

# 环境约束下的中国火电行业 技术效率及其影响因素实证研究

王兵 卢金勇 陈茹\*

**摘要:** 本文运用方向性距离函数测度了环境约束下中国 30 个省火电行业 2001-2007 年的技术效率,并对技术效率影响因素进行了实证分析。实证结果表明:在研究期间,沿海地区或煤炭资源丰富省份的技术效率较高,东部地区技术效率优于中西部地区,而全国火电行业的技术效率平均水平为 0.940;火电行业发展模式与技术效率变化率呈负相关关系;利用面板数据以及可行性广义最小二乘法对技术效率影响因素进行分析发现,机组容量利用率、燃煤效率与环境约束对技术效率有显著的影响,其中环境约束与技术效率基本呈现“U”型关系;在技术效率影响因素分析模型中,通过引入时间变量,发现我国电力体制改革对技术效率的促进作用并没有得到体现。

**关键词:** 环境约束 技术效率 方向性距离函数

## 一、引言

火电是中国电力供应的主要来源,对国民经济的健康发展具有重要影响。<sup>①</sup>总的来说,在改革开放三十余年中,我国火电行业虽然得到了飞速发展,但是高投入、低产出,尤其是高污染问题依然存在,亟待解决。我国火电行业以燃煤电厂为主,不仅需要消耗大量煤炭等不可再生资源,且其产出伴随着各种污染,是我国 SO<sub>2</sub>及 CO<sub>2</sub>的最大排放源,对环境状况构成重大威胁。<sup>②</sup>可见,环境问题在火电行业绩效的研究中不容忽视。然而在 1990 年前,国外学者关于火电行业环境绩效的研究只有较少的一部分,例如 Färe 等 (1985, 1989),大部分相关研究始于 1990 年后 (如 Yaisawamg et al., 1994; Färe, Grosskopf and Tyteca, 1996; Athanassopoulos et al., 1999; Korhonen and Luptack, 2004; Färe et al., 2007a; Barros, 2008)。目前,国外学术界对火电行业绩效的研究 (包括考虑环境约束与不考虑环境约束)较多,但是他们研究的对象以发达国家为主,较少关注像中国这样处于改革转型时期的发展中国家的火电行业。虽然 Lam 和 Shiu (2004)利用数据包络分析 (DEA)方法,对 1995-2000 年中国火电行业全要素生产率变化进行了比较全面的研究,同时对技术效率的影响因素进行了分析,但是没有将环境因素纳入考虑,而且在其研究期间中国还没有开展电力体制改革。

近年来,国内关于我国电力行业绩效的文献有所增多,如罗道平和肖笛 (1996)、孙建国和李文溥 (2003)、楼旭明等 (2006)、白雪洁和宋莹 (2008, 2009)以及陶峰等 (2008),但只有极少的文献考虑了环境约束。其中,白雪洁和宋莹 (2008)利用 DEA 三阶段分析法对 2004 年中国 30 个省火电行业进行了排除环境变量和统计噪音影响的技术效率分析,结果表明很多省份火电行业效率水平的确受到地区经济发展水平、资源

\* 王兵,暨南大学经济学院,邮政编码:510632,电子信箱:twangb@jnu.edu.cn;卢金勇,暨南大学经济学院,邮政编码:510632,电子信箱:hurricane85@163.com;陈茹,暨南大学经济学院,邮政编码:510632,电子信箱:weisi08@163.com

本文为教育部人文社科项目“节能减排约束下中国经济绩效研究:基于全要素生产率的视角”(08JC790047)的阶段性成果,并获中央高校基本科研业务费专项资金资助(10JYB2025)。作者感谢匿名审稿人的建设性修改意见,当然,文责自负。

① 2009 年 6 月《火电厂大气污染物排放标准》编制说明(征求意见稿)的资料显示:截至 2008 年底,全国发电装机容量达到 7.9253 亿千瓦,其中火电达到 6.0132 亿千瓦,约占总容量的 75.87%。

② 火电行业 SO<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub>排放量分别超过了全国总排放量的 一半及三分之一。

禀赋等环境变量和好坏运气的影响,在同质经营环境下规模效率不高的问题更为突出。白雪洁和宋莹(2009)基于效率的视角,利用三阶段 DEA 从非规制、弱规制、强规制三个层次分析环境规制程度与中国火电行业效率的关系,得出环境规制可以提升中国火电行业整体的效率水平的结论,并将中国各地区火电行业的发展模式划分为内力驱动环境友好型、环境弱友好型和外力推动环境友好型三种。白雪洁和宋莹在 2008 年的研究中将污染物简单的作为投入,而在 2009 年的研究中则按照 Seiford 和 Zhu (2002)的方法将污染物进行转换,从而使其具有产出的特性。但是, Färe 和 Grosskopf (2004)对这两种方法进行了批评,并建议用方向性距离函数 (Directional Distance Function) 将污染物作为“坏产出”纳入分析框架中。

基于上述文献研究的不足,本文将在考虑环境约束的前提下,利用方向性距离函数测算 2001-2007 年我国火电行业的技术效率,并对影响技术效率的因素进行实证分析。至于方向性距离函数,目前国内学者还没有将这种较为先进的方法运用到我国火电行业技术效率的研究当中。方向性距离函数具有优越性,它不需要污染物(可称为“坏”产出)的价格信息,只需要得到各种污染排放物的数量就能将环境因素纳入效率研究当中。它的主要思想是:既要求产出增加,又要求污染减少。这符合我国经济与资源、环境协调发展的战略。

