

# 环境约束下的中国全要素能源效率测度及其收敛性

汪克亮<sup>1</sup> 杨宝臣<sup>2</sup> 杨力<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学经济与管理学院; 2. 天津大学管理与经济学部)

**摘要:** 基于省际面板数据和 meta-frontier 方法, 利用数据包络分析方法构建非参数前沿, 分析比较了 2000~2008 年中国全要素能源效率的区域差异, 采用“技术差距比”衡量中国三大地区之间能源利用的技术差距, 并在此基础上运用收敛性分析考察了全国和三大地区全要素能源效率的趋同情况。结果表明: 中国全要素能源效率整体水平较低且区域差异显著, 存在巨大的节能减排潜力; 三大地区生产技术差距明显; 共同前沿和区域前沿下的  $\sigma$  检验结果均显示全国和三大地区全要素能源效率不存在收敛趋势, 表明中国各省份全要素能源效率的差距有进一步扩大的危险。

**关键词:** 全要素能源效率; 环境约束; 共同前沿; 收敛; 技术差距比

**中图分类号:** C93; F124.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-884X(2012)07-1071-07

## The Measurement and Convergence of China's Total-factor Energy Efficiency under the Environmental Constraints

WANG Keliang<sup>1</sup> YANG Baochen<sup>2</sup> YANG Li<sup>1</sup>

(1. Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui, China;  
2. Tianjin University, Tianjin, China)

**Abstract:** Under the meta-frontier method, an analysis and comparison have been made of the regional disparities in total-factor energy efficiency throughout China during the year 2000 to 2008. Additionally, a quantitative TGR-based analysis has been made on the technology gap of energy utilization. Subsequently, a test is utilized for investigating total-factor energy efficiency's convergence of overall country and three major areas. Empirical conclusions drawn are as follows: i) the overall level of China's total-factor is on the low side and its regional disparities are significant during the sample period and there exists tremendous room for energy conservation and emissions reduction. Additionally, there are significant gaps on production technology among China's three major areas; ii) there are not convergences of total-factor energy efficiency among overall China and its three major areas, and the risk of the widen gap of total-factor energy efficiency among China's provinces still exist.

**Key words:** total-factor energy efficiency; environmental constraints; meta-frontier; convergence; technology gap ratio (TGR)

改革开放 30 多年来, 中国创造了世界经济发展的奇迹——经济占世界比重由 1978 年的 2.3% 上升到 2008 年的 7.2%, 并维持了年均 9.9% 的罕见高增长率。然而, 高增长率背景下的经济增长是以巨大的资源消耗和严重的环境污染为代价实现的, 是一种典型的“高投入、高消耗、高排放、不协调、难循环、低效率”的“粗放

型”增长模式。尽管早在 20 世纪 90 年代, 党的十四届五中全会就提出“积极推进经济增长方式从‘粗放型’到‘集约型’的转变”。十几年过去了, 我国经济增长仍然表现出较粗放的特征。经济增长与能源、环境之间的矛盾越来越尖锐, 能源约束与环境污染已经成为中国经济、社会可持续发展所面临的严峻挑战, 引起了全社会

收稿日期: 2011-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71071003); 教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(09YJC630004); 安徽省级高校自然科学基金资助项目(KJ2010B322)

的广泛关注。此外,中国以煤为主的能源结构导致了二氧化硫、氮氧化物和烟尘等有害物的大量排放,对居民身体健康和生态环境造成了恶劣的影响,能源利用已经成为中国环境污染的主要原因。

### 1 文献综述

近年来,中国能源效率问题一直是学术界关注的热点。已有研究主要基于单要素能源效率与全要素能源效率 2 类研究方法展开。其中,单要素能源效率方法最常用的指标是能源强度,该方法众多优点,如直观、计算简单及操作性强等,在能效问题研究中具有不可替代的优势,然而,在表征能源潜在利用技术效率方面存在缺陷,如无法反映结构因素(包括产业结构、能源消费结构等)变化、要素替代对能效测度结果的影响<sup>[1,2]</sup>。为了对此进行改进, HU 等<sup>[3]</sup>基于全要素生产理论和 DEA 技术提出了全要素能源效率(TFEE)这一全新方法,认为经济产出是资本、劳动及能源等要素共同作用的结果,强调各类要素之间的相互配合,有效克服了单要素能源效率方法过分强调能源要素作用这一缺陷。近几年来,TFEE 方法已经陆续被引入到中国能源效率问题的研究之中<sup>[4~8]</sup>,然而,已有研究的主要缺陷在于:①绝大多数研究没有从系统论的角度出发,只关注能源利用经济产出最大化,忽视了能源利用形成的污染;只单纯从经济侧面反映能源利用水平,忽视了其社会效应,无法全面、科学地衡量中国各地区能源利用的真实水平。②几乎所有研究都没有考虑中国区域间的生产技术差距。严格来说,只有具备相似生产技术(本研究假定“生产技术”为“转化投入为产出的知识与能力”)水平的生产单元才能比较技术效率,否则可能因为比较标准的缺失而无法确定影响其效率的真实因素。

