



绿色生产率及其 对工业低碳发展的影响研究

吴英姿, 闻岳春

同济大学 经济与管理学院, 上海 200092

摘要: 基于1995年至2009年碳排放特征分组的工业投入产出数据, 采用方向距离函数估算工业的生产效率和绿色生产率, 基于方向距离函数的SML指数方法测算绿色生产率增长指数, 从时间和行业两个维度比较分析工业绿色生产率的变化趋势和行业差异, 结合改进的STIRPAT模型面板数据模型估计方法, 就绿色生产率对工业低碳经济发展的作用及影响工业低碳发展的主要因素进行实证研究。研究表明, 相对于不考虑碳排放的生产效率, 绿色生产率在高碳排放强度行业上升, 在低碳排放强度行业下降; 绿色生产率先升后降, 对工业低碳发展有显著正向影响, 对高碳排放强度行业作用更大; 绿色技术进步对工业绿色生产率增长和低碳经济发展的促进作用显著大于绿色技术效率; 碳排放强度与经济产出关系具有U型曲线特征, 化石能源结构调整不能促进工业低碳发展。

关键词: 工业; 绿色生产率; 低碳经济发展; 绿色技术效率; 绿色技术进步

中图分类号: F42 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1672-0334.2013.01.011

文章编号: 1672-0334(2013)01-0112-09

1 引言

长期以来, 中国面临着资源和环境的压力, 并且这种压力与日俱增, 工业能耗与碳排放是这些压力的主要来源, 工业的能源消耗量占全国能源消耗总量的70%以上, 也是碳排放量最大的产业部门。随着工业化、城镇化进程的加快, 中国工业在国民经济中的比重仍将在相当长的一段时期内居于主导地位, 受发展阶段、资源禀赋、技术水平和体制机制等多种因素的限制, 中国工业发展具有高污染、高能耗、高碳排放的特征。要实现中国经济低碳转型必须关注工业低碳发展, 也就需要重视绿色生产率及其对工业低碳经济发展的影响作用。因此, 科学精确地评估中国工业绿色生产率, 研究其对工业低碳经济发展的作用, 从理论和实践上总结工业低碳经济发展的可行路径具有深远的意义。

2 相关研究评述

在评价绿色生产绩效时, 不但要考虑经济的产

出, 还要考虑经济活动的副产品——碳排放, 即产出不再是一项。因此, 在构建绿色生产绩效评价指数时应当考虑所有相关变量, 即投入数据中应将能源消耗考虑进来, 产出数据不但要考虑经济产出, 还应该包括碳排放等经济产出的副产品, 即全要素的思想^[1]。Malmquist 和 Malmquist-Luenberger (ML) 指数方法在宏观层面的全要素环境绩效评价中得到较为广泛的应用。基于 Malmquist 指数方法, Kortelainen^[2] 估算欧盟等国的动态环境绩效; 王群伟等^[3] 和陶长琪等^[4] 评估中国各省的碳排放绩效; 何小钢等^[5] 测算中国工业行业的绿色增长全要素绩效。基于 ML 指数方法, Kumar^[6] 研究1973年至1992年41个国家的环境绩效; Zhou 等^[7] 测算1997年至2004年18个高碳排放国家的碳排放绩效。研究结果都表明技术进步是全要素生产率增长的主要动力。

一般而言, 在宏观经济视角下技术总是进步的, 至少维持在原有水平不会倒退。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

收稿日期: 2012-04-25 修返日期: 2013-01-21

基金项目: 国家社会科学基金(11&ZD139); 教育部人文社会科学研究规划项目(10YJA790196)

作者简介: 吴英姿(1978-), 女, 湖南株洲人, 同济大学经济与管理学院博士研究生, 研究方向: 低碳经济等。

E-mail: wuyingzi@189.cn

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^[8]。为了避免传统 ML 指数方法的这一缺陷,Oh 等^[9]结合序列生产可能集^[10]和方向距离函数处理环境污染变量的方法^[11],提出 SML (sequential malmquist-luenberger) 指数方法,并对 1970 年至 2003 年 26 个 OECD 国家间的环境绩效进行测算,结果表明全要素生产率增长的主要动力在样本前期来自技术效率,后期来自技术进步;尤建新等^[12]运用 SML 指数对 1998 年至 2009 年中国省域碳排放绩效进行测算,结果显示技术进步促进了碳排放绩效增长。

从目前研究看,现有关于工业绿色生产率的测算都是运用 Malmquist 或传统 ML 指数方法,存在虚假技术退步缺陷,且大多未同时考虑能源和碳排放因素,无法全面、客观地反映工业绿色生产率的增长情况,在研究技术进步与工业低碳发展关系中没有过多关注工业的碳排放特征。在已有研究基础上,本研究采用距离函数方法分别测算考虑碳排放的工业绿色生产率和不考虑碳排放的工业生产效率,基于 SML 指数方法测算工业绿色生产率增长指数,并分解为绿色技术效率指数和绿色技术进步指数,然后基于改进的 STIRPAT 模型面板数据模型估计方法,结合工业碳排放特征,分析绿色生产率对工业低碳经济发展的作用,识别工业低碳经济发展的主要影响因素及其行业差异,为正确选择促进工业低碳经济发展的可行路径提供经验和数据借鉴。

