

A²O 工艺城市再生水厂减污降碳协同效益评估 与绿色低碳运行策略^{*}

王敬烨¹⁾, 张紫檀²⁾, 李翰文³⁾, 刘存辉⁴⁾, 王振北¹⁾, 贾榘翰¹⁾, 齐飞^{1)†}, 李群⁵⁾

(1)北京林业大学环境科学与工程学院, 水体污染源控制技术北京市重点实验室, 北京; 2)康达新材料(集团)股份有限公司, 北京; 3)北京市排水管理事务中心, 北京; 4)北京河沐生态科技有限公司, 北京; 5)北京城市排水集团有限责任公司, 北京)

摘要 以 A²O 工艺再生水厂为研究对象, 构建减污降碳协同评价体系, 开展情景分析, 深入揭示典型城市再生水厂减污降碳协同效益及碳减排潜力, 提出绿色低碳运行策略. 研究结果表明: 该再生水厂在减污维度中 COD、BOD₅、SS、NH₃-N、TP 污染物削减率均>95%, 出水满足 DB11/890—2012《城镇污水处理厂水污染物排放标准》, 减污指标评分达优秀; 在降碳维度, 基准情景下平均降碳得分为 77.2 分, 通过实施污泥资源化、太阳能光伏、水源热泵等技术及综合优化, 平均得分提升至 92.0 分, 增幅达 19.2%; 在协同效益方面, 基准情景减污降碳综合得分为 87.7 分, 技术集成后综合得分达 95.1 分的优秀水平; 在综合优化情景下, 再生水厂绿色低碳运行综合得分较基准情景提高 8.4%, 年碳排放强度降至 0.297 kg·m⁻³, COD 去除率每提升 1%, 污水体积碳排放强度下降 0.8%. 研究表明, 资源回收与清洁能源利用技术是提升再生水厂减污降碳协同效益的核心路径, 为再生水厂融入“双碳”管理提供高效技术支撑.

关键词 A²O 工艺; 再生水厂; 绿色低碳运行; 减污降碳协同; 碳减排策略; 情景分析

中图分类号 X823

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2025207

0 引言

在全球气候变化加剧与我国“双碳”战略目标深度推进的双重背景下^[1], 城市再生水厂作为城市代谢过程的关键环节之一, 其年均温室气体排放量已占市政领域总排放的 12%~15%, 是城市碳排放的重要贡献者.

A²O(厌氧-缺氧-好氧)工艺因兼具高效脱氮除磷性能, 成为我国应用最广泛的工艺^[2]. 然而, 该工艺存在显著的空间异质性, 也存在直接与间接温室气体排放差异化贡献, 导致简单采用 IPCC 推荐因子开展温室气体核算时结果偏差较大^[3]. 因此, 需明确科学减碳路径, 开展绿色低碳运行效率评价, 提出针对性优化改造工程措施和管理政策转型^[4-5].

本文以华北地区大型城市的某再生水厂为研究对象, 从“绿色低碳运行”和“减污降碳”2 个角度对其进行评价, 旨在阐明当前典型再生水厂绿色低碳运行和减污降碳效率^[6], 揭示关键制约性因子, 为再生水厂绿色低碳运行和减污降碳提出优化对策与行业政策建议.

1 研究对象与研究方法

1.1 再生水厂概况

水厂占地面积 56 hm², 日处理能力为 60 万 m³, 日再生水产出量为 60 万 m³, 工艺流程如图 1. 其当前实际运行配置为: 采用 A²O 主体工艺, 再生水利用率达 100%, 已完成资源回收与能源利用技术改造, 相关技术稳定运行. 其进出水常规水质指标见表 1.

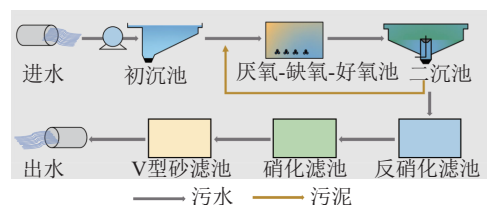


图 1 再生水厂工艺流程

表 1 再生水厂进出水常规水质指标 mg·L⁻¹

水质指标	COD	BOD ₅	TN	NH ₃ -N	TP
进水	281±108	150	43.7±7.9	35.2±9.5	4.97±1.43
出水	13±2	<2	11.3±1.1	0.27±0.21	0.16±0.02

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3205600)

[†] 通信作者: 齐飞(1980—), 男, 教授, 博士. 研究方向: 流域污染溯源与管理. E-mail: qifei@bjfu.edu.cn

收稿日期: 2025-11-12

1.2 再生水厂温室气体监测与核算边界

通常,城镇污水处理或再生处理过程中排放的温室气体主要包括 2 类:1)处理过程中直接排放的 CH_4 和 N_2O (即为直接排放);2)处理过程中消耗电力和化

学药剂带来的间接排放。

本研究再生水厂温室气体监测与核算的边界如图 2 所示,城镇污水进入再生水厂后依次经一级、二级、深度处理,达标排放。

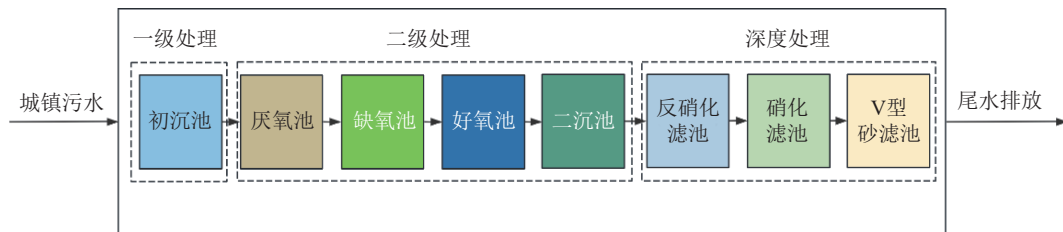


图 2 再生水厂监测与核算边界

1.3 再生水厂采样点位与样品采集方法

本研究温室气体直接排放采用间歇式采样监测,通过季度性实测保障数据可靠性^[7]。监测点布设遵循代表性与空间差异性原则。具体为:初沉池、二沉池各 4 个, A^2O 生化池共 43 个,反硝化滤池 2 个、硝化滤池 3 个、V 型砂滤池 2 个;采样覆盖四季共 9 次,均选晴天上午 09:00—11:00 进行。释放性温室气体采集:静态区域采用静态箱法,动态区域用气袋法;溶解性温室气体通过顶空平衡法获取。水样现场过滤后,冷藏保存,送往实验室进行后续相关指标分析。

1.4 再生水厂绿色低碳运行与减污降碳协同效益评价方法

1.4.1 绿色低碳运行评价方法

绿色低碳运行评价方法参照胡香等^[8]构建的城镇再生水厂绿色低碳运行评价指标体系。该城镇再生水厂绿色低碳运行评价指标体系包含 4 个一级层面(能耗物耗、资源回用、碳汇、碳排放)和 13 个二级要素指标,各一级层面权重分别为 30%、20%、10%、40%。其中能耗物耗一级指标涵盖污水体积耗电量(F_{11})、耗氧污染物质量耗电量(F_{12})、TN 削减碳源消耗量(F_{13})和 TP 削减除磷药剂质量消耗量(F_{14}) 4 项二级指标;在资源回收层面,二级指标包括再生水利用率(F_{21})、污泥资源化能源自给率(F_{22})、太阳能光伏发电能源自给率(F_{23})、水源热泵能源自给率(F_{24})及其他能源自给率(F_{25});碳汇的二级指标包括厂区绿化率(F_{31})和生态处理工艺植物固碳率(F_{32}) 2 项;碳排放层面包含污水体积碳排放量(F_{41})与污染物质量碳排放量(F_{42}) 2 项。具体各层面要素指标见相关参考文献。

