

张超,张钰雪,李清嘉,等.镇街级治理单元碳排放差异化分布特征及影响因素研究:以广州市为例[J].华中农业大学学报,2024,43(6):75-86.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.06.008

镇街级治理单元碳排放差异化分布特征 及影响因素研究:以广州市为例

张超^{1,2},张钰雪³,李清嘉^{1,2},王睿³,刘晓宇^{1,2}

1. 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司北京分院,北京 100032;

2. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室,广州 510060; 3. 天津大学建筑学院,天津 300000

摘要 为探究城市镇街级治理单元的碳排放差异化分布特征及影响因素,以广州市为例,采用上下结合的碳排放空间计量方法,核算2020年175个镇街单元的碳排放总量及强度,分析不同类型镇街单元的碳排放空间分布异质性特征;通过IPAT模型和Spearman相关性分析筛选影响要素并构建岭回归模型,得到镇街级治理单元的差异化治理要素及减碳策略。结果显示:广州市街道单元碳排放总量远高于乡镇单元总量,但乡镇单元的人均碳排放量远高于城区街道单元,其中工业型乡镇的人均碳排放量为14.37 t,约是商业办公型城区街道人均碳排放量(2.89 t)的5倍;从空间分布特征上来看,碳排放总量及强度呈现出“内低-中高-外低”环状格局,但碳排放总量高值区聚集于近郊,人均碳排放量高值区聚集于远郊;结合不同类型镇街级治理单元的碳排放影响因素分析,人口密度、城镇化率、建设用地结构等城市建设指标均表现出了与碳排放的强相关性,但不同类型的镇街单元呈现显著差异化影响。基于此,针对不同类型街道与乡镇提出了“控总量”和“控强度”的差异化减碳路径。

关键词 双碳;镇街尺度碳排放;碳排放测算;低碳;碳减排

中图分类号 X171 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)06-0075-12

为实现我国的“双碳”战略目标,各级政府已展开因地制宜的碳排放治理行动^[1]。镇街是城市构成的基本单元^[2],其土地利用及经济活动^[3-5]决定了能源的消耗结构,并使碳排放产生空间差异^[6]。这种差异使得在镇街层面展开碳排放治理,能够根据区域特性制定更具针对性的减排措施。因此,在镇街层面制定差异化的减排策略尤为重要。

早期的碳排放治理多集中在省域^[7]、市域^[8]及县域^[9]等尺度。这些大尺度的研究往往依赖宏观数据,难以反映镇街级的碳排放特征。同时,由于数据获取困难及碳排放计量方法的局限性,早期的研究往往忽略了较小尺度的差异化治理需求。随着“双碳”战略的推进,低碳治理逐渐从大尺度向镇街等更小尺度下沉,镇街尺度的差异化治理需求被重视,但相关研究仍相对有限。已有潘浩之等^[10]、丰显康等^[11]的研究涉及镇街尺度的碳排放,但对碳排放的空间分布及具体影响机制的探讨仍有待进一步深入。

现有的碳排放计量方法主要分“自上而下”与“自下而上”2类^[12-13]。“自上而下”方法^[14-16]基于宏观能源消耗数据,适用于大尺度区域分析,但精度较低;“自下而上”方法^[17]侧重细节,能提升中小尺度区域的计算精度,但数据获取难度较大。单一方法很难全面应对镇街层级的需求,因此,结合两者优势的“上下结合”方法被认为是提升镇街碳排放测算精度的有效手段^[18]。然而,目前该方法大多仍基于降维数据^[10],导致在精确度和类型化分析上有所欠缺。

本研究基于广东省城市感知与监测预警企业重点实验室获取的高精度土地利用数据,采用“上下结合”的碳排放测算方法,通过ArcGIS可视化平台分析广州市镇街的碳排放分布及其影响因素,提升碳排放计量的精度,并提出差异化的减排策略,以期由政府制定不同类型镇街的低碳管理目标和减碳政策提供参考。

收稿日期:2024-04-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3807700);广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金项目(2020B121202019);广州市城市规划勘测设计研究院有限公司科技基金项目(RDI2220202059)

张超, E-mail: zhangchao216@qq.com

通信作者: 张钰雪, E-mail: zhangyuxue@tju.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究范围

1)样本分类。本研究选取 2020 年广州市 175 个镇街单元作为研究样本,并采用 K-Means 聚类算法进行分类。其步骤为:①根据行政区划将镇街单元分为街道类、乡镇类;②选取能够表征镇街特性的分类指标进行聚类分析,其中,街道类指标为居住用地

占比、工业用地占比及商业用地占比,乡镇类为居住用地占比、工业用地占比及耕地占比;③依据 Elbow 模型确定初始 K 值^[19],当 K=3 时,街道类、乡镇类 2 组样本的 K-质心均处于平衡状态;④通过 SPSSAU 平台运行 K-Means 聚类算法,并得出相应的分类结果及依据。根据以上分类步骤,最终将样本划分类 6 个类型(表 1),并通过 ArcGIS10.8.1 平台进行可视化处理(图 1)。

表 1 广州市镇街单元分类表
Table 1 Classification of town and street units in Guangzhou City

镇街类型 Types of town and street	街镇名称 Name of the town or street	数量 Amount	最终聚类中心 Final cluster centroid			
			居住用地占比/% Residential land proportion	工业用地占比/% Industrial land proportion	商业用地占比/% Commercial land proportion	耕地占比/% Arable land proportion
居住型街道 Residential streets	三元里街、永平街、石门街等	97	51.613 0	0.989 7	8.985 3	—
商业办公型街道 Commercial and office streets	小谷围街、大石街、石壁街等	16	26.743 8	4.806 5	15.761 5	—
工业型街道 Industrial streets	同德街、市井街、桥南街等	31	11.750 9	8.265 1	7.396 3	—
城乡融合型乡镇 Urban-rural integrated towns	石楼镇、人和镇、大岗镇等	10	4.933 0	2.519 3	—	6.639 9
农业型乡镇 Agricultural towns	梯面镇、万顷沙镇、温泉镇等	12	9.907 9	6.500 9	—	21.626 8
工业型乡镇 Industrial towns	狮岭镇、榄核镇、太平镇等	10	20.366 9	12.465 8	—	6.407 3

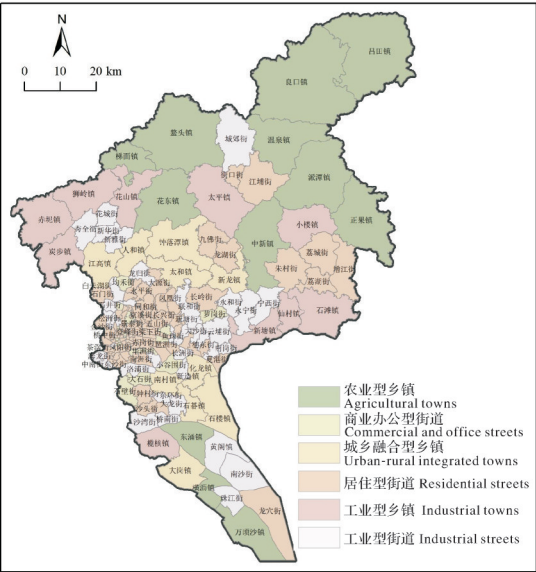


图 1 广州市镇街单元分类
Fig.1 Classification of town and street units in Guangzhou City

2)核算范围。本研究核算范围涵盖生活、生产和交通三大领域。生活领域碳排放源自居民日常活动,选取生活用电量、用水量和生活垃圾量作为核算指标^[20-21]。生产领域碳排放主要来自工业生产的能

