

DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2015.0103

中国建筑业能源经济效率与能源环境效率研究 ——基于 SBM 模型和面板 Tobit 模型的两阶段分析

冯博, 王雪青

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 定义建筑业的能源经济效率和能源环境效率,对中国各省建筑业在 2004—2011 年期间的能源经济效率、能源环境效率及其分解指数进行测算分析,检验各种外部环境因素对能源效率的影响。研究表明:中国东部、中部和西部三大地区建筑业能源效率呈逐年上升的趋势,建筑业能源纯技术效率较低是制约我国建筑业能源效率上升的主要原因。中国应通过进一步规范建筑业市场、加大节能减排领域的技术创新力度、提高电力等清洁能源的消费比重等措施来提高建筑业能源效率。

关键词: 建筑业; 能源经济效率; 能源环境效率; SBM 模型; 面板 Tobit 模型

中图分类号: F407.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-3370(2015)01-0014-09

近年来,伴随着全球经济高速增长,能源短缺、环境恶化等问题日益突出。在国际社会倡导“能源-经济-环境可持续发展”的大背景下,中国不仅面临着如何提高能源效率的难题,而且承担着巨大的 CO₂ 减排压力;同时,能源环境问题也严重制约了中国经济和社会的可持续发展。2011 年出台的《国民经济和社会发展的第十二个五年规划纲要》为中国 2011—2015 年的节能减排与污染物控制工作提出了明确的目标,即非化石能源占一次能源消费比重的 11.4%,单位国内生产总值能源消耗降低 16%,单位国内生产总值 CO₂ 排放降低 17%。建筑业作为中国的支柱产业,为国民经济和社会发展做出重大贡献的同时,也大量地消耗了能源并排放了 CO₂ 气体。据统计,2000—2012 年间中国建筑业能源消耗量增长了 4 734.41 万吨标准煤,年均增长率高达 12.9%。因此,提高建筑业的能源效率,减少 CO₂ 排放量,对解决中国的能源和环境问题意义重大。

一、文献回顾

鉴于能源效率的重要性,国内外许多学者对其做了深入研究,这些研究基本上是从能源效率评价和影响因素分析两个方面展开的。在能源效率评价方面,主要将能源效率分为两种^[1]:一是单要素能源效率,指一个评价单元的能源投入与有效产出的比值;二是全要素能源效率,即考虑各种投入要素对

能源替代作用的能源效率。近年来,后者在能源效率评价中运用广泛,其测度方法分为参数法和非参数法。其中,非参数的 DEA 方法因不必预先确定各指标的权值和输入输出之间可能存在的某种显式关系而被广泛应用。Hu 和 Wang(2006)^[1] 基于全要素生产率框架对全要素能源效率做了定义,并以能源、资本、劳动力和生物质能为投入指标,GDP 为产出指标构建 DEA 评价模型,对中国 29 个省 1995—2002 年的全要素能源效率进行测算。之后,Wei 等(2007)^[2]、Nouri 等(2013)^[3]、Zhao 等(2014)^[4] 以及王艳丽和李强等(2012)^[5] 学者根据 Hu 和 Wang 的思路,在产业层面和区域层面上对能源效率进行了探讨。传统的全要素能源效率框架中只包含经济产出指标,如 GDP。但近年来,随着环境问题愈发突出,能源消耗带来的环境污染受到了越来越多的关注。许多学者在测算全要素能源效率时,将环境污染作为非期望产出指标加入测算框架中,使能源效率的研究更具实际意义。Shi 等(2010)^[6] 选取能源、劳动力和工业投资额作为投入指标,选取工业产值为期望产出指标,工业废气排量为非期望产出指标,测算了中国 28 个省 2000—2006 年的工业能源效率,结果表明东部地区能源效率最高,西部地区能源效率最低。

CCR、BCC 以及之后发展的多个 DEA 模型都是从径向和角度两个方面对效率进行度量,当存在投

收稿日期: 2014-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71172148);住房和城乡建设部基金资助项目(2011-R3-18)

作者简介: 冯博(1985—),男,博士研究生,E-mail:fengboedu@163.com;王雪青(1965—),女,教授,博士生导师,E-mail:wqxqtju@163.com

入和产出的非零松弛时,容易使效率值的度量出现偏差。鉴于此,Tone(2001)^[7]提出了一种基于松弛变量测度的非径向、非角度的DEA分析方法,即SBM模型。该模型的优点在于考虑了投入和产出的松弛变量,并且能够同时从投入角度和产出角度展开效率分析,使效率测算结果更加准确合理。此外,Tone(2003)^[8]在传统SBM模型基础上进行修正,提出SBM-Undesirable模型,很好地解决了生产过程中非期望产出的问题。许多学者也将SBM及其修正模型应用于全要素能源效率研究中,如Chang等(2013)^[9]运用包含非期望产出的SBM模型对中国各省运输行业的能源效率进行测算,结果表明大多数省份的效率值低于0.5,有很大的改善空间。

在能源效率影响因素分析方面,学者主要采用要素计量回归法与因素分解法。Pan等(2013)^[10]基于Tobit模型对中国省际工业全要素能源效率的影响因素进行回归分析。魏楚和沈满洪(2007)^[11]运用广义最小二乘法,研究政府影响力、产业结构、对外开放程度以及制度因素对全国29个省份的全要素能源效率的影响。史丹(2008)^[12]采用方差分解法对1980—2005年间影响中国能源效率地区差异的各因素进行研究分析。赵领娣和郝青(2013)^[13]测算了2002—2010年中国28个省市的全要素能源效率,并运用差分GMM方法研究了技术要素和人力资本要素对能源效率的影响。相比于要素计量回归法,因素分解法选取的指标不够具体,无法准确地把握能源效率的影响因素。鉴于此,本文通过对建筑业能源效率的影响因素进行分析,选取适当的指标,采用计量回归方法探讨各因素对建筑业能源效率的影响机制。

