

DOI: 10.20103/j.stxb.202407291788

陈卓灵, 朱君瑶, 何庆港, 黄超, 唐昱, 赵雪妍, 张学玲. 2001—2022 年饶河流域森林 NPP 总量的空间分异与影响因素分析. 生态学报, 2025, 45 (17): - .

Chen Z L, Zhu J Y, He Q G, Huang C, Tang Y, Zhao X Y, Zhang X L. Spatial distribution and influencing factors of multi-year NPP accumulation and Anomalous Points in Raohe River Basin from 2001 to 2022. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

2001—2022 年饶河流域森林 NPP 总量的空间分异与影响因素分析

陈卓灵^{1,2}, 朱君瑶², 何庆港³, 黄超^{1,2}, 唐昱², 赵雪妍², 张学玲^{1,2,*}

1 江西农业大学鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 南昌 330045

2 江西农业大学亚热带森林资源培育江西省重点实验室, 南昌 330045

3 江西农业大学江西省自然资源利用科技与管理创新研究基地, 南昌 330045

摘要: 计算森林净初级生产力(NPP)的多年总量, 分析其分布与异常的成因, 对于评估和优化森林长期碳汇功能具有重要意义。以饶河流域为研究对象, 基于 NPP 数据与土地覆被数据, 提取叠加获取 2001—2022 年森林 NPP 总量分布图, 使用 OLS 模型、地理探测器、空间自相关和交叉表等方法对森林 NPP 总量的分布与异常进行分析。结果表明: (1) 2001—2022 年饶河流域森林的减少主要由于耕地和建设用地的占用, 森林增加主要来源于退耕还林, 流域森林面积总体呈下降趋势; (2) 研究期间饶河流域森林的碳吸收量为 122.20TgC, 森林 NPP 总量平均值为 $12.31\text{kgC m}^{-2}(\text{22a})^{-1}$, 范围为 $0\text{—}25.49\text{kgC m}^{-2}(\text{22a})^{-1}$, 其中, 80% 的森林在 $9.26\text{—}16.23\text{kgC m}^{-2}(\text{22a})^{-1}$ 之间, 有过土地利用变更的森林在生长期固碳能力略有下降。(3) 饶河流域森林 NPP 总量分布总体呈东北高、西南低的态势, 其空间分布与 9 种因子的分布均存在显著相关性 ($P < 0.01$), 各影响因子中植被覆盖度、气温、高程、坡度、夜间灯光和土壤类型的影响较强, 并且分布趋势与植被覆盖度、高程、坡度、降水相同, 与气温和夜间灯光的趋势相反。(4) 在 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 空间尺度下, 异常点的分布受到交通与水系分布的极显著影响 ($P < 0.001$), 道路对异常高值分布的影响远高于河流, 而对异常低值的影响略低于河流。研究探析了饶河流域森林 22 年碳吸收量的空间差异与成因, 以期为林业长期固碳功能评价、风险点识别与可持续发展提供理论依据和技术支持。

关键词: 饶河流域; 鄱阳湖流域; 森林 NPP; 碳汇; 莫兰指数; 相关性分析

Spatial distribution and influencing factors of multi-year NPP accumulation and Anomalous Points in Raohe River Basin from 2001 to 2022

CHEN Zhuoling^{1,2}, ZHU Junyao², HE Qinggang³, HUANG Chao^{1,2}, TANG Yu², ZHAO Xueyan², ZHANG Xueling^{1,2,*}

1 Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Basin, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2 Jiangxi Provincial Key Laboratory of Subtropical Forest Resources Cultivation, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

3 Jiangxi Provincial Innovation Research Base of Natural Resources Utilization Technology and Management, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract: It is important to calculate the multi-year total of forest net primary productivity (NPP) and analyze its distribution and anomalies for evaluating and optimizing the long-term carbon sequestration function of forests. This study takes the Raohe River Basin as the research area, utilizing NPP data and land cover data to extract and overlay forest NPP

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31660140, 31560150); 江西省土地开发整理中心项目 (9131207547)

收稿日期: 2024-07-27; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ok_zhangxl@126.com

information, thereby generating a spatial distribution map of total forest NPP from 2001 to 2022. Analytical methods such as the Ordinary Least Squares (OLS) model, geographic detectors, spatial statistics, and cross-tabulation were applied to investigate the spatial distribution patterns and anomalies of total forest NPP. The results showed that: (1) The decrease of forest in Raohe River Basin from 2001 to 2022 was mainly due to the occupation of cropland and construction land, while the increase of forest was mainly resulted from returning farmland to forests. Overall, the forest area in the basin showed a declining trend. (2) During the study period, the sequestration capacity of forests in Raohe River Basin was 122.20TgC, with an average total forest NPP of $12.31\text{kgC m}^{-2}(22\text{a})^{-1}$, ranging from 0 to $25.49\text{kgC m}^{-2}(22\text{a})^{-1}$. Among these, 80% of the forests had NPP values between 9.26 and $16.23\text{kgC m}^{-2}(22\text{a})^{-1}$. Forests with land-use changes had a slight decrease in carbon sequestration capacity during the growth period. (3) The overall spatial distribution of total forest NPP in the Raohe River Basin exhibited a general pattern of higher values in the northeast and lower values in the southwest. The spatial distribution was significantly correlated ($P < 0.01$) with the distribution of all nine factors. Among these, the influence of vegetation coverage, temperature, elevation, slope, nighttime light intensity, and soil type were stronger. and the distribution trend was consistent with vegetation coverage, elevation, slope, and precipitation, but opposite to the trends of temperature and nighttime light. (4) At the spatial scale of $500\text{m} \times 500\text{m}$, the distribution of anomaly points was significantly affected by transportation and water system distribution ($P < 0.001$). The influence of roads on the distribution of high-value anomalies was much higher than that of water systems, while the influence of roads on low outliers was slightly lower than that of water systems. This study investigates the spatial variation and underlying causes of forest carbon sequestration in the Raohe River Basin over a 22-year period, which can provide theoretical support and technical guidance for long-term carbon sequestration function evaluation, the identification of risk points, and sustainable development.

