

文章编号:1003-207(2016)08-0053-09

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2016.08.007

灰霾环境下能源效率测算与节能减排潜力分析

—基于多非期望产出的 NH-DEA 模型

孟庆春^{1,3}, 黄伟东^{1,3}, 戎晓霞^{2,3}

(1. 山东大学管理学院, 山东 济南 250100; 2. 山东大学数学学院, 山东 济南 250100;
3. 山东大学价值共创网络研究中心, 山东 济南 250100)

摘要:考虑到现有能源效率测算未把灰霾作为环境约束这一问题, 基于非参数前沿构建了不可分的混合测度 DEA 模型, 将致霾污染物 SO₂、NO_x、CO₂ 和烟(粉)尘作为非期望产出, 对各省份 2010—2013 年灰霾环境约束下的能源效率进行了更加科学的测算, 结果发现: 我国省际能源效率差异比较大; 东部平均能源效率最高, 中部次之, 西部最差; 我国整体的能源效率为 0.63。通过 Tobit 模型对能源效率的影响因素进行分析, 发现能源禀赋、产业结构、政府影响力和能源效率呈显著的负相关关系, 技术进步和能源效率呈显著正相关关系, 各因素对我国区域间的影响程度存在差异。在节能减排潜力方面, 我国各省份的能源节约潜力和致霾污染物减排潜力都很大。这些结果有助于制定能源节约和灰霾治理规划。

关键词: 灰霾; 能源效率; NH-DEA; 多非期望产出; 节能减排

中图分类号: C931; X51 **文献标识码:** A

1 引言

改革开放 36 年间, 我国经济飞速发展。2014 年我国 GDP 达到 10.36 万亿美元, 占全球的 13.3%。与此同时, 能源消费量也随着经济发展而迅速增长, 2013 年我国的能源消费量就已经超过了整个北美地区, 2014 年占全球能源消费量的 23%^[1]。但从能源强度来看, 2013 年我国的能源强度分别为英国、德国、法国、日本和美国的 4.5 倍、3.6 倍、3.4 倍、2.9 倍和 2.2 倍, 可见单位 GDP 的能耗要比发达国家高很多。能源消费在推动经济发展的同时也带来了严重的环境污染, 近年来大规模爆发的灰霾污染就是表征之一。2013 年 1 月底我国中东部地区出现大规模持续性的灰霾天气, 灰霾覆盖面积达 143 万平方公里, 影响人数达到 8 亿人。研究表明, 除气候因素外, 能源燃烧产生的 SO₂ 和

NO_x 等污染物是引起灰霾的重要前体物, 要减轻灰霾污染, 就必须在我国能源消费总量仍然增长的情况下, 减少致霾污染物的排放^[2~3]。因此, 精确测算灰霾环境下我国的能源效率水平, 并在此基础上确定节能减排方向, 就显得尤为重要。

在能源效率测算方面, 中外学者已经进行了大量研究, 取得了丰硕的研究成果。Patterson^[4]对能源效率的定义、指标和计量方法做了分析和总结; Phylipsen^[5]、Boyd^[6]、Hu Jinli 和 Wang^[7]认为单要素生产率角度无法全面的反映能源效率, 进而从全要素生产率的角度对 Patterson^[4]的研究进行了扩展, 将能源效率的测算纳入全要素生产率框架下。此后, 能源效率的测算研究主要有两个方向: (1) 能源效率区域特征研究。魏楚等^[8]、汪克亮等^[9]构建了非参数前沿函数, 采用省级面板数据对我国能源效率进行测算, 发现我国东部能源效率要比中西部高, 并且各省份之间的能源效率差异有扩大的危险; 屈小娥^[10]、李金铠^[11]利用 Malmquist 指数对我国能源效率进行了分解, 也发现我国东部能源效率较高, 而中西部的能源效率则处于较低水平; 师博等^[12]、马海良等^[13]则是将知识存量纳入生产函数对我国省际、三大经济区域的能源效率, 发现各地区的

收稿日期: 2015-05-31; 修订日期: 2016-03-26

基金项目: 山东省软科学研究项目(2015RKE27019)、山东大学
基本科研业务费资助项目(2014QY001-05)

通讯作者简介: 戎晓霞(1973—), 女(汉族), 山东禹城人, 山东大学
数学学院副教授, 硕士生导师, 理学博士, 研究方向: 运筹与管理, E-mail: rongxiaoxia@sdu.edu.cn.

