

DOI: 10.20103/j.stxb.202210223005

何小钰, 庄雅焯, 邱穗萱, 李桦, 招扬, 卢思言, 林锦耀. 城市三维空间结构对碳排放影响的尺度效应. 生态学报, 2024, 44(2): 612-624.

He X Y, Zhuang Y Y, Qiu S X, Li H, Zhao Y, Lu S Y, Lin J Y. Analyzing the impact of urban three-dimensional spatial structure on CO₂ emissions at multiple scales. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 612-624.

城市三维空间结构对碳排放影响的尺度效应

何小钰, 庄雅焯, 邱穗萱, 李桦, 招扬, 卢思言, 林锦耀*

广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006

摘要:城市是碳排放最集中的区域,全面厘清城市空间结构对碳排放的影响对碳减排规划具有重要意义。以往研究主要关注城市二维结构与碳排放的关系,表明城市扩张是碳排放剧增的主要原因。虽然城市三维空间结构也会显著影响碳排放,然而其影响的尺度效应依然缺少深入分析。为此以广州市为例,结合相关性分析、随机森林探究三维空间结构与碳排放的关系,并揭示三维空间结构影响的尺度效应。研究结果表明:(1)(高层)建筑物密度、建筑覆盖率、容积率与人口密度是碳排放的关键影响因素,主要通过直接增加人类活动或加剧热岛效应使得能源消耗和碳排放增多;(2)三维空间结构对碳排放的影响具有明显的尺度效应。随着分析尺度的变化,碳排放受三维空间结构的不同方面主导;(3)广州作为紧凑型城市的代表,如果片面追求城市三维空间的紧凑布局将不利于低碳城市的发展。因此,相关部门应重视宏观尺度下的三维空间结构的合理布局,合理开发城市边缘地区,降低城市中心建筑物的紧凑布局,构建多中心的城市格局,以有效降低碳排放水平,促进低碳城市的构建与可持续发展。研究所得成果可为城市建筑三维空间布局的合理优化提供参考依据,助力“双碳”目标的实现。

关键词:三维空间结构;碳排放;尺度效应;随机森林

Analyzing the impact of urban three-dimensional spatial structure on CO₂ emissions at multiple scales

HE Xiaoyu, ZHUANG Yaye, QIU Suixuan, LI Hua, ZHAO Yang, LU Siyan, LIN Jinyao*

School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Carbon dioxide (CO₂) is the primary greenhouse gas that has emerged as a serious threat to environmental conditions and public health. Many studies have shown that cities are the areas with the highest CO₂ emissions. It is of great significance to comprehensively analyze the impact of urban spatial structure on CO₂ emissions so that CO₂ emission can be reduced through reasonable urban planning. Previous studies have mainly focused on the relationship between urban two-dimensional spatial structure and CO₂ emissions, indicating that urban expansion is the main reason for the sharp increase in CO₂ emissions. Although the urban three-dimensional spatial structure also significantly affects CO₂ emissions, the relationship between them still lacks in-depth investigations. Therefore, the purpose of this research is to explore the relationship between three-dimensional spatial structure and CO₂ emissions and to reveal the associated scale effect at multiple grid scales by taking Guangzhou as an example. These tasks were conducted by using the Pearson correlation test, random forest regression, and scale analysis. The results indicated that: (1) The effect of three-dimensional spatial structure on CO₂ emissions is greater than that of two-dimensional land cover. Among them, (high-rise) building density, building coverage ratio, floor area ratio, and population density were the key factors affecting CO₂ emissions, which could increase energy consumption and CO₂ emissions by directly increasing human activities or intensifying urban heat island effects and the associated energy consumption. (2) Scale effect is obvious in terms of the relationship between three-dimensional spatial structure and CO₂ emissions. Although the three-dimensional spatial structure is the major influencing

基金项目:国家自然科学基金项目(41801307);省级大学生创新训练计划项目(S202111078001);广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金项目(2023A1515030300);教育部人文社会科学研究青年基金(23YJZCH125)

收稿日期:2022-10-22; **网络出版日期:**2023-10-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lly2012@ gzhu.edu.cn

factor at all scales, the order of importance of influencing factors varies among different scales. The dominance of high-rise buildings is stronger in small and large grid scales, and the dominance of the overall layout of buildings is stronger in moderate grid scales. Therefore, determining a reasonable analysis scale is another important aspect of revealing the influencing mechanisms of CO₂ emissions. (3) As a representative of modern compact cities, Guangzhou should not unilaterally pursue the compact layout of the urban three-dimensional space, which is not beneficial to the development of low-carbon city. Rational planning of the urban three-dimensional spatial structure is an important approach to low-carbon city construction. In conclusion, it is necessary for policy-makers to pay attention to the reasonable layout of the three-dimensional spatial structure at macro scale and the difference in the impact of three-dimensional spatial structure at different scales. Additionally, policy-makers should attach importance to the reasonable development of urban fringe areas. Furthermore, policy-makers should reduce the compact degree of urban central buildings and develop a multi-center urban development pattern, which can effectively reduce the CO₂ emissions and promote the sustainable development of low-carbon cities. In summary, this research can support the rational optimization of urban three-dimensional spatial structure, and can help to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals of China.

Key Words: three-dimensional spatial structure; CO₂ emission; scale effect; random forest

近年来,全球变暖问题严重影响人类的生产与生活^[1-2]。以二氧化碳为主的温室气体排放严重超标,导致大气温度进一步上升^[3-5]。城市是碳排放最集中的区域,全球 80% 以上的碳排放来源于城市^[6-8]。因此,大量研究分析城市发展与碳排放的关系^[9-14],以从节能降耗^[15-16]、清洁能源推广^[17-18]等角度实现碳减排。此外,研究表明土地利用变化与碳排放密切相关^[19-22],通过改变土地利用状况、城市空间结构同样可以达到碳减排目标。因此在节能降耗存在限度的情况下,全面厘清城市空间结构对碳排放的影响对碳减排规划具有重要意义。

虽然城市空间结构包括平面和垂直两大维度,然而以往研究主要关注城市平面结构与碳排放的关系。学者普遍认为城市扩张是碳排放剧增的主要原因^[21,23-25]。例如,王桂新与武俊奎^[26]证实土地非农化导致城市规模扩张,降低城市空间的使用效率并导致碳排放水平上升;Shi 等^[27]通过景观格局指数衡量城市平面结构,发现土地利用的紧凑性、连通性等均对碳排放产生影响。此外城市平面结构还会通过改变居民居住、交通出行等影响碳排放水平^[28-30]。余倩楠等^[2]揭示长三角道路密度、交通耦合度和建设用地最大斑块指数通过对路网交通产生作用,从而影响城市碳排放;Liu 等^[31]发现随着城市紧凑度的上升,城市居民碳排放呈现下降趋势。

除平面结构的影响外,城市垂直空间结构也会显著影响碳排放。例如,Mouzourides 等^[32]发现建筑高度、建筑密度与建筑的供暖、制冷的能源需求存在显著关系,从而对碳排放产生影响;Shareef^[33]揭示建筑高度的异质性与室外太阳增温密切相关,并对室内制冷能耗以及碳排放产生重要影响。目前已有研究表明,城市三维空间结构与城市热环境^[34-35]、风环境^[36]、大气污染^[37]、内涝^[38-39]等环境问题息息相关。然而,城市三维空间结构与碳排放的关系依然缺少深入分析。尤其分析的尺度往往会影响研究结论,即同一影响因素在不同尺度下的作用方式和影响强度存在一定差异。

