

非期望产出、影子价格与无效决策单元的改进^①

宋马林¹, 吴 杰², 杨 力², 曹秀芬¹, 梁 樑²

(1. 安徽财经大学统计与应用数学学院, 蚌埠 233030;

2. 中国科学技术大学管理学院, 合肥 230026)

摘要: 本文首先建立考虑非期望产出的非参数 DEA 效率模型, 从影子价格的视角论证 DEA 有效的充分必要条件, 计算出无效 DMU 的可改进量, 从而构建了一个考虑非期望产出、影子价格以及无效决策单元的改进的非参数 DEA 模型, 然后通过一个算例进行实证分析, 将这个新的模型和经典的 SBM 模型进行比较, 结果显示两者的相关系数超过 0.9, 而且这一新模型还显示出一些 SBM 模型所没有的优良特性. 这种新的非参数方法不仅能够对环境效率水平进行测度评价, 而且相较于参数方法而言, 它不需要事先设定规范的函数形式, 对指标数据也不需要考虑计量单位问题, 具有比较独特的优势.

关键词: 非期望产出; 影子价格; 决策单元; 调整量

中图分类号: F224; F205 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2012)10-0001-10

0 引 言

现代生产效率分析用于环境问题的研究, 主要起始于 20 世纪 80 年代. 伴随着许多国家对环境问题关注的热潮, 效率分析方法被广泛应用于环境系统评价中^[1]. 数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 方法作为评价决策单元 (DMU) 相对有效性的一种行之有效的非参数方法, 由于其不需考虑投入与产出之间的函数关系、不需预先估计参数、许多情况下不需设置任何权重假设以及能够有效避免主观因素等优点, 自从 Färe 等^[2]首次提出将 DEA 方法应用于环境效率评价工作中, 已被越来越多的研究者加以研究和发展. 不过, 传统的 DEA 效率模型一般只考虑期望型产出, 却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, 在一个造纸厂中, 造纸过程中不可避免地要排放污

染物等非期望产出. 这时, 传统 DEA 效率模型关于产出最大化的假定并不适用. 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, 国际上的一些著名学者, 如 Färe^[3-7] 和 Seiford^[8] 等人, 做出了一些奠基性的研究工作.

尽管与传统 DEA 效率模型相关的研究取得了许多重要的成果, 但对考虑非期望产出的 DEA 效率模型的研究成果并不多^[9]. 环境效率评价实践具有广泛的现实需求, 开展这方面的研究具有重要的现实意义. 另外, 由于在现实生产系统中, 影子价格所具有的虚拟性、最优性、确定性、可及性和方向性, 符合环境效率评价的需要, 使得构建同时考虑非期望产出、影子价格以及无效决策单元的改进的非参数模型, 无疑拓展了环境效率评价方法的研究范围, 由此得出的研究成果将具有一定的科学意义.

① 收稿日期: 2010-11-09; 修订日期: 2011-01-02.

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体资助项目 (70821001); 国家自然科学基金资助项目 (71171001; 70901069); 教育部人文社会科学研究青年基金资助项目 (10YJC630208); 安徽省哲社规划资助项目 (AHSK07-08D25; AHSKF09-10D116; AHSK09-10D14).

作者简介: 宋马林 (1972—), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 副教授. Email: songml@aufe.edu.cn

1 文献述评

自从 Färe 第一个提出处理非期望产出的 DEA 模型后,现有的考虑非期望产出的环境效率评价的文献多见于国外. Sarkis 和 Talluri^[10]对 DEA 在环境效率研究方面的应用进行了总结. Lansink 和 Reinhard^[11]将污染物作为投入变量,利用基于污染物可弱处理的 DEA 模型,研究荷兰养猪场的技术效率以及潜在的技术增长情况. Lee 等^[12]运用非参数的有向距离函数对污染物的影子价格进行了估算. Kordrostami 和 Amirteimoori^[13]提出了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 (multi-component) 的效率评价方法,提出了相应的效率评价指标. André's 等^[14]运用有向距离函数评估了环境法规对工厂经营状况的影响,并指出当环境法规阻止自由排放有害产出时,工厂仅通过提高效率来增加期望产出的潜力将大受影响. Murty 等^[15]分别按不良产出的强、弱可处置性 (weak and strong disposability of bad outputs) 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了估算. Mika 和 Timo^[16]提出以绝对影子价格来评价生态效益的方法,并以越野车的生态效益评价为例对该方法进行了解释说明. Sharp 等^[17]在 DEA 模型分析中考虑到不良投入与不良产出的情况,并提出了 MSBM 模型,解决了 SBM 模型中转移变量的缺失问题. Watanabe 和 Tanaka^[18]分别运用两种效率测评方法对中国各地工业水平进行测评,通过比较得出,不考虑非期望产出的评测方法会高估工业效率水平.

