

水处理低碳技术与能源回收

刘雪洁, 石培培, 黄继会, 等. 污水处理厂减污降碳协同控制技术评估方法与应用[J]. 净水技术, 2026, 45(3): 65-74.

Liu X J, Shi P P, Huang J H, et al. Assessment and application of synergistic control technology for pollution and carbon emission reduction in WWTPs [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(3): 65-74.

污水处理厂减污降碳协同控制技术评估方法与应用

刘雪洁¹, 石培培¹, 黄继会², 张俊², 朱春伟¹, 邱勇^{3,*}

(1. 清华苏州环境创新研究院, 江苏苏州 215000; 2. 苏州市排水有限公司, 江苏苏州 215000; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要 【目的】污水处理厂减污降碳协同控制是水务系统双碳转型的必然要求。为基于“双碳”目标的污水处理厂建设与技术改造项目的技术比选提供决策支持, 本文开展了以减污降碳协同控制为目标的技术评估方法研究。【方法】本文基于GPS-X软件构建污水处理厂不同工艺模型, 并应用实际运行数据对模型进行率定; 采用协同控制坐标系-交叉弹性值($E_{w/C}$)法、层次分析法(AHP)-等权重法构建了定性与定量相结合的协同控制技术综合评估方法及模型, 评估了6项协同控制措施的协同控制效果。【结果】精确曝气技术、间歇曝气技术和膜曝气生物膜反应器(MABR)工艺均具有减污降碳的协同控制效果。其中, 精确曝气技术综合评分最高, 是对减污降碳协同效果最佳的技术。以苏州市某污水处理厂为应用案例, 精确曝气技术应用后吨水电耗降低了3.7%, 总氮(TN)去除率增加了1.4%, 化学需氧量(COD)去除率增加了0.74%, 技术应用后的评估结果位于协同控制坐标系第一象限且协同控制 $E_{w/C} < 1$, 与预评估结果一致, 体现了该方法的可行性。【结论】本文构建的减污降碳协同控制效果评估方法, 可作为以减污降碳协同增效为核心目标的技术比选的辅助决策工具, 对显著提升污水处理行业在“双碳”目标下的系统评估能力具有重要的实践指导意义。

关键词 污水处理厂(WWTP) 模拟 减污降碳 协同控制 技术评估

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)03-0065-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.03.006

Assessment and Application of Synergistic Control Technology for Pollution and Carbon Emission Reduction in WWTPs

Liu Xuejie¹, Shi Peipei¹, Huang Jihui², Zhang Jun², Zhu Chunwei¹, Qiu Yong^{3,*}

(1. Research Institute for Environmental Innovation <Suzhou> Tsinghua, Suzhou 215000, China;

2. Suzhou Drainage Co., Ltd., Suzhou 215000, China;

3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract [Objective] Synergistic control of pollution reduction and carbon reduction in wastewater treatment plants(WWTPs) is an inevitable requirement for the dual-carbon transformation of the water system. The research has been conducted on the technical assessment method for synergistic control of pollution reduction and carbon reduction, to provide decision support for the technical comparison and selection of WWTPs based on the “dual carbon” goals. [Methods] This paper constructed different process models for WWTPs based on GPS-X software and calibrated the models using actual operational datas. A collaborative control coordinate system-cross elasticity value ($E_{w/C}$) and analytic hierarchy process (AHP)-equal weight method were adopted to construct a comprehensive assessment method and model combining qualitative and quantitative aspects for collaborative control technology. The collaborative control effects of 6 collaborative control measures were evaluated. [Results] Precision aeration technology, intermittent aeration technology and membrane aerated biofilm reactor (MABR) process had synergistic control effects on pollution reduction and

[收稿日期] 2025-09-02

[基金项目] 清华大学-丰田联合研究院跨学科专项

[作者简介] 刘雪洁(1987—), 女, 高级工程师, 主要从事污水处理技术评估研究等工作, E-mail: liuxuejie87@aliyun.com。

[通信作者] 邱勇(1977—), 男, 副研究员, 主要从事污水处理过程控制与技术评估等工作, E-mail: qiuyong@tsinghua.edu.cn。

carbon reduction, with precision aeration technology receiving the highest comprehensive score. It was the most recommended technology for achieving the best synergistic control effect in pollution reduction and carbon reduction. Taking a WWTP in Suzhou as an application case, the application of precise aeration technology reduced the electricity consumption per ton of water by 3.7%, increased the total nitrogen (TN) removal rate by 1.4%, and increased the chemical oxygen demand (COD) removal rate by 0.74%. The evaluation results after the application of the technology were located in the first quadrant of the cooperative control coordinate system and the $E_{w/c}$ of co-control < 1, which was consistent with the pre-assessment result, demonstrating the feasibility of this method. [**Conclusion**] The assessment method for the synergistic control effect of pollution reduction and carbon emission reduction in this paper, can serve as an auxiliary decision-making tool for the technical comparison with the core objective of achieving synergistic benefits from pollution reduction and carbon emission reduction. It has significant practical guidance for significantly improving the system evaluation capability of the wastewater treatment industry under the “dual carbon” goals.

