

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.04.016

基于 DEA 的废水治理效率评估方法及其应用

胡晓波¹, 吴红艳¹, 葛小东¹, 朱端卫¹, 周文兵¹, 程东升²

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 基于数据包络分析(DEA)模型, 以废水处理设施年度运行费用、工业污染源废水治理完成投资和城市环境基础设施建设污水处理投资为投入指标, 以工业用水重复利用量、工业废水 COD 去除量和城市污水处理厂处理量为产出指标, 利用 2003—2010 年我国 26 个地区的面板数据对湖北省废水治理效率进行评估。结果表明: 2010 年该省废水治理相对总效率比 2003 年提高 53%; 3 项产出不足值变化情况基本一致, 且具有可同步、均衡提升的特点。马奎斯特全要素生产率指数(Malmquist TFP)计算结果显示湖北省废水治理效率变化指数累积值为 1.529, 远大于废水治理技术变化指数累计值 0.929, 表明该省废水治理绩效提升的主导因素是优化了废水治理投入产出配置。

关键词: 数据包络分析; 废水治理; 政策评估; 效率分析

中图分类号: X12 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2013)04-0077-05

Method for efficiency assessment of wastewater treatment and application based on DEA

HU Xiaobo¹, WU Hongyan¹, GE Xiaodong¹, ZHU Duanwei¹, ZHOU Wenbing¹, CHENG Dongsheng²

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The efficiency of wastewater treatment in Hubei Province, China was analyzed using the data envelopment analysis (DEA) model. The model's inputs included the annual expenditure for the operation of wastewater treatment equipment and the investment completed in pollution treatment of industrial wastewater and sewage treatment for urban environmental infrastructure construction, and its outputs included the quantity of industrial recycled water use, the amount of COD removed from industrial wastewater, and the quantity of wastewater treated in wastewater treatment plants. Panel data from 26 districts of China from 2003 to 2010 were employed. The results show that the CRS technical efficiency increased by 53% in 2010 compared with 2003. The deficiency of the three outputs varied consistently. The calculation result of the Malmquist TFP index shows that the cumulative value of the wastewater treatment efficiency change for Hubei Province was 1.529, which was much higher than the cumulative value of the technical change (0.929), indicating that the dominant factor in the improvement of the wastewater treatment efficiency was the optimized allocation of inputs and outputs.

Key words: data envelopment analysis (DEA); wastewater treatment; policy assessment; efficiency analysis

长期以来,水污染控制及其治理是我国环保工作的重点工作之一,2000—2010 年间全国工业污染源(包括废水、废气、固体废弃物、噪声及其他)治理

投资中废水治理投资平均每年 127.42 亿元,占工业污染源治理投资平均值 364.03 亿元的 35%。然而,尽管水污染防治政策在阻止水污染进一步恶化

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07631-03)
作者简介:胡晓波(1987—),男,硕士研究生,研究方向为环境规划与管理。E-mail:huxiaobo@webmail.hzau.edu.cn
通信作者:葛小东,副教授。E-mail:gexd@mail.hzau.edu.cn

方面发挥了一定的作用,但如何评估水污染防治政策的效率并提出合理的改革措施,仍然研究不足。当前,国内关于水环境政策效率分析的研究相对较少,且着力点不同。比如,贺桂珍等^[1]讨论了太湖水污染防治“十五”规划的相对效率,王宝顺等^[2]研究了我国地方城市环境治理财政支出效率水平,黄和平等^[3]应用改进的资源环境绩效指数对江西省整体资源环境强度与绩效进行了分析。这些研究并未深入分析决策单元水污染防治产出不足及效率变化因素。基于此,笔者试图以数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法为基础,构建水污染防治政策效率评估模型,并以湖北省为例,研究其水污染防治效率的变化趋势及主导因素。

1 研究方法

1.1 评估模型

笔者基于 DEA 模型建立废水治理效率评估模型。DEA 是运筹学家 Charnes 等^[4]提出的一种效率评价方法,借助线性规划工具,以决策单元的投入产出项观测值为已知量,求解目标决策单元相对其他决策单元的效率值及其投入冗余值和产出不足值。

