引文格式：范成,蔡捷娜,林漪雯. 珠三角地区街道级碳排放空间格局及其影响因素分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(7): 38-45. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.07.008

珠三角地区街道级碳排放空间格局及其影响因素分析

范　成[1,2,3]，蔡捷娜[2,3]，林漪雯[2,3*]

（1. 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室，广东 深圳 518060；2. 深圳大学 中澳BIM与智慧建造联合中心，广东 深圳 518060；
3. 深圳大学 土木与交通工程学院，广东 深圳 518060）

摘　要：城市是碳排放的主体区域，街道是城市的基层行政单元，准确分析街道级碳排放空间格局及其驱动因素对精细化落实“双碳”目标具有基础性作用。以珠三角632个城市街道为例，基于经济、人口、交通、社会属性、建筑和用地特征数据，利用探索性空间数据分析方法和空间计量回归模型分析街道级碳排放空间格局与城市要素对碳排放影响的空间异质性，并基于STIRPAT模型量化城市要素的碳排放影响机制。结果表明：①珠三角地区碳排放高值区呈现以广州与深圳为中心的双核心空间结构，具有向四周辐射扩张的趋势；②碳排放密度较高区域与所属城市的行政中心点吻合，当两个城市中心距离较近时将出现“联带”现象；③街道人口密度、植被率是影响街道级碳排放强度的重要因素。

关键词：珠三角地区；街道级碳排放；空间相关性分析；影响因素；STIRPAT模型

中图分类号：TU982　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）07-0038-08

Spatial Pattern of Street-level Carbon Emissions and Its Influence Factor Analysis in the Pearl River Delta Region

FAN Cheng[1,2,3], CAI Jiena[2,3], LIN Yiwen[2,3]

(1. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities, Ministry of Education, Shenzhen 518060, China;
2. Sino-Australia Joint Research Center in BIM and Smart Construction, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Cities are the main areas of carbon emissions, and streets are the grassroots administrative units of cities. Accurately analyzing the spatial pattern and driving factors of carbon emissions at the street-level plays a fundamental role in the refined implementation of “carbon peaking and carbon neutrality” target. Taking 632 urban streets in the Pearl River Delta region for example, based on the data of economy, population, transportation, social attributes, buildings and land-use characteristics, we used the exploratory spatial data analysis method and the spatial econometric regression model to analyze the spatial pattern of street-level carbon emissions and the spatial heterogeneity of impact of urban factors on carbon emissions. And then, we quantified the carbon emissions impact mechanism of urban factors based on the stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology (STIRPAT) extended model. The results show that ①the high-value areas of carbon emissions in the Pearl River Delta region present a dual-core spatial structure centered on Guangzhou and Shenzhen, and have a trend of radial expansion in all four directions. ②Areas with a relatively high carbon emissions density coincide with the administrative center points of cities to which they belong. When the centers of two cities are relatively close to each other, a coupling phenomenon will occur. ③Street population density and vegetation rate are important factors affecting the carbon emissions intensity at the street-level.

Key words: the Pearl River Delta region, street-level carbon emissions, spatial correlation analysis, influence factor, STIRPAT model

在全球气候变暖背景下，碳排放问题已成为制约可持续发展的核心问题之一。我国碳排放总量占全球的31%，其中85%集中在城市区域[1]。珠三角是我国最具经济活力的地区之一，单位GDP能耗是东京、旧金山的2~3倍[2]。其中广佛肇（广州、佛山、肇庆）、深莞惠（深圳、东莞、惠州）、珠中江（珠海、中山、江门）三大都市圈的一体化进程加速了人口与产业聚集，也导致了碳排放空间分异格局。理论上碳排放的空间分异格局可能受区域内经济发展水平、人口密度分布、土地利用结构以及交通网络联系强度等多元城市要素在空间上的非均衡分布及其复杂的相互作用影响。珠三角地区以深圳、广州为核心，具有显著

项目来源：国家自然科学基金面上项目（52278117）；广东省自然科学基金面上项目（2024A1515011549）；深圳市基础研究面上项目（20220531101800001、20240813143330039）；深圳市哲学社会科学规划青年项目（SZ2024C006）。

