

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.21.009

福州市东南区水厂运营阶段碳排放核算研究

魏忠庆^{1,2}, 吕会¹, 许兴中¹, 陈欣¹, 陈巧珍², 林靖伟¹,
郑怀远¹

(1. 福州市自来水有限公司, 福建 福州 350001; 2. 福州水务集团有限公司, 福建 福州 350001)

摘要: 福州市东南区水厂在“混凝+澄清+过滤+消毒”常规处理工艺的基础上,进水端增加了“预臭氧”工艺,出水端增加了“臭氧+生物活性炭”深度处理工艺,采用厢式隔膜压滤系统进行污泥脱水。通过排放因子法核算得到,该水厂2022年的碳排放强度均值为 $0.103\ 82\ \text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$,碳排放总量为 $3\ 426\ 635.85\ \text{kgCO}_2\text{-eq}$;按工艺段划分,二级泵房的碳排放占比最大,为58.22%;按主要碳排放活动划分,电力消耗引起的碳排放占比最大,为77.85%;深度处理工艺的应用降低了整个净水过程的碳排放强度,该水厂由消毒剂产生的碳排放强度约为采用常规处理工艺的东区水厂的52.94%;厢式隔膜压滤系统的碳排放强度为离心脱水系统的61.37%,节能减碳效果明显。

关键词: 水厂; 深度处理工艺; 碳排放核算; 碳排放强度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)21-0054-05

Accounting of Carbon Emission from Dongnan Waterworks of Fuzhou City during Operational Stage

WEI Zhong-qing^{1,2}, LÜ Hui¹, XU Xing-zhong¹, CHEN Xin¹, CHEN Qiao-zhen²,
LIN Jing-wei¹, ZHENG Huai-yuan¹

(1. Fuzhou Water Supply Co. Ltd., Fuzhou 350001, China; 2. Fuzhou Water Group Co. Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Based on the conventional treatment process of coagulation, clarification, filtration and disinfection in Dongnan Waterworks of Fuzhou City, the pre-ozonation was incorporated at the inlet, and the advanced treatment process of ozonation and biological activated carbon was appended at the outlet, while the sludge was dewatered through the chamber type diaphragm filter press system. Based on the emission factor method, the average carbon emission intensity of the waterworks in 2022 was $0.103\ 82\ \text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$, and the annual carbon emission was $3\ 426\ 635.85\ \text{kgCO}_2\text{-eq}$. Based on the process unit, the carbon emission of the secondary pumping house took up the largest proportion, amounting to 58.22%. Based on the major carbon emission activities, the proportion of carbon emission attributed to electricity consumption was the highest, reaching 77.85%. The application of the advanced treatment process was capable of reducing the carbon emission intensity throughout the entire water purification process, and the carbon emission intensity generated by disinfectants in this waterworks was approximately 52.94% of that of Dongqu Waterworks employing conventional treatment technology. The carbon emission intensity of the

通信作者: 魏忠庆 E-mail: 654606536@qq.com

chamber type diaphragm filter press system amounted to 61.37% of that of the centrifugal dehydration system, and the effect of energy conservation and carbon reduction was remarkable.

Key words: waterworks; advanced treatment process; accounting of carbon emission; carbon emission intensity

随着碳减排、碳中和的不断推进,关于城市水系统碳排放的研究也更加深入。供水系统是城市低碳发展不可缺少的重要组成部分,而城市水厂是城市供水系统的核心部分,是关系到城市生存和发展的重要基础设施^[1],因此有必要对其开展碳排放核算,全面了解水厂的碳排放关键路径与节点,以期日后水厂的碳减排研究提供数据参考。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究对象为福州市东南区水厂,该水厂位于闽江北岸,占地面积约 3.87 hm²,供水规模为 15×10⁴ m³/d,供水压力为 0.28~0.30 MPa。为进一步提升饮用水水质,东南区水厂在 2019 年实施工艺改造,

