

DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2015.0408

中国电力行业环境技术效率及影响因素研究 ——基于1995—2012年省级面板数据

范玉仙, 袁晓玲

(西安交通大学 经济与金融学院, 西安 710061)

摘要:基于电力系统生产供应的内在机制和NSBM(Network SBM)模型,将能源、环境因素纳入投入产出体系,打开系统内部的“黑箱”,考察1995—2012年中国30个省区电力行业总体、发电环节和电网环节的环境技术效率。结果表明:中国电力行业环境技术效率特别是环境纯技术效率偏低。1998年“政企分开”的体制改革对电力行业环境技术效率有正向促进作用,而2002年“厂网分开”的体制改革则未起到积极作用;国有资产控制水平与发电环境技术效率呈倒“U”形关系,临界值为69.6%,2002年以后有越来越多的地区位于临界点的左侧;集中输入和集中输出的跨区电力贸易促进了发电环境技术效率的提高,但不利于电网环境技术效率的提升;煤炭资源聚集的地区环境技术效率偏低,表明这些地区存在资源滥用和环境治理不到位的情况,同时也体现了地区层面的“资源诅咒”“污染天堂”现象。

关键词: 电力行业; 环境技术效率; NSBM模型; 政府规制

中图分类号: F424.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-3370(2015)04-0057-10

电力行业是国民经济发展的重要支撑,是现代
社会进步、国家能源安全的基础和保障,同时也是
消耗煤炭、天然气等稀缺能源进而造成环境污染的
第一“罪魁祸首”。在第22次APEC(Asia-Pacific
Economic Cooperation)会议上,中国承诺2030年
左右CO₂排放达到峰值且将努力早日达峰,并计划
到2030年非化石能源占一次能源消费比重提高
到20%左右。提高电力行业环境效率无疑是实现这
一目标的重要保障。在纳入能源环境因素后,中国
电力行业的技术效率如何?哪些因素影响电力行业
的环境技术效率?中国从20世纪90年代开始逐步
实施的电力行业体制改革,意在打破垄断,提高电
力行业效率,那么,20多年的改革是否真的促进了
中国电力行业的环境技术效率?

关于电力行业效率的测量,文献中最常用的方
法是DEA(Data Envelopment Analysis)方法,如
Sueyoshi T等(2012)^[1],Kwoka J等(2010)^[2],Yang H
等(2010)^[3],陶锋、郭建万等(2008)^[4]分别运用DEA
方法测算电力行业的效率。传统的DEA模型将被
评价单元的生产过程视作一个黑箱,根据评测结果
难以找出导致决策单元无效率的具体环节,从而限
制了DEA的实用性^[5]。为了解决这一问题,1996年
Färe和Grosskopf对传统DEA方法进行了改进,建

立了第一个网络DEA模型^[6],后来一些学者如Färe
Rolf、Grosskopf Shawna(2000)^[7],K.Tone、Tsutsui M.
(2009)^[8],毕功兵等(2009)^[9],Yu Ming-Miin、Lin
Erwin T J(2008)^[10]对网络DEA模型作了进一步
的研究,其中K. Tone将网络模型与SBM(slacks-
based measure)模型相结合构建了NSBM(network
SBM)模型,关注产业链上具体环节的效率及其相互
关系,解决了“黑箱化”处理的问题,同时还考虑了
径向松弛和非期望产出的问题。将NSBM模型用于
分析电力产业技术效率的文献极少,本文用该方法
打开电力行业的“黑箱”,将煤炭消耗、清洁能源比
例的期望产出、污染排放的非期望产出同时纳入投
入产出指标体系,研究电力行业总体、发电和电网
环节的环境技术效率。

在投入产出指标选择上,根据研究目的和侧重
点的不同而有所差异。如表1所示,文献中有的
是基于微观电力企业的财务数据;有的是基于中
观电力行业的实物性投入产出数据,从总体来看,
大多数的文献从资产投入和人力投入两方面考
虑,还有些文献也考虑了煤炭资源的投入,但是
除彭昱外,很少有文献考虑电力污染排放的非期
望产出和清洁能源发电比例的期望产出。

关于电力行业技术效率的影响因素,很多学者

收稿日期: 2014-12-30

基金项目: 国家社会科学基金重点项目资助“电网智能化对中国能源供用方式和能源产业格局的影响及发展战略研究”(12AZD103)

作者简介: 范玉仙(1978—),女,讲师,博士研究生,E-mail: qdfyx2002@sohu.com; 袁晓玲(1964—),女,教授,博士生导师,E-mail: xiaoling@xjtu.edu.cn

表1 参考文献中电力行业投入产出指标的选择统计

文献作者	投入指标	产出指标	研究主题和研究范围
Alexander-Vaninsky ^[11]	营业费用、能源耗费	净产能利用率	美国电力行业环境效率
李永来 ^[12]	资产、人力、成本、资产负债率	收益类指标	以39家电力上市公司为例,研究市场化改革与电力行业效率
徐云鹏 ^[13]	资产、工资	主营业务收入	1998—2007年34个电力上市公司为例,研究政府电力管制
李金超 ^[14]	从业人员、主营业务成本、变电容量、线路总长度	售电量、利润表示经济效应指标;线损率、供电煤耗、清洁能源发电量表示环境效应指标;户户通电率、用户数、供电可靠率、供电面积、电网最大负荷表示社会效应指标	以5个省级电网为例,研究电网投资效率
张各兴 ^[15]	员工数量、线路长度	售电量、用户数	2005—2009年24家电力公司输电网络技术效率和全要素生产率
彭昱 ^[16]	发电装机、煤炭消费	发电量、SO ₂ 、烟尘排放、废水排放、固体废物排放	2000—2007年各省电力产业环境效率评价
杨淑云 ^[17]	职工人数、厂用电率、发电耗煤、供电耗煤、装机容量、高变容量、高压输电线路	发电量、供电量	1996—2003年省际电力产业效率
陈素琼 ^[18]	发电装机、发电从业人员、发电煤耗	发电量	研究中国区域发电行业绩效

资料来源:作者根据文献整理得到。

从不同的角度作了深入的研究,考虑的因素主要包括产权结构、市场结构、要素价格、政府规制、技术、燃料使用等。Kwoka J等(2010)^[19]研究发现电力企业的并购没有提高美国电力行业效率。乔岳、周利华(2010)^[20]运用随机前沿模型考察1994—2008年中国省级电网效率,结果发现,2002年电网改革成效明显,网络规模对电网产出影响显著,但电网总体效率依然很低,有很大改进空间。Yang H和Pollitt M(2010)^[21]研究表明非期望产出的因素对电力行业效率的评估有重要影响。可以看出,以往文献对电力行业效率和影响因素的研究主要集中在发电行业,对电网环节关注较少。在影响因素方面,未见文献考虑电力跨区贸易、资源禀赋等因素。

