

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1672-884x.2015.04.017

# 基于物质平衡原则的工业碳排放效率评估

袁 鹏

(西南财经大学工商管理学院)

**摘要:** 考虑物质平衡原则,采用数据包络分析法构建了一个新的碳排放效率指标,并应用于分析1997~2012年间中国工业部门的CO<sub>2</sub>排放效率、减排潜力,以及排放与成本之间的权衡。结果表明,中国工业部门的CO<sub>2</sub>排放效率和成本效率均较低,且具有较大的省际差异;在现行技术下,全国平均的成本节约和排放削减存在潜力。成本有效和排放有效之间存在权衡关系,虽然可以通过征税或者补贴等措施来同时达到这两种目标,但由此产生的额外成本巨大,在经济上不可行。比较而言,成本有效是现行市场条件下更为合理的选择。

**关键词:** 碳排放效率; 物质平衡原则; 数据包络分析; 权衡

**中图法分类号:** C93   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-884X(2015)04-0609-10

## An Evaluation of CO<sub>2</sub> Emission Efficiency in China's Industrial Sector: Based on Materials Balance Principle

YUAN Peng

(Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu, China)

**Abstract:** Taking the materials balance principle into account, this study presents a new CO<sub>2</sub> emission efficiency measure that is constructed by a data envelopment analysis framework, and uses the model to estimate the CO<sub>2</sub> emission efficiency, the potential emission reduction, and cost/carbon tradeoffs in China's industrial sector for the period of 1997~2012. The main findings are as follows. The emission and cost efficiencies are both quite low at a national average level while they vary dramatically among provinces. Secondly, on average, the potential reduction in CO<sub>2</sub> emissions and cost for the China's industrial sector are promising. Since the cost and emission efficient operations cannot be achieved within current market condition, there are commonly tradeoffs between cost and emission. Although taxes on the worst-polluting energy source and/or subsidies on the least-polluting energy source can be designed to change market condition, by which the cost and emission efficient operations can be achieved simultaneously, they are economically infeasible because of huge extra cost. Finally, instead of being emission efficient, it is more reasonable and realistic for China's industrial sector to be cost efficient which can also results in a large reduction of emissions and does not need a drastic change in energy mix.

**Key words:** carbon emissions efficiency; materials balance principle; data envelopment analysis; tradeoff

伴随着快速的经济增长,中国的能源消费以及碳排放也迅速增加。目前,中国碳排放总量已经超过了美国和欧盟的总和,使得中国面临着国际社会要求加强减排的巨大压力。

## 1 研究背景

近年来,许多学者对中国的碳排放绩效进行了研究。一些研究采用碳强度或者碳生产率(碳强度的倒数)等简单的指标来分析中国碳排放绩效的演变趋势,并采用指数分解、结构分

解、经济计量等方法考察了碳排放绩效变化的原因<sup>[1,2]</sup>。碳强度和碳生产率指标具有含义明确、简单易算,对数据的要求较小的优点,但缺点也很突出。这类指标没有考虑投入和产出之间的技术联系,如投入替代的影响,也不能考察生产单元现有的技术状态,以及绩效改进的潜力。

针对上述缺点,一些研究采用基于环境技术的效率模型来构建碳排放效率绩效指标。基于环境技术的效率模型改进了传统的技术效率模型,将污染物( $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和废水等)作为非期望的投入或者产出纳入到效率评估框架,进而能够处理包含污染物的效率评价问题。这类模型通常是基于数据包络分析(DEA)技术的,主要采用了投入导向、产出导向、双曲线型,以及方向型的多种距离函数进行效率估计<sup>[3]</sup>。基于环境技术的效率模型构建的碳排放绩效指标考虑了投入产出之间的技术联系,能够评估生产单元的技术状态和改进潜力。近年来,这类模型被广泛应用于估计中国省域地区、行业和城市的碳排放效率、减排潜力和边际减排成本(或  $\text{CO}_2$  的影子价格)。这些研究在构建碳排放效率指标所采用的 DEA 模型方面略有不同,主要包括了径向式<sup>[4]</sup>、松弛变量型<sup>[5]</sup>、方向型距离函数<sup>[6]</sup>、范围调整(Range-Adjusted)的 DEA<sup>[7]</sup>、共同前沿(Meta-frontier)<sup>[8]</sup>等多种 DEA 模型。此外,一些研究采用扩展的 Malmquist 生产率指数,对中国地区的碳排放绩效进行了动态分析<sup>[9]</sup>。

上述研究获得了许多有价值的研究结论,极大地丰富了本研究对中国碳排放的绩效水平、变化趋势、提升潜力以及减排路径的认识,但却存在一个共同的局限,即忽视了投入与产出在物质上的联系或者函数关系,从而违背了物质平衡原则(Materials balance principle, MBP)。所谓的 MBP 指的是物质既不能被毁灭,也不能被创造出来,只不过是改变了形式,其本质上指的是投入中包含的物质必然要在产出中体现出来,或者被排放到环境中。最近,一些研究批评并证明了被广泛采用的基于环境技术的效率模型不满足 MBP<sup>[10,11]</sup>。为此,COELLI 等<sup>[10]</sup>和 LAUWERS<sup>[11]</sup>基于 MBP,采用 DEA 框架,构建了一个新的环境效率评估模型。在该模型中,污染排放量被视为从投入中包含的污染物数量中扣掉产出中包含的污染物数量后的物质余额,而不是被视为投入或者非期望产出。环境效率被定义为在产出不变的情况下,最小技术可行的物质余额与实际观测到的物质

余额的比值。MBP-DEA 模型被广泛应用于农作物生产和牲畜饲养等领域的环境效率评估<sup>[12]</sup>。事实上,只要生产过程的物质转换受到质量守恒定律的约束,就必须考虑 MBP<sup>[11]</sup>,这一基本原则不仅适用于农业生产部门,同样适用于工业生产领域。在工业生产中,碳排放与能源投入(不含作为原料用)之间的物质转换自然也遵循质量守恒定律和 MBP。然而,在现有研究中,碳排放一般被视为非期望产出,而碳排放效率也通常被设定为在现有技术条件和投入水平不变的情况下,碳排放能够削减的最大程度。如此设定忽视了碳排放与能源投入之间的物质平衡关系,可能导致错误的评估结果。

本研究基于 MBP-DEA 框架,构建了一个新的碳排放效率指标。该指标能够被分解为技术效率和配置效率。这一分解不仅增强了模型的诊断力,还指出了两个重要的效率提升和减排的路径,即提高能源使用效率和优化能源结构。这有助于帮助决策者根据效率特征和来源制定更有针对性的减排措施。利用这个新的碳排放效率指标,本研究评估了中国工业的  $\text{CO}_2$  排放效率、减排潜力,并考察了排放和成本之间的权衡问题。

