

中国碳中和发展绩效及其内在驱动力研究

李爱军 张入川

摘要: 针对气候变化和全球变暖问题,党和国家提出了参与和推进全球生态文明建设的战略,明晰了碳达峰和碳中和的“双碳”目标,已成为全球生态文明建设的重要参与者。然而,2021年多个省份出现了“拉闸限电”现象,暴露出一些地方存在诸多认知短板和执行不力等问题。在此背景下,应对中国各个省份的碳中和发展绩效进行定量评估,同时,要区分技术进步因素和效率改进因素对碳中和发展绩效的影响,并对阻碍技术传播的内在驱动因素进一步展开分析。实证结果表明,中国碳中和发展绩效拥有较大的提升空间,并且区域、省际之间依然存在着较为明显的绩效差异;技术进步因素和效率改进因素,均是提升碳中和发展绩效的重要因素,并且可以弥补一些省份在低碳资源上的禀赋劣势;此外,西部地区内部的技术差异,是重要的技术传播障碍。因此,促进区域内部的技术传播和效率改进是提升碳中和发展绩效的有效手段。

关键词: 碳中和发展绩效; 优势赋权模型; 评估绩效; 方向距离函数; 泰尔指数

DOI: 10.19836/j.cnki.37-1100/c.2023.04.010

一、引言

当前,全球气候变化及相关可持续发展问题,成为国际社会关注的重要议题^①。为应对全球气候变暖问题,党和国家先后公布了2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标(简称为“双碳”目标),这是中国主动应对气候变化、加快推动绿色低碳发展、成为全球生态文明建设重要参与者的庄严承诺。并且,党的二十大报告明确指出,中国主张“积极稳妥推进碳达峰碳中和”,主张“完善碳排放统计核算制度,健全碳排放权市场交易制度。提升生态系统碳汇能力。积极参与应对气候变化全球治理”^②。不容忽视的是,2021年,在实现能源消耗总量和强度“双控”目标的过程中,有10个省份被国家发展和改革委员会提示“一级预警”,这暴露出相关省份在“双控”“双碳”等问题上存在认知短板和执行不力等问题。在此背景下,对各个省份碳中和发展绩效进行全面科学的系统评估,可以为决策部门提供完整准确且及时有效的信息,进而有助于稳妥推进碳达峰和碳中和工作的有序开展^{③④}。

在现有研究基础上,基于中国2008—2019年省际数据,采用改进的BoD模型(Benefit of the Doubt Model,优势赋权模型)、曼奎斯特指数(Malmquist index)分解和泰尔指数(Theil index)分解方法,对各个省份的碳中和发展绩效及其内在驱动因素进行系统性评估。在本文中,碳中和发展绩效,指的是各个决策单元实现“双碳”目标的远近程度的综合度量。为实现该度量,本文确定了多个具体

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“多重市场扭曲下中国低碳转型战略研究”(项目编号71873078);山东省“泰山学者”青年专家项目;山东省自然科学基金面上项目“考虑技术异质性下可持续发展绩效测度及影响因素分析”(ZR2019MG020);宣传思想文化青年英才项目“可持续发展视角下中国生态文明战略体系研究”。

作者简介: 李爱军,山东大学经济研究院教授,博士生导师(济南250100; liaijun@sdu.edu.cn);张入川(通讯作者),山东大学经济研究院博士研究生(济南250100; zhangruchuan@mail.sdu.edu.cn)。

① 杜之利、苏彤、葛佳敏等:《碳中和背景下的森林碳汇及其空间溢出效应》,《经济研究》2021年第12期。

② 习近平:《高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告》,《人民日报》2022年10月26日,第1版。

③ 郭彩霞:《中国低碳经济发展的协同效应研究》,《管理世界》2021年第8期。

④ 胡雅蓓、邹蓉:《新常态下碳减排与经济转型多目标投入——产出优化研究》,《资源开发与市场》2018年第8期。

衡量指标。此处,本文根据党和国家关于“双碳”目标推出的一系列政策体系,尤其是碳达峰、碳中和“1+N”政策体系,从中选取了五个重要组成部分(能源强度、碳排放强度、非化石能源发展、森林碳汇与全民参与程度)作为具体衡量指标。

在理论上,碳中和发展绩效应该包括所有影响因素。例如,《2030年前碳达峰行动方案》提到的科技支撑、碳汇能力、能源保障、交通运输等,这些因素均会影响碳中和目标的实现进程,因此是碳中和发展绩效的重要影响因素。然而,在具体度量上,本文无法将所有因素一一量化,因此仅选择了其中的五个代表性领域进行具体量化分析。

本文的研究有以下两点贡献:第一,从优化模型视角,拓展了对不同维度指标科学赋予权重的研究思路^{①②}。对于指标赋权问题,现有研究主要采用下列两种方法:第一种方法是主观赋予权重^{③④},即通过以往的经验判断反映决策者对各类指标的重视程度,这种方法主观性强,且难以彰显一定的科学性价值。第二种方法是通过优化模型客观赋予权重^{⑤⑥},这类模型(如BoD模型)在目标方程最优化的求解过程中,可能得到不真实的极端权重,违反评价结果的合理性要求。为解决此类难题,采用基于前景理论的交叉效率模型,通过计算自身权重与其他决策单元权重的加权平均值,进而改进BoD模型的权重赋予方式。因此,该权重赋予方法通过消除极端值获得合理、可信的评价结果,因而具有科学性。

第二,在碳达峰和碳中和的“双碳”目标背景下,丰富了关于碳中和发展内在驱动力的研究。现有研究大多采用计量回归方法,定量评估绩效相关变量的影响,有助于理解外部驱动因素与核心变量的统计依存关系。为深刻剖析碳中和发展的内在驱动力问题,本文紧紧围绕技术进步和技术传播两个关键因素展开研究,采用曼奎斯特指数分解方法定量评估技术进步的差异水平,通过泰尔指数分解方法进一步剖析技术传播的内在驱动因素。因此,基于结构分析法和其对应的分解方法,协同剖析碳中和发展的内在驱动力,加深了对碳中和发展绩效演变规律的科学认识。

