

DOI: 10.20103/j.stxb.202311032391

杨铭鑫,李俊,同小娟,于裴洋,王雅婷,史倩,王音.2001—2020 年中国森林植被 EVI 对气候因子的响应.生态学报,2024,44(23):10850-10863.
Yang M X, Li J, Tong X J, Yu P Y, Wang Y T, Shi Q, Wang Y. Response of forest vegetation Enhanced Vegetation Index to climatic factors in China in 2001—2020. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23):10850-10863.

2001—2020 年中国森林植被 EVI 对气候因子的响应

杨铭鑫¹, 李 俊², 同小娟^{1,*}, 于裴洋¹, 王雅婷¹, 史 倩¹, 王 音¹

¹ 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

² 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

摘要:森林是陆地生态系统的主要组成部分,其在维持生物圈和大气圈的动态平衡中发挥着重要作用。探究森林生态系统植被指数变化及其对气候因子的响应对优化我国生态环境建设具有重要意义。基于 2001—2020 年 MODIS-EVI 数据及气象数据,利用趋势分析和偏相关分析等方法,探究中国森林生态系统生长季植被指数变化及其对气候因子的响应。结果表明,2001—2020 年中国森林植被 EVI 以 0.028/10a 的速率增长,显著改善区占总面积的 39.63%。生长季,植被指数与气温、降水量、太阳辐射和土壤湿度均呈正相关,其中土壤湿度对其影响最为显著,在中南地区尤为突出。EVI 对各气候因子响应的时滞效应在不同地区之间存在差异;六个区域 EVI 对气温的响应均不存在时滞效应;对太阳辐射响应的滞后期均为 3 个月;西北地区、西南地区 EVI 对降水量响应的滞后期分别为 3 个月、6 个月,华东地区 EVI 对土壤湿度的响应滞后期为 6 个月,其余地区 EVI 对降水量和土壤湿度的响应均不存在时滞效应。整体上看,土壤湿度是影响生长季植被变化的主要因子。

关键词:森林;生长季;增强型植被指数(EVI);气候因子;时滞效应

Response of forest vegetation Enhanced Vegetation Index to climatic factors in China in 2001—2020

YANG Mingxin¹, LI Jun², TONG Xiaojuan^{1,*}, YU Peiyang¹, WANG Yating¹, SHI Qian¹, WANG Yin¹

¹ School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Forests are the main component of terrestrial ecosystems and play an important role in maintaining the dynamic balance of the biosphere and the atmosphere. It is of great significance to explore the change of vegetation index of forest ecosystem and its response to climate factors to optimize the ecological environment construction in China. In this study, based on MODIS-EVI (Enhanced Vegetation Index) data and meteorological data from 2001 to 2020, we investigated the changes of vegetation index in forest ecosystems and its response to climate factors during the growing season in China using trend analysis and partial correlation analysis. The results showed that the EVI of forests increased at a rate of 0.028/10a from 2001 to 2020, and the significantly improved area accounted for 39.63% of the total area. During the growing season, EVI was positively correlated with temperature, precipitation, global radiation and soil moisture, with soil moisture having the most significant effect, especially in the central and southern regions. The time-lag effect of EVI in response to various climatic factors varied among different regions. There was no time-lag effect in the response of EVI to temperature in all six regions. The lag in the response to global radiation was 3 months in all of them. In the northwestern region, the lag period of EVI response to precipitation was 3 months and 6 months in Southwest China. The lag period of EVI response to soil

基金项目:国家自然科学基金(32271875,31872703);国家重点研发计划(2020YFA0608101)

收稿日期:2023-11-03; 网络出版日期:2024-09-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongxj@bjfu.edu.cn

moisture was 6 months in East China. There was no time-lag effect in EVI response to precipitation and soil moisture in the rest of the regions. Overall, soil moisture was the main factor affecting vegetation changes in the growing season.

Key Words: forests; growing season; Enhanced Vegetation Index (EVI); climate factors; time-lag effect

近年来,全球温度急剧上升,极端天气事件频发^[1]。气候变化导致的降水、辐射以及其它气候因子的变化,已经对陆地生态系统的生理生态特性和地理分布特征造成了严重的影响^[2]。随着全球气候变化强度的增加,植被对气候变化的动态响应已经成为研究的热点问题之一。森林植被是陆地生态系统的重要组成部分,在维持生物圈和大气圈的动态平衡中发挥着重要作用^[3]。作为森林生态系统中最主要的组成部分,植被是土壤和大气之间物质交换、能量传输的桥梁,对全球气候变化具有极高的敏感性^[4]。

植被在反映和表征地球表面的能量交换、物质循环和区域人类活动方面发挥着重要作用^[5]。随着气候因子的变化,植被生长状况表现出明显的季节和年际变化^[6]。植被指数是对地表植被状况的简单、有效地度量^[7],其变化情况在很大程度上能代表植被覆盖率随气候因子变化的总体状况^[8]。遥感技术已成为研究长期、大尺度植被覆盖状况的主要手段^[9]。根据植被的光谱特性,将卫星可见光和近红外波段进行组合得出各种植被指数。在不同的光谱分辨率下,植被指数结合了红外和近红外光谱反射率,可精确反映植被的变化情况^[10]。目前,增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)已被广泛应用于植被生长状况和覆盖变化监测^[11]。与归一化植被指数(NDVI)不同的是, EVI 减弱了气溶胶和地表下垫面的影响,在相同的空间分辨率下,其不仅能敏感地区分稀疏植被,还能更有效地反映茂盛植被的生长变化^[12]。Huete 等^[13]研究发现, NDVI 和 EVI 均对植被变化、土地覆被变化和生物物理参数变化敏感。NDVI 和 EVI 表征植被数量和植被状况的时空变化和敏感性。通过合成带有残留云污染的像元发现,污染像元 NDVI 值明显下降, EVI 下降则不明显。在大气干扰情况下, EVI 比 NDVI 更稳定,对背景噪音敏感度更低^[7]。

气候因子对森林植被覆盖状况和植被生长影响的研究,对区域生态系统管理、政策实施具有重要的意义^[14]。Moreira 等^[15]研究不同类型植被的生长与气象因子的关系指出, EVI 与气温具有较强的相关性。Banerjee 等^[16]通过研究 2000—2022 年气候变化对印度东部植被动态变化的影响发现, EVI 的变化情况受到温度和降水的共同影响。我国学者也利用 EVI 开展了一系列植被与气候因子相关性的研究。如, He 等^[17]结合内蒙古自治区气温、相对湿度、降水等数据研究得出, 植被生长并不取决于单一气候因子, 内蒙古自治区 EVI 与降雨量的相关性最高, 其次是相对湿度和温度。解晗等^[18]基于黄河流域 MODIS-EVI 数据及气象数据, 探究发现降水和辐射是驱动生长季植被变化的主要气候因子。胡英敏等^[19]发现, 在北方农牧交错带, 降水对黄河流域植被变化影响较大; EVI 与降水、温度均呈显著正相关, 其中 EVI 与降水的相关性较大。结合同期降水量、温度以及极端气候指数, 李美丽等^[20]对西南地区植被覆盖变化的影响因素及其之间的相关性研究发现, 西南地区 EVI 与降水量、温度均以正相关为主, 西藏阿里北部和青海中部植被 EVI 与降水量的偏相关系数最高。EVI 对气候因子的响应也存在一定的时滞性。Sedighifar 等^[21]通过对伊朗北部马赞达兰省植被 EVI 对地表温度和降水量的响应进行时序分析发现, EVI 与降水量之间不存在显著的同步关系, 在春季滞后 1.5—2.5 个月后, 两者的相关性达到峰值。Tang 等^[22]通过对中国 32 个主要城市研究发现, 气候因子对 EVI 的时滞效应强度随着时间的推移而减弱, 各气候因子对 EVI 的时滞效应主要集中在 4 个月内, 时滞效应在 1 年内消失。Yang 等^[23]在探究中国亚热带湿润季风区清河流域气候因子对森林覆盖的影响时发现, 降水对森林植被 EVI 存在 4 个月的累积时滞效应, 而温度对森林植被 EVI 没有时滞效应。谷正楠等^[24]研究指出, EVI 对降水的响应存在明显的空间异质性, 具有 0—3 个月的滞后时间, 有林地对降水的响应主要存在 3 个月的滞后。

