

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

董会忠 韩沅刚

摘要 作者选取“2+26”城市2009—2018年的面板数据，运用基于非期望产出下的SE-SBM模型测算各城市全要素能源效率，并通过面板门槛模型分析环境规制对全要素能源效率的约束效应。结果表明：（1）“2+26”城市的全要素能源效率逐年上升且区域差异显著，但其变动值呈波动下降趋势，纯技术效率退步是主要原因；（2）环境规制与全要素能源效率存在非线性关系，过分提高环境规制强度不一定会提升全要素能源效率；（3）环境规制约束下经济规模和技术水平对全要素能源效率提升的影响存在差异，大部分城市没有达到环境规制的最佳实施效果，说明经济规模和技术水平只有在合理的环境规制强度区间内才能有效实现波特效应。因此，“2+26”城市应该针对区域全要素能源效率的差异制定不同的政策措施，在合理的环境规制约束下有效控制高耗能、高排放产业规模，提高企业能源利用的技术创新能力，实现经济规模与技术水平对区域全要素能源效率的双重促进。

关键词 全要素能源效率 环境规制 SE-SBM “2+26”城市

[中图分类号] F427 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X(2020)03-0093-19

一、引言

改革开放以来，我国工业经济快速发展，工业经济规模已经跃居世界首位，但传统粗放型发展模式的“高能耗、高污染、低效率”特征依然没有得到根本解决，导

【基金项目】 国家社会科学基金项目“‘2+26’城市煤炭消费减量替代差异化路径与政策协同机制研究”（批准号：19BJY085）。

【作者简介】 董会忠（1968-），山东理工大学管理学院教授、硕士生导师，邮政编码：255000；韩沅刚（1994-），山东理工大学管理学院硕士研究生。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

致工业经济发展的环境附加成本持续上升,成为制约我国工业经济可持续发展的关键。因此,加快产业结构转型升级步伐,提高工业全要素能源效率,是减少能源资源消耗、降低环境污染水平的关键举措。作为我国工业较为发达的地区之一,京津冀及周边地区在传统发展模式没有得到根本改观的背景下,能源紧缺与环境负外部性的影响日益凸显。近年来京津冀及周边地区雾霾频发的现实表明该区域工业发展与环境保护之间的矛盾进一步加剧,为此,国家在《京津冀及周边地区2017年大气污染防治工作方案》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中将京津冀及周边地区28个城市(即“2+26”城市)^①列为大气污染传输通道城市,对该区域高能耗、高污染工业企业进行重点治理(程钰等,2019)。但是,在自上而下的政策环境下,“2+26”城市的社会发展阶段与水平差异往往被忽视,出现了企业简单关停、能源替代直接粗暴等“一刀切”问题,以及各自为政、效果不一等政策“孤岛”现象,致使环境政策失灵。在考虑区域环境压力异质性的基础上,如何合理制定政策组合才能提升环境规制对能源效率的驱动作用?如何理解环境规制提升能源利用效率路径多样化?识别这些问题,对提高区域环境政策的有效性、实现区域节能减排政策的协同推进具有重要现实意义。

有关全要素能源效率的研究已取得大量卓有成效的成果。能源效率的测度方式主要分为两个方面:一是仅从期望产出和能源投入角度考虑所得比值,即单要素能源效率,该方式计算过程简单,但存在一定的局限性,无法适用于计算多投入、多产出下的能源效率(黄杰,2018);二是考虑多投入、多产出角度下进行能源效率复杂计算,相较于前者,这一方法弥补了单要素能源效率无法考虑要素间替代作用的缺陷,能够准确测算多投入、多产出的能源效率(Hu et al., 2006)。随着研究的深入,部分学者开始将废水、废气等非期望经济产出引入效率测度框架中,以避免全要素能源效率测算产生的偏误(Wu et al., 2012)。常用的测度方法主要有随机前沿函数(SFA)和数据包络分析(DEA)两类,随机前沿函数在使用过程中需要事先确定生产函数形式,并且其产出类型具有唯一性,导致该模型难以处理多产出问题。而DEA模型摆脱了生产函数的束缚,并且解除效率值小于1的限制,能够进一步比较效率前沿面的样本差异。相比较而言,DEA模型测度方法更加合理科学。另外,学者们针对全要素能源效率影响因素也展开多角度研究,一般认为全要素能源效率在演进过程中受到能源消费结构、能源强度、产业集聚、技术水平和对外开放等多种因素的影响(罗会军等,2015)。而环境规制作为全要素能源效率的外部驱动因素,近年来已成为环境经济管理、能源经济等领域的研究热点(杨先明等,2016;李珊珊、马艳芹,2019),企业等相关利益主体在决策过程中往往会忽略环境污染的负外部性

^① 2015年,《京津冀空气重污染预警会商与应急联动工作方案》首次确立以北京、天津2座直辖市为中心,廊坊、保定、唐山、沧州4座河北地级市为主的“2+4”大气污染治理核心区。而随着大气污染防治力度的加大,到2017年初,原环境保护部将“2+4”城市扩大为“2+26”城市,新加入的城市包括河北省的石家庄、邢台、衡水、邯郸,山西省的太原、长治、晋城、阳泉,山东省的济南、淄博、聊城、菏泽、滨州、德州、济宁,河南省的郑州、开封、濮阳、新乡、焦作、鹤壁、安阳,统称为京津冀大气污染传输通道城市。

与环境能源的公共特性，政府采取环境管制干预措施有助于促使企业考虑外部成本因素，实现决策行为与经济可持续发展的吻合（Thomas and Callan, 2010）。目前的研究主要集中于环境规制的影响效果与作用机制方面，已有文献结合环境经济理论、计量经济模型以及空间分析法从宏观与微观空间层面、直接影响与中介效应等维度出发，研究环境规制对生态效率（雷玉桃、游立素，2018）、水资源效率（孙才志、赵良仕，2013）以及全要素生产效率（张建清等，2019）的影响机制。

关于环境规制对全要素能源效率的影响，学者基于不同的理论假说、案例分析和模型设定进行了大量实证研究，主要分为三种观点。第一种观点认为环境规制能够提升全要素能源效率。总体上环境规制不仅能够降低生产过程中环境污染的负外部性，还可以降低能源消耗，提升能源效率，抵消企业环境治理投资的生产成本，达到经济效益与环境效益的双赢局面（万伦来、童梦怡，2010；王艳丽、钟奥，2015）。第二种观点认为环境规制会抑制全要素能源效率。严格的环境规制会迫使企业加大环境污染治理投资力度，挤占企业用于生产活动的流动资金，导致企业生产经营活动的发展速度、扩张规模以及经济产出发生停滞，进而抑制全要素能源效率的提升（Walley and Whitehead, 1994；尤济红、高志刚，2013）。第三种观点认为环境规制对全要素能源效率的作用存在非线性、滞后性。非线性表现在环境规制在不同的强度区间和不同的规制组合下会对全要素能源效率产生异质性作用，如U型或倒U型的非线性关系（郭文，2016；王腾等，2017）。而滞后性表现在环境规制的实施需要一定的时间才能产生积极效果，短期内的观察会低估环境规制的正向作用（李鹏升、陈艳莹，2019）。