二、相关文献综述

随着碳达峰与碳中和目标的提出,学者们开始关注和分析中国碳排放或碳中和发展绩效及其变化。本部分将对碳排放或碳中和指标体系的相关研究和方法进行归纳和评述,这也是本文研究的主要出发点。

(一)碳排放或碳中和指标体系的相关研究

到目前为止,在关于中国碳排放或碳中和的相关研究中,部分从碳源—碳汇角度展开分析。例如,刘骏等从减少碳源、增加碳汇的方向入手,构建基于低碳理论的碳源—碳汇分析框架,将生产、交通、建筑与居民生活三大碳源及森林碳汇、绿地碳汇作为评估维度^⑦。王佐仁和马越在考虑工业、废弃物处理、农业、畜牧业碳排放及林业碳吸收的基础上,对主要碳源、碳汇的碳排放强度、增长速度等设置评价指标,形成相对完整的基础统计指标体系^⑧。

① Zhou L., Zhang R., Li A., “New Concepts for Bootstrap-based Cross-efficiency and Relative Weight Analysis and an Application to China’s Governance-finance-innovation-sustainability System”, *Journal of Cleaner Production*, 2022, 379, 134549.

② Zhang R., Wei Q., Li A., et al., “Measuring Efficiency and Technology Inequality of China’s Electricity Generation and Transmission System: A New Approach of Network Data Envelopment Analysis Prospect Cross-efficiency Models”, *Energy*, 2022, 246, 123274.

③ 王欣媛、徐佳苗、刘健等:《基于层次分析法的区域医疗中心评价指标体系构建研究》,《中国卫生政策研究》2023年第2期。

④ 罗敏红、黄若楠、李慧敏:《基于德尔菲法和层次分析法构建区域间居民健康素养综合评价指标体系研究》,《中国健康教育》2023年第1期。

⑤ 龚日朝、刘俞希、潘芬萍:《带权重约束的DEA超效率评价模型及其应用研究》,《中国管理科学》2020年第4期。

⑥ 许诗源:《基于PCA-DEA模型的农产品流通效率分析》,《商业经济研究》2019年第10期。

⑦ 刘骏、胡剑波、罗玉兰:《低碳城市测度指标体系构建与实证》,《统计与决策》2015年第5期。

⑧ 王佐仁、马越:《关于碳排放评价指标体系构建的思考》,《统计与决策》2014年第3期。

同时,部分研究对经济社会发展相关的各个子系统进行整合分析,考察环境与经济、社会系统的协同。例如邓荣荣与赵凯在综合考虑经济与社会的基础上,构建了由“三废”综合利用产品价值、低碳消费模式倡导等14项具体指标组成的低碳评价指标体系^①。连玉明在经济发展、社会进步、资源承载、环境保护与生活质量5个一级指标的基础上,细分客观评价指标与导向性指标,构建低碳城市的评价指标体系^②。

此外,还有研究基于低碳相关政策构建低碳发展指标。例如,陈楠和庄贵阳以宏观层面的国家自主贡献目标、国家应对气候变化目标、IPCC报告提出的重点减排领域为主要依据,构建层次结构模型^③。厉以宁等将低碳发展纳入宏观经济目标,即以低碳发展目标与经济增长、充分就业、物价稳定、国际收支平衡一起作为一国宏观经济的发展、调控和管理的目标^④。经过梳理这些文献可知,低碳发展指标的研究,难以形成统一标准的评估指标体系。对此,不同文献往往从不同视角出发,丰富了碳排放或碳中和指标体系的研究内容。

(二)碳排放或碳中和发展绩效评估的相关研究

在绩效评估领域,数据包络分析模型属于非参数模型,因而不需要事先假定投入与产出变量的具体函数关系,也不需要各个指标主观赋予权重。由于该模型的这些优点,数据包络分析模型在碳排放等多个领域得到了广泛的应用与发展。其中,有些学者将资本、劳动力和能源作为投入要素,将地区生产总值和二氧化碳排放分别作为合意与非合意产出,评估不同地区的全要素二氧化碳减排效率^{⑤⑥⑦}。并且,有些研究基于数据包络分析模型,拓展现有指标分解方法,分析各省二氧化碳排放效率的内在驱动因素。例如,仲云云和仲伟周考察纯技术效率和规模效率因素对碳排放效率的影响^⑧。Sueyoshi等认为经济活动效应、合意产出技术进步效应和潜在能源强度变化效应是降低二氧化碳排放效率的主要指标,合意产出运营效率效应和节能技术进步效应是促进二氧化碳排放效率提升的两类分解指标^⑨。然而,上述文献尚未探讨影响碳中和发展绩效的内在驱动因素。此外,有些研究采用BoD模型构建绿色制度环境绩效指数^⑩、行业发展绩效指数^⑪或营商指数^⑫。其中,BoD模型区别于传统的数据包络分析模型,可以处理只有产出没有投入的情形。从研究方法来看,BoD模型属于非参数模型和确定性模型。该类模型具有一些显著优点,例如非参数(不需要事先假定函数形式)、线性模型(求解简便);同时,该模型也存在一些不足,例如假定所有数据不具有随机性特征,因而无法处理不确定性问题。

① 邓荣荣、赵凯:《中国低碳试点城市评价指标体系构建思路及应用建议》,《资源开发与市场》2018年第8期。

② 连玉明:《城市价值与低碳城市评价指标体系》,《城市问题》2012年第1期。

③ 陈楠、庄贵阳:《中国低碳试点城市成效评估》,《城市发展研究》2018年第10期。

④ 厉以宁、朱善利、罗来军等:《低碳发展作为宏观经济目标的理论探讨——基于中国情形》,《管理世界》2017年第6期。

⑤ Li L., Cai Y., Liu L., “Research on the Effect of Urbanization on China’s Carbon Emission Efficiency”, *Sustainability*, 2019, 12(1), 163.

⑥ 张伟、朱启贵、李汉文:《能源使用、碳排放与我国全要素碳减排效率》,《经济研究》2013年第10期。

⑦ 韩晶、王赞、陈超凡:《中国工业碳排放绩效的区域差异及影响因素研究——基于省域数据的空间计量分析》,《经济社会体制比较》2015年第1期。

⑧ 仲云云、仲伟周:《中国区域全要素碳排放绩效及影响因素研究》,《商业经济与管理》2012年第1期。

⑨ Sueyoshi T., Li A., Liu X., “Exploring Sources of China’s CO₂ Emission: Decomposition Analysis under Different Technology Changes”, *European Journal of Operational Research*, 2019, 279(3), pp.984-995.

