

# 中国工业绿色生产与治理效率研究

## ——基于两阶段 SBM 网络模型和全局 Malmquist 方法

李 静 倪冬雪

(合肥工业大学 经济学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 工业发展在对国民经济做出巨大贡献的同时,也造成了严重的能源和环境危机。不同于现有文献仅关注绿色生产率,本文基于 SBM 的网络 DEA 模型对工业行业 2001—2012 年绿色生产和环境治理的两阶段的效率、生产率及构成进行了研究。结果表明: SBM 两阶段网络模型的结果比仅考虑生产阶段结果更能反映真实的工业效率;我国工业治理阶段绩效优于绿色生产绩效;重工业和高耗能行业是造成综合绩效低下的主要行业;税收调整对各工业行业综合绩效和绿色生产绩效水平造成较大的冲击,高技术行业不但综合绩效高,且实现了自身绩效和国家贡献的双赢;生产率的增长主要归因于技术进步,与生产阶段相比,治理阶段 TFP 增长及构成都相对乏力。政策含义表明:工业行业在注重绿色生产改造的同时也要关注污染治理的技术升级和管理水平的提升,重点以重工业和高耗能产业为突破口,狠抓绿色生产和污染治理。

**关键词:** 工业行业;网络 DEA;两阶段 SBM 网络模型;全局 Malmquist 方法;绿色生产效率;环境治理效率;绿色技术

中图分类号: F424.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-9301(2015)03-0042-12

DOI:10.13269/j.cnki.ier.2015.03.005

### 一、引言

改革开放以来,我国工业占国内生产总值的比重一直维持在 40% 左右,工业对国民经济具有举足轻重的作用。但我国工业能耗占全社会总能耗的 70% 左右。2012 年,工业废水排放量占全国废水排放总量的 32.3%;工业二氧化硫排放量占全部排放的 90.3%,工业氮氧化物排放量占 70.9%,工业烟(粉)尘排放量占 83.4%;工业固体废物占我国固废排放总量高达 94%。其中,电力生产、非金属制造、黑色冶金、化工等 SO<sub>2</sub> 排放大户和造纸、食品加工及化工等 COD 排放大户,其 SO<sub>2</sub> 去除率、COD 去除率仍低于行业平均水平<sup>①</sup>。“十一五规划”提出的节能减排约束性指标已全部实现,但“十二五”节能减排 6 项约束性指标中,单位 GDP 能耗和氮氧化物排放量下降率前三年分别只完成“十二五”规划的 54% 和 20%,与 60% 的进度要求还有明显差距。污染治理水平仍待提高,环境质量改善任重道远。

目前我国学者对工业绿色生产与治理效率的研究主要分为三类。一是使用方向性距离函数或 SBM 模型研究包含非期望产出的单一生产阶段的绿色经济效率;第二类大多采用 Malmquist 指数和

收稿日期:2014-09-30;修回日期:2014-12-26

作者简介:李静(1978—),男,安徽涡阳人,合肥工业大学经济学院副教授,管理学博士,主要研究方向为环境与发展;倪冬雪(1990—),女,辽宁鞍山人,合肥工业大学经济学院硕士研究生,主要研究方向为资源与环境经济。

基金项目:本文受国家自然科学基金项目“区域污染物的影子价格度量方法与应用研究(项目编号:71103057)”和“资源与环境双重约束下的产业用水效率研究(项目编号:71473068)”的资助。

ML 指数方法分析各地区或各工业行业连续时期内的绿色生产率的增长及其构成;第三类多使用径向的网络 DEA 模型研究我国工业生产的多阶段管理效率问题。多数文献只关注于我国工业生产阶段绿色效率的研究,而没有进一步考虑到环境治理阶段的效率问题;有些学者考虑到生产与环境治理两阶段效率,但只局限于打开“黑箱”,未考虑污染等非期望产出问题,且均是基于径向的网络模型,未考虑其中严重的松弛性问题;以往文献中很少有将网络模型与动态 Malmquist 指数法结合起来进一步考察多阶段生产率变化及构成问题。

本文主要贡献在于:基于 SBM 而非径向 DEA 模型来研究中国工业行业的绿色生产和治理效率问题,并把污染作为非期望产出加入生产阶段,在此类研究上有所突破;利用全局 ML 指数方法考察绿色生产和治理阶段的绿色效率变化及技术进步,分析生产率增长的来源。

## 二、文献综述

Charnes 等<sup>[1]</sup>提出的数据包络分析方法(DEA)被认为是评价相似决策单元绩效水平的绝佳工具,但传统 DEA 思想对于包含污染物等非期望产出的情况则不再适用。绿色经济效率的评价经历了非期望产出作投入法、倒数处理法、双曲线法、转换向量法、方向性距离函数法和松弛测度的 SBM 非径向与非角度方法。Lozano<sup>[2]</sup>等得出 SBM 方法比方向性距离函数方法更具有辨识力。李静<sup>[3]</sup>和程丹润<sup>[4]</sup>论证出环境污染造成了较大程度的效率损失。刘勇等<sup>[5]</sup>对上述六种评价模型进行了比较研究,得出基于非径向非角度的 SBM 模型是衡量绿色经济效率的最有效方法。

Ramanathan<sup>[6]</sup>提出了考虑所有相关变量的 TFP 思想。瑞典经济学家和统计学家 Malmquist<sup>[7]</sup>提出考察跨期多投入和多产出变量间的动态生产率的 Malmquist 指数方法。Shephard<sup>[8]</sup>使用方向性距离函数替代产出距离函数来衡量期望产出增加和非期望产出减少时的 TFP 指数,Chung<sup>[9]</sup>将该指数命名为 ML 生产率指数,Caves<sup>[10]</sup>等人首先将该指数应用于生产率的测算,Fare<sup>[11]</sup>等人建立了用来考察两个相邻时期生产率变化的 Malmquist 生产率变动指数。

