of surface soil in Inner Mongolia over the past 40 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 149-159.

近 40 年内蒙古近地表土壤冻融状态时空演变特征解析

田鑫^{1,2}, 萨楚拉^{1,2}, 孟凡浩^{1,2}, 罗敏^{1,2},
王牧兰^{1,2}, 张翔^{1,2}, 张昊琛³

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室,
呼和浩特 010022; 3. 内蒙古自治区土地储备中心, 呼和浩特 010041)

摘要: [目的] 解析内蒙古近地表土壤冻融状态的时空分异及变化规律并量化驱动因素的影响, 为区域生态环境保护及基础设施建设提供理论依据。[方法] 基于 ERA5-LAND 土壤温度数据, 利用 Sen 趋势分析 (Theil-Sen median)、Mann-Kendall 检验和多元回归残差分析, 对内蒙古地区近 40 年地表土壤冻融状态的时空演变特征及其驱动因素进行了分析。[结果] (1) 近 40 年内蒙古地区秋冬始冻期和完全冻结期起始日期呈推迟趋势, 变化速率分别为 0.54 d/10 a 和 0.45 d/10 a; 在空间分布上, 随着经纬度的增加逐渐提前。冬春解冻期和完全融化期起始日期呈提前趋势, 变化速率分别为 2.17 d/10 a 和 2.15 d/10 a; 空间上随着经纬度的增加逐渐推迟。(2) 秋冬始冻期、完全冻结期和冬春解冻期的发生天数呈减少趋势, 变化速率分别为 0.10 d/10 a、2.61 d/10 a 和 0.27 d/10 a, 而完全融化期的发生天数则以 2.68 d/10 a 的速率在增加。空间分布上, 除完全冻结期呈东北向西南逐渐减少的趋势, 其余 3 个阶段均呈东北向西南逐渐增加的趋势。(3) 不同土壤冻融状态受气候变化和人类活动共同驱动影响的面积占比最大, 其次为单独由气候变化驱动影响的面积占比, 单独由人类活动驱动影响的面积占比最小。[结论] 近地表土壤冻融状态的时空分异及变化规律明显, 不同区域不同土壤冻融状态的驱动力各不相同, 对内蒙古地区生态环境保护及基础设施建设意义重大, 未来应更加深入分析气候变化及人类活动对其的影响。

关键词: 地表土壤冻融; 时空演变特征; 内蒙古; 气候变化; 人类活动

中图分类号: S152; P461⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0148-12

Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of freeze-thaw state of surface soil in Inner Mongolia over the past 40 years

Tian Xin^{1,2}, Sa Chula^{1,2}, Meng Fanhao^{1,2}, Luo Min^{1,2},
Wang Mulan^{1,2}, Zhang Xiang^{1,2}, Zhang Haochen³

(1. College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;
2. Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Inner Mongolia Autonomous Region,
Hohhot 010022, China; 3. Land Reserve Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010041, China)

Abstract: [Objectives] The aims of this study are to analyze the spatiotemporal differentiation and variation patterns of near-surface soil freeze-thaw state in Inner Mongolia, to quantify the influence of driving factors, so as to provide a theoretical basis for regional ecological environment protection and infrastructure construction. [Methods] Based on ERA5-LAND soil temperature data, the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of near-surface soil freeze-thaw states in Inner Mongolia over the past 40 years were analyzed by using Theil-Sen median, Mann-Kendall and multiple regression residual analysis

收稿日期: 2024-02-19

修回日期: 2024-03-09

资助项目: 国家自然科学基金(42361024, 42261079); 内蒙古自治区自然科学基金(2022MS04004); 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2022YFDZ0061); 内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金资助(2023JBPT004, 2022JBBJ014, 2022JBQN093)

第一作者: 田鑫(1999—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 硕士研究生, 主要从事冰冻圈遥感研究。E-mail: t3013174556@126.com

通信作者: 萨楚拉(1977—), 男(蒙古族), 内蒙古通辽人, 教授, 博士, 主要从事冰冻圈遥感研究。E-mail: sachula@imnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

methods. **[Results]** (1) In recent 40 years, the onset dates of the autumn-winter freezing period and the complete freezing period in Inner Mongolia showed a delayed trend, with the change rates of 0.54 d/10 a and 0.45 d/10 a, respectively; with respect to the spatial distribution, they were gradually advanced with the increase of latitude and longitude. The onset dates of the winter-spring thawing period and the complete thaw period showed an advanced trend, with the change rates of 2.17 d/10 a and 2.15 d/10 a, respectively; with respect to the spatial distribution, they were gradually delayed with the increase of latitude and longitude. (2) The occurrence days of autumn-winter initial freezing period, complete freezing period and winter-spring thawing period showed a decreasing trend, with the change rates of 0.10 d/10 a, 2.61 d/10 a and 0.27 d/10 a, respectively, while the occurrence days of complete melting period increased at a rate of 2.68 d/10 a. In terms of spatial distribution, except for the complete freezing period, the trend of decreasing gradually from northeast to southwest, the other three phases showed a trend of gradual increase from northeast to southwest. (3) The area of different soil freeze-thaw states affected by climate change and human activities together accounted for the largest proportion, followed by climate change alone, and human activities alone accounted for the smallest. **[Conclusion]** The spatiotemporal differentiation and variation patterns of near-surface soil freeze-thaw state are obvious. The driving forces of different soil freeze-thaw states in different regions are different, which is of great significance for ecological environment protection and infrastructure construction in Inner Mongolia. In the future, more in-depth analysis should be conducted on the impacts of climate change and human activities on it.

Keywords: near-surface soil freezing and thawing state; characteristics of spatiotemporal evolution; Inner Mongolia; climate change; human activities

冻土,一般是指温度在 0°C 或 0°C 以下,并含有冰的各种岩土和土壤,按冻结状态保持时间的长短,可分为短时冻土(数小时、数日以至半月)、季节冻土(半月至数月)以及多年冻土(数年至数万年)^[1]。近年来,受气候变化和人类活动的影响,全球冰冻圈处于加速萎缩的状态^[2]。冻土作为冰冻圈的重要组成部分,对气候变化具有高度的敏感性和重要的反馈作用^[3],近地表作为陆地和大气相互作用的重要界面,地表土壤的冻融状态能够直接或间接地反映陆地表面面对气候变化的响应程度^[4]。通过监测地表冻融状态的变化,对于了解气候变化、有效管理水资源、维护生态平衡和规划基础设施建设有着重要的意义^[5-6]。

内蒙古作为我国北方重要的生态屏障,区内多年冻土和季节冻土更是广泛分布,近地表土壤对于气候变化和人类活动极为敏感。近 40 年来,该区域内气候条件发生了显著变化,气温和 NDVI 显著增长,降水量、雪深和土壤含水量则显著减少^[7-8]。已有研究表明,气温的变化将直接影响土壤的冻融状态,随着气温的升高,土壤冻结起始日期会推迟、冻结持续时间会缩短^[4];降水量的增加会减少冻土对气候变暖的热响应,而区内降水量的减少则可能进一步增加冻土对气候变暖的热响应^[9];积雪在地表土壤与空气之间起着绝缘层的作用,积雪越厚土壤温度的变化越稳

定^[10],雪深的减少则可能使土壤温度的变化趋于活跃,导致更加频繁的冻融循环过程;植被覆盖对活动层冻融过程有着明显的迟滞作用,即植被覆盖度越高,活动层冻结和消融时间越滞后^[11];土壤冻融状态的变化实质为土壤水的相变过程,土壤含水量越低越容易受到气候变暖的影响^[12]。

此外,人类活动对地表土壤冻融状态的变化也有不同程度的影响,已有研究表明人类活动会对冻土土壤含水量和土壤温度的垂直格局产生显著影响^[13]。土壤含水量和土壤温度作为判别土壤冻融状态的关键要素,必然会影响土壤冻融状态的变化,而目前还缺乏人类活动对地表土壤冻融状态变化的专门研究。鉴于此,本研究将内蒙古地表冻融循环过程划分为 4 个阶段,进一步研究各阶段的时空变化规律,并就气候变化和人类活动对地表土壤冻融的影响进行分析,了解该地区地表土壤的冻融变化规律,以期为内蒙古的生态环境保护及经济基础建设提供科学依据。