本文主要的创新有:一是将能源消耗、环境污染、清洁能源比例同时纳入投入产出体系,以体现中国在节能减排和提高清洁能源比例方面的目标。二是运用NSBM模型测度了1995—2012年中国各地区电力行业总体、发电环节、电网环节的环境技术效率,体现出电力生产过程中发电和电网两个环节的相互影响和紧密联系。三是用Tobit模型检验电力行业环境技术效率时,除了考虑政府规制、经济发展等影响因素以外,还加入了电力跨区贸易、地区能源禀赋等因素。

一、电力行业环境技术效率测算方法论

本文借鉴Tone K(2014)^[22]构建的NSBM模型

计算中国电力行业的环境技术效率。NSBM模型将网络模型与SBM模型结合,一方面具备SBM模型的优点,将松弛变量放入目标函数,既解决了非零松弛问题对效率评估的影响,也考虑了存在非期望产出的效率评价问题,弥补了传统DEA模型的不足;另一方面,结合网络模型,弥补了其他模型将生产过程看作一个整体进行“黑箱”化处理的弊端,考察相互关联的不同生产环节以及总体的效率问题,有利于揭示系统内部的效率及对整体行业的影响。

假设 $DMU_i(i=1,2,\dots,n)$ 的生产过程包括 k 个环节,环节 $k(k=1,2,\dots,K)$ 有 m_k 个投入($x_j^k \in R_+^{m_k}$),有 r_k 个产出($y_j^k \in R_+^{r_k}$),有 u_k 个非期望产出($b_j^k \in R_+^{u_k}$),环节 k 到环节 h 有 $t_{(k,h)}$ 个中间链接变量($z_j^{(k,h)} \in R_+^{t_{(k,h)}}$)。

当生产过程分为两个生产环节,即 k 为2时,NSBM模型的生产结构图如图1所示,其中 S_1 、 S_2 分别表示两个生产过程。

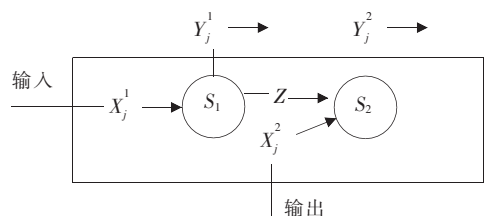


图1 两阶段NSBM模型生产过程结构图

基于固定规模报酬的NSBM模型的生产可能

性集 P 可定义为

$$\left\{ \begin{aligned} x^k &\geq \sum_{j=1}^n x_j^k \lambda_j^k (k=1,2,\dots,k) \\ y^k &\leq \sum_{j=1}^n y_j^k \lambda_j^k (k=1,2,\dots,k) \\ b^k &\leq \sum_{j=1}^n b_j^k \lambda_j^k (k=1,2,\dots,k) \\ z^{(k,h)} &= \sum_{j=1}^n z_j^{(k,h)} \lambda_j^k (\forall (k,h)) (\text{作为 } k \text{ 环节的产出}) \\ z^{(k,h)} &= \sum_{j=1}^n z_j^{(k,h)} \lambda_j^k (\forall (k,h)) (\text{作为 } h \text{ 环节的投入}) \\ \lambda_j^k &\geq 0 (\forall j,h) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

针对某一特定的决策单元 $DMU_o(o=1, \dots, n)$ 可以表示为

$$\left\{ \begin{aligned} x_o^k &= X^k \lambda^k + s^{k-} (k=1, \dots, K), \\ y_o^k &= Y^k \lambda^k - s^{k+} (k=1, \dots, K), \\ b_o^k &= B^k \lambda^k - s^{k+} (k=1, \dots, K), \\ e \lambda^k &= 1 (k=1, \dots, K), \\ \lambda^k &\geq 0, s^{k-} \geq 0, s^{k+} \geq 0, s_b^{k+} \geq 0 (\forall k) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

其中, $X^k = (x_1^k, \dots, x_n^k) \in R_+^{m \times n}$; $Y^k = (y_1^k, \dots, y_n^k) \in R_+^{r \times n}$; $B^k = (b_1^k, \dots, b_n^k) \in R_+^{u \times n}$; $Z^{(k,h)} = (z_1^{(k,h)}, \dots, z_n^{(k,h)}) \in R_+^{t_{k,h} \times n}$; $\lambda^k \in R_+$ 是子环节 k 的权重向量; s^{k-}, s^{k+}, s_b^{k+} 是投入产出的松弛向量。

NSBM 模型的中间链接变量 ($z^{(k,h)}$) 有两种链接方式,一种是自由链接,一种是固定链接。自由链接方式下,中间链接变量可自由处置和变化,固定方式下不可自由处置和变化。为了反映中间变量的现实意义,本文采用自由链接方式,对应的限制条件为

$$z^{(k,h)} \lambda^k = z^{(k,h)} \lambda^k, (\forall (k,h)) \quad (3)$$

基于固定规模报酬的投入导向下的网络 SBM 模型

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_o &= \min \lambda^k, s^{k-} \sum_{k=1}^k w^k \left[1 - \frac{1}{m^k} \sum_{i=1}^{m^k} \frac{s_i^{k-}}{x_{io}^k} \right] \\ \text{s.t.} \quad &\text{式(2)、式(3)} \\ &\sum_{k=1}^k w^k = 1 (w^k \geq 0) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

其中, w^k 是子环节 k 的相对权重。当 $\lambda^{k*}, s^{k-*}, s^{k+*}$ 是模型(4)的最优解,则 DMU 整体和子环节 k 的效率分别为

$$\theta_o^* = \sum_{k=1}^k w^k \left[1 - \frac{1}{m^k} \sum_{i=1}^{m^k} \frac{s_i^{k-*}}{x_{io}^k} \right] \quad (5)$$

$$\theta_k^* = 1 - \frac{1}{m^k} \left(\sum_{i=1}^{m^k} \frac{s_i^{k-*}}{x_{io}^k} \right) \quad (6)$$

