

# 中国钢铁行业能源内部的替代弹性分析

## ——基于超越对数生产函数

史红亮<sup>1</sup>, 陈 凯<sup>2</sup>, 闫 波<sup>3</sup>

(1 上海财经大学 财经研究所, 上海 200433; 2 东北大学 经济系, 河北 秦皇岛 066004;

3 燕山大学 校长办公室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 本文运用中国钢铁行业滞后一期的产出代替劳动和资本变量, 把钢铁行业能源投入要素分解为煤炭、石油、天然气和电力的投入, 建立了一个超越对数生产函数模型, 用岭回归估算了中国钢铁行业各能源品种投入要素的产出弹性、替代弹性。结果表明: 煤炭与石油、煤炭与天然气、煤炭与电力的替代弹性在 1 左右, 中国钢铁行业可通过用石油、天然气、电力替代煤炭来实现其行业全要素能源效率的提高。

**关键词:** 钢铁行业; 产出弹性; 替代弹性; 超越对数生产函数

中图分类号: F06 21 文献标识码: A 文章编号: 1002- 980X(2010)09- 0056- 04

## 1 研究背景

中国是钢铁生产和消费大国, 粗钢产量连续 13 年居世界第一。进入 21 世纪以来, 中国钢铁产业快速发展, 粗钢产量年均增长 21. 1%。2008 年, 粗钢产量达到 5 亿吨, 占全球产量的 38%, 国内粗钢表观消费量 4. 53 亿吨, 直接出口折合粗钢 6000 万吨, 占世界钢铁贸易量的 15%。2007 年, 规模以上钢铁企业完成工业增加值 9936 亿元, 占全国 GDP 的 4%, 实现利润 2436 亿元, 占工业企业利润总额的 9%, 直接从事钢铁生产的就业人数 358 万, 钢铁企业单位数为 6999 个。中国钢铁产量的迅速增长伴随着极高的能源消耗。2003—2006 年钢铁业能源消费量分别为 2. 44 亿吨标煤、2. 97 亿吨标煤、3. 69 亿吨标煤、4. 24 亿吨标煤, 分别占据当年工业能源消费量的 20%、20. 7%、24. 6%、25. 8%; 占据当年中国能源消费量的 13. 9%、14. 6%、16. 4%、17. 3%。2010 年中国国民经济要比 2000 年翻一番, 2020 年达到全面小康社会, 国民经济比 2010 年再翻一番, 2030 年基本实现工业化, 经济达到中等发达国家水平, 我国目前还处于工业化的中期, 国内市场对钢铁的需求还会在今后若干年呈现持续稳定的增长态势, 如果把实现工业化定为钢材消费达到饱和的条件, 我国钢材生产将在 2030 年左右达到峰值。目前, 中国钢铁总产量相当于世界前十大产钢

国的总产量之和, 中国粗钢产量分别是美国和日本的 5 倍。钢铁冶炼产业则是标准的“高能耗、高污染”产业。研究中国钢铁业的能源效率问题则对中国节能降耗有重要意义。

在现有文献中, 能源效率提高的因素识别与度量一直是众多学者关注的重点, 主要集中在产业结构调整、技术进步两个方面。学者们目前把能源效率的提高主要归结为两类因素。

一是能源从低生产率的产业流向高生产率的产业, 即产业结构的调整, 又称结构效率。Kambara<sup>[1]</sup>认为行业结构的调整对 1980—1990 年中国能源效率的提高起了一半以上的作用, 高耗能行业向低耗能行业转变的产业结构调整促进了能源效率的提高。Huang、Sinton 和 Levine、Lin 和 Polenske、Garbaccio 等、Zhang<sup>[2-6]</sup>分别研究了 1980—1987 年、1980—1990 年、1981—1987 年、1987—1992 年、1990—1997 年时间段我国能源效率的变化情况, 结论都表明子行业能源效率的提高(能源产出比例下降)是整体能源利用效率得到改善的重要因素。Jenne、Farla<sup>[7-8]</sup>分别对英国、荷兰能源效率与经济结构的关系做了相关研究。韩智勇、魏一鸣和范英<sup>[9]</sup>提出在 1998—2000 年中国能源强度下降的主要动力来自于各产业能源利用效率的提高, 其中工业能源强度下降是总体能源强度下降的主要原因。