源消耗,按一类(100101)、二类(100102)和三类(100103)工业用地分别核算^[22-23]。交通领域碳排放集中于机动车,鉴于其占城市交通碳排放的 80% 以上^[24-25],本研究仅核算城市机动车碳排放。铁路、航空等区域级基础设施的碳排放不在本研究范围内。

1.2 数据来源

本研究主要采用广州市土地利用和社会经济数据,详见表 2。数据已更新至可获取和实验需求的最佳年份,数据处理基于 ArcGIS10.8.1 平台进行。

1.3 研究方法

1)基于不同人口活动量、产业用地细分及各级道路交通活动量,结合各部门的能耗统计,核算广州市各镇街单元的生活、生产及交通碳排放。进一步,通过核算结果分析碳排放总量及强度分布特征,识别关键减排区域。在此基础上,利用 IPAT 模型,结合空间规划探索性因素,筛选出碳排放的主要影响因素。通过 Spearman 相关性检验和岭回归模型,识别出影响碳排放的关键治理要素,归纳分析结果,提出广州市镇街单元的碳减排策略。

2)碳排放核算方法。碳排放核算采用“自上而下”和“自下而上”相结合的方法。生活领域通过“自

表 2 研究所用的数据说明
Table 2 Data description of the study

项目 Item	年份 Year	来源 Source	说明 Description
行政区划边界数据 Administrative division boundary data	2021	资源环境科学与数据平台 (resdc.cn)	模型基础输入数据(矢量数据)
广州市土地利用数据 Land use data of Guangzhou	2019	广东省城市感知与监测预警企业重点实验室	二类类三调数据(表格)
用电量 Electricity consumption			
用水量 Water consumption	2021	广州市统计年鉴(2021)	市辖区的用电量、用水量以及垃圾处理量,用以生活碳排放计算(文本)
垃圾处理量 Waste treatment volume			
工业用地面积(一、二、三类) Industrial land area (Categories I II, and III)	2019	广东省城市感知与监测预警企业重点实验室	三类类三调数据,用以生产碳排放计算(表格)
拥堵数据 Traffic congestion data	2023	高德开放平台 高德地图 API (amap.com)	快速路、主干路、次干路及支路的时刻数据,用以交通碳排放计算(表格)获取时间:2023-06-27,08:00,19:00,2023-07-02,10:00
常住人口数量 Permanent population count			街镇级常住人口数量(文本)
国内生产总值 Gross domestic product	2021	广州市各行政区的《统计年鉴(2021)》	市辖区级 GDP(文本)
产业统计 Industry statistics			市辖区级产业统计(文本)
电力碳排放系数 Electricity carbon emission coefficient	2011	《省级温室气体清单编制指南》 P020210601177040314696.pdf (edcmep.org.cn)	
生活垃圾处理碳排放系数 Municipal waste treatment carbon emission coefficient	2020	文献[26]	
居民用水碳排放系数 Residential water consumption carbon emission coefficient	2020	文献[26]	碳排放系数确定(文本)
工业用地碳排放系数 Industrial land carbon emission coefficient	2019	文献[27]	
拥堵碳排放系数 Traffic congestion carbon emission coefficient	2022	文献[28]	

上而下”方式,分解广州市各镇街的本地能源活动系数^[28],再根据各街镇人口规模,采用“自下而上”方法核算居民生活各部门的能耗碳排放量。生产领域结合用地类型,对不同工业用地进行“自下而上”核算。由于生产领域地区差异较大,基于广州市本地能源统计数据,采用“自上而下”方式进行校正,通过等比例分配法^[29-30]对核算结果进行总量再分配。交通领域由于缺乏其他部门及私人车辆的详细能源使用数据,主要依赖于营运车辆的能源消耗统计;为弥补该方法的不足,利用交通实时大数据并引入拥堵系数,采用“自下而上”的拥堵延时指数(congestion delay index)进行碳排放的补充计算。具体计算方法如下:

①镇街单元总碳排放核算。镇街单元总碳排放量由镇街单元内的生活碳排放、生产碳排放及交通碳排放组成。镇街单元内总碳排放公式为:

$$C_{total} = C_{life} + C_{production} + C_{traffic}$$
 (1)

式(1)中 C_{total} 表示镇街的总碳排放量, C_{life} 、 $C_{production}$ 和 $C_{traffic}$ 分别表示镇街的生活碳排放总

量、生产碳排放总量和道路交通碳排放总量,万 t。

②生活碳排放核算。生活碳排放核算内容是用电量、用水量及生活垃圾处理量。从统计年鉴中获取各区用电量、用水量及生活垃圾处理总量,再根据不同行政区常住人口数量分配至镇街单元。

第一步,计算各区的人均用电量。由于不同区有显著的用电差异,该步计算能够突出地区差异性。人均用电量分配公式为:

$$P_{mean} = \frac{P_{total}}{P_{QCZ}}$$
 (2)

式(2)中, P_{mean} 为区级行政单元人均生活消费量, P_{total} 为区级行政单元生活总用电量,包括用水量、用电量、垃圾处理量, P_{QCZ} 为区级行政单元常住人口数量。

第二步,计算镇街用电量,公式为:

$$P_{Ztotal} = P_{mean} \times P_{ZJCZ}$$
 (3)

式(3)中, P_{Ztotal} 为镇街单元生活消费量, P_{ZJCZ} 为镇街常住人口数量。镇街单元的生活消费量采用公

式(2)进行分配,再通过公式(3)进行“自下而上”计算。

第三步,核算生活碳排放,公式为:

$$C_{\text{life}} = \sum_{i=1}^3 (P_{\text{Ztotal}} \times I_{\text{CE},i}) \quad (4)$$

式(4)中, $I_{\text{CE},i}$ 为生活活动碳排放强度。生活活动碳排放强度如下:电力碳排放强度为0.714 kg/(kW·h);生活垃圾处理为2.06 kg/kg;居民用水碳排放强度为0.3 kg/t。

3)生产碳排放核算。生产碳排放主要受土地利用影响^[31],核算内容为镇街单元内生产碳排放。由于年鉴中生产活动能源消费情况与工业用地难以直接匹配。因此,首先折算一类、二类和三类工业用地的碳排放比例关系,再通过该比例将年鉴中的生产活动能源消耗碳排放量分解至各街道。具体计算步骤如下:

首先,估算工业用地(包括一类、二类、三类工业用地)的碳排放情况:

$$C_{\text{IGS}} = \sum_{k=1}^3 (A_{\text{IL}} \times C_{\text{Ik}}) \quad (5)$$

式(5)中, C_{IGS} 表示镇街生产活动碳排放,kg; A_{IL} 为镇街单元内工业用地面积, m^2 ; C_{Ik} 为 k 类工业用地的单位建设用地碳排(CO_2)放量,kg/ m^2 。工业用地碳排放强度分别为:一类工业用地为25.5 kg/ m^2 ;二类工业用地为433.3 kg/ m^2 ;三类工业用地为569 kg/ m^2 。

其次,使用估算工业用地碳排放与年鉴数据的比值计算生产碳排放:

$$C_{\text{EIGS}} = \frac{C_{\text{EINI}}}{C_{\text{IGS}}} \times A_{\text{IL}} \quad (6)$$