能源效率整体呈上升趋势。赵金楼等^[14]还对能源效率的影响因素和收敛性做了分析,发现煤炭消费比重下降能提高能源效率,我国东部地区能源效率不存在趋同趋势,而中西部地区存在趋同收敛趋势。蔡圣华等^[15]则在能源效率影响因素的基础上估计了我国的节能目标,认为在政府适当干预情形下节能潜力能达到 14%~17%。还有学者充分考虑了投入产出的松弛性问题,利用 SBM-DEA 模型对我国的能源效率进行了测算:Choi 等^[16]发现我国能源效率总体较低,且和 CO₂ 排放效率成倒 U 型函数关系;Bian Yiwen 等^[17]发现我国经济系统的无效率主要是由第二产业的能源绩效不佳引起的,并认为当前能源结构调整、工业结构优化对我国能源效率有负作用;Meng Ming 等^[18]对我国的能源效率进行三维分解,发现我国北部地区能源效率要高于南部,应该调整经济结构和限制小规模私营工业企业的数量来提升能源效率。(2)能源效率行业特征研究。Wei Yiming 等^[19]利用 Malmquist 指数将我国钢铁行业 1994—2003 年的能源效率分解为技术进步和技术效率两个部分,发现各地区钢铁行业能源效率差距有扩大趋势,且这一时期我国钢铁行业的能源效率提高主要是技术进步引起的;李廉水等^[20]则发现技术效率提升才是我国工业部门能源效率提高的主要原因。此外,还有学者利用 DEA 模型对我国工业部门能源效率进行测算:Zhao Xiaoli^[21]、Wang Zhaohua 等^[22]发现我国东部工业部门能源效率要高于西部,并认为技术进步和经济发展对工业部门能源效率提高具有促进作用;唐玲等^[23]人则发现了开放程度高的工业部门能源效率较高,而垄断程度高的工业部门能源效率低。

分析上述文献可以看到,学者们对于我国区域及行业能源效率研究尚未得出一致结论,且大多数研究并未考虑能源消费所产生的环境污染问题。然而,能源燃烧所排放的 SO₂ 和 NO_x 等污染物不仅是灰霾细颗粒物的重要组成,同时也是二次细颗粒物的重要前体物质,因此能源效率测算时必须考虑致霾污染物的影响。另外,尽管已有文献考虑了非期望产出的影响,但都未考虑能源投入与非期望产出之间的不可分性(是指在技术水平不变的情况下,每消费 1 单位能源必然产生一定比例的环境污染物),这些不足将导致现有研究不能真实地反映我国灰霾环境约束下的能源效率水平,因此在测算能源效率过程中,考虑灰霾环境约束及投入产出之间的不可分性是极其必要的。

为此,本文做出以下改进:(1)充分考虑能源效率测算中的环境约束问题,考虑能源消费排放的 SO₂、NO_x、CO₂ 和烟(粉)尘 4 种致霾污染物;(2)采用不可分的混合 DEA 模型(Nonseparable Hybrid DEA Model),充分考虑投入产出的松弛性,又兼顾径向和非径向角度,还区分了能源投入与非期望产出之间的不可分性。在此基础上,本文将以煤炭、石油和天然气的消费量作为能源投入指标,应用考虑多非期望产出的不可分混合 DEA 模型对我国各省份在灰霾环境下的能源效率进行测算,并通过处理受限变量的 Tobit 模型对能源效率的影响因素进行计量分析,然后分别计算出各省份的节能减排潜力,进而给出我国各地区提高能源效率、减轻灰霾污染的对策建议。

2 灰霾环境下能源效率测算和影响因素分析

2.1 考虑致霾污染物的不可分混合 DEA 模型

Farrell^[24]首次提出可以构造一个非参数线性凸面作为生产前沿来估计生产效率。Charnes 和 Cooper^[25]等人在 Farrell^[24]研究基础上提出了首个 DEA 模型(CCR)以后,DEA 模型在生产率测度评价领域得到了广泛应用。Banker 等^[26]在 CCR 基础上,提出了规模报酬可变的 VCR 模型,此后还有学者不断地对 DEA 模型进行扩展。Tone 等^[27-28]基于已有研究提出了考虑投入产出松弛性的 SBM-DEA 模型,又在此基础上发展了能够处理多种非期望产出并且考虑投入产出不可分性的混合 DEA 模型(NH-DEA),该模型可以描述如下:

假设生产系统中有 n 个相似的决策单元,决策单元在生产过程中的投入和产出向量分别为

$X \in R^{m \times n}$ 和 $Y \in R^{l \times n}$,这里将投入产出矩阵 X 和 Y 分解为:

$$X = \begin{pmatrix} X^F \\ X^{BF} \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} Y^{FG} \\ Y^{FB} \\ Y^{BFG} \\ Y^{BFB} \end{pmatrix}$$

其中: $X^F \in R^{m1 \times n}$ 和 $X^{BF} \in R^{m2 \times n}$ 分别代表可分和不可分的投入矩阵; $Y^{FG} \in R^{l1 \times n}$ 、 $Y^{FB} \in R^{l2 \times n}$ 、 $Y^{BFG} \in R^{l3 \times n}$ 和 $Y^{BFB} \in R^{l4 \times n}$ 分别代表可分的期望产出、可分的非期望产出、不可分的期望产出和不可分的非期望产出。此时规模报酬不变的生产可能性集可描述为:

$$P_{BF} = \{(x^F, x^{BF}, y^{FG}, y^{FB}, y^{BFG}, y^{BFB}) \mid x^F \geq X^F \lambda, x^{BF} \geq X^{BF} \lambda, y^{FG} \leq Y^{FG} \lambda, y^{FB} \geq Y^{FB} \lambda,$$

$$y^{BFG} \leq Y^{BFG} \lambda, y^{BFB} \geq Y^{BFB} \lambda \}$$

其中 λ 是权重向量。

生产可能性集的特征有:

(1)不可分的投入产出变量是径向的,可分投入产出变量是非径向的。

(2)不可分非期望产出减少的同时,不可分期望产出也会按比例减少。

在此生产可能性集下,生产单元 $DMU_0(x_0^F,$

$x_0^{BF}, y_0^{FG}, y_0^{FB}, y_0^{BFG}, y_0^{BFB})$ 的不可分有效性定义为:

对于任意 $\theta (0 \leq \theta < 1)$, 当且仅当 $(x_0^F, \theta x_0^{BF}, y_0^{FG}, y_0^{FB}, \theta y_0^{BFG}, \theta y_0^{BFB}) \notin P_{BF}$ 且不存在 $(x^F, x^{BF}, y^{FG}, y^{FB}, y^{BFG}, y^{BFB}) \in P_{BF}$ 使得 $x_0^F \geq x^F, y_0^{FG} \leq y^{FG}, y_0^{FB} \geq y^{FB}, x_0^{BF} \geq x^{BF}, y_0^{BFG} \leq y^{BFG},$

$y_0^{BFB} \geq y^{BFB}$ 任一严格不等式成立时,则该生产单元是有效的,这时用 ρ 表示能源效率值。则本文模型可表述为:

$$\rho^* = \text{Min} \frac{1 - \frac{1}{m} (\sum_{i=1}^{m_1} \frac{S_i^{F-}}{x_{i0}^F} + m_2 (1 - \theta) + \sum_{i=1}^{m_2} \frac{S_i^{BF-}}{x_{i0}^{BF}})}{1 + \frac{1}{l} (\sum_{r=1}^{l_1} \frac{S_r^{FG+}}{y_r^{FG}} + \sum_{r=1}^{l_2} \frac{S_r^{FB+}}{y_r^{FB}} + (l_3 + l_4) (1 - \theta) + \sum_{r=1}^{l_3} \frac{S_r^{BFG+}}{y_r^{BFG}} + \sum_{r=1}^{l_4} \frac{S_r^{BFB+}}{y_r^{BFB}})}$$

$$s. t. \begin{cases} x_0^F = X^F \lambda + s^{F-} \\ \theta x_0^{BF} = X^{BF} \lambda + s^{BF-} \\ y_0^{FG} = Y^{FG} \lambda - s^{FG+} \\ y_0^{FB} = Y^{FB} \lambda + s^{FB+} \\ \theta y_0^{BFG} = Y^{BFG} \lambda - s^{BFG+} \\ \theta y_0^{BFB} = Y^{BFB} \lambda + s^{BFB+} \\ \sum_{r=1}^{l_1} y_r^{FG} + \sum_{r=1}^{l_3} y_r^{BFG} = \sum_{r=1}^{l_1} y_{r0}^{FG} + \sum_{r=1}^{l_3} y_{r0}^{BFG} \\ y_r^{FG} \leq (1 + \delta) y_{r0}^{FG} \\ m = m_1 + m_2 \\ l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \\ s^{F-} \geq 0, s^{BF-} \geq 0, s^{FG+} \geq 0, s^{FB+} \geq 0, s^{BFG+} \geq 0, s^{BFB+} \geq 0 \\ \lambda \geq 0, 0 \leq \theta \leq 1 \end{cases}$$

其中: $s^{F-}, s^{BF-}, s^{FG+}, s^{FB+}, s^{BFG+}, s^{BFB+}$ 分别是投入产出的松弛变量(这里剩余变量统称为松弛变量); θ 是缩减系数, δ 是可分期望产出的膨胀系数; $\sum_{r=1}^{l_1} y_r^{FG} + \sum_{r=1}^{l_3} y_r^{BFG} = \sum_{r=1}^{l_1} y_{r0}^{FG} + \sum_{r=1}^{l_3} y_{r0}^{BFG}$ 表示期望产出的数量要保持不变。

当 $0 \leq \rho^* < 1$ 时,说明该决策单元存在无效率,生产过程中投入产出需要进行改进;当 $\rho^* = 1$ 时,说明该决策单元是有效率的,处于生产前沿面上。

2.2 变量选择和数据来源

本文采用我国 30 个省(市、区)(西藏除外)的投入产出面板数据,考虑到数据的可得性,样本区间选取为 2010—2013 年。当前学者大多选择资本存量、劳动力和能源消费量作为投入变量,且能源消费量使用各省(市、区)的能源消费总量作为指标(魏楚等^[8];史丹等^[29];师博等^[12];Choi 等^[16];Zhao Xiaoli 等^[21])。与这些学者不同,本文分别使用煤炭、石

油和天然气作为能源投入指标,不纳入水电消费量(水电属二次能源,且消费过程不污染环境),这样可以更有针对性地为各省(市、区)提出节能减排的对策建议。产出变量方面,大多数学者选择地区 GDP 作为期望产出,在非期望产出方面,学者往往选择 SO_2 或 CO_2 作为非期望产出(袁晓玲等^[30];汪克亮等^[9];Wang Zhaohua 等^[31]),而事实上,2010 年我国氮氧化物(NO_x)的排放总量已经超过了 SO_2 ,成为主要的大气污染物之一,更严重的是 NO_x 的危害比 SO_2 还大,因此必须考虑其对能源效率的影响,因此本文选择 SO_2, NO_x, CO_2 和烟(粉)尘的排放量作为非期望产出变量。指标选取如表 2.1 所示:

2.3 结果分析

本文利用上述投入产出面板数据,通过 DEA solver pro5.0 软件对模型进行求解,得到我国各省(市、区)在 2010—2013 年间灰霾环境下的能源效率值,并求得能源效率均值,结果如表 2.2 所示:

