



珠江三角洲地区碳排放空间关联网 特征及影响因素

徐 茜¹, 林洁欣¹, 林子晴¹, 张家俊¹, 程 丽², 杨 忍³

1. 广东财经大学 公共管理学院, 广东 广州 510320; 2. 广州康养集团有限公司, 广东 广州 510630;
3. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510006

摘要 在“双碳”目标下,揭示珠江三角洲地区碳排放空间关联网特征,对探索区域社会经济的绿色化和低碳化转型具有重要理论价值和现实意义。采用 IPCC 测评方法、修正后的引力模型及 QAP 回归方法等,剖析 2010—2022 年珠三角碳排放的时空演化过程,以及碳排放的空间关联网演化特征和影响因素。结果表明:①珠三角碳排放量在时序上呈持续上升态势,但 2020 年略有下降,在空间上呈现以深圳和广州为核心的高排放区域,且珠江东岸地区明显高于西岸地区,珠三角碳排放与社会经济发展的脱钩关系整体呈弱脱钩特征,2020 年以来,随着碳排放量持续下降,正加速向强脱钩迈进;②碳排放空间关联网整体特征逐渐趋于复杂化、通达化演变,关联线更加密集且朝着多向性发展,广州和深圳位于网络的中心位置,扮演着“中心行动者”角色,其他各区域板块在空间关联网中呈现出显著的梯度性,板块内部存在明显的空间溢出特征;③地理空间邻近性、经济发展水平、能源消费强度和产业结构等对区域碳排放的空间关联网产生重要影响。上述研究为区域协同减排、优化碳平衡及推动可持续发展提供了科学依据与实践指引。

关键词 碳排放;空间关联网;脱钩关系;珠江三角洲地区

中图分类号:X321 DOI:10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-04-017

The characteristics and influencing factors of spatial correlation network of carbon emissions in the Pearl River Delta Region

Xu Qian¹, Lin Jiexin¹, Lin Ziqing¹, Zhang Jiajun¹, Cheng Li², Yang Ren³

1. School of Public Administration, Guangdong University of Finance & Economics, Guangzhou 510320, China;

2. Guangzhou Health & Wellness Group Co., Ltd., Guangzhou 510630, China;

3. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

Abstract Under the "dual carbon goals", revealing the spatial correlation network characteristics of carbon emissions in the Pearl River Delta Region, holds significant theoretical value and practical significance for exploring the green and low-carbon transformation of regional socioeconomic systems. Using the IPCC assessment methodology, modified gravity model, and QAP regression method, this study conducts an analysis of the spatiotemporal evolution process of carbon emissions in the Pearl River Delta Region from 2010 to 2022, and ex-

收稿日期:2025-09-15 修回日期:2025-11-09

基金项目:国家自然科学基金(42171193)

第一作者:徐茜,女,博士,副教授,硕士生导师,从事土地利用生态效应及土地资源管理研究,xuqian@gdufe.edu.cn。

通信作者:杨忍,男,博士,教授,博士生导师,从事土地资源管理及乡村地理研究,yangren0514@163.com。

plores the evolutionary characteristics and influencing factors of the spatial correlation network of carbon emissions. The results have 3 findings. ①Temporally, carbon emissions presented a continuous upward trend in the Pearl River Delta Region, with a slight decline in 2020; spatially, it showed a pattern where Shenzhen and Guangzhou were the core high-emission areas, and the eastern bank of the Pearl River was significantly higher than the western bank. The overall decoupling relationship between carbon emissions and socioeconomic development in the Pearl River Delta Region showed a weak decoupling characteristic, and since 2020, with the continuous decline in carbon emissions, it has been accelerating toward strong decoupling. ②The overall characteristics of the carbon emission spatial correlation network have gradually evolved toward being more complex and accessible, with connection lines becoming denser and developing toward multi-directionality. Guangzhou and Shenzhen are located at the center of the network, playing the role of "central actors"; other regional plates show significant graduality in the spatial association network, with obvious spatial spillover characteristics within the plates. ③Geographical proximity, economic development level, energy consumption intensity, and industrial structure have significant impacts on the spatial correlation network of regional carbon emissions. The research provides scientific basis and practical guidance for regional collaborative emission reduction, optimizing carbon balance, and promoting sustainable development.

Keywords carbon emissions; spatial correlation network; decoupling relationship; the Pearl River Delta Region

工业化及城市化的发展是人类文明发展的产物,促进了经济的快速发展,但同时也带来了大量碳排放增加等问题,使得区域可持续发展问题面临严峻挑战^[1-2],由此探究碳排放与经济间的脱钩关系及碳排放空间网络特征的相关研究也成为学术界关注的焦点问题之一^[3]。我国作为全球第二大经济体,为解决温室气体引起的全球气候变暖问题和区域性生态环境问题,国家在战略政策上做出积极响应,全面推行碳达峰和碳中和的“双碳”战略,致力于推动区域社会经济发展的可持续性发展^[4]。随着经济发达地区从高速发展向高质量发展转型,社会经济的发展逐渐减少了对高碳能源的依赖,经济发展与碳排放之间开始出现反向变动关系,即脱钩关系^[5]。在“双碳”战略纵深推进的背景下,碳排放与经济增长的脱钩关系已超越传统单一区域、单一要素的线性范式,呈现出“时空耦合-网络关联-节点异质”的多维复杂特征。厘清碳排放与社会经济间的脱钩关系,揭示区域碳排放的空间关联网络关系,识别碳排放网络中的关键节点和中心节点,以更好地认知和实现“双碳”的科学规律,也是重要的关键性科学问题。

长期以来,我国能源消费结构较为单一,以煤炭消费为主,工业能耗强度高,能源消费结构的失衡决定了碳排放与经济发展之间产生“挂钩”^[6]。面向可持续发展和生态文明建设,我国明确提出

2030 年实现碳达峰,2060 年实现碳中和的“双碳战略”^[7],意味着区域碳排放将全面迎来由增转降的历史性转折拐点,区域碳排放与经济发展之间逐渐实现脱钩。但随着区域异质性增强,单一指标难以揭示多尺度、多主体、多机制交互下的脱钩演化路径。城市是碳排放活动的中心^[8],也是碳减排的主要核心区。伴随城市化进程由单体扩张迈向群落融合,城市群内部在基础设施互联互通、产业链垂直分工与要素市场一体化驱动下,物质流、能源流与信息流呈指数级增长,城市间碳排放的空间联系亦突破传统“属地-边界”范式,呈现出多尺度嵌套、非线性耦合与动态演化的复杂网络特征。基于有向加权复杂网络视角,节点城市不再仅是碳排放的“源”或“汇”,而是转化为碳资源流动的“路由器”:有向加权复杂网络出强度反映对外碳服务的供给能力,入强度表征对异地碳负载的消费需求,介数中心性则衡量在网络中充当“碳中介”的枢纽地位,碳治理逻辑亟需从“行政区经济”转向“流域-网络”协同^[9-10]。洞悉城市群碳排放的“黑箱”结构,精准刻画城际碳流动的空间交互机理,已成为制定协同减排的关键科学前提。近年来,学界遵循着“格局-过程-机制”的研究链条,将空间统计学与多区域计量模型深度融合,揭示其区域碳排放的空间关联性和异质性特征,以及空间溢出效应^[11-13]。随后,复杂网络技术被引入以精细刻画碳排放的空

间分布格局与城际转移路径,通过节点中心性、边权强度及社团识别量化“碳流”结构,显著提升了空间解析度;然而,数据更新滞后、动态捕捉能力弱,时效性不足成为制约实时政策响应的突出短板^[14]。近年来,研究者普遍将引力模型用于识别碳排放空间网络关系,系统识别城市群碳排放空间关联中的整体和个体之间的空间网络关系和区域关键性特征^[15-16],研究从内生、外生等多维变量分析其网络关系的影响机制,认为城市间的能源流、资金流、技术流、数字流和生态流综合影响着碳排放的流动关系,区域间的产业联动和联合减排策略对整体碳排放具有互惠作用^[10]。碳排放不仅具有本地效应,更通过贸易、投资、产业转移、能源流动等渠道产生跨区域的空间溢出效应。借助复杂网络理论,可构建碳排放空间关联网络模型,识别网络结构特征与演化规律。学界对碳排放空间关联网络的研究逐渐趋于深入,网络关系的刻画也趋于定量化发展,但影响区域碳排放的整体网络及个体结构的关键因素识别,以及个体内部及个体之间的微观联通模式研究等还有待于进一步深入。

