

碳中和目标下我国区域能源效率测算与 节能减排潜力分析

孟 聪¹, 蔡海霞²

(1. 中核汇能河南能源有限公司, 郑州 450003; 2. 中原工学院系统与工业工程技术研究中心, 郑州 450007)

摘要: 采用我国各省 2011—2020 年的面板数据, 考虑不同投入和产出指标的径向和非径向特征, 以及能源投入与非期望产出之间的不可分性, 构建非期望产出的不可分混合数据包络分析(DEA)模型, 测算我国各省份的全要素能源效率和节能减排潜力。研究发现: 2011—2020 年, 我国总体全要素能源效率为 0.725, 各省份的全要素能源效率存在很大的差异性, 能源效率最高的集中在广东、北京、江苏、上海等经济发达省份, 能源效率最低的为内蒙古、山西、新疆与河北; 从全国来看, 节能潜力为 40.7%, 远远小于各种污染物的减排潜力; 不同的省份节能潜力和减排潜力之间的差距不一样, 大致可以分为以辽宁为代表的节能减排并举型和以江苏为代表的减排优于节能型两类。研究结果可为我国区域节能减排政策的制定提供一定的科学参考。

关键词: 能源效率; 不可分混合数据包络分析(DEA)模型; 节能减排

中图分类号: F206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)11-0035-06

中国的生态建设和环境治理进入了压力叠加、负重前行的关键期^[1], 既要稳步促进经济增长, 同时又要不断改善生态环境。节约能源、减少碳排放的诉求在碳中和目标下显得更为紧迫。气候变化已经成为全球最为关注的问题。为了减少碳排放, 减缓气候变暖带来的可预期的严重后果, 在世界范围内推行碳中和成为大多数国家的选择。到目前为止, 已经有欧盟、英国、日本、韩国、加拿大等几十个国家公布了明确的达到碳中和的时间表。我国将努力在 2030 年使碳排放达到峰值, 并于 2060 年之前实现碳中和目标。碳中和目标的提出和实施是我国经济高质量发展的一次契机。借此机会, 能更快地推进产业结构升级, 改善生态环境, 提升我国在国际贸易竞争中的地位和竞争力。此外, 碳中和也对我国的能源系统提出了更高的要求, 低碳转型任务更加艰巨, 节能减排再次成为能源环境政策的关注点。在明确的碳中和目标下, 进一步深入理解能源效率的内涵, 采用更加贴近真实生产过程的效率评价方法研究能源效率是实现碳中和目标的基础性工作。

1 文献综述

一直以来对能源效率的测度都是能源经济领域的研究热点, 产生了大量高水平的研究成果。目前测算全要素能源效率的方法包括非参数的数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法和参数的随机前沿分析(stochastic frontier analysis, SFA)方法。关于 DEA 方法与 SFA 方法在能源效率评价中的优缺点, 很多研究都进行了比较分析。总体上来说, DEA 方法不需要预先生产函数和相关参数, 避免了因函数设定错误所导致的误差。尤其是在能源效率的测算中, 通常要考虑多个期望和非期望产出, DEA 方法在这方面具有较大的优势。

对能源效率的测度最开始采用传统的规模收益不变(constant returns to scale, CRS)^[2]和变动规模报酬(variable returns to scale, VRS)^[3]模型。Hu 和 Wang^[4]采用 DEA 方法, 首次提出了基于 DEA 的全要素能源效率指数, 此后大量学者采用该指数对能源效率进行研究, 不同尺度、行业、区域的研究蓬勃发展。

收稿日期: 2024-03-09

基金项目: 国家社会科学基金(19BKS024); 河南省哲学社会科学规划项目(2022BJJ116)

作者简介: 孟聪(1984—), 男, 河南郑州人, 高级工程师, 研究方向为能源经济; 通信作者蔡海霞(1983—), 女, 湖南常德人, 管理学博士, 副教授, 研究方向为能源经济。

