

中国工业节能绩效与环保绩效协调性研究

——基于 NDDF 测算的全要素生产率视角

尚晶^{1 2}, 刘海英^{1 3}

(1. 吉林大学 商学院, 吉林 长春 130012; 2. 黑龙江省社会科学院 黑龙江 哈尔滨 150018;

3. 吉林大学 数量经济研究中心, 吉林 长春 130012)

摘要:按照节能规制与环保规制的不同组合形式建立三种研究情境,基于非径向方向性距离函数和曼奎斯特生产率指数测算中国工业全要素效率及全要素生产率增长指数,研究工业行业节能绩效与环保绩效的协调性。实证研究发现,工业节能绩效优于环保绩效,工业绿色发展水平受限于环保的现实状态,以牺牲环境为代价换取工业增长的现象仍然存在。节能绩效、环保绩效对规制强度变化的敏感性不同,节能、环保和绿色规制对全要素生产率增长的影响具有显著的行业异质性。技术进步是全要素生产率增长的源泉。实现节能与环保互相协调、同步改善需从提高工业企业环保意识、优化节能政策与环保政策组合、推动节能技术和环保技术进步等方面做出努力。

关键词:全要素生产率; 节能绩效; 环保绩效; 绿色规制; 非径向方向性距离函数(NDDF)

中图分类号:F224.0;F205 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-6049(2019)01-0088-11

一、引言与文献综述

工业是能源消费的主体,工业部门是污染物排放的主要部门,单位产值能源消费量、单位产值污染物排放量常被用来衡量工业节能、环保的变化。然而,行业属性不同所致的行业之间能耗、污染物排放水平的差异以及产值增长对节能和环保方面不足的掩盖,导致应用这些指标的比较结果有失公平性。节能、环保是具有比较属性的概念,是指相对更节能或更环保,节能和环保的意义因比较对象及其所在时空的不同而不同。从这个意义上说,体现决策单元为提高能源利用效率节约能源、保护环境降低环境污染物排放量所做出努力的节能效率和环保效率是评价节能绩效和环保绩效的合适工具。节能效率和环保效率既能够实现评价单元节能绩效和环保绩效的组间比较,又能够实现同一单元节能绩效和环保绩效的跨时空比较,然而,我们更关注同一个决策单元的生产方式在节能和环保方面是否是持续改善和同时进步的。实现这一比较,须建立一个能够同时度量节能绩效和环保绩效的研究框架,非径向方向性距离函数因其能够实现投入及产出要素多方面兼顾的特点,是一个合适的建模工具。因此,本文致力于建立一个基于非径向方向性距离函数的模型框架,实现一定时空范围内决

收稿日期:2018-11-05;修回日期:2019-01-07

基金项目:国家社会科学基金重大项目(15ZDA015);国家自然科学基金项目(71373101);吉林大学青年学术领袖培育计划项目(2015FRLX14)

作者简介:尚晶(1981—),女,吉林德惠人,吉林大学商学院博士研究生,黑龙江省社会科学院助理研究员,研究方向为环境与经济可持续发展;刘海英(1972—),男,吉林松原人,吉林大学数量经济研究中心教授,博士,博士生导师,研究方向为环境与经济可持续发展、绿色金融与信用风险评估。

策单元之间节能、环保的绩效测度和比较,同时给出决策单元的节能绩效与环保绩效是否协调的判断。

经济效率是加权总产出与加权总投入的最大比率,传统的做法是以投入产出要素的价格作为权重,求得决策单元的效率。而实际生产过程中某些投入或产出要素的价格数据难以获得,Cooper *et al.*^[1]将数据包络分析方法(DEA)用于测量投入产出效率,并将之以线性规划的形式呈现,突破了效率计算对投入产出价格数据的依赖。DEA方法是基于具有相同属性的投入产出的固定的决策单元集合,构造由每个DMU(decision making units)的最佳潜在投入或产出构成的生产前沿,每个DMU的实际投入产出量与潜在投入产出量之比即为其效率值,该方法参照多投入和多产出的观测数据客观的确定权重。然而实际生产中,除了期望产出外,还不可避免的产生如环境污染物等非期望产出。Pittman^[2]意识到非期望产出不是自由可处置的,或者说无法对其无成本处置,在修正CCD模型的同时,对产出做了期望产出和非期望产出的区分。Fare *et al.*^[3]给出了非期望产出弱可处置性的定义,并基于扩张期望产出,压缩非期望产出的基本生产目标,提出了基于投入产出数量计算双曲线产出效率的测度方法。然而,针对Shephard^[4]距离函数只能实现期望产出和非期望产出同时增加或减少的限制,Chung *et al.*^[5]提出了方向性距离函数的建模方法,实现了扩张期望产出的同时压缩非期望产出,使效率的测度更接近真实水平,同时论证了Shephard^[4]的距离函数是方向性距离函数的特殊情况,并基于方向性距离函数构建了曼奎斯特-伦伯格(Malmquist-Luenberger, ML)生产率指数,给出了类似于曼奎斯特(Malmquist)生产率指数在效率改善和技术进步两个方向的分解形式。该方法被广泛应用于全要素生产率、环境效率、能源效率等研究领域,在具体问题的研究中,学者们对方向性距离函数的方向向量的修正,对效率指数形式变化及其内涵的丰富都做出了有益探索。Zhou *et al.*^[6]提出非径向DEA技术的建模方法,基于其构建了ML指数,并以OECD国家为例进行了实证检验。Zhou *et al.*^[7]提出了非径向方向性距离函数的建模方法,并做了实证检验。Wang *et al.*^[8]基于非径向方向性距离函数的DEA建模方法,构建了全要素能源效率及其增长指数。Zhou *et al.*^[9]采用非径向方向性距离函数构建曼奎斯特指数,测算了中国241个城市的节能减排效率。非径向方向性距离函数具备方向性距离函数的所有优点,而且还能够赋予每种要素最合适的方向向量,本文的实证模型也是基于非径向方向性距离函数构建的。

