

DOI: 10.20103/j.stxb.202305060947

马云飞,何全军,张月维,石艳军,李建平,袁福香.气候因子和人类活动对松辽流域植被叶面积指数动态的影响.生态学报,2024,44(5):2043-2056.

Ma Y F, He Q J, Zhang Y W, Shi Y J, Li J P, Yuan F X. Influences of climate factors and human activities on vegetation leaf area index dynamics in the Songliao River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2043-2056.

# 气候因子和人类活动对松辽流域植被叶面积指数动态的影响

马云飞<sup>1,2,3</sup>, 何全军<sup>4</sup>, 张月维<sup>4</sup>, 石艳军<sup>4</sup>, 李建平<sup>1,2,3</sup>, 袁福香<sup>1,3,\*</sup>

1 吉林省气象科学研究所, 长春 130062

2 长白山气象与气候变化吉林省重点实验室, 长春 130062

3 吉林省农业气象灾害风险评估与防控科技创新中心, 长春 130062

4 广州气象卫星地面站, 广州 510640

**摘要:**了解气候变化和人类活动对植被的影响对陆地生态系统可持续发展具有重要意义。基于月尺度 MODIS LAI、气象等数据,采用基于像元的趋势及偏相关分析、时滞与累积效应分析和改进的残差分析等方法,评估松辽流域 2001—2021 年生长季植被叶面积指数(LAI)动态,在顾及时滞与累积效应的情况下探究气候与人为驱动因素对植被的影响。结果表明:(1)松辽流域 LAI 总体呈“平原低,山地高”的空间分布格局。近 21 年植被 LAI 在波动中呈上升趋势,未来植被变化以持续改善为主,但内蒙古西部草原及大、小兴安岭局部地区仍存在退化风险。(2)LAI 总体上与气温、降水呈正相关,相较气温植被生长对降水更敏感。LAI 变化的时间效应随气候因子、覆被类型及植被分区的不同而发生变化。LAI 对气温的主要时间效应为 2 个月滞后和 0—1 个月累积,而对降水主要为无显著滞后和 1 个月累积。(3)气候变化和人类活动的联合作用是影响松辽流域植被 LAI 动态的主要原因,两者对植被变化的贡献分别占 41.7% 和 58.3%,同时考虑时滞和累积效应时,提升了气候因子对植被生长的解释度。

**关键词:**气候因子;松辽流域;时滞累积效应;人类活动;残差分析

## Influences of climate factors and human activities on vegetation leaf area index dynamics in the Songliao River Basin

MA Yunfei<sup>1,2,3</sup>, HE Quanjun<sup>4</sup>, ZHANG Yuewei<sup>4</sup>, SHI Yanjun<sup>4</sup>, LI Jianping<sup>1,2,3</sup>, YUAN Fuxiang<sup>1,3,\*</sup>

1 Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062, China

2 Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology & Climate Change, Changchun 130062, China

3 Agricultural Meteorological Disaster Risk Assessment and Prevention Technology Innovation Center of Jilin Province, Changchun 130062, China

4 Guangzhou Meteorological Satellite Ground Station, Guangzhou 510640, China

**Abstract:** Understanding the impact of climate change and human activities on vegetation is of great significance to the sustainable development of terrestrial ecosystems. Based on monthly MODIS leaf area index and meteorological data, the trend and partial correlation analysis, time-lag and cumulative effects analysis, and the improved residual analysis were used to evaluate the LAI dynamics of vegetation in the growing season of Songliao River Basin from 2001 to 2021, explore the impact of climate and human drivers on vegetation under the premise of taking time-lag and cumulative effects into account. The results showed that: (1) the overall distribution pattern of LAI in Songliao River Basin was low in plain and

基金项目:吉林省科技发展项目(20210203152SF);中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J076)

收稿日期:2023-05-06; 网络出版日期:2023-12-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Yfx1998@126.com

high in mountain area. In the past 21 years, the vegetation LAI showed an upward trend in fluctuations, and the future vegetation change trend will be mainly continuous improvement, but there is still a risk of degradation in the grasslands of western Inner Mongolia and some areas of Daxing'an Mountains and Xiaoxing'an Mountains. (2) Vegetation LAI was positively correlated with precipitation, and vegetation growth was more sensitive to precipitation than air temperature. The time effects of the LAI change varied with climate factors, land cover types and vegetation zoning. The main time effects of LAI on air temperature were 2 month lag and 0—1 month accumulation, while for precipitation, there was no significant lag and 1 month accumulation. (3) The combined effects of climate change and human activities were the main reasons that affected the dynamics of vegetation LAI in Songliao River Basin, and their contributions to vegetation change accounted for 41.7% and 58.3%, respectively. When considering time-lag and cumulative effects at the same time, the explanation degree of climate factor to vegetation growth was improved.

**Key Words:** climate factors; Songliao River Basin; time-lag and cumulative effects; human activities; residuals analysis

植被是地球生物圈的重要组成部分之一,对全球环境变化非常敏感<sup>[1]</sup>。植被生长动态是气候变化和人类活动影响的综合体现。国内外学者研究发现植被变化与气候条件存在一定相关性,全球变暖和降水变化显著影响植被分布格局<sup>[2-3]</sup>。而人类经济活动、生态工程建设等人为扰动也推动了植被的变化。因此,定量分析气候变化和人类活动对长期植被动态的贡献,对于理解生态环境与人类社会发展的关系及应对未来气候变化制定环境保护策略具有重要意义。

得益于遥感技术发展,近年来学者们基于植被遥感数据对不同区域植被变化及气候和人为因素进行研究。如 Gao 等<sup>[4]</sup>利用 1982—2020 年归一化植被指数(NDVI)数据和气候因子,分析毛乌素沙地植被动态并采用残差分析探讨植被变化与气候及人类活动的响应,发现月尺度上气温是植被生长的主要气候驱动因子,而在年尺度则由降水驱动,人类活动是植被变化主要驱动力;岳萌等<sup>[5]</sup>基于 2000—2019 年 NDVI 等数据,采用趋势分析和残差分析研究黄河流域 NDVI 变化特征及其驱动因素,发现相比温度降水对植被影响更大,人类活动是植被变化主要驱动因素;马炳鑫等<sup>[6]</sup>基于 1982—2019 年融合 GIMMS 和 SPOT 的 NDVI 和气象数据,采用趋势分析、残差分析探究我国西南地区气候和人类驱动对植被动态的贡献,发现西南地区人迹稀少区人类活动对植被的影响可能会低于气候的影响。总体上,诸多学者的相关研究取得了积极进展,然而植被生长滞后于季节性天气变化<sup>[7-8]</sup>,且气候对植被生长还具有累积效应,即植被生长对前一段时间累积的气候效应更敏感<sup>[9-10]</sup>。在分析气候变化和人类活动对植被动态的贡献时,以往研究通常忽略气候变量的时滞和累积效应,多使用同期植被数据和气候因子进行残差分析,导致气候对植被变化的影响被低估,造成气候变化部分影响被误归为人类活动的影响<sup>[11-12]</sup>,植被变化归因的解释可能会缺乏科学性。

松辽流域是中国北方重要生态安全屏障,气候变化正加剧当地生态脆弱性,近年来极端气候事件频发<sup>[13]</sup>,对当地生态系统带来极大压力。同时受农业生产和城市化进程等人类活动影响,导致水土流失、植被退化等一系列问题。目前有关流域植被动态及影响因素的研究主要集中于黄河流域<sup>[5,14]</sup>、长江流域<sup>[15-16]</sup>等地区,针对松辽流域研究较少。同时在反映植被生长动态的遥感植被指数中,叶面积指数(LAI)的时空演变可以较好反映植被数量和结构特征的变化以及植被与陆气的相互作用,已广泛应用在生态、气象水文等领域<sup>[14,17]</sup>。而以往研究多基于 NDVI,基于 LAI 数据的研究不足,松辽流域气候及人为因素对植被 LAI 动态的影响缺乏系统分析。

鉴于此,本文基于 2001—2021 年 LAI 数据,运用均值法、趋势分析法分析了松辽流域植被 LAI 空间格局与时空变化趋势,利用偏相关分析法分析气候因子与植被 LAI 的关系并探讨 LAI 对气候因子的时滞与累积效应,最后借助改进的残差分析法,在考虑时滞与累积效应的情况下进一步探究气候变化和人类活动对植被 LAI 动态的影响,以期松辽流域应对气候变化及生态环境可持续发展提供科学依据。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究区概况