加强环境管制政策,提高企业的清洁生产水平,从而减少无效单元的数量,才能实现经济的最优增长^[19]. 基于这些实际需要,研究者们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. 一些成果还涉及到以下三个方面:

一是非期望产出作投入处理法. 各种环境污染等物等非期望产出常常伴随资源的投入,出现在生产过程中,与期望产出之间是同增同减的关系,而且该关系与传统的生产函数中的投入产出关系是相类似的. Haynes 等^[20]提出一种基于数据包络的环境保护的生产前沿面来研究环境效率. Reinhard 等^[21]用 DEA 分析荷兰牛奶场的环境效率,并与随机生产前沿面的效率评价方法进行了比较. Hailu 和 Veeman^[22]采用 DEA 的方法分析加拿大造纸工业的环境效率.

二是距离函数法. Chung 等^[23]将污染物纳入技术效率分析的框架,基于污染物弱处理性,提出了一种基于距离函数的 DEA 环境效率分析模型,用设定特别的方向,使得沿着该方向改进决策单元的效率时,可以同时增加期望产出,非期望产出能同比例减少,这样就弥补了前两种方法单维改变的缺陷,比如不能反映生产过程、破坏生产可能集的凸性等. 这种方法突破了传统的径向测度的效率改进方法,具有一定优越性. Hailu^[24]运用距离函数法对加拿大不同区域的造纸业进行了比较,估算了不同区域的成本水平. Färe 和 Grosskopf^[25]对这种方法做了进一步研究.

三是数据转换函数处理法. 数据转换函数法是将污染物仍旧放在产出一边,但要将其越小越好的非期望产出转化为越大越好的期望产出,然后将转化后的产出作为普通的期望产出,采用传统的 DEA 模型分析决策单元的环境效率. 数据转换函数主要包括负产出法、线性数据转换法和非线性的数据转化法三种形式^[8].

从以上对国内外环境效率评价成果的综述中可以看出,涉及到环境效率的研究依然主要集中在非参数 DEA 技术方面,同时考虑非期望产出、影子价格与无效决策单元的改进的非参数 DEA 效率模型还是很罕见^[26-27],使得无论是考虑非期望产出的 DEA 方法本身,还是对环境效率定量评价及改进分析,都还存在不少缺陷. 另外,考虑到影子价格可以既不是来自于某个买方或卖方的标价,也不是买卖双方标价的线性组合,而是反映事物内在价值的市场公允价格^[28]. 因此,从非期望产出、影子价格与无效决策单元的改进等几个方面

开展研究很有必要,这其中,需要通过确定全部的最优对偶向量,然后选择符合定义的影子价格,以利用线性规划求解影子价格;需要在此基础上分析无效决策单元的改进,即投入的可减少量,期望产出的应增加量,以及非期望产出的可减少量.这些研究将会进一步推动考虑非期望产出的环境效率评价方法创新的深度和广度,也会为环境保护实践提供更加有效的分析工具.

2 构建模型

假设有 n 个决策单元(DMU),每个决策单元都有 m 项投入、 s 项期望产出和 k 项非期望产出.决策单元 j 用 $DMU_j (1 \leq j \leq n)$ 表示,记: $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$ 表示 DMU_j 的投入向量,其中 x_{ij} 为 DMU_j 对第 i 种投入的投入量, $x_{ij} > 0$; $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})^T$ 表示 DMU_j 的期望产出向量,其

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

考察第 j_0 个决策单元 DMU_{j_0} ,记 $X_0 = X_{j_0}, Y_0 = Y_{j_0}, Z_0 = Z_{j_0}$,建立如下非参数规划模型

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

模型(1)的经济意义在于在投入不超过 X_0 的情况下,尽可能地提高期望产出,降低非期望产出,可以实现经济发展和环境保护的双赢.针对模型(1),可以给出决策单元有效的充分必要条件.

定理 1 若 $\lambda_j^0 (j = 1, 2, \dots, n), \alpha^0, \beta^0$ 为模型(1)的最优解,则决策单元 DMU_{j_0} 为 DEA 有效的充分必要条件是 $\alpha^0 = 1, \beta^0 = 1$.

证明 (充分性) $\alpha^0 = 1, \beta^0 = 1 \Rightarrow DMU_{j_0}$ 为

中 y_{rj} 为 DMU_j 对第 r 种期望产出的产出量, $y_{rj} > 0$; $Z_j = (z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{kj})^T$ 表示 DMU_j 的非期望产出向量,其中 z_{tj} 为 DMU_j 对第 t 种非期望产出的产出量, $z_{tj} > 0$; $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 表示 m 项投入对应的权向量; $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s)^T$ 表示 s 项期望产出对应的权向量; $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k)^T$ 表示 k 项非期望产出对应的权向量.其中 ω, μ 和 γ 均为变量. $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; r = 1, 2, \dots, s; t = 1, 2, \dots, k$

2.1 考虑非期望产出的非参数 DEA 效率模型

在实际生产过程中,企业希望以一定的投入获得尽可能多的期望产出,并且带来尽可能少的环境污染.据此,本文建立考虑非期望产出的非参数 DEA 效率模型.假设投入产出向量 (X, Y, Z) 满足四条经济学公理:1) 平凡公理;2) 凸性公理;3) 无效性公理;4) 最小型公理.则可以构造含有非期望产出的生产可能集为

DEA 有效.

