

【生态文明与区域发展】

环境规制下中国能源效率的区域异质性研究*

李宝新 李春玉 安博文 黄寰

摘要:能源是中国经济跨越式发展的基本动力保障,环境规制约束下提高能源效率成为实现能源高质量发展的重要途径。结合2001—2020年中国30个省(区、市)的面板数据,采用超效率SBM模型测度考虑环境规制的能源效率,运用泰尔指数与核密度估计法揭示中国能源效率的地区差异来源和分布动态演进,借助计量模型分析能源效率的驱动因子及异质性,研究表明:中国能源效率偏低,但“十二五”以来增长趋势明显,地区间效率水平存在明显差异;中国能源效率的总体差距较大,东西差距与南北差距交替成为总体差距的主要来源;地区内差距是造成总体差距的重要原因,考察期内多数局部地区出现过不同程度的极化现象;全国视角下,经济增长对能源效率提高存在抑制作用,城市化、产业升级、技术创新和能源结构对能源效率提高具有促进作用,并且驱动因子的作用效果存在区域异质性。

关键词:能源效率;异质性;非期望超效率SBM;泰尔指数分解;核密度估计

中图分类号:F062.1 文献标识码:A 文章编号:2095-5766(2022)06-0128-12 收稿日期:2022-09-27

*基金项目:成都大学文明互鉴与“一带一路”研究中心重点项目“‘一带一路’倡议导向下成渝地区双城经济圈发展路径探究”(WMHJ2022B03);四川省人文社会科学重点研究基地资源型城市发展研究中心重点项目“攀西经济区全面融入成渝地区双城经济圈的路径与对策研究”(ZYZX-ZD-2001);成都理工大学社科规划重大培育项目“基于‘双碳’目标约束的资源绿色利用研究”(YJ2021-XP001)。

作者简介:李宝新,男,河北经贸大学数学与统计学学院教授,硕士生导师(石家庄 050061)。

李春玉,女,河北经贸大学数学与统计学学院硕士生,通信作者(石家庄 050061)。

安博文,男,华侨大学经济与金融学院博士生(泉州 362021)。

黄寰,男,成都理工大学商学院和数字胡焕庸线研究院教授,中国人民大学长江经济带研究院研究员,博士生导师(成都 610059)。

一、引言

改革开放以来,中国作为世界上最大的能源消费国,能源始终为中国经济跨越式发展提供着基本动力保障。在取得经济飞速发展的成绩背后,粗放式能源消费导致的能源短缺和环境污染等问题日渐凸显。生态兴则文明兴,党的十八大以来,中国式能源消费进入新时代。“能源的饭碗必须端在自

己手里”,在新发展理念驱动下,中国能源步入高质量发展之路。2020年国务院新闻办公室发布的《新时代的中国能源发展》中写道:以清洁低碳为导向,抑制不合理能源消费,建立多元化可持续能源供给结构,构建绿色能源技术创新体系。2022年10月,习近平总书记在党的二十大报告中强调,要推动能源结构调整优化,全面推进各类资源节约集约利用,加快发展方式的绿色转型,促进人与自然和谐共生。以习近平生态文明思想为指导,以增进人民

福祉、建设美丽中国为价值导向,以现代化生态文明系统观为方法论基础,开展环境规制下能源效率研究具有重要的实践意义与时代价值。

中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化,在环境规制约束下加快提高能源效率是实现能源高质量发展的重要途径。值得关注的是,有关能源效率尚存在诸多疑问急需得到回答:首先,新时代能源效率的含义比以往更为丰富,现阶段能源效率不仅要关注能源投入与经济产出的优化问题,还需要将能源消费对生态环境的负面影响考虑在内(张士强等,2021)。环境污染不单单包括二氧化碳,还包括二氧化硫、氮氧化物等多项指标,在环境污染约束下中国能源效率如何?其次,中国地大物博,各地区能源消费结构的异质性问题由来已久(隋建利等,2017)。能源消费结构与能源效率息息相关,中国能源效率是否存在区域异质性?异质性的来源究竟在哪里?最后,能源消费与经济社会发展和人民福祉密切相关,能否通过国家调控和政策导向等措施发挥宏观因素的涓滴效应以提高能源效率?基于上述问题,本研究拟从中国能源效率的异质性入手,测算考虑环境污染约束下的能源效率,通过变换空间划分尺度探究区域异质性的主要来源,考察不同空间尺度下能源效率的驱动机制,以期全面客观反映中国能源效率的发展现状,助推中国能源高质量发展。

二、文献综述

伴随中国经济发展步入新阶段,能源效率评估从“能源—经济”的二维动力框架逐步演变为“能源—经济—生态”的三维可持续体系。这一阶段中,能源效率测算需要考虑投入要素、期望产出、非期望产出和生产环境等多种因素,在诸多不确定因素影响下,数据包络分析(DEA)成为估算能源效率的重要方法(Afonso, et al., 2021)。传统发展模式下能源效率的投入要素包括劳动力投入、资本投入和能源投入,新发展阶段的投入要素与之相同(陈星星,2019)。环境规制约束下能源效率的产出由期望与非期望两部分组成,期望产出通常采用GDP衡量。就非期望产出而言,Mardani等(2017)将二氧化碳作为非期望产出,以反映能源消费对温室效应的影响,关伟等(2020)将二氧化硫和烟粉尘同时

作为非期望产出反映能源消费对空气污染的影响。此外,还有文献将固体废弃物和废水作为非期望产出(穆献中等,2022;田成诗、张亚兵,2022)。在DEA方法的选择上,SBM模型能够有效解决能源效率估算时投入产出的冗余量问题,这比CCR模型与BCC模型更具优势(陈星星,2019)。评价对象效率值为1表示该决策单元能源效率达到有效状态,SBM模型无法识别多个决策单元同时处于有效状态的情况,超效率SBM模型恰能弥补这一缺陷(Xu & Bao, 2022)。考虑到能源消费对生态环境的负向影响,包含非期望产出的超效率SBM模型成为估算能源效率的最佳选择(关伟等,2020;穆献中等,2022;田成诗、张亚兵,2022)。

能源结构的区域异质性是阻碍区域协调发展的重要原因(隋建利等,2017),相关研究结合多种空间划分尺度对能源效率的区域异质性进行探究。部分研究基于东中西部地区进行考察,发现东部地区的能源效率明显高于中西部地区,东部地区能源效率集中趋势明显,西部地区能源效率集聚度逐渐扩散,中部地区集聚度呈倒U型变化趋势(张士强等,2021;潘雄锋等,2012);部分研究立足八大经济区分析异质性成因,认为经济区间异质性是全国层面总体差异的主要来源,关键在于各经济区产业结构和对外开放等因素存在异质性,并且这些因素也导致各经济区内能源效率敛散性存在区别(周四军等,2017;陈菁泉等,2022);还有部分研究对城市群能源效率进行比较,发现沿海城市群与内陆城市群效率水平差异明显(田泽等,2020),对比黄河流域与长江流域的城市群发现,技术进步是影响长江经济带能源效率的重要因素,而政策导向会对黄河流域能源效率产生显著影响(关伟等,2020;吴巧生、李慧,2016)。就研究方法而言,目前对能源效率空间特征的考察多集中在以下方面:一是采用集中度指数、社会网络分析和Moran指数等地理探测器方法刻画能源效率的空间关联特征(田成诗、张亚兵,2022;陈菁泉等,2022),二是通过泰尔指数、聚类分析和收敛模型等方法揭示能源效率存在空间分异的客观事实(Xu & Bao, 2022;吴巧生、李慧,2016),三是借助时变核密度估计和空间Markov链等分布动态学方法描述中国能源效率的空间演变趋势(关伟等,2020;Tang等,2020)。