二是通过技术进步提高能源利用效率。Richr

收稿日期: 2010- 06- 09

基金项目: 上海财经大学第四批研究生科研创新基金(CXJF 2009 302)

作者简介: 史红亮(1982—), 男, 山西浑源人, 上海财经大学与澳大利亚迪肯大学联合培养博士研究生, 迪肯大学访问学者, 研究方向: 能源经济和环境政策; 陈凯(1961—), 男, 山西大同人, 东北大学经济系教授, 博士生导师, 博士, 研究方向: 农业经济和环境政策; 闫波(1980—), 男, 山东烟台人, 燕山大学助理研究员, 硕士, 研究方向: 区域经济、人力资源管理。

ard F Garbaccio, Mun S HoDale, W Jorgenson 的研究显示, 1987—1992 年间, 除电力消耗强度略有增加之外, 其他 4 类能源产品消耗强度均明显下降, 技术进步对消耗强度下降的作用均超 65%。吴巧生和成金华、齐志新和陈文颖<sup>[10-12]</sup>的研究则认为工业部门的技术改进是影响能源消耗强度的主导因素。李廉水和周勇<sup>[13]</sup>运用数据包络分析( DEA )发现, 技术效率是工业部门能源效率提高的主要原因。

关于能源替代如何影响能源的全要素效率文献较少。能源替代主要指通过改变能源与其他非能源的投入比例或者对能源消费内部结构的调整, 以达到降低能源投入成本、提高能源利用效率。能源替代的内容主要包括能源的外部替代和内部替代。前者主要基于能源价格的变化( 一般指价格上升), 生产投入中的资本、劳动对能源的替代, 通过三者投入的优化配置, 也可以实现等产量经济产出中能源消费的减量。后者一般指初级能源消费结构的优化; 以电能为代表的二次能源替代以煤炭为主的初级能源, 新兴能源、可再生能源对煤、石油等不可再生能源的替代, 实现能源全要素生产效率的提高。对某一特定的具体行业从能源、资本、劳动的替代、能源内部各种能源投入要素的替代考虑提高全要素能源效率的文献缺少。Robert Halvorsen<sup>[14]</sup>考察了美国制造业不同能源品种的自价格弹性和交叉价格弹性; Ozatalay<sup>[15]</sup>研究结果显示, 能源和资本的交叉弹性系数是 1.22, 能源和劳动的交叉弹性系数是 1.03, 能源和材料的交叉弹性系数是 0.58; 不同品种能源要素的相互替代也能在一定程度上影响能源强度; Han 关于能源消费结构与能源效率关系的分析结果证实了这一点; Han Zhryong、Fan Ying 等<sup>[16]</sup>计算并比较了不同能源品种的产出率, 从而获得了不同能源品种的替代指数; 张瑞等<sup>[17]</sup>建立能源效率与能源消费结构的协整模型, 煤炭、石油、天然气消费比重都与能源效率存在着长期的协整关系, 煤炭消费比重越大, 能源效率越低。

各种能源由于热效率值差异以及应用技术水平原因, 其经济产出能力也会不同, 因此, 研究各种能源品种的经济产出率, 从而有意识地调整能源结构以获得更多的经济产出, 将是降低能源强度、提高能源效率的有效方法之一。本文基于前面研究的能源内部不同品种的替代可以提高全要素生产效率的实证分析的基础上, 对中国钢铁行业能源内部替代使用超越对数生产函数进行估计, 研究了钢铁业基于不同能源品种的替代弹性而可能对钢铁行业全要素能源效率产生的影响, 从能源内部替代角度研究了中国钢铁行业提高全要素能源效率的可能性。

