

DOI: 10.5846/stxb202205191417

张宇,余振,栾军伟,王一,叶晓丹,刘世荣.1982—2020 年东北森林带植被绿度时空变化特征.生态学报,2023,43(16):6670-6681.

Zhang Y, Yu Z, Luan J W, Wang Y, Ye X D, Liu S R. Spatiotemporal variations of vegetation greenness in the forest belt of Northeast China during 1982—2020. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6670-6681.

1982—2020 年东北森林带植被绿度时空变化特征

张 宇¹, 余 振², 栾军伟¹, 王 一¹, 叶晓丹¹, 刘世荣^{3,*}

1 国际竹藤中心竹藤资源与环境研究所, 国家林业和草原局/北京市共建竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102

2 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

3 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

摘要: 植被绿度变化(绿化或褐化)的时空格局研究有助于了解生态系统结构和功能的变化, 制定适应气候变化的生态系统管理政策。在全球气候变化加剧的背景下, 过去 40a 间东北森林带植被绿度如何变化仍不清楚。基于气象再分析数据分析了 1982—2020 年来东北森林带的气候变化趋势, 以叶面积指数(LAI)作为植被绿度的衡量指标分析了东北森林带中大兴安岭、小兴安岭和长白山脉植被绿度的时空变化格局和影响因素。研究发现: 1982—2020 年东北森林带气候趋势呈现“暖干化”特征。研究区植被绿度总体呈绿化趋势, 但 2000 年后植被绿度变化呈降低趋势的区域增加了 7.23 倍, 主要位于大兴安岭西北部。影响因素分析表明, 1982—2000 年温度和土壤水分是植被绿度增加的主要驱动因素; 而 2000 年之后, 区域内植被绿化的主要驱动因素为土壤水分的增加, 降雨和相对湿度降低引起的水分胁迫导致大兴安岭西北部植被褐化加剧。研究结果为揭示东北森林带固碳能力变化、制定适应气候变化的林业管理对策提供了科学参考。

关键词: 东北森林带; 植被绿度; 温度; 降雨; 相对湿度; 土壤水分

Spatiotemporal variations of vegetation greenness in the forest belt of Northeast China during 1982—2020

ZHANG Yu¹, YU Zhen², LUAN Junwei¹, WANG Yi¹, YE Xiaodan¹, LIU Shirong^{3,*}

1 Institute of Resources and Environment, International Centre for Bamboo and Rattan, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration/Beijing for Bamboo & Rattan Science and Technology, Beijing 100102, China

2 School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Study on spatiotemporal variations of vegetation greenness, characterized with greening or browning, can contribute to the understanding of changes in ecosystem structure and function, which helps formulate ecosystem management strategy for climate change mitigation and adaptation. Dramatic changes in temperature and moisture in a context of global climate change are significantly influencing vegetation greenness, but it remains uncertain how climate warming affects vegetation greenness in the forest belt of Northeast China (FBNC) over the past four decades, and whether the vegetation greenness patterns in response to changing climate and soil moisture keep consistent during different time periods. In this study, we examined the climate change trends in FBNC from 1982 to 2020 using a global meteorological reanalysis dataset, the ERA5 reanalysis, and further investigated the influencing factors shaping spatiotemporal dynamic patterns of vegetation greenness in the Great Khingan Range (GKR), the Little Khingan Range (LKR) and Changbai

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD2200405, 2018YFC0507301)

收稿日期: 2022-05-19; 网络出版日期: 2023-06-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

Mountains (CBM) by employing the leaf area index (LAI) as an indicator of vegetation greenness. The Results indicated that the climate change trend in FBNC from 1982—2020 was characterized by warming and drying, but the temperature increasing rate slowed down after 2000. The precipitation, relative humidity and soil moisture in the central part of the study area turned to an increasing trend, especially in the LKR. The overall trends of vegetation greenness in the study area were greening. However, there was a shift in the vegetation greenness trend in 2000 detected by Pettitt test, and the increasing rate of vegetation greenness during 2000—2020 was lower than that during 1982—2000, with an insignificant trend. The areas with a decreasing trend in vegetation greenness after 2000 increased by 7.23 times, which were mainly located in the northwestern part of GKR. The drivers shaping vegetation greenness change between the two periods of 1982—2000 and 2000—2020 were not consistent, with the primary drivers of air temperature and soil moisture during 1982 to 2000. While the positive effect of air temperature on vegetation greenness diminished after 2000, and the main factors driving the increasing vegetation greenness in the central part of the study area included the rising precipitation, relative humidity and soil moisture. The main factor driving vegetation browning in northwestern part of GKR was moisture limitation resulting from decreased precipitation and relative humidity. This study gained a deep insight into spatiotemporal variations of vegetation greenness in FBNC in a context of climate change, and highlights the significance of understanding climate change impact on vegetation response for developing adaptive forestry management strategy to mitigate climate change.

Key Words: forest belt of Northeast China; vegetation greenness; temperature; precipitation; relative humidity; soil moisture

在全球气候变化日益加剧的背景下,影响植被光合作用活动的温度和降雨等因素发生了显著变化,改变了植被生长和固碳能力^[1-3]。植被光合作用活动可用遥感植被绿度,即植被指数(vegetation indices, VIs)或叶面积指数(leaf area index, LAI),进行间接表征^[3-4]。以植被绿度为衡量指标,量化植被活动的时空变化有助于理解气候变化和植被之间的关系,对于预测植被对气候变化的响应至关重要。

近年来一些研究利用 NDVI^[5-6]或 LAI^[7-8]分析了全球植被绿度变化,结果表明自 1980s 以来植被的绿化(植被绿度在某一时间段内呈显著增加趋势则定义为绿化,代表着植被光合作用活动增强;反之则为褐化)是普遍的,北半球高纬度^[9]和温带^[8]区域是绿化的热点地区,而气候变暖是主要驱动因素之一^[2,10-11]。然而,由于气候变化的时空异质性^[12],植被绿度变化存在较大的时空差异。气候变暖停滞^[13-14]和植被生长的温度响应逐渐减弱^[15-16]改变了植被绿度变化趋势^[17-18],一些温带区域的植被褐化加剧^[18],甚至出现从绿化到褐变的逆转^[4]。降雨减少和温度持续增加造成植被面临越来越大的水分胁迫^[19-20],以相对湿度(relative humidity, RH)和土壤水分(soil moisture, SM)作为水分胁迫衡量指标的研究指出水分胁迫是植被绿度增加速度放缓或逆转的关键因素^[4,21-23]。