在能源效率外生影响机制的研究上,相关文献

大多从社会经济因素、技术进步方面以及能源结构转型等角度进行讨论。其一,经济发展对能源效率既存在增长效应也存在抑制作用,虽然经济增长可以为能源绿色技术革新积累资本,但高强度经济增长目标会给能源效率带来压力,同时能源效率变动还会对经济系统产生反馈作用,即二者存在双向因果关系(Zhu & Lin, 2022; Lin & Zhou, 2022)。其二,城市化规模不断扩大使得城市对人才和物质的筛选效应愈发明显,城市化会带来人力资本等生产要素集聚,促进能源效率提高;同时,城市扩张还能加快产业集聚,通过工业园区等形式带动能源效率提高(关伟等,2020;田成诗、张亚兵,2022)。其三,产业结构调整会通过改变有效劳动力投入来影响能源效率,产业结构对能源效率的影响存在区域异质性和行业异质性,区域异质性体现在产业结构对不同经济区内能源效率敛散性的影响存在区别,行业异质性主要表现在不同工业部门之间(陈星星,2019;Xiong等,2019)。其四,技术进步是能源效率提高的重要驱动因子,其中技术进步的能源偏向性是影响能源效率的关键因素(王林辉等,2022)。从国家对科技研发的支持来看,科研投入能够为能源效率的技术进步积累物质资本,通过技术设备创新等方式促进能源效率提高(安博文、肖义,2022)。其五,能源结构对能源效率的影响存在区域异质性,东部地区产能集聚有利于提高能源效率,但中西部地区却呈现抑制作用(张士强等,2021)。特别是对于东南部地区而言,随着清洁能源占比不断增加,能源结构对能源效率的促进作用更加明显(Tao & Li, 2018)。

纵观上述文献,有关能源效率的研究主要还存在以下几点不足:第一,在能源效率的测度指标上,大多数研究仅采用二氧化碳、二氧化硫或氮氧化物等单一因素作为非期望产出,鲜有文献同时考虑多种非期望产出。第二,在能源效率的空间划分尺度上,近年来南北方发展差距成为阻碍区域协调发展的重要因素(刘学良等,2022),但几乎没有文献从南北方视角比较中国能源效率的发展差异。第三,在能源效率驱动机制的异质性分析上,相关文献多从全国层面探究能源效率的影响因素,当然也有部分研究分区域异质性进行讨论,伴随中国进入新发展阶段,大多研究忽视了时期异质性问题。

三、研究方法说明

本研究采用包含非期望产出的超效率SBM模型测算2001—2020年中国各省份能源效率,该方法既能将能源使用对环境污染的影响考虑在内,还能避免出现多个决策单元效率值为1的情形;在区域异质性的分析上,本文同时采用参数与非参数两种方法,泰尔指数从数值上反映能源效率的全国总体差距,核密度估计以图形展示局部地区能源效率的空间非均衡特征;在驱动机制的讨论中,本文基于高质量发展理念,从经济增长、技术创新与能源转型等维度进行考量。

(一)非期望超效率SBM模型

超效率SBM模型测算效率时分成两步,首先依据SBM模型区分决策单元是否处于有效状态,其次对有效决策单元做进一步区分。考虑到生产活动对生态环境的负向反馈,结合尺度分割算法将产出划分为期望产出与非期望产出(Tone & Sahoo, 2003),本文采用包含非期望产出的超效率SBM模型评估能源效率。

第一,非期望产出SBM模型。假设第 $k(k=1, \dots, n)$ 个决策单元包含 m 种投入 $x_k = (x_{1k}, \dots, x_{mk})$ 、 r_1 种期望产出 $y_k^e = (y_{1k}^e, \dots, y_{r_1k}^e)$ 和 r_2 种非期望产出 $y_k^u = (y_{1k}^u, \dots, y_{r_2k}^u)$,且所有投入产出都大于0。在规模报酬不变的假定下,生产可能性集为:

$$P_1(x, y^e, y^u) = \left\{ \begin{array}{l} x_{ik} = \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + w_i^- \quad i=1, \dots, m \\ y_{sk}^e = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{sj}^e - w_s^e \quad s=1, \dots, r_1 \\ y_{qk}^u = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{qj}^u + w_q^u \quad q=1, \dots, r_2 \end{array} \right\} \quad (1)$$

式(1)中, λ 表示权重向量, w_1 是投入松弛变量, w_2 是期望产出松弛变量, w_3 是非期望产出松弛变量。能源效率(EE)测算结果为:

$$\min EE = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{w_i^-}{x_{ik}}}{1 + \frac{1}{r_1 + r_2} \left(\sum_{s=1}^{r_1} \frac{w_s^e}{y_{sk}^e} + \sum_{q=1}^{r_2} \frac{w_q^u}{y_{qk}^u} \right)} \quad (2)$$

第二,有效决策单元对比。式(2)中 $EE=1$ 时表示决策单元处于有效状态,重新定义有效决策单元的生产可能性集:

$$P_2(x, y^e, y^u) = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{x}_i \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j x_{ij} \ \& \ \tilde{x}_i \geq x_{ik} \quad i=1, \dots, m \\ \tilde{y}_s^e \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{sj}^e \ \& \ \tilde{y}_s^e \leq y_{sk}^e \quad s=1, \dots, r_1 \\ \tilde{y}_q^u \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{qj}^u \ \& \ \tilde{y}_q^u \geq y_{qk}^u \quad q=1, \dots, r_2 \end{array} \right\} \quad (3)$$

有效决策单元的能源效率(EE)计算结果为:

$$\min EE = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{x}_i}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left(\sum_{s=1}^{r_1} \frac{\tilde{y}_s^e}{y_{sk}^e} + \sum_{q=1}^{r_2} \frac{\tilde{y}_q^n}{y_{qk}^n} \right)} \quad (4)$$

结合新发展阶段能源效率的内涵与特点并参考既有文献,能源效率的投入变量包括劳动力投入、资本投入和能源投入,具体代理变量依次为人力资本结构指数(与文末参考文献[24]不同的是,本文将受教育层次分为未上过学、小学、初中、高中、专科、本科和研究生7类,对应受教育年限依次取为0年、6年、9年、12年、15年、16年和20年)、固定资产投资和标准煤能源消费量(本文从煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力共9类核算能源消费量);期望产出用经济产出衡量,代理变量为GDP;非期望产出包括二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物和烟粉尘,运用客观AHP方法对4项指标加权以构造综合非期望产出(安博文、侯震梅,2021;安博文、黄寰,2022)。本研究考察期为2001—2020年,所有数据来源于《中国统计年鉴》《中国劳动统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》和CEADs数据库。

