

# 能源偏向型技术进步的测算及对 能源效率的影响研究\*

——基于制造业 27 个细分行业的实证考察

廖茂林 任羽菲 张小溪

**〔摘要〕**技术进步作为影响能源效率的关键因素,其偏向性对能源效率的提升至关重要。本文以 1995-2014 年制造业行业的发展状况和能源利用情况为研究样本,从技术进步偏向性入手,构建双层嵌套型 CES 生产函数,并利用面板数据模型对制造业 27 个细分行业非能源要素和能源要素间替代弹性进行估计,测算出资本-劳动要素偏向型和能源偏向型技术进步水平。在测算能源偏向型技术进步的基础上,利用向量自回归模型对能源偏向型技术进步、能源价格以及能源效率三者之间的长期关系进行探究,进一步使用误差修正模型对比分析高能耗行业和其他行业各因素对能源效率影响效应的差异所在,进而为制定提高工业行业能源效率的政策建议提供理论依据。研究结果表明:(1)制造业能源要素与劳动、资本聚合成的非能源要素之间存在互补关系,且在 1995-2014 年,全行业非能源要素偏向型的技术进步水平稳步增长,能源偏向型技术进步波动较大且表现出明显的行业异质性;(2)制造业能源价格、能源偏向型技术进步和能源效率之间存在长期均衡关系。误差修正模型估计结果表明,能源偏向型技术进步对能源效率存在短期和长期的正向影响,能源价格对能源效率存在短期和长期的负向影响,且能源价格的提升对低能耗行业的影响更大,而技术进步对能源效率的提升在高能耗行业上体现出更大效用。

**关键词:**能源偏向型技术进步 替代弹性 能源效率 技术进步

**JEL 分类号:**E23 O12 O13

## 一、引言

2015 年,我国 GDP 水平约为世界的 15.5%,但能源消耗占比却为 23%。在单位 GDP 能耗上,我国高达世界平均水平的 1.5 倍,相比其他先进国家来说更体现出明显差距,并且在发展中国家也处于高位。

节能减排既是我国庄严的国际承诺,也是国内经济转型升级的必然要求。从国际承诺看,中国在 2015 年巴黎气候变化大会上,承诺在 2030 年左右使二氧化碳排放达到峰值,同时在 2030 年实现单位国内生产总值的二氧化碳排放比 2005 年下降 60%-65%。从国内约束来看,2017 年国务院印发的“十三五”节能减排综合工作方案提出,到 2020 年,全国万元国内生产总值能耗比 2015 年下降 15%,能源消费总量控制在 50 亿吨标准煤以内。2017 年中央经济工作会议认为,中国经济运行

\* 廖茂林,中国社会科学院城市发展与环境研究所,副研究员,经济学博士;任羽菲,中国社会科学院研究生院,博士研究生;张小溪,中国社会科学院经济研究所,副研究员,经济学博士。本文得到以下项目支持:国家自然科学基金项目“中国建设制造强国的行动路径研究”(批准号:71673296)、中国社会科学院创新工程重大专项“推进新时代中国特色生态文明建设与绿色发展战略研究”(项目编号:2017YCXZD007)、中国社会科学院登峰计划“气候变化经济学优势学科”项目(批准号:2017CASS03)。

面临的突出矛盾和问题,根源是重大结构性失衡,必须深化供给侧结构性改革,努力实现供求关系新的动态均衡。2016年以“三去一降一补”五大任务为抓手的供给侧结构性改革取得初步成效。完成节能减排目标,是保障人民群众健康和经济社会可持续发展,促进经济转型升级,实现经济发展与环境改善双赢的必然要求。

就我国现阶段经济结构来看,制造业不仅在GDP增长中占据重要位置,其能源消耗也占据相当大的比重。改革开放以来,我国的工业发展一直呈现出高投资、高能耗、高排放的特征。2014年,制造业在全行业GDP的贡献仅为22.95%,却在能源消耗上占比64.29%。因此,节能减排目标能否顺利实现,关键取决于制造业的结构调整和技术进步。

能源作为世界经济与全球环境之间的桥梁,和劳动、资本一样,是当今社会的基础性战略资源和经济系统的基本生产要素,同样需要作为独立生产要素引入测算。因此,对工业,尤其是制造业的能源偏向型技术进步水平进行深入研究,对政府各种环保政策的制定与实施,对引进先进能源效率技术以及工业产业结构升级、实施节能减排战略发展都意义重大。

本文的主要贡献可以归结为如下两个方面:其一,针对制造业细分子行业,将能源消耗作为独立的生产要素引入技术进步偏向性测算,从而确定不同时点制造业行业生产中资本、能源及劳动投入的组合特征,要素间的替代弹性及能源和非能源偏向型技术进步,即特定行业的双层嵌套CES生产函数结构,掌握行业采用技术的要素使用偏向的动态特征;其二,采用实证方法分别从长期和短期两方面分析能源偏向型技术进步水平与能源价格、能源效率之间的关系,从而为我国节能减排目标的实现和保障经济的稳定增长提供政策建议。

## 二、文献回顾

技术进步作为经济增长的源泉,是国内外经济学家研究的重点。现阶段对于技术进步偏向性的研究大多围绕在包含资本和劳动的双要素模型上。David and Klundert(1965)最早对技术进步方向进行了测算,他们基于Arrow提出的CES生产函数,对美国20世纪以来资本和劳动之间的替代弹性进行了估计,并算出了资本效率和劳动效率的增长率。研究发现两要素之间的替代弹性小于1,且劳动效率比资本效率增长得快,即表明技术进步更偏向于资本。Klump et al.(2007)基于CES生产函数,利用标准化系统方法估计两要素之间的替代弹性,度量了美国的技术进步偏向性,得出的结论仍为美国体现为资本偏向性技术进步。Sato and Morita(2009)针对1960年至2004年美国和日本的数据,采用指数方法对两国劳动增强型和资本增强型技术进步速率进行测算,并研究其对各国经济增长的影响差异。国内学者戴天仕和徐现祥(2010)根据Acemoglu(2002)的定义,基于Klump et al.(2007)提出的“全局最优”方法,在完全竞争假设下,利用标准化CES生产函数以及标准化供给面系统估计方法,确定出替代弹性,对1979年以来中国技术进步偏向水平做出测算,结果表明技术进步水平整体表现为资本偏向型。雷钦礼(2013)构建了一套系统测算要素偏向性技术进步的方法,通过最大化政府征收生产税条件下的企业利润,得到各年的劳动增强型技术进步速率和资本增强型技术进步速率,并在此基础上计算出技术进步的整体偏向性,其结论表明中国近20年的技术进步是偏向于资本使用和劳动节约的,且经济增长主要是依靠要素投入而非技术进步。资本和劳动双要素技术偏向测算方法的发展为能源、技能等其他要素参与技术进步偏向性测算提供了发展基础和标准化思路。

在对能源要素的技术进步研究中,很重要的前提是对能源要素及非能源要素之间替代弹性的估计。早在1975年,Berndt and Wood(1975)通过建立超越对数成本函数,并在希克斯中性技术进步的前提下,利用三阶段最小二乘法估计出了能源与其他非能源要素之间的替代弹性,结果表明,

能源和劳动有弱替代性, 偏替代弹性为 0.65, 而能源和资本是互补的, 弹性约为 -3.2。Jorgenson and Fraumeni (1981) 和 Jorgenson (1984) 发现美国多数产业表现为能源节约型技术进步, 主要源于能源价格冲击所产生的替代效应。Ma et al. (2009) 和樊茂清等 (2009) 基于 Welsch and Ochsen (2005) 的方法来分析能源与非能源要素替代弹性对能源强度的影响, 结论显示地区能源与劳动、资本间均体现为替代关系。Sanstad et al. (2006) 将劳动、资本、能源以及中间产品作为投入要素, 利用超越对数成本份额分析法, 研究印度、韩国以及美国的一些能源密集型产业的能源增强型技术进步水平, 并在此基础上探究生产率的波动趋势。其结果表明, 韩国的化肥和钢铁产业, 以及印度和美国的绝大多数产业都表现出能源节约型技术进步。Hassler et al. (2012) 分别采用 C-D 生产函数和嵌套 CES 生产函数对技术进步水平进行测算, 并对非能源要素及能源要素间替代弹性进行估计, 最终得到平衡增长路径下能源与资本 - 劳动增强型技术进步的增长率。其结果发现, 能源要素的技术进步与资本 - 劳动复合型技术进步的增长率之间呈现负相关, 且能源要素的技术进步增长率受石油价格的冲击影响显著。国内学者对基于能源要素的偏向型技术进步的研究还处于初级阶段。郑照宁和刘德顺 (2004) 对资本、劳动和能源三种要素之间的替代弹性进行了测算, 结果表明三者之间均存在显著替代效应, 但技术进步总体体现为中性。吕振东等 (2009) 利用 1980-2006 年的数据, 使用三种双层嵌套 CES 生产函数测算了能源、资本和劳动间的替代弹性, 结果发现资本先和能源聚合, 之后再和劳动聚合的模型最适合我国国情, 并估算出能源与资本之间的替代弹性为 0.47, 资本与能源聚合后与劳动之间的替代弹性为 0.84。在要素替代弹性测算的文献中, 以上国内外文献无论是采用指数方法还是采用规格化供给方程组方法, 均只对平衡增长路径下或一个阶段内的能源与非能源要素替代弹性做出测算, 而中国自改革开放以来, 制造业发展环境与特点日新月异, 全行业生产方式和技术水平均发生巨大变化, 故须对能源与非能源要素替代弹性分行业做出时变动态测算。

