

文章编号: 1671-4229(2022)03-0074-07

# 碳中和视角下广东省城市低碳发展效率 空间分异及其驱动机制

曾紫琪, 王芳\*, 冯艳芬, 陈子龙  
(广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 为了解广东省城市低碳发展现状, 提高城市的低碳发展效率, 利用 DEA-Malmquist 模型评价 2009 - 2018 年广东省城市的低碳发展效率空间分异特征及其演化特点, 并运用地理探测器分析城市低碳发展效率空间分异的驱动机制。结果表明: ①广东省各市的低碳发展效率存在较大差异, 2009 - 2018 年低碳发展效率较高的城市主要分布在珠三角, 西翼城市的低碳发展效率处于中等以上水平, 西翼城市的低碳发展效率水平优于东翼城市, 东翼城市的低碳发展效率水平与山区差异不大; ②广东省各市的全要素低碳发展效率与技术进步指数均呈增长趋势, 但仍存在部分城市技术进步与技术效率下降并存的现象, 该现象形成的原因主要因为缺乏优化产出效益的能力; ③城市的生产效益是影响低碳发展效率的主导因素, 能源消耗及科研资源、城市开发是影响低碳发展效率的重要因素。

**关键词:** DEA-Malmquist 模型; 城市低碳发展效率; 空间分异; 地理探测器

**中图分类号:** F 127      **文献标志码:** A

## Spatial variation in urban low-carbon development efficiency and its driving mechanism in Guangdong from a carbon neutral harmonized perspective

ZENG Zi-qi, WANG Fang\*, FENG Yan-fen, CHEN Zi-long

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

**Abstract:** In order to learn the current situation of low-carbon development in Guangdong cities, and improve low-carbon development efficiency, the DEA-Malmquist model was used to evaluate the spatial differentiation and evolution characteristics of low-carbon development efficiency in Guangdong province from 2009 to 2018, and the geographic detector was used to analyze the driving mechanism of spatial differentiation of low-carbon development efficiency. The results indicate that: ① There are great differences in low-carbon development efficiency among cities in Guangdong province. From 2009 to 2018, cities with high low-carbon development efficiency are mainly distributed in the Pearl River Delta. The low carbon development efficiency of the west wing cities is above the medium level, the low carbon development efficiency level of the west wing cities is better than that of the east wing cities, and the low carbon development level of the east wing cities does not differ much from that of the mountains. ② The Total Factor Productivity and technological change of all cities in Guangdong province show an increasing trend, but there is still a coexistence of technological advancement and declining technological efficiency in some cities, mainly due to the lack of capacity to optimize the effectiveness of output. ③ Production efficiency is the dominant factor influencing urban low-carbon de-

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(42071262); 广东省哲学社会科学“十三五”规划资助项目(GD16CGL03); 广州市哲学社会科学“十三五”规划资助项目(2020GZYZB90); 广州大学科研资助项目(YK2020016)

**作者简介:** 曾紫琪(1998—), 女, 硕士研究生. E-mail: zengziqi68@163.com

\* 通信作者: E-mail: wangfang@gzhu.edu.cn

**引文格式:** 曾紫琪, 王芳, 冯艳芬, 等. 碳中和视角下广东省城市低碳发展效率空间分异及其驱动机制[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2022, 21(3): 74-80.

velopment efficiency, while energy consumption, research resources, and urban development are important factors influencing urban low-carbon development efficiency.

**Key words:** DEA-Malmquist model; urban low-carbon development efficiency; spatial differentiation; geographic detector

气候变化挑战当前,我国积极实施应对战略。习近平总书记在2020年气候雄心峰会上提出了“力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”的目标,旨在推进我国的低碳经济发展,极大地推动了我国低碳事业进入攻关期。广东省作为低碳经济发展和低碳城市建设的先锋,在2009年便率先编制了我国第一个《低碳经济发展试点方案》;2010年被确定为全国开展低碳试点工作的排头兵之一。随后又陆续制定了多种战略方案,2021年4月发布的《广东省国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》更是提到要以碳达峰为牵引,促进经济社会发展全面绿色转型。在调整优化产业结构后,广东省整体在低碳发展上取得了明显成效,但也存在着部分后工业发展的城市因重大项目投产而无法完成节能降耗目标的情况<sup>[1]</sup>。