表 2.1 投入产出变量

类别	变量名及可分性	变量解释
投入变量	资本存量(可分)	借鉴张军等 ^[32] 提出的“永续盘存法”估计中国各省份的资本存量作为资本投入变量,计算公式为: $K_{it} = I_{it} + (1 - \delta_{it}) K_{it-1}$, 其中 I 是当年投资, δ 是固定资产折旧率
	人力资本(可分)	使用地区就业人数作为人力资本投入变量
	能源投入(不可分)	使用省际煤炭、石油和天然气消费量作为能源投入指标
产出变量	GDP(可分)	选取地区 GDP 为期望产出指标,并以 2010 年为基期做不变价处理。
	NO _x (不可分)	能源消费排放了大量致霾污染物,这里选取 SO ₂ 、NO _x 、CO ₂ 和烟(粉)尘 4 种污染物的排放量作为非期望产出指标。NO _x 的计算本文采用“自下而上”法,排放因子参照 Shi Yun 等 ^[33] 的研究结果。
	SO ₂ (不可分)	
	CO ₂ (不可分)	
烟(粉)尘(不可分)		

数据来源包括《中国统计年鉴》(2011—2014)、《中国能源统计年鉴》(2011—2014)和《中国环境统计年鉴》(2011—2014)。

表 2.2 2010—2013 年我国各省份能源效率值

地区	2010	2011	2012	2013	均值	地区	2010	2011	2012	2013	均值
北京	1	1	1	1	1	湖北	0.73	0.69	0.68	0.71	0.70
天津	0.74	0.62	0.58	1	0.73	湖南	0.98	0.96	0.90	1	0.96
河北	0.56	0.55	0.52	1	0.66	四川	0.58	0.58	0.58	0.52	0.56
辽宁	0.56	0.46	0.41	0.47	0.47	重庆	0.61	0.60	0.61	0.54	0.59
上海	0.99	0.92	0.86	1	0.94	广西	1	1	1	0.95	0.99
江苏	1	1	1	1	1	贵州	0.47	0.47	0.50	0.45	0.47
浙江	0.90	0.84	0.86	1	0.90	云南	0.72	0.64	0.67	0.72	0.69
福建	0.74	0.69	0.69	0.71	0.71	陕西	0.34	0.34	0.34	0.36	0.35
山东	0.68	0.65	0.59	1.00	0.73	甘肃	0.31	0.32	0.30	0.31	0.31
广东	1	1	1	1	1	青海	0.32	0.30	0.29	0.30	0.30
海南	0.53	0.46	0.44	0.45	0.47	宁夏	0.25	0.28	0.23	0.25	0.25
山西	0.41	0.42	0.42	0.40	0.41	内蒙古	0.42	0.44	0.46	1	0.58
吉林	0.45	0.48	0.49	0.52	0.49	新疆	0.22	0.22	0.21	0.23	0.22
黑龙江	0.39	0.41	0.39	0.43	0.40	东部	0.79	0.74	0.72	0.87	0.78
安徽	0.78	0.72	0.68	0.64	0.71	中部	0.66	0.64	0.61	0.62	0.64
江西	0.92	0.88	0.79	0.71	0.83	西部	0.48	0.47	0.47	0.51	0.48
河南	0.61	0.59	0.56	0.57	0.58	全国	0.64	0.62	0.60	0.67	0.63

由表 2.2 可以看出:在 2012 年之前,能源效率在前沿面上的地区分别是北京、江苏、广东和广西 4 个省份,其能源效率值都为 1,主要位于我国东部地区。而陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆 5 个省份的能源效率值都低于 0.4,全部位于我国西北地区。从三大区域看,我国区域能源效率“东高西低”的态势非常明显,东、中、西部地区 2010—2013 年的能源效率均值分别为 0.78、0.64、0.48,这与大多学者的研究结果一致(魏楚和沈满洪^[8];史丹等^[29];屈小娥^[10];李金铠等^[11];Wang Zhaohua 等^[31]);另外还可以看到,我国区域能源效率不仅差距较大,而且有扩大的危险。2010—2012 年,东部能源效率分别是中部和西部的 1.2 倍和 1.6 倍,而到了 2013 年,差距已经扩大为 1.4 倍和 1.7 倍。再从全国来看,全国 30 个省(市、区)2010—2013 年的能源效率均值仅达到 0.63,能源效率损失高达 0.37,能源效率整体比较低。

需要注意的是,2013 年处于能源效率前沿面的

省份大幅增加,东部新增天津、河北、上海、浙江 4 个省份,中部和西部分别新增了湖南和内蒙古两个省份。究其原因,可能是 2013 年 1 月份出现的强灰霾天气,以及国务院相继印发的《重点区域大气污染防治“十二五”规划》、《大气污染防治行动计划》等大气污染防治条例,使得各地政府意识到了灰霾污染的严重性,采取了更加积极有效的灰霾治理措施,因此 2013 年出现了多个省份的能源效率到达前沿面的情况。此外,需要指出的是,2013 年我国京津冀鲁地区、长三角地区和广东的能源效率都较高,但恰恰是灰霾污染最严重的的地区,这二者看似矛盾,其实不然。尽管我国东部技术水平较高,能源效率也处于较高水平,但是人口密度很大,为满足人们生产生活需要,消费的能源数量非常巨大,因此排放了大量的致霾污染物。经测算,这 3 个区域每平方公里承载的致霾污染物分别为 6500、7344、和 3429 吨,均为我国致霾污染物密度(是指 SO₂、NO_x、CO₂ 和烟(粉)尘的重量之和除以地区土地面积,其中 CO₂ 的

