

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.12.009

多模式A/O+MBR工艺的碳排放及优化途径分析

陈浩林^{1,2}, 王 忍³, 安 东^{1,2}, 方运川², 张 鑫⁴, 王 伟⁴,
史乃彪¹, 柳振伟², 赵 媛⁵, 彭 轶^{1,2}

(1. 北京信通碧水再生水有限公司, 北京 101149; 2. 信开环境投资集团有限公司, 北京 101101; 3. 四川远通规划设计有限公司 成都分公司, 四川 成都 610000; 4. 黑龙江工程学院 土木与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150050; 5. 北京市通州区水务局, 北京 101199)

摘 要: 在“双碳”目标背景下,如何在现行污水处理工艺运行条件下实现碳减排对污水处理低碳运行提出了新要求与新使命。以我国北方某3万m³/d处理规模的MBR工艺地下式污水处理厂为例进行碳排放分析,综合污水处理效率、能耗成本核算出该污水处理厂的碳排放强度为1.45 kgCO₂/m³,直接碳排放量约占全厂碳排放总量的20%,间接碳排放量占全厂碳排放总量的80%;在间接碳排方面,电耗的碳排放量占比最高,占总碳排放量的53.93%;药耗的碳排放量占总碳排放量的26.17%。减碳降碳措施方面,在水质达标排放的前提下,以持续优化工艺和设备运行策略为着力点,采用搅拌器间歇运行、除臭分浓度梯度收集等方式,该污水处理厂减碳量约6 293 kgCO₂/d。

关键词: 地下污水处理厂; MBR工艺; 运行效能; 碳排放

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)12-0058-06

Analysis of Carbon Emissions and Optimization Approaches of Multi-mode A/O+MBR Process

CHEN Haolin^{1,2}, WANG Ren³, AN Dong^{1,2}, FANG Yunchuan², ZHANG Xin⁴,
WANG Wei⁴, SHI Naibiao¹, LIU Zhenwei², ZHAO Yuan⁵, PENG Yi^{1,2}

(1. Beijing Xintong Bishui Reclaimed Water Co. Ltd., Beijing 101149, China; 2. Xinkai Environment Investment Group Co. Ltd., Beijing 101101, China; 3. Chengdu Branch, Sichuan Yuantong Planning and Design Co. Ltd., Chengdu 610000, China; 4. College of Civil and Architectural Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China; 5. Tongzhou District Water Affairs Bureau of Beijing Municipality, Beijing 101199, China)

Abstract: Under the “dual-carbon” background, how to achieve carbon reduction under the current operation conditions of sewage treatment processes has put forward new requirements and new missions for the low-carbon operation of sewage treatment. This paper conducts a carbon emission analysis on an underground MBR process sewage treatment plant with a treatment capacity of 30 000 m³/d in North China. Based on the comprehensive sewage treatment efficiency and energy consumption cost, it is calculated that the daily carbon emission intensity of this sewage treatment plant is 1.45 kgCO₂/m³. Direct carbon emissions account for approximately 20% of the total carbon emissions of the entire plant,

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(51778216); 黑龙江省自然科学基金项目(JJ2025PL0120)

通信作者: 彭轶 E-mail: pengyi@sdic.com.cn

and indirect carbon emissions account for 80% of the total carbon emissions of the entire plant. In terms of indirect carbon emissions, the carbon emissions from electricity consumption account for the highest proportion, accounting for 53.93% of the total carbon emissions. The carbon emissions from chemical agents consumption account for 26.17% of the total carbon emissions. In terms of carbon reduction measures, under the premise of meeting the water quality discharge standards, the focus is on continuously optimizing the process and equipment operation strategies. Methods such as intermittent operation of agitators and gradient collection of deodorization concentrations are adopted to achieve a carbon reduction of approximately 6 293 kgCO₂/d for this underground sewage treatment plant.