松辽流域地处我国东北部,主要包括黑龙江、吉林、辽宁三省及内蒙古东四盟等地区,总面积约 123.8 万 km<sup>2</sup>。西面和北面分别坐落大、小兴安岭,东起长白山山脉,南抵黄海与渤海,东北部为三江平原,中、南部分别为松嫩平原与辽河平原。流域内林地、草地、耕地资源丰富,是我国粮食主产区,在保障国家粮食安全中具有重要战略地位<sup>[18]</sup>。松辽流域横跨寒温带针叶林区、暖温带落叶阔叶林区、温带草原区和温带针叶、落叶阔叶混交林区(图 1,表 1),自东向西呈湿润、半湿润和半干旱的湿度层级,具有典型植被分布格局<sup>[19]</sup>,是全球变化重要研究区之一。

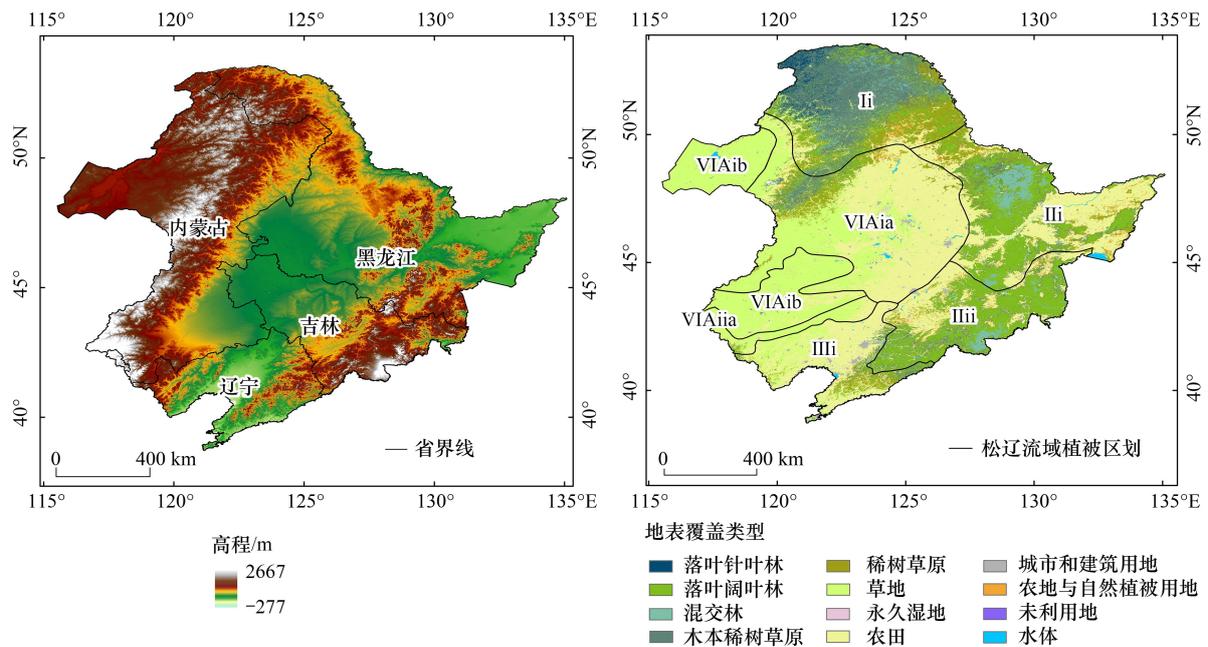


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

I i:南寒温带落叶针叶林地带; II i:温带北部针叶、落叶阔叶混; II ii:温带南部针叶、落叶阔叶混; III i:暖温带北部落叶柞林地带; VIAia:温带北部草甸草原亚地带; VIAib:温带北部典型草原亚地带; VIAiia:温带南部森林(草甸)草原

表 1 松辽流域植被区划表

Table 1 Vegetation zoning table of Songliao River Basin

区域 Regions	地带 Zones	代码 Codes
寒温带针叶林区 Cold temperate deciduous needleleaf forest region	南寒温带落叶针叶林地带	I i
温带针阔叶混交林区	温带北部针叶、落叶阔叶混	II i
Temperate mixed needleleaf and broadleaf forest region	温带南部针叶、落叶阔叶混	II ii
暖温带落叶阔叶林区	暖温带北部落叶柞林地带	III i
Warm temperate deciduous broadleaved forest region	温带北部草甸草原亚地带	VIAia
温带草原区	温带北部典型草原亚地带	VIAib
Temperate steppe region	温带南部森林(草甸)草原	VIAiia

### 1.2 数据来源及处理

#### 1.2.1 LAI 数据

本文 LAI 数据为 MOD15A2H V6 叶面积指数产品,该产品是空间分辨率 500 m、时间分辨率 8 d 的综合数

数据集,时间范围 2001—2021 年。相关研究表明该数据产品在全球主要 5 套 LAI 产品交叉评估中理论不确定性最低,且空间分辨率较其它产品更高<sup>[20]</sup>。此数据集成于谷歌地球引擎云计算平台,在该平台根据研究区范围剪裁、重采样并采用最大值合成法(MVC)将 8 d 数据合成为逐月空间分辨率为 1 km 的 LAI 数据。松辽流域植被在冬季多处于休眠期并被积雪覆盖,这一时段植被动态研究的指示意义不大,故本文选取每年 4—10 月植被生长季作为研究时段。

### 1.2.2 气象数据

气象数据为 2001—2021 年中国 1 km 分辨率逐月平均气温、降水数据集,数据为格点数据,来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。该气象数据集的降水数据单位为 0.1 mm,气温数据单位是 0.1 °C,基于 matlab 软件完成批量转换和剪裁后得到 tif 格式的松辽流域气温、降水数据集。

### 1.2.3 地表覆盖数据

地表覆盖数据来自 MODIS 土地覆盖产品 MCD12Q1\_V06,数据包含 17 个主要土地覆盖类型,根据国际地圈生物圈计划(IGBP),包括 11 个自然植被类型、3 个土地开发和镶嵌地类及 3 个非草木地类<sup>[21]</sup>,空间分辨率 500 m,时间分辨率 1 a。本文结合研究区现状,筛选出以下 8 类主要覆被类型用以以后文分析:落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、木本稀树草原、稀树草原、草地、永久性湿地、农田(图 1)。

### 1.2.4 中国植被区划数据

植被分区在空间上是完整的、连续的和不重复出现的植被类型或其组合的地理单元,本文引用中国植被区划数据,将松辽流域划分为 4 个子植被分区和 7 个植被地带(图 1,表 1),以便从宏观角度分析松辽流域植被 LAI 空间分布格局以及时滞与累积效应下气候因子对植被的影响的地域分异,该数据来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

### 1.2.5 数字高程模型(DEM)数据

DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>)STRM DEM 90 m 分辨率高程数据。利用 ArcGIS 10.8 将该数据按照研究区范围剪裁并制作高程图(图 1)。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 趋势及相关性分析

本文利用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验<sup>[22]</sup>,研究松辽流域长时序植被 LAI 数据的多年变化趋势,当计算所得斜率值  $S_{obs}$  为正值时,表示 LAI 呈现增长的趋势,反之则表示 LAI 呈现退化趋势。同时,采用 Mann-Kendall 检验来判断趋势的显著性,本文将检验在 0.05 置信水平上的显著性检验结果划分为显著变化(标准化后的统计检验量  $Z$  的绝对值  $> 1.96$ ) 和不显著变化(标准化后的统计检验量  $Z$  的绝对值  $\leq 1.96$ )。

采用 Hurst 指数分析法<sup>[23]</sup>,分析松辽流域 2001—2021 年植被 LAI 变化的持续性特征。Hurst 指数取值包括以下三种:当  $0.5 < H < 1$  时,表明未来 LAI 变化趋势与过去变化趋势一致,越接近 1,其持续性越强;若  $H = 0.5$ ,则未来变化趋势未知;若  $0 < H < 0.5$ ,表明 LAI 时间序列具有反持续性。将 Sen 趋势与 Hurst 指数相结合,将未来 LAI 变化趋势分为持续上升( $S_{obs} > 0, 0.5 < H < 1$ )、上升转下降( $S_{obs} > 0, 0 < H < 0.5$ )、持续下降( $S_{obs} < 0, 0.5 < H < 1$ )、下降转上升( $S_{obs} < 0, 0 < H < 0.5$ )四种类型并逐一进行分析<sup>[24]</sup>。

采用偏相关分析法<sup>[25]</sup>逐像元计算 2001—2021 年松辽流域植被生长季 LAI 与气温、降水量之间的相关性,并进行显著性检验( $P < 0.05$ )。其公式如下<sup>[6]</sup>:

$$R_{LAI-P} = \frac{R_{LAI-T} - R_{LAI-P}R_{TP}}{\sqrt{(1 - R_{LAI-P}^2)(1 - R_{TP}^2)}} \quad (1)$$

