

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2017. 05. 008

省际工业用水效率测度及空间关联特征

赵沁娜,王若虹

(合肥工业大学管理学院,安徽 合肥 230009)

摘要:采用考虑非期望产出的数据包络分析(slacks based measure-data envelopment analysis, SBM-DEA)方法测算出我国 30 个省市 2005—2014 年的工业用水效率,运用探索性空间数据分析(exploratory spatial data analysis,ESDA)方法对我国工业用水效率的空间关联特征进行了定量探讨。结果表明:10 年来,我国工业用水效率平均值从 2007 年开始呈现逐年上升的趋势,且总体呈现出东部大于中部大于西部的趋势。各省市区工业用水效率 10 年间均出现显著的空间正相关,相邻地区工业用水效率高的地区和低的地区出现相对集聚的现象,高高集聚区主要分布在东部地区,低低集聚区主要分布在西部地区。不同省市之间工业用水效率的改善途径和潜力不尽相同,应从实际情况出发制定差异化政策,提高工业用水效率。

关键词:工业用水效率;非期望产出;数据包络分析方法;空间数据分析;空间关联特征

中图分类号:F293.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2017)05 - 0042 - 06

Measurement of provincial industrial water use efficiency and its characteristics of spatial association

ZHAO Qinna, WANG Ruohong

(School of management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper has measured and calculated the industrial water use efficiency among China's thirty provinces and cities during the year 2005—2014 by applying the SBM-DEA (slack based measure-data envelopment analysis) model which considers undesirable outputs. The characteristics of spatial association of industrial water use efficiency in China has also been quantitatively investigated with the ESDA method. Study results show that: The average value of industrial water use efficiency in China has been increasing year by year from 2007, on the whole showing the tendency that the said average value of the eastern region is bigger than that both in the middle region and the western region. The industrial water use efficiency of the related provinces and municipalities has significant spatial positive correlation in 10 years. The districts with high and low efficiency in industrial water use in the adjacent areas have displayed the phenomenon of being relatively gathered together. High-high concentration areas are mainly distributed in the eastern region and low-low concentration areas are mainly distributed in the western region. Therefore, different provinces and cities have different ways and potentials to improve the efficiency of industrial water use, so the policy of differentiation should be formulated from the actual situation so as to enhance the efficiency of industrial water use.

Key words: industrial water use efficiency; undesirable output; data envelopment analysis; spatial data analysis; characteristics of spatial association

水资源是人类赖以生存和发展的根源,是维系地球生态环境可持续发展的首要条件,同时水资源

又是一种战略性经济资源,是代表国家综合国力不可或缺的重要组成部分。2012 年,国务院办公厅出台了

基金项目:国家自然科学基金(41401654);教育部人文哲学社会科学研究项目(11YJCZH248)
作者简介:赵沁娜(1978—),女,副教授,博士,主要从事资源环境政策与管理方面研究。E-mail:zhaoqinna@sina.com

《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》，文件明确提出：至 2020 年，万元工业增加值用水量降低到 65 m³ 以下，到 2030 年，用水效率达到或接近世界先进水平，万元工业增加值用水量降低到 40 m³ 以下^[1]。就工业用水而言，随着我国工业化、城市化不断加速，工业用水量逐年攀升，在此背景下，工业用水量的减少和工业用水效率的提高对促进我国工业行业长远发展意义重大。

目前在进行工业用水效率测算时，最常用的方法有数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 方法和随机前沿函数分析 (stochastic frontier analysis, SFA) 方法，如王春燕等^[2]以陕西省 35 个重点行业作为研究对象，利用 DEA 方法分析样本对象的水资源利用效率，结果表明各行业之间的工业用水效率差异较大，并提出发展高端制造业是提高工业用水效率的有效措施；买亚宗等^[3]采用 DEA 方法，测算了我国大部分省区的工业水资源效率，并分别评价了各地区的工业经济效率和环境效率，认为我国大部分省区都实现了工业用水水平较高的经济产出，但是对环境造成了不容乐观的影响；孙爱军等^[4]运用 SFA 方法测算了我国 1953—2004 年的工业用水效率，并对效率值的变化趋势做了分析。除上述方法外，学者们还采用其他方法来测算工业用水效率，如贾绍凤等^[5]建立了环境库兹涅茨曲线，对我国工业用水与经济发展水平的关系进行了实证研究，对我国工业用水效率也进行了相应的计算；朱启荣^[6]在对我国工业水资源利用效率和工业配置的测算研究中采用了常规比较法，同时比较分析了不同区域中工业用水效率的提升发展空间。