目前, 有关植被指数对气候变化响应的开展了一系列的研究工作。然而, 多数研究是在较小区域上探究气候因子对植被 EVI 的影响, 缺乏对全国森林植被指数及其对气候因子响应的综合研究, 难以反映气候变化

对我国森林植被生长的影响。因此,开展生长季中国森林植被 EVI 的时空变化特征及其对气候因子响应的研究,明确限制森林植被生长的主要气象因子,对深入理解森林应对气候变化具有重要意义。本文基于 2001—2020 年 MODIS-EVI 遥感数据及气象数据,利用趋势分析法和偏相关分析方法等研究了中国森林植被 EVI 时间变化趋势与空间分布特征,分析了影响生长季森林植被覆盖变化的主导因素,探究了植被指数变化对气温、降水量、太阳辐射、土壤湿度的时滞效应,旨在揭示植被动态变化的气候驱动机制,为提高森林生态系统生产力、实现资源的合理配置和可持续发展提供理论依据和科学支撑。

1 研究区概况

我国森林面积 3.24 亿 hm^2 ,森林覆盖率为 22.96%,森林蓄积 170.58 亿 m^3 ,森林面积居世界第 5 位^[25]。由于中国地域辽阔,气候类型多种多样,不同区域的地理环境、气候特征等差异显著,气候变化对各个区域的影响也有所不同^[26]。因此,根据中国科学院资源环境科学与数据中心中国六大区域分布图,本研究将我国划分为东北、华北、西北、华东、中南、西南六大地区,分区域研究森林植被 EVI 对气候因子的响应(图 1)。

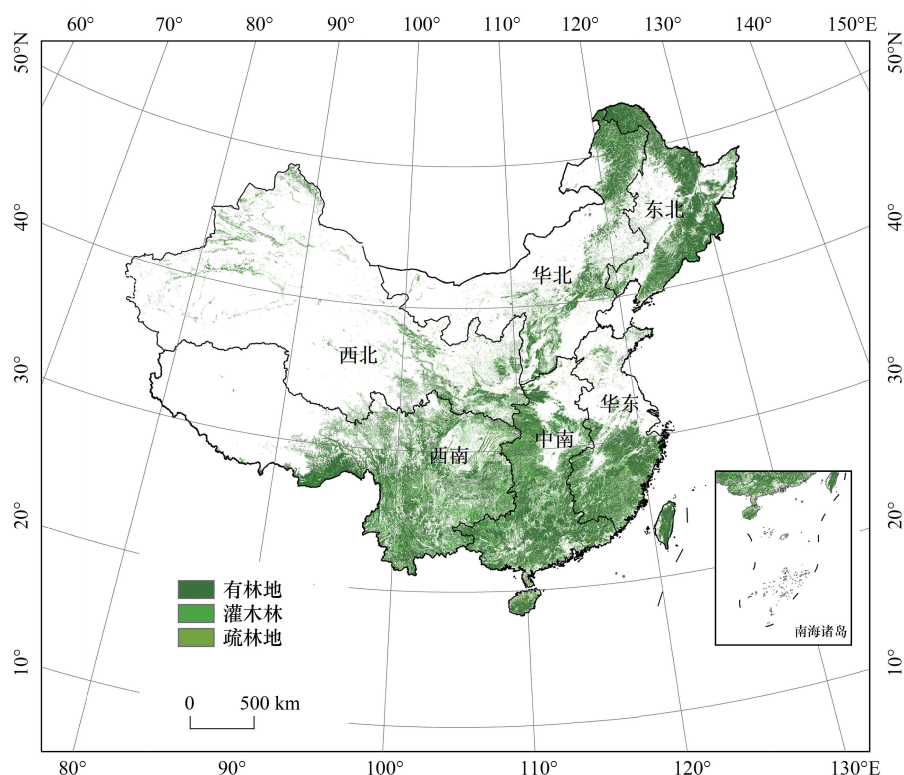


图 1 中国森林生态系统分布

Fig.1 Distribution of forest ecosystems in China

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

中国森林植被生长区域矢量图来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)2020 年土地利用数据,空间分辨率为 30 m。该数据集是以美国陆地卫星 Landsat 遥感影像作为主要信息源,使用 Landsat-MSS、Landsat-TM/ETM、Landsat8 遥感影像数据,经过影像融合、几何校正、图像增强与拼接处理后,通过人工目视解译构建的中国国家尺度多时相土地利用/土地覆盖专题数据库^[27]。

植被指数遥感数据来源于 NASA (<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) MODIS13A3 数据集 2001—2020 年 EVI 月值数据,空间分辨率为 1 km。MOD13A3 提供每月 1km 分辨率的 3 级正弦曲线投影网格产品。MODIS 植被指数算法是基于像元进行运算,经多次观测从而产生一个合成的植被指数,月产品加工过程中,算法吸收全部 16 天覆盖全月的 1 km 产品,若大气中无云,采用时间加权平均方法,或者采用最小值以防云的影响^[28]。

平均气温与累计降水量数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>) 2001—2020 年月值数据,空间分辨率为 1 km,该数据集是根据 CRU 发布的全球 0.5°气候数据集以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集,通过 Delta 空间降尺度方案在中国地区降尺度生成的。同时,使用 496 个独立气象观测点数据进行验证。

太阳辐射数据来源于国家生态科学数据中心 (<http://www.nesdc.org.cn/>) 基于 ERA5 的中国太阳辐射数据集中的月值数据,空间分辨率为 0.05°。该数据集是基于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) ERA5 数据集的辐射数据(空间分辨率为 0.25°),利用 CDO 软件插值重建得到我国 1982—2020 年生长季空间分辨率为 0.05°×0.05°的太阳总辐射数据^[29]。

土壤湿度数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/home>) 基于站点观测的中国 1 km 土壤湿度日尺度数据,空间分辨率为 1 km。该数据集是以中国气象局提供的 1648 个站点观测 10 层土壤湿度作为基准,使用 ERA5_Land 时间序列数据、叶面积指数 (LAI)、土地覆盖类型、地形 (DEM) 和土壤特性作为协变量,通过机器学习方式获得^[30]。

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen media 趋势分析

Theil-Sen media 趋势分析是非参数统计趋势分析方法^[31]。该方法是计算时间序列数据的所有 $n(n-1)/2$ 成对组合之间的中位数斜率,在分析过程中不要求所分析的数据服从正态分布,且不受异常值的影响,因此避免了由少数异常值产生的误差^[18]。对研究区逐像元进行分析,计算公式如下:

$$\beta = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i} (1 < i < j < n) \quad (1)$$

式中, β 表示 EVI 的年际变化趋势, x_j 、 x_i 分别为第 j 和第 i 年 EVI 的月平均值, n 为时间序列长度。 $\beta > 0$ 表示植被指数呈升高趋势, $\beta < 0$ 表示植被指数呈下降趋势。

Theil-Sen 中位数趋势分析方法可以与 Mann-Kendall 检验有效结合。这种组合是判断长时间序列数据趋势的重要方法,已经逐渐被用于分析植被长时间序列,可以反映时间序列中每个像素的趋势变化^[32]。

