

引用格式:汪克亮,刘悦,史利娟,等.长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素——基于EBM-Tobit模型的两阶段分析[J].资源科学,2017,39(8):1522-1534.[Wang K L, Liu Y, Shi L J, et al. Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors based on two-step analysis of EBM-Tobit Model[J]. Resources Science, 2017, 39(8): 1522-1534.] DOI: 10.18402/resci.2017.08.09

# 长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素 ——基于EBM-Tobit模型的两阶段分析

汪克亮<sup>1</sup>, 刘悦<sup>1</sup>, 史利娟<sup>1</sup>, 刘蕾<sup>1</sup>, 孟祥瑞<sup>1</sup>, 杨宝臣<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学经济与管理学院, 淮南 232001; 2. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

**摘要:**提高工业绿色水资源效率是缓解长江经济带水资源短缺与水环境污染的重要途径。本文以地区工业为研究对象,将工业用水与水污染排放纳入分析框架,构建Epsilon-Based Measure(EBM)-Tobit两阶段效率分析模型。首先,采用兼容径向与非径向特点的EBM模型测算2005-2014年长江经济带11省市的工业绿色水资源效率,分析效率的时空差异特征;然后,从投入要素视角对长江经济带各省市工业绿色水资源无效率进行解构,测算各投入要素的贡献率,通过泰尔指数分解解释长江经济带工业绿色水资源效率地区差距的形成根源;进而,根据EBM模型计算得到的投入目标值与实际值的差异测算长江经济带各省市的工业节水与水污染减排潜力;最后,利用面板Tobit模型检验长江经济带工业绿色水资源效率的影响机制。研究表明:研究期内长江经济带工业绿色水资源效率较低,地区差异特征明显,工业节水与水污染减排潜力巨大;缩小长江上游、中游与下游三大地区间差距和长江上游各省市内部差距是未来优化长江经济带工业绿色水资源效率的关键;经济发展水平、工业化程度、工业用水强度、科技进步、政府环境规制力度、地域差异对长江经济带工业绿色水资源效率均有一定影响,但是各因素影响方向、影响力度与显著性存在差异。本文研究结论可以为长江经济带实现工业水资源高效、绿色利用提供理论与实践依据。

**关键词:**长江经济带;工业绿色水资源效率;EBM-Tobit模型;两阶段分析;时空分异;影响因素

DOI: 10.18402/resci.2017.08.09

## 1 引言

当前,作为全球最大的内河流域经济带,长江经济带人口和生产总值占中国比重超过40%<sup>[1]</sup>,在中国经济发展版图中具有举足轻重的影响力。然而,长期高强度的经济开发使得长江经济带正面临严峻的资源环境问题,尤其是水资源短缺与水环境污染问题。一方面,虽然长江水资源总量相对丰富,但是人均占有量较低且不同地区水资源利用模式迥异。长期粗放的用水模式导致长江流域水资源利用率较低,浪费现象严重。随着经济持续增长、工业化与城镇化进程的加快,未来长江经济带

需水总量将会继续维持增加态势;另一方面,由于缺乏有效监管,大量未经任何处理的工业废水和生活污水被直接排入长江,已经远超水体自净能力,长江水环境承载力已逼近极限。当前,水资源短缺、水环境污染、水生态退化、水管理不善等多重水问题相互交织,不同程度地制约了长江经济带的可持续发展,对经济社会发展形成前所未有的压力。因此,在维持经济持续增长的同时,实现水资源的高效利用和绿色利用,是长江经济带解决水资源危机和实现水环境可持续发展的客观要求。

随着工业化与城镇化进程的不断推进,水资源

收稿日期:2017-03-13;修订日期:2017-06-16

基金项目:国家自然科学基金项目(71403003);教育部人文社会科学研究项目(13YJC790136);安徽理工大学研究生创新基金项目(2017CX2055)。

作者简介:汪克亮,男,安徽枞阳人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为资源经济与环境管理、效率与生产率分析。E-mail:klwang@163.com

2017年8月

约束逐渐成为中国经济社会发展的一大关键制约。如何提升水资源利用效率,实现水资源的优化配置已经成为中国可持续发展面临的一项严峻挑战,受到了学界的广泛关注。在诸多研究方法中,数据包络分析(DEA)以其特有优势成为当前水资源效率研究的主流。Hu等首次基于DEA方法定义了“全要素用水效率”这一指标,并以中国各省份为研究对象进行了实证分析,发现中国节水潜力较大,且水效率与人均收入之间存在U型曲线关系<sup>[2]</sup>,这一研究开启了国内外同类研究的先河。如Manjunatha等、Chemark等、Njiraini等和Azad等均采用DEA方法分别测度了印度、突尼斯、肯尼亚和澳大利亚等国的水资源利用效率<sup>[3-6]</sup>;钱文婧等采用径向DEA方法测算了中国各省份水资源利用效率,发现中国水资源利用效率存在显著的区域差异<sup>[7]</sup>;马海良等基于Malmquist指数对中国30个省份的水资源利用效率的动态演进特征与驱动机制进行了实证考察<sup>[8]</sup>;任俊霖等采用超效率DEA模型与Malmquist指数测算了长江经济带各省会城市的水效率,并分析其驱动因素与影响机制<sup>[9]</sup>;程永毅等将要素禀赋纳入分析框架,利用DEA模型测算分析了中国各省份的工业用水效率,并对其收敛性进行了检验<sup>[10]</sup>;刘渝等、佟金萍等采用DEA方法分析中国不同地区的农业水资源利用效率,并考察效率的影响机制<sup>[11,12]</sup>。然而,上述文献在测算水资源利用效率时,均未考虑到水环境污染因素,偏重于水资源节约,有可能会误导政策建议。马海良等、孙才志等、陈旭升等、李静等、Sun等、杨骞等、Deng等将水环境污染因素纳入水资源利用效率测度框架,测算了中国不同地区、行业环境约束下的水资源利用效率,不仅可以获得更科学的效率测算结果,而且更能体现可持续发展的“绿色”内涵<sup>[13-19]</sup>;2016年,由沙丘提出了“绿色全要素水资源效率”这一概念,并采用DEA方法以中国不同区域城市为对象进行实证分析<sup>[20]</sup>。

在DEA模型选择上,多数文献选择的是传统径向DEA模型,如CCR模型和BCC模型<sup>[2-15]</sup>,少数文献选择非径向DEA模型,主要是SBM模型<sup>[16,18,19]</sup>。但无论是径向还是非径向模型都有自身的局限性。径向模型要求所有投入或产出同比例变化,忽

略了非径向松弛变量的影响,也无法实现效率的要素层面分解。非径向模型虽然能够考虑所有径向与非径向松弛变量,但损失了投入或产出目标值与实际值之间的比例信息<sup>[21,22]</sup>。为了改进这一局限,Tone等提出了一种同时包含径向与SBM两类距离函数的混合模型,即EBM(Epsilon-Based Measure)模型<sup>[22]</sup>,该模型能够同时兼顾径向与非径向DEA模型的优势,为全面、科学、准确评价决策单元效率提供了一种全新途径。考虑到工业在中国国民经济中的主体地位,以及当前长江经济带正在面临严峻的工业用水与废水治理问题,本文以地区工业为研究对象,将水环境污染因素纳入工业水资源效率测度体系,运用EBM模型测算长江经济带各省市(包括省份和直辖市,统称省市)工业绿色水资源效率,在此基础上分析效率的时空特征、地区差距根源、工业节水与水污染减排潜力以及工业绿色水资源效率的影响机制,为实现长江经济带工业与水资源环境协调发展提供决策支撑。

