

Water Use Efficiency in China's Industrial Sector: A Regional Study

Xinhui Lin¹, Youyou Chen², Binyin Xu³, Tailong Li³

¹Department of Basic Teaching, Zhejiang Economic & Trade Polytechnic, Hangzhou Zhejiang

²College of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

³School of Economics & Management, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Email: cyy000123@163.com

Received: Aug. 4th, 2015; accepted: Aug. 20th, 2015; published: Aug. 24th, 2015

Copyright © 2015 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 paper aims to study the water use efficiency in the industrial sector with respect for regional characteristics in China. Based on the principle of directional distance function, four different models (efficiency model, fresh water model, waste water model and substitution model) are presented to analyze the efficiency level of industrial water use in each province of China (mainland except Tibet), to measure the potential reduction on fresh water use and waste water discharge, and to show how much fresh water can be substituted with recycled water. The results are obtained considering the provincial characteristics such as water endowments, mineral resources and industrial structures. Provinces which have abundant mineral resources or sufficient water resources generally utilize water inefficiently in the industrial sector, and can increase recycled water use efficiency greatly. Developed provinces such as Beijing and Shanghai have high water use efficiency in the industrial sector. In light of these results, policy implications are provided for China's government.

Keywords

Industrial Water, Fresh Water, Recycled Water, Waste Water, Efficiency

中国省际工业用水效率分析

林新辉¹, 陈优优², 许濒尹³, 李太龙³

¹浙江经贸职业技术学院基础教学部, 浙江 杭州

²浙江理工大学理学院, 浙江 杭州

³浙江理工大学经济管理学院, 浙江 杭州
Email: cyy000123@163.com

收稿日期: 2015年8月4日; 录用日期: 2015年8月20日; 发布日期: 2015年8月24日

摘要

本文研究中国大陆1999~2011年除西藏外各省份的工业用水效率并提出改善意见。文章应用方向距离函数(DDF)建立四个模型——效率模型、新鲜水模型、废水模型和替代模型, 用以计算各地工业用水的无效率分数, 衡量效率水平及提升潜力, 说明新鲜水可节约程度、废水可减排程度和新鲜水能被循环用水替代的程度。研究表明, 拥有丰富矿产资源的贫水省份或水资源丰富的省份工业用水效率低下, 而北京、上海这类经济发达但缺水严重的省份工业用水效率较高。

关键词

工业用水, 新鲜水, 循环用水, 废水, 效率

1. 引言

中国工业经济持续发展, 工业用水不断攀升。然而, 中国淡水资源贫乏, 是国际公认的贫水大国。水资源供不应求的现实, 使得不断增加的工业用水需求陷入窘境。此外, 工业废水排放长期居高不下, 水生态和水环境受工业废水污染的情况时有发生, 这进一步加剧水资源短缺。

应对水资源短缺的重要手段是工业节水, 其核心是提高用水效率。由于存在地区差异, 包括经济发展情况、工业结构以及水资源禀赋等方面的差异, 各地实行统一的工业节水政策显然是不合适的。本文基于省际差异, 分析各地的工业用水情况, 量化估计省际工业用水效率, 分析效率损失背后的原因, 测度效率提升的潜力, 探讨效率提升的途径, 这对提高工业用水效率、落实“三条红线”政策、缓解水资源紧缺和建设可持续发展社会意义重大。

2. 研究方法、模型构建和数据

本文应用方向距离函数(DDF)原理构建四个模型实现两个目标: 一是估计各地区的工业用水效率; 二是测算通过节约新鲜水、减少废水排放或增加循环用水等方式所能达到的工业用水效率提升水平。首先, 构建效率模型计算各地区的无效率分数——无效率分数表明在没有牺牲好的产出或增加新的投入的情况下, 工业用水能被节约的程度。然后, 构建新鲜水模型测度各地工业用新鲜水的节约潜力, 构建废水模型测度各地工业废水的减排潜力, 构建替代模型测度各地工业用新鲜水能被循环用水替代的潜力。¹

2.1. 研究方法: 方向距离函数(DDF)