随着研究的深入,DEA 模型不断得到改进,使能源效率的测算更加符合实际的生产过程。其中最为典型的是基于环境技术的 DEA 模型得到大规模应用。这类模型可以处理能源消费过程中的非期望产出,在环境问题日益复杂、日益紧迫的情况下,出现了大量的相关研究。例如,李磊和蒋泌怡^[5]采用非期望产出 DEA-SBM 方法测算了中国 280 个城市的能源效率,认为数字经济的发展显著提升了城市能源效率。江洪等^[6]采用省市的面板数据,用博弈交叉 DEA 模型,以能源、资本和劳动力作为投入变量,以碳排放为非期望产出,以 GDP 作为期望产出,测算区域能源效率。龙如银等^[7]采用省级面板数据,用 DEA 模型测算环境约束下的各省能源效率。刘建翠和朱承亮^[8]利用 SBM-Undesirable 模型测算了 2012—2021 年中国地区能源效率,分析了各地区节能潜力。杨仲山和魏晓雪^[9]采用超效率 SBM 模型测算重点地区 2005—2015 年的全要素能源效率。

基于已有文献,采用 DEA 模型进行能源效率测度已经比较成熟,产生了大量有意义的研究成果,不过仍然存在可以改进的空间。本文从以下两个方面对现有研究进行扩展:①大多测算中国能源效率的研究基于径向或者非径向模型,而没有将径向和非径向整合起来研究。因此,采用混合(Hybrid)测度模型,将径向和非径向整合到 DEA 效率测度的统一框架下,对中国区域全要素能源效率进行测度;②考虑能源投入与非期望产出之间的不可分性。能源的消费必然会产生环境污染,两者之间甚至可能成比例变化,如化石能源消费的过程中一定会产生相应的 CO₂ (二氧化碳)、SO₂ (二氧化硫)、NO_x (氮氧化物)等环境污染物。而以往的研究往往没有考虑这种不可分性,因此,考虑不同投入和产出指标的径向和非径向特征,同时考虑能源投入与非期望产出之间的不可分性,采用不可分的混合 DEA 模型,对我国区域全要素能源效率进行测度。在此基础上,进一步计算各省份的节能减排潜力,为我国区域节能减排政策的制定提供一定的科学参考。

2 模型设定

在模型的设定中,必须考虑以下几个因素:①必

须考虑到能源消费过程中所产生的非期望产出,如碳排放,才能体现实际的生产过程;②在 DEA 效率测度模型中同时考虑径向和非径向的效率改进;③体现化石能源消费与非期望产出之间的不可分性。为了同时满足这几个模型设定的要求,本文采用 Tone 和 Tsutsui^[10]提出的考虑非期望产出的不可分混合 DEA 模型,测算我国各省份的全要素能源效率及节能减排潜力。

用 \mathbf{X} 表示能源效率测定中的投入向量,用 \mathbf{Y} 表示产出向量,并假设生产系统中有 n 个相似的决策单元(DMUs),则投入和产出向量可以分解为

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}^S \\ \mathbf{X}^{NS} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}^{SG} \\ \mathbf{Y}^{SB} \\ \mathbf{Y}^{NSG} \\ \mathbf{Y}^{NSB} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:投入向量 \mathbf{X} 分为可分的投入数据矩阵和不可分的投入数据矩阵,分别用 $\mathbf{X}^S \in R^{m_1 \times n}$ 和 $\mathbf{X}^{NS} \in R^{m_2 \times n}$ 表示,且 $m = m_1 + m_2$; 产出向量 \mathbf{Y} 分为可分期望产出、可分非期望产出、不可分期望产出和不可分非期望产出,分别用 $\mathbf{Y}^{SG} \in R^{s_1 \times n}$ 、 $\mathbf{Y}^{SB} \in R^{s_2 \times n}$ 、 $\mathbf{Y}^{NSG} \in R^{s_3 \times n}$ 、 $\mathbf{Y}^{NSB} \in R^{s_4 \times n}$ 表示,因此有 $s = s_1 + s_2 + s_3 + s_4$,则生产可能性集可以定义为

$$P_{NS} = \{ (x^S, x^{NS}, y^{SG}, y^{SB}, y^{NSG}, y^{NSB}) \mid x^S \geq X^S \lambda, x^{NS} \geq X^{NS} \lambda, y^{SG} \leq Y^{SG} \lambda, y^{SB} \geq Y^{SB} \lambda, y^{NSG} \leq Y^{NSG} \lambda, y^{NSB} \geq Y^{NSB} \lambda \} \quad (2)$$

