城市街区三维空间形态对碳排放的影响机制

王嘉诚[1], 张琳敏[1], 李渊[1*], 蔡智[1], 温慧[2], 郭宇龙[3], 张芝镏[1]

(1. 浙江工商大学旅游与城乡规划学院, 杭州 310018; 2. 嘉兴南湖学院公共基础部, 嘉兴 314000; 3. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

摘要: 城市街区是城市规划和碳排放精细化管理的基础单元,探究城市街区三维空间形态对碳排放的影响,对实现"双碳"目标和城市可持续发展具有重要意义.然而,当前相关研究的空间尺度多集中在区域和城市尺度,街区尺度下三维空间形态对碳排放的影响机制尚不清晰.综合利用夜间灯光、土地利用和能源消费等数据,以街区为基本单元,估算城市碳排放总量的空间分布.然后叠加紧凑度和复杂度等城市三维空间形态指标,采用多尺度地理加权回归模型,探究街区三维空间形态对碳排放的影响机制.结果表明:①2020年杭州市主城区各街区单元的碳排放总量约为5 088.75万t;2020年平均碳排放强度约为30 456.49 t·km^{-2};②街区三维空间形态呈现4种空间分布模式:内聚圈层模式、外高内低模式、环状分布模式和南高北低模式,体现出杭州市主城区中心区域的空间紧凑度较高,外围区域的空间不规则度和形态复杂度较大,空间紧凑度较低的特点;③城市空间扩张和空间不规则度对碳排放具有正向影响,空间复杂度对碳排放具有负向影响,空间紧凑度对碳排放具有双重影响.

关键词: 城市街区; 三维空间形态; 碳排放; 多尺度地理加权回归(MGWR); 多源数据

中图分类号: X21 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2025)05-2921-13 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202405094

Mechanisms of Three-dimensional Urban Morphology of Urban Block on Carbon Emissions

WANG Jia-cheng[1], ZHANG Lin-min[1], LI Yuan[1*], CAI Zhi[1], WEN Hui[2], GUO Yu-long[3], ZHANG Zhi-qiang[1]

(1. School of Tourism and Urban & Rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. Public Infrastructure Department, Jiaxing Nanhu University, Jiaxing 314000, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Urban blocks are the basic unit of urban planning and fine management of carbon emissions. Investigating the interplay between urban morphology and carbon emissions holds notable implications for achieving carbon peak and carbon neutrality targets, as well as for urban sustainable development. However, most of the current research focuses on the regional and urban scales, and the influence mechanism of three-dimensional urban morphology on carbon emissions at the urban block scale remains unclear. Taking the main urban area of Hangzhou as an example, this study first estimated the spatial distribution of total urban carbon emissions at the scale of urban blocks by integrating nightlight, land use, and energy consumption data. Then, we calculated and superimposed the three-dimensional urban morphology indicators of these blocks and employed multiscale geographically weighted regression (MGWR) to explore the impact of block three-dimensional urban morphology on carbon emissions. The results showed that: ① The total CO_2 emissions from urban blocks in Hangzhou's main urban area were 50.88 million tons, with an average CO_2 emission intensity of 30 456.49 t·km^{-2} in 2020. ② The three-dimensional urban morphology of blocks exhibited four spatial distribution patterns: cohesive ring-layer pattern, outer high-inner low pattern, ring distribution pattern, and south high-north low pattern. This indicates that the central area of Hangzhou's main urban area had higher spatial compactness, whereas the outer areas exhibited greater spatial irregularity and complexity in buildings. ③ Spatial extension and spatial irregularity had a positive effect, whereas spatial complexity had a negative effect. Spatial compactness had a dual effect on carbon emissions.

Key words: urban block; three-dimensional urban morphology; CO_2 emissions; multiscale geographically weighted regression (MGWR); multi-source data

在人口快速增长和城市化加速的双重背景下,人类活动所产生的碳排放大幅增加,这进一步加剧了全球气候变暖趋势,严重威胁着人类生存和社会经济发展[1,2].城市作为人类生产生活的主要场所,是碳排放最主要的区域.相关研究表明,城市所释放的二氧化碳约占全球总量的71%~76%[3].城市空间形态是社会、经济和自然等多种要素在物质实体上的综合反映,其形态特征对碳排放有着重要影响[4],且对碳排放总量变化的解释度超过50%[5].《城乡建设领域碳达峰实施方案》指出城市形态、密度、功能布局和建设方式对碳减排具有基础性重要影响.因此,明晰城市空间形态对碳排放的影响机制,对实现"双碳"目标和城市可持续发展具有切实的理论和现实意义.

近年来,国内外学者在不同空间尺度下探究了城市空间形态对碳排放的影响.在区域(城市群)尺度下,Gudipudi等[6]利用土地覆盖数据,运用城市聚类算法发现城市建设用地面积扩大将导致更多的碳排放,持续的城市扩张将导致城市能源消耗的增加.Wang等[7]以中国6个城市群为研究对象,运用时空地理加权回归模型分析了城市群空间结构对碳排放的影响,结果表明部分城市群的多中心结构并没有达

收稿日期: 2024-05-11; **修订日期**: 2024-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071333);嘉兴南湖学院2023年度校级科研项目(62312YW);浙江工商大学"数字+"学科建设管理项目(SZJ2022B014);浙江工商大学研究生科研创新基金项目(YBXM2023014);国家级大学生创新创业训练计划项目(202210353037)

作者简介: 王嘉诚(1999~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市环境遥感,E-mail: wangjiachenghsy@163.com

* 通信作者,E-mail: liyuan@mail.zjgsu.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

到碳减排的效果,反而促进了碳排放.在市级城市尺度下,Falahatkar等[8]以伊朗15个城市为研究对象,运用景观格局指数表征城市空间形态,利用IPCC碳排放因子法计算城市碳排放,研究结果表明城市周长面积比指数越高,土地形态越不规则,碳排放越高.Xu等[9]以中国86个市级城市为对象,利用STIRPAT模型分析了三维城市结构对碳排放的影响,结果表明密集拥挤的城市三维形态会加剧交通拥堵,进而导致更多的碳排放.在县域尺度下,袁青等[10]以长三角地区44个县域中小城市为对象,运用经济效率指数和社会效率指数衡量碳排放,利用景观格局指数量化城市二维空间形态,采用面板数据模型分析了城市空间形态对碳排放效率影响,结果表明降低空间形态的复杂程度和破碎化程度有助于提高碳排放经济和社会效率.总体上,当前研究主要集中在区域、市级城市以及县域尺度,很少有研究从街区尺度下探究三维空间形态对碳排放的影响.

城市街区作为城市规划和碳排放精细化管理的基础单元,对环境影响和规划实践具有重要意义.Ye等[11]指出高度城市化地区的街区单元具有极大的碳中和潜力.随着我国城镇化进入下半场,城市建设逐渐聚焦至中小尺度,重塑街区的空间形态是减少区域碳排放和建设低碳城市的重要空间策略[12].然而,街区尺度与区域和城市尺度在空间形态的精细度方面存在显著差异,因此,区域和城市尺度下的研究结果在街区尺度上的适用性有待进一步验证.另一方面,城市空间形态对碳排放的影响存在空间异质性,同一形态要素在不同空间尺度下对碳排放的影响存在显著差异.如Zheng等[13]在县域尺度下发现城市空间紧凑度的提高,会提高城市公共设施和公共交通的使用效率,从而降低碳排放.而Shi等[14]在市级城市尺度下发现成渝城市群和京津冀地区由于密集的城市人口和有限的公共服务资源,城市空间紧凑度的提高反而会增加碳排放.因此,厘清街区尺度下三维空间形态和街区碳排放响应关系对城市内部的不同地区制定差异化的减碳策略具有重要意义.

为全面揭示城市街区三维空间形态对碳排放的影响,本研究以杭州市主城区为例,利用NPP-VIIRS夜间灯光数据、土地利用数据和能源消费数据,建立不同土地利用类型的碳排放反演模型,刻画杭州市主城区碳排放空间分布;基于城市街区单元,计算街区三维空间形态指标,分析杭州市主城区三维空间形态特征;采用多尺度地理加权回归模型(multiscale geographically weighted regression,MGWR),探究空间形态对碳排放的影响机制,以期为面向碳中和愿景的城市空间治理策略和低碳城市的规划建设提供理论依据.

1 研究区概况

杭州,地处长江三角洲南翼,常住人口超千万,是中国的特大城市之一[15],也是华东地区消费碳排放的重点地区.近年来,杭州市的城市用地规模迅速扩大,城市建筑高度和容积率不断上升,给城市生态环境保护带来了极大挑战[16].参考《杭州市城市总体规划2001-2020年》,本研究选择了杭州市主城区(2020年)作为研究区,包括上城、拱墅、西湖、滨江、下城、江干、余杭和萧山等8个区(图1).本研究以城市街区作为基本空间单元,该区域容纳了杭州市的大部分建设用地和建筑,共包含1 285个街区单元.

