

# 白洋淀流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素

闫丰<sup>1,2</sup>, 李晨阳<sup>1</sup>, 鲁志雪<sup>1</sup>, 黄雪寒<sup>1</sup>, 庞娇<sup>3</sup>, 刘鑫<sup>3</sup>, 陈亚恒<sup>1,2</sup>

(1.河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071000;

2.河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071001; 3.河北农业大学 渤海学院, 河北 黄骅 061100)

**摘要:** [目的] 评估白洋淀流域长时间序列植被生长状况及驱动机制, 为进一步保护雄安新区生态环境质量提供理论支撑。[方法] 基于2007—2020年NASA MOD17A3H的NPP数据, 运用趋势分析、变异系数、Hurst指数、地理探测器等方法, 探究白洋淀流域植被NPP的时空分异、变化趋势及驱动因素。[结果] ①白洋淀流域植被年均NPP值在217.1~357.6 g/(m<sup>2</sup>·a)之间变化, 在空间上呈现西北部山区较高, 东南部平原区较低的分布规律; ②超过80%的研究区域植被NPP具有明显波动性, 其中西北山区和东南平原波动性最强; ③绝大部分植被NPP随年份呈增加趋势, 并且由东南至西北, 从不显著增加逐渐过渡到显著增加状态; ④研究区内, 西北部地区为Hurst指数小于0.5的反向持续性区域, 未来植被NPP可能会出现增加趋势减缓的问题, 西南地区为正向持续区, 未来变化趋势良好; ⑤研究区植被NPP空间分异的主导驱动因素为温度、人口、第三产业等, 双因子交互作用的影响力明显高于单因子, 其中降水和温度的交互作用最强。[结论] 2007—2020年, 白洋淀流域植被NPP逐渐增强, 温度虽是影响NPP空间分异的主要驱动因素, 但社会因素发挥的作用在逐渐增强。

**关键词:** 净初级生产力; 时空变化; 驱动因子; 白洋淀流域; 雄安新区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0345-09

中图分类号: TP79, Q948.15<sup>+6</sup>

**文献参数:** 闫丰, 李晨阳, 鲁志雪, 等. 白洋淀流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 345-353. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.035; Yan Feng, Li Chenyang, Lu Zhixue, et al. Spatial and temporal succession and driving factors of vegetation net primary productivity in Baiyangdian watershed [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 345-353.

## Spatial and Temporal Succession and Driving Factors of Vegetation Net Primary Productivity in Baiyangdian Watershed

Yan Feng<sup>1,2</sup>, Li Chenyang<sup>1</sup>, Lu Zhixue<sup>1</sup>, Huang Xuehan<sup>1</sup>, Pang Jiao<sup>3</sup>, Liu Xin<sup>3</sup>, Chen Yaheng<sup>1,2</sup>

(1.College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001,

China; 2.Key Laboratory for Farmland Eco-environment of Hebei Province, Baoding, Hebei

071001, China; 3.Bohai College, Hebei Agricultural University, Huanghua, Hebei 061100, China)

**Abstract:** [Objective] The long-term vegetation growth status and driving mechanism in the Baiyangdian watershed were assessed in order to provide theoretical support for further protection of the ecological environmental quality in the Xiongan New Area. [Methods] Based on the net primary productivity (NPP) data of NASA MOD17A3H from 2007 to 2020, we used trend analysis, coefficient of variation, Hurst index, and geographical detector to investigate the spatial and temporal variability of vegetation NPP, change trends, and driving factors in the Baiyangdian basin. [Results] ① The mean annual NPP values for vegetation in the Baiyangdian basin varied from 217.1 to 357.6 g/(m<sup>2</sup>·a), with a spatial distribution pattern of higher in the northwestern mountainous areas and lower in the southeastern plains; ② More than 80% of the vegetation NPP in the study area had obvious fluctuations, with the strongest fluctuations in the northwestern mountainous areas and the southeastern plains; ③ The vast majority of vegetation NPP tended to increase over the years, and gradually transitioned from a non-significant to a significant increase from

收稿日期: 2023-10-24

修回日期: 2024-01-14

资助项目: 河北省省属高等学校基本科研业务费项目“白洋淀上游流域植被覆盖时空格局演变及驱动机制研究”(KY2022062)

第一作者: 闫丰(1987—), 男(汉族), 河北省保定市人, 博士, 讲师, 主要从事生态遥感相关教学和科研工作。Email: yanfeng@hebau.edu.cn.

通信作者: 陈亚恒(1973—), 男(汉族), 河北省保定市人, 博士, 教授, 主要从事土地整治、土地资源利用等相关的教学和科研工作。Email: chenyaheng@126.com.

southeast to northwest; ④ Within the study area, the north-western region was a reverse persistence area with Hurst index less than 0.5. Future vegetation NPP may have the problem of slowing down the increasing trend. The southwestern region was a positive persistence area with a favorable trend of future changes; ⑤ The dominant drivers of vegetation NPP spatial differentiation in the study area were temperature, population, tertiary industry, etc. The influence of the two-factor interaction was significantly higher than that of a single factor, with the strongest interaction between precipitation and temperature. [Conclusions] During 2007—2020, the vegetation NPP in the Baiyangdian Basin has gradually increased. Although temperature was the main driving factor affecting the spatial differentiation of NPP, the role played by social factors has been gradually increasing.

**Keywords:** net primary productivity; temporal and spatial changes; driving factors; Baiyangdian basin; Xiong'an New Area