Keywords: underground sewage treatment plant; MBR process; operational efficiency; carbon emissions

MBR作为现有污水处理主流工艺之一,因具有建设占地小、富集生物量高、工艺集约程度高、处理效率高、出水水质稳定等优势而应用广泛,但其高能耗问题也一直被诟病。如何在“双碳”目标背景下实现MBR工艺及其组合工艺的碳减排途径优化,是该工艺运行中面临的难题。本文以北方某采用多模式A/O+MBR工艺的地下式污水处理厂为例,结合工艺特征,从处理效果、运行能耗与成本及碳排放情况等方面进行多维度分析,系统诊断该污水处理厂的碳排放特征,并提出碳减排措施,以期为同地区地下式污水处理工艺选择和运行提供参考。

1 项目概况

该地下污水处理厂设计规模为3万m³/d,本着土地集约、处理高效、成本节省和“邻避”环境友好的原则进行设计,核心工艺采用多模式A/O+MBR工艺(见图1),出水水质满足北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB11/890—2012)中的B标准要求,出水用于城市景观补水及冲厕、市政环卫道路浇洒和园林绿化浇灌,实现再生水资源充分循环利用;污泥经离心脱水至含水量<80%后外运至污泥处置中心。另外,厂区臭气经收集后均通过生物除臭工艺集中处理,并达到北京市《城镇污水处理厂大气污染物排放标准》(DB11/2007—2022)规定限值。

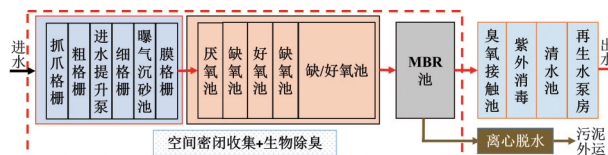


图1 多模式A/O+MBR工艺流程

Fig.1 Process flow chart of multi-mode A/O+MBR

2 主要工艺设计参数

该污水处理厂生化池采用多模式A/O工艺,设计水力停留时间(HRT)为17.4 h,设计平均污泥浓度(MLSS)为3 500 mg/L,污泥负荷为0.08 kgBOD₅/(kgMLSS·d),生化池平均气水比为6:1。MBR膜池设计8格,每格布置4组膜组器,平均膜通量不大于18 L/(m²·h),膜池MLSS为6 000~10 000 mg/L。生化池与膜池的回流系统由两部分组成:一部分是MBR池的混合液回流到多模式A/O池的第一好氧池前端,回流比R₃为400%;另一部分是生化池内部的循环回流,首先是第一好氧池的污泥内回流至第一缺氧段,回流比R₂为300%;进而第一缺氧池的污泥内回流至厌氧段,回流比R₁为100%。该厂设计4套生物除臭系统,生物除臭总风量为105 000 m³/h,生物除臭塔设计停留时间为20 s。

3 运行效果分析

采用2024年的统计数据,对该污水处理厂的运行效果进行分析。从运行数据来看,全年总处理水量为1 111.324 7万m³,日均处理水量为30 364 m³,处理负荷为101.21%。从电耗情况来看(厂区所购电力均来自国家电网,不涉及绿电),全年总用电量为9 137 668.7 kW·h,水处理电耗为0.82 kW·h/m³。

从处理水质和去除率情况来看,全年进水COD平均为215 mg/L,出水COD平均为12 mg/L,COD的去除率约94%;全年进水TP平均为4.00 mg/L,出水TP平均为0.22 mg/L,TP的去除率为95%;全年进水TN平均为48 mg/L,出水TN平均为9 mg/L,TN的去除率约81%;全年进水氨氮平均为45.00 mg/L,出水氨氮平均为0.23 mg/L,氨氮的去除率约99%。贯穿全年的水质浓度变化分析可知,该厂进水污染物浓

度受季节周期变化影响较大,从COD指标来看,年中的进水COD浓度相较于年初与年尾的浓度有明显差异,其主要原因为该厂服务范围内雨污分流不彻底,雨季径流进入污水管网稀释水质浓度。从综合达标排放情况和处理效率来看,各项指标均较好。另外,从污染物的削减角度可以计算出,该厂全年COD、TP、TN削减量分别约为2 265、46、428 t。