2.2.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 属于非参数检验方法,与其他参数检验方法相比,不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值干扰,更适合顺序变量^[31]。该方法对 EVI 进行逐像元分析,获取 EVI 数据的时空变化特征^[33]。将 2001—2020 年 EVI 数据逐像元值构造为一组时间序列来判断显著性差异^[12]:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.2.3 偏相关分析

偏相关分析是在控制其他变量的线性影响的条件下分析两变量间的线性关系,通常用偏相关系数表示。偏相关系数是在对其他变量的影响进行控制的条件下,衡量多个变量中某两个变量之间的线性相关程度的指标。基于像元的空间分析法,对 2001—2020 年中国森林植被 EVI 数据与气候因子进行偏相关分析,利用偏相关系数来反映 EVI 与气温、降水量、太阳辐射、土壤湿度的相关程度:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中, R_{xy} 表示变量 x 、 y 的相关系数, x_i 表示第 i 年的生长季植被指数, y_i 表示不同时序各气象要素, $\bar{x}$ 表示生长季植被指数平均值, $\bar{y}$ 表示各要素平均值, i 表示样本数。

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)(1-R_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中, R_{xy} 为将 z 影响剔除后 x 与 y 之间的偏相关系数, R_{xz} 、 R_{yz} 为两因子间相关系数。

$$R_{xy,zw} = \frac{R_{xy,z} - R_{xw,z}R_{yw,z}}{\sqrt{(1-R_{xw,z}^2)(1-R_{yw,z}^2)}} \quad (7)$$

式中, $R_{xy,zw}$ 为将 z 、 w 影响剔除后 x 与 y 之间的二阶偏相关系数, $R_{xy,z}$ 、 $R_{xw,z}$ 、 $R_{yw,z}$ 分别为将 z 的影响剔除后变量 x 与 y 、变量 x 与 w 、变量 y 与 w 两因子间的一阶偏相关系数。

2.2.4 EVI 对气候因子的时滞效应分析

植被生长对气候变化的响应存在一定的适应性^[34]。植被指数对气象因子的最大响应通常不是即时的,而是存在一定的时滞效应^[35]。本研究通过皮尔逊相关性分析,研究生长季前期(4—5 月)森林植被 EVI 与对 4—5 月、1—2 月、前一年 10—11 月气候因子响应的时滞效应。

皮尔逊相关性分析是一种统计方法,基于变量之间的协方差和方差来计算它们之间的关系程度。本文利用皮尔逊相关系数来分析森林植被 EVI 与不同气候因子的相关性:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中, x 为气候因子, y 为植被 EVI, n 为数据组数, i 为序列数。相关系数 r 取值范围为 $-1 \sim 1$, $r > 0$ 表示 x 和 y 为正相关关系, $r < 0$ 表示 x 和 y 为负相关关系,绝对值越大表示相关性越强^[36]。

2.2.5 LMG 模型定量评价

Lindeman-Merenda-Gold (LMG) 模型是对同一变量多次测量的数据进行建模,描述总体中该变量随时间的发展变化的轨迹,通过 LMG 模型对气象因子的相对重要性进行了定量评价^[37—38]。该指标基于可用回归量的所有排列中每个变量的顺序 R^2 的未加权平均值,以避免回归量的顺序效应^[39]。该方法能很好地避免回归变量的阶次效应,从而准确地度量出各个因子的相对重要性^[40]。以生长季气温、降水量、太阳辐射及土壤湿度的时间序列为自变量,以生长季 EVI 时间序列为因变量,量化各气候因子对 EVI 的相对贡献。

3 结果与分析

3.1 气候因子的时间变化

2001—2020 年,我国森林植被分布区生长季气温、降水量、土壤湿度总体上均呈上升趋势,太阳辐射呈下降趋势(图 2)。土壤湿度和降水量上升幅度较大,气温上升幅度较小,各气候因子随年份的变化波动幅度

较大。

研究时段内,各气候因子的变化波动幅度较大(图 2)。2009 年至 2010 年生长季期间,气温呈现出明显的下降趋势,且在 2010 年达到了近 20 年来的最低水平。同期太阳辐射值也出现了显著下降。这一现象可能与发生在热带太平洋的厄尔尼诺和拉尼娜事件的转换密切相关,拉尼娜事件会导致全球部分地区气温偏低^[41]。拉尼娜事件的快速发展对我国 2010 年气候和台风活动产生了重要影响,2010 年中国暴雨过程频繁,降雨强度大,生长季降水量达到了近 20 年来最高值,土壤湿度也在 2010—2011 年间出现大幅度升高。2010 年生长季降水量达到了近 20 年来的最高值,而 2011 年的却是近 20 年来的最低值。

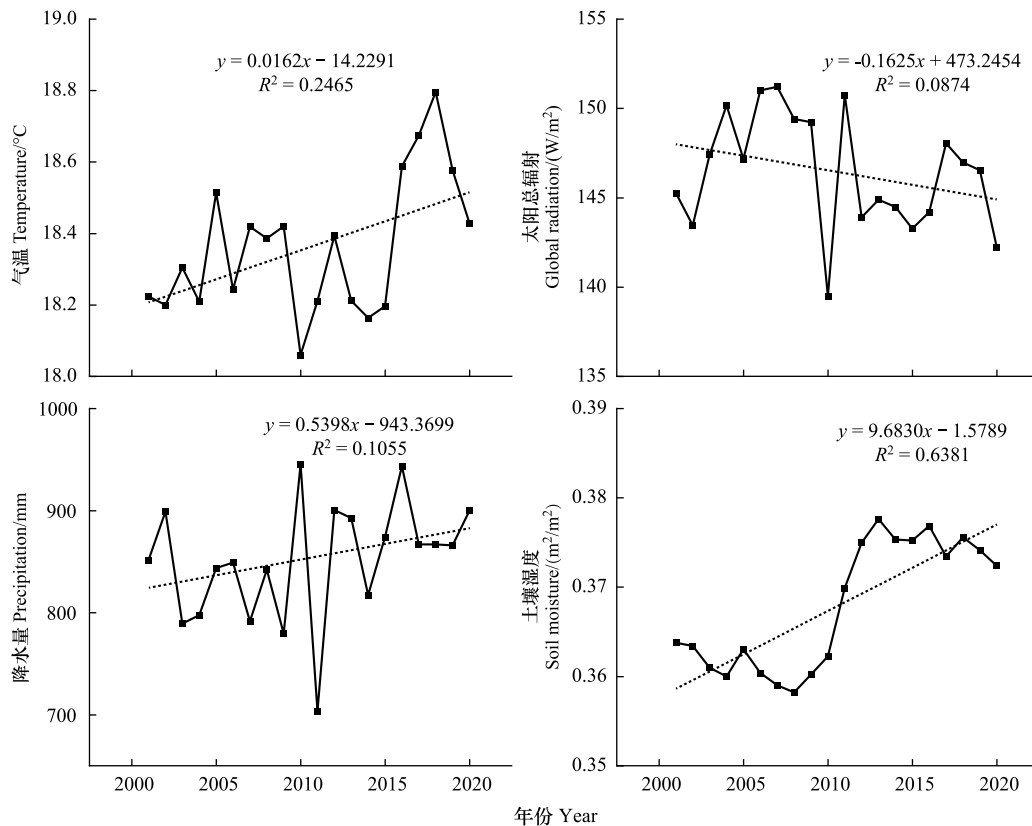


图 2 生长季森林植被分布区气候因子的变化趋势

Fig.2 Variations of climate factors in forest vegetation distribution areas during the growing season

