

引用格式: 闫庆友, 桂增侃, 张文华, 等. 中国能源影子价格和能源环境效率省际差异[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1040-1051.
[Yan Q Y, Gui Z K, Zhang W H, et al. The heterogeneity of regional energy shadow price and energy environment efficiency in China[J]. Resources Science, 2020, 42(6): 1040-1051.] DOI: 10.18402/resci.2020.06.03

中国能源影子价格和能源环境效率省际差异

闫庆友¹, 桂增侃¹, 张文华¹, 陈立忠²

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031)

摘要:为响应政府推进能源定价机制改革, 充分发挥市场配置资源的决定性作用。本文以能源影子价格为切入点, 基于共同前沿下SBM-Undesirable模型, 选取2000—2017年中国30个省份数据分别测算群组前沿和共同前沿下能源影子价格和能源环境效率, 分析其地区差异性和演变趋势, 然后利用面板数据模型对中国地区能源影子价格影响因素进行回归分析。结果表明: ①中国能源环境效率整体偏低, 且地区间技术差异性显著, 能源环境效率高、中、低3个群组之间技术落差比为1、0.571、0.614, 表明高水平组拥有最优的生产技术; ②群组前沿下中国能源影子价格呈现上升趋势, 表明中国能源要素的经济价值逐年提升, 而共同前沿下中国省际能源影子价格潜在提升空间呈现差异性, 云南可提升空间最大, 北京可提升空间最低; ③各影响因素对国家和各地区影响程度和作用方向不同, 市场化程度对高水平组省份有显著正向影响, 政府干预对中水平组省份有显著负向影响, 产业结构对低水平组省份有显著负向影响。据此提出: 各地在推进能源市场化改革时, 不应简单“一刀切”, 应考虑群组技术异质性, 制定差别化的能源定价机制。

关键词:能源影子价格; SBM-Undesirable; 共同前沿; 全要素能源环境效率; 中国

DOI: 10.18402/resci.2020.06.03

1 引言

面对日益严峻的能源供需矛盾和环境污染问题, 政府积极推进节能减排工作, 取得了一定成效。但这种依靠行政干预调节能源要素初始配置的方式, 不能充分发挥市场配置资源的作用, 能源价格不能真实反映能源稀缺性, 造成能源价格扭曲, 抑制了能源效率的进一步提高^[1-3]。中国政府在“十三五”能源规划中提出, 要深入推进能源价格市场化改革, 充分发挥能源市场配置资源的作用。为顺利推进能源价格改革, 必须建立合理反映能源资源稀缺程度、市场供求关系、生态环境价值的能源价格机制。能源影子价格从边际产出的角度体现能源稀缺性, 是衡量能源价格制定是否合理的重要依据, 且能源影子价格与市场价格之间的差距更能反映能源要素配置的状况^[4]。鉴于此, 本文希望通

过研究省际能源影子价格的差异性, 为各省(区、市)能源定价机制改革和能源要素配置优化提供决策依据。

在影子价格研究方面, 国内外学者主要利用参数化和非参数化两种方法研究生产要素的影子价格。参数化方法早期主要是利用Shephard投入或产出函数开展研究。例如, Zhang等^[5]基于Shephard产出距离函数估算中国省际碳排放影子价格, Tamaki等^[6]基于Shephard投入距离函数测算168个国家和地区32种矿产资源的影子价格。近年来, 一些学者开始采用方向距离函数测算影子价格, 相比Shephard距离函数, 方向距离函数摆脱了角度的约束, 允许期望产出增加的同时非期望产出减少。基于方向距离函数, 陈欣等^[7]和Zhao等^[8]测算了中国省际CO₂影子价格, Wang等^[9]则从行业层面测算了

收稿日期: 2019-09-30; 修订日期: 2020-02-10

基金项目: 北京市社会科学基金项目(16JDGLB032); 国家电网有限公司科技项目(1300-201957273A-0-0-00)。

作者简介: 闫庆友, 男, 山东茌平人, 教授, 主要从事能源经济与管理研究。E-mail: yanqingyou@263.net

通讯作者: 桂增侃, 男, 河北冀州人, 硕士研究生, 主要从事能源经济与管理研究。E-mail: gzkm@mail@126.com

2020年6月

中国CO₂的边际减排成本。非参数方法则是以数据包络方法(DEA)为主,优点是不需要设定具体函数形式,适合多投入多产出系统。基于DEA模型, Singbo等^[10]测算了蔬菜生产中农药和用水的影子价格。Choi等^[11]和Yan等^[12]利用SBM模型测算了中国省际碳减排成本。在能源影子价格研究方面, Sheng等^[13]基于Shephard投入距离函数测算了1998—2011年中国省际能源影子价格,结果显示中国各地能源影子价格普遍高于市场价格。Lai等^[14]进一步分析了煤、石油、天然气和电力4种能源的影子价格,认为能源价格市场化是改善能源效率的关键因素。吴凡等^[14]分别测算了单要素、多要素和全要素配置下的能源影子价格,结果表明不同配置下能源市场价格均未合理反映能源要素稀缺性。上述研究普遍使用径向、角度的测算方法,忽略了投入和产出要素的松弛性问题,可能会导致高估效率^[15]。所以本文引入松弛变量,选择更灵活的SBM模型测算能源影子价格。

另外,由于中国区域发展不平衡,各省(区、市)在经济发展、资源禀赋、产业结构等方面存在显著差异,能源市场机制不健全,省间能源壁垒突出。因此中国省际能源技术存在异质性,其生产前沿也一定存在差异性,再继续使用总体进行评价必然不能反映真实情况^[16,17]。Battese等^[18]考虑决策单元技术异质性提出了共同前沿理论,依据某一标准将决策单元划分为不同群组,并分别构建生产前沿。基于共同前沿理论,方琳等^[19]和Long等^[20]测算了中国农业用水效率和农业环境效率,国涓等^[21]测算了中国省际能源环境效率, Lin等^[22]利用SBM模型测量中国4个能源密集型行业的能源效率, Li等^[23]进一步对比分析轻重工业技术落差比和能源效率,聂磊等^[24]利用SBM模型测算了中国238个地级市的建设用地效率。上述研究表明共同前沿理论可有效解决技术异质性下的效率和影子价格测度问题。因此,本文利用共同前沿下的SBM模型对中国省际能源影子价格和能源环境效率进行测算,分析不同地域能源影子价格和能源环境效率的差异及变动趋势,以期各地制定合适的能源定价机制提供理论支撑。

相较于以往研究,本文在以下3方面进行拓展: 第一,考虑投入和产出要素的松弛和环境规制问

题,引入环境变量,利用SBM-Undesirable模型测算地区能源环境效率和影子价格,避免高估能源环境效率和能源影子价格;第二,考虑地区绿色生产技术具有异质性,利用共同前沿理论研究地区能源影子价格,更能真实反映地区能源稀缺性情况;第三,利用面板数据模型分析外部环境影响因素对能源影子价格的影响,以明确区域能源影子价格影响因素和影响机制。