式中, $T$  表示气温, $P$  表示降水,  $R_{LAI-P}$  表示剔除降水影响时, LAI 与气温的偏相关系数。  $R_{LAI-T}$ 、  $R_{LAI-P}$  以及  $R_{TP}$  分别为 LAI 与气温、LAI 与降水和气温与降水的相关系数。  $R_{LAI-P} > 0$  表示 LAI 与气温为正相关,反之则为负相关。

### 1.3.2 植被变化对气候因子的时滞和累积效应分析

为了评估植被 LAI 对气温、降水的时滞累积效应影响,对每个气候因子使用线性回归<sup>[12]</sup>,以气温为例,计算公式如下:

$$LAI_t = b \times \sum_{j=0}^n TMP_{t-m-j} + a \quad (2)$$

式中,  $a$  和  $b$  为回归系数,  $TMP_{t-m-j}$  为滞后  $m$  个月、累积  $n$  个月的第  $t$  个月的气温,按照前人相关研究<sup>[26]</sup>,时滞和累积效应通常在 0—3 个月,且  $m+n \leq 3$ 。对  $m$  和  $n$  进行排列组合,对应如下 4 种情况:当  $m=0, n=0$  时,不存在时间效应;当  $m$  在 1—3 之间,  $n=0$  时,只考虑滞后效应;当  $m=0, n$  在 1—3 之间时,只考虑时间累积效应;当  $m$  和  $n$  都在 1—3 范围内时,同时考虑时滞效应和时间累积效应。本文采用决定系数( $R^2$ )确定时滞、累积月( $m, n$ )的最佳拟合时间效应,同时用决定系数  $R^2$  定量评估 4 种情况下气候因子对植被 LAI 变化的可解释程度。

### 1.3.3 改进的多元回归残差分析

残差分析常用于剥离气候变化和人类活动的影响并分别量化评价<sup>[27]</sup>。在考虑时滞与累积效应的基础上,采用 Ma 等<sup>[28]</sup>提出的修正残差分析法,重构 LAI 与气候因子在月尺度上的线性关系。公式具体如下:

$$LAI_{CC} = A \times TMP + B \times PRE + C \quad (3)$$

$$LAI_{HA} = LAI_{obs} - LAI_{CC} \quad (4)$$

式中,  $TMP$  和  $PRE$  分别为 1.3.2 节确定的相应滞后月和累积月的气温和降水,  $A, B$  分别为回归系数,  $C$  为截距,  $LAI_{CC}$  代表基于回归模型的 LAI 预测值,即气候变化对植被 LAI 的影响,  $LAI_{obs}$  为基于遥感影像的观测值,  $LAI_{HA}$  表示残差,即人类活动对植被 LAI 的影响。

### 1.3.4 LAI 动态驱动因素判定及贡献率计算

采用一元线性回归计算 2001—2021 年松辽流域  $LAI_{CC}$  和  $LAI_{HA}$  的线性趋势率,分别用  $Slope(LAI_{CC})$  和  $Slope(LAI_{HA})$  表示气候变化和人类影响下的植被生长季 LAI 变化趋势。 $Slope$  值  $>0$  表示气候变化或人类活动对植被 LAI 起到促进作用;反之则起到抑制作用。参考金凯等<sup>[29]</sup>分级方式,根据  $LAI_{CC}$  和  $LAI_{HA}$  变化趋势值将两种因素的影响划分为明显抑制 ( $\leq -0.32$ )、中度抑制 ( $-0.32$ — $-0.16$ )、轻微抑制 ( $-0.16$ — $-0.06$ )、基本无影响 ( $-0.06$ — $0.06$ )、轻微促进 ( $0.06$ — $0.16$ )、中度促进 ( $0.16$ — $0.32$ ) 和明显促进 ( $\geq 0.32$ ) 7 个等级。此外,根据表 2 方法计算气候变化和人类活动对生长季 LAI 变化的相对贡献率。

表 2 植被 LAI 变化的驱动因素判定标准及贡献率计算方法

Table 2 Identification criterion and contribution calculation of the drivers of LAI change

$S_{obs}$	驱动因素 Driving factors	驱动因素划分标准 Division criteria of driving factors		驱动因素相对贡献率/% Relative contribution of driving factors	
		$Slope(LAI_{CC})$	$Slope(LAI_{HA})$	CC	HA
$>0$	CC&HA	$>0$	$>0$	$\frac{Slope(LAI_{CC})}{Slope(LAI_{obs})}$	$\frac{Slope(LAI_{HA})}{Slope(LAI_{obs})}$
	CC	$>0$	$<0$	100	0
	HA	$<0$	$>0$	0	100
$<0$	CC&HA	$<0$	$<0$	$\frac{Slope(LAI_{CC})}{Slope(LAI_{obs})}$	$\frac{Slope(LAI_{HA})}{Slope(LAI_{obs})}$
	CC	$<0$	$>0$	100	0
	HA	$>0$	$<0$	0	100

LAI:叶面积指数 Leaf area index; CC:气候变化 Climate change; HA:人类活动 Human activities;  $S_{obs}$ :基于遥感数据的 LAI 观测值变化趋势率;  $Slope$ : LAI 变化趋势

## 2 结果与分析

### 2.1 植被 LAI 时空动态特征

#### 2.1.1 LAI 空间分布格局

利用均值法计算得到 2001—2021 年松辽流域植被生长季 LAI 多年均值空间分布(图 2),发现松辽流域

LAI 分布大体呈“平原低,山地高”的空间格局。其中,植被 LAI 介于 0.06—3.66 之间,LAI 在 0.5—3.0 的区域面积占 91.02%。LAI 相对低值区集中在东北平原和内蒙古西部草原区,相对高值区集中在大、小兴安岭及长白山山脉地区。不同植被区划方面,温带针阔叶混交林区 LAI 最高(2.31),而温带草原区最低(0.85),各植被带 LAI 由高至低依次为 II ii > I i > II i > VI Aia > III i > VI Aiaa > VI Aib。

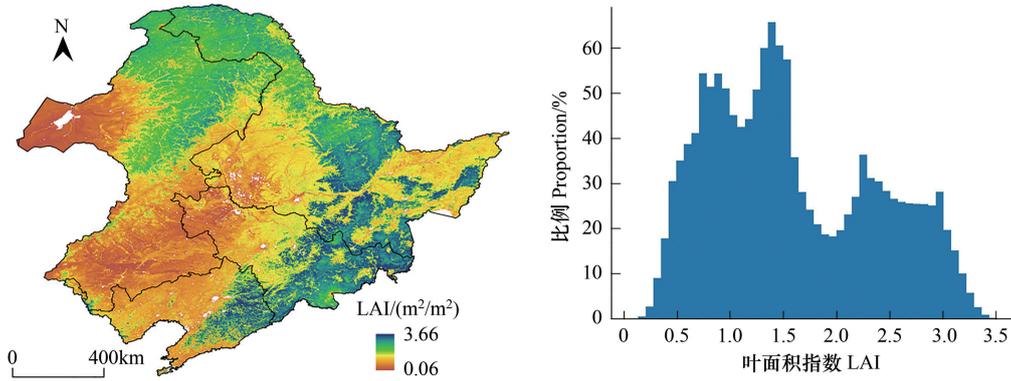


图2 LAI 多年均值空间分布

Fig.2 Spatial distribution of multi-year average value of LAI

LAI:叶面积指数 Leaf area index

### 2.1.2 LAI 时空变化特征

2001—2021 年松辽流域植被 LAI 历年均值变化见图 3,近 21 年植被 LAI 呈多年波动上升趋势,每年植被 LAI 平均增加量约为 0.0149。历年 LAI 变化范围在 1.36—1.74 之间,最低最高值分别对应 2003 年和 2017 年。多年来,逐渐形成低 LAI 等级比例下降而高 LAI 等级比例增加的此消彼长的态势(图 3)。总的来看,松辽流域植被生态环境逐渐向好发展,随着 2013 年东北各地陆续停止天然林商业性采伐,国有林区进入全面保