也有学者对工业用水效率的影响因素进行研究，如汪恕诚^[7]指出工业水价对工业用水效率有显著的负向影响，可以通过发挥价格杠杆的作用在一定程度上减少工业用水量；贾绍凤等^[8]对北京市工业水价进行了研究，得出工业企业用水定额对水价的变动非常敏感的结论；解伏菊等^[9]在对山东省 17 个地市 2004—2008 年工业水资源利用效率值测算的基础上，提出山东省工业水资源利用生产率水平停滞不前甚至下降主要是因为科技水平停滞不前；李静等^[10]基于我国 1999—2011 年的省际面板数据研究了我国各省区的工业水资源利用效率的影响因素，结果表明我国现阶段人均 GDP 对工业用水效率有负向影响，工业用水影子价格的上升对工业用水效率的提高具有积极作用；在用水效率空间分布特征方面，孙才志等^[11-12]搜集了我国 31 个省市区 1997—2010 年相关指标的面板数据，对测算的水资源利用环境技术效率值进行了空间分析，结果表明

中国的水资源利用环境技术效率分布存在显著的空间自相关性。

目前的针对工业用水效率的研究更多地考虑经济效益，在环境社会的可持续发展方面考虑的不够细致和全面，本文采用考虑非期望产出的数据包络分析 (slacks based measure-data envelopment analysis, SBM-DEA) 方法对我国各省 (市) 工业用水效率进行评价，并利用探索性空间数据分析 (exploratory spatial data analysis, ESDA) 方法进行工业用水效率的空间相关分析，探索其空间关联特征，以期为各地区水资源利用及管理提供政策建议。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 考虑非期望产出的数据包络分析方法

由于传统的 DEA 模型是径向的，没有把投入产出的松弛变量问题引入到模型中，会导致效率测度的结果失真，因此，本文采用 SBM-DEA 模型，综合考虑了各决策单元的投入与产出，把松弛变量直接加入目标函数中，解决了投入产出的松弛问题和径向、角度选择的偏差，计算公式为

$$\rho^* = \min \left[\frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{s_{x,n}}{x_n}}{1 + \frac{1}{M+I} \left(\sum_{m=1}^M \frac{s_{g,m}}{y_{g,m}} + \sum_{i=1}^I \frac{s_{b,i}}{y_{b,i}} \right)} \right] \quad (1)$$

其中：

$$\begin{aligned} x_n &= X\phi + s_{x,n}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad s_{x,n} \geq 0 \quad \phi \geq 0 \\ y_m &= Y_g\phi - s_{g,m}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad s_{g,m} \geq 0 \quad \phi \geq 0 \\ y_i &= Y_b\phi + s_{b,i}, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad s_{b,i} \geq 0 \quad \phi \geq 0 \end{aligned}$$

式中： ρ^* 为工业用水效率值； N 、 M 、 I 分别为投入、期望产出和非期望产出的指标个数； X 、 Y_g 、 Y_b 分别为每年不同地区的投入量、期望产出量和非期望产出量； $s_{x,n}$ 、 $s_{g,m}$ 、 $s_{b,i}$ 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量； x_n 、 y_m 、 y_i 分别为决策单元的投入、期望产出和非期望产出值； ϕ 为决策单元的权重。

ρ^* 范围在 0 到 1 之间，当且仅当 $\rho^* = 1$ ，即 $s_{x,n} = 0$ ， $s_{g,m} = 0$ ， $s_{b,i} = 0$ 时，决策单元才是有效的；当 $\rho^* < 1$ ，即 $s_{x,n}$ 、 $s_{g,n}$ 、 $s_{b,i}$ 三者中至少有一个不为 0 时，说明未取得效率值有效，效率值存在损失，可以通过改进决策单元的投入产出量对工业用水效率结果值进行改进。