于 2021 年 7 月改造完成并投入运行,在“混凝+澄清+过滤+消毒”常规处理工艺的基础上,增加了“预臭氧”预处理工艺和“臭氧+生物活性炭”深度处理工艺,工艺流程如下:原水→预处理→高密度澄清池→翻板砂滤池→臭氧接触池→生物活性炭池→清水池→二级泵房→出水,详细情况见表 1。东南区水厂的原水取自水库,通过重力流输送至厂区,不消耗能源,因此取水过程不产生碳排放;排泥水采用厢式隔膜压滤脱水工艺进行处理,工艺流程为:排泥水→废水调节池→浓缩池→平衡池→厢式隔膜压滤→污泥外运。本研究涉及水厂各工艺段运行的电力消耗、药剂消耗、材料消耗及运输等产生的碳排放情况如图 1 所示。

表 1 福州市东南区水厂的工艺详细情况

Tab.1 Details of treatment process in Dongnan Waterworks of Fuzhou City

工艺段	主要建(构)筑物	主要设备
预处理	预臭氧接触池(3座)	格栅提升电机、反冲洗泵、尾气破坏器
高密度澄清池	高密度澄清池(3座)	前混合搅拌机、絮凝搅拌机、刮泥机、污泥螺杆泵(回泥用)、搅拌器等
翻板砂滤池	翻板砂滤池(9座)	鼓风机、空压机等
深度处理	臭氧接触池(3座)、生物活性炭池(8座)	臭氧发生器、空压机、反冲洗水泵
清水池	清水池(4座)	
二级泵房	二级泵房	离心泵(4台)
排泥水处理	废水调节池(2座)、浓缩池(2座)、平衡池(3座)、脱水车间	刮泥机、排污泵、中心浓缩机、搅拌机、污泥螺杆泵、多级离心泵、高压柱塞泵、加药螺杆泵、空压机、板框压滤机
生产辅助用电	办公场所、食堂	变配电设备、自动化设备等

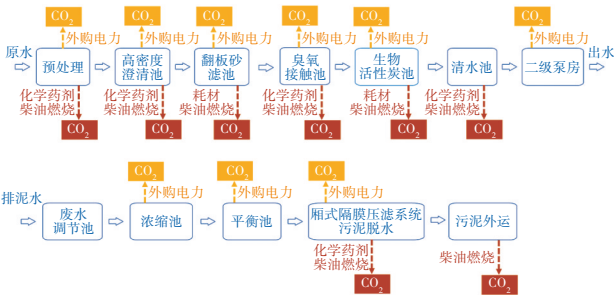


图 1 福州市东南区水厂处理工艺的碳排放识别示意

Fig.1 Diagram of carbon emission identification of treatment process in Dongnan Waterworks of Fuzhou City

1.2 碳排放核算边界及碳排放活动

对碳排放进行核算的过程中,首先需要考虑碳排放的核算边界,以保证核算结果的准确性,也可以有效避免重复计算或者漏算^[2]。福州市东南区水厂碳排放核算边界为自预处理至二级泵房供水及排泥水和生产辅助用电过程中产生的全部碳排放,时间边界以运营维护阶段为核算对象,主要碳排放活动包括:

- ① 电力消耗引起的碳排放:水泵运行及搅拌等水处理设备运行使用的电力能源造成的间接碳排放。

② 材料消耗引起的碳排放:水处理过程中使用絮凝剂聚合氯化铝(PAC)、助凝剂聚丙烯酰胺(PAM)、消毒剂次氯酸钠等产生的间接碳排放。

③ 运输过程引起的碳排放:自外部购入的材料、药剂等,以及污泥外运处置使用能源造成的间接碳排放。

1.3 碳排放核算方法

目前国际上常用的碳排放核算方法主要包括直接测量法和排放因子法,其中,排放因子法是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的一种碳排放估算方法,也是目前广泛应用的方法,排放因子可以采用IPCC报告中给出的缺省值(即依照全球平均水平给出的参考值)。此次碳排放核算采用排放因子法,用到的相关排放因子数据及来源如下:①电能,碳排放因子取 $0.570\ 3\ \text{tCO}_2\text{-eq}/(\text{MW}\cdot\text{h})$,来源于生态环境部发布的《关于做好2023—2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》中2022年度全国电网平均排放因子;②柴油燃料,碳排放因子取 $2.63\ \text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{L}$,来源于《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》中表2.1常见化石燃料特性参数缺省值;③PAC,碳排放因子取 $1.62\ \text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$,来源于《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022);④次氯酸钠,碳排放因子取 $0.92\ \text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$,来源于《城镇水务系统碳核算与碳减排路径技术指南》^[3];⑤PAM,碳排放因子取 $1.48\ \text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$,来源于《城镇水务系统碳核算与碳减排路径技术指南》^[3];⑥液氧,碳排放因子取 $0.28\ \text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$,根据生产厂家提供的单位电力消耗及碳排放因子进行计算取值;⑦石英砂,碳排放因子取 $0.002\ 5\ \text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$,根据生产厂家提供的单位电力消耗及碳排放因子进行计算取值;⑧颗粒活性炭,碳排放因子取 $0.053\ \text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{kg}$,根据生产厂家提供的单位电力消耗及碳排放因子进行计算取值。

