

珠江三角洲低碳效率区域差异性研究

央金卓嘎

中央民族大学管理学院, 北京

收稿日期: 2023年8月16日; 录用日期: 2023年10月9日; 发布日期: 2023年10月20日

摘要

在双碳背景下, 区域低碳效率值与效率值空间分布差异是制定减排措施的重要基础, 珠三角作为广东省乃至全国经济发展的重要引擎, 需在实现碳中和方面做出先行示范。本文以非期望产出的超效率 SBM 模型为基础, 在指标构建体系中纳入科学技术创新指标, 测算珠三角九市2010年至2019年的低碳效率值, 同时结合GIS探析珠三角低碳效率的空间分布差异, 提出实施差异化低碳转型策略、深化国家森林城市群建设等建议。

关键词

碳中和, SBM模型, 珠江三角洲, 低碳效率, GIS

Study on Regional Heterogeneity of Low Carbon Efficiency in the Pearl River Delta Region

Zhuoga Yangjin

College of Management, Minzu University of China, Beijing

Received: Aug. 16th, 2023; accepted: Oct. 9th, 2023; published: Oct. 20th, 2023

Abstract

Against the background of dual-carbon, the regional low-carbon efficiency value and the difference in the spatial distribution of the efficiency value are important bases for the formulation of emission reduction measures. The Pearl River Delta, as an important engine of economic development in Guangdong Province and even the whole country, needs to make a pioneering demonstration of the realization of carbon neutrality. This paper based on the super-efficiency SBM model with non-expected output. Incorporates science and technology into the indicator construc-

tion system to measure the value of low-carbon benefits of the nine cities in the Pearl River Delta (PRD) from 2010 to 2019. At the same time explores the spatial distribution differences in the low-carbon efficiency of the PRD in conjunction with GIS. Finally, it puts forward suggestions such as implementing differentiated low-carbon transformation strategies and deepening the construction of national forest city clusters.

Keywords

Carbon Neutrality, Slacks-Based Measure, Pearl River Delta, Low Carbon Efficiency, GIS

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2020年,中国在第七十五届联大一般性辩论中提出力争2030年前二氧化碳排放达到峰值,力争2060年前实现碳中和。近年来,以化石能源为主体的能源体系所产生的环境污染与温室气体排放问题日益突出,加强环境治理和应对气候变化成为人类面临的巨大挑战,推进全球能源向绿色发展,追求低碳转型日益成为大多数国家的共识。“碳中和”、“碳达峰”等理念的进一步提出,积极应对能源安全、生态安全和可持续发展安全问题,妥善处理经济发展与环境保护之间的矛盾,成为当前珠三角作为全国经济发展的重要引擎所急需的。《广东省生态文明建设“十四五”规划》提出落实分区域、差异化的低碳发展路线图,推动珠三角城市碳排放率先达峰。与此同时,目前广东省能源消费结构仍以化石能源为主,煤炭、石油消费约占六成,而珠江三角洲作为拉动广东省经济增长的核心地区,能源消耗不言而喻,高碳特征为珠三角生态环境治理带来巨大的压力。此外,珠江三角洲内部区域发展存在较大差距,中山、肇庆等城市发展水平相对较低,这也意味着珠三角要走低碳发展的差异化路径。因此,在“碳中和”目标下评估珠三角各市低碳效率值的空间分异就尤为重要。

2. 文献综述

现有研究运用数据包络法(DEA)主要针对区域环境效率进行了一系列的测算。Zhou等基于广东省21个城市2005至2014年的数据,运用非期望产出的超松弛测度模型探讨低碳生态效率及其空间分布差异[1]。王一帆等采用超效率SBM模型对2006至2016年中国城市的碳效率进行了测算,构建空间马尔科夫链探究中国碳效率的时空演变特征和发展趋势[2]。刘伟晗等采用三阶段SBM-DEA模型测算了2001至2020年各省市的碳排放效率,同时分析其影响因素[3]。贾智杰等基于2002年至2017年的面板数据,采用SBM模型测算264个城市的全要素碳效率,分析了碳试点对其的影响[4]。彭文斌等采用三阶段SBM-DEA模型测度2006年至2019年长江中游28个城市的碳效率,探析长江中游城市群的影响路径[5]。高赢等利用US-SBM模型对“一带一路”沿线32个国家二十年的低碳发展效率进行了动态评估,并分析其影响因素[6]。综上,运用DEA测算低碳效率的研究在理论和实践上都有了一定的广度和深度,在很大程度上丰富了经济与生态关系的认知。然而,现有研究在构建低碳效率投入指标时大多没有考虑科学技术的投入和进步对节能减排带来的积极影响。