令 $x \in \mathcal{R}_+^l$ 、 $y \in \mathcal{R}_+^m$ 和 $b \in \mathcal{R}_+^r$ 分别表示经济生产的 l 维投入向量、 m 维好产出向量和 r 维坏产出向量, 那么输出集可以定义为:

$$P(x) = \{(y, b) : \text{以 } x \text{ 为投入可以生产 } (y, b) \text{ 的产出}\}$$

可见, 输出集包含利用投入向量所能生产的所有可能的产出向量。

¹Fujii 等(2012) [1]应用 DDF 原理建立新鲜水模型、废水模型和替代模型研究中国大陆 2007 年除西藏外各省 1996~2006 年各行业的工业用水效率问题。为使计算结果更真实可靠并使研究结论更具现实意义和政策价值, 本文改进相关模型, 研究中国大陆除西藏外 1999~2011 年的省际工业用水效率问题。

假定经济生产的好产出和坏产出满足“零结合”条件，即生产过程不带来坏产出的唯一途径就是不生产，或者说没有坏产出的同时也不会有好产出。²

DDF 原理可以找出在经济生产中减少投入、增加好产出且减少坏产出的可能。令 \mathbf{g}_x 、 \mathbf{g}_y 和 \mathbf{g}_b 表示投入方向向量、好产出方向向量和坏产出方向向量，则方向距离函数 \bar{D} 可以表示为³

$$\bar{D}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{b} | \mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y, \mathbf{g}_b) = \sup \left\{ \beta : (\mathbf{y} + \beta \mathbf{g}_y, \mathbf{b} - \beta \mathbf{g}_b) \in P(\mathbf{x} - \beta \mathbf{g}_x) \right\}$$

此时， $\beta \mathbf{g}_x$ 、 $\beta \mathbf{g}_y$ 和 $\beta \mathbf{g}_b$ 分别刻画经济生产单元 $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{b})$ 到生产前沿面的投入方向距离、好产出方向距离和坏产出方向距离，即相对于效率最高的生产前沿面而言，该生产单元可以在 \mathbf{g}_x 方向上减少 β 单位投入，在 \mathbf{g}_y 方向上增加 β 单位好产出，同时在 \mathbf{g}_b 方向上降低 β 单位坏产出。

假定存在 N 个地区，对于给定的地区 $k (k=1, \dots, N)$ ，令 \mathbf{x}_k 表示该地区的 l 维投入向量， \mathbf{y}_k 表示该地区的 m 维好产出向量， \mathbf{b}_k 表示该地区的 r 维坏产出向量。地区 k 的方向距离函数 \bar{D} 可以通过如下线性规划计算得到：

$$\bar{D}(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, \mathbf{b}_k | \mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y, \mathbf{g}_b) = \max \beta_k \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_k - \beta_k \mathbf{g}_x \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{y}_i \geq \mathbf{y}_k + \beta_k \mathbf{g}_y \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{b}_i = \mathbf{b}_k - \beta_k \mathbf{g}_b \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (5)$$

$$\lambda_i, \beta_k \geq 0 \quad (i=1, \dots, N) \quad (6)$$

其中 λ_i 为地区 i 对应的权重， β_k 为地区 k 在 \mathbf{g}_x (\mathbf{g}_y 或 \mathbf{g}_b) 方向上的投入减少距离(好产出增加距离或坏产出减少距离)。(2)、(3)、(4)三式左边的线性组合表示能通过 N 个地区线性拟合得到的所有生产可能性；(2)、(3)、(4)三式的右边部分表示地区 k 减少 $\beta_k \mathbf{g}_x$ 投入、增加 $\beta_k \mathbf{g}_y$ 好产出、降低 $\beta_k \mathbf{g}_b$ 坏产出；(4) 式的等号由“零结合”条件而来；(5) 式意味着这 N 个地区的线性组合应满足规模报酬可变假设；最后，(1)式给出地区 k 到达生产前沿面的距离，即地区 k 的无效率分数。