为了弥补已有研究的缺陷,本研究拟展开以下主要工作:①将环境污染引入到全要素能源效率研究之中,分析比较环境约束下的中国区域全要素能源效率问题。②充分考虑到区域间生产技术水平的差距,依据共同前沿理论<sup>[9,10]</sup>框架,采用数据包络分析方法分析比较 2000~2008 年中国各省份、三大地区的全要素能源效率,采用技术差距比这一指标考察三大地区潜在能源利用技术水平与全国潜在技术水平的差异,最后检验中国各省份全要素能源效率的收敛情况,以期为中国各地区制定有针对性的节

能减排政策提供有效的经验依据。

## 2 研究模型

### 2.1 非参数共同前沿理论

BATTESE 等<sup>[9]</sup>基于随机前沿分析方法,最先提出了共同前沿生产函数的研究框架; O'DONNELL 等<sup>[10]</sup>则首次利用数据包络分析构建非参数共同前沿,解决了随机前沿分析方法只能处理单一产出问题的缺陷。下面介绍非参数共同前沿方法的理论框架。

设  $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_M) \in R_+^M$  为投入向量,  $y_i = (y_1, y_2, \dots, y_N) \in R_+^N$  为产出向量。在共同前沿方法下,首先按相关标准对所有生产单元进行合理分类,从而得到  $k(k=1, 2, \dots, K)$  个群组<sup>①</sup>,将每个群组下生产单元的可行投入产出组合归属于同一技术集合  $T_i^k$ 。此时,生产可能集为  $P_i^k(x)$ 。 $P_i^k(x)$  的上界即为“群组前沿”,隐含了群组之间生产技术水平无法被超越这一假定,群组中各单元追求最小投入的生产前沿。由此,基于投入最小化的距离函数可定义为

$$D_i^k(x_i, y_i) = \sup_{\delta} \{ \delta > 0 : (x_i/\delta, y_i) \in P_i^k(x_i) \} \quad (1)$$

假设整体研究对象中包括  $k$  个子技术集合  $T^k, k=1, 2, \dots, K$ , 都在共同技术集合  $T^*$  下运行,此共同技术集合  $T^*$  与各子技术集合  $T^k$  有如下关系

$$T_i^* = \{T_i^1 \cup T_i^2 \cup \dots \cup T_i^k\}, \quad (2)$$

且  $T_i^* = \{(x_i, y_i) : x_i \text{ 能生产出 } y_i\}$ , 此时生产可能集表示为:  $P_i^*(x) = \{y_i : (x_i, y_i) \in T_i^*\}$ 。 $P_i^*(x)$  的上界即为“共同前沿”。不同于群组前沿,共同前沿隐含群组之间生产技术水平差距可以被超越这一假定。此时,生产单元面临的生产前沿为共同前沿,而不再是群组前沿,故共同前沿下基于投入最小化的距离函数为

$$D_i^*(x_i, y_i) = \sup_{\delta} \{ \delta > 0 : (x_i/\delta, y_i) \in P_i^*(x_i) \} \quad (3)$$

由于距离函数为实际生产水平与前沿生产水平的比值,所以,生产单元在群组前沿和共同前沿下的技术效率(本研究即为全要素能源效率)分别为

$$0 \leq TE_i^k(x_i, y_i) = [D_i^k(x_i, y_i)]^{-1} \leq 1; \quad (4)$$

$$0 \leq TE_i^*(x_i, y_i) = [D_i^*(x_i, y_i)]^{-1} \leq 1, \quad (5)$$

式中,  $TE_i^k(x_i, y_i)$  可以衡量生产单元实际投入水平与区域前沿上投入水平间的差距,而反映的是生产单元实际投入水平与共同前沿投入水

① 本研究将中国所有省份划分为东部、中部和西部三大地区,即在共同前沿模式下将中国整体划分为三大群组。

平间的差距。

另外,按照定义,共同前沿是群组前沿的包络曲线<sup>[9]</sup>。生产单元在共同前沿与群组前沿下的技术效率存在如下关系

$$D_t^*(x_t, y_t) \geq D_t^k(x_t, y_t) \Rightarrow TE_t^*(x_t, y_t) \leq TE_t^k(x_t, y_t)。(6)$$

