

# 基于网络SBM-DEA模型和GML指数的中国 各省工业用水效率研究

邓光耀<sup>1,2</sup>, 张忠杰<sup>1,2</sup>

(1. 兰州财经大学甘肃经济发展数量分析研究中心, 兰州 730020; 2. 兰州财经大学统计学院, 兰州 730020)

**摘要:** 近年来, 中国工业用水占全部用水的比例在20%~30%左右, 提升工业用水效率、节约集约利用水资源已经成为影响中国国民经济可持续发展的重要问题之一。本文基于网络SBM-DEA模型和GML指数, 研究了2007-2015年中国各省工业用水效率, 实证结果发现: (1) 从年度平均值来看, 与污水治理阶段相比, 生产阶段处于前沿面的省份更多, 各省份与前沿面的差距相对较小。北京、天津、内蒙古、山东、广东、海南等省份生产阶段工业用水效率较高, 但是污水治理阶段的效率值却较低; 辽宁、吉林、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广西、贵州、云南、青海等省份生产阶段效率值较低, 但是污水治理阶段的效率值却较高。(2) 从各时间段的几何平均值来看, 大部分省份网络和污水治理阶段的GML指数值小于1, 但是生产阶段的GML指数值大于1。因此, 在提升生产阶段的工业用水效率的同时, 需要加大工业污水的治理力度, 提升污水治理阶段的效率, 并树立工业生产和治污同步进行的意识, 特别是北京、天津、内蒙古、山东、广东、海南等污水治理效率较低的省份。

**关键词:** SBM-DEA模型; GML指数; 工业用水效率

近年来, 中国工业用水占全部用水的比例在20%~30%左右。虽然与农业用水相比, 中国工业用水占比较低, 但是与农业用水存在大量的天然降水(绿水)相比, 工业用水取水更为不易, 使用的多是江河和湖泊中的水资源(蓝水), 工业废水造成的污染问题也更为严重, 净化工业废水需要的水资源也更多(灰水)。工业水资源的节约集约利用已经成为影响中国国民经济可持续发展的重要问题之一, 为此提升工业用水效率势在必行。

工业用水效率可分为绝对效率和相对效率, 其中绝对效率是指采用节水技术所能提高效率, 例如中国政府所颁布的《关于实行最严格水资源管理制度的意见》中指出“到2030年, 用水效率接近甚至达到世界先进水平, 工业方面的万元工业增加值用水量降低到40 m<sup>3</sup>以下(以2000年不变价计算)”；相对效率是指相对于各省共同前沿面的效率, 学术界则通常研究相对效率, 测算水资源相对效率的方法主要是DEA (Data Envelopment Analysis) 方法和SFA (Stochastic Frontier Analysis) 方法<sup>[1]</sup>。(1) DEA方面。岳立等<sup>[2]</sup>基于非期望产出的方向性环境距离函数, 计算了2003-2009年中国13个省区的工业用水效率。程永毅等<sup>[3]</sup>基于地区要素禀赋的投入价格体系, 利用成本效率DEA模型测算

收稿日期: 2018-12-13; 修订日期: 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(71704070); 教育部人文社会科学研究青年基金西部和边疆地区项目(17XJC790002); 甘肃省高等学校科研项目(2017B-41); 兰州财经大学丝绸之路经济研究院科研项目(JYYZ201603); 兰州财经大学科研项目(Lzufe2018B-06)

作者简介: 邓光耀(1985-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 研究方向为资源环境经济学。

E-mail: dgy203316@163.com

通讯作者: 张忠杰(1979-), 男, 河南柘城人, 博士, 副教授, 研究方向为宏观经济理论与政策。

E-mail: eruditeman@126.com

了中国各省2002-2011年工业用水效率,并研究了工业用水效率的收敛性。Li等<sup>[4]</sup>基于中国30个省区1999-2013年的面板数据,利用SBM-Undesirable和Meta-frontier模型对共同前沿与群组前沿下各省区工业用水效率及其影响因素进行实证研究,指出工业用水效率不仅与不同省份的技术异质性有关,而且与非期望产出污水有关。Wang等<sup>[5]</sup>以化学需氧量(COD)和氨氮(NH<sub>4</sub>-N)为非期望产出,利用SBM-DEA测算了中国各省2009-2010年的工业用水效率,指出工业用水效率和节水潜力存在明显的地理差异。李静等<sup>[6]</sup>利用MinDS-DEA模型测算了中国各省2005-2015年工业用水效率,指出全国总体的平均用水效率为0.75,东中西的平均用水效率分别为0.79、0.70和0.77。孙冬营等<sup>[7]</sup>基于SBM-DEA模型测算了2005-2014年长江三角洲26个城市的工业用水效率,指出长江三角洲城市群工业用水效率水平整体偏低。另外,石广明等<sup>[8]</sup>利用Malmquist指数测算了中国各省1999-2015年工业用水效率的动态变化,指出中国大部分省份工业用水效率相对低下。(2) SFA方面。雷贵荣等<sup>[9]</sup>利用随机前沿生产函数,研究了徐州市的工业用水效率,指出徐州市工业用水效率呈现上升趋势,总体节水潜力是当前用水量的22.52%。雷玉桃等<sup>[10]</sup>利用SFA方法测算了中国各省2002-2013年的工业用水效率,并利用多元回归模型分析了全国、东部、中部和西部地区用水效率的影响因素,指出东部地区工业用水效率最高,中部次之,西部最低。雷玉桃等<sup>[11]</sup>利用随机前沿模型研究了中国各省1999-2014年的工业用水效率,并利用Tobit模型分析了工业结构等因素对工业用水效率的影响,指出中国工业用水效率平均值呈现逐年上升的趋势,合理的工业结构有助于提升工业用水效率。

与已有文献相比,本研究存在以下创新:(1)利用网络SBM-DEA(Slacks-Based Measure-Data Envelopment Analysis)模型,综合考虑生产阶段的工业用水效率和对工业污水的治理效率,从而能够更为全面地考察中国各省工业用水效率。以往的文献(如岳立等<sup>[2]</sup>、雷玉桃等<sup>[11]</sup>)一般只考虑生产阶段的工业用水效率,忽视了污水治理阶段的效率问题,这会与实际的工业用水效率产生偏差。(2)利用GML(Global Malmquist Luenberger)指数研究中国各省生产阶段和污水治理阶段的工业用水效率的动态变化,并将GML指数分解为测度技术效率变化的EC指数和测度技术进步变化的BPC指数的乘积,而以往的文献(如石广明等<sup>[8]</sup>)一般只研究生产阶段工业用水效率的动态变化。因此,采用网络SBM-DEA模型,结合生产阶段和污水治理阶段,全方位地研究中国各省工业用水效率,并进一步利用GML指数研究中国工业用水效率的动态变化。由于已有的文献对污水治理阶段的工业用水效率缺乏研究,而本文综合考虑生产阶段和污水治理阶段的工业用水效率,研究更为全面,从而在提升中国各省工业用水效率方面具有重要的理论与现实意义。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 网络SBM-DEA模型