⑩ Liu Y., Chen S., Zhang R., et al., “Understanding the Efficiency Changes of Green Institutional Environment: An Application of Two New Cross-efficiency Benefit-of-the-Doubt Models to China”, *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380, 134864.

⑪ Zanella A., Camanho A., Dias T., “Undesirable Outputs and Weighting Schemes in Composite Indicators Based on Data Envelopment Analysis”, *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(2), pp.517-530.

⑫ Rogge N., Archer G., “Measuring and Analyzing Country Change in Establishing Ease of Doing Business Using a Revised Version of World Bank’s Ease of Doing Business Index”, *European Journal of Operational Research*, 2021, 290(1), pp.373-385.

综上所述,相对于现有文献,本文贡献主要体现在两个方面。第一,在研究方法上,对优势赋权模型进行了拓展,通过引入交叉效率方法增强了效率区分度,并通过引入基于前景理论的二次目标模型,解决了各个维度指标权重不唯一的难题。第二,在研究内容上,基于五个维度的指标体系,对中国各个省份碳中和发展绩效进行综合评估,并基于优势赋权模型展开研究,进而厘清技术进步因素和效率改进因素对碳中和发展绩效的影响,并对阻碍技术传播的内在驱动因素展开进一步分析,从而为碳中和及相关政策的科学决策提供参考依据,因而具有较强的现实意义和政策意义。

三、研究设计

研究设计主要包括两个部分,分别是测度碳中和发展绩效和探究绩效演变的内在驱动力。对于碳中和发展绩效,采用拓展的优势赋权模型,对各个省份的碳中和发展绩效开展定量评估。对于内在驱动力,本文采用了下列两种方法:第一种方法是曼奎斯特指数及分解方法,该方法通过区分技术进步和效率改进因素,考察碳中和发展绩效的驱动因素;第二种方法是泰尔指数及分解方法,该方法可以用于确定技术传播的阻碍因素,从技术传播角度考察区域间绩效差异的原因。

(一)碳中和发展绩效评估模型构建

1. 碳中和发展绩效测度模型。本文基于 Zanella 等^①提出的线性优化方法,建立如下 BoD 方向距离函数模型:

$$\begin{aligned} \text{Max } & \beta + \epsilon \left(\sum_{i=1}^I s_i^- + \sum_{r=1}^R s_r^+ \right) \\ \text{s.t. } & \sum_{j=1}^J u_{ij} \lambda_j + s_i^- = u_{ik} - \beta g_{ik} \quad (i=1, \dots, I), \\ & \sum_{j=1}^J y_{rj} \lambda_j - s_r^+ = y_{rk} + \beta g_{rk} \quad (r=1, \dots, R), \\ & \lambda_j \geq 0 \quad (j=1, \dots, J). \end{aligned} \quad (1)$$

其中, u_{ij} 与 y_{rj} 分别表示第 j 个决策单元的第 i 类负向指标和第 r 类正向指标, u_{ik} 与 y_{rk} 表示待评估决策单元 k 的负向指标与正向指标的原始数量。 g 表示效率改进的方向向量, β 则表示两类指标的改进比例。 ϵ 为阿基米德无穷小量, s 表示松弛变量,在模型中被用来测算弱有效决策单元无法被 β 值捕捉到的改进程度。

另外,本研究基于传统径向方法会高估被评估决策单元绩效的不足,选取被评估决策单元可改进的范围为其方向向量,即 $(g_{rk}, g_{ik}) = (\max\{y_{rj}\} - y_{rk}, u_{ik} - \min\{u_{ij}\})$ 。同时,综合绩效值 (CI_k) 用 $1/(1+\beta)$ 表示,它的取值范围在 0—1 内。其中,1 表示该决策单元完全有效。

为了更直观地得到正向指标与负向指标的相对权重,本文引入模型(1)的对偶形式,具体如下所示:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \theta = \sum_{i=1}^I v_{ik} u_{ik} - \sum_{r=1}^R w_{rk} y_{rk} \\ \text{s.t. } & \sum_{i=1}^I v_{ik} g_{ik} + \sum_{r=1}^R w_{rk} g_{rk} = 1 \quad (r=1, \dots, R), \\ & \sum_{i=1}^I v_{ik} u_{ij} - \sum_{r=1}^R w_{rk} y_{rj} \geq 0 \quad (j=1, \dots, J), \\ & v_{ik} \geq \epsilon, \quad w_{rk} \geq \epsilon. \end{aligned} \quad (2)$$

其中, v 和 w 分别表示第 k 个被评估决策单元负向指标与正向指标的相应权重, θ 表示模型(2)的目标

① Zanella A., Camanho A., Dias T., “Undesirable Outputs and Weighting Schemes in Composite Indicators Based on Data Envelopment Analysis”, *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(2), pp.517-530.

函数值,测算了被评估决策单元的总无效程度。

基于已有的 BoD 方向距离函数模型,本文引入前景理论,考察决策者收益感知和损失规避行为对决策的影响^①。为此,本文以绩效最优的决策单元(正向指标最大,负向指标最小)与绩效最差的决策单元(正向指标最小,负向指标最大)作为参考点,在集中决策的情形下,将决策者对于收益感知和损失规避的态度纳入优势赋权模型,通过目标函数最大化其感知的“主观价值”。具体而言,基于前景理论的 BoD 模型形式如下:

$$\text{Max} \left[\mu \left(\sum_{r=1}^R w_{rk} (y_{rk} - y_r^-)^{\alpha} \right) + \sum_{i=1}^I v_{ik} (u_i^- - u_{ik})^{\alpha} \right] - (1 - \mu) \left[\sum_{r=1}^R w_{rk} \gamma (y_r^+ - y_{rk})^{\eta} \right] + \sum_{i=1}^I v_{ik} \gamma (u_{ik} - u_i^+)^{\eta} \quad (3)$$