4 药耗分析

根据该厂药剂投加种类和药剂统计报表,主要使用药剂为碳源、除磷剂(聚合氯化铝,PAC)、次氯酸钠、阳离子聚丙烯酰胺(PAM)、柠檬酸和液氧。其中,全年投加碳源55.58 t,投加单耗为50 mg/L;除磷药剂采用液体PAC, Al_2O_3 含量为12%,全年投加量为101.80 t,折算单耗为92 mg/L。厂区次氯酸钠使用分两部分:一部分为膜池原位清洗(CIP)和离线碱洗浸泡使用,另一部分为出水消毒使用,在物料统计层面,将两部分用量合并,全年次氯酸钠总用量为51.08 t,投加单耗为46 mg/L。厂区出水回用,在满足回用水的标准下,消毒部分次氯酸钠的投加量控制在10 mg/L左右,高于设计值,其主要原因是外部再生水管网不具备补充加氯条件,为满足再生水用户的要求,防止再生水在枝状管网中水质变质和藻类物质的增生,在再生水泵口端额外增投一定量的次氯酸钠;MBR膜池在线和离线清洗的次氯酸钠使用单耗为36 mg/L。

柠檬酸(固体)用于膜池离线清洗时的酸性浸泡,全年柠檬酸使用量为5.5 t,折算单耗为0.5 mg/L。柠檬酸投加主要集中在5月—7月与11月—12月,与离线洗膜作业时间吻合。液氧主要为臭氧接触反应提供原料,全年液氧使用量为18.30 t,单耗为17 mg/L。该厂全年脱水污泥9 460 t(以含水率80%计),阳离子PAM作污泥调理剂,干粉使用量为15 t,折算成单位绝干污泥(DS)投加量为7.9 kg/tDS(合计水处理单耗为1.35 mg/L),上半年的单耗明显比下半年高,其中1月—6月阳离子PAM平均使用量为10.41 kg/tDS,7月—12月阳离子PAM平均使用量为5.38 kg/tDS,其原因是:①对阳离子PAM进行优选,通过试验,将原分子质量800万当量、离子度为40%的产品更换成分子质量1 000万当量、离子度为45%的阳离子PAM产品;②对离心机运转效能进行优化,如调整离心机腔内堰板,增大离心机污

泥料斗下部的干污泥输送泵能力。

5 碳排放分析与减碳评价

基于已有研究成果^[1-3],本文将结合国内、国际相关碳排放标准和模型对地下污水处理厂的碳排放进行分析,主要以《工业企业温室气体排放核算和报告通则》(GB/T 32150—2015)、《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)、《政府间气候变化专门委员会第五次评估报告》等文献为计算指导依据,该地下式污水处理厂的碳排放核算边界如图2所示。

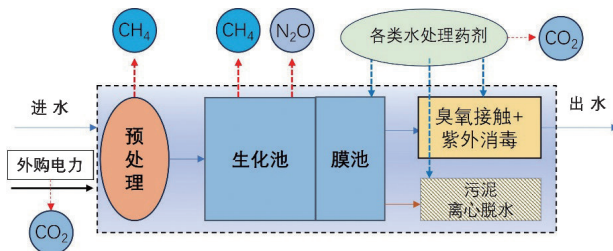


图2 该污水处理厂碳排放核算边界示意

Fig.2 Schematic diagram of carbon emission accounting boundary of the sewage treatment plant

5.1 直接碳排放计算

① CH_4 碳排放量

$$E_{\text{CH}_4} = [Q_{\text{进水}} \times (\text{COD}_{\text{进水}} - \text{COD}_{\text{出水}}) \times \text{EF}_{\text{CH}_4/\text{COD}} - R_{\text{CH}_4}] \times f_{\text{CH}_4} / 1\,000 \quad (1)$$