传统DEA模型不考虑投入到产出的中间过程,而网络DEA模型考察投入到产出各环节对效率的影响。为了考虑生产和环境治理两个环节对水资源利用效率的影响,将工业用水效率的测算过程分成两个阶段:第一阶段(生产环节)以工业就业人数、工业物质资本存量、工业用水量为投入,产出则为工业增加值和工业污水排放量,其中工业污

水排放量作为非期望产出; 第二阶段(污染治理环节)以工业污水排放量、污水处理设施数、污水处理设施运行费用和污水处理投资额为投入, 产出则为工业污水处理量。其中, 工业污水排放量是两个阶段的连接变量, 在第一阶段作为非期望产出, 在第二阶段作为投入。另外, 常规网络DEA模型存在径向和松弛性问题, 而网络SBM-DEA模型则考虑了径向和松弛性问题。径向是指投入或产出按比例缩小或者扩大达到有效, 当存在投入冗余或产出不足时, 也即投入或产出存在非零松弛时, 径向网络DEA模型会高估评估各省的工业用水效率水平。

参考Tone<sup>[12]</sup>对网络SBM-DEA模型的研究, 本文考虑 $n$ 个决策单元 $DMU_j$  ( $j=1, \dots, n$ )、 $K$ 个节点 ( $k=1, \dots, K$ ) 的水资源利用效率。令 $m_k$ 和 $r_k$ 分别为第 $k$ 个节点投入和产出变量的个数, 第 $k$ 个节点到第 $h$ 个节点的关系为  $(k, h)$ , 连接变量的个数为 $L$ 。令投入变量、产出变量和连接变量为  $x_j^k$ 、 $y_j^k$  和  $z_j^{(k,h)}$ , 则生产可能集被定义为:

$$\begin{aligned} x^k &\geq \sum_{j=1}^n x_j^k \lambda_j^k \quad (k=1, \dots, K) \\ y^k &\geq \sum_{j=1}^n y_j^k \lambda_j^k \quad (k=1, \dots, K) \\ z^{(k,h)} &= \sum_{j=1}^n z_j^{(k,h)} \lambda_j^k \quad (\text{第}k\text{阶段作为产出}) \\ z^{(k,h)} &= \sum_{j=1}^n z_j^{(k,h)} \lambda_j^h \quad (\text{第}h\text{阶段作为投入}) \end{aligned} \quad \lambda_j^k \geq 0 (\forall j, k) \quad (1)$$

式中:  $\lambda^k$ 为第 $k$ 阶段的权重向量, 另外无权重之和等于1的约束条件, 表示该DEA模型是规模报酬不变的。引入松弛变量, 决策单元  $DMU_o$  ( $o=1, \dots, n$ ) 可写成:

$$x_o^k = X^k \lambda^k + s^{k-}, \quad y_o^k = Y^k \lambda^k - s^{k+}, \quad \lambda^k \geq 0, \quad s^{k-} \geq 0, \quad s^{k+} \geq 0, \quad \forall k \quad (2)$$

式中:  $X^k = (x^1, \dots, x^k)$ ,  $Y^k = (y^1, \dots, y^k)$ ;  $s^{k-}$ 为投入冗余;  $s^{k+}$ 为产出不足。关于连接变量的约束条件, Tone<sup>[12]</sup>提供了自由和固定两种选择, 本文选择自由链接, 也即认为链接活动是自由决定的, 同时保持投入和产出之间的连续性:

$$Z^{(k,h)} \lambda^h = Z^{(k,h)} \lambda^k, \quad \forall k, h \quad (3)$$

式中:  $Z^{(k,h)} = (z_1^{(k,h)}, \dots, z_n^{(k,h)})$ 。

本文选择Non-oriented efficiency (非径向效率) 测算网络效率, 即:

$$\rho_o^* = \min_{\lambda^k, s^{k-}, s^{k+}} \frac{\sum_{k=1}^K w^k [1 - \frac{1}{m_k} (\sum_{i=1}^{m_k} \frac{s_j^{k-}}{x_{io}^k})]}{\sum_{k=1}^K w^k [1 + \frac{1}{r_k} (\sum_{i=1}^{r_k} \frac{s_j^{k+}}{y_{io}^k})]} \quad (4)$$

式中:  $\sum_{k=1}^K w^k = 1$ ,  $w^k \geq 0$ ,  $w^k$ 为第 $k$ 阶段权重 (生产和环境治理阶段的权重均取1/2);  $m_k$ 、 $r_k$ 分别为投入和产出变量的个数。

根据Tone<sup>[12]</sup>的定义, 非径向的分工效率 (Non-oriented Divisional Efficiency) 测算公式如下:

$$\rho^k = \frac{1 - \frac{1}{m_k} (\sum_{i=1}^{m_k} \frac{s_j^{k-}}{x_{io}^k})}{1 + \frac{1}{r_k} (\sum_{i=1}^{r_k} \frac{s_j^{k+}}{y_{io}^k})} \quad (5)$$

式中:  $s^{k-}$  为投入冗余的最优值;  $s^{k+}$  为产出不足的最优值。

由于式(4)是非线性规划,不易直接求解,参考Tone<sup>[13]</sup>、Deng等<sup>[14]</sup>,转化为以下线性规划求解:

$$\begin{aligned} \text{Min } \tau &= t - \sum_{k=1}^K w^k \left( \frac{1}{m_k} \sum_{j=1}^{m_k} \frac{S_j^{k-}}{x_{jo}} \right) \\ \text{s.t. } 1 &= t + \sum_{k=1}^K w^k \left[ \frac{1}{r_k} \left( \sum_{j=1}^{r_k} \frac{S_j^{k+}}{y_{jo}^k} \right) \right] \\ tx_{jo} &= \sum_{j=1}^{m_k} \gamma_j x_j + S_j^{k-}, \quad ty_{jo}^k = \sum_{j=1}^{r_k} \gamma_j y_j^k - S_j^{k+}, \quad \gamma_j \geq 0, \quad S_j^{k-} \geq 0, \quad S_j^{k+} \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\tau$  为效率值 (等于  $\rho_o^*$ );  $\gamma_j = t\lambda_j$ ;  $S_j^{k-} = ts_j^{k-}$ ;  $S_j^{k+} = ts_j^{k+}$ 。

需要说明的是,工业用水效率是比值数据,没有单位。对每个决策单元来说,其效率值是相对于前沿面的比值,位于前沿面的省份工业用水效率值等于1,不在前沿面的省份工业用水效率在0~1之间。

