

多尺度空间结构对寒地城市碳排放的作用效果—以长春市为例

李冰心¹, 郑强², 贺宸南³

摘要: 寒冷地区的城市碳排放存在总量大、能源结构落后等现实问题,是实现碳中和的主战场之一。既有研究已证明空间结构对碳排放有重要影响,但不同尺度的具体作用尚不清晰。本研究以长春市为例,利用 2012-2021 年的能源统计、夜间灯光等数据,结合空间句法、随机森林和分段线性回归等方法,分析多尺度空间结构对碳排放的影响。结果显示:1) 年度碳排呈现先降后升再趋稳的趋势,冬季碳排放为夏季的 1.84 倍且空间形态向内部双中心+外部多中心转变。2) 空间结构的整合度持续提高而选择度持续下降,形成了微观散射型多核点状、中观网格型单核条状、宏观鱼骨型多轴群状的空间结构演化特征。3) 空间结构对碳排放的影响随尺度变化呈现先减小、后增大再减小的规律。

关键词: 寒地城市; 碳排放核算; 空间句法; 随机森林; 作用效果

Keywords: Cold City; Carbon Emission Accounting; Space Syntax; Random Forest; Effect Of Action

资助项目情况: 吉林省住房和城乡建设厅 2023 年科学技术项目,双碳目标下寒地城市碳排放的空间演化特征及其减碳规划策略,2023-R-07; 吉林省科技厅重点研发项目,基于多源数据的寒地城市碳排放核算关键技术研发与应用,202403044142SF

引言

为应对气候变化,中国在第七十五届联合国大会中提出了“双碳”目标,标志着国家经济与社会系统将经历深刻的变革,并推动城镇化向低碳发展的新纪元迈进^[1]。鉴于城市的碳排放量超过了全国的 70%^[2],城市的低碳转型无疑成为实现这一目标的核心途径。并且中国东北、华北和西北的寒地城市碳排放量较高,已成为实现“双碳”目标的主要障碍^[3]。因此,通过国土空间规划优化城市空间结构,引导寒地城市走向低碳发展,成为了减碳目标的关键。

国内外相关领域研究主要涉及碳排放量与空间结构的测算方法、相关性及作用机制、低碳城市的规划策略三方面内容:(1) 碳排放与空间结构的测算方法:分为直接和间接两类,早期研究主要依赖国家统计数据,采用投入产出法和 IPCC 能源消耗法,直接测算国家或区域碳排放量^[4,5];近年来,随着土地遥感、夜间灯光等开源数据的应用,间接测算市域和建成区碳排放逐渐增多,研究重心转向地方性^[6,7],并且与其相关的空间结构测算主要涵盖物质形态和交通区位,前者包括紧凑度、景观密度等,后者涉及路网密度和城市等级^[8-11]。(2) 相关性及作用机制:研究分

¹ 李冰心,吉林建筑大学,副教授

² 郑强(✉),吉林建筑大学,硕士研究生,1497972121@qq.com

³ 贺宸南,吉林建筑大学,硕士研究生

为线性和非线性两类，线性研究通常采用皮尔森系数、线性回归等方法，非线性研究则利用随机森林和地理探测器等方法，分析影响因素的相互作用^[12]。（3）低碳城市规划策略：自《巴黎协定》签署以来，全球多个国家和城市设定了净零排放目标^[13]。发达国家侧重于产业升级、绿色出行等策略，而中国则从土地类型管控和街区单元设计等角度开展低碳导向的研究。

综上所述，现有研究从普适性向地方性转变，测算方法由单一生产端数据向多源消费端数据发展，研究内容主要以宏观用地调控和微观空间设计为主。尽管如此，现有研究仍然不足，主要体现在以下三方面：第一，对寒地城市的关注较少；第二，单一的消费端碳排放测算方法限制了识别结果的准确性；第三，多尺度空间结构对碳排放的作用机制尚未明确。为填补这些空白，本研究以长春市为例，利用 2012–2021 年的多源数据，结合空间句法、随机森林等方法，分析多尺度空间结构对碳排放的非线性影响，为寒地城市的低碳规划提供科学依据。

1 数据来源和研究方法

1.1 研究区域

长春市位于我国严寒气候区，冬季平均气温为 $-15\sim-5$ 摄氏度，属于典型的寒地城市。根据 2017 年修订的《长春市城市总体规划（2011—2020 年）》，选择中心城区作为研究对象（图 1）。

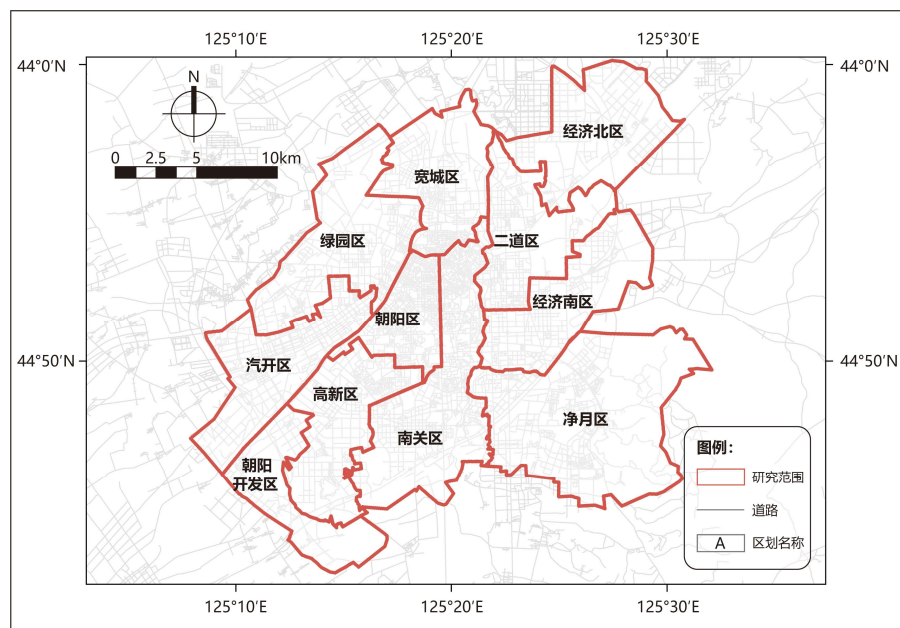


图 1 研究范围（图片来源：作者自绘）

1.2 数据来源和预处理

（1）路网测绘数据

利用 2012–2021 年的开源路网测绘数据（Open Street Map，简称：OSM）^[14]。提取了速公路、快速路、城市主干道、城市次干道、城市支路、居住区道、其他道路以及各级道路的连接道路，并使用 Arcmap 软件处理为中心线。