根据 DEA 理论与废水治理情况,以废水治理效果为导向,设定模型为可变规模效益(variable returns to scale, VRS)模式,构建线性规划模型如式(1)^[5]所示。

$$\begin{cases} \max_{\phi, \lambda} \phi \\ \text{s. t.} & -\phi y_i + y\lambda \geq 0 \\ & x_i - x\lambda \geq 0 \\ & N'\lambda = 1 \\ & \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ 为目标函数; λ 为权系数向量; x 、 y 分别为目标决策单元的投入、产出观测值矩阵; x_i 、 y_i 分别为其他决策单元的投入、产出观测值矩阵; N' 为单元行向量。

通过纯技术效率值($1/\phi$)——可变规模效益时技术效率(variable returns to scale technical efficiency, VRSTE)值 V_{VRSTE} , 结合 DEA 软件 Windeap 计算出的总效率值——规模效益不变时技术效率(constant returns to scale technical efficiency, CRSTE)值 V_{CRSTE} , 可计算规模效率(scale efficiency)值 V_{SE} , $V_{SE} = V_{CRSTE}/V_{VRSTE}$ 。上述 3 种效率值取值范围为 0~1, 值为 1 时表示达到有效;将约束条件 $N'\lambda = 1$ 替换为 $N'\lambda \leq 1$, 可得 NIRS(non-increasing returns to scale)模型,可使 Windeap 计算 V_{NIRSTE} 并判断决策单元的规模效益是递增还是递

减。 V_{NIRSTE} 若与 V_{VRSTE} 相等,则该决策单元规模效益递减,否则规模效益递增;若与 V_{CRSTE} 相等,则规模效益不变。

($1/\phi$)=1 时,表示决策单元达到了废水治理技术有效;($1/\phi$)<1 时,则表示决策单元存在(废水治理)投入冗余或(废水治理效果)产出不足。求出 λ 后,对其他各决策单元的产出进行线性组合可得理想产出值向量($1/\phi$) $y\lambda$ 。比较理想产出值与原值,可计算决策单元产出不足值。

1.2 全要素生产率指数

全要素生产率(Malmquist TFP)指数最初用于生产效率变化的测算,1994 年 Färe 等^[6]将其与 DEA 理论相结合,使得 Malmquist TFP 指数得到广泛应用。根据废水治理效率评估模型,可以确定 Malmquist TFP 指数,该指数用于计算决策单元的废水治理效率与相邻时期废水治理的最佳状态的距离来反映废水治理绩效的变动情况。为分析决策单元绩效演变的主导因素,可进一步将其分解为技术效率变化和技术变化两大因子,其定义式见式(2)^[7]:

$$\text{Malmquist } TFP_i^{t+1}(y^{t+1}, x^{t+1}, y^t, x^t) = \frac{D_i^{t+1}(y^{t+1}, x^{t+1})}{D_i^t(y^t, x^t)} \left[\frac{D_i^t(y^{t+1}, x^{t+1})}{D_i^{t+1}(y^{t+1}, x^{t+1})} \cdot \frac{D_i^t(y^t, x^t)}{D_i^{t+1}(y^t, x^t)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: t 为第 t 个废水治理期; i 为第 i 个废水治理决策单元; x^t 、 y^t 、 x^{t+1} 、 y^{t+1} 分别表示第 i 个废水治理决策单元 t 期、 $t+1$ 期的投入、产出项观测值短阵; $D_i^t(y^t, x^t)$ 为第 i 个废水治理决策单元第 t 期与同期废水治理前沿面的距离函数; $D_i^t(y^{t+1}, x^{t+1})$ 为第 i 个废水治理决策单元第 $t+1$ 期与 t 期废水治理前沿面的距离; $D_i^{t+1}(y^t, x^t)$ 、 $D_i^{t+1}(y^{t+1}, x^{t+1})$ 的意义同理类推。等式右边第 1 项和第 2 项分别是废水治理技术效率变化因子和技术变化因子的表达式。其值大于 1 时,决策单元废水治理效率上升,反之则下降。