1.1.2 空间自相关分析

空间自相关分析是 ESDA 技术的核心内容之一，其通过对数据空间关系的测度研究来分析工业用水效率的空间关联格局。空间自相关分析包括全

局空间自相关和局部空间自相关两个指标。全局空间自相关分析是用来衡量空间数据在整个系统内表现出的空间关联和空间差异的分布特征,一般用全局 Moran's I 指数来测度;局部空间自相关分析是用来分析某个单元上表现出的某一现象与相邻近区域同一现象之间的相关程度,一般用 Moran 散点图和 LISA 指标来度量。全局 Moran's I 指数的计算公式为

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad j \neq i \quad (2)$$

其中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$

式中: I 为全局 Moran's I 指数值; x_i 和 x_j 分别为 i 省市和 j 省市的工业用水效率; n 为空间研究样本数; ω_{ij} 为空间权重,当区域 i 与 j 相邻时, $\omega_{ij} = 1$,当区域 i 与 j 不相邻时, $\omega_{ij} = 0$ 。

采用一个标准化的 Z 统计量来进行 Moran's I 指数的显著性检验:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{S(I)} \quad (3)$$

式中: $Z(I)$ 为统计量值; $E(I)$ 为理论上 I 的期望值; $S(I)$ 为理论上 I 的方差。 I 值介于 -1 到 1 之间, $[-1, 0]$ 、 0 和 $(0, 1]$ 分别为具有负相关关系、不具有相关关系和具有正的相关关系。

局部 Moran's I 指数的计算公式为

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad j \neq i \quad (4)$$

表 1 30 个省市工业用水效率评价指标统计值

统计值	投入指标			期望产出	非期望产出
	工业用水量/ 亿 m ³	工业从业人员/ 万人	工业固定资产投资/ 亿元	工业总产值/ 亿元	工业废水中 COD 和 NH ₄ ⁺ -N 总排放量/万 t
最大值	225.30	1 055.30	18 371.80	29 144.15	198.24
最小值	0.47	1.50	23.79	21.71	0.07
样本均值	44.77	147.13	2 969.79	5 880.37	41.17

表 2 东部地区 2005—2014 年工业用水效率值

省市	工业用水效率										
	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	均值
北 京	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
天 津	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
河 北	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
辽 宁	0.567	0.549	0.475	0.508	0.469	0.572	0.643	0.710	0.806	0.757	0.606
上 海	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
江 苏	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
浙 江	1.000	1.000	0.742	0.625	0.601	0.716	1.000	1.000	1.000	1.000	0.868
福 建	0.506	0.491	0.439	0.408	0.425	0.455	0.517	0.495	0.457	0.544	0.474
山 东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
广 东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
海 南	0.407	0.528	0.496	1.000	0.594	1.000	1.000	0.672	0.624	1.000	0.732
均 值	0.862	0.870	0.832	0.867	0.826	0.886	0.924	0.898	0.899	0.936	0.880

式中, I_i 为局部 Moran's I 指数值。 I_i 为正值表示成正相关,高观测值和低观测值分别在空间上集聚; I_i 为负值表示要素具有包含不同值的邻近要素,该要素是异常值; I_i 接近于 0,样本在空间上呈现随机分布,空间上均匀发展,不存在空间自相关性。

1.2 数据来源

指标选取时要考虑与工业水资源投入、产出具有一定相关性,并且考虑水资源在工业生产过程中所产生的经济效益和生态效益。工业生产过程中离不开水的参与,资产的投入量是除自然资源外必须要考虑的因素,人力资源是工业生产中最基本的生产要素,因此在投入指标方面,选取工业用水量、工业从业人员和工业固定资产投资 3 个指标。在产出指标方面,选取工业总产值和工业废水中 COD 和 NH₄⁺-N 排放总量作为指标。选取 2005—2014 年,我国 30 个省市(不包括台湾、香港、澳门、西藏)的相关数据进行分析,数据来源于 2006—2015 年的《中国统计年鉴》和《中国工业经济统计年鉴》,具体指标见表 1。

2 结果与分析

2.1 工业用水效率测度

运用 DEA-PRO 8.0 软件,选取 SBM-Undesirable 模型对我国 2005—2014 年的工业用水效率进行了测算。在测算过程中,对我国 30 个省区按照东部、中部、西部地区进行了划分,划分标准是参照国家统计局数据的分类标准,结果见表 2~4。

