

# 资本替代能源的节能减排效应研究

赫永达<sup>1</sup> 刘智超<sup>2</sup> 孙 巍<sup>3</sup>

(1. 山西财经大学 统计学院, 山西 太原 030006; 2. 吉林大学 商学院, 吉林 长春 130012;  
3. 吉林大学 数量经济研究中心, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 用资本替代能源以提高能源使用效率并提升减排功效,对于当前我国经济社会转型发展具有极为重要的意义。因此,从资本与能源的要素替代视角,对资本替代能源对我国各省际区域的能源使用效率与节能减排的影响进行必要探讨:在双产出生产函数和投入方向距离函数的框架下,采用超越对数成本函数形式建立双情景数理模型、参数随机前沿 SFA 方法、静态与动态比较式分析了各地区资本替代能源的区域能效与减排潜力;然后将资本能源比、能源结构因素纳入联合回归模型,考察其对能源效率的影响程度,探讨资本替代能源对提高能源效率及减排效果的显著性和地区异质性。结果表明,资本替代能源对提高能源效率及减排效果作用显著,并且这种影响存在着明显的地区异质特征,即能源效率偏低的地区用资本替代能源以提高能源环境绩效空间显著,效率值较高的地区替代效应相对较弱。实证还表明,产业结构升级、提高资本能源比重,调整能源结构,尤其是降低能源中的煤炭比例对中国能源及环境绩效意义重大。

**关键词:** 要素替代; 能源效率; 节能减排; 超越对数成本函数; 随机前沿分析(SFA)

中图分类号: F426 文献标识码: A 文章编号: 1671-9301(2017)01-0114-00

DOI:10.13269/j.cnki.ier.2017.01.010

## 一、引言与文献综述

在过去的 30 多年时间里,中国经历了高速经济增长,GDP 年均增长率达到了近 10%,成为世界第二大经济体,经济总量仅次于美国。然而中国经济快速增长伴随的是巨大的资源和环境代价。能源瓶颈、自然环境承载力等问题,已经成为正处于经济深度转型发展时期的中国必须面对的关键问题<sup>[1]</sup>,而且在“新常态”背景下,GDP 增速下滑是大概率事件,宏观经济波动将不可避免<sup>[2]</sup>。为使经济实现可持续性发展,在“十二五”期间,国家严格贯彻节能减排的政策和量化指标,并在超额完成了“十二五”规划纲要确定的约束性目标后,于 2016 年制定了“十三五”的节能减排措施。

然而,在此期间,仅从技术角度入手,通过节能设备升级的手段提高能效,从而降低能耗的方法具有一定的局限性。随着“节能减排”的约束目标越来越严格,许多现有节能技术的潜力已到极限,节能降耗的空间越来越小,而且节能技术创新也不会再在短时期内一蹴而就。另外,以行政命令推动的节能减排效果衰减明显,“低悬的果实”几近摘完。而另一方面,近些年来国际金融危机、欧洲债务危机以及结构调整和内需不足等内外因素使得我国经济下行压力显著加大,促进经济增长与推动节

收稿日期:2016-09-16;修回日期:2016-12-15

**作者简介:** 赫永达(1979—),男,内蒙古赤峰人,山西财经大学统计学院讲师,吉林大学数量经济学博士,研究方向为数量经济学、能源经济学;刘智超(1990—),女,吉林省吉林市人,吉林大学商学院博士研究生,主要研究方向为数量经济学、产业经济学;孙巍(1963—),男,吉林省吉林市人,吉林大学数量经济研究中心教授,博士生导师,研究方向为数量经济学。

**基金项目:** 国家社会科学重大项目(15ZDA015);教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(10JJD790032);山西省哲学社会科学规划课题(晋规办字[2016]2号);高等学校哲学社会科学基金项目(晋教科研[2015]26号)

能减排成了一个两难困局:若严保节能减排,则会使得耗能较大的市场主体面临巨大的成本压力,产出放缓,产生大量“关停并转”,从而拉低经济增长水平;促进经济增长,就要加大公共投资,必然会导致能源需求增加,污染排放加大。所以,如何在现有技术条件下实现经济增长和节能减排双赢,探索出新的增长模式,其重要性不言而喻。

实际上,从生产要素替代角度促使资本等要素替代能源,同时积极引导清洁能源对污染类能源进行相应的替代,可以使能源和产业结构得到双重优化,也是我国经济可持续发展和建立长效节能减排机制的必然途径<sup>[3]</sup>。首先,从理论上讲,自从 Berndt and Wood<sup>[4]</sup>提出资本与能源的替代问题以后,有关能源替代特别是能源与资本之间的替代问题,一直是研究者高度关注的课题,因为资本对能源的替代研究直接关系到能源的利用效率问题。一方面,相对于能源内部替代性的研究,能源外部替代强调能源与生产要素(资本、劳动力以及原材料等)之间的替代,这具有更显著的经济性属性,因为这种替代是通过资源的优化配置完成的。同时,由于能源内部替代是一个长期的技术研发与规模应用的过程,这就决定了能源外部替代成为经济学者们的主要研究对象。另一方面,资本对能源的外部替代过程,不仅与国家制定针对性的能源和非能源产业政策息息相关,而且一定程度上决定了企业和地区通过要素优化配置实现最优生产的策略。比如,根据生产理论,节能技术的使用可以通过资本对能源的要素替代表现出来,也就是说替代性与节能技术的使用密切相关<sup>[5]</sup>。因此,当资本和能源之间表现为替代关系时,在一定技术条件下,借助于更多资本投入就有助于能源节约政策目标的实现。反之,如果两者的替代关系并不明显,则试图通过资本替代能源来实现节能减排就难以取得较好效果。此时,能源节约的政策目标,应更多地依托纯技术性的工程研发与应用。而实际上,资本与能源作为主要的生产要素,相互间替代的根本动因是:对生产厂商而言,达到利润最大化的条件是两种投入要素的边际产量之比等于这两种要素价格之比。当投入要素的价格相对失衡时,在现有技术条件下,理性生产者总会努力使用相对便宜的生产要素替代昂贵的生产要素<sup>[6]</sup>。而且,除要素价格之外,要素可得性、要素禀赋和要素成本等都会影响生产要素的最优投入状态,进而促使要素间发生替代。

其次,从中国当前的现实情况看,我国经济面临错综复杂的国内外环境,结构性调整带来下行压力,“刘易斯拐点”的到来使得劳动力红利逐步消失,资本边际报酬开始递减,与此同时资源环境约束日益趋紧。能源供需失衡、环境质量下降已经威胁到中国的可持续发展,因此研究资本与能源之间的替代性意义重大。国家政策制定必须更加重视环境保护和可持续发展,大幅减少经济增长对能源尤其是化石能源的依赖和过度投入。其中,进行能源的外部替代是较好的战略选择,尤其资本对能源进行替代不仅可以提升资本的运作效率和生产效率,而且可以抵消能源价格大幅波动带来的不确定性,对于我国实行的“稳增长、调结构、促改革、惠民生”战略具有重大意义<sup>[7]</sup>。在过去两个五年规划期间,极具针对性的节能重点工程和污染物减排重点工程及相关能源环境产业政策被严格贯彻实施。这些节能减排重大工程就是以大量的资本投入为特征的<sup>[8]</sup>,从投入产出的经济视角看,这意味着能源节约以及污染排放的降低可以通过资本与能源之间的替代获得<sup>[9-12]</sup>,这可大大减轻经济增长对于能源投入和环境承载的依赖,大幅提高能源环境的效率。