此外,需要注意的是,在研究期间实施的《电力体制改革方案》以及“十五”、“十一五”规划中制定的火电行业节能减排目标,都有可能在一定程度上对我国火电行业的技术效率产生影响。<sup>①</sup>因此,本文还将初步探讨电力改革和节能减排措施对环境约束下火电行业技术效率的作用如何。

本文的结构安排如下:第二部分将对方向性距离函数进行简要介绍并交代本文研究数据的来源及其处理情况,第三部分对利用方向性距离函数计算得出的技术效率实证结果进行分析,第四部分则利用可行性广义最小二乘法 (FGLS) 对技术效率影响因素进行实证分析,第五部分给出本文研究的结论。

## 二、研究方法 & 数据说明

### (一) 研究方法

经济学家很早就认识到,由于没有考虑“坏”产出而使得全要素生产率的测度出现偏差。Pittman (1983)在对美国威斯康星州造纸厂的效率进行测度时,发展了 Caves 等 (1982)的超对数生产率指数,第一个尝试在生产率测度中引入“坏”产出,并采用治理污染成本作为“坏”产出价格的代理指标。此后,大量的学者开始将环境污染变量纳入到估计的生产模型中,主要的思路有两个:一是将污染变量作为一种投入(如 Hailu and Veeman 2001);二是将污染变量作为具有弱可处置性的“坏”产出(如 Chung et al, 1997)。本文主要是运用 Chung 等 (1997)在测度瑞典纸浆厂的全要素生产率时介绍的一种新函数——方向性距离函数来测度环境约束下中国火电行业的技术效率。

#### 1. 环境技术

为了将环境因素纳入效率分析的框架中,我们首先需要构造一个既包含“好”产出,又包含“坏”产出的生产可能集。Färe 等 (2007b)将这种生产可能集称为环境技术 (The Environment Technology)。用产出集合模拟环境技术为:

$$P(x) = \{ (y, b) : x \text{ 可以生产 } (y, b) \}, x \in R_+^N \quad (1)$$

其中,集合  $P(x)$  是指  $N$  种要素投入  $x$  所能生产的“好”产品  $y$  与“坏”产品  $b$  的所有组合。投入向量表示为  $x = (x_1, \dots, x_N) \in R_+^N$ ; “好”产品向量表示为  $y = (y_1, \dots, y_M) \in R_+^M$ ; “坏”产品向量表示为  $b = (b_1, \dots, b_N) \in R_+^N$ , 是指生产过程中排放的污染物,如废气、废水等(本文中是指火电行业产生的主要污染物  $SO_2$ )。此外,环境技术的产出集合  $P(x)$  具有联合弱可处置性 (Jointly Weak Disposability)、强可处置性 (Strong or Free Disposability)、零结合公理 (Null-jointness Axiom, 或称副产品公理 (Byproducts Axiom))、投入的自由可处置性 (Free Disposability) 四个特征(详见王兵等, 2008 涂正革, 2008)。

假设在某时期  $t (t = 1, \dots, T)$  的某省  $k (k = 1, \dots, K)$  的投入和产出值为  $(x_{kt}^i, y_{kt}^j, b_{kt}^l)$ 。运用数据包络分析 (DEA) 可以将满足上述特征的环境技术模式表示为:

<sup>①</sup>2002 年颁布的《电力体制改革方案》使我国电力体制改革迈出重大步伐。“十五 (2001-2005)”和“十一五 (2006-2010)”规划则对火电行业的节能减排作出了明确规定。

$$P^t(x^t) = \begin{cases} \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t \geq y_{km}^t & m = 1, \dots, M \\ \sum_{k=1}^K z_k^t b_{kj}^t = b_{kj}^t & j = 1, \dots, J \\ \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t \leq x_{kn}^t & n = 1, \dots, N; z_k \geq 0, k = 1, \dots, K \end{cases} \quad (2)$$

## 2 方向性距离函数

环境技术实际上给出了环境产出的可能前沿,即在给定投入  $x$  条件下,最大产出、最小污染的集合。Chung 等 (1997) 根据 Luenberger (1992, 1995) 短缺函数 (Short Function) 的思想构建了方向性环境距离函数:

$$D(x, y, b, g) = \sup \{ \beta (y, b) + \beta g \in p(x) \} \quad (3)$$

其中,  $g = (g_y, g_b)$  是“好”产出和“坏”产出扩张和缩减的方向向量。对于给定投入  $x$ , 当产出  $y$  和污染  $b$  按照相同比例扩张和收缩, 那么  $\beta$  就是产出  $y$  增长、污染物  $b$  减少的最大可能数量。因此, 方向性距离函数值衡量了生产者相对于前沿环境技术水平, 非效率 (Inefficiency) 的大小程度。我们通过解数学线性规划来计算方向性距离函数:

$$\begin{aligned} \rightarrow & D_0(x_k^t, y_k^t, b_k^t; y_k^t, -b_k^t) = \max \beta \\ \text{s.t.} & \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t \geq (1 + \beta) y_{km}^t \quad m = 1, \dots, M \\ & \sum_{k=1}^K z_k^t b_{kj}^t = (1 - \beta) b_{kj}^t \quad j = 1, \dots, J \\ & \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t \leq x_{kn}^t \quad n = 1, \dots, N; z_k \geq 0, k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (4)$$

