

大兴安岭植被变绿速率对霜冻的响应研究

温智虹^{1,2}, 邓国荣^{1,2}, 赵建军^{1,2}, 张洪岩^{1,2*}, 郭笑怡^{1,2}

(1. 东北师范大学地理科学学院/长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 长春 130024;

2. 东北师范大学地理科学学院/城市遥感应用创新中心, 长春 130024)

摘要:气候变暖降低了霜冻发生的频率,但生长季延长使植被更容易暴露在霜冻中。同时,植被物候和光合初级生产力的变化导致植被变绿速率发生改变。大兴安岭是中国对气候变化最为敏感和最早做出响应的地区之一,该区域霜冻对不同植被变绿速率的影响还未得到充分研究。论文使用NOAA气候数据记录归一化植被指数数据,分析了1982—2019年大兴安岭地区植被变绿速率的时空变化特征。以霜冻天数和霜冻强度为指标,探讨从春季开始到植被生长季旺季开始的时间段内霜冻对植被变绿速率的影响。结果表明:研究时段内霜冻天数与强度均呈下降趋势,平均下降速率分别为 -0.24 ± 0.07 d/a和 -0.036 ± 0.015 °C/(d·a)。霜冻天数的减少和霜冻强度的减弱加速了森林生态系统的植被变绿速率,却也同时减缓了草原生态系统的植被变绿速率。不同生态分区的植被变绿速率对霜冻响应不同,大兴安岭北段山地落叶针叶林区和北段西侧森林草原区的植被变绿速率与霜冻天数的偏相关系数分别为 $-0.42(P<0.05)$ 和 $-0.48(P<0.01)$,与霜冻强度的偏相关系数分别为 $-0.49(P<0.01)$ 和 $-0.36(P<0.05)$,霜冻对植被变绿速率的影响显著。研究突出了霜冻对植被变绿速率的影响,结果可为理解区域植被对气候变化的响应提供有用参考。

关键词:气候变化;变绿速率;霜冻;大兴安岭

全球气候变化正在迅速改变地表植被,影响生态系统功能^[1]。植被物候是反映植物景观动态变化的重要指标,直接反映生态系统对全球气候变化的响应和反馈过程^[2]。大量气象记录和遥感观测表明,北半球在过去三四十年里生长季开始时间(start of season, SOS)和生长季旺季开始时间(start of peak season, SOP)提前^[3-5]。变化的物候期导致了植被变绿持续时间(duration of vegetation greenup, Dgreenup, 定义为SOS到SOP的时间跨度)的变化。同时由于各种因素的综合影响,如区域气候变化、二氧化碳浓度的升高,地球正在经历一个逐渐“变绿”的过程^[6]。这种“变绿”的趋势被认为是植被光合作用能力提高的结果,即植被在变绿期间ND-

VI振幅(amplitude during vegetation greenup, Agree-nup, 定义为SOS和SOP之间的NDVI振幅)的提高。植被与气候之间复杂的交互作用使植被物候和光合作用能力同时发生变化,从而影响了植被的变绿速率(velocity of vegetation greenup, Vgreenup, 定义为Agreenup与Dgreenup的比值)^[7]。植被变绿速率的变化可能影响生态系统的碳、水和能量循环以及植被对区域气候的反馈^[8-9]。当前植被变绿速率在区域尺度上的空间格局及相关变化尚不明确,研究植被变绿速率的时空分布特征有助于加深对当前植被动态以及植被对气候变化响应的理解。

霜冻是一种由低温引起的气象灾害,具有许多生态影响,包括碳储存和养分的损失,以及改变物

收稿日期:2020-07-21;修订日期:2020-12-23。

基金项目:国家自然科学基金项目(41871330);吉林省科技发展计划资助项目(20190103151JH)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41871330; The Science and Technology Development Project of Jilin Province, No. 20190103151JH.]

第一作者简介:温智虹(1996—),女,江西于都人,硕士生,主要研究方向为GIS与环境遥感。E-mail: wenzh449@nenu.edu.cn

*通信作者简介:张洪岩(1965—),男,吉林安图人,教授,博士生导师,主要研究方向为GIS与环境遥感。

E-mail: zhy@nenu.edu.cn

引用格式:温智虹, 邓国荣, 赵建军, 等. 大兴安岭植被变绿速率对霜冻的响应研究[J]. 地理科学进展, 2021, 40(5): 839-847. [Wen Zhihong, Deng Guorong, Zhao Jianjun, et al. Response of velocity of vegetation greenup to frost in the Greater Khingan Mountains. Progress in Geography, 2021, 40(5): 839-847.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.05.010

种间的竞争等^[10]。尽管气候变暖降低了霜冻发生的频率和强度,但在以气温为主要限制因素的生态系统中,春季物候的提前导致植被更频繁地暴露在霜冻中^[11],植被的受灾风险并没有降低。先前的研究强调了霜冻发生的时间和频率的变化,以及霜冻对植被物候的影响^[12-13],然而不同植被的变绿速率对霜冻的响应还没有得到充分研究。

大兴安岭位于北半球中纬度地区,是中国对气候变化最为敏感和最早做出响应的地区之一^[14]。研究区内植被多样,寒冷的气候条件为研究霜冻对植被变绿速率的影响提供了良好的条件。本文重建了1982—2019年间大兴安岭地区的植被变绿速率,详细分析植被变绿速率对霜冻的响应。研究结果对理解区域植被对全球气候变化的响应提供了有用参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域