需要注意的是,在该模型中,可分投入产出变量是非径向的,不可分的投入产出变量是径向的,它们之间的关系可用缩减系数 $\theta (0 \leq \theta \leq 1)$ 来表示。由于不可分性的存在,不可分非期望产出减少的同时,不可分期望产出也会按比例减少。此时,DMU_o ($x_o^S, x_o^{NS}, y_o^{SG}, y_o^{SB}, y_o^{NSG}, y_o^{NSB}$) 的能源效率可以表示为

对于任意的 $\theta (0 \leq \theta \leq 1)$,当且仅当 $(x_o^S, \theta x_o^{NS}, y_o^{SG}, y_o^{SB}, \theta y_o^{NSG}, \theta y_o^{NSB}) \notin P_{NS}$ 且不存在 $(x^S, x^{NS}, y^{SG}, y^{SB}, y^{NSG}, y^{NSB}) \in P_{NS}$,使得 $x_o^S \geq x^S, y_o^{SG} \leq y^{SG}, y_o^{SB} \geq y^{SB}, x_o^{NS} \geq x^{NS}, y_o^{NSG} \leq y^{NSG}, y_o^{NSB} \geq y^{NSB}$ 任一严格不等式成立时,则认为该 DMU 是有效的,此时不可分混合能源效率值可以表述为

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^{m_1} \frac{s_i^-}{x_{io}^S} + m_2(1 - \theta) + \sum_{i=1}^{m_2} \frac{s_i^-}{x_{io}^{NS}} \right]}{1 + \frac{1}{s} \left[\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^{SG+}}{y_{ro}^{SG}} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^{SB+}}{y_{ro}^{SB}} + (s_3 + s_4)(1 - \theta) + \sum_{r=1}^{s_3} \frac{s_r^{NSG+}}{y_{ro}^{NSG}} + \sum_{r=1}^{s_4} \frac{s_r^{NSB+}}{y_{ro}^{NSB}} \right]}$$

$$\begin{cases}
 x_o^s = X^s \lambda + s^{s-} \\
 \theta x_o^{NS} = X^{NS} \lambda + s^{NS-} \\
 y_o^{SG} = Y^{SG} \lambda - s^{SG+} \\
 y_o^{SB} = Y^{SB} \lambda + s^{SB+} \\
 \theta y_o^{NSG} = Y^{NSG} \lambda - s^{NSG+} \\
 \theta y_o^{NSB} = Y^{NSB} \lambda + s^{NSB+} \\
 s^{s-} \geq 0, s^{NS-} \geq 0, s^{SG+} \geq 0, s^{SB+} \geq 0, \\
 s^{NSG+} \geq 0, s^{NSB+} \geq 0 \\
 y_r^{SG} \leq (1 + \delta) y_{ro}^{SG}, r = 1, 2, \dots, s_1 \\
 \lambda \geq 0, 0 \leq \theta \leq 1 \\
 m = m_1 + m_2, s = s_1 + s_2 + s_3 + s_4
 \end{cases} \quad (3)$$

式中: s^{s-} 、 s^{NS-} 、 s^{SG+} 、 s^{SB+} 、 s^{NSG+} 、 s^{NSB+} 分别为投入产出的松弛变量。 δ 为可分期望产出的膨胀系数。当 $\rho^* = 1$ 时,该决策单元位于生产前沿面上,是有效率的;当 $0 \leq \rho^* < 1$ 时,则该决策单元是无效率的,需要对投入产出进行改进。

3 数据与变量选取

采用 2011—2020 年我国 30 个省份(因数据缺失,未含西藏和港澳台地区)的面板数据,以资本存量、劳动力和能源消费作为投入变量。在产出变量方面,现有大多数研究将 GDP 作为期望产出^[11-12],将 SO_2 或者 CO_2 作为对环境的非期望产出^[13],这样做的局限性在于:能源消费过程中产生的排放物除了 SO_2 或者 CO_2 ,还包括 NO_x 等。早在 2010 年,我国 NO_x 的排放总量已经超过了 SO_2 ,是主要的空气污染物^[14]。因此本文认为,在非期望产出中,应该全面关注导致环境污染、灰霾天气的主要污染物,这包括各种排放源: CO_2 、 SO_2 和 NO_x 。