在研究考虑资源环境约束的生产率测度的文献中,由于研究的关注点不同,非期望产出指标选取各具特色。李玲^[10]、王兵和黄人杰^[11]、Zhou *et al.*^[9]选择工业三废作为非期望产出;Kumar^[12]、陈诗一^[13]等则选择二氧化碳作为非期望产出。对能源指标的处理方式基本一致,无论是研究环境效率还是能源效率,无论是基于省际数据还是基于工业行业数据,现有文献^[14-17]大多是将能源消费总量(包括煤炭、原油、天然气、电力等)作为投入要素,体现了节约能源的思想,但缺少对于优化能源结构的考虑。能源为生产提供动力来源,在一定技术水平下,消费总量意义上的节约总是有限度的。但是,如果从优化能源结构的角度考虑,最大程度的节约和减少可能造成大气污染和温室气体排放的非清洁化能源的消费量,提高清洁化能源占能源消费总量比重,就能够促使能源消费量与环境污染物及温室气体排放之间关系脱钩。因此,将能源作为投入要素时,本文采取了与已有文献不同的处理方式,将能源消费区分为清洁化能源和非清洁化能源^[18],注重能源节约的同时,强调优化能源消费结构。清洁化能源包括电力和天然气等,非清洁化能源为煤炭、石油及其制品等。

二、研究情境设定及研究方法

(一) 研究情境设定说明

传统生产过程不存在任何形式的节能或者环保约束,能源消费、污染物和二氧化碳的排放都是任意的。能源的节约利用、环境污染物及二氧化碳排放减少都仅与当期的技术水平和管理效率有关,不存在节能、环保及低碳等其他外界约束。这一生产技术是绝对粗放型的生产技术,已被现代生产方式所摒弃。节能、环保、低碳已经成为现代工业生产面临的常态化约束,不同之处在于规制强度的差异,因此,本文研究情境设定的基调是节能、环保和绿色规制,不同研究情境的差异在于某一种或几种规

制强度的增强, 低碳作为控制变量, 以一般强度的约束形式纳入模型中, 不随研究情境的变化而变化。

情境一(一般规制): 节约使用能源并减少环境污染物和二氧化碳排放的生产技术, 致力于工业增长。能源利用不仅与当期技术水平有关, 而且受当期环境污染物和二氧化碳排放水平及能源和环保政策的约束。环境污染物和二氧化碳排放量减少的比例除了受当期生产技术的制约, 还受到能源利用效率、能源和环保政策的影响。这一生产技术是在对传统生产技术施加了节能、环保和低碳规制条件的基础上, 谋求工业产值增长最大化, 是由粗放型、外延式向集约型、内涵式生产方式的过渡, 这一情境下的效率称为规制效率, 对应的全要素生产率为规制全要素生产率。

情境二(节能或环保规制单方面增强): 该研究情境分为两种情况, 一是增强节能约束, 在情境一的基础上更加强调节能, 同时追求工业增长, 这一情况下的全要素生产率称为节能全要素生产率, 对应的单要素生产率称为节能工业增长生产率和节能生产率; 二是增强环保约束, 在情境一的基础上更加注重环保, 同时追求工业增长, 这一情况下的全要素生产率称为环保全要素生产率, 对应的单要素生产率成为环保工业增长生产率和环保生产率。以上两种情况在现实生产和生活过程中普遍存在, 例如, 某些城市为了组织一些国际会议或赛事, 需要展示良好的城市形象, 这时环保约束可能会加强。

情境三(绿色规制): 兼顾节能和环保, 要求高效率地节约和使用能源, 产生和排放相对较少的环境污染物, 同时最大程度的实现工业增长。节能、环保是其基本属性和特征, 是低碳背景下的最佳生产方式。这一情境下的全要素生产率称为绿色全要素生产率, 对应的单要素生产率称为绿色节能生产率、绿色工业增长生产率、绿色环保生产率。

(二) 基于环境技术的非径向方向性距离函数

假设 N 个决策单元都使用 M 种非清洁化能源(能源使用过程中产生并超量排放环境污染物), 记为 $FE^m (m = 1, \dots, M)$; S 种清洁化能源(能源使用过程符合排放标准) ($CE^s (s = 1, \dots, S)$); 对能源投入要素的处理与已有文献^[14-17]不同。 K 种非能源投入, 记为 $NE^k (k = 1, \dots, K)$; 生产 P 种期望产出, 记为 $Y^p (p = 1, \dots, P)$, 并伴随 $Q + R$ 种非期望产出, 记为 $B^q (q = 1, \dots, Q)$ 和 $C^r (r = 1, \dots, R)$ 。生产技术集 $T = \{ (E^m, NE^k, Y^p, B^q, C^r) : (FE^m, CE^s, NE^k) \text{ 能够生产 } (Y^p, B^q, C^r) \}$ 满足以下条件:

(1) $(FE^m, CE^s, NE^k, Y^p, B^q, C^r) \in T$ 且 $B^q = 0, C^r = 0$ 则有 $Y^p = 0$;

(2) $\sum_{n=1}^N (B_n^q + C_n^r) > 0$ 与 $\sum_{q=1}^Q B_n^q > 0$ 或 $\sum_{r=1}^R C_n^r > 0$ 同时成立, 其中 $n = 1, \dots, N$ 表示第 n 个决策单元;

(3) 若 $(FE^m, CE^s, NE^k, Y^p, B^q, C^r) \in T$ 且 $0 \leq \|\theta\| \leq 1$ 则 $(FE^m, CE^s, NE^k, \theta Y^p, \theta B^q, \theta C^r) \in T$ 其中 θ 为期望产出扩张和非期望产出压缩的比例。

涵义为: 期望产出与非期望产出具有联合生产特性, 生产期望产出的同时必然伴随非期望产出, 非期望产出具有弱可处置性, 即减少非期望产出的代价是同比例减少期望产出。