与模型(2)的相同约束

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I v_{ik} u_{ik} - \sum_{r=1}^R w_{rk} y_{rk} &= \theta^*, \\ y_r^+ &= \max \{y_{rk}\}, \quad u_i^+ = \min \{u_{ik}\}, \\ y_r^- &= \min \{y_{rk}\}, \quad u_i^- = \max \{u_{ik}\}. \end{aligned}$$

其中, γ 为前景理论的损失规避系数, α, η 分别表示决策者对待收益和损失的风险规避系数, μ 表示收益和损失对决策者而言的相对重要程度, θ^* 表示根据模型(2)计算得到的目标函数值。

通过求解模型(3),得到不同决策单元各个正向指标与负向指标的最优权重,并将该权重纳入交叉效率评价矩阵,从而对各个决策单元合理赋权,以消除极端权重对绩效的影响。具体而言,决策单元(k)的交叉效率定义如下:

$$CI_k^* = \sum_{j=1}^J \left(1 / \left(1 + \left(\sum_{i=1}^I v_{ij}^* u_{ik} - \sum_{r=1}^R w_{rj}^* y_{rk} \right) \right) \right) / J, \quad (j=1, \dots, J). \quad (4)$$

其中, CI_k 表示综合自我评价效率与($J-1$)个同类被评估单元评价效率的加权平均数值,即第 k 个决策单元的交叉效率。

2. 曼奎斯特生产率耦合指数分解。本文基于 Rogge 和 Archer^②所采用的曼奎斯特分解方法,引入曼奎斯特(Malmquist)生产率耦合指数,以测度碳中和发展绩效的动态演变规律。具体而言,该指数及其分解形式如下所示:

$$\begin{aligned} PC_k &= (EC_k^* CU_k)^{1/2}, \\ EC_k &= \left(\frac{CI_k^*(v^t, w^t, u^{t+1}, y^{t+1})}{CI_k^*(v^{t+1}, w^{t+1}, u^{t+1}, y^{t+1})} \right)^{1/2} \left(\frac{CI_k^*(v^t, w^t, u^t, y^t)}{CI_k^*(v^{t+1}, w^{t+1}, u^t, y^t)} \right)^{1/2}, \\ CU_k &= \left(\frac{CI_k^*(v^{t+1}, w^{t+1}, u^{t+1}, y^{t+1})}{CI_k^*(v^t, w^t, u^t, y^t)} \right) = PTC_k^* SEC_k, \\ PTC_k &= \left(\frac{CI_k^{VRS^*}(v^{t+1}, w^{t+1}, u^{t+1}, y^{t+1})}{CI_k^{VRS^*}(v^t, w^t, u^t, y^t)} \right), \\ SEC_k &= \left(\frac{CI_k^*(v^{t+1}, w^{t+1}, u^{t+1}, y^{t+1}) / CI_k^{VRS^*}(v^{t+1}, w^{t+1}, u^{t+1}, y^{t+1})}{CI_k^*(v^t, w^t, u^t, y^t) / CI_k^{VRS^*}(v^t, w^t, u^t, y^t)} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

① Liu H., Song Y., Yang G., “Cross-efficiency Evaluation in Data Envelopment Analysis Based on Prospect Theory”, *European Journal of Operational Research*, 2019, 273(1), pp.364-375.

② Rogge N., Archer G., “Measuring and Analyzing Country Change in Establishing Ease of Doing Business Using a Revised Version of World Bank's Ease of Doing Business Index”, *European Journal of Operational Research*, 2021, 290(1), pp.373-385.

其中, PC 为二者的曼奎斯特生产率耦合指数, 该指数反映了 EC 和 CU 两个指标的协调程度, 其值越大, 意味着协调度越高, 即碳中和发展状况越佳^①。 EC 代表技术进步指数, 测度从 t 期到 $t+1$ 期生产技术前沿面的变化, 该指数反映了各个省份(决策单元)碳中和政策环境的变化。如果 $EC > 1$, 则表示该省份碳中和政策环境不断改善, 反之则不断恶化。同时, CU 表示效率改进指数, 测度从 t 期到 $t+1$ 期某个省份与生产技术前沿面差距的变化。如果 $CU > 1$, 则表示该省份碳中和绩效与最优决策单元之间的差距不断减少, 反之则不断增加。

为了深入探究效率改进的来源, 效率改进指数还可以进一步分解为纯技术效率指数(PTC)和规模效率指数(SEC)。其中, 纯技术效率指数测度的是当规模报酬可变时, t 期到 $t+1$ 期某个省份与生产技术前沿面距离的变化。如果 $PTC > 1$, 表示在规模报酬可变的条件下, 生产资源要素的配置效率得到提升, 决策单元与生产技术前沿面距离进一步缩小, 反之则增加。而规模效率指数则是衡量从 t 期到 $t+1$ 期, 规模报酬不变时的生产前沿面与规模报酬变化时的生产前沿面之间距离的变化程度。

3. 技术不平等与泰尔指数分解。本文基于胡萌和宫晓芹^②所采用的泰尔指数分解方法, 测度技术传播状况, 并通过分解方法剖析技术传播的内在驱动因素。具体而言, 泰尔指数的计算公式如下^③:

$$T^t = \sum_{j=1}^J \left(\frac{CI_j^t}{CI^t} \cdot \ln \left(\frac{CI_j^t / CI^t}{1/J} \right) \right). \quad (6)$$

其中, T 代表泰尔指数, CI_j^t 表示第 j 个省份(决策单元)在 t 时期的碳中和发展交叉效率, CI^t 表示 t 时期各个省份的交叉效率之和。

为了考察技术传播的内在驱动因素, 本文采用基于分组的泰尔指数分解法。关于分组, 依据国家统计局的划分标准, 将各个省份分为西部、中部与东部区域^④。关于泰尔指数分解, 将泰尔指数分解为区域间差异(T_b)和区域内差异(T_w), 其计算公式如下:

$$\begin{aligned} T^t &= T_w^t + T_b^t, \\ T_b^t &= \left(\frac{CI_E^t}{CI^t} \ln \left(\frac{CI_E^t / CI^t}{J_E / J} \right) + \frac{CI_C^t}{CI^t} \ln \left(\frac{CI_C^t / CI^t}{J_C / J} \right) + \frac{CI_W^t}{CI^t} \ln \left(\frac{CI_W^t / CI^t}{J_W / J} \right) \right), \\ T_w^t &= \frac{CI_E^t}{CI^t} T_E^t + \frac{CI_C^t}{CI^t} T_C^t + \frac{CI_W^t}{CI^t} T_W^t. \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 下标 W 、 C 和 E 分别表示西部、中部与东部区域, J_W 、 J_C 和 J_E 分别代表相关区域内的省份个数。