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究使用的数据包括NPP-VIIRS夜间灯光数据、土地利用数据、能源消费数据、街区单元数据、建筑屋顶面数据(CBRA)和建筑高度数据(CNBH-10 m),见表1.其中,NPP-VIIRS夜间灯光数据来源于科罗拉多矿业大学提供的Annual VNL V2夜间灯光数据集.考虑到背景噪声的影响,本研究对夜灯数据做了去除异常值等预处理,预处理方法参考Wu等[17]的方法.

为确保空间数据的准确性和完整性,本研究结合行政边界数据和遥感卫星影像,运用ArcGIS中的空间拓扑工具,对街区单元数据进行了校准与预处理.处理完成后的街区单元数据相互邻接,无重叠且无空隙.其他数据的详细介绍见表1.

2.2 研究方法

本研究的方法框架由3部分组成(图2):①街区单元碳排放计算.利用土地覆盖数据和夜间灯光数据,分别运用碳排放系数法和间接碳排放回归模型,估算直接碳排放和间接碳排放.接着利用ArcGIS软件对碳排放数据进行分区统计,获取各个街区的碳排放总量.进一步将街区碳排放总量除以街区面积,获取街区碳排放强度.②街区三维空间形态计算.本研究选择19个空间形态指标,分区统计街区单元的三维空间形态.③街区三维空间形态对碳排放的影响探究.基于1 285个街区样本数据,结合碳排放和三维空间形态指标,运用MGWR模型和空间自相关指数,探究街区三维空间形态对碳排放的影响.

2.2.1 碳排放估算模型

参考Wang等[21]的研究,本研究所计算的碳排放是由直接碳排放和间接碳排放构成.其中,直接碳排放指耕地、林地、草地、水域以及未利用地等非建设

中国知网 https://www.cnki.net

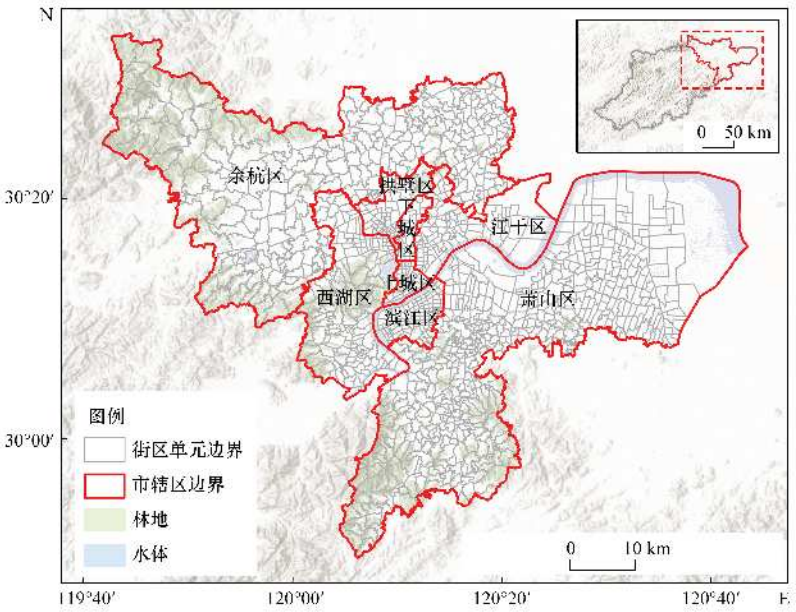


图 1　杭州市区位及研究单元

Fig. 1　Location of the Hangzhou and research units

表 1　本研究使用数据汇总 1)

Table 1　Summary of data used in this study

数据内容	年份	空间分辨率/m	数据说明	数据来源	数据用途
NPP - VIIRS 夜间灯光数据	2013~2020	500	用于构建碳排放估算模型，反演 2020 年杭州市主城区碳排放空间分布	Earth Observation Group（https://eogdata.mines.edu/products/vnl/#annual_v2）	构建间接碳排放遥感估算模型和反演 2020 年杭州市主城区碳排放
土地覆盖数据	2013~2020	30	用于反演碳排放空间分布和计算 2020 年土地形态指数	文献[18]	
能源消费统计数据	2013~2020	—	统计各年份浙江省能源消费碳排放总量，构建碳排放估算模型	《中国能源统计年鉴》《中国电力年鉴》	
建筑屋顶面数据（CBRA）	2020	10	用于构建建筑数据集，计算建筑形态指标	文献[19]	计算 2020 年杭州市主城区空间形态指数
建筑高度数据（CNBH-10 m）	2020	2.5		文献[20]	
街区单元区划数据	2020	—	用于汇总城市形态指标和碳排放，构建回归模型	浙江省自然资源厅和杭州市地理信息公共服务平台	基本研究单元

1)“—”表示该数据无空间分辨率属性

用地的碳排放，间接碳排放指人类活动在不透水面所消耗的能源碳排放[22].

2.2.1.1　直接碳排放估算模型

采用土地利用类型碳排放系数法计算，计算公式为：

$$E_i = \frac{44}{12} \times \sum S_i \times \delta_i \tag{1}$$

式中，E_i 为土地利用的碳排放量；i 为土地利用类型；S_i 为土地 i 的面积；δ_i 为土地 i 的碳排放系数，正值表示碳排放，负值表示碳吸收. 结合杭州市的地理位置和气候条件，综合前人研究选取了耕地、林地、灌木林、水域、草地、湿地以及未利用地的碳排放系数（表 2）.

2.2.1.2　间接碳排放估算模型

利用夜间灯光数据对间接碳排放的估算主要分为两步：第一步，基于各类统计年鉴数据，运用 IPCC 清单估算方法，计算间接碳排放；第二步，利用夜间灯光数据，结合上一步估算所得的间接碳排放数据，构建回归模型，实现间接碳排放的遥感估算，模拟碳排放数据.

（1）基于能源统计数据的间接碳排放计算. 本研究采用 IPCC 清单估算方法计算各能源消耗产生的碳排放，计算公式为：

$$C = \frac{44}{12} \times \sum_{i=1}^{j} E_i \times \sigma_i \times \rho_i \tag{2}$$

式中，C 为能源碳排放总量；j 为选取能源种类数；E_i 为第 i 种能源消费总量；σ_i 为第 i 种能源折标准煤参考系数；ρ_i 为第 i 种能源的碳排放系数.

考虑到统计口径差异以及能源重复计算的影响，研究所采用的各类能源数据为 2014~2021 年《中

中国知网　https://www.cnki.net

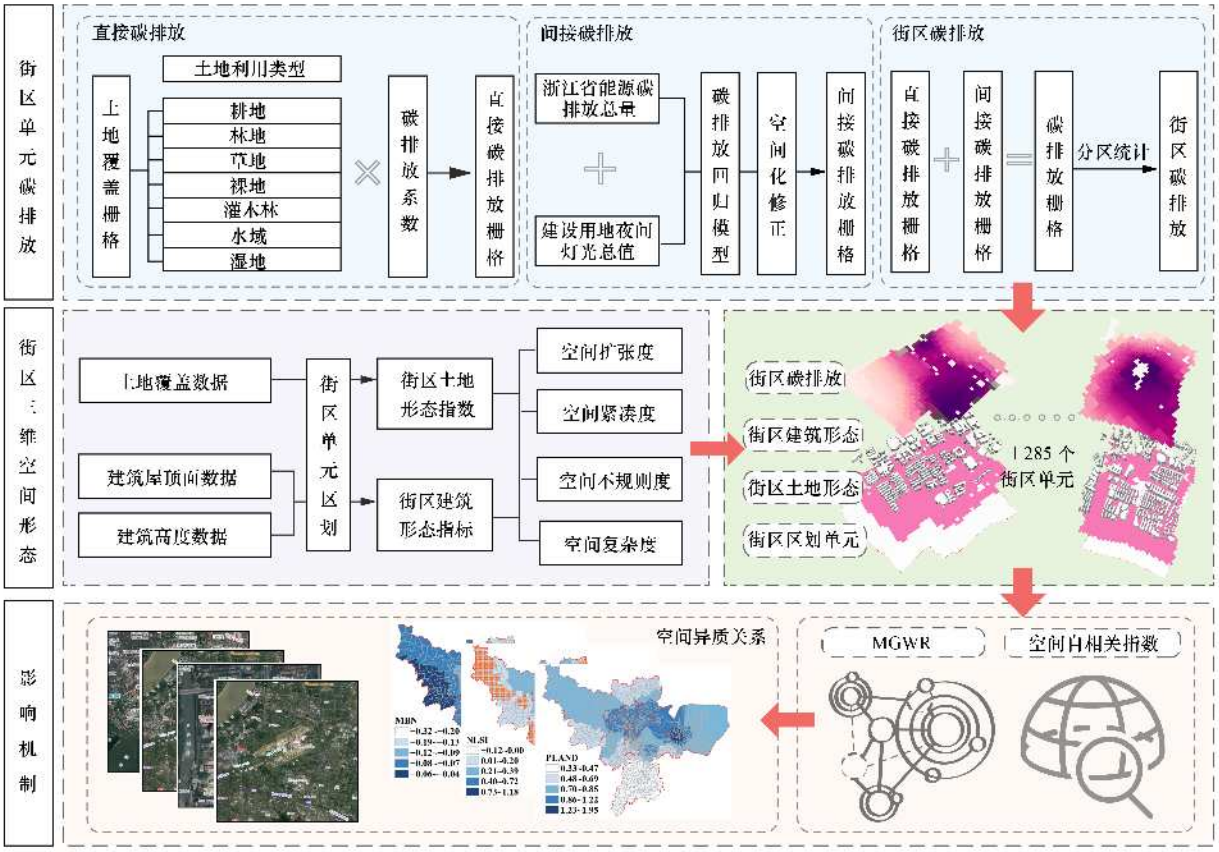


图 2 技术框架

Fig. 2 Research framework

表 2 土地碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficients for the land-use types

