中国工业绿色发展的技术效率及其影响因素研究

——基于投入产出表的分析

刘建翠　郑世林

摘　要　随着环境对经济的影响日益显著，把环境因素纳入生产函数测度其对经济的影响成为众多学者研究的重要内容。作者在分析已有文献的基础上，提出了测算效率的合理指标，并以2002—2015年中国投入产出表的数据为基础，利用SBM-Undesirable模型测算了中国21个工业行业的绿色技术效率，并用Tobit模型分析了不同因素对绿色技术效率的影响。研究发现：（1）中国工业绿色发展的技术效率总体较低，具有较大的提升空间；（2）绿色技术效率具有明显的行业异质性，行业之间差距较大；（3）根据回归结果，研发投入和制度变量能显著影响工业行业绿色技术效率，研发人员对工业行业绿色技术效率有显著负影响，环境治理强度对低污染行业绿色技术效率有显著正影响，能源消费结构对高污染行业有显著抑制作用。

关键词　工业　绿色发展　技术效率　环境因素　SBM-Undesirable模型

［中图分类号］F061.2　**［文献标识码］**A　**［文章编号］**2095－851X（2019）03－0037－18

一、引言与文献综述

在改革开放的前30年，中国经济保持了年均9.93%的高速增长，即使在2008年受到国际金融危机冲击的情况下，经济实际平均增速也达到了8.10%，工业作为中国经济的主体，在这两个阶段的实际增长速度分别达到了11.56%和8.20%。经济的高速增长提升了国家经济实力，也给环境造成了大量负面影响，环境污染不仅影响了

【基金项目】中国社会科学院哲学社会科学创新工程项目“新时代动能转换的机制与效果评价”（2019年）。

【作者简介】刘建翠（1971－），中国社会科学院数量经济与技术经济研究所副研究员、硕士生导师，邮政编码：100732；郑世林（1975－），北京大学国家发展研究院副研究员、硕士生导师，邮政编码：100871。

致谢：感谢数量经济与技术经济研究所朱承亮副研究员在测算过程中的帮助。感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

居民生活质量，也会降低经济实际增长速度，Jorgenson 和 Wilcoxen（1990）认为环境污染导致美国经济增长下降 0.19%。根据《中国能源统计年鉴 2017》和《中国环境统计年鉴 2017》的数据，2015 年中国工业消费能源占总能源消费的 67.99%，排放出的二氧化硫、氮氧化物和烟粉尘分别占全国总排放的 83.73%、63.80% 和 80.14%，但是工业增加值只有国内生产总值的 34.3%，工业固体废弃物排放迅速增长，从 2000 年的 8.16 亿吨增长到 2015 年的 33.11 亿吨。中国工业绿色发展和发展绩效如何，成为学者关注的焦点。

为了度量真实的经济发展效率，反映经济的绿色发展绩效，学者一般把能源和环境因素考虑进来，把能源消耗作为新的投入要素，把环境污染变量作为非期望产出或“坏”产出来处理，因为不考虑环境因素或者不能正确考虑环境因素会给生产率度量带来有偏的结果（Nanere et al.，2007）。20 世纪 80 年代以来，有大量经济学者开始把环境因素纳入生产理论，测算对效率和生产率的影响。Pittman（1983）通过发展 Caves 等（1982）的超越对数生产函数，把环境因素（非期望产出）纳入生产函数，测算了威斯康星州造纸厂 1976 年的效率。此后，大量的学者把环境变量纳入到生产模型中，估计对生产率和效率的影响（Reinhard et al.，1999；Färe et al.，2001；Coelli et al.，2005；Kumar，2006）。

近十几年来，研究中国经济增长和效率的国内外专家和学者也认识到这个问题，开始将环境和资源纳入中国工业和区域层面生产率和效率的研究。根据研究的内容和结果大体可以分为以下几类。第一类主要是绿色生产率和绿色效率研究。胡晓珍和杨龙（2011）、李静和沈伟（2012）、王兵和刘光天（2015）、冯杰和张世秋（2017）分别测算了中国有关省份不同年份的绿色全要素生产率；李玲和陶锋（2012）测算了中国 28 个制造业绿色全要素生产率；王兵和黄人杰（2014）测算了中国区域绿色发展效率和绿色全要素生产率增长；蔡宁等（2014）、原毅军和谢荣辉（2016）分别测算了中国有关省份工业绿色全要素生产率；李斌等（2013）、岳鸿飞等（2018）分别测算了中国 36 个工业行业不同年份的绿色全要素生产率和绿色技术效率。第二类主要是环境效率和环境全要素生产率研究。涂正革和肖耿（2009）、涂正革和刘磊珂（2011）分别测算了中国有关省份不同年份工业的环境全要素生产率；刘伟明和唐东波（2012）测度了中国有关省份工业的环境技术效率和环境全要素生产率；李胜文等（2010）、王兵等（2010）、齐亚伟和陶长琪（2012）、匡远凤和彭代彦（2012）、李小胜等（2014）分别估算了中国省际不同年份的环境效率以及环境全要素生产率；吴茵茵等（2018）估计了中国有关省份的工业环境生产效率；曾贤刚（2011）、宋马林等（2012）估算了中国有关省份的环境效率；李胜文等（2013）估算和比较了中国区域间考虑环境因素的技术差距和技术效率；沈可挺和龚健健（2011）估算了中国高耗能产业的环境全要素生产率；陈黎明等（2014）测算了 2011 年“两横三纵”城市化战略格局中 62 个城市的经济效率、环境效率和生态效率；陈诗一（2010）测度了中国工业的环境全要素生产率。第三类是考虑环境因素的研究，但没有在效率或

生产率的前面冠以“环境”或“绿色”。胡鞍钢等（2008）测度了中国省级考虑环境因素的技术效率；杨俊和邵汉华（2009）、陈茹等（2010）、吴军等（2010）、屈小娥和席瑶（2012）、梁俊和龙少波（2015）分别测度了考虑环境因素和不考虑环境因素的效率或者全要素生产率，并进行了分析。

上述文献主要存在以下几个问题。

第一，概念内涵模糊。目前大多数文献将考虑环境因素的效率称为环境效率，但是环境效率的内涵很不统一。胡鞍钢等（2008）认为环境效率是一个省份在保持投入不变时，“好”产出增加和污染排放同时减少的潜力，李胜文等（2010）认为环境效率是一个省份在保持投入产出不变时，污染排放能在现有基础上减少的潜力，王兵等（2010）则认为环境效率是一个省份“好”产出增加，投入和污染排放同时减少的潜力。本文认同胡鞍钢等（2008）的解释，因为在现有资源条件下，在短期内一个行业或省份的投入难以做大的调整，即投入难以改变，所以认为环境效率是投入不变、期望产出增加和非期望产出同时减少的潜力。