珠江三角洲地区作为国家三大增长极之一,其高度一体化、深度全球化与快速产业升级的复合特征,为解析经济先发地区“碳达峰-碳中和”演化路径提供了不可替代的研究的典型区域。本文系统分析 2010—2022 年珠三角城市群区域碳排放的时空演化特征,揭示其碳排放与社会经济之间的脱钩关系,深度剖析碳排放区域整体及个体之间的空间关联网络关系,考虑到相邻城市间空间集聚效应带来的影响,采用块模型刻画不同板块的溢出及接收关系,揭示其内部联系和指向性,并深化分析其影响机制。该研究对于支撑探索率先经历经济高质量跃升、人地关系良性耦合与可持续范式系统重塑的珠江三角洲地区路径,具有辐射全国、锚定“双碳”战略与全球超大城市群治理的理论参考和实践价值。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

珠江三角洲地区位于广东省中南部、珠江下游,是我国南亚热带最大的冲积平原,也是我国重要的城市群,包括广州、深圳、佛山、珠海、东莞、中

山、惠州、肇庆、江门 9 个地级市,土地面积为 5.48 万 km²,占全省土地面积的 30.5%。珠江三角洲地区作为我国华南地区的经济中心地带,城市化率高达 87.48% (2022 年),集聚了全省约 61.86% 的人口;地区生产总值约 10.47 万亿元,为全省 81.07% 的经济总量,且以第二、第三产业为主;其能源消费也较高,其中电力消费量为 5 559.56 × 10⁸ kWh,占全省 70.64%,但自 2010 年以来其 9 个地市的单位 GDP 能耗增长速度均为下降趋势。珠江三角洲地区各地市之间经济发展水平相对差异较大,其中广州和深圳两个一线城市呈绝对领跑优势,并带动佛山和东莞两市迅速发展,4 市的经济水平高于其他地市,且在 2020 年后 4 个地市的地区生产总值均超过 1 万亿元。2021 年《广东省生态文明建设“十四五”规划》中提出,着重推动珠三角城市碳排放率先达峰,这对珠江三角洲地区的碳减排目标提出了更高的要求。

1.2 研究方法

1.2.1 碳排放测算

基于 IPCC 的表现消费量法和碳排放系数法,参照《IPCC 国家温室气体排放清单(2006)》及《省级温室气体清单编制指南》中碳排放核算内容和方法,主要从综合能源消费碳排放方面对珠三角的碳排放进行测评。计算公式如下:

$$C_{ij} = Q \cdot e \tag{1}$$

式中: C_{ij} 为第 i 年 j 城市能源消费碳排放量,单位为 t; Q 为能源折标准煤后的消费量,tce; e 为能源折标准煤后的碳排放系数,t/tce。国内采用的能源燃料折标准煤后 CO₂ 排放系数取值范围介于 2.42 ~ 2.72 t/tce,本文参考娄伟等的研究结果^[17],取值 2.6 t/tce。

1.2.2 脱钩模型

Tapio 脱钩模型的稳定性相对较好,能够较为精准地区分脱钩状态^[18],本文采用该模型测评珠江三角洲地区碳排放与社会经济的脱钩关系。公式如下

$$\rho = \frac{\Delta C / C}{\Delta G / G} \tag{2}$$

式中: ρ 为脱钩弹性指数, ΔC 、 ΔG 分别为碳排放年度增量与社会经济增量,依据 ρ 、 ΔC 和 ΔG 的取值范围,将脱钩状态分为 8 类(见表 1)。

表 1 碳排放与社会经济脱钩状态及含义
Tab. 1 The decoupling state and meaning of social economy and carbon emissions

碳排放增量	社会经济增量	ρ 脱钩弹性指数	脱钩状态	含义
$\Delta C < 0$	$\Delta G > 0$	$\rho < 0$	强脱钩	社会经济水平提升,碳排放量减少
$\Delta C > 0$	$\Delta G > 0$	$0 \leq \rho < 0.8$	弱脱钩	社会经济增速显著高于碳排放增速
$\Delta C > 0$	$\Delta G > 0$	$0.8 \leq \rho \leq 1.2$	扩张连接	社会经济增速与碳排放增速大致相同
$\Delta C > 0$	$\Delta G > 0$	$\rho > 1.2$	扩张负脱钩	社会经济增速显著低于碳排放增速
$\Delta C > 0$	$\Delta G < 0$	$\rho < 0$	强负脱钩	社会经济水平下降,碳排放量增加
$\Delta C < 0$	$\Delta G < 0$	$0 \leq \rho < 0.8$	弱负脱钩	社会经济降速显著高于碳排放降速
$\Delta C < 0$	$\Delta G < 0$	$0.8 \leq \rho \leq 1.2$	衰弱连接	社会经济降速与碳排放降速大致相同
$\Delta C < 0$	$\Delta G < 0$	$\rho > 1.2$	衰退脱钩	社会经济降速显著低于碳排放降速

1. 2. 3 社会网络分析

社会网络分析(social network analysis, SNA)被广泛运用于分析多种网络组织的结构,能有效识别复杂网络中最具有影响作用的关键节点和中心性,将数据量冗杂的数据集转化为简单直观的图形^[19-20]。研究中采用社会网络分析方法辨析珠江三角洲地区碳排放网络的空间关联特征,从整体网络、个体网络和块模型 3 个维度探究珠江三角洲地区整体碳排放网络结构及不同地市间碳排放的空间联动作用关系,揭示碳排放网络构造的紧凑程度,反映城市间碳排放的空间联系频率及城市间的互联互通水平,识别碳排放网络中的关键节点和中心节点,探寻网络中某一城市受其他城市的影响程度,进而探讨区域碳排放空间联系的模式。

1. 2. 4 指标选择和 QAP 回归模型构建

基于地理学、经济学等学科理论基础及区域碳排放特征,综合考虑前人研究基础,一般认为碳排放水平和地理空间位置、经济发展水平、科学技术创新能力、产业结构、人口等因素相关^[21-23]。由于这些影响因素之间可能存在多重共线性问题,而 QAP 回归模型不需要独立性和正态分布的假设,能较好地解决共线性问题^[24]。由此,研究综合考虑地理空间邻近性、经济、社会、人口等多要素指标构建碳排放空间关联影响因素模型。

$$R = f(D, U, E, I, G, T, H) \tag{3}$$

式中: R 为碳排放空间关联矩阵; D 为地理空间邻近性,以城市地理空间几何中心之间的距离表征; U 为城市化水平差异,即城镇人口占总人口比重表征; E 为能源消费强度差异,用能源消费总量和能源消费强度(即单位 GDP 能耗)表征; I 为产业

结构的区域差异,以第三产业占比来表征; G 为经济发展水平的区域差异,以地区生产总值(GDP)、人均 GDP 和 GDP 年均增速表征; T 为技术创新水平的区域差异,以全社会 R&D(参与研究与试验发展)经费内部支出占 GDP 比例、R&D 活动人员及发明专利授权量综合表征; H 为环境保护差异,以工业废气达标总量、工业烟尘去除率、人均公园绿地面积来表征。各指标需先用极差法进行标准化处理,由多要素构成的指标,取其平均值后,再构建差异矩阵。

1. 3 数据来源

研究以珠江三角洲地区为研究区域,基于 IPCC 的测评方法估算碳排放量,能源消耗总量(当量值)等相关数据来源于 2010—2023 年《广东统计年鉴》《中国能源统计年鉴》;测评碳排放与社会经济的脱钩状态及碳排放与社会经济的空间联系等所需的国内生产总值(GDP)、年末常住人口数量等社会经济数据来源于 2010—2023 年《广东统计年鉴》《中国城市统计年鉴》以及各地市的统计年鉴等。