能源效率, 即能源生产率, 是衡量当前各地区能源利用水平的重要指标。近年来, 由技术进步带来的一系列能源环境问题也受到了众学者的重视。Popp (2001) 研究得出美国制造业能源要素与非能源要素之间存在互补关系, 且能源效率增长的 1/3 来源于与能源相关的专利技术。Welsch and Ochsen (2005) 使用超越对数成本函数方法对能源和非能源要素之间的替代弹性及偏向型技术进步进行了测算, 结果表明德国能源强度降低的主要影响因素为要素替代和偏向型技术进步。Fisher-Vanden et al. (2006) 发现, 技术研发是能源效率提高的重要因素之一。Sue Wing (2006) 在研究影响能源效率因素时表明要素替代弹性是主要影响途径之一, 即存在各要素上的技术进步水平差异, 而各要素的技术进步水平对于能源效率具有不同影响。并且当技术进步水平不变时, 能源价格的冲击将对企业在能源与非能源要素间投入的选择产生影响, 能源价格对能源效率的影响也十分显著。另外, 产业结构的变化也具有一定影响, 即对于不同能耗的行业, 其能源效率存在差异性。Okushima and Tamura (2009) 利用多校准分解技术研究日本在 1970-1985 年技术变化对能源效率和碳排放的影响, 揭示了技术变化对能源效率具有重要影响。Acemoglu et al. (2012) 将技术进步偏向性扩展到环境节约型技术进步领域, 进而研究碳排放和二氧化碳的定价问题。从国内研究来看, 多项研究结果表明, 就目前我国社会发展状况而言, 仅靠调整产业结构来提高能源效率已经很难改善当前能源消耗过量、能源效率不高的状况。例如, 史丹 (2003) 认为, 从 20 世纪 90 年代中期开始, 我国产业结构对于能源效率的影响在逐渐消失, 甚至转向产生负向影响。因而, 对于技术进步的研究更是逐渐成为研究我国能源问题的重要途径。李廉水和周勇 (2006) 用 DEA-Malmquist 指数分解法, 将技术进步分解成纯技术效率、科技进步和规模效率三个指数, 以 35 个工业行业的数据为基础分析了这三个指数对能源效率的影响, 并发现纯技术效率为影响能源效率的首要因素。王霄和屈小娥 (2010) 使用 Malmquist 生产率指数法对中国制造业 28 个

子行业的全要素能源效率进行测算,并使用 Tobit 模型对能源效率影响因素进行分析,结果表明研发投入、市场竞争、外资进入有利于改进能源效率。以上国内外对能源效率影响因素的研究中,主要侧重技术效率、外资进入、R&D 投入等方面,涉及要素偏向性的研究并不多,并甚少将能源偏向型技术进步作为主要研究对象。在对国内外能源效率影响因素研究进行分析的基础上,本文在发展制造强国战略的大背景下,选取了制造业分行业数据,对时变的能源与非能源要素替代弹性进行测算,并对各行业能源偏向型技术进步对能源效率影响情况进行分析讨论。

### 三、能源偏向型技术进步的测度及相关分析

#### (一) 测算方法说明

本文基于劳动、资本和能源三者作为投入要素做经济增长研究,且主要探究技术进步水平在能源要素与非能源要素上各自的发展情况以及差异性。由于 CES 生产函数的替代弹性可变,能够更好地刻画行业之间能源要素与非能源要素替代效应的异质性,且根据周晶等(2015)关于我国工业多数行业支持使用嵌套 CES 生产函数的结论,本文选取资本与劳动先聚合再与能源聚合的如下形式的三要素双层嵌套 CES 生产函数:

$$Y_t = \left\{ (1 - \gamma) [A_t K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}]^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + \gamma [A_t^E E_t]^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right\}^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \quad (1)$$

其中, $Y_t$  为总产出, $K_t$  为资本投入, $L_t$  为劳动投入, $A_t$  为资本-劳动增强型技术进步水平, $E_t$  为能源投入, $A_t^E$  为能源增强型技术进步水平, $\varepsilon$  表示非能源要素对能源的替代弹性, $\alpha$  为资本收入与非能源要素总收入之比。当要素市场为完全竞争时,可计算得到非能源要素偏向型技术进步和能源要素偏向型技术进步如式(4)和(5)。

$$L_t^{share} = \frac{\partial Y_t}{\partial L_t} \frac{L_t}{Y_t} = (1 - \alpha)(1 - \gamma) \left[ \frac{A_t K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}}{Y_t} \right]^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \quad (2)$$

$$E_t^{share} = \frac{\partial Y_t}{\partial E_t} \frac{E_t}{Y_t} = \gamma \left[ \frac{A_t^E E_t}{Y_t} \right]^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得两类技术进步水平为:

$$A_t = \frac{Y_t}{K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}} \left[ \frac{L_t^{share}}{(1 - \alpha)(1 - \gamma)} \right]^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \quad (4)$$

$$A_t^E = \frac{Y_t}{E_t} \left[ \frac{E_t^{share}}{\gamma} \right]^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \quad (5)$$

由上式可知,只要设定  $\alpha$ 、 $\varepsilon$  和  $\gamma$  的值,并利用数据  $Y_t$ 、 $K_t$ 、 $L_t$ 、 $E_t$ 、 $L_t^{share}$  和  $E_t^{share}$ ,即可求得两类技术进步的水平。对于  $\gamma$  的取值,根据 Hassler et al.(2012) 的设定,取值  $\gamma = 0.05$ 。对于两类要素间替代弹性  $\varepsilon$  的取值,假定技术进步水平满足如下过程:

$$\begin{bmatrix} a_t \\ a_t^E \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{t-1} \\ a_{t-1}^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^A \\ \theta^E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varpi_t^A \\ \varpi_t^E \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $a_t = \ln(A_t)$ ,  $a_t^E = \ln(A_t^E)$ ,  $\begin{bmatrix} \varpi_t^A \\ \varpi_t^E \end{bmatrix} \sim N(0, \Sigma)$ 。

即可得:

$$\frac{A_t}{A_{t-1}} = \frac{Y_t}{K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}} \frac{K_{t-1}^\alpha L_{t-1}^{1-\alpha}}{Y_{t-1}} \left[ \frac{L_t^{share}}{L_{t-1}^{share}} \right]^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \quad (7)$$

$$\frac{A_t^E}{A_{t-1}^E} = \frac{Y_t}{E_t} \frac{E_{t-1}}{Y_{t-1}} \left[ \frac{E_t^{share}}{E_{t-1}^{share}} \right]^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \quad (8)$$

最终计算得到关于替代弹性的表达式：

$$\begin{pmatrix} s_t^A \\ s_t^E \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^A \\ \theta^E \end{bmatrix} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \begin{bmatrix} z_t^A \\ z_t^E \end{bmatrix} + \omega_t \quad (9)$$

其中,  $s_t^A = \ln\left(\frac{Y_t}{K_t^\alpha L_t^{1-\alpha}}\right) - \ln\left(\frac{Y_{t-1}}{K_{t-1}^\alpha L_{t-1}^{1-\alpha}}\right)$ ,  $s_t^E = \ln\left(\frac{Y_t}{E_t}\right) - \ln\left(\frac{Y_{t-1}}{E_{t-1}}\right)$ ,  $z_t^A = \ln L_t^{share} - \ln L_{t-1}^{share}$ ,  $z_t^E = \ln E_t^{share} - \ln E_{t-1}^{share}$ 。