如果方向性距离函数的值等于零, 则表明该省的生产处于生产可能性边界上, 具有技术效率, 否则表示技术无效率。为了将方向性距离函数转换为符合值越大技术效率越高的指标, 我们根据 Chung 等 (1997), 利用式 (5) 进行转换:

$$TE(x_k^t, y_k^t, b_k^t; y_k^t, -b_k^t) = \frac{1}{1 + D_0(x_k^t, y_k^t, b_k^t; y_k^t, -b_k^t)} \quad (5)$$

## (二) 数据处理

鉴于数据的可得性与完整性, 本文选取 2001-2007 年中国 30 个省 (西藏除外) 的火电行业产出与投入的数据, 其中产出变量为发电量 (亿千瓦) 和  $\text{SO}_2$  (吨), 投入变量包括劳动力 (人)、机组容量 (万千瓦) 和燃料 (万吨)。发电量和  $\text{SO}_2$  分别代表“好”产出和“坏”产出。<sup>①</sup> 由于缺乏火电行业劳动人数的单独统计, 故劳动力变量采用与之具有高度相关性的电力、热力生产与供应从业人数来替代; 机组容量代表火电行业的资本投入量; 燃料用标准煤来表示, 由发电量乘以发电技术经济指标中的标准煤耗计算得出。除  $\text{SO}_2$  和劳动力分别来源于历年《环境统计年鉴》和《中国劳动统计年鉴》外, 其余数据均来源于《电力年鉴》相关各年。

为了检验变量选取的合理性, 我们借鉴白雪洁和宋莹 (2009) 的方法, 采用非参数的 Kendall's tau-b 秩方法对 30 个省的投入与产出变量进行相关性分析 (见表 1)。从表 1 可以看到, 投入产出变量之间具有显著相关性。

表 1 Kendall's tau-b 相关系数

变量		劳动力	机组容量	燃料
发电量	相关系数	0.528***	0.904***	0.946***
	P 值	0.000	0.000	0.000
$\text{SO}_2$	相关系数	0.522***	0.589***	0.616***
	P 值	0.000	0.000	0.000

注: \*\*\* 表示相关系数在 1% 水平上显著。

<sup>①</sup> 由于西藏火电行业相应数据的欠缺, 故在研究对象中将西藏排除。由于我国统计资料缺乏各省火电行业  $\text{CO}_2$  排放量的统计, 所以也没有将其纳入研究范围中。

对产出与投入数据的统计描述见表 2。在研究期间,除了受国家宏观调控的影响使得 2004-2005 年间的发电量增长速度有所回落外,火电行业电力生产一直保持较高的增长水平。燃料投入基本保持着稳定的增长速度,而 SO<sub>2</sub> 增长变化急剧。SO<sub>2</sub> 排放量经历了 2001-2002 年间低速增长后,2002-2005 年间急速增长,平均增速将近 20%。能源消费的超常规增长和火电行业 SO<sub>2</sub> 排放增长过快是导致“十五”期间 SO<sub>2</sub> 排放总量失控的主要原因。<sup>①</sup> 而到了“十一五”初期,SO<sub>2</sub> 增长迅速回落到 2.59%,甚至出现负增长 1.92%,这得益于装备脱硫设施的火电机组占全部火电机组的比例由 2006 年的 32% 提高到 2007 年的 48%。<sup>②</sup>

表 2 投入与产出的数据描述 (年增长率 %)

变量	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007
发电量	13.09	19.69	13.56	9.27	17.88	15.23
SO <sub>2</sub>	4.38	27.24	15.3	16.90	2.59	-1.92
劳动力	1.57	1.33	1.82	1.18	1.61	0.65
机组容量	3.81	9.05	12.44	13.42	24.69	18.91
燃料	7.9	20.42	11.28	10.19	13.45	11.63

### 三、实证结果分析

根据上述研究方法及所得数据,运用 GAMS22.6 软件包得到了我国火电行业技术效率的测算结果 (见表 3 和图 1)。我们选择了 2001、2004 和 2007 年三个年份的技术效率值,依照研究期间各省技术效率平均值由高到低排列,得出表 3 的结果。

表 3 中国各省区火电行业技术效率值<sup>③</sup>

省份	2001	2004	2007	年均值	省份	2001	2004	2007	年均值
上海	1.000	1.000	1.000	1.000	内蒙古	0.925	0.987	0.948	0.955
北京	1.000	1.000	1.000	1.000	青海	1.000	1.000	0.863	0.937
天津	1.000	1.000	1.000	0.999	辽宁	0.919	0.936	0.939	0.934
贵州	1.000	0.985	1.000	0.994	吉林	0.943	0.909	0.935	0.926
宁夏	1.000	1.000	0.993	0.993	山东	0.946	0.955	0.909	0.922
安徽	1.000	1.000	0.945	0.982	江西	0.867	0.936	0.928	0.912
浙江	0.974	0.955	0.997	0.976	湖北	0.877	0.925	0.953	0.909
广西	1.000	0.952	0.966	0.974	云南	0.886	0.904	0.912	0.903
江苏	0.960	0.948	1.000	0.972	湖南	0.879	0.902	0.895	0.888
福建	0.936	0.985	0.990	0.966	河南	0.910	0.804	0.937	0.885
重庆	0.892	1.000	1.000	0.965	黑龙江	0.889	0.886	0.872	0.878
河北	0.988	0.963	0.939	0.962	新疆	0.813	0.795	0.822	0.809
甘肃	0.918	1.000	0.940	0.959	四川	0.789	0.817	0.846	0.799
山西	0.953	0.924	0.961	0.958	东部	0.960	0.972	0.976	0.968
陕西	0.942	0.942	0.976	0.958	中部	0.914	0.909	0.928	0.917
广东	0.944	0.972	0.965	0.958	西部	0.921	0.941	0.931	0.929
海南	0.898	0.983	1.000	0.958	全国	0.933	0.944	0.946	0.940

