

陈红芳, 贺珊珊, 马民, 等. 污水厂碳排放影响因素及碳中和潜力分析[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 98-107, 158.

CHEN H F, HE S S, MA M, et al. Analysis on influencing factors of carbon emissions and carbon neutrality potential of WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 98-107, 158.

污水厂碳排放影响因素及碳中和潜力分析

陈红芳¹, 贺珊珊^{1,*}, 马民², 黄琦³, 万年红¹, 刘海燕¹, 计险², 周小丹³

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010; 2. 武汉市城市排水发展有限公司, 湖北武汉 430010; 3. 武汉市海绵城市和综合管廊建设管理站, 湖北武汉 430023)

摘要 【目的】“3060”碳目标的提出, 激励各个行业聚焦“双碳”问题。污水处理过程中产生碳源和碳汇, 对其进行核算是非常有必要的。【方法】文章针对运营企业层面, 研究污水处理厂碳排放影响因素, 进一步分析碳排放特征和碳中和潜力, 为污水处理厂低碳运行调整提供依据。文章通过明确运营企业管理范围内碳排放核算边界, 结合实际工艺运行情况选取切实可行的碳核算方法和排放因子, 对该运营企业管理的 8 座污水处理厂展开碳排放核算和分析。【结果】研究显示, 该运营企业总碳排放量为 1.95×10^5 t CO₂/a, 总碳排放强度为 0.25 kg CO₂/m³。8 座污水厂年碳排放量为 7 365.8 ~ 53 083.1 t CO₂/a, 碳排放强度为 0.17 ~ 0.47 kg CO₂/m³。污水处理厂碳排放强度与吨水电耗相关性系数(R^2)为 0.94, 与吨水药耗 R^2 为 0.91, 从工艺类型考虑, 碳排放强度表现为氧化沟 < 厌氧/缺氧/好氧(AAO) < AAO+膜生物反应器(MBR) < 曝气生物滤池(BAF), 这主要跟工艺运行电耗、药耗相关; 按碳源贡献进行修正的污染物削减综合指数、耗氧污染物削减量, 均与碳排放强度相关性增强; 在采用光伏发电、再生水回用等减排措施后, WWTP1 净碳排放强度为 -0.022 kg CO₂/m³。【结论】该运营企业管理的污水厂采用工艺不同, 碳排放差异较大, 根本原因是受吨水药耗、吨水电耗的影响; 在碳排放研究时, 应当考虑碳源对直接碳排放的影响; 利用厂区环境和工艺优势, 该运营企业管理的污水厂可实现厂区运行碳中和目标。

关键词 碳排放 碳中和 污水处理厂(WWTP) 碳源 污染物削减

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)04-0098-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.012

Analysis on Influencing Factors of Carbon Emissions and Carbon Neutrality Potential of WWTPs

CHEN Hongfang¹, HE Shanshan^{1,*}, MA Min², HUANG Qi³, WAN Nianhong¹, LIU Haiyan¹, JI Xian², ZHOU Xiaodan³

(1. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Wuhan Urban Drainage Development Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

3. Wuhan Sponge City and Utility Tunnel Construction Management Station, Wuhan 430023, China)

Abstract [Objective] The proposal of the "3060" carbon target has encouraged various industries to focus on the "double carbon" issue. It is necessary to calculate the carbon sources and carbon sinks in the process of wastewater treatment. [Methods] The paper studied the factors of the carbon emissions of wastewater treatment plants (WWTPs) at the operating enterprise level, further analyzed the characteristics of carbon emissions and carbon neutrality potential, and provides basis for the low-carbon operation adjustment of WWTPs. This paper clarified the boundaries of carbon emission accounting within the management scope of the operating enterprise, selected practical and available carbon accounting method and emission factors based on the actual process operation, and conducted carbon emission accounting and analysis of the eight WWTPs managed by the operating enterprise. [Results] Research showed that the total carbon emissions of the operating company were 1.95×10^5 t CO₂/a, and the total carbon emission intensity was 0.25 kg CO₂/m³. The annual carbon emission range of the eight WWTPs was 7 365.8 ~ 53 083.1 t CO₂/a, and the carbon emission intensity