## 2 基于 MBP 的碳排放效率分析框架

本研究首先介绍成本效率测算框架,在此基础上引入 MBP,构建碳排放效率的测算框架。在本研究中,工业部门的技术集包含了 4 种能源投入,分别是煤炭、油品、电力和天然气,以及一种产出:工业增加值。虽然劳动和资本对于工业生产而言也是至关重要的,但本研究未予考虑,原因在于:①劳动和资本是非污染性的投入,并不直接产生碳排放;②若能源和非能源都被包含在投入集合中,那么会导致投入变量相对于决策单元(30 个省域地区)的数量过多,以致于决策单元的效率值为 1,降低了 DEA 模型的诊断力。③更为重要的是,本研究的重点在于考察能源组合(或能源结构)的变化所产生的经济效应和环境效应,若在投入中包含了非能源投入,则能源组合变化的效应难以从投入组合变化的总效应中剥离出来。由此,设定技术集 T 如下

$$T = \{(Y, E) \mid E \text{ 能生产出 } Y\}, \quad (1)$$

式中,  $E$  表示能源投入向量,  $Y$  表示产出。成本最小化问题可以表示为

$$\text{Cost}(Y, W) = \min_E (W'E \mid (Y, E) \in T), \quad (2)$$

式中,  $W$  表示能源投入的价格向量。  $\text{Cost}(Y,$

$\mathbf{W}$ )为成本前沿,用以描述在给定能源价格和生产技术的条件下,生产某一特定数量的产出所需要的最小的投入支出。假定  $\mathbf{E}_c$  为满足成本最小的投入向量,即上述成本最小化问题的解,那么最小成本为  $\mathbf{W}'\mathbf{E}_c$ 。

一般地,成本效率被定义为最小可行成本与观测成本的比率,即

$$CE = \frac{\mathbf{W}'\mathbf{E}_c}{\mathbf{W}'\mathbf{E}} \quad (3)$$

成本效率可以分解为技术效率和配置效率两个成分,即

$$\begin{aligned} CE &= \frac{\mathbf{W}'\mathbf{E}_c}{\mathbf{W}'\mathbf{E}} = \left( \frac{\mathbf{W}'\mathbf{E}_t}{\mathbf{W}'\mathbf{E}} \right) \left( \frac{\mathbf{W}'\mathbf{E}_c}{\mathbf{W}'\mathbf{E}_t} \right) = \\ &\left( \frac{\theta\mathbf{E}}{\mathbf{W}'\mathbf{E}} \right) \left( \frac{\mathbf{W}'\mathbf{E}_c}{\mathbf{W}'\mathbf{E}_t} \right) = \theta \left( \frac{\mathbf{W}'\mathbf{E}_c}{\mathbf{W}'\mathbf{E}_t} \right) = T_E C_A, \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\theta$  为标量,指的是投入导向的技术效率 ( $T_E$ ),是在现有技术条件下生产特定数量的产出所需要的最小投入量与实际投入量的比率,反映了生产单元的投入能够压缩的最大程度。 $\theta$  可以通过以下最优化问题求出

$$T_E(Y, \mathbf{E}) = \min_{\theta} (\theta \mid (Y, \theta\mathbf{E}) \in T). \quad (5)$$

如果  $\mathbf{E}_t$  为上述最优化问题的解,即技术有效的能源投入向量,那么  $\mathbf{E}_t = \theta\mathbf{E}$ 。 $\theta\mathbf{W}'\mathbf{E}$  表示的是技术有效的成本。 $C_A$  表示的是成本配置效率,其值为最小成本与技术有效的成本的比率,衡量了生产单元在投入配置方面的合理性。需要指出的是,由于在投入中只包含了能源投入,而未含非能源投入,因此本研究中的技术效率和配置效率均非全要素意义上的,技术效率实际上反映了生产单元的能源使用效率,而成本配置效率则衡量了现有投入价格下,生产单元的能源结构与成本最优的能源结构之间的差距。成本效率、技术效率和成本配置效率的取值范围均为 0~1 之间,取值为 1 时达到有效状态。

引入物质平衡原则来解决碳排放最小化问题。根据物质平衡条件,污染物质的排放数量等于投入中的污染物质总量减去产出中污染物质总量,这是一个简单的线性函数。对于能源燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放来说,由于产出为增加值,碳含量为零,因此,CO<sub>2</sub> 排放总量仅来自于能源投入,即

$$CO_2 = \mathbf{A}'\mathbf{E}, \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{A}$  表示能源投入的排放因子向量,反映了单位能源消耗的 CO<sub>2</sub> 排放量。一个有趣的问题是,生产一定数量的产出,什么样的能源组合能够产生最小数量的 CO<sub>2</sub> 排放?这一问题可以通过一个类似于成本最小化的最优化问题来求解,即

$$CO_2(Y, \mathbf{A}) = \min_{\mathbf{E}} \{ \mathbf{A}'\mathbf{E} \mid (Y, \mathbf{E}) \in T \}, \quad (7)$$

式中,  $CO_2(Y, \mathbf{A})$  表示在排放因子和生产技术给定的情况下,一定数量的产出所产生的最小 CO<sub>2</sub> 排放量。假设  $\mathbf{E}_e$  为上述最优化问题的解,即产生最小排放的能源组合,那么可以求得最小排放量为  $\mathbf{A}'\mathbf{E}_e$ 。类似于成本效率的定义,CO<sub>2</sub> 排放效率 ( $C_E$ ) 被定义为最小排放与实际排放 ( $\mathbf{A}'\mathbf{E}$ ) 的比值

$$C_E = \frac{\mathbf{A}'\mathbf{E}_e}{\mathbf{A}'\mathbf{E}}, \quad (8)$$

式中,  $C_E$  取值为 0~1 之间,等于 1 时表示排放有效,即在现有可行技术下,生产特定数量的产出所排放的 CO<sub>2</sub> 达到了最小水平。与成本效率类似,排放效率也可以分解为技术效率和配置效率

$$\begin{aligned} C_E &= \frac{\mathbf{A}'\mathbf{E}_e}{\mathbf{A}'\mathbf{E}} = \left( \frac{\mathbf{A}'\mathbf{E}_t}{\mathbf{A}'\mathbf{E}} \right) \left( \frac{\mathbf{A}'\mathbf{E}_e}{\mathbf{A}'\mathbf{E}_t} \right) = \\ &\left( \frac{\theta'\mathbf{E}}{\mathbf{A}'\mathbf{E}} \right) \left( \frac{\mathbf{A}'\mathbf{E}_e}{\mathbf{A}'\mathbf{E}_t} \right) = \theta \left( \frac{\mathbf{A}'\mathbf{E}_e}{\mathbf{A}'\mathbf{E}_t} \right) = T_E E_A, \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $T_E$  为技术效率,与前述的含义一样,是排放效率和成本效率的共同组成部分。为了区别,称为排放配置效率,它衡量了生产单元的能源结构与排放最小的能源结构之间的差距。上述分解揭示了两种提高排放效率或者削减排放的路径:提高技术效率和排放配置效率。在本研究中,这两种路径也可以称为提高能源利用效率和优化能源结构。