所有原始数据来源于历年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》、各省历年统计年鉴以及国家统计局网站系统数据。

4 区域全要素能源效率实证分析

根据上文构建的考虑非期望产出的不可分混合 DEA 模型,在 MAXDEA 7.0 软件中输入各省份 2011—2020 年的统计面板数据,对式(3)中包含多种非期望产出的不可分混合 DEA 模型进行运算求解,从而得到数据包络前沿面,并计算出各个省份在不同年份的全要素能源效率值。

4.1 全国总体演变趋势

在混合 DEA 模型下,从全国总体水平来看,2011—2020 年的全要素能源效率呈现先下降再上升的过程(表 1)。2011 年全国能源效率值为 0.758,然而到 2012 年出现了断崖式的下降,效率值只有

0.724,比 2011 年下降了 3.4 个百分点。这种下降的趋势一直持续到 2015 年,2016 年效率值才开始有缓慢的提高。而能源效率值出现大幅度回升是在 2019 年和 2020 年,达到了 0.75 左右。这跟我们的直观感受是吻合的,2012—2015 年恰好是我国空气污染最严重的 3 年,在此期间频繁发生的强雾霾天气极大地影响了人们的生产生活和健康,严重的生态环境破坏已经成为我国亟待解决的重大问题。

为此,国家加大了治理空气污染力度,相继出台了一系列政策以减少污染排放物。2013 年 9 月《大气污染防治行动计划》出台,提出了在全国范围内逐步减少重污染天气,全面改善空气质量的的目标。随后,各个省份也制定并开展了一系列的大气污染防治行动方案,自上而下对空气污染的重视使得能源效率逐步缓慢上升。2016 年全国 74 个重点城市的优良天数比例为 74.2%,比 2015 年提升 3 个百分点,比 2013 年提升 13.7 个百分点^[15]。2016 年是《大气污染防治行动计划》实施的第 3 年,全国平均能源效率得到较大幅度提升,这说明国家对于大气污染的治理是有一定成效的。但是,也应该看到,能源效率损失即使到 2020 年仍然高达 25%,这说明在节能和减排上还有很大的空间,加上实现碳中和目标的压力,加快能源系统的升级与转型,节约使用能源、减少污染物排放迫在眉睫,需要更有力的能源系统转型政策与措施。

4.2 不同区域的能源效率差异

就各个省份而言,全要素能源效率的差异性较大(表 2)。2011—2020 年,全国平均能源效率值为 0.725,能源效率高于全国平均水平的是广东、海南、青海、北京、江苏、四川、上海、天津和浙江。其中,如广东、北京、上海等是我国经济最发达的地区,经济发展水平可以从几个方面来影响能源效率。①经济发展水平越高,城镇化水平相应也会更高,那么这个地区的人口更加集中,相应的能源基础设施建设更加完善,能源消费更加集约化,有利于能源效率的提高;②经济发达的省份在产业结构上更趋向于合理,随着经济的增长,第三产业在经济中的比例会越来越高,由于大多数第三产业都具有节约能源、无污染的特点,能使能源效率得到提高;③经济发达的地区会有更多的资金投入 to 能源节约与废气减排的技术创新中,其单位 GDP 增长所消耗的能源以及单位 GDP 所排放的废气会因此而显著降低,从而提高能源效率。