传统的 DEA 方法不再适用于包含前后连续的多阶段过程。Tone 等<sup>[12]</sup>提出基于 SBM 的网络 DEA 模型,可以解决中间产品的问题,同时评估整体效率和分阶段的效率。Lozano 等<sup>[13]</sup>用包含期望产出和非期望产出的网络 DEA 模型进行效率测试,与传统的单一阶段 DEA 模型结果对比,网络方法能够发掘更多非有效的决策单元。Fukuyama<sup>[14]</sup>使用基于松弛测度的方法对包含非期望产出的日本银行两阶段系统进行评估。Yu<sup>[15]</sup>使用基于 SBM 的网络 DEA 模型来考察机场的效率;Maghbouli 等<sup>[16]</sup>对最终产出和中间产品都包含非期望产出的情况,使用合作博弈与非合作博弈模型来评估西班牙 39 个机场 2008 年的效率。Cook 等<sup>[17]</sup>回顾两阶段模型并建立每种方法之间的联系,并指出现有的方法可分为使用斯坦克尔伯格模型和合作博弈模型,并对未来的视角和挑战进行了讨论。毕功兵等<sup>[18]</sup>提出了一类特殊的网络 DEA 模型,其评价原理有别于以往的研究成果,有助于管理者确定生产过程的非有效来源及其效率改进方向。随后,毕功兵等<sup>[19]</sup>将一个算例应用到一个简单网络生产系统的 DEA 效率评价模型中去;卞亦文<sup>[20]</sup>研究了非合作博弈的两阶段生产系统的环境效率评价问题,经济生产子系统居于主导地位,污染物处理子系统居于从属地位,采用中国各地区的工业系统的环境效率评价的实例分析说明了该方法的合理性和有效性;涂正革等<sup>[21]</sup>将工业生产过程分为生产、环境治理两个环节,但是用基于方向性距离函数的网络 DEA 模型对我国工业面板数据进行效率分析。吴传威等<sup>[22]</sup>使用两阶段 DEA 模型来测量工业行业生产阶段的技术效率和经济效益形成阶段的经济效率;李鹏等<sup>[23]</sup>使用网络 DEA 模型研究我国工业细分行业效率,并对行业进行分类对比分析。夏琼等<sup>[24]</sup>人在串联和并联生产系统的基础上,提出复杂的混联结构生产系统的效率评价方法。

目前我国关于绿色经济效率和绿色生产率的研究都对国民经济起到了很大的参考作用,我国学者也对兼顾生产及污染物治理两阶段网络效率进行评价,打开“黑箱”寻找无效的根源,多阶段网络模型比传统的单一阶段效率更加精准和精细,更能反应我国工业行业真实的效率值。但前人的文献

也存在不足之处:关于绿色生产效率的研究只局限于生产阶段,没有关注后续的治理阶段;评价绿色生产率的 Malmquist 指数和 ML 指数方法存在一定的缺陷,可能会对决策者产生误导;多阶段网络 DEA 绩效评估比传统的单一阶段更全面真实,但注意力仅限于多阶段,很少有文献将副产出纳入生产过程中去,存在径向和松弛性问题,且大多数学者只局限于分析某一年的两阶段效率,而没有将网络 DEA 模型与 Malmquist 指数方法结合。

本文创新性地使用基于 SBM 的网络 DEA 模型研究我国工业行业绿色生产与环境治理两阶段的效率,将副产品作为非期望产出纳入其中,克服传统的两阶段 DEA 方法存在的径向和松弛型问题;使用全局 Malmquist 指数方法考察我国工业绿色生产和治理阶段全要素生产率的构成与生产率增长的来源;此外,研究中将税收作为一个主要产出指标来考察各工业行业对国家和社会的贡献,并进行对比研究;同时,从轻工业、高低耗能行业等多角度审视中国工业的绿色生产和治理效率的差别之处与行业规律。

### 三、研究方法

#### (一) 基于 SBM 的两阶段网络 DEA 模型

传统 DEA 方法,模型结构都是单层结构,并且通常把系统内部作为一个“黑箱”,即投入经过这一黑箱转变为产出,具体过程不需要精确地表述,这一假设曾是 DEA 的优势。但随着 DEA 的发展,深入 DMU 内部寻找低效的所在就变得极为迫切,因此需要打开这个“黑箱”。网络 DEA 是指“黑箱”是由一系列的子单元构成,这些子单元之间进行着一系列的投入和产出活动,因此会对系统整体效率产生重要影响。网络 DEA 是将决策单元复杂业务流程分解,方便考察各环节对效率的影响。

图 1 为工业生产与治理的两阶段流程图,在每一个节点有,也可能没有自己直接的投入或产出变量,至少有一个节点通过中间投入变量把其他节点联系起来,网络 DEA 能够提供每个节点的效率,也能提供整体的效率评估。现有文献中使用的网络 DEA 模型存在径向和松弛性问题,径向是指投入或产出按等比例缩减或放大以达到有效,当存在投入过



图 1 两阶段网络 DEA 图

度或产出不足,即存在投入或产出的非零松弛时,径向网络 DEA 模型会高估评价对象的效率水平。使用径向网络 DEA 模型进行工业环境绩效评价的代表性文献有涂正革<sup>[21]</sup>、卞亦文<sup>[25]</sup>、毕功兵等<sup>[18]</sup>以及庞瑞芝等<sup>[26]</sup>学者所著的相关论文。

借鉴 Tone 等<sup>[27]</sup>提出的基于 SBM 的网络 DEA 模型,本文使用非径向产出角度 SBM 网络模型。

我们研究  $n$  个决策单元  $DMU_s (j = 1, \dots, n)$  包含  $K$  个节点的效率  $(k = 1, \dots, K)$ 。设  $m_k$  和  $r_k$  分别是第  $k$  个节点投入产出的个数。定义从第  $k$  个节点到第  $h$  个节点的关系为  $(k, h)$ , 连接变量的个数为  $L$ 。观察数据为  $\{x_j^k \in R_+^{m_k}\} (j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, K)$  (第  $j$  个决策单元在第  $k$  个节点所投入的资源),  $\{y_j^k \in R_+^{r_k}\} (j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, K)$  (第  $j$  个决策单元在第  $k$  个节点的产出) 和  $\{z_j^{(k, h)} \in R_+^{t_{(k, h)}}\} (j = 1, \dots, n; (k, h) \in L)$  (第  $k$  个节点到第  $h$  个节点中间产品的连接变量), 其中  $t_{(k, h)}$  是连接关系  $(k, h)$  的变量个数。本文假设生产是规模报酬不变的, 生产可能性集  $\{(x^k, y^k, z^{(k, h)})\}$  被定义为:

$$\begin{aligned}
 x^k &\geq \sum_{j=1}^n x_j^k \lambda_j^k \quad (k = 1, \dots, K), \quad y^k \leq \sum_{j=1}^n y_j^k \lambda_j^k \quad (k = 1, \dots, K) \\
 z^{(k, h)} &= \sum_{j=1}^n z_j^{(k, h)} \lambda_j^k \quad (\forall (k, h)) \quad (\text{作为第 } k \text{ 个节点的产出}) \\
 z^{(k, h)} &= \sum_{j=1}^n z_j^{(k, h)} \lambda_j^h \quad (\forall (k, h)) \quad (\text{作为第 } h \text{ 个节点的投入})
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中  $\lambda^k \in R_+^n$  是对应于第  $k (k = 1, \dots, K)$  个节点的权重向量。决策单元  $DMU_o (o = 1, \dots, n)$  可以描述为:

$$x_o^k = X^k \lambda^k + s^{k-}, \quad y_o^k = Y^k \lambda^k - s^{k+}, \quad \lambda^k \geq 0, \quad s^{k-} \geq 0, \quad s^{k+} \geq 0, \quad (\forall k) \tag{2}$$

$$X^k = (x_1^k, \dots, x_n^k) \in R^{m_k \times n}, Y^k = (y_1^k, \dots, y_n^k) \in R^{r_k \times n} \quad (3)$$