植被绿度的时空变化及对气候和土壤水分的响应是非线性的^[24],不同时间尺度上气候和土壤水分对植被绿度的影响大小也并不一致。目前分析植被绿度与气候和土壤水分关系的研究多采用相关分析法^[24-25],以变量间的相关系数来确定因子对植被绿度的影响,忽视了各因子间的相互作用。因此,一些研究基于通径分析或地理探测器量化了各因子对植被绿度变化的影响大小^[23,26-29]。通径分析可分析多个因子与因变量之间的复杂关系^[29],地理探测器可根据因子和因变量之间的时空分布相似性来确定因子对因变量的影响,不需要构建变量之间的线性关系^[30]。

东北森林带源于“两屏三带”生态安全战略建设,区域内包括大兴安岭、小兴安岭和长白山脉。东北森林带是我国重要的碳汇功能区和生态屏障区^[31-33],也是对气候变化响应的敏感区^[34]。近几十年来东北地区气候呈“暖干化”趋势^[35-36],但上世纪末开始区域气候变暖出现停滞^[37]。近年来一些研究评估了东北地区植被绿度变化,并分析了气候因素的影响^[38-40],但尚不清楚东北森林带是否出现了植被褐化,也不清楚气候和土壤水分对植被绿度的影响在时间尺度上是否一致。此外,气候和土壤水分变化对植被绿度变化的影响大小也

需进一步分析。综上,本研究利用长时间序列 LAI 遥感数据分析东北森林带 1982—2020 年植被绿度时空变化,并基于通径分析和地理探测器量化气候和土壤水分对植被绿度的影响大小及时间差异,以明确东北森林带植被绿度变化的主要驱动因素。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于 118—135°E 和 38—54°N,平均海拔约 499 m。研究区大部处于中温带,年均温总体上从南至北递减,年降水量总体呈东南至西北递减趋势,总体上四季分明,雨热同期,为植被生长提供了良好的环境条件,大兴安岭和小兴安岭分布有寒温带针叶林和阔叶林,长白山脉主要分布为温带阔叶林和针阔混交林(图 1)。

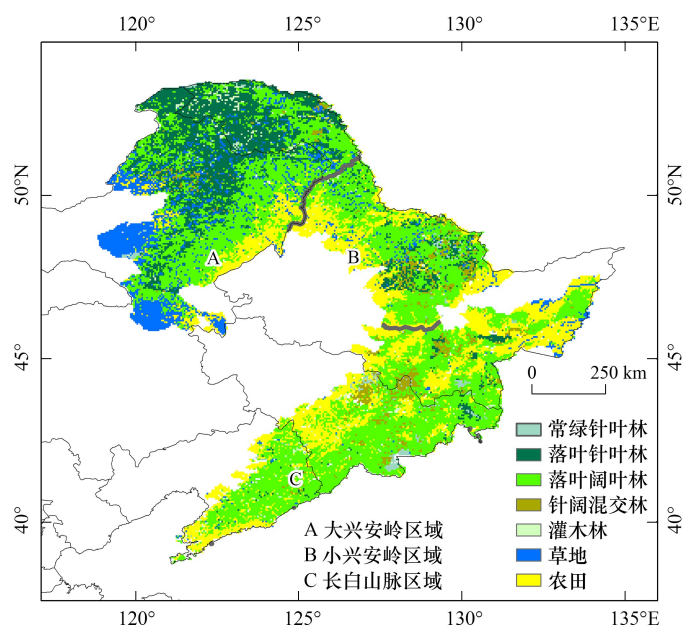


图 1 研究区示意图

Fig.1 Location of the study area

1.2 遥感数据

大尺度植被绿度变化研究一般采用遥感植被指数作为衡量植被生长的指标。早期研究多采用 NDVI 为衡量指标,但 NDVI 在植被茂盛地区($LAI > 2$)易出现过饱和现象^[41],因此本研究选取 LAI 为衡量指标^[7-8]。LAI 定义为单位土地面积上植物叶片总面积与土地面积的比值^[42]。LAI 数据来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发布的气候数据记录(Climatic Data Record, CDR)产品中的 AVHRR LAI 数据集(version 5),空间分辨率为 0.05°(大约 5 km),时间分辨率为 1 d。本研究选取了 1982—2020 年的 LAI 数据,并采用最大值合成法生成每月 LAI 数据,以消除大气影响、云污染对信号的影响。采用 Matlab 插值算法“pchip”进行了缺失值插补。选取每年 4—10 月的生长季 LAI 作为植被绿度的表征^[18]。

1.3 气候与土壤水分数据

本研究采用 ERA5-LAND 数据集(分辨率 0.1°, <https://cds.climate.copernicus.eu/>)中的 1982—2020 年逐月平均温度(T_{mn})、降雨量(P_{re})和土壤水分(SM)数据,并用双线性插值方法将数据重采样至 0.05°分辨率。土壤水分数据包括 0—7 cm、7—28 cm、28—100 cm 和 100—289 cm。相对湿度(RH)计算详见参考文献^[43]。

1.4 方法

1.4.1 距平值计算和时间序列突变点检测

距平值计算如下:

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \quad (1)$$

式中, X_i 为第 i 年 ($i = 1982, 1983, \dots, 2020$) 的生长季平均温度、降雨量或相对湿度, $\bar{X}$ 和 ΔX_i 分别为对应变量的多年平均值和距平值。

采用 Pettitt 突变检验识别植被绿度趋势的突变点^[44], 计算过程详见参考文献^[45]。

1.4.2 趋势分析和显著性检验

采用 Theil-Sen 方法分析植被绿度变化趋势, 该方法可避免数据不符合正态分布要求的限制, 并减少异常值的干扰^[46]。但 Theil-Sen 方法无法判断时间序列变化趋势的显著性, 需引入 Mann-Kendall 检验^[46—47]对趋势进行显著性检验。Theil-Sen 方法和 Mann-Kendall 检验计算详见参考文献^[48]。

1.4.3 通径分析和地理探测器

基于通径分析可将不同因素对 LAI 的影响分解为直接影响和间接影响。直接或间接通径系数绝对值越大, 表明该因素对 LAI 的影响越强, 系数为正表示对 LAI 起促进作用, 反之为抑制作用。通径分析计算过程详见参考文献^[29]。

地理探测器可量化气候和土壤水分对植被绿度变化的相对作用大小。该方法只对类型变量进行分析, 对于连续数据, 可在离散化对其进行分析。利用 R 包“GD”可将气候和土壤水分数据离散化, 离散化的最优标准由“GD”包的 optdisc 函数确定, 以得出最佳的解释力 q 。解释力 q 计算方式详见参考文献^[30]。

2 研究结果

2.1 1982—2020 年东北森林带植被绿度的时空变化特征

Pettitt 突变检验发现研究区植被绿度于 2000 年发生了突变 ($P < 0.05$, 图 2); 栅格水平上, 38.87% 的区域植被绿度在 2000 年发生突变, 其次为 1999 年 (20.66%, 图 2)。以 2000 年作为植被绿度变化突变点, 研究发现两个阶段植被绿度均呈现增加趋势 (分别为 0.00993/a 和 0.00558/a, 图 3), 但 2000 年后植被绿度增加速度