共同前沿框架下最重要的指标为“技术差距比(TGR)”,该指标数值上定义为某单元共同前沿下技术效率与群组前沿下技术效率的比值,可以定量反映群组与总体之间技术水平的差距。其中,TGR 越高,表示群组内潜在技术水平越接近共同前沿内潜在技术水平,两者之间的技术差距越小,反之亦然。即:

$$0 \leq TGR_t^k(x_t, y_t) = \frac{D_t^k(x_t, y_t)}{D_t^*(x_t, y_t)} = \frac{TE_t^*(x_t, y_t)}{TE_t^k(x_t, y_t)} \leq 1, (7)$$

亦可表达为

$$TE_t^*(x_t, y_t) = TE_t^k(x_t, y_t) \times TGR_t^k(x_t, y_t)。(8)$$

## 2.2 距离函数的测算

本研究基于全要素理论,采用 DEA 方法构建非参数前沿和测算距离函数,并在此基础上测算中国各省份全要素能源效率。该方法的优点在于无需提供先验权重信息和具体的生产函数形式,且可以非常便捷地处理多投入、多产出问题<sup>[11]</sup>。由于生产的负外部性,能源利用过程中会产生污染这一非期望产出,在现实技术条件下,这是无法避免的。已有研究对非期望产出的处理方法有多种,如曲线测度法<sup>[12]</sup>、数据变换处理法<sup>[13]</sup>、污染物作投入处理法<sup>[14]</sup>以及方向性距离函数法<sup>[15]</sup>,这几种方法各有利弊。本研究将采用污染物作投入处理法,即将环境污染物视为经济活动的一种社会成本,利用该方法处理含有非期望产出的效率测度问题非常普遍。设第  $i$  个生产单元的投入、期望产出和环境污染向量为  $(x_i, y_i, b_i)$ ,则在规模报酬不变条件下求解距离函数的 DEA 模型为

$$[D_t(x_i, y_i, b_i)]^{-1} = TE(x_i, y_i, b_i) = \min \theta, \\ \text{s.t. } \theta x_i - X\lambda \geq 0; \theta y_i - Y\lambda \leq 0; -\theta b_i + B\lambda \geq 0; \\ \lambda \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad t = 1, 2, \dots, T。(9)$$

式中  $x, y, b$  分别为投入、期望产出和非期望产出; $D_t(\cdot)$ 代表第  $t$  时期在共同前沿或群组前沿下的距离函数; $TE(\cdot)$ 为生产单元的技术效率; $X, Y, B, \lambda$  分别为投入、期望产出、非期望产出和权重矩阵; $I$  为构成共同前沿或群组前沿的决策单元个数; $\theta$  为维持既定产出下所有投入或环境污染物同比例减少所能达到的最低值,即生产单元的技术效率。

## 3 样本、变量与数据

本研究以中国 29 个省份为研究对象(包括省、直辖市、自治区,以下统称省份。为了便于资料整理,重庆归入四川,西藏、台湾、香港、澳门不包括在分析范围之内),样本期间跨度为 2000~2008 年,按照地域差别将中国各省份划分为东部、中部和西部三大地区<sup>①</sup>。以资本、劳动、能源为投入变量,各省份 GDP 为期望产出变量,以  $SO_2$  排放量作为非期望产出变量。在共同前沿框架下展开对环境约束下的中国区域全要素能源效率的研究。投入产出变量的具体界定如下。

(1)资本投入 采用“永续盘存法”估算中国各省份的资本存量,并将其作为资本投入的代理指标。本研究根据单豪杰<sup>[16]</sup>提供的方法,以 1952 年不变价格对 2000~2008 年各省份资本存量进行换算。

(2)劳动投入 以各省份年末就业人数来表示。需要指出的是,由于缺乏更为详尽的资料,没有考虑劳动力的质量。

(3)能源投入 以各省份的能源消费量来表示能源投入,数据直接来源于 2001~2009 年《中国统计年鉴》,并对不同类型的能源进行了折标煤计算。

(4)期望产出 选择各省份 GDP 为期望产出指标。为保持统计口径一致,各省份 GDP 数据也以 1952 年不变价格表示。

(5)非期望产出 首先,考虑到  $SO_2$  是大气中主要污染物之一,是“酸雨”形成的主要原因,对人类健康和生态环境的危害无法估计。其次, $SO_2$  排放量与中国以煤为主的能源结构密切相关,是能源利用形成的主要污染之一。最后,各省份  $SO_2$  排放量数据直接可以从中国统计年鉴上获得,增加了研究的可靠性。为此,选择各省份  $SO_2$  作为非期望产出的代理指标。