表1 2011—2020年各省份能源效率值

| 省份 | 2011年 | 2012年 | 2013年 | 2014年 | 2015年 | 2016年 | 2017年 | 2018年 | 2019年 | 2020年 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 北京 | 1.000 | 0.965 | 0.999 | 0.925 | 0.902 | 0.937 | 0.969 | 0.963 | 1.000 | 1.000 |
| 天津 | 1.000 | 0.788 | 0.686 | 0.691 | 0.691 | 0.704 | 0.706 | 0.700 | 0.717 | 0.714 |
| 河北 | 0.623 | 0.620 | 0.618 | 0.618 | 0.610 | 0.610 | 0.616 | 0.609 | 0.603 | 0.603 |
| 山西 | 0.603 | 0.599 | 0.597 | 0.596 | 0.593 | 0.593 | 0.593 | 0.592 | 0.597 | 0.598 |
| 内蒙古 | 0.603 | 0.602 | 0.602 | 0.601 | 0.600 | 0.600 | 0.596 | 0.594 | 0.597 | 0.603 |
| 辽宁 | 0.626 | 0.624 | 0.627 | 0.626 | 0.625 | 0.610 | 0.610 | 0.607 | 0.602 | 0.603 |
| 吉林 | 0.649 | 0.650 | 0.654 | 0.655 | 0.669 | 0.672 | 0.673 | 0.669 | 0.659 | 0.664 |
| 黑龙江 | 0.649 | 0.632 | 0.635 | 0.634 | 0.638 | 0.636 | 0.636 | 0.636 | 0.629 | 0.631 |
| 上海 | 1.000 | 0.739 | 0.715 | 0.721 | 0.705 | 0.702 | 0.697 | 0.701 | 0.902 | 1.000 |
| 江苏 | 1.000 | 0.937 | 0.896 | 0.864 | 0.824 | 0.813 | 0.868 | 0.883 | 1.000 | 1.000 |
| 浙江 | 0.796 | 0.797 | 0.785 | 0.777 | 0.768 | 0.774 | 0.776 | 0.788 | 0.833 | 0.920 |
| 安徽 | 0.676 | 0.648 | 0.642 | 0.639 | 0.637 | 0.638 | 0.637 | 0.635 | 0.657 | 0.658 |
| 福建 | 0.749 | 0.709 | 0.695 | 0.677 | 0.682 | 0.692 | 0.688 | 0.677 | 0.742 | 0.744 |
| 江西 | 0.717 | 0.712 | 0.693 | 0.689 | 0.682 | 0.681 | 0.681 | 0.673 | 0.689 | 0.686 |
| 山东 | 0.706 | 0.690 | 0.693 | 0.680 | 0.666 | 0.659 | 0.658 | 0.657 | 0.656 | 0.725 |
| 河南 | 0.659 | 0.665 | 0.665 | 0.663 | 0.665 | 0.668 | 0.679 | 0.676 | 0.730 | 0.732 |
| 湖北 | 0.681 | 0.653 | 0.662 | 0.661 | 0.666 | 0.667 | 0.678 | 0.673 | 0.735 | 0.700 |
| 湖南 | 0.714 | 0.678 | 0.676 | 0.680 | 0.680 | 0.677 | 0.678 | 0.673 | 0.717 | 0.727 |
| 广东 | 1.000 | 1.000 | 0.991 | 0.984 | 0.964 | 0.988 | 1.000 | 0.963 | 1.000 | 1.000 |
| 广西 | 0.689 | 0.676 | 0.676 | 0.677 | 0.685 | 0.680 | 0.676 | 0.669 | 0.669 | 0.663 |
| 海南 | 1.000 | 0.964 | 1.000 | 0.951 | 0.908 | 1.000 | 0.992 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 重庆 | 0.703 | 0.705 | 0.731 | 0.718 | 0.744 | 0.739 | 0.734 | 0.737 | 0.773 | 0.771 |
| 四川 | 1.000 | 0.877 | 0.769 | 0.684 | 0.675 | 0.680 | 0.698 | 0.709 | 0.778 | 0.785 |
| 贵州 | 0.639 | 0.633 | 0.632 | 0.635 | 0.636 | 0.633 | 0.634 | 0.641 | 0.659 | 0.656 |
| 云南 | 0.656 | 0.653 | 0.655 | 0.666 | 0.677 | 0.678 | 0.672 | 0.661 | 0.680 | 0.625 |
| 陕西 | 0.634 | 0.626 | 0.622 | 0.619 | 0.619 | 0.618 | 0.618 | 0.620 | 0.631 | 0.646 |
| 甘肃 | 0.683 | 0.657 | 0.652 | 0.651 | 0.652 | 0.659 | 0.660 | 0.659 | 0.665 | 0.668 |
| 青海 | 1.000 | 0.951 | 0.993 | 0.895 | 0.956 | 0.913 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 宁夏 | 0.657 | 0.651 | 0.646 | 0.645 | 0.642 | 0.645 | 0.631 | 0.626 | 1.000 | 0.764 |
| 新疆 | 0.626 | 0.618 | 0.612 | 0.608 | 0.606 | 0.605 | 0.604 | 0.604 | 0.611 | 0.621 |
| 全国平均 | 0.758 | 0.724 | 0.717 | 0.704 | 0.702 | 0.706 | 0.712 | 0.710 | 0.751 | 0.750 |

