

一个新的考虑非期望产出的 非径向 - 双目标 DEA 模型

宋马林¹, 曹秀芬¹, 吴杰²

1 安徽财经大学 统计与应用数学学院, 安徽 蚌埠 233030

2 中国科学技术大学 管理学院, 合肥 230026

摘要: 如何实现对环境效率更准确的定量评价, 是国际上从事 DEA 研究的学者们当前关注的问题之一。在传统 DEA 效率模型的基础上, 综合考虑评价过程中期望产出与非期望产出之间的差异以及实际生产过程中人们追求期望产出最大化和非期望产出最小化的双重目标, 构建非期望产出的非径向 - 双目标 DEA 环境效率评价模型, 通过线性加权和法转化为一个求最大值的单目标线性规划问题。研究表明, 这种新模型不仅可以分析 DEA 有效性与 Pareto 最优之间的关系, 还利用决策单元的“投影”获得投入和产出的可调整量, 从而提高考虑非期望产出的环境效率评价的精度。实证分析结果与现实情况的高度吻合, 说明这种新的非径向 - 双目标 DEA 环境效率模型是有效的。

关键词: 非期望产出; 非径向 - 双目标; 环境效率; 可调整量

中图分类号: X196

文献标识码: A

文章编号: 1672-0334(2011)04-0113-08

1 引言

环境问题正在成为影响社会经济可持续发展的难题之一。在已有的研究中, 不同国家的学者们提出大量的管理定量分析模型和方法, 用于解决复杂的环境问题^[1], 并把对环境效率的评价研究作为关注的一个重点方向。自从 Färe 等^[2]首次提出将数据包络分析 (DEA) 方法应用于环境效率评价, 已有越来越多的学者对此加以研究和发展。不过, 传统的 DEA 效率模型一般只考虑期望型产出, 往往忽视了实际生产过程中伴随期望型产出的生产而出现的非期望产出。例如, 在一个热电厂, 发电过程中不可避免地要排放 CO₂ 等非期望产出, 这时传统 DEA 效率模型关于产出最大化的假定就不适用。因此, 如何在传统 DEA 效率模型中考虑非期望产出成为一个具有重要理论意义和应用价值的课题。针对这个问题, Färe 等^[3]和 Seiford 等^[4]做出了一些奠基性的研究工作, Liang 等^[5]和 Hua 等^[6]也取得了一些新的研究成果。

但是, 如何在研究环境效率评价具体特征的基础上, 构建新的更加有效的 DEA 环境效率评价模型, 从而实现对环境效率更准确的定量评价, 已经成为国际上从事 DEA 研究的学者们当前关注的问题之一。本研究就上述问题的解决展开论证。

2 相关研究评述

一般情况下, 在实际生产过程中不可避免地会产生诸如各种环境污染物等非期望产出, 从而不能满足传统 DEA 效率模型关于产出最大化的假设, 因此需要在传统 DEA 效率模型中考虑非期望产出^[7]。在 DEA 效率模型中考虑非期望产出的方法大致可以分成 3 类。第一类是将非期望产出当做投入进行处理^[8], 但是无法反映真实的生产过程^[9]; 第二类是对非期望产出先做数据变换, 然后再采用传统的效率模型进行评价^[8,10], 但是由于加入一个很强的凸性约束, 使其只能在规模报酬可变的条件下求解; 第三类是 Färe 等^[2,11]提出并加以完善的弱可处置性生产

收稿日期: 2010-10-06 **修返日期:** 2011-04-18

基金项目: 国家自然科学基金 (70901069, 71171001); 教育部人文社会科学青年基金 (10YJC630208); 安徽高等学校省级自然科学研究重点项目 (KJ2011A001); 安徽省哲社规划项目 (AHSK07-08D25, AHSKF09-10D116); 安徽财经大学研究生创新基金 (ACYC2010BL11)

作者简介: 宋马林 (1972-), 男, 安徽蚌埠人, 毕业于中国科学技术大学, 获管理学博士学位, 现为安徽财经大学统计与应用数学学院副教授, 研究方向: 环境经济学、系统建模与分析等。E-mail: songmartin@163.com

技术,它能够同时适用于非参数 DEA 模型和参数效率模型,但这种技术随后也分别受到质疑^[12]和扩展^[13]。

在效率测度的类型上,最常采用的是与 Shephard 距离函数成倒数关系的径向效率测度,包括可同时扩张期望产出和减少非期望产出的双曲效率测度^[2]、将传统的 Shephard 距离函数拓展为更一般化的有向距离函数的一种特殊情形的测度^[14]、在考虑非期望产出的非参数 DEA 效率模型框架内进一步讨论非径向和基于松弛变量的效率测度^[15]。