[收稿日期] 2024-02-07

[基金项目] 武汉市城建局科技计划项目(202236); 武汉市城市排水发展有限公司科研项目(PS-ZGB-FK-2023-218)

[作者简介] 陈红芳(1995—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事市政给水及污水处理低碳研究工作, E-mail: cxj99521@qq.com。

[通信作者] 贺珊珊(1987—), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事低废水处理技术研究工作, E-mail: heshanshan2010@126.com。

was 0.17~0.47 kg CO₂/m³. The correlation coefficient (R^2) of the carbon emission intensity and electricity consumption per ton of water was 0.94, and the R^2 of the carbon emission intensity and chemical consumption per ton of water was 0.91. From the perspective of process type, the order of carbon emission intensity was manifested as oxidation ditch<anaerobic/anoxic/oxic (AAO)<AAO+(MBR)<biological aerated filter (BAF), which was mainly related to the power consumption and chemical consumption of the process. The comprehensive pollutant reduction index and the reduction of oxygen-consuming pollutants adjusted based on carbon source contributions both exhibit enhanced correlation with carbon emission intensity. With using emission reduction measures such as photovoltaic power generation and recycled water reuse, the net carbon emission intensity of WWTP1 was -0.022 kg CO₂/m³. [**Conclusion**] The WWTPs adopt different processes, resulting large differences in carbon emissions, the fundamental reason is that they are affected by the electricity consumption per ton of water and the chemical consumption per ton of water. When studying carbon emissions, the impact of carbon sources on direct carbon emissions should be considered. It is feasible for the WWTP managed by the operating enterprise to realize the goal of carbon neutrality by taking advantage of the environment and process.

Keywords carbon emission carbon neutrality wastewater treatment plant(WWTP) carbon sources pollutant reduction

控制碳排放是全社会共同面临的重大挑战,我国污水处理量已超 2 亿 m³/d,污水处理位居前十大碳排放行业,对污水处理行业进行碳排放分析十分必要。

现有污水处理碳排放研究主要分 3 个不同层面:一是区域层面,二是行业层面,三是企业层面。针对区域层面,全国各省市污水处理碳排放特征已有较多研究,包括上海^[1]、重庆^[2]、山东^[3]等多个地区;针对行业层面,已有不少有关城镇污水^[4]、农村生活污水^[5]、工业废水^[6]等方面的碳排放测算和碳减排分析。针对企业层面,目前相关研究较少。

本文从运营企业角度进行碳排放分析,列出管理范围内污水厂碳排放来源与边界,通过碳排放核算和碳中和潜力分析,研究污水处理厂碳排放影响因素,为污水厂低碳运行调整提供依据。

1 碳排放核算方法

1.1 核算边界

本文碳核算边界为污水运营企业管理范围内污

水处理、污泥处理过程,不包括污泥处置。涉及碳排放和碳减排两部分。碳排放过程包括管理范围内污水处理、污泥处理过程材料、药剂、电力消耗导致的间接碳排放,污水处理、污泥处理过程产生温室气体甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)导致的直接碳排放。碳减排包括厂区光伏发电产生电能、再生水回用等减碳或替碳过程。

1.2 核算方法

本文中温室气体直接排放数据基于污水厂进、出水水质情况计算所得,间接排放数据基于污水厂运行过程能耗、药耗情况计算所得。为提高核算结果的可比性,选取相同周期长度的运行数据展开核算分析,本文选取污水厂运行数据年均值进行核算。

目前针对城镇污水厂碳核算方法已有较多研究,本研究结合污水厂水质参数、运行情况对现有公式进行修正,最终形成切实可行的碳核算方法。具体核算方法如表 1 所示,核算参数如表 2 所示。

表 1 碳排放核算方法
Tab. 1 Accounting Method of Carbon Emission

类别	计算公式	参考文献
间接碳排放量	$C_g = M_i f_i$	(1) [7]
直接碳排放量	$C_{N_2O} = G_{N_2O} Q \times (N_I - N_O) \times f_{N_2O} \times 10^{-6}$	(2)
	$C_{CH_4} = 10^{-6} \times G_{CH_4} Q \times (B_I - B_O + B_E) \times f_{CH_4}$	(3)
碳排放量	$C = C_g + C_{N_2O} + C_{CH_4}$	(4)
碳减排量	$J = M_j f_j$	(5)
净碳排放量	$C_\Delta = C - J$	(6)