大量研究表明中国的能源利用效率处于较低的水平,然而对能源利用低效率的解释却存在较大争议。配置效率、技术效率、市场化程度、能源禀赋、经济结构等都成为研究的对象<sup>[13]</sup>。由于能源效率能否提高直接关系到能源节约和碳排放问题,近年来,国内外学者针对中国能源使用效率等问题进行了大量的研究。对于中国跨地区能源效率及环境绩效问题已有一些有益的探索,比如,Boyd and Pang<sup>[14]</sup>指出,能源效率的提高有赖于全要素生产率的提高。之后,Hu and Wang<sup>[15]</sup>运用 DEA 的方法,使用全要素能源效率指标分析了中国 29 个省份的全要素生产率。张兵兵<sup>[16]</sup>则在碳排放约束条件下测算了中国省际全要素能源效率,并对其影响因素进行实证分析,发现中国省际全要素能源效率较低,并呈现东中西逐渐递减的特征。史丹<sup>[17]</sup>认为,地方在制定节能政策时,需要不失一般性地

考察能源效率的影响因素,同时还需要和地区特殊性相结合,不能不分地区制定同一节能降耗目标。Zhou and Ang<sup>[18]</sup>则将非合意产出因素纳入生产框架,对同时考虑合意产出和非合意产出情况下的能源效率进行了估算。基于这种思想,Yeh *et al.*<sup>[19]</sup>采用 DEA 方法,将 SO<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 作为非合意产出,分析了大陆东中西地区及台湾地区的能源效率。Shi *et al.*<sup>[20]</sup>也采用 DEA 方法,在考量非合意产出情况下,分析了中国 28 个省份的能源效率及能源消费最小化的问题。刘亦文和胡宗义<sup>[21]</sup>从碳排放效率的角度,运用超效率 DEA 模型测算了中国各地区的碳排放效率,发现中国碳排放效率呈现上升趋势,但上升速度缓慢且各地区碳排放效率差距在逐年拉大;但同年,张三峰和吉敏<sup>[22]</sup>运用同样的超效率 DEA 能源效率模型,发现各地区能源效率呈现“东—中—西”阶梯递减趋势,中部与西部的能源效率差距在逐步缩小,各地区能源效率收敛趋势明显。Bian and Yang<sup>[23]</sup>用几种 DEA 方法在两种资源投入、三种非合意产出情形下估计了中国 30 个省份加总的资源与环境效率。Hu *et al.*<sup>[24]</sup>则基于四阶段 DEA 方法,计算了中国台湾 23 个地区环境调整后的能源效率。此外,为了得到更综合的效率,Zhang *et al.*<sup>[25]</sup>在多种资源投入与污染物排放框架下,构建了包含三个主要类别资源投入的聚合指数,分析了中国区域工业系统的生态效率。

梳理现有相关研究,我们发现:第一,大部分的现有研究都是在假定非能源要素投入(资本、劳动和原材料等)固定不变的情况下,分析能源效率或者资源环境的整体绩效。但这种传统的假设并不符合中国能源环境的现状。实际上,为了达到节能与减排的标准,生产者可以增加更多的资本来替代能源投入并减少排放,但现有的相关研究几乎没有考虑这个重要因素。第二,现有对能源环境效率的研究多采用 DEA 方法,这种方法不需要提前对投入与产出间的函数形式进行设定<sup>[26]</sup>,因此被广泛应用在宏观层面测量能源环境效率。但是,DEA 方法估计的效率值很可能是有偏的,因为它是一种非参数数学线性规划的方法,没有考虑统计噪声的影响<sup>[27]</sup>,在进入微观层面分析效率时,效率值的偏离会变得更加严重。第三,对于节能减排空间和潜力的分析,相关研究涉及效率参照系的选择<sup>[17]</sup>、综合节能测算<sup>[28]</sup>、产业层面节能测算<sup>[29]</sup>等,并提出了结构演进法<sup>[30]</sup>、学习曲线法<sup>[31]</sup>和基于 DEA 构建的 AP-ESER 分析法<sup>[32]</sup>等,而从要素替代的微观层面并考虑区域发展不平衡的背景对节能潜力进行探索还十分缺乏,而该视角的研究非常重要。第四,对于能源效率进行研究时,多数没有将“非合意产出”纳入分析框架,这会使效率值被高估,失真可能性增大。

基于以上分析,本文使用参数 SFA 方法作为分析工具<sup>[33-34]</sup>,借助不同的距离函数,采取情境对比的方式,并考虑“非合意产出”,分别从静态和动态角度,比较研究资本替代能源对于减少区域污染排放和提升区域能效的潜力和空间的影响。从要素替代的视角研究能源效率及节能减排问题具有重要的现实意义,因为从能源外部替代角度研究既关系到国家产业政策的制定,又关系到各生产单元通过要素合理组合实现生产优化。外部替代能够减少经济对能源价格波动的敏感性,提升整体的产出效率和能源使用效率,这在当前经济背景下尤为重要<sup>[7]</sup>。

本文接下来的结构安排如下:第二部分阐述考虑资本对能源替代和不考虑资本对能源替代两种情形下的能源环境效率模型;第三部分给出两种情形下各地区能源效率估计值的实证结果,进而计算出资本替代能源情形下各地区节能减排的潜力,并分区域进行分析;第四部分讨论区域能源效率差异的影响因素;第五部分总结并提出政策启示。

## 二、数理分析框架

本文运用参数随机前沿(SFA)的方法估算能源效率。首先将能源消费和非合意产出考虑进来定义生产技术;然后,根据是否考虑资本对能源的替代,分别设定距离函数形式;最后,为减少随机误差造成的技术无效性,采用超越对数的函数形式,用 SFA 方法对能源和环境效率值进行估计,进而计算出各地区节能减排的潜在空间。

### (一) 生产技术形式的设定

一个生产过程(包括能源与非能源要素投入)实际上是一个“双产出”的过程,既生产出“好”产品(称为“合意产出”),同时也生产了“坏”的副产品(“非合意产出”)。从理论上讲,这个生产过程可以用技术  $T$  来刻画,集合表达如下:

$$T = \{(X, E, Y, B) : (X, E) \text{ 可以生产出 } (Y, B)\} \quad (1)$$

其中  $X$  指非能源要素投入(这里指资本投入  $K$  和劳动投入  $L$ ),  $Y$  和  $B$  分别表示合意产出和非合意产出。生产技术  $T$  满足单调性、紧密性、齐次性等常规的限制性条件<sup>[35]</sup>。与现有文献假设<sup>[18, 36]</sup>不同的是,本文假定中国能源消费引致了非合意产出,即二者关联性较强。其原因在于,中国排放的污染物大部分来自化石能源的燃烧,使用最广泛的煤炭能源长期占比高达 70% 以上。因此,关于能源使用引致合意产出和非合意产出假设对于中国而言比较合理。值得注意的是,生产技术  $T$  既要满足常规的一般约束条件,同时也要满足以下约束条件:

$$\text{若 } (E, K, L, Y, B) \in T \text{ 且 } \delta \geq 1 \text{ 则 } (E/\delta, K, L, Y, B/\delta) \in T \quad (2)$$

