

# 城镇污水处理设施运行效率及其规模效应研究

## Assessing the Efficiency and Scale Effect of Municipal Sewage Treatment Facilities in China

买亚宗 卢佳馨 马 中 石 磊

MAI Ya-zong LU Jia-xin MA Zhong SHI Lei

**[摘要]** 污水处理设施运行效率的定量评价及其规模效应研究是当前备受关注的问题。笔者基于全要素生产率框架，采用数据包络分析（DEA）方法构建了污水处理设施运行效率评价模型，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、 $BOD_5$ 和氨氮削减量为产出变量，对2014年我国315座排放标准为一级且处理工艺相同的污水处理设施进行效率评价，进而对运行效率和设计处理能力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。研究发现：有32个样本的运行效率达到相对最优，可成为其余效率不足样本改进的标杆；有10个样本纯技术效率有效但规模效率无效，需改进其规模；DEA无效样本中规模报酬状态为递增的占70.0%，表明我国污水处理行业总体上处于规模收益递增的发展阶段；通过Kruskal-Wallis检验发现，样本污水处理设施具有规模效应，规模越大的运行效率越高；283个DEA无效样本存在不同程度的投入冗余和产出不足，是今后进行效率改进的重点对象。

**[关键词]** 污水处理设施 运行效率 规模效应 数据包络分析

**[中图分类号]** F062.2    **[文献标识码]** A    **[文章编号]** 1000-1549(2016)04-0122-07

**Abstract:** The quantitative assessment of the efficiency of municipal sewage treatment facilities (STFs) is a key issue that need to be solved, as well as the scale effect of sewage treatment industry. For this purpose, under the framework of total factor productivity, data envelopment analysis (DEA) is employed to established evaluation model of the efficiency of STFs, including inputs indices of gross fixed assets, annual operating cost, employment and annual power consumption, and output indices of wastewater treatment capacity, pollutant reduction of  $BOD_5$  and  $NH_3-N$ . 315 samples are selected as the empirical analysis objects which have the same discharge standard and treatment process. It is found that 32 samples reach relative efficiency, which means these samples could be a benchmark for other samples. 70.0% of the DEA invalid samples show increasing returns to scale, which indicates the sewage treatment industry in China is in the process of rapid development and being high potential to increase the profits by augmenting investments in the industry. Furthermore, through Kruskal-Wallis Test, it was verified that the larger plants run more efficiently than smaller plants, which indicates the scale effect existing in the industry, as was to be expected. Different levels of input redundancy or output slack exist in the 283 DEA invalid samples and these samples should be the key objects to improve the operating efficiency.

**Key Words:** Sewage treatment facility Operation efficiency Scale effect Data envelopment analysis

**[收稿日期]** 2015-11-26

**[作者简介]** 买亚宗，男，1988年9月生，中国人民大学环境学院博士研究生，主要研究方向为环境经济与资源管理；卢佳馨，女，1993年5月生，中国人民大学环境学院硕士研究生，研究方向为水务规划与管理；马中，男，1954年3月生，中国人民大学环境学院院长，教授，经济学博士，博士研究生导师，主要研究方向为环境经济与政策；石磊，男，1978年6月生，中国人民大学环境学院副教授，工学博士，硕士研究生导师，主要研究方向为环境与资源经济学。

**[基金项目]** 中国人民大学科学研究基金“中央高校基本科研业务费专项资金”（项目编号：15XNH043）。

感谢编辑部和论文评审人提出的修改建议，笔者已做了相应修改，本文文责自负。

## 一、引言

城镇污水处理设施在水污染防治中发挥着重要作用，投资建设污水处理设施是城镇化过程中的必要环节，城镇污水集中处理也一直是我国水污染防治的一项重要方针。由于近年来国家积极推动政府和社会资本进入城镇污水处理设施建设，污水处理设施的数量和规模迅速增加。根据住房和城乡建设部公布的数据，截至2014年年底，全国城镇累计建成污水处理厂3717座，较2013年增加204座；污水处理能力1.57亿m<sup>3</sup>/d，较2013年新增约800万m<sup>3</sup>/d。水污染控制目标的实现，不仅需要大量的污水处理设施，更需要提高处理设施的运行效率。当前，我国城镇污水处理设施的运行效率偏低，是制约水污染防治的主要因素之一。<sup>[1]</sup>同时，污水处理设施规模的大小是否对其运行效率产生影响的问题也备受关注。