通过公式(7), 可以度量各个分解因素及其对技术传播的贡献率。

(二) 碳中和发展绩效指标体系

在五个阶段性目标(详见表1)基础上, 构建碳中和发展绩效评价指标体系, 包括能源强度、碳排放强度、非化石能源发展、森林碳汇与全民参与程度五个维度, 具体指标及含义如表2所示。在指标选取上, 注重正向与负向性质指标的相对平衡, 采用2008—2020年《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《电力工业统计年鉴》以及国家统计局等有关部门统计公报中的数据。

碳中和发展绩效评价指标体系包括五个维度:(1)能源强度, 该维度指标反映了经济活动中对能源的利用程度, 因而降低能源强度是助力实现“双碳”目标的重要方式;(2)碳排放强度, 该维度指标是表征碳中和发展绩效的最核心变量, 也是“双碳”目标的首要任务;(3)非化石能源发展, 该维度指标可以促进能源替代和保障经济社会发展, 因而是助力实现“双碳”目标的重要途径;(4)森林碳汇, 该维度

① 徐胜:《中国陆海系统协调度及经济互动效率评价研究》,《山东大学学报(哲学社会科学版)》2019年第6期。

② 胡萌、宫晓芹:《都市圈尺度下区域经济差距的测度和分解》,《统计与决策》2022年第7期。

③ 陈凯、刘筱慧、王雪等:《商业银行不良贷款地区差异的泰尔指数分解及影响因素分析》,《工业技术经济》2021年第10期。

④ 柯宗俊、邓汉慧:《中国人口老龄化地区差异和收敛性分析》,《统计与决策》2021年第19期。

指标反映了生态系统固碳能力,是促进“双碳”目标的重要参与者;(5)全民参与程度,该维度指标是助力实现“双碳”目标的最终途径。

表1 碳达峰与碳中和的五个阶段性目标

阶段性目标	2025年	2030年	2060年
碳排放规模	—	二氧化碳排放量达到峰值并实现稳中有降	碳中和目标顺利实现
能源强度	单位国内生产总值能源消耗比2020年下降13.5%	单位国内生产总值能源消耗大幅度下降	—
碳排放强度	单位国内生产总值二氧化碳排放比2020年下降18%	单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降65%以上	—
非化石能源发展	非化石能源消费比重达到20%左右	非化石能源消费比重达到25%左右,风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上	非化石能源消费比重达到80%以上
森林碳汇	森林覆盖率达到24.1%,森林蓄积量达到180亿立方米	森林覆盖率达到25%左右,森林蓄积量达到190亿立方米	—

资料来源:《2030年前碳达峰行动方案》和《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》。

表2 碳中和发展绩效评价指标体系

领域层	指标层	指标含义	性质
能源强度	单位国内生产总值能耗(吨标准煤/万元)	地区每生产一个单位的地区生产总值所消耗的能源数量	负向
碳排放强度	GDP碳排放(吨/万元)	单位GDP的二氧化碳排放量	负向
非化石能源发展	非化石能源发电装机容量占比(%)	非化石能源发电装机容量/该地区发电装机容量	正向
森林碳汇	森林覆盖率(%)	森林面积占土地总面积的比率	正向
	林业投资占比(%)	林业本年完成投资/当年国内生产总值	正向
全民参与程度	人均生活用电量(千瓦时/人)	居民家庭平均每人每年消耗的电量	负向
	每万人口绿色专利拥有量(个/万人)	该地区获得的绿色专利数量/常住人口数	正向

为了消除指标之间的量纲影响,采用均值法对正向指标与负向指标分别进行处理,具体方法如下:

$$Y_{rk(\text{无量纲})} = \frac{Y_{rk}}{\overline{Y_r}}, U_{ik(\text{无量纲})} = \frac{U_{ik}}{\overline{U_i}}. \quad (8)$$

此外,以所有年份数据为基础构建前沿面,以保证评估结果的纵向可比性。

四、实证分析

(一)碳中和发展绩效分析

本小节考察中国各个区域和各个省份的碳中和发展绩效水平。经过观察表3和表4可知,中国碳中和发展绩效值从2008年的0.6903上升至2019年的0.7246,总体呈现上升态势。其中,东部区域的绩效值最高,且省份之间的差异程度最小,其次是中部区域,最后是西部区域,其内部省份之间的差别程度最大。从五个维度指标来看,东部区域在能源强度、碳排放强度和全民参与度方面均处于领先地位,表明东部区域能够较好地协调能源、环境与经济之间的关系,但其在非化石能源发展方面具有相对劣势,结果表明现阶段东部区域非化石能源发电装机容量占比较低,且在提高清洁能源的替代比率方面仍存在较大的上升空间。同时,中部区域在能源强度、碳排放强度、非化石能源发展和全民参

与度四个方面处于中等水平,在森林碳汇方面处于劣势地位。此外,西部区域拥有相对丰富的煤电、水电和油气资源,其产业结构升级主要依赖于将自然资源、地理区位等要素优势转化成社会生产力这一途径,导致西部区域技术创新转化为生产力的效率过低,使其在能源强度、碳强度和全民参与度三个方面均处于劣势地位。

表3 各个区域碳中和发展绩效

年份	东部区域	中部区域	西部区域	中国平均
2008	0.7104	0.6893	0.6646	0.6903
2009	0.7105	0.6922	0.6657	0.6916
2010	0.7155	0.7030	0.6831	0.7021
2011	0.7212	0.7087	0.6905	0.7082
2012	0.7154	0.7109	0.6916	0.7069
2013	0.7284	0.7214	0.7027	0.7186
2014	0.7366	0.7322	0.7121	0.7279
2015	0.7395	0.7367	0.7235	0.7339
2016	0.7350	0.7333	0.7253	0.7316
2017	0.7288	0.7368	0.7233	0.7296
2018	0.7290	0.7281	0.7263	0.7278
2019	0.7294	0.7222	0.7206	0.7246