采用面板数据模型对(9)式进行估计,可得到不同行业各个年度非能源要素与能源要素替代弹性的估计值。

(二)数据来源与变量说明

由于各细分行业数据在统计上的难度和现有数据的缺失,本文对制造业细分行业的研究采用1995-2014年的数据。同样由于数据可获得性,将橡胶制品制造业与塑料制品制造业合并为橡胶与塑料制品制造业,汽车制造业与铁路、船舶航空航天和其他运输设备制造业合并为交通运输设备制造业,最终得到27个制造业子行业20年的年度数据,具体如表1所示。

表1 行业分类及序号

序号	行业	序号	行业	序号	行业
1	农副食品加工业	10	造纸和纸制品业	19	黑色金属冶炼和压延加工业
2	食品制造业	11	印刷和记录媒介复制业	20	有色金属冶炼和压延加工业
3	酒、饮料和精制茶制造业	12	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	21	金属制品业
4	烟草制品业	13	石油加工、炼焦和核燃料加工业	22	通用设备制造业
5	纺织业	14	化学原料和化学制品制造业	23	专用设备制造业
6	纺织服装服饰业	15	医药制造业	24	交通运输设备制造业
7	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	16	化学纤维制造业	25	电气机械和器材制造业
8	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	17	橡胶与塑料制品制造业	26	计算机、通信和其他电子设备制造业
9	家具制造业	18	非金属矿物制品业	27	仪器仪表制造业

对于产出  $Y_t$  和劳动投入  $L_t$ ,分别使用工业分行业增加值和工业企业分行业全部从业人员年平均人数作为衡量。为克服工业经济指标统计口径1997年前和1998年后不一致的问题,采用陈诗一(2011)的做法补充了缺失数据,调整了统计口径。对于资本存量  $K_t$ ,采用永续盘存法对分行业资本存量进行估算。以上指标数据来源为《中国统计年鉴》和《中国工业经济统计年鉴》。对于劳动收入份额  $L_t^{share}$ ,使用工业分行业城镇单位就业人员平均工资与劳动投入的乘积作为衡量,数据来源于《中国劳动统计年鉴》。价格处理方面,将基期固定为2000年。能源消费量  $E_t$  的数据来自历年《中国能源统计年鉴》,另由于煤炭在工业能源中占比最高,本文选取煤炭价格与能源消耗总量乘积作为能源收入份额  $E_t^{share}$  的衡量。资本收入份额  $K_t^{share}$  采用资本收入比收入总额得到,其中资