(二)泰尔指数分解

本文采用泰尔指数衡量中国能源效率的总体差异,通过比较不同空间分割尺度下泰尔指数组间贡献率,探究总体差异的主要来源。衡量总体差异(T)的泰尔指数计算公式为(Xu & Bao, 2022):

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{EE_i}{EE} \times \log \frac{EE_i}{EE} \quad (5)$$

式(5)中 n 表示所有省份个数。假设整个区域被分割成 K 个子区域,第 $k(k=1, \dots, K)$ 个子区域包括 n_k 个省份,则子区域间的差异(T_b)表示为:

$$T_b = \sum_{k=1}^K EE_k \times \log \frac{EE_k}{n_k/n} \quad (6)$$

式中 EE_k 表示第 k 个子区域能源效率求和与所有区域能源效率求和之比,组间贡献率即为子区域间差异占总体差异的比重。

(三)核密度估计

用 EE_{it} 表示 t 年 i 省份能源效率, $f_i(u)$ 表示 t 年能源效率的概率密度函数,该函数可采用核密度估计法计算:

$$f_i(u) = \frac{1}{nh_t} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{EE_{it}-u}{h_t}\right) \quad (7)$$

式(7)中, n 为样本个数, h_t 表示最优窗宽,核函数 $K(u)$ 取为高斯形式。依据式(7)可以绘制能源效率为横轴、年份序列为纵轴、概率密度为竖轴的三维曲面图。

(四)驱动机制分析

经济增长方面:新发展理念引领下,经济增长与能源可持续的良性循环是缓解能源短缺和实现“双碳”目标的有效途径;经济高质量发展对能源效率变革提出新的要求,同时,经济增长也为能源技术变革积累资本。城市化方面:伴随城市规模不断扩大,城市建设对生产要素的筛选与集聚作用直接影响能源效率投入变量的有效性;新型城镇化建设对能源利用率和生态环境等方面提出了更高要求,这对能源投入的有效性以及非期望产出都产生极大影响。产业升级方面:去产能、调结构是中国进入新发展阶段的重要举措,产业升级有助于促进高耗能、高污染生产方式向低耗能、低污染生产方式转型,使产业结构朝着绿色、低碳、可持续方向发展,这一阶段能源消费将由粗放型转变为集约型。技术创新方面:技术创新对能源效率的促进方式有多种,一是通过技术设备升级提高能源利用率,二是利用脱碳、脱硫、脱氮等技术减少非期望产出,三是通过优化管理模式实现能源消费的帕累托最优。能源结构方面:以天然气为代表的清洁高效化石能源在中国能源转型阶段发展着主导作用,伴随煤电价格大幅下降,可再生能源电力发展迅速,高能耗、高污染的火力发电逐步得到缓解。

综上所述并参考相关文献,本研究选取的驱动因子包括:经济增长(EC),为避免模型的内生性,故采用人均GDP取对数衡量经济发展水平;城市化(UR),本文采用城市人口占比衡量城市化水平;产业升级(IU),采用第三产业增加值与第二产业增加值之比测度产业升级;技术创新(TE),本研究重点考察技术革新对能源效率的影响,故采用R&D经费投入强度衡量技术创新能力;能源结构(ES),本文采用折算标准煤后煤炭消费量占比衡量能源结构,煤炭消费量占比越低表示能源结构逐步朝高效、低碳、清洁方向转型。建立的驱动机制分析模型见式(8),后文将采用面板数据方法进行估计。

$$\ln EE_{it} = \alpha + \beta_1 EC_{it} + \beta_2 UR_{it} + \beta_3 IU_{it} + \beta_4 TE_{it} + \beta_5 ES_{it} + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

四、中国能源效率的区域异质性来源

本部分依据超效率SBM模型测算2001—2020年中国30个省(区、市)(不包含西藏和港澳台地区)的能源效率,并对其空间异质性进行测度与分解。在空间划分尺度上:一是东西对比,东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南,中部地区包括山西、内蒙古、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北和湖南,西部地区包括广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆;二是南北比较,北方省份包括山东、河南、山西、陕西、甘肃、青海、新疆、河北、天津、北京、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江和宁夏,南方省份包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、四川、贵州和云南。

(一)能源效率测算结果

图1展示了能源效率年度均值的时间演变趋势。从全国层面来看,2001—2020年期间能源效率

介于0.368和0.544之间,说明化石能源的产出绩效不足60%,可见中国能源效率还存在很大上升空间。整个考察期内能源效率以2009年为拐点呈U形发展趋势,其中,2001—2009年能源效率整体呈现下降趋势,特别是2003年骤降到0.423,负增长率为14.9%;2009—2020年能源效率增长势头强劲,年均增速为3.5%。“十五”时期是中国工业化发展的强盛时期,工业化进程加快促使化石能源大量消费,再加上该阶段中国清洁能源技术与节能减排技术覆盖率较低,导致这一时期能源效率明显下降。2009年是中国能源进出口贸易的重要转折点,中国从煤炭资源净出口国转变为净进口国,能源资本投入增加是导致该时期能源效率降低的主要原因。从测算结果来看,虽然2009—2014年能源效率有小幅增长趋势,但效率水平始终围绕在0.38左右,可见煤炭资源进出口贸易变化对能源效率的影响时间较长且存在滞后性。在生态文明思想引领下,“十三五”时期中国能源消费迈入集约型、可持续型、清洁型生产方式,能源效率水平不断提高。

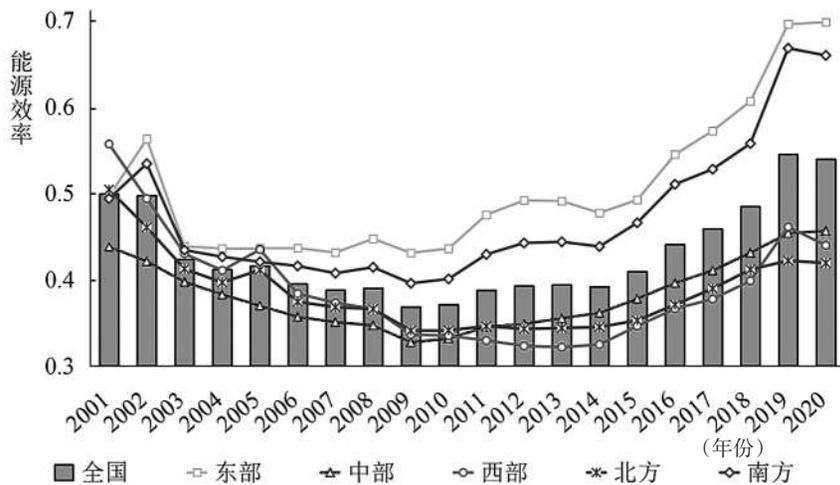


图1 中国各地区能源效率的时间演变趋势

资料来源:根据 Matlab 计算结果绘制。

从不同空间划分尺度来看,所有子区域能源效率的发展趋势与全国层面相近,都呈现先下降后上升的U形变化趋势。对比东中西部地区能源效率可以发现,东部地区能源效率远超过中西部地区,2001—2010年西部地区能源效率高于中部地区,2010年后与之相反。一方面中部地区崛起战略一定程度上扩大了化石能源的粗放型使用,另一方面与黄河流域城市群和长江经济带建设有关。比较南北方地区能源效率不难发现,南方地区能源效率

