

中国城市污水处理厂资源配置效率的比较

褚俊英¹,陈吉宁^{1*},邹 骥²,王 灿¹ (1.清华大学环境科学与工程系,北京 100084; 2.中国人民大学环境经济与管理系,北京 100872)

摘要: 采用平均生产函数模型、边界生产函数以及数据包络分析(DEA)模型 3 种方法,对中国 81 个污水处理厂的样本观测数据,从不同角度进行了比较研究,分别得出上述 3 种模型对产出弹性、技术效率和规模经济性等主要指标的模拟结果.研究发现,资本对我国城市污水处理厂的产出弹性最大(0.507),其次是运营电耗(0.415),再次为劳动力;我国污水厂普遍处于规模报酬率递增阶段,样本总体的规模报酬率为 1.11;根据 DEA 的分析结果,列出了 81 个样本污水厂的效率排序清单,这将有助于制定行业绩效标准.

关键词: 城市污水处理厂; 效率; 数据包络分析; 生产函数; 资源配置

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2004)02-0242-05

Comparative study on resource allocation efficiency of urban wastewater treatment plants in China. CHU Jun-ying¹, CHEN Ji-ning¹, ZOU Ji², WANG Can¹ (1.Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Department of Environmental Economics and Management, Renmin University of China, Beijing 100872, China). *China Environmental Science*, 2004,24(2): 242~246

Abstract: Three methods i.e., average production function (APF), frontier production function (FPF) and data envelopment analysis (DEA) model, are employed to quantitatively assess the efficiency of China's urban wastewater treatment plants (WWTPs) and to identify the critical factors affecting the efficiency. Based on the data from 81 surveyed WWTPs, the three models are solved and some variables are gained. The examined variables cover the production elasticity of input factors, technological efficiency, return rate to scale, and so on. The study finds that capital is the factor with the highest production elasticity (0.507), which is followed by electricity with the production elasticity of 0.415, and labor is the factor with lowest production elasticity. The average rate to return derived from the APF model is 1.11, which shows that there is high potential to increase the profit by augmenting the inputs. Based on the results from DEA model, the relative efficiency of each sample WWTP is gained and a full WWTP list can be ordered by efficiency, which would be helpful to establish the benchmark standard for efficiency regulation.

Key words: urban wastewater treatment plant; efficiency; DEA; production function; resource allocation

我国城市污水处理厂在城市水污染控制中发挥着重要作用并得到快速发展.2000 年全国城市污水处理厂数目达到 427 个.未来几十年中,其处理规模仍将持续扩大^[1,2].在发展的同时,我国城市污水处理厂也面临着效率不高的问题.效率研究将有助于政府制定合理政策促进污水厂的发展^[3].目前我国对污水厂效率问题的认识主要来自定性判断,缺乏系统的定量研究.褚俊英等^[4]曾用指标法对我国污水厂的投资效率进行比较.本研究进一步根据实际调研数据利用 3 种不同的效率评估模型对我国主要的污水处理厂进行了评估和比较分析.

1 方法

研究污水处理厂效率的方法有多种^[5],本研究分别采用基于回归分析的平均生产函数、基于线性规划法的边界生产函数以及数据包络分析法(DEA)测算模型进行比较分析.

1.1 回归方法估计平均生产函数

生产函数主要用来描述生产过程中投入要素与相应产出的关系,即: $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.其中, Y

收稿日期: 2003-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70073040)

* 责任作者, 教授, jchen1@tsinghua.edu.cn

为产出量; x_1, x_2, \dots, x_n 为生产过程中的投入要素量. 根据投入要素组合方式的不同, 生产函数的形式有多种, 如线性、C-D、CES、VES、超对数等^[6]. 本研究采用 C-D 形式的平均生产函数.

