

DOI: 10.20103/j.stxb.202301150102

孙洋洋, 沈泽琦, 黄乐妍, 胡金丽, 赵馨玉, 吴珏莹, 胡广. 不同城市绿地类型碳源/汇的城乡梯度格局——以杭州市为例. 生态学报, 2024, 44(3): 930-943.

Sun Y Y, Shen Z Q, Huang L Y, Hu J L, Zhao X Y, Wu J Y, Hu G. Patterns of carbon source/sink across urban-rural gradient and urban green space types: A case study of Hangzhou City. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 930-943.

不同城市绿地类型碳源/汇的城乡梯度格局 ——以杭州市为例

孙洋洋, 沈泽琦, 黄乐妍, 胡金丽, 赵馨玉, 吴珏莹, 胡 广*

浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018

摘要:探究城市化对绿地空间碳源/汇的空间分布格局的影响,对评估城市生态系统的碳足迹和制定相应的碳收支管理措施具有重要意义。以净生态系统生产力(NEP)做为碳源/汇的反映指标,基于净初级生产力和土壤呼吸估算杭州市主城区绿地碳源/汇的空间分布格局,关注城乡梯度对不同绿地类型碳源/汇水平的作用。基于净初级生产力和土壤呼吸数据综合获得绿地空间 NEP,通过土地利用数据和 Fragstats 软件进行景观格局分析,采用多元线性回归模型和逐步回归模型筛选影响 NEP 的景观、植被和气象因子,最后利用广义加性模型探讨 NEP 与各因子之间的关系。此外,分别比较了相同统计过程在不同城乡梯度和不同绿地类型之间的模型差异。结果表明:杭州市绿地空间 NEP 分布及其影响因子存在显著的城乡梯度与绿地类型差异。2019—2022 年杭州市主城区绿地空间,整体表现为碳源,年均 NEP 为 $-0.277 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;其中表现为碳汇的绿地主要分布在杭州市主城区的西部,而碳源绿地主要分布在中部和东部。整体绿地空间的 NEP 大小与绿地斑块面积、乔木盖度和灌木盖度呈正相关,与灌木物种丰富度和气温呈负相关。NEP 随城区、城郊结合部、郊区的城乡梯度逐步增强;城区 NEP 与乔木盖度呈正相关,与景观多样性和气温呈负相关;城郊结合部 NEP 与乔木物种丰富度和灌木盖度呈正相关,与绿地斑块密度和气温呈负相关;郊区 NEP 则与聚集度指数、乔木盖度和灌木盖度呈正相关。公园、农田、自然植被的 NEP 依次增大并受到不同因素的调控。公园 NEP 与聚集度指数、乔木盖度和灌木盖度呈正相关,与景观分割指数、灌木物种丰富度和气温呈负相关;农田 NEP 与聚集度指数和灌木盖度呈正相关,与气温呈负相关;而自然植被 NEP 则与乔木盖度呈正相关,与景观多样性指数和气温呈负相关。研究进一步揭示了城市化对绿地空间碳源/汇的影响,为城乡碳收支的差异化管理提供了一定的理论和数据支持。

关键词:绿地空间;净生态系统生产力;城乡梯度;净初级生产力;广义加性模型

Patterns of carbon source/sink across urban-rural gradient and urban green space types: A case study of Hangzhou City

SUN Yangyang, SHEN Zeqi, HUANG Leyan, HU Jinli, ZHAO Xinyu, WU Jueying, HU Guang*

Architectural Engineering Institute, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310018, China

Abstract: To effectively evaluate the carbon footprint of urban ecosystems and appropriately manage urban carbon budget, it is crucial to investigate how urbanization affects the spatial pattern of carbon source/sink of green space. This study employed net ecological productivity (NEP) as an indicator for carbon source/sink, evaluating by the integration of net primary productivity and soil respiration. Then we formed the carbon source/sink distribution of urban green spaces, and analyzed the impact of the urban-rural gradient on carbon source/sink levels across different types of green spaces in Hangzhou City. Following the landscape pattern analysis with the land use data using Fragstats, we applied multiple linear regression and stepwise analysis to pre-examined the effects of landscape, vegetation, and microclimatic factors on NEP. A

基金项目:国家自然科学基金项目(32171570);浙江理工大学基本科研业务费(2021Q037)

收稿日期:2023-01-15; **网络出版日期:**2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hug163@163.com

generalized additive model was then employed to analyze the relationship between NEP and each factor. Furthermore, the different performances of these factors across the urban-rural gradient and greenspace types from the same statistic process were compared. The results showed that there were significant variations of NEP distribution and its influencing factors across green space types and urban-rural gradient. From 2019 to 2022, the whole carbon budget of main urban area in Hangzhou was carbon source, with annual average NEP $-0.277 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ carbon sink greenspace mostly located at the western part of Hangzhou, while the carbon source greenspace at the central and eastern part. NEP of the entire green space was positively correlated with patch area, tree coverage, and shrub coverage, but negatively correlated with shrub richness and temperature. Furthermore, NEP increased gradually with urban, sub-urban and rural gradient. Urban NEP was positively correlated with tree coverage, but negatively correlated with Shannon's diversity index and temperature. Sub-urban NEP displayed a positive correlation with tree richness and shrub coverage, but a negative correlation with patch density and temperature. Rural NEP showed a positive correlation with the aggregation index, tree coverage and shrub coverage with different driving factors. Aggregation index, tree cover, and shrub cover were all positively connected with park's NEP, while negatively correlated with temperature, shrub richness, and landscape division index. Farmland's NEP had a negative correlation with temperature and a positive correlation with the aggregation index and shrub coverage. The natural vegetation's NEP had a positive correlation with tree cover and a negative correlation with both temperature and Shannon's diversity index. Our findings highlighted the impact of urbanization on the carbon source/sink of green space, and provided theoretical and empirical support for differentiated managements of urban and rural carbon budget.

Key Words: green space; net ecosystem productivity; urban-rural gradient; net primary productivity; generalized additive model

2020 年中国提出了力争 2030 年前达到碳达峰,2060 年前努力实现碳中和的重大承诺^[1]。而对城市区域碳收支的有效管理是实现这一承诺的重要路径^[2-3]。根据联合国政府间气候变化专门委员会的报告,城市分别贡献了全球总能源消费量的 67%—76%和能源相关 CO₂排放量的 71%—76%^[4],中国城市 CO₂的排放占比更是达到 75%^[5],而据 2019 年中国碳市场发展报告显示,中国城市的碳吸收占比仅 20%左右。由此可见,对城市碳足迹和碳源/汇时空分布的研究尤为重要。城市绿地空间是城市中最重要碳汇来源^[6],探索城市绿地空间碳源/汇的空间分布特征及其影响因子,对城市绿地的合理规划,城市碳收支管理政策的科学制定和有效实施,乃至“双碳”目标的顺利实现具有十分重要的理论和实践意义。

净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP) 一般指生态系统净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 与土壤异养呼吸碳排 (Heterotrophic Respiration, R_h) 两者之差^[7],是表征生态系统碳收支的重要指标,可以用来定量描述生态系统碳源/汇的水平。近年来,相关领域学者多以 NPP 为指标探究某个生态系统或区域的植被固碳情况,但对 NEP 的研究不多,现有研究多从时空格局、土地利用等维度分析 NEP,影响因子主要涉及气候因子、地形因子、人为因子等方面。何洪林^[8]、陶波^[9]、杨延征^[10]、张梅^[11]等对中国大陆不同时间段 NEP 空间格局的研究发现,中国陆地 NEP 分布存在空间异质性,其中何洪林^[8]、张梅^[11]等的研究指出 NEP 的空间分布和年际变化主要受气温和降水的影响。陈书涛等发现气候和植物因子对陆地碳通量的影响在不同气候区存在差异^[12]。徐倩等分析了珠江三角洲不同土地利用类型的固碳情况,结果表明地形和地貌特征对区域碳汇有明显影响^[13]。项明顺等对 2000—2020 年川西高原碳储量的研究指出,人类活动是引起区域碳储量时空分异的主要因素^[14]。山西南部中条山生态系统碳储量研究则进一步发现碳储量空间分异是由自然因素和人为因素共同作用的结果^[15]。林子奇等对 2005—2020 年淮海经济区耕地碳储量的研究指出,人为因子和地形因子是驱动 NEP 的主要因素^[16]。李成龙等发现 1971—2020 年滨海河口湿地 NEP 主要受降水、CO₂浓度、气温等影响^[17]。周夏飞等对 2001—2015 年青藏高原草地碳源/汇的研究发现,草地 NEP 与降水、温度均呈负相关^[18]。孙滨峰等对东北森林带 NEP 的研究指出,人为干扰、较高温度可降低森林生态系统的固碳水平^[19]。针对城市碳源/汇的研究,相关学者多以 NPP 为指标从时空格局、城市扩张、土地利用