### 1.1.2 GML 指数

为了进一步分析中国各省工业用水效率的动态变化,参考Oh<sup>[15]</sup>,利用GML指数测算中国各省工业用水效率的跨年变化。与网络SBM-DEA模型一致,本文将各省视为一个决策单元(DMU),生产阶段的要素投入 $x$ 包括工业就业人数、工业物质资本存量、工业用水量,期望产出 $y$ 为各省工业增加值,非期望产出 $b$ 为工业污水排放量;污水治理阶段的要素投入 $x$ 包括工业污水排放量、污水治理设施数、污水治理设施运行费用和污水治理投资额,期望产出 $y$ 为各省工业污水处理量,另外本阶段不存在非期望产出。设研究时期总数为 $T$ (文中为9年),利用各省第 $t$ 期的投入和产出值,构造生产可行集 $P^t(x') = \{(y', b') : x' \text{ 生产 } (y', b')\}$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ 。设全局生产技术集为 $P^G(x) = P^1(x^1) \cup P^2(x^2) \cup \dots \cup P^T(x^T)$ ,参考Oh<sup>[15]</sup>,GML指数可定义为:

$$GML_k^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \quad (7)$$

式中:  $D^G(x^t, y^t, b^t)$  是全局方向性距离函数,利用式(6)所示的SBM-DEA模型求解(生产可行集的期限不再局限于同一年)。GML指数大于1,表明考察年度内工业用水效率值在增加,等于1则表示保持不变,小于1则表示下降。另外,GML指数可以进一步分解为测度技术效率变化的EC指数和测度技术进步变化的BPC指数的乘积,EC指数和BPC指数的定义如下:

$$EC_k^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{1 + D^t(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \quad (8)$$

$$BPC_k^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \times \frac{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{1 + D^t(x^t, y^t, b^t)} \quad (9)$$

类似地,EC指数大于1,表明考察年度内工业用水效率的技术效率部分在上升,等于1则表示保持不变,小于1则表示下降;BPC指数大于1,表明考察年度内技术进步部分在上升,等于1则表示保持不变,小于1则表示下降。

### 1.2 数据来源

限于数据的可得性,考虑除西藏外中国大陆30个省份2007-2015年工业用水利用效

率。各省工业物质资本存量按照永续盘存法估算，计算公式为：

$$K_{it}=I_{it}+(1-\sigma)K_{i,t-1}$$
 (10)

式中： $K_{it}$ 为第*i*个省份第*t*年度工业资本存量； $I_{it}$ 为第*i*个省份第*t*年度工业固定资产投资额；参考张军等<sup>[16]</sup>折旧率σ取9.6%。

基期的资本存量按照以下公式估算：

$$K_{i,2007}=\frac{I_{i,2007}}{(g_{2007}+\sigma)}$$
 (11)

式中： $g_{2007}$ 为2007年各省份工业固定资产的平均增长率。

2007-2015年中国各省工业行业就业人数、用水量、增加值、污水治理投资额以及计算物质资本存量工业固定资产投资额来自于历年《中国统计年鉴》，工业污水排放量、污水治理设施数、污水治理运行费用、工业污水处理量来自于历年《中国环境年鉴》。

2 结果分析

2.1 网络SBM-DEA模型的结果分析

2007-2015年中国各省工业用水效率的9年平均值如表1所示。从表1可以看到：（1）与污水治理阶段相比，生产阶段处于前沿面的省份更多（效率值等于1），各省份与前沿面的差距相对较小。（2）从网络效率值来看，效率值较高的省（市、自治区）是河北、北京和内蒙古，效率值较低的省（自治区）是甘肃、浙江和新疆。不过，部分生产阶段工业用水效率较高的省份污水治理阶段的效率却较低，例如北京、天津、内蒙古、山东、广东、海南等6个省（市、自治区）生产阶段的效率值大于30个省份的平均值0.51，但是污水治理阶段的效率值小于30个省份的平均值0.45；另外，部分生产阶段效率值较低的省份污水治理阶段的效率值却较高，例如辽宁、吉林、安徽、福建、江西、

表1 2007-2015年中国各省工业用水效率的9年平均值

Table 1 9-year average of industrial water use efficiency in China's provinces from 2007 to 2015

省(市、自治区)	网络	生产阶段	治理阶段	省(市、自治区)	网络	生产阶段	治理阶段
北京	0.71	1.00	0.41	湖北	0.59	0.47	0.72
天津	0.67	1.00	0.35	湖南	0.53	0.45	0.61
河北	0.76	0.52	1.00	广东	0.54	0.84	0.23
山西	0.45	0.48	0.43	广西	0.57	0.41	0.74
内蒙古	0.71	1.00	0.43	海南	0.40	0.54	0.26
辽宁	0.54	0.48	0.61	重庆	0.33	0.41	0.25
吉林	0.46	0.42	0.49	四川	0.39	0.44	0.34
黑龙江	0.45	0.46	0.45	贵州	0.57	0.37	0.78
上海	0.63	0.71	0.56	云南	0.43	0.36	0.50
江苏	0.32	0.34	0.30	陕西	0.46	0.67	0.25
浙江	0.29	0.37	0.22	甘肃	0.29	0.35	0.23
安徽	0.49	0.35	0.62	青海	0.57	0.43	0.71
福建	0.44	0.40	0.48	宁夏	0.35	0.36	0.33
江西	0.39	0.31	0.47	新疆	0.31	0.44	0.19
山东	0.46	0.60	0.32	平均	0.48	0.51	0.45



湖北、湖南、广西、贵州、云南、青海等11个省份生产阶段的效率值小于30个省份的平均值0.51,但是污水处理阶段的效率值大于30个省份的平均值0.45;因此,只考虑生产阶段的工业用水效率不考虑污水处理阶段的效率得到的结果是有局限的。

部分生产阶段工业用水效率较高的省份污水处理阶段的效率较低,另外部分生产阶段效率值较低的省份污水处理阶段的效率值较高的原因如下:中国不同省份对污水处理的要求存在差异,或者即使是同一要求,不同地方政策执行力度也不一样,部分省(市)(如北京)对污水处理的要求以及政策执行力度比其他省份更高,因此即使在相同的污水处理投入和污水处理技术的情况下,部分省份能够处理的污水量较低,从而存在部分省份生产效率高、但是治理效率较低的现象。相应地,部分省份对污水处理的要求和执行力度相对宽松,则可能出现生产效率较低、污水处理效率较高的现象。

为了考察中国各区域之间工业用水效率的差异,将中国大陆除西藏外的30个省份划分为东中西三大区域,其中东部区域包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南等11个省(市、自治区),中部区域包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北和湖南等8个省份,西部区域包括重庆、四川、云南、贵州、广西、内蒙古、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆等11个省(市、自治区)。2007-2015年各区域工业用水效率如图1所示。从图1可以看到:(1)各区域网络效率值介于生产效率值和治理效率值之间,因为网络效率值是生产和治理阶段效率值的加权平均值,另外2007-2015年中大部分时间东部和西部区域生产阶段的效率值大于污水处理阶段的效率值,中部区域则是污水处理阶段的效率值大于生产阶段的效率值。(2)从生产阶段来看,东部区域用水效率最高,西部次之,中部最低,由于东部区域掌握了更为先进的生产技术,因此在资本、劳动力和用水投入一定的情况下,其产出水平较高且污水排放量较低,因此工业用水效率最高。从治理阶段来看,大部分时间中部区域污水处理效率较高,东部和西部相对较低,这说明中部地区更关注污水处理。