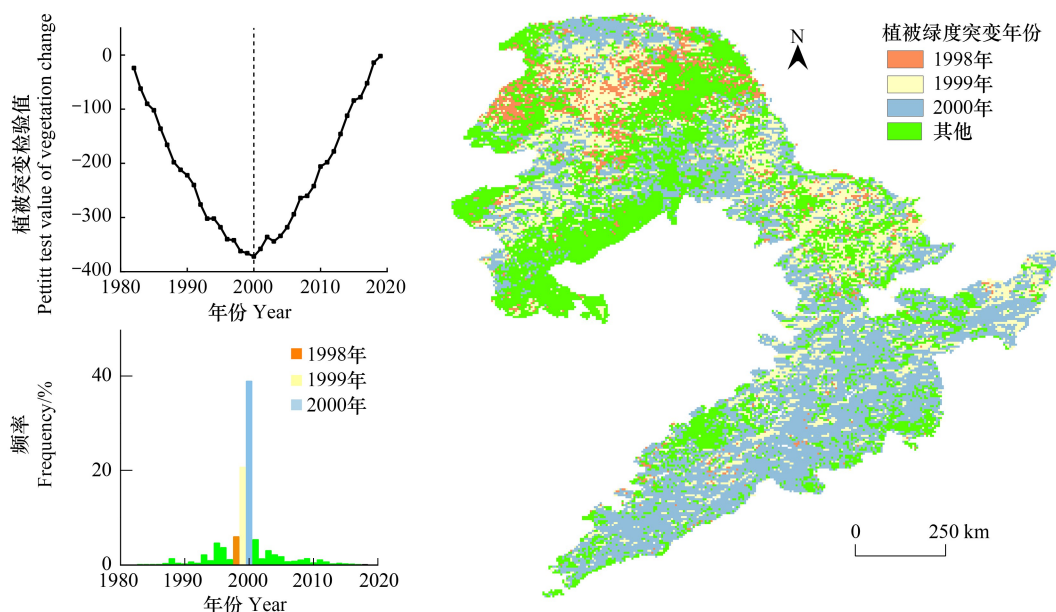


图 2 东北森林带植被绿度突变图

Fig.2 The abrupt vegetation greenness transitions in the forest belt of Northeast China

较 1982—2000 年间有所下降,且趋势转变为不显著。空间分布上,1982—2000 年间 83.28% 区域植被绿度呈增加趋势(图 3),绿化和褐化区域分别占 17.73% 和 0.48%,大、小兴安岭增加速度较快;2000 年后 35.23% 的区域植被绿度呈降低趋势,褐化区域占 3.95%,大兴安岭西北部最为突出(图 3)。两个时期植被绿化区域的空间分布差异较大,褐化面积增加了约 7.23 倍。

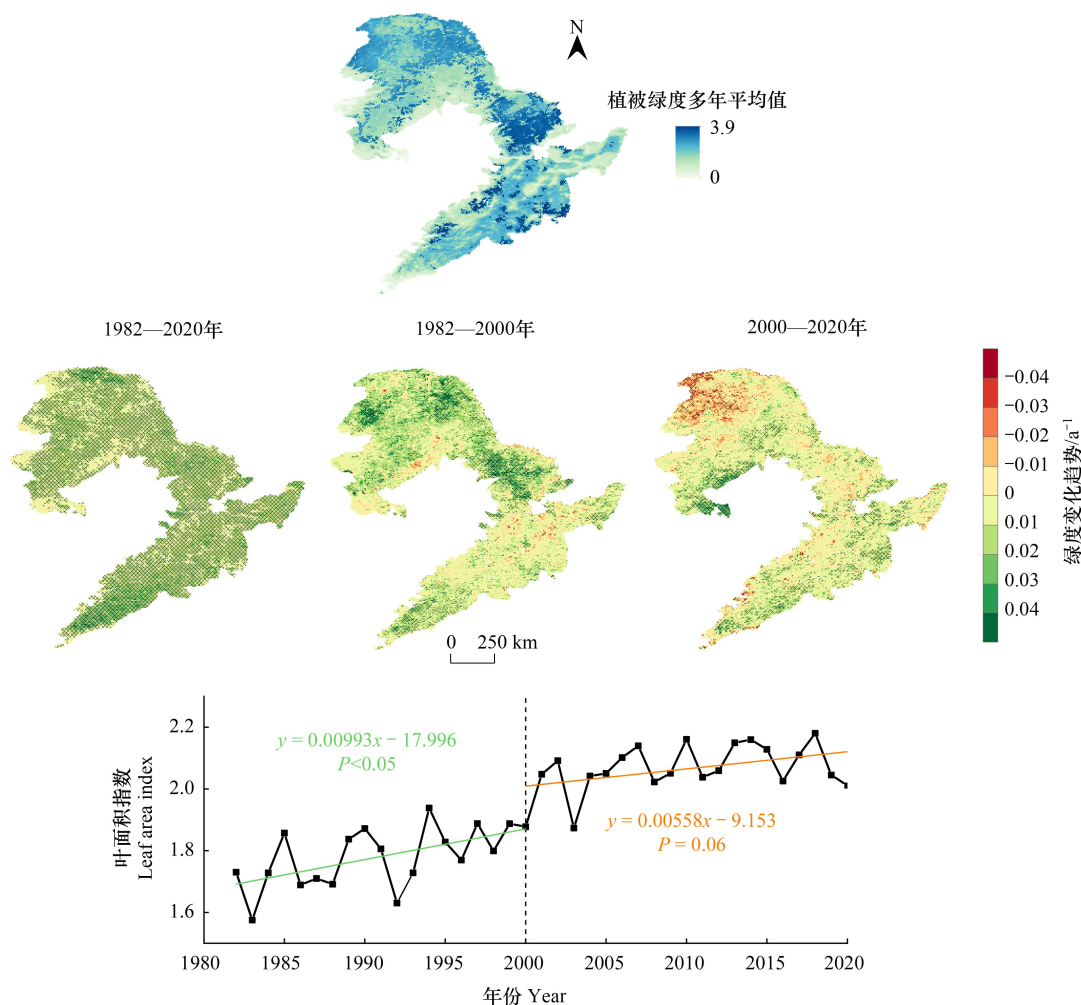


图 3 东北森林带植被绿度年际变化

Fig.3 The interannual variation of vegetation greenness in the forest belt of Northeast China