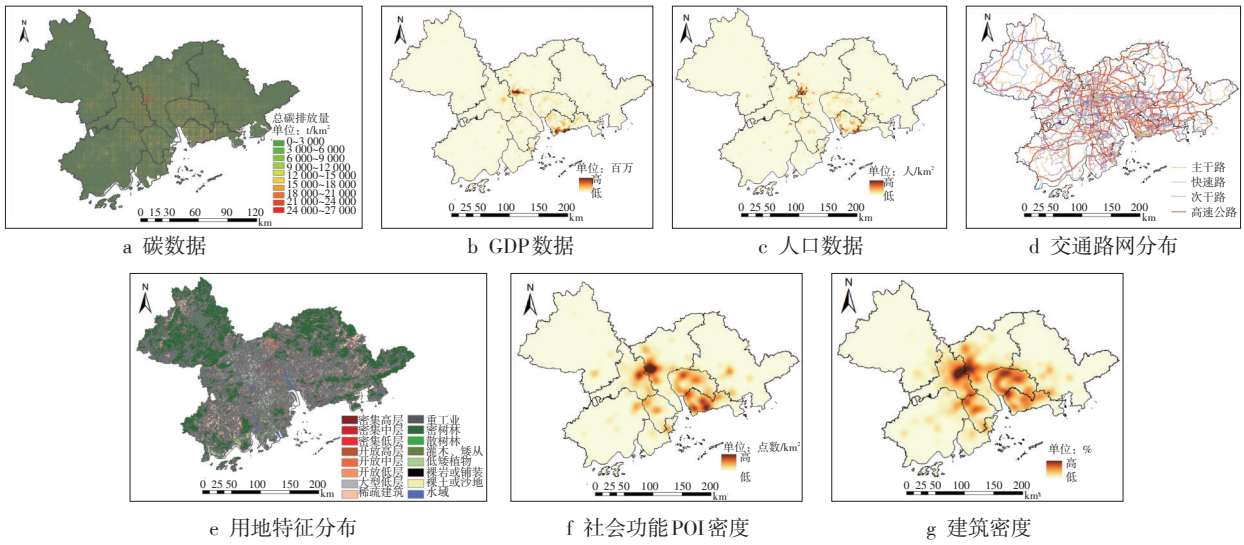
第一作者简介：范成（1988—），博士，副教授，研究方向为双碳管理、大数据分析、机器学习，E-mail：fancheng@szu.edu.cn。
通信作者：林漪雯（1999—），硕士，研究方向为碳环境、地理信息数据分析，E-mail：2200474008@email.szu.edu.cn。

的双核心结构，内部功能高度分化，城市间互动强度各异，因此亟需分析该区域碳排放的空间异质性，寻找其中的重要影响因素，因地制宜地提出精细化的治理策略。现有碳排放空间格局相关研究多聚焦于省级[3-5]、地市级[6-7]或县级[8]尺度，借助GIS技术[5,9-12]进行相关分析。在此基础上，部分研究结合深度学习与机器学习方法做进一步分析[13]。既有研究在碳排放影响因素识别方面，主要围绕土地利用、交通网络、人口密度等维度展开，存在分析维度单一或变量系统性不足的局限。在单因子解析层面，从土地利用单一维度去分析其变化引起的碳排放演变[14]；在多因子交互作用层面，如综合考虑城市化和人口密度，指出城市化水平和人口密度对交通碳排放效率存在负面影响[15]。部分研究从土地利用结构[16]、规模[17]等视角剖析土地利用与碳排放的关系。值得注意的是，现有土地利用策略若持续偏向经济效益导向，必然会制约“碳达峰、碳中和”目标的实现[18]。虽然STIRPAT模型被广泛用于碳排放因子解析[19]，但传统模型忽略了影响因素的空间异质性，难以揭示街道级微观机制。街道是城市治理的最小行政单元，能更好地支持城市治理体系，是实现精细化城市治理的关键节点。本文以珠三角城市群为研究对象，系统整合了经济、人口、交通、社会属性、建筑和用地特征6大维度，构建了15个街道级城市要素变量，搭建了街道级碳排放分析框架；采用探索性空间数据分析和空间计量回归模型深入分析了街道级碳排放空间格局以及城市要素对碳排放影响的空间异质性；并基于扩展式STIRPAT模型量化城市要素的影响程度，以突破传统碳排放分析的尺度局限；立足城市治理的基层空间单元，提出街道级碳排放空间解析新范式，为珠三角城市群的低碳治理体系构建和差异化减排路径设计提供科学支撑，推动“双碳”目标在基层治理中的精准实施。

1　研究区概况与数据来源

本文选取珠三角城市群作为研究区，位于广东省中南部（21°31′～23°10′N、112°45′～115°50′E）；以广州、深圳为双核心，辅以佛山、东莞等7个城市；总面积约为4.16万km^2，是广东省面积最大的平原地区。珠三角地区集聚广东省61.86%的人口，79.67%的经济总量，是我国实力最强的三大城市群之一。