本文主要贡献在于:①兼顾径向与非径向DEA模型的研究优势,将EBM模型用于工业水资源效率评价领域,这一做法在国内外尚未发现有文献报道;②实现水资源利用多要素效率向单要素效率的拓展,衡量了各种单要素效率在水资源全要素效率中的贡献度;③采用泰尔系数分解方法诠释长江经济带工业绿色水资源效率地区差距的形成机制;④建立面板Tobit模型检验长江经济带工业绿色水资源效率的影响因素。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 工业绿色水资源效率的内涵及其测度方法

水资源效率是衡量水资源投入-产出的一个重要指标,可以通过水资源产出与水资源投入的比值来衡量<sup>[23]</sup>。本文以地区工业为研究对象,在传统“水资源效率”概念的基础上引入水环境污染因素,并将其定义为“工业绿色水资源效率(Industrial Green Water Efficiency, IGWE)”,追求在实现工业产值持续增长同时,最大限度地减少工业水资源消耗和工业水污染排放。需要指出的是,本文将工业水污染也作为一种投入,因为工业水污染与工业水资源利用相伴而生,是一种“副产品”,可以将其视为工业

水资源产出的水环境投入成本。设长江经济带各省市工业产值为  $y$ , 工业水资源投入向量为  $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ,  $m$  为投入指标个数。根据 Kuosmanen 等的定义<sup>[24]</sup>, 工业绿色水资源效率可表示为:

$$IGWE = y / \sum_{i=1}^m \omega_i x_i \quad (1)$$

式中  $IGWE$  为工业绿色水资源效率;  $\omega_i (i=1, 2, \dots, m)$  是每种水资源投入权重, 且满足  $\sum \omega_i = 1$ 。为了更加科学、准确地衡量工业绿色水资源效率水平, 本文在 Kuosmanen 等<sup>[24]</sup>、Picazo-Tadeo 等<sup>[25]</sup>研究的基础上, 引入一种全新的 DEA 模型——EBM 模型测算长江经济带各省市工业绿色水资源效率。EBM 模型的最大特点是能够实现径向与非径向松弛变量的兼容。待评省市  $o (o=1, 2, \dots, 11)$  工业绿色水资源效率测算的线性规划表达式如下:

$$\begin{aligned} \min \gamma^* &= \theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i s_i^-}{x_{io}} \\ \text{s.t. } X\lambda - \theta x_{io} + s^- &= 0, \quad Y\lambda \geq y_o, \lambda \geq 0, s^- \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $X$ 、 $Y$ 、 $\lambda$ 、 $s^-$  分别为投入、产出、权重系数和投入松弛向量;  $\gamma^*$  为待评省市的工业绿色水资源效率值;  $\theta$  是  $\gamma^*$  中的径向成分;  $\varepsilon_x$  是一个关键参数, 取值范围为  $[0, 1]$ , 它表示在效率值的计算中非径向部分的重要程度, 取 0 时相当于径向模型, 取 1 时相当于 SBM 模型。考虑到文章篇幅有限, 具体计算过程可参考文献<sup>[22]</sup>。

如果在公式(2)中加入“ $\sum \lambda = 1$ ”这一约束, 可以计算得到待评省市  $o (o=1, 2, \dots, 11)$  工业绿色水资源利用的“纯技术效率”, 工业绿色水资源效率与纯技术效率的比值即为该省市工业绿色水资源利用的“规模效率”, 由此可以判断该省市水资源利用的技术有效性与规模有效性。为了表述方便, 本文中基于投入导向与规模报酬不变的 EBM 模型简写为 EBM-I-C, 基于投入导向与规模报酬可变的 EBM 模型简写为 EBM-I-V。

为了进一步挖掘长江经济带各省市工业绿色水资源无效率的来源, 对无效率基于每种投入要素进行分解, 来衡量每种投入要素在无效率中的贡献率。待评省市  $o (o=1, 2, \dots, 11)$  的工业绿色水资源效率  $\gamma^*$  的分解模式如公式(3)、公式(4)(式中变量

加\*号表示目标值, 下同)所示。

$$\gamma^* = \sum_{i=1}^m \omega_i \theta^* - \varepsilon_x^* \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i s_i^{*-}}{x_{io}} = \sum_{i=1}^m \omega_i \left( \theta^* - \frac{\varepsilon_x^* s_i^{*-}}{x_{io}} \right) \quad (3)$$

各投入要素的无效率值  $I_i^*$  为:

$$I_i^* = 1 - \left( \theta^* - \frac{\varepsilon_x^* s_i^{*-}}{x_{io}} \right) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

根据公式(3)、公式(4), 各投入要素对待评省市  $o (o=1, 2, \dots, 11)$  工业绿色水资源无效率的贡献率  $Contr_i$  可以由公式(5)计算得到:

$$Contr_i = \frac{\omega_i^* \left[ 1 - \left( \theta^* - \frac{\varepsilon_x^* s_i^{*-}}{x_{io}} \right) \right]}{\sum_{i=1}^m \omega_i^* \left[ 1 - \left( \theta^* - \frac{\varepsilon_x^* s_i^{*-}}{x_{io}} \right) \right]} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

## 2.1.2 泰尔(Theil)指数及其分解

本文利用泰尔(Theil)指数来衡量长江经济带工业绿色水资源效率的地区差距。作为广义熵指标体系的一种特殊形式, 泰尔指数的突出优点是可将地区总体差距分解为地区内部差距和地区间差距, 并由此衡量它们在总体差距中的重要性贡献率。泰尔指数的取值范围为 0~1 之间, 数值越小, 表明地区差距越小; 反之, 则表明差距越大。本文借鉴李博等对于泰尔指数及其结构分解的方法<sup>[26]</sup>, 得到长江经济带工业绿色水资源效率的泰尔指数及其分解, 见公式(6)-公式(9)所示。

$$Theil = Theil_w + Theil_b = \frac{1}{11} \sum_{i=1}^{11} \frac{e_i \ln e_i}{\bar{e}} \quad (6)$$

$$Theil_p = \frac{1}{n_p} \sum_{p=1}^3 \frac{e_{pi} \ln e_{pi}}{\bar{e}_p} \quad (7)$$

$$Theil_w = \sum_{p=1}^3 \left( \frac{n_p}{11} \times \frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) Theil_p \quad (8)$$

$$Theil_b = \sum_{p=1}^3 \frac{n_p}{11} \left( \frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \ln \left( \frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \quad (9)$$