$s^{k-}$  和  $s^{k+}$  分别是投入和产出的松弛变量。关于中间连接变量的约束条件,有4种不同的选择来连接各节点,本文选择  $LF$  作为中间变量<sup>②</sup>。 $LF$  表示连接变量是自由决定的,并保持投入产出的连续性:

$$Z^{(k,h)} \lambda^h = Z^{(k,h)} \lambda^k, (\forall (k,h)) \quad (4)$$

$$Z^{(k,h)} = (z_1^{(k,h)}, \dots, z_n^{(k,h)}) \in R^{l^{(k,h)} \times n} \quad (5)$$

式(5)可以看出连接变量对其他决策单元是否合理。在线性规划的最优解中,连接变量可能增加或减少。本文使用产出角度的网络模型,线性规划模型表达如下:

$$1/\theta_o^* = \max \sum_{k=1}^K w^k \left[ 1 + \frac{1}{r_k} \left( \sum_{r=1}^{r_k} \frac{s_{ro}^{k+}}{y_{ro}^k} \right) \right] \quad (6)$$

约束条件为(2)和(4)式。

其中  $\sum_{k=1}^K w^k = 1, w^k \geq 0 (\forall k)$ ,  $w^k$  是第  $k$  个节点的相对权重,由该节点的重要性决定。

我们定义决策单元  $DMU_o$  产出角度的整体效率为  $\theta_o^*$ 。如果  $\theta_o^* = 1$ , 则称  $DMU_o$  为产出角度整体有效。定义产出角度各节点效率表达式为:

$$\theta_k = \frac{1}{1 + \frac{1}{r_k} \left( \sum_{r=1}^{r_k} \frac{s_{ro}^{k+}}{y_{ro}^k} \right)} \quad (7)$$

其中  $s_{ro}^{k+}$  是公式(6)中最优的产出松弛量。

产出角度的整体效率值是各节点效率值的加权调和平均数:

$$\frac{1}{\theta_o^*} = \sum_{k=1}^K \frac{w_k}{\theta_k} \quad (8)$$

本文分析我国工业行业绿色生产与环境治理效率及两阶段的加权网络效率值,绿色生产阶段不仅包含期望产出,也包含污染物等非期望产出,因此,本文在使用两阶段网络 DEA 模型的同时,绿色生产阶段中结合使用 Tone<sup>[28]</sup> 提出的处理非期望产出的非径向产出角度的 SBM 模型,环境治理阶段中非期望产出作为投入,不涉及处理非期望产出的 SBM 模型。

## (二) 生产和治理阶段的 TFP 及分解

静态的 DEA 效率问题,是评价在某一时间点或时间段内同类 DMU 的相对效率问题,而 Malmquist 指数关注同类 DMU 在连续时期中效率和生产率的动态变化,重点考察 Malmquist 非参数 DEA 指数以及分解构成。但传统的 ML 生产率指数存在以下问题:第一,几何平均在形式上不满足传递性;第二,针对非同时期的参照技术时,线性规划可能无可行性解;第三,传统 ML 指数方法在估算环境绩效时通常会得出长期的技术退步,尤其在工业的环境绩效测算中,传统 ML 指数表现出更为频繁的技术退步。这三方面的缺陷导致了传统的 ML 生产率指数的度量可能会对决策者产生误导。

本文使用 Oh<sup>[29]</sup> 提出的全局 ML 生产率指数(GML),克服了传统 ML 生产率指数存在的问题。全局与传统相比,在生产可能性集的定义上做了改进,不仅定义了同期的生产技术集,也定义了一个全局的生产技术集。全局生产技术集建立了一个囊括了所有观测单元和所有时期的参照技术集。这样,整个研究期内仅使用了一个全局生产技术集,因此,也就不需再像传统 ML 生产率指数那样写成几何平均的形式,避免了由于几何平均的形式导致的不能满足传递性的缺陷。经验证明,GML 满足传递性的要求,而利用全局生产技术集又可避免线性规划无可行性解的缺陷。

## 四、数据来源与结果分析

### (一) 数据来源与研究设计

本文研究不同工业行业的绩效水平,包含使用传统单一阶段的 DEA 模型运行出的只考虑生产阶段的绩效,以及使用两阶段网络 DEA 模型运行出的绿色生产与环境治理的两阶段综合绩效。工业行业的

划分依据中经网产业数据库的划分标准,共包含 15 个两位码行业,每个两位码行业包含数量不等的三位码行业,共 32 个三位码行业。两阶段投入产出和中间连接变量、数据来源及描述性统计如表 1 所示<sup>③</sup>。第一阶段的非期望产出作为两阶段的中间连接变量。为了考察各工业行业对国家贡献的综合绩效与自身经营绩效的差别,在绿色生产阶段的产出中,针对是否进行税收调整两种情况进行分析。

表 1 变量、数据来源及 2001—2012 年平均描述性统计值

阶段与节点	变量名称及单位	数据来源	最大值	最小值	平均值	标准差	
第一阶段	投入变量	年平均从业人员数/万人	中经网产业数据库	641	20	244	317
		固定资产净值/亿元	《中国统计年鉴》	41328	340	4803	7185
		能源投入/万吨标煤	中经网产业数据库	42345	215	5717	9010
	产出变量	产品销售收入/亿元	中经网产业数据库	49074	1005	13303	12693
		两税(产品销售税金及附加+应交增值税)/亿元	中经网产业数据库	2123	51	572	490
两阶段连接变量 LF		废水排放量/吨	中经网产业数据库	2291	0.40	144	432
		废气排放量/万吨	中经网产业数据库	372788	1504	61722	90176
		环境治理设施数(废水+废气)/套	《中国环境统计年鉴》	63160	519	9627	12478
第二阶段	投入变量	环境治理运行费用(废水+废气)/万元	《中国环境统计年鉴》	2978064	4494	268224	554670
		环境治理投资额(废水+废气)/万元	中华人民共和国环境保护部	689295	1788	80664	136316
	产出变量	工业废水排放达标量/万吨	《中国环境统计年鉴》	344923	1416	57548	83929
		工业废气排放达标量/万吨	《中国环境统计年鉴》	2087	0.24	112	380