综上,排放效率与成本效率具有类似的定义和分解项,两者之间的联系见图 1。简言之,假设只有两种投入 ( $\mathbf{E}_1$  和  $\mathbf{E}_2$ ) 和一种产出。等产量线为效率前沿,表示一定数量的产出所需要的最小投入组合。等成本线和等碳线分别表示给定成本和排放量的所有可能的投入组合。假定等成本线、等碳线与等产量线分别相切于 C 点和 D 点,这意味着 C 点具有最小的成本,而 D 点产生的排放最小。若生产单元位于前沿以内的 P 点,那么它的技术有效、成本有效

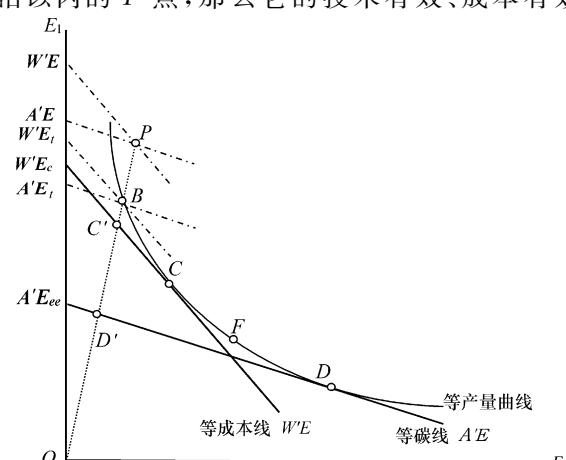


图 1 排放效率与成本效率的解释

和排放有效的目标点分别为  $B$  点、 $C'$  点和  $D'$  点。由此,  $P$  点的技术效率为:  $T_E = OB/OP$ , 成本效率为:  $CE = W'E_c/W'E_t = OC'/OB$ , 排放效率为  $C_E = A'E_e/A'E_t = OD'/OP$ 。

成本效率和排放效率的分解也可以通过图 1 来说明。对于  $P$  点来说, 成本配置效率为  $C_A = W'E_c/W'E_t = (OC'/OB)$ , 排放配置效率为  $E_A = W'E_e/W'E_t = (OD'/OB)$ , 因而, 成本效率  $C_E = OC'/OP = (OB/OP)(OC'/OB) = T_E C_A$ , 排放效率为  $C_E = OD'/OP = (OB/OP)(OD'/OB) = T_E E_A$ 。由于技术效率是成本效率和排放效率的共同组成项, 因此技术效率的改善同时能够提高成本效率和排放效率, 如从  $P$  点移动到  $B$  点。然而, 成本配置效率的改善既有可能提高排放配置效率(如从  $B$  点移动到  $C$  点), 也有可能降低排放配置效率(如从  $F$  点移动到  $C$  点)。具体情形取决于移动方向是否朝向  $D$  点(排放有效点)。类似地, 排放配置效率的改善既有可能导致更高的成本, 也有可能减少成本。

显然, 由图 1 可见, 如果成本有效点和排放有效点没有重合, 那么成本有效和排放有效之间存在权衡。例如, 如果生产单元位于  $C$  点, 它实现了成本有效, 但是如果希望实现排放有效, 则需要从  $C$  点移动到  $D$  点。这意味着在保持产量不变的情况下, 使用了更多的  $E_2$  来代替  $E_1$ 。然而, 这种移动或者说能源结构调整将带来更多的成本, 因此生产单元并无调整的动力。要驱动生产单元追求排放最小化, 唯有对其施加政策影响。一种政策选项是提供补贴, 以弥补从成本有效转向排放有效所额外增加的成本; 另一种政策选项是改变投入的价格比率, 以使得等成本线与等碳线重合, 实现成本有效和排放有效的统一。例如, 可以通过对污染相对较轻的投入( $E_2$ )进行补贴, 而对污染相对较重的投入( $E_1$ )进行征税, 从而改变投入的价格比率, 以激励生产单元采用排放更少的能源组合。征税和补贴的规模应该等于从  $C$  点移动到  $D$  点所增加的成本。类似地, 也可以估计从  $D$  点到  $C$  点所导致的排放增加。

### 3 数据处理

本研究所采用的数据集包含了 1997~2012 年间中国省际工业部门的投入产出数据。基础数据来自于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国物价年鉴》以及《中国工业经济统计年鉴》等。

如前所述, 选择工业增加值作为产出指标, 并采用工业品出厂价格指数将其调整为以 1997 年为基期的可比价。为了考察能源结构变化对排放绩效的影响, 地区能源平衡表中所列出的 29 种主要能源品种均被考虑在内, 并转化为标准煤当量。各种能源的标准煤当量系数取值于《中国能源统计年鉴》。由于自由度的限制, 所有的能源品种均按照标准煤当量归集为 4 类能源。原煤以及煤炭制品被归集为一种能源, 简称煤炭; 原油以及石油制品被归集为油品, 除此之外的另外两种能源为天然气(包括其液化形态)和电力。由此, 本研究中的能源投入一共包含了 4 种: 煤炭、油品、电力和天然气, 采用工业最终能源消费量指标作为其投入的数量(未含用做原料的部分)。

由于缺乏官方数据, 各省区工业部门的能源价格是根据《中国物价年鉴》、《中国统计年鉴》报告的数据估计出来的。《中国物价年鉴》仅报告了 1999~2006 年所有直辖市以及各省区的省会城市主要能源品种的价格(以实物量计), 因此采用各省区省会城市的能源价格来表示各省区的能源价格, 并转换标准煤当量价格。煤炭、电力和天然气的标准煤当量价格可以采用以下公式进行转换

$$w_j = p_j / sc_j, \quad (10)$$

式中,  $j$  表示煤炭、电力和天然气 3 种能源;  $w$ 、 $p$  和  $sc$  分别为各能源的标准煤当量价格、实物量价格和标准煤当量系数。煤炭的实物量价格以烟煤工业锅炉混煤(粒度 < 50 mm)的价格表示, 电力和天然气的实物量价格分别以普通工业用电(国家规定 < 315 千伏安)和天然气(工业用)的价格表示。

