

买亚宗,肖婉婷,石磊,等.我国城镇污水处理厂运行效率评价[J].环境科学研究,2015,28(11):1789-1796.

MAI Yazong, XIAO Wanting, SHI Lei, et al. Evaluation of operating efficiencies of municipal wastewater treatment plants in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(11): 1789-1796.

## 我国城镇污水处理厂运行效率评价

买亚宗,肖婉婷,石磊\*,马中

中国人民大学环境学院,北京 100872

**摘要:** 污水处理厂运行效率的定量评价是当前污水处理行业管理需要解决的问题,效率研究将有助于政府制订合理政策以促进污水处理厂的发展。基于全要素生产框架,采用 DEA(数据包络分析)方法构建了污水处理厂运行效率评价模型,以固定资产总额、年运行费用、污水处理人员数和年耗电量为投入变量,以污水年处理量、BOD<sub>5</sub>和氨氮削减量为产出变量,对 2013 年我国 74 座排放标准为一级 A 且处理工艺相同的城镇污水处理厂作为样本进行效率评价。基于评价结果,对运行效率和污水厂处理规模之间的关系进行检验,并对样本的投入冗余和产出不足情况进行定量分析。结果显示:有 20 个样本的运行效率达到相对最优,可以成为其余效率不足样本今后改进的标杆;有 10 个样本纯技术效率有效但规模效率无效,需要改进其规模;85.2% 的 DEA 无效样本规模报酬为递增状态,表明我国污水处理行业整体上处于规模收益递增的发展阶段;通过 KW( Kruskal-Wallis) 检验发现,样本污水处理厂具有规模效应,规模越大的运行效率越高;54 个 DEA 无效样本存在不同程度的投入冗余和产出不足,冗余率或不足率较高的样本是今后进行效率改进的重点对象。

**关键词:** 污水处理厂;效率;全要素生产率;数据包络分析

中图分类号: X324

文章编号: 1001-6929(2015)11-1789-08

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2015.11.18

## Evaluation of Operating Efficiencies of Municipal Wastewater Treatment Plants in China

MAI Yazong, XIAO Wanting, SHI Lei\*, MA Zhong

School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

**Abstract:** Quantitative evaluation of the efficiency of municipal wastewater treatment plants (WTPs) is a problem for the sewage treatment industry. Efficiency assessment contributes to making WTP development policy more scientific and reasonable. For this purpose, under the framework of the total factor productivity (TFP), data envelopment analysis (DEA) was employed to establish an evaluation model of the efficiency of WTPs, including input indices of gross fixed assets, annual operating cost, employment and annual power consumption, and output indices of wastewater treatment capacity and pollutant reduction of BOD<sub>5</sub> and NH<sub>3</sub>-N. A total of 74 samples were selected as the empirical analysis objects, which have the same discharge standard and treatment process. An efficiency index was obtained for each plant by means of mathematical programming techniques, aiming to determine the relationship between WTPs' efficiency and their scales, and to analyze the sample input redundancy and output slack using a quantitative method. In total, 20 samples reached their relative optimal efficiencies, which means these samples could be benchmarks for other samples. There were 10 samples with pure technical efficiencies, but no scale efficiencies which are needed to improve their scale. 85.2% of the DEA invalid samples showed increasing returns to scale, which indicates the sewage treatment industry in China is in the process of rapid development, with high potential to increase the profits by augmenting investments in the industry. Furthermore, through the Kruskal-Wallis Test, it was determined that the larger plants ran more efficiently than the small plants, which indicates the scale effect in the industry, as was expected. Different levels of input redundancy or output slack existed in the 54 DEA invalid samples; these samples would be the key objects to improve the operating efficiency.

**Keywords:** wastewater treatment plant; efficiency; total factor productivity; data envelopment analysis

收稿日期: 2015-02-12

修订日期: 2015-05-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07633-02); 国家自然科学基金青年项目(12CG1069); 中国人民大学科学研究基金项目(15XNH043)

作者简介: 买亚宗(1988-)男(回族)河南焦作人 maiyazong@163.com

\* 责任作者 石磊(1978-)男 山东青岛人 副教授,博士,主要从事环境经济与管理研究 qdshl@126.com

随着我国工业化、城镇化进程的快速推进,工业废水和生活污水的排放总量不断加大,许多地区主要

水污染物排放量已经超过环境容量,给水环境带来巨大压力,经济社会发展的环境约束将日趋凸显。投资建设污水处理设施是城镇发展过程中的重要环节,其中城镇污水集中处理一直是我国水污染防治的一项指导方针。近年来,大量政府和民间资本进入城镇污水处理设施建设的领域,城镇污水处理厂的数量和规模迅速提升。截至 2014 年 3 月,我国城镇污水处理厂的数量达 3 622 座,较 2010 年增加了 45%;全国建有污水处理厂的县城共有 1 381 个,占总县城数的 85%;污水日均处理能力达  $2.758 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