（2）城市功能数据

利用中国科学院提供的 2010、2015、2018、2020 年 30 米分辨率的土地利用数据^[15]（简称：LUCC），以及宫鹏团队于 2018 年发布的中国城市功能分区数据^[16]（简称：EULUC-China）。根据

表 1 对 2018 年的 LUCC 数据进行重新分类，并提取建设用地范围以裁剪 EULUC-China 数据，从而获得 2018 年长春市建设用地功能分区，结合百度地图 POI 数据与建筑空间数据进行模型训练后^[17]，对 2012-2021 年的长春建设用地功能进行识别，并与 LUCC 整合生成历年城市功能分区数据。

表 1 土地利用类型重分类（表格来源：作者自绘）

重分类类型	土地利用类型
建设用地	城镇用地
农村居住	农村居民点
耕地	水田、旱地
未利用土地	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地、其他
林地	有林地、灌木林、疏林地、其他林地
草地	高中低覆盖度草地
水域	河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂、滩地

（3）夜间灯光数据

利用 2012-2021 年 NOAA 提供的 500m 分辨率月度夜间灯光数据集^[18]（简称：NPP-VIIRS）进行预处理^[19]后合并为年度夜间灯光栅格数据集与夏季（6、7、8 月份数据）、冬季（12、1、2 月份的数据）夜间灯光数据集，并重采样为 10 米精度后分区统计至各个地块中。

（4）碳排放量数据

根据《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》（以下简称《指南》），生产端碳排放包括能源活动、工业过程与产品使用、农林业与其他土地利用及废弃物处理四类。2005 年和 2010 年，中国的废弃物处理的排放量不足 0.1%^[20]，可忽略不计。

长春市能源活动的碳排放量依据 2013-2022 年《中国能源统计年鉴》数据，按人口比进行折算^[21]，并参照《指南》和《省级温室气体清单编制指南》进行估算。

$$EC = \sum_{i=1}^n EC_i = \sum_{i=1}^n E_i \times CF_i \times CC_i \times COF_i \times 3.67 \quad (1)$$

式中：EC 为能源消费的碳排放总量； E_i 为各类能源消费总量； CF_i 为发热值； CC_i 为碳含量； COF_i 为氧化因子。 $CF_i \times CC_i \times COF_i$ 为碳排放系数，乘 3.67 后为碳排放系数。

工业过程和产品使用的碳排放量因数据获取受限，部分利用《长春市政府公报》提供的水泥和钢铁生产数据进行计算，化学工业则依据《电力工业统计资料汇编》的电石生产数据计算。

$$E_{\text{steel}} = AD_1 \times EF_1 + AD_d \times EF_d + (AD_r \times F_r - AD_s \times F_s) * \frac{44}{12} \quad (2)$$

$$E_c = AD \times EF \quad (3)$$

式（2）中： E_{steel} 是钢铁生产的碳排放量； AD_1 石灰石用量； EF_1 为石灰石的排放因子； AD_d 为白云石用量； EF_d 为白云石的排放因子； AD_r 为炼钢生铁用量； F_r 为生铁含碳率； AD_s 是炼钢的钢材产量； F_s 钢材含碳率。

式（3）中： E_c 是水泥或电石生产过程的碳排放量，AD为产量，EF 为该生产过程平均碳排放因子。

农业、林业和其他土地利用的碳排放使用面积乘系数的方法进行估算^[22]，其中草地、林地、水域和未利用土地作为碳汇。城市绿地按 1:1 拆分为林地和草地，碳排放系数见表 2。

表 2 土地利用类型碳排放系数表（表格来源：作者自绘）

土地利用类型		碳排放系数 t/hm2
其他土地	耕地	0.422
	草地和未利用土地	-0.021
	林地	-0.578
	水域	-0.252

1.3 研究方法

（1）碳排放端口转译

将生产端碳排放转译至用地端^[23]（图 2），利用 Arcmap10.5 软件进行整合，提取不同土地利用类型对应的年度夜间灯光总值，并使用不同土地利用类型的碳排放总量除以对应夜间灯光总值，得到不同用地碳排放系数^[24]，进而计算每个地块的年度性、季节性排放量。随后，提取长春市中心城区所有地块，将碳排放量提取至 500 米精度网格上。

