

# 基于多维效应的能源效率评估理论 ——以非参数 DEA 方法为例

蔡海霞

(中原工学院 系统与工业工程技术研究中心, 郑州 450007)

**摘要:**基于多维效应的能源效率评估使人们在达到经济增长目的的同时兼顾能源安全、竞争力、环境、社会和技术可持续性。论述能源效率内涵演化发展的路径,在此基础上将能源效率的内涵扩展至多维效应。以非参数 DEA (Data Envelopment Analysis)方法为例,研究基于多维效应的能源效率评估方法的演化与发展趋势。研究结果显示:采用 DEA 方法对基于多维效应的能源效率进行评估的发展趋势主要有以下3点:能源效率的内涵不断延伸;DEA 模型向非导向非径向模型转变;能源效率评估的研究维度不断扩展。对多维效应的能源效率综合指标评价体系和评价方法还需做深入研究。

**关键词:**多维效应;能源效率评估;数据包络分析

中图分类号:F062.6

文献标识码:A

文章编号:1009-3370(2016)04-0009-10

随着中国能源供需矛盾的日益突出,有关能源浪费和能源效率问题越来越受到人们的关注。中国是能源消费大国,也是 CO<sub>2</sub> 和其他温室气体的排放大国,其能源与环境政策对国际能源市场和全球气候变化的影响举足轻重。受国内人均能源资源储量的限制,中国未来的能源供需矛盾日益突出,由化石能源消费所引致的环境问题也可能继续恶化。尽管如此,中国能源的利用效率与其他国家相比仍然存在较大差距(魏楚、沈满洪,2007)<sup>[1]</sup>。尽管在《京都议定书》中,中国作为发展中国家并不承担强制性的碳减排义务,但因为环境问题已经成为社会各界和政府都十分重视和关注的问题,中国也面临着节能减排和减缓气候变化两方面的巨大压力。2014年9月,国务院批复《国家应对气候变化规划(2014—2020年)》,明确到2020年,实现单位国内生产总值 CO<sub>2</sub> 排放比2005年下降40%~45%,非化石能源占一次能源消费的比重达到15%左右。2014年11月,《中美气候变化联合声明》发布,中美两国元首宣布了两国各自2020年后应对气候变化的行动,中国计划2030年左右 CO<sub>2</sub> 排放达到峰值且将努力早日达峰,并计划到2030年非化石能源占一次能源消费比重提高到20%左右。

作为世界上最大的发展中国家,中国面临着严

峻的能源和环境问题,改善能源效率是应对能源和环境问题的重要且有效途径。要实现这一目标需要各个省区乃至各个微观经济体的协同努力。为了准确把握不同地区和部门的能源效率,有必要对中国整体及各省区的能源效率进行科学、系统的评估。这不仅可以反映出中国不同区域间能源效率的差别,而且能够为中国能源效率的提高提供一个客观的参照标准,具有很强的现实指导意义。能源效率在很多国家和地区已经成为其能源战略的一个重要组成部分,因此能源效率评估在很多国家公共政策的制定中意义重大(Ang,2006)<sup>[2]</sup>。能源效率的提高被认为是增强能源安全、改善工业竞争力、缓解气候变化最经济有效的途径(Ang等,2010)<sup>[3]</sup>。

长期以来人们关注的焦点是经济的增长、生产率的提高,主要是强调经济产出。然而,随着能源环境问题的日益严重,人们开始关注除经济增长之外的其他问题,如环境的改善、民生福祉的提高、幸福感的增加等,GDP不再是人们追求的唯一目标。人们关注目标的改变对能源效率的评估提出了新的要求,能源消费不仅仅能够对经济增长产生影响,还对环境、社会、人口、技术等多方面产生多维效应,因而应该在能源效率评估中充分考虑能源消费的多维效应。基于多维效应的能源效率评估将会对

收稿日期:2015-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目“基于云模型的环境经济系统动力学仿真与预警管理研究”(71173248);河南省高等学校重点科研项目“十三五时期河南能源产业发展的制约因素及对策研究”(16A630040)

作者简介:蔡海霞(1983—),女,管理学博士,中原工学院经济与管理学院讲师,E-mail:hx\_cai@126.com

能源效率的评估产生深远的影响。这种思维范式的转变使人们在达到经济增长目的的同时兼顾能源安全、竞争力、环境、社会和技术的可持续性。

## 一、能源效率内涵的演化发展——多维效应

对能源效率的概念和内涵进行界定是研究能源效率问题时首先要解决的重要问题。Patterson(1996)<sup>[4]377</sup>指出,研究者基于其研究目的和重点对能源效率概念进行不同界定,继而选择不同的指标来测度能源效率水平,会得到不同甚至相矛盾的研究结论。总体来讲,能源效率包括单要素能源效率和全要素能源效率两类(Hu和Wang,2006)<sup>[5]</sup>。所谓单要素能源效率,是指一个经济体的有效产出和能源投入的比值;而全要素能源效率,则是考虑了各种投入要素相互替代和影响的能源效率。

### (一)单要素能源效率

能源效率的传统定义是由世界能源委员会在1995年出版的一份报告中提出的,即为减少提供同等能源服务的能源投入。Patterson(1996)<sup>[4]383</sup>基于“帕累托效率”对能源效率进一步定义为:用较少的能源生产同样数量的服务或者有用的产出。而在此之前,研究者往往将能源效率与节能(Energy Conservation)的概念混淆。魏一鸣等(2010)<sup>[6]</sup>针对这个问题,总结了能源效率与节能之间的区别,尽管与节能在概念上基本一致,但能源效率的概念更加宽泛。能源效率侧重于能源服务,节约能源侧重于减少能源消耗;能源效率侧重于能源的经济含义或者社会效益。Bosseboeuf等(1997)<sup>[7]</sup>从经济和技术经济两个角度分别定义能源效率,经济上的能源效率是指用相同或者更少的能源获得更多产出或更好的生活质量,而技术经济上的能源效率是指由于技术进步、生活方式的改变、管理的改善等导致特定能源使用的减少。