始终高于北方地区,北方作为中国重工业、制造业和化石资源的重要基地,能源消费量相对较高,除北京、天津外,其他北方省份能源效率偏低。依据表1结果比较中国30个省(区、市)能源效率的有效性,2020年有效省份个数是3个,效率水平由高到低依次为广东、北京、江苏,分别对应于南部沿海经济区、北部沿海经济区、东部沿海经济区,是中国高技术产业与高端制造业集聚地。就历年有效省份数量而言,2001年有3个省份,分别为海南、青海和宁

夏;2005年仅有1个省份,为青海;2010年和2015年并无省份能源效率达到有效状态,可见有效省份个数也呈现先减后增的变化趋势。需要注意的是,虽然2001年与2020年有效省份同为3个,但表现出来的实际情况并不相同。首先,青海和宁夏作为大西北经济区的代表性省份,是中国能源战略接替基地,意味着这两个省份化石能源并未大量投入使用,属于低投入—低产出型有效;其次,整个考察期海南能源效率均值排名第4,海南作为外向型经济省份,对能源需求量相对较低,这与北京和江苏的能源需求差别较大。总体来看,高能源需求量省份中属于有效状态的省份数量不断增加。对比各省份能源效率

表1 2001—2020年中国各省(区、市)能源效率

省份	2001年	2005年	2010年	2015年	2020年	全期均值
北京	0.414	0.424	0.473	0.609	1.007	0.575
天津	0.432	0.407	0.359	0.388	0.373	0.400
河北	0.393	0.365	0.321	0.345	0.368	0.357
山西	0.356	0.340	0.300	0.267	0.356	0.323
内蒙古	0.459	0.298	0.307	0.322	0.331	0.328
辽宁	0.424	0.333	0.308	0.388	0.457	0.373
吉林	0.432	0.362	0.305	0.347	0.328	0.350
黑龙江	0.443	0.416	0.329	0.343	0.319	0.366
上海	0.395	0.399	0.464	0.534	0.924	0.538
江苏	0.437	0.414	0.501	0.568	1.002	0.556
浙江	0.399	0.395	0.516	0.570	0.784	0.531
安徽	0.473	0.386	0.327	0.396	0.550	0.398
福建	0.519	0.447	0.387	0.489	0.733	0.492
江西	0.490	0.373	0.333	0.366	0.497	0.388
山东	0.424	0.375	0.434	0.446	0.495	0.434
河南	0.438	0.373	0.359	0.410	0.530	0.414
湖北	0.404	0.390	0.360	0.472	0.620	0.441
湖南	0.445	0.387	0.364	0.476	0.574	0.436
广东	0.442	0.472	0.613	0.724	1.074	0.744
广西	0.486	0.404	0.346	0.352	0.391	0.383
海南	1.175	0.766	0.416	0.350	0.452	0.549
重庆	0.443	0.349	0.348	0.469	0.696	0.438
四川	0.422	0.377	0.381	0.518	0.714	0.480
贵州	0.389	0.370	0.322	0.326	0.387	0.351
云南	0.481	0.375	0.329	0.371	0.485	0.385
陕西	0.429	0.355	0.316	0.322	0.381	0.350
甘肃	0.476	0.419	0.321	0.296	0.377	0.364
青海	1.033	1.002	0.396	0.300	0.344	0.490
宁夏	1.014	0.335	0.272	0.235	0.302	0.338
新疆	0.392	0.359	0.316	0.270	0.315	0.323

资料来源:根据 Matlab 计算结果整理。

的发展趋势,东部地区内有近一半省份能源效率呈现递增态势,西部地区内仅有四川和重庆呈现增长趋势。一方面,四川作为中国矿产资源大省,近年来绿色矿业建设稳步推进,以攀枝花为代表的资源型城市顺利转型,为能源效率持续提升打下坚实基础;另一方面,重庆和成都作为大西南经济区的重工业与轻工业中心,成渝地区双城经济圈建设为重庆和四川能源效率协调发展提供有利平台。

(二)能源效率的区域异质性分析

图2显示了中国能源效率的总体差异与分解结果。全国范围内2001—2020年泰尔指数平均值为0.291,整个考察期内泰尔指数以2007年、2012年和2014年为拐点呈“下降—上升—下降—上升”的W形变化趋势。该结果表征出中国能源效率异质性的两个基本事实:一是中国30个省(区、市)能源效率的总体差异较大,能源效率的省间异质性是抑制能源消费协调发展的关键原因;二是中国能源效率区域异质性仍然存在扩大趋势,特别是2019年泰尔指数骤增到0.339,可见缩小省份间能源效率差距任重道远。对比东西差距与南北差距的贡献率可以发现:首先,区域内差异是造成总体差异的重要原因。泰尔指数分解结果显示,两种空间划分尺度下组间贡献率都低于50%,说明地区内能源效率的协同发展有待加强。其次,总体差异的地区来源存在阶段性特征,2001—2005年、2015—2020年南北方差异贡献率略高于东中西部差异贡献率,2006—2014年东中西部差异贡献率明显高于南北方差异贡献率。南北差距成为近年来中国发展新格局的新特征,南北方地区能源消费结构存在明显差异,同时北方还存在资本投入增速降低和劳动力南移等现象(刘学良等,2022),这可能是导致南北方能源效率异质性的宏观因素;尽管“十三五”时期以来南北方差距日益扩大,但东中西部差距依然存在,因此东中西部地区的能源效率异质性也不容忽视。

以地区内差异为切入点,采用核密度估计法绘制不同空间划分尺度下局部地区能源效率的分布动态演变图。下面依据图3从曲线位置、主峰形状、延展偏态和波峰数量等维度对各地区能源效率的发展现状进行比较。

