

# 深圳市工业碳排放现状及驱动因素研究

叶斌<sup>1</sup> 梁旭阳<sup>1</sup> 宋亚植<sup>2</sup>

1 南方科技大学 环境科学与工程学院 2 江苏师范大学 商学院

DOI:10.12238/eep.v5i6.1659

**[摘要]** 在深圳等城市率先试行和实验低碳经济,积极探索符合我国工业化和城市化实际的低碳经济发展道路是中央政府对深圳的期待。碳排放驱动力研究有助于揭示当前深圳碳排放转型过程中的驱动因素与典型特征,为破解超大城市碳困境提供参考。本文在数据分析与LMDI分解模型的基础上,对深圳市工业碳排放现状进行梳理分析,得到驱动深圳碳排放的相关因素与具体效力。本文研究结果显示,深圳市工业碳排放整体呈现明显下降趋势。工业碳排放主要来自计算机、通信和其他电子设备制造产生的电力和原煤消耗。能源强度和碳排放系数是抑制深圳市碳排放的主要因素,从业人口、人均产出和能源结构是促进深圳市工业碳排放的主要因素。本文的研究结果认为深圳市的工业已步入经济发展与碳排放脱钩阶段,可实现既不影响工业经济增长,同时碳排放大幅下降的目标。本文的研究结果将为“碳中和”过程中深圳产业转型升级提供数据支撑与基本面参考。

**[关键词]** 深圳; 工业碳排放; 驱动因素

**中图分类号:** TK421+.5 **文献标识码:** A

## Research on the Current Situation and Driving Factors of Industrial Carbon Emission in Shenzhen

Bin Ye<sup>1</sup> Xuyang Liang<sup>1</sup> Yazhi Song<sup>2</sup>

1 School of Environmental Science & Engineering Southern University of Science and Technology

2 Business School Jiangsu Normal University

**[Abstract]** It is the expectation of the central government for Shenzhen to take the lead in piloting and experimenting with a low-carbon economy in cities such as Shenzhen, and actively explore a low-carbon economy development path that is in line with China's industrialization and urbanization. The research on the driving forces of carbon emissions is helpful to reveal the driving factors and typical characteristics in the current transformation process of carbon emissions in Shenzhen, and provide a reference for solving the carbon dilemma of mega cities. Based on data analysis and LMDI decomposition model, this paper combs and analyzes the current situation and driving factors of industrial carbon emissions in Shenzhen. The results show that the overall industrial carbon emission in Shenzhen shows a significant downward trend. Industrial carbon emission mainly comes from electricity and raw coal consumption generated by the manufacturing of computers, communications and other electronic equipment. The energy intensity and carbon emission coefficient are the main factors to restrain carbon emission, while the employed population, per capita output and energy structure are the main factors to promote industrial carbon emission. Results of this paper supports that the industry of Shenzhen has stepped into the decoupling stage of economic development from carbon emissions, and can achieve the goal of not affecting the industrial economic growth, while significantly reducing carbon emission. The results of this paper will provide data support and fundamental reference for the industrial transformation and upgrading of Shenzhen in the process of "carbon neutrality".

**[Key words]** Shenzhen; industrial carbon emission; driving factors

### 引言

历经三个“五年规划”,深圳初步实现了空气质量达标、碳排放达峰和产业结构高端化的“两达一高”目标<sup>[1]</sup>。2010至2020

年间,深圳碳排放净共增加965万吨。其中,2010-2015年,深圳碳排放量增长1130万吨,碳强度下降28.9%;2016-2020年,深圳碳排放量下降166万吨,碳强度下降31%。比较2010-2015年和

2016–2020年两个时期,可以看到深圳碳排放强度加速下降。然而,由于经济增速放缓,碳强度下降速度持续超过经济增长速度时,深圳已进入碳达峰平台期。

当前,深圳市已形成以第三产业为主的产业结构。但与同为一线城市的北京、广州、上海相比,深圳市的第三产业占比在四个城市中排在末尾。且统计数据显示,2021年深圳第二产业占比为37%;规模以上工业总产值突破4万亿元,位居全国城市第一。作为排放量最大的产业,工业占比大将导致减排难度大、减排成本高。摸清深圳工业碳排放现状并理清其驱动因素是进一步推进工业碳减排的前提与重要条件。