1.4.2 减污降碳协同效益评价方法

减污降碳协同效益评价指标及具体方法参照 T/ACEF 144—2024《废水处理减污降碳协同评估指南》^[9]。减污与降碳存在紧密内在关联,污染物高效去除可减

少冗余处理环节的能耗浪费,而清洁能源替代与能效提升能在降低碳排放的同时,为污染深度处理提供稳定运行保障,二者协同支撑评价体系落地。减污降碳协同评估分为 2 个一级指标,即减污指标评价与碳排放指标评价。其中减污指标分为 2 个二级指标,分别是污染物指标和出水标准指标。污染物指标包含 COD、 BOD_5 、SS、TN、TP,权重依废水特征分配,各污染物削减率经过加权总和为总削减率;出水标准对标 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》分级评分。碳排放指标聚焦强度,整合直接、间接排放及碳补偿核算。

1.4.3 适用于 2 种评价方法的假设

基于上述绿色低碳运行与减污降碳协同评价方法的应用需求,2 种评价体系均需以明确的技术应用场景为基础。本研究设定 2 类假设:假设 1 是该再生水厂现行状态,未进行资源回用与能源利用技术改造,即保持 A^2O 主体工艺和 100% 再生水利用率的核心配置,以此作为评价改造效益的基准,也为同类型未改造水厂的绿色低碳运行评价提供参考。假设 2 是该再生水厂实施了资源回用与能源利用技术改造后状态^[10],实施后经实际监测评估,其污泥资源化能源自给率 100%,太阳能光伏发电能源自给率 10%,水源热泵能源自给率 50%。其中污泥资源化采用污泥制气技术,在厌氧发酵过程中降解污泥有机质并产出以甲烷(CH_4)为主的沼气。一方面完成污泥稳定化与减量化,降低污泥二次污染与处置碳排放;另一方面将沼气用于热电联产,实现能源就地回用,减少外购电力与热力带来的间接碳排放,形成污泥减量化与资源化,同时通过能源自给降碳增效达到减污降碳协同^[11]。太阳能光伏发电采用分布式光伏发电技术,利用厂区 15% 的闲置空间,在屋顶及非生产性硬化空地上铺设光伏组件,实现电力自发自用,降低曝气、回流、抽升等工艺环节的碳足迹;水源热泵技术采用污水源专用

螺杆式热泵机组,回收再生水余热,实现就近供能,减少化石能源消耗,进一步强化低碳运行效益。目前,国内再生水厂资源回用及清洁能源利用技术已开展大范围研究与工程应用,相关工艺的成熟度、工程适配性已通过多地实际案例验证,且本再生水厂已进行实际应用^[12]。从该厂应用现状来看,技术可行性与成本效益均得到验证:污泥资源化工艺适配该厂规模,设备投资可通过沼气收益 3~5 a 回收,技术难度中等;太阳能光伏契合华北日照条件,厂区闲置空间满足组件铺设需求,运维成本低、技术难度低;水源热泵可高效回收再生水余热,运行能耗仅为传统供能的 30%~50%,技术成熟度高、经济可行性良好,各项技术均已在厂区实现稳定运行。

1.5 绿色低碳运行预测情景

为系统评估不同干预措施对再生水厂低碳转型的实际影响,本研究在假设 1 的基准框架下,结合绿色低碳运行与减污降碳协同评价的量化需求,设定 5 种减排情景。以上述再生水厂为对象,假定进水量、进水 COD 和 TN 保持恒定;将已监测年温室气体排放量作为基准年情景,代表业务常态(business as usual,

BAU)^[13]。在基准年情景中,再生水厂的温室气体排放减少措施保持在基准年水平,表明没有实施干预措施。在此基础上,结合相关文献和《城镇水务 2035 年行业发展规划纲要》中对能源高效循环利用及温室气体协同控制的核心要求^[13],结合电力系统低碳转型趋势,本研究设定 6 类减排情景。其中, S1(能量节约)对应规划中“推广高效节能设备”要求,设定用电量强度降低 30%; S2(操作优化)呼应温室气体排放控制的要求,设定 CH₄ 和 N₂O 目标排放因子削减 20%; S3(化学能回收)、S4(太阳能利用)和 S5(热能回收)分别针对沼气资源化、清洁能源替代及余热利用,响应污泥资源化与提升可再生能源占比部署; S6(所有缓解措施)则整合前述技术,通过逐一递进的方式使每一步实现最优效果,各措施间互不干扰、协同兼容,最终达成减排效应的线性叠加,以此模拟多手段协同的最大减排潜力。根据表 2 中设定的 6 类减排情景,结合前文绿色低碳运行评价与减污降碳协同评价方法^[13-16],进一步量化分析各类情景对应的措施对当前运行状态再生水厂的改进效果。

表 2 再生水厂绿色低碳运行预测情景

情景	描述
BAU(业务常态)	维持基准年状态,进水量、水质恒定,不新增减排措施,以监测年排放量为基准
S1(能量节约)	到2035年,用电量强度降低30%
S2(操作优化)	到2035年,CH ₄ 和N ₂ O的排放因子将降低20%
S3(化学能回收)	到2035年,厌氧消化沼气(CH ₄)回收率将提高30%
S4(太阳能利用)	到2035年,太阳能利用率提高30%
S5(热能回收)	到2035年,废水热能回收率提高20%
S6(所有缓解措施)	一个综合的场景,结合所有的措施(S1~S5),假设各措施均发挥最大减排效能,在此基础上逐一实现减排效应的线性叠加,达成多手段协同的最大减排潜力