当 θ_o^* 或 θ_k^* 等于 1, 表示 DMU 整体或子环节 k 是 DEA 有效的, 整体效率是各个子环节效率的加权平均数, 因此当且仅当每个子环节效率均有效时, DMU 整体才会有效。上述是固定规模报酬(CRS)的模型, 将模型加入约束条件 $\sum_{o=1}^n \lambda_o^k = 1$ 就变为可变规模报酬(VRS)模型。

二、电力行业环境技术效率测度及结果分析

(一) 电力系统的网络生产过程

根据电力系统生产的特征,从发电和电网两个环节构建垂直网络生产结构(如图2所示),发电企业运用设备、人员、燃料等进行发电,将发出的电输出,经过供应环节将电输送到用电终端,其中发电企业的产出电量是供应环节的投入,因此将其作为中间变量。通过这种关联,发电环节的产出效率决定供应环节的投入,反过来供应环节的输电能力决定发电环节需要发出多少电量,倘若输电能力有限,就会在发电环节产生“窝电”,导致发电设备闲置,从而影响发电效率,二者是否协调发展则会影响行业的总体效率。用电量、环境、能源等状况是电网环节的产出同时也是系统最终的产出。

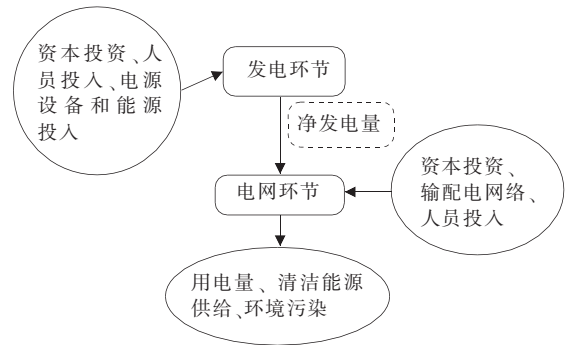


图2 电力系统生产的网络结构图

(二) 指标体系及变量选取

根据电力生产供应的实际过程,本文构建相应的投入产出指标体系,如表2所示。由于电力行业 SO_2 和烟尘排在工业排放中的比例较高,本文选择这两项指标代表电力行业废气排放。目前中国年鉴中没有历年分地区电力行业污染排放的数据,一些文献直接使用工业排放来代替电力行业排放,这种做法很可能影响结果的准确性。为了弥补这一不足,本文选取了 SO_2 和烟尘两项环境污染指标,将电力行业污染排放从工业污染数据中分解出来,分解公式为

地区电力 SO₂ 污染排放=地区 SO₂ 污染排放×
(地区发电标准煤耗/地区能源消耗标准煤)^① (7)
其中,煤耗和排放的数据分别来源于《中国能源统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》,为了减少投入产

出指标数量,最后将电力 SO₂ 烟尘排放的数据加总得到电力行业废气排放。

表 2 中发电耗煤由发电标准煤耗与发电量的乘积计算而得,清洁能源发电比例由火电以外的其

表 2 投入产出指标体系

评价类型	评价环节	投入	期望产出	非期望产出
电力行业环境技术效率	发电环节	发电装机容量 发电耗煤	厂供电量 (中间变量)	废气排放
	电网环节	厂供电量(中间变量) 输电线路长度	用电量 清洁能源发电比例	

表 3 1995—2012 年分省区电力行业总体环境技术效率年度均值及排名^②

地区	综合环境技术效率		纯技术效率		规模效应		地区	综合环境技术效率		纯技术效率		规模效应	
	效率值	地区排名	效率值	地区排名	效率值	地区排名		效率值	地区排名	效率值	地区排名	效率值	地区排名
北京	0.919 6	3(6)	0.956 3	4(6)	0.960 6	2(6)	湖北	0.368 1	21	0.698 5	12(4)	0.565 8	26
天津	0.574 6	6	0.737 2	9	0.778 7	15	湖南	0.359 3	22	0.538 0	20	0.685 0	20
河北	0.402 1	16	0.686 7	14	0.589 7	25	广东	0.551 6	7	0.998 5	3(17)	0.552 4	28
山西	0.317 4	25	0.382 7	23	0.831 0	13	广西	0.421 0	13	0.630 3	17(1)	0.692 9	19
内蒙古	0.263 9	30	0.294 9	30	0.897 5	9	海南	0.759 9	4	1.027 2	2(18)	0.749 5	16(1)
辽宁	0.427 4	12	0.670 1	15	0.655 2	24	重庆	0.577 8	5	0.626 3	18	0.918 9	4
吉林	0.319 9	24	0.359 1	25	0.893 3	10	四川	0.412 4	14	0.901 4	6(4)	0.456 9	30
黑龙江	0.268 3	29	0.310 8	28	0.880 3	11	贵州	0.369 4	20	0.395 9	22	0.938 7	3
上海	1.182 3	1(10)	1.326 3	1(12)	0.908 7	7(1)	云南	0.401 7	17	0.643 4	16(1)	0.658 0	21
江苏	0.456 6	11	0.816 3	7	0.563 6	27	陕西	0.322 2	23	0.367 8	24	0.908 4	8
浙江	0.482 0	8	0.736 5	10	0.655 4	23	甘肃	0.379 3	19	0.457 4	21	0.837 2	12
安徽	0.278 7	27	0.305 1	29	0.913 7	5	青海	0.951 6	2(3)	0.918 5	5	1.030 5	1(4)
福建	0.481 3	9	0.712 2	11(1)	0.700 1	17	宁夏	0.474 0	10	0.691 2	13	0.696 5	18
山东	0.317 2	26	0.774 0	8(5)	0.551 0	29	新疆	0.270 6	28	0.328 3	27	0.823 7	14
江西	0.405 3	15	0.346 7	26	0.912 7	6	均值	0.469 9		0.640 9		0.762 1	
河南	0.380 1	18	0.590 1	19	0.656 4	22	标准差	0.214 1		0.253 4		0.149 8	

