

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): 116-124.

LI S Y, DENG A X, MA N, et al. Carbon emission accounting and carbon reduction path exploration of a WWTP in Chongqing[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 116-124.

重庆某污水处理厂碳排放核算及减碳路径探究

李书钺*, 邓艾欣, 马念, 雷锦涛, 刘梦一, 明 仆

(林同棧国际工程咨询<中国>有限公司, 重庆 401121)

摘 要 【目的】 在“双碳”战略背景下,推动城镇污水处理厂提标改造并降低其碳排放对可持续发展具有重要意义。通过分析提标改造污水厂运维过程的碳排放来源及影响因素,可为碳减排路径的优化提供依据。【方法】 文章以重庆市某提标改造污水厂为研究对象,结合相关技术指南,采用排放因子法核算其运维过程碳排放量。【结果】 该污水厂年总碳排放量为 4 264.99 t CO₂ e,碳排放强度为 0.584 2 (kg CO₂ e)/m³,范围 1 占比为 49.26%,其中范围 1 中的化石源 CO₂ 排放占比高达 25.16%,化石源 CO₂ 排放是污水处理厂运行过程中不可忽视的重要排放源。范围 2 占比为 44.15%,范围 3 占比为 6.59%。根据碳排放核算结果分析,通过光伏替碳技术、智能曝气与精准投药技术以及再生水利用,可使年间接碳排放量分别减少 91.33、105.78、895.32 t CO₂ e。【结论】 污水处理厂运维过程中直接碳排放与电耗是碳排放热点因素。污水厂运营过程中电力的使用是促进碳排放的主要贡献者,其中高能耗设备是电力消耗的主要来源。从替碳和减碳 2 个角度进行分析,提出了适合该污水厂的碳减排路径为光伏系统替碳使用、优化智能曝气系统、控制精准投药以及再生水利用。研究结果将为其他污水处理厂的碳减排工作提供有价值的参考与启示。

关键词 污水处理 碳排放 碳核算 减碳路径 节能

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)06-0116-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.014

Carbon Emission Accounting and Carbon Reduction Path Exploration of a WWTP in Chongqing

LI Shuyue*, DENG Aixun, MA Nian, LEI Jintao, LIU Mengyi, MING Pu

(T. Y. Lin International Engineering Consulting <China> Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract [Objective] "Dual Carbon" strategy, promoting the upgrading and reconstruction of urban wastewater treatment plants (WWTPs) while reducing their carbon emissions is of great significance for sustainable development. By analyzing the carbon emission sources and influencing factors in the operational process of upgraded WWTPs, this study provides a basis for optimizing carbon reduction pathways. [Methods] Taking an upgraded WWTP in Chongqing as a case study, this paper estimates the operational carbon emissions using the emission factor method in accordance with relevant technical guidelines. [Results] The total annual carbon emission reached 4 264.99 t CO₂ e and the carbon emission intensity was 0.584 2 (kg CO₂ e)/m³. Scope 1 accounted for 49.26%, of which the fossil source CO₂ in scope 1 was as high as 25.16%, the fossil source CO₂ emission was an important emission source that could not be ignored in the operation process of WWTPs. Scope 2 accounted for 44.15%, and scope 3 accounted for 6.59%. Based on the evaluation, adopting photovoltaic (PV) carbon replacement, intelligent aeration, precise dosing, and reclaimed water reuse could reduce annual indirect emissions by 91.33 t CO₂ e, 105.78 t CO₂ e, and 895.32 t CO₂ e, respectively. [Conclusion] The direct carbon emissions and power consumption during the operation and maintenance of the WWTP are the hot factors of carbon emissions. The utilization of electricity during the operation of this WWTP is a major contributor to carbon emissions, with energy-intensive equipment being the main source of electricity consumption. From the perspectives of carbon replacement and carbon reduction, the carbon emission reduction pathways suitable for the WWTP are proposed to replace carbon use in photovoltaic

[收稿日期] 2024-07-12

[基金项目] 城市排水系统碳核算与减排路径技术指南(108012481001)

[通信作者] 李书钺(1984—),男,正高级工程师,主要从事水污染控制及市政基础设施维护等工作,E-mail:421665920@qq.com。

system, optimize intelligent aeration system, control precision dosing and reclaimed water utilization. The result will provide valuable reference and inspiration for the carbon reduction in other WWTPs.

Keywords wastewater treatment carbon emissions carbon accounting carbon reduction path energy conservation

气候变化是全球共同面临的挑战,而碳排放的增加是其主要原因之一。在我国“双碳”目标的背景下,各行业和各地区正在积极进行碳核算统计和碳减排行动。作为全球温室气体排放量大国,我国的污水处理在全社会碳排放总量中占据了 1%~3%^[1]。随着城市化的推进,城镇污水处理规模不断扩大,同时排放标准也变得更加严格,这导致污水处理产生的温室气体排放量也在增加。据统计,2016 年我国污水处理行业的碳排放总量达到 1.97 亿 t CO₂ e,占全国总排放量的 1.71%。如果按照目前的处理模式继续发展,到 2030 年,污水处理行业的碳排放量预计将达到 3.65 亿 t CO₂ e,占全国总排放量的 2.95%^[2]。因此,我国污水处理行业的碳排放问题需要引起重视。