3 模型、方法和数据

3.1 绿色生产率的 SML 指数估算方法

SML 指数方法是对传统 ML 指数方法的改进,假设 P 为生产可能集, x 为生产要素投入, T 为时间区间, t 为时间区间 T 内任一时间,即 $1 \leq t \leq T$,用序列生产可能集替换当期生产可能集。 t 期序列生产可能集为 $\bar{P}^t(x^t)$, $\bar{P}^t(x^t) = P^1(x^1) \cup P^2(x^2) \cup \dots \cup P^t(x^t)$, 其生产可能边界包含 $1 \sim t$ 期所有的投入产出数据,保持了生产的连续性,规避了虚假的技术退步效应^[9],估算结果相对传统的 ML 指数更加真实稳健。假设 t 期第 k 个行业的投入产出值为 (x_k^t, y_k^t, b_k^t) , $t = 1, 2, \dots, T, k = 1, 2, \dots, K, K$ 为行业数量,建立满足上述生产可能性的序列生产可能集合,即

$$\bar{P}^s(x) = \{(y, b) \mid \sum_{i=1}^s Y^i \lambda^i \geq y, \sum_{i=1}^s B^i \lambda^i = b, \sum_{i=1}^s X^i \lambda^i \leq x, \lambda^i \geq 0\} \quad (1)$$

其中, $\bar{P}^s(x)$ 为 s 期的序列生产可能集, $t < s < t + 1$; Y^t 为 t 期 $(M \times K)$ 阶经济产出矩阵, B^t 为 t 期 $(J \times K)$ 阶非经济产出矩阵, X^t 为 t 期 $(N \times K)$ 阶生产要素投入矩阵; y 为 $(M \times 1)$ 阶经济产出, b 为 $(J \times 1)$ 阶非经济产出, x 为 $(N \times 1)$ 阶生产要素投入; λ^t 为 $(K \times 1)$ 阶向量,代表每个观测值的权重; M 为经济产出的向量数量; J 为非经济产出的向量数量; N 为生产投入要素的向量

数量。

目前中国工业的发展现状是经济增长伴随碳排放量增加,而低碳发展模式追求保证经济增长同时减少碳排放量。基于方向距离函数的 SML 指数方法测算的绿色生产率增长指数区分经济产出和碳排放,能比较客观地反映低碳生产率的增长情况^[9],因此在具体测算过程中,本研究采用基于方向距离函数的 SML 指数方法对中国工业绿色生产率增长指数进行测算。假设方向向量为 $g, g = (g_y, g_b)$, g_y 为经济产出的方向向量, g_b 为碳排放的方向向量,则工业方向距离函数为

$$\bar{D}(x, y, b; 1, -1) = \max \{\theta : [(1 + \theta)y, (1 - \theta)b] \in P\} \quad (2)$$

其中, θ 为经济产出增长的同时减少碳排放量的最优目标函数值。

结合序列生产可能集 $\bar{P}^t(x)$ 和方向距离函数,工业绿色生产率增长指数 (SML) 定义为^[9]

$$SML^{t,t+1} = \left[\frac{1 + \bar{D}^t(x^t, y^t, b^t)}{1 + \bar{D}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \cdot \frac{1 + \bar{D}^{t+1}(x^t, y^t, b^t)}{1 + \bar{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中, $SML^{t,t+1} > 1$ 表示 $t \sim (t + 1)$ 期绿色生产率提高, $SML^{t,t+1} < 1$ 表示 $t \sim (t + 1)$ 期绿色生产率下降, $SML^{t,t+1} = 1$ 表示 $t \sim (t + 1)$ 期绿色生产率不变。绿色生产率增长指数可以进一步分解为绿色技术效率指数 (SEF) 和绿色技术进步指数 (STE)^[9], 即

$$SML^{t,t+1} = \frac{1 + \bar{D}^t(x^t, y^t, b^t)}{1 + \bar{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \cdot \left[\frac{1 + \bar{D}^{t+1}(x^t, y^t, b^t)}{1 + \bar{D}^t(x^t, y^t, b^t)} \cdot \frac{1 + \bar{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{1 + \bar{D}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} = SEF^{t,t+1} \cdot STE^{t,t+1} \quad (4)$$

其中, $SEF^{t,t+1}$ 为 $t \sim (t + 1)$ 期绿色技术效率指数, $STE^{t,t+1}$ 为 $t \sim (t + 1)$ 期绿色技术进步指数。 $SEF^{t,t+1} < 1$ 表示 $(t + 1)$ 期相对于 t 期绿色技术效率降低。 $STE^{t,t+1} \geq 1$, 如果绿色技术进步增长能导致更多的经济产出和更少的碳排放, $STE^{t,t+1} > 1$, 否则 $STE^{t,t+1} = 1$, 不同于 ML 指数中代表技术进步增长指数可以小于 1, 即不存在技术退步。

为了计算工业行业在 $t \sim (t + 1)$ 期的 SML 指数, 必须解答 $\bar{D}^t(x^t, y^t, b^t), \bar{D}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}), \bar{D}^{t+1}(x^t, y^t, b^t)$ 和 $\bar{D}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})$ 4 个线性规划问题, 具体估算方法详见 Oh 等^[9] 的研究。