在以上背景下,研究选取非期望产出的超效率SBM模型,将科技创新指标纳入指标构建体系,通过MaxDEA对珠三角9个城市2010~2019年低碳效率值进行测算,并结合ArcGIS空间分析技术可视化分

配效率值，对珠三角 9 个城市产生波动的驱动力及总体低碳效率值进行进一步探讨，以期为珠三角制定更加合理的低碳转型战略提供参考。

3. 模型及指标构建

3.1. 模型构建

数据包络分析法(Data Envelopment Analysis, DEA)来源于“相对效率评价”概念[7]。一般被用来测量一些决策部门的生产效率。其是将属性分为投入项和产出项，用不预先设定权重的方式分别加总产出属性值和总投入属性值，总产出除以总投入的比率作为相对效率[8]。数据包络分析法和其他多属性决策分析模式的区别就在于前者不用设置多属性的相对权重，因而也被国内外学者普遍认同，应用范围十分广泛。从最初的教育部门扩展到公共卫生、企业管理等众多的领域，DEA 从最初的测算效率的分析方法发展成为一个包含了数学、运筹学和管理学等多元学科的重要工具。并在近三十年内得到了快速发展，广泛应用于生产效率测量、绩效评估和决策等方面。

数据包络分析(DEA)方法是由美国运筹学家 Charnes 等人提出的一种系统分析方法。而超效率 DEA 模型(Super-SBM Model)由 Anderson 等学者[9]提出。在该模型中一个有效 DMU (Decision Making Unit, 决策单元，即被评估对象，具有一定的输入和输出，并且拥有在转化中实现决策目标的能力[10]。)的投入数量可以按照比例增加，其效率值保持不变，而投入增加的比例则为此 DMU 的超效率评估值，在此模型下有效 DMU 的超效率值通常大于 1，以便能够更直接地把握多个有效 DMU 的效率差异。由于要评价珠江三角洲九市的低碳效率差异，且考虑的投入要素相对较多，因此选用非期望产出的 SBM 模型开展对低碳效率值的测算。基于非期望产出的 SBM 模型低碳效率的测度是一种要求投入资金、物力及温室气体排放量等对环境有害的产出都达到最小的生产过程。假设每一个生产系统拥有 n 个决策单元，表示为 $DMU_j (j=1,2,\dots,n)$ ，每个决策单元包含 m 个投入 $x_i (i=1,2,\dots,m)$ ， l_1 个期望产出 $y_r^g (r=1,2,\dots,l_1)$ ，以及 l_2 个非期望产出 $y_r^b (r=1,2,\dots,l_2)$ [11]。

因此，参考何沙[12]等人的模型构建为：

$$\begin{aligned} \min \rho^* &= \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_i}{\frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{\bar{y}_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{\bar{y}_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \\ \text{s.t. } \bar{x} &\geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j x_{ij} x_0 = \lambda_x + S^- \\ \bar{y}^g &\leq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_{ij}^g y_{r0}^g = \lambda y_r^g + S^{g-} \\ \bar{y}^b &\geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_{ij}^b y_{r0}^g = \lambda y_r^g - S^{g-} \\ \bar{x} &\geq x_0 \\ \bar{y}^g &\leq y_0^g \end{aligned}$$

其中 $\bar{y}^b \geq y_0^b$

$$\lambda_j \geq 0$$

式中 ρ^* 表示低碳效率值, 其取值可以大于 1; λ 表示的是决策单元权重变量; S^- 、 S^{g-} 、 S^{b-} 分别表示投入、期望产出与非期望产出的松弛变量。只有 $\rho^* \geq 1$ 且 S^- 、 S^{g-} 、 S^{b-} 都为 0 时 DMU 有效, ρ^* 越大 DMU 的相对效率水平越高; 如果决策单位的目标函数值 $\rho^* < 1$, 表示 DMU 与生产前沿面上的决策单元相比仍然存在一定的效率损失, 需要调整投入或产出以达到有效值[13]。

