

经济转型视角下中国工业行业环境全要素生产率及增长动力分析

范 丹^{1,2*} (1.东北财经大学数学与数量经济学院,辽宁 大连 116025;2.中国科学院预测科学研究中心东北分中心,辽宁 大连 116025)

摘要: 从工业行业存在技术异质特征出发,在全球 DEA 分析框架下,应用共同前沿理论的 MML 生产率指数,测度了 2001~2012 年我国工业行业环境全要素生产率的动态变化及分解构成,并采用动态 GMM 估计方法对其增长因素进行分析.结果表明:2001~2012 年 36 个工业行业的环境全要素生产率年均增长率为 2.3%,工业环境全要素生产率的增长主要源于技术进步与规模效率的提升.环境全要素生产率呈现清洁型生产行业、中污染生产行业、污染密集型行业依次递减的发展格局,群组间技术差异整体上呈现缩减趋势;通信设备、计算机及其他电子设备制造业、烟草制品业是推动前沿面扩张的主力行业;增长动力分析显示,工业行业存在投入要素利用的规模经济,工业行业“国退民进”的产权改革与能源结构调整有利于环境全要素生产率的提升,资本深化对环境全要素生产率的提升影响微弱,FDI 抑制了环境全要素生产率的增长,行业集中度与环境全要素生产率存在“倒 U”型关系,不同群组的技术异质性导致了对环境全要素生产率产生不同影响.

关键词: 共同前沿; 技术异质性; 环境全要素生产率; MML 生产率指数

中图分类号: X22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2015)10-3177-10

Analysis of industrial environmental productivity and growth dynamic in China from the perspective of economic transformation. FAN Dan^{1,2*} (1.Department of Mathematics and Quantitative Economics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian, 116025, China; 2.Center for Econometric Analysis and Forecasting, Northeastern Branch Liaoning, Dalian, 116025, China). *China Environmental Science*, 2015,35(10): 3177~3186

Abstract: In this paper, based on the global DEA directional distance function and MML productivity index, environmental productivity and decomposition variables were measured by resources and environmental constraints of from 2001 to 2012 in China, and the driving factors of green productivity industries were analyzed by the dynamic GMM estimation methods. The main conclusions were as follows. The average growth rate of green productivity of 36 industrial sectors was 2.3% from 2001 to 2012, environmental total factor productivity was mainly due to the progress of green technology progress and scale efficiency. Environmental total factor productivity showed clean production industry, polluting industries, pollution intensive industries in descending order of the different development pattern. Between the technical differences of groups showed reduction in the overall trend. Communications equipment, computers and other electronic equipment manufacturing industry and Tobacco industry were pushing the outward expansion of the production frontier in each period. Dynamic analysis showed the scale economy of the input factors in the industrial sector. The reforms of Property Rights of industrial privatization and the adjustment of energy structure were conducive to enhancing the environmental productivity, capital deepening impacted on environmental productivity weakly. FDI inhibited the growth of environmental productivity, there was an inverted U - shaped relationship in environmental productivity efficiency and industry concentration. Heterogeneity of the technology of different groups had led to different effects on the environmental productivity.

Key words: metafrontier technology; technology heterogeneity; environmental total factor productivity; MML productivity index

收稿日期: 2015-03-04

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年项目(13YJC790023);国家自然科学基金项目(71171035,71271045,71571035);辽宁省优秀人才支持计划(WJQ2014031);辽宁省社会科学规划基金项目(L14AJY002);国家社会科学基金重大项目(15DZA011)

* 责任作者, 副教授, fandanrx@163.com

改革开放 30 多年以来,工业经济通过高投资、高能耗和高污染排放取得的高增长渐渐难以为继.同时中国的碳排放量已经超过美国成为世界第一.在此国内外严峻的现实背景下,如何在经济转型期使得中国工业经济摆脱对资源依赖和生态环境的破坏是目前亟待解决的问题.而解决这个问题最有效和直接的方式就是提高工业全要素生产率.

近年来,关于工业全要素生产率的研究已引起了大量学者的广泛关注.在研究方法上,主要集中在使用索罗残差法、CD 生产函数(或超越对数函数)回归法、随机前沿生产函数法、非参数数据包络分析法(即 DEA 方法),利用地区工业数据,工业行业及企业数据对工业全要素生产率进行核算^[1-4].在投入产出指标的选取上,主要以资本和劳动为投入指标,以经济产出为产出指标.然而生产单位在生产所期望产出时,不可避免地会产生诸如二氧化碳、二氧化硫等环境副产出,从而整个给经济带来负外部性.伴随资源和环境与经济增长越来越体现出不协调性之后,越来越多的学者将环境纳入全要素生产率的研究中,这种考虑环境约束下的全要素生产率即为环境全要素生产率.在大量研究方法中越来越多地采用方向距离函数及 Malmquist-Luenberger (ML)生产率指数模型来考察环境约束对生产率度量的影响,这样估算得到的环境全要素生产率更具生产经济学含义^[5-6].多数文献从宏观层面地区工业层面和中观行业层面对环境约束下的环境全要素生产率进行度量.尽管研究方法和研究时期不尽相同,但都发现工业环境全要素生产率小于传统生产率,不考虑环境约束所测算的工业传统生产率是有偏的^[7-13].随着测量全要素生产率的研究方法不断发展,Oh^[14]提出全局 ML(Global Malmquist-Luenberger,GML)指数,从而克服在测算 ML 指数过程中产生的不可行解问题.进一步考虑到生产单位存在技术异质性问题,Oh^[15]提出基于共同前沿技术的 MML 生产率指数.随后一些学者运用 MML 生产率指数对国内外环境全要素生产率进行了测算^[16-19],但针对我国工业行业存在的技术异质性问题来度量行业绿色全

要素生产率的文献相对少见.