2000~2008 年中国三大地区与全国投入产出数据的描述统计特征,见表 1。

## 4 实证研究

### 4.1 区域差异分析

在实证计算各省份能源效率之前,采用 Pearson 相关分析来验证所谓的“等张性”<sup>[11]</sup>,

① 其中东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南;中部地区为山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南;西部地区为内蒙古、广西、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆。

表1 投入、产出变量的描述性统计特征(2000~2008年)

地区	变量	最小值	最大值	平均值	标准差
全国	资本存量/亿元	135.44	16 997.46	3 301.99	3 382.23
	劳动投入/万人	238.57	6 711.60	2 305.59	1 616.28
	能源消费/万吨标煤	479.95	30 569.95	8 124.54	5 742.20
	经济产出/亿元	62.57	6 368.20	1 462.40	1 294.59
	SO <sub>2</sub> 排放量/万吨	2.00	214.10	76.88	52.09
东部	资本存量/亿元	226.15	16 997.46	5 475.50	4 291.67
	劳动投入/万人	333.68	5 478.00	2 381.93	1 629.84
	能源消费/万吨标煤	479.95	30 569.95	10 472.37	7 094.38
	经济产出/亿元	526.82	6 386.20	2 547.34	1 450.73
	SO <sub>2</sub> 排放量/万吨	2.00	200.30	77.83	55.93
中部	资本存量/亿元	605.06	9 391.22	2 466.64	1 718.35
	劳动投入/万人	1 044.62	5 835.45	2 699.53	1 411.67
	能源消费/万吨标煤	2 329.00	18 976.27	8 081.39	3 755.20
	经济产出/亿元	410.68	2 674.95	1 106.43	455.34
	SO <sub>2</sub> 排放量/万吨	26.50	162.50	72.31	39.10
西部	资本存量/亿元	135.44	6 868.53	1 579.41	1 400.73
	劳动投入/万人	238.57	6 711.60	1 906.45	1 680.39
	能源消费/万吨标煤	897.20	21 617.43	5 576.45	4 117.88
	经济产出/亿元	62.57	2 731.73	633.75	491.21
	SO <sub>2</sub> 排放量/万吨	3.20	214.10	79.48	56.90

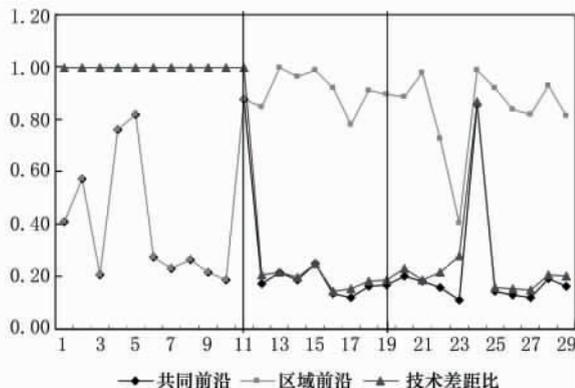
注:①面板数据包括中国29个省份在9年内的时间序列数据,样本观测点共261个;②资料来源:根据相应年份的《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》以及中国各省份统计年鉴整理得到。

这是利用DEA方法建立效率测度模型必须满足的一个条件,即在决策单元各项投入增加的情况下,产出也应该相应增加。结果证实东部、中部和西部三大地区及全国整体的投入产出数据在1%的检验水平下均符合“等张性”假设(检验结果从略)。此外,在利用DEA方法求解距离函数时,为了避免决策单元较少、数据稀疏而无法构造近似光滑的前沿面,将样本期间所有的投入产出数据作为当期的参考技术集,生产前沿面的构建采用“跨时期前沿”方法<sup>[17]</sup>。由于历史原因、地理位置、资源因素和国家发展战略等诸多因素,导致了中国区域经济发展显著不平衡,在技术方面的差距表现尤为突出。从当前来看,中国三大地区实现生产技术趋同将是一个长期过程。为此,充分考虑到中国三大地区之间存在生产技术差距这一事实,有助于我们制定更为现实、有效和具有地区针对性的节能减排政策。鉴于此,本研究基于技术差距视角和非参数共同前沿理论,为中国能源效率问题提供了一种全新的研究体系。表2和图1分别给出了在区域前沿<sup>①</sup>和共同前沿下中国各省份2000~2008年的全要素能源效率的统计描述结果。

由表2可知,样本期内,共同前沿和区域前沿下的全国整体能效均值分别为0.294和0.705,整体水平偏低,节能减排潜力巨大。从区域角度来看,在全国共同前沿下,东部、中部

表2 共同前沿和区域前沿下中国全要素能源效率的统计描述(2000~2008年)

