

# 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

涂正革 刘磊珂\*

**摘要:** 如何在提高技术效率的同时,降低工业的资源环境负荷,实现经济与资源环境的多赢,是摆在全世界面前的严峻课题。本文采用 SBM 模型,利用线性规划技术,对 1998-2008 年资源环境约束下我国工业的环境效率展开实证分析。我们发现,总体上,在资源环境约束与技术进步的共同作用下,全国 SBM 环境效率微降;从静态观察,地区尤其是西部与东部沿海地区之间,协调性水平存在明显差距,从动态观察,沿海与中部地区工业与资源环境协调性变化不大,而东北与西部地区均出现了阶段性下降。究其原因:经济结构重型化、工业企业规模过大制约 SBM 环境效率的提高;生活水平提高、自主创新与技术引进、外商直接投资则有利于工业与资源环境协调发展。

**关键词:** 数据包络分析 SBM 环境效率 效率评估

### 一、引言

人类社会发展经历了“资源依赖型、环境自然型”、“资源消耗型、环境可承受型”、“资源浪费型、环境污染型”三大阶段。20 世纪下半叶以来,大规模的工业活动已经逼近资源和环境的承载极限,威胁到全球人类生存。我国当前既存在早期工业化国家环境污染、资源耗竭的“贫困病”,又存在后工业化国家资源浪费、消费过度的“富裕病”,经济与环境资源之间的矛盾日益突出,资源环境的承载力面临着前所未有的严峻考验。对此,我国“十一五”规划纲要明确要求:到 2010 年,在 2005 年的基础上,单位 GDP 能源消耗降低 20%,主要污染物排放总量减少 10%。2010 年 10 月召开的中共十七届五中全会,首次提出了“资源产出率”的概念,将工业与资源环境的协调发展问题摆在突出位置。那么,落实到具体践行,如何阐释政策的经济内涵,如何科学衡量经济增长、能源消耗、环境污染三者之间的关系,并探究造成协调性差异的深层原因,就具有极其重要的意义。

在纳入环境约束的工业企业效率评价方面,相关研究主要采取两大类方法:一是利用环境库兹涅茨曲线(EKC)假设检验中国环境污染排放是否存在随着人均产出水平增长而逆转的拐点(如彭水军、包群,2006;曹光辉等,2006)。二是采用 DEA 方法,考虑在纳入环境污染排放因素条件下中国工业企业效率,如涂正革(2008)采用 1998-2005 年中国分省规模以上工业企业数据,针对我国现实应用方向性距离函数方法,考察各地区环境、资源与工业增长的协调性,并基于模型揭示环境工业协调性的地区差异。

针对本文涉及的 DEA 方法,如何在其框架下纳入环境因素,众多学者进行了深入研究:Fare 等(1989)最早运用投入产出的弱可处置性处理污染变量,但非线性规划使用极不方便,应用受限。Hailu 和 Veeman

\* 涂正革,华中师范大学经济管理学院,邮政编码:430079 电子信箱:tuzhengge@163.com;刘磊珂,武汉经济技术开发区发展研究中心,邮政编码:430056。

本文是国家社科基金重点项目“两型社会建设与中部地区工业增长模式研究”(08AJY032)、国家社科基金项目“环境、资源约束下的中国工业模式研究”(07BJY019)和教育部人文社科研究基金项目“转变经济发展方式、促进国民经济又好又快发展”(2008JYJ059)以及教育部新世纪优秀人才计划“低碳经济与中国经济发展方式转变研究”(NCET-10-0409)的阶段性研究成果。感谢匿名审稿人的宝贵意见,文责自负。

(2001)把非期望产出变量作为投入, Scheel(2001)把非期望产出的值变换为  $1/Y_b$  作为期望产出处理,但是这两种方法都不符合实际生产过程。Seiford和 Zhu(2002)将非期望产出乘以  $-1$ , 然后寻找一个合适的转换向量使所有负的非期望产出变成正值。这种方法较好地解决了非期望产出存在的效率评价问题,但加入了一个很强的凸性约束  $\sum \lambda = 1$ , 使其只能在规模报酬可变条件下求解效率。<sup>①</sup> Chung等(1997)提出了方向性距离函数法,较好地解决了非期望产出的效率评价问题,但未考虑松弛问题,且可能由于径向及产出角度的选择带来偏差。Tone(2004)在最初的非径向和非角度的 SBM (Slacks-based Measure)模型中纳入了非期望产出。

在 SBM 模型的推广应用上, Zhou 等人(2006)运用 SBM 效率方法,衡量 30 个经济合作发展组织(OECD)国家 1998-2002 年的 CO<sub>2</sub> 排放及环境管制的影响;程丹润和李静(2009)基于非期望产出的 SBM 模型,测算 1990-2006 年中国 28 个省份的环境效率值,分析中国区域环境效率差异及演进规律,指出环境变量的引入明显降低了中国区域的评价效率水平。但目前利用 SBM 模型纳入环境污染因素,分析我国工业环境效率的相关研究的文献并不多,尚有较大的分析探讨空间。

本文根据科学发展观的要求,针对经济可持续增长所面临的环境资源约束问题,通过数据包络分析的 SBM 模型,利用线性规划技术,采用适宜的数量经济学理论与方法,测度 1998-2008 年我国 30 个省市地区规模以上工业企业的环境效率,并以实证研究结果为基础,分析我国现阶段工业经济增长与资源消耗、环境污染之间的协调关系,以探究背后的因素,为深刻认识科学发展观的经济内涵,选择适宜的工业增长模式改革路径以及制定微宏观节能减排政策提供客观依据。

## 二、SBM 模型

### (一)环境技术

低投入、高产出、少污染,是工业生产的相对理想境界。在实际工业生产活动中,伴随着期望产出或者说“好”产出的生产,各种工业污染如废气、废水、工业固体废物等也不断增加。这些不受欢迎的副产品,在衡量环境技术效率的相关文献中被称为“非期望产出”或“坏”产出。进一步, Fare 等(2007)定义了环境技术的概念(environmental technology),即包括“坏”产品在内的产出与要素资源投入之间的技术结构关系。

