

# 资源枯竭型城市转型对净生态系统生产力的影响 ——以江苏省徐州市为例

马崇<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>, 王雨辰<sup>2</sup>, 赵珂莹<sup>1</sup>

(1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院土地资源研究所, 江苏徐州 221116; 2. 徐州工程学院管理工程学院, 江苏徐州 221018)

**摘要:** [目的] 分析净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)时空变化特征与驱动机制, 为准确评估区域碳收支状况和优化生态环境管理策略提供科学依据。[方法] 以资源枯竭型城市江苏省徐州市为对象, 综合利用MOD17 A3遥感产品、气象观测数据, 结合Theil-Sen median回归分析、变异系数、Hurst指数及最优参数地理探测器(OPGD)等方法, 定量分析2001—2023年徐州市植被NEP的时空演变规律、波动特性、未来趋势及其驱动因素。[结果] ①徐州市植被NEP多年平均值为141.36 g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计), 年际变化呈显著上升趋势(增速约1.690 g/(m<sup>2</sup>·a))。空间分布上呈现“西北部和东南部较高、中部偏低”的格局, 且呈现向东南方向递增的梯度特征。②2001—2023年徐州市NEP呈增加趋势的区域占67.70%, 呈减少趋势的区域占13.49%。高波动区域面积显著大于低波动区域, 表明城市转型中NEP的稳定性相对较低。③基于Hurst指数(均值0.425)分析表明, 未来徐州市NEP的变化趋势倾向于与过去23 a的特征相反。④最优参数地理探测器识别出城市转型影响徐州NEP的主要驱动因子依次为植被覆盖状况、环境污染胁迫、水土保持能力、社会经济发展水平和人类活动强度。气候因子(气温、降水)及景观格局为次要驱动因素。[结论] 徐州市虽然在转型过程中已展现出碳汇能力逐步增强的趋势, 但整体稳定性不足, 且未来仍存在功能逆转的潜在风险。要保持并提升区域碳汇效益, 关键在于优化植被恢复路径, 加大环境污染治理力度, 并妥善协调社会经济发展与生态保护的关系。

**关键词:** 净生态系统生产力(NEP); Theil-Sen median回归分析; OPGD模型; 时空特征; 驱动机制; 资源枯竭型城市; 徐州市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0417-13

中图分类号: Q948.1

**文献参数:** 马崇, 张宇, 王雨辰, 等. 资源枯竭型城市转型对净生态系统生产力的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 417-429. Ma Chong, Zhang Yu, Wang Yuchen, et al. Impact of resource-exhausted city transformation on net ecosystem productivity [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 417-429.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.019

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.019

## Impact of resource-exhausted city transformation on net ecosystem productivity —A case study of Xuzhou City, Jiangsu Province

Ma Chong<sup>1</sup>, Zhang Yu<sup>1</sup>, Wang Yuchen<sup>2</sup>, Zhao Keying<sup>1</sup>

(1. Institute of Land Resources, School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Management Science and Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou, Jiangsu 221018, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal variation characteristics and driving mechanisms of net ecosystem productivity (NEP) were investigated in order to provide a scientific basis for the refined evaluation of regional carbon budgets and the optimization of ecological and environmental management strategies. [Methods] Xuzhou City, a resource-exhausted city in Jiangsu Province, was selected as the study area. By integrating MOD17 A3 remote sensing products with meteorological observation data, and applying Theil-Sen median regression

收稿日期: 2025-07-29

修回日期: 2025-09-21

采用日期: 2025-11-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“耦合建筑物能量模型的高分辨率城市地表蒸散发反演模型研究”(42101256)

第一作者: 马崇(1999—), 男(回族), 贵州省毕节市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用碳排放效应模拟与分析。Email: chongma@jnsu.edu.cn.

通信作者: 张宇(1988—), 男(汉族), 安徽省庐江县人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用环境效应监测与模拟研究。Email: yuzhang@jnsu.edu.cn.

analysis, coefficient of variation, Hurst index, and optimal parameters-based geodetector methods, the spatiotemporal evolution patterns, fluctuation characteristics, future trends, and driving factors of vegetation NEP in Xuzhou from 2001 to 2023 were quantitatively analyzed. [Results] ① The multi-year mean NEP in Xuzhou was  $141.36 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (calculated as C), showing a statistically significant upward trend with an annual increase of  $1.690 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . Spatially, NEP exhibited a clear gradient pattern, with higher values in the northwest and southeast and lower values in the central region, forming a pronounced southeastward-increasing distribution. ② From 2001 to 2023, NEP increased in 67.70% of the study area, while 13.49% experienced a decline. High-volatility regions covered a much larger area than low-volatility regions, indicating relatively low NEP stability during the city's transition. ③ Hurst exponent analysis (mean value: 0.425) indicated a tendency for future NEP trends to reverse compared with those observed over the past 23 years. ④ Optimal parameters-based geodetector results identified the main driving factors of NEP variation in Xuzhou, ranked by explanatory power, as vegetation cover, environmental pollution, soil and water conservation capacity, socioeconomic development, and human activity intensity. Climate factors (temperature and precipitation) and landscape patterns played secondary roles. [Conclusion] Although Xuzhou has gradually enhanced its carbon sink capacity during the transition period, its overall stability remains limited, and there is a potential risk of future functional reversal. To maintain and strengthen regional carbon sink capacity, it is necessary to optimize vegetation restoration pathways, improve pollution control, and achieve a balanced integration of socioeconomic development and ecological protection.

**Keywords:** net ecosystem productivity (NEP); Theil-Sen median regression analysis; OPGD model; spatio-temporal characteristics; driving mechanisms; resource-exhausted cities; Xuzhou City

气候变暖是全人类共同面临的全球性生态环境问题,给人类社会经济发展带来了严峻挑战。相关研究表明,全球平均气温升高  $2^\circ\text{C}$  将导致粮食产量减少、极端气候频发、物种灭绝等一系列危害,将威胁到全人类生存,其根本原因是剧烈的人类活动对生态系统中碳收支平衡造成了破坏<sup>[1]</sup>。为了缓和碳循环失衡对人类生存带来的严重影响,2015年11月联合国气候变化框架公约第21届缔约方会议在巴黎召开,在大会上世界各国达成了《巴黎协定》,该协定作为应对碳收支失衡的全球性行动框架,其核心约束性目标要求缔约方协同实施国家自主贡献(NDCs),以实现在2100年前将全球气温升幅相较工业化前水平限制在  $2^\circ\text{C}$  之内、并向  $1.5^\circ\text{C}$  努力的气候治理路径<sup>[2]</sup>。实现该目标的重要途径就是对以  $\text{CO}_2$  为首的温室气体进行减排增汇,而陆地生态系统是  $\text{CO}_2$  储存的主要场所,也是人类活动最频繁的场所。

如何提升陆地生态系统的碳汇能力和碳储量已成为当前全世界各国研究的热点前沿。陆地生态系统对环境变化的响应主要反映在其碳源与碳汇的分布及动态变化上。净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)作为表征区域生态系统碳通量的核心参数,其数值特征可定量解析陆地碳汇/源转换阈值<sup>[3]</sup>。

净生态系统生产力(NEP)的量化方法主要有清查法、湍度相关技术、大气反演模型及过程模型模拟等多元研究范式<sup>[4]</sup>。在多种NEP量化方法中,模型

法因其能够综合考虑多种自然与人文因子且具备较强的空间适应性与预测能力,逐渐成为评估区域生态系统碳汇变化的核心方法。一方面,与清查法、湍度相关技术等依赖点位或局地观测的方法相比,模型法能够基于遥感影像、气候数据、土地利用信息以及实地观测结果构建完整的时空模拟体系,从而实现大尺度、长时序的碳汇估算与动态分析。另一方面,已有研究验证了模型法在揭示NEP驱动机制与空间差异方面的优势<sup>[5]</sup>。例如, Ye Xin等<sup>[6]</sup>改进NEP模型后定量评估了城市扩张造成的NEP损失,并揭示了其时空异质性特征;田朋飞等<sup>[7]</sup>基于NEP估算模型,发现太行山-燕山地区2002—2020年净生态系统生产力(NEP)呈波动上升趋势且空间分异显著,主要受气温、GDP密度和高程等因素驱动;侯金龙等<sup>[8]</sup>基于2000—2022年多源数据,发现京津冀地区NEP呈显著波动上升趋势,且林地扩张对京津冀地区碳汇提升具有决定性作用。这些成果表明,模型法不仅能够有效量化NEP的时空演变,还能识别不同环境因子的驱动机制,并为预测未来生态系统固碳潜力和制定区域生态管理政策提供科学支撑。