表 4 1995—2012 年中国各省区发电和电网环节环境技术效率年度均值及排名

地区	发电环境技术效率		电网环境技术效率		地区	发电环境技术效率		电网环境技术效率	
	年度均值	地区排名	年度均值	地区排名		年度均值	地区排名	年度均值	地区排名
北京	0.839 2	3(6)	1.000 0	3(18)	湖北	0.340 6	21	0.395 7	18
天津	0.440 4	7	0.708 7	6	湖南	0.395 6	13	0.322 9	24
河北	0.372 6	18	0.431 7	15	广东	0.394 4	14	0.708 8	5
山西	0.257 9	30	0.376 9	19	广西	0.492 0	6	0.350 0	21
内蒙古	0.259 6	29	0.268 1	27	海南	0.647 1	4(1)	0.872 7	4(13)
辽宁	0.383 7	16	0.471 1	12	重庆	0.542 5	5	0.613 2	7(2)
吉林	0.313 6	26	0.326 2	22	四川	0.419 5	10	0.405 2	17(1)
黑龙江	0.291 3	27	0.245 2	29	贵州	0.316 3	25	0.422 5	16
上海	0.936 7	1(10)	1.427 8	1(18)	云南	0.427 5	9	0.376 0	20
江苏	0.384 7	15	0.528 6	11	陕西	0.322 7	23	0.321 8	25
浙江	0.376 3	17	0.587 7	8	甘肃	0.432 9	8	0.325 6	23
安徽	0.289 5	28	0.267 9	28	青海	0.839 5	2(3)	1.063 6	2(18)
福建	0.414 9	12	0.547 7	9(1)	宁夏	0.416 5	11	0.531 6	10
山东	0.347 0	20	0.463 7	13	新疆	0.328 1	22	0.213 2	30
江西	0.356 6	19	0.277 9	26	全国均值	0.430 0		0.509 7	
河南	0.320 1	24	0.440 2	14	标准差	0.188 2		0.289 9	

①电力行业烟尘排放的计算方法与 SO₂ 计算方法相同。

②表 3、表 4 中地区排名后面括号中的数字表示该地区历年对应的效率值位于有效前沿面的次数。

他发电量与总发电量的比得到,厂供电量是指发电量与厂用电量的差额,其中厂用电量由发电量与厂用电率的乘积得到。1995年和1996年重庆的数据中,比值类的数据直接参照四川的数据,总量值数据将原四川的数据按往年的平均比例分配得到,其他原始数据均来自《中国电力年鉴》。由于西藏数据缺失较多,所以本文没有将西藏列入考察样本。

(三)电力行业环境技术效率评估结果

根据上述 NSBM 模型,运用 MaxDea 软件,以投入为导向,计算得到电力行业环境技术效率。表 3 可以看出,电力行业总体的综合环境技术效率高的省区依次是上海、青海和北京,其他地区的综合环境技术效率值均为较低水平,可见电力行业综合环境技术效率总体水平偏低。纯技术效率高的主要有上海、海南、广东、北京、青海、四川 6 个地区,纯技术效率低的省区主要集中在中西部地区和东北地区。规模效率高的省区有青海、北京、贵州、重庆、安徽、江西、上海、山西,多数都属于资源丰富的中西部地区或电力集中输入的大城市。另外,省区综合环境技术效率位于生产有效前沿面的次数最多的是上海;纯技术效率位于生产前沿面次数最多的是海南;规模效率位于生产前沿面次数最多的是北京。从全国均值看,规模效率均值大于纯技术效率均值。

表 4 列出了中国各省区发电环节和电网环节的环境技术效率值^①,发电环节效率高的省份是上海,有 10 个年度都位于发电生产前沿面;效率最低的 5 个省份由低到高依次是山西、内蒙古、安徽、黑龙江、吉林,集中在煤炭资源比较富集的地区,表明这些地区很可能存在滥用资源、过度污染等问题。电网环节效率高的地区有上海、青海;电网环节效率最低的五个省份由低到高依次是新疆、黑龙江、安徽、内蒙古、江西。两个环节相比较来看,电网环节的效率总体上高于发电环节。从省区间的标准差系数来看,两个环节的省区差距都比较小,但电网环节差距大于发电环节差距。

三、电力行业环境技术效率影响因素 设置及模型选择

(一)环境技术效率影响因素及变量选择

本文把电力行业环境技术效率的影响因素分为 4 类:

1. 政府规制因素。用国有产权比重、跨地区电力贸易、规制改革时间虚拟变量三类指标表示政

府对电力行业的规制。产业组织理论认为,市场结构越趋于垄断,产业的市场绩效就越低,这里用产权结构的变化表示电力规制改革过程中国有垄断程度的变化。跨地区电力贸易的多少是地区电力市场开放和市场结构变化的重要体现。由于技术、制度、地区壁垒等因素的限制,早期电力行业在各个地区基本是“自给自足”。同时中国经济发展的格局导致煤炭和水资源富集的地区电力需求有限,电力设备闲置,而经济发展较快的地区资源贫乏,电力供不应求,这种资源配置的失调大大降低了中国电力行业的效率。远距离输电技术的应用和地区电力贸易壁垒的降低可以使上述问题得到改观。

指标计算时,用国有资本占电力行业实收资本的比重代表国有产权比重,用时间虚拟变量表示 1998 年“政企分开”和 2002 年“厂网分开”的电力体制改革政策实施,改革年份以前取 0,改革年份以后取 1。这里需要特别说明的是跨区电力贸易的核算用电力自足率来衡量,电力自足率表示地区电力自给自足的程度,等于 1 表示地区电力完全自给自足;大于 1 表示该地区是电力净流出地区,且数值越大表示向外售出电量越多;小于 1 表示该地区是电力净流入地区,且数值越小表示从外界购入的电量越多。因此电力自足率越远离 1,表示跨地区电力贸易越多,越接近 1 表示跨地区电力贸易越少。借鉴 Zhao 等(2007)^[23]对石油空间流动问题的研究,用电力生产与电力消费之间的比率表示电力自足率,用以判断电力是否流动和如何流动。电力自足率表达式为

$$PSS_{it} = (P_{it}/C_{it}) \times 100\% \quad (8)$$

其中, PSS_{it} 代表 i 地区第 t 年的电力自足率; C_{it} 代表 i 地区第 t 年电力消费; P_{it} 代表 i 地区第 t 年电力生产(发电量)。

2. 生产技术指标。选取发电标准煤耗、厂用电率、发电设备平均利用小时、供电标准煤耗和线损率代表技术指标。另外,借鉴陶锋(2008)、刘文君(2013)^[24]等的做法,用时间趋势变量 T 表示电力行业的技术进步。

3. 经济发展因素。宏观经济发展是电力行业发展的基础环境,而工业是电力的主要生产和消费领域,因此这里将人均 GDP 取对数表示经济发展水平,用第二产业增加值占 GDP 的比重表示工业化水平。由于通货膨胀因素的存在,用人均 GDP 指数将当年价格换算为 1995 年为 100 的实际价格,原

