

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.23.011

江西某典型城镇给水厂碳核算与碳减排潜力分析

陈芃宇¹, 唐守娟¹, 黄文鼎¹, 詹健¹, 李梓洋²

(1. 南昌大学 资源与环境学院, 江西 南昌 330031; 2. 中国政法大学 商学院, 北京 102249)

摘要: 基于排放因子法,对江西某典型城镇给水厂2021年—2023年运行阶段的碳排放进行核算与分析。该给水厂三年内碳排放强度分别为0.188 4、0.171 0、0.171 8 kg/m³,其中外购电力碳排放占比为87.80%,是核心排放源;净水药剂的生产贡献为12.13%,以聚合氯化铝和次氯酸钠为主。碳排放呈现显著季节性特征,电力碳排放峰值出现在夏季(8月—9月),聚合氯化铝碳排放峰值与雨季高浊度原水(4月—5月)强相关。使用光伏系统后,2023年电力碳排放强度较2021年降低14.78%。对气候指标、供水指标与碳排放强度的相关性分析表明,电力消耗、原水浊度、降水量及气温是碳排放强度的关键驱动因素。碳减排潜力分析表明,案例水厂通过技术优化与清洁能源的使用,可减排约44%。

关键词: 城镇给水厂; 排放因子法; 碳排放; 碳核算; 碳减排潜力

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)23-0070-07

Carbon Accounting and Analysis of Carbon Emission Reduction Potential in a Typical Urban Water Supply Plant in Jiangxi Province

CHEN Peng-yu¹, TANG Shou-juan¹, HUANG Wen-ding¹, ZHAN Jian¹, LI Zi-yang²

(1. School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Business School, China University of Political Science and Law, Beijing 102249, China)

Abstract: The carbon emissions of a typical urban water supply plant in Jiangxi Province during its operational period from 2021 to 2023 were calculated and analyzed using the emission factor method. The carbon emission intensity of the water supply plant over the three-year period was 0.188 4 kg/m³, 0.171 0 kg/m³, and 0.171 8 kg/m³, respectively. Of the total emissions, 87.80% were attributed to purchased electricity, making it the primary source of carbon emissions. The production-related emissions from water purification chemicals accounted for 12.13%, primarily due to polyaluminium chloride and sodium hypochlorite. Carbon emissions exhibited distinct seasonal patterns. The peak in electricity-related carbon emissions occurred during the summer season of August and September, while the peak in carbon emissions associated with polyaluminium chloride production was closely correlated with periods of high-turbidity raw water intake during the rainy season, particularly from April to May. Following the implementation of photovoltaic systems, the carbon emission intensity of electricity in 2023 decreased by 14.78% compared to 2021. Correlation analysis of climate indicators, water supply

基金项目: 2025年度江西省科学教育学会在校研究生课题(2025KXJYS038); 北京市教育科学“十四五”规划重点课题(CDAA23048)

通信作者: 詹健 E-mail: 1243871232@qq.com

indicators, and carbon emission intensity revealed that electricity consumption, raw water turbidity, precipitation, and temperature were the primary driving factors influencing carbon emission intensity. Analysis of carbon emission reduction potential indicated that the case water supply plant could achieve an approximate 44% reduction in emissions through technological optimization and the adoption of clean energy.

Key words: urban water supply plant; emission factor method; carbon emission; carbon accounting; carbon emission reduction potential

在“十三五”期间,我国城市基础设施投资稳步增加。据统计,2022年我国城镇水务系统碳排放总量约占全社会总碳排放量的0.82%^[1],供水系统碳排放总量约占水系统总碳排放量的38.3%^[2]。未来不断增长的用水需求将导致城市供水系统的能源需求进一步增加。在“双碳”目标的背景下,供水系统必须向低碳方向发展。

目前关于供水系统碳排放的研究较为有限,约占水系统研究的10%^[3],且相关研究主要集中在以下两个层面:一是区域层面的供水系统宏观碳核算;二是城市供水系统核心环节的碳排放核算和分析,包括取水、净水和供水管网系统。通过对供水系统中不同环节碳排放特征的研究,为制定精准的碳减排策略提供了重要依据^[4-5]。开展水务行业碳核算的主要问题包括碳排放活动多且复杂、核算边界不统一、缺乏本地化排放因子等,导致漏算错算现象较为普遍^[6]。主流的碳核算方法包括现场实测法^[7]、排放因子法^[8]、全生命周期法^[9]、投入产出法^[10]。其中,排放因子法是最常用的碳核算方法,广泛应用于各个行业。

