

能源和环境绩效评价方法的最新研究进展

杜克锐 鄢哲明 杨志明*

摘要:评估不同国家或地区的能源效率和环境效率不仅有助于人们了解他们之间的能源和环境绩效差异,而且为提高能源效率和环境效率也提供了有利的参考依据。本文首先厘清能源效率、环境效率和系统综合效率的内涵,梳理出国内外能源和环境绩效评价方法的发展脉络以及在中国的经验研究;其次,系统地比较不同绩效评价方法之间的优点和缺点;最后,探讨该领域内进一步的研究方向。通过文献分类爬梳,本文发现未来的研究方向包括异质技术的相关建模、考虑随机噪声或不确定性因素、寻找能源或环境非效率的根源。

关键词:能源效率;环境效率;数据包络分析;随机前沿分析

一、引言

自第一次工业革命起,人类社会对化石能源的消费就与日俱增。特别是进入20世纪中叶以后,全球人口的急速膨胀和工业生产的大规模扩张引起化石能源消费的快速增加。化石能源是工业生产的基础,推动了世界经济的发展和人类生活水平的提高,为人类文明的进步作出了巨大的贡献。然而,高速增长化石能源消费也为人类社会的发展带来了一些难题和挑战。首先,过快的消费增长造成能源资源日益枯竭,影响了人类经济发展的空间。根据英国石油公司(BP)的报告,2013年世界石油储量为1687.9亿桶,按照目前的开采速度,只能维持生产53.3年^①。日趋紧张的能源资源也导致了多起地区冲突,是地区政治动荡不安的一个

*杜克锐(通讯作者),山东大学经济研究院,邮政编码:250100,电子邮箱:kerrydu@sdu.edu.cn;鄢哲明,陕西师范大学国际商学院,邮政编码:710119,电子邮箱:zhemingyan88@163.com;杨志明,北京科技大学东凌经济管理学院,邮政编码:100083,电子邮箱:zhiming0419@126.com。

本文系山东省自然科学基金博士项目“考虑个体异质性下的山东省环境效率测度及影响因素分析”(ZR2016GB10)和国家自然科学基金青年项目“异质技术和空间相关下的环境效率测度方法及应用研究”(71603148)的阶段性成果。感谢匿名审稿人的宝贵修改建议,文责自负。

①数据来源:<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>。

导火索。其次,迅速增长的化石能源消费导致温室气体大量排放,也带来了一系列的环境问题。过多的化石能源燃烧带来了大量的二氧化碳排放,二氧化碳排放的增加使得温室气体效应越来越明显,全球气候明显变暖。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第五次评估报告,在过去100年间,全球几乎所有地区都经历了地表增暖;与1850-1900年时期相比,2003-2012年的平均温度上升了0.78摄氏度左右。气候变暖不但导致了厄尔尼诺等气候异常现象频发,对人类生命和财产造成了巨大的损失,还引起了极地冰川融化和海平面升高,致使处于低洼之地的人们无家可归,造成了不可忽视的气候环境问题。因此,经济发展过程中的能源与环境问题越来越多地受到人们的关注。人们普遍意识到提高能源效率和环境效率对经济可持续发展的重要性。

对生存环境的广泛关注,使得人们开始重视环境相关问题的研究。一个普遍的共识是,环境的改善与恶化,不仅仅是单纯的物理学或环境科学里的技术性问题,也不仅仅是单靠行政命令就能解决的政策问题,它更多地体现为一个有关经济生产与消费、能源使用和环境变化的综合性系统性问题。基于此,学界普遍关注:(1)随着经济发展,能源使用和污染物排放的变化是否存在规律;(2)哪些因素主导了能源使用和污染物排放的变化;(3)如何客观评价和科学预测经济活动中有关能源使用和环境变化的绩效。对上述问题的解答,其核心是厘清经济投入、能源投入、经济产出和环境变化等若干变量之间的相互关系,而能源效率和环境效率评价则为我们提供了一条可行的探索路径。

评估不同国家或地区的能源效率和环境效率,不仅有助于人们了解他们之间的能源和环境绩效差异,而且为提高能源效率和环境效率也提供了有利的参考依据。在过去的几十年里,能源效率和环境效率逐渐成为研究者关注的焦点,已经有大量的研究致力于发展评估能源效率和环境效率的定量分析技术。本文主要从能源效率、环境效率及综合效率三个方面对国内外相关研究成果进行归纳、总结和分析,重点考察能源和环境绩效评价研究方法的发展脉络以及有关中国的经验研究,以期为国内学者开展相关研究提供一些有价值的参考。

二、能源效率评价

有关能源效率的研究一直都是能源经济学的热点问题,这方面的国内外文献汗牛充栋。从能源效率界定范围来看,能源效率指标可以划分为两大类:单要素能源效率指标和全要素能源效率指标(杨红亮、史丹,2008)。

(一)单要素能源效率指标

单要素能源效率指标主要从能源投入与产出之间的关系进行度量。在这方面根据能源投入和产出指标的属性,王庆一(2003)又将其划分为两类,即物理能源效率指标和经济能源效率指标。物理能源效率主要是测度从物质能源转换成能源服务的效率(即热力学转换效

率)。由此可见,物理能源效率概念主要用来反映机器设备等的能源技术水平。因此,这类指标多用于工程研究和评价之上。经济能源效率指标主要测度能源投入与其经济产出之间的关系。与物理能源效率相比,经济能源效率指标更适合在宏观上对一个国家或地区的能源绩效进行评价。在这方面常用的指标有能源强度和能源生产率^①。能源强度定义为物质能源投入与经济产出之比,通常用单位GDP能耗来测度。能源生产率则定义为经济产出与物质能源投入之比,测度的是单位能源的产出(即能源强度的倒数)。

经济能源指标具有定义直观、计算简单、容易应用等优点,在实践中不但被学者所广泛使用,而且还被各个国家和世界组织作为制定能源政策的参照指标。此外,能源经济学家提出了多种分解方法对能源强度变化的驱动因素进行分析。从技术上来看,这些分解方法可以划分为三类:结构分解方法(SDA)、指数分解方法(IDA)和基于生产理论的分解方法(PDA)。SDA建立在投入产出模型的基础之上,使用了来自投入产出表中的终端消费数据和投入产出系数。因此,SDA分解能够计算出终端消费变化的效应。Rose和Casler(1996)、Su和Ang(2012)对SDA方法的发展及应用作了优秀的综述。但是由于利用SDA进行分析对数据要求较高,因此在实际应用中存在较大的数据困难。

与SDA相比,IDA只是使用了部门产出和能源消费数据,对数据要求相对低得多^②。方法论上,IDA建立在指数理论的基础上,其分解形式非常灵活,因此有多种指数方法能够被IDA所应用。在Hankinson和Rhys(1983)、Reitler等(1987)、Boyd等(1988)、Liu等(1992)、Ang和Lee(1994)、Ang和Choi(1997)、Ang和Liu(2001)、Ang等(2004)等文献的发展之下,IDA分析框架已经相当完善。Ang和Zhang(2000)、Ang(2004)对IDA的发展脉络以及相关应用作了较全面的综述。

当前IDA已经成为能源经济学建模的一个流行工具。有大量的文献将IDA应用到世界上各个国家能源问题的研究之中,代表性文献包括Choi等(1995)、Greening等(1997)、Zhang(2003)、Aguayo和Gallagher(2005)等。在国内研究方面,代表性文献包括周勇和李廉水(2006)、郑义和徐康宁(2012)、张伟和朱启贵(2012)等。

一般而言,IDA将能源强度变动分解为三大影响因素:强度效应、产业结构效应和能源结构效应。然而,IDA分析没有考虑诸如技术进步、效率变化以及要素间替代等与能源强度变化密切相关的因素^③。因此,IDA在经济解释能力方面具有很大的局限性。

①这两种指标都属于价值型能源效率指标,其测度可能会受到价格变动的影 响。因此,也有学者提出了实物型的能源效率指标。这方面的指标可参考Reddy和Ray(2011)。感谢匿名评审专家对此的建议。

②Hoekstra和Van den Bergh(2003)对SDA和IDA进行了详细的比较。

③近来文献也将IDA模型扩展到多层次,涵盖了从时间层面的分解到空间层面的分解。由于文章篇幅的原因,我们这里不展开详细讨论。感兴趣的读者,可参考Ang和Wang(2015)、Ang等(2016)。

为了弥补IDA在经济解释能力上的缺陷,近年来一些学者提出了基于生产理论的分解方法(PDA)。PDA从生产理论的角度上对能源(环境)指标的变化进行分析,从而具有更好的经济学基础。PDA的思想最早可以追溯到Färe等(1994)。Färe等(1994)基于新古典生产理论和数据包络分析(DEA)测度了全要素生产率并将其分解为技术进步和技术效率变化两个成分。此后,Zaim(2004)、Pasurka(2006)、Wang(2007)、Zhou和Ang(2008b)对Färe等(1994)的模型进行扩展应用到能源和环境分析中。其中,Wang(2007)对能源生产率变化进行了分解。Wang(2007)基于产出方向的谢泼德距离函数(Shephard Distance Function)将能源生产率变化分解为六个效应,分别是产业结构变化、能源结构变化、技术进步、技术效率变化、资本能源替代和劳动能源替代。从分解成分来看,Wang(2007)的模型能为能源生产率变化提供更好的经济学解释,并有更强的政策涵义。因此,近来有不少文献开始使用这一方法。例如,Wang(2011)和Wang(2013)利用这一方法分别对中国和世界69个国家的能源生产率变化的驱动因素进行了实证分析。孙广生等(2012)也提出一个与Wang(2007)类似的模型对中国地区能源生产率变动的驱动因素进行分析。林伯强和杜克锐(2013a)从技术差距和规模报酬两个角度对Wang(2007)的模型进行扩展,并将其应用于中国30个省份能源生产率变化的分析。

PDA虽然具有以上突出的优点,但是由于不能反映不同能源投入(不同产出)之间的异质性,PDA在测度结构效应(能源结构变化和产出结构变化)上存在不一致性,可能会导致与现实相悖的结论。例如,北京和上海在1990-2005年间产业结构从第二产业大幅度向第三产业转移,但Wang(2011)的实证结果显示这种产业结构的变化对其能源强度的下降产生了负面影响。事实上,第二产业的能耗要比第三产业高,因此,这种产业结构的转变应该带来能源强度的下降。相似地,在Wang(2007)的实证中也出现了能源消费结构的改善阻碍了能源强度下降的结果。通常而言,能源消费比重从低质量能源品种向高质量能源品种转移时,我们合理的预期是能源结构的转变应该可以促进能源强度的降低,至少不会对能源强度的下降产生负面影响。