实现城镇污水和工业废水的有效治理,不仅需要大幅增加污水集中处理设施,更需要提高处理设施的运行效率。然而,目前我国城镇污水处理设施的运行效率较低<sup>[1]</sup>。因此如何科学地评价及提高现有污水处理设施运行效率的问题备受关注,效率评价研究将有助于政府部门制订合理政策促进污水处理行业的健康发展,同时也为企业制订发展战略提供指导和建议。

目前,国内关于污水处理厂运行效率的研究,主要采用定性分析和单指标评价法<sup>[2-6]</sup>,系统的定量研究较少。胡晓波等<sup>[7-8]</sup>从不同年份的角度对废水治理效率进行评估;赵强等<sup>[9-10]</sup>对单一年份进行效率评估,但是样本量偏少;褚俊英等<sup>[11-12]</sup>根据实地调研数据,对污水处理厂进行效率评估,但是缺乏对评估结果的进一步分析。国外研究中,相当一部分是从不同处理工艺和技术对污水处理厂运行效率影响的角度进行评价<sup>[13-17]</sup>。Nourali 等<sup>[18-21]</sup>通过构建评价模型对不同地区的污水处理企业进行效率评估,并对企业提高运行效率的潜力和发展趋势进行分析。Francesc 等<sup>[22-25]</sup>采用定量研究的方法对污水处理厂进行运行效率测算,并对效率差异影响因素进行探讨。目前已有研究主要以效率评价为主,对评价结果挖掘不够深入。该研究综合资本、劳动和能源等生产投入要素,在全要素生产框架下,将综合效率细分为纯技术效率和规模效率进行分析,对决策单元的投入冗余和产出不足情况做进一步分析,以期为每一座污水处理厂进行效率改进提供方向和建议。

## 1 研究方法

### 1.1 DEA 方法

DEA (data envelopment analysis, 数据包络分析) 方法由美国运筹学家 Charles、Cooper 和 Rhodes 于 1978 年提出,该方法主要是通过保持 DMU (decision making unit, 决策单元) 的输出和输入不变,根据一组

关于投入-产出的观察数据来确定有效生产前沿面,利用线性规划来判断各 DMU 对应的点是否位于有效生产前沿面上,通过比较 DMU 偏离前沿面的程度来评价他们的相对有效性<sup>[26]</sup>。DMU 可以是任何将多种投入转化成多种产出的实体。生产前沿是对一个经济系统最优生产行为的描述,是根据已知的投入-产出数据,构造出的投入-产出一切可能组合的外部边界。有效生产前沿面是满足最优化条件的曲线,可以看成是可行域的边界。

事实上,DEA 方法已经在给水排水产业效率评价的研究中得到广泛应用<sup>[27]</sup>。相比其他效率评价方法(如最小二乘法、随机前沿法等),DEA 方法拥有诸多优势,如能够综合处理多投入、多产出变量,使得评价更为准确、全面;基于实证数据,不需要进行先验假设;不需要预先设定权重系数和函数公式,避免受到主观因素影响等<sup>[28]</sup>。

DEA 模型假设在每一个时期  $t$  内,有  $n$  个决策单元,每个决策单元都通过  $m$  种投入要素  $X$  和  $l$  种产出  $Y$ ,由此构成生产可能集。投入集向量和产出集向量分别为

$$X = (x_{1m}^t, x_{2m}^t, \dots, x_{nm}^t)^T, Y = (y_{1l}^t, y_{2l}^t, \dots, y_{nl}^t)^T$$

基于投入导向规模报酬可变的 DEA 模型:

$$h = \min \varphi$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \delta_i x_{ij} + s^- = \varphi x_0, & j = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^n \delta_i y_{ir} - s^+ = y_0, & r = 1, 2, \dots, l \\ \sum_{i=1}^n \delta_i = 1 \\ \delta_i \geq 0, & i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

式中  $\varphi$  为模型的最优解,  $\delta_i$  为对偶变换系数,  $x_{ij}$  表示决策单元  $i$  对于要素  $j$  的投入,  $y_{ir}$  表示决策单元  $i$  对于  $r$  的产出,  $s^-$  和  $s^+$  分别代表各项投入/产出的松弛变量,  $x_0$  和  $y_0$  分别代表决策单元的初始投入和产出。

该模型是假定决策单元 VRS (variable returns to scale, 规模收益可变) 假设条件下的效率评价模型,通常称为 BCC 模型,该模型与 CCR 模型是最广为使用的 2 种 DEA 模型,前者假设当决策单元的规模增大或减小时其规模报酬会发生变化,而后者则假定规模报酬不会发生变化<sup>[29]</sup>。

如图 1 所示,假设有 6 个单投入、单产出的决策单元(分别为 A、B、C、D、E、F,它们各自的投入和产

出情况不同), 直线代表 CRS (constant returns to scale, 规模收益不变) 假设条件下的效率前沿面, CRS 有效代表规模效率和纯技术效率皆有效, 即决策单元不仅在资源投入上配置最优, 而且在生产规模上也达到最优; 而曲线代表 VRS 假设条件下的效率前沿面, VRS 有效代表技术有效, 即决策单元在生产中投入资源的数量有效. 如果决策单元将点投影在前沿面上, 说明该决策单元达到技术或规模有效, 反之则代表技术或规模无效. 图 1 中决策单元 A、B、C、D、E 均达到了 VRS 有效, 但是只有决策单元 C 达到了 CRS 有效. 当给出效率值排序时, DEA 允许分别从规模效率和纯技术效率的角度去进行分析<sup>[30-31]</sup>.