考虑到城市污水处理厂的特点和数据的可得性, 以基本建设资本、劳动力和运营电耗为主要生产投入要素构造生产函数模型, 如式(1):

$$Y = AK^a L^b E^g \tag{1}$$

式中: Y 为实际污水处理能力, 10^4 t/d ; K 为基本建设投资, 万元, 1990 年可比价; L 为职工人数, 人; E 为耗电量, 万度; a 为资本的产出弹性; b 为劳动力的产出弹性; g 为运营电耗的产出弹性; A 为效率系数.

基于回归方法建立的生产函数, 反映了城市污水厂生产要素组合效率的平均状况, 但无法反映单个样本的最大效率潜力. 利用平均生产函数, 可以对一定技术水平和要素价格条件下, 投入要素的相对变动对产出相对变动的影响 (即产出弹性) 进行定量估计. 同时, 还可以对规模效益 (RTS) 进行计算, 即资本、劳动力和运营电耗的弹性系数之和.

1.2 线性规划法估计边界生产函数

为考察不同投入要素组合所能产生的最大产量, 本研究建立 C-D 形式的确定性参数边界生产函数, 同公式(1). 根据张晓的推导^[7], 得到估计 A 、 a 、 b 、 g 的线性规划模型为:

$$\min w = a_0 + a \ln \bar{K} + b \ln \bar{L} + g \ln \bar{E} \tag{2}$$

$$\text{s.t. } a_0 + a \ln K_j + b \ln L_j + g \ln E_j = \ln Y_j, (j=1, 2, \dots, n)$$

式中: w 为目标函数值; n 为样本总数; 下标 j 表示第 j 个样本的实际值; \bar{K} 、 \bar{L} 、 \bar{E} 分别为样本的均值; 其余变量及参数同公式(1).

可以看出, 对于平均生产函数模型, 样本的实际产出量可能位于函数模拟值的上方和下方; 而对于边界生产函数, 样本的实际产出量只能位于函数模拟值的下方或边界上. 实际产出量与边界产出量的差距, 可以用来度量生产的技术效率状况. 将实际观测值和根据边界生产函数计算的边界产出进行比较, 得到各城市污水厂的技术效率

指标 $Er_j = Y_j / Y_j^*$, 其中, Y_j 为第 j 个污水处理厂的实际产出; Y_j^* 为第 j 个污水处理厂的边界产出.

1.3 DEA 的测算效率与规模效率

上述两种方法都以特定函数形式 (本研究均采用 C-D 函数) 为基础, 而函数形式的选择可能会对模拟结果产生很大的影响^[8]. 因此, 一些非参数估计方法 (如 DEA) 得到了发展与应用. DEA 主要用于评价观测样本的相对有效性. 通过对输入输出的综合分析, DEA 可以得出每个观测样本的综合效率评价指标, 从而识别出有效率的样本, 并指出其他样本的相对低效程度.

DEA 方法的基本模型为 C^2R 模型以及在此基础上发展的 C^2GS^2 模型. 前者用来判定样本个体是否同时具有规模有效和技术有效; 后者用来判定样本之间的相对技术有效性^[9]. 单独用 C^2R 模型评估规模经济效益时, 有可能造成判定失效^[9], 因此本研究采用 Zhu 推荐的方法^[10], 同时建立两种模型进行污水厂的效率评估. C^2R 模型如式(3)所示, C^2GS^2 模型由式(3)和式(4)构成.

$$\min w = q_i - e (s_k + s_l + s_e + s_y) \tag{3}$$

$$\text{s.t. } \sum I_j K_j + s_k = q_i K_i;$$

$$\sum I_j L_j + s_l = q_i L_i$$

$$\sum I_j E_j + s_e = q_i E_i$$

$$\sum I_j Y_j + s_y = Y_i$$

$$I_j, s_k, s_l, s_e, s_y \geq 0$$

$$\sum I_j = 1 \tag{4}$$

式中: I 为权重系数; s 为松弛变量; q_i 为第 i 污水厂的效率; e 为非阿基米德无穷小量 (计算时取值 $10^{-3} \sim 10^{-6}$), 其余变量和参数同公式(1).