目前碳排放研究的尺度多集中在国家级^[40]、区域级^[41]、省级^[42]和市级^[43-44],较少研究深入城市内部分析碳排放的影响机制。即使有研究关注城市内部结构与碳排放的关系^[45],仍然极少探究不同尺度下三维空间结构对碳排放的影响并分析尺度不同造成的差异。从格网尺度对三维建筑空间结构与城市碳排放进行分析探讨,能够更合理地将宏观的碳排放数据与微观的三维建筑、土地利用等数据相关联,为研究三维建筑结构与城市碳排放的关系提供更为精细的依据。由于空间分析尺度会影响所得研究结论^[46],通过对比各级格网尺度下三维建筑指标与碳排放的关系,有助于更全面地揭示两者的空间变化特征,进一步深入城市内部结构探究不同尺度造成的差异。

综上,为了全面揭示城市三维空间结构对碳排放产生的精细影响,本研究以广州市为例,立足于城市内部不同格网尺度,结合皮尔逊相关性分析、随机森林等探究三维空间结构与碳排放的关系,并通过尺度差异的对

比分析揭示三维空间结构影响的尺度效应。目的是从国土空间规划的角度合理布局城市三维空间结构,为低碳城市的规划与建设提供参考依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

本研究以碳排放较高、建筑密集的广州市为案例。广州是粤港澳大湾区的核心城市之一,也是国际商贸中心和综合交通枢纽。在城市发展过程中,广州市的建设用地在平面上不断“南拓、东进”,且表现出垂直方向上的强烈抬升^[47],具有高密度的建筑分布特征。同时,人类活动也在空间上高度集中,导致碳排放增加、热岛效应日益严重。为此,广州市从优化国土空间开发、调整产业结构等多方面推进低碳规划。2022年广州市住房和城乡建设局发布《广州市关于推动城乡建设绿色发展的实施意见》,提出要在“双碳”背景下可持续优化城市空间结构,加快推动城乡建设绿色发展。因此本研究探究城市三维空间结构与碳排放的关系,可以为广州市的低碳城市建设提供参考。同时,所得结果也能为其他城市缓解碳排放问题提供科学依据和技术支撑。

1.2 数据来源与处理

本研究所用数据包括广州市 2019 年碳排放量、人口、建筑空间分布、数字高程模型、土地利用数据及行政区划(图 1)。其中,碳排放数据来源于人类活动二氧化碳开源数据清单(ODIAC),现已被广泛应用于碳循环与低碳城市相关研究,在国内外学术界认可度较高。该数据具有综合性,结合多源遥感数据、非点源数据、化

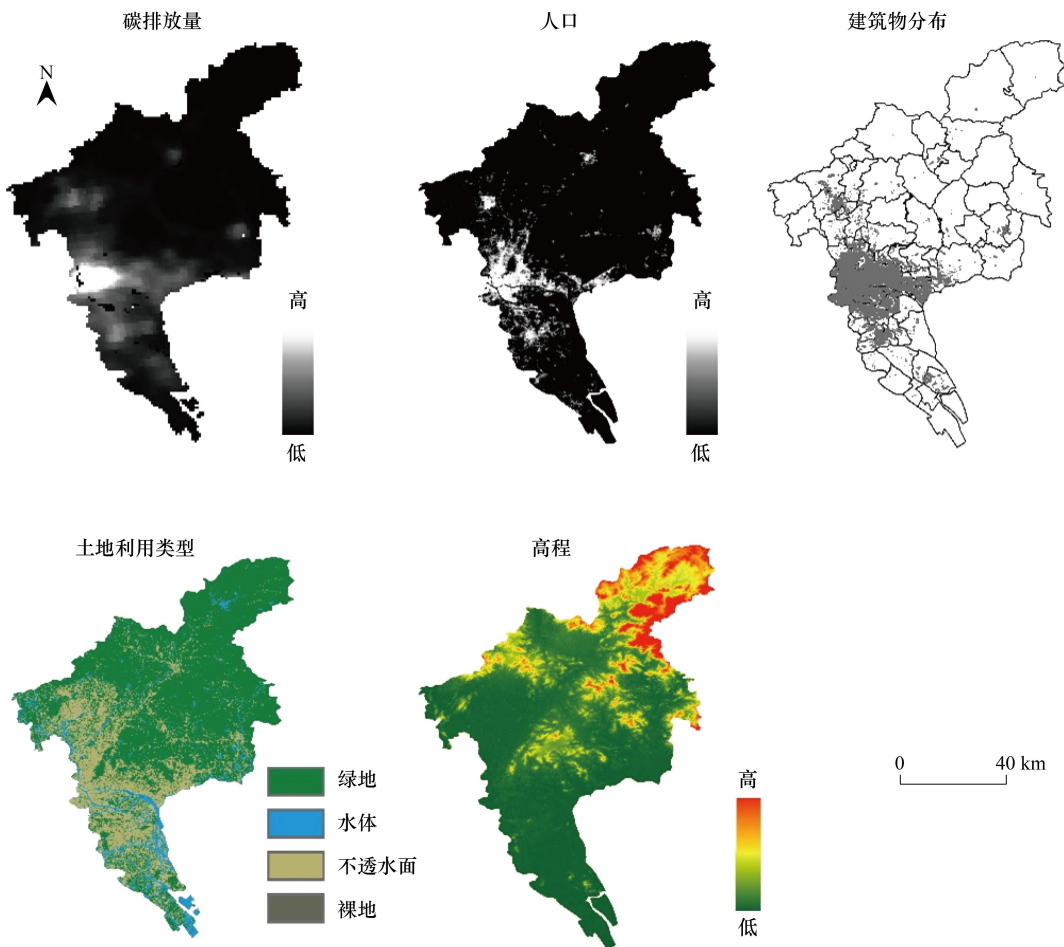


图 1 本研究所用的空间数据
Fig.1 Spatial data used in this study

石燃料消耗统计碳排放进行估算, 并已通过精度验证; 人口数据来源于世界人口数据集 (WorldPop)^[48], 其结合多源地理空间数据, 如居民点位置与范围、卫生设施位置、难民营, 构建随机森林回归模型, 以此得出人口精细分布情况; 建筑空间分布数据来源于高德地图, 其中包括建筑位置、楼层数等信息; 其余数据来源详见表 1。多源海量数据的集成有效保证了碳排放和建筑、人口等数据的相对独立性。

表 1 本研究数据来源

Table 1 Data sources of this study

数据 Data	信息 Information	来源 Sources
碳排放 Carbon emissions	1000m 分辨率	人类活动二氧化碳开源数据清单 (ODIAC)
建筑空间分布 Spatial distribution of buildings	建筑位置、楼层数	高德地图
数字高程模型 Digital elevation model	30m 分辨率	国家基础地理信息中心
土地利用 Land cover	10m 分辨率, 分为: 绿地、水体、不透水面、裸地	FROM-GLC10 ^[49]
人口 Population	100m 分辨率	世界人口数据集 (WorldPop) ^[48]