为了解决策单元的废水治理效率是否得到提升及其变化程度,需要计算 Malmquist TFP 指数。计算该指数分解项——技术效率变化和技术变化因子则有助于挖掘废水治理绩效变动的因素。

2 评估模型参数确定

废水治理的投入由两部分组成:治理设施投资和日常运行费用。前者主要以废水处理土建构筑物、废水处理机械设备等固定资产的形式存在,是废水治理的原始基础投入;后者是废水处理过程中持续消耗的费用,由废水处理设计工艺和运营管理决定。两者在投资时间上存在先后关系,治理设施投资属一次性短期投资,运行费用属持续性长期投资;

在投资使用性质上,前者属长期使用但存在折旧,后者属消耗性日常开支。

我国废水治理设施投资主要包括城市环境基础设施建设污水处理投资、工业废水污染源治理投资和建设项目“三同时”环保投资废水治理部分。事实上,“三同时”数据主要是针对主体工程和环保设施建设期间的环保投入,该项投入理论上与企业本身废水治理的固定投入有一定的重叠性,而“三同时”期间,还没有生产过程的废水治理。在本文的讨论中,更重要的是讨论在生产过程中实际产生废弃物后,企业为达标排放而进行的废水治理,以及政府为进一步工业废水处理以及城市生活污水处理而进行的废水治理。因此,笔者将废水治理设施投资按来源分为政府和企业两部分讨论:城市环境基础设施建设污水处理投资是指用于处理城市生活污水的基础设施投资,由政府投资建设,主要包括城市污水处理厂和排水管道的建设;工业废水污染源治理投资主要指排污企业内部污染源治理基础设施的投入,由排污企业投资建设,一般为分散式污水处理站建设,对企业产生污水进行处理,达标后排入城市污水处理厂或接纳水体。如果要进一步评估环境影响评价制度等政策对废水治理的总体影响,即必须考虑工业建设期或无环保建设的运行时期时废水产生和治理情况时,则应当考虑“三同时”数据。

废水治理设施运行费用主要包括废水处理过程中能源和物料消耗的费用,具体包括电费、药剂费、管理人员工资福利及设施维护费用。该项指标属消耗性指标,反映了废水治理设施实际运行投入。

废水治理产出指标则涵盖了对工业废水和生活污水的实际处理效果,包括废水经处理后回用和排放两种去向。2010 年湖北省工业用水重复利用量达 219296 万 t,重复利用率达 82.57%,是废水治理的“节水减排”产出之一。工业废水 COD 去除量数据较为详尽,可准确反映工业废水治理的效果,对于城市生活污水治理效果,采用可获得的城市污水处理厂处理量数据。

因此,废水治理效率评估模型主要投入项包含工业废水和生活污水治理工程设施及其运行投入,具体为工业污染源废水治理完成投资、城市环境基础设施建设污水处理投资及废水处理设施运行费用;主要产出项包含工业废水或生活污水的处理量、废水污染物去除量和废水处理后回用量,具体为城市污水处理厂处理量、工业废水 COD 去除量及工业用水重复利用量。

废水治理效率分析投入产出指标说明如表 1 所示。

表 1 废水治理效率分析投入产出指标说明		
类别	指标名称	说明
投入项	工业污染源废水治理完成投资	工业废水处理基础设施投入(固定资产)
	城市环境基础设施建设污水处理投资	城市污水处理投入(生活污水处理为主,固定资产)
	废水处理设施运行费用	废水治理日常运行投入
产出项	城市污水处理厂处理量	城市污水污染物削减(以生活污水为主)
	工业废水 COD 去除量	工业污染物削减
	工业用水重复利用量	节约水资源