^①限于篇幅本文没有将各省区分年度的效率值列出来,只列出了省区效率的年度均值。

始数据来源于《中国统计年鉴》。

4.其他因素。包括资源禀赋、上(下)游环节的效率等。资源禀赋是指煤炭资源的丰富程度,煤炭资源集中的地区可以借助资源优势进行电力的规模化生产和环保处理,从而提高电力行业环境技术效率。但是如果地区抱着“靠山吃山,靠水吃水”的思想,滥用当地廉价的煤炭资源,则会出现相反的结果,因此煤炭资源禀赋对地区电力行业效率来讲是一把“双刃剑”。本文用虚拟变量表示资源禀赋,历年煤炭储量总和位于全国前10位的省区用“1”表示,其他省区用“0”表示。

(二)模型设定

由于前文运用 NSBM 方法计算的环境技术效率值均在 0~2 之间,属于典型的审查数据(censored data),采用最小二乘法会造成参数估计有偏和不一致,而采用截断数据模型(truncated regression)又会把数值为零的观测值删除掉,造成大量的样本损失,导致估计有偏。当因变量为受限或截断值时,采用 Tobit 模型比较适宜。

Tobit 模型也叫审查回归模型,模型的基本形式为

$$y_i^* = X_i \beta + \sigma u_i \quad (9)$$

其中, σ 是比例系数; y_i^* 是潜在变量。被观察的数据 y 与潜在变量 y^* 的关系如下

$$y_i = \begin{cases} c_i & \text{if } y_i^* \leq c_i \\ y_i^* & \text{if } c_i < y_i^* < \bar{c}_i \\ \bar{c}_i & \text{if } \bar{c}_i \leq y_i^* \end{cases} \quad (10)$$

其中, c_i, \bar{c}_i 代表截取(审查)点,是常数。

本文采用面板 Tobit 模型,运用 1995—2012 年的地区面板数据,检验中国电力行业环境技术效率的影响因素和传导机制。基于上述有关说明,构建了如下计量模型

$$y_{it}^* = \beta X_{it} + \mu_{it}, y_{it} = \max(0, y_{it}^*) \quad (11)$$

其中,下标 i 代表地区; t 代表年份; y_{it} 是被解释变量; X_{it} 是解释变量的向量。

四、实证结果

(一)发电环节环境技术效率影响因素实证检验

运用 stata11.0 构建 Tobit 随机效应模型,以发电环节环境技术效率为被解释变量,采用逐步回归法^①,得到模型 1~模型 5。模型 1 中人均 GDP、工业化发展水平和国有控制 3 个指标在统计上都不显

著,电力自足率指标虽然在统计上显著,但系数为负,理论上无法得到很好的解释,因此为了更进一步了解这四个变量对发电环节环境技术效率的影响,在模型 2 中加入四个变量的二次项,结果发现人均 GDP 和工业化水平仍然不显著,这与白雪洁(2013)^[25]得出的结论不一致,主要原因是选取的变量和采取的模型不同。电力自足率在加入二次项后变得统计上显著,一次项符号为负,二次项符号为正,表明电力自足率与发电环境技术效率呈先负后正的“U”形关系,即在开始阶段电力自足率越高,发电环境技术效率越低,达到一定临界点后电力自足率越高发电环境技术效率越高,主要原因是电力自足率很低的地区,电力需求很大而煤炭资源却很稀缺,这些地区越是想通过自给自足来满足电力需求,其发电的资源成本就越高;相反电力自足率能达到一定水平的地区一般是煤炭资源丰富的地区,这些地区电力自足率越高越能形成电力生产的规模经济。从静态来看,位于“U”形曲线两端的地区(即电力集中输入和电力集中输出的地区)有较高的发电环境效率,相反“U”形曲线中间的地区(即电力自给自足的地区)发电环境技术效率较低。

国有产权比重在加入二次项后变得统计上显著,一次项符号为正,二次项符号为负,表明国有产权比重与发电技术效率之间呈现先正而后负向的倒“U”形关系,即在开始阶段国有控制水平越高,发电环境技术效率越高,当国有控制水平达到一定临界点之后,国有控制力进一步扩大,发电环境技术效率会降低。计算出临界点的国有控制水平为 69.6%,2002 年以前多数观察值分布在临界点的右边,对发电环境技术效率的负面影响比较严重,而 2002 年以后多数观察值分布在临界点的左边,开始有利于发电环境技术效率的提高。这一结论与陶锋等(2008)^[47]得出的国有资产比重与发电技术效率负相关的结论不同,但却符合中国电力行业的实际情况。在起步时期,电力基础设施及技术研发投入较多,国家在技术和管理上的优势促进电力企业效率的提高,但随着电力技术门槛降低,发电设备和技术可以为普通企业甚至私人所拥有,这时其他所有制形式在管理上的优势体现出来,因此在国有产权比重达到一定水平以后,继续增加国有比例将会阻碍电力技术效率的提高。

模型 3、模型 4 中分别引入改革虚拟变量,结果发现 1998 年体制改革对发电环境技术效率没有起到重要作用,2002 年体制改革统计上显著,但符号

①下文对电网环节效率影响因素的回归也采用类似的逐步回归法,后面将不再赘述。

表5 发电环节环境技术效率 tobit 随机效应回归结果

解释变量	模型1		模型2		模型3		模型4		模型5	
	系数	Z值	系数	Z值	系数	Z值	系数	Z值	系数	Z值
厂用电率	-0.008 3	-1.66*	-0.008 6	-1.65*	-0.008 8	-1.71*	-0.008 1	-1.57	-0.005 4	-1.04
电力自足率	-0.185 2	-6.17***	-0.569 1	-3.40***	-0.486 9	-3.15***	-0.516 9	-3.36***	-0.505 2	-3.32***
电力自足率二次			0.164 4	2.29**	0.134 5	2.00**	0.144 9	2.16**	0.145 6	2.19**
人均GDP	-0.066 0	-1.15	-0.172 6	-0.48						
人均GDP二次项			0.008 9	0.21						
工业比重	-0.013 9	-0.12	-0.016 7	-0.03*						
工业比重二次项			0.114 9	0.16						
电网效率	0.395 0	11.72***	0.398 5	11.86***	0.379 7	13.26***	0.375 5	13.14***	0.369 5	13.04***
国有产权比重	0.045 4	1.55	0.440 1	2.49**	0.433 7	2.46**	0.414 0	2.36**	0.405 3	2.32**
国有产权比重的二次项			-0.299 6	-2.28**	-0.296 0	-2.27**	-0.296 5	-2.29**	-0.291 1	-2.25**
时间趋势变量	-0.004 3	-1.55	-0.004 6	-1.65	-0.009 1	-6.87***	-0.005 6	-3.36***	-0.005 2	-3.14***
1998年体制改革					0.009 2	0.62				
2002年体制改革							-0.040 8	-2.48**	-0.041 8	-2.55**
煤炭储量									-0.056 0	-1.95*
log-likelihood	477.745 2		483.362 4		482.206 5		485.072 5		486.962 9	
Wald chi2	306.740 0		328.920 0		340.070 0		345.890 0		373.960 0	

