

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.12.002

# 城镇污水处理厂治污降碳的精细化管控研究

蒋富海<sup>1</sup>, 李俊奇<sup>2</sup>, 张显忠<sup>3</sup>, 程俊<sup>4</sup>

(1. 中持水务股份有限公司, 北京 100192; 2. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 3. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125; 4. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430014)

**摘要:** 2014年污水处理行业贡献的温室气体排放量占国家排放总量的比例接近1%,城镇污水处理厂作为国家重要的环保集中治污设施,亟待科学了解其污染治理活动与温室气体排放的关联性,在确保污染物去除的同时,通过对其温室气体关键排放点位的控制,明确其碳排放的核算边界和指标体系,量化核算与评价其温室气体排放量和排放强度。为此,优化了碳排放核算方式、明确产污参数与排放因子,并开展了处理流程的能(药)耗分析。从工艺设计、设备选型、精准控制、精细化运行等项目全周期环节,提出了系统性的减污降碳优化路径,旨在为污水处理厂的减污降碳、节能降耗协同增效提供参考。

**关键词:** 城镇污水处理厂; 温室气体; 碳达峰; 碳排放; 碳排放强度; 节能降耗

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)12-0013-08

## Fine Management & Control of Pollution Control and Carbon Reduction in the Urban WWTPs

JIANG Fu-hai<sup>1</sup>, LI Jun-qi<sup>2</sup>, ZHANG Xian-zhong<sup>3</sup>, CHENG Jun<sup>4</sup>

(1. CSD Water Service Co. Ltd., Beijing 100192, China; 2. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 4. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430014, China)

**Abstract:** The greenhouse gas emissions from the wastewater treatment industry accounted for nearly 1% ratio of the total national emissions in 2014. As crucial centralized facilities for achieving sewage purification targets and ensuring environmental protection, it is urgent to gain a scientific understanding of the relationship between WWTPs' pollution control activities and greenhouse gas emission. Based on ensuring pollutant removal, through the control of greenhouse gas key emission points, it is necessary to establish a clear accounting boundary and index system for carbon emission in WWTPs to accurately quantify and evaluate their greenhouse gas emission and emission intensity. In this study, the carbon emission accounting method was refined and optimized, and the pollution production parameters and emission factors were clarified. An analysis of energy (chemicals) consumption throughout the entire treatment process has been conducted. Based on the entire cycle of WWTPs, including process design, equipment selection, accurate control, fine operation, a systematic optimization approach for pollution and carbon reduction has been proposed. This aims to offer practical insights into integrating

pollution and carbon reduction efforts, as well as reducing energy and chemical consumption in WWTPs.

**Key words:** urban WWTPs; greenhouse gas; carbon peak; carbon emission; carbon emission intensity; energy saving and consumption reduction

污水处理厂的污染治理减排转向绿色低碳化、能(药)耗精细化是大势所趋,减污增效与节能降碳协同,贯穿治理设施规划、设计、实施、运行等全周期,从而促使污水治理的技术产品、管理服务向降碳控源、降耗节能的“水效-能(药)效-碳效”多效合一模式迭代升级。城镇污水处理厂作为环保集中治污设施,亟待科学了解其污染治理活动与温室气体排放的关联性,明确碳排放的核算边界和指标体系,量化核算评价其温室气体排放量和排放强度。

在国家宏观层面上,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)《2006年IPCC国家温室气体清单指南》、中国环境保护部《省级温室气体清单编制指南(试行)》、中国环境保护部办公厅《工业企业污染治理设施污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)》、生态环境部办公厅《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)》(征求意见稿)、中国环境保护产业协会《污水处理厂(站)低碳运行评价标准》(征求意见稿),针对污(废)水处理的碳排放核算逻辑做了阐述,并以城镇污水处理厂为研究对象,试行推出量化核算的方法。付加锋等<sup>[1]</sup>、郑思伟等<sup>[2]</sup>、郭盛杰等<sup>[3]</sup>分别以单厂、地级市或全国地区的城镇污水处理厂为一个核算单位,针对其污染物与温室气体协同减排核算的问题,提出了一些核算边界、协同机制、核算参数、核算方法及测算模型,但在核算口径上均缺少生产药耗的碳排放行为数据与分析。而张岳等<sup>[4]</sup>在核算污水处理厂的碳排放量时,与前述学者存在核算边界的明显差异,他认为外加碳源转化排放的 $\text{CO}_2$ 需计入直接碳排放范畴,且将水质提升、污泥灰(好)氧消化、污泥土地利用等活动关联数据作为碳减排量纳入核减计算,并提出适当提高污水排放标准可有效降碳的结论。目前,针对城镇污水处理厂的碳排放核算尚未正式发布规范化、系统性的量化核算程序。为此,通过城镇污水处理厂的碳排放路径分析,根据前述研究优化碳排放核算方式、明确产污参数与排放因子取值,并结合能(药)耗的控制点分析,基于设计、设备、运行等项目全周期环节,提出