3.2. 指标构建及数据来源

“碳中和”是指国家、企业或个人等在一段时期内产生的温室气体排放总量, 通过节能减排、植树造林等形式, 正负抵消自身生产生活中产生的温室气体排放量, 将人为活动排放的影响降低到最低, 达到相对零排放。本文以尽可能小的碳排放量、尽可能大的经济发展水平作为目标, 构建 DEA 模型的生产前沿面。决策单位的目标函数值, 即低碳效率值越高, 越有利于推动碳中和碳达峰的实现。碳中和碳排放的实现。另外, 通过对各区域不同效率水平的划分, 可以为珠江三角洲的差异化碳排及碳交易项目方案的制定提供支撑依据。由此, 本文采用珠江三角洲九个城市 2010 至 2019 年的面板数据, 构建的指标体系包括投入指标(能源、劳动力、技术投入及资本存量)、期望产出指标(珠江三角洲九市历年实际地区生产总值)及非期望产出指标(温室气体排放总量)。其中, 温室气体排放总量包括城市辖区内的所有直接排放以及发生在城市辖区外的与能源有关的间接排放等。由于资本投入有关数据公布限制, 研究限度到 2019 年。具体研究指标如下。

1) 能源投入。主要以珠三角九市历年能源消费总量表示, 包括煤炭、石油等一次能源消费量。为了能直观反映比较各市各年份的能源消费情况, 所有单位统一为标准煤进行计算。能源投入原始数据来自《中国能源统计年鉴》[14]《广东省统计年鉴》[15]及珠三角各市统计年鉴。

2) 劳动力投入。由于各市劳动力素质相关数据无法测算, 因此该项投入主要以珠三角九市历年从业人数表示。该项原始数据来自《广东省统计年鉴》及珠三角各市统计年鉴。

3) 技术投入。考虑到技术创新对碳排放有一定的抑制作用, 因此采用珠三角九市 2010 年至 2019 年的科学技术支出占公共预算支出的比重表示。该项原始数据来自珠三角各市统计年鉴。

4) 资本投入。多数研究表明资本存量能够很好地表现资本投入, 因此基于单豪杰[16]与张健华等[17]的方法估算珠三角九市十年的资本存量, 资本存量并将其折算成以 2000 年为基期的不变价格, 以消除价格指数对分析结果的影响。

5) 地区生产总值。选取珠三角九市十年 GDP 为预期产出变量, 以 2000 为基期进行折算, 排除物价变动影响, 以实际 GDP 为基准进行测算。

6) 温室气体排放总量。主要采用丛建辉[18]方法估算珠三角九市十年的温室气体排放总量。主要是指城市辖区内的所有直接排放以及发生在城市辖区外的与能源有关的间接排放, 包括交通和建筑、工业生产过程、农林业与土地利用变化、废弃物处理活动或为满足城市消费而外购的电力、供热和制冷等产生的温室气体的排放。主要数据来自《中国能源统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国农业统计年鉴》《中国畜牧业年鉴》《中国林业和草原统计年鉴》以及各市级统计年鉴。排放因子以《省级温室气体排放清单指南(试行)》和各级政府发布的碳排放清单指南为准。

4. 珠三角低碳效率分析

利用 MaxDEA 软件, 采用非期望产出的超效率 SBM 模型, 计算得到 2010 至 2019 年珠三角九市的低碳效率值如表 1 所示。考虑到珠三角九市低碳效率的空间差异性, 运用 GIS 进行低碳效率的可视化处理, 得到图 1 所示的珠江三角洲低碳效率空间可视化分布图。通过计算得出的珠三角九市低碳效率值与空间可视化分配的结果可得出以下结论。

Table 1. Low carbon efficiency value for Pearl River Delta and nine cities, 2010~2019
表 1. 2010~2019 年珠江三角洲及九市低碳效率值

