

火力发电水足迹特点分析评价——以广州市为例

王雨欣¹, 何家祥¹, 汤舒¹, 苏春生², 房春艳²

1. 广州市南部水网流域事务中心, 广东 广州 511401

2. 广东丰泽源水务科技有限公司, 广东 广州 510603

DOI:10.61369/WCEST.2025070013

摘要：火力发电行业需要大量的水来保证生产安全性和可靠性。而我国水资源禀赋较为缺乏, 水资源地区分布不均, 污染问题日趋严重。火电生产引发的大规模取用水和水污染问题, 给当地水资源的可持续发展提出了巨大挑战。基于生命周期评价的思想, 本研究采用水足迹有关理论, 对我国广州地区主要火力发电厂生产中的蓝水、灰水足迹开展研究, 分析生产过程中水足迹对当地水资源的影响, 提出火力发电节水方向与举措。

关键词：水足迹; 蓝水; 灰水; 节水方向与举措

Analysis and Evaluation of Water Footprint Characteristics of Thermal Power Generation: A Case Study of Guangzhou City

Wang Yuxin¹, He Jiaxiang¹, Tang Shu¹, Su Chunsheng², Fang Chunyan²

1. Guangzhou Southern Water Network Basin Affairs Center, Guangzhou, Guangdong 511401

2. Guangdong Fengzeyuan Water Technology Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510603

Abstract : The thermal power generation industry requires a large amount of water to ensure production safety and reliability. However, China's water resources are relatively scarce, with uneven distribution of water resources in different regions and increasingly serious pollution problems. The large-scale water intake and pollution caused by thermal power production pose significant challenges to the sustainable development of local water resources. Based on the concept of life cycle assessment, this study adopts the theory of water footprint to investigate the blue and grey water footprints in the production of major thermal power plants in Guangzhou, China. The impact of water footprint on local water resources during the production process is analyzed, and water-saving directions and measures for thermal power generation are proposed.

Keywords : water footprint; blue water; grey water; directions and measures for water conservation

2002年Hoekstra等^[1]首次明确提出水足迹概念, 是分析某项活动或生产过程水资源占用的综合指标。N.DING等^[2]研究了我国主要化石燃料和发电方式的平均水足迹。目前, 已有的火电水足迹评价研究大多忽略占比更大的灰水足迹, 更多的关注电厂水耗和取水量。基于此, 本次尝试开展不同燃料类别火力发电的蓝水与灰水足迹核算分析, 探究各类别水足迹差异性, 与行业水足迹平均水平情况进行对比, 以提出火力发电的节水策略, 为水资源管理提供一些理论支持。

一、研究区概况及研究方法

(一) 研究区概况

广州市是国务院批复确定的中国重要的中心城市、全国先进制造业基地重要承载地。2023年, 广州市总用水量为60.93亿m³, 其中工业用水23.30亿m³, 工业用水中的火电用水18.36亿m³, 占全市总用水量的30.13%, 因此, 探究广州市工业用水特点特别是取用水量占比最大的火电行业和水资源之间的相互关系, 对提高区域水资源综合利用效率和促进区域可持续发展具有重要

意义。

(二) 研究方法

火力发电生产过程中的水足迹包含蓝水足迹和灰水足迹两部分, 各自核算公式如下:

1. 蓝水足迹

生产过程蓝水足迹核算公式如下:

WF_{b,proc}=WF_{b,evap}+WF_{b,product}+WF_{b,unreuse}
式 (1-1)

WF_{b,proc}——某一过程直接消耗的蓝水 (L/kWh) ;

基金项目名: 广州市水利科技项目 (GZSWKJ2023-004)

作者简介: 王雨欣 (1999.09—), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 从事取供节水工作。

WF_{b, evap}——蒸发水量 (L/kWh)；
WF_{b, product}——进入到产品的蓝水 (L/kWh)；
WF_{b, unreuse}——同一时段不能被同一流域重新利用的回水 (L/kWh)。

2. 灰水足迹

污染物 i 的无量纲影响因子 n_i 核算公式如下：

$$n_i = C_{max,i} / C_{nat,i} \quad (1-2)$$

$C_{max,i}$ ——污水中污染物 i 的浓度 (mg/L)；

$C_{nat,i}$ ——受纳水体中污染物 i 的本底浓度 (mg/L)。

生产过程灰水足迹核算公式如下：

$$WF_{g,i} = n_{max} \times m_{waste} \quad (1-3)$$

$WF_{g,i}$ ——单一活动的灰水足迹 (L/kWh)；

m_{waste} ——生产单位产品排放的污水总量 (L/kWh)；

n_{max} ——最大影响因子。

(三) 基础数据

本次研究选取广州市 3 个不同火力发电燃料代表性企业进行核算与分析，分别为：广州市珠江电厂（燃煤类）、广州珠江天然气发电有限公司（天然气类）、广州环投云山环保能源有限公司（生物质类），3 家企业 2021~2023 年发电过程基本数据如下表 1 所示：