3.2 森林植被 EVI 的时空变化特征

3.2.1 EVI 的时间变化

EVI 可有效地表征森林植被覆盖程度和森林生长状况。近 20 年我国森林植被 EVI 总体呈上升趋势,年际变化率为 0.028/10a(图 3)。2003 年 EVI 为研究时段内的最低值。2003 年南方地区降水量较常年异常偏少,为 1961 年以来最少年份;北方地区则较常年明显偏多,为 1961 年以来第二个多雨年^[42],这种不均衡的降水分布可能对当年的植被生长产生了影响,从而导致 EVI 下降。2004—2016 年, EVI 值波动上升,在 2016 年达到了最高值。在 2017—2018 年 EVI 值出现小幅度下降。推测是由于 2017—2018 年间中国部分地区遭受了强降雨、洪涝灾害、高温等极端天气,导致植被生长不良,从而降低了 EVI。

3.2.2 EVI 的空间变化

采用 Theil-Sen media 趋势分析法与 M-K 统计检验方法对 EVI 逐像元进行分析,得到植被变化空间分布图(图 4)。将研究区内植被覆盖区植被指数划分为显著退化($\beta < 0, P < 0.01$)、中度退化($\beta < 0, 0.1 > P > 0.01$)、轻度退化($\beta < 0, P > 0.1$)、轻度改善($\beta > 0, P > 0.1$)、中度改善($\beta > 0, 0.1 > P > 0.01$)、显著改善($\beta > 0, P < 0.01$)。

6 种变化类型。2001—2020 年间,大部分地区森林植被呈显著改善趋势。显著改善区面积约为 $54.02 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占研究区总面积的 39.63%。我国实施的生态保护工程使得大部分地区森林植被覆盖率显著提升, 生态环境得到明显改善。退化区面积区域面积较小, 主要分布在新疆北部、西藏东南部、四川、云南、台湾、内蒙古东北部等地。以上地区多属于干旱与半干旱区和青藏高原高寒区, 生态系统较为脆弱, 过度的人类活动破坏了这些地区的自然生态系统, 造成生物多样性减少、土地沙漠化、水资源污染等等导致植被覆盖呈下降趋势。

3.3 EVI 对气候因子的响应

3.3.1 EVI 与气候因子的关系

本研究逐像元计算了 2001—2020 年中国森林植被 EVI 与气候因子之间的偏相关系数, 探究了植被动态变化与气候因子的关系 (图 5)。结果表明, 2001—2020 年间生长季 EVI 与各气候因子呈正相关区域面积均大

于呈负相关区域面积。生长季森林植被 EVI 与气温呈正相关和负相关的面积分别占研究区总面积的 66.72% 和 33.28%。EVI 与气温偏相关系数在 $-0.78 \sim 0.99$ 之间, 正相关区域和负相关区域在全国范围内分布较为均匀。EVI 与太阳辐射呈正相关和负相关的区域分别占研究区总面积的 51.53% 和 48.47%, 以正相关为主。太阳辐射与 EVI 在西南地区喜马拉雅山脉一带呈现出最强的正相关关系, 相关系数最高为 0.99。负相关区域主要集中在东北地区东部以及华北地区北部, 小兴安岭地区森林植被 EVI 与太阳辐射的负相关关系最为明显, 最强负相关地区的相关系数为 -0.84 。EVI 与降水量呈正相关和负相关的区域分别占研究区总面积的 60.20% 和 39.80%, 偏相关系数在 $-0.83 \sim 0.94$ 之间。生长季森林植被 EVI 与降水量在东北地区东部及华东地区东部呈较强的正相关关系, 偏相关系数大于 0.5 的像元在浙江省中部分布最为集中, 最高相关系数为 0.94。EVI 与降水量呈明显负相关区域集中在东北地区北部及华北地区北部, 最强负相关地区的相关系数为 -0.83 。EVI 与土壤湿度呈正相关和负相关的面积分别占研究区总面积的 71.73% 和 28.27%, 偏相关系数在 $-0.85 \sim$

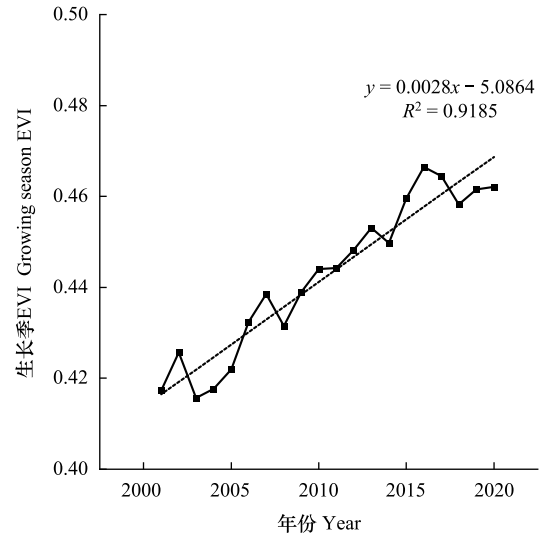


图 3 生长季森林植被 EVI 的变化趋势

Fig.3 EVI of forests in the growing season

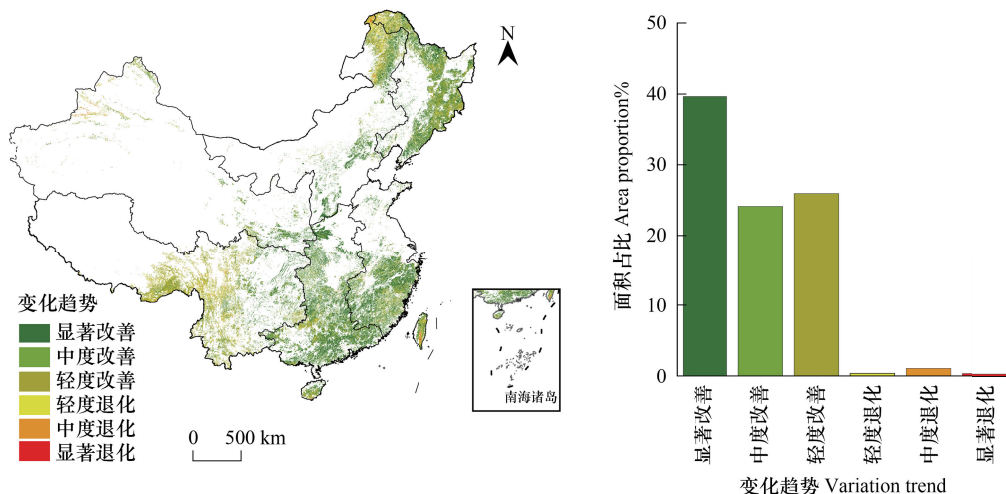


图 4 2001—2020 年森林植被 EVI 的变化趋势

Fig.4 Variation trend of EVI in forests in 2001—2020

0.94之间。其中,偏相关系数大于 0.5 的区域主要分布在东北地区北部、华北地区北部、华东地区南部及中南地区南部。偏相关系数小于-0.5 的区域主要分布在东北地区东部及中南地区北部。