2 结果与讨论

2.1 再生水厂绿色低碳运行评价

基于前文设定的绿色低碳运行评价指标体系,通过对目标再生水厂的实地数据监测与指标核算,围绕 4 类一级指标展开具体分析,得出不同情景下的绿色低碳运行评价结果。

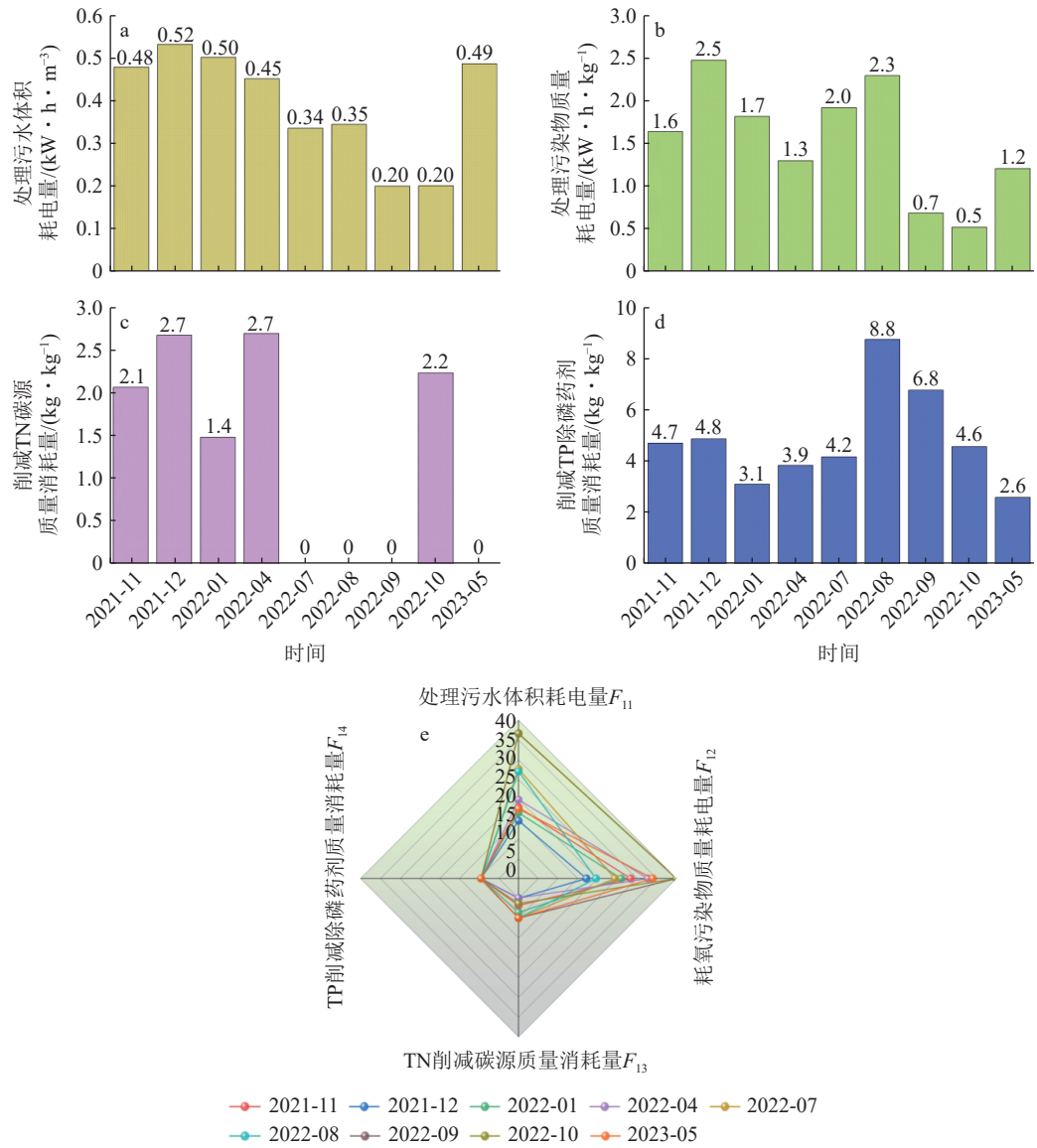
2.1.1 能耗物耗

图 3-a~d 为不同时间各要素指标值对比。春季和冬季(1、4、5、11 和 12 月)的 F_{11} (图 3-a)以及 F_{12} (图 3-b)相对更高。由于春季和冬季水温低,微生物活性低,需要通过提高曝气量和曝气时间来处理污水^[17],造成耗电量相比秋季(9 和 10 月)增加 15%~25%。而根据图 3-c 和图 3-d 的结果来看,在进水 TN 浓度较高的月

份(4 和 12 月)和进水 TP 质量浓度较高的月份(8 和 9 月),消耗的碳源更多^[18], F_{13} 和 F_{14} 同比其他月份增加 30%~50%。图 3-e 为能耗物耗层面的各指标评价结果,4 个指标每一个时间维度所构成的四边形不规则, F_{11} 、 F_{12} 、 F_{13} 对应每个月份的能耗物耗层面各指标评价结果差距较大。 F_{14} 评价结果相同,是因为单位 TP 削减除磷药剂消耗量基本处于同一得分范围内。冬季(11、12 和 1 月)的微生物活性降低,为保证污水处理效率,期间耗电量与碳源投加量增加, F_{11} 、 F_{12} 和 F_{13} 评价结果显著偏低,需在该时段内重点优化电耗管理与碳源投加策略。春夏季(4、5、7 和 8 月)的 F_{11} 和 F_{12} 评价结果较低,该时段进水量因降水、用水波动,污水处理设备需高负荷运转保障工艺效果^[15],使得电耗增加,需持续关注春夏季耗电量控制。在秋季(9 和

10月), 温度适宜, 碳源投加匹配高效, 各指标评价结果接近, F_{11} 评价结果相对较低, 其余基本为满分. 整体而言, 污水体积耗电量指标的评价结果均较低, A^2O 工艺全年耗电量较高, 如果要保证该指标接近满分, 则至少需要降低 25% 的耗电量以达到 $0.15 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ 及以下. 冬季 1 和 11 月及春季 4 和 5 月

污水体积耗电量指标的评价结果低于耗氧污染物耗电量, 表明该阶段有机物去除效率较高但能源消耗偏大, 需要关注冬季和春季减污降碳的协同; 夏季和秋季的污水体积耗电量与耗氧污染物质量耗电量均获得较高评价结果, 体现出污染物去除效率与低能耗的协同性.



a. 处理污水体积耗电量; b. 处理污染物质量耗电量; c. 削减总氮碳源质量消耗量; d. 削减总磷除磷药剂质量消耗量; e. 各要素加权得分.

图 3 能耗物耗层面各要素自然变化指标值与综合评估结果

2.1.2 资源回收与清洁能源利用

在资源回收方面, 该再生水厂的 F_{21} 已达到 100%. 基于此, 在能耗物耗、碳汇和碳排放相同的情况下, 对 2 种假设情况进行不同的分析评价.

1) 在假设 1 的情况下, 再生水利用率达 100%, 因此评价得分为 100 分, 加权得分为 20 分.

2) 在假设 2 的情况下, 评价结果见图 4. 再生水利

用率、污泥资源化能源自给率、太阳能光伏发电能源自给率、水源热泵能源自给率均为满分. 如果太阳能光伏发电自给率稳定到 15% 左右, 水源热泵能源自给率稳定到 $>60\%$, 同时开发其他的能源回收技术, 该厂便能实现全部能源的自给自足.

对比 2 种假设可见, 假设 2 通过资源回收与清洁能源利用技术措施能够实现比假设 1 更佳的优化. 通

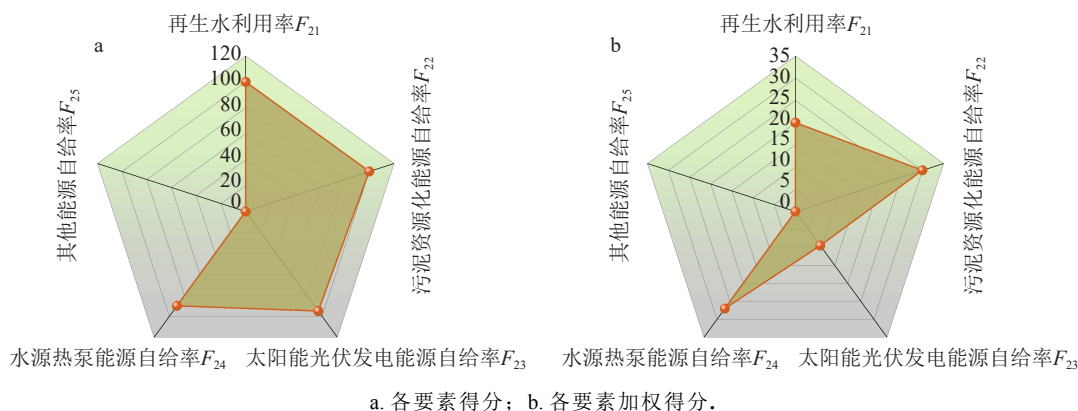


图4 资源回收与清洁能源利用层面评价结果

过整合污泥资源化利用、太阳能与水源热泵清洁能源技术,补充假设1在能源回收与可再生能源替代上的空白,形成“再生水、能源回收、清洁能源”的多元资源回用体系^[5],资源回收一级指标中提高60分。

2.1.3 碳汇

在碳汇层面,该厂区绿化率为35%,对应绿化率评价得分为90分;该企业不含生态处理工艺,生态处理工艺植物固碳率为0%,碳汇加权后每月得分为45分。当前,该厂出水稳定达标,处理工艺可满足要求,无须增设生态处理工艺;但可通过拓展绿化空间、利用厂

区屋顶面积等方式将绿化率提升至>40%,将绿化率得分提高至100分,最终提升碳汇加权得分至50分。若工艺难以保障稳定达标,可在深度处理段增设人工湿地等生态工艺,实现污染治理与碳汇提升协同。类似的已建成水厂,均需结合场地、运行及成本等实际条件确定生态改造方案;对于新建水厂,建议在设计阶段统筹布局生态工艺,实现高水平减污降碳协同。