油品的标准煤当量价格( $w_o$ )采用 0 号柴油和 93 号汽油标准煤当量价格的加权平均估计得到

$$w_o = \sum_k w_k \frac{E_k}{\sum_k E_k}, \quad (11)$$

式中,  $k$  表示 0 号柴油和 93 号汽油两种油料;  $w_k$  采用式(10)进行转换;  $E_k$  表示第  $k$  种油料以标准煤当量计算的工业部门消费量。

在获得 1999~2006 年 4 种能源的标准煤当量价格后<sup>①</sup>, 再推算出 1997~1998 年、2007~

<sup>①</sup> 煤炭价格以烟煤工业锅炉混煤(粒度 < 50mm)代替, 油品价格由两种主要油料的价格为基础估算, 这会造成一定误差, 但误差不大。考虑到煤、油、电、气 4 类能源的市场价格(以标准煤当量计)相互之间均存在较大差距, 煤、油价格估算的误差对各能源之间价格差距的影响较小, 因而不会对研究结果产生根本性影响。

2012 年 4 种能源的标准煤当量价格,推算公式分别为

$$w_j^t = w_j^{t+1} / P_j^{t+1} \quad (t = 1997, 1998); \quad (12)$$

$$w_j^t = w_j^{t-1} P_j^{t-1} \quad (t = 2007, \dots, 2012), \quad (13)$$

式中,  $P$  为能源购进价格指数(上一年=1)。由于缺乏分能源品种的能源购进价格指数,故分别采用煤炭开采和洗选业、石油加工炼焦及核燃料加工业、电力热力的生产和供应业、燃气生产和供应业的工业品出厂价格指数来代替 4 类能源购进价格指数<sup>①</sup>。

各种能源的排放因子也需要估计。由于煤炭、油品均包含多种细分品种,天然气也包括气态和液态两种形态,因此,这 3 类能源的排放因子是所属细分品种(形态)的排放因子的加权平均,即

$$A_j = \frac{\sum_k E_{jk} A_{jk}}{\sum_k E_{jk}}, \quad (14)$$

式中,  $E_{jk}$  为第  $j$  种能源所属的第  $k$  种细分能源品种的消费当量;  $A_{jk}$  为第  $j$  种能源所属的第  $k$  种细分能源品种的排放因子,可用以下公式计算

$$A_{jk} = C_{V_{jk}} C_{C_{jk}} C_{O_{jk}} (44/12), \quad (15)$$

式中,  $C_V$  表示平均发热值;  $C_C$  为单位热值的碳含量;  $C_O$  为碳氧化因子;  $44/12$  为  $\text{CO}_2$  与碳的分子重量之比。由于《中国能源统计年鉴》只发布了主要能源品种的平均发热值,因此部分消耗较少的能源品种的平均发热值取值于 IPCC 指南<sup>②</sup>;单位热值碳含量和碳氧化因子全部取自 IPCC 指南。

虽然电力本身不含碳,但是火力发电需要消耗化石燃料(如煤、油和天然气),因此电力也隐含了  $\text{CO}_2$ 。计算电力隐含的排放因子不仅需要考虑火力发电的碳排放因子,还需要考虑火电占总电力的份额。正式地,电力隐含排放因子( $A_E$ )的估计公式如下

$$A_E = \frac{\sum_m E_m A_m}{\sum_m E_m} \times s, \quad (16)$$

式中,  $E_m$ 、 $A_m$  分别为用于火力发电的第  $m$  种细分能源的消费当量和排放因子;  $s$  为火力发电占总发电量的份额<sup>③</sup>。由于  $E_{jk}$ 、 $E_m$  在省际层面上随时间而变化,上述 4 种能源的排放系数也在省际层面上随时间变化。对以上变量的少数缺失数据采用了线性插值法进行替代。表 1 列出了变量的描述性统计结果。

## 4 效率分析

### 4.1 全国总体的效率特征与变化趋势

本研究采用规模报酬不变的投入导向型

DEA 模型来估计技术效率、成本效率和排放效率,然后根据后两者的分解式再反向求解出成本配置效率和排放配置效率<sup>④</sup>。以下分析在全国整体层面各种效率的特征和演变趋势。

表 1 变量的描述性统计

变量名称	单位	均值	最大值	最小值	标准差
工业增加值	亿元	2 935.3	26 617.2	24.1	3 772.8
煤炭消耗量	万 t 标准煤	2 401.0	11 763.9	35.9	2 089.4
油品消耗量	万 t 标准煤	389.4	2 394.7	14.1	432.0
电力消耗量	万 t 标准煤	733.4	3 878.0	15.3	692.7
天然气消耗量	万 t 标准煤	113.7	933.3	0.1	146.3
煤炭价格	元/t 标准煤	526.8	1 420.2	103.7	283.4
油品价格	元/t 标准煤	3 452.4	6 885.5	1 436.1	1 492.8
电力价格	元/t 标准煤	5 159.5	12 303.0	1 238.3	1 900.3
天然气价格	元/t 标准煤	1 534.5	3 035.4	548.9	465.6
煤炭排放因子	tCO <sub>2</sub> /t	2.7	3.1	2.2	0.1
油品排放因子	tCO <sub>2</sub> /t	2.1	3.1	1.9	0.1
电力排放因子	tCO <sub>2</sub> /t	6.7	10.3	1.7	1.8
天然气排放因子	tCO <sub>2</sub> /t	1.6	1.7	1.6	0.0

研究期间,全国平均的  $\text{CO}_2$  排放效率为 0.396,成本效率为 0.496,表明中国工业部门存在较为严重的排放非效率和成本非效率。这也意味着在排放和成本的削减方面具备的巨大潜力。当然,这仅仅是理论上的潜力,要将潜力转变为现实,需要在效率改进方面做出艰巨的努力。进一步地,通过对  $\text{CO}_2$  排放效率和成本效率的分解,能够更清楚地了解改进这两种效率的主要路径。全国平均的技术效率、排放配置效率和成本配置效率分别为 0.720、0.550 和 0.689。这表明,工业部门之所以未实现排放有效和成本有效,主要源于能源结构的不合理,当然,能源利用效率不高也是不可忽视的原因。从效率分解结果来看,无论是提高能源利用效率,还是优化能源结构,都有较大改进空间,是削减排放和节约成本的重要路径。

本研究测算得到的排放效率值与王群伟等<sup>[8]</sup>的结果相似。然而,和大多数研究相比,本研究的排放效率值明显较小,许多研究得到的

① 用能源生产部门的出厂价格指数代替能源购进价格指数虽然会带来一定误差,但有其合理性,原因在于能源出厂价格的波动会传导至能源采购价格,而且通常情况下两者的波动幅度也是较为接近的。