Key Words: Raohe River Basin; Poyang Lake Basin; forest NPP; carbon sink; Moran's I ; correlation analysis

森林是陆地光合产物的生产主体,木材含碳量约为其质量的一半,80%的地上碳储量来自森林^[1-4]。森林 NPP(净初级生产力, Net Primary Productivity)指森林生态系统中植物光合作用固定的碳量,即单位面积单位时间森林植被吸收的二氧化碳总量,这一指标也反映了森林生态系统积累有机物质量的多少,是衡量森林生态系统生产力、健康状况和碳汇功能的关键指标^[5-8]。NPP 通常采用植被指数、气象数据和土地覆盖类型数据,通过 CASA、BEPS、IBIS、BIOME-BGC 等模型估算得到^[9-10]。MOD17A3 NPP 产品是基于 MODIS 卫星数据,采用光能利用率模型和 BIOME-BGC 模型生成的 NPP 数据集,目前已在我国的 NPP 分析领域得到广泛应用^[10-14],也是本文的 NPP 数据源。学界对森林 NPP 的研究角度多样,研究区域广泛。例如,Reichle 等^[15]评估热带、温带与寒温带的年均森林 NPP,林黛仪^[16]、靳专等^[5]分别估算了 2020 年和 2022 年的年度与月度 NPP,成勤^[12]、赵金彩^[17]、周璐红等^[18]研究时间跨度约 20 年的植被 NPP,分析其年度均值、变化趋势和空间分布,研究区覆盖广东南岭、三峡库区、长江流域、黄河流域、陕甘宁等地。

单位时间为月度、季度和年度的 NPP 研究^[19-22]对于了解森林固碳功能的动态变化具有重要作用,但同时也应注意森林生态系统的长周期性和复杂性。20 世纪 40 年代后期我国开始大范围营造人工林^[23],造林面积占比达到全国森林面积的三分之一,并通过封山育林工程保护和恢复森林生态系统,使中国在扩大森林面积和提高森林质量方面取得了巨大成效。然而随着时间推移,我国森林面临着林分老化带来的生长速度减缓、生物量积累减少、生态功能下降等一系列问题。因此,以数十年为时间尺度计算森林 NPP 总量,分析其空间分布与异常点的产生原因,对森林长期碳汇服务功能的评估与提升具有重要意义。

饶河是鄱阳湖流域的重要支流,该流域拥有丰富的森林资源。近年来有不少学者对饶河流域展开过研究,主要涉及土地利用、水源涵养、植被指数、生态服务功能评价等方面^[24-27]。本文基于 MOD17A3 NPP 数据与土地覆被数据,逐年提取累加生成 2001—2022 年饶河流域森林的 NPP 总量分布图。从地形、气候、土壤、植被及人类活动角度选取因子共 9 个,包括高程、坡度、坡向、气温、降水、日照时数、土壤类型、归一化植被指

数(NDVI)和夜间灯光,使用普通最小二乘法(OLS)和因子探测器分析各因子对森林 NPP 总量空间分布的影响。从乡镇、2km×2km 和 500m×500m 三种空间尺度,使用局部莫兰指数识别出森林 NPP 总量高值、低值的聚集区与异常点,计算全局莫兰指数以分析异常点的聚散特征,通过缓冲区和交叉表判断异常点分布与道路、河流分布的相关性。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

饶河是鄱阳湖的重要支流,其两大支流乐安河与昌江在鄱阳县汇入鄱阳湖,形成典型的“一河双干”水系。饶河流域地处江西省东北部(116°37′—118°6′E,28°31′—29°55′N),涉及浮梁县、婺源县、珠山区、昌江区、鄱阳县、乐平市等 9 个县市(图 1),覆盖 105 个乡镇,总面积约 1.3 万 km²。流域整体地势呈东北高、西南低的格局,以山地和丘陵地貌为主。气候温暖湿润,年均气温 11—18℃,年降水量 1500—2000mm,为森林植被生长提供了良好的气候条件,植被覆盖率约为 70%。流域内河网密布,地形复杂多样,生态系统丰富,使其具备较高的研究示范价值。

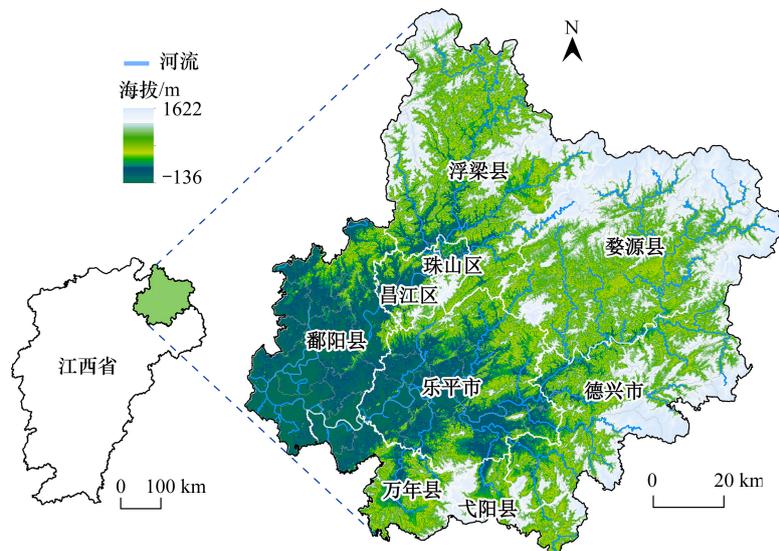


图 1 饶河流域区位图

Fig.1 Location map of the Raohe River Basin

1.2 数据来源

本文研究数据来源见表 1。其中,土地利用数据参照《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)标准将林地与灌木归为森林,重分类为耕地、森林、草地、水域、裸地和建设用地 6 类。森林 NPP 数据通过 MRT (MODIS Reprojection Tool) 软件定义投影,使用栅格计算器剔除异常值,乘以比例因子 0.0001 换算调整。坡度与坡向数据则基于 DEM 数据提取生成,气温、降水和日照时数、NDVI 与夜间灯光取多年的年均值。栅格数据统一分辨率为 30m,统一投影为 WGS_1984_UTM_Zone_50N,与土地利用数据对齐栅格,因子通过自然断点法离散化处理。水系从类型为“water”的字段中提取,道路则包括铁路、高速公路、主干道、次干道、辅路及相关连接线。

1.3 森林 NPP 总量叠加

为全面评估 2001 年至 2022 年饶河流域森林积累的有机物质量,结合逐年的土地利用和 NPP 数据进行综合分析。年度森林范围的界定不仅包含当年年底的森林分布区域,同时考虑到当年损失的森林范围:

当年的森林范围=年底的森林范围+当年损失的森林范围

具体分析使用 ArcGIS 软件,首先从 2001 年至 2022 年逐年的土地利用数据中提取研究区内 22 期森林分布,定义为逐年年底的森林范围。同时,通过栅格计算器分析 2000 年至 2022 年逐年土地利用变化情况,识别各年份的森林增损范围。森林范围与森林损失范围的 NPP 使用掩膜工具逐年提取,采用“镶嵌至新栅格”的方法,并选择“sum”作为运算模式,生成 2001 年至 2022 年饶河流域森林范围的 NPP 总量分布图。

表 1 研究数据基本信息与来源

Table 1 Basic information and sources of research data

数据类型 Data type	格式 Format	时间 Time	期数 Quantity	单位 Unit	分辨率 Resolution	来源 Source
CLCD	栅格	2000—2022 年	23 期	—	30m	zenodo(https://zenodo.org/)
NPP	栅格	2001—2022 年	22 期	kgC m ⁻² a ⁻¹	500m	earthdata(https://earthdata.nasa.gov/)
DEM	栅格	—	1 期	m	30m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
气温	栅格	2000—2022 年	23 期	℃	1km	资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)
降水	栅格	2000—2022 年	23 期	mm	1km	资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)
日照时数	栅格	2000—2020 年	5 期	h	1km	资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)
土壤类型	栅格	—	1 期	—	1km	资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)
NDVI	栅格	2000—2020 年	3 期	—	250m	Zhou ^[28]
夜间灯光	栅格	2000—2020 年	5 期	—	1km	常建波 ^[29]
道路、水系	矢量	—	1 期	—	—	openstreetmap(https://www.openstreetmap.org/)

CLCD:中国土地覆被数据集 China land cover dataset;NPP:净初级生产力 Net primary production;DEM:数字高程模型 Digital elevation model;NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

2 研究方法

2.1 相关性分析

研究使用方差膨胀因子法进行共线性诊断,运用 OLS 模型和地理探测器(Geo-Dectector)的因子探测模块分析各因子与森林 NPP 总量空间分布的相关性强弱^[30-31],采用交叉表判断异常点分布与道路、河流分布的相关性。其中,主要通过因子探测器衡量各自变量对因变量影响强弱,公式为:

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

式中, q 为因子对森林 NPP 总量空间分布的影响力, N 和 σ^2 为整个区域的样本数和方差, N_h 和 σ_h^2 为各变量分层的样本数和方差。 q 值的取值范围为 $[0,1]$,值越大表明因子的影响力越强。此外,结合各因子等间隔梯度下的森林 NPP 总量,直观展示变量间的影响趋势。

2.2 空间自相关分析

考虑到不同空间尺度样本的分析结果可能存在差异^[32-33],研究结合 ArcGIS 的渔网工具,从乡镇、2km 和 500m 三种尺度计算森林 NPP 总量空间自相关关系^[34-36]。采用局部莫兰指数(Anselin Local Moran's I)探析森林 NPP 总量各区域与邻域间的关系,判断高值、低值的聚集区和异常点空间分布,公式为:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3)$$

式中, x_i 和 x_j 是位置 i 和 j 的 NPP 总量, \bar{x} 是 NPP 总量的均值, ω_{ij} 是位置 i 和 j 之间的权重, n 为样本量,下同。采用全局莫兰指数(Global Moran's I)分析研究区森林 NPP 总量以及异常点的空间聚集性,量化空间相关性的强弱和方向,公式为:

$$MI = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Global Moran's I 指数值域为 $[-1, 1]$, 低于 0 表示数据趋向于聚集, 高于 0 表示数据趋向于分散, 绝对值越大表明聚散的程度越高, 并可通过 z 得分和 P 值判断数据是否显著偏离随机分布的期望值。

3 结果与分析

3.1 饶河流域森林面积与 NPP 年度变化

提取分析饶河流域森林逐年的土地利用转移与森林年度 NPP, 结果如下:

从时间上看(图 2), 2001—2022 年饶河流域的森林面积在 9127.1—9704.4km² 之间, 森林覆盖率为 69.5—73.9%。流域森林面积的减少量高于增加量, 2022 年相较于 2001 年森林面积减少了 560.5km² (5.8%)。每年减少的森林面积范围在 16.0—190.7km² 之间, 其中 96.1% 转化为耕地, 3.8% 转化为建设用地; 每年增加的森林面积在 7.4—74.1km² 之间, 主要由退耕还林产生(99.0%)。森林年均 NPP 大小呈锯齿状波动。

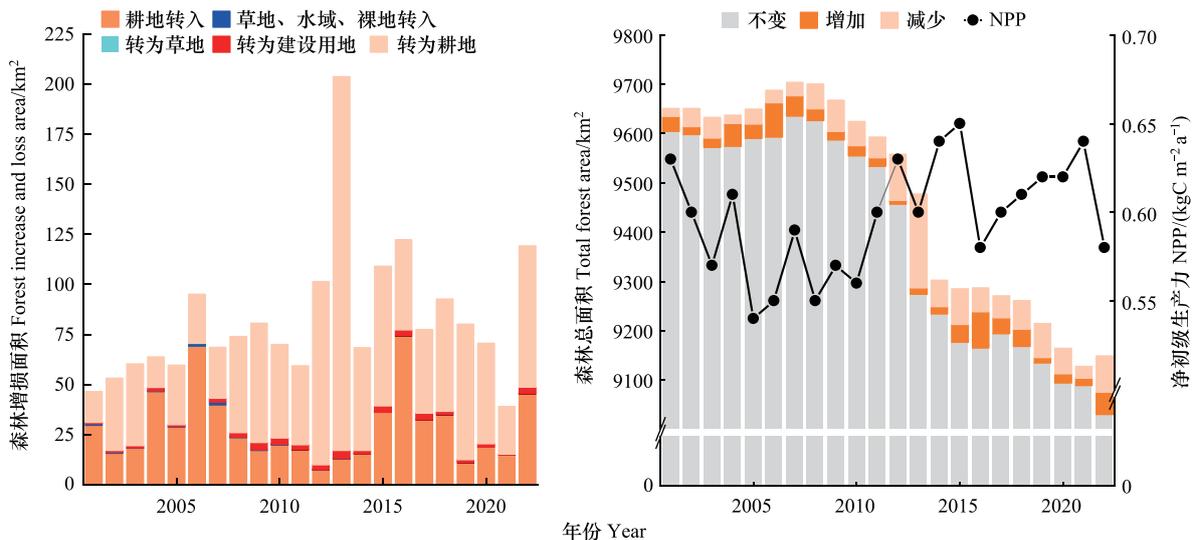


图 2 2001—2022 年饶河流域森林面积与 NPP 年度变化情况

Fig.2 Annual changes in forest area and NPP in the Raohe River Basin 2001 to 2022