从省份层面来看,技术效率排名前五位的省份分别为上海、北京、天津、贵州和宁夏,其技术效率平均值达到了 0.997。排名末五位的省份分别为四川、新疆、黑龙江、河南和湖南,其技术效率平均值只有 0.852。其中四川效率平均值低于 0.8。可知,前五位省份都处于经济发达的沿海地区或者属于煤炭资源丰富的省份,而未五位省份则处于经济相对落后的中西部地区。这说明经济发达地区和煤炭资源丰富的省份更有可能拥有较高的技术效率,这与 Lam 和 Shiu (2004) 的结论是一致的。出现这样的结果可能是因为经济发达地区领先的整体技术水平、开放的市场体制以及煤炭大省丰富的资源更有利于火电行业技术效率的提高。同时,我们还应该看到排在首位的上海和北京的技术效率值 (1.000) 只是排名末位的四川省 (0.799) 的 1.25 倍,说明各省技术效率值存在一定的差距,但差距并没有想象的那么明显。若与发达国家的火电行业相比,我国的

①援引中国环境规划院副院长邹首民于 2006 年 4 月 12 日在国家环保总局举行的新闻通气会上的讲话。

②关于装备脱硫设施比例的数据来源于《2007 年中国环境状况公报》。

③以下计算的技术效率值是相对的,是与研究样本中处于生产前沿的省份相比较得出的结果。若某一省份技术效率最优值为 1 时,则其处于生产前沿。

效率将会存在较大的差距 (Lan and Shiu, 2004)。然而,陶峰等 (2008)在没有考虑环境约束的情况下,得出 2002-2005 年中国各省之间的 DEA 技术效率值存在着较大的差异的结论,并将各省分为高效率、中等效率、低效率三个层次。这可能与两者研究方法的不同和是否考虑环境因素存在着联系。但是,在陶峰等 (2008)的研究中,处于高效率层次的 7 个省份都属于经济发达地区或煤炭资源丰富省份,与本文研究结果相同。<sup>①</sup>此外,白雪洁和宋莹 (2009)的研究结果与本文一致,表现为各省火电行业技术效率值差距不明显。

从地区层面来看,中西部地区技术效率值低于东部地区,甚至低于全国平均水平;而 2001-2004 年间,中部地区技术效率落后于西部地区且差距越拉越大,到了 2005 年以后两地区的技术效率水平开始接近 (见表 3 及图 1)。具体来说,东部经济发达地区凭借良好的市场机制和较高的技术水平,使得其技术效率达到 0.968 而西部地区 (0.929)依靠丰富的资源和“西电东送”等国家能源政策使得其技术效率又略高于中部地区 (0.917),但是能源政策的实施对西部地区技术效率的促进作用是逐步递减的。虽然 Lan 和 Shiu (2004)、陶峰等 (2008)以及白雪洁和宋莹 (2009)的研究中都没有直接对技术效率进行地区比较,但是我们从其公布的实证结果,经过整理后可以看出在他们的研究中,东中西部火电行业技术效率也存在着差异。其中,东部地区技术效率都要高于中西部,只是在中部与西部之间孰高孰低的问题上存在着不同。

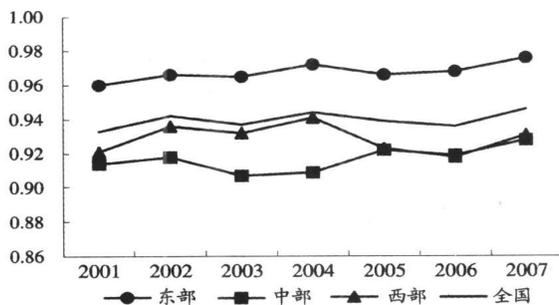


图 1 各地区年平均技术效率

从总体层面来看,我国火电行业技术效率有所起伏 (见图 1),从 2001 年的 0.933 上升到 2004 年的 0.944,2006 年却回落到 0.936,到 2007 年又上升为 0.946。总的来说,研究期间我国火电行业技术效率值略有上升,平均水平为 0.940。白雪洁和宋莹 (2009)从环境强规制层次上计算得出的 2004 年全国平均技术效率值为 0.89,低于本文计算得出的相应技术效率值。<sup>②</sup>长期以来粗放的发展模式和忽视环境保护造成了我国资源紧缺,环境质量不断恶化,生态功能持续下降,环境事故频发,生态风险凸显。发达国家上百年陆续出现的环境问题在我国短短几十年集中反映出来。为了检验我国火电行业发展模式与环境约束下技术效率的关系,我们在前面研究的基础上,利用公式 (6)计算出技术效率变化值 (EFFCH),并以此来研究各省火电行业发展模式与技术效率变化率之间的关系。

$$EFFCH_t^{t+1} = \frac{1 + D_0(x_k^t, y_k^t, b_k^t; y_k^t, -b_k^t)}{1 + D_0(x_k^{t+1}, y_k^{t+1}, b_k^{t+1}; y_k^{t+1}, -b_k^{t+1})} \quad (6)$$