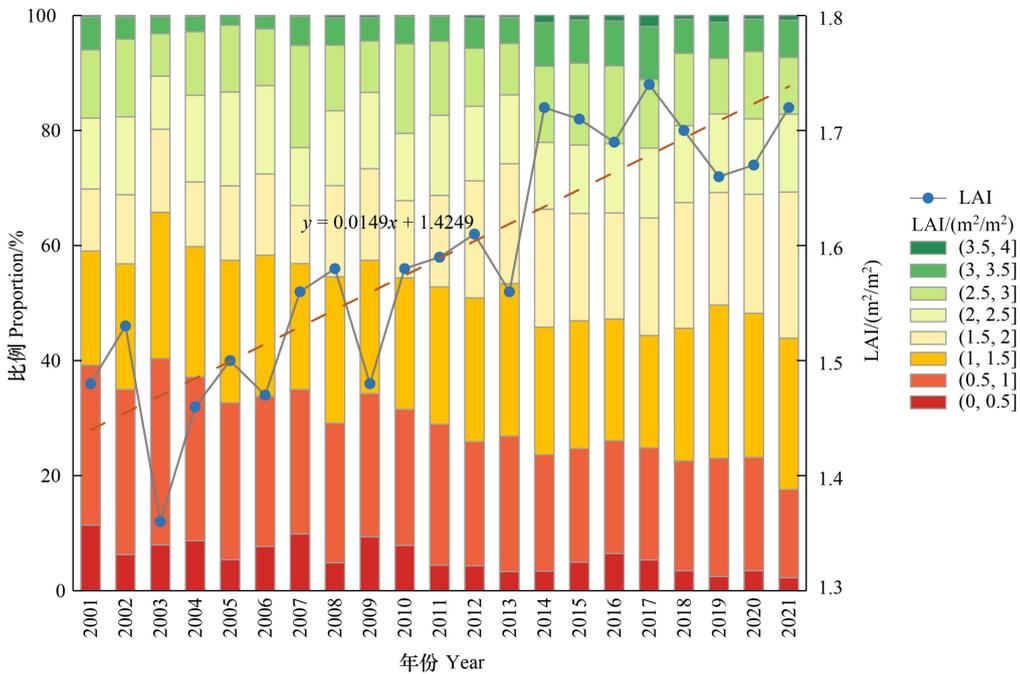


图3 2001—2021 年历年 LAI 时间变化

Fig.3 Temporal variation of the annual LAI from 2001 to 2021

护的新阶段,这与 2013 年后 LAI 显著提升具有一定的关联性。

基于 Theil-Sen 斜率估计和 M-K 检验方法得到近 21 年松辽流域 LAI 变化趋势空间分布(图 4),发现 LAI 总体以显著增加趋势为主。其中,Sen 斜率主要介于-0.26—0.42 之间,呈增加趋势面积占研究区总面积的 88.5%,LAI 显著增加区域占比最高,达到 57.8%,集中分布在东北平原大部地区,不显著增加区域面积占比 30.5%。LAI 呈减少趋势区域集中分布在大、小兴安岭等地,以不显著下降为主,面积占比为 10.3%。不同植被区划方面,VI<sub>Aia</sub>、VI<sub>Aii</sub>及 VI<sub>Aib</sub> 南部植被带 LAI 增长最为显著, I<sub>i</sub> 下降最为显著。总体而言,LAI 增加趋势的面积比例远高于减少趋势,表明松辽流域植被生长状况整呈不断改善趋势。

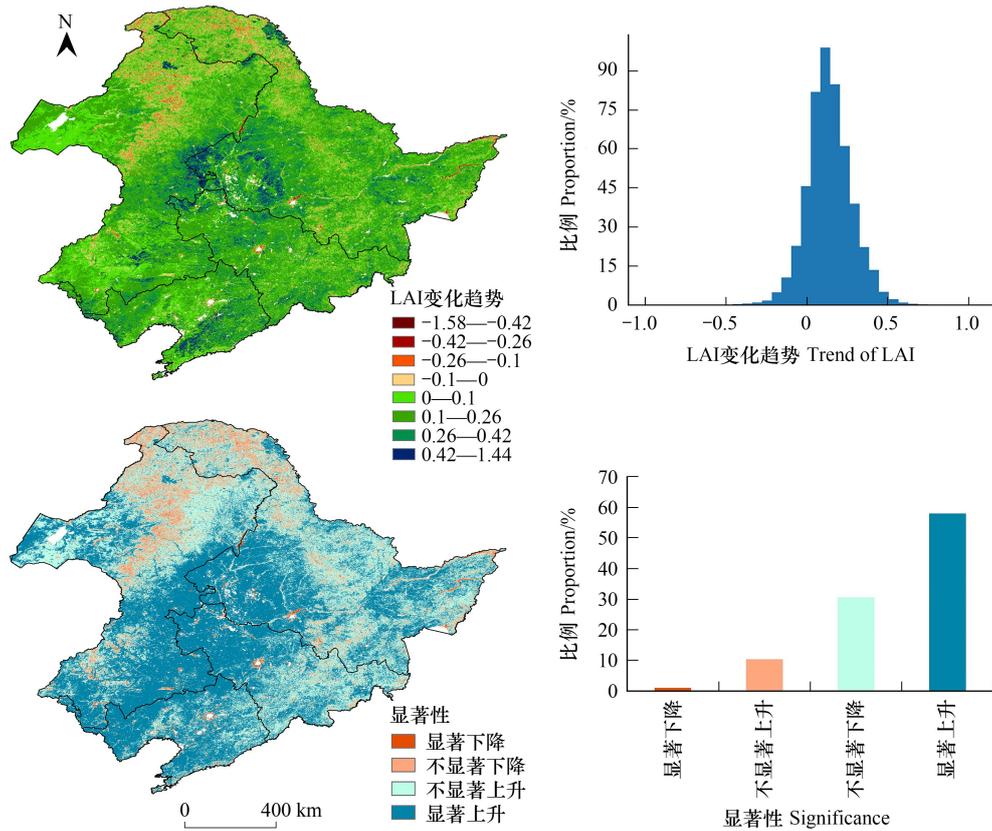


图 4 2001—2021 年 LAI 变化趋势及显著性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of change trend and significance of LAI from 2001 to 2021

### 2.1.3 LAI 未来变化特征

为分析松辽流域植被 LAI 变化趋势可持续性,逐像元计算近 21 年 Hurst 指数空间分布(图 5)。Hurst 指数介于 0.22—0.76 之间,均值为 0.59,Hurst 指数大于 0.5 的区域占总面积的 83.16%,表明研究区大部植被 LAI 变化趋势具有较强的同向持续性。Hurst 指数高值区主要分布在松嫩平原及辽河平原大部,普遍在 0.6 以上,低值区主要分布在大、小兴安岭部分地区、三江平原以及长白山山脉局部地区。未来 LAI 变化趋势为持续上升、上升转下降、持续下降、下降转上升四种类型的面积分别占研究区总面积的 77.4%、11.1%、5.8%和 5.7% (图 5),即松辽流域 LAI 目前处于上升趋势的大部分地区未来仍将呈上升趋势,但需注意的是约 11.1% 的上升区域未来可能出现逆转,该区域主要分布在内蒙古西部草原区。

## 2.2 植被 LAI 对气候因子的时滞与累积效应

### 2.2.1 LAI 与气候因子的关系

利用偏相关分析逐像元计算 2001—2021 年松辽流域植被生长季 LAI 与气温、降水之间的相关性(图 6),结果表明:植被 LAI 总体上与气温、降水呈正相关,与降水的显著性明显高于气温,表明相对于气温植被 LAI