地区	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	平均值
广州	1.2411	1.0910	1.0947	1.2758	1.0514	1.0580	1.1367	1.0028	1.1624	1.0656	1.1180
佛山	1.0665	0.8503	0.8120	1.0087	0.7846	1.0013	0.8224	0.7343	0.8063	1.0103	0.8897
肇庆	0.5196	0.4517	0.4113	0.4461	0.3930	0.3959	0.4449	0.3911	0.4360	0.4082	0.4298
深圳	1.4472	1.1955	1.2387	1.2482	1.2817	1.2966	1.3219	1.3805	1.3339	1.2556	1.3000
东莞	1.0137	0.5633	0.5540	0.7613	0.6924	1.0151	1.0078	1.0106	1.0961	1.1456	0.8860
惠州	0.4966	0.4466	0.4756	0.5354	0.3857	0.3999	0.4187	0.3892	0.4431	0.4277	0.4419
珠海	0.6261	0.5653	0.5377	0.5428	0.5259	0.5305	0.5276	0.5005	0.5635	1.0023	0.5922
中山	0.5743	0.5212	0.5079	0.5164	0.4625	0.4732	0.4476	0.4125	0.4256	0.4260	0.4767
江门	0.5295	0.4723	0.4287	0.4525	0.3897	0.3974	0.4115	0.3909	0.4400	0.4288	0.4341
平均值	0.8350	0.6841	0.6734	0.7541	0.6630	0.7298	0.7266	0.6903	0.7452	0.7967	0.7298

珠三角地区低碳效率值整体呈现中间高四周低的特征。其中 2010~2014 年低碳效率值有起伏波动，2014~2019 年整体上稳步提升。这主要得益于加强生态保护理念的不断发展完善，对森林等植被的重视程度稳步上升，持续的推进珠江三角洲的经济产业体系、能源体系等向绿色低碳转型。2019 年珠三角低碳效率值为 0.7967，但与有效生产前沿面还有一定距离。造成这种现象的原因可能是：1) 珠江三角洲碳排放的能源消耗结构仍以化石燃料为主。由于化石能源自身具备的属性，其各类废气的排放量远远高于其他能源消耗过程中产生的数量，化石燃料燃烧是珠三角碳排放的主要来源。在技术水平与基础设施约束下能源的转型过程需要较长时间才能完成，经济社会发展对化石能源的依赖至少在几年内无法实现根本性转变[19]，因此珠三角进行能源消耗结构的转型优化在短期内不会对区域碳排放量的减少带来显著效益和优势。2) 人口规模膨胀会造成碳排放增多。近年来，随着我国人口老龄化的程度愈发严重，计划生育一孩到三孩政策的新转变等，一方面人口规模的扩大会需要更多的资源满足人民生产生活及必要的消费需求，导致能源消耗直接或间接增加，引起碳排放的增加；另一方面人口规模的扩大会加大人类对生态环境的剥夺，尤其是对林木草原等的破坏，从而减弱森林生态系统的固碳作用。从 2010 年到 2020 年，珠三角地区常住人口从 5622.95 万人上升到 7823.54 万人，增长了 39.14% [20]，人口规模快速扩张，一定程度上导致了珠三角碳排放的增加。

珠江三角洲低碳效率值在 2011 年和 2014 年都出现较为明显的下降趋势，造成这种现象的原因可能是：1) 2011 年的环境统计包括工业源、农业源、城镇生活源等其他设施，能源统计口径有所变化[21]，导致其消费量等统计方式跟以往不同，使低碳效率值与前年有较大的波动。同时，受西电东输减少的影响，珠三角 9 市 2011 年火力发电量急剧上升，造成废气排放总量上升，显著降低了低碳效率值。2) 广东省 2014 年 21 个城市空气质量排名中，肇庆市、中山市分别为第 15 名和第 16 名，后 4 名由低至高依次为佛山、东莞、广州和江门市。下降幅度最多的为东莞和佛山市，其次为肇庆市。可见，2014 年珠三角地区的整体大气环境较为恶劣。此外，2013、2015 年珠三角低碳效率值呈现明显上升趋势。通过相关政策文件梳理，认为原因可能有：2013 年珠三角各市基本都制定出台了大气污染防治综合治理方案等各项治理文件，建立了较为完善的大气污染防治管理体系。针对 2013 年大气污染防治工作，广州、惠州、江门、肇庆市分别制定了相关文件，佛山、东莞、深圳、中山市也分别制定了重污染天气应急预案，有效提升低碳效率值。2015 年是“十二五”规划的收官之年，在一定程度上强调了国家发展战略、地区政策文件与区域低碳效率之间的重要关联作用。