② 此处 IPCC 指南指的是《2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2》,详细请见网址 <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>。对比《中国能源统计年鉴》和 IPCC 指南中公布的同类型能源品种的平均发热值,煤炭类能源存在较大差异,其他能源品种的差异较小。煤炭类能源的平均发热值取值于《中国能源统计年鉴》,原因在于中国的煤炭品质总体上较低,若采用 IPCC 的平均发热值,将较大地高估碳排放量。

③ 各地区的电力消费中有一部分购自外地,由于无法获得详细的数据,在此假定购入的电力中火电比例与本地区火电比例是一样的。

④ 限于篇幅,未提供各省市区有关 CE、CEE 及其分解项的详细数据,如有需要可与笔者联系索取。

中国排放效率值在 0.6 以上。原因可能在于两个方面:①现有研究对排放效率的定义更接近于技术效率成分,衡量的是产出(包括碳排放在内)保持不变的情况下投入能够缩减的程度,或者投入保持不变的情况下,碳排放能够削减的程度,通常没有考虑投入配置对排放的影响。与此不同,本研究的排放效率不仅包含了技术效率成分,还包含了配置效率成分,因此能够考察能源投入配置的不合理对排放绩效的影响,而这一点往往是现有研究所忽略的。②本研究所构建的碳排放效率符合投入与排放之间的物质平衡条件,而该条件在现有研究中是被疏忽的,这也可能是出现差异的原因。

从演变趋势上来看,由图 2 可见,全国平均的 CO<sub>2</sub> 排放效率存在不太明显的 N 型趋势:1997~2001 年间小幅度上升,到 2001 年达到最高值(0.415);之后持续下降,至 2008 年达到最低值(0.376);2008 年以后呈现缓慢的上升趋势。成本效率的变化趋势近似于倒 U 型:从期初的 0.486 上升到 2001 年的最高值 0.541,而后逐渐下降至期末的最低值 0.446。排放效率和成本效率的变化趋势在 1997~2008 年间相似,2001 年之前均持续上升,之后持续下降;不过 2008 年以后两者的变化趋势有所不同,前者出现反弹,后者继续下降。

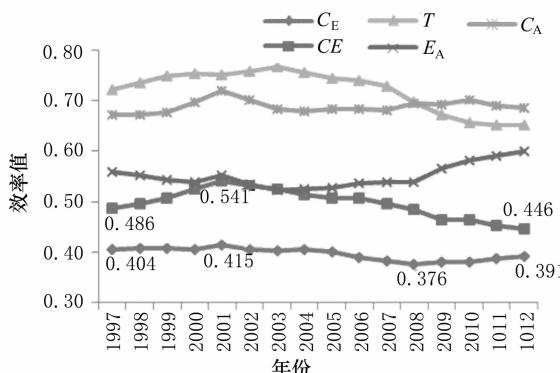


图 2 各种效率全国均值的变化趋势

排放效率和成本效率之所以出现上述变化,可以从分解项的变化趋势上找到答案。1997~2001 年间,技术效率和成本配置效率呈现上升趋势,而排放配置效率表现为下降趋势。这表明,能源利用效率的提高是这段时间排放效率改善的唯一原因,也是成本效率提高的重要来源;能源结构的调整相对地偏向成本节约目标,而远离了排放削减目标。2001~2008 年间,技术效率表现为先上升(2001~2003 年)后下降的趋势(2003~2008 年),而两种配置效率与技术效率的变化趋势正好相反。由此,这段时间成本

效率和排放效率下降的原因在两个子阶段有所不同。具体而言,在前一个子阶段,能源结构变化引起成本上升和排放上升,导致成本效率和排放效率的下降;在后一个子阶段,两种效率的下降主要受到能源利用效率下降的拖累,原因在于 2004 年以来中国的工业化进程加快,重化工业发展迅猛导致这一时期能源利用效率下降。“十一五”期间,我国单位国内生产总值能耗由“十五”后 3 年上升 9.8% 转为下降 19.1%<sup>①</sup>。

值得注意的是,近期(2008~2012 年)技术效率继续呈现出下降趋势,意味着工业部门在能源利用效率方面不断远离了技术前沿;排放配置效率有一个较为明显的上升势头,而成本配置效率的变化趋势相对平稳,意味着这段时间的能源结构调整有利于排放削减,而对成本的影响不大。在近期,能源利用效率的下降是成本效率降低的主因,也在一定程度上制约了排放效率的提高。不过,由于能源结构的调整有利于减排,排放效率在这段时间仍然表现为上升趋势。由此,从最近的趋势来看,无论是从成本节约角度还是排放削减的角度,遏制能源利用效率的下降是工业部门面临的首要任务。

#### 4.2 省际层面的效率差异及变化趋势

进一步考察省际层面上的效率差异及变化趋势,发现排放效率和成本效率均存在显著的省际差异。在所有年份上,只有广东处于成本前沿和排放前沿。此外,上海、浙江、福建、北京、天津、江苏等东部省份排放效率也较高,高于 0.70,超出全国平均水平 30% 以上;宁夏、山西、青海、贵州、甘肃、新疆、内蒙古、广西等中西部省份排放效率较低,在 0.30 以下。在成本效率方面,上述排放效率较高的省份全部位于东部地区,这些地区通常也具有较高的成本效率,而排放效率较低的省份全部位于中西部地区,其成本效率也相对较低。事实上,各地区的成本效率和排放效率的确具有很强的正向关系,两者的 Person 相关系数达到了 0.94,原因在于:①两种效率具有共同的技术效率成分;②两种效率在配置效率成分上具有较强的正向关系, $C_A$  和  $E_A$  的相关系数为 0.85,表明若一个地区的能源结构不合理,不仅不利于成本节约,也不利于排放削减。

排放效率的分解项也存在明显的省际差异,这种差异实际上决定了各省在减排路径上应该有所侧重。对大多数省份而言,其技术效

<sup>①</sup> 数据来源于《国务院关于印发节能减排“十二五”规划的通知》。

率值高于排放配置效率值,意味着提升排放配置效率的空间相对大于提升技术效率的空间。由此,从理论上讲,对于这些省份而言,通过优化能源结构来提升排放配置效率,是相对更为重要的减排路径。特别是对于位于技术前沿但存在排放配置非效率的浙江、福建、江苏等省份,唯有如此才能进一步实现减排。当然,也有陕西、吉林、辽宁、黑龙江、甘肃、新疆、青海和宁夏等少数省份的技术效率低于其排放配置效率。对这些省份来说,改善技术效率是相对更为重要的减排路径。同时,这些省份的排放配置效率也较低,优化能源结构显然是较为重要的减排路径。

