

# Study on the Industrial Wastewater Control Efficiency of the Main Cities in China

—Based on the DEA Model and Malmquist Index

Shan Yin\*, Zhiyuan Zhao, Man Zhu

School of Economics and Management, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang  
Email: \*y\_s\_kiki@163.com

Received: Dec. 29<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jan. 16<sup>th</sup>, 2016; published: Jan. 21<sup>st</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

This thesis applied the VRS model and CRS model (different forms of DEA model) to statically analyze the efficiency of industrial wastewater control of China's 35 key cities in 2010, and used the Malmquist index to dynamically analyze these cities' nominal total factor productivity (TFP) and the actual total factor productivity from the year 2000 to 2010, after taking fixed-asset investment price index into consideration. The result shows that in 2010 the 35 key cities' average efficiency of industrial wastewater control only comes to 0.508, only 13.8% among them reached the DEA effective, and 63.9% are in a condition of reducing efficiency. The nominal TFP of the crucial cities' industrial waste water remedy is 0.957 and the actual is 0.967. The main reason of this technological change is the gap in the efficiency of industrial wastewater control between different cities and technological backwardness.

## Keywords

Industrial Wastewater, Efficiency, DEA Model, Malmquist TFP, City

---

# 中国主要城市工业废水治理效率研究

—基于DEA模型和Malmquist指数

尹珊\*, 赵志远, 朱曼

\*通讯作者。

浙江理工大学经济管理学院, 浙江 杭州  
Email: y\_s\_kiki@163.com

收稿日期: 2015年12月29日; 录用日期: 2016年1月16日; 发布日期: 2016年1月21日

## 摘要

文章运用DEA模型的CRS与VRS模型对2010年中国35个主要城市的工业废水治理效率进行静态分析, 并在考虑固定资产投资价格指数后, 运用Malmquist TFP指数对这些城市2000~2010年工业废水治理的名义全要素生产率和实际全要素生产率进行动态分析。结果表明, 2010年35个主要城市的工业废水治理平均综合效率仅为0.508, 达到DEA有效的城市仅占总数的13.8%, 且63.9%的城市处于规模效率递减阶段; 2000~2010年这些城市工业废水治理的名义TFP和实际TFP分别为0.957、0.967。不同城市的工业废水治理效率差异过大且技术进步不足是导致整体效率偏低、效率改进缓慢的主因。

## 关键词

工业废水, 治理效率, DEA模型, Malmquist TFP指数, 城市

## 1. 引言

随着我国工业经济的快速发展, 工业用水总量大幅上升, 从1999年的1159亿立方米到2010年的1447亿立方米, 上升25% (《水资源公报2000》、《水资源公报2011》)。与此同时我国工业废水排放量急剧上升, 2011年我国各地区工业废水排放总量为231亿吨, 相较于2001年增加了28亿吨(《中国环境年鉴2012》)。一方面工业用水需求增加而水资源短缺, 另一方面废水排放增多使得水污染形势依然严峻, 水资源控制与治理成为我国环境保护事业的重点工作, 工业用水问题随即成为学界关注的热点。目前, 对于工业用水的研究主要分为工业节水研究、工业用水效率研究和工业废水治理效率研究等方面。尽管理论研究对于节水、治水发挥了一定作用, 但在如何评估废水治理效率方面, 现有研究仍有以下三点不足。1) 多以某一地区或特定领域为研究对象: 李蕊(2010)评价了辽河流域造纸业的废水治理技术效益[1]; 郑丽娟(2011)对杭州市8个区域的工业污染排放和治理效率进行了测算[2]; 胡伟等(2014)对太湖殷村港流域工业园区内的企业污水治理效率进行了实证研究[3]。2) 多以省域为测算单位: 李磊等(2011)计算了2003~2008年全国除西藏外30个省份的工业废水治理效率, 认为工业废水治理效率较低的主因是技术落后[4]; 石风光(2014)测算中国各省2012年的工业水污染治理效率后, 认为东部地区工业水污染治理效率较高, 而中西部地区较低[5]。3) 研究方法有待改进。沈满洪和程永毅(2015)认为数据包络分析(DEA)方法和随机前沿分析(SFA)方法是测算用水效率的前沿方法[6]。但目前, 应用DEA或SFA模型评价工业废水治理效率的研究仍较少。

