

2001—2022年天津市植被净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系

张颖¹, 黄执美², 孟伟庆³, 李洪远⁴, 袁雪松⁵, 杨菲¹, 王洪成¹

(1.天津大学 建筑学院, 天津 300072; 2.西南大学 地理科学学院, 重庆 400700; 3.天津师范大学 地理学部, 天津 300387; 4.南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 5.华东师范大学 地理科学学院, 上海 200241)

摘要: [目的] 定量分析植被生产力的变化规律及其对气候因子的响应情况, 为评估不同气候条件下的城市碳汇作用以及提升城市生态系统碳汇等提供科学参考。[方法] 基于 GEE(Google Earth Engine)对天津市 2001—2022 年植被净初级生产力(NPP)进行计算, 采用 Slope 趋势分析、F 检验、重心迁移模型、标准差椭圆模型等方法分析植被 NPP 时空变化格局, 采用多因素敏感性分析、相关系数评价等方法定量评估在温度、降水、风速变化下植被 NPP 的响应特征。[结果] ①天津市年均植被 NPP 呈波动性上升的趋势, 波动范围是 53.46~96.54 g/(m²·a)(以 C 计)。②天津市植被 NPP 北高南低、西高东低, 重心集中分布在中部区域, 2001—2022 年间重心逐步向南迁移。③天津市植被 NPP 对气候因子的响应具有明显滞后性, 对温度和降水响应的滞后期为 1 个月, 对风速响应的滞后期为 3 个月。[结论] 天津市 NPP 变化存在较大的时空异质性, 且受温度、降水、风速影响, 对气候因子响应的滞后效应在 1~3 个月。

关键词: 气候; 植被净初级生产力; 滞后性; 天津市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0278-10

中图分类号: X321, X826, Q148

文献参数: 张颖, 黄执美, 孟伟庆, 等. 2001—2022 年天津市植被净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 278-287. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.029; Zhang Ying, Huang Zhimei, Meng Weiqing, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation net primary production and its relationship with climate factors in Tianjin City from 2001 to 2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 278-287.

Spatial and Temporal Dynamics of Vegetation Net Primary Production and Its Relationship with Climate Factors in Tianjin City from 2001 to 2022

Zhang Ying¹, Huang Zhimei², Meng Weiqing³,

Li Hongyuan⁴, Yuan Xuesong⁵, Yang Fei¹, Wang Hongcheng¹

(1.School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072,

China; 2.School of Geography Sciences, Southwest University, Chongqing

400700, China; 3.Faculty of Geography, Tianjin Normal University, Tianjin

300387, China; 4.School of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin

300350, China; 5.School of Geography Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: [Objective] The changes of vegetation net primary production (NPP) and its response to climate factors were quantitatively analyzed to provide scientific reference for assessing the role of urban carbon sequestration under different climate conditions and improving urban ecosystem carbon sequestration. [Methods] Based on GEE (Google Earth Engine), the NPP of Tianjin City during 2001—2022 was calculated, and the spatial and temporal variation pattern of NPP was analyzed by Slope trend analysis, F-test, barycentric migration model, standard deviation ellipse model, and other methods. Multi-factor sensitivity analysis and correlation coefficient evaluation were used to quantitatively evaluate the NPP response characteristics under temperature, precipitation, and wind-speed changes. [Results] ① The average

收稿日期: 2024-06-11

修回日期: 2024-09-06

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“三生空间演化博弈下的韧性生态空间仿真优化配置与分类管控机制”(41971249)

第一作者: 张颖(1997—), 女(汉族), 山西省汾阳市人, 博士研究生, 研究方向为城市生态和可持续发展。Email: sxzy0429@163.com。

通信作者: 王洪成(1965—), 男(汉族), 吉林省通化市人, 教授, 主要从事低碳园林与城市景观设计方面的研究。Email: hongcheng_wang_tju@163.com。

annual vegetation NPP in Tianjin City showed an increasing trend of fluctuation, and the fluctuation range was 53.46—96.54 g/(m²·a) (calculated by C); ② The vegetation NPP of Tianjin City is higher in the north and lower in the south, and higher in the west and lower in the east. The center of gravity is concentrated in the central region, and it gradually moved to the south during 2001—2022. ③ The response of vegetation NPP to climate factors in Tianjin City has a significant lag time of 1 month for temperature and precipitation and 3 months for wind speed. [Conclusion] The variation of NPP in Tianjin City has great spatiotemporal heterogeneity and is affected by temperature, precipitation, and wind speed, with a lag effect of 1—3 months in response to climate factors.

Keywords: climate; vegetation net primary production (NPP); lag; Tianjin City

植被净初级生产力(net primary production, NPP)指的是植被固定的有机物减去植被自身生长呼吸消耗所剩余的物质,是量化植被固定 CO₂ 能力的指标,反映了植被的生产能力,对于评估生态系统碳汇以及可持续程度具有重要意义。全球气候变化背景下,气温持续上升^[1]、降水变幅显著^[2]、大风天气频繁^[3],极端事件发生频率增加^[4],这些因素影响着植被的生长,进而影响 NPP。高温、干旱作用于植物叶片、根系等,直接影响植物的光合以及呼吸作用,极端降水通过影响土壤状态来间接影响植被 NPP,极端大风事件则通过影响大气碳通量来间接作用于植被 NPP。然而,不是所有长期以及瞬时的气候变化都会使城市植被 NPP 产生即时响应,因为植被在应对气候变化时,会通过自我调节来产生一定的抵抗力,以维持原本的系统稳定性^[5-6],直到超过其承受阈值,才会减弱甚至失去维持生产力稳定的能力,导致植被 NPP 发生剧烈变化。

目前的研究主要采用模型分析、直接计算等方法对不同生态系统类型的 NPP 进行了分析,如刘健等^[7]对内蒙古高原内陆河流域植被 NPP 进行计算,并分析了其与降水和气温之间的关系;肖强松等^[8]探究了河南省耕地生产力的变化及影响因素;王志鹏等^[9]对毛乌素沙地植被 NPP 时空格局及其驱动因素进行了研究。由于气候变化将持续进行,越来越多的研究开始关注各类生态系统的植被 NPP 动态与气候变化的关系,尤其是植物在气候因子变化下的响应^[10]。大多数研究表明,当前气候变化背景下,植被 NPP 整体呈现在波动中不断增长的趋势^[11],存在着地域以及季节差异。Li Xinxin 等^[12]的研究发现,气候变暖使得北亚热带森林在 2002 至 2017 年间光合作用期提前了 6.8 d,且南方季风常绿林中光合作用期的主要气候影响因素是降水。Xie Yingying 等^[13]的研究表明,寒冷、霜冻和潮湿以及高热条件会诱发美国落叶林群落的早期休眠,而中度的热浪和干旱胁迫会延迟休眠。当前研究大多以温度和降水等气候因子为主,探讨一定时间范围内植被 NPP 的响应,缺少对风