等维度进行探究,影响因子主要涉及城市扩张、土地利用变化等方面。刘小平^[20]、卢学元^[21]、杨永菊^[22]等通过对全球城市、昆明市、河南城镇 NPP 的时空分布研究,得出城市扩张对 NPP 具有负向影响。袁甲^[23]、陈探^[24]等通过对皖江城市带、沈阳经济区 NPP 的估算研究,得出不同的土地利用变化对 NPP 具有显著影响,其中农田转为建设用地使得 NPP 损失最大。而以 NEP 为指标对城市绿地碳源/汇的研究则较为缺乏,杨海峰等对淮北市植物碳汇的研究指出,NEP 的主要影响因素为人口密度、GDP 和道路密度^[25]。蔡晓伟等分析了 2000—2010 年南京市 NEP 的空间分布及变化情况,但未涉及具体的影响因子^[26]。

上述研究表明,碳源/汇(以 NEP 为代表)的分布存在空间异质性,且在不同的时空尺度下其影响因子会发生变化。现有针对碳源/汇分布的影响因子的研究主要以气象因子、地形因子、人为因子为主,较少涉及植被因子及景观因子;且研究尺度多以区域或流域尺度为主,对城市内部的研究相对较少,无法为城市的碳收支管理提供针对性的建议。杭州作为我国新一线的代表城市,以杭州主城区绿地空间为研究对象,具有重要的参考价值。本文从城乡梯度和绿地类型的角度研究城市绿地碳源/汇空间分布及影响因子,以期对低碳城市的规划设计和“双碳”目标的顺利实现提出合理的建设性对策与建议。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

杭州市位于浙江省北部(北纬 29°11′—30°34′和东经 118°20′—120°37′),是浙江省省会和经济、文化、科教中心,首批国家历史文化名城。杭州属亚热带季风性气候,四季分明,光照充足,雨量充沛,春秋短冬夏长。至 2020 年,杭州市建成区面积为 666.18 km²,绿化覆盖率为 43.36%;园林绿地面积为 262.49 km²;城市公园共 305 个,公园面积为 35.39 km²^[27]。杭州地处中国经济最为发达的长三角地区,是中国城市化发展最为迅猛的城市之一。与此同时,杭州坐拥西湖、西溪两大著名城市公园,以及众多中小型城市公园,城市绿化率占全国各大城市前列。杭州主城区的绿地类型同时包括了公园、农田和自然植被,且均有一定规模,城乡梯度较为明显,是研究城乡梯度和城市绿地系统的优质平台,是城市化进程中自然经济社会均衡发展的典型城市代表。本研究以杭州市主城区绿地空间为研究对象,具体涉及上城区、下城区、江干区、拱墅区、西湖区、滨江区、萧山区、余杭区等 8 个区。

1.2 城乡梯度划分

城乡梯度划分主要基于土地利用现状与人口密度,其中土地利用数据源自欧空局基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 卫星数据绘制的 2020 年全球土地利用类型数据(<https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover/>),空间分辨率为 10 m,包括林地、灌木、草地、耕地、建筑、裸地、水体和湿地等土地利用类型。人口数据源自 2020 年 WorldPop 数据集(<https://www.worldpop.org/>),空间分辨率为 100 m。研究涉及的行政边界来自自然资源部标准地图服务(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>)。

利用 ArcGIS 10.8 软件将杭州市主城区划分为 250 m 分辨率的网状栅格,并以每个栅格为单位计算不透水面面积占比和人口密度,利用空间聚类分析将杭州市主城区划分为三类不同的城乡梯度类型,即城区、城郊结合部和郊区^[28](图 1)。杭州主城区的城乡梯度呈现为中心到四周的辐射分布格局,城区主要位于下城区的大部、上城区的大部、拱墅区南部、江干区东部、滨江区西部和萧山区西部;城郊结合部主要分布于萧山区中部、余杭区东南部和江干区的中部与东部;而郊区主要分布于杭州市主城区的四周,其中以余杭区、萧山区和西湖区占比较大。

1.3 实地调研

1.3.1 取样设计

将城市绿地分为公园、农田和自然植被三种绿地类型。结合城乡梯度分布图(图 1),选择城区 12 个绿地样点(公园 6 个,农田 0 个,自然植被 6 个)、城郊结合部 18 个(公园、农田、自然植被各 6 个)、郊区 18 个(公园、农田、自然植被各 6 个),共计 48 个样点进行实地取样调查(图 2)。样点均位于 3 种典型绿地的中心地

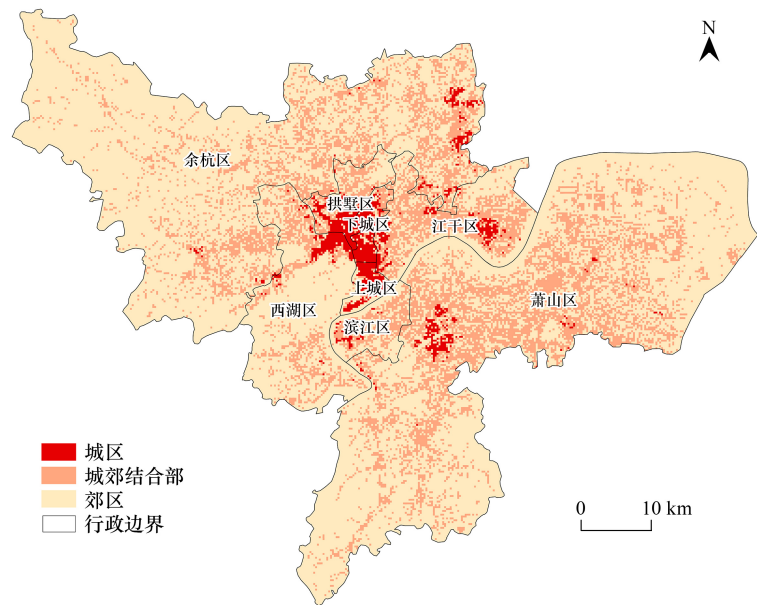


图 1 杭州主城区城乡梯度分布图

Fig.1 Urban-rural gradient of main area in Hangzhou

带。调研通过在每个样点内设置 3 条 10 m×100 m 样带,在每条样带的两端及中间设置 3 个 10 m×10 m 样方的形式进行数据采集。各样带之间间隔至少 200 m。其中公园样带的选择尽可能穿越多种植物景观。

1.3.2 调研过程

2022 年 7—9 月在样方内采集 GPS 位点数据、植被数据和气象数据。位点数据使用集思宝移动 GIS 终端 UG908 记录,气象数据使用 Kestrel 5500 气象测量仪测量,包括气温、湿度与风速,每个样方重复测量 3 次。记录样方范围内植被中的乔木物种丰富度、乔木盖度、灌木物种丰富度、灌木盖度、灌木多度、草本物种丰富度、草本盖度、草本多度等数据。

1.4 景观格局指数计算

基于获取的土地利用数据,利用 ArcGIS 10.8 和 Fragstats 4.2 计算类型和景观 2 个水平共 5 种景观格局指数^[29](表 1)。

表 1 景观格局指数信息

Table 1 Information of landscape indices

景观指数 Landscape index	定义 Definition	水平 Level	描述 Description
斑块类型面积 CA Class area	某斑块类型的总面积;	类型	CA 的大小制约着以此类型斑块作为聚居地 (Habitat) 的物种的丰度、数量、食物链及其次生种的繁殖等。
斑块密度 PD Patch density	单位面积上的斑块数,是描述景观破碎化的重要指标;	类型	PD 越大,破碎化程度越大。
景观分割指数 DIVISION Landscape division index	用于表示景观中斑块分离程度的一项指标;	景观	0≤DIVISION<1,当 DIVISION=0 时,表示景观由一个斑块组成,DIVISION 越接近 1,说明景观内斑块组成越破碎、景观越复杂。
景观多样性指数 SHDI Shannon's diversity index	各斑块类型的面积比乘以其值的自然对数之后的和的负值;	景观	SHDI=0 表明整个景观仅由一个斑块组成;SHDI 增大,说明斑块类型增加或各斑块类型在景观中呈均衡化趋势分布。
聚集度指数 AI Aggregation index	表明了每一种景观类型斑块间的连通性;	景观	AI 值越小,景观越离散。