本文试图在已有研究的基础上进行如下拓展:(1)在研究视角方面,本文以工业经济增长和生态环境双赢发展为目标,将非期望产出 SO_2 排放量、COD 排放量、 CO_2 排放量引入到工业行业全要素生产率的评价模型之中.(2)在研究方法方面,针对传统 DEA 线性规划模型存在的无可行解问题,本文基于全局生产技术的方向距离函数对工业行业的技术效率进行考核;针对我国工业行业间存在技术异质性问题,采用共同前沿的 MML 生产率指数测算工业行业的环境全要素生产率及其分解变量;针对所测算的环境全要素生产率存在序列相关问题,采用动态 GMM 模型系统全面地探讨工业行业环境全要素生产率的提升和制约因素及作用机理.

1 研究方法

1.1 全局生产技术条件下的方向距离函数

Oh 等^[14]指出针对非同时期的参照技术时,线性规划可能存在无可行解.针对无可行解问题,已有多数研究通常将其作为有效方式处理,这种处理方式并不合理.Oh 等^[14]克服上述缺陷,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,也定义了一个全局的生产技术集.同期的生产技术定义为: $P^t(x')=\{(y',b')|x \text{ 能生产 } (y',b'),x' \in R_+^N\}$, $t=1, \dots, T$, $P^t(x')$ 表示每个决策单元在 t 时期的参照技术集.全局生产技术集定义为: $P^U(x')=P^1(x^1) \cup P^2(x^2) \cup \dots \cup P^T(x^T)$.因此,全局生产技术集建立了一个所有观测单元和所有时期的参照技术集.基于全局生产技术集的方向性距离函数求解的线性规划问题可写成:

$$\begin{aligned} \bar{D}_0^s(x_k^s, y_k^s, b_k^s; y_{k'}^s, -b_{k'}^s) &= \max \beta, \\ \text{s.t. } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_k^s y_k^s &\geq (1+\beta) y_{k'}^s; \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_k^s b_k^s &= (1-\beta) b_{k'}^s; \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_k^s x_k^s &\leq x_{k'}^s; \\ \lambda_k^s &\geq 0, k=1, \dots, K. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $s=\{t, t+1\}$, λ_k^s 为权重变量.模型(1)是基于规

模报酬不变(CRS),若添加限制条件 $\sum_{k=1}^K \lambda_k^s = 1$; 即

为规模报酬可变(VRS).

1.2 Metafrontier Malmquist Luenberger (MML) 生产率指数及其分解

基于全局生产技术集的方向性距离函数,根据生产技术异质性假定,按照合理标准将研究对象分为具有不同生产技术水平的 K 个组别.假设一个 DMU 在群组 $k(k=1,2,\dots,K)$ 里,在群组 k 里的 DMU 生产可能性技术集表示为: $P_t^k(x_t^k) = \{u_t^k : x_t^k \text{ 能产生 } u_t^k\}$. 其上界即为“群组前沿”.由于整体中存在 K 个子技术集合,假定所有的 K 技术集遵守共同边界,均运作于共同技术集合 P_t^* 下,因此,共同技术集为各子技术集的并集,即 $P_t^* = \{P_t^1 \cup P_t^2 \cup \dots \cup P_t^K\}$,其上界即为“共同前沿”,共同前沿为各群组前沿的包络曲线.基于群组前沿和共同前沿的方向距离函数可表示为:

$$\bar{D}_t^k(x_t^k, y_t^k, b_t^k; g_{yt}^k, g_{bt}^k) = \sup\{\beta_t^k : (x_t^k, y_t^k + \beta_t^k g_{yt}^k, b_t^k + \beta_t^k g_{bt}^k) \in P_t^k(x_t^k)\} \quad (2)$$

$$\bar{D}_t^*(x_t^*, y_t^*, b_t^*; g_{yt}^*, g_{bt}^*) = \sup\{\beta_t^* : (x_t^*, y_t^* + \beta_t^* g_{yt}^*, b_t^* + \beta_t^* g_{bt}^*) \in P_t^*(x_t^*)\} \quad (3)$$

由于共同边界包含群组边界,所以有 $\bar{D}_t^*(x_t, y_t, b_t; g_{yt}, g_{bt}) \geq \bar{D}_t^k(x_t, y_t, b_t; g_{yt}^k, g_{bt}^k)$. 由方向距离函数可以定义技术缺口比率(TGR):

$$0 < \text{TGR}_t^k(x_t, y_t, b_t; g_{yt}, g_{bt}) = \frac{\bar{D}_t^*(x_t, y_t, b_t; g_{yt}, g_{bt})}{\bar{D}_t^k(x_t, y_t, b_t; g_{yt}^k, g_{bt}^k)} = \frac{1/[1 + \bar{D}_t^*(x_t, y_t, b_t; g_{yt}, g_{bt})]}{1/[1 + \bar{D}_t^k(x_t, y_t, b_t; g_{yt}^k, g_{bt}^k)]} \leq 1 \quad (4)$$

结合 chen 等^[16]提出的 MM 生产率指数和 chung 等^[20]提出的 ML 生产率指数的结构方式,在考虑非期望产出的条件下,基于共同前沿和群组前沿的环境全要素生产率指数分别定义为如下:

$$\text{MML}_{t,t+1}^{t+1} = \left\{ \frac{[1 + \bar{D}_t^*(x_t', y_t', b_t'; g_t')]}{[1 + \bar{D}_t^*(x_t^{t+1}, y_t^{t+1}, b_t^{t+1}; g_t^{t+1})]} \times \frac{[1 + \bar{D}_{t+1}^*(x_t', y_t', b_t'; g_t')]}{[1 + \bar{D}_{t+1}^*(x_t^{t+1}, y_t^{t+1}, b_t^{t+1}; g_t^{t+1})]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\text{GML}_{t,t+1}^{t+1} = \left\{ \frac{[1 + \bar{D}_t^k(x_t', y_t', b_t'; g_t')]}{[1 + \bar{D}_t^k(x_t^{t+1}, y_t^{t+1}, b_t^{t+1}; g_t^{t+1})]} \times \frac{[1 + \bar{D}_{t+1}^k(x_t', y_t', b_t'; g_t')]}{[1 + \bar{D}_{t+1}^k(x_t^{t+1}, y_t^{t+1}, b_t^{t+1}; g_t^{t+1})]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