在碳中和与城市转型的背景下,提高城市的低碳发展水平是必要之举<sup>[2]</sup>。相对珠三角城市而言,粤东、粤西和粤北地区的低碳发展水平受到经济因素的强烈影响<sup>[3]</sup>。城市经济水平的提升必然离不开产业的发展<sup>[4]</sup>,而产业发展带来的环境问题也日趋严重。一方面,城市需要发展壮大,另一方面城市需要绿色低碳,这使得广东省各市的低碳发展水平存在着明显的差异。因此,如何缩小各城市间的低碳发展水平成为目前急需解决的重要问题。

效率是衡量管理有效性的标准,学者们运用效率测度低碳发展水平的研究已经相对成熟。周平<sup>[5]</sup>利用超效率DEA模型(Supper Efficiency Data Envelopment Analysis)测算湖南各市州“十二五”期间的低碳效率,并以此评估低碳发展的成效;杨颖<sup>[6]</sup>运用DEA模型计算了四川省的低碳经济发展效率,并以此作为评估“十一五”期间四川省低碳经济发展水平的依据;兰洁等<sup>[7]</sup>为了解湖北省低碳经济发展的困境,对湖北省的低碳经济发展效率做出评价;凡婕等<sup>[8]</sup>亦通过测算中国各省的低碳发展效率,对我国省域的低碳发展状况进行了实证分析。

上述分析表明,效率成为衡量区域低碳发展水平的重要标尺<sup>[5]</sup>。广东省作为低碳发展最为活跃的地区之一<sup>[2]</sup>,目前关于其城市低碳发展水平的研究大部分只停留在静态分析层面<sup>[9]</sup>,鲜有研究从动态层面分析广东省低碳发展水平的空间分异特征。基于此,本文采用DEA模型测算2009-2018年广东省各城市的低碳

发展效率,以此评价广东省城市低碳发展的水平。结合Malmquist指数,用以测度10年间城市低碳发展效率的动态变化,并利用地理探测器探讨低碳发展效率的影响因素。通过对广东省城市的低碳发展效率进行评价,为提高城市的低碳发展水平及缩小城市间的低碳发展水平差异提供参考。

## 1 研究区概况、方法及数据来源

### 1.1 研究区域概况

广东省位于北纬20°~25°、东经109°~117°之间,总面积为179 757 km<sup>2</sup>。全省主要分为4个区域(图1),即珠三角地区、东翼地区(粤东)、西翼地区(粤西)和粤北山区。珠三角地区包括广州、深圳、佛山、东莞、珠海、中山、江门、肇庆和惠州;东翼地区包括汕头、汕尾、揭阳和潮州;西翼地区包括湛江、茂名和阳江;粤北山区包括清远、梅州、云浮、河源和韶关。

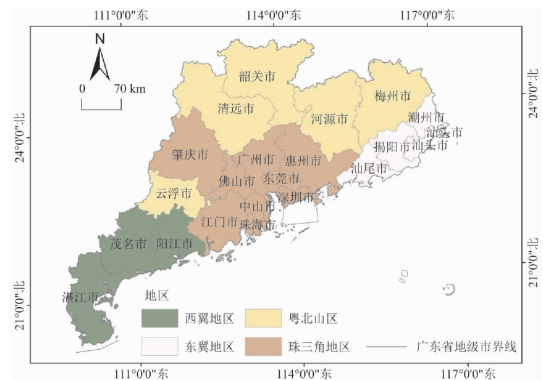


图1 广东省区域分布图

Fig. 1 Regional distribution map of Guangdong province

广东省经济发展水平位于全国各省前列,对能源的需求量大,是全国CO<sub>2</sub>排放量最高的地区之一。进入改革开放以来,广东省的产业结构模式由传统的“一二三”模式转变为“二一三”模式,并逐步地转向“三二一”模式。2008年,广东省被列为“中英气候变化影响与适应合作项目”国内的3个试点省份之一。2010年广东省全面启动国家低碳省试点工作。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)