本文基于数据分析与LMDI分解模型,从时间和空间维度挖掘深圳市工业能源消耗现状、提炼深圳工业碳排放特征,进而对工业碳排放影响因素进行要素分解,并据此提出适合深圳市降低工业碳排放的建议举措。本文的研究成果将对于深圳乃至全国工业碳排放减排提供一定理论参考与案例支持。

## 1 文献综述

相较于第一和第三产业,第二产业对中国碳排放强度影响最为显著<sup>[2]</sup>。在众多工业部门中,尤以电力、热力、采掘、化工等重工业部门碳排放量最大<sup>[3]</sup>。为降低工业碳排放,已有研究从改变能源消费结构<sup>[4,5]</sup>、能源消费强度<sup>[6]</sup>、产业结构<sup>[7]</sup>等多方面进行了积极探索。研究结果表明产业结构调整可有效降低工业碳排放<sup>[8]</sup>,且通过“双轮驱动”,中国可实现以结构减排和强度减排方式降低工业碳排放总量<sup>[9]</sup>。

为构建有效的碳减排路径,已有研究以碳排放源分解的方式,进一步挖掘工业减排潜力。基于指数因素分解法(IDA),在能量守恒的基础上,已有研究将碳排放分解为不同驱动因素<sup>[10]</sup>。Paulo等<sup>[11]</sup>基于IDA分解法综合考虑燃料结构、热效率、化石份额和地理效应等因素,评价了哥伦比亚综合电力碳排放强度的演化。Song等<sup>[12]</sup>基于时空IDA分解法采用2000–2015年省区面板数据来研究中国区域碳强度特征以及揭示主要影响因素的空间差异和时间动态,指出了影响区域碳强度变化的驱动因素时空差异并分析不同经济空间集聚区域的碳强度特征。Zha等<sup>[13]</sup>利用IDA分解法对2000–2016年的中国省级数据进行分解,确定了9个因素来解释区域二氧化碳排放的变化。进一步细化IDA模型,对数平均迪氏指数法(Logarithmic Mean Index Method, LMDI)成为当前CO<sub>2</sub>驱动因素分解的主流。Chen等<sup>[14]</sup>基于LMDI分解法探索了2002–2018年按经济结构和人口规模分类的中国不同城市二氧化碳排放的时空驱动因素,结果表明人均GDP和产业结构分别是最促进和最抑制的因素。Zhou等<sup>[15]</sup>基于LMDI分解法对1996–2012年中国8个主要地区碳排放与经济增长的脱钩关系进行研究,指出了影响各地区碳排放变化的主要因素。

在研究工业碳排放驱动因素方面,LMDI模型有着较好的延展性。Liang等<sup>[15]</sup>基于LMDI分解法对1991–2015年中国工业和子行业的18种不同能源二氧化碳排放量进行研究,指出了二氧化碳排放的特征和影响因素的动态演变规律。Wen等<sup>[16]</sup>基于LMDI分解法分析中国30个省份的工业二氧化碳排放驱动因素。Chen

等<sup>[17]</sup>基于LMDI分解法评估了中国珠江三角洲制造业碳排放变化的驱动力,结果表明经济增长促进了碳排放的高速增长,而产业结构效应,尤其是劳动密集型产业和技术密集型产业则有助于抑制碳排放的不断增加。Jia等<sup>[18]</sup>基于LMDI分解法,以河南省12个主要工业碳排放行业为研究对象,探索碳排放驱动因素分析碳排放与经济发展的脱钩关系。Zhao等<sup>[19]</sup>基于LMDI分解法对1996–2007年上海工业碳排放的主要影响因素进行了识别和定量分析。

已有对工业碳排放测算与驱动力分解的研究多集中于省际层面,对行业分类较为粗略,且在涉及工业部门结构的碳排放源研究方面缺乏必要的分析。对产业结构调整导致的碳排放比例变化缺少相应的机理分析,难以解释深圳市工业产值高且碳排放总量相对较低的现象。

本文在细化深圳涉及的工业部门基础上,运用深圳工业碳排放时间序列数据,研究深圳市工业碳排放现状,识别其工业碳减排潜力点;进而构建工业碳强度驱动因素的分解模型,基于LMDI方法解析深圳市工业碳排放强度影响因素,从机理与实证角度为深圳工业减排提供理论与实践支持。