为了考察2007-2015年中国各省工业用水效率动态演进趋势,以2007年、2009年、2011年、2013年和2015年网络效率值为例,参考邓光耀等<sup>[17]</sup>、金魏等<sup>[18]</sup>,利用核密度估计方法来进行分析,如图2所示。从图2可以看到:(1)从密度函数中心来看(横坐标 $X_i$ 所对应的值),2007年的中心值最大,说明2007年各省份网络效率值的平均值最大,其他年份差异较小。(2)从密度函数中心的峰值来看(纵坐标密度所对应的值),2013年和2015年较大,2007年较小,这说明2013年和2015年在平均值附近的省份较多,数据更集中。(3)从波峰的个数来看。2009年和2015年波峰均为两个,说明2009年和2015年各省工业用水效率的网络效率值呈现两极分化的现象;2007年、2011年和2013年的波峰个数则只有一个,未出现两极分化。(4)从尾

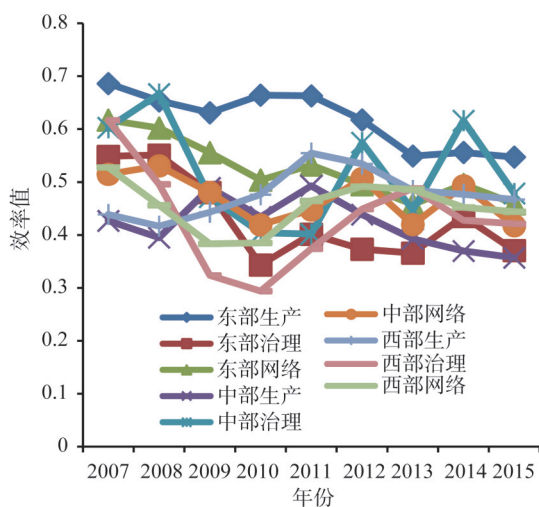


图1 2007-2015年各区域工业用水效率

Fig. 1 Industrial water use efficiency in each region of China from 2007 to 2015

部来看,呈现右偏分布的特征,说明右边的省份个数比左边更多,也即考察年度里工业用水效率的网络效率值大于平均值的省份个数更多。

2.2 GML 指数的结果分析

2007-2008年、2008-2009年、2009-2010年、2010-2011年、2011-2012年、2012-2013年、2013-2014年、2014-2015年8个阶段中国各省工业用水 GML 指数的几何平均值<sup>①</sup>如表2所示。从表2可以看到:(1)各省网络 GML 指数值介于生产阶段和污水治理阶段的 GML 指数值之间,这是因为利用网络 SBM-DEA 模型计算出来的各省工业用水网络效率值是生产和治理阶段的加权平均值。(2)大部分省份网络和污水治理阶段的 GML 指数值小于1,但是生产阶段的 GML 指数值大于1,说明2007-2015年虽然生产阶段大部分省份工业用水效率在提升,但是结合污水治理阶段之后,网络效率值在下降。生产阶段的工业用水效率提升的主要原因是节水技术的提升,而污水治理效率下降的可能原因是环境规制越来越强,污水治理投入成本在增加。其中,网络、生产和治理阶段的 GML 指数均大于1的省份有辽宁和青海,而

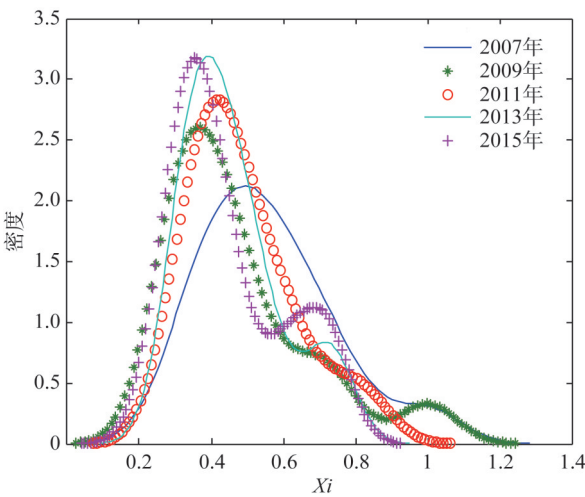


图2 2007-2015年各省份网络效率值的核密度估计  
Fig. 2 Kernel density estimates of network efficiency values for provinces of China from 2007 to 2015

表2 中国各省工业用水 GML 指数 8 个阶段的几何平均值							
Table 2 Geometric mean values of 8 stages of GML index of industrial water use in each province of China							
省(市、自治区)	网络	生产阶段	治理阶段	省(市、自治区)	网络	生产阶段	治理阶段
北京	0.8481	1.0000	0.8031	湖北	0.9558	1.0060	0.9154
天津	0.8846	1.0000	0.8493	湖南	0.9896	1.0073	0.9753
河北	1.0277	0.9963	1.0623	广东	0.9580	0.9736	0.9551
山西	0.9382	0.9888	0.9144	广西	0.9162	0.9562	0.8876
内蒙古	0.9579	1.0269	0.9329	海南	1.0113	0.9651	1.0186
辽宁	1.0454	1.0110	1.0715	重庆	0.9339	1.0300	0.8971
吉林	0.9768	1.0162	0.9552	四川	0.9787	1.0202	0.9598
黑龙江	1.0036	0.9771	1.0175	贵州	0.9778	1.0284	0.9340
上海	0.9262	0.9766	0.9142	云南	0.9713	1.0065	0.9432
江苏	0.9758	1.0038	0.9642	陕西	0.9322	1.0091	0.9061
浙江	0.9502	1.0026	0.9339	甘肃	0.9888	0.9982	0.9862
安徽	0.9525	1.0246	0.9010	青海	1.0241	1.0240	1.0243
福建	0.9309	1.0059	0.8808	宁夏	0.9265	1.0243	0.8498
江西	0.9487	1.0040	0.9080	新疆	1.0488	0.9951	1.0620
山东	0.9742	0.9872	0.9692	平均	0.9631	1.0016	0.9437

① 平均值如无特别说明,是指算术平均值。另外根据Oh<sup>[15]</sup>,与算术平均值相比,利用几何平均值分析各阶段的 GML 指数、EC 指数、BPC 指数更好。

网络、生产和治理阶段的 *GML* 指数均小于 1 的省份有山西、上海、山东、河南、广东、广西和甘肃。另外大部分省份生产阶段的 *GML* 指数值大于污水治理阶段的 *GML* 指数值, 例外的省区有河北、辽宁、黑龙江、海南、青海和新疆。(3) 从 30 个省份的平均值来看, 生产阶段的 *GML* 指数值大于 1, 而网络、污水治理阶段的 *GML* 指数值小于 1。