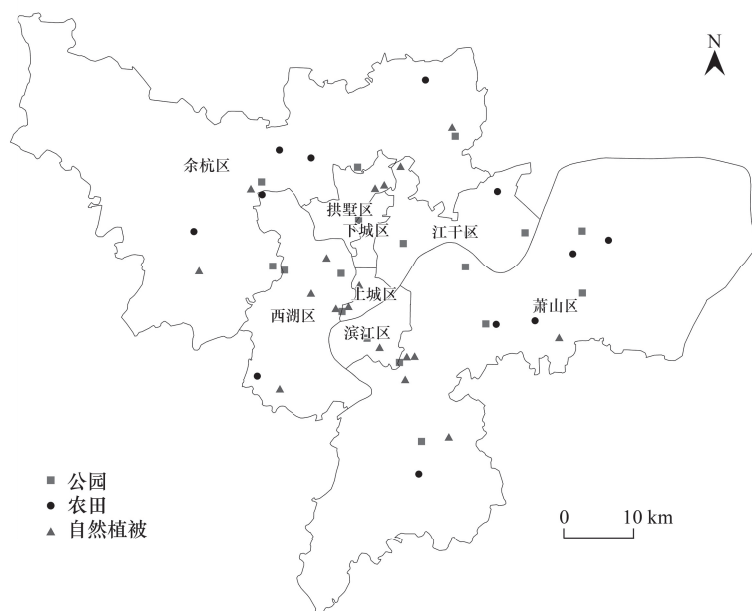


图2 调研样点分布图

Fig.2 Locations of sampling sites

1.5 变量数据预处理

根据植被调查数据计算样点中乔木、灌木的物种丰富度、盖度、多度。气象数据使用绿地实测值与周边裸地实测值的比值,以消除不同时间天气差异造成的测量误差。数据分析前,对全部变量数据进行标准化处理。

1.6 NEP 计算

1.6.1 数据来源

NEP 计算所需的生态系统净初级生产量 (NPP) 作为基础数据,源自美国 2019—2022 年 NASA EOS/MODIS 数据 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgv061/>),空间分辨率为 500 m,据现有研究表明 MODIS NPP 数据平均误差在 10% 以内^[30-31],同时利用野外样点的植被数据,通过生物量估算法计算样点区域 NPP,和 MODIS 数据进行比对验证,Kolmogorov-Smirnov 检验证明两种 NPP 的数据分布之间没有显著差异 ($D=0.4, P=0.401$),说明利用 MODIS NPP 数据研究城乡梯度的 NPP 变化规律具有较高的可信度。使用克里金空间插值法提升 NPP 数据分辨率至 250 m。年均气温、年降水量数据来自 2019—2022 年《杭州统计年鉴》。土壤有机碳密度 (Soil Organic Carbon, SOC) 数据来源于联合国粮农组织 (FAO) 2019—2022 年全球土壤有机碳储量图 (GSOCmap v1.5.0)。

1.6.2 计算方法

NEP 数值采用 NPP 与 R_h 的差值获得^[32-33], R_h 计算参考张梅等人基于 113 组实测数据构建的 R_h 估算模型^[11];公式中的 R_s (Soil Respiration) 则利用 Chen 等人基于土壤呼吸与年均气温和年均降水的拟合模型^[34],具体计算如公式 (1) (2) (3) 所示。

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

$$R_h = 0.6163_s^{0.7981} \quad (2)$$

$$R_s = 1.55e^{0.031T} \times \frac{P}{P + 0.68} \times \frac{SOC}{SOC + 2.23} \quad (3)$$

式中, NEP 为净生态系统生产力 (kg/m^2), NPP 是植被净初级生产力 (kg/m^2), R_h 是土壤微生物呼吸 (kg/m^2)。公式 (2) 中 R_s 为年土壤呼吸 (kg/m^2), 与 R_h 的关系方程如式 (2) 所示; 公式 (3) 中 T 为年均气温 ($^{\circ}\text{C}$); P 为年降水量 (m); SOC 为 0—20cm 的表层土壤碳密度 (kg/m^2)。考虑到单一年份 NEP 随机波动较大, 故使用

2019—2022 年年均 NEP 作为数据分析的因变量。

1.7 数据分析

使用 Wilcoxon 秩和检验来判断 NEP 是否在城乡梯度和绿地类型之间存在差异。计算各景观、植被和气象因子的方差膨胀系数(VIF)以检验各变量之间的共线性水平,选择 VIF 小于 10 的变量进行后续分析。构建广义加性模型(GAM)探究城市绿地空间 NEP 与相关变量的关系。与一般的线性模型比较,广义加性模型具有更高的准确率,保留了线性模型良好的可解释性^[35—37],并能根据结果中的 F 统计值对各驱动因子的重要性进行判别^[38]。本研究中的所有统计均通过 R 4.2 实现。

2 结果与分析

2.1 杭州主城区碳源/汇空间分布特征

2019—2022 年杭州市主城区年均 NEP 为 $-0.277 \text{ kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,整体表现为碳源,NEP 整体空间分布表现为由城中心向四周递增的态势(图 3),其中城市中部为碳源($\text{NEP} < 0$),东部接近碳中和($\text{NEP} \approx 0$),城西部则为碳汇($\text{NEP} > 0$)。碳源的分布以拱墅区、下城区、上城区北部、江干区西部和萧山区西部为主;萧山区东部和余杭区东北部接近碳中和状态;而余杭区西北部、西湖区中部和萧山区南部则为主要的碳汇区域。

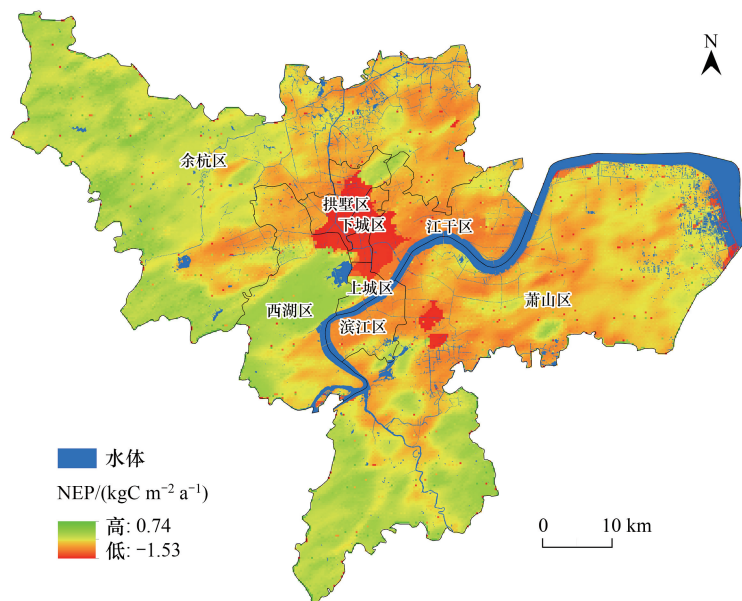


图 3 杭州主城区净生态系统生产力分布图

Fig.3 Net ecosystem productivity distribution of built-up area in Hangzhou

2.2 城乡梯度与绿地类型对 NEP 的影响

杭州绿地空间 NEP 在城乡梯度与绿地类型上存在明显差异(图 4)。Wilcoxon 秩和检验结果显示,公园、农田、自然植被两两之间存在显著差异(P 值皆小于 0.001);城乡结合部与郊区($P=0.009$),城区与郊区($P=0.002$)之间存在显著差异,城区与城乡结合部的差异不显著($P=0.080$)。城乡梯度中,郊区的大部分绿地样点 NEP 皆为正,表现为碳汇绿地;城郊结合部 NEP 正值和负值样点数量相当,碳收支基本平衡;而城区样点以负值为主,表现为碳源绿地(图 4)。绿地类型中,自然植被和农田两种绿地类型 NEP 为正值的样点较多,为碳汇绿地,其中自然植被 NEP 数值最高;而公园绿地仍有大量样点的 NEP 为负值,表现为碳源绿地(图 4)。