在资源枯竭型城市的生态重建进程中,NEP作为核心指标,其变化受到气候、地形、植被、人类活动、景观格局以及社会经济的多维度驱动。这类城市的转型特殊性在于产业退出、土地再利用与生态修复活动的交织,使得  $\text{PM}_{10}$  污染治理、土壤侵蚀控制和景观格局优化成为区域NEP演变的关键。江苏省

徐州市作为中国资源型城市与省际交界区的双重典型代表,其百年煤炭工业发展历程叠加苏鲁豫皖四省交界的区位特性,塑造了复合型生态系统服务的空间分异格局。在100 a多的煤炭开采历史中,徐州累计煤炭开采量达 $1.00 \times 10^8$  t,形成252.20 km<sup>2</sup>塌陷地,占全市面积的2.15%<sup>[9]</sup>。高强度采矿及工业活动引发的表土流失、地基变形及空气污染等生态问题,与省际交界区特有的政策割裂、跨域污染扩散和生态补偿机制缺失形成叠加效应,导致植被碳汇能力呈现显著的行政边界异质性特征。2000年后,徐州市煤炭资源逐步枯竭,2011年被列入中国第三批资源枯竭型城市,城市发展开始进入后工业化转型阶段,生态修复和产业结构调整逐步开展<sup>[10]</sup>。本研究以徐州市为对象,使用中分辨率成像光谱仪MOD17A3 HGF提供的NPP数据及气象数据,构建NEP估算模型,并结合土壤微生物呼吸模型,系统反演2001—2023年徐州市的净生态系统生产力(NEP)。综合运用Sen斜率估计与Mann-Kendall显著性检验、变异系数分析以及Hurst指数等时空分析方法,深入解析区域NEP的演变特征与未来趋势。研究进一步采用优化参数地理探测器,定量揭示城市转型过程中以PM10浓度、土壤侵蚀指数和景观格局等为代表的因子对NEP变化的驱动强度与解释能力。旨在为徐州及同类资源型转型城市的可持续发展和生态修复提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

徐州市位于江苏省西北部(33°43′—34°58′N, 116°22′—118°40′E),地处苏鲁豫皖四省交界处,全市面积11 765 km<sup>2</sup>,是中国淮海经济区中心城市和全国性综合交通枢纽(图1)。地貌以黄泛冲积平原为主体,地势自西北向东南阶梯式下降。京杭大运河穿境而过,高速公路网和高铁网络四通八达,使其成为淮海经济区1.2亿人口的核心交通节点,承担着长三角与环渤海经济区、中西部地区产业梯度转移的战略支点功能。因历史上作为华东能源基地,长期以煤炭开采和重工业为主导的经济发展模式而导致生态环境问题突出。在土地利用类型方面,全市以耕地为主,占比超过60%,是江苏省重要的商品粮生产基地;水域面积次之,约占总面积的10%。随着生态修复与城市绿化工作的持续推进,植被覆盖度稳步提升,林地、草地及城市绿地占比接近15%,用地结构正逐步从工矿主导转向宜居与生态复合型。在经历传统工业城市转型后,通过大规模采煤塌陷区生态修复工程,成功将潘安湖等区域打造为国家级湿地公园,构建“一城青山半城湖”的生态格局,成为资源型城市绿色转型的全国典范,并获评国家生态园林城市,其生态治理经验对全国资源枯竭型城市可持续发展具有示范意义。

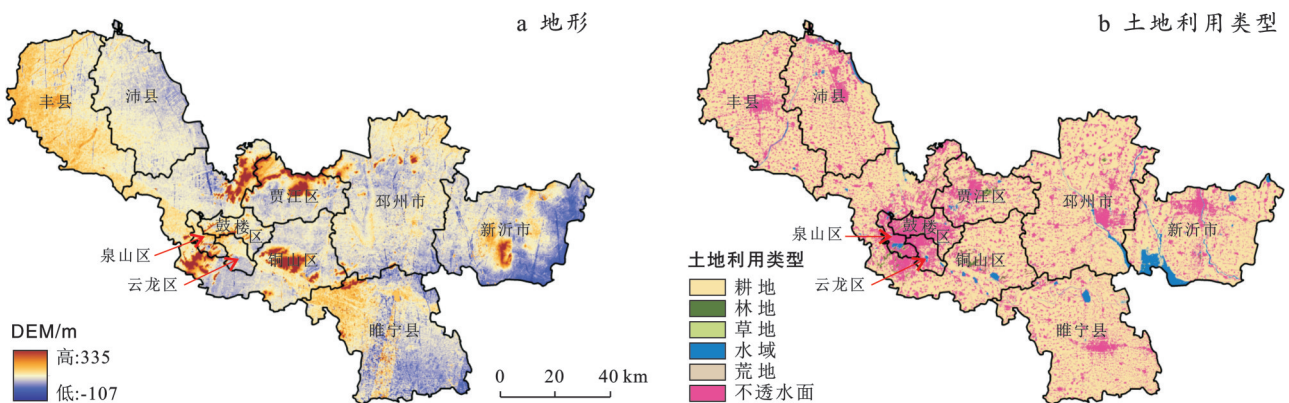


图1 江苏省徐州市地形及土地利用类型

Fig.1 Topography and land use types at Xuzhou City, Jiangsu Province

### 1.2 数据来源

本研究使用的数据类型包括遥感数据、气象数据、地形数据、土地利用数据及社会经济数据(表1)。所有数据均经过严格预处理。利用ArcGIS软件基于徐州市行政边界进行裁剪,空间分辨率统一为500 m,地理坐标系统一为WGS\_1984,投影坐标系统一为WGS\_1984\_UTM\_50N。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 NEP估算模型

基于NPP(净初级生产力)与 $R_h$ (土壤异养呼吸)的差值构建NEP估算模型,其中 $R_h$ 通过月均温、降水数据的多元回归模型实现参数化计算<sup>[11]</sup>。计算公式如下:

$$NEP = NPP - R_h \quad (1)$$

$$R_h = 0.22 \times \left[ \exp(0.0913T) + \ln(0.3145R + 1) \right] \times 30 \times 46.5\% \quad (2)$$

式中:  $R_h$  为土壤微生物呼吸碳排放量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 以 C 计);  $T$  为气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $R$  为降水量 ( $\text{mm}$ )。

### 1.3.2 趋势分析

基于 Theil-Sen 斜率估计与 Mann-Kendall (MK) 显著性检验的耦合方法, 对徐州市 2001—2023 年

NEP 时间序列进行趋势量化分析<sup>[12]</sup>。计算公式如下:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall j > i \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为变化趋势率; median 代表取中值;  $j$  和  $i$  为时间序列;  $x_j$  和  $x_i$  分别为第  $j$  个和第  $i$  个时间序列的 NEP 值。若  $\beta$  大于 0, 表明 NEP 为增长趋势, 小于 0, 则为下降趋势。

表 1 数据类型及来源

Table 1 Data types and sources

数据名称	分辨率/m	数据来源
MODIS NPP	500	NASA ( <a href="https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/">https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/</a> )
NDVI	1 000	
降水、气温	1 000	国家地球系统科学数据中心 ( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )
DEM	30	地理空间数据云平台 ( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )
土地利用数据	30	CLCD
人口密度	1 000	World Pop ( <a href="https://hub.worldpop.org/">https://hub.worldpop.org/</a> )
国内生产总值 (GDP)	—	各省市统计年鉴
夜间灯光	1 000	资源环境科学与数据中心平台 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
土壤侵蚀	1 000	全球资源数据云 ( <a href="https://www.gis5g.com/">https://www.gis5g.com/</a> )
PM <sub>10</sub>	1 000	国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/home">https://data.tpdc.ac.cn/home</a> )
斑块内连接度指数、分散指数	30	通过 Fragstats 软件计算

MK 检验是一种非参数的时间序列趋势显著性检验方法, 不需要参与计算的数据满足特定的分布, 能降低数据中含有异常值时对整体结果的影响。计算公式如下:

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

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

$$V_{ar}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: sgn 为符号函数;  $S$  为检验统计量;  $V_{ar}$  为求方差函数;  $Z$  为标准化后的检验统计量;  $n$  为序列中数据个数, 当  $n > 10$  时,  $S$  近似正态分布;  $j$  和  $i$  为时间序列;  $x_j$  和  $x_i$  分别为第  $j$  个和第  $i$  个时间序列的 NEP 值。

### 1.3.3 稳定性分析

变异系数作为地理要素空间异质性的量化指标, 其数值特征直接表征区域要素波动特征与稳态阈值<sup>[13]</sup>。计算公式如下:

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

式中:  $C_v$  为 NEP 的变异系数;  $x_i$  为第  $i$  年各个像元的 NEP 值;  $\bar{x}$  为各个像元 NEP 多年平均值。

将区域  $C_v$  划分为 5 个等级:  $C_v < 0.05$ , 为低波动;  $0.05 \leq C_v < 0.10$ , 为相对低波动;  $0.10 \leq C_v < 0.15$ , 为中等波动;  $0.15 \leq C_v < 0.20$ , 为相对高波动;  $C_v \geq 0.20$ , 为高波动。