就能源效率的涨幅趋势而言,比较东中西部地区可以发现,东部地区密度曲线先左移后右移,2013年后右移幅度明显增加,说明东部地区能源效

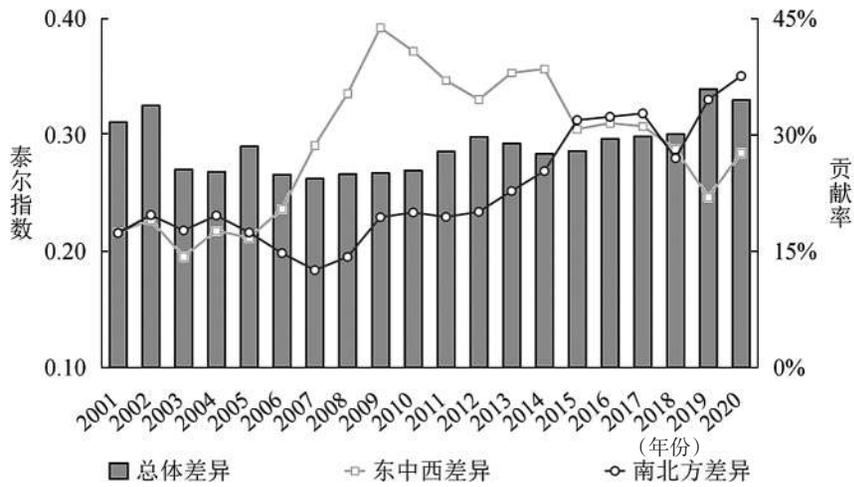


图2 中国能源效率地区差异来源及演变

资料来源:根据 Matlab 计算结果绘制。

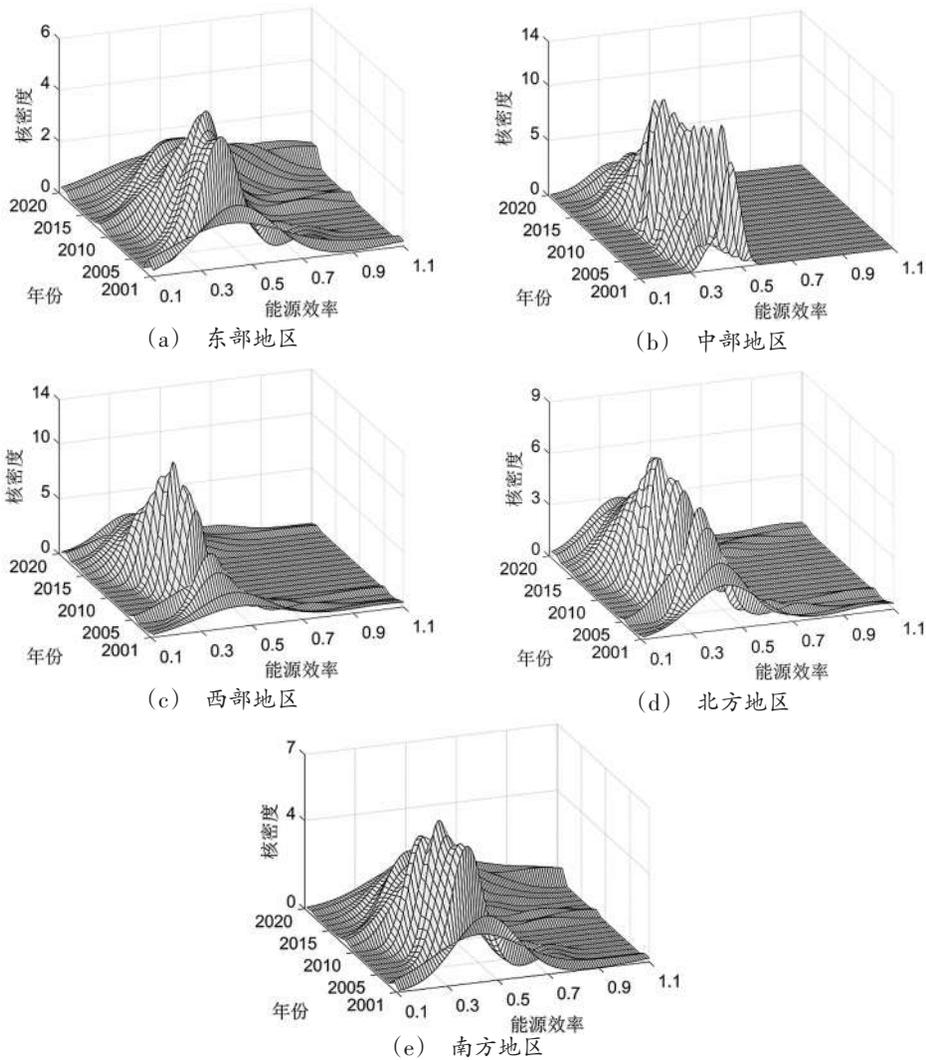


图3 局部地区能源效率分布动态演变

资料来源:根据 Matlab 计算结果绘制。

率历经下降、上升两个阶段,且后期增长势头强劲;东部地区分布曲线呈对称的钟形,说明地区内部能源效率多集中在中等水平。中部地区和西部地区

的能源效率依然是先降低后升高,2020年密度曲线仍在2001年左侧,可见中西部地区能源效率存在很大提升空间;中部地区和西部地区的分布曲线依次

经历右倾斜、对称和左倾斜,说明地区内部能源效率由高水平集中逐步转向低水平集中,能源效率的相对水平明显降低。从南北方地区来看,虽然二者地区内部能源效率都是先下降后升高,但不同的是,北方地区期末整体效率水平低于期初,南方地区于2014年回升到期初水平且后期能源效率持续上升;南北方地区的密度曲线都是对称分布,反映出地区内部多数省份的能源效率处于中等水平。

就能源效率的发展差距而言,从东西方向来看,东部地区和中部地区的内部差距变化趋势相近,主峰高度先升高后降低且宽度先变窄后变宽,说明地区内部差距先缩小后扩大;2016—2020年分布曲线的右拖尾现象明显,可见“十三五”期间各地区内部都存在少数省份能源效率明显上升,使得地区内高低水平差距持续扩大。西部地区内部差距先缩小后扩大,期初和期末的主峰高度相近,表明地区内部非均衡特征并不突出;整个考察期内分布曲线始终存在右拖尾现象,反映出历年西部地区总有少数省份能源效率提高,地区内绝对差距明显。从南北方向来看,二者地区内部差距都是先缩小后扩大,不同之处在于,北方地区2007年内部差距最小且期初、期末内部差距相近;南方地区2009年内部差距最小且期末密度曲线的主峰高度约为期初一半,近年来地区内部非均衡特征日渐凸显。此外,北方地区分布曲线左右两侧都存在严重拖尾,高低水平差距不断拉大,未来可能出现高低分化现象。

就能源效率的极化现象而言,除中部地区外,整个考察期内其他地区都出现过不同程度的两极分化现象,时间范围主要集中在2003—2015年。具体来看,整个考察期内东部地区的主峰集中在0.4—0.5效率水平,2003—2006年右侧偏峰相对明显,围绕在0.8效率值附近,这源于部分省份能源效率快速提高,直至2013年右侧偏峰逐渐消失且后期并未出现;西部地区右侧偏峰持续时间最短,2003—2006年在0.5效率值处形成偏峰,2007年偏峰到达最高,约为主峰高度的五分之一,2008年后偏峰消失且并未出现;北方地区的偏峰与主峰融为一体,2003年在0.8效率水平处出现偏峰,2004—2015年右侧偏峰逐渐左移,2016年后偏峰与主峰在0.4效率值处合并,可见北方地区高效率省份数量不断减少;2003—2013年南方地区的右侧偏峰逐渐右移,效率水平的两极差距不断加大,2014年后右