不同绿地类型 NEP 随着城乡梯度的变化,其数值差异也存在明显差异(图 5)。Wilcoxon 秩和检验结果显示,城区中公园与自然植被(P 值小于 0.001)、郊区中自然植被与公园和农田的 NEP 皆存在显著性差异(P 值分别为 0.008 和 0.005),而在城郊结合部,各绿地类型之间 NEP 差异不显著。自然植被样点 NEP 在各

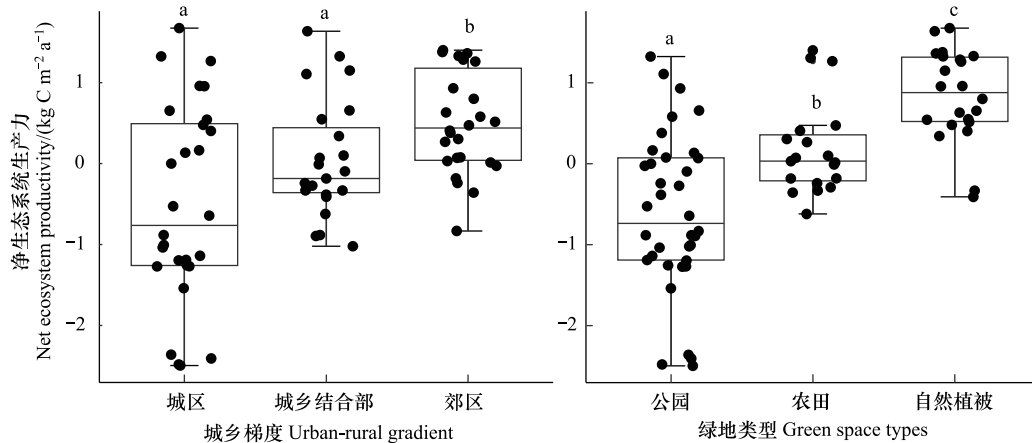


图4 城乡梯度与绿地类型的净生态系统生产力分布

Fig.4 Net ecosystem productivity distribution with urban-rural gradients and green space types

字母不同(a,b,c)说明存在显著性差异,字母相同说明没有显著性差异

城乡梯度下多为正值,表现为碳汇绿地;公园样点 NEP 在城区和城郊结合部多为负值,表现为碳源绿地,而在郊区则多为正值,表现为碳汇绿地;农田样点 NEP 在城郊结合部多为负值,表现为碳源绿地,而在郊区则多为正值,表现为碳汇绿地。

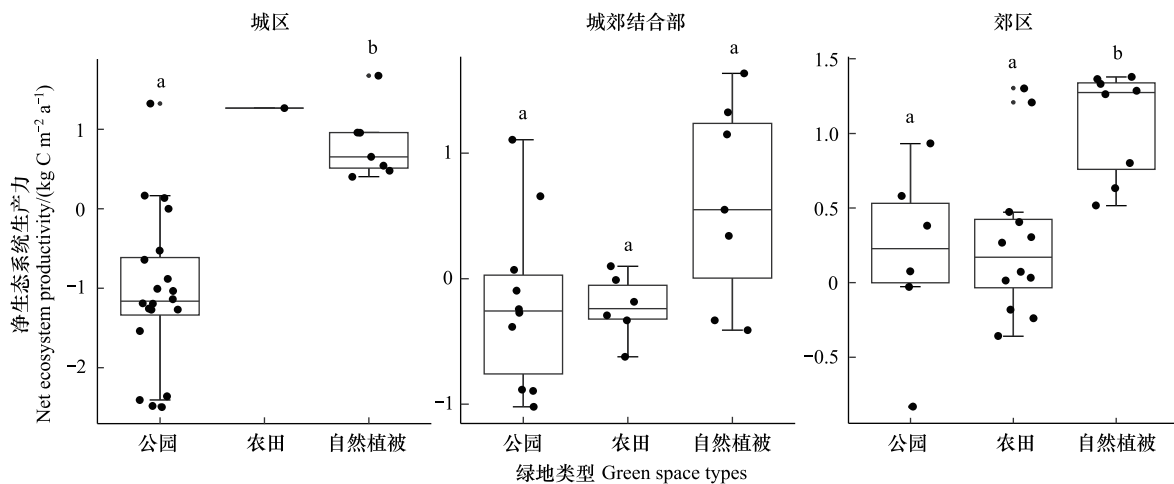


图5 不同城乡梯度下绿地类型净生态系统生产力的分布

Fig.5 Net ecosystem productivity distribution of different green space types across urban-rural gradient

字母不同(a,b)说明存在显著性差异,字母相同说明没有显著性差异

2.3 绿地空间 NEP 影响因子分析

2.3.1 杭州主城区绿地空间 NEP 的影响因子

利用广义加性模型对杭州市主城区绿地空间 NEP 进行显著影响因子分析,模型结果解释度为 83.9%,影响绿地空间 NEP 的显著因子,按照相对重要性排序依次为:气温、乔木盖度、绿地斑块面积、灌木盖度和灌木物种丰富度。绿地空间 NEP 与绿地斑块面积为非线性关系,随着绿地斑块面积的增加,NEP 先小幅度地降低再迅速上升;与乔木盖度、灌木盖度为近线性正相关关系,随着乔木盖度和灌木盖度的增加,NEP 持续增大,但增加幅度逐渐减小。而与灌木物种丰富度和气温则为线性负相关关系(图 6)。

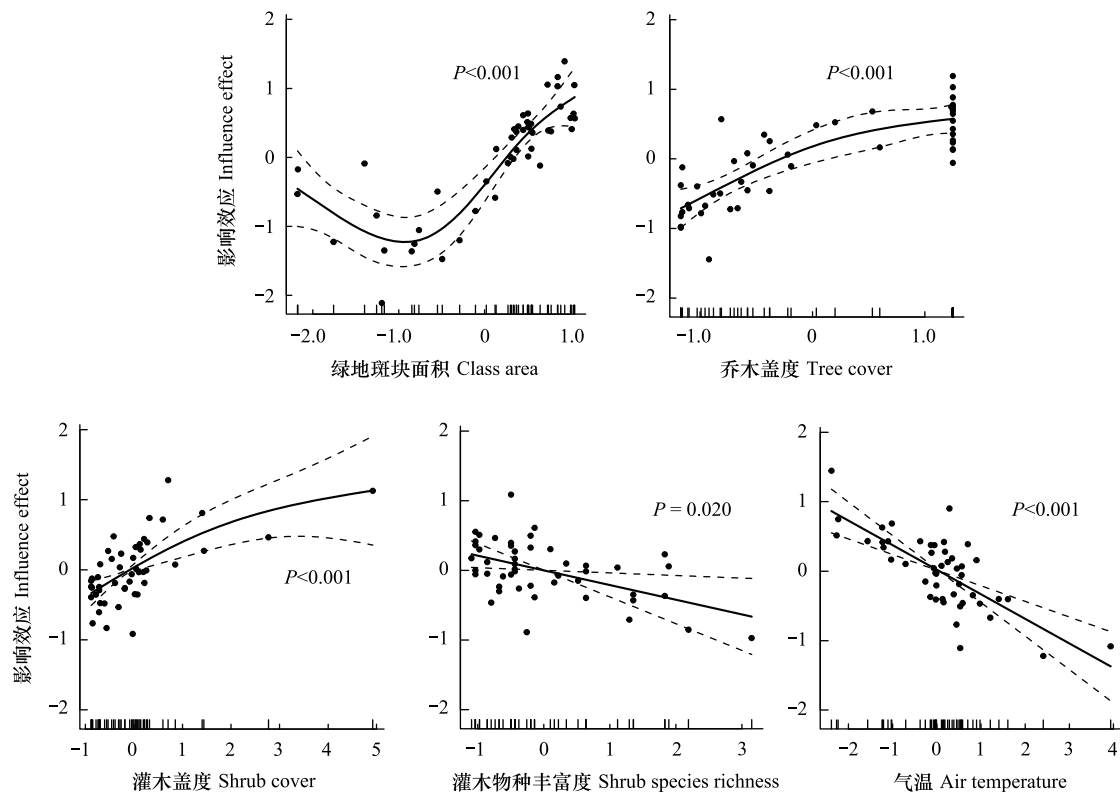


图6 影响因子对绿地空间净生态系统生产力的效应分析

Fig.6 Effects of influencing factors to net ecosystem productivity of green space