2.2 近几十年东北森林带气候变化特征

如图 4 所示,1982 年以来研究区气候总体呈现暖干化特征,三个区域生长季平均温度和相对湿度分别呈现显著增加和显著降低的趋势,其中大兴安岭温度上升速度最大($0.036^{\circ}\text{C}/\text{a}$, $P < 0.01$),相对湿度下降速度最快($-0.156\%/ \text{a}$, $P < 0.01$),且降雨量呈显著降低趋势($-0.894 \text{ mm}/\text{a}$, $P < 0.05$)。为揭示植被绿度突变前后气候条件是否存在差异,研究分析了 2000 年前后两个时期气候变化特征。结果显示三个区域温度在两个时期均保持增加趋势,但 1982—2000 年变化速度(分别为 0.058 、 0.039 、 $0.033^{\circ}\text{C}/\text{a}$)高于 2000 年后(分别为 0.009 、 0.009 、 $0.012^{\circ}\text{C}/\text{a}$)。2000 年后各区域降雨量和相对湿度均转为增加趋势,但仅有小兴安岭趋势显著($3.109 \text{ mm}/\text{a}$, $P < 0.01$)。综上,2000 年后研究区升温速度降低,降雨量和相对湿度增加,暖干化趋势有所缓解,尤其是小兴安岭区域。

空间分布上,1982—2000 年研究区温度整体呈增加趋势,26.00% 区域变化显著,主要位于大兴安岭;而降雨量、相对湿度和土壤水分整体呈减少趋势,约 11.38% 的区域相对湿度呈显著下降趋势,主要分布于大兴安

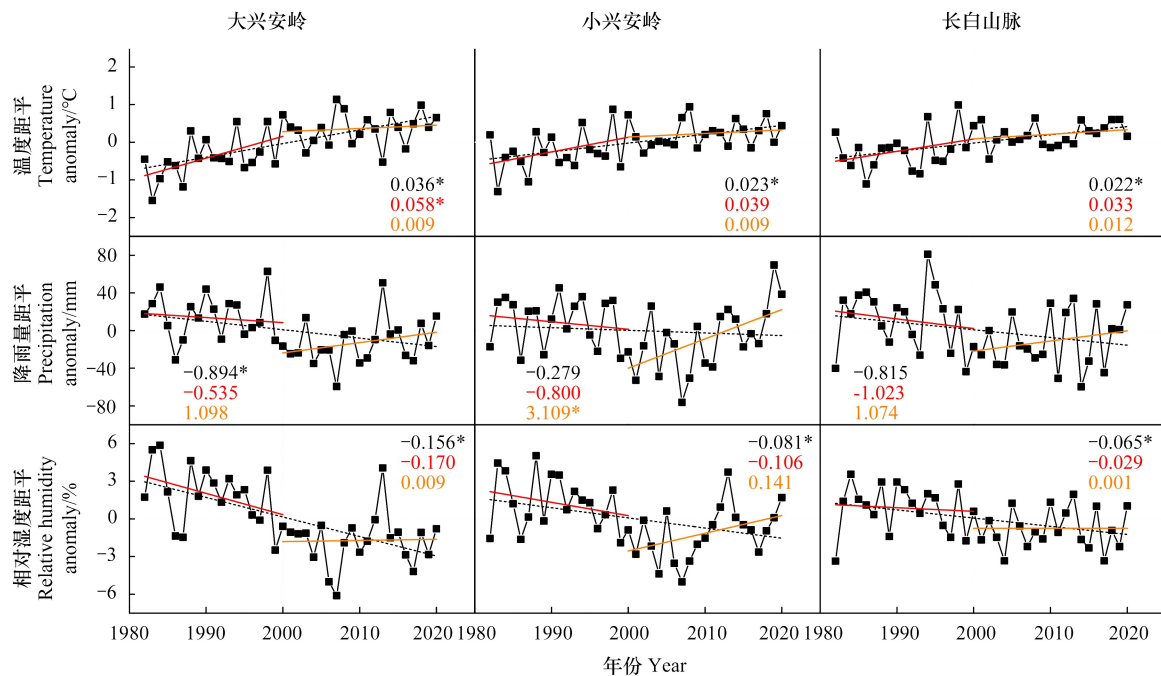


图 4 东北森林带气候演变特征

Fig.4 The evolution characteristics of climate in the forest belt of Northeast China

数字和“*”表示趋势大小及趋势通过 95%显著性检验;黑色、红色和黄色分别表示 1982—2020、1982—2000 和 2000—2020 年

岭东部。2000 年后,温度仍呈增加趋势,但趋势基本不显著且增温速率较 2000 年前有所降低,降雨量、相对湿度和土壤水分在研究区中部呈增加趋势,部分区域趋势显著,而在大兴安岭北部和长白山脉南部呈降低趋势,降雨量、相对湿度和土壤水分的变化表现出较为一致的空间分布(图 5)。