3.2 绿色生产率对工业低碳发展的作用模型

Ehrlich 等^[13] 提出环境影响决定因素的 IPAT 分析框架, 即 $I = PAT$, I 为环境影响, P 为人口因素, A 为富裕程度, T 为技术水平, IPAT 模型被广泛地作为分析环境变化驱动因素的模型框架^[14-15]。 Dietz 等^[16] 发展了 IPAT 模型, 建立 STIRPAT (stochastic impacts by regression on population affluence and technology) 模型, 保

留了 IPAT 模型中环境影响与人口、富裕度、技术的关系等主要思想,还克服了它的单位弹性的假设限制的缺点,加入了随机性,既允许将各系数作为参数来估计,也允许对各影响因素进行适当分解,便于根据各自研究的特点进行相应的改进来开展实证分析^[17-18]。STIRPAT 模型的形式为

$$I_i = \beta_0 P_i^{\beta_1} A_i^{\beta_2} T_i^{\beta_3} \zeta_i \quad (5)$$

其中, I_i 、 P_i 、 A_i 、 T_i 的含义与 IPAT 模型中的含义相同, β 为估计参数, ζ_i 为随机误差, i 为地区或行业。为便于研究和分析,将 STIRPAT 模型转换成对数形式,即

$$\ln(I_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(P_i) + \beta_2 \ln(A_i) + \beta_3 \ln(T_i) + \zeta_i \quad (6)$$

本研究对 STIRPAT 模型进行相应的拓展和改进,实证分析绿色生产率对工业低碳经济发展的影响作用。除此之外,综合已有研究,考虑碳排放的主要影响因素,选取经济产出^[19]和能源结构指标^[20],基于 1995 年至 2009 年中国工业数据,构建工业低碳发展影响因素的研究面板数据模型,即

$$\ln \tau_{i,t} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln Y_{i,t} + \gamma_2 (\ln Y_{i,t})^2 + \gamma_3 \ln SEF_{i,t} + \gamma_4 \ln STE_{i,t} + \gamma_5 \ln EM_{i,t} + u_{i,t} + \zeta_{i,t} \quad (7)$$

其中, τ 为工业碳排放强度,既代表 STIRPAT 模型中的环境影响 I ,也代表工业低碳发展程度,工业碳排放强度越小,表示单位经济产出的碳排放越小,对环境的影响也越小; Y 为工业总产出,代表 STIRPAT 模型中的富裕程度 A ,结合已有研究,将其一次项和平方项引入模型^[21]; EM 为煤炭在能源消耗中的比重,代表能源结构; γ 为工业低碳发展的影响系数; i 为行业, $u_{i,t}$ 为不可观测的个体效应, $\zeta_{i,t}$ 为随机误差。这里忽略人口因素的影响。

3.3 数据的核算和处理

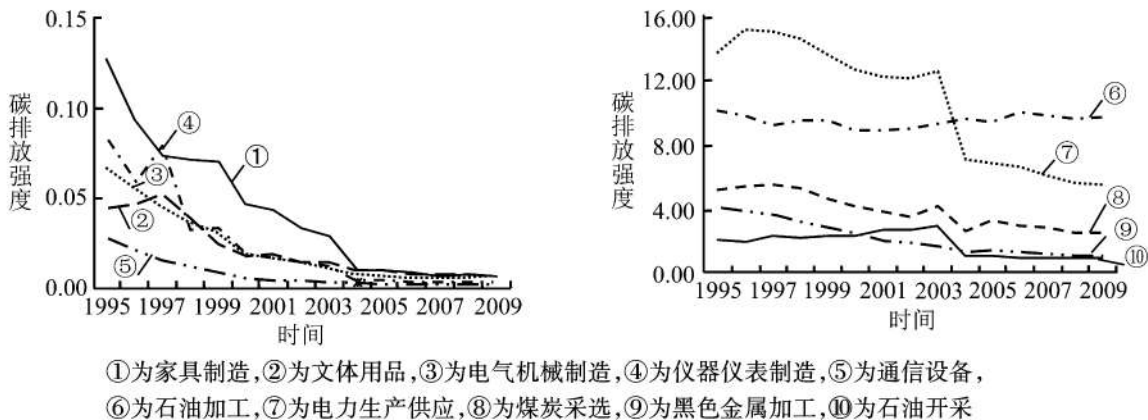
基于历年《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》和《中国科技统计年鉴》,构建 1995 年至 2009 年中国工业 36 个行业投入产出的数据。所有与价格相关的数据都以 1990 年为基年按历年的价格平减指数平

减,资本存量数据不像产出、劳动和能源数据一样可以直接获得,必须进行估算。Jefferson 等^[22]和涂正革^[23]将固定资产净值年平均余额序列进行价格平减后作为工业分行业资本存量的一种近似估算,本研究也采用这种方法,将历年的固定资产净值年平均余额根据历年固定资产投资价格指数平减成以 1990 年为基年的可比价固定资产净值,即历年的资本存量。