本研究将以上数据经过数据清洗、数据统计及指标计算三大步骤, 得出的潜在驱动因素如表 2 所示, 三维尺度的城市空间结构特征分析指标体系则见图 2 与表 3。目前已有相关研究探讨了部分指标与城市碳排放之间的关系。王建军^[50]通过构建新模型的方法指出建筑高度、建筑高度标准差、建筑平均体积、建筑覆盖率指标与城市碳排放呈正相关, 而建筑总体积与城市碳排放呈负相关。具体而言, Borck^[51]发现限制建筑物高度会降低居民生活产生的能源消耗, 可能促使碳排放总量下降; 柏春^[52]指出建筑密度与室内自然采光强度及各类设施利用率有关, 建筑密度会通过改变照明能耗而间接影响城市碳排放量; Ewing 等^[53]指出高密度建筑区的建筑单体的空间与外墙面小, 能源消耗量小、储存效率高, 从而降低其产生的碳排放量; 龙惟定等^[54]认为高容积率地区以集约化发展的形式容纳工作、生活等功能, 并通过增加能耗来影响城市碳排放; 刘科^[55]则表示减少建筑体型系数, 简化建筑轮廓以及平面布局, 能够降低城市碳排放量。城市三维空间结构在垂直方向上体现为高度及其衍生的容积率、建筑形状系数等, 而这些建筑形态主要是通过影响居民的生活习惯和生活方式及城市环境, 对能源相关的二氧化碳排放产生直接或间接的影响。本文在此基础上对各项指标进行进一步的探究、验证, 完善碳排放的影响机制的相关理论内容。

N: 建筑物数量
A: 土地总面积
H_i: 建筑*i*的高度
V_i: 建筑*i*的体积
A_i: 建筑*i*的建筑总面积
P_i: 建筑*i*的底面积周长
S_i: 建筑*i*的底面积

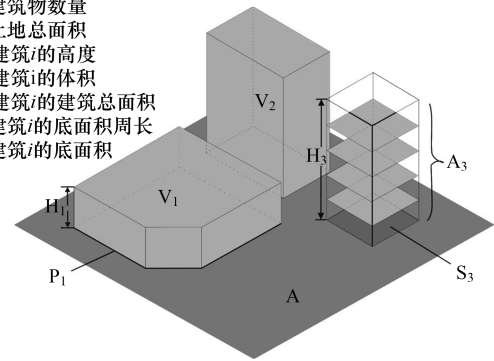


图 2 三维空间结构指标计算示意

Fig.2 Example of three-dimensional spatial metrics

表 2 城市碳排放的潜在驱动因素

Table 2 Potential driving factors behind urban carbon emissions

因变量 Dependent variables	碳排放 Carbon emissions	单位格网平均碳排放量 Average carbon emissions per unit grid
自变量 Independent variables	人口	人口密度
	土地利用	绿地比例
		水体比例
		不透水面比例
		裸地比例
	三维空间结构	详见表 3

表 3 三维空间结构指标简介

Table 3 Information on three-dimensional spatial metrics

指标 Metrics	公式 Formulas	含义 Definitions
建筑物密度 Building density	$BD = \frac{N}{A}$	BD 是区域内建筑物数量与区域面积之比
高层建筑物密度 High building density	$HBD = \frac{NT}{A}$	HBD 是区域内高层建筑物数量与区域面积之比
平均建筑高度 Mean building height	$MBH = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N}$	—
最高建筑高度 Highest building height	$HBH = \max(H_i)$	HBH 是建筑物高度的支配性度量
平均建筑体积 Mean building volume	$MBV = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N}$	—
建筑高度标准差 Standard deviation of building height	$SDBH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_i - MBH)^2}{N}}$	SDBH 反映建筑物高度的分散和变化程度
建筑体积标准差 Standard deviation of building volume	$SDBV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - MBV)^2}{N}}$	SDBV 反映建筑物体积的分散和变化程度
容积率 Floor area ratio	$FAR = \frac{\sum_{i=1}^N F_i \times S_i}{A}$	FAR 是总建筑面积与所在土地利用地块面积的比率
建筑覆盖率 Building coverage ratio	$BCR = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{A}$	BCR 是建筑面积与建设用地面积之比
建筑体型系数 Building shape coefficient	$BSC = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i \times H_i + S_i}{V_i}}{N}$	BSC 是建筑表面积与体积之比,是决定热损失和增益的重要因素
建筑拥挤度 Building congestion degree	$BCD = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{\max(H_i) \times A}$	BCD 是所有建筑物数量占城市体积百分比的总和
天空开阔度 Sky view factor	$SVF = 1 - \sum_{i=1}^n \sin^2 \beta_i \left(\frac{\alpha_i}{360} \right)$	SVF 指一个平面从天空接收(或发射)的辐射与整个半球辐射环境发射(或接收)的辐射之比

N 为建筑数量; NT 为高层建筑数量; A 为流域的土地总面积; H_i 为建筑 i 的高度; S_i 为建筑 i 的建筑面积; P_i 为建筑 i 的底面周长; F_i 为建筑 i 的楼层数量; V_i 为建筑 i 的体积; n 为天空半球中被障碍物遮蔽的角元素总数; α_i 和 β_i 分别为在该角元素处所能看见太阳的最小仰角和方位角; BD : 建筑物密度 Building density; HBD : 高层建筑物密度 High building density; MBH : 平均建筑高度 Mean building height; HBH : 最高建筑高度 Highest building height; MBV : 平均建筑体积 Mean building volume; $SDBH$: 建筑高度标准差 Standard deviation of building height; $SDBV$: 建筑体积标准差 Standard deviation of building volume; FAR : 容积率 Floor area ratio; BCR : 建筑覆盖率 Building coverage ratio; BSC : 建筑体型系数 Building shape coefficient; BCD : 建筑拥挤度 Building congestion degree; SVF : 天空开阔度 Sky view factor

本文将研究区域划分为五个不同的尺度: 社区(约 1—2km)、街道(约 3—4km)、区级(约 5km), 同时基于广州市建筑物分布数据构建相应的尺度网格, 并以此为基础对不同尺度下三维城市空间结构指标与碳排放的关系进行深入探讨。需要注意的是, 本文的研究范围虽为广州市全市, 但只有建筑分布的区域才会被纳入数据统计的范围, 建筑数据未分布的区域由于未能构建三维建筑结构体系而不在统计范围内。

1.3 研究方法

1.3.1 皮尔逊相关性分析

本研究首先采用皮尔逊相关性分析方法计算城市碳排放与各类潜在驱动因素的相关系数。皮尔逊相关

系数是介于 $[-1, 1]$ 之间的实数,其正负属性及数值大小能够衡量变量之间的线性相关程度,其表达式^[56]如下:

$$\rho_{XY} = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}} \quad (1)$$

假设 $X=(x_1, x_2, \dots, x_N)$, $Y=(y_1, y_2, \dots, y_N)$, 则 X, Y 代表两个随机变量, N 为样本数量, 为皮尔逊相关系数。在本研究中, X 为各类潜在驱动因素(如三维空间结构、土地利用类型、人口密度), Y 为单位格网碳排放。皮尔逊相关系数越接近于正负 1, 相关性越强; 皮尔逊相关系数越接近于 0, 相关性越弱; 且负值为负相关, 正值为正相关。

1.3.2 随机森林模型

以往研究通常采用多元线性回归模型揭示多个自变量对因变量的影响, 但建立多元线性回归模型时常遇到多重共线性问题。为克服多元线性回归的不足, 本研究采用随机森林回归^[57]深入剖析碳排放的影响因素。随机森林对多重共线性不敏感, 可应对各自变量之间的相关性^[57]。此外, 随机森林通过样本随机与特征随机过程避免过拟合的发生, 能有效地在大数据集上运行。