式(6)中, C_{EINI} 为年鉴中的生产能源消费量。

4)交通碳排放核算。交通碳排放通过分析交通拥堵的时空特征与 I_{CD} 特征,构建基于速度的 CO_2 排放因子,再模拟街镇不同交通运行环境来计算。该核算方法在文献^[28]中已被证实其有效性。交通拥堵碳排放计算公式为:

$$T_{\text{CE}} = L_{\text{congestion}} \times t_{\text{congestion}} \times R_{\text{congestion}} \quad (7)$$

式(7)中, $L_{\text{congestion}}$ 为拥堵长度,km; $t_{\text{congestion}}$ 为拥堵时长,h; $R_{\text{congestion}}$ 为不同 I_{CD} 下的碳排放系数。碳排放系数根据 I_{CD} 分级与1 km路段单位时长排放总量进行换算,且交通情况分为畅通、缓行、拥堵及严重拥堵4类状态; $R_{\text{congestion}} < 1.2$ 表示畅通,

$1.5 < R_{\text{congestion}} < 1.8$ 表示缓行, $1.8 < R_{\text{congestion}} < 2.2$ 表示拥堵, $R_{\text{congestion}} > 2.2$ 表示严重拥堵。此外,每个交通状态对应的1 km路段的单位时长排放总量分别为:畅通时为0.353/[t/(h·km)],缓行时为1.576/[t/(h·km)],拥堵时为2.004/[t/(h·km)],而严重拥堵时的排放总量达到3.927/[t/(h·km)]。

1.4 影响因素筛选方法

1)IPAT模型。影响因素的筛选范围基于IPAT模型,即环境影响(I)与人口(P)、富裕度(A)、技术(T)三大因素密切相关。鉴于城市空间及用地结构在镇街级碳排放中的重要性,本研究对该部分指标进行了细化并纳入IPAT模型。此外,考虑到研究聚焦于镇街级碳排放的治理要素,能源强度被归入经济要素大类,以确保理论一致性,而不作为独立分类。最终,本研究将影响因素整合为公式化的理论模型:

$$C_{\text{st}} = F(P_{\text{factor}}, E_{\text{factor}}, L_{\text{factor}}) \quad (8)$$

式中, C_{st} 为镇街级碳排放总量, P_{factor} 为人口要素, E_{factor} 为经济要素, L_{factor} 为用地要素。为深入分析镇街级治理要素,本研究假设人口、经济和用地因素均对镇街级碳排放产生影响,同时,这些要素对碳排放的作用方向 and 影响程度具有差异性。

2)影响因素指标筛选。本研究结合现有文献中的影响机制和关键指标,并根据镇街单元的空间异质性特点筛选出相关影响因素。人口要素方面,碳排放主要由人口规模增长和城镇化水平提升驱动。人口增长带动能源需求上升,加速城镇化进程。基于此机制,人口要素选取常住人口(P_{CZ})、人口密度(D_{RK})表征人口规模,城镇化率(R_{CZ})表征城镇化水平。在经济要素方面,随着经济增长,人均收入提升和人口规模扩大,消费模式和生活方式的变化导致碳排放量增加。经济要素采用人均GDP(P_{GDP})、人均能耗(E_{RJ})来表征经济和能源水平,产业结构(S_{CY})表征经济城镇化水平。用地要素与碳排放也密切相关,主要表现在用地紧凑度、生态水平、工业化水平上。用地紧凑度通过人均建设用地面积(A_{RJ})和路网密度(D_{LW})来表征;生态水平通过林地占比(R_{FL})来表征;工业化水平则采用工业用地占比(R_{IL})来表征;土地城镇化水平通过建设用地占比(R_{BL})来表征(表3)。这些用地类指标在既有研究基础上进一步细化,旨在探讨广州市空间布局和用地结构对碳排放的影响。

表 3 镇街级影响因素体系

Table 3 Town and street levels impact factors

影响因素 Impact factors		指标 Indicator	定义 Definition	参考文献 Reference
人口要素 Population factor	人口规模	常住人口 P_{CZ}	镇街常住人口	[32-33]
		人口密度 D_{RK}	镇街常住人口/镇街面积	[34-36]
	人口城镇化水平	城镇化率 R_{CZ}	城镇区域户籍人口/总人口	[33, 37-38]
经济要素 Economic factors	经济强度	人均GDP P_{GDP}	镇街GDP总量/镇街常住人口	[14, 32, 39]
		人均能耗 E_{RJ}	人均用电量	[20, 40]
	经济城镇化水平	产业结构 S_{CY}	行政区划第二产业产值占比	[41-44]
用地要素 Land use factors	用地紧凑度	人均建设用地面积 A_{RJ}	城镇(城乡)建设用地面积 / 城镇(城乡)常住人口	新增
		路网密度 D_{LW}	镇街路网长度/镇街区域面积	[41, 45]
	生态水平	林地占比 R_{FL}	镇街林地面积/镇街区域面积	新增
	工业化水平	工业用地占比 R_{IL}	镇街工业用地面积/镇街区域面积	新增
	土地城镇化水平	建设用地占比 R_{BL}	城镇建设用地面积/镇街总建设用地面积	新增

3)Spearman 相关性检验。采用 Spearman 相关性检验方法来探究广州市镇街级碳排放与城市治理要素之间的相关性。该方法能够有效处理非正态分布的数据,且无需变量间呈现线性关系,是评估非参数数据相关性的理想选择^[46]。数据处理采用 SPSSAU 平台进行统计分析。

4)岭回归模型。岭回归通过在损失函数中引入参数平方和的正则化项,有效处理多重共线性问题,是线性回归的改进方法。其核心在于通过引入正则化参数,将参数估计的平方和作为正则化项纳入模型^[19]。本研究采用岭回归模型来探究广州市镇街级碳排放的关键治理因素。通过调整模型复杂度,岭回归能够有效避免过度拟合,提升模型的预测稳定性与准确性。

2 结果与分析

2.1 碳排放核算

1)碳排放总量及强度差异。碳排放总量特征(图2)显示,街道单元(居住型、商业办公型、工业型)的碳排放总量显著高于乡镇单元(城乡融合型、农业型、工业型),这与街道数量远多于乡镇数量密切相关。碳排放结构特征(图3)显示,城镇化程度越高的镇街单元,其生活碳排放占比越高。商业办公型街道的生活碳排放高于生产碳排放,居住型街道的生活碳排放略低于生产碳排放,而其他街道和乡镇的生产碳排放占比则处于绝对优势。商业办公型街道多位于城市中心,具有大量商住混合区及高密度住宅区,且产业结构以高端服务业为主,较少涉及制造类生产,导致生活碳排放高于生产碳排放。相反,乡