省份	共同前沿				区域前沿			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
北京	0.336	0.546	0.409	0.076	0.336	0.546	0.409	0.076
天津	0.374	0.766	0.573	0.148	0.374	0.766	0.573	0.148
河北	0.171	0.271	0.206	0.039	0.171	0.271	0.206	0.039
辽宁	0.609	0.822	0.762	0.074	0.609	0.822	0.762	0.074
上海	0.674	1.000	0.819	0.117	0.674	1.000	0.819	0.117
江苏	0.212	0.354	0.274	0.050	0.212	0.354	0.274	0.050
浙江	0.186	0.298	0.233	0.040	0.186	0.298	0.233	0.040
福建	0.244	0.282	0.267	0.013	0.244	0.282	0.267	0.013
山东	0.156	0.298	0.216	0.049	0.156	0.298	0.216	0.049
广东	0.151	0.244	0.190	0.035	0.151	0.244	0.190	0.035
海南	0.812	1.000	0.876	0.057	0.812	1.000	0.876	0.057
山西	0.159	0.232	0.176	0.023	0.159	0.232	0.176	0.023
吉林	0.186	0.288	0.218	0.037	0.186	0.288	0.218	0.037
黑龙江	0.171	0.237	0.189	0.024	0.171	0.237	0.189	0.024
安徽	0.217	0.270	0.249	0.022	0.217	0.270	0.249	0.022
江西	0.127	0.149	0.134	0.008	0.127	0.149	0.134	0.008
河南	0.107	0.129	0.120	0.007	0.107	0.129	0.120	0.007
湖北	0.155	0.187	0.166	0.010	0.155	0.187	0.166	0.010
湖南	0.153	0.184	0.168	0.010	0.153	0.184	0.168	0.010
内蒙古	0.132	0.336	0.203	0.069	0.132	0.336	0.203	0.069
广西	0.154	0.205	0.185	0.017	0.154	0.205	0.185	0.017
四川	0.150	0.173	0.159	0.007	0.150	0.173	0.159	0.007
贵州	0.103	0.132	0.113	0.010	0.103	0.132	0.113	0.010
云南	0.787	0.942	0.858	0.058	0.787	0.942	0.858	0.058
陕西	0.124	0.194	0.147	0.024	0.124	0.194	0.147	0.024
甘肃	0.112	0.175	0.131	0.022	0.112	0.175	0.131	0.022
青海	0.103	0.153	0.120	0.017	0.103	0.153	0.120	0.017
宁夏	0.170	0.231	0.194	0.020	0.170	0.231	0.194	0.020
新疆	0.129	0.211	0.164	0.028	0.129	0.211	0.164	0.028
东部	0.151	1.000	0.439	0.267	0.151	1.000	0.439	0.267
中部	0.107	0.288	0.178	0.044	0.107	0.288	0.178	0.044
西部	0.103	0.942	0.227	0.216	0.103	0.942	0.227	0.216
全国	0.103	1.000	0.294	0.238	0.151	1.000	0.705	0.288



注:1~11为东部地区各省份;12~19为中部地区各省份;20~29为西部地区各省份。

图1 区域前沿和共同前沿下中国各省份全要素能效与技术差距比均值

① 此处的“区域前沿”与上文的“群组前沿”具备同一内涵,下同。

和西部地区的全要素能效均值分别为 0.439、0.178 和 0.227。东部地区显然高于中西部地区,这是由东部地区拥有全国最优的生产技术、最先进的管理以及较合理的制度安排所决定的。以中部地区为例,样本期内其能效均值为 0.178,预示着若采用全国潜在最优生产技术,在维持既定产出下,中部地区仍存在 82.2% 的节能减排潜力。在区域前沿下东部、中部和西部地区能效均值分别为 0.403、0.913 和 0.832。此时,中部地区最高,其后依次为西部地区和东部地区。以西部地区为例,样本期内其能效均值为 0.832,表明如果采用西部地区潜在最优生产技术,在维持产出不变的条件下,西部地区还存在 16.8% 的节能减排潜力。从单个省份来看(见图 1),可见,区域前沿下中国各省份的全要素能效均不低于全国共同前沿下的全要素能效值,且存在很大差距。以中部地区的江西为例,在区域下其全要素能效均值为 0.918,意味着如果采用中部地区潜在最优生产技术,还存在 8.2% 的节能减排潜力。参照共同前沿,其全要素能效均值仅为 0.134,表明如果采用全国潜在最优生产技术,其节能减排潜力可以提升至 86.6%,两者之间的缺口达到 78.4%。主要原因在于,2 种前沿下参考技术集是不一样的,区域前沿参照的只是中部地区潜在最优生产技术,而共同前沿下参照的是全国潜在最优生产技术。比较中部和西部地区的其他省份也得到了类似的结果。然而,东部地区各省份 2 种前沿下的全要素能效是相同的,这是因为东部地区本来就代表了我国生产技术的最高水平,2 种前沿下的参考技术集是一致的,所以 2 种条件下的全要素能效测度结果自然不存在任何差别。