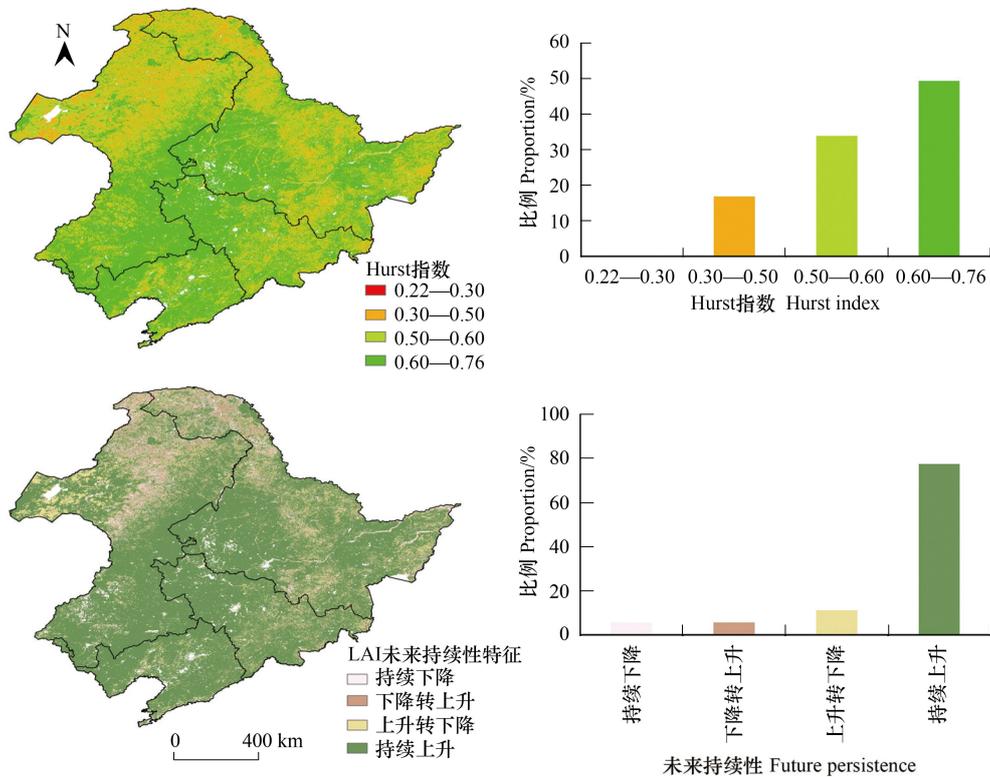


图5 松辽流域 LAI 的 Hurst 指数及持续性特征

Fig.5 Hurst index and persistence characteristics of LAI in Songliao River Basin

对降水更敏感,这可能与流域内半干旱区的气候条件有关。其中,LAI 与年均气温的相关性较弱,总体呈不显著正相关,占研究区总面积的 64%,其次为不显著负相关占比约 29%;LAI 与同期降水的相关关系相较气温更大,相关系数介于 $-0.91$ — $0.96$ 之间,呈正相关关系的区域占总面积的 60.2%,其中显著性正相关( $P < 0.05$ )区域占全域的 26.1%,主要分布在流域中西部地区及三江平原部分地区。

### 2.2.2 LAI 对气候因子的时滞和累积效应

研究发现气候对植被 LAI 变化的时间效应随着气候因子、覆被类型及植被分区的不同而发生变化(表 3)。气温方面,在松辽流域内总体表现出 $(1.24 \pm 0.98)$ 个月(平均值 $\pm$ 标准差)的滞后和 $(0.46 \pm 0.63)$ 个月的累积。具体而言,LAI 对气温的滞后(L)和积累月数(A)主要以 LOA0 (34.6%)、L2A1 (31.2%)、L2A0 (19.1%)、L1A2 (7.0%) 4 类为主(图 7)。无时间效应、仅时滞效应、仅时间累积效应和综合时间效应(时滞+累积)的面积分别占总面积的 33.2%、25.1%、0.3%和 41.4%(表 3)。其中,植被分区方面,各个分区几乎无仅时间累积效应的情况,温带针阔叶混交林区超过半数区域无时间效应,而寒温带针叶林区综合时间效应最明显。覆被类型方面,落叶阔叶林时间效应最低,稀树草原和永久性湿地时滞效应相对最高,落叶针叶林综合时间效应最高。

降水方面,在松辽流域内总体表现出 $(0.38 \pm 0.79)$ 个月(平均值 $\pm$ 标准差)的滞后和 $(0.78 \pm 0.42)$ 个月的累积。具体而言,滞后和积累月数主要以 LOA1 (60.1%)、LOA0 (20.9%)和 L2A1 (17.1%) 3 类为主(图 7)。无时间效应、仅时滞效应、仅时间累积效应和综合时间效应的面积占比分别为 23.7%、1.9%、52.8%和 21.6%(表 3)。其中,植被分区方面,各个分区几乎没有仅存在时滞效应的情况,除寒温带针叶林区外,其他三个分区时间累积效应较为明显,而寒温带针叶林区综合时间效应远大于其他分区。覆被类型方面,稀树草原时间效应最低,草地和农田时间累积效应相对最高,落叶针叶林综合时间效应最高。

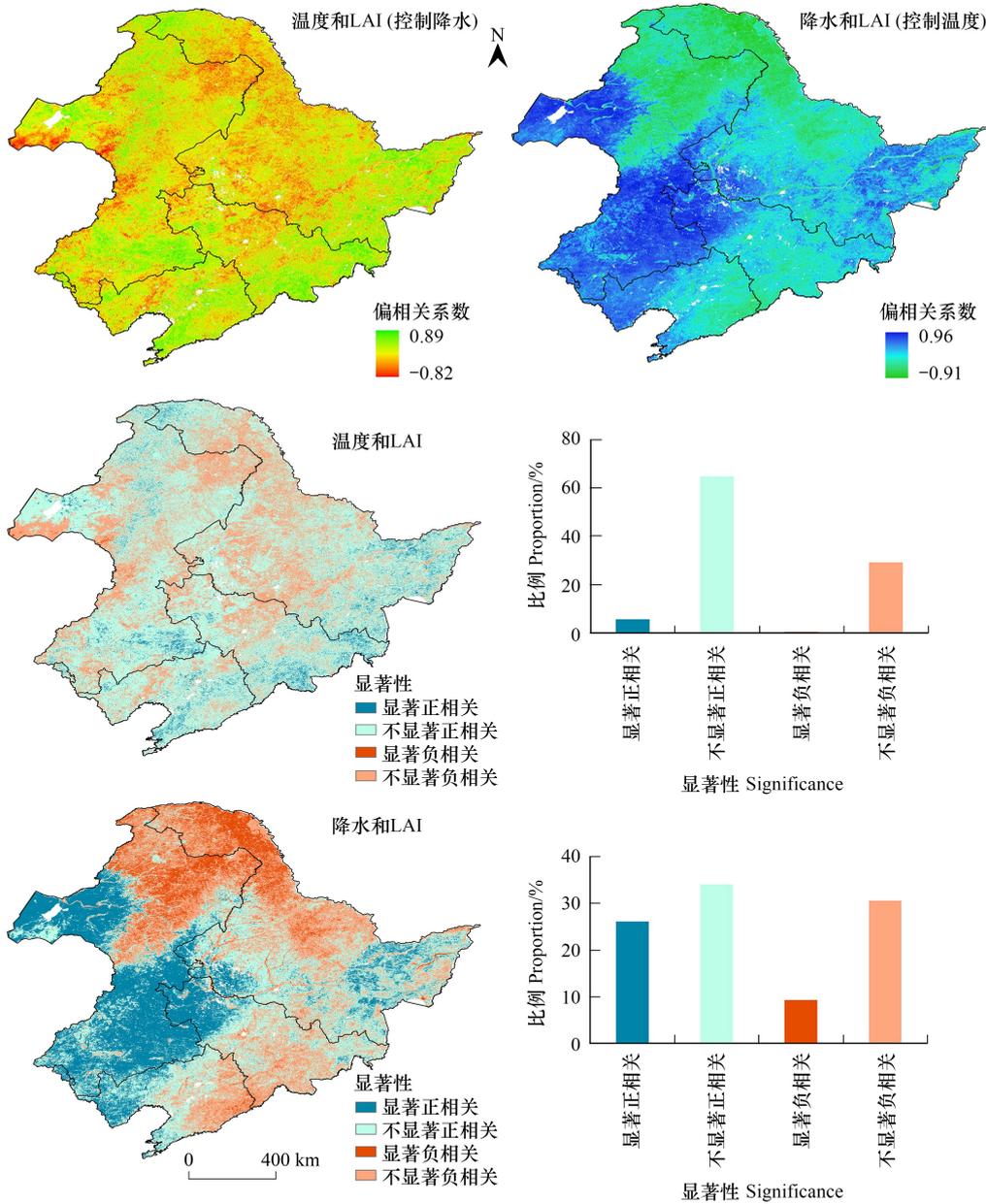


图 6 植被 LAI 与气温、降水相关性及其显著性检验

Fig.6 Correlation and significance test between vegetation LAI and temperature and precipitation

### 2.3 气候变化和人类活动对植被 LAI 变化的影响

基于考虑时滞和累积效应的改进残差分析,将 LAI 预测及残差时间序列进行逐像元趋势分析,用以表征近 21 年来气候变化和人类活动对松辽流域 LAI 的影响,发现两者对松辽流域植被的影响均体现出较大的空间异质性(图 8)。气候因子(气温、降水)对生长季 LAI 起到促进作用的面积占研究区总面积的 35.9%,主要集中在分布在内蒙的西部和中南部、吉林省西部、三江平原及长白山山脉地区,土地类型主要以草地、农田和落叶阔叶林为主。起抑制作用的区域占流域总面积的 8.3%,主要分布在大兴安岭林草交错区;人类活动对 LAI 起促进作用的区域占 56.3%,其中起中度或明显促进作用的区域面积占 13.9%,主要分布在内蒙古东北部、黑龙江省西南部和辽宁省东南部地区。起抑制作用的区域占 5.8%,主要分布在内蒙古部分草原区,该区域由于多年来的过度放牧导致草原生境质量的下降。