(续表1)

类别	计算公式	参考文献
碳排放强度	$E = \frac{C}{Q}$	(7)
净碳排放强度	$E_{\Delta} = \frac{C_{\Delta}}{Q}$	(8)
污染物削减率综合指数	$F = (0.3 \times X_{\text{COD}} + 0.1 \times X_{\text{BOD}} + 0.1 \times X_{\text{SS}} + 0.3 \times X_{\text{氨氮}} + 0.1 \times X_{\text{TN}} + 0.1 \times X_{\text{TP}}) \times 100\%$	(9) [8]
水质指标削减率	$X_{\text{COD}} = \frac{D_1 - D_0}{D_1}$	(10)
耗氧污染物削减量	$\Delta X = \frac{Q_1 \times (B_1 + 3.5 \times N_1) - Q_0 \times (B_0 + 3.5 \times A_0)}{Q_0}$	(11) [9]

表2 碳排放核算参数
Tab.2 Accounting Parameters of Carbon Emission

参数	含义	单位
E, E_{Δ}	碳排放强度、净碳排放强度	t CO ₂ /m ³
C, J, C_g, C_{Δ}	碳排放量、碳减排量、间接碳排放量、净碳排放量	t CO ₂ /a
$C_{\text{N}_2\text{O}}, C_{\text{CH}_4}$	污水处理 N ₂ O 类、CH ₄ 类碳排放量	t CO ₂ /a
Q	年处理水量	m ³ /a
$f_{\text{N}_2\text{O}}, f_{\text{CH}_4}$	污水处理 N ₂ O、CH ₄ 转化因子	t N ₂ O/(t TN)、t CH ₄ /(t BOD ₅)
M_i	第 i 种药剂、能源年均消耗量	t/a 或 kW·h/a
f_i	第 i 种药剂、能源排放因子	t CO ₂ /t 或 t CO ₂ /(kW·h)
N_1, N_0	进、出水总氮浓度年均值	mg/L
B_1, B_0	进、出水 BOD ₅ 浓度年均值	mg/L
B_E	碳源投加浓度年均值	mg BOD ₅ /L
M_j	第 j 种减排方式发电量、回用量等	m ³ /a
f_j	第 j 种减排方式排放因子	t CO ₂ /m ³
$G_{\text{N}_2\text{O}}$	N ₂ O 全球变暖潜力值	t CO ₂ /(t N ₂ O)
G_{CH_4}	CH ₄ 全球变暖潜力值	t CO ₂ /(t CH ₄)
F	污染物综合削减率	—
$X_{\text{COD}}, X_{\text{BOD}}, X_{\text{SS}}, X_{\text{氨氮}}, X_{\text{TN}}, X_{\text{TP}}$	COD _{Cr} 、BOD ₅ 、SS、氨氮、TN、TP 削减率	—
D_1, D_0	进、出水 COD _{Cr} 浓度年均值	mg/L
ΔX	耗氧污染物削减量	mg/L
A_0	出水氨氮浓度	mg/L
Q_1, Q_0	进水、出水流量	m ³ /a

1.3 排放因子

自 2020 年我国提出“双碳”目标以来,各行业在温室气体减排工作上采取了工艺优化、智能控制等节能降耗措施,相关排放因子有所调整。本文涉及的排放因子如表 3 所示。

2 污水厂基本情况

2.1 总体情况

某运营企业管理的 8 座大、中型污水处理厂,处理对象为服务范围内的市政污水,处理规模为 $8 \times 10^4 \sim 5.63 \times 10^5$ m³/d,总处理能力达 2.169×10^6 m³/d,