式中: E_{CH_4} 为污水处理过程中 CH_4 所产生的直接碳排放量, kgCO_2/d ; $Q_{\text{进水}}$ 为污水处理厂进水量, m^3/d ; $\text{COD}_{\text{进水}}$ 为进水COD平均浓度, mg/L ; $\text{COD}_{\text{出水}}$ 为出水COD平均浓度, mg/L ; $\text{EF}_{\text{CH}_4/\text{COD}}$ 为污水处理过程中甲烷排放因子,取 $6.9 \times 10^{-3} \text{ kgCH}_4/\text{kgCOD}_{\text{Re}}$; R_{CH_4} 为污水处理过程中 CH_4 的回收量,厂区并未开展 CH_4 回收,故取0; f_{CH_4} 为 CH_4 温室效应指数,取 $28 \text{ kgCO}_2/\text{kgCH}_4$ 。

② N_2O 碳排放量

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = Q_{\text{进水}} \times (\text{TN}_{\text{进水}} - \text{TN}_{\text{出水}}) \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}} \times C_{\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2} \times f_{\text{N}_2\text{O}} / 1\,000 \quad (2)$$

式中: $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为污水处理过程 N_2O 平均碳排放量, kgCO_2/d ; $\text{TN}_{\text{进水}}$ 为进水TN平均浓度, mg/L ; $\text{TN}_{\text{出水}}$ 为出水TN平均浓度, mg/L ; $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 和总氮测试值的分子质量比,取 $44/28$; $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为污水处理过程中 N_2O 排放因子,取 $5.6 \times 10^{-3} \text{ kgN}_2\text{O}-\text{N}/\text{kgTN}_{\text{Re}}$; $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 温室效应指数,取 $265 \text{ kgCO}_2/\text{kgN}_2\text{O}$ 。

③ 直接碳排放量

$$E_{\text{直接}} = E_{\text{CH}_4} + E_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

式中: $E_{直接}$ 为污水处理过程中直接碳排放总量,以 CO_2 当量计, kgCO_2/d 。

5.2 间接碳排放计算

① 电耗碳排放量

$$E_{电耗}=W\times EF_{电} \tag{4}$$

式中: $E_{电耗}$ 为污水处理外购电力所产生的碳排放量, kgCO_2/d ; W 为污水处理厂日均电耗, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{d}$; $EF_{电}$ 为电耗的碳排放因子,取 $0.9419\text{ kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

表1 化学药剂种类及其CO₂排放因子

Tab.1 Types of chemicals and their CO ₂ emission factors							kgCO_2/kg
药剂种类	碳源(液体)	除磷剂(液体)	次氯酸钠(液体)	柠檬酸(固体)	液氧(液体)	阳离子PAM(固体)	
碳排放因子	2.90	1.60	2.99	8.17	2.00	1.50	

5.3 总碳排放量及减碳途径分析

污水处理厂碳排放总量由直接碳排放量和间接碳排放量之和构成,通过式(1)~(5)计算该厂各类碳排放量及占比,结果见表2。

表2 各类碳排放量及占比情况

Tab.2 Carbon emissions and their proportion

项目		碳排放量/(kgCO_2/d)	占比/%
直接碳排放	CH_4	1 190.86	2.73
	N_2O	7 485.51	17.17
间接碳排放	电耗	23 515.48	53.93
	碳源(液体)	1 518.44	3.48
	除磷剂(液体)	4 505.77	10.33
	次氯酸钠(液体)	4 173.02	9.57
	柠檬酸(固体)	122.55	0.28
	液氧(液体)	1 034.00	2.37
	阳离子PAM(固体)	61.50	0.14