伴随着国际社会对环境及可持续发展问题的关注,将环境因素纳入生产效率的研究中是非常必要的。由于 DEA 方法不限定生产前沿面的具体函数形式,具有很大灵活性,因此对原有效率评价方法的改进主要应用该方法。至此,效率分析模型,特别是非参数 DEA 方法在环境效率评价的研究中已经获得越来越广泛的应用^[16]。Färe 等^[2]最早运用投入产出的弱可处置性处理污染变量,即假设减少非期望输出一定会对其他正常产出产生影响,要想减少污染等非期望产出,则必须牺牲期望产出。

1989 年 Färe 等^[2]提出第一个处理非期望产出的 DEA 模型后,现有的考虑非期望产出的环境效率评价的实证分析多见于国外文献。Kordrostami 等^[17]提出一种具有链式内部结构的决策单元的环境效率评价问题,基于多部门的效率评价方法,提出相应的效率评价指标;Murty 等^[18]分别按不良产出的强、弱可处置性对印度制糖产业的环境效率、Malmquist 生产率指数和污染物的影子价格进行估算;Gomes 等^[19]开发出基于考虑非期望产出的非参数 DEA 效率模型的碳排放定额分配分析模型;Zhou 等^[16]提出基于环境 DEA 技术与 Shephard 距离函数的碳排放分解分析方法;Yang 等^[20]进一步构建非参数模型、径向效率测度的环境绩效 DEA 评价模型;Sueyoshi 等^[21]提出考虑碳排放的生产效率评价的非参数模型。可见,国外研究者已经开发出各种各样的考虑非期望产出

的 DEA 效率模型,用于包括环境绩效评价、环境管制影响评价、污染物排放定额分配、污染物影子价格估计等环境系统评价分析问题。

当前,在全球减排压力下,可持续发展已经被定为中国的基本国策,发展低碳经济刻不容缓^[22]。由于中国对环境效率研究起步较晚,对考虑非期望产出理论认识相对滞后,有关考虑非期望产出的环境效率的系统研究相当薄弱,只有少量零散的实证分析散落于相关文献之中,包括卞亦文^[23]、杜春丽等^[24]、李静等^[25]、刘勇等^[26]、王群伟等^[27]和解百臣等^[28]的成果。

经过努力,国内外学者们已经提出一些考虑非期望产出的 DEA 效率模型,用于研究环境效率评价等问题,但总体来看,在环境效率评价研究中,考虑非期望产出的 DEA 效率模型的完善和应用尚有亟待解决的问题。上述研究主要集中在非参数 DEA 技术方面,仍然未能分析 DEA 有效性与 Pareto 最优之间的关系,也无法利用决策单元的“投影”获得投入和产出的可调整量。因此,本研究基于这种考虑对模型扩展,构建一个新的非径向-双目标 DEA 环境效率模型,以提高考虑非期望产出的环境效率评价的精度,这对完善基于 DEA 的环境效率评价方法以及深入理解中国环境系统、制定更为有效和完备的环境政策、发挥环境保护促进经济发展方式转变的综合作用都是非常必要的。

3 模型构建

环境效率评价工作中至关重要的环节是如何测度非期望产出,图 1 描述了考虑非期望产出的环境效率评价模型的分析结构。从图 1 可知,在生产过程中,随着各个决策单元(decision making unit, DMU)增加投入,期望产出和非期望产出也会增加。同时,由于生产资料是有限的,投入的增加也是有限的,如一味地降低非期望产出,势必会减少期望产出,所以必须在它们之间找到均衡点,寻求效率的最优化。

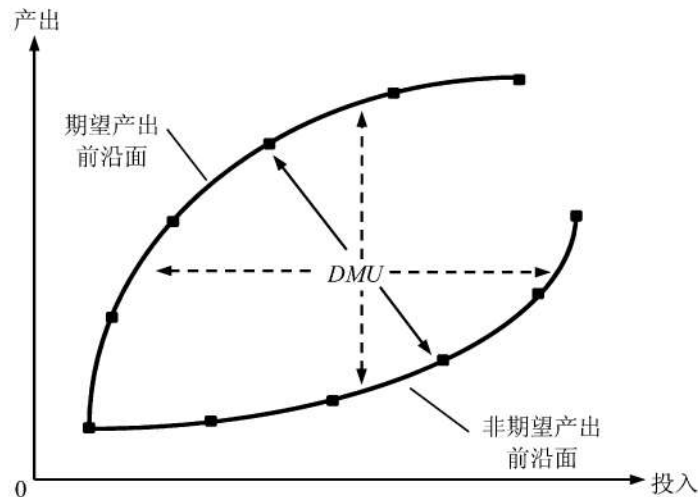


图 1 投入、期望产出和非期望产出

Figure 1 Inputs, Desirable Outputs and Undesirable Outputs

本研究构造和分析非径向-双目标 C^2R 模型,研究非径向 C^2R 模型的 DEA 有效性和 Pareto 最优,并针对具有非 DEA 有效的决策单元进行“投影”分析,最后测算出考虑非期望产出的非 DEA 有效的决策单元实现“比较最优”的可调整量。