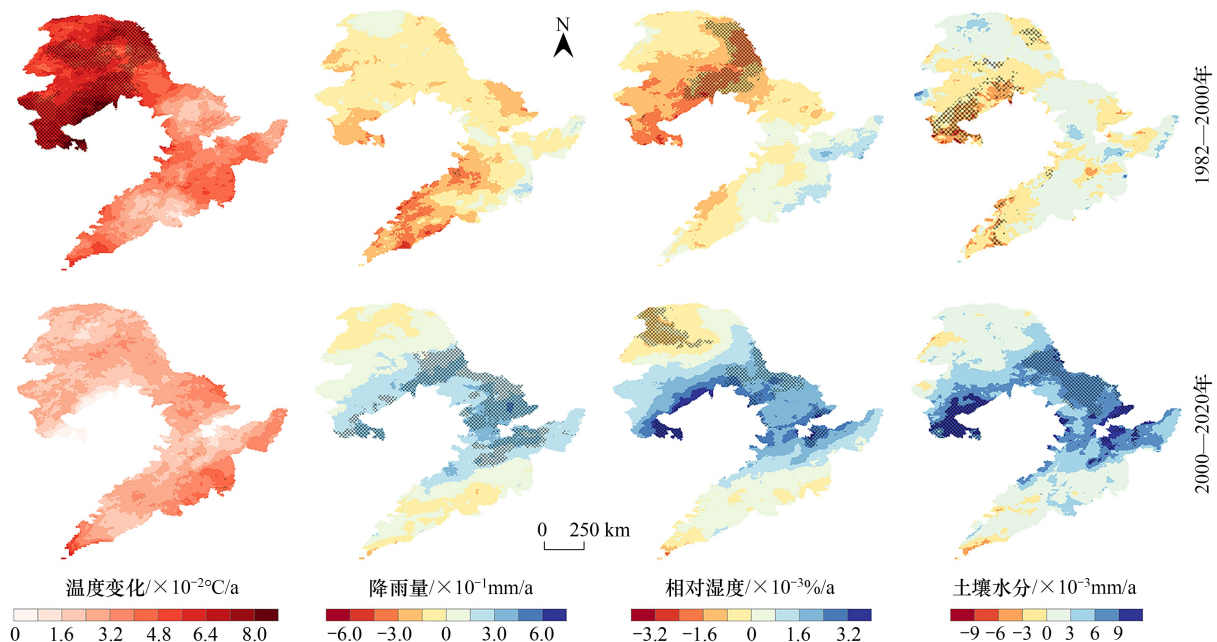


图 5 气候因素时空变化

Fig.5 Spatiotemporal variation in climatic factors

2.3 气候和土壤水分对植被绿度变化的影响

为厘清植被绿度转变前后气候和土壤水分对植被绿度变化的影响是否存在差异,研究以温度、降雨、相对湿度和土壤水分作为自变量,以 LAI 为因变量,构建了 1982—2000 和 2000—2020 年两个时期不同区域的通径分析模型。结果表明,在考虑了影响因子的直接和间接作用后,1982—2000 年期间对各区域植被绿度变化的影响依次为相对湿度>平均温度或土壤水分>降雨(图 6),相对湿度降低是植被绿度增加的限制因素(分别为 -1.230、-1.093 和 -1.108),温度上升(分别为 0.649、0.697 和 0.751)和充足的土壤水分(分别为 0.648、0.713

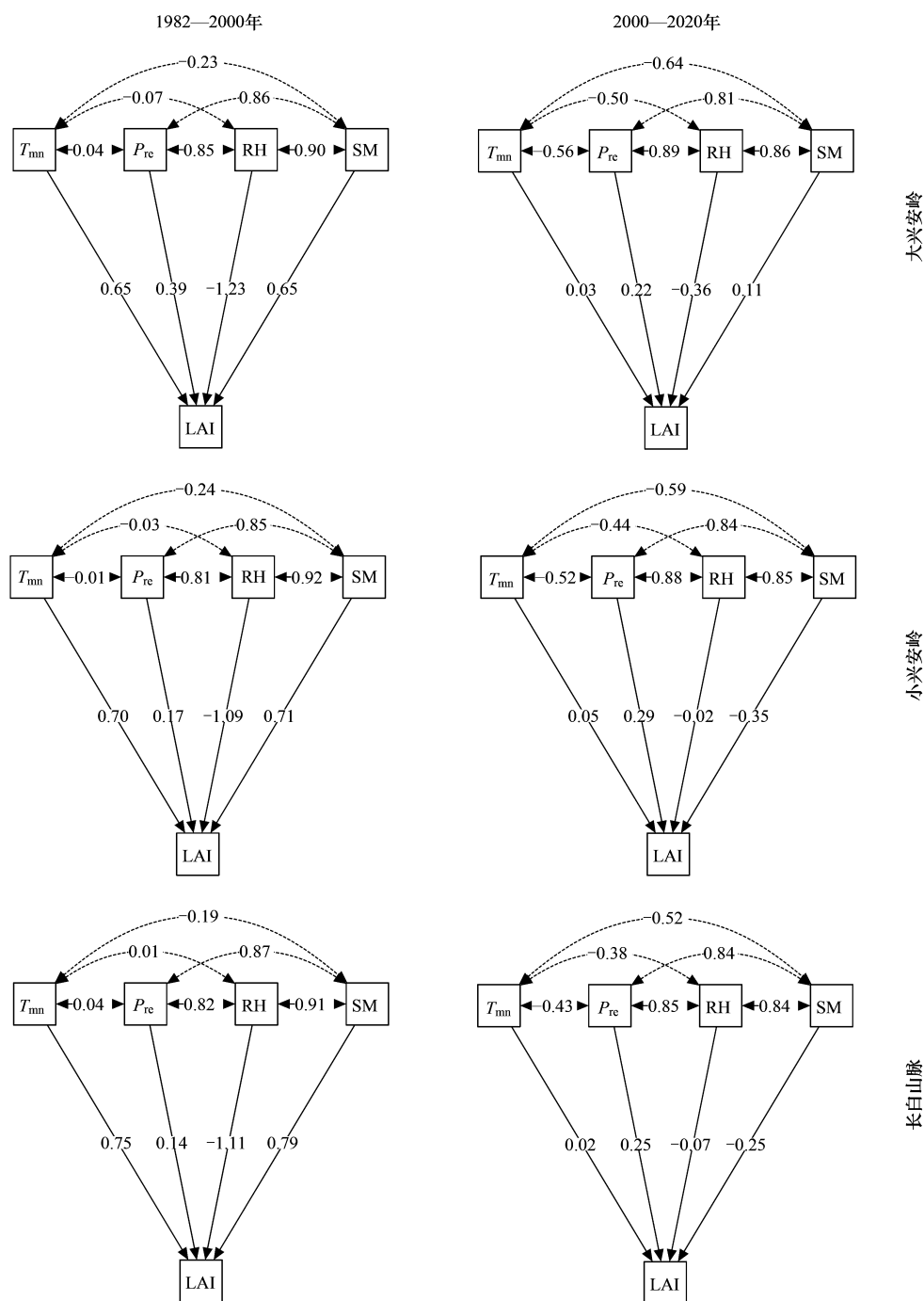


图 6 植被绿度变化通径分析

Fig.6 Path analysis of vegetation greenness change

T_{ms} : 平均温度; P_{re} : 降雨量; RH: 相对湿度; SM: 土壤水分; LAI: 叶面积指数

和 0.792) 对植被绿度增加呈促进作用,降雨对植被绿度变化的直接作用较小,但也可通过调节相对湿度和土壤水分对植被绿度变化产生间接影响。

2000 年后,温度上升对植被绿度变化的积极影响大幅降低(图 6,分别为 0.028、0.048 和 0.049);大兴安岭北部相对湿度持续降低(图 5)是区域植被绿度增加的限制因素(-0.360),而小兴安岭和长白山脉土壤水分胁迫是主要的限制因素(分别为-0.350 和-0.255),降雨增多对三个区域植被绿度增加起促进作用(分别为 0.219、0.287 和 0.246)。

为进一步确定主导植被绿度变化的气候因子,研究采用地理探测器分析了气候和土壤水分与植被绿度变化的关系,并提取对植被绿化和褐化解释力最强的因子及交互作用。结果如表 1 所示,1982—2000 年间,温度及与其他因子的交互作用是植被绿化的主要驱动因子,温度与土壤水分交互作用对长白山脉植被绿化的促进作用最大。2000 年后,三个区域植被绿化的主要驱动因子均转变为土壤水分及与其他因子的交互作用,而植被褐化的主要驱动因子为降雨和土壤水分的交互作用。