进一步地,通过方差分解法考察排放效率省际差异的变化。在排放效率式(9)的左右两边取对数后,得到以下方差分解式<sup>[13]</sup>

$$Var(\ln C_E) = Cov(\ln T_E, \ln C_E) + Cov(\ln E_A, \ln C_E), \quad (17)$$

等式左边为取对数的排放效率的方差,右边第一项为取对数后的排放效率与技术效率的协方差;第二项为取对数后的排放效率对数与排放配置效率的协方差。通过式(13),将排放效率的省际差异分解为技术效率差异的贡献和排放配置效率差异的贡献。图3给出了方差分解的结果,可见,排放效率的省际差异呈现出扩大趋势,这一趋势主要受到技术效率省际差异变化的驱动。

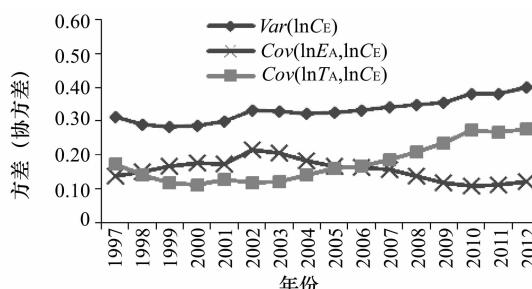


图3 排放效率值(对数)的方差分解

## 5 排放和成本的削减潜力与权衡关系

### 5.1 排放和成本的削减潜力

由效率分析表明,中国工业部门的生产普遍偏离了排放有效和成本有效。那么,如果消除了排放非效率和成本非效率,排放和成本会发生怎样的变化?这一问题实际上指出在现有技术和市场条件下,工业部门能够获得排放削减和成本节约的最大潜力。

DEA估计结果报告了所有观测值的成本最小化的能源组合和排放最小化的能源组合。在现行的能源价格和排放因子下,成本有效的

能源投入成本( $W'E_c$ ),以及排放有效的总排放( $A'E_c$ )能够被轻松地估计出来。由此,能够获得在达到成本有效后CO<sub>2</sub>排放的变化,以及实现排放有效后总成本的变化。表2显示了从现行运营点分别移动到成本有效点( $C_U \rightarrow CE$ )和排放有效点( $C_U \rightarrow C_E$ ),成本和排放的变化情况。此外,表2还列出了其他几种情景下排放和成本的变化,包括:从现行运营点到技术有效点( $C_U \rightarrow T$ );从成本有效点移动到排放有效点( $CE \rightarrow C_E$ ),以及从排放有效点移动到成本有效点( $C_E \rightarrow CE$ )。

表2 几种情形下成本与排放的平均变化/%

项目	$C_U \rightarrow CE$	$C_U \rightarrow C_E$	$C_U \rightarrow T$	$CE \rightarrow C_E$	$C_E \rightarrow CE$
成本	-43.4	-39.3	-26.0	9.3	-7.9
排放	-47.8	-54.2	-26.0	-13.3	17.1

结果显示,研究期间,在全国平均水平上,从现行点移动到完全的成本有效点能够降低总成本的43.4%,以及降低总排放的47.8%;从现行点移动到完全的排放有效点,能够降低现有排放的54.2%和现有成本的39.3%。这表明,就工业部门整体而言,无论是从现有状态移动到成本有效点,还是排放有效点,均能达到经济和环境的双赢。这一结论在意料之中。其中的一个原因在于,技术效率是成本效率和排放效率的共同组成项,故而技术效率的改善能够同时提高成本效率和排放效率。

由表2可见,如果所有观测点均从现行运营点移动到技术有效点,也就是说所有地区的工业部门在研究期间均有效地使用了现有可行技术,那么,平均而言,成本和排放将同时下降26%。显然,提高能源利用效率是一种重要的且低成本的减排方式,因为在减排的同时,还获得了成本节约。虽然提高能源利用效率的节能潜力巨大,但也仅仅是潜力而已,只有通过进一步深化体制改革,加强制度创新,改进管理和技术水平,才能有效地提高能源利用效率,实现减排潜力<sup>[14]</sup>。另外,还要特别重视缩小地区间的能源利用效率差距,必须打破区域间的技术壁垒,有效地促进区域间的效率趋同,如此才能有利于全国整体层面的节能减排<sup>[15]</sup>。

本研究还发现,通过技术效率的改进所获得的成本节约和排放削减潜力,显著小于成本节约和排放削减的最大潜力。其原因在于,从现行运营点到排放有效点(或成本有效点)不仅实现了技术效率的改进,也提高了排放(或成本)配置效率。这暗示着,为实现排放配置有效的能源重配不仅能够降低排放,也能够降低成

本;为实现成本配置有效的能源重配不仅削减了成本,还降低了排放。

本研究可以从总的潜力中扣掉消除技术非效率的那部分贡献,从而估计出能源重配所能实现的成本节约和排放削减的潜力。结果显示,就全国平均而言,通过能源重配,若实现了成本配置有效,成本将减少 17.4%,排放将下降 21.8%;而实现排放配置有效,排放和成本将分别下降 28.2% 和 13.3%。这一结果表明,优化能源结构能够在较大程度上实现成本节约和排放削减,而这一点在现有研究中通常被忽视了。

表 3 列出了研究期间,在全国平均水平上各种能源在现行运营点、成本有效点和排放有效点的份额。可见,从现行运营点到成本有效点,能源结构的调整幅度较小,具体为:煤炭和天然气的份额将分别下降 3.9% 和 2.4%,而油品和电力的份额分别上升 4.8% 和 1.5%;从现行运营点到排放有效点,能源结构的调整幅度较大,具体为:煤炭的份额和天然气的份额将分别下降 20.9% 和 3.7%,而油品和电力的份额分别上升 16.2% 和 8.4%。由此,不管是实现成本有效还是排放有效,煤炭和天然气的份额都需要降低,而电力和油品的份额都将上升<sup>①</sup>。

表 3 各类能源的份额及其变化/%

能源类别	份额			份额变化	
	C <sub>U</sub>	C <sub>E</sub>	C <sub>E</sub>	C <sub>U</sub> →C <sub>E</sub>	C <sub>U</sub> →C <sub>E</sub>
煤炭	63.9	60.0	43.0	-4.0	-20.9
油品	11.0	15.8	27.2	4.9	16.2
电力	20.1	21.6	28.5	1.5	8.4
天然气	5.0	2.6	1.3	-2.4	-3.7
总和	100	100	100	0	0