综上所述，国内外学者在全要素能源效率和环境规制的理论基础与渐进性研究上作出贡献，但环境规制对全要素能源效率的内在机理亟待深入探索与研究。全要素能源效率能够分解为纯技术效率与规模效率，一方面环境规制对全要素能源效率的影响可能作用于纯技术效率上，即通过“倒逼企业创新”实现技术进步、提高能源利用技术；另一方面环境规制又可能对规模效率产生影响，即限制生产规模、降低能耗强度。同时，全要素能源效率存在一定的时间演化趋势，因此具有一定的时间累积性，若不考虑全要素能源效率在各时间点间的联系，利用无时间关联的静态计量模型模拟环境规制对全要素能源效率的影响机制，会造成分析结果与基本事实偏离。因此，本文将采用SE-SBM模型分别测算全要素能源效率及其变动值，并对“2+26”城市的全要素能源效率进行分解，将其滞后项纳入门槛模型，构建动态面板门槛模型，具体分析环境规制影响全要素能源效率的经济规模与技术水平作用机理，探讨环境规制对全要素能源效率的影响机制，为完善环境治理政策体系以提高全要素能源效率提供参考依据。

二、研究设计与数据来源

（一）SE-SBM模型

“2+26”城市政策的核心就是淘汰落后耗能设备，开发清洁能源技术，提升能

源利用效率,改善区域空气质量。因此,本文从提升能源效率的角度出发,探究“2+26”城市的节能减排路径。

全要素能源效率是目标能源投入与实际能源投入的比值(张少华、蒋伟杰,2016)。其往往受到废气、废水等环境污染产出的约束,这些来自环境污染排放的产出要素会降低全要素能源效率的实际测算结果,被定义为非期望产出。传统的DEA模型一般从角度和径向维度对其进行测算(Charmes et al., 1979),忽视了非期望产出因素,难以解决要素松弛和投入冗余带来的效率结果失真问题。而SBM模型能够实现对期望产出与非期望产出的区分,将“多投入-单产出”的全要素能源效率测度扩展为“多投入-多产出”,解决了投入要素与产出要素的“拥挤”或“挤出”现象。SE-DEA模型与SBM模型的有机结合,解决了SBM模型不能比较有效决策单元的问题。测算全要素能源效率的SE-SBM模型可表示为:

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{i0}}{1 + \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s s_j^+ / y_{j0}} \quad \text{s. t.} \quad \begin{cases} x_0 = X\lambda + s^- \\ y_0 = Y\lambda - s^+ \\ \sum_{i=1}^n \lambda_j = 1, \lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, ρ 表示效率评价值; x_{i0} 和 y_{j0} 分别表示决策单元的第 i 个投入变量和第 j 个产出变量; X 和 Y 分别表示决策单元的投入和产出矩阵; s^- 、 s^+ 分别表示投入和产出冗余; λ 表示权重矩阵。

(二) DEA-Malmquist 指数模型

DEA-Malmquist指数模型是由统计学家Fare和Grosskopf(1990)提出,将非参数线性规划与DEA结合,分析研究期内全要素能源效率动态变化的方法。基于非期望产出SE-SBM模型,构建DEA-Malmquist指数模型,可定义为:

$$M_0^t(x_{t+1}, y_{t+1}, x_t, y_t) = d_0^t(x_{t+1}, y_{t+1}) / d_0^t(x_t, y_t) \quad (2)$$

其中, d_0^t 为 t 时期的方向性距离函数, (x_t, y_t) 、 (x_{t+1}, y_{t+1}) 分别为 t 、 $t+1$ 时期的投入产出向量。基于规模报酬不变的情况,将全要素能源效率变化(ML)分解为技术效率变化(EC)和技术进步(TC),技术效率变化是指对现有资源的利用能力,体现决策单元的管理能力,技术进步是测量决策单元技术效率的进步情况,即式(3):

$$ML = EC \times TC \quad (3)$$

其中, ML 大于1表示 t 期到 $t+1$ 期的全要素能源效率提高,小于1为下降趋势,等于1则表明没有变化。 EC 和 TC 为 ML 变化的来源,二者的指数变化趋势与 ML 相似,大于1表示会促进全要素能源效率的提高,小于1则表示会降低全要素能源效率。

规模报酬可变时,技术效率变化可进一步分解为纯技术效率变化(PTE)和规模效率变化(SE),全要素能源效率变化可表示为技术进步、纯技术效率变化、规模效率变化的乘积,即:

$$ML = EC \times TC = PTE \times SE \times TC \quad (4)$$

(三) 面板门槛模型

SE-SBM 模型中各投入产出指标对全要素能源效率具有一定的内部影响，而环境规制作为主要外部环境因素，其强度的高低对全要素能源效率存在显著影响。本文参照屈小娥等（2018）、徐建中和王曼曼（2018）的做法，以全要素能源效率作为被解释变量，以环境规制强度作为门槛变量，分别构建以经济规模、技术水平为解释变量的面板门槛模型。考虑到全要素能源效率提升存在一个持续累积的过程，引入被解释变量的滞后项，构建面板模型，并对选取变量进行对数化处理。

环境规制下经济规模对全要素能源效率的门槛模型为：

$$ML_{i,t} = \alpha_i + \beta_1 ML_{i,t-1} + \beta_2 \ln scale_{i,t} (\ln er_{i,t} \leq \gamma_{11}) + \beta_3 \ln scale_{i,t} (\gamma_{11} < \ln er_{i,t} \leq \gamma_{12}) + \beta_4 \ln scale_{i,t} (\ln er_{i,t} > \gamma_{12}) + \beta_5 \ln y_{i,t}^2 + \beta_6 \ln sp_{i,t} + \beta_7 \ln ti_{i,t} + \beta_8 \ln op_{i,t} + \beta_9 \ln c_{i,t} + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

环境规制下技术水平对全要素能源效率的门槛模型为：

$$ML_{i,t} = \alpha_i + \beta_1 ML_{i,t-1} + \beta_2 \ln tc_{i,t} (\ln er_{i,t} \leq \gamma_{11}) + \beta_3 \ln tc_{i,t} (\gamma_{11} < \ln er_{i,t} \leq \gamma_{12}) + \beta_4 \ln tc_{i,t} (\ln er_{i,t} > \gamma_{12}) + \beta_5 \ln y_{i,t}^2 + \beta_6 \ln sp_{i,t} + \beta_7 \ln ti_{i,t} + \beta_8 \ln op_{i,t} + \beta_9 \ln c_{i,t} + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