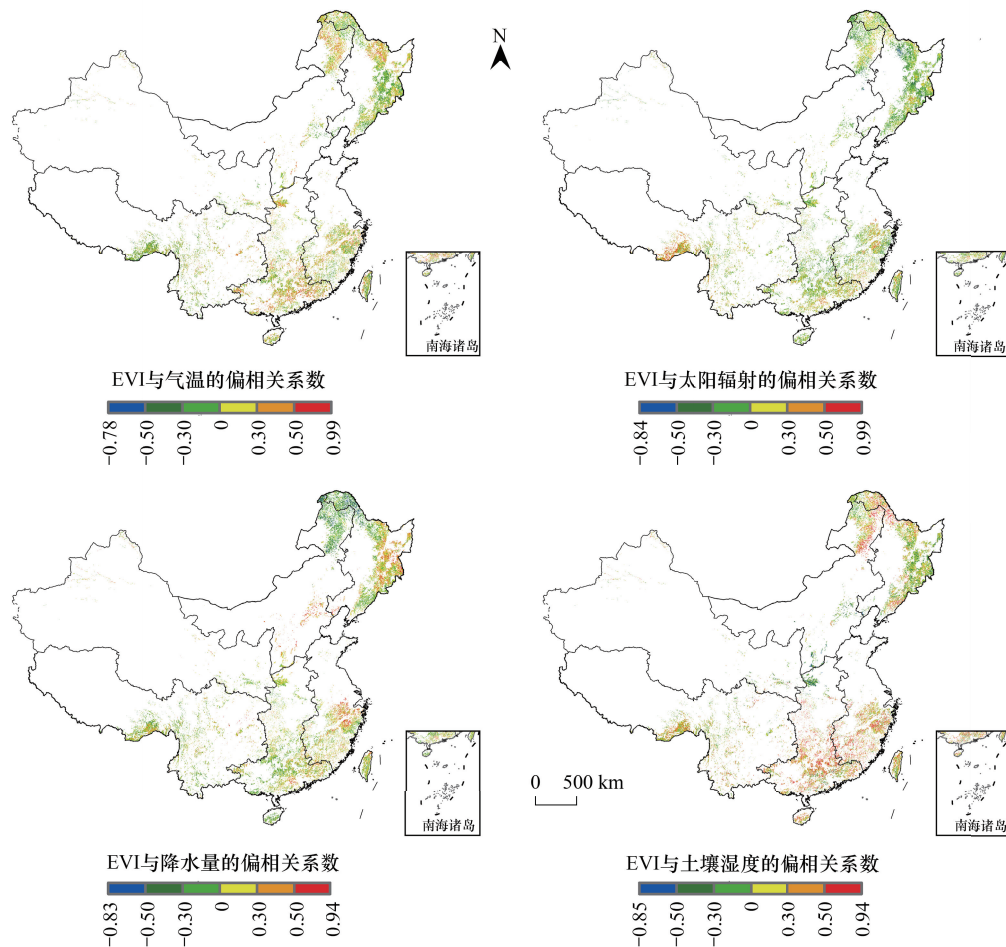


图 5 森林植被 EVI 与气候因子偏相关系数的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of biased correlation coefficients between EVI and climatic factors during the growing season

不同区域 EVI 与气候因子的相关性存在一定的差异(图 6)。在六个地区中,EVI 与气温均呈正相关关系,其中华北地区的相关性最强,通过显著性检验的偏相关系数达到 0.54($P<0.05$)。东北、华北、西北地区 EVI 与太阳辐射具有显著负相关关系,在东北地区相关性最强,通过显著性检验的偏相关系数达到-0.25($P<0.05$)。这可能是由于北方地区纬度较高,生长季初期温度较低,降水量相对较少,导致森林土壤中养分循环速率小,从而限制了森林的生长,此时太阳辐射上升不能补偿温度较低和降水量少对 EVI 的负面影响。华东、中南、西南地区,EVI 与太阳辐射则呈显著正相关($P<0.05$)。其中,西南地区 EVI 与太阳辐射的相关性最强,通过显著性检验的偏相关系数为 0.51,对太阳辐射较为敏感。西南地区的森林多为亚热带常绿阔叶林和针阔混交林,植物叶片较大,较大的叶面积有利于植物吸收更多的太阳辐射,从而促进了植物的光合作用。

东北、西北、华东、中南、西南地区 EVI 与降水呈显著正相关,华北地区则呈显著负相关($P<0.05$),其中华东地区的相关性最强,通过显著性检验的偏相关系数达到 0.54(图 6)。华北北部的森林具有较强的储水能力,在降水量变化明显的情况下,该地区森林植被通过调整自身生长策略、提高水分利用效率来维持正常生长,这可能是华北地区 EVI 与降水量变化呈负相关的主要原因^[43]。各气候因子中,土壤湿度对 EVI 的影响最为显著,六个地区均呈现显著正相关($P<0.05$),其中中南地区的相关性最强,通过显著性检验的偏相关系数达到 0.57。且不同区域之间,EVI 与土壤湿度相关的区域面积差异较大,其中华东地区的相关面积最大,占总

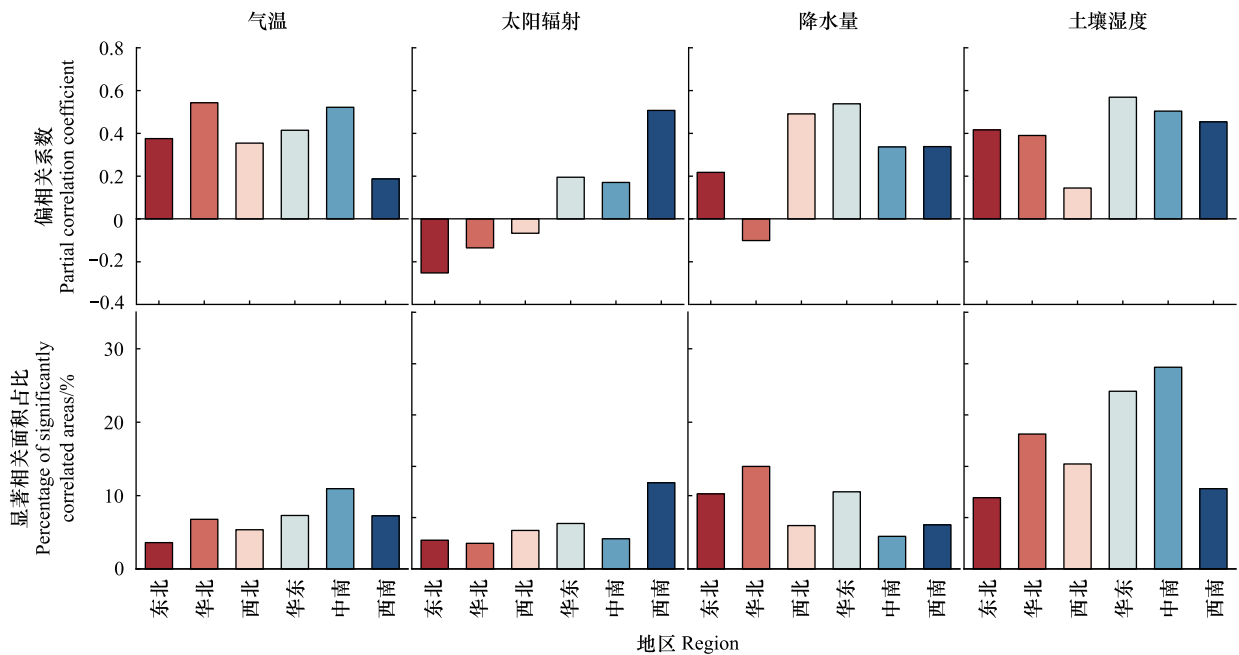


图6 不同区域森林植被 EVI 和气候因子的平均偏相关系数及显著相关面积占比(通过显著性检验, $P<0.05$)

Fig.6 Average partial correlation coefficients and the significant percentage between EVI and climatic factors in different regions of forests during the growing season ($P<0.05$)

显著相关区域面积的 24.22%。

3.3.2 气候因子对 EVI 变化的相对贡献率

基于 LMG 模型计算得到的生长季各气候因子对 EVI 变化的相对贡献率(图 7)。土壤湿度对东北、华东、中南和西南地区 EVI 变化的贡献均高于其它气候因子,其中中南地区土壤湿度对 EVI 变化的贡献率最高,其贡献率达到了 80%。在中南地区,尽管降水充沛,但森林生态系统蒸散较高,导致土壤湿度对植被生长的限制较大。尤其是在雨季结束后,土壤湿度成为植物生长的关键限制因素之一。气温对华北地区及西北地区生长季 EVI 变化的贡献率最大,贡献率分别为 57%和 48%。生长季(4—9 月),气温对东北地区 EVI 变化的贡献率相对较小,其贡献率约为 4%。这表明生长季温度不再是该地区植物生长的主要限制因子。对华北、西北地区森林植被 EVI 变化贡献率最低的气候因子为太阳辐射,其贡献率分别为 6%和 11%;降水量对华东、中南、西南地区 EVI 变化的贡献率低于其它气候因子,贡献率分别为 8%、1%和 3%,我国南方地区,水资源丰富,降水较为充沛,EVI 对降水量的变化敏感性较弱。总体而言,东北地区、华东地区、中南地区和西南地区的植被生长主要受土壤湿度的影响,而华北地区和西北地区的植被生长主要受气温影响。

