

一种考虑整数约束的环境效率评价 MOISBMSE 模型^①

宋马林¹, 王舒鸿^{2*}, 邱兴业³

(1. 安徽财经大学管理统计研究中心, 蚌埠 233030; 2. 南开大学经济学院, 天津 300071;
3. 南开大学数学科学学院, 天津 300071)

摘要: 传统的基于数据包络分析的环境效率评价常常忽略投入、期望产出和非期望产出为离散型变量的可能性, 从而无法精确处理现实中存在的具有整数特征的指标数据, 一直以来影响着评价结果的精确性. 本文以混合导向的整数 DEA 为基础, 对超效率 SBM 模型进行拓展, 构建了一种能够同时兼顾整数约束和非期望产出指标数据的超效率 SBM 模型, 并在实例中采用搜索算法, 对该模型进行求解并通过 Bootstrap 方法对结果进行修正. 将每一个最优整数点与被评价决策单元之间的距离进行比较, 可以找出最短距离所对应的最优整数点, 即为其帕累托改进方向. 该模型将为环境效率评价提供了适用范围更广泛的测度方法.

关键词: 环境效率; 整数约束; 非期望产出; 搜索算法

中图分类号: F224.3; O224 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2014)11-0069-10

0 引言

近些年来, 环境问题已经成为阻碍许多国家社会经济可持续发展的重大难题之一. 如何尽快遏制环境的进一步恶化, 业已成为国际上不少学者的重要研究方向之一. 学者们普遍认识到, 提高单位环境负荷的经济价值, 即环境效率, 是协调环境保护和经济增长的必由之路^[1]. 在此情况下, 效率评价相关理论和技术在环境经济与管理领域得到越来越广泛的发展和运用. 作为一种计算相对效率的较为有效的方法, 数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 可以对一组同质决策单元 (decision making units, DMUs) 的效率进行排序, 并能够算出无效 DMUs 的冗余和不足, 提出这些 DMUs 实现帕累托改进的具体方向和数量^[2-4]. DEA 是进行环境效率评价的公认的最好方法之一, 在评价结果中, 投入较少、期望产出

多且非期望产出较少的 DMUs 的环境效率值相对较高^[5,6]. 但是, 在现实中, 有些决策单元的指标数值只能为整数, 而经典的 DEA 模型是建立在假定投入、产出均为连续型变量的基础上, 因此无法准确计算和讨论整数变量的情形, 只能进行简单的近似计算, 所得到的结果也往往与现实相差甚远, 甚至根本不具有可比性.

针对上述问题, 目前还没有发现有相关文献提出较为准确的解决办法^[7]. 本文将基于整数规划理论, 同时兼顾投入和产出指标中可能出现的整数约束与非期望产出, 提出一种混合导向的考虑整数约束的超效率 SBM (mixed-objective integer slacks-based measure of super-efficiency, MOISBMSE) 模型, 以期提高环境效率评价结果的可靠性和稳定性, 并实现对 DMUs 的完全排序; 随后还应用具有优良性质的自举法 (Bootstrap) 对评价结果进行了模拟和修正^[8-9].

① 收稿日期: 2012-08-11; 修订日期: 2012-12-23.

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-12-0595); 国家自然科学基金资助项目 (71171001); 安徽高等学校省级自然科学研究重点资助项目 (KJ2011A001); 安徽省软科学项目 (12020503063); “知行南开”研究生社会调研项目 (2012027); 中央高校基本科研业务费专项资助项目 (201513020).

通讯作者: 王舒鸿 (1986—), 男, 山东青岛人, 博士生. Email: wangshuhong1127@163.com

1 文献述评

传统的 DEA 模型通常不对投入和产出指标的属性进行论证,而是将它们默认为连续型变量^[3].当投入、期望或非期望产出中出现只能为整数的指标时,这些传统的 DEA 模型就不能精确得出各决策单元的效率值,也不能确定哪些 DMUs 在生产前沿面上.可见,在计算环境效率过程中,需要将考虑非期望产出的效率评价模型加入整数约束的因素,设计出更为精确的评价工具.

针对上述问题,国际学者已经做了一些有限的探索性研究. Lozano 和 Villa 首次提出了整数 DEA 模型的概念,并在 CCR 模型的基础上建立了混合整数 DEA 模型 (mixed integer DEA, MID-EA)^[10];接着, Lozano 和 Villa 将该混合整数 DEA 模型进行了拓展,探讨规模报酬可变状态下的可能情形^[11].一些学者还针对该模型做了不少改进,使其更加符合现实的需要. Kuosmanen 和 Matin 将中间产品引入分析,并使模型符合最小推断原则,建立了一个新的混合线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 模型^[12]; Matin 和 Kuosmanen 还讨论了规模报酬不变情形下的 MILP-DEA 的情况,并采用实例进行了说明^[13].