实际上, 我国的水资源管理与规制更多是以城市为基本单位。各市行政主管部门享有规定的权限, 可以对各自行政区域内水资源转让、废水污水监管、水价调控等项目进行统一管理和监督。我国的工业生产具有典型的市域、县域特征。在自然资源、传统风俗、区位及政府政策的影响下, 各地市形成了特色产业集群, 不同产业对水资源的需求和影响程度差异显著。由于“短板效应”的存在, 特定行业的测量数据无法科学反映城市的整体废水治理水平, 因此评估地方工业整体治理效率不能只专注于某一行业。综上所述, 城市才是工业废水的治理单位, 测量并评价城市的废水治理效率有利于各城市直观地发现自身优劣, 相互借鉴并加以改进。然而城市工业废水排放与治理问题却是既有研究缺失的视角。

本文应用 DEA 模型和 Malmquist TFP 指数, 建立了全国 35 个主要城市<sup>1</sup>2000~2010 年工业废水治理效率评价体系, 并利用该体系进行静态, 动态效率研究, 评估我国城市的工业废水治理效率, 为政府进一步制定城市工业用水和废水治理政策提供合理建议。

## 2. 基本模型与数据

作为一种利用非参数方法在多投入多产出情况下测算决策单元相对效率的评估方法, DEA 利用线性规划构建有效率的生产前沿, 通过与生产前沿的比较来识别效率的相对高低(尹怡诚等, 2015) [7]。DEA 是一种静态效率分析方法, 分析经济现象在均衡时的相对效率状态, 而不考虑经济现象效率状态随时间的变化过程。DEA 模型可以判断工业废水治理的投入产出是否在特定年份技术水平下达到最优, 并通过计算纯技术效率、规模效率和规模收益趋势来分析没有达到最优的原因所在。

作为一种通过距离函数来衡量不同时期生产率变动情况的评估方法, Malmquist 指数最早由瑞典统计和经济学家 Sten Malmquist 提出, 被用来分析不同时期的消费变化, 后来其他学者用其研究生产率变化(李玉龙、李忠富, 2011) [8]。通常, 学者将 Malmquist 指数思想与 DEA 模型相结合, 通过构造 Malmquist 生产率指数测算经济现象效率变化的动态过程。

### 2.1. DEA 模型设定

#### 2.2.1. DEA 模型之 CRS 模型

在 DEA 模型中,  $n$  个决策单元(DMU)都对应着  $m$  种投入资源和  $s$  种产出, 其投入产出数据表如下表 1:

**Table 1.** The input-output table of decision-making units in DEA model  
**表 1.** DEA 模型决策单元投入产出表

决策单元(投入)		1	2	...	j	...	N	决策单元(产出)	
种类	权重							权重	种类
1	$V_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1j}$	...	$x_{1n}$		
2	$V_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2j}$	...	$x_{2n}$		
...	...	...	...	...	...	...	...		
$I$	$V_i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	...	$x_{ij}$	...	$x_{in}$		
...	...	...	...	...	...	...	...		
$m$	$V_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mj}$	...	$x_{mn}$		
		$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1j}$	...	$y_{1n}$	$U_1$	1
		$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2j}$	...	$y_{2n}$	$U_2$	2
		...	...	...	...	...	...	...	...
		$y_{r1}$	$y_{r2}$	...	$y_{rj}$	...	$y_{rn}$	$U_r$	$r$
		...	...	...	...	...	...	...	...
		$y_{s1}$	$y_{s2}$	...	$y_{sj}$	...	$y_{sn}$	$U_s$	$s$

<sup>1</sup> 本文选取的 35 个主要城市均为各省的政治或经济中心, 经济较其他地区发达, 往往是各省进行资源分配时侧重的地区。因此一方面这些城市之间的差距小, 可以更为科学地分析其工业废水处理效率。另一方面从发展阶段和路径上, 这些城市的治理现状或之前几年的状况是许多二线城市在若干年后可能会面临的问题。