针对IDA和PDA的缺点,林伯强和杜克锐(2014)提出了一个综合的分解框架,其基本思路包含两个阶段的分解:第一阶段利用IDA方法将整体能源强度变化分解为部门能源强度变化、产业结构变化和能源结构变化三个部分;第二阶段基于PDA方法将部门能源强度变化进一步分解为生产技术效应、技术效率效应、资本能源替代效应和劳动能源替代效应四个因素。林伯强和杜克锐(2014)提出的分解模型进一步拓展了IDA框架,为能源强度的变化提供了生产理论层面的解释,并且克服了PDA在产业结构效应和能源消费结构效应上的缺陷,使分解结果更合理。表1归纳了一些利用分解方法对中国单要素能源效率指标进行分析的代表性文献。

表1 中国单要素能源效率研究的代表性文献

作者	方法类型	具体方法	样本	主要结论
王玉潜(2005)	SDA	投入产出分析	中国,1987-1997年	样本期间能源技术进步累计推动能源强度下降39.1%
Liao等(2013)	SDA	投入产出分析	北京,2002年,2007年,2010年	技术进步是推动能源强度下降的主导因素
周勇和李廉水(2006)	IDA	AWD	中国六大产业,1980-2003年	产业部门能源强度下降是我国能源强度下降的主要因素
齐志新和陈文颖(2006)	IDA	拉氏因素分解法	中国四大产业部门,36个工业行业,1980-2003年	我国能源强度下降的决定因素在于技术进步
吴巧生和成金华(2006)	IDA	拉氏因素分解法	中国三次产业部门,1980-2003年	各产业能源使用效率提高是推动中国能源消耗强度下降的主要推动力
李国璋和王双(2008)	IDA	LMDI	全国以及三大地区,三大产业,1995-2005年	技术进步是推动能源强度下降的主要因素
施凤丹(2008)	IDA	LMDI	中国23个工业部门,1997-2002年	部门能源强度下降是工业节能的主要贡献者
郑义和徐康宁(2012)	IDA	LMDI	中国3个产业部门,8大行业部门,43个子部门,1994-2008年	能源强度下降的主要动力在于技术因素
张伟和朱启贵(2012)	IDA	LMDI	中国39个工业行业合并成11个部门,1994-2007年	能耗下降主要是由能源技术引致的
Wang(2011)	PDA	谢泼德距离函数、DEA	中国29个省份,1990-2005年	资本能源替代是促进我国地区能源生产率增长的主要贡献者
孙广生等(2012)	PDA	谢泼德距离函数、DEA	中国29个省份,1986-2010年	能源生产率变化的驱动因素按贡献大小依次为技术进步、投入替代和效率变化
林伯强和杜克锐(2013a)	PDA	谢泼德距离函数、DEA	中国30个省份,2000-2010年	资本能源替代是我国地区能源生产率增长的主要动力
林伯强和杜克锐(2014)	综合IDA和PDA	LMDI、DEA	中国30个省份三大产业部门,2003-2010年	技术进步是我国2003-2010年能源强度下降的最大推动力
白雪洁和孟辉(2017)	PDA	方向性距离函数、DEA	中国14个服务行业和27个制造行业	技术进步、资本投入能源效应、能源结构效应是促进服务业能源效率提升的主要因素

(二)全要素能源效率指标

1. 概念界定

能源只是生产过程中的一种投入要素。单要素能源效率指标只是能源投入与产出之间的简单比例关系,没有考虑到劳动与资本对产出的贡献及不同生产要素之间的替代作用,因

而近来受到一些学者的批评。有鉴于此, Hu 和 Wang(2006)首次提出了全要素能源效率的概念。全要素能源效率指标,是在新古典生产理论的框架下,将劳动和资本等生产要素也同时纳入到效率的分析之中,考虑了能源与其他生产要素之间的替代效应,具有综合多维度的特征。其基本思路如下:首先,通过对生产可能集(生产技术)进行定义;然后利用各生产单位的投入产出数据构造出前沿生产边界;最后分析各生产单位与前沿生产边界之间的关系,如果偏离前沿生产边界,则该生产单位的资源没有得到充分使用,存在帕累托改进的空间。具体而言,全要素能源效率指标可以定义为最优能源投入(理论上最少的能源投入)与实际能源投入之比。由此可见,全要素能源效率指标实质上是属于技术效率的范畴,与单要素能源效率指标的最大不同之处在于:后者分析的是能源与GDP之间的投入产出关系,而前者讨论的是能源作为投入要素的利用效率。

然而, Hu 和 Wang(2006)所定义的全要素能源效率实质上只是在传统经济效率测度上加入能源投入作为生产要素,并且所有投入被要求同比例缩减,测度了包含所有生产要素的综合利用效率。因此,严格意义上讲,如果在全要素能源效率中我们不能将劳动和资本等投入要素的无效率分离出来,便不能获知现实经济中真实的能源浪费程度或节能空间。例如,假设存在这样的一个经济系统,在保持产出不变的情况下,其资本、劳动和能源可以分别缩减20%、30%和40%,那么所有投入要素的共同可缩减程度是20%。但是在允许资本和劳动投入不变情况下,这个经济系统可以减少40%的能源投入。这个例子说明 Hu 和 Wang(2006)提出的能源效率测度方法会存在偏差。我们可以借用效率分析的概念对此进行更为正式的讨论。考虑一个新古典的生产框架。假设一个决策单元以劳动(L)、资本(K)和能源(E)作为投入要素生产单一产品(Y),其生产技术可以用以下集合表示: $T = \{(L, K, E, Y) | (L, K, E) \text{ 可以生产出 } Y\}$ 。Hu 和 Wang(2006)的全要素能源效率概念可以通过投入导向的谢泼德方向距离函数进行说明:

$$D(L, K, E, Y) = \sup\{\theta | (L/\theta, K/\theta, E/\theta, Y) \in T\} \quad (1)$$

由式(1)可以看到投入导向的谢泼德距离函数刻画了在现有生产技术下资本、劳动和能源的最大缩减程度。 $L/D(L, K, E, Y)$, $K/D(L, K, E, Y)$ 和 $E/D(L, K, E, Y)$ 分别是所有投入要素同比例缩减条件下的最优劳动投入、最优资本投入和最优能源投入。 $1/D(L, K, E, Y)$ 便是 Hu 和 Wang(2006)所定义的能源效率,但同时也是劳动效率和资本效率。从这个角度而言, Hu 和 Wang(2006)的全要素能源效率是属于径向效率测度模型。径向效率测度模型会高估能源效率的真实值。为了解决这一问题, Boyd(2008)定义了能源导向的谢泼德距离函数(简称能源距离函数):

$$D_E(L, K, E, Y) = \sup\{\theta | (L, K, E/\theta, Y) \in T\} \quad (2)$$

由式(2)不难发现能源距离函数只要求能源的最大程度缩减而允许其他投入要素保持不变。因此,能源距离函数反映了决策单元在能源投入方向上与最优生产状态的偏离程度。基于

能源距离函数, Boyd(2008)将能源效率定义为 $1/D_E(L, K, E, Y)$ 。Hu 和 Wang(2006)与 Boyd(2008)在能源效率测度上的差别可以用图1来说明。其中,纵轴表示能源投入;横轴表示其他投入;曲线表示等产量线。集合 T 可以用等产量线的右上方区域进行表示,曲线也称为生产边界。假设决策单元为点 A , 可以看到决策单元 A 没有落在生产边界,因此决策单元 A 在生产活动中过度使用了能源。Boyd(2008)定义的能源距离函数要求决策单元移动到点 B 。在这种情况下,决策单元 A 的能源效率为 BD/AD 。而按照 Hu 和 Wang(2006)的定义,决策单元 A 被要求移到点 C , 以实现所有投入的同比例减少,此时,决策单元 A 的能源效率为 CO/AO 。由图1容易看出 CO/AO 大于 BD/AD 。因此, Hu 和 Wang(2006)所定义的能源效率概念会高估其能源效率真实值。

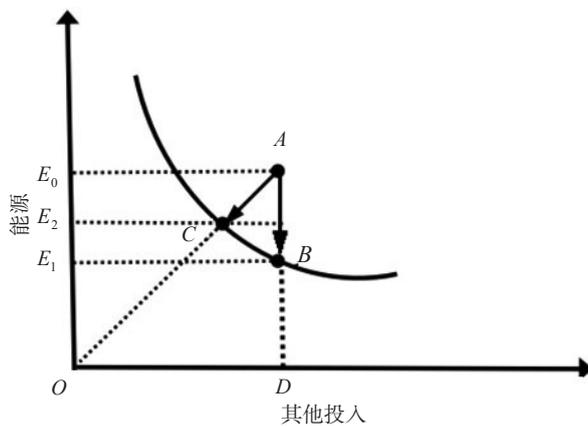


图1 全要素能源效率示意图

Boyd(2008)的能源效率定义实质上是一种非径向的效率测度方法。近来一些学者也沿着这一思路对全要素能源效率的测度进行了扩展。例如 Zhou 和 Ang(2008a)基于非径向效率测度和投入的松弛变量提出了一组全要素能源效率指标。Wu 等(2012)将二氧化碳作为非期望产出引入到能源距离函数中进一步考虑实际生产活动的污染排放。Zhang 和 Choi(2013b)在SBM-DEA模型上定义了两个全要素能源效率指标。Wang 等(2013a)在非径向方向距离函数基础上定义了不同技术生产情形下的全要素能源效率。Wang 等(2013b)利用多方向效率分析定义了能源效率指标。Zhang 等(2015)运用共同前沿下的SBM模型定义了生态约束下的全要素能源效率。

2.估计方法

与单要素能源效率指标相比,全要素能源效率在估计上要显得复杂一些。这主要在于最优能源投入作为全要素能源效率评价的基准,但其在操作层面上是未知的(或者说是观察不到的)。为了克服这一困难,在实践中通常都借助生产前沿的分析技术。在这方面主要有两种方法:数据包络分析(DEA)和随机前沿分析(SFA)。