大兴安岭(40°59'N~53°33'N, 115°5'E~125°16'E)位于内蒙古自治区东部、黑龙江省北部,南部与河北省接壤,呈东北—西南走向。研究区属温带大陆性季风气候,冬寒夏暖,昼夜温差较大。年平均气温约-2.8℃,年均降水量约为746 mm,无霜期约为90~110 d。大兴安岭是中国重要的气候分界线,夏季海洋季风受阻于山地东坡,东坡降水多,西坡干旱,二者呈明显的对比。研究区森林覆被率在60%以上,以兴安落叶松为优势种的针叶林为主,主要树种包括兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)等,是中国东北重要的生态屏障和国家森林保育区。

生态地理区域系统作为生态与环境特征检测的宏观框架,主要体现一些自然要素的地域差异,如植被覆盖、气温、水分等。本文根据中国生态地理区划图^[15],将研究区划分为:大兴安岭北段山地落叶针叶林区(IA₁)、大兴安岭北段西侧森林草原区(IIB₃)、大兴安岭中段山地草原森林区(IIB₂)和大兴安岭南段草原区(IIC₂)4个部分,如图1。

1.2 数据来源

本文研究使用NOAA气候数据记录归一化植被指数数据(Climatic Data Record Normalized Differ-

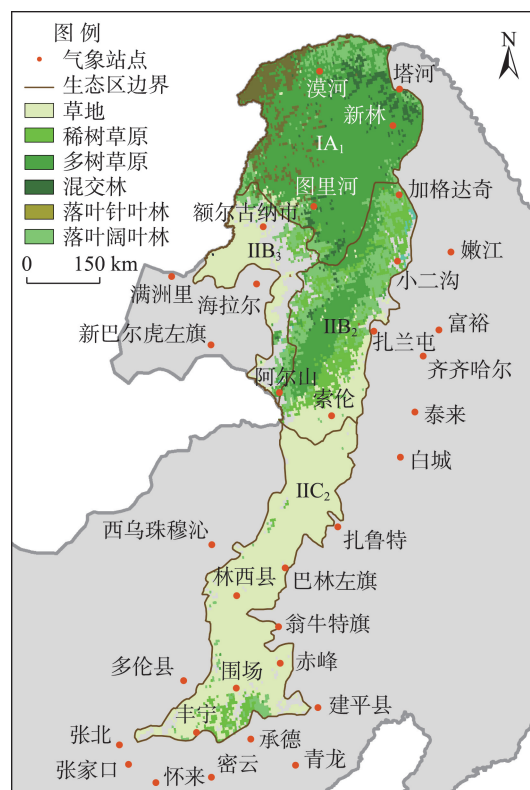


图1 研究区位置及主要土地利用类型的空间分布
Fig.1 Location of the study area and spatial distribution of main land use / land cover types

ence Vegetation Index, CDR NDVI)估算1982—2019年大兴安岭地区植被的变绿速率。该数据集的空间分辨率为0.05°,时间分辨率为1 d。利用最大值合成法对NDVI数据进行合成,可以有效减少成像过程中云、气溶胶及太阳高度角等因素的影响,并将最大值合成后NDVI<0.1的像元作为非植被区去除。

从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取了研究区及周边共34个气象站点1982—2019年的日平均气温、日最低气温(T_{\min})、日降水量和日照时数等气象因子。本文中, T_{\min} 被用来计算霜冻天数和霜冻强度,其余气象因子作为评估霜冻对植被变绿速率影响的控制因子。

农田等非自然植被的生长受到人类控制,对霜冻具有较强的抵御能力。为了减少非自然植被对研究结果的干扰,首先使用中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)全球土地覆盖类型产品(MCD12C1)逐年去除了2001—2019年间所有的农田像元,仅使用这19 a内土地覆盖类型未发生变化的自然植被像元进行分析。由于缺少2001年以前的逐年土地覆盖类型

产品,本文结合20世纪80年代的土地利用和土地覆盖地图(<http://www.geodata.cn>),再次剔除农田等非自然植被。

1.3 研究方法

1.3.1 植被变绿速率的计算

本文采用 Savitzky-Golay(S-G)滤波拟合植被 NDVI 年生长曲线。S-G 滤波保留了 NDVI 时间序列的细节,并根据植被生长规律对曲线进行平滑处理,有利于植被物候信息的高精度提取。在 TIME-SAT 软件中设定 NDVI 值达到当年振幅的 20% 所对应的时间作为 SOS, NDVI 年振幅的 80% 所对应的时间作为 SOP。基于 Wang 等^[7]的计算方式,植被变绿速率定义为 Agreenup(SOS 到 SOP 之间的 NDVI 振幅)与 Dgreenup(SOS 到 SOP 的时间跨度)的比率:

$$V_{\text{greenup}} = \frac{\text{Agreenup}}{\text{Dgreenup}} = \frac{\text{NDVI}_{\text{SOP}} - \text{NDVI}_{\text{SOS}}}{\text{SOP} - \text{SOS}} \quad (1)$$