“碳达峰”“碳中和”目标的进一步提出，粤港澳大湾区的腹地经济战略稳步推进、珠三角国家森林城市群建设还可继续完善。绿色低碳是大势所趋，珠三角未来也将不断转变经济发展模式，因此“十四五”期间珠三角的低碳效率有待进一步发展提升。根据计算结果，细化珠三角九市的低碳效率类型为先发优势型、发展型和潜力型。具体分析如下。

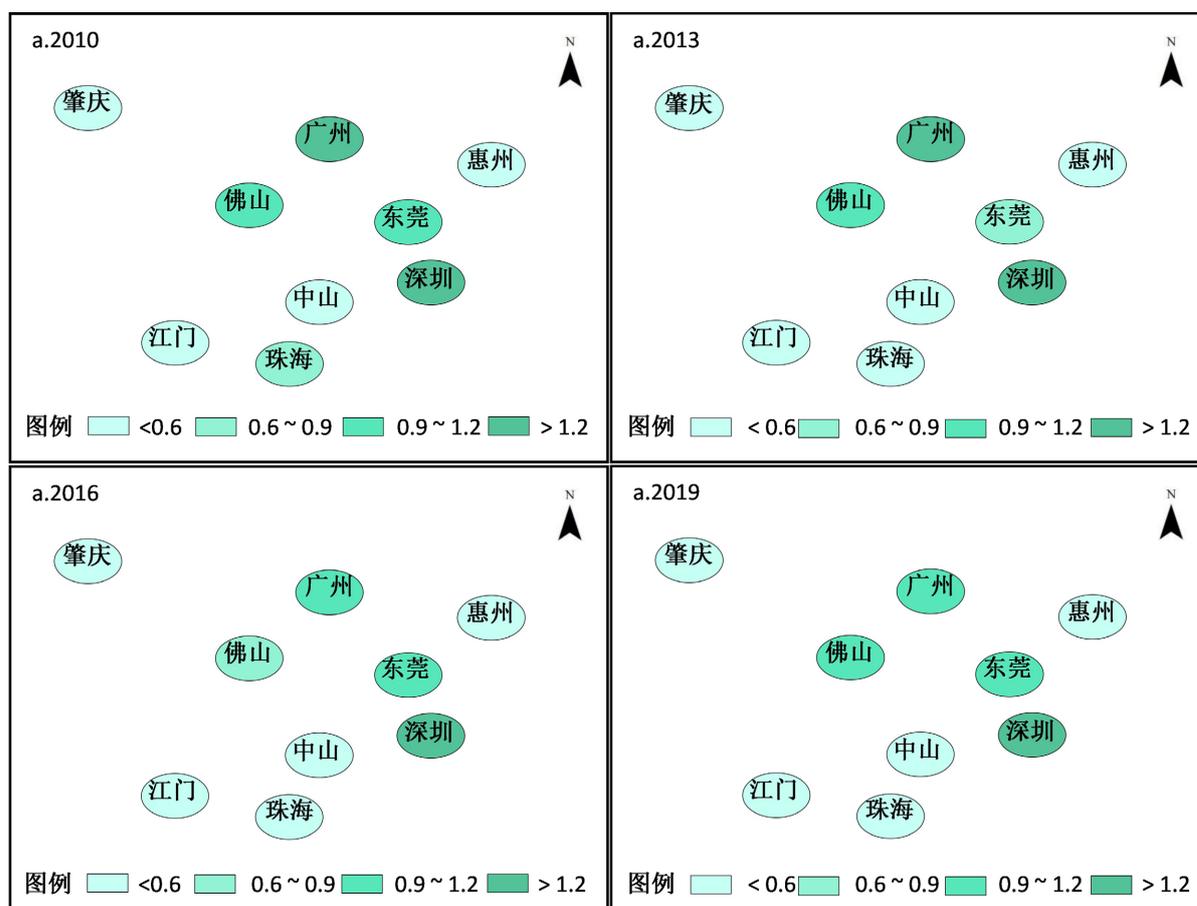


Figure 1. Spatial distribution of low carbon efficiency in the Pearl River Delta

图 1. 珠江三角洲低碳效率空间分布示意图

4.1. 先发优势型地区

广州、深圳地区低碳效率值较高，十年内低碳效率值均处于 1 以上。两个城市建城历史悠久，自身经济发展水平较珠三角其他城市较高，城市化已处于中后期，基础设施及其他服务设备相对完备，是珠江三角洲地区低碳转型的先发优势型地区。广州市是广东省的省会，具有门户枢纽功能，出行便利，地理区位优势及省会城市身份使得其在国家支持、外资引入等各方面的优势更加凸显。广州市 2019 年第三产业占地区生产总值的比重高达 72.51%，在珠三角各市中名列前茅。同时，科学技术支出占公共预算支出的 8.5%，在一定程度上为减少碳排放量提供了绿色技术发展的资金保障。2019 年广州市低碳效率值为 1.0656，已经初现碳达峰趋势。深圳市单位 GDP 的碳排放是全国平均水平的五分之一，但单位 GDP 的碳排放强度和人均碳排放强度与一些发达国家城市相比还有差距，需要在经济发展中以更精准、更有效的措施推动深度脱碳。深圳市 2019 年第三产业占地区生产总值的比重高达 60.9%，深圳的第三产业和高技术制造业占比大，碳排量小。从能源利用结构来看，深圳市是以电力利用为主的能源终端消费模式，

目前已经形成了以核电为主，气电为主，新能源发电为辅，煤电为备的多元化能源消费格局，这使得深圳在能源开发和生产环节的清洁度较高，煤电利用比例远低于国家或省。且深圳市定期开展“生态文明论坛”等活动，持续不断增加全市森林覆盖率，提高中心城区绿化水平，围绕城市产业低碳化、服务集约化、新能源生产利用规模化等进行不断的探索，不断推广绿色低碳建筑等以降低碳排放。以上各项低碳工作成效显著，故区域低碳效率位于珠三角前列。

4.2. 发展型地区

