#### DOI: 10.20103/j.stxb.202405151113

张韬略,姜亮亮,刘冰,刘睿,肖作林,刘文利.中国植被对气候变化的敏感性定量分析.生态学报,2025,45(5):2412-2423.

Zhang T L, Jiang L L, Liu B, Liu R, Xiao Z L, Liu W L.Quantitative analysis of vegetation sensitivity to climate change in China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5):2412-2423.

# 中国植被对气候变化的敏感性定量分析

张韬略<sup>1,3</sup>、姜亮亮<sup>1,3,\*</sup>、刘  $\lambda^2$ 、刘 睿<sup>1,3</sup>、肖作林<sup>1,3</sup>、刘文利<sup>1,3</sup>

- 1 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331
- 2 重庆师范大学化学学院, 重庆 401331
- 3 地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331

摘要:随着全球气候变化日益加剧,极端气候频发,严重威胁着植被稳定性。目前,植被敏感性研究通常以定性研究为主,且常常忽略了气候变化对植被的累积滞后效应。因此,考虑气候变化对植被的累积滞后效应下,定量分析植被对气候变化的敏感性,旨在为预防区域植被退化提供理论支撑。利用 AVHRR NDVI3g 数据、ERA5-Land 数据,运用自回归模型方法,考虑气候对植被的累积滞后效应,计算植被对气候变化的敏感性,并探讨中国植被对气候变化的敏感性时空变化特征。研究表明,不同气候区气候因子(降水、太阳辐射、气温)对植被的累积滞后影响存在差异。在湿润区,因降水充沛,降水对植被的累积滞后时效长达3个月,而在半干旱区,由于降水较少,降水对植被的累积滞后时效缩减到1个月。中国大部分植被受太阳辐射的累积滞后影响时效为2到3个月,而南方湿润区森林受气温的累积滞后时效为3个月,半干旱区草地受气温的累积滞后时效仅为1个月,而东北森林和华中耕地受气温的累积滞后时效为当月。中国92.60%的植被敏感性较低,对外界干扰具有一定的抵抗力。然而,7.40%的植被敏感性极高,主要分布在华东湿润区和东北半湿润区,这些地区植被生长易受气候变化影响,面临着较大的退化风险,均被视为生态脆弱区。在空间上,华东湿润区和东北半湿润区,这些地区植被生长易受气候变化影响,面临着较大的退化风险,均被视为生态脆弱区。在空间上,华东湿润区的耕地敏感性常年较高,而半干旱区的植被敏感性随季节波动变化明显,在春季的敏感性最大。季节尺度上,在春季,西藏、内蒙古高原北部等地区的草地敏感性指数达到最大值,而在夏季,植被敏感性较高地区主要集中在华中湿润区耕地,中国植被的敏感性强弱在空间分布上具有明显的异质性。因此,定量分析植被对气候变化的敏感性,有利于为中国生态环境保护以及减缓气候变化不利影响等决策提供科学依据。

关键词:植被敏感性;气候变化;累积滞后效应;中国

# Quantitative analysis of vegetation sensitivity to climate change in China

ZHANG Taolüe<sup>1,3</sup>, JIANG Liangliang<sup>1,3,\*</sup>, LIU Bing<sup>2</sup>, LIU Rui<sup>1,3</sup>, XIAO Zuolin<sup>1,3</sup>, LIU Wenli<sup>1,3</sup>

- 1 School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China
- 2 College of Chemistry, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China
- 3 Chongqing Key Laboratory of Geographic Information System Application, Chongqing 401331, China

**Abstract:** As global climate change intensifies, the frequency of extreme weather events is increasing, posing a serious threat to the stability of vegetation. Many studies have utilized partial correlation analysis, autoregressive models, and similar methods to investigate vegetation's responsiveness to climate change, providing significant insights. However, they often focus on qualitative aspects, neglecting the cumulative and lagged effects of climate change on vegetation. Accordingly, this study quantitatively assessed vegetation sensitivity to climate change, incorporating cumulative and lagged effects, aiming to offer a theoretical basis for preventing regional vegetation degradation. Based on AVHRR NDVI3g and ERA5-Land data, an autoregressive model was applied in the study to calculates the sensitivity of vegetation to climate

**基金项目:**重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2024NSCQ-LZX0064); 国家自然科学基金(42201124); 中国博士后科学基金(2023M740433); 重庆创业创新支持计划项目(2204012976986965)

