

梁言, 杨景然, 陈阳, 等. 福建某污水厂碳排放核算及低碳运行分析[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 108-118, 165.

LIANG Y, YANG J R, CHEN Y, et al. Carbon emission accounting and low-carbon operation analysis of a WWTP in Fujian[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 108-118, 165.

福建某污水厂碳排放核算及低碳运行分析

梁言^{1,*}, 杨景然², 陈阳^{1,3}, 石凤¹, 曾鸿杰⁴

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 天津 300201; 2. 中建玖合发展集团有限公司, 北京 100071; 3. 北京龙涛环境科技有限公司, 北京 100071; 4. 福建漳发生态科技有限公司, 福建漳州 363000)

摘要 【目的】在我国生态文明建设的大背景下, 污水处理行业不仅是打好污染防治攻坚战的关键环节, 也是温室气体减排的重要领域。因此, 明确污水处理厂的碳排放状况, 并实施低碳化改造, 对于应对气候变化、推动可持续发展至关重要。研究旨在通过科学的方法和实际案例, 探索污水处理厂的低碳化改造路径, 为未来污水厂的节能减排工作提供了经验和启示。【方法】研究基于国内现有的碳核算理论框架, 选取福建某具有代表性的污水处理厂作为研究对象。利用福建某污水处理厂日处理量、进出水指标、污泥产量、耗电量及药剂消耗量等数据对该污水厂直接碳排放和间接碳排放进行碳排放核算。通过分析该水厂污水处理碳排放核算结果, 因地制宜综合厂区地理位置及周边资源, 提出了更换低碳碳源药剂、调节运行参数降低碳排放、优化变频调节设备降低功率、光伏改造能源利用 4 条减碳措施。【结果】经过一系列低碳化改造并稳定运行 8 个月后再次进行碳排放核算, 该污水处理厂的碳排放强度得到了显著降低。其碳排放强度由改造前的 $0.7650 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ 下降至 $0.7104 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$, 取得了显著的环保效益。【结论】污水处理低碳运行应以微观低碳机理为抓手, 通过调节运行参数等手段, 辅以新能源发电的使用, 共同推动污水处理行业向更加低碳、环保的方向发展。

关键词 污水处理厂(WWTP) 碳减排 碳核算 低碳运行 节能降耗

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)04-0108-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.013

Carbon Emission Accounting and Low-Carbon Operation Analysis of a WWTP in Fujian

LIANG Yan^{1,*}, YANG Jingran², CHEN Yang^{1,3}, SHI Feng¹, ZENG Hongjie⁴

(1. CSCEC Aecom Consultants Co., Ltd., Tianjin 300201, China;

2. CSCEC Jiuhe Development Group Co., Ltd., Beijing 100071, China;

3. Beijing Longtech Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100071, China;

4. Fujian Zhangzhou Development Ecological Technology Co., Ltd., Zhangzhou 363000, China)

Abstract [Objective] Against the backdrop of ecological civilization construction in China, the wastewater treatment industry is not only a crucial link in the battle against pollution prevention and control but also a significant area for greenhouse gas emission reduction. Therefore, clarifying the carbon emission status of wastewater treatment plants (WWTPs) and implementing low-carbon retrofits are vital for addressing climate change and promoting sustainable development. [Methods] This study aimed to explore the pathways for low-carbon retrofits of WWTPs through scientific method and practical cases, providing experience and insights for future energy conservation and emission reduction efforts in wastewater treatment. Based on the existing domestic carbon accounting theoretical framework, a representative WWTP in Fujian Province was selected as the research object. Data such as daily treatment capacity, influent and effluent indices, sludge production, electricity consumption, and reagent consumption from the WWTP in Fujian were utilized to conduct carbon emission accounting for both direct and indirect carbon emissions. By analyzing the carbon emission accounting result of the WWTP's wastewater treatment process, and considering the WWTP's geographical location and surrounding resources, four carbon reduction measures were proposed: Replacing low-carbon carbon source agents, optimizing operational controls

[收稿日期] 2024-04-18

[基金项目] 中建市政西北院科技研发课题(XBSZKY2218)资助项目

[通信作者] 梁言(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市给水排水理论与技术, E-mail: 262108437@qq.com.

e. g. aeration control, enhancing frequency conversion control, and transforming photovoltaic energy utilization. After a series of low-carbon retrofits and eight months of stable operation, carbon emission accounting was conducted again, revealing a significant reduction in the carbon emission intensity of the WWTP. [Results] Specifically, its carbon emission intensity decreased from 0.765 0 kg CO₂/m³ before the retrofits to 0.710 4 kg CO₂/m³ after, achieving notable environmental benefits. [Conclusion] Low-carbon operation in wastewater treatment should focus on micro-level low-carbon mechanisms, leveraging adjustments to operational parameters and complemented by the use of renewable energy generation, to collectively propel the wastewater treatment industry towards a more low-carbon and environmentally friendly direction.

Keywords wastewater treatment plant (WWTP) carbon emission reduction carbon accounting low carbon operation energy conservation and consumption reduction

在全球气候变化的严峻形势下,温室气体减排成为当务之急^[1]。我国生态文明建设聚焦减污降碳,力求通过协同手段,推动经济社会向绿色转型,提升生态环境质量^[2]。其中,污水处理不仅是污染防治的关键环节,也是温室气体减排的重要领域^[2]。据统计,全球污水处理行业碳排放占温室气体总排放的比例显著^[3]。因此,明确污水处理厂的碳排放状况,并实施低碳化改造,对于应对气候变化、推动可持续发展至关重要。

针对污水处理厂的碳排放问题,全球范围内已有广泛研究。例如,郝晓地等^[4]深入分析了芬兰 Kakolanmäki 污水处理厂的能源与资源回收策略及碳减排成效;刘善军等^[5]评估了厌氧-缺氧-好氧工艺结合膜生物反应器(AAO+MBR)工艺污水处理厂的碳排放状况,并提出了减排建议;赵荣钦等^[6]以郑州市为例,构建了基于水、能、碳关联的污水处理系统碳排放研究框架。然而,目前针对污水处理厂碳排放核算的标准和方法尚不完善,主要依赖《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)》^[7]这一早期发布的指南,该指南发布早于我国“3060 双碳”战略目标确立时间,对污水处理厂温室气体排放源的识别较粗略。中国环境保护产业协会于 2022 年 6 月发布的《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)^[8]详细界定了污水处理过程中的碳排放核算边界和方法,并制定了低碳运行的评价策略。为污水处理厂的碳排放核算和低碳运行分析提供了宝贵指导^[9]。

本文基于《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)的理论框架,利用福建某污水处理厂的的实际数据进行了详细的碳排放核算。根据结果提出了一系列针对性的碳减排措施,并对其低碳运行效果进行了深入分析。这一研究不仅为

污水处理厂的碳排放核算提供了理论依据,同时也为低碳运行提供了实践指导,有助于推动整个行业向更加绿色、低碳的方向发展。

1 污水厂概况与研究方法

1.1 污水厂概况

福建省某污水厂位于福建省南部,满负荷运行处理规模为 26 万 m³/d。污水处理工艺采用 AAO+MBR 工艺,污泥处理工艺采用“深度脱水+污泥外运”工艺,除臭采用生物滤池除臭工艺。该厂工艺流程如图 1 所示。本文基于该厂在 2021 年 1 月—2022 年 8 月的运行数据,涵盖日处理量、进出水指标、污泥产量、耗电量及药剂消耗等,该厂污水污泥处理工艺、能源和物耗均为市政典型常用一般类型,数据具有代表性。