当 $\text{MML}(\text{GML}) > 1$ 时,表示环境全要素生产率增长, $\text{MML}(\text{GML}) < 1$ 时,则表示环境全要素生产率下降.MML 与 GML 关系可表示为:

$$\text{MML}_{t,t+1}^{t+1} = \text{GML}_{t,t+1}^{t+1} \times \text{TGRC}_{t,t+1}^k \quad (7)$$

其中: $\text{TGRC}_{t,t+1}^k$ 是当期生产技术达到潜在生产技术的调节项,表示 $t+1$ 期的技术缺口率相对 t 期技术缺口率的变化.参考 MM 生产率指数分解方式^[16],进一步将 MML 分解为如下形式:

$$\begin{aligned} \text{MML}_{t,t+1}^C &= \frac{1 + \bar{D}_t^{k,V}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}{1 + \bar{D}_{t+1}^{k,V}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})} \times \left[\frac{1 + \bar{D}_t^{k,V}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}{1 + \bar{D}_t^{k,V}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})} \times \frac{1 + \bar{D}_t^{k,V}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}{1 + \bar{D}_t^{k,V}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})} \right] \times \\ &\quad \left[\frac{1 + \bar{D}_t^{*V}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}{1 + \bar{D}_t^{k,V}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})} \times \frac{1 + \bar{D}_{t+1}^{*V}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}{1 + \bar{D}_{t+1}^{k,V}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \times \\ &\quad \left[\frac{1 + \bar{D}_{t+1}^{C,C}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}{1 + \bar{D}_{t+1}^{k,V}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})} \times \frac{1 + \bar{D}_t^{C,C}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}{1 + \bar{D}_t^{k,V}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})} \right]^{\frac{1}{2}} \times \\ &\quad \left[\frac{1 + \bar{D}_{t+1}^{C,C}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}{1 + \bar{D}_{t+1}^{k,V}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})} \times \frac{1 + \bar{D}_t^{C,C}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}{1 + \bar{D}_t^{k,V}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\left\{ \frac{\frac{1+\bar{D}_{t+1}^{VC}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}{1+\bar{D}_{t+1}^{V^*}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})} \times \frac{1+\bar{D}_t^{VC}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}{1+\bar{D}_t^{V^*}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}}{\frac{1+\bar{D}_{t+1}^{VC}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}{1+\bar{D}_{t+1}^{V^*}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})} \times \frac{1+\bar{D}_t^{VC}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}{1+\bar{D}_t^{V^*}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}} \right\}^{\frac{1}{2}} \bigg/ \left\{ \frac{\frac{1+\bar{D}_{t+1}^{k,C}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}{1+\bar{D}_{t+1}^{k,V^*}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})} \times \frac{1+\bar{D}_t^{k,C}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}{1+\bar{D}_t^{k,V^*}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})}}{\frac{1+\bar{D}_{t+1}^{k,C}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}{1+\bar{D}_{t+1}^{k,V^*}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})} \times \frac{1+\bar{D}_t^{k,C}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}{1+\bar{D}_t^{k,V^*}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})}} \right\}^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$= \text{TEC}_{t,t+1}^k \times \text{TC}_{t,t+1}^k \times \text{PTCU}_{t,t+1} \times \text{FCU}_{t,t+1} \times \text{SEC}_{t,t+1}^k \times \frac{\text{SEC}_{t,t+1}^*}{\text{SEC}_{t,t+1}^k} \quad (8)$$

其中： $\bar{D}_t(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})$ 与 $\bar{D}_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})$ 分别为 t 期与 $t+1$ 期(即当期)距离函数; $\bar{D}_t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}, g_{yt+1}, g_{bt+1})$ 表示基于 t 期技术的 $t+1$ 期的混合距离函数; $\bar{D}_{t+1}(x_t, y_t, b_t, g_{yt}, g_{bt})$ 表示基于 $t+1$ 期技术的 t 期混合距离函数.其中 $\bar{D}_t, \bar{D}_v$ 分别表示基于规模报酬不变(CRS)与规模报酬可变(VRS)条件下的方向距离函数.MML 生产率指数各分解变量的含义如下: $\text{TEC}_{t,t+1}^k$ 表示群组前沿条件下的 t 期到 $t+1$ 期技术效率的变化; $\text{TC}_{t,t+1}^k$ 表示群组前沿条件下的 t 期到 $t+1$ 期技术进步的变化; $\text{PTCU}_{t,t+1}$ 表示 t 期到 $t+1$ 期的纯技术追赶效应; $\text{FCU}_{t,t+1}$ 表示 t 期到 $t+1$ 期的共同前沿相对于群组前沿的移动速度; $\text{SEC}_{t,t+1}^k$ 表示群组前沿条件下的 t 期到 $t+1$ 期规模效率的变

化; $\text{SEC}_{t,t+1}^* / \text{SEC}_{t,t+1}^k$ (SECT)表示共同前沿条件下规模效率变化与群组前沿条件下规模效率变化的比率.