目前，国内关于污水处理设施运行效率及其规模效率的研究，以定性分析和单指标评价法为主。<sup>[2-5]</sup>在已有的定量研究中，高琴等（2006）<sup>[6]</sup>利用DEA模型对污水处理厂进行效率评价，并探讨了运行效率的影响因素，但是受限于样本量过少。褚俊英等（2004）<sup>[7]</sup>从建设资金、运行费用、建设周期等方面入手，定量比较了不同处理规模污水处理厂的运行效率，但是缺乏对效率评估结果的进一步分析。国外研究中，主要是从不同处理工艺和技术的角度对污水处理设施的运行效率进行评估。<sup>[8-10]</sup>Abbott等（2012）<sup>[11]</sup>对澳大利亚不同城市的污水处理部门进行效率评估，并对提高污水处理行业运行效率的潜力及污水处理的规模效应进行分析。Hernández-Sancho和Sala-Garrido（2009）<sup>[12]</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。已有研究主要以效率评价为主，对评价结果挖掘不够深入，本研究综合资本、劳动和能源等生产投入要素，在全要素生产率框架下，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设施改进效率提供方向和建议。

## 二、研究方法与数据来源

### （一）研究方法

Cobb-Douglas生产函数是经济学中一种经典的

生产函数形式，用来探索既定生产技术条件下投入和产出之间的关系。我们借助Cobb-Douglas生产函数，构建基于全要素的污水处理设施投入产出分析框架<sup>[13]</sup>：

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

式中：G代表经济产出，D代表环境产出；K代表资本投入，L代表劳动力投入，E代表能源投入。

污水处理设施的投入成本可由两部分组成：建设成本和运行成本。前者主要以污水处理设施和管网的建设投资为主；后者主要包括工资福利、水电费、药剂费、维护费和管理费等。污水处理设施的产出则可由投入成本所形成的污水处理能力和处理效果组成。因此，本研究在投入指标上，选取污水处理设施的固定资产总额和年运行费用作为资本投入的代表，用污水处理从业人员数作为劳动力投入的代表，用年耗电总量作为能源投入的代表；在产出指标上，选取污水年处理总量表示污水处理能力，用BOD<sub>5</sub>削减量和氨氮削减量表示污水处理效果（表1）。

表1 污水处理设施的投入-产出框架

投入/产出	变量	代表指标
投入	资本	固定资产总额
		年运行费用
	劳动力	污水处理从业人员数
	能源	年耗电总量
产出	经济	污水年处理总量
	环境	BOD <sub>5</sub> 年削减量
		氨氮年削减量

### （二）数据来源与处理

本研究选取2014年全国315座城镇污水处理设施的运行数据作为效率评价样本，数据均取自2014年《城镇排水统计年鉴》。考虑到不同出水执行标准和处理工艺对污水处理设施运行效率所带来的影响，本文选取出水执行标准均为一级且处理工艺均采用二级处理的污水处理设施作为研究样本，经过对数据进行预处理，共筛选出315个有效样本。对样本数据进行描述性统计分析的结果详见表2。

表2

研究样本的描述性统计分析

变量	投入			产出		
	资本		劳动力	污水年处理 总量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	BOD <sub>5</sub> 年 削减量/t	氨氮年 削减量/t
	固定资产总额 /10 <sup>4</sup> 元	年运行费用 /10 <sup>4</sup> 元	污水处理 从业人数/人			
平均值	6 161.37	645.88	24	213.29	838.81	787.66
标准差	6 631.70	815.09	15	224.45	897.73	1 293.08
最小值	600.00	29.68	5	10.80	65.00	14.20
最大值	59 009.00	8 114.45	144	1 537.00	6 355.10	15 165.00
						2 131.00

### (三) 研究模型

自1978年数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)方法被首次提出后,已经被广泛应用于管理科学、数理经济学等领域,该方法主要是通过保持决策单元(Decision Making Unit, DMU)的输出与输入不变,利用数学规划和统计数据确定相对有效的生产前沿面,将各个DMU投影到DEA的生产前沿面上,通过比较DMU偏离前沿面的程度来评价它们的相对有效性。<sup>[14]</sup> DMU可以是任何将多种投入转化成多种产出的实体,例如,污水处理设施投入资本、劳动力、能源等,得到污水处理量、污染物削减量等产出。事实上,DEA方法已经在给水排水领域的效率评价研究中得到了广泛应用。<sup>[15]</sup>