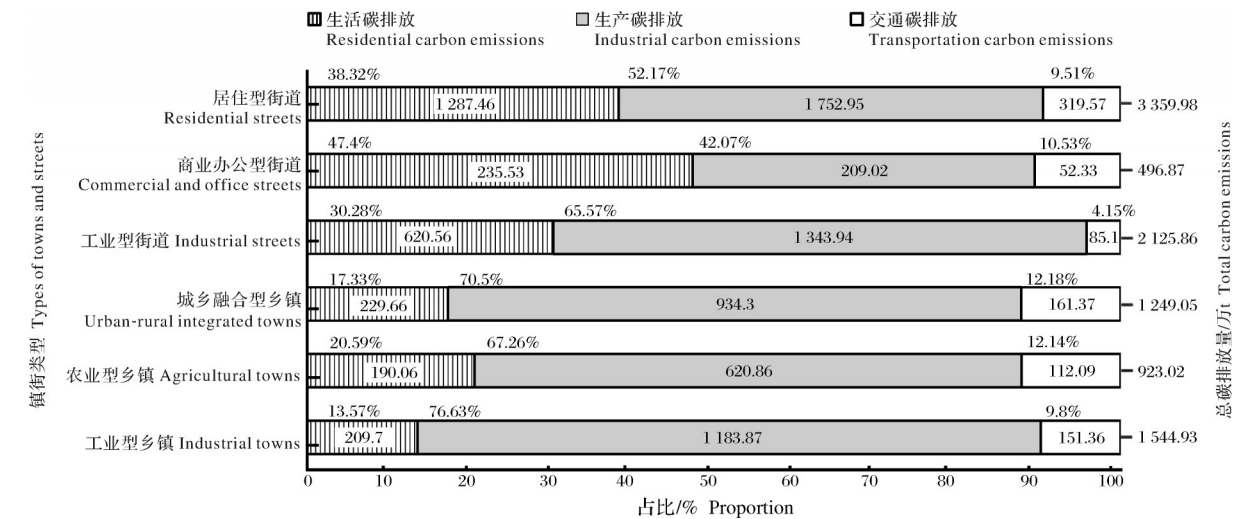


图 2 碳排放总量

Fig.2 Total carbon emissions

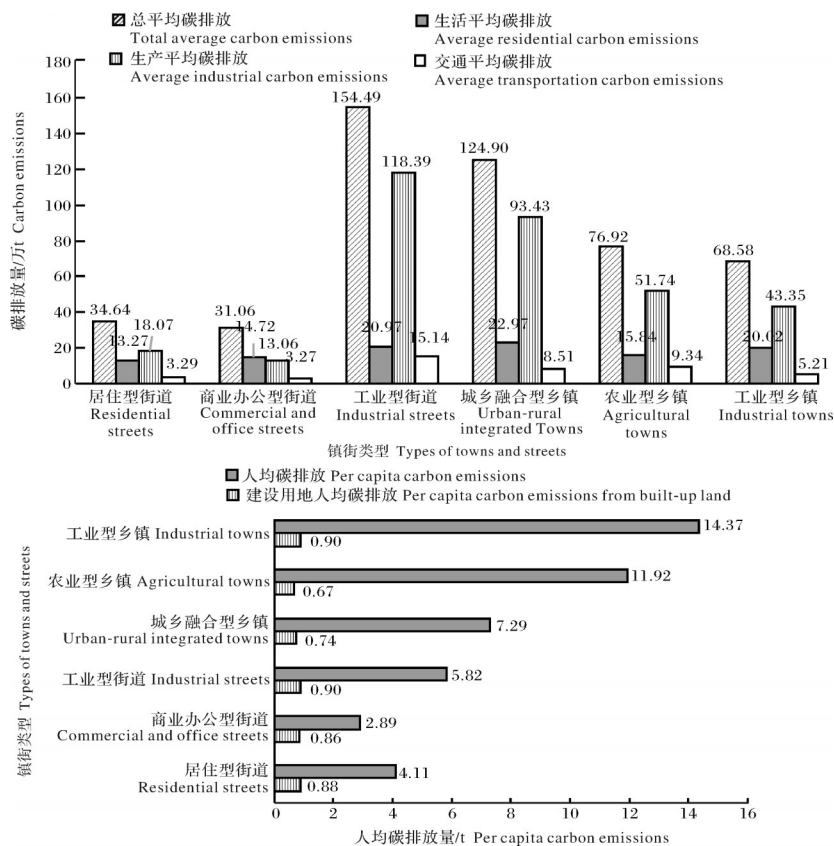


图3 广州市各类镇街碳排放情况

Fig.3 Carbon emission conditions by town and street types in Guangzhou City

镇区域人口较少,生活能源消耗总量较低,但制造业主要集中在近郊和远郊地区,因此生产碳排放高于生活碳排放。交通碳排在6类镇街空间中均占比较低,但乡镇单元普遍高于街道单元,这与乡镇地区高等级道路货运车辆较多密切相关。

镇街单元的碳排放量结构显示,工业型街道、城乡融合型乡镇、农业型乡镇以及工业型乡镇平均碳排放量远高于居住型街道和商业办公型街道。从人均碳排放角度,这4类镇街的平均值仍然高于其他2类街道,且在人均碳排放排序中,工业型乡镇和农业型乡镇的人均碳排放远高于城乡融合型乡镇和工业型街道。特别是工业型乡镇的人均碳排放强度为14.37 t,约是商业办公型街道(2.89 t)的5倍,进一步验证了高密度、高城镇化城区在降低碳排放强度方面的优势。整体上单位建设用地碳排放量较为均衡,碳排放强度不存在显著差异,仅农业型乡镇和城乡融合型乡镇碳排放强度相对较低。综上,虽然城区街道单元碳排放总量占比大,但结合碳排放强度及比例分析,工业型乡镇、城乡融合型乡镇与工业型街道碳减排需求更为迫切,其碳排放强度和总量均处于较高水平。

2)碳排放总量空间分布差异。广州市2020年的碳排放空间分布结果显示出总量和强度上的明显空间分异特征(图4)。从总量空间分布差异(图4A)上看,广州市呈现出“内低-中高-外低”的分布格局,高碳排放和低碳排放区域均表现出显著的聚集现象。低碳排放区域主要集中在中心城区的居住型街道和商业办公型街道,而近郊城乡结合型乡镇、工业型乡镇、工业型街道等则呈现环状聚集的高碳排放特征。北部远郊的农业型乡镇则呈现聚集性低碳排放特征。从人均碳排放空间分布差异(图4D)上看,广州市碳排放强度与总量分布模式相似,亦呈现出“内低-中高-外低”格局。然而,近郊高碳排放强度呈现出向外偏移的趋势,北部、西北部、南部地区的工业乡镇和农业乡镇成为高碳排放强度的聚集区,这些乡镇多位于中远郊的工业生产区域,导致其碳排放强度明显高于其他区域。

直接比较碳排放总量能够识别碳排放的主要集中区域,虽然能够针对这些区域制定重点减排策略,但是由于镇街面积和人口密度的差异,仅比较碳排放总量会导致偏差。因此,需要将碳排放强度纳入分析中。碳排放强度基于人均碳排放量,能够更准

确地反映碳排放在不同人口密度和经济活动水平下的分布情况,消除由于人口规模和面积差异带来的影响,提供更加公平和科学的基础数据。因此,本研究进一步分析了街道和乡镇2类镇街单元内部的碳排放总量和强度的空间分布差异。在城区街道组(图4B、E)中,碳排放强度表现出比总量更显著的内外差异性,即城区碳排放强度远低于近远郊街道单元。城区高密度的人口聚集和产业高端化有助于降低碳排放强度,而中远郊的街道单元则面临更高的

减排需求。在乡镇型单元组(图4C、F)中,城乡融合型乡镇呈现出高总量、低强度的碳排放特征,其交通碳排放占比在6种类型中最高。这主要源于大量居民居住或工作于近郊地区,职住分离导致较高的交通碳排放,且产业和生活行为的聚集性较强。由于城郊地区产业发展相对外围地区更为先进,低端产业逐步外迁,其人均能源消耗强度低于外围区域。而工业型乡镇则在碳排放总量和强度方面均呈现高值,显示出在碳减排方面的显著压力。