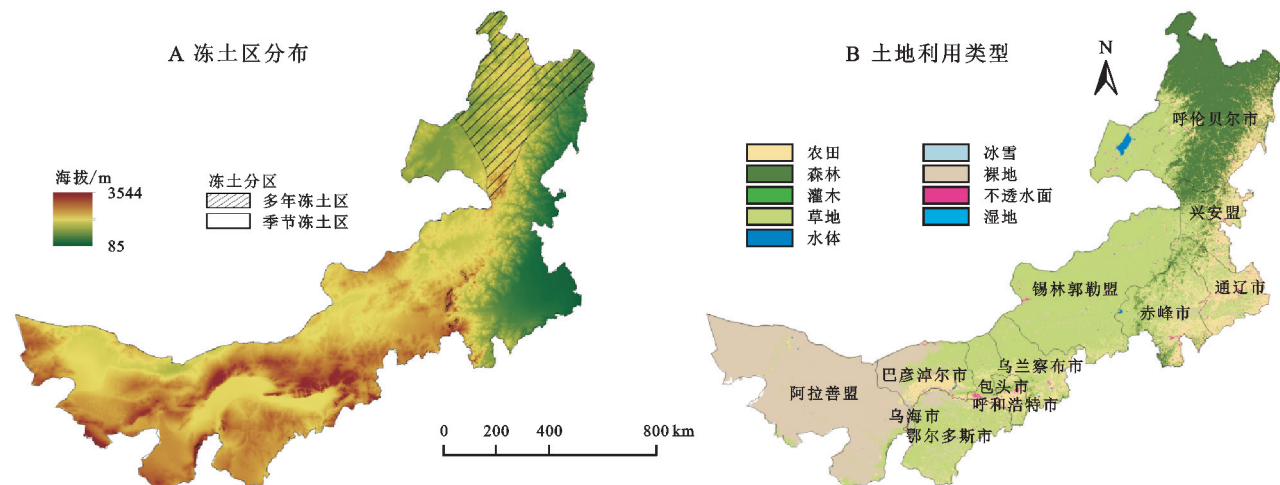
1 数据与方法

1.1 研究区概况

内蒙古地处祖国北疆,地理位置位于 $37^{\circ}24' - 53^{\circ}23' \text{ N}$, $97^{\circ}12' - 126^{\circ}04' \text{ E}$ (图 1),总面积 118.3 万 km^2 ,占全国总面积的 12.3%。内蒙古地貌类型多样,

以高原为主,兼有平原、山地、沙地和丘陵,平均海拔约 1 000 m^[14]。研究区冻土广泛分布,以季节冻土为主,面积约占全区总面积的 86.4%,多年冻土则主要分布于东北部的呼伦贝尔地区。研究区气候以温带大陆性季风气候为主,由于所跨经纬度范围较大,研究区气候空间差异显著,年均降水量 35~530 mm,整体呈东北

向西南递减的分布特征;年均温度-5~10℃,由东北向西南递增;受降水及气温等气候条件的综合影响,研究区的植被类型丰富度也由东北向西南逐渐减少^[15-16]。研究区内畜牧业发达,牲畜存栏量及舍饲牧业普及率高,受气候变化和长期过度放牧等人类活动的影响,区内土地退化现象较为严重^[15]。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 内蒙古冻土区分布和土地利用类型图

Fig. 1 Distribution of permafrost areas in Inner Mongolia and land use types

1.2 数据来源与处理

本研究所选用的 1982—2021 年 0—7 cm 土壤温度、2 m 温度、降水量、积雪深度、0—7 cm 土壤水分数据,其空间分辨率为 0.1°(9 km)^[17],均来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)所制作的第五代欧洲再分析(ERA5)的数据集(<https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>)。

冻土类型分区依据国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)提供的中国冻土分布图进行划分,通过对冻土类型进行整合,将研究区划分为多年冻土区和季节冻土区^[18]。

海拔高程数据为卫星传感器 ASTER-GDEM V1 提供的空间分辨率为 30 m 的数字高程模型(DEM),来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。

NDVI 数据由马里兰大学研究团队生产的 15 d 合成产品 GIMMS NDVI 3G 数据(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>)和美国国家航空航天局提供的 MODIS 16 d 合成产品 MODIS NDVI 数据(<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>)的基础上,利用线性回归分析重构了这两种数据的时间序列,将数据重新采样到相同的时空尺度,从而获得 1982—2021 年的 NDVI 数据。根据研究区内土地利用情况,认为 NDVI 值小于 0.15 的地区为无植被覆盖区^[19]。

本研究所选用的 2022 年土地利用类型数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)所提供的中国 30 m 年度土地覆盖数据集及其动态变化(1985—2022 年),土地利用类型包括农田、森林、灌木、草地、水体、冰雪、裸地、不透水面和湿地 9 类^[20]。

由于所选 ERA5-LAND 土壤温度数据所表示的是 0—7 cm 土层的温度,故选择基于站点观测的陆地表面向下 0 cm 和 5 cm 的土壤温度数据分别进行验证,拟合优度 R^2 分别为 0.86, 0.92(图 2)。该站点数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)所提供的中国大陆地区均一化及格点化的多层逐日土壤温度数据集(1960—2017)^[21]。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤冻融阶段的划分

以 0℃ 作为判别地表冻融状态的阈值^[22],参照 Li^[23] 和林笠^[24] 等的研究,以 8 月 1 日作为时间分界,将 8 月 1 日后首次连续 5 天地表土壤最高温度低于 0℃ 的第 1 天定义为完全冻结期起始日期,将 1 月 1 日至 8 月 1 日之前首次连续 5 天地表土壤最低温度高于 0℃ 的第 1 天定义为完全融化期起始日期。将最后 1 次连续 5 天地表土壤最高温度低于 0℃ 的最后 1 天定义为完全冻结期结束日期;最后 1 次连续 5 天地表土壤最低温度高于 0℃ 的最后 1 天定义为完全融化期结束日期。完全

冻结期起始日期到结束日期之间为完全冻结期,完全融化期起始日期到结束日期之间为完全融化期。介

于完全冻结期和完全融化期之间的时期,根据所处季节划分为秋冬始冻期和冬春解冻期。

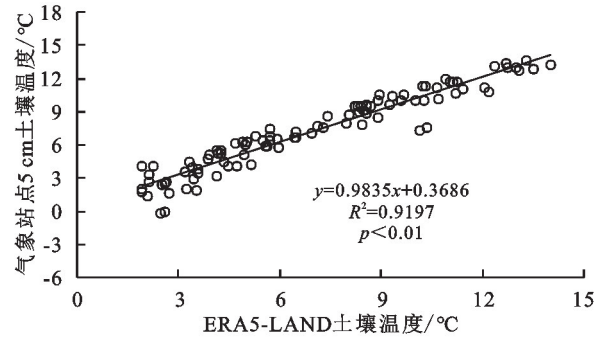
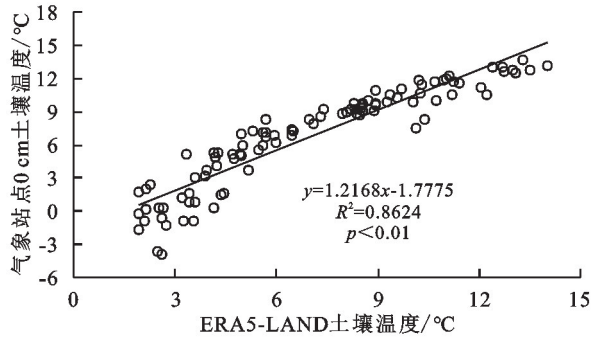


图 2 气象站点和 ERA5-LAND 土壤温度数据拟合

Fig. 2 Fitting of Meteorological Stations and ERA5-LAND Soil Temperature Data

1.3.2 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验 Theil-Sen Median 趋势分析作为一种稳健的非参数计算方法,可以很好地减少异常值的干扰,但是无法实现序列趋势的显著性判断,而 Mann-Kendall 作为一种非参数统计检验方法,既不受少数异常值的干扰,也不需要样本遵从一定的分布,两种方法能够很好地结合起来,分析判断长时间序列数据的变化趋势及其显著性^[25]。本研究对内蒙古 1982—2021 年不同冻融状态的起始日期和发生天数进行逐像元的趋势分析与检验。

Theil-Sen Median 趋势分析法计算公式:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right), 1982 \leq j \leq i \leq 2021 \quad (1)$$