该厂碳排放总量为 $43\,607.13\text{ kgCO}_2/\text{d}$,碳排放强度为 $1.45\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$,相较于国内污水处理厂的碳排放强度($0.45\sim2.26\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$)^[4],处于中等水平。从碳排放占比可以看出,直接碳排放量约占全厂碳排放总量的20%。从直接碳排放的途径分析可知,目前暂未有技术对 CH_4 和 N_2O 碳排放量进行优化或衰减,但已有相关文献对生物固碳技术进行展望^[5],结合现有污水处理厂的实际运行情况和技术水平,这部分碳排放量不可避免。间接碳排放量占全厂碳排放总量的80%,为主要的贡献途径,因此对间接碳排放量(电耗和药耗)的优化和减少才是当前及未来持续的课题,也是后运营时代提升污泥处理水平的立身之本。从该厂的间接碳排放组成结构来看,电耗的碳排放占比最高,占总碳排放量的

② 药剂使用碳排放量

$$E_{药剂}=\sum(M_i\times EF_{药剂i}) \tag{5}$$

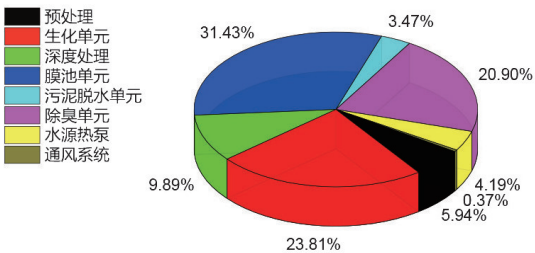
式中: $E_{药剂}$ 为污水处理过程中药剂使用所产生的碳排放量, kgCO_2/d ; M_i 为污水处理过程中第 i 种药剂的使用量, kg/d ; $EF_{药剂i}$ 为污水处理过程中第 i 种药剂所对应的碳排放因子, kgCO_2/kg 。

该污水处理厂化学药剂种类及其 CO_2 排放因子取值如表1所示。

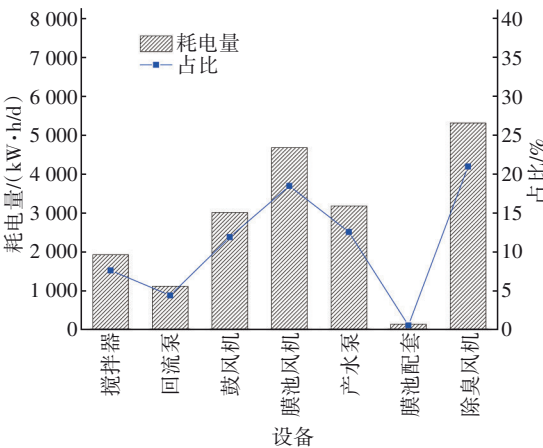
53.93%;药耗的碳排放占26.17%,其组成占比从高到低分别为除磷剂、次氯酸钠、碳源、液氧、柠檬酸、阳离子PAM。如下将对污水处理厂的间接碳排放途径进行实用性分析,以期达到减碳降碳目标。

① 电耗的碳减排途径优化

通过电能监控(智能电表)对各工艺段的用电量进行追踪,统计结果见图3。



a. 用电结构分布



b. 设备耗电量及占比

图3 2024年案例污水处理厂电耗分布及占比

Fig.3 Electricity consumption distribution and proportion of the sewage treatment plant in 2024

由图3(a)可知,生化池、膜池和除臭系统三者

的用电量占比较高,分别为23.81%、31.43%和20.90%,占每日总用电量的76.14%;预处理、深度处理、污泥脱水单元、水源热泵和通风系统占比分别为5.94%、9.89%、3.47%、4.19%和0.37%。从图3(b)可以看出,生化池的电耗主要来自搅拌器、回流泵、鼓风机三部分,占全厂总电量的比例分别为7.57%、4.36%、11.84%;膜池的电耗主要集中于膜池风机(占比18.40%)和产水泵(占比12.50%);除臭系统主要耗电设备为除臭风机,占比高达20.90%。