2 结果与分析

2. 1 碳排放时空演化特征

2010—2022 年珠江三角洲地区碳排放量呈逐渐增加趋势(见图 1),由 4. 06 亿吨增加至 5. 57 亿吨,但 2020 年碳排放总量首次开始出现下降趋势,2020 年及 2022 年分别较上一年份减少 1. 10% 和 2. 67%。不同地市的碳排放演化特征具有明显差异,其中广州及深圳市的碳排放水平明显高于其他地市,广州始终处于亿吨级碳排放

水平,深圳自 2015 年也进入亿吨级排放,两市的碳排放总量占珠江三角洲地区碳排放总量的 1/3 以上,但 2020 年两市碳排放总量均表现出逐渐下降趋势,且深圳市碳排放降幅要略高于广州。深圳作为国家创新型城市、全国先进制造业基地,科技推动产业升级,例如“分市规模以上工业企业 R&D 活动人员和经费”深圳高于广州三倍,在高速发展向高质量发展的转型中,深圳科技创新明显走在前列,碳减排工作也卓有成效。2010—2022 年,肇庆和惠州市为碳排放增幅最大的城

市,增幅分别为 137.61% 和 112.47%,肇庆经济水平相对较低,其碳排放总量也始终是珠江三角洲地区最少的城市;而惠州则由 2010 年的第 5 位攀升至 2022 年的第 3 位,仅次于广州、深圳,碳排放量为 0.77 亿吨,2022 年碳排放总量略微有所下降,降幅仅为 0.99%。在 9 个地市中,珠海为唯一一个在研究时段内碳排放始终处于攀升态势的地市,而其他地市均在 2018 年之后逐渐开始出现碳排放下降趋势。

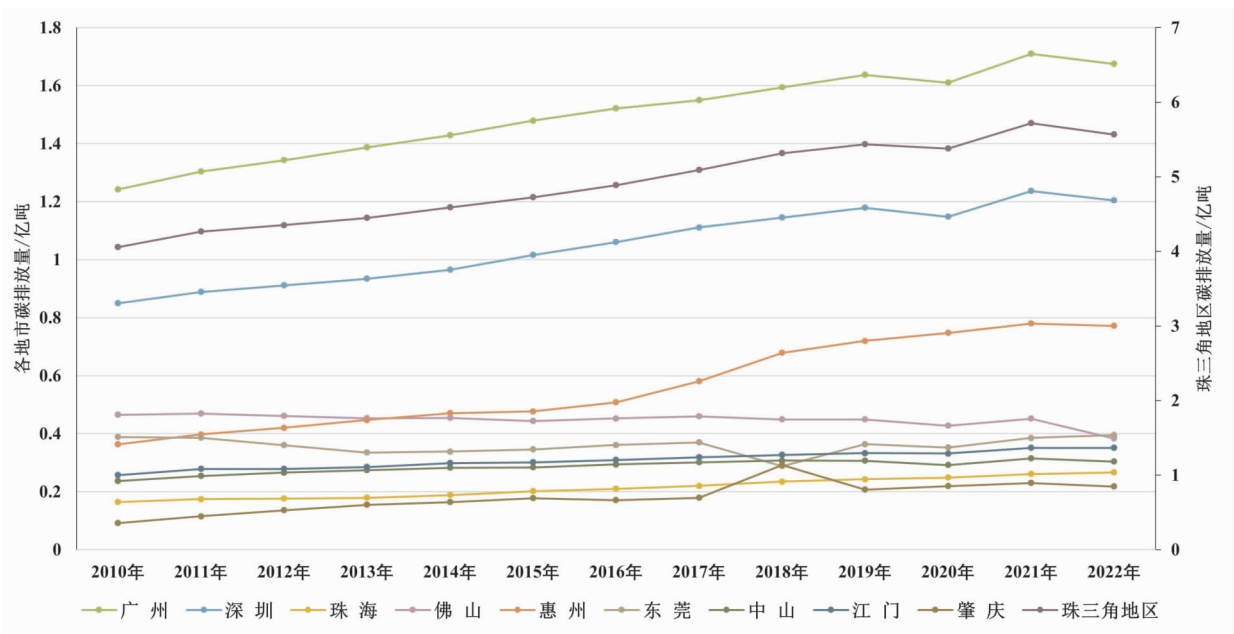


图 1 2010—2022 年珠江三角洲地区碳排放时序变化特征

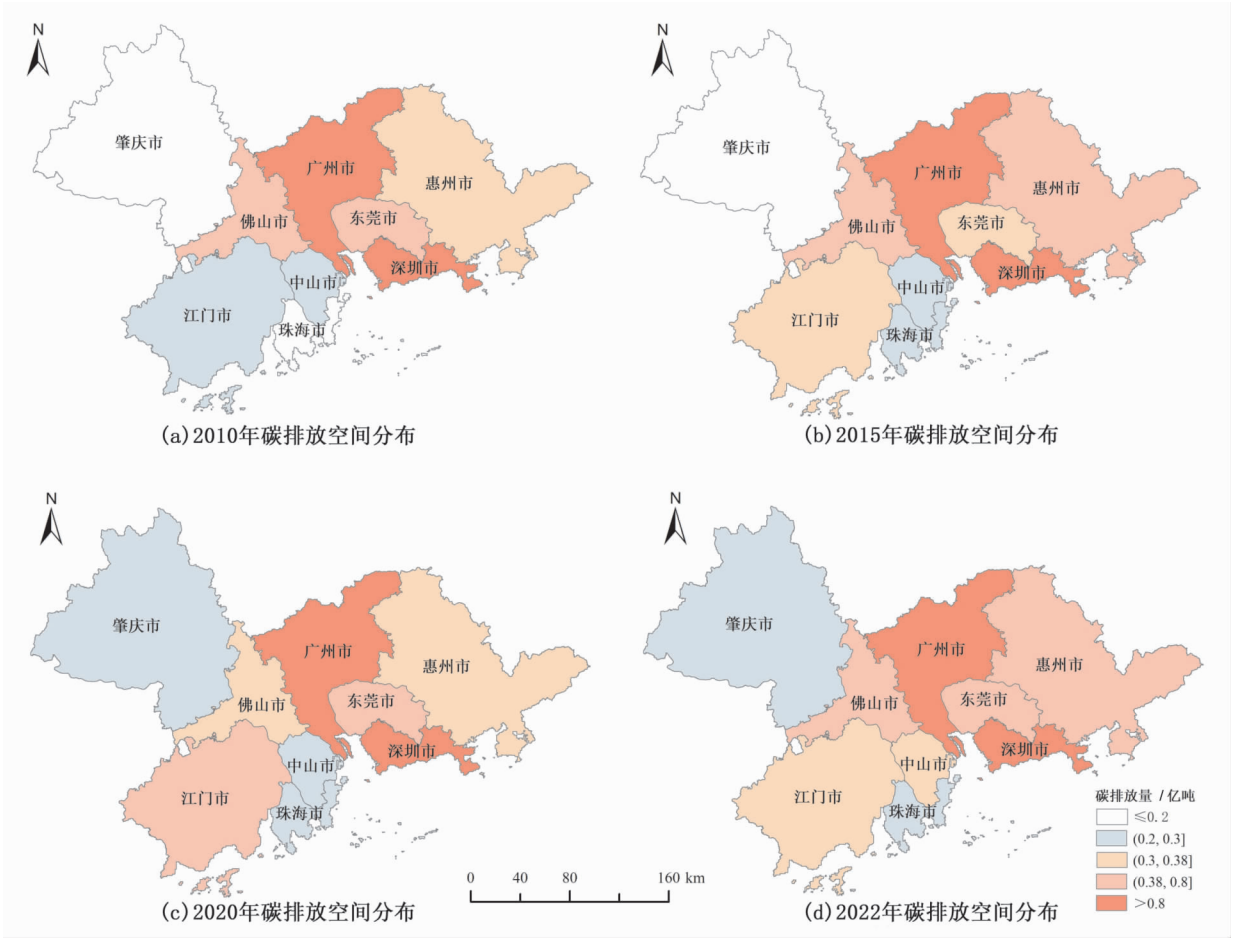
Fig. 1 Temporal variation characteristics of carbon emissions in the Pearl River Delta Region from 2010 to 2022