上述模型其实是规模报酬可变的非参数模型，它在 DDF 原理下计算得出各地区的无效率分数。注意，该规模报酬可变模型存在一个缺陷，即最值会影响效率估算结果。这是因为(5)式使具有最小投入 x 、最大好产出 y 或最大(小)坏产出 b 的地区无法通过其它地区线性拟合，这样，具有最值的地区会被模型估算为无效率分数为 0，即位于生产前沿面上。为此，本文称真正有效率的无效率分数为 0 的地区集为“真生产前沿面”，由模型缺陷导致的无效率分数为 0 的地区集为“伪生产前沿面”。对无效率分数为 0 的地区，可以通过分析原始数据鉴定它们是属于真生产前沿，还是属于伪生产前沿。

2.2. 模型构建

2.2.1. 新鲜水模型

新鲜水模型用来计算在不增加新鲜水以外的其它投入和不减少好产出的条件下，新鲜水可以被节约

² “零结合”条件意味着，现实中，生产过程一定会带来污染或废物排放，即是说，没有任何污染或不排放任何工业三废(废水、废气、固体废弃物)的生产是不存在的。参见 Chung 等(1997) [2]。

³ 参见 Lee 等(2002) [3]。

的百分比。新鲜水模型为:

$$D(\mathbf{x}_k, \mathbf{f}_k, \mathbf{y}_k | \mathbf{0}, \mathbf{f}_k, \mathbf{0}) = \max \beta_k \quad (7)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_k \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{f}_i \leq (1 - \beta_k) \mathbf{f} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{y}_i \geq \mathbf{y}_k \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (11)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (12)$$

其中 (x, f) 和 y 分别代表投入向量和好产出向量, x 是除新鲜水外的投入, f 是新鲜水投入。

首先, 新鲜水模型不考虑坏产出; 其次, 新鲜水模型将 x 方向向量和 y 方向向量取为 $\mathbf{0}$ 向量, 并将新鲜水方向向量取为 \mathbf{f}_k 。这意味着该模型只关心新鲜水投入的减少, 而不关心其它投入的减少或好产出的增加, 更不关心坏产出到底是增加还是减少。事实上, (9)式中的 $(1 - \beta_k) \mathbf{f}_k$ 表示地区 k 在用水效率提高后所消耗的新鲜水量, β_k 代表新鲜水的节约强度(百分比)。

2.2.2. 废水模型

同理, 废水模型只考虑废水排放的减少:

$$D(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, \mathbf{w}_k | \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{w}_k) = \max \beta_k \quad (13)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_k \quad (14)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{y}_i \geq \mathbf{y}_k \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{w}_i = (1 - \beta_k) \mathbf{w}_k \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (17)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (18)$$

其中 \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 和 \mathbf{w} 分别代表投入向量、好产出向量和废水排放, 即经济生产的坏产出以废水排放为代表。该模型计算在不增加投入和不减少好产出的条件下, 地区 k 通过提高用水效率所能实现的废水减排强度(百分比)。

2.2.3. 效率模型

效率模型用于计算各地区工业用水的无效率分数。无效率分数衡量的是, 用水效率提高后, 工业用水总量和废水排放所能减少的强度(百分比), 其中工业用水总量由新鲜水和循环用水两部分组成。即是考虑在不增加其它投入和不减少好产出的条件下, 用水效率提高使工业生产在减少用水总量的同时同比例减排废水。这是因为, 有理由相信当工业用水总量下降时, 废水排放会同比例下降。

效率模型的具体表示如下:

$$D(x_k, t_k, y_k | 0, t_k, 0, w_k) = \max \beta_k \quad (19)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i \leq x_k \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i y_i \geq y_k \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i t_i \leq (1 - \beta_k) t_k \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i w_i = (1 - \beta_k) w_k \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (24)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (i=1, \dots, N) \quad (25)$$

其中 (x, t) 、 y 和 w 分别代表投入向量、好产出向量和废水排放, x 是除工业用水外的投入, t 是包含新鲜水和循环用水在内的工业用水总投入。该模型计算在不增加其它投入和不减少好产出的情况下, 地区 k 通过提高用水效率所能实现的工业用水总量减少和废水减排强度(百分比)。