假设有  $n$  个决策单元 DMU (decision making units), 每个相似的决策单元均有投入、好产出、坏产出三种要素。具体地,设有  $m$  种投入,  $s_1$  种好产出,  $s_2$  种坏产出, 则  $x \in R_m, y^g \in R_{s_1}, y^b \in R_{s_2}$ 。定义矩阵  $X, Y^g$  和  $Y^b$  分别为:  $X = (x_{ij}) \in R_{m \times n}, Y^g = (y_{ij}^g) \in R_{s_1 \times n}, Y^b = (y_{ij}^b) \in R_{s_2 \times n}$ 。根据投入产出实际,假定  $X > 0, Y^g > 0, Y^b > 0$ 。于是,环境技术或生产可能集  $P$  (production possibility set), 即  $N$  种要素投入  $x$  所能生产的“好”产品与“坏”产品产量的所有组合,可以定义为:

$$P = \left\{ \left( x, y^g, y^b \right) \mid x \geq X \lambda, y^g \leq Y^g \lambda, y^b \geq Y^b \lambda, \lambda \geq 0 \right\} \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为权重变量,且  $\lambda \geq 0, x \geq X \lambda$  表示实际投入大于前沿投入水平,  $y^g \leq Y^g \lambda$  表示实际的期望产出低于前沿好的产出水平,  $y^b \geq Y^b \lambda$  表示实际的非期望产出大于前沿非期望产出。

### (二)传统的 SBM 模型

SBM 模型由 Tone(2001)提出,作为非径向非角度的数据包络分析方法(DEA),它遵循 DEA 的基本思想,即用“最小的”或“匹配最紧密的”凸面球壳包络投入产出数据集,所得到数据集的边界就代表“最佳实践”的技术前沿。各投入产出数据信息实际上构建了一个相对最优的技术前沿,于是,该模型方法科学地界定了“两型”社会以及“又快又好”发展的经济学内涵。两型社会,是在社会生产、建设、流通和消费各领域,在经济和社会发展各方面,切实保护和合理利用各种资源,提高资源利用率,以尽可能少的资源消耗,获得最大的经济效益和社会效益,实现人与自然和谐发展、经济社会可持续发展。“快”即经济增长速度快,“好”则是污染少、能耗低,“又快又好”即以较少的资源投入获得较高的产出和尽可能少的环境污染。

传统的 SBM 模型,综合考虑了各决策单元的投入、产出,并提供了松弛问题的有效解决途径。用  $s^- \in$

<sup>①</sup>程丹润、李静,2009《环境约束下的中国省区效率差异研究:1990-2006》,《财贸研究》第1期,第13-17页。

$R_m, s^+ \in R_s$  分别表示投入与产出的松弛, 某一特定的 DMU 如  $(x_0, y_0)$  可以表示为:

$$x_0 = X\lambda + s^-, y_0 = Y\lambda - s^+ \quad (2)$$

同时, Tone 定义了指标  $\rho$  即:

$$\rho = \frac{1 - \left( \frac{1}{m} \right) \sum_{i=1}^m \bar{s}_i / x_{i0}}{1 + \left( \frac{1}{s} \right) \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{r0}} \quad (3)$$

可以证明: (1) 当数据的度量单位变化时,  $\rho$  保持不变; (2)  $\rho$  随着投入、产出松弛的增加单调递减; (3)  $0 < \rho \leq 1$ . 进一步地, 由恒等变形可以分析得到,  $\rho$  实际为投入平均可缩减率与产出平均可扩张率的乘积, 即  $\rho$  反映投入、产出的效率水平。

$$\begin{aligned} \min \rho = & \frac{1 - \left( \frac{1}{m} \right) \sum_{i=1}^m \bar{s}_i / x_{i0}}{1 + \left( \frac{1}{s} \right) \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{r0}} \\ \text{s t: } & x_0 = X\lambda + s^-; y_0 = Y\lambda - s^+; \lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

就此, 当  $\rho = 1$  时, 该相应决策单元是有效的 (SBM - efficient), 等价于  $s^- = 0, s^+ = 0$  即在最佳状态下没有投入产出松弛产生。若某 DMU 是非有效的, 那么它可以通过改进, 消除投入产出的松弛实现效率生产, 即:

$$x'_0 \leftarrow x_0 - s^-; y'_0 \leftarrow y_0 + s^+ \quad (5)$$

### (三) 拓展的 SBM 模型及其经济涵义

为了进一步综合考虑投入、产出、污染三者之间的关系, 并较好地解决效率评价中的松弛问题, Tone (2004) 提出了加入非期望产出的 SBM 模型, 即:

$$\begin{aligned} \min \rho = & \frac{1 - \left( \frac{1}{m} \right) \sum_{i=1}^m \bar{s}_i / x_{i0}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{r=1}^{s_1} s_r^g / y_{r0}^g + \sum_{r=1}^{s_2} s_r^b / y_{r0}^b \right)} \\ \text{s t: } & x_0 = X\lambda + s^-; y_0^g = Y^g\lambda - s^g; y_0^b = Y^b\lambda + s^b; \lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

通过一定变换将以上的非线性规划转换成线性规划。当  $\rho = 1$  时, 相应的 DMU 是有效的, 即  $s^- = 0, s^g = 0, s^b = 0$ . 若  $0 < \rho < 1$  该 DMU 是非有效的, 并且可以通过消除投入产出松弛, 改进为有效, 具体如下所示:

$$x'_0 \leftarrow x_0 - s^-; y_0^g \leftarrow y_0^g + s^g; y_0^b \leftarrow y_0^b - s^b \quad (7)$$

Tone (2004) 构造的指标  $\rho$  若单从数学形式很难看出背后的经济学含义, 因而, 本文特别在此以基本的 SBM 模型为例, 对“ $\rho$ ”的经济内涵作具体的说明。

对指标  $\rho$  作如下的形式变换:

$$\rho = \frac{1 - \left( \frac{1}{m} \right) \sum_{i=1}^m \bar{s}_i / x_{i0}}{1 + \left( \frac{1}{s} \right) \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{r0}} \rightarrow \rho = \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{x_{i0} - \bar{s}_i}{x_{i0}} \right] \cdot \left[ \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s \frac{y_{r0} + s_r^+}{y_{r0}} \right]^{-1} \quad (8)$$

其中,  $\frac{x_{i0} - \bar{s}_i}{x_{i0}}$  表示第  $i$  个决策单元投入  $x$  的相对可缩减比例,  $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{x_{i0} - \bar{s}_i}{x_{i0}}$  则是对所有决策单元某种投入要素可缩减比例的平均。因而, 其经济含义即为投入  $x$  的平均缩减比例, 或者称为投入的无效率 (input inefficiency)。类似地,  $\frac{y_{r0} + s_r^+}{y_{r0}}$  表示第  $i$  个决策单元 (具体到本文即为第  $i$  个地区), 产出  $y$  的相对可扩张比例。同样地,  $\frac{1}{s} \sum_{r=1}^s \frac{y_{r0} + s_r^+}{y_{r0}}$  是对某一时间所有省市地区产出可扩张比例的平均值。于是,