本研究分别在五个格网尺度, 即社区(约 1—2km)、街道(约 3—4km)、区级(约 5km), 构建随机森林回归, 衡量不同尺度中各潜在驱动因素的重要程度并对比所得结果的差异, 最终反映三维空间结构对碳排放的影响情况。随机森林是以决策树为基础的一种机器学习算法, 按照一定准则对不同的决策树进行组合, 构成集合预报模型, 用以处理高维以及非线性数据集, 能有效地解决数据回归和分类问题。随机森林结构简单, 所需的参数较少, 并且能有效避免模型过拟合。最重要的是, 随机森林可以利用在随机抽样过程中未被选中的袋外样本来评估模型的效果, 且能够进一步衡量不同自变量的重要程度。

随机森林回归主要依靠四类评价指标评估模型效果, 即均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、相关系数(r)。 r 越大, MSE、RMSE、MAE 越小, 表明随机森林回归模型解释精度越高, 结果越准确。

2 结果与分析

2.1 广州市 1—5km 格网尺度下碳排放与各影响因素的相关性

表 4 总结了不同尺度下碳排放与各影响因素的相关系数及显著性检验结果。在土地利用类型方面, 不透水面比例、绿地比例在 2—5km 格网尺度下的相关系数均通过显著性检验, 与碳排放显著相关。其中不透水面比例表现为正相关, 绿地比例表现为负相关, 说明随着不透水面继续扩张、绿地比例不断下降, 碳排放水平会上升。然而所得的相关系数均小于 0.3, 说明不透水面比例与绿地比例对碳排放的影响程度不高。相比之下, 人口密度在 1—5km 格网尺度下与碳排放的正相关性均非常显著, 说明随着人口密度的不断增大, 碳排放水平会不断升高。且相关系数从 1km 到 5km 格网尺度不断增大, 因此人口密度的影响作用逐渐增强。

此外在三维空间结构方面, 建筑物密度、最高建筑高度、高层建筑物密度、容积率、建筑覆盖率以及天空开阔度在 1—5km 格网尺度下均通过显著性检验, 与碳排放显著相关, 且除天空开阔度以外, 均呈正相关; 在 2—5km 尺度, 建筑拥挤度也与碳排放呈显著正相关。随着尺度的增大, 各指数与碳排放的相关系数均有所增大。除了天空开阔度, 其余指数的相关程度均从弱相关过渡到中度相关, 说明随着尺度增大, 三维空间结构(尤其是建筑物密度、最高建筑高度、高层建筑物密度、容积率、建筑覆盖率)对碳排放的影响不断增强。

进一步对比各格网尺度下不同影响因素的相关性大小(图 3)。随着分析尺度增大, 与碳排放显著相关的因素有所增加。其中, 平均建筑体积、建筑体积标准差只在 3km 格网尺度下与碳排放相关, 而建筑高度标准差则只在 5km 尺度下相关。此外随着尺度的增大, 大多数因素的相关系数都在不断增大, 说明在城市内部, 尺度过小的结果会存在一定的随机性和不确定性, 而宏观尺度下的分析效果会更具有全面性。其中建筑物密

度、最高建筑高度、高层建筑物密度、容积率、建筑覆盖率以及人口密度的相关系数增长较明显,说明与其他因素相比,三维空间结构对碳排放的影响更显著,因此需要更加重视三维建筑的合理布局,以达到碳减排的效果。

表 4 广州市不同尺度下碳排放与各影响因素的相关性

Table 4 Correlation between carbon emissions and various influencing factors at different scales in Guangzhou

变量类型 Variable categories	影响因素 Impact factors	尺度 Scales				
		1km	2km	3km	4km	5km
土地利用 Land cover	水体比例	-0.140	-0.029	-0.003	-0.029	-0.003
	不透水面比例	0.045	0.100 *	0.172 *	0.235 **	0.236 **
	裸地比例	-0.012	-0.028	-0.053	-0.063	-0.047
三维空间结构 Three-dimensional building structure	绿地比例	-0.040	-0.085 *	-0.161 **	-0.202 **	-0.212 **
	建筑物密度	0.119 **	0.225 **	0.351 **	0.397 **	0.501 **
	最高建筑高度	0.086 **	0.133 **	0.283 **	0.305 **	0.377 **
	高层建筑物密度	0.091 **	0.235 **	0.381 **	0.399 **	0.603 **
	容积率	0.134 **	0.266 **	0.427 **	0.461 **	0.563 **
	建筑覆盖率	0.121 **	0.227 **	0.344 **	0.396 **	0.439 **
	建筑拥挤度	0.049	0.173 **	0.244 **	0.355 **	0.433 **
	建筑体型系数	-0.020	-0.026	-0.037	-0.017	-0.027
	平均建筑高度	0.016	0.028	0.060	0.031	0.118
	平均建筑体积	-0.002	-0.001	0.344 **	-0.013	-0.001
	建筑高度标准差	0.037	0.067	0.030	0.129	0.210 **
	建筑体积标准差	0.006	0.010	0.427 **	0.054	0.028
人口 Population	天空开阔度	-0.055 *	-0.122 **	-0.193 **	-0.230 **	-0.267 **
	人口密度	0.103 **	0.237 **	0.488 **	0.467 **	0.664 **

** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

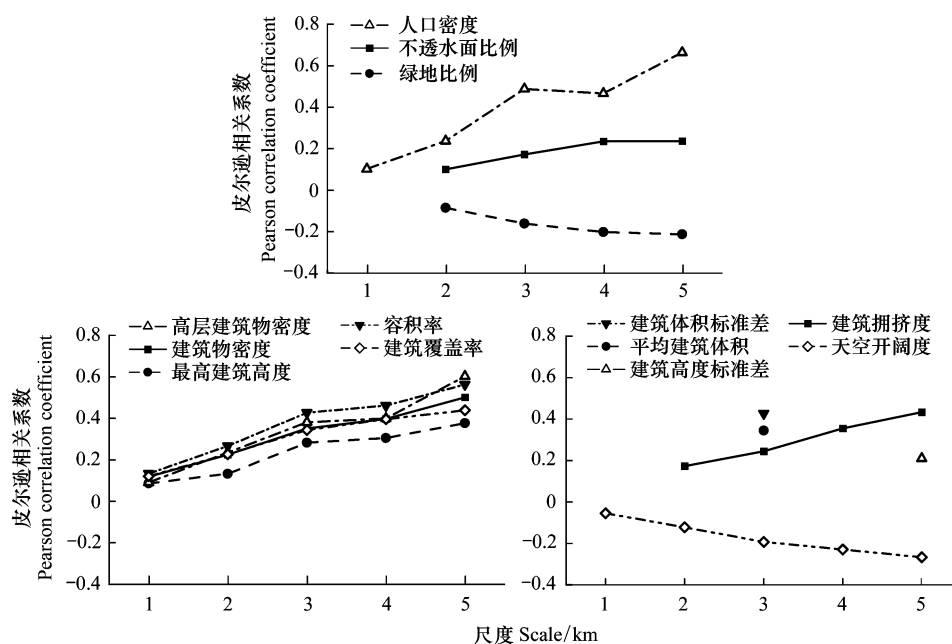


图 3 不同尺度下各因素的相关性对比

Fig.3 Comparison of correlation coefficients of each factor at different scales

2.2 广州市 1—5km 格网尺度下碳排放影响因素的重要性分析

随机森林模型结果(表 5)显示,各格网尺度下的相关系数均超过 0.9,说明随机森林模型拟合的效果较好;模型的平均绝对误差、均方根误差较小,说明随机森林模型的可信度较高。此外,将各尺度所有因素的重要性得分进行排序(表 6),将 17 个影响因素中排名靠前的作为该尺度下的主导影响因素。结果表明 1—5km 格网尺度下的主导因素分别为:高层建筑物密度、建筑覆盖率、建筑物密度、建筑体积标准差、水体比例、最高建筑高度、容积率(1km);建筑覆盖率、建筑拥挤度、高层建筑物密度、建筑物密度、容积率、天空开阔度、建筑体型系数(2km);平均建筑体积、建筑物密度、建筑覆盖率、人口密度、建筑体积标准差、容积率、高层建筑物密度(3km);建筑覆盖率、建筑物密度、容积率、高层建筑物密度、人口密度、天空开阔度、绿地比例(4km);高层建筑物密度、建筑覆盖率、建筑拥挤度、人口密度、容积率、最高建筑高度、建筑物密度(5km)。