土地利用类型	碳排放系数(以C计) /(t·hm^2·a)$^{-1}$	文献
耕地	0.497	[23]
林地	−0.586	
草地	−0.021	
裸地	−0.005	
灌木林	−0.23	[24]
水域	−0.252	[25]
湿地	−1.06	[26]

国能源统计年鉴》中浙江省地区能源平衡表中的终端消费量.电力消费量和火电发电标准煤耗参考2014~2021年《中国电力年鉴》中的浙江省火力发电占比和发电标准煤耗数据.其他能源类型的碳排放系数和标准煤换算系数参考《IPCC国家温室气体清单指南》和2014~2021年《中国电力年鉴》(表3).

(2)基于夜灯数据的间接碳排放估算模型构建.基于2013~2020年的NPP-VIIRS数据和基于能源统计数据的间接碳排放估算结果,利用无常数项线性方程进行拟合,构建间接碳排放遥感估算模型.进一步,为提高估算精度,参考Zhang等[27]的方法,本研究对每个栅格的反演碳排放进行了空间修正.间接碳排放遥感估算模型和修正系数的结果如表4所示.

表 3 能源碳排放系数/10^4 t·(10^4 t)$^{-1}$

Table 3 Carbon emission coefficients of energy/10^4 t·(10^4 t)$^{-1}$

能源种类	标准煤换算系数	碳排放系数
原煤	0.714 3	0.755 9
焦炭	0.971 4	0.855
原油	1.428 6	0.585 7
汽油	1.471 4	0.553 8
煤油	1.471 4	0.571 4
柴油	1.457 1	0.592 1
燃料油	1.428 6	0.618 5
天然气	13.300 0	0.448 3
热力	0.034 12	0.67
电力	当年浙江省发电标准煤耗	0.272

表 4 浙江省间接碳排放估算模型和各年份修正系数

Table 4 Indirect carbon emission estimation model and correction coefficients for each year in Zhejiang Province

年份	拟合方程	R^2	空间修正系数
2013	$y = 2.79 \times 10^{-4}x$	0.98	1.17
2014			1.23
2015			1.18
2016			1.09
2017			0.96
2018			0.89
2019			0.88
2020			0.90

中国知网 https://www.cnki.net

2.2.2　街区空间形态指标

（1）街区土地形态指数　结合前人研究[28,29]，本研究利用土地覆盖数据，对每个街区单元计算了景观百分比（PLAND）等7个土地形态指数，以表征城市街区单元内土地形态的扩张度、紧凑度、复杂度以及不规则度（表5）.

表5　街区土地形态指数[1)]

Table 5　Land morphology indicators for each urban block

空间特征	街区土地形态指数	计算公式	含义
扩张度	景观百分比（PLAND）	$\frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{A}$	表示单元内某类斑块占总面积的百分比
紧凑度	建设用地斑块密度（PD）	$\frac{n}{A}$	反映单元内某类斑块的破碎化程度
	最大斑块指数（LPI）	$\frac{\max a_i}{A} \times 100\%$	描述单元内某类斑块的聚集性，反映了城市发展模式是否为单核
	斑块结合度（COHESION）	$\left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{m} p_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} p_{ij}\sqrt{a_{ij}}}\right) \times \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{Z}}\right)} \times 100$	衡量单元内某类斑块的物理连通性，值越大物理连通越紧密，越紧凑
复杂度	平均斑块形状指数（SHAPE_MN）	$\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \frac{p_{ij}}{4 \times \sqrt{a_{ij}}}$	反映单元内某类斑块形状指数的平均值
	边缘密度（ED）	$\frac{E}{A}$	代表单元内某类斑块的蔓延和形状，可以用来描述城市形态的复杂性
不规则度	归一化景观形状指数（NLSI）	$\frac{p_i - \min p_i}{\max p_i - \min p_i}$	是景观形状指数（LSI）的标准化，反映了单元内某类斑块不规则程度

1）n 为景观类型 i 的斑块个数；a_{ij} 为景观类型 i 的第 j 个斑块的面积；p_i 为第 i 类景观类型斑块总周长；p_{ij} 为第 i 类景观类型中第 j 个斑块的周长；$\max a_i$ 为景观类型 i 中最大斑块面积；$\max p_i$ 为景观类型 i 中最大斑块周长；$\min p_i$ 为景观类型 i 中最小斑块周长；A 为景观单元总面积；E 为所有斑块的周长总和；Z 为景观单元总栅格数

（2）街区建筑形态指标　利用CBRA和CNBH-10 m数据，在每个街区单元上计算了12个建筑形态指标（表6）. 同样地，这些指标综合反映了城市街区内建筑二维和三维尺度上的空间扩张度、紧凑度、复杂度以及不规则度.

2.2.3　多尺度地理加权回归模型（MGWR）

多尺度地理加权回归模型（MGWR）在经典地理加权回归模型（GWR）的基础上，允许为各个自变量选择独立的带宽. 变量特定的带宽可以用来反映其空间尺度并降低估计的偏差[30]. MGWR模型可以更准确地展现空间数据的非平稳特征，更好地解释空间中自变量系数的变化[31]. 计算公式如下：

$$y_i = \sum_{j=0}^{q} \beta_j X_{ij} + \sum_{j=q+1}^{p} \beta_j(u_i, v_i) X_{ij} + \varepsilon_i \qquad (3)$$

式中，y_i 为因变量；X_{ij} 为位置 i 处的第 j 个解释变量；$\beta_j(u_i, v_i)$ 为局部变量的估计系数；$\beta_j(j = 0, 1, 2, \cdots, q)$ 为局部变量的估计系数；(u_i, v_i) 为位置 i 的坐标；ε_i 为位置 i 的随机误差.

本研究首先对19个空间形态指标进行了多重共线性检验，筛选出16个方差膨胀因子（VIF）值低于10的形态指标（NLSI、ED、PD、PLAND、COHESION、SHAPE_MN、OV、MH、NHV、FD、3DSC、MBN、MBV、FAR、BSC和DEI），以排除解释变量之间可能存在的相关性. 然后构建MGWR模型，其中因变量为碳排放强度，自变量为16个空间形态指标.

2.2.4　空间自相关指数

空间自相关分析是模型检验的关键步骤，用于描述空间相邻区域内变量之间的相关性. 本研究利用全局莫兰指数（Global Moran's I）量化MGWR模型残差的空间自相关. 模型残差若存在显著的空间自相关，模型的有效性则值得怀疑[32]. 全局莫兰指数的取值范围为-1~1，接近0表明不存在空间自相关[33].

3　结果与分析

3.1　碳排放空间分布特征

2020年杭州市主城区各街区单元碳排放量和不同市辖区之间的数据分布如图3（a）和3（b）所示. 杭州市主城区的碳排放总量约为5 088.75万t，大多数单元的碳排放量超过1万t. 空间上，碳排放量较高的街区主要集中在江干区、下城区和拱墅区. 碳排放量较低的街区集中在滨江区、上城区和萧山区. 低碳排放街区一般位于南部和西北部，远离武林、湖滨和钱江新城等中心城区. 此外，受街区面积的影响，滨江区和上城区街区单元碳排放量相对较小.

2020年杭州市主城区各街区单元地均碳排放强度和不同市辖区之间的数据分布如图3（c）和3（d）所示. 杭州市主城区的平均碳排放强度约为30 456.49 t·km^{-2}，大多数单元的碳排放强度超过1 000 t·km^{-2}.