### (二)全要素能源效率

全要素能源效率概念来源于微观经济学的全要素生产理论,其主要思想是:社会生产的各投入要素在一定程度上可以相互替代,决定最终产出的并非是某单一生产要素,而是各种生产要素的组合。

无论是单要素能源效率还是全要素能源效率,都有一个共同的特点,它们认为劳动、资本和能源等生产要素的投入最终所得到的产出是单一的,一般表现为GDP的增长。然而,生产要素尤其是能源的投入除了对GDP有所贡献之外,还将对社会、经济、环境的各个方面产生不可忽视的影响。如能源

消费会导致碳排放的增加,加剧环境污染;能源消费能提高社会福利水平,减少能源贫困,这一点对于发展中国家尤其重要。因此,对于能源效率的测算应该全面考虑多维产出效应,忽视这一点将会导致能源效率的错误估计。这一点已经引起了国内外学者的重视,对于“非期望产出”的研究正是基于这样的考虑。Scheel(2001)<sup>[8]</sup>认为,实际生产过程不可避免地会产生非期望产出如CO<sub>2</sub>,因此很有必要在传统模型中考虑非期望产出。基于此,Zhou和Ang(2008)<sup>[9]2911</sup>第一次在能源效率的评价中考虑非期望产出,并开发出一些基于环境DEA技术的DEA模型用于评价能源效率。此后,越来越多的学者在能源效率的研究中同时考虑期望和非期望产出。王兵(2011)<sup>[10]</sup>利用方向性距离函数方法将能源、资本与劳动力作为投入,以GDP为合意产出,以CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>为非合意产出,对中国省际能源效率进行了实证研究。沈能、王群伟(2013)<sup>[11]</sup>将污染排放指数作为非合意性产出测度中国区域能源效率。Wu等(2012)<sup>[12]</sup>在DEA模型框架下同时考虑了期望产出和非期望产出,并测算了中国不同省份的工业能源效率。Nicholas Apergis等(2015)<sup>[13]</sup>采用基于松弛变量的非期望产出DEA模型,测算了OECD国家的能源效率。宫大鹏等(2015)<sup>[14]</sup>运用包含非期望产出的超效率SBM模型来评价中国各省的工业化石能源效率。

然而,正如之前所提到的,非期望产出仅仅只是生产过程中的产出之一,还有很多期望产出,如社会福利的增加等在能源效率的测算中一直被忽略。有些能源活动,尽管多消耗了能源,但为人们提供了更多、更有用的服务,也有可能改善了能源效率。在能源效率的测度中考虑多维效应还有助于人们深化对于回弹效应的理解。能源效率的提高可能会降低能源成本,从而使人们对能源服务的需求增加,对能源服务消费的增加量有可能会大于能源效率提高所节约的能源量,从而产生回弹效应。由于回弹效应的存在,能源效率政策的有效性受到严重质疑。回弹效应的存在或许会阻碍预定节能目标的实现,但与此同时,“回弹”的能源消费很可能对其他社会方面有正面的影响。美国、新西兰相关研究表明,尽管能源节约十分有限,但能源效率的提高增强了人们的健康和福祉。在这种背景下,回弹效应可以看成是达成更广泛社会目标的代价,反映出达成社会发展目标能源效率政策的最小成本。

### (三)基于多维效应的能源效率内涵扩展

一些学者对能源效率内涵的扩展和探索做出

了贡献。这主要体现在对能源效率的“非能源效应(Non-Energy Benefits)”和附加效应(Additional Benefits)的研究上。Pye和McKane(2000)<sup>[15]</sup>认为,节能并不是工业决策制定者的最重要的驱动力,因此应该把节能摆在更加正确的位置,它只是能源效率项目众多目标和效应中的一部分,而不是唯一的中心目标。他们还认为,将能源效率项目的全部效益进行量化测算有助于更好地理解能源效率政策。Skumatz(2005)<sup>[16]</sup>一直致力于研究工业能源效率政策的非能源(Non-energy)影响,包括正面和负面的影响。在他的研究中,列出了20种非能源效应,如生活成本的节约、生产率的提高、生活舒适性的提高、照明质量的提高等等。Mills和Rosenfeld(1996)<sup>[17]</sup>研究了建筑物能源效率提高的附加效应,并构建了一个包含能源效率多维效应的理论框架,有助于人们理解除了节能之外的其他效应。他们认为,在能源效率的众多效应中,国家层面效应如国家竞争力、能源安全、就业岗位的增加和环境保护是最重要的。他们还进一步指出,能源效率技术以较低的成本提供等同的服务,而非能源效应增加了能源效率技术的价值。Worrell等(2003)<sup>[18]</sup>指出,能源效率的多维效应在大多数研究中被忽视,并在他的研究中将生产力效应(productivity benefits)着重考虑进去,将多维效应分为5类:减少浪费、较少排放、运作成本的降低、产品质量的提高和工作环境的改善。

以上大多数研究或多或少地指出了能源效率提高所带来的多维效应,然而,这些研究只是零散地提出一些效应,缺乏系统性的研究。Fleiter等(2012)<sup>[9]</sup>首次给出了选择能源效率关键多维效应的几个标准:相关性(relevance)、适用性(applicability)、特征性(specificity)、独立性(independence)和显著性(distinctness)。Andrea Trianni等(2014)<sup>[20]</sup>以Fleiter等提出来的遴选标准为依据,将能源效率的多维效应归纳为以下6种类型:经济效应、能源效应、环境效应、生产相关效应、实施相关效应和非直接效应。他们认为,现有研究大多只关注能源效率提高所带来的节能和碳排放的减少,而很少关注能源效率提高所带来的其他社会经济效应,而正确理解能源效率的内涵对持续性节能和减少碳排放至关重要。同时,他还指出,忽略能源效率提高所带来的其他社会经济效应将会低估能源效率。

廖华、魏一鸣(2010)<sup>[21]</sup>认为,能源效率不是一个孤立的度量结果,它与经济、社会、环境、技术等密切相关。能源效率的含义不仅在于它的工程技术或热力学方面的效率含义,更在于它的经济、社会和