整数 DEA (integer DEA) 也可以被认为是 BCC-DEA 模型基础上的一系列重要拓展.经典的 BCC-DEA 模型是 Banker 等人提出的^[14].在一般情况下,该模型在规模报酬可变的情形下采用,但在解决现实问题时,常常存在投入产出固定的情况.基于此, Lins 等人提出了 MO-DEA (multi-objective data envelopment analysis) 模型来解决这一问题^[15].但是,当投入或产出指标为整数的时候,该模型的有效性就会减弱.所以, Kuosmanen 和 Matin 将整数规划的概念引入 DEA 模型,建立了整数 DEA 模型^[12].随后, Wu 与其合作者构建了 MO-IDEA 模型,不但能够对固定投入与产出的 DMUs 进行评价,还可以将 MO-DEA 模型拓展到考虑整数约束的定量分析中,使应用范围再次扩大^[16-18]. MO-DEA 效率值往往小于相应 MO-I-DEA 的最优效率值. Wu 和 Zhou 还证明了该模型的整数约束特性与稳定特征^[18].

在此之后,国际上还出现了一些与之相关的研究,讨论了考虑整数约束的效率评价方法及其应用问题,包括整数 DEA 的搜索算法^[19],以及考虑 Additive super-efficiency 的整数 DEA 的计算^[20].不过,上述研究虽然在一定程度上发展了整数 DEA 领域的理论,但是并未考虑非期望产出因素,因而无法直接被用来开展考虑整数约束的环境效率分析.

近些年来,资源环境问题受到了人们越来越广泛的关注. Färe 等人提出并采用与之相关的环境效率这一概念,用以衡量考虑环境因素的生产效率情况,已经成为国际学术界的一个重要研究方向^[5, 21-24].实现基于 DEA 模型的环境效率评价的一个非常重要的标志就是考虑非期望产出.当考虑非期望产出时,就不能再遵循经典的 DEA 效率模型中关于产出最大化的假设.因为在传统的效率评价中,总是假定产出越大、投入越少的情形下效率较高.然而,非期望产出并不是人们所希望得到的,它和期望产出相反,因而是越少越有利^[25].一种考虑非期望产出的经典效率评价模型是 SBM (slacks-based measure) 模型^[26].该模型将传统的 DEA 模型的评价范围从径向扩展到非径向,对期望与非期望产出分别计算.为了实现完全排序,超效率 SBM (slacks-based measure of super-efficiency) 模型也在随后被提出^[27, 28].还有一些新的成果对上述经典的环境效率评价模型进行拓展,提出了构建考虑非期望产出、影子价格以及无效决策单元的改进的非参数 DEA 模型^[29].但是,正如前文所述,现有的考虑非期望产出的效率评价模型并没有涉及指标的整数约束问题,因此在解决考虑整数约束的环境效率评价问题上存在不足,主要体现在求解得到的最优解未必与实际相符.

因此,在考虑非期望产出的效率评价模型中,对于现实中不可避免具有整数特征的指标数据,尤其是涉及到投入、产出必须为整数的环境效率评价时,整数约束的作用就显得重要.考虑到超效率 SBM 模型是较为成熟的环境效率评价 DEA 模型,本文将 MO-IDEA 模型作为考虑整数约束评价模型的基础,然后对超效率 SBM 模型进行拓展,建立混合导向的考虑整数约束的超效率 SBM (MOISBMSE) 模型.这一新模型将考虑非期

望产出的 DEA 模型与整数约束结合起来,并能够实现完全排序,是一种更为稳健、适用范围更加广泛的环境效率评价工具。

2 模型构建与转换

在拓展考虑整数约束的超效率 SBM 模型之前,需要首先解决的一些问题。这主要包括三个方面,一是模型的整数化处理问题,企业的生产设备数量是整数的,如果使用传统的方法计算,生产设备数量的松弛变量可能等于零,也可能是小数,这与实际不符,因此需要在 MO-SBM 模型基础上建立考虑整数约束的效率评价模型加以解决;二是现实中非期望产出的属性,污染物等非期望产出一般可以视为连续型变量,这需要在模型构建过程中放宽对非期望产出的限制;三是整数规划的求解方法常用分枝定界法和割平面法等,但是并没有计算量较小的解决办法,本文计划使用搜索算法进行相应的求解,对要解决的所有可能情况进行检验,这样做虽然会造成计算机编程求解时间较长,但能够实现计算结果的正确性。