表 3 碳排放核算因子一览表
Tab. 3 Accounting Factors of Carbon Emission

大类	参数	数值	单位	参考文献
药剂	聚丙烯酰胺 (PAM)	1.48	t CO ₂ /t	[7]
	聚合氯化铝 (PAC)	0.53	t CO ₂ /t	[10]
	乙酸钠	0.623	t CO ₂ /t	[11]
	次氯酸钠	0.99	t CO ₂ /t	[12]
	柠檬酸	1.6	t CO ₂ /t	[9]
	氢氧化钠	1.12	t CO ₂ /t	
电力	电力	5.257×10 ⁻⁴	t CO ₂ /(kW·h)	[13]
转化因子	f_{N_2O}	0.016	t N ₂ O/(t TN)	[14]
	f_{CH_4}	0.003 6	t CH ₄ /(t BOD ₅)	
减排因子	$f_{回用水}$	0.3	kg CO ₂ /m ³	[15]
	$f_{光伏}$	5.257×10 ⁻⁴	t CO ₂ /(kW·h)	[13]
温室气体全球变暖潜力值	G_{N_2O}	265	t CO ₂ /(t N ₂ O)	[7]
	G_{CH_4}	28	t CO ₂ /(t CH ₄)	

其中大型处理规模污水厂 4 座, 占总处理规模比例为 75.4%。采用主体工艺有厌氧/缺氧/好氧 (AAO)、氧化沟、曝气生物滤池 (BAF)、AAO+膜生物反应器 (MBR) 等, 其中采用 AAO 类工艺的污水厂有 4 座, 占总处理规模比例为 57.2% (表 4)。

表 4 污水厂基本情况
Tab. 4 Information of the WWTP

污水厂	设计规模/(m ³ ·d ⁻¹)	实际水量/(m ³ ·d ⁻¹)	主体工艺	污泥处理工艺
WWTP1	8.0×10 ⁵	5.63×10 ⁵	AAO/AAO+MBR	板框脱水
WWTP2	2.0×10 ⁵	1.72×10 ⁵	BAF	离心脱水
WWTP3	2.4×10 ⁵	2.62×10 ⁵	AAO	离心脱水
WWTP4	2.0×10 ⁵	1.81×10 ⁵	氧化沟	离心脱水
WWTP5	1.2×10 ⁵	1.03×10 ⁵	氧化沟	离心脱水
WWTP6	1.0×10 ⁵	8.00×10 ⁴	BAF	板框脱水
WWTP7	5.0×10 ⁵	5.23×10 ⁵	AAO/AAO+MBR	离心/板框脱水
WWTP8	3.0×10 ⁵	2.85×10 ⁵	AAO	板框脱水

2.2 水质情况

该运营企业管理的各污水厂进水水质略有差别, 进水污染物浓度范围如表 5 所示。各污水厂出水水质基本控制在《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 及以上标准。8 座污水厂的污染物去除情况如图 1 所示。

各污水厂的 COD_{Cr}、BOD₅、TP 去除率均达到 84% 以上, SS、氨氮去除率均达到 95% 以上。TN 去

除率均相对较低, 其中 WWTP2 去除率最高, 为 72.3%, WWTP7 去除率最低, 为 49.1%。

3 污水厂碳排放特征

3.1 碳排放核算水平

3.1.1 企业碳排放

该运营企业总碳排放量为 1.95×10⁵ t CO₂/a, 总碳排放强度为 0.25 kg CO₂/m³。本研究中碳排放强度整体水平低于之前的研究结果^[14-20], 一方面,

表 5 进水水质情况
Tab. 5 Water Quality of Influent

进水指标	污染物质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
SS	73.2~196.1	126.2
COD_{Cr}	125.4~245.3	154.6
BOD_5	49.4~105.0	64.0
氨氮	13.3~31.3	16.7
TN	19.2~39.5	22.5
TP	1.6~2.6	2.0