式中  $n_p (p=1, 2, 3)$  表示长江经济带上中下游各地区的省市数量;  $\bar{e}_p (p=1, 2, 3)$  表示上中下游地区工业绿色水资源效率的平均值;  $\bar{e}$  为长江经济带工业绿色水资源效率的平均值;  $e_{pi} (p=1, 2, 3)$  表示长江上中下游各省市工业绿色水资源效率值;  $Theil$  为长江经济带工业绿色水资源效率总体差距的泰尔指



2017年8月

数;  $Theil_p$  为上中下游各省市工业绿色水资源效率总体地区差距的泰尔指数;  $Theil_w$  和  $Theil_b$  分别表示长江经济带工业绿色水资源效率的地区内差距与地区间差距的泰尔指数。

### 2.1.3 Tobit 模型

在测算得到长江经济带各省市工业绿色水资源效率后,本文将进一步以各省市工业绿色水资源效率为被解释变量,各影响因素为解释变量构建计量经济模型来考察长江经济带工业绿色水资源效率的影响机制。由于工业绿色水资源效率的取值范围在 0~1 之间,属于受限因变量,如果仍然采用普通最小二乘法会带来参数估计量的有偏与不一致。为此,本文将采用 Tobit 回归模型,该模型是对部分连续分布和部分离散分布的因变量提出的一种计量经济模型,可以用于解决受限或截断因变量建模问题,其具体形式为:

$$Y_k = \begin{cases} X_k^T \beta + \mu_k & (\text{当 } X_k^T \beta + \mu_k > 0) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (10)$$

式中  $Y_k$  为受限因变量;  $X_k$  为自变量向量;  $\beta$  为待估计的参数向量;随机干扰项  $\mu_k \sim N(0, \sigma^2)$ ,  $k=1, 2, \dots$ , 为观测值个数。可以证明,当采用极大似然法对 Tobit 模型进行估计时,可以得到  $\hat{\beta}$  和  $\hat{\sigma}^2$  是一致估计量<sup>[27]</sup>。

### 2.2 样本选择与变量界定

为了考察工业绿色水资源效率的地区差异,本文将长江经济带 11 省市进一步划分为上游、中游与下游三大地区,其中下游地区包括上海、江苏与浙江 3 个省市,中游地区包括安徽、江西、湖北与湖南 4 个省份,上游地区包括重庆、四川、云南和贵州 4 个省市。考虑到数据可得性,本文以各省市工业用水量、工业 COD 排放量与工业氨氮排放量为投入指标,各省市工业产值为产出指标(按照出厂价格指数将其折算为 2004 年不变价格)。各指标变量数据

来自 2005-2015 年《中国统计年鉴》<sup>[28]</sup>、《中国环境统计年鉴》<sup>[29]</sup>并经过整理得到。投入产出变量的描述性统计如表 1 所示。

## 3 结果及分析

### 3.1 长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异特征

#### 3.1.1 工业绿色水资源效率的变化趋势与地区差异

研究表明,决策单元的个数会影响效率测度的准确性<sup>[30-31]</sup>。为了避免决策单元较少、数据稀疏导致效率差异性过低这一问题,本文采用窗口分析方法来构建生产前沿面,这样不仅能提升决策单元效率的区分度,而且能够考察效率的时空差异特征。窗口分析法将包括当期在内的前  $S$  期投入产出数据作为当期参考技术集,会使得计算时段减少  $S-1$  个周期。本文设定的窗口宽度  $S=2$ ,即每一年的参考技术由当期和前期的投入产出值来共同决定,因此计算时段由 2004 年推后为 2005 年。根据公式(2),得到长江经济带 11 省市工业绿色水资源效率的 EBM-I-C 模型计算结果如表 2 所示。为了便于比较,表 2 同时给出了长江经济带各省市工业绿色水资源效率的 CCR-I-C 与 SBM-I-C 模型测算结果。

EBM 模型既能考虑投入目标值与投入实际值之间的径向比例,又能反映各投入之间差异化的非径向松弛变量,在一定程度上克服了 CCR 模型和 SBM 模型的缺陷,能够更准确地衡量决策单元生产效率。在不考虑松弛变量的情况,CCR 模型容易高估决策单元的效率;而在忽略线性比例关系信息的情况下,SBM 模型则容易低估决策单元的效率。由于 EBM 模型统筹了径向与非径向信息,因而能够更加真实反映效率水平<sup>[21]</sup>。表 2 结果显示,基于 CCR-I-C 与 SBM-I-C 模型测算的效率值分别为 0.576 与 0.472,而 EBM-I-C 模型测算的效率值为 0.554,正好位于 CCR 与 SBM 模型之间。考虑到

表 1 2004-2014 年长江经济带投入产出变量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of input and output variables in Yangtze River Economic Zone from 2004 to 2014

指标	均值	标准差	最大值	最小值
投入变量	工业用水量/亿 m <sup>3</sup>	75.03	48.50	238.00
	工业 COD 排放量/万 t	14.32	8.66	38.98
	工业氨氮排放量/万 t	1.22	0.92	4.16
产出变量	省市工业产值/亿 RMB	2 934.35	2 271.87	9 353.85
				574.62

表2 2005–2014年不同DEA模型下的长江经济带  
工业绿色水资源效率值

Table 2 Industrial green water resource efficiency of different  
DEA model of Yangtze River Economic Zone from 2005 to 2014

模型	CCR-I-C	SBM-I-C	TE:	PTE:	SE:
			EBM-I-C	EBM-I-V	EBM-I-V
2005年	0.594	0.467	0.571	0.715	0.806
2006年	0.595	0.470	0.565	0.717	0.796
2007年	0.586	0.466	0.561	0.716	0.791
2008年	0.594	0.480	0.564	0.721	0.786
2009年	0.563	0.462	0.542	0.711	0.763
2010年	0.581	0.500	0.567	0.718	0.785
2011年	0.573	0.491	0.550	0.712	0.764
2012年	0.560	0.458	0.541	0.798	0.687
2013年	0.563	0.466	0.546	0.806	0.687
2014年	0.549	0.457	0.528	0.811	0.664
平均	0.576	0.472	0.554	0.743	0.753

EBM模型的优势,下文将根据EBM测算结果考察长江经济带工业绿色水资源效率的时空差异特征。

由表2可知,2005-2014年长江经济带工业绿色水资源效率的平均值为0.554,整体水平严重偏低,效率改进空间巨大,说明长江经济带工业化进程中存在严重的水资源浪费与水环境污染现象。根据效率分解结果,工业水资源利用的纯技术效率(PTE)与规模效率(SE)均值分别为0.743与0.753,两者均存在很大的改进空间,且规模效率要略高于纯技术效率。因此,为了促进长江经济带工业绿色水资源效率的进一步改善,今后在提高工业领域的水资源利用、水污染控制技术与水资源管理水平的时候,还应保证合理用水规模,尽量避免水资源浪费,充分发挥水资源利用的规模经济效应。从变化趋势来看,如表2所示,研究期内长江经济带工业绿色水资源效率从2005年的0.571波动下降至2014年的0.528,这意味着工业发展与水资源环境之间的关系趋于恶化,人水之间的关系愈加紧张。具体来看,纯技术效率从2005年的0.715升至2014年的0.811,而规模效率从2005年的0.806下降至2014年的0.664,这表明近年来长江经济带工业绿色水资源效率的下降主要源自于规模效率下降,因此各省市在今后应该更加注重工业用水与水污染排放的总量控制,从而实现工业水资源的集约利用、绿色利用与优化配置。