植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 是绿色植被在单位时间和面积内, 通过光合作用产生的有机物质总量中, 扣除自养呼吸后的剩余部分<sup>[1]</sup>。作为陆地生态系统关键组成部分, 植被在降低温室气体浓度、维持全球物质和能量循环, 以及对全球气候变化和碳平衡具有重要作用<sup>[2-3]</sup>。同时, 植被 NPP 是反映植物生长发育状况的主要指标, 可以直接体现植物种群的生产能力和生态效率<sup>[4]</sup>。关于植被 NPP 的研究开始于 19 世纪 80 年代<sup>[5]</sup>, 国内外学者利用不同的数据源, 对不同地区进行时空动态和气候影响因子的研究。Peng 等<sup>[6]</sup>分析了加拿大中部植被 NPP 分布特征, 指出与植被 NPP 变化密切相关的碳含量和气候变化等因素; 德国生态学家 Lieth 基于自然生态系统温度和降水量, 采用最小二乘法建立了全球初级生产模型<sup>[7]</sup>。刘恒等<sup>[8]</sup>采用 MOD17A3 资料数据, 全面分析了武陵山区植被 NPP 的时空动力特性和变化趋势, 首次明确提出总产量和净产量的概念和计算方法。夏冰等<sup>[9]</sup>采用最新生物属性调查表 (BPLUT) 和新版全球模型与融合室 (GMAO) 的日值气象数据对 NPP 数值进行模拟, 提高了 NPP 的估算精度。NOAA/AVHRR 和其他卫星全球数据的出现, 为全球监测陆地生态系统的时间变化提供了新的可能。Cramer 等人<sup>[10]</sup>通过对 17 个全球陆地生物地球化学模型与陆地生物圈净初级生产力 (NPP) 的年度和季节通量进行比较, 结果表明, 全球 NPP 的大格局及其与主要气候变量的关系在大部分地区一致。当前 NPP 估算主要有野外实测和模型模拟两种方式, 但传统实地测算法难以满足较大时空尺度 NPP 观测需求, 故引入遥感技术以简化 NPP 计算流程, 遥感技术的进步使基于遥感影像的模拟方法在 NPP 研究中得到广泛应用<sup>[11-13]</sup>。中国多数学者对流域内植被 NPP 及其驱动因素的研究多集中于长江、黄河流域, 例如郭睿妍等人<sup>[14]</sup>对基于 GEE 平台对黄河流域森林植被净初级生产力时空变化特征进行分析, 并

指出土地利用、海拔、温度和坡度是影响其变化的主要因素, 为其流域内治理提供了重要基础, 黄端、冯椰林等人<sup>[15-16]</sup>对长江流域中赣江、乌江流域 2000—2021 年植被 NPP 数据集进行分析, 得出流域内变化规律。但目前仍少有对于中国海河流域内植被 NPP 的相关研究。

白洋淀流域是海河流域大清河水系中最大的南支水系湖泊, 但目前针对白洋淀流域植被 NPP 的相关研究较少且缺乏较大范围尺度内的监测变化, 不利于为白洋淀地区及其周边县域生态发展提供更多数据支持。本文从自然、人为因子两方面研究白洋淀区域近年植被动态变化状况, 提取白洋淀上游 38 个县域近 14 a 间的 MOD17A3H NPP 作为原始数据, 运用变化趋势分析、线性回归、变异系数、Hurst 指数和地理探测器技术等方法, 结合气候和统计年鉴数据, 分析和研究白洋淀流域植被 NPP 时空分异格局、变化以及主要驱动因素。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

白洋淀流域位处雄安新区上游, 流域主体部分位于河北省中部平原。其地理坐标为东经 113°39′—116°11′, 北纬 38°8′—40°4′, 流域面积约为 31 100 km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>, 白洋淀的坡度比约为 1 : 2 000, 自西北向东南方向倾斜。土地利用类型主要是耕地、草地、林地, 总地势自西向东自然分布着山区、平原和洼地 3 大地貌类型。白洋淀地属暖温带半湿润大陆季风气候区, 年均气温略低, 约为 12.2 °C。华北地区处于中游, 年平均降水量约为 550 mm<sup>[18]</sup>。年日照时数 107.43 d, 年平均无霜期 195 d。

### 1.2 数据来源

1.2.1 NPP 数据 在全球环境监测中, MODIS 传感器和 Landsat 卫星影像是重要的遥感数据源, Landsat 数据精度较高 (30 m), 但存在容易受云层和大气

影响、数据处理复杂等问题,MODIS 数据提供全球植被指数和生产力等数据,空间分辨率为 500 m,具有应用范围广、数据处理简单、可靠等优点。故本文选取美国国家航空航天局(NASA)数据中心提供的 2007—2020 年 14 a 间的分辨率为 500 m 精度的 MOD17A3HGF.061 版本中给定年份的净初级生产(NPP)影像数据,利用 GEE 平台进行数据获取和预处理,并利用 ArcGIS(10.8 版本)软件进行重采样、重投影等处理,获得白洋淀流域历年植被 NPP 数据。

1.2.2 自然和社会数据 气象数据来自中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>),该数据集基于 CRU 发布的全球 0.5°气候数据集和 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集,为中国月降水量数据和月平均气温数据,空间分辨率为 0.008 3 333°(约 1 km)。利用 ArcGIS 掩模提取白洋淀流域数据作为研究区的降水和温度数据。2007—2020 年白洋淀流域各县(市)社会经济资料来源于《山西省统计年鉴》《河北省统计年鉴》及《北京市统计年鉴》。

## 2 研究方法

### 2.1 趋势分析方法

变化趋势分析法是研究植被长期变化的重要方法。对于植被指标时间序列资料,用最小二乘法拟合得到对应的线性方程,相同的像素点位置对应一组时间数列<sup>[19]</sup>。本文对植被 NPP 和时间序列进行回归分析,基于像素点研究白洋淀流域区域 NPP 变化趋势<sup>[20]</sup>,其表达式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \overline{X_i} - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n \overline{X_i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: $i$  为年序号; $X_i$  为第  $i$  年 NPP; $n$  为所研究时间序列的时间长度(年)。 $\text{slope} > 0$  表明植被活动在  $n$  年间的变化趋势是增强的,反之则减弱。

### 2.2 变异系数

变异系数( $C_v$ )常用于测量一组数据中每个变量的变异程度<sup>[21]</sup>,本研究用该模型基于像元尺度,对 2007—2020 年 NPP 的变异程度进行统计分析,评估 NPP 随时间变化的稳定性,计算公式为:

$$C_v = \frac{\text{SD(NPP)}}{\overline{\text{NPP}}} \quad (2)$$

式中: $C_v$  为 NPP 的变异系数;SD(NPP)为 2007—2020 年的 NPP 的标准差; $\overline{\text{NPP}}$ 为 2007—2020 年的 NPP 平均值 [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ]; $C_v$  值越大,即越不稳定,反之则稳定。

### 2.3 线性回归分析

回归分析方法常用于评估两个或更多要素属性的关系。采用一元线性回归分析方法,分析白洋淀地区 2007—2020 年每个像元的植被净初级生产力的时间序列变化趋势,回归直线斜率( $b$ )采用最小二乘法求得白洋淀地区植被净初级生产力变化趋势,计算公式为:

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i - n \overline{xy})}{\sum_{i=1}^n (x_i^2 - n \overline{x^2})} \quad (3)$$

式中:变量  $x$  为年序号; $n$  为年限(年); $y$  为时间序列遥感数据; $\hat{b}$  表示遥感数据变化趋势线的斜率, $\hat{b} > 0$  说明其变化趋势是增加的,反之则是减少。

### 2.4 Hurst 指数

Hurst 指数( $H$ )通常取值范围为 0~1,本研究中  $H < 0.5$  表示植被 NPP 的发展趋势与过去趋势不一致, $H$  值越接近 0,表明植被 NPP 发展趋势与过去趋势不一致的概率越大。 $H = 0.5$  表示数据序列为随机游走序列,很难根据植被 NPP 的变化规律预测其未来发展趋势<sup>[22]</sup>。 $H > 0.5$  表明植被 NPP 发展趋势与过去趋势一致, $H$  值越接近 1,保持原有趋势的概率越大。若时间序列定义为  $\{\xi(t), t=1, 2, \dots\}$ ,再定义序列  $\tau=1, 2, \dots$ ,且定义某个  $\tau$  为均值序列,即

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t), t=1, 2, \dots \quad (4)$$

$t$  时刻的累积离差为

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t [\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}], 1 \leq t \leq \tau \quad (5)$$

级差  $R$  定义为

$$R(t) = \max_{t=1, 2, \dots, \tau} X(t, \tau) - \min_{t=1, 2, \dots, \tau} X(t, \tau) \quad (6)$$

标准差  $S$  定义:

$$S(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau}]^2} \quad (7)$$

$R(\tau), S(\tau), \tau$  关系如下:

$$R(\tau)/S(\tau) = c \cdot \tau^H \quad (8)$$

式中: $R(\tau)$  为极值; $S(\tau)$  标准差; $c$  为常数; $H$  为 Hurst 指数。采用最小二乘法进行拟合,可计算出 Hurst 指数,即

$$\lg(R/S) = \lg(\tau) + H \cdot \lg(\tau) \quad (9)$$

式中: $H$  为 Hurst 指数; $\lg(R/S)$  序列为自变量; $\lg(\tau)$  序列为因变量。

### 2.5 地理探测器技术

地理探测器是分析空间差异的工具<sup>[19]</sup>,此方法可评估两因子在植被 NPP 上共同作用时,对植被 NPP 的解释力是否有增强或减弱的作用,具体计算



方法详见参考资料<sup>[23]</sup>。通过地理探测器的  $q$  值衡量空间分异度大小,  $q$  的取值范围为  $[0, 1]$ 。  $q$  值越大, 说明该因素对 NPP 的影响越大, 反之亦然。该方法能够探测到各个要素对 NPP 的贡献, 并能够从空间数据库中提取出有用的空间关联规则<sup>[24]</sup>。本文利用地理探测器技术, 分析白洋淀地区温度、降水等气候因子与人类活动因子对植被 NPP 的影响效果。

单因子探测。在植被 NPP 空间演变方面应用很少, 采用地理探测器分析模式, 利用各年植被 NPP 资料作为因素变量, 引入了对区域植被 NPP 值分化判断的标准— $q$  值<sup>[25]</sup>。

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2 \quad (10)$$

式中:  $h$  为该因子的所有样本数(个);  $n$  为白洋淀流域内的所有样本数总和(个);  $L$  为一种影响因素  $A$  的分类数;  $\sigma_h^2$  是整个白洋淀流域覆盖区域的离散方差。

因子交互作用探测: 交互作用探测用于识别因素之间的相互作用, 即评估自然因素和人类活动(增加或减少)的解释力或对 NPP 空间分布的独立影响<sup>[26]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 白洋淀流域植被 NPP 时空分异特征

#### 3.1.1 植被单位面积多年平均 NPP 空间分布特征

基于均值法, 对白洋淀流域年均植被 NPP 的空间分布格局进行分析, 如图 1 所示, 将植被单位面积多年平均 NPP 分为 7 个等级<sup>[27]</sup>。整体呈由北向南、由西向东先增后减的趋势。① NPP 平均值介于  $74 \sim 325 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的地区主要位于太行山、燕山、恒山交汇处, 海拔较高, 林地、耕地相对较多; ② NPP 平均值介于  $325 \sim 475 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的地区主要处于太行山区的涞源县、易县和阜平县, 所处地带属暖温带大陆性季风气候, 降水较多, 温度相对较高, 土地利用以林地为主, 仅涞源县有较大范围耕地, 总体植被固碳能力较强, 因此, NPP 年平均值较高。③ NPP 年平均值介于  $245 \sim 420 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的区域主要处于经济强区, 例如房山区、定兴县、曲阳县、灵寿县等山前低缓平原, 土地利用以耕地与建设用地为主, 地区 NPP 值波动较大, 以低值区为主。④ NPP 年平均值介于  $74 \sim 290 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的地区主要分布于任丘市、高阳县, 地处洼地, 易产生季节性积水, NPP 年平均值相对较低。

3.1.2 植被 NPP 线性变化趋势 基于最小二乘法趋势方法, 对白洋淀流域 2007—2020 年植被 NPP 进行逐像元趋势分析。将 14 a 内的植被 NPP 变化状况, 划分为无变化、极显著增加、显著增加、不显著增加、不显著降低、显著降低和极显著降低 7 个等级。从图 2 可以看出, 调查区域 14 a 间 NPP 增加趋势,

呈现由西北到东南呈递减状态, NPP 明显增加 ( $p < 0.05$ ) 的区域占总面积的 50.47%, 其中, 极显著增加 ( $p < 0.01$ ) 区域占 29.27%, 显著增加 ( $0.01 < p < 0.05$ ) 区域占 21.20%, 主要集中在浑源县、繁峙县东北部和蔚县西北部等地区; 不显著增加 ( $p > 0.05$ ) 区域占总面积的 41.32%, 在研究区域内由西北向东南呈增多趋势; 植被 NPP 无变化区域占总面积的 3.59%, 主要分布在竞秀区、莲池区等区域; 植被 NPP 降低区域占总面积的 0.20%, 在浑源县东北部、阜平县、徐水区等地都有零星分布。整体看, 超过 95% 的研究区面积植被 NPP 呈增加的趋势, 区域内植被 NPP 的变化存在显著的空间异质性。