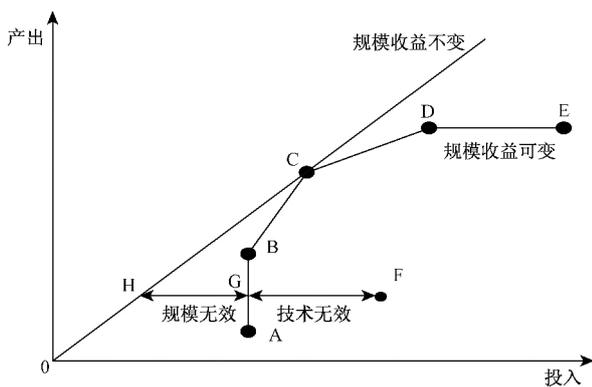


图 1 单投入和单产出情况下 CRS 与 VRS 的效率前沿面比较

Fig. 1 Comparison of CRS and VRS in a single-input and single-output case

1.2 模型构建

借助 Cobb-Douglas 生产函数, 可以构建 DEA 模型的全要素生产框架:

$$Q(G, D) = f(K, L, E)$$

式中,  $G$  为经济产出,  $D$  为污染物削减,  $K$  为资本投入,  $L$  为劳动力投入,  $E$  为能源投入.

尽管不同时期建设的污水处理厂所采用的处理工艺和标准有所不同, 但是污水处理厂的投入均可由两部分组成: ①建设成本, 主要以污水处理设施和污水管网的建设投资为主; ②运行成本, 包括人员费用、水电费、外购原材料费、维护费、污泥处理处置费和管理费等. 污水处理厂的产出则可由建设投资所形成的污水处理能力和污水处理效果组成. 因此, 该研究在 DEA 投入指标上, 以污水处理厂的固定资产总额和年运行费用代表资本投入, 以污水处理从业人数代表劳动力投入, 以年耗电量代表能源投入; 在产出指标上, 以污水年处理量代表污水处理能力, 以  $BOD_5$  削减量和氨氮削减量代表污水处理效果.

2 结果与分析

2.1 数据说明

数据来自 2013 年《城镇排水统计年鉴》<sup>[32]</sup>. 考虑执行标准的不同和处理工艺对污水处理厂运行效率所带来的影响, 以及未来我国对水污染控制日趋严格, 该研究选择执行一级 A 标准且处理工艺为二级处理的 400 余座污水处理厂为研究对象, 再根据所选样本的数据完整性和异常值进一步进行筛选, 最后得到 74 座城镇污水处理厂的数据作为研究样本. 样本数据的描述性统计分析见表 1.

表 1 研究样本的描述性统计分析

Table 1 Summary statistics of inputs and outputs

变量	投入			产出			
	资本		劳动力	能源	污水年处理	$BOD_5$ 年削	氨氮年削
	固定资产总额/ $10^4$ 元	年运行费用/ $10^4$ 元	污水处理从 业人数	年耗电总量/ $10^4$ kW·h	总量/ $10^4$ $m^3$	减量/t	减量/t
平均值	6 195.64	627.55	26	272.89	919.78	1 097.76	223.59
标准差	3 445.41	505.09	11	255.99	712.66	1 282.51	239.87
最小值	1 454.00	126.00	10	20.52	82.00	131.05	18.26
最大值	15 891.00	2 455.00	53	1 492.00	3 741.70	7 262.10	1 847.00

2.2 模型评价结果

运用 DEAP 2.1 软件包对指标数据进行投入导向型的 DEA 计算, 得到 2013 年 74 座污水处理厂的运行效率评价结果见表 2. 图 2 显示了样本综合效率的总体分布情况.

由表 2 和图 3 可见, 达到 DEA 最优 (即  $C =$

1.000) 的共 20 座污水处理厂, 说明这些污水处理厂在运行过程中资本、劳动力和能源的配置相对较好, 运行效率在全部 74 个样本中处于最优水平. 运行效率处于良好 ( $0.800 \leq C < 1.000$ ) 和中等 ( $0.600 \leq C < 0.800$ ) 水平的样本分别有 21 和 15 座, 约占总样本数的一半. 运行效率处于差等 ( $C < 0.600$ ) 水平的样本