本文采用的多源地理空间数据包括：①1 km×1 km栅格数据，2021年碳数据来源于国内大气定量遥感团队[20-21]，2020年经济数据来源于国家地球系统科学数据中心发布的中国公里网格GDP数据[22-23]，2020年人口数据来源于WorldPop数据集（https://www.worldpop.org）（图1）；②其他数据，2023年交通路网数据来源于OpenStreetMap（https://www.openstreetmap.org），2022年城市用地特征数据来源于Global LCZ Map [24]，分辨率为100 m，2023年社会功能兴趣点（POI）与建筑矢量数据来源于高德地图，珠三角地区与街道行政区划数据来源于自然资源部标准地图，划分为9个城市632个街道。本文采用的硬件环境为处理器Windows 11，显卡17-12800HX，AMDIA RTX3080 TiLaptop，内存32 G；软件环境为ArcGIS10.2版本，GWR4软件。



a 碳数据　b GDP数据　c 人口数据　d 交通路网分布

e 用地特征分布　f 社会功能POI密度　g 建筑密度

图1　研究区数据分布图

审图号：粤S(2026)013号

2 研究方法

2.1 自然间断点分级法

自然间断点分级法是一种常见的数据分级方法，其目标是使组内平方和（SSW_i）最小化，而总平方和（SST）最大化。全局自然间断点分级法针对研究区内所有栅格的碳排放数据进行分析，寻找整体数据中的自然间断点；局部自然间断点分级法则侧重于局部街道数据特征，反映局部差异性。由于若采用局部数据计算间断点，可能会受局部样本量的影响，导致分级结果代表性较弱，破坏跨街道可比性，因此本文借助ArcGIS10.2软件，采用全局自然间断点分级法对珠三角街道碳排放区域进行分级处理。按照街道年生产总值，从大到小划分为一~四类街道；按照单位年碳排放量（t/km^2）划分为5类碳排放区域，即高碳排区域、较高碳排区域、中碳排区域、较低碳排区域和低碳排区域。

2.2 核密度分析

核密度分析是一种估计数据在空间中分布密度的分析方法。本文采用高斯核函数将离散的数据转化为连续的密度分布。密度值的计算公式为：

$$K(d)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}h}e^{-\frac{d^2}{2h^2}} \tag{1}$$

$$D(x)=\frac{1}{h^2}\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{d(x,x_i)}{h}\right) \tag{2}$$

式中，$K(d)$为高斯核函数；d为标点与分析点之间的距离；h为带宽参数；$d(x,x_i)$为x与输入点x_i的欧氏距离。

2.3 ESDA方法

1）全局空间自相关性分析用于衡量整个研究区内属性值的空间分布是否存在自相关性。本文采用全局莫兰指数（Global Moran's I）和高/低聚类（General G）两种方法。Global Moran's I可反映数据的全局空间分布格局，计算公式为：

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\dot{x})(x_j-\dot{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\dot{x})^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}} \tag{3}$$

式中，n为样本总数；x_i、x_j为第i和第j个样本点属性值；$\dot{x}$为样本点属性值均值；w_{ij}为空间权重矩阵元，值为1相邻，值为0表示不相邻。

General G通常用于测量研究区内高值或低值的空间聚集程度，计算公式为：

$$G=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}x_ix_j}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}x_ix_j} \tag{4}$$

通过计算区域中数值较高或较低的空间点是否集中，揭示数据的全局聚集特征。$G>0$表示高值或低值的全局聚集显著。

2）局部空间自相关性分析是一种揭示空间数据局部分布特征的方法，旨在衡量研究区域中单个观测点或小区域的空间自相关性，能捕捉数据的空间异质性，帮助发现局部热点、冷点和离群点。本文采用热点分析（Getis-Ord G_i^*）方法，表达式为：

$$G_i^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{ij}x_j-\dot{X}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}}{S\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{ij}^2-\left(\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\right)^2}{n-1}}} \tag{5}$$

式中，$\dot{X}$为全局平均值；S为全局标准差。

3）双变量空间自相关分析。通过双变量莫兰指数（Bivariate Moran's I）值可揭示两个变量之间的关系在空间上是否呈现聚集性，表达式为：

$$I_B=\frac{\sum_i\sum_j w_{ij}(X_i-\dot{X})(Y_j-\dot{Y})}{S_XS_Y\sum_i\sum_j w_{ij}} \tag{6}$$

式中，X_i为区域i的变量X值；Y_j为邻近区域j的变量Y值；$\dot{X}$、$\dot{Y}$为X、Y的均值；S_X、S_Y为X、Y的标准差。

2.4 空间计量模型

1）最小二乘法回归模型（OLS）是经典的回归分析方法，通过最小化预测值与实际值之间误差的平方和，获取模型参数的最佳估计值。其计算公式为：

$$y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\cdots+\beta_px_p+\epsilon \tag{7}$$

式中，y为碳排放强度；$x_1,x_2,\cdots,x_p$为各城市要素；$\beta_0,\beta_1,\cdots,\beta_p$为城市要素对应的弹性系数；$\epsilon$为误差项。

若自变量存在多重共线性将影响模型的可靠性和解释力，因此需引用方差膨胀因子VIF检测自变量之间的线性相关性（VIF < 10）。

2）地理加权回归模型（GWR）是在OLS模型的基础上赋予地理位置不同的权重，分析不同地理位置的变量对因变量的异质性，表达式为：

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{k=1}^{p}\beta_k(u_i,v_i)x_{ik}+\epsilon_i \tag{8}$$

式中，y_i 为街道 i 的碳排放强度；(u_i, v_i) 为街道 i 的地理坐标；$\beta_k(u_i, v_i)$ 为街道 i 第 k 个城市要素的局部回归系数；ϵ_i 为随机误差项。