数据包络分析最初于1978年由美国著名运筹学家Charnes提出,是主要应用于公共项目评价的一种效率

评价方法,可实现多输入、多输出的同类决策单元间的相对有效性评价<sup>[10]</sup>。现被广泛应用于经济效率评价<sup>[6]</sup>、资源配置应用<sup>[11]</sup>、技术进步与可持续发展<sup>[12]</sup>等众多研究领域。目前,DEA模型涵盖了CCR、BCC、FG和ST等多种模型,常用的主要是用于测算生产是否为规模有效与技术有效的CCR模型和评价生产技术相对有效的BBC模型<sup>[13]</sup>。本文采用CCR模型检验广东省各市的低碳发展效率,CCR的线性规划式如下:

$$\min[\theta - \varepsilon(e_1^T s^- + e_2^T s^+)] \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n x_j \lambda_j + s^- = \theta x_0 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n y_j \lambda_j - s^+ = y_0 \quad (3)$$

$$\lambda_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$s^- \geq 0, s^+ \geq 0 \quad (5)$$

式中, $n$ 表示总的决策单元数, $j$ 表示第 $j$ 个决策单元, $X_j, Y_j$ 分别为第 $j$ 个决策单元的投入与产出变量, $\lambda_j$ 为投入和产出的权重, $\theta$ 为效率评价指数, $\varepsilon$ 为非阿基米德无穷小变量, $e_1^T, e_2^T$ 空间单位向量, $S^-, S^+$ 分别为投入和产出的松弛变量。

### 1.2.2 Malmquist 指数

Malmquist指数最早是由Malmquist<sup>[14]</sup>提出的,由于其能够较好地刻画相对效率的动态变化,研究者将其与DEA模型相结合,并用于测算发展效率的变化。本文引入Malmquist指数,用于测度2009-2018年广东省各地级市低碳城市发展效率的变化情况。Malmquist指数表达式如下:

$$TFPCH = (M^t \times M^{t+1})^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$M^t = \frac{D_C^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_C^t(x^t, y^t)} \quad (7)$$

$$M^{t+1} = \frac{D_C^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_C^{t+1}(x^t, y^t)} \quad (8)$$

式中, $TFPCH$ (Total Factor Productivity Change)表示生产率的变化; $M^t, M^{t+1}$ 分别表示在 $t$ 时期和 $t+1$ 时期的技术条件下,从 $t$ 期到 $t+1$ 期的技术效率变化指数; $x^t, y^t$ 分别为 $t$ 时期的投入和产出, $x^{t+1}, y^{t+1}$ 分别为 $t+1$ 时期的投入和产出; $D_C^t(x^t, y^t), D_C^{t+1}(x^t, y^t)$ 分别为 $(x^t, y^t)$ 在 $t$ 和 $t+1$ 时期的距离函数; $D_C^t(x^{t+1}, y^{t+1}), D_C^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$ 分别为 $(x^{t+1}, y^{t+1})$ 在 $t$ 和 $t+1$ 时期的距离函数。

### 1.2.3 地理探测器

地理探测器是由王劲峰团队提出的一种探测某种属性空间分异性及揭示其背后驱动因素的统计方法,它包括因子探测、风险探测、生态探测以及交互探测4部分内容<sup>[15]</sup>。本文主要应用因子探测器来检验投入产出

要素( $X$ )的空间分布是否与城市低碳发展效率( $Y$ )的空间分布存在显著的一致性 or 相似性,以此分析投入产出要素对城市低碳发展效率空间分异产生的影响程度,用 $q$ 值来表示度量,表达式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (9)$$

式中, $L$ 为样点值 $Y$ 或者变量 $X$ 分区数; $h$ 为自变量的分类数; $N$ 为全省的样本数; $N_h$ 为各因素类型的样本数; $\sigma^2$ 为全省 $Y$ 值方差; $\sigma_h^2$ 为各因素类型的方差。 $q$ 取值范围为 $[0, 1]$ , $q$ 值越接近于1,说明 $Y$ 的空间分异性就越明显,而且自变量 $X$ 对样点值 $Y$ 解释力越强;当 $q=1$ 时,表示自变量 $X$ 的空间分异与 $Y$ 的空间分异具有完全一致性;相反, $q$ 值越接近于0,说明 $Y$ 的空间分异性越不明显,自变量 $X$ 对样点值 $Y$ 解释力越弱;当 $q=0$ 时,表示自变量 $X$ 与 $Y$ 的分布没有关系。