进一步考察中国各区域之间工业用水 *GML* 指数的差异, 8 个阶段各区域的 *GML* 指数如表 3 所示。从表 3 可以看到: (1) 各区域网络、生产和治理阶段的 *GML* 指数波动较为频繁, 这说明与上一年度相比, 各区域网络、生产和治理阶段的工业用水效率可能增加也可能减少, 其中 2013-2014 年东部治理效率波动最大。(2) 各区域网络 *GML* 指数介于生产 *GML* 指数和治理 *GML* 指数之间, 是因为各区域所包括的省份网络 *GML* 指数介于生产 *GML* 指数和治理 *GML* 指数之间。

表 3 各区域 *GML* 指数  
Table 3 *GML* index in each region of China

时间段/年	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
东部生产	1.0067	0.9441	1.0969	0.9905	0.9828	0.9674	1.0059	0.9682
东部治理	1.0250	1.0701	0.9891	0.8397	0.9279	0.9667	1.4900	0.8797
东部网络	1.0101	1.0176	1.0343	0.8564	0.9518	0.9624	1.2096	0.8737
中部生产	1.0611	1.0143	1.0192	1.0520	0.9600	0.9498	0.9887	0.9934
中部治理	1.0148	0.9821	0.9842	0.7592	1.1646	0.8220	1.0766	0.8977
中部网络	1.0395	0.9958	0.9960	0.8576	1.0730	0.8648	1.0411	0.9295
西部生产	1.0674	0.9605	1.0873	1.0521	0.9871	0.9642	1.0024	0.9840
西部治理	0.9485	1.0467	0.9473	1.0506	0.9850	1.0461	0.8182	0.9622
西部网络	0.9914	1.0215	0.9834	1.0495	0.9847	1.0129	0.8694	0.9642

部分年份西部 *GML* 指数大于中部和东部 *GML* 指数的原因如下: 根据 *GML* 指数的计算公式, 对每个决策单元来说, 该指数实质上考察的自身工业用水效率值是否在增加, 也即是每个决策单元与自身前期效率值的动态比较 (跨年比较), 不是为了与其他决策单元同期效率值进行比较。当某个时间段自身水资源利用效率提升较快, 那么 *GML* 指数会较大 (大于 1), 因此会出现部分年份西部的 *GML* 指数大于中部和东部的 *GML* 指数。这与网络 SBM-DEA 模型测算的结果进行静态比较 (各决策单元的同期比较) 是不一样的。

以网络 *GML* 指数为例, 说明中国各省 2007-2015 年 *GML* 指数的动态演进趋势。2007-2008 年、2009-2010 年、2011-2012 年、2014-2015 年中国各省网络 *GML* 指数的核密度估计如图 3 所示。从图 3 可以看到: (1) 各时间段密度函数的中心在 1 附近, 这是因为各时间段中国各省网络 *GML* 指数的平均值在 1 附近。(2) 2014-2015 年密度函数中心的峰值最高, 这说明与其他时间段相比, 2014-2015 年在平均值附近的省份较多, 数据更集中。(3) 2007-2008 年和 2014-2015 年波峰均为两个, 说明 2007-2008 年和 2014-2015 年各省工业用水效率的网络 *GML* 指数呈现两极分化的现象; 2009-2010 年和 2011-2012 年的波峰个数则只有一个, 未出现两极分化。(4) 2007-2008 年和 2014-2015 年呈现左偏分布特征, 说明网络 *GML* 指数值小于平均值的省份更多; 2009-2010 年和 2011-2012 年则近似对称分布, 说明各省网络 *GML* 指数值分布较为均匀。

2.3 *EC* 指数和 *BPC* 指数的结果分析

根据式 (8) 和式 (9), 可计算得到测度技术效率变化的 *EC* 指数值和测度技术进步



变化的BPC指数值, 8个阶段的几何平均值如表4所示。结合表2和表4中的数据, 可以发现: (1) 8个阶段的几何平均值中, 各省份网络、生产阶段和治理阶段GML指数等于EC指数和BPC指数的乘积, 例如北京市网络、生产阶段和治理阶段的GML指数分别为0.8411、1.0000和0.8031, 等于EC指数和BPC指数的乘积 ( $0.8795 \times 0.9643$ 、 $1.0000 \times 1.0000$ 、 $0.8266 \times 0.9715$ )。这是分析GML指数、EC指数和BPC指数时, 选择几何平均值的原因, Oh<sup>[15]</sup>的论文中也证明了这种性质。(2) 对EC指数来说, 各省份网络效率值介于生产阶段和治理阶段的效率值之间。其中, 网络EC指数上升 (大于1) 的省区有辽宁、吉林、山东、湖北、海南、四川、贵州、甘肃、青海和新疆; 生产阶段和污水处理阶段EC指数均存在上升的省份有湖南、海南和四川。(3) 从BPC指数来看, 各省份网络效率值介于生产阶段和治理阶段的效率值之间。其中, 网络BPC指数存在上升的省(市、自治区)河北、辽宁、黑龙江、上海、海南、青海和新疆, 生产阶段和污水处理阶段BPC指数均存在上升的省份有河北、黑龙江、青海。(4) 从表4中最后一行30个省份的平均值可以看到, 生产阶段的EC指数和BPC指数均存在进步, 但是网络和污水处理阶段的EC指数和BPC指数存在下降 (小于1)。

8个阶段各区域EC指数和BPC指数如表5和表6所示。从表5和表6可以看到: (1) 各区域网络、生产和治理阶段的EC指数和BPC指数波动较为频繁, 说明与上一年度相比, 各区域网络、生产和治理阶段工业用水效率的技术效率部分和技术进步部分可能增加也可能减少, 其中2013-2014年东部治理阶段的BPC指数值最大。(2) 各区域网络EC指数(BPC) 介于生产EC (BPC) 指数和治理EC (BPC) 指数之间, 因为各区域所包括的省份网络EC (BPC) 指数介于生产EC (BPC) 指数和治理EC (BPC) 指数之间。另外, 由于表3、表5和表6中各区域的指数值是所包括省份所对应指数值的算术平均值, 因此不再存在GML指数值等于EC指数和BPC指数的乘积, 例如2007-2008年东部生产阶段的GML指数值为1.0067, 不等于对应的EC指数和BPC指数的乘积 ( $0.9698 \times 1.0434$ )。

以生产阶段的EC指数和污水处理阶段的BPC指数为例, 说明2007-2015年各省EC指数和BPC指数的动态演进过程, 2007-2008年、2009-2010年、2011-2012年、2014-2015年各省生产阶段EC指数和污水处理阶段BPC指数的核密度估计如图4和图5所示。可以看到: (1) 图4中各时间段密度函数的中心在1附近, 但是图5中只有2007-2008年、2009-2010年密度函数的中心在1附近, 2011-2012年、2014-2015年密度函数的中心在0.8附近, 说明与2011年或2014年相比, 2012年和2015年污水处理效率相对下降。(2) 与其他时间段相比, 图4中2014-2015年密度函数中心值最高, 而图5中2011-2012年最高。(3) 图4中各时间段的波峰个数均大于等于两个, 图5中则只有2009-2010年、