环境系统可持续发展含义。有时简单地把“减少能源消耗”或“降低单位产出能耗”作为追求目标,可能在长远系统或全局角度造成经济社会其他方面的损失。由于对能源效率内涵的理解和认识不一致,导致了“回弹效应”“杰文斯悖论”等一系列讨论和争议。

国际能源署(International Energy Agency, IEA)近期也关注到了能源效率的多维效应。IEA的Lisa Ryan和Nina Campbell(2014)<sup>[22]</sup>认为,改善能源效率可以给经济和社会带来一系列的效应。然而,人们在评估能源效率政策时仅仅关注其所带来的能源节约,因而导致能源效率普遍被低估。他们构建了一个包含4个层次的能源效率多维效应分析框架:(1)微观个体层次(健康和福利的增加、减少能源贫困、可支配收入的增加);(2)产业层次(产业竞争力提高、资产价值增加等);(3)国家层次(提高就业、较少公共能源开支、增强能源安全等);(4)国际层次(减少碳排放、降低能源价格等)。这个分析框架是目前对能源效率的多维效应总结最全面、分析最深入的研究。然而,由于能源效率的多维效应中有很多是分散的、非直接的、很难量化的或者很难单独归结为能源效率的功劳,因此大多数的研究只是局限在浅层次的定性分析,缺乏对于能源效率多维效应的量化和度量研究。考虑到能源效率多维效应的重要程度、可量化程度和数据的可获得性,IEA认为,在众多的效应维度中,最具有应用潜力的维度包括以下5种:(1)公共健康与民生福祉效应:人们观察到很多疾病,特别是呼吸类疾病、儿童哮喘跟室内温度过低、湿度太大有很强的相关性,因此建筑物能效的提高所节约的能源可以提高室内温度,进而改善健康,该效应通过减少健康支出进而影响到宏观经济运行。(2)工业竞争力效应:人们在追求能源效率的过程中会自然而然地使工业生产率和竞争力得到提高。如Boyd和Pang(2000)<sup>[23]</sup><sup>[28]</sup>提供的统计数据表明,能源效率和工业生产率之间呈正比例变化关系。(3)环境效应:能源效率的提高能有效减少碳排放和其他的废弃物。(4)能源贫困缓解效应:一方面,能源效率提高使贫穷家庭特别是发展中国家的贫穷家庭能源支出减少,使这些贫穷家庭有能力支付更多的能源产品或者服务;另一方面,供给侧能源效率的提高使发展中国家为其居民提供更多的电力,进而缓解能源贫困。(5)宏观经济效应:能源效率提高能引起一系列的宏观经济效应,包括就业率的提高、GDP的增长、居民可支配收入增加等。

IEA 提出,传统观点认为“回弹效应”的存在严重影响到了能源效率提高的有效性(Steve Sorrell, 2007, 2009; Harry Sounders, 2013)<sup>[24-26]</sup>。能源效率的提高可能会降低能源成本,从而使人们对能源服务的需求增加,对能源服务消费的增加量有可能会大于能源效率提高所节约的能源量,从而产生回弹效应。但如果考虑能源效率的多维效应,则增加的能源消费很可能有利于其他经济社会目标的实现。回弹效应一向被认为是负面的影响,但如果从更加宏观、更加系统的视角来看,回弹效应只是能源节约潜能与社会福利增加之间的平衡。IEA 还提出,越来越多的人意识到,能源效率已经从“隐藏的能源”转变成“第一能源”,因为 IEA 成员国 2010 年所节约的能源量已经超过了任何一种能源种类,包括石油、天然气、煤炭等的需求,而且能源效率是一种清洁的能源。

基于此,将能源效率的内涵扩展至多维效应,不仅有助于节能和碳减排目标的实现,还有助于人们更好地理解回弹效应的影响和机制。同时,能源效率内涵的扩展将会对能源效率的评估产生深远的影响。这种思维范式的转变使人们在达到经济增长目的的同时兼顾能源安全、竞争力和环境的可持续性。

## 二、基于多维效应能源效率评估方法的演化与发展趋势

早期对于能源效率的测度多采用单要素能源效率指标。随着研究的深入,研究者发现单要素能源效率指标测度较为方便可行,但不适用于刻画现实复杂世界的能源效率问题,影响研究的有效性和准确性(史丹,朱彤,2013)<sup>[27]</sup>。为了克服单要素能源效率指标的缺陷,基于现代生产效率研究方法的全要素能源效率的概念被引入,并产生了大量基于多元分析和计量方法的研究文献。全要素能源效率指标,是在新古典生产理论框架下,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(林伯强,杜克锐,2013)<sup>[28]</sup>。前沿生产边界的获取方法主要有两种:一种是在无法得知参数函数具体形式的情况下,根据样本点的投

入与产出水平的观测值构建一个非参数的线段曲面,常用的是 DEA(Data Envelopment Analysis)方法;而另一种是在已知参数函数条件下通过参数函数获得前沿生产边界,常用的是 SFA(Stochastic Frontier Analysis)方法。

DEA 是一种非参数方法,与 SFA 相比,其最大的优势在于不用对生产函数及参数做任何假设,测算结果具有较好的稳健性。更由于 SFA 方法在处理多产出的情况时不如 DEA 方法方便,需要将多产出合并成一个综合产出,如果需要对多个期望和非期望产出进行处理,则采用 DEA 方法对效率进行测算具有较大的优势。近年来,DEA 方法在测算能源效率和环境效率方面被广泛应用,DEA 方法已经成为全要素能源效率研究的主流方法。