1.2 研究方法

在污水处理行业中,碳排放主要涵盖了直接碳排放和间接碳排放两大类,直接碳排放主要源于生物过程中释放的温室气体,如二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、一氧化二氮(N₂O)等。其中 N₂O 的产生主要来自污水厂使用的脱氮技术,特别是自养反硝化和异养反硝化这 2 个微生物反应过程^[10]。然而,目前学术界普遍认为 N₂O 的释放不仅仅局限于这 2 个反应,曝气池也是一个重要的排放源,因为大量气体在这里从液相转移到空气中^[11]。为了估算 N₂O 的排放量,本研究采用了进出水总氮(TN)变化量作为衡量指标。CH₄ 主要来源被认为是在污水处理过程中去除化学需氧量(COD_{Cr})所产生的产物,进出水 COD_{Cr} 的去除总量不仅表现为甲烷气体的排放,还以有机质的形式存留在污泥中。为了准确衡量甲烷的排放量,本研究计算了进出水 COD_{Cr} 去除总量与污泥留存有机质的碳值之差^[12]。CO₂ 排放主要来自煤炭、汽油、柴油等各类化石燃料的燃烧过

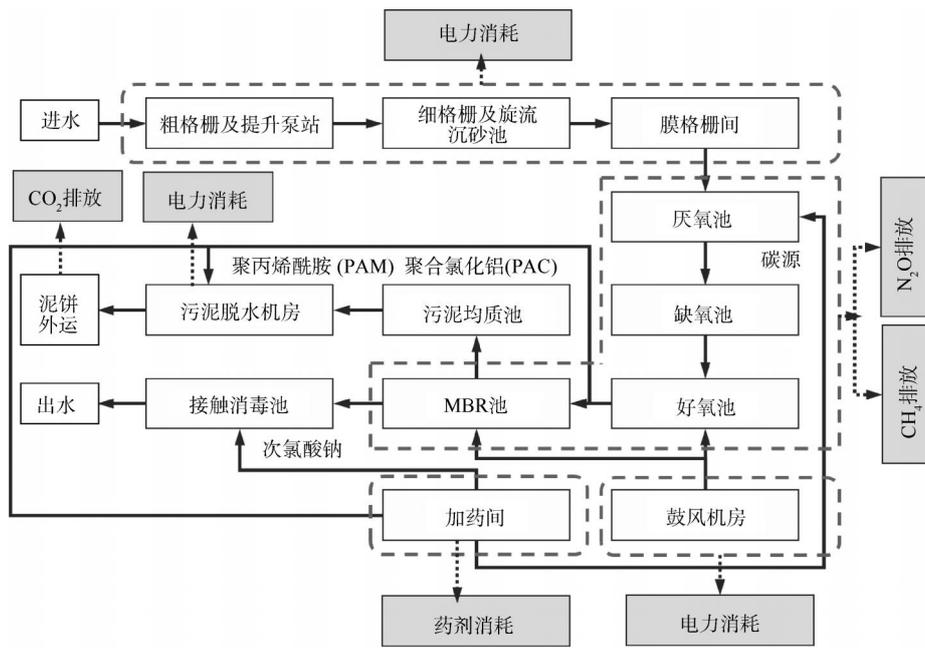


图1 福建某污水厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of a WWTP in Fujian

程^[13],这些燃料在锅炉燃烧、内燃机发电及运输车辆的日常使用中起着决定性作用。为了准确衡量CO₂的排放量,本研究结合了化石燃料的使用量以及相应的标准煤转化因子进行计算。此外,间接碳排放同样重要,涵盖了内部和外部两部分。间接内部碳排放主要源于污水处理过程中的电耗、热耗等,而间接外部碳排放则与污水厂所需投加化学药剂的生产密切相关。需要说明的是,电耗计算仅考虑生产运行部分,排除了办公与生活用电;由于该厂无采暖需求,热耗在此暂不讨论;物耗则聚焦于生产过程中使用的混凝剂、絮凝剂、碳源消毒剂等化学药剂,根据各自的CO₂排放因子进行碳排放量核算^[14]。

1.2.1 直接碳排放核算

直接碳排放核算包括了污水处理过程中产生的CO₂、CH₄、N₂O排放。其计算如式(1)~式(3)。

$$E_{N_2O} = \sum_{i=1}^l [Q_{tb,i} \times (T_{TNb,i} - T_{TNeb,i}) \times E_{EFN_2O} C_{N_2O/N_2} \times 10^{-3} \times F_{N_2O}] / \sum_{i=1}^l Q_{tb,i} \quad (1)$$

其中: E_{N_2O} ——N₂O直接排放强度,kg CO₂/m³;
 $Q_{tb,i}$ ——污水生物处理单元第*i*d进水水量,m³;
 $T_{TNb,i}$ ——污水生物处理单元第*i*d平均

进水TN质量浓度,mg/L;

$T_{TNeb,i}$ ——污水生物处理单元第*i*d平均

出水TN质量浓度,mg/L;

E_{EFN_2O} ——N₂O排放因子,取值为0.016 kg N₂O-N/kg TN;

C_{N_2O/N_2} ——N₂O/N₂分子量之比为4/28;

F_{N_2O} ——N₂O温室效应指数^[15],取值为65 kg CO₂/(kg N₂O)。

$$E_{CH_4} = \sum_{i=1}^l \{ [Q_{ra,i} \times (C_{COD_{ra,i}} - C_{COD_{ea,i}}) \times 10^{-3} - S_{G_i} P_{v,i} \rho_s] \times B_0 M_{CF} F_{CH_4} \} / \sum_{i=1}^l Q_{ra,i} \quad (2)$$

其中: E_{CH_4} ——CH₄直接排放强度,kg CO₂/m³;

$Q_{ra,i}$ ——污水厂第*i*d进水水量,m³;

$C_{COD_{ra,i}}$ ——污水生物处理单元第*i*d平均进水COD_{Cr}质量浓度,mg/L;

$C_{COD_{ea,i}}$ ——污水生物处理单元第*i*d平均出水COD_{Cr}质量浓度,mg/L;

S_{G_i} ——污水处理厂第*i*d产生的干污泥量,kg DS;

$P_{v,i}$ ——污水厂第*i*d干污泥量的有机分;

ρ_s ——污泥中有机物与COD_{Cr}的转化系

数,取值为 1.42 kg COD_{Cr}/(kg DS);
 B₀——厌氧过程降解单位 COD_{Cr} 时 CH₄ 的产率系数,取值为 0.25 kg CH₄/(kg COD_{Cr});
 M_{CF}——污水处理过程 CH₄ 修正因子,本研究污水厂厌氧缺氧区充分混合搅拌,好氧区曝气均匀,各构筑物无污泥淤积, M_{CF} 取值为 0.003;
 F_{CH₄}——CH₄ 温室效应指数,取值为 28 kg CO₂/(kg CH₄)^[15]。

$$E_{CO_2} = \sum_{j=1}^l (f_c M_{f,j}) / \sum_{i=1}^l Q_{ra,i} \quad (3)$$

其中: E_{CO₂}——CO₂ 直接排放强度,kg CO₂/m³;
 f_c——标准煤 CO₂ 排放因子,取值为 2.772 5 kg CO₂/(kg 标准煤);
 M_{f,j}——第 j 种化石燃料使用量,按标准煤计算,kg 标准煤;
 j——化石燃料种类代号;
 i——化石燃料种类数量。本研究中污水厂用到的化石燃料为污泥外运的车辆用柴油,取值为 1.457 kg 标准煤/(kg 柴油)。