收稿日期:2024-05-15; 网络出版日期:2024-11-28

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jiang@ cqnu.edu.com

change, considering the cumulative and lagged effects of climate on vegetation. The study further explored the spatiotemporal variations in vegetation sensitivity across China. The results indicate that precipitation, solar radiation, and temperature have varying cumulative and lagged impacts on vegetation across different climatic zones. Vegetation in arid regions shows extended cumulative and lagged responses to solar radiation, whereas in humid regions, it is predominantly affected by precipitation, exhibiting lagged effects for up to three months. Grasslands and cultivated lands exhibited shorter lagged responses to changes in temperature and precipitation, while forests in the Northeast showed a short-lagged effect in response to temperature variations. In humid regions, abundant precipitation resulted in a prolonged lagged effect of up to three months, whereas in semi-arid regions, the lagged effect was reduced to one month due to lower precipitation levels. The cumulative and lagged effects of solar radiation on most vegetation in China last for 2 to 3 months. Forests in southern humid regions exhibited a three-month lagged effect in response to temperature, while grasslands in semi-arid regions showed only a one-month lagged response. In contrast, Northeast forests and cultivated lands in central China responded to temperature changes in the same month. Vegetation sensitivity was generally higher in humid regions, gradually increasing from semi-arid to humid zones. In arid areas, the arid zone displayed greater vegetation sensitivity than in the semi-arid zone. Approximately 92.60% of vegetation in China exhibited low sensitivity, with a sensitivity index of 0.25, indicating a certain resistance to external interference. However, 7.40% of the vegetation, primarily located in the humid region of Eastern China region and semi-humid area of Northeast China, exhibited extremely high sensitivity, with a sensitivity index of 0.4. Vegetation growth in these regions was highly susceptible to climate change and faced significant degradation risks. Hence, these areas are deemed ecologically fragile. Spatially, cultivated lands in the humid zone of Eastern China region consistently showed high sensitivity, while vegetation sensitivity in semi-arid regions fluctuated notably with the seasons, peaking in spring. On a seasonal scale, the sensitivity index of grasslands in regions such as Tibet and the northern Inner Mongolia Plateau peaked in spring, while in summer, higher vegetation sensitivity was concentrated in the cultivated lands of the humid Central China region. The spatial distribution of vegetation sensitivity in China demonstrated significant heterogeneity. Therefore, a quantitative analysis of vegetation sensitivity to climate change provides a solid scientific foundation for decision-making regarding ecological environment protection and mitigation strategies, helping to reduce the adverse impacts of climate change in China.

Key Words: vegetation sensitivity; climate change; cumulative lag effect; China

气候变暖的背景下,极端气候事件对生态系统的结构和功能产生了严重影响。植被是陆地生态系统中最重要的组分之一,也是对气候变化最敏感的组分<sup>[1]</sup>。中国陆地增温速率显著高于全球陆地增温速率<sup>[2]</sup>,导致自然灾害频发,例如极度干旱,高温,暴雨等,从而导致土地退化、植被退化和水土流失,对人们的生产生活造成了严重影响。生态系统对气候变化的响应是衡量恢复力的重要标准,恢复力较低的生态系统对外界干扰或环境变化更为敏感<sup>[3]</sup>。植被敏感性指数被定义为在气候干扰条件下植被变化的幅度,可作为植被对气候变化响应的重要参数,衡量植被的稳定性。一些地区的植被在极端气候条件下,植被恢复缓慢,植被敏感性是造成这一现象的主要原因<sup>[4]</sup>。此外,在敏感性较高的地区,植被系统对外界干扰的反应较为剧烈,植被退化的风险较大<sup>[5]</sup>。所以,在全球气候变暖的背景下,量化中国植被对气候变化的敏感性可深入了解区域生态环境变化,对于保护生态环境、减缓气候变化的不利影响具有重要的现实意义。

目前,许多研究使用偏相关分析、自回归模型等方法探究植被对气候变化的敏感性并取得了重要的成果<sup>[6-9]</sup>。前人在不同气候区下利用敏感性指数探究了植被对气候因子的响应程度<sup>[5]</sup>,分析了不同地区植被敏感性程度的空间差异性。但目前大多数对植被敏感性研究仅考虑了当月气候因子的影响,而忽略了气候因子对植被累积滞后的影响。随着遥感技术的迅速发展和生态遥感应用的不断深入,借助多源遥感数据产品,利用自回归模型等方法,剖析植被对气候变化的敏感性<sup>[4]</sup>。已有研究发现植被的敏感性高低主要受到降水、太

阳辐射、气温等因素影响,但较少研究从定量角度分析植被敏感性。由于不同地区因气候条件不同,植被敏感性大小也存在差异,且目前多数研究着重考虑了全球范围,忽视了中国独特的气候情况,较少按照气候区划分进行分类探讨植被敏感性<sup>[10]</sup>。因此,本研究从定量的角度出发,综合考虑累积滞后效应的影响,着重关注中国不同气候区植被敏感性空间分布格局,为应对极端气候提供科学依据。

本文探究中国不同区域植被对气候变化的敏感性,分析植被生态系统与气候之间的相互作用关系,在考虑气候累积滞后效应的影响下,基于归一化植被差异指数(NDVI)和气象(气温、降水和太阳辐射)数据集,采用自回归模型与主成分回归分析等方法研究植被对不同气候因素的响应,揭示气候因子对植被的影响,并探究中国植被对气候变化的敏感性及其时空分布规律。本研究将有助于深入了解气候变化对植被的影响程度,为保护中国植被生态系统,防止极端气候对植被生态的破坏提供科学支撑。

# 1 数据与方法

## 1.1 研究区概况

中国位于亚洲东部,其陆地面积约为960万km²。地势呈现东低西高,复杂的地势条件和独特的地理位置导致了中国气候的多样性。根据前人研究,将中国分为七大地理分区,分别为华中、华南、华北、西北、华东、西南、东北地区,并依据联合国环境规划署气候分区标准<sup>[11]</sup>,中国可分为5个气候区(图1),分别为极度干旱区(6.07%)、干旱区(14.75%)、半干旱区(29.07%)、半湿润区(14.95%)和湿润区(35.16%)。随着全球气温的升高,未来中国气温将持续上升。由于中国地形与气候的独特性,雨量分配不均,极端气候的频繁发生,极易影响生态系统结构和功能的稳定性<sup>[12]</sup>。中国植被类型主要以草地、森林、耕地为主,其中西藏地区,西北地区,华北地区主要以草地为主,而森林主要分布在东北地区的长白山脉和大、小兴安岭,以及华东地区的武陵山脉等,耕地主要分布在中国华东、华中等地区。图1中变化区域为研究期间土地利用类型发生改变的地区,为了减少误差,研究结果在不同植被类型统计中不予考虑。