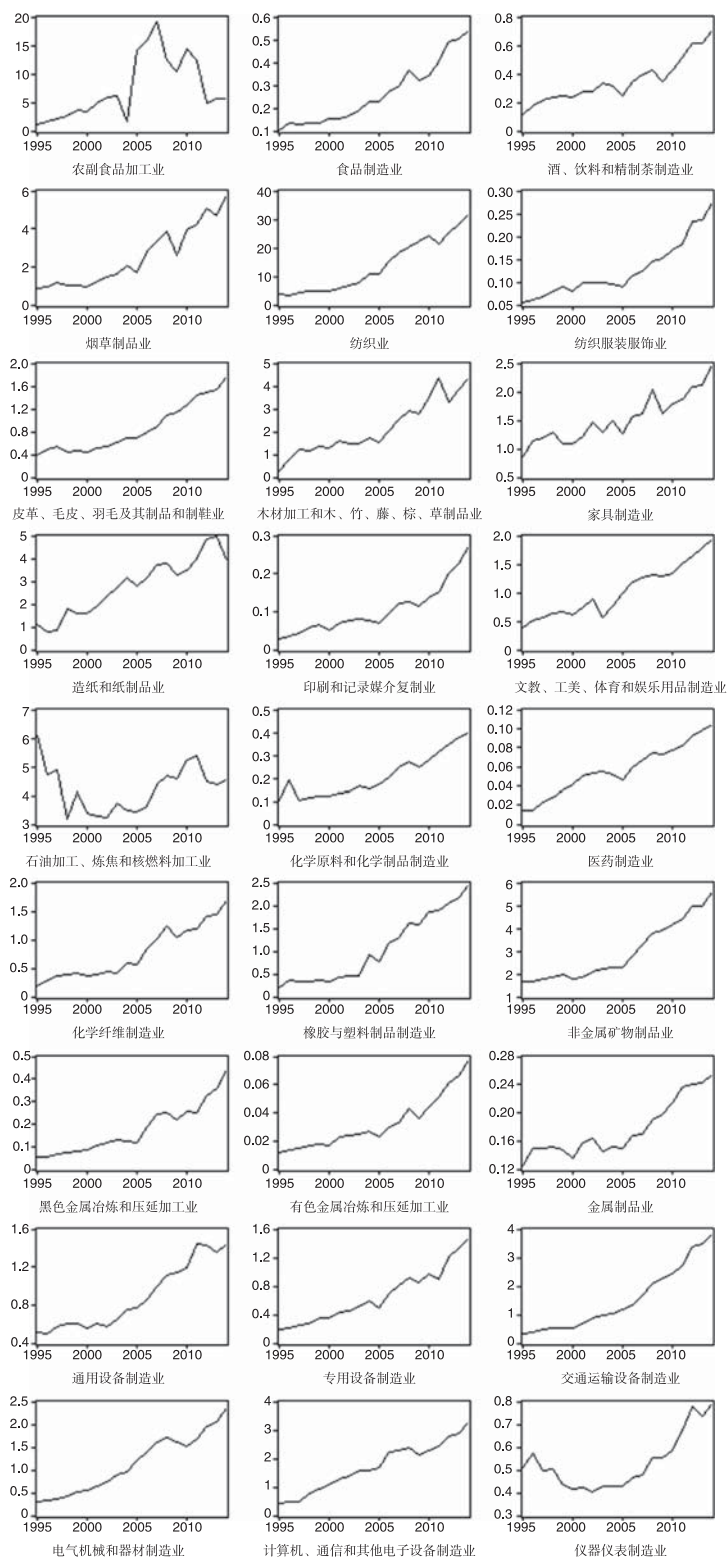


图 1 1995-2014 年我国制造业 27 个行业的非能源要素偏向型技术进步

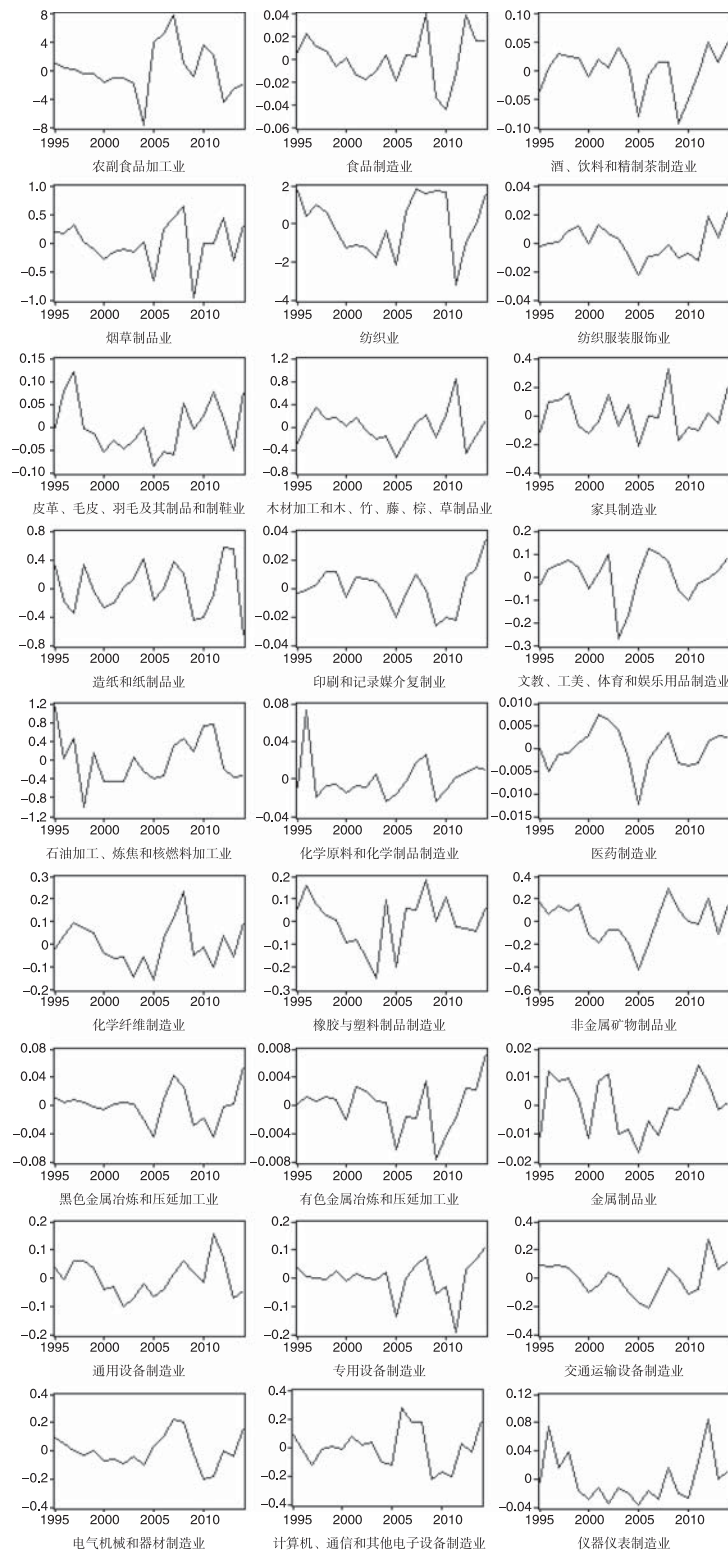


图 2 1995-2014 年我国制造业 27 个行业的能源要素偏向型技术进步

本收入由营业利润与折旧加总计算。最后,  $\alpha$  的取值可根据  $L_t^{\text{share}}/K_t^{\text{share}} = (1 - \alpha)/\alpha$  计算得到。

### (三) 估计结果与分析

本文对制造业 27 个子行业 1995 年到 2014 年的相关数据进行分析, 使用 Eviews9.0 软件及固定效应面板数据模型方法对替代弹性进行估计, 根据得到的替代弹性估计值计算得到制造业各子行业的非能源要素偏向型技术进步及能源偏向型技术进步水平, 测算结果如图 1 和图 2 所示。

图 1 中的结果表明, 制造业子行业的非能源偏向型技术进步总体呈明显上升态势。其中同类型行业技术进步轨迹相似, 如图 1 第 1 行中农副食品加工业、食品制造业和酒饮料及精制茶制造业自 1995 年到 2004 年非能源要素偏向型技术进步水平增长较缓慢, 2005 年后提升较快; 第 2 行第 2、3 列的纺织业及纺织服装、服饰业均为先升后降再升的态势。总体结果同钟世川 (2014) 的测算结果相一致。

图 2 为 27 个子行业能源偏向型技术进步测算结果。类似何小钢和王自力 (2015) 的结果, 各制造业子行业技术进步的波动次数和幅度整体偏大。就波动的次数而言, 制造业整体能源要素偏向型技术进步水平在 1995-2014 年波动较频繁, 但长期内总体保持稳定。多数行业能源要素偏向型技术进步自 20 世纪 90 年代中期到 2005 年前存在缓步下降趋势, 推测由于该时段内制度变化对要素市场发展产生影响, 改革开放以后金融环境和市场开放程度改善对技术进步向资本方面倾斜偏向起到了引导作用。但 2012 年后绝大多数制造业子行业的能源要素偏向型技术进步开始上升, 说明宏观环境收紧时技术进步偏向由非能源向能源倾斜, 能源消耗增加, 这一现象值得警惕。技术进步的波动次数方面, 出现大幅度波动的时间点呈现分布相近特征, 表明能源要素偏向型技术进步受宏观经济政策和环境的影响较明显。制造业投资的波动也导致技术进步偏向性的波动, 短期内受到政府政策支持时, 能源要素市场价格信号失效, 企业无法对价格变化做出准确预期, 间接导致波动加剧。

在能源价格和宏观经济因素冲击下, 技术进步能源偏向性在行业之间呈现异质性特征。但总体上绝大多数行业的能源偏向技术进步水平长期较稳定, 趋势性不明显。其中传统制造业, 如食品制造业、纺织服装服饰业等呈现出先降后升的趋势; 而技术水平较高的行业, 包含计算机、通信和其他电子设备制造业, 仪器仪表制造业这样的新兴制造业, 其能源偏向技术进步水平自 2000 年开始维持了长时间低水平后, 2010 年左右出现短暂上扬, 但 2012 年后再次回落。重工业行业如金属制品业、交通运输设备制造业、电气机械和器材制造业等市场化程度相对较低, 生产技术多为能源密集型, 故其能源偏向型技术进步水平相对较高, 波动程度相对较低。轻工业行业如纺织业、家具制造业等, 由于市场化程度相对较高, 技术研发投资调整更加灵活, 故而能源偏向型技术进步波动次数较多, 但波动幅度相对较小。

## 四、技术进步对能源效率的影响分析

### (一) 技术进步、能源价格与能源效率的关系分析

参照陈晓玲等 (2015) 的处理方法, 本文将能源效率定义为产出与能源消耗之比, 其表达式为:

$$e_t = \ln Y_t / E_t = \ln P_t / (E_t^{\text{Share}} \cdot P_t^E) \quad (10)$$

其中,

$$E_t^{\text{Share}} = (E_t \cdot P_t^E) / (P_t \cdot Y_t) \quad (11)$$

根据陈晓玲等 (2015) 的结论, 当生产函数为  $(K/L)E$  型双层嵌套 CES 形式时, 能源偏向型技术进步对能源份额的影响 (由能源份额对能源偏向型技术进步求导得到) 方向不定, 根据  $K/L$  和



E/L 的值将工业行业分类,其中 K/L 高且 E/L 低的行业 1994-2006 年影响不明显,2006 年后负向影响能力大幅提高;K/L 低且 E/L 高的行业有效能源的提高使得能源份额降低,从而使能源效率降低。由(11)式可知,能源份额同能源价格关系密切,故本文在对能源偏向型技术进步与能源效率关系进行研究的基础上加入能源价格变量,建立状态空间模型来研究二者对能源效率的影响。

## (二) 制造业能源效率的现状

由式(10)代入相关变量数据,测算得到制造业各子行业 1995-2014 年能源效率。由表 2 可以看出,我国制造业各行业的能源效率大多呈现明显的上升趋势,并具有一定同步性。1995 年至 2014 年,制造业能源效率由 0.18 增长到 0.96,年均增长 9.21%,全国总体能源效率也由最初的 0.19 上升到 2012 年的 1.43,年均增长 12.61%。1996 年之后,能源效率进一步反弹,恢复强劲增长趋势。

为了便于对比结果,将全部 27 个制造业子行业按照 K/L 和 E/L 中位数上下分为四组,第一组为 E/L 高于中位数且 K/L 高于中位数,包括表 1 中 3、4、13、14、15、16、19、20、24 和 25,多是高耗能、高资本密集度的行业;第二组为 E/L 高且 K/L 低于中位数,包括表 1 中 1、2、10 和 18,多是技术水平较低的高耗能且劳动密集型行业;第三组为 E/L 低且 K/L 高于中位数,包括表 1 中行业 26,为资本密集型且低耗能的行业;第四组为 E/L 低且 K/L 低于中位数,包括表 1 中 5、6、7、8、9、11、12、17、21、22、23、27 共 12 个行业。取每组子行业能源效率均值得到四个序列,由 1995 年到 2014 年的走势如图 3 所示。