应用非参数效率模型研究能源效率始于 Boyd 和 Pang(2000)<sup>[23]</sup><sup>[29]</sup>和 Ramanathan(2000)<sup>[29]</sup>。随后, Hu 和 Wang(2006)<sup>[30]</sup>与 Hu 和 Kao(2007)<sup>[31]</sup>基于 DEA 技术提出了用于测度国家/地区能源效率的全要素能效指数, Mukherjee(2008)<sup>[32]</sup>运用 DEA 方法测算了美国和印度制造业的全要素能源效率。Zhang 等(2011)<sup>[33]</sup>采用 DEA 窗口分析方法对发展中国家的全要素能源效率动态发展趋势进行了研究。Georgia Makridou 等(2015)<sup>[34]</sup>采用 DEA 方法对 2000—2009 年期间 23 个欧盟国家的高能耗行业的能源效率进行了研究。其他学者如 Zhou 等(2007)<sup>[35]</sup>、Picazo-Tadeo 和 Prior(2009)<sup>[36]</sup>、Mukherjee(2010)<sup>[37]</sup>、Lozano 和 Gutierrez(2011)<sup>[38]</sup>、Sueyoshi 和 Goto(2012)<sup>[39]</sup>等也采用 DEA 方法测算能源效率。Roberto Gomez-Calvet 等(2014)<sup>[40]</sup>在 SBM-DEA 模型中考虑了非期望产出 CO<sub>2</sub>, 测算欧盟 25 个成员国的发电效率,提出将方向距离函数和 SBM 方法联合起来应用。Yücel Özkara, Mehmet Atak(2015)<sup>[41]</sup>采用非径向 DEA 模型,考虑非期望产出对 2003—2012 年土耳其的能源效率进行了测算。

总体上来说,采用 DEA 方法对基于多维效应的能源效率进行评估的发展趋势主要有以下 3 个方面:

### (一)能源效率的内涵不断延伸

能源效率的内涵逐渐延伸,从单要素能源效率到基于传统 DEA 模型的全要素能源效率,再到考虑非期望产出 DEA 模型的生态全要素能源效率。

最初的研究成果主要考虑以资本、劳动力、能源为投入要素,以 GDP 为产出,利用 DEA 模型与传统的生产率指数(Malmquist)测度全要素能源效率,

而没有考虑非期望产出如CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>对能源效率的影响(魏楚,沈满洪,2007;Hu和Wang,2006;王群伟,周鹏,周德群,2010)<sup>[42-44]</sup>。

后来,Zhou和Ang(2008)<sup>[9]2912</sup>提出,在测算能源效率时很有必要考虑非期望产出如碳排放的影响,忽略非期望产出的影响将会导致能源效率估计值出现偏差。他们第一次在能源效率的评价中考虑非期望产出,并开发出了一些基于环境DEA技术的DEA模型用于评价能源效率。此后,大量的实证研究将碳排放等非期望产出考虑到能源效率模型框架中。Li和Hu(2012)<sup>[45]</sup>提出了包含非期望产出的生态全要素能源效率(Ecological Total Factor Energy Efficiency,ETFEE)指数,并运用ETFEE指标评价了2005—2009年中国省际能源效率。郭凯、慈兆程(2013)<sup>[46]</sup>运用基于非期望产出的SBM模型计算出2000—2011年中国29个省份及东、中、西部区域的煤炭、石油和燃气3种主要能源的生态全要素能源效率(ETFEE)。这类文献大多基于方向距离函数及Malmquist-Luenberger(ML)生产率指数测度全要素能源效率,这种测量方法综合考虑了产出增加和污染减少,并将ML指数分解为科技进步的变化及技术效率的变化。王婷婷和朱建平(2015)<sup>[47]</sup>构建了包含非期望产出的DEA生态全要素能源效率模型,并应用该模型对中国省际电力行业能源消耗与环境协调发展程度展开实证分析与讨论。

单要素能源效率假定能源是产出的唯一投入要素而忽略了其他生产要素的贡献和替代效应,从而高估了能源效率。考虑单一产出,而忽略期望和非期望产出的全要素能源效率测度则有可能高估或者低估能源效率。如果忽略环境污染、碳排放等非期望产出,则会高估能源效率,国内外相关研究已经证实了这一点。王珊珊和屈小娥(2011)<sup>[48]</sup>在比较考虑与不考虑环境效应时的中国制造业行业全要素能源效率水平的差别后发现,考虑环境效应时的能源效率水平远远低于后者。若忽略其他期望产出则明显会低估能源效率。Mandal(2010)<sup>[49]</sup>采用DEA方法测算了印度水泥工业的能源效率,得出结论显示,忽略非期望产出会导致能源效率估计值的偏差。

## (二)DEA模型向非导向非径向模型转变

传统DEA模型主要包括CRS(Constant Returns to Scale)和VRS(Variable Returns to Scale)模型,这两种模型都属于导向径向DEA模型。径向(Radial)的含义是指无效率的测量方式为投入能够等比例减少的程度,或产出能够等比例增加的程度(成刚,

2014)<sup>[50]</sup>。按照对效率的测量方式,DEA模型可以分为投入导向(Input-Oriented)、产出导向(Output-Oriented)和非导向(Non-Oriented)。投入导向模型是从投入的角度对被评价DMU(Decision Making Unit)无效率程度进行测量,关注的是在不减少产出的条件下,要达到技术有效各项投入应该减少的程度;产出导向模型是从产出的角度对被评价DMU无效率的程度进行测量,关注的是在不增加投入的条件下,要达到技术有效各项产出应该增加的程度;非导向模型则是同时从投入和产出两个方面进行测量。然而,传统DEA模型建立在特定的假设条件之上,即所有的产出都应该最大化,但如果要在能源效率的测算中考虑非期望产出,则该假设条件并不符合实际的生产过程。为了解决这个问题,一些学者(Fare等,2001;Chambers等,1996)<sup>[51-52]</sup>试图在DEA模型中引入方向距离函数(Directional Distance Functions,DDF)。可以对好产出和坏产出进行区别对待是DDF模型的主要功能之一。DDF模型同样也适用于同时考虑期望和非期望产出的能源效率和环境效率的测量。Fare等(2007)<sup>[53]</sup>采用DDF测量美国燃煤厂的环境效率。Chang和Hu(2010)<sup>[54]</sup>在全要素能源效率框架下,采用基于DDF的DEA-Luenberger模型对2000—2004年中国的能源效率变迁进行测算。进行同类研究的学者还包括Oggioni等(2011)<sup>[55]</sup>、Riccardi等(2012)<sup>[56]</sup>、和Xia和Chen(2012)<sup>[57]</sup>等。