2.3.2 不同城乡梯度绿地空间 NEP 影响因子分析

对不同城乡梯度的绿地空间 NEP 及对应的影响因子进行广义加性模型分析,结果显示城区模型的解释度为 98.0%、城郊结合部的解释度为 84.7%、郊区的解释度为 84.2%,说明广义加性模型能够较好的拟合并解释城市绿地空间城乡梯度下 NEP 与所选因子之间的关系。

各影响因子在不同城乡梯度上对 NEP 的作用存在明显差异(图 7)。城区中,按照因子相对重要性排序,NEP 主要受到乔木盖度、气温和景观多样性指数影响;城区 NEP 与景观多样性指数呈非线性负相关,随着景观多样性的增加,NEP 降低,但降低趋势逐渐减慢;与气温呈近线性负相关;而与乔木盖度则呈明显的线性正相关。城郊结合部中,影响 NEP 的显著影响因子,按照相对重要性排序依次为:灌木盖度、乔木物种丰富度、绿地斑块密度和气温;城郊结合部 NEP 与气温呈非线性负相关,随着气温的增加,NEP 逐渐降低,但降低幅度逐渐趋于平缓;与绿地斑块密度呈近线性负相关,随着绿地斑块密度的增大,NEP 逐渐减少;而与乔木物种丰富度和灌木盖度呈明显的线性正相关。郊区中,NEP 则根据相对重要性排序依次受乔木盖度、聚集度指数和灌木盖度的显著影响。其中郊区 NEP 与聚集度指数呈非线性正相关,随着聚集度指数的增大,NEP 先增加,后趋于平缓;与乔木盖度和灌木盖度则明显呈线性正相关。

2.3.3 不同绿地空间类型 NEP 影响因子分析

对不同绿地类型分别进行广义加性模型分析,公园模型解释度为 83.6%、农田为 88.1%、自然植被为 85.4%。图 8—10 分别展示了公园、农田和自然植被样点 NEP 与其显著影响因子的关系,可以看出不同绿地类型 NEP 的影响因子存在明显不同。

公园 NEP 的显著性影响因子,按照相对重要性排序依次为:灌木盖度、景观分割指数、聚集度指数、气温、乔木盖度和灌木物种丰富度(图 8)。其中,公园 NEP 与灌木物种丰富度呈非线性负相关,随着灌木物种丰富度的增加,NEP 先降低后趋于平缓;与聚集度指数、乔木盖度和灌木盖度明显呈线性正相关;而与景观分割指

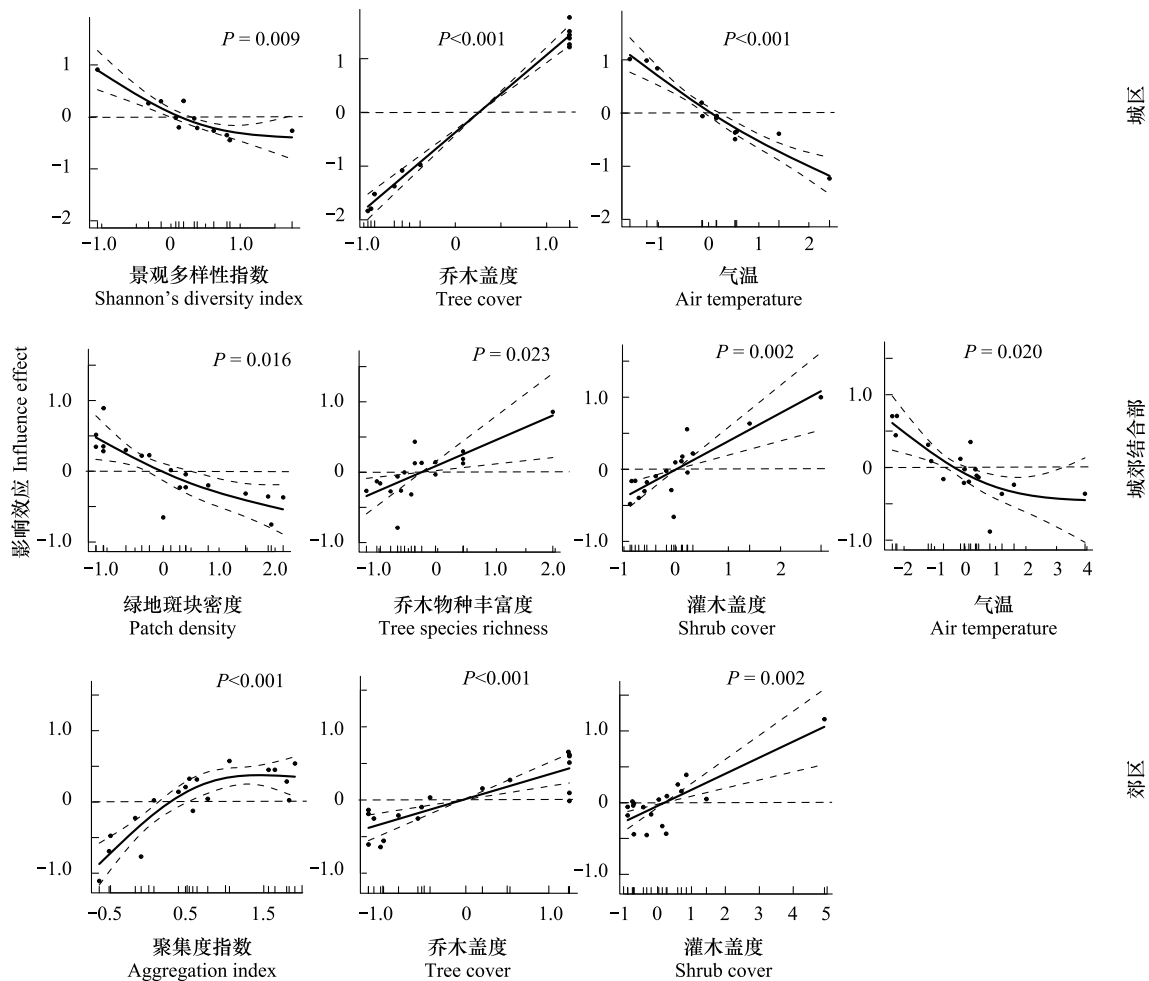


图7 影响因子对不同城乡梯度下绿地空间净生态系统生产力的效应分析

Fig.7 Effects of influencing factors to green space net ecosystem productivity of urban-rural gradient

数和气温则呈线性负相关。

农田 NEP 的显著性影响因子,按照相对重要性排序依次为:聚集度指数、灌木盖度和气温(图 9)。其中,农田 NEP 与灌木盖度呈近线性正相关,随着灌木盖度的增加 NEP 逐渐增加,且增加趋势逐渐增大;与聚集度指数呈线性正相关;而与气温则呈线性负相关。

自然植被 NEP 的显著性影响因子,按照相对重要性排序依次为:景观多样性指数、乔木盖度和气温(图 10)。其中,自然植被 NEP 与乔木盖度呈非线性关系;随着乔木盖度的增加,NEP 逐渐增加且增加幅度递增;与景观多样性指数和气温则呈线性负相关。

3 讨论

杭州市绿地空间 NEP 分布及其影响因子在城乡梯度和绿地类型上均存在显著差异。针对绿地空间 NEP 的分布,在城乡梯度上,呈现城区、城郊结合部、郊区依次递增现象,这可能与杭州市从城区到郊区,建设用地面积占比和人口密度逐渐降低、人类活动相对减少、绿地覆盖率增加有关;在绿地类型上,基本呈现公园、农田、自然植被 NEP 依次递增态势,这与已有研究中林地固碳能力最高^[39]的结果一致。但对于不同城乡梯度的不同绿地类型 NEP 分布略有差异,主要表现为公园、农田在城区、城郊结合部为碳源绿地,而在郊区则为碳汇绿地,且郊区中部分公园的碳汇水平大于农田,这可能是由于郊区较之城区和城郊结合部,其森林植被占比更高、乔木盖度更大,且人口密度更低、人类活动更少等因素造成的。