胡鞍钢等 (2008)研究了中国各省总体经济增长模式与环境约束下技术效率的关系。他们发现,一个省份增长模式越是接近集约型,其技术效率进步越快;而一个省份增长模式越是接近粗放型,其技术效率进步越慢。本文采用机组容量增长率和发电量增长率的比值来衡量一个省份火电行业的发展模式,如果该比值小于 1,则该省份为“集约式”发展模式,否则为“粗放式”发展模式。<sup>③</sup>按照这个比值,我们发现 2001-2007 年有 13 个省份属于“粗放式”发展模式 (见表 4)。这表明,“十五”期间和“十一五”前期发展大型燃煤电厂,进一步优化火电机组结构,推进循环流化床、洁净煤燃烧、空冷机组等高新技术的应用促进了火电行业生产

①陶峰等 (2008)认为大于 0.9 为高效率,大于 0.6 而小于 0.9 为中等效率,小于 0.6 为低效率,其中处于高效率层次的省份分别是上海、北京、河北、宁夏、贵州、广东和山东。

②白雪洁和宋莹 (2009)的研究中所指的环境强规制模型与方向性距离函数中“既要求产出增加,又要求污染减少”的思想是一致的。但是,我们在文献综述部分已经提到 Färe 和 Grosskopf (2004)对 Seiford 和 Zhu (2002)的方法进行了批评。

③胡鞍钢等 (2008)采用资本存量增长率和 GDP 增长率的比值来衡量中国各地区的经济增长模式。

能力的提高,但还有将近一半的省份仍然主要是通过扩大机组容量规模来实现发电量增长。

表 4 各省份发展方式划分

方式	省份
粗放型发展	上海 (1.000)、河北 (1.000)、广西 (1.001)、江苏 (1.007)、重庆 (1.007)、宁夏 (1.011)、河南 (1.012)、云南 (1.014)、山东 (1.016)、内蒙古 (1.022)、浙江 (1.028)、青海 (1.029)、贵州 (1.034)
集约型发展	海南 (0.893)、福建 (0.927)、天津 (0.938)、江西 (0.949)、吉林 (0.964)、新疆 (0.966)、辽宁 (0.972)、湖北 (0.973)、黑龙江 (0.974)、四川 (0.977)、甘肃 (0.979)、北京 (0.981)、山西 (0.987)、陕西 (0.988)、安徽 (0.992)、湖南 (0.993)、广东 (0.996)

为了检验火电行业发展方式与技术效率变化率的关系,我们假设机组容量增长率和发电量增长率的比值为  $G$ , 技术效率变化值为  $EFFCH$ , 对两者进行 OLS 回归估计, 得出以下结果 (见图 2):

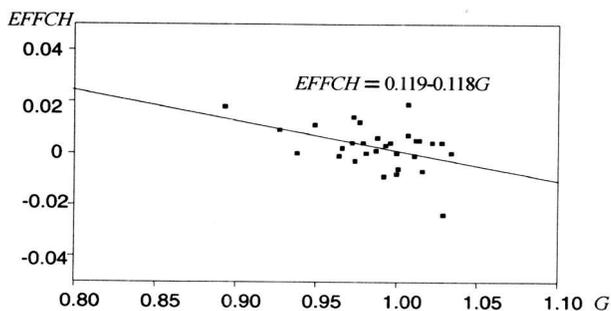


图 2 增长方式与技术效率变化拟合图

常数项与  $G$  的系数均通过了 5% 的显性水平的检验。回归系数为负, 意味着发展模式越粗放的省份, 其技术效率越低。这就说明火电行业发展模式与技术效率变化率显著相关, 这与胡鞍钢和郑京海等 (2008) 以中国各省整体经济为研究对象时所得出的结论是一致的。因此, 一个省份要想提高火电行业的技术效率就必须转变其发展模式。

#### 四、技术效率影响因素分析

上文已经对技术效率的实证结果进行了分析, 那么有哪些因素影响技术效率呢? 紧接着我们将着重地对技术效率的影响因素进行实证分析。由于机组容量和燃料是火电生产的不可或缺的投入变量, 因此我们与 Pun- Lee Lam 和 Alice Shiu (2004) 一样, 将机组容量利用率和燃料效率作为技术效率的影响因素。<sup>①②</sup> 我们用  $X_1$  代表机组容量利用率, 等于机组全年运行小时数占全年总小时数的比例;  $X_2$  代表燃煤效率, 用发电技术经济指标的标准煤耗 (kg/kwh) 来反向表示, 表示生产一度电需要消耗多少千克标准煤 (该值越低, 说明燃煤效率越高; 反之则燃煤效率越低)。同时, 我们还将环境约束作为技术效率的影响因素, 用  $X_3$  代表环境约束, 由治硫费用表示, 等于治理废气运行费用 (万元) 与发电量 (百万千瓦) 的比值。它不仅代表企业防治污染的投入程度, 也反映了政府环境管制力度。<sup>③</sup>  $X_1$  和  $X_2$  的数据都来源于《电力年鉴》,  $X_3$  则来源于《环境统计年鉴》。由于篇幅所限, 在此将不对它们进行数据描述。此外, 我们还引入了年份虚拟向量  $T_{2002} = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ 、 $T_{2003} = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ 、 $T_{2004} = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)^T$ 、 $T_{2005} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)^T$ 、 $T_{2006} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)^T$