当 $\beta > 0$ 时,表示时间序列呈增加趋势;当 $\beta < 0$ 时,表示时间序列呈减少趋势。

Mann-Kendall(MK)趋势检验计算如下:

设定 $\{T_i\}, i = 1982, 1983, 1984, \dots, 2021$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(T_j - T_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(T_j - T_i) = \begin{cases} +1 & T_j - T_i > 0 \\ 0 & T_j - T_i = 0 \\ -1 & T_j - T_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_i 和 T_j 分别表示像元 i 年和 j 年的像元值; n 表示时间序列的长度; sgn 是符号函数;

当 $n < 10$ 时,直接用统计量 S 进行双边趋势检验;当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 大致服从正态分布,使用检验统计量 Z 进行趋势检验:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)]}{18}$$

式中: n 为序列中数据个数; m 为序列中结(重复出现的数据组)的个数; t_i 是结的宽度(第 i 组重复数据组中的重复数据个数)。同样采用双边趋势检验,在给定显著性水平 α 下,在正态分布表中查得临界值 $Z_{1-\alpha/2}$,当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时,接受原假设,即趋势不显著;若 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$,则拒绝原假设,即认为趋势显著。

当 $|Z|$ 大于 1.65, 1.96, 2.58 时,表示趋势分别通过了信度为 90%, 95% 和 99% 的显著性检验,本研究给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,则临界值 $Z_{1-\alpha/2} = \pm 1.96$,即当 $|Z| > 1.96$ 时,变化趋势显著;当 $|Z| \leq 1.96$ 时,变化趋势不显著。

1.3.3 多元回归残差分析 采用多元回归残差分析方法研究气候变化和人类活动对地表土壤冻融状态变化的影响及相对贡献^[15,26]。该方法主要有以下 3 个步骤:(1) 基于不同土壤冻融状态起始时间、发生天数和各影响因素(气温、降水量、土壤含水量、雪深和 NDVI)的时间序列数据,分别以不同土壤冻融状态起始时间、发生天数为因变量、影响因素为自变量,建立多元线性回归模型,计算模型中各项参数;(2) 基于各影响因素及回归模型参数,分别计算不同土壤冻融状态起始时间、发生天数的预测值(Y_{CC}),用来表示气候因素对不同土壤冻融状态起始时间、发生天数的影响;(3) 分别计算不同土壤冻融状态起始时间、发生天数观测值(Y_{obs})与 Y_{CC} 之间的差值,即残差(Y_{HA}),用来表示人类活动对不同土壤冻融状态起始时间、发生天数的影响。具体计算公式如下:

$$Y_{CC} = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n + b \quad (5)$$

$$Y_{HA} = Y_{obs} - Y_{CC} \quad (6)$$

式中: Y_{CC} 和 Y_{obs} 分别指基于回归模型的预测值和基于地

表土壤温度的计算值; a_1, a_2, \dots, a_n 为模型参数; x_1, x_2, \dots, x_n 为不同影响因素; b 为方程截距; Y_{HA} 为残差。

1.3.4 不同土壤冻融状态变化驱动因素判定及影响 Y_{CC} 和 Y_{HA} 的线性趋势率分别表示在气候变化和人类活动影响下不同土壤冻融状态的变化趋势^[26]。趋势率为正表示气候变化或人类活动会推迟不同土壤冻融状态起始日期或增加发生天数;反之,则表示会提前起始日期或减少发生天数。为了更好地评价气候变化和人类活动对土壤冻融状态的影响,结合 MK 检验的结果将两种影响因素分为 5 个等级:显著提前(或减少)、不显著提前(或减少)、基本无影响、不显著推迟(或增加)和显著推迟(或增加)(表 1)。并根据表 2 对土壤冻融状态的主要驱动因素进行区分。

表 1 气候变化或人类活动对地表土壤冻融状态的影响分级

Table 1 Classification of the impact of climate change or human activities on the freeze-thaw state of surface soil

| Sen 趋势 | MK(<-1.96 或 >1.96) | MK($-1.96 \sim 1.96$) |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|
| <-0.1 | 显著提前(或减少) | 不显著提前(或减少) |
| >0.1 | 显著推迟(或增加) | 不显著推迟(或增加) |
| $-0.1 \sim 0.1$ | 基本无影响 | |

表 2 不同土壤冻融状态变化的驱动因素判定标准

Table 2 Criteria for determining the driving factors of freeze-thaw state changes in different soils

| Sen(Y_{obs}) | 驱动因素 | 驱动因素划分标准 | |
|------------------|-------|-----------------|-----------------|
| | | Sen(Y_{CC}) | Sen(Y_{HA}) |
| >0 | CC&HA | >0 | >0 |
| | CC | >0 | <0 |
| | HA | <0 | >0 |
| <0 | CC&HA | <0 | <0 |
| | CC | <0 | >0 |
| | HA | >0 | <0 |

注:CC 和 HA 分别表示驱动因素为气候变化和人类活动。

2 结果与分析

2.1 内蒙古地表土壤冻融状态的时空变化特征

2.1.1 不同土壤冻融状态起始日期的时空变化特征

从图 3A 可以看出,近地表层土壤完全冻结期起始日期主要集中在 10—11 月,由东北向西南逐渐推迟,呼伦贝尔市北部在 10 月中上旬进入完全冻结期,而阿拉善盟南部地区在 12 月中下旬才进入完全冻结期;同时,受局部地形变化的影响,大兴安岭东西两侧及锡林郭勒盟东、西部的起始日期相差近 15 d。近地表层土壤冬春解冻期起始日期的空间分布大体与完全冻结期相反,阿拉善盟西部和南部地区最早于 1 月份就进入了冬春解冻期,而东北部的多年冻土区 4 月中下旬才进入冬春解冻期,局部地形的变化使大兴安

岭东侧较西侧、锡林郭勒盟西部较东部起始日期早近 15 d。内蒙古地区完全融化期的起始日期主要在 4 月份及 5 月中上旬,与冬春解冻期的空间分布大体相似,阿拉善盟中部地区在 3 月末就进入了完全融化期,东北部的多年冻土区 5 月中下旬才开始进入;局部地形的变化使大兴安岭东侧比西侧早近 20 d,锡林郭勒盟西部比东部早近 10 d,乌兰察布市南部比北部迟近 10 d。整个研究区秋冬始冻期的起始日期相差不大,除东北部的多年冻土区集中在 9 月末,其余地区在 10 月份也都进入了秋冬始冻期。

从变化趋势的空间分布来看(图 3B),完全冻结期起始日期在大兴安岭东侧,与大兴安岭相平行地带推迟趋势显著,推迟速率在 0.2 d/a 以上;东北部的多年冻土区及西部的阿拉善盟至鄂尔多斯市的东部地区则以不显著提前趋势为主,变化速率在 $-0.2 \sim 0$ d/a。从全区近 40 年的时间变化趋势来看(图 4),完全冻结期起始日期年均约推迟 0.04 d,其中季节冻土区推迟速率较全区更快一些,年均约 0.06 d,而多年冻土区则年均提前约 0.02 d。冬春解冻期起始日期以呼伦贝尔市北部、东部的西辽河流域、中部的乌兰察布市至巴彦淖尔市东部地区的提前趋势显著,提前速率在 0.2 d/a 以上,西部阿拉善盟仅零星区域呈推迟趋势;近 40 年全区年均提前约 0.22 d,其中多年冻土区的提前速率略快于全区,季节冻土区的提前速率则与全区接近。

完全融化期起始日期的提前趋势则更加明显,1982—2021 年,全区完全融化期起始日期年均提前约 0.21 d,其中,多年冻土区年均提前约 0.18 d,季节冻土区的提前速率更快,年均提前约 0.22 d。整个研究区秋冬始冻期起始日期的变化趋势则比较稳定,除位于东部的西辽河流域有显著的推迟趋势,推迟速率在 0.2 d/a 以上,其余各地的变化速率均在 $-0.2 \sim 0.2$ d/a;就年均变化趋势来看,季节冻土区年均推迟约 0.05 d,与全区变化速率接近,多年冻土区的推迟速率更快(0.07 d/a)。