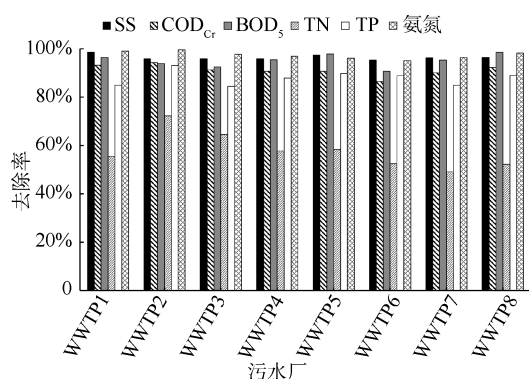


图 1 污水处理厂污染物去除情况
Fig. 1 Pollutants Removal of WWTPs

本文调研的运行数据较新,该企业在近 3 年采取多种减污降碳措施,在工艺运行管理、设备效率、药剂智能投加方面较之前有不同程度的提升,因此整体碳排放强度有所下降;另一方面,本文电力排放因子采用最新数据,中南地区较之前研究^[7]下调了 38.8%。

企业的总碳排放量中,污水厂 WWTP1、WWTP7 占比最多(图 2),分别为 27.2%、21.5%,WWTP2、WWTP8 占比较大,分别为 15.0%、11.6%,剩余 4 座污水厂碳排放量约占总排放量的 24.7%。

企业间接碳排放量占比为 86.2%,电力消耗碳排放量占比为 54.0%,药剂消耗碳排放量占比为 32.3%。污水厂运行过程水力提升、混合搅拌、生化曝气、污泥脱水等各环节的泵、阀门、鼓风机、搅拌机、压滤机等高能耗设备长期运行,导致电力消耗成为碳排放量主要贡献点。企业总体吨水电耗为 0.25 $\text{kW}\cdot\text{h}$,吨水药耗为 0.12 kg 。

企业直接碳排放量占比为 13.8%, N_2O 类碳排放量是 CH_4 类碳排放量的 3.8 倍。 N_2O 类碳排放量普遍高于 CH_4 类碳排放量,主要原因是 N_2O 气体

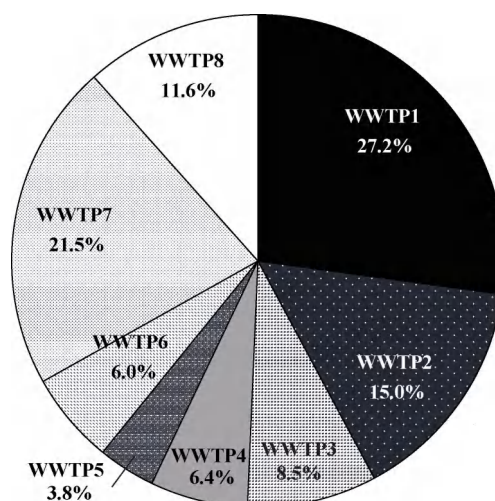


图 2 各污水厂年碳排放量占比
Fig. 2 Proportions of Annual Carbon Emissions in Different WWTPs.

全球变暖潜力值是 CH_4 的 9.46 倍。

该运营企业总碳排放量各组分占比情况(图 3),电力消耗>药剂消耗> N_2O 类> CH_4 类碳排放量。对各组分碳排放量与总碳排放量进行线性拟合(图 4),相关性表现为电力消耗> N_2O 类> CH_4 类>药剂消耗。

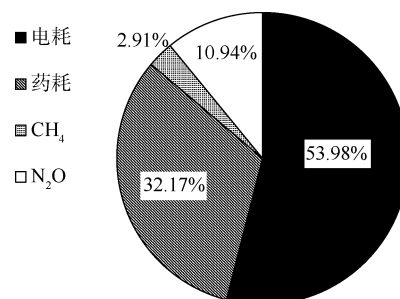


图 3 各组分碳排放量占比
Fig. 3 Proportions of Different Carbon Emissions of WWTPs

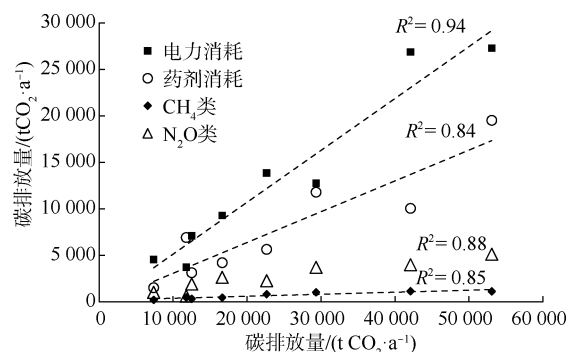


图 4 各组分碳排放量对总碳排放量的影响
Fig. 4 Effect of Different Group's Carbon Emission on Total Carbon Emissions