① Pun- Lee Lam 和 Alice Shiu (2004) 的研究中使用机组容量利用率、燃料效率和国家电力公司 (SPC) 组织控制虚拟变量这三个指标来分析中国火电行业技术效率的影响因素。由于经过 2002 年的电力体制改革, 国家电力公司已不存在, 所以本文并没有使用组织控制虚拟变量。此外, Pun- Lee Lam 和 Alice Shiu (2004) 的影响因素检验中只使用了 2000 年的数据, 而本文研究使用的是 2001- 2007 年的面板数据。由于各省火电行业从业人员的学历和职称构成的数据无法取得, 因此本文研究没有将劳动者素质纳入影响因素的考虑范围。

② Pun- Lee Lam 和 Alice Shiu (2004) 将机组容量利用率和燃煤效率对技术效率的作用机理归结为: 更高的机组容量利用率有利于电力生产单位享有更大的规模效应和更低的电力生产成本, 从而改善了其技术效率; 燃煤效率主要由电力生产企业的运作效率 (Operating Efficiency) 和热效率 (Thermal Efficiency) 决定, 而享有更高热效率的电力生产企业更有可能促进技术效率的提高。

③ 加强环境管制力度, 使得在投入一定的情况下“好”产出和“坏”产出同时减少。因此, 环境管制对技术效率的作用如何具有不确定性, 应视具体研究对象和时期而定。

$Q \ 1 \ 0)^T, T_{2007} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)^T$  作为技术效率的影响因素, 以此来考察技术效率在研究期间的动态变化。

表 5 技术效率影响因素的回归分析

变量	模型 I		模型 II		模型 III	
	系数	t 值	系数	t 值	系数	t 值
C	1.425 <sup>***</sup>	48.98	1.477 <sup>**</sup>	51.013	1.497 <sup>**</sup>	52.85
X <sub>1</sub>	0.107 <sup>***</sup>	7.42	0.106 <sup>***</sup>	7.65	0.162 <sup>**</sup>	11.014
X <sub>2</sub>	-1.556 <sup>***</sup>	-19.878	-1.687 <sup>***</sup>	-21.737	-1.812 <sup>***</sup>	-25.48
X <sub>3</sub>	-0.015 <sup>***</sup>	-3.538	-0.041 <sup>***</sup>	-5.481	-0.012 <sup>*</sup>	-1.334
(X <sub>3</sub> ) <sup>2</sup>			0.010 <sup>***</sup>	4.366	0.005 <sup>*</sup>	1.79
T <sub>2002</sub>					-0.001	-0.267
T <sub>2003</sub>					-0.006	-1.219
T <sub>2004</sub>					-0.027 <sup>***</sup>	-4.963
T <sub>2005</sub>					-0.034 <sup>***</sup>	-6.356
T <sub>2006</sub>					-0.039 <sup>***</sup>	-7.295
T <sub>2007</sub>					-0.039 <sup>***</sup>	-6.499

注: \*\*\* 表示显著水平为 5%, \*\* 表示显著水平为 10%, \* 表示显著水平为 20%。

为了修正可能的异方差和序列相关问题, 我们采用面板数据的可行性广义最小二乘法 (FGLS), 利用 Eview 6.0 软件对模型 I、模型 II 和模型 III 进行估算 (结果见表 5)。同时对三个模型进行估算, 是为了更好地检验各影响因素与技术效率之间的关系。我们的实证发现主要可归纳为以下几个方面:

第一, 在三个回归模型中机组容量利用率和燃料效率都对技术效率具有显著的影响。机组容量利用率和燃料效率的回归系数分别为正和负, 与 Pun- Lee Lam 和 Alice Shiu (2004) 在没有考虑环境约束的情况下而得出的检验结果是一样的。一方面, 机组容量利用率的回归系数为正, 说明机组容量利用率越高越有利于技术效率的提高。我们的研究数据表明, 沿海经济发达省份 (如江苏、浙江等) 和煤炭大省 (如山西、贵州和宁夏等) 更有可能保持较高的机组容量利用率。<sup>①</sup> 这可能是因为沿海经济发达省份庞大的电力需求市场和煤炭大省丰富的煤炭资源使得机组更有可能高负荷地运转。另一方面, 燃料效率的回归系数为负, 说明生产 1 度电所消耗的标准煤越少, 越有利于技术效率的提高。根据国家电力监管委员会《电力监管年度报告 (2009)》, 1997-2009 年我国供电煤耗逐年降低, 从 408 克 / 千瓦时下降到 339 克 / 千瓦时, 这在一定程度上提高了我国火电行业的技术效率。但是, 2007 年我国发电标准煤耗为 334 克 / 千瓦时, 比同期美国发电标准煤耗高 29 克 (林森, 2009)。我国燃料效率低下也在一定程度上给我国“十五”和“十一五”规划中节能减排目标的实现带来了困难。