在保证出水达标的前提下,对于污水处理厂的运行实操来讲,综合现有技术条件和专业人员水平,若要降低生化池的电耗,首先应提升生化池的微生物活性,提高优势菌种的占比,增大硝化速率、反硝化速率,或者对现有生化工艺开展新技术改造,如采用短程硝化反硝化、反硝化脱氮除磷、好氧颗粒污泥、精准曝气系统等低碳技术,所需时间较长且需持续。膜池节能主要体现在曝气吹扫擦洗风机能耗和产水泵能耗上,结合运行经验来看,吹扫风机主要防止膜丝板结,故以控制膜池污泥浓度为切入点,开展膜池污泥浓度与跨膜压差的运行经验积累。产水泵的节能主要采用变频控制,在实操层面的调控空间不是很大。结合本项目生化池与膜工艺的高回流比特性,在保证生化池完全混合和水力紊流条件下,适当优化搅拌器的运行方式,如采用间歇式运行,每半小时启停不相邻两个搅拌器的运行工况。采取该项措施后,估算搅拌器电耗节省960 kW·h/d,电耗间接碳排放量减少904 kgCO₂/d左右。

对于除臭系统,基于除臭在设计阶段和安装阶段均采用“全覆盖、大收集”模式,在设备提资方面存在冗余的除臭能耗。因此应结合污水处理厂的恶臭浓度分布情况(阶梯式),精准、高效去除恶臭污染物,优先采用针对各处理单元的恶臭浓度进行采样分析,对除臭风机进行点对点分区式调控,如以处理工艺流程中的氨气和硫化氢指标为重点监测项目。对粗格栅、细格栅、曝气沉砂池、生化池、膜池和污泥间的恶臭气体进行多次采样分析,结果见表3。可以看出,氨气主要集中在预处理单元(粗格栅、细格栅、曝气沉砂池)、生化池厌氧段和污泥间;硫化氢主要集中在曝气沉砂池和脱泥间。现场采取的措施主要为:依据实测恶臭气体浓度,按处

理单元区域恶臭气体浓度值进行抽吸以控制除臭风机风量,对预处理和污泥车间进行抽吸除臭,生化池和膜池可适当缩减运行时间。在满足恶臭气体浓度达标排放的情况下,厂区除臭电耗节省3 024 kW·h/d,电耗间接碳排放量减少2 848 kgCO₂/d左右。

表3 氨气、硫化氢监测数据

Tab.3 Monitoring data of ammonia and hydrogen sulfide mg/m³

采样点位	氨气	硫化氢
粗格栅	1.563 5	0.549
细格栅	1.315 0	0.016
曝气沉砂池	1.407 0	1.896
厌氧池	1.755 5	N.D.
好氧池	0.603 5	N.D.
膜池	0.366 0	N.D.
污泥脱水间	2.081 5	0.072

注:N.D.代表未检出。

② 药耗的碳减排途径优化

对于药剂的碳减排,其根源还在于生化处理单元的效能或潜能的提升。结合上述分析,该污水处理厂药剂碳排放量占总碳排放量的26.17%,除磷剂和次氯酸钠占比均处于高位,建议优选碳排放因子较小的除磷剂,同时借助智能加药系统耦合处理水质动态调节药剂的投加,精细化节约药剂投加量。另外,通过分析出水水质,在符合排放标准的要求下,可适当不投加药剂。以臭氧为例,其主要作用是脱色和去除难降解有机物,从出水COD和色度指标来看,膜池出水COD均值为18 mg/L,出水色度<2倍,均低于排放标准值,因此实际运行中可适当减少或不投加臭氧,以直接减少臭氧发生器运行和液氧使用造成的碳排放量。据此估算,碳排放量可减少2 541 kgCO₂/d。

6 结论与建议

6.1 结论

① 该地下污水处理厂运行良好,各项水质指标去除率均较好,其中COD、TP、TN、氨氮的去除率分别约为94%、95%、81%和99%。经测算,电耗为0.82 kW·h/m³,生化池、膜池和除臭系统三者的用电量占每日总用电量的76.14%,分别为23.81%、31.43%和20.90%。