$$t_n = \frac{T_n}{L_n} \times l_n \quad (4)$$

式中： t_n 为某地块碳排放量， T_n 为该功能用地碳排放总量， L_n 为该用地类型夜间灯光 DN 值总量， l_n 为某地块的 DN 值。

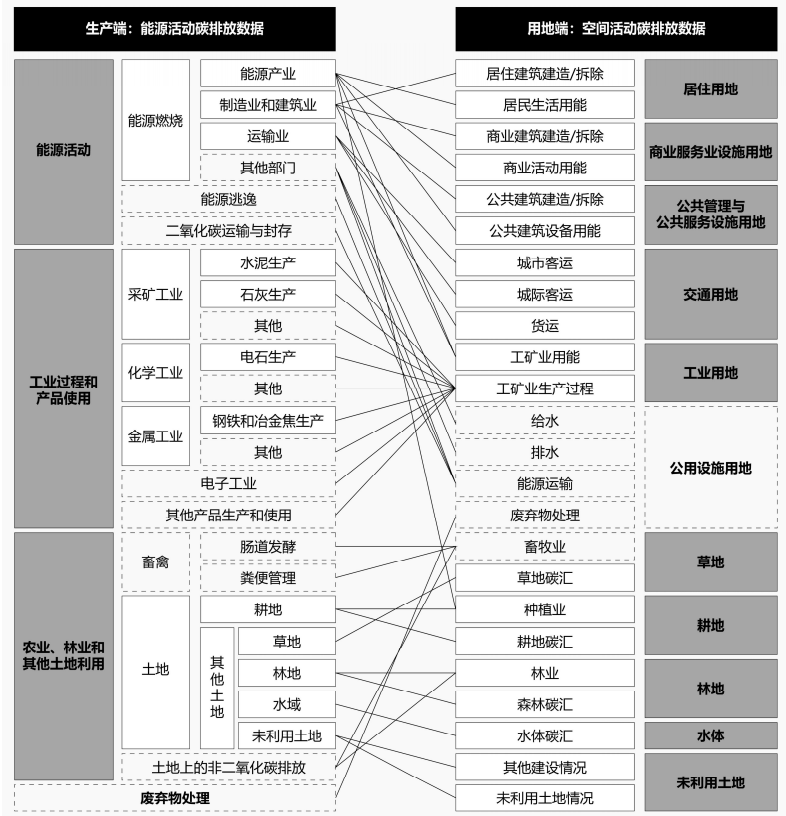


图2 用地端碳排放转译（图片来源：作者自绘）

（2）空间句法

将道路中心线轴线模型转为线段模型，设定微观（400m、800m、1200m、1400m）、中观（2800m、3200m、4200m、6400m）、宏观（9600m、12000m、20000m、n）共12个分析半径，通过Depthmap软件进行分析，并对integration与choice指标进行标准化，得到标准化角度整合度（NAIN）和选择度（NACH）^[25,26]，用于空间结构可视化分析。随后提取网格单元内不同尺度的NAIN和NACH最大值，作为空间句法数值进行分析。

$$NAIN = \frac{(\text{node count})^{1.2}}{(\text{angular total depth})+2} \quad (5)$$

$$NACH = \frac{\log(\text{angular choice}+1)}{\log(\text{angular total depth}+3)} \quad (6)$$

式（5）和（6）中，node count为线段节点数，angular total depth为角度总深度，angular choice为角度选择度。整合度反映空间中心性，选择度反映等级性。因整合度受路网密度影响，选择核心整合度分析^[27]。

（3）景观格局指数

景观格局指标是空间计量常用方法^[28]，利用Fragstats软件计算斑块凝聚指数（COHESION）和景观形态指数（LSI）^[29]对碳排放量进行定量描述。

$$COHESION = \frac{\left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij}}{\sum_{j=1}^n p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right]}{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{z}} \right]} \times 100 \quad (7)$$

$$LSI = \frac{\sum_{k=1}^m e_{ik}}{4\sqrt{A}} \quad (8)$$

式（7）中： g_i 为斑块类型*i*的同类相邻的像元数； $maxg_i$ 为同类相邻栅格边数，范围为[0~100]。COHESION指数反映斑块连通性，值越大表示斑块连通性越强，反之越破碎，以下简称连通性。

式（8）中， e_{ik} 表示类型*i*与*k*的斑块之间相邻的总长度； A 为斑块总面积；LSI值 ≥ 1 ，反映斑块复杂度，值越大表示斑块越离散，反之越聚集，以下简称复杂度。

（4）随机森林回归

随机森林模型通过集成多个决策树来降低过拟合风险，能够处理大规模数据，鲁棒性好、抗噪性强，因此适用于检验不同尺度下空间结构对城市碳排放的影响^[30,31]。以碳排放量为因变量，整合度和选择度为自变量，通过计算IncMSE评估模型预测能力，并确定各尺度对碳排放贡献最大的关键半径。

$$im_i = \frac{1}{nt} \sum_{V \in S_{xi}} Gain(X_i, V) \quad (9)$$

式中， S_{xi} 表示第*i*棵回归树的随机森林中 X_i 被分裂的节点集合； $Gain(X_i, V)$ 为 X_i 在分裂节点*V*的基尼信息增益； im_i 为 X_i 对模型的贡献度。

（5）分段线性回归

在确定不同尺度的关键半径后，通过自然断点法将网格尺度的碳排放量分为五个等级，并认为中等及以下等级可满足城市低碳发展需求。鉴于不同尺度的空间结构对碳排放的影响呈非线性变化^[32]，采用分段线性回归法推导碳排放达到中等水平时各尺度关键半径的阈值范围^[33]。以碳排

放量为因变量，整合度和选择度为自变量，明确高碳排网格对应的不同尺度空间结构的临界阈值。

$$y_i = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i & x_i \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 (x_i - \alpha) + e_i & x_i > \alpha \end{cases} \quad (10)$$

式（10）中， y_i 为碳排放量， x 为关键半径的整合度或选择度数值； α 为拐点值； β_0 为 $x \leq \alpha$ 时的截距； β_1 和 β_2 为系数； e 为误差项。