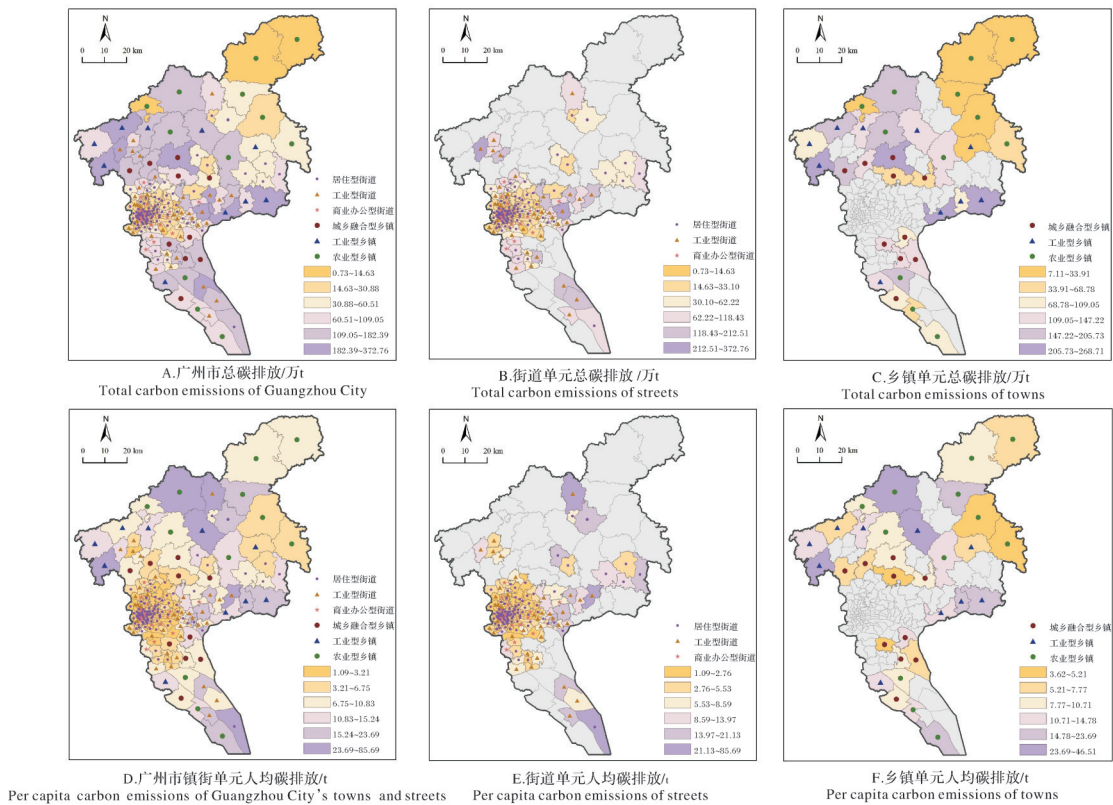


图4 广州市各镇街碳排放总量及强度空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of total carbon emissions and intensity by town and street in Guangzhou City

2.2 影响因素分析

1) Spearman 相关性检验。基于 Spearman 相关性分析结果,11个人口、经济、土地影响因素指标均通过相关性检验($P < 0.05$)。但不同指标对碳排放影响方向和程度呈显著差异,结果显示:相关性最强的3项指标为人均GDP(0.801) > 人均建设用地(0.685) > 人口密度(-0.666)。在镇街层面,人口密度、城镇化率、建设用地结构等城市建设指标均表现出了与碳排放的强相关性,其相关系数和显著性与城市级及区县级影响结果相比,具有更强的显著性。从影响关系方向分析,常住人口(0.500)、人均GDP(0.801)、人均能耗(0.452)、产业结构(0.504)、人均建

设用地面积(0.685)、工业用地占比(0.642)与碳排放呈现正相关,人口密度(-0.666)、城镇化率(-0.408)、路网密度(-0.623)、林地占比(-0.602)、建设用占地占比(-0.561)与碳排放呈现明显的负相关。

2) 广州市整体样本岭回归结果。经岭回归分析, k 值取0.200时, $R^2 = 0.961$,方差膨胀因子VIF值均小于10,且模型通过 F 检验($P < 0.05$),证明模型有效。由此得到岭回归模型:

$$\ln C_{GZ} = -6.727 + 0.828 \ln P_{CZ} - 0.075 \ln R_{CZ} + 0.506 \ln P_{GDP} - 0.057 \ln D_{LW} - 0.053 \ln D_{RK} + 0.036 \ln S_{CY} + 0.167 \ln A_{RL} + 0.008 \ln R_{BL} - 0.018 \ln R_{FL} + 0.203 \ln E_{RJ} + 0.043 \ln R_{IL}$$

岭回归模型中 $\ln C_{GZ}$ 表示广州市区碳排放量,各

指标中常住人口(P_{CZ})、人均GDP(P_{GDP})、产业结构(S_{CY})、人均建设用地面积(A_{RJ})、人均能耗(E_{RJ})、工业用地占比(R_{IL})每增加1%,则广州市碳排放相应增加0.828%、0.506%、0.036%、0.167%、0.203%、0.043%,城镇化率(R_{CZ})、路网密度(D_{LW})、人口密度(D_{RK})、林地占比(R_{FL})每增加1%,广州市碳排放相应减少0.075%、0.057%、0.053%、0.018%。因此,人口总量、经济强度以及能源总量在影响程度上仍表现出较强的碳排放调控作用,用地类指标则起到了辅助调整功能。

3)广州市6种类型样本岭回归结果。通过对6种类型的镇街建立岭回归模型,进一步揭示了人口、经济和用地要素中各指标对广州市碳排放的量化影响及差异(表4)。除城镇人口数量和人均GDP这2项指标在6类镇街回归模型中均表现出较强的影响外,工业占比指标在除商业办公型街道外的各类镇街中也显示出一定的影响作用,其他指标在不同类型的镇街回归模型中表现出显著的差异性。其中,人口密度、人均能耗、人均建设用地、建设用地比例等在不同镇街类型样本中影响差异最显著。

表4 镇街级治理要素分析
Table 4 Analysis of governance factors at town and street levels

因素 Factor	自变量 Independent variable	居住型街道 Residential street	商业办公型街道 Commercial and office street	工业型街道 Industrial street	城乡融合型乡镇 Urban-rural integrated town	农业型乡镇 Agricultural town	工业型乡镇 Industrial town
	常量 Constant	-6.04(0.000**)	-1.829(0.000**)	-5.54(0.000**)	-2.285(0.008*)	0.071(0.002**)	0.316(0.006*)
人口因素 Population factor	P_{CZ}	0.783(0.000**)	0.569(0.002**)	0.761(0.000**)	0.51(0.000**)	0.478(0.000**)	0.345(0.002**)
	D_{RK}	-0.061(0.000**)		-0.107(0.000**)		0.067(0.003**)	
	R_{CZ}	-0.09(0.000**)					
经济因素 Economic factors	P_{GDP}	0.463(0.000**)	0.552(0.014*)	0.331(0.000**)	0.387(0.012*)	0.535(0.000**)	0.294(0.002**)
	E_{RJ}	0.281(0.000**)		0.196(0.012*)			
	S_{CY}	0.031(0.444*)					
	A_{RJ}	0.149(0.000**)		0.163(0.003**)			0.191(0.025*)
用地因素 Land use factors	D_{LW}	-0.06(0.049*)					
	R_{FL}						
	R_{IL}	0.023(0.017*)		0.287(0.000**)	0.17(0.008**)	0.119(0.000**)	0.155(0.000**)
	R_{BL}					0.148(0.020*)	0.184(0.002**)

注 Note: * $P<0.05$, ** $P<0.01$.