表2 各省份全要素能源效率排名

| 排名 | 省份 | 能源效率 | 排名 | 省份 | 能源效率 |
|----|----|-------|----|-----|-------|
| 1 | 广东 | 0.994 | 16 | 湖北 | 0.664 |
| 2 | 海南 | 0.979 | 17 | 河南 | 0.663 |
| 3 | 青海 | 0.960 | 18 | 甘肃 | 0.661 |
| 4 | 北京 | 0.957 | 19 | 云南 | 0.658 |
| 5 | 江苏 | 0.924 | 20 | 吉林 | 0.652 |
| 6 | 四川 | 0.832 | 21 | 安徽 | 0.651 |
| 7 | 上海 | 0.794 | 22 | 宁夏 | 0.650 |
| 8 | 天津 | 0.791 | 23 | 黑龙江 | 0.638 |
| 9 | 浙江 | 0.789 | 24 | 贵州 | 0.635 |
| 10 | 重庆 | 0.714 | 25 | 辽宁 | 0.626 |
| 11 | 福建 | 0.708 | 26 | 陕西 | 0.625 |
| 12 | 江西 | 0.703 | 27 | 河北 | 0.620 |
| 13 | 山东 | 0.692 | 28 | 新疆 | 0.616 |
| 14 | 湖南 | 0.687 | 29 | 内蒙古 | 0.602 |
| 15 | 广西 | 0.680 | 30 | 山西 | 0.599 |

能源效率最低的是内蒙古、山西、新疆与河北。内蒙古和山西是我国煤炭生产量最大的两个省份，

煤炭的开采和生产导致大量的水污染、空气污染和固体废弃物污染，排放出大量的烟粉尘和废弃物如CO₂、SO₂、CO等，从而降低能源效率。河北的产业结构偏向于钢铁、石化、电力等高能耗高污染行业，消耗了的能源量多，光石家庄每年冬季供热所消耗的煤炭便超过了北京全年的煤炭消耗总量，从而导致大量的污染物排放。河北的NO_x和烟粉尘排放量多年位居全国第1，SO₂排放量居全国第2，再加上气象和地理条件不理想，不利于污染物的扩散，使得河北成为全国空气污染最严重的省份。此外，东北地区的黑龙江、辽宁和吉林，平均能源效率也只有0.639，远远低于全国平均水平0.725。东北三省也是重工业聚集地，能源消耗量大，排放的污染物数量大，整体能源效率较低。

4.3 节能减排潜力分析

在全要素能源效率的测度中，如果想要提高能

源效率,减轻能源消费对环境的负面影响,可以通过以下两个途径来实现:一是减少单位 GDP 的化石能源投入量,二是减少单位能源消费的污染排放量。基于此,有必要进一步计算各个省份的节能减排潜力的大小,以帮助各个区域有针对性地制定节能和减排政策。第 i 个省份在第 t 年的节能潜力 ERP(i, t) 计算公式如式(4)所示,而第 i 个省份在第 t 年的某种排放物的减排潜力 DRP(i, t) 计算公式如式(5)所示。

$$ERP(i, t) = \frac{\text{实际能源消费}(i, t) - \text{目标能源消费}(i, t)}{\text{实际能源消费}(i, t)} \quad (4)$$

$$DRP(i, t) = \frac{\text{实际排放}(i, t) - \text{目标排放}(i, t)}{\text{实际排放}(i, t)} \quad (5)$$

按照式(4)和式(5)对 2011—2020 年各省份的节能减排潜力进行计算,从计算结果来看,全国范围内的节能潜力为 40.7%,远远小于各种污染物的减排潜力:CO₂ 56.3%, SO₂ 71.2%, NO_x 72.2%。这说明,为了接近或者达到效率前沿面,应该把重点更多地放在污染物减排上,其中,SO₂的减排潜力最大。