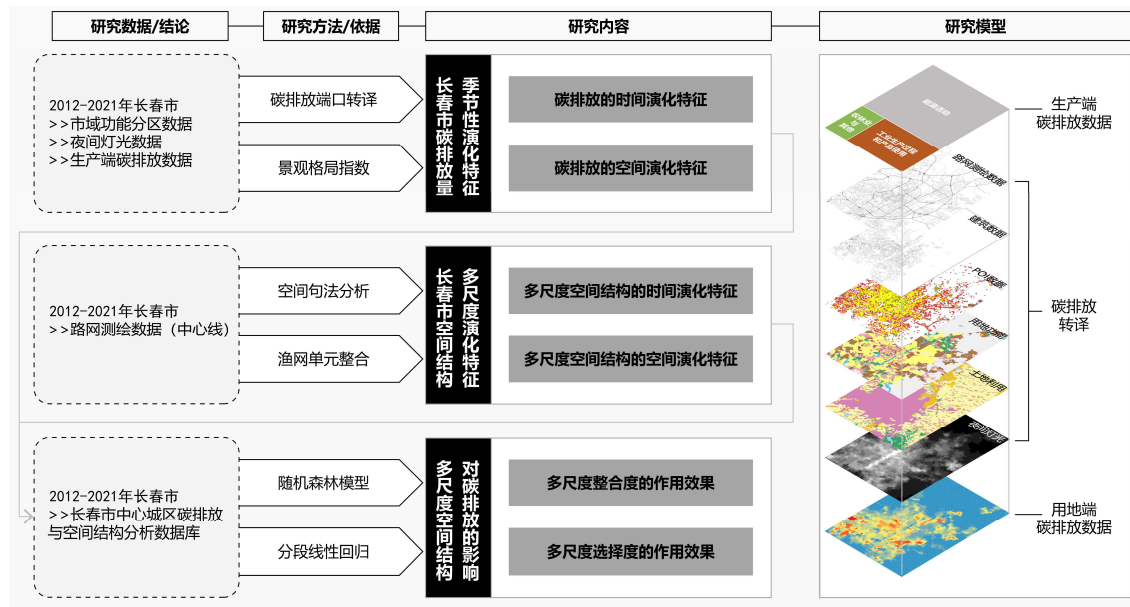


图 3 技术路线（图片来源：作者自绘）

2 论述分析

2.1 碳排放量的演化特征

（1）时间演化特征

长春市中心城区的碳排放在研究期间整体下降了 26.70%，共经历了三个阶段：2012-2018 年下降阶段，2018-2019 年回升阶段，2019-2021 年平稳阶段（图 4）。下降阶段中 2012-2014 年下降速率相对缓慢，其中能源产业和耕地的排放减少是主要原因，然而水泥生产的排放却有所增加；2014-2018 年，随着水泥生产和运输业的排放从增加转为减少，碳排放下降速率明显加快。回升阶段，由于制造业和建筑业的排放显著增加，碳排放出现回升。平稳阶段，碳排放增率较低，其中能源产业排放增加，但制造业和建筑业的减少抵消了这一增幅（图 5）。可见，碳排放变化主要受能源产业、制造业和建筑业以及水泥生产的影响较大。

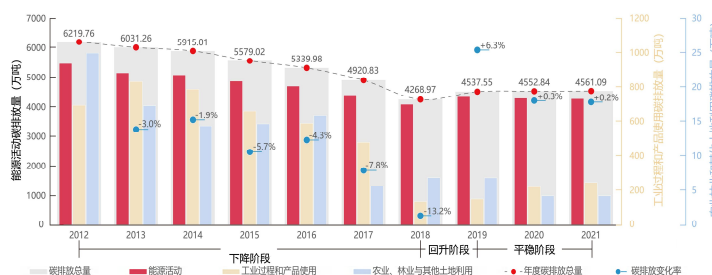


图 4 年度性变化趋势分析（图片来源：作者自绘）

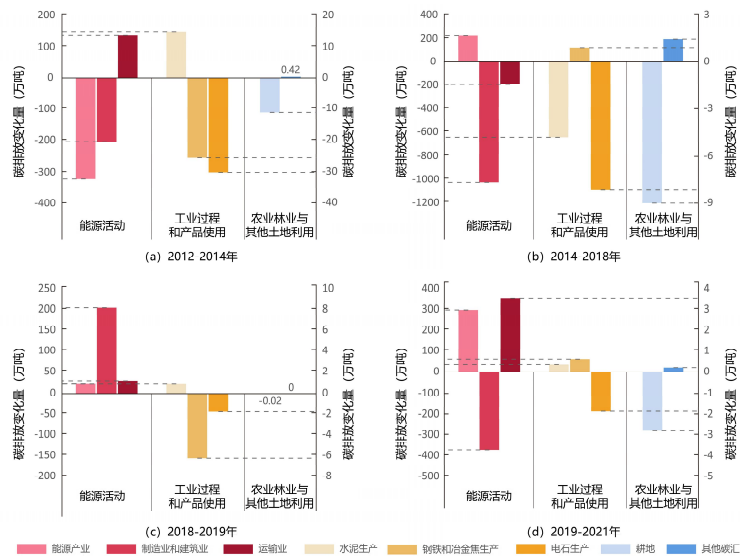


图5 各行业部门的碳排放变化量（图片来源：作者自绘）

在季节性上，冬季碳排放是夏季的 1.84 倍，分别下降了 27.12%和 45.21%。夏季排放在 2012-2014 年呈先降后升的趋势，2014-2021 年则逐步下降，仅 2019 年略有回升。冬季排放在 2012-2018 年波动下降，2018-2021 年则有所回升（图 6）。可见，季节性碳排放量的演化特征受冬季碳排放量的影响更为明显，并且冬季的演化特征与年度性基本保持一致。

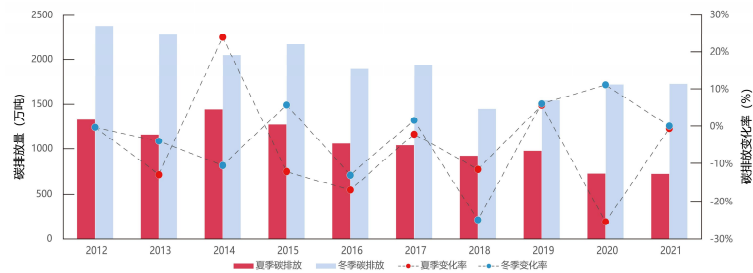


图6 季节性变化趋势分析（图片来源：作者自绘）

（2）空间演化特征

选取 2012、2015、2018 和 2021 年作为典型年份，划分为前期（2012-2015 年）、中期（2015-2018 年）和后期（2018-2021 年）三个阶段，分析发现高碳排放区域由外部扩展逐渐转向内部集聚，且年度与季节性均呈现复杂度提升、连通性下降的演化趋势（图 7）。前期，碳排放集中在老城区，外部向西南扩展，夏季向老城区聚集并向西南扩展，冬季在外部西侧形成单中心。中期，碳排放向新区延伸，形成多中心格局，夏季碳排放继续向南部新区扩展，形成内部双中心和外部双中心格局，冬季双中心进一步加强，并出现多个副中心；后期，老城区和新城区分化，外部组团中心逐步形成，呈现内部双中心、外部多中心布局，夏季内部多中心结构形成，外部多中心分化为多个组团，冬季则恢复为内部双中心，外部组团面积收缩但数量增加（图 8）。可见，夏季高碳排区域从单中心转为多中心，冬季从单中心向多中心过渡，二者差异逐年缩小。