当前科研人员大多聚焦于给水厂总体碳排放特征研究,少有对月度变化进行详细分析和对碳减排潜力的量化分析。同时,除了电力、物料消耗等直接可量化因素,原水水质、用水量等环境因素也会影响水、能源与碳的动态关系^[11]。因此,笔者基于江西某典型城镇给水厂实际月度运行数据,用排放因子法计算运行期碳排放量,分析水质、气候、物料与碳排放的关联及碳排放特征、关键环节,最后从减碳和替碳角度分析该厂的碳减排潜力。

1 研究方法

1.1 系统概况

案例水厂采用典型的混凝-沉淀-过滤-消毒水处理工艺,具体流程与碳排放来源如图1所示。该

水厂规划总供水规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,目前已建设完成三期,实际规模为 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。原水浊度约为2.6~65.0 NTU,采用聚合氯化铝作为混凝剂,并且在处理流程中多点投加消毒剂以保证水质安全。2023年之前,一、二期使用液氯消毒,三期使用次氯酸钠消毒,之后全部改为次氯酸钠消毒。出水浊度在0.15 NTU左右。排泥水进入排泥池,经过浓缩、脱水,并在脱水阶段添加聚丙烯酰胺,对收集形成的泥饼进行外运。取水泵站和处理厂区内配有光伏发电设施。水厂出水压力每天根据时段调整,最低为0.32 MPa,最高为0.40 MPa。

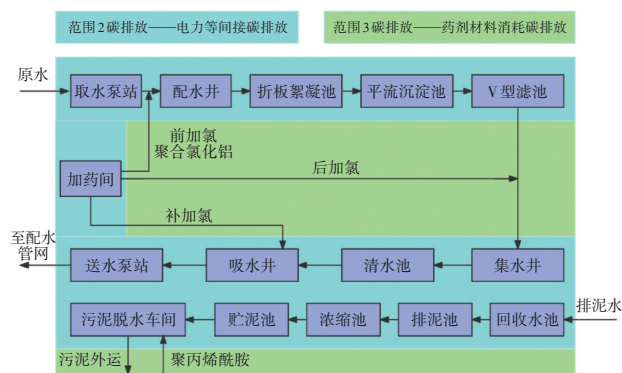


图1 案例水厂工艺流程及碳排放来源

Fig.1 Process flow of case water supply plant and carbon emission source

1.2 系统边界及计算原理

基于碳排放的来源与属性,在系统和自然的交互边界上,考虑取水泵站、给水厂和送水泵站,碳排放核算边界如下:范围1,核算主体为自身活动导致的直接碳排放,即水厂设施设备燃气、燃油燃烧碳排放;范围2,核算主体为购买电力、蒸汽等导致的间接碳排放,即水厂电力和热力消耗碳排放;范围3,核算主体为其他活动导致的但在核算边界外的间接碳排放,即水厂运行消耗净水药剂的生产和运输碳排放,以及废弃物的运输和处置碳排放。

在时间范围上,需要考虑规划建设、运行维护、资产重置及拆除。相关研究表明,建设阶段碳排放量远小于运营阶段,尤其是资源密集型处理工艺,其运营阶段的环境影响远超建设、维护及最终处置阶段^[12]。在决定水处理基础设施是否考虑建设和拆除碳排放时,需要综合评估其全生命周期各阶段的资源消耗强度以及基础设施的具体类型。对于新建或计划建设的供水设施则可以重点考虑建设阶段,此时不同建筑材料的选择和施工过程的统筹规划会对全生命周期内的碳排放产生较大影响。由于该系统规划建设期数据难以获取且还在运行使用中,所以未计算规划建设期和资产重置及拆除阶段的碳排放。