速变化下植被 NPP 变化的研究以及对时滞性的量化。

目前已有研究对天津市气温、降水等气候的时空变化进行了关注^[14],但对于这些气候因素是如何影响该区域植被 NPP 以及植被是如何响应的,相关的研究还比较少。因此,本文以天津市为研究范围,通过对 2001—2022 年植被 NPP 分布格局及其与气候变化要素的关联研究,尝试探讨分析气候对城市植被 NPP 的影响以及植被对气候变化的响应。以期理解气候变化对大都市地区植被的影响提供科学支持,另外为城市绿地和生态基础设施应对气候变化和科学决策提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

天津市是中国北方重要的港口城市,也是京津冀城市群的主要核心城市(图 1)。全市总面积 11 966.45 km²,根据天津市统计年鉴数据,2023 年全市常住人口为 1.39×10⁷ 人。

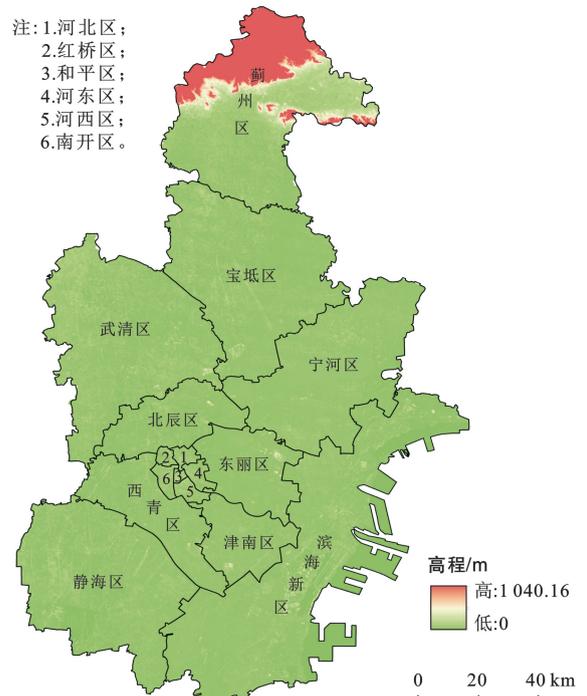


图 1 天津市地形与行政区划图

Fig.1 Topography and administrative division map of Tianjin City

天津市地处欧亚大陆中纬度东部沿海区域,地势以平原为主,约占 93%,北部有低山丘陵,海拔自北向南呈下降趋势,地处北温带,主要受季风环流的影响,是东亚季风盛行的地区,呈暖温带季风性气候。根据气象数据网的统计结果,2023 年天津市年平均气温为 14℃,年平均降水量在 360~970 mm 之间。自 1961 年以来,天津每 10 a 上升气温达到 0.38℃^[15],城市热岛效应明显^[16],超过了全国以及全球平均水平,且异常增温现象显著^[17]。例如,2023 年 6 月 22 日,天津市最高气温突破历史最高,达到 41.5℃,为 72 a 来最高。近年来,天津市极端事件发生频率增

加。2012 年 7 月 21 日,2016 年 7 月 20 日,2018 年 7 月 16 日发生了极端暴雨事件。2023 年 7 月 28 日台风“杜苏芮”引发罕见暴雨洪涝。2018 年 7 月 24 日,天津市受台风影响发生了八级大风事件。

1.2 数据来源

研究所需数据包括气候因子数据(气温、降水、风速等)及影像数据(表 1)。气候数据来源于气象数据中心,所缺数据采用空间插值方法进行处理。影像数据以及 NPP 数据可通过 GEE 平台合成处理与下载,包括 NPP 年值以及 GPP(gross primary production, GPP)月值数据,数据分辨率为 500 m。

表 1 研究数据类型及来源

Table 1 Research data types and sources

数据类型	数据名称	数据集名称	单位	来源
气候数据	温度	average month temperature	℃	气象数据中心(https://data.cma.cn/)
	降水	average month precipitation	mm	
	风速	average month maximum wind speed	m/s	
影像数据	NPP	MOD17A3HGF	g/(m ² ·a)(以 C 计)	GEE 数据集(https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgf061/)
	GPP	MOD17A2H	g/(m ² ·a)(以 C 计)	

2 研究方法

2.1 NPP 计算

本研究在 GEE 平台进行数据处理,年度 NPP 数据来源于 MOD17A3HGF NPP 数据集,月度 NPP 数据融合 MOD17A2H GPP 数据集进行计算。

2.2 NPP 时空分析

本文采用一元线性回归分析方法和最小二乘法逐像元拟合近 22 a 间遥感影像每个栅格 NPP 的斜率(slope),得到多年 NPP 的变化趋势,综合分析天津市多年 NPP 变化的方向和速率,依据 slope 的正负值判断 NPP 的增长与减少态势。采用 F 检验方法对显著性进行判断,将其分为显著与不显著两类,结合增长与减少进行合并处理^[18],计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (1)$$

式中: i 表示第 i 年; y_i 为第 x_i 年的 NPP 值。

NPP 时空变化趋势运用重心迁移模型以及标准差椭圆模型进行分析^[19],分别计算 2001—2022 年逐年 NPP 重心位置,并绘制 2001,2022 年标准差椭圆以及 2001,2004,2007,2010,2013,2016,2019,2022 年重心迁移轨迹。重心坐标计算公式为:

$$X_i = \frac{\sum_{j=1}^n (A_{ji} \times X_{ji})}{\sum_{j=1}^n A_{ji}} \quad (2)$$

$$Y_i = \frac{\sum_{j=1}^n (A_{ji} \times Y_{ji})}{\sum_{j=1}^n A_{ji}} \quad (3)$$

式中: X_i, Y_i 分别为第 i 年 NPP 分布重心的经纬度坐标; A_{ji} 为第 i 年像元 j 处的 NPP 值; X_{ji}, Y_{ji} 分别为第 i 年像元 j 的中心经纬度坐标。