DEA的基本思想是使用最小的凸集来刻画生产可能集(涂正革、刘磊珂,2011)。生产可

能集的边界就是技术前沿,体现了现有技术下的最优生产状态。在实践中,DEA通过线性规划技术构造出技术前沿,从而确定评价的基准并进行效率分析。从这个角度而言,DEA是一种非参数的方法。它主要具有以下优点:首先,DEA不需要对投入产出之间的函数关系进行假设,即不需要先验地假定生产函数形式或距离函数形式,进而能够避免模型错误设定的风险;其次,DEA模型设定灵活(DEA类型很多),能够适用于大部分效率评价模型的估计。因此,DEA在全要素能源效率估计中得到广泛的运用。例如,上文提到的Hu和Wang(2006)、Zhou和Ang(2008a)、Wu等(2012)、Wang等(2013a)和Wang等(2013b)都是利用不同类型的DEA模型对全要素能源效率进行估计。

虽然DEA类型的估计方法具有以上优点,但也不可避免地存在以下几个方面的缺点:首先,DEA模型没有考虑统计误差和其他随机性误差的影响,容易受到样本数据质量的影响^①,因此其效率估计可能存在偏差;其次DEA模型不具有统计基础,不能对模型进行检验(杜克锐、邹楚沅,2011)。考虑到宏观数据往往带有较大的噪声,近来的一些学者建议利用SFA方法对全要素能源效率进行估计。例如,基于能源距离函数,Boyd(2008)和Zhou等(2012a)建立了能源效率的SFA估计方法。DEA将决策单元偏离技术前沿部分都视为无效率。与DEA不同,SFA将决策单元对技术前沿偏离分为两部分:一部分是由无效率引起的,另外一部分是由随机误差造成的。因此,SFA模型可以测度剔除数据噪声对能源效率的影响。此外,SFA是一种建立在统计理论之上的参数估计方法,因此可以对模型设定进行统计检验。当然,SFA也有相应的缺点,主要体现在:SFA需要对模型的函数形式进行假定,因而模型存在错误设定的风险;SFA只适用于少数全要素能源效率指标的估计^②。

除了以上区别,DEA和SFA存在一个共同点,即都是利用样本数据对技术前沿进行构造。因此,它们都暗含着一个重要的假设:所有决策单元都是可以互相参照的,这意味着所有决策单元的技术都是同质的,因此它们的技术前沿是共同的。然而在现实经济中,由于地理位置、资源禀赋和经济发展阶段的不同,不同地区(决策单元)的技术水平可能并不一致。有鉴于此,近来的一些学者关注了存在异质性技术时的能源效率估计问题。例如,Lin和Du(2013)在Zhou等(2012a)的基础上提出了一个基于参数共同前沿(Parametric Metafrontier)的分析方法。Wang等(2013d)提出了一个基于共同前沿—DEA的估计方法。共同前沿分析的概念最早由Battese和Rao(2002)提出。Battese等(2004)和O'Donnell等(2008)对共同前沿分析方法进行了发展和完善。

共同前沿分析方法的基本思想是假设所有决策单元根据其生产技术可以划分为不同的

①Simar(2003)指出DEA估计对样本数据很敏感,样本异常值对DEA估计结果影响很大。

②据作者所知,SFA目前只运用在基于能源距离函数定义上的能源效率估计。对于诸如基于非径向方向距离函数的能源效率指标,SFA应用的难度在于模型的识别上。

组群;组内决策单元的技术是相同的;而组间决策单元是异质的;共同潜在的技术是由所有组群的技术构成。由此可见,共同前沿分析的关键在于对样本进行合理的分组。在实践中,研究者通常按照地理位置、收入水平和制度等指标对样本进行分组。这种分组方法的依据在于诸如收入水平等指标与生产技术存在密切的关系。然而,由于技术在宏观上是不可观察的,并且受到众多因素的影响,因此,按照一些先验信息进行分组不一定是可靠的,并且不同的分组方法也将导致不同的估计结果。此外,分组估计的另外一个缺陷是会损失组间的一些有用的共同信息。考虑到共同前沿分析存在的缺点,Lin和Du(2014)提出了利用潜类别随机前沿模型(Latent Class SFA)对全要素能源效率进行估计。潜类别随机前沿模型不需要对样本进行先验的分割,而是假设每个决策单元以未知的概率属于某个组群,利用极大似然估计方法对模型参数进行估计,并计算出每个决策单元从属于每个组群的概率。Lin和Du(2014)提出的方法是一种数据驱动的方法,理论上可以解决共同前沿分析的缺陷。然而,这种方法的缺陷在于:首先,潜类别随机前沿模型的估计比较复杂,经常遇到不收敛的情况;其次,随着组群数的增加,估计参数成倍数增长。

3.实证应用

随着我国经济发展的能源瓶颈问题日益明显,有关能源浪费和能源效率的问题越来越受到人们的关注。越来越多的文献采用全要素能源效率指标对我国地区和工业行业的能源效率及其影响进行测度和实证分析。例如,魏楚和沈满洪(2007)利用Hu和Wang(2006)的模型对中国29个省份1995-2004年间的能源效率进行测度,在此基础上对能源效率的影响因素进行分析,得到以下主要结论:样本期间内中国各省平均能源效率为0.778;第三产业比重对能源效率有正的影响,而政府干预和进出口贸易对能源效率存在负面影响。师博和沈坤荣(2008)利用投入导向的超效率DEA模型对中国各地区1995-2004年间的能源效率进行评价,在此基础上进一步分析了市场分割与能源效率之间的关系。李国璋和霍宗杰(2009)也利用了投入导向的DEA模型测度了我国各个省份1995-2006年间的能源效率,并对其收敛性和影响因素进行实证分析。孙广生等(2011)利用投入方向的DEA模型对中国14个工业部门1987-2005年的能源效率进行测算并对其影响因素进行回归分析。其主要研究结论有:样本期间内工业行业平均效率值为0.73;企业规模有助于提高能源效率,而国有企业比重则不利于能源效率的提升。基于投入导向的谢泼德距离函数和SFA模型,何晓萍(2011)以中国36个工业行业1994-2008年的数据为样本对我国工业的能源效率和影响因素进行了实证研究,结果发现样本期间工业行业平均能源效率为0.76;对外开放有助于能源效率的提升,而国有产权则是能源效率提升的不利因素。

通过中国知网数据库、Scimedirect和Jstor数据库的搜索可以发现研究中国全要素能源效率的文献数量众多。表2对这个方面的代表性文献进行了归纳总结。

表2 中国全要素能源效率研究的代表性文献

作者	效率测度类型	研究方法	样本	影响因素变量
汪克亮等 (2010)	径向效率测度	投入导向的 BCC-DEA 模型, Tobit	中国 29 个省份, 2000-2007 年	产业结构、市场化水平、能源消费结构、能源价格、技术进步
袁晓玲等 (2009)	径向效率测度	投入导向的超效率模型, Tobit	中国 28 个省份, 1995-2006 年	产业结构、所有权结构、能源结构、能源禀赋
李兰冰 (2012)	径向效率测度	四阶段 DEA 模型	中国 30 个省份, 2005-2009 年	开放程度、产业结构、基础设施、文化素质
王兵等 (2011)	径向效率测度	方向距离函数, Tobit	中国 30 个省份, 1998-2007 年	经济发展水平、企业的环境管理能力、产业结构、能源结构、外商直接投资、价格指数
张伟和吴文元 (2011)	径向效率测度	方向距离函数, 面板数据计量模型	长三角都市圈 15 城市, 1996-2008 年	经济发展水平、要素禀赋、产业结构、能源结构、外商直接投资
杨骞 (2010)	径向效率测度	投入方向的 DEA 模型, Tobit	中国 28 个省份, 2000-2006 年	行政垄断、技术进步、对外开放程度、经济结构
魏楚和沈满洪 (2007)	径向效率测度	投入方向的 DEA 模型, 面板固定效应模型	中国 29 个省份, 1995-2004 年	产业结构、政府干预、对外开放度、国有企业比重
师博和沈坤荣 (2008)	径向效率测度	投入方向的超效率 DEA 模型, Tobit	中国 29 个省份, 1995-2005 年	市场分割、资源充裕度、贸易依存度、产业结构、能源价格
李国璋和霍宗杰 (2009)	径向效率测度	投入方向的 DEA 模型, Tobit	中国 29 个省份, 1995-2006 年	国有经济比重、产业结构、对外开放程度、能源禀赋、能源消费结构、政府影响力、能源价格
孙广生等 (2011)	径向效率测度	投入导向的 DEA 模型	中国 14 个工业部门, 1987-2005 年	规模效应、国有企业比重、固定资产更新率
何晓萍 (2011)	径向效率测度	谢泼德距离函数, SFA	中国 36 个工业行业, 1994-2008 年	行业集中度、所有制结构、行业开放度
陈德敏和张瑞 (2012)	径向效率测度	方向距离函数, Tobit	中国 29 个省份, 2000-2010 年	环境规制因素、产业结构、FDI、能源结构
林伯强和杜克锐 (2013b)	非径向效率测度	谢泼德能源距离函数, SFA	中国 30 个省份, 1997-2010 年	要素市场扭曲、产业结构、FDI、能源价格
Wu 等 (2012)	非径向效率测度	谢泼德能源距离函数, DEA	中国 29 个省份工业部门, 1997-2008 年	—
Choi 等 (2012)	非径向效率测度	SBM-DEA 模型	中国 30 个省份, 2001-2010 年	—
Wang 等 (2013a)	非径向效率测度	非径向方向距离函数, DEA	中国 28 个省份, 2005-2010 年	—
Wang 等 (2013b)	非径向效率测度	多方向效率模型, DEA	中国 30 个省份, 1997-2010 年	—
Lin 和 Du (2013)	非径向效率测度	谢泼德距离函数, 共同前沿分析, SFA	中国 30 个省份, 1997-2010 年	—
Lin 和 Du (2014)	非径向效率测度	谢泼德距离函数, 潜类别 SFA 模型	中国 30 个省份, 1997-2010 年	—
李兰冰 (2015)	径向效率测度	序贯方向距离函数	1985-1998 年: 中国 28 个省份; 1999-2012 年: 中国 29 个省份	—
周梦玲和张宁 (2017)	非径向效率测度	谢泼德距离函数, 共同前沿分析, SFA	中国 30 个省份, 1998-2012 年	—

注:“—”表示此篇文章中没有分析外生变量的影响。

三、环境效率评价

与能源效率指标的分类相似,环境效率指标根据定义框架的不同也可以划分为两大类:单要素环境效率指标和全要素环境效率指标。本节将围绕着环境效率评价的发展与其在中国的应用展开回顾和评述。

(一) 单要素环境效率指标

评估不同国家或地区的环境效率不仅有助于人们了解他们之间的环境绩效差异,而且对提高环境绩效水平也提供了有利的参考依据(Song et al., 2012)。在过去几十年里,环境效率逐渐成为公众关注的热点,已经有大量的研究致力于发展评估环境效率的定量分析技术。