3.1.2 各污水厂碳排放

8座污水厂年碳排放量为7 365.8~53 083.1 t CO₂,碳排放强度为0.17~0.47 kg CO₂/m³(图5)。其中WWTP2、WWTP6碳排放强度最高,均高于0.40 kg CO₂/m³,其余污水厂碳排放强度分布在0.17~0.26 kg CO₂/m³。

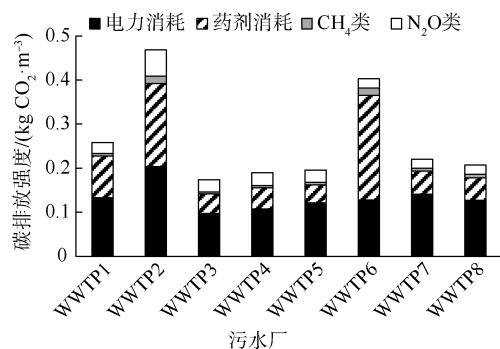


图5 各污水厂碳排放强度

Fig. 5 Carbon Emission Intensities of Different WWTPs

各污水厂间接碳排放量为6 102.9~46 805.9 t CO₂/a,间接碳排放强度为0.141~0.392 kg CO₂/m³,各污水厂间接碳排放占各自总碳排放比例为81.3%~90.7%,电力消耗占比为31.8%~63.8%,药剂消耗占比为20.8%~58.9%。污水厂WWTP2、WWTP6药剂消耗碳排放强度明显高于其余污水厂,2座污水厂吨水药耗分别为0.30、0.36 kg,其余污水厂吨水药耗分布在0.06~0.14 kg。由图6可知,碳排放强度与吨水电耗、吨水药耗均存在显著线性关系。

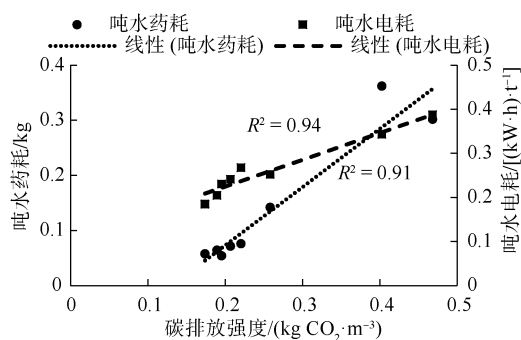


图6 碳排放强度与吨水药耗、吨水电耗的相关性

Fig. 6 Correlation between Carbon Emission Intensities and Unit Chemical Dosage and Unit Power Consumption

各污水厂直接碳排放量为1 100.0~6 277.1 t CO₂/a,直接碳排放强度为0.027~0.076 kg CO₂/m³,8座污水厂直接碳排放占各自总碳排放比例为

9.3%~18.7%。直接碳排放中,各污水厂N₂O类碳排放是CH₄类碳排放的1.3~5.7倍,污水厂WWTP2、WWTP6该比值均较低,主要原因是2座污水厂在生物处理工艺中投加了碳源,原水中BOD₅浓度增加,CH₄类碳排放也随之增加,N₂O类与CH₄类碳排放比值降低。污水厂WWTP6投加碳源向原水贡献了120 mg/L BOD₅,大大提高了CH₄类碳排放。因此,当碳源投加量达到一定程度后,CH₄类碳排放将会超过N₂O类碳排放。