2005-2014年长江经济带的工业绿色水资源效

率的分解结果与变化趋势如表3、表4所示。根据表3,首先从省市层面来看,2005-2014年,长江经济带9省2市中,上海市一直位于技术前沿,工业绿色水资源利用是完全有效率的;浙江、江苏与云南的水资源效率位于2~4位次;湖南、重庆、安徽、江西的工业绿色水资源效率水平较低,均在0.40以下,工业用水、水污染排放与工业产值之间的匹配度较差。其中水资源效率最低的是湖南,只有0.307。根据效率分解结果,来自长江下游的3个省市水资源利用纯技术效率较高,无论是工业水资源利用技术、节水技术、废水处理技术,还是工业水资源管理水平,它们在长江经济带11省市中都是“佼佼者”。纯技术效率较高的省市还包括上游地区的贵州与云南,这2个省份纯技术效率都在0.90以上,表明近年来长江上游节水型社会建设取得了明显成效。统计数据表明,贵州与云南的工业用水量与水污染排放量在长江经济带11省市中是最低的,单位工业产值付出的水资源环境代价相对较小;相比之下,中游地区4个省份纯技术效率在11省市中最低,都在0.60以下。长期以来,长江中游地区一直是中国能源与制造业基地,重工业比重高,工业用水总量大,再加上近年来大量承接了下游地区的低端制造

表3 2005–2014年长江经济带工业绿色水资源效率、  
纯技术效率与规模效率

Table 3 Overall technical efficiency, pure technical efficiency  
and scale efficiency of industrial green water resource  
of Yangtze River Economic Zone's from 2005 to 2014

模型	TE:EBM-I-C	PTE:EBM-I-V	SE:EBM-I-V
上海	1.000	1.000	1.000
江苏	0.675	0.997	0.677
浙江	0.999	0.999	1.000
安徽	0.359	0.457	0.787
江西	0.376	0.565	0.670
湖北	0.448	0.492	0.911
湖南	0.307	0.397	0.778
重庆	0.356	0.686	0.545
四川	0.538	0.644	0.847
贵州	0.403	0.960	0.420
云南	0.629	0.972	0.647
下游地区	0.891	0.999	0.892
中游地区	0.373	0.478	0.787
上游地区	0.482	0.815	0.615
总体	0.554	0.743	0.753

2017年8月

表4 2005-2014年长江经济带各省市、三大地区工业绿色水资源效率的变化趋势

Table 4 Trend of industrial green water resource efficiency Of Yangtze River Economic Zone's each province and

three major areas from 2005 to 2014										
地区	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年
上海	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
江苏	0.859	0.866	0.875	0.878	0.879	0.884	0.867	1.000	1.000	0.805
浙江	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
安徽	0.717	0.712	0.694	0.735	0.742	0.805	0.624	0.620	0.631	0.620
江西	0.665	0.650	0.617	0.656	0.673	0.686	0.594	0.600	0.602	0.609
湖北	0.659	0.695	0.689	0.684	0.722	0.780	0.741	0.770	0.782	0.764
湖南	0.530	0.583	0.585	0.614	0.643	0.692	0.671	0.650	0.668	0.659
重庆	0.642	0.675	0.680	0.645	0.684	0.774	0.725	0.786	0.821	0.791
四川	0.704	0.735	0.745	0.756	0.783	0.878	0.884	1.000	1.000	1.000
贵州	0.641	0.703	0.719	0.709	0.721	0.772	0.602	0.558	0.620	0.548
云南	0.818	0.825	0.861	0.854	0.855	0.849	0.729	0.734	0.774	0.749
下游	0.882	0.871	0.882	0.890	0.896	0.933	0.922	0.898	0.885	0.853
中游	0.386	0.385	0.380	0.382	0.353	0.378	0.369	0.354	0.376	0.364
上游	0.524	0.517	0.502	0.502	0.466	0.480	0.453	0.459	0.462	0.450
总体	0.571	0.565	0.561	0.564	0.542	0.567	0.550	0.541	0.546	0.528

业,导致工业用水量进一步攀升。另外,由于技术基础薄弱,中游地区工业水资源利用水平低,水资源浪费严重,再加上水污染防治不力导致水环境质量也在不断下降,这些因素都限制了中游地区工业绿色水资源效率的进一步提高。规模效率最高的是上海与浙江,实现了完全有效率,达到长江经济带工业水资源利用与水污染排放的最佳规模;湖北、四川、安徽与湖南的工业水资源规模效率也较高,均在0.75以上,工业用水与水污染排放规模基本合理。需要指出的是,下游地区3省市中,只有江苏的规模效率明显偏低,仅为0.677,这主要是由于过多的工业用水与水污染排放所导致的规模报酬下降。从统计数据来看,无论是工业用水总量还是水污染排放总量,江苏在长江经济带11省市中都是最高的。由于受制于边际报酬递减规律,资源投入过多必然会导致规模效益下降,最终会抑制水资源效率的提升。与此同时,规模效率较低也是重庆、贵州与云南等上游省市工业绿色水资源效率改善的重要障碍,但与江苏不同的是,这些省市工业水资源利用仍处于规模报酬递增阶段,还可以适当通过增加用水规模来提升工业水资源利用效率。

再从地区层面分析,根据表3,2005-2014年间下游地区工业绿色水资源效率、纯技术效率与规模

效率在三大地区中都是最高的,其中纯技术效率接近完全有效,无效率主要源于规模效益下降;中游地区工业绿色水资源效率与纯技术效率在三大地区中是最低的,较低的工业水资源利用技术与管理水平是其效率低下的关键制约;下游地区的工业绿色水资源效率、纯技术效率位于下游和中游之间,但规模效率最低,主要是由于工业水资源利用规模偏小所致。

最后考察各省市与三大地区效率的时间变化趋势,如表4所示,上海与浙江2省市一直保持了最优的水资源利用水平,工业绿色水资源效率值在研究期内始终为1.000;在长江经济带11省市中,仅湖南、重庆与四川3省市的工业绿色水资源效率整体水平在研究期内趋于上升,其它6省市效率水平都是下降的。从地区角度来看,与长江经济带总体趋势保持一致,上中下游三大地区工业绿色水资源效率在研究期内整体上都是下降的,其中上游地区从2005年的0.524降至2014年的0.450,中游地区从2005年的0.386下降到2014年的0.364,下游地区从2005年的0.882降至2014年的0.853。三大地区工业发展与水资源环境之间的关系无一例外地出现恶化态势,凸显了长江经济带严峻的工业水资源与水环境保护形势。



### 3.1.2 工业绿色水资源效率地区差距的形成机理

本节利用泰尔(Theil)指数分解法来揭示长江经济带工业绿色水资源效率地区差距的形成机理。根据公式(6)-公式(9)测算得到2005-2014年间长江经济带11省市工业绿色水资源效率地区差距的泰尔指数及其分解结果如表5所示。