2 指标的选择与群组分类

考虑到数据的连贯性与可获性,本研究样本选取 2001~2012 年中国工业 36 个行业投入产出的面板数据,由于部分行业的投入产出数据缺失,在工业 39 个细分行业中,剔除其他采矿业、工艺品及其他制造业与废弃资源和废旧材料回收加工业 3 个行业数据.资料来自历年《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国工业经济统计年鉴》及《中国劳动力年鉴》整理获得.投入产出指标如下:

表 1 36 个工业行业聚类分析结果
Table 1 Clustering analysis results of 36 industrial sectors

群组类型	细分行业名称
污染密集型行业	煤炭开采和洗选业(H1)、石油和天然气开采业(H2)、黑色金属矿采选业(H3)、非金属矿采选业(H4)、造纸及纸制品业(H5)、化学原料及化学制品制造业(H6)、非金属矿物制品业(H7)、黑色金属冶炼及压延加工业(H8)、燃气生产和供应业(H9)
中污染生产行业	有色金属矿采选业(M1)、农副食品加工业(M2)、食品制造业(M3)、饮料制造业(M4)、纺织业(M5)、木材加工业(M6)、石油加工炼焦及核燃料加工业(M7)、医药制造业(M8)、化学纤维制造业(M9)、橡胶制品业(M10)、有色金属冶炼及压延加工业(M11)、金属制品业(M12)、通用设备制造业(M13)、专用设备制造业(M14)、电力热力的生产和供应业(M15)、水的生产和供应业(M16)
清洁型生产行业	烟草制品业(L1)、纺织服装鞋帽制造业(L2)、皮革毛皮羽及其制品业(L3)、家具制造业(L4)、印刷业和记录媒介(L5)、文教体育用品制造业(L6)、塑料制品业(L7)、交通运输设备制造业(L8)、电气机械及器材制造业(L9)、通信设备计算机及其他电子设备制造业(L10)、仪器仪表及文化办公用机械制造业(L11)

(1)投入指标的选取.资本投入:选取各行业规模以上工业企业的固定资产净值年均余额作为资本投入,利用历年固定资产价格指数转换为 2001 年不变价,单位为亿元;劳动力投入:以各行

业规模以上工业企业的年平均从业人员数表示,单位为万人;能源投入:采用工业分行业能源终端消耗量,主要包括:原煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石

油气、天然气、热力、电力共 13 种主要能源，单位为万 t 标准煤。

(2)产出指标的选取.期望产出:选取工业各行业规模以上工业企业的工业总产值作为产出指标,用分行业工业品出厂价格指数转换为 2001 年不变价.单位为亿元;非期望产出(SO₂、COD、CO₂):考虑到我国“十一五”、“十二五”期间,国家环境污染物总量控制指标主要有 SO₂ 和 COD、CO₂,其中 SO₂ 二级浓度标准是空气质量标准的重要指标;COD 是水中污染物的最为主要的代表;碳减排是我国工业实现低碳经济转型的重要任务,所以本文选取 SO₂、COD、CO₂ 作为非期望产出指标.

为了进一步分析工业行业环境全要素生产率的行业技术差异,本研究采用单位 GDP 的非期望产出排放量来分类不同群组,利用聚类分析法将研究样本划分为污染密集型行业、中污染生产行业、清洁型生产行业 3 个群组,具体分组结果见表 1.

3 实证分析

3.1 经济转型期工业行业环境全要素生产率变动差异及其分解变量

将样本期间所有的投入产出数据作为当期的参考技术集,采用全局 DEA 方法构建生产前沿,分别在共同前沿和群组前沿条件下测算我国工业行业的环境全要素生产率及其分解变量,测算结果如表 2 所示.由表 2 可知,在资源和环境的双重约束下,样本期内 36 个工业行业在两种技术条件下的环境全要素生产率平均值增长率分别为 2.3%、4.4%,工业环境全要素生产率的增长主要源于技术进步率的提升(3.1%)与规模效率的小幅提升(0.2%),而技术效率的变化并不显著.这意味着经济转型期间我国工业行业追赶最优前沿面程度不断改善,生产技术的最优前沿面不断外移.这与其他学者^[8,12,21]的研究结果是一致的.此外,本文估算的环境全要素生产率的增长率接近陈诗一^[8]的估算中国工业行业的生产率,不考虑生产的外部性会高估生产率^[22].

表 2 2001~2012 年工业行业环境全要素生产率及其分解
Table 2 Environmental total factor productivity and its decomposition in the industrial from 2001 to 2012

行业	行业	MML	GML	TGRC	TEC	TC	PTCU	FCU	SEC	SECT
污染密 集型行 业	H1	1.003	1.060	0.946	1.027	1.034	0.948	0.998	1.001	0.997
	H2	1.001	1.032	0.970	1.000	1.031	0.984	0.986	1.000	1.001
	H3	1.002	1.042	0.961	0.996	1.002	0.965	0.997	0.996	1.050
	H4	1.000	1.045	0.957	1.000	1.018	0.986	0.970	0.994	1.033
	H5	1.003	1.053	0.953	1.000	1.052	0.956	0.996	1.000	1.001
	H6	1.001	1.019	0.982	0.985	1.052	0.971	1.012	0.989	0.995
	H7	1.017	1.048	0.970	1.000	1.047	0.980	0.990	1.000	1.002
	H8	1.022	1.058	0.966	1.000	1.054	1.017	0.949	1.000	1.004
	H9	1.037	1.060	0.978	1.000	1.002	1.055	0.928	1.008	1.050
平均值		1.010	1.046	0.965	1.001	1.032	0.982	0.982	0.998	1.014
中污染 生产行 业	M1	1.002	1.019	0.983	1.000	1.001	0.999	0.984	0.985	1.034
	M2	1.012	1.058	0.956	1.000	1.052	0.983	0.972	1.000	1.006
	M3	1.001	1.017	0.985	0.984	1.026	0.995	0.990	1.000	1.008
	M4	1.004	1.037	0.968	1.003	1.041	0.964	1.004	0.983	1.009
	M5	1.003	1.049	0.957	0.997	1.058	0.955	1.002	1.009	0.986
	M6	1.014	1.061	0.956	1.000	1.002	1.011	0.946	1.014	1.045
	M7	1.064	1.053	1.010	1.000	1.048	1.018	0.993	1.000	1.005
	M8	1.004	1.030	0.975	0.985	1.040	0.983	0.991	0.999	1.006
	M9	1.014	1.058	0.959	1.000	1.055	0.994	0.964	1.017	0.986
	M10	1.020	1.054	0.968	1.016	1.017	0.989	0.978	1.009	1.011