1.4 碳排放强度核算

碳排放强度,即核算主体生产单位产品所产生的碳排放总量^[4]。

1.4.1 电力消耗的碳排放强度

水厂各类设施运营维护因电力消耗而导致的碳排放强度,根据实际消耗的总电量进行核算,核算方法参考《城镇水务系统碳核算与碳减排路径技术指南》^[3]中5.2节的式(5-2)。

1.4.2 材料消耗的碳排放强度

水厂运营中消耗的各类材料、药剂等,在其生产阶段已产生相应的碳排放强度,核算方法为材料消耗量乘以该材料排放因子再除以处理水量,核算方法参考《城镇水务系统碳核算与碳减排路径技术指南》^[3]中5.2节的式(5-4)。

1.4.3 运输过程的碳排放强度

在水厂运营中,需要将自外部购入的材料、药剂等产品运入厂区,也可能需要将内部产生的产品或废物等向外部运输,运输过程中产生的碳排放强度计算方法如下:

$$\text{CES}_{\text{ys}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l [(L_{\text{ys},i,j}/100) \cdot U_{\text{ys},i,j} \cdot \text{EF}_{\text{ys},j}] / Q \quad (1)$$

式中: CES_{ys} 为因运输材料所产生的碳排放强度, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$; $L_{\text{ys},i,j}$ 为第*i*次运输中使用第*j*种方式的运输距离,为厂家提供的实测运输距离,km; $U_{\text{ys},i,j}$ 为第*i*次运输中使用第*j*种方式运输的百千米油耗, $\text{L}/100\ \text{km}$; $\text{EF}_{\text{ys},j}$ 为第*j*种运输方式燃料的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{L}$; *n*为运输总次数(取整数); *l*为第*i*次运输中采用的运输方式总数; *Q*为处理水量, m^3 ,以达标水质的水量计。

2 结果与分析

2.1 总体碳排放情况

东南区水厂2022年的碳排放强度见图2。

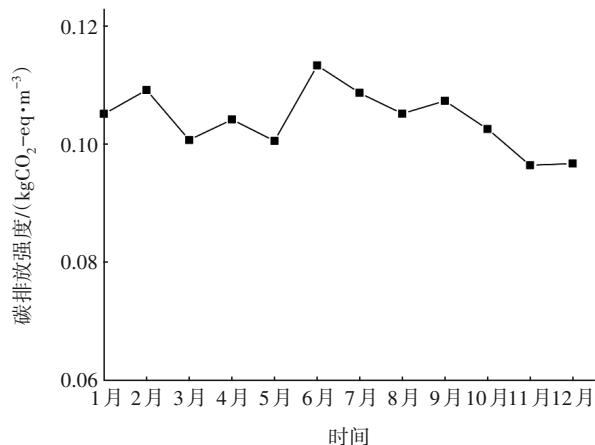


图2 东南区水厂的碳排放强度

Fig.2 Carbon emission intensity of Dongnan Waterworks

东南区水厂2022年的供水总量为 $33\ 006\ 830\ \text{m}^3$,电力消耗总量为 $4\ 677\ 330\ \text{kW}\cdot\text{h}$,药剂(液氧、PAC、PAM、次氯酸钠)消耗总量为 $778\ 295.5\ \text{kg}$,耗材(石英砂、无烟煤、生物活性炭)总量为 $440\ 400\ \text{kg}$,运输油耗共 $9\ 296.99\ \text{L}$ 。从图2可以看出,该水

厂 2022 年的碳排放强度在 0.096 61~0.113 56 kgCO₂-eq/m³之间,均值为 0.103 82 kgCO₂-eq/m³,年碳排放总量为 3 426 635.85 kgCO₂-eq。