若 DMU_{j_0} 为非 DEA 有效,则说明 DMU_{j_0} 的期望产出可以进一步提高,非期望产出也可以再进一步降低,也就是说可以找到一个假想的决策单元,它可以用不大于 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,于是得到 $\alpha^0 > 1$ 或 $\beta^0 < 1$.这与已知条件 $\alpha^0 = 1, \beta^0 = 1$ 相矛盾,故 DMU_{j_0} 为 DEA 有效.

证毕.

(必要性) DMU_{j_0} 为 DEA 有效 $\Rightarrow \alpha^0 = 1, \beta^0 = 1$.若 α^0 和 β^0 至少有一个不为 1,不妨假设 $\alpha^0 > 1, \beta^0 = 1$,则根据模型(1)的约束条件,有

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{i0} & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq \alpha y_{r0} > y_{r0} & r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j z_{tj} \leq z_{t0} & t = 1, 2, \dots, k \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0 & j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

又由于

$$\left(\left(\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{1j} ; \dots ; \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{mj} \right) \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{1j} ; \dots ; \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{sj} \right) , \right. \\ \left. \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j z_{1j} ; \dots ; \sum_{j=1}^n \lambda_j z_{kj} \right) \right) \in T ,$$

因此可以在生产可能集内找到一个决策单元,它可以用不大于 DMU_{j_0} 的投入,获得比 DMU_{j_0} 更多的期望产出,并产生不多于 DMU_{j_0} 的非期望产出,说明 DMU_{j_0} 是非 DEA 有效的,这与已知条件 DMU_{j_0} 为 DEA 有效相矛盾. 同理可证其他情况,故 $\alpha^0 = 1 \beta^0 = 1$. 证毕.

定义 1 设 $\alpha^0 \beta^0$ 为模型(1)的最优解,令 $e_0 = \frac{1}{2}(\beta^{0^2} + \frac{1}{\alpha^{0^2}})$ 称 e_0 为具有非期望产出的决策单元 DMU_{j_0} 的效率评价.

由定理 1 可以知道,若 $e_0 = 1$,则表明 DMU_{j_0} 为 DEA 有效;相反,若 DMU_{j_0} 为非 DEA 有效,则有 $0 < e_0 < 1$.

2.2 投入、期望产出、非期望产出的影子价格 线性规划模型(1)的对偶规划模型为

$$\min V_0 = \omega^T X_0 - \mu_0 \\ \text{s. t. } \begin{cases} \omega^T X_j - \mu^T Y_j + \gamma^T Z_j + \mu_0 \geq 0 \\ \mu^T Y_0 \geq 1 \\ \gamma^T Z_0 \leq 1 \\ \omega \geq 0 \mu \geq 0 \gamma \geq 0 \mu_0 \in E^1, \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\omega \mu \gamma$ 分别为投入、期望产出、非期望产出的影子价格^[29].

定理 2 若 $\omega^0 \mu^0 \gamma^0$ 为模型(2)的最优解,则 DMU_{j_0} 为 DEA 有效的充分必要条件是 $\omega^0 > 0, \mu^0 > 0 \gamma^0 > 0$,且目标函数的最优值为 $V_0^0 = 0$.

证明 (充分性)

$$\omega^0 > 0 \mu^0 > 0 \gamma^0 > 0, V_0^0 = 0 \Rightarrow$$

DMU_{j_0} 为 DEA 有效.

由于 $\omega^0 > 0 \mu^0 > 0 \gamma^0 > 0$ 根据线性规划的“松紧定理”^[30],有

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 x_{ij} = x_{ij_0} & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 y_{rj} = \alpha^0 y_{rj_0} & r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 z_{tj} = \beta^0 z_{tj_0} & t = 1, 2, \dots, k \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 = 1 \lambda_j^0 \geq 0 & j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

其中 $\lambda^0 \alpha^0 \beta^0$ 为模型(1)的最优解. 又 $V_0^0 = 0$, 由对偶理论可知 $h_0^0 = \alpha^0 - \beta^0 = 0$, 从而 $\alpha^0 = \beta^0$. 再根据实际理论知 $\alpha^0 \geq 1 \beta^0 \leq 1$, 故 $\alpha^0 = \beta^0 = 1$, 于是由定理 1 知, DMU_{j_0} 为 DEA 有效. 证毕.

(必要性) DMU_{j_0} 为 DEA 有效 $\Rightarrow \omega^0 > 0 \mu^0 > 0 \gamma^0 > 0, V_0^0 = 0$.