表2 基于全要素生产率的DEA评价结果

Table 2 Evaluation results of DEA model based on TFP

样本序号	C	V	S	irs/drs/—	样本序号	C	V	S	irs/drs/—
1	1.000	1.000	1.000	—	43	0.834	0.938	0.889	irs
2	1.000	1.000	1.000	—	44	0.832	1.000	0.832	irs
10	1.000	1.000	1.000	—	41	0.829	0.847	0.978	irs
26	1.000	1.000	1.000	—	73	0.819	0.990	0.827	irs
30	1.000	1.000	1.000	—	33	0.797	0.844	0.944	irs
31	1.000	1.000	1.000	—	59	0.793	0.837	0.947	irs
36	1.000	1.000	1.000	—	63	0.783	1.000	0.783	irs
39	1.000	1.000	1.000	—	67	0.777	0.784	0.992	drs
45	1.000	1.000	1.000	—	27	0.773	1.000	0.773	irs
49	1.000	1.000	1.000	—	5	0.754	0.800	0.943	drs
51	1.000	1.000	1.000	—	46	0.744	0.835	0.891	irs
53	1.000	1.000	1.000	—	16	0.733	0.741	0.989	irs
55	1.000	1.000	1.000	—	20	0.727	1.000	0.727	irs
56	1.000	1.000	1.000	—	40	0.712	0.733	0.972	irs
57	1.000	1.000	1.000	—	29	0.711	0.741	0.958	irs
58	1.000	1.000	1.000	—	52	0.702	0.770	0.912	irs
61	1.000	1.000	1.000	—	22	0.668	0.798	0.837	irs
65	1.000	1.000	1.000	—	38	0.637	0.683	0.932	irs
66	1.000	1.000	1.000	—	8	0.632	0.632	0.999	—
71	1.000	1.000	1.000	—	11	0.585	0.732	0.799	irs
9	0.998	1.000	0.998	irs	54	0.584	0.587	0.995	drs
69	0.974	1.000	0.974	irs	32	0.563	0.601	0.938	irs
37	0.956	0.973	0.982	drs	74	0.555	1.000	0.555	irs
60	0.934	0.939	0.995	drs	12	0.552	0.680	0.812	irs
35	0.925	0.936	0.988	irs	23	0.526	0.823	0.639	irs
25	0.923	1.000	0.923	irs	6	0.526	0.764	0.689	irs
21	0.920	1.000	0.920	irs	19	0.516	0.626	0.823	irs
48	0.905	0.919	0.984	irs	72	0.508	1.000	0.508	irs
50	0.885	1.000	0.885	irs	7	0.488	0.885	0.551	irs
14	0.877	0.913	0.961	irs	24	0.488	0.774	0.631	irs
47	0.874	0.956	0.914	irs	18	0.485	0.513	0.944	irs
64	0.872	0.971	0.898	drs	13	0.477	0.497	0.960	irs
62	0.872	0.969	0.900	irs	34	0.473	0.557	0.849	irs
42	0.861	0.930	0.927	irs	68	0.454	0.500	0.908	irs
4	0.861	0.864	0.997	drs	3	0.423	0.701	0.603	irs
28	0.850	0.991	0.857	irs	15	0.390	0.642	0.608	irs
70	0.841	0.846	0.994	irs	17	0.312	1.000	0.312	irs

注: C 为综合效率值; V 为纯技术效率值; S 为规模效率值; irs、drs、— 分别表示规模收益递增、递减、不变。

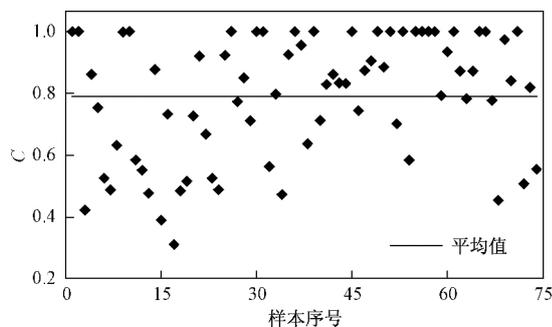


图2 样本综合效率的分布和平均值

Fig. 2 Samples comprehensive efficiency indices by plant

有 18 座,其中,效率最低的污水处理厂是样本 17 (C=0.312) 相对于效率最优的样本而言,该样本在

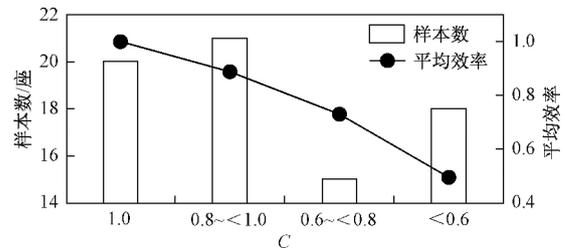


图3 研究样本综合效率的区间分布

Fig. 3 Interval distribution of samples comprehensive efficiency

综合投入上具有 68.8% 的提升空间. 处于差等水平的污水处理厂,其资源配置距离最优配置出现了较大偏离,资本、劳动力和能源存在较大的投入冗余,同时

产出不足的问题也比较突出。

从纯技术效率和规模效率的角度看,74 个样本中有 12 个样本(序号分别为 9、17、20、21、25、27、44、50、63、69、72、74)的纯技术效率达到 DEA 有效,但是由于其  $S < 1$ ,因此其综合效率没有达到 DEA 最优。这说明就该 12 个样本的纯技术效率而言,不存在投入冗余和产出不足的情况,其综合效率没有达到有效,是因为其规模和投入、产出不相匹配,需要增加规模或减小规模。从表 2 可见,为了达到综合效率最优,这 12 个样本的规模都应该加大(irs)。