系统性的减污降碳优化路径,旨在为污水处理厂的减污降碳、节能降耗协同增效提供参考。

## 1 城镇污水处理厂的碳排放分析

### 1.1 碳排放源

温室气体源主要包括 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ ,分为直接排放和间接排放两类,城镇污水处理厂的碳排放源简化核算体系如图1所示。通过获得的活動数据、相应的温室气体排放因子,以及温室气体全球变暖潜势,从而核算碳排放量及碳排放强度。根据《中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报》, $\text{CO}_2$ 的全球增温潜势为1, $\text{N}_2\text{O}$ 全球增温潜势 $\text{GWP}_1$ 为310, $\text{CH}_4$ 全球增温潜势 $\text{GWP}_2$ 为21。

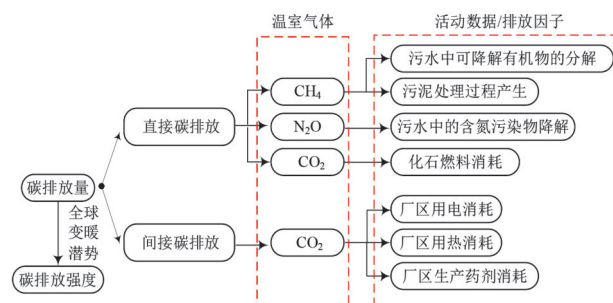


图1 污水处理系统的碳排放源

Fig.1 Carbon emission sources of the sewage treatment system

### 1.2 碳排放点位分布

城镇污水处理系统的主要碳排放点位分布如图2所示,其中 $\text{CH}_4$ 可能来自预处理、二级处理或污泥处理的厌氧过程, $\text{N}_2\text{O}$ 可能来自流动性较差的下水道、二级处理单元的硝化/反硝化释氮过程, $\text{CO}_2$ 则来自电耗/生产药耗等燃煤原材料消耗的间接排放过程。

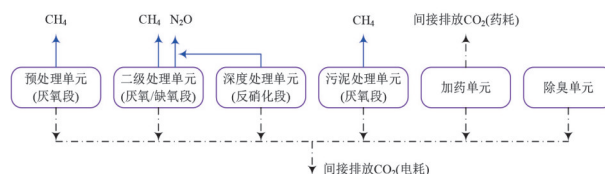


图2 污水处理系统的碳排放点位

Fig.2 Carbon emission point-position of the sewage treatment system

## 2 城镇污水处理厂的碳排放核算与预测评价

### 2.1 碳排放量的核算方式

可生物降解COD排放的CO<sub>2</sub>(大多为生源性碳)不列入碳排放清单统计<sup>[5]</sup>,而针对生物脱氮外碳源转化排放的CO<sub>2</sub>,有研究将其计入直接碳排放<sup>[4]</sup>,而其他同类研究在核算时均未考虑<sup>[1-3]</sup>,本次研究亦不计算作为直接碳排放的外碳源,而将其纳入间接碳排放(药耗类),由此推出碳直接排放量和间接排放量的计算公式,明确量化相关参数取值,定量化核算城镇污水处理厂的温室气体指示性指标——碳排放总量和碳排放强度。

#### 2.1.1 去除TN产生的N<sub>2</sub>O折算直接碳排放量

去除TN产生的N<sub>2</sub>O折算直接碳排放量计算如下:

$$E_1 = \sum_{i=1}^{365} [Q_i \times (TN_{0,i} - TN_{1,i})] \times 10^{-6} \times 44/28 \times EF_1 \times GWP_1 \quad (1)$$

式中: $E_1$ 为污水处理厂去除TN产生的N<sub>2</sub>O折算CO<sub>2</sub>当量的年排放量,tCO<sub>2</sub>/a; $Q_i$ 为污水处理厂第*i*天的处理水量,m<sup>3</sup>/d; $TN_{0,i}$ 、 $TN_{1,i}$ 分别为污水处理厂第*i*天日均进、出水TN浓度,mg/L;44/28为N<sub>2</sub>O与N<sub>2</sub>的分子质量之比; $EF_1$ 为污水处理厂去除总氮的N<sub>2</sub>O排放因子,推荐取值0.005 tN<sub>2</sub>O/tN。

#### 2.1.2 去除COD产生的CH<sub>4</sub>折算直接碳排放量

$$E_2 = \left\{ \sum_{i=1}^{365} [Q_i \times (COD_{0,i} - COD_{1,i}) \times 10^{-6} - 1.42 \times SG_i \times f_i] \times EF_2 - W \right\} \times GWP_2 \quad (2)$$