第二，根据生产经济学理论，大部分文献所选取的投入产出指标存在遗漏（见表1），不符合生产的实际状况。一般来说，在测算全要素生产率或效率的文献中，投入指标一般是资本和劳动，产出指标是增加值，考虑环境因素后，大部分文献投入指标增加能源，产出指标增加非合意产出，合意产出指标应该是“总产值”，而不是“增加值”，同时投入指标应该增加其他中间投入。这是因为能源是中间投入，考虑能源因素的同时其他中间投入也应该考虑，因此选择投入产出指标时应按照图1的组合，而不是随意选取，否则会造成指标的遗漏，测算的全要素生产率或效率值难免误差较大。①

第三，数据处理缺乏合理性。在工业行业的资本存量处理上，选择数据类型不合适，例如直接采取统计年鉴中的固定资产净值代替资本存量，固定资产净值指的是固定资产的原始价值或重置价值减去历年已计提折旧后的净额，主要用于企业计算盘盈、盘亏和毁损固定资产的损益，该值并非企业实际投入生产的资本，且不同的企业有不同的折旧计提方法，对该指标值也会有较大的影响（李双杰、李春琦，2018），即固定资产净值是会计而非经济学意义上的资本存量。同时，在劳动投入方面，有的学者把从业人数和人力资本并用，造成劳动投入的重复。这些都会影响估算结果的可信性。

针对以上问题，本文做出如下改进。首先，在模型设计上明确引入中间投入。根据图1，选择的投入指标包括资本、劳动和中间投入，产出指标包括总产值和非期望产出。因为目前没有公开的各行业中间投入数据，为了保持数据的准确性，只能用中国投入产出表中的行业中间投入数据，这样做的代价是减少了考察年份，但是保证了数据的可靠性和生产理论的内在一致性。其次，对于行业资本存量的估算，采取了合理的估算参数，并尽最大可能保持数据与现实情况相符合。同时，在分析文献时发现研究地区工业环境绩效的文献非常多，研究工业各行业环境绩效的文献较少，研究影

① 作者认为在考虑环境因素时，最好选择图1中的A组合，因为污染排放主要来自能源的利用过程。

响绿色效率因素的文献也较少，故本文以投入产出表的数据为基础来研究分析中国 21 个工业行业绿色技术效率，并分析其影响因素。

表 1 部分典型文献的投入产出指标

学者	投入指标	产出指标
杨俊和邵汉华(2009)	固定资产净值、劳动人数	地区工业增加值、SO_2
王兵等(2010)	资本存量、劳动、能源	地区生产总值、COD、SO_2
陈诗一(2010)	资本存量、从业人员和能源	工业总产值、CO_2^*
沈可挺和龚健健(2011)	固定资产净值、劳动人数	工业总产值、SO_2
匡远凤和彭代彦(2012)	基础设施、市场化指数、资本存量、人力资本、CO_2	地区生产总值
李斌等(2013)	固定资产净值、从业人员、能源	工业总产值、环境污染综合指数**、CO_2^*
李小胜等(2014)	资本存量、能源、从业人员	地区生产总值、CO_2^*、SO_2
王兵和刘光天(2015)	资本存量、人力资本、能源	地区生产总值、COD、SO_2
原毅军和谢荣辉(2016)	固定资产投资净值、城镇单位从业人员、能源	地区工业总产值、CO_2^*
冯杰和张世秋(2017)	资本存量、能源、从业人员	地区生产总值、COD、SO_2
吴茵茵等(2018)	固定资产净值、从业人员、能源、工业废气	地区工业增加值

注：* 表示 CO_2 排放量的数据来源相对复杂，因为不仅化石燃料燃烧的过程中排放 CO_2，水泥生产过程也排放 CO_2，而大部分文献中只是测算了化石燃料燃烧过程排放的 CO_2，没有估算水泥生产过程排放的 CO_2，因此估计的 CO_2 偏低；** 表示将工业废水排放量、工业废气排放量及工业固体废弃物排放量综合成环境污染综合指数来衡量环境污染排放非期望产出。

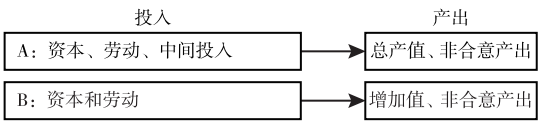

图 1 投入和产出的对应关系

二、测算模型

（一）绿色技术效率模型

测算绿色效率的常用模型包括 SBM 模型、方向性距离函数和随机前沿生产函数。前两种方法属于非参数方法，随机前沿生产函数属于参数方法。随机前沿生产函数常常采用超越对数生产函数，而此函数在处理 3 个及以上的投入时会变得非常复杂，且对多个产出难以进行处理，计算时繁杂，可操作性差，而 DEA 模型能够处理多产出的问题，因此计算多投入多产出效率时 DEA 模型具有优势。基于 DEA 的非参数方法具有不需要价格信息、不用预设生产函数形式、无须对误差项的概率分布进行强假设等优点，在国内外得到了广泛应用（周五七，2015）。而 SBM 模型是非径向非角度的

数据包络分析方法（Tone，2001），不仅综合考虑了各个决策单元的投入和产出，还提供了松弛问题的有效解决途径，一经提出就得到了广泛应用。与传统的 CCR 和 BCC 模型相比较，SBM 模型不仅解决了投入松弛的问题，还解决了非期望产出存在下的效率问题，并且 SBM 模型属于 DEA 模型中的非径向非角度的度量方法，从而避免了径向和角度选择差异带来的偏差和影响，所以，它比其他模型更能体现效率评价的本质（李静，2008；涂正革、刘磊珂，2011）。Färe 等（2004）提出的径向产出角度的方向性距离函数，没有充分考虑投入产出的松弛问题，难以保证测算结果无偏。用 SBM 模型测度绿色效率已是成熟的方法，鉴于此原因，本文在 Tone 提出的 SBM 模型基础上构造了基于产出角度的 SBM 模型，从经济学的角度看，此模型是指在不增加投入的情况下，尽可能增加期望产出，同时减少（不增加）非期望产出，这样可实现经济发展与环境保护的双赢。这一点与其他文献不同，王兵等（2010）、涂正革和刘磊珂（2011）、李斌等（2013）是用 SBM 模型测算环境效率，本文采用的模型符合胡鞍钢等（2008）对环境效率的定义，符合绿色发展的观念。