综上所述,对中国全要素能源效率的研究集中在国家和区域层面上,在产业层面上的研究还很少。大多数全要素能源效率研究选取了径向和角度的效率测算方法,忽视了评价单元投入和产出的松弛问题。为区分环境污染对建筑业能源效率的影响,本文将其分为经济效率和环境效率两大指标。在产业层面上将传统的与考虑环境污染的全要素能源效率置于统一的研究框架中,是本研究的主要特色。基于以上分析,本文对中国区域建筑业能源效率的研究分为两个阶段:第一阶段,基于非径向、非角度的SBM模型对30个省建筑业的能源经济效率、能源环境效率及其分解指数进行测算;第二阶段,采用处理受限因变量的面板Tobit模型检验外部环境因素对建筑业两种能源效率的影响。最后,根据所得结论提出提高建筑业能源效率的政策建议。

二、建筑业能源效率及其分解指数的地区差异分析

(一)建筑业能源效率概念界定

本文同时研究传统的建筑业能源效率与考虑非期望产出的建筑业能源效率,根据是否考虑环境污染因素,将两种能源效率定义为建筑业能源经济效率与建筑业能源环境效率,具体定义如下:

1. 建筑业能源经济效率(EEC)。在全要素能源效率框架中,只包含建筑业的期望产出,即建筑业总产值,不考虑与之伴随而生的非期望产出。该指标只注重实现最大经济利益,在建筑业产值既定的条件下实现能源投入最小化,或在建筑能源投入既定的条件下实现产值最大化。

2. 建筑业能源环境效率(EEN)。在全要素能源效率框架中,包含了期望产出与非期望产出,不仅考虑了建筑业的经济产出,又考虑了在能源利用过程中所造成的环境污染。该指标注重在实现经济产出最大化的同时,将环境污染降至最小。

为进一步研究中国各省建筑业能源效率的技术有效性和规模有效性,将EEC和EEN分解为纯技术效率和规模效率。纯技术效率主要反映评价单元的科技水平、政策环境与管理模式等因素对能源利用效率的影响,规模效率反映评价单元的规模因素对能源利用效率的影响。因此,建筑业能源经济效率指标可分解为建筑业能源经济纯技术效率和建筑业能源经济规模效率,分别用EECPTE和EECSE表示;建筑业能源环境效率指标可分解为建筑业能源环境纯技术效率和建筑业能源环境规模效率,分别用EENPTE和EENSE表示。按照DEA理论中综合效率、纯技术效率和规模效率的定义,EEC和EEN可表示为

$$EEC=EECPTE \times EECSE \quad (1)$$

$$EEN=EENPTE \times EENSE \quad (2)$$

(二)SBM模型

本研究采用SBM模型对建筑业能源经济效率进行测度分析。记 X 为投入矩阵, $X=(x_1, x_2, \dots, x_m) \in R_+^{m \times k}$; Y 为经济产出矩阵, $Y=(y_1, y_2, \dots, y_s) \in R_+^{s \times k}$ 。其中, m 为投入指标个数; s 为产出指标个数; k 为决策单元个数; λ 为权重向量系数, $\lambda \geq 0$; s^- 为投入松弛向量, $s^- \geq 0$; s^+ 为产出松弛向量, $s^+ \geq 0$ 。建立测量建筑业能源经济效率的SBM模型

$$\min EEC = \frac{1 - \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \left(\frac{1}{s}\right) \sum_{r=1}^s \frac{s_r^+}{y_{r0}}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & x_0 = X\lambda + s^-, y_0 = Y\lambda - s^+ \\ & \lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0 \end{aligned}$$

其中, $x_0 = (x_{10}, \dots, x_{m0})$ 为待评价决策单元的投入向量; $y_0 = (y_{10}, \dots, y_{s_0})$ 为待评价决策单元的产出向量; s_i^- 为第 i 个投入指标的松弛值; s_r^+ 为第 r 个产出指标的松弛值。若模型(3)中增加 $E\lambda=1$ 的约束条件, 则转化为规模报酬可变的 SBM 模型, 由此可以测算出 EECPTTE, 而 EECSE 可由式(1)求得。

本研究采用 SBM-Undesirable 模型对建筑业能源环境效率进行测度分析。

记 $Y^g = (y_1^g, y_2^g, \dots, y_{s_1}^g) \in R_+^{s_1 \times k}$ 为期望产出矩阵; s_1 为期望产出指标的个数; $Y^b = (y_1^b, y_2^b, \dots, y_{s_2}^b) \in R_+^{s_2 \times k}$ 为非期望产出矩阵; s_2 为非期望产出指标的个数。建立测量建筑业能源环境效率的 SBM-Undesirable 模型

$$\min \text{EEN} = \frac{1 - \left(\frac{1}{m} \right) \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \left(\frac{1}{s_1 + s_2} \right) \left[\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_r^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_r^b} \right]} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & x_0 = X\lambda + s^-, y_0^g = Y^g\lambda - s^g \\ & y_0^b = Y^b\lambda + s^b, \lambda \geq 0, s^- \geq 0, \\ & s^g \geq 0, s^b \geq 0 \end{aligned}$$