2.2 各工艺段的碳排放情况

表 2 为东南区水厂 2022 年各工艺段电力消耗、药剂消耗、耗材、运输油耗相关数据,图 3 为各工

段的碳排放强度占比。预处理、高密度澄清池、翻板砂滤池、深度处理(臭氧接触池、生物活性炭池)、清水池、二级泵房、排泥水处理工艺、生产辅助用电的碳排放强度占比分别为 1.28%、16.70%、1.63%、4.18%、9.04%、58.22%、2.95%、5.99%。由此可见,东南区水厂的碳排放主要在二级泵房工艺段。

表 2 东南区水厂各工艺段电力消耗、药剂消耗、耗材、运输油耗相关数据

Tab.2 Data of power consumption, reagent consumption, transportation fuel consumption and consumables in each process unit of Dongnan Waterworks

工艺段	电力消耗量/(kW·h)	液氧/kg	PAC/kg	PAM/kg	次氯酸钠/kg	石英砂/kg	无烟煤/kg	生物活性炭/kg	运输油耗/L
预处理	74 515	5 026							26.77
高密度澄清池	353 966		221 825	3 762.50					2 028.75
翻板砂滤池	92 507					180 000	94 500		966.00
深度处理	128 288	210 942				99 900		66 000	2 814.23
清水池					335 940				288.00
二级泵房	3 498 374								
排泥水处理工艺	169 822			800					3 173.24
生产辅助用电	359 858								

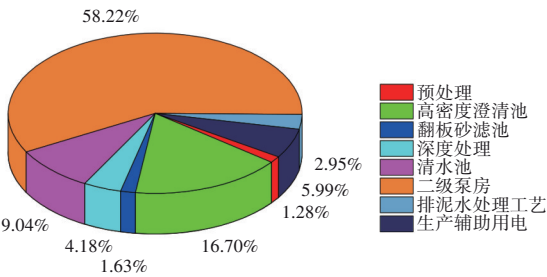


图 3 东南区水厂各工艺段的碳排放强度占比

Fig.3 Proportion of carbon emission intensity of each process unit of Dongnan Waterworks

2.3 主要碳排放活动占比

经核算,2022 年东南区水厂的主要碳排放活动为设备运行产生的电力消耗,其碳排放强度均值为 0.080 82 kgCO₂-eq/m³,占总运行碳排放的 77.85%;其次是药剂消耗(液氧、PAC、PAM、次氯酸钠),其碳排放强度均值为 0.022 29 kgCO₂-eq/m³,占总运行碳排放的 21.47%;运输过程和耗材产生的碳排放强度占比分别为 0.56% 和 0.12%。

2.4 深度处理对碳排放的影响

福州市东南区水厂与东区水厂采用同一水源,东区水厂采用“原水→机械混合→折板絮凝→平流沉淀→V 型滤池→清水池→二级泵房→出水”常规处理工艺,为探究深度处理对碳排放的影响,对两个水厂 2022 年消毒剂次氯酸钠的碳排放强度进行对比分析,结果见图 4。东南区水厂 2022 年的次氯

酸钠消耗量为 335 940 kg,供水量为 33 006 830 m³,出厂水余氯平均为 0.64 mg/L,次氯酸钠的碳排放强度为 0.009 kgCO₂-eq/m³;东区水厂 2022 年的次氯酸钠消耗量为 1 639 540 kg,供水量为 85 970 804 m³,出厂水余氯平均为 0.80 mg/L,次氯酸钠的碳排放强度为 0.017 kgCO₂-eq/m³。可见,深度处理工艺的应用降低了整个净水过程中消毒剂次氯酸钠产生的碳排放强度,仅为常规处理工艺的 52.94%,降低值为 0.008 kgCO₂-eq/m³。