范围1:水厂各类设施采用燃气、燃油等化石燃料产生的直接碳排放量按式(1)计算。

$$CES_1 = \sum_{i=1}^n (M_{1,i} \times EF_{1,i}) / Q \quad (1)$$

式中: CES_1 为范围1的碳排放强度,kg/m³或kg/kg; n 为使用化石燃料的种类数; $M_{1,i}$ 为计算时间范围内化石燃料消耗总量,m³或kg; $EF_{1,i}$ 为第*i*种化石燃料排放因子; Q 为计算时间范围内总处理水量,m³。

范围2:各类设施运行维护过程中因电力消耗导致的间接碳排放按式(2)和式(3)计算。其中,式(2)适用于所有设施,结果较准确;式(3)仅适用于水泵。本研究采用式(2)进行计算。

$$CES_2 = (E_d - E_r) \times EF_d / Q \quad (2)$$

$$CES_2' = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{g \times L \times \rho \times EF_d}{3.6 \times 10^6 \mu_i} \quad (3)$$

式中: CES_2 为范围2碳排放强度,kg/m³; E_d 为计算时间范围内运行维护总电耗,kW·h; E_r 为计算时间范围内可再生能源发电量,kW·h; EF_d 为该地区电力排放因子,kg/(kW·h); Q 为计算时间范围内总处理水量,m³; CES_2' 为范围2碳排放强度(主要为泵),kg/m³; n_1 为总计使用的不同工作效率的水泵机组数; g 为重力加速度,取9.8 m/s²; L 为实际提升扬程,m; ρ 为水的密度,kg/m³; μ_i 为第*i*种水泵机组的工作效率。

范围3:系统运行过程中消耗的各类材料、药剂等在其生产阶段产生的碳排放量按式(4)计算。

$$CES_c = \sum_{i=1}^{n_2} (M_{c,i} \times EF_{c,i}) / Q \quad (4)$$

式中: CES_c 为消耗药剂、材料等产生的碳排放

强度,kg/m³; n_2 为使用的药剂、材料种类数量; $M_{c,i}$ 为计算时间范围内药剂、材料等消耗总量,kg; $EF_{c,i}$ 为第*i*种药剂、材料的碳排放因子,kg/kg; Q 为计算时间范围内总处理水量,m³。

外部购入的药剂、材料等运输进厂区以及将厂区内产生的废物等运送出去过程产生的间接碳排放强度按式(5)计算。

$$CES_y = \sum_{i=1}^{n_3} \sum_{j=1}^k (M_{y,i,j} \times L_{y,i,j} \times EF_{y,j}) / Q \quad (5)$$

式中: CES_y 为因运输材料产生的碳排放强度,kg/m³; $M_{y,i,j}$ 为计算时间范围内第*i*次运输中,使用第*j*种方式的运输总量,t; $L_{y,i,j}$ 为计算时间范围内第*i*次运输中,使用第*j*种方式的运输距离,km; $EF_{y,j}$ 为第*j*种运输方式的碳排放因子,kg/(t·km); n_3 为计算时间范围内的总运输次数; k 为第*i*次运输中,总计采用了*k*种运输方式; Q 为计算时间范围内总处理水量,m³。

1.3 相关性分析

通过皮尔逊相关系数探究水量、水质和气候指标等对案例水厂关键节点碳排放的影响。皮尔逊相关系数*r*衡量了两个连续型随机变量间的线性关联强度与方向,取值范围为[-1,1]。 $r=1$ 表示完全正相关, $r=-1$ 表示完全负相关, $r=0$ 表示无线性关联^[13]。

1.4 数据来源

为核算该系统总碳排放量,对该案例水厂进行实地调研,收集系统的厂区设备台账、2021年—2023年月度用电量、月度药剂使用量、水厂物流记录等数据。该水厂电力来源包括从当地电网购入以及厂区自建光伏发电系统所生产的电力,且光伏发电量全部为厂区自用。根据ISO标准^[14],在电力消耗计算中,将总消耗量减去光伏发电量。产生的污泥因其有机质含量较低和处置过程未形成厌氧发酵条件,污泥处置碳排放忽略不计^[15]。计算时采用权威机构及文献公布的碳排放因子数据。2021年外购电力的碳排放因子为0.583 5 kg/(kW·h),2022年为0.575 2 kg/(kW·h),液氯、次氯酸钠、聚合氯化铝、聚丙烯酰胺的碳排放因子分别为0.93、0.99、0.53、1.48 kg/kg。10 t货车公路运输的碳排放因子为0.162 kg/(t·km)^[1]。由于生态环境部未发布2023年省级电力平均碳排放因子,所以在2023年电力核算中使用2022年的因子。