3.1 非径向-双目标 C^2R 模型

在实际生产过程中,人们往往希望在投入一定的情况下,期望产出越多越好,非期望产出越少越好;同时,评价过程中各期望产出之间、各非期望产出之间以及期望产出与非期望产出之间存在差异。基于这种思想,构建考虑非期望产出的非径向-双目标 DEA 环境效率模型。

假设有 n 个决策单元(DMU),每个决策单元都有 $i(i = 1, 2, \dots, m)$ 项投入、 $r(r = 1, 2, \dots, s)$ 项期望产出和 $t(t = 1, 2, \dots, k)$ 项非期望产出。决策单元 j 用 $DMU_j(1 \leq j \leq n)$ 表示,记 X_j 为 DMU_j 的投入向量, $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$; Y_j 为 DMU_j 的期望产出向量, $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})^T$; Z_j 为 DMU_j 的非期望产出向量, $Z_j = (z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{kj})^T$; ω 为 m 项投入对应的权向量, $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$; μ 为 s 项期望产出对应的权向量, $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s)^T$; γ 为 k 项非期望产出对应的权向量, $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k)^T$ 。 ω 、 μ 和 γ 均为变量,每个向量括号外上角标的 T 表示向量转置,下同。

考察第 j_0 个决策单元 DMU_{j_0} , 建立双目标规划模型,即

$$\begin{aligned} & \max \sum_{r=1}^s \alpha_r; \min \sum_{t=1}^k \beta_t \\ & s. t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{i0} & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq \alpha_r y_{r0} & r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j z_{tj} \leq \beta_t z_{t0} & t = 1, 2, \dots, k \\ \lambda_j \geq 0, \alpha_r \geq 0, \beta_t \geq 0 & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, α_r 为在投入一定的条件下期望产出的效率值; β_t 为在投入一定的条件下非期望产出的效率值; λ_j 为投入组合的权重,是标量。作为双目标规划模型,(1)式的经济意义十分明显。如果 α_r 的最优值大于 1, β_t 的最优值小于 1, 则可以找到一个假想的决策单元,它可以不用不大于被评价决策单元 DMU_{j_0} 的投入,获得比 DMU_{j_0} 更多的期望产出,产生比 DMU_{j_0} 更少的非期望产出,从而表明被评价的决策单元 DMU_{j_0} 为非 DEA 有效。所以,只有当 $\alpha_r = 1, \beta_t = 1$ 时,被评价的决策单元才 DEA 有效。

采用线性加权和法处理双目标规划模型(1)式,根据两个目标以及其中各个指标的重要性程度,对双目标函数赋权,进而成为单目标的最大化模型(2)式。因为把双目标规划模型(1)式中的两个目标函数分别赋以权重,使单独的两个目标函数变为一个加权目标函数,相应的,求解双目标规划模型(1)式

也就简化成为求解单目标规划模型(2)。即

$$\begin{aligned} & \max h_0 = \sum_{r=1}^s \theta_r \alpha_r - \sum_{t=1}^k \xi_t \beta_t \\ & s. t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{i0} & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq \alpha_r y_{r0} & r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j z_{tj} \leq \beta_t z_{t0} & t = 1, 2, \dots, k \\ \lambda_j \geq 0, \alpha_r \geq 0, \beta_t \geq 0 & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, h_0 为第 j_0 个决策单元在综合考虑期望产出和非期望产出后的效率值, θ_r 为决策者对第 r 项期望产出的重视程度, ξ_t 为决策者对第 t 项非期望产出(如污染物)的优先控制程度, $\sum_{r=1}^s \theta_r + \sum_{t=1}^k \xi_t = 1, 0 < \theta_r < 1, 0 < \xi_t < 1$ 。 θ_r 值越大表明决策者越希望生产此项期望产出, ξ_t 值越大表明决策者越优先考虑减少此项污染物的排放。

(1)式和(2)式的经济含义均为,在投入不超过 X_0 的情况下,尽可能的提高期望产出和降低非期望产出。若最优解 α_r^* 和 β_t^* 均为 1, 即 DMU_{j_0} 的期望产出不能进一步提高,非期望产出也不能再降低,则说明决策单元 DMU_{j_0} 为 DEA 有效;否则,为非 DEA 有效。

3.2 DEA 有效性与 Pareto 最优

线性规划模型(2)式的对偶规划为

$$\begin{aligned} & \min \omega^T X_0 \\ & s. t. \begin{cases} \omega^T X_j - \mu^T Y_j + \gamma^T Z_j \geq 0 & j = 1, 2, \dots, n \\ \mu^T Y_0 \geq e_s^T \theta \\ \gamma^T Z_0 \leq e_k^T \xi \\ \omega \geq 0, \mu \geq 0, \gamma \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s)^T$; $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$; e_s 为值都为 1 的 s 维列向量, $e_s = (1, 1, \dots, 1)^T \in E^s, E^s$ 为向量集; e_k 为值都为 1 的 k 维列向量, $e_k = (1, 1, \dots, 1)^T \in E^k, E^k$ 为向量集。