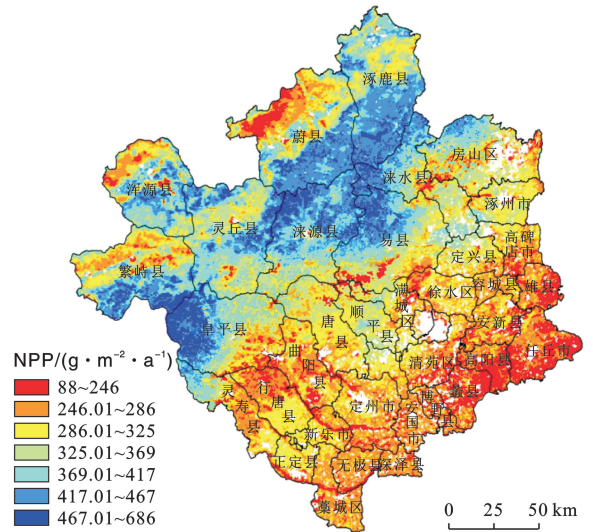


图 1 2007—2020 年白洋淀流域平均 NPP 空间分布  
Fig.1 Spatial distribution of average NPP in Baiyangdian watershed from 2007 to 2020

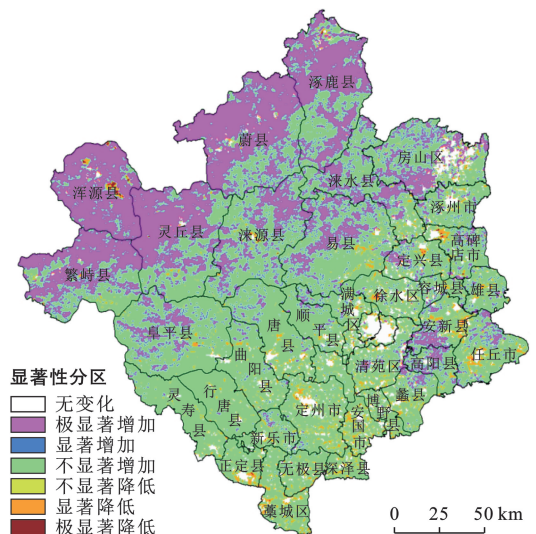


图 2 2007—2020 年白洋淀流域 NPP 变化趋势显著性分区

Fig.2 Significance division of NPP change trend in Baiyangdian watershed from 2007 to 2020

3.1.3 不同年份年均植被 NPP 变化趋势分析 如图 3 所示,基于变化趋势分析法,白洋淀流域植被年均 NPP 值的波动范围介于 217.1~357.6 g/(m<sup>2</sup>·a), NPP 平均值为 300.92 g/(m<sup>2</sup>·a)。其中 2007 年 NPP 值最小,为 217.1 g/(m<sup>2</sup>·a),2020 年最大,为 357.6 g/(m<sup>2</sup>·a)。整体来看,虽然个别年份年均 NPP 值有突降现象,但在经历 3 次不连续减少后,整体呈现波动上升趋势。

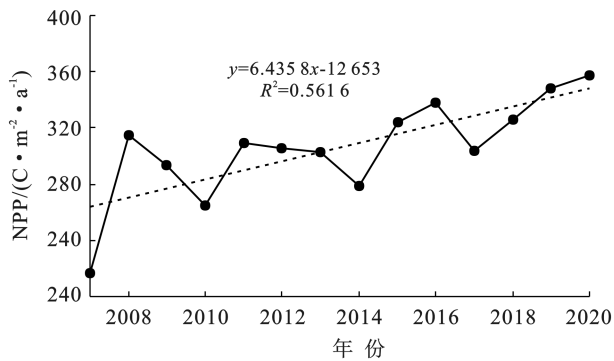


图 3 2007—2020 年白洋淀流域 NPP 年际变化趋势  
Fig.3 NPP interannual change trend in Baiyangdian watershed from 2007 to 2020

### 3.2 白洋淀流域植被 NPP 时空变化规律

3.2.1 植被 NPP 变异程度分析 根据 2007—2020 年白洋淀流域 NPP 的变异系数,对 14 a 间 NPP 的变异程度进行了像元尺度的统计分析。将其生长稳定性划分为 5 个等级<sup>[2]</sup>(表 1)。其中处于较低波动状态下的 NPP 占总面积的 15.16%,主要分布在研究区的西部至北部;处于中等波动性状态下 NPP 占总面积的 55.68%,主要分布在研究区域的西北部(图 4);研究区分别有 22.37%和 6.79%的区域处于较高波动和的高波动状态,这些高波动状态区域主要集中在研究区中部,较高波动状态的区域主要分布在研究区的西北、东南部。

表 1 2007—2020 年白洋淀流域 NPP 的变异系数统计  
Table 1 Statistics of variation coefficient in Baiyangdian watershed from 2007 to 2020

变异程度	变异系数	数量	比例/%
低波动状态	<0.05	1	0
较低波动状态	0.05~0.1	23 968	15.16
中等波动状态	0.1~0.15	88 058	55.68
较高波动状态	0.15~0.2	35 375	22.37
高波动状态	>0.2	10 734	6.79

3.2.2 植被 NPP Hurst 指数分析 Hurst 的值域范围为 0~0.89,均值为 0.48,标准差为 0.08。将 Hurst 指数划分为强反向持续性、弱反向持续性、弱正向持

续性和强正向持续性 4 种持续性类型。其阈值分别为 0~0.2,0.2~0.5,0.5~0.7 和 >0.7。2007—2020 年, NPP 变化 Hurst 指数结果表明(图 5),以房山区、涑水县、易县、顺平县、唐县、曲阳县、行唐县、灵寿县为分界线, *H* 小于 0.5(占研究区总面积的 57.73%)的区域大部分位于分界线的西北方向,说明以上区域植被 NPP 的变化具有反向持续性。 *H* 大于 0.5(占总面积的 42.26%)的区域主要集中在分界线的东南方向,表明上述区域的 NPP 变化趋势具有正向持续性。