## 2 深圳工业能耗现状

### 2.1 深圳工业产值

深圳市产业结构主要集中在第二产业和第三产业。图1显示,2009–2019年内,深圳市工业增加值增长152%,尤其在2009–2011年期间工业增加值增长迅猛,年增长率最高达到了18%;2012–2017年增长率较上一阶段有所放缓,在8%上下波动;在2017–2019年间,工业增加值增长率逐渐下降,截至2019年,增长率下降到4%。

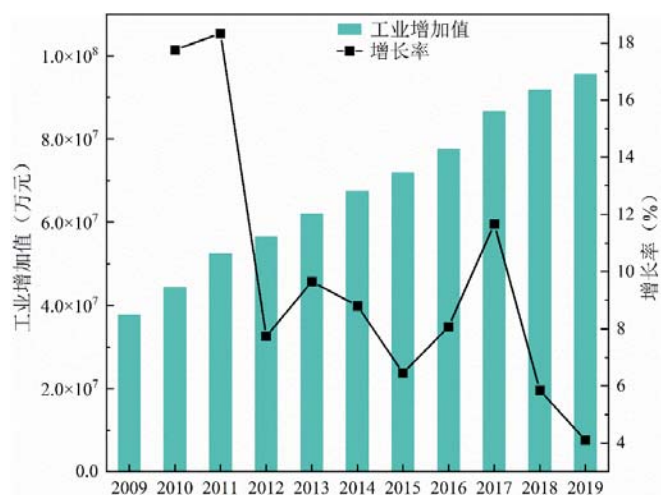


图1 2009–2019年深圳市工业增加值时序图

深圳市工业门类较为齐全,主要包括除煤炭开采和洗选业、非金属矿采选业、有色金属矿采选业、黑色金属矿采选业以及其他采矿业外有36个行业门类,且以高附加值、低能耗的计算机、通信设备制造业为主。近年来,土地成本昂贵,迫使高能耗、低产出的行业迁出深圳,造成工业增加值增长率放缓。

### 2.2 深圳市工业能耗总量

Ecological Environment and Protection

总体上，深圳市工业能源消耗量呈现出波动式下降趋势。如图2所示，深圳市工业能源消耗量在2010年达到了峰值，从2010年开始，深圳市的工业能源消耗开始逐年下降。2010年至2013年间，深圳市工业能源消耗量快速下降，尤其是2011和2012年，工业能源消耗量陡然下降，2013年下降幅度较小。2013至2016年，深圳市工业能源消耗量保持在1070万吨标准煤左右，但2017年后，深圳市工业能源消耗量开始又一波明显下降，且变化趋势与2010年至2013年相近。2009至2019年，深圳市工业能源消耗量从最高的1600万吨标准煤下降到975万吨标煤，下降39%。



图2 2009-2019年深圳市工业能源折合标准煤消耗量

具体地，首先，深圳市能源消耗强度呈显著下降趋势。图3所示，深圳市工业能源强度由2009年的0.364吨标准煤/万元逐渐下降到2019年的0.101吨标准煤/万元，下降了72%，降幅明显。



图3 2009-2019年深圳市能源消耗强度

第二，深圳工业能耗的结构调整显著。图4显示，2009年深圳市工业部门电力能源消耗占29%、天然气占17%、液化石油气占1%、燃料油占18%、柴油占20%、汽油和原油不到1%、原煤消耗占据14%。在经过2010年的能源结构转型升级后，各能源的消费

量占比开始发生显著变化，2011年后，工业能源消耗逐渐形成了以电力、天然气和原煤为主的能源结构。电力能源消耗占比经过缓慢上升后达到43%；天然气消耗占比在2009-2017年上升到37%，在2019年占比下降到28%。原煤消耗占比呈现倒“U”形，在2012年占比最高上升到29%后又逐渐下降到21%，液化石油气、燃料油、柴油、汽油和原油六种能源总计达到8%。