2.1.2 不同土壤冻融状态发生天数的时空变化特征

由图 5A 看出,内蒙古地区近地表土壤冻融状态发生天数以完全融化期最长,整个研究区年均发生天数在 173 d 以上,全年近一半的时间处于完全融化期;其次是完全冻结期,全区年均发生天数在 127 d 以上,两种冻融状态的年均累计持续时间近 10 个月;冬春解冻期和秋冬始冻期的发生天数相对较少,全区年均发生天数都接近 1 个月,但冬春解冻期较秋冬始冻期的发生天数较多。完全冻结期发生天数的空间分布受经纬度和局部地形变化的影响较大,东北部多年冻土区发生天数在 180 d 以上,而西部阿拉善盟南

部和西部地区发生天数仅有 18~60 d,发生天数最大时间差约 5 个月;局部地形变化使大兴安岭西侧较东侧、锡林郭勒盟东部较西部发生天数多达 30 d。冬春解冻期发生天数的空间分布具有明显的异质性,总体表现为东北向西南逐渐增加的趋势,呼伦贝尔市东部的嫩江、甘河、诺敏河流域发生天数都小于 20 d,而阿拉善盟西部和南部地区发生天数都大于 60 d。完全融化期与完全冻结期发生天数的空间分布大体相反,完

全冻结期发生天数相对较多的地区,完全融化期则相对较少,东北部多年冻土区发生天数在 123~150 d 之间,西部阿拉善盟大部、鄂尔多斯市及东部的西辽河流域发生天数都大于 190 d;局部地形的变化使大兴安岭东西两侧发生天数相差近 1 个月。整个研究区秋冬始冻期发生天数的空间差异较小,研究区 69.9% 的地区发生天数在 10~30 d 之间,所以整个区域在秋冬始冻期出现冻融交替的现象也较少。

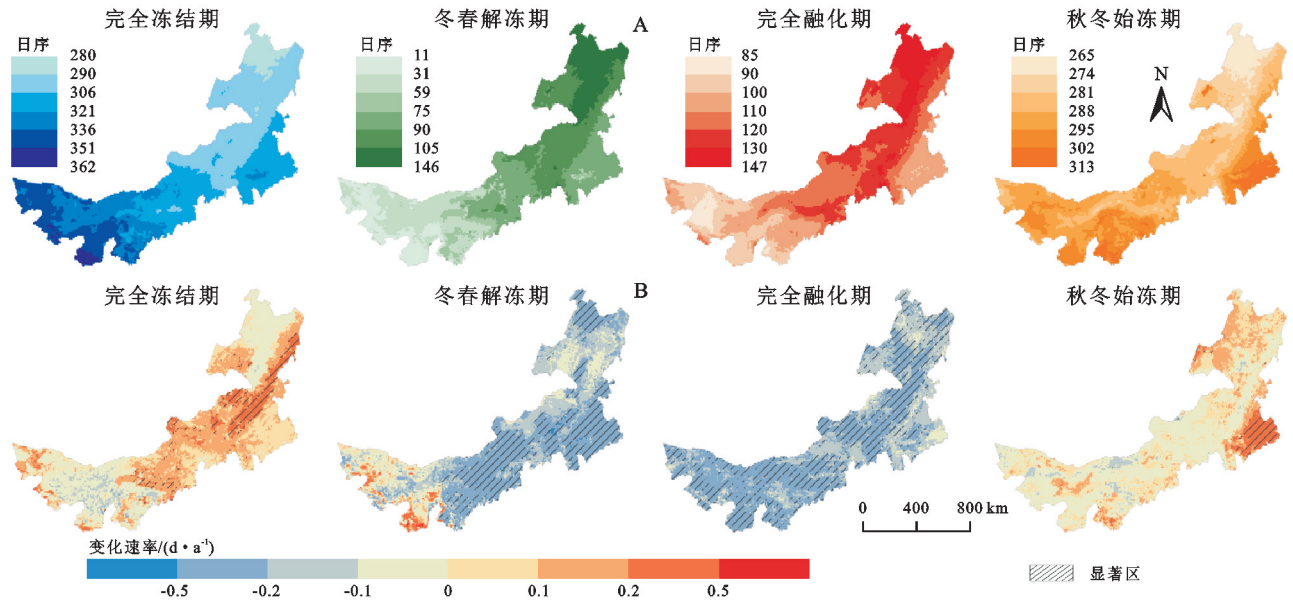


图 3 1982—2021 年内蒙古地区不同冻融状态起始日期分布 (A) 与变化趋势分布 (B)

Fig. 3 Distribution of starting dates (A) and changing trend (B) of different freeze-thaw states in Inner Mongolia from 1982 to 2021

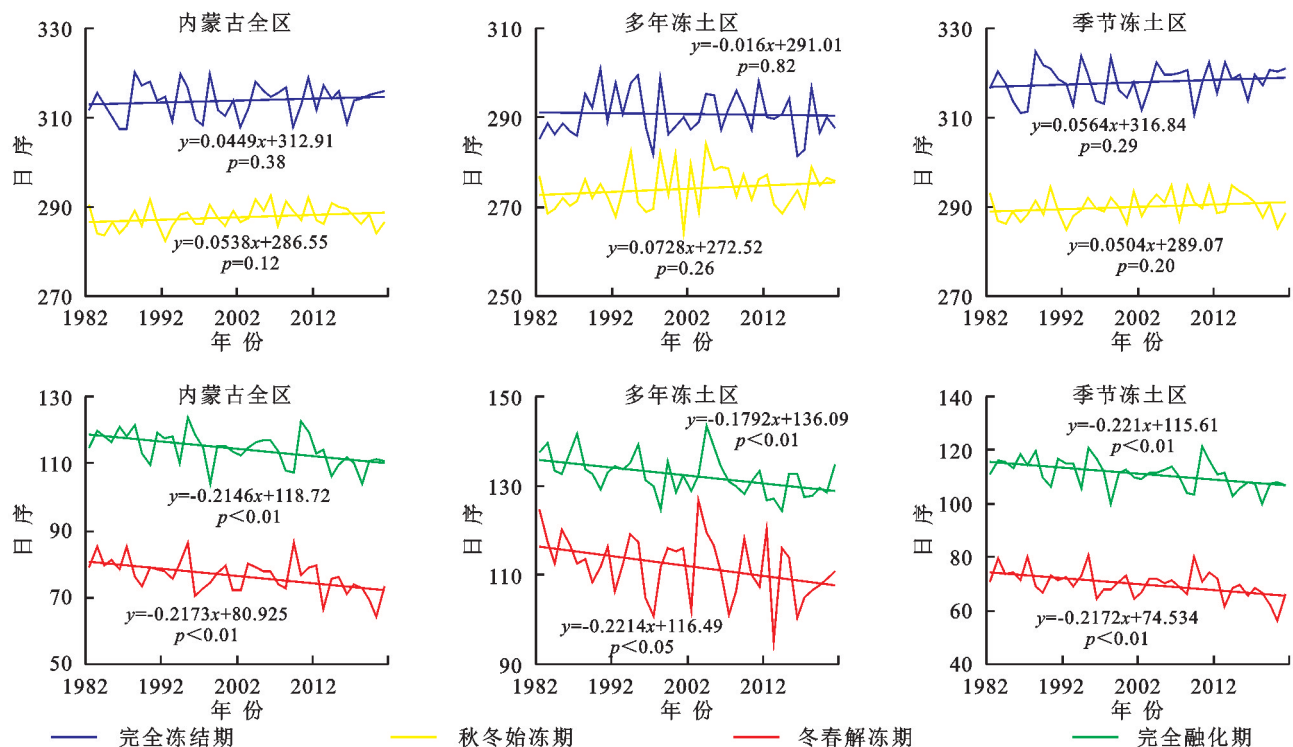


图 4 内蒙古地区不同冻融状态起始日期年际变化趋势

Fig. 4 Interannual variation trend of starting date of different freeze-thaw states in Inner Mongolia

由图 5B 看出,1982—2021 年内蒙古地区完全冻结期发生天数整体呈减少趋势,仅阿拉善盟南部及中西部零星地区呈不显著增加趋势。全区完全冻结期发生天数年均减少约 0.26 d(图 6),其中,季节冻土区较全区的减少速率更快,年均减少约 0.28 d。冬春解冻期以中西部地区、多年冻土区北部、大兴安岭东侧为增加趋势,增加速率为 0.1~0.5 d/a,其余地区为减少趋势;全区年均减少 0.027 d,季节冻土区年均减少 0.036 d,而多年冻土区则年均增加 0.027 d。