### 1.3.4 Hurst 指数

Hurst ( $H$ ) 指数是定量描述时间序列长期依赖性 & 未来趋势的有效工具<sup>[14]</sup>, 计算公式如下:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = C \times \tau^H \quad (9)$$

$$\lg \left[ \frac{R(\tau)}{S(\tau)} \right] = \lg C + H \times \lg \tau \quad (10)$$

式中:  $R(\tau)$  为极差;  $S(\tau)$  为标准差;  $C$  为常数;  $\tau$  为时间序列长度; Hurst ( $H$ ) 指数的范围在  $[0, 1]$ , 表明时间序列的长期记忆性特征。

### 1.3.5 最优参数地理探测器 (OPGD)

最优参数地理探测器模型通过引入离散化方法与分类层级的动态组合机制, 系统筛选出具有最大解释力 ( $Q$  值) 的参数配置方案<sup>[15]</sup>。计算公式如下:

$$Q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (11)$$

式中:  $Q$  表示因素对 NEP 的解释力, 其取值范围为  $[0, 1]$ ,  $Q$  值越大, 表明因子对 NEP 的解释力越强;  $h = 1, 2, 3, \dots$ ;  $L$  表示 NEP 和影响因素的分层;  $N_h$  和  $N$  分别是第  $h$  层和整个区域的单位数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  是第  $h$  层和整个区域的方差;  $SSW$  表示层内方差之和;  $SST$  表示全区总方差。

## 2 结果与分析

### 2.1 徐州市 NEP 时空变化特征

#### 2.1.1 NEP 年际变化特征

2001—2023 年徐州市植被 NEP 多年平均值为  $141.36 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 年际变化率为  $1.690 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。2013 年, 徐州市 NEP 最小, 为  $71.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 2021 年, 植被 NEP 达到最大值  $204.79 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (图 2)。整体来看, 徐州市植被 NEP 年均值呈波动上升趋势, 碳循环以碳汇为主 ( $\text{NEP} > 0$ )。其变化大致可分为“上升—下降—上升”3 个阶段。在生态转型起步阶段的 2001—2007 年, 政策引导对控制污染、保护生态环境起到积极作用, 推动徐州市 NEP 平均值上升, 区域年均 NEP 由 2001 年的  $81.97 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  上升至 2007 年的  $189.82 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 显著增强植被碳吸收能力。而在转型推进阶段的 2007—2013 年, 伴随着潘安湖、九里等城市湿地公园的大力建设, 植被扰动导致徐州市 NEP 平均值呈整体下降趋势, 区域年均 NEP 由 2007 年的  $189.82 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  下降至 2013 年的  $71.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。进入转型深化阶段的 2013—2023 年, 政府开展全方位的城市生态修复, 通过增加绿色空间等措施<sup>[16]</sup>, 促使植被碳吸收能力逐渐恢复并增强, 徐州市 NEP 平均值因此呈波动上升趋势, 由 2013 年的  $71.68 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  上升至 2023 年的  $165.98 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。虽然, 徐州市 NEP 平均值呈现显著的波动上升趋势, 但上升过程并非单调递增, 其中存在明显的年际波动。例如, 2023 年的 NEP 值相较于 2021 年的峰值有所回落, 这主要是由于 2023 年特定的气候条件 (如降水分布、干旱时间)、人类活动的短期干扰或其他因素所致, 但并未改变该时间序列整体的增长趋势。说明生态系统演变并非沿直线平滑上升, 而是长期积极政策与短期环境扰动共同作用的结果。

由图 3 可知, 徐州市各县 (区) 2001—2023 年平均 NEP 数值波动较大 [ $-9.85 \sim 176.31 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ], 表明研究区生态恢复能力存在显著差异。10 个行政区中, 睢宁县 NEP 多年平均值最高, 为  $176.31 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 泉山区 NEP 多年平均值最低, 为  $-9.85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。除泉山区外, 所有县 (区) NEP 均为正值, 表明徐州大部分区域生态系统呈现碳汇功能。新沂市 [ $170.91 \text{ g}/$

$\text{m}^2 \cdot \text{a}$ ] 和睢宁县 [ $176.31 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ] 碳汇能力表现最强, 主要与当地农业生态保护和植被覆盖率较高有关。2001—2023 年徐州市各县 (区) NEP 年际变化 (图 4) 表明, 10 个行政区中, 睢宁县和新沂市 NEP 长期保持在  $150 \sim 250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 波动幅度小; 邳州市和铜山区 2001—2010 年 NEP 在  $50 \sim 100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  间波动, 2012 年后快速上升至  $150 \sim 200 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 主要受退耕还林工程和采矿塌陷区生态修复的影响, 植被覆盖率提高; 沛县和丰县 NEP 在  $0 \sim 200 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  间剧烈波动, 如沛县 2013 年突降至  $43.49 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 2020 年反弹至  $201.38 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 主要与集约化农业对气候敏感性高, 或土地利用快速转换有关; 泉山区多次出现负值 [最低  $-49.85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ], 云龙区 NEP 长期低于  $50 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 主要原因是主城区热岛效应和工业排放导致生态系统碳释放较多。

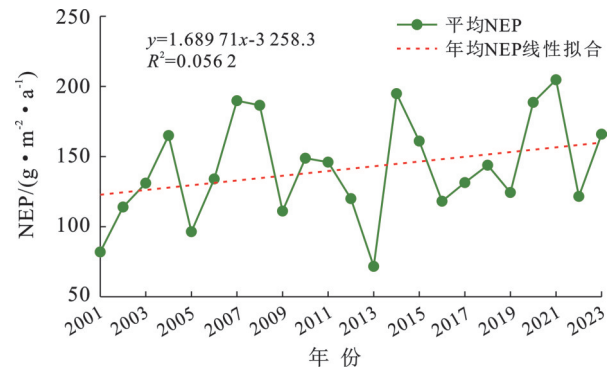


图 2 2001—2023 年徐州市年均 NEP (以 C 计)  
Fig.2 Average annual NEP changes in Xuzhou City (2001—2023, calculated as C)

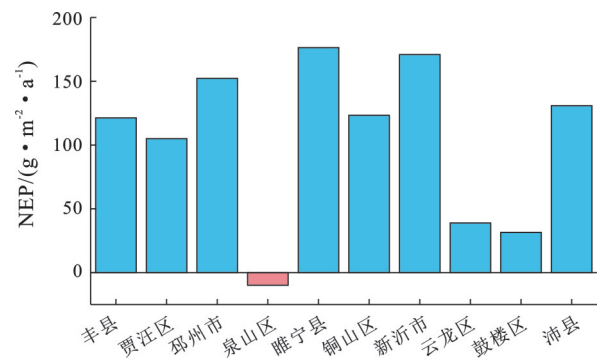


图 3 2001—2023 年徐州市各县 (区) 年均 NEP (以 C 计)  
Fig.3 Average NEP changes in different counties and districts of Xuzhou City (2001—2023, calculated as C)

#### 2.1.2 NEP 空间变化特征

2001—2023 年徐州市植被净初级生产力 (NPP) 的高值区主要分布在东南部的睢宁县和新沂市, 低值区主要分布在西北部 (图 5a), 主要与集约化旱作农业与城市扩张导致植被生产力受限有关。土壤微生物

呼吸量( $R_h$ )空间分异整体差异较小[292.50~317.50  $g/(m^2 \cdot a)$ ],但呈现东北低、西南高的分布格局(图5b)。净生态系统生产力(NEP)呈现显著的空间分异特征(图5c),表现为NEP由西北向东南逐渐增加的趋势(图6),整体呈现“西北、东南高,中部低”的分布格局<sup>[17]</sup>。从研究区整体来看,徐州市NEP为-186.34~264.56 [ $g/(m^2 \cdot a)$ ],植被碳循环均呈现为碳汇状态。从各行政区来看,NEP低值区主要集中在鼓楼区、云龙区和泉山区,多年年均值分别为31.52, 38.94和-9.85  $g/(m^2 \cdot a)$ 。鼓楼区、云龙区和泉山区主要为徐州市经济中心,经济发达,人口相对集中,植被相对较少。NEP高值区主要集中在睢宁县、邳州市和新沂市,多年年均值分别为176.31, 152.28和170.91  $g/(m^2 \cdot a)$ 。NEP中值区主要集中在铜山区、贾汪区、丰县和沛县,分别为123.30, 104.10, 121.27和130.86  $g/(m^2 \cdot a)$ 。2001—2023年徐州市碳源/汇空间分布(图5d)表明,徐州市大部分区域以碳汇为主,而碳源区主要分布在泉山区、云龙区和鼓楼区。呈现出