判定规则为^[10]: 当 $q_i^* = q_i^{**}$ 时, 表明第 i 污水厂的 RTS 不变; 当 $q_i^* < q_i^{**}$ 时, 若 $\sum \varepsilon_j < 1$, 表示 RTS 递增; 若 $\sum \varepsilon_j > 1$, 则 RTS 递减. 其中, q_i^* 为 C^2R 模型的最优解; q_i^{**} 为 C^2GS^2 模型的最优解.

2 数据来源

调查了 124 座城市污水处理厂, 去掉一级处理厂及部分数据不全的二级处理厂, 选取 81 个二级污水处理厂作为样本, 占我国 1999 年生化污水

处理厂总数的 28.7%,覆盖 20 个省、自治区和直辖市的 48 个城市.处理能力为 $633.49 \times 10^4 \text{t/d}$,占 1999 年全国总生化处理能力的 42.9%.

3 结果与讨论

3.1 平均生产函数

表 1 给出了平均生产函数模型的回归结果及拟合程度.从函数的拟合程度看,调整后的 $R^2=0.822$, $F=124.25$,拟合程度可以接受.另外,S.E 为 0.49; D.W 为 1.84,接近于 2,认为不存在序列相关.从变量的显著性看,劳动力变量的 t 检验数值偏小,这在一定程度上反映了我国城市污水处理厂人员冗余的现象.另外,也不能排除一些城市污水产业向综合性集团发展,使得与城市污水厂生产能力实际相关的劳动力人数统计失真.但鉴于其在 90%的概率水平下是显著的,该变量予以保留,其他变量在 95%的概率水平下为显著.

表 1 平均生产函数的回归结果与拟合程度

Table 1 Regression results of the average production functions of China's WWTPs

项目	LNA	a	b	g
回归值	-3.748	0.507	0.187	0.415
标准差	0.629	0.074	0.107	0.058
置信区间 (95%)	(-5.000, -2.495)	(0.359, 0.655)	(-0.027, 0.401)	(0.298, 0.531)
t 检验	-5.958	6.822	1.742	7.113
sig	0.000	0.000	0.086	0.000

根据回归结果,我国城市污水厂产出弹性最大的要素为资本(0.507,即资本变动 10% 产出变动 5.07%),其次为运营电耗(0.187,电耗变动 10% 产出变动 1.87%),说明城市污水行业发展不仅需要巨大的初始资本投入,经常性投入如电耗等对于城市给水产业的增长也具有举足轻重的地位;同时也说明我国城市污水处理厂的市场发展态势处于建设阶段.劳动力的贡献相对较小,说明城市化进程的发展所带来劳动力的增加,对城市污水处理厂产出的贡献相对较弱.同时,可以进一步得出,规模经济报酬率 $RTS=a+b+g=1.109>1.0$,

说明当前我国城市污水处理厂处于规模报酬递增状态,尚未达到最优规模.

3.2 边界生产函数

城市污水厂边界生产函数的计算见式(5).资本、劳动力和运营电耗的产出弹性分别为 0.09, 0.001,0.53,运营电耗对边界产出的贡献最大,其次为资本,劳动力的贡献最小.由式(5)计算得到的结果 平均生产函数,边界生产函数与平均生产函数计算结果与实际观测值的双对数分布如图 1.