DEA模型假设在某一个时期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s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:

$$x_m^t = (x_{1m}^t, x_{2m}^t, \dots, x_{nm}^t)^T, y_s^t = (y_{1s}^t, y_{2s}^t, \dots, y_{ns}^t)^T$$

基于投入导向规模报酬可变的DEA模型可表示为:

$$h = \min \varphi$$

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

表3

污水处理设施运行效率的DEA评价结果①

Firm	crste	vrste	scale	irs/drs/-	Firm	crste	vrste	scale	irs/drs/-
1	0.704	0.737	0.955	drs	...				
2	0.298	0.380	0.785	irs	291	0.658	0.692	0.951	irs
3	0.354	0.431	0.822	irs	292	0.977	0.977	1.000	—
4	0.538	0.544	0.990	irs	293	0.632	0.632	1.000	—
5	0.402	0.404	0.996	drs	294	0.998	1.000	0.998	irs

① 由于篇幅所限,仅展示部分运算结果,如需全部结果可向作者索取。

续前表

Firm	crste	vrste	scale	irs/drs/-	Firm	crste	vrste	scale	irs/drs/-
6	0.717	0.808	0.887	irs	295	0.544	0.550	0.990	drs
7	0.627	0.630	0.994	drs	296	1.000	1.000	1.000	—
8	0.548	0.565	0.970	irs	297	0.826	0.866	0.955	irs
9	0.148	0.549	0.269	irs	298	0.871	0.871	1.000	—
10	0.589	0.597	0.986	irs	299	0.926	0.945	0.980	drs
11	0.757	0.855	0.885	irs	300	0.602	0.643	0.936	irs
12	0.540	0.544	0.991	irs	301	0.824	0.859	0.960	irs
13	0.554	0.729	0.760	irs	302	0.864	0.899	0.961	drs
14	1.000	1.000	1.000	—	303	0.739	0.756	0.978	drs
15	0.587	0.594	0.988	irs	304	0.694	0.696	0.997	drs
16	0.410	0.412	0.994	irs	305	0.740	0.801	0.924	drs
17	0.383	0.511	0.749	irs	306	0.805	0.816	0.986	drs
18	0.627	0.685	0.915	drs	307	0.912	0.936	0.974	drs
19	1.000	1.000	1.000	—	308	0.618	0.650	0.951	drs
20	1.000	1.000	1.000	—	309	0.397	0.432	0.918	irs
21	0.621	0.693	0.896	irs	310	0.674	0.687	0.982	irs
22	0.343	0.542	0.633	irs	311	0.681	0.682	0.999	irs
23	0.348	0.465	0.749	irs	312	0.801	0.811	0.988	irs
24	0.350	0.393	0.889	irs	313	0.322	0.441	0.731	irs
25	0.531	0.591	0.899	irs	314	0.598	0.612	0.977	irs
...					315	0.455	0.528	0.862	irs