2.5　STIRPAT模型及其扩展

STIRPAT模型是一种用于分析环境影响的计量模型，能更灵活地探索复杂的非线性关系。通过随机回归模型解析人类活动对环境影响的非线性驱动机制。STIRPAT模型是影响—人口—富裕度—技术（IPAT）理论的可量化拓展形式，基本表达式为：

$$I = aP^b A^c T^d \epsilon \tag{9}$$

式中，I 为环境影响指标；P 为人口规模；A 为经济水平；T 为技术水平；a 为常数系数；b、c、d 为变量弹性系数；ϵ 为随机误差项。

将IPAT等式两边取对数可改写成加法模式，并结合本文筛选出的城市要素对公式进行扩展，最终形成扩展式STIRPAT模型，即

$$\ln C = \ln a + \beta_1 \ln(PS) + \beta_2 \ln(BD) + \beta_3 \ln(PD) + \beta_4 \ln(\mathrm{GDP}) + \beta_5 \ln(\mathrm{CC_A}) + \beta_6 \ln(TP) + \ln \epsilon \tag{10}$$

式中，C 为碳排放强度（t/km²）；PS 为社会功能丰富度；BD 为建筑密度；PD 为人口密度；GDP 为地均生产总值（百万/km²）；CC_A 为交通时间成本（min）；TP 为植被率；β_1、β_2、β_3、β_4、β_5、β_6 为弹性系数，表示当 PS、BD、PD、GDP、CC_A、TP 每变化1%时，分别引起 C 的 β_1%、β_2%、β_3%、β_4%、β_5%、β_6% 变化。

3　碳排放空间格局

3.1　各级街道碳排放情况

由街道与碳排放区域的分级统计结果可知（表1），47.4%的高碳排区域位于一类街道，23.29%位于二类街道，21.28%位于三类街道，8.13%位于四类街道；无低碳排区域位于一类街道，0.25%位于二类街道，3.02%位于三类街道，绝大部分（96.73%）位于四类街道。整体来看，经济条件较好的街道普遍碳排放量较高，如广州、深圳的中心区域街道；而肇庆、江门西南部等经济条件较差的街道基本属于四类街道且位于低碳排区域。

表1　街道与碳排放区域的分级统计结果

碳排放类型	一类街道		二类街道		三类街道		四类街道		总面积/km²
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	
高碳排区域	470.64	47.40	231.32	23.29	210.33	21.18	80.71	8.13	993.00
较高碳排区域	1 155.79	32.20	894.35	24.92	1 157.03	32.24	382.10	10.65	3 589.27
中碳排区域	716.18	9.12	1 035.73	13.20	2 560.30	32.62	3 536.44	45.06	7 848.65
较低碳排区域	229.97	2.04	571.02	5.06	1 633.83	14.48	8 851.10	78.43	11 285.91
低碳排区域	0.00	0.00	44.08	0.25	543.33	3.02	17 402.68	96.73	17 990.09
总计	2 572.59	6.17	2 776.50	6.66	6 104.82	14.64	30 253.03	72.54	41 706.94

3.2　碳排放空间热点识别

本文在ArcGIS10.2软件下采用核密度分析方法识别碳排放空间热点（图2），可以看出，珠三角碳排放密度热点区域与9个城市的行政中心点吻合，不同城市中心相近时会出现“联带”现象，即两个城市中心点之间的碳排放量也较高。广州市中心与佛山市中心之间形成椭圆形密度高值区；深圳市西北、西南以及中部地区有大面积的密度高值区；惠州市片区在空间上呈现倒U形高密度区，由于深圳西北部与惠州南部相连，两地之间存在“联带”现象；东莞、肇庆、江门、中山和珠海城市之间距离较大，互动强度弱于广佛两地，未出现“联带”现象。在城市内部，行政中心、商业水平较高的区域人们生活较活跃，城市碳排放较高；在不同城市之间，各城市间的交通联系与互动强度提高将形成“联带”现象，从侧面反映出城市互动强度影响碳排放密度。

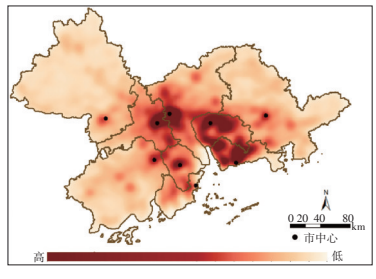


图2　珠三角碳排放空间热点识别

审图号：粤S(2026)013号

3.3　空间相关性分析

本文利用ArcGIS10.2软件对碳排放强度进行空间相关分析，结果表明（图3），Global Moran's I为0.62，Z 值为26.30；General G指数为0.01，Z 值为19.85，