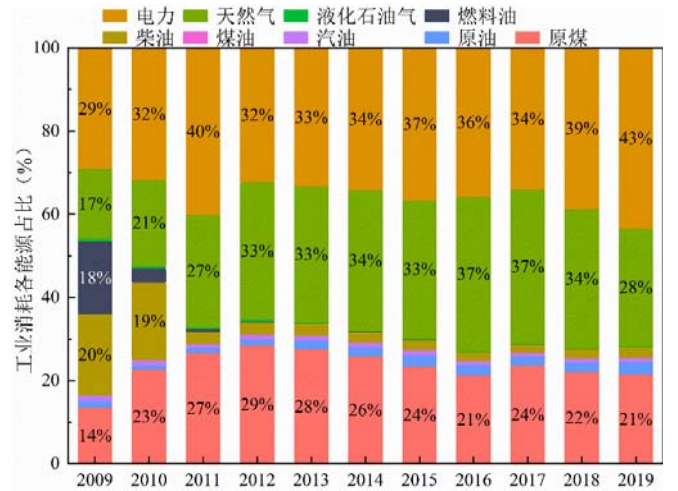


图4 2009-2019年深圳市工业各能源折合标准煤消耗量占比

第三，深圳市主要能源消费量变化差异性大。从图5的测算结果可看出，2009-2019年间深圳市工业能源消费类型中，只有电力和原油能源呈现出缓慢上升的趋势，其他能源整体呈现出下降趋势。与自身相比，每种能源消耗量显著，汽油下降48%、煤油下降91%、柴油下降90%、燃料油几乎实现100%下降、液化石油气下降84%。2019年原煤的消耗量虽然与2009相比增加12%，但与原煤消耗量最高的2011年相比，8年来原煤消耗量下降43.3%。天然气消耗量在2019年与2009年相比虽略有增加，但从2011年以来呈现出下降趋势，下降26.4%。

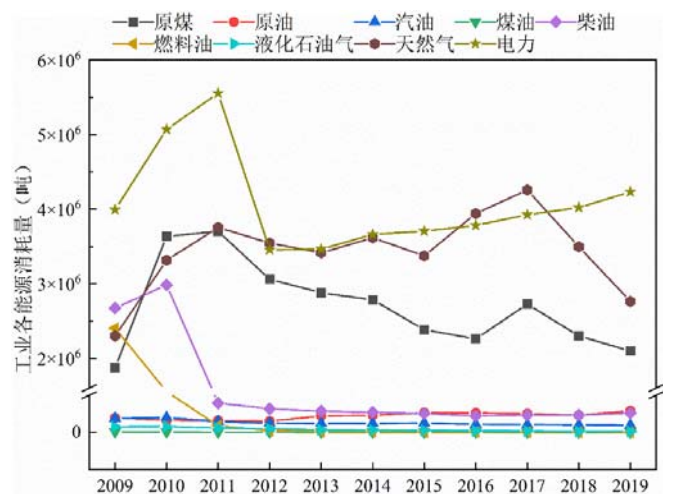


图5 2009-2019年深圳市工业各能源折合标准煤消耗量

综上，以能源结构为标准测算深圳市工业部门碳排放，深圳市工业碳排放主要来自电力的间接排放和化石能源直接排放。从行业大类分析深圳市工业CO2特征，电力、热力生产和供应业、

计算机、通信和其他电子设备制造业、电气机械和器材制造业、橡胶和塑料制品业以及石油和天然气开采业是碳排放量最高的几个行业。

### 3 深圳市工业碳排放驱动因素分析

#### 3.1 核算模型及数据来源

能耗数据统计方面, 本文根据深圳市工业部门能源消耗数据, 选择排放因子法测算工业碳排放量, 其具体公式为:

$$C = \sum_i^9 C_i \times EF_i \times \frac{44}{12} \quad \#(1)$$

其中表示深圳市工业部门的碳排放总量(万吨);  $i$  为不同的能源类型, 主要包括深圳市工业消耗的主要能源类型;  $EF_i$  为能源  $i$  的碳排放系数; 二氧化碳的分子量与碳元素相对原子质量的比值为44/12。

碳排放驱动因子解析方面, 本文根据KAYA恒等式分解深圳市工业碳排放驱动因素, 其公式为:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n P \times \frac{G}{P} \times \frac{E}{G} \times \frac{E_i}{E} \times \frac{C_i}{E_i} \\ \sum_{i=1}^n p \times r \times m \times e \times f_i \quad \#(2)$$

其中  $p$  为深圳市工业从业人口(人);  $G$  为深圳市工业部门的工业增加值(万元);  $E_i$  为第  $i$  种能源的消耗数量(万吨);  $c_i$  为第  $i$  种能源产生的碳排放量(万吨)。