综合 Spearman 相关性分析和岭回归结果,广州市镇街单元的碳排放构成了一个复杂的系统,受到经济增长、人口增长和用地模式等多重因素的共同影响。其中,城镇人口数量和经济强度是普遍的影响因素,而不同类型镇街的碳排放影响机制具有显著差异,具体表现为:①居住型街道的碳排放影响机制最为复杂,人口密度和城镇化率的增加、人均建设用地的减少、路网密度的增加以及工业用地比例的减少均对控碳减排具有正向作用。②商业办公型街道除人口和经济因素外,其他指标对排放影响均不显著,表明该类街道的碳排放更依赖于服务业和交通等因素。③工业型街道受城镇人口数量和人口密度影响最为显著,劳动力密集型产业发展会加剧广州市碳排放增长。人均能耗、建设用地增加、工业用地占比的增加以及人口密度降低均会进一步加剧碳排放产生。表明提高土地利用效率是减排的关键。

④城乡融合型乡镇的碳排放受工业用地比例的增加影响,产业用地的大规模增长显著增加近郊区域的碳排放。⑤农业型乡镇则对人口密度、工业用地比例和建设用地比例较为敏感,农村地区人口聚集和低端产业发展加剧碳排放增长,且低效的建设用地扩张值得关注。⑥工业型乡镇的碳排放对人均建设用地、工业用地比例和建设用地比例敏感,这类区域的土地利用和产业发展模式对碳排放有显著影响。

3 讨 论

本研究结果表明,6类镇街单元均受到经济活动和人口增长的影响,这与 IPAT 理论模型的结论一致,进一步验证了 IPAT 理论在碳排放研究中的适用性。然而,各类镇街单元也展现出显著的差异化治理要素,尤其在用地要素上差异更为明显。具体而言,居住型街道的碳排放受人口密度增加、城镇化率

提升、人均建设用地减少及路网密度的增加影响;商业办公型街道的碳排放主要受城镇人口数量与人均GDP影响,其他指标均不显著,表明经济活动为该街道的高碳排因素;工业型街道的碳排放与劳动密集型产业的发展密切相关,人均能耗增加、人均建设用地增加、工业用地占比增加和人口密度降低均加剧碳排放;城乡融合型乡镇和农业型乡镇的碳排放主要受工业用地比例和人口密度影响,工业用地比例增加会显著提升碳排放,农村地区人口聚集和低端产业发展也会加剧碳排放。据此本研究提出不同类型街镇的关键减碳治理策略。

3.1 广州市街道单元减排策略

广州市街道单元整体碳排放总量较高但强度较低,因此从“控总量”角度推进减排工作。在3个街道类型中,工业型街道碳排放总量和强度最高,最具减碳潜力;而居住型街道的影响因素复杂,土地调控作用显著。因此,需要针对这2类街道分别制定具体的减碳策略。

1)广州市居住型街道在空间优化方面,应推行紧凑城市理念,重点关注增强镇街单元的建设密度、减少土地蔓延及增强城市活力3个建设维度。在增强建设密度方面,通过城市更新,提升土地利用效率,降低居住用地空置率;采用“小街区、密路网”设计,改善交通拥堵,缩短交通距离,同时提升公共交通系统的效率。在减少土地蔓延及增强城市活力方面,应减少增量指标的供给,挖掘可用存量建设用地,优化居住空间环境,提升居住品质,鉴于广州市独特的气候特点,推广使用高能效的建筑标准与节能技术,以减少建筑领域的能源消耗。

2)广州市工业型街道在土地供给方面,应鼓励高新技术型企业落地,限制或减少高能耗及劳动密集型企业的土地供给。同时,在工业型街道中配置工业共享设施,如共享物流、存储服务设施,以减少企业单独建设所需的空間。在优化交通系统方面,对各企业的货物运输进行时间上的调度和统一调配,避免高峰时段进行货物运输,减少交通拥堵。

3.3 广州市乡镇单元减排策略

广州市乡镇单元整体碳排放强度较高但总量较低,应着重从“控强度”角度提出减排策略。然而,城乡融合型乡镇表现出高碳排放总量特征,因此在“控总量”的同时也需关注强度控制。因此,对3类乡镇单元分别提出控碳减排策略。

1)广州市城乡融合型和工业型乡镇应着重关注

产业园区的低碳化建设,避免污染型产业分散式布局,加快零散工业入驻园区,以避免无序扩张和土地资源浪费。重点对低效产业园区进行更新规划,调整园区的产业类型及结构。同时鼓励绿色厂房建设,并加装新能源设施、碳监测设备等。此外,重视城乡融合型乡镇的职住分离现象,增强城市郊区的公共交通可达性,改善公共交通系统,促进低碳出行。并通过调整职住结构,降低远距离通勤,形成小规模组团式发展模式。

2)广州市农业型乡镇在集约化农村住房、改善村庄生活生产用能结构方面,提升整体绿色化水平。在平衡用地方面,可在现有农村工业用地的基础上,引入环境友好工业政策,如限制高污染产业,鼓励并推广清洁生产技术。同时,推广绿色宅基地建设,提高绿色生态化农村居民用房比例。在标准化建房的同时,推行绿色基础设施建设引导。同时减少低效工业及居住用地比例,以恢复广州乡村的生态碳汇能力。

参考文献 References

- [1] LIU X, CIFUENTES-FAURA J, ZHAO S, et al. Government environmental attention and carbon emissions governance: firm-level evidence from China[J]. *Economic analysis and policy*, 2023, 80: 121-142.
- [2] 薛磊,李琦,刘帅.北京城市产业碳排放的小尺度空间分布[J]. *地理研究*, 2013, 32(7): 1188-1198. XUE L, LI Q, LIU S. Research on the small-scale spatial distribution of urban industrial carbon emissions: a case study of Beijing[J]. *Geographical research*, 2013, 32(7): 1188-1198 (in Chinese with English abstract).
- [3] 韩依纹,万明暄,方铁树,等.生态底线约束下的国土生态空间碳储量预测:以襄阳市为例[J]. *华中农业大学学报*, 2024, 43(3): 89-99. HAN Y W, WAN M X, FANG T S, et al. Predicting carbon storage of ecological space under constraints of ecological bottom line: taking Xiangyang City as an example[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43(3): 89-99 (in Chinese with English abstract).
- [4] TONG X, LI X S, TONG L, et al. Spatial spillover and the influencing factors relating to provincial carbon emissions in China based on the spatial panel data model[J/OL]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4739 [2024-01-16]. <https://doi.org/10.3390/su10124739>.
- [5] 陈理浩.中国碳减排路径选择与对策研究[D].长春:吉林大学,2014. CHEN L H. Study on the path choice and countermeasures of carbon emission reduction in China[D]. Changchun: Jilin University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [6] ZHANG Y, QUAN J, KONG Y Q, et al. Research on the fine-