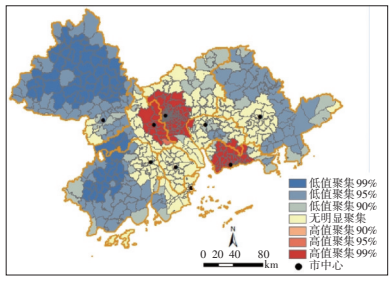


图3　珠三角碳排放强度热点分析结果

审图号：粤S(2026)013号

说明碳排放呈现高—高聚集格局。珠三角城市群在高值聚集区域呈现以广州与深圳为中心的双核心结构，且向四周呈辐射性扩张，周边街道均呈现高值聚集现象，高值聚类水平均在90%以上，中心区域则高达99%；低值聚集区大部分位于珠三角西北部、西南和东部，其中西北部地区的低值聚类程度更高，可达99%，主要为肇庆市全市街道、江门市西南部街道；而无明显聚集区则分布在高值聚类与低值聚类地区之间，呈半环状形态，成为高值聚类与低值聚类的过渡带，包括珠海、中山、江门和惠州4个城市中心。

4　碳排放影响因素研究

4.1　多元城市要素构建

根据研究需求，本文构建涵盖珠三角街道经济水平、人口、社会信息、建筑特征、交通信息和用地特征的6大类城市要素。由于各原始数据分辨率不统一，构建前需对原始数据进行重采样，各要素来源与计算结果见表2。在 *PS* 和 *LS* 指标中引用香农熵计算方法分别对街道内部便捷度和用地整体情况进行描述；在 PRD_A 和 CC_A 指标中，通过计算交通时间成本反映地区的交通可达性。

表2　多元城市要素统计方法与数据情况

类型	内容	计算公式	注释	第一四分位数	第二四分位数	第三四分位数	平均值
经济水平	地均GDP（百万/km²）	$\frac{GDP}{A_{街道}}$	GDP为街道年国内生产总值，$A_{街道}$为街道总面积	663.295	7 700.439	70 488.234	98 287.055
人口数据	人口密度 *PD*（人/km²）	$\frac{POP}{A_{街道}}$	POP为街道常住人口	140.494	655.393	3 280.678	4 896.892
社会信息	*PS*	$-\sum_{i=1}^{n} p_i \ln(p_i)$	n为类别总数，p_i为第i类POI的比例	3.187	3.361	3.491	3.274
建筑特征	建筑高度（*BH*）	$\frac{\sum_{i=1}^{n} H_i}{n}$	n为街道内建筑总数，H_i为第i栋建筑的高度/m	8.335	9.552	13.203	11.556
	建筑密度（*BD*）	$\frac{\sum_{i=1}^{n} A_i}{A_{街道}}$	$\sum_{i=1}^{n} A_i$为街道内所有建筑的总占地面积	0.010	0.055	0.157	0.091
	道路密度（*RD*）	$\frac{L}{A_{街道}}$	L为道路总长度/km	2.333	9.058	20.374	14.743
交通信息	城市互动成本（PRD_A）	$\frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \times t_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i}$	n为珠三角区域的节点总数，W_i为节点i的权重，t_i为从研究区到节点i的最短交通时间/min	57.007	72.159	95.595	81.824
	内部交通时间成本（CC_A）	$\frac{\sum_{j=1}^{9} W_j \times R_{kj}}{\sum_{j=1}^{9} W_j}$	W_j为城市j的权重	16.875	30.000	54.956	42.470
用地特征	密集型建筑率（*DP*）	$LCZ_{p_i} = \frac{Area_{p_i}}{A_{街道}}$	LCZ_{p_i}为第i种用地率，$Area_{p_i}$为第i种用地面积/km²	0.000	0.003	0.054	0.071
	开放型建筑率（*OP*）			0.016	0.147	0.305	0.191
	大型低层建筑率（*LP*）			0.003	0.072	0.285	0.170
	工业区率（*IP*）			0.000	0.000	0.000	0.005
	植被率（*TP*）			0.014	0.216	0.576	0.320
	裸地率（*BP*）			0.000	0.000	0.001	0.002
	用地混合度（*LS*）	$-\sum_{i=1}^{n} p_i \ln(p_i)$	n为用地类型的总数，p_i第i种用地类型的比例	0.505	0.621	0.704	0.588

4.2　双变量空间自相关分析

为分析各城市空间要素对碳排放的影响，本文利用GWR4软件将15种城市要素与地均碳排放强度进行双变量空间自相关分析，结果表明（表3）各城市指

标全部通过显著性检验，说明城市要素与地均碳排放强度存在空间自相关性；与碳排放强度呈现负相关的城市要素包括交通时间成本、植被率与裸地率。其中，Moran's I > 0，表示正相关，反之为负相关；*Z* 值绝对值大于1.96，则表现显著。