表 1 植被绿化或褐化的主要驱动因子

Table 1 Dominant drivers of vegetation greenness greening or browning

区域 Areas	驱动因素类型 Type of drivers	1982—2000				2000—2020			
		绿化驱动因子	q 值	褐化驱动因子	q 值	绿化驱动因子	q 值	褐化驱动因子	q 值
大兴安岭 The Great Khingan Range	单因素	温度	0.62	相对湿度	0.53	土壤水分	0.65	相对湿度	0.34
	交互作用	温度×相对湿度	0.71	温度×相对湿度	0.69	相对湿度×土壤水分	0.76	降雨×土壤水分	0.58
小兴安岭 The Little Khingan Range	单因素	温度	0.57	温度	0.45	温度	0.42	降雨	0.56
	交互作用	温度×降雨	0.63	温度×相对湿度	0.60	温度×土壤水分	0.85	降雨×土壤水分	0.80
长白山脉 The Changbai Mountains	单因素	降雨	0.45	降雨	0.42	降雨	0.33	土壤水分	0.50
	交互作用	温度×土壤水分	0.74	降雨×土壤水分	0.77	温度×土壤水分	0.48	降雨×土壤水分	0.84

3 讨论

3.1 气候趋势与植被绿度变化

气候与植被绿度的变化并不是单调不变的^[4,49]。许多研究发现上世纪末期开始全球气候变暖趋于平缓^[37,50],尤其是欧亚大陆的中纬度地区^[17]。同时,全球部分区域植被绿度增加趋势放缓乃至逆转^[22,43,51]。全球 82% 的植被绿度在 1982—2000 年间呈现增加趋势,但 1999 年后全球 59% 植被绿度呈降低趋势,甚至在许多区域出现趋势逆转^[43]。本研究发现 83.28% 研究区植被绿度在 2000 年之前呈增加趋势,与北半球其他中纬度植被活动变化的面积比例类似^[10]。2000 年后 35.23% 区域植被绿度呈降低趋势,与全球尺度相比,植被绿度降低的面积比例较小,表明以森林覆盖为主的东北森林带对逐渐增加的水分胁迫的抗性较其他植被类型更高。全球尺度研究一般认为全球植被绿度变化在 1990s 中后期^[4,18,43]发生逆转,然而本研究发现东北森林带的转变点略晚于这些研究,这也表明该区域气候和植被具有一定的特异性。

3.2 植被绿度变化的影响因素

植被绿度的年际变化是气候趋势和人类活动影响共同作用的结果^[3]。本研究采用的气候和植被数据的空间分辨率为 0.05°,而这一尺度上的气候趋势是植被绿度变化的主导因素^[52]。1980 年以来北半球中高纬度地区温度升高促进了植被生长,是导致植被绿度增加的主要驱动因素之一^[5,45],温度上升显著提升了该区域内植被的光合作用酶活性和净光合速率^[5],促进了生物量积累^[53]。本研究结果也表明 1982—2000 年间温度是研究区植被绿度增加的主要驱动因子,与其他研究一致^[29]。东北森林带位于北半球中高纬度地区,从西北至东南分别跨越半干旱区、半湿润区和湿润区,1982—2000 年间温度在均呈显著上升趋势(图 5),在温度低于植被光合作用最适温度时,温度上升对植被绿度增加的促进作用毋庸置疑^[2,10]。1982—2000 年间,研究区降雨和相对湿度呈普遍下降趋势,在温度显著增加而降雨减少的情况下,相对湿度降低引起的水分胁迫加剧

限制了植被绿度的增加,但湿润半湿润地区在降雨减少时可能会通过增加光照的方式对植被绿度变化起到促进作用^[18]。温度持续上升时,充足的土壤水分可保障植被活动对水分有效性的需求,有利于植被绿度的增加,温度和土壤水分对植被绿化的促进作用在长白山脉区域最为显著。

1982—2020 年间研究区生长季平均温度呈持续增加趋势,但 2000 年后升温速率有所下降,这与其他研究结果一致^[37]。尽管温度上升速率降低,但温度的持续上升会对植被活动产生负面影响,在生长季温度过高(高于植被最适温度)或蒸发散增加引发的水分胁迫加剧时,植被光合作用将受到明显的抑制^[3]。另外,一些研究指出 1998 年后夏季温度的持续上升对北半球高纬度地区植被活动的促进作用正在降低^[16,22],本研究也发现 2000—2020 年间温度对三个区域植被绿度变化的促进作用显著低于 1982—2000 年间。2000 年后大兴安岭植被绿化的驱动因素由温度转为土壤水分,且交互作用也由温度和相对湿度转为相对湿度和土壤水分。大气干燥度上升和土壤水分不足将促使植被为减少水分损失而降低叶片气孔导度,削弱光合作用能力,进而引发植被褐变^[18,22,54]。研究区气候趋势呈现“暖干化”特征,大兴安岭北部区域属于半干旱区,植被绿度变化对水分有效性更为敏感,同时区域遭受的气象干旱也高于其他区域^[55],特别是温度持续上升引起的蒸发散增加以及降雨和土壤水分的持续下降导致的大气干燥度上升,植被生长受到的水分胁迫更为严重,区域内植被褐化与降雨和土壤水分降低的空间分布基本一致也说明了水分胁迫是植被褐化的主要因素,而温度上升对植被绿度的促进作用不足以抵消水分胁迫对植被绿度的抑制作用^[22,56]。

2000 年后小兴安岭植被绿化的驱动因素仍为温度,区域内降雨、相对湿度和土壤水分的持续增加保障了植被生长对水分有效性的需求,温度持续上升仍然是植被绿化的主要驱动因素。尽管长白山脉属于半湿润区域,但温度持续上升时土壤水分亏缺对植被活动的限制越来越大^[22],长白山中部和南部降雨、相对湿度和土壤水分的变化说明水分有效性有所降低,是区域植被褐化的主要驱动因素,这与过往研究^[51]得出的水分限制增加是中国植被生长在 1999 年后逐渐降低的主要原因之一的结果较为一致。土壤水分在 1982—2000 年间的降低趋势也侧面反应了植被生长增加对土壤水分的消耗,从而造成了 2000 年之后一些区域植被正常活动所需的土壤水分不足^[57]。此外,东北地区 2002 年发生了严重的干旱,由此引发的高温限制和水分胁迫阻碍了植被的持续绿化^[4,58—59],并可能是该区域大范围植被褐化的原因之一^[60]。

3.3 本研究的不确定性

本研究所使用的 NOAA-CDR AVHRR LAI 数据是 0.05 度分辨率(约 5 km)数据中跨度最长的数据集。但该数据集包含 NOAA 多颗卫星的观测数据,在传感器漂移校正过程中存在一定的不确定性^[19]。同时,由于云层覆盖等因素影响,数据集的时空连续性受到了削弱。因此,采用最大值合成法将日尺度数据转换为月尺度,并对缺失值进行插补,以提升 LAI 时间序列的质量是进行数据分析的前提。