在未达到 DEA 有效的 54 个样本中,有 46 个样本的规模收益递增,占 85.2%,这表明我国污水处理厂整体上处于规模收益递增的发展阶段。此外,有 7 个样本的规模收益递减,1 个样本的规模收益保持不变。以样本 8(规模收益不变)为例,其  $V$  只有 0.632,说明该厂无论是在资本、劳动力还是能源的投入上,都存在着较为严重的冗余情况,管理和技术水平是制约该厂运行效率提高的主要因素;但是另一方面,该厂  $S$  达到 0.999,表明该厂在运行规模上已经接近最优水平,不需要在规模上进行增加或减小,该厂应该在现有规模下,重视企业管理水平和技术水平的提高,以实现企业运行效率的最优化。

### 2.3 Kruskal-Wallis 检验

通过 DEA 得到效率评价结果之后,对污水处理厂的运行效率和处理规模之间的关系进行检验。由于 DEA 的效率评价值不满足正态分布,因此在对不同规模群组之间进行比较时,采用 KW(Kruskal-Wallis)检验方法。KW 是一种非参数检验的单因子方差分析方法,它可以用来检测总体函数分布的一致性原假设和其替代假设,测试多组数据之间数据波动的差异性。

74 个样本的设计处理能力从最小的 1 500 t/d 到最大的  $12 \times 10^4$  t/d 不等。将所有样本归为 4 类:设计处理能力  $< 2 \times 10^4$  t/d 的为 I 类,  $2 \times 10^4$  t/d ~  $3 \times 10^4$  t/d(不含)的为 II 类,  $3 \times 10^4$  t/d ~  $5 \times 10^4$  t/d(不含)的为 III 类,  $\geq 5 \times 10^4$  t/d 的为 IV 类。运用 SPSS 19.0 对样本进行 KW 检验,结果见表 3。由于渐近显著性( $P = 0.007$ )小于 0.05,并且卡方统计值为 12.254,高于 Chi-sq,因此拒绝原假设,即 4 类不同规模群组之间的效率水平存在显著差异。规模较大的 IV 类污水处理厂的综合效率平均值最高,达到 0.925,远高于规模较小的 II 类和 I 类污水处理厂;13 座 IV 类污水处理厂中达到 DEA 有效的有 8

座,占 61.5%,远高于 III 类(23.8%)、II 类(23.8%)和 I 类(10.5%)污水处理厂。可见,在研究样本中,污水处理厂的运行存在规模效应,规模越大的污水处理厂的运行效率越高,即规模增大可以带来污水处理厂经济效益的提高。这与褚俊英等<sup>[2]</sup>通过指标比较法得出的污水处理厂不具有规模效应的结论相悖,与 Francesc 等<sup>[22]</sup>通过两阶段 DEA 方法得到的结论相同。

表 3 不同处理规模污水处理厂的运行效率比较

Table 3 Comparison of operating efficiency among different scale's wastewater treatment plants

类型	样本数/座	效率平均值	DEA 有效数/座	DEA 有效数所占比例/%
I	19	0.689	2	10.5
II	21	0.769	5	23.8
III	21	0.820	5	23.8
IV	13	0.925	8	61.5
合计	74	0.790	20	27.0

### 2.4 投入冗余与产出不足分析

对样本中未达到 DEA 有效的 54 座污水处理厂的投入冗余率(投入冗余量与实际投入量之比)和产出不足率(产出不足量与实际产出量之比)进行计算。根据 DEA 运算结果,得到为了达到最优效率投入,各污水处理厂应减少的年运行费用、固定资产总额、污水处理人数和年耗电总量的投入量,表 4 列出了 10 个典型样本的计算结果。

在现有产出水平下,DEA 无效的污水处理厂存在不同程度的投入冗余,即存在资本、劳动力和能源的低效率配置情况。54 个样本中,年运行费用、固定资产总额、污水处理从业人数和年耗电总量 4 项指标的投入冗余率超过 0.200 的样本所占比例分别为 46.3%、51.9%、46.3% 和 44.4%。在所有投入中,样本 13、18 和 68 的投入冗余率均处于最高水平,相应地,这 3 座污水处理厂的资源配置优化潜力也最高。