$\left( \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s (y_{r0} + s_r^+) / y_{r0} \right)^{-1}$  则表示产出的无效率 (output inefficiency)。如此, 两项乘积得到的指标  $\rho$  代表的就是投入与产出的无效率比率。

#### (四) SBM 模型的评价

首先, 作为一种非参数方法, SBM 模型拥有 DEA 的一个最大优点——它依靠投入产出的数据得到相应的技术前沿以及各决策单元 (DMU) 相对于参照技术的效率评价, 而不需要设定生产者的最优行为目标, 也不需要生产函数的形式做特殊的假定。其次, DEA 模型从其发展和度量方法上可分为四种类型, 即径向角度的、径向非角度的、非径向角度的以及非径向非角度的。径向是投入或产出按等比例缩减或放大以达到有效, 角度是指投入或产出的角度。传统的 DEA 模型大都属于径向和角度的度量, 不能充分考虑到投入产出的松弛问题, 度量的效率值也因此是不准确或有偏的。SBM 模型, 不同于传统 CCR、BCC 模型, 它把松弛变量直接放入目标函数中。这样, 一方面解决了投入产出松弛的问题, 另一方面也解决了非期望产出存在下的效率评价问题。同时, SBM 模型属于 DEA 模型中的非径向和非角度的度量方法, 从而避免了径向和角度选择差异带来的偏差和影响, 因此, 从这个意义上讲, 它比其他模型更能体现效率评价的本质。

当然, SBM 模型也有自己的不足。最突出的缺点表现为, Tone 构造的指标  $\rho$  的具体含义尤其是经济内涵存在一定的理解和解释困难, 并不像传统 DEA 方法或方向性距离函数中的效率评价指标那样便于考察和诠释。

### 三、数据及变量界定

#### (一) 数据来源与变量选取

本文以 1998—2008 年为考察区间, 以全国 30 个省市地区的规模以上企业为基本研究单元 (DMU), 以固定资产净值、劳动从业人数、能源消耗作为要素投入指标, 以地区加总工业增加值作为期望产出指标, 以二氧化硫排放量作为非期望产出指标。

首先, 规模以上工业企业, 即规模以上独立核算工业企业, 包括国有和国有控股工业企业, 以及年产品销售收入 500 万元以上 (含) 的非国有工业企业。考察绝对数量, 自 1998 年中国将规模以上工业企业确定为考察重点起, 规模以上企业数量快速增长, 整体经济规模不断扩大。1998—2008 年, 规模以上工业企业数由 16 万多家快速增长到 42 万多家, 增长了 26 万多家, 增幅达近 2.6 倍。考察产值贡献, 2008 年规模以上工业企业带来工业增加值达 127 793 亿元, 占中国整个工业的 99.80%。可见, 规模以上工业企业是中国工业的绝对主体, 其发展协调程度势必在很大程度上决定着我国整体的资源环境与经济协调状况及变化趋势。因此, 本文特选取规模以上工业企业为基本研究单元。

其次, 投入方面, 综合考虑资本、劳动、资源三种要素投入。其中, 资本以规模工业企业固定资产净值年均余额来衡量, 劳动以规模工业全部从业人员年均人数来度量。重点地, 就资源要素而言, 诸多文献选择煤炭消费为工业能源投入指标。但是, 为了排除工业煤炭生产与煤炭消费的差异影响, 避免其他非煤能源投入对实证研究结果可能带来的偏差, 本文选取地区工业能源消费量为资源要素投入指标。

另外, 产出方面: 其一, 期望产出。工业产品总量通常通过工业总产值、工业增加值等来衡量。工业增加值, 是报告期内工业企业全部生产活动的总成果扣除了在生产过程中消耗或转移的物质产品和劳务价值之后的余额。与工业总产值相比, 它反映工业生产活动的最终成果, 不包括原材料等一次性转移到产品中的价值量和付给各部门的劳务支出, 是工业企业生产过程中新增加的价值量, 与其他部门没有重复计算。因此, 本文选取工业增加值并以 1998 年不变价格为基准价格进行换算, 来度量规模工业企业的“好产出”。其二, 非期望产出。三废一般是污染水平比较全面的度量变量, 但由于各省份相关数据缺失, 本文暂仅考虑废气污染。由于  $SO_2$  主要在工业生产过程中排放, 生活排放量相对较小。并且, 与其他污染物相比,  $SO_2$  排放量自 20 世纪 70 年代以来就受到各国的严密监测。因此, 它既与经济发展过程密切相关又具有统计连续性。于是, 本文以工业  $SO_2$  排放量, 即报告期内企业在燃料燃烧和生产工艺过程中排入大气的  $SO_2$  总量作为非期望产出指标。

#### (二) 变量的统计描述

变量的描述性统计见表 1。

表 1 1998-2008年规模以上工业企业相关变量

年份	不变价格工业增加值 (亿元)	不变价格固定资产净值 (亿元)	年均从业人数 (万人)	能源消耗量 (万吨标准煤)	二氧化硫排放量 (吨)
1998	19 414 88	44 118 78	6 193 12	138 091	15 928 777
1999	22 060 81	47 490 00	5 802 24	139 889	14 600 058
2000	25 002 51	51 272 19	5 556 43	150 575	15 860 081
2001	28 239 46	54 545 62	5 438 50	153 929	15 033 626
2002	33 732 73	58 212 48	5 517 90	166 708	15 119 071
2003	41 837 27	62 890 42	5 745 79	189 467	17 914 871
2004	51 465 93	66 155 31	6 096 78	230 818	18 915 000
2005	65 190 10	78 700 44	6 893 96	262 564	21 682 000
2006	80 096 32	91 526 52	7 356 29	289 278	22 328 000
2007	99 445 80	102 601 25	7 873 17	316 788	21 399 018
2008	116 848 87	115 310 36	8 835 85	346 966	19 912 539

数据来源:根据《中国统计年鉴》(1999-2009)整理。2005年GDP数据经过调整;2008年工业增加值是根据工业总产值推算;另外按照统计年鉴,地方规模工业增加值之和大于全国工业增加值,于是本文对此进行了调整。