珠江三角洲地区碳排放量的空间分异性特征明显,呈中心高、两侧低的空间分布格局,且珠江口东侧高于西侧(见图 2)。碳排放量高值区集中于广州和深圳,次高值区为佛山和东莞,空间上逐渐形成广州—佛山、深圳—东莞两个碳排放带,且碳排放带逐渐延伸,深圳—东莞碳排放带逐渐向惠州延伸,广州—佛山碳排放带逐渐向中山和江门延伸的趋势。而肇庆和珠海市呈现碳排放的相对低值点。

2.2 碳排放与社会经济的脱钩关系

基于 Tapio 脱钩模型,测评得到珠江三角洲地区碳排放与社会经济的脱钩关系(见图 3)。2010—2022 年珠江三角洲地区整体碳排放与社会经济之间呈弱脱钩状态,碳排放和社会经济水平平均呈增加趋势,脱钩指数为 0.23。其中,2010—2019 年珠江三角洲地区的脱钩指数波动

上升,2018 年达到最大值,但随着 2020 年珠江三角洲地区碳排放总量的逐渐下降,其脱钩状态逐渐由弱脱钩趋于强脱钩状态发展,2019—2020 年以及 2021—2022 年脱钩指数均为负值。2010—2022 年,珠江三角洲地区 8 个地市(除佛山市)的碳排放与社会经济间整体呈弱脱钩状态。2013 年,深圳市成为碳排放权交易试点城市之一,企业开始在市场机制的作用下,自主进行节能减排,2010—2015 年深圳市脱钩指数上升至 0.57 后逐渐趋于下降,2020 年首次出现碳排放总量的下降,脱钩指数为负值,呈强脱钩状态,2020—2022 年脱钩状态虽在强脱钩和弱脱钩间有所波动,但整体呈强脱钩状态发展。而肇庆和江门市经济发展水平相对较低,碳排放与社会经济之间的脱钩状态也呈现多状态相互转化的不稳定阶段。



注:该图基于广东省公共地图服务网下载的审图号为粤 S(2022)206 号的标准地图制作,底图无修改。

图 2 珠江三角洲地区碳排放的空间分布特征

Fig. 2 The spatial distribution of carbon emissions in the Pearl River Delta Region

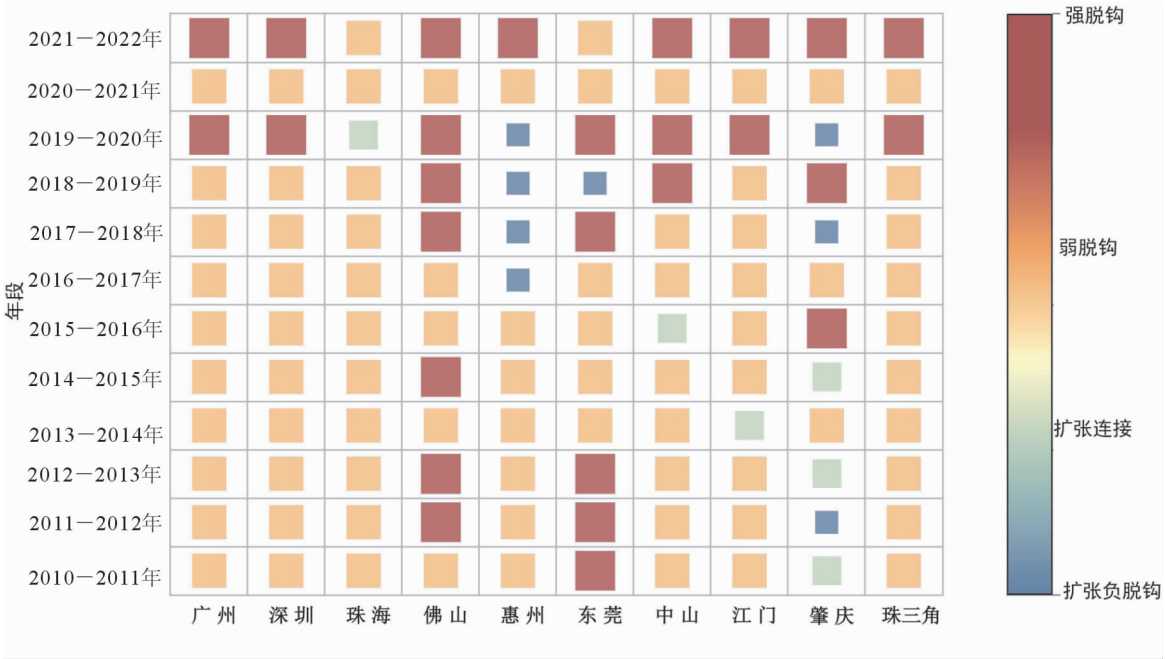


图 3 2010—2022 年珠江三角洲地区碳排放与社会经济的脱钩关系

Fig. 3 Decoupling relations of carbon emissions and social economy in the study area from 2010 to 2022

2.3 碳排放空间关联网络特征

2.3.1 整体网络结构特征

基于修正后的引力模型,构建珠江三角洲地区各地市之间的碳排放空间关联矩阵,并进行二值化处理,利用 Ucinet 和 Netdraw 软件对珠江三

角洲地区碳排放空间关联网络进行可视化处理,节点大小表示城市在珠江三角洲地区的中心地位,箭头表示城市间能源流动关系,得到珠江三角洲地区碳排放空间关联网络(见图 4)。

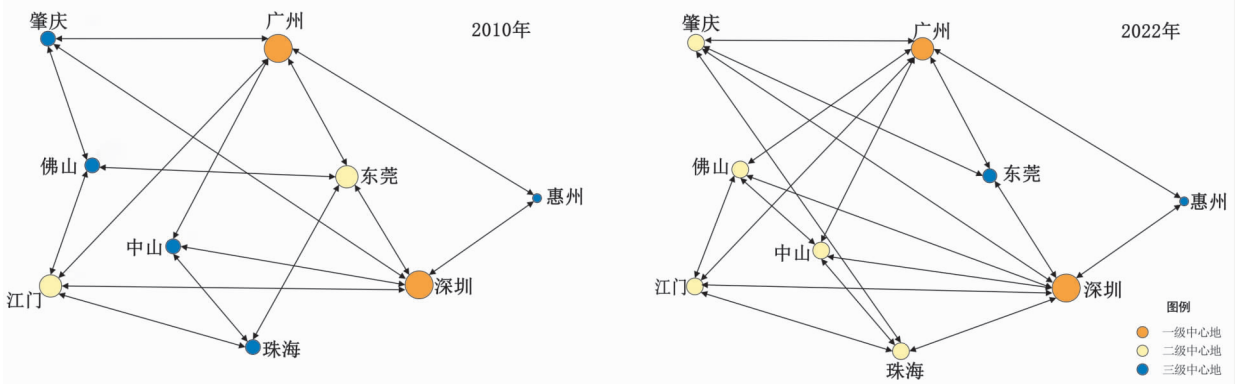


图 4 珠江三角洲地区碳排放空间关联网络

Fig. 4 Carbon emissions spatial correlation network in the Pearl River Delta Region

2010—2022 年,珠江三角洲地区的网络关联度均为 1(见图 5),说明各地市碳排放在空间维度上的关联不存在不可达点对数,各个城市在空间关联网络中连通可达,这种关联可能是相邻区域的直接空间关联,也可能是跨区域之间的间接空间关联,空间关联网络是较为稳定的状态。网络密度表征碳排放空间关联网络中各节点关联的紧密程度,能够反映网络总体表现出的周期性波动特征。网络密度不可过高或者过低,网络密度过高,说明城市之间存在多余的运输线路,增加资源流通的成本;网络密度过低,说明城市间联系交流不足,不利于资源要素的流通与高效利用。2010—2022 年,珠江三角洲地区的网络密度呈缓慢的稳定增加趋势,由 0.2 增加至 0.4。其中,2012—2020 年一直保持在 0.3,说明珠江三角洲地区网络密度仍略偏低,碳排放空间关联关系紧密程度仍不高,需进一步加强城市间社会经济活动及低碳技术研发的合作与交流。网络等级度反映空间关联网络的非对称可达程度,珠江三角洲地区的网络等级度呈整体下降趋势,但波动变化较大。2011 年、2014 年及 2018 年均为 0.89 的高值,说明有个别节点在空间关联网络中呈主导地位,控制着内部要素的流动,此时为不稳定的网络状态,网络系统过于依赖个别节点的主导;2016 年及 2021 年网络等级度为 0,说明空间关联网络稳定性较强,但在整个研究期内变化起伏较大,说明空间关联网络还尚不成熟。网络效率表征网络