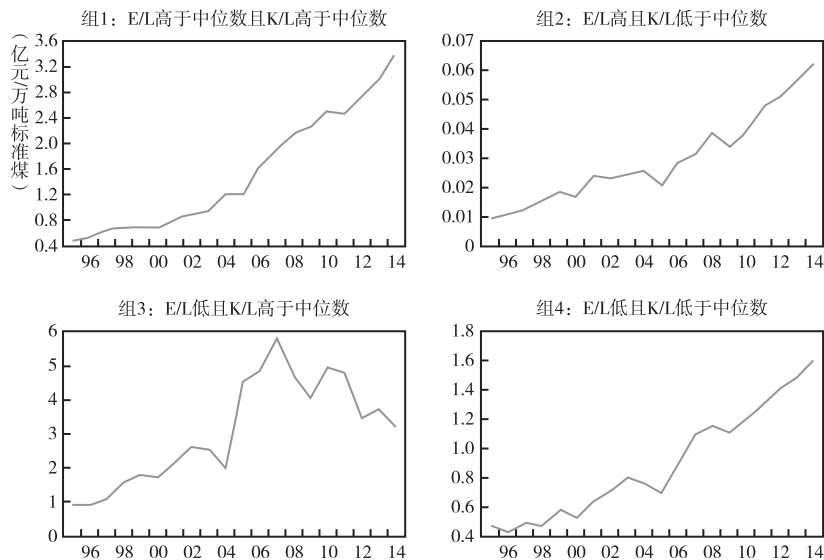


图 3 1995-2014 年 4 组子行业能源效率走势

注:采用 2000 年价格。

由图 3 可以看出,高能耗且资本密集行业的能源偏向型技术进步幅度最大并且波动次数最少,仅 2005 年与 2009 年出现两次极小幅度下降;高能耗、低资本密集度行业整体能源效率增长较平缓;低能耗、高资本密集度行业只包括计算机、通信和其他电子设备制造业,该行业能源效率波动较剧烈,并且 2008 年后呈现震荡下降趋势;低能耗、低资本密集行业同样呈震荡上行趋势,其中波动时点及方向同低能耗、高资本密集度行业相似,表明资本密集程度高行业的能源效率在能耗高低两

个层次上受到相同因素影响。两组高能耗行业在 1995-2014 年的总能耗占工业总能耗的比重始终较高,并且在 2002 年以前占比相对稳定。自 2003 年后,一些低资本密集度高能耗行业成长较快,使得能源消耗总量增长加快。其中黑色金属及工业的能源消费量在 1995-2014 年始终处于领先地位。预计制造业整体能源效率自 2014 年后呈现稳定增长趋势。

表 2 制造业各子行业能源效率:1995-2015 年 单位:亿元/万吨标准煤

年份	食品 加工	食品 制造	酒及 饮料	烟草 制品	纺织 业	服装 制造	皮羽 制品	木材 加工	家具 制造	造纸 业	印刷 业	文教 体育	石油 加工
1995	1.177	0.061	0.210	0.473	2.690	0.074	0.410	0.300	0.161	1.701	0.042	0.383	2.710
1996	1.522	0.087	0.281	0.539	2.189	0.097	0.555	0.773	0.239	1.324	0.049	0.505	1.916
1997	1.878	0.114	0.409	0.740	3.072	0.112	0.645	1.161	0.304	1.513	0.066	0.573	2.082
1998	2.222	0.130	0.480	0.725	3.430	0.131	0.555	1.074	0.374	3.222	0.081	0.639	1.492
1999	2.853	0.158	0.504	0.840	3.149	0.152	0.606	1.213	0.349	3.156	0.100	0.660	2.034
2000	2.657	0.184	0.470	0.716	3.200	0.142	0.574	1.178	0.306	3.110	0.077	0.619	1.617
2001	3.682	0.212	0.591	1.089	4.042	0.179	0.706	1.448	0.396	3.760	0.109	0.739	1.592
2002	4.529	0.229	0.591	1.253	4.787	0.169	0.743	1.363	0.422	4.832	0.112	0.881	1.527
2003	4.369	0.271	0.713	1.358	5.426	0.172	0.821	1.357	0.392	4.580	0.125	0.575	1.716
2004	1.159	0.293	0.711	1.285	7.596	0.160	0.857	1.561	0.418	5.715	0.116	0.754	1.494
2005	11.929	0.206	0.518	0.804	7.918	0.138	0.698	1.399	0.303	5.366	0.101	0.999	1.310
2006	12.104	0.350	0.797	1.484	11.064	0.182	0.886	1.854	0.442	6.163	0.143	1.203	1.387
2007	14.616	0.392	0.953	1.755	13.380	0.200	0.970	2.337	0.486	7.205	0.180	1.273	1.695
2008	10.807	0.376	0.952	1.745	15.176	0.219	1.067	2.724	0.474	6.474	0.174	1.326	1.665
2009	9.122	0.285	0.857	1.241	16.713	0.224	1.040	2.590	0.372	5.776	0.161	1.295	1.606
2010	12.423	0.360	1.040	1.794	18.270	0.253	1.163	3.212	0.438	5.999	0.194	1.348	1.778
2011	10.723	0.429	1.187	1.902	16.170	0.277	1.285	4.006	0.463	6.949	0.215	1.523	1.768
2012	4.385	0.467	1.404	2.018	20.179	0.301	1.227	3.056	0.492	7.817	0.255	1.645	1.402
2013	4.889	0.498	1.507	2.013	22.078	0.319	1.336	3.553	0.562	8.269	0.293	1.784	1.390
2014	5.008	0.512	1.660	2.312	25.311	0.362	1.469	4.101	0.614	6.061	0.331	1.948	1.350
化学 制品	医药 制造	化纤 制造	橡胶 塑料	非金属	黑色 金属	有色 金属	金属 制品	通用 设备	专用 设备	交通 运输	电气 机械	电子 通信	仪器 仪表
0.110	0.012	0.117	0.238	0.616	0.038	0.009	0.119	0.547	0.195	0.508	0.410	0.895	0.345
0.202	0.013	0.166	0.397	0.603	0.035	0.011	0.145	0.533	0.202	0.608	0.456	0.978	0.448
0.109	0.021	0.243	0.356	0.665	0.043	0.012	0.147	0.646	0.239	0.755	0.474	1.420	0.368
0.126	0.026	0.285	0.356	0.749	0.048	0.015	0.155	0.690	0.274	0.939	0.545	2.107	0.438
0.134	0.035	0.395	0.394	0.874	0.057	0.018	0.158	0.708	0.348	1.074	0.710	2.822	0.374
0.131	0.042	0.318	0.352	0.747	0.063	0.016	0.145	0.653	0.358	1.059	0.751	3.445	0.354
0.150	0.053	0.297	0.447	0.814	0.082	0.024	0.173	0.717	0.426	1.544	0.906	4.457	0.375

续表

化学 制品	医药 制造	化纤 制造	橡胶 塑料	非金属	黑色 金属	有色 金属	金属 制品	通用 设备	专用 设备	交通 运输	电气 机械	电子 通信	仪器 仪表
0.159	0.055	0.345	0.463	0.851	0.089	0.023	0.176	0.680	0.459	2.015	0.987	4.786	0.345
0.187	0.058	0.315	0.476	0.891	0.103	0.025	0.155	0.780	0.510	2.281	1.195	5.675	0.422
0.169	0.062	0.370	0.982	0.821	0.089	0.026	0.159	0.893	0.588	2.139	1.251	6.183	0.439
0.190	0.051	0.298	0.819	0.662	0.078	0.021	0.149	0.904	0.487	2.138	1.544	6.372	0.438
0.229	0.071	0.480	1.244	0.853	0.130	0.029	0.171	1.020	0.693	2.634	1.771	8.705	0.494
0.277	0.079	0.610	1.402	1.009	0.152	0.032	0.174	1.181	0.812	3.433	2.069	8.561	0.522
0.301	0.086	0.670	1.736	1.007	0.124	0.039	0.187	1.274	0.910	3.864	2.088	8.300	0.555
0.270	0.085	0.583	1.717	0.996	0.117	0.034	0.195	1.349	0.858	4.294	1.980	7.440	0.579
0.307	0.090	0.614	2.014	1.021	0.124	0.039	0.209	1.380	0.964	4.404	1.857	7.728	0.594
0.346	0.096	0.619	2.054	1.110	0.119	0.048	0.226	1.684	0.892	4.920	2.028	8.440	0.676
0.373	0.105	0.665	2.236	1.127	0.137	0.051	0.232	1.645	1.199	5.679	2.328	9.458	0.713
0.409	0.115	0.709	2.385	1.194	0.162	0.057	0.239	1.580	1.335	6.095	2.469	10.171	0.700
0.430	0.120	0.767	2.698	1.237	0.182	0.063	0.247	1.651	1.473	6.423	2.789	11.199	0.695