2 模型构建

2.1 能源影子价格测度模型

假设有 N 个决策单元,每个决策单元使用 M 个投入要素 $x \in R_+^M$ 可以生产 Z 个期望产出要素 $y \in R_+^Z$ 和 J 个非期望产出要素 $b \in R_+^J$, 生产技术 T 定义为 $T = \{(y, b) | x \text{ produce}(y, b)\}$, 它须同时满足:

- ① x 和 y 具有强可处置性。即如果 $(x, y, b) \in T$, $x' \geq x$ (或者 $y' \leq y$), 那么 $(x', y, b) \in T$ (或者 $(x, y', b) \in T$)。
- ② y 和 b 符合零和性。即如果 $b = 0$, 那么 $y = 0$, 说明 y 和 b 是同时产生的, 只要有 y 产生, 那么 b 一定也会产生。

$$\begin{aligned} \rho = \min & \frac{1 - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{s_{mo}^x}{x_{mo}}}{1 + \frac{1}{Z+J} \left(\sum_{z=1}^Z \frac{s_{zo}^y}{y_{zo}} + \sum_{j=1}^J \frac{s_{jo}^b}{b_{jo}} \right)} \\ \text{s.t. } & x_{mo} = \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{mn} + s_{mo}^x; \\ & y_{zo} = \sum_{n=1}^N \lambda_n y_{zn} + s_{zo}^y; \\ & b_{jo} = \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{jn} + s_{jo}^b; \\ & s_{mo}^x \geq 0, s_{zo}^y \geq 0, s_{jo}^b \geq 0, \sum_{n=1}^N \lambda_n = 1 \end{aligned} \tag{1}$$

式中: λ_n 是一个非负向量,表示指标权重,下角标 n 表示决策单元个数, $\lambda_n \geq 0$ 表示规模报酬不变,如果施加约束 $\sum_{n=1}^N \lambda_n = 1$,则表示规模报酬可变,本文假设规模报酬可变;下角标“ o ”代表被评价的决策单元; s_{mo}^x 、 s_{zo}^y 、 s_{jo}^b 分别表示 x_{mo} 、 y_{zo} 、 b_{jo} 的松弛变量,反映了投入要素潜在的减少量、产出要素潜在的增加量和非期望产出潜在减少量; m 、 z 、 j 分别表示投入、期望产出和非期望产出指标的个数。目标函数 ρ 是严格递减的,且 $0 < \rho \leq 1$ 。假设 $(x_{mo}^*, y_{zo}^*, b_{jo}^*)$ 为式(1)最优解,那么当且仅当 $\rho = 1$, $s_{mo}^{x*} = s_{zo}^{y*} = s_{jo}^{b*} = 0$

时,决策单元有效;当 $\rho < 1$ 时,决策单元的效率值处于群组前沿下方。式(1)为非线性规划模型,可通过 Charnes-Cooper 变换,将其转化为线性规划形式:

$$\begin{aligned} & \max u^y y_o - u^x x_o - u^b b_o \\ \text{s.t. } & \sum_{z=1}^Z u_z^y y_{zo} - \sum_{m=1}^M u_m^x x_{mo} - \sum_{j=1}^J u_j^b b_{jo} \leq 0; \\ & u^x \geq \frac{1}{M}(1/x_o); \\ & u^y \geq \frac{1 - u^x x_o - u^b b_o + u^y y_o}{Z + J}(1/y_o); \\ & u^b \geq \frac{1 - u^x x_o - u^b b_o + u^y y_o}{Z + J}(1/b_o) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: u_m^x 、 u_z^y 、 u_j^b 分别表示要素 x_{mo} 、 y_{zo} 、 b_{jo} 的价格。在完全竞争市场环境中,企业追寻利益最大化原则,即边际成本等于边际收益,以期达到要素的合理分配。假设 P^x 、 P^y 、 P^b 分别表示投入要素、期望产出要素和非期望产出要素的影子价格,参照陈诗一^[25]的研究,设期望产出的影子价格等于市场价格或标准化为 1,那么投入要素的绝对影子价格 P^x 就可以用 P^y 表示为:

$$P^x = P^y \cdot \frac{u^x}{u^y} \quad (3)$$

根据共同前沿理论, N 个决策单元被分为 H 个群组,群组 h 内的决策单元为 $n = \{1, 2, \dots, N_h\}$, 其技术集合 T_h 可表示为:

$$T_h = \left\{ (x_h, y_h, b_h); \sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n x_n \leq x_h; \sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n y_n \geq y_h; \sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n b_n \leq b_h; \sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n = 1 \right\} \quad (4)$$

式中: x_h 、 y_h 、 b_h 分别表示群组 h 内决策单元的投入指标、期望产出指标和非期望产出指标; $\sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n = 1$ 表示规模报酬可变。与群组技术集合 T_h 不同,共同前沿下技术集合 T^{meta} 包含所有群组技术,即 $T^{\text{meta}} = \{T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_h\}$ 。那么共同前沿下技术集合 T^{meta} 可表示为:

$$T^{\text{meta}} = \left\{ (x, y, b); \sum_h \sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n x_n \leq x; \sum_h \sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n y_n \geq y; \sum_h \sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n b_n \leq b; \sum_h \sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n = 1 \right\} \quad (5)$$

式中: x 、 y 、 b 分别表示共同技术集合内决策单元的投入指标、期望产出指标和非期望产出指标;

$\sum_h \sum_{n=1}^{N_h} \lambda_n = 1$ 表示规模报酬可变。

在技术集合 T_h 和 T^{meta} 约束下,决策单元在群组前沿与共同前沿下能源影子价格可分别表示为 P_h 和 P^{meta} , 而全要素能源环境效率分别表示为 $E_h = (e_o - s_{ho}^e)/e_o$ 和 $E^{\text{meta}} = (e_o - s_o^e)/e_o$ 。 e_o 表示能源要素实际投入量, s_{ho}^e 和 s_o^e 分别表示群组前沿和共同前沿下能源要素投入松弛变量。而共同技术落差比 $TGR = E^{\text{meta}}/E_h$, 反映了群组技术水平与最优生产技术间差异,其数值越大,表示距离最优生产技术越接近。为了更好地区分制约能源环境效率提升的根本因素,参考 Chiu 等^[26]研究,将能源无效率 (E^{TOI}) 分解为技术无效率 (E^{T}) 和管理无效率 (E^{M}), 分别表示为:

$$E^{\text{T}} = E_h(1 - TGR) \quad (6)$$

$$E^{\text{M}} = 1 - E_h \quad (7)$$

2.2 能源影子价格影响因素分析模型

根据 Sheng 等^[13]和吴凡等^[14]的研究,能源影子价格影响因素主要有产业结构、市场化程度、政府干预、能源禀赋和能源消费结构等。其中,产业结构 (IS) 用第二产业增加值占 GDP 比重表示,市场化进程 (MR) 使用樊纲市场化指数表示,政府干预程度 (GI) 用地区财政支出占 GDP 比重表示,能源禀赋 (EE) 用地区人均能源生产量与全国人均能源生产量比值表示,能源消费结构 (EC) 用能源终端消费量中煤炭占比表示。