1.2.2 间接碳排放核算

间接碳排放核算包括了污水处理过程中使用的能耗和物耗碳排放。其计算如式(4)~式(5)。

$$E_e = \sum_{j=1}^l (f_e - w_i) / \sum_{i=1}^l Q_{ra,i} \quad (4)$$

其中: E_e——电耗碳排放强度,kg CO₂/m³;
 f_e——电耗排放因子,本研究采用华东区域电网数值为 0.792 1 kg CO₂/(kW·h);
 w_i——第 i d 用于生产运行的外购电量, kW·h。

$$E_c = \sum_{j=1}^l [\sum_{g=1}^m (f_{c,g} M_{cg,i})] / \sum_{j=1}^l Q_{ra,i} \quad (5)$$

其中: E_c——物耗碳排放强度,kg CO₂/m³;
 f_{c,g}——第 g 种化学药剂的 CO₂ 排放因子,本研究污水厂采用的化学药剂及其 CO₂ 排放因子如表 1 所示^[14];
 M_{cg,i}——第 i d 使用第 g 种化学药剂的质量,kg;
 g——化学药剂种类代号;
 m——化学药剂种类数量。

表 1 化学药剂种类及其 CO₂ 排放因子

化学药剂	排放因子/(kg CO ₂ ·kg ⁻¹)
碳源(乙酸钠)	5.46
PAC	1.62
PAM	1.50
柠檬酸	1.60
次氯酸钠	0.92

1.2.3 碳排放强度修正评价

为了使碳排放核算定量评价更具有普适性,方便污水厂不同周期的纵向对比,在碳排放强度的基础上进行了修正评价,分别对直接碳排放指标进行 TN 去除率(η_{TN})修正,对间接碳排放指标进行处理规模修正以及臭气控制程度修正。通过修正后的碳排放强度可以尽可能准确地核算出归一化的碳排放强度。

η_{TN} 修正系数用于修正 N₂O 排放因子,用 K₁ 表示,η_{TN} 按式(6)计算,不同 η_{TN} 对应的 K₁ 如表 2 所示。

$$\eta_{TN} = \sum_{i=1}^l (T_{TNrb,i} - T_{TNeb,i}) / \sum_{i=1}^l T_{TNrb,i} \quad (6)$$

表 2 η_{TN} 修正系数

η _{TN}	K ₁
η _{TN} < 60%	1.00
60% ≤ η _{TN} < 65%	0.90
65% ≤ η _{TN} < 70%	0.75
70% ≤ η _{TN} < 75%	0.60
75% ≤ η _{TN} < 80%	0.45
80% ≤ η _{TN} < 85%	0.30
85% ≤ η _{TN} < 90%	0.15
90% ≤ η _{TN} < 95%	0.05
η _{TN} ≥ 95%	0.00

处理规模(Q_{da})修正系数用于修正电耗碳排放强度,用 K₂ 表示,处理规模按评价周期内污水处理厂平均进水水量计,不同处理规模对应的 K₂ 如表 3 所示。

表 3 处理规模修正系数

Q _{da} /(m ³ ·d ⁻¹)	K ₂
0 < Q _{da} ≤ 3×10 ⁵	1.00
Q _{da} > 3×10 ⁵	0.90

臭气控制程度修正系数用于修正电耗碳排放强度,用 K_3 表示,不同除臭方式对应的 K_3 如表 4 所示。

表 4 臭气控制程度修正系数
Tab. 4 Correction Coefficients for Odor Control

除臭方式	K_3
无除臭	1.00
部分除臭	0.95
全部除臭加盖	0.90
全部除臭地下式	0.79

无除臭指未对污水处理厂各工艺单元产生的臭气进行收集处理,部分除臭指对部分工艺单元的臭气进行收集处理,全部除臭指对全部工艺单元的臭气进行收集处理,包括加盖和地下 2 种方式。

经过修正后的 N_2O 直接碳排放修正强度和电耗修正强度按式(7)~式(8)计算。

$$E_{N_2O} = E_{N_2O} K_1 \quad (7)$$

$$E_{ec} = E_e K_2 K_3 \quad (8)$$

其中: E_{ec} ——电耗碳排放修正强度, $kg CO_2/m^3$ 。

2 结果和讨论

2.1 污水处理碳排放核算分析

2.1.1 直接碳排放核算分析

该污水厂进出水 TN 浓度如图 2(a) 所示,进水 TN 质量浓度为 3.62~52.60 mg/L,平均质量浓度为 33.63 mg/L。经过处理后,出水 TN 质量浓度为 3.18~52.60 mg/L,平均降至 8.15 mg/L,实现了约 76% 的 TN 去除。 N_2O 直接排放强度与污水处理厂每日进水水量、进出水 TN 浓度相关,通过计算得出逐日 N_2O 排放量变化如图 2(b) 所示,2021 年 N_2O 日均最大排放量为 159.83 kg,最小排放量为 48.81 kg,平均每日排放量为 110.90 kg。则 2021 年 N_2O 转换 CO_2 排放总量为 1.07×10^7 kg, N_2O 碳排放强度为 0.168 7 $kg CO_2/m^3$ 。根据每日进出水 TN 浓度计算的 TN 平均去除率为 71.7%,对应表 2 可知 K_1 取 0.60, N_2O 碳排放修正强度为 0.101 2 $kg CO_2/m^3$ 。

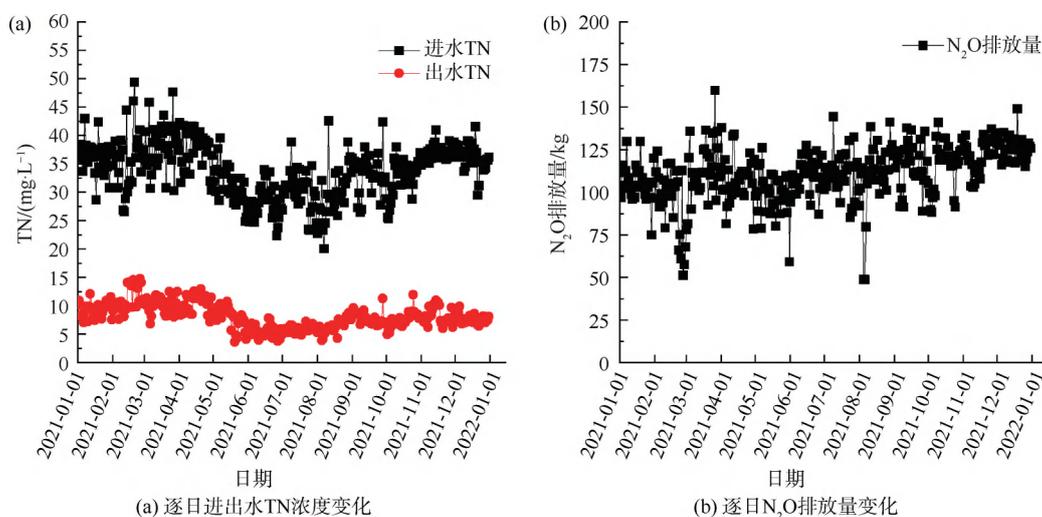


图 2 福建某污水厂逐日进出水 TN 浓度及 N_2O 排放量变化

Fig. 2 Variations of TN Concentration in Daily Influent and Effluent and Daily N_2O Emissions of a WWTP in Fujian