佛山和东莞的人口众多，城镇化进程加快，城市基础设施日益完善，受到国家的大力支持，拥有良好的节能减排环境，是珠三角地区低碳转型的发展型地区。2019年佛山、东莞市的第二产业占比分别为56.2%和56.5%，产业结构以第二产业为主，其中东莞以制造业为主，且工业厂房等布局分散，废气排放量较大，对生态环境造成较大压力。若不及时改变产业结构，东莞能源使用量将持续快速提高。同时，低碳产业还属于新兴产业，在社会上的认知度不够充分，一些工业企业对“低碳发展”的实施持有抵触情绪，他们对碳汇项目的了解甚少，认为这将导致高成本和低利润。这种认知导致低碳创新技术所带来的质量及成本的优势得不到充分的展现。基于此，虽然目前佛山与东莞的低碳效率值较高，但如果不采取有效措施加快推进清洁低碳能源的发展，改变现有的能源消费结构，促进各行各业的绿色低碳发展，就很难有效地加快碳减排进程。

4.3. 潜力型地区

中山、江门等地区低碳效率较低。该区域多以低端传统产业为主，城镇化水平较其他地区较低，是珠三角地区低碳转型的潜力型地区。该区域总体经济发展是珠三角下游水平，且地区内的差异较大，但第三产业的比重近年来随着产业结构的不断调整而稳中有升。同时，生态环保理念的逐步深入，积极倡导绿色低碳的生活方式，也推动了该地区的可持续发展。中山首个全面系统的生态功能分区于2019年出炉，其中一级生态区9个、生态亚区21个、生态功能区59个；截止2020年中山已建成6个碳普惠试点及企业减碳项目。江门市生态环境局还加大了对生态环境源头的防控力度，如防治高耗能、高排放的建设工程等。说明珠三角低碳效率潜力型地区对环境保护的重视程度越来越高，已为后续降低碳排放提供一定保障。

5. 珠三角低碳效率分析

5.1. 实施差异化低碳转型策略

广东珠三角各地产业结构、能源结构和资源禀赋存在很大不同，这一特征决定了珠三角各城市不能采取完全同步的碳达峰实施路径，而应找准经济社会发展与碳减排的平衡点，制定出差异化的区域减排策略，使各地达成“双碳”目标中的“同向而不同步”，稳步降碳。首先，对于珠三角低碳转型先发优势地区，应注重结构性减碳和制度性减碳，借助产业结构升级、能源结构转型和消费模式脱碳率先撬动碳达峰、碳中和。鼓励低碳转型先发优势地区率先发展低碳零碳负碳新产业，在零碳技术、零碳产业、零碳社区等方面作出示范，在创新型减排机制和制度上“先行先试”。其次，对于低碳转型发展型地区，应积极主动挖掘新的可持续增长点，注重并加强与绿色低碳创新有关的技术合作。推动设立减碳扶持资金并向此区域倾斜。未来，在面对产业发展固化等种种问题时，可以针对提升清洁能源企业竞争力进行政策设计，对低碳企业采取减税降费和低息贷款政策等创新型解决方案，助力解决珠三角碳减排的负外部性问题。注重环境修复治理工作，积极打造以低碳教育、能源文化为核心的生态旅游区。针对低碳转型潜力型区域，着重孵化和引进绿色低碳项目，持续推进有关基础设施的建设完善，健全人才吸引机制。