其中,  $x_{ij} > 0$  是第  $j$  个决策单元的第  $i$  种投入,  $y_{rj} > 0$  是第  $j$  个决策单元的第  $r$  种产出,  $v_i$  是第  $i$  种投入对应的权重,  $u_r$  是第  $r$  种产出对应的权重。

对决策单元  $k$  的效率评价建立在对所有决策单元 ( $j=1, \dots, n$ ) 整体评价的基础之上。运用线性规划对偶理论可得如下 DEA 模型之 CRS 模型:

$$\begin{aligned} & \min \theta_k \\ & \text{s.t.} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j \leq \theta_k x_k \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j \geq \theta_k y_k \\ & \lambda_j \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, n \\ & \theta_k \text{ 无约束} \end{aligned}$$

将松弛变量  $s^+$  和剩余变量  $s^-$  置入 CRS 模型, 可得:

$$\begin{aligned} & \min \theta_k \\ & \text{s.t.} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j + s_k^+ = \theta_k x_k \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j - s_k^- = \theta_k y_k \\ & \lambda_j \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, n \\ & \theta_k \text{ 无约束}, \quad s_k^+ \geq 0, \quad s_k^- \geq 0 \end{aligned}$$

CRS 模型的计算结果满足:

- 1) 若  $\theta_k = 1, s_k^+ = 0, s_k^- = 0$ , 则决策单元  $k$  为 DEA 有效, 即其经济活动同时满足技术有效和规模有效;
- 2) 若  $\theta_k = 1, s_k^+ > 0$  或  $s_k^- > 0$ , 则决策单元  $k$  为弱 DEA 有效, 即其经济活动没有同时满足技术效率最佳和规模最佳;
- 3) 若  $\theta_k < 1$ , 则决策单元  $k$  非 DEA 有效, 即其经济活动既不满足技术效率最佳, 也不满足规模最佳。

对于决策单元的规模收益而言, 如果取得极小  $\theta_k$  的  $\lambda_j \geq 0$  ( $j=1, \dots, n$ ) 满足  $\sum \lambda_j = 1$ , 则该决策单元为规模收益不变; 如果不存在满足  $\sum \lambda_j = 1$  的  $\lambda_j \geq 0$  ( $j=1, \dots, n$ ), 而是满足  $\sum \lambda_j < 1$ , 则该决策单元为规模收益递增; 如果不存在满足  $\sum \lambda_j = 1$  的  $\lambda_j \geq 0$  ( $j=1, \dots, n$ ), 而是满足  $\sum \lambda_j > 1$ , 则该决策单元为规模收益递减。

### 2.2.2. DEA 模型之 VRS 模型

在 CRS 模型基础上, 加入可变规模报酬假定即得 VRS 模型:

$$\begin{aligned} & \min \theta_k \\ & \text{s.t.} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j \leq \theta_k x_k \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j \geq y_k \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ & \lambda_j \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, n \\ & \theta_k \text{ 无约束} \end{aligned}$$

其中, 约束条件  $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$  代表可变规模报酬假定。一般来说, 基于 CRS 模型计算的效率结果和基于 VRS 模型计算的结果是不同的, 两者的比值被定义为规模效率, 即:

$$SE = TE_{CRS} / TE_{VRS}$$

SE 可以理解为决策单元之间不同的产出规模所导致的产出效率差异, 其中  $TE_{VRS}$  被称为纯技术效率,  $TE_{CRS}$  称为综合效率。

## 2.2. 数据来源

本文使用的 35 个主要城市数据来源于 2000~2010 年《中国统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》<sup>2</sup>。在废水治理模型中, 将工业企业专职环保人员数(单位: 人)作为劳动投入; 将废水治理设施运行费用(单位: 万元)以及工业废水污染治理投资完成额(单位: 万元)作为资本存量变量; 将工业废水排放量(单位: 万吨)和工业废水排放达标率(单位: %, =工业废水排放达标量/工业废水排放总量)作为产出变量。