2.1.4 碳排放

在碳排放层面,污水体积碳排放量和污染物质量碳排放量参照1.3.1的方法进行核算,结果如图5所示

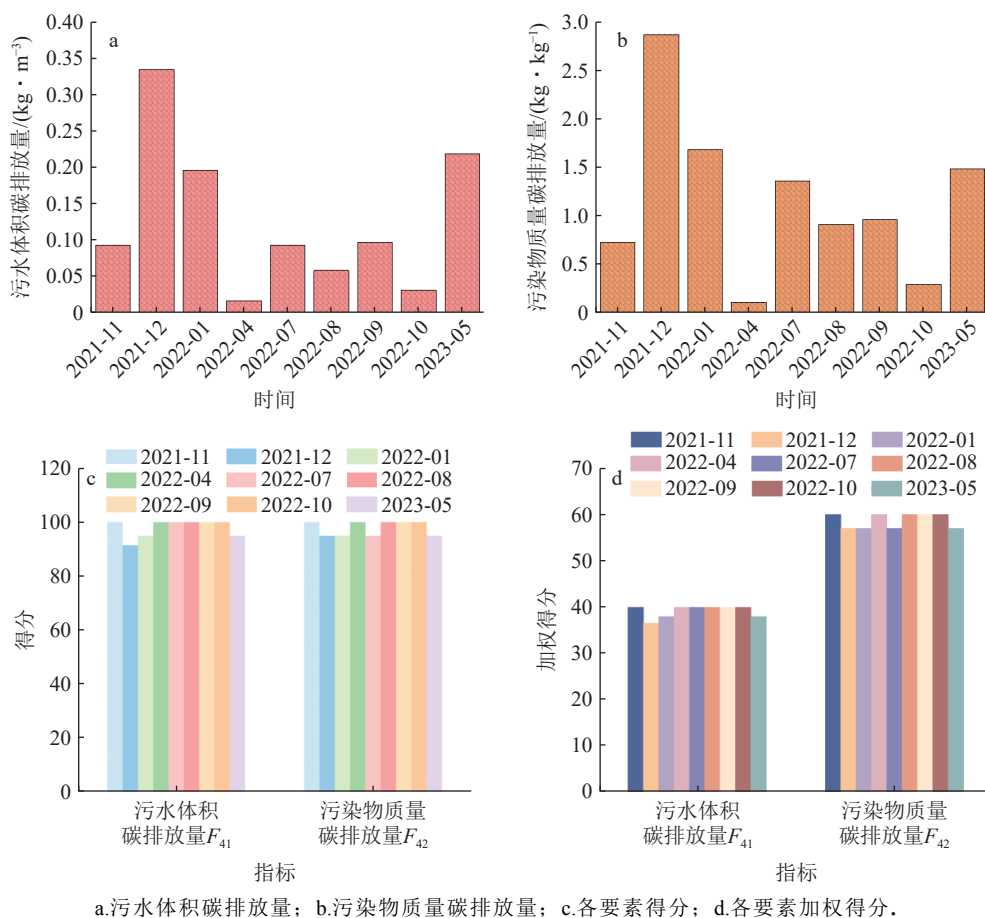


图5 碳排放层面各要素指标值与评价得分

示. 图 5-a、b 所示污水体积碳排放量(即排放强度)以及污染物质量碳排放量均呈现出冬季较高的特点, 这与冬季 N_2O 排放量高有直接关系. 如图 5-c、d 所示, 污水体积碳排放量和污染物质量碳排放量二者加权得分均高于能耗物耗指标的评价结果, 说明该厂对直接碳排放的管理优于间接碳(能耗物耗)排放.

2.1.5 综合评价

图 6-a、b 分别对应假设 1 情景下的评价结果, 图 6-c、d 分别对应假设 2 情景下的评价结果.

1) 假设 1

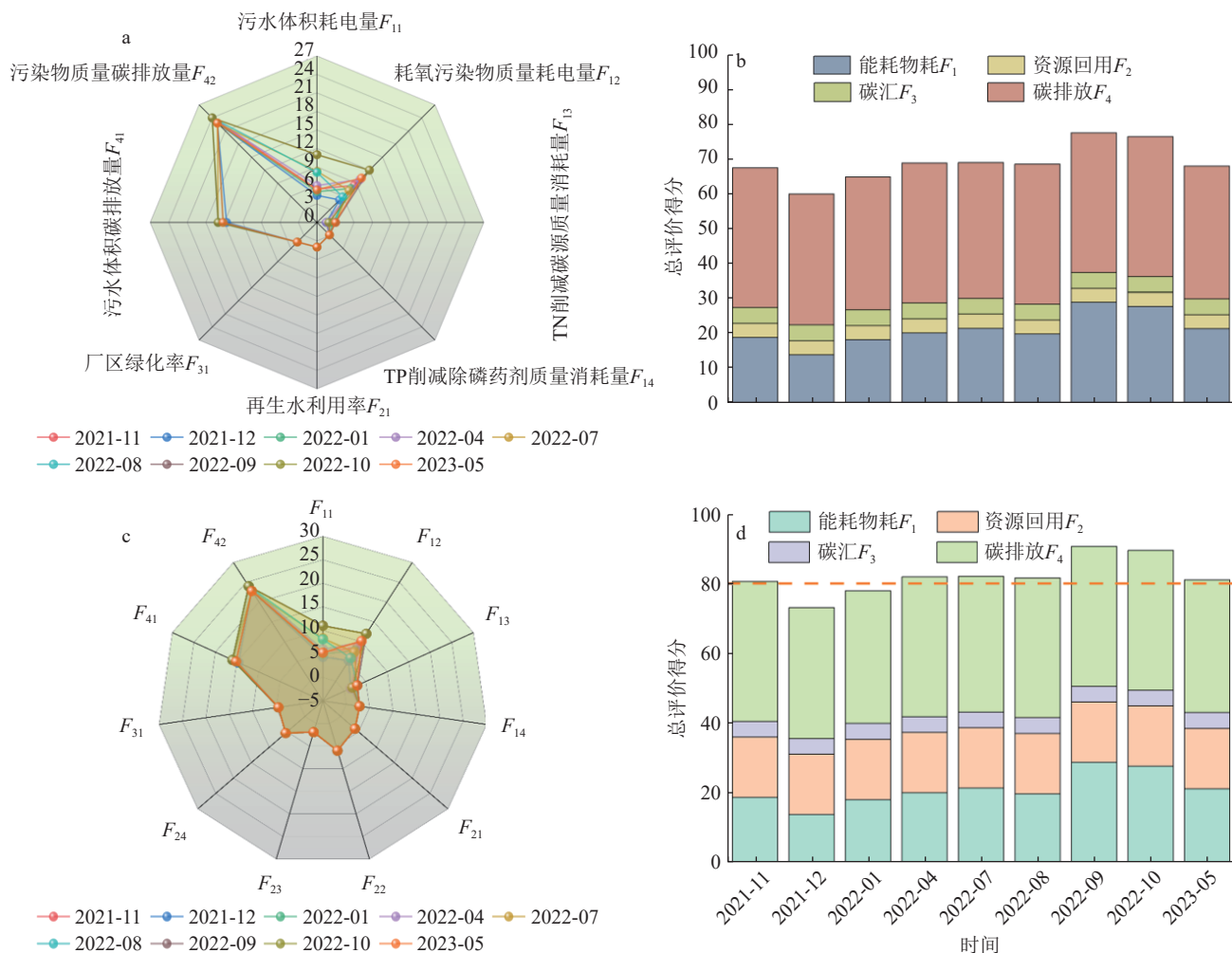
由图 6-a 可知, 每个月份构成的多边形并不规则, F_1 权重占比较大, 但对总分贡献率较小, 说明能源和药剂消耗所带来的负面影响较大, 不满足协同减污降碳实施标准. F_2 和 F_3 的贡献率也较小, 说明该厂在能源回收、清洁能源利用等方面存在不足. F_4 碳排放类得分对总分的贡献较大, 且污染物质量碳排放量高于污水体积碳排放量. F_{42} 和 F_{41} 的指标得分在各个月份得分较为接近, 在不同的时间维度上都相对较高, 说

明该指标对评价总分的贡献率较高.

2) 假设 2

在假设 2 的情况下, 绿色低碳运行各个指标加权得分情况如图 6-c 所示. 从整体来看, 碳排放层面贡献相对较大. 和假设 1 情况类似, 不同月份或季节的指标要素呈现较为一致的贡献率, 但 F_{11} 和 F_{42} 有较为明显的差异, 说明该厂的耗电量的季节性差异比较明显, 因此减排还需从电耗方面入手.