以上涉及价格的指标均以 2001 年为基期进行了不变价格处理。其中固定资产净值使用固定资产投资价格指数进行折算,其余变量使用各三位码行业每年的出厂价格指数进行折算。两种指数均来自中经网产业数据库。

## (二) 我国工业的绿色生产效率和治理效率

图 2 显示出每年各行业两阶段加权网络效率与不考虑治理阶段效率平均值,可以看出,传统生产效率值大于加权网络效率值,说明考虑治理阶段后的两阶段综合绩效低于只考虑生产阶段的效率值,更能反映真实的效率水平。生产效率值与网络效率值随时间的走势基本一致。“十五”期间两种效率值呈下降趋势,“十一五”期间效率值明显升高,2004 年为一个较明显的拐点,原因是国家加大了对工业污染的治理力度,2005 年“十一五”规划纲要首次提出“节能减排”目标,要求单位国内生产总值能耗降低 20% 左右,主要污染物排放总量减少 10% 的约束性指标。国家层面的政策约束以及投入的人力物力带动了全国工业的节能减排工作,从而扭转了平均效率下降的趋势。而我国“十二五”规划提出了更加明确的节能减排目标,即到 2015 年,单位 GDP 二氧化碳排放降低 17%,单位 GDP 能耗下降 16%。此外,“十二五”规划还在“十一五”的基础上增加了污染物控制种类,“十二五”规划提出的约束性指标更加明确了国家节能减排的决心,成就了我国工业绩效水平的持续与稳步上升。

图 3 中绿色生产和环境治理阶段各年平均值的折线图显示,加权网络效率值位于绿色生产效率值和环境治理效率值之间。环境治理阶段效率值远高于绿色生产阶段效率值,缘于我国对工业环境治理的重视,节能减排政策和清洁环保的工业转型策略的实施。而绿色生产效率低下的原因可能是污染物排放量较多,非期望产出的增加降低了绿色生产效率,且我国工业处于污染减排的瓶颈时期,处理大量污染物需要更先进的技术和设备,边际成本增加,因此绿色生产率的提高需要长期的努力。

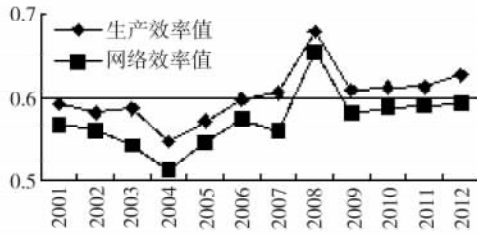


图2 两阶段加权网络效率与只考虑生产阶段效率比较

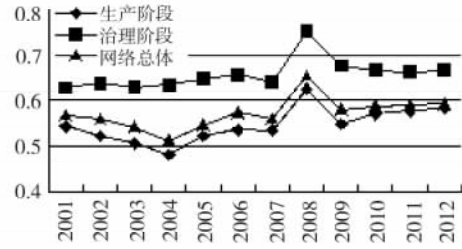


图3 绿色生产阶段效率与环境治理阶段效率对比

## 1. 不同行业绿色生产效率与治理效率的差别

表2 提供了15个两位码行业和32个三位码行业未经税收调整时加权网络效率值与各阶段效率值12年平均值。

表2 各行业绿色生产效率与环境治理效率

两位码行业	网络效率	绿色生产效率	治理效率	三位码行业	网络效率	绿色生产效率	治理效率
				农副食品加工业	0.58	0.61	0.56
食品	0.61	0.63	0.61	食品制造业	0.48	0.44	0.53
				烟草制造业	0.90	1.00	0.81
				饮料制造业	0.48	0.44	0.53
纺织	0.50	0.46	0.55	纺织业	0.50	0.46	0.55
医药	0.48	0.44	0.56	医药制造业	0.48	0.44	0.56
造纸	0.58	0.51	0.68	造纸及纸制品业	0.43	0.38	0.51
车船	0.71	0.75	0.68	印刷和记录媒介复制业	0.72	0.64	0.85
电力	0.57	0.54	0.61	交通运输设备制造业	0.71	0.75	0.68
电子	0.99	1.00	0.98	电力、热力的生产和供应业	0.57	0.54	0.61
钢铁	0.41	0.34	0.54	通信设备、计算机及其他电子设备制造业	0.99	1.00	0.98
				黑色金属矿采选业	0.39	0.31	0.55
				黑色金属冶炼及压延加工业	0.42	0.36	0.54
机械	0.69	0.71	0.69	电气机械及器材制造业	0.86	0.91	0.81
				交通运输设备制造业	0.71	0.76	0.69
				金属制品业	0.59	0.61	0.58
				通用设备制造业	0.63	0.61	0.68
				仪器仪表及文化、办公用机械制造业	0.73	0.82	0.67
				专用设备制造业	0.61	0.56	0.69
家电	0.93	0.95	0.90	电气机械及器材制造业	0.86	0.91	0.82
				通信设备、计算机及其他电子设备制造业	0.99	1.00	0.98
建材	0.48	0.41	0.61	非金属矿物制品业	0.43	0.34	0.60
				木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业	0.53	0.47	0.63
煤炭	0.21	0.13	0.60	煤炭开采和洗选业	0.21	0.13	0.60
				石油和天然气开采业	0.40	0.27	0.86
				非金属矿采选业	0.38	0.30	0.54
石化	0.46	0.41	0.62	化学原料及化学制品制造业	0.45	0.41	0.52
				石油加工、治焦及核燃料加工业	0.61	0.68	0.56
				橡胶制品业	0.48	0.39	0.61
石油	0.40	0.27	0.87	石油和天然气开采业	0.40	0.27	0.87
				有色金属矿采选业	0.33	0.25	0.52
有色	0.41	0.34	0.55	有色金属冶炼及压延加工业	0.49	0.42	0.58