式中: $E_2$ 为污水处理厂去除COD产生的CH<sub>4</sub>折算CO<sub>2</sub>当量的年排放量,tCO<sub>2</sub>/a; $COD_{0,i}$ 、 $COD_{1,i}$ 分别为污水处理厂第*i*天的日均进、出水COD浓度,mg/L; $SG_i$ 为污水处理厂界内第*i*天产生的绝干污泥总量,tDS/d; $f_i$ 为污水处理厂第*i*天产生污泥中的有机质含量,若无实测值则取0.4~0.6 tSS/tDS<sup>[3]</sup>;1.42为干污泥中有机质(以C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>细胞体计,相对分子质量为113)折合COD当量(5O<sub>2</sub>,相对分子质量为160),1.42=160/113, tCOD/tVSS; $EF_2$ 为污水处理厂去除COD的CH<sub>4</sub>排放因子,为最大CH<sub>4</sub>产生潜势值(推荐取值0.25)与CH<sub>4</sub>修正因子MCF(推荐取值0.165)的乘积,即0.041 tCH<sub>4</sub>/tCOD; $W$ 为污水处理厂的CH<sub>4</sub>年回收量,城镇污水处理厂若无此项统计时可取0, tCH<sub>4</sub>/a<sup>[1-2]</sup>。

#### 2.1.3 污泥滞留产生的CH<sub>4</sub>折算直接碳排放量

$$E_3 = \sum_{i=1}^{365} [(SG_i - SG'_i) \times f_i] \times DOC \times MCF \times 16/12 \times GWP_2 \quad (3)$$

式中: $E_3$ 为污水处理厂处理污泥滞留厂界内产生的CH<sub>4</sub>折算CO<sub>2</sub>当量的年排放量,tCO<sub>2</sub>/a; $SG'_i$ 为污水处理厂第*i*天运至厂界外的绝干污泥总量,tDS/d; $DOC$ 为污水处理厂污泥中可降解的有机碳部分(经验比率约50%)可产CH<sub>4</sub>的碳比例(可产CH<sub>4</sub>部分碳占比约50%),推荐取值0.25(50%×50%); $MCF$ 为CH<sub>4</sub>修正因子,推荐取值0.165;16/12为CH<sub>4</sub>与C的分子质量之比。

#### 2.1.4 电力、热力、药剂消耗产生的间接碳排放量

电力、热力、药剂消耗产生的间接碳排放量计算公式分别如下:

$$E_4 = A_e \times EF_{\text{电力}} \quad (4)$$

$$E_5 = A_h \times EF_{\text{热力}} \quad (5)$$

$$E_6 = \sum (A_{c,j} \times EF_{\text{药剂},j}) \quad (6)$$

式中: $E_4$ 为污水处理厂的电耗折合CO<sub>2</sub>年排放量,tCO<sub>2</sub>/a; $A_e$ 为污水处理厂的年耗电量,MW·h/a; $EF_{\text{电力}}$ 为电能碳排放因子,推荐取值0.581 0 tCO<sub>2</sub>/(MW·h); $E_5$ 为污水处理厂的供热损耗折合CO<sub>2</sub>年排放量,tCO<sub>2</sub>/a; $A_h$ 为污水处理厂的供热量,城镇污水处理厂若无此项则取0, t标准煤/a; $EF_{\text{热力}}$ 为热力产生的碳排放因子,tCO<sub>2</sub>/t标准煤; $E_6$ 为污水处理厂生产药剂消耗折合CO<sub>2</sub>年排放量,tCO<sub>2</sub>/a; $A_{c,j}$ 为污水处理厂第*j*种生产药剂的年消耗量,t/a; $EF_{\text{药剂},j}$ 为第*j*种生产药剂的碳排放因子,可参考《污水处理厂(站)低碳运行评价标准》(征求意见稿)或简化取值1.5 tCO<sub>2</sub>/t药剂。

#### 2.1.5 碳排放总量、碳排放强度

综上,碳排放总量、碳排放强度计算公式分别如下:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 \quad (7)$$

$$e = \frac{E \times 1000}{\sum_{i=1}^{365} Q_i} \quad (8)$$

式中: $E$ 为碳排放总量,tCO<sub>2</sub>/a; $e$ 为碳排放强度,kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>。

## 2.2 碳排放的预测评价

以5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d规模的城镇污水处理厂为例,基于三种梯级负荷(高、中、低)的水质模型参数,即其



进出水水质、电耗、药剂(以有效主含量的干基计入) 消耗等与碳排放关联指标数据假设,具体如表 1 所示。

表 1 污水处理厂碳排放计算的基础参数假设

Tab.1 Basic hypothetical parameters of carbon emission calculation of WWTPs

水质模型	假设平均进、出水水质/ (mg·L <sup>-1</sup> )	假设年产污泥量/(tDS·a <sup>-1</sup> )	假设年耗电量/ (10 <sup>4</sup> kW·h·a <sup>-1</sup> )	假设年耗药量 (以主含量干基计)/(t·a <sup>-1</sup> )
模型 1:高 负荷水质	进水:COD=450,TN=65; 出水:COD=30,TN=12	2 920(绝干污泥产率 1.6 tDS/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> , 污泥有机质含量约 50%)	694 (单耗 0.38 kW·h/m <sup>3</sup> )	碳源:730;除磷:224;消毒:91; HPAM:22;CPAM:16
模型 2:中 负荷水质	进水:COD=300,TN=45; 出水:COD=30,TN=12	2 190(绝干污泥产率 1.2 tDS/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> , 污泥有机质含量约 50%)	548 (单耗 0.30 kW·h/m <sup>3</sup> )	碳源:456;除磷:160;消毒:91; HPAM:22;CPAM:11
模型 3:低 负荷水质	进水:COD=150,TN=25; 出水:COD=30,TN=12	1 278(绝干污泥产率 0.7 tDS/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> , 污泥有机质含量约 50%)	438 (单耗 0.24 kW·h/m <sup>3</sup> )	碳源:274;除磷:96;消毒:91; HPAM:22;CPAM:6
注: HPAM 指阴离子 PAM;CPAM 指阳离子 PAM;污泥日产日运,污水处理厂内日滞留污泥量默认为 0。				