通常而言,城市污水处理厂进行碳减排首先需要开展碳排放核算工作。本文以重庆某提升改造污水处理厂为碳排放计算分析的对象,基于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)计算碳排放的方法学原理,搭建该研究中的碳排放核算范围与方法,识别运行维护过程中各个关键环节的碳排放特征,进行相关处理工艺碳减排方法和路径预估分析,并提出实现绿色高效运行维护的建议。

1 碳排放核算

1.1 核算边界

系统核算边界的确定是碳排放核算的首要步骤。对于污水处理厂系统的碳核算边界,需要将污水处理工艺流程、药剂种类、设备使用等因素纳入考虑范围。本文以重庆市某尚未投入运营的提升改造污水处理厂为例,系统核算边界包括物理边界与时间边界。本研究物理边界为污水厂厂区内二级处理工艺、深度处理工艺、污泥处理工艺运行过程中所产生的碳排放量,污水收集和污泥处置不算在其内。时间边界为包括相关设施及构筑物从建设、投入使用、运行重置,以及到拆除的过程所产生的碳排放量,规划建设以及资产重置拆除过程不纳入本污水处理厂的碳排放核算研究范围内^[3]。污水中生源性 COD 产生的 CO₂(直接排放)和运输过程中产生的 CO₂(间接排放)不纳入本研究的碳排放核算中。

1.2 核算方法

当前用于碳排放核算方法有以下几种:全生命周期法、实测法、排放因子法、物料平衡法等。排放因子法使用范围最广、应用最为普遍,也是最简便的碳排放核算方法。这种方法基于温室气体排放清单,通过将每个排放源的活动水平数据与相应的排放因子相乘,再将所有结果相加,从而计算出该排放源的碳排放量^[4]。本研究采用排放因子法,并结合物料平衡法核算案例污水处理厂的碳排放量。

1.2.1 识别碳源,制作温室气体排放清单

根据《温室气体核算体系》,污水处理厂温室气体排放分为 3 类,其中,范围 1 指的是在污水污泥处理过程中直接产生的包括甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)以及污水中 COD 中化石成分产生的 CO₂ 在内的温室气体排放。关于污水处理厂的碳足迹研究报告可能会根据碳足迹评估方法、污泥和废水处理过程的类型、国家特定的能源结构的碳强度等而有所不同。尽管存在这些差异,但在大多数研究中,碳足迹的主要贡献者是相似的,其中主要排放为 N₂O^[5-6],这是由于 N₂O 的排放量很大以及其增温潜势是 CO₂ 的 298 倍。因此该工作中范围 1 的 NO_x 直接碳排放量主要为 N₂O,其他形式的 NO_x 不纳入本研究的碳排放核算中。范围 2 指的是因消耗外购电力而间接产生的温室气体排放。范围 3 则指的是在污水厂运行生产过程中物料消耗而间接产生的温室气体排放^[7]。

1.2.2 计算公式

目前,国内外使用的碳排放计算公式多来自 IPCC 制定的《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》(以下简称“IPCC 指南”)^[8]。我国城镇水务系统碳排放核算计算公式基于 IPCC 指南,先后发布了《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)与《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》(下文简称《指南》)。《指南》在传统的 CH₄ 与 N₂O 排放的核算基础上,新增并扩充了化石燃料 CO₂ 排放核算方法,该方法已达成国际共识但尚未包含在 IPCC 指南中^[9]。研究^[10]表明在污水处理厂进水中化石碳含量高达 28%,若将化

石碳排放纳入碳排放总量中,总量增加了 13%,因此不能忽略化石源 CO_2 排放。因此本文选用《指南》中的污水处理厂运行维护阶段碳核算公式进行计算^[11]。

(1) 范围 1 排放

化石源碳排放计算方法如式(1)~式(3)^[4]。

$$C_{\text{CES-}\text{CO}_2} = M_{\text{MFCF}} \times \left\{ \left[1.1 \times (B_{\text{in}} + B_{\text{ex}} - B_{\text{eff}}) \times \left(1.47 - 1.42 \times \frac{0.67}{1 + K_d S_{\text{SRT}}} \right) \right] + (1.947 \times H_{\text{HRT}} M_{\text{MLVSS}} K_d) - 4.49 \times [(N_{\text{TKN-in}} - N_{\text{TKN-eff}}) - (B_{\text{in}} + B_{\text{ex}} - B_{\text{eff}}) \times \left(\frac{0.67}{1 + K_d S_{\text{SRT}}} \right) \times 0.124] \right\} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$M_{\text{MFCF}} = \frac{F_{\text{FCF}} B_{\text{in}} \times 100\% + B_{\text{ex}}}{B_{\text{in}} + B_{\text{ex}}} \quad (2)$$

$$K_d = 0.05 \times 1.04^{T_b - 20} \quad (3)$$

其中: $C_{\text{CES-}\text{CO}_2}$ ——污水处理化石源 CO_2 排放强度, $(\text{kg CO}_2 \text{ e})/\text{m}^3$;

M_{MFCF} ——化石源 CO_2 排放比例;

B_{in} ——集中式污水处理厂平均进水 BOD_5 质量浓度, $(\text{mg BOD}_5)/\text{L}$;