### 1.2.4 指标选取与数据来源

结合2011年中国社科院公布的低碳城市评价体系,以及参照前人研究的成果<sup>[5, 16-18]</sup>,发现碳排放是城市低碳发展效率最为直观的一个衡量因子,地区经济发展状况可以衡量一个地区的城市发展水平。因此,选取单位GDP二氧化碳排放量与地区生产总值为产出指标。从污染物排放、城市绿化方面选取指标衡量环境的低碳水平;从社会科研发展人才与投入、土地开发利用方面选取指标衡量社会的低碳水平;以全社会电力消耗和能源消耗总量代表能源的低碳利用水平。以低碳环境、低碳社会和低碳能源3个方面的指标作为测算城市低碳发展效率的投入指标。具体指标体系如表1。

表 1 城市低碳发展效率评价指标

Table 1 Evaluation index of urban low-carbon development efficiency

指标属性	指标类别	指标变量
投入指标	低碳环境	工业固体废物产生量/万 t
		工业废气排放量/亿 m <sup>3</sup>
		废水排放总量/亿 t
	低碳社会	城市人均公园绿地面积/km <sup>2</sup>
		R&D 经费内部支出/亿元
		R&D 活动人员/人
低碳能源	建成区面积/km <sup>2</sup>	
	能源消耗总量/万 t 标准煤	
产出指标	生产效益	全市电力消费量/亿 kW·h
		单位 GDP 二氧化碳排放量/(t/万元)
		地区生产总值/亿元

指标数据取自《广东省统计年鉴(2009-2018)》,

以及各地级市的统计年鉴与统计公报。本文所用到的二氧化碳排放量是由统计年鉴上获得的各能源种类消耗量,根据2006年联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提出的各种能源对应的碳排放系数计算所得。由于二氧化碳是非期望产出,因此,在处理单位GDP二氧化碳排放量数据时,对数据进行逆处理,处理后的数据被认为产出越高(二氧化碳排放量越少),则效率越高。

## 2 结果分析

### 2.1 广东省城市低碳发展效率时空分异特征

#### 2.1.1 城市低碳发展效率静态变化

通过Maxdea平台计算,获得广东省21个地级市

2009-2018年的低碳城市发展效率,见表2。当效率值为1时,表明该决策单元的低碳发展效率在生产的前沿面上,达到有效水平。效率值越低,意味着投入产出的效率越低,资源配置效率离最优状态距离越大。从2009-2018年的广东省低碳城市发展效率均值来看,广东省整体的低碳城市发展效率并不高,仅为0.43。广州、深圳在10年里的低碳发展效率均处于有效状态,说明这2个城市相对于广东省其它城市而言,其总体资源配置达到了最佳状态。这与城市的发展水平有很大的关系,广州、深圳率先进行产业转型,且这2个城市的资源丰富,因此,低碳发展水平优于其他城市。从均值看,仅有9个城市高于全省的平均水平,城市间的低碳发展水平差异明显,还有很大的改进空间。

表2 2009-2018年广东省各市的低碳发展效率

Table 2 Urban low-carbon development efficiency of cities in Guangdong province from 2009 to 2018

区域	城市	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	均值	排名
珠三角	广州市	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	深圳市	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	东莞市	0.44	0.49	0.58	0.54	0.52	0.57	0.63	0.53	0.63	0.61	0.55	4
	佛山市	0.54	0.75	0.83	0.85	0.81	0.77	0.72	0.73	0.72	0.70	0.74	3
	惠州市	0.23	0.25	0.24	0.24	0.27	0.24	0.19	0.20	0.18	0.21	0.23	20
	江门市	0.22	0.28	0.34	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.21	0.23	0.26	19
	肇庆市	0.25	0.29	0.32	0.37	0.33	0.34	0.28	0.34	0.26	0.27	0.31	14
	中山市	0.26	0.40	0.39	0.41	0.39	0.37	0.22	0.32	0.22	0.29	0.33	11
西翼	珠海市	0.55	0.51	0.60	0.54	0.51	0.52	0.66	0.47	0.56	0.60	0.55	5
	茂名市	0.47	0.65	0.72	0.54	0.54	0.61	0.53	0.49	0.38	0.41	0.53	6
	阳江市	0.33	0.42	0.37	0.43	0.45	0.50	0.44	0.50	0.39	0.51	0.44	9
东翼	湛江市	0.41	0.51	0.55	0.51	0.49	0.45	0.42	0.58	0.60	0.60	0.51	7
	潮州市	0.28	0.38	0.37	0.36	0.36	0.29	0.21	0.26	0.19	0.21	0.29	17
	揭阳市	0.31	0.38	0.35	0.36	0.38	0.33	0.22	0.29	0.21	0.25	0.31	13
山区	汕头市	0.28	0.34	0.30	0.29	0.31	0.28	0.24	0.25	0.21	0.22	0.27	18
	汕尾市	0.31	0.36	0.34	0.34	0.35	0.32	0.27	0.26	0.21	0.21	0.30	16
	河源市	0.30	0.35	0.48	0.36	0.35	0.32	0.29	0.28	0.23	0.29	0.32	12
	梅州市	0.28	0.34	0.35	0.33	0.31	0.31	0.32	0.29	0.22	0.28	0.30	15
	清远市	0.19	0.29	0.27	0.20	0.21	0.26	0.20	0.25	0.17	0.17	0.22	21
	韶关市	0.38	0.40	0.42	0.43	0.45	0.49	0.43	0.43	0.43	0.51	0.44	8
云浮市	0.28	0.32	0.41	0.45	0.46	0.28	0.30	0.28	0.27	0.26	0.33	10	
均值		0.40	0.46	0.49	0.47	0.47	0.45	0.42	0.43	0.39	0.42	0.43	