从两位码行业看,电子、家电行业位居前两名,车船、机械效率值也较高,而煤炭、钢铁、石油、石化、有色、纺织和医药行业不容乐观,但石油行业治理阶段的效率值较突出。

表2左侧两位码行业的绿色生产和环境治理效率只能粗略地反映行业的整体状况,不能反映该行业效率优劣的根源所在,因此需要深入行业内部去探究大行业中细分行业两个阶段存在的失衡等问题。从表2右侧可看出,电子和家电行业绩效最高,这归功于共同拥有的细分行业通信设备、计算机及其他电子设备制造业,此行业的三种效率值都为1,而家电行业中电气机械及器材制造业的效率值也较高。此外,食品中的烟草制造业效率值较好。这三个细分行业的高绩效源于政策和资金的大力支持,另外,这三个行业能源消耗低,污染排放少,其清洁高效的生产模式也成就了其较高的绩效水平。绩效较低的两位码行业中,煤炭开采和洗选业、有色金属矿采选业、石油和天然气开采业、非金属矿采选业、医药制造业及钢铁业的两个细分行业都对两位码行业的绩效值有较强的拉低效果。这些行业都占有大量的资金和资源,其行政属性和垄断势力的存在,使其缺乏改善资源效率的激励,导致效率水平偏低。同时,能源消耗高、污染排放大的粗放型生产模式也决定了这些行业绩效水平的提高并非易事。本文对各工业行业绩效水平排名的分析结果与吴传威等<sup>[22]</sup>的研究结果基本一致。

## 2. 轻、重工业与高、中低耗能行业绿色生产效率与环境治理效率的差别

图4中轻、重工业的绿色生产效率随时间推移略有提高,但变化不大,波动平稳。“十五”期间轻、重工业的绿色生产效率值呈下降趋势,“十一五”和“十二五”期间整体上呈上升趋势,说明国家的节能减排政策起到了一定作用;轻工业绿色生产效率值大于重工业,平均高出0.18,原因是重工业能源消耗高、污染排放大,降低了绿色生产效率水平。

图5显示,除2008年轻、重工业环境治理效率值都有所提高外,其他年份效率值保持稳定水平。轻工业环境治理效率值高于重工业,二者相差0.06,小于绿色生产效率值之差,重工业拉低了我国工业污染治理的整体水平。对比图4和图5可以看出,重工业环境治理绩效远高于其绿色生产绩效,而轻工业的环境治理效率和绿色生产效率相差较小,今后重工业应在兼顾环境治理的同时,着重提高和改善绿色生产绩效。

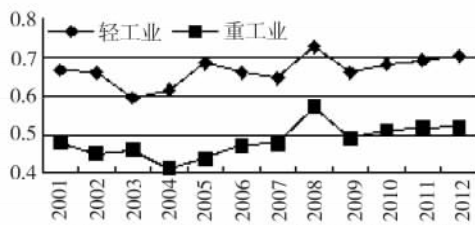


图4 轻、重工业绿色生产效率值对比

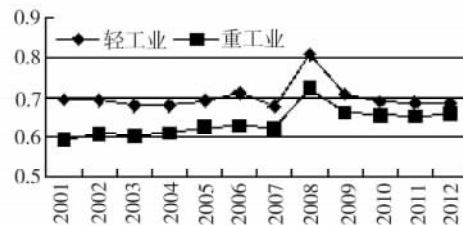


图5 轻、重工业环境治理效率值对比

图6显示,中低耗能行业各年的绿色生产阶段效率都高于高耗能行业,且随着时间推移,二者的差距越来越大。“十五”期间,高耗能和低耗能行业绿色生产效率值呈下降趋势,“十一五”和“十二五”期间,中低耗能行业的效率水平整体上逐渐变好,而高耗能行业效率值除2008年波动外,随时间推移趋于恶化,2012年高、中低耗能行业绿色生产效率值相差0.3以上。

图7显示,高、中低耗能行业环境治理阶段效率值12年间基本保持平稳,在2008年达到各自的最高点且几乎重合。中低耗能行业环境治理效率略高于高耗能行业,平均高出0.09,高、中低耗能行业的环境治理效率之差小于二者的绿色生产效率之差,但大于轻、重工业环境治理阶段效率值之差。

重工业和高耗能行业是造成绿色生产效率和环境治理效率低下的主要原因,二者同时拉低了我国工业的加权网络绩效,且高耗能行业的两种效率值都低于重工业。因此,我国必须加强重工业尤其是高耗能行业污染物排放的监管,提高环境治理的力度,狠抓高耗能行业的能源利用效率,只有提高这两类

行业的绿色生产和环境治理效率,才能改善我国工业整体的绿色生产与环境治理的综合绩效水平。

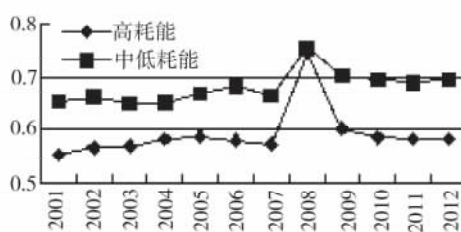
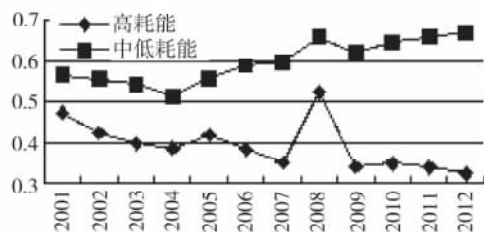


图6 高、中低耗能行业绿色生产阶段效率值对比 图7 高、中低耗能行业环境治理阶段效率值对比

### 3. 纳入税收贡献的绿色生产效率和环境治理效率

经税收调整后的只考虑生产阶段效率值、加权网络效率值和绿色生产效率值各年波动较大且绩效水平低。企业更多地考虑到自身的绩效问题,当兼顾到税收贡献时,则可能对企业的短期绩效造成一定的冲击。但税收调整后的环境治理阶段效率值较平稳,与未进行税收调整时几乎无差别。总体上,经税收调整后,各行业12年间只考虑生产阶段效率值降低了37.6%,而网络效率值降低了41.1%,绿色生产效率值降低48.74%,环境治理效率值平均提高3.48%。说明我国工业在兼顾国家贡献的同时仍能兼顾污染物治理,但未能兼顾污染物的减排。

考虑了税收贡献因素后,烟草制造业和通信设备、计算机及其他电子设备制造业的加权网络效率值和绿色生产效率值没有变化,且环境治理效率略有提高,说明这两个细分行业实现了自身绩效和国家贡献的双赢。