$$\ln Y = 1.53 + 0.09 \ln K + 0.001 \ln L + 0.53 \ln E \quad (5)$$

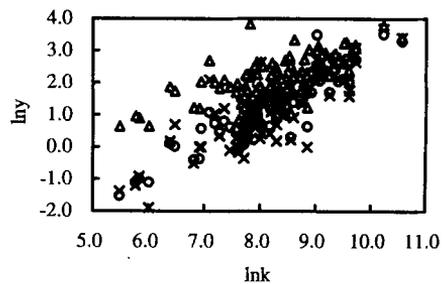


图 1 生产函数计算值与实际值比较

Fig.1 Comparison of the simulation and observation

× 实际观测值 o 平均生产函数 Δ 边界生产函数

各城市污水厂的技术效率 Er_j 如表 2 所示.城市污水厂 3, 4, 10, 18, 11, 9, 13, 22, 1 的技术效率较高($Er_j>0.8$),而 76, 46, 80, 65, 44, 78, 77, 51, 75, 28, 67, 79, 81 相对较低($Er_j<0.2$).技术效率水平与城市污水厂处理工艺如活性污泥法、氧化塘、氧化沟、AO、 A^2O 等相关,因为不同处理工艺、技术水平对资本、劳动力和能源的要求不同.此外,建设资本来源的差异也会对产出有一定影响^[11]——国外资本参与建设的污水处理厂相对于国内资本建设的污水厂,设备投入价值较高,生产的先进性程度也较高.

3.3 DEA 模型

根据 DEA 的 C^2R 模型和 C^2GS^2 模型计算的结果如表 3 所示.对于技术效率而言,一些利用边界生产函数判定效率较低的污水处理厂,如 2,5,6,7 等,在 DEA 分析中有效,这在一定程度上说明,线性规划法估计出的边界生产函数数值偏

高,这与其自身优化的约束条件有关.对于 RTS, 不变,两者之和占总数的 71.6%,与平均生产函数城市污水厂有 50 个规模收益递增,8 个规模收益 得出的整体上 RTS 递增的结论基本吻合.

表 2 根据边界生产函数计算得到的城市污水厂边界生产函数技术有效性

Table 2 Technological efficiency of sampled WWTPs resulted from frontier production function

<i>j</i>	<i>Er_j</i>														
1	0.804	10	1	19	0.353	28	0.125	37	0.228	46	0.186	55	0.352	64	0.237
2	0.331	11	0.907	20	0.416	29	0.435	38	0.763	47	0.293	56	0.336	65	0.177
3	1	12	0.715	21	0.367	30	0.727	39	0.508	48	0.392	57	0.323	66	0.285
4	1	13	0.906	22	0.882	31	0.302	40	0.373	49	0.312	58	0.449	67	0.115
5	0.387	14	0.564	23	0.412	32	0.445	41	0.378	50	0.532	59	0.541	68	0.363
6	0.543	15	0.649	24	0.767	33	0.438	42	0.566	51	0.133	60	0.32	69	0.227
7	0.65	16	0.445	25	0.379	34	0.522	43	0.348	52	0.402	61	0.224	70	0.244
8	0.75	17	0.431	26	0.509	35	0.649	44	0.163	53	0.254	62	0.295	71	0.446
9	0.907	18	0.953	27	0.537	36	0.316	45	0.639	54	0.456	63	0.398	72	0.272