在现有投入水平下,DEA 无效的污水处理厂也存在一定程度的产出不足,即存在污水年处理总量、BOD<sub>5</sub> 削减量和氨氮削减量的提升空间。54 个样本中,3 项产出指标的产出不足率超过 0.200 的样本所占比例分别为 13.0%、37.0% 和 29.6%。相对于其他样本,样本 3 在 3 种产出上均存在较高度度的不足,样本 70、73 和 59 在 BOD<sub>5</sub> 和氨氮削减量上存在较高度度的产出不足。

表4 未达到 DEA 有效样本的投入冗余率与产出不足率分析

Table 4 Input redundancy and output slack of inefficient samples

样本序号	投入冗余率				产出不足率		
	年运行费用	固定资产总额	污水处理从业人数	年耗电总量	污水年处理总量	BOD <sub>5</sub> 削减量	氮氮削减量
3	0.311	0.299	0.299	0.440	0.563	0.809	0.227
13	0.503	0.503	0.503	0.503	0.000	0.000	0.000
16	0.468	0.259	0.259	0.259	0.000	0.000	1.295
18	0.487	0.533	0.616	0.487	0.000	0.000	0.000
19	0.734	0.374	0.374	0.374	0.000	0.365	0.009
24	0.226	0.226	0.227	0.226	0.403	0.277	0.000
40	0.267	0.267	0.267	0.267	0.000	0.878	0.208
68	0.563	0.055	0.500	0.500	0.000	1.930	0.960
70	0.154	0.484	0.154	0.154	0.000	1.930	0.960
73	0.010	0.010	0.010	0.010	0.000	0.423	1.357

### 3 讨论

根据 DEA 的评价结果,对 74 座样本污水处理厂的效率进行排序(见表 1),这将有助于制订该行业的绩效管理和考核标准。其中有 20 座污水处理厂运行效率达到最优( $C = 1.000$ ),它们应该成为行业标杆和此阶段的最佳实践,其他污水处理厂应以此为基准,结合自身具体情况进行规范和改进,最终实现管理创新并获得竞争优势。对于运行效率处于差等水平的 18 座污水处理厂而言,年运行费用偏高、固定资产总额偏大、职工人数偏多以及耗电量偏大是普遍问题,这是由于企业内部较为落后的管理水平和技术水平所致。在现实情况中,固定资产总额可能无法改变,但是对于其他 3 项投入,可以成为污水处理厂提高运行效率的重点改进方向。

74 个样本中有 10 个样本的纯技术效率达到最优( $V = 1.000$ ),但是规模效率却没有达到 DEA 有效。对于这些样本,并不存在投入冗余和产出不足的情况,说明其管理和技术水平已经达到行业最优水平,但是其运营规模却与之不相匹配,因而综合效率没有达到最优。DEA 结果显示,这 10 家污水处理厂均应该加大现有规模,以实现规模收益最大化。对于其他 54 个样本,超过 85% 的规模收益呈现递增状态,这表明我国污水处理行业整体上处于规模收益递增的发展阶段,我国应该继续加大对该行业的建设投资,以促进并最终实现该行业资源配置的帕累托最优。

对 DEA 结果进行 KW 检验发现,在所选样本中,污水处理厂具有规模经济效应,规模较大的污水处理厂的运行效率高于规模较小的。从经济学上讲,企业生产规模达到或超过盈亏平衡点,即为规模效应。规模效应是根据边际成本递减推导出来的,企业的成本

包括固定成本和可变成本,在生产规模扩大之后,可变成本同比例增加而固定成本不变,因此单位产品的成本就会下降,从而企业的经济效益就会上升。大型污水处理厂便于对资源进行集中管理,在一定程度上可以克服小型处理厂管理效率低下的弊端,这也与《国家环境保护“十二五”规划》中提出的“提高城镇污水集中处理率”的目标相符合。

基于全要素生产函数,DEA 评价结果给出了未达到 DEA 有效的 54 座污水处理厂的投入冗余和产出不足情况,这有助于每一座样本污水处理厂在现有生产水平下进行效率改进,以实现资本、劳动力和能源资源的最优配置。样本冗余率较高,一方面说明其在实际生产过程中的资源投入量过多,另一方面也说明其具有较高的资源配置优化潜力。同样,产出不足率越高,说明提升污水年处理总量、BOD<sub>5</sub> 削减量和氮氮削减量的空间越大。

考虑到污水处理厂之间运行效率的差异性和可比性,以及国家对于水污染控制的趋严,该研究以出水执行标准(一级 A)和处理工艺(二级处理)为前提条件进行样本选择。由于统计数据的不完整和异常问题较为突出,经认真筛选后仅选取了 74 个样本数据,分布区域大大缩小,仅涵盖 8 个省份,而且各省样本数量的分布也不均匀,因而对于污水处理厂运行效率的区域差异研究也受到约束。此外,受到统计指标的约束,该研究只是将污水处理厂的年运行费用和固定资产总额作为资本投入、污水行业从业人数作为劳动力投入、年耗电量作为能源投入,并没有将建设投资、配套管网的建设及运行成本、除电能外的其他能源投入、污泥产生及处置情况等因素考虑在内。在今后的研究中,如果统计数据的完整性和可得性得到完善,可以对投入和产出指标进一步细化,综合经济、社