CH_4 直接排放量通过进出水中的碳与固体(污泥)中的碳的差值来衡量,因此 CH_4 排放量与进出水 COD_{Cr} 浓度、污泥有机质含量相关(图 3),污水厂 2021 年度每日进出水 COD_{Cr} 浓度变化情况如图 3(a) 所示,进水 COD_{Cr} 质量浓度为 105~324 mg/L,平均质量浓度为 188.18 mg/L。经过处理,出水

COD_{Cr} 质量浓度为 5~43 mg/L,平均质量浓度降至 12.44 mg/L,实现了约 93.39% 的 COD_{Cr} 去除率。污水厂每日污泥绝干量变化情况如图 3(b) 所示,该污水厂的污泥绝干量基于每日外运的污泥量进行推算,考虑到污泥泥饼的含水率约为 60%。污泥中的有机成分占比,由污水厂实验室每周定期检测的混

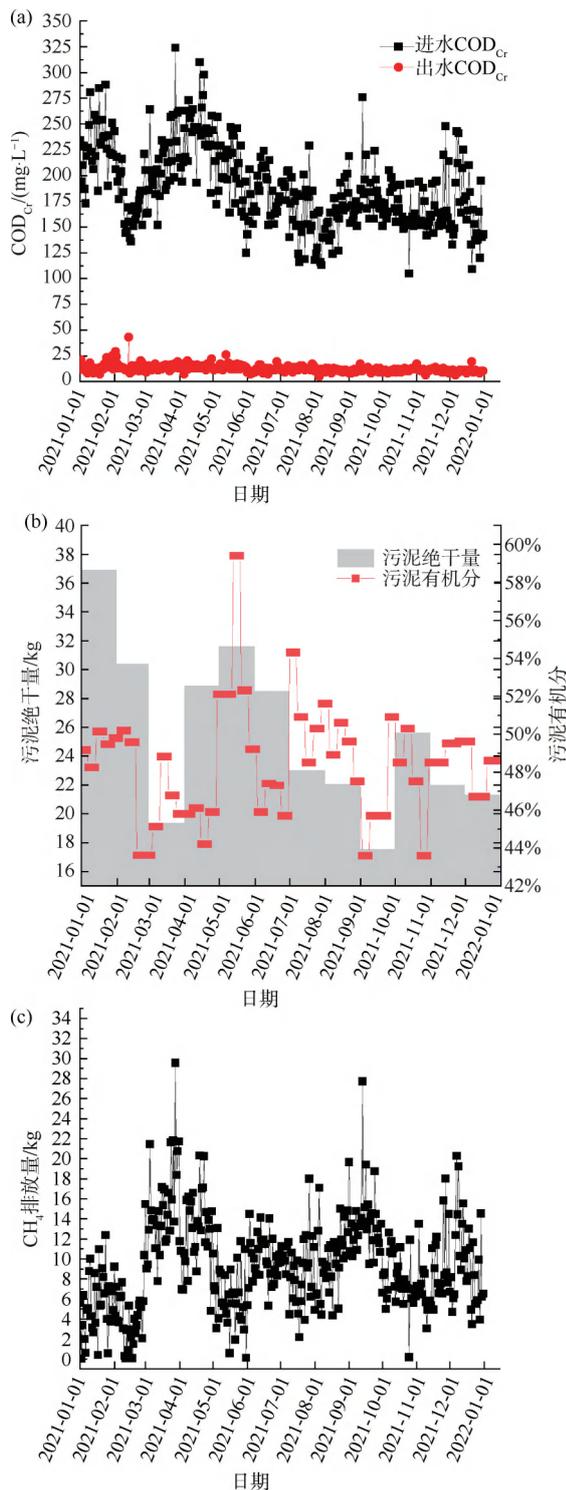


图3 福建某污水厂 (a) 逐日进出水 COD_{Cr} 浓度; (b) 污泥有机分、污泥绝干量; (c) CH_4 排放量变化
Fig. 3 Variations of (a) COD_{Cr} Concentration in Daily Influent and Effluent; (b) Daily Organic Matter of Sludge, and Daily Dried Sludge; (c) Daily CH_4 Emissions from a WWTP in Fujian

合液悬浮固体浓度 (MLSS) 和混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS) 数据得出。从图中可以看出污泥绝干量为 17 532.67~36 895.55 kg, 每日平均污泥绝干量为 25 574.93 kg, 污泥有机分为 43.62%~59.4%, 平均污泥有机分为 49.06%。通过计算得出逐日 CH_4 排放量变化如图 3(c) 所示, 2021 年日均最大排放量为 29.58 kg, 最小排放量为 5.32 kg, 平均每日 CH_4 排放量为 9.28 kg。2021 年 CH_4 转换 CO_2 排放总量为 94 813.89 kg, CH_4 碳排放强度为 $0.001 497 \text{ kg } CO_2/m^3$ 。

污水厂二氧化碳直接排放量由化石燃料直接或间接燃烧产生, 该水厂用到的化石燃料为污泥外运的车辆用油, 污泥外运卡车平均每车载重 20 t, 厂区距离污泥外运处置单位平均距离为 32 km, 污泥外运车辆油耗为 0.5 L/km。最终 CO_2 年排放量如图 4 所示, CO_2 排放总量为 86 981.09 kg, CO_2 碳排放强度为 $0.001 373 \text{ kg } CO_2/m^3$ 。

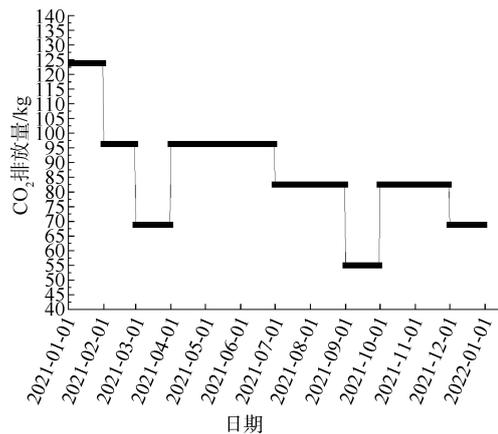


图4 福建某污水厂逐日 CO_2 排放量变化
Fig. 4 Variations of Daily CO_2 Emissions of WWTP in Fujian

综上, 2021 年 N_2O 碳排放强度为 $0.168 7 \text{ kg } CO_2/m^3$, CH_4 碳排放强度为 $0.001 497 \text{ kg } CO_2/m^3$, CO_2 碳排放强度为 $0.001 373 \text{ kg } CO_2/m^3$, 直接排放强度为 $0.171 6 \text{ kg } CO_2/m^3$ 。

2.1.2 间接碳排放核算分析

2021 年水厂外购电量如图 5(a) 所示。由图 5(a) 可知, 每日电耗最大值为 $89 249.03 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 最小值为 $76 885.71 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 平均值为 $82 866.27 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 电耗碳排放量如图 5(b) 所示, 电耗排放总量为 $23 958 005.51 \text{ kg } CO_2$, 电耗碳排放强度为 $0.378 2 \text{ kg } CO_2/m^3$ 。