#### 4.2 技术差距分析

技术差距比是共同前沿方法框架下最重要的考察指标,利用其可以考察三大地区潜在最优生产技术与全国潜在最优生产技术的差距,进而可以分析三大地区之间的生产技术差距。2000~2008 年,三大地区的生产技术差距是非常明显的(见表 3)。其中,东部地区历年的 TGR 均为 1,为全国最高水平,能源利用实现了全国潜在最优生产技术的 100%。东部一直是我国经济最发达、技术实力最强的地区,地理位置优越,有利于引进和吸收国外先进的节能减排技术,相应的管理方法、制度安排等都处于国内先进水平,再加上国家政策的倾斜,为东部地区经济、能源和环境发展提供了重要的支撑,使

表 3 三大地区生产技术差距的测度结果

年度	技术差距比			区域技术差距		
	东部地区	中部地区	西部地区	东部-中部	东部-西部	中部-西部
2000	1.000	0.194	0.279	0.806	0.721	0.085
2001	1.000	0.189	0.265	0.811	0.735	0.076
2002	1.000	0.186	0.257	0.814	0.743	0.071
2003	1.000	0.187	0.261	0.813	0.739	0.074
2004	1.000	0.188	0.263	0.812	0.737	0.075
2005	1.000	0.189	0.264	0.811	0.736	0.075
2006	1.000	0.193	0.266	0.807	0.734	0.073
2007	1.000	0.202	0.268	0.798	0.732	0.066
2008	1.000	0.207	0.269	0.793	0.731	0.062
平均	1.000	0.193	0.266	0.807	0.734	0.073

之成为全国经济增长和节能减排的引领者和标杆。中西部地区的 TGR 值分别只有 0.193 和 0.266,距离全国潜在最优生产技术还有 80.7% 和 73.4% 的改进潜力,与东部地区的技术差距分别达到 0.807 和 0.734,生产技术水平远远低于东部地区。自改革开放以来,由于国家实行非均衡的区域发展政策,对中西部地区的经济发展造成了一定负面影响。当前,中西部地区的生产设备与工艺、开放度、财政支持和人力资本水平与东部地区还存在很大差距。此外,中西部地区一直是我国重要的工业制造和能源供应基地,支柱产业是高耗能、高污染的第二产业,其经济增长在很大程度上依赖于资源的不断消耗和生态环境的持续破坏,再加上技术水平的落后,最终导致中西部地区的“能源、经济和环境”系统难以协调发展,形势不容乐观。需要注意的是,在本分析框架下,中部地区的生产技术水平最低,这与经验直觉得出的“东部—中部—西部”的发展格局有一定差别。主要原因在于:本研究将  $SO_2$  排放量作为投入要素引入到研究中,由于中部地区各省份基本上都是以资源、环境密集型产业为主,经济增长导致了大量能源资源的消耗和环境质量的严重下降,西部地区很多省份的支柱产业并非高耗能、高污染的第二产业,而是以第一产业和第三产业为主,如云南的旅游、青海和宁夏的旅游和农牧业等。此外,2002 年以来中西部地区与东部地区的技术差距已有逐步减小的趋势(见表 3),随着“西部大开发”、“中部崛起”和“振兴东北老工业基地”等发展战略的进一步推进,中西部地区会迎头赶上,最终实现三大地区生产技术的趋同。

#### 4.3 收敛性分析

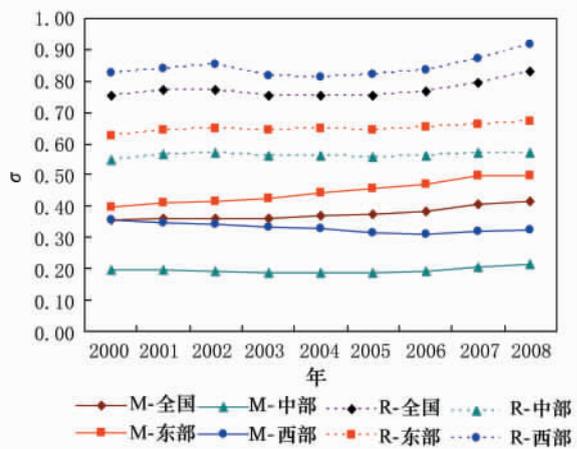
本研究采用收敛性分析来研究环境约束下,中国各地区全要素能源效率的趋同和发散情况。如果各省份间的全要素能效存在收敛