表 5 广州市各尺度下的随机森林模型结果

Table 5 Results of random forest model at various scales in Guangzhou

指标 Metrics	尺度 Scales				
	1km	2km	3km	4km	5km
相关系数 Correlation coefficient	0.9652	0.9394	0.9834	0.9282	0.9754
平均绝对误差 Mean absolute error	0.0363	0.0603	0.0691	0.1020	0.0881
均方根误差 Root mean squared error	0.4047	0.3820	0.3302	0.4423	0.3704

表 6 广州市各尺度下碳排放影响因素的重要性排序

Table 6 Importance ranking of carbon emission impact factors at various scales in Guangzhou

变量类型 Variable categories	影响因素 Impact factors	尺度 Scales				
		1km	2km	3km	4km	5km
土地利用 Land cover	水体比例	7.6(5)	3.98(11)	0.9(9)	2.08(11)	0.5(12)
	不透水面比例	3.66(9)	4.99(9)	0.37(14)	2.62(8)	0.91(10)
	裸地比例	0.88(14)	4.31(10)	0.67(11)	1.76(13)	0.46(14)
三维空间结构 Three-dimensional building structure	绿地比例	2.65(12)	5.14(8)	0.62(12)	3.00(7)	1.45(8)
	建筑物密度	14.56(3)	11.37(4)	17.41(2)	9.14(2)	5.68(7)
	最高建筑高度	7.35(6)	2.46(13)	1.56(8)	2.15(10)	5.71(6)
	高层建筑物密度	15.74(1)	12.36(3)	4.17(7)	5.59(4)	9.12(1)
	容积率	7.06(7)	8.66(5)	4.59(6)	6.67(3)	7.25(5)
	建筑覆盖率	14.83(2)	29.84(1)	14.2(3)	13.34(1)	8.8(2)
	建筑拥挤度	2.9(10)	17.8(2)	0.36(15)	2.48(9)	7.57(3)
	建筑体型系数	2.76(11)	5.26(7)	0.55(13)	0.03(17)	0.44(15)
	平均建筑高度	0.01(16)	3.95(12)	0.31(16)	0.93(15)	0.38(16)
	平均建筑体积	5.12(8)	0.03(16)	19.39(1)	0.7(16)	0.21(17)
人口 Population	建筑高度标准差	0.01(17)	0.03(15)	0.06(17)	1.83(12)	1.4(9)
	建筑体积标准差	11.15(4)	0.03(17)	5.63(5)	1.63(14)	0.47(13)
	天空开阔度	0.78(15)	7.15(6)	0.74(10)	3.31(6)	0.72(11)
	人口密度	2.06(13)	2.23(14)	11.72(4)	4.59(5)	7.54(4)

表内的数值表示各尺度下各影响因素的重要性得分及其排序,如 7.6(5)表示在某一尺度下,对应的影响因素的重要性得分为 7.6,在各影响因素中排序为 5;表内数值按照重要性得分由高到低排序

最后,对各尺度下所有主要影响因素的出现频数进行统计(图 4),结果发现高层建筑物密度、建筑覆盖率、容积率、建筑物密度在五个尺度均有出现。因此对比这四大因素在不同尺度的排名(图 5)。从主要影响因素的频数(图 4)来看,三维空间结构与人口密度在 5 个尺度出现次数均不少于 3 次,说明人口密度仍然是碳排放的主要影响因素,而三维空间结构的影响程度要远大于二维土地利用类型;说明随着平面扩张的放缓,建筑在垂直方向的扩张导致其三维空间结构变得多样复杂,逐渐取代二维土地利用结构,成为影响碳排放的

最主要因素。值得注意的是,从四个主要的三维空间结构指数在不同尺度的排名(图5)来看,虽然三维空间结构为主导因素,但不同尺度下,排名第一的三维建筑指数具有差异。1km 与 5km 格网尺度下最重要的主导因素是高层建筑物密度。高层建筑物密度表征高层建筑在平面上的集聚程度,在过小的分析尺度下,它很大程度影响了区域内人口生产生活等活动的聚集,如在 1km 的社区级别下人们出行方式一般为步行,出行方式的选择会影响碳排放水平;但在 5km 区级的分析尺度下,高层建筑则由于其集聚会对城市热岛效应产生显著影响,又成为最重要的影响因素。

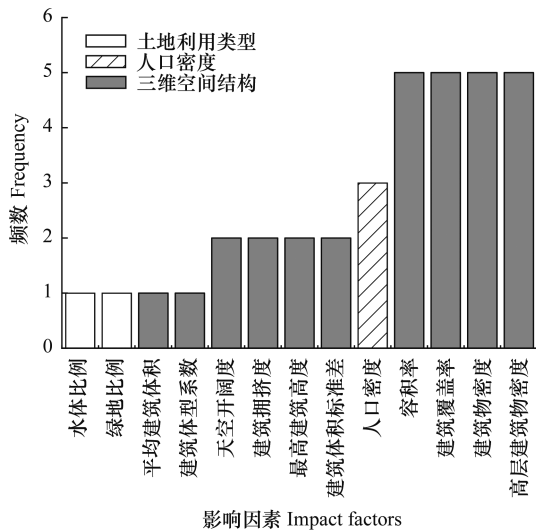


图4 碳排放主要影响因素的出现频数

Fig.4 Frequency of occurrence of the main impact factors on carbon emissions

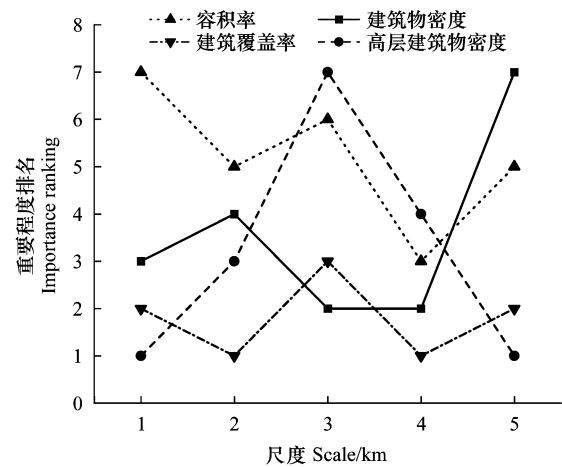


图5 各尺度下四大建筑指标的重要程度排名

Fig.5 Importance ranking of the four major building indicators at various scales

在 2km 和 4km 的分析尺度下,建筑覆盖率成为了最重要的主导因素,说明当分析尺度较适中时,建筑在平面上的覆盖情况更能代表人类活动、建筑分布的具体情况,并通过直接或间接的影响导致城市能耗改变,进而影响碳排放水平。而在 3km 格网尺度下,唯一出现一次的平均建筑体积成为排名第一位的主要影响因素,原因可能是在 3km 的分析尺度下,城市建筑的平均大小可能更能直接表明其容纳的人类活动,加上在该分析尺度下,建筑集聚对城市热环境的影响仍不突出,因此平均建筑体积对碳排放水平起着最重要的影响。上述情况说明随着分析尺度的不同,三维空间结构的不同方面主导着碳排放水平的变化,进一步揭示出城市三维空间结构与碳排放的关系受到分析尺度的影响,且影响机制较为复杂。