Keywords wastewater treatment plant (WWTP) simulation pollution and carbon emission reduction synergistic control technical assessment

2020年,我国承诺2060年前实现“碳中和”目标,作为世界最大的发展中国家和全球第一碳排放大国,加快落实国家碳达峰目标、碳中和愿景已成为推动我国经济高质量发展的关键任务^[1]。污水处理行业属于高能耗行业,其处理过程中会产生二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、一氧化二氮(N₂O)等直接碳排放和电耗、药耗等间接碳排放^[2]。2023年12月,三部委发布的《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》总体要求中提出:到2025年,污水处理行业减污降碳协同增效取得积极进展,能效水平和降碳能力持续提升^[3]。

我国水务系统在减污和降碳方面有了大量的研究,但对于协同控制的研究仍处于起步阶段,且多集中于单一技术的应用效果分析。杨洋^[4]通过对广东某城镇污水处理厂氧化沟工艺结构和曝气系统进行改造,实现了出水水质从一级B标准提升至一级A标准,同时,CO₂年减排量达335.6 t;胡香等^[5]通过实施曝气系统精确控制、内回流比优化等措施,使化学需氧量(COD)、总氮(TN)去除率分别增加了21.15%、16.42%,碳排放量降低了15.81%。目前仍缺乏对减污降碳协同控制措施的协同控制效应研究和技术比选。

常见的协同控制效应研究方法有协同控制坐标系法^[6]、协同控制交叉弹性分析法^[7]、协同控制评估指数法^[8-9]、生命周期评价法^[10]等。目前,研究主要集中于重点行业的大气污染物和碳排放的协同效应,对于水质污染物的去除和碳排放的协同效应研究较少。高月明等^[11]基于污水处理厂历史运行数据,从工艺和规模方面评价了我国南方640座污水处理厂的减污降碳协同效果,未对具体的减污降

碳技术进行评估。协同控制技术的比选是筛选协同控制技术、实现减污降碳协同控制的重要途径。层次分析法(AHP)是一种将定性与定量相结合的分析方法,充分利用人的主观判断,并转化为数量标度进行科学的处理方法^[12],已被广泛用于水处理技术评估。谢礼国等^[12]应用AHP法对三峡库区农村生活污水处理技术进行比选,筛选出人工湿地处理技术为当地最优污水处理技术;刘建伟等^[13]基于AHP评估了北京市农村污水处理常见的6种技术;刘雪洁等^[14]采用AHP-模糊数学(Fuzzy)综合评价模型评估了46项碳减排技术的可行性。

本文以苏州市某污水处理厂为对象,构建了工艺概化模型,基于协同控制效应坐标系法、协同控制交叉弹性法构建了污水处理系统减污降碳协同控制技术的评估方法,评估了目标技术的协同控制效果;采用AHP-等权重综合评价模型对具有协同控制效果的技术进行技术综合评估,为污水处理厂减污降碳技术比选提供决策依据,并应用于该污水处理厂以验证实际应用效果。

1 方法

1.1 污水处理厂概况

苏州市某污水处理厂设计规模为4万m³/d,采用厌氧-缺氧-好氧(AAO)活性污泥法工艺,出水满足《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB32/1072—2018)和苏州市发布的《关于高质量推进城乡生活污水治理三年行动计划的实施意见》中“苏州特别排放限值”标准要求。

数据来源于案例污水处理厂运行报表,利用模拟软件GPS-X构建基准工艺(图1)及技术工艺模

型,对实际运行条件、优化运行条件进行模拟,模型率定的主要参数及调整范围如表 1 所示,本研究选用污水处理厂 2022 年进水水质月度均值来进行稳态模拟。根据国际水协会在《活性污泥模型使用指

南》中提出的:高质量的模型产生的平均相对误差应该为 5%~15%^[15]。本文出水水质模拟值与实际值的平均相对误差偏差均小于 10%,符合国际水协会的高质量模型的评价标准。

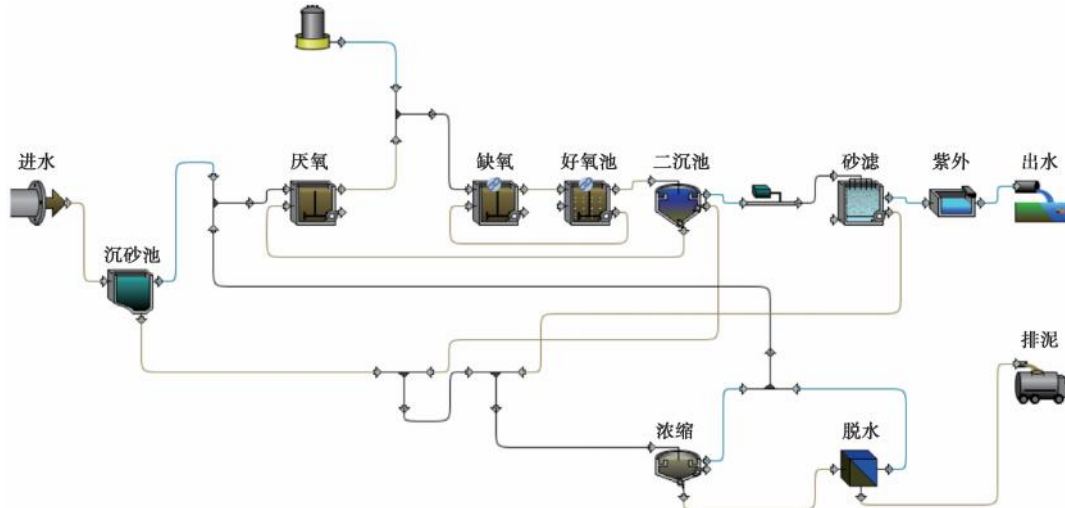


图 1 案例污水处理厂基准工艺概化模型

Fig. 1 Generalized Model of Basic Process for the Case of WWTP

表 1 GPS-X 模型率定主要参数及调整范围

Tab. 1 Main Parameters and Adjustment Scopes for GPS-X Model Calibration

参数类型	参数	单位	默认值	校正值
进水组分参数	总 COD 中的溶解惰性组分占比	—	0.04	0.03
	溶解惰性物质的磷含量	g P/(g COD)	0.010	0.006
化学计量参数	基于溶解基质的异氧菌好氧产率	g COD/(g COD)	0.666	0.730
	基于溶解基质的异氧菌缺氧产率	g COD/(g COD)	0.533	0.480
	聚磷菌好氧产率	g COD/(g COD)	0.639	0.600
	聚羟基脂肪酸酯(PHA)存储产率	g P/(g COD)	0.4	0.3
动力学参数	基于基质的最大比生长速率	d ⁻¹	3.2	4.0
	氨氧化菌的最大生长速率	d ⁻¹	0.90	0.65
	聚磷菌最大生长速率	d ⁻¹	1.0	1.5
	聚磷菌的好氧衰减系数	d ⁻¹	0.20	0.25