从空间上看(图 3), 研究期间饶河流域存在过森林的面积共 9927.7km², 占流域面积的 77.6%。研究区森林的减少主要出现在西南与中部地区, 耕地对林地的占用广泛发生于森林边缘, 建设用地对林地的占用主要出现在城市化进程迅速的区域, 如昌江区、珠山区、浮梁县南部及德兴市的西北部地区, 退耕还林主要发生在地势相对平坦、以粮食蔬菜种植为主要产业的西南部地区, 如鄱阳县和乐平市。值得注意的是, 近 20 年内研究区没有建设用地转为森林的情况出现, 这表明一旦森林转为建设用地, 就很难再恢复为森林。

3.2 饶河流域森林 NPP 总量的空间分布

2001—2022 年饶河流域森林 NPP 总量分布见图 4。在此期间, 饶河流域森林共积累 122.20TgC, NPP 总量范围为 0—25.49kgC m⁻²(22a)⁻¹, 平均值为 12.31kgC m⁻²(22a)⁻¹, 年均积累 0.56kgC m⁻²。大多数森林 NPP 总量在 9.26—16.23kgC m⁻²(22a)⁻¹ 之间, 其余 20% 的分布范围如右图所示。饶河流域森林 NPP 总量在空间上呈现与地形相似的东北高、西南低的分布态势, 西南与中部的鄱阳县、昌江区、珠山区等地总量较低, 流域东北部如浮梁县、婺源县和德兴市总量相对较高, 反映出这些地区近 22 年来的森林固碳能力的差异。

此外, 存在土地利用变更的森林 NPP 总量远低于未发生变动的森林, 分别为 6.73 和 13.13kgC m⁻²(22a)⁻¹。

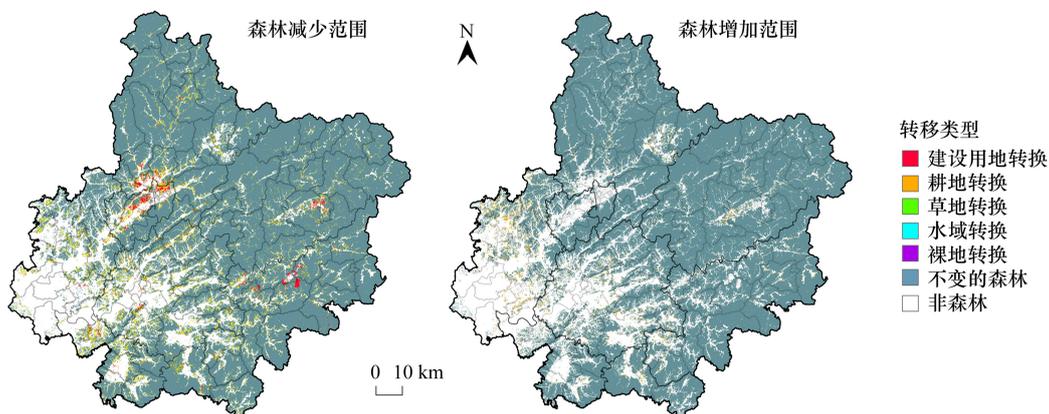


图3 2001—2022年饶河流域森林土地利用转移

Fig.3 Forest land use transitions in Raohe River Basin from 2001 to 2022

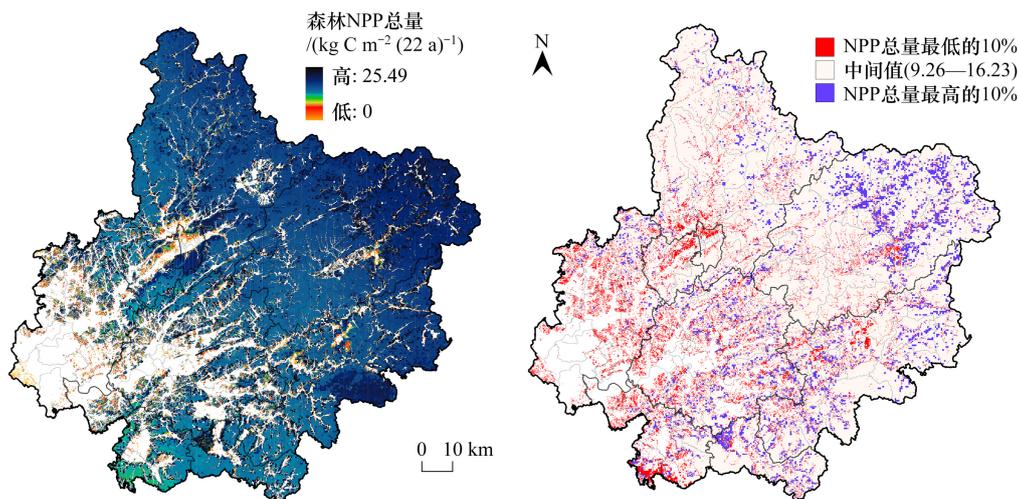


图4 2001—2022年饶河流域森林 NPP 总量分布图

Fig.4 Total forest NPP distribution map of the Raohe River Basin from 2001 to 2022

但考虑到不同栅格范围的森林生长年份有所差异,经计算发现,有土地利用变更范围内的森林平均生长 12.9 年,其在生长期与未发生变动的森林年均 NPP 分别为 0.55 和 $0.60 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 略微下降 8.3%。这表明研究区受干扰的森林在生长期恢复较好,有机物质积累能力与未受干扰的森林接近。

