

广东省绿色低碳创新效率的统计测度与时空演化分析

张倩生*, 朱曹了了

广东外语外贸大学 数学与统计学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/ASDS.2026060012

摘 要 : 本文以2014–2024年广东省21个地级市的面板数据为样本, 采用考虑非期望产出的超效率SBM–DEA模型测度广东省各地市的绿色低碳创新效率, 并结合Malmquist–Luenberger (ML) 指数分析其动态演变趋势。进而, 还检验考察了广东省绿色低碳创新效率的区域收敛性, 最后通过Tobit回归模型探究识别影响广东绿色低碳创新效率的关键因素。研究表明, 广东省绿色低碳创新效率整体呈波动上升趋势, 但区域差异明显, 珠三角绿色创新效率最高, 粤西地区最低; ML指数分解显示, 技术进步是推动广东低碳创新效率提升的主要动力, 技术效率变化的作用相对有限; 收敛性检验发现, 广东省绿色低碳创新效率存在显著的 σ 收敛和 β 收敛, 区域差距有缩小趋势。建议通过扩大对外开放程度, 并提升产业结构和各地城镇化水平, 有助于广东省绿色经济高质量发展和低碳目标的实现。

关 键 词 : 绿色低碳创新; 超效率DEA模型; ML指数; 收敛性; Tobit回归

Statistical Measurement and Spatiotemporal Evolution Mechanisms of Green and Low-Carbon Innovation Efficiency in Guangdong Province

Zhang Qiansheng*, Zhu Caoliaoliao

School of Mathematics and Statistics, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract : This study takes panel data from 21 cities in Guangdong Province for the period 2014–2024 as its sample. We employ the super-efficiency SBM–DEA model with undesirable output to measure the green and low-carbon innovation efficiency of these cities, and further analyzes its dynamic evolution using the Malmquist–Luenberger (ML) index. In addition, the regional convergence of low-carbon innovation efficiency in Guangdong Province is examined. Finally, a Tobit regression model is applied to identify the key factors influencing this efficiency. The results indicate that while the overall green and low-carbon innovation efficiency in Guangdong Province shows a fluctuating upward trend, significant regional disparities exist: the Pearl River Delta region exhibits the highest efficiency, whereas western Guangdong ranks the lowest. Decomposition of the ML index reveals that technological progress is the primary driver of efficiency improvements, while changes in technical efficiency play a relatively limited role. Convergence tests suggest significant σ -convergence and β -convergence in green and low-carbon innovation efficiency, indicating a narrowing trend in regional disparities. Policy recommendations include expanding Guangdong Province's openness to the outside world, upgrading its industrial structure, and enhancing the urbanization level across regions. These measures facilitate the development of green economy and the achievement of its low-carbon goal.

Keywords : green and low-carbon innovation; Super-efficiency DEA model; Malmquist–Luenberger index (ML); convergence; Tobit regression

引言

在全球气候变暖加上资源环境约束日益加剧的背景下, 绿色低碳创新已成为推动经济高质量发展、实现“碳达峰、碳中和”目标的核心动力。广东省作为中国经济第一大省, 既是制造业与科技创新的高地, 也面临较大的能源消耗和污染物排放所带来的压力。如何测度广东绿色低碳效率并在保证经济增长质量的同时, 用更少的资源与环境代价去获得更多的创新与经济产出, 是广东省乃至全国可持续发展面临的重要问题。目前关于绿色创新效率的测度方法主要分为随机前沿法 (郭树华^[1]) 与数据包络分析 (DEA) 两大类。特别地

基金项目: 2025年度广东省自然科学基金项目“特征驱动下基于机器学习的投资决策研究”(2025A1515010937); 2024年度广东省社科规划办项目“不确定需求下动态设施布局的多目标滚动优化研究”(GD24CGL54)。

作者简介: 朱曹了了, 广东外语外贸大学数学与统计学院, 硕士研究生, 研究方向为数据驱动与统计优化。

通讯作者: 张倩生, 广东外语外贸大学数学与统计学院, 教授, 研究方向为智能决策。

Tone^[2] 提出超效率 SBM-DEA 模型,能有效处理非期望产出并考虑投入冗余和产出不足问题。Wang 等^[3]和钱丽等^[4]分别基于共同前沿 DEA 方法,测算了群组前沿与共同前沿下的碳减排效率和绿色创新效率。为处理 CO₂排放等数据估计误差和不确定性, Ignatius 等^[5]提出了基于模糊 DEA 的碳效率评价框架; Zha 等^[6]采用机会约束 DEA 模型对区域能源效率评估。张辽^[7]采用三阶段 SBM-DEA 模型测度了工业企业真实绿色技术创新效率。张盼^[8]运用四阶段 DEA-超效率 SBM 模型测度了中国 30 个省份的真实绿色创新效率,并通过泰尔指数分析了区域差异。赵雅婷^[9]运用超效率网络 SBM-DEA 模型对中国绿色技术创新进行效率测度和时空演化分析。Zhang 等^[10]提出了基于公平视角的交叉效率网络 DEA 测度方法。赵志芳^[11]运用超效率 SBM 模型测度探究全国 30 个省份绿色技术创新效率的区域差异。滕琳娜^[12]也采用超效率 SBM 模型测度省际工业绿色创新效率的区域差异。刘子豪等^[13]运用 Dagum 基尼系数分析了省域绿色创新效率的差异。张平凤^[14]和王金河^[15]探究了中国绿色创新效率在空间上存在的收敛特征。