其中, s_r^g 为待评价决策单元的期望产出不足量; s_r^b 为待评价决策单元的非期望产出超标量。若模型(4)中增加 $E\lambda=1$ 的约束条件, 则转化为规模报酬可变的 SBM-Undesirable 模型, 由此可以测算出 EENPTE, 而 EENSE 可由式(2)求得。

(三) 指标选取及数据说明

运用 DEA 方法进行效率测算需要合理地选取投入、产出指标, 主要遵循以下几点原则: 第一, 指标要满足评价要求, 客观地反映评价对象的生产率水平; 第二, 应避免指标之间有较强的线性关系; 第三, 所选指标的相关数据要易于获取。基于以上三点原则, 参照 Hu 和 Wang(2006)^[14]、王雪青等(2012)^[14a]、Sueyoshi 和 Goto(2001)^[15]等学者对能源效率评价指标的选取以及结合建筑业自身特点, 本研究将能源、劳动力、资本和机械设备作为投入指标, 选取建筑业总产值和 CO₂ 排放量为产出指标, 各指标介绍如下:

1. 能源: 能源是生产过程中的重要投入要素, 建筑业所消耗的能源种类较多, 主要包括煤炭、原油、天然气和电力等 12 种能源。本文将各种能源消

耗统一折算成“万吨标准煤”后进行加和, 求得的能源消耗总量作为能源投入。

2. 劳动力: 劳动时间是衡量生产过程中劳动投入的最好指标, 但其数据无法获得。因此, 本文参考相关文献, 选择“建筑业从业人员数”衡量建筑业的劳动力投入。

3. 资本: 建筑业的资本构成较为复杂, 并且无法获得各省建筑业固定资产的折旧率, 因此不能用资本存量来度量建筑业的资本投入。鉴于此, 本文选择“建筑业总资产”作为资本投入指标。

4. 机械设备: 机械设备是建筑业重要的生产要素。建筑业需要大量的机械设备投入, 尤其是在施工阶段。本文选择“自有施工机械设备年末总功率”来表示建筑业机械设备投入量。

5. 建筑业总产值: 建筑产品种类繁多, 无法采用实物量来衡量各省建筑业的产出水平。本文参考以往研究, 选择“建筑业总产值”作为衡量建筑业期望产出的指标。

6. CO₂ 排放量: CO₂ 是建筑业最主要的非期望产出物, 也是全球关注最多的环境污染物, 因此选择“CO₂ 排放量”来衡量建筑业的非期望产出。张智慧和刘睿劼(2013)^[16]将建筑业 CO₂ 的排放分为直接碳排放和间接碳排放, 其中, 直接碳排放是指建筑业直接消耗能源而产生的碳排放; 间接碳排放是指建筑业引发相关行业产生的碳排放。而 Yan 等(2010)^[17]的研究表明, 82%~87% 的建筑碳排放来自于建筑材料的生产, 其中水泥和钢铁是碳排放的主要来源。因此, 本文采用张智慧和刘睿劼^[16]对建筑业 CO₂ 排放的分类方法, 并参考 Yan 等^[17]的研究结论, 在省际建筑业层面上, 充分考虑数据获取的可能性和模型建立的实用性, 将中国建筑业 CO₂ 排放来源确定为建筑业直接消耗原煤、型煤、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、润滑油、液化石油气、天然气、热力和电力等 12 种能源产生的直接碳排放与生产水泥、钢材、玻璃、木材和铝材等 5 种建筑材料所造成的间接碳排放。基于 IPCC 碳排放核算方法, 建立建筑业 CO₂ 排放量测算模型

$$E_{\text{co}_2} = \sum C_i \times \alpha_i + \sum G_i \times \beta_i \times (1 - \varepsilon_i) \quad (5)$$

其中, E_{co_2} 为建筑业 CO₂ 总排放量; C_i 为第 i 种能源消耗总量, 千克; α_i 为第 i 种能源 CO₂ 排放系数, 即第 i 种能源平均低位发热量与对应的缺省 CO₂ 排放因子的乘积; G_i 为第 i 种建筑材料的使用量, 千克; β_i 为第 i 种建筑材料单位 CO₂ 排放系数^①; ε_i 为第 i 种

①水泥: 0.815 千克/千克; 钢材: 1.789 千克/千克; 玻璃: 0.966 千克/千克; 木材: -842.8 千克/立方米; 铝材: 2.6 千克/千克。

可回收建筑材料的回收系数;钢材回收系数取 0.8;铝材回收系数取 0.85。

从《中国能源统计年鉴》(2005—2012年)、《中国统计年鉴》(2005—2012年)、《中国建筑业统计年鉴》(2005—2012年)、《2006年IPCC国家温室气体清单指南目录》和《综合能耗计算通则(GB/T 2589—2008)》中获取原始数据与计算所需的相关因子。

(四)EEC、EEN 及其分解指数的测算分析

选取中国 30 个省、市、自治区(以下全部简称“省”)作为独立的决策单元,其中,西藏和港、澳、台地区由于数据缺失未包括在内。按照经济发展水平和地理位置相结合的原则,将全国划分为东部、中

部和西部三大经济区。其中,东部地区包括北京、天津、上海、辽宁、江苏、浙江、福建、广东、海南、河北和山东 11 个省份;中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北和湖南 8 个省份;西部地区包括内蒙古、广西、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、重庆和新疆 11 个省份。

采用 SBM 模型与 SBM-Undesirable 模型,基于中国 30 个省 2004—2011 年的建筑业面板数据,利用 DEA-SOLVER Pro5.0 软件,分别测算各省建筑业的能源经济效率和能源环境效率,并将其分解为纯技术效率指数和规模效率指数,最后求得各指标的 8 年平均值,结果如表 1 所示。