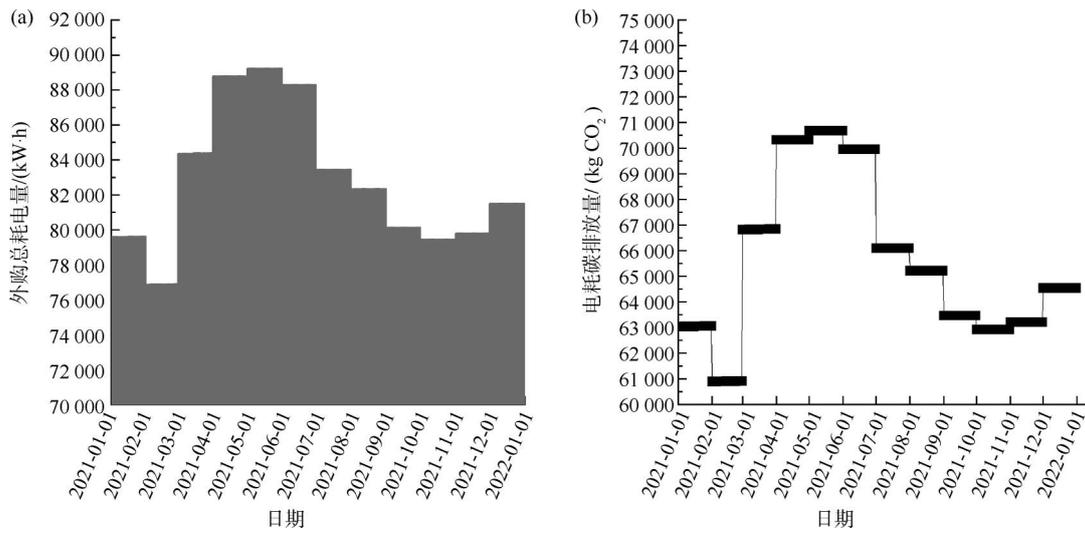


图5 福建某污水厂(a)逐日外购总耗电量;及(b)电耗碳排放量变化

Fig. 5 Variations of (a) Daily Total Power Consumption; and (b) Carbon Emission of lower Consumption of a WWTP in Fujian

CO_2/m^3 。根据水厂处理规模,由表3可知, K_2 取1.00;根据污水厂全厂加盖除臭现状由表4可知 K_3 取0.90。综上电耗碳排放修正强度为 $0.340\text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ 。

该污水厂日常运行过程中用到的药剂主要有碳源、PAC、PAM、柠檬酸、次氯酸钠。日均消耗如图6所示,其中碳源每日消耗最大值为 4.57 t ,最小值为

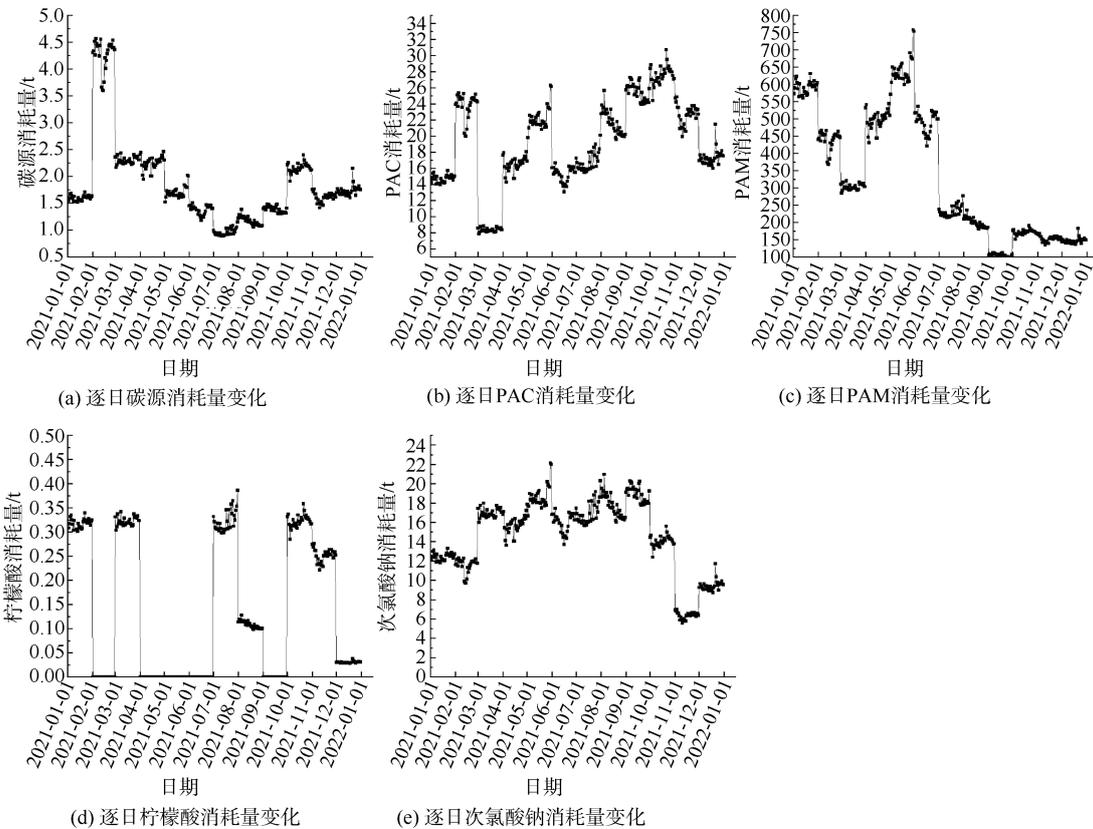


图6 福建某污水厂逐日药剂消耗量变化

Fig. 6 Variations of Daily Chemical Consumption of a WWTP in Fujian

0.89 t,平均值为 1.86 t。2021 年 PAC 日均投加量为 7.88~30.73 t,平均投加量为 19.32 t/d,投加波动较大,这与水量波动变化相关。2021 年 PAM 日均投加量为 98.59~758.36 kg,平均投加量为 329.66 kg/d。柠檬酸投加主要用来 MBR 工艺膜清洗,膜清洗频率根据膜通量变化决定。次氯酸钠投加主要用来出水消毒,用量与出水水量呈正相关性,平均用量为 14.59 t/d。物耗碳排放量如图 7 所示,物耗排放总量为 200 609 kg CO₂,物耗碳排放强度为 0.003 167 kg CO₂/m³。

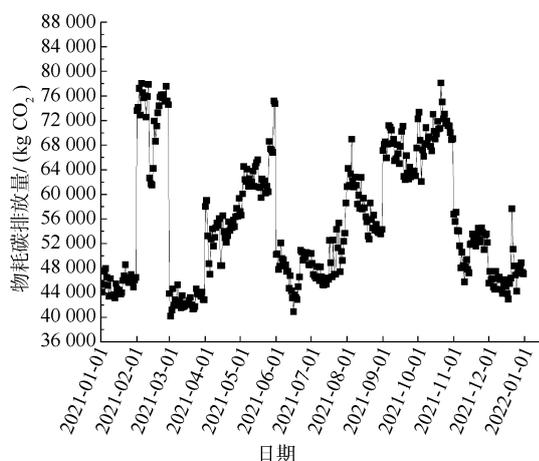


图 7 福建某污水厂物耗碳排放量变化

Fig. 7 Variations of Daily of Carbon Emission of Material Consumption of a WWTP in Fujian

综上,2021 年度电耗碳排放强度为 0.378 2 kg CO₂/m³,物耗排放强度为 0.003 1 kg CO₂/m³。间接排放强度为 0.381 4 kg CO₂/m³。