根据定理 1, 已知 DMU_{j_0} 为 DEA 有效, 有 $\alpha^0 = 1 \beta^0 = 1$, 故 $h_0^0 = \alpha^0 - \beta^0 = 0$, 从而 $V_0^0 = 0$. 对于对偶规划模型(2), 因 $\alpha^0 > 0 \beta^0 > 0$ 根据线性规划的“松紧定理”, 有 $\mu^{0^T} Y_0 = 1 > 0 \gamma^{0^T} Z_0 = 1 > 0$, 故 $\mu^0 > 0 \gamma^0 > 0$.

对于 ω^0 , 若 $\omega^0 = 0$, 从影子价格角度来说, 说明投入的影子价格为 0, 第 j_0 个决策单元的投入资源 X_0 仍有剩余, 实际使用的投入量小于 X_0 , 即

$\sum_{j=1}^n \lambda_j^0 X_j \leq X_0$; 从 DEA 有效性来说, 说明存在一个决策单元, 它可以用比 DMU_{j_0} 少的投入, 获得不少于 DMU_{j_0} 的期望产出, 并产生不多于 DMU_{j_0} 的非期望产出, 也就是说 DMU_{j_0} 是非 DEA 有效的, 与已知条件矛盾, 故 $\omega^0 \neq 0$, 从而 $\omega^0 > 0$. 证毕.

2.3 无效决策单元的改进

首先将松弛变量

$$S_i^- (i = 1, 2, \dots, m), S_r^+ (r = 1, 2, \dots, s), \\ S_t^- (t = 1, 2, \dots, k)$$

引入模型(1), 有

$$\max h_0 = \alpha - \beta \\ \text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + S_i^- = x_{ij_0} & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - S_r^+ = \alpha y_{rj_0} & r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j z_{tj} + S_t^- = \beta z_{tj_0} & t = 1, 2, \dots, k \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \lambda_j \geq 0 \alpha \geq 0 \beta \geq 0 S_i^- \geq 0, \\ S_r^+ \geq 0 S_t^- \geq 0 & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

定义 2 假设 DMU_{j_0} 非 DEA 有效, 令

$$\hat{x}_{ij_0} = x_{ij_0} - S_i^{-0}$$

$$\hat{y}_{j_0} = \alpha^0 y_{j_0} + S_r^{+0}$$

$$\hat{z}_{j_0} = \beta^0 z_{j_0} - S_t^{-0}$$

其中 $\alpha^0 \beta^0 S_i^{-0} S_r^{+0} S_t^{-0}$ 为模型(3)的最优解.

$$\hat{X}_0 = (\hat{x}_{1j_0} \hat{x}_{2j_0} \dots \hat{x}_{mj_0})^T$$

$$\hat{Y}_0 = (\hat{y}_{1j_0} \hat{y}_{2j_0} \dots \hat{y}_{sj_0})^T$$

$$\hat{Z}_0 = (\hat{z}_{1j_0} \hat{z}_{2j_0} \dots \hat{z}_{kj_0})^T$$

则称 $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$ 为 DMU_{j_0} 在生产可能集 T 的生产前沿面上的“投影”^[29].

对于非有效的决策单元,可以通过调整投入和产出量,使其成为 DEA 有效,“投影”即为调整后的投入产出量,这样本文可以得到一系列的改进信息,为非有效的决策单元进一步调整提供决策支持.下面给出一个投影定理:

定理 3 无效 DMU_{j_0} 的“投影” $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$ 是 DEA 有效的.

证明 假设“投影” $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$ 是非 DEA 有效的,说明该决策单元的投入产出量可以进一步调整,故可以在生产可能集 T 内找到这样一个决策单元 DMU_k , 它的投入产出量 (X_k, Y_k, Z_k) 满足

$$\hat{X}_0 \geq X_k$$

$$\hat{Y}_0 \geq Y_k$$

$$\hat{Z}_0 \geq Z_k$$

且至少有一个不等式成立.

根据模型(3)和投影表达式,有

$$\hat{X}_0 = \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 X_j$$

$$\hat{Y}_0 = \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 Y_j$$

$$\hat{Z}_0 = \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 Z_j$$

设 $\omega^0, \mu^0, \gamma^0$ 为模型(2)的最优解,对于该模型的第一个约束条件,根据库恩-塔克条件中的“互补”条件,有

$$(\omega^{0T} X_j - \mu^{0T} Y_j + \gamma^{0T} Z_j + \mu_0) \lambda_j^0 = 0$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

即

$$\omega^{0T} X_j \lambda_j^0 - \mu^{0T} Y_j \lambda_j^0 + \gamma^{0T} Z_j \lambda_j^0 + \mu_0 \lambda_j^0 = 0$$