从表5可以看出,2005-2014年,长江经济带工业绿色水资源效率的泰尔指数总体是上升的,从2005年的0.089升至2014年的0.099,表明效率总体差距在扩大。根据泰尔指数的分解结果,平均来说,地区之间差距贡献率较高,达到了74.17%,地区内部差距贡献率仅为25.83%,即地区之间差距是长江经济带工业绿色水资源效率地区差距形成的主要根源。从动态视角上来看,地区之间差距贡献率大致呈现“先上升,后下降”的变化趋势,2005-2010年地区之间差距贡献率从64.77%上升至86.17%,然后逐渐下降至2014年的68.03%,占比一直维持在60%以上,是地区差距形成的主导因素;而地区内部差距贡献率则呈现“先下降,后上升”的变化特征,从2005年的35.23%下降至2010年的13.83%,然后逐渐上升至2014年的31.97%。这一结果蕴含了重要启示:为了改善工业绿色水资源效率,未来长江经济带应重点缩小地区之间的差距,同时也应密切关注地区内部差距的演变。从地区内部差距来看,上游地区贡献率最大,平均值达到15.20%,且伴随时间推移贡献率有所下降,从2005年的20.73%下

降至2014年的15.50%;中游地区贡献率最小,平均值为2.80%,且随时间推移有减小趋势,从2005年的5.50%下降至2014年的2.23%;相比之下,下游地区贡献率近年来有所提升,2014年已达到14.24%,这主要是由于江苏的效率下降比较明显所致。综上所述,未来能否缩小地区间差距和上游地区省市内部差距,是长江经济带工业绿色水资源率实现优化提升的关键。

### 3.2 长江经济带工业绿色水资源无效率的来源:基于投入分解视角

本文一大特点是可以利用EBM模型的性质将长江经济带工业绿色水资源无效率基于每种投入要素角度进行分解,以此追溯无效率的深层次来源,为有针对性地制定相关对策提供了依据。根据公式(3)-公式(5)可以计算得到各投入要素对长江经济带绿色水资源无效率的贡献率,结果如表6所示。

表6测算结果显示,2005-2014年间长江经济带工业绿色水资源无效率均值为0.446。由工业用水、工业COD排放与工业氨氮排放引致的无效率均值分别为0.409、0.469与0.459。工业COD排放是长江经济带工业绿色水资源无效率的首要原因,其次为工业氨氮排放,工业用水位居末位。具体来看,工业用水、工业COD排放与工业氨氮排放对长江经济带工业绿色水资源无效率的贡献率分别为27.39%、37.02%和35.59%。可以发现,工业水污染

表5 2005-2014年长江经济带三大地区工业绿色水资源效率的内部及地区间差距对工业绿色水资源效率总体差距的贡献

Table 5 Contribution of the internal gap and the gap between one and another area for the overall gap of industrial green water resource efficiency among Yangtze River Economic Zone's three major areas from 2005 to 2014

	总体差距	地区之间差距		地区内部差距		下游地区	中游地区	上游地区
		数值	贡献率/%	数值	贡献率/%	贡献率/%	贡献率/%	贡献率/%
2005年	0.089	0.057	64.77	0.031	35.23	9.01	5.50	20.73
2006年	0.091	0.057	61.88	0.035	38.12	10.70	5.19	22.23
2007年	0.088	0.061	69.77	0.027	30.23	9.23	3.65	17.36
2008年	0.087	0.062	71.43	0.025	28.57	7.91	2.90	17.76
2009年	0.099	0.077	78.03	0.022	21.97	6.42	2.84	12.71
2010年	0.087	0.075	86.17	0.012	13.83	2.70	0.80	10.33
2011年	0.095	0.080	84.37	0.015	15.63	3.56	1.30	10.77
2012年	0.098	0.079	79.79	0.020	20.21	5.51	0.90	13.81
2013年	0.089	0.069	76.94	0.021	23.06	8.74	2.98	11.35
2014年	0.099	0.067	68.03	0.032	31.97	14.24	2.23	15.50
平均	0.092	0.068	74.17	0.024	25.83	7.82	2.80	15.20

2017年8月

表6 2005-2014年各投入要素对长江经济带工业绿色水资源无效率的贡献率

Table 6 Contribution rate of each input for industrial green water resource efficiency of Yangtze River Economic Zone from 2005 to 2014

	工业绿色水资源EBM-I-C无效率				贡献率/%		
	工业用水	工业COD排放	工业氨氮排放	总量	工业用水	工业COD排放	工业氨氮排放
2005年	0.378	0.464	0.442	0.429	26.58	37.92	35.50
2006年	0.380	0.467	0.456	0.435	26.98	37.16	35.86
2007年	0.394	0.470	0.451	0.439	28.37	36.36	35.27
2008年	0.356	0.497	0.461	0.436	26.89	36.80	36.32
2009年	0.423	0.477	0.474	0.458	29.60	33.50	36.90
2010年	0.422	0.437	0.439	0.433	27.83	36.10	36.07
2011年	0.426	0.462	0.455	0.450	25.43	38.92	35.65
2012年	0.440	0.470	0.464	0.459	27.28	38.93	33.79
2013年	0.437	0.462	0.461	0.454	29.10	36.18	34.71
2014年	0.434	0.486	0.487	0.472	25.84	38.30	35.86
平均	0.409	0.469	0.459	0.446	27.39	37.02	35.59

排放的贡献率明显高于工业用水,这在一定程度上表明长江经济带在工业化进程中过于偏重水资源节约,而忽视了水环境保护。因此,有效防治工业废水污染,切实提高水环境质量应该成为今后长江经济带水资源保护的一项重点工作,不可偏废。从变化趋势看,2005-2014年间长江经济带工业绿色水资源无效率由0.429上升为0.472。其中,工业用水引致的无效率值由0.378上升为0.434,工业COD排放引致的无效率值从0.464上升至0.486,工业氨氮排放引致的无效率由0.442上升为0.487。工业用水、工业COD与氨氮排放的效率都无一例外地出现下降,进一步表明长江经济带工业发展与水资源环境之间的矛盾愈加突出。3种投入要素中,工业用水对工业绿色水资源无效率的贡献率由2005年的26.58%下降到2014年25.84%,工业COD排放的贡献率从2005年的37.92%上升至2014年的38.30%,工业氨氮排放的贡献率从2005年的35.50%上升至2014年的35.86%,这一结果正好呼应了前文结论,即长江经济带各省市应充分认识到工业水污染防治的重要性,并将其作为一项重点工作来实施。

### 3.3 长江经济带各省市工业节水减排潜力指数测算

本文通过EBM模型计算得到各投入目标值与实际值之间的差异来衡量长江经济带工业节水与水污染减排潜力,计算结果如表7所示。表7结果显示,长江经济带工业节水与水污染减排潜力是非

表7 2005-2014年长江经济带各省市工业节水减排潜力指数

Table 7 Industrial water conservation index and water pollution emission reduction index of Yangtze River Economic Zone's each province