3 结果与分析

3.1 湖北省废水治理效率变化情况

根据废水治理效率评估模型,以表 1 中各项指标的观测数据为基础,湖北省 2003—2010 年废水治理效率变化情况如图 1 所示。湖北省 2003—2010 年废水治理总效率值大体呈上升趋势,由 2003 年的 0.587 上升至 2010 年的 0.896,提高了 53%,并于 2007 年达到了 DEA 有效,说明了该省废水治理的各项投入资源配置逐渐得到优化。截至 2010 年,该省废水治理相对纯技术效率和规模效率分别达到 0.922 和 0.972,相对总效率值达到 0.896,说明湖北省废水治理效率水平近年来进步较大。由图 1 还可以看出,2008—2010 年间各效率值变化趋于稳定。

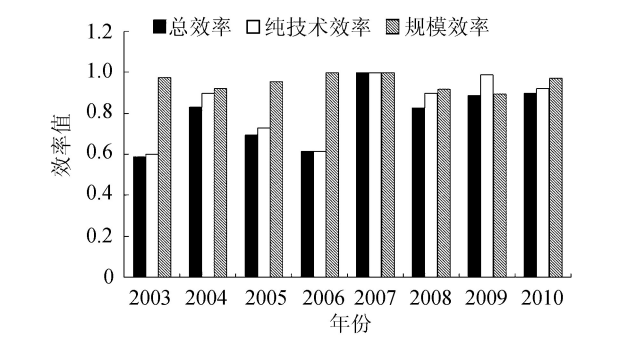


图 1 湖北省废水治理效率变化情况 (2003—2010 年)

3.2 湖北省废水治理产出不足分析

废水治理主要关注以水体污染物削减和节约水资源为代表的环境效益和经济效益产出,此处仅对湖北省废水治理产出不足进行分析。对产出项工业用水重复利用量、工业废水 COD 去除量和城市污水处理厂处理量作产出不足分析,结果见图 2。

由图 2 可见,除 2007 年外,2003—2010 年间湖北省废水治理相对于废水治理前沿省份都存在产出不足,不同年份间波动性较大。工业用水重复利用量、工业废水 COD 去除量和城市污水处理厂处理量 3 项产出不足量变化情况基本一致,前 4 年(2003—2006 年)产出不足量明显大于后 3 年(2008—2010 年),进一步说明了该省废水治理效率得到提高。

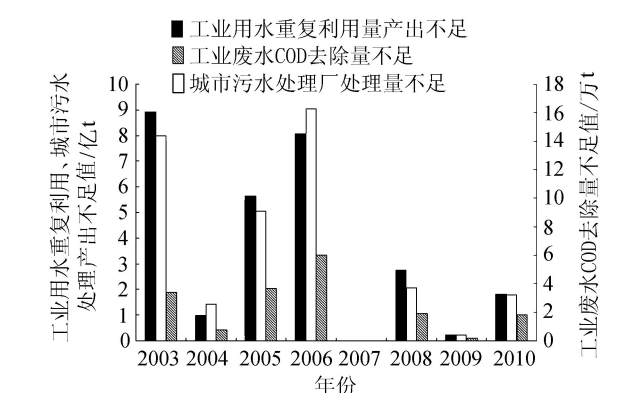


图2 湖北省废水治理产出不足变化情况(2003—2010年)

同时,3项产出在不同年份均出现不足,且可提升幅度在各个年份基本一致,表明各项废水治理效果具有可同步、均衡提升的特点,具体见表2。

湖北省废水治理出现产出不足的原因是多方面的:①该省环保投资比率较低,废水治理缺乏力度,2010年该省环境污染治理投资占GDP比重仅为0.92%,远低于全国平均水平1.66%;②该省经济欠发达,无论是环保重视程度还是环保产业都与东部沿海地区存在差异,其管理水平和环保技术都遏制了该省废水治理效率的提高;③该省位于我国长江中游,较下游而言,废水治理压力较轻,也是导致废水治理效率较低的原因之一。