整个研究区完全融化期发生天数以增加趋势为

主,不论是多年冻土区还是季节冻土区,增加速率均超过 0.25 d/a。与冬春解冻期发生天数变化趋势的空间分布相似,整个研究区秋冬始冻期发生天数的变化相对平缓,仅大兴安岭东侧平行条状地带有显著的增加趋势,增加速率介于 0.2~0.5 d/a,约占全区的 5.4%;东部西辽河流域零星区域有显著减少趋势,减少速率在 0.2~0.5 d/a 之间,约占全区的 8.4%;其余地区的变化趋势比较稳定,变化速率在 -0.2~0.2 d/a;多年冻土区年均减少 0.09 d,而季节冻土区则有年均不到 0.01 d 的增加。

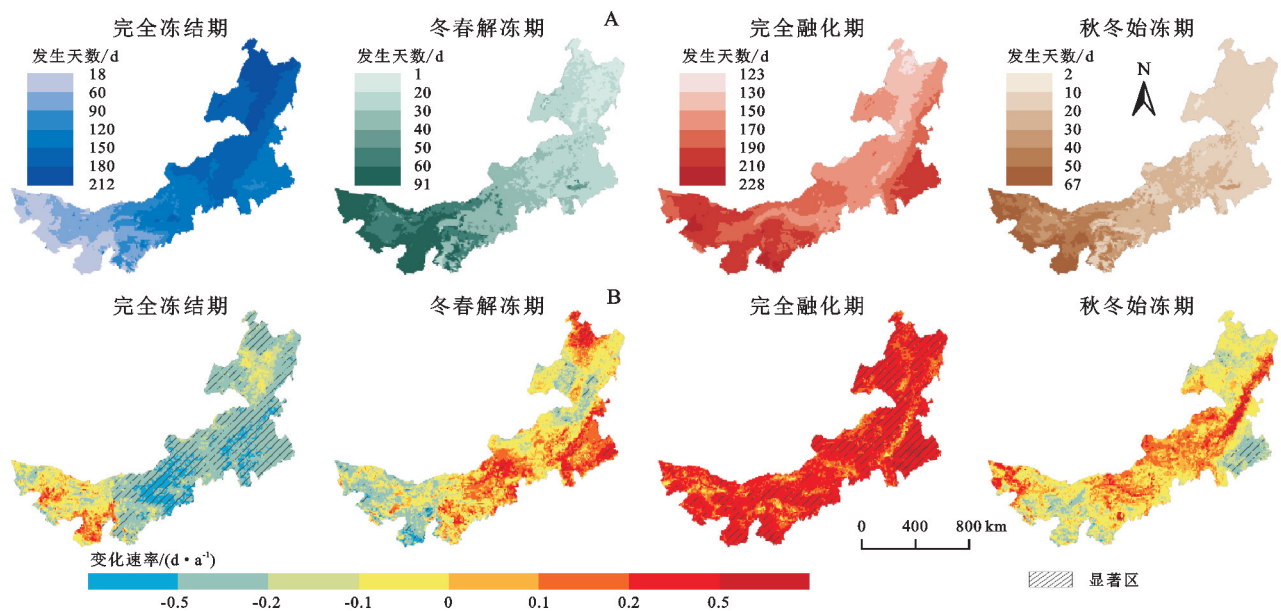


图 5 1982—2021 年内蒙古地区不同冻融状态发生天数分布(A)与变化趋势分布(B)

Fig. 5 Distribution of days (A) and variation trend (B) of different freeze-thaw states in Inner Mongolia during 1982–2021

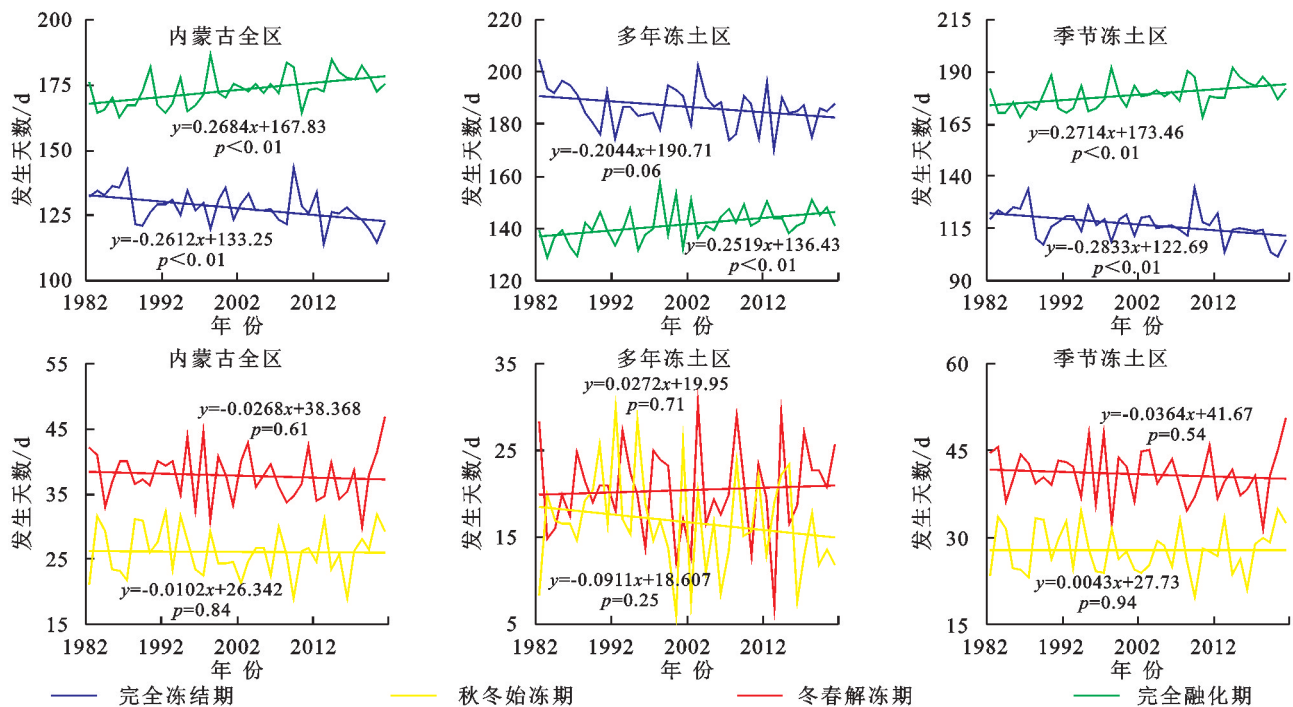


图 6 内蒙古地区不同冻融状态发生天数年际变化趋势

Fig. 6 Interannual variation trend of different freeze-thaw days in Inner Mongolia

2.2 内蒙古地表土壤冻融状态变化的驱动力分析

2.2.1 气候变化对地表土壤冻融状态的影响空间分布

从图7可以看出,气候变化对不同土壤冻融状态的影响有着明显的空间异质性。从气候变化对不同土壤冻融状态起始日期的影响来看,全区约有69.4%的区域显示气候变化对完全冻结期基本无影响;气候变化使完全冻结期推迟的区域约占21%,主要分布在锡林郭勒盟东部地区;约有9.6%的区域显示气候变化使完全冻结期提前,主要分布在西部的阿拉善盟。气候变化主要使冬春解冻期提前,提前区域面积约占85.9%;气候变化使冬春解冻期推迟的区域主要分布在阿拉善盟的西部零星区域,约占全区的3.8%。气候变化对完全融化期的影响只有提前和基本无影响两种,其中,基本无影响区域主要分布在东北部和东部地区,约占全区的38.2%。全区84.2%的区域显示气候变化对秋冬始冻期基本无影响;气候变化使秋

冬始冻期推迟的区域主要分布在东部的通辽市和赤峰市,约占全区的14.8%。

从气候变化对不同土壤冻融状态发生天数的影响来看,气候变化主要使完全冻结期发生天数减少,减少区域面积约占84.9%;对呼伦贝尔市的中部和阿拉善盟中东部地区基本无影响。气候变化使冬春解冻期发生天数减少的区域主要分布在西部的阿拉善盟地区,约占全区的28.6%;气候变化使冬春解冻期发生天数增加的区域主要分布在东部的通辽市和赤峰市,约占全区的9.9%。气候变化对完全融化期发生天数的影响主要为增加和基本无影响,分别占全区的77.5%和22.4%。气候变化对秋冬始冻期发生天数影响变化的像元分布比较分散,其中约有12%的区域显示气候变化会使秋冬始冻期的发生天数增加;约有20.4%的区域显示秋冬始冻期发生天数减少,主要分布在阿拉善盟东部、通辽市和呼伦贝尔市中部地区。