3.3 影响因子分析

选择的 9 种因子对饶河流域森林 NPP 总量的空间分布均存在显著影响 ($P < 0.01$), 除高程 ($VIF = 8.691$) 和气温 ($VIF = 4.810$) 外,其他因子 VIF 值均低于 3,进行相关性分析具有可靠性。各因子与森林 NPP 总量空间分布的相关性 (q 值) 排序分别为, $NDVI (0.171) > \text{气温} (0.103) > \text{高程} (0.101) > \text{坡度} (0.030) > \text{夜间灯光} (0.019) > \text{土壤类型} (0.011) > \text{降水} (0.004) > \text{日照时数} (0.002) > \text{坡向} (0.000)$ 。同时,森林 NPP 总量在各影响因子不同类别中的分布变化如下(图 5)。

结果表明,在各驱动因子中 NDVI 对饶河流域森林 NPP 的解释力最高 ($q = 0.171$),随着 NDVI 的增加,树木生长越茂盛,森林 NPP 总量呈上升趋势。地形因子的高程和坡度对森林 NPP 总量的空间分布也存在较强的影响,海拔越高、坡度越大时森林 NPP 总量越高。气候因子中气温的解释力最强,气温高的区域森林碳吸收能力下降明显。作为人类活动的评价因子,夜间灯光对森林 NPP 总量有一定的负向影响。此外,不同土壤

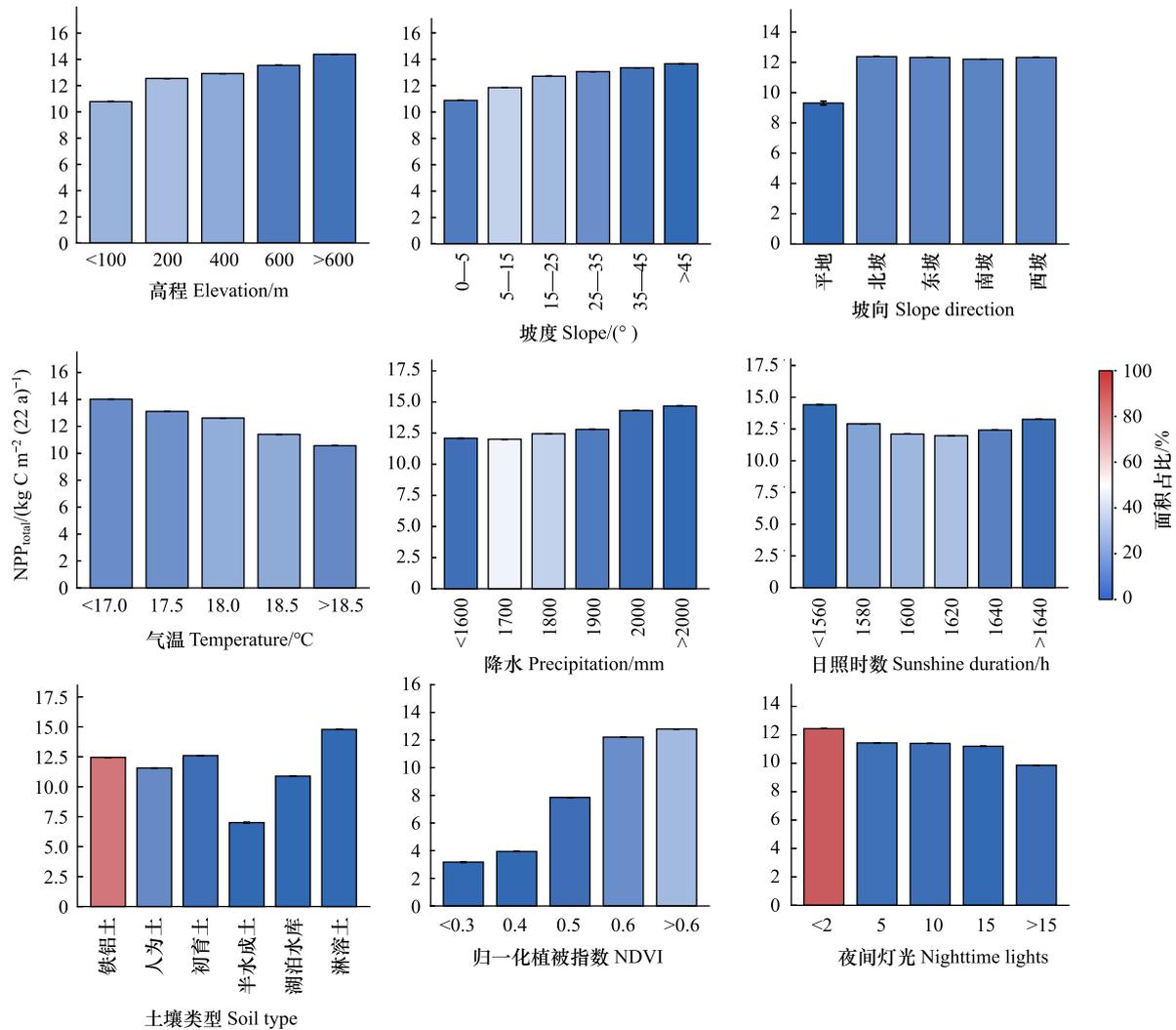


图 5 不同影响因子类别的森林 NPP 总量分布图

Fig.5 Bar chart of total forest NPP distribution by different influencing factor categories

NPP_{total}:2001—2022 年研究区森林净初级生产力总量 The total net primary productivity of forests in the study area from 2001 to 2022;NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

类型的森林 NPP 总量不同,淋溶土中生长的树木森林 NPP 总量最高,为 14.78kgC m⁻²(22a)⁻¹,而半水成土中生长的树木长期固碳能力最低,仅为 7.01kgC m⁻²(22a)⁻¹。

3.4 异常点分析

局部空间自相关分析检测结果如图 6,HH(高值聚集区)表示被高值包围高值,LL(低值聚集区)表示被低值包围的低值,HL(高值异常点)表示被低值包围的高值,LH(低值异常点)表示被高值包围的低值。检测结果表明,在乡镇、2km 格网、500m 格网三种尺度下,研究区森林多年 NPP 总量的五种聚类特征分布整体趋势接近,呈现从东北向西南由高值聚集分布转向低值聚集分布的态势,但异常点的数量和分布有所不同。随着格网精度的提高,异常点逐渐上升到 500m 格网尺度下的 949 个(表 2),且分布更加满足高值异常点处在低值之中,低值异常点处在高值之中的概念。同时,异常点的全局莫兰指数由 2km 格网尺度的 0.270 下降到 500m 格网尺度的 0.024,表明异常点的分布随着样本尺度的减小逐渐趋于分散,但各尺度的异常点均不属于随机分布($P<0.001$)。