准确把握“绿色低碳”要义，避免走“先发展后治理”的盲道，避免成为高耗能、高碳排行业的避风港，不断探索“绿色低碳”与“经济发展”共赢的新路径。

5.2. 深化珠三角国家森林城市群建设

严格保护珠江三角洲的各种重要生态系统，稳定森林、草原等的固碳作用。继续发展完善珠三角国家森林城市群建设，建立健全能够体现碳汇价值的林业生态保护补偿机制，完善森林碳汇交易市场机制。广州、深圳市要重点开发森林经营碳汇项目，江门市可重视发展造林碳汇与林地经营碳汇项目，依托国家湿地公园继续推动红树林的保护工作。肇庆市作为珠三角中唯一森林覆盖率超过七成的城市，要继续加强对自然保护区等绿色资源的保护，大力实施造林绿化，构筑起大湾区绿色生态屏障。同样拥有较高森林覆盖率的惠州，要大力推进“森林碳汇、生态景观林带、森林进城围城、乡村绿化美化”工程。与此同时，加快组织林草碳汇专家指导小组和林草碳汇专业研究所，为碳汇提供基础理论和科技支持。推进建立珠三角碳排放权益交易中心，引导高耗能、高污染企业购买林草碳汇承担减排义务。

5.3. 打造绿色低碳循环发展经济体系

广东省预计 2025 年基本建成绿色低碳循环发展经济体系，提出珠三角地区以经济社会发展全面绿色转型为引领，率先实现高质量发展[22]。在具体实践中，珠三角既要一手抓减污节能降碳协同治理，又要一手抓绿色低碳循环经济发展，把绿色化贯穿到经济发展理念、发展方式、产业结构、增长动力、效益评价等各方面和全过程之中，推动绿色产业化、产业绿色化，不断培育壮大资源消耗少、环境影响小、科技含量高、产出效益好、发展可持续的绿色低碳优势产业集群，使经济更加绿色化。具体而言，珠三角要积极构建全产业链和产品全生命周期的绿色制造体系，积极创建绿色工厂和绿色园区。加快实施钢铁、石化、化工、有色等行业绿色化改造。积极推动国家绿色工业示范基地建设，大力发展节能环保、绿色低碳工业。推动大宗固体污染物实现高效高质高值利用，提高再生资源产品回收利用率，推进废旧电池资源化、大规模、高值化使用等等。加强新能源技术开发和深化创新力度以提高碳汇，形成清洁低碳安全高效的能源系统，减少燃煤在电能消费中的比例，形成以清洁能源为主导的新型电力系统。构建绿色低碳高效综合交通运输体系，积极打造绿色公路、绿色铁路、绿色航道、绿色港口、绿色空港，建立智慧交通发展新模式，以提高区域低碳效率值。

5.4. 推进能源结构低碳化转型

基于广东省的背景下，珠三角难以短时间内扭转以化石能源为主的能源消费结构，而增加清洁能源比例必然成为确保能源安全与低碳转型的必由之路。因此，要加大对新能源产业的投入，发展适合珠三角资源禀赋特征的清洁能源，在新能源安全可靠的基础上，有节奏地扩增清洁能源，并逐步推动传统能源的退出，实现能源供应在“一增一减”的过程中保持动态平衡。在这过程中，既要实现能源结构低碳化转型，又要满足能源消费的刚性需求，确保能源供应稳定。与此同时，增加省外电力调入中可再生能源比例，坚持“先立后破”，以实现能源结构的平稳、安全、低成本转型。