CO₂施肥效应是全球植被绿化的主要因素之一,但有研究认为由于养分和水分限制,植被生长的 CO₂施肥效应有所下降^[61]。由于缺乏 CO₂浓度的时空分布数据,本研究未量化 CO₂施肥效应对植被绿度变化的贡献。一些实地观测研究也指出北半球温带区域植被生长并没有显著增加^[62]。东北森林带是我国陆地生态系统的主要碳汇区之一^[31—32],在未来气候变化加剧的背景下,评估该区域植被活动和固碳能力需要更多野外实地观测的支持。

4 结论

本研究基于遥感和气候数据,分析了东北森林带植被绿度和气候的时空变化规律以及气候和土壤水分对植被绿度变化的影响,主要结论为:

(1) 1982—2020 年间东北森林带植被绿度整体呈绿化趋势,但 2000—2020 年间绿化速度降低,植被褐化的区域扩大了 7.23 倍,主要分布于大兴安岭西北部;

(2) 1982—2020 年间东北森林带气候趋势整体呈“暖干化”特征,2000 年后温度上升速度降低,部分区域降雨、相对湿度和土壤水分转为增加趋势;

(3) 1982—2000 年间温度上升和土壤水分是植被绿化的主要驱动因子,2000 年后植被绿度增加来源于研究区中部降雨、相对湿度和土壤水分的增加的驱动,而大兴安岭西北部降雨和土壤水分降低所引发的水分胁迫导致了植被绿度增加速率放缓乃至褐化区域扩大。

参考文献 (References):

- [1] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [2] Xu L, Myneni R B, Chapin III F S, Callaghan T V, Pinzon J E, Tucker C J, Zhu Z, Bi J, Ciais P, Tømmervik H, Euskirchen E S, Forbes B C, Piao S L, Anderson B T, Ganguly S, Nemani R R, Goetz S J, Beck P S A, Bunn A G, Cao C, Stroeve J C. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nature Climate Change*, 2013, 3(6): 581-586.
- [3] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27.
- [4] Pan N Q, Feng X M, Fu B J, Wang S, Ji F, Pan S F. Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: insights from time-varying trends. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 214: 59-72.
- [5] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [6] Tucker C J, Fung I Y, Keeling C D, Gammon R H. Relationship between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index. *Nature*, 1986, 319(6050): 195-199.
- [7] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Armeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [8] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [9] Park T, Ganguly S, Tømmervik H, Euskirchen E S, Høgda K A, Karlsen S R, Brovkin V, Nemani R R, Myneni R B. Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(8): 084001.
- [10] Lucht W, Prentice I C, Myneni R B, Sitch S, Friedlingstein P, Cramer W, Bousquet P, Buermann W, Smith B. Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 2002, 296(5573): 1687-1689.
- [11] Keenan T F, Riley W J. Greening of the land surface in the world's cold regions consistent with recent warming. *Nature Climate Change*, 2018, 8(9): 825-828.
- [12] Ji F, Wu Z H, Huang J P, Chassignet E P. Evolution of land surface air temperature trend. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 462-466.
- [13] Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling? *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(8): L08706.
- [14] Fyfe J C, Meehl G A, England M H, Mann M E, Santer B D, Flato G M, Hawkins E, Gillett N P, Xie S P, Kosaka Y, Swart N C. Making sense of the early-2000s warming slowdown. *Nature Climate Change*, 2016, 6(3): 224-228.
- [15] Piao S L, Liu Z, Wang T, Peng S S, Ciais P, Huang M T, Ahlstrom A, Burkhardt J F, Chevallier F, Janssens I A, Jeong S J, Lin X, Mao J F, Miller J, Mohammad A, Myneni R B, Peñuelas J, Shi X Y, Stohl A, Yao Y T, Zhu Z C, Tans P P. Weakening temperature control on the interannual variations of spring carbon uptake across northern lands. *Nature Climate Change*, 2017, 7(5): 359-363.
- [16] Wang T, Liu D, Piao S L, Wang Y L, Wang X Y, Guo H, Lian X, Burkhardt J F, Ciais P, Huang M T, Janssens I, Li Y, Liu Y W, Peñuelas J, Peng S S, Yang H, Yao Y T, Yin Y, Zhao Y T. Emerging negative impact of warming on summer carbon uptake in northern ecosystems. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 5391.
- [17] Wei H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Wu D H, Tang B J. Effects of warming hiatuses on vegetation growth in the Northern Hemisphere. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 683.
- [18] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [19] Li Y P, Chen Y N, Sun F, Li Z. Recent vegetation browning and its drivers on Tianshan Mountain, Central Asia. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107912.