定义 1 若(3)式存在最优解 $\omega^0, \mu^0, \gamma^0$, 满足 $\omega^0 > 0, \mu^0 > 0, \gamma^0 > 0$, 且目标最优值为 $\omega^{0T} X_0 = e_s^T \theta - e_k^T \xi$, 则称 DMU_{j_0} 为 DEA 有效。

含有非期望产出的生产可能集为

$$G = \{ (X, Y, Z) \mid \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j \leq X, \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j \geq Y, \sum_{j=1}^n \lambda_j Z_j \leq Z, \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \}$$

构建多目标规划,即

$$\begin{cases} \min F(X, Y, Z) \\ (X, Y, Z) \in G \end{cases}$$

其中, $F(X, Y, Z) = \begin{pmatrix} X \\ -Y \\ Z \end{pmatrix}$

定义2 设 $(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z}) \in G$, 若不存在 $(X, Y, Z) \in G$ 满足 $F(X, Y, Z) < F(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z})$, 则称 $(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z})$ 为多目标规划的弱 Pareto 解。

定义3 设 $(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z}) \in G$, 若不存在 $(X, Y, Z) \in G$ 满足 $F(X, Y, Z) \leq F(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z})$, 则称 $(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z})$ 为多目标规划的 Pareto 解。

定理1 若 (X_0, Y_0, Z_0) 为多目标规划的 Pareto 解, 则决策单元 DMU_{j_0} 为 DEA 有效。

证明: 假设决策单元 DMU_{j_0} 为非 DEA 有效, 则其最优值 $\omega^{0T} X_0 > e_s^T \theta - e_k^T \xi$, $h_0 < e_s^T \theta - e_k^T \xi$, 说明该企业可以通过进一步缩减投入、增加期望产出和降低非期望产出, 使最优值达到 $(e_s^T \theta - e_k^T \xi)$, 即使评价单元达到 DEA 相对有效。

设 (X_*, Y_*, Z_*) 为企业调整后的投入产出量, 有

$$X_* < X_0 \quad Y_* > Y_0 \quad Z_* < Z_0$$

现在将 (X_*, Y_*, Z_*) 看做是另一个决策单元 DMU_{j_*} 的投入产出量代入到(2)式中, 根据前面的分析, 已知 DMU_{j_*} 为 DEA 有效, 说明 $\alpha_r = 1, \beta_t = 1$, 于是可以得出 (X_*, Y_*, Z_*) 满足下面的条件, 即

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j &\leq X_* \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j &\leq Y_* \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Z_j &\leq Z_* \\ \lambda_j &\geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

从而有 $(X_*, Y_*, Z_*) \in G$, 说明存在一个 $(X_*, Y_*, Z_*) \in G$ 满足

$$F(X_*, Y_*, Z_*) < F(X_0, Y_0, Z_0)$$

根据定义2, 说明 (X_0, Y_0, Z_0) 不是多目标规划的弱 Pareto 解, 当然也就不是 Pareto 解, 显然这与已知条件 (X_0, Y_0, Z_0) 为多目标规划的 Pareto 解相矛盾, 故决策单元 DMU_{j_0} 是 DEA 有效的。证毕。

3.3 决策单元的“投影”

若决策单元是非 DEA 有效的, 可以通过调整投入和产出量使其成为 DEA 有效, 经过调整后的投入产出量即可称为决策单元在生产前沿面上的“投影”。下面主要针对具有非 DEA 有效的决策单元进行分析。

将松弛变量 S_i^-, S_r^+, S_t^- 引入(2)式, 有

$$\begin{aligned} \max h_0 &= \sum_{r=1}^s \theta_r \alpha_r - \sum_{t=1}^k \xi_t \beta_t \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + S_i^- = x_{i0} & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - S_r^+ = \alpha_r y_{r0} & r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j z_{tj} + S_t^- = \beta_t z_{t0} & t = 1, 2, \dots, k \\ \lambda_j \geq 0, \alpha_r \geq 0, \beta_t \geq 0, S_i^- \geq 0, S_r^+ \geq 0, \\ S_t^- \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

定义4 设 $\lambda_j^0, \alpha_r^0, \beta_t^0, S_i^{-0}, S_r^{+0}, S_t^{-0}$ 为(4)式的最优解, 令

$$\begin{aligned} \hat{x}_{i0} &= x_{i0} - S_i^{-0} \\ \hat{y}_{r0} &= \alpha_r^0 y_{r0} + S_r^{+0} \\ \hat{z}_{t0} &= \beta_t^0 z_{t0} - S_t^{-0} \end{aligned}$$

称 $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$ 为 DMU_{j_0} 在生产可能集 G 的生产前沿面上的“投影”。