当然，SBM 模型也不是完美的，缺陷主要在于 Tone 构造的指标 ρ，其经济含义理解和解释比较困难，而传统的 DEA 方法或方向性距离函数中的效率指标便于考察和理解。根据 Chung 等（1997）提出的考虑环境因素的技术函数，本文将每一个工业行业作为一个决策单元构造每一个时期的最佳生产可能性边界。假设有 n 个决策单元，每个决策单元对应的投入向量矩阵为 $X=(x_{ij})\in R^{+}_{n\times m}$，期望产出对应的向量矩阵是 $Y^{g}=(y^{g}_{ij})\in R^{+}_{u\times m}$，非期望产出对应的向量矩阵是 $Y^{b}=(y^{b}_{ij})\in R^{+}_{v\times m}$，并且 $X>0$，$Y>0$。当生产可能性集 $P(x)$ 满足闭集和凸集、联合弱可处置性、零结合性、投入的自由可处置性和期望产出的强可处置性四个特性时，[①] 则包含环境的技术效率模型为：

$$P(x)=\{(x,y^{g},y^{b})\mid x\geqslant X\lambda,y^{g}\leqslant Y^{g}\lambda,y^{b}\geqslant Y^{b}\lambda,\sum_{i=1}^{m}\lambda=1,\lambda\geqslant 0\} \tag{1}$$

本文在 Tone（2003）定义的非期望产出的 SBM 效率测度模型的基础上，构建了基于产出角度的 SBM-Undesirable 模型：

$$\min\rho=\frac{1}{1+\frac{1}{u+v}\left(\sum_{j=1}^{u}\frac{s^{g}_{j}}{y^{g}_{j0}}+\sum_{j=1}^{v}\frac{s^{b}_{j}}{y^{b}_{j0}}\right)} \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}y^{g}_{0}-Y^{g}\lambda+s^{g}=0\\ y^{b}_{0}-Y^{b}\lambda-s^{b}=0\\ s^{g}\geqslant 0,s^{b}\geqslant 0,\lambda\geqslant 0,\sum\lambda=1\end{cases}$$

① 按照 Chung 等（1997）的定义，对于 $P(x)$，联合弱可处置性（Jointly Weak Disposability）是指在一定的投入水平下，降低非期望产出需要付出成本，非期望产出减少的同时期望产出相应减少；零结合性（Null-jointness）是指没有非期望产出就没有期望产出。如果 $x'\geqslant x$，那么 $P(x')\supseteq P(x)$，说明投入要素 x 具有自由可处置性；如果 $(y^{g},y^{b})\in P(x)$，且 $y^{g'}\leqslant y^{g}$，那么 $(y^{g'},y^{b})\in P(x)$，说明期望产出 y^{g} 是强可处置的。

其中，λ 是横截面的权重向量，$\sum\lambda = 1$ 表示规模报酬可变。s 表示产出的松弛变量，j 表示产出的个数，u 表示期望产出的个数，v 表示非期望产出的个数。目标函数 $\rho \in [0, 1]$，当且仅当 $\rho = 1$ 时，被评价的决策单元是有效率的，松弛变量为 0。需要指出的是，本文构建的 SBM-Undesirable 模型是一个测算相对效率的 DEA 静态模型。

本文用这个模型测度中国工业 21 个行业的绿色技术效率，并进行分析。

（二）Tobit 回归模型

Tobit 模型自从 1958 年被提出以来（Tobin，1958），已得到广泛应用（韩晶，2008；于晓宇、谢富纪，2011；曾贤刚，2011；胡根华、秦嗣毅，2012；刘建翠、郑世林，2018）。Tobit 模型考察因变量受限制的回归，也就是说解释变量是可观测的，被解释变量只能以受限制的方式被观测到。从经济学意义上讲，SBM 模型得出的效率值属于（0，1］，因此是受限变量，如果直接采用最小二乘法回归，会给参数估计带来有偏和不一致（涂俊、吴贵生，2006；于晓宇、谢富纪，2011；孙东，2014）。本文采用 Tobit 模型来分析工业各行业绿色技术效率影响因素。

Tobit 模型的一般形式如下：

$$\begin{cases} y_i^* = \beta X_i + \mu_i \\ y_i = y_i^* \quad \text{if} \quad y_i^* > 0 \\ y_i = 0 \quad \text{if} \quad y_i^* \leqslant 0 \end{cases} \tag{3}$$

其中，y_i 为潜变量，y_i 为观察到的因变量，X_i 为自变量向量，β 为相关系数向量，μ_i 为独立的，且 $\mu_i \sim N(0, \sigma^2)$，因此 $y_i \sim N(X_i\beta, \sigma^2)$，独立同分布。

三、数据准备和处理

本文将工业部门 21 个行业作为研究对象（见表 3），因为各工业行业的中间投入数据是通过投入产出表来估算的，而我国正式的投入产出表是从 1987 年才开始编制，但是 21 个部门的环境污染数据从 2002 年开始有详细的数据，所以我们将初始期定为 2002 年。因为中国投入产出表是“每 5 年编一次全国表（逢 2、7 年度），每两个编表年间修正一次（逢 0、5 年度）”，本文考察 2002 年、2005 年、2007 年、2010 年、2012 年、2015 年 6 个时间段环境影响下的技术效率。本文经济数据基准年是 1990 年，即折算为 1990 年不变价。

（一）投入

1. 工业行业资本存量的估算。中国目前还没有公布官方的资本存量资料，更没有行业资本存量。对于工业资本存量的估计，一般采用国际上较为通用的永续盘存法进行估计：

$$CS_t = CS_{t-1}(1 - \delta_i) + INV_{it} \tag{4}$$

其中，i 代表行业，t 代表年份，CS_{t-1} 和 CS_t 分别是第 i 行业在第 $t-1$ 年和第 t 年

的资本存量，INV_{it}是第 i 行业第 t 年的不变价投资，δ_i 是第 i 行业的折旧率。《中国统计年鉴》里面可以查到 2002 年以来每年各个行业规模以上的固定资产投资和工业总投资额，根据工业各行业规模以上的投资占规模以上的固定资产投资额的比例，与工业总投资额相乘得到各个行业的全部投资额，将其按照固定资产投资价格指数进行平减即得到 INV_{it}，其他数据必须进行估算。

关于折旧率的取值，文献之间并不相同，相差较大，一般在 4% 和 10% 之间，本文为了接近实际情况，2002—2015 年各个行业的折旧率按照徐杰等（2010）的方法计算，为了提高数据的准确性，资本存量从 1980 年开始计算，1980—2002 年数据来自龚飞鸿等（2009），对于初始资本存量、1980—1990 年的固定资产投资价格指数和各行业固定资产投资都有详细的说明，本文不再介绍。2002 年以后的固定资产投资价格指数来自《中国统计年鉴》。

2. 劳动力投入。严格来说，劳动力投入应该不仅要考虑劳动的时间，也要考虑劳动的效率。但是中国目前的收入不能合理地反映劳动质量，考虑到数据的可获得性和准确性，本文选择工业行业全部从业人员年平均人数来代表劳动力投入，但是统计年鉴只有“规模以上工业行业年平均用工人数”，本文以此数据为基准，根据采掘业和制造业数据进行匹配得到全部从业人员人数。数据根据相应年份的《中国统计年鉴》计算得到。

3. 中间投入。中间投入来自 2002—2015 年投入产出表和投入产出延长表，用工业生产者购进价格指数平减为 1990 年不变价。

（二）产出

1. 合意产出。按照图 1，合意产出选择总产值，各个行业总产值来自 2002—2015 年投入产出表和投入产出延长表，用工业行业生产者出厂价格指数平减为 1990 年不变价。