非径向的方向性距离函数的优点在于其方向设置的灵活性, 能够实现期望产出扩张及投入要素和非期望产出缩减的比例实现相对最优。基于环境技术的非径向方向性距离函数^[5, 9, 10]的一般形式为:

$$\vec{D}(FE^m, CE^s, NE^k, Y^p, B^q, C^r; g) = \sup\{\omega^T \beta : (FE^m + g_{FE^m}, CE^s + g_{CE^s}, NE^k + g_{NE^k}, Y^p + g_{Y^p}, B^q + g_{B^q}, C^r + g_{C^r}) \in T\} \quad (1)$$

式中 $\omega = (\omega_{FE^m}, \omega_{CE^s}, \omega_{NE^k}, \omega_{Y^p}, \omega_{B^q}, \omega_{C^r})$ 为非清洁化能源投入、清洁化能源投入、非能源投入、期望产出和非期望产出的权重向量, 其取值因研究情境的不同而不同。 $g = (-g_{FE^m}, -g_{CE^s}, -g_{NE^k}, g_{Y^p}, -g_{B^q}, -g_{C^r})$ 为以 $\beta = (\beta_{FE^m}, \beta_{CE^s}, \beta_{NE^k}, \beta_{Y^p}, \beta_{B^q}, \beta_{C^r})$ 为比例缩减投入要素, 增加期望产出和减少非期望产出的方向向量。当 $\beta = (\beta_{FE^m}, \beta_{CE^s}, \beta_{NE^k}, \beta_{Y^p}, \beta_{B^q}, \beta_{C^r}) = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 时, 表明该决策单元的投入产出比例相对最佳。

情境一对应的非径向方向性距离函数为:

$$\vec{D}(FE^m, CE^s, NE^k, Y^p, B^q, C^r; g) = \sup\{\omega^T \beta : (FE^m, CE^s, NE^k, Y^p + g_{Y^p}, B^q, C^r) \in T\} \quad (2)$$

式中 $\omega = (\omega_{FE^m}, \omega_{CE^s}, \omega_{NE^k}, \omega_{Y^p}, \omega_{B^q}, \omega_{C^r}) = (0, 0, 0, 1, 0, 0)$

情境二对应的非径向方向性距离函数分别为节能非径向方向性距离函数和环保非径向方向性距离函数。

节能非径向方向性距离函数为:

$$\vec{D}(FE^m, CE^s, NE^k, Y^p, B^q, C^r; g) = \sup\{\omega^T \beta: (FE^m + g_{FE^m}, CE^s, NE^k, Y^p + g_{Y^p}, B^q, C^r) \in T\} \quad (3)$$

式中 $\omega = (\omega_{FE^m}, \omega_{CE^s}, \omega_{NE^k}, \omega_{Y^p}, \omega_{B^q}, \omega_{C^r}) = (1/2M, 0, 0, 1/2P, 0, 0)$

环保非径向方向性距离函数为:

$$\vec{D}(FE^m, CE^s, NE^k, Y^p, B^q, C^r; g) = \sup\{\omega^T \beta: (FE^m, CE^s, NE^k, Y^p + g_{Y^p}, B^q + g_{B^q}, C^r) \in T\} \quad (4)$$

式中 $\omega = (\omega_{FE^m}, \omega_{CE^s}, \omega_{NE^k}, \omega_{Y^p}, \omega_{B^q}, \omega_{C^r}) = (0, 0, 0, 1/2P, 1/2Q, 0)$

情境三对应的非径向方向性距离函数为:

$$\vec{D}(FE^m, CE^s, NE^k, Y^p, B^q, C^r; g) = \sup\{\omega^T \beta: (FE^m + g_{FE^m}, CE^s, NE^k, Y^p + g_{Y^p}, B^q + g_{B^q}, C^r) \in T\} \quad (5)$$

式中 $\omega = (\omega_{FE^m}, \omega_{CE^s}, \omega_{NE^k}, \omega_{Y^p}, \omega_{B^q}, \omega_{C^r}) = (1/3M, 0, 0, 1/3P, 1/3Q, 0)$

为简化规划计算的约束条件,减少计算过程中自由度损失,把属于非清洁化能源和清洁化能源的不同种类的能源消费量分别化为标准量并进行加总,因此,这里 $M=1, S=1, K=2, P=1, Q=4, R=1$ 。

根据方向性距离函数的涵义及其与效率的关系,定义 $F_{FE^m} = 1 - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \beta_{FE^m}$ 、 $F_{Y^p} = 1 / (1 + \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \beta_{Y^p})$ 、 $F_{B^q} = 1 - \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \beta_{B^q}$ 分别为对应研究情境下的节能效率、工业增长效率、环保效率。采用 Wang *et al.* [8] 和 Zhou *et al.* [9] 的处理方式,定义三种研究情境对应的综合效率。

情境一: 规制综合效率为 $F_1 = F_{Y^p}$ 。

情境二: 节能综合效率为 $F_2^{FE} = \frac{1}{2}(F_{FE^m} + F_{Y^p})$; 环保综合效率为 $F_2^B = \frac{1}{2}(F_{Y^p} + F_{B^q})$ 。

情境三: 绿色综合效率为 $F_3 = \frac{1}{3}(F_{FE^m} + F_{Y^p} + F_{B^q})$ 。

当效率值为 1,表明决策单元效率有效,投入产出比例达到相对最佳状态,是当期生产边界的开拓者,处于对应的生产技术边界,不存在改进的空间和潜力。否则,说明决策评价单元相对效率无效,距离当期生产前沿面有一定距离。

(三) 全要素生产率增长指数测算方法

根据 Chung [5] 和 Zhou *et al.* [9] 构建曼奎斯特生产率指数:

$$M(t, t+1) = \left[\frac{F(t, t+1) \times F(t+1, t-1)}{F(t, t) \times F(t+1, t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