2 结果与讨论

2.1 碳排放总量

该水厂2021年—2023年的总碳排放量分别为8 554.57、8 229.92、8 165.86 t,碳排放强度分别为0.188 4、0.171 0、0.171 8 kg/m³,如图2所示。三年内范围2产生的碳排放量占比最大,碳排放量达到21 904.33 t,约占87.80%。其余碳排放均属于范围3,包括各类药剂的生产和运输。其中次氯酸钠、聚合氯化铝、聚丙烯酰胺、液氯的碳排放量分别达到1 146.18、1 657.24、50.45、174.67 t,分别约占总碳排放量的4.59%、6.64%、0.20%、0.70%。在能源使用方面,案例给水厂在生产 and 操作过程中没有直接使用化石燃料,范围1产生的直接碳排放量为0。

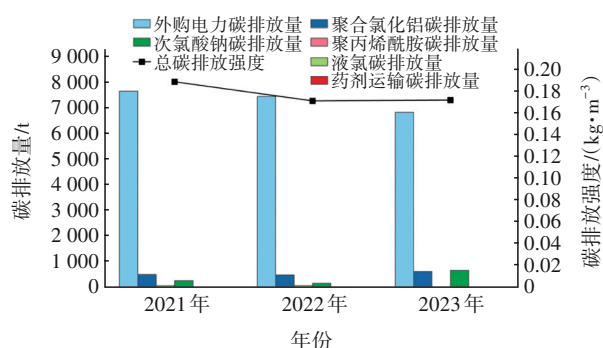


图2 2021年—2023年案例水厂碳排放构成及占比

Fig.2 Composition and proportion of carbon emissions of case water supply plant from 2021 to 2023

由水厂碳排放总量特征可知,外购电力和各类药剂生产的碳排放量占比高达约99.93%,这是因为水处理过程所需的设备基本由电力驱动,且与药剂配合使用达到净化水质的效果。该水厂采用传统净水工艺,在处理过程中,需要使用絮凝搅拌器、刮泥车、反冲洗水泵、反冲洗风机、空压机及冷干机等较高耗能设备,而在送水过程中,送水泵需要连续运行,功率较高,会产生大量电耗。污泥处理包括浓缩和脱水,主要设备包括污泥泵、污泥脱水机和干化设备等。药剂生产也是给水厂碳排放的重要来源之一,在该水厂总碳排放中占12.13%,其中混凝剂聚合氯化铝产生的碳排放量最大(1 657.24 t)。其次是消毒剂次氯酸钠(1 146.18 t)。

2.2 碳排放变化趋势和特征

为了进一步探究该水厂碳排放特征和变化趋势,结合2021年—2023年月度生产运行数据对各类碳排放进行了深入分析,结果如图3所示。由图3

(a)可知,每年的水厂碳排放量总体呈现先上升后下降的趋势,2021年在9月达到峰值855.43 t,2022年在8月达到峰值781.71 t,2023年在9月达到峰值794.39 t。这是因为在每年的8月和9月左右气温较高,用水量增加,导致水泵和水处理设备运行时间增加,产生了更多的碳排放。运输净水药剂造成的碳排放对整体碳排放贡献较小。由图3(b)可知,从2021年—2023年,碳排放强度总体呈下降趋势。其中外购电力的碳排放强度约占90%,且逐年下降。不同种类的药剂碳排放强度有所区别,但都随时间而产生波动。