由于 DMU_{j_0} 为非 DEA 有效, 说明 α_r^0 和 β_t^0 均不全为 1, S_i^{-0}, S_r^{+0} 和 S_t^{-0} 也不全为 0。根据线性规划的松弛定理, 对偶模型(3)式的最优解向量均大于 0, 即 $\omega^0 > 0, \mu^0 > 0, \gamma^0 > 0$ 。

定理2 设 DMU_{j_0} 的“投影”为 $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$, 该“投影”是 DEA 有效的。

证明: 由定义4有

$$\begin{aligned} \hat{x}_{i0} &= \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 x_{ij} \\ \hat{y}_{r0} &= \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 y_{rj} \\ \hat{z}_{t0} &= \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 z_{tj} \end{aligned}$$

对于(3)式的第一个条件, 根据数学规划库恩-塔克条件中的互补条件, 有

$$\begin{aligned} \lambda_j^0 (\omega^{0T} X_j - \mu^{0T} Y_j + \gamma^{0T} Z_j) &= 0 \\ j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

将这 n 个等式加总, 有

$$\omega^{0T} \hat{X}_0 - \mu^{0T} \hat{Y}_0 + \gamma^{0T} \hat{Z}_0 = 0$$

对 $\forall (X, Y, Z) \in G$, 有

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j \leq X \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j \geq Y \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j Z_j \leq Z \\ \lambda_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

又 $\omega^{0T} X_j - \mu^{0T} Y_j + \gamma^{0T} Z_j \geq 0$, 于是有

$$\begin{aligned} &\omega^{0T} X - \mu^{0T} Y + \gamma^{0T} Z \\ &\geq \omega^{0T} \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j X_j \right) - \mu^{0T} \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j \right) + \gamma^{0T} \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j Z_j \right) \\ &= \sum_{j=1}^n \lambda_j (\omega^{0T} X_j - \mu^{0T} Y_j + \gamma^{0T} Z_j) \geq 0 \\ &= \omega^{0T} \hat{X}_0 - \mu^{0T} \hat{Y}_0 + \gamma^{0T} \hat{Z}_0 \end{aligned}$$

所以, $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$ 是多目标规划的 Pareto 解。

事实上, 若 $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$ 不是多目标规划的 Pareto 解, 那么根据定义3, 存在 $(X', Y', Z') \in G$, 满足 $X' \leq \hat{X}_0, Y' \geq \hat{Y}_0, Z' \leq \hat{Z}_0$ 。又由于 $\omega^0 > 0, \mu^0 > 0, \gamma^0 > 0$, 故

$$\omega^{0T} X' - \mu^{0T} Y' + \gamma^{0T} Z' < \omega^{0T} \hat{X}_0 - \mu^{0T} \hat{Y}_0 + \gamma^{0T} \hat{Z}_0$$

这与前面的证明相矛盾,故 $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$ 是多目标规划的 Pareto 解,再根据定理 1, $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$ 为 DEA 有效。证毕。

由定理 2 可知,对于非 DEA 有效的决策单元,其“投影”是 DEA 有效的,所以在实际生产过程中,人们可以寻求生产的“投影”量以达到 DEA 相对有效。将“投影”表达式重新改写,有

$$\begin{aligned} \hat{x}_{j_0} - x_{j_0} &= -S_i^{-0} \\ \hat{y}_{j_0} - y_{j_0} &= (\alpha_r^0 - 1)y_{j_0} + S_r^{+0} \\ \hat{z}_{j_0} - z_{j_0} &= -[(1 - \beta_t^0)z_{j_0} + S_t^{-0}] \end{aligned}$$

于是,可以得到决策单元 j_0 对投入产出的可调整量,即对第 i 种投入,可缩减的量为 S_i^{-0} ;对第 r 种期望产出,可提高的量为 $(\alpha_r^0 - 1)y_{j_0} + S_r^{+0}$;对第 t 种非期望产出,可减少的量为 $[(1 - \beta_t^0)z_{j_0} + S_t^{-0}]$ 。

4 实证分析

选取能源消耗总量 (TEC) 和全社会固定资产投资总额 (TIFA) 作为投入指标,国内生产总值 (GDP) 作为期望产出指标,工业废气排放量 (GE)、工业废水排放量 (WD) 和工业固体废物产生量 (SWG) 作为非期望产出指标,并利用 1990 年至 2008 年的相关数据进行实证分析,考察全国的环境效率水平。将 19 个年份看做 19 个决策单元,对每一年的环境效率进行绩效评价。原始数据来源于《中国统计年鉴》(1991 年至 2009 年)和《新中国 55 年统计资料汇编》。

根据 (2) 式,由于 θ_r 和 ξ_t 仅仅影响目标函数值,对约束条件没有影响,且取值具有主观性,故可以假设每一年对期望产出和非期望产出的权重是固定的,具有 DEA 有效的决策单元,其最优值都为 $h_{\max} = \sum_{r=1}^s \theta_r - \sum_{t=1}^k \xi_t, n = 19, m = 2, s = 1, k = 3$ 。假设 $\theta_1 = 0.5, \xi_1 = 0.2, \xi_2 = \xi_3 = 0.15$ (取值不唯一),具有 DEA 有效的决策单元, $\alpha_1 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1$, 最优值 $h_{\max} = 0.5 - (0.2 + 0.15 + 0.15) = 0$ 。利用 Lingo 9.0 软件求解,得到的结果见表 1。