如图 6-d 所示, 在假设 2 情况下, 该厂采用了先进的能源回收技术, 使得绿色低碳运行等级又上升了 2~3 级. 秋季时, 该厂的绿色低碳运行水平为 I 级, 冬季时该厂的绿色低碳运行水平最低, 为 III 级, 而其余季节为 II 级, 全年绿色低碳运行评价得分为 82.08 分.



a. 假设 1 各指标加权得分; b. 假设 1 综合评价得分; c. 假设 2 各指标加权得分; d. 假设 2 综合评价得分.

图 6 绿色低碳运行评价结果对比

秋季的碳排放量相对低,因此低碳水平最高。

综上所述,2种假设情景下的综合评价差异显著,在假设1的条件下,全年平均综合评价指数68.7分(Ⅳ级),仅9和10月达Ⅲ级、12月降至Ⅴ级。在假设2的条件下,全年平均综合评价指数升至82.08分,等级提升2~3级。2种假设的对比明确验证:资源回收与清洁能源利用是再生水厂实现绿色低碳升级的核心路径。假设1背景下的分析结果,揭示了再生水厂单一资源回用难以支撑协同减污降碳的短板;而假设2背景下,优化效果证明多元技术协同可有效提升绿色低碳运行效果。在能耗物耗层面,需重点聚焦 F_{11} 的季节性耗电差异,进一步提升可再生能源自给率,加强再生水厂的全年运行水平,有效提升再生水

厂的综合评价指数。

2.2 再生水厂减污降碳协同效益评价

2.2.1 减污效益评价

对减污指标中 COD、BOD₅、SS、TN、NH₃-N 和 TP 污染物削减率指标进行得分分析, TN 削减率为 64%~78%, 指标得分最低(图 7-a), 其余指标削减率基本都>95%, 且得分接近 100。通过对比不同时间各个时间段, 每一个月份的指标得分都基本相同。单独对减污指标进行综合评分(图 7-b), 可以看出该水厂的污染物削减能力达到了优秀。该厂的出水排放标准也达到了 DB11/890—2012《城镇污水处理厂水污染物排放标准》^[19]。根据《废水处理减污降碳协同评估指南》(T/ACEF 144—2024)对其评价打分为 100 分。

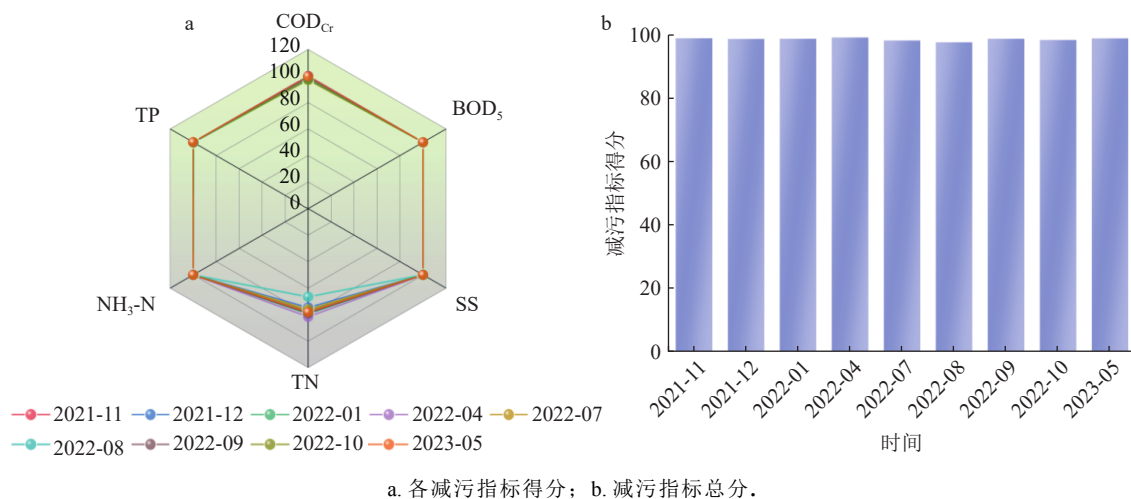


图7 减污指标评价结果

2.2.2 降碳指标评价

因我国资源回用技术在污水处理行业暂未全面普及,为明晰资源回收与清洁能源利用策略对绿色低碳运行的影响,基于1.4.3提出的假设1与假设2背景,结合目前已有的国内不同区域、工艺及规模污水处理厂的碳排放案例进行分析,具体见表3^[20-25]。

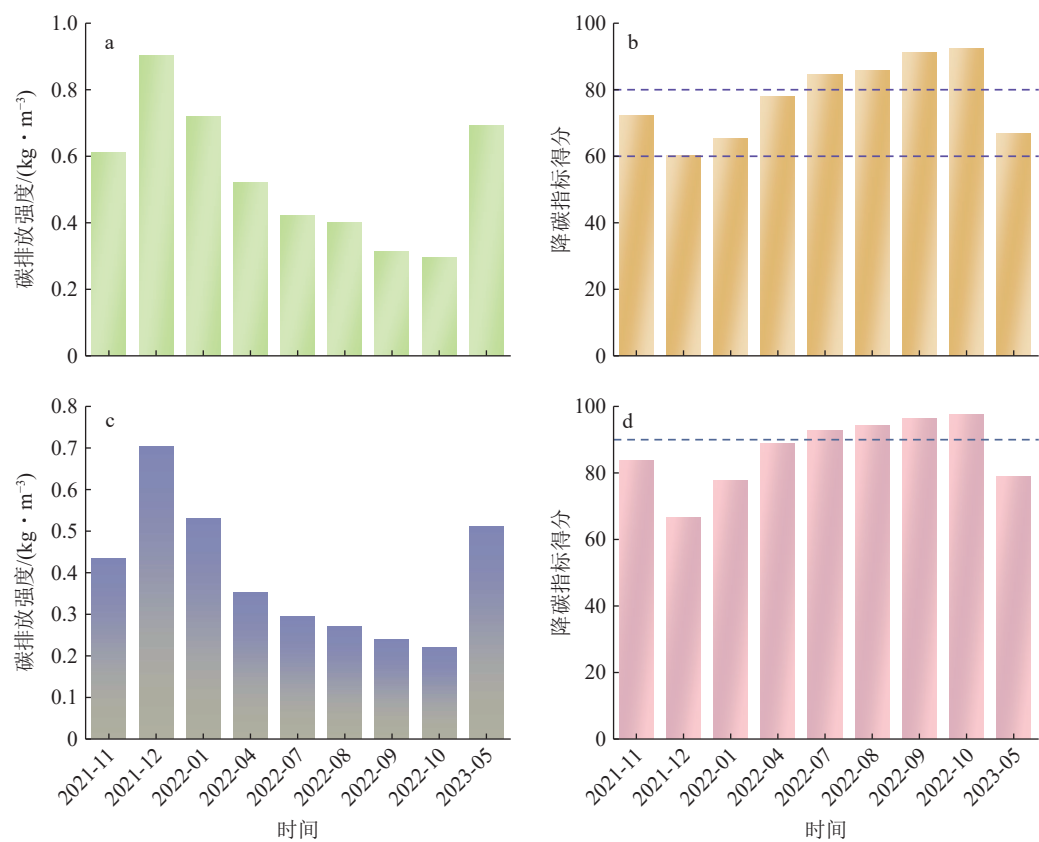
在假设1条件下,该厂的平均碳排放强度为 $0.529 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 8-a)。结合表3分析可知:从区域维度看,华北地区水厂碳排放强度普遍偏高,而本水厂地处华北,即便未改造,碳排放强度也远低于区域内其他水厂;从工艺维度看,本水厂采用的 A²O 主体工艺本身具备基础低碳优势;同时,该厂规模较大,改造主体工艺的成本相对较高,选择 A²O 工艺能够在控制改造成本的前提下,维持较低的碳排放水平;从规模维度看,碳排放强度与处理规模呈反比趋势,该厂日处理规模 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$,已超过绝大多数污水处理厂,在碳排放控制层面具备天然的规模优势。这一对比结果表