## 2 计量模型及数据说明

超越对数生产函数模型是一种易于估计和包容性很强的变弹性生产函数模型, 它在结构上属于平方反映面模型, 可有效研究生产函数中投入要素的交互影响、各种投入技术进步的差异。本文以滞后一期钢铁行业 GDP 及煤炭、石油、天然气和电力为投入要素, 构建了一个中国钢铁行业超越对数生产函数模型, 通过该模型分析了钢铁行业各品种能源的产出弹性、替代弹性。

为了简化模型, 考虑到当年经济生产中资本、劳动、技术水平等要素在很大程度上是由上年经济总量决定的, 因此用滞后一期的经济总量代替劳动和资本解释变量。本文产出中国钢铁行业生产总值滞后一期 GDP ( $Y_{t-1}$ ) 来表示一个时间趋势变量, 这样把经济系统自主技术进步也考虑进了生产函数中。投入的各种能源要素为煤炭 ( $C_t$ ), 石油 ( $O_t$ ), 天然气 ( $G_t$ ), 电力 ( $E_t$ ); 建立的超越对数生产函数如下:

$$\begin{aligned} \ln Y_t = & \varepsilon + \alpha \ln Y_{t-1} + \alpha_c \ln C_t + \alpha_o \ln O_t + \alpha_g \ln G_t \\ & + \alpha_e \ln E_t + \alpha_{co} \ln C_t \ln O_t + \alpha_{cg} \ln C_t \ln G_t + \\ & \alpha_{ce} \ln C_t \ln E_t + \alpha_{oc} \ln O_t \ln C_t + \alpha_{og} \ln O_t \ln G_t + \\ & \alpha_{oe} \ln O_t \ln E_t + \alpha_{gc} \ln G_t \ln C_t + \alpha_{cc} (\ln C_t)^2 + \alpha_{oo} (\ln O_t)^2 + \\ & \alpha_{gg} (\ln G_t)^2 + \alpha_{ee} (\ln E_t)^2. \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中:  $Y$  为钢铁业 GDP, 经济系统自主技术进步要素用滞后一期的 GDP 表示;  $C$  为煤炭的消耗量, 能源投入要素分别用煤炭、石油、天然气和电表示;  $C_t$ 、 $O_t$ 、 $G_t$ 、 $E_t$  分别为  $t$  年煤炭、石油、天然气和电力的消耗量;  $\beta$  位需要估计的系数;  $\varepsilon$  为常数。

煤炭投入产出弹性为:

$$\eta_c = \frac{dY/Y}{dC/C} = \frac{d \ln Y_t}{d \ln C_t} = \alpha + \alpha_{co} \ln O_t + \alpha_{cg} \ln G_t + \alpha_{ce} + 2\alpha_{cc} \ln C_t. \quad (2)$$

石油投入的产出弹性为:

$$\eta_o = \frac{dY/Y}{dO/O} = \alpha_o + \alpha_{co} \ln C_t + \alpha_{og} \ln G_t + \alpha_{oe} \ln E_t + 2\alpha_{oo} \ln O_t. \quad (3)$$

天然气投入的产出弹性为:

$$\eta_g = \frac{dY/Y}{dG/G} = \alpha_g + \alpha_{cg} \ln C_t + \alpha_{og} \ln O_t + \alpha_{ge} \ln E_t + 2\alpha_{gg} \ln G_t. \quad (4)$$

电力投入的产出弹性为:

$$\eta_e = \frac{dY/Y}{dE/E} = \alpha_e + \alpha_{ce} \ln C_t + \alpha_{oe} \ln O_t + \alpha_{ge} \ln G_t + 2\alpha_{ee} \ln E_t. \quad (5)$$

各种能源之间的替代弹性可表示如下:

煤炭与石油的替代弹性为:

$$\alpha_{CO} = \left[ 1 + \frac{-\alpha_{CO} + \frac{\eta_C}{\eta_O} \alpha_{OO}}{-\eta_C + \eta_O} \right]^{-1} \quad (6)$$