注：表中 crste 为综合效率，vrste 为纯技术效率，scale 为规模效率，irs/drs/- 表示规模收益递增/递减/不变。

全部样本的综合效率分布情况如图 1 所示，可以看出，污水处理设施之间存在不同程度的效率差异。

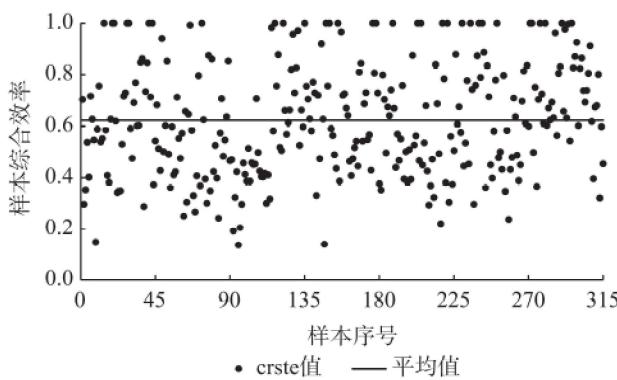


图 1 全样本综合效率 (crste) 的分布及平均值

具体而言，在综合效率 (crste) 上，共有 32 个样本达到 DEA 最优（即效率值为 1），表明该 32 座污水处理设施在运行过程中资本、劳动力和能源等投入的资源配置相对较好，运行效率在 315 个样本中处于最优水平。由图 2 可见，运行效率处于较优水平 ( $0.8 \leq e < 1.0$ ) 和中等水平 ( $0.6 \leq e < 0.8$ ) 的样本分别有 42 个和 86 个。运行效率处于较差水平 ( $0.4 \leq e < 0.6$ ) 和差等水平 ( $e < 0.4$ ) 的样本分别有 102 个和 53 个，两者合计 155 个，占总样本量的 49.2%。

在所有样本中，运行效率最低的污水处理设施是样本 95，效率值仅为 0.138，相对效率最优的样本而言，该样本在投入上具有 86.2% 的优化空间。污水处理设施综合效率排名较为靠后，说明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。处于差等水平的 53 座污水处理设施投入冗余和产出不足情况最为突出，应当是今后进行运行效率改进的重点对象。

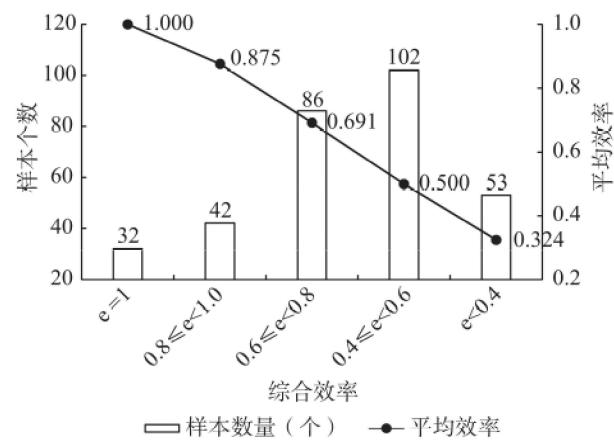


图 2 样本综合效率 (crste) 的区间分布

在纯技术效率和规模效率上，有10个样本的纯技术效率(*vrste*)达到DEA有效，但是由于其规模效率(*scale*)不足，导致其综合效率没有达到DEA最优。这说明就该10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。通过表3中“*irs/drs/-*”一栏可知，为达到综合效率最优，这10个样本中有6个应当增加规模，4个应当减小规模。同样，有8个样本的规模效率达到DEA有效，但是由于其纯技术效率不足，综合效率没有达到最优，这表明该8个样本在规模上已经适度，不需要再增加或减少规模，但是在投入和产出上存在一定的冗余和不足，今后应当注重加强技术和管理水平的改进工作。

在未达到DEA有效的283个样本中，有198个样本的规模收益呈现递增状态，占到70.0%，这表明我国污水处理设施总体上处于规模收益递增的发展阶段。此外，有76个样本的规模收益呈现递减状态，9个样本的规模收益保持不变。以样本62(规模收益不变)为例，其纯技术效率只有0.252，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的主要因素；但另一方面，该厂规模效率达到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，在现有规模下该厂应该重视管理和技术水平的提高，以实现企业运行效率的最优化。

## (二) Kruskal-Wallis 检验

Kruskal-Wallis(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。本研究采用该方法对污水处理设施的运行效率与其设计处理能力之间的关系进行检验。

315个样本的设计处理能力从最小的 $2\ 500\text{m}^3/\text{d}$ 到最大的 $26\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 不等，将所有样本按照设计处理规模分为5个类型：设计日处理能力在 $1\times10^4\text{m}^3/\text{d}$

d以下的为I型， $1\times10^4\text{m}^3/\text{d}\sim2\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 的为II型， $2\times10^4\text{m}^3/\text{d}\sim3\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 的为III型， $3\times10^4\text{m}^3/\text{d}\sim5\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 的为IV型， $5\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 及以上的为V型。运用SPSS对样本进行KW检验，得到结果见表4。由于渐近显著性P-value小于0.05，且卡方统计值高于Chi-sq.查表值，因此拒绝null hypothesis，即5类不同规模群组之间的效率水平存在显著差异。设计日处理能力越大，效率平均值越高。V型污水处理设施的效率平均值最高，达到0.789，明显高于其他4个类型的污水处理设施；47座V型污水处理设施中达到DEA有效的有9座，比重达到19.2%，同样明显高于其他4个类型。可见，在研究样本中，污水处理设施的运行存在规模效应，设计处理能力越大的污水处理设施运行效率越高，即处理规模的增大可以带来污水处理设施经济效益的提高。