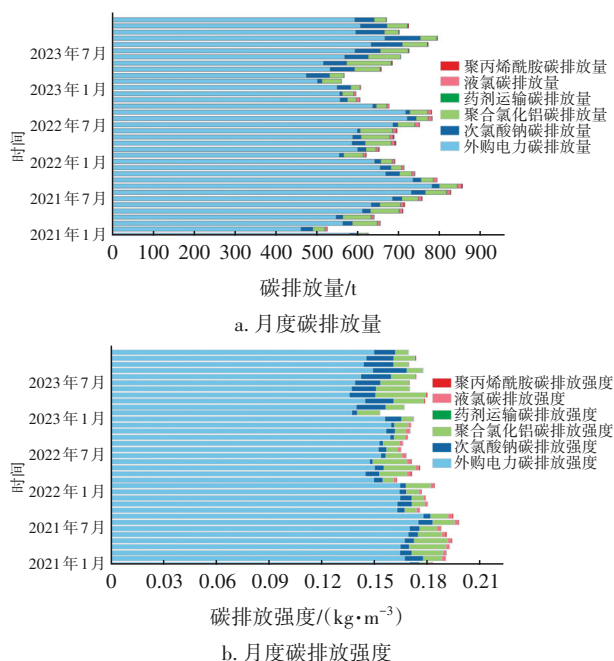


图3 2021年—2023年案例水厂月度碳排放的变化

Fig.3 Change in monthly carbon emission of case water supply plant from 2021 to 2023

水处理及送水过程消耗的电力是最主要的碳排放贡献者,而且处理水量与水泵的运行及水处理药剂的用量关系密切,所以深入分析2021年—2023年月度电力消耗碳排放强度的变化,结果如图4所示。可知,总的电力碳排放量呈现较大的波动,并且每年的变化趋势相似,都是先增加后下降,且均在8月和9月左右达到相对最大值。电力排放强度比较稳定,但也存在小幅度波动。2021年和2023年的取水站电力碳排放强度以及水处理、送水碳排放强度均在8月和9月达到峰值,与当年碳排放量峰值出现时间接近。但2022年的二者峰值在11月和12月,这是受到当年季节性用水需求和处理要求

的影响,即供水量减少但实际的电力消耗减少幅度较小,导致碳排放强度增加。总体来看,总的电力碳排放强度逐年降低,2021年—2023年月平均电力碳排放强度分别为0.168 4、0.154 5、0.143 5 kg/m³。这是因为案例水厂自2022年3月开始在厂区内使用光伏发电系统,代替了部分外购电力,减少了碳排放。2023年光伏系统全年投入使用,当年电力碳排放强度相对未使用光伏系统的2021年降低了14.78%,说明采用可再生能源能够在一定程度上降低水厂运行产生的碳排放。

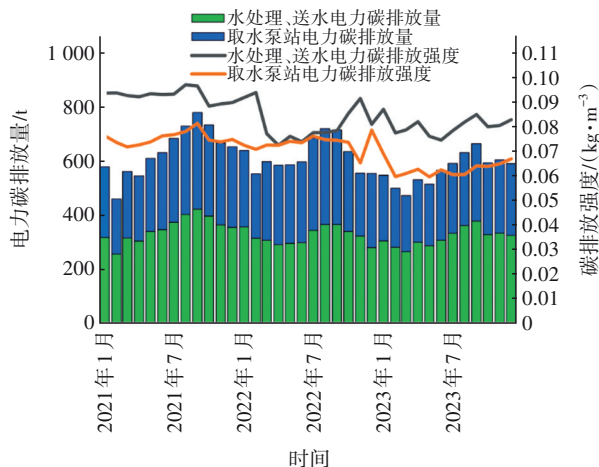


图4 2021年—2023年案例水厂电力碳排放及强度的变化
Fig.4 Change in electricity carbon emissions and intensity of case water supply plant from 2021 to 2023

除了电力之外,药剂的生产也是重要的碳排放来源之一,图5为该水厂在2021年—2023年药剂产生的碳排放变化情况。可以看出,每年的药剂碳排放量波动较明显,聚合氯化铝和次氯酸钠是主要的贡献者。聚合氯化铝碳排放量在每年的4月和5月达到最高,根据厂区水质资料,原水浊度每年均呈先明显上升再下降的趋势,4月和5月浊度达到最大值,所以这段时间需要投加更多的混凝剂来处理原水。消毒剂产生的碳排放则在每年的8月和9月达到峰值,原因可能是夏季水温上升,微生物活性增加,需使用更多的消毒剂来控制水质。从总的碳排放趋势来看,2023年消毒剂碳排放量和碳排放强度分别为683.55 t、0.014 4 kg/m³,均高于前两年。这是因为案例水厂在2023年之前采用液氯和次氯酸钠两种消毒剂,2023年之后全部使用次氯酸钠,而在实际使用过程中,2023年消毒剂使用量增多,且次氯酸钠的碳排放因子为0.99 kg/kg,高于液氯的