各污水厂月度碳排放强度变化较小,以碳排放量占比最大的污水厂WWTP1为例,分析碳排放强度月度分布情况(图7)。

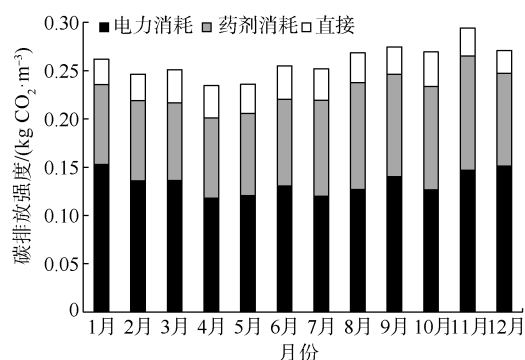


图7 碳排放强度月度分布

Fig. 7 Monthly Distribution of Carbon Emission Intensities

污水厂WWTP1全年碳排放强度为0.26 kg CO₂/m³,月度碳排放强度分布在0.23~0.29 kg CO₂/m³,均方差为0.000 3。相对而言,2月—5月碳排放强度略低,11月略高。7月左右,藻类物质影响污水处理效果,11月之后,进水水温降低,絮凝效果较差,为保证处理出水水质达标,该时间段各类药剂投加量增加;4月—8月水温度合适,微生物处理效果较好,污水、污泥回流比可以适当降低,该时间段电力消耗偏低。

3.2 碳排放影响因素分析

3.2.1 碳排放与处理规模关系

对8座污水厂碳排放量与处理规模进行线性拟合(图8),结果发现碳排放量与处理规模相关性拟合度较高($R^2=0.83$)。其原因是,处理规模越大,药剂、电力消耗及污染物削减量越多,碳排放量越大。本研究涉及污水厂数量较少,碳排放强度分布波动较大,8座污水厂碳排放强度与处理规模大致呈现出污水处理规模效应(图9),处理规模较小的污水

厂,运行设备能效相对较高,导致碳排放强度较大,随着规模增大,运行能效提高,碳排放强度减小。

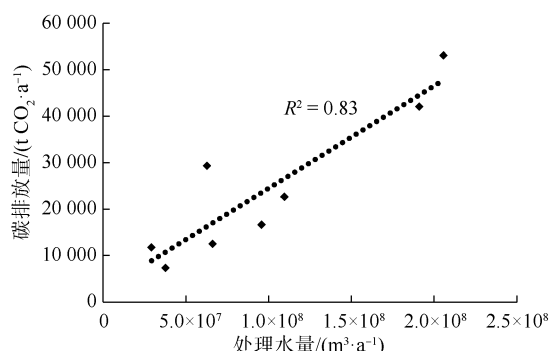


图8 碳排放量与处理水规模相关性

Fig. 8 Correlation between Carbon Emission and Treated Wastewater Capacity

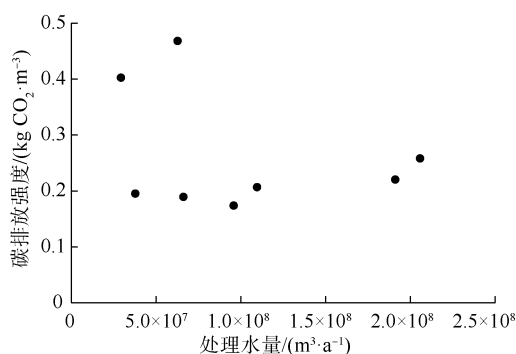


图9 碳排放强度与处理水规模相关性

Fig. 9 Correlation between Carbon Emission and Treated Wastewater Capacity

3.2.2 碳排放与工艺关系

将8座污水厂按处理工艺进行划分,对于污水厂分期建设采用不同主体工艺的情况,按各主体工艺处理水量进行拆分计算。对碳排放强度及处理工艺电耗、药耗进行分析,结果呈现明显的工艺差异(图10)。从碳排放强度角度来看,氧化沟<AAO<AAO+MBR<BAF,其中BAF明显高于其余3种工艺。

BAF工艺碳排放强度为0.44 kg CO₂/m³,吨水电耗为0.37 kW·h,吨水药耗为0.33 kg。BAF类污水厂电力消耗、药剂消耗均较高,因此碳排放强度最大。调研发现,在进入BAF前,需要控制进水SS,常规工艺降低SS同时去除了污水中有机物,导致滤池进水碳氮比严重失衡。为促进微生物活动,有效去除污水中氮磷物质,需在滤池前投加碳源。投加碳源一方面增加了药剂投加量,导致间接排放升高;另一方面向污水系统投加了有机物,这部分有机物经过生