关联线的数量多少,珠江三角洲地区网络效率呈整体下降趋势,由 0.71 下降至 0.61,且 2020 年后稳定在 0.61 的水平,说明区域整体的碳排放空间关联网络趋于稳定发展。

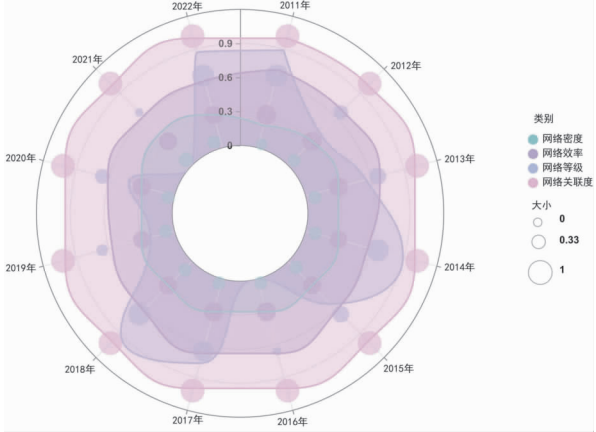


图 5 珠江三角洲地区碳排放空间关联整体网络特征

Fig. 5 Overall network characteristics of spatial correlation of carbon emissions in the Pearl River Delta Region

2.3.2 个体网络分析

不同城市碳排放水平及社会经济发展水平有所差异,故在空间关联网络中承担着不同的角色。根据碳排放空间关联整体网络特征的分析,从点度中心度、接近中心度以及中介中心度 3 个方面,分析珠江三角洲地区碳排放空间关联网络的个体特征(见表 2)。

表 2 珠江三角洲地区碳排放空间关联网络中心度分析

城市	点度中心度						接近中心度		中介中心度	
	中心度		点入度		点出度		2010	2022	2010	2022
	2010	2022	2010	2022	2010	2022				
广州	5.00	3.00	2.00	6.00	62.50	75.00	72.73	80.00	17.71	17.56
深圳	6.00	2.00	2.00	6.00	75.00	75.00	80.00	80.00	24.85	17.56
珠海	0.00	2.00	4.00	3.00	50.00	37.50	66.67	57.14	4.17	3.27
佛山	2.00	5.00	2.00	0.00	37.50	62.50	53.33	72.73	3.27	3.87
惠州	2.00	2.00	2.00	2.00	25.00	25.00	53.33	53.33	0.71	0.60
东莞	4.00	3.00	2.00	4.00	50.00	50.00	66.67	66.67	8.60	7.74
中山	1.00	3.00	2.00	2.00	37.50	50.00	57.14	66.67	1.91	5.95
江门	2.00	3.00	3.00	2.00	50.00	50.00	66.67	66.67	8.60	5.95
肇庆	0.00	3.00	3.00	1.00	37.50	50.00	61.54	66.67	5.18	1.79
均值	2.44	2.89	2.44	2.89	47.22	52.78	64.23	67.76	8.33	7.14

2010—2022 珠江三角洲地区点度中心度均值由 47.22 增加至 52.78,其中广州、深圳和佛山超过均值,说明大城市对整个碳排放空间关联网络的影响较大。尤其广州和深圳,广州的点度中心度有了明显提升,2022 年两市的点度中心度均为 75.00,标志着它们在网络中占据核心位置。广州和深圳的社会经济发展水平全国遥遥领先,也较早践行产业升级和低碳转型,良好的经济基础与区域地理优势,使得两市与其他城市也有较密切的空间关联关系。伴随广佛一体化的发展,佛山市在区域碳排放空间关联网络中对其他城市的影响力加大,点度中心度由 37.50 上升至 62.50。而珠海和惠州的中心度较低,2022 年分别是 37.50 和 25.00,且珠海是 9 市中唯一一个点度中心度有所下降的地市,说明其位于空间关联网络的外围区域。接近中心度和中介中心度的高值区均以广州和深圳为中心,向“广州—佛山”“深圳—东莞”两条城市带延伸,接近中心度表征碳排放空间关联网络中某节点受其他节点的控制能力,其说明大城市为网络核心主节点,主导力更强。

2.3.3 块模型分析

城市内部或城市之间的碳排放活动可能相互影响并产生集聚效应,通过块模型以刻画珠江三角洲地区碳排放网络的空间集聚特点以及板块的划分。将集中标准设为 0.2,最大分割深度则为 2,将珠江三角洲地区的 9 个地市划分为了 4 个板

块。

2010—2022 年珠江三角洲地区碳排放空间关联关系逐渐由内部关系向外部关系转变(见表 3),溢出效应主要转变为以板块间溢出为主,板块间的溢出关系由 11 个增加至 24 个,而板块内空间关联关系(内部关系)由 11 个减少至仅为 2 个,发生在板块 3 中。具体来看,2010—2022 年板块 1 均由广州和深圳组成,为净受益板块,广州和深圳作为全省乃至全国的经济发达城市,吸引了周围其他地市的资源要素,从而减少了本板块内部的关系数,2020 年具有 12 个接收关系和 5 个溢出关系,成为区域要素的主要集中地,也是碳排放高值区,随低碳技术的输入,该板块的碳排放强度呈现出下降趋势。2010 年,板块 2 仅为佛山市,表现为强接受板块,接收关系为 11 个,以单项接收关联为主,体现出佛山市以传统制造业基地为主的特征,主要以陶瓷、家电、家具等传统产业为核心,但随着广佛一体化发展的政策影响和空间邻近优势,佛山的传统制造业逐渐通过数字化转型实现升级。至 2022 年,佛山市连同相邻的肇庆市和中山市组成新的板块 3,表现较为强烈的空间外溢效应,9 个溢出关系、1 个接收关系及 2 个内部关系,主要发挥着输出作用,在网络中充当着净溢出的角色。珠海市始终为一个单独的板块,2010 年为弱溢出—强接收板块,溢出与接收均较强,但净值为接收,接收关系为 10 个,承担“经纪人”角色,为区域枢纽型城市,连接着区域

的不同板块;2022 年,珠海的溢出关系和接收关系数量分别为 2 个和 1 个,溢出和接收规模相对均等,表现出显著的碳排放双向流动,说明与周围其他地市间存在更加紧密的经济联系和技术交流等活动。板块 4 的城市较多,2010 年为 5 个城市,为强内部关联板块,实际内部关系比例高达 83.33%;2022 年减少至 3 个城市,保留东莞、江

门、惠州 3 市,逐渐提升了外部联系,空间溢出效应明显增加,表现出 8 个溢出关系和 8 个接收关系,溢出及接收作用均较强,说明在网络中充当“中介”作用,虽然自身未必是主要输出或输入方,但具有协调或传递碳排放流动的作用,被视为“经纪人”角色,起到了连接不同节点的“桥梁”功能。

表 3 珠江三角洲地区碳排放板块间的空间关联关系

Tab.3 The spatial correlation plate spillover effect of carbon emissions in the Pearl River Delta Region

年份	板块	城市	内部 关系	溢出 关系	接收 关系	期望内部 关系比例 /%	实际内部 关系比例 /%	板块特征
2010	板块 1	广州、深圳	0	4	11	11.11	0.00	净受益板块
	板块 2	佛山	0	2	11	0.00	0.00	强接收板块
	板块 3	珠海	1	3	10	0.00	25.00	弱溢出-强接收板块
	板块 4	东莞、江门、惠州、 肇庆、中山	10	2	1	44.44	83.33	强内部关联板块
2022	板块 1	广州、深圳	0	5	12	12.50	0.00	净受益板块
	板块 2	珠海	0	2	3	0.00	0.00	双向溢出板块
	板块 3	佛山、肇庆、中山	2	9	1	25.00	18.18	净溢出板块
	板块 4	东莞、江门、惠州	0	8	8	25.00	0.00	经纪人板块