在早期研究中,单要素环境效率指标被广泛应用于评估环境绩效。与单要素能源效率指标类似,单要素环境效率以环境污染排放量与某一经济变量之间的比例作为指标。例如,Kaya和Yokobori(1998)提出碳生产效率(即GDP与二氧化碳排放量之比)指标来反映一个国家或地区在追求经济增长的同时所付出的环境代价。Mielnik和Goldemberg(1999)提出单位能源消费的二氧化碳排放量作为发展中国家应对气候变化所做努力的评价标准。Sun(2005)则认为碳强度(二氧化碳排放量与GDP之比)是评价一个国家或地区的能源政策以及减排效果的一个合适指标。

单要素效率指标在定义上具有直观、容易使用的优点。在这种指标下,能源强度相关的分解方法也可以用来对环境绩效变化的机理进行分析。这方面的代表性文献包括Greening等(1998)、Fan等(2007)、Chen(2011)、Du等(2017)。由于单要素环境效率指标没有考虑要素投入在生产过程中的作用,它并不能反映评价决策单元实际污染排放量与其潜在最小排放量(实现最优生产时的排放量)之间的差距。这使得单要素环境指标在政策评估中具有很大的局限性。

(二) 全要素环境效率指标

环境污染通常是要素投入在生产期望产出时伴随的副产品,通常称为非期望产出。为了恰当地刻画实际生产过程,许多研究在包含投入要素、期望产出和非期望产出的全要素生产框架下进行环境效率评价。与全要素能源效率定义相似,全要素环境效率可以定义为最优污染排放量(理论最小的污染排放量)与实际污染排放量之比^①。在方法论上,这个方面的研

^①这是大部分全要素环境效率文献所定义的概念。作者注意到也存在一些引申的定义。例如,杜克锐和邹楚沅(2011)将碳排放效率定义为“实际碳生产率”与“最优碳生产率”之比;Zhang和Choi(2013a、2013c)、Zhang等(2013d)则将碳排放效率定义为“最优碳强度”与“实际碳强度之比”。此外,在实际应用的径向效率评价模型中,除环境污染排放外,投入要素也被要求同比例缩减,因此,其计算得到的效率既反映了环境效率,也反映了其他投入要素的利用效率。

究大部分都是建立在数据包络分析(DEA)方法之上^①。

将非期望产出纳入到传统的DEA模型,主要有两种处理方式。第一种是将非期望产出看作投入要素。代表性的文献包括Haynes等(1998)、Lee等(2002)、Hailu和Veeman(2001)。这种方法很简便并且满足非期望产出越少越好的要求。但是,它与实际生产过程并不相符,因而遭到一些研究的批评。

第二种是数据转换方法,即将“越少越好”的非期望产出转换为“越多越好”的新变量。然后,新的变量可以作为期望产出纳入到传统DEA模型的分析中。这方面的代表性文献有Scheel(2001)、Seiford和Zhu(2002)、Hua等(2007)。然而这种方法意味着非期望产出与期望产出一样可以在没有成本付出的情况减少。这相对来说不够合理。

除了上面介绍的处理方法,近年来更为广泛使用的方法是联合生产(Joint-production)框架,这种方法将期望产出和非期望产出的弱处置性和强处置性区分开来。弱处置性是指减少非期望产出(即环境污染物)是需要付出成本的。基于联合生产框架,研究者已经提出多种环境绩效评价模型。例如Färe等(1989)、Chung等(1997)、Zaim和Taskin(2000)、Zhou等(2010)、Yang和Pollitt(2010)。在这些研究方法中,Chung等(1997)提出的方向距离函数(Directional Distance Function, DDF)被广泛应用于实证研究中,例如,Boyd和McClelland(1999)利用方向距离函数方法计算了在环境约束下的潜在产出损失。Färe等(2007)利用方向距离函数估计美国火力发电厂的技术效率和环境治理成本。Oggioni等(2011)和Riccardi等(2012)在方向距离函数的基础上测算了世界水泥行业的生态效率。

方向距离函数允许期望产出增加的同时减少非期望产出,这和人类社会可持续发展的要求是一致的。尽管方向距离函数在理论上有其自身的优点,但是也有其不足之处,即非期望产出的减少和期望产出的增量需要同比例。从这一点来说,方向距离函数可以划分为径向效率测度方法。在这个意义上说,径向效率测度方法可能会低估决策单元的无效率程度。因此,学者们开始提出非径向的效率测度模型。例如,Färe和Grosskopf(2010)、Zhou等(2012b)在原始方向距离函数的基础上提出了非径向的方向距离函数(Non-radial Direction Distance Function)。Tone(2004)和Zhou等(2006)提出了基于松弛变量的测度方法(SBM)用以评价环境绩效。Sueyoshi等(2010)提出了RAM(Range-adjust Measure)模型用以评估美国火力发电厂的环境绩效。基于RAM模型,Cooper等(2011)提出了更加灵活的BAM(Bounded Adjusted Measure)模型(王兵、宫明丽,2017)。

上述研究的一个共同特点是:假设所有的决策单元都使用同一技术。然而,在现实经济中不同的决策单元可能拥有不同的生产技术。因此,技术同质性的假设看起来就过于牵强和

^①Zhou等(2008)提供了一个数据包络分析在能源和环境经济学中应用的综述。

不切实际。已有少数研究注意到技术异质性这一问题。例如,Oh和Lee(2010)基于共同前沿分析框架提出了考虑组别技术异质性的Malmquist-Luenberger生产率增长指数。Chiu等(2012)综合了方向距离函数和共同前沿的分析方法对环境非效率进行了分解。为了考虑韩国不同类型的发电企业的技术异质性,Zhang等(2013d)提出了一个综合非径向方向距离函数和共同前沿分析的模型。

除了利用DEA这种非参数方法对全要素环境效率进行分析外,也有部分文献采用了参数的方法。在这方面的研究主要有两种处理方式。第一种方式是将环境污染作为投入要素放入生产函数中。例如,杜克锐和邹楚沅(2011)将二氧化碳作为一种投入要素引入到超越对数生产函数中,进而将碳排放效率定义为“实际碳生产率”与“最优碳生产率”之比,并且利用SFA模型进行了估计。然而,将环境污染作为投入要素不符合实际生产过程,因此在近来研究中较为少用。第二种的思路是利用参数形式对方向距离函数进行刻画。这种处理方式的代表性文献是Färe等(2005)。Färe等(2005)采用二次型函数对方向距离函数进行识别,并且通过方向距离函数的性质变换成可估计的方程。在此基础上,Färe等(2005)分别使用线性规划和SFA对方程的参数进行估计。此外,Vardanyan和Noh(2006)、Murty等(2006)、Park和Lim(2009)也采取了类似的方法。

这种处理方式建立在环境生产理论之上,具有良好的经济涵义,因而得到一些研究者的青睐。但是,这类方法在估计上可能存在内生性问题。为了克服这一问题,Lin和Du(2015)采用超越对数生产函数对谢泼德碳距离函数(Shephard Carbon Distance Function)进行识别。Lin和Du(2015)进一步考虑了个体异质效应,使用面板固定效应SFA模型进行估计。由于参数方法在模型识别上存在一些困难,很多全要素能源效率测度模型尚未有成熟的参数估计方法。因此,总体上来看,DEA仍是全要素环境效率分析的主流方法。此外,还有一些文献(例如,白雪洁、宋莹,2008;黄德春等,2012;刘亦文、胡宗义,2015)综合使用了DEA和SFA的多阶段估计方法。其主要思路是:先使用DEA模型进行效率估计,然后利用SFA模型对投入或者产出的松弛变量进行调整以消除外生变量和统计噪声的影响,最后用调整后的投入产出变量进行DEA效率计算。

随着我国环境问题的日益突出,有关中国地区环境绩效评价也得到学者的广泛关注。近年来,这方面的文献大量涌现^①。许多学者利用不同的方法对中国地区的全要素碳排放效率及减排潜力进行了测算。例如,王群伟等(2010)使用谢泼德碳距离函数考察了中国各个地区的动态碳排放绩效。Guo等(2011)利用了径向的环境DEA模型估计中国29个省份的二氧化碳排放效率,并

^①通过中国知网数据库分别以环境效率为主题、篇名和关键词进行搜索可以找到大量的文献。但作者通过对文献的仔细阅读后,发现大部分文献实质上分析的是环境约束下的技术效率或全要素生产率,其测度的是整个经济的综合绩效。作者将在下一节对此类文献进行梳理。

且从节能技术和能源结构调整角度计算了他们的减排潜力。Choi等(2012)利用SBM模型估计了中国地区的二氧化碳减排潜力和边际减排成本。Wang等(2012)使用一组不同方向的DEA模型对中国地区二氧化碳排放效率进行评价。Wang等(2013c)使用RAM-DEA方法估计了2006-2010年间的中国地区能源效率和环境效率。Wang等(2013b)使用多方向效率分析方法考察了中国各个省份的二氧化碳排放效率。Zhang和Choi(2013a)利用非径向方向距离函数和共同前沿分析方法对中国火力发电企业的二氧化碳排放效率进行了分析。汪克亮等(2016)采用非径向距离函数测度了中国2006-2013年30个省份的二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘的排放效率。

四、综合效率评价

全要素能源效率评价和全要素环境效率评价侧重于能源和环境纬度的评价。从方法论上来看,这类指标实质上是效率分析的应用。效率分析还被广泛地运用于整个经济综合技术效率的评价。正如上文所讨论的,Hu和Wang(2006)所定义的全要素能源效率指标所测度的是整个经济的技术效率。传统效率分析框架中只考虑了投入和期望产出。随着人们对环境问题日益关注,效率分析也逐渐扩展到考虑非期望产出的环境生产理论,进而可以对环境约束下的经济绩效进行评估。

Chung等(1997)提出的方向距离函数是进行环境约束下的经济绩效评估的主要方法之一。每个决策单元使用投入向量 $x \in \mathfrak{R}_+^I$ 联合生产期望产出 $y \in \mathfrak{R}_+^J$ 和非期望产出 $b \in \mathfrak{R}_+^H$ 。根据环境生产理论,我们可以用以下集合来刻画该生产技术:

$$P = \{(x, y, b) : x \text{ 可以生产 } (y, b)\} \quad (3)$$

在生产理论上,集合 P 通常被假设满足以下公理:(1)期望产出(y)和投入(x)是可自由处置的;(2)非期望产出(b)是弱可处置的,即非期望产出的处理是有成本的;(3)零结合性生产,只有当期期望产出(y)为0时非期望产出(b)才可能为0;(4)不生产总是可能的,有限的投入只能生产有限的产出。