以碳排放强度最大和最小的 5 个行业为例,绘制 1995 年至 2009 年行业碳排放强度走势,见图 1。可以看出,与碳排放强度最小组的行业相比,碳排放强度最大组的行业的碳排放强度相对大得多,以 2009 年为例,碳排放强度最大的行业石油加工行业的碳排放强度为 9.634kg/元,将近是最低行业通讯设备制造行业的碳排放强度(0.002kg/元)的 5 000 倍。从行业碳排放强度下降的幅度和走势看,碳排放强度最小组行业的下降幅度明显大于碳排放强度最大组行业,碳排放强度最小组在 1997 年出现小幅波动上升后,基本都在下降的通道中,碳排放强度最大组行业表现出更为频繁的波动,如石油加工业的碳排放强度在 1998 年小幅上升后,在 2002 年至 2004 年、2006 年、2009 年出现波动,这与中国重化工业重新启动有关,也说明中国重工业的扩张还是以高能耗型扩张为主。

由于不同行业的碳排放特征存在较大的差异,本研究依据 2009 年各行业碳排放强度,将 36 个工业行业分成高、低碳排放强度组,每组 18 个行业,各組行业投入产出数据的主要描述性统计变量见表 1 (取自然对数)。

由表 1 可以看出,高、低碳排放强度行业的生产特征存在明显差异。虽然两组行业平均吸纳的劳动力数量相当,但高碳排放强度行业的平均资本存量、能源的消耗量、碳排放量比低碳排放强度行业高出很多,平均的总产出却比低碳排放强度组的行业小。显然,高碳排放强度组高资本投入、高耗能、高碳排放并未带来较高的经济产出和增长。



(a) 碳排放强度最小的 5 个行业的碳排放强度走势

(b) 碳排放强度最大的 5 个行业的碳排放强度走势

图 1 1995 年至 2009 年中国工业碳排放强度走势

Figure 1 Trends of Industrial Carbon Emission Intensity in China from 1995 to 2009

表1 按碳排放强度分组的统计性描述
Table 1 Descriptive Analysis of the Variables Grouped by Carbon Emission Intensity

	低碳排放强度组				高碳排放强度组			
	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差
碳排放(万吨)	4.268	8.566	6.365	1.166	5.807	12.906	8.848	1.788
能源消耗(万吨标准煤)	4.127	8.019	6.343	0.960	5.592	10.940	7.937	1.333
GDP(亿元人民币)	4.543	10.725	7.386	1.245	3.664	9.931	6.937	1.295
劳动力(万人)	2.708	6.518	4.771	0.901	2.639	6.733	4.684	1.004
资本存量(亿元人民币)	3.678	8.182	5.964	0.910	3.678	9.763	6.499	1.204

表2 1995年至2009年工业生产效率和绿色生产效率
Table 2 Productivity and Green Productivity in Industry from 1995 to 2009

行业	绿色生产效率	生产效率	行业	绿色生产效率	生产效率
农副加工	0.301	0.539	石油加工	0.006	0.257
医药制造	0.386	0.395	电力生产供应	0.217	0.200
木材加工	0.411	0.525	煤炭采选	0.159	0.080
水的生产供应	0.067	0.100	黑色金属加工	0.261	0.348
塑料制品	0.286	0.410	石油开采	0.013	0.110
金属制品	0.367	0.454	非金属制品	0.314	0.262
通用设备制造	0.438	0.563	燃气生产供应	0.581	0.182
专用设备制造	0.443	0.543	化学原料及制品	0.343	0.443
服装业	0.205	0.697	非金属矿采选	0.358	0.243
烟草加工	0.507	0.930	造纸业	0.358	0.351
皮羽制品	0.266	0.678	有色金属加工	0.308	0.372
交通设备制造	0.481	0.647	黑色金属采选	0.426	0.231
印刷业	0.468	0.302	化纤制造	0.503	0.573
家具制造	0.381	0.705	食品制造	0.391	0.379
文体用品	0.243	0.856	橡胶制品	0.503	0.377
电气机械制造	0.405	0.783	饮料制造	0.408	0.354
仪器仪表制造	0.527	0.775	有色金属采选	0.266	0.234
通信设备制造	0.396	1.000	纺织业	0.337	0.447
低碳排放强度行业	0.365	0.606	高碳排放强度行业	0.320	0.302
整个工业	0.343	0.454			

4 绿色生产率的行业差异及趋势分析

本研究基于距离函数,分别测算不考虑碳排放的工业生产效率和考虑碳排放的工业绿色生产效率,估算结果如表2所示。结果显示,工业平均生产效率为0.454,平均绿色生产效率为0.343。可见,在

考虑能源和环境因素后,工业的生产效率有所降低。

从分行业看,低碳排放强度行业的生产效率和绿色生产效率均高于高碳排放强度行业,低碳排放强度行业考虑能源和环境因素后,行业的生产效率均有所降低,尤其是通信设备制造和文体用品制造

行业,分别由1.000和0.856下降为0.396和0.243。高碳排放强度行业在考虑减排因素后,行业生产效率略有上升,说明随着国家节能减排政策力度和宏观经济调控力度的加大,以往担心的保护环境和节能会降低经济增长速度的现象没有出现;相反,经济增长速度却在加快,意味着如果中央政府继续加大环境规划和执法力度,把“扶大压小”的产业组织结构调整政策真正全面落实到位,中国的重化工业将会在低碳经济模式下的重新整合中升级,最终将会实现经济快速增长、能源效率提高和碳排放下降的目标。