首先定义 MOISBMSE 模型的投入、期望产出和非期望产出指标。投入 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 中整数和非整数向量分别为 p 维、 $m - p$ 维;期望产出为假定整数是前 p_1 维 $(y_1, y_2, \dots, y_{p_1})$, $(1 \leq$

$$\min \rho^* = \frac{1}{2} \left(\frac{\theta_0^{\text{sup}}}{\delta_0} + \frac{1 - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^p \frac{[s_i^X]}{x_{i0}} + \sum_{i=p+1}^m \frac{s_i^X}{x_{i0}} \right)}{1 + \frac{1}{s+q} \left(\sum_{r=1}^{p_1} \frac{[s_r^Y]}{y_{r0}} + \sum_{r=p_1+1}^p \frac{s_r^Y}{y_{r0}} + \sum_{t=1}^q \frac{s_t^Z}{z_{t0}} \right)} \right)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} = \theta_0^{\text{sup}} x_{i0} - s_i^X, i \in I^N$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} = \tilde{x}_{i0} - s_i^X, i \in I^I, \theta_0^{\text{sup}} x_{i0} - s_i^X = \tilde{x}_{i0}, i \in I$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} = \delta_0 y_{r0} + s_r^Y, r \in R^N$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} = \tilde{y}_{r0} + s_r^Y, r \in R^I, \delta_0 y_{r0} + s_r^Y = \tilde{y}_{r0}, r \in R^I,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j z_{tj} = z_{t0} - s_t^Z, t \in T$$

$p_1 \leq s_1)$ 的 $y = (y_1, y_2, \dots, y_s)$; 非期望产出为 $z = (z_1, z_2, \dots, z_q)$ 。为简化起见,本文认定产出和非期望产出均可进行连续规划。由实际意义,可假设上述均为正的向量。

在规模收益可变情况下,MOISBMSE 的可行集为: $T = \{ (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \mid \hat{x}_i \geq \sum_j \lambda_j x_{ij}; \hat{y}_r \leq \sum_j \lambda_j y_{rj}; \hat{z}_t \geq \sum_j \lambda_j z_{tj}; \text{当 } i = 1, 2, \dots, p, \hat{x}_i \text{ 为整数; 当 } i = p + 1, \dots, m, \hat{x}_i \text{ 为实数; 当 } r = 1, 2, \dots, p_1, \hat{y}_k \text{ 为整数; 当 } r = p_1 + 1, \dots, s, \hat{y}_k \text{ 为实数; } \lambda_j \geq 0 \text{ 且 } \sum_j \lambda_j = 1 \}$ 。

定义 对于决策单元 (x_0, y_0, z_0) ,若可行集内存在除自身外的一单元 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 不劣于 (x_0, y_0, z_0) 的生产决策,那么决策单元 (x_0, y_0, z_0) 非有效;反之决策单元 (x_0, y_0, z_0) 有效。

因为可行集 T 为闭集,所以其中必存在有效的决策单位 (x_0, y_0, z_0) 。在规划中引入 $\theta_0^{\text{sup}}/\delta_0$ 指标,这样就可以将投入或产出指标不变的问题考虑进来,为了使规划结果为 1,本文在前面加上 $1/2$,由此可得同时考虑非期望产出和整数约束的效率评价模型。又考虑到该模型的计算结果中可能出现较多 DMUs 效率值为 1 的情况而无法区分有效单元的优劣,本文放松效率值为 1 的假定,建立 MOISBMSE 模型,可以实现对 DMUs 效率值的完全排序。模型的表达形式为

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n, \theta_0 \leq 1, \delta_0 \geq 1$$

$$s_i^X, s_r^Y, s_t^Z \geq 0, \tilde{x}_{i0} \text{ 为整数}, i \in I^I \quad (1)$$

定理 1 当 $\rho^* \neq 1$ 时,决策单元 (x_0, y_0, z_0) 为无效。

证明 因为 (x_0, y_0, z_0) 取值为正,且 $\rho^* < 1$,所以在整数投入中存在整数投入冗余,使 $[s_i^-] > 0$ ($1 \leq i \leq p$) 或在非整数投入中存在投入冗余,使 $s_i^- > 0$ ($p + 1 \leq i \leq m$),或者模型 MO 规划 $\theta_0^{\text{sup}}/\delta_0 < 1$,为证明模型适用的普遍性,在整数规

划中,任取 $[s_u^-] > 0 (1 \leq u \leq p)$ 则有 $s_u^- \geq 1$.

令 $\bar{x} = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{u-1,0}, x_{u0} - 1, x_{u+1,0}, \dots, x_{p,0}, x_{p+1,0}, \dots, x_{m,0})$ $\bar{y} = y_0, \bar{z} = z_0$, 易知 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 在生产可能集中,且 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 的生产决策不劣于 (x_0, y_0, z_0) 的生产决策,而 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 与 (x_0, y_0, z_0) 为不同的生产可能集,由有效性的定义可知, (x_0, y_0, z_0) 无效.