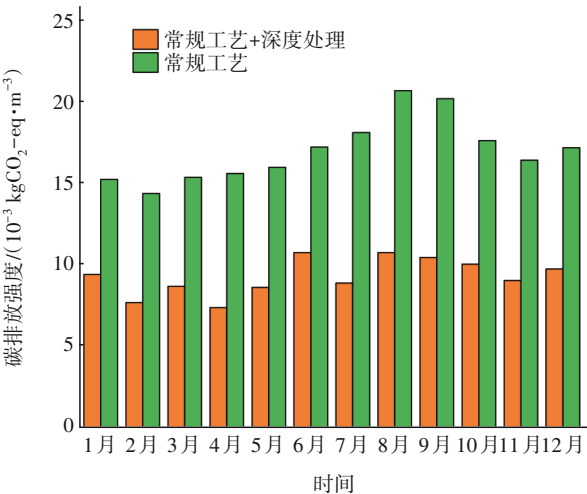


图 4 不同水处理工艺中消毒剂的碳排放强度对比

Fig.4 Comparison of carbon emission intensity of disinfectants in different water treatment processes

深度处理工艺(臭氧接触池、生物活性炭池)的碳排放强度为 $0.004\,34\,\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$,占总运行碳排放强度的4.18%。深度处理的应用降低了整个净水过程的碳排放强度,降低值为 $0.003\,66\,\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$,占总运行碳排放强度的3.52%。

2.5 污泥脱水工艺对碳排放的影响

福州市东南区水厂采用厢式隔膜压滤系统进行污泥脱水,运行方式为批式(间歇式),而城门水厂采用离心脱水系统进行污泥脱水,运行方式为连续式。为评价厢式隔膜压滤系统的碳排放强度,将2023年3月厢式隔膜压滤系统与离心脱水系统运行的电力消耗量、药剂消耗量、干泥量进行对比分析。结果显示,厢式隔膜压滤系统的电力消耗量为 $730.36\,\text{kW}\cdot\text{h}$,药剂消耗量为 $90.40\,\text{kg}$,干泥量为 $34.00\,\text{t}$;离心脱水系统的电力消耗量为 $5\,772.00\,\text{kW}\cdot\text{h}$,药剂消耗量为 $33.85\,\text{kg}$,干泥量为 $137.48\,\text{t}$ 。由此可得,厢式隔膜压滤系统和离心脱水系统的碳排放强度分别为 14.92 、 $24.31\,\text{kgCO}_2\text{-eq/t}$ 。厢式隔膜压滤系统的碳排放强度为离心脱水系统的61.37%,节能减碳效果明显。

3 结论

① 福州市东南区水厂运行的碳排放强度均值为 $0.103\,82\,\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$,碳排放关键环节为二级泵房,占总运行碳排放的58.22%。主要碳排放活动由电力消耗产生,占总运行碳排放的77.85%;其次是药剂消耗引起的碳排放,占总运行碳排放的21.47%。

② 深度处理工艺的应用降低了整个净水过程的碳排放强度,降低值为 $0.003\,66\,\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$,占总运行碳排放的3.52%。其中,消毒剂次氯酸钠的碳排放强度约为常规处理工艺的52.94%,显著降低了消毒剂消耗引起的碳排放。

③ 厢式隔膜压滤系统的碳排放强度为离心脱水系统的61.37%,采用厢式隔膜压滤系统进行污泥脱水的节能减碳效果明显。

参考文献:

- [1] 陆柯. 城市给水系统能耗分析与节能技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
LU Ke. Research on Energy Consumption of Urban Water Treatment System and Energy Saving Technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005 (in Chinese).
- [2] 郭恰. 城市污水厂污泥处理处置过程中碳排放核算边界浅析[J]. 净水技术, 2019, 38(10): 131-134, 142.
GUO Qia. Brief analysis of carbon emission accounting boundaries in process of sludge treatment and disposal of municipal sewage plant [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(10): 131-134, 142 (in Chinese).
- [3] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
China Urban Water Association. Guidelines for Carbon Accounting and Emission Reduction in the Urban Water Sector [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022 (in Chinese).
- [4] 刘然彬, 于文波, 张梦博, 等. 城镇水务系统碳核算与减碳/降碳规划方法[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 1-10.
LIU Ranbin, Yu Wenbo, ZHANG Mengbo, et al. Carbon accounting and reduction planning in urban water sector [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 1-10 (in Chinese).

作者简介:魏忠庆(1980—),男,福建福清人,博士,教授级高级工程师,注册公用设备工程师和注册咨询工程师,主要从事水处理技术、给排水管网系统工程、数字水务技术应用与科研工作。

E-mail:654606536@qq.com

收稿日期:2023-05-12

修回日期:2023-07-07

(编辑:刘贵春)