2.3 影响因子分析

由于植被对气候变化的响应需要一定时间,因此探讨气候因子对 NPP 的滞后效应,即滞后性。首先进行因子分析,采用 KMO 和巴特利特检验进行评估,KMO 值大于 0.5 且巴特利特检验小于 0.05 表明数据适合因子分析。然后进行滞后性分析,滞后性定义为城市 NPP 对不同气候因子变化响应的的时间,通过滞后相关系数来表示。滞后相关系数采用 Pearson 相关性分析得出。在 2001—2022 年间,计算逐月 NPP 与滞后时间(同期,1,2,3 个月)之间的相关系数,并将相关系数最大值所在时间定义为滞后时间。滞后时间 T 为:

$$T = \max\{|r_0, r_1 \cdots r_x|\} \quad (4)$$

式中: T 为滞后时间; r_x 表示滞后 x 个月 NPP 与气候因子的相关系数。

为了便于比较 22 a 时序下的 NPP 及各气候因子变化趋势,对各值进行 min—max 归一化处理,采用离差标准化处理,即通过对原数值的线性变化来将结果映射到 $[0, 1]$ 区间范围内。变换公式为:

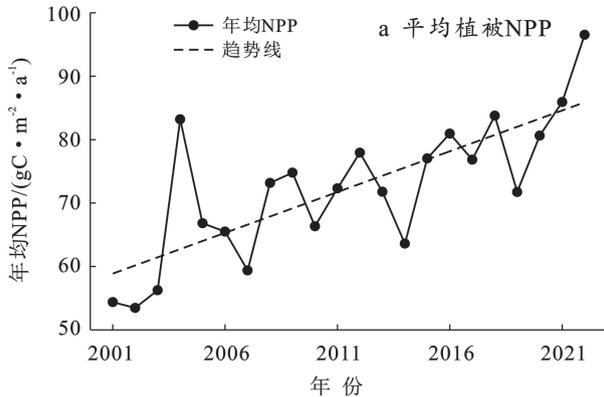
$$J = (B - B_{\min}) / (B_{\max} - B_{\min}) \quad (5)$$

式中: B 为各月的原数值; B_{\min} 为时序下原样本数值的最小值; B_{\max} 为时序下原样本数值的最大值; J 为变换后的数值。

3 结果

3.1 NPP 时空格局动态

3.1.1 天津市年均 NPP 变化 对 2001—2022 年 NPP 年平均值,结合 NPP 值像元分布情况即面积所



占比例情况进行趋势分析(见图 2)。植被 NPP 中值区分布最广,70~80 g 的面积占 26.56%,80~90 g 的面积占 24.90%,60~70 g 的面积占 23.99%。天津市年均 NPP 整体呈波动上升趋势,波动范围是 53.46~96.54 g/(m²·a)(以 C 计)(2002,2022 年),因为 2022 年冬季较为温暖,而植物生长季期间温度较低,且与降水搭配较好,所以植被 NPP 较高。整体趋势来讲,2019 年后持续增加,总体在以 1.95 g/(m²·a)(以 C 计)的趋势增长。

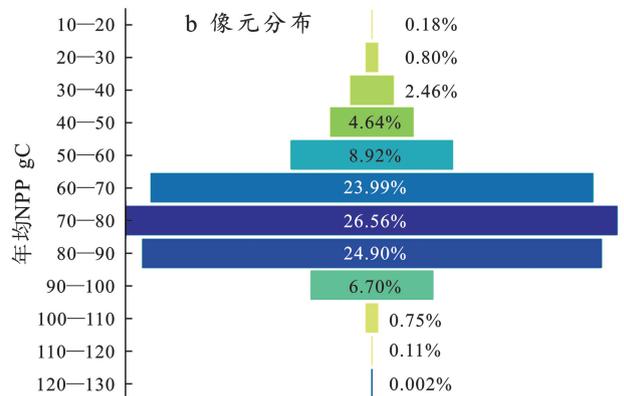


图 2 天津市 2001—2022 年平均植被 NPP 变化及像元空间分布情况

Fig.2 Spatial pattern of pixel distribution and annual vegetation NPP changes in Tianjin City from 2001 to 2022

3.1.2 天津市 NPP 空间变化 通过逐像元方法分析 2001—2022 年天津市植被 NPP 的变化斜率(k),得到变化趋势,并采用 F 检验的方法综合分析多年 NPP 变化的方向、速率及显著性(见图 3)。可以看出天津市植被 NPP 变化特征明显,具有较强的东西差异性。其中,不显著减少的区域占 0.12%,不显著增加的区域占 0.10%,显著减少的区域占 37.95%,显著增加的区域占 61.83%,整体上增加的区域大于减少的区域,由此可以看出天津市 NPP 状况有所好转,且以天津西部为主。东部沿海区域由于发展进程加快,受人工干扰大,因此 NPP 大多为显著减少。此外,近 22 a 来天津市 NPP 的时空分布特征整体呈现较大的空间异质性,北高南低、西高东低,说明西北部植被覆盖程度以及植被生长情况整体较好。NPP 高值区集中分布于武清区北部、宝坻区、蓟州区以及滨海新区西南部。中心城区大多为 NPP 低值区,因为该区域人口密集,建筑用地占比大,植被数量少且一直受到了较大的人类活动影响,随着城市的高密度化发展,绿化缩减且斑块破碎,加上城市小气候及空气污染等影响,一定程度上阻碍了植被生长,致使该区域 NPP 持续较低。研究区 NPP 水平整体上表现为增长,且呈增长趋势的范围大于减少趋势的范围,说明 2001 年以来天津市绿化状况得到了明显改善。