然而,DDF模型只能以同样的比例减少非期望产出和增加期望产出,因而属于径向模型。径向DEA模型存在一些不可忽视的缺点。径向DEA模型对无效率的调整只能是各项投入或者产出的等比例调整,不包含生产过程中单个特定投入或者产出的效率的调整。径向DEA模型还忽略了松弛变量,从而导致有偏估计。也就是说,在径向DEA模型中,对无效率的测量只包含了所有投入或者产出等比例缩减或增加的比例。对于无效率DMU来说,其当前状态与强有效目标值之间的差距,除了等比例改进的部分之外,还包括松弛改进的部分,而松弛改进的部分在径向效率值的测量中并未得到体现。在这种情况下,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,是包含所有生产要素的综合利用效率。因此,从严格意义上讲,如果在全要素能源效率中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的能源浪费程度或可节能的空间。由于这些缺陷的存在,近期的研究试图发展非径向(Non-Radial)DEA方法。

Tone(2004)<sup>[58]</sup>提出的处理非期望产出的 SBM (Slack-base Measure) 模型是非径向模型的一种。SBM 模型是一种非径向非导向的 DEA 模型, 能够避免传统 DEA 模型径向和角度选择差异带来的偏差和影响。SBM 模型通过将松弛变量直接引入目标函数, 解决了投入产出的松弛性问题。这个特点非常适合于分析非期望产出和能源消费的减少。Zhou 等(2006)<sup>[59]</sup>采用 SBM 模型测算考虑非期望产出的环境绩效。近两年一些研究采用 SBM 模型测算生态全要素能源效率或者碳排放效率。Song 等(2013)<sup>[60]</sup>采用超效率 SBM 模型, 以 1992—2010 年样本区间, 测算中国的全要素能源效率。研究表明, 在这 19 年间, 尽管有些年份的能源效率出现了下降, 但总体而言, 中国的能源效率呈现缓慢上升趋势。Zhang 等(2015)<sup>[61]</sup>采用改进的 SBM-DEA 模型, 同时融入区间异质性、总量松弛和非期望产出, 测量中国的生态全要素能源效率。陶雪萍、王平和朱帮助(2015)<sup>[62]</sup>采用 SBM Undesirable 模型和 Meta Frontier 生产函数测算了 APEC17 个成员 1990—2012 年期间的能源效率。Yong Zha 等(2016)<sup>[63]</sup>采用随机非径向 DEA 模型测算中国 2010 年的能源效率。

### (三) 能源效率评估的研究维度不断扩展

国内外对于能源效率评估的研究日益丰富, 研究维度在时间和空间上都在扩展。在时间维度上, 有的学者关注了能源效率的长期演化问题。根据 Rosenberg(1989)<sup>[64]</sup>的研究, 能源效率在工业化的不同阶段表现出不同的变化趋势。在工业化早期, 由于产出增长对能源的依赖程度较低, 能源效率相对较高; 随着工业化进程的推进, 产出增长对能源依赖程度不断提高, 能源效率出现下降; 当经济基本实现了工业化, 能源效率将大幅下降并趋于稳定。而 Mork(1994)<sup>[65]</sup>在总结发达国家的现实经验时也发现, 如果从较长的历时时期来考察, 各国能源效率的影响因素诸如技术水平、产业结构、工业发展模式、资源禀赋等在不同的发展阶段和经济条件下的影响作用差别很大。

尽管目前国内对于能源效率评估的研究比较丰富, 但研究的样本期间一般较短, 有的只有 3~5 年, 而从较长的历史时期研究能源效率长期演化的研究相对较少。吴旭晓(2015)<sup>[66]</sup>基于 2001—2012 年省级面板数据, 运用超效率 DEA 视窗分析方法测算河南省湖北省和广东省的能源效率。高振宇和王益(2007)<sup>[67]</sup>也在研究中按照五年计划实施的期限将 1980—2005 年划分为 5 个阶段, 分别研究能

源效率的变化及其影响因素, 旨在考虑不同经济发展时期的差异。傅晓霞和吴利学(2010)<sup>[68]</sup>在研究中选取了 1952—2006 年较长历史时期的中国能源效率和影响因素的变化趋势, 他们在研究中发现, 在改革开放前后两个历史时期的能源效率主要影响因素及其作用方向、大小都存在很大差别。范如国、罗明(2014)<sup>[69]</sup>采用时空加权回归模型对中国 30 个省区在 1995—2011 年间各时空点上能源效率演化的异质特征进行了分析, 研究表明, 能源效率的演化路径存在异质性特征, 从时间维度上看, 2000 年后的能源效率改善效果比 2000 年前有很大提高。李兰冰(2015)<sup>[70]</sup>基于“全要素”与“产出多样性”的双重约束, 提出一种新型的生态全要素能源生产率变动指标, 并对 1985—2012 年间中国生态全要素能源效率的阶段性演进特征进行了实证考察。Yuan Chen 等(2015)<sup>[71]</sup>采用三阶段 DEA 模型对 2003—2011 年间中国 30 个省份建筑行业的能源效率变化趋势进行了实证分析, 研究结果表明, 在样本期间内, 除了山东省以外, 中国大多数省份的建筑行业能效都得到了提高。由此看来, 能源效率不是一个静态或短期的概念, 还需要从动态或者长远的角度来考量。