由表4可知,不同省份之间的碳中和发展绩效水平存在显著差异。从绩效值来看,江西省、广西壮族自治区、四川省和云南省四个省份绩效值最高。相比而言,宁夏回族自治区、山西省、内蒙古自治区和新疆维吾尔自治区效率值最低,这些省份多数是能源生产大省,具有明显的高碳特征,具体体现在能源强度、碳排放强度绩效值较低,且森林碳汇投入不足三个方面。此外,许多东部省份(如北京市、广东省、江苏省、浙江省等)在能源强度与碳排放强度方面优势明显,在非化石能源或森林碳汇方面往往具有相对劣势。

表4 各个省份碳中和发展绩效

区域	省份	绩效值	绩效档次	能源强度	碳排放强度	非化石能源发展	森林碳汇	全民参与程度
东部区域	北京市	0.8098	优秀	优秀	优秀	合格	良好	中等
	天津市	0.6922	合格	中等	中等	优秀	良好	优秀
	河北省	0.6231	改进	改进	改进	合格	良好	中等
	辽宁省	0.6360	改进	合格	改进	良好	良好	中等
	上海市	0.6661	合格	优秀	优秀	改进	改进	优秀
	江苏省	0.7093	中等	优秀	良好	中等	良好	中等
	浙江省	0.7518	良好	优秀	优秀	中等	中等	合格
	福建省	0.7374	中等	优秀	优秀	改进	改进	合格
	山东省	0.6703	合格	中等	中等	改进	合格	良好
	广东省	0.7660	良好	优秀	优秀	中等	优秀	合格
	广西壮族自治区	0.8562	优秀	中等	良好	良好	优秀	改进
	海南省	0.7816	良好	良好	中等	改进	改进	良好
	均值	0.7250	—	—	—	—	—	—

续表 4

区域	省份	绩效值	绩效档次	能源强度	碳排放强度	非化石能源发展	森林碳汇	全民参与程度
中部区域	山西省	0.5303	改进	改进	改进	优秀	中等	良好
	内蒙古自治区	0.5396	改进	改进	改进	中等	合格	改进
	吉林省	0.7287	中等	合格	合格	良好	中等	中等
	黑龙江省	0.6948	中等	合格	合格	合格	优秀	改进
	安徽省	0.7561	良好	良好	中等	改进	合格	合格
	江西省	0.8578	优秀	良好	良好	优秀	改进	优秀
	河南省	0.7287	中等	中等	中等	合格	中等	良好
	湖北省	0.8091	良好	良好	良好	良好	中等	中等
	湖南省	0.8160	优秀	良好	良好	中等	合格	良好
	均值	0.7179	—	—	—	—	—	—
西部区域	重庆市	0.8036	良好	良好	优秀	良好	中等	合格
	四川省	0.8502	优秀	中等	良好	改进	合格	良好
	贵州省	0.6563	合格	合格	合格	良好	优秀	改进
	云南省	0.8422	优秀	合格	中等	优秀	优秀	改进
	陕西省	0.7132	中等	中等	合格	优秀	改进	合格
	甘肃省	0.6943	合格	合格	合格	优秀	优秀	改进
	青海省	0.6618	合格	改进	合格	合格	良好	优秀
	宁夏回族自治区	0.5044	改进	改进	改进	中等	改进	优秀
	新疆维吾尔自治区	0.5960	改进	改进	改进	合格	合格	优秀
	均值	0.7024	—	—	—	—	—	—

(二)技术进步与效率改进指数的变动分析

基于曼奎斯特指数分解方法,本小节分别测算了技术进步指数与效率改进指数对碳中和发展绩效的促进作用。经过观察表5和表6可知,从2008至2019年,中国省份的平均技术进步指数(EC)和效率改进指数(CU)均大于1,且年均增长率分别为3.12%和8.83%,表明这两类指数有效促进了中国碳中和的持续改善和技术水平的显著提升。此外,相较技术进步指数而言,效率改进指数是推动曼奎斯特生产率指数提升的重要驱动因素。

表5 碳中和发展绩效指数

年份	曼奎斯特生产率耦合指数	技术进步指数	效率改进指数	效率改进指数分解	
				纯技术效率指数	规模效率指数
2008—2009	0.7885	0.8834	1.2343	0.9897	1.2484
2009—2010	0.8242	0.9974	1.1946	0.9949	1.2021
2010—2011	0.7748	1.0314	1.0208	0.9956	1.0262
2011—2012	0.7931	1.1612	0.9500	0.9877	0.9618
2012—2013	0.8295	0.9230	1.3074	1.0055	1.3045
2013—2014	0.8085	1.3415	0.8546	1.0072	0.8483
2014—2015	0.7996	0.9949	1.1270	1.0056	1.1208
2015—2016	0.8154	0.9041	1.2899	0.9926	1.2994

续表 5

年份	曼奎斯特生产率耦合指数	技术进步指数	效率改进指数	效率改进指数分解	
				纯技术效率指数	规模效率指数
2016—2017	0.7523	1.0140	0.9790	0.9994	0.9796
2017—2018	0.7853	1.1371	0.9511	1.0020	0.9487
2018—2019	0.7608	0.9555	1.0625	1.0013	1.0604
均值	0.7938	1.0312	1.0883	0.9983	1.0909