3.3 湖北省废水治理绩效提升因素分析

在Windeap中导入2004—2010年26个地区的面板数据,计算湖北省废水治理Malmquist TFP相关指数,结果见图3。2004年和2007年TFP指数较大,表明这两年该省废水治理绩效提升较大,TFP和技术效率变化指数先下降、后上升,其值围绕1上下波动。为便于分析,进一步对各指数值分别进行累乘二次处理,得出:湖北省废水治理效率变化、治理技术变化和废水治理绩效变动指数的累计值分别为1.529,0.929和1.421,其中废水治理效率变化指数累积值为1.529,远大于废水治理技术变化指数累积值0.929,表明优化废水治理投入产出配置是该省废水治理绩效提升的主导因素。其他26个地区

的均值分别为1.355,0.854和1.178,可见湖北省无论是废水治理效率变化幅度还是废水治理技术变化幅度都超出全国平均水平。

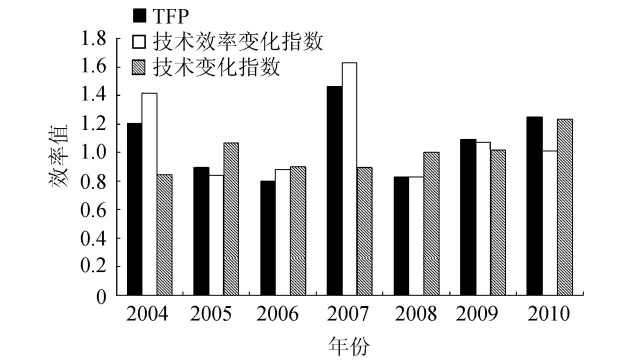


图3 湖北省废水治理 Malmquist TFP 相关指数变化情况(2004—2010年)

4 结论与建议

以废水处理设施年度运行费用、工业污染源废水治理完成投资和城市环境基础设施建设污水处理投资为投入指标,以工业用水重复利用量、工业废水COD去除量和城市污水处理厂处理量为产出指标,建立DEA模型,对湖北省废水治理效率进行评估,得出如下结论。

- a. 该省2003—2010年废水治理效率整体呈上升趋势并趋于稳定,2010年与2003年相比,效率提升53%,说明该省水污染防治效率水平在各省之中得到较大提升并趋于稳定。
- b. 该省废水治理仍普遍存在产出不足,表现在工业用水重复利用量不足、工业废水污染物削减量不足和城市生活污水处理量不足等方面;且具有可同步、均衡提升的特点,表现在不同年份各项产出都出现不足,且可提升幅度基本相同。废水治理产出不足比率存在巨大幅降低,也说明废水治理效率的提升。不同年份间产出不足比率的巨大差异的原因不仅包括自身效率水平波动,而且源自其他各省效率水平更大范围的变动。
- c. 进一步研究该省废水治理绩效上升的原因,

表2 湖北省废水治理产出不足分析(2003—2010年)

年份	产出项目标值/万 t			产出项原值/万 t			产出项可提升率/%		
	工业重复用水量	工业废水COD去除量	城市污水处理厂处理量	工业重复用水量	工业废水COD去除量	城市污水处理厂处理量	工业重复用水量	工业废水COD去除量	城市污水处理厂处理量
2003	119480.31	36.05	47952.48	30361.00	21.66	28810.50	293.53	66.44	66.44
2004	96977.23	25.19	43261.53	87165.00	22.64	38884.30	11.26	11.25	11.26
2005	146945.28	33.36	75730.17	90643.00	24.29	55136.00	62.11	37.35	37.35
2006	208739.16	42.11	86774.92	128111.00	25.85	53257.00	62.94	62.93	62.94
2007	167478.00	22.69	85061.00	167478.00	22.69	85061.00	0.00	0.00	0.00
2008	270048.23	36.43	104092.32	242584.00	32.72	93506.00	11.32	11.32	11.32
2009	208503.81	36.06	105734.58	206300.00	35.68	104617.00	1.07	1.07	1.07
2010	231151.79	41.08	131220.35	213097.00	37.87	120971.00	8.47	8.47	8.47