注:***、**、*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著。log-likelihood, waldchi2分别表示模型的似然估计值和Wald检验结果,本文其他回归结果的说明与此表相同,不再重复注明。

为负,对发电环境技术效率不仅没有起到促进作用,反而有负面影响。模型5引入coal虚拟变量统计上显著,且符号为负,表明地区资源的聚集与发电环境技术效率呈反向作用,表明煤炭资源越富集的地区发电环境技术效率越低,说明煤炭资源丰富的地区存在资源滥用的情况。

电网环境技术效率值在统计上显著,对发电环境技术效率有显著的正向影响。时间趋势表示的技术进步指标在模型3、模型4、模型5中显著,且符号为负,表明随着生产技术的进步,发电环境技术

效率不但没有提高,反而下降,其中一个原因是生产技术的这种进步很可能是依靠增加大量科技投入得到的,另一个原因是生产技术进步所带来的效率很可能被电力垄断经营过程中的低效率所抵消。

(二) 电网环节环境技术效率影响因素实证检验

以电网环节环境技术效率为被解释变量,得到模型6~模型10,如表6所示^①。在模型6中,平均供电标准煤耗在统计上不显著;电力自足率和工业化程度指标在统计上不显著。在模型7中将二次项引入,结果由不显著变为显著,且一次项系数为正,二

表6 电网环节环境技术效率影响因素的Tobit随机效应回归结果

解释变量	模型6		模型7		模型8		模型9		模型10	
	系数	Z值	系数	Z值	系数	Z值	系数	Z值	系数	Z值
供电标准煤耗	-0.000 3	-0.92								
线损率	0.006 9	1.66*	0.003 9	0.99						
电力自足率	0.055 8	1.40	0.561 2	2.71***	0.708 3	3.29***	0.697 7	3.26***	0.686 0	3.23***
电力自足率二次			-0.216 0	-2.45**	-0.264 0	-2.89***	-0.261 6	-2.86***	-0.255 3	-2.81***
人均GDP	0.540 7	3.81***	0.530 1	3.79***	0.646 9	5.14***	0.635 2	5.18***	0.614 9	5.07***
工业比重	0.010 5	0.06	-3.184 7	-3.98***	-3.347 3	-4.19***	-3.320 2	-4.17***	-3.308 2	-4.17***
工业比重二次			3.439 0	3.87***	3.500 3	3.94***	3.467 6	3.92***	3.485 4	3.95***
发电效率	0.238 4	3.78***	0.240 2	4.09***	0.491 8	10.35***	0.492 9	10.22***	0.488 1	10.30***
时间趋势变量	-0.027 9	-4.23***	-0.023 5	-3.89***	-0.025 2	-4.34***	-0.024 4	-4.37***	-0.023 6	-4.50***
1998年体制改革					0.006 9	0.38				
2002年体制改革							0.001 9	0.10		
煤炭储量									-0.099 7	-1.33
log-likelihood	341.475 0		377.295 0		379.400 0		379.333 0		380.204 0	
Wald chi2	91.170 0		125.510 0		230.510 0		230.200 0		234.880 0	

^①由于到目前为止,中国电网由国家电网和南方电网两家国有企业垄断经营,资产以国有资产为主,混合所有制在电网领域一直没有得到推行,因此电网环境技术效率的因素因素中未考虑国有控制因素。

次项系数为负,说明电力自足率与电网环境技术效率之间呈现先正而后负向的倒“U”形关系,即在开始阶段电力自足率越高电网环境技术效率也越高,当电力自足率达到一定临界点之后,随着电力自足率的提高,电网环境技术效率就会下降。从静态来看,位于倒“U”形曲线两端的地区(即电力集中输入和电力集中输出的地区)电网环境技术效率较低,相反位于倒“U”形曲线中间的地区(即电力自给自足的地区)电网环境技术效率较高,表明跨地区电力贸易不利于电网环境技术效率的提高,主要原因是目前跨地区电力贸易总规模较小,而跨区输电网络的建设则需要较大成本,未实现跨区电网的规模经济。

工业化水平与电网环境技术效率呈先负而后正向的“U”形关系,即工业化水平达到一定临界点之前,随着工业化水平的提高电网环境技术效率会降低,但当达到临界点之后随着工业化水平的进一步提高电网环境技术效率也随之提高,这仍然与电网的规模经济有关系。另外,线损率指标的影响不稳健。在模型 8、模型 9、模型 10 中分别加入体制改革和煤炭资源三个虚拟变量,结果都不显著,说明 1998 年和 2002 年两次电力体制改革对电网环境技术效率都没有产生实质影响,而电网环境技术效率与煤炭资源的富集水平也没有直接关系。人均 GDP、发电环境技术效率对电网环境技术效率有正的影响;代表技术进步的时间趋势 T 对电网环境技术效率具有负向影响。

(三) 电力行业总体环境技术效率影响因素实证检验

以电力行业总体环境技术效率为被解释变量,

得到模型 11~模型 15,如表 7 所示。在模型 11 中,发电设备平均利用率、线损率指标在统计上不显著。电力自足率、工业化水平、国有控制力三个变量也在统计上不显著,为了进一步考察它们的二次项对电力行业效率的影响,在模型 12 中加入三个变量的二次项,结果发现电力自足率和国有控制仍然不显著,工业化水平由不显著变为显著,且一次项为负,二次项为正,表明工业化水平与电力行业总体效率呈“U”形关系,即在一定临界点之前,随着工业化水平提高,电力行业总体效率会下降,但超过这个临界点以后,工业化水平的提高将促进电力行业总体效率的提高,这与地区用电的规模效率有关。