中心城区碳源较多,边缘地区碳汇较多的空间格局,表明在资源型城市转型过程中,中心区域仍是碳排放的主要来源,而边缘地区则是碳吸收的主要区域。

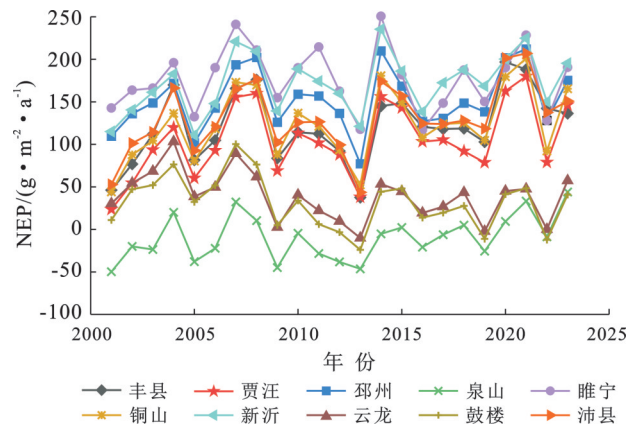


图4 2001—2023年徐州市各县区NEP年际变化情况(以C计)  
Fig.4 Inter-annual NEP changes in different counties and districts of Xuzhou City (2001—2023, calculated as C)

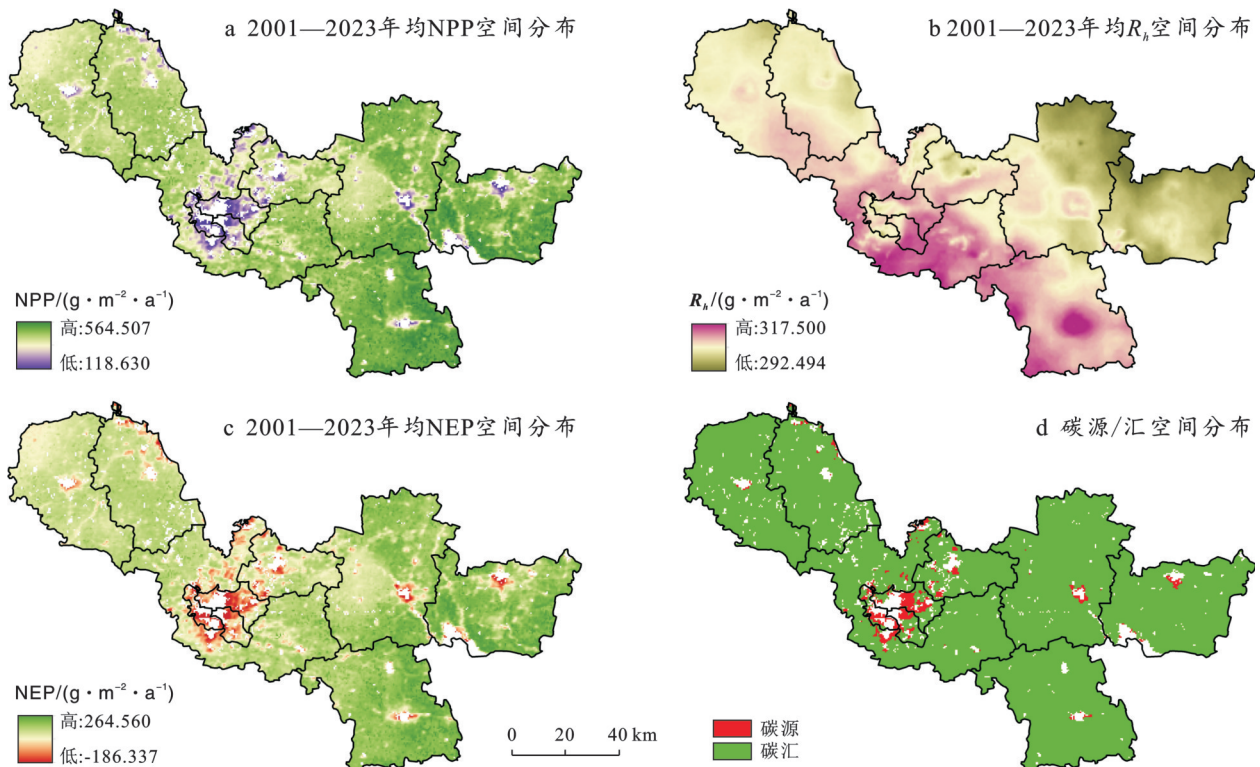


图5 徐州市NPP,  $R_h$ , NEP和碳源/汇空间分布示意图(以C计)

Fig.5 Schematic diagram of spatial distribution of NPP,  $R_h$ , NEP, and carbon source/sink in Xuzhou City (calculated as C)

## 2.2 NEP变化趋势及稳定性分析

基于显著性检验结果,将NEP变化趋势分为9类。研究结果显示(图7a),2001—2023年徐州市NEP呈增加趋势的区域占徐州市的67.70%。其中,极显著增加和显著增加分别占11.84%和14.02%,主要集中在丰县、沛县、铜山区西北部、贾汪区西北部、

邳州市西北部、新沂市南部和东南部,其空间分布与城市转型中退耕还林工程与历史遗留矿区的生态修复工程有关。微显著增加和不显著增加的区域分别占8.24%和33.60%,主要集中在贾汪区南部、铜山区东北部、邳州市南部和睢宁县。NEP呈减少趋势的地区占徐州市的13.49%。其中,极显著减少和显著

减少分别占 1.13% 和 0.67%，主要集中在各城市的中心城区位置，主要与资源型城市转型发展过程中持续人口增加和城市扩张对城区植被造成破坏密切相关。微显著减少和不显著减少的地区分别占 0.49% 和 11.20%，主要分布在邳州市和睢宁县。无变化地

区占徐州市的 18.81%。

总体来看，徐州市 NEP 呈增加趋势的地区大于呈减少趋势的地区，这一显著对比表明在资源型城市转型战略的持续推动下，徐州市碳汇能力呈整体增强趋势。

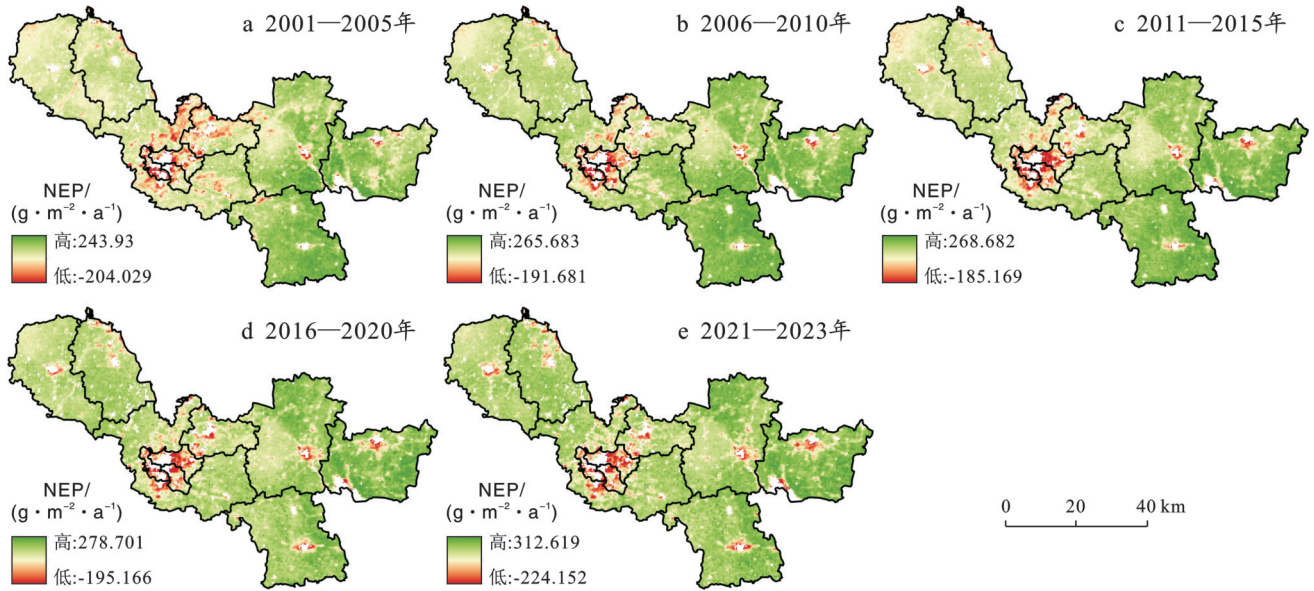


图 6 徐州市 2001—2023 年 5 个时段 NEP 空间分布示意图 (以 C 计)

Fig.6 Spatial distribution of NEP in five periods of Xuzhou City (2001—2023, calculated as C)