式（5）和式（6）中， $i=1, 2, \dots, M$ ； $t=1, 2, \dots, N$ ； $ML_{i,t}$ 表示全要素能源效率； $scale_{i,t}$ 、 $tc_{i,t}$ 分别表示 i 城市在第 t 期的工业销售产值、人均 R&D 经费投入，作为以上模型的解释变量； $er_{i,t}$ 表示环境规制强度，作为以上模型的门槛变量；其余变量作为控制变量； α_i 、 μ_i 和 $\varepsilon_{i,t}$ 分别表示截距项、时间固定效应和随机扰动项。

(四) 指标选取与数据来源

1. 全要素能源效率的测算

本文以由 SE-SBM 模型测得的 2009—2018 年京津冀及周边地区“2+26”城市的全要素能源效率为被解释变量，其投入产出指标选取与界定如下。①期望产出：以各城市地区生产总值作为衡量指标，采用 2000 年基期不变价格计算。②非期望产出：国内外学者大多选用单一污染物衡量非期望产出（Watanabe and Tanaka, 2007；Tu, 2008），然而单一污染物在衡量地区环境污染程度上存在片面性，本文根据工业生产中的污染物对环境的破坏程度，选用工业 SO₂、工业粉尘排放量、工业废水排放量作为非期望产出的衡量指标。③能源投入：以工业生产中煤炭、石油、天然气等 8 种主要化石能源的消费量核算工业能源消费量，通过折标煤系数将各种能源换算为以吨标准煤为单位的能源消费量，并进行加总得到各城市的工业能源消费总量。④劳动力投入：采用年末就业人员数作为劳动力投入指标。⑤资本投入：采用资本存量来衡量资本投入，并采用永续盘存法（张军等，2004）计算资本存量：

$$K_{i,t} = K_{i,t-1}(1 - \delta) + I_{i,t} \quad (7)$$

其中， $K_{i,t}$ 、 $K_{i,t-1}$ 分别为城市 i 在第 $t-1$ 、 t 年时的资本存量； $I_{i,t}$ 为城市 i 在第 t

年的实际资本投资增量,实际资本投资增量采用各城市的固定资产投资总额进行衡量。 δ 表示资本折旧率,借鉴单豪杰(2008)的做法,取10.96%作为统一值。统一计算之后,为与国民生产总值统计口径相一致,以2000年为基期,并以2000—2018年的投资增长率($\bar{g}_{i,2000-2018}$)对2000年的资本存量进行计算,并用式(7)扩展计算其余年份的资本存量。2000年资本存量的计算公式为:

$$K_{i0} = \frac{I_{i2000}}{\bar{g}_{i,2000-2018} + \delta_i} \quad (8)$$

2. 核心解释变量

(1) 经济规模(*scale*)。具有较大工业规模的城市依赖能源消费,能源的大量消耗能够带来更多经济效益,同时会诱导企业忽略环境效益,通过重复建设与低端产能扩张的方式维持经济产出,使能源消费规模进一步攀升,加剧环境恶化,导致能源效率下降(师博、任保平,2019)。由于2011年之后《中国工业统计年鉴》以及各地方年鉴不再公布工业总产值和工业增加值的数据,本文采用工业销售产值作为经济规模的衡量指标。

(2) 技术水平(*tc*)。技术水平的提升能够减少企业对低端能源的依赖,调整能源结构,开发新能源技术(李力、洪雪飞,2017),同时绿色技术创新也是治理大气污染有效方式之一。为探究“2+26”城市技术水平对全要素能源效率提升的影响,本文采用工业行业人均R&D投入衡量各城市技术水平,并以2000年为基期对各数据进行平减,所得数据用以衡量各城市的技术水平。

3. 门槛变量

本文采用环境规制强度(*er*)作为门槛变量。从环境治理的角度构造环境规制指标是现有研究的主要做法,衡量环境规制强度的方式主要包括单一指标法和综合指标法,考虑到各区域在环境税、污染物排放量、SO₂去除率以及工业废水达标率等单一指标上存在差异(牛丽娟,2016)以及不同城市数据口径各不相同,本文选取SO₂去除率、工业烟尘去除率以及工业固体综合利用率等指标,并采用熵值法综合计算得到各城市污染治理指数,用该指数衡量各城市环境规制强度,具体计算步骤如下。

第一步,对各污染物处理效率进行标准化处理,由于各指标方向均为正向,因此其表达式为:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (9)$$

其中, X_{ij} 表示第*i*个城市的第*j*种污染物处理效率的原始值, X'_{ij} 、 X_{\max} 、 X_{\min} 分别表示该原始值的标准化值、最大值和最小值。

第二步,计算第*j*类污染物在第*i*个城市的比重 P_{ij} :

$$P_{ij} = X'_{ij} / \sum_{i=1}^m X'_{ij} \quad (10)$$

第三步,计算第*j*类污染物的熵值 e_j :

$$e_j = \frac{-1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} (0 \leq e_j < 1) \quad (11)$$

第四步，计算第 j 类污染物的差异性系数 g_j ：

$$g_j = 1 - e_j \quad (12)$$

第五步，计算第 j 类污染物的权重 a_j ：

$$a_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j \quad (13)$$

第六步，计算第 i 个城市环境规制强度 er_i ：

$$er_i = \sum_{j=1}^n a_j P_{ij} \quad (14)$$

以上计算所用原始数据来源于《中国城市统计年鉴》、《中国环境年鉴》以及各市统计年鉴，其计算结果如图 1 所示，从线性趋势线可以看出，环境规制强度在研究期内总体呈上升趋势，同时整体水平在 75 以上，体现出“2+26”城市近十年来对环境治理的重视。

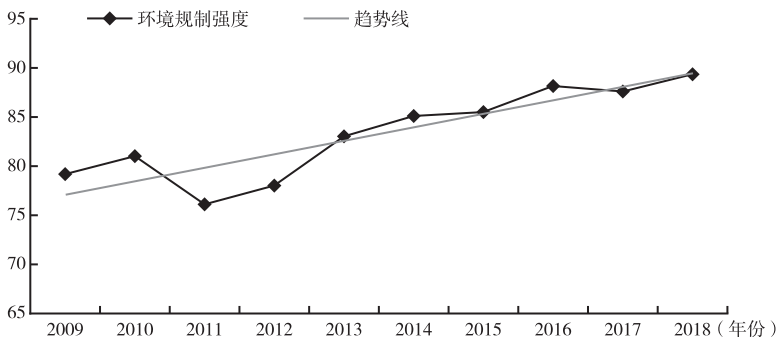


图 1 2009—2018 年“2+26”城市的环境规制强度

资料来源：作者绘制。

4. 控制变量

为降低变量遗漏对估计结果产生的偏误，本文选取以下指标作为控制变量。

(1) 经济发展水平 (y)。工业经济活动伴随能源消耗与污染排放，为揭示经济发展对能源节约与环境保护的影响机制，参考以往学者的做法（林伯强、蒋竺均，2009；汪克亮等，2013），本文选用人均 GDP 作为经济发展水平的衡量指标，并结合环境库兹涅茨假说将人均 GDP 二次项引入计量模型，以探究经济发展水平对全要素能源效率的影响是否存在非线性关系。