注：*j* 为污水厂编号：1.深圳市滨河污水处理厂，2.重庆市唐家桥污水处理厂，3.长沙市第二污水净化中心，4.花都市新华净水厂，5.大连开发区大窑湾污水处理厂，6.大连经济技术开发区污水处理厂，7.合肥市王小郢污水处理厂，8.唐山市东郊污水处理厂，9.昆明市第三污水处理厂，10.广州市大坦沙污水处理厂，11.沈阳市北部污水处理厂，12.深圳市南山水质净化厂，13.天津市东郊污水处理厂，14.佛山市镇安净水厂，15.昆明市第二污水处理厂，16.昆山市污水处理公司，17.长沙市第一污水处理厂，18.南京市江心洲污水处理厂，19.上海市泗塘污水处理厂，20.常州市城北污水处理厂，21.上海市青浦污水处理厂，22.石家庄市桥西污水处理厂，23.秦皇岛市海港区东部污水处理厂，24.太原市杨家堡污水净化厂，25.唐山市西郊污水处理厂，26.枣庄市污水处理厂，27.济南市污水处理厂，28.西安市北石桥污水净化中心，29.珠海市吉大水质净化厂，30.保定市污水处理厂，31.常州市丽华污水处理厂，32.昆明市第一污水处理厂，33.桂林市第四污水净化厂，34.邯郸市东污水处理厂，35.西安市污水处理厂，36.青岛市李村河污水处理厂，37.南海市桂城区污水处理厂，38.天津市纪庄子污水处理厂，39.北京市北小河污水处理厂，40.苏州新区污水处理厂，41.上海市曹杨污水处理厂，42.徐州市污水处理厂，43.唐山市新区污水处理厂，44.奉化市污水处理厂，45.淄博市污水处理公司，46.安阳市豆腐营污水处理厂，47.常熟市城北污水处理厂，48.上海市曲阳污水处理厂，49.福州市开发区市政处污水处理厂，50.成都市污水处理厂，51.合肥市琥珀山庄污水处理厂，52.珠海市香洲水质净化厂，53.桂林市七里店污水处理厂，54.珠海市拱北水质净化厂，55.上海市天山污水处理厂，56.上海市北郊污水处理厂，57.广州开发区污水处理厂，58.泰安市污水处理厂，59.福州市祥坂污水处理厂，60.厦门市杏林污水处理厂，61.黄石市污水净化厂，62.北京市方庄污水处理厂，63.中山市污水处理公司，64.威海市污水处理厂，65.广州市从化水质净化厂，66.上海市奉贤县南桥污水处理厂，67.杭州市大关污水处理厂，68.上海市龙华中水质净化厂，69.北京市密云县污水处理厂，70.常州市清潭污水处理厂，71.上海市闵行污水处理厂，72.南通市污水处理厂，73.四川绵阳市中国市政工程物理研究院水质净化厂，74.武汉市水质净化厂，75.大同市污水处理厂，76.上海市长桥水质净化厂，77.慈溪市污水处理厂，78.上海市南汇县周浦水质净化厂，79.南京市锁金村污水处理厂，80.南通市开发区污水处理厂，81.苏州市城西污水处理厂

3.4 比较与分析

本研究采用的 3 种效率评估方法各具特点且互为补充.平均生产函数是一种参数模型,主要用回归方法估计参数,可对城市污水处理厂样本总体的产出弹性和 RTS 进行估计.边界生产函数也是一种参数模型,主要用线性规划算法实现参数估计,可对单个城市污水处理厂的相对技术效率进行比较.而 DEA 模型是一种非参数的方法,可对单个城市污水处理厂的相对技术效率及

RTS 进行分析.

根据 DEA 和边界生产函数得到的结果,编号为 1, 3, 4, 7~13, 18 的污水处理厂技术效率为优,编号为 44, 46, 51, 65, 67, 75~81 的污水处理厂技术效率较差.效率高的城市污水处理厂可作为行业效率提高的龙头企业和制订水价的重要参考标准.由平均生产函数得出的样本总体的 RTS 大于 1,说明整体上我国城市污水厂规模报酬率递增.