表 1 2004—2011 年中国区域建筑业能源效率及其分解指数均值

省、地区	EEC	EECPTE	EECSE	EEN	EENPTE	EENSE
北京	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
天津	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
河北	0.647	0.708	0.921	0.588	0.608	0.961
山西	0.627	0.695	0.893	0.547	0.559	0.972
内蒙	0.575	0.659	0.864	0.530	0.568	0.922
辽宁	0.765	0.847	0.924	0.811	0.907	0.888
吉林	0.827	0.863	0.943	0.881	0.899	0.970
黑龙江	0.868	0.952	0.908	1.000	1.000	1.000
上海	0.986	0.986	1.000	1.000	1.000	1.000
江苏	0.970	0.970	1.000	1.000	1.000	1.000
浙江	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
安徽	0.623	0.684	0.920	0.654	0.690	0.941
福建	0.735	0.789	0.932	0.738	0.778	0.951
江西	0.864	0.980	0.847	0.933	1.000	0.916
山东	0.550	0.609	0.952	0.622	0.645	0.921
河南	0.760	0.843	0.886	0.721	0.834	0.868
湖北	0.618	0.684	0.916	0.605	0.636	0.954
湖南	0.687	0.745	0.920	0.661	0.678	0.966
广东	0.625	0.679	0.936	0.589	0.601	0.977
广西	0.672	0.803	0.812	0.669	0.758	0.859
海南	0.656	0.939	0.608	0.668	1.000	0.620
重庆	0.666	0.739	0.899	0.678	0.707	0.951
四川	0.593	0.657	0.933	0.614	0.624	0.982
贵州	0.517	0.623	0.801	0.467	0.555	0.821
云南	0.515	0.601	0.865	0.494	0.529	0.926
陕西	0.732	0.785	0.918	0.715	0.750	0.944
甘肃	0.421	0.518	0.835	0.407	0.460	0.865
青海	0.575	0.888	0.529	0.543	0.973	0.488
宁夏	0.625	0.905	0.595	0.562	0.953	0.537
新疆	0.805	0.867	0.885	0.731	0.773	0.916
东部地区	0.812	0.866	0.934	0.820	0.867	0.938
中部地区	0.734	0.806	0.904	0.750	0.787	0.948
西部地区	0.609	0.731	0.812	0.583	0.695	0.837
全国	0.717	0.801	0.881	0.714	0.783	0.904

分析表 1 可以得出:(1) 中国大部分省份的 EEC 和 EEN 均处于无效率状态。EEC 均值为 1 的省份有北京、天津和浙江,EEN 均值为 1 的省份有北京、天津、黑龙江、上海、江苏和浙江。这些省份分别处于 EEC 和 EEN 的生产前沿面上,能源效率处于相对最优的水平。而内蒙古、贵州、云南、甘肃和

青海的 EEC 和 EEN 均值较低,与生产前沿面相比,这些省份的能源效率存在较大的改进空间。与王雪青等^[47]的研究结果相比,北京、天津、浙江、江苏、上海和黑龙江等省仍处于能源效率较高的行列,而全国能源效率均值略高于此前的研究结果,这可能与计算时增加了机械设备指标有一定关系。(2) 东部

地区的能源效率总体上高于其他两个地区。由表1发现,EEC和EEN较高的省份均处于经济发达的东部地区,EEC和EEN较低的省份均处于相对落后的西部地区。从东部、中部、西部三大地区的EEC和EEN均值也可以看出,东部地区EEC和EEN指数都是最高的,均值分别为0.812和0.820,中部地区分别为0.734和0.750,西部地区分别为0.609和0.583,东部、中部地区的EEC和EEN均值都高于全国平均水平。因此,西部地区应该作为建筑业能源效率改进的重点地区,有必要进一步加强地区间能源领域的技术交流,从而促进西部地区能源效率的提高。(3)各省的EEC和EEN之间差异较大。东部地区省份的EEN比EEC要高,中部地区除山西、河南、湖北和湖南外,其余省份的EEN高于EEC,而西部地区则相反。这表明,在相对发达的地区,当能源效率测算框架中考虑CO₂排放后,效率值变高。这是由于相比西部地区的省份,东部地区省份和中部地区大部分省份的

科技水平较高,CO₂减排技术运用广泛,建筑业能源利用过程中能更好地满足建筑业产值最大化与CO₂排放最小化。(4)从能源效率分解指数上看,大部分省份处于无效率状态,且技术效率是制约能源效率提高的主要因素。北京、天津、上海、江苏和浙江的EECSE和EENSE均为1,表明该5省建筑业能源利用达到最优规模,而其余省份仍可通过增加要素投入来提升能源综合效率。例如,海南省的EENPTE为1,但EENSE仅为0.62,说明影响该省EEN的是其建筑业的能源投入规模不足。各省的EECPTE和EENPTE要明显低于EECSE和EENSE,表明制约各省建筑业能源效率提高的主要因素是科技水平、政策环境与管理模式,能源规模效率的改进空间有限。未来中国能源利用水平的提升不能一味地致力于扩大能源等生产要素的投入规模,应该继续加大能源领域的技术研发力度,加强碳减排技术的推广应用,从而提高能源效率。值得注意的是,中国建筑业在2004—