煤炭与天然气的替代弹性为:

$$\alpha_{CG} = \left[ 1 + \frac{-\alpha_{CG} + \frac{\eta_C}{\eta_G} \alpha_{GG}}{-\eta_C + \eta_G} \right]^{-1} \quad (7)$$

煤炭与电力的替代弹性为:

$$\alpha_{CE} = \left[ 1 + \frac{-\alpha_{CE} + \frac{\eta_C}{\eta_E} \alpha_{EE}}{-\eta_C + \eta_E} \right]^{-1} \quad (8)$$

石油与天然气的替代弹性为:

$$\alpha_{OG} = \left[ 1 + \frac{-\alpha_{OG} + \frac{\eta_O}{\eta_G} \alpha_{GG}}{-\eta_O + \eta_G} \right]^{-1} \quad (9)$$

石油与电力的替代弹性为:

$$\alpha_{OE} = \left[ 1 + \frac{-\alpha_{OE} + \frac{\eta_O}{\eta_E} \alpha_{EE}}{-\eta_O + \eta_E} \right]^{-1} \quad (10)$$

天然气与电力的替代弹性为:

$$\alpha_{GE} = \left[ 1 + \frac{-\alpha_{GE} + \frac{\eta_G}{\eta_E} \alpha_{EE}}{-\eta_G + \eta_E} \right]^{-1} \quad (11)$$

在超越对数生产函数中, 产出弹性和替代弹性反映了投入要素之间、投入要素与趋势变量(滞后一阶钢铁业产出)之间的相互作用关系。

### 3 模型估计及分析

实证分析的样本时间段为 1978—2007 年, 中国钢铁行业经济产出数据(GDP)以 1978 年不变价为基期, 数据来源于《中国钢铁工业五十年数字汇编》, 《中国钢铁工业年鉴 1995—2008》, 《中国能源统计年鉴 2003—2007》, 能源类 1978—2000 年数据来源于《中国钢铁工业五十年数字汇编》, 2000—2007 年能源数据来源于《中国统计年鉴 2001—2008》。

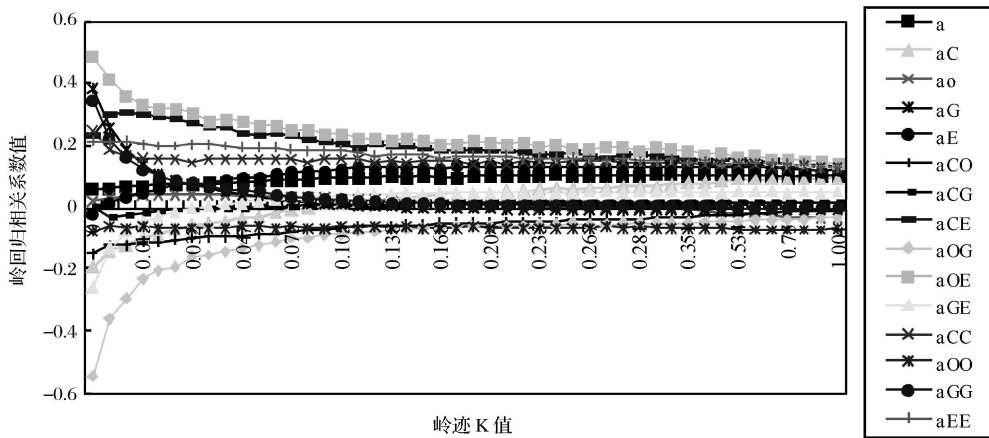


图 1 钢铁行业投入因子关于产出的岭迹图

由于变量间多重共线性比较显著(相关系数均在 0.87 以上), 由 OLS 估计的结果容易失真, 因此本文用岭回归进行估计, 根据岭迹图(图 1), 各变量系数在 0.20 趋于稳定, 方差膨胀因子(VIF)在岭