在式(3)的基础之上,方向距离函数可以表示为:

$$\bar{D}(x, y, b; g) = \sup\{\beta | (x, y, b) + \beta \cdot g \in P\} \quad (4)$$

其中, g 是方向向量,决定了各投入产出变量的缩减(扩张)方向; β 是各投入产出变量的缩减(扩张)的规模因子。一般情况下可以设置 $g = (-x; y; -b)$ 。在这种情形下, β 测度了投入(产出)共同的可缩减(扩张)比例, $\bar{D}(x, y, b; g)$ 则是最大的可缩减(扩张)比例,反映了决策单元偏离有效生产边界的程度。因此, $\bar{D}(x, y, b; g)$ 可以用来评价决策单元的经济效率。为了进一步测度环境约束下的全要素生产率,Chung等(1997)进一步定义了如下 Malmquist-Luenberger生产率指数:

$$ML_{t,t+1} = \left[\frac{1 + \bar{D}_t(x_t, y_t, b_t; g_t)}{1 + \bar{D}_t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g_{t+1})} \times \frac{1 + \bar{D}_{t+1}(x_t, y_t, b_t; g_t)}{1 + \bar{D}_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g_{t+1})} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Malmquist-Luenberger生产率指数是Färe等(1994)提出的Malmquist生产率指数的扩展,进一步考虑了环境因素的影响。

方向距离函数要求所有投入和产出同比例变动,是一种径向的效率测度方法,可能会高估决策单元的效率值。针对这一问题,Tone(2004)提出了SBM(Slack-base Measure)模型。SBM模型利用投入和产出的松弛变量进行效率指标的构造。具体的SBM模型形式如下:

$$\rho = \min_{\{\lambda_1, \dots, \lambda_N, s^x, s^y, s^b\}} \frac{1 - \frac{1}{Z}(\sum_{i=1}^Z s_i^x / x_{i0})}{1 + \frac{1}{J+H}(\sum_{i=1}^J s_i^y / y_{i0} + \sum_{i=1}^H s_i^b / b_{i0})}$$

$$s.t. \quad \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{in} + s_i^x = x_{i0}, i = 1, \dots, Z$$

$$\sum_{n=1}^N \lambda_n y_{in} - s_i^y = y_{i0}, i = 1, \dots, J$$

$$\sum_{n=1}^N \lambda_n b_{in} - s_i^b = b_{i0}, i = 1, \dots, H$$

$$\lambda_n \geq 0, n = 1, \dots, N$$
(6)

Tone(2004)提出的SBM模型只能对经济效率进行静态评价,而不能对全要素生产率进行测度,即进行动态效率评价。有鉴于此,Fukuyama和Weber(2009)结合了SBM和DDF的思想,提出了一种SBM方向距离函数,进而构建了Luenberger生产率指数(LPI)。SBM方向距离函数具体形式如下:

$$\bar{D}^{sbm}(x, y, b; g) = \max_{\{\lambda_1, \dots, \lambda_N, s^x, s^y, s^b\}} \frac{\frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z \frac{s_i^x}{g_i^x} + \frac{1}{J+H} \left(\sum_{i=1}^J \frac{s_i^y}{g_i^y} + \sum_{i=1}^H \frac{s_i^b}{g_i^b} \right)}{2}$$

$$s.t. \quad \sum_{n=1}^N \lambda_n x_{in} + s_i^x = x_{i0}, i = 1, \dots, Z$$

$$\sum_{n=1}^N \lambda_n y_{in} - s_i^y = y_{i0}, i = 1, \dots, J$$

$$\sum_{n=1}^N \lambda_n b_{in} - s_i^b = b_{i0}, i = 1, \dots, H$$

$$\lambda_n \geq 0, n = 1, \dots, N$$
(7)

SBM方向距离函数 $\bar{D}^{sbm}(x, y, b; g)$ 测度了决策单元各个投入和产出的平均无效率程度。在式(7)的基础上:

$$LPI_{t,t+1} = \frac{1}{2} \left[\bar{D}_t^{sbm}(x_t, y_t, b_t; g_t) - \bar{D}_t^{sbm}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g_{t+1}) \right] + \frac{1}{2} \left[\bar{D}_{t+1}^{sbm}(x_t, y_t, b_t; g_t) - \bar{D}_{t+1}^{sbm}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g_{t+1}) \right]$$
(8)

与Tone(2004)的处理方式不同,Zhou等(2012b)对Chung等(1997)的方向距离函数进行

修改,将其扩展为非径向的方向距离函数。非径向方向距离函数的具体形式表示为:

$$\bar{D}^{non}(x, y, b; g) = \sup_{\beta \geq 0} \{w^T \beta : (x, y, b) + \text{diag}(\beta) \cdot g \in P\} \quad (9)$$

其中, w 是权重向量, g 是方向向量, 决定了各投入产出变量的缩减(扩张)方向; β 是各投入产出变量的缩减(扩张)的规模因子。与式(4)不同的是, 在这里 β 是一个向量而非标量, 这意味着各投入产出变量可以以不同的比例进行变动, 从而克服了原始方向距离函数的缺陷。

需要指出的是, 这里所界定的综合效率其实质是综合反映投入要素利用效率、环境缩减可能和产出扩张可能的综合效率。而前文所提到的全要素能源效率和全要素环境效率都只考虑了能源和环境维度的缩减可能。我们可以把整个经济看成个大系统, 而把能源或环境看成子系统。近年来逐渐流行的网络DEA方法, 可以用以评价整个系统和各个子系统的效率。这方面的文献可参考Färe和Grosskopf(2000)、Hua和Bian(2008)、Tone和Tsutsui(2009)等。

在经验研究方面, 已有大量文献对中国环境约束下的经济效率进行实证分析。例如, 胡鞍钢等(2008)采用方向距离函数对中国30个省份在1999-2005年间环境约束下的技术效率进行排名。涂正革(2008)也采用相同方法测度了中国30个省份的工业部门在环境约束下的技术效率, 用以考察中国地区环境、资源与工业增长的协调性。胡玉莹(2010)利用SBM模型对中国30个省份2000-2007年间环境约束下的技术效率进行测度并对其影响因素进行考察。涂正革和刘磊珂(2011)则用SBM模型实证考察中国30个省份的工业部门在1998-2008年间环境约束下的经济绩效。Zhang等(2014)利用非径向方向距离函数构造了能源环境绩效指标和综合绩效指标, 在此基础上实证分析了中国火力发电企业的绩效与规模控制政策之间的关系。

此外, 还有不少文献对中国环境约束下的全要素生产率进行考察。例如, 杨俊和邵汉华(2009)使用了基于方向距离函数的Malmquist-Luenberger生产率指数对1998-2007年中国各地区工业在环境约束下的全要素生产率进行测度, 其主要发现有: 技术进步是中国生产率提升的主要推动力; 地区全要素生产率与人均GDP、资本劳动比和外商直接投资密切相关。陈诗一(2010)使用相同的方法对中国38个工业部门两位数子行业在1980-2008年的绿色生产率增长进行测度。庞瑞芝和李鹏(2011)则使用基于序列SBM方向性距离函数的Luenberger生产率指数对中国各省的工业部门在1985-2009年间环境约束下的增长绩效进行评价, 主要结论有: 改革开放的区域不平衡发展策略拉大了东部地区和中西部地区的工业发展差距; 过去十多年间的中西部扶持政策并未有效改变其工业落后的格局; 高耗能高污染产业的西迁进一步加剧了地区间的新型工业化差距。陈诗一(2012)也采用了SBM方向性距离函数测算中国各省份在二氧化碳排放约束下的全要素生产率, 用以对各个地区的低碳经济转型进行评估。表3对有关中国综合效率评价的代表性文献进行了归纳和总结。

表3 研究中国综合效率的代表性文献

作者	主题	研究方法	效率测度类型	环境指标	样本
胡鞍钢等(2008)	经济效率	方向距离函数	径向效率测度	CO ₂ 、SO ₂ 、COD、固体废物、废水	中国30个省份, 1999-2005年
涂正革(2008)	经济效率	方向距离函数	径向效率测度	SO ₂	中国30个省份工业部门, 1998-2005年
李静(2009)	经济效率	SBM模型	非径向效率测度	废水、废气、固体废物	中国28个省份, 1990-2006年
胡玉莹(2010)	经济效率	SBM模型	非径向效率测度	CO ₂	中国30个省份, 2000-2007年
周五七和聂鸣(2012)	经济效率	SBM模型	非径向效率测度	CO ₂	中国30个省份工业部门, 1998-2009年
刘瑞翔(2012)	经济效率	SBM方向性距离函数	非径向效率测度	废水、固体废物、SO ₂	中国29个省份, 1989-2009年
Zhang等(2014)	能源-环境综合效率	非径向方向距离函数	非径向效率测度	CO ₂	中国252家火力发电企业
杨俊和邵汉华(2009)	全要素生产率	方向距离函数, Malmquist-Luenberger生产率指数	径向效率测度	SO ₂	中国30个省份, 1998-2007年
陈诗一(2010)	全要素生产率	方向距离函数, Malmquist-Luenberger生产率指数	径向效率测度	CO ₂	中国38个工业两位数子行业, 1980-2008年
庞瑞芝和李鹏(2011)	全要素生产率	序列SBM方向性距离函数, Luenberger生产率指数	非径向效率测度	CO ₂ 、SO ₂ 、COD	中国各省的工业部门, 1985-2009年
陈诗一(2012)	全要素生产率	SBM方向性距离函数, Luenberger生产率指数	非径向效率测度	CO ₂ 、SO ₂ 、COD、固体废物、废水、工业废气	中国31个省份, 1985-2010年
王兵等(2011)	经济效率, 全要素生产率	SBM方向性距离函数, Luenberger生产率指数	非径向效率测度	SO ₂ 、COD	中国30个省份, 1998-2007年
孙传旺等(2010)	全要素生产率	方向距离函数, Malmquist-Luenberger生产率指数	非径向效率测度	CO ₂	中国29个省份, 2000-2007年
林伯强和刘泓汛(2015)	能源和环境综合效率	非径向方向距离函数	非径向效率测度	CO ₂	中国23个工业子行业, 2003-2012年
王娟等(2016)	能源和环境综合效率	自然处置性和管理处置性下的RAM模型	非径向效率测度	CO ₂	中国36个工业子行业, 2006-2012年
庞瑞芝和王亮(2016)	环境全要素生产率	Bootstrap两阶段分析方法,	径向效率测度	CO ₂ 、SO ₂	中国2010-2013年间30个省市服务业
王兵和罗佑军(2015)	生产效率、环境治理效率、综合效率	基于RAM网络DEA模型	非径向效率测度	SO ₂ 、COD	中国29个省份2001率测度治理效年
王兵等(2014)	绿色发展效率	RAM模型	非径向效率测度	化学需氧量、SO ₂ 、NO _x	中国112个环保重点城市2005-2010年
李涛(2013)	经济效率、碳环境效率、综合效率	RAM模型	非径向效率测度	CO ₂	1998-2010年中国29个省份