表4 污水处理设施运行效率与设计处理能力比较

类型	数量	效率平均值	DEA有效数	DEA有效比重
合计	315	0.623	32	10.2%
I类	35	0.427	2	5.7%
II类	83	0.509	2	2.4%
III类	95	0.668	13	13.7%
IV类	55	0.693	5	9.1%
V类	47	0.789	9	19.2%
KW检验				
Chi-sq.			93.898	
P-value			0.000	

## (三) 投入冗余与产出不足分析

对样本中未达到DEA有效的283座污水处理设施进行投入冗余和产出不足分析，可为各污水处理设施实现最优资源投入而应当减少的各项投入提供量化目标。通过DEA运算结果可得各样的最优投入和产出，进而根据投入冗余量与实际投入量之比以及产出不足量与实际产出量之比分别得到投入冗余率和产出不足率，表5列出了15个典型样本的计算结果。

表5 未达到DEA有效样本的投入冗余与产出不足分析

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	氨氮削减量
2	0.620	0.719	0.809	0.620	0.341	4.057	2.412
6	0.894	0.192	0.744	0.192	0.000	0.000	0.000
9	0.451	0.911	0.706	0.891	0.000	17.406	2.815
13	0.572	0.271	0.335	0.271	1.274	0.000	0.964
47	0.627	0.436	0.753	0.436	0.000	0.693	0.000

续前表

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	氨氮削减量
95	0.718	0.776	0.718	0.901	0.000	21.077	17.496
142	0.615	0.615	0.615	0.931	0.000	26.743	7.890
143	0.276	0.276	0.459	0.276	4.644	0.000	0.000
154	0.560	0.852	0.463	0.463	0.767	0.843	0.000
175	0.850	0.549	0.549	0.563	0.000	2.046	0.298
195	0.680	0.865	0.595	0.595	0.309	2.905	4.055
209	0.253	0.697	0.253	0.742	0.000	9.454	3.025
244	0.855	0.602	0.586	0.657	0.000	5.499	1.018
248	0.756	0.584	0.781	0.584	0.000	2.476	0.000
261	0.275	0.275	0.275	0.275	2.009	0.000	0.000

在现有产出水平下,非DEA有效的污水处理设施存在不同程度的投入冗余,即存在资本、劳动力和能源三种资源的低效率配置情况。样本中,固定资产总额、年运行费用、污水处理从业人数和年耗电总量4项投入的平均冗余率分别为40.4%、36.9%、36.4%和34.5%。其中,样本6、244、175的固定资产总额冗余率最高,分别为89.4%、85.5%和85.0%;样本9、195、154的年运行费用冗余率最高,分别为91.1%、86.5%和85.2%;样本2、248、47的劳动力冗余率最高,分别为80.9%、78.1%和75.3%;样本142、95、9的耗电量冗余率最高,分别为93.1%、90.1%和89.1%。

在现有投入水平下,非DEA有效的污水处理设施同样存在一定程度的产出不足,即存在提高污水年处理总量、BOD<sub>5</sub>削减量和氨氮削减量的空间。3项产出的平均不足率分别4.1%、107.2%和45.7%。其中,样本143、261、13的污水年处理总量不足率最高,分别为464.4%、200.9%和127.4%;样本142、95、9的BOD<sub>5</sub>削减量不足率最高;样本95、210、142的氨氮削减量不足率最高。相对于其他样本,样本2、195等在三种产出上均存在较高程度的不足,样本9、95、142等在BOD<sub>5</sub>和氨氮削减量上均存在较高程度的产出不足。

#### 四、讨论

根据DEA的评价结果,列出了315座污水处理设施的效率排序,这将有助于制定该行业的绩效管理和考核标准。有32座污水处理设施运行效率达到最优,它们应该成为行业标杆和现阶段最佳实践,其余效率不足的污水处理设施应以标杆样本为基准,结合自身具体情况进行效率改进。对于运行效率相对较差的155座污水处理设施而言,固定资产总额过大、年