续表 2

行业	行业	MML	GML	TGRC	TEC	TC	PTCU	FCU	SEC	SECT
中污染 生产行 业	M11	1.025	1.065	0.963	1.028	1.035	0.998	0.965	1.000	1.001
	M12	1.005	1.031	0.975	0.978	1.020	1.017	0.958	1.000	1.034
	M13	1.024	1.036	0.988	1.000	1.008	1.018	0.971	1.000	1.028
	M14	1.042	1.057	0.986	1.000	1.029	1.015	0.971	1.000	1.027
	M15	1.035	1.064	0.973	1.003	1.060	1.003	0.970	1.034	0.968
	M16	1.082	1.053	1.028	1.000	1.002	1.003	1.024	1.002	1.049
	平均值	1.022	1.046	0.977	1.000	1.031	0.997	0.980	1.003	1.012
清洁型 生产行 业	L1	1.056	1.063	0.994	1.000	1.052	1.001	0.993	1.000	1.010
	L2	1.002	0.994	1.009	0.963	1.038	1.000	1.009	1.000	0.994
	L3	1.037	1.037	0.999	0.986	1.037	1.000	0.999	0.996	1.018
	L4	1.064	1.064	1.000	1.000	1.007	1.000	1.000	1.035	1.020
	L5	1.026	1.026	1.000	1.035	1.005	0.997	1.003	0.985	1.001
	L6	1.042	1.042	1.000	1.000	1.002	1.000	1.000	1.012	1.027
	L7	0.989	0.988	1.001	0.964	1.033	1.003	0.998	1.000	0.992
	L8	1.041	1.041	1.000	1.018	1.033	1.000	1.000	1.010	0.980
	L9	1.061	1.061	1.000	1.022	1.037	1.000	1.000	1.000	1.000
	L10	1.050	1.050	1.000	1.000	1.049	1.000	1.000	1.000	1.001
	L11	1.056	1.056	1.000	1.001	1.021	1.001	0.999	1.026	1.008
	平均值	1.039	1.038	1.000	0.999	1.029	1.000	1.000	1.005	1.006
全行业平均值		1.023	1.044	0.980	1.000	1.031	0.993	0.987	1.002	1.011

注:MML=GML·TGRC=TEC·TC·PTCU·FCU·SEC·SECT

从两种技术条件的比对来看,群组前沿下的环境全要素生产率明显高于共同前沿下的环境全要素生产率,两者之间平均技术缺口率为 2.0%.由 TGRC 指数的测算结果可知,污染密集型行业的平均缺口率最大为 3.5%,中污染行业的平均技术缺口率为 2.3%,而清洁型生产行业的平均技术缺口率最小为 0.这意味着在考察期内,污染密集型行业与中污染行业在 2 种技术条件下存在较大的技术差异.而清洁型生产行业间在两种技术条件下并不存在显著差异.因此,污染密集型行业存在着更多能源浪费及二氧化碳、二氧化硫等污染物的过度排放,依旧是我国工业行业节能减排的重点对象.在污染密集型行业群组中,以石油和天然气开采业为例,在群组前沿下,技术效率均值为 0.849,表明在污染密集型行业群组中,尚存在 15.1%的节能减排空间;若把该行业放在 36 个工业行业中,参照共同前沿,其技术效率均值仅为 0.51,节能减排潜力可以提升至 49%,远高于群组前沿下的改进幅度.其他行业的比较也得到了类似的结论.由全行

业 PTCU 及 FCU 的平均测算指数小于 1 来看,群组间技术差异整体上呈现缩减趋势,其中污染密集型行业与中污染生产行业的群组前沿面外移速度要快于共同前沿面外移速度.从规模效率变化的测算结果来看,清洁型生产行业表现最佳,规模效率提升最快,尽早实现了产业结构的优化调整.

3.2 工业“创新者”行业分析

由工业行业环境全要素生产率的分解结果可知,技术进步是推动工业行业环境全要素生产率提高的主要动力.本文利用 Fare 等^[23]提出的“创新者”单位判断准则对工业行业的“创新者”行业进行判断分析.

由表 3 可知,在共同前沿条件下,2001~2012 年间共有 2 个行业推动最优生产前沿面的外移,其中通信设备、计算机及其他电子设备制造业表现尤为突出,每个时期都推动了生产前沿面的向外扩张.烟草制品业次之,共有 10 次推动最优生产前沿面的外移.这与陈诗一^[8]的研究结果是一致的.这也说明这 2 个行业无论在节能减排,

技术创新等各方面都位于工业行业的前列.在污染密集型行业群组中,“创新者”行业比较集中在非金属矿采选业、造纸及纸制品业、化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼及压延加工业、燃气生产和供应业这 6 个行业.尽管这几个行业在共同前沿技术条件下表现不佳,但在考虑了行业间的技术异质性问题后,这几个行业在污染密集型行业群组里表现出色.这意味着虽然这几个行业隶属高能耗、高排放行业,但在国家“十五”至“十二五”期间连续出台一系列节能减排政策后,节能减排已初显成效.如国家逐步完善非金属矿采选业重点矿种产业布局,实行开采和生产总量限制,严格控制新增产能,着力现有产能优化,引进先进技术,完成节能减排设施的升级改造.此外,针对造纸工业已成为我国污染较为严重的行业之一.国家制定了《造纸化学品行业“十二五”发展规划》.部分企业加大造纸化学品新产品、新技术、新工艺的开发,技术装备水平均已达到国内领先水平,部分设备已达世界领先水平.在中污染生产行业群组中,“创新者”行业主要有农副