五、总结

本文对能源效率、环境效率以及综合经济绩效评价的相关文献进行了梳理和评述,重点回顾和总结了效率测度方法的发展脉络及与中国相关的经验研究。在方法论上,首先,单要素效率指标的分解框架已经发展比较完善,许多成熟的分解方法已经在实践中得到大量的应用。其次,效率分析已经从径向效率测度向非径向效率测度演变,进而提高效率测度的准确性。SBM模型和非径向方向距离函数的提出丰富了效率测度的方法。在估计上,个体异质性逐渐受到研究者的重视,共同前沿分析方法是目前使用最为广泛的方法。在经验研究上,大量的文献采用了不同的研究方法对中国能源效率、环境效率和综合效率进行了广泛而深入的讨论,得到了很多深刻的结论,加深了我们对中国能源效率、环境效率和经济绩效的认识。然而,现有研究还存在以下几个方面的不足,有待进一步完善。

首先,现有文献广泛地使用全要素生产框架进行研究,但许多文献在绩效定义上存在一些混淆。例如,一些文献直接将纳入能源和环境变量的SBM模型所得到的效率指标定义为全要素能源效率或者全要素环境效率。考虑到在SBM模型中,所有投入要素、期望产出和非期望产出的缩减或者扩张都对效率指标有贡献。在这种情况下,SBM模型直接得到的效率指标测度的是整个经济的综合效率。在实证研究中,研究者需要明确其效率的内涵,进行明确的定义,在此基础上选择合理的模型。

其次,IDA模型和PDA模型对数据要求低,因而受到研究者的青睐。但是,这两种分解模型自身都存在一些缺陷。IDA模型不能对技术进步、技术效率变化和要素间替代等基本因素进行分析。而PDA模型在测度结构效应上存在不一致性。林伯强和杜克锐(2014)提出的综合分解模型可以有效解决以上问题。但是因素分解模型只能涵盖一些直接的影响因素,不能分析诸如市场、政策和制度等重要因素的影响。

再者,在研究中国全要素能源效率的文献中,大部分采用了径向的测度方法,可能会高估中国的能源效率。在估计方法上,只有少数文献注意到我国地区间的技术异质性问题。这一问题也出现在中国地区二氧化碳排放效率和减排潜力的相关研究上。忽略地区间的技术异质性不但会带来效率评价的偏差,而且会导致错误估计中国地区的节能减排潜力。

最后,许多文献对我国能源和环境效率的影响因素进行了分析。但是,现有文献所关注的影响因素主要是一些经济变量,例如,经济结构、能源价格、能源消费结构和对外贸易等。甚少有文献关注到我国正处于市场化转型阶段,制度可能是影响我国地区能源和环境绩效更为根本的因素。事实上,在政府关闭落后产能等行政措施的操作空间将大大减小情况下,节能减排政策的制定应当着力于能源市场的完善上。这方面的研究可以为政府政策的制定和实施提供理论参考。

参考文献:

- [1] 白雪洁,孟辉. 服务业真的比制造业更绿色环保?——基于能源效率的测度与分解[J]. 产业经济研究, 2017, (03):1-14.
- [2] 白雪洁,宋莹. 中国各省火电行业的技术效率及其提升方向——基于三阶段DEA模型的分析[J]. 财经研究, 2008, (10):15-25.
- [3] 陈德敏,张瑞. 环境规制对中国全要素能源效率的影响——基于省际面板数据的实证检验[J]. 经济科学, 2012, (04):49-65.
- [4] 陈诗一. 中国的绿色工业革命:基于环境全要素生产率视角的解释(1980—2008)[J]. 经济研究, 2010, (11):21-34.
- [5] 陈诗一. 中国各地区低碳经济转型进程评估[J]. 经济研究, 2012, (08):32-44.
- [6] 杜克锐,邹楚沅. 我国碳排放效率地区差异、影响因素及收敛性分析——基于随机前沿模型和面板单位根的实证研究[J]. 浙江社会科学, 2011, (11):32-43.
- [7] 何晓萍. 中国工业的节能潜力及影响因素[J]. 金融研究, 2011, (10):34-46.
- [8] 胡鞍钢,郑京海,高宇宁,张宁,许海萍. 考虑环境因素的省级技术效率排名(1999—2005)[J]. 经济学(季刊), 2008, (03):933-960.
- [9] 胡玉莹. 中国能源消耗、二氧化碳排放与经济可持续增长[J]. 当代财经, 2010, (02):29-36.
- [10] 黄德春,董宇怡,刘炳胜. 基于三阶段DEA模型中国区域能源效率分析[J]. 资源科学, 2012, 34(04):688-695.
- [11] 李国璋,霍宗杰. 中国全要素能源效率、收敛性及其影响因素——基于1995—2006年省际面板数据的实证分析[J]. 经济评论, 2009, (06):101-109.
- [12] 李国璋,王双. 中国能源强度变动的区域因素分解分析——基于LMDI分解方法[J]. 财经研究, 2008, (08):52-62.
- [13] 李静. 中国区域环境效率的差异与影响因素研究[J]. 南方经济, 2009, (12):24-35.
- [14] 李兰冰. 中国全要素能源效率评价与解构——基于“管理—环境”双重视角[J]. 中国工业经济, 2012, (06):57-69.
- [15] 李兰冰. 中国能源绩效的动态演化、地区差距与成因识别——基于一种新型全要素能源生产率变动指标[J]. 管理世界, 2015, (11):40-52.
- [16] 李涛. 资源约束下中国碳减排与经济增长的双赢绩效研究——基于非径向DEA方法RAM模型的测度[J]. 经济学(季刊), 2013, 12(02):667-692.
- [17] 林伯强,杜克锐. 我国能源生产率增长的动力何在:基于距离函数的分解[J]. 金融研究, 2013a, (09):84-96.
- [18] 林伯强,杜克锐. 要素市场扭曲对能源效率的影响[J]. 经济研究, 2013b, (09):125-136.
- [19] 林伯强,杜克锐. 理解中国能源强度的变化:一个综合的分解框架[J]. 世界经济, 2014, (04):69-87.
- [20] 林伯强,刘泓汛. 对外贸易是否有利于提高能源环境效率——以中国工业行业为例[J]. 经济研究, 2015, (09):127-141.
- [21] 刘瑞翔. 资源环境约束下中国经济效率的区域差异及动态演进[J]. 产业经济研究, 2012, (02):43-52.
- [22] 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, 37(02):23-34.
- [23] 庞瑞芝,李鹏. 中国新型工业化增长绩效的区域差异及动态演进[J]. 经济研究, 2011, (11):36-47+59.
- [24] 庞瑞芝,王亮. 服务业发展是绿色的吗?——基于服务业环境全要素效率分析[J]. 产业经济研究, 2016,

(04):18-28.

[25] 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,(06):8-16.

[26] 师博,沈坤荣. 市场分割下的中国全要素能源效率:基于超效率DEA方法的经验分析[J]. 世界经济,2008,(09):49-59.

[27] 施凤丹. 中国工业能耗变动原因分析[J]. 系统工程,2008,(04):55-60.

[28] 孙传旺,刘希颖,林静. 碳强度约束下中国全要素生产率测算与收敛性研究[J]. 金融研究,2010,(06):17-33.

[29] 孙广生,黄祎,田海峰,王凤萍. 全要素生产率、投入替代与地区间的能源效率[J]. 经济研究,2012,(09):99-112.

[30] 孙广生,杨先明,黄祎. 中国工业行业的能源效率(1987-2005)—变化趋势、节能潜力与影响因素研究[J]. 中国软科学,2011,(11):29-39.

[31] 涂正革. 环境、资源与工业增长的协调性[J]. 经济研究,2008,(02):93-105.

[32] 涂正革,刘磊珂. 考虑能源、环境因素的中国工业效率评价——基于SBM模型的省级数据分析[J]. 经济评论,2011,(02):55-65.

[33] 王兵,宫明丽. 中国城市水资源系统效率实证研究——基于网络BAM模型的分析[J]. 产经评论,2017,(08):133-148.

[34] 王兵,罗佑军. 中国区域工业生产效率、环境治理效率与综合效率实证研究——基于RAM网络DEA模型的分析[J]. 世界经济文汇,2015,(01):99-119.

[35] 王兵,唐文狮,吴延瑞,张宁. 城镇化提高中国绿色发展效率了吗?[J]. 经济评论,2014,(04):38-49.

[36] 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,(04):31-43.

[37] 汪克亮,孟祥瑞,杨宝臣,程云鹤. 中国区域经济增长的大气环境绩效研究[J]. 数量经济技术经济研究,2016,(11):59-76.

[38] 汪克亮,杨宝臣,杨力. 考虑环境效应的中国省际全要素能源效率研究[J]. 管理科学,2010,(06):100-111.

[39] 王娟,赵涛,张啸虎. 2006-2012年中国工业行业能源和环境综合效率及其影响因素[J]. 资源科学,2016,(02):311-320.

[40] 王庆一. 中国的能源效率及国际比较(上)[J]. 节能与环保,2003,(08):5-7.

[41] 王群伟,周鹏,周德群. 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J]. 中国工业经济,2010,(01):45-54.

[42] 王玉潜. 基于投入产出方法的能源消耗强度因素模型[J]. 中南财经政法大学学报,2005,(06):35-39.

[43] 魏楚,沈满洪. 能源效率及其影响因素:基于DEA的实证分析[J]. 管理世界,2007,(08):66-76.

[44] 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,(06):75-85.

[45] 杨红亮,史丹. 能效研究方法和中国各地区能源效率的比较[J]. 经济理论与经济管理,2008,(03):12-20.

[46] 杨骞. 地区行政垄断与区域能源效率—基于2000-2006年省际数据的研究[J]. 经济评论,2010,(06):70-75.

[47] 杨俊,邵汉华. 环境约束下的中国工业增长状况研究——基于Malmquist-Luenberger指数的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究,2009,(09):64-78.

[48] 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,(02):76-86.