会和环境效益,使得对污水处理厂运行效率的评价更为准确和完善。

当前,在我国实施“水十条”和推广公私合营(PPP)模式的背景下,污水处理行业已经受到国家和社会各界的广泛关注,污水处理领域也开始迎来投资热潮,如何积极引导市场竞争、充分发挥市场优化资源配置的功能,满足水污染治理的需求,实现污水处理规模和运行效率二者之间关系的平衡,是未来我国污水处理行业发展的关键所在。

#### 4 结论

a) 基于全要素生产框架,通过 DEA 方法对 2013 年我国 74 座污水处理厂的运行效率进行了评估。根据样本数据,DEA 给出了所有样本的效率排序,寻找出最优生产前沿发掘出的 20 个标杆样本,并通过对每个样本的效率进行深入分析,包括技术效率、规模效率以及投入冗余和产出不足分析,为其优化投入产出、提高运行效率提供了改进方向和最优目标。效率不足的 54 个样本应以 20 个标杆样本为基准,结合自身具体情况进行技术改进和管理优化,实现效率提升并最终达到行业最佳。有 12 个样本纯技术效率达到最优但是规模效率不足,DEA 分析结果显示,这 12 座污水处理厂应该加大自身规模,以提高其规模效率,最终实现综合效率最优。

b) 根据对 54 个 DEA 无效样本的分析,85.2% 的规模收益呈现递增状态,表明我国污水处理厂整体处于规模报酬递增的阶段,同时也说明我国污水处理厂现有规模不足,污水处理行业仍处于建设发展期,具有较强的增加投入提高报酬的潜力。利用 KW 法对是否存在规模效应进行检验显示,不同规模群组之间的效率水平存在显著差异。在达到或超过盈亏平衡点的条件下,污水处理厂的运行具有规模效应,规模越大的运行效率越高,大型污水处理厂便于对资源进行集中管理,在一定程度上可以克服小型处理厂管理效率低下的弊端。

c) 54 个 DEA 无效样本存在不同程度的投入冗余和产出不足情况,年运行费用、固定资产总额、污水处理从业人数和年耗电总量四项指标的投入冗余率超过 0.200 的样本所占比例分别为 46.3%、51.9%、46.3% 和 44.4%;污水年处理总量、BOD<sub>5</sub> 削减量和氨氮削减量 3 项指标的产出不足率超过 0.200 的样本所占比例分别为 13.0%、37.0% 和 29.6%。投入冗余率或产出不足率较高的污水处理厂,是将来进行管理、技术水平提升和运行效率改进的重点对象。

#### 参考文献(References):

- [1] 宋国君,韩冬梅.中国城市生活污水管理绩效评估研究[J].中国软科学,2012(8):75-83.  
SONG Guojun, HAN Dongmei. Research on the performance evaluation of urban domestic sewage management in China [J]. China Soft Science, 2012(8): 75-83.
- [2] 褚俊英,陈吉宁,邹骥,等.城市污水处理厂的规模与效率研究[J].中国给水排水,2004,20(5):35-38.
- [3] 马乃毅,徐敏.污水处理企业投资运行效率比较分析:基于河南省 13 座污水厂的实际调研[J].生产力研究,2011(5):115-116.
- [4] 赵泽斌,安实,马放.我国东北地区城市污水处理效率研究[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(4):588-591.  
ZHAO Zebin, AN Shi, MA Fang. Efficiency of wastewater treatment in northeast cities of China [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(4): 588-591.
- [5] 吴迪,郝育毅,张江山.基于未确知测度识别模型在污水处理厂运行效率评价中的应用[J].北方环境,2011,23(7):125-127.  
WU Di, ZHENG Yuyi, ZHANG Jiangshan. Application of unascertained measurement identification model in sewage treatment plant operation efficiency parity [J]. Northern Environment, 2011, 23(7): 125-127.
- [6] 高晰.我国城市污水处理厂的规模与效率研究[J].科技创业家,2014(1):195-196.
- [7] 胡晓波,吴红艳,葛小东,等.基于 DEA 的废水治理效率评估方法及其应用[J].水资源保护,2013,29(4):77-81.  
HU Xiaobo, WU Hongyan, GE Xiaodong, et al. Method for efficiency assessment of wastewater treatment and application based on DEA [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 77-81.
- [8] 王碧红,和锋.基于 DEA 的环保投融资绩效评价研究:以青岛市污水处理厂为例[J].东岳论丛,2013,34(8):167-171.
- [9] 赵强,张慎峰,吴育华.污水处理厂规模与技术相对有效评估研究[J].成都信息工程学院学报,2003,18(1):36-39.  
ZHAO Qiang, ZHANG Shenfeng, WU Yuhua. Efficiency assessment of scale and technology for a sewage disposal factory [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2003, 18(1): 36-39.
- [10] 高琴,张辉国,安哲,等.基于 DEA 分析的乌鲁木齐市污水处理厂规模技术有效性研究[J].新疆大学学报(自然科学版),2006,23(2):211-215.  
GAO Qin, ZHANG Huiguo, AN Zhe, et al. Research on the validity of scale and technology of Urumqi's sewage disposal factories based on DEA method [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2006, 23(2): 211-215.
- [11] 褚俊英,陈吉宁,邹骥,等.中国城市污水处理厂资源配置效率的比较[J].中国环境科学,2004,24(2):242-246.  
CHU Junying, CHEN Jining, ZOU Ji, et al. Comparative study on resource allocation efficiency of urban wastewater treatment plants in China [J]. China Environmental Science, 2004, 24(2): 242-246.