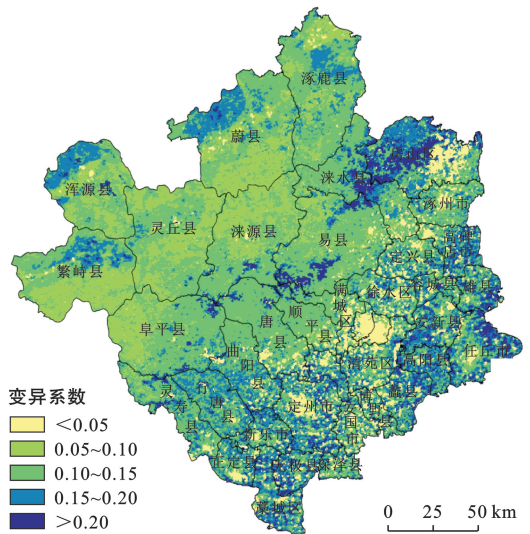


图 4 2007—2020 年白洋淀流域 NPP 变异系数  
Fig.4 NPP variation coefficient in Baiyangdian watershed from 2007 to 2020

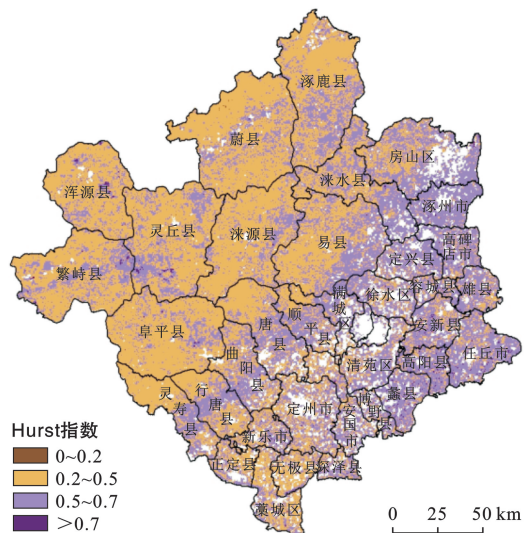


图 5 2007—2020 年白洋淀流域 NPP-Hurst 指数分析  
Fig.5 NPP-Hurst index in Baiyangdian watershed from 2007 to 2020

### 3.3 植被 NPP 时空分异驱动力诊断

植被 NPP 的变化受多个因子协同影响,本文基于地理探测器方法,选取降水( $X_1$ )、温度( $X_2$ )、GDP( $X_3$ )、人口( $X_4$ )、城镇人口比例( $X_5$ )、第一产业比例

( $X_6$ )、第二产业比例( $X_7$ )、第三产业比例( $X_8$ )共计 8 种自然和社会因素,以探测影响植被 NPP 变化的因素。

从因子探测的结果来看,各年份的主导因子均为温度,代表年份解释力分别为 0.452, 0.444, 0.345 (表 2)。q 值可以衡量空间分异度大小,q 值越大,说明该因素对 NPP 的影响越大,反之亦然。从不同年份各因子的 q 均值来看,表现为:温度(0.414) > 第三产业(0.186) > 第一产业(0.180) > 第二产业(0.178) >

城镇人口比例(0.173) > 人口(0.171) > GDP(0.118) > 降水(0.087),进一步表明温度是 NPP 变化的主要驱动力,第一产业、第二产业、第三产业是影响研究区年均 NPP 空间差异的次要驱动力,降水对 NPP 的影响值围绕在 0.1 上下,影响程度较小。同时,鉴于降水与气温两者存在密切关联,降水本质上是气温波动的体现,降水量与气温呈现显著的正相关性。将降水因素归结于温度因素,进一步证实温度是 NPP 变化的主要驱动力。

表 2 2007—2020 年白洋淀流域单项因子对植被 NPP 影响力

Table 2 Influence of single factor on NPP of vegetation in Baiyangdian watershed from 2007 to 2020

2007 年	q 值	P 值	2014 年	q 值	P 值	2020 年	q 值	P 值
温度	0.452	0.000	温度	0.444	0.000	温度	0.345	0.000
人口	0.263	0.000	第一产业	0.227	0.000	第三产业	0.153	0.000
城镇人口比例	0.217	0.000	第三产业	0.209	0.000	第二产业	0.153	0.000
GDP	0.196	0.000	人口	0.186	0.000	城镇人口比例	0.120	0.000
第一产业	0.196	0.000	第二产业	0.184	0.000	第一产业	0.116	0.000
第二产业	0.196	0.000	城镇人口比例	0.182	0.000	GDP	0.082	0.000
第三产业	0.196	0.000	降水	0.111	0.000	人口	0.063	0.000
降水	0.111	0.000	GDP	0.074	0.000	降水	0.039	0.000

采用地理探测器交互作用模块探测植被 NPP 驱动因子的交互作用,评价在相互作用下,双因子是否会增加或削弱对 NPP 的解释力。结果显示,双因子交互作用的影响力明显高于单因子,任意两因子交互作用呈现非线性增强特征,这表明 NPP 变化受到多个因子的协同影响。对各代表年份的交互因子影响值进行排列,如图所示,2007 年降水和温度因子在交

互后的影响值最高,达到 0.566。GDP、第三产业和温度因子在交互后的影响值最低,均为 0.559。而到 2020 年,第三产业及温度双因子交互后,解释力达到最高(表 3)。从最终结果来看,温度为 NPP 变化的主导因子,但随着时间变化,降水因子与城镇人口比例、第三产业的交互解释力逐步上升,表明社会因素对 NPP 值变化的影响力不断增强。

表 3 2007—2020 年白洋淀流域双因子交互作用对植被 NPP 的解释力

Table 3 Effect of two factor interaction on NPP of vegetation in Baiyangdian watershed from 2007 to 2020

年份	主导交互因子 1	主导交互因子 2	主导交互因子 3	主导交互因子 4
2007	温度 $\cap$ 降水 0.566	城镇人口比例 $\cap$ 温度 0.564	GDP $\cap$ 温度 0.559	第三产业 $\cap$ 温度 0.559
2014	城镇人口比例 $\cap$ 温度 0.582	第二产业 $\cap$ 温度 0.568	第三产业 $\cap$ 温度 0.566	第一产业 $\cap$ 温度 0.562
2020	第三产业 $\cap$ 温度 0.503	第一产业 $\cap$ 温度 0.496	第二产业 $\cap$ 温度 0.49	温度 $\cap$ 降水 0.489

## 4 讨论

2007—2020 年,白洋淀流域植被 NPP 年均值整体呈正向增长趋势。这与国家政策、法律的出台以及环境保护力度增大密切相关。中国推进“五位一体”总体布局,提出尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念,实施一系列相关政策。对 14 a 间植被 NPP 低值区面积的缩减,高值区面积逐渐增加并扩