- [20] Trenberth K E, Dai A G, van der Schrier G, Jones P D, Barichivich J, Briffa K R, Sheffield J. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 2014, 4(1): 17-22.
- [21] Winkler A J, Myneni R B, Hannart A, Sitch S, Haverd V, Lombardozzi D, Arora V K, Pongratz J, Nabel J E M S, Goll D S, Kato E, Tian H Q, Arneeth A, Friedlingstein P, Jain A K, Zaehle S, Brovkin V. Slowdown of the greening trend in natural vegetation with further rise in atmospheric CO₂. *Biogeosciences*, 2021, 18(17): 4985-5010.
- [22] Feng X M, Fu B J, Zhang Y, Pan N Q, Zeng Z Z, Tian H Q, Lyu Y H, Chen Y Z, Ciais P, Wang Y P, Zhang L, Cheng L, Maestre F T, Fernández-Martínez M, Sardans J, Peñuelas J. Recent leveling off of vegetation greenness and primary production reveals the increasing soil water limitations on the greening Earth. *Science Bulletin*, 2021, 66(14): 1462-1471.
- [23] Zhao W, Hu Z M, Guo Q, Wu G N, Chen R R, Li S G. Contributions of climatic factors to interannual variability of the vegetation index in Northern China grasslands. *Journal of Climate*, 2020, 33(1): 175-183.
- [24] Piao S L, Yin G D, Tan J G, Cheng L, Huang M T, Li Y, Liu R G, Mao J F, Myneni R B, Peng S S, Poulter B, Shi X Y, Xiao Z Q, Zeng N, Zeng Z Z, Wang Y P. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [25] Yao Y T, Wang X H, Li Y, Wang T, Shen M G, Du M Y, He H L, Li Y N, Luo W J, Ma M G, Ma Y M, Tang Y H, Wang H M, Zhang X Z, Zhang Y P, Zhao L, Zhou G S, Piao S L. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years. *Global Change Biology*, 2018, 24(1): 184-196.
- [26] 左丽媛, 高江波. 基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 686 - 694.
- [27] 张思源, 聂莹, 张海燕, 李永利, 韩燕东, 刘晓煌, 王兵. 基于地理探测器的内蒙古植被 NDVI 时空变化与驱动力分析. *草地学报*, 2020, 28(5): 1460-1472.
- [28] Dong Y, Yin D Q, Li X, Huang J X, Su W, Li X C, Wang H S. Spatial-temporal evolution of vegetation NDVI in association with climatic, environmental and anthropogenic factors in the loess plateau, China during 2000-2015: quantitative analysis based on geographical detector model. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4380.
- [29] 谢舒笛, 莫兴国, 胡实, 陈学娟. 三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应. *地理研究*, 2020, 39(1): 152-165.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] Ding Y B, Xu J T, Wang X W, Peng X B, Cai H J. Spatial and temporal effects of drought on Chinese vegetation under different coverage levels. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137166.
- [32] Tian H Q, Melillo J, Lu C Q, Kicklighter D, Liu M L, Ren W, Xu X F, Chen G S, Zhang C, Pan S F, Liu J Y, Running S. China's terrestrial carbon balance: contributions from multiple global change factors. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(1): GB1007.
- [33] Shi M Y, Qi J G, Yin R S. Has China's natural forest protection program protected forests? —Heilongjiang's experience. *Forests*, 2016, 7(12): 218.
- [34] 陈智. 2000—2015 年中国东北森林生产力和碳素利用率的时空变异. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1625-1632.
- [35] 张淑杰, 张玉书, 陈鹏狮, 蔡福, 武晋雯, 纪瑞鹏. 东北地区湿润指数及其干湿界线的变化特征. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(3): 226-232.
- [36] Ye L, Shi K, Zhang H R, Xin Z H, Hu J, Zhang C. Spatio-temporal analysis of drought indicated by SPEI over northeastern China. *Water*, 2019, 11(5): 908.
- [37] Du Q Q, Zhang M J, Wang S J, Che C W, Ma R, Ma Z Z. Changes in air temperature over China in response to the recent global warming hiatus. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(4): 496-516.
- [38] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 1981—2002 年中国东北地区森林生态系统碳储量的模拟. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 241-249.
- [39] 方利, 王文杰, 蒋卫国, 陈民, 王永, 贾凯, 李延森. 2000—2014 年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应. *地理科学*, 2017, 37(11): 1745-1754.
- [40] Zhu W Q, Pan Y Z, Liu X, Wang A L. Spatio-temporal distribution of net primary productivity along the Northeast China Transect and its response to climatic change. *Journal of Forestry Research*, 2006, 17(2): 93-98.
- [41] Goswami S, Gamon J A, Vargas S, Tweedie, C E. Relationships of NDVI, Biomass, and Leaf Area Index (LAI) for six key plant species in Barrow, Alaska. *PeerJ*, 2015.
- [42] Fang H L, Baret F, Plummer S, Schaepman-Strub G. An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(3): 739-799.
- [43] Yuan W P, Zheng Y, Piao S L, Ciais P, Lombardozzi D, Wang Y P, Ryu Y, Chen G X, Dong W J, Hu Z M, Jain A K, Jiang C Y, Kato E, Li S H, Lienert S, Liu S G, Nabel J E M S, Qin Z C, Quine T, Sitch S, Smith W K, Wang F, Wu C Y, Xiao Z Q, Yang S. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaax1396.

- [44] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [45] Kim D, Baik J, Umair M, Choi M. Water use efficiency in terrestrial ecosystem over East Asia: effects of climate regimes and land cover types. *Science of the Total Environment*, 2021, 773: 145519.
- [46] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [47] Kendall M G. *Rank Correlation Methods* (4th edn.) Charles Griffin. San Francisco, CA, 1975.
- [48] Yang S S, Zhang J H, Han J Q, Wang J W, Zhang S, Bai Y, Cao D, Xun L, Zheng M X, Chen H, Xu C, Rong Y J. Evaluating global ecosystem water use efficiency response to drought based on multi-model analysis. *Science of the Total Environment*, 2021, 778: 146356.
- [49] Yan X H, Boyer T, Trenberth K, Karl T R, Xie S P, Nieves V, Tung K K, Roemmich D. The global warming hiatus: Slowdown or redistribution? *Earth's Future*, 2016, 4(11): 472-482.
- [50] Wang R, Liu Z F. Stable isotope evidence for recent global warming hiatus. *Journal of Earth Science*, 2020, 31(2): 419-424.
- [51] Peng S S, Chen A P, Xu L, Cao C X, Fang J Y, Myneni R B, Pinzon J E, Tucker C J, Piao S L. Recent change of vegetation growth trend in China. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 044027.
- [52] 李双成, 蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨. *地理研究*, 2005, 24(1): 11-18.
- [53] Chen J M, Ju W M, Ciais P, Viovy N, Liu R G, Liu Y, Lu X H. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4259.
- [54] Yuan M X, Zhao L, Lin A W, Wang L C, Li Q J, She D X, Qu S. Impacts of preseason drought on vegetation spring phenology across the Northeast China Transect. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140297.
- [55] Zhang X W, Liu X H, Wang W Z, Zhang T J, Zeng X M, Xu G B, Wu G J, Kang H H. Spatiotemporal variability of drought in the northern part of northeast China. *Hydrological Processes*, 2018, 32(10): 1449-1460.
- [56] 张林林. 1982—2016 年西南地区变干、变绿趋势分析. *西南农业学报*, 2021, 34(9): 1994-2003.
- [57] Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Wu L H, Chen F, Wang J F, Li C J, Yang Y J, Hu Z Y, Tian S Q, Lu Q. Vegetation greening intensified soil drying in some semi-arid and arid areas of the world. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 292/293: 108103.
- [58] Piao S L, Nan H J, Huntingford C, Ciais P, Friedlingstein P, Sitch S, Peng S S, Ahlström A, Canadell J G, Cong N, Levis S, Levy P E, Liu L, Lomas M R, Mao J F, Myneni R B, Peylin P, Poulter B, Shi X Y, Yin G D, Viovy N, Wang T, Wang X H, Zaehle S, Zeng N, Zeng Z Z, Chen A P. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 5018.
- [59] Wang M, Ding Z, Wu C Y, Song L S, Ma M G, Yu P J, Lu B Q, Tang X G. Divergent responses of ecosystem water-use efficiency to extreme seasonal droughts in Southwest China. *Science of the Total Environment*, 2021, 760: 143427.
- [60] Liu L B, Gudmundsson L, Hauser M, Qin D H, Li S C, Seneviratne S I. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4892.
- [61] Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, Chen J M, Ciais P, Cescatti A, Sardans J, Janssens I A, Wu M S, Berry J A, Campbell E, Fernández-Martínez M, Alkama R, Sitch S, Friedlingstein P, Smith W K, Yuan W P, He W, Lombardozzi D, Kautz M, Zhu D, Lienert S, Kato E, Poulter B, Sanders T G M, Krüger I, Wang R, Zeng N, Tian H Q, Vuichard N, Jain A K, Wiltshire A, Haverd V, Goll D S, Peñuelas J. Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science*, 2020, 370(6522): 1295-1300.
- [62] Peñuelas J, Canadell J G, Ogaya R. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(4): 597-608.