测评得到各板块间的密度矩阵和像矩阵,以分析不同板块之间的交互作用联系(见表 4、表 5)。研究中以整体网络的密度值 0.32 为分界,高于该值则认为板块间具有较强联系,并将这些板块的密度值设为 1;低于此值的设为 0,指示相对较弱的关联性,据此构建了碳排放空间关联性网络的像矩阵。2010—2022 年,珠江三角洲地区板块间空间关联密度明显增加,板块之间的联系增加,要素间的流动更加频繁和复杂化。2022 年,板块 2、3 和 4 之间展现了强烈的内部联系和指向性,其中板块 3 和 4 对板块 2 的资源 and 要素有显著的吸收作用,表现出强烈的逆向溢出效应。在板块间的交互作用关联中,第 1 板块表现出与其

他板块间明显的溢出效应,且 2、3、4 板块间也表现出交互溢出效应,表明区域不同城市利用各自的比较优势与其他城市间均会产生不同程度的空间联系和要素流动。由此可知,一个板块内的关系数量明显超过板块之间的,表明存在显著的俱乐部效应,例如广州和深圳所在的板块 1;板块之间的联系也揭示了广州和深圳因经济发达、交通便利等因素接受了其他城市的各类要素,产生了要素的空间流动关系。东莞、江门、惠州属于经济人板块,对于区域各个地市间的网络关联具有一定的“桥梁”作用。各板块具有不同的等级关系,形成一定的梯度效应,在彼此的关联作用影响下形成复杂的碳排放空间关联网络。

表 4 珠江三角洲地区碳排放空间关联板块的密度矩阵

Tab.4 The density matrix of carbon emissions spatial correlation plate in the Pearl River Delta Region

年份		板块 1	板块 2	板块 3	板块 4
2010	板块 1	0.00	0.00	0.00	0.40
	板块 2	0.00	0.00	0.00	0.40
	板块 3	0.50	0.00	0.00	0.60
	板块 4	1.00	0.40	0.00	0.00

续表 4

年份		板块 1	板块 2	板块 3	板块 4
2022	板块 1	0.00	0.00	0.00	0.83
	板块 2	0.00	0.00	0.33	0.33
	板块 3	1.00	0.33	0.33	0.22
	板块 4	1.00	0.67	0.00	0.00

表 5 珠江三角洲地区碳排放空间关联板块的像矩阵

Tab. 5 The image matrix of carbon emissions spatial correlation plate in the Pearl River Delta Region

年份		板块 1	板块 2	板块 3	板块 4
2010	板块 1	0	0	0	1
	板块 2	0	0	0	1
	板块 3	1	0	0	1
	板块 4	1	1	0	0
2022	板块 1	0	0	0	1
	板块 2	0	0	1	1
	板块 3	0	1	1	0
	板块 4	0	1	0	0

2.4 碳排放空间关联网络的影响因素

珠江三角洲地区各地市间形成错综复杂的碳排放空间关联网络,基于对各地市碳排放空间交互作用的分析,构建社会网络矩阵 QAP 模型,进而解析该碳排放空间关联网络的影响因素(见表 6)。从地理空间、社会经济及人口分布等因素来看,地理空间邻近性、经济发展水平差异、能源消费强度差异及产业结构的区域差异是对碳排放空间关联网络关系影响较为明显的因子,具体表现为以下 3 个方面。

表 6 珠江三角洲地区碳排放空间关联网络影响因素回归结果

Tab. 6 Regression results of driving factors of carbon emissions spatial correlation network in the Pearl River Delta Region

	2010 年		2022 年	
	标准化系数	显著性水平	标准化系数	显著性水平
地理空间邻近性 D	-0.248 727	0.011 **	-0.347 83	0.001 ***
城市化水平 U	0.087 442	0.254	0.016 701	0.418
能源消费强度差异 E	-0.007 555	0.479	0.299 951	0.015 **
产业结构 I	0.321 633	0.005 ***	0.054 717	0.318
经济发展水平 G	-0.172 413	0.076 *	-0.279 299	0.046 **
技术创新水平 T	0.169 5	0.064 *	-0.064 21	0.314
环境保护差异 H	-0.109 769	0.170	0.142 272	0.099 *
决定系数 R^2	0.317		0.339	
调整系数 R^2	0.254		0.278	
p 值	0.00 ***		0.00 ***	
观察值	72		72	
置换次数	100 000		100 000	

注: *、**、*** 表示分别在 10%、5%、1% 的统计水平上显著。

1) 地理空间邻近性和经济发展水平对碳排放空间关联均为负向影响。研究中地理空间邻近性的指标选取为城市地理空间几何中心之间的距离,故该距离越小,即两城市距离越近,空间上的碳排放关系愈为密切。例如,当广州—佛山、深圳—东莞城市带处于城市化快速发展期时,第二产业的激增带来了大量碳排放,产业转移和要素流动等使得广州和深圳带动了佛山和东莞碳排放的增加,故碳排在空间上形成了连片化高值区^[25];但随着进入高质量发展时期,距离上的邻近加速了佛山、东莞产业结构的升级改造和低碳技术的空间流动等,碳排放的增速会首先在空间联动作用下有所下降^[26]。经济发展水平地区差异为显著负相关,说明经济发展水平接近的两市之间可能存在更紧密的碳排放关联性,且两个城市对劳动力、资源及技术的需求也具有较强的相似性,在市场机制的作用下,各种要素间的空间流动性加强,促使碳排放的空间关联性加强。

2) 能源消费强度差异和环境保护差异对碳排放空间关联的影响从不显著变为显著,且为正向显著。能源消费强度差异越大,说明经济发达的大城市吸引周边小城市的能源和资源等要素的流入,发达城市的空间中心性形成,同时也推动空间关联网络的形成;环境保护差异的影响表现在,可能企业会考虑经济成本迁往环境保护政策宽松的区域。产业结构和技术创新水平区域差异仅在 2010 年为正向显著,说明当区域间的产业结构差异较大时,更容易产生产业在区域间的迁移;而技术创新水平差异大的两个区域间,更容易产生科学技术的空间流动,促进欠发达地区的低碳技术发展。

3) 城市化水平差异和碳排放空间关联为正相关,但均未通过显著性检验。城市化以城镇人口占总人口的比重来表征,城市化水平越高的大城市往往能源消费量也较高,可能有更高的碳排放,但在研究中并未体现出城市化水平的地区差异和碳排放空间关联有明显的影响关系。也有研究认为,当城市化差异缩小时,区域间要素和资源的空间流动性减小甚至停滞,因而对碳排放的空间关联网络也不再产生显著影响^[22]。

3 讨论与结论

3.1 讨论

深入研究碳排放与经济发展间的交互作用关系,厘清碳排放的空间关联网络特征及其影响机制,这对于加快实现“碳达峰、碳中和”目标,以及经济高速发展向高质量发展的顺利转型具有至关重要的现实意义^[27-28]。

研究发现,广州、深圳的碳排放量居于高位,其原因为两市经济发展水平在珠江三角洲 9 市中处于领先水平,2022 年 GDP 总量均超过 2 万亿元,可以看出经济水平和产业结构是影响城市碳排放水平的重要因素。依据《珠江三角洲产业布局一体化规划(2009—2020 年)》^[29],惠州重点布局建设世界级石化产业基地,其第二产业占比 55.9% (2022 年),故惠州 2022 年碳排放量仅次于广州、深圳;东莞、佛山的产业定位均为国际产业制造中心,第二产业占比均超过了 50%;江门、中山为国家级先进制造业基地,技术进步引导产业升级,两市碳排放水平也相对前几个城市较低;而珠海在珠三角总体产业布局中处于沿海生态环保型重化产业带上,第三产业占比 53.8%,碳排放位居第八;肇庆的经济发展水平在珠三角 9 个城市中居于末位,碳排放量也是最少。碳排放与社会经济脱钩关系的研究中,研究区整体呈弱脱钩状态,这与王永阳等人的研究结果相一致^[30];而佛山市为唯一一个整体呈强脱钩状态的城市,自 2012 年起就趋于强脱钩状态,这得益于佛山市积极推动能源结构调整和能源产业的发展,依据《中国电气化年度发展报告 2022》^[31],佛山市能源生产消费迎来新的变革,“供电蓝”助力佛山市进入了新的电气化时代,在工业、建筑业、交通运输等多领域进行深度脱碳,逐渐进入绿色能源道路。