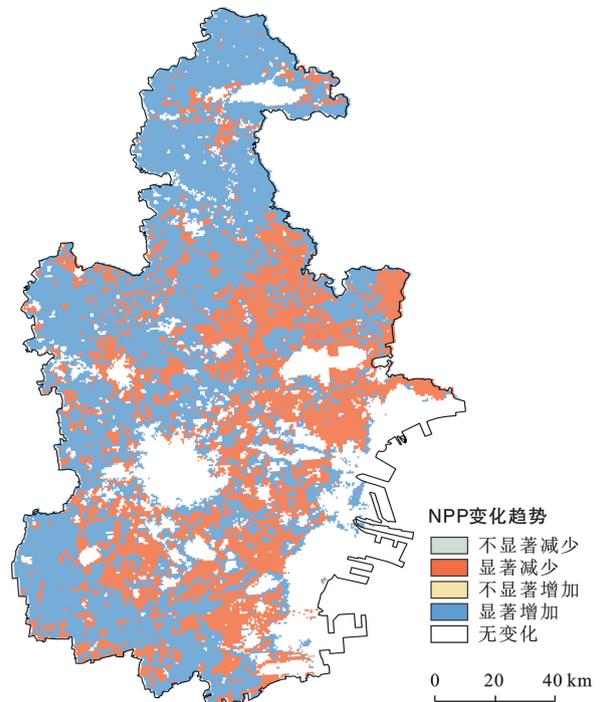


图 3 2001—2022 年天津市植被 NPP 变化趋势

Fig.3 Trends of vegetation NPP change in Tianjin City from 2001 to 2022

对天津市 2001—2022 年 NPP 重心进行逐年计算,以分析其时空变化的方向及轨迹,为了便于比较,以 2 a 为间隔进行重心轨迹分析(见图 4)。天津市

NPP 重心较为集中地分布在中部偏东北方向。多年以来,重心逐步向南迁移,表明南部 NPP 变化幅度高于北部地区。具体而言,重心从 2001 年向南变化,2004—2007 年向北迁移,随之向南迁移,2016—2019 年向北迁移,而后向南迁移。由 2001 及 2022 年标准差椭圆可以看出,2001 年植被 NPP 分布向心力较大,2022 年则离散性较强,表明植被 NPP 变化的方向趋势有所减弱,即分布逐渐均匀。结合图 4 可知,高值区呈现缩减趋势,低值区变幅极不明显,中值区范围逐步扩散。由此可见,自 2001 年以来天津市植被 NPP 格局差异逐渐缩小,植被 NPP 极值区域逐渐不明显。

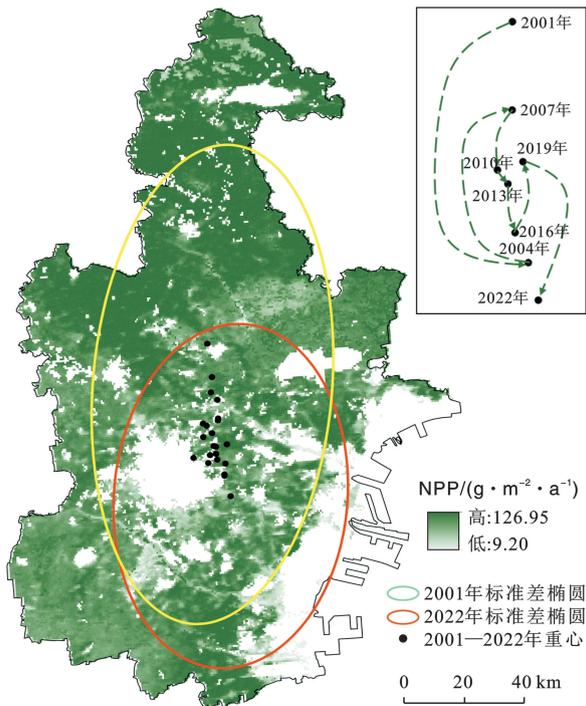


图 4 2001—2022 年天津市植被 NPP 重心的演变轨迹

Fig.4 Evolution trajectories of vegetation NPP gravity center in Tianjin City from 2001 to 2022

3.2 植被 NPP 与气候因子的关系

3.2.1 植被 NPP 对气候因子变化的敏感性 为了确保结果的准确性,增加样本量,通过对 2001—2022 年气候因子与 NPP 逐月值的线性回归分析及多元线性回归敏感系数的计算来评估植被 NPP 时空变化范围的不确定性。多元线性回归结果显示自变量与因变量存在显著的线性关系,相关系数 R 为 0.922,决定系数 R^2 为 0.851,自变量可以解释因变量 85.1% 的变异性。回归方程显著性检验结果中, $\text{sig} < 0.05$,说明回归方程有效。得到非标准化回归方程为:

$$Y = 2.197 + 0.406X_1 + 0.428X_2 - 0.252X_3 \quad (6)$$

去除单位的影响,对所有变量进行无量纲处理后的标准化方程为:

$$Y = 0.786X_1 + 0.175X_2 - 0.092X_3 \quad (7)$$

式中: X_1, X_2, X_3 分别为温度、降水及风速因子; Y 为 NPP。

式(7)的 $F = 494.851, p < 0.001$,说明温度、降水及风速因子对植被 NPP 存在影响关系,在 1% 水平上呈现显著性。结果表明,3 个因子的影响程度顺序由大到小为温度、降水、风速,即温度变化 1 °C 时,植被 NPP 对应变化范围是 $\pm 0.786 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,降水变化 1 mm 时,植被 NPP 对应变化范围是 $\pm 0.175 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,风速变化 1 m/s 时,植被 NPP 对应变化范围是 $0.092 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

3.2.2 植被 NPP 对气候因子变化的滞后性 为了便于比较,对各变量进行归一化处理,在时间序列下,对 NPP、温度、降水以及风速的变化情况进行趋势比较(图 5)。对 4 组数据进行 KMO 和巴特利特检验,得到 KMO 值为 0.66,处于 0~1 之间,且较接近于 1。这表明 4 组变量之间的趋势存在一定的共性。 p 值为 0.00,小于 0.05,说明变量之间的相关性结构较好,趋势规律性较强。具体而言,2001—2022 年间天津市植被 NPP 变化整体平稳,NPP 平均增长速率为 $0.63 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,整体变化幅度较小,但是呈现出了一定的季节性特征。温度年变化趋势均呈现单峰值特征,各月最低温值均出现于 2012 年之前,各月最高温大多出现于 2013—2022 年间,尤其是 2018 和 2019 年,21 世纪以来月最低温为 2010 年 1 月 $-5.20 \text{ }^\circ\text{C}$,月最高温为 2018 年 7 月 $28.90 \text{ }^\circ\text{C}$ 。降水年变化趋势差异较大,各年峰值情况不同,但大多集中于 6—9 月。21 世纪以来月均降水最多为 2021 年 7 月,降水量为 12.47 mm,风速的年际变化差异较小,峰值出现于春、冬季,其中最大值大多在 4 月,最小值在 8 月。2011 年风速普遍较大,42% 的月最大风速发生在 2011 年。风速最大值是 2010 年 4 月,月均风速为 16.13 m/s。2002 年 12 月风速最小,月均风速为 5.19 m/s。

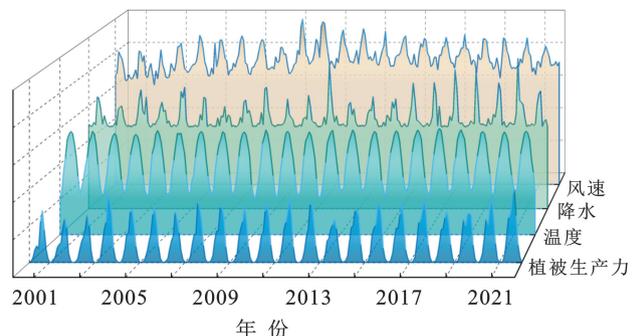


图 5 2001—2021 年天津市植被 NPP、温度、降水量、风速变化趋势
Fig.5 Trends of vegetation NPP, temperature, precipitation and wind speed changes in Tianjin City from 2001 to 2021