相比能源效率在时间维度的长期演化而言, 能源效率在空间维度上的差异的研究成果更加丰富。在国外, 对于能源效率空间维度的比较研究, 主要从国家、区域和行业 3 个层面来进行。而在国内的研究中, 由于中国能源效率区域差异较大, 对于能源效率的区域差异、影响因素和收敛性的研究已经成为研究热点, 并引入了空间分析方法, 以更好地刻画区域间交互效应和能源效率的空间演变机制。沈能(2010)<sup>[72]</sup>运用空间计量分析方法, 从地理空间溢出的视角研究了区域能源效率差异的影响因素。徐盈之和管建伟(2011)<sup>[73]</sup>在此基础上进一步研究了中国区域能源效率的趋同性问题, 测度了基于超效率 DEA 模型并包含非期望产出的地区能源效率, 并将空间相关性引入趋同检验模型以验证地区能源效率的趋同性特征。潘雄锋、杨越、张维维(2014)<sup>[74]</sup>采用 DEA 方法计算了 1997—2009 期间中国各省市的能源效率, 并运用空间计量经济学模型研究了能源效率的空间溢出效应。研究结果表明, 中国区域能源效率具有明显的空间溢出作用, 并且这种空间溢出作用在逐渐增强。杨宇、刘毅(2014)<sup>[75]</sup>采用 DEA-ESDA 模型对 1990 年、2000 年和 2010 年中国各省市能源效率进行分析, 并探索其空间集聚状态以及冷热点区域格局

的演化,发现中国各省市能源效率的地带性差异显著,呈现出从东部沿海向西部地区递减的趋势。

### 三、结论

总之,迄今为止有关能源效率评估的研究已有较多,在评估理论与方法上取得了大量有益的研究成果。一部分研究开始关注到能源效率的多维效应问题,但对于多维效应下的能源效率评估无论在研究方法还是在研究对象方面,都不同程度地存在一些问题或障碍,还可从以下几个方面做进一步深化的研究:

1. 由于对能源效率内涵的理解与认识不足,单纯地把“减少能源消耗”或“降低单位产值能耗”作为追求目标,而忽略了能源消费中的其他期望或者非期望产出。这有可能导致在能源效率的测量中造成有偏误的评价或判断;基于多维效应的能源效率内涵的扩展,不断发掘能源效率在国际、国家、区域等不同层次下的多维效应,仍然是值得深入讨论的问题。尽管对于能源效率内涵的认识已经从单一的能源节约目标扩展到包含经济、社会、环境、技术等多重目标,但在运用DEA方法对多维度能源效率进行测算过程中,多产出情况会使能源效率的识别与测量变得更加复杂和困难。不过生态全要素能源效率的出现为解决该问题提供了思路和方法。生态全要素能源效率中的产出包括期望的经济产出和非期望的环境污染,突破了全要素能源效率中的单一产出限制,然而生态全要素能源效率模型仅仅考虑了适用于一种期望产出和一种非期望产出的情形,而没有讨论在多种期望产出情形下,综合指标如何构建、构建几个等诸如此类的问题。因此,在这种思想方法的指导下,逐步完善多维度能源效率综合指标评价体系和评价方法,提出一种具有普适性的综合指标模型是将来运用DEA方法测量多维度能源效率需要

解决和突破的主要问题之一。

2. 由于传统的径向和导向模型存在着缺陷,总体来看,DEA模型在能源效率评估上的应用正向非径向、非导向模型转变。在这个过程中,随着DEA方法的不断完善和对能源效率问题的不断深入研究,不同形式的径向和非径向模型有交叉结合使用的趋势。如将径向的方向距离函数与非径向的SBM相结合超效率SBM模型、元前沿(Meta-frontier)非径向方向距离函数模型等等。为了考虑所研究具体问题之间的异质性,在同一模型中包含多种距离函数的模型即混合距离函数(Hybrid Distance Function)将会得到更多的应用。

3. 仅从时间差异来考虑难以体现区域能源效率演化的结构性问题,仅从空间差异考虑难以体现能源效率决定机制在其演化中的转变趋势。只有同时考虑时间和空间特征,才能全面深入地剖析能源效率在不同时空下的演化过程。现有研究要么只从时间维度来考虑能源效率的演化问题,要么只从空间维度考虑区域能源效率差异问题,缺少同时考虑时间和空间维度的研究。而能源效率在不同的时空点上的局域性质是测度和分析能源效率演化过程的重要内容,因为演化过程中的空间差异性可以体现区域能源效率演化的结构性问题,而时间差异性则可以体现能源效率决定机制在其演化中的转变趋势,并且只有将两个维度结合在一起考虑,才能全面深入地评估能源效率在不同时空下的演化过程。特别是有关多种产出约束下的能源效率动态演化问题,国内外研究还没有充分捕捉到其内部规律,在多维效应的框架内,该问题的讨论无论是在选题背景上,还是在理论方法上,都存在很大的拓展空间。今后的研究应该大幅度提升研究对象的选择范围以及时间区间,这样更有利于研究方法的施展,其结论也会更加具有说服力和科学性。

#### 参考文献:

- [1] 魏楚,沈满洪. 能源效率与能源生产率:基于DEA方法的省际数据比较[J]. 数量经济技术经济研究,2007(9):110-121.
- [2] ANG B W. Monitoring changes in economy-wide energy efficiency:from energy-GDP ratio to composite efficiency index[J]. Energy Policy,2006(34):574-582.
- [3] ANG B W, MU A R, ZHOU P. Accounting frameworks for tracking energy efficiency trends[J]. Energy Economics,2010,32:1209-1219.
- [4] PATTERSON M G. What is energy efficiency? concepts, indicators and methodological issues[J]. Energy Policy,1996,24(5):377-390.
- [5] HU J L, WANG S H. Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. Energy Policy,2006,34(17):3206-3217.
- [6] 魏一鸣,廖华. 中国能源报告(2010):能源效率研究[M]. 北京:经济科学出版社,2010.