2010—2022 年珠江三角洲地区碳排放空间关联网络整体特征逐渐趋于复杂化发展,关联线条更多、更密集、密度也更大,城市间碳排放的联系由单向向双向、多向性发展。其中,广州和深圳市处于空间关联网络的中心位置,两市的经济发展水平、产业升级、科技创新等位居全省、乃至全国前列,中心城市的碳排放量、碳减排经验及减排措施等与相邻的佛山、东莞积极联系,包括对珠江三角洲地区的其他城市和全省的其他城市的联系

都更加积极,碳排放各个方面(包括数量、技术等)的流动性都趋于增强。点度中心度、接近中心度和中介中心度的高值区均为广州和深圳两个核心城市,大城市一方面引领经济发展,接受周围地市的人口流入和其他资源要素的流入,同时输出技术、资本等要素,带动周围区域的共同发展;中介中心度则表征节点在空间关联网络中的中介作用,说明广州和深圳对区域其他地市影响明显,两个发达城市随经济发展向高质量发展转型,其低碳技术、绿色产业发展、绿色消费习惯等也在影响着其他地市,是经济发展的导向,也是未来控制和调节整个区域产业结构和碳排放的重点。

总体而言,珠江三角洲地区碳排放空间关联网络呈空间非均衡分布的特点,广州和深圳为净受益板块,两市因自身资源的供给能力较低,需要周围其他城市对其源源不断的资源供给;但两市经济发达、产业基础雄厚、科技水平领先,且作为省会城市和特区有较好的政策支持,两市碳排放总量和低碳减排技术都具有先发优势,对周围地市具有明显的虹吸效应;但两市的产业基础雄厚、科技水平突出、政策支持力度大,具备实现节能减排目标的先发优势,因此对周边城市具有强大的虹吸效应。地理空间邻近性、经济发展水平差异、能源消费强度差异及产业结构的区域差异是影响珠江三角洲碳排放空间关联网络特征的主要因素,这也与徐水太、周汝波^[32-33]等对长江三角洲地区及广东省的研究吻合;政策因素对碳排放的影响,也决定了碳排放空间关联网络的周期性变化,郑航等人研究结果佐证了其正确性^[34]。

3.2 结论

1) 2010—2022 年珠江三角洲地区碳排放总量整体呈上升趋势,但 2020 年出现拐点,较上一年份减少 1.10%;空间分布上呈现中心高、两侧低的格局,形成以广州、深圳为中心并向周围扩散的空间结构。珠江三角洲地区整体碳排放与社会经济之间呈弱脱钩状态,脱钩指数均值为 0.23,其中 2018 年达到最大值,且脱钩指数逐渐趋于负值,脱钩状态趋于强脱钩状态发展。

2) 2010—2022 年碳排放空间关联网络整体特征逐渐趋于复杂化发展,关联线条更密集,城市间碳排放空间关系向双向、甚至多向性发展;网络密度呈缓慢的稳定增加趋势,但网络密度仍略偏低,说明碳排放空间关联关系的紧密程度仍不高;碳排放空间关联网络的个体特征可以看出,广州

和深圳的中心性较强,成为区域碳排放空间关联网络的核心节点,并沿着“广州—佛山”“深圳—东莞”两条城市带逐渐延伸;珠江三角洲地区碳排放空间关联关系逐渐由内部关系向外部关系转变,板块间的溢出关系增加至 24 个,两个核心城市广州和深圳组成净受益板块,说明主要吸收了周围其他地市的要素和资源。

3) 区域碳排放空间关联网络演化特征的主要影响因素有地理空间邻近性、经济发展水平的差异、能源消费强度差异及产业结构的区域差异,两城市距离越近,受到空间联动影响,碳排放空间关联性更明显;且空间邻接的两市经济水平常差异较小,故距离对碳排放空间关联关系为负向显著影响;而能源消费强度和产业结构的区域差异均为正向显著影响,二者区域差异较大时有时会促进碳排放空间关联网络的形成。

3.3 启示

珠江三角洲地区为经济强省广东省的经济发展引擎,也是节能减排工作的排头兵和重点区域。基于上述研究结论,可为珠江三角洲地区未来经济与碳减排工作的协同发展提供一些启示。

1) 强化空间关联网络协同治理,构建多层次碳减排共同体。依据研究结果,珠三角碳排放空间关联网络呈“广深双核辐射”结构,网络密度虽明显增加但仍不高(0.2 增加至 0.4),且核心城市(广州、深圳)为净受益板块,依赖周边资源输入,故建议:建立梯度跨区域协作机制,以“广深”为核心,依托已形成的“广佛”“深莞”城市带继续向外延伸,要求核心城市通过技术和资金的转移反哺周围地市(例如肇庆、江门),实现跨市碳排放协同减排;构建珠江三角洲地区的碳数据共享平台,实时监测各节点中心度变化(如中介中心度高的佛山、东莞)对弱关联边缘城市(如肇庆、惠州),定向增加绿色基建投资,避免“核心虹吸”加剧区域不平衡;由珠江三角洲地区继续外拓至全省,推动空间关联的内部化,将省内产业转移产生的碳排放溢出(如粤东西北)纳入珠三角网络治理范畴,探索跨行政区碳配额交易制度,强制要求产业转出方(如深圳、广州)承担部分承接地的减排成本。

2) 深化经济—碳排放脱钩路径,以差异化政策驱动绿色增长。珠江三角洲地区脱钩指数逐渐趋负(弱脱钩→强脱钩),说明经济增长与碳排放逐步解耦,但能源强度与产业结构差异仍是关键

阻力,建议实施“双轨制”产业政策:对于广州、深圳等强脱钩城市(脱钩指数趋负),严控高耗电新兴产业的绿电使用比例(例如可设定为“ $\geq 40\%$ ”);在弱脱钩城市(如珠海、惠州、江门),可设立传统制造业低碳改造专项,支持陶瓷、家电行业的氢能替代;激活地理邻近性的减排红利,利用城市间经济水平负向关联特征(距离越近,经济水平越接近,碳关联越弱),在 1 小时交通圈内(如广佛、深莞)试点产业共生园区,共享余热回收、碳捕集设施,降低单位 GDP 能耗;创新绿色金融工具,发行区域脱钩绩效债券,将各市脱钩指数与债券利率挂钩,激励地方政府通过服务业数字化、高端装备制造升级提升脱钩强度。

3) 锚定能源-技术-结构转型三角,打造零碳产业增长极。能源消费强度与产业结构差异对网络形成呈正向影响,需通过技术跃迁破解高碳锁定,可构建“核心研发-腹地应用”技术扩散链:依托深圳新能源、广州氢能技术优势,在东莞、佛山设立中试基地,推动新型光伏、固态电池技术在五金、家具产业应用;在肇庆、江门布局绿氢化工示范区,消纳粤西海上风电弃电;触发产业结构“链式反应”,针对能源强度差异大的行业(如深圳电子、佛山陶瓷),建立跨市碳排放效率对标体系,强制落后企业购买先进企业减排信用,设立珠三角高碳产能退出基金,补偿陶瓷、印染企业关停转产,尽量减少产业转型升级带来的经济损失。

参考文献

[1] Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2020 [DS/OL]. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 3269-3340(2020-12-11)[2025-5-10]. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.

[2] United Nations Environment Programme. Emissions gap report 2021: The heat is on: A world of climate promises not yet delivered[R]. United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2021: 1.

[3] Wang Z S, Xie W C, Zhang C Y, et al. Towards COP26 targets: Characteristics and influencing factors of spatial correlation network structure on U. S. carbon emission [J]. Resources Policy, 2023, 81: 103285.

[4] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. 经济研究, 2022, 57(1): 56-71.

Lin B Q. China's high-quality economic growth in the process of carbon neutrality[J]. Economic Research, 2022, 57(1): 56-71.

[5] 陈涛, 李晓阳, 陈斌. “双碳”目标下交通运输业碳排放脱钩效应与峰值预测[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(4): 104-116.

Chen T, Li X Y, Chen B. Decoupling effect and peak prediction of carbon emission in transportation industry under dual-carbon target[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(4): 104-116.

[6] 王世进, 姬桂荣, 仇方道. 雾霾、碳排放与经济增长的脱钩协同关系研究[J]. 软科学, 2022, 36(7): 104-110, 144.