(2) 生产要素规模 (sp)。工业生产过程中生产要素的投入直接影响工业生产效率，进而影响工业生产中的能源利用效率，同时也可能存在生产规模扩大导致污染排

放严重等问题。本文以工业产业人员投入作为生产要素规模的衡量指标,分析其对全要素能源效率的影响。

(3) 产业结构 (ti)。第三产业发达程度是衡量国家产业发展水平的标志(周健, 2020),本文采用第三产业产值占地区生产总值比重表示产业结构,其指标值越大,表明产业结构越“清洁”,工业污染排放越少,能源利用效率越高(胡宗义、李毅, 2019)。

(4) 对外开放程度 (op)。本文以 FDI 占地区生产总值的比重衡量对外开放程度,考察其对全要素能源效率的影响。FDI 对能源效率影响存在不确定性,一方面 FDI 可能通过技术溢出效应提升东道国能源效率,成为东道国新旧动能转化的重要动力;另一方面 FDI 可能会导致低端产业转移到东道国,导致东道国沦为“污染天堂”并降低能源效率(李江, 2016)。

(5) 城镇化水平 (c)。本文以城镇人口占地区总人口比重衡量城镇化水平。城镇化水平的提升反映出城市居民生活质量的改善,但同时也可能产生环境恶化、交通拥挤等问题,导致城市能源消费激增、污染排放加剧。

5. 数据来源及描述性统计

本文选取 2009—2018 年为研究期。数据主要来源于历年《中国城市统计年鉴》《中国环境年鉴》《中国城市建设年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》等,部分城市缺失数据根据各省份统计年鉴数据、国民经济和社会发展报告进行校对与补充,主要变量的原始数据描述性统计如表 1 所示。

表 1 变量数据描述性统计

变量	指标	单位	样本容量	平均值	标准差	最大值	最小值
经济规模	$scale$	万元	280	4990.920	2.132	32027.174	632.511
技术水平	tc	万元	280	21.699	68.349	160.522	1.098
环境规制强度	er	无量纲	280	82.027	1.126	97.841	54.809
经济发展水平	y	亿元/人	280	175525	2.566	1663941	13600
生产要素规模	sp	万人	280	47.306	1.314	70.233	18.53
产业结构	ti	%	280	37.632	1.319	80.6	17.732
对外开放程度	op	%	280	21.180	6.492	42.994	8.719
城镇化水平	c	%	280	50.303	1.324	91.312	22.314

资料来源:作者计算整理。

三、实证研究

(一) “2+26”城市全要素能源效率的总体特征和效率分解

通过构建非期望产出下 SE-SBM 方向距离模型,本文借助 DEA 软件 MaxDEA,得

到“2+26”城市投入导向的全要素能源效率（见表2）。“2+26”城市全要素能源效率差异显著，研究期内始终位于全要素能源效率前沿面的有北京与天津2座城市，郑州、开封等城市仅在个别年份达到能源利用的有效水平，但多数城市存在能源低效率问题。全要素能源效率的变化可分为两个阶段，2009—2014年为稳定期，该阶段多数城市的全要素能源效率持续低迷；2015—2018年为增长期，2015年之后“2+26”城市的全要素能源效率逐渐提高，尤其是北京、天津等大气污染防治的先行城市，表明大气污染防治措施取得一定成效。但河北城市全要素能源效率低的情况并未得到根本转变，直到2017年，“2+26”城市的全要素能源效率才整体回升。这可能是由于原环保部等单位发布《京津冀及周边地区2017年大气污染防治工作方案》，首次提出“2+26”城市的概念，明确了京津冀及周边地区节能减排任务与生态文明建设的重要性，促进了经济发展模式向高质量发展转变，提升了区域整体全要素能源效率。

表2 2009—2018年“2+26”城市的全要素能源效率

城市	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
北京	1.000	1.064	1.064	1.060	1.058	1.054	1.086	1.086	1.155	1.134
天津	1.000	1.272	1.239	1.305	1.195	1.267	1.312	1.382	1.730	1.782
石家庄	0.221	0.267	0.269	0.278	0.309	0.303	0.359	0.362	0.503	0.435
唐山	0.130	0.178	0.133	0.136	0.152	0.148	0.150	0.158	0.167	0.197
廊坊	0.540	0.567	0.433	0.447	0.433	0.443	0.442	0.487	0.571	0.568
保定	0.520	0.694	0.567	0.643	0.702	0.678	1.028	1.099	1.329	1.341
沧州	0.450	0.475	0.521	0.510	0.500	0.511	0.533	0.549	0.616	0.653
衡水	0.450	0.527	0.519	0.520	0.521	0.528	0.550	0.594	0.779	0.727
邢台	0.273	0.310	0.291	0.296	0.334	0.289	0.289	0.299	0.393	0.336
邯郸	0.196	0.237	0.241	0.254	0.400	0.293	0.235	0.242	0.296	0.277
太原	0.451	0.471	0.450	0.446	0.462	0.397	0.383	0.390	0.444	0.456
阳泉	0.647	0.799	0.649	0.653	0.708	0.750	0.653	0.480	0.521	0.374
长治	0.286	0.304	0.241	0.231	0.251	0.234	0.185	0.187	0.189	0.188
晋城	0.404	0.403	0.349	0.356	0.356	0.350	0.248	0.241	0.258	0.251
济南	0.646	0.734	0.775	0.763	0.878	0.895	0.891	0.951	1.589	1.143
淄博	0.316	0.317	0.236	0.156	0.157	0.155	0.140	0.138	0.143	0.155
济宁	0.534	0.573	0.497	0.454	0.481	0.455	0.414	0.430	0.489	0.484
德州	1.000	1.042	1.038	1.068	1.182	1.163	0.976	1.043	1.036	1.126
聊城	0.910	0.911	0.974	0.951	0.939	0.954	0.840	0.797	0.956	1.105
滨州	0.911	0.991	0.978	0.962	0.954	0.941	0.864	0.785	0.761	0.870
菏泽	0.519	0.437	0.386	0.321	0.432	0.471	0.314	0.313	0.266	0.322
郑州	1.000	1.033	0.870	0.836	0.829	0.803	0.827	0.917	1.308	1.502
开封	1.000	0.879	0.887	0.810	0.805	0.798	0.680	0.741	0.807	1.143

续表

城市	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
安阳	0.394	0.431	0.403	0.409	0.423	0.424	0.392	0.393	0.473	0.438
鹤壁	0.510	0.539	0.495	0.489	0.561	0.568	0.640	0.698	0.684	0.744
新乡	0.514	0.623	0.601	0.622	0.725	0.757	0.658	0.659	0.864	0.834
焦作	0.564	0.614	0.608	0.650	0.699	0.722	0.711	0.720	0.781	0.729
濮阳	0.332	0.360	0.340	0.337	0.352	0.458	0.477	0.554	0.653	0.821
均值	0.561	0.609	0.573	0.570	0.600	0.600	0.581	0.596	0.706	0.719