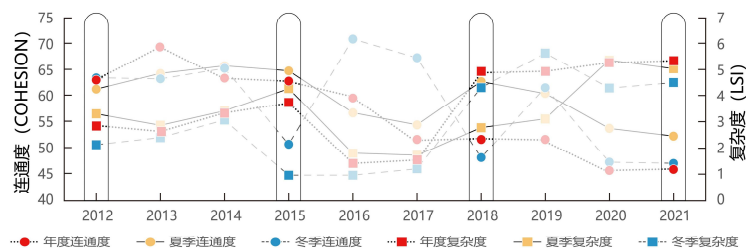


图 7 景观格局指数变化 (图片来源: 作者自绘)

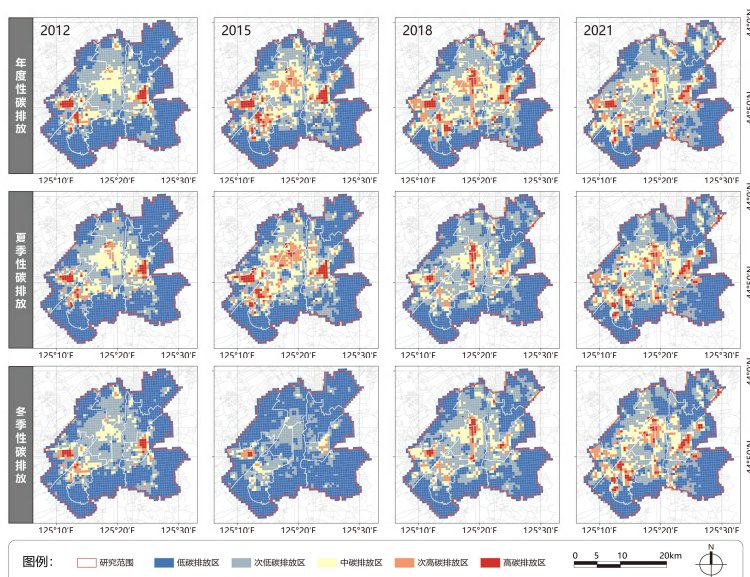


图 8 碳排放空间分布 (图片来源: 作者自绘)

2.2 空间结构的演化特征

(1) 时间演化特征

长春市中心城区的整合度整体呈下降趋势且数据分布趋于集中, 表现出高值偏态特征。前期, 微观尺度整合度以每年 1.5% 的速率下降, 中观尺度以每年 8.8% 的速率下降, 宏观尺度则以每年 5.7% 的速率下降 (图 9)。中期, 微观尺度下降速率减缓至每年 0.6%, 中观尺度至减缓至 2.2%, 宏观尺度下降速率上升至每年 7.0%。后期, 微观尺度反弹至每年 0.6%, 中观尺度下降速率减缓至每年 0.3%, 宏观尺度下降至每年 1.7%。可见, 长春市处于整合度减缓发展的阶段且 1400 米、6400 米和 9600 米的半径可作为整合度分析的代表性半径 (图 10)。

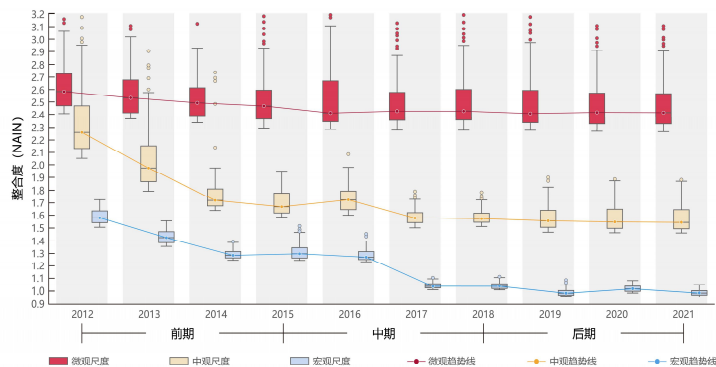


图 9 核心整合度变化趋势图 (图片来源: 作者自绘)

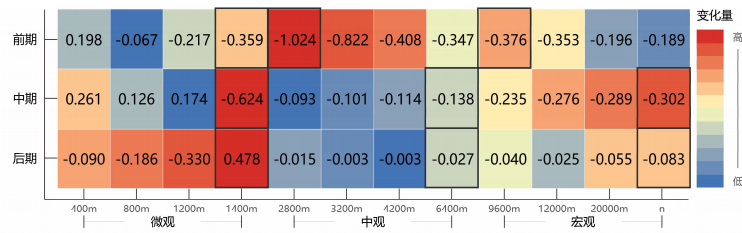


图 10 核心整合度变化量（图片来源：作者自绘）

选择度整体呈上升趋势且数据分布趋于集中，表现出低值偏态特征。微观尺度选择度的上升速度是宏观尺度的 27.6 倍（图 11）。前期，微观尺度选择度以每年 6.0% 的速率上升，中观尺度以每年 0.6% 的速率上升，宏观尺度则以每年 0.1% 的速率上升。中期，微观尺度选择度上升速率减缓至每年 1.6%，中观尺度至每年 0.1%，宏观尺度基本保持稳定。后期，微观尺度以每年 1.5% 的速率上升，中观和宏观尺度分别上升至每年 0.2%。可见，长春市处于选择度加速发展的阶段，400 米、6400 米和 9600 米的半径可作为多尺度选择度分析的代表性指标（图 12）。

