

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.02.040

# 基于 DEA 模型的火核电行业用水特征分析

杨虹<sup>1</sup>, 张海涛<sup>1</sup>, 谢丛丛<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 华北水利水电大学, 郑州 450011)

**摘要:** 火核电行业是工业行业的第一用水大户, 掌握分析其用水特征是提高工业用水效率的前提, 对建设节水型社会、落实最严格水资源管理制度具有非常重要的意义。数据包络分析法( DEA 模型) 是一种非参数前沿效率分析方法, 结合我国火核电行业历年用水趋势和区域分布特征, 基于 DEA 模型对火核电工业的用水特征进行了分析。结果表明, 1999 年- 2011 年火核电行业的装机规模和用水量均呈显著增长趋势, 但近年来用水量逐渐趋于稳定; 由于直流式火核电的比例逐渐降低, 火核电行业的整体用水效率逐步提高; 区域分布上, 火核电行业的用水效率基本呈东南沿海向西北内陆逐渐升高的分布特征, 与我国水资源分布特点具有明显的对应关系。

**关键词:** 工业用水; 火核电行业; 用水效率; 用水特征; 用水结构; 装机容量; 数据包络分析法

**中图分类号:** TV1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672 1683( 2015) 02- 0374- 04

## Water use characteristics of thermal and nuclear power industry based on DEA model

YANG Hong<sup>1</sup>, ZHANG Hai tao<sup>1</sup>, XIE Cong cong<sup>2</sup>

( 1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** Thermal and nuclear power industry has the largest water use in the industrial sector. Knowledge of the water use characteristics of thermal and nuclear power industry is the foundation of improving water use efficiency, which is beneficial for the construction of water saving society and the strictest water resources management system. Data envelopment analysis( DEA) is a non parametric frontier method, and it is used to analyze the water use characteristics of thermal and nuclear power industry based on the water use trend and regional distribution. The results show that ( 1) the installed capacity scale and water use of thermal and nuclear power industry are increasing from 1999 to 2011; however, water use is steady while the installed capacity is still increasing in recent years; ( 2) water use efficiency of thermal and nuclear power industry is improved because of the increasing of once through cooling power plants; and ( 3) characteristics of water use efficiency increases gradually from the southeast coastal area to the northwest inland area, which is similar to the distribution characteristics of water resources in China.

**Key words:** industrial water use; thermal and nuclear power industry; water use efficiency; water use characteristics; water use structure; installed capacity; data envelopment analysis

## 1 研究背景

火核电行业是指利用煤、石油、天然气作为燃料或利用原子核内部蕴藏的能量生产电能的行业。该行业用水量占我国工业总用水比重的 1/3 左右, 已成为工业行业的第一用水大户<sup>[1-2]</sup>。从我国的能源发展现状和规划来看, 未来几十年内我国的电力资源仍将以火核电为主, 而火核电行业是我国用水量较大和耗水量较高的行业之一<sup>[3]</sup>。因此, 着力提高火

核电行业的用水效率, 合理规划火核电行业的空间布局, 使之与我国水资源的分布特点相适应, 对于实行最严格的水资源管理制度具有非常重要的现实意义。

目前, 对火核电用水效率的研究主要通过建立与经济指标的联系, 采用万元工业增加值用水量、单位装机容量用水量、单位发电用水量、重复利用率等指标进行评价。姜蓓蕾<sup>[5]</sup>等分析了全国火力发电厂的单位发电量耗水状况和用水占比情况, 并与发达国家对比, 评估了我国的火电行业用

收稿日期: 2014-05-21    修回日期: 2015-02-05    网络出版时间: 2014-03-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150320.1632.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“基于二层结构的水量水质联合模拟调控模型研究”(51279210)

作者简介: 杨虹(1961-), 女, 重庆人, 高级工程师, 主要从事水利水电技术方面的研究。E-mail: yangh@iwhr.com

通讯作者: 张海涛(1981-), 男, 河南新乡人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: zhanght@iwhr.com