近年来,学者们还从政府、市场、社会与开放等多个维度探讨了绿色创新效率的影响因素。钱丽等^[4]运用随机效应的 Tobit 模型,分别从技术差距无效率和管理无效率两个层面分析影响因素。在区域层面,赵志芳^[11]运用 Tobit 模型检验影响因素,发现地区经济发展水平、政府支持力度、环境规制和产业结构均与效率呈显著正相关。刘子豪等^[13]同样采用 Tobit 模型发现经济发展水平、市场竞争强度、对外开放程度和政府扶持力度可提高绿色创新效率,而环境规制因挤占企业资源呈现抑制作用。

现有研究大多集中在全国或重点城市群层面,针对广东省地级市层面的系统性研究相对较少,尤其是在效率的收敛性检验和影响因素的综合分析方面仍存在不足。因此,本文的贡献是将考虑非期望产出的超效率 SBM-DEA 模型,利用 2014-2024 年广东省 21 个地级市的面板数据,从城市和地域板块两个维度系统测度绿色低碳创新效率,并引入 ML 指数刻画其动态演变过程,同时结合 σ 收敛与 β 收敛与 Tobit 回归,全面揭示广东绿色低碳创新效率的区域差异和时空演化机理,旨在为促进广东区域绿色协同发展提供科学理论支撑与实践建议,为广东省绿色转型和区域创新资源优化配置、制定差异化绿色政策提供实证依据。

一、广东省绿色低碳创新效率测度模型设计

(一) 考虑非期望产出的超效率 SBM-DEA 模型构建

在绿色创新效率的测度研究中,传统 DEA 模型要求所有投入或产出都按同一比例进行调整,易使效率评价产生偏差。针对这一不足,本文采用如下超效率 SBM-DEA 模型(1)来评估广东省各地市的绿色低碳创新效率,对于处于效率前沿的有效决策单元先把它们从参照集中剔除,再基于剩余单元构建新的前沿面进行重新测算,这样有利于各地市效率区分和排序;它既考虑了非期望产出,又能获得投入和产出的松弛变量,以期提升效率落后地区的技术管理。

$$\rho_k^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{ik}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^+}{y_{rk}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^-}{z_{lk}} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{ik}, & i=1, \dots, m \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk}, & r=1, \dots, s_1 \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j z_{lj} + s_l^- = z_{lk}, & l=1, \dots, s_2 \\ \lambda_j \geq 0, & s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0, s_l^- \geq 0 \end{cases}$$

其中, ρ_k^* 为广东省被评价的第 k 个地市(决策单元)的综合技术创新效率, x_{ij} 表示第 j 个决策单元(地市)的第 i 种投入量, y_{rj} 表示第 j 个决策单元的第 r 种期望产出量, z_{lj} 表示第 j 个决策

单元的第 l 种非期望产出量, s_i^- 、 s_r^+ 和 s_l^- 分别为投入、期望产出与非期望产出的松弛变量, λ 为广东省各地市的资源权重向量。

(二) 构建 Malmquist-Luenberger 指数模型

超效率 SBM-DEA 模型主要测度的是各年份的静态效率,无法反映效率随时间的变化趋势。同时,广东省绿色低碳创新效率包含非期望产出,传统 Malmquist 指数无法处理这类问题。因此,本文采用基于方向性距离函数的 Malmquist-Luenberger (ML) 指数,考察广东省绿色低碳创新效率的动态演变。

为了定义 ML 指数,首先需要构建方向性距离函数。设定生产可能性集为 $P^1(x^1) = \{(y^1, b^1): x^1 \text{ 可以生产 } (y^1, b^1)\}$, 其中 y 表示期望产出, b 表示非期望产出。方向性距离函数为 $\bar{D}(x^1, y^1, b^1; g_y, -g_b) = \sup \{\beta: (y^1 + \beta g_y, b^1 - \beta g_b) \in P^1(x^1)\}$ 。式中, g_y 和 g_b 分别为好产出的扩张方向和坏产出的缩减方向; β 表示在给定方向上可以同时扩张好产出、缩减坏产出的最大比例。该函数能够恰当地描述“增加期望产出的同时减少非期望产出”这一绿色生产目标。

基于方向性距离函数,以第 t 期和第 $t+1$ 期的技术为参照, ML 指数定义为:

$$ML_t^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; x^t, y^t, b^t) = \left[\frac{\bar{D}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{\bar{D}^t(x^t, y^t, b^t)} \times \frac{\bar{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{\bar{D}^{t+1}(x^t, y^t, b^t)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

其中 ML 指数还可以进一步分解为技术效率变化 (EC) 和技术进步变化 (TC):

$$ML_t^{t+1} = \frac{\bar{D}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{\bar{D}^t(x^t, y^t, b^t)} \times \left[\frac{\bar{D}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{\bar{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \times \frac{\bar{D}^t(x^t, y^t, b^t)}{\bar{D}^{t+1}(x^t, y^t, b^t)} \right] = EC \times TC \quad (2)$$

当 $ML > 1$ 时,表明广东绿色全要素生产率提高;当 $ML = 1$ 时,表明绿色全要素生产率不变;当 $ML < 1$ 时,表明绿色全要素

生产率下降。当技术效率变化 $EC>1$ 表明技术效率改善, 存在追赶效应; 当技术进步变化 $TC>1$ 表明技术进步, 存在生产前沿面外移。

(三) 广东省绿色低碳创新效率的区域收敛性检验

绿色创新效率收敛性检验旨在考察落后地区是否具有追赶先进地区的趋势, 是分析区域差异动态演变的重要工具。本文从 σ 收敛和 β 收敛两个维度展开检验, 其中 β 收敛又可以进一步分为绝对 β 收敛和条件 β 收敛。