### 五、我国工业绿色生产和环境治理的 TFP 及构成

此部分只分析未经税收调整时网络模型及其绿色生产和环境治理的全要素生产率(TFP)及分解,找出TFP的构成及变动的的原因,同时对比分析高、中低耗能行业的TFP及分解。对TFP的分析采用Global-Malmquist指数法,TFP的变动表示为全局ML生产率指数(GML),GML的变动可以分解为效率进步指数(GMLEC)与技术进步指数(GMLTC)的乘积。

#### (一) 绿色生产和环境治理的 TFP 及构成

图8展示了加权网络模型的全局ML生产率指数(GML)及其分解为效率进步指数(GMLEC)与技术进步指数(GMLTC)值。“十五”期间指数值波动较大,“十二五”期间三种指数值趋于平稳,且相差较小。可能是受金融危机的影响,2008年和2009年TFP的变动主要归功于效率改善,其他时期TFP的变动主要归功于技术进步。我国2001—2012年各工业行业TFP指数几何平均值为1.068,说明各行业全要素生产率平均增长6.8%,这与周燕等<sup>[30]</sup>各工业行业TFP指数平均值为1.067的研究结论基本一致。其中效率进步指数平均值为1,无增长或下滑,而技术进步指数平均值为1.068,因此工业行业加权网络总体TFP的提高全部来源于技术进步,这与韩先锋等<sup>[31]</sup>对工业行业全要素生产率的研究结论一致。

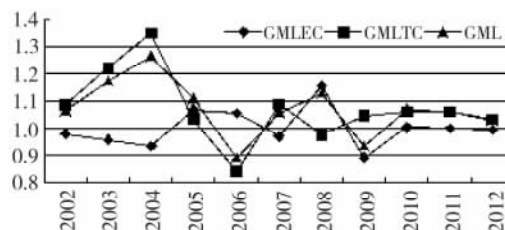


图8 加权网络 TFP 及分解

图9中绿色生产阶段的TFP及分解指数与图8中三种指数值接近,且变动趋势一致。同样,除2008年和2009年全要素生产率的变动归功于效率进步外,其他时期主要归功于技术进步。经计算,绿色生产阶段效率进步指数几何平均值依然为1,而TFP指数和技术进步指数平均值都为1.098,因此,绿色生产阶段年均9.8%的TFP增长中,技术进步起到了全部的作用。

图10中环境治理TFP及分解指数与图8加权网络和图9绿色生产TFP及分解指数有所不同,



2008 年与 2009 年三种指数值拉开一定距离,且 TFP 变动归功于效率指数变动,其余时期三种指数值相差非常小,且都在 1 上微小波动。此外,环境治理阶段效率进步指数有所增加,平均值为 1.005,而技术进步指数平均值为 1,TFP 指数平均值为 1.006。因此,与加权网络 TFP 和绿色生产 TFP 进步的来源不同,环境治理 TFP 增长的主要来源是效率进步,但 TFP 的增幅较小,仅为 0.6%,环境治理 TFP 的增长全部来源于效率进步。

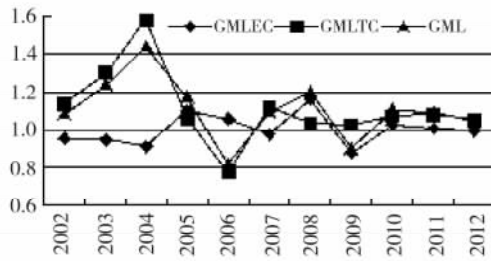


图9 绿色生产阶段TFP及分解

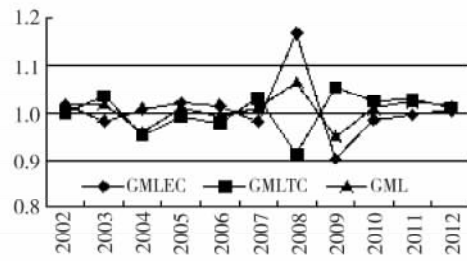


图10 环境治理阶段TFP及分解

(二) 高、中低耗能行业绿色生产和环境治理 TFP 及分解

观察图 11 和图 12 可以看出,“十五”和“十一五”期间高、中低耗能行业的绿色生产 TFP 及分解指数“十五”和“十一五”期间波动较大,“十二五”期间三种指数值走势平稳,相差较小。高、中低耗能行业绿色生产 TFP 都在 2004 年达到最大值,最大进步率分别为 42.5% 和 44.6%,而最大降幅分别为 2009 年的 19.9% 和 2006 年的 18%。2002—2012 年间,高、中低耗能行业绿色生产 TFP 的平均进步率分别为 6.5% 和 10.9%,而对应的技术进步指数值为 1.102 和 1.097,效率进步指数平均值分别为 0.966 和 1.011。因此,高、中低耗能行业的绿色生产 TFP 进步主要归功于技术进步,高耗能行业在 2008 年和 2009 年 TFP 的变动归功于效率进步。

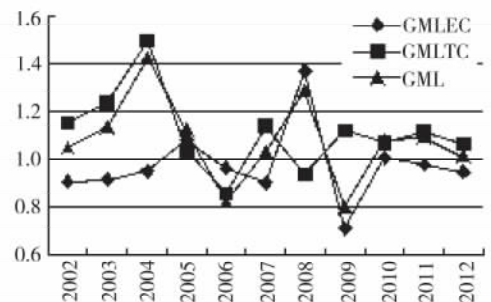


图11 高耗能行业绿色生产阶段TFP及分解

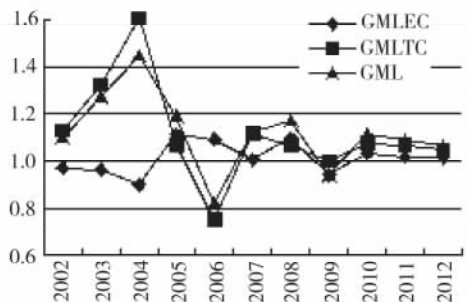


图12 中低耗能行业绿色生产阶段TFP及分解

图 13 和图 14 中,高耗能行业和中低耗能行业环境治理阶段 TFP 及分解指数值都在 2008 年和 2009 年波动最大,且 TFP 的变动归功于效率指数变动而不是技术进步,其他时期三种指数波动较平稳,且高耗能行业的波动比中低耗能行业小。高、中低耗能行业环境治理 TFP 都在 2008 年达到最大进步率,分别为 10.8% 和 4.9%,高耗能行业环境治理 TFP 的最大退步率为 2009 年的 8.6%,而中低耗能行业对应为 2004 年的 5.6%。高耗能行业 2002—2012 年间环境治理 TFP 总体上呈退步趋势,平均退步率为 0.5%,中低耗能行业 TFP 平均进步率为 0.9%。高耗能行业技术退步率 0.9%,而效率改善了 0.4%,中低耗能行业效率进步率为 0.5%,技术进步了 0.4%。因此,高耗能行业 TFP 退步是由技术退步造成的,中低耗能行业的技术进步与效率改善共同促进了 TFP 提高。