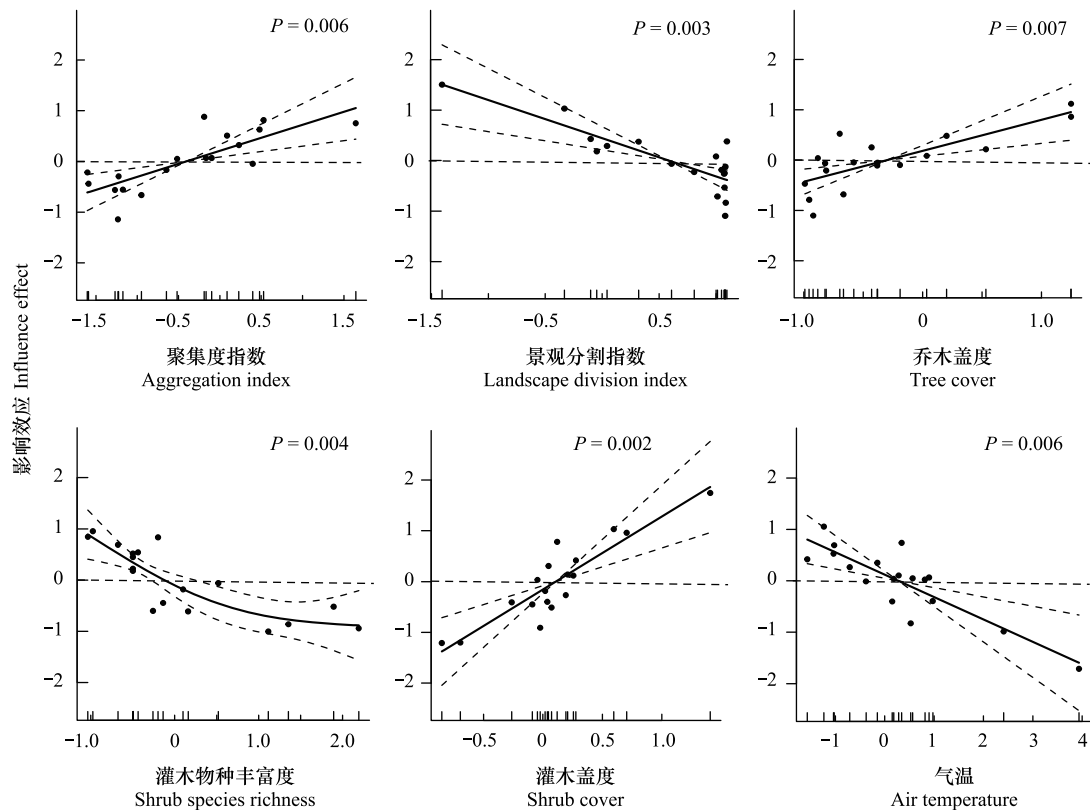


图8 影响因子对杭州公园净生态系统生产力的效应分析

Fig.8 Effects of influencing factors to net ecosystem productivity of park in Hangzhou

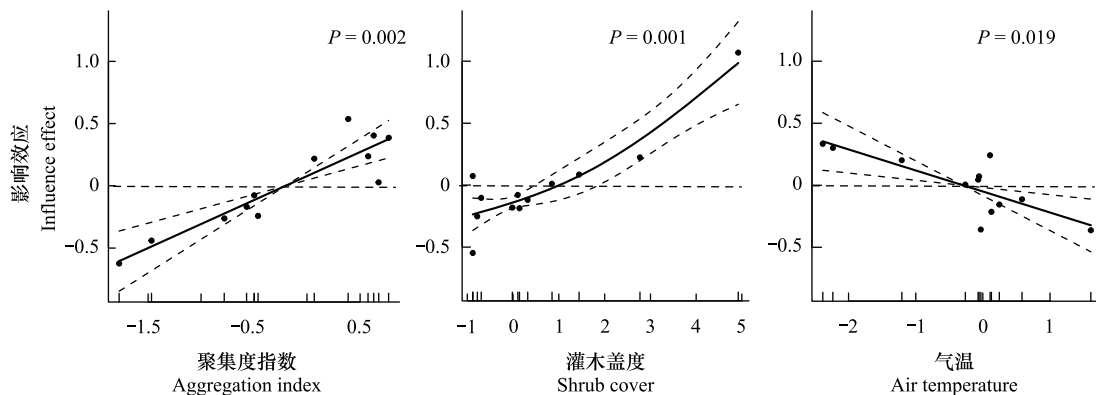


图9 影响因子对杭州农田净生态系统生产力的效应分析

Fig.9 Effects of influencing factors to net ecosystem productivity of farmland in Hangzhou

3.1 影响城市绿地碳汇能力的正向效应

综合来看,绿地斑块面积、聚集度指数、乔木盖度、乔木物种丰富度和灌木盖度是影响城市绿地空间 NEP 的正效应因子,绿地斑块面积越大、植被越集聚,植被固碳能力就越强,这与苟文雅、汤煜等人研究结果一致^[40—41]。现有研究表明乔木具有更大的冠幅和叶面积指数,固碳能力最强^[42—43],而乔木丰富度的增加可增强乔木群落的稳定性,有效利用空间和资源,从而提升植被固碳能力;灌木固碳能力较乔木相对较弱,但也具有可观的固碳能力^[42],因此植被中的乔木盖度、乔木物种丰富度、灌木盖度越大,绿地固碳能力就越强。不同城乡梯度和绿地类型的绿地空间,其正效应因子存在差异,针对整体绿地空间,绿地斑块面积、乔木盖度和灌

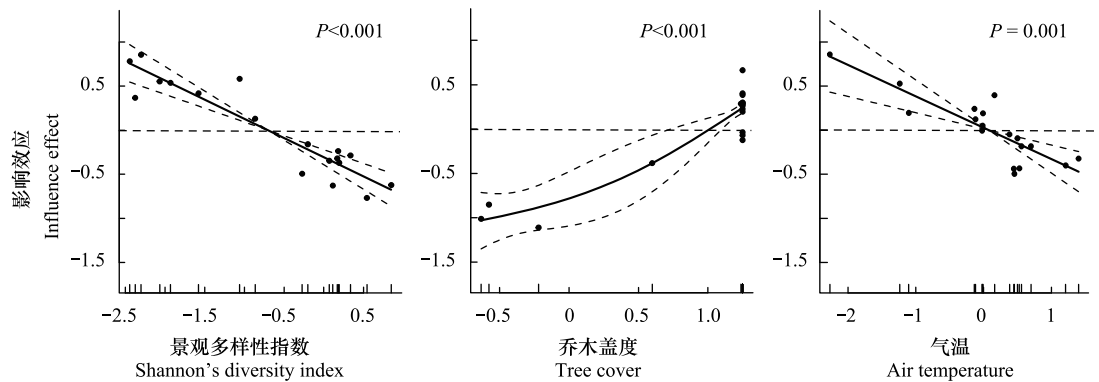


图 10 影响因子对杭州自然植被净生态系统生产力的效应分析

Fig.10 Effects of influencing factors to net ecosystem productivity of natural vegetation in Hangzhou

木盖度是显著影响绿地 NEP 的正向因子,其中绿地斑块面积的增加会使 NEP 先降低后迅速上升,这可能是因为在中小型城市绿地的营建和管理过程中产生的碳排^[44]大于植物产生的碳汇,表现为 NEP 先降低;但当城市绿地面积达到一定规模时,碳汇作用超过了碳排,NEP 迅速上升。

从城乡梯度来看,城区 NEP 受乔木盖度的正向影响,这可能是由于城区受到人类活动的影响最为强烈和频繁^[15,19],掩盖了其他作用较弱的正向效应,只有乔木植被的固碳能力得以彰显。城乡结合部受乔木物种丰富度和灌木盖度的正向影响,而郊区则受乔木盖度、灌木盖度和聚集度指数的正向影响。其中,随着绿地聚集度指数的增加,NEP 先增加后趋于平稳,说明绿地集聚导致 NEP 增加的规律存在饱和阈值。