为探索能源影子价格的影响因素及作用机制,本文以能源影子价格为被解释变量,选取产业结构、市场化程度、政府干预、能源禀赋和能源消费结构作为解释变量,构建面板数据模型:

$$Y_{it} = c + \beta_1 X_{1, it} + \beta_2 X_{2, it} + \beta_3 X_{3, it} + \beta_4 X_{4, it} + \beta_5 X_{5, it} + \alpha_i + u_{it} \quad (8)$$

式中: i 表示决策单元; t 表示时间; Y 表示能源影子价格; X_1 为政府干预 (GI); X_2 为产业结构 (IS), X_3 为市场化进程 (MR); X_4 为能源禀赋 (EE); X_5 为能源消费结构 (EC); $\beta_1 - \beta_5$ 分别表示各因素的回归系数; α_i 表示被忽略的反映地区差异性的变量; u_{it} 表示随机误差项。

3 数据来源及群组划分

3.1 数据选取及来源

由于西藏及港澳台地区相关统计资料缺失,本

文以2000—2017年中国30个省(区、市)为研究对象,取资本存量、能源消费、劳动力作为投入指标,GDP和环境污染指数分别作为期望和非期望产出。资本存量 k ,借鉴张军等^[27]的永续盘存法,以2000年为基期,测算2001—2017年资本存量。劳动力 l ,选取社会就业人数^①,以当期年末从业人数与上年年末从业人数的平均值表示。能源消费 e ,选取各省(区、市)年末能源终端消费量进行测算。地区国民生产总值 g ,以2000年为基年,2001—2017年数据按2000年不变价进行平减得到。环境污染综合指数 c ,选取SO₂、CO₂、化学需氧量(COD)和工业固体废弃物4种污染物,利用熵权法将其拟合合成环境污染综合污染指数。所有数据均来自《中国统计年鉴》^[28]、《中国能源统计年鉴》^[29]和各省份统计年鉴。

3.2 群组划分

传统群组划分一般根据地理位置或行政区划来划分,这种方法简单但易忽略资源禀赋和制度环境等外部因素,导致分组结果不理想,使得群组内单元生产技术的相似性较差,组内效率最优单元对其他低效单元起不到有效的指导作用。因此本文选取资本存量、人均能源消费、劳动力、人均GDP、环境污染指数5个指标,利用SPSS软件进行K-

means聚类分析,计算各个样本到聚类中心的欧氏距离,将30个省(区、市)划分到距离其最近的聚类中心所在的类。根据聚类结果将其划分为3个群组,群组A:北京、天津、上海、江苏、浙江、福建、广东、海南、辽宁共9个省(市);群组B:吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南、广西、重庆、四川、陕西共11个省(区、市);群组C:河北、山西、内蒙古、山东、贵州、云南、甘肃、青海、宁夏、新疆共10个省(区)。聚类结果呈现较强的地域特征,群组A中的省(市)全部位于沿海地区;群组B中的省(区、市)以中部地区为主,包含四川、重庆等经济发展较好的西部地区;群组C中省(区)则包含河北、山东、山西以及7个西部欠发达地区,河北和山东的二产比重分别为51.2%和52.1%,位列第2名和第4名;高耗能产业的比重分别占42.7%、32.8%,环境污染指数位列第1名和第2名,导致被划分到C组。

如表1所示,A组中省(市)在经济发展、资本存量方面都远高于其他地区,同时在能源消费较高的情况下造成的环境污染却很低,表明该组拥有最优的绿色生产技术,主要是广东、上海、江苏等经济发展较好、产业结构较为合理的沿海省份。B组中省(区、市)在经济发展、资本存量、环境污染指数方面

表1 聚类结果的投入产出变量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of inputs and outputs

	变量	单位	平均值	最大值	最小值	标准差
A组	资本存量	亿元	33712.932	177723.015	1157.632	33000.163
	劳动力	万人	2283.834	6310.014	330.974	1705.803
	能源消费量	万t标准煤	11880.717	32342.004	479.955	8389.987
	地区生产总值	亿元	14687.278	62401.513	526.829	12816.087
	环境污染指数		0.193	0.595	0.013	0.154
B组	资本存量	亿元	25605.809	141653.974	2375.282	24906.032
	劳动力	万人	3040.019	6746.432	1044.624	1415.241
	能源消费量	万t标准煤	9909.742	23647.109	2329.007	5124.148
	地区生产总值	亿元	8547.678	29348.583	1747.442	5666.173
	环境污染指数		0.216	0.509	0.091	0.092
C组	资本存量	亿元	20801.614	190365.189	710.265	29382.224
	劳动力	万人	1964.539	5960.014	238.578	1530.583
	能源消费量	万t标准煤	11319.868	38899.253	897.219	9259.562
	地区生产总值	亿元	6739.013	51736.438	294.534	8783.717
	环境污染指数		0.267	0.785	0.014	0.190

① 就业人数用相邻两年年末社会从业人数的平均值,而不是当年年末全社会从业人数来衡量劳动力投入量,可以在一定程度上剔除劳动力短期波动对劳动力真实数量的影响。

均处于中等水平,而从业人数最高,这表明该组省份劳动密集型产业较多,主要为河南、湖南、湖北等能源环境效率一般的省份。C组中省(区)在经济发展、资本存量方面最低,同时在能源环境方面表现较差,多为能源生产大省或煤炭消耗大省,例如山西、内蒙、河北等地,依赖于能源消耗拉动经济发展。

4 结果与分析

4.1 中国能源环境效率实证分析

如图1,在共同前沿下,A、B和C 3个群组能源环境效率分别为0.738、0.507和0.382,群组差异性显著,A组能源环境效率远高于B、C组,表明A组省份能源使用表现良好。根据其能源环境效率的大小,将A、B、C组分别定义为高水平组、中水平组、低水平组。如采用潜在最优生产技术,3个群组分别有0.262、0.493、0.618能效提升空间,节能潜力巨大。从全国范围来看,能源环境效率最高的依次为广东、海南、北京三地,全部处于A组,而山西、贵州、新疆等地能源环境效率最低。在群组前沿下A、B和C 3个群组能源环境效率分别为0.738、0.887和0.623,表明在现有技术水平上3个群组能源环境效率将分别有0.262、0.113和0.377提升空间。从群组内部来看,A组中广东和海南能源环境效率最高,且接近于1,辽宁能源环境效率仅为0.562,节能潜力最大;B组中江西、安徽能源环境效率最高,吉林能