注:采用2000年价格。

图4为1995-2014年中国制造业整体能源效率的测算结果。总体看来,制造业的整体能源效率有显著提升,但细分到具体行业和时期,能源效率的增长动态则不尽相同。

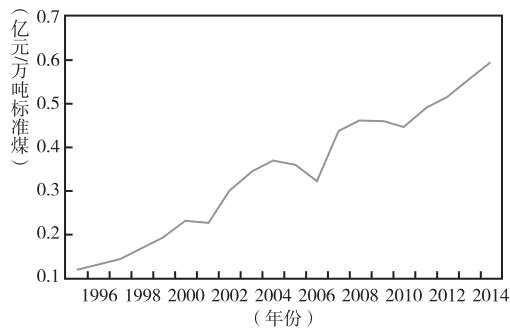


图4 1995-2014年我国制造业能源效率

注:采用2000年价格。

资料来源:历年《中国工业统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》。

### (三)各因素对能源效率的动态变化分析

由于经济、能源、产业政策及贸易形式等变化及能源价格的冲击等各因素对能源效率影响变化明显,非时变参数的模型无法对这些变化进行很好的刻画,故而本文利用状态空间模型来研究能源效率的影响因素对其动态变化过程。为增强时间序列的平稳性,对各变量取自然对数后的状态空间模型如下:

$$lef_t = c(1) + sv1_t lae_t + sv2_t lp_t + \mu_t \quad (12)$$

$$sv1_t = c(2) + sv1_{t-1} + \varepsilon_{1t} \quad (13)$$

$$sv2_t = c(3) + sv2_{t-1} + \varepsilon_{2t} \quad (14)$$

其中,  $lef$ 、 $lae$  和  $lp$  分别表示取自然对数后的能源效率、能源偏向型技术进步和能源价格,  $\mu_t$  和  $\varepsilon_t$  为相互独立、零均值同方差的随机扰动项。使用 1995–2014 年制造业能源效率、能源偏向型技术进步测算值及能源价格数据及 Kalman 滤波方法估计以上状态空间模型, 可得到估计结果如下:

$$lef_t = 1.413 + sv1_t lae_t + sv2_t lp_t + \mu_t \quad (15)$$

$$sv1_t = 0.039 + sv1_{t-1} + \varepsilon_{1t} \quad (16)$$

$$sv2_t = 0.024 + sv2_{t-1} + \varepsilon_{2t} \quad (17)$$

模型的对数极大似然估计量为 -164.535, 各系数均在 10% 水平下显著, 说明状态变量的随机游走形式设定合理。各状态参数各年份的变化情况如图 5 所示。

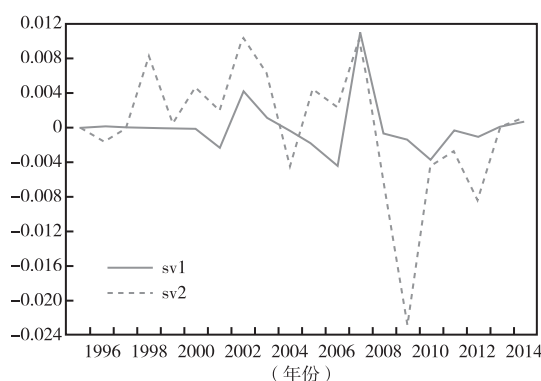


图 5 我国能源偏向型技术进步和能源价格对能源效率弹性的变化:1995–2014 年

从  $sv1$  的走势看, 行业技术进步能源偏向性对能源效率的影响在 1995 年之后频繁上下波动, 2007 年后出现明显下降。2000 年前, 能源偏向型技术进步对能源效率影响基本为 0, 此阶段技术进步更多偏向资本劳动, 在非能源偏向型技术进步影响较明显的前提下, 能源偏向型技术进步缺乏必要发展基础, 其边际影响被削弱。2002 年后该弹性由正值逐渐回落到 2006 年的负值, 2007 年迅速回升到峰值之后又迅速回落, 并于 2009 年后呈缓慢上升态势。说明能源偏向型技术进步对能源效率的影响同宏观经济环境相关, 且 2011–2014 年对能源效率产生不断加强的正向影响。该阶段能源要素市场化进程不断加快, 能源市场的规模效应逐渐凸显, 制造业企业对技术的研发和投入行为受能源要素市场的影响更加明显, 能源偏向型技术进步对能源效率的影响开始增强。

从  $sv2$  来看, 能源价格对能源效率的弹性方面波动性较大, 1995 年至 2007 年在略高于 0 的值附近上下波动, 2008 年突降至 -0.024, 随后回升, 但直到 2013 年仍为负值。原因在于我国煤炭价格在 1995 年至 2000 年有所提升, 1996 年后煤炭价格实行国家指导, 使得煤炭价格长期相对国际市场偏低从而企业对能源过度使用的情况有所改善。2007 年前能源偏向型技术进步对中国制造业能源效率的影响为正, 能源偏向型技术进步的提升可带来能源效率的小幅上升, 二者呈现协同效应。2008–2012 年当制造业技术进步向能源偏向时带来能源效率的下降, 推测宏观经济环境收紧, 制造业技术进步向能源方向偏移, 但企业生产设施及资金支持未能跟上, 导致二者相悖。2013 年后该弹性回升至正值, 且 2014 年后仍有上升趋势。

为验证以上结论, 采用 VAR 方法对能源效率、能源偏向型技术进步和能源价格进行建模。由表 3 的 ADF 检验可知 3 个变量均一阶差分后平稳, 为一阶单整序列, 可建立 VAR 模型。

表 3 各变量单位根检验结果

变量	ADF 检验值	1% 临界值	5% 临界值	10% 临界值	P 值	结论
lef	-1.553590	-3.831511	-3.029970	-2.655194	0.4857	不平稳
lae	-0.594809	-3.831511	-3.029970	-2.655194	0.8499	不平稳
lp	0.628031	-3.831511	-3.029970	-2.655194	0.9866	不平稳
D(lef)	-4.563435	-3.857386	-3.040391	-2.660551	0.0024	平稳
D(lae)	-3.967293	-3.857386	-3.040391	-2.660551	0.0080	平稳
D(lp)	-7.115853	-5.124875	-3.933364	-3.420030	0.0009	平稳

注:表中 lef、lae 和 lp 分别表示取自然对数后的能源效率、能源偏向型技术进步和能源价格,D(·)为取差分。

表 4 VAR 模型最优滞后阶数的确定

滞后阶数	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	5.1424	NA	0.0002	-0.2678	-0.1229	-0.2604
1	51.2645	69.1831*	0.0000*	-4.9081	-4.3286*	-4.8784
2	58.3010	7.9160	0.0000	-4.6626	-3.6486	-4.6107
3	69.0648	8.0729	0.0000	-4.8831	-3.4345	-4.8089
4	82.3114	4.9675	0.0000	-5.4139*	-3.5307	-5.3175*

表 4 显示了模型滞后阶数的确定。在 LR、FPE 和 SC 准则下滞后阶数 p 为 1,因而本文建立 VAR(1) 模型,得到结果如下(括号内为系数估计值的标准差):

$$lef = \underset{(0.142)}{0.722} * lef(-1) + \underset{(0.083)}{0.275} * lae(-1) - \underset{(0.015)}{0.085} * lp(-1) + \underset{(0.013)}{0.088} \quad (18)$$

由此可以看出能源效率对能源偏向型技术进步的弹性系数在滞后一期时为 0.275。这表明在短期来看,制造业能源偏向型技术进步水平对能源效率有明显的促进作用,当技术进步水平增加 1%,能源效率会相应上升 0.275%;就能源价格对能源效率的影响来看,滞后一期弹性系数为 -0.085,即能源价格对能源效率存在负向影响,1%的能源价格上涨能带来 0.085%的能源效率下降。

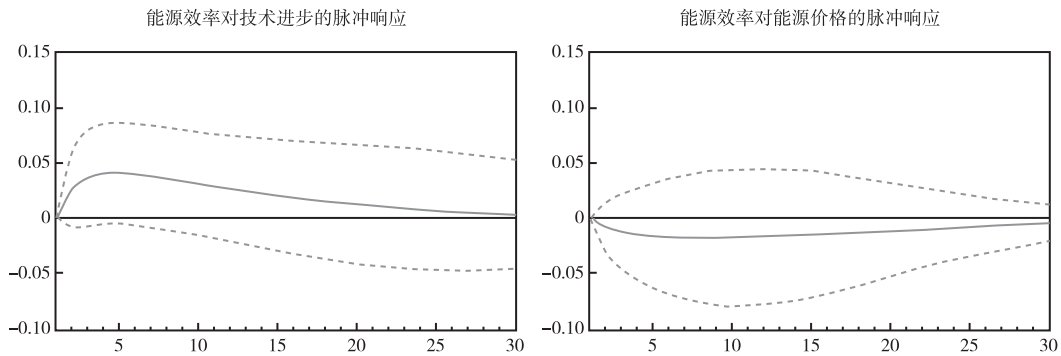


图 6 能源效率对技术进步和能源价格的脉冲响应

图6为制造业能源效率对技术进步和能源价格的脉冲响应,由图中可看出对于技术进步的一单位冲击,能源效率在第3期内响应值达到峰值,随后缓慢下降,到30期左右恢复为0。对于能源价格的一单位正向冲击,能源效率产生负向响应,并在5期左右达到最大值,随后缓慢减弱,到30期左右恢复为冲击前的水平。