根据表 1 数据假设,并基于式(1)~(8)推演预测碳排放总量及碳排放强度,结果分别见表 2 和图 3。从预测结果来看,去除 TN 产 N<sub>2</sub>O、去除有机物产 CH<sub>4</sub>、电药耗产生的碳排放量(CO<sub>2</sub>当量)贡献排序为:电耗(碳排放量占比 31%~51%)>去除有机物产 CH<sub>4</sub>(碳排放量占比 22%~38%)>去除 TN 产 N<sub>2</sub>O(碳排放量占比 12%~18%)>药耗(碳排放量占比 13%~15%),电耗和药耗两者的碳排放量占碳排放总量的

比例超过 60%。可见,城镇污水处理厂温室气体碳排放量受电耗及 COD 去除影响较大<sup>[2]</sup>,当然 TN 去除及药耗所产生的碳排放贡献也不可小觑。因此,通过主动性节能降耗协同挖潜,对于降碳减排效益明显。受不同进、出水水质负荷因素的显著影响,污水处理碳排放总量为(0.50~1.29)×10<sup>4</sup> tCO<sub>2</sub>/a,而碳排放强度为 0.27~0.70 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>,这与相关研究提出的排放强度分布结果趋近<sup>[3]</sup>。

表 2 污水处理厂碳排放指标的推演预测结果

Tab.2 Deduction & prediction results of carbon emission indicators of WWTPs

水质模型	直接碳排放				间接排放		碳排放总 量/(tCO <sub>2</sub> · a <sup>-1</sup> )	碳排放 强度/(kg CO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )
	N <sub>2</sub> O 计算排放 量/(tCO <sub>2</sub> ·a <sup>-1</sup> )	CH <sub>4</sub> 计算排放 量/(tCO <sub>2</sub> ·a <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O 折算碳排 放量/(tCO <sub>2</sub> ·a <sup>-1</sup> )	CH <sub>4</sub> 折算碳排 放量/(tCO <sub>2</sub> ·a <sup>-1</sup> )	电耗计算碳排 放量/(tCO <sub>2</sub> ·a <sup>-1</sup> )	药耗计算碳排 放量/(tCO <sub>2</sub> ·a <sup>-1</sup> )		
模型 1:高负荷水质	7.6	231	2 356(18%)	4 844(38%)	4 029(31%)	1 622(13%)	12 851	0.70
模型 2:中负荷水质	4.7	139	1 467(17%)	2 922(34%)	3 181(37%)	1 110(13%)	8 680	0.48
模型 3:低负荷水质	1.9	53	578(12%)	1 111(22%)	2 545(51%)	734(15%)	4 968	0.27
注: 括号内数值为各类排放源的碳排放量占碳排放总量的比例。								

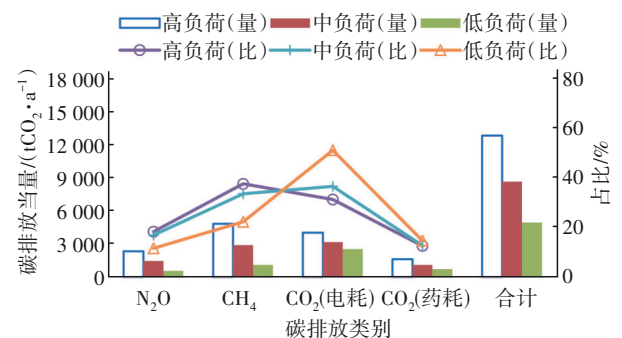


图 3 污水处理厂碳排放量的贡献来源比较

Fig.3 Comparison of contribution sources of carbon emission from WWTPs

### 3 城镇污水处理厂的能(药)耗分布

#### 3.1 典型污水处理厂的能耗分布

以浙江某规模为 10×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 的生活污水处理厂(A 厂)为例分析能(药)耗分布。按照治理流程的

处理单元或动力设备类别划分,其实际电耗分布分别见图 4、5。可以看出,二级生化处理单元为能耗(间接碳贡献)权重较大的工段,而鼓风机、水泵则是需重点进行节能碳管理的大功率用电负荷设备。