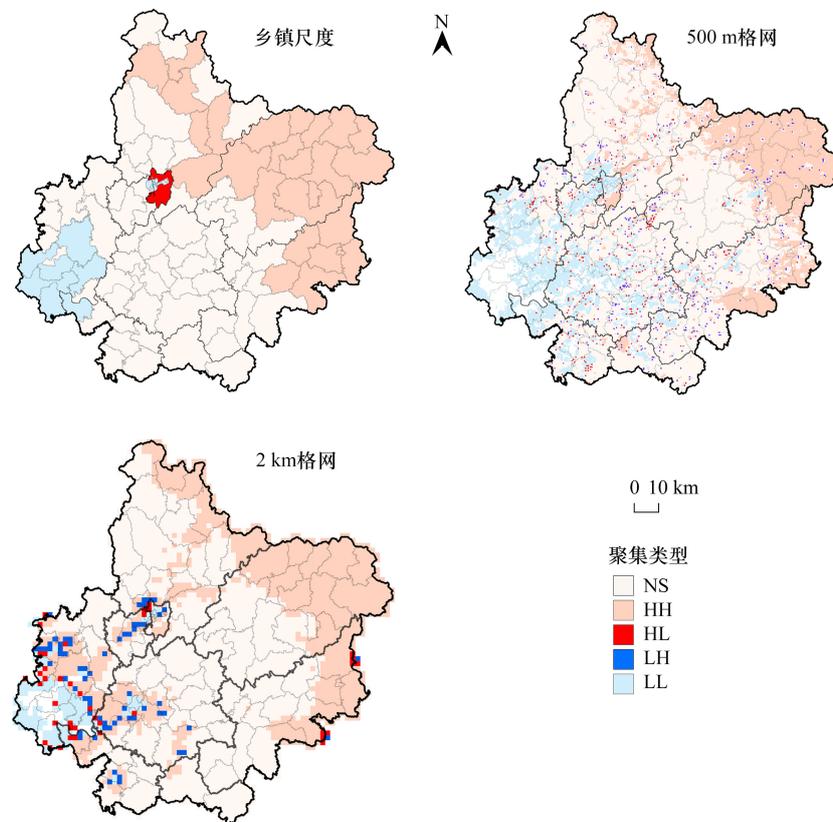


图 6 2001—2022 年饶河流域全域森林 NPP 总量的局部空间自相关聚类结果

Fig.6 Anselin Local Moran's *I* clustering results of total forest NPP in Raohe River Basin from 2001 to 2022

NS: 无显著的随机分布区 Not Significant; HH: 周围是高位的高值区 High-High; HL: 周围是低位的高值异常点 High-Low; LH: 周围是高位的低值异常点 Low-High; LL: 周围是低位的低值区 Low-Low

表 2 不同尺度下的异常点全局空间自相关分析结果

Table 2 Analysis results of Global Moran's *I* analysis of outliers at different scales

分析尺度 Analysis scale	样本总数 Sample size	高值异常点 High-value outliers	低值异常点 Low-value outliers	全局莫兰指数 Global Moran's <i>I</i>	标准偏差 <i>z</i>	显著性 <i>P</i>
乡镇 Township	105	1	0	—	—	—
2km×2km	3452	40	66	0.270	30.854	0.000
		40	0	0.146	16.848	0.000
		0	66	0.175	19.982	0.000
500m×500m	49680	415	534	0.024	32.875	0.000
		415	0	0.032	43.756	0.000
		0	534	0.025	34.139	0.000

$z > 0$ 表示趋向于聚集, $z = 0$ 表示趋向于随机分布, $z < 0$ 表示趋向于分散; $P < 0.05$ 代表显著, $P < 0.01$ 表示极显著

534 个低值异常点的森林 NPP 总量在 $0—11.47\text{kgC m}^{-2}(22\text{a})^{-1}$ 之间, 415 个高值异常点的森林 NPP 总量在 $11.47—18.10\text{kgC m}^{-2}(22\text{a})^{-1}$ 之间。观察 500m 格网尺度下的异常点发现, 它们的分布靠近道路与河流。初步计算可知, 道路、河流直线距离在 10m 内的红色高值异常点占比为 32.0% 和 15.7%, 蓝色低值异常点占比为 37.8% 和 29.6%, 饶河流域森林 NPP 总量异常点的分布或与交通和河流的分布相关 (图 7)。

通过对接触道路、水系不同半径 (10m、50m、100m、500m、1km、2km) 缓冲区的格网数量和异常点数量进行卡方检验 (χ^2), 进一步分析异常点分布与道路、河流分布的相关性。结果显示, 高值异常点与道路在所有缓冲

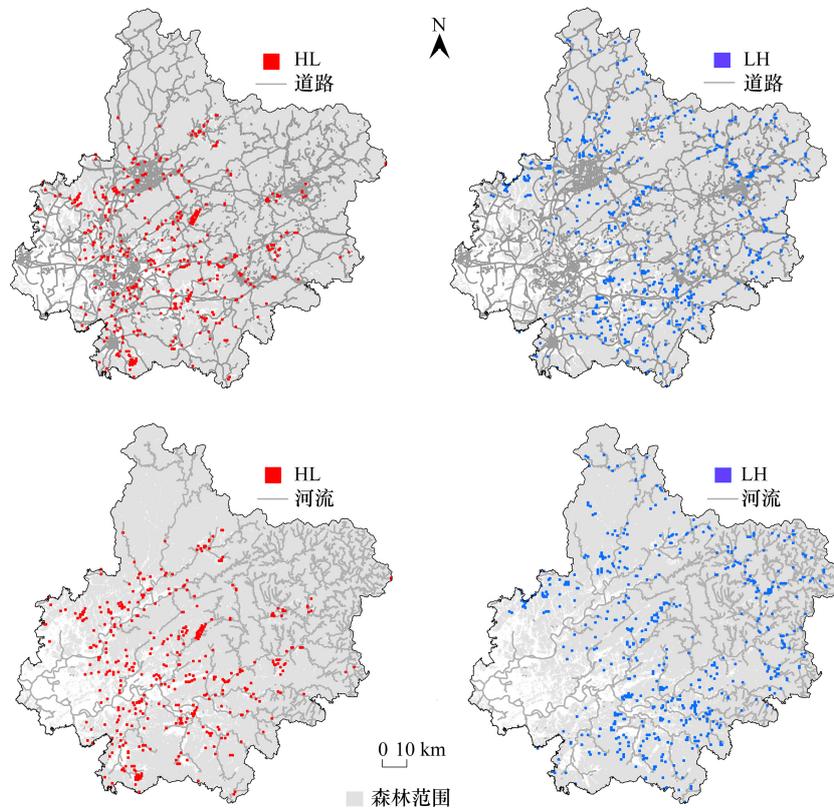


图 7 道路、河流与异常点分布图(异常点加粗描边)