展至研究区全域,均发挥了积极作用。

经分析 14 a 间的植被 NPP 变化趋势,结果显示,尽管研究区年均 NPP 在研究期内经历了 3 次不连续的减少,但其总体趋势仍表现为增加状态。这种增长态势对于保持淀区水位的稳定起到了积极的作用,同时得益于 NPP 增加的区域比例达到了 34.29%,基本不变的区域比例达到 64.7%,减少的区域仅占总面积的 0.99%。NPP 增加的趋势反映出区域植被生产力



的提升,为淀区水位的恢复提供了有力保障,这与黄悦悦<sup>[28]</sup>研究所得 2000—2018 年,华北平原多年植被 NPP 总体呈上升趋势结果一致。在 NPP 总体变化趋势方面,Tum 等<sup>[29]</sup>和 Li 等<sup>[30]</sup>人分别研究全球和中国 2000 年以来 NPP 变化趋势,得出的结论与本文总体 NPP 变化趋势基本一致。

在不同时间阶段和研究区范围内,由于选用不同数据源的 NPP 和土地覆盖类型等数据,导致模拟结果存在差异。朱文泉等<sup>[31]</sup>学者指出,研究区域与数据源的差异会导致研究结果不一致,本研究基于 MOD17A3H 中提取加工的 NPP 数据,通过自然因子与人为因子多因素结合分析,发现 14 a 间白洋淀流域地区植被 NPP 总体均值为  $300.92 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,与李登科等<sup>[32]</sup>研究所得中国陆地植被 NPP 均值的  $273.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  有所差异。这可能与白洋淀水域地区气候、水文条件匹配良好,植物长势旺盛,以及实施生态环保措施等人类活动有关。

地理探测结果表明,温度是 NPP 变化的主要驱动力,温度解释力高于降水。不同年份各因子的  $q$  均值表现为:温度(0.414) > 第三产业(0.186) > 第一产业(0.180) > 第二产业(0.178),其中第三、一、二产业,这 3 种驱动因子与温度具有较大的线性相关关系。这与谷晓平等<sup>[33]</sup>研究结果有所差异,其原因可能与 NPP 估算模型和驱动因素的不同以及研究区域选取的时间段不同有关<sup>[33]</sup>。研究结果同样证明,降水解释力( $q=0.087$ )低于温度解释力( $q=0.414$ ),此结论与黄晓云等<sup>[34]</sup>的研究一致。同时,植被 NPP 的变化受气候变化与人类活动的协同影响,已有研究表明<sup>[35]</sup>,白洋淀流域地区随着人类退耕还林、还草政策的实施,人类活动对 NPP 的影响力逐步增强,这与众多的研究结果一致<sup>[36-37]</sup>。在本次研究中,并未进行有关具体人类活动对植被 NPP 影响的定量分析,此方面将作为下一步的深层研究内容。

## 5 结论

(1) 从空间角度来看,近 14 a 白洋淀流域植被 NPP 总体均值为  $300.92 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,总体呈现由东南至西北从不显著增加到显著增加的变化趋势。2007—2020 年白洋淀流域绝大部分区域植被 NPP 均具有一定程度的波动性,处于较低波动状态、中等波动状态、较高波动状态和高波动状态下的 NPP 分别占研究区域总面积的 15.16%, 55.68%, 22.37% 和 6.79%,其中西北部山区和东南部平原区波动性最强。在张家口与保定交界一带 NPP 值较高,石家庄和雄安新区等地 NPP 值较低。

(2) 从时间角度来看,近 14 a 研究区植被 NPP 整体呈上升趋势,虽然研究区年均 NPP 经历了 3 次不连续减少,但整体呈现不稳定增加状态。

(3) 因子探测结果显示 NPP 空间分异的主导驱动因素为温度,其次是人口、第三产业、第一产业等,双因子交互作用的影响力明显高于单因子。随时间推移,社会因素所起的作用越来越明显。

白洋淀流域植被生长旺盛,白洋淀流域植被固碳能力正逐渐增强。退耕还淀,建立多水源补水机制生态保护修复工程在生态系统恢复方面成效显著。研究结果对白洋淀流域生态环境监测和治理有重要参考价值,为该区域内未来植被恢复与保护政策制定提供数据支持,同时可服务于雄安新区建设的千年大计。

## 参考文献 (References)

- [1] 冯婉,谢世友.长江流域片 2000—2015 年植被 NPP 时空特征及影响因子探测[J].水土保持研究,2022,29(1):176-183.  
Feng Wan, Xie Shiyu. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of vegetation NPP in the Yangtze River Basin from 2000 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(1):176-183.
- [2] 梁程,苏惠敏,张伊琳,等.2000—2019 年关中平原城市群植被 NPP 时空变化及影响因素[J].水土保持研究,2023,30(4):293-300.  
Liang Cheng, Su Huimin, Zhang Yilin, et al. Spatiotemporal changes and influencing factors of net primary productivity of Guanzhong Plain city cluster from 2000 to 2019 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):293-300.
- [3] 徐勇,黄海艳,戴强玉,等.西南地区陆地植被生态系统 NPP 时空演变及驱动力分析[J].环境科学,2023,44(5):2704-2714.  
Xu Yong, Huang Haiyan, Dai Qiangyu, et al. Spatial-temporal variation in net primary productivity in terrestrial vegetation ecosystems and its driving forces in Southwest China [J]. Environmental Science, 2023, 44 (5):2704-2714.
- [4] 兰小丽,孙慧兰,许玉凤.贵州植被 NPP 时空格局及其对气候变化的响应[J].安徽农学通报,2020,26(18):162-166.  
Lan Xiaoli, Sun Huilan, Xu Yufeng. Spatial and temporal pattern of vegetation NPP variations in Guizhou and its response to climate change [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020,26(18):162-166.
- [5] 赵苗苗,刘熠,杨吉林,等.基于 HASM 的中国植被 NPP 时空变化特征及其与气候的关系[J].生态环境学报,