为了分析不同气候要素对城市植被 NPP 影响的效应,分别对温度、降水、风速进行滞后 0,1,2,3 个月的相关性分析(见图 6)。通过图 6 可以看出,天津市植被 NPP 与温度的相关性在 0.03~0.96 之间,其中同期相关性在 0.81~0.96 之间,滞后 1 个月相关性在 0.79~0.88 之间,滞后两个月相关性在 0.49~0.62

之间,滞后三个月相关性在 0.03~0.25 之间。通过相关性比较发现,植被 NPP 与对温度的响应在滞后 3 个月时呈现弱相关性,在同期情况下相关性最大,在滞后 1 个月时相关性较好,说明温度对植被 NPP 影响的滞后性不超过 2 个月,大多滞后期在 1 个月以内。

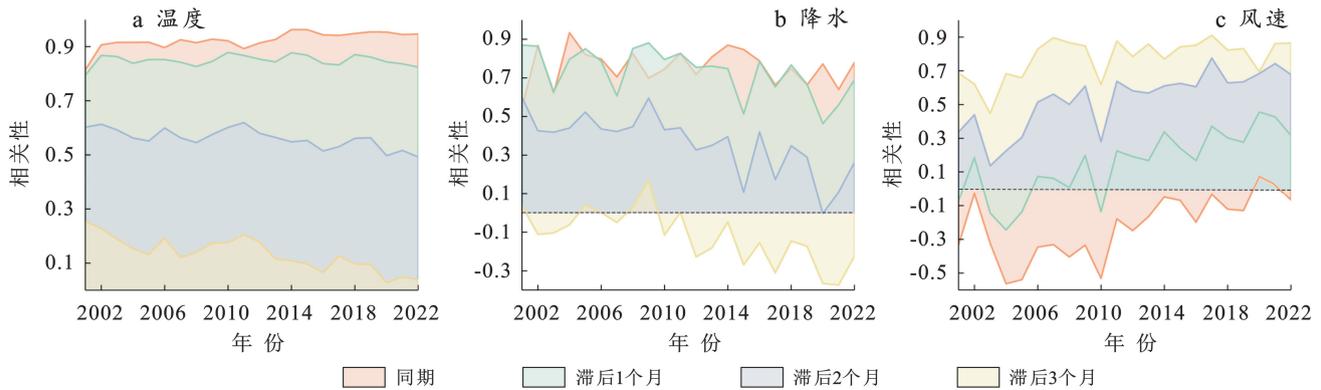


图 6 天津市植被 NPP 对温度、降水、风速变化响应滞后性

Fig.6 Response lags of vegetation NPP to temperature, precipitation, wind speed in Tianjin City

植被 NPP 与降水的平均相关系数绝对值在 0~0.93 之间,其中同期相关性在 0.54~0.93 之间,滞后 1 个月相关性在 0.46~0.88 之间,滞后 2 个月相关性在 0~0.60 之间,滞后 3 个月相关性在 0~0.37 之间。与温度不同的是,NPP 与降水变化的相关性存在正负两种情况。植被 NPP 与同期及滞后 1 个月的相关性均为正相关,滞后 2 个月开始出现少量负值,滞后 3 个月时,呈负相关的时间占 73%,这说明 NPP 与降水之间存在一定程度的联系,且在 3 个月后将由正相关转为负相关,即降水对植被 NPP 的作用由促进转为抑制。

植被 NPP 与风速的平均相关系数绝对值在 0~0.91 之间,其中同期相关性绝对值较低,在 0.03~

0.56 之间,滞后 1 个月相关性弱,相关系数绝对值在 0.17~0.32 之间,滞后两个月相关性在 0.14~0.78 之间,滞后 3 个月相关性较大,在 0.45~0.91 之间。同期相关性基本为正相关,滞后 1 个月时,植被 NPP 与风速 77% 为正相关,滞后 2~3 个月均为正相关。

将多年各月的植被 NPP 与气候均值进行相关性分析,结果如表 2 所示。植被 NPP 对温度和降水的响应作用时间较快,在 1 个月以内。植被 NPP 对风速的响应滞后期为 2 个月以上,说明植被生长对极端风速的响应需要一定的时间,滞后期可达 3 个月。此外,降水与滞后 3 个月的植被 NPP 相关性由正转负,说明降水对植物的生长作用出现一定的抑制效应。

表 2 天津市植被 NPP 对不同气候因子响应滞后系数

Table 2 Response lag coefficients of vegetation NPP to different climate factors in Tianjin City

滞后期	温度	降水	风速	滞后期	温度	降水	风速
同期	0.939**	0.882**	-0.251	滞后 2 个月	0.567	0.396	0.609*
滞后 1 个月	0.860**	0.823**	0.180	滞后 3 个月	0.132	-0.153	0.897**

注: * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著; ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

4 讨论

4.1 植被 NPP 对气候因子响应的机制探讨

天津市植被 NPP 呈现增长趋势,与其生态保护政策以及生态屏障建设有关。由于气候因子对植被的影响极其复杂,因此大多研究通过植被生产力来反映,且许多研究均表明其存在一定的滞后效应^[20]。通

过与已有研究进行对比,以佐证本研究结果的可靠性并探讨 NPP 对气候因子响应的机制。

(1) 在温度方面,大多研究表明,温度对植被指数的影响为显著正相关^[21]。Wu Donghai 等^[22]研究发现亚洲中高纬度地区植被对气温响应的滞后期为 1 个月,张蕾等^[23]研究发现,长江流域植被 NPP 受高温干旱影响出现明显下降。李霞等^[24]研究发现,温度

对植被指数的影响存在明显的滞后效应,滞后时间为 0~1 个月。本研究得到了相似的结论,植被 NPP 对温度变化响应的滞后时间为 1 个月以内。温度的升高将会加快相关化学反应的速率,因此温度的升高一定程度上会增加植被 NPP。然而,当温度显著升高时候,会加速土壤水分的蒸发,导致植物生长受限,进而影响植被 NPP。关于阿勒泰地区^[25]以及额尔齐斯河流域^[26]植被对温度响应滞后期的研究表明,滞后时间为 2 个月以及 1.7 个月,滞后时间较本研究晚,主要是因为当地温度较低,土壤保温效果较差,积温累计时间较长。