根据LMDI分解模型, 将碳排放量变化情况分为5个影响因素(见表1)。

表1 LMDI分解法中各影响因素的符号及含义

影响因素	符号	含义	单位
从业人口	$\Delta C_p$	深圳市工业从业人口	万人
人均产出	$\Delta C_r$	工业增加值与从业人口的比值	万元/人
能源强度	$\Delta C_m$	能源消耗总量与工业增加值的比重	吨标煤/万元
能源结构	$\Delta C_e$	第 $i$ 种燃料占总能源消耗量的比重	%
碳排放系数	$\Delta C_f$	单位消费第 $i$ 种能源产生的碳排放	吨/吨

鉴于8种化石能源(原煤、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气)在不同年份碳排放系数的变化率较小, 本文假定化石能源的碳排放系数在研究期间保持不变。由于电力碳排放系数因电源不同而出现变化, 本文认为碳排放系数效应主要表现为电力碳排放系数变化对碳排放量变化引起的效应, 最终得到的碳排放增长量的综合效应公式为式(3)。

$$\Delta C = \Delta C_p + \Delta C_f + \Delta C_r + \Delta C_m + \Delta C_e \quad \#(3)$$

逐年各因素效应公式为:

$$\Delta C_p = \sum_{i=1}^n \frac{C_i^t - C_i^{t-1}}{\ln C_i^t - \ln C_i^{t-1}} \ln \left[ \frac{p(t)}{p(t-1)} \right] \quad \#(4)$$

$$\Delta C_r = \sum_{i=1}^n \frac{C_i^t - C_i^{t-1}}{\ln C_i^t - \ln C_i^{t-1}} \ln \left[ \frac{r(t)}{r(t-1)} \right] \quad \#(5)$$

$$\Delta C_m = \sum_{i=1}^n \frac{C_i^t - C_i^{t-1}}{\ln C_i^t - \ln C_i^{t-1}} \ln \left[ \frac{m(t)}{m(t-1)} \right] \quad \#(6)$$

$$\Delta C_e = \sum_{i=1}^n \frac{C_i^t - C_i^{t-1}}{\ln C_i^t - \ln C_i^{t-1}} \ln \left[ \frac{e_i(t)}{e_i(t-1)} \right] \quad \#(7)$$

$$\Delta C_f = \sum_{i=1}^n \frac{C_i^t - C_i^{t-1}}{\ln C_i^t - \ln C_i^{t-1}} \ln \left[ \frac{f_i(t)}{f_i(t-1)} \right] \quad \#(8)$$

本文采用2009-2019年《深圳市统计年鉴》中工业部门分行业的各类能源消耗量数据。能源标准煤折算依据为《中国能源统计年鉴》。由于深圳市统计工业部门主要能源消耗量时未统计工业部门的总化石能源与电力能源消耗量, 本文以规模以上工业企业能耗为测算依据, 按工业行业分组消费量将能源种类划分为9个品种, 分别是原煤、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气和电力。

#### 3.2 深圳市工业碳排放驱动因素

基于LMDI分解, 本文得到2009-2019年的能源结构效应、人均产出效应、能源强度效应、碳排放系数效应和从业人口效应分别对工业碳排放量的影响(见图6和图7)。

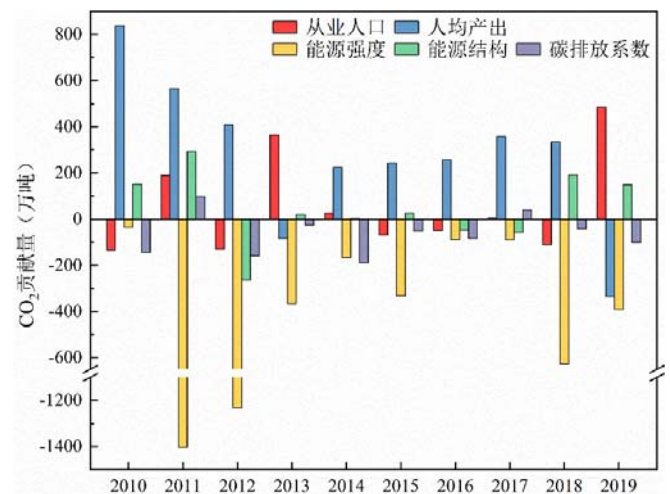


图6 2009-2019年深圳市工业部门碳排放因素逐年分解效应

在总分解效应方面, 如图6所示, 深圳市工业部门碳排放因素除2011-2012年、2015-2016年、2016-2017年期间对碳排放的贡献为负值外, 其余年份都表现为正的贡献。同时, 深圳市工业部门碳排放能源强度效应在研究期间始终都是负值, 表示能源强度对碳排放始终都是抑制作用。