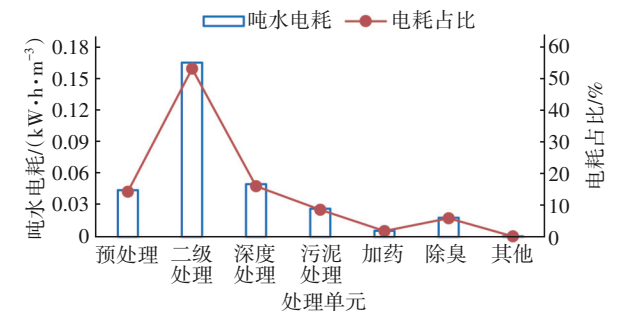


图 4 A 污水处理厂实际处理单元的电耗分布

Fig.4 Power consumption distribution of actual treatment units in WWTP A

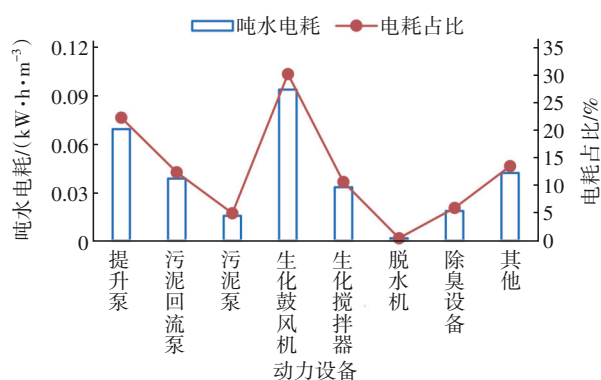


图5 A污水处理厂实际动力设备的电耗分布

Fig.5 Power consumption distribution of actual power equipment in WWTP A

### 3.2 典型污水处理厂的药耗分布

仍以A厂为例,按照治理流程的处理单元或药剂使用功能类别划分,其药耗分布分别见图6、7。可见,二级处理单元(反硝化脱氮段)为药耗(间接碳贡献)占比较大的工段,而碳源(如采用乙酸钠时)、除磷剂则是需重点进行降耗碳管理的大类药剂。

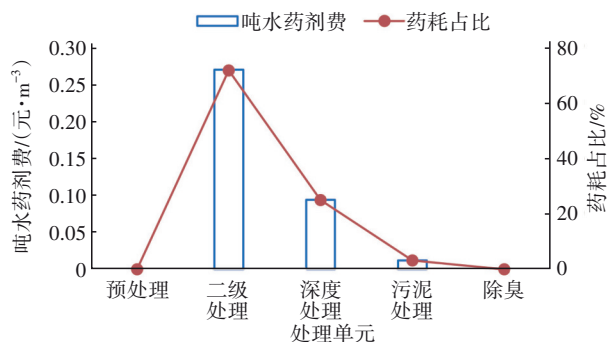


图6 A污水处理厂的药耗分布

Fig.6 Chemicals consumption distribution of actual treatment unit in WWTP A

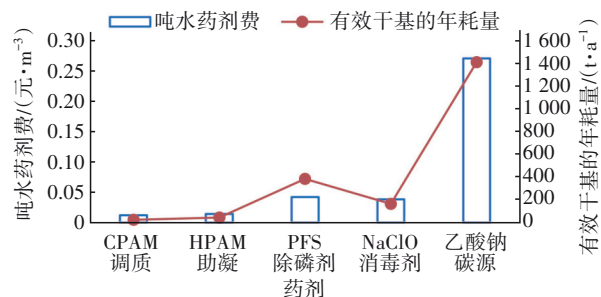


图7 A污水处理厂的药耗分布

Fig.7 Distribution of actual chemicals consumption in WWTP A

## 4 城镇污水处理厂减污降碳优化路径

“十四五”期间,为大力推动污水处理行业的节

能减排,提升水污染治理效能和能(资)源利用效率,控制其衍生的碳排放,协同实施减污降碳双增效,现针对城镇污水处理厂,通过技术设计优选、高效设备选型、精准控制嵌入、精细运行模式、清洁能源利用(碳汇)等系列组合手段,以期实现温室气体碳减排管控。

### 4.1 技术设计优选

优选设计:①根据水环境功能目标需求,制定科学、合理的污水处理厂排放标准(不宜盲目追求过高、过严的极致尾水水质)。②减小污水/污泥中的厌(缺)氧段时空停留区间,做好臭气源的封闭收集与净化设计以减少 $\text{CH}_4$ 产生。③预处理段尽量少采用初沉池等造成进水内碳源损耗的单元,一、二级提升前后构筑物宜合理设置水头以降低提升扬程,强化生化池兼氧同步硝化反硝化(SND)效率以降低 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放强度。④生化单元采用“泵+渠道”回流取代“泵+管道”回流,采用“风机+底部微孔曝气”方式取代传统的机械表面曝气方式(如倒伞/转刷/转碟),合理设计池型结构及其有效池深,如推流式优于完全混合式,通过导流墙消除死水区等。⑤采用上下折墙式的多点进水、多点回流的多级AO或类似工艺,以替代传统的氧化沟或高能耗的MBR工艺,推广应用厌氧氨氧化、短程硝化反硝化等单一或耦合的(短程反应机理)生物降解新处理技术。⑥深度脱氮滤池单元宜采用自养反硝化(以无机碳为能源,如单质硫或硫的化合物复合载体为电子供体),替代异养反硝化(以有机碳为能源和电子供体)<sup>[6]</sup>。⑦针对COD的强化去除需求时,在深度高效澄清处理单元采用粉末炭等吸附剂投加工艺替代臭氧(高能耗和高液氧源物耗)氧化工艺。深度处理慎用耗氧型的曝气生物滤池工段(即C/N滤池),宜采用DN滤池替代。⑧采用次氯酸钠消毒替代紫外或臭氧消毒。