B_{ex} ——运行过程中人为投加的额外碳源, $(\text{mg BOD}_5)/\text{L}$;

B_{eff} ——平均出水 BOD_5 质量浓度, $(\text{mg BOD}_5)/\text{L}$;

K_d ——衰减系数, d^{-1} ;

S_{SRT} ——生物固体平均停留时间, d ;

H_{HRT} ——生物反应池水力停留时间, d ;

M_{MLVSS} ——生物池混合液挥发性悬浮固体平均质量浓度, $(\text{mg MLVSS})/\text{L}$;

$N_{\text{TKN-in}}$ ——污水处理厂平均进水总凯氏氮质量浓度, $(\text{mg N})/\text{L}$;

$N_{\text{TKN-eff}}$ ——污水处理厂平均出水总凯氏氮质量浓度, $(\text{mg N})/\text{L}$;

F_{FCF} ——生物固体平均停留时间集中式污水处理厂进水中化石源有机物比例;

T_b ——水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

式(1)中,1.1 为 BOD_5 矿化产生 CO_2 的产量,1.47 为进水总 BOD 浓度与 BOD_5 浓度之比,1.42 为

微生物细胞 BOD_5 当量取值,0.67 为绝对产率系数取值,单位为 $\text{kg MLVSS}/(\text{kg BOD}_5)$;1.947 为污泥内源呼吸 CO_2 产率取值,单位为 $\text{kg CO}_2/(\text{kg MLVSS})$;4.49 为单位质量氮氮硝化固定的 CO_2 质量取值,单位为 $\text{kg CO}_2/(\text{kg 氮氮})$;0.124 为微生物体内含 N 质量比;此外, F_{FCF} 在本次研究中取值为 10%^[11]。

CH_4 排放计算方法如式(4)。

$$C_{\text{CES-}\text{CH}_4} = (B_{\text{in}} E_{\text{EF-}\text{CH}_4} - M_{\text{CH}_4}) \times 28 \times 10^{-3} \quad (4)$$

其中: $C_{\text{CES-}\text{CH}_4}$ ——污水处理单元 CH_4 排放强度, $(\text{kg CO}_2 \text{ e})/\text{m}^3$;

$E_{\text{EF-}\text{CH}_4}$ ——污水处理单元 CH_4 排放因子, $\text{kg CH}_4/(\text{kg BOD}_5)$;

M_{CH_4} ——回收或处理去除的 CH_4 气体量, $(\text{kg CH}_4)/\text{m}^3$ 。

N_2O 排放计算方法如式(5)。

$$C_{\text{CES-}\text{N}_2\text{O}} = (N_{\text{TN-in}} E_{\text{EF-}\text{N}_2\text{O}} \times 22/14 - M_{\text{N}_2\text{O-N}}) \times 265 \times 10^{-3} \quad (5)$$

其中: $C_{\text{CES-}\text{N}_2\text{O}}$ ——污水处理 N_2O 排放强度, $\text{kg CO}_2 \text{ e}/\text{m}^3$;

$N_{\text{TN-in}}$ ——集中式污水处理厂平均进水总氮(TN)质量浓度, $\text{mg N}/\text{L}$;

$E_{\text{EF-}\text{N}_2\text{O}}$ ——生物处理污水过程中 N_2O 排放因子, $\text{kg N}_2\text{O-N}/(\text{kg N})$;

$M_{\text{N}_2\text{O-N}}$ ——回收/处理去除的 N_2O , $\text{kg N}_2\text{O}/\text{m}^3$ 。

(2) 范围 2 排放

电能消耗碳排放强度计算方法如式(6)。

$$C_{\text{CES-d}} = (e_d E_{\text{EF-d}})/Q \quad (6)$$

其中: $C_{\text{CES-d}}$ ——电能消耗碳排放强度, $\text{kg CO}_2 \text{ e}/\text{m}^3$;

e_d ——评价年内污水厂运行维护总耗电, $\text{kW}\cdot\text{h}$;

$E_{\text{EF-d}}$ ——核算地区的电力排放因子, $\text{kg CO}_2 \text{ e}/(\text{kg kW}\cdot\text{h})$;

Q ——该年内总处理的达标水质水量, m^3 。

(3) 范围 3 排放

药耗碳排放强度计算方法如式(7)。

$$C_{\text{CES-cl}} = \sum_{i=1}^n (M_{\text{cl},i} E_{\text{EF-cl},i})/Q \quad (7)$$

其中: $C_{\text{CES-cl}}$ ——运行过程中药剂、材料等消耗产生的间接排放强度, $\text{kg CO}_2 \text{ e/m}^3$;
 $M_{\text{el},i}$ ——核算年内第 i 种药剂总消耗量, kg ;
 $E_{\text{EF-cl},i}$ ——核算年内第 i 种药剂的排放因子, $\text{kg CO}_2/\text{kg}$;
 n ——所使用药剂的种类数量。

(4) 总碳排放量

总碳排放为范围 1、范围 2、范围 3 碳排放之和如式(8)。

$$C_{\text{CE-T}} = Q \times (C_{\text{CES-CO}_2} + C_{\text{CES-CH}_4} + C_{\text{CES-N}_2\text{O}} + C_{\text{CES-d}} + C_{\text{CES-cl}}) \quad (8)$$