由表 1 可以看出,在 1990 年至 2008 年期间,中国的环境效率水平在 1990 年、1991 年、1997 年、2000 年、2001 年、2002 年、2003 年、2007 年和 2008 年这 9 年里达到了 DEA 有效,其余的 10 年均未达到 DEA 有效。1993 年和 1994 年的国内生产总值有待进一步提高,同时环境污染也比较严重,这两年需要提高环境污染的治理能力,这正反映出中国 1992 年开始的新一轮经济高速增长,造成在 1993 年和 1994 年这两年环境间环境问题凸显;剩余的 8 年,国内生产总值虽然达到了预期目标,但是环境污染问题没有受到重视,以致降低了环境效率水平,所以在生产过程中应该合理地控制污染物的排放量。这一结论与这些年中国的现实情况吻合。

表 1 环境效率评价结果

Table 1 Results of Environmental Efficiency Evaluation

DMU	期望产出		非期望产出			最优值 h
	α_1	β_1	β_2	β_3		
1990	1	1	1	1	0	
1991	1	1	1	1	0	
1992	1	0.62	0.53	0.58	0.21	
1993	1.12	0.59	0.35	0.53	0.31	
1994	1.07	0.73	0.47	0.68	0.21	
1995	1	0.79	0.55	0.78	0.14	
1996	1	0.91	0.76	0.89	0.07	
1997	1	1	1	1	0	
1998	1	0.97	0.81	0.86	0.05	
1999	1	0.98	0.89	0.94	0.03	
2000	1	1	1	1	0	
2001	1	1	1	1	0	
2002	1	1	1	1	0	
2003	1	1	1	1	0	
2004	1	0.95	0.99	0.97	0.01	
2005	1	0.95	0.90	0.95	0.03	
2006	1	0.89	0.92	0.94	0.04	
2007	1	1	1	1	0	
2008	1	1	1	1	0	

注:表中数据根据 (2) 式利用 Lingo 9.0 软件计算得到。

根据 Lingo 9.0 软件计算的结果,可以得到 (4) 式中松弛变量的值。由于具有 DEA 有效的模型松弛变量均为 0,故只考虑 10 个非有效决策单元对应的松弛变量。结果显示,所有的非有效决策单元投入产出对应的松弛变量中,只有能源消耗总量这一行对应的松弛变量非零,其余的投入产出对应的松弛变量均为 0,将非零松弛变量整理如表 2 所示。

表 2 能源消耗总量对应的松弛变量

Table 2 Slack Variables of Total Energy Consumption

DMU	S_1^{-0}	DMU	S_1^{-0}
1992	40 539.45	1998	15 090.15
1993	60 970.79	1999	8 784.21
1994	51 005.62	2004	20 187.84
1995	42 982.19	2005	26 695.15
1996	25 559.03	2006	28 017.95

注:表中数据根据 (4) 式利用 Lingo 9.0 软件计算得到。

表3 10个非有效决策单元投入和产出的可调整量
Table 3 Adjustable Volumes of Non-Effective Decision Making Units

DMU	TEC 可缩减量 (万吨)	TIFA 可缩减量 (亿元)	GDP 应增加量 (亿元)	GE 可减少量 (亿标准立方米)	WD 可减少量 (万吨)	SWG 可减少量 (万吨)
1992	40 539.45	0	0	34 082.81	1 091 035.00	26 095.70
1993	60 970.79	0	4 066.23	38 562.81	1 423 550.00	29 299.80
1994	51 005.62	0	3 167.28	25 942.86	1 149 493.00	19 454.10
1995	42 982.19	0	0	22 420.41	988 346.90	14 373.90
1996	25 559.03	0	0	10 352.99	493 932.60	6 948.87
1998	15 090.15	0	0	3 763.95	371 379.90	10 959.10
1999	8 784.21	0	0	1 962.39	222 167.80	4 758.31
2004	20 187.84	0	0	11 574.25	4 463.10	3 561.25
2005	26 695.15	0	0	14 107.13	246 640.60	6 723.75
2006	28 017.95	0	0	37 646.77	190 070.80	9 053.10

注:表中数据根据(2)式和(4)式计算得到。

根据表达式

$$\Delta x_{y_0} = -S_i^{-0}$$

$$\Delta y_{y_0} = (\alpha_r^0 - 1)y_{y_0} + S_r^{+0}$$

$$\Delta z_{y_0} = -[(1 - \beta_i^0)z_{y_0} + S_i^{-0}]$$

计算投入和产出的可调整量,结果如表3所示。

由表3可以看出,10个决策单元在固定资产投资总量方面均不需要缩减;对于国内生产总值,1993年应提高4 066.23亿元,1994年应提高3 167.28亿元,其余年份不需要增加,这与表1的效率评价结果是一致的;对于能源消费总量、废气、废水和固定废物产生量,10个决策单元需要减少相应的量。通过调整,就能够提高环境效率水平,达到DEA有效。