1.2 协同控制效果评估方法

首先,采用协同控制效应坐标系法^[6](图 2)、协同控制交叉弹性法^[16][式(1)、表 2]同时对减污降碳技术措施进行减污降碳协同控制效果评估。

$$E_{a/G} = \frac{W_{a,j}/Q_{a,0}}{E_{G,j}/Q_{G,0}} \quad (1)$$

式中: $E_{a/G}$ ——污染物 a 与温室气体协同控制交叉弹性值;

$W_{a,j}$ ——应用措施 j 后,污染物 a 的去除率变化量;

$Q_{a,0}$ ——污染物 a 在基准工艺下的去除率;

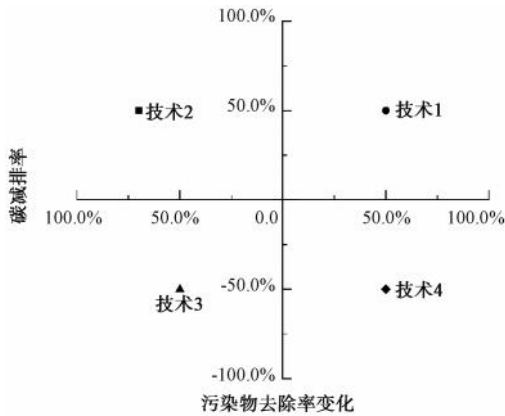
$E_{G,j}$ ——应用措施 j 后的碳排放强度变化量, $\text{kg CO}_2/\text{m}^3$;

$Q_{G,0}$ ——基准工艺的碳排放强度, $\text{kg CO}_2/\text{m}^3$ 。

其次,对 2 种方法评估结果均具有协同控制效果的技术,采用 AHP-等权重综合评价模型进行技术综合评估。

1.2.1 协同控制参数选取

污水处理过程碳排放包括直接碳排放和间接碳



注:技术 1—具有减污降碳协同控制效果;技术 2—具有减污效果,但无降碳效果;技术 3—既无减污效果,也无降碳效果;技术 4—仅具有降碳效果,但无减污效果。

图 2 减排措施协同控制效应坐标系示意图

Fig. 2 Schematic of Coordinate System for Synergistic Control Effect of Emission Reduction Measures

排放,其中直接碳排放主要是在生化段去除碳氮化合物过程当中产生^[17],间接碳排放主要来源于电耗和物耗。综上,本研究选取 COD 去除率变化量、TN 去除率变化量、氨氮去除率变化量、总磷(TP)去除率变化量作为污染物协同控制参数,选择碳减排率作为碳排放协同控制参数。

1.2.2 协同控制措施选取

刘善军等^[18]、邹启贤等^[19]基于污水厂碳排放的研究,提出污水处理行业的碳减排路径。第一阶段是以节能降耗为目标的低碳改造,包括智能管控技术和新型处理工艺等。由此,本研究结合污水处理厂实际需求,选择节能降耗控制技术和低碳工艺优化两类协同控制措施(表 3),分析不同技术措施下污染物去除和碳减排协同控制效果。

1.2.3 协同控制参数计算

(1) 污染物减排量计算方法

本研究以污染物去除率变化量来衡量污染物减

表 2 协同控制 $E_{a/G}$ 分析

Tab. 2 Analysis of $E_{a/G}$ in Synergistic Control

$E_{a/G}$	含义
$E_{a/G} \leq 0$	某技术对污染物 a 的去除或碳减排中的一种有促进作用,而对另外一种没有促进作用
$0 < E_{a/G} < 1$ 且 $W_{a,j}/Q_{a,0} > 0, E_{G,j}/Q_{G,0} > 0$	某技术对污染物 a 的去除和碳减排具有协同控制效应,且对碳减排的程度高于对污染物 a 的去除
$E_{a/G} = 1$ 且 $W_{a,j}/Q_{a,0} > 0, E_{G,j}/Q_{G,0} > 0$	某技术对污染物 a 的去除和碳减排具有协同控制效应,且对碳减排的程度与对污染物 a 的去除程度一致
$E_{a/G} > 1$ 且 $W_{a,j}/Q_{a,0} > 0, E_{G,j}/Q_{G,0} > 0$	某技术对污染物 a 的去除和碳减排具有协同控制效应,且对污染物 a 的去除程度高于碳减排
$E_{a/G} > 0$ 且 $W_{a,j}/Q_{a,0} < 0, E_{G,j}/Q_{G,0} < 0$	某技术同时增强碳排放和降低污染物去除率,为“反协同”措施

表 3 协同控制措施

Tab. 3 Synergistic Control Measures

措施	说明
精确曝气控制技术(A)	利用在线监测仪表的响应对曝气量实现精准控制
间歇曝气控制技术(B)	通过控制鼓风机周期性启停,创造交替的缺氧/好氧环境,实现生物脱氮除磷
低溶氧曝气技术(C)	通过控制曝气量使活性污泥系统在较低溶解氧条件下运行,实现生物脱氮除磷并显著降低能耗
侧流鸟粪石回收工艺(D)	侧流磷回收工艺
侧流厌氧氨氧化工艺(E)	氨氮和亚硝氮在厌氧氨氧化菌的作用下发生氧化还原反应生成氮气的过程
MABR 工艺(F)	利用透气性膜材料直接向附着生长的生物膜供氧,实现同步硝化反硝化的膜曝气生物膜反应器