② 2024年案例污水处理厂的碳排放总量为43 607.13 kgCO₂/d,碳排放强度为1.45 kgCO₂/m³,其

中直接碳排放量约占20%,间接碳排放量约占80%。在间接碳排放方面,电耗碳排放量占比最高,为53.93%,药耗碳排放量占26.17%。

6.2 建议

① 以间接碳排放为重点控制对象,持续提高生化处理效能,降低或优化运转设备的耗电功率。例如,优化生化池搅拌器的运行方式,采用间歇式运行模式,每半小时启停不相邻两个搅拌器运行,估算搅拌器节省电耗为960 kW·h/d,电耗间接碳排放量减少904 kgCO₂/d左右。

② 对于高能耗的除臭碳减排,应结合污水处理厂的恶臭浓度呈阶梯分布特点,精准、高效去除恶臭污染物,对除臭风机进行点对点分区式调控。例如,在生化池和膜池的恶臭浓度满足排放标准或无法检测条件下,可适当缩减除臭风机的运行时间,估算电耗节省3 024 kW·h/d,电耗间接碳排放量减少2 848 kgCO₂/d左右。

③ 对于药剂碳减排,可优选碳排放因子较小的药剂,同步借助智能加药系统耦合处理水质动态调节药剂的投加量,精细化节约药剂。在符合排放标准的要求下,可适当不投加或少投药剂。例如,该污水处理厂膜池出水COD和色度均低于排放标准限值,可灵活调整臭氧发生器的运行策略,降低碳排放量。采取该举措后,该污水处理厂碳排放量可减少2 541 kgCO₂/d左右。

综上所述,在现有运行条件下,通过一系列组合运行优化策略,案例污水处理厂可减少碳排放量6 293 kgCO₂/d左右。

参考文献:

- [1] 张海亚,李思琦,黎明月,等. 城镇污水处理厂碳排放现状及减污降碳协同增效路径探讨[J]. 环境工程技术学报,2023,13(6):2053-2062.
- ZHANG H Y, LI S Q, LI M Y, et al. Carbon emission analysis of municipal wastewater treatment plants and discussion on synergistic path of pollution and carbon reduction [J]. Journal of Environmental Engineering

Technology,2023,13(6):2053-2062(in Chinese).

- [2] 张石进,丁晶,王琨,等. 污水生化处理中N₂O产生途径、影响因素及减排策略[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,57(2):33-43.

ZHANG S J, DING J, WANG K, et al. Pathways, influencing factors and mitigation strategies for N₂O emissions in wastewater biochemical treatment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024,57(2): 33-43(in Chinese).

- [3] 郝晓地,杨振理,于文波,等. 污水处理过程N₂O排放:过程机制与控制策略[J]. 环境科学,2023,44(2): 1163-1173.

HAO X D, YANG Z L, YU W B, et al. N₂O emission from the processes of wastewater treatment: mechanisms and control strategies[J]. Environmental Science, 2023, 44(2):1163-1173(in Chinese).

- [4] 赵泽佳,庾豪锐,谢祥塔,等. 采用改良A²O工艺中型城镇污水处理厂碳排放特征研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2024,56(1):63-71.

ZHAO Z J, TUO H R, XIE X T, et al. Research on characteristics of carbon emissions in medium-sized urban sewage treatment plants using improved A²O processes[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2024, 56(1): 63-71 (in Chinese).

- [5] 卢伟,朱曜曜,魏彬,等. 华中地区某污水处理厂低碳运行措施及效果[J]. 环境工程学报,2023,17(9): 2813-2819.

LU W, ZHU Y Y, WEI B, et al. Low-carbon operation measures and analysis of the effects in a sewage treatment plant in central China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 2813-2819 (in Chinese).

作者简介:陈浩林(1992—),男,四川平昌人,大学本科,工程师,主要从事给排水技术研发与城镇污水处理运营管理工作。

E-mail:1175688856@qq.com

收稿日期:2025-03-28

修回日期:2025-05-03

(编辑:丁彩娟)