其中: $C_{\text{CE-T}}$ ——总碳排放量, $\text{kg CO}_2 \text{ e/a}$ 。

2 重庆某污水处理厂碳排放核算

2.1 项目概况

本案例研究对象为重庆某地污水处理厂,规模为 $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,流程图如图 1 所示。污水处理厂主体工艺采用多级多段厌氧-好氧(AO)工艺,该工艺是由多个 AO 串联布置而成,通过多点进水充

分利用原水中的碳源进行反硝化反应。得益于在进水分配和反应池的优化设计,该工艺无需设置硝化液回流设施,在减少电耗和运行成本的同时,能够提高碳源的利用效率。特别是在脱氮方面,多级多段 AO 工艺通过优化碳源分配和反应条件,显著提高了反硝化细菌的活性和反硝化效率。同时,可通过投加乙酸钠代替碳源不足的情况,有利于后续污水处理。该工艺还有占地面积较传统厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺小,内回流流量少及脱氮效率高、耐冲击负荷强等特点。深度处理采用高效沉淀池与滤布滤池的处理工艺,聚合氯化铝(PAC)作为混凝剂、聚丙烯酰胺(PAM)作为助凝剂在高效沉淀池进行投加,消毒采用二氧化氯。该污水处理厂出水水质能够达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,设计进出水水质如表 1 所示。污泥经过储泥池到污泥脱水间的带式浓缩脱水一体机,出泥含水率达到 80%以下再外运至厂外生物有机肥公司进行处理。

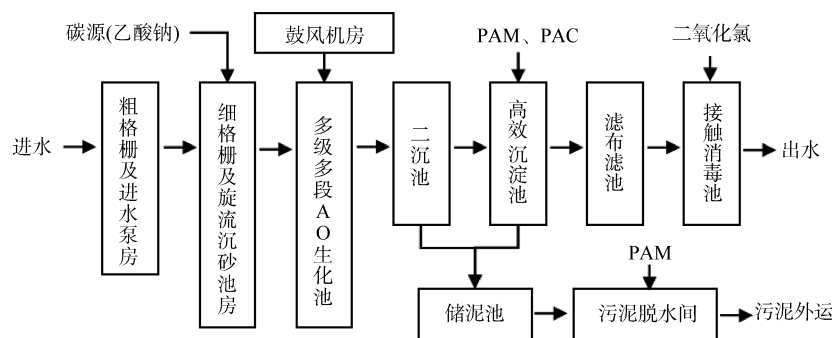


图 1 案例污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of WWTP Case

表 1 案例污水处理厂设计进出水水质指标

Tab. 1 Influent and Effluent Quality for WWTP Case

指标	进水/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率
BOD ₅	180	15	92%
COD	350	50	86%
SS	250	10	96%
氨氮	30	5(8)	83%(73%)
TN	35	15	57%
TP	3	0.5	83%

注:括号内的数据表示温度 $\leq 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的控制指标,括号外的数值为温度 $\geq 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的控制指标。

2.2 运行维护活动数据

水泵、风机等污水处理(不含污泥处理)耗电量数据与 PAM、PAC 等药剂投加量(不含污泥处理)数据如表 2 与表 3 所示。

2.3 碳排放因子选取

地区的不同、材料的不同以及管理方法的不同等都不同程度的影响碳排放因子的值,不同的碳排放因子取值对计算结果的影响也较大。但由于针对碳排放因子的长期跟踪实测研究较少,研究成果差别也较大,碳排放因子取值多采用各个权威机构发

表2 案例污水处理厂运行维护阶段电力消耗
Tab. 2 Energy Consumption during Operation and Maintenance for WWTP Case

项目	设备	额定功率/kW	使用数量/台	年耗电量/(kW·h)
粗格栅及提升泵房	粗格栅	1.87	2	18 406
	总提升泵	90	2	787 416
	中途提升泵	30	2	295 281
细格栅	细格栅	1.1	2	10 827
	输送机	3.7	1	18 209
	砂水分离器	0.55	1	2 707
	风机	2.2	1	10 827
	压榨机	2.2	1	10 827
生物池	搅拌器	5.5	18	487 213
	搅拌器	0.9	1	4 429
	混合液回流泵	4	6	118 112
污泥泵房	外回流泵	15	3	221 461
	剩余污泥泵	3	1	14 764
二沉池	吸泥机	0.37	2	3 642
高效沉淀池	搅拌机	2.5	2	24 607
	絮凝搅拌机	5.5	2	54 135
	刮泥机	1.5	2	14 764
	转子泵	7.5	3	110 730
	回流转子泵	7.5	4	147 640
	潜污泵	3	1	14 764
	滤布滤池	反洗泵	2.2	4
	旋转驱动机	0.75	2	7 382
	加药间	卸料泵	1	1
	搅拌机	3	4	59 056
	计量泵	1.5	7	51 674
	PAM 装置	2.2	2	21 654
	加药泵	1.5	6	44 292
	消毒接触池	潜污泵	11	2
风机房	磁悬浮风机	75	2	738 202
除臭	风机	7.5	2	73 820
	循环水泵	3.75	2	36 910
	加湿水泵	2.2	2	21 654