0.93 kg/kg,所以造成了更大的碳排放量。因此,控制净水药剂的碳排放需要综合考虑季节气候因素和药剂的种类。

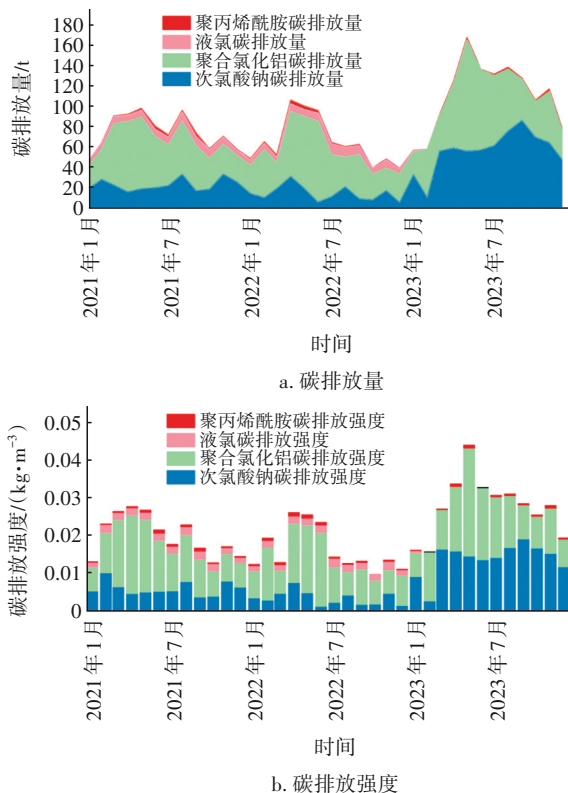


图5 2021年—2023年案例水厂药剂碳排放的变化
Fig.5 Change in carbon emission of chemicals in case water supply plant from 2021 to 2023

2.3 碳排放关键因素分析

案例给水厂总碳排放量主要来自药剂生产碳排放和外购电力消耗碳排放,与之对应的关键碳排放节点分别为聚合氯化铝和消毒剂碳排放,以及取水、水处理和送水碳排放。各类药剂碳排放量呈明显的季节性变化,电力消耗也和取水、供水量密不可分。因此收集供水量、原水平均浊度、当地气候情况(包括月均气温、月降水量),进行皮尔逊相关性分析,结果见图6。案例水厂碳排放强度受电力消耗、药剂使用及自然环境因素的协同影响。外购电力碳排放强度与水处理/送水电力碳排放强度($r=0.883$)、取水泵站电力碳排放强度($r=0.823$)呈强正相关,表明电力集中消耗是碳排放的核心驱动力,三者联动效应显著,优化电网结构或提升输配电效率可能产生全局性减排效果。聚合氯化铝碳排放强度与原水平均浊度($r=0.808$)、降水量($r=0.700$)呈强正相关,说明原水水质恶化(如高浊度)或降雨

增多会显著增加聚合氯化铝用量及碳排放。次氯酸钠碳排放强度与液氯碳排放强度呈现显著替代关系($r=-0.792$),符合实际运行中将液氯逐渐替代为次氯酸钠的过程,结合上述分析,改用次氯酸钠后产生了更多碳排放,说明选择低碳替代药剂是重要减排路径。气温升高显著提升供水量($r=0.662$),可能是由于夏季或暖季供水负荷增大,提高了电力和药剂消耗,从而增加碳排放。供水量仅与气温显著相关,与多数变量相关性较弱($|r|<0.36$)。结合王超^[16]对上海水厂碳排放核算的分析发现,深度处理水厂碳排放强度与产能利用率呈负相关,而常规处理水厂的碳排放强度则与产能利用率关系不显著。说明若能改造工艺和扩大供水规模,发挥规模效应,能在一定程度上减少碳排放。