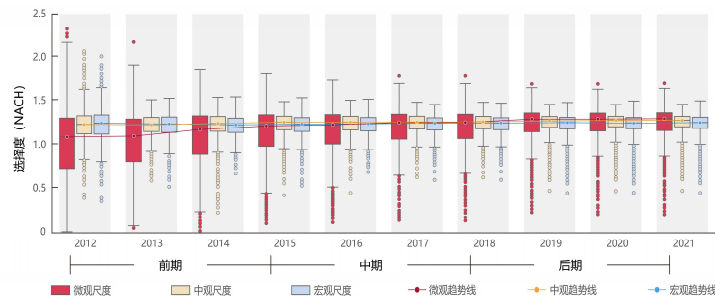


图 11 选择度变化趋势图（图片来源：作者自绘）

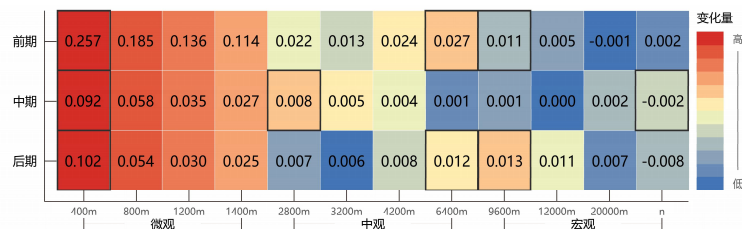


图 12 选择度变化量（图片来源：作者自绘）

（2）空间演化特征

分析 1400 米、6400 米和 n 三个代表性半径的整合度后发现：微观尺度上，前期老城区周围形成双中心结构，外围开发区呈组团分布；中期双中心减弱，外围组团增强；后期双中心结构恢复，外围组团增多，呈多核点状布局。中观尺度上，前期内部单中心结构显著并向南扩展；中期单中心减弱，与西南和东部开发区建立带状联系；后期单中心通过轴线与多个副中心连接，恢复主导地位，呈单核条状布局。宏观尺度上，前期形成南北轴线连接老城与新城；中期南北轴线减弱，外围开发区扩张；后期发展向东偏移，与外围开发区形成多轴群状布局。可见，不同尺度的中心性分别表现为多核点状、单核条状、多轴群状的中心性演化特征。

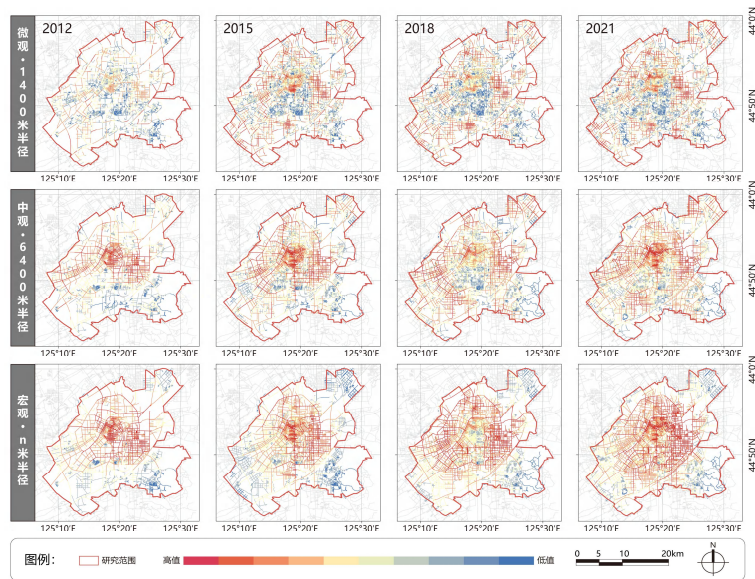


图 13 整合度空间分布（图片来源：作者自绘）

分析 400 米、6400 米和 9600 米三个代表性半径的选择度后发现：微观尺度上，前期高等级路网集中于老城区，外围呈点状分布；中期内外路网向外扩展并建立联系；后期内部路网向南部新城扩展，形成老城区为核心的散射型布局。中观尺度上，前期路网向外围扩展，西南方向形成轴带结构；中期内部路网密度降低，南部新城路网等级提升；后期内部路网密度恢复，外部路网均匀分布，呈网格型结构。宏观尺度上，前期路网形成南北十字型结构；中期南北轴线减弱；后期路网等级优化，恢复南北轴线，呈鱼骨型布局。可见，不同尺度的等级性分别表现为散射型、网格型、鱼骨型的等级性演化特征。

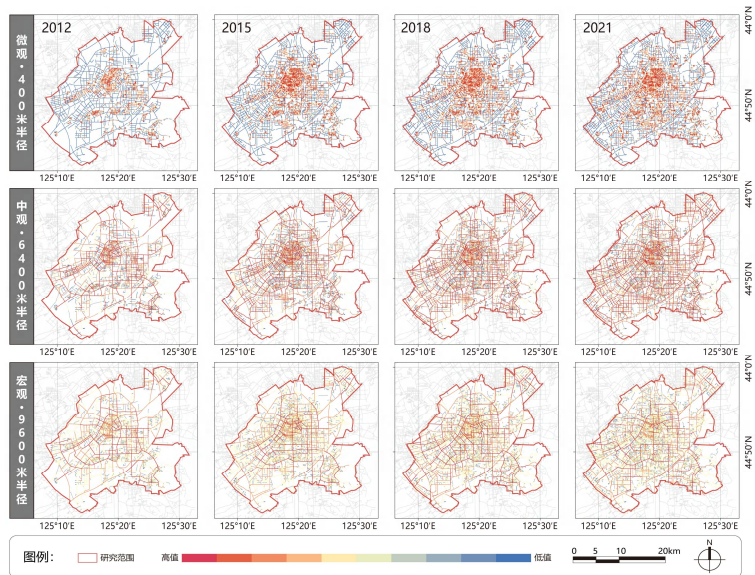


图 14 选择度空间分布（图片来源：作者自绘）

2.3 空间结构对碳排放的作用效果

采用随机森林模型，以 12 个不同半径的整合度和选择度作为自变量，并通过六折交叉验证优化模型参数（包括设置内部节点分裂的最小样本数为 2，最大深度为 16，叶子节点的最大数量为 130，以及决策树数量为 80），对年度和季节性碳排放量的贡献度进行了分析。结果表明：在微观尺度下，400 米的整合度和选择度对年度碳排放贡献度较高，并在季节性碳排放中也具有显

著影响；在中观尺度下，4200 米的选择度对年度和冬季碳排放的贡献度最高，而 3200 米的选择度在夏季碳排放中表现突出，但整合度影响较小；在宏观尺度下，9600 米的整合度对年度和季节性碳排放均有显著影响，但选择度的影响较弱。冬季碳排放主要受采暖需求和交通排放的集中影响，因此中观尺度（如 4200 米）的空间结构对其贡献较大。而夏季碳排放来源较为分散，植被光合作用和蒸腾作用在局部环境中的调节作用突出，因此 3200 米的中观尺度更具影响力。宏观尺度（9600 米）的整合度则可能由于区域整体布局影响了广泛范围内的能源使用和交通模式，从而对年度和季节性碳排放产生显著影响。空间结构对碳排放的影响随着尺度的变化呈现出“减小—增大—减小”的规律，其中，微观尺度下的 400 米、中观尺度下的 4200 米，以及宏观尺度下的 9600 米可视为关键半径。