迹值趋于 0.2 时通过显著性检验; 取岭参数值  $k(k = 0.20)$ , 应用 DPS 软件包进行数据处理, 岭回归估计结果见表 1。

表 1 岭回归估计参数结果

变量系数	回归系数	标准误差	标准化回归系数	T 值	显著性 T	膨胀因子
$\alpha$	0.070	0.035	0.096	1.911	0.038	1.030
$\alpha_C$	0.100	0.038	0.112	6.627	0.000	0.120
$\alpha_O$	0.021	0.034	-0.066	-4.870	0.000	0.080
$\alpha_G$	-0.013	0.026	-0.014	-1.158	0.133	0.060
$\alpha_E$	0.144	0.013	0.137	12.937	0.000	0.050
$\alpha_{CO}$	-0.006	0.010	0.014	0.560	0.292	0.240
$\alpha_{CG}$	0.003	0.003	0.007	0.550	0.296	0.070
$\alpha_{OE}$	0.017	0.001	0.131	13.767	0.000	0.040
$\alpha_{OG}$	-0.020	0.005	-0.027	-1.937	0.037	0.080
$\alpha_{OE}$	0.070	0.008	0.152	7.047	0.000	0.190
$\alpha_{GE}$	0.012	0.004	0.043	2.610	0.010	0.110
$\alpha_{CC}$	0.016	0.002	0.114	6.936	0.000	0.110

续 表

变量系数	回归系数	标准误差	标准化回归系数	T 值	显著性 T	膨胀因子
$\alpha_{OO}$	- 0.015	0.003	- 0.061	- 4.454	0.000	0.080
$\alpha_{GG}$	0.004	0.015	0.015	0.577	0.286	0.260
$\alpha_{EE}$	0.014	0.001	0.139	11.535	0.000	0.060
常数项	- 0.753	1.196	0.000	- 1.452	0.084	

注: VIF(膨胀因子)值 SPSSADDINS2.0 插件计,  $k=0.2$ , Adjusted  $R^2=0.954911$ ,  $F=22.407$ ,  $p<0.0029$ , 标准误差估计: 0.0683。

岭回归所得结果的统计检验比较显著, 煤炭与石油交互项, 煤炭与天然气的交互项, 天然气二次项系数未通过显著性检验, 而岭回归结果的完美性在于是否有效克服了共线性问题和参数的合理性。表 1 显示, 回归项系数 VIF 值在 0~1 之间波动, 远低于临界值 5 的标准。交叉影响项和平方影响项有负值说明中国钢铁行业能源对产出的总体规模报酬呈现非递增状态, 符合中国钢铁业经济现实, 可以认为模型参数估计结果是合理的。

根据模型估计结果, 计算每年各种投入的产出弹性和替代弹性如图 2 和图 3 所示。

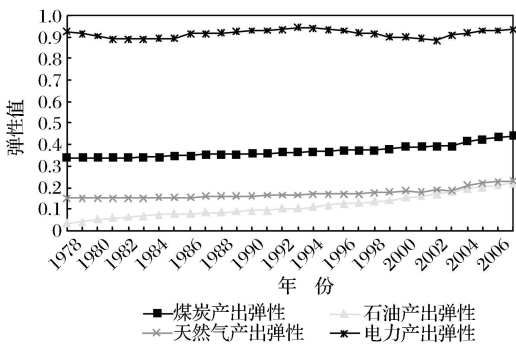


图 2 各种能源要素的产出弹性

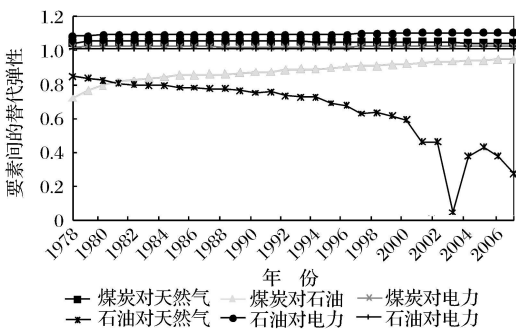


图 3 能源不同品种的替代弹性

各种能源由于热效率值差异以及应用技术水平原因, 其经济产出能力不同。电力和煤炭的产出弹性在考察期间相对稳定。电力的产出弹性在 0.9~1 之间波动, 产出弹性最高; 煤炭的产出弹性在考察期内在 0.3~0.4 之间波动。