1. 广东省绿色低碳创新效率的 σ 收敛检验

σ 收敛是用来判断广东省各地区绿色低碳创新效率的差距是否随着时间推移而缩小。本文采用变异系数 (CV) 作为衡量指标, 其计算公式为:

$$CV_t = \frac{\sigma_t}{\mu_t} \quad (3)$$

其中, σ_t 为第 t 年广东省各地区效率值的标准差, μ_t 为第 t 年广东省绿色创新效率的均值, 若 CV_t 随时间呈下降趋势, 则表明存在 σ 收敛, 即区域间的效率差距在缩小; 反之, 区域间的差距在扩大。

2. 广东省绿色低碳创新效率的绝对 β 收敛检验

绝对 β 收敛检验假定广东所有地区具有相同的稳态水平, 旨在探究在不考虑其他外部条件的情况下, 初期效率较低的地区会不会有更高的增长率, 从而慢慢追赶先进地区。本文设定如下面板回归模型:

$$\frac{1}{T} \ln \left(\frac{EFF_{i, t+T}}{EFF_{i, t}} \right) = \alpha + \beta \ln(EFF_{i, t}) + \varepsilon_{i, t} \quad (4)$$

其中, 被解释变量为地区 i 在 t 到 $t+T$ 期间绿色低碳创新效率的年均增长率, 核心解释变量为初期效率水平的对数。若回归系数 β 显著为负, 则表明初期效率越低的地区, 其后期的增长越快, 存在绝对 β 收敛; 反之, 若 β 显著为正, 则表明初期效率越高的地区增长越快, 区域差距呈现扩大趋势, 存在绝对 β 发散。考虑到样本时间跨度为 11 年, 本文将 T 设为 1, 采用年度增长率进行面板固定效应回归。

3. 广东省绿色低碳创新效率的条件 β 收敛检验

在现实中, 广东省各地区在产业结构、经济发展水平等结构性因素存在的显著差别会影响到各地区效率长期的稳态水平, 进而制约了收敛效应的发生。条件 β 收敛检验正是为了解决这一问题而设计出来的措施, 它在回归模型中引入一些控制变量, 以此来考察在给定那些结构性差异的条件下, 落后地区是否具有更高的增长率。本文借鉴已有研究的做法, 设定如下条件 β 收敛面板回归模型:

$$\frac{1}{T} \ln \left(\frac{EFF_{i, t+T}}{EFF_{i, t}} \right) = \alpha + \beta \ln(EFF_{i, t}) + \gamma X_{i, t} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{i, t} \quad (5)$$

其中, 被解释变量为广东省地区 i 在 t 到 $t+T$ 期间绿色低碳创新效率的年均增长率, 核心解释变量为初期效率对数 $\ln(EFF_{i, t})$, $X_{i, t}$ 为控制变量向量, 包括影响绿色创新效率的结构性因素, μ_i 和 λ_t 分别为个体固定效应和时间固定效应。若回归系数

β 显著为负, 则表明存在条件 β 收敛, 即结构性因素只能部分解释增长差异, 收敛效应具有独立存在的稳健性; 反之, 则表明初始差异完全可由结构性因素解释, 不存在独立追赶趋势。

(四) 基于 Tobit 回归模型探究广东省绿色低碳创新因素

为探究广东省绿色低碳创新效率的影响因素, 需要建立一个回归模型。由于超效率 SBM 模型测算出来的广东各地市的绿色低碳创新效率值会有一个下限截断的情况, 也就是效率值会大于或等于零, 这就属于一种受限因变量, 如果采用普通最小二乘法 (OLS) 进行回归估计, 会导致得到的参数估计变得有偏且不一致。所以本文采用如下 Tobit 回归模型 (6) 对广东省绿色低碳创新效率进行影响因素分析。

$$Y_{it}^* = \alpha + \beta X_{it} + \varepsilon_{it}, \quad (6)$$
$$Y_{it} = \begin{cases} Y_{it}^*, & Y_{it}^* > 0; \\ 0, & Y_{it}^* \leq 0. \end{cases};$$

其中, Y_{it} 为可观测的被解释变量 (广东省城市 i 在 t 年的绿色低碳创新效率), Y_{it}^* 为潜变量, α 为截距项, X_{it} 为解释变量向量, β 为待估系数, ε_{it} 为随机扰动项。

二、广东省绿色低碳创新效率相关评价指标

(一) 广东省绿色低碳创新的投入产出指标

在广东省绿色低碳创新投入产出指标方面, 投入指标选择 R&D 经费内部支出、R&D 人员全时当量、能源消耗总量, 用来说明资金投入、劳动力投入和地区的资源消耗。期望产出指标选择发明专利授权量作为知识产出, 其能够有效反映创新成果的技术含量与实质性突破, 规避低质量专利对创新效率测算的干扰; 新产品销售收入作为经济产出指标, 直接度量了绿色创新成果的市场化转化能力, 能精准反映创新活动对区域经济增长的实际贡献。非期望产出指标选取工业 SO_2 排放量、工业废水排放量、一般工业固体废物产生量, 能够反应地区的环境污染状况; 详细投入产出指标如表 1 所示。

表 1: 广东省绿色低碳创新效率评价的投入和产出指标

指标类型	指标构成	变量	单位
投入	资金	R&D 经费内部支出	万元
	劳动力	R&D 人员全时当量	人年
	能源	能源消耗总量	万吨标准煤
	知识产出	发明专利授权量	件
产出	经济产出	新产品销售收入	万元
		工业 SO_2 排放量	吨
	非期望产出	工业废水排放量	万吨
		一般工业固体废物产生量	万吨

(二) 广东省绿色低碳创新效率条件 β 收敛的控制变量指标

在针对广东省绿色低碳创新效率的条件 β 收敛检验中, 我们选取广东各地市经济发展水平 ($\lnpgdp$)、产业结构 (is)、城镇化水平 ($urban$)、对外开放程度 ($open$)、市场竞争强度 ($\lnimc$) 作为控制变量 (如表 2), 旨在剔除各地区结构性差异对