源环境效率最低;C组中青海能源环境效率最高,山西能源环境效率最低。

技术落差比(TGR)反映了特定群组技术水平与潜在最优技术水平之间的缺口,其值越大,表明决策单元的技术水平越接近潜在的最优技术水平。A、B、C 3个群组技术落差比分别为1、0.571、0.614。A组技术落差比多年均值为1,说明A组拥有潜在的最优绿色生产技术,与Zhang等^[16]研究的结果一致,A组内各省(市)处于沿海地区,市场环境良好,对外资吸引力较大,自主创新和管理模式较为先进。而B、C两组技术落差比相对较小,表明技术落后是制约B、C组能源环境效率提高的关键因素。从动态角度来看(图2),2000—2017年,A组技术水平比较平稳,且一直处于领先地位。B、C两组技术落差比则先降后升,且C组高于B组,与Yao等^[30]研究的结果一致。主要因为B、C组省(区、市)大多位于传统中西部地区,随着劳动力和环境成本持续上升,政府鼓励东部地区劳动密集型产业和资源密集型产业向中西部地区转移,东部地区开始出现去工业化的趋势,制造业逐步迁移至自然资源丰富的中西部地区,尤其是一些高耗能高污染的资源密集型产业,带动了中西部地区经济增长的同时也导致能源消费和环境污染的快速上升,致使B、C组技术落差比与A组差距拉大,但随着经济进入“新常态”,政府鼓励高耗能、高污染行业减产转型,B、C

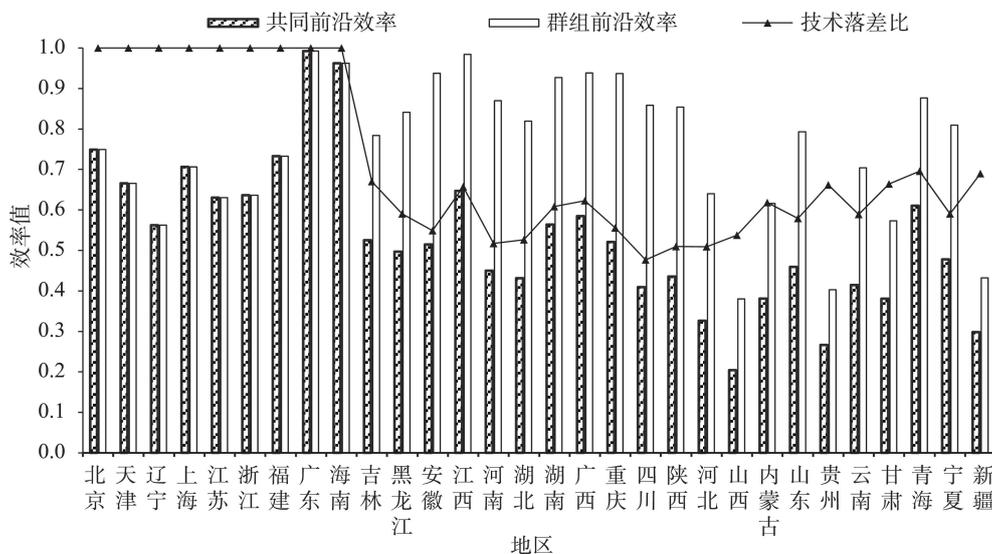


图1 2000—2017年共同前沿和群组前沿下中国省际能源环境效率值对比图

Figure 1 Energy environment efficiency under group-frontier and meta-frontier, 2000-2017

2020年6月

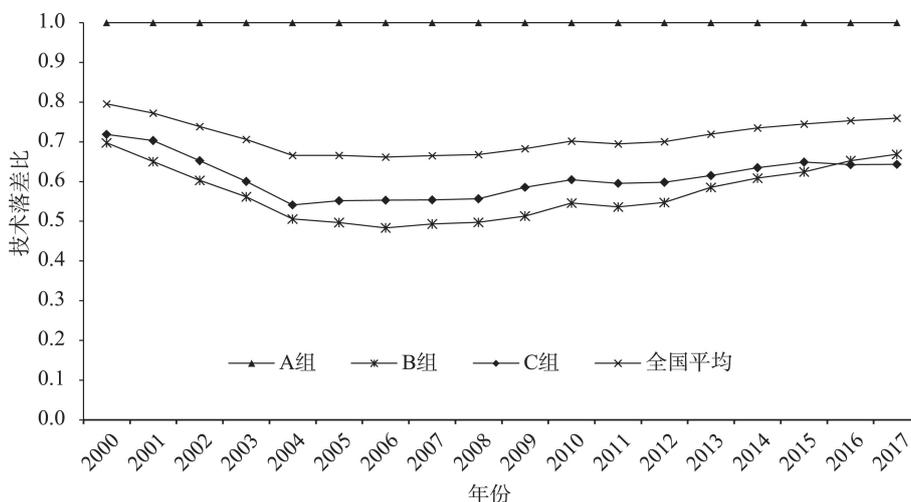


图2 2000—2017年中国地区间技术落差比率变化趋势图

Figure 2 Trends of technology gap in three types of areas in China, 2000-2017

组技术落差比呈现上升趋势。

为深入剖析制约各省能源环境效率提升的主要因素,本文利用式(6)和式(7)分别测算2000—2017年30个省(区、市)年平均 E^{Tot} 、 E^T 、 E^M 。另外,设定当某省的技术无效(管理无效)占比超过40%时就认定应着重改进该项能力。如表2,中国能源无效均值为0.465,节能潜力巨大,有17个省(区、市)制约能源环境效率提升因素为管理,其中

山西(0.620)、贵州(0.597)、新疆(0.568)3省(区)管理水平改善空间巨大。有16个省(区、市)制约能源环境效率提升因素为技术,其中四川(0.449)、安徽(0.423)、河南(0.420)3省技术无效率值最高。另外,吉林、河北和云南3省无论是技术还是管理都处于无效区,因此3省在重点改善管理能力的同时也应通过技术交流,进行生产技术革新。就群组内部来看,A组能源无效均来自于管理,其中辽宁最高

表2 中国各省能源无效率分解及改善策略

Table 2 Decomposition and improvement potential of energy inefficiency in some selected provinces in China

地区	E^{Tot}	E^T	E^M	改善策略		地区	E^{Tot}	E^T	E^M	改善策略			
				技术	管理					技术	管理		
A组	北京	0.251	0.000	0.251	✓								
	天津	0.334	0.000	0.334	✓								
	辽宁	0.438	0.000	0.438	✓								
	上海	0.293	0.000	0.293	✓								
	江苏	0.369	0.000	0.369	✓								
	浙江	0.363	0.000	0.363	✓								
	福建	0.267	0.000	0.267	✓								
	广东	0.007	0.000	0.007	✓								
	海南	0.037	0.000	0.037	✓								
	平均	0.262	0.000	0.262									
B组	吉林	0.475	0.259	0.216	✓	✓	广西	0.415	0.354	0.061	✓		
	黑龙江	0.503	0.345	0.158	✓		重庆	0.479	0.416	0.063	✓		
	安徽	0.485	0.423	0.062	✓		四川	0.591	0.449	0.141	✓		
	江西	0.353	0.337	0.016	✓		陕西	0.564	0.419	0.146	✓		
	河南	0.550	0.420	0.130	✓		平均	0.493	0.380	0.113			
	湖北	0.569	0.388	0.180	✓		C组	河北	0.674	0.314	0.359	✓	✓
	湖南	0.436	0.363	0.073	✓		山西	0.796	0.176	0.620		✓	
							内蒙古	0.619	0.235	0.384		✓	
							山东	0.541	0.333	0.207		✓	
							贵州	0.734	0.136	0.597	✓		
						云南	0.585	0.289	0.296	✓	✓		
						甘肃	0.619	0.192	0.427		✓		
						青海	0.389	0.266	0.123	✓			
						宁夏	0.522	0.332	0.190	✓			
						新疆	0.702	0.134	0.568		✓		
						平均	0.618	0.241	0.377				
						全国	0.465	0.219	0.246				