侧偏峰逐渐消失,同时分布曲线的主峰也不断右移,表现出南方地区效率水平持续上升。

五、能源效率驱动机制的异质性分析

考虑到发展阶段的异质性与地区外部环境的差异性,本部分将重点讨论中国能源效率提升路径的时期异质性与区域异质性。

(一)全国层面结果分析

表2分时期显示了所有样本地区的回归结果,混合效应估计结果旨在检验地区间能源效率是否存在显著差异,因此计量模型中增添了两个分类变量:东西差异(东部地区取值为1,中部地区取值为2,西部地区取值为3)和南北差异(北方地区取值为1,南方地区取值为2);LR检验结果显示,固定效应模型比混合效应模型更适用于面板数据分析,后文将基于固定效应估计结果分析驱动因子对能源效率的影响程度。

从整个考察期来看:经济增长对能源效率的压力作用显著,每当人均GDP上升1个百分点,能源效率降低0.290%,表明经济增长与能源效率的良性循环效应并未形成,“经济—能源—生态”的三维可持续系统仍待完善;城市化对能源效率的促进作用通过1%水平下的显著性检验,城市建设有利于产业集聚,城市人口规模扩大有利于为经济增长积累人力资本;产业升级有利于能源效率提高,随着以交通运输业、科技行业和金融业为代表的第三产业不断壮大,产业结构逐步向绿色、低碳方向发展,能源消费也逐步向清洁、集约式转型;技术创新对能源效率的影响显著,R&D经费投入强度每增加1%,能源效率整体提高0.218个百分点,科研经费是技术创新的有力支撑,而科技进步是能源效率提高的核心动力;能源结构转型有利于能源效率提升,煤炭消费量占比减少1%时,能源效率提高约0.851%。此外,混合效应估计结果表明,东西方向与南北方向的能源效率都存在显著差异,南北差异系数绝对值约为东西差异系数绝对值的3倍,意味着南北方能源效率差距高于东中西部差距。

从各个时期来看:(1)经济增长对能源效率的影响效果存在阶段性特征。“十五”至“十一五”期间主要表现为压力效应,“十二五”时期后动力作用占据优势,并且“十三五”时期二者弹性系数达到最

表2 全国层面样本分时期估计

变量名	整个时期		“十五”时期		“十一五”时期		“十二五”时期		“十三五”时期	
	固定	混合	固定	混合	固定	混合	固定	混合	固定	混合
EC	-0.290*** (0.031)	-0.028 (0.019)	-0.178*** (0.064)	-0.216*** (0.073)	-0.168*** (0.032)	-0.017 (0.044)	0.227** (0.104)	0.237*** (0.081)	0.671** (0.266)	0.417*** (0.087)
UR	1.256*** (0.275)	-0.238* (0.138)	0.322 (0.249)	0.276 (0.256)	0.279 (0.288)	-0.162 (0.181)	-0.474 (0.383)	-0.834*** (0.286)	-1.995** (0.920)	-1.215*** (0.321)
IU	0.172*** (0.025)	0.049** (0.020)	0.331*** (0.064)	0.338*** (0.069)	-0.067 (0.050)	-0.008 (0.037)	-0.059 (0.040)	-0.030 (0.030)	-0.064 (0.079)	0.001 (0.026)
TE	0.218*** (0.024)	0.066*** (0.013)	-0.108*** (0.023)	-0.104*** (0.025)	0.068** (0.033)	0.027 (0.019)	0.082*** (0.028)	0.109*** (0.021)	0.130* (0.072)	0.145*** (0.023)
ES	-0.851*** (0.144)	-0.577*** (0.078)	-0.960*** (0.161)	-0.957*** (0.164)	-0.639*** (0.172)	-0.622*** (0.089)	-0.664*** (0.136)	-0.268** (0.108)	-0.710** (0.313)	-0.220* (0.117)
东西差异	—	-0.063*** (0.013)	—	-0.043 (0.029)	—	-0.054*** (0.017)	—	-0.087*** (0.020)	—	-0.095*** (0.021)
南北差异	—	0.172*** (0.018)	—	-0.033 (0.034)	—	0.105*** (0.021)	—	0.249*** (0.025)	—	0.285*** (0.031)
截距项	1.397*** (0.215)	-0.442*** (0.161)	1.041* (0.560)	1.526** (0.672)	0.902*** (0.291)	-0.451 (0.410)	-2.834*** (0.958)	-3.234*** (0.777)	-6.695** (2.577)	-5.102*** (0.820)

注:圆括号中为标准误,***、**、*依次表示在1%、5%、10%水平下显著。

资料来源:根据Stata计算结果整理。

高。值得反思的是,尽管“十二五”时期后经济增长与能源效率呈现正向反馈作用,但依然没有弥补之前负向反馈带来的后果,使得整个考察期系数为负。(2)城市化对能源效率的影响效果由正转负。“十五”和“十一五”时期城市化的系数为正但不显著,“十二五”时期系数为负且不显著,“十三五”时期系数显著为负且绝对值最大。一定范围内的城市建设有利于能源效率提高,但城市规模大幅扩张与城市人口大量集聚,则增加了城市发展的运行成本,使得城市地区能源效率持续下降。(3)产业升级对能源效率的影响效果逐渐减弱。伴随着互联网行业、平台经济等行业的不断发展,数据表现为第三产业日益壮大,以第二产业为主的实体经济有所衰落,表征出强调产业转型升级的同时也要充分发展第二产业,并积极引导第二产业朝着绿色方向发展。(4)技术创新对能源效率的促进作用持续增强。“十五”时期R&D经费投入强度对能源效率存在抑制效用,“十一五”至“十三五”期间R&D经费投入强度对能源效率作用效果显著为正且效应系数不断增大,可见R&D经费投入结构不断朝着匹配能源效率的方向优化,二者的帕累托效用逐步扩大。(5)能源结构转型对能源效率提高始终具有促进作用。“十五”至“十三五”期间能源结构系数一直显著为负,新发展阶段

更应该发挥天然气等清洁能源及非化石能源的替代效应,促进能源效率水平持续提高。(6)南北差异不断扩大且东西差距不容忽视。“十五”期间二者差异系数并未通过统计检验,“十一五”时期后二者系数均通过1%显著性检验且系数绝对值不断扩大,表现为南北方向、东中西部间都存在差距且差距逐渐拉大。

(二)分区域异质性讨论

前文表明中国能源效率同时存在东西差异与南北差异,那么影响能源效率的驱动因子是否存在区域异质性?本部分将基于该问题给出回答。表3显示了不同区域下固定效应模型的估计结果。