### 1 工业产品出厂价格与固定资产价格

为了剔除价格变动因素的影响,本文以1998年的产出变量和资产变量价格为不变价格。在此,特对工业品出厂价格指数与固定资产价格指数作简要统计描述:从全国平均来看,两大价格指数1998-2003年变化不大,2004-2008年均呈现稳步上涨。与1998年的不变价格相比,2008年全国工业品出厂价格上升了42%,全国平均固定资产价格上涨32%。从地区来看,工业品出厂价格变化不平衡,固定资产投资价格变化差异不大。自2003年起,河北工业品出厂价格增长迅速,至2008年其工业品价格指数在1998年基础上上涨了57%;黑龙江在石油产品价格上涨的带动下,工业品价格2006年便翻了一番,11年间上涨了142%;山西随着煤价上涨工业品出厂价2008年较基期增长了90%;新疆1999年起,工业品价格快速增长,增幅多次达到20%~30%左右,11年间增长了169%。

### 2 工业增加值与固定资产净值

首先,1998-2008年,规模以上工业企业由164738家增加到426025家。按1998年不变价格计算,2008年工业增加值为11.68万亿元,是1998年所创工业增加值的6倍多;固定资产净值,2008年达1998年的2.6倍,为11.53万亿元。其次,工业增加值与固定资产净值的变化趋势相似,都呈现先慢后快的增长态势。以工业增加值为例,1998-2002年,工业增加值缓慢增加,2003年起增速加快,2005-2008年,工业增加值逐年增幅均大大超过万亿元。

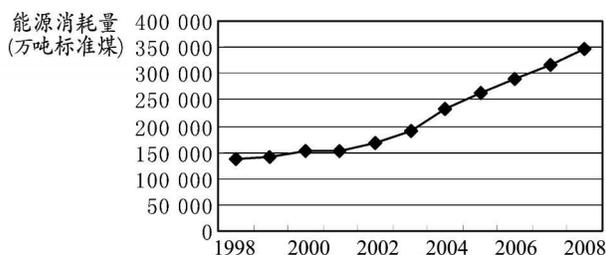
### 3 规模以上工业企业劳动力就业人数

规模工业劳动就业人数先降后升,其变化趋势与工业经济的持续增长态势并不同步。1998-2001年,规模工业劳动就业人数由近6200万下降到5400万,下降了12.18%。2002-2004年,就业人数缓慢回升,年平均增长3.5%,但到2004年仍少于1998年的规模以上工业企业就业人数。2005年起,规模工业劳动就业人数较快增长,从2005年的近6900万人增长到2008年的8800多万人,增幅达28.17%,年均增长48.5万多人。

### 4 工业能源消耗与污染排放量

本文采用各地区工业能源消费量代表资源性原材料投入,一方面排除工业煤炭生产与煤炭消费的差异影响,另一方面避免其他非煤能源投入对实证研究结果可能带来的偏差。整理分析能源投入做出图1,由图1可以看出:1998-2008年,与经济增长相匹配,规模以上工业企业能源消耗逐年增多。具体地,1998-2003年,规模工业能耗1998-2003年增长较缓;2004年在经济发展带动下能源消耗量出现大幅增长,较上年增长了41.351万吨标准煤;2004-2008年,规模工业能耗较快增长,年均增长10.06%;2008年规模以上工业企业能源消耗量达346966万吨标煤,是1998年的2.5倍多。

污染排放方面,规模工业二氧化硫排放总量增加,但其增长过程是有起伏反复的,具体变化趋势如图2所示。结合简单的统计分析,可以得到:1998-2001年,规模工业二氧化硫排放基本维持在1500万吨;2002-2006年,二氧化硫排放量较快增长,从2002年的1511.91万吨增加到2006年的2232.80万吨,年均增长10%;2007-2008年,在两型社会建设目标作用下,规模工业二氧化硫排放均有大幅下降。



数据来源: 根据《中国统计年鉴》(1999-2009)整理。

图 1 1998-2008年规模工业企业能源消耗量

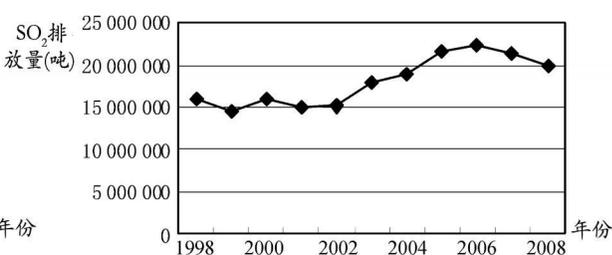


图 2 1998-2008年规模工业企业 SO<sub>2</sub> 排放量

#### 四、SBM 效率与环境工业协调性评价

本文利用 Excel 汇总相关变量, 用 STATA 软件进行数据前期处理, 基于发展后的 SBM 模型, 纳入资源、经济、污染三方面因素, 通过 MATLAB 软件计算得到 1998-2008 年全国 30 个省市地区的 SBM 环境效率值。为了更加深入地分析全国环境工业协调性水平, 更加清晰地阐述, 本文沿袭传统的区域划分方法, 即将我国省市地区按照地理属性划分为东部、中部、西部三大区域进行深入研究。同时, 结合“十一五”规划中关于八大经济区的区域构想以及我国的重大发展战略, 例如“西部大开发”、“振兴东北老工业基地”、“中部崛起”等, 本文特别将 30 个省市地区分为四大区域, 即东部沿海地区、东北老工业基地、中部地区、西部地区。具体的划分如下<sup>①</sup>: 东部沿海地区 (10 省市): 北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南; 东北老工业基地 (3 省市): 辽宁、吉林、黑龙江; 中部地区 (8 省区): 山西、内蒙古、安徽、江西、河南、湖北、湖南、陕西; 西部地区 (9 省区): 广西、四川、重庆、贵州、云南、甘肃、青海、宁夏、新疆。

##### (一) 经济发展与资源环境协调性的静态评价

以 SBM 环境效率的实际取值为依据, 试定义 SBM 经济发展与资源环境的协调性 (为便于观察, 将 SBM 环境效率值同时放大 100 倍): SBM 环境效率等于 100 即该地区处于效率前沿上, 表明在全国 30 个省市地区中, 投入、产出和污染排放处于相对最佳的水平, 即资源投入最少、产出最多、污染排放最少。因此, 本文将这种协调程度定义为 SBM 经济与资源环境协调发展, 实现了“又好又快”; SBM 环境效率在 (82, 100) 为“SBM 经济发展与资源环境高度协调地区”; SBM 环境效率值在 (64, 82] 为“SBM 经济发展与资源环境较协调地区”; SBM 环境效率值在 (46, 64] 为“环境工业较不协调发展地区”; SBM 环境效率在 (28, 46] 为“环境工业不协调发展地区”; 如果 SBM 环境效率值在 28 以下 (包括), 则为“环境工业极不协调地区”。