- scale spatial-temporal evolution characteristics of carbon emissions based on nighttime light data; a case study of Xi'an City [J/OL]. *Ecological informatics*, 2024, 79: 102454 [2024-04-19]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102454>.
- [7] TIAN S, XU Y, WANG Q S, et al. Research on peak prediction of urban differentiated carbon emissions: a case study of Shandong Province, China [J/OL]. *Journal of cleaner production*, 2022, 374: 134050 [2024-04-19]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134050>.
- [8] YANG X L, JIN K, DUAN Z, et al. Spatial-temporal differentiation and influencing factors of carbon emission trajectory in Chinese cities: a case study of 247 prefecture-level cities [J/OL]. *Science of the total environment*, 2024, 928: 172325 [2024-04-19]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172325>.
- [9] 刘泓江, 闫凤英, 尹文超. 基于低碳土地利用的县级国土空间规划控碳体系研究: 以长兴县为例 [J]. *城市发展研究*, 2024, 31(5): 1-7. LIU H J, YAN F Y, YIN W C. Research on spatial planning carbon control system at the county-level based on low-carbon land use: a case study of Changxing County [J]. *Urban development studies*, 2024, 31(5): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [10] 潘浩之, 施睿, 蔡子攀, 等. 基于城市土地利用碳排放源识别的国土空间规划支撑研究: 以南京市为例 [J]. *现代城市研究*, 2024, 39(1): 1-7. PAN H Z, SHI R, CAI Z P, et al. Study on supporting territorial spatial planning through identification carbon emission sources in urban land use: a case study of Nanjing [J]. *Modern urban research*, 2024, 39(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [11] 丰显康, 匡文慧, 窦银银, 等. 北京市乡镇街道尺度碳排放格局及驱动因素 [J]. *遥感信息*, 2023, 38(6): 82-87. FENG X K, KUANG W H, DOU Y Y, et al. Carbon emission pattern and driving factor at township and street level in Beijing [J]. *Remote sensing information*, 2023, 38(6): 82-87 (in Chinese with English abstract).
- [12] SHI K F, CHEN Y, YU B L, et al. Modeling spatiotemporal CO₂ (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP/OLS nighttime stable light data using panel data analysis [J]. *Applied energy*, 2016, 168: 523-533.
- [13] 郭忻怡, 闫庆武, 谭晓悦, 等. 基于DMSP/OLS与NDVI的江苏省碳排放空间分布模拟 [J]. *世界地理研究*, 2016, 25(4): 102-110. GUO X Y, YAN Q W, TAN X Y, et al. Spatial distribution of carbon emissions based on DMSP/OLS nighttime light data and NDVI in Jiangsu Province [J]. *World regional studies*, 2016, 25(4): 102-110 (in Chinese with English abstract).
- [14] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理 [J]. *地理学报*, 2013, 68(11): 1513-1526. SU Y X, CHEN X Z, YE Y Y, et al. The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries [J]. *Acta geographica sinica*, 2013, 68(11): 1513-1526 (in Chinese with English abstract).
- [15] 郑德高, 吴浩, 林辰辉, 等. 基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究 [J]. *城市规划学刊*, 2021(4): 43-50. ZHENG D G, WU H, LIN C H, et al. The formulation of urban carbon reduction unit and integrated planning methodology based on carbon accounting [J]. *Urban planning forum*, 2021(4): 43-50 (in Chinese with English abstract).
- [16] CHAU C K, LEUNG T M, NG W Y. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings [J]. *Applied energy*, 2015, 143: 395-413.
- [17] 潘毅群, 梁育民, 朱明亚. 碳中和目标背景下的建筑碳排放计算模型研究综述 [J]. *暖通空调*, 2021, 51(7): 37-48. PAN Y Q, LIANG Y M, ZHU M Y. Review of building carbon emission calculation models in context of carbon neutrality [J]. *Heating ventilating & air conditioning*, 2021, 51(7): 37-48 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈红敏. 国际碳核算体系发展及其评价 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(9): 111-116. CHEN H M. Evaluation on the development of international carbon accounting systems [J]. *China population, resources and environment*, 2011, 21(9): 111-116 (in Chinese with English abstract).
- [19] ZHANG Y X, WANG R, YANG X Y, et al. Can China achieve its carbon emission peak target: empirical evidence from city-scale driving factors and emission reduction strategies [J/OL]. *Land*, 2023, 12(6): 1129 [2024-04-19]. <https://doi.org/10.3390/land12061129>.
- [20] 曲建升, 刘莉娜, 曾静静, 等. 中国城乡居民生活碳排放驱动因素分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(8): 33-41. QU J S, LIU L N, ZENG J J, et al. An analysis on driving factors of China's urban and rural household carbon emissions [J]. *China population, resources and environment*, 2014, 24(8): 33-41 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王春艳, 周雨澎, 尤恺杰, 等. 北京市居民家庭水-能消费活动碳核算及影响因素分析 [J]. *中国环境管理*, 2021, 13(3): 56-65. WANG C Y, ZHOU Y P, YOU K J, et al. Analysis of carbon emissions accounting and influencing factors of water-energy consumption behaviors in Beijing residents [J]. *Chinese journal of environmental management*, 2021, 13(3): 56-65 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张秀梅, 李升峰, 黄贤金, 等. 江苏省1996年至2007年碳排放效应及时空格局分析 [J]. *资源科学*, 2010, 32(4): 768-775. ZHANG X M, LI S F, HUANG X J, et al. Effects of carbon emissions and their spatio-temporal patterns in Jiangsu Province from 1996 to 2007 [J]. *Resources science*, 2010, 32(4): 768-775 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王金南, 蔡博峰, 曹东, 等. 中国CO₂排放总量控制区域分解方案研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 680-685. WANG J N, CAI B F, CAO D, et al. Scenario study on regional allocation of CO₂ emissions allowance in China [J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2011, 31(4): 680-685 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- [24] 李振宇,廖凯,崔占伟,等.缓解城市交通拥堵的CO₂减排效益评估方法研究[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(2):8-12.LI Z Y, LIAO K, CUI Z W, et al. An evaluation method of CO₂ emissions reduction in urban traffic congestion mitigation [J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2020, 20(2): 8-12 (in Chinese with English abstract).
- [25] YANG S X, JI Y, ZHANG D, et al. Equilibrium between road traffic congestion and low-carbon economy: a case study from Beijing, China[J/OL]. Sustainability, 2019, 11(1): 219 [2024-04-19]. <https://doi.org/10.3390/su11010219>.
- [26] 杨选梅,葛幼松,曾红鹰.基于个体消费行为的家庭碳排放研究[J].中国人口·资源与环境,2010,20(5):35-40.YANG X M, GE Y S, ZENG H Y. The household carbon emission analysis under individual consumer behavior[J]. China population, resources and environment, 2010, 20(5): 35-40 (in Chinese with English abstract).
- [27] 姜洋,何永,毛其智,等.基于空间规划视角的城市温室气体清单研究[J].城市规划,2013,37(4):50-56.JIANG Y, HE Y, MAO Q Z, et al. City-level greenhouse gas emission inventory from a spatial planning perspective [J]. City planning review, 2013, 37(4): 50-56 (in Chinese with English abstract).
- [28] 冯海霞,王兴渝,咸化彩,等.城市交通运行状况对机动车碳排放的影响研究[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(4):167-175.FENG H X, WANG X Y, XIAN H C, et al. Impact of urban traffic operations on vehicle carbon dioxide emission [J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2022, 22(4): 167-175 (in Chinese with English abstract).
- [29] 王奇,赵欣.基于改进等比例分配方法的我国各省二氧化碳减排目标分配[J].干旱区资源与环境,2019,33(1):1-8.WANG Q, ZHAO X. Allocation of carbon dioxide emission reduction targets in China based on the improved equal proportion distribution [J]. Journal of arid land resources and environment, 2019, 33(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [30] 宋德勇,刘习平.中国省际碳排放空间分配研究[J].中国人口·资源与环境,2013,23(5):7-13.SONG D Y, LIU X P. Spatial distribution of provincial carbon emissions [J]. China population, resources and environment, 2013, 23(5): 7-13 (in Chinese with English abstract).
- [31] 陈诗一.能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J].经济研究,2009,44(4):41-55.CHEN S Y. Energy consumption, CO₂ emission and sustainable development in Chinese industry [J]. Economic research journal, 2009, 44(4): 41-55 (in Chinese with English abstract).
- [32] 邹秀萍,陈劭锋,宁森,等.中国省级区域碳排放影响因素的实证分析[J].生态经济,2009,25(3):34-37.ZOU X P, CHEN S F, NING M, et al. An empirical research on the influence factor of carbon emission in Chinese provincial regions [J]. Ecological economy, 2009, 25(3): 34-37 (in Chinese with English abstract).
- [33] 赵强,周月凌,方潜生,等.中部地区碳排放时空演变及其影响因素分析[J].环境科学学报,2023,43(2):354-364.ZHAO Q, ZHOU Y L, FANG Q S, et al. Spatial-temporal evolution of carbon emissions and its influencing factors in China central region [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2023, 43(2): 354-364 (in Chinese with English abstract).
- [34] 渠慎宁,郭朝先.基于STIRPAT模型的中国碳排放峰值预测研究[J].中国人口·资源与环境,2010,20(12):10-15.QU S N, GUO C X. Forecast of China's carbon emissions based on STIRPAT model [J]. China population, resources and environment, 2010, 20(12): 10-15 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李治国,王杰.中国城乡家庭碳排放核算及驱动因素分析[J].统计与决策,2021,37(20):48-52.LI Z G, WANG J. Accounting and driving factors analysis of household carbon emissions in urban and rural China [J]. Statistics & decision, 2021, 37(20): 48-52 (in Chinese with English abstract).
- [36] 黄蕊,王铮,丁冠群,等.基于STIRPAT模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J].地理研究,2016,35(4):781-789.HUANG R, WANG Z, DING G Q, et al. Trend prediction and analysis of influencing factors of carbon emissions from energy consumption in Jiangsu Province based on STIRPAT model [J]. Geographical research, 2016, 35(4): 781-789 (in Chinese with English abstract).
- [37] SUN X T, WANG Z H. Can Chinese families achieve a low-carbon lifestyle? an empirical test of China's low-carbon pilot policy [J/OL]. Frontiers in energy research, 2021, 9: 655733 [2024-04-19]. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.655733>.
- [38] 张赫,贺晶,杨兴源,等.碳增汇目标下县域生态空间的分区及管控策略:以京津冀地区县域为例[J].规划师,2022,38(1):32-40.ZHANG H, HE J, YANG X Y, et al. Zoning and governance of county ecological space for the increase of carbon sinks: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Planners, 2022, 38(1): 32-40 (in Chinese with English abstract).
- [39] 李国志,李宗植.人口、经济和技术对二氧化碳排放的影响分析:基于动态面板模型[J].人口研究,2010,34(3):32-39.LI G Z, LI Z Z. The impact of population, economy and technology on carbon dioxide emissions: a study based on dynamic panel model [J]. Population research, 2010, 34(3): 32-39 (in Chinese with English abstract).
- [40] 武春友,常涛.生态社区综合评价指标体系的初步探讨[J].中国人口·资源与环境,2003,13(3):30-33.WU C Y, CHANG T. Probing of comprehensive evaluation indicator system of urban ecological community [J]. China population, resources and environment, 2003, 13(3): 30-33 (in Chinese with English abstract).
- [41] ZHAO B Y, SUN L C, QIN L. Optimization of China's provincial carbon emission transfer structure under the dual constraints of economic development and emission reduction goals [J]. Environmental science and pollution research international, 2022, 29(33): 50335-50351.
- [42] JIA J S, DENG H B, DUAN J, et al. Analysis of the major