## 3. 实证结果与分析

### 3.1. DEA 模型静态效率结果和分析

#### 3.1.1. 2010 年 DEA 效率计算结果

2010 年全国主要城市的 DEA 效率值见表 2。

#### 3.1.2. 2010 年 DEA 效率结果分析

由表 2 可知 2010 年中国主要城市工业废水治理的平均综合效率仅为 0.508, 即达到理想效率的 50.8%, 相对效率偏低。纯技术效率和规模效率也偏低, 分别只有 0.720 和 0.753。

① 从综合效率来看, 只有大连、海口、拉萨、西宁和乌鲁木齐这五个城市达到 DEA 有效, 仅占所有城市的 13.8%。其中, 深圳的工业废水治理综合效率最差, 仅有 0.084。

② 从纯技术效率来看, 达到纯技术效率最优的城市有 17 个, 占有所有城市的 47.2%, 说明这 17 个城市投入要素的配置结构处于合理状态, 而其他城市需要进一步完善要素的投入配置结构。

③ 从规模效率来看, 达到规模效率最优的城市有六个, 除五个 DEA 有效的城市外, 还有青岛达到了规模效率最优, 占总数的 16.7%; 太原、长春等七个城市规模效率递增, 说明这些城市可以在扩大规模的条件下增进效率; 而北京、天津等 23 个规模效率递减的城市则已超过最优治理规模。

④ 大部分纯技术效率和规模效率存在明显的相反的现象, 如深圳纯技术效率仅有 0.098, 而相比较规模效率高达 0.855; 昆明纯技术效率为 1.000, 而规模效率仅为 0.198。没有实现技术效率和规模效率的协调发展可能是中国主要城市工业废水治理效率偏低的重要原因。

### 3.2. Malmquist TFP 指数动态结果和分析

#### 3.2.1. 名义 TFP 与实际 TFP 计算结果

在 TFP 指数动态分析中, 所用数据涉及不同年份的废水治理设施运行费用和工业废水治理投资完成额, 因此需要考虑价格指数对 TFP 指数的影响, 以免低估 TFP 值。此处, 以 2005 年为基期考虑 2000~2010 年固定资产投资价格指数(资料来源《中国统计年鉴 2011》)。未考虑价格指数的计算结果记做名义 TFP 值, 考虑价格指数的计算结果记为实际 TFP 值, 具体结果见表 3 和表 4。

<sup>2</sup> 《中国统计年鉴》自 2011 年起不再记录“工业企业专职环保人员数”和“工业废水排放达标率”。若采用新指标, 则只能分析三年的情况, 所得结果不足以提供科学的动态分析结论。因此为保证数据的连续性和准确性, 本文选用的样本数据截至 2010 年。

**Table 2.** The efficiency of industrial wastewater control of key cities in 2010  
**表 2.** 2010 年主要城市工业废水治理效率

城市	综合效率	纯技术效率	规模效率	城市	综合效率	纯技术效率	规模效率
北京	0.294	0.576	0.511	青岛	0.235	0.235	1.000
天津	0.231	1.000	0.231	郑州	0.341	0.427	0.799
石家庄	0.269	0.571	0.471	武汉	0.934	1.000	0.934
太原	0.165	0.167	0.987	长沙	0.497	0.499	0.995
呼和浩特	0.512	1.000	0.512	广州	0.430	0.822	0.523
沈阳	0.322	0.423	0.762	深圳	0.084	0.098	0.855
大连	1.000	1.000	1.000	南宁	0.452	0.454	0.995
长春	0.617	0.623	0.990	海口	1.000	1.000	1.000
哈尔滨	0.399	1.000	0.399	成都	0.263	1.000	0.263
上海	0.291	1.000	0.291	重庆	0.400	0.598	0.669
南京	0.698	1.000	0.698	贵阳	0.254	0.260	0.977
杭州	0.815	1.000	0.815	昆明	0.198	1.000	0.198
宁波	0.341	0.484	0.704	拉萨	1.000	1.000	1.000
合肥	0.569	1.000	0.569	西安	0.428	0.453	0.947
福州	0.486	0.494	0.983	兰州	0.577	1.000	0.577
厦门	0.518	1.000	0.518	西宁	1.000	1.000	1.000
南昌	0.685	0.691	0.990	银川	0.718	0.738	0.972
济南	0.284	0.295	0.963	乌鲁木齐	1.000	1.000	1.000
				总平均	0.508	0.720	0.753