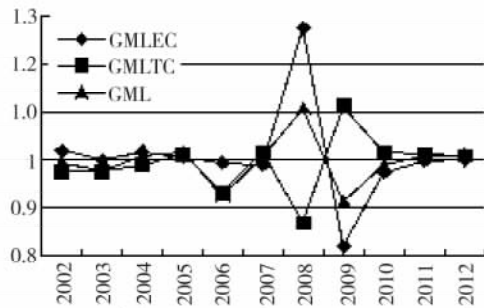


图13 高耗能行业环境治理阶段TFP及分解

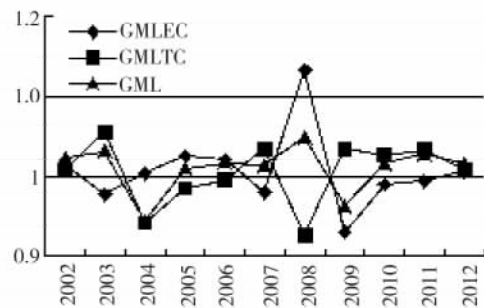


图14 中低耗能行业环境治理阶段TFP及分解

## 六、结论和政策建议

本文引入基于SBM的网络DEA模型实证分析了我国各工业行业2001—2012年两阶段总体效率及其分解效率,同时使用全局Malmquist指数法动态考察绿色生产和环境治理TFP的构成及其来源。研究过程中还将税收作为一个重要产出指标来考察各工业行业对国家和社会的贡献。此外,还分别从轻重工业、高中低耗能行业等多角度分析不同属性行业绩效的差异,从而找出其效率低下的原因及演化态势。主要结论如下:

(1)基于SBM的网络DEA模型能够打开“黑箱”,寻找效率低下的原因,同时纠正以往网络模型中存在的径向和松弛性问题。解决了污染物等非期望产出存在下的效率评价难题,使评价结果具有准确性和真实性。全局Malmquist指数法能够纠正传统Malmquist指数或ML指数度量TFP时给决策者造成的误导。(2)两阶段网络效率值低于传统的只考虑生产阶段效率值,说明只考虑生产阶段的绩效分析是不全面的,会高估我国工业的绩效水平。(3)运用基于SBM的网络DEA模型发现,我国工业网络效率值介于绿色生产效率值和治理效率值之间,而治理阶段效率值高于绿色生产效率值,说明环境治理效果显著,而污染物减排遇到了瓶颈。(4)在对各两位码行业及三位码行业的网络效率值及其分解效率值的分析中发现,通信、计算机等高技术行业绿色生产效率较高,而传统的煤炭、石油、纺织业、医药等都对整体效率起到相反的拉低效果。(5)对网络效率及其分解效率结果进行行业分类对比分析发现,重工业和高耗能行业的绿色生产和环境治理效率值都低于对应的轻工业和中低耗能行业效率值,且高耗能行业绿色生产和环境治理绩效水平都不及重工业,因此,重工业尤其是高耗能行业是造成我国工业绿色生产和环境治理效率低下的主要原因。(6)总体上,生产和治理的TFP增长多数时期均来源于技术进步,年均增长高达10%左右,但治理阶段的TFP增速仅为2%左右,且主要来源于效率的提升。

根据以上分析结果,提出以下政策建议:(1)我国工业的污染物治理能力较好,但污染物减排能力较弱。目前我国工业的污染减排遇到了技术瓶颈,国家应出台相应的污染物减排的激励约束政策,在加大减排努力的同时推动减排设备和减排技术的发展,增强自身的自主研发能力,同时借鉴和引进国外处理工业污染物的先进技术和设备,把减排纳入常规生产过程,使之变成企业自觉的内部行为。(2)努力促进我国重化工业和高耗能行业的绿色转型,综合利用法律、节能减排政策、税收以及诸如污染物总量控制下的交易模式等政策和经济杠杆,努力促成行业的清洁生产。(3)我国工业综合利用各要素进行协调生产的能力还不高,应加强对各种生产要素、人力资源等的组织、协调和管理能力。通过寻求各种投入资源之间的有效配比,改革优化资源配置,提高能源利用率和产出水平;重视各行业的规模经济提升;同时应加快技术创新步伐,构建系统的技术创新政策,加强传统行业的技术改造和结构升级实现全要素生产力的提高。(4)国家应逐步建立环境评估指标体系,并开展环境绩效审计工作。借鉴国外的环境绩效评估程序和指标体系选取方法<sup>[32]</sup>,根据我国各行业的性质

和环境状况,就能源的可持续利用、生态环境保护、环境治理能力等方面,遵循相关性、透明性、公平性、数据的可得性与数据质量等原则制定具体的行业环境评估指标体系。并定期进行调查与统计,与既定环境目标进行比较分析,找出问题所在,提高我国环境政策的方向性和实效性。