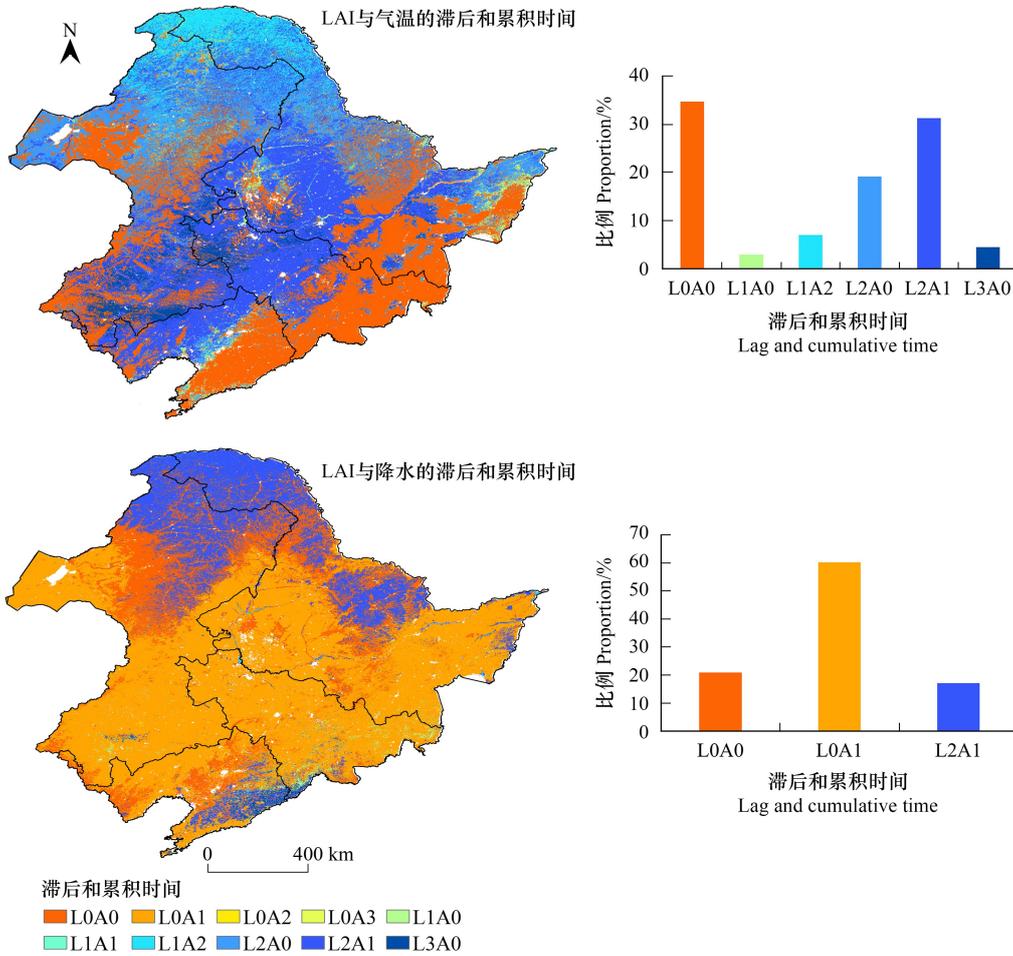


图7 植被 LAI 的气候指标滞后和累积时间的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of lag and cumulative time of vegetation LAI on climatic index

L:滞后 Time-lag ; A:累积时间 Accumulation 如 L1A2 表示滞后 1 个月累积 2 个月,其他以此类推

计算气候变化和人类活动对生长季 LAI 变化的相对贡献率(图 9)。总体上,13.1%地区的植被动态由气候变化导致,20.5%由人类活动导致,66.4%是受双重驱动导致,气候变化和人类活动的联合作用是影响松辽流域大部地区植被变化的原因。其中,气候变化的贡献率在 0%—20%和 40%—60%范围的区域面积占比最大,均达到 23%,主要集中分布在内蒙古东北部、黑龙江中北部、吉林中东部和辽宁东部地区,地表覆被类型以林地和农田为主,贡献率大于 80%的区域面积约占 12.2%,主要集中在内蒙古西部地区,以草地为主;人类活动对 LAI 的贡献率主要以 60% 以上居主导地位,面积占比为 44.2%,主要分布在内蒙古北部、黑龙江除东北部以外大部、吉林中西部以及辽宁大部地区。综合计算可得,人类活动对植被 LAI 变化的贡献占比为 58.3%,整体上贡献比气候变化更大。

### 3 讨论

#### 3.1 考虑时滞与累积效应的必要性

以往研究通常调查同期气候因子对同期多种植被绿度指标变化的影响<sup>[30-31]</sup>,已有多项研究证明,当忽略时滞效应时,气候的影响将无法得到正确估计,导致气候因子影响的低估<sup>[32-33]</sup>。本文计算每种植被类型的平均决定系数  $R^2$ (表 4),No 情况下气候因子解释度在 38%—71%,Lag 下为 41%—76%,Acc 效应下为 39%—75%,Both 下在 42%—78%。可以看出各覆被类型同时考虑时滞和累积效应的情景总是好于其他时间情景,

表 3 气候因素对不同植被分区及主要植被类型的时间影响面积百分比/%

Table 3 The time-influenced area percentage of climate factors on different vegetation divisions and main vegetation types

植被分区及主要地表覆盖类型 Vegetation region and main land cover types	气温 Temperature				降水 Precipitation			
	无时间 效应 No	时滞 效应 Lag	时间累 积效应 Acc	综合时 间效应 Both	无时间 效应 No	时滞 效应 Lag	时间累 积效应 Acc	综合时 间效应 Both
	寒温带针叶林区 Cold temperate deciduous needleleaf forest region	6.2	31.9	0.8	61.1	35.5	0.1	1.6
暖温带落叶阔叶林区 Warm temperate deciduous broadleaved forest area	42.4	15.8	0.1	41.7	26.1	4.1	61.3	8.5
温带草原区域 Temperate steppe region	28.9	29.9	0.1	41.1	16.2	0.5	80.9	2.4
温带针阔叶混交林区 Temperate mixed needleleaf and broadleaf forest region	55.7	22.3	0.2	21.8	16.9	3.2	67.1	12.8
落叶针叶林 Deciduous needleleaf forests	2.5	16.2	2.2	79.1	4.1	0.1	0.4	95.4
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forests	72.9	13.2	0.2	13.7	19.9	6.6	44.4	29.1
混交林 Mixed forests	34.0	27.7	0.4	37.9	12.2	0.7	15.8	71.3
木本稀树草原 Woody savannas	29.0	22.4	0.9	47.7	29.6	0.5	14.6	55.3
稀树草原 Savannas	35.2	41.6	0.1	23.1	65.6	1.9	14.6	17.9
草地 Grassland	41.5	31.9	0.2	26.4	16.2	0.8	81.1	1.9
永久性湿地 Permanent wetlands	44.2	38.8	3.1	13.9	40.8	7.5	32.8	18.9
农田 Croplands	9.7	28.8	0.1	61.4	14.2	0.1	85.2	0.5

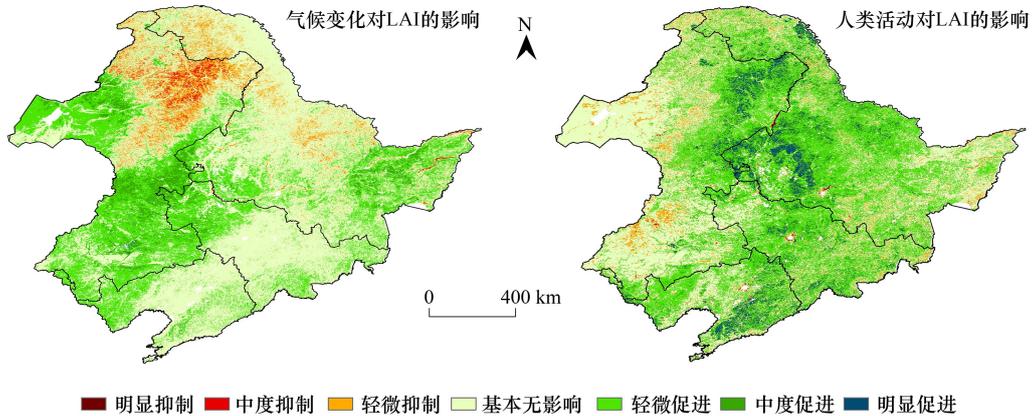


图 8 2001—2021 年气候变化和人类活动对植被变化影响的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of the impacts of climatic change and human activities on vegetation change during 2001—2021