3.3.3 EVI 对气候因子响应的时滞性

为了进一步研究 EVI 对气候因子的响应,对生长季前期(4—5 月)EVI 分别与 4—5 月、1—2 月、前一年 10—11 月气候因子进行相关性分析(图 8)。结果表明,EVI 与 4—5 月气温的相关系数最高,EVI 对气温的响应不存在时滞效应。EVI 与 1—2 月太阳辐射的相关系数均大于与 4—5 月、前一年 10—11 月太阳辐射的相关系数。EVI 对太阳辐射的响应存在一定的时滞性,时滞期均为 3 个月;在东北地区和华北地区时滞较为明显。西北地区 EVI 与 1—2 月降水量的相关系数最高,西南地区 EVI 与 10—11 月降水量的相关系数最高。西北地区、西南地区 EVI 对降水量的响应存在一定的时滞性,滞后期分别为 3 个月和 6 个月,其余地区 EVI 与降水量不存在时滞效应。这可能是由于西北地区气候干燥,降水稀缺,在这种环境下森林植被生长具有较强的适应性。而西南地区降水充沛,湿度较高,降水量的变化可能不会直接对植被生长产生影响。华东地区 EVI 与前一年 10—11 月的土壤湿度的相关系数高于与 4—5 月、1—2 月的相关系数。华东地区 EVI 对土壤湿度

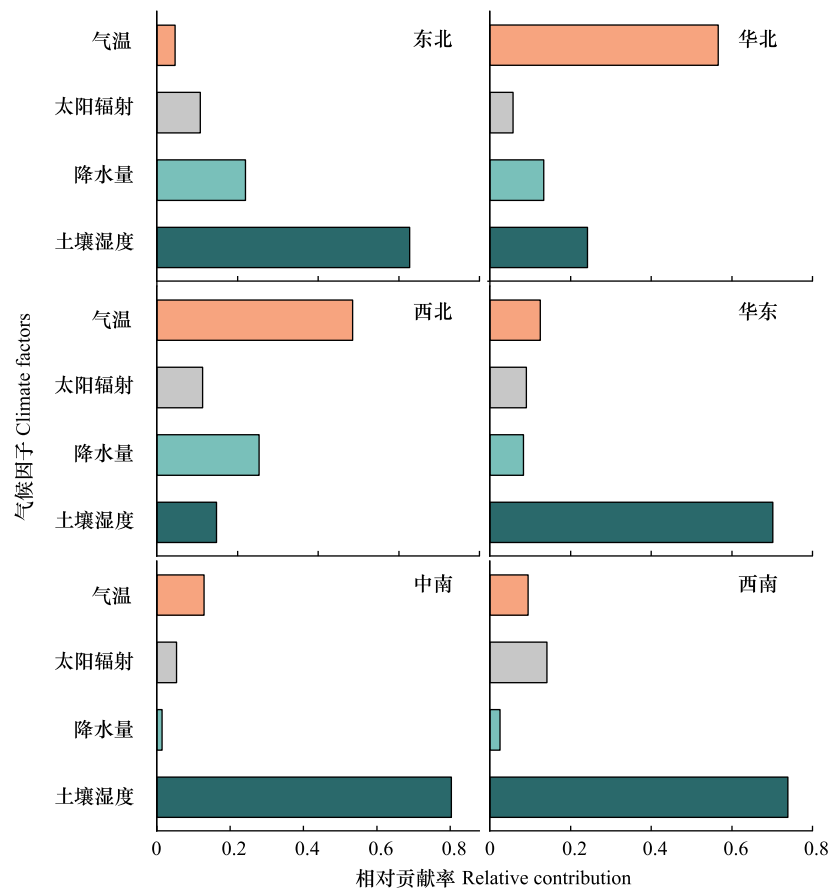


图 7 生长季气候因子对森林植被 EVI 变化的相对贡献率

Fig.7 Relative contribution of climate factors to forest EVI changes during the growing season

的响应存在一定的时滞性,时滞期为 6 个月。其余地区 EVI 对降水量和土壤湿度的响应均不存在时滞效应。

4 讨论

4.1 EVI 的时空变化特征

2001—2020 年中国森林植被生长整体上呈上升趋势,EVI 的线性增长率为 0.028/10a;空间上呈改善趋势。东北、华东和中南地区植被改善较为显著。东南地区植被改善情况明显高于西北地区。东南地区气候条件优于西北地区(图 4),适宜的气候条件为植被生长提供了有利的条件。良好的植被生长状况又会反作用于环境,进而改善优化环境^[44]。Zhang 等^[45]研究表明,近 30 年来中国植被整体呈改善趋势良好,植被绿度增加。天然林保护工程、三北防护林工程、退耕还林还草工程、长江中下游地区重点防护林体系建设工程的实施,使得中国大部分地区植被覆盖率显著上升,生态环境得到明显改善^[46]。在新疆北部、西藏东南部以及四川、云南西部,则出现植被显著退化。这些地区生态系统相对脆弱,过度的人类活动如砍伐、放牧和采矿等,对自然生态系统造成了破坏,加剧了环境问题的严重性^[33]。

4.2 EVI 对气候因子的响应

生长季,森林植被指数变化与气温、降水量、太阳辐射和土壤湿度等气候因子均呈现出正相关关系,但地域间存在差异。在东北地区、华北地区和西北地区,生长季森林植被 EVI 与太阳辐射表现为负相关,可能是由于这些地区气候干燥^[47],较高的太阳辐射会造成温度升高,植物蒸腾作用增强,土壤水分消耗加快,引起土壤水分胁迫,进而抑制植被生长。当土壤水分不足时,太阳辐射的增强会导致 EVI 下降^[48]。此外,华北地区生长季森林植被 EVI 与降水量呈负相关。在降水较少时,该地区植被通过调整生长策略以维持正常生长,使