(0.438),广东最低(0.007)。技术无效是制约B组提升的主要因素,其中江西技术无效占比超过90%。C组中青海技术无效占比最高,为68.4%;新疆管理无效占比最高,为82.1%。

4.2 中国能源影子价格实证分析

根据共同前沿理论,群组前沿下能源影子价格反映了在现有生产技术下能源作为投入要素所产生的经济价值,而共同前沿下能源影子价格则反映了在潜在最优生产技术下能源要素所产生的经济价值。如图3所示,A、B、C 3组在现有生产技术水平下能源影子价格均值分别为0.704万元/t、0.554万元/t、0.294万元/t,与3个群组能源环境效率排序保持一致。如果采用潜在最优生产技术,A、B、C 3组能源影子价格均值分别为0.709万元/t、0.619万元/t、0.453万元/t,3个群组可提升空间分别为0.005万元/t、0.065万元/t、0.159万元/t。A组在共同前沿与群组前沿下能源影子价格差距相对较小,这表明A组处于技术前沿,能充分利用最优生产技术实现能源投入产出最大化。从群组内部来看(表3),A组中能源影子价格最高的为北京(0.891万元/t),最低的为辽宁(0.502万元/t),说明北京市能源要素所产生的经济价值最高,辽宁最低。B组中能源影子价格最高的为安徽(0.623万元/t),最低的为黑龙江(0.472万元/t),如果采用潜在的最优生产技术,广西能源影子价格提升空间最大。C组中能源影子价格最高的为山东(0.357万元/t),最低的为新疆(0.243万元/t),如果采用潜在的最优生产技术,云南能源影子价

格提升空间最大。

如图4所示,2000—2017年,3个群组能源影子价格均值呈现平稳上升趋势,年均增幅分别为3.0%、6.1%和4.7%。2000—2005年,3个群组能源影子价格变化相对平稳,主要是由于“十五”期间国家的高污染、高耗能产业集中上马,多个行业出现结构性矛盾,经济增长的同时环境污染加剧,同时低端产业导致能源利用率低,致使能源影子价格变化平缓。2006—2007年,国家调整经济结构,注重经济增长的质量和效益。2007年后,A、B两组能源影子价格不断上升,且两者之间差距不断缩小呈收敛趋势。C组能源影子价格则缓慢爬升,与A、B组差距拉大。从群组内部来看,A组省(市)能源影子价格均呈波动上升趋势,其中北京年均增幅6.4%,尤其在2014年后飞速上涨,主要是由于2014年为加快推进首都经济圈战略,北京市通过技改升级、就地淘汰、转移疏解3种方式逐步去除不符合城市战略定位的存量型产业。上海年均增幅最低为1.3%,主要是由于进入后工业化阶段,能源环境效率已提升到较高水平,节能空间变小所致。B组中湖南能源影子价格年均增幅最大为12.1%,其余各省(区、市)年均增幅在5.5%上下波动。C组各省(区)能源影子价格增长较为平缓,其中山西和内蒙古能源影子价格涨幅最快,分别为6.2%和6.9%,主要是由于近年来煤炭价格不断飙升,例如电煤价格指数从2015年362元/t涨到2018年532元/t。

如果采用潜在最优生产技术,A、B、C 3个群组

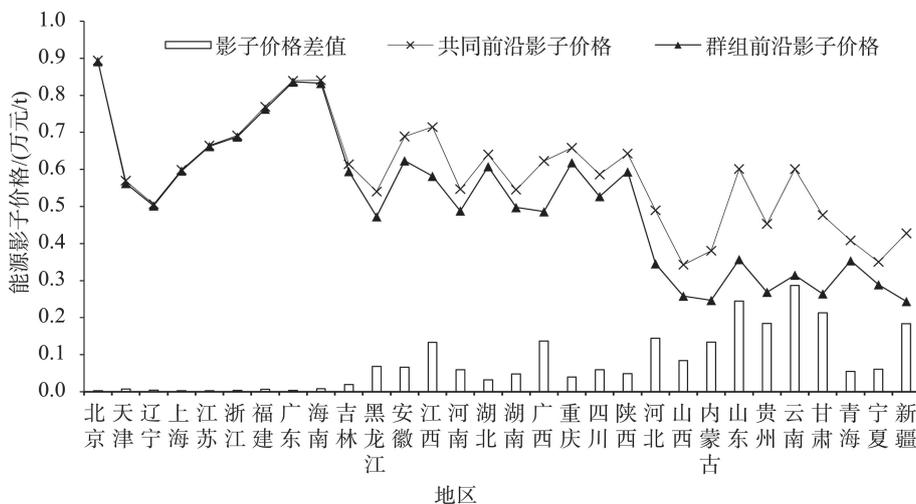


图3 2000—2017年共同前沿和群组前沿下中国省际能源影子价格对比图

Table 3 Energy shadow price under group-frontier and meta-frontier by province, 2000-2017

2020年6月

表3 2000—2017年群组前沿与共同前沿下中国省际能源影子价格

Table 3 Energy shadow price under group-frontier and meta-frontier of selected provinces in China, 2000-2017