表 4 主要植被类型在四种时间效应下的决定系数均值

Table 4 Mean values of determination coefficients of main vegetation types under four time effects

主要地表覆盖类型 Vegetation region and main land cover types	$R^2_{No}$	$R^2_{Lag}$	$R^2_{Acc}$	$R^2_{Both}$
落叶针叶林 Deciduous needleleaf forests	0.71	0.76	0.75	0.78
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forests	0.51	0.62	0.65	0.69
混交林 Mixed forests	0.57	0.59	0.59	0.64
木本稀树草原 Woody savannas	0.43	0.47	0.48	0.52
稀树草原 Savannas	0.38	0.41	0.39	0.42
草地 Grassland	0.64	0.64	0.66	0.78
永久性湿地 Permanent wetlands	0.46	0.48	0.49	0.49
农田 Croplands	0.42	0.57	0.59	0.61

No: 无时间效应 No time effect; Lag: 时滞效应 Time lag effect; Acc: 时间累积效应 Time accumulation effect; Both: 综合时间效应 Both of time lag and accumulation effect

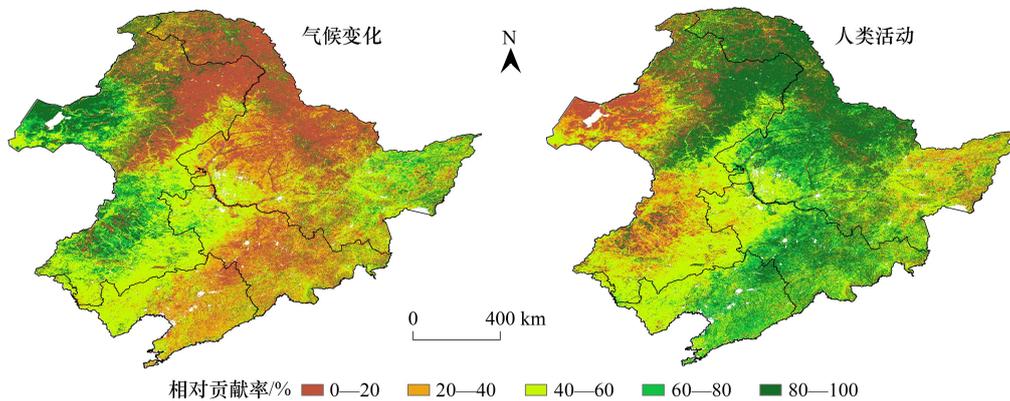


图9 气候变化及人类活动对 LAI 变化的相对贡献率

Fig.9 The relative contribution rate of climate change and human activities to the change of LAI

气候因子对植被 LAI 的解释度有所提升,时滞和累积效应一起更好地评估了气候因素对植被生长的影响,这点也在刘宁等<sup>[11]</sup>对青藏高原植被生长的时间效应研究中得到证实。因此,作为植被对气候因子响应的重要影响,在分析植被 LAI 动态时应考虑时滞和累积效应。

### 3.2 植被对气候因素的时间效应

时滞效应的存在一是因为植被的光合、呼吸作用的适应机制使其能在一段时间内适应气象条件的变化<sup>[34]</sup>,二是土壤温度对植被生长有较大影响,土壤热容量比较大,需要一定时间才能响应季节性气候的变化<sup>[35]</sup>。本文研究表明,松辽流域植被对气温的时滞响应普遍比降水更加滞后,即植被对降水变化的响应更敏感,这与张景华等<sup>[7]</sup>、毕馨予等<sup>[36]</sup>研究结果基本一致。气温的滞后性和时间累积性在大、小兴安岭地区以及农田表现明显。原因可能是在流域北部尤其是小兴安岭地区,气候寒冷且雨量相对充足,植被发育受光合作用、养分吸收等因素<sup>[37]</sup>,需要一定时间来适应气温变化,才能开始快速生长。积温是影响东北地区单季作物农业生产的重要气象因素,主要粮食作物如玉米等均为喜温作物,从种子出苗到各发育阶段的累计温度在单株玉米植株的总干重中起决定性作用<sup>[38-39]</sup>;降水方面,研究表明流域内大部地区植被 LAI 对降水无滞后效应,而累积效应普遍在 1 个月及以上,尤其在寒温带针叶林区累积效应更明显。这可能是由于森林的垂直结构和枯枝落叶层的存在可以帮助森林生态系统截留和储存水分,并逐渐释放储存的水分以避免受到即时干旱的影响,这与雷茜等<sup>[40]</sup>的研究结果相符。

### 3.3 植被对气候变化和人类活动的响应

本文发现气候变化对内蒙古北部大兴安岭森林草原过渡带的植被起到抑制作用。有研究表明,该地区多年降水呈减少趋势,植被退化受水分影响显著<sup>[41]</sup>。本文同时发现气候对植被变化的贡献占比为 41.7%,总体高于石淞等<sup>[24]</sup>和贾志峰等<sup>[42]</sup>得出的气候相对贡献率,这种差异可能由于所用植被数据不同,以及本文是在考虑时滞与累积效应情况下评估各驱动因素的相对贡献,这也进一步证明该方法提升了气候因子对植被生长的解释度。值得关注的是,松辽流域未来气候条件总体向暖湿发展,导致植被总体将获得更多降水,近年来暴雨等极端气候事件频发<sup>[43]</sup>,这也给流域植被生长的可持续性带来较大挑战。

人类活动对松辽流域植被变化贡献整体上占主导地位。随着三北工程、天然林保护等生态工程的实施,以及 2013 年后相继停止天然林商业性采伐<sup>[44]</sup>,流域内大部林地生境改善明显。在以农田覆盖为主的平原,受农业技术、政策等因素影响,主要粮食作物玉米、水稻和大豆自 2000 年来种植结构经历演变。种植面积方面,2000—2015 年,玉米和水稻种植面积不断增加,大豆种植面积则是先增长后减少。种植结构方面,2000 年大豆为最主要粮食作物。2005—2015 年,玉米逐渐取代大豆成为主要粮食作物<sup>[45]</sup>。东北平原以玉米和水稻为主作物种植的扩张,也反映出该地区 LAI 总体呈显著增加的趋势(图 4)。同时,有研究表明农田管理、灌溉

及农药的合理使用可防止作物生长受气候波动的影响<sup>[46]</sup>。此外,需要注意的是东三省省会城市周边环境受中度和明显人类活动抑制作用(图9),近年来,省会城市都市圈不断扩大,建设用地挤占耕地和林地,造成城市周边区域植被退化。与此同时,人类活动通过驱动土地利用类型变化,进而影响植被生长,如城市用地扩张、退耕还林还草等人类活动均对植被生境产生较大影响<sup>[47]</sup>。

### 3.4 研究的不确定性

本文基于对时滞累积效应的考虑以及改进的残差分析,可减少气候对植被 LAI 影响的低估,但研究仍存在一些不确定性。首先,用于计算时滞累积效应的数据为 1 km 分辨率月尺度 LAI 数据和气象数据,计算的时滞、累积时间难以精确到旬以内,且 1 km 分辨率的植被评估精度仍然不足。其次,影响植被生长的气候因素除气温和降水外,还包括太阳辐射、蒸散发等其他条件。此外,人类活动影响具有一定综合性,目前还无法具体量化如城市扩张、农业生产、生态工程等人类活动对植被变化产生的影响。因此,后续仍需进一步将上述不确定性加以明晰,从而进一步提升对气候变化及人类活动与植被生长之间关系的理解。

## 4 结论

(1) 松辽流域植被生长季多年 LAI 均值大体呈“平原低,山地高”的空间分布格局。2001—2021 年 LAI 呈波动上升趋势,时空变化具有一定空间异质性。LAI 显著增加面积占比 57.8%,集中分布在东北平原大部地区,LAI 呈减少趋势区域集中分布在大、小兴安岭地区。未来植被以持续改善趋势为主,但内蒙古西部草原及大、小兴安岭局部地区仍有退化风险。

(2) 植被 LAI 总体上与气温、降水呈正相关,相较气温植被生长对降水更敏感。气候对 LAI 变化的时间效应随着气候因子、覆被类型及植被分区的不同而发生变化。总体上,松辽流域植被 LAI 变化对气温的主要时间效应为 2 个月滞后和 0—1 个月累积,而对降水主要体现为 0 个月滞后和 1 个月累积。

(3) 气候变化对流域内 35.9% 的植被起促进作用,起抑制作用区域占 8.3%,主要分布在大兴安岭林草交错区。人类活动对 LAI 起促进作用的区域占 56.3%,起抑制作用的区域占 5.8%,主要分布在内蒙古部分草原区。气候变化和人类活动对松辽流域 LAI 变化的贡献分别占 41.7% 和 58.3%,除内蒙古西部、中南部以及三江平原地区 LAI 动态主要受气候因素影响外,人类活动主导了植被变化。