地区	from 2005 to 2014 (%)		
	工业节水 潜力	工业COD 减排潜力	工业氨氮 减排潜力
上海	0.00	0.00	0.00
江苏	21.31	54.94	49.98
浙江	0.08	0.22	0.08
安徽	59.93	66.45	75.55
江西	55.58	72.51	77.13
湖北	50.75	56.03	69.27
湖南	66.90	66.90	80.24
重庆	63.86	65.87	64.85
四川	43.54	58.18	44.04
贵州	57.43	67.14	62.86
云南	30.74	67.68	30.74
下游	7.13	18.39	16.69
中游	58.29	65.47	75.55
上游	48.89	64.72	50.62
总体	40.92	52.36	50.43

常可观的,多数省市投入的实际值与目标值之间存在很大差距。总体来看,2005-2014年间长江经济带11省市工业节水潜力、工业COD减排潜力与工业氨氮减排潜力分别为40.92%、52.36%和50.43%,节水减排潜力巨大。如果各省市都能达到效率前沿省市的节水减排能力,长江经济带工业水资源利用与水环境质量将会得到极大的改善。从各投入要素来看,长江经济带工业用水存在40.92%的节水



潜力,工业 COD 与工业氨氮则分别存在 52.36%和 50.43%的减排潜力。从各省市来看,湖南、重庆和安徽 3 省市工业节水潜力最大,分别为 66.90%、63.86%和 59.93%;工业 COD 减排潜力最大的是江西、云南和贵州 3 省份,分别为 72.51%、67.68%和 67.14%;湖南、江西和安徽 3 省份工业氨氮减排潜力最大,分别为 80.24%、77.13%和 75.55%。从地区来看,由于效率水平较高,下游地区工业节水减排潜力相对最小,分别为 7.13%、18.39%和 16.69%;中游地区工业节水减排潜力最大,分别达到 58.29%、65.47%与 75.55%,3 项指标值在三大地区中都是最高的;上游地区工业节水减排潜力略低于中游地区,分别存在 48.89%、64.72%和 50.62%的节水减排比例。从数值上来看,充分挖掘中上游地区的工业节水减排潜力是长江经济带未来进一步改善工业绿色水资源效率的主要途径。

### 3.4 长江经济带工业绿色水资源效率的影响因素分析

为了更好地诠释长江经济带工业绿色水资源效率时空差异的形成机制,有必要对其影响因素进行实证检验。工业绿色水资源效率的影响因素众多,本文根据经验分析与已有研究结论<sup>[11-13,16,32-34]</sup>,并基于数据的可得性,最终选择了以下几类影响因素:

(1)经济发展水平。以长江经济带各省市人均 GDP 来衡量经济发展水平。为了保证统计口径统一,按照 2004 年不变价格对其进行换算。为了减少异方差带来的负面影响,将人均 GDP 对数化后再引入回归方程。

(2)工业化程度。以长江经济带各省市工业产值占当年 GDP 的比重来衡量工业化程度。

(3)工业用水强度。以长江经济带各省市万元工业产值耗水量来表示工业用水强度。

(4)技术进步。以长江经济带各省市 R&D 投入占 GDP 的比重来反映各省市的研发投入强度,其值越高就越表明技术创新能力越强,反之则表示技术创新能力越弱。

(5)政府环境管制力度。以长江经济带各省市排污费收入占 GDP 的比重来衡量政府环境规制力度。

(6)地区特征。由于区域发展不平衡,长江上游、中游与下游地区的经济规模、科技水平、开放度、基础设施等固有属性存在明显差别。本文引入虚拟变量,虚拟变量为 1 时表示下游地区,为 0 时表示中上游地区,以此来反映地域因素对工业绿色水资源效率的影响。

上述各变量数据均来自相应年份的《中国统计年鉴》<sup>[28]</sup>、《中国环境年鉴》<sup>[35]</sup>、《中国科技统计年鉴》<sup>[36]</sup>等。

遵循两阶段分析思路,本文以 2005-2014 年间长江经济带各省市工业绿色水资源 EBM 效率作为被解释变量,以各省市经济发展水平、工业化程度、工业用水强度、技术进步、政府环境管制力度与地区特征作为解释变量,建立面板计量经济模型定量考察工业绿色水资源效率的影响机制。由于回归方程被解释变量值处于 0 到 1 之间,是受限因变量,因此本文采用面板 Tobit 模型来检验效率影响机制。借助 stata12.0 软件,利用极大似然估计方法得到 Tobit 回归模型的估计结果如表 8 所示。

根据表 8 的回归结果,各因素的影响机制分析如下:

(1)地区经济发展水平的提高对促进长江经济带工业绿色水资源效率提升有明显积极作用,回归模型的系数为正且在 1%的水平下显著,这与马海良等<sup>[13]</sup>的研究结论保持一致。在其他条件不变的情况下,人均 GDP 增加 1%,长江经济带工业绿色水资源效率将会增加 1.296 个单位。经济发展水平越

表 8 面板 Tobit 回归结果

Table 8 The regression result of panel Tobit model				
解释变量	回归系数	稳健标准差	t 值	P> t
经济发展水平	1.296***	0.305	4.256	0.000
工业化程度	0.252*	0.148	1.698	0.092
工业用水强度	-0.865**	0.389	-2.225	0.028
技术进步	2.232***	0.622	3.587	0.000
政府环境管制力度	-0.419	0.366	-1.145	0.255
地区特征	0.540***	0.182	2.962	0.004
常数项	0.418***	0.137	3.054	0.003
Pseudo R <sup>2</sup>	0.356			
Log pseudolikelihood	-98.425			
F 值	43.261***			
样本数	110			

注:\*\*\*、\*\*、\*分别代表 1%、5%与 10%的显著性水平。

2017年8月

高,工业节水减排技术也越先进,企业与政府同时也有足够的资金用于工业水污染的防治。

(2)工业化程度提高对于长江经济带工业绿色水资源效率有正向影响,但是影响力较低,没有通过5%水平的显著性检验。正如陈关聚等<sup>[32]</sup>指出,伴随时间推移,中国农业比重逐渐下降,服务业比重逐渐提高,而第二产业比重基本维持稳定,已经很难再通过提高工业比重来达到节水这一目的。另外,如果在工业化过程中高耗水、高污染的重工业比重有所增加的话,反而还会抑制水资源利用效率的进一步提升。

(3)工业用水强度的增加明显阻碍了长江经济带工业绿色水资源效率的提升,回归系数在5%的水平下显著为负。众所周知,工业用水强度是一个重要的衡量用水效率的单要素指标,由单位工业产值耗水量来反映,工业用水强度越高,工业用水效率越低,工业发展付出的水资源代价也就越大。因此,有效降低工业用水强度是改善长江经济带工业绿色水资源效率的重要手段。

(4)以增加R&D经费投入强度所表征的技术进步显著促进了长江经济带工业绿色水资源效率的提高,回归系数高达2.232且在1%的水平下显著,这表明技术进步产生了非常明显的效率促进作用。一个地区研发活动经费投入量的增加会带来显著的技术创新效应,特别是工业节水与水污染防治领域的技术革新会带来更为直接的效率提升效果。这与解伏菊等<sup>[33]</sup>、廖虎昌等<sup>[34]</sup>的研究结论相同。因此,加大工业节水与水污染防治领域研发资金的投入,提升工业节水减排技术,是长江经济带提高工业水资源利用水平、改善水环境质量的一项关键举措。