在此,本研究发现了两个有趣的现象:煤炭的价格最低而电力的价格最高,但为实现成本有效,反而需要降低煤炭的份额而提高电力的份额;类似的,为了实现排放有效,排放因子最高的电力的份额得到了提高,而排放因子最低的天然气的份额却面临下降。这两个现象貌似违反常理,实则是符合生产实践的,原因在于以下两个方面:<sup>①</sup>各种能源之间具有不完全替代性。如果各种能源能够完全替代,那么为实现成本有效,只需要全部使用价格最为便宜的能源;而为实现排放有效,只需要完全使用排放因子最低的能源。然而,受制于现有可行的生产技术,各种能源并不具有完全替代性。由此,为实现排放(成本)最优目标,并非总是能够尽可能多地使用排放因子(价格)最低的能源。<sup>②</sup>实现成本有效或排放有效的能源调整方向不仅与各能源的价格或排放因子有关,还与它们的经

济产出率有关,如虽然煤炭具有最低的单位价格,但其产出弹性也可能较低,电力的单位价格最高,但其产出弹性可能较高,因此生产一定数量的产出,使用电力可能比使用煤炭更为经济划算。类似地,由于电力较高的产出弹性弥补了其高排放因子的劣势,而天然气较低的产出弹性抵消了其低排放因子的优势,因此为达到排放最小化,增加电力份额而降低天然气份额就不足为奇了。由于本研究采用的是非参数的效率模型,不能估计出各能源的产出弹性,但黄磊等<sup>[16]</sup>的研究结果证实了本研究的推测。

## 5.2 排放和成本的权衡关系

前面的分析表明,无论是选择成本有效,还是排放有效,均能达到成本节约和排放削减的双赢。对于一个追求经济效益的生产单元来说,努力实现成本最小化并不需要额外的政策干预,然而,倘若缺乏外在的经济激励或者约束,排放最小化通常不是决策单元追求的目标。这为本研究指出了一个重要的问题,若工业部门在实现了成本有效的基础上,以更为环境友好的方式进行生产,需要付出多大的额外成本。为此,本研究估计了从成本有效点移动到排放有效点后成本的变化。如前所述,如果这两个点没有重合,这种移动会增加成本;反过来,从排放有效点移动到成本有效点,则会增加排放水平。以上两种移动所导致的成本和排放的变化均列于表 2。

在全国平均水平上,从成本有效点移动到排放有效点将减少 13.3% 的 CO<sub>2</sub> 排放,但是将增加 9.3% 的成本;相反的移动则减少 7.9% 的成本,而增加 17.1% 的排放。由此,成本有效和排放有效之间存在权衡关系。如前所述,这种权衡存在的原因在于,成本有效点偏离了排放有效点,而使得两者重合的条件是任意两种能源投入的价格比率等于排放因子比率。这一条件也可以表述为每种能源的排放因子与价格的比率均相等。由于排放因子与价格分别为单位能源消耗的环境成本和货币成本,因此,上述条件清楚地表明,要达到成本有效目标与排放有效目标的一致,必须使得各种能源的相对环境成本,即环境成本与货币成本之比 (A/w) 是相等的。图 4 给出了煤炭、油品、电力和天然气 4 种能源在全国层面上平均的相对环境成本。

<sup>①</sup> 这一结论是针对全国平均水平而言的,并不适用于所有地区。例如,海南、新疆、青海等省份为实现成本有效,需要提高煤炭的份额,青海、陕西、宁夏等省份需要降低电力份额;为实现排放有效,福建、河南、安徽等省份要增加天然气份额。受篇幅受限,没有详细讨论各地区的能源结构调整方向。

可见,煤炭的相对环境成本虽然呈现不断下降的趋势,但仍然远高于其他3种能源。这表明,在相同的货币支出下,煤炭消耗产生的CO<sub>2</sub>排放远高于其他3种能源。

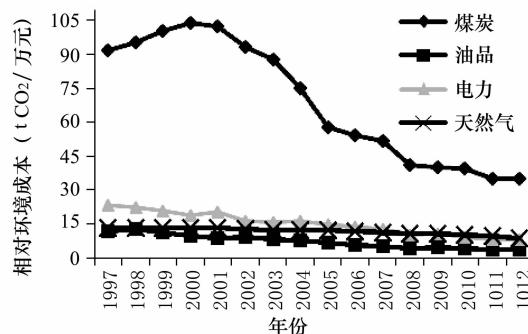


图4 各类能源全国平均的相对环境成本

由于能源的排放因子与价格决定于不同的因素,两者没有必然联系<sup>①</sup>,因此通常需要适当的政策干预,才能使得各种能源的相对环境成本相等。常见的干预措施包括对相对环境成本较高的能源征税,或者对相对环境成本较低的能源进行补贴。由此,根据本研究的结果,要实现成本有效与排放有效的统一,需要对煤炭进行征税,进一步降低其相对环境成本,或者对其他3种能源进行补贴,以提高它们的相对环境成本。然而,无论是征税或补贴,都将面临巨大的经济成本。以2012年为例,要将煤炭的相对环境成本降至天然气的水平,煤炭价格需要提高289%。显然,征收如此高的税率是不可行的。由此,以煤为主的能源禀赋条件,决定了煤炭相比其他能源具有明显的价格优势。在此市场条件下,通过政策干预,实现成本有效和排放有效的统一,在经济上是不可行的。

既然无法同时实现成本有效和排放有效,那么,选择哪个目标更为合理?比较而言,在现有资源禀赋和市场条件下,成本最小化目标是更为可行的选择,因为选择成本最小化,虽然不能实现最小排放,但也能降低47.8%的排放,与最大的排放削减潜力(54.2%)相差仅6.4%;并且,从表3可见,实现成本最小化所需要的能源结构调整幅度相对较小,容易实现。相反地,选择排放最小化目标,虽然能够比选择成本最小化多降低6.4%的排放,但需要增加9.3%的成本,影子成本约1800元/tCO<sub>2</sub>,经济代价过大;且需要的能源结构调整幅度较大,短期不可能实现。

## 6 结论与政策建议

本研究将物质平衡原则纳入到碳排放绩效

分析框架,采用数据包络分析法构建了一个新的碳排放效率指标。该指标不仅避免了现有研究忽视投入与产出之间物质联系的缺点,而且还能被分解为技术效率和配置效率两个成分,从而增强了效率模型的诊断力。应用该框架,本研究估计了1997~2012年中国工业部门的碳排放效率、减排潜力,并分析了排放削减与成本节约之间的权衡关系。基本结论如下。

(1)在总体上,中国工业部门存在较为严重的成本非效率和排放非效率,主要源于能源配置不合理导致的能源配置效率低下,但能源利用效率较低也是重要原因。排放效率在省际间存在较大差异,排放效率较高的省份往往也具有相对较高的成本效率。省际之间的排放效率差异呈现出扩大的趋势,主要受到技术效率省际差异变化的驱动。