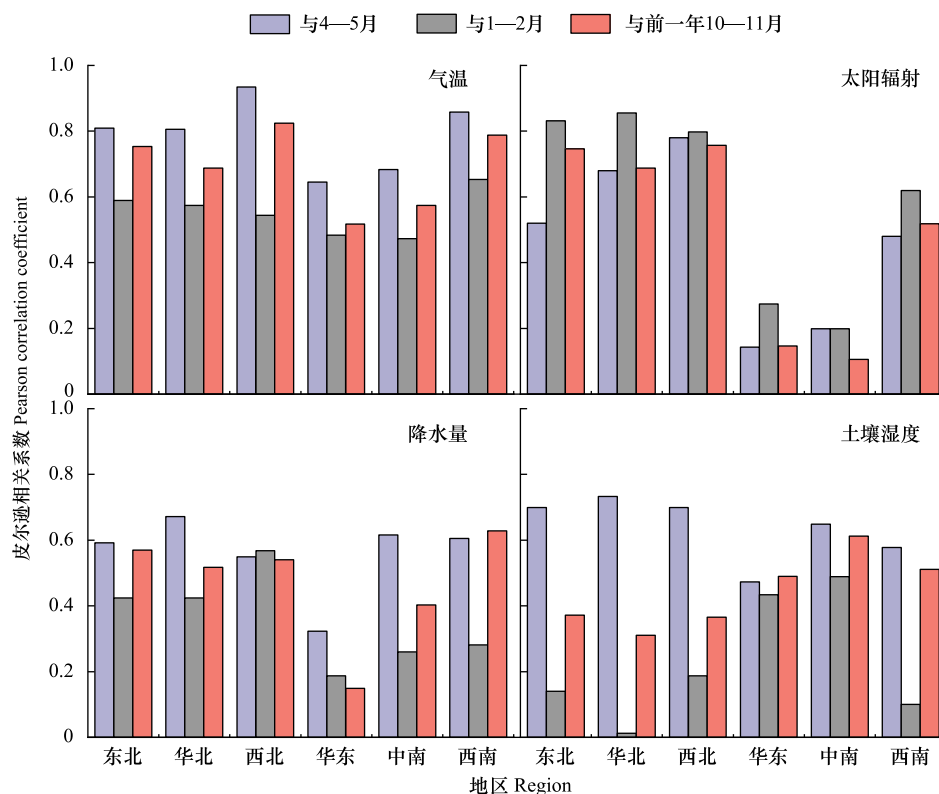


图8 EVI与不同时序气候因子的相关系数

Fig.8 Correlation coefficients between EVI and different temporal climate factors

得 EVI 相对较高^[49—51]。

华北和西北地区森林植被 EVI 则受气温影响较大。北方地区植被生长受到水热条件的共同影响,并且受气温的影响更加显著^[52]。这可能是由于华北地区和西北地区的气候较为干旱和寒冷,年平均降水量相对较低^[53]。马有绚^[54]等研究也发现,西北地区林地植被生长季(春、夏、秋季)气温对 EVI 的影响大于降水的影响。温度变化会影响生长季的长度,即影响植物能够进行光合作用和生长的时间^[55],进而影响森林植被 EVI。

土壤湿度是影响生长季森林植被 EVI 变化的主导因子之一。东北、华东、中南和西南地区的森林植被 EVI 变化主要受土壤湿度影响,尤其在中南地区 EVI 对土壤湿度的响应最为强烈。这一结论与以往研究结果不同,可能是因为以往的研究通常采用温度、降水与太阳辐射作为主要气候因子,很少考虑土壤湿度对 EVI 的影响。土壤湿度对植被生长至关重要,它直接影响营养物质的吸收,进而影响植被的生长状况^[56]。

4.3 森林植被 EVI 对气候因子响应的时滞效应

植被生长对气候因子的响应常表现为时间上的时滞性^[46]。以往研究多聚焦于年尺度的气候与植被关系,但这种平均化处理会弱化短期气候波动的影响。研究发现,特定几个月份气候因子的变化会决定植被的生长变化^[56]。为了更准确地捕捉这种短期异常变化,利用逐月气象数据及植被指数数据,分析了生长季前期(4—5月)植被生长对气候因子响应的时滞效应。不同地区 EVI 对气候因子响应的时滞效应存在差异。生长季,植被指数对气温的响应较为及时,不存在明显时滞。EVI 对太阳辐射的响应则存在约 3 个月的时滞期,这与已有的多个研究结果相一致^[18,38,57]。彭代亮等^[8]研究发现,EVI 对气温的响应不存在时滞性,而对降水最大响应时滞为 1 个月左右。缪丽娟等^[58]研究发现,植被指数对当月平均气温和降水总量的响应最为强烈,对太阳辐射和土壤水分则存在显著的时滞响应,时滞期均为 1 个月。这些差异可能与研究的时间尺度、植被类型以及环境因素有关。因此,在探究植被与气候因子关系时,需综合考虑多种因素,以深入理解气候因子对植

被生长的驱动机制。

5 结论

(1) 2001—2020 年间,中国大部分地区生长季森林植被呈显著改善趋势,空间异质性显著。东北地区和华北地区植被显著改善区域相对分布广,显著改善区面积约占研究区总面积的 39.63%,显著退化区面积区域约占研究区总面积的 0.35%。

(2) 生长季森林植被指数变化与气温、降水量、太阳辐射、土壤湿度均以正相关为主,六个区域森林植被 EVI 和土壤湿度的相关性均较高,其中中南地区 EVI 与土壤湿度相关程度最高,偏相关系数为 0.57。在东北、华东、中南、西南地区,土壤湿度对森林植被 EVI 变化的贡献高于其它气候因子。在华北地区和西北地区,气温对森林植被 EVI 变化的贡献率最大。

(3) 六个区域 EVI 对气温的响应均不存在时滞效应。EVI 对太阳辐射响应的滞后期均为 3 个月。西北地区、西南地区 EVI 对降水量响应的滞后期分别为 3 个月和 6 个月,华东地区 EVI 对土壤湿度的响应滞后期为 6 个月,其余地区降水量和土壤湿度对 EVI 的影响均不存在时滞效应。

以中国六大地理分区数据为基础,探究了我国森林生态系统生长季植被指数变化与气候因子的响应关系。植被指数的变化不仅受到气温、降水量、太阳辐射以及土壤湿度的影响,还受人类活动等多种因素的影响。此外,不同植被类型 EVI 与气候因子的关系也可能存在差异。因此,未来研究植被生长对气候变化的响应时,还需综合考虑植被类型、人类活动等因素,以深入理解不同时间尺度植被变化的原因和驱动机制,为生态环境管理和气候变化研究提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Sarkar S K, Ansar S B, Ekram K M M, Khan M H, Talukdar S, Naikoo M W, Islam A R T, Rahman A, Mosavi A. Developing robust flood susceptibility model with small numbers of parameters in highly fertile regions of northwest Bangladesh for sustainable flood and agriculture management. *Sustainability*, 2022, 14(7): 3982.
- [2] 李峰,周广胜,曹铭昌. 兴安落叶松地理分布对气候变化响应的模拟. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2255-2260.
- [3] 余新晓,武昱鑫,贾国栋. 森林植被不同尺度的碳水过程及耦合机制研究进展. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 1-13.
- [4] 张含玉,方怒放,史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [5] Qu L L, Huang Y X, Yang L F, Li Y R. Vegetation restoration in response to climatic and anthropogenic changes in the Loess Plateau, China. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(1): 89-100.
- [6] 李爱心. 植被 EVI 动态变化及其对气候变化的响应分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [7] 郭锐. 植被指数及其研究进展. *干旱气象*, 2003, 21(4): 71-75.
- [8] 彭代亮,黄敬峰,王秀珍. 基于 MODIS-EVI 区域植被季节变化与气象因子的关系. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 985-991.
- [9] Moura Y M, Galvao L S, dos Santos J R, Roberts D A, Breunig F M. Use of MISR/Terra data to study intra-and inter-annual EVI variations in the dry season of tropical forest. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127(2012): 260-270.
- [10] 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.
- [11] 戴强玉,徐勇,赵纯,卢云贵,黄雯婷. 四川盆地植被 EVI 动态变化及其驱动机制. *中国环境科学*, 2023, 43(8): 4292-4304.
- [12] Son N T, Chen C F, Chen C R, Minh V Q, Trung N H. A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 197: 52-64.
- [13] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E, Gao X, Ferreira L. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 195-213.
- [14] 解晗,李俊,同小娟,张静茹,刘沛荣,于裴洋,胡海洋,杨铭鑫. 2000—2018 年黄河流域森林和草地物候的时空变化. *应用生态学报*, 2023, 34(3): 647-656.
- [15] Moreira A, Fontana DC, Kuplich TM. Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2019: 147:335-44.
- [16] Banerjee A, Kang SC, Meadows ME, Sajjad W, Bahadur A, Ul Moazzam MF, Xia ZL, Mango J, Das B, Kirsten KL. Evaluating the relative