资料来源：作者计算整理。

本文进一步采用 Malmquist 模型计算“2+26”城市全要素能源效率变动值 (ML), 并对其进行分解, 结果如表 3 所示。整个研究期内, 各城市的全要素能源效率变动值普遍大于 1, 说明“2+26”城市的全要素能源效率得到提升。而全要素能源效率变动值小于 1 的城市包括河北省的石家庄、唐山, 山西省的长治, 以及山东省的菏泽、淄博。其中, 石家庄、唐山的纯技术效率 (PTE) 大于 1, 规模效率 (SE) 小于 1; 长治和淄博正好相反; 菏泽的规模效率与纯技术效率则均小于 1。

表 3 2009—2018 年“2+26”城市全要素能源效率平均变动及分解

城市	ML	TC	EC	PTE	SE
北京	1.022	1.014	1.008	1.000	1.008
天津	1.060	1.053	1.007	1.017	0.990
石家庄	0.992	1.037	0.957	1.048	0.914
唐山	0.948	1.049	0.904	1.009	0.896
廊坊	1.004	1.041	0.964	0.976	0.989
保定	1.164	1.081	1.077	1.051	1.025
沧州	1.054	1.043	1.011	1.000	1.011
衡水	1.100	1.060	1.038	1.000	1.038
邢台	1.063	1.034	1.028	0.997	1.031
邯郸	1.048	1.060	0.989	1.005	0.984
太原	1.025	1.051	0.975	0.959	1.016
阳泉	1.419	1.054	1.346	0.919	1.464
长治	0.990	1.040	0.952	0.927	1.028
晋城	1.080	1.038	1.040	0.928	1.121
济南	1.111	1.051	1.057	1.027	1.030
淄博	0.941	1.007	0.934	0.932	1.002
济宁	1.004	1.031	0.974	0.970	1.004
德州	1.047	1.035	1.012	0.989	1.023
聊城	1.072	1.037	1.034	0.985	1.049

续表

城市	<i>ML</i>	<i>TC</i>	<i>EC</i>	<i>PTE</i>	<i>SE</i>
滨州	1.002	1.039	0.964	0.957	1.007
菏泽	0.978	1.023	0.956	0.960	0.996
郑州	1.047	1.084	0.966	0.976	0.990
开封	1.147	1.065	1.077	0.965	1.116
安阳	1.039	1.027	1.012	0.992	1.020
鹤壁	1.211	1.036	1.169	1.026	1.139
新乡	1.037	1.040	0.997	1.025	0.973
焦作	1.031	1.034	0.997	1.005	0.992
濮阳	1.229	1.092	1.125	1.019	1.104
均值	1.067	1.045	1.020	0.988	1.034

资料来源：作者计算整理。

鉴于所有城市的技术进步 (*TC*) 均达到效率前沿水平, 本文仅从全要素能源效率 (*ML*)、纯技术效率 (*PTE*)、规模效率 (*SE*) 变动趋势进行分析 (见图 2)。可以看出, “2+26”城市的全要素能源效率增长率在 2009—2018 年呈现波动下降趋势。根据 Malmquist 指数的效率分解来看, 规模效率除 2016 年小于 1 外, 其余年份均达到效率前沿水平, 说明“2+26”城市的工业生产规模对全要素能源效率的贡献较高。2010—2011 年和 2014—2015 年的全要素能源效率增长率小于 1, 主要受纯技术效率影响。能源的有效利用依赖要素投入与规模扩张, 充分发挥二者的作用离不开技术支持, 因此当生产管理水平出现退步时, 全要素能源效率随之下降。2016—2018 年, 纯技术效率有所上升, 同时全要素能源效率处于效率前沿水平, 这与“十三五”规划纲要实施现代能源建设政策的时间吻合, “2+26”城市在能源供给结构优化、能源生产利用方式变革的工作上取得成效, 能源利用效率得到改善, 但纯技术效率仍有较大提升空间。

(二) “2+26”城市全要素能源效率与环境规制的差异

为进一步分析“2+26”城市全要素能源效率差异的成因, 本文根据各城市技术效率分解的纯技术效率和规模效率, 以效率前沿面 (效率值 > 1.0) 为临界点将“2+26”城市分为双高型、高低型、低高型和双低型四类 (见图 3)。双高型城市整体上全要素能源效率较高, 包括北京、济南、保定、濮阳、鹤壁、沧州、衡水。高低型城市包括天津、石家庄、新乡、邯郸、唐山和焦作, 这些城市的纯技术效率大于 1, 而规模效率小于 1, 存在资源配置失衡和资金管理不当等问题, 应当重视企业生产规模的扩张, 合理整合与配置资源。菏泽、郑州和廊坊属于双低型城市, 亟须从技术与规模上进行调整, 既要合理调配工业企业资源, 又要兼顾工业技术进步。值得注意的是, 低高型城市数量的比重接近 50%, 这些城市的纯技术效率水平约束着全要素能源效率的提高, 可能是过去几年这些城市过于依赖能源资源要素的投入, 导致工业生

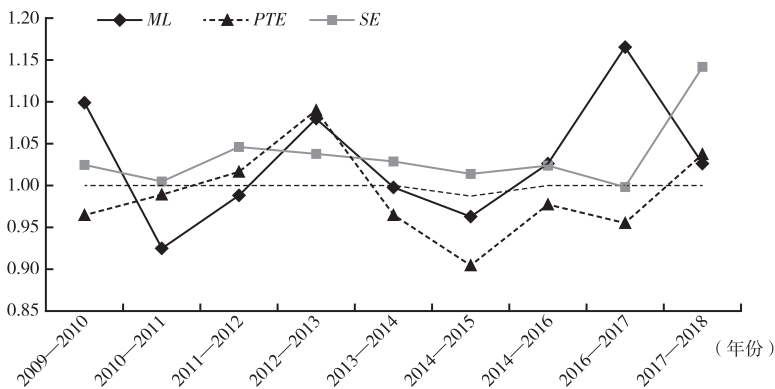


图2 2009—2018年“2+26”城市全要素能源效率变动趋势

资料来源：作者绘制。

产的高污染和低能效，同时也挤占了企业有限资金的使用，因此低高型城市需要提高企业资源调配能力和资金管理水平和资金管理水平，使纯技术效率的提高能够获得足够的物质与资金支持。