中国知网　https://www.cnki.net

表 6 街区建筑形态指标[1)]

Table 6 Building morphology indicators for each urban block

维度	空间特征	街区建筑形态指标	计算公式	指标说明
二维	扩张度	建筑覆盖率(BCR)	$\frac{\sum_{i=1}^{B} A_i}{A}$	总建筑足迹面积占单元总土地面积的比例
	紧凑度	平均建筑数量(MBN)	$\frac{B}{A}$	单元中建筑物数量除以单元总面积
	复杂度	分形维数(FD)	$\frac{\sum_{i=1}^{B} \frac{\ln\left(\frac{P_i}{4}\right)^2}{\ln A_i}}{B}$	单元中建筑物的分形维数平均值
	不规则度	方向方差(OV)	$\frac{\sum_{i=1}^{B} O_i^2 - B(\bar{O})^2}{B-1}$	单元中建筑物朝向的变化
三维	扩张度	平均高度(MH)	$\frac{\sum_{i=1}^{B} H_i}{B}$	单元中的平均建筑高度
		平均建筑体积(MBV)	$\frac{\sum_{i=1}^{B} V_i}{B}$	单元中建筑体积的平均值
		容积率(FAR)	$\frac{\sum_{i=1}^{B}\left(F_i \times A_i\right)}{A}$	单元总建筑面积占土地面积的比例
	复杂度	建筑体形系数(BSC)	$\frac{\sum_{i=1}^{B} \frac{P_i \times H_i + A_i}{V_i}}{B}$	单元中建筑表面积与体积之间的定量关系的平均值
	紧凑度	形状紧凑度(3DSC)	$\frac{\sum_{i=1}^{B} \frac{P_i \times H_i + A_i}{V_i^{\frac{2}{3}}}}{B}$	单元中建筑物3D形状紧凑度的平均值
		空间拥挤度(SCD)	$\frac{\sum_{i=1}^{B} V_i}{\max(H) \times A}$	单元中所有建筑物体积之和占城市体积的比例
	不规则度	标准化高度标准差(NHV)	$\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{B}\left(H_i - \mathrm{MH}\right)^2}{B}}}{\mathrm{MH}}$	单元中建筑高度标准差与平均建筑高度之比
		分布均匀度系数(DEI)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{B}\left(V_i - \mathrm{MBV}\right)^2}{A}}$	单元中三维建筑物的分布均匀度

1)B为单元中建筑物数;A为单元面积;A_i为建筑i的足迹面积;P_i为建筑i的足迹周长;O_i为建筑物i的朝向(建筑物足迹的最小外接矩形的长轴与y轴之间的角度);$\bar{O}$为单元中建筑物朝向均值;H_i为建筑物i的高度;V_i为建筑物i的体积;F_i为建筑物i的层数;max(H)为单元中建筑物的最高高度

空间上,碳排放强度较高的街区主要集中在下城区、拱墅区、江干区和上城区.碳排放强度较低的街区集中在余杭区和萧山区.低碳排放街区一般位于东部、西北部和南部,远离各市辖区中心城区.

3.2 街区三维空间形态的空间分布特征

每个街区单元上的7个土地形态指数和12个建筑形态指标的空间分布特征如图4所示.总体上,这些空间形态指标主要呈现出4种空间分布模式:内聚圈层模式、环状分布模式、南高北低模式以及外高内低模式(图4).

空间形态指数PLAND、LPI、NLSI、COHESION、BCR、MH、FAR和SCD呈现内聚圈层模式[图4(a)~4(i)],即杭州市中心(武林湖滨主中心及周边地区)的空间形态值较高,杭州市周边(余杭区西部和萧山区南部)的空间形态值较低.结果表明,杭州市主城区中心地区的建筑布局和城市空间更加紧凑,土地开发强度更大,外围地区的建筑布局和城市空间更加稀疏,土地开发强度更小.此外,为保护湖城天际轮廓线,受《西湖文化景观保护管理条例》影响,MH高值街区集中在钱塘新城和滨江区,而非武林湖滨主中心.城市边缘区(如余杭区西部和萧山区南部)的街区NLSI值相对较高,表明城市郊区土地形态的不规则度相对较大.

空间形态指数OV、FD、NHV和BSC呈现外高内低模式[图4(j)~4(n)],即杭州市周边(余杭区西部和萧山区南部)的空间形态值较高,杭州市中心区(上城区和滨江区)的空间形态值较低,表明杭州市郊区的建筑三维不规则度和形态复杂度较大.

中国知网 https://www.cnki.net

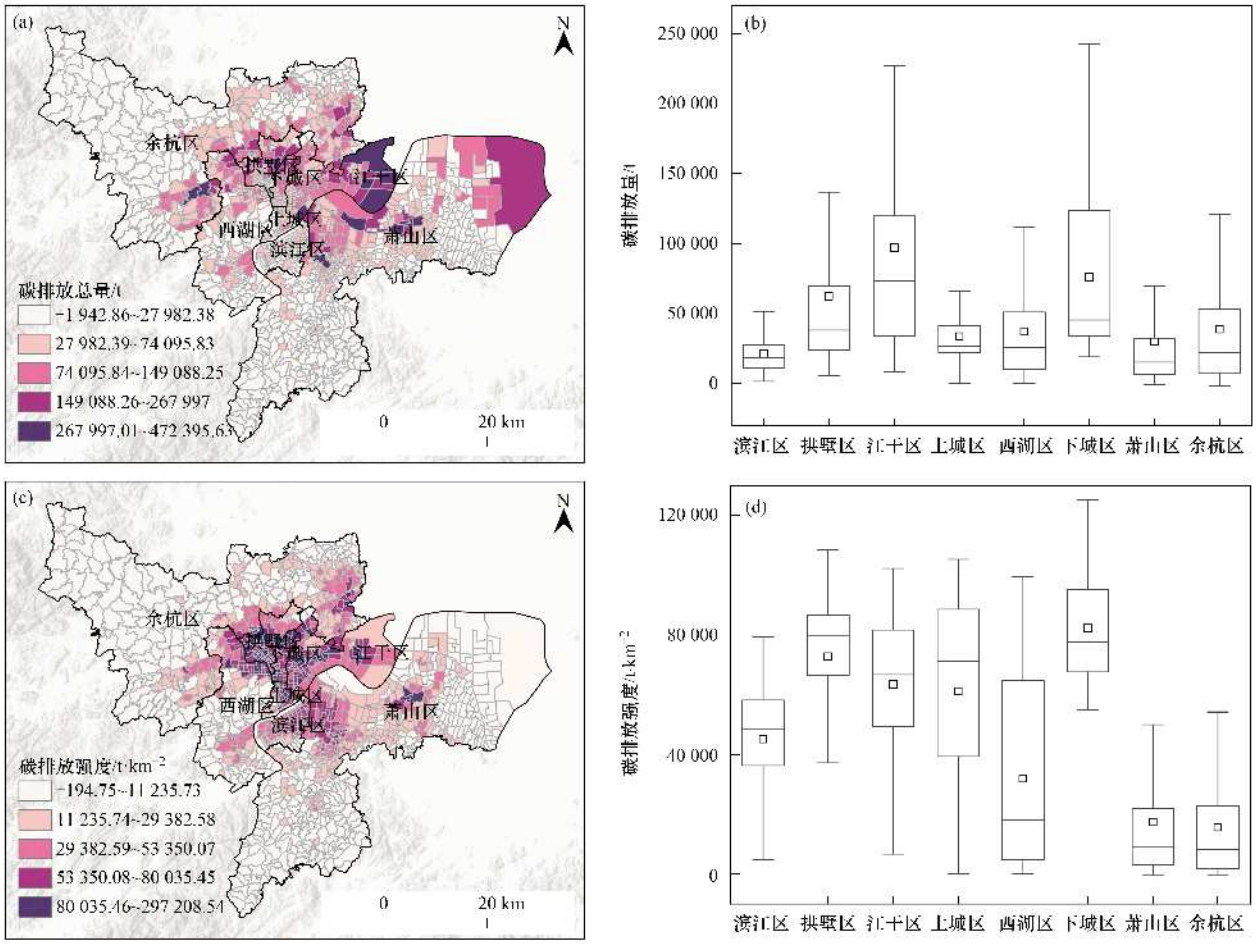


图 3　碳排放总量和碳排放强度的空间分布及统计

Fig. 3　Spatial distribution and statistics of total carbon emissions and carbon emission intensity

空间形态指数 ED、SHAPE_MN、PD 和 MBN 呈现环状分布模式[图 4(o)~4(s)]，主要表现为萧山区东部和余杭区东部等城市边缘区的空间形态值较高，城市郊区(余杭区西部和萧山区南部)和城市核心区(武林湖滨主中心)的空间形态值较低．这个结果表明，萧山区与余杭区的城郊接合部地区土地形态较为复杂，破碎化程度较高．

空间形态指数 MBV、3DSC 和 DEI 呈现南高北低模式[图 4(t)~4(w)]，主要表现为萧山区的空间形态值较高，余杭区西部的空间形态值较低．结果表明，萧山区建筑单体的体积和形状紧凑度相对较高．此外，萧山区城郊融合的建成环境也导致了建筑三维分布差异较大．