2.2.4. 替代模型

替代模型计算在不增加其它投入和不减少好产出的条件下, 以循环用水替代新鲜水的方式, 所能达到的新鲜水节约强度(百分比)。替代模型具体表示为:

$$D(x_k, f_k, r_k, y_k, w_k | 0, f_k, r_k, 0, w_k) = \max \beta_k \quad (26)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i \leq x_k \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i y_i \geq y_k \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i f_i \leq (1 - \beta_k) f_k \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i r_i = (1 + \beta_k) r_k \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i w_i = (1 - \beta_k) w_k \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (32)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (i=1, \dots, N) \quad (33)$$

相较于效率模型考虑工业用水总量 t , 替代模型分别考虑新鲜水 f 和循环用水 r 两部分, 并认为用水效率提高带来的新鲜水节约、循环用水增加和废水减排的强度一致——新鲜水使用和废水排放下降, 然而循环用水上升。

2.3. 数据

本文所使用的数据来自历年《中国环境年鉴》和《中国工业经济统计年鉴》。数据包括 1999~2011

年除西藏外中国大陆各省(直辖市、自治区)的 7 类工业指标: 资本投入、劳动投入、工业产值(好产出)、废水排放(坏产出)、工业用水总量、新鲜用水和循环用水, 由此组成的面板数据共 2730 个数据值。⁴

3. 结果和分析

3.1. 工业用水效率及分析

根据各省份无效率分数的计算结果, 可以把它们分为四类地区: 前沿效率地区、高效地区、低效地区和极低效地区(见表 1)。表 1 中, 有 9 个省份的无效率分数在 1999~2011 年间几乎都为 0 值。勘查原始数据发现, 江苏、海南、广西和福建的无效率分数为 0, 源于其数据中出现的极值。

用水效率比较高的地区主要集中在缺水地区。长期以来, 水资源贫乏的现实激励这些地区不得不通过改进生产中的节水技术、提高废水处理和循环水再生能力、升级产业结构来实现高效用水。相比之下, 水资源丰富的省份和矿产资源丰富的省份多是低效用地区。丰富的水资源往往会提高工业用水效率的努力程度偏低, 丰富的矿产资源则会导致特定的高耗水产业成为当地工业经济发展的主导产业, 这都不利于工业节水。

3.2. 提高工业用水效率的途径及分析

(1) 节约新鲜用水和减少废水排放

根据新鲜水模型和废水模型的计算结果, 山西、黑龙江、重庆、湖南、安徽、浙江、吉林和辽宁等 8 个省份节约工业用新鲜水和减少工业废水排放的潜力巨大。改进煤炭产业的用水技术、升级废水处理设备是山西提高工业用水效率的有效途径; 其它 7 个省份位于水资源较为丰富的地区, 提高工业水价, 利用价格机制有助于它们提高工业用水效率。重庆、湖南、安徽、浙江、吉林和辽宁这 6 个省份的工业用新鲜水节约潜力大于工业废水减排潜力, 因此, 制定政策激励工业企业节约新鲜用水要比严格管制废水排放更加有效。

(2) 减少工业用水总量和提高循环用水率

根据效率模型和替代模型的计算结果, 全国有 2/5 的省份具有很大的工业节水潜力, 可以通过综合运用改进用水技术、升级废水处理设备以及增加循环用水的方式来提高工业用水效率。尤其, 在山西、黑龙江、广西、贵州、云南和新疆等省份, 有超过 60% 的工业用水可以被节约, 同时有超过 60% 的工业用新鲜水可以被循环用水替代。

在宁夏、甘肃、陕西、湖南、福建和吉林等省份, 改进用水技术的可能性不大, 而提高循环用水率的空间较大, 即可以通过安装或升级循环用水系统来提高工业用水效率。相反, 在四川和河南等地, 通过改进工业用水技术节约总用水量的潜力较大, 这类政策则更有助于提高工业用水效率。