排效果,污染物 a 去除率变化量计算如式(2)。

$$W_{a,j} = \frac{\int_0^t \left(\frac{C_{a,j} - X_a}{X_a} \right) dt - \left(\frac{C_{a,0} - X_a}{X_a} \right) dt}{\int_0^t \left(\frac{C_{a,j} - X_a}{X_a} \right) dt} \times 100\% \quad (2)$$

其中: $C_{a,j}$ ——应用措施 j 后出水中污染物 a 的质量浓度, mg/L;

$C_{a,0}$ ——基准工艺出水中污染物 a 的质

量浓度, mg/L;

X_a ——进水污染物 a 的质量浓度, mg/L。

(2) 碳减排率计算方法

本研究的碳排放核算范围为案例污水处理厂运营期的污水处理和污泥脱水过程。碳排放核算模型参照《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022) 构建, 主要碳排放源包括 CH_4 、 N_2O 的直接碳排放, 电耗、物耗的间接碳排放, 其中电耗的碳排放因子按照《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》取值为 0.792 1; 物耗碳排放因子取值参照 T/CAEPI 49—2022 附录 B。本研究碳排放强度均以 CO_2 当量表示, 其中 CH_4 的温室效应指数为 $28 \text{ kg CO}_2/(\text{kg CH}_4)$, N_2O 的温室效应指数为 $265 \text{ kg CO}_2/(\text{kg N}_2\text{O})$ 。本研究以碳减排率 ($E_{C,j}/Q_{C,0}$) 为碳减排效果的衡量标准。

1.2.4 技术综合评估模型

采取准则和指标双重等权重法, 构建协同控制技术综合评估指标体系如表 4 所示。并采用隶属度函数[式(3)~式(4)]对指标数据进行标准化处理, 最后根据式(5)计算得到协同控制技术的综合评价得分。

表 4 协同控制技术综合评估指标体系及指标说明

Tab. 4 Comprehensive Evaluation Index System and Index Description for Co-Control Technology

准则层	指标层	指标说明	单位
经济成本	投入成本	实施技术所必须投入的设备、设施的一次性投入费用	元/ m^3
	运行成本	系统正常运行时, 所需要的运维成本, 不包括人力成本	元/ m^3
减污效果	COD 去除率变化量	采取减污降碳协同措施后的 COD 去除率增加或降低量	—
	TN 去除率变化量	采取减污降碳协同措施后的 TN 去除率增加或降低量	—
	氨氮去除率变化量	采取减污降碳协同措施后的氨氮去除率增加或降低量	—
	TP 去除率变化量	采取减污降碳协同措施后的 TP 去除率增加或降低量	—
降碳效果	直接碳减排率	采取减污降碳协同措施后的直接碳减排量与使用前直接碳排放量的比值	—
	间接碳减排率	采取减污降碳协同措施后的间接碳减排量与使用前间接碳排放量的比值	—

升半梯形函数如式(3)。

$$A(x) = \begin{cases} 0, & x < c \\ \frac{x-c}{b-c}, & c \leq x \leq b \\ 1, & b < x \end{cases} \quad (3)$$

降半梯形函数如式(4)。

$$A(x) = \begin{cases} 0, & x < c \\ \frac{b-x}{b-c}, & c \leq x \leq b \\ 1, & b < x \end{cases} \quad (4)$$

其中: $A(x)$ ——标准化后的指标数据;

c, b ——定量评估指标的上界、下界。

各项技术的综合评价得分如式(5)。

$$M = R_{ij} \times P = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1j} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{i1} & R_{i2} & \cdots & R_{ij} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_j \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中: M ——各技术的综合评价得分;

R_{ij} ——第 i 种技术的第 j 项指标数据;

P ——各指标的综合权重。

2 结果与讨论

2.1 减排率分析

如图 3(a) 所示, A、B、F 可略微增加 COD 的去除, C、D、E 略微抑制 COD 的去除, 整体而言, 各项技术对 COD 的去除影响均较弱; 对于 TN 去除率的变化, 6 项技术均为促进作用, 各项技术的 TN 的去除率增量分别为 1.3% (A)、1.0% (B)、4.3% (C)、5.1% (D)、4.9% (E) 和 1.9% (F); 针对氨氮的去除, A、B、F 可增加氨氮的去除率, 增幅分别为 0.3%、0.1% 和 0.8%, D、E 对氨氮的去除既无促进也无抑制作用, 而 C 会抑制氨氮的去除; 对于 TP 的去除, A、B、E、F 4 项技术均无明显抑制或促进作用, 技术 D 可促进 TP 的去除, 去除率增量约为 1.2%, 技术 C 则会抑制 TP 的去除, 导致 TP 去除率降低 2% 左右。谭觉等^[20]、Guo 等^[21]、荆玉姝等^[22]、张强等^[23] 研究均表明技术 A、B、F 可有效促进污染物的去除, 与本文结论一致。

A~F 6 项技术对于 CH_4 减排率由高到低分别为 0.41% (D)、0.19% (E)、0.11% (C)、-0.33% (B)、-0.59% (A)、-0.89% (F); 对于 N_2O 减排率由高到低分别为 -2.73% (B)、-2.93% (F)、

-3.51% (A)、-5.90% (C)、-6.03% (E)、-6.98% (D)。结合碳排放核算模型和污染物去除率变化量可知,CH₄ 减排率、N₂O 减排率与 COD、TN 去除率变化量一致,因此,本研究重点关注间接碳减排率和总碳减排率,如图 3(b) 所示。A、B、C、F 均可促进