水水平;张丽艳<sup>[6]</sup>等采用单位发电取水量和单位发电废水排放量共同分析历年的火核电用水效率。在评价方法方面,沈旭<sup>[7]</sup>等通过分析水在火力发电厂生产环节中所起到的功能和作用,针对不同分类的用水,依据其使用原理计算理论值,将理论值与实际生产值相比较,从而反映出生产中的用水效率水平的方法;朱启荣<sup>[8]</sup>采用洛伦兹曲线和基尼系数分析了我国工业用水的资源配置效率情况;魏科技<sup>[9]</sup>等采用模糊评价法对珠江流域的典型火核电企业的用水效率进行了评估;Kamal Alsharif<sup>[10]</sup>等利用 DEA 方法对加沙地带和西方发达国家城市供水和用水效率进行了评价和比较。

考虑到数据包络分析法( DEA 模型)具有避免建立评价指标体系、回避确定各方权重、增加评价客观性等优点,本文结合火核电行业的分布特征和结构特点,尝试应用 DEA 模型对我国各地区火核电用水特征进行综合评价,以期更客观、合理的评价我国火核电用水现状。

## 2 火核电行业用水基本特征

### 2.1 火核电区域分布特征

据统计,至 2011 年底,我国有火核电厂 1 198 座,总装机容量为 78 091 万 kW(占全国发电装机容量的 73.5%),年发电量为 39 875 亿 kW·h(占全国发电总量的 84.3%)<sup>[11]</sup>。从区域分布来看,火核电行业主要分布在江苏、广东、内蒙、山东、浙江、山西、河北、河南等省区。从火核电冷却方式来看,直流式冷却的火核电装机容量占 23%,主要分布在上海、江苏、浙江、安徽、湖南、广东、广西等水资源较丰富、经济较发达的省区;循环式冷却的火核电装机容量占 77%。从工业用水结构来看,2011 年全国火核电用水量占工业用水量的 35%,其中江苏和上海的比例均超过了 70%,安徽超过了 50%,吉林、湖北、湖南、广东、广西比例也相对较高(图 1)。

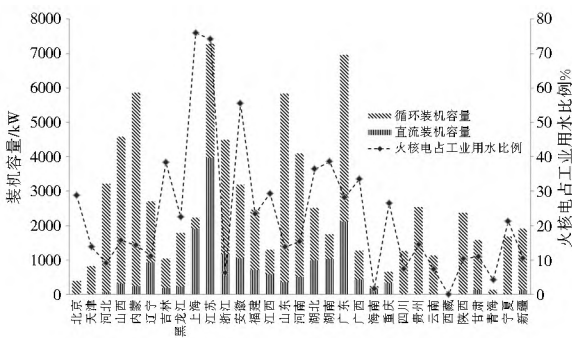


图 1 2011 年火核电行业区域分布特征

Fig. 1 Regional distribution of thermal and nuclear power industry in 2011

### 2.2 用水量历年趋势

根据 1999 年- 2011 年数据(图 2),我国的火核电行业总装机容量和用水量总体呈增长趋势,但装机容量的增长速度更快,年均增长率在 10% 左右;用水量的增长速度相对较缓,年均增长率在 3% 左右。由于我国从 1999 年开始,经济发展的增长速度较快,对用电量的需求增大,造成火核电装机容量的快速增长;而火核电用水量在 2007 年以前是快速增长时期,增长率达到 6%,在 2007 年以后许多直流冷却技术被淘汰或限制使用,因此年用水量趋于平稳,总体维持在