表 3 中部地区 2005—2014 年工业用水效率值

省市	工业用水效率										
	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	均值
山 西	0.434	0.474	0.382	0.407	0.363	0.507	0.709	0.533	0.721	0.757	0.528
吉 林	0.387	0.450	0.313	0.318	0.335	0.399	0.570	0.574	0.570	0.456	0.437
黑龙江	1.000	0.466	0.496	0.417	0.383	0.439	0.439	0.577	0.538	0.614	0.532
安 徽	0.380	0.438	0.305	0.407	0.358	0.426	0.469	0.544	0.569	0.521	0.442
江 西	0.379	0.455	0.340	0.323	0.423	0.384	0.459	0.494	0.495	0.346	0.410
河 南	0.712	0.585	0.612	0.692	0.633	0.712	0.807	0.731	0.695	0.539	0.672
湖 北	0.359	0.448	0.340	0.386	0.450	0.496	0.516	0.510	0.514	0.496	0.451
湖 南	0.425	0.477	0.405	0.427	0.545	0.556	0.556	0.575	0.587	1.000	0.555
均 值	0.509	0.474	0.399	0.422	0.456	0.490	0.566	0.567	0.586	0.591	0.506

表 4 西部地区 2005—2014 年工业用水效率值

省市	工业用水效率										
	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	均值
内蒙古	0.427	0.557	0.418	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.840
广 西	0.386	0.431	0.347	0.366	0.391	0.371	0.423	0.583	0.544	0.500	0.434
重 庆	0.362	0.409	0.314	0.318	0.344	0.404	0.425	0.397	0.428	0.462	0.386
四 川	0.370	0.443	0.373	0.386	0.432	0.486	0.523	0.384	0.458	0.573	0.443
贵 州	0.324	0.376	0.306	0.347	0.348	0.360	0.370	0.390	0.392	0.450	0.366
云 南	0.458	0.496	0.387	0.335	0.336	0.373	0.394	0.331	0.364	0.362	0.383
陕 西	0.455	0.481	0.441	0.427	0.426	0.520	0.537	1.000	1.000	0.630	0.592
甘 肃	0.319	0.396	0.337	0.331	0.337	0.385	0.407	0.433	0.381	0.353	0.368
青 海	0.378	0.311	0.415	0.406	0.363	0.613	1.000	0.760	1.000	0.700	0.594
宁 夏	0.291	0.413	0.338	0.362	0.375	0.297	0.302	0.488	0.445	0.446	0.376
新 疆	0.442	0.339	0.452	0.307	0.358	0.453	0.388	0.295	0.322	0.391	0.375
均 值	0.383	0.423	0.375	0.417	0.428	0.478	0.524	0.551	0.576	0.537	0.470
全国均值	0.592	0.600	0.549	0.583	0.585	0.631	0.682	0.683	0.697	0.698	0.630

由表 2~4 可见,我国工业用水效率平均值从 2007 年开始呈现逐年上升的趋势,从 2007 年的 0.549 提高至 2014 年的 0.698,说明近 10 年来,随着我国经济水平的不断发展,科技水平不断提高,产业结构调整更加合理,人们节水意识的逐渐增强,使我国工业用水效率总体朝着水资源的可持续利用方向发展。不过,各省市之间的工业用水效率差别较大,30 个省市中有 7 个地区的工业用水效率为 1,分别是北京、天津、河北、上海、江苏、山东和广东,这说明相对于其他地区,这 7 个省市的投入产出配置达到较佳状态;工业用水效率最低的 3 个省为贵州、新疆和宁夏,效率值分别为 0.366、0.375 和 0.376,有较大提高空间。总体上看,我国 30 个省市中,工业用水效率值高于全国多年平均值的有 11 个,分别是北京、天津、河北、内蒙古、上海、江苏、浙江、山东、河南、广东和海南;有 19 个省市工业用水效率比多年平均值低,整体用水效率有较大提高空间,这一研究结果与李静等^[10]的研究结果相吻合。