(四)制造业能源要素的技术进步和能源价格对能源效率的长期影响分析

为考察能源效率、能源偏向型技术进步和能源价格三者长期均衡关系,先对  $lef$ 、 $lae$ 、 $lp$  三个变量进行 Johansen 协整检验,得到检验结果如表5所示。从检验结果可以看出,三个变量间存在2个协整关系,即表明三者之间存在长期均衡关系。

表5 Johansen 协整检验结果(迹检验)

协整方程个数	特征值	迹统计量	5% 临界值	P 值
None *	0.618855	31.24076	24.27596	0.0057
At most 1 *	0.453549	13.87839	12.32090	0.0272
At most 2	0.153556	3.000792	4.129906	0.0985

通过 Johansen 协整检验确定三个变量间存在长期均衡关系后,建立 VEC 模型(括号内为系数估计值的标准差):

$$\begin{aligned} \Delta lef_t = & \underset{(0.051)}{0.095} - \underset{(0.019)}{0.041} * ecm_{t-1} - \underset{(0.027)}{0.088} * \Delta lef_{t-1} \\ & + \underset{(0.196)}{0.335} * \Delta lae_{t-1} - \underset{(0.205)}{0.321} * \Delta lp_{t-1} \end{aligned} \quad (19)$$

制造业能源效率的变动可分为两个部分:一部分是自变量波动的影响,一部分是其偏离长期均衡的影响。关于自变量波动的影响,制造业能源偏向型技术进步与能源价格对能源效率均存在显著时滞效应,即在持续一年后仍对制造业能源效率波动具有较强影响力。其中,制造业的能源偏向型技术进步对能源效率的影响呈现显著正效应,即能源偏向型技术进步对于制造业能源效率的提升具有持续性的促进作用;能源价格对制造业能源效率的影响为负,即一旦出现能源价格波动,制造业能源效率会随之偏离长期均衡,并呈现相反方向的波动。

图7表示误差修正项,即制造业能源效率偏离均衡的状态。制造业能源效率偏离长期均衡状态是其长期变动的另一个来源。误差修正项本身可以表示制造业能源效率偏离长期均衡的程度,而其系数大小反映了对偏离长期均衡的调整力度。在式(19)中具体表现为,当短期波动偏离长期均衡时,将以  $-0.041$  的调整力度将非均衡状态拉回到均衡状态,即制造业的能源效率本身存在一定的反向修正机制。

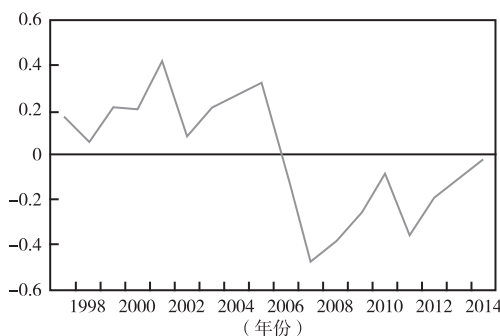


图7 能源效率偏离均衡的状况

## 五、结论及政策建议

### (一) 结论

本文针对 1995-2014 年的中国制造业全行业数据和细分行业数据,对工业能源使用情况展开分析,并测算了能源要素和非能源要素的技术进步水平,在此基础上进一步研究了能源价格以及能源偏向型技术进步对能源效率的影响。得到主要研究结论如下。

第一,构建双重嵌套 CES 生产函数并辅助以面板数据回归估计出要素间替代弹性,从而对制造业全行业能源要素和非能源要素的技术进步水平进行测算,得到能源要素与劳动、资本聚合成的非能源要素之间存在互补关系,但非能源要素的技术进步水平高于能源要素的技术进步水平。技术进步能源偏向性在行业之间呈现异质性特征,但总体上绝大多数行业的能源偏向技术进步水平长期较稳定,趋势性不明显。其中传统制造业,如食品制造业、纺织服装、服饰业等呈现出先降后升的趋势;而技术水平较高的行业,如计算机、通信和仪器仪表制造业,在 2000 年后维持了长时间低水平后,2010 年左右开始出现短暂上扬,随后 2012 年后再次回落。重工业行业如金属制品业、交通运输设备制造业、电气机械和器材制造业等市场化程度相对较低,生产技术多为能源密集型,故其能源偏向型技术进步水平相对较高,波动程度相对较低。轻工业行业如纺织业、家具制造业等,由于市场化程度相对较高,技术研发投资调整更加灵活,故而能源偏向型技术进步波动次数较多,但波动幅度相对较小。

第二,对制造业全行业能源价格、能源偏向型技术进步和能源效率之间的关系建立状态空间模型和 VAR 模型进行动态分析,建立 VEC 模型进行长期分析,结果表明行业技术进步能源偏向性水平在 1995 年之后上下波动频繁,1995-2000 年技术进步能源偏向性水平逐步下降。能源价格对能源效率弹性波动性较大,1995-2007 年在略高于 0 的值附近上下波动,2008-2012 年当制造业技术进步向能源偏向时带来能源效率的下降,推测其原因是宏观经济环境收紧,制造业技术进步向能源方向偏移,但企业生产设施及资金支持未能跟上,导致二者相悖。2013 年后该弹性回升至正值,且 2014 年后仍有上升趋势。VEC 模型估计的结果表明能源价格、能源偏向型技术进步和能源效率三者之间存在一个长期均衡关系。在此基础上,进一步利用误差修正模型分析高能耗行业和其他行业在能源效率影响因素上的异同,发现能源偏向型技术进步对能源效率存在短期和长期的正向影响,能源价格对能源效率存在短期和长期的负向影响,且能源价格的提升对低能耗行业的影响更大,而技术进步对能源效率的提升在高能耗行业上体现出更大效用。

### (二) 政策建议

针对目前我国工业行业能耗高、能源效率低下的现状,急需采取相关措施进行改善,要加大对节能减排的重视,不能片面追求经济增长,而要正确处理经济发展同节能减排之间的关系。我国制造业能源效率对宏观环境、产业政策和要素价格扭曲等非市场因素的冲击相对更敏感,能源偏向型技术进步整体水平较高、波动较剧烈,对于能源价格冲击,不同类型的行业表现出明显的异质性。对此,本文提出如下政策建议。

一是完善能源政策体系。结合不同性质行业的特点,针对行业资本劳动密集程度和能源密集程度、生产周期和技术创新周期等,有针对性地安排能源政策指导。对于资本密集型的重工业部门企业,应主要通过能源需求侧进行引导,对非清洁能源使用加强税收,对新型能源技术提供补贴等,促使其完成长期的能源技术和效率升级;对于资本密集程度较低、能耗也相对较低的轻工业行业,主要偏重能源供给侧引导,通过进一步推动能源要素价格市场化,促使其自觉提高能源使用效率。加强高能耗行业能耗管控,在重点耗能行业全面推行能效对标,推进工业企业能源管控中心建设,

推广工业智能化用能监测和诊断技术。降低各类交易成本特别是制度性交易成本、减少审批环节、降低各类中介评估费用、降低企业用能成本。进一步地,要充分抓住中国经济进入“新常态”这一机遇,积极应对困难与挑战,优化产业结构,实现产业升级,减少经济增长对能源需求的依赖度,扩大绿色经济在经济总量中的比重,强化节能减排政策导向,实现能源强度与能源消费同步减少,促进制造业高端化、智能化、绿色化、服务化。

二是积极推进能源要素价格市场化。保障能源和非能源要素价格形成机制畅通,进一步扭转能源价格扭曲。加快能源市场改革,深化不同能源种类之间的联动机制,发挥能源要素市场的资源配置功能,通过合理的资源配置促进制造业企业技术进步平衡发展,促使企业对能源市场价格做出合理调整,研发和引进提升能源效率的新型能源技术,促进节能减排和制造业绿色化进程。