运行费用过高、职工人数过多以及耗电量过大是一个普遍存在的问题,这是由于企业内部较为落后的管理水平和技术水平所致。现实中,固定资产总额可能无法改变,因此对于其他三项投入,可以成为污水处理设施今后提高运行效率的重点改进方向。

有10个样本的纯技术效率达到最优但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,该10座污水处理设施有6座应当加大现有规模,另外4座应当减小现有规模,以实现规模收益最大化。同样,有8个样本的规模效率达到DEA有效,但是由于其纯技术效率不足,其综合效率没有达到最优,这表明该8个样本在规模上已经适度,但是在投入和产出上存在一定的冗余和不足,今后应当注重提升管理和技术水平。在未达到DEA有效的样本中,有198个样本(70.0%)的规模收益呈现递增状态,这表明中国城镇污水处理行业总体上处于规模收益递增的发展阶段,中国应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Kruskal-Wallis检验发现,在所选样本中,污水处理设施存在规模经济效应,规模较大的污水处理设施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。大型污水处理设施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，这也与中国《国家环境保护“十二五”规划》提出“提高城镇污水集中处理率”的目标相符合。

笔者基于全要素生产函数 DEA 给出了未达到 DEA 有效的 283 座污水处理设施的投入冗余和产出不足情况，这有助于每一座污水处理设施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。通过各项投入的平均冗余率以及各项产出的平均不足率可知，现有污水处理设施存在较为严重的投入冗余和产出不足情况。冗余率较高，一方面说明样本在生产过程中的资源实际投入量过多，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，说明污水年处理总量、 $BOD_5$ 削减量和氨氮削减量的提升空间越大。这些污水处理设施是将来进行管理、技术水平提升和运行效率改进的重点对象。

## 五、结论

笔者基于全要素生产率框架，通过 DEA 方法对中国 2014 年 315 座城镇污水处理设施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 32 个标杆样本，其余效率不足的样本应当以标杆样本为基准进行规范和

改进。基于对未达到 DEA 有效的 283 个样本的分析，70.0% 的规模收益呈现递增状态，这表明中国污水处理行业整体上处于规模报酬递增的阶段，同时也说明中国污水处理设施现有规模不足，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。通过 Kruskal-Wallis 检验发现，在达到或超过盈亏平衡点的条件下，污水处理设施的运行具有规模效应，规模越大效率越高，国家今后应当以大型污水处理设施的建设投资为主，集中资源进行污水处理以提高运行效率。通过分析平均冗余率和平均不足率发现，当前城镇污水处理设施存在较为严重的投入冗余和产出不足，这将是污水处理行业亟待解决的一个重点问题。

近年来，国家积极鼓励采取特许经营、政府购买服务等多种形式，吸引社会资金参与投资、建设和运营城镇污水处理设施，伴随着国家《水污染防治行动计划》的实施和公私合营（PPP）模式的兴起，我国污水处理行业将迎来更大的投资热潮和发展机遇。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，是未来中国污水处理行业发展的关键所在。

## 参考文献

- [1] 杨勇, 王玉明, 王琪, 等. 我国城镇污水处理厂建设及运行现状分析 [J]. 中国给水排水, 2011, 37 (8): 35–39.
- [2] 刘勇, 马良. 城市污水处理企业最佳效率组合 [J]. 系统管理学报, 2013, 22 (3): 437–440.
- [3] 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.
- [4] 宋连朋, 魏连雨, 赵乐军, 等. 我国城镇污水处理厂建设运行现状及存在问题分析 [J]. 给水排水, 2013, 39 (3): 39–43.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Hernández-Sancho F, Sala-Garrido R. Technical Efficiency and Cost Analysis in Wastewater Treatment Processes: A DEA Approach [J]. Desalination, 2009, 249 (1): 230–234.
- [13] 买亚宗, 孙福丽, 石磊, 马中. 基于 DEA 的中国工业水资源利用效率评价研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28 (11): 42–47.
- [14] Cooper W W, Seiford L M, Zhu J. Data Envelopment Analysis: Models and Interpretations [M]. Boston: Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [15] Herrala E M, Huotari H, Haapasalo H. Governance of Finnish Waterworks—A DEA Comparison of Selected Models [J]. Utilities Policy, 2012 (20): 64–70.

(责任编辑: 郊 霖 张安平)