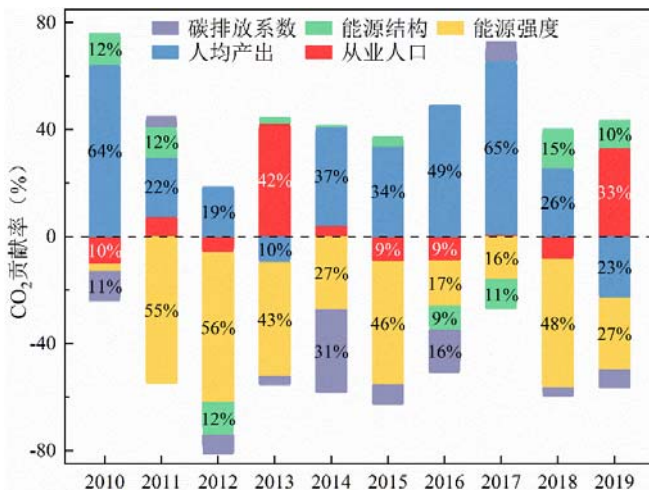


图7 2010-2019年深圳市工业部门碳排放分解因素逐年贡献率

在逐年贡献率方面,由图7可知,首先,2010-2011年的贡献值最大为293.54万吨,增加碳排放贡献率为12%。能源结构对深圳市工业部门的碳排在总体上是呈现促进作用。其次,2009-2010年是能源强度抑制碳排放效率最低的一年,减少碳排放贡献率只占3%,随即在2010-2011年能源强度效应贡献CO<sub>2</sub>减少排放1402万吨。同时,2010至2011年期间,只有能源强度表现出碳排放的抑制作用,碳排放贡献率为55%。第三,从业人口效应对深圳市工业部门的碳排在研究期间的正负效应表现相当。从业人口效应的贡献值只有在2018-2019年达到最大值,贡献值为484万吨,在当年的5个影响CO<sub>2</sub>的因素中占比为33%。与之相对,2011-2012年期间是从从业人口效应贡献值占比最低的一段时期。

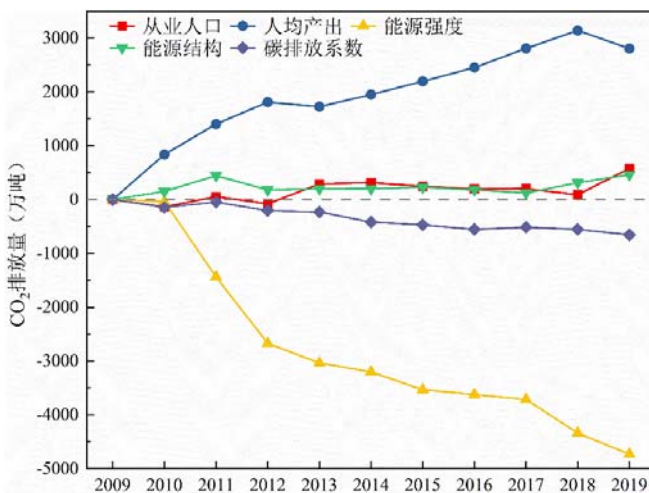


图8 2009-2019年深圳市工业部门碳排放分解因素累计贡献值

在累积贡献率方面,图8显示,2009-2019年间,深圳市能源结构的总效应表现为促进碳排放,累计贡献碳排放461万吨。与人均产出效应相比,该指标的增碳作用较小。一方面,截止2019年,深圳市工业部门的能源强度效应已经使得工业部门成功减少碳排放4729万吨。另一方面,能源强度已成为驱动深圳市工业碳减排的最重要因子。