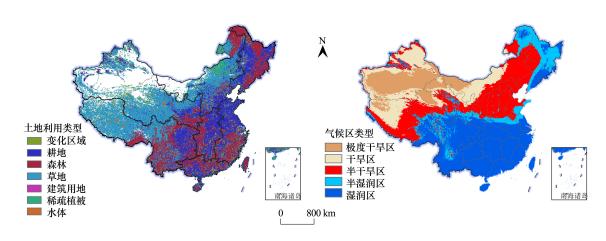


图 1 中国植被类型及气候区图

Fig.1 Vegetation types and Climate zones in China

## 1.2 数据

## 1.2.1 NDVI3g 数据

NDVI3g 数据集来自于全球监测与模拟研究组(GIMMS)(http://glcf.umd.edu),由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)-先进的极高分辨率辐射仪(AVHRR)获得。本文 NDVI 数据集的空间分辨率为 0.083°,时间分辨率为 15 天,时间序列为 1982—2015 年。采用最大值合成法(MVC)获得了月尺度 NDVI 数据集<sup>[13—14]</sup>,该方法能够有效减少云和气溶胶的大气影响<sup>[15—17]</sup>,同时排除非植被区域(包括雪和水体)。

## 1.2.2 ERA5-Land 数据

ERA5-Land 是结合各地观测数据利用再分析模型生成的再分析数据集(https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search)。由欧洲中期天气预报中心(European Centre For Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布<sup>[18]</sup>,气候数据集的空间分辨率为 0.1°,时间分辨率为每月一期。本文选取 1982—2015 年的逐月降水、气温和太阳辐射数据,以研究气候因子对植被的累积效应影响。

## 1.2.3 干旱指数数据集

年降水量与潜在蒸散量的比值定义为干旱指数(AI),表示气候干旱程度<sup>[13]</sup>,该干旱指数数据集由 Antonio Trabucco 和 Robert Zomer 建立,空间分辨率为 1 km (https://figshare.com/ndownloader/files/14118800)。AI 可以确定潜在蒸发量和降水有效性之间的差异,根据 Middletion 和 Thomas 研究气候分区可划分为<sup>[19]</sup>:湿润区(AI > 0.65)、半湿润区(0.5<AI  $\leq$  0.65)、半干旱区(0.2<AI  $\leq$  0.5)、干旱区(0.03<AI  $\leq$  0.2)、极度干旱区(AI<0.03)。为了保证数据间空间分辨率的一致性,利用双线性插值法对气候数据和干旱指数数据进行重采样,研究数据的空间分辨率均统一为 0.083°。

## 1.3 研究方法

## 1.3.1 气候对植被的累积和滞后效应

植被生长受到气候的累积滞后效应的影响<sup>[20]</sup>。研究表明,植被生长不仅受到同时期气候的影响,还会受到早期气候的累积滞后影响<sup>[21]</sup>。考虑累积滞后效应的影响,可以深入探究植被对气候变化的响应<sup>[22]</sup>:

$$AClim_{m,j} = \sum_{k=0}^{k=j} \left( Clim_{m-k} - B_0 \right) \qquad 0 \le j \le n$$
 (1)

式中,m 代表月序列,k 代表相对当前月份的间隔月数,j 代表累积持续时间,Clim 代表气候因素的月值,AClim 代表气候因素的累积月值, $B_0$ 代表累积计算的基值<sup>[23]</sup>,n 代表最大的累积持续时间。根据前人研究<sup>[24]</sup>, $B_0$ 和n 值分别为 0 和 3。

基于回归模型确定气候因子(降水,气温,太阳辐射)最佳的累积月数:

$$NDVI_{i} = a_{i} \times AClim_{i} + b_{i}$$
 (2)

其中,NDVI<sub>i</sub>是 NDVI 在第 i 月的值, $a_i$ 是回归系数, $b_i$ 是截距。考虑年际间月份的连续性,最佳累积月数确定使用研究期间 1—12 月份时间序列数据。由于中国南北季节存在时间差异,南北地区存在同一时间不同季节的现象,为了统一季节这一时间尺度,根据前人研究选取 4 月至 10 月作为中国植被生长季节,生长季可分为春季(4 月、5 月),夏季(6 月至 8 月),秋季(9 月和 10 月)[25]。

# 1.3.2 植被的敏感性

考虑累积和滞后效应的影响下,本文利用自回归模型计算气候因子对植被的动态影响,计算公式如下:

$$NDVI_{t} = \alpha \times NDVI_{t-1} + \beta \times OPRE_{t} + \gamma \times OTMP_{t} + \delta \times OSWD_{t} + \varepsilon_{t}$$
(3)

其中, $\varepsilon_t$ 表示残差项。 $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$  和  $\delta$  为回归系数。 $\beta$  、 $\gamma$  和  $\delta$  的大小可分别量化降水、气温和辐射对植被动态的影响。当回归系数越大,植被对相应的气候因子越敏感。OPRE,、OTEM,和 OSWD,分别表示第 t 个月的最佳累积降水、气温和地表太阳辐射。

为保证模型系数之间的可比性,消除季节和量级的影响,本文计算了标准化 NDVI,计算公式如下:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \tag{4}$$

式中, $z_i$  表示第 i 月的 NDVI 标准化值, $x_i$  表示第 i 月的 NDVI 值, $\bar{x}$  和  $\delta$  分别表示第 i 月的 NDVI 的平均值和标准差。