从数据来看,节能潜力和减排潜力是高度正相关的,且大部分省份都是节能潜力小于减排潜力。不过不同的省份节能潜力和减排潜力之间的差距不一样。根据节能减排重点的差异性,将 30 个省份分为两类:节能减排并举型和减排优先型(表 3)。比如说辽宁,其节能潜力为 65.6%,与其 CO₂ 和 NO_x、SO₂减排潜力差距相对较小,类似的省份还有天津、河北、内蒙古、山西、四川等。对于这类省份来说,应该节能与减排并举;而江苏的节能潜力为 8.2%,其减排潜力远远高于节能潜力,类似的省份还有北京、上海、浙江、福建、江西等,对于这类省份来说,减排应该重于节能,属于减排优先型。

5 结论与启示

采用我国各省 2011—2020 年的面板数据,构建非期望产出的不可分混合 DEA 模型,测算各省份的全要素能源效率,并进一步计算各省份的节能减

排潜力,得出以下结论。

2011—2020 年的我国总体全要素能源效率平均值为 0.725。各个省份的全要素能源效率存在很大的差异性。能源效率最高的省份除海南和青海外,都是经济发达的省份。能源效率最低的省份在内蒙古、山西、新疆与河北。从全国来看,节能潜力为 40.7%,远远小于各种污染物的减排潜力:CO₂ 56.3%, SO₂ 71.2%, NO_x 72.2%。一般来讲,节能潜力和减排潜力是高度正相关的。不过不同的省份节能潜力和减排潜力之间的差距不一样,大致可以分为两类:以辽宁为代表的节能减排并举型、以江苏为代表的减排优于节能型。

根据研究结论,从 3 个层面提出政策建议。

(1)国家战略层面:以碳中和战略为契机,加快我国能源系统升级转型。化石能源消费过程中产生的废气和烟粉尘是导致大气污染、水污染、固体废弃物污染以及气候变化的来源,想要改变这种状况,根本途径是推进能源革命,加快我国能源系统升级转型。一方面,加快发展可再生能源。风能、水能、太阳能、生物质能等可再生能源能极大地提高能源效率,保障国家能源安全。另一方面,积极推动传统化石能源的转型发展。在很长的一段时期内,我国经济的发展仍然离不开煤炭、石油等化石能源,但是可以通过一些途径如将煤炭生产集中在煤炭富集地区、适当地控制煤炭发电厂的建设速度和规模,最大可能地减少化石能源消费,降低消费过程对环境的负面影响。

(2)地区和行业层面:重点关注高能耗、高污染行业和地区的节能减排。根据本文的研究结论,能源效率较低的省份大多是能源资源富集地区和高耗能、高污染重化工业聚集的地区,这些省份的节能减排空间较大,应该得到重点关注。①从产业转型入手,着力改变传统的低端高能耗高污染为特点的工业体系,对于能耗大的产业如火力发电、钢铁等应该严格控制其发展节奏,引导和鼓励企业加大技术研发力度,激励相关企业对老旧的生产设备进行技术改造或者更新换代,约束高污染、高能耗行业

表 3 2011—2020 年各省份节能减排潜力类型

| 节能减排类型 | 代表省份 | 节能潜力 | CO ₂ 减排潜力 | SO ₂ 减排潜力 | NO _x 减排潜力 | 同类省份 |
|---------|------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|---|
| 节能减排并举型 | 辽宁 | 0.656 | 0.832 | 0.972 | 0.959 | 天津、河北、内蒙古、山西、四川、贵州、云南、新疆、青海、广东、黑龙江、河南、湖北、湖南、广西、陕西、甘肃、宁夏 |
| 减排优先型 | 江苏 | 0.082 | 0.142 | 0.539 | 0.530 | 北京、上海、浙江、福建、江西、山东、安徽、海南、重庆 |

的发展;②从能源结构入手,在现有节能财税政策上完善相关政策,采取财政补贴、融资优惠、税收优惠等经济手段,加大天然气等清洁能源替代煤炭等化石能源的支持力度,逐渐实现能源结构的优化,不断提升重点行业和省份的能源效率。

(3)社会消费层面:引导社会树立正确的资源消费观,促进能源节约利用。在能源短缺、环境污染严重的情况下,能源的节约离不开社会公众的共同参与和努力。应该在全社会树立节约的资源消费观。①适当引导消费者在选购商品时优先选择低能耗、低污染的绿色产品,从市场需求侧推动生产企业向节能环保的方向发展;②提升消费者对垃圾的合理处理和重复利用,以使垃圾不对环境产生污染,并通过回收利用,减少资源浪费,提高资源使用效率;③引导消费者转变消费观念,倡导合理的消费模式,尽量避免过度消费和奢侈浪费,提倡节俭消费、绿色消费、文明消费。