地区	群组前沿				共同前沿				
	2000—2005	2006—2011	2012—2017	2000—2017	2000—2005	2006—2011	2012—2017	2000—2017	
A组	北京	0.623	0.755	1.296	0.891	0.625	0.758	1.302	0.895
	天津	0.476	0.562	0.649	0.562	0.478	0.574	0.657	0.570
	辽宁	0.376	0.455	0.675	0.502	0.382	0.458	0.678	0.506
	上海	0.561	0.574	0.653	0.596	0.563	0.576	0.658	0.599
	江苏	0.630	0.628	0.729	0.662	0.636	0.630	0.729	0.665
	浙江	0.594	0.696	0.773	0.688	0.600	0.702	0.773	0.692
	福建	0.655	0.694	0.939	0.763	0.669	0.699	0.942	0.770
	广东	0.736	0.825	0.947	0.836	0.740	0.830	0.949	0.840
	海南	0.740	0.806	0.952	0.833	0.744	0.821	0.958	0.841
	平均	0.599	0.666	0.846	0.704	0.604	0.672	0.850	0.709
B组	吉林	0.319	0.583	0.882	0.595	0.347	0.603	0.893	0.614
	黑龙江	0.361	0.424	0.632	0.472	0.442	0.471	0.708	0.540
	安徽	0.382	0.570	0.918	0.623	0.483	0.625	0.959	0.689
	江西	0.372	0.530	0.842	0.582	0.472	0.697	0.975	0.715
	河南	0.258	0.545	0.661	0.488	0.322	0.586	0.733	0.547
	湖北	0.480	0.531	0.812	0.608	0.527	0.550	0.844	0.640
	湖南	0.215	0.476	0.800	0.497	0.289	0.503	0.845	0.546
	广西	0.272	0.462	0.723	0.486	0.315	0.659	0.894	0.623
	重庆	0.503	0.556	0.796	0.618	0.539	0.577	0.860	0.658
	四川	0.414	0.457	0.710	0.527	0.448	0.515	0.796	0.586
	陕西	0.451	0.581	0.748	0.593	0.501	0.603	0.824	0.643
	平均	0.366	0.520	0.775	0.554	0.426	0.581	0.848	0.619
C组	河北	0.261	0.329	0.446	0.345	0.370	0.425	0.674	0.490
	山西	0.174	0.249	0.352	0.258	0.207	0.312	0.508	0.343
	内蒙古	0.170	0.256	0.313	0.246	0.218	0.368	0.554	0.380
	山东	0.275	0.330	0.465	0.357	0.497	0.556	0.750	0.601
	贵州	0.196	0.232	0.377	0.268	0.309	0.401	0.650	0.453
	云南	0.261	0.241	0.441	0.314	0.457	0.526	0.820	0.601
	甘肃	0.206	0.218	0.368	0.264	0.345	0.430	0.655	0.477
	青海	0.277	0.368	0.415	0.353	0.351	0.385	0.488	0.408
	宁夏	0.265	0.283	0.319	0.289	0.265	0.341	0.444	0.350
	新疆	0.219	0.233	0.279	0.243	0.398	0.424	0.461	0.427
平均	0.230	0.274	0.377	0.294	0.342	0.417	0.600	0.453	
全国平均	0.391	0.482	0.664	0.512	0.451	0.553	0.766	0.590	

能源影子价格均值呈现平稳上升趋势(图5),年均增幅分别为3.0%、5.5%和5.0%,且随着时间推移,3组能源影子价格差距不断缩小。从群组内部来看,A组中年均增幅最高的为北京(6.5%),最低的为上海(1.4%),与群组前沿保持一致。B组中年均增幅最高的为湖南(9.9%),最低的为黑龙江(3.3%)。C组中年均增幅最高的为内蒙古(7.6%),最低的为新

疆(1.6%)。

4.3 中国能源影子价格影响因素实证分析

(1)政府干预。从全国层面看,其对能源影子价格有显著的负向影响(表4)。这表明政府干预会扭曲资源配置,使市场价格背离能源影子价格,当能源市场价格低于其影子价格时,企业便会通过加大能源要素投入换取更高的经济回报,导致单位能

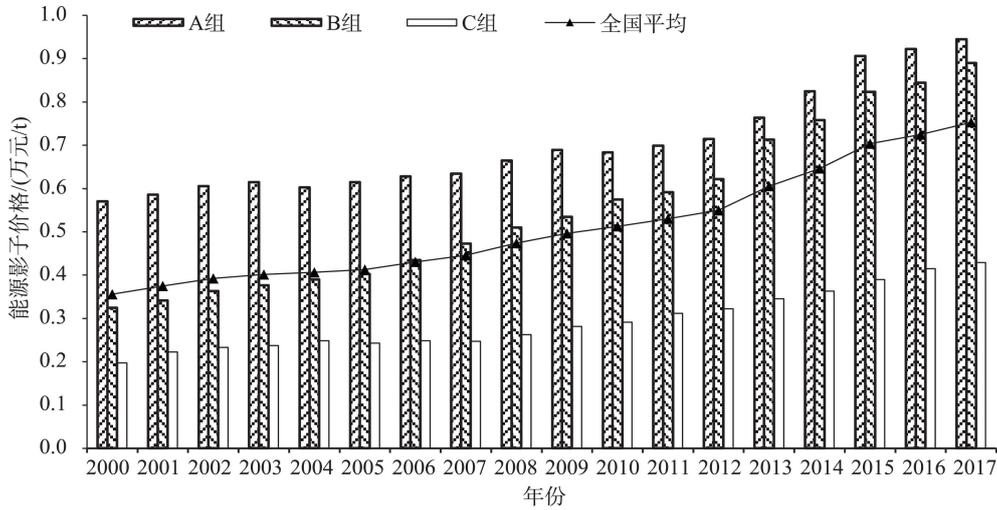


图4 2000—2017年群组前沿下中国地区能源影子价格变化趋势

Figure 4 Trends of energy shadow price under group frontier in China, 2000-2017

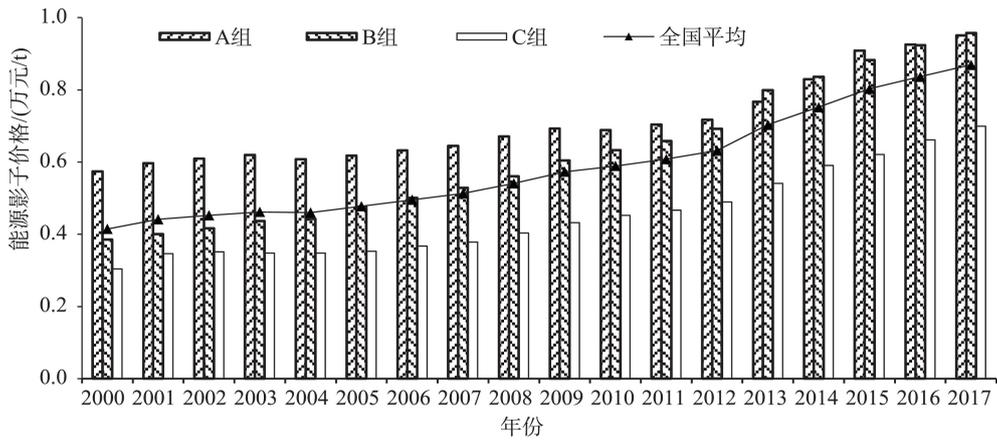


图5 2000—2017年共同前沿下中国地区能源影子价格变化趋势

Figure 5 Trends of energy shadow price under meta frontier in China, 2000-2017

表4 中国区域能源影子价格影响因素回归结果

Table 4 Regression result of influencing factors of regional energy shadow price in China

变量	全国			A组			B组			C组		
	系数	t值	P值									
GI	-0.268	-1.586	0.073	-0.507	-0.880	0.202	-0.388	-1.996	0.045	-0.295	-1.703	0.072
IS	-0.089	-1.551	0.079	-0.311	-1.045	0.181	-0.279	-2.071	0.040	-0.469	-5.063	0.000
MR	0.012	1.427	0.099	0.024	2.144	0.034	0.001	0.094	0.925	0.004	0.726	0.239
EE	-0.027	-5.042	0.000	-0.177	-1.246	0.116	-0.032	-2.448	0.015	-0.002	-2.181	0.037
EC	-0.536	-6.018	0.000	-1.184	-6.095	0.000	-0.521	-4.386	0.000	-0.191	-2.355	0.020