Wang S J, Ji G R, Qiu F D, et al. Research on the decoupling and synergistic relationship between haze, carbon emissions and economic growth[J]. Soft Science, 2022, 36(7): 104-110, 144.

[7] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.

[8] Feng H, Rui X, Yue L, et al. The effects of urban agglomeration economies on carbon emissions: evidence from Chinese cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1096-1110.

[9] 林明裕, 崔兴华. 碳排放绩效的空间关联网络结构及其形成机制: 以长江经济带为例[J]. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2867-2878.

Lin M Y, Cui X H. The spatial correlation network structure and formation mechanism of carbon emission performance: A case study of the Yangtze River Economic Belt[J]. China Environmental Science, 2024, 44(5): 2867-2878.

[10] 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.

Yu J, Zhang Y, Li Q Y. Structural characteristics and evolutionary mechanism of spatial correlation network of carbon emissions in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(2): 372-391.

[11] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进: 基于县域碳排放数据的实证研究[J]. 地理科学, 2021, 41(11): 1917-1924.

Liu H J, Shao M J, Ji Y M. The spatial pattern and distribution dynamic evolution of carbon emissions in China: Empirical study based on county carbon emission data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(11): 1917-1924.

[12] Liu F Y, Liu C Z. Regional disparity, spatial spillover effects of urbanisation and carbon emissions in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241:

- 118226.
- [13] 朱冰丽,丁利杰.长三角城市群碳排放强度的空间效应及影响因素:基于产业转移视角[J].资源科学,2022,44(7):1373-1387.
- Zhu Y I, Ding L J. Spatial effects and influencing factors of carbon emission intensity in the Yangtze River Delta urban agglomeration: An industrial transfer-based perspective[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1373-1387.
- [14] 韩梦瑶,刘卫东,杨茗月.低碳转型下中国高耗能行业的碳风险传导解析:基于隐含碳关联网络视角[J].地理研究,2022,41(1):79-91.
- Han M Y, Liu W D, Yang M Y. Carbon risk transmission of China's energy-intensive industries under low-carbon transition: From the embodied carbon network perspective[J]. Geographical Research, 2022, 41(1): 79-91.
- [15] 李爱,王雅楠,李梦,等.碳排放的空间关联网络结构特征与影响因素研究:以中国三大城市群为例[J].环境科学与技术,2021,44(6):186-193.
- Li A, Wang Y A, Li M, et al. Study on the structural characteristics and influencing factors of spatial correlation network of carbon emissions: A case study of three major urban agglomerations in China[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(6): 186-193.
- [16] 郑航,叶阿忠.空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角[J].环境科学,2022,43(10):4401-4407.
- Zheng H, Ye A Z. Carbon emission reduction effect of spatial correlation network structure characteristics: From the perspective of urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4401-4407.
- [17] 娄伟.城市碳排放量测算方法研究:以北京市为例[J].华中科技大学学报(社会科学版),2011,25(3):104-110.
- Lou W. Study on measurement methods of city carbon emissions: Beijing as a case[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Sciences Edition), 2011, 25(3): 104-110.
- [18] 陈龙,孙芳芳,黄涛.深圳市生态资源消耗与经济增长的脱钩关系研究[J].生态经济,2019,35(3):152-157.
- Chen L, Sun F F, Huang T. Research on the decoupling relationship between economic development and ecological resource consumption in Shenzhen[J]. Ecological Economy, 2019, 35(3): 152-157.
- [19] Fan J D, Xiao Z H. Analysis of spatial correlation network of China's green innovation[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 299: 126815.
- [20] 闫丹,黄少轩,何佳乐,等.数字经济对区域碳排放空间关联网络结构的作用机制及优化策略[J].环境科学,2025,46(5):1-18.
- Yan D, Huang S X, He J L, et al. Formation mechanism of digital economy on the spatial correlation network structure in carbon emission and its optimization strategy[J]. Environmental Science, 2025, 46(5): 1-18.
- [21] 吉雪强,刘慧敏,张跃松.中国省际土地利用碳排放空间关联网络结构演化及驱动因素[J].经济地理,2023,43(2):190-200.
- Ji X Q, Liu H M, Zhang Y S. Spatiotemporal evolution and driving factors of spatial correlation network structure of China's land-use carbon emission[J]. Economic Geography, 2023, 43(2): 190-200.
- [22] 张苗,刘璇,彭山桂,等.中国省域土地利用碳排放效率的空间关联网络演变特征与形成机制[J].中国土地科学,2023,37(10):91-101.
- Zhang M, Liu X, Peng S G, et al. Evolution characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of provincial land use carbon emission efficiency in China[J]. China Land Science, 2023, 37(10): 91-101.
- [23] 刘敏,陈银蓉,王珏,等.中国土地利用碳排放效率的空间关联网络及其驱动因素:基于国家重大战略区域的考察[J].资源科学,2024,46(12):2462-2476.
- Liu M, Chen Y R, Wang J, et al. The spatial association network and driving factors of land use carbon emission efficiency in China: An investigation in the National Major Strategic Regions[J]. Resources Science, 2024, 46(12): 2462-2476.
- [24] 冯颖,侯孟阳,姚顺波.中国粮食生产空间关联网络的结构特征及其形成机制[J].地理学报,2020,75(11):2380-2395.
- Feng Y, Hou M Y, Yao S B. Structural characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of grain production in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(11): 2380-2395.
- [25] Xu Q, Dong Y X, Yang R, et al. Temporal and spatial differences in carbon emissions in the Pearl River Delta based on multi-resolution emission inventory modeling[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214: 615-622.
- [26] Xu Q, Dong Y X, Yang R. Influence of the geographic proximity of city features on the spatial variation of

- urban carbon sinks: A case study on the Pearl River Delta[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 354-363.
- [27] 张赫,黄雅哲,王睿,等. 中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变[J]. *资源科学*, 2022, 44(4): 744-755.
- Zhang H, Huang Y Z, Wang R, et al. Decoupling and spatiotemporal change of carbon emissions at the county level in China[J]. *Resources Science*, 2022, 44(4): 744-755.
- [28] 方大春,王琳琳. 我国碳排放空间关联的网络特征及其影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(3): 571-581.
- Fang D C, Wang L L. Network characteristics and influencing factors of spatial correlation of carbon emissions in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(3): 571-581.
- [29] 广东省人民政府. 珠江三角洲产业布局一体化规划(2009—2020 年)[Z]. 广州: 广东省人民政府, (2010-7-30)[2025-5-10]. <http://gdee.gd.gov.cn/attachment/0/421/421596/2527881.pdf>.
- [30] 王永阳,蔡宴朋,张盼. 珠三角城市群净碳排放与经济发展脱钩效应及其驱动力[J]. *生态学报*, 2025, 45(3): 1303-1314.
- Wang Y Y, Cai Y P, Zhang P. Decoupling effect and driving factors of net carbon emissions and economic development in the Pearl River Delta urban agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3): 1303-1314.
- [31] 中国电力企业联合会. 中国电气化发展报告 2022 [R]. 北京: 中国电力企业联合会, (2023-02-24)[2025-05-10]. <http://www.cec.org.cn/upload/1/editor/1660028204444.pdf>.
- [32] 徐水太,林一民,朱文兴,等. 长三角城市群碳排放空间关联网络特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2026, 47(7): 4374-4390.
- Xu S T, Lin Y M, Zhu W X, et al. Carbon emission characteristics and spatial correlation network research of Yangtze River Delta urban agglomeration: Based on the dual perspectives of "Attribute" and "Relationship" [J]. *Environmental Science*, 2026, 47(7): 4374-4390.
- [33] 周汝波,洪武扬. 社会网络分析视角下广东省土地利用碳排放空间关联与碳平衡优化分区[J]. *环境科学*, 2025, 46(9): 5403-5414.
- Zhou R B, Hong W Y. Spatial correlation and optimization zoning of carbon emission from land use in Guangdong province from the perspective of social network analysis [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(9): 5403-5414.
- [34] 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[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(5): 2413-2422.
- Zheng H, Ye A Z. Spatial correlation network structure and influencing factors of carbon emission in urban agglomeration [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(5): 2413-2422.

(编辑 邵煜)