5 结论

本研究在传统DEA效率模型的基础上,综合考虑评价过程中期望产出与非期望产出之间的差异以及实际生产过程中人们追求期望产出最大化和非期望产出最小化的双重目标,构建非期望产出的非径向-双目标DEA环境效率评价模型,并通过线性加权和法转化为一个求最大值的单目标线性规划问题。研究表明,这种新模型不仅可以分析DEA有效性与Pareto最优之间的关系,还利用决策单元的“投影”获得投入和产出的可调整量,从而提高考虑非期望产出的环境效率评价的精度。

基于新模型的实证分析结果给出期望产出和非期望产出的环境效率评价,从1990年到2008年,有

9年是DEA有效的,其余10年是非DEA有效的。这表明中国在增加国内生产总值的同时,应该加大控制环境污染的力度,对于高耗能、高排放的重点行业,要把能效和污染排放指标作为行业准入的必要条件,同时对于污染程度高、危害性大的工厂或企业应进行严格控制甚至关闭,以进一步有效地提高环境绩效水平。上述实证结果与1990年至2008年间中国的现实情况吻合,充分说明本研究设计的非径向-双目标DEA环境效率模型是有效的。

在现实中,由于投入的增加是有限的,如果一味地降低非期望产出,势必会减少期望产出,所以必须在它们之间寻求均衡,实现效率的最优化。然而,在传统的非期望产出DEA模型中,这一点一直未能得到有效的体现。本研究对传统的非期望产出DEA模型进行修正和改进,构建具有较高精度的同时考虑期望产出最大化和非期望产出最小化的双重目标的DEA模型,拓宽了模型的应用范围,以更好地服务于实践。但是,需要进一步关注的是,在社会生产过程中,还会面临投入的分配问题。在包含生产环节和污染处理环节的生产链中,如何分配生产资源和处理非期望产出造成的损失是人们必须要面对的。如果在生产方面投入分配过多,则不能有效处理非期望产出,使得非期望产出对环境造成损害,一方面超过政府规定的排污标准就会受到责罚,另一方面也间接地损害了公众形象;如果在非期望产出方面投入过多,则会造成产出不足,无法实现利润最大化。

因此,如何在生产系统总投入固定的情况下,确定有效分配生产资源和减排资源的多阶段的最优策略,将是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] Jebaraj S, Iniyar S. A review of energy models [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2006, 10(4):281-311.
- [2] Färe R, Grosskopf S, Lovell C A K, Pasurka C. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: A nonparametric approach [J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1989, 71(1):90-98.
- [3] Färe R, Grosskopf S, Pasurka C A, Jr. Pollution abatement activities and traditional productivity [J]. *Ecological Economics*, 2007, 62(3/4):673-682.
- [4] Seiford L M, Zhu J. A response to comments on modeling undesirable factors in efficiency evaluation [J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 161(2):579-581.
- [5] Liang Liang, Li Yongjun, Li Shibing. Increasing the discriminatory power of DEA in the presence of the undesirable outputs and large dimensionality of data sets with PCA [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3):5895-5899.
- [6] Hua Zhongsheng, Bian Yiwen. Performance measurement for network DEA with undesirable factors [J]. *International Journal of Management and Decision Making*, 2008, 9(2):141-153.
- [7] Scheel H. Undesirable outputs in efficiency valuations [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 132(2):400-410.
- [8] Hailu A, Veeman T S. Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: An application to the Canadian pulp and paper industry [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2001, 83(3):605-616.
- [9] Liu W B, Meng W, Li X X, Zhang D Q. DEA models with undesirable inputs and outputs [J]. *Annals of Operations Research*, 2010, 173(1):177-194.
- [10] Hua Zhongsheng, Bian Yiwen, Liang Liang. Eco-efficiency analysis of paper mills along the Huai River: An extended DEA approach [J]. *Omega*, 2007, 35(5):578-587.
- [11] Färe R, Grosskopf S, Hernandez-Sancho F. Environmental performance: An index number approach [J]. *Resource and Energy Economics*, 2004, 26(4):343-352.
- [12] Zhou Peng, Ang B W, Poh K L. Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies [J]. *Energy Economics*, 2008, 30(1):1-14.
- [13] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1):32-41.
- [14] Chung Y, Färe R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51(3):229-240.
- [15] Zhou Peng, 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.
- [16] Zhou Peng, Ang B W, Poh K L. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(1):1-18.
- [17] Kordrostami S, Amirteimoori A. Un-desirable factors in multi-component performance measurement [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2005, 171(2):721-729.
- [18] Murty M N, Kumar S, Paul M. Environmental regulation, productive efficiency and cost of pollution abatement: A case study of the sugar industry in India [J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 79(1):1-9.
- [19] Gomes E G, Lins M P E. Modelling undesirable outputs with zero sum gains data envelopment analysis models [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2008, 59(5):616-623.
- [20] Yang Hongliang, Pollitt M. The necessity of distinguishing weak and strong disposability among undesirable outputs in DEA: Environmental performance of Chinese coal-fired power plants [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(8):4440-4444.
- [21] Sueyoshi T, Goto M. DEA approach for unified efficiency measurement: Assessment of Japanese fossil fuel power generation [J]. *Energy Economics*, 2011, 33(2):292-303.
- [22] 赵珊珊. 国际碳排放交易的成本与收益分析 [J]. *科学决策*, 2011(5):36-59.
Zhao Shanshan. Analysis of cost and revenue of international Carbon emission trade [J]. *Scientific Decision Making*, 2011(5):36-59. (in Chinese)
- [23] 卞亦文. 基于 DEA 的环境绩效评价研究现状及拓展方向 [J]. *商业时代*, 2009(6):64-65.
Bian Yiwen. Research and development orientation of environmental efficiency evaluation based on DEA [J]. *Commercial Times*, 2009(6):64-65. (in Chinese)
- [24] 杜春丽, 成金华. 我国钢铁产业循环经济效率评价: 2003-2006 [J]. *产业经济研究*, 2009(5):7-14.
Du Chunli, Cheng Jinhua. Evaluation on circular e-