(5)政府加大环境规制力度并没有促进长江经济带工业绿色水资源效率提升,回归系数为负,但未通过5%水平的显著性检验。一般来说,政府加大环境规制力度,对企业产生节水减排的反向激励,显然有利于水资源利用效率的提升。然而,本文回归结果并不支持这一观点,主要原因可能是由于当前中国排污收费制度实施效果不佳,没有达到应有的环境保护效果,因此政府可以考虑制定更全面、更严格的排污收费制度,以更好地发挥政策导

向作用。

(6)地区特征虚拟变量的系数为0.418,且在1%的水平下显著,这表明地域差异因素对长江经济带工业绿色水资源效率有非常明显的影响。相对于中上游地区,下游地区地理位置优越、开放水平高、经济规模大、工业内部结构合理、财政资金雄厚、工业节水减排技术发达、人力资本水平高等一系列优势都能够促进工业绿色水资源效率的提升。

## 4 结论与政策启示

### 4.1 结论

本文将一种新型的DEA模型——EBM模型与面板Tobit计量模型相结合,遵从两阶段分析思路,全面考察长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异特征与影响机制。结果表明:

(1)长江经济带工业绿色水资源效率水平较低,工业节水与水污染减排潜力巨大。不同省市、地区的效率指数存在显著差异,下游地区表现明显优于中上游地区。

(2)工业用水、工业COD排放与工业氨氮排放对长江经济带工业绿色水资源无效率的贡献率分别为27.39%、37.02%与35.59%。

(3)长江上中下游三大地区之间差距和上游地区内部省市差距是长江经济带工业绿色水资源效率地区差距形成的主要根源;工业节水潜力为40.92%,工业COD与工业氨氮的减排潜力分别为52.36%与50.43%。

(4)经济发展水平的提高、科技进步、地域差异对长江经济带工业绿色水资源效率有显著促进作用,而工业用水强度增加则显著抑制了长江经济带工业绿色水资源效率的改善,工业化程度的提高虽然对改善长江经济带绿色水资源效率有积极作用,但是影响效果并不明显,政府加大环境规制力度反而阻碍了长江经济带绿色水资源效率的提升,但回归系数没有通过5%水平的显著性检验。

### 4.2 政策启示

(1)鉴于长江经济带工业绿色水资源效率的显著地区差异性,为了保证政策效果,需要对不同地区、省市的工业用水特征进行深入研究,因地制宜地制定工业节水战略与水污染防治对策,避免实施“一刀切”政策。

(2)为了缩小长江经济带工业绿色水资源效率的地区差距,长江上中下游各地区、各省市之间应打破行政壁垒,破除条块分割与地方保护主义,扩大工业节水与水污染防治领域的交流与合作,实现先进节水减排技术的全流域分享。

(3)未来长江经济带各省市应着力推动工业结构升级,重点发展耗水量和废水排放量低的高新技术产业,在革新工业节水技术的同时,进一步加大工业水污染的防治力度,坚定不移地依靠科技创新促进工业水资源的高效利用和绿色利用,着力完善节水减排激励机制,对现行排污收费制度进行更为科学、全面、严格的再设计,让企业形成节水减排的内生动力。

## 参考文献(References):

- [1] 周冯奇,程进,陈宁,等.长江经济带环境绩效评估报告[M].上海:上海社会科学院出版社,2016. [Zhou F Q, Cheng J, Chen N, et al. Environmental Performance Assessment Report of Yangtze River Economic Zone[M]. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press, 2016.]
- [2] Hu J L, Wang S C, Yeh F Y. Total-factor water efficiency of regions in China[J]. *Resources Policy*, 2006, 31(4): 217-230.
- [3] Manjunatha A V, Speelman S, Chandrakanth M G, et al. Impact of groundwater markets in India on water use efficiency: a data envelopment analysis approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(11): 2924-2929.
- [4] Chemark F, Boussemart J P, Jacquet F. Farming system performance and water use efficiency in the Tunisian semi-arid region: data envelopment analysis approach[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2009, 17(3): 381-396.
- [5] Njiraini G W, Guthiga P M. Are small-scale irrigators water use efficient? Evidence from Lake Naivasha Basin, Kenya[J]. *Environmental Management*, 2013, 52(5): 1192-1201.
- [6] Azad M A S, Ancev T, Hernandez-Sancho F. Efficient water use for sustainable irrigation industry[J]. *Water Resource Management*, 2015, 29(5): 1683-1696.
- [7] 钱文婧,贺灿飞.中国水资源利用效率区域差异及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(2):54-60. [Qian W J, He C F. China's regional difference of water resource use efficiency and influencing factors[J]. *China population, Resources and Environment*, 2011, 21(2): 217-230.]
- [8] 马海良,黄德春,张继国,等.中国近年来水资源利用效率的省际差异:技术进步还是技术效率[J].资源科学,2012,34(5): 794-801. [Ma H L, Huang D C, Zhang J G, et al. The provincial differences of China's water use efficiency in recent years: technological progress or technical efficiency[J]. *Resources Science*, 2012, 34(5): 794-801.]
- [9] 任俊霖,李浩,伍新木,等.长江经济带省会城市用水效率分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(5):101-107. [Ren J L, Li H, Wu X M, et al. Analysis of water efficiency of capital cities in Yangtze River Economic Belt in China[J]. *China population, Resources and Environment*, 2016, 26(5): 101-107.]
- [10] 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年的中国地区数据的分析[J].自然资源学报,2014,29(12):2001-2012. [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[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12): 2001-2012.]
- [11] 刘渝,杜江,张俊飏.湖北省农业水资源利用效率评价[J].中国人口·资源与环境,2007,17(6):60-65. [Liu Y, Du J, Zhang J B. Estimation on utilization efficiency of agricultural water resource in Hubei province[J]. *China population, Resources and Environment*, 2007, 17(6): 60-65.]
- [12] 佟金萍,马剑峰,王圣,等.长江流域农业用水效率研究:基于超效率DEA和Tobit模型[J].长江流域资源与环境,2015,(4): 603-608. [Tong J P, Ma J F, Wang S, et al. Research on agricultural water use efficiency in Yangtze River Basin based on super-efficiency DEA and Tobit Model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, (4): 603-608.]
- [13] 马海良,黄德春,张继国.考虑非合意产出的水资源利用效率及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2012,22(10):35-42. [Ma H L, Huang D C, Zhang J G. Water resource utility efficiency and its influencing factors considering undesirable goods[J]. *China population, Resources and Environment*, 2012, 22(10): 35-42.]
- [14] 孙才志,赵良仕.环境规制下的中国水资源利用环境技术效率测度及空间关联特征分析[J].经济地理,2013,33(2):26-32. [Sun C Z, Zhao L S. Water resources utilization environmental efficiency measurement and its spatial correlation characteristic analysis under the environmental regulation background[J]. *Economic Geography*, 2013, 33(2): 26-32.]
- [15] 陈旭升,范德成.中国工业水污染状况及其治理效率实证研究[J].统计与信息论坛,2009,24(3):30-35. [Chen X S, Fan D C. Empirical study on status of water pollution and treatment efficiency in China[J]. *Statistics & Information Forum*, 2009, 24(3): 30-35.]
- [16] 李静,马潇璐.资源与环境双重约束下的工业用水效率——基于SBM-Undesirable和Meta-frontier模型的实证研究[J].自然资源学报,2014,29(6):920-933. [Li J, Ma X C. The utilization efficiency of industrial water under the dual constraints of