间接碳减排,碳减排率由高到低分别为 8.81% (B)、6.70% (C)、5.37% (A) 和 3.74% (F);D、E 对间接碳减排无明显影响。从总碳减排率看,A、B、C、F 均可促进总碳排放量的降低,而 D、E 由于间接碳排放未减少,而直接碳排放量增加,故总碳排放量增加。

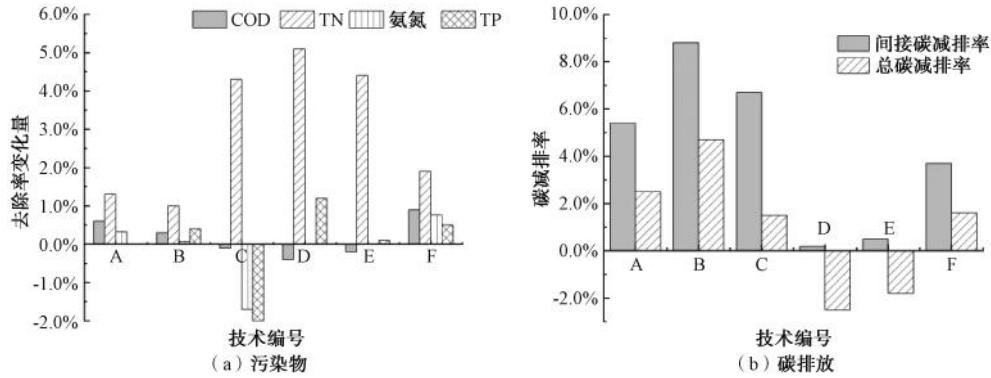


图 3 协同控制措施污染物去除率和碳减排率变化统计

Fig. 3 Statistics on Changes of Pollutant Removal and Carbon Emission Reduction Rates of Synergistic Control Measures

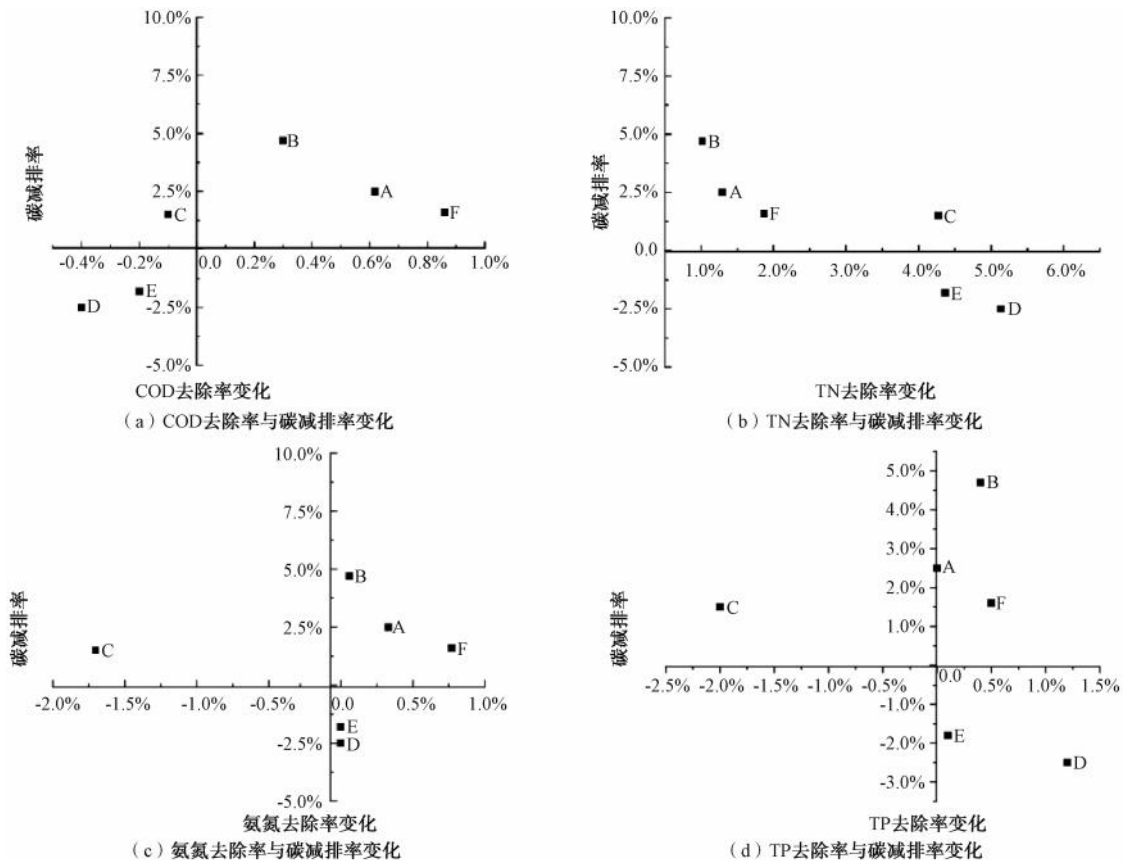
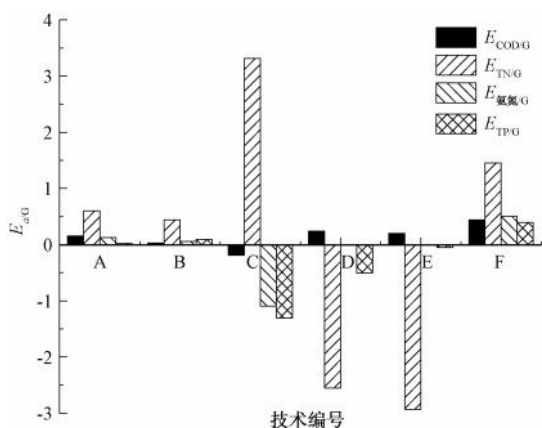