绿色生产效率较低的行业主要集中在石油加工和石油开采行业,不足0.020,绿色生产效率较高的行业主要集中在燃气生产供应和仪器仪表等行业,分别为0.581和0.527,一方面说明不同行业在绿色生产效率上存在较大差异,另一方面也说明中国工业各行业在绿色生产效率方面均有较大的潜力和提升空间。

上面对绿色生产效率的分析仅限于静态视角,本研究采用基于距离函数的SML指数方法测算工业绿色生产率增长指数,估算结果如表3和表4所示,表3和表4分别从时间和行业两个维度比较分析工业绿色生产率的变化。

表3 1995年至2009年中国工业年均SML指数及分解
Table 3 Chinese Annual Industrial SML Index and Its Decomposition from 1995 to 2009

年份	低碳排放强度			高碳排放强度		
	SML	SEF	STE	SML	SEF	STE
1995~1996	0.974	0.947	1.028	1.008	0.992	1.016
1996~1997	1.005	0.989	1.025	1.039	1.017	1.021
1997~1998	1.016	0.973	1.046	1.033	0.992	1.042
1998~1999	1.028	0.946	1.105	1.048	0.961	1.110
1999~2000	1.082	0.968	1.120	1.059	0.984	1.078
2000~2001	1.086	1.088	1.008	1.046	1.011	1.034
2001~2002	1.096	1.015	1.079	1.069	0.996	1.073
2002~2003	1.057	0.921	1.154	1.006	0.986	1.019
2003~2004	1.213	1.102	1.099	1.144	1.067	1.070
2004~2005	0.950	0.917	1.036	0.999	0.973	1.027
2005~2006	1.051	0.996	1.055	1.056	1.002	1.056
2006~2007	1.057	1.023	1.032	1.076	1.001	1.074
2007~2008	1.019	0.998	1.021	1.032	1.016	1.015
2008~2009	1.001	0.997	1.003	1.054	1.003	1.051
均值	1.045	0.991	1.058	1.048	1.000	1.049

从表3可以看出,1995年至2009年高、低碳排放强度行业绿色生产率整体表现出增长态势,平均增长率分别为1.048和1.045,可见高碳排放强度行业绿色生产率的进步总体略高于低碳排放强度行业。工业绿色技术进步指数均大于1,低碳排放强度行业的绿色技术进步水平略高于高碳排放强度行业,平均增长指数分别为1.058和1.049。低碳排放强度行业绿色技术效率指数大多小于1,行业平均为0.991,说明绿色技术效率有所下降;而半数的高碳排放强度行业绿色技术效率指数大于1,行业平均为1,说明高碳排放强度行业的绿色技术效率水平总体高于低碳排放强度行业。虽然低碳排放强度行业的绿色技术进步水平略高于高碳排放强度行业,但由于绿色技术效率下降,低碳排放强度行业绿色生产率的进步水平反而低于高碳排放强度行业。因此,对高碳排放强度行业而言,绿色生产率增长是绿色技术效率和绿色技术进步共同作用的结果;对低碳排放强度行业来说,绿色技术进步是主要推动力。

纵观整个研究期间,低碳排放强度行业除2000年至2001年和2003年至2004年之外、高碳排放强度行业除2007年至2008年之外,其余年份的绿色技术效率指数均低于绿色技术进步指数,可见两类行业绿色生产率增长的主要推动力是绿色技术水平,而非绿色技术效率。因此,绿色技术的发展和进步是推动中国工业增长模式转变和产业绿色升级的主要动力,这一结论与岳书敬^[24]和何小钢等^[5]的研究结论一致,并且绿色技术进步对工业绿色生产率增长的促进作用在低碳排放强度行业更为显著。

从中国工业绿色生产率增长的总体走势看,呈先升后降的变动趋势,1995年至2004年为波动式上升,2004年至2009年呈下降趋势,低碳排放强度行业的变动幅度均大于高碳排放强度行业,这种差距在2008年后有加大的趋势。这与中国工业增长模式的转变趋势一致,即世纪之交是中国工业增长方式转变的拐点,而2003年后中国重现重工业化趋势,这一趋势在2008年世界金融危机后尤为明显。可见,以高耗能、高碳排放投入为特征的行业扩张盛行,低耗能、低碳排放的行业低碳增长方式受到一定程度的抑制。

根据表4的估算结果,低碳排放强度行业大致可分成两类。第一类,绿色生产率增长大于1,且主要是由于绿色技术进步和绿色技术效率提高所引致的行业,如农副加工、烟草加工、交通设备、仪器仪表和通信设备行业;第二类,绿色生产率增长大于1,但主要原因是绿色技术进步增长抵消了绿色技术效率降低的影响而使绿色生产率得到提升,如医药制造、木材加工、水生产供应、塑料制品、金属制品、通用设备、专用设备、服装业、皮羽制品、印刷业、家具制造、文体用品、电气机械行业。