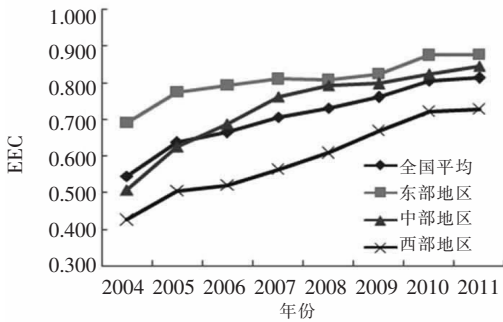


图1 2004—2011年全国及三大地区EEC变化趋势

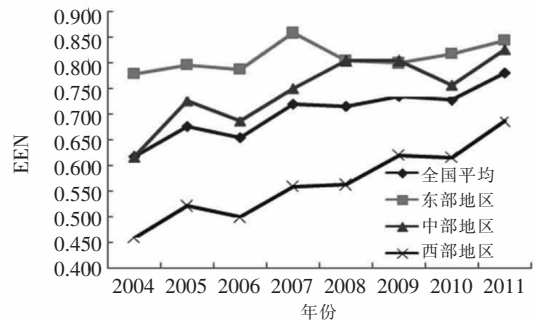


图2 2004—2011年全国及三大地区EEN变化趋势

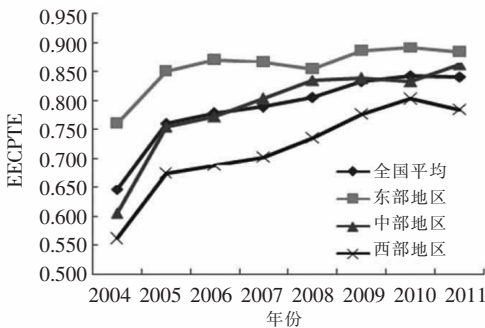


图3 2004—2011年全国及三大地区EECPTE变化趋势

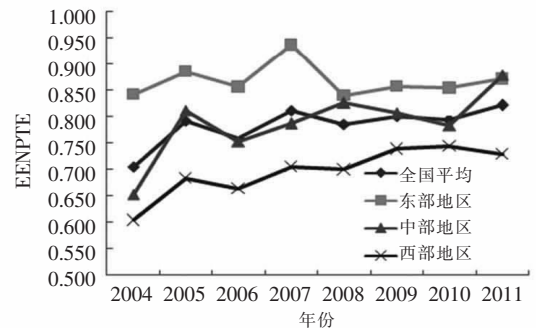


图4 2004—2011年全国及三大地区EENPTE变化趋势

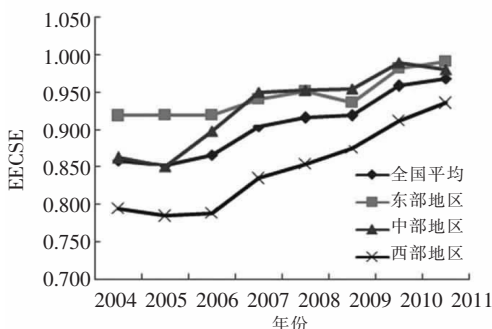


图5 2004—2011年全国及三大地区EECSE变化趋势

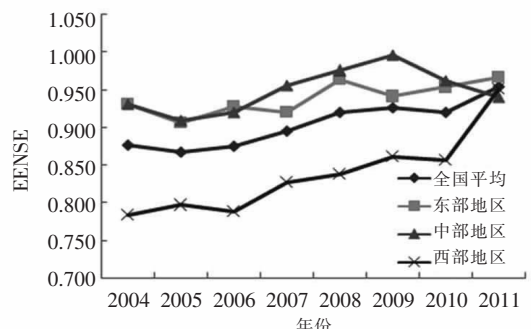


图6 2004—2011年全国及三大地区EENSE变化趋势

2011年间发生了不小的变化,由于篇幅有限,本文不能具体分析各省建筑业每年的能源效率及其分解指数,而采用分析各指标平均值的做法,该方法具有一定的局限性,在今后的研究中有待改进。基于Wang等(2013)^[18]、Bi等(2014)^[19]、史丹(2006)^[20]的能源效率趋势分析法,通过图1~图6描述全国和三大地区建筑业能源效率及其分解指数在2004—2011年间的变化趋势,以便观察效率值及其分解指数在此期间是否有所改进。

由图1~图6可以得出以下几点结论:(1)全国及三大地区的EEC与EEN及其分解指数在2004—2011年间总体呈上升趋势。原因在于中国“十一五”期间积极开展节能减排领域技术的相关研究,重点开发资源潜力大、环境污染小的风力发电、生物质发电、太阳能等可再生能源。另外,国家出台一系列具体政策,如对钢铁、水泥、电解铝等8个高耗能行业的企业实行差别电价等,促使其降低生产建筑材料的单位能耗,有效地推动了节能减排工作的顺利进行,促进了能源利用效率的提高。(2)从分解指数的层面上看,全国及三大地区的EECPTE和EENPTE在波动中增长。将EEC和EEN分解为纯技术效率和规模效率可以进一步分析中国各省建筑业能源效率的技术有效性和规模有效性。由图3和图4可以看出,EECPTE和EENPTE在2005年涨幅最高。这是由于“十五”期间中国科技投入大幅增长,2005年作为“十五”的收官之年,中国R&D经费为2360亿元,比2004年增长20%,占国内生产总值的1.3%,科技投入增加有效地提高了建筑业能源纯技术效率^[21]。2005年之后,三大地区的EECPTE稳步增长,EENPTE在波动中增长。这是由于国家“十一五”计划提出了节能减排的新目标,企业更加注重科技创新和改善管理模式,同时政府也提供了良好的政策环境,这些措施有效地推动了各地区EECPTE和EENPTE的增长。从图5和图6可以看出,三大地区的EECSE和EENSE均处于较高水平,最低值为0.783。其中东部、中部地区高于全国平均水平,而西部地区最低。(3)三大地区的EECSE和EENSE整体为上升趋势,但增幅比EECPTE和EENPTE要小很多。东部地区整体增幅分别为7.90%和3.83%,中部地区分别为13.68%和1.02%,西部地区分别为17.69%和21.36%。其中,西部地区增幅最大,东部、中部地区增幅较小。当前,东部、中部地区很多省份的建筑业能源利用规模已接近生产前沿面,这两个地区的省份应适当优化能源等要素配置,实现能源的有效利用。而对于西部地区的