第二, 当前我国的环境管制程度不利于技术效率的提高。在模型 I 中, 治硫费用的系数估计值为负值, 说明当前企业的污染防治投入对技术效率的提高起负作用, 即环境管制阻碍了技术效率的提高。为了更好地检验环境约束与技术效率的关系, 我们在模型 II 中引入了环境约束的二次项。研究发现一次项和二次项的符号分别为负和正, 且两者都在 5% 水平上显著。这表明环境约束和技术效率之间基本呈现“U”型关系, 即治硫费用处于低水平时, 增加费用将会导致技术效率的下降; 当超过一定的临界点时, 再增加费用将会逐步提高技术效率。在模型 II 计算出的临界点为 2.05 而截至 2007 年底, 全国平均治硫费用仅为 0.688 (万元 / 百万千瓦), 绝大多数的省份治硫费用还远远低于该临界值。可见, 在我们的研究期间内, 若政府采取严格的环境管制和加大治硫力度并使其越过临界值, 将有利于促进技术效率的改善。这也说明了加强环境管制力度是我国火电行业技术效率的优化路径之一。

第三, 我国电力体制改革对技术效率的促进作用并没有体现。在模型 III 中我们又引入了时间虚拟向量 T<sub>2002</sub>、T<sub>2003</sub>、T<sub>2004</sub>、T<sub>2005</sub>、T<sub>2006</sub>、T<sub>2007</sub>。模型 III 中 X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub> 和 (X<sub>3</sub>)<sup>2</sup> 的回归系数符号与模型 I 和模型 II 是一致的。除了 T<sub>2002</sub>、T<sub>2003</sub> 的回归系数为负但不显著外, 其余时间虚拟变量的回归系数均为负且显著。T<sub>2004</sub>、T<sub>2005</sub>、T<sub>2006</sub>、T<sub>2007</sub> 的回归系数为负且显著, 说明电力体制改革期间我国火电行业总体技术效率没有得到改善, 甚至出现了下降。这也表明我国电力体制改革还面临着许多困难, 改革还需要不断地深化。

①陶峰等 (2008) 在技术效率影响因素分析部分中, 得出各地区原煤产量 (说明地区煤炭资源丰富程度) 对技术效率影响显著而为正。

## 五、结论

本文在考虑环境约束的前提下,运用方向性距离函数测算了 2001—2007 年我国火电行业的技术效率值,研究了发展模式与技术效率变化率的关系,并对火电行业技术效率的影响因素进行了实证分析。研究结果表明:

1 经济发达和煤炭资源丰富的省份的技术效率一般要高于其他省份,但相互之间的差距并不大;中西部地区技术效率(0.917, 0.929)要低于东部地区(0.968);研究期间全国技术效率值略有上升,平均水平为 0.940。

2 火电行业发展模式与技术效率变化率存在显著的相关关系。也就是说,一个省份火电行业的发展模式越是接近“集约型”,其技术效率进步越快;而其发展模式越是接近“粗放型”,其技术效率进步越慢。

3 机组容量利用率、燃料效率和环境约束对技术效率具有显著影响。机组容量利用率和燃料效率越高越有利于技术效率的提高;而当前我国针对火电行业的环境管制阻碍着技术效率的提高,但是环境管制水平与技术效率之间呈现“U”型关系,即当管制程度超过一定的临界点时,环境管制越严厉越有利于技术效率的提高。

4 通过时间虚拟变量的引入,研究发现电力体制改革期间,我国火电行业总体技术效率没有得到改善,甚至出现了下降,即电力体制改革没有体现应有的成效。

### 参考文献:

1. 白雪洁、宋莹, 2008《中国各省火电行业的技术效率及其提升方向——基于三阶段 DEA 模型的分析》,《财经研究》第 10 期。
2. 白雪洁、宋莹, 2009《环境规制、技术创新与中国火电行业的效率提升》,《中国工业经济》第 8 期。
3. 胡鞍钢、郑京海、高宇宁、张宁、许海萍, 2008《考虑环境因素的省级技术效率排名(1999—2005)》,《经济学(季刊)》第 4 期。
4. 林森, 2009《基于 SCP 分析框架的我国电力产业改革思路探讨》,《商业时代》第 12 期。
5. 楼旭明、龚彩兰、汪贵浦, 2006《基于 DEA 的中国电力改革绩效相对有效性评价》,《当代财经》第 4 期。
6. 罗道平、肖笛, 1996《数据包络分析(DEA)在电力工业的应用》,《系统工程理论与实践》第 4 期。
7. 陶峰、郭建万、杨舜贤, 2008《电力体制转型期发电行业的技术效率及其影响因素》,《中国工业经济》第 1 期。
8. 涂正革, 2008《环境、资源与工业增长的协调性》,《经济研究》第 2 期。
9. 王兵、吴延瑞、颜鹏飞, 2008《环境管制与全要素生产率增长: APEC 的实证研究》,《经济研究》第 5 期。
10. 孙建国、李文溥, 2003《电力行业技术效率和全要素生产率增长的国际比较》,《中国经济问题》第 6 期。
11. Athanassopoulou A. D., N. Lambroukos and L. Seiford 1999. “Data Envelopment Scenario Analysis for Setting Targets to Electricity Generating Plants” *European Journal of Operational Research*, 115: 413–428.
12. Barros C. P. 2008 “Efficiency Analysis of Hydroelectric Generating Plants: A Case Study for Portugal” *Energy Economics*, 30(1): 59–75.
13. Caveş D. W., L. R. Christensen and W. E. Diewert 1982. “Multilateral Comparisons of Output, Input and Productivity Using Superlative Index Numbers” *Economic Journal*, 92 (March): 73–86.
14. Chung Y. H., and R. S. Grosskopf 1997. “Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach” *Journal of Environmental Management*, 51(3): 229–240.
15. Domazlicky Bruce and William Weber 2004. “Does Environmental Protection Lead to Slower Productivity Growth in the Chemical Industry.” *Environmental and Resource Economics* 28(3): 301–324.
16. Färe R., S. Grosskopf and J. Logan 1985. “The Relative Performance of Publicly-owned and Privately-owned Electric Utilities” *Journal of Public Economics* 26: 89–106.
17. Färe R., S. Grosskopf, C. A. K. Lovell and C. Pasurka 1989. “Multilateral Productivity Comparisons when Some Outputs are Undesirable: A Nonparametric Approach.” *The Review of Economics and Statistics* 71: 90–98.
18. Färe R., S. Grosskopf, S. Yaisawamg, S. K. Li and Z. Wang 1990. “Productivity Growth in Illinois Electric Utilities” *Resources and Energy*, 12(4): 383–398.
19. Färe R., S. Grosskopf and D. Tyteca 1996. “An Activity Analysis Model of the Environmental Performance of Firms—application to Fossil-fueled Electric Utilities” *Ecological Economics* 18(2): 161–175.
20. Färe R., S. Grosskopf and A. P. J. Carl 2001. “Accounting for Air Pollution Emissions in Measures State Manufacturing Productivity Growth” *Journal of Regional Science*, 41(3): 381–409.
21. Färe R., and S. Grosskopf 2004. “Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation: Comment” *European Journal of Operational Research*, 157(1), 242–245.
22. Färe R., S. Grosskopf, A. P. J. Carl and William Weber 2007a. “Substitutability among Undesirable Outputs” Working Paper, Oregon State University, Corvallis, OR (2007).