图 4 协同控制措施污染物去除率和碳减排比例坐标系评估

Fig. 4 Evaluation of Pollutant Removal Rates and Carbon Emission Reduction Proportion Coordinate System for Synergistic Control Measures

2.2 协同控制效果评估

由协同效应坐标系法评估结果(图4)和协同控制 $E_{a/G}$ 法评估结果(图5)可知,B和F对COD、TN、氨氮、TP的去除和碳减排有协同控制作用,A对COD、TN、氨氮的去除和碳减排有协同控制作用;C仅对碳减排和总氮的去除有协同控制作用;D、E无协同控制效果。

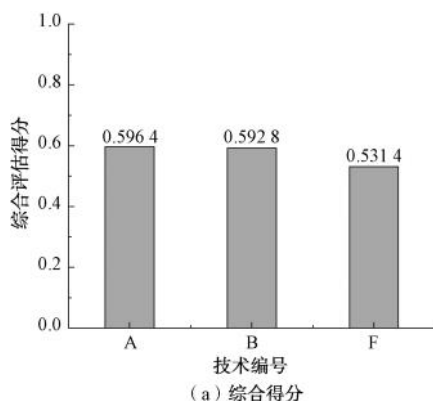


注: $E_{COD/G}$ —污染物 COD 与温室气体协同控制 $E_{a/G}$; $E_{TN/G}$ —污染物 TN 与温室气体协同控制 $E_{a/G}$; $E_{氨氮/G}$ —污染物氨氮与温室气体协同控制 $E_{a/G}$; $E_{TP/G}$ —污染物 TP 与温室气体协同控制 $E_{a/G}$ 。

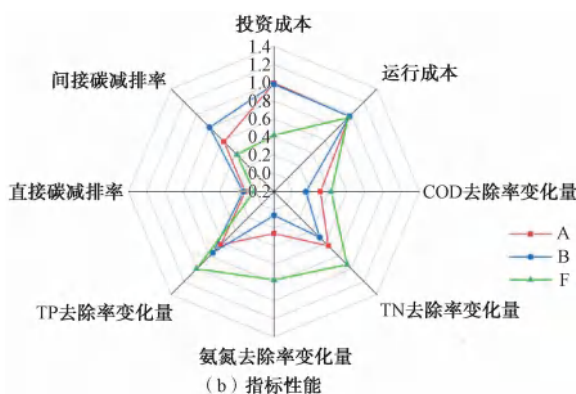
图5 协同控制 $E_{a/G}$

Fig. 5 Synergistic Control $E_{a/G}$

A、B对碳减排的作用要强于对COD、TN、氨氮的去除。A和B对于碳减排的本质是以空气流量为控制对象,通过进水污染物负荷得出所需空气流



(a) 综合得分



(b) 指标性能

图6 协同控制综合评估结果

Fig. 6 Comprehensive Evaluation Results of Synergistic Control

2.4 实际应用效果评估

选取案例污水处理厂部署精确曝气系统前后同

量,结合实际空气流量和溶解氧浓度,调整阀门及鼓风机工况,保证供需平衡,实现电耗间接碳排放的降低^[24-26],而对于污染物的去除,主要是通过使好氧池保持较低的溶解氧状态,促进同步硝化反硝化反应的进行,从而增加污染物的去除。而工艺F的TN去除能力要强于碳减排能力,工艺F的“逆向扩散特性”^[27],使其具有同时去除有机污染物和同步硝化反硝化脱氮(SND)的能力,相较于传统的活性污泥法污染物的去除率更高,也可有效降低系统的硝化液回流量^[28];对于碳排放的降低,主要是由于其“无泡曝气”的特性,提高了氧的传递效率^[27],降低了电耗。

A和B2种曝气技术更侧重于电耗间接碳排放降低,而污染物去除相对较弱;工艺F相较于降碳更侧重于氮的去除。因此,污水处理厂可根据实际需求选择相应技术,或考虑组合技术,提高减污降碳协同效果。

2.3 协同控制技术综合评估

如图6所示,A综合得分相对较高,推荐为减污降碳协同效果最佳的技术,主要在于其间接碳减排率和污染物去除能力较为均衡,投资成本、运行成本指标性能优异;B得分仅次于A,其间接碳减排率、投资成本、运行成本指标性能较为优异,但COD、氨氮、TN污染物去除率指标性能较差;F综合得分相对较低,其COD、氨氮、TN出去能力明显优于技术A和技术B,但其间接碳减排能力和投资成本指标性能相对较差。

期的吨水碳排放量进行比对,如图7(a)所示,精确曝气系统安装前,总碳排放强度为(0.702±0.087)

kg CO₂/m³,其中,直接碳排放占比为 38.0%,间接碳排放占比为 62.0%。精确曝气系统正式运行后总碳排放强度为(0.688±0.051) kg CO₂/m³,直接碳排放占比为 46.0%,间接碳排放占比为 54.0%。与精确曝气系统安装前相比,直接碳排放强度增加了 27.8%,间接碳排放强度降低了 16.5%,总碳排放强度降低 2.0%。刘善军等^[18]研究发现,直接碳排放主要受脱氮过程影响,而技术 A 主要降低了电耗间接碳排放。

案例污水处理厂精确曝气系统安装前后的 COD、TN、TP 去除率和吨水电耗分析结果如图 7(b)