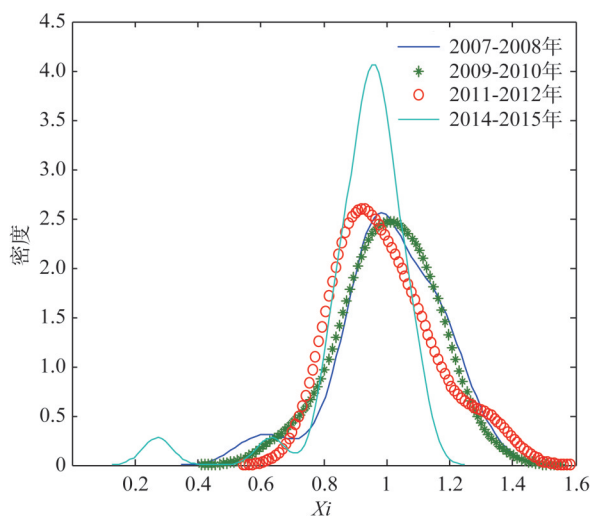


图3 中国各省网络GML指数的核密度估计  
Fig. 3 Kernel density estimation of the networks GML index of China's provinces

表4 中国各省工业用水EC指数和BPC指数8个阶段的几何平均值

Table 4 Geometric mean values of eight stages of industrial water EC index and BPC index in each province of China

省(市、自治区)	EC指数			BPC指数		
	网络	生产阶段	治理阶段	网络	生产阶段	治理阶段
北京	0.8795	1.0000	0.8266	0.9643	1.0000	0.9715
天津	0.9181	1.0000	0.8793	0.9636	1.0000	0.9658
河北	0.9784	0.9605	1.0000	1.0503	1.0373	1.0623
山西	0.9636	0.9744	0.9554	0.9737	1.0149	0.9571
内蒙古	0.9675	1.0000	0.9511	0.9902	1.0269	0.9809
辽宁	1.0311	0.9933	1.0726	1.0139	1.0179	0.9990
吉林	1.0089	0.9942	1.0209	0.9682	1.0222	0.9356
黑龙江	0.9973	0.9731	1.0171	1.0063	1.0041	1.0004
上海	0.9048	1.0000	0.8565	1.0236	0.9766	1.0673
江苏	0.9948	0.9958	0.9941	0.9809	1.0080	0.9699
浙江	0.9871	0.9952	0.9831	0.9626	1.0074	0.9499
安徽	0.9790	1.0075	0.9468	0.9730	1.0170	0.9516
福建	0.9705	1.0245	0.9273	0.9592	0.9818	0.9498
江西	0.9859	0.9959	0.9753	0.9622	1.0082	0.9309
山东	1.0023	1.0000	1.0033	0.9720	0.9872	0.9660
河南	0.9736	0.9607	0.9836	0.9659	1.0237	0.9332
湖北	0.9921	0.9997	0.9825	0.9634	1.0063	0.9318
湖南	1.0285	1.0152	1.0421	0.9622	0.9922	0.9359
广东	0.9965	1.0000	0.9956	0.9614	0.9736	0.9594
广西	0.9861	1.0000	0.9737	0.9292	0.9562	0.9116
海南	1.0035	1.0067	1.0029	1.0078	0.9587	1.0157
重庆	0.9903	1.0239	0.9719	0.9430	1.0059	0.9230
四川	1.0106	1.0201	1.0039	0.9684	1.0001	0.9560
贵州	1.0193	1.0396	0.9964	0.9593	0.9892	0.9374
云南	0.9968	1.0116	0.9801	0.9744	0.9950	0.9624
陕西	0.9777	1.0226	0.9549	0.9535	0.9868	0.9489
甘肃	1.0189	0.9808	1.0357	0.9704	1.0177	0.9523
青海	1.0057	1.0098	1.0000	1.0183	1.0140	1.0243
宁夏	0.9702	1.0730	0.8913	0.9550	0.9546	0.9534
新疆	1.0415	0.9723	1.0674	1.0070	1.0235	0.9950
平均	0.9860	1.0017	0.9764	0.9768	1.0002	0.9666

2011-2012年的波峰个数均大于等于两个。(4)图4中各时间段均呈现左偏分布特征,而图5中2011-2012年左偏、2009-2010年和2014-2015年右偏、2007-2008年近似对称分布。

3 结论与讨论

3.1 结论

基于网络SBM-DEA模型和GML指数,研究了2007-2015年中国各省工业用水效

表5 各区域EC指数  
Table 5 EC index of in each region of China

时间段/年	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
东部生产	0.9698	1.0050	1.0201	1.0093	0.9888	1.0191	1.0191	0.9655
东部治理	1.1080	0.8035	0.9467	1.0822	1.1123	1.2757	0.9734	0.9768
东部网络	1.0493	0.8500	0.9869	1.0169	1.0879	1.1300	0.9694	0.9521
中部生产	0.9770	1.0525	1.0040	1.0310	0.9556	0.9620	0.9695	0.9922
中部治理	1.1415	0.7469	1.0353	0.9328	1.4320	0.7992	1.2727	0.9603
中部网络	1.0567	0.8799	1.0168	0.9689	1.1859	0.8606	1.1013	0.9781
西部生产	0.9956	1.0379	1.0349	1.0666	0.9599	1.0413	1.0106	1.0026
西部治理	0.9516	0.8526	1.0182	1.2402	1.1614	1.0157	0.8365	1.1537
西部网络	0.9728	0.9181	1.0035	1.1716	1.0839	1.0186	0.8933	1.0934

表6 各区域BPC指数  
Table 6 BPC index of in each region of China

时间段/年	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
东部生产	1.0434	0.9395	1.0755	0.9818	0.9943	0.9515	0.9896	1.0056
东部治理	0.9368	1.4079	1.0927	0.8057	0.8468	0.9411	1.5928	0.9013
东部网络	0.9728	1.2336	1.0654	0.8519	0.8830	0.9266	1.2814	0.9272
中部生产	1.0872	0.9610	1.0140	1.0206	1.0055	0.9885	1.0201	1.0012
中部治理	0.8933	1.3426	0.9466	0.8219	0.8354	1.0853	0.9039	0.9706
中部网络	0.9847	1.1412	0.9764	0.8871	0.9106	1.0199	0.9594	0.9584
西部生产	1.0729	0.9335	1.0528	0.9970	1.0380	0.9377	0.9953	0.9833
西部治理	1.0014	1.2271	0.9407	0.8673	0.8580	1.0350	0.9910	0.8517
西部网络	1.0196	1.1154	0.9835	0.9076	0.9132	0.9976	0.9790	0.8887