布的参考取值,或采用自主研究并经过认证的碳排放因子。在本文中,碳排放因子取值根据《指南》中排放因子总结及其延伸更新的参考数据取值。因为不同污水处理工艺的CH₄及N₂O排放因子值各不相同,由于缺少多级多段AO的碳排放因子取值,本文CH₄排放因子参考巴顿普工艺,CH₄排放因子取0.042 kg N₂O/(kg BOD₅),N₂O排放因子参考AO

表3 案例污水处理厂运行维护阶段药剂消耗
Tab. 3 Chemicals Consumption during Operation and Maintenance for WWTP Case

药剂类别	药剂消耗总量/(kg·a ⁻¹)
PAM	3 660
PAC	190 409
乙酸钠	156
二氧化氯	109 500

工艺,N₂O排放因子取0.006 8 kg N₂O/(kg N)。关于电力碳排放因子的取值,本文采用重庆或我国发布温室气体指南提供的缺省值。在《重庆市区县温室气体清单编制指南(试行)》中,重庆地区电力调入调出为华中电网,因此电力排放因子取值为0.525 7 kg CO₂/(kW·h)。污水厂使用药剂排放因子参考《指南》及《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(CAEPT 49—2022),其中,PAM、PAC、二氧化氯、乙酸钠取值分别为1.48、0.53、1.6、0.623 kg CO₂ e/kg。

2.4 碳排放核算结果

根据设计数据计算了污水厂运行维护阶段污水处理过程(不含污泥处理处置)的单位碳排放量及年碳排放量,其中包括直接碳排放、间接碳排放。直接碳排放包括在污水处理系统实际运营过程中:(1)污水中有机物被微生物摄取利用后以及生物内源呼吸消耗自身有机物氧化/生成的CO₂; (2)污水处理系统所涉及的厌氧环境单元在生物作用下产生并释放的甲烷;(3)硝化与反硝化过程中反应不彻底从而产生的N₂O中间产物。间接碳排放包括:电力消耗间接排放、材料消耗间接排放。本文中的碳排放结果以kg CO₂ e计,计算结果如表4所示。

表4 案例污水处理厂运行维护阶段碳排放
Tab. 4 Carbon Emission during Operation and Maintenance for WWTP Case

项目		碳排放强度/ [(kg CO ₂ e) · m ⁻³]	年排放量/ (t CO ₂ e)	占比
范围 1	化石源 CO ₂	0.147 0	1 073.10	25.16%
	CH ₄	0.041 8	305.14	7.15%
	N ₂ O	0.099 0	722.70	16.95%
范围 2	电力消耗	0.257 9	1 883.00	44.15%
范围 3	药剂消耗	0.038 5	281.05	6.59%
合计		0.584 2	4 264.99	100.00%

2.5 碳排放量分析

经过详细计算,该污水处理厂的碳排放强度为 $0.584\ 2\ \text{kg CO}_2\ \text{e}/\text{m}^3$,在处理每 m^3 污水的过程中,会产生 $0.584\ 2\ \text{kg CO}_2\ \text{e}$ 。这一强度值是通过综合考虑污水处理过程中的各项能源消耗、药剂使用及相关设施的运行数据得出的。此外,结合污水处理厂的年处理总量,估算出该厂年总碳排放量约为 $4\ 264.99\ \text{t CO}_2\ \text{e}$ 。这一年总碳排放量反映了该处理厂在一年内因处理污水所产生的全部碳排放,包括直接排放和间接排放。范围1占比为49.26%,范围2占比为44.15%,范围3占比为6.59%。

范围1包括污水处理厂在其运营过程中直接产生的温室气体排放,如燃料燃烧、化学反应过程中的排放以及设施泄漏等。范围1中化石源占比较大,达到25.16%,未来碳核算应将其纳入统计;污水处理过程产生的 CH_4 与 N_2O 温室气体折算成的 CO_2 排放量占24.10%。回收与去除污水处理厂中产生的温室气体是未来主要的减碳路径,但案例污水厂规模较小,该方法不具备经济效益。

范围2涉及污水处理厂为运营所购买的电力、蒸汽、热力和制冷等能源的间接排放。这些能源虽然不是在污水处理厂内部产生的,但其生产过程中的碳排放也应归入污水处理厂的碳足迹。范围2的碳排放占总排放量的44.15%,主要反映了污水处理厂对外部电力和其他能源的依赖程度,其中耗能较大的设备排序为曝气鼓风机、生物池搅拌器、进水泵和内外回流泵等,进水泵房和鼓风机耗电量最大。可以通过提高能源使用效率、采用节能设备以及转向可再生能源来减少间接碳排放。与此同时,也需要探索采用绿色能源替代以减少污水处理厂所需电能的碳排放。

范围3所用到的药剂主要使用除磷剂和碳源。范围3的碳排放占总排放量的6.59%,尽管这一比例相对较小,但仍然需要关注和管理,因为它们代表了整个运营过程中的碳排放影响。在污水处理厂的运行过程中,确保出水水质稳定达标是首要任务。这一目标主要通过人工干预来实现,具体表现为操作人员根据实时监测结果调整加药量。然而,这种方法具有加药量不稳定和药剂使用量偏高的局限性。上述局限可以通过引入基于模型的自动化加药系统优化出水水质目标值和加药过程来减少人为操作的误差与波动,推动污水处理厂向绿色环保方