2017年8月

- resource and environment: an empirical study based on SBM-undesirable and Meta-frontier model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(6): 920-933.]
- [17] Sun C Z, Zhao L S, Zou W, *et al.* Water resource utilization efficiency and spatial spillover effects in China[J]. *Journal of Geographical Science*, 2014, 24(5): 771-788.
- [18] 杨骞, 刘华军. 污染排放约束下中国农业水资源效率的区域差异与影响因素[J]. 数量经济技术经济研究, 2015, (1): 114-128. [Yang Q, Liu H J. Regional disparity and influencing factors of agricultural water resources efficiency with the constraint of pollution[J]. *The journal quantitative & Technical Economies*, 2015, (1): 114-128.]
- [19] Deng G Y, Li L, Song Y N. Provincial water use efficiency measurement and factor analysis in China: based on SBM-DEA model[J]. *Ecological Indicators*, 2016(69): 12-18.
- [20] 由沙丘. 我国不同区域城市绿色全要素水资源效率研究[J]. 学术交流, 2016(6): 173-176. [You S Q. Study on green total-factor water resource efficiency of China's different regions[J]. *Academic Exchange*, 2016, (6): 173-176.]
- [21] 李兰冰, 刘秉镰. 中国高技术产业的效率评价与成因识别[J]. 经济学动态, 2014, (9): 1-10. [Li L B, Liu B L. Efficiency measurement and factors recognition of China's high technology industry[J]. *Economic Dynamic*, 2014, (9): 1-10.]
- [22] Tone K, Tsutsui M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, (207): 1554-1563.
- [23] 魏楚, 沈满洪. 水资源效率的测度及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 197-204. [Wei C, Shen M H. Water efficiency measures and their determinants: A literature review [J]. *Resource Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(2): 197-204.]
- [24] Kuosmanen T, Kortelainen M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(4): 59-72.
- [25] Picazo-Tadeo A J, Reig-Martinez E, Gomez-Limon J A. Assessing farming eco-efficiency: A data envelopment analysis approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(4): 1154-1164.
- [26] 李博, 张文忠, 余建辉. 碳排放约束下的中国农业生产效率地区差异分解与影响因素[J]. 经济地理, 2016, 36(9): 150-157. [Li B, Zhang W Z, Yu J H. Decomposition and influence of district difference of China agricultural production efficiency under the constraint of carbon emission[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(9): 150-157.]
- [27] 高铁梅. 计量经济分析方法与建模[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. [Gao T M. *Econometric Analysis Method and Modeling*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.]
- [28] 国家统计局. 中国统计年鉴(2005-2016)[J]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2016. [National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook(2005-2016)*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005-2016.]
- [29] 国家统计局. 中国环境统计年鉴(2005-2016)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2016. [National Bureau of Statistics. *China Environmental Statistical Yearbook(2005-2016)* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2005-2016.]
- [30] 王群伟, 周鹏, 周德群. 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J]. 中国工业经济, 2010(1): 45-54. [Wang Q W, Zhou P, Zhou D Q. Research on dynamic carbon dioxide emissions performance, regional disparity and affecting factors in China[J]. *China Industrial Economics*, 2010, (1): 45-54.]
- [31] 汪克亮, 孟祥瑞, 杨宝臣, 等. 中国地区大气环境效率的异质性、动态演化与成因识别[J]. 统计与信息论坛, 2017, 32(6): 55-63. [Wang K L, Meng X R, Yang B C, *et al.* Study on the heterogeneity, dynamic evolution and cause recognition of China's regional air environmental efficiency[J]. *Statistics & Information Forum*, 2017, 32(6): 55-63.]
- [32] 陈关聚, 白永秀. 基于随机前沿的区域工业全要素水资源效率研究[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1593-1600. [Chen G J, Bai Y X. Regional differences in total-factor industrial water efficiency based on a stochastic frontier approach[J]. *Resources Science*, 2013, 35(8): 1593-1600.]
- [33] 解伏菊, 张红, 郑明喜. 山东省工业水资源全要素生产率研究——基于DEA方法的实证分析[J]. 理论学刊, 2010, (12): 55-58. [Xie D J, Zhang H, Zheng M X. Study on industrial water resource totalfactor productivity of Shandong province[J]. *Theory Journal*, 2010, (12): 55-58.]
- [34] 廖虎昌, 董毅明. 基于DEA和Malmquist指数的西部12省水资源利用效率研究[J]. 资源科学, 2011, 33(2): 273-279. [Liao H C, Dong Y M. Utilization efficiency of water resources in 12 western provinces of China based on the DEA and Malmquist TFP index[J]. *Resources Science*, 2011, 33(2): 273-279.]
- [35] 国家统计局. 中国环境年鉴(2005-2015)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2015. [National Bureau of Statistics. *China Environmental Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005-2015.]
- [36] 国家统计局. 中国科技统计年鉴(2005-2015)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2015. [National Bureau of Statistics. *China Science and Technology Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2005-2015.]

# Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors based on two-step analysis of EBM-Tobit Model

WANG Keliang<sup>1</sup>, LIU Yue<sup>1</sup>, SHI Lijuan<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>, MENG Xiangrui<sup>1</sup>, YANG Baochen<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Improving industrial green water efficiency is important to alleviating water resource shortage and water environmental pollution in China. Here we incorporated industrial water resource consumption and water pollution emissions into a unified analysis framework and EBM modeling with characteristics of radial and non-radial modeling. Our aim was to measure industrial green water efficiencies in 11 provinces from the Yangtze River Economic Zone and investigate the spatial-temporal differences from 2005 to 2014. The contribution rate of inefficiency for each input was measured by decomposition of overall industrial green water inefficiency from an input perspective. The reason for regional disparities in the Yangtze River Economic Zone industrial green water efficiency was investigated using the Theil index decomposition method, and the potential for industrial water conservation and industrial water pollution reduction were measured according to the gap between target and actual values of inputs. Panel Tobit modeling was done investigate the factors influencing industrial green water resource efficiency. We found that industrial green water efficiency in the zone is relatively low and regional difference are significant, indicating a large potential for industrial water conservation and industrial water pollution reduction. Decreasing the efficiency gap between upstream, midstream and downstream and the efficiency internal gap of upstream provinces is a key measure for the zone's industrial green water efficiency. Economic development, increasing industrialization degree, increasing industrial water intensity, technological progress, environmental regulation and regional differences all have an effect on industrial green water resource efficiency. These data can help provinces in the Yangtze River Economic Zone utilize industrial water resource efficiently and greenly.

**Key words:** Yangtze River Economic Zone; industrial green water efficiency; EBM-Tobit Model; Two-step analysis; spatial and temporal disparities; influencing factors