明,即便未采取针对性降碳措施,本水厂已具备优于行业同类型项目的基础碳排放控制水平;同时,水厂仍存在进一步挖掘减排潜力的空间,可通过应用碳补偿技术,实现减污降碳协同。

在假设2条件下,该再生水厂实施资源回用与能源利用技术,污泥资源化能源自给率100%、太阳能光伏发电能源自给率10%、水源热泵能源自给率50%,热电联产和太阳能光伏发电技术抵消了40%的电能后的平均碳排放强度降至 $0.387 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 8-c)^[26]。该再生水厂夏季和秋季的降碳层面达到A级优秀水平,相比于未实施降碳策略提高了11.3%。结合表3进一步对比可知:本水厂改造后的碳排放强度,不仅低于华北、华东区域同工艺水厂,还优于华南地区部分水厂,同时较同工艺的华东水厂4低42.3%。可见,本研究已采用的能源回收与资源回用技术组合,能在之前的基础上进一步大幅削减碳排放,验证了改造技术路线的高效性。

表 3 不同区域、工艺及规模污水处理厂碳排放强度对比

水厂情况	主体工艺	污水日处理量/10 ⁴ m ³	碳排放强度/(kg · m ⁻³)
假设1(该水厂未改造)	A ² O	60	0.529
假设2(水厂实际改造后)	A ² O	60	0.387
华北水厂1	A ² O + MBR	1.7	1.980
华北水厂2	改良型 SBR 工艺	11.2	1.484
华北水厂3	C-TECH 工艺	5.9	1.351
华东水厂1	A ² O + MBR	10	1.111
华东水厂2	A ² O + 多级AO	12	0.590
华东水厂3	多级 A ² O	12	0.578
华东水厂4	A ² O	15	0.671
华南水厂1	A ² O + MBR	26	0.765
华南水厂2	A ² O	9.6	0.388
华南水厂3	A ² O + 氧化沟	10.2	0.402
华南水厂4	A ² O + 厌氧/缺氧调节池	9.5	0.367
华南水厂5	多级 AO	10.8	0.317
西南水厂1	多级 AO	2	0.584



a. 假设 1 碳排放强度；b. 假设 1 降碳指标得分；c. 假设 2 碳排放强度；d. 假设 2 降碳指标得分。

图 8 降碳指标评价结果分析

2.2.3 减污降碳协同效益评价

减污降碳协同效益评价结果如图 9 所示。在假设 1 的前提下，当再生水厂未实施碳补偿技术时，降碳指标层面无增益，导致综合评价得分较低。具体来说，

在 7—10 月，综合减污降碳指标评价达到了 A 级，但在其他月份则仅为 B 级。整体来看，平均综合得分为 87 分，位于 B 级。评价结果表明，该厂在减污层面效果稳定，COD、TN、TP 等污染物削减达标，但降碳层

面存在短板: 1) 能耗方面无清洁能源替代, 风机、回流泵、曝气等工艺环节间接碳排放偏高; 2) 污泥未实现资源化能源化, 仅常规处置未形成碳减排; 3) 余热

未回收、运行负荷波动导致无效能耗与冗余排放, 整体碳减排措施不足, 导致该厂减污降碳协同不足, 评分有待提升。

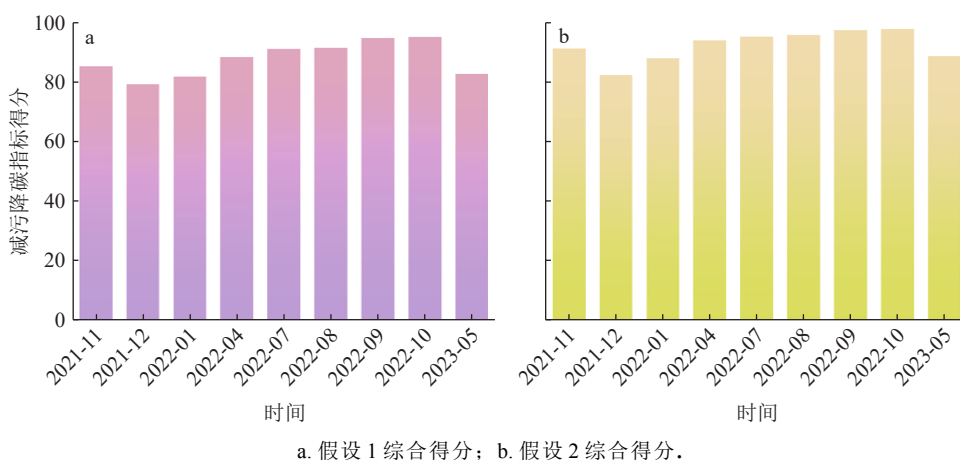


图9 减污降碳综合分析

在假设2的前提下, 实施热电联产和太阳能光伏发电技术^[27], 再生水厂在减污降碳方面的表现得到了显著提升, 平均综合得分达到了92分(图9-b), 属于优秀水平。太阳能光伏发电作为清洁可再生能源, 在不产生碳排放的前提下, 降低厂区用电负荷与间接碳排放。污泥制气与热电联产则具有如下作用: 一方面通过厌氧发酵实现污泥稳定化、削减有机物排放, 强化减污效果; 另一方面回收甲烷用于热电联产, 提升能源利用效率, 减少外购电力与化石能源消耗, 从源头降低碳排放, 真正体现减污降碳协同。该厂通过优化能源结构、降低电耗损耗, 既减少风机、水泵等动力设备的间接碳排放, 又为硝化、反硝化等深度处理工艺提供稳定低耗的运行条件, 强化TN、TP去除效果; 而污染物的高效去除可减少回流重处理带来的额外能耗, 进一步降低碳排放, 形成能源低碳化支撑深度减污、高效减污反向降低能耗碳排放的协同闭环。

综上所述, 再生水厂在保证污染物达标排放的同时, 应更加注重碳排放总量的控制。通过实施热电联产和太阳能光伏发电等先进技术, 再生水厂可以在降低污染物排放的同时, 有效降低碳排放量, 实现更高的减污降碳协同效果。

2.3 再生水厂碳减排情景分析

2.3.1 基于减排情景分析绿色低碳运行状况

在假设1的前提下, 根据1.5节所述5个情景, 对该再生水厂2035年的减排潜力进行分析^[28]。情景S1与S2通过优化A²O工艺运行参数、调控滤池系统工况、匹配高能耗设备的变频运行、更换节能设备等手

段, 在不改变主体工艺、保障出水水质的前提下, 同步实现30%用电量降低与20%温室气体排放因子降低, 达到减污降碳协同增效目标^[20-22]。

具体来看, A²O生化池通过多参数精准调控构建最优反应微环境, 厌氧区控制 $\rho(\text{DO}) < 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此环境下聚磷菌(PAOs)通过厌氧释磷代谢水解胞内聚磷酸盐为无机磷释放至水体, 同时将污水中大分子有机物水解为乙酸、丙酸等易降解挥发性脂肪酸(VFAs), 为后续缺氧反硝化提供优质碳源, 低质量浓度DO可抑制甲烷氧化菌活性, 减少 CH_4 逸散; 缺氧区调控碳氮质量比至3~5, 该比例契合反硝化菌的营养需求, 反硝化菌以VFAs为碳源将 $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ 逐步还原为 N_2 (式(1)), 避免碳氮质量比不足导致的 N_2O 积累; 好氧区精准维持 $\rho(\text{DO})$ 为 $2.0 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此质量浓度下氨氧化菌(AOBs)高效氧化 NH_4^+ 为 NO_2^- , 亚硝酸盐氧化菌(NOBS)进一步将 NO_2^- 氧化为 NO_3^- (式(2)和(3)), 既保障硝化完全, 又避免过曝气能耗, 同时优化硝化液回流比(100%~200%)与污泥回流比(50%~80%), 强化氮素循环转化, 抑制 N_2O 产生^[29], 实现污染物削减与碳减排协同。