- influence of climate and human activities on recent vegetation dynamics in West Bengal, India. *Environmental Research*, 2024, 250: 118450.
- [17] He D, Yi G, Zhang T, Miao J, Li J, Bie X. Temporal and spatial characteristics of EVI and its response to climatic factors in recent 16 years based on grey relational analysis in Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 961-978.
- [18] 解晗, 同小娟, 李俊, 张静茹, 刘沛荣, 于裴洋. 2000—2018 年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2022, 42(11): 4536-4549.
- [19] 胡英敏, 高琼, 兰玉芳, 金东艳, 徐霞. 太仆寺旗 2000—2008 年 EVI 对气候及土地利用变化的响应. *自然资源学报*, 2012, 27(7): 1200-1213.
- [20] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 苏旭坤, 刘国华, 王晓峰, 奥勇, 伍星. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. *生态学报*, 2021, 41(3): 1138-1147.
- [21] Sedighfar Z, Motlagh M G, Halimi M. Investigating spatiotemporal relationship between EVI of the MODIS and climate variables in northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, 17(2): 733-744.
- [22] Tang W, Liu S, Kang P, Peng X, Li Y, Guo R, Jia J, Liu M, Zhu L. Quantifying the lagged effects of climate factors on vegetation growth in 32 major cities of China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108290.
- [23] Yang Q, Zhang H, Peng W, Lan Y, Luo S, Shao J, Chen D, Wang G. Assessing climate impact on forest cover in areas undergoing substantial land cover change using Landsat imagery[J]. *Science of the total environment*, 2019, 659: 732-745.
- [24] 谷正楠, 张震, 胡克宏, 陆艺杰. 基于结构方程模型的安徽省归一化植被指数变化及影响因素分析. *科学技术与工程*, 2022, 22(28): 12259-12267.
- [25] 菅宁红, 赵海兰, 刘珉. 我国森林资源增长驱动因素及潜力分析——基于第九次全国森林资源清查结果. *林草政策研究*, 2022, 2(3): 64-71.
- [26] 《气候变化国家评估报告》编写委员会 编著. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京市: 科学出版社, 2011.
- [27] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新. 中国多时期土地利用遥感监测数据集. 资源环境科学数据注册与出版系统. 2018
- [28] 曹雪佳, 沈欣悦, 沈亲, 黄华国. 云南省墨江县森林对虫害和干旱干扰的响应特征. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(7): 57-63.
- [29] 王昭生. 基于 ERA5 的 1982-2020 年中国太阳净辐射数据集. 国家生态科学数据中心, 2022.
- [30] Li Q L, Shi G S, Shangguan W, Nourani V, Li J D, Li L, Huang F N, Zhang Y, Wang C Y, Wang D G, Qiu J X, Lu X J, Dai Y J. A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning. *Earth System Science Data*, 2022, 14(12): 5267-5286.
- [31] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 姚俊强. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征. *生态学报*, 2017, 37(9): 2994-3008.
- [32] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Cao R, Zhang Y F, Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [33] 贺忠华, 张育慧, 何月, 张小伟, 蔡菊珍, 雷莉萍. 浙江省近 20 年植被变化趋势及驱动因子分析. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1530-1539.
- [34] 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.
- [35] 陈燕丽, 莫伟华, 罗永明, 莫建飞, 黄永璘, 丁美花. 基于气候信息的喀斯特地区植被 EVI 模拟. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 187-194.
- [36] 张艳可, 王金亮, 农兰萍, 程峰, 张云峰. 基于 MODIS 时序数据北回归线(云南段)地区植被物候时空变化及其对气候响应分析. *生态环境学报*, 2021, 30(2): 274-287.
- [37] 黄豪奔, 徐海量, 林涛, 夏国柱. 2001—2020 年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(7): 2798-2809.
- [38] 李晓兵, 王瑛, 李克让. NDVI 对降水季节性和年际变化的敏感性. *地理学报*, 2000, 55(S1): 82-89.
- [39] 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.
- [40] 李汇文, 王世杰, 白晓永, 操玥, 田义超, 罗光杰, 陈飞, 李琴, 吴路华, 王金凤, 王明明, 田诗琪, 邓元红, 胡泽银, 杨钰杰, 李朝君, 路茜, 习慧鹏, 陈欢, 冉晨, 罗旭玲. 气候变化及生态恢复对喀斯特槽谷碳酸盐岩风化碳汇的影响评估. *生态学报*, 2019, 39(16): 6158-6172.
- [41] 王遵娅, 曾红玲, 高歌, 陈峪, 司东, 刘波. 2010 年中国气候概况. *气象*, 2011, 37(4): 439-445.
- [42] 耿庆国. 2003 年全国气候概况//2004 年全国天灾预测总结学术会议文集. 中国地球物理学会, 2004: 64-67.
- [43] 白天豪, 贡恩军, 周娜芳, 赵婷, 白红英, 王俊等. 2001—2022 年秦巴山区生态碳汇时空格局及驱动力分析. *环境科学*, 2024: 1-15
- [44] 王茜, 陈莹, 阮玺睿, 李小冬, 王小利, 史健宗, 王志伟. 1982—2012 年中国 NDVI 变化及其与气候因子的关系. *草地学报*, 2017, 25(4): 691-700.
- [45] Zhang Y H, Ye A Z. Spatial and temporal variations in vegetation coverage observed using AVHRR GIMMS and Terra MODIS data in the mainland

- of China. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(11): 4238-4268.
- [46] 孙瑞, 张方敏, 翁升恒, 刘倩. 2001—2021 年中国 NDVI 时空格局变化及对气候的响应. *中国环境科学*, 2023, 43(10): 5519-5528.
- [47] 孙高鹏, 刘宪锋, 王小红, 李双双. 2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 205-212.
- [48] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 魏伟, 曹建军. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征. *生态学报*, 2018, 38(6): 1908-1919.
- [49] 臧迪, 郑有飞, 张顾炜. 近 60 年华北春季干旱特征及其与北大西洋海表温度的关系. *大气科学学报*, 2021, 44(3): 451-460.
- [50] 王欣, 贾国栋, 邓文平, 刘自强, 刘子赫, 邱贵福, 李文立. 季节性干旱地区典型树种长期水分利用特征与模式. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 1943-1950.
- [51] 刘志娟, 杨晓光, 薛昌颖, 张秋, 王化琪. 华北地区旱稻产量适应性及耗水特征分析. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1143-1148.
- [52] 何航, 张勃, 侯启, 李帅, 马彬, 马尚谦. 1982—2015 年中国北方归一化植被指数 (NDVI) 变化特征及对气候变化的响应. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80.
- [53] 路畅, 马龙, 刘廷玺, 黄星. 1951—2018 年中国年降水量及气象干旱的时空变异. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1572-1580.
- [54] 马有铄, 张武, 向亚飞, 王紫文, 陈继全. 西北干旱半干旱地区植被指数对气温和水分因子的响应//第 34 届中国气象学会年会 S4 重大气象干旱成因, 物理机制, 监测预测与影响论文集, 中国气象学会, 2017.
- [55] 王邦锡, 黄久常, 王辉. 不同生长季节光照强度和温度对柠条叶片光合作用和呼吸作用的影响. *中国沙漠*, 1996, 16(2): 145-148.
- [56] 张辉. 基于多源遥感数据的内蒙古植被长势变化监测及其气候影响要素研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [57] 何奕萱, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 别小娟, 闫利, 郑飞鸽. 红河流域“通道-阻隔”作用下 2000—2014 年植被 EVI 变化趋势与驱动力. *生态学报*, 2018, 38(6): 2056-2064.
- [58] 缪丽娟, 张宇阳, 揣小伟, 包刚, 何昱, 朱敬雯. 亚洲旱区草地 NDVI 对气候变化的响应及滞后效应. *植物生态学报*, 2023, 47(10): 1375-1385.