高碳排放强度行业大致分成3类。第一类,绿色生产率增长小于1,主要是绿色技术效率降低的影响大于绿色技术进步作用的行业,如石油加工;第

表4 1995年至2009年中国工业行业SML指数及分解
Table 4 Chinese Industrial SML Index and Its Decomposition from 1995 to 2009

行业	低碳排放强度			行业	高碳排放强度		
	SML	SEF	STE		SML	SEF	STE
农副加工	1.078	1.002	1.125	石油加工	0.991	0.963	1.054
医药制造	1.003	0.991	1.013	电力生产供应	1.005	0.997	1.007
木材加工	1.027	0.989	1.036	煤炭采选	1.001	0.998	1.004
水生产供应	1.013	0.990	1.023	黑色金属加工	1.146	1.027	1.120
塑料制品	1.022	0.994	1.029	石油开采	1.009	0.992	1.017
金属制品	1.019	0.997	1.022	非金属制品	1.102	0.999	1.102
通用设备	1.053	0.994	1.057	燃气生产供应	1.049	1.027	1.020
专用设备	1.026	0.980	1.047	化学原料制品	1.042	0.998	1.045
服装业	1.038	0.965	1.079	非金属矿采选	1.056	0.999	1.055
烟草加工	1.084	1.002	1.083	造纸业	1.065	0.983	1.082
皮羽制品	1.041	0.966	1.081	有色金属加工	1.073	0.987	1.087
交通设备	1.085	1.003	1.081	黑色金属采选	1.070	1.016	1.051
印刷业	1.025	0.997	1.029	化纤制造	1.029	1.000	1.029
家具制造	1.070	0.992	1.081	食品制造	1.060	1.008	1.051
文体用品	1.043	0.973	1.073	橡胶制品	1.055	0.993	1.062
电气机械	1.084	0.986	1.099	饮料制造	1.029	1.000	1.029
仪器仪表	1.085	1.024	1.068	有色金属采选	1.066	1.015	1.051
通信设备	1.020	1.000	1.020	纺织业	1.016	1.000	1.016
均值	1.045	0.991	1.058	均值	1.048	1.000	1.049

二类,绿色生产率增长大于1,且主要是由于绿色技术进步和绿色技术效率提高所引致的行业,黑色金属加工、燃气生产供应、黑色金属采选、化纤制造、食品制造、饮料制造、有色金属采选和纺织业;第三类,绿色生产率增长大于1,但主要原因是绿色技术进步作用抵消了绿色技术效率降低的影响而使绿色生产率得到提升,如电力生产供应、煤炭采选、石油开采、非金属制品、化学原料制品、非金属矿采选、造纸业、有色金属加工、橡胶制品。

从绿色生产率增长与绿色技术进步增长排序看,绿色生产率增长最快的行业是低碳排放强度行业的仪器仪表,平均增长指数为1.085,绿色技术进步最快的行业是低碳排放强度行业的农副加工行

业,平均增长指数为1.125。虽然何小钢等^[5]的研究认为通信设备行业是技术进步增速最快的行业,但是依据表4的估算结果,通信设备行业的绿色生产率增长幅度较低,平均增长指数仅为1.020,甚至低于很多高碳排放强度行业。可见行业的技术发展水平高并不能说明其绿色技术水平就一定先进,原因可能因为这些行业虽然在技术创新和经济产出方面进步较快,但在节能减排方面关注和投入不够。

5 实证结果和分析

运用EViews 6.0软件,采用面板数据分析方法,对中国工业低碳发展的影响因素及其行业差异进行分析。通过F统计量分析和豪斯曼检验,可以确定,

对于(7)式,高、低碳排放强度行业均应建立个体固定效应模型,计量结果如表5所示。

表5 回归结果
Table 5 Regression Results

	低碳排放强度组	高碳排放强度组
常数项	5.721** (2.529)	9.894*** (3.349)
lnY	-2.298*** (-5.939)	-1.367*** (-5.183)
(lnY) ²	0.104*** (4.496)	0.056*** (2.997)
lnSEF	-0.172** (-2.385)	-0.430*** (-3.935)
lnSTE	-0.323*** (-2.582)	-0.508*** (-3.733)
lnEM	-0.096** (-3.195)	-0.188** (-2.310)
AR(1)	0.975*** (105.226)	1.009*** (168.842)
R ²	0.981	0.992
调整 R ²	0.981	0.992
F	1 998.678	4 817.200
DW	2.211	2.387

注:被解释变量为碳排放强度;括号内数据为t统计量;***为1%水平显著,**为5%水平显著。

高、低碳排放强度行业经济产出的一次项系数为负,二次项系数为正,说明中国工业碳排放强度与经济产出具有U型曲线特征,这个结论与林伯强等^[20]的结论相似。根据碳排放与经济关系曲线拐点计算公式 $\xi = \exp(-\frac{\beta_1}{2\beta_2})$,可以分别得到中国高、低碳排放强度行业的碳排放强度库兹涅茨曲线拐点,分别为19.986万亿元人民币和6.282万亿元人民币。这表明,一方面,样本期间工业碳排放强度随经济产出增长处于下降阶段,高碳排放强度行业拐点处的经济产出比低碳排放强度行业高很多,因而低碳排放行业的拐点先于高碳排放行业出现,相对于拐点,高碳排放强度行业的碳排放强度下降空间较大;另一方面,工业碳排放强度与经济的关系呈现U型走势,说明碳排放与经济的协调发展需要更多的人为干预和矫正,如果减排规制政策和低碳发展策略得当,非常有可能改变碳排放强度与经济产出关系曲线的弧度和走势,实现减排和经济增长的双赢。