- 2019,28(2):215-225.
- Zhao Miaomiao, Liu Yi, Yang Jilin, et al. Spatio-temporal patterns of NPP and its relations to climate in China based on HASM [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019,28(2):215-225.
- [6] Peng Changhui, Apps M J. Modelling the response of net primary productivity (NPP) of boreal forest ecosystems to changes in climate and fire disturbance regimes [J]. *Ecological Modelling*, 1999,122(3):175-193.
- [7] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world [M]. Berlin, Heidelberg: Primary Productivity of the Biosphere, 1975,237-263.
- [8] 刘恒,汤弟伟,宋鄂平,等.2000—2015 年武陵山区植被净初级生产力的时空动态特征及其驱动因子[J].水土保持研究,2020,27(6):218-225.
- Liu Heng, Tang Diwei, Song Eping, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation net primary productivity and its driving factors in Wuling Mountainous area during 2000—2015 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020,27(6):218-225.
- [9] 夏冰,马鹏宇,徐聪,等.近 20 年黄河流域植被净初级生产力时空分布及其对极端天气变化的时空响应[J].水土保持研究,2023,30(2):256-266.
- Xia Bing, Ma Pengyu, Xu Cong, et al. Spatiotemporal variation of NPP and its response to extreme climate indices in Yellow River basin in recent 20 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):256-266.
- [10] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results [J]. *Global Change Biology*, 1999,5(S1):1-15.
- [11] 杜波波,阿拉腾图娅,包刚,等.基于 CASA 模型模拟锡林郭勒草原净初级生产力[J].水土保持研究,2021,28(5):293-300.
- Du Bobo, A L, Bao Gang, et al. Simulation of net primary productivity of Xilingol grassland based on CASA model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(5):293-300.
- [12] 王丽霞,丁慧兰,刘招,等.基于 CASA 模型探究泾河流域植被 NPP 时空动态及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2022,29(1):190-196.
- Wang Lixia, Ding Huilan, Liu Zhao, et al. Spatiotemporal change of NPP based on CASA model and its response to climate change in Jing River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(1):190-196.
- [13] 陈晓杰,张长城,张金亭,等.基于 CASA 模型的植被净初级生产力时空演变格局及其影响因素:以湖北省为例[J].水土保持研究,2022,29(3):253-261.
- Chen Xiaojie, Zhang Changcheng, Zhang Jinting, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution patterns of vegetation net primary productivity and its influencing factors based on CASA model: A case study of Hubei Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(3):253-261.
- [14] 郭睿妍,田佳,杨志玲,等.基于 GEE 平台的黄河流域森林植被净初级生产力时空变化特征[J].生态学报,2022,42(13):5437-5445.
- Guo Ruiyan, Tian Jia, Yang Zhiling, et al. Spatiotemporal variation characteristics of forest net primary productivity in the Yellow River Basin based on Google Earth Engine cloud platform [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(13):5437-5445.
- [15] 黄端,甘家亮,胡辉,等.赣江流域植被 NPP 时空演变及其驱动因子研究[J].测绘科学,2023,48(6):119-130.
- Huang Duan, Gan Jialiang, Hu Hui, et al. Temporal and spatial evolution of NPP and the impact of driving factors in the Ganjiang River basin [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023,48(6):119-130.
- [16] 冯椰林.乌江流域植被 NPP 时空变化及影响因素研究[D].贵州 贵阳:贵州师范大学,2023.
- Feng Yelin. Temporal and spatial variation of vegetation NPP and its influencing factors in Wujiang River basin [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou Normal University, 2023.
- [17] 任晓强,管孝艳,陶园,等.白洋淀流域水环境风险评估综述[J].中国农村水利水电,2021(1):22-27.
- Ren Xiaoqiang, Guan Xiaoyan, Tao Yuan, et al. Review of water environment risk assessment in Baiyangdian Basin [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(1):22-27.
- [18] 黄斌斌,李若男,李睿达,等.雄安新区上游白洋淀流域水质净化提升目标下的生态恢复格局优化[J].生态学报,2020,40(20):7143-7152.
- Huang Binbin, Li Ruonan, Li Ruida, et al. Optimization of ecological restoration pattern targeted for water purification improvement in the Baiyangdian watershed, Xiong'an New Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(20):7143-7152.
- [19] 金芳芳.西南山区生态特征的变化及其与人类活动的关系[D].河南 开封:河南大学,2018.
- Jin Fangfang. The change of ecological characteristics of mountainous areas of Southwest China and its relationship with human activities [D]. Kaifeng, Henan: Henan University, 2018.
- [20] 于静,高亚敏,贾宁,等.科尔沁草地 NPP 时空变化特征