此处  $\delta$  为收缩系数,用来衡量能源投入与非合意产出的收缩程度。该约束条件意味着假定能源消费量的变动将导致非合意产出发生同比例变动,若能源消费减少,则污染物排放也会同比例减少。收缩系数的假定是合理的,因为从现实生产状况看,能源投入在生产过程中是无法被其他生产要素完全替代的,也就是说  $\delta$  不能趋于正无穷大,否则将会出现在生产中不需要能源投入、也不会有任何污染物排放的极端和荒谬的结论。

### (二) 投入方向距离函数

在对生产技术  $T$  进行了完整定义后,需要选择合适的距离函数<sup>①</sup>作为分析效率的理论和工具。根据研究需要,本文选取投入方向距离函数作为分析手段,因其可以较好地地区分能源和非能源投入,较好地处理多产出技术<sup>[20-23]</sup>。此外,借鉴现有研究的思想,本文采用情境假定的思路,区分考虑资本替代能源和资本不替代能源两种情境,分别选用两种具体形式的投入方向距离函数表示两者的差异,依托双曲线距离函数与传统距离函数对两种情境下的能源效率进行测度,弄清资本替代能源对能源环境效率产生的影响程度,进而明确各地区用资本替代能源以节能减排的潜在空间。

#### 1. 情境 A: 资本替代能源假定下的双曲线型投入方向距离函数

如果生产厂商考虑资本替代能源,其会在保持合意产出不变情况下尽可能多地使用资本来降低能源投入。根据对生产技术  $T$  的定义,污染物排放将会与能源投入以相同的比例降低。为刻画资本对能源替代产生的效应,本文参考 Färe *et al.*<sup>[38]</sup> 和 Cuesta *et al.*<sup>[39]</sup> 的研究,在能源环境效率的投入方向上采用加强型双曲线距离函数来进行分析,具体函数形式定义如下:

$$D_{EK}(E, K, X_N, Y, B) = \sup\{\theta > 0 : (E/\theta, \theta K, X_N, B/\theta) \in T\} \quad (3)$$

其中  $E$  和  $K$  代表能源与资本投入向量,  $X_N$  代表资本外的其他非能源投入,  $\theta$  代表衡量污染排放和能源消耗的收缩系数,也代表了资本投入的扩张系数,取值范围是  $[1, +\infty)$ 。

根据以上假设,(3)式代表了生产技术的效率前沿,也就是生产者以最大资本投入和最小能源投入(其他投入不变)组合生产一定水平的合意产出,并将非合意产出(污染物)控制在最小范围。 $E/\theta$  表示某一生产者使生产达到最优效率时所需要的能源投入量。根据 Farrell<sup>[40]</sup> 的有关投入方向距离函数技术效率的定义,生产者的能源使用效率被定义为技术可实现的最优能源投入与实际能源消耗量之比,即:

$$AEE = \frac{E/\theta}{E} = \frac{1}{\theta}, (\theta \geq 1) \quad (4)$$

从(4)式显见,若  $\theta = 1$ ,该生产者(或地区)的能源使用效率也为 1,说明其能源利用率已经达到了当前技术水平的前沿,无需进一步投入更多资本替代能源使用,否则反而会出现资本使用的浪

费。若  $\theta > 1$  ,说明该生产者能源使用效率小于 1 ,可以通过资本替代能源来实现节能减排的目标。 $\theta$  值越大 ,对应的生产者(或地区)的能源使用效率越低。

需要指出 根据本文对能源使用效率的定义 ,效率值小于 1 的省份的资本与能源的替代弹性都记作 1<sup>[41]</sup>。

该替代弹性值与 Ma *et al.*<sup>[11]</sup>和 Smyth *et al.*<sup>[12]</sup>的计算结果非常接近。此外 ,为了便于能源效率值的估算 根据 Cuesta and Zofio<sup>[42]</sup>和相应生产技术  $T$  满足的约束条件 (3) 式  $D_{EK}$  有下面三个性质: (1) 非能源投入与合意产出的非增性; (2) 能源投入与非合意产出的非减性; (3) 一阶近齐次性。

### 2. 情境 B: 不考虑资本替代能源情境下的常规投入方向距离函数

若不考虑资本替代能源 ,生产者(或地区)考虑将合意产出和非能源投入的比例固定 ,则会使能源投入和非合意产出降低到最低水平。在这种情况下 ,非合意产出便可以作为额外的生产要素投入 ,对此 ,我们可以通过常规函数形式对其效率值进行估算<sup>[36]</sup>。参照 Bian and Yang<sup>[23]</sup>的处理思路 ,我们将该情境下的距离函数定义如下:

$$D_{NEK}(E, K, X_N, Y, B) = \sup\{\rho > 0: (E/\rho, K, X_N, Y, B/\rho) \in T\} \quad (5)$$

$D_{NEK}$  是指在保持合意产出和能源投入比例固定的情况下 ,生产者(或地区)能源投入与非合意产出的最大比值。因此 ,能源效率可以用其距离函数的倒数表示。同时  $D_{NEK}$  也满足单调性 ,并满足对能源投入和非合意产出一阶齐次性条件<sup>[32]</sup> ,即:

$$D_{NEK}(E/\rho, K, X_N, Y, B) = 1/\rho D_{NEK}(E, K, X_N, Y, B)$$

$D_{NEK}$  测度能源效率的方法与  $D_{EK}$  不同 ,其假定条件是资本投入固定不变。

根据上述情境下决策单元的能源效率估计值 ,节能潜力 ( $PES_{it}$ ) 以及污染物减排潜力 ( $PBER_{it}$ ) 就可依据公式 (6) 与 (7) 计算得到:

$$PES_{it} = e_{it} \times (1 - AEE_{it}) \quad (6)$$

$$PBER_{it} = b_{it} \times (1 - AEE_{it}) \quad (7)$$

其中  $AEE_{it}$  表示各省历年能源效率值  $e_{it}$  和  $b_{it}$  分别表示各省每年的能源消费量和污染排放量。

### (三) 超越对数函数形式的设定

运用随机前沿分析法估算生产者(或地区)的能源使用效率 ,需要一个具体可计算的函数形式 ,本文采用相关研究常用的超越对数函数形式。这一函数可以满足灵活性、可计算和齐次性等条件。同时引入时间趋势项 ( $\tau$ ) 将技术进步因素纳入函数 ,此外还包含随机白噪声 ( $\varepsilon$ ) 项。在此设定下 ,距离函数为:

$$\begin{aligned} \ln D_{it} = & \alpha_0 + \alpha_\tau \tau + \sum_{r=1}^k \alpha_r \ln x_{ri} + \sum_{m=1}^p \beta_m \ln y_{mi} + \sum_{n=1}^t \beta_n \ln b_{ni} + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^k \sum_{s=1}^k \alpha_{rs} \ln x_{ri} \ln x_{si} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^p \sum_{s=1}^p \beta_{rs} \ln y_{ri} \ln y_{si} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^t \sum_{l=1}^t \beta_{jl} \ln b_{ji} \ln b_{li} + \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^t \beta_{mn} \ln y_{mi} \ln b_{ni} + \sum_{r=1}^k \sum_{m=1}^p \chi_{rm} \ln x_{ri} \ln y_{mi} \\ & + \sum_{r=1}^k \sum_{n=1}^t \chi_{rn} \ln x_{ri} \ln b_{ni} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $x$  是  $k \times 1$  阶投入向量  $y$  是  $p \times 1$  阶合意产出向量  $b$  是  $t \times 1$  阶非合意产出向量  $i$  表示第  $i$  个生产者(或地区)  $\varepsilon_{it}$  是一个服从  $N(0, \sigma_\varepsilon^2)$  分布的随机向量。根据齐次性条件的假定 ,并以能源投入为标准进行计算 ,式(8) 可进一步转化为适用于 SFA 估计方法的组合误差模型 ,用于效率值的估计。具体地 ,运用模型 (3) 近齐次性条件 ,式(8) 可以写成:

$$\begin{aligned} -\ln e_{it} = & \alpha_0 + \alpha_\tau \tau + \alpha_k \ln k_{it}^* + \sum_{r=1}^{k-2} \alpha_r \ln x_{rit} + \sum_{m=1}^p \beta_m \ln y_{mit} + \sum_{n=1}^t \beta_n \ln b_{nit}^* + \frac{1}{2} \alpha_{kk} \ln k_{it}^* \ln k_{it}^* \\ & + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^{k-2} \sum_{s=1}^{k-2} \alpha_{rs} \ln x_{rit} \ln x_{sit} + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^p \sum_{s=1}^p \beta_{rs} \ln y_{rit} \ln y_{sit} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^t \sum_{l=1}^t \beta_{jl} \ln b_{jit}^* \ln b_{lit}^* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{r=1}^{k-2} \alpha_{kr} \ln k_{it}^* \ln x_{rit} + \sum_{m=1}^p \chi_{km} \ln k_{it}^* \ln y_{mit} + \sum_{n=1}^t \chi_{kn} \ln k_{it}^* \ln b_{nit}^* + \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^t \beta_{mn} \ln y_{mit} \ln b_{nit}^* \\
& + \sum_{r=1}^{k-2} \sum_{m=1}^p \chi_{rm} \ln x_{rit} \ln y_{mit} + \sum_{r=1}^{k-2} \sum_{n=1}^t \chi_{rn} \ln x_{rit} \ln b_{nit}^* + \varepsilon_{it} - u_{it}
\end{aligned} \quad (9)$$

其中  $k_{it}^* = k_{it} \times e_{it}$ ,  $b_{nit}^* = b_{nit} / e_{it}$ 。

类似地,运用模型(5)的一阶齐次性条件,方程(8)可转化为:

$$\begin{aligned}
-\ln e_{it} & = \alpha_0 + \alpha_{\tau} \tau + \sum_{r=1}^{k-1} \alpha_r \ln x_{rit} + \sum_{m=1}^p \beta_m \ln y_{mit} + \sum_{n=1}^t \beta_n \ln b_{nit}^* + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^{k-1} \sum_{s=1}^{k-1} \alpha_{rs} \ln x_{rit} \ln x_{sit} \\
& + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^p \sum_{s=1}^p \beta_{rs} \ln y_{rit} \ln y_{sit} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^t \sum_{f=1}^t \beta_{jf} \ln b_{jit}^* \ln b_{fit}^* + \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^t \beta_{mn} \ln y_{mit} \ln b_{nit}^* \\
& + \sum_{r=1}^{k-1} \sum_{m=1}^p \chi_{rm} \ln x_{rit} \ln y_{mit} + \sum_{r=1}^{k-1} \sum_{n=1}^t \chi_{rn} \ln x_{rit} \ln b_{nit}^* + \varepsilon_{it} - u_{it}
\end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $b_{nit}^* = b_{nit} / e_{it}$ 。

在方程(9)和(10)中  $\mu_{it} = \ln D_{it}$ ,表示第*i*地区的技术无效项  $\mu_{it} \geq 0$ 。因此,该地区的效率得分为  $AEE_{it} = 1/D_{it} = \exp(-\mu_{it})$ 。随后,采用极大似然估计方法,对上述两个方程进行参数估计。

### 三、实证结果分析

根据上述的研究思路和函数设定,我们选用中国2003—2013年的省际面板数据,其中包含合意和非合意产出以及要素投入,在情境A和情境B下对中国30个行政省份的能源使用效率进行估计。由于能源消费数据的缺失,西藏自治区没有纳入研究范围。这些基础数据主要来源于中经网数据库、历年《中国统计年鉴》、《中国环境年鉴》和《中国能源统计年鉴》。

#### (一) 数据的说明与整理

如前文阐释,生产技术*T*包括能源*E*、资本*K*、劳动*X<sub>N</sub>*三种要素投入,以及“好”的产出*Y*与“坏”的产出*B*。

1. 产出 合意产出*Y*用各省份(直辖市)以2003年为基期的实际地区生产总值(GDP)表示。对于非合意产出的衡量,不同学者采用的指标不尽相同,王兵等<sup>[43]</sup>、何文强等<sup>[44]</sup>用废气表示非合意产出,袁晓玲等<sup>[45]</sup>将6种排放污染物合成一个污染物排放指数,再用指数的倒数度量非合意产出。本文认为与能源投入相关的大气污染物主要是二氧化硫、氮氧化物、烟(粉)尘,但由于2011年以前没有氮氧化物排放量的具体指标,因此本文用各地区二氧化硫、烟尘排放量和粉尘排放量的加总数据表示各地区的非合意产出。

2. 劳动投入 衡量劳动在生产中的贡献的最好指标是劳动时间<sup>[43]</sup>,或者用劳动者的受教育年限来衡量劳动投入的差异<sup>[46-47]</sup>。然而,劳动时间的数据很难得到;而不同行业的平均利润率相差并不明显,“劳动在行业间分布具有均质性”这样的假设仍然是适合的。因此,本文仍选用各省历年的从业人数作为劳动投入量指标。

3. 能源投入 即各地区的各类能源消费量,及折算成标准煤后的能源使用量,均可从《中国能源统计年鉴》上获得。

4. 资本投入 资本存量是衡量资本投入的合适指标,借用目前最广泛采用的方法“永续盘存法”,并参考张军等<sup>[48]</sup>的研究,得到资本存量:

$$K_t = I_t + (1 - \delta) K_{t-1} \quad (11)$$

其中  $K_t$  是*t*期资本存量,  $K_{t-1}$  表示上一年资本存量,  $K_t$  用*t*期固定资本形成总额表示,  $\delta$  表示折旧率。根据张军等<sup>[48]</sup>的做法,我们取  $\delta = 0.096$ 。根据“永续盘存法”计算出2003—2013年各地区资本存量。

#### (二) 参数估计与分析

本文使用Stata 11.0软件教程,通过随机前沿估计方法对参数进行估计。为了得到各地区相对



准确的能源使用效率数值,首先对上述两类情境下的距离函数的有效性进行检验。式(9)和式(10)的参数估计结果见表1。

根据表1的参数估计结果,至少得到三点结论:首先,两个模型中随时间变化的技术无效项是稳健的, $\gamma = 0.9889$ ,显著不为零,表明在解释区域能源消费及污染排放与生产前沿间的偏离程度和偏离过程时,技术无效项扮演着十分重要的角色。而且,两个方程的 $\eta$ 值均显著为正,这符合 Battese and Coelli<sup>[49]</sup>论述的技术无效项随时间递减的结论<sup>[41]②</sup>。

其次,对两个方程而言,80%以上的一阶参数在统计上是显著的,并且符号合理,符合一般经济理论预期,这充分表明本文采用的距离函数形式符合在理论模型中对函数单调性的设定。比如,在估计结果中,能源投入项对应的一阶参数分别为0.7042和0.8032,符号均为正,表明距离函数值会随着能源投入量的增加而不断扩大,进而导致能源使用效率的下降。这一结论同样适用于非合