重量通过能源消费量和折算系数算得)最高的地区之一。污染物密度高,再加上静稳和逆温天气等不利于污染物扩散的气候因素,这3个地区很容易爆发严重的灰霾天气。

2.4 影响因素计量分析

由上分析可以看到,灰霾环境下我国省际间的能源效率相差很大,东、中、西部的差异也很大。为了探查造成能源效率差异的原因,下面对能源效率的影响因素进行分析。

2.4.1 影响因素指标选择和模型构建

能源禀赋(EB):能源禀赋体现了一个省份的能源充裕程度,也是其能源依赖度的重要指标。考虑到不是每个省份都有煤炭矿藏,因此这里能源禀赋用各省份的一次能源(煤炭、石油、天然气)的生产量和能源消费总量的比值来衡量,这与师博等^[12]、袁晓玲等^[30]以煤炭生产量占能源消费量的比重作为能源禀赋不同。

产业结构(IS):与魏楚等^[8]、屈小娥^[10]选择第三产业作为产业结构变量不同,本文认为工业生产排放是引起灰霾的重要污染源,且我国第二产业消耗的能源达到能源消费总量的70%,因此这里选择各省份第二产业和地区生产总值的比值作为产业结构指标。

技术进步(TP):R&D经费投入能代表一个省份在科技方面的投入力度,一定程度上能体现其技术进步水平,因此这里选择各省份R&D经费投入强度作为技术进步的衡量指标。

政府影响力(GI):政府主要是通过财政支出对经济社会进行干预,因此这里选择财政支出占GDP的比重作为政府影响力的衡量指标。

基于以上指标选择,构建如下模型:

$$EE_{i,t} = C + \beta_1 EB_{i,t} + \beta_2 IS_{i,t} + \beta_3 TP_{i,t} + \beta_4 GI_{i,t} + \mu_{i,t}, EE_{i,t} \in (0, 1)$$

其中: $EE_{i,t}$ 为能源效率值, $\mu_{i,t}$ 为随机误差项, i 为省份, t 为时期。

所用基础数据来源于《中国统计年鉴》(2011—2014)、《中国能源统计年鉴》(2011—2014)。

2.4.2 计量结果分析

由于能源效率值大于0而小于或等于1,为受限因变量,因此这里选择处理受限因变量的Tobit模型进行能源效率影响因素分析,模型估计结果如表2.3所示:

由表2.3可以看出:

(1)能源禀赋(EB)与全国及中部、西部的能源效率都呈显著的负相关关系,与东部也呈负相关,但不显著,与师博等^[12]、袁晓玲等^[30]的研究结果基本一致。从全国来看,在其它因素不变的情况下,能源禀赋每增加1%,能源效率就下降0.072%。此外,能源禀赋对中部、西部地区的影响也不相同,对中部影响最大,能源禀赋增加1%,中部能源效率就下降0.102%,而西部只下降0.078%。这与我国的能源矿藏主要分布在西部是相对应的,西部能源储量丰富,对能源效率的边际影响较小,而中部较西部来说,能源矿藏缺乏,对能源效率的边际影响较大。

(2)产业结构(IS)对全国具有显著的负作用,即第二产业每增加1%,能源效率就降低1.05%。从三大区域来看,产业结构对东部的影响为负,对中部、西部的影响为正,但都不显著。

(3)从全国来看,技术进步(TP)对全国有显著的正作用,技术进步每提高1%,能源效率就提高7.605%。此外,技术进步对三大区域的能源效率影响是不同的,对东部有显著的正影响,对中部影响不显著,对西部甚至有负影响。这与东部能源禀赋较低,只能通过技术进步来提高能源效率的现实情况是相对应的,而西部由于能源禀赋较高,R&D经费很有可能倾向于投入到能源开采上,而对于能源消费领域的研究投入不足,因此出现了这一情况。

(4)从全国及三大区域来看,政府影响力(GI)和能源效率都呈显著负相关关系。相关研究表明,政府通过财政支出对经济社会的影响会造成能源效

表 2.3 能源效率影响因素 Tobit 模型估计结果

EE	全国	东部	中部	西部
EB	-0.072 * * *	-0.197	-0.102 * * *	-0.078 * * *
IS	-1.05 * *	-2.026	0.081	0.397
TP	7.605 * *	12.726 *	8.211	-15.590 * *
GI	-1.200 * * *	-3.957 * * *	-0.774	-1.642 * * *
C	1.409 * * *	2.236 * *	0.746	1.072 * * *
Prob>chi ²	0.0000	0.0000	0.0085	0.0001
LR chi ²	95.65	40.80	13.66	25.01