式中: NDVI_{SOS} 和 NDVI_{SOP} 分别代表 SOS 和 SOP 所对应的 NDVI 值。

1.3.2 霜冻指标的定义

本文调查的霜冻天数为每年春季开始(每年的3月1日)到 SOP 的时间段内日 T_{\min} 低于 0°C 的天数。对 T_{\min} 进行重分类(小于 0°C 的像素重分类为 1,其他像素重分类为 0),并累加相应时间段内的网格,最终得到研究时段内的霜冻天数。

本文定义低于霜冻阈值积温的平均值为平均累计霜冻度日^[16](accumulated frost degree days, AFDD),以此来表征霜冻强度。平均 AFDD 的计算如下:

$$\text{平均AFDD} = \frac{\sum_{i=60}^{\text{SOP}} \max(\text{Th} - T_{\min, i}, 0)}{\text{SOP} - 60} \quad (2)$$

式中: Th 代表霜冻的阈值温度; $T_{\min, i}$ 为第 i 天的最低气温。

为了确定适合研究区的霜冻阈值温度,利用多元线性回归检验了植被变绿速率在不同霜冻阈值温度下($-2 \sim 2^{\circ}\text{C}$)对平均 AFDD 的敏感性。植被变绿速率对不同霜冻阈值温度下霜冻强度的敏感性定义为平均 AFDD 每变化 1 个单位,而引发的植被变绿速率的变化^[17]。以植被变绿速率为因变量,气候参数(平均气温、降水和下行短波辐射)和不同霜冻阈值温度下的平均 AFDD 为自变量建立多元线性回归模型:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k + \mu \quad (3)$$

式中: k 、 β_0 和 μ 分别表示自变量个数、常数项和随机

误差; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 为回归系数,即敏感性。选择敏感性最强的阈值作为本文的霜冻阈值温度,最终 Th 确定为 2°C 。

1.3.3 气象插值方法

本文使用 ANUSPLIN 4.3 软件对 1982—2019 年的日平均气温、日最低气温、日降水量和日照时数进行内插,得到研究区内逐日气象因子的连续分布(空间分辨率为 0.05°)。ANUSPLIN 方法以研究区内 DEM 为基础,充分考虑了地形因素的影响,引入多个影响因子作为协变量进行气象要素的空间插值,并根据数据自动确定模型系数,适用于气象时间序列数据的内插^[18-19]。已有研究表明,在复杂的山地环境中,ANUSPLIN 方法对气象因子的插值误差较小^[20-21]。

1.3.4 统计分析

本文使用 Sen's 斜率评估 1982—2019 年间霜冻指标和植被变绿速率的趋势。相比最小二乘线性趋势拟合,Sen's 斜率可以排除个别异常值的干扰,减少缺失数据对结果的影响^[22]。Mann-Kendall 是一种非参数的统计检验,它不要求样本服从特定的分布。在本文中 Mann-Kendall 被用来检验趋势的显著性。

本文使用偏相关分析评价霜冻指标对植被变绿速率的影响。偏相关分析可以去除其他变量对结果的影响,设置植被变绿速率和霜冻指标(霜冻天数或霜冻强度)为因变量,平均气温、降水和日照时数为自变量。霜冻强度和平均气温使用春季开始到 SOP 时段内的平均值,而霜冻天数、降水和日照时数使用春季开始到 SOP 时段内的累积值进行计算。

2 结果与分析

2.1 大兴安岭霜冻时空分布特征

1982—2019 年大兴安岭地区春季开始至 SOP 时段内每年平均霜冻天数为 66.66 ± 13.85 d(图 2a)。霜冻天数随纬度及海拔的下降而减少,大兴安岭北段山地落叶针叶林区(IA₁)、北段西侧森林草原区(IIB₃)、中段山地草原森林区(IIB₂)和南段草原区(IIC₂)每年的平均霜冻天数分别为 79.18 ± 3.61 、 66.61 ± 7.86 、 66.51 ± 8.60 和 49.90 ± 8.78 d。研究时段内大兴安岭的霜冻天数呈现普遍减少趋势(图 2b),平均为 -0.24 ± 0.07 d/a。霜冻强度的空间分布与霜冻天数保持了良好的空间一致性,平均 AFDD