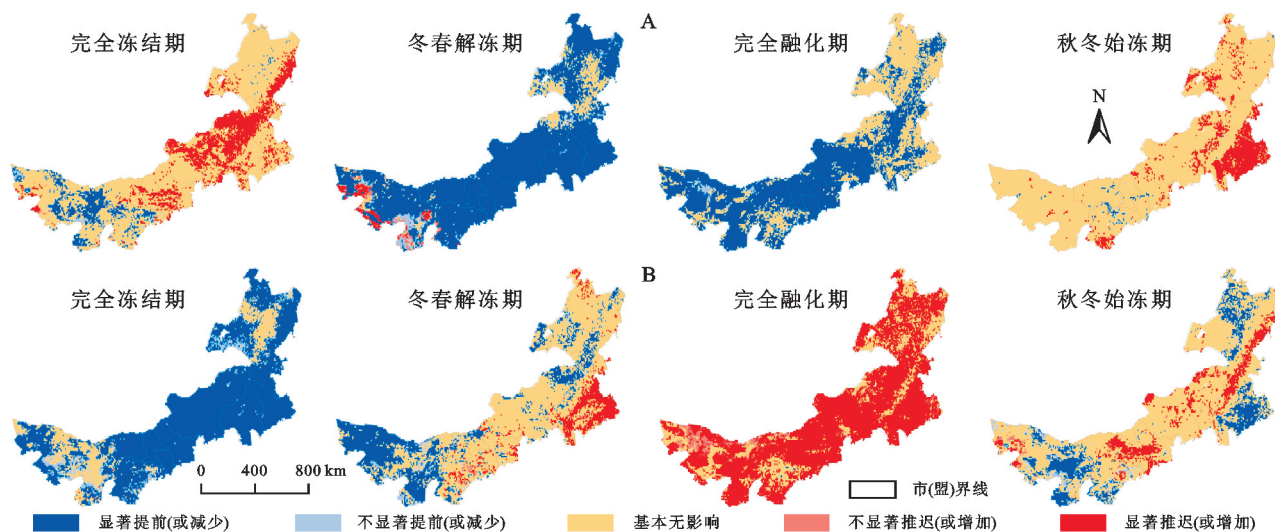


图7 1982—2021年气候变化对不同土壤冻融状态起始日期(A)和发生天数(B)的影响

Fig. 7 Effects of climate change on starting dates (A) and occurrence days (B) of different soil freeze-thaw states during 1982–2021

2.2.2 人类活动对地表土壤冻融状态的影响空间分布

从人类活动对地表土壤冻融状态影响的空间分布来看(图8),人类活动影响的空间分布相对分散,相较于气候变化的影响,人类活动的影响较小。不同冻融状态起始日期受人类活动无影响的区域面积更大,就完全冻结期而言,人类活动推迟的区域面积仅占6.4%,提前区域的面积更小仅占1.4%。人类活动使冬春解冻期提前的区域面积约占19.5%,主要分布在呼伦贝尔市北部、锡林郭勒盟西部和阿拉善盟西部地区;人类活动使冬春解冻期推迟的区域主要分布在阿拉善盟北部,约占全区的7.4%。人类活动使完全融化期提前的区域面积约占40.9%,其中约有5.5%的区域显著提前,主要分布在呼伦贝尔市西部地区;其余地区受到人类活动的影响则较小。全区秋冬始冻期受人类活动影响变化的区域面积

更小,约有5.4%的区域显示人类活动会推迟秋冬始冻期,主要分布在通辽市东部地区;仅有零星区域显示人类活动使秋冬始冻期提前,约占全区的2.9%。

从人类活动对不同冻融状态发生天数的影响来看,全区约有22.8%的区域显示人类活动使完全冻结期发生天数减少,主要分布在呼伦贝尔市北部、兴安盟和锡林郭勒盟西部地区;约有7.8%的区域显示气候变化使完全冻结期发生天数增加,主要分布在西部的阿拉善盟。人类活动使冬春解冻期发生天数增加的区域主要分布在呼伦贝尔市北部、锡林郭勒盟西部和乌兰察布市等地区,约占全区的23.4%;仅有约9%的区域显示冬春解冻期发生天数会减少,主要分布在阿拉善盟东南部地区。人类活动对完全融化期发生天数的影响主要为增加和基本无影响,分别占全

区的 51% 和 48.6%。人类活动对秋冬始冻期发生天数影响变化的像元分布比较分散, 其中约有 12.9% 的

区域显示人类活动会使秋冬始冻期的发生天数增加, 约有 7% 的区域显示秋冬始冻期发生天数减少。

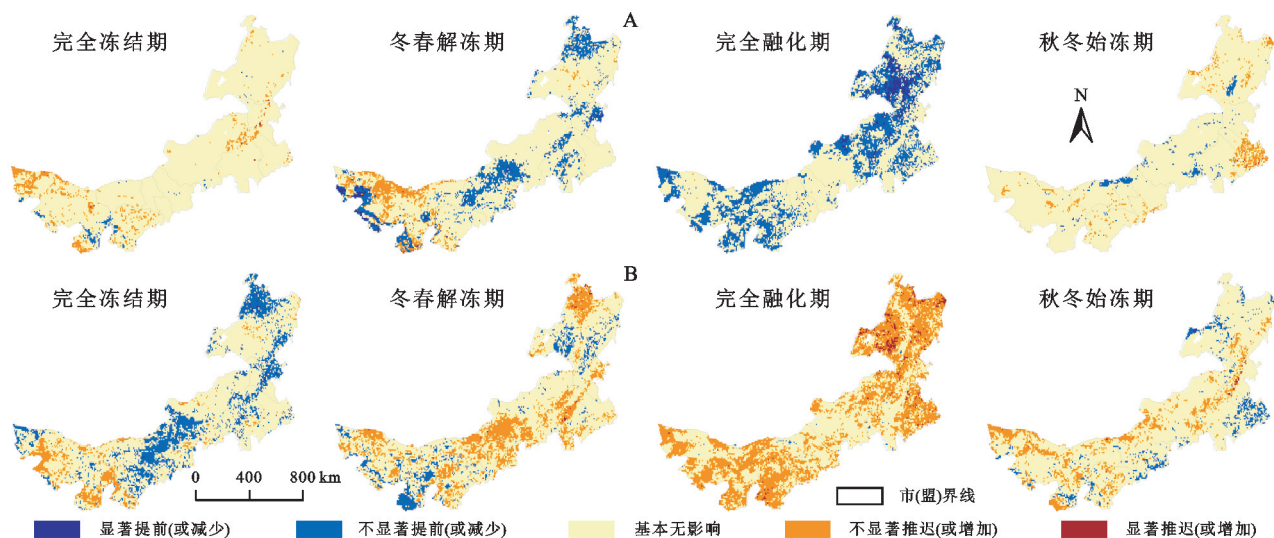


图 8 1982—2021 年人类活动对不同土壤冻融状态起始日期 (A) 和发生天数 (B) 的影响

Fig. 8 Effects of human activities on the onset dates (A) and occurrence days (B) of different soil freeze-thaw states during 1982–2021

2.2.3 气候变化和人类活动对地表土壤冻融状态的综合影响 内蒙古地表土壤冻融状态受气候变化和人类活动的共同影响, 但不同冻融状态变化的驱动因素各不相同, 通过逐像元的分析不同冻融状态变化的驱动因素, 结果如图 9 所示。从不同冻融状态起始日期变化的驱动因素空间分布来看, 完全冻结期驱动因素的空间分布具有明显的异质性, 东北部的多年冻土区、西部的阿拉善盟、鄂尔多斯市和巴彦淖尔市的西北部共约 43.3% 的区域显示完全冻结期提前, 其中受气候变化影响的面积最大, 约占全区的 24%; 其余约 56.7% 的区域显示完全冻结期推迟, 其中气候变化和人类活动共同驱动的区域面积最大, 约占全区的 38.1%, 其次为气候变化驱动的区域面积约占 15.5%。冬春解冻期和完全融化期受气候变化和人类活动共同驱动提前的区域面积分别为 61.1% 和 89.8%; 约有 33.3% 的区域显示气候变化驱动冬春解冻期提前, 主要分布在阿拉善盟和呼伦贝尔市中部地区。秋冬始冻期驱动因素的空间分布则比较分散, 受气候变化和人类活动共同驱动区域的面积最大, 约占全区的 47.9%, 其中推迟区域面积更大约占全区的 33.4%。