2. 非合意产出。非合意产出是考虑环境因素下的效率与传统效率的重要区别之一。我国环境污染管制的典型污染物和主要控制对象包括废水中的化学需氧量（COD）和二氧化硫排放量（SO_2），本文也与大多数学者研究相同（吴军等，2010；王兵等，2010），选择 SO_2 和 COD 作为非合意指标，数据来自《中国环境统计年鉴》和《中国环境年鉴》，并利用线性转换方法转换非合意产出（曾贤刚，2011）。

各变量的描述性统计见表 2。

表 2　2002—2015 年 21 个工业行业投入产出数据的描述统计

变量	单位	个数	最大值	最小值	均值	标准差
资本	亿元	126	48541.30	121.09	6214.56	8716.12
劳动力	万人	126	2100.59	52.31	758.18	515.03
中间投入	亿元	126	70011.92	293.37	8200.03	9835.69
总产值	亿元	126	180351.71	723.16	24931.76	30963.08
SO_2	万吨	126	1169.58	0.09	80.64	198.34
COD	万吨	126	346.83	0.30	45.79	72.90

资料来源：作者计算。

四、中国工业绿色技术效率实证分析

（一）工业行业绿色技术效率分析

总体看来，中国工业绿色技术效率偏低，并呈下降趋势，还有较大的提升空间。2002—2015 年的测算结果表明（见表 3），中国工业绿色技术效率平均值是 0.564，说明在现有的资源投入和技术条件下，还有 43.6% 的提升空间，因为对污染物的处理需要消耗额外的投入，生产过程的转换也导致了一定程度的期望产出损失，这被认为是环境监管的机会成本（袁鹏、程施，2011），也被认为是环境发展绩效的提升潜力或潜在期望产出的损失程度。工业各行业应该通过加强制度创新、优化组织结构和内部管理、提高组织管理水平等手段来改善工业绿色技术效率，最大限度地发挥企业技术潜力，促进效率提高。

在不同的年份，从工业各个行业来看，绿色技术效率具有明显的行业异质性（见表 3）。因此本文根据各个行业单位产值排放的 SO_2 和 COD 与工业平均水平进行对比，分为高污染行业和低污染行业，低污染行业包括木材加工及家具制造业，金属制品业，通用、专用设备制造业，交通运输设备制造业，电气、机械及器材制造业，通信设备、计算机及其他电子设备制造业，仪器仪表及文化办公用机械制造业和工艺品及其他制造业 8 个行业，其余 13 个行业是高污染行业。据此分析行业绿色技术效率变化情况。

表 3　工业各行业绿色技术效率

行业	2002 年	2005 年	2007 年	2010 年	2012 年	2015 年
高污染行业						
煤炭开采和洗选业	0.865	0.399	0.539	0.394	0.365	0.378
石油和天然气开采业	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
金属矿采选业	1.000	0.591	0.564	0.506	0.510	0.590
非金属矿及其他矿采选业	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
食品制造及烟草加工业	0.512	0.443	0.426	0.394	0.394	0.371
纺织业	0.393	0.325	0.344	0.363	0.378	0.394
纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	0.565	0.414	0.381	0.365	0.364	0.336
造纸印刷及文教体育用品制造业	0.530	0.412	0.404	0.411	0.446	0.409
石油加工、炼焦及核燃料加工业	0.542	0.512	0.482	0.513	0.513	0.613
化学工业	1.000	0.367	0.367	0.350	0.366	0.379
非金属矿物制品业	0.415	0.380	1.000	1.000	1.000	1.000
金属冶炼及压延加工业	0.426	0.341	0.342	0.345	0.369	0.398
电力、热力、燃气和自来水业	0.349	0.278	0.278	0.297	0.290	0.262
高污染行业均值	0.613	0.458	0.498	0.484	0.489	0.495

续表

行业	2002 年	2005 年	2007 年	2010 年	2012 年	2015 年
低污染行业						
木材加工及家具制造业	1.000	0.553	0.522	0.458	0.471	0.433
金属制品业	0.804	0.644	0.512	0.457	0.468	0.444
通用、专用设备制造业	0.528	0.488	0.462	0.425	0.407	0.378
交通运输设备制造业	0.547	0.561	0.619	0.611	0.586	0.552
电气、机械及器材制造业	1.000	0.610	0.559	0.521	0.481	0.482
通信设备、计算机及其他电子设备制造业	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
仪器仪表及文化办公用机械制造业	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
工艺品及其他制造业	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
低污染行业均值	0.833	0.703	0.674	0.640	0.632	0.611
全行业均值	0.689	0.539	0.559	0.538	0.539	0.536

资料来源：作者计算。

（二）高污染行业绿色技术效率分析

2002—2015 年，高污染 13 个行业绿色技术效率年度均值总体呈下降趋势（见表 3），说明高污染行业还有较大的提升空间。根据图 2，从 2002—2015 年的绿色技术效率均值来看，石油和天然气开采业，非金属矿及其他矿采选业，非金属矿物制品业，金属矿采选业，石油加工、炼焦及核燃料加工业 5 个行业的绿色技术效率均值高于高污染行业的均值，其余 8 个行业的绿色技术效率均值低于高污染行业绿色技术效率均值，电力、热力、燃气和自来水业的绿色技术效率均值只有 0.291，不仅在高污染行业中最低，