(2) 在降水影响方面,有研究发现,亚洲中高纬度地区植被对于降水响应的滞后期为 1~2 个月^[22],高滢等^[27]认为,植被指数对极端降水的滞后时间为 2 个月,马云飞等^[28]研究表明,松辽流域 2001—2021 年植被叶面积指数与降水呈正相关,且较温度更为敏感,滞后效应为 0~1 个月,而三江源保护区草地覆盖度受降水影响较大,但是滞后效应不明显^[29]。从植被响应机制来看,首先植被生长更依靠根部吸水,而降水进入土壤再被植物根系所吸收并不是即时的,此外,对于降水较少的区域,植被会有相应的适应性表现来面对这种气候特征,以免受到较大的影响,且土质也会对其产生一定的阻碍作用,水土流失导致其生长特性对降水的响应时间有所延迟。本研究中降水

滞后性结果较南方更长,是因为森林复杂的垂直结构增强了其对降水胁迫的抵抗性,水分更容易截留而后逐渐释放,造成累积效应,而天津市缺少这样的复层结构,因此滞后期较短,且叶片面积较之小,水分传输效率较低,因此响应时间更久。

(3) 在风速影响方面,由于风速超过 10.8 m/s 即为大风,天津市大风概率较大,2001—2021 年近 30% 的月平均风速超过大风阈值,因此本研究对此滞后性进行了分析。适当的风速有利于促进植物周边空气流通,改善 CO₂ 的供应状况,提高光能利用率,促进植物、大气、土壤之间的物质与能量循环,进而促进植物的光合呼吸作用,以达到改变植被 NPP 的结果,即风速对植被 NPP 具有直接影响。但当风速超过一定限度时,叶片蒸腾旺盛,气孔张开度减小,导致光合作用强度降低,大风的出现会破坏植物组织,甚至造成植被倒伏,甚至致其死亡^[30]。

4.2 NPP 对极端事件响应的特征探讨

气候因子的变化不只是长期特征,还存在一些瞬时变化的情况,如极端事件的发生。本研究结合历史灾害灾情统计数据,筛选 2001—2022 年天津市的气象灾害作为极端事件进行突变情况分析,4 次极端事件由天津市自然综合风险普查小组专家技术组筛选(如表 3 所示)。

表 3 2001—2022 年天津市极端事件

Table 3 Extreme events in Tianjin City from 2001 to 2022

极端事件类型	开始时间	结束时间	产生原因
洪涝灾害	20050808	20050809	2005 年台风麦莎致北京连续降雨,但规模都比较小
洪涝灾害	20120721	20120722	2012 年京津冀“7·21”暴雨洪涝灾害
洪涝灾害	20160718	20160721	2016 年 7 月中下旬华北地区暴雨洪涝灾害
洪涝灾害	20210729	20210730	2021 年台风“烟花”致天津市出现强降雨。全市平均降水量 131.3 mm,最大降水量 234.1 mm

结合历史灾害灾情数据,对 2001—2022 年间天津市极端事件发生期间城市植被 NPP 变化进行研究,结果如图 7 所示。4 个显著极端事件期间,植被 NPP 增长出现明显拐点,增长速率相较无极端事件年份发生显著变化。2012 年 7 月,NPP 增速逆势上升,由 2.80 增长到 4.14,2005,2016 和 2021 年 7 月,植被 NPP 增速变缓,表明大幅降水、强风等极端事件对植物生长产生了一定的影响。

由于极端事件发生概率极小,因此缺少样本量,目前无法对极端事件与植被 NPP 变化之间的滞后效应进行更精确的量化分析。

4.3 研究不足与展望

(1) 植被 NPP 的响应机制有待补充和完善。气候变化作用于生态系统,改变植被生产力,进而改变

区域碳通量。当前大量研究均表明,气候变化,尤其是极端事件的发生对城市植被产生了不同程度的胁迫。然而,胁迫作用的正负效应及其强度在定量识别方面还未有足够的研究,在滞后效应的具体时效问题上还存在较大不确定性,为城市植被响应气候变化的研究以及未来城市生态系统管理带来了较大的挑战。因此未来研究需要对气候变化下植被响应机制进行讨论,构建气候变化背景下基于多源数据的多时空尺度城市生态系统植被生产力的准确量化与未来情景预测框架。