注: drs 指规模收益递减; irs 指规模收益递增; crs 指规模收益不变。

### 3.2.2. Malmquist TFP 指数动态结果分析

从总体水平来看, 2000~2010 年中国主要城市工业废水治理的 Malmquist TFP 名义值为 0.957, 即使扣除固定资产投资价格指数等因素的影响, 平均 TFP 实际值也只有 0.967, 这表明中国主要城市的工业废水治理效率在十年间进展缓慢。

从技术的角度来看, 实际技术进步大于 1 的城市有呼和浩特、大连、合肥、长沙、广州和乌鲁木齐。我国主要城市的平均技术效率变动为 1.006, 每年仅上升 0.6%, 平均技术进步为 0.961, 每年下降 3.9%, 这导致技术效率变动的正效应被技术变动的负效应全部抵消, 可见是技术进步不足拖累实际 TFP。因此, 依靠技术进步来推动全要素生产率上升是行之有效的办法。

表 4 的全要素生产率结果表明我国主要城市实际 TFP 整体上呈现波动上升的趋势。2002~2005 年间我国主要城市实际 TFP 值在一个略微的上升后持续降低, 最终在 2005~2006 年间呈现最低 0.709, 显示出工业废水治理发展滞后。从 2006 年后开始, 我国实际 TFP 值呈现上升趋势, 除 2007~2008 年间外, 其后三个时期均大于 1。2009~2010 年间的实际 TFP 指数为 1.139, 表明在此期间我国实际全要素生产率上升了 13.9%。

**Table 3.** The Malmquist TFP index and its decomposition of key cities' industrial wastewater control from 2000 to 2010  
**表 3.** 2000~2010 年主要城市工业废水治理 Malmquist TFP 指数及其分解