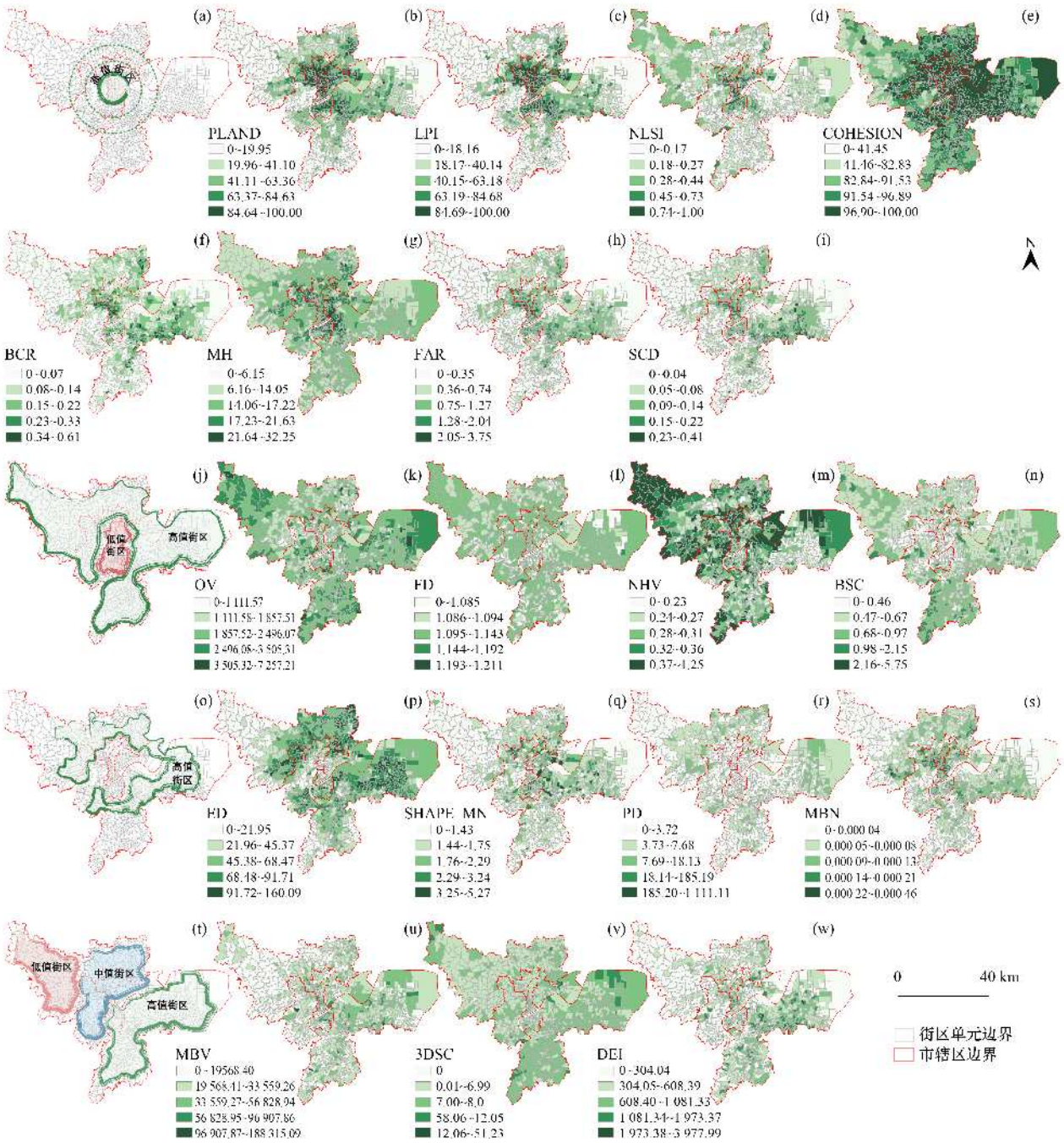
3.3　街区三维空间形态对碳排放的影响

基于 16 个空间形态指标和碳排放强度数据，构建了 MGWR 模型，模型的统计检验结果如表 7 所示．从中可以看出，MGWR 模型具有较好的拟合精度(R^2=0.98)，且拟合残差不存在显著的空间自相关(global Moran's I = 0.03，P = 0.14)，结果表明利用 MGWR 模型可以表征空间形态指标和碳排放之间的空间异质关系．

MGWR 模型中各空间形态指标的回归系数如表 8 所示，其中空间形态指标 OV、NHV 和 MBV 为不显著解释变量，其余 13 个空间形态指标为显著解释变量．利用 MGWR 模型中各空间形态指标的回归系数可以表征各空间形态指标对碳排放的影响．为保证结果的严谨性，本研究就 13 个显著解释变量，对具有统计显著性(P<0.1)的街区单元，探究各形态因子对碳排放的影响．总体上，城市空间扩张度(PLAND、MH 和 FAR)和城市空间不规则度(NLSI 和 DEI)对碳排放具有正向影响，城市空间复杂度(ED、FD、BSC 和 SHAPE_MN)和城市空间紧凑度(COHESION、3DSC、PD 和 MBN)对碳排放分别具有负向和双重影响(图 5)．

从城市空间扩张度的角度看，空间形态指标 PLAND 具有全局性正向影响(表 8)，表明街区建设用地占比对碳排放具有正向作用；空间形态指标 MH 在 87% 的街区单元呈现出对碳排放的正向影响，只有在萧山国际机场[图 6(c)]的街区(13%，表 8)呈现出负向影响；空间形态指标 FAR 在城市核心区表现出正

中国知网　https://www.cnki.net



高值、低值和中值表示空间形态指数的数值高低

图 4 街区空间形态指标的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of urban morphology indicators

表 7 MGWR模型回归结果

Table 7 Results of MGWR model

类型	指标	MGWR
残差	global Moran's *I*	0.03
	Z-value	1.48
	P-value	0.14
结果	R^2	0.98
	Adj.R^2	0.97
	AIC	−485.27
	AICc	−198.77

向影响，在交通枢纽和工业园区呈现出负向影响. 例如，FAR在钱江世纪城的街区单元上(38%，表8)呈现出正向影响，在萧山国际机场[图6(c)]及大江东工业园区[图6(d)]的街区单元上(62%，表8)呈现出负向影响.

从城市空间不规则度的角度看，空间形态指标(NLSI)具有全局正向影响(表8)，高值街区在萧山国际机场集聚[图6(c)]，表明不规则的土地形态会增加碳排放；空间形态指标(DEI)在60%的街区单元上呈现出正向影响，主要分布在萧山区东部、拱宸桥片区[图6(a)]及良渚新城，在杭州东站、临平南站及萧山南部的街区(40%，表8)呈现负向影响.

中国知网 https://www.cnki.net

从城市空间复杂度的角度看，空间形态指标ED、FD和BSC具有全局负向影响；空间形态指标SHAPE_MN对大部分街区（65%，表8）的碳排放具有负向影响，在主要位于西湖区的街区（35%，表8）呈现正向影响，例如小和山高教园区[图6(e)].

从城市空间紧凑度的角度看，空间形态指标COHESION对碳排放具有双重影响，在46%和54%的街区单元分别呈现出正向和负向影响，正向影响的街区主要位于萧山国际机场[图6(c)]和拱宸桥片区[图6(a)]，负向影响的街区主要位于江南科技城[图6(f)]. 空间形态指标MBN和PD分别在100%和83%的街区单元上对碳排放具有负向影响. 空间形态指标3DSC在92%的街区单元上对碳排放具有正向影响.

表8　MGWR模型回归系数统计和街区单元数量统计[1)]

Table 8　Statistics of MGWR coefficients and the number of urban blocks

指数	MGWR系数						P<0.1	正向影响	负向影响
	带宽	平均值	标准差	最小值	中位数	最大值			
NLSI	44	0.152	0.19	−0.118	0.092	1.182	600	599(100)	1(0)
ED	1 283	−0.058	0.001	−0.061	−0.058	−0.056	1 285	0(0)	1 285(100)
PD	986	−0.011	0.04	−0.037	−0.035	0.08	1 089	182(17)	907(83)
PLAND	44	0.748	0.222	0.329	0.758	1.947	1 285	1 285(100)	0(0)
COHESION	44	0.007	0.177	−0.84	0.003	0.788	339	155(46)	184(54)
SHAPE_MN	131	−0.019	0.052	−0.146	−0.014	0.087	420	149(35)	271(65)
OV	1 283	−0.006	0	−0.007	−0.006	−0.005	0	0(0)	0(0)
MH	44	0.032	0.297	−2.411	0.079	0.309	630	551(87)	79(13)
NHV	1 283	0.007	0.001	0.004	0.007	0.009	0	0(0)	0(0)
FD	1 283	−0.102	0	−0.102	−0.102	−0.102	1 285	0(0)	1 285(100)
3DSC	56	0.093	0.167	−0.568	0.111	0.63	410	378(92)	32(8)
MBN	162	−0.109	0.053	−0.322	−0.095	−0.044	1 142	0(0)	1 142(100)
MBV	1 283	−0.01	0.001	−0.012	−0.01	−0.008	0	0(0)	0(0)
FAR	52	−0.03	0.167	−0.889	0.005	0.221	370	141(38)	229(62)
BSC	1 283	−0.031	0.001	−0.033	−0.031	−0.029	1 285	0(0)	1 285(100)
DEI	149	0.001	0.048	−0.112	0.004	0.135	341	205(60)	136(40)

1)P<0.1列为具有统计显著性的街区单元数量；正向影响列为具有统计显著性且回归系数大于0的街区单元数量（括号外）和占比（括号内，单位为%）；负向影响列为具有统计显著性且回归系数小于0的街区单元数量（括号外）和占比（括号内，单位为%）

4　讨论

4.1　街区三维空间形态对碳排放的影响机制

结合MGWR模型结果和三维空间形态指标的内涵，本研究进一步从街区单元的空间扩张度、紧凑度、复杂度以及不规则度视角下讨论街区三维空间形态对碳排放的影响（表9）.