食品加工业、石油加工、炼焦及核燃料加工业、金属制品业、通用设备制造业、专用设备制造业、水的生产和供应业这 7 个行业.其中农副食品加工业在各时期均推动了中污染生产行业群组生产前沿面的外移.值得注意的是,石油加工、炼焦及核燃料加工业共 10 次推动了中污染生产行业群组的生产前沿面的外移.随着我国目前对环境污染治理的力度加强,对油品升级、燃料加工等技术要求越来越高,这推动了石油加工、炼焦及核燃料加工业的生产技术不断提高创新.在清洁型生产行业群组中,烟草制品业、纺织服装、鞋、帽制造业、皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业、家具制造业、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这 6 个行业不同程度地推动了清洁型生产行业群组生产前沿面的外移.其中烟草制品业、通信设备、计算机及其他电子设备制造业仍然保持最佳.综上分析,在考虑工业行业间存在着技术异质性问题后,一些高能耗,高排放行业推动了群组前沿面的外移,由此也验证了技术异质性在生产率评估和创新单位识别中的重要作用.

表 3 2001~2012 各年份“创新者”行业
Table 3 Innovator industry from 2001 to 2012

年份	共同前沿	污染密集型行业	中污染生产行业	清洁型生产行业
2001~2002	L1,L10	H4,H5,H6	M2,M7,M12,M14,M16	L1,L2,L3,L10
2002~2003	L1,L10	H4,H5,H6	M2,M7,M12,M13,M14	L1,L2,L3,L10
2003~2004	L1,L10	H5,H6	M2,M7,M12	L1,L2,L3,L10
2004~2005	L1,L10	H6	M2,M7,M12,M16	L1,L10
2005~2006	L1,L10	H5,H6	M2,M7,M12,M16	L1,L10
2006~2007	L1,L10	H5,H7,H8	M2,M7,,M16	L1,L10
2007~2008	L1,L10	H5,H6,H8	M2,M7,M16	L1,L9,L10
2008~2009	L10	H7,H8	M2,M7,M13,M16	L1,L9,L10
2009~2010	L1,L10	H5,H7,H8,H9	M2,M13,M16	L1,L3,L10
2010~2011	L1,L10	H5,H7,H8,H9	M2,M7	L1,L9,L10
2011~2012	L1,L10	H5,H7,H9	M2,M7,M16	L1,L4,L6,L10

3.3 环境全要素生产率的增长动因分析

根据转型期中国工业经济的特点,为了进一步揭示在资源和环境约束下工业行业环境全要素生产率增长的动力源泉,选取以下 8 个指标对

工业行业的环境全要素生产率的影响因素进行分析,同时对各个解释变量作用机理进行了预判,具体指标的设定和说明见表 4.

在面板数据模型估计中,如果解释变量具有

内生性,采取固定效应模型和随机效应模型不能保证得出无偏的参数估计.一些影响全要素生产率的因素,例如经济规模、能源消费等解释变量既可能是全要素生产率增长的原因,也可能是全要素生产率增长产生的结果,这些解释变量存在一定程度的内生性.鉴于采用DEA方法测算的全要素生产率具有序列相关特征^[24],解释变量的内生性问题且具有动态变化特征,因此,采用动态GMM估计方法对生产率进行影响因素的分析

更为可靠^[25].动态 GMM 估计分为差分 GMM (DIF-GMM)和系统 GMM(SYS-GMM),本文选用差分GMM与系统GMM估计分别对共同前沿和群组前沿条件下的工业行业环境全要素生产率的影响因素进行估计,在模型估计过程中,采用Stata 10.0 对模型进行估计,为了捕捉不同群组行业的技术异质性对环境全要素生产率的影响,在估计过程中引入 2 个群组虚拟变量 D1,D2.估计结果见表 5.

表 4 解释变量的选取与说明
Table 4 Selection and explanation of variable

变量	简称	指标说明	预判
滞后一期环境全要素生产率	L1	考察上一年的环境全要素生产率对今年的环境全要素生产率的影响	正
行业规模	IS	规模以上工业企业的工业总产值/该行业企业单位数	正
禀赋结构	KL	行业总资产/行业年末从业人数	正
行业集中度	IPE	工业各行业就业人数/工业行业在总就业人数	正
	IPE ²	IPE 平方项,考察马歇尔外部性与环境全要素生产率是否存在非线性关系	负
产权结构	GS	规模以上国有控股工业企业总产值/规模以上工业企业总产值	负
外资水平	FDI	规模以上外商投资、港澳台投资工业企业总产值/规模以上工业企业工业总产值	未知
能源结构	ES	各行业煤炭消费/各行业总的能源消费	负
虚拟变量	D1	污染密集型行业取 1,其余两大群组行业取 0	负
	D2	中污染生产行业取 1,其余两大群组行业取 0	未知

注:以上数据均来自历年《中国统计年鉴》、《中国工业经济年鉴》、《中国能源统计年鉴》

在模型的估计过程中,本文采用了稳健的动态 GMM 估计,从而使得模型的估计结果更具有解释力.从 4 个模型的总体估计结果来看,差分 GMM 和系统 GMM 通过过度识别检验(Sargan Test),验证了工具变量的选取与估计方法是有效的;由 AR 检验的估计结果可知,残差序列存在一阶序列相关,不存在二阶序列相关.从模型各系数的回归结果来看,MML 生产率指数与 GML 生产率指数的各系数回归结果具有一致性.下面对各影响因素进行分析:(1)4 个模型中一阶滞后变量所对应的系数均为正,且在 1%水平上显著,与预期一致.这说明上一年的环境全要素生产率对下一年的环境全要素生产率的增长具有显著的促进作用.这与王兵等^[11]的研究结果一致.其中系统GMM估计对2种技术条件下的环境全要素生产率增长的贡献比例更为突出.(2)行业规模的扩大对工业行业环境全要素生产率的水平提高具