在非整数规划部分,任取 $s_v^- > 0 (p+1 \leq v \leq m)$ 则有 $s_v^- > 0$. 又令 $\bar{x} = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{p,0}, x_{p+1,0}, \dots, x_{v-1,0}, x_{v0} - s_v^-, x_{v+1,0}, \dots, x_{m,0})$ $\bar{y} = y_0, \bar{z} = z_0$, 易知 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 在生产可能集中,且 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 的生产决策不劣于 (x_0, y_0, z_0) 的生产决策,而 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 与 (x_0, y_0, z_0) 为不同的生产可能集,由有效性的定义可知, (x_0, y_0, z_0) 无效.

假设 $\theta_0^{sup} < 1$, 又令 $\bar{x} = (\tilde{x}_{1,0}, \tilde{x}_{2,0}, \dots, \tilde{x}_{p,0}, \theta_0 x_{p+1,0}, \theta_0 x_{p+2,0}, \dots, \theta_0 x_{m,0})$ $\bar{y} = y_0, \bar{z} = z_0$, 易知 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 的生产决策不劣于 (x_0, y_0, z_0) 的生产决策,而 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 与 (x_0, y_0, z_0) 为不同的生产可能集,由有效性的定义可知, (x_0, y_0, z_0) 无效. 定理得证.

定理2 当 $\rho^* > 1$ 时, (x_0, y_0, z_0) 为帕累托弱有效.

证明 因 $\rho^* > 1$, 所以取得最优解时 $\theta_0 > 1, \delta_0 = 1$. 假设 (x_0, y_0, z_0) 无效, 则存在决策单元 d 使得 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \in T$, 使 $\bar{x} \leq x_0, \bar{y} \geq y_0, \bar{z} \leq z_0$, 其中, 这三个不等式中至少有一个是严格不等的. 即 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 中至少存在一个投入小于 x_0 的相应投入, 或者至少存在一个期望产出大于 y_0 的相应期望产出, 或者至少存在一个非期望产出小于 z_0 的相应非期望产出, 在保持其他指标都相等的情况下. 这里本文不妨设 $\bar{y} > y_0$, 则决策单元 d 使得 $\bar{y}_d > y_{d0}$.

因为 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 满足规划所需条件, 所以存在 $\lambda = (\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_N^*)$ 使得:

$$\begin{cases} \bar{x}_i - \sum_j \lambda_j^* x_{ij} \geq 0 & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_j \lambda_j^* y_{rj} - \bar{y}_r \geq 0 & r = 1, 2, \dots, s \\ \bar{z}_t - \sum_j \lambda_j^* z_{tj} \geq 0 & t = 1, 2, \dots, q \end{cases}$$

1) 若 $1 \leq d \leq p_1$, 则 $\bar{y}_d \geq y_{d0} + 1$, 又因为

$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 的生产决策不劣于 (x_0, y_0, z_0) 的生产决策, 所以

$$\begin{aligned} x_{i0} - \sum_j \lambda_j^* x_{ij} &\geq \bar{x}_i - \sum_j \lambda_j^* x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_j \lambda_j^* y_{rj} - y_{r0} &\geq \sum_j \lambda_j^* y_{rj} - \bar{y}_r \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, s \\ z_{t0} - \sum_j \lambda_j^* z_{tj} &\geq \bar{z}_t - \sum_j \lambda_j^* z_{tj} \geq 0 \quad t = 1, 2, \dots, q \end{aligned}$$

这与 $\rho^* > 1$ 矛盾.

2) 若 $p_1 + 1 \leq d \leq s_1$, 则 $\bar{y}_d > y_{d0}$, 又因为 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 的生产决策不劣于 (x_0, y_0, z_0) 的生产决策, 由此得到

$$\begin{aligned} x_{i0} - \sum_j \lambda_j^* x_{ij} &\geq \bar{x}_i - \sum_j \lambda_j^* x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_j \lambda_j^* y_{kj} - y_{k0} &\geq \sum_j \lambda_j^* y_{kj} - \bar{y}_k \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, n \\ z_{i0} - \sum_j \lambda_j^* z_{ij} &\geq \bar{z}_i - \sum_j \lambda_j^* z_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, s_2 \end{aligned}$$

这与 $\rho^* > 1$ 矛盾.

综上所述, 当 $\rho^* > 1$ 时, 对应的 (x_0, y_0, z_0) 为帕累托弱有效. 定理得证.