Fig.7 Distribution map of roads, rivers, and anomalous points (anomalous points highlighted with bold outlines)

区半径下均表现出极显著的相关性($P < 0.001$), 500m 时相关性最高($\chi^2 = 122.213, df = 1, P < 0.001$); 而与河流分布的相关性稍弱, 仅在半径 ≥ 500 m 时表现为极显著相关($P < 0.001$), 最高卡方值出现在半径 1000m($\chi^2 = 20.110, df = 1, P < 0.001$)。这表明, 高值异常点的分布受到道路、河流分布的影响, 且与道路的相关性更强。

低值异常点与道路在缓冲区半径 ≤ 1000 m 时相关性极显著($P < 0.001$), 2000m 时相关性显著($P < 0.01$), 半径 50m 相关性最强($\chi^2 = 62.910, df = 1, P < 0.001$); 低值异常点与水系的相关性更强, 缓冲区半径 ≤ 100 m 时相关性极显著($P < 0.001$), 500m 时相关性显著($P < 0.01$), 500m 以上表现为不显著, 水系缓冲区的最高卡方值出现在半径 10m 时($\chi^2 = 82.584, df = 1, P < 0.001$)。由此可知, 低值异常点的分布同时受到道路、水系的较强影响, 其中水系分布的影响更强, 且在与河流接近的区域表现出更高的相关性。

4 结论与讨论

本文采用 22 年森林 NPP 的总量评估饶河流域的森林长期碳汇功能, 分析其空间格局与自然、人类因素的关系, 并在不同尺度下探索其空间异常点的分布与成因, 结论如下:

(1) 2001—2022 年饶河流域的森林面积总体呈下降趋势, 森林减少主要由于耕地和建设用地的占用, 增加主要来源于退耕还林, 城市化进程与农业发展深刻影响着该地区的森林面积变化。

(2) 22 年间饶河流域森林共吸收 122.20TgC, 森林 NPP 总量范围为 0—25.49kgC m⁻²(22a)⁻¹, 平均为 12.31kgC m⁻²(22a)⁻¹。在人为影响造成土地利用变更的区域, 森林生长期时长降低至 12.19 年, 生长期树木光合固碳能力未达到无变更森林的标准, 平均下降 8.3%。

(3) 流域森林 NPP 总量的分布整体表现为东北高、西南低, 与 NDVI、高程、坡度和降水分布趋势相同, 与气温和夜间灯光分布趋势相反, 森林 NPP 总量的空间分布与地形、气候、土壤、植被和人类活动的 9 种因子均

存在显著相关性($P < 0.01$),其中 NDVI、气温、高程、坡度、夜间灯光和土壤类型的影响较强。

(4) 500m×500m 空间尺度异常点的分布受到交通与河流分布的极显著影响($P < 0.001$),其中,异常高值受到道路的影响($\chi^2 = 122.213$)远高于水系的影响($\chi^2 = 20.110$),异常低值受到道路的影响($\chi^2 = 62.910$)低于水系的影响($\chi^2 = 82.584$)。HL 与 LH 森林 NPP 总量的平均值分别为 13.08 和 9.95kgC m⁻²(22a)⁻¹。

饶河所在的鄱阳湖流域属于长江流域范畴,研究区森林年均 NPP 处在长江流域中等偏上的水平,相较于成勤等^[12]估算的长江流域植被 NPP 略高,分别为 0.56kgC m⁻² a⁻¹和 0.52kgC m⁻² a⁻¹。从驱动因子的角度来看,研究区人类活动较少、平均气温较低、降水充足、分布有暗黄棕壤(淋溶土)或黄壤的高海拔陡坡区域有助于森林发挥长期碳汇功能,而人口密集、高温干旱、覆盖有半水成土(潮土、潜育水稻土)的低海拔平坦地区不利于树木的光合生长。同时,森林植被在交通可达性良好的区域更可能受到经营抚育,在降水充足的河流附近有遭受洪涝灾害的风险。具体来说,研究区 500m×500m 的异常点中,77.1%的高值异常点距离车行道路小于 500m,30.5%的低值异常点距离河流不到 10m。此外,因子间例如坡向、日照与高程之间密切且复杂的关系,以及森林结构、土壤理化性质等其他因素对森林固碳能力的影响也有待进一步发掘。

森林固碳是实现双碳战略目标的主要方式之一,林分老化与可造林地不足是当前林业碳汇不可忽视的阻力。如何降低林分老化带来的碳库损失,如何利用现有林地提升区域森林固碳量,如何将二者在满足生态、经济、有效的前提下实现,是学界长期以来一直在探索的问题。同时,地理现象的空间异常是当下空间数据挖掘的研究热点^[36-37],因此,笔者认为对于森林长期碳汇功能的空间异常研究必将引起更多学者的关注。尤其是将森林长期碳汇分析应用于未来决策,例如,分析高值异常点森林的过往历史,优化相近条件下的森林管理措施;识别区域森林异常低值,及时加以干预和生态修复。本文采用多年 NPP 总量对饶河流域 22 年森林固碳能力的空间分异及成因进行评估,为流域森林长期固碳功能评价和异常点识别提供数据和技术支持,为森林碳汇服务的可持续发展提供新的角度参考。

参考文献(References):