500 亿 m<sup>3</sup>, 但仍在工业行业中占有较大的用水比重。

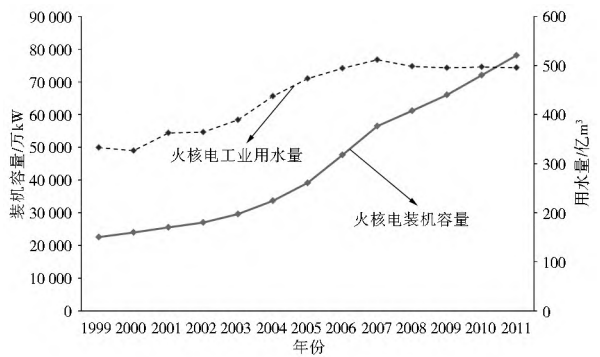


图 2 1999 年- 2011 年火核电行业增长趋势

Fig. 2 The growth trend of thermal and nuclear power industry from 1999 to 2011

## 3 基于 DEA 模型的用水效率评价

### 3.1 DEA 模型

数据包络分析法<sup>[12]</sup>(Data Envelopment Analysis, DEA)是 1978 年由 Charnes、Cooper 和 Rhodes 依据 Farrell<sup>[13]</sup>提出的技术效率概念所发展而来的,简称为 DEA 模型。它以 Pa-rato 优化这一经济学概念为基础,以规划理论为工具,使用多种投入和多种产出变量,构建出一条非参数前沿(non-parametric frontier)的包络沿线,有效点位于生产前沿<sup>[14]</sup>上方,无效点处于前沿下方,从而对决策单元进行经济效率定量化评价<sup>[15]</sup>。DEA 模型主要有两类:一类是不变规模报酬的 DEA 模型(CRS),主要用于测算含规模效率的综合技术效率(STE);另一类是可变规模报酬的 DEA 模型(VRS 模型),可以排除规模效率的影响,测算技术效率(TE)。

假定有  $t$  个被评价的同类部分,称为决策单元 DMU,每一个决策单元均有  $m$  个投入变量和  $n$  个产出变量,用  $X_{ij}$  表示第  $j$  个 DMU 对第  $i$  种输入的投入量( $X_{ij} > 0; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ),  $Y_{rj}$  表示第  $j$  个 DMU 对第  $r$  种输出的产出量( $Y_{rj} > 0; r = 1, 2, \dots, s$ ),  $V_i$  表示第  $i$  种输入的一种度量,  $U_r$  表示第  $r$  中输出的一种度量。  $X_{ij}$ 、 $Y_{rj}$  为已知数据,可以根据历史资料得到;  $V_i$ 、 $U_r$  为变量。

每一个 DMU 都有相应的效率评价指数:

$$h_j = \frac{U^T Y_j}{V^T X_j} = \frac{\sum_{r=1}^s U_r Y_{rj}}{\sum_{i=1}^m V_i X_{ij}}, \quad j = 1, 2, \dots \quad (1)$$

可以适当地选取权重和,使其满足  $h_j \leq 1$ 。对第  $j_0$  个决策单元进行效率评价时,  $h_{j_0}$  越大,表明能够用相对较少的输入而取得相对较多的输出。

### 3.2 模型计算结果

根据 DEA 模型原理,本文计算案例中投入变量为火核电行业用水量和直流式火核电占用水量的比率,产出变量为装机容量和年发电量。利用 Desp2.1 软件分析得出,在可变规模报酬条件下,2011 年我国 30 个省区(不包括港、澳、台、西藏)火核电厂的用水综合技术效率平均值为 0.424,纯技术效率均值为 0.531,规模效率均值为 0.875(表 1),说明我国各省区火核电厂用水效率较低,且差异较大。从表 1 还可以看出如下结果。

表 1 2011 年我国 30 个省区市火核电行业用水技术效率、纯技术效率及规模效率值

Tab.1 Industrial water use technical efficiency, pure technical efficiency, and scale efficiency values of the thermal and nuclear power industry in 30 provinces and municipalities of China in 2011

地区	TE	PTE	SE	规模报酬
山西	1	1	1	-
海南	1	1	1	-
陕西	0.957	0.971	0.985	irs
新疆	0.932	0.938	0.993	irs
宁夏	0.846	0.862	0.982	irs
浙江	0.839	1	0.839	drs
河北	0.835	0.836	0.998	irs
北京	0.744	0.807	0.921	irs
青海	0.661	1	0.661	irs
天津	0.629	0.668	0.942	irs
河南	0.619	0.629	0.984	drs
山东	0.607	1	0.607	drs
辽宁	0.563	0.567	0.992	irs
甘肃	0.48	0.496	0.967	irs
贵州	0.442	0.449	0.985	irs
内蒙古	0.433	0.668	0.648	drs
云南	0.329	0.34	0.968	irs
四川	0.252	0.262	0.96	irs
广东	0.099	1	0.099	drs
福建	0.069	0.07	0.989	irs
黑龙江	0.068	0.071	0.966	irs
吉林	0.052	0.056	0.934	irs
安徽	0.051	0.052	0.996	-
江西	0.047	0.048	0.977	irs
重庆	0.032	0.035	0.932	irs
广西	0.029	0.031	0.944	irs
江苏	0.027	1	0.027	drs
湖北	0.025	0.026	0.979	irs
湖南	0.024	0.024	0.982	-
上海	0.016	0.016	0.982	-
平均值	0.424	0.531	0.875	