有一定的促进作用,说明工业行业在一定程度上存在投入要素使用的规模经济.随着行业规模扩大,这时如果企业科技创新能力也随规模扩大而同步提高,则有助于企业更加集约化地使用各种投入要素,提高企业的全要素生产率.但从模型的回归系数较小来看,行业规模的扩大对行业环境全要素生产率的提高作用是有限的.(3)在结构因素中,反映禀赋结构的资本与劳动比对工业行业环境全要素生产率的影响显著为正,但对环境全要素生产率的作用微弱.对全行业而言,资本深化提高 1%,可以使全行业的环境全要素生产率提高 0.1%.主要原因是若地区资本与劳动比上升,说明该地区经济结构正从劳动密集型向资本密集型转化,而资本密集型产业多数集中在清洁型生产产业,其能源利用与污染排放的技术创新能力较强,从而促进了环境全要素生产率的提高.(4)行业集中度对工业行业的环境全要素生产率一

次项显著为负,二次项显著为正,即马歇尔外部性与工业全行业及制造业的能源效率提高存在显著的倒“U”型关系.这一回归结果的经济意义显而易见:产业集聚效应在初期增强了企业的竞争力度,行业之间治污成本、劳动力互补、上下游企业合作等促进了环境全要素生产率的提高.但随着行业集聚程度超过临界值后,行业的垄断程度不断增强,一些垄断企业凭借垄断地位占有廉价资源和高额利润,减少了企业技术改造的动力,进而导致能源使用的无效,从而阻碍了行业环境全要素生产率的提高.(5)产权结构对行业的环境全要素生产率的回归系数均为负,这也说明进一步降低国有经济比重,深化国有企业改革,推动国退民进的工业体制改革,可以从微观上强化企业激励机制,从而推动环境全要素生产率提高.(6)外资水平对全行业环境全要素生产率影响为负.这也与涂正革^[26]的研究结论一致.传统观点认为通过 FDI 通过先进管理和工艺技术的溢出效应可以提高当地产出水平和环境技术效率,但污染转移论认为,发达国家将高能耗、高污染产业转移到发展中国家,给发展中国家带来大量的转移环境污染,从而 FDI 的增加抑制了行业环境全要素生产率的提升.因此,本研究框架验证了 FDI 的污染转移论假说.(7)能源结构对全行业的环境全要素生产率的回归结果都显著为负,这与预期的结果一致.适当降低煤炭消费量所占的比重,提高天然气、电力等清洁能源所占的比重,可以在一定程度上降低二氧化碳、二氧化硫、COD 等污染物的排放水平,从而提高行业整体的环境全要素生产率水平.(8)从本文设置的群组虚拟变量估计结果来看,污染密集型行业、中污染生产行业与行业环境全要素生产率呈现非常显著负向关系.这意味着对全行业整体而言,污染密集型行业与中污染生产行业并不利于全行业环境全要素生产率的提升,而清洁型生产行业相对其他两大群组行业有着明显的技术优势,从而更有效的提升了全行业的环境全要素生产率水平.因此,不同群组行业的技术差异导致了对环境全要素生产率产生不同影响,这也进一步验证了本文考虑行业间的技术异质性对行业环境全要素生产率

的影响是十分必要的.

表 5 2001~2012 年工业行业环境全要素生产率动态 GMM 估计结果

Table 5 Dynamic GMM estimation of environmental total factor productivity of industrial from 2001 to 2012

变量	MML		GML	
	DIF-GMM	SYS-GMM	DIF-GMM	SYS-GMM
L1.	0.567*** (31.440)	0.645*** (24.710)	0.312*** (6.050)	0.640*** (14.540)
	0.012*** (9.610)	0.012*** (11.310)	0.012*** (5.950)	0.011*** (3.670)
IS	0.001*** (7.290)	0.002*** (5.140)	0.001*** (3.320)	0.001*** (3.070)
	2.009*** (2.940)	4.547*** (9.640)	3.990 (1.540)	7.009*** (7.050)
KL	-4.465 (-0.610)	-25.219*** (-5.320)	2.664 (0.070)	-45.504*** (-2.950)
	-0.133*** (-8.490)	-0.058*** (3.450)	-0.743*** (-12.220)	-0.160*** (-3.780)
GS	-0.356*** (-9.390)	-0.031* (-1.900)	-0.519*** (-5.090)	-0.229*** (-2.590)
	-0.040** (2.360)	-0.340*** (-13.450)	-0.673*** (-8.690)	-0.159 (-1.310)
FDI	-0.006** (-2.390)	-0.023*** (-10.750)	0.013 (0.830)	-0.056 (-2.990)
	-0.013 (-5.740)	-0.035*** (-24.190)	-0.004 (-0.500)	-0.014** (-2.170)
D1	0.499*** (18.590)	0.378*** (13.200)	1.184*** (21.050)	0.456*** (7.100)
	-2.354** (-0.019)	-2.481** (0.013)	-2.902*** (0.004)	-3.229*** (0.001)
D2	-1.489 (0.136)	-1.268 (0.205)	-1.602 (0.190)	-1.744 (0.181)
	26.333 (1.000)	31.437 (1.000)	31.660 (0.994)	30.697 (1.000)
Sargan test				

注:***,**,*分别表示在 1%,5%,10% 水平上显著表中“()”内数据为 Z-stat 值;“[]”内数据为 P 值,L1 表示滞后一期环境全要素生产率; Constant 表示截距项; Sargan test 为过度识别检验

4 结论

4.1 在资源和环境的双重约束下,2001~2012 年 36 个工业行业在共同前沿环境全要素生产率平均值增长率分别为 2.3%,其增长主要源于技术进步与规模效率提升.考察期内,GML 生产率指数高于 MML 生产率指数,两者之间平均技术缺口率为 2.0%.在共同前沿技术条件下,环境全要素生产率呈现清洁型生产行业、中污染行业、污染密集型行业依次递减的不同发展格局.群组间技