- [49] 张伟,吴文元. 基于环境绩效的长三角都市圈全要素能源效率研究[J]. 经济研究,2011,(10):95-109.
- [50] 张伟,朱启贵. 基于LMDI的我国工业能源强度变动的因素分解—对我国1994-2007年工业部门数据的实证分析[J]. 管理评论,2012,(09):26-34+93.
- [51] 郑义,徐康宁. 中国能源强度不断下降的驱动因素—基于对数均值迪氏分解法(LMDI)的研究[J]. 经济管理,2012,(02):11-21.
- [52] 周梦玲,张宁. 中国省际能源效率的再测算[J]. 环境经济研究,2017,2(3):64-78.
- [53] 周五七,聂鸣. 中国工业碳排放效率的区域差异研究—基于非参数前沿的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究,2012,(09):58-70+161.
- [54] 周勇,李廉水. 中国能源强度变化的结构与效率因素贡献——基于AWD的实证分析[J]. 产业经济研究,2006,(04):68-74.
- [55] Aguayo, F. and K. P. Gallagher. Economic Reform, Energy, and Development: The Case of Mexican Manufacturing[J]. Energy Policy, 2005, (33): 829-837.
- [56] Ang, B. W. and K. H. Choi. Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: A Refined Divisia Index Method[J]. Energy Journal, 1997, 18(3): 59-73.
- [57] Ang, B. W. and S. Lee. Decomposition of Industrial Energy Consumption: Some Methodological and Application Issues[J]. Energy Economics, 1994, 16: 83-92.
- [58] Ang, B. W. and F. Liu. A New Energy Decomposition Method: Perfect in Decomposition and Consistent in Aggregation[J]. Energy, 2001, 26: 537-548.
- [59] Ang, B. W., F. Liu, and H. S. Chung. A Generalized Fisher Index Approach to Energy Decomposition Analysis[J]. Energy Economics, 2004, 26: 757-763.
- [60] Ang, B. W., B. Su, and H. Wang. A Spatial-temporal Decomposition Approach to Performance Assessment in Energy and Emissions[J]. Energy Economics, 2016, 60: 112-121.
- [61] Ang, B. W. and H. Wang. Index Decomposition Analysis with Multidimensional and Multilevel Energy Data [J]. Energy Economics, 2015, 51: 67-76.
- [62] Ang, B. W. and F. Zhang. A Survey of Index Decomposition Analysis in Energy and Environmental Studies [J]. Energy, 2000, 25(12): 1149-1176.
- [63] Ang, B. W. Decomposition Analysis for Policymaking in Energy: Which is the Preferred Method?[J]. Energy Policy, 2004, 32: 1131-1139.
- [64] Ang, B. W. Decomposition of Industrial Energy Consumption: The Energy Intensity Approach[J]. Energy Economics, 1994, 16: 163-174.
- [65] Battese, G. E., D. P. Rao, and C. J. O'Donnell. A Metafrontier Production Function for Estimation of Technical Efficiencies and Technology Gaps for Firms Operating under Different Technologies[J]. Journal of Productivity Analysis, 2004, 21: 91-103.
- [66] Battese, G. E. and D. P. Rao. Technology Gap, Efficiency, and a Stochastic Metafrontier Function[J]. International Journal of Business Economics, 2002, (1): 87-93.
- [67] Boyd, G. A. Estimating Plant Level Energy Efficiency with a Stochastic Frontier[J]. Energy Journal, 2008, 29 (2): 23-43.
- [68] Boyd, G. A., D. A. Hanson, and T. Sterner. Decomposition of Changes in Energy Intensity: A Comparison of the Divisia Index and other Methods[J]. Energy Econom, 1988, 10: 309-12.
- [69] Boyd, G. A. and J. D. McClelland. The Impact of Environmental Constraints on Productivity Improvement in Integrated Paper Plants[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1999, 38: 121-142.
- [70] Chen, S. The Abatement of Carbon Dioxide Intensity in China: Factors Decomposition and Policy Implica-

tions[J]. *World Economics*, 2011, 34: 1148–1167.

[71] Chiu, C. R., J. L. Liou, P. I. Wu, and C. L. Fang. Decomposition of the Environmental Inefficiency of the Meta–frontier with Undesirable Output[J]. *Energy Economics*, 2012, 34: 1392–1399.

[72] Choi, Y., N. Zhang, and P. Zhou. Efficiency and Abatement Costs of Energy–related CO₂ Emissions in China: A Slacks–based Efficiency Measure[J]. *Applied Energy*, 2012, 98: 198–208.

[73] Choi, K. H., B. W. Ang, and K. Ro. Decomposition of the Energy–intensity Index with Application for the Korean manufacturing Industry[J]. *Energy*, 1995, 20: 835–842.

[74] Chung, Y. H., R. Färe, and S. Grosskopf. Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51: 229–240.

[75] Cooper, W. W., J. T. Pastor, and F. Borrás. BAM: A Bounded Adjusted Measure of Efficiency for Use with Bounded Additive Models[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2011, 35(2): 85–94.

[76] Du, K., B. Q. Lin, and C. Xie. Exploring Change in China’s Carbon Intensity: A Decomposition Approach [J]. *Sustainability*, 2017, 9(2): 296.

[77] Fan, Y., L. C. Liu, G. Wu, H. T. Tsai, and Y. M. Wei. Changes in Carbon Intensity in China: Empirical Findings from 1980–2003[J]. *Ecological Economics*, 2007, 62: 683–691.

[78] Färe, R., S. Grosskopf, C. K. Lovell, and C. Pasurka. Multilateral Productivity Comparisons when Some Outputs are Undesirable: A Nonparametric Approach[J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1989, 71: 90–98.

[79] Färe, R. and S. Grosskopf. Network DEA[J]. *Socio–Economic Planning Sciences*, 2000, 34: 35–49.

[80] Färe, R., S. Grosskopf, M. Norris, and Z. Zhang. Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries[J]. *American Economic Review*, 1994, 87: 66–83.

[81] Färe, R., S. Grosskopf, D. W. Noh, and W. Weber. Characteristics of a Polluting Technology: Theory and Practice[J]. *Journal of Econometrics*, 2005, 126(2): 469–492.

[82] Färe, R., S. Grosskopf, and J. C. A. Pasurka. Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions[J]. *Energy*, 2007, 32: 1055–66.

[83] Färe, R. and S. Grosskopf. Directional Distance Functions and Slacks–based Measures of Efficiency[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 200: 320–2.

[84] Fukuyama, H. and W. L. Weber. A Directional Slacks–based Measure of Technical Inefficiency[J]. *Socio–Economic Planning Sciences*, 2009, 43: 274–287.

[85] Greening, L. A., W. B. Davis, L. Schipper, and M. Khrushch. Comparison of Six Decomposition Methods: Application to Aggregate Energy Intensity for Manufacturing in 10 OECD Countries[J]. *Energy Economics*, 1997, 19: 375–390.

[86] Greening, L. A., W. B. Davis, and L. Schipper. Decomposition of Aggregate Carbon Intensity for the Manufacturing Sector: Comparison of Declining Trends from 10 OECD Countries for the Period 1971–1991[J]. *Energy Economics*, 1998, 20: 43–65.

[87] Guo, X. D., L. Zhu, Y. Fan, and B. C. Xie. Evaluation of Potential Reductions in Carbon Emissions in Chinese Provinces Based on Environmental DEA[J]. *Energy Policy*, 2011, 39: 2352–2360.

[88] Hailu, A. and T. S. Veeman. Non–parametric Productivity Analysis with Undesirable Outputs: An Application to the Canadian Pulp and Paper Industry[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2001, 83: 605–616.

[89] Hankinson, G. A. and J. M. W. Rhys. Electricity Consumption, Electricity Intensity and Industrial Structure [J]. *Energy Economics*, 1983, 5: 146–152.

[90] Haynes, K. E., S. Ratick, and J. Cummings–Saxton. Pollution Prevention Frontiers: A Data Envelopment

Simulation[J]. *Environmental Program Evaluation: A Primer*, 1998: 270–290.

[91] Hua, Z. and Y. Bian. Performance Measurement for Network DEA with Undesirable Factors[J]. *International Journal of Management and Decision Making*, 2008, 9: 141–153.

[92] Hoekstra, R. and J. C. Van den Bergh. Comparing Structural Decomposition Analysis and Index[J]. *Energy Economics*, 2003, 25: 39–64.

[93] Hu, J. L. and S. C. Wang. Total-factor Energy Efficiency of Regions in China[J]. *Energy Policy*, 2006, 34: 3206–3217.

[94] Hua, Z., Y. Bian, and L. Liang. Eco-efficiency Analysis of Paper Mills along the Huai River: An Extended DEA Approach[J]. *Omega*, 2007, 35: 578–587.

[95] Kaya, Y. and K. Yokobori. *Environment, Energy and Economy: Strategies for Sustainability*[M]. Washington, DC: Aspen Inst, 1998.

[96] Lee, J. D., J. B. Park, and T. Y. Kim. Estimation of the Shadow Prices of Pollutants with Production/Environment Inefficiency Taken into Account: A Nonparametric Directional Distance Function Approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64: 365–375.

[97] Liao, H., C. Wang, Z. Zhu, and X. Ma. Structural Decomposition Analysis on Energy Intensity Changes at Regional Level[J]. *Transactions of Tianjin University*, 2013, 19: 287–292.

[98] Lin, B. and K. Du. Measuring Energy Efficiency under Heterogeneous Technologies Using a Latent Class Stochastic Frontier Approach: An Application to Chinese Energy Economy[J]. *Energy*, 2014, 76: 884–890.

[99] Lin, B. and K. Du. Technology Gap and China's Regional Energy Efficiency: A Parametric Metafrontier Approach[J]. *Energy Economics*, 2013, 40: 529–536.

[100] Lin, B. and K. Du. Modeling the Dynamics of Carbon Emission Performance in China: A Parametric Malmquist Index Approach[J]. *Energy Economics*, 2015, 49: 550–557.

[101] Liu, X., B. W. Ang, and H. Ong. The Application of the Divisia Index to the Decomposition of Changes in Industrial Energy Consumption[J]. *Energy Journal*, 1992, 13: 161–178.

[102] Mielnik, O. and J. Goldemberg. The Evolution of the Carbonization Index in Developing Countries[J]. *Energy Policy*, 1999, 27(5): 307–308.

[103] Murty, M. N., S. Kumar, and M. Paul. Environmental Regulation, Productive Efficiency and Cost of Pollution Abatement: A Case Study of the Sugar Industry in India[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 79(1): 1–9.