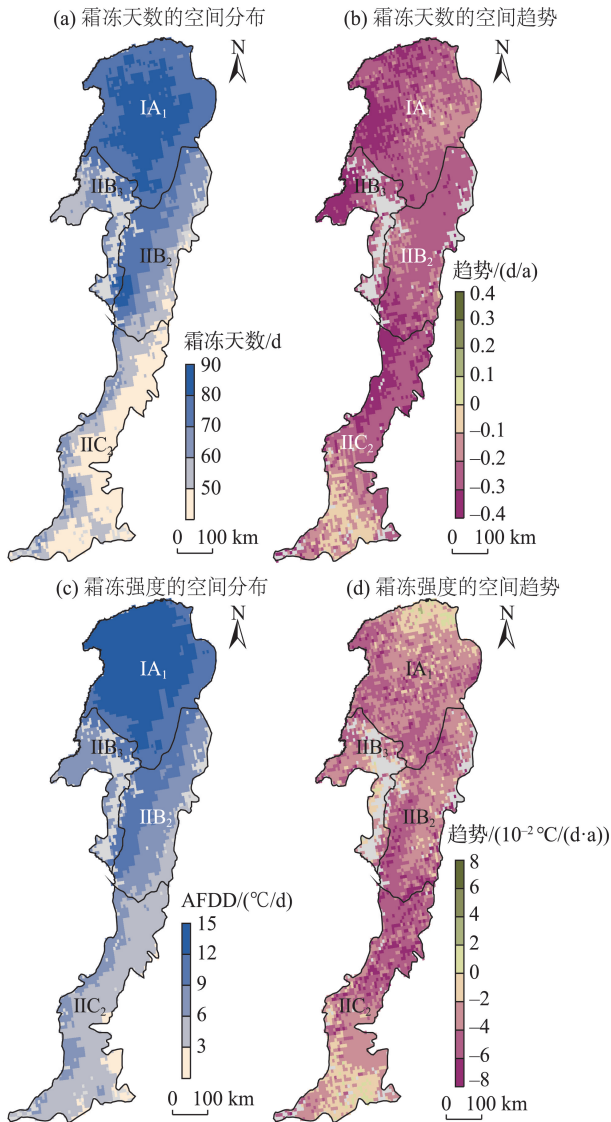


图2 大兴安岭霜冻天数和霜冻强度的空间分布及趋势
Fig.2 Spatial patterns of frost days and frost intensity and their trends in the Greater Khingan Mountains

为 9.17 ± 3.74 °C/d(图2c)。研究区北部地区霜冻强度明显强于南部地区,北段山地落叶针叶林区(IA_1)平均 AFDD 为 13.08 ± 1.65 °C/d,而南段草原区(IIC_2)的平均 AFDD 仅为 4.87 ± 1.33 °C/d。研究区内霜冻强度同样呈现普遍减弱的趋势,平均为 -0.036 ± 0.015 °C/(d·a)(图2d),仅北段山地落叶针叶林区(IA_1)北端的落叶阔叶林地区的霜冻强度呈现轻微的积极趋势。气候变暖同时降低了霜冻发生的频率和强度。

2.2 大兴安岭植被变绿速率时空分布特征

1982—2019年大兴安岭地区植被平均变绿速率为 0.79×10^{-2} /d(图3a)。变绿速率较快的地区主要

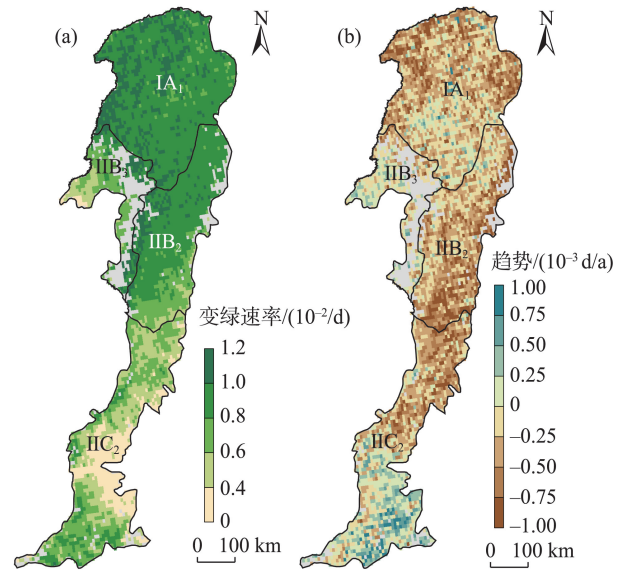


图3 大兴安岭植被变绿速度的空间分布(a)及趋势(b)
Fig.3 Spatial patterns of (a) velocity of vegetation greenup and (b) its trend in the Greater Khingan Mountains

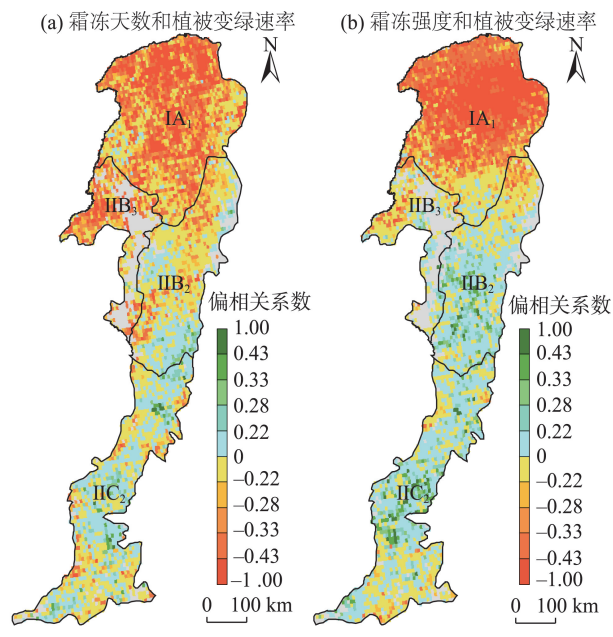
分布在大兴安岭北段山地落叶针叶林区(IA_1)和中段山地草原森林区(IIB_2),植被平均变绿速率分别为 0.94×10^{-2} /d 和 0.86×10^{-2} /d,该地区植被密度较大且海拔较高,以落叶针叶林、稀树草原和混交林为主。变绿速率较慢的地区主要集中在南段草原区(IIC_2)的中部和东部,植被类型以草地为主。