示例一:某规模为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂通过技术革新进行原位节能改造,将二级氧化沟的原有射流曝气搅拌一体机改为“鼓风机+可提式管膜微孔曝气”方式,改造效益分析见表3。相较于改造前,改造后其能耗同比可节约1235 MW·h/a,年降碳潜力达到718 t $\text{CO}_2$ 。示例二:某污水处理厂曝气池设计了3种不同有效水深(5、6、7 m,对应曝气充氧扩散器以上的曝气池水深不同),则标准传氧速率(SOR)与实际计算传氧速率(AOR)的比值系数

(SOR/AOR)不同,且曝气风机的风压、风量、功率有显著性差异,导致风机耗电量结果具有明显差异,具体结果如表4所示。相较于曝气水深7 m,设计中降低水深至5~6 m时,由于风压降低致使曝气节能与降碳效益优化约8%~17%。示例三:某规模为

$4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂其深度处理单元采用硫自养深床反硝化滤池替代传统的异养深床滤池,实现药耗节约40%以上<sup>[6]</sup>,基于每去除1 mg/L的TN的替碳潜力超过160  $\text{tCO}_2/\text{a}$ 计算,则去除5 mg/L的TN时,年度替碳效益达到800  $\text{tCO}_2$ 以上。

表3 某污水处理厂生化曝气节能改造效益分析

Tab.3 Benefit analysis of energy saving by technical innovation of biochemical aeration system in a WWTP

分类	生化池设备配置	装机功率/kW	运行功率/kW	年运行电耗/( $\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1}$ )	年节能潜力/( $\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1}$ )	年降碳量/( $\text{tCO}_2 \cdot \text{a}^{-1}$ )
生化池节能技改前	曝气机(7.5 kW+5.5 kW)8台,斜轴推流器(22 kW+18 kW)8台,推进器(4 kW)12台	472	366	2 725		
生化池节能技改后	空气悬浮风机(120 kW)3台,推流器(4 kW)20台,可提升管式曝气器(每套每根竖管接4根1 m× $\phi$ 65 mm水平曝气分配管,共348套)	440	200	1 490	1 235	718

表4 某污水处理厂曝气风机耗电与曝气水压的关联性

Tab.4 Correlation between power consumption of aeration blower and aeration water-pressure in a WWTP

有效水深/m	5	6	7
曝气器淹没水头/kPa	48	58	68
SOR/AOR	1.48	1.40	1.33
曝气风机额定风压/kPa	60	70	80
曝气风机相对风量比	1.11	1.05	1
曝气风机相对风压比	0.75	0.88	1
曝气风机相对功率比	0.83	0.92	1
曝气风机节能率/%	17	8	
注: ①相对风压(风量及功率)以有效水深7 m为参比;②在曝气器淹没水头基础上,鼓风机相对额定风压增加约12 kPa(管阻估测值);③风机电量为其功率的函数,而功率又为风量、风压的关联函数。			

## 4.2 高效设备选型

设备选型要点:①采用高效提升泵、高效低耗鼓风机(选用磁悬浮风机、单级高速离心风机、空气悬浮风机等替代传统的罗茨鼓风机)等新型节能设备,以及板式(管式)等氧转移效率相对高效的微孔曝气替代传统的中孔曝气(或射流曝气)<sup>[5,7-9]</sup>。②机泵或搅拌类大功率设备配备变频电机或调速变频器,降低启动时电流或调控高效段运行。③针对部分污水处理厂存在水质水量负荷低的情况,宜采用必要的大小组合配置(主要为水泵、风机等大功率类设备),避免“大马拉小车”造成能耗浪费。

示例:南方某污水处理厂规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,进水负荷较低,设计风机即使在最低频率下运行仍存在极大冗余,因此通过技改增加了1台小功率风机( $10 \text{ m}^3/\text{min}$ , 18.5 kW)替代原设计的大功率风机(43

$\text{m}^3/\text{min}$ , 55 kW)运行,2年实现了投资回报,且实现节电110  $\text{MW} \cdot \text{h}/\text{a}$ ,年降碳潜力达到64  $\text{tCO}_2/\text{a}$ 。

## 4.3 精准控制嵌入

### ① 节能控制

针对生化曝气配备必要的硬软件控制模块,建立精确控制逻辑(精确曝气)或实时动态精细调控策略。例如,曝气风机及供气主管路的智能调节阀与DO/ORP/耗氧水质(如基于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 前馈或后馈)参数进行关联控制<sup>[10]</sup>;内回流比与反硝化脱氮率关联调控内回流变频设备的运行,优化内回流泵能耗<sup>[5]</sup>;外回流(或排泥)与生化污泥浓度进行关联调控,降低外回流泵能耗。