性,则表明当前节能减排政策有利于减少落后省份与发达省份的能效差异。若不存在收敛性,则说明当前各省份之间的全要素能效差距有进一步扩大的危险,必须采取相应的修正措施加以改善。有关收敛性分析的方法一般有3种: $\sigma$ 收敛、绝对 $\beta$ 收敛与条件 $\beta$ 收敛。本研究将采用 $\sigma$ 收敛来检验中国全要素能源效率是否存在趋同现象。

$\sigma$ 收敛研究随着时间推移,不同省份间全要素能效TFEE的离差随时间推移而变化的情况。若离差逐渐变小,则表示全要素能效的离散程度在缩小,趋于 $\sigma$ 收敛。反之,则趋于发散。依据文献[18]的方法,本研究环境约束下中国全要素能效 $\sigma$ 收敛可表示如下

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (TFEE_{it} - \overline{TFEE}_t)^2}, \quad (10)$$

式中,  $TFEE_{it}$ 表示第*i*个省份在*t*时期的全要素能效; $\overline{TFEE}_t$ 表示*t*时期所有*I*个省份全要素能效的平均值。当 $\sigma_{t+1} < \sigma_t$ 时,说明环境约束下中国全要素能效的离散系数在缩小,存在 $\sigma$ 收敛。鉴于此,分别在共同前沿和区域前沿下根据式(10)来研究中国全要素能源效率的收敛性(见图2)。



注:M代表共同前沿,R代表区域前沿

图2 共同前沿和区域前沿下全国和三大地区收敛系数

2000~2008年,在共同前沿和区域前沿下,全国和三大地区的全要素能效既不存在整体收敛趋势,也不存在“俱乐部”收敛特征(见图2)。在共同前沿下,仅有西部地区全要素能效在2002~2006年间呈现微幅收敛,在2007年以后却又发生了转折,出现发散迹象;全国、东部和中部地区绝大多数年份的全要素能效都呈现发散特征,其中东部地区的发散趋势比较明显。在区域前沿下,全国和东部地区自2002年开始,由发散转入收敛,但是到了2005年,这种

局面发生了变化,又由收敛转入发散,且 $\sigma$ 值有持续扩大的倾向;中部和西部地区则均一直呈现出微弱发散特征。这与李国璋等<sup>[19]</sup>得出的全国和三大地区全要素能效均收敛的结论有很大差别,这固然与研究选择的年限有直接关系,更重要的原因是研究并未引入环境因素的作用,从而导致了结果出现偏差。相比较而言,本研究结果与袁晓玲等<sup>[20]</sup>的研究殊途同归:都考虑了环境因素,虽然 $\sigma$ 值计算方法不同,但所得结论基本保持一致,从一个侧面说明引入环境因素可以大大提高研究的科学性,获得一些更深层次和更具政策指导价值的研究结论。

总之,在样本期内,无论是在共同前沿还是区域前沿下,中国全要素能效均不存在 $\sigma$ 收敛,而是呈现微弱的发散特征。由此可见,全国和三大地区各省份之间的全要素能效差距不仅没有缩小,而且还存在进一步扩大的危险。究其原因,可能是由于一些先进节能减排技术在转移和扩散过程中出现障碍,使得其不能被生产技术相对落后的省份有效吸收,导致中国各省份之间的全要素能效未能实现收敛。鉴于此,相关决策部门应该对此加以足够重视,及时采取行之有效的措施防止各省份之间能源利用效率差距的进一步扩大。

## 5 结语与政策启示

以煤为主的能源资源禀赋条件,决定了未来中国社会将会面临越来越严峻的环境污染问题,因此,必须从战略角度来重视能源利用效率问题,应将环境污染作为中国中长期能源决策必须考虑的关键因素之一。鉴于此,本研究将环境因素引入中国全要素能源效率之中,力求全面、系统考察环境约束下中国全要素能源效率的时空差异特征。主要工作如下:①以SO<sub>2</sub>作为环境污染代理指标引入全要素能源效率研究之中,在当前中国全面贯彻落实科学发展观的现实背景下更具有政策指导意义。②充分考虑到中国三大地区技术差距现实,基于共同前沿研究框架,利用技术差距比这一指标来定量考察中国三大地区潜在最优生产技术与全国最优生产技术之间的差距。③在测算中国各省份全要素能源效率的基础上,采用收敛方法来检验全国和三大地区全要素能源效率的趋同与发散情况。主要结论如下:①样本期内,中国全要素能源效率还处于较低水平。在全国范围内比较,平均能效仅为0.294;各省份、三大地区的全要素能效差异显著,尚存巨大的节能减排空