为了避免三个气候因子间共线性的影响,采用主成分回归法对方程(3)结果进行分析,研究仅保留了具有显著相关性的像元(*P*<0.1)进行深入分析。

即植被敏感性指数(Vegetation sensitivity index, VSI)的计算可分为两步骤:一是量化各气候因子对植被变

化的相对重要性(公式3);二是植被对气候因子的敏感性计算。植被敏感性计算如下:

$$VSI = \sum (\beta \times PREsen + \gamma \times TMPsen + \delta \times SWDsen)$$
 (5)

式中, $\beta$ 、 $\gamma$  和  $\delta$  分别为降水、气温和太阳辐射的权重(相对重要性),由公式 3 计算获得; PREsen、TMPsen 和 SWDsen 分别表示植被对降水、气温和太阳辐射的敏感性,PREsen、TMPsen 和 SWDsen 是通过降水、气温、太阳辐射的时间序列的方差来计算变换量,并运用  $\log_{10}$ 转换比值得到<sup>[3]</sup>。

# 2 结果与分析

# 2.1 气候因子对植被的累积效应识别

从不同的气候区来看(图 2),半干旱和干旱地区植被受太阳辐射影响的累积滞后时效相比其他两个气候因素跨度大,而湿润地区受降水影响的时效跨度大。除广东、福建等地区外,68.56%的湿润区降水对植被的累积影响时间长达 2—3 个月,其中,38.02%的湿润区植被受降水的累积影响时间长达 3 个月,而有 83.02%的半湿润区和 76.12%的半干旱区植被受降水的累积影响时间均为 1 个月。73.57%的干旱区,降水对植被的累积影响时间为 1—2 个月。大多数地区的植被受太阳辐射的累积影响时效为 3 个月,特别在半干旱和干旱地区,分别占各自总面积的 83.09%和 90.31%,而在横断山脉地区累积效应影响月份为 0 个月。73.48%的半干旱区和 53.90%的干旱区植被受气温的累积影响时间均为 1 个月,而在沿海湿润区,气温对植被的影响累积效应时间为 3 个月。总之,干旱区植被受太阳辐射的累积滞后时效长,而湿润区植被受降水的累积滞后时效长。

从不同植被类型来看,草地和耕地受气温和降水的累积滞后时效短,东北森林受气温的累积滞后时效短。在西藏干旱区与半干旱区,植被类型主要为草地和耕地,受降水的累积影响月份为1个月。在以耕地为主的华中、华东地区受气温累积影响的月份为0个月,以森林为主的大部分湿润区受气温累积影响的月份为3个月,但在东北地区的森林受气温累积影响的月份为0个月。总体而言,草地和耕地受气温和降水的累积滞后时效短,东北森林受气温的累积滞后时效短。

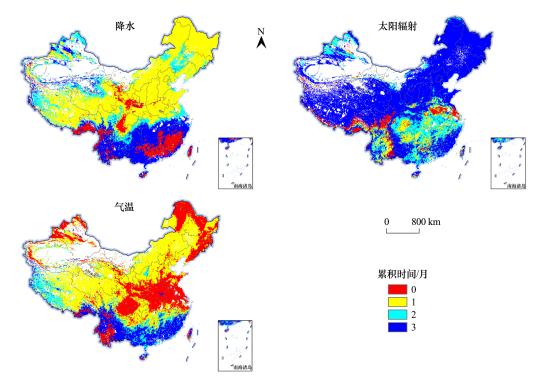


图 2 不同气候因子对植被的累计效应影响

Fig.2 Cumulative effects of different climate factors on vegetation

# 2.2 气候因素对植被影响定量分析

中国大部分地区影响植被生长的主要气候因子为降水和气温,而湿润区植被主要受太阳辐射影响(图3)。在春季,华东地区受太阳辐射的影响程度明显高于降水和气温。总体来看,在春季,34.54%的极度干旱地区、50.56%的干旱区和38.14%的半干旱区植被对降水更为敏感。在夏季,华南与华中地区主要受太阳辐射影响,其他地区并不明显,而38.59%的极度干旱区、31.58%的干旱区、37.13%的半干旱区、41.57%的半湿润区、31.92%的湿润区植被受气温影响更为显著,因此,夏季气温是影响植被敏感性的主要因素。在秋季,中国植被整体受太阳辐射影响显著,尤其在湿润地区。其中,41.13%的半湿润区和38.89%的湿润区植被对太阳辐射较为敏感。在整个生长季节中,气候因素相对重要性的空间分布特征与春季相似。54.03%的干旱区和42.58%的半干旱区植被主要受降水影响,但湿润区仅有25.83%的区域植被对降水敏感,湿润地区植被对气温和太阳辐射的敏感性较高。总体而言,中国大部分地区植被受降水和气温影响,湿润区的植被主要受太阳辐射影响。

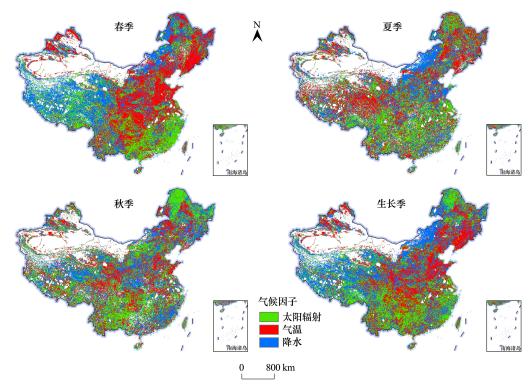


图 3 不同季节气候因子对植被生长相对重要性空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of relative importance of different seasonal climate factors on vegetation growth