绿色低碳创新效率收敛趋势的干扰，从而检验在给定这些结构性特征后，落后地区是否仍然具有更快的增长速率。其中，经济发展水平用人均 GDP 来表示，能够反映地区经济发展阶段和要素禀赋。产业结构以第三产业增加值占 GDP 比重来衡量，第三产业占比的提升，通常意味着更低的能耗与更高的附加值，能通过产业协同与技术外溢加速绿色创新成果转化。城镇化率反映了人口与经济活动的空间集聚程度，因此选取城镇人口占常住人口比例衡量城镇化水平，考察其对绿色创新效率收敛的影响。对外开放程度以地区货物进出口总额与 GDP 之比衡量，反映了地区参与国际技术溢出和市场竞争的深度。市场竞争强度以规模以上工业企业个数对数近似表征的市场竞争程度，会影响企业进行绿色技术创新的激励和资源获取能力。

表 2：控制变量指标

变量名称	变量说明
经济发展水平（lnpgdp）	地区人均 GDP 的对数
产业结构（is）	第三产业增加值占 GDP 比重
城镇化水平（urban）	地区城镇人口占常住人口的比例
对外开放程度（open）	地区货物进出口总额与地区 GDP 之比
市场竞争强度（lnimc）	地区规模以上工业企业个数的对数

（三）广东省绿色低碳创新效率的影响因素指标

为探究广东省绿色创新效率的影响因素，我们选取经济发展水平（lnpgdp）、产业结构（is）、城镇化水平（urban）、对外开放程度（open）、市场竞争强度（lnimc）、政府支持（gov）作为研究变量（如表 3 所示）。然后通过 Tobit 回归，识别出哪些因素会显著地促进或抑制广东省各地级市的绿色创新效率，这为政策制定提供实证依据。其中，政府支持（gov）以一般预算内财政收入与财政支出之比来衡量，比值越高表明政府财政状况越好、对绿色创新的直接扶持能力可能越强。但该指标同时也反映了政府对经济的干

预程度和支出效率，若财政支出主要投向传统基建而非绿色技术，或存在低效补贴，则可能对绿色创新产生“挤出效应”。

表 3：广东省绿色低碳创新效率的影响因素指标

变量类型	变量名称	变量说明
被解释变量	绿色创新效率（gtie）	各城市的绿色低碳创新效率值
	经济发展水平（lnpgdp）	地区人均 GDP 的对数
	产业结构（is）	第三产业增加值占 GDP 比重
	城镇化水平（urban）	地区城镇人口占常住人口的比例
解释变量	对外开放程度（open）	地区货物进出口总额与地区 GDP 之比
	市场竞争强度（lnimc）	地区规模以上工业企业个数的对数
	政府支持（gov）	一般预算内财政收入与一般预算内财政支出之比

（四）指标数据来源

本文选取 2014–2024 年广东省 21 个地级市的面板数据作为研究样本。数据取自历年的《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《广东省统计年鉴》及各市统计年鉴、国民经济和社会发展公报、环境公报等，对于个别年份的缺失数据，采用线性插值法进行补充。

三、实证测度分析

（一）广东省绿色低碳创新效率的整体演变分析

利用考虑非期望产出的超效率 SBM–DEA 模型（1），本研究运用 MATLAB 软件测算 2014–2024 年广东省 21 个地级市的绿色低碳创新效率，结果如下表 4 所示。

表 4：2014–2024 年广东省各城市的绿色低碳创新效率

城市	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	平均值
深圳市	1.623	1.631	1.562	1.625	1.574	1.531	1.505	1.450	1.438	1.453	1.462	1.532
东莞市	1.008	1.019	1.090	1.130	1.238	1.177	1.160	1.098	1.082	1.087	1.074	1.106
汕尾市	1.039	1.008	1.060	1.031	1.072	1.111	1.187	1.077	1.014	1.111	1.085	1.072
珠海市	1.016	1.063	1.171	1.104	1.087	0.704	1.084	1.100	1.118	1.039	1.065	1.050
惠州市	1.122	1.121	1.076	1.036	1.020	1.027	1.005	1.013	1.017	0.475	0.432	0.940
河源市	1.045	1.019	1.033	1.020	1.050	0.630	0.658	0.374	0.468	1.029	0.322	0.786
佛山市	0.617	0.555	0.590	0.655	0.642	0.498	0.601	1.038	1.033	1.053	1.054	0.758
清远市	0.305	1.022	0.413	1.018	0.330	0.415	0.442	1.077	1.086	0.280	1.014	0.673
广州市	0.429	0.364	0.401	0.435	0.580	0.486	0.551	1.023	1.004	1.028	1.014	0.665
中山市	0.221	0.291	0.258	0.413	0.563	1.129	0.325	0.515	0.461	0.452	1.026	0.514
汕头市	1.022	1.026	0.314	0.287	0.238	0.225	0.214	0.313	0.308	0.299	0.334	0.416
梅州市	0.177	0.203	0.245	0.358	0.293	1.152	0.397	0.407	0.430	0.362	0.352	0.398
江门市	0.287	0.319	0.357	0.314	0.242	0.257	0.279	0.383	0.449	0.421	0.399	0.337
肇庆市	0.227	0.262	0.383	0.191	0.238	0.233	0.339	0.464	0.440	0.334	0.372	0.317
潮州市	0.328	0.282	0.198	0.232	0.205	0.265	0.243	0.349	0.341	0.300	0.403	0.286
湛江市	0.275	0.259	0.193	0.255	0.302	0.304	0.240	0.286	0.257	0.265	0.291	0.266
阳江市	0.083	0.273	0.060	0.114	0.329	0.137	0.221	0.311	0.353	0.361	0.491	0.249
揭阳市	0.270	0.293	0.271	0.223	0.222	0.167	0.099	0.260	0.236	0.273	0.364	0.243
韶关市	0.201	0.147	0.126	0.156	0.171	0.132	0.168	0.307	0.400	0.361	0.355	0.229
云浮市	0.100	0.159	0.089	0.098	0.238	0.252	0.283	0.246	0.235	0.213	0.258	0.197
茂名市	0.257	0.179	0.107	0.095	0.132	0.103	0.108	0.148	0.189	0.205	0.113	0.149
平均值	0.555	0.595	0.524	0.561	0.560	0.568	0.529	0.630	0.636	0.591	0.632	0.580