- [1] 吴闰宁,郝珉辉,何怀江,张春雨,赵秀海. 长白山森林功能多样性与地上碳汇功能的关系及其随演替的变化. 植物生态学报, 2025, 49(2):1-12.
- [2] Raihan A, Begum R A, Mohd Said M N, Pereira J J. Assessment of carbon stock in forest biomass and emission reduction potential in Malaysia. Forests, 2021, 12(10): 1294.
- [3] 郭明辉,刘伟. 木材固碳量与含碳率研究进展. 世界林业研究, 2014, 27(5): 50-54.
- [4] Hong S B, Ding J Z, Kan F, Xu H, Chen S Y, Yao Y T, Piao S L. Asymmetry of carbon sequestrations by plant and soil after forestation regulated by soil nitrogen. Nature Communications, 2023, 14(1): 3196.
- [5] 靳专,胥焘,黄应平,陈鸿飞. 三峡库区消落带植被 NPP 估算——基于机器学习优化 CASA 模型. 生态学报, 2024, 44(6): 2464-2478.
- [6] Xuan W X, Rao L Y. Spatiotemporal dynamics of net primary productivity and its influencing factors in the middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1043807.
- [7] Juknelienė D, Kazanavičiūtė V, Valčiukienė J, Atkocevičienė V, Mozgeris G. Spatiotemporal patterns of land-use changes in Lithuania. Land, 2021, 10(6): 619.
- [8] Zhao L, Chen Y Q, Wang X Y, Su M W, Xu H, Zhang P T. Spatiotemporal changes in net primary productivity before and after the development of unused land in the hilly areas of Hebei, China. PLoS One, 2022, 17(6): e0270010.
- [9] 包志意,范文义. 基于 BEPS 模型的塞罕坝植被净初级生产力时空变化分析研究. 森林工程, 2024, 40(1): 74-84.
- [10] 袁金国,杨紫妍,李卓琳,王文超. 淳沱河流域植被 NPP 时空演变及其影响因子分析. 长江科学院院报, 2025, 42(3): 76-83.
- [11] 闫丰,李晨阳,王靖,鲁志雪,黄雪寒,王敏丽,王文迪,李若茜,庞娇,陈亚恒. 京津冀生态屏障区植被 NPP 时空演变驱动力定量解析. 环境科学, 2025, 46(1): 327-339.
- [12] 成勤,万君,王清龙,等. 2000—2021 年长江流域植被 NPP 特征及对气候变化的响应. 三峡生态环境监测, 2024, 9(2): 27-36.
- [13] 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. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1876-1884.
- [14] 张子凡,熊茂秋,李福杰,刘晓煌,郝玉恒,邢莉圆,王新华,赖明,袁鹏程. 内蒙古草原自然资源大区植被净初级生产力时空变化及其影响因子分析. 草业科学, 2022, 39(12): 2492-2502.
- [15] Reichle K E, Dinger B E, Edwards N T, Harris W F, Sollins P. Carbon flow and storage in a forest ecosystem. Brookhaven Symposia in Biology,

- 1973(30): 345-365.
- [16] 林黛仪, 周平, 徐卫, 李吉跃, 林雯. 基于 IBIS 模型的南岭不同植被类型碳收支研究. 生态学报, 2024, 44(4): 1-12.
- [17] 赵金彩, 潘涛. 基于多时间尺度的黄河流域植被 NPP 时空特征及其对气候变化的响应. 水土保持研究, 2024, 31(4): 214-222.
- [18] 周璐红, 张康. 陕甘宁三省区植被 NPP 时空变化及影响因素. 西北林学院学报, 2024, 39(6): 177-186.
- [19] 靖娟利, 孙佳荟, 赵婷, 付宝苇. 西南地区植被 NPP 对多尺度气象干旱的响应. 水土保持学报, 2024, 38(3): 335-344.
- [20] 罗健梅, 阿布都热合曼·哈力克, 段越帆, 姚凯旋, 姚磊, 唐华, 布威阿依谢姆·吐合提. 艾比湖流域植被 NPP 时空演变特征及其驱动因素. 生态学报, 2025, 45(1): 182-196.
- [21] Ge W Y, Deng L Q, Wang F, Han J Q. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016. *Science of the Total Environment*, 2021, 773: 145648.
- [22] 孙彦, 蔺星娜, 李生, 罗超, 王佳, 郑宇. 河南省南阳市植被 NPP 时空变化及驱动因素. 陆地生态系统与保护学报, 2023, 3(5): 20-30, 40.
- [23] 任立冬. 造林事业的发展趋势. 国外林业, 1987, (1): 9-11.
- [24] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 张学玲, 曾珩. 基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析. 生态学报, 2022, 42(10): 3947-3958.
- [25] 陈艺, 蔡海生, 张学玲, 曾珩, 邵晖, 洪士林. 基于 MCE 的饶河流域国土空间生态质量综合评价及其空间分异. 生态学报, 2021, 41(6): 2236-2247.
- [26] 高明会, 蔡海生, 张学玲, 余艳, 彭思卿. 饶河流域水源涵养服务供需演变及驱动因素. 水土保持通报, 2024, 44(2): 389-399, 464.
- [27] 朱君瑶. 2000—2020 年饶河流域 NDVI 时空变化及驱动因素分析[D]. 南昌: 江西农业大学, 2023.
- [28] Zhou T Y, Liu H M, Gou P, Xu N. Conflict or Coordination? measuring the relationships between urbanization and vegetation cover in China. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109993.
- [29] 常建波, 付兴涛, 郑美君, 郝舒哲. 能源消耗碳排放的时空演变与预测: 基于山西省夜间灯光数据. 环境科学与技术, 2023, 46(3): 81-89.
- [30] 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. 干旱区研究, 2023, 40(11): 1833-1844.
- [31] Zhang X M, Brandt M, Yue Y M, Tong X W, Wang K L, Fensholt R. The carbon sink potential of Southern China after two decades of afforestation. *Earth's Future*, 2022, 10(12): e2022EF002674.
- [32] Liao Q, Li T, Wang Q Y, Liu D E. Exploring the ecosystem services bundles and influencing drivers at different scales in southern Jiangxi, China. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110089.
- [33] 危小建, 辛思怡, 张颖艺, 龙英豪, 张茜. 不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响因素差异——以大南昌都市圈为例. 生态学报, 2023, 43(18): 7585-7597.
- [34] 蓝皓新, 徐军. 云南省多尺度碳排放时空格局及影响因素. 亚热带资源与环境学报, 2024, 19(1): 1-8.
- [35] 栾思雨. 黑龙江省土地利用碳排放特征及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [36] 孙滨峰, 赵红, 逮非, 王效科. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(14): 4975-4983.
- [37] 杨屹, 苏越. 关中平原城市群碳收支时空分异特征及碳平衡驱动因素分析. 中国环境科学, 2025, 45(2): 619-628.