三是加快能源开发和利用的技术创新。借鉴发达国家的先进节能减排技术,加强煤炭无害化开采技术创新、非常规油气和深层、深海油气开发技术创新、煤炭清洁高效利用技术创新等。围绕环境质量改善目标提供清洁能源技术支撑、围绕能源效率目标提供智慧能源技术支撑、围绕二氧化碳峰值目标提供低碳能源技术支撑、围绕能源技术发展提供关键材料技术支撑,最终实现制造业企业技术进步对能源效率提升的良性促进。实施创新驱动发展战略,既要推动战略性新兴产业蓬勃发展,也要注重用新技术、新业态全面改造提升传统产业。

#### 参考文献

- 陈诗一(2011):《中国工业分行业统计数据估算:1980-2008》,《经济学(季刊)》,第3期。
- 陈晓玲、徐舒、连玉君(2015):《要素替代弹性、有偏技术进步对我国工业能源强度的影响》,《数量经济技术经济研究》,第3期。
- 戴天仕、徐现祥(2010):《中国的技术进步方向》,《世界经济》,第11期。
- 刁心柯、唐安宝(2012):《能源价格变动对能源效率影响研究》,《中国矿业》,第6期。
- 樊茂清、任若恩、陈高才(2009):《技术变化、要素替代和贸易对能源强度影响的实证研究》,《经济学(季刊)》,第1期。
- 冯泰文、孙林岩、何哲(2008):《技术进步对中国能源强度调节效应的实证研究》,《科学学研究》,第5期。
- 郝枫、盛卫燕(2014):《中国要素替代弹性估计》,《统计研究》,第7期。
- 何小钢、王自力(2015):《能源偏向型技术进步与绿色增长转型——基于中国33个行业的实证考察》,《中国工业经济》,第2期。
- 雷钦礼(2012):《技术进步偏向、资本效率与劳动收入份额变化》,《经济与管理研究》,第12期。
- 雷钦礼(2013):《偏向性技术进步的测算与分析》,《统计研究》,第4期。
- 李廉水、周勇(2006):《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》,《管理世界》,第10期。
- 李玮、张荣霞、梁文群、赵国浩(2012):《基于VAR模型的技术进步对能源强度的脉冲响应分析——以山西省为例》,《工业技术经济》,第4期。
- 吕振东、郭菊娥、席西民(2009):《中国能源CES生产函数的计量估算及选择》,《中国人口、资源与环境》,第4期。
- 史丹(2003):《中国能源需求的影响因素分析》,华中科技大学博士学位论文。
- 宋冬林、王林辉、董直庆(2010):《技能偏向型技术进步存在吗?来自中国的经验证据》,《经济研究》,第5期。
- 谭忠富、张金良(2012):《中国能源效率与其影响因素的动态关系研究》,《中国人口资源与环境》,第4期。
- 唐安宝、李星敏(2014):《能源价格与技术进步对我国能源效率影响研究》,《统计与决策》,第15期。
- 王班班、齐绍洲(2014):《有偏技术进步、要素替代与中国工业能源强度》,《经济研究》,第2期。
- 王霄、屈小娥(2010):《中国制造业全要素能源效率研究——基于制造业28个行业的实证分析》,《当代经济科学》,第3期。
- 郑照宁、刘德顺(2004):《超越对数生产函数及对中国的应用》,载于《第六届中国青年运筹与管理学者大会论文集》。
- 钟世川(2014):《要素替代弹性、技术进步偏向与我国工业行业经济增长》,《当代经济科学》,第1期。
- 周晶、王磊、金茜(2015):《中国工业行业能源CES生产函数的适用性研究及非线性计量估算》,《统计研究》,第4期。
- Acemoglu, D. (2002): “Directed Technical Change”, *Review of Economic Studies*, 69, 781-810.
- Acemoglu, D. (2007): “Equilibrium Bias of Technology”, *Econometrica*, 75, 1371-1409.
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztny and D. Hemous (2012): “The Environment and Directed Technical Change”, *American Economic Review*, 102, 131-166.



- Berndt, E. and D. Wood (1975): "Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy", *Review of Economic & Statistics*, 57, 259–268.
- David, P. and T. Van de Klundert (1965): "Biased Efficiency Growth and Capital-Labor Substitution in the U. S., 1899–1960", *American Economic Review*, 55, 357–394.
- Fellner, W. (1961): "Two Propositions in the Theory of Induced Innovations", *Economic Journal*, 71, 305–308.
- Fisher-Vanden, K., G. Jefferson, J. Ma and J. Xu (2006): "Technology Development and Energy Productivity in China", *Energy Economics*, 28, 690–705.
- Fukunaga, I. and M. Osada (2009): "Measuring Energy-Saving Technical Change in Japan", Bank of Japan Working Paper Series.
- Hassler, J., P. Krusell and C. Olovsson (2012): "Energy-saving Technical Change", NBER Working Paper, No. 18456
- Jorgenson, D. (1984): "The Role of Energy in Productivity Growth", in J. W. Kendrick (eds.), *International Comparisons of Productivity and Causes of the Slowdown*, Cambridge MA: Ballinger, 279–323.
- Jorgenson, D. and B. Fraumeni (1981): "Relative Prices and Technical Change", in E. Berndt and B. Field (eds.), *Modeling and Measuring Natural Resource Substitution*, Cambridge: MIT Press, 17–47.
- Kemfert, C. and H. Welsch (2000): "Energy-Capital-Labor Substitution and the Economic Effects of CO2 Abatement: Evidence for Germany", *Journal of Policy Modeling*, 22, 641–660.
- Kennedy, C. (1964): "Induced Bias in Innovation and the Theory of Distribution", *Economic Journal*, 4, 541–547.
- Klump, R., P. Mc Adam and A. Willman (2007): "Factor Substitution and Factor-Augmenting Technical Progress in the United States: A Normalized Supply-Side System Approach", *Review of Economics and Statistics*, 89, 183–192.
- Linn, J. (2008): "Energy Prices and the Adoption of Energy - Saving Technology", *Economic Journal*, 118, 1986–2012.
- Ma, H., L. Oxley and J. Gibson (2009): "Substitution Possibilities and Determinants of Energy Intensity for China", *Energy Policy*, 37, 1793–1804.
- Ma, H., L. Oxley, J. Gibson and B. Kim (2008): "China's Energy Economy: Technical Change, Factor Demand and Interfactor/Interfuel Substitution", *Energy Economics*, 30, 2167–2183.
- Nordhaus, W. (1973): "Some Skeptical Thoughts on the Theory of Induced Innovation", *Quarterly Journal of Economics*, 87, 208–219.
- Okushima, S. and M. Tamura (2009): "A Double Calibration Approach to the Estimation of Technological Change", *Journal of Policy Modeling*, 31, 119–125.
- Popp, D. (2001): "The Effect of New Technology on Energy Consumption", *Resource and Energy Economics*, 23, 215–239.
- Samuelson, P. (1965): "A Theory of Induced Innovations along Kennedy-Weissacker Lines", *Review of Economics and Statistics*, 47, 444–464.
- Sanstad, A., J. Roy and J. Sathaye (2006): "Estimating Energy-Augmenting Technological Change in Developing Country Industries", *Energy Economics*, 28, 720–729.
- Sato, R. (1970): "The Estimation of Biased Technical Progress and the Production Function", *International Economic Review*, 11, 179–208.
- Sato, R. and T. Morita (2009): "Quantity or Quality: The Impact of Labor-Saving Innovation on US and Japanese Growth Rates, 1960–2004", *Japanese Economic Review*, 60, 407–434.
- Solow, R. (1957): "Technical Change and the Aggregate Production Function", *Review of Economics and Statistics*, 39, 312–320.
- Sue Wing, I. (2006): "Representing Induced Technological Change in Models for Climate Policy Analysis", *Energy Economics*, 28, 539–562.
- Welsch, H. and C. Ochs (2005): "The Determinants of Aggregate Energy Use in West Germany: Factor Substitution, Technological Change, and Trade", *Energy Economics*, 27, 93–111.
- Yuan, C., S. Liu and J. Wu (2009): "Research on Energy-Saving Effect of Technological Progress Based on Cobb-Douglas Production Function", *Energy Policy*, 37, 2842–2846.

(责任编辑:程 炼)