此外,由于人类活动的干预也会对城市植被响应机制产生极大影响,使滞后与积累效应更为复杂和难以估计,因此需要构建更为完整的自然和社会集成体系(图 8)。

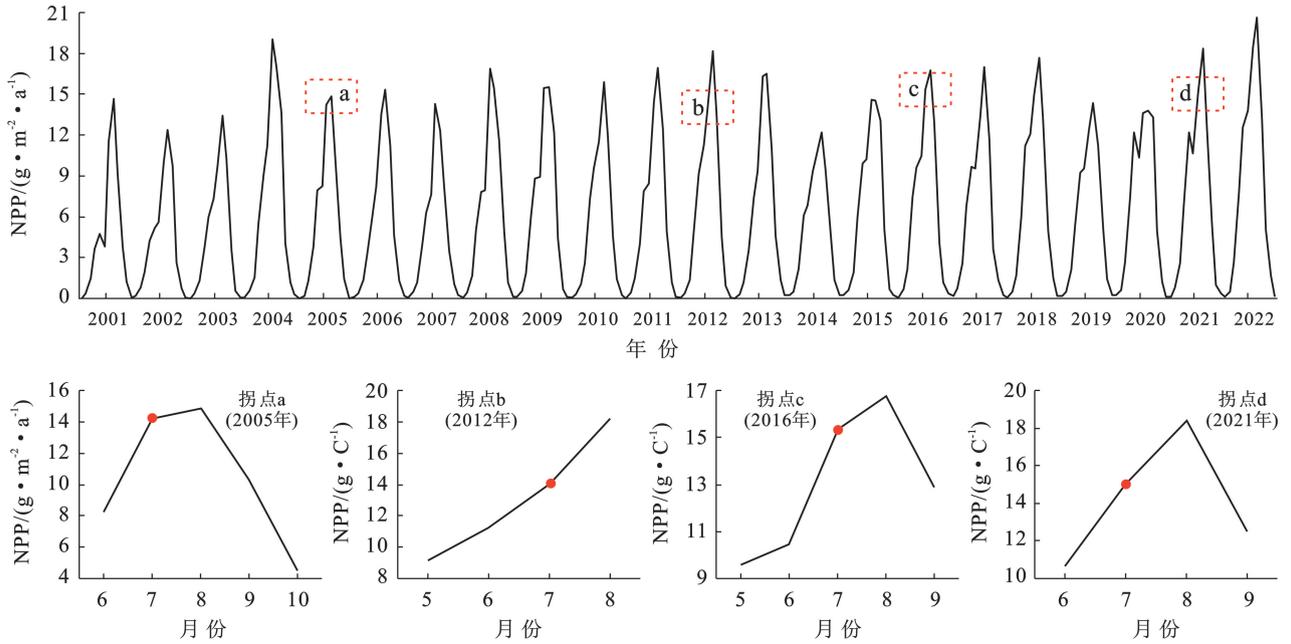


图 7 极端事件对天津市植被 NPP 影响拐点

Fig.7 Inflection point of extreme events on vegetation NPP in Tianjin City

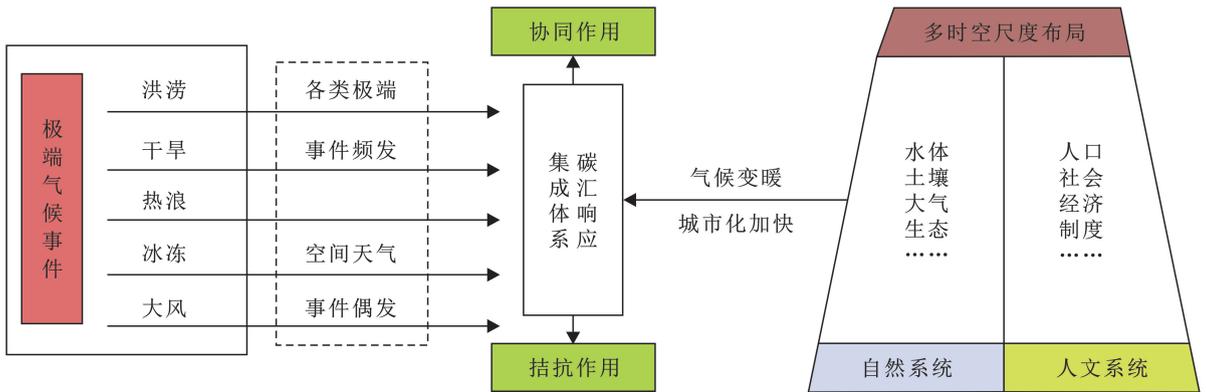


图 8 植被生产力响应自然社会集成体系

Fig.8 Natural social integration systems of vegetation productivity response

(2) 空间敏感性分析有待进一步扩展。本研究未综合考虑各类气候变化之间的关系,且缺乏对人文系统的耦合,导致滞后性结果不够精确。由于天津市区域面积有限,气候差异较小,因此本研究没有考虑空间敏感性,未来研究可以分析在不同的气候情景下植被 NPP 的变化阈值,空间敏感区的识别也有待扩展。

(3) 研究时段及精度有待进一步深入。本研究识别了天津市植被 NPP 对气候因子响应的表现,为评估不同气候因子对城市植被 NPP 的影响提供了研究范例,然而,在研究时段和精度方面还有待深入,未来研究应该采用更长的时间序列、更精细的数据和模拟方法。

5 结论

本研究在 GEE 平台进行植被 NPP 计算,采用相

关性分析等方法对不同滞后期内植被 NPP 响应程度进行研究,在 500 m 精度下分析了天津市 2001—2022 年植被 NPP 时空变化格局及其对气候因子的响应表现,讨论了植被 NPP 受气候影响的机制。得到以下结论。

(1) 天津市年均植被 NPP 整体呈波动上升的趋势,波动范围是 53.46~96.54 g/(m²·a)(以 C 计),呈现较大的空间异质性,整体上北高南低、西高东低。

(2) 天津市植被 NPP 重心较为集中地分布在中部偏东北方向,2001—2022 年间重心逐步向南迁移,南部 NPP 变化幅度高于北部地区。

(3) 天津市城市植被 NPP 受温度、降水、风速影响,且影响程度递减,具有较强滞后效应。温度及降水对植被 NPP 影响的滞后性不超过 2 个月,大多滞后期在 1 个月以内,风速对植被 NPP 影响的滞后性

达 3 个月,降水对植被 NPP 的影响在 3 个月内由正转负。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Summary for policymakers [M]// Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 2013.
- [2] Ombadi M, Risser M D, Rhoades A M, et al. A warming-induced reduction in snow fraction amplifies rainfall extremes [J]. *Nature*, 2023,619(7969):305-310.
- [3] Jiang Yingsha, Miao Yunfa, Zhao Yongtao, et al. Extreme-wind events in China in the past 50 years and their impacts on sandstorm variations [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023,10:1058275.
- [4] Stott P. How climate change affects extreme weather events [J]. *Science*, 2016,352(6293):1517-1518.
- [5] Li Peilin, Hu Zhongmin, Liu Yongwen. Shift in the trend of browning in Southwestern Tibetan Plateau in the past two decades [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020,287:107950.
- [6] Liu Dan, Wang Tao, Peñuelas J, et al. Drought resistance enhanced by tree species diversity in global forests [J]. *Nature Geoscience*, 2022,15:800-804.
- [7] 刘健,张泽中,冯凯,等.内蒙古高原内陆河流域植被净初级生产力时空演变特征及驱动因素[J/OL].生态学报,2024(2024-08-23).<https://link.cnki.net/irid/11.2031.0.20240821.1126.004>.
Liu Jian, Zhang Zezhong, Feng Kai, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in the Inland River basin of the Inner Mongolia Plateau [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024 (2024-08-23). <https://link.cnki.net/irid/11.2031.0.20240821.1126.004>.
- [8] 肖强松,王昱之.粮食主产区(河南省)耕地 NPP 时空分异特征及影响因素分析[J/OL].环境科学,2024(2024-08-20).<https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406053>.
Xiao Qiangsong, Wang Yuzhi. Spatial-temporal differentiation characteristics and influencing factors of cultivated land NPP in major grain producing areas (Henan Province) [J/OL]. *Environmental Science*, 2024 (2024-08-20). <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406053>.
- [9] McDowell N G, Sapes G, Pivovarov A, et al. Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022,3:294-308.
- [10] Forzieri G, Dakos V, McDowell N G, et al. Emerging signals of declining forest resilience under climate change [J]. *Nature*, 2022,608(7923):534-539.
- [11] 高艳妮,于贵瑞,张黎,等.中国陆地生态系统净初级生产力变化特征:基于过程模型和遥感模型的评估结果[J].地理科学进展,2012,31(1):109-117.
Gao Yanni, Yu Guirui, Zhang Li, et al. The changes of net primary productivity in Chinese terrestrial ecosystem: Based on process and parameter models [J]. *Progress in Geography*, 2012,31(1):109-117.
- [12] Li Xinxi, Fu Y H, Chen Shouzhi, et al. Increasing importance of precipitation in spring phenology with decreasing latitudes in subtropical forest area in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021,304:108427.
- [13] Xie Yingying, Wang Xiaojing, Silander J A Jr. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015,112(44):13585-13590.
- [14] 李锐,郭义瑄,郭长城,等.近 60 年天津海岸带地区降水与气温的演变规律[J].天津师范大学学报(自然科学版),2020,40(5):44-53.
Li Rui, Guo Yixuan, Guo Changcheng, et al. Evolution of annual and spring precipitation and air temperature in Tianjin coastal zone in recent 60 years [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2020,40(5):44-53.
- [15] 徐灵芝,卜清军,许长义,等.天津沿海气候特征及灾害性天气影响[J].天津科技,2018,45(9):109-113.
Xu Lingzhi, Bu Qingjun, Xu Changyi, et al. Climatic characteristics and disastrous weather effects in Tianjin coastal area [J]. *Tianjin Science & Technology*, 2018,45(9):109-113.
- [16] 张良,白宇.应对气候变化城市空间敏感性分析及规划策略:以天津市为例[C]//中国城市规划学会,沈阳市人民政府.规划 60 年:成就与挑战——2016 中国城市规划年会论文集(07 城市生态规划).天津:天津市城市规划设计研究院;2016.
Zhang Liang, Bai Yu. Urban spatial sensitivity analysis and planning strategy to cope with climate change: A case study of Tianjin [C]// China Society of Urban Planning, Shenyang Municipal People's Government. 60 Years of Planning: Achievements and Challenges—Proceedings of the 2016 China Urban Planning Annual Conference (07 Urban Ecological Planning). Tianjin Urban Planning and Design Institute; 2016.
- [17] 司鹏,梁冬坡,陈凯华,等.城市化对天津近 60 年平均温