3 讨论

3.1 三维空间结构对碳排放的影响机制

三维空间结构作为城市发展的重要表征,会通过各类中介要素对碳排放产生影响^[58],主要包括三大影响途径:一是三维建筑空间作为承载人类活动的主要场所,其形态、大小、分布会直接影响碳排放的高低及空间特征;二是三维空间结构通过影响地表及建筑表面的空气流动从而影响城市热岛效应,改变城市的能源消耗及相应的碳排放^[59-61];三是三维空间结构通过影响城市发展进程,导致城市经济产业更新,各类高耗能产业的出现改变城市碳排放。本文研究结果表明(高层)建筑物密度、建筑覆盖率及容积率是最显著的影响因素。(高层)建筑物密度、建筑覆盖率衡量单位面积内(高层)建筑物的数量、建筑面积的大小,反映建筑在平面的扩张情况以及其承载的城市活动状况,而容积率则是建筑垂直方向扩张的表征,高容积率常以集约化的形式产生显著的影响,紧凑的建筑在降低交通油耗的同时也影响着室内能源消耗,进而影响城市碳排放。因此,当(高层)建筑物密度、建筑覆盖率和容积率不断增大时,首先会直接使区域内承载的人类活动和能源消耗不断

增多,导致碳排放显著增加。此外,上述指数的增大会显著改变城市的下垫面性质导致地面的增温,同时建筑的间距减小、高度增加,导致空气流动受到阻碍,散热过程受到影响,从而加剧城市热岛效应,最终增加城市居民的通风、空调系统的使用。除通风制冷外,城市不合理的建筑布局也会对照明产生影响,比如过高过密的建筑布局减少低楼层的自然采光,增加了照明需求,最终导致更高的碳排放。再者,城市三维空间结构作为城市化进程的重要呈现方式,与城市发展、经济增长密切相连^[62],因此城市三维空间结构与碳排放生态问题的出现相互呼应。城市三维空间结构为人类提供了更多经济活动的场所,让制造业、运输业等有了更多的平台与机会创造利益,同时高耗能产业不断发展,在生产、排放、耗能等方面增加碳排放。为缓解碳排放的生态问题,相关部门应制定与采取相关减排措施,同时进行合理的城市规划,构建出良好的可持续发展生态格局。而相关的减排措施与合理的城市规划理念,需要科学客观的理论指导以及精准明确的数据作为支撑,最终落实到不同格网尺度内部城市三维建筑空间结构的合理布局上。从城市建筑的三维空间结构视角以及各格网尺度出发,能够全方位、精细地了解城市三维空间结构对碳排放的影响,从而缓解碳排放导致的生态问题。

3.2 三维空间结构指标对碳排放影响的尺度分析

以往研究大多仅以市级、省级等为单位,从宏观角度对碳排放进行探讨。本研究进一步深入城市微观结构,从社区(约1—2km)、街道(约3—4km)、区级(约5km)的角度出发,分别在各格网尺度下探讨三维空间结构与碳排放的关系。基于不同格网尺度分析城市三维建筑空间指标对碳排放的影响,可以在空间结构上细化研究尺度格局,实现多源数据融合,使得研究成果更加精细与准确。此外,以格网尺度为出发点来探究典型区域内的空间格局特征以及生态变化已成为目前的研究热点,精细格网尺度下所得结论相对于较大尺度(市级、省级、国家级等)更加贴合实际发展情况,能够更真实反映城市微观结构的复杂性,可以更科学客观地揭示三维空间结构特征以及碳排放变化趋势,同时更精确准确地分析三维建筑空间指标与城市碳排放的关系,对于缓解碳排放生态环境问题具有重要指导意义。

在各三维空间结构指标中,建筑物密度、最高建筑高度、高层建筑物密度、容积率、建筑覆盖率以及天空开敞度皆通过了1—5km格网尺度下相关系数的显著性检验;建筑拥挤度通过了2—5km格网尺度下的显著性检验;平均建筑体积、建筑体积标准差、建筑高度标准差均只通过了一个格网尺度下的显著性检验;而建筑体型系数、平均建筑高度均未通过显著性检验。上述表明,部分三维空间结构指标与碳排放有显著相关性,因此在日后的城市规划中应重视对城市三维建筑空间格局的合理布局与调整,比如通过合理规划城市建筑覆盖率来优化城市建设用地布局、通过调整城市建筑密度来控制人类经济活动的场所与范围,从而达到减少碳排放的效果。

在1—5km格网尺度中,高层建筑物密度为1km与5km格网尺度的主导影响因子;建筑覆盖率为2km与4km格网尺度的主导影响因子;平均建筑体积为3km格网尺度下的主导影响因子;另外,高层建筑物密度、建筑覆盖率、容积率、建筑物密度这四个三维建筑指标在五个尺度中均有出现。由以上结果可发现,不同格网尺度下的三维空间结构指标影响程度具有差异性。因此在实践中,应将尺度效应纳入至城市规划的理念设计,综合考虑不同尺度下影响城市碳排放的重要因子,合理优化城市三维空间布局结构,以缓解碳排放的生态问题。

3.3 针对碳减排的多尺度城市空间结构优化建议

基于上述碳排放影响因素以及尺度效应的分析,本研究从国土空间规划优化的角度为广州市未来的低碳城市建设提出以下优化建议:

(1)合理优化城市二维土地利用结构。城市化进程中,绿地面积的不断缩小与不透水面的不断扩张,均会增加碳排放量^[63];同时,建筑三维空间的扩张很大程度上受到城市不透水面扩张的影响。因此,在考虑建筑的合理布局之前,要首先合理优化城市不透水面的分布,加大城市绿色空间的建设,以降低城市碳排放量;

(2)重视城市三维空间结构的规划布局。与二维的土地利用相比,三维空间结构对碳排放具有更显著的影响。三维建筑通过改变垂直方向上的空间结构,使其比二维空间更易影响空气流通和散热,从而导致制冷

产生的能源消耗和碳排放;其次三维建筑空间结构加剧了城市结构的复杂性与紧凑性,城市公共空间的减少与不足将使人们的室内活动增加,进一步加剧室内能源消耗和碳排放;同时,城市三维空间结构提高了城市土地的利用效率,城市垂直结构逐渐加剧交通拥堵,导致能源消耗和碳排放增加。综上,三维空间(高层)建筑物密度、建筑覆盖率以及容积率的增大均会显著增加碳排放。虽然有研究提出建设紧凑型城市可以降低碳排放^[64],然而对于广州等具有高密度的高层建筑特征的城市而言,对建筑三维空间结构进行合理的规划会比单纯追求紧凑发展更有利于实现碳减排;