表3 城市污水厂 DEA 有效性结果的比较
Table 3 DEA efficiencies of the sampled WWTPs

<i>i</i>	q_i^*	q_i^{**}	<i>R</i>												
1	1	1	0	22	0.548	0.924	-1	43	0.406	0.442	1	64	0.29	0.364	1
2	1	1	0	23	0.548	0.6	1	44	0.395	0.815	1	65	0.287	0.421	1
3	1	1	0	24	0.544	0.753	-1	45	0.394	0.607	-1	66	0.285	0.421	1
4	1	1	0	25	0.535	0.535	1	46	0.39	0.607	1	67	0.285	0.778	1
5	1	1	0	26	0.491	0.535	1	47	0.39	0.688	1	68	0.277	0.284	1
6	0.998	1	0	27	0.491	0.503	-1	48	0.378	0.393	1	69	0.265	0.517	1
7	0.998	1	-1	28	0.487	0.487	0	49	0.37	0.421	1	70	0.245	0.517	1
8	0.987	1	-1	29	0.471	0.677	1	50	0.366	0.421	-1	71	0.245	0.336	-1
9	0.94	1	-1	30	0.461	0.677	-1	51	0.366	1	1	72	0.241	0.351	1
10	0.895	1	-1	31	0.461	0.664	1	52	0.353	0.395	1	73	0.232	0.241	1
11	0.895	1	-1	32	0.456	0.489	1	53	0.346	0.383	1	74	0.203	0.241	1
12	0.871	0.872	-1	33	0.455	0.454	1	54	0.338	0.383	1	75	0.203	0.344	1
13	0.81	0.715	-1	34	0.447	0.454	0	55	0.338	0.355	1	76	0.202	0.37	1
14	0.691	0.715	-1	35	0.447	0.592	-1	56	0.336	0.381	1	77	0.191	0.262	1
15	0.691	0.705	-1	36	0.443	0.447	-1	57	0.332	0.334	1	78	0.169	0.262	1
16	0.668	1	1	37	0.443	0.73	1	58	0.324	0.334	1	79	0.169	1	1
17	0.664	1	1	38	0.434	0.73	-1	59	0.324	0.456	-1	80	0.156	0.248	1
18	0.652	1	-1	39	0.434	0.437	1	60	0.317	0.376	1	81	0.109		1
19	0.652	0.859	1	40	0.432	0.513	1	61	0.315	0.353	1				
20	0.587	0.685	1	41	0.421	0.488	1	62	0.295	0.353	1				
21	0.56	0.924	1	42	0.406	0.488	-1	63	0.295	0.324	-1				

注: *i* 为污水厂编号,同表 2; q_i^* 为 C^2R 模型最优解, q_i^{**} 为 C^2GS^2 模型最优解; $R=0$, 规模效益不变; $R=1$, 规模效益递增; $R=-1$, 规模效益递减

4 结语

我国城市污水处理厂产出弹性最大的要素为资本,其次为劳动力和运营电耗.这反映了城市污水处理厂属于资本密集型产业的事实,也说明我国污水处理厂仍处于建设发展阶段,对资本和电力投入需求大;我国污水处理厂普遍处于规模报酬率递增阶段,说明该行业仍有增加投入提高报酬率的潜力,同时也反映了国内污水处理厂规模不足的现状.对污水处理厂相对效率的分析结果仅限于所调研的 81 个样本污水处理厂.

参考文献:

[1] 褚俊英,陈吉宁,邹 骥.我国城市水环境产业发展规模和市场容量的 SD 模型 [J]. 环境科学,2002,23(4):1-7.
 [2] Chu J, Chen J, Zou J. Perspectives on urban water infrastructure in China for the 21st Century: SDMUWEIC Model [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2003,12(4):470-480.
 [3] 王 灿,陈吉宁,邹 骥.环境基础设施市场化运作下的政府管理 [J]. 上海环境科学,2001,20(12):565-568.

[4] 褚俊英,陈吉宁,邹 骥.我国城市污水厂投资效率的定量分析 [J]. 中国给水排水,2002,18(3):27-29.
 [5] Estache A, Rossi M A. Comparing the performance of public and private water companies in Asia and Pacific Region [R]. Washington: The World Bank, 1999.
 [6] 李子奈. 计量经济学 [M]. 北京:清华大学出版社,1992.181-232.
 [7] 张 晓. 前沿生产函数及其统计估计 [J]. 数量经济技术经济研究,1992,(9):31-33.
 [8] 褚俊英,王 灿,王 琦,等. 水价对城市居民用水行为影响的研究进展 [J]. 中国给水排水,2003,19(11):32-35.
 [9] 盛昭瀚,朱 乔,吴广谋. DEA 的理论方法与应用 [M]. 北京:科学出版社,1996.78-79.
 [10] Zhu J. Further discussion on linear production functions and DEA [J]. Theory and Methodology, 2000,127:611-618.
 [11] 褚俊英,陈吉宁,邹 骥. 城市水环境基础设施融资分析 [J]. 环境保护,2001,12:18-21.

作者简介:褚俊英(1976-),女,山东夏津人,清华大学在读博士生,主要从事环境产业政策模拟与系统分析研究.发表论文 8 篇.