### ② 降耗控制

对加药设备(脱氮、除磷、消毒等)配备必要的软硬件控制模块,建立精确控制逻辑(精准加药等)或实时动态精细调控策略。例如,脱氮外碳源投加与单元TN水质(进出水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 或TN的在线监测或手工数据)以及进水C/N比等关联<sup>[11]</sup>;除磷药剂投加与进出水 $\text{PO}_4^{3-}$ 或TP的在线监测或人工检测数据等关联;消毒药剂投加与出水余氯关联等。

## 4.4 精细运行模式

### 4.4.1 节能优化

优化方式:①一、二级提升泵房宜采用高液位运行,降低提升能耗。②将生化池MLSS及生化污泥中有机分(MLVSS/MLSS比值)控制在合理经验范围内,以降低曝气电耗<sup>[9]</sup>。③机泵搅拌等大功率设备充分利用变频运行,或依据“尖峰平谷”时段错峰运行。④通过降低生化曝气段的供氧,实现氧的供需平衡,从而降低最低供气能耗。⑤针对曝气生物



滤池单元,可采用“一带二”(单台曝气风机向两格以上滤池供气)来降低风机开启数量与能耗。⑥合理控制碳化、硝化所需能耗,避免出水COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标极限过度处理(调控实际出水值为尾水限值的65%~85%为宜)。

示例:某污水处理厂规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用粗放式曝气方式时,气水比达到6.5:1,曝气区末端DO达到3~5 mg/L,通过实时调控,在氨氮达标的基础上,将DO控制在1.5~2.5 mg/L,鼓风机气水比降至5.4:1,能耗同比降低15%以上,实现了显著的低碳效益;另外,通过模拟计算,将生化池DO控制在1.0~5.0 mg/L时,系统SOR与AOR的理论比值为1.2~2.3(见图8);风压一定时,曝气能耗与供气量正向关联(供气量又受需氧量影响),曝气能耗比为1.0~2.0。因此,在耗氧污染指标达标的前提下,沿曝气池长度方向分区设置合理低限的DO不同目标预设值<sup>[8,10]</sup>,可实现显著的协同节能降碳效益。

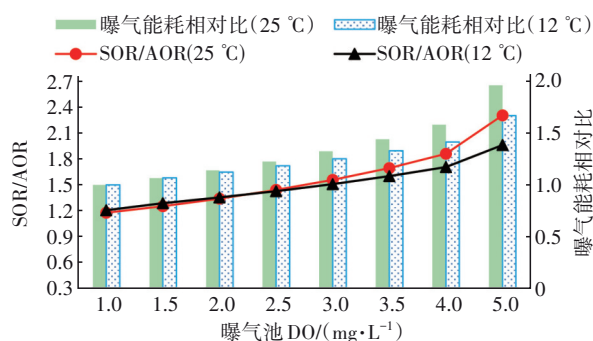


图8 某污水处理厂生化曝气区不同DO水平时的需氧分析  
Fig.8 Analysis of oxygen demand at different DO level in biochemical aeration zone of a WWTP

#### 4.4.2 降耗优化

优化并消除降低全流程的跌水以防复氧,重点是减少进入缺氧反硝化单元(如生化厌氧池/缺氧池,深度处理反硝化滤池等)的上一单元或其间过流通道的DO,防止内碳源的无效损耗,以降低外碳源的投量<sup>[6,11]</sup>。为强化生物脱氮效果,可合理调配进水多点分配点位,并充分利用进水内碳源作为电子供体<sup>[5]</sup>。对于脱氮除磷药剂,应提前做好技术验证比选,充分做好药剂“5定”(定类、定质、定点、定量、定环)优化和质控管理,提高碳源等核心药剂的利用效率。此外,还应合理控制碳源、除磷两类药剂,避免出水TN和TP指标极限过度处理(调控实际出水值为尾水限值的65%~85%为宜)。

#### 4.5 清洁能源利用

采用清洁能源(如太阳能分布式光伏发电、污泥生物质厌氧消化产沼气等)实现替碳<sup>[1-2,5]</sup>,加大厂区绿林种植实现有效碳汇减排。某污水处理厂规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用分布式光伏发电技术(自产自消),在池体、空地、屋顶等可利用区域,设置了1.5 MW光伏机组(采用500 W单晶硅光伏组件),实现近28%的电耗替代,每年电耗节约1 400 MW·h,年替碳量达到813 tCO<sub>2</sub>以上。但是分布式光伏发电的单位投资较高,一般为4~6元/W,投资回收期一般超过6年,而且国家尚无政策性补贴,尽管北京、上海、广州等地已实现碳排放公开交易(交易价为30~80元/tCO<sub>2</sub>),但一次投资的经济负担仍很重,需要总体平衡降碳生态效益与投资回报的经济效益,合理开展投资与节能比选与效益评估。

#### 5 结论

针对污水处理厂的三类温室气体碳排放,建立了基于碳排放总量和碳排放强度的量化评估体系。基于此,计算分析得出如下结论:

① 城镇污水处理厂碳排放量受电耗及COD去除影响较大,TN去除及药耗所产生的碳排放贡献也不可小觑。通过推演不同梯级的进、出水水质负荷,电(药)耗两者的碳排放量占排放总量的比例超过60%,碳排放强度为0.27~0.70 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>。

② 二级生化处理单元为能(药)耗和碳排放量贡献较大的工段,鼓风机、水泵为重点节能与碳管理的大功率动力负荷设备;碳源、除磷剂则是需重点降耗与碳管理的大类药剂。通过主动性节能降耗协同挖潜,可实现显著的降碳效益。

③ 城镇污水处理厂的降碳管控包括技术设计优选、高效设备选型、精确控制嵌入、精细运行模式、清洁能源利用等,如将曝气池有效水深从7 m降至5 m时,曝气节能与降碳效益理论可达17%;某规模为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂,通过对原生化池机械曝气设备的节能技改替换,年降碳潜力达到718 tCO<sub>2</sub>;某规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水厂,采用硫自养深度脱氮技术替代传统有机碳源的异养脱氮滤池后,每去除1 mg/L的TN其替碳潜力超过160 tCO<sub>2</sub>/a。

#### 参考文献:

- [1] 付加锋,冯相昭,高庆先,等. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算方法与案例研究[J]. 环

- 境科学研究, 2021, 34(9): 2086-2093.
- FU Jiafeng, FENG Xiangzhao, GAO Qingxian, *et al.* Collaborative control method and case study of greenhouse gases in urban sewage treatment plants[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(9): 2086-2093(in Chinese).
- [2] 郑思伟,唐伟,闫兰玲,等. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体的核算及排放特征研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(5): 556-559,583.
- ZHENG Siwei, TANG Wei, YAN Lanling, *et al.* Accounting and emission characteristics study on co-control of pollutants and greenhouse gases in municipal wastewater treatment plant[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(5): 556-559,583(in Chinese).
- [3] 郭盛杰,黄海伟,董欣,等. 中国城镇污水处理行业温室气体排放核算及其时空特征分析[J]. 给水排水, 2019, 45(4): 56-62.
- GUO Shengjie, HUANG Haiwei, DONG Xin, *et al.* Calculation of greenhouse gas emissions of municipal wastewater treatment and its temporal and spatial trend in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(4): 56-62(in Chinese).
- [4] 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 Yue, GE Tonggang, SUN Yongli, *et al.* Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9): 65-74(in Chinese).
- [5] 郝晓地,张益宁,李季,等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 1-8.
- HAO Xiaodi, ZHANG Yining, LI Ji, *et al.* Case analysis of energy neutrality and carbon neutrality for wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 1-8(in Chinese).
- [6] 蒋富海. 自(异)养脱氮在低C/N污水处理厂的应用实践[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 124-131.
- JIANG Fuhai. Application practice of autotrophic (heterotrophic) denitrification in a WWTP with low C/N ratio influent[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 124-131(in Chinese).
- [7] 程树辉,孙月娣. 污水处理厂提标改造工程中曝气控制制系统的应用[J]. 中国给水排水, 2016, 32(1): 63-66,70.
- CHENG Shuhui, SUN Yuedi. Application of aeration control system in upgrade and expansion project[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1): 63-66,70(in Chinese).
- [8] 李瑞峰,马金金,李治刚. 曝气风机压力和能耗升高的处理方法[J]. 净水技术, 2020, 39(9): 176-178.
- LI Ruifeng, MA Jinjin, LI Zhigang. Solutions to the increase of pressure and energy consumption for aeration blower[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(9): 176-178(in Chinese).
- [9] 刘芳,王光辉,郑鹏凯. 市政污水处理厂节能粗评估方法研究[J]. 给水排水, 2021, 47(11): 37-40.
- LIU Fang, WANG Guanghui, ZHENG Pengkai. Study on coarse evaluation method for energy-saving in municipal wastewater treatment plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(11): 37-40(in Chinese).
- [10] 李升,胡晓东,许飞飞,等. 马头岗污水厂精确曝气系统的实施及应用效果[J]. 中国给水排水, 2016, 32(15): 26-31.
- LI Sheng, HU Xiaodong, XU Feifei, *et al.* Implementation and application efficiency of aeration volume control system in Matougang wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(15): 26-31(in Chinese).
- [11] 李鹏飞,蒋奇海,张达飞,等. 北京某大型再生水厂反硝化生物滤池运行管控实践[J]. 给水排水, 2021, 47(4): 39-44.
- LI Pengfei, JIANG Qihai, ZHANG Dafei, *et al.* Operation control practice of denitrification biofilter in a large scale reclaimed water plant in Beijing[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(4): 39-44(in Chinese).

作者简介:蒋富海(1983- ),男,安徽怀宁人,硕士,正高级工程师,从事污(废)水处理的运营技术精细化研发应用与管理工作。

E-mail:jafeyh@163.com

收稿日期:2022-04-06

修回日期:2022-05-14

(编辑:丁彩娟)