表 2 1998-2008 年各地区 SBM 经济与资源环境协调性静态评价

	合计	沿海地区	东北地区	中部地区	西部地区
高度协调地区	5 个	广东、上海、北京、福建、江苏	-	-	-
较协调地区	4 个	天津、山东、浙江	-	-	云南
较不协调地区	5 个	海南	黑龙江	安徽、河南、湖北	-
不协调地区	12 个	河北	吉林、辽宁	湖南、江西、陕西、内蒙古	四川、重庆、广西、新疆、青海
极不协调地区	4 个	-	-	山西	贵州、甘肃、宁夏

根据 SBM 环境效率均值, 结合上述定义, 发现 1998-2008 年: SBM 经济与资源环境高度协调发展的均为东部沿海地区, SBM 环境效率前十名中东部沿海地区就占九席; 东北老工业基地和中部地区经济与资源环境处于不同程度的失衡状态, 其中, 中部的山西省 SBM 环境效率非常低, 属于经济发展与资源环境极不协调地区, 几乎成为我国北方的污染源; 西部地区 9 省市地区, 除云南为经济发展与资源环境较协调地区以外, 其余 8 个省市地区均为不协调或极不协调地区, 青海、贵州、甘肃、宁夏 SBM 环境效率值均在 0.3 以下。强烈的对比, 鲜明地体现了西部与东部沿海地区在经济与资源环境协调性上的差距, 而且这种差距不仅仅表现在产出效率上, 也表现为资源节约和环境友好方面的差异。

<sup>①</sup>具体区域划分参考了魏楚、沈满洪, 2007: 《能源效率及其影响因素: 基于 DEA 的实证分析》, 《管理世界》第 8 期, 66-76 页, 以及中国社会科学院工业经济研究所, 2005: 《2005 中国工业发展报告——资源与环境约束下的中国工业发展》, 经济管理出版社, 第 330 页。

## (二) 经济发展与资源环境协调性的动态分析

根据 SBM 效率值逐年变化的走势与特点, 分 1998-2002 年、2003-2008 年两个时间段进行考察。总体上, 1998-2002 年, SBM 效率平均为 0.56, 2003-2008 年为 0.51, SBM 环境效率呈下降态势, 资源环境与工业经济的发展协调性有所下降。结合经济与资源环境协调性的定义, 地区 SBM 经济与资源环境协调性的动态变化归纳如下:

- (1) 保持经济与资源环境协调发展的地区: 广东、上海、福建、江苏、山东、浙江。
- (2) 经济与资源环境仍不协调发展的地区: 海南、安徽、河南、湖北、湖南、四川、吉林、江西、重庆、河北、广西、陕西、辽宁、内蒙古、山西、宁夏。
- (3) 三者由不协调向协调发展转化的地区: 北京、天津。
- (4) 经济与资源环境协调状况恶化的地区: 云南、黑龙江、新疆、青海、贵州、甘肃。

为了更清楚直观地看到各省市地区效率水平的动态变化, 在 1998-2002 年与 2003-2008 年这两个阶段中, 特分别选择 1998 年与 2001 年、2005 年与 2008 年, 作出相应的 SBM 环境效率雷达图, 如图 3-图 6 所示。

北京自 2003 年进入了经济与资源环境高度协调地区, SBM 评分由 1998-2002 年的 81.2 分迅速增长到满分, 并维持在前沿水平。天津, 在滨海新区的良性发展推动下, SBM 评分由 1998-2002 年的 59 分(属较不协调地区), 增长到 2003-2008 年的 90.07 分(高度协调地区), 自 2005 年便在全国 30 省市地区中维持最佳的经济与资源环境协调水平。然而, 另一方面, 云南、黑龙江、新疆、青海、贵州和甘肃均出现了不同程度的恶化。其中, 新疆、青海、贵州、甘肃 4 个省市地区, 动态变化相似, 均从不协调发展地区恶化为极不协调发展地区; 黑龙江则由较协调地区降为不协调发展地区; 尤其是云南, 1998-2002 年均处在效率前沿, 但是自 2003 年后协调状况持续恶化, 2003-2008 年, SBM 平均效率值仅为 0.4383, 即由最佳恶化为不协调发展地区, 状况堪忧。

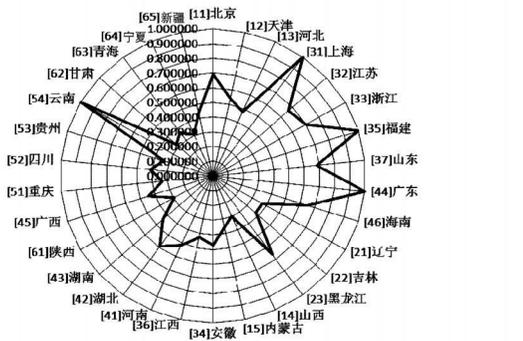


图 3 1998 年各地区 SBM 环境效率

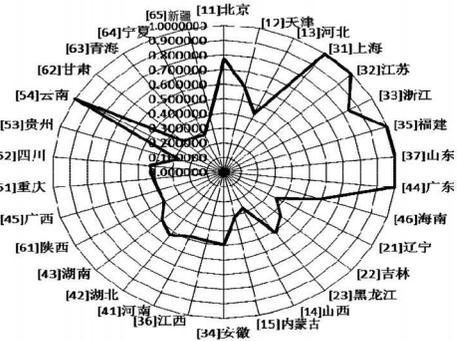


图 4 2001 年各地区 SBM 环境效率

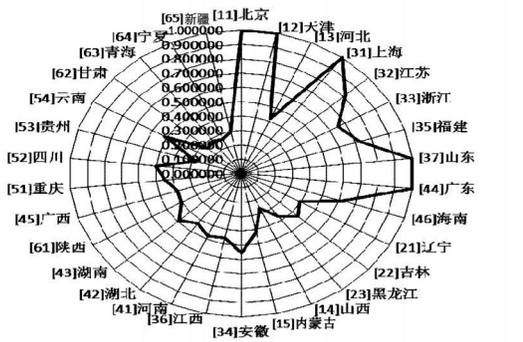


图 5 2005 年各地区 SBM 环境效率

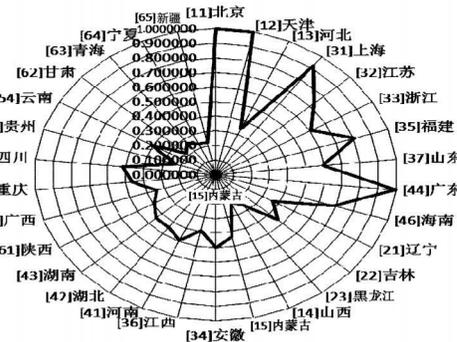


图 6 2008 年各地区 SBM 环境效率

注: 图 3-图 6 根据 MATLAB 软件计算获得的 1998 年、2002 年、2005 年、2008 年 SBM 环境效率。

## 五、环境工业协调性影响因素的回归分析

### (一) 模型设定及估计

根据环境经济学的相关理论, 工业 SBM 环境效率可能受到这些因素的影响: 微观层面, 一是企业自身的

技术因素,主要包括工业企业对生产工艺技术、产出效率技术、污染控制技术等方面所进行的改造、引进以及自主创新;二是外来投入因素,例如外商直接投资。中观层面,是人均生活水平以及地区的工业结构,包括其规模结构、所有制结构、产业结构等。同时,宏观的环境政策与环境管制力度等也会在一定程度上影响工业发展与资源环境的协调状况。基于此,模型设定如下:

$$Y = a_1 + a_2 \ln(kl) + a_3 \ln(yl) + a_4 \ln(\ln srndy) + a_5 \ln(trenovaty) + a_6 \ln(tinporty) + a_7 \ln(fdi) + a_8 soe\_ratio + a_9 large\_ratio + a_{10} t + u_i$$

本文试分析经济结构、人均生活水平、外商直接投资、地区工业结构(主要是所有制结构与规模结构),以及科技因素对 SBM 环境效率差异的影响。具体地,通过人均资本拥有量( $kl$ ),即固定资产净值余额与在岗职工人数的比值,衡量地区的经济结构;通过地区人均收入水平( $yl$ ),即工业增加值与劳动人数的比值,测度地区生活水平;科技因素,分别以大中型工业企业的科技经费支出强度( $\ln srndy$ ,即单位 GDP 的研发支出额)、大中型工业企业技术改造经费支出强度( $trenovaty$ )、大中型工业企业技术引进经费支出强度( $tinporty$ )来度量;地区工业结构方面,用国有及国有控股工业企业占整个规模工业总产值的比重代表地区产权结构( $soe\_ratio$ ),用地区单位企业平均产出指标(即大型工业企业在地区规模工业中的产值)反映工业的规模结构。

在模型估计的选择上,通常主要有 OLS 估计和固定效应模型(FEM)、随机效应模型(REM)三种方法可供选择。做 Hausman 检验,拒绝随机效应模型与固定效应模型系数无系统性差异的假设,似乎应选择固定效应模型来进行回归分析。但是,需要指出,根据数据包络分析方法的基本思想与 SBM 环境效率的内涵,不同时期的 SBM 环境效率实际上是某一时期全国 30 省市地区各项指标变量进行比较得到效率前沿,然后各个地区与该效率前沿相比计算得出其环境效率值。也就是说,效率前沿仅由当年各个地区的工业状况、技术水平、资源环境变量等特征当期决定,因而不同时期的 SBM 环境效率是不相关的,可以选择 OLS 回归分析。为了严谨起见,本文还是分别采用 OLS、固定效应模型、随机效应模型进行了回归分析,但在 SBM 环境效率影响因素探析中以 OLS 回归结果为主要依据进行阐释。估计结果见表 3。

表 3 各因素对 SBM 环境效率影响的回归分析

	(1) OLS	(2) FE	(3) RE	(4) OLS	(5) FE	(6) RE
经济结构 - $\ln(kl)$	- 0.195 <sup>**</sup> [0.037]	- 0.272 <sup>**</sup> [0.046]	- 0.24 <sup>**</sup> [0.043]	- 0.227 <sup>**</sup> [0.037]	- 0.271 <sup>**</sup> [0.046]	- 0.238 <sup>**</sup> [0.042]
生活水平 - $\ln(yl)$	0.441 <sup>***</sup> [0.042]	0.335 <sup>**</sup> [0.043]	0.352 <sup>**</sup> [0.043]	0.574 <sup>**</sup> [0.049]	0.366 <sup>**</sup> [0.055]	0.437 <sup>**</sup> [0.053]
LM S 科技投入强度 - $\ln(\ln srndy)$	0.081 <sup>**</sup> [0.022]	0.018 [0.027]	0.035 [0.026]	0.078 <sup>**</sup> [0.021]	0.02 [0.027]	0.038 [0.025]
LM S 技术改造投入强度 - $\ln(trenovaty)$	- 0.084 <sup>**</sup> [0.013]	0.015 [0.014]	- 0.01 [0.014]	- 0.076 <sup>**</sup> [0.012]	0.016 [0.014]	- 0.011 [0.014]
LM S 技术引进投入强度 - $\ln(tinporty)$	0.037 <sup>**</sup> [0.008]	0.019 <sup>**</sup> [0.007]	0.025 <sup>**</sup> [0.007]	0.034 <sup>**</sup> [0.008]	0.02 <sup>**</sup> [0.007]	0.026 <sup>**</sup> [0.007]
FDI 投资年终总额 - $\ln(fdi)$	0.047 <sup>**</sup> [0.011]	0.024 [0.019]	0.059 <sup>**</sup> [0.014]	0.047 <sup>**</sup> [0.010]	0.025 [0.019]	0.06 <sup>**</sup> [0.014]
国有企业比重 - $soe\_ratio$	- 0.003 <sup>**</sup> [0.001]	0.001 [0.001]	- 0.001 [0.001]	- 0.001 [0.001]	0.001 [0.001]	0 [0.001]
$t$	- 0.083 <sup>**</sup> [0.007]	- 0.042 <sup>**</sup> [0.007]	- 0.056 <sup>**</sup> [0.006]	- 0.081 <sup>**</sup> [0.006]	- 0.043 <sup>**</sup> [0.007]	- 0.058 <sup>**</sup> [0.006]
大型企业的比重 $large\_ratio$				- 0.143 <sup>**</sup> [0.029]	- 0.036 [0.040]	- 0.095 <sup>**</sup> [0.037]
常数项	1.016 <sup>***</sup> [0.143]	1.011 <sup>***</sup> [0.178]	0.913 <sup>**</sup> [0.168]	0.534 <sup>**</sup> [0.170]	0.89 <sup>**</sup> [0.224]	0.588 <sup>**</sup> [0.207]
观测值	329	329	329	329	329	329
$R^2$	0.74	0.24		0.76	0.24	
省份数量		30	30		30	30

注:方括弧内为标准差,\*、\*\*和\*\*\*分别表示显著性水平为 10%、5%和 1%; $kl = nfixa/labor$ ,  $yl = avalue/labor$ ;模型(4)-(6)因为 2004 年和 2005 年规模工业企业的大小结构和轻重工业结构数据缺失而减少 60 个观察值;模型(1)-(3)没有包括规模结构和轻重结构变量。