从不同冻融状态发生天数变化的驱动因素空间分布来看, 全区约有 96.2% 的区域显示完全冻结期发生天数减少, 其中气候变化和人类活动共同驱动的面积约占 64.8%, 其次为气候变化驱动的区域面积约占 30.3%, 人类活动驱动区域面积仅占 1%。冬春解冻期驱动因素的空间分布相对分散, 受气候变化和人类活动共同驱动的面积约占 53%, 受气候变化驱动的区域面积约占 30%, 人类活动驱动的面积约占 17%。全区

约有 88.5% 的区域显示气候变化和人类活动共同驱动完全融化期发生天数增加; 由气候变化驱动完全融化期发生天数增加的区域约占 9.1%。全区秋冬始冻期约有 53.8% 的区域受气候变化和人类活动的共同驱动; 其次为气候变化驱动区域的面积约占全区的 30.7%; 受人类活动驱动区域的面积最小, 占全区的 15.5%。

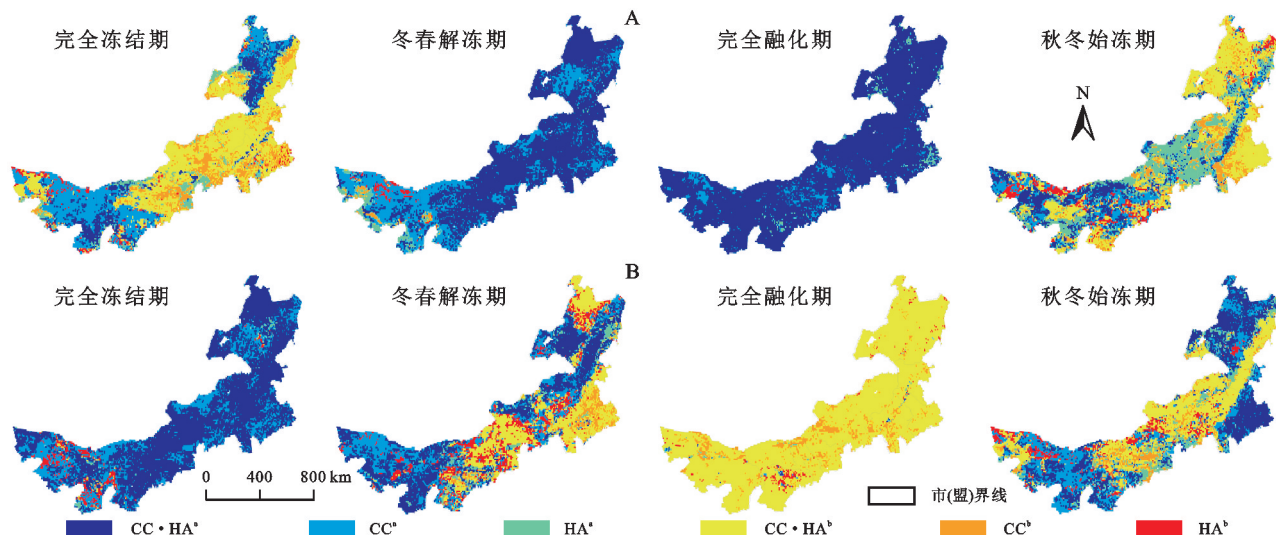
3 讨论

1982—2021 年内蒙古地区完全冻结期起始日期推迟, 完全融化期起始日期提前, 完全冻结期发生天数减少, 完全融化期发生天数增加, 该结果与岳书平^[22]、杨淑华^[27]、邵婉婉^[28]等分别在东北地区、青藏高原、北半球的研究结论相吻合, 说明受气候变化和人类活动的影响, 内蒙古地区的冻土环境发生显著变化。相较于完全冻结期, 完全融化期起始日期和发生天数的变化速率更快, 说明近地表土壤在夏季的变暖趋势更为显著; 无论起始日期还是发生天数, 季节冻土区的变化速率较多年冻土区更快, 这也进一步说明季节冻土对气候的变化更加敏感^[29]。

全球变化和人类活动会直接影响到地表状况和冻土活动层的冻结融化过程^[30]。从研究结果来看, 气候变化和人类活动对地表土壤冻融状态的影响有着明显的空间异质性, 以区内东北部和西部地区尤为明显。除了受区域内气候变化的影响, 以城镇化为代表的人类活动增强也是重要的原因, 近年来, 城镇“热岛”效应的增加、畜牧业和旅游业的发展以及矿产资源和自然资源的开采等都对冻土环境造成了显著的影响; 同时, 由于各类工程对工作地表的任意开挖和植

被破坏等活动,使得原有动态平衡机制被破坏,导致冻土活动层的厚度增加,加速多年冻土的退化^[13,30]。

总的来说,气候变化和人类活动是导致区域内地表土壤冻融状态变化的共同驱动力。



注:CC 和 HA 分别表示驱动因素为气候变化和人类活动;^a和^b分别表示不同冻融状态提前(或减少)和推迟(或增加)。

图 9 内蒙古地表土壤冻融状态起始日期(A)和发生天数(B)变化的驱动因素空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of driving factors for the change of starting date (A) and occurrence days (B) of freeze-thaw state in Inner Mongolia

本研究所采用的多元回归残差分析方法虽然已被广泛地用于分离人类活动的影响研究中,但在多元回归模型建立选择气候因素时,由于内蒙古地区所跨经纬度范围较大,气候条件复杂多样,不同区域地表土壤冻融状态的影响因素各不相同;同时由于 ERA5-LAND 数据容易受到雪深的影响,并且分辨率略小,所以研究结果可能与实际情况存在误差^[22,26]。因此,在今后对地表土壤冻融状态的研究中,应进一步细化地表土壤的影响因素,同时结合实测数据,进一步提高近地表土壤冻融状态监测结果的准确性。

4 结论

(1) 从空间变化上来看,不同土壤冻融状态受经纬度变化影响,局部受地形变化影响较大。随着经纬度的增加,秋冬始冻期和完全冻结期的起始日期逐渐提前,而冬春解冻期和完全融化期的起始日期则逐渐推迟;就不同冻融状态发生天数的空间分布而言,除完全冻结期呈东北向西南逐渐减少的趋势,其余 3 个阶段均呈东北向西南逐渐增加的趋势。同时,受局部地形变化的影响,使大兴安岭东、西两侧及锡林郭勒盟东、西部有明显时间差。

(2) 从时间变化上来看,近 40 年内蒙古地区不同冻融状态起始日期及发生天数显著变化。全区秋冬始冻期和完全冻结期起始日期呈推迟趋势,变化速率分别为 0.54 d/10 a 和 0.45 d/10 a,冬春解冻期和完全融化期起始日期呈提前趋势,变化速率分别为 2.17 d/10 a 和 2.15 d/10 a;进而使完全融化期发生天数呈增加趋势,变

化速率为 2.68 d/10 a,而秋冬始冻期、完全冻结期和冬春解冻期的发生天数则呈减少趋势,变化速率分别为 0.10 d/10 a, 2.61 d/10 a 和 0.27 d/10 a。

(3) 1982—2021 年内蒙古地区气候变化和人类活动对地表土壤冻融状态有着显著影响,其中对完全冻结期和秋冬始冻期的影响主要为起始日期推迟、发生天数减少;对冬春解冻期的影响主要为起始日期提前、发生天数减少;对完全融化期的影响主要为起始日期提前、发生天数增加。气候变化和人类活动的共同驱动是近 40 年来内蒙古地表土壤冻融状态变化的主要驱动因素。

参考文献(References):

- [1] 周幼吾. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Zhou Y W. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] 钟敬羽, 康世昌, 郭万钦, 等. 最近十多年来冰冻圈加速萎缩: IPCC 第六次评估报告之冰冻圈变化解读[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 946-953.
Zhong X Y, Kang S C, Guo W Q, et al. The rapidly shrinking cryosphere in the past decade: an interpretation of cryospheric changes from IPCC WGI Sixth Assessment Report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 946-953.
- [3] 王国亚, 毛伟峰, 贺斌, 等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1293-1300.
Wang G Y, Mao W Y, He B, et al. Changes in Snow Covers during 1961-2011 and Its Effects on Frozen Ground in Altay Region, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1293-1300.