- [7] BOSSEBOEUF D, CHATEAU B, LAPILLONNE B. Cross-country comparison on energy efficiency indicators: the on-going European effort towards a common methodology[J]. *Energy Policy*, 1997(25): 673-682.
- [8] SCHEEL H. Undesirable outputs in efficiency valuations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 132: 400-410.
- [9] ZHOU P, ANG B W. Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance[J]. *Energy Policy*, 2008(36): 2911-2916.
- [10] 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.
- [11] 沈能, 王群伟. 中国能源效率的空间模式与差异化节能路径——基于 DEA 三阶段模型的分析[J]. *系统科学与数学*, 2013, 33(4): 457-467.
- [12] WU F, FAN L W, ZHOU P, ZHOU D Q. Industrial energy efficiency with CO<sub>2</sub> emissions in China: a nonparametric analysis[J]. *Energy Policy*, 2012(49): 164-172.
- [13] APERGIS N, GOODNESS C, CARLOS P B, et al. Energy efficiency of selected OECD countries: a slacks based model with undesirable outputs[J]. *Energy Economics*, 2015, 51(9): 45-53.
- [14] 宫大鹏, 赵涛, 慈兆程. 基于超效率 SBM 的中国省际工业化石能源效率评价及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2): 585-595.
- [15] PYE M, MCKANE A. Making a stronger case for industrial energy efficiency by quantifying non-energy benefits[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, 28(3-4): 171-183.
- [16] SKUMATZ L A, GARDNER J. Methods and results for measuring non-energy benefits in the commercial and industrial sectors introduction: NEBs as omitted effects[C]//ACEEE summer study on energy efficiency in industry: cutting the high cost of energy. New York: West Point; 2005: 163-176.
- [17] MILLS E, ROSENFELDS A. Consumer non-energy benefits as a motivation for making energy-efficiency improvements[J]. *Energy*, 1996, 21(7-8): 707-720.
- [18] WORRELL E, LAITNER J A, RUTH M, et al. Productivity benefits of industrial energy efficiency measures[J]. *Energy* 2003, 28: 1081-1098.
- [19] FLEITER T, HIRZEL S, WORRELL E. The characteristics of energy-efficiency measures—a neglected dimension[J]. *Energy Policy*, 2012, 51: 502-513.
- [20] ANDREA T, ENRICO C, ALESSIO D D. A framework to characterize energy efficiency measures[J]. *applied energy*, 2014, 118: 207-220.
- [21] 廖华, 魏一鸣. 能源效率及其与经济系统关系的再认识[J]. *公共管理学报*, 2010, 7(1): 28-34.
- [22] LISA R, NINA C. Capturing the multiple benefits of energy efficiency[EB/OL]. (2014)[2015-10-18]. [http://www.iea.org/bookshop/475-Capturing\\_the\\_Multiple\\_Benefits\\_of\\_Energy\\_Efficiency](http://www.iea.org/bookshop/475-Capturing_the_Multiple_Benefits_of_Energy_Efficiency), IEA, 2014.
- [23] BOYD G A, PANG J X. Estimating the linkage between energy efficiency and productivity[J]. *Energy Policy*, 2000, 28(5): 289-296.
- [24] SORRELL S. The rebound effect; an assessment of the evidence for economy-wide savings from improved energy efficiency[R]. UK Energy Research Center, 2007.
- [25] SORRELL S, JOHN D, MATT S. Empirical estimates of the direct rebound effect a review[J]. *Energy Policy*, 2009(37): 1356-1371.
- [26] SAUNDERS H D. Historical evidence for energy efficiency rebound in 30 US sectors and a toolkit for rebound analysts[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2013(80): 1317-1330.
- [27] 史丹, 朱彤. 能源经济学理论与政策研究述评[M]. 北京: 经济管理出版社, 2013.
- [28] 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*, 2013(9): 125-136.
- [29] RAMANATHAN R. A holistic approach to compare energy efficiencies of different transport modes[J]. *Energy Policy*, 2000, 28: 743-747.
- [30] HU J L, WANG S C. Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*, 2006, 34: 3206-3217.
- [31] HU J L, KAO C H. Efficient energy-savings targets for APEC economies[J]. *Energy Policy*, 2007, 35: 373-382.
- [32] MUKHERJEE K. Energy use efficiency in the Indian manufacturing sector: an interstate analysis[J]. *Energy Policy*, 2008, 36: 662-672.
- [33] ZHANG X P, CHENG X M, YUAN J H. Total-factor energy efficiency in developing countries[J]. *Energy Policy*, 2011, 39: 644-650.
- [34] MAKRIDOU G, ANDRIOSPOULOS K, DOUMPOS M, et al. Measuring the efficiency of energy-intensive industries across European countries[J]. *Energy Policy*, 2016, 88(1): 573-583.