意产出(两个方程一阶参数值分别为0.2015和0.2119)。相对于方程(10)而言,考虑资本替代能源的方程(9)中资本投入项的一阶参数为负值(-0.2131),说明资本投入量的增加会引发距离函数值的减小,进而使能源使用效率得到提高。同样,两方程中合意产出和劳动投入的参数值为负,说明了相同的道理。

另外,两方程中时间趋势项 $\tau$ 显著为正,说明当某一地区采用更先进的能源使用技术时,中性技术进步降低了该地区效率前沿的能源投入。而且,在资本替代能源的情境假设下,前沿面更向资本投入轴靠近,这表明能源的进一步节约以及非合意产出的减少需要更多的资本投入,而且这种投入是有效的<sup>[50]</sup>。

### (三) 结果与讨论

#### 1. 资本替代能源对全国及地区能源效率的影响

本文计算得到在两种情境下中国各地区2003—2013年的能源环境效率值。特别地,在计算全国能源效率值过程中,对各省数据进行加权处理,权重为各地区能源消费占全国的比重,具体计算公式如下:

$$NAEE_t = \sum_{i=1}^{30} e_{ist} \times AEE_{it} \quad (12)$$

式中 $NAEE_t$ 表示第 $t$ 年全国能源环境效率, $e_{ist}$ 表示第 $i$ 地区的能源消费份额<sup>③</sup>。

图1为两种情境下全国及各省份的效率值比较。为了从全国及各区域层面上看到两种情境下效率值的变化趋势及动态差距,根据王纪全等<sup>[51]</sup>的划分办法,本文将全国31个省(直辖市、自治区)划分为东部、中部、西部和东北四大地区<sup>④</sup>。

根据图1就全国而言,资本替代能源明显提高了能源使用效率,即情境A能源效率高于情境B。

表1 两种距离函数下的参数估计

参数	方程(9)		方程(10)		
	估计值	T 统计量	参数	估计值	T 统计量
$\alpha_0$	0.4033	11.8404	$\alpha_0$	0.5384	7.9393
$\alpha_\tau$	0.2125	6.7445	$\alpha_\tau$	0.2180	3.3423
$\alpha_K$	-0.2131	-4.1824	$\alpha_K$	0.1176	0.4112
$\alpha_l$	-0.6435	-1.4654	$\alpha_l$	-0.5902	-0.1034
$\alpha_e$	0.7042	7.1019	$\alpha_e$	0.8032	26.9688
$\beta_y$	-0.8022	-13.5337	$\beta_y$	-1.0847	-13.9446
$\beta_b$	0.2015	4.3446	$\beta_b$	0.2119	-4.1497
$\beta_{y2}$	1.2217	3.4005	$\beta_{y2}$	0.7070	2.2258
$\beta_{b/e2}$	-0.0411	-0.2985	$\beta_{b/e2}$	-0.0608	-0.7857
$\beta_{yb/e}$	0.1537	1.2458	$\beta_{yb/e}$	0.1474	1.4121
$\alpha_{ke2}$	0.2214	2.3504	$\alpha_{ke2}$	0.2453	1.3546
$\alpha_{l2}$	-0.3449	-4.1768	$\alpha_{l2}$	-0.3403	-4.0042
$\alpha_{kel}$	0.1035	2.3282	$\alpha_{kl}$	0.0644	1.0914
$\chi_{b/eke}$	-0.1299	-2.3246	$\chi_{b/ek}$	-0.1931	-2.9179
$\chi_{yke}$	-0.7136	-3.2037	$\chi_{yk}$	-0.5912	-2.1302
$\chi_{yl}$	-0.0980	-1.0015	$\chi_{yl}$	0.0339	0.369
$\chi_{b/el}$	0.0543	0.6705	$\chi_{b/el}$	0.0482	0.5316
$\sigma^2 = \sigma_e^2 + \sigma_u^2$	0.7041	2.4304	$\sigma^2 = \sigma_e^2 + \sigma_u^2$	0.6579	1.5396
$\gamma = \sigma_u^2 / \sigma^2$	0.9889	4.8763	$\gamma = \sigma_u^2 / \sigma^2$	0.9889	3.3976
$\eta$	0.0346	3.2515	$\eta$	0.0298	4.0358

在考虑资本替代能源时,中国在2003—2013年期间,能源使用的平均效率值为70.24%;而不考虑资本替代能源时,效率均值为62.96%,平均下降了近10%。从各地区来看,北京、天津、上海和广东四个地区比较特殊(两种情境对效率值影响不大)除此之外,其他地区在考虑替代下的效率值均高于不考虑替代下的效率值。这表明中国目前资本替代能源可以明显提高能源的使用效率。

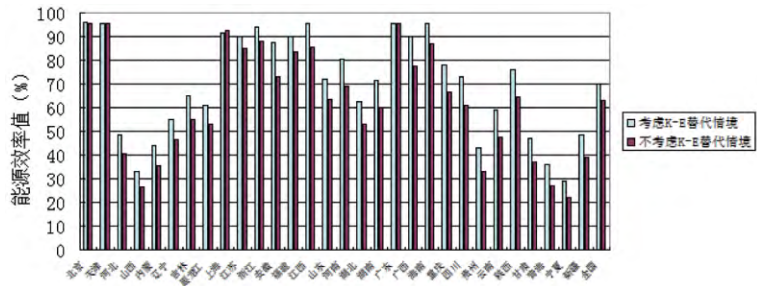


图1 两种情境下全国及各省份的效率值比较

通过图1还会发现,资本替代能源的效率提升效应具有明显的地区差异性,能效水平低的地区其效果高于能效水平高的地区。

2. 两种情境下的节能潜力和减排潜力比较

为了说明资本替代能源对地区能源环境效率影响的重要性,根据公式(6)和(7)计算出各地区在两种情境下的节能和减排潜力,并对此进行对比分析。

从图2可以看到,从全国来看,绝大部分地区在考虑资本替代能源时的能源效率明显高于不考虑替代时的能源效率。具体来说,东部地区的北京、天津、上海和广东变化不大,说明这些地区在“十一五”、“十二五”期间的节能政策及节能技术的效果正在逼近极限,即使通过资本替代能源的途径节能,其效果也是有限的。中部地区的山西、河南和湖南,以及西部地区的四川、云南和陕西却存在很大的资本替代能源的节能空间;值得一提的是,东部地区虽然能效相对较高,但是从图2看,山东、河北和江苏仍有很大的节能空间。

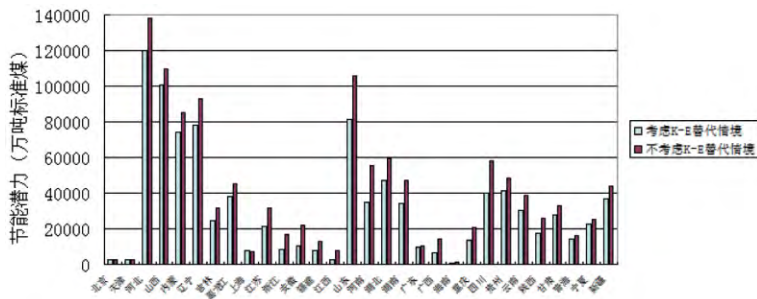


图2 两种情境下各地区的节能潜力比较

图3给出了全国及各区域(东、中、西及东北地区)层面两种情境下节能的变化趋势及动态差距。从图3看,2005年是个重要的分水岭,此前各个区域的节能空间相对较小,中部地区甚至在考察期内的2003—2004年出现节能空间的快速萎缩,在此之前其他区域的能源无效使用表现为温和性增长。从2005年开始至2010年,各区域的节能空间上升趋势明显,2011年之后这种增长势头才开始减慢。这出现了看似矛盾的现象:一方面,我国能源使用效率逐年上升(见前文分析),另一方面能源的无效使用也逐年严重。这可能是因为2000年开始,我国工业结构再次出现了转变,高耗能、高污染的重工业比重再次上升并加速发展<sup>[52]</sup>。以钢铁、化工等行业为代表的重化工业,为国民经济持续快速发展作出了重要贡献的同时,也带来了能源的巨大消耗和环境污染;而且居民对于住房、汽车等大宗消费的需求升级,更将“重化工”推到越来越重要的位置,这就造成了能源的引致需求效应远超过能