耗经济收益降低。分组来看,政府干预对A组的能源影子价格影响不显著,对B、C组有显著负向影响。这主要因为A组经济发达,市场化程度高,政府干预对能源影子价格影响不显著。而B、C组大

部分位于中西部地区,市场化相对落后,政府干预能显著影响市场经济对能源环境效率的作用效果,从而影响能源影子价格。

(2)产业结构。从全国层面看,其对能源影子

2020年6月

价格有显著的负向影响(表4)。这表明过高的二产占比会促使单位能源的经济收益下降,从而影响能源影子价格。分组来看,产业结构对A组能源影子价格影响不显著,对B、C组有显著负向影响。这主要是因为A组省(市)大都已进入工业化后期或后工业化时期,工业占比下降,而工业产业能源强度普遍高于其他产业,因此二产占比与A组能源影子价格相关性不显著。而B、C组省(区、市)主要集中在中西部,承接了来自东部地区产业转移,正在经历工业化或再工业化,工业比重相对较高,因此二产占比对B、C组能源影子价格有显著负向影响。

(3)市场化程度。从全国层面来看,其对能源影子价格有显著的正向影响(表4)。这表明市场化程度越高,能源要素在市场上越能得到充分流动,可以有效降低交易成本,从而有利于能源要素从影子价格较低的产业向影子价格较高的产业流动,实现能源影子价格的提高。分组来看,市场化程度对A组能源影子价格有显著正向影响,而对B、C组影响不显著。这主要是因为A组省(市)位于沿海地区,市场化程度相对较高,能源市场交易成本低,有利于能源要素流向高附加值的产业,使得单位能源要素的经济价值提高。而B、C组资源禀赋充沛,能源市场化程度滞后,从而使市场化程度对能源影子价格的影响不显著。

(4)能源禀赋。从全国层面来看,其对能源影子价格有显著的负向影响(表4)。这表明中国确实存在“能源诅咒”现象,丰裕的能源禀赋会通过降低能源市场制度效率、提升市场信息成本,从而影响能源要素在市场上的流动,降低了单位能源要素的经济效益。分组来看,能源禀赋对B、C组的能源影子价格有显著负向影响,而对A组能源影子价格影响不显著。这主要因为B、C组能源禀赋相对丰裕,例如内蒙古、山西、新疆等地,且能源密集型产业聚集,丰裕的能源产量增加了企业对能源投入的调整空间,企业会通过加大能源投入替代其他相对价格过高的要素,造成单位能源要素经济价值下降。而A组省(市)能源消费量虽大,但大部分依赖于中西部能源输入,因此能源禀赋对能源影子价格的影响并不显著。

(5)能源消费结构。无论从国家层面还是区域层面看,煤炭消费比重都对能源影子价格有显著负向影响(表4)。这主要是因为煤炭作为非清洁能

源,不仅热效率低,同时燃烧会排放大量污染气体,将环境规制作为成本扣除后,单位能源要素产生的收益便会降低。另一方面,中国资源税、污染税等环境管制长期缺失,能源价格不包含环境成本,致使煤炭价格低于天然气等清洁能源,造成能源价格结构性失衡。

5 结论与建议

本文提出了一个基于共同前沿的SBM模型,将组间技术异质性和非零松弛变量2个因素同时纳入考虑,用于测算群组前沿和共同前沿下能源环境效率和能源影子价格。然后利用2000—2017年省际面板数据进行实证研究,得到以下结论及建议:

(1)无论是在共同前沿还是群组前沿下,中国整体能源环境效率偏低,提升潜力巨大。A、B、C 3组技术落差比均值为1、0.571、0.614,群组间技术差异性显著。制约A组能源环境效率提升主要因素为管理无效率,而B、C组能源无效率主要来源于技术。基于此,建议政府在短期内应以群组前沿为参考基准,通过降低管理无效因素,提高能源要素配置效率;长期来看,需建立地区间技术交流机制,打破能源技术壁垒,缩小B、C组与A组技术差距,逐步消除技术无效因素。

(2)中国能源影子价格多年均值为0.512万元/t,动态来看,3组能源影子价格均呈现上升趋势,年均增幅分别为3.0%、6.1%和4.7%。且地区间不同前沿下能源影子价格差距较大,A组最小为0.005万元/t,说明A组拥有最优的能源要素配置,其可提升空间最小。B、C组分别有0.065万元/t和0.159万元/t的提升空间。基于此,建议政府在制定能源影子价格提升目标时,不能搞“一刀切”模式,应首先与组内前沿对标,并逐年递增,当达到该组前沿时,再参考与共同前沿的差距制定目标,这样因地制宜,稳步推进,更为合理。

(3)各影响因素对全国和区域的作用方向及影响程度皆存在差异性。从全国层面来看,市场化程度对能源影子价格有显著正向影响,其余均有显著负向影响。市场化程度对A组能源影子价格有显著正向影响,对B、C组无影响。而能源消费结构对3个群组均有显著负向影响。基于此,建议各地区在提高能源要素经济价值时侧重点应有所不同,A组应进一步加快市场化改革,B组应通过减少政府干预,提高清洁能源的消费占比,C组则应侧重调整

产业结构。

参考文献(References):