以3年为间隔,选取2009年、2012年、2015年和2018年4个年份,采用自然间断点法对其各自的低碳效率进行等级划分,见图2。

从图2可以看出,4个时间段城市低碳发展效率高值区域始终分布在珠三角地区,且广州、深圳保持高水平不变,珠三角的其余城市(东莞、佛山、珠海)均保持在较高水平,而肇庆、中山、惠州和江门的低碳发展效率则相对较低。东翼城市汕头、汕尾、揭阳、潮州的低碳

发展效率大致处于较低水平(除了2009年揭阳与汕尾处于中等水平)。西翼城市的低碳发展效率优于东翼城市,阳江、茂名及湛江保持着中等偏上的水平。山区城市除韶关的低碳发展效率保持在中等水平外,其余城市(如河源、梅州、云浮和清远)处于中等以下的水平。从空间分布的区域看,低碳发展效率较高的城市主要分布在珠三角区域,西翼城市比东翼城市的低碳发展效率要稍高,山区城市的低碳发展效率与东翼地区相差不

大, 10 年间城市的低碳发展效率分异现象并没有太大的改变。

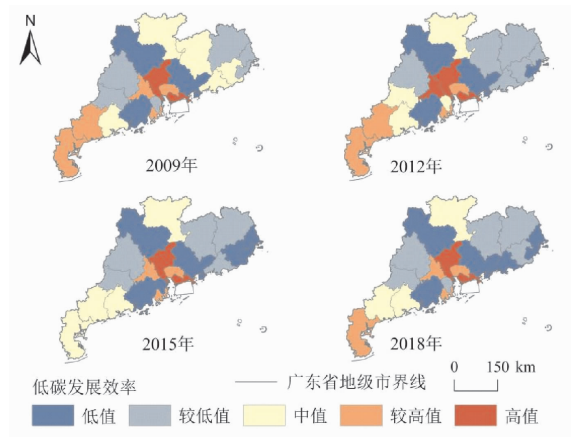


图 2 广东省城市低碳发展效率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of urban low-carbon development efficiency in Guangdong province

根据广东省统计年鉴的产业结构数据显示, 2009 - 2018 年珠三角地区的肇庆、中山、惠州和江门, 东翼地区的揭阳、汕头、汕尾和潮州, 产业结构均以第二产业为主<sup>[19]</sup>, 第二产业带来的高碳排量是造成城市低碳发展效率较低的主要原因之一。此外, 广东省在 2005 年印发了广东省山区、东西两翼与珠三角联手推进产业转移的相关文件, 文件里面提到为加快山区和东西两翼的经济发展, 珠三角的产业将向山区和东西两翼转移<sup>[20]</sup>。因此, 对于未能掌握高新技术的地区而言, 带动经济发展的同时也带来了较高的能耗。虽然粤西地区也承接了珠三角转移的产业, 但从粤西地区的产业结构来看, 粤西地区以第三产业发展为主, 因此, 与东翼地区的城市低碳发展效率相比, 西翼地区优于东翼地区。

### 2.1.2 城市低碳发展效率动态演进分析

为更好地反映广东省城市低碳发展效率的动态变化趋势, 运用 Malmquist 指数进行分析, 见表 3。

表 3 2009 - 2018 年广东省各市 Malmquist 指数变化及分解

Table 3 Change in Malmquist Index and decomposition by cities in Guangdong province from 2009 to 2018