- drivers of the ecological footprint using the STIRPAT model and the PLS method: a case study in Henan Province, China [J]. *Ecological economics*, 2009, 68(11): 2818-2824.
- [43] DORAN J C, FAST J D, BARNARD J C, et al. Applications of Lagrangian dispersion modeling to the analysis of changes in the specific absorption of elemental carbon [J]. *Atmospheric chemistry and physics*, 2008, 8(118): 1377-1389.
- [44] YI Y C, QI J, CHEN D. Impact of population agglomeration in big cities on carbon emissions [J]. *Environmental science and pollution research international*, 2022, 29(57): 86692-86706.
- [45] HUANG H Q, ZHOU J. Study on the spatial and temporal differentiation pattern of carbon emission and carbon compensation in China's provincial areas [J/OL]. *Sustainability*, 2022, 14 (13) : 7627 [2024-04-19]. <https://doi.org/10.3390/su14137627>.
- [46] VAN DEN HEUVEL E, ZHAN Z Z. Myths about linear and monotonic associations: Pearson's r , Spearman's ρ , and Kendall's τ [J]. *The American statistician*, 2022, 76(1): 44-52.

Characteristics of differential distribution and influencing factors of carbon emissions at levels of town and street governance units: taking Guangzhou City as an example

ZHANG Chao^{1,2}, ZHANG Yuxue³, LI Qingjia^{1,2}, WANG Rui³, LIU Xiaoyu^{1,2}

1. *Guangzhou Urban Planning Survey and Design Institute Co., Ltd. Beijing Branch, Beijing 100032, China;*

2. *Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China;*

3. *School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300000, China*

Abstract Guangzhou City was used to study the characteristics of differentiated distribution and influencing factors of carbon emissions at the level of town and street governance units. A top-down approach to spatial econometric methods for carbon emissions was used to calculate the total carbon emissions and intensity of 175 town and street units in 2020 and analyze the heterogeneous spatial distribution characteristics of carbon emissions in different types of town and street units. The IPAT model and Spearman correlation analysis was used to screen influencing factors and construct a ridge regression model. Differentiated factors of governance and strategies for reducing carbon emissions at levels of town and street governance units were obtained. The results showed that the total carbon emissions of street units in Guangzhou City were much higher than those of town units, but the per capita carbon emissions of town units were much higher than those of street units. Among them, the per capita carbon emission of industrial towns (14.37 t) were about five times that of streets with commercial offices (2.89 t). The total carbon emissions and intensity had a circular pattern of "low-inner, high-middle, low-outer" in terms of spatial distribution, but high-value areas of total carbon emissions were concentrated in the suburbs, and high-value areas of per capita carbon emissions were concentrated in the far suburbs. The indexes of urban construction including the population density, the rate of urbanization, and the structure of construction land were strongly correlated with carbon emissions based on analyzing factors affecting carbon emission at different levels of town and street governance units, but different types of street and town units had significantly differential effects. It is indicated that differentiated pathways of carbon reduction including "controlling the total amount" and "controlling the intensity" should be proposed for different types of streets and towns.

Keywords carbon peak and carbon neutrality; carbon emissions at the scale of town and street; estimation of carbon emissions; low-carbon planning; strategies for reducing carbon emissions

(责任编辑:张志钰)