从绿地类型来看,公园 NEP 受聚集度指数、乔木盖度和灌木盖度的正向影响,公园绿地面积有限,且植被分布较为零散,故乔灌木盖度和绿地聚集度指数一般低于饱和阈值,表现出这些因素和 NEP 之间的持续正向效应。农田绿地以农作物和伴生灌草为主,几乎没有大型乔木,故主要受景观聚集度和灌木盖度的影响。自然植被大多以城市森林为主,乔木主导整个生态系统的功能,因此增加乔木盖度,会显著增强 NEP。

3.2 影响城市绿地碳汇能力的负向效应

景观多样性、绿地斑块密度、景观分割指数、灌木物种丰富度和气温是影响城市绿地空间 NEP 的负效应因子。绿地景观多样性、斑块密度和景观分割指数主要体现了绿地景观的异质性和破碎化程度,数值越大,表明其破碎化程度越高;而姚科、王家慧等人的研究发现高景观异质性和破碎化程度会降低城市 NEP^[39,45],且人工植被在营建和管理过程中会产生碳排^[44],分散式绿地较之聚集性绿地管理效率更低,进而产生更多的碳排。气温对碳汇的作用目前研究结论不一,王玮的研究表明西藏西北部昆仑高寒荒漠地带以及羌塘高寒草原地带北部地区植被 NEP 与气温呈正相关^[46];而李朝晖等的研究则显示植被 NEP 与气温呈负相关^[47-48];此外,当气温大于 28℃ 时,植被的固碳能力受高温抑制,呈下降趋势^[49]。在本研究中,绿地环境中较高的气温,可能意味着绿地系统中硬质铺装的占比较高,具有降温效果的植被盖度较少^[50],从而导致整体 NEP 降低。

针对整体绿地空间,灌木物种丰富度和气温是显著影响绿地空间 NEP 的负向因子。对于城市而言,绿地营造中以景观价值为主,较少考虑不同植物间的相互作用,单纯追求复杂的植物景观(使用种类更多的灌木)而忽略基本的生态规律,反而在营造和养护过程中产生更多的碳排,进而使绿地空间 NEP 降低。从城乡梯度来看,城区和城郊结合部 NEP 都受绿地破碎化程度和气温的负向影响,绿地破碎化程度越大(城区表现为绿地景观多样性指数,城郊结合部表现为绿地斑块密度),气温越高,NEP 就越低。其中城区 NEP 随着气温的增加,NEP 逐渐降低,而城郊结合部 NEP 则随着气温的增加先降低后趋于平缓,这可能是因为城区较之城郊结合部,人口密度更高^[51],破碎化程度更为强烈^[52],热岛效应产生的负面影响更大^[53];而郊区无显著的负向因子。从绿地类型来看,公园 NEP 受景观分割指数、灌木物种丰富度和气温的负向影响,由于公园的面积有限,且除绿色植被外还有一定比重的建筑与硬质铺装,是被普遍认可的碳源空间^[54-56]。景观分割指数越大意

意味着公园绿地越分散;灌木物种丰富度越高,可能会导致每种灌木的数量有限无法形成稳定的植物群落,而气温越高可能意味着公园内硬质铺装占比较高,植物盖度较少(植物有明显的降温作用^[46]);故而使植物的固碳能力降低,NEP 减少。农田 NEP 受气温的负向影响,农田中气温越高,意味着农田中乔灌的缺失,故此 NEP 呈下降趋势;自然植被受景观多样性指数和气温的负面影响,景观多样性越高,表明绿地空间斑块越多,破碎化程度越强,使 NEP 降低;而气温越高,可能意味着植被盖度的减少,进而造成 NEP 的下降。

3.3 研究局限性

本文通过多源数据和模型估算了杭州市主城区 NEP,并探究其空间分布和影响因素,研究结果具有一定的可信度。但 NEP 是自然因素和人类活动共同作用的结果,且 R_h 的估算存在一定的不确定性,目前大多数相关研究均通过遥感或模型对 NEP 进行估算,普遍缺乏城市范围内的实测数据进行验证。故而 R_h 和 NEP 的实测检验和自然经济社会因子的多方面考量,将是未来城市碳源/汇研究的重要方向。

4 结论与建议

4.1 结论

本文基于遥感数据和土壤呼吸模型估算了杭州市主城区的碳源/汇情况(以 NEP 为指标),并按照城乡梯度和绿地类型两个维度探究了其分布特征及显著影响因素的差异性,主要结论如下:

(1) 杭州市碳源/汇的分布存在城乡梯度和绿地类型差异;城乡梯度上,从城区、城郊结合部到郊区呈现由碳源逐渐过渡到碳汇的态势;绿地类型上,大体呈现自然植被为碳汇、农田接近碳中和、公园为碳源的现象。但公园随着城乡梯度的不同,其碳收支存在变化,如郊区的大部分公园表现为明显的碳汇绿地。

(2) 对于杭州市主城区绿地空间 NEP,不同城乡梯度和绿地类型其影响因素存在较大差异。在不同城乡梯度和绿地类型中,乔木盖度、灌木盖度、聚集度指数是普遍影响绿地空间 NEP 的重要正向因子。负效应因子在不同城乡梯度和绿地类型上则存在较大差异,城乡梯度上,影响城区 NEP 的负向因子主要是景观多样性指数和气温,而影响城郊结合部 NEP 的负向因子是绿地斑块密度和气温;绿地类型上,影响公园 NEP 的负向因子有景观分割指数、灌木物种丰富度和气温;影响农田 NEP 的负向因子主要为气温;而影响自然植被 NEP 的负向因子则为景观多样性和气温。

4.2 建议

本文以杭州市主城区绿地空间为研究对象,探索了城市绿地空间碳源/汇的城乡梯度分布特征及其影响因素,并据此提出如下建议,以期提升城市绿地空间碳汇能力献计献策,促进“双碳”目标顺利实现。

(1) 对于城市整体绿地空间而言,应该规划大型的聚集性绿地,而非零散式地建设大量小型绿地,同时增加乔木盖度,种植固碳能力高、抗逆性强的植被种类,提升乔木种类多样性,可以对城市碳收支平衡产生较好的正面效应。

(2) 城区绿地空间多以公园为主,应当积极以控制植被种类数量为前提(保障植被群落稳定性)增加乔灌的盖度,尽量避免分散式的植被建设,另外,可通过植被覆盖减少硬质铺装的裸露,以有效降低环境气温。杭州主城区的城郊结合部以农田为主,缺乏乔灌植被,应当积极成片补种高碳汇、强抗逆的植被物种。而针对杭州郊区,主要以自然植被为主,则应避免多点随意开发,破坏自然植被的整体性、连通性,降低自然植被群落的生产力;此外,可对郊区的荒地进行植被补种,增加乔木盖度,以增强绿地空间的固碳能力。

参考文献(References):

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- [2] 赵荣钦, 黄贤金, 鄢文聚, 吴克宁, 陈银蓉, 王少剑, 卢鹤立, 方恺, 李宇. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1123-1136.
- [3] 王政强, 覃盟琳, 唐世斌, 赵胤程, 庞雅月, 龚苑红. 北部湾城市群土地利用碳收支时空分异及碳补偿分区. 水土保持通报, 2022, 42(5): 348-359.