有研究表明，城市空间扩张通常会加剧碳排放[34]. 本研究发现街区建设用地面积占比（PLAND）和建筑平均高度（MH）对街区碳排放具有正向影响. 一方面，建设用地作为重要的碳源，承载绝大多数的城市能源消耗[35]. 另一方面，较高的建筑则需要更多的电力能源[36]，同时会加剧城市热岛效应[37]，引起的通风或冷却需求的能源消耗会大幅度增加[38]，进而导致更多的碳排放. 而且，受航空限高影响，建筑高度对机场周边街区的碳排放具有负向影响. 此外，街区容积率（FAR）对城市碳排放具有双重影响，一般地，容积率较高的街区具有更多的碳排放，因为这些街区位于城市核心区，充满了高层建筑，人群流动和能源消耗剧烈. 相反，交通枢纽和工业园区的容积率较低，但交通活动和生产活动能源消耗量较大，导致碳排放量较多[39].

空间紧凑度对碳排放的影响在区域、城市以及组团等不同尺度层级上具有不同的作用[40]. 本研究在街区尺度下发现土地形态紧凑度（COHESION）对碳排放具有双重影响：在城市新区（江南科技城），紧凑的土地形态因其增加了交通可达性和公共设施效率[41]，有利于降低碳排放；在城市旧区（如拱宸桥片区）及人口密集区（如萧山国际机场），人口过度集聚，公共服务资源有限，紧凑土地形态所带来的减排效应超过阈值，最终减排效果被抵消转变为促进碳排放[14]. PD和MBN对碳排放具有负向影响，这可能是因为杭州市城郊接合部正处于开发建设的早期，空间紧凑度较低，建设用地斑块和建筑物破碎化程度大，但城郊接合部相较于城市核心区碳排放较小. 此外，紧凑型的三维城市结构（3DSC）将极大地阻碍空气流动并限制光照，引发更严重的城市热岛问题，导致照明和制冷的电力消耗显著增加，进而导致更多的碳排放[42].

城市尺度下，有研究表明空间复杂度对碳排放

中国知网　https://www.cnki.net

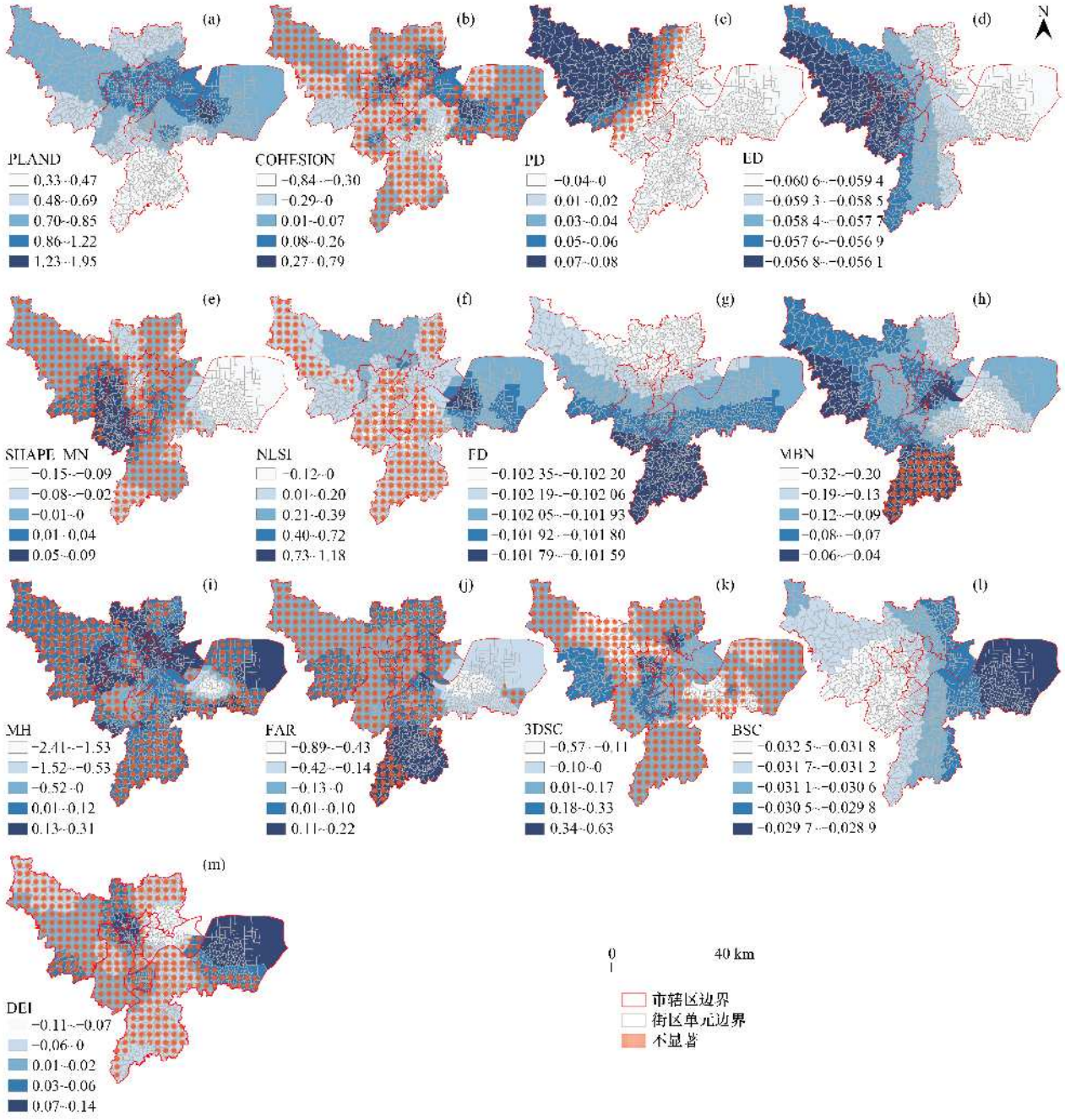


图 5 MGWR 模型的回归系数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of coefficients computed by MGWR model

具有正向影响. 例如 Li 等[43]发现城市形态复杂度的上升会增加交通拥堵的可能性,降低城市交通系统的运行效率,导致更多的碳排放. 然而,本研究在街区视角下发现城市空间复杂度对碳排放具有负向影响. 这是因为:①城市内部建设用地形态(SHAPE_MN)越复杂,意味着街区内部混合了越多的蓝绿空间,这些蓝绿空间能够有效增加碳汇功能,降低街区碳排放. ②街区内建筑复杂度(FD)越高意味着内部道路越复杂,复杂度高的道路通常是城市支路,相较于快速路和主干路产生更少的碳排放. 另外,街区单元内三维体形系数(BSC)越大,体形越复杂的建筑,往往表现为平房和低层建筑,多位于城市郊区和边缘区,这些区域相较于城市核心区碳排放较小.

空间不规则度往往对碳排放具有正向影响[44],因为不规则的城市形态会增加市民的职住流动时间和距离. 街区视角下,不规则的城市用地形态(NLSI)和三维建筑分布(DEI)对碳排放亦具有正向作用. 但这一规律在交通枢纽和城市郊区并不适用,因为交通枢纽的建筑体量较大,空间肌理粗犷,立体结构均匀,但却承载了大量的能源活动,街区碳排放大. 城市郊区建筑体量小,空间肌理细致,立体结构极度不规则,但街区碳排放小.