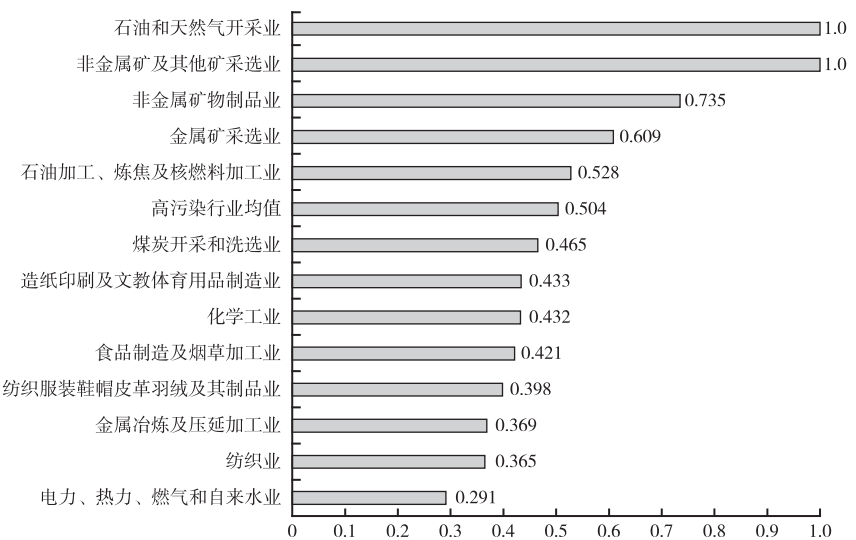

图 2　2002—2015 年高污染行业绿色技术效率均值

资料来源：作者计算。

在 21 个行业中也是最低的。

从 13 个高污染行业看，石油和天然气开采业、非金属矿及其他矿采选业两个行业的绿色技术效率值均为 1，说明这两个行业已在技术前沿面，如果进一步提高绿色技术效率必须进行技术革新，依靠技术进步推动技术前沿面外移。纺织业，石油加工、炼焦及核燃料加工业和非金属矿物制品业三个行业的绿色技术效率总体呈上升趋势，其余 8 个行业绿色技术效率总体呈下降趋势，提高这些行业的组织管理水平和改变其管理方式，提高资源配置能力，适当加强环境规制，提高技术能力迫在眉睫。这也意味着这些行业考虑绿色技术效率有更大的提升空间，通过改善组织规模、优化组织结构、深化制度创新、加强内部管理、改变管理方法、提升管理水平等手段，最大限度发挥技术潜力，促使高污染行业最佳生产可能性边界不断向技术前沿面移动，从而提高绿色技术效率。

（三）低污染行业技术效率分析

2002—2015 年，低污染 8 个行业绿色技术效率年度均值总体呈下降趋势（见表 3），说明低污染行业还有较大的提升空间。根据图 3，从 2002—2015 年的绿色技术效率均值来看，只有通信设备、计算机及其他电子设备制造业，仪器仪表及文化办公用机械制造业，工艺品及其他制造业 3 个行业的绿色技术效率均值大于低污染行业的均值，而这 3 个行业始终处于前沿面，说明这 3 个行业提高了低污染行业的绿色技术效率均值，而金属制品业等 5 个行业的绿色技术效率均值拉低了低污染行业的均值。从 8 个低污染行业看，通信设备、计算机及其他电子设备制造业，仪器仪表及文化办公用机械制造业，工艺品及其他制造业 3 个行业的绿色技术效率值均为 1，说明这 3 个行业已在技术前沿面，唯有进行技术革新，依靠技术进步推动技术前沿面外移，才能提高绿色技术效率。只有交通运输设备制造业的绿色技术效率总体呈上升趋势，说明其正在逼近技术前沿面，木材加工及家具制造业等 4 个行业的绿色技术效率呈下降趋势，说明这些行业在远离技术前沿面，有必要采取适当的环境规制措施，促进企业的创新活动，提高管理组织水平，提高技术能力，以及提高资源配置效率，来提高绿色技术效率。

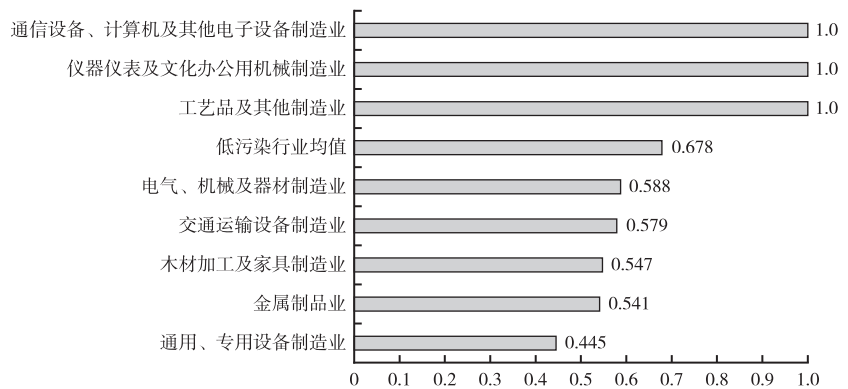

图 3　2002—2015 年低污染行业绿色技术效率均值

资料来源：作者计算。

根据表3可知，低污染行业绿色技术效率的年度均值高于高污染行业绿色技术效率的均值，说明环境规制对低污染行业更有效果，可能的原因在于低污染行业的清洁生产技术和工艺更容易获得和推广，更有利于抵消环境规制成本，提高企业的盈利能力。除了石油和天然气开采业等5个行业始终处于技术前沿面外，其余16个行业中有12行业的绿色技术效率总体呈下降态势，或许是因为随着节能减排政策的深入实施，清洁生产技术和工艺的成本越来越大，企业难以有开发环保技术的动力。对此，这些行业应该继续淘汰落后产能，加强对节能减排技术的引进、研发及应用环节的税收优惠或财政补贴力度（吴茵茵等，2018），并采取适当严厉的环境估值策略，提高这些行业的绿色技术效率。

（四）与其他文献结果的对比

进行效率对比时，由于采取的数据、数据处理方法和模型不同，计算结果有较大差异。鉴于目前的文献多数是测度区域工业的绿色技术效率，与本文的结果没有可比性，在测算中国工业行业的文献中，比较接近的有徐晔（2012）用方向性距离函数测算了2003—2010年中国28个制造业的环境技术效率。本文选择相同的年份和行业进行简单对比（见表4）。

表4　绿色技术效率计算结果对比

行业	徐晔(2012)			本文				
	2005年	2007年	2010年	2005年	2007年	2010年	2012年	2015年
石油加工、炼焦及核燃料加工业	1.000	1.000	1.000	0.512	0.482	0.513	0.513	0.613
非金属矿物制品业	0.540	0.570	0.520	0.415	0.380	1.000	1.000	1.000
金属制品业	0.700	0.810	0.830	0.644	0.512	0.457	0.468	0.444
交通运输设备制造业	0.660	0.720	0.780	0.547	0.561	0.619	0.611	0.586
电气、机械及器材制造业	0.770	0.810	0.900	1.000	0.610	0.559	0.521	0.481
通信设备、计算机及其他电子设备制造业	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
仪器仪表及文化办公用机械制造业	0.850	0.900	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
工艺品及其他制造业(含废品废料)	0.810	0.820	0.860	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

资料来源：徐晔（2012）、作者计算。

表4显示，徐晔（2012）的计算结果只有石油加工、炼焦及核燃料加工业和通信设备、计算机及其他电子设备制造业2个行业处于行业前沿面上；本文的计算结果是通信设备、计算机及其他电子设备制造业，仪器仪表及文化办公用机械制造业和工艺品及其他制造业3个行业处于行业前沿面上。对于非金属矿物制品业，徐晔（2012）的计算结果是总体呈下降趋势，本文的计算结果是总体呈上升趋势。对于金属制品业和电气、机械及器材制造业，徐晔（2012）的计算结果是总体呈上升趋势，本文的计算结果是总体呈下降趋势。对于交通运输设备制造业，徐晔（2012）和本文的计算结果均总体呈上升趋势。部分行业计算结果不同的原因主要在于：（1）采