2.1.3 厂区碳排放核算汇总

综上,该污水厂 2021 年 N₂O、CH₄、CO₂ 的碳排放强度分别为 0.101 2、0.001 497、0.001 373 kg CO₂/m³,直接排放强度为 0.104 112 kg CO₂/m³。电耗和物耗的碳排放强度分别达 0.340 4 kg CO₂/m³ 和 0.320 4 kg CO₂/m³。间接排放强度为 0.660 9 kg CO₂/m³。该污水厂 2021 年碳排放强度为 0.765 0 kg CO₂/m³。

2.2 污水厂节能降耗低碳运行策略与措施

污水处理过程中不可避免地需要消耗能源,而这些能源的消耗往往伴随着温室气体的排放。本研究致力于在确保污水处理质量达标的同时,积极探索实现低碳运行的策略,以期达到减污降碳的双重目标^[16]。污水处理作为复杂过程,长期依赖于人工

技术和资源能源消耗以去除污染物,但其本质仍是从水污染向其他污染形式的转化,如大气和土壤污染。面对碳中和的挑战,污水处理行业因其高能耗特性,急需解决由此产生的碳排放问题。为此,需要在污水处理过程中实现“资源最大化与能效最优化”。在“资源最大化”方面,应充分利用污水厂场地资源,积极挖掘污水和污泥中的有机能源潜力,并有效整合太阳能、风能等可再生能源,通过新能源发电技术,实现污水厂运行的低碳化。在“能效最优化”方面,需要从宏观和微观 2 个层面入手,全面推动污水处理厂的节能降耗工作。从宏观层面来看,可以通过优化工艺流程、提升设备效率等手段,减少污水处理过程中直接消耗的电能和药剂量。而从微观层面来看,可以通过调整工艺运行参数、优化微生物群落结构等方式,降低微生物所需的耗能,从而间接减少电能和药剂的消耗。

本研究根据分析该污水厂污水处理碳排放核算结果,因地制宜综合厂区地理位置及周边资源,提出了以下 4 条减碳措施,并维持低碳运行 8 个月,记录了相关基础数据。

(1) 更换低碳碳源药剂

在污水处理过程中,外加碳源和化学药剂是构成间接能耗的重要组成部分,污水厂原设计中外加碳源选用乙酸钠,相对分子质量为 82.03,碳排放因子通过相对分子质量转化测算为 5.46 kg CO₂/kg。值得一提的是,本研究污水厂地理位置特殊,紧邻附近的制糖工业。糖蜜是制糖工业的副产物,成分多样但富含可发酵蔗糖。在制糖工业中,糖蜜并非最终产品,需要特殊处理。然而,将糖蜜用作碳源投加不仅降低了用药成本,还解决了制糖工业中糖蜜的处置难题。糖蜜成分复杂,主要以糖类(蔗糖和其他还原糖)为主,作为碳源投加时易被微生物分解。从更宏观的角度看,利用本地产生的糖蜜而非外购其他碳源,实现了当地碳源的内循环,减少了间接能耗的消耗,达到了药剂使用的“能效最优化”效果^[17]。由于糖蜜的精确成分因制糖工艺和原料的不同而有所差异,因此很难给出一个绝对的碳排放因子,本研究基于蔗糖作为糖蜜中的主要成分来进行估算,相对分子质量为 342.3,碳排放因子通过相对分子质量转化测算为 1.58 kg CO₂/kg,显著低于原使用的乙酸钠的碳排放因子。

(2) 调节运行参数降低碳排放

经过深入分析该污水厂 2021 年的运行数据及其工艺流程,发现鼓风机用电是该厂的主要能耗来源。从微观角度分析,曝气量的精确调控对提升废水处理系统效能和降低能耗具有关键作用。当曝气量不足时,硝化反应受阻且易滋生丝状菌,导致污泥膨胀^[18];而过量曝气则显著增加电耗,破坏污泥絮体结构,损害出水质量。值得注意的是,生物池中溶解氧溶氧仪所检测的氧含量主要反映的是好氧微生物用氧后的剩余量,这暗示着在日常运行过程中,曝气量可能存在过剩的情况。为了优化能耗,本研究在生物段实施低氧控制技术^[19],具体而言,是将生物池好氧段的溶解氧质量浓度从传统的 2.0 mg/L 降低至 0.5 mg/L,这一举措在确保氨氮有效去除的同时,维持了后续回流缺氧区的低氧状态,并保留了部分 COD_{Cr} 用于缺氧区的反硝化除氮过程,从而减少了碳源投加量。最重要的是,这一举措能大幅度降低曝气量,进而显著减少污水处理厂的能耗。

(3) 优化变频调节设备降低功率

经过对现场运行情况和水质水量的深入分析,通过变频精确调整主要设备的运行参数,以实现功率降低与能耗减少。基于工艺流程的水力损失和污染物去除效率的综合计算,成功地将提升泵、回流泵等设备通过变频调整至各自运行区间的最优模式,从而提升了设备的整体运行效率。针对 2021 年的进出水水质水量数据,全面排查了全场用电设备,并对膜池回流泵进行了变频调节参数的优化。在确保出水水质稳定达标的前提下,有效降低了回流泵的功率消耗。同时,还对脱水机房的泥饼螺旋输送机进行了技术改造,进一步实现了设备功率的节能降耗。这些措施共同推动了水厂的节能减排工作,取得了显著成效。

(4) 光伏改造能源利用

该污水厂所处地区日照条件优越,据 SolarGIS 软件数据显示年太阳辐射量为 5 319 MJ/m²,充分证明了该地区太阳能资源的丰富性。因此,该污水厂区域具备较高的太阳能开发潜力,适宜建设光伏发电系统。为了充分利用太阳能资源,污水厂在现有园区的屋顶及水池上空布局了分布式光伏发电设施。铺设面积约为 24 922.3 m²。光伏设计容量为 2.299 MW_p,共采用 4 219 块 545 W_p 单晶硅光伏组件。光伏组件在运行过程中,光电转换效率会受到

一定影响,导致输出功率有所降低,且电池组件在光照及常规大气环境中使用会逐渐衰减。根据本工程的设计,光伏组件设计寿命内总衰减率不超过 20%,逐年递减,首年衰减 2.5%。经过计算,该污水厂通过光伏发电累计发电量可达到 6 128.49 万 kW·h,预计未来 25 年内的年均发电量为 245.14 万 kW·h。这一举措不仅实现了污水厂在能源利用上的“资源最大化”,也为污水厂的低碳运行提供了重要的技术支持,成为推动整体污水厂低碳发展的重要途径之一^[20]。

2.3 污水厂低碳运行分析

该污水厂自 2022 年初项目启动起积极推进方案实施,对厂区各个工艺段进行维护管理,并按照减碳措施进行工艺改进、加强各个生产环节的能耗控制、建设分布式光伏电站等。2021 年全年和 2022 年 1 月—8 月份碳排放核算结果如表 5 所示,各项碳排放强度变化及逐日碳排放总强度如图 8 所示,通过近 2 年各项碳排放强度动态变化结果可以得出:采取减碳措施后所有碳排放强度指标都在呈现下降趋势,尤其是物耗碳排放强度,其下降幅度尤为显著。逐日碳排放总强度热图进一步揭示,2021 年 1 月—2022 年 8 月,碳排放量存在明显的季节性波动,整体呈下降趋势。冬季由于气温低、进水浓度高、水量小,碳排放量相对较高;而夏季则因气候条件及处理效率的提高,碳排放量相对较低。这些变化对未来污水厂运行参数的优化及设备维护具有重要的指导意义。此外,减碳措施实施后,碳排放强度整体呈现下降趋势,这证实了低碳运行是通过全面调控各能耗环节而非单一减少某项能耗来实现的。