表3　城市要素与碳排放强度的双变量空间自相关分析

城市要素	Moran's I	*Z* 值
GDP	0.547	15.732***
PD	0.515	16.173***
PS	0.267	8.326***
BH	0.569	16.190***
BD	0.666	18.890***
RD	0.629	18.237***
PRD_A	−0.486	−11.850***
CC_A	−0.500	−12.506***
DP	0.604	17.062***
OP	0.455	13.126***
LP	0.161	5.000***
IP	0.111	4.182***
TP	−0.481	−12.704***
BP	−0.052	−1.695***
LS	0.238	7.904***

注：*、**和***分别表示 $P<0.1$、$P<0.05$ 和 $P<0.01$。

4.3　空间回归分析

1）OLS与GWR模型结果与对比。为研究各城市要素对碳排放的影响，运用ArcGIS10.2和GWR4软件分别构建OLS、GWR空间回归模型。采用步进法保留主要影响因子、剔除次要和共线性影响因子，逐步引入城市要素得到回归模型，最后考虑空间异质性进行分析。根据VIF检验形成6个对碳排放强度有显著影响的城市要素（表4）。不考虑空间异质性的OLS模型，R^2 为0.89，*K*(*BP*) 显著，表明城市要素存在空间异质性；考虑空间异质性的GWR模型，R^2 为0.91。赤池信息量准则（AIC）常用于权衡模型的拟合优度和复杂度。由改进指标结果可知，GWR模型的拟合优度更好，模型复杂度降低，综合解释力显著优于OLS模型，因此通过GWR模型能更有效地揭示各城市要素对碳排放影响。

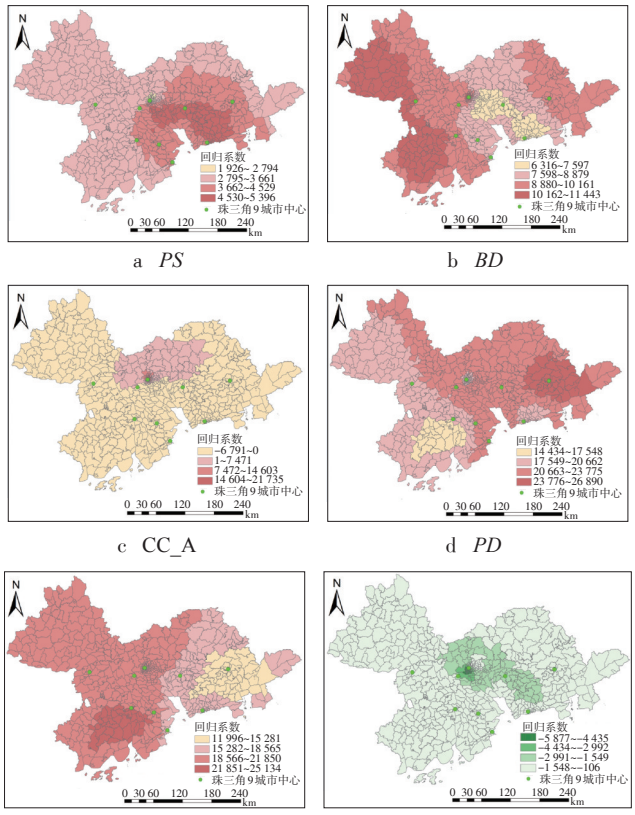
由GWR模型结果可知，与地均碳排放强度呈正相关的城市要素包括 *PS*、*BD*、*PD* 和GDP，呈负相关的城市要素为CC_A和 *TP*。*PD* 对碳排放强度的正向影响最大，GDP次之；*TP* 的负向影响最大。*PS*、*BD* 较高的地区往往是经济中心、商业热点或居住区，由于聚集了大量人群，导致交通压力和能源消耗提高，产生较高的碳排放。从交通内部可达性指标来看，内部交通时间成本越低，人们与城市中心互动意愿越高，将造成交通碳排放量增加；反之交通成本越高，交通碳排放量随着人们出行意愿的减少而降低。

表4　城市要素与碳排放强度的OLS、GWR空间回归弹性系数结果

城市要素	OLS	GWR
PS	−657.54	3 705.79
BD	19 327.33	9 017.94
PD	0.15	20 845.91
GDP	0.01	18 878.25
CC_A	−20	−345.80
TP	−1 305.35	−1 321.27
AIC	11 007.4	10 970.62
AICc	11 007.59	10 973.46
R^2	0.89	0.91
K(*BP*)	148.79*	–
改进自由度 Im_*DF*		291 749 196.27
改进残差和 Im_*SS*		30.29
改进均方误差 Im_*MS*		9 632 496.82