1. 广东省绿色低碳创新效率整体变化趋势分析

从时间上看，广东省绿色低碳创新效率呈波动上升态势，但不同阶段差异明显。2014–2020年期间，效率均值在0.52至0.60之间反复波动，未形成持续增长趋势，2021–2024年，效率均值出现明显跃升，从2020年的0.529升至2021年的0.630，2022年达到峰值0.636，2023年回落至0.591，2024年又回升至0.632，这表明在“双碳”目标政策驱动下，广东省绿色创新效率有明显的提升。

从整体来看，2014–2024年广东省绿色低碳创新效率的总均值为0.580，这说明广东省在绿色低碳创新方面虽然取得了一定的进展，但还没有达到生产前沿面的有效状态，存在投入冗余或产出不足的问题，绿色创新效率还有巨大提升空间。

2. 广东省各城市绿色低碳创新效率演变分析

表4将广东省21个地级市2014–2024年绿色创新效率由高到低进行排序，可看出广东省各城市的绿色创新效率发展极不平衡。深圳、东莞、汕尾、珠海这四个城市效率较高，其中深圳遥遥领先，历年效率均大于1.45，表现出绝对优势。惠州、河源、佛山、清远、广州、中山处于中等水平，效率均值在0.5–1.0之间。而汕头、梅州、江门等城市效率较低，特别是茂名、云浮、韶关等城市，多数年份效率不足0.3，绿色创新效率存在巨大提升空间。从时间纵向来看，绝大部分城市的效率在这11年内表现出波动中略有上升的趋势。深圳、东莞等城市效率值始终大于1，并且年度波动也比较小，这显示出它们有着持续的创新能力；广州、佛山等城市则在2021年后效率从低于0.6跃升至1.0以上，说明它们的追赶效应较明显；而河源、清远、中山等城市的效率起伏较大，缺乏长期的稳定性。

（二）基于地域板块的广东省绿色低碳创新效率分析

按照广东省“十四五”规划的区域划分标准，本文将21个地级市划分为珠三角核心区、粤东地区、粤西地区和粤北山区四大板块，计算各区域研究期内的平均绿色低碳创新效率，结果如表5所示。

表5：广东省各区域绿色低碳创新效率		
区域	包含城市	平均效率
珠三角	广州、深圳、珠海、佛山、江门、肇庆、惠州、东莞、中山	0.838
粤东	汕头、汕尾、潮州、揭阳	0.504
粤北	韶关、河源、梅州、清远、云浮	0.457
粤西	湛江、茂名、阳江	0.221

由上表5可知，2014–2024年珠三角核心区的绿色低碳创新效率均值远高于其他板块，且效率呈现由珠三角向粤东、粤北、粤西依次递减的态势。结合上述城市排序可知，效率较高的城市，如深圳、东莞、珠海、广州等全部位于珠三角核心区，而排名靠后的城市，如茂名、云浮、阳江等主要位于粤西和粤北地区。这说明了珠三角地区凭借雄厚的经济实力以及密集的创新资源，在推动绿色低碳创新方面取得了显著成效；而粤西、粤北地区受到经济发展水平较低、创新人才短缺、产业转型缓慢等因素的制约，使得绿色创新效率长期处于低位。因此，未来应加大对粤东西北地区的绿色技术转移与政策扶持，以此促进区域绿色创新的协调发展。

（三）广东省绿色低碳创新效率的动态演变——基于 ML 指数的测度与分解

为进一步揭示广东省绿色低碳创新效率的动态演变趋势，本节运用 Malmquist–Luenberger(ML) 指数模型（2）对2020–2024年四个时期的变化情况进行测度，结果如表6所示。