针对滤池系统, 反硝化滤池精准控制 $\rho(\text{DO})$ 为 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 7.0~8.0、碱度 $\geq 50 \text{ mg/L}$ (以 CaCO_3 计)及ORP $-100 \sim -200 \text{ mV}$, 搭配多孔生物陶粒或改性活性炭填料构建“厌氧-缺氧”微区梯度, 硝化滤池则基于在线氨氮监测实施精准曝气, 维持 $\rho(\text{DO})$ 为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg/L}$, 通过多条件协同强化 NO_2^- 还原效率, 同时避免过量曝气带来的电耗浪费与温室气体额外排放。

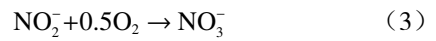
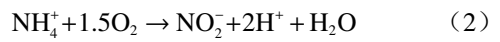
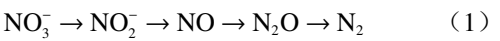
通过实施高能耗设备的变频运行, 动态匹配设施

的进水负荷既能减少 CH₄ 与 N₂O 生成,又能避免过曝气导致的风机无效能耗,稳定 A²O 和滤池微生物生长环境以降低温室气体无序排放风险.此外,更换永磁同步风机、高效节能水泵等设备可进一步提升能源转换效率,降低单位处理水量能耗.

上述全流程协同优化措施,既通过减少无效曝气、优化动力设备运行,降低 30% 用电量,又通过调控微生物代谢微环境、强化完全反硝化减少 CH₄ 与 N₂O 生成,降低 20% 温室气体排放因子,最终使能耗物耗层面(*F*₁)评价结果提高 4.9 分,碳排放层面评价结果提升至 40 分满分.

在 S3、S4 和 S5 的条件下,通过实施沼气回收、太阳能利用及热能回收的协同措施^[30],有效填补资源回用短板,使资源回用层面(*F*₂)评价得分提高 2.2 分.其中,依托厌氧消化达成 S3 情景的沼气回收和污泥减量,削减有机污染物存量、规避污泥二次污染隐患,回收甲烷用于资源化供能,达到污泥处置减污与能源回收降碳的双向协同;S4 情景提升太阳能光电利用率,降低厂区常规动力设备的外购电耗,削减电网供电衍生的间接碳排放;S5 情景废水采用热泵机组回收再生水余热,达成热能回收,缓解供热供冷环节碳排放,同时调控生化反应体系温度,保障生化处理单元高效运行和出水水质的稳定达标,减少工艺回流复处理产生的能耗损耗,形成余热回收降碳、高效治污降耗的良性循环体系.

在综合减排情景 S6 的条件下,对 2035 年的再生水厂的绿色低碳运行状况进行了全面的评估,结果见表 3.再生水厂的绿色低碳运行综合得分为 76.7^[31],相较于未实施减排策略的基线情景 BAU,这一得分显著提高了 11.6%.其中,能耗物耗层面的绿色低碳运行综合评价结果增幅最为明显.这表明在污水再生处理过程中,能源和物料的高效利用对实现绿色低碳运行具有至关重要的作用^[32].通过降低用电强度,实施能量节约策略,如优化工艺设计、提高设备效率等,再生水厂不仅降低了自身的运营成本,还为减少温室气体排放做出了重要贡献.实施能量节约策略是再生水厂推进绿色低碳运行的关键举措,对其绿色低碳运行水平的提升贡献极大.在未来的发展中,再生水厂应继续关注能耗物耗、废水处理效果和技术管理等方面的改进和提升,以实现更高水平的绿色低碳运行目标.



2.3.2 基于减排情景分析减污降碳协同效益

由于已经假定进水量、进水 COD 和 TN 保持恒定,所以减污指标评价结果不变,和基准情况一致,故减污降碳协同效益的提升主要源于降碳指标的优化.从单情景贡献来看:S1 中 30% 用电量降低减少了电力消耗带来的间接碳排放,为降碳指标奠定基础;S2 通过优化温室气体排放因子,修正核算偏差并提升排放管控精准度;S3、S4、S5 回收利用清洁能源替代传统能源消耗,进一步削减了能源相关碳排放.在综合减排情景 S6 下,整合 S1~S5 的所有措施,实现减排效能的逐一叠加,最终使年际碳排放强度降至 0.297 kg·m⁻³,降碳指标得分从基准情景的 77.2 分提升至 92.0 分,增幅达 19.2%;叠加减污指标得分后,综合减污降碳得分为 95.1 分(表 4).这一结果表明,单情景措施可针对性降低特定来源碳排放,而 S6 综合情景通过多维度协同,实现降碳效益的最大化,体现减污与降碳的协同适配性^[33-34].

表 4 实施综合减排策略后绿色低碳运行评价得分与减污降碳协同效益评价

评价维度	评价指标	实施减排策略前	实施减排策略后
绿色低碳运行评价得分	能耗物耗 <i>F</i> ₁	21.1	26.0
	资源回用 <i>F</i> ₂	4.0	6.2
	碳汇 <i>F</i> ₃	4.5	4.5
	碳排放 <i>F</i> ₄	39.1	40.0
	综合指数 <i>F</i>	68.7	76.7
减污降碳协同效益评价	减污指标	98.2	98.2
	降碳指标	77.2	92.0
	减污降碳综合指标	87.7	95.1

2.4 再生水厂碳减排效益与经济分析

结合工程实践,各减排措施的成本与效益如下:低成本高效益措施主要为 S1 与 S2,通过调控 A²O 工艺参数、变频优化现有设备运行实现,无须新增大型投资,仅需少量调试成本,投资回收期不足 1 a,能快速降低 30% 电耗与 20% 温室气体排放因子;中成本中效益措施涵盖 S3(化学能回收)与 S4(太阳能利用),依托现有污泥系统改造成沼气回收、利用厂区闲置空间铺设光伏,投资回收期 5~8 a,长期可抵消部分外购能源消耗^[12];高成本长效益措施以 S5(水源热泵热能回收)为代表,需新增换热管道与机组,投资回收期 8~10 a,但运行能耗仅为传统供能的 30%~50%,长期生态效益突出^[12].该厂情况优先推进低成本措施,后续逐步推进中高成本措施,实现投入与效益平衡.

3 结论

通过评价再生水厂的绿色低碳运行、减污降碳协同状况和减排情景分析,得出以下几点结论。

1)在绿色低碳运行的评价结果中,假设1情况下,该再生水厂未进行任何资源回收和清洁能源利用策略,其绿色低碳运行效益结果为Ⅳ级(一般水平);假设2情况下,该再生水厂实际实施了资源回用与能源利用技术,绿色低碳运行效益为Ⅱ级,表明热电联产技术和太阳能光伏利用能有效降低碳排放,达到绿色低碳运行水平。

2)目前改造后的再生水厂减污降碳协同评价结果为优秀水平,并且能够完成严格的出水水质达标的任务,如果结合情景分析中的能源利用技术,则会进一步减少再生水厂温室气体的碳排放。但是若未进行再生水厂改造,则降碳指标不合格。

3)通过情景分析研究发现,能量节约具有最大的温室气体减排潜力,可以减少23.41%的排放;热回收贡献了10.15%的减排;其次是化学能回收(6.75%)、操作优化(3.27%)和太阳能利用(0.1%)。综合所有减排措施能够使得温室气体排放量降至 $0.297 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比BAU情景减少43.68%。因此,在实施减排策略时,应优先考虑节能措施,其次是热回收。在条件允许的情况下,综合减排措施是最佳选择。