## (二) 估计结果的说明

### 1 经济结构重型化是工业与资源环境协调性的重要制约因素

人均资本拥有量 ( $kl$ ), 反映经济的重型化程度, 体现地区的要素禀赋。若  $kl$  上升, 说明经济结构向资本密集型转化。1998–2008年, 中国工业资本存量持续增加, 增幅较大, 相应地, 人均资本拥有量不断攀升。

无论是 OLS 方法, 还是用固定效应模型和随机效应模型, 均显示资本有机构成对中国规模工业 SBM 效率有非常显著的影响, 都通过了 1% 的显著性水平检验。并且, 根据回归结果, 资本有机构成上升 1%, SBM 环境效率下降 22.68%。经济中的资本密集型产业越是占主导, 工业与资源环境的协调程度越易受到制约。这与相关理论研究相吻合, 即“资本密集型产业倾向于重污染产业, 而劳动密集型产业倾向于轻污染产业”。涂正革 (2008) 基于方向性距离函数测度了环境资源与工业的协调性, 该文以 1998–2005 年为考察区间, 结果为资本有机构成上升 1%, 环境技术效率 (ETE) 显著下降 2.4%。其结论与本文一致, 即其他条件不变, 若经济结构的重型化速度加快, 则中国工业与资源环境的协调性水平将显著下降。

### 2 生活水平是工业经济又好又快发展的强大推动因素

理论上, 随着收入增长和公众环境生态意识加强, 人们在基本的就业、消费外, 需求层次日益提高, 有更强的意愿关注环境质量、治理环境污染。实践中, 人均生活水平的提高反映了地区经济实力的增强。经济的快速发展也使得社会可能有更多的资源来实现工业经济的又好又快发展。回归结果表明, 生活水平的提高对工业与资源环境的协调发展有显著的正效应。控制其他因素不变, 人均产出水平每提高 1%, SBM 环境效率将显著提高 57.42%。分地区来看, 人均生活水平每提高 1%, 东部沿海地区 SBM 效率显著提高 55.50%, 东北老工业基地提高 84.45%, 中部地区 49.99%, 西部地区 42.45%。

因此, 无论是从全国来看, 还是分地区分析, 回归结果都表明了生活水平对工业增长与资源环境协调发展的重要贡献。这个结果也与环境库兹涅茨倒“U”型曲线 (EKC) 及其环境偏好理论相契合。

### 3 自主创新与技术引进是提高 SBM 环境效率的有效途径

(1) 自主研发投入可有效提高 SBM 环境效率。自主研发投入强度, 即大中型工业企业科技活动经费支出与规模工业增加值的比值。回归结果表明, 其他条件不变, 若企业自主研发强度增加 1%, 则全国 SBM 效率显著提高 7.76 个百分点。同时, 东部沿海、东北老工业基地、中部 SBM 效率提高的百分比分别为: 9.17、33.27、2.61。但是自主研发投入对西部的 SBM 效率没有显著影响。

(2) 技术引进有利于提升 SBM 环境效率。技术引进投入强度为大中型工业企业技术引进经费支出与规模工业增加值的比值。三种估计方法得到的结果均表明技术引进投入强度对全国平均 SBM 环境效率有显著的积极影响。其他变量恒定不变, 技术引进投入强度每提高 1%, 全国规模工业企业的 SBM 效率将在 1% 的显著性水平下提高 3.39%。分地区考察: 东北老工业基地 SBM 环境效率受技术引进推动不明显; 而东部沿海地区、中部地区、西部地区, 在其他条件不变的情况下, 技术引进强度每提高 1%, 相应区域的 SBM 环境效率分别提高 4.72%、1.92%、2.42%。其弹性差异可由规模工业企业选择引进外来技术的科学性以及吸收转化能力来解释。

(3) 技术改造对 SBM 环境技术有显著的负效应。同样以规模工业增加值为参考处理大中型工业企业技术改造经费投入, 得到技术改造投入强度。根据回归结果, 其他条件不变, 技术改造投入强度每提高 1%, 全国规模工业 SBM 环境效率将显著地下降 7.56%。这可能主要是由于技术改造经费支出集中在国有企业以及大型国有控股企业, 经费来源多为国家财政拨款或优惠贷款<sup>①</sup>, 依靠政策扶持的惰性导致了技改经费的低效使用, 从而使技术改造未达到预期效果。

### 4 工业结构因素对 SBM 环境效率的提高形成一定阻力

(1) 工业企业规模结构的进一步扩大会导致 SBM 效率损失。回归结果显示, 工业规模结构与 SBM 环境效率显著负相关。控制其他因素不变, 1998–2008 年地区大型企业产值比重每提高 1%, 全国 SBM 环境效率均值显著下降 14.35 个百分点, 东部沿海地区显著下降 20.59%, 中部地区显著下降 17.39%, 东北老工业

<sup>①</sup>涂正革:《环境、资源与工业增长的协调性》,《经济研究》第 2 期,第 93–105 页。

基地和西部地区阻碍效应不明显。

(2)其他因素恒定,除西部国有企业比重下降 1%其 SBM 效率显著上升 0.46%外,其余三大区域以及全国整体的地区工业产权结构对 SBM 效率均无显著影响。这一点与涂正革(2008)的相关研究结果不太一致。可能的解释是我国尤其是我国东部沿海、东北老工业基地以及中部地区的规模工业,经过产权结构与国有企业管理体制的大力变革,已经调整到一个较为合理的结构水平,从而对工业增长与资源环境的协调性不再构成明显阻碍。对此,本文特别进一步分段进行了考察:国有及国有控股工业企业占整个规模工业总产值的比重提高 1%,1998-2003年 SBM 环境效率下降 0.13%,2004-2008年下降 0.09%,边际制约作用在减弱。这或许正是工业企业产权改革获得突破的良好信号。

5 外商直接投资是改善我国资源环境与工业协调性的有力支持

外商直接投资(FDI)对东道国的环境会产生规模效应、结构效应和技术效应,是把双刃剑:由于环境标准存在国别差异,一些污染密集型或资源消耗型产业从环境标准高的国家通过直接投资转移至环境标准低的国家。同时,为了竞争 FDI 各国竞相降低本国的环境标准,导致资金流入国生态环境的恶化与自然资源的浪费,从而形成所谓的“污染天堂”<sup>①</sup>;相反地,另一种是“污染光环”,即 FDI 跨国公司带动了更高效率、更清洁技术的推广,从而促进经济增长与资源环境协调性的改善。本文实证分析发现:1998-2008年,单纯提高 1%的 FDI 能够使得 SBM 环境效率显著提高 4.68%,表明 FDI 对改善我国工业增长与资源环境的协调性有着积极的作用。并且进一步地,从分段回归结果来看,1998-2003年,其他因素不变,FDI 提高 1 个百分点,SBM 环境效率提高 2.35%,而 2004-2008年,则显著提高 5.84%。这表明,通过政策引导,FDI 投资质量有了一定提高,进而对我国工业经济的良性、可持续发展提供了有力支持。