- 其对气候的响应研究[C]//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会论文集(二).南昌,2022:605-613.
- Yu Jing, Gao Yamin, Jia Ning, et al. Study on Temporal and spatial variation of NPP in Horqin grassland and its response to climate [C]// Proceedings of the 2022 Annual Science and Technology Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences ( II ). Nanchang, China, 2022:605-613.
- [21] 李佳洺,陆大道,徐成东,等.胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J].地理学报,2017,72(1): 148-160.
- Li Jiaming, Lu Dadao, Xu Chengdong, et al. Spatial heterogeneity and its changes of population on the two sides of Hu Line [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):148-160.
- [22] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Spatial-temporal trend of seasonally-integrated normalized difference vegetation index as an indicator of changes in Arctic tundra vegetation in the early 1990s[C]// IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, NSW, Australia. IEEE,2001:181-183.
- [23] Rao A R, Bhattacharya D. Hypothesis testing for long-term memory in hydrologic series [J]. *Journal of Hydrology*, 1999,216(3/4):183-196.
- [24] 马苏,崔国屹,赵玉,等.植被 NPP 时空变化特征及驱动因子分析:以延安地区为例[J].中国农学通报,2022,38(19):93-98.
- Ma Su, Cui Guoyi, Zhao Yu, et al. Spatial-temporal variation characteristics of NPP and the driving factors: A case study of Yan'an [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022,38(19):93-98.
- [25] 潘洪义,黄佩,徐婕.基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J].生态学报,2019,39(20): 7621-7631.
- Pan Hongyi, Huang Pei, Xu Jie. The spatial and temporal pattern evolution of vegetation NPP and its driving forces in middle-lower areas of the Min River based on geographical detector analyses [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(20):7621-7631.
- [26] 庞静.基于地理探测器模型的自然和人为因素对植被变化的影响[D].山西 太原:山西大学,2016.
- Pang Jin. Geographical detector-based identifying the impact of natural and human factors on vegetation changes [D]. Taiyuan, Shanxi: Shanxi University, 2016.
- [27] 杨星星,杨云川,邓思敏,等.基于 SPEI 的广西干旱综合特征及农业旱灾风险研究[J].水土保持研究,2020,27(4):113-121.
- Yang Xingxing, Yang Yunchuan, Deng Simin, et al. Research on drought characteristics and agricultural drought risk assessment in Guangxi based on SPEI [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020,27(4): 113-121.
- [28] 黄悦悦.2000—2018 年华北平原植被净初级生产力时空分布及其驱动因素研究[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2020.
- Huang Yueyue. Spatial-temporal distribution and driving factors of vegetation net primary productivity in North China Plain from 2000 to 2018 [D]. Lanzhou, Gansu: Northwest Normal University, 2020.
- [29] Tum M, Zeidler J N, Günther K P, et al. Global NPP and straw bioenergy trends for 2000—2014 [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2016,90: 230-236.
- [30] Li Jun, Wang Zhaoli, Lai Chengguang, et al. Response of net primary production to land use and land cover change in China's mainland since the late 1980s [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,639:237-247.
- [31] 朱文泉,潘耀忠,何浩,等.中国典型植被最大光利用率模拟[J].科学通报,2006,51(6):700-706.
- Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, He Hao, et al. Simulation of maximum light utilization efficiency of typical vegetation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006,51(6):700-706.
- [32] 李登科,王钊.基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J].生态环境学报,2018,27(3):397-405.
- Li Dengke, Wang Zhao. The characteristics of NPP of terrestrial vegetation in China based on MOD17A3 data [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(3):397-405.
- [33] 谷晓平,黄玫,季劲钧,等.近 20 年气候变化对西南地区植被净初级生产力的影响[J].自然资源学报,2007,22(2):251-259.
- Gu Xiaoping, Huang Mei, Ji Jinjun, et al. The influence of climate change on vegetation net primary productivity in Southwestern China during recent 20 years period [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007,22(2): 251-259.
- [34] 黄晓云,林德根,王静爱,等.气候变化背景下中国南方喀斯特地区 NPP 时空变化[J].林业科学,2013,49(5): 10-16.
- Huang Xiaoyun, Lin Degen, Wang Jing'ai, et al. Temporal and spatial NPP variation in the karst region in South China under the background of climate change [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013,49(5):10-16.

- Sun Jixing, Zhong Cheng, He Hongwei, et al. Continuous remote sensing monitoring and changes of land desertification in China from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(3): 87-92.
- [24] 宁立波, 杨俊仓. 民勤县土地荒漠化遥感分析[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 28(2): 115-119.  
Ning Libo, Yang Juncang. The remote sensing analysis of land desertification dynamic changes in Minqin [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 28(2): 115-119.
- [25] 魏伟, 俞啸, 张梦真, 等. 1995—2018 年石羊河流域下游荒漠化动态变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2098-2106.  
Wei Wei, Yu Xiao, Zhang Mengzhen, et al. Dynamics of desertification in the lower reaches of Shiyang River Basin, Northwest China during 1995-2018 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2098-2106.
- [26] Han Lanying, Zhang Zhengcai, Zhang Qiang, et al. Desertification assessments in the Hexi corridor of Northern China's Gansu Province by remote sensing [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(3): 2715-2731.
- [27] 薛华柱, 金磊, 董国涛, 等. 河西走廊近 40 年地表土壤冻融状态变化特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 65-73, 82.  
Xue Huazhu, Jin Lei, Dong Guotao, et al. Analysis of spatiotemporal variations of freeze-thaw state of surface soil in Hexi corridor in recent 40 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 65-73, 82.
- [28] 刘玉璋, 董光荣, 李长治. 影响土壤风蚀主要因素的风洞实验研究[J]. *中国沙漠*, 1992, 12(4): 41-49.  
Liu Yuzhang, Dong Guangrong, Li Changzhi. Study on some factors influencing soil erosion by wind tunnel experiment [J]. *Journal of Desert Research*, 1992, 12(4): 41-49.
- [29] 朱震达, 崔书红. 中国荒漠化土地分布地域特征及其治理措施的评估[J]. *中国环境科学*, 1996(5): 328-334.  
Zhu Zhenda, Cui Shuhong. Features of distribution and assessment for control measures of desertification in China [J]. *China Environmental Science*, 1996(5): 328-334.
- [30] 汪震, 姜勇彪, 岳兵. 江西吉泰盆地荒漠化时空变化特征及影响因素分析[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(2): 150-155.  
Wang Zhen, Jiang Yongbiao, Yue Bing. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of land desertification in Jitai Basin, Jiangxi Province [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2021, 44(2): 150-155.
- [31] 李伯祥, 陈晓勇, 徐爱婷. 基于 DEM 校正 TVDI 的华北地区旱情监测分析[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(3): 266-273.  
Li Boxiang, Chen Xiaoyong, Xu Wenting. Drought monitoring analysis in North China based on DEM correction TVDI [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2019, 42(3): 266-273.
- [32] 何鹏杰, 张恒嘉, 王玉才, 等. 河西地区临泽县土地荒漠化影响因素分析[J]. *环境工程*, 2016, 34(增刊 1): 1111-1116.  
He Pengjie, Zhang Hengjia, Wang Yucai, et al. Analysis of influencing factors of land desertification of Hexi corridor of Linze County [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(Suppl.1): 1111-1116.
- [33] 马龙, 王静茹, 刘廷玺, 等. 2000—2012 年科尔沁沙地植被与气候因子间的响应关系[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 162-172.  
Ma Long, Wang Jingru, Liu Tingxi, et al. Response relationship between vegetation and climate factors in Horqin sandy land from 2000 to 2012 [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 162-172.
- Wang Zhao, Li Dengke. Spatial-temporal distribution of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2015 in Shaanxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1876-1884.
- [37] 吴艳艳, 吴志峰, 余世孝. 定量评价人类活动对净初级生产力的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2535-2544.  
Wu Yanyan, Wu Zhifeng, Yu Shixiao. Quantitative assessment of the impacts of human activities on net primary productivity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2535-2544.

(上接第 353 页)

- [35] 盛叶子, 曾蒙秀, 林德根, 等. 2000—2014 年人类活动对贵州省植被净初级生产力的影响[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(1): 62-70.  
Sheng Yezi, Zeng Mengxiu, Lin Degen, et al. Impacts of human activities on net primary productivity of vegetation in Guizhou Province from 2000 to 2014 [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1): 62-70.
- [36] 王钊, 李登科. 2000-2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1876-1884.