表 5 低碳运行前后碳排放指标对比(单位:kg CO₂/m³)
Tab. 5 Comparison of Carbon Emission Indices before and after Low-Carbon Operation(Unit: kg CO₂/m³)

指标	2021 年	2022 年
N ₂ O 碳排放修正强度	0.101 242	0.086 463
CH ₄ 碳排放强度	0.001 497	0.001 215
CO ₂ 碳排放强度	0.001 373	0.001 270
电耗碳排放修正强度	0.340 403	0.305 609
物耗碳排放强度	0.320 448	0.315 810
直接碳排放强度	0.104 112	0.088 948
间接碳排放强度	0.660 852	0.621 424
碳排放强度	0.764 964	0.710 371

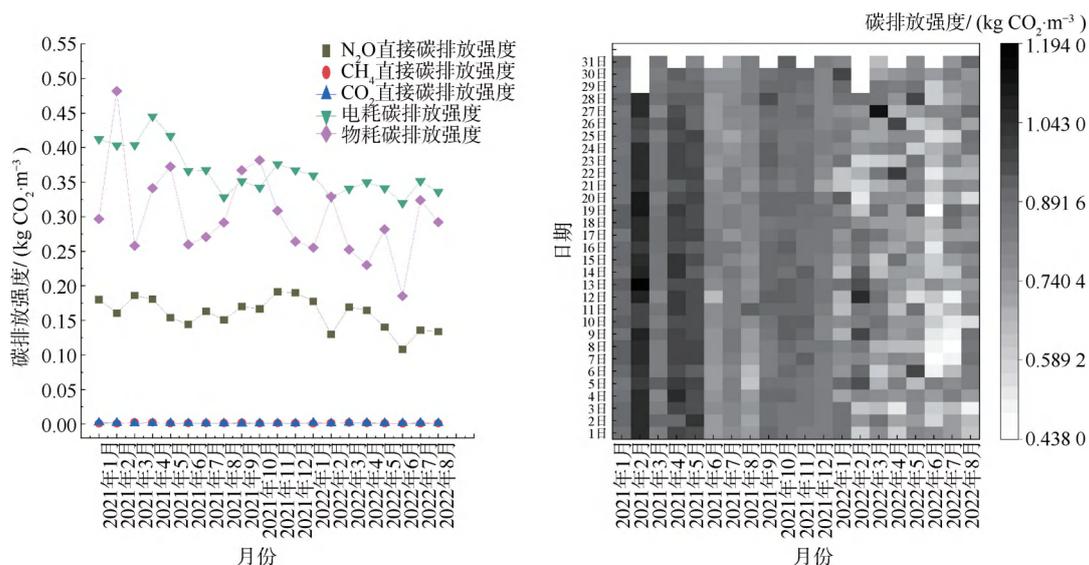


图8 福建某污水厂(a)低碳运行前后各项碳排放强度动态变化图;(b)逐日碳排放总强度时间序列热图

Fig. 8 (a) Dynamic Line Chart of Various Carbon Emission Intensities; (b) Time-Series Heatmap of Daily Total Carbon Emission Intensity; before and after Low-Carbon Operation of a WWTP in Fujian

以调解曝气量为例,从宏观角度看,通过调整溶解氧浓度,直接降低了鼓风机的能耗,进而减少了电耗碳排放强度。从微观角度看,精确控制曝气量在保障氨氮去除效果的同时,确保了回流缺氧区的低氧状态,延长了污泥使用寿命,促进了微生物的内源性呼吸,从而减少了污泥产量及相应的 CO₂ 排放和加药调理的物耗碳排放。

综上所述,该污水厂通过实施一系列减碳措施,成功实现了碳排放强度的整体下降,这不仅证明了低碳运行的可行性,也为未来污水厂的节能减排工作提供了宝贵的经验和启示。

3 结论

(1) 本文遵循《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)的理论框架,对福建某污水厂实施了详尽的碳排放核算,结果显示该厂2021年全年碳排放强度为 0.765 0 kg CO₂/m³。

(2) 根据分析该水厂污水处理碳排放核算结果,因地制宜综合厂区地理位置及周边资源,提出了以下4条减碳措施:更换低碳碳源药剂、调节运行参数降低碳排放、优化变频调节设备降低功率、光伏改造能源利用。

(3) 该水厂低碳运行阶段碳排放强度为 0.710 4 kg CO₂/m³。较2021年度碳排放强度各项指标有全面减少趋势。

(4) 污水处理低碳运行应以微观低碳机理为抓

手,通过调节运行参数等手段,辅以新能源发电的使用,共同推动污水处理行业向更加低碳、环保的方向发展。

参考文献

[1] DUAN H, ZHOU S, JIANG K, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5 °C warming limit [J]. Science, 2021, 372 (6540): 378-385.

[2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国生态环境部. 关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见 [EB/OL]. (2023-12-12) [2024-03-22]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6923468.htm.

National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Implementation opinions on promoting synergistic efficiency enhancement of wastewater treatment for pollution reduction and carbon reduction [EB/OL]. (2023-12-12) [2024-03-22]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6923468.htm.

[3] 章智勇. 更严格排放标准下的市政污水处理厂工程设计与碳排放分析——以宁波某污水处理厂为例 [J]. 净水技术, 2023, 42(5): 158-163.

ZHANG Z Y. Engineering design and carbon emission analysis of municipal WWTP under stricter discharge criteria——Case of a WWTP in Ningbo [J]. Water Purification Technology, 2023, 42