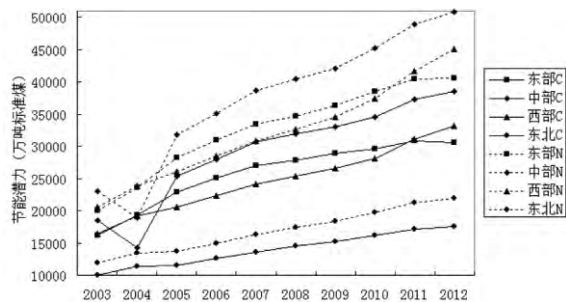


图3 两种情境下各区域节能潜力波动比较



效提高带来的节约效应。而从资本替代能源带来的能源节约角度看,2005年之后,各个区域都表现出很大的节能潜力,中部地区节能空间最大。即使2011年后节能速度放缓,但通过资本替代能源的节能路径依然效果良好。

图4给出了考察期内两种情境下我国各地区的无效污染的平均排放量。总体上看,在考虑资本替代能源时,大部分地区的无效污染排放量都小于不考虑资本替代能源的情况,这说明用资本替代能源在大部分地区均可以大幅度地降低无效的污染排放,是实现减排目标的一个不错的路径选择。具体来看,河北、山西、内蒙、辽宁、山东、河南、湖南、四川、贵州9个省份无效污染排放较严重,资本替代能源实现减排的空间同样也很大,这一点可以从图4各省不同情境下的对比分析得出。但是,北京、天津、上海、广东和海南等5省的污染排放较小,两种情境下的减排差异也很小,表明5个省份的减排政策效果几近最大化。

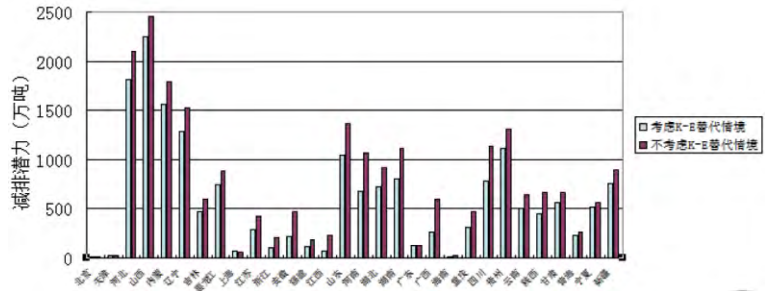


图4 两种情境下各地区减排潜力的比较

从降低污染排放的角度,图5给出了资本替代能源与不考虑替代两种情境下无效污染排放量10年期的比较。可以看到,考察期内,各区域的减排潜力总体上呈现递减趋势,说明污染排放整体呈现下降趋势,减排政策取得了不错的效果。具体来说,2005年之前,各区域无效污染排放呈温和上升趋势,这与前面提到的我国“重工业化”对能源环境的负向影响是一致的,能源消耗的大幅增加掩盖了减排的效果,经过一年左右的平稳过渡,2006年开始无效污染排放呈现明显下降趋势。值得注意的是,2010年污染排放出现反弹迹象,2011年开始出现小幅回落,这说明减排政策效果正在衰减,后劲不足。而从两种情境的对比看,各个地区考虑资本替代能源时的减排效果均大于不考虑替代时的效果,东北差距最小,但绝对空间仍然巨大,中部减排潜力最大。

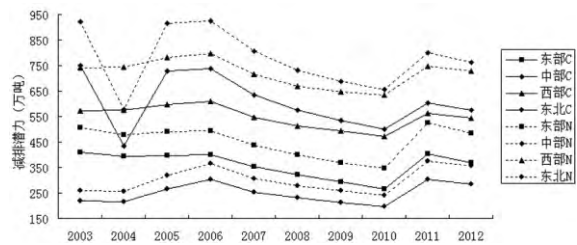


图5 两种情境下各区域减排潜力的波动比较

#### (四) 影响能源效率的因素

根据本文(6)式和(7)式,不难看到,能源效率的高低将直接决定生产者(或地区)的节能和减排能力,而且上文实证研究的结果也证实了这样的结论。既然提高能源使用效率对能源节约和减少污染物排放有如此重要的意义,那么,必然要考察能源效率的影响因素,以制定合理的能源政策,实现节能减排目标。在对能源效率可能产生较大影响的因素变量中,本文首先选取普遍认可的两个变量,即产业结构和经济发展水平,并根据本文研究目的,将能源结构及要素结构这两个重要的影响因素纳入建立混合数据回归模型,从省际层面深入分析我国能源效率的影响因素,本文模型的基本形式如下:

$$AEE_{it} = \alpha_0 + \beta_1 x_{1it} + \beta_2 x_{2it} + \beta_3 x_{3it} + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

此处  $AEE_{it}$  表示各省每年的能源效率值,  $\alpha_0$  是截距项,  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  是待估参数,  $\varepsilon_{it}$  是随机误差项,其服从标准的高斯过程。

从解释变量来看,我们使用第三产业产值占GDP的比重来表示产业结构,经济规模用实际GDP表示,能源结构用煤炭消费占总能源消耗的比重表示,要素投入结构用资本使用量与能源比值表示。数

据方面,产业结构及实际 GDP 规模可从各年的《中国统计年鉴》获取;能源结构即煤炭占能源消费的比重,大多数省份的数据可以从其地区统计年鉴获得,部分省份缺失的数据可以从《新中国 60 年统计资源汇编》得到。需要说明的是,由于不同情境下不同省份能源效率排名得分差别不大,因此我们重点分析资本替代能源情境下的能源效率影响因素。区域能源效率影响因素的回归结果见表 2。

由表 2 可以看出,总体来说,第三产业占比的提高与宏观经济规模的适度扩大,有利于能源效率的提升。这一现象产生的主要原因是:首先,第三产业相对于以前以重化工为主的第二产业,能源强度明显较低<sup>[51]</sup>,其对能源的依赖性较弱。而第二产业能源使用效率虽然不断提高,但其发展对能源的引致需求巨大,从而抵消了能效提高的效果。其次,经济总量扩张和增长速度的提升可以促进区域能源效率提升,但其效果并不十分明显。

表 2 能源效率影响因素的参数估计结果

影响因素	系数	估计结果	标准差	T 统计量	P 值
	$\alpha_0$	-2.354 3	0.096 2	-19.507 4	0.000 0
第三产业比重(%)	$\beta_1$	0.294 8	0.081 5	4.320 4	0.000 3
GDP(亿元)	$\beta_2$	0.248 0	0.032 6	24.715 5	0.000 0
煤炭占能源消费比(%)	$\beta_3$	-0.438 5	0.063 1	-7.105 3	0.000 0
资本存量与能源消费比(%)	$\beta_4$	0.280 2	0.050 7	6.334 1	0.001 1