由以上两个定理知, $\rho^* > 1$ 与帕累托弱有效完全等价. 若定义 $\rho^* > 1$ 时的 DMUs 为 MOISBMSE 有效, 则 MOISBMSE 有效与前述定义的有效性完全等价. 又知 T 中必存在帕累托弱有效的决策单元 (x_0, y_0, z_0) , 故 T 中必存在 MOISBMSE 弱有效的 DMUs. 以上论述说明, 所建立的 MOISBMSE 模型是合理的.

上述规划问题是非线性的, 很难进行直接求解. 为了计算简便, 通过 Charnes-Cooper 变换方法进行以下变量替换 $[S_i^-] = \frac{\theta_0^{sup}}{\delta_0} [s_i^-]$, $S_i^- = \frac{\theta_0^{sup}}{\delta_0} s_i^-$, $[S_r^+] = \frac{\theta_0^{sup}}{\delta_0} [s_r^+]$, $S_r^+ = \frac{\theta_0^{sup}}{\delta_0} s_r^+$, $\xi_j = \frac{\theta_0^{sup}}{\delta_0} \lambda_j$, 可以将非线性规划模型(1)进一步地转化为线性规划问题(2).

$$\min \rho^* = \frac{\theta_0^{sup}}{\delta_0} - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^p \frac{[S_i^-]}{x_{i0}} + \sum_{i=p+1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}} \right)$$

s. t.

$$\frac{\theta_0^{sup}}{\delta_0} + \frac{1}{s+q} \left(\sum_{r=1}^{p_1} \frac{[S_r^+]}{y_{r0}} + \sum_{r=p_1}^p \frac{s_r^+}{y_{r0}} + \sum_{t=1}^q \frac{s_t^-}{z_{t0}} \right) = 1$$

$$\sum_{j=1}^n \xi_j x_{ij} = \theta_0 x_{i0} - S_i^-, \quad i \in I^N$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \xi_j x_{ij} &= \tilde{x}_{i0} - S_i^-, i \in I^l, \\ \theta_0 x_{i0} - S_i^{l-} &= \tilde{x}_{i0}, i \in I^l \\ \sum_{j=1}^n \xi_j y_{rj} &= \delta_0 y_{r0} + S_r^+, r \in O^M \\ \sum_{j=1}^n \xi_j y_{rj} &= \tilde{y}_{r0} - S_r^+, r \in O^l, \\ \delta_0 y_{r0} + S_r^{l+} &= \tilde{y}_{r0}, r \in O^l \\ \sum_{j=1}^n \xi_j z_{ij} + S_i^- &= z_{i0}, i = 1, 2, \dots, s_2 \\ \sum_{j=1}^n \xi_j &= t, 0 \leq \theta_0 \leq 1 \\ \tilde{x}_{i0} \text{ 和 } \tilde{y}_{r0} &\text{ 为整数}, i \in I^l \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n, S_i^-, S_r^+, S_i^-, S_i^l &\geq 0 \quad (2) \end{aligned}$$

3 实例分析

第二产业在我国国民经济中占据重要的地位,SO₂和CO₂等非期望产出主要来源于该产业,对资源环境的可能的负面影响最强^[30]。所以,本文选择该产业进行计量分析。运用前文构建的MOISBMSE模型,本节将评价我国各省份该产业2012年的环境效率,通过实例分析验证该模型的稳健性和有效性。在综合评价指标体系中,投入指标选取废水治理设施数和工业废水污染治理投资;期望产出指标包括各省份业已竣工运行的治污项目和反映产品总量的工业GDP,非期望产出是工业废水排放总量。在选取的指标体系中,作为投入的废水治理设施数和作为产出的治污竣工项目数为整数,存在整数约束。这也说明前文所构建的MOISBMSE模型在现实中具有广泛的应用空间。

由于污染性产业的数据搜集较为困难,因而相关研究污染排放的文献往往采用面板数据进行计算,如果采用DEA模型进行估计,则只有在大样本情形下,估计结果才会具有统计意义上的稳定性。为了避免样本量过小的情况,本文计划采用Bootstrap模拟效率评价值的稳态分布。Bootstrap方法是专门针对小样本数据所采取的一种方法,对于待评DMU_A,每次剔除A以外的决策单元进行评价,一共剔除A-1次,进行A-1次评

价,得到A的效率评价值的均值即为MOISBMSE的Bootstrap估计值^[8,9]。

投入产出指标体系和数值见表1,计算得到的环境效率和可改进数量见表2。

据前所述,本文采用搜索算法对MOISBMSE模型进行求解。这种算法存在两个重要难题:一是如果把搜索区间定义得过大,将会导致搜索时间较长;二是对n维松弛变量进行的取整,往往导致规划得到的结论并不在生产前沿面上。针对这两个问题,本文将搜索范围扩大一个单位,这样新包络面就可以完全覆盖原始包络面的单元点,得到的规划结果就是最优整数解,为DMUs的帕累托改进方向。