将这 n 个等式加总,有

$$\omega^{0T} \left(\sum_{j=1}^n X_j \lambda_j^0 \right) - \mu^{0T} \left(\sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j^0 \right) + \gamma^{0T} \times$$

$$\left(\sum_{j=1}^n Z_j \lambda_j^0 \right) + \mu_0 \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 = 0$$

$$\text{即 } \omega^{0T} \hat{X}_0 - \mu^{0T} \hat{Y}_0 + \gamma^{0T} \hat{Z}_0 + \mu_0 = 0 \text{ 其中 } \sum_{j=1}^n \lambda_j^0 = 1.$$

对 $\forall (X, Y, Z) \in T$, 有

$$\sum_{j=1}^n X_j \lambda_j \leq X, \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j \geq Y, \sum_{j=1}^n Z_j \lambda_j \leq Z,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{又 } \omega^{0T} X_j - \mu^{0T} Y_j + \gamma^{0T} Z_j + \mu_0 \geq 0, \text{ 于是 } \omega^{0T} X - \mu^{0T} Y +$$

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

即

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

然而,根据 (X_k, Y_k, Z_k) 满足的条件,可知存在一个 $(X_k, Y_k, Z_k) \in T$, 有

$$\omega^{0T} X_k - \mu^{0T} Y_k + \gamma^{0T} Z_k < \omega^{0T} X_0 -$$

$$\mu^{0T} \hat{Y}_0 + \gamma^{0T} \hat{Z}_0$$

两者前后矛盾. 故无效 DMU_{j_0} 的“投影” $(\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0)$ 是 DEA 有效的. 证毕.

由定理 3 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,企业可以寻求生产的“投影”量以达到 DEA 相对有效. 令

$$\Delta x_{ij_0} = \hat{x}_{ij_0} - x_{ij_0} = -S_i^{-0}$$

$$\Delta y_{rj_0} = \hat{y}_{rj_0} - y_{rj_0} = (\alpha^0 - 1) y_{rj_0} + S_r^{+0}$$

$$\Delta z_{tj_0} = \hat{z}_{tj_0} - z_{tj_0} = -((1 - \beta^0) z_{tj_0} + S_t^{-0})$$

由此,可以为无效企业提供一个可以改进的调整量:投入和非期望产出可以分别减少 S_i^{-0} , $(1 - \beta^0) z_{tj_0} + S_t^{-0}$, 期望产出可以增加 $(\alpha^0 - 1) y_{rj_0} + S_r^{+0}$. 其中 $i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, s; t = 1, 2, \dots, k$.

3 实证分析

目前反映环境效率的指标种类有很多,本

文为了考察中国各地区的环境效率水平,选取社会消费品零售总量和全社会固定资产投资总额作为投入指标,地区生产总值作为期望产出指标,工业废气排放量、工业废水排放量和工业固体废物产生量作为非期望产出指标,利用 2009 年 31 个地区的最新相关数据进行实证分析,各指标数据来源于《中国统计年鉴 2010》。根据模型(1),利用 Lingo9.0 软件求解,得到结果见表 1 所示。

表 1 中,中国 31 个省份在 2009 年里,只有北京、天津、内蒙古、上海、江苏、广东、海南、西藏、青海、宁夏和新疆 11 个地区的环境效率水平达到 DEA 有效,其余 20 个地区均未达到 DEA 有效,这说明我国的环境效率水平整体上有待于进一步

提高。

为了验证上述结论的有效性,本文再采用经典的 SBM 模型计算 31 个地区的环境效率水平,将其与本文构造的新的模型得到的结果做一比较。利用 LINGO9.0 软件求解 SBM 模型,得到的效率评价结果如下表 2 所示。

进一步的计算可以得出,新的模型和经典的 SBM 模型的拟合优度达到 0.9,呈现高度正向相关关系,表明新模型得到的结果能够很好地拟合实际情况,给出很客观的定量评价。根据 LINGO 软件求得的结果,可以同时得到模型(1)中投入产出对应的松弛变量,代入调整量计算表达式,从而算出无效决策单元的投入产出可改进量,结果见表 3。

表 1 环境效率评价结果

Table 1 The results of environmental efficiency evaluation

地区	α	β	e_0	地区	α	β	e_0
北京	1	1	1	湖北	1.073 8	0.446 2	0.533 2
天津	1	1	1	湖南	1	0.667 4	0.722 7
河北	1	0.679 5	0.730 9	广东	1	1	1
山西	1	0.294 7	0.543 4	广西	1	0.353 2	0.562 4
内蒙古	1	1	1	海南	1	1	1
辽宁	1	0.472 6	0.611 7	重庆	1.085 2	0.381 1	0.497 2
吉林	1	0.456 6	0.604 2	四川	1	0.489	0.619 6
黑龙江	1	0.417 8	0.587 3	贵州	1	0.794 7	0.815 8
上海	1	1	1	云南	1	0.480 5	0.615 4
江苏	1	1	1	西藏	1	1	1
浙江	1	0.709 8	0.751 9	陕西	1	0.553 5	0.653 2
安徽	1	0.420 1	0.588 2	甘肃	1	0.444 4	0.598 7
福建	1	0.69	0.738 1	青海	1	1	1
江西	1	0.726 5	0.763 9	宁夏	1	1	1
山东	1	0.965 6	0.966 2	新疆	1	1	1
河南	1	0.601 3	0.680 8				