取的数据不同，本文的投入包括资本（资本存量）、劳动（年平均从业人数）和中间投入，产出是总产值、SO_2 和 COD，徐晔（2012）的投入包括资本（固定资产净值）和劳动（年平均从业人数），产出是工业总产值和 SO_2，投入和产出数据不同，计算的结果也就不同；（2）采取的模型不同，本文用 SBM-Undesirable 模型，徐晔（2012）用方向性距离函数，这两种方法的不同在前文已有介绍，这里不再重复。

五、绿色技术效率影响因素的实证检验

（一）检验模型和变量解释

经济社会是一个复杂的系统，影响技术效率的因素是多方面的，根据目前的测算方法和手段，难以准确测量某一因素对技术效率的实际影响程度，但是可以测算不同因素对其的影响方向，所以本文用 Tobit 模型测算各因素对绿色技术效率的影响方向。

本文构建了以下的面板数据 Tobit 模型：

$$ETC_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 RD_{i,t} + \alpha_2 RDH_{i,t} + \alpha_3 WS_{i,t} + \alpha_4 LNST_{i,t} + \alpha_5 EC_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

公式（5）中，α_0 是截距，i 表示某个行业，t 代表时间；*ETC* 是考虑环境因素的技术效率，*RD* 是研发投入强度，用研发经费支出占产品销售收入的比例代表，自主创新的过程就是积累知识的过程，不仅促进技术进步，为经济发展提供源泉和动力，还能促进环保技术的研发、推广和利用，降低环境污染，提高技术效率。数据来源于历年《中国科技统计年鉴》和《中国统计年鉴》。

RDH 代表研发人员，用研发人员占从业人员的比例代表，高素质的劳动力可以进一步发挥设备的效率潜能。数据来源于历年《中国科技统计年鉴》和《中国统计年鉴》。

WS 代表环境治理强度，用工业各行业废水设施和废气治理设施运行费用总额与各行业主营业务收入的比值来衡量，此值越高说明企业环境投入越大，环境治理能力越强。数据来源于历年《中国环境统计年鉴》、《中国环境年鉴》和《中国统计年鉴》。

ST 代表制度变量，用各行业内部国有企业（包括国有控股）的工业总产值占行业工业总产值的百分比来表示。市场化的发展，促进了资源配置的主体和机制的转变，非国有经济成分得到发展，产权制度明晰化、多元化以及竞争机制的发挥有助于全社会经济效率的提高（李静，2009）。数据来源于历年《中国统计年鉴》。

EC 代表能源消费结构，用能源消费中煤炭消费比值来表示，此值越大说明煤炭消耗量越多，污染排放越多，不利于考虑环境因素的技术效率的提高。我国的煤炭属于高硫煤，二氧化硫主要来自煤炭的燃烧。数据来源于历年《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》。

所有变量的描述性统计结果见表 5。

表 5　变量描述性统计

变量	最大值	最小值	均值	标准差
ETC	1.000	0.262	0.618	0.267
RD	2.069	0.028	0.711	0.490
RDH	6.424	0.126	1.817	1.393
WS	3.457	0.015	0.400	0.514
LNST	4.574	-0.632	2.799	1.195
EC	0.671	0.016	0.211	0.164

资料来源：作者计算。

（二）实证检验结果分析

利用 2002—2015 年行业面板数据，用 Stata 11.0 软件对方程（4）首先进行全部工业行业、高污染行业和低污染行业的混合 Tobit 回归，并使用聚类稳健标准误，其次进行随机效应的面板 Tobit 回归。回归结果表明 rho 值分别为 0.785、0.741 和 0.914，LR 检验 t 值均为零，说明均存在个体效应，应采用随机效应模型，[①] 得到表 6 的回归结果，回归均通过了显著性检验。Tobit 模型的估计结果只是说明因素的影响方向，不能得到解释因变量和自变量之间的影响大小，这是与其他的回归模型不同的地方，比如 OLS 回归等（刘建翠、郑世林，2018）。

常数项系数均在 1% 水平上显著，说明各行业本身生产特点是影响绿色技术效率差异的一个因素。

研发投入在 5% 水平上对工业总体、低污染行业绿色技术效率具有显著的促进作用，与前文论述相同，适当的环境规制能够刺激企业的技术创新活动，从而在降低成本、提高产品竞争力的同时也减少了污染物的排放，达到了双赢。

研发人员在 5% 水平上对工业总的绿色技术效率具有显著的抑制作用，与预期结果相反。说明研发人员的配备不是越多越好，将具有超高专业素养的研发人员合理配备是必要的（王娟等，2016 等）。

环境治理强度在 5% 水平上对低污染行业绿色技术效率具有显著的促进作用，与前文论述相同，说明环境治理投入能有效减少污染排放。环境治理强度对工业行业和高污染行业绿色技术效率有促进作用，但效果不显著。

制度变量在 10% 水平上对工业总体的绿色技术效率有显著促进作用，说明国有企业的增加能够降低环境污染，提高技术效率。与王兵等（2010）研究结论类似。因为相对于民营企业，我国国有企业有雄厚的资金和技术人员，有能力进行技术改进和创新活动。制度变量对高污染行业和低污染行业绿色技术效率具有促进作用，不明显。

能源消费结构在 5% 水平上对高污染行业绿色技术效率具有显著抑制作用，这和王

① 根据陈强（2013），当 ρ 越大，说明个体效应的作用越大，应该选择随机效应模型。

表 6 影响因素的 Tobit 回归结果

	全部行业	高污染行业	低污染行业
常数项	0.521***	0.669***	0.416***
	(5.48)	(4.52)	(3.44)
RD	0.163**	0.057	0.175**
	(2.13)	(0.42)	(2.42)
RDH	-0.055**	-0.062	-0.029
	(-2.11)	(-1.19)	(-1.25)
WS	0.017	0.034	0.476**
	(0.56)	(0.94)	(2.85)
LNST	0.036*	0.020	0.032
	(1.78)	(0.77)	(1.22)
EC	-0.129	-0.558**	0.465
	(-0.62)	(-2.12)	(1.63)
Log likelihood	52.53	28.72	38.22
Wald chi2(5)	14.73	7.63	49.53
Prob > chi2	0.01	0.18	0.00

注：括号内是 t 值，*、** 和 *** 分别表示 10%、5% 和 1% 的显著性水平。
资料来源：作者计算。

兵等（2010）研究结论类似。煤炭消费量在中国能源消费总量中长期徘徊在 70% 左右，2014 年仍然达到 65.5%，“十三五”以来才有较大幅度的下降，2017 年降到 60.4%，而国际上煤炭消费比重平均为 30% 左右，美国低于 20%。改善能源消费结构，降低能源消费中煤炭消费量，提高清洁能源的消费总量，对于改善绿色技术效率非常重要。