向发展。同时,可使用低碳排放因子的替代药剂,并对工艺段进行优化运行,降低药剂的消耗量,也能达到减碳目的。

3 减碳/替碳路径预估与分析

3.1 替碳路径分析

光伏发电是一种清洁能源,能够替代传统化石燃料发电,从而减少温室气体排放。具体而言,通过在污水处理厂安装光伏发电系统,生产的电力可以直接用于厂区的运营,减少对电网中化石燃料电力的依赖,增强能源供应的稳定性,降低碳足迹。同时,采用合同能源管理,可在一定程度上降低水处理成本及运维管理成本。污水处理厂通常有大面积的建筑物顶面,这些空间在常规情况下未被充分利用。利用闲置建筑物顶面进行光伏发电是目前污水厂比较常用的一种替碳路径。《光伏发电站设计规范》(GB 50797—2012)(2024年版)式6.6.2是国家规范的算法,然而,综合效率系数需要通过电缆线损、逆变器、变压器、组件损耗等实际情况进行把控,这增加了该计算方法在实际应用的使用难度。因此本案例根据光伏系统的整体效率,按总装机容量与光伏系统峰值日照年发电小时数估算潜在年平均发电量。光伏系统的整体效率针对一般项目的初步设计阶段,可按照80%取值;施工图阶段需要详细计算(一般使用PVsyst仿真)。

项目设置有屋顶光伏系统,光伏发电系统采用光伏系统与建筑相结合(即BAPV),微电网发电形式。本工程新建建筑鼓风机房及配电间、高密度沉淀池、污泥脱水间,设置有分布式光伏系统,采用605单面单晶硅组件,对钢筋混凝土平屋面上采用固定倾角安装式,固定阵列采用倾角为 $8^\circ\sim 20^\circ$ 固定安装在支架上。光伏组件安装面积为 $386\ \text{m}^2$,组件功率为605 W,工程装机容量为18.8 kW_p,本项目光伏总装机容量为0.25 MW_p。该污水处理厂所在地的光伏系统峰值日照年发电小时数为868.7 h,光伏系统的整体效率为80%,光伏系统潜在年平均发电量为17.4万 kW·h。通过光伏系统潜在发电量替代原污水厂运行过程中的一部分电耗,可以实现年度碳减排量约为91.33 t CO₂ e。

3.2 减碳路径分析

3.2.1 智能系统

药剂成本是污水和污泥处理的重要开支之一。

通过精确控制加药量,污水处理厂可以显著降低药剂采购和使用成本。这一方法有助于提升污水处理厂的处理效率和环保绩效,符合可持续发展的要求,是实现低碳运营的重要举措。现有建立的化学除磷、碳源智能投加控制智能加药系统均可实现节省药剂投加量与出水水质稳定达标的目标^[12-13]。采用先进的自动化控制系统和在线监测设备,可以实时监测污水和污泥的质量参数,如 COD、SS、氨氮等。根据监测数据,自动调节加药量,确保在达到处理效果的前提下,使用最少的药剂。同时,通过应用人工智能和机器学习算法,建立污水处理过程的优化模型,精确预测药剂的需求量,进一步减少药剂的过量使用。因此,在本文研究中,该污水厂可建立一套智能加药系统,实现药剂在除磷与碳源投加过程中的精确控制。按除磷药剂精确控制后可减少 10% 的使用量以及碳源可减少 15% 的使用量估算,该污水处理厂预计可实现年度碳减排量为 28.17 t CO₂ e。

除药耗外,电力消耗是污水处理厂运营中主要的碳排放源之一。智能曝气系统通过降低曝气系统的电力消耗,能够实现电能使用量下降 20%~25%,同时减少与电力生产相关的二氧化碳排放^[14]。针对进水氮、磷浓度高,SS 含量较高的情况,该污水厂预处理阶段采用旋流沉砂池工艺,相较于曝气沉砂池,该工艺节能且高效沉砂,有助于减少后续工艺的机械磨损和能耗。不仅如此,鼓风机房的电耗为全厂电耗的 60% 左右,本工程鼓风机设计采用磁悬浮鼓风机,与传统风机相比,磁悬浮鼓风机具有效率高、节约能源、噪音低、安装方便、系统集成性高、冷却效率高、维护量低、方便远程控制等优点,能够有效提高污水处理厂的运行稳定性,降低系统全寿命周期成本。因为其采用的是磁悬浮轴承,无接触、无摩擦、无需润滑,不易造成接触和机械损失,且无需变速调节。同时,该鼓风机还可根据工况需求进行转速调整,为用户节约了更多的电能;最主要的是它还能依据外界因素的变化,通过调节转速实现压力和流量的变化,相比传统风机节能 20% 以上。

在本文研究中,污水厂产生电耗主要发生在进水泵站和多级多段 AO 工艺阶段,工艺设备包括提升泵、鼓风机等。按使用磁悬浮鼓风机电能使用量下降 20% 计算,将智能曝气系统引进该污水处理厂后预计可减少碳排放 77.61 t CO₂ e。