表 6 各个省份碳中和发展绩效指数测算结果

区域	省份	曼奎斯特生产率耦合指数	技术进步指数	效率改进指数	效率改进指数分解	
					纯技术效率指数	规模效率指数
东部区域	北京市	0.6511	1.0076	1.0120	1.0162	0.9956
	天津市	0.6530	0.9863	1.0401	1.0100	1.0298
	河北省	0.6418	0.9960	0.9948	0.9923	1.0026
	辽宁省	0.6449	0.9859	1.0148	0.9951	1.0198
	上海市	0.7010	1.0918	1.0828	1.0085	1.0810
	江苏省	0.6832	1.0475	1.0719	0.9979	1.0763
	浙江省	0.6440	0.9931	1.0046	1.0051	0.9987
	福建省	0.6404	0.9999	0.9866	1.0020	0.9846
	山东省	0.6485	0.9671	1.0461	0.9921	1.0544
	广东省	0.6475	1.0042	1.0043	1.0094	0.9953
	广西壮族自治区	0.6444	0.9793	1.0200	0.9920	1.0278
	海南省	0.6512	1.0009	1.0191	1.0005	1.0176
	均值	0.6542	1.0050	1.0248	1.0017	1.0236
中部区域	山西省	0.7303	1.1058	1.1602	0.9887	1.1730
	内蒙古自治区	0.6447	0.9390	1.0648	0.9905	1.0751
	吉林省	0.6779	1.0107	1.0939	0.9992	1.0965
	黑龙江省	0.6816	1.0533	1.0610	0.9942	1.0682
	安徽省	0.6473	0.9722	1.0368	1.0014	1.0367
	江西省	0.6447	0.9983	1.0016	1.0000	1.0016
	河南省	0.6554	0.9659	1.0698	0.9957	1.0753
	湖北省	0.6675	0.9928	1.0797	0.9999	1.0815
	湖南省	0.6411	1.0019	0.9867	1.0007	0.9861
	均值	0.6656	1.0044	1.0616	0.9967	1.0660
西部区域	重庆市	0.6547	0.9840	1.0479	1.0065	1.0413
	四川省	0.6671	1.0084	1.0618	1.0011	1.0605
	贵州省	0.7213	1.1472	1.0911	0.9849	1.1055
	云南省	0.6713	0.9935	1.0912	1.0005	1.0927
	陕西省	0.6939	0.9529	1.2154	0.9856	1.2350
	甘肃省	0.7493	1.0202	1.3238	0.9947	1.3315
	青海省	0.6682	0.9852	1.0903	1.0004	1.0903
	宁夏回族自治区	0.9626	1.6117	1.3829	0.9958	1.3843
	新疆维吾尔自治区	0.8389	1.1341	1.4926	0.9890	1.5091
	均值	0.7364	1.0930	1.1997	0.9954	1.2056

为了进一步探究效率改进指数变动的原因,本文引入规模报酬可变假设,将效率改进指数分解为纯技术效率指数和规模效率指数。经过比较可知,中国纯技术效率指数基本上在1附近上下波动,总体均值略低于1,这意味着该指数对于效率改进指数的提升作用相对有限;与此同时,规模效率指数以年均9.09%的速度增长,意味着各个省份投入规模是驱动效率改进指数增长的重要源泉。经过区域间比较可知,西部区域的技术进步指数与效率改进指数皆处于领先水平。该结果表明,西部区域在“西部大开发”等一系列政策支持下,研发创新能力的提升促进了当地产业的转型升级,其与技术前沿面省份的差距不断缩小。与此同时,西部区域的碳中和政策环境也在评估时期不断得到改善,例如光伏发电在西部区域被列为鼓励性产业项目,风电、多能互补等新能源发电项目也逐步规模化发展,技术进步和碳中和政策环境的进一步优化共同促进了中国西部区域碳中和绩效的不断提高。

由表6可知,北京市、上海市和广东省等14个省市技术进步指数均大于1。与此同时,其余16个省市的技术进步指数均值小于1,说明这些省市的碳排放进展状况与碳中和目标仍有一定差距,碳中和政策的执行力和落实力还需要进一步增强。以内蒙古自治区为例进行分析,其技术进步指数值最低。在被评估期间,内蒙古自治区建设了一批高水平煤电、现代煤化工等项目,导致了二氧化碳排放量的增加。在“十三五”期间,内蒙古自治区未完成能耗强度和碳强度分别下降14%和17%的能源双控目标,能耗强度和碳强度不降反升。因此,内蒙古自治区需要进一步细化政策措施,加大节能减排领域的政策力度。此外,山东省与河北省的技术进步指数也小于1。这两个省份高耗能行业工业总产值较大,导致二氧化碳排放总量也相对较高,因而面临的碳达峰与碳中和的压力相对较大。

在样本观察期内,发现北京市、天津市、上海市和江苏省等27个省市的效率改进指数均大于1。与此同时,有25个省份的规模效率指数大于1,表明绝大多数省份的效率改进是由规模效率因素导致的。上述结果进一步表明,效率改进指数提高的一个重要原因在于,许多省份通过对生产规模的优化调整,进而提高了资源的利用效率,缩小了与最优前沿省份之间的差距,因此提升了碳中和绩效。

(三)技术不平等与内在驱动力分析

本文采用泰尔指数反映各个省份的技术不平等状况,并考察阻碍技术传播的重要因素,具体结果如表7所示。经过观察可知,泰尔指数从0.01083下降至0.00856,该结果表明技术差异程度总体呈现下降趋势。此外,区域内总体差异是阻碍技术传播的主要内在驱动因素,对泰尔指数的年平均贡献率达到98.77%,是引起中国碳中和发展绩效差异的主要来源。

表7 泰尔指数测算结果

年份	泰尔指数	区域内泰尔指数分解				区域间差异
		区域内总体差异	东部区域	中部区域	西部区域	
2008	0.01083	96.50%	27.94%	41.77%	30.30%	3.50%
2009	0.01088	96.69%	28.75%	40.68%	30.57%	3.32%
2010	0.00984	98.13%	29.02%	40.66%	30.33%	1.87%
2011	0.00982	98.36%	23.31%	41.42%	35.27%	1.64%
2012	0.00942	98.90%	20.59%	39.86%	39.55%	1.10%
2013	0.00942	98.79%	22.54%	37.48%	39.98%	1.21%
2014	0.00948	98.90%	19.49%	39.27%	41.25%	1.10%
2015	0.01014	99.57%	19.61%	38.93%	41.46%	0.43%
2016	0.00952	99.83%	19.17%	38.83%	42.01%	0.17%
2017	0.00896	99.71%	16.60%	38.03%	45.37%	0.29%
2018	0.00806	99.99%	14.86%	38.01%	47.13%	0.01%
2019	0.00856	99.83%	20.14%	33.84%	46.02%	0.17%