徐州市 NEP 变异系数空间分布主要以低波动和高波动为主 (图 7b)，分别占研究区的 18.81% 和 74.04%。高波动区域远大于低波动区域，呈现出资源型城市转型生态系统稳定性相对薄弱的特征<sup>[18]</sup>。低波动区域主要分布在泉山区、鼓楼区、云龙区、贾汪区西部和邳州市的南部，这些区域主要是各行政区的城市中心地带，植被相对较少，NEP 稳定性较

高，波动较小。较高波动区域主要分布在邳州市东南部、新沂市、睢宁县东部。高波动区域主要分布在丰县、沛县、铜山区东部、邳州市北部和西部和睢宁县西部等地区，这些区域主要是耕地、林地等生态系统，在资源型城市转型发展过程中，容易受到自然或人为因素的干扰，在城市化扩张、人类活动的干扰下，NEP 稳定性较低，波动较大。

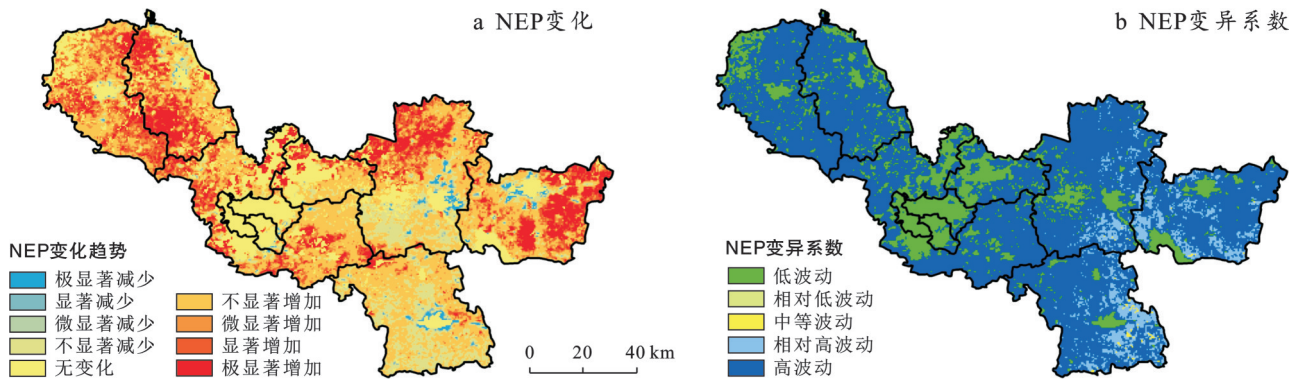


图 7 徐州市 NEP 变化趋势及波动情况空间分布示意图

Fig.7 Spatial distribution of trend and fluctuation of NEP changes in Xuzhou City

### 2.3 NEP 可持续性分析

基于 Hurst(*H*) 指数的徐州市 NEP 可持续性分析表明 (图 8a)，*H* 值空间分异特征显著，全域范围为 0.187~0.739，均值为 0.425 (小于 0.5)，表明该时间序

列具有显著的反持续性特征。意味着从长期统计规律来看，徐州市 NEP 的未来变化趋势 (20~30 a) 存在较高的可能性与过去 23 a (2001~2023) 的整体上升趋势相反，即呈现出波动下降的倾向。Hurst 指数揭

示的是一种长期动量特征,而非精确的短期预测,趋势的反转可能发生在未来的数年(20~30 a)甚至更长的时间尺度上。空间格局显示, $H < 0.5$ 的逆持续性区域占研究区面积的66.66%,分布范围广,且多呈片状分布,主要分布在徐州市东部和东南部。 $H > 0.5$ 的持续性区域占比14.23%,主要分布在徐州市的西北部。徐州市呈反持续性的区域大于呈持续性的区域,即大部分区域NEP未来变化趋势与过去相反。意味着过去20 a多所观察到的NEP变化模式很可能不会无限期地持续下去,在制定长期生态管理措施时,必须将这种趋势反转的可能性纳入考量范围中。

将NEP变化趋势和Hurst指数叠加可得到NEP未来变化趋势。徐州市NEP未来变化趋势可划分为

4类演变模式(图8b):持续性增加、逆持续性增加、持续性减少、逆持续性减少,各演变模式类型占比排序为逆持续性增加(54.92%)>持续性增加(12.53%)>逆持续性减少(11.40%)>持续性减少(1.70%)。其中,徐州市NEP未来持续增加的区域主要分布在西北部的沛县和丰县;未来由增加转变为减少的区域主要分布在铜山区、邳州市北部和新沂市等地区;未来由减少转变为增加的区域主要分布在邳州市南部和睢宁县。根据可持续性分析结果,徐州市作为资源型城市,其大部分地区碳汇功能在未来存在减弱风险,因此亟需在生态敏感区或碳汇波动区持续投入,加大造林种草等生态修复力度,以加强和巩固转型过程中的生态环境治理成效<sup>[19]</sup>。

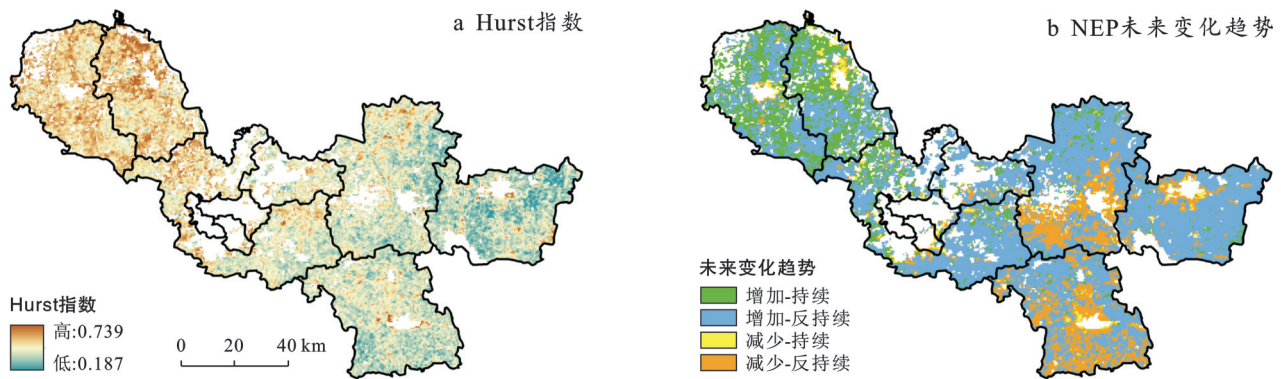


图8 徐州市Hurst指数及NEP未来变化趋势空间分布

Fig.8 Spatial distribution of Hurst index and future trend of NEP changes in Xuzhou City

## 2.4 NEP变化的驱动因素

### 2.4.1 驱动因子选取

本研究的时间序列始于2001年。到2010年,徐州市的生态建设正处于一个关键的基础期和探索期,能够体现产业结构调整前NEP的基础格局。并且,此时,一系列重大的生态环保政策正处于酝酿和初步实施阶段。分析2010年有助于理解后续变化的起点;2017年作为中期节点,既承载资源型城市转型和生态修复政策深入实施的关键过程,又是体现NEP波动上升的重要阶段,其生态效益在2017年左右开始集中显现。选择此年可以探究政策驱动从“投入”到“产出”的关键转变;2021年则位于研究时段后期,2021年的NEP值达到研究序列中的一个新高点,代表当前生态系统碳汇功能所达到的较高水平,体现了在“生态文明建设”与“碳达峰碳中和”战略背景下NEP的最新响应特征。因此,本研究选取2010,2017和2021年作为驱动因子探测的代表年份,探究徐州市NEP的驱动机制。通过3个阶段代表年份的对比分析,揭示徐州市NEP驱动因子在时间维度上的差异性与演变机制。

选取土地利用类型、气温、降水量、归一化植被

指数(NDVI)、高程、坡度、坡向、GDP、人口密度、夜间灯光、土壤侵蚀、PM<sub>10</sub>、斑块内连接度指数和分散指数等14个因子对2001—2023年徐州市NEP的影响因素进行定量分析(表2)。

表2 驱动因子选取

Table 2 Selection of driving factors

类型	因子
人类活动因子	土地利用类型( $X_1$ )
气候因子	年平均降水量( $X_2$ )
气候因子	年平均气温( $X_3$ )
植被因子	归一化植被指数(NDVI)( $X_4$ )
地形因子	高程( $X_5$ )
地形因子	坡度( $X_6$ )
地形因子	坡向( $X_7$ )
社会经济因子	国内生产总值(GDP)( $X_8$ )
人类活动因子	人口密度( $X_9$ )
社会经济因子	夜间灯光( $X_{10}$ )
人类-自然复合因子	土壤侵蚀指数( $X_{11}$ )
人类-自然复合因子	PM <sub>10</sub> ( $X_{12}$ )
景观格局因子	斑块内连接度指数( $X_{13}$ )
景观格局因子	分散指数( $X_{14}$ )