所示。精确曝气系统安装后,吨水电耗较安装前降低了 3.7%,TN 去除率增加了 1.4%,COD 去除率增加了 0.74%,TP 去除率增加了 0.9%,与直接、间接碳排放强度变化匹配。采用协同控制效应坐标系分析法和协同控制交叉弹性分析法对案例污水处理厂进行计算,结果表明案例污水处理厂技术 A 位于协同控制坐标系第一象限(碳减排率>0,污染物去除率变化>0), $E_{a/G}$ 均<1($E_{COD/G}$ = 0.522, $E_{TN/G}$ = 0.712),说明案例污水处理厂应用技术 A 后具有减污降碳协同控制效果,且降碳效果要强于污染物去除效果,与 2.2 节的评估结果一致。

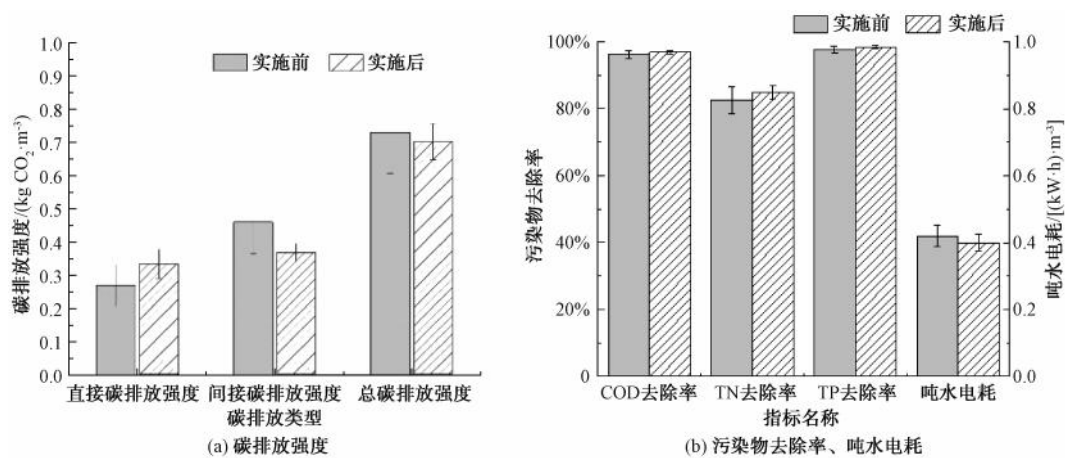


图 7 A 技术实施前后变化

Fig. 7 Changes before and after the Implementation of Technology A

3 结论

本文构建了减污降碳协同控制技术评估方法,并应用于案例污水处理厂,结果如下。

(1) A、B、C、D、E 和 F 均能促进 TN 的去除,对 COD、TP 的去除均无明显影响;对碳减排,除 E 外均有促进作用,其中碳减排率最大的为 B。

(2) 协同控制效果评估表明, A、B 和 F 有协同控制效应,且 A、B 的碳减排程度要强于对 COD 和 TN 的去除率增加程度, F 则更侧重于 TN 的去除。

(3) 综合评估表明, A 综合得分相对较高,为减污降碳协同效果最佳技术,其次依次为 B、F。

(4) 实际应用效果表明, A 应用后吨水电耗降低了 3.7%, TN 去除率增加了 1.4%, COD 去除率增加 0.74%, TP 去除率增加了 0.9%。实际应用后协同控制效果评估结果为位于协同控制坐标系第一象限且 $E_{a/G}$ < 1, 与预评估结果一致,体现了该方法的可行性。

(5) 本文构建的减污降碳协同控制效果评估方法,适用于新建、改扩建及技术改造的污水处理厂,可作为有效支撑其以减污、降碳及协同增效为核心目标需求的辅助决策工具,具有较好的科学性和可操作性,对显著提升污水处理行业在“双碳”目标下的系统评估能力具有重要的实践指导意义。

参考文献

- [1] 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88-97.
Zhang Y X, Luo H L, Wang C. Progress and trends of global carbon neutrality pledges[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 88-97.
- [2] Hao X D, Liu R B, Huang X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China[J]. Water Research, 2015, 87: 424-431. DOI: 10.1016/j.watres.2015.05.050.
- [3] 宫仁. 三部门发布实施意见 推进污水处理减污降碳协同增效[J]. 建筑工人, 2024, 45(2): 55-55.
Gong R. Three departments jointly release implementation