3.2.2 尾水回用

尾水回用是指将污水处理厂的出水(即尾水)经过进一步处理后,重新用于工业、农业、城市绿化等用途。能够降低企业对原水的依赖性、优化处理工艺、提高水资源的整体利用效率。同时,尾水回用还能减少对传统净水厂的需求,有助于降低水处理过程中的能耗和相应碳排放^[15]。秦波^[16]对再生水利用效益进行分析,如污水厂出水已达到污水再生利用水质标准,则再生水利用比使用自来水减少碳排放量近 93.73%。该案例污水处理厂出水水质已优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,其尾水可直接应用于道路浇洒、设备冲洗、景观与绿化用水领域,实现节约水资源、降低能源消耗,以达到减碳目的。案例项目按用水量为 1.0 万 m³/d 有效利用考虑,可以减少周边道路浇洒、景观绿化的自来水用水量,能够实现年度碳减排量为 895.32 t CO₂ e。

值得注意的是,在探讨污水处理厂尾水回用的回用扬程与取水费用时不能一概而论。大部分污水处理厂被设置在城市地势相对较低的区域,以便更有效地收集和处理城市污水,因此,当这些尾水需要被重新利用时,通常需要进行提升操作,即利用泵等设备将水从低处抽送到高处或远距离的地方。这一过程中所需的能量消耗,即扬程,是一个关键因素。

具体来说,每个项目的实际情况都有所不同,包括尾水回用的具体地点、用途、管道布局以及所需的水压等因素,都会影响到扬程的大小。因此,不能简单地断定污水厂尾水回用的扬程一定低于取水费用。实际上,在某些情况下,由于尾水回用地点较高或距离较远,所需的扬程可能会相当大,甚至可能超过直接从水源地取水的费用。而在另一些情况下,如果尾水回用地点较低或距离较近,且管道布局合理,那么所需的扬程可能会相对较小,从而有可能实现比取水更低的费用。

因此,在进行污水厂尾水回用的规划和设计时,需要根据每个项目的具体情况进行具体分析,综合考虑尾水回用的扬程、取水费用以及其他相关因素,以制定出最经济、最合理的尾水利用方案,在实现水资源再利用的同时,最大限度地降低能耗和费用。

3.3 预计碳减排量

结合案例污水厂实际情况,在采用光伏系统、智能控制系统、尾水回用措施后,可实现年度碳减排量

为 1 092.43 t CO₂e(表 5)。

表 5 案例污水处理厂潜在碳减排量

Tab. 5 Potential Carbon Emission Reduction for WWTP Case

项目	年排放量/(t CO ₂ e)
光伏系统	91.33
智能系统	105.78
尾水回用	895.32
合计	1 092.43

4 结论

本文以《指南》为依据,对案例污水厂运行维护过程进行碳排放核算,结论如下。

(1)本文通过梳理计算体系,确定核算方法与边界范围,计算出该污水处理厂的碳排放强度为 0.584 2 kg CO₂e/m³,年总碳排放量约为 4 264.99 t CO₂e,范围 1 占比为 49.26%,其中范围 1 中的化石源 CO₂e 在碳排放核算中不可忽视,高达 25.16%。范围 2 占比为 44.15%,范围 3 占比为 6.59%。

(2)通过对案例污水厂运行碳排放测算分析,范围 2 主要为电力消耗,占总碳排放量的比值仅次于范围 1,为 44.15%。这说明污水厂运营过程中电力的使用是促进碳排放的主要贡献者,其中高能耗设备是电力消耗的主要来源。范围 3 主要是使用除磷剂与碳源等药剂产生的碳排放,仅为总排放量的 6.59%,比例相对较低但仍需关注。因此,该污水处理厂运维过程中直接碳排放与电耗是碳排放热点因素。针对范围 1,未来碳减排工作可进一步对回收与去除污水处理厂中产生的温室气体进行分析与研究。

(3)基于该提升改造的污水厂碳排放的实际情况,本文从替碳和减碳 2 个角度进行分析,提出了适合该污水处理厂的碳减排路径为光伏系统替碳使用、优化智能曝气系统、控制精准投药以及再生水利用,并分别量化了其减排效应。其中,在污水处理厂使用光伏替碳技术,可使年间接碳排放量减少 91.33 t CO₂e;在鼓风机系统与加药工艺中使用智能曝气与精准投加技术,可使年间接碳排放量减少 105.78 t CO₂e;当进行污水厂再生水利用,可使年间接碳排放量减少 895.32 t CO₂e。以上 3 种减排措施能够实现年度碳减排量总计 1 092.43 t CO₂e。未来污水处理厂可从提升运行效能、处理工艺优化、能源回收利用、再生资源利用等方面减少温室气体排放。