从南北方向来看,产业升级在两地区回归系数的正负性相同、显著性一致且95%置信区间存在重叠,表明南北方地区间产业升级对能源效率的促进作用不存在异质性;与之同理,能源结构转型对能源效率的影响效果在各地区内部也无明显区别。经济增长对能源效率的压力效果存在区域异质性,虽然南北方地区内经济增长的系数都显著为负,但南方地区系数95%置信区间在北方地区左侧且二者无重叠部分,可见南方地区经济增长对能源效率的压力更大。技术创新对能源效率的促进作用存在异质性,南方地区技术创新系数的95%置信区间为0.365—0.508,北方地区技术创新系数介于

表3 分区域异质性估计

变量名	东部地区	中部地区	西部地区	北方地区	南方地区
<i>EC</i>	-0.304*** [-0.429, -0.178]	-0.186*** [-0.247, -0.126]	-0.482*** [-0.684, -0.281]	-0.208*** [-0.274, -0.142]	-0.530*** [-0.631, -0.429]
<i>UR</i>	1.389*** [0.470, 2.308]	1.094*** [0.407, 1.780]	3.086*** [1.079, 5.093]	0.205 [-0.401, 0.810]	3.156*** [2.292, 4.020]
<i>IU</i>	0.320*** [0.237, 0.403]	0.083*** [0.024, 0.141]	0.089 [-0.119, 0.297]	0.217*** [0.161, 0.274]	0.173*** [0.091, 0.256]
<i>TE</i>	0.224*** [0.151, 0.297]	0.093** [-0.001, 0.188]	0.066 [-0.102, 0.234]	0.081*** [0.025, 0.138]	0.436*** [0.365, 0.508]
<i>ES</i>	0.312 [-0.264, 0.888]	-2.041*** [-2.446, -1.637]	-1.200*** [-1.659, -0.740]	-0.489*** [-0.855, -0.123]	-0.663*** [-1.077, -0.250]
截距项	0.604 [-0.370, 1.578]	1.541*** [1.168, 1.914]	3.010*** [1.680, 4.340]	0.968*** [0.512, 1.423]	2.575*** [1.871, 3.279]

注:方括号中为95%置信区间,***、**、*依次表示在1%、5%、10%水平下显著。

资料来源:根据Stata计算结果整理。

0.025—0.138之间,表明南方地区的促进效果明显高于北方地区。城市化对能源效率的促进作用存在异质性,南方地区城市人口集聚有利于能源效率提高,而北方地区城市人口集聚对能源效率的促进作用并不显著,北方地区人口南迁导致劳动力大量流失,使得北方地区人力资本有所下降。

就东西方向而言,三大地区内部经济增长和城市人口集聚对能源效率的作用效果相近,产业升级、技术创新和能源结构的边际效应存在不同程度异质性。首先,产业升级对能源效率提高的促进作用仅在东部地区和中部地区显著,并且东部地区系数的95%置信区间在中部地区右侧,意味着东部地区产业升级对能源效率的弹性效应更强,同时也表明中西部地区要充分发挥第三产业对经济增长的带动效应。其次,东部和中部地区的技术支撑对能源效率提高的促进效果显著,西部地区技术创新水平有待加强,同时要充分发挥技术革新对能源效率提高的促进作用。最后,能源结构转型对能源效率提高的促进作用仅在中部和西部地区显著,东部地区表现为不显著的抑制作用,表明东部地区的能源消费结构问题急需得到改善,以山西为代表的煤炭消费结构和火力发电模式需要进一步优化。

六、结论与建议

(一)结论

本文基于2001—2020年中国省级面板数据,采用超效率SBM模型测度考虑环境规制的能源效率,

运用泰尔指数探究能源效率异质的主要来源,通过核密度估计法描述局部地区能源效率的内部差距与动态演进,借助面板数据模型分析能源效率的驱动因子及异质性,得出的主要结论有:其一,中国能源效率偏低,考察期内以2009年为拐点呈U形变化趋势,“十三五”时期处于有效状态的省份数量不断增加;地区间能源效率存在明显差异,东部地区效率水平高于中西部地区,南方地区能源效率高于北方地区。其二,中国能源效率的总体差距以2007年、2012年和2014年为拐点呈W形变化趋势,东西差距与南北差距交替成为总体差距的主要来源,“十五”和“十三五”时期南北差距略高于东西差距,“十一五”至“十二五”期间东西差距明显高于南北差距。其三,地区内差距是造成总体差距的重要原因,整个考察期内,除中部地区外,其他地区都出现过不同程度的极化现象。在东西方向上,东部和中部地区内部差距先缩小后扩大,高低水平差距明显拉大;在南北方向上,南方地区比北方地区的空间非均衡特征更加明显,但北方地区未来可能出现高低分化现象。其四,全国视角下,经济增长对能源效率的压力效应掩盖了其动力效应,城市人口集聚、第三产业壮大、R&D经费投入加强和煤炭消费占比降低都有利于提高能源效率水平,且不同时期内因子作用效果存在区别。其五,驱动因子的作用效果存在区域异质性,产业升级与能源结构对能源效率的区域异质性集中体现在东西维度上,经济增长与城市化对能源效率的区域异质性主要表现在南北方向上,技术创新对能源效率的作用效果同时存在东西差异和南北差异。

(二)建议

以环境规制为约束探究中国能源效率的区域差异与提升路径,不仅有助于促进能源结构转型发展、缓解能源供需矛盾,更对加快建设人与自然和谐共生的美丽中国具有重要实践意义。面对能源效率的水平低和差异化以及提升路径存在异质性问题,提出如下对策建议。

1.贯彻绿色发展理念,将可持续作为能源结构转型的根本目标

能源作为社会经济发展的必要保障,绿色发展既是实现“双碳”目标的必然选择,也是破解中国能源供需矛盾的重要途径。要深入贯彻绿色发展基本理念,不断优化“经济—能源—生态”三维可持续发展体系。在经济发展方面,积极引导各行各业朝集约式、可持续型方向发展,对于高效型、清洁型行业政府可以给予一定政策倾向;建立以市场为导向的绿色经济发展模式,绿色金融以支持绿色低碳发展为目的,该措施同样适用于绿色能源发展,绿色能源金融既是一项激励措施,还能为能源结构转型提供资本支持。在能源消费方面,将低碳、高效、可持续作为能源使用的出发点和落脚点,通过环境规制等措施促使企业广泛使用清洁能源;逐步扩大可再生能源与清洁能源的市场化规模,大力推进新能源在发电过程中的应用,同时还要提高化石能源的利用率。在生态保护方面,自然环境是人类赖以生存的基础,生产生活过程中要始终坚持人与自然和谐发展,绿色生活方式是构建美丽中国的必要前提。

2.落实创新驱动发展,将技术创新作为能源效率提高的第一动力

新增长理论认为,技术进步是社会经济发展的动力源泉,是提高劳动生产率与资本生产率的前提基础。在能源广泛利用的当代中国,技术创新同样是实现能源可持续发展的必要保障。一是要积极探索开发新型能源。大力发展风能、太阳能、水能等可再生能源,充分发挥非化石能源对化石能源的替代效用,特别是发挥对煤炭资源的替代作用。二是要完善绿色创新技术体系。建立“能源开发—能源使用—废物排放”等一系列流水线式污染物处理方案,积极推进新能源示范区、生态化工业区以及绿色技术园区建设。三是要加大基础研发与成果转化。优化科研经费投入结构,使科研投入能够发挥最大效用,以促进能源效率提高;完善绿色技术