(下转第 108 页)

## Research on Asymmetry of Chinese Treasury Auction Market Auction Econometrical Analysis Based on Structural Methods

Xia Xiaohua<sup>1</sup>, Li Jinyi<sup>2</sup> and Wang Meijin<sup>3</sup>

(1 Peking University 2 Jinan University 3 Sun Yat-sen University)

**Abstract** This paper extends A-S Constrained Strategic Equilibrium model to make use of hybrid auction data. Based on structural auction econometrical methods, we find there are evident asymmetry in Chinese treasury investors, the small investors' requirement tactics are approximately linear, other kinds of investors exhibit nonlinear relationship between requirement tactics and prices, large investors are the major source of market power. Counter-fact analysis indicates uniform auction has highest revenue, and auction methods have different influences on the open position of different investors. Simulation research results suggest the seller should introduce more small investors and the investors should lower their bidding price to decrease "winner's curses".

**Key Words** Treasury Auction; Structural Econometrics; Simulation Moments

**JEL Classification** D44, G12

(责任编辑:陈永清、刘明宇)

(上接第 97 页)

23 Färe R., S. Grosskopf and Carl A. Pasurka 2007h "Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions." *Energy*, 32(7), pp. 1055–1066.

24 Gollop F. M., and M. J. Roberts 1983 "Environmental Regulations and Productivity Growth: The Case of Fossil-fueled Electric Power Generation." *Journal of Political Economy*, 91(4): 654–674.

25 Hailu A., and T. S. Veeman 2001 "Non-parametric Productivity Analysis with Undesirable Outputs: An Application to the Canadian Pulp and Paper Industry." *American Journal of Agricultural Economics*, 83(3), pp. 605–616.

26 Korhonen Pekka J., and Mikuš Luptacik 2004 "Eco-efficiency Analysis of Power Plants: An Extension of Data Envelopment Analysis." *European Journal of Operational Research*, 154(2): 437–446.

27 Lam, Pun-lee and Alice Shiu 2004 "Efficiency and Productivity of China's Thermal Power Generation." *Review of Industrial Organization*, 24(1): 73–93.

28 Luenberger D. G., 1992 "Benefit Functions and Duality." *Journal of Mathematical Economics*, 21(5): 461–481.

29 Luenberger D. G., 1995 *Microeconomic Theory*. Boston: McGraw-Hill.

30 Pittman R. W. 1983 "Multilateral Productivity Comparisons with Undesirable Outputs." *Economic Journal*, 93(372), pp. 883–891.

31 Seiford L., and J. Zhu 2002 "Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation." *European Journal of Operational Research*, 142(1), 16–20.

32 Yaisawang S. Klein, and J. Douglass 1994 "The Effects of Sulfur Dioxide Controls on Productivity Change in the U. S. Electric Power Industry." *Review of Economics and Statistics*, 76(3): 447–460.

## An Empirical Study on Technical Efficiency of China's Thermal Power Generation and Its Determinants under Environmental Constraint

Wang Bing Lu Jinyong and Chen Ru

(School of Economics, Jinan University)

**Abstract** This paper adopts directional distance functions to measure the technical efficiency of China's Thermal Power Generation over the period 2001 to 2007 under the constraint of SO<sub>2</sub> emissions, and empirically examines influencing factors of efficiency. The results indicate that the technical efficiency is higher in coastal areas or those provinces rich in coal, and eastern areas have higher technical efficiency than central and western areas. The average technical efficiency arrives at 0.940 in China between 2001 and 2007. The development model is negatively correlated with the technical efficiency change. It is also found that capacity utilization rate, fuel efficiency and environmental regulation have significant influence on technical efficiency, and the reform of power system has not promoted the improvement of technical efficiency.

**Key Words** Environmental Constraint; Technical Efficiency; Directional Distance Functions

**JEL Classification** D24, L94, Q53

(责任编辑:陈永清)