术差异整体上呈现缩减趋势。

4.2 从工业行业“创新者”行业来看,通信设备、计算机及其他电子设备制造业在各时期都推动了生产前沿面的向外扩张;烟草制品业次之。一个重要发现是,尽管非金属矿采选业、造纸及纸制品业等几个行业隶属高能耗、高排放行业,在考虑了行业间的技术异质性问题后,这几个行业在污染密集型群组里成为推动群组前沿面外移的主力行业,说明我国对高能耗、高排放产业的升级改造已初显成效。

4.3 动态 GMM 估计结果显示:工业行业在一定程度上存在投入要素使用的规模经济;资本深化对工业行业环境全要素生产率的影响为正,但影响微弱,产权结构、能源结构对全行业的环境全要素生产率具有抑制作用;行业集中度与工业行业的环境全要素生产率存在“倒 U”型关系;本研究框架验证了 FDI 的污染转移论假说;不同群组行业的技术异质性导致了对环境全要素生产率产生不同影响,清洁型生产行业性凭借技术优势有效的提升了全行业的环境全要素生产率水平。

参考文献:

- [1] 张 军,施少华,陈诗一.中国的工业改革与效率变化——方法、数据、文献和现有的结果 [J]. 经济学(季刊), 2003,3(1):2-38.
- [2] Bosworth Barry, Susan M Collins. Accounting for growth: comparing China and India [J]. Journal of Economic Perspectives, 2008,22(1):45-66.
- [3] Jefferson Gary H, Thomas G Rawski, Zhang Yifan. Productivity growth and convergence across China's industrial economy [J]. Journal of Chinese Economic and Business Studies, 2008,6(2):124-140.
- [4] 蔡 昉、王德文、曲 玥.中国产业升级的大国雁阵模型分析 [J]. 经济研究, 2009,(9):4-14.
- [5] 胡鞍钢,郑京海,高宇宁,等.考虑环境因素的省级技术效率排名 (1999-2005) [J]. 经济学(季刊), 2008,7(2):934-961.
- [6] 范 丹、王维国.中国区域环境绩效及波特假说的再检验 [J]. 中国环境科学, 2013,33(5):952-959.
- [7] Kumar S. Environmentally sensitive productivity growth: A global analysis using Malmquist-Luenberger index [J]. Ecological Economics, 2006,56(4):280-293.
- [8] 陈诗一.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) [J]. 经济研究, 2010,(4):21-34.
- [9] 涂正革、肖 耿.环境约束下的中国工业增长模式研究 [J]. 世界经济, 2009,(11):41-54.
- [10] Shi Guang-Ming, Bi Jun, Wang Jin-Nan. Chinese regional industrial energy efficiency evaluation based on a DEA model of fixing non-energy Inputs [J]. Energy Policy, 2010,38(6):6172-6179.
- [11] 王 兵,吴延瑞,颜鹏飞.中国区域环境效率与环境全要素生产率增长 [J]. 经济研究, 2010,(5):95-109.
- [12] 庞瑞芝,李 鹏.中国工业增长模式转型绩效研究——基于 1998-2009 年省际工业企业数据的实证考察 [J]. 数量经济技术经济研究, 2011,(9):34-46.
- [13] 王喜平、姜 晔.碳排放约束下我国工业行业全要素能源效率及其影响因素研究 [J]. 软科学, 2012,26(2):73-78.
- [14] Oh D H. A global Malmquist-Luenberger productivity index [J]. Product Anal, 2010,34(3):183-197.
- [15] Oh D H. A metafrontier approach for measuring an environmentally Sensitive productivity growth index [J]. Energy Econ, 2010,32(1):146-157.
- [16] Chen Ku-Hsieh, Yang Hao-Yen. A cross-country comparison of productivity growth using the generalised metafrontier Malmquist productivity index: with application to banking industries in Taiwan and China [J]. Journal of Productivity Analysis, 2011,35:197-212.
- [17] Juo Jia-Ching, Lin Yu-Hui, Chen Tsai-Chia. Productivity change of Taiwanese farmers' credit unions: a nonparametric metafrontier Malmquist-Luenberger productivity indicator [J]. European Journal of Operations Research, 2013,(6):125-147.
- [18] 国 涓,刘 丰,王维国.中国区域环境绩效动态差异及影响因素——考虑可规模报酬和技术异质性的研究 [J]. 资源科学, 2013,35(12):2444-2456.
- [19] 汪克亮,杨 力,程云鹤.异质性生产技术下中国区域绿色经济效率研究 [J]. 财经科学, 2013,39(4):57-67.
- [20] Chung Y H, Fare R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach [J]. Journal of Environmental Management, 1997,51,(3):229-240.
- [21] 陈 勇,李小平.中国工业行业的技术进步与工业经济转型 [J]. 管理世界, 2007(6):62-71.
- [22] Nanere Marthin, Iain Fraser, Ali Quazi, et al. Environmentally adjusted productivity measurement: An Australian case study [J]. Journal of Environmental Management, 2007,85(2):350-362.
- [23] Fare R, Grosskopf S, Pasurka Jr C A. Accounting for air pollution emissions in measures of state manufacturing productivity growth [J]. Journal of Regional Science, 2001,41(3):381-409.
- [24] Simar L, Wilson P W. Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes [J]. Journal of Econometrics, 2007,136(1):31-64.
- [25] Guan Z, Lansink A O. The source of productivity growth in Dutch agriculture: A perspective from finance, American [J]. Journal of Agricultural Economics, 2006,88(3):644-656.
- [26] 涂正革.环境、资源与工业增长的协调性 [J]. 北京:经济研究, 2008,(5):93-105.

作者简介: 范 丹(1978-),女,辽宁海城人,副教授,博士,主要从事资源与环境经济研究.发表论文 10 余篇。