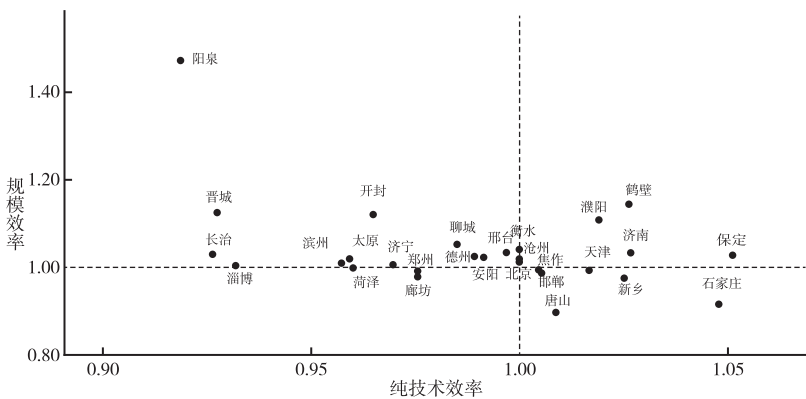


图3 “2+26”城市的纯技术效率与规模效率

资料来源：作者绘制。

从图4可以看出，环境规制强度与全要素能源效率之间并不存在明显的线性关系，环境规制强度高的城市全要素能源效率不一定高。例如淄博与阳泉的全要素能源效率均未达到效率前沿水平，但淄博的环境规制强度要远远高于阳泉。环境规制强度与全要素能源效率存在明显的空间分布异质性，这在一定程度上解释了环境规制强度与全要素能源效率的非线性关系。当然，要深入探究“2+26”城市环境规制强度对全要素能源效率的影响，还需要分角度对全要素能源效率的规模效率与技术水平进行分析。

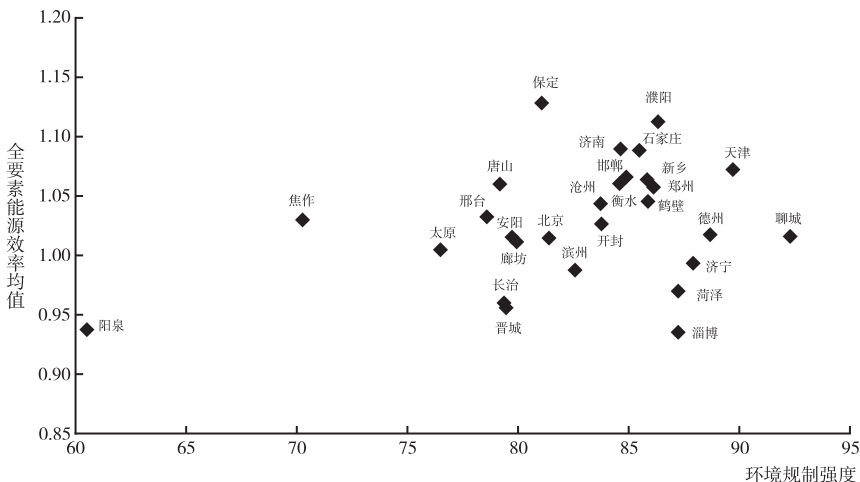


图 4 “2+26”城市的环境规制强度与全要素能源效率均值

资料来源：作者绘制。

（三）环境规制门槛效应检验

环境规制由于自身的约束性与激励性，会通过影响生产规模与技术投入等对企业能源使用产生影响，因此全要素能源效率的提升与环境规制强度密切相关（杨志江、朱桂龙，2017）。本文基于 Hansen（1999）的研究构建面板门槛模型，分别就经济规模与技术水平的环境规制门槛效应展开研究，探讨在不同环境规制强度下，经济规模与技术水平对全要素能源效率的影响，并以研究期初与期末的环境规制强度变动测评各城市的环境规制实施效果。

从表 4 可以看出，经济规模与技术水平存在环境规制门槛效应。以经济规模为解释变量时，环境规制的单一门槛和双重门槛检验分别在 1% 和 10% 的水平下显著；而以技术水平为解释变量时，环境规制仅有单一门槛显著。即经济规模对全要素能源效率存在双重环境规制门槛效应，双重门槛值分别为 4.355 和 4.576；而技术水平对全要素能源效率存在单一门槛限制，单门槛值为 4.251。

表 4 环境规制面板门槛估计及显著性检验

门槛变量	解释变量	门槛数	门槛值	F 值	1%	5%	10%	95% 置信区间	Bootstrap 次数
环境规制	经济规模	单一	4.355	13.359 ***	10.964	7.292	5.749	[4.097, 4.557]	300
		双重	4.576	2.837 *	20.170	11.487	8.913	[4.395, 4.576]	300
环境规制	技术水平	单一	4.251	6.134 **	6.669	5.030	3.565	[4.097, 4.558]	300
		双重	4.576	0.091	17.446	14.458	12.715	[4.404, 4.576]	300

注：***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的统计水平下显著。

资料来源：作者计算整理。

面板门槛模型的回归结果(见表5)表明,考虑到环境规制因素后,经济规模与技术水平对全要素能源效率的作用与动态面板模型的预期结果并不一致,二者对全要素能源效率的作用效果均不呈现单纯的线性影响。

(1) 经济规模边际效应先减后增。当环境规制强度 ≤ 4.355 时,经济规模影响系数为0.049且在5%的水平下显著。随着环境规制强度上升到4.355~4.576的区间内,经济规模系数有所下降,说明该区间内环境规制强度的上升对经济规模的正向边际效应产生抑制作用,导致经济规模无法充分发挥对全要素能源效率的促进作用。当环境规制强度大于4.576时,经济规模影响系数为0.069,相较于上两个阶段有了大幅度提升,即当环境规制强度处于此阶段时,经济规模对全要素能源效率的正向影响最大。整体而言,随着环境规制强度的提高,“2+26”城市的经济规模对全要素能源效率的影响呈现“J”型关系。可能的原因是“2+26”城市重工业企业主要依赖于能源投入、生产规模扩张等手段来提升经济效益,这样势必会抑制环境效益从而降低全要素能源效率。环境规制强度对经济规模的正向作用受环境政策实施时间长短的影响而存在差异,短期内由于政府在环境规制强度设定与规制工具组合上的不成熟,往往采取简单关停等强硬的环境治理措施,造成地方经济效益下降,使得环境规制实施效果不佳。随着地方政府逐步建立起规制强度得当和规制工具合理的环境治理体系,企业的生产规模扩张与能源要素投入等行为对全要素能源效率的促进作用开始得以充分发挥。

(2) 技术水平边际效应受限于环境规制强度的最优区间。与经济规模相比,技术水平的环境规制门槛值较低,说明技术水平相较于经济规模更容易跨越环境规制强度的门槛约束,发挥其对全要素能源效率的促进作用。当环境规制强度 ≤ 4.251 时,技术水平的系数符号为负,说明在此区间内技术水平抑制了全要素能源效率的提升,而随着环境规制强度逐渐越过门槛值,系数由负变正,表现为显著的促进作用。可见,技术水平对全要素能源效率的影响呈“V”型关系。可能的原因是,研究期初工业企业内部存在设备老化、技术低下以及人才比例失衡等问题,在相对宽松的环境规制下,政府干预无法起到“倒逼创新”的作用,企业在遵循成本效应与技术创新风险性的驱动下维持原有的生产模式,导致全要素能源效率下滑;而随着环境规制强度的提升,通过环境规制对高耗污染型企业的淘汰以及生产模式的更新,技术水平对全要素能源效率开始呈现促进作用,同时政府加大对清洁能源的推广力度以及对中小企业的能源补贴、技术研发补助投入,激发了企业技术创新动力,有效改善了企业的用能结构、用能技术以及污染治理能力,进而提升能源利用效率。