2.4.2 连续型因子离散化

选取自然断点法、几何间距法、分位数法、相等间隔分类法、标准差分类法 5 种方法对自变量进行离散化处理<sup>[20]</sup>,将分类数设置为 3~10 类,计算不同离散化组合下  $q$  值的大小,选择  $q$  值最大的离散化方法和离散数的组合作为最优离散化组合(表 3)。

2.4.3 单因子探测分析

不同因子对 NEP 变化的解释力表现出明显的差异。由表 4 和图 9 可知,2010 年各因子解释力  $q$  值排名为:  $PM_{10}(X_{12}) > GDP(X_8) > 人口密度(X_9) > NDVI(X_4) > 土壤侵蚀(X_{11}) > 夜间灯光(X_{10}) > 年平均降水量(X_2) > 年平均气温(X_3) > 斑块内连接度指数(X_{13}) > 高程(X_5) > 土地利用类型(X_1) > 分散指数(X_{14}) > 坡度(X_6) > 坡向(X_7)$ 。其中,  $PM_{10}$  的  $q$  值为 0.454,  $GDP$  的  $q$  值为 0.380, 人口密度的  $q$  值为 0.371,

坡向未通过 95% 的显著性检验。2017 年各因子解释力  $q$  值排名为:  $NDVI(X_4) > 夜间灯光(X_{10}) > GDP(X_8) > PM_{10}(X_{12}) > 土壤侵蚀(X_{11}) > 人口密度(X_9) > GDP(X_8) > PM_{10}(X_{12}) > 土地利用类型(X_1) > 斑块内连接度指数(X_{13}) > 年平均气温(X_3) > 分散指数(X_{14}) > 年平均降水量(X_2) > 高程(X_5) > 坡度(X_6) > 坡向(X_7)$ 。其中,  $NDVI$  的  $q$  值为 0.569, 夜间灯光的  $q$  值为 0.483, 土壤侵蚀的  $q$  值为 0.359, 坡向未通过 95% 的显著性检验。

表 3 连续型因子离散化方法和分类数

Table 3 Discretization methods and number of categories for continuous factors

年份	方法及类数	驱动因子												
		$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$
2010	离散化方法	分位数	分位数	相等间隔	自然断点	自然断点	几何间距	分位数	分位数	分位数	自然断点	几何间距	几何间距	自然断点
	分类数	9	8	10	10	9	10	10	8	9	10	10	3	9
2017	离散化方法	自然断点	分位数	自然断点	自然断点	几何间距	相等间隔	几何间距	分位数	几何间距	几何间距	自然断点	几何间距	自然断点
	分类数	10	10	9	10	8	10	7	8	9	10	10	3	9
2021	离散化方法	分位数	几何间距	自然断点	自然断点	自然断点	自然断点	几何间距	几何间距	自然断点	几何间距	相等间隔	几何间距	分位数
	分类数	8	9	10	10	7	10	8	4	10	9	9	3	10

注:表中驱动因子符号  $X$  的含义见表 1。下同。

表 4 单因子探测结果

Table 4 Single-factor detection results

年份	解释力( $q$ ) 及显著性( $p$ )	驱动因子													
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$
2010	$q$ 值	0.059	0.144	0.136	0.368	0.070	0.042	0.002	0.380	0.371	0.268	0.322	0.454	0.080	0.056
	$p$ 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.873	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2017	$q$ 值	0.064	0.143	0.121	0.364	0.024	0.008	0.001	0.319	0.228	0.345	0.289	0.310	0.083	0.029
	$p$ 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.455	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2021	$q$ 值	0.095	0.038	0.063	0.569	0.015	0.007	0.001	0.303	0.350	0.483	0.359	0.134	0.076	0.043
	$p$ 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.137	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

2010 年属于污染驱动时期,  $PM_{10}$  对徐州市 NEP 空间分异的解释力最强,  $GDP$ 、人口密度紧随其后, 表明粗放发展期工业污染与经济活动对生态系统具有严重的影响。2017 年属于转型过渡期,  $NDVI$  对徐州市 NEP 的解释力升至第一, 与夜间灯光、 $GDP$  形成新三角驱动,  $PM_{10}$  解释力下降至第四。2021 年属于生态主导时期,  $NDVI$  的解释力继续上升至 0.569,

夜间灯光解释力保持第二, 土壤侵蚀取代  $GDP$  成为第三大驱动因子,  $PM_{10}$  进一步下降至第六, 表明生态修复成为 NEP 提升的核心驱动引擎。  $NDVI$  解释力从 2010 年的 0.368 上升至 2021 年的 0.569, 增幅 55%, 表明植被覆盖对碳汇能力的决定性作用。夜间灯光解释力始终稳居前三, 表明经济活跃度与 NEP 存在深度关联。  $PM_{10}$  解释力从第一下降至第

六,表明产业绿色转型对污染因子的成功剥离。坡向在 3 个时期均未通过 95% 的显著性检验,表明地形因素对徐州 NEP 无实质性影响。综合 3 个时期的单因子探测结果来看,社会经济因素、人类活动因素、人类-自然复合因素对徐州市 NEP 变化的影响力整体高于气候因素、地形因素和景观格局因素<sup>[21]</sup>。气候因素中降水( $X_2$ )和气温( $X_3$ )也对徐州市植被 NEP 存在着一定的影响,植被生长发育和呼吸作用都会受到降水量、气温的影响,从而影响着植被 NEP 的变化<sup>[22]</sup>。

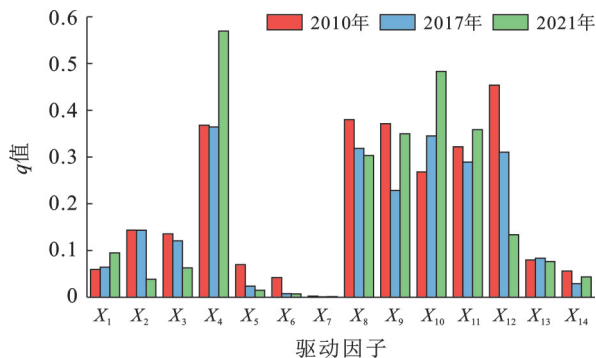


图 9 单因子探测结果柱状图

Fig.9 Bar chart of single-factor detection results

#### 2.4.4 交互因子探测分析

净生态系统生产力(NEP)的演变机制具有多维驱动特征,其变化过程不仅受单一环境因子的独立作用,更受多因子耦合效应的非线性调控。大部分双因子组合的交互解释力均显著超越单因子独立作用,具体表现为双因子协同增强 $[q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))]$ 或非线性增强关系 $[q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)]$ <sup>[23]</sup>。

2010 年交互探测结果(图 10a)表明,  $X_4$ (NDVI) $\cap X_{12}$ (PM<sub>10</sub>)的交互解释力最强,为 0.690,其次是  $X_4$ (NDVI) $\cap X_8$ (GDP),为 0.640,  $X_{13}$ (斑块内连接度指数) $\cap X_7$ (坡向)最低,为 0.008。  $X_{12}$ (PM<sub>10</sub>)为单因子和交互作用的主导驱动因子,其单因子  $q$  值达 0.454,且与  $X_8$ (GDP)交互  $q$  值上升至 0.602,与  $X_4$ (NDVI)交互  $q$  值为 0.690,表明工业污染、经济扩张和污染抑制植被对徐州市植被碳汇能力存在双重抑制作用。GDP( $X_8$ )、人口密度( $X_9$ )、夜间灯光( $X_{10}$ )三者相互交互  $q$  值均超过 0.350,且三者与 PM<sub>10</sub> 发生交互时  $q$  值均在 0.550 以上。  $X_{13}$ (斑块连接度)与  $X_{14}$ (分散指数)最高交互  $q$  值仅 0.056,且单因子  $q$  值较小,景观格局作用微弱,表明转型初期空间规划尚未发力。2017 年交互探测结果表明,  $X_4$ (NDVI) $\cap X_{12}$ (PM<sub>10</sub>)的交互解释力最强(图 10b),为 0.499,其次是  $X_2$ (降