石油、天然气产出弹性低, 与石油与天然气高效率能源特征未匹配, 原因在于其在中国钢铁行业能源总体消费中所占比例太小。图 2 也现实出, 从 1992 年后, 石油与天然气的产出弹性呈现出加速上

升趋势, 特别是石油的产出弹性, 在 1978-2007 的考察期内, 其产出弹性从 0.03 上升到了 0.25, 与煤炭的产出弹性的差距拉小, 这表明: 随着石油和天然气在钢铁行业总体能源消费中比例的不断增大, 其作为高效的能源特征逐步凸显出来。

替代弹性可以定义为: 在技术水平和投入要素的价格不变的情况下, 边际技术替代率的相对变动所引起的生产要素投入的比例的相对变动, 即投入要素比例的变动的百分比与边际技术替代率的变动百分比的比值。要素之间可替代程度的高低可用要素替代弹性(the elasticity of substitution)来描述, 图 3 显示: 石油和天然气的替代弹性在考察期内波动幅度最大, 石油和天然气的可替代弹性逐步降低, 两者作为一次能源, 在热值和特性方面具有天然的相识性, 可替代弹性的降低表明两种能源作为高效率的能源品种的相识性逐步表现出来。煤炭与天然气、煤炭与电力的替代弹性都大于 1, 煤炭与石油的替代弹性在考察期内向 1 靠近; 显然煤炭可以被电力、石油、天然气有效的替代。

## 4 结论与建议

本文建立了一个以滞后产出、煤炭、石油、天然气和电力为投入的中国钢铁行业超越对数生产函数模型, 计算各种能源投入要素的产出弹性、替代弹性。结果显示: 电力的产出弹性最高、煤炭的经济产出弹性要高于天然气和石油, 但三者之间产出的弹性差距在逐步缩小, 作为优质能源品种的天然气和石油的高效性在中国钢铁行业逐步凸显。煤炭与电力、石油、天然气间的高替代弹性表明: 在中国钢铁行业, 要实现能源全要素生产率的提高, 除了中性技术进步、产权机制、价格管制、产出的产品结构、能源与资本、劳动力的替代外, 还可以通过高效率的能源品种电力、石油、天然气对煤炭的替代来实现。

### 参考文献

- [1] KAMBARA. The energy situation in China[J]. ChinaQ, 1992, 131: 608-636.
- [2] HUANG. Industry energy use and structural change: a case study of the People's Republic of China[J]. Energy Economics, 1993, 15: 131-136.

(下转第 73 页)

- [11] 宋小佳. 福建经济结构竞争力的现状及对策建议[J]. 宏观经济研究, 2002(11): 48-51.
- [12] 周小亮, 何刚, 陈文静, 等. 福建省经济结构战略性调整与稳定快速增长的体制创新研究[J]. 东南学术, 2004(3): 101-109.
- [13] 陈明森, 陈新, 何宇, 等. 福建新型工业化进程基本评价与新时期战略选择[J]. 中共福建省委党校学报, 2006(7): 43-49.
- [14] 蔡加福, 郭善耘. 提升福建就业水平的对策研究[J]. 福建论坛: 人文社会科学版, 2006(12): 130-134.
- [15] 程思怡. 优化投资结构, 转变增长方式——对福建投资结构优化的对策建议[J]. 浙江统计, 2008(4): 19-21.

## Analysis on Evolution of Economic Structure and Its Growth Efficiency: A Case from Fujian

Zheng Jinghui, Zhang Wenqi

(Economics and Management College, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** This paper uses the Cobb-Douglas production function to analyze the evolution of economic structure and its growth efficiency in Fujian. The results show as follows: the output elasticity of capital ( $\beta$ ) is greater than that of labor ( $\alpha$ ), which indicates that the economic development in Fujian is entering a stage of capital intensive heavy chemical industry; the sum of output elasticity coefficient of capital and labor is less than 1, which indicates that the economic development in Fujian is in the stage of decreasing returns to scale. The results also show that the adjustment of industrial restructuring in Fujian plays a relatively small role in promoting economic growth. After the empirical analysis, it proposes some suggestions on promoting the optimization of economic structure in Fujian.