基于跨越门槛值情况,对2009年和2018年“2+26”城市的环境规制实施效果进行分析(见表5)。2009年,“2+26”城市大都克服了阻碍技术创新的环境规制门槛约束,但环境规制强度整体上较低,依然存在能源资源的过度使用与能源投入要素结构不均衡等问题,经济规模的扩张并没有实现对全要素能源效率的最优提升。2018年,“2+26”城市的环境规制强度整体提升,其中北京、天津等城市的环境规制效

果最佳，能够实现环境规制强度对技术水平和经济规模的协调驱动，促进全要素能源效率提升。石家庄、唐山、廊坊等 22 个城市经济规模的正向促进在环境规制的作用下不增反降，表明这些城市发展的重心逐渐由追求速度转向追求质量，使得环境规制约束下经济规模对全要素能源效率的促进由高度促进转为中高度促进。环境规制具有持续渐进性，这些城市应坚持并严格实施长期有效的环境规制政策，努力通过环境规制约束和规范企业能源过度消耗行为，循序渐进地提升清洁能源比重，缓解工业污染物排放所带来的环境压力，提升全要素能源效率。阳泉、济南的环境规制实施效果较差，这两个城市 2009 年和 2018 年的环境管制强度均较弱，政府对企业的污染行为监管力度过低，造成环境规制失效，技术水平与经济规模无法充分释放对全要素能源效率的正向促进作用。

表 5 面板门槛估计结果与城市统计

解释变量	区间划分	系数	2009 年“2+26”各城市 跨越门槛值情况	2018 年“2+26”各城市 跨越门槛值情况
<i>lnscale</i>	$lner \leq 4.355$	0.049** (1.98)	北京、唐山、保定、邢台、太原、阳泉、长治、晋城、开封、安阳、新乡、焦作	阳泉、济南、滨州
	$4.355 < lner \leq 4.576$	0.042* (1.79)	天津、石家庄、廊坊、沧州、衡水、邯郸、济南、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽、郑州、鹤壁、濮阳	石家庄、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、邯郸、太原、阳泉、长治、晋城、淄博、济宁、德州、聊城、菏泽、郑州、安阳、鹤壁、新乡、焦作
	$lner > 4.576$	0.069** (2.52)	无	北京、天津、开封
<i>lntc</i>	$lner \leq 4.251$	-0.012* (-1.92)	北京、阳泉、晋城、开封、焦作	阳泉、济南
	$lner > 4.251$	0.002** (2.33)	天津、石家庄、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、邯郸、太原、长治、晋城、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽、郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳	北京、天津、石家庄、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、邯郸、太原、长治、晋城、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽、郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳

注：门槛模型中其他控制变量的回归结果与动态模型仅系数与显著性发生变化，系数符号未发生改变，回归结果具有一定的稳健性；受篇幅所限，本文未列出控制变量的回归结果；括号内的值表示 t 值，**、* 分别表示在 5%、10% 的水平下显著。

资料来源：作者计算整理。

四、结论与建议

本文采用 SE-SBM 模型测度“2+26”城市的全要素能源效率，结合 Malmquist

指数效率分解将样本城市分类,考察纯技术效率和规模效率贡献对全要素能源效率的影响。在此基础上,基于“2+26”城市2009—2018年的面板数据,构建环境规制约束下的全要素能源效率门槛模型,验证经济规模和技术水平对全要素能源效率影响是否存在环境规制约束,并从各城市跨越门槛值的情况分析环境规制实施效果。主要结论如下。(1)环境约束下的城市全要素能源效率逐年上升,但其变动值呈波动下降趋势,主要原因是纯技术效率水平低下。未达到纯技术效率前沿水平的城市主要分布在河北省、山西省和山东省。(2)根据规模效率与纯技术效率是否有效将“2+26”城市划分为双高型、高低型、低高型、双低型四个类型。低高型城市的数量高于高低型城市,比重接近50%,说明“2+26”城市全要素能源效率整体的提升在于纯技术效率的提升。双高型城市主要分布在京津冀地区,双低型城市包括郑州、菏泽和廊坊3个城市。(3)经济规模和技术水平对全要素能源效率的作用受到环境规制的约束。环境规制约束下,经济规模边际作用始终为正,但正向作用随环境规制强度的增加先减后增,存在充分发挥经济规模促进作用的环境规制强度最优区间。而技术水平边际作用存在异质性,环境规制强度位于第一区间时,技术水平会抑制全要素能源效率,而跨越门槛后,技术水平的作用系数由负转正,开始促进全要素能源效率。“2+26”城市仅北京、天津和开封达到环境规制的最优实施效果,大部分城市仍需要及时加强对企业的监管调控。综合以上分析,本文提出以下政策建议。

第一,加大节能技术改造投入,改进与提升装备工艺水平。提高企业的生产技术和管理水平是提升“2+26”城市全要素能源效率的关键路径,各城市应鼓励企业增加技术改造投入,推广应用先进节能技术与装备,建立能源清洁利用技术中心、工程中心和实验室,不断降低能源消耗规模和强度。同时深入推进政产学研协同创新,加快节能技术成果转移与转化。

第二,限制高能耗型产业发展,不断优化能源消耗结构。“2+26”城市长期以来以低端高耗型工业为主的发展模式导致能源利用率低下与环境污染严重等问题,产业转型升级与能源结构调整是解决这一系列问题的重要推手。在产业转型方面,地方政府要围绕由资源依赖型向创新驱动型转变的方针,严格控制能耗较大的火电、石化、钢铁等产业,支持优势企业兼并、收购和重组落后产能,鼓励企业加快生产设备更新换代,倒逼产业转型升级。在能源结构方面,在现有节能财税政策上完善相关政策,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。

第三,完善环境法律法规,建立区域联控机制。“2+26”城市经济规模与技术水平的差异与内部环境规制强度不匹配,使得环境规制无法充分发挥波特效应,合理完善环境规制实施强度是“2+26”城市提升全要素能源效率的重要一步。应针对各城市经济规模与技术水平所处阶段,制定因时制宜、因地制宜的动态环境政策,调整不同类型城市的环境规制强度趋近各自最优规制区间,灵活利用绿色税收、绿色价格

与环境税等政策工具。同时，应开展区域联合执法监察，定期开展重点行业、企业能耗情况专项检查，实现“2+26”城市能耗监管的协同联动。

参考文献

程钰、刘婷、赵云璐等（2019）：《京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量时空演变与经济驱动机理》，《经济地理》第10期，第183~192页。