(3) 针对性关注不同尺度下三维空间结构的影响差异。不同尺度下关注不同的三维空间结构指标,针对性地结合最主要的影响因素进行规划才能将城市碳排放量降至最小化。在社区尺度(约 1km)及区级尺度(约 5km)下,更应重点关注高层建筑物的聚集,对于高层建筑的审批与建设需要严格把控;而在社区尺度(约 2km)及街道尺度(约 4km)下,则需要关注所有建筑的分布情况,控制区域内建筑数量;在街道尺度(约 3km)时,需要比其他尺度更重点关注区域内建筑的体积情况,需要同时将占地面积及建筑高度纳入考虑进一步优化建筑布局,推动碳减排工作的顺利进行;

(4) 注重宏观尺度下的三维空间结构的影响。随着分析尺度的增大,三维空间结构与碳排放的相关系数逐渐增大,说明在宏观尺度下三维空间结构指标能更综合、更全面地衡量建筑的三维布局特征。因此,未来需要从宏观尺度下揭示城市内部碳排放的影响机制,并从县区等更宏观的尺度考虑其空间结构的合理性,实现全面、合理的建筑物三维空间规划布局。

4 结论

本研究以广州市为例,结合皮尔逊相关性分析和随机森林模型,对城市三维空间结构与碳排放关系的尺度效应开展研究,所得结果能够综合多尺度、全面揭示三维空间结构对碳排放的影响机制。本研究有望为国土空间规划提供科学合理的建议,从而辅助城市建筑三维空间布局的合理优化,最终实现碳减排。本研究所得结论如下:

(1) 综合相关性分析、随机森林回归模型结果显示,(高层)建筑物密度、建筑覆盖率、容积率与人口密度是碳排放的主要影响因素。上述因素主要通过直接增加人类活动或通过加剧热岛效应、提高能源消耗来增加碳排放量;

(2) 三维空间结构对碳排放的影响具有明显的尺度效应。虽然三维空间结构在所有尺度下均是主要的影响因素,但随机森林模型的结果显示,不同尺度下的影响因素重要性排序仍具有一定差异。因此,合理的分析尺度是揭示碳排放影响机制及未来城市建设的另一重要因素;

(3) 城市三维空间结构的合理规划是低碳城市建设的重要途径。广州作为现代紧凑型城市的代表,如果片面追求城市三维空间的紧凑布局将不利于低碳城市的发展。因此通过城市规划的手段,合理开发城市边缘地区,降低城市中心建筑物的紧凑布局,构建多中心的城市格局会更有利于降低碳排放水平,能更好地实现城市的低碳可持续发展。

然而本研究仍存在以下不足,有待后续研究进行探讨:(1) 本研究对碳排放的影响机制是从承载的人类活动与产生的热岛效应导致能源消耗增加两大角度进行分析,没有单独考虑紧凑的城市布局对居民交通的影响,未来研究可以纳入居民交通因素,进一步揭示城市碳排放的影响机制;(2) 本研究构建的三维建筑指标体系暂未考虑建筑的功能类型和经济产业,未来的研究可更精细地考虑建筑功能对碳排放产生的影响,从而为碳减排制定更针对性的政策。

参考文献(References):

- [1] 王长建,张虹鸥,汪菲,叶玉瑶,吴康敏,徐茜,杜志威. 城市能源消费碳排放特征及其机理分析——以广州市为例. 热带地理, 2018, 38(6): 759-770.
- [2] 余倩楠,贾文晓,潘晨,朱希扬,杨芳,刘敏,象伟宁. 长三角地区城市形态对区域碳排放影响的时空分异研究. 中国人口·资源与环境

- 境, 2015, 25(11): 44-51.
- [3] 王兴民, 吴静, 王铮, 贾晓婷, 白冰. 中国城市 CO₂ 排放核算及其特征分析. 城市与环境研究, 2020, 7(1): 67-80.
- [4] 陈珍启, 林雄斌, 李莉, 李贵才. 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. 生态经济, 2016, 32(10): 22-26.
- [5] 姜宛贝, 刘卫东, 刘志高, 韩梦瑶. 中国化石能源燃烧碳排放强度非均衡性及其演变的驱动力分析. 地理科学进展, 2020, 39(9): 1425-1435.
- [6] 秦波, 戚斌. 城市形态对家庭建筑碳排放的影响——以北京为例. 国际城市规划, 2013, 28(2): 42-46.
- [7] 秦波, 邵然. 城市形态对居民直接碳排放的影响——基于社区的案例研究. 城市规划, 2012, 36(6): 33-38.
- [8] 王少剑, 刘艳艳, 方创琳. 能源消费 CO₂ 排放研究综述. 地理科学进展, 2015, 34(2): 151-164.
- [9] 马明义, 郑君薇, 马涛. 多维视角下新型城市化对中国二氧化碳排放影响的时空变化特征. 环境科学学报, 2021, 41(6): 2474-2486.
- [10] 郑航, 叶阿忠. 城市群碳排放空间关联网络结构及其影响因素. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2413-2422.
- [11] Lv T G, Hu H, Xie H L, Zhang X M, Wang L, Shen X Q. An empirical relationship between urbanization and carbon emissions in an ecological civilization demonstration area of China based on the STIRPAT model. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25(3): 2465-2486.
- [12] Zhang C Q, Chen P Y. Industrialization, urbanization, and carbon emission efficiency of Yangtze River Economic Belt—empirical analysis based on stochastic frontier model. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(47): 66914-66929.
- [13] 王雅晴, 谭德明, 张佳田, 孟楠, 韩宝龙, 欧阳志云. 我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析. 生态学报, 2020, 40(21): 7897-7907.
- [14] 卢奕帆, 梁颖然, 卢思言, 肖钺, 何小钰, 林锦耀. 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. 地球信息科学学报, 2022, 24(6): 1176-1188.
- [15] 黄畅, 张攀, 王卫良, 黄中, 吕俊复, 刘吉臻, 岳光溪, 倪维斗. 燃煤发电产业升级支撑我国节能减排与碳中和国家战略. 热力发电, 2021, 50(4): 1-6.
- [16] Guo R, Zhu Q A, Cao X J, Ren Z Y, Li F T, Pradhan M, Jin F M, Zhou Q, Wu B. GIS-based carbon balance assessment and its application in Shanghai//AIP Conference Proceedings. Sanya Hainan, (China). AIP, 2010: 246-251.
- [17] 徐斌, 陈宇芳, 沈小波. 清洁能源发展、二氧化碳减排与区域经济增长. 经济研究, 2019, 54(7): 188-202.
- [18] Gyamfi B A, Adebayo T S, Ogbolime U. Towards a sustainable consumption approach: the effect of trade flow and clean energy on consumption-based carbon emissions in the Sub-Saharan African countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(36): 54122-54135.
- [19] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 时小翠, 蔡春苗. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [20] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423(6939): 528-531.
- [21] 舒心, 夏楚瑜, 李艳, 童菊儿, 史舟. 长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系. 生态学报, 2018, 38(17): 6302-6313.
- [22] 彭文甫, 周介铭, 徐新良, 罗怀良, 赵景峰, 杨存建. 基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局. 生态学报, 2016, 36(22): 7244-7259.
- [23] 宋丽美, 徐峰. 基于 CiteSpace 的城市碳排放研究进展与研究体系建构. 生态科学, 2021, 40(5): 183-194.
- [24] 秦耀辰, 荣培君, 杨群涛, 李旭, 宁晓菊. 城市化对碳排放影响研究进展. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1526-1534.
- [25] 王少剑, 莫惠斌, 方创琳. 珠江三角洲城市群碳排放动态模拟与碳达峰. 科学通报, 2022, 67(7): 670-684.
- [26] 王桂新, 武俊奎. 城市规模与空间结构对碳排放的影响. 城市发展研究, 2012, 19(3): 89-95, 112.
- [27] Shi K F, Xu T, Li Y Q, Chen Z Q, Gong W K, Wu J P, Yu B L. Effects of urban forms on CO₂ emissions in China from a multi-perspective analysis. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110300.
- [28] 龚咏喜, 李贵才, 林姚宇, 段仲渊. 土地利用对城市居民出行碳排放的影响研究. 城市发展研究, 2013, 20(9): 112-118.
- [29] 范秋芳, 王劲草, 王杰. 城市空间结构演化的减排效应: 内在机制与中国经验. 城市问题, 2021(12): 87-96.
- [30] 荣培君, 张丽君, 秦耀辰, 李阳, 郑智成. 建成环境对城市居民日常出行碳排放的影响——以开封市 248 个居住区为例. 地理研究, 2019, 38(6): 1464-1480.
- [31] Liu X J, Wang M S, Qiang W, Wu K, Wang X M. Urban form, shrinking cities, and residential carbon emissions: evidence from Chinese city-regions. *Applied Energy*, 2020, 261: 114409.
- [32] Mouzourides P, Kyprianou A, Neophytou M K A, Ching J, Choudhary R. Linking the urban-scale building energy demands with city breathability and urban form characteristics. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 49: 101460.
- [33] Shareef S. The impact of urban morphology and building's height diversity on energy consumption at urban scale. The case study of Dubai. *Building and Environment*, 2021, 194: 107675.
- [34] 于晓雨, 许刚, 刘樾, 肖锐. 长江三角洲地区城市建筑三维形态对地表热环境的影响. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5806-5816.