水) $\cap X_4$ (NDVI),为 0.489,  $X_7$ (坡向) $\cap X_{13}$ (斑块连接度)最低,为 0.005。  $X_4$ (NDVI)与  $X_{12}$ (PM<sub>10</sub>)发生交互作用时,解释力依旧最强,标志植被碳汇与污染治理形成协同增效,但较 2010 年同组合相比  $q$  值下降 27.68%,表明生态工程通过 NDVI 提升消除部分污染胁迫,建立“以绿制污”的新平衡。  $X_2$ (降水)与  $X_4$ (NDVI)交互解释力位居第二,表明转型中期自然水热条件与植被恢复耦合,生态补水工程放大降水对碳汇的正向调节作用。  $X_{11}$ (土壤侵蚀)上升为关键驱动因素,与  $X_4$ (NDVI)交互  $q$  值为 0.449,与夜间灯光交互  $q$  值为 0.423。  $X_{13}$ (斑块连接度)与  $X_{14}$ (分散指数)交互  $q$  值下降,表明在转型中期,空间规划在生态治理中存在缺失。2021 年徐州市 NEP 交互探测结果显示,  $X_4$ (NDVI) $\cap X_{11}$ (土壤侵蚀)的交互解释力最强(图 10c),为 0.620,且  $X_4$ (NDVI)与其他因子交互  $q$  值均在 0.550 以上,再次印证植被覆盖是驱动碳汇的核心中枢。其次是  $X_2$ (降水) $\cap X_4$ (NDVI),为 0.619,  $X_7$ (坡向) $\cap X_{13}$ (斑块连接度)依旧为最低,为 0.012。  $X_{11}$ (土壤侵蚀)与其他因子交互  $q$  值均在 0.450 以上。  $X_{13}$ (斑块连接度)与  $X_{14}$ (分散指数)交互  $q$  值由 2017 年的 0.029 提高至 0.044,表明进入生态主导期,空间规划开始发力。  $X_{12}$ (PM<sub>10</sub>)与其他因子交互  $q$  值下降,表明退出核心驱动序列,体现出大气治理的成效。

综合徐州市 3 个时期的交互探测结果,徐州市资源转型过程中,植被覆盖率、污染胁迫、水土保持、社会经济、人类活动是净生态系统生产力(NEP)变化的主要驱动因素,气温、降水等气候因素和景观格局因素是次要驱动因素<sup>[24]</sup>。

## 3 讨论

本研究聚焦于典型资源型城市徐州市的城市转型,借助 NEP 估算模型、土壤微生物呼吸模型和参数最优地理探测器技术对徐州市 2001—2023 年 NEP 的时空变化特征及驱动机制进行深入分析。鉴于目前大多数研究主要集中在探究气候因子与 NEP 的相互影响,对其他相关影响因子的研究相对缺乏。因此,本研究引入参数最优地理探测器对气候因子、社会经济因子、人类活动因子、地形因子、人类-自然复合因子和景观格局因子等转型关键影响因子进行深入探究。

徐州市 2001—2023 年植被净生态系统生产力(NEP)平均值为 141.36 g/(m<sup>2</sup>·a),年际变化率为 1.690 g/(m<sup>2</sup>·a),植被 NEP 年均值呈波动上升趋势,碳循环整体以碳汇为主(NEP>0),并且碳汇能力呈增强趋势。这一研究结果与 Huang Yutao 等<sup>[25]</sup>采用

归一化植被指数(NDVI)、平均温度和日照时数驱动 C-FIX 模型模拟得出的结论高度一致,其研究指出 2000—2019 年中国陆地生态系统的年平均 NEP 为 1.08 Pg,同样呈现出显著的上升趋势,中国陆地生态系统一直呈现碳汇存在且碳汇能力显著增加,NEP 分布存在空间差异。这共同印证包括徐州市在内的中国区域生态系统碳汇功能在近 20 a 的整体提升,而徐州市作为资源型城市实现碳汇能力的持续增强,更凸显其在生态转型过程中取得的积极成效。

本研究采用参数优化地理探测器(OPGD)对徐州市 NEP 空间异质性进行多因子驱动机制探究,选取涵盖自然与人文领域的 14 类驱动因素开展驱动机制研究。定量解析表明,植被覆盖、污染胁迫、水土保持、社会经济、人类活动是徐州市净生态系统生产力(NEP)变化的主要驱动因素,其解释力( $q$  值)显著超越自然因子。这一发现与 Yang Haifeng 等<sup>[26]</sup>在典型煤矿开采城市淮北市的研究结论形成空间实证呼应,后者基于 CASA-NEP 模型同样揭示人类活动强度参数(人口密度、GDP、路网密度)对生态系统碳汇具有主导性调控作用。值得注意的是,双因子交互产生的非线性增强效应 $[q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)]$ 在两地研究中均显著提升模型解析力,证实高强度人类干扰背景下社会经济要素对生态过程的胁迫作用具有普适性空间规律。

结合徐州市在城市转型中的 NEP 演变特征与驱动因子识别结果,未来提升区域碳汇能力应从以下几个方面统筹推进。①持续推进植被恢复与优化工程,因地制宜扩大森林、草地和湿地覆盖,强化矿区塌陷地、工矿废弃地的生态修复,提升整体植被覆盖度与连通性,增强固碳潜力;②加大环境污染治理力度,推动清洁能源和绿色产业替代,降低污染胁迫对植被光合作用与土壤微生物过程的抑制作用;③强化水土保持与生态基础设施建设,通过坡耕地整治、河流湿地修复、绿廊建设等措施,提高区域土壤水分与养分保持能力,为植被稳健生长提供良好环境;④合理调控经济发展与人类活动强度,优化城市扩展格局,避免无序建设对生态空间的挤压。

本研究虽然系统揭示徐州市 2001—2023 年 NEP 的时空演变规律及其驱动机制,但仍存在不足之处。首先,数据源主要依赖于 MOD17A3 遥感产品,其空间分辨率和精度在复杂城市-农业交错区仍有限,可能导致局地碳收支估算存在偏差;其次,本研究采用的 Theil-Sen 回归、变异系数与 Hurst 指数等方法虽能够较好刻画趋势与波动,但对生态系统内部过程(如光合作用效率、土壤呼吸强度、土地利用变化对碳循环的直接反馈等)的研究仍不够深入。未来的研究应在跨尺度数据融合、生态过程建模与人类活动机制解释等方面实现突破,从而为资源枯竭型城市的碳收支评估与生态修复实践提供更加坚实的科学依据。

### 4 结论

(1) 2001—2023 年徐州市的净生态系统生产力(NEP)平均值为 141.36 g/(m<sup>2</sup>·a),年际变化率为

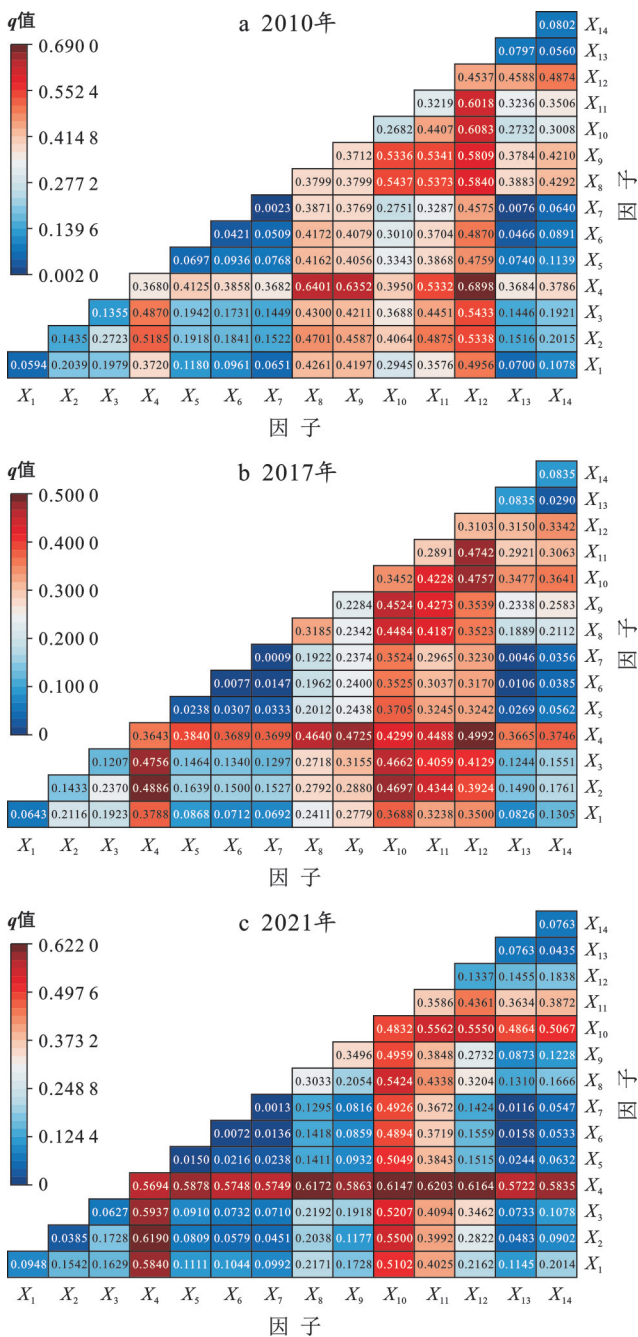


图 10 2010, 2017, 2021 年交互探测结果  
Fig.10 Results of interactive detection in 2010, 2017 and 2021