郭文（2016）：《环境规制影响区域能源效率的阈值效应》，《软科学》第11期，第61~65页。

胡宗义、李毅（2019）：《金融发展对环境污染的双重效应与门槛特征》，《中国软科学》第7期，第68~80页。

黄杰（2018）：《中国能源环境效率的空间关联网结构及其影响因素》，《资源科学》第4期，第759~772页。

雷玉桃、游立素（2018）：《区域差异视角下环境规制对产业生态化效率的影响》，《产经评论》第6期，第140~150页。

李江（2016）：《要素价格扭曲、外商直接投资对城市能源效率的影响——以中国260个地级市为例》，《城市问题》第8期，第4~13页。

李力、洪雪飞（2017）：《能源碳排放与环境污染空间效应研究——基于能源强度与技术进步视角的空间杜宾计量模型》，《工业技术经济》第9期，第65~72页。

李鹏升、陈艳莹（2019）：《环境规制、企业议价能力和绿色全要素生产率》，《财贸经济》第11期，第144~160页。

李珊珊、马艳芹（2019）：《环境规制对全要素碳排放效率分解因素的影响——基于门槛效应的视角》，《山西财经大学学报》第2期，第50~62页。

林伯强、蒋竺均（2009）：《中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析》，《管理世界》第4期，第27~36页。

罗会军、范如国、罗明（2015）：《中国能源效率的测度及演化分析》，《数量经济技术经济研究》第5期，第54~71页。

牛丽娟（2016）：《环境规制对西部地区能源效率影响研究》，兰州：兰州大学博士学位论文。

屈小娥、胡琰欣、骆海燕（2018）：《中国对外直接投资对能源环境效率的影响——基于我国吸收能力与制度环境的视角》，《现代经济探讨》第10期，第64~72页。

单豪杰（2008）：《中国资本存量K的再估算：1952~2006年》，《数量经济技术经济研究》第10期，第17~31页。

师博、任保平（2019）：《产业集聚会改进能源效率么？》，《中国经济问题》第1期，第27~39页。

孙才志、赵良仕（2013）：《环境规制下的中国水资源利用环境技术效率测度及空间关联特征分析》，《经济地理》第2期，第26~32页。

万伦来、童梦怡（2010）：《环境规制下中国能源强度的影响因素分析——基于省际面板数据的实证研究》，《山西财经大学学报》第S2期，第6~7页。

汪克亮、杨力、杨宝臣等（2013）：《能源经济效率、能源环境绩效与区域经济增长》，《管理科学》第3期，第86~99页。

王腾、严亮、何建华等（2017）：《环境规制影响全要素能源效率的实证研究——基于波特假

说的分解验证》，《中国环境科学》第4期，第1571~1578页。

王艳丽、钟奥（2015）：《工业行业环境规制、创新能力与全要素能源效率的实证检验》，《统计与决策》第15期，第139~142页。

徐建中、王曼曼（2018）：《绿色技术创新、环境规制与能源强度——基于中国制造业的实证分析》，《科学学研究》第4期，第744~753页。

杨先明、田永晓、马娜（2016）：《环境约束下中国地区能源全要素效率及其影响因素》，《中国人口·资源与环境》第12期，第147~156页。

杨志江、朱桂龙（2017）：《技术创新、环境规制与能源效率——基于中国省际面板数据的实证检验》，《研究与发展管理》第4期，第23~32页。

尤济红、高志刚（2013）：《政府环境规制对能源效率影响的实证研究——以新疆为例》，《资源科学》第6期，第1211~1219页。

张建清、龚恩泽、孙元元（2019）：《长江经济带环境规制与制造业全要素生产率》，《科学学研究》第9期，第1558~1569页。

张军、吴桂英、张吉鹏（2004）：《中国省际物质资本存量估算》，《经济研究》第10期，第35~44页。

张少华、蒋伟杰（2016）：《能源效率测度方法：演变、争议与未来》，《数量经济技术经济研究》第7期，第3~24页。

周健（2020）：《中国第三产业产业结构与就业结构的协调性及其滞后期研究》，《兰州学刊》第6期，第95~109页。

Charmes, A. W., W. W. Cooper and E. L. Rhodes (1979), "Measuring Efficiency of Decision-making Units", *European Journal of Operational Research*, 2 (6), pp. 429 - 444.

Fare, R. and S. Grosskopf (1990), "The Fisher Ideal Index and the Indirect Malmquist Productivity Index: A Comparison", *New Zealand Economic Papers*, 24 (1), pp. 66 - 72.

Hansen, B. E. (1999), "Threshold Effects in Non-dynamic Panels: Estimation, Testing, and Inference", *Journal of Econometrics*, 93 (2), pp. 345 - 368.

Hu, J. L., S. C. Wang and F. Y. Yeh (2006), "Total-factor Water Efficiency of Regions in China", *Resources Policy*, 31 (4), pp. 217 - 230.

Thomas, J. M. and S. J. Callan (2010), *Environmental Economics: Applications, Policy, and Theory*, America: Cengage Learning.

Tu, Z. G. (2008), "The Coordination of Industrial Growth with Environment and Resource", *Economic Research Journal*, (2), pp. 93 - 105.

Walley, N. and B. Whitehead (1994), "It's Not Easy Being Green", *Harvard Business Review*, 72 (3), pp. 46 - 51.

Watanabe, M. and K. Tanaka (2007), "Efficiency Analysis of Chinese Industry: A Directional Distance Function Approach", *Energy Policy*, 35 (12), pp. 6323 - 6331.

Wu, F., L. W. Fan and P. Zhou, et al. (2012), "Industrial Energy Efficiency with CO₂ Emissions in China: A Nonparametric Analysis", *Energy Policy*, 49 (1), pp. 164 - 172.

Evaluation and Improvement Strategy of “2 + 26” Cities’ Total-factor Energy Efficiency under the Constraints of Environmental Regulations

DONG Hui-zhong HAN Yuan-gang

(Business School, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The authors select the panel data of “2 + 26” cities from 2009 to 2018, use the SE-SBM model based on undesired output to measure the total factor energy efficiency of each city, and analyze the total factor energy efficiency of environmental regulations through the panel threshold model. The results show that: (1) The total factor energy efficiency of “2 + 26” cities has been increasing year by year with significant regional differences, but its change value shows a fluctuating downward trend, and the decline in pure technical efficiency is the main reason. (2) There is a nonlinear relationship between environmental regulation and total factor energy efficiency. (3) There are differences in the impact of economic scale and technological level on the improvement of total factor energy efficiency under the constraints of environmental regulation. Most cities have not achieved the best implementation effect of environmental regulation, indicating that the porter effect can be effectively exerted only when the economic scale and technological level are within a reasonable intensity range of environmental regulations. Therefore, “2 + 26” cities should formulate different policies and measures for the differences in regional total factor energy efficiency, effectively control the scale of high-energy-consuming and high-emission industries under the constraints of reasonable environmental regulations, and improve the technological innovation capabilities of enterprises in energy use. To achieve the dual promotion of economic scale and technological level of regional total factor energy efficiency.

Key Words: total-factor energy efficiency; environmental regulation; SE-SBM; “2 + 26” Cities

责任编辑：庄立