4 参考文献

- [1] 段诗昊,贾志昇,张明慧,等.中国绿色流域政策制度管理体系研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2025,61(5):680
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城乡建设统计年鉴2022[M].北京:中国统计出版社,2022
- [3] Ramírez-Melgarejo M, Reyes-Figueroa A D, Gassó-Domingo S, et al. Analysis of empirical methods for the quantification of N₂O emissions in wastewater treatment plants: comparison of emission results obtained from the IPCC Tier 1 methodology and the methodologies that integrate operational data[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 747: 141288
- [4] Maktabifard M, Al-Hazmi H E, Szulc P, et al. Net-zero carbon condition in wastewater treatment plants: a systematic review of mitigation strategies and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 185: 113638
- [5] 齐浩然,尹明山,唐兆国,等.城镇污水处理厂节能减碳实现路径与技术探讨[J].净水技术,2023,42(10):16
- [6] 王红瑞,刘艺欣,张力,等.“双碳”目标下流域生态城市绿色发展与高质量发展实施路径[J].水资源保护,2024,40(1):16
- [7] Zhang Z T, Qi F, Liu Y, et al. Comprehensive assessment, intelligent prediction, and precise mitigation strategies for greenhouse gas emissions in full-scale wastewater treatment plants[J]. *Environmental Research*, 2025, 270: 121052
- [8] 胡香,陈孔明,李涛.城镇污水处理厂低碳运行评价指标体系的构建及应用[J].工业用水与废水,2023,54(2):39
- [9] 中华环保联合会.废水处理减污降碳协同评估指南:T/ACEF 144—2024[S].北京:中华环保联合会,2024
- [10] Angelidaki I, Treu L, Tsapekos P, et al. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives[J]. *Biotechnology Advances*, 2018, 36(2): 452
- [11] 乔翹嵩,顾登海,卢广亮,等.城镇生活污水处理厂污泥资源化利用研究进展[J].工业水处理,2025,45(7):1
- [12] 李翔,朱灿耀.新能源在污水处理厂中的应用[J].给水排水,2023,59(增刊2):472
- [13] Yang M J, Peng M, Wu D, et al. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants in China: historical emissions and future mitigation potentials[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 190: 106794
- [14] Wei L L, Zhu F Y, Li Q Y, et al. Development, current state and future trends of sludge management in China: based on exploratory data and CO₂-equivalent emissions analysis[J]. *Environment International*, 2020, 144: 106093
- [15] Yang X Z, Wei J Y, Ye G J, et al. The correlations among wastewater internal energy, energy consumption and energy recovery/production potentials in wastewater treatment plant: an assessment of the energy balance[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136655
- [16] Liu R X, Huang R Y, Shen Z H, et al. Optimizing the recovery pathway of a net-zero energy wastewater treatment model by balancing energy recovery and eco-efficiency[J]. *Applied Energy*, 2021, 298: 117157
- [17] Duan H R, Zhao Y F, Koch K, et al. Insights into nitrous oxide mitigation strategies in wastewater treatment and challenges for wider implementation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(11): 7208
- [18] Lee Y Y, Choi H, Cho K S. Effects of carbon source, C/N ratio, nitrate, temperature, and pH on N₂O emission and functional denitrifying genes during heterotrophic denitrification[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2019, 54(1): 16
- [19] 北京市质量技术监督局.城镇污水处理厂水污染物排放标准:DB11/890—2012[S].北京:中国环境科学出版社,

- 2012
- [20] 何秋杭, 陈奕彤, 乔金岩, 等. 基于月排放数据的北京 3 座区级污水处理厂年碳排放特征 [J]. *环境工程学报*, 2023, 17(9): 2827
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 张涵, 王吉苹, 孔子轩, 等. 厦门市污水处理厂碳排放核算及碳减排途径探讨 [J]. *厦门理工学院学报*, 2025, 33(3): 81
- [24] 李书钺, 邓艾欣, 马念, 等. 重庆某污水处理厂碳排放核算及减碳路径探究 [J]. *净水技术*, 2025, 44(6): 116
- [25] 郑晓英, 胡天星, 邓雄成, 等. 典型 A²O 工艺城镇污水处理厂碳排放核算、影响因素及碳减排路径研究 [J]. *环境工程*, 2026, 44(3): 177
- [26] Li K L, Duan H R, Liu L F, et al. An integrated first principal and deep learning approach for modeling nitrous oxide emissions from wastewater treatment plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(4): 2816
- [27] 何道清, 何涛, 邓勇. 太阳能光伏发电系统原理与应用技术 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2023
- [28] Nourani V, Elkiran G, Abba S I. Wastewater treatment plant performance analysis using artificial intelligence: an ensemble approach[J]. *Water Science and Technology*, 2018, 78(10): 2064
- [29] 吴昌永. A²O 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
- [30] 刘耕源, 郭丽思, 陈钰, 等. 城市碳中和措施的边际减排成本分析: 以北京市为例 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(2): 249
- [31] 中国城镇供水排水协会组织. 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
- [32] Tong Y D, Liao X W, He Y Y, et al. Mitigating greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment in China[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024, 20: 100341
- [33] Asadi M, Mcphedran K. Estimation of greenhouse gas and odour emissions from a cold region municipal biological nutrient removal wastewater treatment plant[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 281: 111864
- [34] 洪思扬, 王红瑞, 程涛. 广东省水与能源利用效率与部门使用特征分析 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(1): 107

Synergistic benefit assessment of reductions in pollution and in CO₂ emission and green low-carbon operation strategies for urban recycled water plant with A²O process

Wang Jingye¹⁾, Zhang Zitan²⁾, Li Hanwen³⁾, Liu Cunhui⁴⁾,
Wang Zhenbei¹⁾, Jia Yunhan¹⁾, Qi Fei¹⁾, Li Qun⁵⁾

(1) Beijing Key Laboratory of Water Pollution Source Control Technology, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing, China; 2) Kangda New Materials Co, Ltd, Beijing, China; 3) Beijing Drainage Management Affairs Center, Beijing, China; 4) Beijing Hemu Ecological Technology Co, Ltd, Beijing, China; 5) Beijing Drainage Group Co, Ltd, Beijing, China)

Abstract To explore the synergistic benefits of reductions both in pollution and in carbon emission, and carbon emission reduction potential of urban recycled water plants, a recycled water plant with A²O process at a capacity of 600 000 m³ · d⁻¹ was studied. A synergistic evaluation system for reductions in pollution and in carbon emission was established. A baseline scenario (BAU, business as usual), technology optimization scenarios (hypothesis 1, hypothesis 2), was set up. Five sub-scenarios (S1-S5) of reduction in carbon emission, and a comprehensive scenario (S6) were all studied. Quantitative analysis was done combining monitoring data and simulation models. For reduction in pollution, the removal rates of COD, BOD₅, SS, NH₃-N, and TP all reached over 95% (with TN removal rate ranging from 64% to 78%), with the effluent meeting *Discharge Standard of Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants* (DB11/ 890-2012). The pollution reduction index score reached an excellent level. For reduction in carbon emissions, average carbon emission reduction score under the baseline scenario was 77.2 (Grade C). The scenario implementing technologies such as sludge resource utilization, solar photovoltaic, and water-source

heat pump increased the average carbon emission reduction score to 92.0 (with a growth rate of 19.2%). Comprehensive emission reduction scenario S6 raised the carbon emission reduction index score from baseline 77.2 to 92.0, with an increase of 19.2%. For synergistic benefits, comprehensive score of pollution reduction and carbon emission reduction under the baseline scenario was 87.7 (Grade B), and after technology integration, the comprehensive score reached 95.1 (excellent level). In scenario S6, the comprehensive score of green low-carbon operation of the recycled water plant was 8.4% higher than that under BAU, the inter-annual carbon emission intensity decreased to $0.297 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, and the carbon emission intensity per unit of wastewater decreased by 0.8%. This study indicates that resource recoveries and clean energy utilization technologies are core to improving the synergistic benefits of pollution reduction and carbon emission reduction in recycled water plants. This provides efficient technical support for recycled water plants to integrate into “dual-carbon” management.

Keywords A²O process; recycled water plant; green low-carbon operation; synergy of pollution reduction and carbon emission reduction; carbon emission reduction strategy; scenario analysis

【责任编辑:武 佳】