城市	名义 TFP					实际 TFP				
	技术效率	技术进步	纯技术效率	规模效率	全要素生产率	技术效率	技术进步	纯技术效率	规模效率	全要素生产率
北京市	1.008	0.952	1.078	0.935	0.960	1.008	0.953	1.005	1.003	0.961
天津市	1.008	0.939	1.153	0.874	0.947	1.008	0.946	1.001	1.007	0.954
石家庄市	0.964	0.913	1.039	0.928	0.880	0.964	0.927	1.051	0.917	0.894
太原市	0.994	0.967	0.994	1.000	0.961	0.994	0.970	1.029	0.966	0.964
呼和浩特市	1.041	1.239	1.084	0.961	1.290	1.041	1.258	1.054	0.988	1.310
沈阳市	0.997	0.899	1.021	0.977	0.897	0.997	0.922	1.022	0.976	0.920
大连市	1.000	1.028	1.000	1.000	1.028	1.000	1.043	1.000	1.000	1.043
长春市	1.064	0.927	1.061	1.003	0.986	1.064	0.933	1.009	1.055	0.993
哈尔滨市	1.104	0.942	1.100	1.004	1.040	1.104	0.948	1.017	1.085	1.047
上海市	0.993	0.931	1.000	0.993	0.925	0.993	0.940	1.000	0.993	0.934
南京市	0.965	0.945	1.000	0.965	0.911	0.965	0.948	1.000	0.965	0.914
杭州市	1.050	0.965	1.068	0.983	1.013	1.050	0.972	1.007	1.043	1.021
宁波市	1.051	0.911	1.087	0.967	0.957	1.051	0.914	1.004	1.047	0.961
合肥市	0.946	0.994	1.000	0.946	0.941	0.946	1.005	1.000	0.946	0.951
福州市	1.044	0.965	1.040	1.003	1.007	1.044	0.977	1.027	1.016	1.019
厦门市	1.105	0.933	1.178	0.937	1.031	1.105	0.945	1.000	1.104	1.044
南昌市	0.999	0.936	0.993	1.006	0.935	0.999	0.943	1.029	0.970	0.942
济南市	1.022	0.959	1.024	0.998	0.980	1.022	0.964	1.010	1.012	0.985
青岛市	1.023	0.953	1.023	1.000	0.975	1.023	0.960	1.001	1.021	0.982
郑州市	0.977	0.956	0.994	0.983	0.934	0.977	0.978	1.021	0.957	0.956
武汉市	0.994	0.976	1.000	0.994	0.971	0.994	0.978	1.000	0.994	0.973
长沙市	0.998	1.155	0.992	1.006	1.153	0.998	1.166	1.018	0.980	1.164
广州市	1.031	1.054	1.090	0.946	1.086	1.031	1.063	1.010	1.021	1.096
深圳市	0.974	0.914	0.974	1.001	0.891	0.974	0.928	0.998	0.976	0.905
南宁市	0.946	0.928	0.943	1.004	0.878	0.946	0.943	1.020	0.928	0.893
海口市	1.000	0.681	1.000	1.000	0.681	1.000	0.690	1.000	1.000	0.690
成都市	0.971	0.941	1.109	0.875	0.913	0.971	0.961	1.024	0.948	0.933
重庆市	0.912	0.911	0.950	0.961	0.831	0.912	0.921	0.996	0.916	0.840
贵阳市	0.992	0.919	0.986	1.006	0.911	0.992	0.936	1.039	0.954	0.928
昆明市	0.946	0.964	1.108	0.853	0.912	0.945	0.971	1.029	0.919	0.918
西安市	0.969	0.916	0.969	1.000	0.887	0.969	0.934	1.034	0.937	0.905
兰州市	1.059	0.623	1.052	1.007	0.660	1.059	0.624	1.016	1.042	0.661
西宁市	1.000	0.906	1.000	1.000	0.906	1.000	0.920	1.000	1.000	0.920
银川市	0.967	0.924	0.970	0.997	0.894	0.967	0.928	1.000	0.968	0.898
乌鲁木齐市	1.121	1.560	1.116	1.004	1.748	1.121	1.576	1.019	1.100	1.766
平均	1.006	0.951	1.033	0.974	0.957	1.006	0.961	1.014	0.992	0.967

**Table 4.** The average annual Malmquist TFP index and its decomposition of key cities' industrial wastewater control  
**表 4.** 主要城市各年平均工业废水治理 Malmquist TFP 指数及其分解

时期	名义 TFP					实际 TFP				
	技术效率	技术进步	纯技术效率	规模效率	全要素生产率	技术效率	技术进步	纯技术效率	规模效率	全要素生产率
2000~2001	1.256	0.761	1.278	0.983	0.956	1.256	0.761	1.087	1.156	0.956
2001~2002	0.757	1.183	0.806	0.939	0.895	0.757	1.185	1.008	0.750	0.896
2002~2003	1.188	0.758	1.278	0.930	0.901	1.188	0.769	0.999	1.189	0.913
2003~2004	0.975	1.093	0.797	1.223	1.067	0.966	1.113	1.024	0.943	1.075
2004~2005	0.876	1.064	1.221	0.717	0.932	0.885	1.070	1.009	0.878	0.947
2005~2006	1.093	0.644	1.050	1.040	0.704	1.093	0.648	0.980	1.115	0.709
2006~2007	0.892	1.276	0.759	1.174	1.138	0.892	1.299	1.013	0.880	1.159
2007~2008	1.109	0.825	1.177	0.942	0.914	1.109	0.860	0.997	1.112	0.954
2008~2009	0.892	1.135	0.899	0.993	1.013	0.892	1.124	1.016	0.878	1.003
2009~2010	1.137	0.992	1.274	0.893	1.128	1.137	1.002	1.011	1.125	1.139
平均	1.006	0.951	1.033	0.974	0.957	1.006	0.961	1.014	0.992	0.967