- economy efficiency about iron and steel industry in China: 2003 - 2006 [J]. *Industrial Economics Research*, 2009(5):7-14. (in Chinese)
- [25] 李静,程丹润. 基于 DEA-SBM 模型的中国地区环境效率研究[J]. *合肥工业大学学报:自然科学版*, 2009,32(8):1208-1211.
Li Jing, Cheng Danrun. Eco-efficiency across regions in China based on DEA-SBM model [J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2009,32(8):1208-1211. (in Chinese)
- [26] 刘勇,李志祥,李静. 环境效率评价方法的比较研究[J]. *数学的实践与认识*, 2010,40(1):84-92.
Liu Yong, Li Zhixiang, Li Jing. Comparative study on DEA methods of environmental efficiency measurement [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2010,40(1):84-92. (in Chinese)
- [27] 王群伟,周德群,葛世龙,周鹏. 环境规制下的投入产出效率及规制成本研究[J]. *管理科学*, 2009,22(6):111-119.
Wang Qunwei, Zhou Dequn, Ge Shilong, Zhou Peng. Research on input-output efficiency and regulatory cost under environmental regulation [J]. *Journal of Management Science*, 2009, 22(6):111-119. (in Chinese)
- [28] 解百臣,徐大鹏,刘明磊,许睿. 基于投入型 Malmquist 指数的省际发电部门低碳经济评价[J]. *管理评论*, 2010,22(6):119-128.
Xie Baichen, Xu Dapeng, Liu Minglei, Xu Rui. Low carbon economy study on provinces' power generation sector based on input Malmquist index [J]. *Management Review*, 2010,22(6):119-128. (in Chinese)

A New Non-radial and Bi-objective DEA Model Considering Undesirable Outputs

Song Malin¹, Cao Xiufen¹, Wu Jie²

¹ School of Statistics and Applied Mathematics, Anhui University of Finance and Economics, Bengbu 233030, China

² School of Management, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: It is one of the issues of current concern for international researches engaged in DEA that how to achieve more accurate results of environmental efficiency evaluation. A new DEA model on environmental efficiency evaluation considering non-radial and bi-objective is established, from which it is transformed as a single objective linear programming problem to find the maximum by linear weighted plus. The results illustrates that this new model can not only analyze the effectiveness of DEA and the relationship between it and Pareto Optimality, but also obtain adjustable volumes of inputs and outputs by using the "projection" of decision making units. The conclusions of subsequent empirical analyses are highly consistent with the very reality in China, which indicate that this new model promotes the accuracy of environmental efficiency evaluation.

Keywords: undesirable outputs; non-radial and bi-objective; environmental efficiency; adjustable volume

Received Date: October 6th, 2010 **Accepted Date:** April 18th, 2011

Funded Project: Supported by the National Natural Science Foundation of China (70901069, 71171001), Ministry of Education Foundation of Humanities and Social Sciences (10YJC630208), Key Foundation of Natural Science for Colleges and Universities in Anhui (KJ2011A001), Philosophy and Social Science Foundation of Anhui (AHSK07-08D25, AHSKF09-10D116) and Innovation Fund for Graduate Students of AUFE (ACYC2010BL11)

Biography: Dr. Song Malin, an Anhui Bengbu native (1972 -), graduated from the University of Science and Technology of China and is an associate professor in the School of Statistics and Applied Mathematics at Anhui University of Finance and Economics. His research interests include environmental economics, system modeling and analysis, etc. E-mail: songmartin@163.com □