从不同的植被类型来看,稀疏植被和草地主要受降水影响,耕地主要受气温影响,森林主要受太阳辐射影响。春季,稀疏植被与草地显著受降水影响,受影响的面积分别占各自总面积的 49.75%与 47.85%;而耕地与森林则主要受气温影响,受影响的面积分别占各自总面积的 50.98%与 45.21%。在夏季,53.03%的稀疏植被主要受降水影响,40.38%的森林主要受太阳辐射影响,森林从受气温影响转为主要受太阳辐射影响。在秋季,73.82%的稀疏植被主要受气温和降水的影响显著,76.24%的森林主要受降水和太阳辐射影响。整个生长季中,55.29%的稀疏植被受降水影响为主,47.86%的草地显著受降水影响;大多数耕地受气温为主,占比44.62%;森林主要受太阳辐射影响,占比40.60%。整体上,不同植被类型受气候因素的影响差异明显,其中稀疏植被和草地主要受降水影响为主,而耕地受气温影响明显,森林主要受太阳辐射影响。

当气候区由极度干旱区过渡到湿润区,太阳辐射与气温的相对重要性逐渐增强(图4)。在春季,太阳辐射权重中位值由0.15上升至0.17,气温权重中位值由0.13上升至0.17。当气候区从极度干旱区过渡到干旱区时,降水影响达到最大,而由干旱区转到湿润区后,降水影响又逐渐减弱。在夏季和秋季,湿润区植被受太

阳辐射影响较大。从整个生长季来看,在极度干旱区,气温、太阳辐射、降水的权重中位值均为 0.15,说明各气候因子对植被的影响差异较小。从干旱区到湿润区,降水对植被的影响逐渐减弱,权重中位值由 0.19 变为 0.17,太阳辐射的影响逐步增强,权重中位值由 0.15 变为 0.17,气温对植被的影响逐渐增强,权重中位值由 0.15变为 0.19,以上结果对于探究不同气候因素对植被生长的影响机理和调控策略具有重要的参考价值。

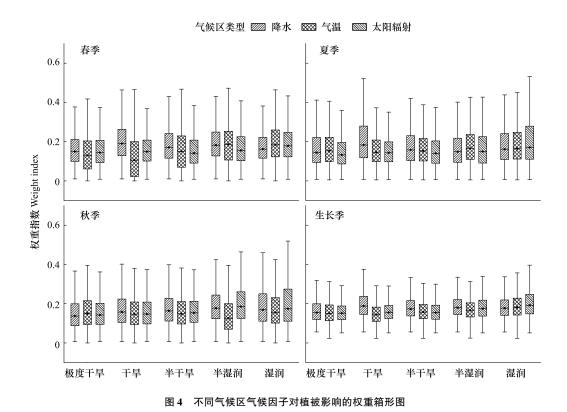


Fig.4 Boxplot of weights of climate factors on vegetation in different climate zones

# 2.3 不同季节植被对气候变化敏感性分析

中国植被在春季敏感性普遍较高,春季以后,半干旱区植被敏感性降低,湿润区敏感性升高(图5)。在春季,湿润区和半干旱区植被敏感普遍较高,特别是华北地区、西南西藏地区和华南少数地区植被敏感性较高,云贵地区和中国沿海边界地区植被敏感性较低。在夏季,华北、西南西藏等半干旱地区植被敏感性较低,相对于春季而言,整体植被敏感性降低,高敏感性地区主要集中在华中与华东湿润区,呈现沿海向内陆敏感性由高到低的变化趋势。在秋季,敏感性较高地区集中在华南地区,而华北、东北以及西南地区的四川西部和云南植被敏感性指数较低。在夏季和秋季,植被敏感性较高的地区主要分布在华中和华南地区,周边各地区的植被敏感性指数逐渐降低。从整个生长季上看,黑龙江北部的半湿润、湿润区和华中、华东湿润区、横断山脉地区的植被敏感性指数较高,而华北半干旱区的植被敏感性较低。综上,在春季,中国植被敏感性普遍较高,特别是西南西藏地区植被敏感性显著高于其他季节,春季以后,干旱区与半干旱区植被敏感性降低,湿润区敏感性升高,中国的植被敏感性在空间上存在显著差异性。

从不同气候区上看(图 6),湿润区的植被敏感性较高,从半干旱区到湿润区,植被敏感性逐渐上升,干旱区植被敏感性要高于半干旱区。在春季,干旱区的植被敏感性指数的中位数较高,约为 0.3。夏季,植被敏感性的中位数从极度干旱地区向湿润地区逐渐增加。秋季,除湿润区外,其余地区植被敏感性指数约为 0.25。从整个生长季上看,湿润区和半湿润区植被敏感性指数相似,均高于其他地区,而极度干旱地区与半干旱地区植被敏感性指数分布接近,敏感性均较低。干旱地区的植被敏感性中位数略高于极度干旱与半干旱地区,约为 0.28。从季节尺度上看,春季植被敏感性整体上高于其他季节,尤其是春季干旱区植被敏感性明显高于秋

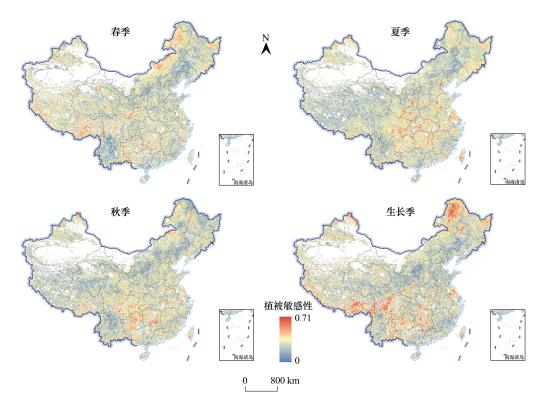


图 5 不同季节植被敏感性空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of vegetation sensitivity in different seasons