专利保护措施,加大绿色技术知识产权保护力度;持续优化技术设备,通过设备研发、试点运营等措施降低能源无效使用率。

3.坚持协调发展模式,重视能源效率的区域异质性问题

协调发展是高质量发展的五大理念之一,坚持多维度协调发展模式是缩小区域发展差距的必由之路。一是要坚持区域协调发展。在充分考虑区域资源禀赋、地理环境与产业结构异质性的前提下,因地制宜地扩大区域能源协同合作,既要考虑南北差距,也要重视东西差异;既要统筹区域间差距,也不能忽略区域内差异。二是要坚持城乡协调发展。以城乡融合发展为导向,强化物质资本和人力资本等多种生产要素的城乡协同,将能源变革同新型城镇化建设、新农村建设对接;统筹城乡能源消费管理模式,提高城乡基础设施绿色化水平,提升农村地区绿色建筑品质。三是要坚持产业协调发展。能源消费与产业发展密不可分,在充分发挥第三产业对经济增长带动效应的同时,以第二产业为主导的实体经济也不容忽视,既要保证第二产业稳步发展,又要大力引导第二产业绿色发展。

参考文献

- [1]张士强,孟璐莎,李跃.能源产能空间集聚对区域能源效率的影响[J].中国人口·资源与环境,2021(5).
- [2]隋建利,米秋吉,刘金全.异质性能源消费与经济增长的非线性动态驱动机制[J].数量经济技术经济研究,2017(11).
- [3] Afonso T L, Marques A C, Fuinhas J A. Does Energy Efficiency and Trade Openness Matter for Energy Transition? Empirical Evidence for Countries in the Organization for Economic Co-Operation and Development [J]. Environment Development and Sustainability, 2021, 23 (9):13569—13589.
- [4]陈星星.非期望产出下我国能源消耗产出效率差异研究[J].中国管理科学,2019(8).
- [5] Mardani A, Zavadskas E K, Streimikiene D, et al. A Comprehensive Review of Data Envelopment Analysis (DEA) Approach in Energy Efficiency [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017(70):1298—1322.
- [6]关伟,许淑婷,郭岫垚.黄河流域能源综合效率的时空演变与驱动因素[J].资源科学,2020(1).
- [7]穆献中,周文韬,胡广文.不同类型环境规制对全要素能源效率的影响[J].北京理工大学学报(社会科学版),2022(3).

- [8]田成诗,张亚兵.中国多中心城市空间结构与能源效率关系[J].自然资源学报,2022(1).
- [9] Xu M T, Bao C. Quantifying the Spatiotemporal Characteristics of China's Energy Efficiency and its Driving Factors: A Super-RSBM and Geodetector Analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022(356):131867.
- [10]潘雄锋,李良玉,杨越.我国能源效率区域差异的时空格局动态演化研究[J].管理评论,2012(11).
- [11]周四军,罗丹,Wang Jiaying.中国能源利用效率 β 收敛性的区域研究[J].财经理论与实践,2017(3).
- [12]陈菁泉,连欣燕,马晓君,等.中国全要素能源效率测算及其驱动因素[J].中国环境科学,2022(5).
- [13]田泽,张怀婧,任芳容.环境约束下中国三大城市群能源效率评价与影响因素比较研究[J].软科学,2020(12).
- [14]吴巧生,李慧.长江中游城市群能源效率评价研究[J].中国人口·资源与环境,2016(12).
- [15]Tang K, Xiong C, Wang Y T, et al.. Carbon Emissions Performance Trend Across Chinese Cities: Evidence from Efficiency and Convergence Evaluation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 28(2):1533—1544.
- [16]Zhu J P, Lin B Q. Economic Growth Pressure and Energy Efficiency Improvement: Empirical Evidence from Chinese Cities [J]. *Applied Energy*, 2022 (307): 118275.
- [17]Lin B Q, Zhou Y C. Does Energy Efficiency Make Sense in China? Based on the Perspective of Economic Growth Quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(804):149895.
- [18]Xiong S Q, Ma X M, Ji J P. The Impact of Industrial Structure Efficiency on Provincial Industrial Energy Efficiency in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(215):952—962.
- [19]王林辉,杨洒洒,刘备.技术进步能源偏向性、能源消费结构与中国能源强度[J].东北师大学报(哲学社会科学版),2022(1).
- [20]安博文,肖义.财政科技投入对经济效益的作用机制研究[J].江汉学术,2022,41(5):50—61.
- [21]Tao C Q, Li C. Impact of Environmental Regulation on Total-Factor Energy Efficiency from the Perspective of Energy Consumption Structure [J]. *International Energy Journal*, 2018, 18(1):1—10.
- [22]刘学良,续继,宋炳妮.中国区域发展不平衡的历史动态、表现和成因:东西差距和南北差距的视角[J].产业经济评论,2022(2).
- [23]Tone K, Sahoo B K. Scale, Indivisibilities and Production Function in Data Envelopment Analysis [J]. *International Journal of Production Economics*, 2003, 84(2):165—192.
- [24]张宽,黄凌云.中国人力资本结构的时空演变特征研究[J].数量经济技术经济研究,2020(12).
- [25]安博文,侯震梅.客观AHP判断矩阵的构造方法研究[J].数量经济技术经济研究,2021(12).
- [26]安博文,黄寰.考虑时间特征的客观AHP判断矩阵构造方法[J].数量经济技术经济研究,2022(6).

Regional Heterogeneity of Energy Efficiency in China under Environmental Regulation

Li Baoxin Li Chunyu An Bowen Huang Huan

Abstract: Energy is the basic driving force for the leapfrog development of China's economy, and improving energy efficiency under the constraints of environmental regulations has become an important way to achieve high-quality energy development. Based on the panel data of 30 Chinese provinces from 2001 to 2020, the super-efficient SBM model is used to measure energy efficiency considering environmental regulations, and the dynamic evolution of regional differences and distribution of energy efficiency in China is revealed by using the Thiel index and kernel density estimation method, and the driving factors and heterogeneity of energy efficiency are analyzed by means of econometric models. China's energy efficiency is low, but the trend of growth since the 12th Five-Year Plan is obvious, and there are significant differences in efficiency levels between regions. The overall gap in energy efficiency in China is large, with the East-West gap alternating with the North-South gap as the main source of the overall gap. Intra-regional disparities are an important cause of overall disparities, and most local areas have experienced varying degrees of polarization during the study period. In the national perspective, economic growth has a suppressive effect on energy efficiency, urbanization, industrial upgrading, technological innovation and energy structure have a catalytic effect on energy efficiency, and there is regional heterogeneity in the effects of the drivers.

Key Words: Energy Efficiency; Heterogeneity; Undesired Super-SBM; Thiel Exponent Decomposition; Kernel Density Estimation

(责任编辑:柳 阳)