表 1 各火电企业 2021~2023 年发电、用材、用水量情况一览表

| 火电厂 | 项目名称 | 2021年 | 2022年 | 2023年 |
|---------------------|--------------|------------|-----------|------------|
| 广州市珠江电厂（燃煤） | 发电量 (万千瓦时) | 643064.28 | 624889.68 | 615800.52 |
| | 燃煤量 (吨) | 2984102 | 2858712 | 2956622 |
| | 自取水量 (立方米) | 866796614 | 820683741 | 850135113 |
| | 总用水量 (立方米) | 2003545 | 1779351 | 2013209 |
| | 生产用水量 (立方米) | 1788259 | 1474219 | 1497300 |
| 广州珠江天然气发电有限公司（天然气） | 发电量 (亿千瓦时) | 28.84 | 24.2 | 27.01 |
| | 用气量 (万吨) | 38.46 | 32.76 | 36.59 |
| | 自取水量 (万立方米) | 28188.48 | 23673 | 25440.48 |
| | 总用水量 (立方米) | 3383861.46 | 3388498.8 | 3315400.54 |
| | 生产用水量 (立方米) | 3366182.46 | 3367141.8 | 3300699.54 |
| | 污水排水量 (立方米) | 44558 | 53511 | 44769 |
| 广州环投云山环保能源有限公司（生物质） | 发电量 (MW · h) | 515412 | 464704 | 460183 |
| | 垃圾燃烧量 (吨) | 1108127 | 931081 | 951755.2 |
| | 取水量 (立方米) | 1875926 | 1606202 | 1595043 |
| | 耗水量 (立方米) | 1857700 | 1588000 | 1576800 |
| | 污水排放量 (立方米) | 0 | 0 | 0 |

注：表中所有数据由企业提供，广州市珠江电厂污水总排放系数为 44.9%。

根据各火电企业提供的 2021~2023 年污水中各主要污染物浓度数据，考虑不同污染物自然本底浓度得到各火电企业 2021~2023 年最大影响因子 n_{max} ，根据上表各火电企业提供污水排放量或排放率与发电量数据，得到各火电企业单位发电量排放的污水总量。

二、水足迹核算和分析评价

(一) 水足迹核算

水足迹核算时，通常研究单位产品所消耗的水量，火力发电的水足迹用耗水体积与发电量之比衡量，单位为 m^3/GJ 或 L/kWh ，本次研究用 L/kWh 表示。

蓝水足迹 ($WF_{b, proc}$)：根据 3 家企业 2021~2023 年用水量、耗水量、发电量等得到 2021~2023 年单位发电蓝水足迹 $WF_{b, proc}$ ：广州市珠江电厂分别为 0.17L/kWh、0.16L/kWh、0.18L/kWh，平均值为 0.17L/kWh；广州珠江天然气发电有限公司分别为 0.02L/kWh、0.02L/kWh、0.02L/kWh，平均值为 0.02L/kWh；广州环投云山环保能源有限公司分别为 3.60L/kWh、3.42L/kWh、3.43L/kWh，平均值为 3.48L/kWh。

灰水足迹 ($WF_{g,i}$)：根据上表 1 中各火电企业基本数据，以及 2021~2023 年各火电企业各类主要污染物浓度，得到各火电企业 2021~2023 年最大影响因子 n_{max} 数值：广州市珠江电厂 1.12、0.76 及 2.18；广州珠江天然气发电有限公司 14.30、10.67、7.87；广州环投云山环保能源有限公司 0、0、0。同理，根据表 4.2-1 的发电量、污水排放量或排放系数数据，相应得到各火电企业 2021~2023 年单位发电量废水排放量 m_{waste} 分别为：广州市珠江电厂 0.14L/kWh、0.13L/kWh、0.15L/kWh；广州珠江天然气发电有限公司 0.15L/kWh、0.22L/kWh、0.17L/kWh；广州环投云山环保能源有限公司 0L/kWh、0L/kWh、0L/kWh。

根据 3 家企业 2021~2023 年最大影响因子、单位发电污水排放量的核算结果，结合公式 1-3，得到 2021~2023 年各火电企业单位发电灰水足迹 $WF_{g,i}$ 分别为：广州市珠江电厂 0.31L/kWh、0.10L/kWh、0.33L/kWh，平均值为 0.25L/kWh；广州珠江天然气发电有限公司 2.21L/kWh、2.36L/kWh、1.30L/kWh，平均值为 1.96L/kWh；广州环投云山环保能源有限公司 0L/kWh、0L/kWh、0L/kWh，平均值为 0L/kWh。

(二) 水足迹核算结果分析评价

通过计算分析，各火力发电企业不同年份蓝水、灰水足迹均与三年平均水平接近，可见各发电企业水足迹平均水平基本反映了其现状真实水平。全国火电厂水足迹平均水平研究成果^[3]：300~600MW 间火电厂平均蓝水足迹为 2.39L/kWh，发电直接灰水足迹为 1.07L/kWh。