- [1] Ju K Y, Su B, Zhou D Q, et al. Does energy-price regulation benefit China's economy and environment? Evidence from energy-price distortions[J]. *Energy Policy*, 2017, 105: 108-119.
- [2] 冷艳丽, 杜思正. 能源价格扭曲与雾霾污染: 中国的经验证据[J]. *产业经济研究*, 2016, 80(1): 71-79. [Leng Y L, Du S Z. Energy price distortion and haze pollution: The evidence from China[J]. *Industrial Economics Research*, 2016, 80(1): 71-79.]
- [3] Wang X L, Bai M Q, Xie C P. Investigating CO₂ mitigation potentials and the impact of oil price distortion in China's transport sector[J]. *Energy Policy*, 2019, 130: 320-327.
- [4] Lai P H, Du M Z, Wang B, et al. Assessment and decomposition of total factor energy efficiency: An evidence based on energy shadow price in China[J]. *Sustainability*, 2016, DOI:10.3390/su8050408.
- [5] Zhang X P, Xu Q N, Zhang F, et al. Exploring shadow prices of carbon emissions at provincial levels in China[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 46: 407-414.
- [6] Tamaki T, Shin K J, Nakamura H, et al. Shadow prices and production inefficiency of mineral resources[J]. *Economic Analysis and Policy*, 2018, 57: 111-121.
- [7] 陈欣, 刘延. 中国二氧化碳影子价格估算及与交易价格差异分析: 基于二次型方向性距离产出函数[J]. *生态经济*, 2018, 34(6): 14-20. [Chen X, Liu Y. Estimation of China's carbon dioxide shadow price and analysis of the difference in transaction price: Output function based on quadratic directional distance[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(6): 14-20.]
- [8] Zhao Q Z, Yan Q Y, Zhang L J, et al. Dynamic and spatial character analysis of regional marginal abatement costs of CO₂ emissions from energy consumption: A provincial aspect[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, 28(4): 2501-2511.
- [9] Wang K, Che L N, Ma C B, et al. The shadow price of CO₂ emissions in China's iron and steel industry[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 598: 272-281.
- [10] Singbo A G, Lansink A O, Emvalomatis G. Estimating shadow prices and efficiency analysis of productive inputs and pesticide use of vegetable production[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(1): 265-272.
- [11] Choi Y, Zhang N, Zhou P. Efficiency and abatement costs of energy-related CO₂ emissions in China: A slacks-based efficiency measure[J]. *Applied Energy*, 2012, 98(5): 198-208.
- [12] Yan Q Y, Wang Y X, Tomas B, et al. Energy-related CO₂ emission in China's provincial thermal electricity generation: Driving factors and possibilities for abatement[J]. *Energy*, 2018, 11(5): 1096-1118.
- [13] Sheng P F, Yang J, Shackman J D. Energy's shadow price and energy efficiency in China: A non-parametric input distance function analysis[J]. *Energies*, 2015, 8(3): 1975-1989.
- [14] 吴凡, 刘雪娇, 谢文秀. 要素配置优化与中国区域能源影子价格[J]. *现代财经(天津财经大学学报)*, 2017, 37(3): 93-101. [Wu F, Liu X J, Xie W X. Factor configuration optimization and regional energy shadow price in China[J]. *Modern Finance and Economics—Journal of Tianjin University of Finance and Economics*, 2017, 37(3): 93-101.]
- [15] Fukuyama H, Weber W L. A directional slacks: Based measure of technical inefficiency[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2009, 43(4): 274-287.
- [16] Zhang N, Kong F B, Yu Y N. Measuring ecological total-factor energy efficiency incorporating regional heterogeneities in China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 165-172.
- [17] Yu Y T, Huang J H, Zhang N. Modeling the eco-efficiency of Chinese prefecture-level cities with regional heterogeneities: A comparative perspective[J]. *Ecological Modelling*, 2019, 402: 1-17.
- [18] Battese G E, Rao D S P, O'Donnell C J. A metafrontier production function for estimation of technical efficiencies and technology gaps for firms operating under different technologies[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2004, 21: 91-103.
- [19] 方琳, 吴凤平, 王新华, 等. 基于共同前沿SBM模型的农业用水效率测度及改善潜力[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(10): 2293-2304. [Fang L, Wu F P, Wang X H, et al. Analysis of agricultural water efficiency measurement and improvement potential based on meta frontier SBM model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(10): 2293-2304.]
- [20] Long X L, Luo Y S, Sun H P, et al. Fertilizer using intensity and environmental efficiency for China's agriculture sector from 1997 to 2014[J]. *Natural Hazards*, 2018, 92: 1573-1591.
- [21] 国涓, 刘丰, 王维国. 中国区域环境绩效动态差异及影响因素: 考虑可变规模报酬和技术异质性的研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(12): 2444-2456. [Guo J, Liu F, Wang W G. Dynamic differences and factors affecting regional environmental performance in China: Variable return to scale and technology heterogeneity[J]. *Resources Science*, 2013, 35(12): 2444-2456.]
- [22] Lin B Q, Tan R P. Ecological total-factor energy efficiency of China's energy intensive industries[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 480-497.
- [23] Li J L, Lin B Q. Ecological total-factor energy efficiency of China's heavy and light industries: Which performs better[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 83-94.
- [24] 聂雷, 郭忠兴, 彭冲. 基于SBM-Undesirable和Meta-frontier模型的城市建设用地利用效率研究[J]. *资源科学*, 2017, 39(5): 836-845. [Nie L, Guo Z X, Peng C. Construction land utilization efficiency based on SBM-Undesirable and Meta-frontier model[J]. *Resources Science*, 2017, 39(5): 836-845.]
- [25] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法[J]. *世界经济*, 2010, 33(8): 93-111. [Chen S Y. Shadow price of industrial carbon dioxide: Parametric and nonparametric approach

2020年6月

- [J]. *The Journal of World Economy*, 2010, 33(8): 93–111.]
- [26] Chiu C R, Liou J L, Wu P I, et al. Decomposition of the environmental inefficiency of the meta-frontier with undesirable output [J]. *Energy Economics*, 2012, 34(5): 1392–1399.
- [27] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952–2000[J]. *经济研究*, 2004, (10): 35–44. [Zhang J, Wu G Y, Zhang J P. The estimation of China's provincial capital stock: 1952–2000 [J]. *Economic Research Journal*, 2004, (10): 35–44.]
- [28] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001–2018. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001–2018.]
- [29] 国家统计局能源统计司, 国家能源局综合司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001–2018. [Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Department of General Affairs National Energy Administration of the People's Republic of China. *China Energy Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001–2018.]
- [30] Yao X, Zhou H C, Zhang A Z, et al. Regional energy efficiency, carbon emission performance and technology gaps in China: A meta-frontier non-radial directional distance function analysis[J]. *Energy Policy*, 2015, 84: 142–154.

The heterogeneity of regional energy shadow price and energy environment efficiency in China

YAN Qingyou¹, GUI Zengkan¹, ZHANG Wenhua¹, CHEN Lizhong²

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: In response to the government's reform of the energy pricing mechanism, the market should play a fundamental role in allocating resources. Based on the meta-frontier and slacks-based measure (SBM)-undesirable model, provincial data from 2000 to 2017 in 30 selected provinces of China were employed to analyze energy shadow price and energy environment efficiency of group frontier and meta-frontier in this study. Then, a provincial panel data model was used to analyze the influencing factors of shadow energy prices in China. The results indicate that Chinese energy environment efficiency is low, and regional energy environment efficiencies differ. The technology gap ratio of A: B: C group are 1: 0.571: 0.614, which shows clear technological heterogeneity. Second under the group frontier, China's energy shadow price is rising, indicating that the economic value of China's energy factors has increased. The potential room for energy shadow price increase in various provinces is different under the meta-frontier, Yunnan has the greatest potential and Beijing has the lowest potential. Third, government intervention, industrial structure, marketization reform, energy endowment, and energy consumption structure all have remarkable impacts on energy shadow price in a country or region, with different influencing mechanisms. Regional marketization reform has significant positive impact on the energy shadow price in A group. Regional government intervention inhibits the promotion of the energy shadow price in B group. Regional industrial structure inhibits the promotion of the energy shadow price in C group. We conclude that a one size fits all approach is inappropriate when promoting energy market reform and that people should consider the heterogeneity of technology when developing different energy pricing mechanism.

Key words: energy shadow price; SBM-Undesirable; meta-frontier; total factor energy environment efficiency; China