可分解为效率改善增长指数 (EFFCH) 和技术进步指数 (TECH),前者表示决策单元之间的学习追赶效应,后者表示决策单元对生产前沿边界拓展的贡献。

$$EFFCH(t, t+1) = \frac{F(t+1, t+1)}{F(t, t)} \quad (7)$$

$$TECH(t, t+1) = \frac{ML(t, t+1)}{EFFCH(t, t+1)} \quad (8)$$

三种情境下的全要素生产率指数及单要素生产率指数均由式(6)~式(8)计算得到。

在本文的三种研究情境下,令 l_1 和 l_2 表示时期,则式(7)对应的跨期非径向距离函数写作为:

$$\vec{D}^{l_1}(FE^{l_2m}, CE^{l_2s}, NE^{l_2k}, Y^{l_2p}, B^{l_2q}, C^{l_2r}; g) = \max: \frac{1}{\theta} \left[\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \beta_{FE^m} + \sum_{p=1}^P \beta_{Y^p} + \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \beta_{B^q} \right]$$

s. t.

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \lambda_n FE_n^{l_1m} &\leq (1 - \beta_{FE^m}) FE_n^{l_2m} \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n Y_n^{l_1p} &= (1 + \beta_{Y^p}) Y_n^{l_2p} \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n B_n^{l_1q} &= (1 - \beta_{B^q}) B_n^{l_2q}; \quad q = 1, 2, \dots, Q \\ 0 \leq \beta_{FE^m}, \beta_{B^q} &\leq 1, \beta_{Y^p} \geq 0, \lambda_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N, \theta = 1, 2, 3 \end{aligned} \tag{9}$$

(四) 变量选择及数据描述性统计

本文的研究对象为 2001—2014 年中国工业 36 个两位数代码行业的节能绩效和环保绩效。产出包括两种属性,一种是期望产出,是生产目的所在;另一种是非期望产出,是生产活动的副产品,无法进行资源化利用,只能作为污染物排放到环境中,是我们极力缩减的产出。本文中期望产出用各工业行业主营业务收入表示,采用工业品出厂价格指数以 2001 年为基期对其进行平减,以消除价格因素的影响。非期望产出包含两类,一类是环境污染物,本文选取化学需氧量、氨氮排放量、二氧化硫排放量和烟粉尘排放量四个指标;另一类是温室气体,以二氧化碳为代表。前者是环保的对象,后者是温室气体减排的对象。

投入要素包括劳动投入、资本投入和能源投入。与大多数研究文献的处理方式一样,选取工业行业历年年末平均从业人员总数作为劳动力投入指标。以工业行业年末固定资产净值作为资本投入数据,并以 2001 年为基期,采用历年工业行业固定资产投资价格指数对其平减。基于能源节约及能源结构优化的考虑,本文将能源投入分为两类,一类是清洁化能源投入,以天然气、电力、其他能源的消耗总量表示;另一类为非清洁化能源,其构成包括煤炭终端消费量、原油终端消费量及油品合计量(汽油、柴油、煤油、燃料油)。随着对小火电厂的整合和关停,一定规模的火力发电厂都有完备的脱硫脱硝及除尘工艺,污染物排放能够得到合理的控制和处理,因此,本文将用于火力发电的煤炭视为实现了清洁利用,并将其以电力的形式计入清洁能源消费量,这样的界定也符合我国当前的能源发展政策^[19-21]。各种能源消费量在加总之前,按标准煤折算系数做了标准化处理。投入要素数据来自历年《中国工业统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》。

为分析节能绩效与环保绩效的差异是否具有行业异质性,将工业行业按能耗强度和污染强度进行分组,根据《2010 年国民经济和社会发展统计公报》,六大高耗能行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、有色金属冶炼及压延加工业、石油加工炼焦及核燃料加工业、电力热力的生产和供应业为高耗能组,其他行业为低耗能组。污染强度分组的依据是基于面板数据的因子分析法计算的工业行业清洁生产指数的正负,将 36 个工业行业分为高污染组和低污染组,由于污染指标是负向指标,因此,总因子得分为正数的为低污染组,得分为负数的为高污染组。两种分组方式叠加,得到按能耗和污染程度的工业行业分组。从分组情况看,高耗能行业同时也是高污染行业,低污染行业同时也是低能耗行业,详细分组情况见表 1。

表 1 36 个工业行业按能源消耗和污染排放强度的分组情况

行业分组	组内行业
高耗能(高污染)行业	电力、热力的生产和供应业,化学原料及化学制品制造业,石油加工炼焦及核燃料加工业,非金属矿物制品业,黑色金属冶炼及压延加工业,有色金属冶炼及压延加工业
低耗能高污染行业	造纸及纸制品业,非金属矿物制品业,有色金属矿采选业,化学纤维制造业,饮料制造业,食品制造业,农副食品加工业,医药制造业,燃气生产和供应业,煤炭开采和洗选业,非金属矿采选业
低污染(低能耗)行业	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,文教体育用品制造业,仪器仪表及文化、办公用机械制造业,家具制造业,通用设备制造业,印刷业和记录媒介的复制业,交通运输设备制造业,烟草制品业,专用设备制造业,塑料和橡胶制品业,纺织服装、鞋、帽制造业,金属制品业,工艺品及其他制造业,石油和天然气开采业,木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业,皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业,黑色金属矿采选业,纺织业,水的生产和供应业

期望产出数据来自历年《中国工业经济统计年鉴》, 环境污染物排放量数据来自历年《中国环境统计年鉴》, 历年二氧化碳排放量数据没有官方统计数据, 笔者根据化石燃料消费量计算而得^①。数据描述性统计如表 2 所示。工业行业单位产值能源消费量的差异较大, 表明能源利用效率具有显著的行业差异。工业行业单位产值污染物和二氧化碳排放量的离散程度较大, 污染物排放的行业异质性显著。