注: TE 表示综合技术效率, PTE 表示纯技术效率, SE 为规模效率。TE = PTE · SE, irs 为规模报酬递增, drs 为规模报酬递减, - 为规模报酬不变。

(1) 以可变规模报酬效率下, 7 个省区(海南、山西、浙江、青海、山东、广东、江苏) 三项效率值均为 1, 处于技术效率前沿面, 其他各省则分别在纯技术效率和规模效率方面存在不同程度的可提高空间; 广东和江苏的规模效率较低, 其他省市则普遍较高。

(2) 以不变规模报酬下的技术效率进行排序, 2011 年处在前沿面即效率为 1 的省市是海南和山西, 距离前沿面较近的是陕西、新疆、宁夏、浙江和河北, 这是因为以上省市的火电厂多采用循环式取水有直接关系, 单位年发电用水量较少。北京、青海、天津、河南和山东的效率在 0.6~0.8 之间, 辽宁、甘肃、贵州、内蒙古、云南、四川在 0.1~0.6 之间, 其余 12 个省市的效率低于 0.1, 最小是上海, 其效率值仅为 0.016。

基于规模报酬不变特征的决策单元评估, 计算出来的值为综合技术效率值, 并不将纯技术效率和规模效率分开, 经检验, 与火核电行业用水效率的空间分布规律存在较大差异, 因此将火核电行业用水量和直流式火核电占用水量的比率作为投入变量, 并不适宜做规模效率的评价。而不变规模报酬的效率评价结果比较符合火核电行业用水效率的空间分布规律,

相对来说更具合理性。

### 3.3 年际变化和空间分布特点分析

采用不变规模报酬的区域用水效率评价方法, 对比分析 2011 年、2012 两年的火核电行业用水情况, 结果见表 2。可以看出 2012 年的用水效率平均值(0.386) 比 2011 年(0.424) 略有降低。而各省区用水效率在 2011 年和 2012 年的空间分布特征基本相同, 总体上东部省区的火电厂年发电量较西部地区大, 北方地区用水效率高于南方。评价结果与我国的水资源地区分布也比较吻合: 北方地区缺水, 近年来新建和改建的火电厂大多采用空冷式, 少部分采用循环式机组, 用水量显著减少; 南方地区水资源相对充裕, 多采用直流或循环冷却方式, 用水效率较低; 西北、华北等缺水地区, 由于近年新投产机组大多采用空冷机组, 因而年取水增加较慢, 用水效率逐渐提高。

表 2 基于 DEA 模型的火核电行业区域用水相对效率结果(不变规模报酬)

Tab.2 The relative efficiency of regional water use of the thermal and nuclear power industry based on DEA (Constant returns to scale)

排序	2011 年	2012 年	排序	2011 年	2012 年
1	山西	山西	16	内蒙古	河南
2	海南	海南	17	云南	北京
3	陕西	宁夏	18	四川	四川
4	新疆	陕西	19	广东	广东
5	宁夏	内蒙古	20	福建	黑龙江
6	浙江	河北	21	黑龙江	福建
7	河北	天津	22	吉林	吉林
8	北京	青海	23	安徽	江西
9	青海	山东	24	江西	安徽
10	天津	新疆	25	重庆	广西
11	河南	浙江	26	广西	湖北
12	山东	辽宁	27	江苏	重庆
13	辽宁	甘肃	28	湖北	江苏
14	甘肃	云南	29	湖南	湖南
15	贵州	贵州	30	上海	上海

## 4 结论

(1) 随着我国电力需求量的增加, 未来火核电行业的装机容量会有一定程度的增加, 但火核电行业的用水量则会趋于稳定。主要是由于直流式火核电逐渐被淘汰, 新建电厂大多采用循环冷却的用水方式, 提高了水的重复利用率; 其次, 厂区内工艺用水改进, 提高了水的利用效率; 最后, 水力发电、新能源发电等行业的不断发展, 将一部分替代了火核电行业的用水量。