研究区内 75.70% 的植被变绿速率呈现负向趋势,主要集中在南段草原区(IIC_2)的北部、中段山地草原森林区(IIB_2)以及北段山地落叶针叶林区(IA_1)的多树草原、混交林和落叶针叶林区(图3b)。植被变绿速率呈现正向趋势的像元主要分布在南段草原区(IIC_2)的南部,均增速仅为 0.3×10^{-3} d/a。

2.3 霜冻对植被变绿速率的影响

大兴安岭地区的植被变绿速率与霜冻天数整体(77.30%)呈负向偏相关关系(图4a),即霜冻天数的普遍减少加速了植被变绿过程。以落叶针叶林、落叶阔叶林为主的北段山地落叶针叶林区(IA_1)对霜冻天数的响应显著($P < 0.01$)。随着纬度的下降和霜冻天数的减少,研究区内的植被对霜冻天数的响应程度也逐渐降低。分布在中部和南部的稀树草原及草地的变绿速率与霜冻天数之间呈现微弱的正向偏相关关系。

研究区内 61.93% 的像元的植被变绿速率与霜冻强度呈负向偏相关关系(图4b),主要集中在研究区北部,其中北段山地落叶针叶林区(IA_1)的北部呈



注：显著性水平 0.01、0.05、0.1 和 0.2 分别对应的偏相关系数为±0.43、±0.33、±0.28 和±0.22。

图4 偏相关系数的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of partial correlation coefficients between frost days and velocity of Vgreenup (a), and between frost intensity and Vgreenup (b)

现显著负向偏相关关系($P<0.01$),即该地区霜冻强度的下降加速了大兴安岭的植被变绿过程。以多树草原、稀树草原和草地为主的生态区,植被变绿速率与霜冻强度呈现不同程度的正向偏相关关系,即霜冻强度的下降减缓了该地区的植被变绿速率。

在气候变暖的背景下,研究区内的霜冻天数和霜冻强度都表现出普遍的负向趋势,但在空间上对不同植被变绿速率的影响表现出明显的差异。整体上,霜冻加速了落叶针叶林、落叶阔叶林和混交林的植被变绿速率,减缓了多树草原、稀树草原和草地的植被变绿速率。

2.4 不同生态分区下植被变绿速率对霜冻的响应

不同生态分区下,植被变绿速率与霜冻天数除南段草原区(IIC₂)呈微弱正相关外,均呈现负向偏相关关系(表1)。北段山地落叶针叶林区(IA₁)和北段西侧森林草原区(IIB₃)与霜冻天数呈显著负偏相关,偏相关系数分别为-0.42($P<0.05$)和-0.48($P<0.01$)。中段山地草原森林区(IIB₂)的植被变绿速率与霜冻天数呈微弱的负偏相关关系。

与霜冻天数相似,北段山地落叶针叶林区(IA₁)和北段西侧森林草原区(IIB₃)的植被变绿速率与霜

表1 不同生态地理分区下植被变绿速率和霜冻的偏相关系数
Tab.1 Partial preseason correlation between velocity of vegetation greenup (Vgreenup) and frost in different eco-geographical regions

生态地理分区	霜冻天数	霜冻强度
大兴安岭北段山地落叶针叶林区(IA ₁)	-0.42*	-0.49**
大兴安岭中段山地草原森林区(IIB ₂)	-0.23	0.19
大兴安岭北段西侧森林草原区(IIB ₃)	-0.48**	-0.36*
大兴安岭南段草原区(IIC ₂)	0.18	0.15

注：**、*分别表示植被变绿速率与霜冻因子之间的偏相关系数通过0.01、0.05的显著性水平检验。

冻强度呈显著负偏相关关系,偏相关系数分别为-0.49($P<0.01$)、-0.36($P<0.05$)。而中段山地草原森林区(IIB₂)和南段草原区(IIC₂)的植被变绿速率与霜冻强度呈微弱的正偏相关关系。

从总体上看,不同生态分区下,大兴安岭北段西侧森林草原区(IIB₃)和北段山地落叶针叶林区(IA₁)的植被变绿速率对霜冻事件的响应都较为明显,而中段山地草原森林区(IIB₂)的植被变绿速率对霜冻事件的响应可能存在部分抵消作用,南段草原区(IIC₂)对霜冻事件的响应较弱且都为正向影响。

3 讨论与结论

3.1 讨论

大兴安岭是中国重要的气候分界线,也是中国对气候变化最为敏感和最早做出响应的地区之一^[14],霜冻事件对该地区植被生长的影响受到了广泛关注^[13,23]。全球气温的升高降低了霜冻发生的频率和强度,同时,中国北方地区的城市化进程会显著降低冷事件的发生频率^[24]。而气温上升也造成了植被生长季的延长,特别是受人类干扰较小的自然植被,提前的SOS增加了植被暴露在霜冻中的风险。虽然本文研究结果表明大兴安岭地区的霜冻天数在研究时段内被观测到呈下降趋势,但这并不意味着霜冻风险也随之降低。整体霜冻天数的下降主要是春季开始到SOS的时间段内霜冻天数的下降所导致,而在植被生长季开始之后,霜冻天数反而增加^[25]。提前的霜冻敏感期增加了春季霜冻对植被的危害^[26],温带植被在春季出芽时最容易受冻,这一时期的叶片脆弱性也随着气温的升高而显著增加^[27]。不同植被对霜冻的敏感性不同,在物候上对气候变暖更敏感的物种更容易受到霜冻的影