表 2 单位产值对应的投入产出数据描述性统计

指标	最大值	最小值	均值	标准差
主营业务收入(亿元)	117 719.71	178.54	11 878.28	251 404 090.30
能源总量(吨标准煤/万元)	3.64	0.03	0.61	0.43
非清洁化能源(吨标准煤/万元)	3.36	0.01	0.49	0.32
清洁化能源(吨标准煤/万元)	0.58	0.01	0.12	0.02
年底平均从业人数(人/万元)	0.22	0.00	0.03	0.00
年末固定资产净值(亿元)	3.19	0.08	0.44	0.25
COD 排放(吨/万元)	1 206.07	0.01	23.27	6 485.50
氨氮排放(吨/万元)	32.47	0.00	1.31	9.99
SO ₂ 排放(吨/万元)	940.76	0.00	42.28	9 747.70
烟(粉)尘排放(吨/万元)	1 831.87	0.00	42.33	20 410.90
CO ₂ 排放(吨/万元)	1 206.07	0.01	23.27	6 485.50

三、节能绩效与环保绩效协调性分析

根据前文对研究情境及对应非径向方向性距离函数的设定, 计算三种情境下工业行业的相对技术效率, 规制效率有效的决策单元数量大于绿色效率有效的决策单元数量, 表明当前工业生产的状态是以规制生产技术为主体, 绿色生产技术正在兴起, 有待进一步扩张。

(一) 不同规制情境下的综合效率有效性分析

样本期内, 节能效率有效的行业数量与规制效率有效的行业数量相同, 均为 428 个, 占样本行业总数的 84.92%。而且节能效率平均值大于规制效率平均值, 表明工业生产的节能效应较好, 节能对工业增长存在正向拉动作用。环保效率有效的行业数量共计 263 个, 占样本行业总数的 52.18%, 显著少于节能效率和规制效率, 且环保效率均值低于节能效率均值和规制效率均值, 表明环境污染对生产效率的负面影响较大。绿色效率有效的决策单元总数与环保效率有效决策单元数相等, 但绿色效率年度均值大于环保效率年度均值, 表明即使是在加强环保约束的条件下, 节能对决策单元生产效率的贡献依然是正向的。节能效率有效的决策单元, 环保效率未必有效; 环保效率有效的决策单元节能均有效, 且环保有效的决策单元绿色效率均有效。可见, 工业行业的绿色发展状态受限于环保的现实状态。

从工业行业分组角度看, 三种规制情境下, 高耗能高污染行业、低耗能高污染行业、低耗能低污染行业的综合效率有效的决策单元总数如表 3 所示。

表 3 样本期内不同情境下工业行业综合效率有效数量及效率均值

情境	高耗能高污染行业		低耗能高污染行业		低耗能低污染行业		合计	
	效率有效的行业数量	效率均值	效率有效的行业数量	效率均值	效率有效的行业数量	效率均值	效率有效的行业数量	效率均值
一般规制	80	0.99	127	0.97	221	0.94	428	0.96
节能规制	80	0.99	127	0.97	221	0.94	428	0.96
环保规制	53	0.81	49	0.66	161	0.83	263	0.78
绿色规制	53	0.84	49	0.75	161	0.88	263	0.84

^①煤炭二氧化碳排放系数来自陈诗一^[13]的研究, 折标准煤系数来自《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2008), 其他数据由笔者根据《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041号)提供的数据计算而得。

一般规制和节能规制情境下,高耗能高污染行业、低耗能高污染行业和低耗能低污染行业综合效率有效的决策单元数量占样本行业总数的比重分别是 95.24%、90.71%、79.93%,高耗能高污染行业的规制效率高于低耗能低污染行业。这可能是因为国家对高耗能高污染行业在能源、环境污染和碳排放的规制要强于低能耗低污染行业,规制政策的不平衡性造成高耗能高污染行业反而具有更好的节能状态。

环保规制和绿色规制下,高耗能高污染行业、低耗能高污染行业和低耗能低污染行业综合效率有效的决策单元数量均比在一般规制和节能规制下少,占样本行业总数的比重分别是 63.10%、35%、57.5%,高污染行业对环保规制强度的敏感性存在差异,其中的低耗能行业对环保规制更敏感,环境污染仍然是阻碍工业绿色发展的主要因素。三组行业中,低耗能低污染行业具有相对最高的环保效率均值和绿色效率均值,表明低耗能低污染行业的绿色发展水平高于其他两组行业。从计算结果中还发现,三组行业绿色效率年度均值均高于环保效率均值,表明加强节能规制对提高决策单元的绿色效率起到积极作用。三种情境下效率有效的行业数量差异及其表现出的行业异质性,表明无论从横向的行业内比较还是纵向的个体比较,节能绩效与环保绩效还不够协调。

(二) 节能与环保规制对工业增长效率的影响分析

一般规制情境下,工业增长效率与综合效率是一致的,效率有效的行业数量为 428 个。节能工业增长效率有效的决策单元共计 429 个,一般规制下增加的决策单元是 2007 年的交通运输设备制造业。节能工业增长效率年度均值大于规制工业增长效率年度均值,节能约束有利于工业增长效率的提升。环保规制情境下,工业增长效率有效行业数量共计 275 个,环保规制增强抑制了工业增长效率的提升。绿色规制情境下,工业增长效率有效的决策单元共计 279 个,比环保工业增长效率有效的行业数量多 4 个,而且,绿色工业增长效率年度均值亦大于环保工业增长效率均值,表明即使是在强环保规制的情况下,增强节能约束依然能够促进工业增长效率的提升。