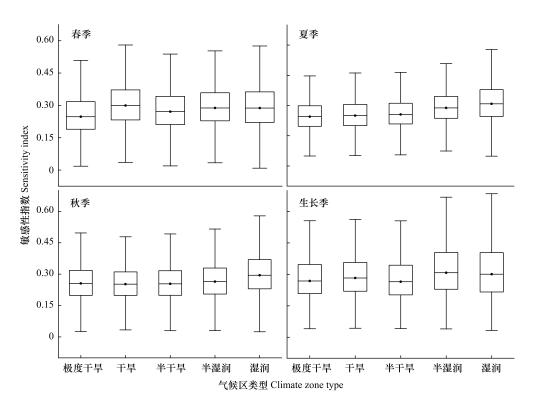


图 6 不同气候区的植被敏感性箱型图

Fig.6 Boxplot of vegetation sensitivity in different climate zones

季。从不同植被类型敏感性看出(图7),从春季到夏季,耕地敏感性的中位数值逐渐升高,由 0.27 上升至0.3, 而草地敏感性则由 0.3 下降至 0.25。森林敏感性全年居高,保持在 0.3。稀疏植被在春季和秋季的敏感性指数较高(0.3),但在夏季呈现低敏感性现象,敏感性指数为 0.25。

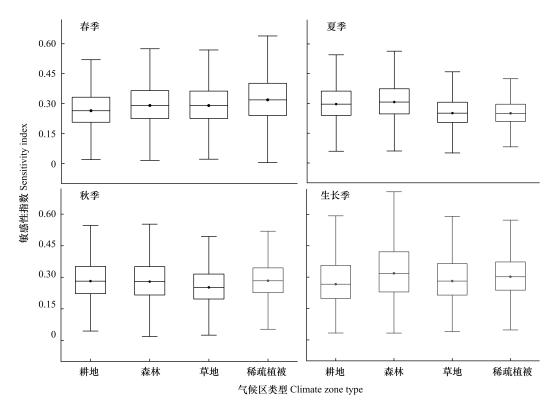


图 7 不同植被类型敏感性箱型图

Fig.7 Boxplot of sensitivity for different vegetation types

# 3 讨论

## 3.1 气候变化对植被的影响

降水对半干旱区、干旱区植被的影响显著。在半干旱区、干旱区,降水对植被的滞后影响主要集中在前一个月,这些地区主要以草地和草甸植被为主,半干旱与干旱地区土壤含水量低,地表蒸发高<sup>[26]</sup>,植被对降水较为敏感<sup>[27]</sup>。特别是在春季生长初期,草本植被根系较小,限制了植被对地下水的吸收<sup>[28]</sup>,当降水异常时,草本植被极易受到降水影响。而在湿润地区,过多的降水导致水分以径流、冠层残留以及土壤蒸发的形式消耗,植被对水分的利用效率降低,植被对降水的拦截作用增强<sup>[29]</sup>。因此,降水显著影响半干旱与干旱区植被,对湿润区和半湿润植被影响较低。

中国半湿润区与湿润区春季气温对植被的影响显著,而太阳辐射对森林影响较大。春季变暖,气温升高,导致植被生长激素增加,植被生长季提前,所以大多数地区植被都受到气温的影响<sup>[30-32]</sup>。西藏地区的植被在春季受气温的影响较小,主要受降水与太阳辐射的影响为主<sup>[33]</sup>,主要是由于西藏地区水汽含量少,气温年较差小、日较差大以及独特的高原气候导致<sup>[34-36]</sup>。中国的森林主要受太阳辐射影响,因为太阳辐射影响叶绿素的合成,导致植被的生长季受到延长<sup>[37]</sup>,同时,森林通过固碳的方式提供植被生长所必要的有机物,而固碳能力主要受到太阳辐射的影响<sup>[38]</sup>。

# 3.2 植被对气候变化的敏感性

东北森林对气候变化敏感性较高,植被退化风险较高。东北半湿润区植被高敏感性较高,尤其是森林,森

林对气候的敏感性全年均较高,意味着其生态系统对气候波动的响应较为剧烈,属于植被退化高风险地区。中国东北地区位于湿润和半干旱地区,主要由湿润森林和温带草甸组成。前人研究表明,这些植被类型对干旱事件的反应时间较长,易受到气候变化影响<sup>[39]</sup>。在东北大、小兴安岭地区原始林减少,次生林增加,导致森林质量显著下滑<sup>[40]</sup>,受气温升高的影响,东北北部多年的冻土减少导致地表植被可利用的水资源降低<sup>[41]</sup>,部分森林发生退化,生态脆弱性加剧。该地区森林敏感性增强,为中国植被治理、生态防护提供了预警信号,应采取退耕还林,以及树种恢复等措施减少森林退化<sup>[42]</sup>。

华中地区与华东地区的耕地受降水影响的滞后时效短,敏感性较高,存在耕地退化的风险。因为华中与华东地区植被以耕地为主,在夏季,耕地易受人类活动影响,例如过度开垦、过度使用农和化肥,导致耕地自身的内部结构受到破坏,当这种破坏程度超过耕地自身修复阈值时,耕地对气候因子的敏感性增强<sup>[43]</sup>。人为耕作过程破坏了土壤根系,导致土壤中饱和导水率降低<sup>[44]</sup>,土壤的保水能力降低,植被吸收水分的能力也降低,耕地易受到降水的影响,植被的敏感性也逐渐增强。