#### 参考文献:

- [1]Charnes A. ,Cooper ,W. W. ,Rhodes E. ,1978,“Measuring the Efficiency of Decision Making Units” ,*European Journal of Operational Research* 2(6) :429-444.
- [2]Lozano S. ,Gutiérrez E. ,2011,“Slacks-based Measure of Efficiency of Airports with Airplanes Delays as Undesirable Outputs” ,*Computers & Operations Research* 38(1) :131-139.
- [3]李静 程丹润. 中国区域环境效率差异及演进规律研究——基于非期望产出的 SBM 模型的分析[J]. 工业技术经济 2008(11) :100-104.
- [4]程丹润 李静. 环境约束下的中国省区效率差异研究:1990—2006[J]. 财贸研究 2009(1) :13-17.
- [5]刘勇 李志祥 李静. 环境效率评价方法的比较研究[J]. 数学的实践与认识 2010(1) :84-92.
- [6]Ramanathan R. ,2002,“Combining Indicators of Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions: A Cross-country Comparison” ,*International Journal of Global Energy Issues* ,17(3) :214-227.
- [7]Malmquist ,S. ,1953,“Index Numbers and Indifference Surfaces” ,*Trabajos de Estadisticay de Investigacion Operativa* 4(2) :209-242.
- [8]Shephard R. W. ,1970 ,*Theory of Cost and Production Functions* ,Princeton: Princeton University Press.
- [9]Chung ,Y. H. ,Färe ,R. ,Grosskopf ,S. ,1997,“Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach” ,*Journal of Environmental Management* 51(3) :229-240.
- [10]Caves D. W. ,Christensen L. R. ,Diewert ,W. E. ,1982,“The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input , Output , and Productivity” ,*Econometrica: Journal of the Econometric Society* 50(6) :1393-1414.
- [11]Färe R. ,Grosskopf S. ,Norris M. ,Zhang Z. ,1994,“Productivity Growth , Technical Progress , and Efficiency Change in Industrialized Countries” ,*American Economic Review* 84(1) :66-83.
- [12]Tone K. ,Tsutsui M. ,2009,“Network DEA: A Slacks-based Measure Approach” ,*European Journal of Operational Research* ,197(1) :243-252.
- [13]Lozano S. ,Gutiérrez E. ,Moreno P. ,2013,“Network DEA Approach to Airports Performance Assessment Considering Undesirable Outputs” ,*Applied Mathematical Modelling* 37(4) :1665-1676.
- [14]Fukuyama H. ,Weber ,W. L. ,2010,“A Slacks-based Inefficiency Measure for A Two-stage System with Bad Outputs” ,*Omega* 38(5) :398-409.
- [15]Yu M. M. ,2010,“Assessment of Airport Performance Using the SBM-NDEA Model” ,*Omega* 38(6) :440-452.
- [16]Maghbouli M. ,Amirteimoori A. ,Kordrostami S. ,2014,“Two-stage Network Structures with Undesirable Outputs: A DEA Based Approach” ,*Measurement* 48:109-118.
- [17]Cook W. D. ,Liang L. ,Zhu J. ,2010,“Measuring Performance of Two-stage Network Structures by DEA: A Review and Future Perspective” ,*Omega* 38(6) :423-430.
- [18]毕功兵 梁樑 杨锋. 两阶段生产系统的 DEA 效率评价模型[J]. 中国管理科学 2007(2) :92-96.
- [19]毕功兵 梁樑 杨锋. 一类简单网络生产系统的 DEA 效率评价模型[J]. 系统工程理论与实践 2010(3) :496-500.
- [20]卞亦文. 非合作博弈两阶段生产系统的环境效率评价[J]. 管理科学学报 2012(7) :11-19.
- [21]涂正革 谌仁俊. 传统方法测度的环境技术效率低估了环境治理效率? ——来自基于网络 DEA 的方向性环境距离函数方法分析中国工业省级面板数据的证据[J]. 经济评论 2013(5) :89-99.
- [22]吴传威 黄章树 易全萍. 基于 DEA 的工业行业绩效评价研究[J]. 中国管理科学 2009(10) :1-6.
- [23]李鹏 胡汉辉. 我国工业细分行业效率研究——基于三阶段 DEA 模型的分析[J]. 山西财经大学学报 2014(02) :72-82.
- [24]夏琼 杨锋 梁樑 吴华清. 两阶段混联生产系统的 DEA 效率评价模型[J]. 系统管理学报 2012(1) :1-5.

- [25] 卞亦文. 基于 DEA 理论的环境效率评价方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学 2006.
- [26] 庞瑞芝, 李鹏. 中国工业创新:过程、效率与模式——基于 2001—2008 年大中型工业企业的数据[J]. 产业经济研究 2011(2):1-8.
- [27] Tone, K., Tsutsui, M. 2009, "Network DEA: A Slacks-based Measure Approach", *European Journal of Operational Research*, 197(1):243-252.
- [28] Tone, K. 2003, Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks-based Measure (SBM) Approach, GRIPS Research Report Series I, 0005.
- [29] Oh, D. 2009, A Global Malmquist-Luenberger Productivity Index: An Application to OECD Countries 1990—2004, Stockholm: The Royal Institute of Technology.
- [30] 周燕, 蔡宏波. 中国工业行业全要素生产率增长的决定因素:1996—2007[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2011(1):133-141.
- [31] 韩先锋, 师萍, 宋文飞. 中国工业行业全要素生产率增长的实证分析[J]. 西安电子科技大学学报(社会科学版), 2010(1):23-27.
- [32] 曹东, 宋存义, 曹颖, 等. 国外开展环境绩效评估的情况及对我国的启示[J]. 价值工程 2008(10):7-12.

#### 注释:

- ①数据来自中华人民共和国环境保护部 2012 年的《全国环境统计公报》。
- ②把各节点连接起来的四种选择:(1) desirable (good) link (LG):网络 DEA 把它作为产出;(2) Undesirable (bad) link (LB):比如损失、坏账以及滞销商品等,网络 DEA 把它作为投入;(3) Discretionary (free) link (LF):其对应的节点的 DMU 能够自由处置,不受约束,不会直接对效率评估造成影响,但会通过非直接的方式影响效率;(4) Non-discretionary (fixed) link (LN) 意味着超出了 DMU 的控制,其值是固定不变的,与观察值相同。通过连续性条件对效率产生间接影响。
- ③因为各工业行业固体废物的治理投入数据缺失严重,所以本文只研究废水和废气的污染和治理问题。

(责任编辑:千山)

## China's Industrial Green Production and Governance Efficiency Research ——Based on Two-stage SBM Network Model and Global Malmquist Method

Li Jing, Ni Dongxue

(School of Economics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** As industrial development has made great contributions to the national economy, it has also caused serious energy and environmental crisis. Different from the existing literature that only focus on the green productivity, this article use the network DEA model based on SBM to study different industries' two stage efficiency of green production and environmental governance, different industries' productivity and its composition from 2001 to 2012. The outcomes show that: the results of SBM two-stage network model can reflect the real industrial efficiency than the results that only consider the production stage; Industrial governance stage performance is better than that of green production stage in our country; Heavy industry and high energy-consuming industry are the main industries to cause the low comprehensive performance; Tax adjustment caused great shock to different industries' comprehensive performance and green production performance level, high technology sectors not only has high comprehensive performance, but also realize a win-win situation of their own performance and the national contribution; The productivity growth mainly attributed to technological progress, compared to the production stage, the TFP growth and its composition of the governance stage are relatively weak. Policy implications indicate that, when different industries pay attention to green production transformation, they must also focus on the technology upgrade of pollution control and the ascension of management level; treat heavy industry and high energy-consuming industry as the penetration point, vigorously promote the green production and pollution governance efficiency.

**Key words:** the industrial sector; network DEA; two-stage SBM network model; global Malmquist method; green production efficiency; environmental governance efficiency; green technology