2）城市要素空间异质性。GWR模型具有考虑研究变量空间异质性的特点，即各城市要素在不同空间下对因变量影响程度不同。将各城市要素弹性系数进行可视化，结果见图4。从城市社会功能角度分析，*PS* 指标可反映城市化与经济活跃程度，广州、东莞和深圳大部分街道的 *PS* 比其他城市高2~3倍；而系数略低的街道则反映出街道功能单一，经济活动强度较低，但不排除这些街道拥有更丰富的碳汇资源从而抵消了碳排放的增加，如肇庆市西北部、广州市从化片区等地区。结合 *BD* 与交通来看，偏离珠三角中心地区的街道 *BD* 系数更高，一方面是商业、办公和住宅功能的建筑密集本身就加剧了能源需求，另一方面则由于地理位置偏远，人们为满足工作或居住需求而导致交通流量增加，相较于中心区域造成了更明显的交通压力，间接增加了交通相关的碳排放。CC_A基本呈现负相关性，但在广州与深圳市中心区域呈现正相关。在珠三角大部分街道中反映出交通时间成本更低的情况下，由于城市互动强度更高导致交通碳排放提高，而广州与深圳中心区域以公共交通为主导，加上新能源车辆或非机动车普及率高，导致CC_A呈现正相关；另外广州市从化片区可能由于该地区功能分散，经济活动低，人口较少，在人口通勤需求较小的情况下呈正相关性。结合 *PD* 与城市经济指标来看，珠三角中心线以东区域的 *PD* 系数更高，反映出人口密集的街道（如广州、深圳和东莞）往往伴随更高的

能源需求，处于经济活动中心的街道更会形成叠加效应，放大 *PD* 与碳排放的正相关性；而偏远地区（如惠州东部），由于人口密集的地区通勤需求大，公共交通、私家车、货运等交通活动频繁，导致交通碳排放占比显著增加，因此若优化公共交通设施，普及新能源交通工具，将有利于减少交通碳排放。GDP 指标的正向影响在珠三角西部区域更高，说明这些地区可能存在高能耗产业（如制造业、物流业），同时由于发展经济导致交通基础设施承载负荷大，能效不足将进一步放大经济与碳排放的关联；珠三角东部区域拥有高效的能源管理模式或低碳技术，如智能电网、绿色建筑和节能设备，加上公共交通系统完善，交通高效减弱 GDP 与碳排放的正相关性。*TP* 的空间异质性反映出当地植被的“降碳”边际效应。*TP* 指标在广州与佛山两个城市中心之间的负相关性更显著，这些街道人口活动强度高，植被的碳汇作用更明显；而其他负相关性略低的片区可能是在经济较活跃地区（广州、深圳、珠海等），高密度城市开发，植被与建筑割裂会导致碳汇效率较低，也可能是在经济较低、植被率高的地区（如肇庆、江门），虽然具备丰富碳汇资源，但由于碳排放量本身基数不高，植被对碳排放的调节效果较弱，导致负相关程度略小，调节作用边际效应减弱。



a *PS* b *BD* c CC_A d *PD* e GDP f *TP*

图4 珠三角城市要素空间异质性结果

审图号：粤S(2026)013号

4.4 基于STIRPAT模型的回归分析

本文借助Python3.8编程语言，基于扩展模型对上述6个城市要素对碳排放影响程度进行量化分析。模型决定系数 R^2 为0.91，AIC为137.00，小于OLS、GWR模型，说明扩展STIRPAT模型的拟合效果最优。结合各城市要素的回归系数来看，与碳排放强度呈负相关的指标为CC_A > *PS* > *TP*，呈正相关的指标为 *PD* > *BD* > GDP。通过弹性系数可知，当珠三角街道 *PD*、GDP、*BD*、*PS*、CC_A、*TP* 每增加1%，碳排放强度将分别发生+0.22%、+0.09%、+0.14%、−0.18%、−0.17%和−0.38%的变化。

5 结 语

本文以珠三角城市群的632个街道为研究对象，首先构建涵盖城市经济、人口、建筑等特征的多元城市要素，利用ESDA方法对珠三角地区碳排放进行空间格局分析；再分别构建街道级别碳排放强度的OLS和GWR模型，利用GWR模型分析各城市要素的空间异质性；最后基于STIRPAT扩展模型量化城市要素对碳排放强度的影响效应。

1）珠三角城市街道经济水平与碳排放程度呈正相关性。广州、深圳城市中心周边街道基本处于高碳排区域，肇庆市、江门市街道大部分处于低碳排区域。碳排放热点与城市中心基本吻合，当两个城市中心距离较近时，会出现明显的“联带”现象。

2）与街道地均碳排放量呈正相关的城市要素影响程度为人口密度 > 地均GDP > 建筑密度 > 社会信息丰富度，其中地均GDP的影响约为建筑密度的2倍；呈现负相关的城市要素为交通时间成本和植被率，植被率的影响为交通时间成本的4倍。

3）城市要素对碳排放影响存在空间异质性。人口密度在珠三角中心线以东区域的影响大于西部地区。建筑密度对碳排放的正向影响在珠三角西部和东部区域比中心区域更显著。交通成本对碳排放强度呈负向影响，但在公共交通设施均衡或新能源普及率高的街道则呈正向影响。植被率在经济水平较低且碳汇资源丰富的地区的负向影响较小，调节作用边际效应减弱。