区域	城市	技术效率变化 指数 (EFFCH)	技术进步指数 (TECHCH)	纯技术效率变化 指数 (PECH)	规模效率变化 指数 (SECH)	全要素低碳发展 效率 (TFP)
珠三角地区	广州市	1.00	1.06	1.00	1.00	1.06
	深圳市	1.00	1.11	1.00	1.00	1.11
	东莞市	1.01	1.07	1.00	1.01	1.09
	佛山市	1.00	1.08	1.00	1.00	1.07
	惠州市	0.98	1.12	1.05	0.94	1.10
	江门市	0.97	1.09	0.87	1.11	1.06
	肇庆市	0.98	1.10	1.03	0.95	1.08
	中山市	0.96	1.11	1.00	0.96	1.07
	珠海市	1.02	1.10	1.02	1.00	1.12
西翼地区	茂名市	0.96	1.09	1.00	0.96	1.04
	阳江市	1.02	1.10	1.02	1.00	1.12
	湛江市	1.03	1.09	1.00	1.03	1.12
东翼地区	潮州市	0.94	1.11	1.00	0.94	1.04
	揭阳市	0.95	1.11	1.00	0.95	1.05
	汕头市	0.95	1.10	0.94	1.01	1.04
	汕尾市	0.91	1.11	1.00	0.91	1.01
山区	河源市	0.95	1.10	1.00	0.95	1.04
	梅州市	0.98	1.09	1.00	0.98	1.06
	清远市	0.94	1.10	1.00	0.94	1.03
	韶关市	1.02	1.08	1.00	1.02	1.10
	云浮市	0.98	1.10	1.01	0.98	1.08
均值		0.98	1.10	1.00	0.98	1.07

从表 3 可以看出, 2009 - 2018 年各市的全要素低碳发展效率 (Total Factor Productivity, TFP) 均大于 1, 广东省整体的全要素低碳效率均值为 1.07, 年均增长率为 7%, 表明广东省整体低碳发展效率呈现上升趋势。全要素低碳效率的值可以分解为技术效率变化指数

(Efficiency Change, EFFCH) 与技术进步指数 (Technological Change, TECHCH), 10 年间各市的技术进步指数均大于 1, 而技术效率的变化同时存在增长与下降 2 种趋势, 意味着技术进步是推动全要素低碳效率增长的主要因素, 而技术效率则是全要素低碳发展效率增长的阻碍

因素。因此,随时间增长而形成的城市低碳发展效率的差异变化主要取决于各市的技术效率变化(*EFFCH*),即各市在给定投入的情况下取得最大产出的能力(二氧化碳的排放量最少)。技术效率呈现负增长的城市主要集中在低碳发展效率处于中低水平的城市,这反映了中低水平城市在发展中虽然其科学技术水平在不断提升,但仍出现了技术效率损失与技术进步并存的情况。可以理解为中低水平城市虽然利用技术进步实现了高产,但仍未能在实现高产的同时有效地控制二氧化碳的排放量。从技术效率变化指数(*EFFCH*)的分解看,江门与汕头的技术运用水平 *PECH* (*Pure Efficiency Change*) 值小于1,惠州、茂名和潮州等城市的规模经济及要素配置 *SECH* (*Scale Efficiency Change*) 值小于1。意味着江门与汕头的技术效率呈负增长是受到了技术运用水平的影响,而惠州、茂名和潮州等城市的技术效率呈负增长则是受到了规模经济及要素配置的影响。

## 2.2 广东省城市低碳发展效率驱动机制分析

为进一步了解投入产出要素对城市低碳发展效率的影响程度,运用地理探测器分析广东省城市低碳发展效率的影响机制。通过对比4个时期影响城市低碳发展效率的主导因素,进一步分析城市低碳发展效率的演变过程。因子探测结果表明,大部分投入产出要素对城市低碳发展效率分异的影响较大,因子解释力超过55%。以上4个时期的地区生产总值及单位GDP二氧化碳排放

量对广东省城市低碳发展效率分异的影响程度均排在第一位或第二位,表明生产效益是影响城市低碳发展效率的主导因素。而城市人均公园绿地面积、工业固体废物产生量对每个时期的城市低碳发展效率影响都较小,其余的因素均对城市低碳发展效率产生较大影响。