- [4] Field C B, Barros V R, Dokke D J, Mastrandrea M D, Mach K J, Bilir T E, Chatterjee M, Ebi K L, Estrada Y O, Genova R C, Girma B, Kissel E S, Levy A N, Macracken S, Mastrandrea P R, White L L. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability: Working Group II contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [5] Cai B F, Wang J N, Yang S Y, Mao X Q, Cao L B. Carbon dioxide emissions from cities in China based on high resolution emission gridded data. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2017, 15(1): 58-70.
- [6] 牛铜钢, 刘为. 双碳战略背景下城市生态系统的碳汇功能与生物多样性可以兼得. *生物多样性*, 2022, 30(8): 205-210.
- [7] 常顺利, 杨洪晓, 葛剑平. 净生态系统生产力研究进展与问题. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 50(5): 517-521.
- [8] He H L, Wang S Q, Zhang L, Wang J B, Ren X L, Zhou L, Piao S L, Hao Y, Ju W M, Gu F X, Yu S Y, Yang Y H, Wang M M, Niu Z E, Ge R, Yan H M, Huang M, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Zhang L M, He N P, Wang Q F, Yu G R. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [9] 陶波, 曹明奎, 李克让, 顾峰雪, 季劲钧, 黄玫, 张雷明. 1981—2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(12): 1131-1139.
- [10] 杨延征, 马元江, 江洪, 朱求安, 刘金勋, 彭长辉. 基于 IBIS 模型的 1960—2006 年中国陆地生态系统碳收支格局研究. *生态学报*, 2016, 36(13): 3911-3922.
- [11] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 解宪丽, 朱振宇, 汪煜. 中国净生态系统生产力空间分布及变化趋势研究. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(2): 69-74.
- [12] Chen S T, Zou J W, Hu Z H, Lu Y Y. Climate and vegetation drivers of terrestrial carbon fluxes: a global data synthesis. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(7): 679-696.
- [13] Xu Q, Dong Y X, Yang R. Influence of different geographical factors on carbon sink functions in the Pearl River Delta. *Scientific Reports*, 2017, 7: 110.
- [14] Xiang M S, Wang C J, Tan Y X, Yang J, Duan L S, Fang Y N, Li W H, Shu Y, Liu M L. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Western Sichuan Plateau. *Scientific Reports*, 2022, 12: 8114.
- [15] 韩玉, 丁素婷, 杨太保. 山西南部中条山生态系统碳储量时空分布及驱动因素. *中国环境科学*, 2023, 43(3): 1298-1306.
- [16] 林子奇, 王培俊, 刘旗, 杨亚丽. 2005—2020 年淮海经济区耕地碳储量时空演变特征及碳汇区识别. *农业工程学报*, 2022, 38(19): 259-268.
- [17] 李成龙, 周广胜, 周梦子, 周莉, 刘杰. 1971-2020 年盘锦芦苇湿地净生态系统生产力及其影响因子. *应用生态学报*, 2023, 34(05): 1331-1340. DOI:10.13287/j.1001-9332.202305.008.
- [18] 周夏飞, 於方, 曹国志, 杨威杉, 周颖. 2001—2015 年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 76-81.
- [19] 孙滨峰, 赵红, 逯非, 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.
- [20] Liu X P, Pei F S, Wen Y Y, Li X, Wang S J, Wu C J, Cai Y L, Wu J G, Chen J, Feng K S, Liu J G, Klaus Hubacek, Steven J. D, Yuan W P, Yu L, Liu Z. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity. *Scientific Reports*, 2019, 10: 5558.
- [21] Lu X Y, Chen X, Zhao X L, Lv D J, Zhang Y. Assessing the impact of land surface temperature on urban net primary productivity increment based on geographically weighted regression model. *Scientific Reports*, 2021, 11: 22282.
- [22] 杨永菊, 乔旭宁, 郭静, 马腾, 张合兵, 牛海鹏. 河南省不同主体功能区城镇扩张及其对净初级生产力的影响. *地域研究与开发*, 2022, 41(2): 27-33.
- [23] 袁甲, 沈非, 王甜甜, 罗小瑞. 2000—2010 年皖江城市带土地利用/覆被变化对区域净初级生产力的影响. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 245-250.
- [24] 陈探, 刘森, 胡远满, 吕久俊, 马俊, 孙凤云, 宫继萍. 沈阳经济区土地利用和净初级生产力变化. *生态学报*, 2015, 35(24): 8231-8240.
- [25] Yang H F, Chen W. Spatio-temporal pattern of urban vegetation carbon sink and driving mechanisms of human activities in Huaibei, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(21): 31957-31971.
- [26] Chuai X W, Yuan Y, Zhang X Y, Guo X M, Zhang X L, Xie F J, Zhao R Q, Li J B. Multiangle land use-linked carbon balance examination in Nanjing City, China. *Land Use Policy*, 2019, 84: 305-315.
- [27] 杭州市统计局, 国家统计局杭州调查队, 杭州市社会经济调查局. *杭州统计年鉴-2021*, 2021. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [28] 李筱璇. 城市化背景下生态系统服务的时空变化——以西安市为例[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- [29] 邬建国. *景观生态学: 格局、过程、尺度与等级*. 北京: 高等教育出版社, 2001: 106-120.
- [30] 赵燕菁. 制度变迁·小城镇发展·中国城市化. *城市规划*, 2001, 25(8): 47-57.
- [31] Wang C Y, Myint S W, Fan P L, Stuhlmacher M, Yang J C. The impact of urban expansion on the regional environment in Myanmar: a case study

- of two capital cities. *Landscape Ecology*, 2018, 33(5): 765-782.
- [32] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 赵东升. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系. *地理学报*, 2016, 71(1): 21-34.
- [33] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 陈安平. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. *植物生态学报*, 2001, 47(4): 414-419.
- [34] Chen S T, Huang Y, Zou J W, Shi Y S, Lu Y Y, Zhang W, Hu Z H. Interannual variability in soil respiration from terrestrial ecosystems in China and its response to climate change. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(12): 2091-2098.
- [35] Lou Y, Caruana R, Gehrke J. Intelligible models for classification and regression. *Proceedings of the 18th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. August 12-16, 2012, Beijing, China. New York: ACM, 2012: 150-158.
- [36] Hastie T J. *Statistical Models in S*. New York: Routledge, 2017: 249-307.
- [37] Wood S N. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2017.
- [38] 胡成媛, 康平, 吴锴, 张小玲, 王式功, 王紫潇, 欧阳正午, 曾胜兰, 向卫国. 基于 GAM 模型的四川盆地臭氧时空分布特征及影响因素研究. *环境科学学报*, 2019, 39(3): 809-820.
- [39] 姚科. 西安市域绿地碳汇效益影响因素研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [40] 苟文雅, 赵敬源, 马西娜. 基于碳污协同影响的西安市宅旁绿地优化设计研究. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2022, 54(3): 450-458.
- [41] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 石羽. 城市绿地碳储量估算及空间分布特征. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1387-1398.
- [42] 张青云, 吕伟娅, 徐炳乾. 华北地区城市绿地固碳能力测算研究. *环境保护科学*, 2021, 47(1): 41-48.
- [43] 李智琦, 林雯, 齐跃强, 潘勇军, 陈彦霖. 2008—2018 年广州市人民公园植被变化及固碳价值核算. *南方林业科学*, 2020, 48(2): 28-32.
- [44] 何晶. 基于全生命周期的城市绿地乔木群落碳收支研究——以广州市为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [45] 王家慧. 基于遥感技术的城市尺度净生态系统生产力估算及预测[D]. 徐州: 江苏师范大学, 2019.
- [46] 王玮. 西藏草地生态系统碳源/汇时空变化及其与气候因子关系[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [47] 李朝晖, 单楠, 王琪, 李文静, 王增龙, 包萨茹, 窦华山, 敖文, 庞博, 王文林. 2013—2020 年呼伦湖流域植被碳源/汇估算及影响因子分析. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(11): 1437-1446.
- [48] 张新中, 李育, 张成琦, 刘和斌. 2000—2014 年石羊河流域净生态系统生产力变化分析. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(4): 486-492.
- [49] 孙予璐. 梯度增温对东北稻田生长季净生态系统生产力的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020: 49-50.
- [50] 徐洪, 杨世莉. 城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 54(6): 790-798.
- [51] Zhong J, Jiao L M, Droin A, Liu J F, Lian X H, Taubenböck H. Greener cities cost more green: examining the impacts of different urban expansion patterns on NPP. *Building and Environment*, 2023, 228: 109876.
- [52] 胡昕利, 易扬, 康宏樟, 王彬, 史明昌, 刘春江. 近 25 年长江中游地区土地利用时空变化格局与驱动因素. *生态学报*, 2019, 39(6): 1877-1886.
- [53] 史姝姝, 匡文慧, 董斯齐. 21 世纪以来西安城乡梯度土地覆盖变化及对城市热岛影响时空特征. *遥感技术与应用*, 2020, 35(3): 537-547.
- [54] 周萍, 陈松林, 李晶, 李晨欣. 福建省土地利用变化碳排放时空差异与碳补偿. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 356-365, 372.
- [55] 张杰, 陈海, 刘迪, 史琴琴, 耿甜伟. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究. *西北大学学报: 自然科学版*, 2022, 52(1): 21-31.
- [56] 李彦旻, 沈育生, 王世航. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 182-188.