参考文献

- [1] DU W J, LU J Y, HU Y R, et al. Spatiotemporal pattern of greenhouse gas emissions in China's wastewater sector and pathways towards carbon neutrality[J]. Nature Water, 2023, 1(2): 166-175.
- [2] 陆家缘. 中国污水处理行业碳足迹与减排潜力分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
LU J Y. Carbon footprint and reduction potential of Chinese wastewater treatment sector[J]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [3] 李成, 马顺君, 贺鑫, 等. 典型给水厂运行碳排放核算与碳减排路径[J]. 给水排水, 2023, 49(7): 1-7.
LI C, MA S J, HE X, et al. Carbon emission calculation and carbon emission reduction path of typical waterworks operation[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(7): 1-7.
- [4] 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.
- [5] 周政, 李怀波, 王燕, 等. 低碳氮比进水 AAO 污水处理厂碳排放特征及低碳运行研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(11): 5088-5099.
ZHOU Z, LI H B, WANG Y, et al. Research on low-carbon operation mode in AAO-based wastewater treatment plants with low C/N influent[J]. 2022, 42(11): 5088-5099.
- [6] 张岳, 葛铜岗, 孙永利, 等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9): 65-74.
ZHANG Y, GE T, SUN Y, et al. Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment[J]. Chian Water & Wastewater, 2021, 37(9): 65-74.
- [7] 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.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [R/OL]. [2024-07-02]. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- [9] 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 Publishing & Media.
- [10] TSENG L, ROBINSON A, ZHANG X, et al. Identification of preferential paths of fossil carbon within water resource recovery facilities via radiocarbon analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(22): 12166–12178.
- [11] 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): 2827–2840.
- HE Q H, CHEN Y T, QIAO J Y, et al. Characterization of annual carbon emissions of three district-level wastewater treatment plants in Beijing based on monthly emission data[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(9): 2827–2840.
- [12] 尹亚云, 蒲文鹏, 陈永娟, 等. 污水处理厂化学除磷精确控制系统研究——以山东某污水处理厂为例[J]. *四川环境*, 2021, 40(1): 228–232.
- YIN Y Y, PU W P, CHEN Y J, et al. Study on the precise control system of chemical phosphorus removal in wastewater treatment plant—Taking a wastewater treatment plant in Shandong Province as an example[J]. *Sichuan Environment*, 2021, 40(1): 228–232.
- [13] 吴宇行, 王晓东, 陈宁, 等. 典型城镇污水处理厂碳源智能投加控制生产性试验[J]. *环境工程*, 2022, 40(6): 212–218.
- WU Y H, WANG X D, CHEN N, et al. Full-scale study of an intelligent carbon dosing control system in a typical urban wastewater treatment plant[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(6): 212–218.
- [14] 杨庆, 王亚鑫, 曹效鑫, 等. 污水处理碳中和运行技术研究进展[J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48(3): 292–305.
- YANG Q, WANG Y X, CAO X X, et al. Research progress of carbon neutrality operation technology in sewage treatment[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2022, 48(3): 292–305.
- [15] 李旺霞. “双碳”背景下污水处理行业降碳减排路径研究[J]. *资源节约与环保*, 2024(10): 13–16.
- LI W X. Research on the path of carbon reduction and emission reduction in sewage treatment industry under the background of "dual carbon". *Resources Economization & Environmental Protection*, 2024(10): 13–16.
- [16] 秦波. 上海市某污水厂再生水利用途径探究及效益分析[J]. *净水技术*, 2022, 41(s1): 144–148.
- QIN B. Research and benefit analysis of reclaimed water utilization at a sewage plant in Shanghai City[J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(s1): 144–148.

(上接第107页)

- WANG L, DONG J X, WANG Y K, et al. Rapid identification of constituents of aronia melanocarpa (Michx.) elliott fruit by UPLC-Q/Orbitrap-MS/MS and GNPS molecular network[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2024, 45(6): 874–883.
- [23] 邝江濛, 郭藤, 徐牛生, 等. 静电场轨道阱超高分辨质谱在新污染物分析中的应用[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(s1): 97–104.
- KUANG J M, GUO T, XU N S, et al. Application of orbitrap ultra-high resolution mass spectrometry on the analysis of emerging contaminants[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(s1): 97–104.
- [24] GAUGLITZ J M, ACEVES C M, AKSENOV A A, et al. Untargeted mass spectrometry-based metabolomics approach unveils molecular changes in raw and processed foods and beverages[J]. *Food Chemistry*, 2020, 302: 125290. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125290.
- [25] 阮华珍. 间甲酚降解菌的筛选及其代谢机理的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- RUAN H Z. Screening of *m*-cresol degrading bacteria and identification of its metabolic mechanism [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2020.
- [26] KRUVE A. Strategies for drawing quantitative conclusions from nontargeted liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 2020, 92(7): 4691–4699.
- [27] 魏娟娟, 孙江晖, 尹伊颜, 等. 基于电喷雾质谱的反应监测研究进展[J]. *质谱学报*, 2021, 42(5): 755–771.
- WEI J J, SUN J H, YIN Y Y, et al. Recent developments on reaction monitoring by electrospray ionization mass spectrometry[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2021, 42(5): 755–771.
- [28] ABRAHAMSSON D P, PARK J S, SINGH R R, et al. Applications of machine learning to in silico quantification of chemicals without analytical standards[J]. *Journal of Chemical Information Modeling*, 2020, 60(6): 2718–2727.
- [29] LI Y, LU Z, ZHANG X, et al. Non-targeted analysis based on quantitative prediction and toxicity assessment for emerging contaminants in tire particle leachates[J]. *Environmental Research*, 2024, 243: 117806. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117806.
- [30] 钱玉立, 耿金菊, 于清森, 等. 污水中新兴污染物的非靶向筛查研究进展[J]. *工业水处理*, 2021, 41(6): 48–57.
- QIAN Y L, GENG J J, YU Q M, et al. Research progress of identification of emerging contaminants in wastewater using non-target screening[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(6): 48–57.