- opinions to promote synergistic enhancement of wastewater treatment, pollution reduction, and carbon reduction [J]. *Construction Workers*, 2024, 45(2): 55-55.
- [4] 杨洋. 城镇污水处理厂减污降碳措施技术应用实例分析[J]. *广东化工*, 2023, 50(22): 123-125.
Yang Y. Analysis of application examples of pollution abatement and carbon reduction measures in municipal wastewater treatment plants[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(22): 123-125.
- [5] 胡香, 孟令鑫, 侯红勋. 巢湖流域某城镇污水处理厂污染物去除协同温室气体排放研究[J]. *工业用水与废水*, 2023, 54(1): 46-50.
Hu X, Meng L X, Hou H X. Study on cooperative control of pollutants removal and greenhouse gas emissions in an urban sewage treatment plant in Chaohu Lake Basin[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2023, 54(1): 46-50.
- [6] 毛显强, 曾桢, 胡涛, 等. 技术减排措施协同控制效应评价研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(12): 1-7.
Mao X Q, Zeng A, Hu T, et al. Study of coordinate control effect assessment of technological measures for emissions reduction[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(12): 1-7.
- [7] 邢有凯, 毛显强, 冯相昭, 等. 城市蓝天保卫战行动协同控制局地大气污染物和温室气体效果评估——以唐山市为例[J]. *中国环境管理*, 2020, 12(4): 20-28.
Xing Y K, Mao X Q, Feng X Z, et al. An effectiveness evaluation of co-controlling local air pollutants and GHGs by implementing blue sky defense action at city level—A case study of Tangshan City [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(4): 20-28.
- [8] 高庆先, 高文欧, 马占云, 等. 大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(3): 268-278.
Gao Q X, Gao W O, Ma Z Y, et al. The synergy effect assessment method and its application for air pollutants and greenhouse gases reduction [J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(3): 268-278.
- [9] 俞珊, 张双, 张增杰, 等. 北京市“十四五”时期大气污染物与温室气体协同控制效果评估研究[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(6): 499-508.
Yu S, Zhang S, Zhang Z J, et al. Assessment of co-control effects for air pollutants and greenhouse gases in Beijing during the 14th Five-Year Plan period [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(6): 499-508.
- [10] Pereira J P, Parady G T, Dominguez B C. Japan's energy conundrum; Post-Fukushima scenarios from a life cycle perspective[J]. *Energy Policy*, 2014, 67: 104-115. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.06.131.
- [11] 高月明, 王建童, 张伟, 等. 污水处理厂减污降碳协同绩效评价[J]. *环境科学*, 2025, 46(9): 5587-5594.
Gao Y M, Wang J T, Zhang W, et al. Evaluation of the synergistic performance of wastewater treatment plants for pollution and carbon reduction [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(9): 5587-5594.
- [12] 谢礼国, 张照清, 谭铭卓, 等. 层次分析法优选三峡库区农村生活污水处理技术研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(s1): 20-22.
Xie L G, Zhang Z Q, Tan M Z, et al. Research of rural domestic sewage treatment technology in Three Gorges Reservoir optimized by analytical hierarchy process [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2011, 33(s1): 20-22.
- [13] 刘建伟, 赵高辉. 基于 AHP 的北京市典型农村污水处理技术适用性评估[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(5): 260-267.
Liu J W, Zhao G H. AHP-based evaluation on applicability of typical rural sewage treatment technology in Beijing [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(5): 260-267.
- [14] 刘雪洁, 李冰, 邱勇, 等. 市政污水处理厂碳减排潜力评估的方法与应用[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(7): 1055-1061, 1067.
Liu X J, Li B, Qiu Y, et al. Assessment method and application of carbon reduction potential in municipal wastewater treatment plants[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2024, 46(7): 1055-1061, 1067.
- [15] Rieger L. Guidelines for using activated sludge models [M]. London: IWA Publishing, 2013.
- [16] 毛显强, 邢有凯, 高玉冰, 等. 温室气体与大气污染物协同控制效应评估与规划[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(7): 3390-3398.
Mao X Q, Xing Y K, Gao Y B, et al. Study on GHGs and air pollutants co-control: Assessment and planning [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(7): 3390-3398.
- [17] 冯振涛, 黄冰, 何明, 等. 污水处理厂减污降碳协同控制研究[J]. *环境生态学*, 2025, 7(4): 178-182.
Feng Z T, Huang B, He M, et al. Synergistic enhancement of pollution reduction and carbon emissions mitigation in wastewater treatment plants [J]. *Environmental Ecology*, 2025, 7(4): 178-182.
- [18] 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.
- [19] 邹启贤, 邱勇, 李冰. 城市水系统碳减排与碳中和的原理、技术与案例 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
Zou Q X, Qiu Y, Li B. Principles, technologies, and case

- studies of carbon emission reduction and carbon neutrality in urban water systems [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [20] 谭觉,尹华升,陈雷,等. 氧化沟连续流间歇曝气生产性试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(2): 194-198.
Tan J, Yin H S, Chen L, et al. Productive experimental research on continuous flow intermittent aeration in oxidation ditch[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(2): 194-198.
- [21] Guo J H, Peng Y Z, Peng C Y, et al. Energy saving achieved by limited filamentous bulking sludge under low dissolved oxygen [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(4): 1120-1126.
- [22] 荆玉姝,牟润芝,姜怡名,等. 曝气精确控制实现污水处理厂节能降耗的应用[J]. 环境工程, 2022, 40(5): 141-145, 165.
Jing Y S, Mou R Z, Jiang Y M, et al. Reducing energy and chemicals consumption of wastewater treatment plants by accurate aeration control: A case study[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(5): 141-145, 165.
- [23] 张强,李一,夏海霞,等. 兰州雁儿湾污水处理厂原位提标 MABR 工程应用[J]. 中国给水排水, 2025, 41(2): 101-104.
Zhang Q, Li Y, Xia H X, et al. MABR application for *in-situ* upgrading of yanerwan WWTP in Lanzhou[J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(2): 101-104.
- [24] 王硕,徐巧,李伟光,等. 浅谈精确曝气控制研究与应用现状[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(s2): 321-325.
Wang S, Xu Q, Li W G, et al. Control and application of accurate aeration: A brief discussion [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(s2): 321-325.
- [25] 谢小明. 精确曝气控制在污水处理厂中的应用和探索[J]. 中国给水排水, 2016, 32(6): 24-27.
Xie X M. Application and exploration of accurate aeration control in sewage treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(6): 24-27.
- [26] 操家顺,叶添,徐润泽. 市政污水生化处理过程中曝气控制系统研究进展[J]. 水处理技术, 2024, 50(2): 7-13.
Cao J S, Ye T, Xu R Z. Research progress on aeration control system in municipal wastewater biochemical treatment process [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(2): 7-13.
- [27] He H Q, Wagner B M, Carlson A L, et al. Recent progress using membrane aerated biofilm reactors for wastewater treatment [J]. Water Science and Technology, 2021, 84(9): 2131-2157.
- [28] 张杨,李庭刚,强志民,等. 膜曝气生物膜反应器研究进展[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1133-1143.
Zhang Y, Li T G, Qiang Z M, et al. Current research progress on the membrane-aerated biofilm reactor (MABR): A review [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6): 1133-1143.