绿色规制情境下,工业增长效率有效的决策单元数量小于节能规制情境下的有效决策单元数量,略高于环保工业增长效率有效的决策单元数量,这一数量关系表明,节能与环保对工业增长效率的影响具有不一致性,节能对工业增长效率提升的促进作用被环保规制的阻滞作用抵消,导致绿色规制情境下工业增长效率有效的决策单元数量远远小于一般规制水平下工业增长率有效的决策单元数量。由于能源生产和供给结构等原因,非清洁化能源在中国目前的工业生产中仍然占据主体地位,出于降低成本的考虑,工业企业会自觉注重节约利用非清洁化能源,采用节能技术进行工业生产。但是,处理环境污染却可能增加企业生产成本或者减少生产利润,刻意的忽视就不足为奇。工业生产主体对节能和环保的重视程度具有不一致性,导致工业生产技术的节能偏向性强于环保偏向性。

从工业行业分组的角度看,除了 2007 年交通运输设备制造业工业增长效率在节能规制下变为有效外,三组行业在一般规制和节能规制下的工业增长效率的有效性是一致的。高耗能高污染行业在环保规制和绿色规制下的工业增长效率有效的数量相同,低耗能高污染行业在绿色规制下的工业增长效率有效的决策单元数量比环保规制下增加 1 个,是 2014 年的医药制造业。低耗能低污染行业在绿色规制下的工业增长效率有效的行业数量比环保规制下增加 4 个,皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业在 2011 和 2012 年变为有效,交通运输设备制造业在 2007 年变为有效,专用设备制造业在 2013 年变为有效,而纺织服装、鞋、帽制造业在 2011 年变为无效。低耗能高污染行业在环保规制和绿色规制情境下的工业增长效率有效的决策单元数量比对应情境下的综合效率有效的行业数量分别多了 2 个和 3 个。低耗能低污染行业在环保规制和绿色规制情境下的工业增长效率有效的行业数量比对应情境下的综合效率有效的行业数量多了 9 个和 13 个。节能对工业增长效率的促进作用在低耗能行业表现的更显著,同时,也表明以牺牲环境换取工业增长的现象在低耗能行业更突出。

(三) 节能绩效与环保绩效对规制强度的敏感性分析

节能规制和绿色规制下,节能效率有效的决策单元数量分别为 454 个和 359 个,比对应规制下的工业增长效率有效的数量分别增加 25 个和 80 个。节能规制下,高耗能高污染行业节能效率有效的

数量与工业增长效率有效的数量相同,低耗能行业节能效率有效数量大于工业增长效率有效数量。绿色规制下,三组行业节能效率有效的数量均大于各自的工业增长效率有效数量。表明无论在节能规制还是绿色规制下,工业行业的节能绩效都高于工业增长绩效。工业行业环保效率在环保规制和绿色规制下的有效性完全一致,并与对应规制下的综合效率有效性一致,但是有效的行业数量小于工业增长效率,这表明工业行业生产的绿色绩效受限于环保绩效,存在以牺牲环境换取工业增长的现象。

绿色规制下,节能效率、环保效率有效的决策单元数量分别为 359 个和 263 个,其中,环保效率有效的决策单元节能效率也有效,这一现象在低耗能高污染行业组更为显著。同一个决策单元在节能与环保方面表现出的不一致性,说明了工业行业的节能状态优于环保,且对节能的重视程度大于环保。

随着环保规制增强,节能效率有效的决策单元数量迅速减少,说明节能绩效对环保规制具有很强的敏感性,可能是由非期望产出的弱可处置性决定的,减少或处理作为工业生产的副产品的环境污染,必然占用生产资源和消耗能源,导致实际能源效率降低,节能绩效随之降低,表现为节能效率无效的决策单元数量增加。绿色规制情境下,环保效率有效的决策单元总数与环保规制下环保效率有效的决策单元数量相同,表明环保效率的有效性对节能约束的敏感性不强。节能效率、环保效率的有效性对规制强度变化的敏感性不同,说明工业行业所处的节能和环保的阶段不一致,二者之间还不够协调。

四、节能及环保约束对全要素生产率增长的影响分析

以规制全要素生产率增长作为参考系,用其他两种情境下全要素生产率增长发生的变化度量节能及环保约束对全要素生产率增长的影响,并据此判断节能与环保的一致性。

(一) 全要素生产率增长的趋势特征

与规制全要素生产率增长趋势相比,节能全要素生产率增速较慢,波动性也较小,表现为持续缓慢的增长,原因在于决策单元对节能的重视程度超过工业增长,加强能源约束,能源效率和工业增长效率有效性增强,但提升的潜力有限,导致节能全要素生产率增速小于规制全要素生产率增速,也就是说,在能源效

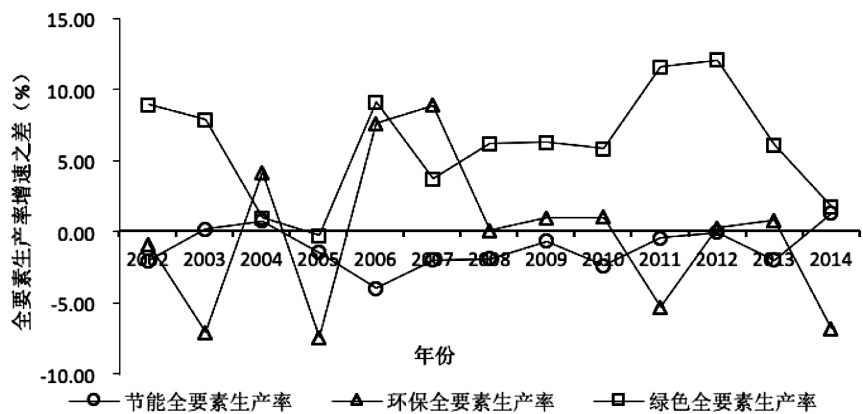


图1 逐渐增强全要素生产率相对于规制全要素生产率的增速变化

率较高的情况下,增强节能约束反而会降低全要素生产率增速。环保全要素生产率增速在样本期内一半的年份超过规制全要素生产率,但是其增长波动性较强,最大振幅达 18%,这表明环保约束对全要素生产率增长的作用不稳定。当逐一增强节能或环保约束时,对工业行业全要素生产率增长的推进作用有限,甚至阻碍了全要素生产率增长。然而,同时增强节能和环保约束的绿色规制下,全要素生产率具有比其他情境全要素生产率更高、更稳定的增速,也说明工业行业的绿色生产能力正不断提升。