参考文献

- [1] 潘家华. 从生态失衡迈向生态文明: 改革开放 40 年中国绿色转型发展的进程与展望[J]. 城市与环境研究, 2018, 4(5): 3-16.
- [2] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [3] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis [J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078-1092.
- [4] HU J L, WANG S C. Total factor energy efficiency of regions in China [J]. Energy Policy, 2006, 34 (2): 3206-3217.
- [5] 李磊, 蒋沁怡. 数字经济发展与我国城市能源效率的提升[J]. 贵州大学学报(社会科学版), 2023, 41(3): 72-83.
- [6] 江洪, 李金萍, 纪成君. 省际能源效率再测度及空间溢出效应分析[J]. 统计与决策, 2020, 36(1): 123-127.
- [7] 龙如银, 刘爽, 王佳琪. 环境约束下中国省际能源效率评价: 基于博弈交叉效率和 Malmquist 指数模型[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2021, 23(1): 75-89.
- [8] 刘建翠, 朱承亮. 中国地区全要素能源效率评价及节能潜力分析[J]. 工业技术经济, 2023, 42(8): 31-40.
- [9] 杨仲山, 魏晓雪. “一带一路”重点地区全要素能源效率测算、分解及影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4384-4392.
- [10] TONE K, TSUTSUI M. Applying an efficiency measure of desirable and undesirable outputs in DEA to U. S. electric utilities[J]. Social Science Electronic Publishing, 2011, 4(2): 236-249.
- [11] 王萌. 区域能源效率测算及影响分析: 基于三阶段 DEA 方法[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 28-35.
- [12] 董会忠, 韩沅刚. 环境规制约束下“2 + 26”城市全要素能源效率评价与提升策略[J]. 城市与环境研究, 2020(3): 95-111.
- [13] 张文锋. 中国沿海地区能源效率的时空演化分析[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2019, 42(4): 538-542.
- [14] 孟庆春, 黄伟东, 戎晓霞. 灰霾环境下能源效率测算与节能减排潜力分析: 基于多非期望产出的 NH-DEA 模型[J]. 中国管理科学, 2016, 24(8): 53-61.
- [15] 王昆婷. 环境保护部发布 2016 年全国空气质量状况 [EB/OL]. (2017-02-17)[2023-12-21]https://www.ce-news.com.cn/environment/zlfb/201702/t20170217_822243.html.

Regional Energy Efficiency Measurement and Energy Saving and Emission Reduction Potential Analysis under Carbon Neutrality

MENG Cong¹, CAI Haixia²

(1. CNNP Rich Energy Henan Corporation Limited, Zhengzhou 450003, China; 2. Systems and Industrial Engineering Technology Research Center, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Using the panel data of each province in my country from 2011 to 2020, considering the radial and non-radial characteristics of different input and output indicators, as well as the inseparability between energy input and undesirable output, a hybrid data envelopment analysis(DEA) model with the inseparability of undesirable output is constructed to measure the total factor energy efficiency of each province in my country, and further calculate the energy saving and emission reduction potential. It is found that, the overall total factor energy efficiency average from 2011 to 2020 is 0.725. There are large differences in total factor energy efficiency among provinces. The provinces with the highest energy efficiency are concentrated in economically developed provinces such as Guangdong, Beijing, Jiangsu, and Shanghai. The provinces with the lowest energy efficiency are Inner Mongolia, Shanxi, Xinjiang and Hebei. From a national perspective, the energy saving potential is 40.7%, which is far less than the emission reduction potential of various pollutants. The gap between energy saving potential and emission reduction potential varies in different provinces. It can be roughly divided into two categories: the type represented by Liaoning that promotes both energy conservation and emission reduction, and the type represented by Jiangsu that prioritizes emission reduction over energy conservation. The research results can provide certain scientific reference for the formulation of regional energy conservation and emission reduction policies in my country.

Keywords: energy efficiency; non-separable hybrid data envelopment analysis(DEA) model; energy saving and emission reduction