综上所述,从能耗维度上看,能源结构以波动的形式对深圳碳排

放产生影响。虽然该指标在整个研究期间均促进CO<sub>2</sub>减排,但与其他因素相比其拉动作用较小。能源强度指标显示,深圳市能源强度对碳排放起到良好的抑制作用。从人口维度上看,由于深圳市的制造业相对发达,就业机会较多,因而从业人口效应均为促进碳排放。同时,人均产出也是促进碳排放的正向驱动因子。在碳排放系数方面,鉴于本文假定化石能源的碳排放系数恒定,但电力的排放系数不恒定,故本文碳排放系数效应即电力碳排放系数的效应。由于广东省大力发展清洁能源发电,故电力排放系数对碳排放的效应为负。

#### 4 总结

本文运用排放因子法与LMDI模型对深圳市工业部门碳排放进行测算、分解和分析,得到以下结论:

(1) 深圳市已步入经济发展与碳排放脱钩阶段。当前深圳正处于社会经济高质量发展的时期,产业集中在第三产业和第二产业,且第三产业比重超过60%,产业结构不断升级,工业对能源的消耗量也在2009-2019年期间呈现下降趋势,能源强度由2009年的0.36吨标煤/万元下降到0.10吨标煤/万元,能源消耗总量中主要以电力、原煤和天然气为主,液化石油气、燃料油、柴油、汽油和原油的占比较低。在2009-2019年深圳市工业碳排放量与能源消耗量变化趋势一致,都是在2010年短暂波动上升后在2011和2012年快速下降,在2013-2019年下降缓慢。从能源消费品种来看,深圳市工业碳排放主要来自电力和原煤的能源消耗,从行业角度来看,碳排放主要在2012年之前主要来自制造业,而后主要来自电力、燃气及水的生产与供应业。细分行业来看2009-2019年工业累计碳排放排名前五的行业分别是电力、热力的生产和供应业,计算机、通信和其他电子设备制造业,电子机械及器材制造业、橡胶和塑料制品业以及石油和天然气开采业。人均工业碳排放量和碳排放强度的趋势路径也相近,总体上呈显著下降趋势。

(2) 人力因素和能源结构是促进深圳市工业碳排放的推动因素。本文结果显示,2009-2019年间,深圳市工业能源强度已累计减少碳排放4729万吨,是抑制碳排放最主要的因素。碳排放系数在研究期间的累计贡献值也是负效应,贡献减少碳排放655万吨。人均产出效应是促进工业碳排放增长的主导因素,累计贡献碳排放2807万吨。工业从业人口和能源结构也是促进碳排放的,累计贡献碳排放分别为576万吨、461万吨。

基于所得结论及深圳市发展需求,本文进一步提出相应政策建议,即:

(1) 提升工业能效水平,降低碳排放强度碳排放强度是衡量一个国家或地区工业化水平高低的重要指标,它体现了该地区化石能源结构,经济发展质量,技术进步,以及城市化高低,也是考量城市竞争力的关键指标。要降低碳排放强度,深圳市需要从能源效率、燃料转换、热电联产、可再生能源的使用以及更有效地使用和回收材料等方面出发。未来深圳市需全面推动重点耗能行业例如在电力、热力的生产和供应业开展降低能效水平工作,持续推进提高电机能源效率扶持计划,加强对工业各行业节约能源

和开展绿色发展的扶持力度,进一步扩大先进的减排技术应用范围,降低单位工业增加值能耗强度。同时,稳步推进工业绿色发展。实施化石能源减量替代,推进工业生产、生活消费“油改气/电”。鼓励企业开发利用可再生能源,开展前海等园区分布式绿色智能微电网建设。构建以绿色工厂、绿色产品、绿色园区、绿色供应链为重点,以绿色数据中心为支撑的绿色制造体系。聚焦电子信息、医药、机械、汽车等重点行业,培育一批绿色制造示范企业。加快推动传统制造业转型升级,淘汰低端和产能落后产业。

(2)持续优化工业产业结构。在“双碳”实现路径过程中,优化产业结构和能源结构是控制碳排放最为有效的举措,当前深圳需要面临产业结构优化空间变小、减排边际成本增大的困境。只有通过合理有序的产业转型升级,才能在达成“双碳”目标的同时满足经济效益和产业结构之间的发展。从细分行业的角度来看,将行业经济从碳密集型制造业转变为更加以服务为基础的经济,提高电力终端使用能源的份额。深圳市要重点关注电力、热力的生产和供应业,橡胶和塑料制品业,石油和天然气的开采业等传统产业的改造升级,着力提高工艺技术水平,大大降低能源消耗量。针对于计算机、通信和其他电子设备制造业,电气机械及器材制造业等高新技术产业,要鼓励企业加快发展新一代信息技术,新能源和新材料的开发利用,持续推进产业绿色低碳化发展。大力发展战略性新兴产业,促进人工智能与绿色低碳产业深度融合发展。