注:根据模型(1)使用 LINGO9.0 软件计算得出。

表 2 两种模型的环境效率评价结果比较

Table 2 Results' comparison of environmental efficiency evaluation of the two models

地区	新模型	SBM	地区	新模型	SBM
北京	1	0.999 9	湖北	0.533 2	0.468 2
天津	1	1	湖南	0.722 7	0.544
河北	0.730 9	0.504 9	广东	1	1
山西	0.543 4	0.450 7	广西	0.562 4	0.463 3
内蒙古	1	1	海南	1	1
辽宁	0.611 7	0.444 9	重庆	0.497 2	0.442
吉林	0.604 2	0.445 3	四川	0.619 6	0.444 2
黑龙江	0.587 3	0.524 4	贵州	0.815 8	0.688
上海	1	1	云南	0.615 4	0.538
江苏	1	0.750 4	西藏	1	1
浙江	0.751 9	0.654 4	陕西	0.653 2	0.558 9
安徽	0.588 2	0.451 5	甘肃	0.598 7	0.495 5
福建	0.738 1	0.560 7	青海	1	0.713 1
江西	0.763 9	0.544 4	宁夏	1	1
山东	0.966 2	0.561 1	新疆	1	1
河南	0.680 8	0.510 0			

注: 根据 SBM 使用 LINGO9.0 软件计算得出.

表 3 无效决策单元投入和产出的可改进量

Table 3 Adjustable volumes of non-effective decision making units

DMU	可减少量		应增加量	可减少量		
	社会消费品零售 总额(亿元)	固定资产 投资(亿元)	地区生产 总值(亿元)	废气排放量 (亿标立方米)	废水排放量 (万吨)	固体废物产生量 (万吨)
河北	0	4 423.95	0	34 807.30	35 273.59	16 755.98
山西	0	1 115.57	0	16 710.61	28 014.67	11 889.60
辽宁	0	6 969.20	0	16 916.43	39 638.64	15 268.84
吉林	0	6 969.20	0	7 491.12	20 412.00	8 327.54
黑龙江	0	1 851.68	0	5 808.65	20 493.61	4 236.95
浙江	0	3 036.25	0	5 473.27	94 956.22	1 134.58
安徽	0	5 509.74	0	8 856.56	47 426.03	7 015.46
福建	0	1 964.95	0	3 254.10	115 208.9	4 662.72
江西	0	1 966.09	0	2 266.23	47 336.37	7 382.99
山东	0	6 239.39	0	13 728.66	6 283.94	9 137.28
河南	0	6 197.66	0	8 845.39	59 156.17	7 567.63
湖北	0	2 713.17	956.53	6 935.03	70 985.76	4 093.28
湖南	0	3 108.20	0	3 649.47	69 845.31	3 355.70
广西	0	2 468.31	0	8 527.54	143 106.5	4 618.65
重庆	0	2 557.27	556.36	7 861.16	40 651.73	1 579.34
四川	0	6 246.12	0	6 852.52	81 090.44	6 958.01
贵州	0	0.00	0	1 598.42	2 766.96	4 583.85
云南	0	1 002.28	0	4 926.83	16 818.92	7 534.71
陕西	0	1 917.75	0	4 925.74	27 610.77	4 053.71
甘肃	0	317.44	0	3 508.03	9 091.62	2 198.14

注: 根据新模型使用 LINGO9.0 软件计算得出.

由表 3 可以看出 20 个无效决策单元在社会消费品零售总额方面均不需要减少;对于地区生产总值,湖北需要增加 956.53 亿元,重庆需要增加 556.36 亿元,其余地区均不需要进一步提高,这与表 1 的效率评价结果是一致的;对于固定资产投资、废气、废水和固定废物产生量,20 个无效地区需要减少相应的量。对于这些地区而言,就需要在合理安排固定资产投资的同时,鼓励属地企业加快技术改造,淘汰落后产能,减少废气、废水和固定废物产生量。这样,通过改进调整,无效地区能够提高环境效率水平,达到 DEA 有效。这也再次印证了政府应该加强环境管制政策,提高企业的清洁生产水平,才能减少无效单元的数量,实现经济的可持续增长。可见,本文构建的新模型不仅计算过程较为方便,而且使用这种方法能够很方便地计算出无效决策单元的投入产出可改进量,比经典的 SBM 模型具有明显的优势。