5.5. 以制度创新倒逼绿色低碳可持续发展

在碳达峰、碳中和的时代背景下，对珠三角的绿色发展提出更高的要求。与此同时，随着经济加快发展与人口增长，珠三角面临的能源消耗压力也更大。尤其是广东省以全国 1.8% 的土地面积，贡献全国超过 10% 的 GDP，人多、地少、经济体量大是广东省发展的基本特征，而对生态环境造成的影响也是不容忽视的。显而易见，过去那种牺牲环境为代价的粗放型发展方式已经落后，珠三角需要率先实现质量、效率、动力的三重变革。而生态系统生产总值核算制度体系的建立，是促进碳达峰碳中和的一条重要路

径。2021年深圳市发布了全国首个GEP核算制度体系,主要包括一个GEP实施方案、一项GEP核算地方标准,一套GEP核算统计报表制度以及一个GEP自动核算平台。通过“1+3”GEP核算制度,有助于推动城市生态系统服务价值精准核算。基于深圳市GEP核算制度体系探索经验,珠三角可以继续深化这方面的制度创新,从而以新的“指挥棒”倒逼绿色低碳可持续发展。

参考文献

- [1] Zhou, C.S., Shi, C.Y., Wang, S.J., *et al.* (2018) Estimation of Eco-Efficiency and Its Influencing Factors in Guangdong Province Based on Super-SBM and Panel Regression Models. *Ecological Indicators*, **86**, 67-80.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.011>
- [2] 王一帆, 袁大昌. 中国城市碳效率时空演变格局及优化研究[J]. *生态经济*, 2022, 38(3): 93-100.
- [3] 刘伟晗, 李伟, 卢灿. 基于三阶段SBM-DEA的碳排放效率分解研究[J]. *电力科学与工程*, 2023, 39(7): 24-33.
- [4] 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.
- [5] 彭文斌, 曹笑天, 苏昌贵, 等. 长江中游城市群碳效率时空演化特征——基于三阶段SBM-DEA模型[J]. *生态学报*, 2023, 43(9): 3532-3545.
- [6] 高赢, 冯宗宪. “一带一路”沿线国家低碳发展效率测评及影响因素探究[J]. *科技进步与对策*, 2018, 35(21): 39-47.
- [7] 曾勇, 张淑英, 李德山. 中国全要素天然气利用效率区域差异性[J]. *天然气工业*, 2018, 38(12): 140-145.
- [8] 张滨沙. 中国工业行业产能过剩的形成机理、测度及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [9] Andersen, P. and Petersen, N.C. (1993) A Procedure for Ranking Units in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, **39**, 1261-1264. <https://doi.org/10.1287/mnsc.39.10.1261>
- [10] 盛昭瀚, 朱乔, 吴广谋. DEA理论、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [11] Zhang, J.R., Zeng, W.H., Wang, J.N., *et al.* (2015) Regional Low-Carbon Economy Efficiency in China: Analysis Based on the Super-SBM Model with CO₂ Emissions. *Journal of Cleaner Production*, **163**, 202-211.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.111>
- [12] 何沙, 李乔楚. 基于Super-SBM模型的区域低碳效率评估与空间分异——以四川省为例[J]. *生态经济*, 2021, 37(10): 40-45+128.
- [13] 郝永勤, 吉星. 我国工业行业碳排放效率实证研究——考虑非期望产出SBM超效率模型与DEA视窗方法的应用[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(17): 53-62.
- [14] 国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 国家统计局出版社, 2020.
- [15] 广东省统计局. 广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [16] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952-2006年[J]. *数量经济技术经济研究*, 2008, 25(10): 17-31.
- [17] 张健华, 王鹏. 中国全要素生产率: 基于分省份资本折旧率的再估计[J]. *管理世界*, 2012(10): 18-30.
- [18] 丛建辉, 刘学敏, 赵雪如. 城市碳排放核算的边界界定及其测度方法[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(4): 19-26.
- [19] Peng, X. and Tao, X.M. (2018) Decomposition of Carbon Intensity in Electricity Production: Technological Innovation and Structural Adjustment in China's Power Sector. *Journal of Cleaner Production*, **172**, 805-818.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.236>
- [20] 广东省统计局. 广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [21] 广东省环境保护厅. 2011年广东省环境统计公报[R]. 2012.
- [22] 广东省人民政府. 关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见[EB/OL].
http://drc.gd.gov.cn/qtwj/content/post_3721810.html, 2021-12-17.