4）由STIRPAT扩展模型结果可知，当街道人口密度、地均GDP、建筑密度、社会信息丰富度、交通时间成本、植被率每变化1%，珠三角街道碳排放强度将分别发生0.22%、0.09%、0.14%、0.18%、0.17%和0.38%的变化。

本文系统分析了珠三角地区街道级碳排放格局和相关影响因素，但存在以下局限：受限于数据源可获取性不足，研究数据涵盖2020—2023年，不同数据源的年份差异可能影响模型参数估计的准确性；空间异质性分析主要聚焦于静态关联，暂未引入时间序列模型揭示演变规律，未来考虑进一步构建时空双维度碳排放评估框架，为差异化碳减排路径设计提供更精准的科学支撑。

参考文献

[1] Yu Y, Dai Y, Xu L, et al. A Multi-level Characteristic Analysis of Urban Agglomeration Energy-related Carbon Emission: A Case Study of the Pearl River Delta[J]. Energy, 2023, 263: 125651

[2] 呼和涛力,骆志刚,袁汝玲,等. 能源革命推动珠江三角洲开放发展研究[J]. 中国工程科学,2021,23(1):52-59

[3] Dong S, Xia B, Li F, et al. Spatial-temporal Pattern, Driving Mechanism and Optimization Policies for Embodied Carbon Emissions Transfers in Multi-regional Tourism: Case Study of Provinces in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 382:135362

[4] Wang N, Qu Z, Li J, et al. Spatial-temporal Patterns and Influencing Factors of Carbon Emissions in Different Regions of China[J]. Environmental Research, 2025, 276: 121447

[5] 郭文强,史瑞雪,雷明,等. 中国省际碳排放空间关联网络结构特征及碳平衡分区[J]. 生态学报,2024,44(18):8003-8020

[6] 韩传峰,宋府霖,滕敏敏. 长三角地区碳排放时空特征、空间聚类与治理策略[J]. 华东经济管理,2022,36(5):24-33

[7] 郭亚丽,贾俊松,李玲,等. 收缩视角下黄河中游城市碳排放时空格局及其影响因素[J]. 生态学报,2024,44(3):903-914

[8] 张智扬,尹海魁,李新旺,等. 河北省县域土地利用碳排放空间格局及协调分区[J]. 江苏农业学报,2024,40(2):281-292

[9] 蓝皓新,徐军. 浙江省县域碳排放时空格局及影响因素研究[J]. 地理空间信息,2024,22(10):5-8

[10] 孙桂候,徐军,张静雯,等. 利用多源数据分析江苏省碳源/汇时空格局[J]. 地理空间信息,2024,22(9):7-12

[11] Wang F, Zhang Q. Exploring the Spatial Association Characteristics of Carbon Emission Efficiency in China's Construction Industry: A Network Perspective[J]. Energy and Buildings, 2025, 329:115289

[12] 俞洁,张勇,李清瑶. 长三角碳排放空间关联网络结构特征及演化机制[J]. 自然资源学报,2024,39(2):372-391

[13] Vu V, Nguyen D, Nguyen T, et al. Self-supervised Air Quality Estimation with Graph Neural Network Assistance and Attention Enhancement[J]. Neural Computing and Applications, 2024, 36(19):11171-11193

[14] 张晓光,张赢心,李士美,等. 基于土地利用的青岛市碳排放变化特征与预测[J]. 地理空间信息,2022,20(5):1-5

[15] 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

[16] 游和远,张津榕,夏舒怡. 面向碳排放效率的多目标土地利用结构与布局优化研究:以杭州市萧山区为例[J]. 中国土地科学,2023,37(6):74-83

[17] 黄贤金,张秀英,卢学鹤,等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J]. 自然资源学报,2021,36(12):2995-3006

[18] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊,2022,37(4):423-434

[19] Amer E, Meyad E, Meyad A, et al. Impacts of Renewable and Disaggregated Non-renewable Energy Consumption on CO_2 Emissions in GCC Countries: A STIRPAT Model Analysis[J]. Heliyon, 2024, 10(9):17

[20] Kim E, Kim B, Kim H, et al. North Korean CO Emissions Reconstruction Using DMZ Ground Observations, TROPOMI Space-borne Data, and the CMAQ Air Quality Model[J]. The Science of the Total Environment, 2024, 921:171059

[21] Kim E, Kim H, Kim B, et al. Development of Surface Observation-based Two-step Emissions Adjustment and Its Application on CO, NO_x, and SO_2 Emissions in China and South Korea[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 907:167818

[22] Chen Y, Wu G, Ge Y, et al. Mapping Gridded Gross Domestic Product Distribution of China Using Deep Learning with Multiple Geospatial Big Data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15:1791-1802

[23] Xu Z, Wang Y, Sun G, et al. Generating Gridded Gross Domestic Product Data for China Using Geographically Weighted Ensemble Learning[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2023, 12(3):123

[24] Demuzere M, Kittner J, Martilli A, et al. A Global Map of Local Climate Zones to Support Earth System Modelling and Urban-scale Environmental Science[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(8):3835-3873