响^[28]。不同物种霜冻适应性的微小差异可能影响种间竞争,从而影响陆地生态系统的功能和结构^[29-30]。

本文研究结果表明,霜冻天数的下降和霜冻强度的减弱整体加速了植被变绿过程,但研究区内的植被变绿速率整体仍呈现负向趋势。这种现象可能由以下2种原因导致:① SOS和SOP对气温的响应程度和方向不同,导致Dgreenup增加,植被变绿速率表现出负向趋势。本文中植被变绿速率是通过Agreenup和Dgreenup两个变量计算得到,二者的变化都直接影响植被变绿速率的趋势。大兴安岭地区Agreenup都表现为积极趋势,表明植被的光合作用能力逐渐增加,这与之前的研究结果一致^[7]。当代的气温仍远低于植物达到最大光合作用速率的平均气温,生态系统的生产力仍然受到夏季气温的限制^[31],植被的光合作用能力随夏季气温的升高而增强。而SOS和SOP对气温的响应程度和方向不同,气温的升高提前了大兴安岭地区植被的SOS,却推迟了SOP(图5a)。尽管过去的38 a间被观测到呈负向趋势的植被变绿速率像元的SOP没有表现出明显的趋势,但SOS显著提前,导致Dgreenup增加,从而植被变绿速率表现出减速趋势(图5b)。② 已有研究表明,植物在休眠期间需要经受寒冷条件的刺激,即冷激温^[32]。休眠期所需的低温是缩短植被变绿时间的必要条件^[33]。气候变暖

导致冬季气温上升,植被休眠期间寒冷条件的刺激不足,这可能也是导致植被变绿速率呈现负向趋势的原因之一。

本文研究结果也表明,大兴安岭地区内的霜冻整体上加速了森林生态系统的植被变绿,减缓了草原生态系统的植被变绿速率。植被在春季变绿需要一定的温度积累^[34-35],季前期内(通常定义为从春季开始到SOS)霜冻天数和强度同时降低导致触发森林生态系统变绿所需的温度更快累积,进而加速了森林生态系统植被变绿。而草原生态系统变绿所需的温度积累较少,更容易获得。此外,草本植物缺乏抵御霜冻的结构完整性^[36],虽然在春季开始至SOP时段内霜冻天数下降,但生长季开始之后(SOS至SOP时段内)霜冻天数反而开始增加,使得植被在变绿后暴露在霜冻中的风险提高,新叶受霜冻损害,进而影响植被长势,植被变绿速率下降。

3.2 结论

本文基于NOAA CDR NDVI数据,估算了1982—2019年大兴安岭地区的植被变绿速率并评估其变化。选取霜冻天数和霜冻强度作为指标,探讨了春季开始到植被生长旺季开始期间霜冻对植被变绿速率的影响。主要结论如下:

(1) 1982—2019年大兴安岭地区在研究时段内每年的平均霜冻天数为 66.66 ± 13.85 d,呈现普遍减少趋势,平均为 -0.24 ± 0.07 d/a。霜冻强度的空间分布与霜冻天数保持了良好的空间一致性,平均AFDD为 9.17 ± 3.74 °C/d,也呈现普遍减弱趋势,平均为 -0.036 ± 0.015 °C/(d·a)。气候变暖同时降低了霜冻发生的频率和强度。

(2) 1982—2019年大兴安岭地区植被平均变绿速率为 0.79×10^{-2} /d,区域差异较小。海拔高且植被密度大的地区植被变绿速率快,草地的变绿速率较慢。研究区内75.70%的植被变绿速率呈减慢趋势,仅南部草地的变绿速率呈加快趋势。同时,研究时段内霜冻天数与霜冻强度表现出良好的空间一致性,且都被观测到普遍的负向趋势。

(3) 植被变绿速率对霜冻天数和霜冻强度的响应表现出明显的差异,霜冻天数的减少和霜冻强度的减弱同时加速了森林生态系统的植被变绿速率,却也同时减缓了草原生态系统的植被变绿速率。不同生态分区下植被变绿速率对霜冻的响应也有所不同,大兴安岭北段西侧森林草原区(II B₃)和北段山地落叶针叶林区(IA₁)的植被变绿速率对霜冻事

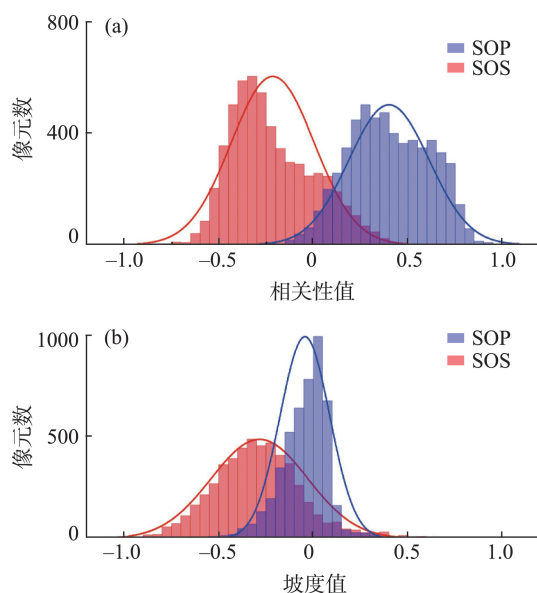


图5 (a)气温和SOS(SOP)的相关性值和
(b)SOS及SOP的坡度值直方图

Fig.5 Histogram of (a) correlation coefficient values between temperature and SOS (SOP) and (b) trend of SOS and SOP