六、结论及政策含义

本文在分析现有文献的基础上，提出了测算效率的合理指标，并构建了 SBM-Undesirable 模型，测算了中国 2002—2015 年 21 个工业行业的环境发展绩效，并对影响绩效的因素进行了回归分析，据此得出以下结论。第一，中国工业绿色技术效率总体呈下降趋势，并有较大提升空间。通过提高管理水平和改变组织规模，有助于提高绿色技术效率。适当的环境规制有利于企业提高技术水平，提高竞争力，获得更高的盈利。第二，分行业来看，不同行业绿色技术效率均值差距较大，具有行业异质性。分年度来看，不同行业绿色技术效率走势不同，5 个行业处于技术前沿面，4 个行业呈上升趋势，12 个行业呈下降趋势。第三，根据影响因素的回归结果，研发投入和制度能显著影响工业行业绿色技术效率；研发人员显著抑制工业绿色技术效率的提高；环境治理强度对低污染行业有显著正影响，与工业行业和高污染行业正相关；制度变量与高污染行业和低污染行业绿色技术效率正相关；能源消费结构显著抑制高污染行业的绿色技术效率，符合现实情况。

根据以上分析，可以提出以下政策建议：第一，针对绿色技术效率的下降，应进一步提升全国范围内的环境规制水平，制定合理严格的规制政策；第二，因为行业具有异质性，应该针对不同的行业制定不同的环境规制政策；第三，实施环境政策时，应该注意环境规制政策的灵活性，在实施过程中，不仅需要随时观察市场反应以做出相应调整，也应该在实践中不断完善各项措施和细节。

参考文献

蔡宁、吴婧文、刘诗瑶（2014）：《环境规制与绿色工业全要素生产率——基于我国 30 个省市的实证分析》，《辽宁大学学报（哲学社会科学版）》第 1 期，第 65 ~ 73 页。

陈黎明、王文平、王斌（2014）：《“两横三纵”城市化地区的经济效率、环境效率和生态效率——基于混合方向性距离函数和合图法的实证分析》，《中国软科学》第 2 期，第 96 ~ 109 页。

陈强（2013）：《高级计量经济学及 Stata 应用》（第二版），北京：高等教育出版社。

陈茹、王兵、卢金勇（2010）：《环境管制与工业生产率增长：东部地区的实证研究》，《产经评论》第 2 期，第 74 ~ 83 页。

陈诗一（2010）：《中国的绿色工业革命：基于环境全要素生产率视角的解释（1980—2008）》，《经济研究》第 11 期，第 21 ~ 34、58 页。

冯杰、张世秋（2017）：《基于 DEA 方法的我国省际绿色全要素生产率评估——不同模型选择的差异性探析》，《北京大学学报（自然科学版）》第 1 期，第 151 ~ 159 页。

龚飞鸿、刘满强、陈平等（2009）：《中国经济增长与生产率发展报告——各行业部门》，汪同三、郑玉歆主编：《中国社会科学院数量经济与技术经济研究所发展报告（2009）》，北京：社会科学文献出版社，第 53 ~ 102 页。

韩晶（2008）：《中国钢铁业上市公司的生产力和生产效率——基于 DEA-TOBIT 两步法的实证研究》，《北京师范大学学报（社会科学版）》第 1 期，第 119 ~ 126 页。

胡鞍钢、郑京海、高宇宁等（2008）：《考虑环境因素的省级技术效率排名（1999—2005）》，《经济学（季刊）》第 3 期，第 933 ~ 960 页。

胡根华、秦嗣毅（2012）：《“金砖国家”全要素能源效率的比较研究——基于 DEA-Tobit 模型》，《资源科学》第 3 期，第 533 ~ 540 页。

胡晓珍、杨龙（2011）：《中国区域绿色全要素生产率增长差异及收敛分析》，《财经研究》第 4 期，第 123 ~ 134 页。

匡远凤、彭代彦（2012）：《中国环境生产效率与环境全要素生产率分析》，《经济研究》第 7 期，第 62 ~ 74 页。

李斌、彭星、欧阳铭珂（2013）：《环境规制、绿色全要素生产率与中国工业发展方式转变——基于 36 个工业行业数据的实证研究》，《中国工业经济》第 4 期，第 56 ~ 68 页。

李静（2008）：《基于 SBM 模型的环境效率评价》，《合肥工业大学学报（自然科学版）》第 5 期，第 771 ~ 775 页。

李静（2009）：《中国区域环境效率的差异与影响因素研究》，《南方经济》第 12 期，第 24 ~ 35 页。

李静、沈伟（2012）：《环境规制对中国工业绿色生产率的影响——基于波特假说的再检验》，《山西财经大学学报》第 2 期，第 56 ~ 65 页。

李玲、陶锋（2012）：《中国制造业最优环境规制强度的选择——基于绿色全要素生产率的视

角》,《中国工业经济》第 5 期,第 70 ~ 82 页。

李胜文、李大胜、邱俊杰等(2013):《中西部效率低于东部吗?——基于技术差异和共同前沿生产函数的分析》,《经济学(季刊)》第 3 期,第 777 ~ 798 页。

李胜文、李新春、杨学儒(2010):《中国的环境效率与环境管制——基于 1986—2007 年省级水平的估算》,《财经研究》第 2 期,第 59 ~ 68 页。

李双杰、李春琦(2018):《全要素能源效率测度方法的修正设计与应用》,《数量经济技术经济研究》第 9 期,第 110 ~ 115 页。

李小胜、余芝雅、安庆贤(2014):《中国省际环境全要素生产率及其影响因素分析》,《中国人口·资源与环境》第 10 期,第 17 ~ 23 页。

梁俊、龙少波(2015):《环境约束下中国地区工业全要素生产率增长:2000—2012 年》,《财经科学》第 6 期,第 84 ~ 96 页。

刘建翠、郑世林(2018):《研发投入对我国区域全要素生产率的影响研究——基于 DEA-Tobit 模型》,《城市与环境研究》第 4 期,第 17 ~ 37 页。

刘伟明、唐东波(2012):《环境规制、技术效率和全要素生产率增长》,《产业经济研究》第 5 期,第 28 ~ 35 页。

齐亚伟、陶长琪(2012):《我国区域环境全要素生产率增长的测度与分解——基于 Global Malmquist-Luenberger 指数》,《上海经济研究》第 10 期,第 3 ~ 13、36 页。

屈小娥、席瑶(2012):《资源环境双重规制下中国地区全要素生产率研究》,《商业经济与管理》第 5 期,第 89 ~ 97 页。

沈可挺、龚健健(2011):《环境污染、技术进步与中国高耗能产业——基于环境全要素生产率的实证分析》,《中国工业经济》第 12 期,第 25 ~ 34 页。

宋马林、张琳玲、宋峰(2012):《中国入世以来的对外贸易与环境效率——基于分省面板统计数据的分析》,《中国软科学》第 8 期,第 130 ~ 142 页。

孙东(2014):《我国科技创新效率测算及影响因素研究——基于超效率 DEA-TOBIT 两步法分析》,《税收经济研究》第 2 期,第 76 ~ 84 页。

涂俊、吴贵生(2006):《基于 DEA-Tobit 两步法的区域农业创新系统评价及分析》,《数量经济技术经济研究》第 4 期,第 136 ~ 145 页。

涂正革、刘磊珂(2011):《考虑能源、环境因素的中国工业效率评价——基于 SBM 模型的省级数据分析》,《经济评论》第 2 期,第 55 ~ 65 页。

涂正革、肖耿(2009):《环境约束下的中国工业增长模式研究》,《世界经济》第 11 期,第 41 ~ 54 页。

王兵、黄人杰(2014):《中国区域绿色发展效率与绿色全要素生产率:2000—2010——基于参数共同边界的实证研究》,《产经评论》第 1 期,第 16 ~ 35 页。