**Key words:** economic structure; growth efficiency; Cobb-Douglas production function; Fujian; the reform and opening up

(上接第 59 页)

- [3] SINTON J E, LEVINE M D. Changing energy intensity in Chinese industry: the relative importance of structural shift and intensity change[J]. Energy policy, 1994, 22: 239-255.
- [4] LIN Xiannuan, POLENSKE K R. Input-output anatomy of China's energy use changes in the 1980s[J]. Economic Systems Research, 1995(7): 67-84.
- [5] GARBACCIO R F, HODALE M S, et al. Why has the energy-output ratio fallen in China? [J]. Energy Journal, 1999, 13: 70-88.
- [6] ZHANG. Why did the energy intensity fall in China's industrial sector in the 1990s? [J]. Energy Economics, 2003, 25: 625-638.
- [7] JENNE C A, CATTELL R K. Structural change and energy efficiency in industry[J]. Energy Economics, 1983(5): 14-23.
- [8] FARLA J, CUELENAERE R, BLOK K. Energy efficiency and structural change in the Netherlands, 1980-1990[J]. Energy Economics, 1998, 20: 1-28.
- [9] 韩智勇, 魏一鸣, 范英. 中国能源强度与经济结构变化特征研究[J]. 数理统计与管理, 2004(1): 1-6.
- [10] 吴巧生, 成金华. 中国工业化中的能源消耗强度变动及因素分析——基于分解模型的实证分析[J]. 财经研究, 2006(6): 75-85.
- [11] 吴巧生, 成金华. 中国能源消耗强度变动及因素分解: 1980—2004[J]. 经济理论与经济管理, 2006(10): 34-40.
- [12] 齐志新, 陈文颖. 结构调整还是技术进步——改革开放后我国能源效率提高的因素分析[J]. 上海经济研究, 2006(6): 8-16.
- [13] 李廉水, 周勇. 技术进步能提高能源效率吗——基于中国工业部门的实证检验[J]. 管理世界, 2006(10): 82-89.
- [14] HALVORSEN R. Energy substitution in US manufacturing[J]. The Review of Economics and Statistics, 1997, 6: 381-388.
- [15] OZATALAY S, GRUBAUGH S, VEACH L T. Energy substitution and national energy policy[J]. American Economic Review, 1992, 69: 369-371.
- [16] HAN Z Y, FAN Y, WEI Y M. Energy structure, marginal efficiency and substitution rate: an empirical study in China [J]. Energy, 2007(6): 935-942.
- [17] 张瑞, 丁日佳. 我国能源效率与能源消费结构的协整分析[J]. 煤炭经济研究, 2006(12): 8-10.

## Substitution Elasticity Among Different Energy Types in Chinese Steel Industry: Based on Trans-log Production Function

Shi Hongliang<sup>1</sup>, Chen Kai<sup>2</sup>, Yan Bo<sup>3</sup>

(1. The Institute of Finance and Economics Research, Shanghai Financial and Economic University, Shanghai 200433, China; 2. Department of Economics, Northeast University, Hebei 066004, China; 3. Principal's Office, Yanshan University, Hebei 066004, China)

**Abstract:** In order to measure output elasticity and substitution elasticity for different types of energy in China's steel industry, with lag GDP deemed as a substitution variable of labor and capital, and taking coal, oil, natural gas and electricity as input factors, and taking GDP of Chinese steel as the output factor, a trans-log production function model for China's steel industry is established. The ridge regression approach is used to estimate the parameters for the model. Output elasticity and substitution elasticity of different types of energy are calculated. The result indicates as follows: the substitution elasticity between coal & oil, and coal & natural gas, and coal & electricity are fluctuated around 1; total energy efficiency in China's steel sector can be improved by substituting oil, natural gas and electricity for coal.

**Key words:** steel industry; output elasticity; substitution elasticity; trans-log production function