件的响应都较为明显。随着纬度的下降,植被变绿速率对霜冻的响应程度逐渐下降。

参考文献(References)

- [1] 马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展 [J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 421-431. [Ma Mingguo, Wang Jian, Wang Xuemei. Advance in the inter-annual variability of vegetation and its relation to climate based on remote sensing. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(3): 421-431.]
- [2] 陈效述, 王林海. 遥感物候学研究进展 [J]. 地理科学进展, 2009, 28(1): 33-40. [Chen Xiaoqiu, Wang Linhai. Progress in remote sensing phenological research. Progress in Geography, 2009, 28(1): 33-40.]
- [3] 丛楠, 沈妙根. 1982—2009年基于卫星数据的北半球中高纬地区植被春季物候动态及其与气候的关系 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2737-2746. [Cong Nan, Shen Miaogen. Variation of satellite-based spring vegetation phenology and the relationship with climate in the Northern Hemisphere over 1982 to 2009. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2737-2746.]
- [4] 杨雪梅, 杨太保, 刘海猛, 等. 气候变暖背景下近30 a北半球植被变化研究综述 [J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 379-391. [Yang Xuemei, Yang Taibao, Liu Haimeng, et al. Vegetation variation in the north hemisphere under climate warming in the last 30 years. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 379-391.]
- [5] 高新月, 戴君虎, 张明庆. 1965—2014年北京西郊地区植物观赏期对气候变化的响应 [J]. 地理研究, 2018, 37(12): 2420-2432. [Gao Xinyue, Dai Junhu, Zhang Mingqing. Responses of variations of plant ornamental period to climate change in the west suburbs of Beijing from 1965-2014. Geographical Research, 2018, 37(12): 2420-2432.]
- [6] Piao S L, Yin G D, Tan J G, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. Global Change Biology, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [7] Wang L H, Tian F, Wang Y H, et al. Acceleration of global vegetation greenup from combined effects of climate change and human land management [J]. Global Change Biology, 2018, 24(11): 5484-5499.
- [8] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 169: 156-173.
- [9] 董晓宇, 姚华荣, 戴君虎, 等. 2000—2017年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(1): 24-35. [Dong Xiaoyu, Yao Huarong, Dai Junhu, et al. Phenological changes of desert steppe vegetation and its effect on net primary productivity in Inner Mongolia from 2000 to 2017. Progress in Geography, 2020, 39(1): 24-35.]
- [10] Ma Q Q, Huang J G, Hänninen H, et al. Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming [J]. Global Change Biology, 2019, 25(1): 351-360.
- [11] Liu Q, Piao S L, Janssens I A, et al. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 426. doi: 10.1038/s41467-017-02690-y.
- [12] Augspurger C K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing [J]. Ecology, 2013, 94(1): 41-50.
- [13] 戴君虎, 王焕炯, 葛全胜. 近50年中国温带季风区植物花期春季霜冻风险变化 [J]. 地理学报, 2013, 68(5): 593-601. [Dai Junhu, Wang Huanjiong, Ge Quansheng. Changes of spring frost risks during the flowering period of woody plants in temperate monsoon area of China over the past 50 years. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 593-601.]
- [14] 郭笑怡, 张洪岩. 生态地理分区框架下的大兴安岭植被动态研究 [J]. 地理科学, 2013, 33(2): 181-188. [Guo Xiaoyi, Zhang Hongyan. The vegetation dynamic research under of eco-geographical region framework on Greater Khingan Mountains. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(2): 181-188.]
- [15] 郑度. 中国生态地理区域系统研究 [M]. 北京: 商务印书馆, 2008. [Zheng Du. Study on eco-geographical regional system in China. Beijing, China: The Commercial Press, 2008.]
- [16] Xiao L J, Liu L L, Asseng S, et al. Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 260/261: 154-164.
- [17] Davy R, Esau I, Chernokulsky A, et al. Diurnal asymmetry to the observed global warming [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(1): 79-93.
- [18] 刘志红, Li Lingtao, Tim R McVicar, 等. 专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN及其应用 [J]. 气象, 2008, 34(2): 92-100. [Liu Zhihong, Li Lingtao, Tim R McVicar, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN. Meteorological Monthly, 2008, 34(2): 92-100.]
- [19] 刘正佳, 于兴修, 王丝丝, 等. 薄盘光滑样条插值中三种协变量方法的降水量插值精度比较 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 56-62. [Liu Zhengjia, Yu Xingxiu, Wang