注: * * *、* *、* 分别代表在1%、5%、10%的显著性水平下显著。

表 3.1 2010—2013 年我国各省份平均节能减排潜力

地区	节能潜力(%)			减排潜力(%)			
	煤炭	石油	天然气	SO ₂	NO _x	CO ₂	烟粉尘
北京	0	0	0	0	0	0	0
天津	-26.5	-26.0	-14.2	-15.4	-15.1	-26.3	-3.0
河北	-45.9	-8.3	-6.1	-39.0	-43.3	-42.6	-51.1
辽宁	-54.9	-66.4	-27.8	-56.1	-41.7	-59.2	-69.4
上海	-3.7	-24.9	-10.8	10.3	7.3	-14.7	26.8
江苏	0	0	0	0	0	0	0
浙江	-19.9	0.1	41.2	-12.6	-2.2	-11.8	-19.8
福建	-35.5	16.7	-3.4	-27.2	-8.9	-20.5	-54.9
山东	-48.4	-22.9	46.6	-41.6	-26.7	-40.7	-41.7
广东	0	0	0	0	0	0	0
海南	-33.8	-68.3	-76.3	-25.3	-57.7	-60.6	-28.6
山西	-80.1	32.2	-74.4	-70.4	-72.2	-76.6	-76.3
吉林	-50.9	-27.9	-22.5	-39.7	-48.5	-46.2	-66.0
黑龙江	-62.9	-48.1	-32.4	-50.0	-58.3	-58.2	-81.9
安徽	-49.2	34.1	9.0	-28.8	-53.1	-39.0	-53.5
江西	-1.5	-7.2	12.0	-27.8	-37.8	-2.7	-29.5
河南	-42.2	26.8	-29.5	-51.1	-49.5	-34.8	-52.2
湖北	-52.3	8.4	45.8	-48.5	-23.1	-39.0	-59.5
湖南	-36.2	42.9	104.4	-41.5	-16.0	-20.9	-57.7
四川	-56.0	49.1	-64.9	-68.4	-30.6	-40.0	-66.3
重庆	-46.7	68.3	-50.1	-77.6	-46.5	-34.2	-67.1
广西	-3.7	-11.0	62.1	-3.9	-8.1	-5.5	-5.4
贵州	-70.0	3.4	-13.2	-81.0	-66.6	-65.3	-57.7
云南	-47.2	-12.5	83.8	-50.3	-47.7	-43.0	-41.7
陕西	-73.6	-39.2	-59.9	-76.4	-62.3	-65.5	-82.1
甘肃	-71.0	-64.1	-52.4	-82.3	-71.6	-68.7	-79.7
青海	-60.9	-33.1	-88.0	-80.9	-66.5	-60.7	-91.5
宁夏	-84.1	-55.4	-81.3	-87.0	-85.9	-81.6	-88.7
内蒙古	-55.6	-0.8	-27.0	-59.7	-52.2	-51.9	-61.5
新疆	-82.0	-68.9	-86.3	-85.8	-79.1	-78.8	-93.1
东部	-30.9	-20.4	-2.3	-26.5	-18.6	-27.4	-37.0
中部	-53.7	0.8	-12.6	-48.9	-48.5	-45.7	-62.8
西部	-59.9	-24.0	-62.7	-67.6	-55.5	-54.5	-66.0
全国	-46.0	-17.4	-26.1	-47.9	-38.1	-39.6	-55.2

率的流失。在其它因素不变的情况下,政府影响力提高1%,能源效率就会下降1.2%。这一结果与王志刚等^[34]、魏楚等^[8]、屈小娥^[10]的研究结果是一致的。因此,为了提升能源效率,各地政府应减少对经济的干预。

3 节能减排潜力分析

我国整体能源效率低,能源效率损失大,能源节约和致霾污染物减排潜力都很高。下面将对各省份的节能减排潜力进行分析。

由表 3.1 可以看出:

(1)从节能潜力来看,我国各省份的煤炭节约潜力都比较大(不含前沿面上的省份),山西、黑龙江、贵州、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆 8 个省份的节煤潜力都超过了 60%,其中山西和新疆两个省份的节

煤潜力甚至超过了 80%。从区域来看,中国西部的节煤潜力最高,中部次之,东部最低,分别达到 59.9%、53.7%和 30.9%。再从全国来看,中国整体的节煤潜力高达 46%。由此可见,我国各地区能源效率若能趋近前沿面,将能够节省近乎一半的煤炭资源。石油方面,辽宁、海南、甘肃、宁夏和新疆 5 个省份的节油潜力都超过了 55%,而福建、山西、安徽、河南、湖南、四川和重庆 7 个省份应增加 10%以上的石油消费量。我国东部和西部地区节油潜力分别为 20.4%和 24.0%,而中部地区应该增加石油消费量。从全国来看,我国的整体节油潜力为 17.4%。再看天然气方面,海南、山西、四川、青海、宁夏和新疆 6 个省份的节气潜力都超过了 60%,而浙江、山东、安徽、江西、湖北、湖南、广西和云南 8 个省份应增加天然气消费。从区域来看,西部节气潜

力最大,为62.7%,东部和中部分别为2.3%和12.6%。全国整体节气潜力为26.1%。从能源结构调整方面来看,所有地区都应该减少煤炭的消费量,改变能源消费中“一煤独大”的现状。浙江、安徽、湖北和湖南4个省份应增加石油和天然气的消费量;福建、山西、河南、四川、重庆和贵州6个省份应增加石油消费量减少天然气消费量;山东、江西、广西和云南4个省份应增加天然气消费量减少石油的消费量;其余16个省份应在提高能源效率的基础上,减少煤炭、石油和天然气三种能源的消费量。