	外购电力碳排放强度	次氯酸钠碳排放强度	聚合氯化铝碳排放强度	液氯碳排放强度	聚丙烯酰胺碳排放强度	水处理、送水电力碳排放强度	取水泵站电力碳排放强度	原水平均浊度	平均气温	降水量	供水量
外购电力碳排放强度	1.000	-0.532	-0.314	0.725	-0.032	0.883	0.823	-0.317	-0.106	-0.226	-0.204
次氯酸钠碳排放强度	-0.532	1.000	0.207	-0.792	0.066	-0.226	-0.733	0.198	0.125	0.046	0.050
聚合氯化铝碳排放强度	-0.314	0.207	1.000	-0.160	0.500	-0.228	-0.318	0.808	0.254	0.700	-0.182
液氯碳排放强度	0.725	-0.792	-0.160	1.000	0.119	0.427	0.854	-0.174	0.125	0.053	-0.048
聚丙烯酰胺碳排放强度	-0.032	0.066	0.500	0.119	1.000	-0.111	0.074	0.482	0.330	0.505	0.132
水处理、送水电力碳排放强度	0.883	-0.226	-0.228	0.427	-0.111	1.000	0.460	-0.294	-0.202	-0.215	-0.356
取水泵站电力碳排放强度	0.823	-0.733	-0.318	0.854	0.074	0.460	1.000	-0.243	0.044	-0.167	0.044
原水平均浊度	-0.317	0.198	0.808	-0.174	0.482	-0.294	-0.243	1.000	0.331	0.647	-0.048
平均气温	-0.106	0.125	0.254	0.125	0.330	-0.202	0.044	0.331	1.000	0.184	0.662
降水量	-0.226	0.046	0.700	0.053	0.505	-0.215	-0.167	0.647	0.184	1.000	-0.170
供水量	-0.204	0.050	-0.182	-0.048	0.132	-0.356	0.044	-0.048	0.662	-0.170	1.000

图6 气候指标、供水指标与碳排放强度的相关性热图

Fig.6 Correlation heat map between climate indicators, water supply indicators and carbon emission intensity

2.4 碳减排潜力分析

根据碳减排原理和机制,国际上将其分为三个范畴:减碳、替碳和碳汇。本研究在碳核算与碳排放关键因素识别的基础上对该案例水厂进行碳减排潜力分析。

技术优化减碳:案例水厂绝大部分碳排放量来自电能和药剂的消耗,改造水厂设备、降低能耗是减少碳排放的关键举措之一。由于案例水厂水泵均为变频运行,减碳潜力较小,所以重点对投药系统进行优化评估。根据相关研究,若采用智能投药系统,混凝剂和消毒剂预计每年分别可以节省约5.68%、22%^[17]。

清洁能源替碳:替碳是通过使用清洁能源代替

传统化石能源来减少碳排放,例如风能、太阳能和其他可再生能源。从案例水厂的可再生能源使用情况来看,2023年光伏发电量为1 827 624 kW·h,占总电耗的13.62%。根据水厂规划,未来将继续建设光伏发电设施,预计年发电量占总电耗的30%。

碳减排潜力综合评估:根据上述分析,基于案例水厂2023年的碳排放情况,探讨具体的碳减排潜力。采取减碳措施后,碳排放量从8 165.86 t减少到4 566.56 t,总体实现了约44%的碳减排量。具体减碳措施包括三个方面:降低区域电网碳排放因子,采用0.474 kg/(kW·h),减碳量为2 372.31 t;采用精准投药系统,减少净水药剂的消耗,得到减碳量为186.12 t;厂区内增设光伏发电设施,提高可再生能源的使用占比,替碳量为1 040.88 t。外购电力的碳减排相对较高,约占总减碳量66%,碳减排潜力较大。药剂的减碳量较小,未来可深入探究智能投药系统和不同种类药剂的减排潜力。在替碳层面,厂区增设光伏系统使用可再生能源达到了约29%的替碳量,具有一定的碳减排潜力。

3 结论

① 某典型城镇给水厂的碳核算结果表明,电力消耗是碳排放的主导因素,占总排放的87.80%,优化能源结构是首要减排路径,案例中光伏系统实现年碳减排14.78%。

② 药剂碳排放具有显著季节性:聚合氯化铝碳排放受原水浊度和降水量的影响,需强化雨季水质预警与精准投加;次氯酸钠全面替代液氯后碳排放增加,可能是因为排放因子的变化,需综合评估低碳消毒工艺。气候-水质-碳排放耦合效应突出:气温升高导致供水量增加,间接加剧电力与药剂消耗的碳排放,需要结合当地的气候特征,建立适应性运行策略。