(二) 全要素生产率增长的组间差异

将各组工业行业的节能、环保和绿色全要素生产率增速与规制全要素生产率增速作差后发现:节能规制对高耗能高污染行业全要素生产率提升的作用有限,环保规制和绿色规制对高耗能高污染行业全要素生产率提高的积极作用显著,这表明在当期技术水平下,加强环保规制和绿色规制对提升高

耗能高污染行业全要素生产率增速仍具有可行性,而增强节能规制的意义不大。节能和绿色规制对低能耗高污染行业全要素生产率提升的作用效果小于环保规制。节能、环保和绿色规制对低耗能低污染行业全要素生产率提升的作用不强。由于当期生产技术水平限制,持续增强对节能状况良好行业的节能约束,强制减少能源消费,可能造成其他投入要素替代比重过高,造成资源浪费,从而抑制全要素生产率增长。

(三) 单要素生产率增长差异分析

对各种情境下单要素生产率的计算是本文生产率测算模型的一个显著特点。将节能、环保和绿色工业增长生产率与规制工业增长生产率分别作差后发现,节能规制抑制了工业增长生产率增长,增强环保和绿色规制,有利于工业增长生产率提高。节能生产率增速高于绿色节能生产率,表明增强环保规制降低了节能生产率增速;环保生产率与绿色环保生产率增速基本相同,说明环保生产率增长对节能规制的敏感性不强。绿色规制下,环保生产率具有比节能生产率更高的增速。

从工业分组角度看,节能规制对工业生产率增长的抑制作用大于促进作用,环保规制和绿色规制对工业增长生产率的促进作用较为显著,特别是对高污染行业工业增长生产率增长起到了较强的促进作用。以上现象表明,高污染行业的污染治理还不够理想,甚至阻碍了工业增长生产率的提高,污染物减排空间仍然较大。环保规制对于提升高耗能行业的节能生产率有积极作用,但是却抑制了低耗能行业节能生产率增长。节能规制增强对三组工业行业环保生产率的提升作用有限。绿色规制下,三组行业环保生产率增速均高于节能生产率。

(四) 节能、环保约束对全要素生产率增长源泉的影响分析

三种情境下,技术进步都是全要素生产率增长的主要源泉,效率改善对全要素生产率增长的贡献较小,个别年份效率恶化甚至阻碍了全要素生产率增长。不同规制情境下,效率改善程度不同,2002—2011年,规制效率处于改善和恶化的不断波动中;2012—2014年,规制效率开始持续改善;样本期内,节能效率处于缓慢持续改善的态势,其最大波动幅度在2%以内;环保效率改善和绿色效率改善的变化趋势基本一致,样本期的一半年份内处于恶化的状态,环保效率改善的振幅较大。与规制效率变化相比,因增强节能或环保约束所导致的效率改善的变化方向和幅度不存在某种显著的规律性,因此,无法从对效率改善的作用上判断工业行业节能与环保的协调性。

技术的进步幅度与约束种类和强度关系密切,与规制技术进步相比,节能技术以低于规制技术进步的速度持续进步,表明节能规制抑制了技术进步;环保技术进步快于规制技术进步,说明环保规制对技术进步的促进作用显著;绿色技术由于受节能技术进步较慢的影响,进步幅度小于规制技术进步。从技术进步的累积效应和跨期溢出效应看,节能技术和绿色技术累积进步较规制技术累积进步缓慢,环保技术累积进步与规制技术累积进步趋势相同,大小关系处于持续小幅波动中。节能规制使得高耗能高污染行业累积技术进步幅度小于规制技术累积进步;环保规制对该组行业技术累积进步的贡献较大,绿色技术累积进步幅度小于环保技术累积进步,高于规制技术累积进步。低能耗高污染行业在节能、环保和绿色规制下的技术累积进步幅度均小于规制技术累积进步,其中,环保技术累积进步幅度高于节能和绿色技术累积进步。低耗能低污染行业的环保技术累积进步在2007年超过规制技术累积进步,同年,绿色技术累积进步超过节能技术累积进步,但是仍低于环保技术累积进步。增强节能规制不利于技术的累积进步;环保规制对技术累积进步的影响作用具有行业异质性,增强环保规制,有利于高耗能高污染行业和低耗能低污染行业的技术累积进步。

五、结论与对策建议

基于非径向方向性距离函数构建的效率测算框架,实现了不同研究情境下效率的计算。实证研究结果表明:工业行业与环保的协调性较弱,二者的不协调影响了工业行业绿色发展水平的提升。工业行业的绿色发展状态受限于环保的现实状态,以牺牲环境为代价换取工业增长的现象普遍存在。节能不一定环保,环保必然节能,表明工业节能绩效优于环保绩效。节能、环保和绿色规制对全要素生产率增长的影响具有显著的行业异质性。基于此,提出实现节能与环保相互促进、共同改善的对策

建议。

一是贯彻绿色发展理念,提高工业企业对环保重要性的认识。在工业生产中,对节能和环保的认识和重视程度不一致以及生产技术的节能偏向性,导致工业行业生产技术的节能效率、环保效率有效性及增长的不一致。前文实证研究表明工业行业在节能方面的现实状态优于环保状态,这是因为节能意味着降低成本,而环保则可能导致成本在短期内增加,但从长期看,环保能够提升工业生产的清洁水平,获得可持续发展。因此,增强企业的环保意识,提高其对环保收益的预期,有利于改善和纠正当下工业企业以环境换经济利益的投机行为。