#### 4. 结论

本文应用 DEA 模型和 Malmquist TFP 指数, 测度全国主要城市的工业废水治理静态和动态效率, 并在考虑价格指数对 TFP 的影响之后, 计算了名义 TFP 值和实际 TFP 值。研究表明, 我国主要城市的工业废水治理效率整体不高, 效率提升空间较大。2010 年 35 个主要城市的工业废水治理平均综合效率仅为 0.508, 即达到理想效率的 50.8%。并且在扣除固定资产投资价格指数等因素的影响后, 2000~2010 年这些城市工业废水治理的 TFP 值只有 0.967, 即平均每年下降 4.3%。

从综合效率来看, 不同城市的废水治理效率差异过大是导致整体效率偏低的主因。尽管大连、海口、拉萨、西宁和乌鲁木齐等五个城市的综合效率为 1.000, 达到 DEA 有效, 但有 60% 的城市综合效率处于 0.5 以下水平, 尤其济南和深圳低至 0.165 和 0.084。所以, 在提高全国各城市废水治理效率过程中, 必须坚持因地制宜原则, 大力推广高效率城市的成功经验, 努力缩小城市间的差异。

在将综合效率分解为纯技术效率和规模效率后得出结论, 技术进步不足是导致效率改进缓慢的主因。十年间实际技术进步大于 1 的城市仅有呼和浩特、大连、合肥、长沙、广州和乌鲁木齐, 而兰州等城市的技术进步只有 0.6 多。同时, 很多城市的纯技术效率和规模效率呈现反向变动, 尤其深圳纯技术效率仅 0.098 而规模效率达 0.855, 昆明纯技术效率为 1.000 而规模效率仅 0.198。因此, 必须进一步促进纯技术效率和规模效率协同发展, 方能真正有效提高城市工业废水的治理效率。

最后, 北京、天津等 23 个城市出现废水治理规模效率递减, 这意味着它们的废水治理投入超过最优规模, 合理调配工业废水治理投入而非简单更新升级治理技术是这些城市改进治理效率的必要选择。

虽然本文选用的样本数据截至 2010 年, 但是对我国主要城市目前工业废水治理情况具有重要的指导意义。这体现在: 一、水资源治理作为一个长期的工程, 在三五年之内的治理方向是统一的。向高效率地区借鉴经验, 加快技术进步应该成为各地市近年来的水资源治理方向。二、政府部门需要从上一阶段的政策执行效果中汲取经验。

#### 致 谢

感谢国家社科基金重点项目“我国工业节水战略研究”(项目批准号 12AJY003)和浙江省大学生科技



创新活动计划暨新苗人才计划(指导教师李太龙)的支持。

### 参考文献 (References)

- [1] 李蕊. 辽河流域典型造纸工业废水治理技术评价方法集成与优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [2] 郑丽娟. 基于 DEA 的杭州市工业污染治理效率研究[J]. 统计科学与实践, 2011(2): 49-50.
- [3] 胡伟, 钱茂, 刘广兵. 基于 DEA 模型的太湖流域企业污水治理效率[J]. 环境工程学报, 2014, 8(4): 1417-1422.
- [4] 李磊, 赵培培. 中国工业废水治理效率评价[J]. 资源开发与市场, 2011, 27(12): 1093-1095.
- [5] 石风光. 中国地区工业水污染治理效率研究——基于三阶段 DEA 方法[J]. 华东经济管理, 2014, 28(8): 40-45.
- [6] 沈满洪, 程永毅. 中国工业水资源利用及污染绩效研究——基于 2003-2012 年地区面板数据[J]. 中国地质大学学报, 2015, 15(1): 31-40.
- [7] 尹怡诚, 刘云国, 许乙青, 等. 基于 DEA 的中国工业污染治理效率[J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 3063-3068.
- [8] 李玉龙, 李忠富. 基于非参数 Malmquist 指数方法的我国基础设施投资生产率研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3): 128-135.