反之,如果煤炭占能源总量的比重上升,则会阻碍能源效率的提高。而从各省资本存量与能源消费比重来看,资本相对于能源比的增加与能源效率的提高是同向的,从目前要素投入结构来看,增加资本在要素使用中的份额不仅会优化要素结构,也会降低能源使用的比例,提高能源使用效率。

#### 四、结论与建议

正如 Ma and Stern<sup>[53]</sup>所言,能源政策的设计、规划及探讨的一个重要命题就是其他生产要素可以在多大程度上替代能源的投入,以及这种替代对经济发展产生什么样的影响。

本文基于我国经济发展的能源要素约束困局,采用参数随机前沿的分析方法,在两种情境对比下(是、否考虑资本替代能源)进行资本替代能源对我国能源效率影响的省际和区域比较,进而分析了各地区的节能减排的潜在空间;同时,在两种情境下考察了资本替代能源对全国及各经济区域(东、中、西及东北)能源效率提高及节能减排效应的动态影响;最后将资本能源比、能源结构因素纳入联合回归模型,分析了其对能源效率的影响程度。主要研究结论如下:

第一,总的来看,能源使用效率在两种情境假设下存在显著的差异,考虑资本替代能源时的能效值明显高于不考虑替代时的能效值,即就中国现阶段国情和经济发展实际而言,资本替代能源可以明显提升能源效率。而且,资本替代能源对能效提高的影响,对于能效水平较低的省份或区域,作用非常明显,而对于个别处于效率前沿的省份(北京、天津、上海和广东),提升能源效率潜力有限。即便如此,当考察区域特征时,东部地区仍然存在资本替代能源的较大的效率提升空间。

第二,从两种情境下节能减排潜力的省际比较来看,除个别省份外,几乎所有省份(或区域)的节能减排潜力,在不考虑替代时都高于考虑替代时的情况,表明通过资本替代能源方式进行节能减排可由理论变为现实。所以,通过加大资本投入,促进节能技术的革新和应用,从而实现节能减排,促进我国经济持续健康发展是一条可行路径。

第三,从动态特征来看,在考察期内,全国和各个经济区域都表现出很大的节能潜力,其中,中部节能空间最大,2011 年节能速度虽有所放缓,但资本替代能源的节能路径依然效果良好;就减排而言,2006 年污染排放开始呈现明显下降趋势,2010 年出现回弹迹象,2011 年开始出现小幅回落,减排政策效果正在衰减,后劲不足。而从两种情境的对比看,各个地区考虑资本替代能源的减排效果均大于不考虑替代时的效果,东北差距最小,但绝对空间仍然巨大,中部减排潜力最大。

第四,区域层面能源效率影响因素分析表明,经济规模扩大及第三产业占 GDP 比重的增加与区域能源效率水平的提升具有明显的正相关性;而煤炭在能源总量中占比的上升,会产生负向作用,阻

碍区域能源效率的改进;值得注意的是,资本存量与能源消费比率的提高与区域能效水平的提高呈同向变动趋势,且推动作用显著(系数值为0.2802)。因此,加快第三产业的发展 and 产业转型升级,降低一次性能源消费中的煤炭消费比例,可以长期提升我国能源效率。但是,应该看到,由于我国工业化和新型城镇化尚处于加速发展阶段,产业结构转型升级是一个长期的过程,产业优化不可能一蹴而就。因此,在经济发展过程中,加大资本替代能源的力度,对于减轻经济发展对能源使用的惯性依赖,跳出“能源诅咒”,缓解并最终解决能源与环境的约束,意义重大。

#### 注释:

- ①Shephard<sup>[37]</sup>所提出的距离函数,近年来在效率测度领域得到了广泛的应用。根据不同的研究目的,学者们对原始的距离函数形式向各个方向上进行了拓展。
- ②随时间变化的无效率项 $\beta_{it}(\geq 0)$ 可以表示为 $U_{it} = \{ \exp[-\eta(t-T)] \} U_i$ ,若 $\eta$ 统计上显著大于零,则无效率项 $U_{it}$ 随时间递减。
- ③由于篇幅原因,全国及各地区效率值的详细估算结果不在文中列出。
- ④东部主要包括北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南;中部包括山西、内蒙古、安徽、江西、河南、湖北、湖南;西部包括广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆;东北地区即辽宁、吉林、黑龙江。对于广西和陕西的归属有不同意见,本文将其划归西部。西藏数据严重缺失,分析中被剔除。

#### 参考文献:

- [1]干春晖. 新常态下中国经济转型与产业升级[J]. 南京财经大学学报, 2016(2): 1-10.
- [2]王桂虎. “新常态”下的宏观经济波动、企业家信心和失业率[J]. 首都经济贸易大学学报, 2015(1): 3-10.
- [3]YANG M, YANG F, CHEN X. Effects of substituting energy with capital on China's aggregated energy and environmental efficiency [J]. Energy policy, 2011, 39(10): 6065-6072.
- [4]BERNDT E R, WOOD D O. Technology, prices, and the derived demand for energy [J]. Review of economics and statistics, 1975, 57(3): 259-268.
- [5]STERN D I, CLEVELAND C J. Energy and economic growth[Z]. Rensselaer working papers in economics 2004, No. 0410.
- [6]杨帅. 中国制造业要素替代效应的计量研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [7]黄光晓, 林伯强. 中国工业部门资本能源替代问题研究——基于元分析的视角[J]. 金融研究, 2011(6): 86-96.
- [8]LIN T T, HUANG S L. An entry and exit model on the energy-saving investment strategy with real options [J]. Energy policy, 2010, 38(2): 794-802.
- [9]GERLACH R, VAN DER ZWAAN B. A sensitivity analysis of timing and costs of greenhouse gas emission reductions [J]. Climatic change, 2004, 65(1): 39-71.
- [10]FAN Y, LIAO H, WEI Y. Can market oriented economic reforms contribute to energy efficiency improvement? Evidence from China [J]. Energy policy, 2007, 35(4): 2287-2295.
- [11]MA H, OXLEY L, GIBSON J. Substitution possibilities and determinants of energy intensity for China [J]. Energy policy, 2009, 37(5): 1793-1804.
- [12]SMYTH R, NARAYAN P K, SHI H. Substitution between energy and classical factor inputs in the Chinese steel sector [J]. Applied energy, 2011, 88(1): 361-367.
- [13]盛鹏飞. 中国能源效率偏低的解释: 技术无效抑或配置无效[J]. 产业经济研究, 2015(1): 9-20+60.
- [14]BOYD G A, PANG J X. Estimating the linkage between energy efficiency and productivity [J]. Energy policy, 2000, 28(5): 289-296.
- [15]HU J L, WANG S C. Total-factor energy efficiency of regions in China [J]. Energy policy, 2006, 34(17): 3206-3217.
- [16]张兵兵. 碳排放约束下中国全要素能源效率及其影响因素研究[J]. 当代财经, 2014(6): 13-22.
- [17]史丹. 中国能源效率的地区差异与节能潜力分析[J]. 中国工业经济, 2006(10): 49-58.