东、中、西部 10 年来的工业用水效率变化趋势见图 1,可见东、中、西部地区的工业水资源利用效率值差异明显,反映出工业用水效率与区域经济发展水平存在着密切联系,按区域集聚效应明显,具有空间特征。究其原因可能是相对中、西部地区而言,

东部地区对外开放度高,经济较为发达,地方投资能力强,对供水和污染治理等基础设施的投资力度较大,有利于工业用水效率的提高。而且,产业聚集在一定程度上能够形成较高的就业乘数,创造和提供巨大的就业机会,加速人口的集聚,从而提高工业用水效率。

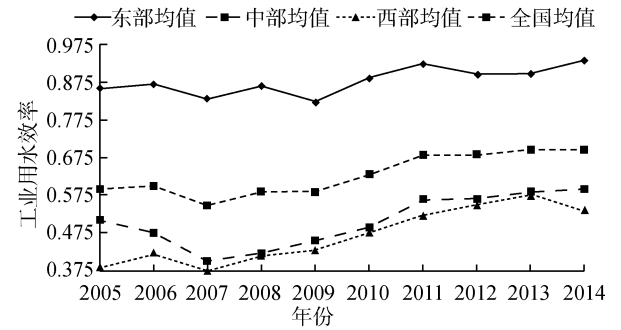


图 1 东、中、西部工业用水效率变化趋势

根据工业用水效率的 DEA 有效性分析可以计算出使效率值无效的决策单元转变为有效决策单元的剩余变量的取值,即达到现有产出下,最优值与实际投入的差值,该差值与当前投入指标量之比为投入冗余率。以 2014 年为例,对全国工业用水效率非 DEA 有效的省市在有效生产前沿面上进行投影和调整,可以达到 DEA 有效,得出我国各省市工业用水效率的投入、产出的优化结果,见表 5。

表 5 2014 年工业用水效率投入、产出的优化结果 %				
省市	工业用水量	工业固定资产投资	工业从业人员	工业废水中 COD 和 NH ₄ ⁺ -N 总排放量
山西	-74.11	-46.10	-44.46	-61.12
辽宁	-58.65	-15.51	0	-27.48
吉林	-0.86	-39.73	0	-68.24
黑龙江	-83.49	-51.18	-24.98	-89.23
安徽	-87.99	-27.59	0	-36.00
福建	-68.26	-19.57	-18.05	-37.95
江西	-91.27	-56.47	-11.70	-71.09
河南	-72.08	-25.86	-18.42	-26.98
湖北	-88.31	-29.49	0	-45.06
广西	-84.46	-23.43	0	-55.99
重庆	-89.21	-27.40	-4.68	-57.63
四川	-79.93	0	-6.12	-48.85
贵州	-87.83	-9.62	-22.81	-66.45
云南	-85.39	-34.48	-30.34	-75.69
陕西	-52.43	-17.81	-1.22	-42.03
甘肃	-78.38	-48.73	-26.49	-76.88
青海	-15.72	-32.50	0	-39.92
宁夏	-57.25	-45.38	-12.65	-76.33
新疆	-74.11	-58.65	-0.86	-83.49

注：表中不包含工业水资源利用效率达到有效的 11 个省（市），期望产出的松弛变量为零，故其松弛变量冗余率未列出。

各省市投入指标和工业废水中的污染物排放量均存在一定程度的冗余，说明导致工业用水效率无效的原因主要表现在资源投入和非期望产出两方面，资源消耗过多和污染物排放过量是各省市工业用水效率无效的主要原因。不同省市导致工业用水效率无效的因素有所不同，在工业用水量方面，江西、重庆和湖北投入冗余率最高，分别为 91.27%、89.21% 和 88.31%，具有较大的改善空间，应注意水资源的节约。在工业固定资产投资方面，有较大改善空间的是新疆、江西和黑龙江，应注意提高资金利用和管理效率。在工业从业人员方面，冗余率较高的省份主要集中在山西、云南和甘肃，说明存在劳动力投入过剩现象，在优化劳动力结构方面有较大改善潜力。同时，黑龙江、新疆和甘肃在工业废水污染物排放过量方面情况最为严重，应采取措施加以改善，在发展工业经济的同时应更多地考虑环境效应。