间。②中国三大地区的生产技术存在很大差距,东部地区技术水平最高,西部地区次之,再次为中部地区。东部地区实现了全国潜在最优生产技术的100%;中西部地区与全国的差距非常明显,样本期内平均技术差距比仅为0.193和0.266。③收敛分析结果显示,样本期内,全国和三大地区各省份全要素能源效率均不存在收敛特征,而是呈现微幅发散趋势,表明全国和三大地区各省份全要素能源效率之间的差距还存在进一步扩大的危险。

以上结论蕴含的政策启示包括以下几点:

- ①构建包括环境污染在内的新型绿色能源效率评估体系,努力实现协调发展的“能源-经济-环境”模式,促进中国经济与社会的可持续发展。
- ②为了进一步提升中西部地区的能源效率,在制定和实施相关政策时应适当向中西部地区倾斜,充分挖掘中西部地区的节能减排潜力,这对提升中国能源效率整体水平具有决定性意义。
- ③加强发达省份与落后省份之间的技术交流与合作,打破地区之间阻碍生产要素与生产技术自由流动的壁垒,使得先进的节能减排技术能够及时向落后省份转移和扩散,以最终实现中国三大地区、各省份之间生产技术水平与全要素能源效率的趋同。

#### 参 考 文 献

- [1] WILSON B, TRIEU L H, BOWEN B. Energy Efficiency of Regions in China[J]. Energy Policy, 1994, 22(4): 287~295.
- [2] PATTERSON M G. What Is Energy Efficiency? Concepts, Indicators and Methodological Issues[J]. Energy Policy, 1996, 24(5): 337~390.
- [3] HU J L, WANG S C. Total-factor Energy Efficiency of Regions in China[J]. Energy Policy, 2006, 34(17): 3 206~3 217.
- [4] 魏楚,沈满洪. 能源效率与能源生产率:基于DEA方法的省际数据比较[J]. 数量经济技术经济研究, 2007, 24(9): 110~121.
- [5] WATANABEW M, TANAKA K. Efficiency Analysis of Chinese Industry: A Directional Distance Function Approach[J]. Energy Policy, 2007, 35(12): 6 323~6 331.
- [6] 屈小娥. 中国省际全要素能源效率变动分解——基于Malmquist指数的实证研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2009, 26(8): 29~43.
- [7] CHANG T P, HU J L. Total-factor Energy Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change: An Empirical Study of China[J]. Applied Energy, 2010, 87(10): 3 362~3 270.
- [8] 汪克亮,杨宝臣,杨力. 基于DEA与方向性距离函数的中国省际能源效率测度[J]. 管理学报, 2011, 8(3): 456~463.
- [9] BATTESE G E, RAO D S P. Technology Gap, Efficiency, and a Stochastic Meta-frontier Function[J]. International Journal of Business and Economics, 2002, 1(2): 87~93.
- [10] O'DONNELL C J, RAO D S P, BATTESE G E. Meta-frontier Frameworks for the Study of Firm-level Efficiency and Technology Ratios[J]. Empirical Economics, 2007, 34(2): 231~255.
- [11] 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.
- [12] FARE R, GROSSKOPF S, LOVELL C A K, et al. Multilateral Productivity Comparisons when Some Output are Undesirable: A Nonparametric Approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 1989, 71(1): 90~98.
- [13] SEIFORD L M, ZHU J. Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 142(1): 16~20.
- [14] HU J L, LEE Y C. Efficient Three Industrial Waste Abatement for Regions in China[J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2008, 15(2): 132~144.
- [15] FÄRE R, GROSSKOPF S, PASURKA C A. Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions [J]. Energy, 2007, 32(7): 1 055~1 066.
- [16] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算:1952~2006年[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 17~31.
- [17] TULKENS H, VANDEN E P. Non-parametric Efficiency, Progress, and Regress Measure for Panel Data: Methodological Aspects [J]. European Journal of Operational Research, 1995, 80(3): 474~499.
- [18] 林光平,龙志和,吴梅. 中国地区经济 $\sigma$ -收敛的空间计量实证分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2006, 23(4): 14~21.
- [19] 李国璋,霍宗杰. 我国全要素能源效率及其收敛性[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 11~16.
- [20] 袁晓玲,张宝山,杨万平. 基于环境污染的中国全要素能源效率研究[J]. 中国工业经济, 2009(2): 76~86.

(编辑 丘斯迈)

通讯作者:汪克亮(1980~),男,安徽枞阳人。安徽理工大学(安徽省淮南市 232001)经济与管理学院讲师。研究方向为能源经济与环境管理。E-mail: klwang@163.com