- [18]ZHOU P ,ANG B W. Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance [J]. *Energy policy* ,2008 ,36( 8) : 2911-2916.
- [19]YEH T ,CHEN T ,LAI P. A comparative study of energy utilization efficiency between Taiwan and China [J]. *Energy policy* ,2010 ,38( 5) : 2386-2394.
- [20]SHI G M ,BI J ,WANG J N. Chinese regional industrial energy efficiency evaluation based on a DEA model of fixing non-energy inputs [J]. *Energy policy* ,2010 ,38( 10) : 6172-6179.
- [21]刘亦文 胡宗义. 中国碳排放效率区域差异性研究——基于三阶段 DEA 模型和超效率 DEA 模型的分析[J]. *山西财经大学学报* 2015( 2) :23-34.
- [22]张三峰 吉敏. 市场化能改善环境约束下的能源效率吗——基于 2000—2010 年省际面板数据的经验研究[J]. *山西财经大学学报* 2014( 1) : 65-75.
- [23]BIAN Y ,YANG F. Resource and environment efficiency analysis of provinces in China: a DEA approach based on Shannon's entropy [J]. *Energy policy* ,2010 ,38( 4) : 1909-1917.
- [24]HU J L ,LIO M C ,YEH F Y , et al. Environment-adjusted regional energy efficiency in Taiwan [J]. *Applied energy* , 2011 ,88( 8) : 2893-2899.
- [25]ZHANG B ,BI J ,FAN Z , et al. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: a data envelopment analysis approach [J]. *Ecological economics* ,2008 ,68( 1-2) : 306-316.
- [26]SEIFORD L M ,THRALL R M. Recent developments in DEA: the mathematical programming approach to frontier analysis [J]. *Journal of econometrics* ,1990 ,46( 1-2) : 7-38.
- [27]LIN L C ,TSENG L A. Application of DEA and SFA on the measurement of operating efficiencies for 27 international container ports [Z]. *Proceedings of the eastern Asia society for transportation studies* ,2005 ,5: 592-607.
- [28]郭丽丽. 节能潜力测算方法及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [29]孔庆宝, 张燕江. 福建三大产业能源效率与节能潜力核算分析[J]. *商业研究* ,2013 ( 8) : 29-35.
- [30]朱守先 张雷. 北京市产业结构的节能潜力分析[J]. *资源科学* 2007( 6) : 194-198.
- [31]韩亚芬 孙根年. 我国“十一五”各省区节能潜力测算[J]. *统计研究* 2008( 1) : 43-46.
- [32]宋红印. 基于 DEA 的中国节能减排视角在潜力分析方法研究[D]. 杭州: 浙江大学 2013.
- [33]CHUNG W. Review of building energy-use performance benchmarking methodologies [J]. *Applied energy* , 2011 , 88( 5) : 1470-1479.
- [34]FUENTES H J ,GRIFELL-TATJÉ E ,PERELMAN S. A parametric distance function approach for Malmquist productivity index estimation [J]. *Journal of productivity analysis* ,2001 ,15( 2) : 79-94.
- [35]FÄRE R ,PRIMONT D. Multi-output production and duality: theory and applications [M]. Netherlands: Springer ,1995.
- [36]FÄRE R ,GROSSKOPF S ,PASURKA C A , Jr. Pollution abatement activities and traditional productivity [J]. *Ecological economics* ,2007 ,62( 3-4) : 673-682.
- [37]SHEPHARD R W. Cost and production functions [M]. Berlin: Springer ,1981.
- [38] FÄRE R , GROSSKOPF S , LOVELL C A K. The measurement of efficiency of production [M]. Netherlands: Springer ,1985.
- [39]CUESTA R A ,LOVELL C A K ,ZOFÍO J L. Environmental efficiency measurement with translog distance functions: aparametric approach [J]. *Ecological economics* ,2009 ,68( 8-9) : 2232-2242.
- [40]FARRELL M J. The measurement of productive efficiency [J]. *Journal of the royal statistical society. Series A ( General)* ,1957 ,120( 3) : 253-290.
- [41]HICKS J R. The theory of wages [M]. 2nd ed. London: Macmillan ,1963.
- [42]CUESTA R A ,ZOFÍO J L. Hyperbolic efficiency and parametric distance functions: with application to Spanish savings banks [J]. *Journal of productivity analysis* ,2005 ,24( 1) : 31-48.
- [43]王兵, 张技辉, 张华. 环境约束下中国省际全要素能源效率实证研究[J]. *经济评论* 2011( 4) : 31-43.
- [44]何文强 汪明星. 全要素能源效率的 DEA 模型评价——基于中国 1991—2007 年数据的实证检验[J]. *上海商学院学报* 2009( 5) : 92-96.

- [45]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.
- [46]杨文举. 适宜技术理论与中国地区经济差距: 基于 IDEA 的经验分析[J]. 经济评论 2008(3):28-33.
- [47]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(1):11-16.
- [48]张军 吴桂英 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000 [J]. 经济研究 2004(10):35-44.
- [49]BATTESE G E , COELLI T J. Frontier production functions , technical efficiency and panel data: with application to paddy farmers in India [J]. Journal of productivity analysis ,1992 3(1-2): 153-169.
- [50]FÄRE R , GROSSKOPF S , NOH D , et al. Characteristics of a polluting technology: theory and practice [J]. Journal of econometrics ,2005 ,126(2): 469-492.
- [51]王纪全 张晓燕 刘全胜. 中国金融资源的地区分布及其对区域经济增长的影响[J]. 金融研究 2007(6):100-108.
- [52]金成晓 任妍. 重化工业化是中国经济发展的必经阶段——基于产业结构调整角度的分析[J]. 经济纵横 2006(7):34-36 + 11.
- [53]MA C , STERN D I. China's changing energy intensity trend: a decomposition analysis [J]. Energy economics ,2008 , 30(3): 1037-1053.

(责任编辑:雨 珊)

## Effects of substituting energy with capital on China's energy conservation and emission reduction

HE Yongda<sup>1</sup> , LIU Zhichao<sup>2</sup> , SUN Wei<sup>3</sup>

(1. School of Statistics , Shanxi University of Finance and Economics , Taiyuan 030006 , China;

2. Business School of Jilin University , Changchun 130012 , China;

3. Center for Quantitative Economics of Jilin University , Changchun 130012 , China)

**Abstract:** It is of great significance for China's economic development to substitute energy with capital ( SEC) to improve energy efficiency and reduce pollutant emission. Therefore , this paper aims to shed some light on the effects of SEC on China's regional aggregated energy efficiency and pollutant emission from the perspective of factor substitution of capital and energy. In the framework of dual output production function and input direction distance function , the energy efficiency and emission reduction potentials of SEC in each region are analyzed by static and dynamic comparison method in the two-scenario mathematical model with translog cost function formula and the stochastic frontier analysis ( SFA) method. Then the capital energy ratio and the energy structure factor are taken into combined regression model to examine the impact on energy efficiency , and to explore the significance and regional heterogeneity of the effect of SEC on energy efficiency and emission reduction. The results show that the effect of SEC on energy efficiency and emission reduction is significant , and this effect has obvious regional heterogeneity that regions with lower efficiency scores hold more extensive potential to improve their energy and environmental performance by means of SEC. Furthermore , upgrading industrial structure , increasing the proportion of capital and energy and adjusting the energy structure , especially reducing the proportion of coal in energy , are of great significance to China's energy and environmental performance.

**Key words:** factor substitution; energy efficiency; energy conservation and emission reduction; translog cost function; stochastic frontier analysis ( SFA)