表 3 空间结构对碳排放的贡献性水平（表格来源：作者自绘）

尺度	半径	年度性碳排放		夏季碳排放		冬季碳排放	
		NAIN	NACH	NAIN	NACH	NAIN	NACH
微观	400 米	16.10%	14.60%	13.70%	13.40%	16.50%	15.80%
	800 米	4.70%	5.70%	4.60%	6.80%	4.70%	7.90%
	1200 米	7.20%	3.30%	6.70%	3.20%	7.50%	2.90%
	1400 米	2.80%	2.50%	2.80%	2.60%	2.90%	2.60%
	2800 米	3.20%	2.70%	3.30%	4.80%	2.80%	2.80%
中观	3200 米	1.90%	3.60%	2.70%	16.20%	2.40%	12.40%
	4200 米	2.80%	33.00%	3.00%	14.60%	2.50%	22.60%
	6400 米	7.50%	13.60%	7.80%	15.10%	7.80%	13.30%
宏观	9600 米	27.50%	3.20%	29.10%	3.10%	25.70%	3.80%
	12000 米	14.00%	3.60%	16.10%	3.40%	12.50%	5.00%
	20000 米	4.90%	8.20%	3.80%	9.80%	5.20%	5.90%
	全局(n)	7.40%	5.90%	6.40%	7.10%	9.50%	5.00%

以微观尺度（400 米）整合度和选择度，中观尺度（4200 米）选择度，以及宏观尺度（9600 米）整合度为自变量，采用分段线性回归分析发现，空间结构与碳排放之间存在非线性关系。根据碳排放量的梯度关系，测算城市低碳发展所对应的不同尺度空间结构的阈值范围：微观尺度，年度碳排放量与整合度呈现先升后降趋势，选择度则持续上升，低碳阈值为整合度[0.00，1.99）和（2.88，+∞]，选择度[0.00，1.55），冬季阈值比夏季略大；中观尺度选择度持续上升，低碳阈值为[0.00，1.21），冬季略增；宏观尺度整合度持续上升，低碳阈值为[0.00，1.09），冬季阈值增加 6.4%。可见，调控微观和宏观尺度整合度及选择度有助于城市低碳发展。

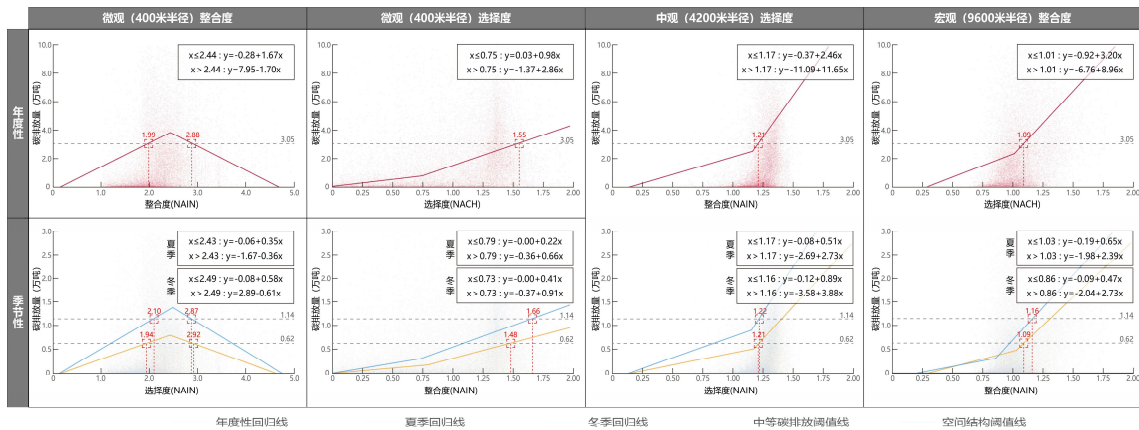


图 15 不同分析半径空间结构的阈值选择（图片来源：作者自绘）

结语

本文以长春市中心城区为研究对象，通过多源数据的整合，结合空间句法、随机森林和分段线性回归等方法，构建了碳排放转译模型，探讨多尺度空间结构对气候性碳排放的非线性影响。主要结论如下：① 年度碳排放量先降后升并趋于平稳，冬季碳排放量为夏季的 1.84 倍，且夏季碳排放量下降趋势更为显著。碳排放逐步从外部多片区转变为内部双中心+外部多中心形态且冬夏两季的空间演化差异逐年减少。② 城市空间结构的演化表现为整合度上升、选择度下降，微观尺度形成散射型多核点状，中观尺度为网格型单核条状，宏观尺度为鱼骨型多轴群状结构。③ 空间结构对碳排放的影响随尺度变化，宏观尺度的整合度和中观尺度的选择度影响尤为显著，且冬季影响大于夏季，关键阈值为微观尺度整合度 $[0.00, 1.99]$ 和 $(2.88, +\infty]$ ，选择度 $[0.00, 1.55]$ ，中观尺度选择度 $[0.00, 1.21]$ ，宏观尺度整合度 $[0.00, 1.09]$ 。基于此，寒地城市低碳发展应重点考虑：① 寒地城市减碳的季节性差异。② 结合存量规划背景加强寒地城市空间结构的等级性发展。③ 实施多尺度减碳策略，微观尺度优化社区布局，中观尺度改进道路设计，宏观尺度构建多中心城市模式等。尽管本研究提供了新的视角，但部分数据获取困难且样本范围有限，未来应扩展至更多寒地城市以验证结论。