- [4] 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[J].冰川冻土, 2019,41(6):1377-1387.
Yang S H, Li R, Wu T H, et al. The variation characteristics of different freeze-thaw status in the near surface soil and the relationship with temperature over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019,41(6):1377-1387.
- [5] Hu J Y, Wu Y P, Zhao W Z, et al. Assessment and projection of ground freezing-thawing responses to climate change in the Upper Heihe River Basin, Northwest China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022,42:101137.
- [6] Shi Y Y, Niu F J, Jin H J, et al. Evaluation and prediction of engineering construction suitability in the China-Mongolia Russia economic corridor [J]. Advances in Climate Change Research, 2023,14(2):166-178.
- [7] 邵艳莹,吴秀芹,张宇清,等.内蒙古地区植被覆盖变化及其对水热条件的响应[J].北京林业大学学报,2018,40(4):33-42.
Shao Y Y, Wu X Q, Zhang Y Q, et al. Response of vegetation coverage to hydro-thermal change in Inner Mongolia of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018,40(4):33-42.
- [8] 毕哲睿,萨楚拉,刘桂香.1982—2015年内蒙古雪深时空变化遥感分析[J].草原与草业,2019,31(4):12-18.
Bi Z R, Sa C L, Liu G X. Remote Sensing Analysis of Temporal and Spatial Changes of Snow Depth in Inner Mongolia from 1982 to 2015[J]. Grassland and Prataculture, 2019,31(4):12-18.
- [9] Zhang G F, Nan Z T, Zhao L, et al. Qinghai-Tibet Plateau wetting reduces permafrost thermal responses to climate warming [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2021,562:116858.
- [10] 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.
Ren X Z. Study on the Effect of Snow Melt on the Soil Water Content and Temperature[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [11] 胡越中,王广军,杜海波,等.北麓河流域不同植被覆盖条件下土壤冻融过程中地表土壤含水量变化[J].冰川冻土,2022,44(6):1925-1934.
Hu Y Z, Wang G J, Du H B, et al. Changes in surface soil moisture during freeze-thaw process under different vegetated status using Sentinel-1A in Beiluhe[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022,44(6):1925-1934.
- [12] Chen X, Jeong S, Park C E, et al. Different responses of surface freeze and thaw phenology changes to warming among Arctic permafrost types[J]. Remote Sensing of Environment, 2022,272:112956.
- [13] 郭正刚,吴青柏,牛富军.人类工程活动对青藏高原北部多年冻土融化层及其环境的影响[J].应用生态学报,2006,17(11):2136-2140.
Guo Z G, Wu Q B, Niu F J. Effects of human engineering activities on permafrost active layer and its environment in northern Qinghai-Tibetan plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006,17(11):2136-2140.
- [14] 乌日汗.2001-2016年内蒙古植被动态特征及其对气候变化的响应[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2020.
Wu R H. Dynamic Characteristics of Vegetation in Inner Mongolia from 2001 to 2016, and Its Response to Climate Change [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2020.
- [15] 王子玉,许端阳,杨华,等.1981—2010年气候变化和人类活动对内蒙古地区植被动态影响的定量研究[J].地理科学进展,2017,36(8):1025-1032.
Wang Z Y, Xu D Y, Yang H, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation dynamics in Inner Mongolia, 1981—2010[J]. Progress in Geography, 2017,36(8):1025-1032.
- [16] 滑永春,张恒,王冰,等.1982—2015年内蒙古地区 NDVI 时空变化及驱动力分析[J].西南林业大学学报:自然科学,2021,41(6):175-182.
Hua Y C, Zhang H, Wang B, et al. Temporal and Spatial Variations of NDVI and Its Driving Factors in Inner Mongolia from 1982 to 2015[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2021,41(6):175-182.
- [17] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-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.
- [18] Ran Y H, Li X, Cheng G D, et al. Distribution of Permafrost in China: an overview of existing permafrost maps[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2012, 23(4):322-333.
- [19] 张昊琛,萨楚拉,孟凡浩,等.内蒙古地表冻融指数动态变化与驱动因素分析[J].干旱区研究,2022,39(6):1996-2008.
Zhang H C, Sa C L, Meng F H, et al. Dynamic changes and driving factors of the surface freeze-thaw index in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2022,39(6):1996-2008.
- [20] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.
- [21] Wang D, Wang A H, Kong X H. Homogenization of the Daily Land Surface Temperature over the Mainland of China from 1960 through 2017 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021,38(11):1811-1822.
- [22] 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 S P, Yan Y C, Zhang S W, 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.
- [23] Li X, Jin R, Pan X D, et al. Changes in the near-surface soil freeze-thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012,17:33-42.
- [24] 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[J].*北京大学学报:自然科学版*,2017,53(1):171-178.
- Lin L, Wang Q B, Zhang Z H, et al. Warming enhances soil freezing and thawing circles in the non-growing season in a Tibetan alpine grassland[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017,53(1):171-178.
- [25] 王佃来,刘文萍,黄心渊.基于 Sen+Mann-Kendall 的北京植被变化趋势分析[J].*计算机工程与应用*,2013,49(5):13-17.
- Wang D L, Liu W P, Huang X Y. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen+Mann-Kendall method[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013,49(5):13-17.
- [26] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J].*地理学报*, 2020,75(5):961-974.
- Jin K, Wang F, Han J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(5):961-974.
- [27] 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 S H, Wu T H, Li R, 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.
- [28] 邵婉婉.利用被动微波遥感监测北半球高分辨率土壤冻融变化[D].兰州:兰州大学,2021.
- Shao W W. High-resolution near-surface soil freeze/thaw status and changes in northern hemisphere based on passive microwave remote sensing[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [29] 高思如,曾文钊,吴青柏,等.1990—2014 年西藏季节冻土最大冻结深度的时空变化[J].*冰川冻土*,2018,40(2):223-230.
- Gao S R, Zeng W Z, Wu Q B, et al. Temporal and spatial variations of the maximum frozen depth of seasonally frozen soil in Tibet from 1990 to 2014[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018,40(2):223-230.
- [30] 王一博,王根绪,常娟.人类活动对青藏高原冻土环境的影响[J].*冰川冻土*,2004,26(5):523-527.
- Wang Y B, Wang G X, Chang J. Impacts of Human Activity on Permafrost Environment of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004,26(5):523-527.

~~~~~

(上接第 147 页)

- [20] 刘晓燕,杨胜天,李晓宇,等.黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制[J].*中国科学:技术科学*,2015,45(10):1052-1059.
- Liu X Y, Yang S T, Li X Y, et al. The current vegetation restoration effect and its influence mechanism on the sediment and runoff yield in severe erosion area of Yellow River Basin[J]. *Sci. Sin. Tech.*, 2015,45(10):1052-1059.
- [21] 刘晓燕,党素珍,高云飞,等.黄土丘陵沟壑区林草变化对流域产沙影响的规律及阈值[J].*水利学报*,2020,51(5):505-518.
- Liu X Y, Dang S Z, Gao Y F, et al. The rule and threshold of the effect of vegetation change on sediment yield in the Loess Hilly Region, China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020,51(5):505-518.
- [22] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. *Global and Planetary Change*, 2013,100:172-182.
- [23] Tian S M, Xu M Z, Jiang E H, et al. Temporal variations of runoff and sediment load in the upper Yellow River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019,568:46-56.
- [24] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979,28(2):126-135.
- [25] 胡彩霞,谢平,许斌,等.基于基尼系数的水文年内分配均匀度变异分析方法:以东江流域龙川站径流序列为例[J].*水力发电学报*,2012,31(6):7-13.
- Hu C X, Xie P, Xu B, et al. Variation analysis method for hydrologic annual distribution homogeneity based on Gini coefficient: a case study of runoff series at Longchun Station in Dongjiang River Basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012,31(6):7-13.
- [26] 贾玲,张百祖,牛最荣,等.疏勒河上游径流变化与预测分析[J].*干旱区研究*,2022,39(5):1588-1597.
- Jia L, Zhang B Z, Niu Z R, et al. Analysis of runoff variation and forecast in the upper reaches of the Shule River[J]. *Arid Zone Research*, 2022,39(5):1588-1597.