很多省份,其建筑业能源利用规模的增长空间较大,仍可以通过加大能源等生产要素的投入规模来进一步提升建筑业能源利用效率。

三、建筑业能源效率及其分解指数的影响因素分析

(一)变量说明和模型构建

在EEC、EEN及其分解指数的测算过程中,SBM模型选择了决策单元可以控制的投入和产出指标,并没有考虑其他一些不可控因素。然而这些因素往往是造成决策单元建筑业能源效率差异的重要原因。本研究分别以EEC、EEN及其分解指数EECPTE、EENPTE、EECSE和EENSE为因变量,借鉴汪克亮等(2013)^[22]、陈关聚(2014)^[23]、王雪青等^[14]相关研究的做法,引入以下4种影响因素作为自变量,对建筑业能源效率及其分解指数进行回归分析。各自变量的具体描述及度量方法如下。

1. 建筑业发展度(CIDD)。以各个省建筑业总产值占该省GDP的比重来表示。建筑业发展程度较高的地区,其建筑市场较为规范,建筑业能源配置趋向合理,能够实现建筑企业间的有效竞争,从而提高地区建筑业的能源利用效率。预期该变量的系数为正。

2. 建筑业能源消费结构(ENST)。建筑业的能源消费种类较多,各省建筑业能源消费结构存在一定差异。其中,电能属于清洁、高效能源,本研究采用建筑业的电力消费总量占建筑业能源消费总量的比重来表示建筑业能源消费结构。有研究表明,电力消费比重的上升,有助于提高能源整体使用效率^[24]。预期该变量的系数为正。

3. 人口数量(POP)。建筑业的发展规模以及建筑业能源的需求量受当地人口数量的影响,以各省的人口数量来表示该指标。东部地区多为沿海发达地区,改革开放以来,从中、西部往东部地区迁移的人口源源不断,东部地区人口在持续增加。人口数量较多的地区,建筑业能源需求量较高、CO₂排放量较大,从而导致环境质量下降。人口数量可能对各地区的建筑业能源利用及建筑业碳排放存在一定影响,预期该变量的系数为负。

4. 科技水平(STL)。以建筑业技术装备率来表示该指标。能源具有不可再生性,提高能源利用效率是应对能源危机的有效方法。有研究表明,生产技术的进步推动了能源效率的提升,提高建筑业的科技水平是改善建筑业能源效率的有效途径^[25]。预期该变量的系数为正。

以上对自变量系数符号的预期主要是针对 EEC 和 EEN, 而影响因素对各分解变量的影响还需具体分析。建筑业能源效率及其分解指数均为介于 0~1 之间的受限变量, 用传统的线性方法对模型直接进行回归在结果上可能有偏且不一致^[26], 因而本文采用处理受限因变量的面板 Tobit 模型, 对 EEC、EEN 及其分解指数的影响因素进行分析。基于上述分析, 我们可以设定以下面板回归模型

$$EE_{k,i,t} = \beta_0 + \beta_1 CIDD_{i,t} + \beta_2 ENST_{i,t} + \beta_3 POP_{i,t} + \beta_4 STL_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

其中, $EE_{k,i,t}$ 为各省建筑业的能源效率, $k=1, 2, \dots, 6$, 当 k 取值不同时, 表示建筑业能源效率的不同测度指标。 $k=1$ 时模型(6)的因变量为 EEC; $k=2$ 时模型

(6)的因变量为 EECPTe; $k=3$ 时模型(6)的因变量为 EECSE; $k=4$ 时模型(6)的因变量为 EEN; $k=5$ 时模型(6)的因变量为 EENPTE; $k=6$ 时模型(6)的因变量为 EENSE。 i 代表各省份; t 代表年份; β_i 为回归系数, $i=0, 1, \dots, 4$; $\varepsilon_{i,t}$ 表示随机误差项。

(二) 面板 Tobit 回归结果分析

EEC、EEN 及其分解指数的回归结果如表 2 所示, 可以看出, 模型的个体效应标准差和干扰项标准差均较小, RHO 值均在 0.65 以上, 这说明个体效应的变化主要解释了各省建筑业能源效率及其分解指数的变化。Wald 检验表明应拒绝不存在个体效应的虚无假设, 即拒绝混合 Tobit 模型; 对数似然值显示模型的拟合优度均较好。