(2)从致霾污染物的减排潜力来看,在能源效率达到前沿面时,除上海外,我国各省(市、区)都有较大的SO₂减排潜力,其中山西、重庆、贵州、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆8个省份的SO₂减排潜力均超过了70%且大部分位于西部地区,我国整体的SO₂减排潜力高达47.9%。NO_x减排方面,山西、贵州、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆7个省份的NO_x减排潜力都超过了60%,也主要位于西部地区,全国整体的NO_x减排潜力达到38.1%。CO₂减排方面,海南、山西、贵州、陕西、甘肃、宁夏和新疆7个省份的CO₂减排潜力超过了60%,中国整体的CO₂减排潜力高达39.6%。最后来看烟(粉)尘方面,减排潜力超过70%的有山西、黑龙江、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆7个省份,我国整体的烟(粉)尘减排潜力高达55.2%。从横向来看,山西、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆这6个省份4种致霾污染物的减排潜力都很大,并且这6个省份大都是煤炭资源比较丰富、能源禀赋较高的地区,这与2.4的研究结果是一致的。

4 结语

本文利用2010—2013年我国30个省份的投入产出数据,采用考虑多非期望产出的不可分混合DEA模型,将资本存量、人力资本和煤炭、石油、天然气作为投入要素,区分期望产出(GDP)和非期望产出(SO₂、NO_x、CO₂和烟(粉)尘)的同时,考虑能源消费和致霾污染物排放的不可分性,测算我国各省份灰霾环境下的能源效率值,并通过处理受限因变量的Tobit模型,对能源效率的影响因素进行分析,最后还计算了我国各省份的节能减排潜力,主要结论如下:

(1)能源效率的测算考虑了SO₂、NO_x、CO₂和烟(粉)尘多种致霾污染物的影响,并考虑了能源消费和致霾污染物之间的不可分性,方法更加科学,结果更符合实际情况。测算结果显示:各省份能源效

率差异明显,节能减排潜力巨大;我国整体的能源效率只有0.63,能源效率损耗较大。

(2)从我国整体来看,能源禀赋、产业结构、政府影响力和能源效率都呈显著负相关关系,在其它因素保持不变的情况下,能源禀赋、产业结构、政府影响力每增加1%,将导致能源效率分别下降0.072%、1.05%、1.2%;技术进步和能源效率呈显著正相关关系,技术进步水平每提高1%,能源效率将提高7.6%;各因素对东、中、西部的影响不尽相同。

(3)我国的能源节约潜力和致霾污染物的减排潜力都非常巨大,煤炭、石油和天然气的整体节约潜力分别达到46%、17.4%和26.1%;SO₂、NO_x、CO₂和烟(粉)尘整体的减排潜力分别达到47.9%、38.1%、39.6%和55.2%。同时还发现,能源禀赋较高的省份,能源节约潜力和致霾污染物减排潜力都要比其他省份高一些。

以上结论蕴含的政策启示主要有:制定节能减排规划和灰霾减轻规划既要着眼全国,又要针对我国不同区域、不同省份的实际情况,制定相应的对策。具体而言就是:对于能源禀赋较高的陕西、内蒙古、山西、黑龙江、宁夏、新疆等省份,要学习北京、江苏等能源禀赋低但能源效率高省份的经验,加快改变能源禀赋高能源效率低的局面,向能源禀赋低但能源效率高的地区看齐,充分发挥节能减排的潜力;政府干预容易导致能源效率的流失,因此各地政府应减少对于经济社会活动的影响,将财政资金更多向节能环保及清洁能源研究方面倾斜,减少化石能源消费及致霾污染物排放;各省份要增加能源利用科技方面的投入,引进国内外先进经验,提高自身能源利用水平,使技术进步成为提高能源效率的内生动力;同时要促进区域间的能源技术扩散,实现能源技术的规模效益,使能源节约和致霾污染物排放减少达到最大化,改善环境质量,减轻灰霾污染。

参考文献:

- [1] BP Amoco. BP statistical review of world energy[R]. Report, London: BP Amoco, 2014—2015.
- [2] Lin Chang, Ma Qingxin, Liu Yongchun, et al. Synergistic reaction between SO₂ and NO₂ on mineral oxides: A potential formation pathway of sulfate aerosol[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14(5): 1668—76.
- [3] 齐晔. 中国低碳发展报告2014[R]. 北京:清华大学气候政策研究中心, 2014.