表2的数据显示,全国31个省份中,北京、天津等11个省份为超效率帕累托弱有效单元,这些省份处于生产前沿面上;其他没有达到DEA有效的河北、山西等20个省份还存在很大的改进空间,可以通过优化向量,即相应地减少投入和非期望产出,达到有效;以河北为例,在保持工业GDP不变的情况下,假使现有的废水治理设施保持不变,则这些治污设施所能够达到的治污竣工项目数应该比现有情形多59个项目;这使得作为非期望产出的工业污水排放总量多排放了0.734万吨;上述的问题解决之后,河北省将可以达到有效状态。这也说明河北省的环境保护任务仍很艰巨。可见,上述结果将给各省份环境效率的改进提供了具体方向。

表2第三列的数值为Bootstrap统计修正,在剔除掉其他DMUs进行估计后,修正后的估计值较原估计值偏大,这是由于原始样本存在异常值的影响,例如西藏,使后期的估计值均大于样本总体估计值。通过Bootstrap方法得到多次模拟的结果,然后根据研究问题需要进行相应选择。比如本文采用的均值方法,还有些研究采取了剔除异常值的方法进行。可见,采用Bootstrap修正的MOISBMSE模型能够很好地分析整数约束条件下的DMUs是否DEA有效,从而求出各DMU环境效率值的大小,并得到非DEA有效的决策单元需要改进的方向和具体数量。

表 1 投入产出指标体系与数据
Table 1 Indicator system and data of inputs & outputs

DMU	废水治理设施数 (套)	工业废水污染治理投资 (万元)	治污竣工项目数 (个)	工业 GDP (亿元)	工业废水排放总量 (万吨)
北京	610	3 012	56	3 294	140 274
天津	720	11 306	174	6 123	82 813
河北	3 591	52 178	226	12 512	305 773
山西	2 378	30 523	707	6 024	134 298
内蒙古	755	38 699	247	7 736	102 424
辽宁	1 798	27 777	132	11 605	238 769
吉林	596	14 702	95	5 582	119 509
黑龙江	2 011	7 350	117	5 241	162 589
上海	1 692	5 336	237	7 098	219 244
江苏	6 685	73 572	600	23 908	598 211
浙江	8 178	101 840	654	15 338	420 961
安徽	1 793	21 476	212	8 026	254 329
福建	5 541	102 883	435	8 542	256 263
江西	1 450	16 575	110	5 828	201 190
山东	4 188	263 797	644	22 798	479 100
河南	3 420	30 452	329	15 018	403 668
湖北	2 018	35 376	273	9 735	290 200
湖南	3 275	48 312	286	9 139	304 214
广东	10 176	57 889	883	25 810	838 551
广西	2 807	43 969	223	5 279	245 578
海南	245	25 043	14	521	37 103
重庆	1 918	17 510	118	4 981	132 430
四川	4 257	53 646	307	10 551	283 657
贵州	2 640	21 041	197	2 217	91 455
云南	2 176	101 066	381	3 451	154 010
西藏	16	922	18	55	4 683
陕西	1 728	112 221	186	6 847	128 749
甘肃	627	29 510	154	2 070	62 813
青海	259	3 263	28	896	21 994
宁夏	341	14 298	84	879	38 948
新疆	689	37 905	127	2 850	93 810

注：数据来源是根据《中国统计年鉴 2012》收集整理得到。

表 2 环境效率值与无效决策单元的改进数量

Table 2 Environmental efficiency values and adjustable volumes of non-effective DMUs