表6：广东省各城市绿色低碳创新效率 ML 指数及因素分解

城市	2020–2021			2021–2022			2022–2023			2023–2024		
	ML	EC	TC	ML	EC	TC	ML	EC	TC	ML	EC	TC
广州市	1.523	0.974	1.563	0.986	1.000	0.986	1.065	1.000	1.065	1.055	1.000	1.055
深圳市	1.024	1.000	1.024	0.989	1.000	0.989	1.020	1.000	1.020	1.096	1.000	1.096
珠海市	1.292	1.000	1.292	1.014	1.000	1.014	0.903	1.000	0.903	1.250	1.000	1.250
佛山市	1.246	0.878	1.418	0.959	1.000	0.959	1.004	1.000	1.004	1.102	1.000	1.102
江门市	1.064	0.849	1.254	1.128	0.868	1.298	1.036	0.986	1.051	0.968	1.039	0.932
肇庆市	1.095	0.777	1.409	0.930	1.017	0.915	0.853	1.242	0.687	1.112	0.921	1.207
惠州市	0.923	1.000	0.923	0.965	1.000	0.965	1.000	1.004	0.997	0.988	1.024	0.965
东莞市	0.938	1.000	0.938	0.979	1.000	0.979	1.031	1.000	1.031	1.084	1.000	1.084
中山市	1.133	0.789	1.437	0.881	1.075	0.819	1.027	1.002	1.026	1.182	0.893	1.325
珠三角	1.138	0.919	1.251	0.981	0.996	0.992	0.993	1.026	0.976	1.093	0.986	1.113
汕头市	1.024	0.902	1.135	0.921	1.033	0.892	0.981	1.065	0.921	1.323	0.804	1.646
汕尾市	0.722	1.000	0.722	0.733	1.000	0.733	1.306	1.000	1.306	1.137	1.000	1.137
潮州市	1.059	0.861	1.229	0.955	0.985	0.970	1.050	1.042	1.008	1.324	0.842	1.572
揭阳市	1.362	0.726	1.875	0.868	1.107	0.784	0.970	1.072	0.905	1.463	0.772	1.894
粤东	1.042	0.872	1.240	0.869	1.031	0.845	1.077	1.045	1.035	1.312	0.855	1.562
韶关市	1.186	0.894	1.327	1.547	0.630	2.454	0.819	1.052	0.779	1.107	1.012	1.094
河源市	0.734	1.041	0.705	0.998	0.930	1.074	1.159	0.994	1.166	0.808	1.309	0.618
梅州市	0.657	1.351	0.486	1.106	0.902	1.227	0.953	0.956	0.996	1.039	1.089	0.954
清远市	1.034	0.989	1.045	0.936	1.000	0.936	0.615	1.309	0.469	1.584	0.764	2.074
云浮市	0.646	1.347	0.480	0.939	1.018	0.923	1.033	1.042	0.991	1.235	0.842	1.468
粤北	0.851	1.124	0.809	1.105	0.896	1.323	0.916	1.071	0.880	1.155	1.003	1.242

城市	2020-2021			2021-2022			2022-2023			2023-2024		
	ML	EC	TC	ML	EC	TC	ML	EC	TC	ML	EC	TC
湛江市	1.245	0.902	1.380	1.029	0.912	1.129	0.851	0.902	0.943	1.307	1.035	1.263
茂名市	0.993	1.014	0.979	1.037	0.956	1.085	1.017	0.981	1.036	0.932	1.082	0.861
阳江市	0.870	0.960	0.907	1.046	0.876	1.194	1.103	1.011	1.092	1.304	0.824	1.583
粤西	1.036	0.959	1.089	1.037	0.915	1.136	0.990	0.965	1.024	1.181	0.980	1.236
平均值	1.037	0.964	1.120	0.997	0.967	1.063	0.990	1.031	0.971	1.162	0.964	1.247

从总体上看，2020-2024年广东省绿色低碳创新效率的 ML 指数平均值为 1.047，说明广东省绿色低碳创新效率总体呈上升趋势，各要素投入得到了较好利用。从各时期变化来看，ML 指数在 2020-2021 年相对较高，随后在 2021-2022 年和 2022-2023 年分别下降至 0.997 和 0.990，这表明中期增长动力有所减弱；而 2023-2024 年又大幅跃升至 1.162，这反映出在“双碳”政策持续推动下，末期的绿色全要素生产率实现了显著的提速。进一步将 ML 指数分解为技术效率变化（EC）和技术进步变化（TC），其均值分别为 0.982 和 1.100；这表明广东省绿色低碳创新效率的提升主要源于技术进步，也就是说近年来广东省在绿色低碳转型、绿色技术研发投入以及政策体系建设方面取得了积极的成效，但是技术效率改善不足的问题还需引起重视。

从区域对比来看，粤东、粤西、珠三角、粤北四大区域的 ML 指数分别为 1.075、1.061、1.051、1.007，呈现粤东最高、粤北最低的格局。其中，粤东地区由于原有经济基础和技术水平相对落后，在区域发展条件改善和政策扶持加大的背景下，绿色创新水平的增长率最高；珠三角地区绿色低碳创新已处于较高水平，增长趋于平缓；粤西地区稳步追赶，增速较为均衡；粤北地区虽然略有增长，但波动较大，总体增速最低，需提升增长的稳定性。

从 ML 指数分解项进一步分析，珠三角、粤东和粤西地区的技术效率变化（EC）均小于 1，这表明这些区域在技术效率方面存在退步；而粤北的 EC 达到了 1.024，是唯一实现技术效率改善的区域，也就显示出一定的追赶效应。与此同时，所有区域的技术进步变化（TC）均大于 1，其中粤东最高。这些情况进一步印证了技术进步是驱动各区域绿色全要素生产率增长的核心力量。

（四）广东省绿色低碳创新效率的收敛性分析

1. 广东省绿色低碳创新效率的 σ 收敛分析

运用前文提出的变异系数公式（3），可计算广东省每年的 σ 收敛变异系数结果如图 1 所示。从中可看出，广东省绿色低碳创新效率的变异系数整体呈波动下降态势，从 2014 年的 0.80 下降至 2024 年的约 0.62，表明各地区效率差异在逐步缩小。尽管这段时期反复出现上升和下降的情况，但变异系数的长期趋势是明显的向下走向，峰值也在逐年降低。这一结果表明，广东省绿色低碳创新效率的区域差距正在稳步收窄；粤东、珠三角、粤西、粤北四大板块间的“分化格局”有所改善， σ 收敛特征较显著。

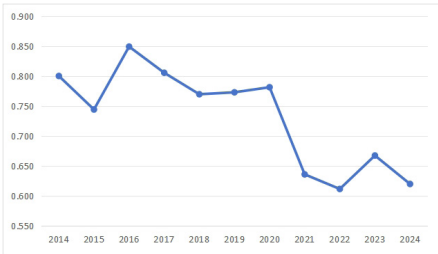


图 1：广东省绿色低碳创新效率的变异系数

2. 广东省绿色低碳创新效率的绝对 β 收敛分析

为考察广东省各地市绿色低碳创新效率是否存在无条件追赶趋势，采用面板回归模型（4）进行绝对 β 收敛检验，结果如表 7 所示。

表 7：广东省绿色低碳创新效率的绝对 β 收敛结果

变量	系数	标准差	t 值	P 值
初期效率对数	-0.737***	0.162	-4.56	0.000
常数项	-0.501**	0.135	-3.71	0.001
R ²	0.289			
收敛速度 λ	1.337			
半生命周期 τ	0.518			