西南横断山脉地区植被敏感性较高,植被生态易受到外界干扰。极端天气、地震、滑坡和泥石流等自然灾害在一定程度上会抑制植被生长<sup>[45]</sup>,据《第二次气候变化国家评估报告》,在全国山地灾害中,西南地区占30%以上。频发的地质灾害与极端的气候变化导致植被敏感性高,抵抗外界干扰能力减弱,加剧了生态系统的退化。因此,结合气候因子的滞后效应来看,横断山脉地区的森林受气温和降水的影响显著,极端的干旱和高温会导致该地区生态系统遭受破坏。

本研究考虑了气候因子对植被敏感性的影响,但是其他因素,例如二氧化碳、肥料、土地肥力等也会对植被造成影响。各区域植被的变化是气候因素与人为因素共同作用的结果,在治理北部荒漠化、防范干旱区与半干旱区植被退化的同时,华东、华中地区以及西南地区也应注重生态防护,植被敏感性较高的地区易受极端气候环境的影响,应采取措施加强保护。

## 4 结论

- (1)不同气候区气候因子对植被的累积滞后影响具有一定差异性。干旱区植被受太阳辐射的累积滞后时效长,而湿润区植被受降水的累积滞后时效长。草地和耕地受气温和降水的累积滞后时效短,东北森林受气温的累积滞后时效短。
- (2)中国湿润区和半湿润区春季气温对植被的影响显著,权重中位值分别为 1.8 和 1.9。然而,在夏季和秋季,气温对植被的重要性明显降低,降水和太阳辐射对植被生长的重要性有所增强。从干旱区到湿润区,降水对植被的影响逐渐减弱,权重中位值由 0.19 下降至 0.17,而太阳辐射和气温对植被的影响逐步增强。
- (3)在不同季节和气候区上,中国植被敏感性存在着显著空间差异性。中国大部分植被敏感性较低,敏感性指数为0.25,但东北森林地区,西南横断山脉地区以及华东、华中耕地敏感性较高,敏感性指数为0.3。东北半湿润区森林和华东、华中耕地存在退化趋势,属于植被退化高风险地区。

本研究旨在探究中国植被对不同气候因子的响应,分析了植被对气候变化敏感性的空间差异性,有利于 预测未来植被动态和了解极端气候对植被的影响,为中国生态环境保护与改善提供科学依据。

## 参考文献 (References):

- [1] 孙红雨,王长耀,牛铮,布和敖斯尔,李兵.中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. 遥感学报,1998,2(3):204-210.
- [2] Liu B H, Henderson M, Zhang Y D, Xu M. Spatiotemporal change in China's climatic growing season: 1955—2000. Climatic Change, 2010, 99 (1): 93-118
- [ 3 ] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, Benz D, Willis K J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. Nature, 2016, 531: 229-232.
- [4] Yuan Y, Bao A M, Liu T, Zheng G X, Jiang L L, Guo H, Jiang P, Yu T, De Maeyer P. Assessing vegetation stability to climate variability in