1.690 g/(m<sup>2</sup>·a)。徐州市NEP年均值呈波动上升趋势,其变化大致可分为“上升—下降—上升”3个阶段,体现了生态转型起步、推进与深化的进程。徐州市NEP呈现显著的空间分异特征,表现为NEP由西北向东南逐渐增加,呈现“西北、东南高,中部低”的分布格局。

(2) 2001—2023年徐州市NEP呈增加趋势的地区占徐州市的67.70%,呈减少趋势的地区占徐州市的13.49%。徐州市NEP变异系数主要以高波动为主,占研究区面积的74.04%,表明NEP稳定性相对偏低,波动性较大。

(3) 徐州市Hurst指数为0.187~0.739,均值为0.425。徐州市呈反持续性的区域大于呈持续性的区域,表明徐州市NEP未来变化趋势与过去23a的变化相反。

(4) 转型时期,影响徐州市NEP空间分异的主导驱动因子发生显著变化,从2010年的PM<sub>10</sub>和GDP转变为2017年和2021年的NDVI和夜间灯光。交互探测结果表明,从2010年污染与经济的强抑制组合转向2021年植被覆盖和水土保持的协同增效,表明城市发展模式从“粗放增长-污染胁迫”向“生态修复-绿色主导”的深度转型。

## 参考文献 (References)

- [1] Leggs. Climate change 2021: The physical science basin [J]. *Interaction*, 2021, 49(4): 44-45.
- [2] 张永香, 黄磊, 周波涛, 等. 1.5℃全球温控目标浅析[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(4): 299-305.  
Zhang Yongxiang, Huang Lei, Zhou Botao, et al. The preliminary interpretation on 1.5 °C global temperature goal [J]. *Climate Change Research*, 2017, 13 (4) : 299-305.
- [3] Liang Liang, Wang Qianjie, Qiu Siyi, et al. NEP estimation of terrestrial ecosystems in China using an improved CASA model and soil respiration model [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 10203-10215.
- [4] 林黛仪, 周平, 徐卫, 等. 基于集成生物圈模型的南岭不同植被类型碳收支研究[J]. *生态学报*, 2024, 44(4): 1429-1440.  
Lin Daiyi, Zhou Ping, Xu Wei, et al. Carbon budget of different vegetation types in Nanling based on IBIS [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4): 1429-1440.
- [5] 于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春, 等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(7): 771-787.  
Yu Guirui, Wang Qiufeng, Liu Yingchun, et al. Conceptual framework of carbon sequestration rate and potential increment of carbon sink of regional terrestrial ecosystem and scientific basis for quantitative carbon authentication [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(7): 771-787.
- [6] Ye Xin, Chuai Xiaowei. Carbon sinks/sources' spatio-temporal evolution in China and its response to built-up land expansion [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115863.
- [7] 田朋飞, 闫丰, 王宗超, 等. 太行山-燕山碳源/碳汇时空变化及驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(7): 4403-4415.  
Tian Pengfei, Yan Feng, Wang Zongchao, et al. Analysis of driving factors for spatiotemporal changes in carbon sources/sinks in Taihang and Yanshan Mountains [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7): 4403-4415.
- [8] 侯金龙, 马志强, 杨澄, 等. 京津冀地区植被碳源/汇的时空变化特征及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2024, 33(9): 1329-1338.  
Hou Jinlong, Ma Zhiqiang, Yang Cheng, et al. Analysis of spatio-temporal variation of vegetation carbon sources and sinks in the Beijing-Tianjin-Hebei region and influencing factors [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(9): 1329-1338.
- [9] 殷献茹. 资源型城市转型的绿色发展之路: 以徐州市为例[J]. *唯实*, 2020(5): 69-72.  
Yin Xianru. The green development road of the transformation of resource-based cities: Taking Xuzhou as an example [J]. *Reality Only*, 2020(5): 69-72.
- [10] 夏梦茹, 崔云霞, 徐璐, 等. 典型资源枯竭型城市转型绿色发展评价研究: 以徐州市贾汪区为例[J]. *环境生态学*, 2021, 3(5): 6-12.  
Xia Mengru, Cui Yunxia, Xu Lu, et al. Evaluation research on the green development in transformation of typical resource-exhausted cities: A case of Jiawang District, Xuzhou City [J]. *Environmental Ecology*, 2021, 3 (5): 6-12.
- [11] Cao Shengpeng, He Yi, Zhang Lifeng, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation net ecosystem productivity and its response to drought in northwest China [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2023, 60 (1) : 2194597.
- [12] 彭倩蓉, 田义超, 李春燕, 等. 桂西南净生态系统生产力时空变化及其影响因素[J]. *生态科学*, 2024, 43(2): 67-77.  
Peng Qianrong, Tian Yichao, Li Chunyan, et al. Temporal and spatial variation of net ecosystem productivity and its influencing factors in southwest Guangxi [J]. *Ecological Science*, 2024, 43(2): 67-77.
- [13] Wei Xindong, Yang Jie, Luo Pingping, et al. Assess-

- ment of the variation and influencing factors of vegetation NPP and carbon sink capacity under different natural conditions [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108834.
- [14] Lu Zhiwei, Chen Peiwen, Yang Yanrui, et al. Exploring quantification and analyzing driving force for spatial and temporal differentiation characteristics of vegetation net primary productivity in Shandong Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110471.
- [15] 高文晶,程诺,张露月,等.基于参数最优地理探测器的福建省植被NPP时空分异及驱动力探究[J].西北林学院学报,2024,39(4):120-130.
- Gao Wenjing, Cheng Nuo, Zhang Luyue, et al. Spatio-temporal differentiation and driving force of vegetation NPP in Fujian Province based on optimal parameter geographical detector [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(4): 120-130.
- [16] 冯姗姗,罗萍嘉.面向空间规划体系变革的资源型城市生态转型规划策略研究:以徐州市为例[J].上海城市规划,2020(1):55-60.
- Feng Shanshan, Luo Pingjia. Planning strategies of ecological transformation of resource-based cities oriented to spatial planning system reform: A case study of Xuzhou [J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2020 (1): 55-60.
- [17] 徐勇,黄雯婷,郭振东,等.2000—2020年我国西南地区植被NEP时空变化及其驱动因素的相对贡献[J].环境科学研究,2023,36(3):557-570.
- Xu Yong, Huang Wenting, Guo Zhendong, et al. Spatio-temporal variation of vegetation net ecosystem productivity and relative contribution of driving forces in southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(3): 557-570.
- [18] He Jianjian, Zhang Pengyan, Jing Wenlong, et al. Spatial responses of net ecosystem productivity of the Yellow River basin under diurnal asymmetric warming [J]. *Sustainability*, 2018, 10(10): 1640.
- [19] Qi Shuaiyang, Zhang Huaiqing, Zhang Meng. Evolutionary characteristics of carbon sources/sinks in Chinese terrestrial ecosystems regarding to temporal effects and geographical partitioning [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111923.
- [20] 赵晓燕,谈树成,张素,等.基于遥感生态指数改进模型的沱江流域生态环境质量时空变化及驱动力研究[J].水土保持学报,2024,38(5):151-163.
- Zhao Xiaoyan, Tan Shucheng, Zhang Su, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving forces of ecological environment quality in Tuojiang River basin based on RSEI improved modeling [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5): 151-163.
- [21] Wang Mi, Hu Zhuowei, Wang Xuotong, et al. Spatio-temporal variation of carbon sources and sinks in the Loess Plateau under different climatic conditions and land use types [J]. *Forests*, 2023, 14(8): 1640.
- [22] 刘凤,曾永年.2000—2015年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化[J].生态学报,2021,41(14):5792-5803.
- Liu Feng, Zeng Yongnian. Analysis of the spatio-temporal variation of vegetation carbon source/sink in Qinghai Plateau from 2000—2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5792-5803.
- [23] Xu Huanyu, Sun Hao, Zhang Tian, et al. Remote sensing study on the coupling relationship between regional ecological environment and human activities: A case study of Qilian Mountain national nature reserve [J]. *Sustainability*, 2023, 15(14): 11177.
- [24] 裴宏泽,赵亚超,张廷龙.2000—2020年黄土高原NEP时空格局与驱动力[J].干旱区研究,2023,40(11): 1833-1844.
- Pei Hongze, Zhao Yachao, Zhang Tinglong. Analysis of spatial and temporal patterns and drivers of local regional NEP in the Loess Plateau from 2000 to 2020 [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(11): 1833-1844.
- [25] Huang Yutao, Wang Fang, Zhang Lijuan, et al. Changes and net ecosystem productivity of terrestrial ecosystems and their influencing factors in China from 2000 to 2019 [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1120064.
- [26] Yang Haifeng, Chen Wei. Spatio-temporal pattern of urban vegetation carbon sink and driving mechanisms of human activities in Huaibei, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(21): 31957-31971.