DMU	得分	Bootstrap 估计值	废水治理 设施数 (套)	工业废水污染 治理投资 (万元)	治污竣工 项目数 (个)	工业 GDP (亿元)	工业废水 排放总量 (万吨)
北京	1.355	1.491	0	-1 924.71	-24	36 968.26	1.355
天津	1.271	1.398	0	0.00	50	-67 215.00	1.271
河北	0.734	0.807	0	21 024.91	59	40 505.27	0.734
山西	0.405	0.446	0	19 386.42	536	52 759.70	0.405
内蒙古	1.061	1.167	0	2 969.13	28	-18 722.50	1.061
辽宁	1.355	1.491	0	0.00	-108	-59 502.90	1.355
吉林	0.892	0.981	0	929.13	22	2 809.26	0.892
黑龙江	0.962	1.058	0	0.00	13	0.00	0.962
上海	1.400	1.540	0	-6 401.89	80	10 865.53	1.400
江苏	1.174	1.291	0	0.00	-175	-138 461.00	1.174
浙江	0.551	0.606	0	60 167.79	380	73 129.42	0.551
安徽	0.672	0.739	0	2 020.56	115	88 096.26	0.672
福建	0.375	0.413	0	82 227.81	333	79 572.39	0.375
江西	0.717	0.789	0	2 230.15	35	79 504.53	0.717
山东	1.059	1.165	0	192 618.60	68	-85 081.60	1.059
河南	1.043	1.147	0	-3 938.29	0	12 553.01	1.043
湖北	0.590	0.649	0	11 946.95	159	89 330.64	0.590
湖南	0.484	0.532	0	26 268.72	178	115 423.90	0.484
广东	1.000	1.100	0	0.00	0	0.00	0.000
广西	0.353	0.388	0	30 900.64	153	135 019.20	0.353
海南	1.205	1.326	0	23 037.50	-9	22 975.49	1.205
重庆	0.687	0.756	0	5 134.52	51	27 910.84	0.687
四川	0.545	0.600	0	28 319.66	185	66 249.61	0.545
贵州	0.316	0.348	0	16 419.23	123	58 934.65	0.316
云南	0.219	0.241	0	94 332.52	276	105 601.00	0.219
西藏	3.264	3.590	0	-2 341.00	-10	-17 311.00	3.264
陕西	0.584	0.642	0	96 635.37	72	0.00	0.584
甘肃	0.363	0.399	0	25 139.79	84	32 185.38	0.363
青海	0.936	1.030	0	385.58	2	266.30	0.936
宁夏	0.341	0.375	0	11 965.91	45	23 655.39	0.341
新疆	0.403	0.443	0	30 484.32	81	32 480.22	0.403

注: 数据来源是根据模型(2) 计算得到.

4 结束语

由于在国际上考虑整数约束的 DEA 模型被提出的时间较短,与之相关的理论和应用研究依然处在尝试和不断完善的过程中,在许多方面还存在缺陷和空白.本文在对已有的考虑整数约束的效率评价模型和考虑非期望产出的评价方法进行系统回顾后,提出了一种考虑整数约束和非期望产出的混合导向的超效率 SBM 模型,并给出了相应定理和证明.随后的实例分析说明,该方法是科学可行的,有着很强的实践意义.

对于 MOISBMSE 模型,采用 Bootstrap 方法进一步开展统计属性分析,可以有效解决小样本决策单元估计结果偏差的问题.尽管有学者将现代统计方法,如回归分析,假设检验等,应用到 DEA 中,但相关成果仍然有限.将 Bootstrap 方法应用到 DEA 模型的检测与检验中,可以完善考虑非期

望产出和整数约束效率评价模型的相关统计分析.经过不断完善对混合导向的考虑整数约束的超效率 SBM 模型统计属性特征的研究,以及在实证分析中设计必要的事前和事后统计检验,将会使该模型成为更为稳健和实用的分析工具.这一方向的研究将进一步推动 DEA 理论的发展以及在环境效率评价方面更广泛的应用.

作为一种重要的效率评价模型,考虑非期望产出的效率评价 DEA 模型在近些年里得到了较多的关注和发展.然而,现有的环境效率评价方法依然存在很多有待改进之处,除了本文所涉及的具有整数约束变量的处置外,在如何定量分析人的有限理性对环境效率的影响,将行为科学方面的研究引入到环境效率分析中,将是一个重要的研究方向.从环境保护的现实需要出发弥补这些不足,为新时期的环境效率评价提供更为稳健实用的定量分析工具,将是本文下一步的工作重点.

参 考 文 献:

- [1] 卞亦文. 非合作博弈两阶段生产系统的环境效率评价[J]. 管理科学学报, 2012, 15(7): 11 - 19.
Bian Yiwen. Eco-efficiency evaluation of non-cooperative game two-stage production system[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(7): 11 - 19. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] Cook W D, Seiford L M. Data envelopment analysis (DEA): Thirty years on[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(1): 1 - 17.
- [4] 查 勇, 梁 樑, 苟清龙, 等. 部分中间产出作为最终产品的两阶段合作效率[J]. 管理科学学报, 2011, 14(7): 21 - 30.
Zha Yong, Liang Liang, Gou Qinglong, et al. Two-stage cooperative efficiency evaluation with part of intermediate outputs as final products[J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(7): 21 - 30. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Song M L, An Q X, Zhang W, et al. Environmental efficiency evaluation based on data envelopment analysis: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 4465 - 4469.
- [8] Song M L, Zhang L L, Liu W, et al. Bootstrap-DEA analysis of BRICS' energy efficiency based on small sample data[J]. Applied Energy, 2013, 112: 1049 - 1055.
- [9] 宋文文. 金融发展能否改善我国国民收入不平等状况——基于面板门限模型分析视角[J]. 现代财经: 天津财经大学