- [35] ZHOU P, POH K L, ANG B W. A non-radial DEA approach to measuring environmental performance[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 178: 1-9.
- [36] PICAZO A J, PRIOR D. Environmental externalities and efficiency measurement[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 3332-3339.
- [37] MUKHERJEE K. Measuring energy efficiency in the context of an emerging economy: the case of Indian manufacturing[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 201: 933-941.
- [38] LOZANO S, GUTIERREZ E. Slacks-based measure of efficiency of airports with airplanes delays as undesirable outputs[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38: 131-139.
- [39] SUEYOSHI T, GOTO M. Data envelopment analysis for environmental assessment: comparison between public and private ownership in petroleum industry[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 216: 668-678.
- [40] ROBERTO G, DAVID C, ANA R G, et al. Energy efficiency in the European union: what can be learned from the joint application of directional distance functions and slacks-based measures? [J]. *Applied Energy*, 2014, 132: 137-154.
- [41] YUCEL O, MEHMET A. Regional total-factor energy efficiency and electricity saving potential of manufacturing industry in Turkey[J]. *Energy*, 2015, 93(1): 495-510.
- [42] 魏楚, 沈满洪. 能源效率与能源生产率: 基于 DEA 方法的省际数据比较[J]. *数量经济技术经济研究*, 2007(9): 110-121.
- [43] HU J L, WANG S C. Total factor energy efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*, 2006, 34(2): 3206-3217.
- [44] 王群伟, 周鹏, 周德群. 中国 CO<sub>2</sub> 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(1): 45-54.
- [45] LI L B, HU J L. Ecological total-factor energy efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*, 2012, 46(7): 216-224.
- [46] 郭凯, 慈兆程. 基于 ETFFEE 指数的中国区域结构能源效率的实证研究[J]. *宏观经济研究*, 2014(10): 99-107.
- [47] 王婷婷, 朱建平. 环境约束下电力行业能源效率研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(3): 120-127.
- [48] 王珊珊, 屈小娥. 基于环境效应的中国制造业全要素能源效率变动研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011(8): 130-137.
- [49] MANDAL S K. Do undesirable output and environmental regulation matter in energy efficiency analysis? [J]. Evidence from Indian cement industry. *Energy Policy*, 2010, 38: 6076-6083.
- [50] 成刚. 数据包络分析方法与 MaxDEA 软件[M]. 北京: 知识产权出版社, 2014: 23.
- [51] FARE R, GROSSKOPF S, PASURKA Jr C. Accounting for air pollution emissions in measures of state manufacturing productivity growth[J]. *Journal of Regional Sci*, 2001, 41(3): 381-409.
- [52] CHAMBERS R G, CHUNG Y, FARE R. Benefit and distance functions[J]. *Journal of Economic Theory*, 1996, 70(2): 407-419.
- [53] FARE R, GROSSKOPF S, PASURKA C A. Environmental production functions and environmental directional distance functions [J]. *Energy*, 2007, 32: 1055-1066.
- [54] CHANG T P, HU J L. Total-factor energy productivity growth, technical progress, and efficiency change: an empirical study of China[J]. *Applied Energy*, 2010, 87: 3262-3270.
- [55] OGGIONI G, RICCARDI R, TONINELLI R. Eco-efficiency of the world cement industry: a data envelopment analysis[J]. *Energy Policy*, 2011, 39: 2842-2854.
- [56] RICCARDI R, OGGIONI G, TONINELLI R. 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.
- [57] XIA X H, CHEN G Q. Energy abatement in Chinese industry: cost evaluation of regulation strategies and allocation alternatives [J]. *Energy Policy*, 2012, 45: 449-458.
- [58] TONE K. Dealing with undesirable outputs in DEA: a slacks-based measure approach [C]. Presentation at NAPW III, Toronto, 2004: 44-45.
- [59] ZHOU P, ANG B W, POH K L. Slacks-based efficiency measures for modeling environmental performance [J]. *Ecological Economics*, 2006, 60: 111-118.
- [60] SONG M L, YANG L, WU J, et al. Energy saving in China: analysis on the energy efficiency via bootstrap-DEA approach[J]. *Energy Policy*, 2013, 57: 1-6.
- [61] ZHANG N, KONG F B, YANNI Y. Measuring ecological total-factor energy efficiency incorporating regional heterogeneities in China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 165-172.
- [62] 陶雪萍, 王平, 朱帮助. 基于 SBM-undesirable 和 Meta-frontier 模型的 APEC 能源效率研究[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2015, 17(2): 20-28.
- [63] ZHA Y, ZHAO L, BIAN Y. Measuring regional efficiency of energy and carbon dioxide emissions in China: a chance constrained DEA approach[J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 66(2): 351-361.
- [64] ROSENBERG N. Energy efficient technology: past, present and future perspectives, how far can the world get on energy

- efficiency alone? [Z]. Oak Ridge National Laboratory, 1989.
- [65] MORK K. A, MYSEN H. T, OLSEN O. Macroeconomic responses to oil price increases and decreases in seven OECD countries [J]. *The Energy Journal*, 1994, 15(4): 19-35.
- [66] 吴旭晓. 区域能源效率动态演化及其驱动因素研究——以豫鄂粤三省为例, *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2015, 17(1): 40-47.
- [67] 高振宇, 王益. 中国生产用能源消费变动的分解分析[J]. *统计研究*, 2007, 24(3): 52-57.
- [68] 傅晓霞, 吴利学. 中国能源效率及其决定机制的变化——基于变系数模型的影响因素分析[J]. *管理世界*, 2010(9): 45-54.
- [69] 范如国, 罗明. 中国能源效率演化中的异质性特征及反弹效应影响[J]. *经济管理*, 2014, 36(6): 1-12.
- [70] 李兰冰. 中国能源绩效的动态演化、地区差距与成因识别[J]. *管理世界*, 2015(11): 40-52.
- [71] CHEN Y, LIU B S, SHEN Y-H, WANG X Q. The energy efficiency of China's regional construction industry based on the three-stage DEA model and the DEA-DA model[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2015(8): 1-14.
- [72] 沈能. 能源投入、污染排放与中国能源经济效率的区域空间分布研究[J]. *财贸经济*, 2010(1): 107-113.
- [73] 徐盈之, 管建伟. 中国区域能源效率趋同性研究: 基于空间经济学视角[J]. *财经研究*, 2011, 37(1): 112-123.
- [74] 潘雄锋, 杨越, 张维维. 中国区域能源效率的空间溢出效应研究[J]. *管理工程学报*, 2014, 28(4): 132-136.
- [75] 杨宇, 刘毅. 基于 DEA-ESDA 的中国省际能源效率及其时空分异研究[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(11): 1815-1825.

## Energy Efficiency Assessment Theory based on Multiple Benefits —Non-parametric Method DEA as an Example

CAI Haixia

(Systems and Industrial Engineering Technology Research Center, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**Abstracts:** Energy efficiency assessment based on the multiple benefits allows people to achieve economic growth while taking energy security, competitiveness, environmental, social and technological sustainability into consideration. This paper discusses the path of evolution and development of energy efficiency connotation, and extends energy efficiency connotation to multiple benefits. It takes non-parametric DEA method as an example, and researches the evolution of the trend of energy efficiency evaluation method based in multiple benefits. The paper puts forward that there are mainly three trends in the assessment of energy efficiency based on multiple benefits by using DEA: energy efficiency connotation continuously expands; DEA model turns to non-oriented and non-radial model; the dimensions of assessment of energy efficiency continues to expand. Comprehensive index evaluation system and evaluation method of energy efficiency based on multiple benefits will be further studied.

**Key words:** multiple benefits; energy efficiency assessment; data envelopment analysis

[责任编辑:孟青]