- [4] Patterson MG. What is energy efficiency? Concepts, indicators, and methodological issues[J]. *Energy Policy*, 1996, 24(5): 377—390.
- [5] Phylipsen G J M, Blok W, Worrell E. Handbook on international comparisons of energy efficiency in the manufacturing industry[M]. Netherlands: Utrecht University, 1998.
- [6] Boyd G A, Pang J X. Estimating the linkage between energy efficiency and productivity [J]. *Energy Policy*, 2000, 28(5): 289—296.
- [7] Hu Jin-li, Wang S C. Total factor energy efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*, 2006, 34(17): 3206—3217.
- [8] 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.
- [9] 汪克亮, 杨宝臣, 杨力. 基于环境效应的中国能源效率与节能减排潜力分析[J]. *管理评论*, 2012, 24(8): 40—50.
- [10] 屈小娥. 中国省际全要素能源效率变动分解—基于Malmquist指数的实证研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2009, (8): 29—44.
- [11] 李金铠, 沈波, 韩亚峰, 等. 中国区域能源效率比较—基于DEA_Malmquist和聚类分析[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2012, 14(6): 1—6.
- [12] 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, (9): 49—59.
- [13] 马海良, 黄德春, 姚惠泽. 中国三大经济区域全要素能源效率研究—基于超效率DEA模型和Malmquist指数[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(11): 38—43.
- [14] 赵金楼, 李根, 苏屹, 等. 我国能源效率地区差异及收敛性分析——基于随机前沿分析和面板单位根的实证研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(2): 175—184.
- [15] 蔡圣华, 杜立民, 毕清华. 我国提高能源效率的目标设计[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(3): 152—160.
- [16] Choi Y, Zhang Ning, Zhou Peng. Efficiency and abatement costs of energy-related CO₂ emissions in China: A slacks-based efficiency measure[J]. *Applied Energy*, 2012, 98(5): 198—208.
- [17] Bian Yiwen, Hu Miao, Wang Yousen, et al. Energy efficiency analysis of the economic system in China during 1986—2012: A parallel slacks-based measure approach[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 990—998.
- [18] Meng Ming, Shang Wei, Zhao Xiaoli, et al. Decomposition and forecasting analysis of China's energy efficiency: An application of three-dimensional decomposition and small-sample hybrid models [J]. *Energy*, 2015, 68(1): 366—369.
- [19] Wei Yiming, Liao Hua, Fan Ying. An empirical analysis of energy efficiency in China's iron and steel sector [J]. *Energy*, 2007, 32(12): 2262—2270.
- [20] 李廉水, 周勇. 技术进步能提高能源效率吗? —基于中国工业部门的实证检验[J]. *管理世界*, 2006, (10): 82—89.
- [21] Zhao Xiaoli, Rui Yang, Qian Ma. China's total factor energy efficiency of provincial industrial sectors [J]. *Energy*, 2014, 65: 52—61.
- [22] Wang Zhaohua, Zeng Hualin, Wei Yiming, et al. Regional total factor energy efficiency: An empirical analysis of industrial sector in China[J]. *Applied Energy*, 2012, 97(9): 115—123.
- [23] 唐玲, 杨正林. 能源效率与工业经济转型—基于中国1998—2007年行业数据的实证分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2009, (10): 34—48.
- [24] Farrell M J. The measurement of productive efficiency [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1957, 120(3): 253—290.
- [25] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429—444.
- [26] Banker R D, Charnes A, Cooper W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. *Management Science*, 1984, 30(9): 1078—1092.
- [27] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498—509.
- [28] Tone K, Tsutsui M. Applying an efficiency measure of desirable and undesirable outputs in DEA to US electric utilities [J]. *Journal of CENTRUM Cathedra: The Business and Economics Research Journal*, 2011, 4(2): 236—249.
- [29] 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.
- [30] 袁晓玲, 张宝山, 杨万平. 基于环境污染的中国全要素能源效率研究[J]. *中国工业经济*, 2009, (2): 76—86.
- [31] Wang Zhaohua, Feng Chao, Zhang Bin. An empirical analysis of China's energy efficiency from both static and dynamic perspectives [J]. *Energy*, 2014, (74): 322—330.
- [32] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. *经济研究*, 2004, (10): 35—44.

[33] Shi Yun, Xia Yinfang, Lu Bihong, et al. Emission inventory and trends of NO_x for China, 2000—2020[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2014, 15(6):454—464.

[34] 王志刚, 龚六堂, 陈玉宇. 地区间生产效率与全要素生产率增长率分解(1978—2003)[J]. 中国社会科学, 2006,(2):55—66.

**Energy Efficiency Calculation and Analysis on Potentials of Energy Conservation
and Emissions Reduction under Haze Environment
—Based on the NH-DEA Model of Multiple Undesirable Output**

MENG Qing-chun^{1,3}, HUANG Wei-dong^{1,3}, RONG Xiao-xia^{2,3}

(1. School of Management, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. School of Mathematics, Shandong University, Jinan 250100, China;

3. Research Center for Value Co-creation Network, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Considering the current energy efficiency calculation hasn't included the grey haze as the environmental constraint, a Nonseparable Hybrid DEA Model is constructed based on the non-parametric frontier. Taking SO₂, NO_x, CO₂, smoke(dust) who cause haze as undesirable output of energy consumption, the provincial energy efficiency in 2010—2013 under haze environment constraint is measured more scientific. The result suggests that: difference of provincial energy in China is significant; energy efficiency in the eastern China is the highest, followed by central China and western China is the worst; the overall energy efficiency in China is 0.63. Then the influence factors of energy efficiency are analyzed through Tobit model and it is found that energy endowment, industrial structure, the government influence have significant negative effect on energy efficiency, and technological progress has significantly positive effect on energy efficiency. The influence degrees of various factors varies on eastern, central, western China are different. From the perspective of energy conservation and emissions reduction potential, potential of energy saving and pollutants caused haze reduction are both huge. Research results will help different provinces to establish energy saving and gray haze management planning.

Key words: haze; energy efficiency; NH-DEA; multiple undesirable output; energy conservation and emissions reduction