- Sisi, et al. Comparative analysis of three covariates methods in thin-plate smoothing splines for interpolating precipitation. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 56-62.]
- [20] 谭剑波, 李爱农, 雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析 [J]. *高原气象*, 2016, 35(4): 875-886. [Tan Jianbo, Li Ainong, Lei Guangbin. Contrast on Anusplin and Cokriging meteorological spatial interpolation in southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(4): 875-886.]
- [21] 张晓东, 朱文博, 张静静, 等. 伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应 [J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 41-53. [Zhang Xiaodong, Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, et al. Phenology of forest vegetation and its response to climate change in the Funiu Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 41-53.]
- [22] Beck P S A, Atzberger C, Høgda K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(3): 321-334.
- [23] 马柱国. 中国北方地区霜冻日的变化与区域增暖相互关系 [J]. *地理学报*, 2003, 58(S1): 31-37. [Ma Zhuguo. Variation of frost days and its relationship to regional warming in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(S1): 31-37.]
- [24] Zhou Y Q, Ren G Y. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961–2008 [J]. *Climate Research*, 2011, 50(2/3): 125-139.
- [25] Deng G R, Zhang H Y, Yang L B, et al. Estimating frost during growing season and its impact on the velocity of vegetation greenup and withering in Northeast China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1355. doi: 10.3390/rs12091355.
- [26] Eccel E, Rea R, Caffarra A, et al. Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: The role of phenological acclimation [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2009, 53(3): 273-286.
- [27] Vitasse Y, Lenz A, Körner C. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 541. doi: 10.3389/fpls.2014.00541.
- [28] Bennie J, Kubin E, Wiltshire A, et al. Predicting spatial and temporal patterns of bud-burst and spring frost risk in north-west Europe: The implications of local adaptation to climate [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1503-1514.
- [29] Gu L H, Hanson P J, Post W M, et al. The 2007 eastern US spring freeze: Increased cold damage in a warming world? [J]. *BioScience*, 2008, 58(3): 253-262.
- [30] 赵彦茜, 肖登攀, 柏会子, 等. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 224-235. [Zhao Yanxi, Xiao Dengpan, Bai Huizi, et al. Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China. *Progress in Geography*, 2019, 38(2): 224-235.]
- [31] Larcher W, Biederman-Thorson M A. *Physiological plant ecology* [M]. Berlin, Germany: Springer, 2003, 514.
- [32] Hänninen H, Kramer K. A framework for modelling the annual cycle of trees in boreal and temperate regions [J]. *Silva Fennica*, 2007, 41(1): 167-205.
- [33] Harrington C A, Gould P J, St Clair J B. Modeling the effects of winter environment on dormancy release of Douglas-fir [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 798-808.
- [34] Deng G R, Zhang H Y, Guo X Y, et al. Asymmetric effects of daytime and nighttime warming on boreal forest spring phenology [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1651. doi: 10.3390/rs11141651.
- [35] 陶泽兴, 葛全胜, 王焕炯. 1963—2018年中国垂柳和榆树开花始期积温需求的时空变化 [J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1451-1464. [Tao Zexing, Ge Quansheng, Wang Huanjiong. Spatio-temporal variations in the thermal requirement of the first flowering dates of *Salix babylonica* and *Ulmus pumila* in China during 1963–2018. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(7): 1451-1464.]
- [36] Hufkens K, Friedl M A, Keenan T F, et al. Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2365-2377.

Response of velocity of vegetation greenup to frost in the Greater Khingan Mountains

WEN Zhihong^{1,2}, DENG Guorong^{1,2}, ZHAO Jianjun^{1,2}, ZHANG Hongyan^{1,2*}, GUO Xiaoyi^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University / Key Laboratory of Geographic Processes and Ecological Security of Changbai Mountain, Ministry of Education, Changchun 130024, China;

2. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University / Urban Remote Sensing Application Innovation Center, Changchun 130024, China)

Abstract: Although climate warming reduces the frequency of frost, the longer growing season increases the vulnerability of plants to frost. At the same time, changes of vegetation phenology and primary photosynthetic productivity lead to changes in the vegetation greenup rate. The Greater Khingan Mountains is one of the most sensitive and earliest responding regions to climate change in China. Further study of the impacts of frost on vegetation greenup rates in this region is insufficient. This study reconstructed the vegetation greenup rate in the Greater Khingan Mountains, following which the responses of vegetation greenup rate to frost were analyzed in detail. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate Data Record (CDR) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data were used to study the spatiotemporal variations in vegetation greenup rates in the Greater Khingan Mountains from 1982 to 2019. This study used frost days and intensity indices to analyze the effect of frost on the rates of vegetation greenup from the beginning of the spring to the beginning of the peak vegetation growth season. The results show that during the study period, the frost days and intensity showed a downward trend, and the average decline rates were -0.24 ± 0.07 d/a and -0.036 ± 0.015 °C/(d · a), respectively. Although decreases in frost days and frost intensity resulted in the acceleration of the greenup of forest ecosystems, the grassland ecosystem greenup rate was reduced at the same time. The response of vegetation greenup rate to frost differed among the different ecological regions. The response of vegetation greenup rate to frost events is obvious in the western forest grassland area (IIB₃) and mountain deciduous and coniferous forest area (IA₁) in northern Greater Khingan Mountains, and the partial correlation coefficients between the vegetation greenup rate and frost days were -0.42 ($P < 0.05$) and -0.48 ($P < 0.01$), respectively; and the partial correlation coefficients between the vegetation greenup rate and frost intensity were -0.49 ($P < 0.01$) and -0.36 ($P < 0.05$), respectively. This study highlights the effect of frost on vegetation greenup rate, and the results can provide a useful reference for understanding the response of regional vegetation to climate change.

Keywords: climate change; greenup rate; frost; Greater Khingan Mountains