(2)全国平均而言,在现行技术下,成本节约和排放削减的最大潜力分别是43.4%和54.2%。实现潜力的路径在于提高能源利用效率和优化能源结构。其中,通过提高能源利用效率,成本节约和排放削减的最大潜力为26%,而通过能源结构优化,成本节约和排放削减的最大潜力分别为13.3%和28.2%。无论是实现成本有效还是排放有效,均需要在现有基础上提高电力和油品的份额,降低煤炭和天然气的份额。

(3)对大多数省份而言,在现有状态下,无论是选择成本有效目标,还是排放有效目标,均能实现经济和环境的双赢。然而,在现有的技术条件和市场条件下,这两个目标并不能同时实现,存在权衡关系。虽然可以通过征税或者补贴等措施改变市场条件,使得两个目标能够同时实现,但将产生的巨大额外成本,在经济上并不可行。在成本有效和排放有效两个目标之间,选择前者虽然不能达到最大的减排潜力,但也能实现较大幅度的减排,并且所需要的能源结构调整幅度也较小,是现行市场条件下更为合理的选择。

根据上述研究结论,本研究提出以下政策建议:①优化能源结构,提高配置效率,以实现低成本减排。对此,必须进一步深化能源市场改革,减少政府对能源市场的直接干预,逐步建立能够反映各种能源稀缺程度、市场供求关系

<sup>①</sup> 由式(11)可见,每种单一能源的排放系数主要取决于含碳量、燃烧热值、碳氧化系数等。在市场化条件下,能源价格主要取决于市场的供给和需求。当然,中国的能源价格在很大程度上受到政府的管制,但无论如何,能源价格与排放系数之间没有必然联系。

和环境成本的能源价格形成机制；在现行能源结构下，要适当提高电力和油品的份额，鼓励以煤发电和以油代煤。此外，要特别重视利用价格手段促进清洁电力的开发，逐步提高清洁电力的比重，这是在能源消费量呈刚性增长的态势下，减少碳排放的重要途径。②进一步挖掘技术节能的潜力，不断提高能源利用效率。除继续加大研发经费投入力度外，还可以采用财政性技改补助或贴息、以奖代补、税收优惠、融资支持等政策，支持企业的技术改造和能源节约型技术、工艺和设备的研发、生产、推广。同时，要注意从国际产业链利益相关方吸收清洁技术，通过FDI、技术购买、合作研发等形式，大力引进低碳技术和设备。③为缩小碳排放效率的地区差距，需要加大对中西部地区在节能减排技术的研发、人才引进与教育发展等方面的支持；同时，推动地区间在要素、技术、制度等层面的合作，建立有关减排技术、制度安排等方面的地区间交流平台，打破区域壁垒，促进先进技术、管理理念和成功经验在不同地区的扩散，从而为实现区域间效率趋同创造有利条件。

本研究为了考察能源结构变化的影响，以及避免投入过多导致效率模型的诊断力下降，在效率评估框架中，只考虑了能源投入，而未纳入资本和劳动这两种重要的生产要素。这种处理的局限在于忽视了非能源投入与能源投入之间的替代效应，因此可能影响到效率评估的准确性。对此，本研究采用两阶段的数据包络分析模型继续拓展这项研究，避免了上述不足。此外，本研究对碳排放效率的估计是基于静态视角的，未来还可以从动态视角方面考察技术进步对碳排放绩效的影响，从而将减排路径拓展为3个，即效率减排、结构减排和技术减排。

## 参 考 文 献

- [1] 林善浪,张作雄,刘国平.技术创新、空间集聚与区域碳生产率[J].中国人口·资源与环境,2013,23(5):36~45
- [2] 沈能,王艳,王群伟.集聚外部性与碳生产率空间趋同研究[J].中国人口·资源与环境,2013,23(12):40~47
- [3] ZHOU P, ANG B W, POH K. A Survey of Data Envelopment Analysis in Energy and Environmental Studies [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(1): 1~18
- [4] ZHOU G H, CHUNG W, ZHANG X L. A Study of Carbon Dioxide Emissions Performance of China's Transport Sector[J]. Energy, 2013, 50(3): 302~314
- [5] 杜慧滨,王洋洋.中国区域全要素二氧化碳排放绩效及收敛性分析[J].系统工程学报,2013,28(2):256~264
- [6] 查建平,唐方方,别念民.结构性调整能否改善碳排放绩效？——来自中国省级面板数据的证据[J].数量经济技术经济研究,2012,29(11):18~33
- [7] WANG K, LU B, WEI Y M. China's Regional Energy and Environmental Efficiency: A Range-Adjusted Measure Based Analysis [J]. Applied Energy, 2013, 112(S1): 1 403~1 415
- [8] 王群伟,周德群,周鹏.中国全要素二氧化碳排放绩效的区域差异——考虑非期望产出共同前沿函数的研究[J].财贸经济,2010(9): 112~117
- [9] WANG Q, ZHANG H, ZHANG W. A Malmquist CO<sub>2</sub> Emission Performance Index Based on a Meta-frontier Approach [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(5): 1 068~1 073
- [10] COELLI T, LAUWERS L, VAN HUYLENBROECK G. Environmental Efficiency Measurement and the Materials Balance Condition[J]. Journal of Productivity Analysis, 2007, 28(1/2): 3~12
- [11] LAUWERS L. Justifying the Incorporation of the Materials Balance Principle into Frontier-Based Eco-Efficiency Models[J]. Ecological Economics, 2009, 68(6): 1 605~1 614
- [12] NIN-PRATT A. Reducing the Environmental Efficiency Gap in Global Livestock Production [J]. American Journal of Agricultural Economics, 2013, 95(5): 1 294~1 300
- [13] KLENOW P, RODRIGUEZ-CLARE A. The Neoclassical Revival in Growth Economics: Has It Gone Too Far? [M]// BERNANKE B, ROTEMBERG J. NBER Macroeconomics Annual 1997 (12). Cambridge: The MIT Press, 1997: 73~114
- [14] 滕玉华,刘长进.中国省际技术进步、技术效率与区域能源需求[J].中国人口·资源与环境,2010,20(3): 30~34
- [15] 傅晓霞,吴利学.技术效率、资本深化与地区差异——基于随机前沿模型的中国地区收敛分析[J].经济研究,2006(10): 52~61
- [16] 黄磊,周勇.基于超越对数生产函数的能源产出及替代弹性分析[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(1): 134~138

(编辑 丘斯迈)

**作者简介:**袁鹏(1981~),男,四川荣县人。西南财经大学(成都市 611130)工商管理学院副教授,博士研究生导师。研究方向为资源环境约束下的产业发展理论与政策。E-mail:ypfeiyu@hotmail.com