- (5): 158-163.
- [4] 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 等. 污水处理厂的能源与资源回收方式及其碳排放核算:以芬兰 Kakolanmaki 污水处理厂为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 2849-2857.
HAO X D, ZHAO Z C, LI J, et al. Analysis of energy recovery and carbon neutrality for the Kakolanmäki WWTP in Finland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 2849-2857.
- [5] 刘善军, 马雪研, 刘雪洁, 等. 济南市某污水处理厂碳排放评估与分析[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(12): 1732-1736, 1742.
LIU S J, MA X Y, LIU X J, et al. Carbon emission accounting and analysis for a wastewater treatment plant in Jinan City [J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(12): 1732-1736, 1742.
- [6] 赵荣钦, 余娇, 肖连刚, 等. 基于“水—能—碳”关联的城市水系统碳排放研究[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3119-3134.
ZHAO R Q, YU J, XIAO L G, et al. Carbon emissions of urban water system based on water-energy-carbon nexus [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 3119-3134.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)[EB/OL]. (2023-12-12) [2024-03-22]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201804/W020180926550238576829.pdf>.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for collaborative control of greenhouse gas accounting for pollutant removal in urban wastewater treatment plants (trial) [EB/OL]. (2023-12-12) [2024-03-22]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201804/W020180926550238576829.pdf>.
- [8] 中国环境保护产业协会. 污水处理厂低碳运行评价技术规范: T/CAEPI 49—2022[S/OL]. (2023-12-12) [2024-03-22]. <http://www.caepi.org.cn/epa/resources/pdfs/web/viewer.html?file=/epa/platform/file/filemanagecontroller/downloadfilebyid/1654504685461037732352>.
China Association of Environmental Protection Industry, Technical specifications for low-carbon operation evaluation of sewage treatment plant: T/CAEPI 49—2022[S/OL]. (2023-12-12) [2024-03-22]. <http://www.caepi.org.cn/epa/resources/pdfs/web/viewer.html?file=/epa/platform/file/filemanagecontroller/downloadfilebyid/1654504685461037732352>.
- [9] 王洪臣, 陈加波, 张景炳, 等. 《污水处理厂低碳运行评价技术规范》标准解读及案例展示[J]. 环境工程学报, 2023, 7(3): 705-712.
WANG H C, CHEN J B, ZHANG J B, et al. Standard interpretation and case presentation *Technical Specification for Low-Carbon Operation Evaluation of Sewage Treatment Plant* [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(3): 705-712.
- [10] ABULIMITI A, WANG X, KANG J, et al. The trade-off between N₂O emission and energy saving through aeration control based on dynamic simulation of full-scale WWTP [J]. Water Research, 2022, 223(1): 1-12.
- [11] HAAS D W D, YE D L. Better understanding wastewater treatment's nitrous oxide emissions [J]. Water, 2021, 6(2): 1-15.
- [12] 盛德洋, 朱洁, 安东璇, 等. 基于碳减排的污水厂污泥处理处置全流程最佳技术路线分析[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 75-82.
SHENG D Y, ZHU J, AN D X, et al. Analysis of the optimized technical route for the whole process of sludge treatment and disposal in WWTPs based on carbon emission reduction [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 75-82.
- [13] 郭恰, 陈广, 马艳. 城市水系统关键环节碳排放影响因素分析及减排对策建议[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 113-117.
GUO Q, CHEN G, MA Y. Analysis on influencing factors of carbon emission in key processes of urban water system and suggestions for emission reduction [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 113-117.
- [14] 章智勇. 更严格排放标准下的市政污水处理厂工程设计与碳排放分析——以宁波某污水处理厂为例[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 158-163.
ZHANG Z Y. Engineering design and carbon emission analysis of municipal WWTP under stricter discharge criteria——Case of a WWTP in Ningbo [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(5): 158-163.
- [15] Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (2019 refinement) [R/OL]. (2023-12-12) [2024-03-22]. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- [16] SHEN W T, ZHANG Y P, ZHANG X, et al. Research on digital energy carbon management platform and services for energy-using companies under the “3060” target [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1171(1): 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/1171/1/012019.
- [17] 朱启荣, 操家顺, 张腾, 等. 污水厂反硝化传统及可供替代碳源研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(6): 1600-1606.
ZHU Q R, CAO J S, ZHANG T, et al. Research progress of traditional and alternative carbon sources for denitrification in wastewater treatment plants [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(6): 1600-1606.
- [18] 罗贤伟, 张晔明, 蒋怀德. 智慧化污水厂全要素运行评价指标体系探索[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 138-143.

(下转第 165 页)

如图 12 所示,2021 年—2022 年,2 套系统共计减少墨水河污染物排放量 COD_{Cr}、TN、SS 分别为 55.164、0.485、41.272 t,为墨水河河道水质改善起到了较大的作用。

7 结语

初期雨水收集处理是解决城市面源污染的重要途径,墨水河下游段初雨系统采用了有效的“分流—调蓄—处理”方案,针对分离、收集、处理等方面,提出了行之有效的手段。通过集中分散相结合的收集方式,采用新型初期雨水分离装置,实现了初期雨水准确收集;通过控制系统将调蓄池与分离装置联动,实现了工程上的精确控制;通过设置真空反冲洗系统,实现调蓄池的定期冲洗,解决了传统初雨调蓄池需要额外水源的问题。新型初期雨水收集系统的构建,为国内河道综合整治工程中初期雨水的收集处理提供了较为典型的治理方案。

参考文献

- [1] 刘楠楠,迟杰,褚一威,等. 高效旋流分离—生态砾间接接触氧化联合装置处理初期雨水径流应用研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1043-1049.
LIU N N, CHI J, CHU Y W, et al. Study on application of efficient hydrocyclone separation combined with ecological gravel contact oxidation device to treat initial rainwater runoff [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(9): 1043-1049.
- [2] 齐明. 城市初期雨水调蓄池布局优化和功能强化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
QI M. Study on optimal layout and function enhancement of storage tanks for initial rainwater [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [3] 周传庭,王梦玉,幸韵欣,等. 城市初期雨水污染及处理措施的研究进展[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 17-26.
ZHOU C T, WANG M Y, XING Y X, et al. Research progress of urban initial stormwater pollution and treatment measures [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 17-26.
- [4] 吕炎,黄更. 北方某城市雨水调蓄池设计案例分析[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 300-304.
LÜ Y, HUANG G. Case study on the design of rainwater detention tank in a northern city [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 300-304.
- [5] 程江. 苏州河储存式雨水调蓄池水环境质量改善效应分析[J]. 中国给水排水, 2014, 30(1): 104-108.
CHENG J. Analysis of water quality improvement in Suzhou Creek by stormwater detention tanks [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(1): 104-108.
- [6] 陈滨,邵丹娜. 镇江城市暴雨强度公式修订分析方法探讨[J]. 中国给水排水, 2014, 30(15): 147-149, 154.
CHEN B, SHAO D N. Discussion on method of amendment and analysis on urban storm intensity formula [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(15): 147-149, 154.
- [7] 杨丰恺,姜应和,许天会. 基于 SWMM 的武汉市城区雨水管网初雨特性分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 22-25.
YANG F K, JIANG Y H, XU T H. Analysis of characteristics of initial rainfall in Wuhan urban analysis of characteristics of initial rainfall in Wuhan urban area rainwater pipe network based on SWMM [J]. Water Resources and Power 2019, 37(8): 22-25.
- [8] 陈民东,张胜,李思敏. 邯郸市雨水初期径流控制量的确定[J]. 资源环境与工程, 2007, 21(4): 435-438.
CHEN M D, ZHANG S, LI S M. The determination on controlled quantity of rainwater initial runoff in Handan City [J]. Resource Environment & Engineering, 2007, 21(4): 435-438.
- [9] 侯文硕,周国华,葛铜岗,等. 道路初期雨水界定及弃流装置研究进展[J]. 给水排水, 2022, 48(2): 133-142.
HOU W S, ZHOU G H, GE T G, et al. Definition of initial road rainwater and disposal device [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(2): 133-142.
- [10] 谢毅,王金鑫,王雄,等. 一种初期污染雨水分离井系统: 202020869171.9 [P]. 2020-05-21.
XIE Y, WANG J X, WANG X, et al. The utility model relates to an initial polluted rainwater separation well system: 202020869171.9 [P]. 2020-05-21.
- [11] 谢毅,王金鑫,王雄,等. 初期雨水截留系统: 202021262828.1 [P]. 2021-05-25.
XIE Y, WANG J X, WANG X, et al. Initial rainwater interception system: 202021262828.1 [P]. 2021-05-25.
- [19] 刘丽娅,刘丹丹,莫华荣,等. 城镇污水生物脱氮除磷研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 49-59.
LIU L Y, LIU D D, MO H R, et al. Research progress of biological nitrogen and phosphorus removal in municipal wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 49-59.
- [20] 吴娇. 上海某污水处理厂碳排放分析及减碳路径探索[J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 135-140.
WU J. Carbon emission analysis and carbon reduction exploration of a WWTP in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s1): 135-140.

(上接第 118 页)