## 六、结论及政策涵义

本文采用拓展的 SBM 模型科学地评价了我国 30 个省市地区 1998-2008 年期间工业增长与资源环境的协调性,并对地区环境工业协调性的差异与变化,以及其背后的影响因素进行了深入分析,得出以下结论与政策含义:

其一,区域间环境工业协调性极不平衡。1998-2008年,工业增长与资源环境关系高度协调发展的均为东部沿海地区,SBM 效率前十名中东部沿海地区就占 9 席,经济发展“又好又快”;东北和中部地区经济与资源环境处于不同程度的失衡;西部地区除云南外均为工业经济与资源环境不协调或极不协调发展地区。

其二,保增长,为改善工业与资源环境协调状况奠定坚实基础。生活水平的提高使得人们有更强的意愿和能力治理工业污染,从而极大地促进了环境技术效率的改善。控制其他条件恒定不变,人均产出水平每提高 1 个百分点,环境技术效率提高 57.42%。

其三,重创新,为提高工业增长与资源环境协调性创造技术支持。分析结果表明,大中型工业企业的自主研发和技术引进显著地提高了环境工业协调性,而以国有企业主导的技术改造并没有达到应有的效果,反而加重企业的财务负担导致企业环境技术效率大幅下降。

其四,调结构,为工业经济“又好又快”发展攻克瓶颈。基于对 SBM 环境效率的回归分析,发现:工业企业产权结构改革有利于环境技术效率的提高,而企业规模过大会导致 SBM 环境效率损失。对此,应转变经济发展方式,努力扭转高资源消耗、高环境成本的发展模式,进一步深化体制改革,推进地区工业产权结构的优化,调整企业组织结构,形成合理的规模,以有利于实现工业与资源环境的协调发展,经济的包容性增长。

其五,上水平,为推动工业与资源环境协调发展提供资金保障。实证结果表明,1998-2008年,其他因素恒定,FDI 提高一个百分点,SBM 环境效率显著提高 4.68%。利用好外国直接投资这把“双刃剑”,充分借助其强大的资金支持与 FDI 技术效应,可为资源节约型、环境友好型社会造福。通过自身作为东道国的主动选择,更多地吸引外资。同时注重利用外资的“优质”与“适量”,把提高工业增长与环境协调性作为改善投资环境、吸引外资的重要内容,进而达到经济发展与环境保护的双赢。

<sup>①</sup>周国梅、王华等 2008《环境优化发展:从边缘走向主流》,中国环境科学出版社,第 136-143 页。

## 参考文献:

1. 曹光辉、汪锋、张宗益、邹畅, 2006《我国经济增长与环境污染关系研究》,《中国人口·资源与环境》,第1期。
2. 程丹润、李静, 2009《环境约束下的中国省区效率差异研究: 1990-2006》,《财贸研究》第1期。
3. 彭水军、包群, 2006《经济增长与环境污染——环境库兹涅茨曲线假说的中国检验》,《财经问题研究》第8期。
4. 涂正革, 2008《环境、资源与工业增长的协调性》,《经济研究》第2期。
5. 魏楚、沈满洪, 2007《能源效率及其影响因素: 基于DEA的实证分析》,《管理世界》第8期。
6. 中国社会科学工业研究院, 2005《2005中国工业发展报告——资源与环境约束下的中国工业发展》,经济管理出版社。
7. 周国梅、王华等, 2008《环境优化发展: 从边缘走向主流》,中国环境科学出版社。
8. Chung Y., R. Fare and S. Grosskopf 1997 "Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach." *Journal of Environmental Management* 51(3): 229-240
9. Fare Rolf, Shawna Grosskopf et al 1989 "Multilateral Productivity Comparisons when Some Outputs are Undesirable: A Non-parametric Approach." *Review of Economics and Statistics* 71(1): 90-98
10. Fare R., S. Grosskopf and Carla Pasurka 2007. "Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions." *Energy*, 32(7): 1055-1066
11. Hailu A. Takely, and Terrence S. Veeman 2001. "Non-parametric Productivity Analysis with Undesirable Outputs: An Application to the Canadian Pulp and Paper Industry." *American Journal of Agricultural Economics*, 83(3): 605-616
12. Scheel H. 2001 "Undesirable Outputs in Efficiency Valuations." *European Journal of Operational Research*, 132(2): 400-410
13. Seiford L. M., and J. Zhu 2002 "Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation." *European Journal of Operational Research*, 142: 16-20
14. Tone K. 2001 "A Slacks-based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis." *European Journal of Operational Research*, 130(3): 498-509.
15. Tone K. 2004. "Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks-based Measure (SBM) Approach." *The Operations Research Society of Japan*
16. Zhou P., et al 2006 "Slacks-based Efficiency Measures for Modeling Environmental Performance." *Ecological Economics* 60(1): 111-118

## Efficiency Evaluation of Industrial Sectors in China Accounting for the Energy and Environment Factors Based on Provincial Data by a SBM Approach

Tu Zhengge<sup>1</sup> and Liu Leke<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Huazhong Normal University

2. Development Research Center, Wuhan Economic and Technological Development Zone)

**Abstract** It is a severe challenge faced by the whole world to maintain a high efficiency while lessen its burden on the resource and environment (R&E) for sake of a win-win development. Applying the Slacks-based Measure (SBM) and linear programming, the thesis studies the industrial efficiency of China from 1998 to 2008. It finds that (1) on the whole, China's SBM efficiency has slightly declined due to the combined impact of R&E restriction and technological improvement; (2) the static analysis figures out the obvious efficiency difference of the four major regions; (3) the dynamic analysis shows that the SBM efficiency of both the Northeast and the west has decreased in stages. Furthermore, it indicates that a high organic composition of capital in economic structure and an unreasonable enterprise scale have negative effects on SBM efficiency. And upturn of living standards, independent innovation and technological import and FDI bring benefits to a balanced development of industry, resources and the environment.

**Key Words** Data Envelopment Analysis; SBM; Environmental Efficiency; Efficiency Evaluation

**JEL Classification** C61, Q43

(责任编辑: 陈永清)