从回归结果来看，初期效率对数的系数为 -0.737，且在 1% 的显著性水平上通过检验。这一结果表明，在 2014-2024 年这个时间段里，初始绿色低碳创新效率较低的城市，它们后期的年均增长率显著高于初始效率较高的城市。换句话说，落后地区会对先进地区表现出一种追赶的态势，绿色创新效率存在显著的绝对 β 收敛。

进一步地，根据收敛速度公式 $\lambda = \frac{\ln(1+\beta)}{T}$ ，可计算出收敛速度 λ 为 1.337，半生命周期 $\tau = \frac{\ln(2)}{\lambda}$ 约为 0.518 年。这意味着，广东省各地级市之间的绿色低碳创新效率差距缩小一半所需时间仅约 0.518 年。这一较快的收敛速度反映出，在样本期内，落后城市的绿色创新效率增长势头强劲，能够迅速对先进城市形成有效追赶。

3. 广东绿色低碳创新效率的条件 β 收敛分析

为剔除各地区结构性差异对收敛效应的影响，本文还进一步引入经济发展水平、产业结构、城镇化水平、对外开放程度及市场竞争强度作为控制变量，进行条件收敛 β 检验。采用面板回归模型（5）得到结果如表 8 所示。

表 8：广东省绿色低碳创新效率的条件 β 收敛结果

变量	系数	标准差	t 值	P 值
初期效率对数	-0.769***	0.175	-4.40	0.000
经济发展水平（lnpgdp）	0.525	0.529	0.99	0.333
产业结构（is）	0.002	0.015	0.15	0.881

变量	系数	标准差	t 值	P 值
城镇化水平 (urban)	-0.005	0.022	-0.24	0.809
对外开放程度 (open)	0.004	0.003	1.35	0.193
市场竞争强度 (lnimc)	-0.100	0.238	-0.42	0.679
常数项	-5.509	3.858	-1.43	0.169
R ²	0.306			
收敛速度 λ	1.464			
半生命周期 τ	0.474			

从核心解释变量来看，初期效率对数的系数为-0.769，且在1%的水平上显著。这一结果与绝对 β 收敛检验中的结论一致，表明即使在控制了各地区的结构性特征之后，初期效率较低的城市仍然表现出更高的后续增长率，故绿色低碳创新效率的条件 β 收敛成立。与绝对 β 收敛相比，条件 β 收敛的系数绝对值从0.737略微增大至0.769，收敛速度 λ 从1.337提升至1.464，半生命周期 τ 从0.518年缩短至0.474年。这一变化说明，在剔除结构性差异的干扰后，收敛效应反而有所增强，即如果进一步缩小产业结构、城镇化水平等方面的差距，落后地区的绿色创新效率可以有更快的提升。

从各控制变量来看，经济发展水平、产业结构、城镇化水平、对外开放程度和市场竞争强度的系数均未通过10%水平的显著性检验，这可能是因为样本量比较有限、变量间存在多重共线性或者各城市的发展阶段差异比较大所导致。尽管如此，各系数的方向基本上符合理论预期，经济发展水平和对外开放程度系数为正，这表明较高的经济基础与开放水平有助于促进绿色创新效率的增长；产业结构系数为正，说明第三产业占比的提升有利于绿色转型；城镇化水平和市场竞争强度的系数为负，反映出快速城镇化过程会带有一定的环境压力，再加上过度竞争可能会把创新资源给挤占掉。

综上所述，条件 β 收敛检验显示广东省绿色低碳创新效率存在稳健的追赶机制，即使把各地区的结构性差异考虑进去，落后城市仍表现出显著的增长优势，且收敛速度比绝对 β 收敛还要更快一些。这表明，推动区域绿色创新协调发展的政策具有坚实的基础，未来应加大对粤东、粤西、粤北等落后地区的绿色技术转移与制度支持，同时还需要着力优化各地区的产业结构与开放环境，以便能够更好地进行绿色转型。

（五）广东省绿色低碳创新效率的影响因素分析——基于Tobit 回归模型

为进一步探究影响广东省绿色低碳创新效率的关键因素，本研究采用 Stata 软件面板 Tobit 回归模型（6）对绿色创新效率影响因素实证分析，结果如表9所示。

表9：广东省绿色低碳创新效率 Tobit 回归结果

变量	系数	标准差	Z 值	P 值
经济发展水 (lnpgdp)	0.045	0.080	0.56	0.573
产业结构 (is)	0.009**	0.003	2.71	0.007
城镇化水平 (urban)	0.007**	0.002	2.95	0.003
对外开放程度 (open)	0.008***	0.001	9.10	0.000
市场竞争强度 (lnimc)	-0.063	0.036	-1.74	0.084
政府支持 (gov)	-0.005*	0.002	-2.48	0.014
常数项	-0.414	0.715	-0.58	0.563
方差参数	0.074***	0.007	10.75	0.000
Log likelihood	-27.66			

结果表明，经济发展水平的系数为0.045，但标准误较大，并且没有通过显著性检验，这可能是因为经济发展水平对绿色创新效率的影响并不是简单的线性关系，而且广东省内各城市经济发展阶段的差异较大，部分城市仍然处于工业化中期，人均 GDP 的提高还没有能够有效转化为绿色创新动力，因此导致整体回归不显著。