中国知网 https://www.cnki.net

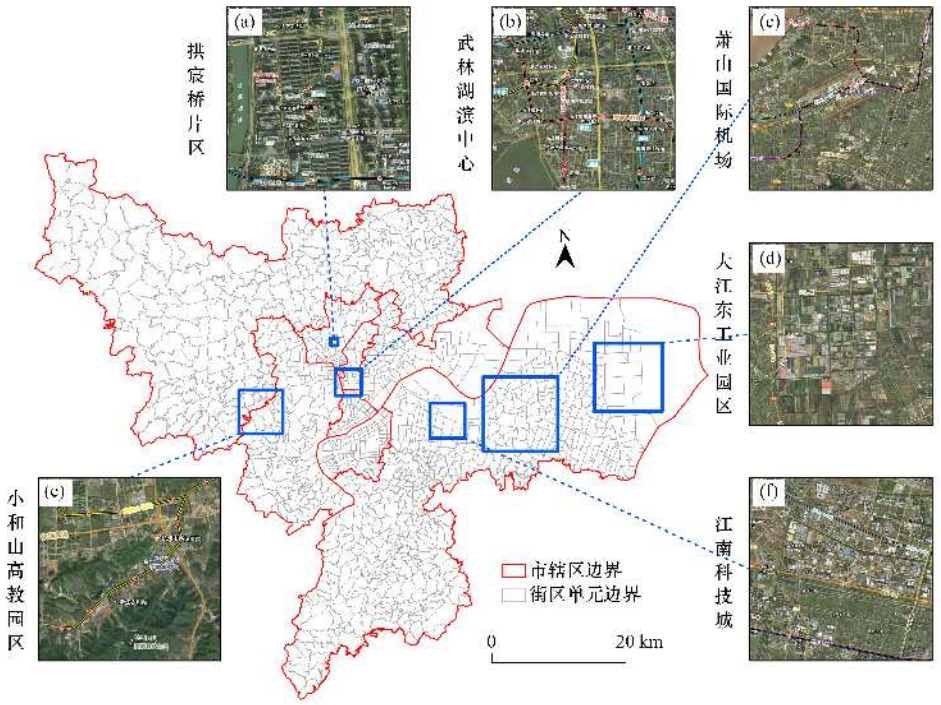


图 6　空间异质关系的典型空间

Fig. 6　Spaces typical of spatial heterogeneous relationships

表 9　城市形态与碳排放的空间异质关系

Table 9　Spatial heterogeneity relationship between urban morphology and carbon emissions

空间特征	维度	指标	主要影响	影响效果说明	影响力较强的地区
扩张度	建设用地	PLAND	正向影响	更大的街区建设用地面积占比导致更多的碳排放	交通枢纽和城市核心区
	三维建筑形态	MH	正向影响	建筑高度的增加会直接或间接地导致更多的碳排放，然而在机场周边这一规律相反	城市核心区
		FAR	双重影响	容积率对城市碳排放具有双重影响	城市核心区/交通枢纽和城市工业园区
紧凑度	建设用地	COHESION	双重影响	建设用地连通性与碳排放的关系存在空间异质性	城市旧区和交通枢纽/城市新区
		PD	负向影响	建设用地斑块密度对碳排放具有负向影响	余杭区中部和西部
	二维建筑形态	MBN	负向影响	建筑物数量密度对碳排放具有负向影响	萧山区中部和东部
	三维建筑形态	3DSC	正向影响	三维建筑形态紧凑度越高，碳排放越大	城市核心区
复杂度	建设用地	ED	负向影响	建设用地边缘形态越复杂，碳排放越小	杭州市东部
		SHAPE_MN	负向影响	建设用地形态复杂度对大部分街区的碳排放具有负向影响	城市核心区和萧山区东部
	二维建筑形态	FD	负向影响	建筑单体形态在二维平面上越复杂，碳排放越小	杭州市北部
	三维建筑形态	BSC	负向影响	三维建筑形态复杂度越大，碳排放越小	杭州市西部
不规则度	建设用地	NLSI	正向影响	不规则的建设用地形态导致更大的碳排放	交通枢纽
	三维建筑形态	DEI	正向影响	建筑三维分布均匀度对碳排放具有正向影响，但在交通枢纽和城市郊区则相反	城市核心区

4.2　研究不足与展望

本研究利用多尺度地理加权回归模型，从街区视角揭示了三维空间形态对碳排放的影响机制，然而尚存在以下不足，有待后续研究探讨．①受限于夜间灯光数据的中低空间分辨率[45]，街区尺度下碳排放估算精度对研究结果的潜在影响仍有待进一步探究．未来可以尝试使用高分辨率的夜间灯光数据（如“吉林一号”视频 3 星），弥补夜间灯光遥感数据中低空间分辨率所带来的不足，或者融合碳卫星遥感数据（如 XCO_2 数据）以提升碳排放估算精度[46,47]．②本研究使用的三维建筑数据为单一时间截面的开源数据，未来的研究可利用深度学习方法生产长时序、高精度的建筑高度数据，更加全面地量化三维城市空间形态．③本研究从土地利用和建筑形态两方面来表征城市空间形态，没有单独考虑街道形态对街区碳排放的影响，未来可以纳入街道数据，进一步揭示街区三维空间形态对碳排放的影响机制．

中国知网　https://www.cnki.net

5 结论

(1)2020年杭州市主城区各街区单元的碳排放总量约为5 088.75万t;平均碳排放强度约为30 456.49 t·km^{-2}.总体上,市区中心的街区碳排放总量和强度较高;市区外围的碳排放总量和强度较低.

(2)杭州市主城区的空间形态指标具有4种空间分布模式:内聚圈层模式、外高内低模式、环状分布模式和南高北低模式.内聚圈层模式表明主城区中心的空间紧凑度较高,土地开发强度较大;外高内低模式表明城市郊区的建筑三维不规则度和形态复杂度较大;环状分布模式表明萧山区和余杭区的城郊接合部的土地形态的复杂度较高,紧凑度较低;南高北低模式表明萧山区建筑单体紧凑度和空间不规则度较大.

(3)城市街区单元视角下空间扩张度和城市空间不规则度对碳排放具有正向影响.空间复杂度对碳排放具有负向影响.空间紧凑度对碳排放具有双重影响:在城市新区,紧凑的土地形态有利于碳减排;在交通枢纽和城市旧区,公共服务设施配置不足,空间紧凑带来的减排效应超过阈值,反而促进碳排放.

(4)对于城市核心区,精细化管控容积率,疏解过于密集的人口及建设街区蓝绿空间体系是减少碳排放的有效方式.对于交通枢纽和城市工业园区,构建通畅规则的道路体系至关重要.对于正在开发的城市新区可以通过提高土地利用效率,完善公共基础设施等措施构建紧凑型的空间结构,减少碳排放.

(5)本研究在街区碳排放估算精度和建筑高度的数据上仍存在一些局限性.未来研究可以通过使用更高分辨率的夜间灯光数据或融合碳卫星数据(XCO_2),提升街区碳排放估算精度;通过生产长时序、高精度的建筑高度数据或纳入街道形态数据,进一步探讨街区空间形态对碳排放的影响.

参考文献:

[1] Betts R A, Belcher S E, Hermanson L, *et al*. Approaching 1.5℃: how will we know we've reached this crucial warming mark?[J]. Nature, 2023, **624**(7990): 33-35.

[2] Li L H, Zhang Y, Zhou T J, *et al*. Mitigation of China's carbon neutrality to global warming[J]. Nature Communications, 2022, **13**(1), doi: 10.1038/s41467-022-33047-9.

[3] Zhang A X, Deng R R. Spatial-temporal evolution and influencing factors of net carbon sink efficiency in Chinese cities under the background of carbon neutrality[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, **365**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132547.

[4] Li Z, Wang F, Kang T T, *et al*. Exploring differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on city-level CO_2 emissions in China: spatial heterogeneity and varying importance levels[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, **84**, doi: 10.1016/j.scs.2022.104028.

[5] Christen A, Coops N C, Crawford B R, *et al*. Validation of modeled carbon-dioxide emissions from an urban neighborhood with direct eddy-covariance measurements[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(33): 6057-6069.

[6] Gudipudi R, Fluschnik T, Ros A G C, *et al*. City density and CO_2 efficiency[J]. Energy Policy, 2016, **91**: 352-361.

[7] Wang Y N, Niu Y J, Li M, *et al*. Spatial structure and carbon emission of urban agglomerations: spatiotemporal characteristics and driving forces[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, **78**, doi: 10.1016/j.scs.2021.103600.

[8] Falahatkar S, Rezaei F. Towards low carbon cities: spatio-temporal dynamics of urban form and carbon dioxide emissions[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020, **18**, doi: 10.1016/j.rsase.2020.100317.

[9] Xu X C, Ou J P, Liu P H, *et al*. Investigating the impacts of three-dimensional spatial structures on CO_2 emissions at the urban scale[J]. Science of the Total Environment, 2021, **762**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143096.

[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**(6): 8-15.
Yuan Q, Guo R, Leng H, *et al*. Research on the impact of urban form of small and medium-sized cities on Carbon emission efficiency in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2021, **36**(6): 8-15.

[11] Ye H P, Li Y, Shi D H, *et al*. Evaluating the potential of achieving carbon neutrality at the neighborhood scale in urban areas[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, **97**, doi: 10.1016/j.scs.2023.104764.