- [12] 王芙蓉 苏波. 基于 DEA 技术的污水处理厂运行效率评估模型研究[J]. 西华大学学报(自然科学版) 2007 26(4):5-8.  
WANG Furong SU Bo. Assessment method of operating efficiency for sewage treatment plants and its application[J]. Journal of Xihua University ( Natural Science) 2007 26(4):5-8.
- [13] HERNÁNDEZ-SANCHO F, MOLINOS-SENANTE M, SALA-GARRIDO R. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: a non-radial DEA approach [J]. Science of the Total Environment 2011 409(14):2693-2699.
- [14] SALA-GARRIDO R, HERNÁNDEZ-SANCHO F, MOLINOS-SENANTE M. Assessing the efficiency of wastewater treatment plants in an uncertain context: a DEA with tolerances approach [J]. Environmental Science & Policy 2012 18:34-44.
- [15] SILVA C, QUADROS S, RAMALHO P, et al. Translating removal efficiencies into operational performance indices of wastewater treatment plants [J]. Water Research 2014 57:202-214.
- [16] TSUI M P, LEUNG H W, LAM P K S, et al. Seasonal occurrence, removal efficiencies and preliminary risk assessment of multiple classes of organic UV filters in wastewater treatment plants [J]. Water Research 2014 53:58-67.
- [17] REHMAN F, MEDLEY G J D, BANDULASENA H, et al. Fluidic oscillator-mediated micro bubble generation to provide cost effective mass transfer and mixing efficiency to the wastewater treatment plants [J]. Environmental Research 2015 137:32-39.
- [18] NOURALI A E, DAVOODABADI M, PASHAZADEH H. Regulation and efficiency & productivity considerations in water & wastewater industry: case of Iran [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences 2014 109:281-289.
- [19] MOLINOS-SENANTE M, HERNÁNDEZ-SANCHO F, MOCHOLÍ-ARCE M, et al. Economic and environmental performance of wastewater treatment plants: potential reductions in greenhouse gases emissions [J]. Resource and Energy Economics 2014 38:125-140.
- [20] SALA-GARRIDO R, MOLINOS-SENANTE M, HERNÁNDEZ-SANCHO F. Comparing the efficiency of wastewater treatment technologies through a DEA metafrontier model [J]. Chemical Engineering Journal 2011 173(3):766-772.
- [21] ABBOTT M, COHEN B, WANG W C. The performance of the urban water and wastewater sectors in Australia [J]. Utilities Policy 2012 20(1):52-63.
- [22] FRANCESC H S, RAMON S G. Technical efficiency and cost analysis in wastewater treatment processes: a DEA approach [J]. Desalination 2009 249(1):230-234.
- [23] LORENZO-TOJA Y, VÁZQUEZ-ROWE I, CHENEL S, et al. Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA + DEA method [J]. Water Research 2015 68:651-666.
- [24] ABBOTT M, COHEN B. Productivity and efficiency in the water industry [J]. Utilities Policy 2009 17(3):233-244.
- [25] ROMANO G, GUERRINI A. Measuring and comparing the efficiency of water utility companies: a data envelopment analysis approach [J]. Utilities Policy 2011 19(3):202-209.
- [26] COOPER W W, SEIFORD L M, ZHU J. Data envelopment analysis: models and interpretations [M]. Boston: Kluwer Academic Publisher 2004.
- [27] HERRALA M E, HUOTARI H, HAAPASALO H J O. Governance of Finnish waterworks: a DEA comparison of selected models [J]. Utilities Policy 2012 20(1):64-70.
- [28] CULLINANE K, WANG T F, SONG D W, et al. The technical efficiency of container ports: comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice 2006 40(4):354-374.
- [29] CUBBIN J, TZANIDAKIS G. Regression versus data envelopment analysis for efficiency measurement: an application to the England and Wales regulated water industry [J]. Utilities Policy 1998 7(2):75-85.
- [30] COELLI T J, RAO D S P, O'DONNELL C J, et al. An introduction to efficiency and productivity analysis [M]. New York: Springer Science & Business Media 2005.
- [31] 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.
- [32] 中国城镇供水排水协会. 城镇排水统计年鉴:2013 [M]. 北京: 中国城镇供水排水协会 2013.

(责任编辑: 郑朔方)