4 结束语

本文首先建立考虑非期望产出的非参数 DEA 效率模型,从影子价格的视角论证 DEA 有效的充分必要条件,计算出无效 DMU 的可改进量,从而构建了一个考虑非期望产出、影子价格以及无效决策单元的非参数 DEA 模型,然后通过一个算例进行实证分析,将这个新的模型和经典的 SBM 模型进行比较,结果显示两者的相关系数超过 0.9,而且这一新模型还显示出一些 SBM 模型所没有的特性。这些特性包括,这种新的非参数方法不仅能够对环境效率水平进行测度评价,而且相较于参数方法而言,它不需要事先设定规范的函数形式,对指标数据也不需要考虑计量单位问题,具有比较独特的优势。相较于传统 DEA 效

率评价模型来说,该模型更加注重非期望产出对环境效率水平的影响,得到的评价结果更加贴近实际情况,并且能够定量给出无效决策单元的改进信息,说明此模型具有十分广泛的应用价值。

未来的研究可以从以下两个方向扩展:一是在深入研究环境效率评价具体特征的基础上,构建一系列新的 DEA 环境效率评价模型,以实现对环境效率更为准确的定量评价,包括:在效率测度类型方面,采用与传统处理方式不同的一系列的非径向 DEA 模型,来研究考虑非期望产出的环境效率评价问题;构建双目标 DEA 环境效率模型,在模型中同时考虑期望产出的增加和非期望产出的减少,并进行求解;在上述研究的基础上,提出考虑非期望产出的非径向-双目标 DEA 环境效率模型,并运用适宜的方法和技术进行求解,以获得更贴近实际的环境效率评价结果。然后在常用的考虑非期望产出的非参数效率 DEA 模型中引入随机因素,分析这些随机因素及其统计干扰对环境效率评价结果的影响。二是环境效率评价指标体系研究。环境效率评价至为关键的因素之一是能够较完备地的构建评价指标体系。目前评价指标体系的构建一般是根据主观性较强的专家经验给出,并考虑到数据的可得性。但是,对于同一指标,不同区域和行业的数据存在很大差异,特别是对一些主观评价指标更是如此。对一组决策单元,构建不同的指标体系,同一决策单元的有效性也会不同^[31]。为了更科学的确定评价指标体系,可以在解决了小样本条件下的环境效率分析问题之后,根据考虑非期望产出的环境效率评价的特征设置各个指标,计算各指标的标准差系数以检验评价指标的有效性,并对各投入产出指标按照其径向和非径向特征分类研究,从投入、过程和产出三个角度构建较完备的评价指标体系。

参 考 文 献:

- [1] Zhou P, 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): 1-8.
- [2] Färe R, Grosskopf S, Lovell C A K. 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, Lovell C A K, et al. Deviation of shadow prices for undesirable outputs: A distance function approach [J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1993, 75(2): 374-380.

- [4]Färe R ,Grosskopf S ,Tyteca D. An activity analysis model of the environmental performance of firms-application to fossil-fuel-fired electric utilities [J]. *Ecological Economics* ,1996 ,18(2) : 161 - 175.
- [5]Färe R ,Grosskopf S ,Pasarika 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.
- [6]Färe R ,Grosskopf S ,Noh D W , et al. Characteristics of a polluting technology: Theory and practice [J]. *Journal of Econometrics* ,2005 ,126(2) : 469 - 492.
- [7]Färe R ,Grosskopf S ,Pasarika Jr C A. Pollution abatement activities and traditional productivity [J]. *Ecological Economics* ,2007 ,62(3 - 4) : 673 - 682.
- [8]Seiford L M ,Zhu J. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation [J]. *European Journal of Operational Research* ,2002 ,142(1) : 16 - 20.
- [9]宋马林 ,王舒鸿 ,刘庆龄 ,等. 一种改进的环境效率评价 ISBM-DEA 模型及其算例 [J]. *系统工程* ,2010 ,28(10) : 91 - 96.
Song Malin ,Wang Shuhong ,Liu Qingling , et al. A new ISBM-DEA model on environmental efficiency measurement and its numerical examples [J]. *Systems Engineering* ,2010 ,28(10) : 91 - 96. (in Chinese)
- [10]Sarkis J ,Talluri S. Ecoefficiency measurement using data envelopment analysis: Research and practitioner issues [J]. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* ,2004 ,6(1) : 91 - 123.
- [11]Lansink A O ,Reinhard S. Investigating technical efficiency and potential technological change in dutch pig fanning [J]. *Agricultural Systems* ,2004 ,79(3) : 353 - 367.
- [12]Lee J D ,Park J B ,Kim T Y. Estimation of the shadow prices of pollutants with production/environment inefficiency taken into account: A nonparametric directional distance function approach [J]. *Journal of Environmental Management* ,2002 ,64(4) : 365 - 375.
- [13]Kordrostami S ,Amirteimoori A. Un-desirable factors in multi-component performance measurement [J]. *Applied Mathematics and Computation* ,2005 ,171(2) : 721 - 729.
- [14]André's J P T ,Ernest R M ,Francesc H C. Directional distance functions and environmental regulation [J]. *Resource and Energy Economics* ,2005 ,27(2) : 131 - 142.
- [15]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.
- [16]Mika K ,Timo K. Eco-efficiency analysis of consumer durables using absolute shadow prices [J]. *Journal of Productivity Analysis* ,2007 ,28(1) : 57 - 69.
- [17]Sharp J D ,Meng Liu. A modified slacks-based measure model for data envelopment analysis with 'natural' negative outputs and inputs [J]. *Journal of the Operational Research Society* ,2007 ,58(12) : 1672 - 1677.
- [18]Watanabe M ,Tanaka K. Efficiency analysis of Chinese industry: A directional distance [J]. *Energy Policy* ,2007 ,35(12) : 6323 - 6331.
- [19]许士春 ,何正霞 ,魏晓平. 资源消耗、污染控制下经济可持续最优增长路径 [J]. *管理科学学报* ,2010 ,13(1) : 20 - 30.
Xu Shichun ,He Zhengxia ,Wei Xiaoping. Sustainable optimal economic growth path under resource consumption and pollution control [J]. *Journal of Management Sciences in China* ,2010 ,13(1) : 20 - 30. (in Chinese)
- [20]Haynes K E ,Ratick S ,Cummings-Sexton J. Pollution prevention frontiers: A data envelopment simulation [M]. in: Knaup G L and Kim T J (Eds.) ,*Environmental Program Evaluation: A Primer*. Urbana: University of Illinois Press ,1997: 1 - 150.
- [21]Reinhard S ,Lovell C A K ,Thijssen G J. Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables: Estimated with SFA and DEA [J]. *European Journal of Operational Research* ,2000 ,121(2) : 287 - 303.
- [22]Hailu A ,Veeman T. Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: An application to Canadian pulp and paper industry [J]. *American Journal of Agricultural Economics* ,2001 ,83(3) : 605 - 616.
- [23]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.
- [24]Hailu A. Pollution abatement and productivity performance of regional Canadian pulp and paper industries [J]. *Journals of*