#### [基金项目]

深圳市哲学社会科学规划课题“碳中和”背景下深圳市产业转型升级研究(项目编号:SZ2021C012)。

#### [参考文献]

- [1]唐杰.深圳“减碳”之道[M].北大金融评论,2022:10.
- [2]李强,左静娴.长江经济带碳排放强度与产业结构的灰色关联分析[J].长春理工大学学报:社会科学版,2018,31(1):77-84.
- [3]刘红光,刘卫东,唐志鹏,等.中国区域产业结构调整的CO<sub>2</sub>减排效果分析:基于区域间投入产出表的分析[J].地域研究与开发,2010,29(3):129-135.
- [4]GREENING L A. Effects of human behavior on aggregate carbon intensity of personal transportation: Comparison of 10 OECD countries for the period of 1970-1993. Energy Economics,2004,26:1-30.
- [5]RAMANATHAN R. A multi-factor efficiency perspective on the relationships among world GDP, energy consumption and carbon dioxide emission. Technological Forecasting & Social Change,2006,73(5):483-494.
- [6]郝珍珍,李健.我国碳排放增长的驱动因素及贡献度分析[J].自然资源学报,2013,28(10):1664-1673.
- [7]徐成龙,任建兰,巩灿娟.产业结构调整对山东省碳排放的影响[J].自然资源学报,2014,29(2):201-210.
- [8]张雷,李艳梅,黄园浙,等.中国结构节能减排潜力分析[J].中国软科学,2011,26(2):42-51.

[9]郭朝先.中国工业碳减排潜力估算[J].中国人口·资源与环境,2014,24(9):13-21.

[10]XU X, ANG B W. Index decomposition analysis applied to CO<sub>2</sub> emission studies[J]. Ecological Economics, 2013,93:313-329.

[11]PAULO M D, Effect of generation capacity factors on carbon emission intensity of electricity of Latin America & the Caribbean, a temporal IDA-LMDI analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews,2019,101:516-526.

[12]SONG C, ZHAO T, WANG J. Spatial-temporal analysis of China's regional carbon intensity based on ST-IDA from 2000 to 2015[J]. Journal of Cleaner Production,2019,238:117874.

[13]CHEN B, XU C, WU Y, et al. Spatiotemporal carbon emissions across the spectrum of Chinese cities: Insights from socioeconomic characteristics and ecological capacity[J]. Journal of Environmental Management,2022,306:114510.

[14]ZHOU X, ZHANG M, ZHOU M, et al. A comparative study on decoupling relationship and influence factors between China's regional economic development and industrial energy-related carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,142:783-800.

[15]LIANG W, GAN T, ZHANG W. Dynamic evolution of characteristics and decomposition of factors influencing industrial carbon dioxide emissions in China: 1991 - 2015[J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2019,49:93-106.

[16]WEN L, LI Z. Provincial-level industrial CO<sub>2</sub> emission drivers and emission reduction strategies in China: Combining two-layer LMDI method with spectral clustering[J]. Science of The Total Environment,2020,700:134374.

[17]CHEN L, XU L, YANG Z. Accounting carbon emission changes under regional industrial transfer in an urban agglomeration in China's Pearl River Delta[J]. Journal of Cleaner Production,2017,167:110-119.

[18]JIA Dong, LI CB, WANG QQ, Decomposition of carbon emission and its decoupling analysis and prediction with economic development: A case study of industrial sectors in Henan Province, Journal of Cleaner Production,2021,321:129019.

[19]ZHAO M, TAN L, ZHANG W, et al. Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method[J]. Energy,2010,35(6):2505-2510.

#### 作者简介:

叶斌(1983-),男,汉族,湖北黄冈人,管理学博士,助理教授,博导,研究方向:环境规划和能源经济。

梁旭阳(1996-),男,汉族,陕西西安人,管理学硕士,研究方向:能源经济。

宋亚植(1989-),女,汉族,江苏徐州人,管理学博士,副教授,研究方向:碳金融和碳交易制度设计。