参考文献

- [1] 冯长春, 赵燕菁, 王富海, 等. 面向碳中和的规划响应[J]. 城市规划, 2022, 46 (02): 25-31.
- [2] 蒋含颖, 段伟然, 张哲, 等. 基于统计学的中国典型大城市 CO₂ 排放达峰研究. 气候变化研究进展[J], 2021, 17 (2): 131-139 doi:10.12006/j. issn. 1673-1719. 2020. 223
- [3] 刘华军, 田震, 石印. 中国二氧化碳排放的空间差异及其双维内在结构解析: 2000—2019 年[J]. 地理研究, 2023, 42 (03): 857-877.
- [4] 耿丽敏, 付加锋, 宋玉祥. 东北三省消费型碳排放的差异分析[J]. 资源科学, 2012, 34 (08): 1445-1451.
- [5] 程豪. 碳排放怎么算——《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[J]. 中国统计, 2014, (11): 28-30.
- [6] 卢响军, 吉蒙, 郭金金. 基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据的华北地区碳排放时空分布模拟研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48 (11): 17-21+27.
- [7] 高楠楠, 曾辉, 李芬. 基于夜间遥感和 POI 的荆门市能耗空间量化分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23 (05): 891-902.
- [8] 韩帅帅, 苗长虹, 李奕灿. 黄河流域城市多中心空间结构对碳排放的影响研究[J]. 地理研究, 2023, 42 (04): 936-954.
- [9] 雷玉桃, 朱鹤政, 彭文祥. 多中心空间结构对城市碳减排的影响研究——基于中国超大城市的实证分析[J]. 城市问题, 2023, (02): 4-12. DOI:10.13239/j. bjsshkxy. cswt. 230201.

- [10] 袁青, 郭冉, 冷红, 等. 长三角地区县域中小城市空间形态对碳排放效率影响研究[J]. 西部人居环境学刊, 2021, 36(06): 8-15. DOI:10.13791/j.cnki.hsfwest.20210602.
- [11] 陈珍启, 林雄斌, 李莉, 等. 城市空间形态影响碳排放吗?——基于全国 110 个地级市数据的分析[J]. 生态经济, 2016, 32(10): 22-26.
- [12] 何小钰, 庄雅焯, 邱穗萱, 等. 城市三维空间结构对碳排放影响的尺度效应[J]. 生态学报, 2024, 44(02): 612-624. DOI:10.20103/j.stxb.202210223005.
- [13] Shibo Zeng, Gui Jin, Kaiyuan Tan, Xuan Liu. Can low-carbon city construction reduce carbon intensity? Empirical evidence from low-carbon city pilot policy in China. *Journal of Environmental Management*. Volume 332(2023), 117363. ISSN03014797 .<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117363>.
- [14] OpenStreetMap. Road Network Dataset [DB/OL]. 2012-2020. Retrieved from www.openstreetmap.org
- [15] 葛咏, 贾远信, 陈跃红, 等. 基于超分辨率制图的中国大陆分省多尺度土地利用数据集 (2005) [J]. 全球变化数据学报(中英文), 2018, 2(03): 323-330+212-219.
- [16] Gong P, Chen B, Li X, et al. Mapping essential urban land use categories in China (EULUC-China): Preliminary results for 2018[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(3): 182-187.
- [17] 杨俊宴, 邵典, 王桥, 等. 一种人工智能精细识别城市用地的方法探索——基于建筑形态与业态大数据[J]. 城市规划, 2021, 45(03): 46-56.
- [18] NOAA. 2012-2020. Earth Observation Group - Payne Institute for Public Policy. Retrieved from <https://www.mines.edu/>
- [19] 胡为安, 刘传立, 詹淇雯. 中国区域 NPP-VIIRS 年度夜间灯光数据的合成方法与对比验证[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(01): 141-148.
- [20] 徐一剑, 李潭峰, 徐丽丽. 国土空间总体规划温室气体核算模型[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(03): 355-365.
- [21] 刘畅, 苏筠, 黎玲玲. 中国县域能源消费碳排放估算及其空间分布[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(01): 113-119. DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.01.022.
- [22] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. 经济地理, 2015, 35(03): 154-162. DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2015.03.023.
- [23] 冷红, 肇禹然, 袁青. “双碳”目标下碳核算方法在国土空间规划中的应用路径研究[J/OL]. 国际城市规划, 1-16[2024-06-06]. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2023.070>.
- [24] 卢奕帆, 梁颖然, 卢思言, 等. 结合“珞珈一号”夜间灯光与城市功能分区的广州市碳排放空间分布模拟及其影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(06): 1176-1188.
- [25] 黄铎, 古恒宇, 姜洪庆. 基于空间句法的城市设计方法与流程融合机制构建[J]. 规划师, 2018, 34(03): 59-65.
- [26] Hillier, B., Yang, T., Turner, A. Advancing Depth-map to Advance Our Understanding of Cities: Comparing Streets and Cities and Streets with Cities[C]//Greene M, Reyes J, Castro A. Proceedings: Eighth International Space Syntax Symposium. Santiago de Chile: PUC, 2012: K001:1-15.
- [27] Batty M. Integrating space syntax with spatial interaction[J]. *Urban Informatics*, 2022, 1(1): 4.
- [28] Silva, E. A., Healey, P., Harris, N., & Van Den Broeck, P. (Eds.). (2015). *Handbook of planning research methods* (pp. 250-261). Edward Elgar Publishing.
- [29] 杨丽萍, 王乐, 孙晓辉, 等. 基于遥感的西安市热力景观格局演变[J]. 水土保持研究, 2017, 24(01): 250-255+264. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2017.01.034.
- [30] 崔鸿雁, 徐帅, 张利锋, 等. 机器学习中的特征选择方法研究及展望[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(01): 1-12. DOI:10.13190/j.jbupt.2017-150.
- [31] 张圆圆, 陈方媛, 许翔, 等. 基于县域尺度的福建省土地利用碳排放效应分析[J]. 环境科学研究, 2023, 36(07): 1446-1456. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2023.05.07.
- [32] Zhu K, Tu M, Li Y. Did polycentric and compact structure reduce carbon emissions? A spatial panel data analysis of 286 Chinese cities from 2002 to 2019[J]. *Land*, 2022, 11(2): 185.
- [33] Wu J, Guo X, Zhu Q et al. Threshold effects and supply-demand ratios should be considered in the mechanisms driving ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109281.