模型 13、模型 14、模型 15 中,加入电力体制改革和地区煤炭资源丰度的虚拟变量,结果发现 1998 年体制改革对电力行业环境技术效率具有正向促进作用,而 2002 年体制改革具有反向作用。煤炭资源丰度对电力行业环境技术效率有负向作用,表明煤炭资源越丰富的地区电力行业环境技术效率越低,一方面的原因是在煤炭资源丰富的地区煤炭利用效率和环境治理效率较低,造成当地电力环境技术效率较低,另一方面也体现了地区层面的“资源诅咒”“污染天堂”的现象,北京、上海等资源匮乏但经济发达地区的高效率是以周边资源省份的资源消耗和环境污染为代价的。

发电标准煤耗、厂用电率系数均为负,表明发电标准煤耗越低,电力行业环境技术效率越高,厂用电率越低电力行业环境技术效率越高,符合预期判断。人均 GDP 对电力行业环境技术效率有正向促进作用,经济发展水平越高电力行业环境技术效率

表 7 电力行业总体环境技术效率影响因素的 Tobit 随机效应回归结果

解释变量	模型 11		模型 12		模型 13		模型 14		模型 15	
	系数	Z 值	系数	Z 值	系数	Z 值	系数	Z 值	系数	Z 值
发电标准煤耗	-0.001 0	-2.26**	-0.001 3	-4.37***	-0.001 4	-4.47***	-0.001 3	-4.04***	-0.001 2	-4.03***
厂用电率	-0.013 6	-1.79*	-0.022 7	-3.81***	-0.019 8	-3.45***	-0.018 9	-3.30***	-0.017 6	-3.07***
设备平均利用小时	0.000 6	0.45								
线损率	-0.003 3	-0.75								
电力自足率	0.010 7	0.16	-0.066 6	-0.36						
电力自足率二次项			-0.020 1	-0.26						
人均 GDP	0.608 2	4.27***	0.350 6	3.15***	0.416 0	3.67***	0.386 7	3.34***	0.363 7	3.23***
工业比重	0.061 5	0.30	-2.267 6	-3.06***	-2.565 0	-3.59***	-2.538 7	-3.57***	-2.572 1	-3.63***
工业比重二次			2.711 2	3.30***	3.001 6	3.75***	3.038 8	3.81***	3.105 9	3.90***
国有产权比重	-0.067 2	-1.30	0.279 5	1.62						
国有产权比重二次项			-0.178 6	-1.39						
时间趋势变量	-0.042 8	-5.33***	-0.030 8	-5.94***	-0.036 0	-6.45***	-0.031 4	-5.12***	-0.030 2	-5.05***
1998 年体制改革					0.040 5	2.77***	0.036 4	2.48**	0.035 7	2.44**
2002 年体制改革							-0.031 5	-1.96*	-0.032 4	-2.02**
煤炭储量									-0.146 5	-2.04**
log-likelihood	220.321 5		445.620 4		441.934 3		443.834 8		445.819 2	
Wald chi2	55.170 0		156.830 0		147.180 0		152.140 0		157.410 0	

越高。代表技术进步的时间趋势与电力环境技术效率呈反向关系,表明技术进步并没有促进电力行业的技术效率提高。

五、结论及政策建议

(一) 结论

通过以上研究,本文得出以下主要结论,揭示了中国各地区电力行业环境技术效率变化规律和影响因素:

1.从环境效率结果来看,大多数省区电力行业总体环境技术效率普遍偏低,纯技术效率低于规模效率,其中规模效率较高的地区主要集中在煤炭、水、清洁能源丰富的中西部地区和电力集中输入的北京、上海等地;从分环节来看,发电和电网环节效率都普遍偏低,其中发电环节环境技术效率最低的省份主要集中在山西、内蒙古、安徽、黑龙江、吉林等煤炭资源丰富的地区,表明这些地区存在滥用资源和治理不到位等问题。

2.从影响因素来看,在发电环节,发电环境技术效率与电力自足率呈“U”形关系,电力集中输入和输出的地区有较高的发电环境技术效率,相反电力自给自足的地区发电环境技术效率较低;与国有控制水平呈倒“U”形关系,2002年以后多数观测值位于临界点的左侧,表明2002年电力体制改革降低国有控制水平促进了发电环节环境技术效率的提高;1998年电力体制改革虚拟变量不显著,2002年电力体制改革虚拟变量符号为负;煤炭资源与发电环境技术效率呈反向作用,煤炭资源越富集的地区发电环境技术效率越低;随着生产技术的进步,发电环境技术效率不但没有提高反而下降,主要原因是电力行业生产技术的进步是依靠增加大量科技投入得到的;电网环节环境技术效率值对发电环境技术效率有显著的正向影响。

3.在电网环节,电网环境技术效率与电力自足率之间呈倒“U”形关系,表明目前的跨地区电力贸易未实现电网规模经济,不利于电网环境技术效率的提升;与工业化水平呈“U”形关系,即工业化水平达到一定临界点之前,随着工业化水平的提高电网环境技术效率会降低,但当达到临界点之后随着工业化水平的进一步提高电网环境技术效率也随之提高;1998年和2002年两次电力体制改革对电网环境技术效率都没有产生实质影响;人均GDP、发电环境技术效率都对电网环境技术效率有正的影响;随着生产技术的进步,电网环境技术效率不但没有提高,反而下降。

4.电力行业总体来看,发电标准煤耗、厂用电率越低,电力行业总体环境技术效率越高;经济发展水平的提高促进电力行业总体环境技术效率的提高,工业化水平与电力行业总体环境技术效率呈“U”形关系,与地区用电的规模效率有关;1998年体制改革对电力行业环境技术效率具有正向促进作用,而2002年体制改革则起反向作用;煤炭资源丰度对电力行业总体环境技术效率有负向作用。

(二) 政策建议

根据上述研究结论,本文提出以下政策建议:

1.着力提高电力行业纯技术效率。中国电力行业的技术效率提高主要依赖于规模效率,普遍偏低的纯技术效率是导致电力行业总体以及发电环节和电网环节环境技术效率低的主要原因,未来电力行业的发展应注重改善管理方式,提高管理效率,促进技术的创新利用,加强环境治理,而不能仅仅依赖规模效率。

2.重点对煤炭资源丰富的地区进行节能减排的监管和规制,同时建立地区间污染补偿机制。发电环境效率最低的省份主要集中煤炭资源丰富的地区,煤炭资源富集的地区虚拟变量与行业总体和发电环节环境技术效率呈负向关系,一方面说明这些地区存在资源浪费和环境治理不到位等情况,需要加强节能减排的规制,另一方面体现了地区层面的“资源诅咒”“污染天堂”现象,需要在地区间建立相应的资源消耗和污染补偿机制,促进煤炭产区节约资源、保护环境的积极性。