③ 碳减排潜力分析表明,在实施技术优化和使用清洁能源的情况下,案例水厂能够实现44%的碳减排。优化电力结构具有较高的碳减排潜力。

参考文献:

[1] 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).
- [2] XU H, FU G T, YE Q, *et al.* Life cycle environmental impacts of urban water systems in China [J]. *Water Research*, 2024, 266: 122350.
- [3] FAN G D, XU Q L, WANG Y M, *et al.* Research on carbon emission accounting and low carbon operation methods for urban water supply systems [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 68: 106438.
- [4] ZHANG P, MA B R, ZHENG G L, *et al.* Unveiling the greenhouse gas emissions of drinking water treatment plant throughout the construction and operation stages based on life cycle assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 272: 116043.
- [5] 程志强, 方火明, 董晓磊, 等. 城镇给水系统运行碳核算与碳减排策略研究[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(14): 13-18.
- CHENG Zhiqiang, FANG Huoming, DONG Xiaolei, *et al.* Carbon emission accounting and carbon emission reduction strategies of urban water supply system operation [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(14): 13-18(in Chinese).
- [6] LI H, ZHAO Y H, LIN J. A review of the energy-carbon-water nexus: concepts, research focuses, mechanisms, and methodologies [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2020, 9(1): e358.
- [7] JOSEPH V R, MUSTAFFA N K. Carbon emissions management in construction operations: a systematic review [J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2023, 30(3): 1271-1299.
- [8] GAO H, WANG X K, WU K, *et al.* A review of building carbon emission accounting and prediction models [J]. *Buildings*, 2023, 13(7): 1617.
- [9] WU L Y, PAN Y L, LI J F, *et al.* Spatial heterogeneity of factors affecting GHG emission intensity in urban water supply and wastewater treatment systems in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 428: 139325.
- [10] ZHANG Q, SMITH K, ZHAO X, *et al.* Greenhouse gas emissions associated with urban water infrastructure: what we have learnt from China's practice [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2021, 8(4): e1529.
- [11] BARRIOS M S S, HAIDER H, CHHIPI-SHRESTHA G K, *et al.* Review of the water-energy-carbon nexus in small and medium drinking water systems: challenges and opportunities [J]. *Environmental Reviews*, 2024, 32(24): 658-687.
- [12] BYRNE D M, LOHMAN H A C, COOK S M, *et al.* Life cycle assessment (LCA) of urban water infrastructure: emerging approaches to balance objectives and inform comprehensive decision-making [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2017, 3(6): 1002-1014.
- [13] GONG H H, LI Y Y, ZHANG J N, *et al.* A new filter feature selection algorithm for classification task by ensembling pearson correlation coefficient and mutual information [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 131: 107865.
- [14] ARFELLI F, CIACCI L, VASSURA I, *et al.* Nexus analysis and life cycle assessment of regional water supply systems: a case study from Italy [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 185: 106446.
- [15] JONES T G, EVANS C D, FREEMAN C. The greenhouse gas (GHG) emissions associated with aquatic carbon removal during drinking water treatment [J]. *Aquatic Sciences*, 2016, 78(3): 561-572.
- [16] 王超. 上海城市水厂碳排放核算与影响因素探讨 [D]. 上海: 华东师范大学, 2024.
- WANG Chao. Discussion on Carbon Emission Accounting and Influencing Factors of Shanghai Urban Drinking Water Treatment Plant [D]. Shanghai: East China Normal University, 2024(in Chinese).
- [17] 陈宏景, 范功端, 徐巧玲, 等. 双碳目标下供水系统发展现状与减排路径研究 [J]. *给水排水*, 2025, 51(7): 1-7.
- CHEN Hongjing, FAN Gongduan, XU Qiaoling, *et al.* A review of the development status and emission reduction approaches of water supply systems under carbon peaking and neutrality goals [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2025, 51(7): 1-7 (in Chinese).

作者简介: 陈芑宇(2001-), 男, 江西新余人, 硕士研究生, 研究方向为城市供水系统碳减排。

E-mail: 1324224315@qq.com

收稿日期: 2025-09-13

修回日期: 2025-10-09

(编辑: 任莹莹)