广东省的能源消耗主要集中在工业产业,工业碳排放最为严重<sup>[21]</sup>,其中电力消耗是二氧化碳排放的主要来源<sup>[22]</sup>,广东省在经过电源结构优化后,逐步实现了以更加低碳排的清洁能源发电代替煤电,大大降低了电力生产活动中二氧化碳的排放,使得电力消耗对城市低碳发展效率影响显著。在产业转型升级前,工业废水是污水的主要来源,伴随着一些废水排放较大的产业逐渐缩减,工业废水排放得到有效控制并明显下降。然而,生活污水以其快速增长的速度,逐渐替代了工业废水,成为废水排放的主体,并给环境带来了新的压力<sup>[23]</sup>。因此,由表4可以看出废水排放对城市低碳发展效率的影响呈现出了先下降再升高的趋势。高新技术及人才的引进改良了工业内部结构,广东省多个城市的工业逐渐朝集约化方向发展,大幅降低了资源环境的压力。建筑能耗在城市由工业型向服务型转变后,其对全省能源消费的影响会更加突出<sup>[24]</sup>,并且,无论是工业还是服务业,建筑部门都是重要的载体,因而建成区面积从4个时间段来看,对城市低碳发展效率都存在着重要的影响。

表4 广东省城市低碳发展效率分异的影响因子探测结果

Table 4 Detection results of factors influencing the divergence of low-carbon development efficiency in Guangdong cities

2009年		2012年		2015年		2018年	
影响因素	q 值	影响因素	q 值	影响因素	q 值	影响因素	q 值
地区生产总值	0.886 ***	地区生产总值	0.853 ***	单位 GDP 二氧化碳排放量	0.833 ***	单位 GDP 二氧化碳排放量	0.828 ***
单位 GDP 二氧化碳排放量	0.790 ***	单位 GDP 二氧化碳排放量	0.810 ***	地区生产总值	0.814 ***	地区生产总值	0.804 ***
建成区面积	0.708 ***	全市电力消费量	0.759 ***	全市电力消费量	0.785 ***	全市电力消费量	0.722 ***
废水排放总量	0.654 ***	能源消耗总量	0.748 ***	能源消耗总量	0.720 ***	废水排放总量	0.690 ***
全市电力消费量	0.637 ***	R&D 经费内部支出	0.726 ***	工业废气排放量	0.712 ***	R&D 活动人员	0.638 ***
R&D 活动人员	0.608 ***	工业废气排放量	0.724 ***	R&D 经费内部支出	0.708 ***	建成区面积	0.634 ***
R&D 经费内部支出	0.605 ***	R&D 活动人员	0.720 ***	R&D 活动人员	0.705 ***	R&D 经费内部支出	0.629 ***
能源消耗总量	0.604 ***	建成区面积	0.663 ***	建成区面积	0.662 ***	工业废气排放量	0.550 ***
工业废气排放量	0.431 ***	废水排放总量	0.584 ***	废水排放总量	0.588 ***	能源消耗总量	0.473 ***
城市人均公园绿地面积	0.354 ***	城市人均公园绿地面积	0.263 ***	城市人均公园绿地面积	0.445 ***	工业固体废物产生量	0.400 ***
工业固体废物产生量	0.323 ***	工业固体废物产生量	0.201 ***	工业固体废物产生量	0.251 ***	城市人均公园绿地面积	0.292 ***

注:\*\*\*代表该因子在统计上达到了1%的显著性水平

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

本文参照国内权威的低碳评价体系及已有研究,

建立了广东省城市低碳发展效率的评价指标体系,利用DEA-CCR模型及Malmquist指数测算广东省2009-2018年的城市低碳发展效率,分析10年间广东省城市低碳发展效率的空间分异特征,并运用地理探测器分析广东省城市低碳发展效率的影响机制,得出了以下

主要结论:

(1)广东省各市的低碳发展效率空间分异大,低碳发展效率处于较高水平的城市大多分布在珠三角地区;西翼城市的低碳发展效率处于中高水平;东翼城市的低碳发展效率处于中低水平,与山区城市无较大区别。区域间各市的低碳发展效率亦存在着较大的差别,其中差异最大的是珠三角地区。

(2)阻碍全要素低碳发展效率增长的原因主要是各市在给定投入情况下,使二氧化碳产出最小的能力还有待提高。低碳发展效率水平较低的城市,需要通过产业结构进行优化配置,优化管理和技术的发挥水平,从而促进全要素低碳发展效率的增长。