王兵、刘光天(2015):《节能减排与中国绿色经济增长——基于全要素生产率的视角》,《中国工业经济》第 5 期,第 57 ~ 62 页。

王兵、吴延瑞、颜鹏飞(2010):《中国区域环境效率与环境全要素生产率增长》,《经济研究》第 5 期,第 95 ~ 109 页。

王娟、赵涛、张啸虎(2016):《2006—2012 年中国工业行业能源和环境综合效率及其影响因素》,《资源科学》第 2 期,第 311 ~ 320 页。

吴军、笪凤媛、张建华(2010):《环境管制与中国区域生产率增长》,《统计研究》第 1 期,

第 83 ~ 89 页。

吴茵茵、李力、李可等（2018）：《中国工业环境生产效率及环境保护税开征的研究》，《中国人口·资源与环境》第 9 期，第 63 ~ 72 页。

徐杰、段万春、杨建龙（2010）：《中国资本存量的重估》，《统计研究》第 12 期，第 72 ~ 77 页。

徐晔（2012）：《中国制造业环境技术效率的测度及其影响因素研究》，《东岳论丛》第 11 期，第 130 ~ 137 页。

杨俊、邵汉华（2009）：《环境约束下的中国工业增长状况研究——基于 Malmquist-Luenberger 指数的实证分析》，《数量经济技术经济研究》第 9 期，第 64 ~ 78 页。

于晓宇、谢富纪（2011）：《基于 DEA-Tobit 的区域创新系统资源配置优化策略研究》，《研究与发展管理》第 1 期，第 1 ~ 10 页。

袁鹏、程施（2011）：《中国工业环境效率的库兹涅茨曲线检验》，《中国工业经济》第 2 期，第 79 ~ 88 页。

原毅军、谢荣辉（2016）：《环境规制与工业绿色生产率增长——对“强波特假说”的再检验》，《中国软科学》第 7 期，第 144 ~ 154 页。

岳鸿飞、徐颖、周静（2018）：《中国工业绿色全要素生产率及技术创新贡献测评》，《上海经济研究》第 4 期，第 52 ~ 61 页。

曾贤刚（2011）：《中国区域环境效率及其影响因素》，《经济理论与经济管理》第 10 期，第 103 ~ 110 页。

周五七（2015）：《绿色生产率增长的非参数测度方法：演化和进展》，《技术经济》第 9 期，第 48 ~ 54 页。

Caves, D. W., L. R. Christensen and W. E. Diewert (1982), “The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity”, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 50 (6), pp. 1393 – 1414.

Chung, Y. H., R. Färe and S. Grosskopf (1997), “Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach”, *Journal of Environmental Management*, 51, pp. 229 – 240.

Coelli, T. J., L. Lauwers and G. V. Huylenbroeck (2005), “Formulation of Technical, Economic and Environmental Efficiency Measures that are Consistent with the Materials Balance Condition”, *CEPA Working Paper Series*.

Färe, R., S. Grosskopf and C. A. Pasurka (2001), “Accounting for Air Pollution Emissions in Measures of State Manufacturing Productivity Growth”, *Journal of Regional Science*, 41 (3), pp. 381 – 409.

Färe, R., S. Grosskopf and C. A. Pasurka (2004), “Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions: A Joint Production Comparison”, https://ssrn.com/abstract=506222 [2019 – 08 – 28].

Jorgenson, D. W., M. Kuroda and M. Nishimizu (1987), “Japan-U. S. Industry-Level Comparisons, 1960 – 1979”, *Journal of Japanese and International Economics*, 1 (1), pp. 1 – 30.

Jorgenson, D. J. and P. J. Wilcoxen (1990), “Environmental Regulation and U. S. Economic Growth”, *The RAND of Economics*, 21 (2), pp. 314 – 340.

Kumar, S. (2006), “Environmentally Sensitive Productivity Growth: A Global Analysis Using Malmquist-Luenberger Index”, *Ecological Economics*, 56 (2), pp. 280 – 293.

Nanere, M., I. Fraser and A. Quazi, et al. (2007), "Environmentally Adjusted Productivity Measurement: An Australian Case Study", *Journal of Environmental Management*, 85 (2), pp. 350 - 362.

Pittman, R. W. (1983), "Multilateral Productivity Comparisons with Undesirable Outputs", *Economic Journal*, 93 (372), pp. 883 - 891.

Reinhard, S., C. A. K. Lovell and G. Thijssen (1999), "Econometric Estimation of Technical and Environmental Efficiency: An Application to Dutch Dairy Darms", *American Journal of Agricultural Economics*, 81 (1), pp. 44 - 60.

Tobin, J. (1958), "Estimation of Relationships for Limited Dependent Variable", *Econometrica*, 26 (1), pp. 24 - 36.

Tone, K. (2001), "A Slacks-based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis", *European Journal of Operational Research*, 130 (3), pp. 498 - 509.

Tone, K. (2003), "Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slack-based Measure (SBM) Approach", *GRIPS Research Report Series* I - 2003 - 0005.

Research on Technical Efficiency Change and Influence Factors of Chinese Industrial Green Development: Based on the Analysis of the Input-Output Table

LIU Jian-cui[1], ZHENG Shi-lin[2]

(1. Institute of Quantitative &Technical Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China; 2. National School of Development, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: With increasingly significant impact of environment on econorny, many scholars take environmental factors into the production function to measure their impact. Based on the analysis of the existing literature, this paper put forward the reasonable calculation efficiency indicators, and measured the efficiency of green technology of 21 indutries in China by SBM-Undesirable model, based on the input-output table during 2002 - 2015. It further studied the influence factors on the efficiency of green technology by adopting Tobit model. The results show that: (1) the overall technical efficiency of China's green industrial development is relatively low which has great room to improve. (2) The efficiency of green technology has obvious heterogeneity and the gap between industries is large. (3) According to the results of regression, R&D input and institutional variables can significantly influence the green technology efficiency of industrial industries, but R&D personnel have significant negative impact. And environmental governance intensity has a significant positive impact on low-pollution industries, energy consumption structure has a significant inhibitory effect on high-pollution industries.

Key Words: industry; green development; technical efficiency; environmental factor; SBM-Undesirable model

责任编辑：周枕戈