- 度和极端温度事件的增暖影响[J].气候与环境研究, 2021,26(2):142-154.
- Si Peng, Liang Dongpo, Chen Kaihua, et al. Urbanization effect on average and extreme temperature warming in Tianjin during the last 60 years [J]. Climatic and Environmental Research, 2021,26(2):142-154
- [18] 杨顺富,赵宇鸾,李秀彬,等.中南半岛喀斯特山区植被 NEP 的时空变化及驱动因素[J/OL].生态学报,2024 (2024-08-22). <https://link.cnki.net/urlid/11.2031.Q.20240821.1228.025>.
- Yang Shunfu, Zhao Yuluan, Li Xiubin, et al. Spatio-temporal variations and driving factors of vegetation NEP in karst mountainous areas of the Indochina Peninsula [J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2024(2024-08-22). <https://link.cnki.net/urlid/11.2031.Q.20240821.1228.025>.
- [19] 高芸,王婉婉,景晶.豫北地区长短历时极端降水重心迁移与变化趋势[J].环境工程,2023,41(增刊2):898-901.
- Gao Yun, Wang Wanwan, Jing Jing. Gravity center migration and change trend of extreme precipitation in long and short durations in Northern Henan [J]. Environmental Engineering, 2023,41(Suppl.2):898-901.
- [20] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle [J]. Nature, 2013,500(7462):287-295.
- [21] 刘健,申浩,王善琦,等.基于 AVHRR 和 MODIS 数据源的山东省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J].水土保持通报,2023,43(2):173-182.
- Liu Jian, Shen Hao, Wang Shanqi, et al. Temporal and spatial variation of vegetation cover and its response to extreme climate in Shandong Province based on AVHRR and MODIS data sources [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):173-182.
- [22] Wu Donghai, Zhao Xiang, Liang Shunlin, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. Global Change Biology, 2015,21(9):3520-3531.
- [23] 张蕾,钱拴,曹云,等.2022 年南方高温干旱特点及其对植被净初级生产力的影响[J].生态学杂志 43(7):2182-2188.
- Zhang Lei, Qian Shuan, Cao Yun, et al. Characteristics of heat and drought events across Southern China in 2022 and their impacts on vegetation net primary productivity [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(7):2182-2188.
- [24] 李霞,李晓兵,陈云浩,等.中国北方草原植被对气象因子的时滞响应[J].植物生态学报,2007,31(6):1054-1062.
- Li Xia, Li Xiaobing, Chen Yunhao, et al. Temporal responses of vegetation to climate variables in temperate steppe of Northern China [J]. Journal of Plant Ecology, 2007,31(6):1054-1062.
- [25] 黄豪奔,徐海量,林涛,等.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[J].生态学报,2022,42(7):2798-2809.
- Huang Haoben, Xu Hailiang, Lin Tao, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate change in the Altay Region of Xinjiang from 2001 to 2020 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(7):2798-2809.
- [26] 汪美宏,赵慧,吴晓兰,等.考虑气候时间效应的额尔齐斯河流域植被动态变化与驱动力量化[J/OL].生态学报,2024(2024-08-22). <https://link.cnki.net/urlid/11.2031.Q.20240821.1200.014>.
- Wang Meihong, Zhao Hui, Wu Xiaolan, et al. Vegetation dynamics and its driving force in the Irtysh River basin considering climatic temporal effects [J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2024(2024-08-22). <https://link.cnki.net/urlid/11.2031.Q.20240821.1200.014>.
- [27] 高滢,孙虎,徐崑尧,等.陕西省植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应[J].生态学报,2022,42(3):1022-1033.
- Gao Ying, Sun Hu, Xu Yinyao, et al. Temporal and spatial variation of vegetation cover and its response to extreme climate in Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(3):1022-1033.
- [28] 马云飞,何全军,张月维,等.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[J].生态学报,2024,44(5):2043-2056.
- Ma Yunfei, He Quanjun, Zhang Yuewei, et al. Influences of climate factors and human activities on vegetation leaf area index dynamics in the Songliao River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(5):2043-2056.
- [29] 张颖,章超斌,王钊齐,等.三江源 1982—2012 年草地植被覆盖度动态及其对气候变化的响应[J].草业科学,2017,34(10):1977-1990.
- Zhang Ying, Zhang Chaobin, Wang Zhaoqi, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland coverage in response to climate change from 1982 to 2012 in the Three Rivers Source Region, China [J]. Pratacultural Science, 2017,34(10):1977-1990.
- [30] 徐霞,成亚薇,江红蕾,等.风速变化对草原生态系统的影响研究进展[J].生态学报,2017,37(12):4289-4298.
- Xu Xia, Cheng Yawei, Jiang Honglei, et al. Research progress of the effects of wind speed change on grassland ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(12):4289-4298.