表 2 中国建筑业能源效率及其分解指数影响因素的面板 Tobit 回归结果

解释变量	EEC	EECPTE	EECSE	EEN	EENPTE	EENSE
常数项	0.056 228* (0.053)	0.448 879*** (0.000)	0.509 537*** (0.000)	0.320 022*** (0.005)	0.632 481*** (0.000)	0.641 050*** (0.000)
建筑业发展度(CIDD)	2.497 691*** (0.000)	1.644 230*** (0.000)	1.345 392*** (0.000)	1.596 126*** (0.000)	0.952 648*** (0.010)	1.023 883*** (0.000)
建筑业能源消费结构(ENST)	0.995 747*** (0.000)	1.191 995*** (0.000)	0.245 741* (0.053)	0.833 101*** (0.000)	1.057 908*** (0.000)	0.220 312 (0.154)
人口数量(POP)	-0.005 133 (0.693)	-0.396 650*** (0.008)	0.023 156*** (0.006)	-0.012 279 (0.477)	-0.044 580** (0.017)	0.016 835** (0.013)
科技水平(STL)	0.078 062*** (0.004)	0.076 847** (0.014)	0.034 497* (0.092)	0.061 652** (0.042)	0.089 849*** (0.009)	0.014 102 (0.558)
个体效应标准差	0.181 489*** (0.000)	0.204 078*** (0.000)	0.113 991*** (0.000)	0.244 710*** (0.000)	0.259 473*** (0.000)	0.153 563*** (0.000)
干扰项标准差	0.106 935*** (0.000)	0.116 687*** (0.000)	0.082 895*** (0.000)	0.117 507*** (0.000)	0.124 289*** (0.000)	0.097 120*** (0.000)
RHO	0.742 297	0.753 621	0.654 091	0.812 625	0.813 374	0.714 275
Wald 检验(卡方)	147.80	79.53	60.52	58.80	44.46	23.43
对数似然值	79.995 593	31.312 288	133.886 820	51.189 647	16.721 681	88.210 920

注:***、**和*分别表示在1%、5%和10%的水平下显著, 括号中数字为检验的真实概率 p 值。

由表 2 可知, (1) 建筑业发展度对 EEC、EEN 及其分解指数 EECPTe、EENPTE、EECSE 和 EENSE 在 1% 的检验水平下均有显著的正相关影响。表明建筑业发展度越高, 该省建筑业能源效率越高。北京、天津、上海和浙江等经济发达地区, 其建筑市场较为规范, 建筑业更容易实现规模经济, 各生产要素的配置趋向合理, 因此建筑业能源利用效率比经济不发达地区要高。此结果与王雪青等^[14]的研究结论相同。(2) 建筑业能源消费结构与 EEC、EEN 及其分解指数 EECPTe、EENPTE 和 EECSE 存在显著正相关关系, 表明建筑业电力消费总量的比重越大, 其能源利用效率就越高。此结果与汪克亮等^[24]的研究结论相同。电力属于清洁、高效的能源, 相比煤炭来讲, 产生等量热量时所排放的 CO_2 要小的多。但 ENST 对 EECSE 没有通过 5% 的显著性检验, 对 EENSE 关联不显著, 这表明中国建筑业电力消费比

重仍很低, 对建筑业能源利用的规模效率影响不显著。当今, 中国建筑业能源消费主要还是煤炭, 今后应提高清洁能源的消费比重, 减少建筑业 CO_2 的排放。黑龙江省的建筑业电力消费比重远远高于其他省份, 这也是其能源效率较高的主要原因。(3) 人口数量对 EECPTe 和 EENPTE 均存在显著的正相关影响, 但对 EECSE 和 EENSE 的影响为负。表明人口数量的增加有利于提升建筑业能源纯技术效率, 但不利于改善建筑业能源规模效率。原因是人口众多的地区城市化水平较高, 建筑企业的管理水平相对较好, 节能减排技术运用广泛, 有助于节约能源、减少碳排放。但在这些地区, 建筑业能源利用的规模报酬递增效应已经逐渐消失, 较大规模的能源投入会导致能源利用水平的下降和 CO_2 排放的增加。人口数量对 EEC 和 EEN 的关联不显著, 表明其对 EEC 和 EEN 的影响尚难确定, 主要是因为人口数量对建

筑业能源效率的两个分解指数影响恰好相反。(4)科技水平对EEC、EEN、EECPTE和EENPTE有显著的正相关影响,表明科技水平的提高有利于建筑业的能源综合效率和能源纯技术效率的改进。此结果与王雪青等^{[14][11]}以及李廉水和周勇^{[2][11]}的研究结论相同。虽然科技水平对EECSE和EENSE的影响为正,但是回归系数均未通过5%水平下的显著性检验,说明科技水平对建筑业能源规模效率的影响远远小于其对能源纯技术效率的影响。

四、结论

本文基于非径向、非角度的SBM模型,假定能源、劳动力、资本和机械设备为生产中必须的投入要素,建筑业总产值为期望产出,CO₂排放量为非期望产出,对2004—2011年中国建筑业的能源经济效率、能源环境效率及其分解指数进行测算分析。并采用处理受限因变量的面板Tobit模型,选取建筑业发展度、建筑业能源消费结构、人口数量和科技水平为影响因素,对中国建筑业的能源经济效率、能源环境效率及其分解指数进行面板回归分析。结果表明,各省建筑业能源经济效率和能源环境效率具有明显差异,建筑业发展度等因素对能源效率的影响不尽相同。具体结论如下:

1. 中国30个省在2004—2011年EEC和EEN的均值分别只有0.717和0.714,有较大的提升空

间。其中,东部、中部和西部三个地区的建筑业能源效率差异明显,呈阶梯状分布,为东部地区最高、中部地区次之、西部地区最低。由此可见,中部、西部地区是导致中国能源利用效率低下的主要原因。为缩短各地区间建筑业能源效率差距,中西部地区要进一步加强与东部地区在能源领域的技术交流,尽快实现中国建筑业能源效率的整体提高。