从三大区域角度分析,东部区域的技术差异对泰尔指数的贡献率最小,占比约为21.84%。其中,北京市作为首都和区域发展中心,能够吸引科技创新资源;江苏省和广东省处于沿海地区,产业结构较为合理,并不断提高技术研发相关投入,增强了对周边地区的辐射带动作用。相比而言,西部区域的影响力度最大,达到39.10%,且呈现出逐年上升态势。该结果说明,西部区域各个省份的技术效率差异较大,相对发达地区而言,其尚未对欠发达地区形成有效的辐射拉动效应。虽然四川省、陕西省和重庆市高端制造业聚集能力不断增强,但是西部各个省份在经济条件、产业结构和区位优势等方面差异巨大,这可能加剧了西部区域的技术不平等状况。

五、结语

如何积极稳妥地推进“双碳”工作,已经成为当前各级政府普遍关注的重要问题。对此,本文依据碳达峰与碳中和的五个阶段性目标,建立与其对应的碳中和发展绩效评价指标体系,对中国各个省份的碳中和发展绩效及内在驱动因素展开分析,得到的主要结论如下:

首先,“双碳”目标势必对各个省份的经济发展格局产生深远影响。在“双碳”问题上,中国碳中和发展绩效仍存在约为三分之一的效率损失,拥有较大的提升空间,并且省际之间、区域之间依然存在着较为明显的绩效差异。例如,福建省、海南省与山东省现阶段非化石能源发电装机容量占比较低,应进一步提高清洁能源的比重;山西省、内蒙古自治区和新疆维吾尔自治区的碳中和发展绩效值较低,这些省份均是能源生产大省,能源强度和碳排放强度高,因而控制能耗和能源强度应该成为这些省份的重点工作。对此,各级政府应根据具体情况,将“双碳”目标细化分解到经济发展规划任务之中,逐步优化当地的产业结构与能源消费结构,充分利用好本地可再生能源和清洁能源开发,推进经济社会的绿色、循环与低碳发展。

其次,技术进步和效率改进均是提升碳中和发展绩效的重要因素。研究结果表明,在样本观察期内,纯技术效率指数对效率改进的作用相对有限,河北省、陕西省与新疆维吾尔自治区等17个省份的纯技术效率指数均小于1。因此,各个省市应依据自然资源、地理区位等要素优势明确当地的低碳技术攻关重点。例如,甘肃省、内蒙古自治区等西部地区应进一步抓好风电、太阳能装备制造发展工作;长江流域需因地制宜,充分发挥其水电优势,打造以“绿色氢源”为核心的水电制氢。与此同时,中央政府应加快建设全国统一技术大市场,构建多层次科技合作平台,加大环境保护及相关科技方面的投入,促进环保技术进步,降低实现“双碳”目标的成本,提升技术进步因素对于实现“双碳”目标的贡献力度。

最后,促进区域内技术传播(尤其是西部区域),有助于降低各个省份的技术不平等程度。本文研究结果表明,西部区域的技术差异对技术不平等的影响程度最大,是阻碍技术传播的重要因素。在此背景下,中央政府应重视制度建设,聚焦西部地区,壮大科技型企业规模和提升企业创新能力,重点支持成渝共建“一带一路”科技创新合作区,打造各具特色的区域性创新高地,减少技术传播障碍,形成中心带动外围、区域协调发展的良好格局。

2021年出现的“拉闸限电”现象,已经引起了国内外社会的广泛关注。在此背景下,本文着重分析了技术进步因素和效率改进因素对提升碳中和发展绩效的作用,测算并评估了省际差异及其内在驱动因素对技术传播带来的影响。同时,本研究也存在一些不足,具体如下:(1)缺少对不同权重赋予方法的有效性的数学证明;(2)所采用的指标主要依赖于五个阶段性政策目标,未对各个指标之间的理论关系进行深入探讨。因此建立更加科学与合理的碳中和发展绩效评价指标体系,是值得进一步研究和探索的方向。

The Performance of China's Carbon Neutral Development and the Potential Driving Factors

Li Aijun Zhang Ruchuan

(The Center for Economic Research, Shandong University, Jinan 250100, P.R.China)

Abstract: The Party and the State put forward the strategy to participate in and promote the construction of a global ecological civilization, and to respond to the problems of climate change and global warming. The “dual carbon” goals of carbon peaking and carbon neutrality are proposed with the aim that China is an important participant in the construction of global ecological civilization. In this regard, the Party and the State advocate “making all-around effort to and steadily promoting carbon neutralization” and a series of important arrangements are carried out. They have also issued implementation plans for peaking carbon dioxide emissions in key areas and sectors and a series of supporting and guaranteeing measures, such as clarifying the phased targets of “dual carbon”, proposing an action plan for peaking carbon dioxide emissions, exercising better control over the amount and intensity of energy consumption, especially fossil fuels, and gradually shifting to controlling both the amount and intensity of carbon dioxide emissions. However, some provinces have taken the initiative to ration power supply in 2021, which results in electricity shortage that affects local industrial production and people's livelihoods. This reveals that not all local implementation is effective. Under such a background, this study develops the BoD (Benefit of the Doubt) model and evaluates the performance of Chinese provinces' carbon neutral development. Meanwhile, this study adopts the decomposition analysis of Malmquist index and Theil coefficient, which distinguishes the impact of technological progress and efficiency improvement on the performance of carbon neutral development. This study also analyzes the main driving forces that hinder technology diffusion. The main findings can be summarized as follows. First, China has achieved an overall improvement in the performance of carbon neutral development during the study period, although further improvement could be made. And there are considerable differences across provinces and regions in efficiency scores. Second, Environmental Change-component (*EC*) and Catching Up-component (*CU*) indexes have interacted and developed in a coordinated manner with a strong dynamic correlation. Together, the two indexes contribute to the continuous progress of carbon neutral performance. Third, the factors of technological progress and efficiency improvement are of great importance to improve the performance of carbon neutral development, which can compensate for the disadvantage of low-carbon resource endowment in some provinces. Finally, the technological gap in Western regions is the main barrier to technology diffusion. From this perspective, promoting intra-regional technology diffusion and efficiency improvement should be an effective measure to improve the performance of carbon neutral development.

Keywords: Carbon neutral development performance; Benefit of the Doubt Model; Performance evaluation; Directional distance function; Theil index

[责任编辑:纪小乐]