- [35] Yang C B, Zhu W H, Sun J B, Xu X L, Wang R H, Lu Y F, Zhang S W, Zhou W Q. Assessing the effects of 2D/3D urban morphology on the 3D urban thermal environment by using multi-source remote sensing data and UAV measurements: a case study of the snow-climate city of Changchun, China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128956.
- [36] 曾忠忠, 倡颖鑫. 基于三种空间尺度的城市风环境研究. *城市发展研究*, 2017, 24(4): 35-42.
- [37] Luan Q Z, Jiang W, Liu S, Guo H X. Impact of urban 3D morphology on particulate matter 2.5 (PM_{2.5}) concentrations: case study of Beijing, China. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(2): 294-308.
- [38] Lin J Y, He X Y, Lu S Y, Liu D Y, He P T. Investigating the influence of three-dimensional building configuration on urban pluvial flooding using random forest algorithm. *Environmental Research*, 2021, 196: 110438.
- [39] 何珮婷, 刘丹媛, 卢思言, 何小钰, 李桦, 杨柳, 林锦耀. 基于最大熵模型的深圳市内涝影响因素分析及内涝风险评估. *地理科学进展*, 2022, 41(10): 1868-1881.
- [40] Sun L L, Cui H J, Ge Q S. Driving factors and future prediction of carbon emissions in the 'Belt and Road initiative' countries. *Energies*, 2021, 14(17): 5455.
- [41] Liu W. Spatial heterogeneity of regional carbon emissions and its driving factors in China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 859(1): 012091.
- [42] 王星. 中国城镇化对碳排放的影响——基于省级面板数据的分析. *城市问题*, 2016(7): 23-29.
- [43] 丛建辉. 碳中和愿景下中国城市形态的碳排放影响效应研究——基于 289 个地级市的数据分析. *贵州社会科学*, 2021(9): 125-134.
- [44] 苏王新, 孙然好. 中国典型城市群城镇化碳排放驱动因子. *生态学报*, 2018, 38(6): 1975-1983.
- [45] Lin J Y, Lu S Y, He X Y, Wang F. Analyzing the impact of three-dimensional building structure on CO₂ emissions based on random forest regression. *Energy*, 2021, 236: 121502.
- [46] 侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 丁振民, 鲁亚楠, 郑雪, 李雅男. 格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 539-552.
- [47] 孙武, 欧阳睿康, 陈翔, 孙靓, 朱琳琳, 崔锋艳, 任燕妮. 1835—2017 年广州主城区建筑高度的结构及其演变. *地理科学*, 2021, 41(3): 454-462.
- [48] Lloyd C T, Chamberlain H, Kerr D, Yetman G, Pistolesi L, Stevens F R, Gaughan A E, Nieves J J, Hornby G, MacManus K, Sinha P, Bondarenko M, Sorichetta A, Tatem A J. Global spatio-temporally harmonised datasets for producing high-resolution gridded population distribution datasets. *Big Earth Data*, 2019, 3(2): 108-139.
- [49] Gong P, Liu H, Zhang M N, Li C C, Wang J, Huang H B, Clinton N, Ji L Y, Li W Y, Bai Y Q, Chen B, Xu B, Zhu Z L, Yuan C, Suen H P, Guo J, Xu N, Li W J, Zhao Y Y, Yang J, Yu C Q, Wang X, Fu H H, Yu L, Dronova I, Hui F M, Cheng X, Shi X L, Xiao F J, Liu Q F, Song L C. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370-373.
- [50] 王建军. 城市空间形态与城市低碳发展质量研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
- [51] Borck R. Will skyscrapers save the planet? Building height limits and urban greenhouse gas emissions. *Regional Science and Urban Economics*, 2016, 58: 13-25.
- [52] 柏春. 城市气候设计城市空间形态气候合理性实现的途径[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [53] Ewing R, Rong F. The impact of urban form on U.S. residential energy use. *Housing Policy Debate*, 2008, 19(1): 1-30.
- [54] 龙惟定, 白玮, 梁浩, 范蕊, 张改景. 低碳城市的城市形态和能源愿景. *建筑科学*, 2010, 26(2): 13-18, 23.
- [55] 刘科. 夏热冬冷地区高大空间公共建筑低碳设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [56] Fieller E C, Pearson E S. Tests for rank correlation coefficients. II. *Biometrika*, 1961, 48(1/2): 29-40.
- [57] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 谢邦昌. 随机森林方法研究综述. *统计与信息论坛*, 2011, 26(3): 32-38.
- [58] 杨磊, 李贵才, 林姚宇, 叶磊. 城市空间形态与碳排放关系研究进展与展望. *城市发展研究*, 2011, 18(2): 12-17, 81.
- [59] 杨磊, 李贵才, 林姚宇. 影响城市居民碳排放的空间形态要素. *城市发展研究*, 2012, 19(2): 26-31.
- [60] 周艺南, 杨沛儒. 基于多目标设计决策的城市形态与能耗相关性. *同济大学学报: 自然科学版*, 2021, 49(7): 1013-1022.
- [61] 李桢, 胡聃, 赵艳华. 建筑三维空间形态对地气能量动态、空气温度和相对湿度的影响. *生态学报*, 2022, 42(6): 2175-2185.
- [62] 王翠平, 王豪伟, 郑渊茂. 城市建筑群三维空间布局评价与优化——以厦门岛滨海地带为例. *生态学报*, 2020, 40(22): 8119-8129.
- [63] 范小利, 罗涛, 张雪薇, 吴良龙. 县域城镇空间形态与居住建筑能耗关联性的连续尺度研究——以浙江长兴、福建连江为例. *生态学报*, 2022, 42(8): 3155-3166.
- [64] Zou Z B, Ergan S, Fisher-Gewirtzman D, Curtis C. Quantifying the impact of urban form on human experience: experiment using virtual environments and electroencephalogram. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2021, 35(3): 04021004.