高、低碳排放强度行业的绿色技术效率指数(SEF)、绿色技术进步指数(STE)的系数均为负值,且系数通过5%显著性水平检验,表明行业绿色技术效率改善和绿色技术进步有利于降低碳排放强度。绿色技术进步每提高一个单位,高、低碳排放强度行业碳排放强度分别降低0.508%和0.323%,绿色技术效率每提高一个单位,高、低碳排放强度行业碳排放强度分别降低0.430%和0.172%。一方面说明绿色生产率增长对高碳排放强度行业低碳发展的影响远远大于低碳排放强度行业,主要原因可能是由于低碳排放强度行业的碳排放强度已经较低,减排的空间较小,因此在实证上表现为绿色生产率的两个影响系数相对较小;另一方面说明绿色技术进步对工业低碳发展的促进作用大于绿色技术效率,工业绿色技术进步成为工业低碳经济增长的重要支撑和手段,这也契合样本期间工业绿色生产率动态演进的事实。

从回归结果看,能源结构对降低工业碳排放强度有显著负向作用,说明若从能源角度考虑促进工业低碳发展,仅调整化石能源消费结构并不能降低工业碳排放强度,还需要结合新能源的开发和利用等其他减排手段。

6 结论

本研究基于1995年至2009年碳排放特征分组的工业投入产出数据,采用方向距离函数估算工业生产效率和绿色生产效率,基于方向距离函数的SML指数方法测算绿色生产率的增长指数,结合改进的STIRPAT模型的面板数据模型估计方法,探讨绿色生产率对工业低碳发展的作用及工业低碳发展的主要影响因素。研究结果表明,①相对于不考虑碳排放的生产效率,低碳排放强度行业绿色生产率有所降低,高碳排放强度行业绿色生产率有所提高;②中国工业绿色生产率先升后降,对工业低碳发展有显著正向影响,对高碳排放强度行业的促进作用较大,绿色技术进步对工业绿色生产率增长和低碳发展的促进作用大于绿色技术效率;③中国工业碳排放强度与经济产出关系具有U型曲线特征,工业碳排放强度随经济产出增长处于下降阶段,相对于关系曲线拐点,高碳排放强度行业碳排放强度下降空间较大,化石能源结构调整不能促进工业低碳发展。

由上述结论得到如下政策启示。继续加强高碳排放强度行业的环境规制,同时重视低碳排放强度行业的节能减排工作,完善节能减排的标准、法规和经济政策,积极发展低碳能源,加快清洁能源的开发和使用。建立健全工业低碳发展的激励制度,优化配置低碳资源,激发低碳排放强度行业绿色技术创新的动力,推动其经济发展模式由技术驱动转向绿色技术创新驱动;加大高碳排放强度行业绿色技术创新投入,推动绿色技术先进的行业优先发展,同时继续推进高碳排放强度行业资源的整合和优化配

置,提升管理效率,推动其在低碳经济模式下的升级改造。

参考文献:

- [1] Ramanathan R. Combining indicators of energy consumption and CO₂ emissions: A cross-country comparison [J]. *International Journal of Global Energy Issues*, 2002, 17(3): 214-227.
- [2] Kortelainen M. Dynamic environmental performance analysis: A Malmquist index approach [J]. *Ecological Economics*, 2008, 64(4): 701-715.
- [3] 王群伟,周鹏,周德群. 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J]. *中国工业经济*, 2010(1): 45-54.
Wang Qunwei, Zhou Peng, Zhou Dequn. Research on dynamic carbon dioxide emissions performance, regional disparity and affecting factors in China [J]. *China Industrial Economics*, 2010(1): 45-54. (in Chinese)
- [4] 陶长琪,齐亚伟. 中国全要素生产率的空间差异及其成因分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2010, 27(1): 19-32.
Tao Changqi, Qi Yawei. Spatial difference and causes analysis of total factor productivity in China [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2010, 27(1): 19-32. (in Chinese)
- [5] 何小钢,张耀辉. 技术进步、节能减排与发展方式转型: 基于中国工业36个行业的实证考察[J]. *数量经济技术经济研究*, 2012, 29(3): 19-33. (in Chinese)
He Xiaogang, Zhang Yaohui. Technology progress, energy save and emission reduce and development pattern transformation [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2012, 29(3): 19-33. (in Chinese)
- [6] Kumar S. Environmentally sensitive productivity growth: A global analysis using Malmquist-Luenberger index [J]. *Ecological Economics*, 2006, 56(2): 280-293.
- [7] Zhou P, Ang B W, Han J Y. Total factor carbon emission performance: A Malmquist index analysis [J]. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 194-201.
- [8] Shestalova V. Sequential Malmquist indices of productivity growth: An application to OECD industrial activities [J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2003, 19(2/3): 211-226.
- [9] Oh D, Heshmati A. A sequential Malmquist-Luenberger productivity index: Environmentally sensitive productivity growth considering the progressive nature of technology [J]. *Energy Economics*, 2010, 32(6): 1345-1355.
- [10] Tulkens H, Vanden Eeckaut P. Non-parametric efficiency, progress and regress measures for panel data: Methodological aspects [J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 80(3): 474-499.
- [11] Färe R, Grosskopf S, Pasurka C A, Jr. Environmental production functions and environmental directional distance functions [J]. *Energy*, 2007, 32(7): 1055-1066.
- [12] 尤建新,陈震,张玲红,马军杰. 我国连续性全要素 CO₂ 排放绩效空间差异及成因研究: 基于 sequential Malmquist-Luenberger 指数分析[J]. *预测*, 2012, 31(2): 57-61.
You Jianxin, Chen Zhen, Zhang Linghong, Ma Junjie. Spatial difference and causes research on continuous total factor CO₂ emission performance in China: Based on Sequential Malmquist-Luenberger index analysis [J]. *Forecasting*, 2012, 31(2): 57-61. (in Chinese)
- [13] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [14] Raskin P D. Methods for estimating the population contribution to environmental change [J]. *Ecological Economics*, 1995, 15(3): 225-233.
- [15] York R, Rosa E A, Dietz T. Bridging environmental science with environmental policy: Plasticity of population, affluence, and technology [J]. *Social Science Quarterly*, 2002, 83(1): 18-34.
- [16] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology [J]. *Human Ecology Review*, 1994, 2(1): 277-300.
- [17] York R, Rosa E A, Dietz T. Footprints on the earth: The environmental consequences of modernity [J]. *American Sociological Review*, 2003, 68(2): 279-300.
- [18] Lin S, Zhao D, Marinova D. Analysis of the environmental impact of China based on STIRPAT model [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2009, 29(6): 341-347.
- [19] Wang Y C, Chuang Y C. Environmental resilience and economic growth: Command economy's optimization and environmental Kuznets curve [J]. *Economic Modelling*, 2011, 28(6): 2854-2861.
- [20] 林伯强,蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. *管理世界*, 2009(4): 27-36.
Lin Baiqiang, Jiang Zhujun. A forecast for China's environmental Kuznets curve for CO₂ emission, and an analysis of the factors affecting China's CO₂ emission [J]. *Management World*, 2009(4): 27-36. (in Chinese)
- [21] 许广月,宋德勇. 中国碳排放环境库兹涅茨曲线的实证研究: 基于省域面板数据[J]. *中国工业经济*, 2010(5): 37-47.
Xu Guangyue, Song Deyong. An empirical study of

- the environmental Kuznets curve for China's carbon emissions: Based on provincial panel data [J]. *China Industrial Economics*, 2010(5):37-47. (in Chinese)
- [22] Jefferson G H, Rawski T G, Zhang Y. Productivity growth and convergence across China's industrial economy [J]. *Journal of Chinese Economic and Business Studies*, 2008, 6(2):121-140.
- [23] 涂正革. 环境、资源与工业增长的协调性 [J]. *经济研究*, 2008, 43(2):93-105.
Tu Zhengge. The coordination of industrial growth with environment and resource [J]. *Economic Research Journal*, 2008, 43(2):93-105. (in Chinese)
- [24] 岳书敬. 基于低碳经济视角的资本配置效率研究: 来自中国工业的分析与检验 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2011, 28(4):110-123.
Yue Shujing. Study on capital allocation efficiency in a low carbon economy development perspective [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2011, 28(4):110-123. (in Chinese)

Research on the Green Productivity and Its Impact on Industrial Low-carbon Development

Wu Yingzi, Wen Yuechun

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: This research paper adopts direction distance function to estimate industrial production efficiency and green productivity on the basis of Chinese industrial input-output data grouped by the characteristics of carbon emissions from 1995 to 2009. This study measures the growth index of green productivity based on Sequential Malmquist-Luenberger index method by direction distance function and analyzes industrial green productivity trends and industry differences in dimensions of time and industry. We do empirical research on green productivity's impacts on the industrial low-carbon development as well as the main factors affecting the industrial low-carbon development with an improved model of STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population Affluence and Technology). The results show that green productivity decreases in industries of low carbon emission intensity and increases in those of high carbon emissions intensity comparing to the productivity without consideration of the carbon emissions. Green productivity, which rises and then drops, has a significant positive impact on the industrial low-carbon development and a greater effect on industries of high carbon emissions intensity. Green technical progress plays a greater role on the growth of green productivity and low-carbon development than that of green technical efficiency. The relationship of carbon emissions intensity and the economic output has a U-shaped curve characteristics and the adjustment of fossil energy consumption structure cannot promote industrial low-carbon development.

Keywords: industry; green productivity; low-carbon development; green technical efficiency; green technical progress

Received Date: April 25th, 2012 **Accepted Date:** January 21st, 2013

Funded Project: Supported by the National Social Science Foundation of China(11&ZD139) and the Humanities and Social Sciences by the Ministry of Education of China(10YJA790196)

Biography: Wu Yingzi, a Hunan Zhuzhou native(1978 -), is a Ph. D. candidate in the School of Economics and Management at Tongji University. Her research interests include low-carbon economy, etc. E-mail: wuyingzi@189.cn □