(2) 我国火核电行业用水量比重大的省区主要集中在华东、华中和华南等地区, 用水量较少的省区集中于西部和中部地区, 与全国水资源南多北少、东多西少的特点相适应。从直流式和循环式的结构来看, 长江中下游和珠江下游地区由于水量充足, 采用直流式冷却方式的省区较多, 而中部和西部地区主要采取循环式或其他冷却方式。

(3) 我国火核电行业的用水效率与产业规模、冷却方式

和节水水平有密切的关系。采用DEA模型分析可知,上海、湖南、江苏、湖北、广西、重庆等省区的火核电行业用水效率较低,山西、宁夏、新疆、陕西等西部省区用水效率较高,用水效率呈东南沿海向西北内陆逐渐升高的分布特征。

#### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[Z]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999-2012. (The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin[Z]. Beijing: China Water & Power Press, 1999-2012. (in Chinese))
- [2] 中国电力企业联合会. 火电行业节水现状、经验及存在问题[J]. 资源节约与环保, 2005(21): 5. (China Electric Council. Situation saving, experience and problems of thermal power industry[J]. Resources Economization & Environment, 2005(21): 5. (in Chinese))
- [3] 江自生, 韩买良. 火电机组水资源利用情况及对策[J]. 华电技术, 2008, 30(6): 1-5. (JIANG Zhi sheng, HAN Mai liang. Water resources utilization situation and countermeasures of thermal power unit[J]. Huadian Technology, 2008, 30(6): 1-5. (in Chinese))
- [4] 祁鲁梁, 高红. 浅谈发展工业节水技术提高用水效率[J]. 中国水利, 2005(13): 125-127. (QI Lu liang, GAO Hong. Discussions on developing industrial water-saving technologies for enhancing water efficiency[J]. China Water Resources, 2005(13): 125-127. (in Chinese))
- [5] 姜蓓蕾, 王丽丽. 我国火电行业用水效率及节水措施分析[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(3): 264-266. (JIANG Bei lei, WANG Li li. Water conservation Status and measurement for thermal industry in China[J]. Water Conservation Science and Technology and Economy, 2010, 16(3): 264-266. (in Chinese))
- [6] 张丽艳, 冯杰, 杨涛. 我国火电行业用水效率分析与节水对策[J]. 水电能源科学, 2012, 30(2): 190-192. (ZHANG Li yan, FENG Jie, YANG Tao. Water use efficiency in thermal power industry and countermeasures for water saving in China[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(2): 190-192. (in Chinese))
- [7] 沈旭, 王建华, 李海红, 等. 基于水功能的火力发电厂用水效率评价方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, 11(1): 53-58. (SHEN Xu, WANG Jiar hua, LI Hai hong, et al. Methodology of water-use efficiency assessment for thermal power plant based on the function of water[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013, 11(1): 53-58. (in Chinese))
- [8] 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 Qi rong. China's industrial water use efficiency and water saving potential empirical research[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2007, 26(9): 48-51. (in Chinese))
- [9] 魏科技, 姜海萍, 刘斌, 等. 珠江流域典型火力发电厂用水效率综合评价研究[J]. 人民珠江, 2013(5): 10-13. (WEI Ke ji, JIANG Hai ping, LIU Bin, et al. Typical thermal power plant water use efficiency comprehensive evaluation research of The Pearl River Basin, 2013(5): 10-13. (in Chinese))
- [10] Kamal Alsharif, Ehsan H. Feroz, Andrew Klemmer, et al. Governance of water supply systems in the Palestinian Territories: A data envelopment analysis approach to the management of water resources[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 87(1): 80-94.
- [11] 中国电力年鉴编辑委员会. 中国电力年鉴[Z]. 北京: 中国电力出版社, 2013. (China Electric Power Yearbook Editor Committee. China Electric Power Yearbook[Z]. Beijing: China Electric Power Press, 2013. (in Chinese))
- [12] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [13] Farrell M J. The Measurement of Productive Efficiency[J]. Journal of Royal Statistical Society, 1957(120): 253-281.
- [14] Coelli T J. A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program. CEPA Working Paper 96/8, Department of Econometrics, University of New England, Armidale NSW Australia.
- [15] Coelli T J, Rao D S P, Battese G E. An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis[M]. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1998.