2.2 省际工业用水效率的空间关联特征

2.2.1 全局空间自相关分析

表 6 为各省市工业用水效率全局空间自相关分析结果，可见 2005—2014 年各省市的 Moran’s I 指数值均介于 0 到 1 之间，工业用水效率空间分布表现出正相关性，除 2014 年是通过了 5% 水平下的显著性检验外，另外 9 年均通过了 1% 水平下的显著性检验，表明我国各省区的工业用水效率在空间上的分布不是随机的，存在集聚效应。另外，2010—2014 年的 *I* 值较 2005—2010 年相比有波动下降趋势，说明地区间的工业用水效率空间相关性变小，空间分

布的集聚效应有减弱趋势。

表 6 各省市工业用水效率全局空间自相关分析结果

年份	<i>I</i>	<i>Z(I)</i>	<i>P</i>
2005	0.191	4.89	0
2006	0.142	3.86	0.0001
2007	0.129	3.60	0.0003
2008	0.099	2.91	0.0036
2009	0.013	3.01	0.0026
2010	0.089	2.67	0.0075
2011	0.073	2.32	0.0204
2012	0.099	2.88	0.0039
2013	0.104	3.00	0.0026
2014	0.076	2.39	0.0170

2.2.2 局部空间自相关分析

表 7 为利用局部空间自相关分析方法计算得到的 2005—2014 年我国各省市的集聚类型分布情况，根据局部 Moran’s I 指数值将 30 个省区划分为 4 种类型，分别是高高集聚区（H-H）、高低集聚区（H-L）、低高集聚区（L-H）和低低集聚区（L-L），可以更加直观地体现我国工业用水效率的空间关联特征。

表 7 2005—2014 年各省市集聚类型分布情况

年份	H-H	H-L	L-H	L-L
2005	北京、天津、河北、山东、江苏、浙江	广东	—	四川、贵州
2006	北京、天津、河北、山东	广东	—	—
2007	北京、天津、河北、山东	广东	—	—
2008	北京、天津、河北、山东	—	—	—
2009	北京、天津、河北、山东	广东	—	—
2010	北京、天津、河北、山东	海南	—	云南
2011	北京、天津、河北、山东	青海	—	云南、贵州
2012	北京、天津、河北、山东	广东	—	四川、云南、贵州
2013	北京、天津、河北、山东、内蒙古	青海、广东	—	云南、贵州
2014	北京、天津、河北、山东	—	吉林	云南

由表 7 可见，高高集聚区（H-H）主要集中在东部沿海地区，北京、天津、河北、山东 4 个省市每年集聚现象都很显著，江苏和浙江在 2005 年表现出高高集聚，内蒙古在 2013 年的工业用水效率也较高。这些地区经济发展水平多处于领先地位，相邻工业用水效率值较高的省份加强投入指标间的优良配置带动了周围省份的用水效率提高。10 年间这些省份的用水效率值均表现出较高水平，说明这些省份为了应对人均水资源占有量较低的现状，采取了一定改善措施。

高低集聚区（H-L）在广东、青海和海南之间变化，这些地区工业用水效率属于较高水平，但还具有一定的增长空间。但是，其较高的工业用水效率并没有带动周围地区的效率增长，而是呈现一定的极化效应。同时还受到邻近区域工业用水效率值较低省区的约束，这对这些地区工业用水效率的提高起

到了一定程度上的抑制作用。

高低集聚区(L-H)数量比较少,只有吉林省在2014年表现显著,该地区邻接于工业水用水效率相对较高的省市,本身的工业用水效率却增长较慢,受到工业用水效率增长较快区域的影响较小。

低低集聚区(L-L)集中在四川、云南和贵州之间,经济落后造成了这些地区的企业对水资源的利用形式和利用效率上的不合理。但是,随着国家对水资源的重视不断加强,该领域相应法律法规的不断出台和完善,以及科技技术的改进和人们普遍环保、节水意识的增强,工业用水效率将会得到很大提升。