率，结果发现：（1）从年度平均值来看，与污水治理阶段相比，生产阶段处于前沿面的省份更多，各省份与前沿面的差距相对较小。北京、天津、内蒙古、山东、广东、海南等省（市、自治区）生产阶段工业用水效率值较高，但是污水治理阶段的效率值却较低；辽宁、吉林、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广西、贵州、云南、青海等省（自治区）生产阶段效率值较低，但是污水治理阶段的效率值却较高。（2）从各时间段的几何平均值来看，大部分省份网络和污水治理阶段的GML指数值小于1，但是生产阶段的GML指数值大于1；网络EC指数上升（大于1）的省（自治区）有辽宁、吉林、山东、湖

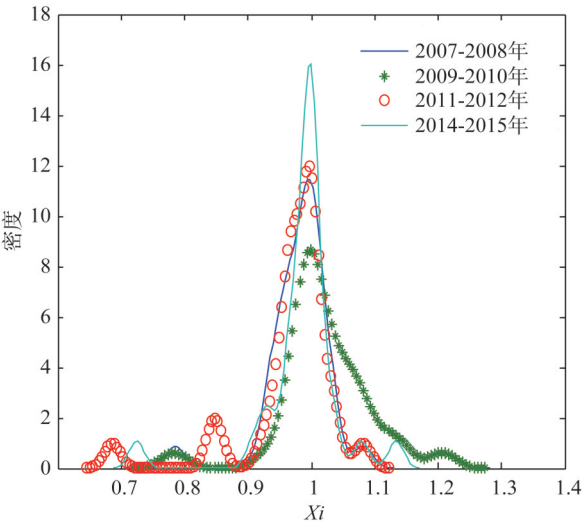


图4 中国各省生产阶段EC指数的核密度估计  
Fig. 4 Kernel density estimation of EC index  
in production stage in China

北、海南、四川、贵州、甘肃、青海和新疆；生产阶段和污水治理阶段 $EC$ 指数均存在上升的省份有湖南、海南和四川；网络 $BPC$ 指数存在上升的省（自治区）有河北、辽宁、黑龙江、上海、海南、青海和新疆，生产阶段和污水治理阶段 $BPC$ 指数均存在上升的省份有河北、黑龙江、青海。

根据以上研究结果，可得以下政策启示：（1）在提升生产阶段工业用水效率的同时，需要加大工业污水的治理力度，并进一步改进污水治理技术，提升污水治理阶段的效率，特别是北京、天津、内蒙古、山东、广东、海南等污水治理效率较低的省（市、自治区）。另外，中国还需要建立统一的污水治理标准，并加大污水治理标准的执行力度，切实提升污水治理效率。（2）虽然大部分省份生产阶段的 $GML$ 指数大于1，但是网络和污水治理阶段的 $GML$ 指数值却小于1，说明在工业用水方面，中国目前仍采用的是先污染后治理的模式，对污水治理的重视程度不高，因此需要加大污水治理的资金投入和宣传力度，树立工业生产和治污同步进行的意识。（3）根据 $GML$ 指数的分解结果，各省份在提升工业用水效率时，需要注意技术效率变化（ $EC$ 指数）和技术进步变化（ $BPC$ 指数）的差异。各省份应当加大技术革新的投资力度，促使技术效率和技术进步同步提高，另外适度限制高耗水和高污染行业产品的生产（例如造纸和化工行业）。（4）由于中国东部、中部和西部地区生产阶段和污水治理阶段的工业用水效率存在较大的差异，因此工业用水效率较低的省份（地区）需要向工业用水效率较高的省份（地区）学习节水、减排和污水治理方面的先进经验。另外东部地区资本相对充裕，可以进一步增加资本投入来提升工业行业的用水技术，发展资本和技术密集型的低耗水行业；中部和西部地区则可以发展劳动密集型的低耗水行业。

需要说明的是，由于测算得到的各省份工业用水效率包含静态（SBM-DEA模型测算的结果）和动态（ $GML$ 指数测算的结果）两个方面的结果，另外两个方面均包含网络、生产阶段以及治理阶段的效率，如果对各省份工业用水效率差异的影响因素进行分析的话，有6个效率值指标可以作为因变量（一般的回归方程只有一个变量作为因变量）。不同效率值指标作为因变量进行回归，即使选择相同的因素作为自变量，回归结果可能也会有较大差异，从而不方便解释回归结果，因此未对各省份工业用水效率差异的影响因素进行分析。当然，对各省份工业用水效率差异的影响因素方面的探讨可以作为进一步研究的方向。

### 3.2 讨论

与已有文献的结果相比，本文有以下新的发现：（1）生产阶段工业用水效率值较高的省份污水治理效率值可能较低，如北京、天津、内蒙古、山东、广东、海南等6省（市、自治区）生产阶段的效率值大于30个省份平均值，但是污水治理阶段效率值小于30个省份平均值。另外，生产阶段效率值较低的省份污水治理阶段的效率值却较高，例

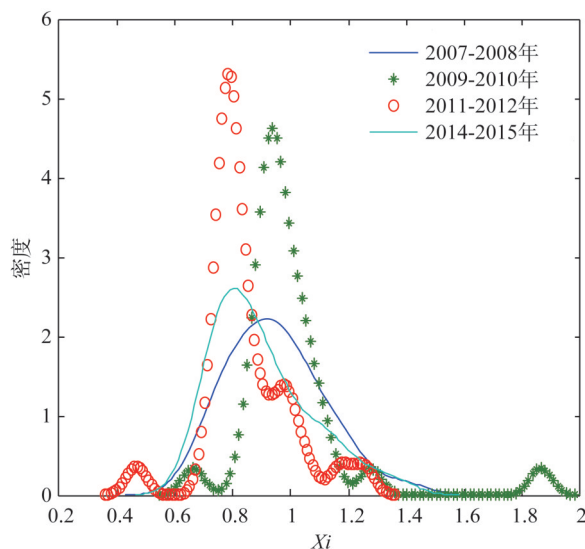


图5 中国各省污水治理阶段 $BPC$ 指数的核密度估计

Fig. 5 Kernel density estimation of  $BPC$  index in wastewater treatment stages in China



如辽宁、吉林、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广西、贵州、云南、青海等11个省份生产阶段的效率值小于30个省份的平均值,但是污水处理阶段的效率值大于30个省份平均值。因此,已有的文献(如岳立等<sup>[2]</sup>、雷玉桃等<sup>[11]</sup>)只考虑生产阶段的工业用水效率不考虑污水处理阶段的效率,得到的结果是有局限的。(2)从各时间段几何平均值来看,虽然大部分省份生产阶段的GML指数大于1,但是网络和污水处理阶段的GML指数仍小于1。因此,已有的文献(如石广明等<sup>[8]</sup>)只考虑生产阶段工业用水效率的动态变化是有局限的。