发现主要原因是优化了废水治理投入产出配置。污水处理工艺和设备技术引自国外,已经较为成熟,我国水污染仍处于初级阶段,技术进步的影响远小于提高管理效率对废水治理绩效的贡献。

根据以上分析,DEA 作为一种相对效率分析方法,能够在复杂的废水治理效率评估中得以较好地运用,主要表现在以下方面:DEA 实现了废水治理效率的定量评估,能够得出更加客观准确的评估结果;DEA 能够对废水治理进行投入冗余和产出不足分析,并提出合理的废水治理投入预算和产出目标;DEA 结合 Malmquist TFP 指数能够挖掘出废水治理绩效变动的主导因素,为废水治理的绩效评估提供信息。

针对湖北省废水治理的效率分析结果,提出如下建议:①加大废水治理投入,力争使环境污染治理投资占 GDP 比率达到 2%(根据西方国家环保发展史,环境污染治理投资占 GDP 比率达到 2%可基本遏制环境进一步恶化);②大力发展污水处理行业,提高污水处理工程技术和污水处理设备制造技术水平,摆脱污水处理设备对沿海产地的依赖;③增强废水治理的危机感和使命感,为保护“千湖之省”——湖北的水环境作出贡献。

参考文献:

[1] 贺桂珍,吕永龙.太湖水污染防治计划实施效率评估[J].生态学报,2008,28(12): 6348-6354. (HE Guizhen, LÜ Yonglong. Efficiency evaluation on Taihu Lake water pollution control[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(12):

6348-6354. (in Chinese))
[2] 王宝顺,刘京焕.中国地方城市环境治理财政支出效率评估研究[J].城市经济,2011,18(4): 71-76. (WANG Baoshun, LIU Jinghuan. Empirical study on efficiency of provincial public spending on urban environment protection in China [J]. Urban Studies, 2011, 18 (4): 71-76. (in Chinese))
[3] 黄和平,伍世安,智颖飙,等.基于生态效率的资源环境绩效动态评估:以江西省为例[J].资源科学,2010,32(5): 924-931. (HUANG Heping, WU Shian, ZHI Yingbiao, et al. Dynamic evaluations of resources and environmental performance based on eco-efficiency: a case study of Jiangxi Province [J]. Resources Science, 2010, 32 (5): 924-931. (in Chinese))
[4] 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.
[5] COELLI T. A guide to DEAP version 2.1: a data envelopment analysis (computer) program [R]. Armidale: Centre for Efficiency and Productivity Analysis (CEPA) of University of New England, 1997.
[6] FÄRE R, GROSSKOPF S, NORRIS M, et al. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries [J]. The American Economic Review, 1994, 84(1): 66-83.
[7] FÄRE R, GROSSKOPF S, LINDGREN B, et al. Productivity changes in Swedish pharmacies 1980-1989: a non-parametric Malmquist approach [J]. Journal of Productivity Analysis, 1992, 3: 85-101.

(收稿日期:2012-12-24 编辑:徐 娟)

(上接第 25 页)

[3] ADAMS S, TITUS R, PIETERSEN K, et al. Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa [J]. Journal of Hydrology, 2001, 241 (1/2): 91-103.
[4] WU F F, WANG X. Eutrophication evaluation based on set pair analysis of Baiyangdian Lake, North China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1030-1036.
[5] 孟宪萌,胡和平.基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2009,40(3): 257-262. (MENG Xianmeng, HU Heping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality [J]. Journal of Hydraulic

Engineering, 2009, 40(3): 257-262. (in Chinese))
[6] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1995:50-51.
[7] GB5749—2006 生活饮用水卫生标准[S].
[8] 章光新,邓伟,何岩,等.中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J].水科学进展,2006,17(1): 20-28. (ZHANG Guangxin, DENG Wei, HE Yan, et al. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. Advances in Water Science, 2006, 17 (1): 20-28. (in Chinese))
[9] GBT14848—93 地下水环境质量标准[S].

(收稿日期:2012-09-05 编辑:高渭文)