产业结构的系数为0.009，在5%水平上显著。这表明，服务业的发展，能够为制造业绿色转型提供技术支撑和资金保障，同时第三产业本身具有较低的能耗和污染排放强度，有助于整体绿色创新绩效的改善。

城镇化水平的系数为0.007，在5%水平上显著。城镇化进程通过人口集聚、产业集聚和基础设施共享，降低了绿色技术研发与推广的平均成本，此外，高城镇化地区通常拥有更完善的教育、医疗等公共服务，有利于吸引高素质人才，为绿色创新提供人力资本支持。因此，城镇化水平的提升对绿色创新效率产生了显著的正向拉动。

对外开放程度的系数为0.008，在1%水平上显著。这一结果表明，货物进出口总额占 GDP 比重越高，地区融入全球市场的程度越深，越有利于通过技术引进、知识溢出和竞争效应促进绿色创新。

市场竞争强度的系数为-0.063，且结果不显著。从理论上来看，一是市场竞争有可能通过“倒逼效应”促进绿色创新，二是它可能因为利润微薄而抑制长期研发投入。在广东省各地级市中，深圳、东莞等城市的企业数量多而且竞争激烈，但龙头企业的绿色创新能力会比较强；而像粤北山区的企业数量少、市场发育也不足，竞争强度低的同时创新动力也会比较弱。这种非线性或异质性的影响，就有可能导致市场竞争强度在整个样本回归中没能呈现出显著的统计关系。

政府支持的系数为-0.005，并且在10%的水平上显著。其系数为负的可能原因，一是财政支出结构中可能存在一种“重基建、轻绿色技术”的倾向，这会导致绿色创新领域的实际支持变得不足；二是政府补贴若缺乏精准性和绩效评估，就可能引发企业的补贴依赖，反而抑制自主创新的动力；三是财政收入占比过高可能意味着企业税负较重，挤占了企业本可用于绿色研发的那部分资金。

四、结束语

本文通过运用超效率 SBM 数据包络分析模型发现，广东省效率水平整体呈上升趋势，但区域之间的发展极不平衡，珠三角的效率均值达到了0.838，而粤西地区却只有0.221，形成了典型的“核心-边缘”格局。从城市层面看，深圳、东莞、汕尾、珠海属于高效领先城市，而茂名、云浮、韶关则长期处在低效率的状态。通过动态曼奎斯特指数分析发现，技术进步是推动广东绿色创新效率提升的主导力量，技术效率的改善就相对滞后一些。另外，广东绿色低碳创新效率收敛的趋势比较明显，区域差距有望持续地缩小， σ 收敛变异系数从2014年的0.80下降到了2024年

的0.62，绝对 β 收敛系数为 -0.737 且在1% 的水平上显著，条件 β 收敛系数为 -0.769 同样也在1% 的水平上显著；这结果表明落后地区存在显著的追赶效应，区域绿色创新效率的不平衡问题正逐步得到缓解。最后通过 Tobit 回归还发现，政府对外开放程度的扩大、产业结构的升级、城镇化水平的提升都会对广东绿色创

新效率产生显著的正向影响，而政府支持表现出负向的影响，这可能与财政支出结构不合理或补贴效率低下有关。广东省政府在推动绿色低碳转型的过程中，应该优化财政支出结构并提高资金使用效率。

参考文献

[1] 郭树华, 方鹏飞, 毕福芳. 基于 SFA 方法的企业绿色创新效率分析 [J]. 工业技术经济, 2024, 43(07):112-119.

[2]Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1):32-41.

[3]Nannan Wang, Ji Chen, Shengnan Yao, Yen-Chiang Chang.A meta-frontier DEA approach to efficiency comparison of carbon reduction technologies on project level[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews.2018, 82(03):2606-2612.

[4] 钱丽, 王文平, 肖仁桥. 高质量发展视域下中国企业绿色创新效率及其技术差距 [J]. 管理工程学报, 2021, 35(06):97-114.

[5]Joshua Ignatius, M. R. Ghasemi, Feng Zhang, Ali Emrouznejad, Adel Hatami-Marbini.Carbon efficiency evaluation: An analytical framework using fuzzy DEA[J]. European Journal of Operational Research.2016, 253(02):428-440.

[6] Yong Zha, Linlin Zhao, Yiwen Bian. Measuring regional efficiency of energy and carbon dioxide emissions in China: A chance constrained DEA approach[J].Computers & Operations Research.2016, 66:351-361.

[7] 张辽, 黄蕾琼. 中国工业企业绿色技术创新效率的测度及其时空分异特征——基于改进的三阶段 SBM-DEA 模型分析 [J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(12):50-61.

[8] 张盼. 中国省域绿色创新效率测度及聚类分析 [D]. 东北林业大学, 2023.

[9] 赵雅婷. 中国绿色技术创新效率测度、时空分异及影响因素研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(06):184-188+191.

[10]Weipan Zhang, Xianhua Wu, Jihong Chen. ow-carbon efficiency analysis of rail-water multimodal transport based on cross efficiency network DEA approach[J]. Energy.2024, 305:132348.

[11] 赵志芳. 中国区域绿色技术创新效率的测度及驱动因素研究——基于超效率 SBM 和 Tobit 模型 [J]. 特区经济, 2022, (08):54-57.

[12] 滕琳娜. 中国省际工业绿色创新效率测度及影响因素研究 [D]. 安徽理工大学, 2022.

[13] 刘子豪, 王子涵, 师路路. 中国省域绿色创新效率测度、差异分析及影响因素 [J]. 科技和产业, 2024, 24(17):63-68.

[14] 张平凤. 中国绿色创新效率的区域差异及收敛性研究 [D]. 中南财经政法大学, 2022.

[15] 王金河, 张玲梅. 中国绿色创新效率的地区差异及空间收敛性研究 [J]. 生态经济, 2023, 39(01):81-86+100.