### 参考文献(References):

- [1] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究. 自然资源学报, 2017, 32(12): 1999-2011. [SUN C Z, JIANG K, ZHAO L S. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China. Journal of Natural Resources, 2017, 32(12): 1999-2011.]
- [2] 岳立, 赵海涛. 环境约束下的中国工业用水效率研究: 基于中国13个典型工业省区2003-2009年的数据. 资源科学, 2011, 31(11): 2071-2079. [YUE L, ZHAO H T. China's water use efficiency of industry under environmental constraints: Based on data of 13 industrial regions during the period 2003 to 2009. Resources Science, 2011, 31(11): 2071-2079.]
- [3] 程永毅, 沈满洪. 要素禀赋、投入结构与工业用水效率: 基于2002-2011年中国地区数据的分析. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2001-2011. [CHENG Y Y, SHEN M H. Factor endowments, inputs structure and industrial water efficiency: A study based on China's provincial data during 2002-2011. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2001-2011.]
- [4] LI J, MA X. Econometric analysis of industrial water use efficiency in China. Environment Development & Sustainability, 2015, 17(5): 1209-1226.
- [5] WANG Y, BIAN Y, XU H. Water use efficiency and related pollutants' abatement costs of regional industrial systems in China: A slacks-based measure approach. Journal of Cleaner Production, 2015, 101: 301-310.
- [6] 李静, 任继达. 中国工业的用水效率与决定因素: 资源和环境双重约束下的分析. 工业技术经济, 2018, (1): 122-129. [LI J, REN J D. Study on efficiency of industrial water use in China based on MINDS model: An empirical analysis under the dual restrictions of resources and environment. Journal of Industrial Technological Economics, 2018, (1): 122-129.]
- [7] 孙冬营, 余靖雯, 刘凌燕, 等. 长江三角洲城市群工业用水效率评价及时空差异研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9): 1901-1908. [SUN D Y, SHE J W, LIU L Y, et al. Efficiency evaluation for industrial water use and analysis of the spatio-temporal differences in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(9): 1901-1908.]
- [8] 石广明, 王金南, 毕军. 基于莫氏指数的中国动态工业用水绩效分析. 系统工程理论与实践, 2013, 33(12): 3237-3242. [SHI G M, WANG J N, BI J. Dynamic performance analysis of China's industrial water use based on the Malmquist index. Systems Engineering Theory & Practice, 2013, 33(12): 3237-3242.]
- [9] 雷贵荣, 胡震云, 韩刚. 基于SFA的工业用水节水潜力分析. 水资源保护, 2010, 26(1): 66-69. [LEI G R, HU Z Y, HAN G. Analysis of water-saving potential in industry based on stochastic frontier production function (SFA). Water Resources Protection, 2010, 26(1): 66-69.]
- [10] 雷玉桃, 黄丽萍. 中国工业用水效率及其影响因素的区域差异研究: 基于SFA的省际面板数据. 中国软科学, 2015, (4): 155-164. [LEI Y T, HUANG L P. Regional differences in industrial water consumption efficiency and its influencing factors for China's major industrial provinces: A study of provincial panel data based on SFA. China Soft Science, 2015, (4): 155-164.]
- [11] 雷玉桃, 黄丽萍, 张恒. 中国工业用水效率的动态演进及驱动因素研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 159-170. [LEI Y T, HUANG L P, ZHANG H. Research on the dynamic evolution and the driving factors of industrial water consumption efficiency in China. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(2): 159-170.]
- [12] TONE K. Network DEA: A slacks-based measure approach. European Journal of Operational Research, 2009, 197(1): 243-252.
- [13] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [14] DENG G, LI L, SONG Y. Provincial water use efficiency measurement and factor analysis in China: Based on SBM-DEA model. Ecological Indicators, 2016, 69: 12-18.
- [15] OH D H. A global Malmquist-Luenberger productivity index. Journal of Productivity Analysis, 2010, 34(3): 183-197.

- [16] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000. 经济研究, 2004, (10): 35-44. [ZHANG J, WU G Y, ZHANG J P. The estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000. Economic Research Journal, 2004, (10): 35-44.]
- [17] 邓光耀, 张忠杰. 城市化、中国各省投资率的动态演进及驱动因素研究. 经济问题探索, 2016, (12): 75-81. [DENG G Y, ZHANG Z J. Urbanization, dynamic evolution and driving factors of China's provincial investment rate. Inquiry into Economic Issues, 2016, (12): 75-81.]
- [18] 金巍, 刘双双, 张可, 等. 农业生产效率对农业用水量的影响. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1326-1339. [JIN W, LIU S S, ZHANG K, et al. Influence of agricultural production efficiency on agricultural water consumption. Journal of Natural Resources, 2018, 33(8): 1326-1339.]

## The study on industrial water use efficiency of Chinese provinces: Based on network SBM-DEA model and GML index

DENG Guang-yao<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhong-jie<sup>1,2</sup>

(1. Center for Quantitative Analysis of Gansu Economic Development, Lanzhou  
University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China; 2. School of Statistics,  
Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** In recent years, China's industrial water consumption accounts for about 20% to 30% of all water use. Improving industrial water efficiency and saving use of water resources have become one of the important issues affecting the sustainable development of China's national economy. Based on the network SBM-DEA model and GML index, this paper studies the industrial water use efficiency of each province in China from 2007 to 2015. The results show that: (1) From the annual average, the production stage is at the forefront compared with the sewage treatment stage. There are more provinces at the forefront, and the gap between provinces and frontiers is relatively small. Industrial water use efficiency is high in the production stages of Beijing, Tianjin, Inner Mongolia, Shandong, Guangdong, Hainan, but the efficiency of sewage treatment is low; For Liaoning, Jilin, Anhui, Fujian, Jiangxi, Hubei, Hunan, Guangxi, Guizhou, Yunnan, Qinghai, the efficiency value is lower in the production stage, but the efficiency value in the sewage treatment stage is higher. This is because there are differences in the requirements for sewage treatment in different provinces of China, or even the same requirements, the implementation of different local policies is not the same, and some provinces (such as Beijing) have higher requirements for sewage treatment and policy implementation than other provinces. (2) From the geometric mean of each time period, the GML index value of most provinces in the network and sewage treatment stage is less than 1, but the GML index value in the production stage is greater than 1. It can be seen from the average of 30 provinces that both the EC index and the BPC index in the production stage have improved (greater than 1), but the EC index and BPC index in the network and sewage treatment stages have decreased (less than 1). Therefore, to enhance the industrial water efficiency in the production stage, it is necessary to increase the treatment of industrial wastewater, improve the efficiency of the sewage treatment stage, and raise the awareness of industrial production and pollution control, especially in Beijing, Tianjin, Inner Mongolia, Shandong, Guangdong, and Hainan with low sewage treatment efficiency.

**Keywords:** SBM-DEA model; GML index; industrial water use efficiency