### 参考文献 (References):

- [1] Lunetta R S, Knight J F, Ediriwickrema J, Lyon J G, Worthy L D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(2): 142-154.
- [2] 路中,雷国平,郭一洋,马泉来.不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响. *生态学报*, 2021, 41(5): 1894-1906.
- [3] Shi Y, Jin N, Ma X L, Wu B Y, He Q S, Yue C, Yu Q. Attribution of climate and human activities to vegetation change in China using machine learning techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 294: 108146.
- [4] Gao W D, Zheng C, Liu X H, Lu Y D, Chen Y F, Wei Y, Ma Y D. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: a case study in the Mu Us Sandy Land, China. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108745.
- [5] 岳萌,耿广坡,王涛,杨睿,顾倩.2000—2019 年黄河流域陕西段植被 NDVI 时空变化及其驱动因素分析. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 238-246, 255.
- [6] 马炳鑫,和彩霞,靖娟利,王永锋,刘兵,何宏昌.1982—2019 年中国西南地区植被变化归因研究. *地理学报*, 2023, 78(3): 714-728.
- [7] 张景华,封志明,姜鲁光,杨艳昭.澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1425-1435.
- [8] 段艺芳,任志远,孙艺杰.陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应. *生态学报*, 2020, 40(10): 3408-3419.
- [9] Zhang H C, Liu S G, Regnier P, Yuan W P. New insights on plant phenological response to temperature revealed from long-term widespread observations in China. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 2066-2078.
- [10] Wen Y Y, Liu X P, Xin Q C, Wu J, Xu X C, Pei F S, Li X, Du G M, Cai Y L, Lin K. Cumulative effects of climatic factors on terrestrial vegetation growth. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(4): 789-806.
- [11] 刘宁,彭守璋,陈云明.气候因子对青藏高原植被生长的时间效应. *植物生态学报*, 2022, 46(1): 18-26.
- [12] Ding Y X, Li Z, Peng S Z. Global analysis of time-lag and-accumulation effects of climate on vegetation growth. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102179.
- [13] 袭祝香,杨雪艳,刘玉汐,纪玲玲,饶维平.松辽流域 1961—2017 年极端降水变化特征. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 199-203,212.
- [14] 李晴晴,曹艳萍,苗书玲.黄河流域植被时空变化及其对气候要素的响应. *生态学报*, 2022, 42(10): 4041-4054.

- [15] 易浪, 孙颖, 尹少华, 魏晓, 欧阳晓. 2000—2019 年长江流域植被覆盖时空演化及其驱动因素. 生态学报, 2023, 43(2): 798-811.
- [16] 杨少康, 刘冀, 魏榕, 董晓华, 林青霞, 章程焱. 长江上游流域生长季植被覆盖度时空变化特征及其成因. 长江流域资源与环境, 2022, 31(7): 1523-1533.
- [17] 贺敏, 闻建光, 游冬琴, 唐勇, 吴胜标, 郝大磊, 林兴稳, 龚张融. 山地森林叶面积指数(LAI)遥感估算研究进展. 遥感学报, 2022, 26(12): 2451-2472.
- [18] 吴铭婉, 臧传富, 傅家仪. 松辽流域片区 1990—2015 年土地利用变化及驱动机制研究. 中国农学通报, 2020, 36(31): 77-85.
- [19] 张筠, 张春华, 张安定, 方美红, 吴孟泉, 林哲, 张奕昂, 宋晓林. 水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响. 生态学报, 2020, 40(21): 7733-7744.
- [20] Fang H L, Jiang C Y, Li W J, Wei S S, Baret F, Chen J M, Garcia-Haro J, Liang S L, Liu R G, Myneni R B. Characterization and intercomparison of global moderate resolution leaf area index (LAI) products: Analysis of climatologies and theoretical uncertainties. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(2): 529-548.
- [21] Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, Zhang X Y, Muchoney D, Strahler A H, Woodcock C E, Gopal S, Schneider A, Cooper A, Baccini A, Gao F, Schaaf C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 287-302.
- [22] 李冠稳, 肖能文, 李俊生. 基于理想参照系-关键指标的赤水河流域生态系统质量变化趋势分析. 生态学报, 2021, 41(18): 7114-7124.
- [23] 曹云, 孙应龙, 姜月清, 万君. 黄河流域净生态系统生产力的时空分异特征及其驱动因子分析. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2101-2110.
- [24] 石淞, 李文, 丁一书, 林晓鹏, 翟育涔. 东北地区植被时空演变及影响因素分析. 中国环境科学, 2023, 43(1): 276-289.
- [25] 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利. 2000—2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征. 环境科学, 2022, 43(6): 3230-3240.
- [26] Wu D H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Huang K C, Tang B J, Zhao W Q. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3520-3531.
- [27] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 田智慧. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应. 生态学报, 2022, 42(9): 3557-3568.
- [28] Ma M Y, Wang Q M, Liu R, Zhao Y, Zhang D Q. Effects of climate change and human activities on vegetation coverage change in Northern China considering extreme climate and time-lag and-accumulation effects. Science of the Total Environment, 2023, 860: 160527.
- [29] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 史尚渝, 丁文斌. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [30] 缪利, 陆晴, 刘根林, 危小建. 1999—2019 年青藏高原不同植被类型 NDVI 时空演变特征及其对气候因子的响应. 水土保持研究, 2023, 30(1): 97-105.
- [31] 曲学斌, 王彦平, 高绍鑫, 张煦明, 辛孝飞, 敖孟奇. 2000—2020 年呼伦贝尔地区归一化植被指数时空变化及其对气候的响应. 气象与环境学报, 2022, 38(5): 57-63.
- [32] Zhao J, Huang S Z, Huang Q, Wang H, Leng G Y, Fang W. Time-lagged response of vegetation dynamics to climatic and teleconnection factors. CATENA, 2020, 189: 104474.
- [33] Shi S Y, Wang P, Zhang Y C, Yu J J. Cumulative and time-lag effects of the main climate factors on natural vegetation across Siberia. Ecological Indicators, 2021, 133: 108446.
- [34] Ma Y R, Guan Q Y, Sun Y F, Zhang J, Yang L Q, Yang E Q, Li H C, Du Q Q. Three-dimensional dynamic characteristics of vegetation and its response to climatic factors in the Qilian Mountains. CATENA, 2022, 208: 105694.
- [35] 尹英杰, 陈冲, 晏朝睿, 朱司航, 李子忠, 商建英. 土壤水汽吸附曲线的模拟及其滞后效应. 土壤学报, 2019, 56(4): 838-846.
- [36] 毕馨予, 刘晓静, 马东来, 刘家福. 辽宁省植被 NDVI 对气候因子的滞后响应研究. 中国农业资源与区划, 2021, 42(10): 233-244.
- [37] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tommervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 14-27.
- [38] 李赢, 马世铭. 黑龙江省活动积温时空变化特征及其对水稻单产的影响. 中国农业气象, 2015, 36(1): 9-16.
- [39] 李明. 东北平原热量与降水区域特征及适宜耕作方式的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [40] 雷茜, 胡忠文, 王敬哲, 张英慧, 郭国锋. 1985—2015 年中国不同生态系统 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2023(15): 1-14.
- [41] 袁换欢, 王智, 徐网谷, 游广永, 张建亮. 林草交错区植被动态变化及其影响因子——以中国东北大兴安岭为例. 生态学报, 2022, 42(18): 7321-7335.
- [42] 贾志峰, 刘鹏程, 刘宇, 吴博博, 陈丹姿, 张向飞. 气候变化和人类活动对松辽流域植被覆盖的影响. 生态环境学报, 2023, 32(1): 1-10.
- [43] Liu M, Shen Y J, Qi Y Q, Wang Y F, Geng X X. Changes in precipitation and drought extremes over the past half century in China. Atmosphere, 2019, 10(4): 203.
- [44] 何兴元, 于景华. 东北森林区生态保护及生物资源开发利用技术及示范. 生态学报, 2016, 36(22): 7028-7033.
- [45] 闫梦川, 魏东岚, 吴云霞. 东北三省主要粮食作物种植结构时空演变分析. 北方农业学报, 2020, 48(6): 114-118.
- [46] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, Potapov P V, Tyukavina A, Vermote E F, Townshend J R. Global land change from 1982 to 2016. Nature, 2018, 560(7720): 639-643.
- [47] 杨志鹏, 许嘉巍, 冯兴华, 郭蒙, 靳英华, 高雪娇. 基于 InVEST 模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究. 生态科学, 2018, 37(6): 139-147.