2. 2004—2011年中国建筑业能源效率在整体上呈上升趋势,将其分解为纯技术效率指数和规模效率指数后发现,建筑业能源纯技术效率较低是制约中国建筑业能源效率上升的主要原因。因此,大力推广节能减排技术,优化建筑企业的管理模式,加强环境保护制度的建设是提高建筑业能源效率的有效措施。而各省的建筑业规模效率已接近最优水平,不能一味地通过加大能源等生产要素的投入规模来提升建筑业的能源效率。

3. 建筑业发展度、建筑业能源消费结构和科技水平对中国建筑业能源效率呈显著的正相关影响。而人口数量的增加有利于提升建筑业的能源纯技术效率,但抑制了建筑业的能源规模效率的提高。因此,进一步规范建筑业市场,加大节能减排领域的技术创新力度,提高电力等清洁型能源的消费比重,是改善中国建筑业能源效率较低现状的有效手段。

参考文献:

- [1] Hu J L, Wang S C. Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. Energy Policy, 2006, 34(17): 3206-3217.
- [2] Wei Y M, Liao H, Fan Y. An empirical analysis of energy efficiency in China's iron and steel sector[J]. Energy, 2007, 32(12): 2262-2270.
- [3] Nouri J, Lotfi F H, Borgheipour H, et al. An analysis of the implementation of energy efficiency measures in the vegetable oil industry of Iran: a data envelopment analysis approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 52: 84-93.
- [4] Zhao X L, Yang R, Ma Q. China's total factor energy efficiency of provincial industrial sectors[J]. Energy, 2014, 65: 52-61.
- [5] 王艳丽, 李强. 对外开放度与中国工业能源要素利用效率——基于工业行业面板数据[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2012(2): 27-33.
- [6] 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.
- [7] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [8] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: a slacks-based measure (SBM) approach[R]. GRIPS Research Report Series, I-2003-0005.
- [9] Chang Y, Ning Z, Denise D, et al. Environmental efficiency analysis of transportation system in China: a non-radial DEA approach[J]. Energy Policy, 2013, 58: 277-283.
- [10] Pan H F, Zhang H Y, Zhang X L. China's provincial industrial energy efficiency and its determinants[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(5): 1032-1039.
- [11] 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(8): 66-76.

- [12] 史丹, 吴利学, 傅晓霞, 等. 中国能源效率地区差异及其成因研究——基于随机前沿生产函数的方差分解[J]. 管理世界, 2008(2):35-43.
- [13] 赵领娣, 郝青. 人力资本和科技进步对能源效率的影响效应——基于区域面板数据[J]. 北京理工大学学报:社会科学版, 2013(1):19-25, 33.
- [14] 王雪青, 娄香珍, 杨秋波. 中国建筑业能源效率省际差异及其影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2012(2):56-61.
- [15] Sueyoshi T, Goto M. DEA approach for unified efficiency measurement: assessment of Japanese fossil fuel power generation[J]. Energy Economics, 2001, 33(2):292-303.
- [16] 张智慧, 刘睿劼. 基于投入产出分析的建筑业碳排放核算[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2013, 53(1):53-57.
- [17] Yan H, Shen Q P, Fan L C H, et al. Greenhouse gas emissions in building construction: a case study of one Peking in Hongkong [J]. Building and Environment, 2010, 45(4):949-955.
- [18] Wang K, Wei Y M, Zhang X. Energy and emissions efficiency patterns of Chinese regions: a multi-directional efficiency analysis[J]. Applied Energy, 2013, 104(4):105-116.
- [19] Bi G B, Wang P C, Yang F, et al. Energy and environmental efficiency of China's transportation sector: a multidirectional analysis approach[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, DOI:10.1155/2014/539596.[2014]http://www.hindwi.com/journals/mpe/2014/539596.
- [20] 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.
- [21] 李廉水, 周勇. 技术进步能提高能源效率吗? [J]. 管理世界, 2006(10):82-89.
- [22] 汪克亮, 杨力, 杨宝臣, 等. 能源经济效率、能源环境绩效与区域经济增长[J]. 管理科学, 2013(3):86-99.
- [23] 陈关聚. 中国制造业全要素能源效率及影响因素研究——基于面板数据的随机前沿分析[J]. 中国软科学, 2014(1):180-192.
- [24] 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, 23(6):100-111.
- [25] 戴永安, 陈才. 中国省际建筑业效率差异及其影响因素研究[J]. 中国软科学, 2010(1):87-95.
- [26] 韩华为, 苗艳青. 地方政府卫生支出效率核算及影响因素实证研究——以中国 31 个省份面板数据为依据的 DEA-Tobit 分析[J]. 财经研究, 2010(5):4-15.

Empirical Research on Energy Economic Efficiency and Energy Environmental Efficiency of China's Construction Industry

—Based on the SBM-Tobit Two-stage Model

FENG Bo, WANG Xueqin

(School of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Two kinds of construction industry energy efficiency indexes are defined, namely the construction industry energy economic efficiency and the construction industry energy environmental efficiency. The study measure two kinds of energy efficiency and their decomposition indexes of China's construction industry from 2004 to 2011, and test the impacts of different kinds of external factors on energy economic efficiency and energy environmental efficiency of China's construction industry. Results show that the average energy efficiency of China's construction industry by area is increased, while low construction energy pure technical efficiency is the main reason for restricting our country's construction industry energy efficiency. Some measures should be taken to improve the energy efficiency of construction industry, such as regulating the construction industry market, increasing energy-saving technology innovation and improving the proportion of electric power of clean energy consumption, etc.

Key words: construction industry; energy economic efficiency; energy environmental efficiency; SBM model; panel tobit mode

[责任编辑:孟青]