[104] O'Donnell, C. J., D. P. Rao, and G. E. Battese. Metafrontier Frameworks for the Study of Firm-level Efficiencies and Technology Ratios[J]. *Empirical Economics*, 2008, 34: 231–255.

[105] Oggioni, G., R. Riccardi, and R. Toninelli. Eco-efficiency of the World Cement Industry: A Data Envelopment Analysis[J]. *Energy Policy*, 2011, 39: 2842–2854.

[106] Oh, D. and J. Lee. A Metafrontier Approach for Measuring Malmquist Productivity Index[J]. *Empirical Economics*, 2010, 38: 47–64.

[107] Park, H. and J. Lim. Valuation of Marginal CO₂ Abatement Options for Electric Power Plants in Korea[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(5): 1834–1841.

[108] Pasurka, C. A. Decomposing Electric Power Plant Emissions within a Joint Production Framework[J]. *Energy Economics*, 2006, 28: 26–43.

[109] Reddy, B. S. and B. K. Ray. Understanding Industrial Energy Use: Physical Energy Intensity Changes in Indian Manufacturing Sector[J]. *Energy Policy*, 2011, 39: 7234–7243.

[110] Riccardi, R., G. Oggioni, and R. Toninelli. Efficiency Analysis of World Cement Industry in Presence of

Undesirable Output: Application of Data Envelopment Analysis and Directional Distance Function[J]. *Energy Policy*, 2012, 44: 140–152.

[111] Reitler, W., M. Rudolph, and H. Schaefer. Analysis of the Factors Influencing Energy Consumption in Industry: A Revised Method[J]. *Energy Economics*, 1987, 9: 145–148.

[112] Rose, A. and S. Casler. Input–output Structural Decomposition Analysis: A Critical Appraisal[J]. *Economic Systems Research*, 1996, 8: 33–62.

[113] Song, M., Q. An, W. Zhang, Z. Wang, and J. Wu. Environmental Efficiency Evaluation Based on Data Envelopment Analysis: A Review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16: 4465–4469.

[114] Su, B. and B. W. Ang. Structural Decomposition Analysis Applied to Energy and Emissions: Some Methodological Developments[J]. *Energy Economics*, 2012, 34: 177–88.

[115] Scheel, H. Undesirable Outputs in Efficiency Valuations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 132: 400–10.

[116] Seiford, L. M. and J. Zhu. Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 142: 16–20.

[117] Simar, L. Detecting Outliers in Frontier Models: A Simple Approach[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2003, 20: 391–424.

[118] Sueyoshi, T., M. Goto, and T. Ueno. Performance Analysis of US Coal–fired Power Plants by Measuring three DEA Efficiencies[J]. *Energy Policy*, 2010, 38: 1675–1688.

[119] Sun, J. W. The Decrease of CO₂ Emission Intensity is Decarbonization at National and Global Levels[J]. *Energy Policy*, 2005, 33: 975–978.

[120] Tone, K. Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks–Based Measure (SBM) Approach[C]. Tokyo: National Graduate Institute for Policy Studies, 2004.

[121] Tone, K. and M. Tsutsui. Network DEA: A slacks–based Measure Approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 197: 243–252.

[122] Vardanyan, M. and D. W. Noh. Approximating Pollution Abatement Costs Via Alternative Specifications of a Multi–Output Production Technology: A Case of the Us Electric Utility Industry[J]. *Journal of Environmental Management*. 2006, 80(2): 177–190.

[123] Wang, C. Changing Energy Intensity of Economies in the World and Its Decomposition[J]. *Energy Economics*, 2013, 40: 637–644.

[124] Wang, C. Decomposing Energy Productivity Change: A Distance Function Approach[J]. *Energy*, 2007, 32(8): 1326–1333.

[125] Wang, C. Sources of Energy Productivity Growth and its Distribution Dynamics in China[J]. *Resource and Energy Economics*, 2011, 33(1): 279–292.

[126] Wang, H., P. Zhou, and D. Q. Zhou. Scenario–based Energy Efficiency and Productivity in China: A Non–radial Directional Distance Function Analysis[J]. *Energy Economics*, 2013a, 40: 795–803.

[127] Wang, K., Y. M. Wei, and X. Zhang. Energy and Emissions Efficiency Patterns of Chinese Regions: A Multi–directional Efficiency Analysis[J]. *Applied Energy*, 2013b, 104: 105–116.

[128] Wang, K., B. Lu, and Y. M. Wei. China’s Regional Energy and Environmental Efficiency: A Range–Adjusted Measure Based Analysis[J]. *Applied Energy*, 2013c, 112: 1403–1415.

[129] Wang, Q., Z. Zhao, P. Zhou, and D. Zhou. Energy Efficiency and Production Technology Heterogeneity in China: A Meta–frontier DEA Approach[J]. *Economic Modeling*, 2013d, 35: 283–289.

[130] Wang, Q., P. Zhou, and D. Zhou. Efficiency Measurement with Carbon Dioxide Emissions: The Case of

China[J]. Applied Energy, 2012, 90: 161–166.

[131] Wu, F., L. Fan, P. Zhou, and D. Zhou. Industrial Energy Efficiency with CO₂ Emissions in China: A Non-parametric Analysis[J]. Energy Policy, 2012, 49: 164–72.

[132] Yang, H. and M. Pollitt. 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: 4440–4444.

[133] Zaim, O. Measuring Environmental Performance of State Manufacturing through Changes in Pollution Intensities: A DEA Framework[J]. Ecological Economics, 2004, 48(1): 37–47

[134] Zaim, O. and F. Taskin. Environmental Efficiency in Carbon Dioxide Emissions in the OECD: A Non-parametric Approach[J]. Journal of Environmental Management, 2000, 58: 95–107.

[135] Zhang, N. and Y. Choi. A Comparative Study of Dynamic Changes in CO₂ Emission Performance of Fossil Fuel Power Plants in China and Korea[J]. Energy Policy, 2013a, 62: 324–332.

[136] Zhang, N. and Y. Choi. Environmental Energy Efficiency of China's Regional Economies: A Non-oriented Slacks-based Measure Analysis[J]. The Social Science Journal, 2013b, 50: 225–234.

[137] Zhang, N. and Y. Choi. Total-factor CO₂ Emission Performance of Fossil Fuel Power Plants in China: A Metafrontier Non-radial Malmquist Index Analysis[J]. Energy Economics, 2013c, 40: 549–559.

[138] Zhang, N., P. Zhou, and Y. Choi. Energy Efficiency, CO₂ Emission Performance and Technology Gaps in Fossil Fuel Electricity Generation in Korea: A Meta-frontier Non-radial Directional Distance Function Analysis[J]. Energy Policy, 2013d, 56: 653–662.

[139] Zhang, N., F. Kong, Y. Choi, and P. Zhou. The Effect of Size-control Policy on Unified Energy and Carbon Efficiency for Chinese Fossil Fuel Power Plants[J]. Energy Policy, 2014, 70: 193–200.

[140] Zhang, N., F. Kong, and Y. Yu. Measuring Ecological Total-factor Energy Efficiency Incorporating Regional Heterogeneities in China[J]. Ecological Indicators, 2015, 51: 165–172.

[141] Zhang, Z. Why did the Energy Intensity Fall in China's Industrial Sector in the 1990s? The Relative Importance of Structural Change and Intensity Change[J]. Energy Economics, 2003, 25: 625–638.

[142] Zhou, P., B. W. Ang, and J. Han. Total Factor Carbon Emission Performance: A Malmquist Index Analysis[J]. Energy Economics, 2010, 32: 194–201.

[143] Zhou, P., B. W. Ang, and K. Poh. A Survey of Data Envelopment Analysis in Energy and Environmental Studies[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189: 1–18.

[144] Zhou, P., B. W. Ang, and K. Poh. Slacks-based Efficiency Measures for Modeling Environmental Performance[J]. Ecological Economics, 2006, 60: 111–118.

[145] Zhou, P. and B. W. Ang. Linear Programming Models for Measuring Economy-wide Energy Efficiency Performance[J]. Energy Policy, 2008a, 36: 2911–2916.

[146] Zhou, P. and B. W. Ang. Decomposition of Aggregate CO₂ Emissions: A Production-theoretical approach[J]. Energy Economics, 2008b, 30(3): 1054–1067.

[147] Zhou, P., B. W. Ang, and D. Zhou. Measuring Economy-wide Energy Efficiency Performance: A Parametric Frontier Approach[J]. Applied Energy, 2012a, 90: 196–200.

[148] Zhou, P., B. W. Ang, and H. Wang. Energy and CO₂ Emission Performance in Electricity Generation: A Non-radial Directional Distance Function Approach[J]. European Journal of Operational Research, 2012b, 221: 625–635.

Progress of Evaluation Methods on Energy and Environmental Performance

Du Kerui^a, Yan Zheming^b and Yang Zhiming^c

(a: The Center for Economic Research Shandong University; b: International Business School of Shaanxi Normal University; c: University of Science & Technology Beijing)

Abstract: Evaluating energy efficiency or environmental efficiency of different countries or regions not only helps us understand the difference in energy and environmental performance between them, but also provides a favorable reference for improving energy efficiency and environmental efficiency. Firstly, we clarify the connotations of energy efficiency, environmental efficiency, and unified efficiency, combs the development of energy and environmental performance evaluation methods, and also summarize empirical studies in China. Secondly, we systematically compare the advantages and disadvantages of different performance evaluation methods. Finally, we explore further research directions in this field. Through literature classification sorting, this paper found the research direction in the future, including modeling of heterogeneous technologies, accounting for statistical noises or uncertainty, exploring source of energy or environmental inefficiency.

Keywords: Energy Efficiency; Environmental Efficiency; DEA; SFA

JEL Classification: Q00

(责任编辑:朱静静)

(上接第 112 页)

that the emission level of national(regional) pollutants and environmental protection input have the greatest influence on the implementation of environmental auditing, the impact of social informatization is medium, the social and economic development level is lowest, and there is no obvious dependence between the popularization level of higher education and the implementation of environmental auditing. The conclusion of this paper proves that the environmental auditing implementation has significant spatial spillover effect, which provides scientific basis for the government to formulate the environmental auditing development strategy. The government should establish an effective communication mechanism in regional environmental governance, coordinate the interests of all parties, and maximize the effectiveness of environmental auditing and other governance tools. At the same time, we should strengthen joint auditing between administrative regions to jointly resolve the problem of environmental pollution across regions.

Keywords: Environmental Governance; Environmental Auditing; Spatial Spillover Effect

JEL Classification: Q56

(责任编辑:卢玲)