3.开放跨区电力交易市场,促进跨区电网的规模化应用。目前的跨区电力贸易有利于发电环境技术效率的提高,但是交易规模较小,在电网侧远未达到规模经济,不利于电网环境技术效率的提高。因此要降低跨区电力交易壁垒,形成开放的电力市场,促进电力环境技术效率的提高。

4.继续深化电力体制改革。1998年电力体制改革促进了电力行业环境技术效率提升,但2002年的电力体制改革则未起到积极作用,2002年的体制改革并未从根本上改变电力企业的自然垄断格局,虽然发电行业分为五大发电集团,但这些企业在一定地区范围内仍然为垄断经营,而电网公司仍然是唯一的买家和卖家。今后电力体制改革的重点是进行输配分离,建立完善的电力市场机制和价格形成机制,促进产业公平竞争和协调发展。继续深化产权结构调整,引入私人资本,促进国有电力企业的混合所有制,以增强竞争活力,提高企业效率。

参考文献:

- [1] Sueyoshi T, Goto M. Efficiency-based rank assessment for electric power industry: a combined use of data envelopment analysis (DEA) and DEA-discriminant analysis (DA)[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(3): 634-644.
- [2] Kwoka J, Pollitt M. Do mergers improve efficiency? Evidence from restructuring the US electric power sector[J]. *International Journal of Industrial Organization*, 2010, 28(6): 645-656.
- [3] Yang H, Pollitt M. The necessity of distinguishing weak and strong disposability among undesirable outputs in DEA: environmental performance of Chinese coal-fired power plants[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(8): 4440-4444.
- [4] 陶锋, 郭建万, 杨舜贤. 电力体制转型期发电行业的技术效率及其影响因素[J]. *中国工业经济*, 2008(1): 68-76.
- [5] Avkiran N K. Opening the black box of efficiency analysis: an illustration with UAE banks[J]. *Omega*, 2009, 37(4): 930-941.
- [6] Färe Rolf, Grosskopf Shawna. *Intertemporal production frontiers: with dynamic DEA*[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [7] Färe Rolf, Grosskopf Shawna. Network DEA[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2000, 34(1): 35-491.
- [8] K T, Tsutsui M. Network DEA: a slacks-based measure approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009(197): 243-252.
- [9] 毕功兵, 梁樑, 杨锋. 资源约束型两阶段生产系统的 DEA 效率评价模型[J]. *中国管理科学*, 2009(2): 71-75.
- [10] Yu Ming-Miin, Lin Erwin T J. Efficiency and effectiveness in railway performance using a multi-activity network DEA model[J]. *Omega*, 2008, 36(6): 1005-1017.
- [11] Vaninsky A Y. Environmental efficiency of electric power industry of the United States: a data envelopment analysis approach[J]. *Energy*, 2010, 35(9): 3657-3665.
- [12] 李永来. 市场化改革与电力行业效率: 基于 DEA 的电力行业上市公司分析[J]. *当代经济科学*, 2009(1): 59-64.
- [13] 徐云鹏. 中国电力生产业的效率: 一个基于政府管制的研究视角[J]. *数理统计与管理*, 2012(1): 85-95.
- [14] 李金超, 牛东晓, 李金颖. 电网投资效率测算及优化研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010(24): 48-51.
- [15] 张各兴, 夏大慰. 中国输配电网技术效率与全要素生产率研究——基于 2005—2009 年 24 家省级电力公司面板数据的分析[J]. *财经研究*, 2012(10): 112-122.
- [16] 彭昱. 中国电力产业环境效率评价[J]. *财经科学*, 2011(2): 76-83.
- [17] 杨淑云, 于良春. 中国电力产业效率和生产率变动的实证研究[J]. *财经论丛*, 2008(3): 15-20.
- [18] 陈素琼. 市场化进程中中国发电行业绩效研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2009.
- [19] Kwoka J, Pollitt M. Do mergers improve efficiency? evidence from restructuring the US electric power sector[J]. *International journal of industrial organization*, 2010, 28(6): 645-656.
- [20] 乔岳, 周利华. 中国电力产业的绩效研究——基于随机前沿模型的分析[J]. *山西财经大学学报*, 2010(12): 67-73.
- [21] Yang H, Pollitt M. The necessity of distinguishing weak and strong disposability among undesirable outputs in DEA: environmental performance of Chinese coal-fired power plants[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(8): 4440-4444.
- [22] Tone K, Tsutsui M. Dynamic DEA with network structure: a slacks-based measure approach[J]. *Omega*, 2014, 42(1): 124-131.
- [23] Zhao Y, Hao L, Wan L. Research on the spatial structure of crude oil flow and the characteristics of its flow field in China[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(10): 5035-5050.
- [24] 刘文君, 邹树梁, 陈甲华. 中国电力产业区域技术效率及其影响因素分析[J]. *华东经济管理*, 2013(10): 78-83.
- [25] 白雪洁, 宋莹. 环境规制、技术创新与中国火电行业的效率提升[J]. *中国工业经济*, 2009(8): 68-77.

The Study of Environment Technical Efficiency and the Impact Factors of Electrical Industry in China

—Based on Provincial Panel Data of 1995—2012

FAN Yuxian, YUAN Xiaoling

(School of Economics and Finance, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on internal production and supply mechanism of power system and the NSBM model, this paper opens the “black box” of the system and investigates the environment technical efficiency of total electrical industry, power generation and power network from 1995 to 2012 in China, involving the energy and environmental factors in the input-output system. The conclusion is that the environment technical efficiencies of Chinese electrical industry are very low. The reform in 1998 which detached government from enterprises promoted the efficiency, while the other reform in 2002 which detached power from grid did not. A U-shaped relationship is found between the proportion of state ownership and the efficiency of power generation, and the threshold value is 69.6%. More and more areas are located in left of the threshold value after 2002. Regional electricity trade promotes the environment technical efficiency of power generation, but does not promote that of power network. The environment technical efficiency in the areas of coal resources accumulation is low, indicating that these areas probably abuse resources and lack of environmental governance, and the paradoxical “resource curse” and “pollution heaven” hypothesis existing between areas.

Key words: electrical industry; environment technical efficiency; NSBM model; reformation of government regulation

[责任编辑: 孟青]