根据 2.1 节水足迹核算结果，与全国同类型火力发电水足迹平均水平进行比较，如下表 2 所示：

表2 广州市3家火电企业(2021~2023年)平均水足迹
与全国平均水平对比情况表

| 企业名称 | 发电类型 | 蓝水足迹 L/kWh | | 灰水足迹 L/kWh | |
|----------------|------|------------|--------|------------|--------|
| | | 企业实际值 | 全国平均水平 | 企业实际值 | 全国平均水平 |
| 广州市珠江电厂 | 燃煤 | 0.17 | 2.39 | 0.25 | 1.07 |
| 广州珠江天然气发电有限公司 | 燃气 | 0.02 | 2.39 | 1.96 | 1.07 |
| 广州环投云山环保能源有限公司 | 生物质 | 3.48 | 2.39 | 0 | 1.07 |

注: 数值越小, 水足迹水平越优。

1.家企业水足迹结果分析

3家企业水足迹对比情况如图1所示, 可见以煤和燃气作为发电原料的广州市珠江电厂和广州珠江天然气发电有限公司的蓝水足迹值均较小, 以生物质作为发电原料的广州环投云山环保能源有限公司的蓝水足迹较大, 新鲜水消耗量较大, 总耗水量占总取水量的98.92%, 根据其生产工艺特点, 可以采取如下提高蓝水足迹水平的措施: 1.进一步提高生产设备严密性, 降低汽水损失; 2.回收凝结水和加热器疏水进行再利用; 3.对废水梯级回收利用, 提高水的重复利用率, 减少新鲜水的取用与消耗。

以煤和生物质作为发电原料的广州市珠江电厂和广州环投云山环保能源有限公司的灰水足迹值均较小, 以燃气作为发电原料的广州珠江天然气发电有限公司的灰水足迹较大, 根据其生产工艺特点, 可以采取如下提高灰水足迹水平的措施: 1.提高锅炉排污水和厂区生活废水处理设施的处理效果, 减少污染物的排放; 2.加大污废水的回用, 减少废水量的排放。总体达到减少单位发电废水排放量和各类主要污染物排放总量。

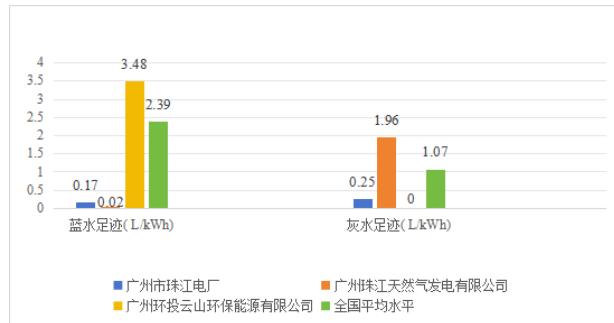


图1 火力发电水足迹水平对比示意图

2.与全国水平对比分析

由表2和图1可知, 燃煤、燃气发电企业的蓝水足迹均优于全国平均水平, 特别燃气类型远超全国平均水平, 生物质发电类型企业蓝水足迹低于全国平均水平, 表明生物质发电消耗新水量较大; 燃气企业灰水足迹低于全国平均水平, 表明燃气污水排放量及污染物综合排放量较大, 燃煤企业和生物质发电企业均领先于全国平均水平, 尤其生物质发电企业灰水足迹远领先于全国平均水平。广州市珠江电厂无论蓝水足迹还是灰水足迹都远优于全国平均水平, 原因在于其生产工艺先进及管理规范, 导致其水足迹总体水平较高。

三、结论与建议

(一) 结论

(1) 广州市不同燃料类型的火力发电企业, 水足迹差异较大。使用燃气作为发电原料发电企业的蓝水足迹远优于燃煤和生物质燃料的火力发电企业, 生物质类蓝水足迹最大。以生物质作为发电原料的火电企业由于污水零排放, 灰水足迹为0, 是所有类型中最优的, 燃煤次之, 燃气灰水足迹最大。

(2) 与全国火力发电企业水足迹平均水平相比, 不同燃料类型的火力发电企业呈现不同特点, 燃煤、燃气火力发电蓝水足迹均优于全国平均水平, 生物质发电企业未达到全国平均水平, 存在较大节水潜力; 燃煤、生物质火力发电灰水足迹均优于全国平均水平, 燃气火力发电灰水足迹未达到全国平均水平, 存在较大的节水潜力。

(二) 建议

(1) 加大节水技改, 通过技术创新和工艺改进, 降低火力发电过程中的水足迹。

(2) 建立完善的节水管理体系和监测机制, 定期对火电厂的用水情况进行评估, 及时发现和解决粗放用水问题。

(3) 进一步加强污废水深度处理与回用, 通过采用高效废水处理技术, 最大程度实现火电厂废水净化与再利用, 减少新鲜水的使用。

参考文献

- [1] HOEKSTRA A Y, CHUNG P Q. Virtual water trade a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [J]. *Value of Water Research Report Series*, 2002, 49(11):203~209.
 [2] DING N, LIU J R, YANG J X, et al. Water Footprints of Energy Sources in China: Exploring Options to Improve Water Efficiency[J]. *J Clean Prod*, 2018, 174: 1 021~1 031.
 [3] 姜小云. 基于生命周期评价的我国区域电力水足迹特征研究 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2019; 41~46.