3 结 论

- a. 2005—2014年我国工业用水效率平均值从2007年开始呈现逐年上升的趋势,说明我国的工业水资源利用总体朝着可持续利用方向发展。不同省市之间的工业用水效率差距较大,总体呈现出东部大于中部大于西部的趋势。导致我国工业用水效率无效的主要原因是资源的消耗和污染物过量排放。
- b. 通过ESDA方法对我国各省市工业用水效率的空间关联特征进行分析,结果表明,各省市工业用水效率2005—2014年均呈现显著性正相关,存在集聚效应。高高集聚区主要分布在东部地区,低低集聚区主要分布在西部地区,可以利用东部较为领先的发展优势带动中、西部工业用水效率较低的地区,提高工业用水效率,推进我国各区域之间水资源的协调可持续发展。

参考文献:

[1] 国务院. 国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见 [EB/OL]. [2012-02-15] <http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content.htm>.

[2] 王春燕,仇亚琴,赵晓慎,等. 基于DEA模型的陕西省工业用水效率分析[J]. 农业与技术,2014,34(3):236-237. (WANG Chunyan, QIU Yaqin, ZHAO Xiaoshen, et al. Analysis of Shaanxi Province's industrial water efficiency based on DEA model [J]. Agriculture and Technology, 2014, 34(3): 236-237. (in Chinese))

[3] 买亚宗,孙福丽,石磊,等. 基于DEA的中国工业水资源利用效率评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(11):42-47. (MAI Yazong, SUN Fuli, SHI Lei. et al. Evaluation of China industrial water efficiency based on DEA model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(11): 42-47. (in Chinese))

[4] 孙爱军,董增川,王德智. 基于时序的工业用水效率测算与耗水量预测[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(4):547-553. (SUN Aijun, DONG Zengchuan, WANG Dezhi. Prediction of technical efficiency and water

consumption of industrial water in China based on time series [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(4): 547-553. (in Chinese))

[5] 贾绍凤,张士锋,杨红,等. 工业用水与经济发展的关系:用水库兹涅茨曲线[J]. 自然资源学报,2004,19(4):279-284. (JIA Shaofeng, ZHANG Shifeng, YANG Hong, et al. Relation of industrial water use and economic development: water use Kuznets Curve [J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(4): 279-284. (in Chinese))

[6] 朱启荣. 中国工业用水效率与节水潜力实证研究[J]. 工业技术经济,2007,26(9):48-51. (ZHU Qirong. Study on the industrial water use efficiency and water saving potential in China [J]. The Industrial Technology & Economy, 2007, 26(9): 48-51. (in Chinese))

[7] 汪恕诚. 水权和水市场:谈实现水资源优化配置的经济手段[J]. 水电能源科学,2001(1):6-9. (WANG Shucheng. Water right and water market-economic measures to realize optimal configuration of water resources [J]. Hydroelectric Energy, 2001(1): 6-9. (in Chinese))

[8] 贾绍凤,张士锋. 北京市水价上升的工业用水效应分析[J]. 水利学报,2003,34(4):108-113. (JIA Shaofeng, ZHANG Shifeng. Response of industrial water use to water price rising in Beijing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(4): 108-113. (in Chinese))

[9] 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]. 理论导刊,2010(12):55-58. (XIE Fujun, ZHANG Hong, ZHENG Mingxi. Study on industrial water resource total factor productivity efficiency in Shandong Province based on DEA model [J]. Theory Journal, 2010(12): 55-58. (in Chinese))

[10] 李静,马潇臻. 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 Jing, MA Xiaocan. The utilization efficiency of industrial water under the dual constraints of resource and environment: an empirical study based on SBM-undesirable and meta-frontier model [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 920-933. (in Chinese))

[11] 孙才志,赵良仕,邹玮. 中国省际水资源全局环境技术效率测度及其空间效应研究[J]. 自然资源学报,2014,29(4):553-563. (SUN Caizhi, ZHAO Liangshi, ZOU Wei. The interprovincial water resources global environmental technology efficiency measurement in China and its spatial effect [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(4): 553-563. (in Chinese))

[12] 孙才志,陈栓,赵良仕. 基于ESDA的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. 自然资源学报,2013,28(4):571-582. (SUN Caizhi, CHEN Shuan, ZHAO Liangshi. Spatial correlation pattern analysis of water footprint intensity based on ESDA model at provincial scale in China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(4): 571-582. (in Chinese))

(收稿日期:2016-10-21 编辑:王 芳)