- 院学报, 2013, (7): 24–32.
- Song Wenwen. Whether financial development can improve income inequality: An analysis from the perspective of panel threshold model[J]. *Modern Finance and Economics—Journal of Tianjin University of Finance and Economics*, 2013, (7): 24–32. (in Chinese)
- [10] Lozano S, Villa G. Data envelopment analysis of integer-valued inputs and outputs[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(10): 3004–3014.
- [11] Zhu J, Cook W D. Modeling Data Irregularities and Structural Complexities in Data Envelopment Analysis[M]. New York: Springer, 2007: 271–290.
- [12] Kuosmanen T, Matin R K. Theory of integer-valued data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 192(2): 658–667.
- [13] Matin R K, Kuosmanen T. Theory of integer-valued data envelopment analysis under alternative returns to scale axioms[J]. *Omega—International Journal of Management Science*, 2009, 37(5): 988–995.
- [14] Banker R D, Charnes A, Cooper W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. *Management Science*, 1984, 30(9): 1078–1092.
- [15] Estellita Lins M P, Angulo-Meza L, Moreira Da Silva A C. A multi-objective approach to determine alternative targets in data envelopment analysis[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2004, 55(10): 1090–1101.
- [16] Wu J, Liang L, Song H. Measuring hotel performance using the integer DEA model[J]. *Tourism Economics*, 2010, 16(4): 867–882.
- [17] Wu J, Zhou Z, Liang L. Measuring the performance of nations at Beijing summer Olympics using integer-valued DEA model[J]. *Journal of Sports Economics*, 2010, 11(5): 549–566.
- [18] Wu J, Zhou Z. A mixed-objective integer DEA model[J]. *Annals of Operation Research*, 2011, DOI: 10.1007/s10479-011-0938-8.
- [19] Alirezaee M R, Sani M R R. An enumeration algorithm for integer-valued data envelopment analysis[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2011, 18(6): 729–740.
- [20] Du J, Chen C M, Chen Y, et al. Additive super-efficiency in integer-valued data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 218(1): 186–192.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Färe R, Grosskopf S, Pasurka Jr C A. Pollution abatement activities and traditional productivity[J]. *Ecological Economics*, 2007, 62(3–4): 673–682.
- [25] 曹秀芬, 杨桂元, 宋马林. 中国电力能源效率影响因素研究[J]. *科学决策*, 2011, 18(11): 76–93.
Cao Xiufen, Yang Guiyuan, Song Malin. Research on influencing factors of electrical energy efficiency in China[J]. *Scientific Decision Making*, 2011, 18(11): 76–93. (in Chinese)
- [26] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498–509.
- [27] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32–41.
- [28] Du J, Liang L, Zhu J. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis: A comment[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 204(3): 694–697.

[29]宋马林,吴杰,杨力,等. 非期望产出、影子价格与无效决策单元的改进[J]. 管理科学学报,2012,15(10): 1-10.

Song Malin, Wu Jie, Yang Li, et al. Undesirable outputs, shadow prices and improvement on inefficient decision making units[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(10): 1-10. (in Chinese)

[30]高静. 中国SO₂与CO₂排放路径与环境治理研究——基于30个省市环境库兹涅茨曲线面板数据分析[J]. 现代财经: 天津财经学院学报,2012,(8): 120-129.

Gao Jing. Study on SO₂ and CO₂ emission path and environment quality: Based on the EKC by panel data of 30 provinces and cities in China[J]. Modern Finance and Economics—Journal of Tianjin University of Finance and Economics, 2012, (8): 120-129. (in Chinese)

Environmental efficiency evaluation MOISBMSE model considering integer constrains

SONG Ma-lin¹, WANG Shu-hong^{2*}, Qiu Xing-ye³

1. Research Center of Statistics for Management, Anhui University of Finance and Economics, Bengbu 233030, China;
2. School of Economics, Nankai University, Tianjin 300071, China;
3. School of Mathematical Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract: Traditional environmental efficiency evaluations based on DEA methods generally neglect that the inputs, desirable outputs and undesirable outputs are possibly discrete variables. Therefore, they cannot precisely address the integer practical variables, which consequently affect the validity of the evaluations. This paper extends the super efficiency SBM model based on mixed-objective integer DEA and builds a new super-efficiency SBM model which considers both integer constraints and undesirable output variables. Searching algorithm is applied to solve the new model and Bootstrap method is further used to amend the results in an application. By measuring the distance between each optimal integer point and the evaluated decision making unit, the shortest one, i. e., Pareto improvement direction, can be found. This model provides a more applicable tool for environmental efficiency evaluation.

Key words: environmental efficiency; integer constraints; undesirable outputs; searching algorithm