二是节能政策与环保政策的互相协调和配合,不能为节能舍弃环保,也不能为环保而放弃节能。节能规制和环保规制对工业增长生产率增长分别起着促进和抑制作用。增强节能规制抑制技术进步,对全要素生产率增长有负向影响。增强环保规制有利于技术进步,却降低了全要素生产率增速的稳定性,对技术累积进步的影响作用具有行业异质性。增强对高耗能高污染行业和低耗能低污染行业的环保规制,有利于技术累积进步。绿色规制对全要素生产率增长的促进作用显著,表明优化节能与环保的政策组合,将有利于提升工业绿色发展水平。

三是通过技术创新实现节能与环保同步,实现绿色发展仅仅依靠强制节能和减排远远不够,还必须依靠技术节能和技术环保实现清洁生产、绿色生产。三种情境下,技术进步都是全要素生产率增长的主要源泉,效率改善对全要素生产率增长的贡献较小,个别年份效率恶化甚至阻碍了全要素生产率增长。同一技术水平下,效率的改善是有限的,而技术进步能够推动生产边界移动,从而推动生产率增长。因此,提高工业绿色全要素生产率和增强工业可持续发展能力,必须依靠节能技术进步和环保技术进步。

参考文献:

- [1] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. *European journal of operational research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [2] PITTMAN R. Multilateral productivity comparisons with undesirable outputs [J]. *Economic journal*, 1983, 93(372): 883-91.
- [3] FARE R, GROSSKOPF S, LOVELL C A K, et al. Measuring efficiency when some outputs are undesirable: a nonparametric approach [J]. *Review of economics and statistics*, 1989(2), 71(1): 90-98.
- [4] SHEPHARD R W. *Theory of cost and production functions* [M]. Princeton: Princeton University Press, 1970.
- [5] CHUNG Y H, FARE R, GROSSKOPF S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach [J]. *Environ manage*, 1997, 51(3): 229-240.
- [6] ZHOU P, POH K L, ANG B W. A non-radial DEA approach to measuring environmental performance [J]. *European journal of operational research*, 2007, 178(1): 1-9.
- [7] ZHOU P, ANG B W, WANG H. Energy and CO₂ emission performance in electricity generation: a non-radial directional distance function approach [J]. *European journal of operational research*, 2012, 221(3): 625-635.
- [8] WANG H, ZHOU P, ZHOU D Q. Scenario-based energy efficiency and productivity in China: a non-radial directional distance function analysis [J]. *Energy economics*, 2013, 40(2): 795-803.
- [9] ZHOU D Q, WANG Q W, SU B, et al. Industrial energy conservation and emission reduction performance in China: a city-level nonparametric analysis [J]. *Applied energy*, 2016, 166: 201-209.
- [10] 李玲. 中国工业绿色全要素生产率及影响因素研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2012.
- [11] 王兵, 黄人杰. 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 [J]. *产经评论*, 2014(1): 16-35.
- [12] KUMAR S. Environmentally sensitive productivity growth: a global analysis using Malmquist-Luenberger index [J]. *Eco-*

- logical economics ,2006 ,56(2) : 280-293.
- [13]陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J]. 经济研究 2009(4) : 41-55.
- [14]李兰冰. 中国全要素能源效率评价与解构——基于“管理—环境”双重视角[J]. 中国工业经济 2012(6) : 57-69.
- [15]王锋, 冯根福. 基于 DEA 窗口模型的中国省际能源与环境效率评估[J]. 中国工业经济 2013(7) : 56-68.
- [16]林伯强, 刘泓汛. 对外贸易是否有利于提高能源环境效率——以中国工业行业为例[J]. 经济研究 2015(9) : 127-141.
- [17]张志辉. 中国区域能源效率演变及其影响因素[J]. 数量经济技术经济研究 2015(8) : 73-88.
- [18]刘海英, 尚晶, 王殿武. 中国省际节能与环保一致性及其影响因素研究[J]. 资源科学 2018(12) : 2348-2540.
- [19]国家发展改革委员会, 国家能源局. 能源发展“十三五”规划[EB/OL]. 2017-01-17. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201701/W020170117335278192779.pdf>.
- [20]国家发展改革委员会, 国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030) [EB/OL]. 2017-04-25. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/W020170425509386101355.pdf>.
- [21]国家发展改革委员会, 国家能源局, 财政部, 等. 北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021) [EB/OL]. 2017-12-20. <http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/5248855/files/7ed7d7cda8984ae39a4e9620a4660c7f.pdf>.

(责任编辑: 黄明晴; 英文校对: 葛秋颖)

Coordination of Industrial Energy Saving Performance and Environmental Performance in China: From the Perspective of Total Factor Productivity Measured by the NDDF

SHANG Jing^{1 2}, LIU Haiying^{1 3}

- (1. Business School, Jilin University, Changchun 130012, China;
2. Heilongjiang Provincial Academy Social Science, Haerbin 150018, China;
3. Quantitative Economic Research Center, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: According to different combinations of energy conservation regulation and environmental regulation, three research scenarios are established. Based on non-radial directional distance function and Manquist productivity index, China's industrial total factor efficiency and total factor productivity growth index are measured to study the coordination of energy saving performance and environmental performance of industry. The empirical research shows that industrial energy-saving performance is better than environmental performance, the industrial green development is limited by environmental protection, and the phenomenon of industrial growth at the expense of environment still exists. Energy-saving performance and environmental performance have different sensitivities to changes in regulatory intensity. The impact of energy conservation, environmental protection and green regulation on total factor productivity growth has significant industry heterogeneity. Technological progress is the source of total factor productivity growth. To achieve mutual coordination and improvement of energy conservation and environmental protection, efforts should be made to improve corporate environmental awareness, to optimize the combination of energy conservation policies and environmental protection policies, and to promote energy conservation technologies and environmental technology advancement.

Key words: total factor productivity; energy saving performance; environmental performance; green regulation; non-radial directional distance function(NDDF)