Table 1. Regional classification of industrial water use efficiency

表 1. 各地区所属工业用水效率类别

效率类别(无效分数范围)	地区
前沿效率(D = 0)	真前沿地区: 北京、天津、上海、山东、广东 伪前沿地区: 海南、江苏、福建、广西 ⁵
高效(0 < D ≤ 0.30)	江西、湖南、浙江
低效(0.30 < D ≤ 0.50)	四川、吉林、陕西、辽宁、内蒙古、甘肃、河南、贵州
极低低效(D > 0.50)	宁夏、湖北、安徽、重庆、新疆、黑龙江、河北、云南、山西

⁴《中国工业经济统计年鉴》调整了 2012 年数据的统计口径, 去除了规模以上工业企业从业人员年均人数这一项, 所以数据到 2011 年止。由于西藏的数据不全, 所以研究时予以剔除。

⁵广西的无效率分数从 1999 年到 2010 年都为 0。

4. 研究结论

从 1999 年到 2011 年间, 中国工业用水效率显著增加, 2006 年至 2011 年的增加速度比前 7 年更为迅速。十一五规划和“三条红线”政策起了很大作用。北京、天津、上海、山东和广东等省份处于我国工业用水的效率前沿面。低新鲜用水量、高循环用水使用率和低废水排放量是这些地区的共同特征。从水资源分布上看, 这些用水高效的地区主要集中于缺水或严重缺水地区。⁶ 工业用水效率较低的省份有: 河北、湖北、山西、黑龙江、安徽、河南、贵州、新疆、云南和宁夏。这些省份的工业经济发展高度依赖高耗水产业。其中, 云南、贵州和新疆等西部省份的工业用水效率不增反降。相反, 内蒙古、辽宁、吉林、江西、四川、山西和甘肃等省份的工业用水效率提高迅速。

基于省际差异, 本研究提出以下政策建议: 首先, 政府应该坚定不移落实并推进“三条红线”政策。第二, 各地政府应基于本地的工业发展特点完善并推进工业用水政策。第三, 各地政府应运用不同政策工具提高工业用水效率。山西、黑龙江、浙江、福建、湖北、广西、重庆和云南等 8 个省份节约新鲜用水和减少废水排放的潜力巨大, 政府不仅要出台政策激励工业企业少取水也要严格监管推进工业废水减排。重庆、湖南、安徽、浙江、吉林和辽宁这 6 个省份的新鲜用水节约潜力要大于废水减排潜力, 激励节约新鲜用水的政策比限制废水排放的政策更有效。山西、黑龙江、福建、湖北、广西、云南、宁夏、甘肃、贵州和新疆等地的政府应重点出台政策提高工业循环用水率。第四, 各地工业部门应采用不同途径提高工业用水效率。宁夏、甘肃、陕西、湖南、福建和吉林等地应重点通过改进循环供水系统来提高工业用水效率。四川、河南等地则应通过改进生产技术节约总用水量来提高工业用水效率。总体上, 全国有 2/5 以上的地区可以通过综合运用改进用水技术、升级废水处理设备和改进循环供水系统的方式提高工业用水效率。

基金项目

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)的支持。

参考文献 (References)

- [1] Fujii, H., Managi, S. and Kaneko, S. (2012) A water resource efficiency analysis of the Chinese industrial sector. *Environmental Economics*, **3**, 82-92.
- [2] Chung, Y.H., Fare, R. and Grosskopf, S. (1997) Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, **51**, 229-240. <http://dx.doi.org/10.1006/jema.1997.0146>
- [3] Lee, J.-D., Park, J.-B. and Kim, T.-Y. (2002) Estimation of the shadow prices of pollutants with production/environment inefficiency taken into account: A nonparametric directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, **64**, 365-375. <http://dx.doi.org/10.1006/jema.2001.0480>
- [4] 王晓青 (2001) 中国水资源短缺地域差异研究. *自然资源学报*, **6**, 516-520.

⁶关于我国水资源分布的划分, 参见王晓青(2001) [4]。