- Forest Economics ,2003 ,9(1) : 5 -25.
- [25]Färe R ,Grosskopf S. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation: Comment [J]. European Journal of Operational Research ,2004 ,157(1) : 242 -245.
- [26]Jahanshahloo G R ,Vencheh A H ,Foroughi A A ,et al. Inputs/outputs estimation in DEA when some factors are undesirable [J]. Applied Mathematics and Computation ,2004 ,156 (1) : 19 -32.
- [27]Liu W B ,Meng W ,Li X X ,et al. DEA models with undesirable inputs and outputs [J]. Annals of Operations Research ,2010 ,173(1) : 177 -194.
- [28]范小勇,石 琴. 基于影子价格的组合双向拍卖交易价格研究 [J]. 管理科学学报,2008 ,11(5) : 16 -22.
Fan Xiaoyong ,Shi Qin. Study on combinatorial double auction transaction prices based on shadow prices [J]. Journal of Management Sciences in China ,2008 ,11(5) : 16 -22. (in Chinese)
- [29]魏权龄,刘起运,胡显佑. 数量经济学(第二版) [M]. 北京: 中国人民大学出版社,2007: 48 -57.
Wei Quanling ,Liu Qiyun ,Hu Xianyou. Quantitative Economics (Second Edition) [M]. Beijing: China Renmin University Press ,2007: 48 -57. (in Chinese)
- [30]魏权龄. 数据包络分析 [M]. 北京: 科学出版社,2004: 51 -54.
Wei Quanling. Data Envelopment Analysis [M]. Beijing: Science Press ,2004: 51 -54. (in Chinese)
- [31]官建成,何 颖. 科学—技术—经济的联结与创新绩效的国际比较研究 [J]. 管理科学学报,2009 ,12(5) : 61 -77.
Guan Jiancheng ,He Ying. Linkage amongst science , technology and economy and international comparison of innovation performance [J]. Journal of Management Sciences in China ,2009 ,12(5) : 61 -77. (in Chinese)

Undesirable outputs , shadow prices and improvement on inefficient decision making units

SONG Ma-lin¹ , WU Jie² , YANG Li² , CAO Xiu-fen¹ , LIANG Liang²

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: To construct an improved non-parametric DEA efficiency model which considers undesirable output ,shadow price and ineffective decision-making units ,this article establishes a non-parametric DEA efficiency model which takes undesirable output into account ,demonstrates the effective necessary and sufficient condition of DEA from the perspective of shadow price , and calculates improvable amount of invalid DMUs. Then ,based on an example ,this article makes an empirical analysis. The correlation coefficient between the results derived from the new model and those derived from the classical SBM model is more than 0.9. At the same time ,the new model is superior to the SBM model: this new non-parametric method can measure the level of environmental efficiency; also ,it does not need to establish the normative function form beforehand , nor does it need to consider the measurement unit of index data.

Key words: undesirable output; shadow price; decision-making unit; adjustable volumes