[12] 孙娟. 城市街区减碳规划方法集成体系[J]. 城市规划学刊, 2022, (6): 102-109.
Sun J. Methodology of integrated planning toward urban block-level carbon reduction[J]. Urban Planning Forum, 2022, (6): 102-109.

[13] Zheng Y, Cheng L L, Wang Y F, *et al*. Exploring the impact of explicit and implicit urban form on carbon emissions: evidence from Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2023, **154**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110558.

[14] Shi F C, Liao X, Shen L Y, *et al*. Exploring the spatiotemporal impacts of urban form on CO_2 emissions: evidence and implications from 256 Chinese cities[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, **96**, doi: 10.1016/j.eiar.2022.106850.

[15] 张立, 李雯骐, 李一姣. 特大城市乡村地区规划编制及管控体系的建构实践与思考[J]. 小城镇建设, 2023, **41**(9): 5-14.
Zhang L, Li W Q, Li Y J. Practice and reflection on the construction of planning and administration system in rural areas of megacities[J]. Development of Small Cities & Towns, 2023, **41**(9): 5-14.

[16] Li Y, Shen J Y, Xia C Y, *et al*. The impact of urban scale on carbon metabolism--a case study of Hangzhou, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **292**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126055.

[17] Wu K, Wang X N. Aligning pixel values of DMSP and VIIRS nighttime light images to evaluate urban dynamics[J]. Remote Sensing, 2019, **11**(12), doi: 10.3390/rs11121463.

[18] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, **13**(8): 3907-3925.

[19] Liu Z P, Tang H, Feng L, *et al*. China building rooftop area: the first multi-annual (2016-2021) and high-resolution (2.5 m) building rooftop area dataset in China derived with super-resolution segmentation from Sentinel-2 imagery[J]. Earth System Science Data, 2023, **15**(8): 3547-3572.

[20] Wu W B, Ma J, Banzhaf E, *et al*. A first Chinese building height estimate at 10 m resolution (CNBH-10 m) using multi-source earth observations and machine learning[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, **291**, doi: 10.1016/j.rse.2023.113578.

[21] Wang Q, Yang C H, Wang M L, *et al*. Decoupling analysis to assess the impact of land use patterns on carbon emissions: a case study in the Yellow River Delta efficient eco-economic zone, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, **412**, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137415.

[22] Zhou Y, Chen M X, Tang Z P, *et al*. Urbanization, land use

中国知网 https://www.cnki.net

change, and carbon emissions: quantitative assessments for city-level carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, **66**, doi: 10.1016/j.scs.2020.102701.

[23] Cui Y F, Li L, Chen L Q, *et al*. Land-use carbon emissions estimation for the Yangtze River Delta urban agglomeration using 1994-2016 Landsat image data [J]. Remote Sensing, 2018, **10**(9), doi: 10.3390/rs10091334.

[24] 张赫, 彭千芮, 王睿, 等. 中国县域碳汇时空格局及影响因素[J]. 生态学报, 2020, **40**(24): 8988-8998.
Zhang H, Peng Q R, Wang R, *et al*. Spatiotemporal patterns and factors influencing county carbon sinks in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(24): 8988-8998.

[25] 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**(3): 154-162.
Sun H, Liang H M, Chang X L, *et al*. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China [J]. Economic Geography, 2015, **35**(3): 154-162.

[26] 张骁栋, 朱建华, 康晓明, 等. 中国湿地温室气体清单编制研究进展[J]. 生态学报, 2022, **42**(23): 9417-9430.
Zhang X D, Zhu J H, Kang X M, *et al*. An overview of greenhouse gas inventory in the Chinese wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(23): 9417-9430.

[27] Zhang X R, Cai Z Y, Song W, *et al*. Mapping the spatial-temporal changes in energy consumption-related carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region via nighttime light data [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, **94**, doi: 10.1016/j.scs.2023.104476.

[28] 滕菲, 王艳军, 王孟杰, 等. 长三角城市群城市空间形态与碳收支时空耦合关系[J]. 生态学报, 2022, **42**(23): 9636-9650.
Teng F, Wang Y J, Wang M J, *et al*. Spatiotemporal coupling relationship between urban spatial morphology and carbon budget in Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(23): 9636-9650.

[29] 邱陈澜, 王彩侠, 章瑞, 等. 京津冀城市群生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征[J]. 生态学报, 2022, **42**(23): 9590-9603.
Qiu C L, Wang C X, Zhang R, *et al*. Characteristics of ecological space carbon sequestration service function and its relationship with landscape pattern in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(23): 9590-9603.

[30] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. 经济地理, 2020, **40**(3): 75-83.
Shen T Y, Yu H C, Zhou L, *et al*. On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: scale law of spatial heterogeneity [J]. Economic Geography, 2020, **40**(3): 75-83.

[31] Lao X, Gu H Y. Unveiling various spatial patterns of determinants of *hukou* transfer intentions in China: a multi-scale geographically weighted regression approach[J]. Growth and Change, 2020, **51**(4): 1860-1876.

[32] Huang Z W, Li S Y, Peng Y H, *et al*. Spatial non-stationarity of influencing factors of China's county economic development base on a multiscale geographically weighted regression model[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2023, **12**(3), doi: 10.3390/ijgi12030109.

[33] Yu H T, Peng Z R. Exploring the spatial variation of ridesourcing demand and its relationship to built environment and socioeconomic factors with the geographically weighted Poisson regression [J]. Journal of Transport Geography, 2019, **75**: 147-163.

[34] Lan T, Shao G F, Xu Z B, *et al*. Considerable role of urban functional form in low-carbon city development [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, **392**, doi: 10.1016/j. jclepro. 2023.136256.

[35] 钟顺昌, 汪文竹, 闫程莉. 碳减排目标下中国省域城市建设用地空间配置响应研究[J]. 自然资源学报, 2023, **38**(7): 1896-1918.
Zhong S C, Wang W Z, Yan C L. Research on the response of spatial allocation of urban construction land in China′s provinces under the goal of carbon emission reduction[J]. Journal of Natural Resources, 2023, **38**(7): 1896-1918.

[36] Borck R. Will skyscrapers save the planet? Building height limits and urban greenhouse gas emissions [J]. Regional Science and Urban Economics, 2016, **58**: 13-25.

[37] Berger C, Rosentreter J, Voltersen M, *et al*. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, **193**: 225-243.

[38] Godoy-Shimizu D, Steadman P, Hamilton I, *et al*. Energy use and height in office buildings [J]. Building Research & Information, 2018, **46**(8): 845-863.

[39] Shen N, Peng H. Can industrial agglomeration achieve the emission-reduction effect?[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2021, **75**, doi: 10.1016/j.seps.2020.100867.

[40] 田达睿, 杨帅, 关冲, 等. 城市空间集聚性与居民生活碳排放相关性探索——基于全国110个城市数据的分析[J]. 城市规划, 2023, **47**(7): 76-85.
Tian D R, Yang S, Guan C, *et al*. Correlation between urban spatial agglomeration and residents′ household carbon emissions: an analysis based on the data of 110 Chinese cities [J]. City Planning Review, 2023, **47**(7): 76-85.

[41] Ou J P, Liu X P, Li X, *et al*. Quantifying the relationship between urban forms and carbon emissions using panel data analysis [J]. Landscape Ecology, 2013, **28**(10): 1889-1907.

[42] Lin J Y, Lu S Y, He X Y, *et al*. Analyzing the impact of three-dimensional building structure on CO_2 emissions based on random forest regression[J]. Energy, 2021, **236**, doi: 10.1016/j.energy.2021.121502.

[43] Li S J, Zhou C S, Wang S J, *et al*. Dose urban landscape pattern affect CO_2 emission efficiency? Empirical evidence from megacities in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **203**: 164-178.

[44] 刘贤赵, 李阳. 县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系[J]. 环境科学, 2023, **44**(12): 6664-6679.
Liu X Z, Li Y. Relationship between urbanization and carbon emissions in the Chang-Zhu-Tan region at the county level [J]. Environmental Science, 2023, **44**(12): 6664-6679.

[45] 余柏蒗, 王丛笑, 宫文康, 等. 夜间灯光遥感与城市问题研究：数据、方法、应用和展望[J]. 遥感学报, 2021, **25**(1): 342-364.
Yu B L, Wang C X, Gong W K, *et al*. 2021. Nighttime light remote sensing and urban studies: data, methods, applications, and prospects[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, **25**(1): 342-364.

[46] Wang M J, Wang Y J, Teng F, *et al*. The spatiotemporal evolution and impact mechanism of energy consumption carbon emissions in China from 2010 to 2020 by integrating multisource remote sensing data[J]. Journal of Environmental Management, 2023, **346**, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119054.

[47] Wang Y J, Wang M J, Teng F, *et al*. Remote sensing monitoring and analysis of spatiotemporal changes in China's anthropogenic carbon emissions based on XCO_2 data[J]. Remote Sensing, 2023, **15**(12), doi: 10.3390/rs15123207.

中国知网 https://www.cnki.net