- Central Asia. Journal of Environmental Management, 2021, 298: 113330.
- [5] Scheffer M, Dakos V, van Nes E H. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2009, 6(6): 062012.
- [ 6 ] Chen T, Bao A M, Jiapaer G, Guo H, Zheng G X, Jiang L L, Chang C, Tuerhanjiang L. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982-2015. Science of the Total Environment, 2019, 653: 1311-1325.
- [7] 侯美亭, 赵海燕, 王筝, 延晓冬. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化响应的研究进展. 气候与环境研究, 2013, 18(3): 353-364.
- [8] Scherhaufer P. Bridging the gap between the theory and practices of stakeholder participation in integrated vulnerability assessments of climate change. Systemic Practice and Action Research, 2014, 27(5): 449-463.
- [9] Yutong Zheng, Jingcheng Han, Yuefei Huang, Steven R. Fassnacht, Shuai Xie, Enze Lv, Min Chen. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China. Ecological Indicators, 2018, 92: 18-29.
- [10] Propastin P A. Inter-annual changes in vegetation activities and their relationship to temperature and precipitation in central Asia from 1982 to 2003. Journal of Environmental Informatics, 2008, 12(2): 75-87.
- [11] Zomer R J, Xu J C, Trabucco A. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database. Scientific Data, 2022, 9: 409.
- [12] 陈云,李玉强,王旭洋,牛亚毅.中国典型生态脆弱区生态化学计量学研究进展.生态学报,2021,41(10):4213-4225.
- [13] Huang NE, Long SR, Wu MLC, Shih HH, Zheng QN, Yen NC, Tung CC, Liu HH, Shen Z. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [14] Vermote E, Kaufman Y J. Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(13);2317-2340.
- [15] Vermote E, El Saleous N, Kaufman Y J, Dutton E. Data pre-processing: stratospheric aerosol perturbing effect on the remote sensing of vegetation: correction method for the composite NDVI after the *Pinatubo* eruption. Remote Sensing Reviews, 1997, 15(1/2/3/4): 7-21.
- [16] Pinzón J E, Brown M E, Tucker C J. EMD Correction of Orbital Drift Artifacts in Satellite Data Stream. Hilbert-Huang Transform And Its Applications, 2005.
- [17] Balcilar, Mehmet, Ozdemir, Zeynel Abidin, Ozdemir, Huseyin, Shahbaz, Muhammad. The renewable energy consumption and growth in the G-7 countries: Evidence from historical decomposition method. Renewable energy, 2018, 126: 594-604.
- [18] Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dee, D., Dutra, E., Munoz-Sabater, J., Pappenberger, F., de Rosnay, P., Stockdale, T., Vitart, F. ERA-Interim/Land; a global land surface reanalysis data set. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(1): 389-407.
- [19] Nash D J, Middleton N, Thomas D. World Atlas of Desertification. Geographical Journal, 1999, 165; 325.
- [20] 顾锡羚, 郭恩亮, 银山, 王永芳, 那仁满都拉, 万志强. 干旱对内蒙古植被生长的累积与滞后影响评估研究. 草地学报, 2021, 29(6): 1301-1310.
- [21] D'Orangeville L, Maxwell J T, Kneeshaw D, Pederson N, Duchesne L, Logan T, Houle D, Arseneault D, Beier C, Bishop D, Druckenbrod D, Fraver S, Girard F, Halman J M, Hansen C, Hart J, Hartmann H, Kaye M W, LeBlanc D, Manzoni S, Ouimet R, Rayback S A, Rollinson C, Phillips R P. Drought timing and local climate determine the sensitivity of eastern temperate forests to drought. Global Change Biology, 2018, 24: 2339-2351.
- [22] 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, Yang J, Wang Y P. Cumulative effects of climatic factors on terrestrial vegetation growth. Journal of Geophysical Research; Biogeosciences, 2019, 124(4); 789-806.
- [23] 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.
- [24] Wen, Youyue, Liu, Xiaoping, Yang, Jian, Lin, Kui, Du, Guoming. NDVI indicated inter-seasonal non-uniform time-lag responses of terrestrial vegetation growth to daily maximum and minimum temperature. Global and Planetary Change, 2019, 177: 27-38.
- [25] 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.
- [26] Bohovic R, Dobrovolny P, Klein D. The spatial and temporal dynamics of remotely-sensed vegetation phenology in central Asia in the 1982—2011 period. European Journal of Remote Sensing, 2016, 49(1): 279-299.
- [27] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 章超斌, 穆少杰, 孙政国. 1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 15-30.
- [28] 李均力, 肖昊, 沈占锋, 白洁. 2013—2018 年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应. 干旱区研究, 2020, 37(4): 985-992.
- [29] 裴婷婷,李小雁,吴华武,吴秀臣,陈英,谢保鹏.黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究.农业工程学报,2019,

- 35(5): 119-125, 封3.
- [30] 南颖, 刘志锋, 董叶辉, 李秀霞, 吉喆. 2000—2008 年长白山地区植被覆盖变化对气候的响应研究. 地理科学, 2010, 30(6): 921-928.
- [31] 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.
- [32] 马守存, 保广裕, 郭广, 杨莲, 代青措, 郑玲. 1982—2013 年黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应. 干旱气象, 2018, 36(2): 226-233
- [33] 李磊磊, 范建容, 张茜彧, 李炫. 西藏自治区植被与气候变化的关系. 山地学报, 2017, 35(1): 9-15.
- [34] 徐宗学, 孟翠玲, 巩同梁, 隋彩虹. 西藏自治区气温变化趋势分析. 自然资源学报, 2009, 24(1): 162-170.
- [35] 德庆措姆, 索朗旦巴. 西藏气候的初步分析. 西藏科技, 2002(8): 49-51.
- [36] 王圆圆, 扎西央宗. 利用条件植被指数评价西藏植被对气象干旱的响应. 应用气象学报, 2016, 27(4): 435-444.
- [37] Lu D L, Zhang G Q, Zhu J J, Wang G G, Zhu C Y, Yan Q L, Zhang J X. Early natural regeneration patterns of woody species within gaps in a temperate secondary forest. European Journal of Forest Research, 2019, 138(6): 991-1003.
- [38] 刘佳,同小娟,张劲松,孟平,李俊,郑宁.太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响.生态学报,2014,34(8):2118-2127.
- [39] Xu H J, Wang X P, Zhao C Y, Yang X M. Diverse responses of vegetation growth to meteorological drought across climate zones and land biomes in Northern China from 1981 to 2014. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 262: 1-13.
- [40] 孙玉军, 张俊, 韩爱惠, 王雪军, 王新杰. 兴安落叶松(Larix gmelini) 幼中龄林的生物量与碳汇功能. 生态学报, 2007, 27(5): 1756-1762.
- [41] 何瑞霞,金会军,吕兰芝,于少鹏,常晓丽,杨思忠,王绍令,孙广友.东北北部冻土退化与寒区生态环境变化.冰川冻土,2009,31 (3):525-531.
- [42] 朱教君,张秋良,王安志,王传宽,于立忠,于大炮,张全智,闫巧玲,郑兴波,王冰,周正虎,郝帅,张欣,宋立宁,郑晓,王兴昌,杨凯,全先 奎,高添,孙一荣,张金鑫.东北地区森林生态系统质量与功能提升对策建议.陆地生态系统与保护学报,2022,2(5):41-48.
- [43] 丁文成,宋大利,周卫.我国耕地质量主控因素及提升策略.植物营养与肥料学报,2024,30(08):1580-1594.
- [44] 常香玲. 华北平原不同土地利用方式下土壤饱和导水率特征及其影响因素. 节水灌溉, 2023(7): 28-33.
- [45] 涂又,姜亮亮,刘睿,肖作林,闵婕. 1982—2015 年中国植被 NDVI 时空变化特征及其驱动分析. 农业工程学报, 2021, 37(22): 75-84.