(3)城市的生产效益是影响城市低碳发展效率的主导因素,其次,能源消耗及科研资源(人才、资金)、城市开发是影响城市低碳发展效率的重要因素。而城市人均公园绿地面积、工业固体废物产生量对每个时期的城市低碳发展效率影响都较小,其余的因素均对城市低碳发展效率产生了较大的影响。

### 3.2 讨论

以往的研究主要是通过综合评价得分法进行城市低碳发展水平的评价,容易在确定权重时受到人为主观因素的影响,而 DEA 模型中的权重不需要事前设定,是由数学规划根据数据产生,因此,本文引入 DEA 模型作为评价城市低碳发展水平的主要方法,可以避免主观因素对评价结果的影响。

与以往研究结果一致,珠三角发展较好的城市(如广州、深圳、东莞、佛山和珠海),其低碳发展效率水平较高<sup>[9]</sup>。而珠三角其余城市(如惠州、肇庆)的低碳发

展效率水平与以往研究的低碳发展水平结果相比,存在一定差异,一个可能的原因是本文运用 DEA 模型算出的低碳发展效率是根据各市的投入与产出的匹配度进行测算的,因此,投入与产出的匹配度相对较高的城市,其城市低碳发展效率也随之较高;另外一个可能的原因是选取的指标不够全面,因此,对各城市的投入与产出匹配度存在一定的影响。

近年,广东省针对气候问题采取了多项措施进行改善<sup>[1]</sup>,广东省的低碳发展因此也得到了大的发展,空气污染排放物得到了明显的控制,但后期劲头不足,面临着末端治理潜力缩减和污染治理边际效益递减的状况<sup>[24]</sup>,这是导致部分城市技术进步指数增长而技术效率变化指数逆增长的重要原因之一。广东省产业结构逐渐由“二三一”模式转变为“三二一”模式,高能耗高碳排的第二产业比重降低,服务业的壮大,高新技术及人才的引入,将会进一步提升广东省城市低碳发展效率。影响城市低碳发展的决定性因素是经济发展,短期之内,部分城市发展还是需要依靠工业发展为主,要缩减广东省各地级市间的低碳发展效率的差异,还需从工业内部结构调整入手,优化配置结构,提高技术效率,提高在给定投入情况下二氧化碳排放最小的能力。广东省城市低碳发展效率空间分异明显,各市发展不平衡,高值区与低值区差异较大,如何缩小城市间低碳发展效率差异仍是值得关注的重点。本文仅从表面分析了投入产出要素对城市低碳发展效率的影响力度,有待进一步模拟在控制各项投入产出要素时,城市低碳发展效率的变化趋势,并以此作为提出提高城市低碳发展水平方案更有力的参考。

### 参考文献:

- [1] 刘蓉. 广东低碳转型与低碳发展研究[J]. 科技管理研究, 2012, 32(18): 102-106.
- [2] 黄华, 蔡克光, 邢谷锐. 基于碳平衡视角的广东省城市低碳发展特征及对策研究[J]. 城市发展研究, 2015, 22(11): 12-18.
- [3] 吴长兰, 王东, 苏彦涛. 广东省市域碳排放时空分异特征及影响因素——基于 EDGAR 数据的分析[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(1): 127-132.
- [4] 岳书敬, 邹玉琳, 胡姚雨. 产业集聚对中国城市绿色发展效率的影响[J]. 城市问题, 2015(10): 49-54.
- [5] 周平. 基于超效率 DEA 模型的区域低碳效率空间分异——以湖南省各市州为例[J]. 经济地理, 2017, 37(3): 188-192.
- [6] 杨颖. 四川省低碳经济发展效率评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(6): 52-56.
- [7] 兰洁, 赵杰, 陈芬, 等. 基于交叉 DEA 模型的湖北省低碳经济效率评价研究[J]. 湖北理工学院学报(人文社会科学版), 2019, 36(5): 35-42, 53.
- [8] 凡婕, 郭彬. 转型视角下中国省际低碳发展效率评价[J]. 煤炭技术, 2021, 40(4): 180-182.
- [9] 莫凡. 广东省低碳经济发展水平的评价及因素分析[J]. 中国商贸, 2014(5): 132-133, 136.
- [10] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 6(2): 429-444.

(下转第 88 页)