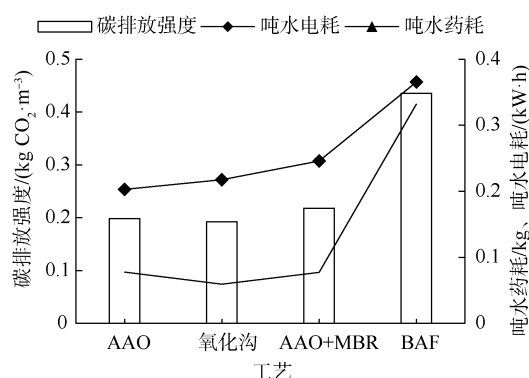


图10 不同工艺碳排放强度

Fig. 10 Carbon Emission Intensities of Different Wastewater Treatment Processes

物处理释放化石源CO₂,导致直接排放同时升高。此外,BAF运行过程曝气系统、反冲洗系统对电力需求较大。因此采用此工艺的2座污水厂WWTP2、WWTP6碳排放强度最高,约是其他污水厂的2倍。

AAO+MBR工艺碳排放强度为0.22 kg CO₂/m³,吨水电耗为0.25 kW·h,吨水药耗为0.08 kg。电力消耗略高于AAO和氧化沟工艺。该组合工艺为有效脱除污水中氨氮、硝态氮,通常采用多级回流形式,保证各功能区对溶解氧的要求;清洗膜丝时采用高速吹扫曝气形式,防止膜丝粘连,高曝气量消耗大量电力。

AAO工艺与氧化沟工艺碳排放强度分别为0.20、0.19 kg CO₂/m³。吨水电耗分别为0.20、0.21 kW·h,吨水药耗分别为0.08、0.06 kg。二者电力消耗均在回流及曝气2个方面。药剂消耗主要为除磷药剂、消毒药剂,药剂种类及用量差异较小。因此2种工艺碳排放强度差别不大。

3.2.3 碳排放与污染物削减综合指数关系

进出水水质直接影响污水厂运行情况,有必要对污染物削减综合指数与碳排放强度关系进行分析。污染物削减率综合指数按COD_{Cr}:BOD₅:SS:TN:氨氮:TP=3:1:1:1:3:1计算^[8],在考虑碳排放强度时,碳源投加所贡献的COD_{Cr}、BOD₅会影响污染物削减量。该运营企业投加碳源均为乙酸钠,乙酸钠与COD_{Cr}转化关系按理论值计算,即1 kg乙酸钠对应0.78 kg COD_{Cr}当量,对应0.52 kg BOD₅当量。按碳源理论贡献值对污染物削减量进行修正。

将碳源物质修正前后的污染物削减率综合指

数,分别与碳排放强度进行拟合(图 11),结果发现碳排放强度与修正后的污染物削减率综合指数呈现正相关关系($R^2=0.82$),与修正前污染物削减率综合指数没有相关性。这说明修正后的污染物削减率综合指数越高,对应吨水电耗、吨水药耗相应增加,碳排放强度越高;在碳排放研究时,有必要考虑碳源物质对研究体系的贡献。

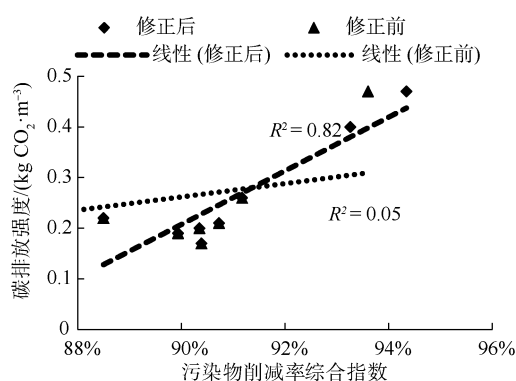


图 11 碳排放强度与污染物削减率综合指数相关性

Fig. 11 Correlation between Carbon Emission Intensities and Comprehensive Index of Pollutants Reduction Rate

对修正前后各污染物削减量与碳排放强度相关性进行分析。图 12(a)修正前各污染物削减量与碳

排放强度相关性 p 值均小于 0.63,相关性表现为 $TN>氨氮>BOD_5>COD_{Cr}>TP>SS$ 。图 12(b)修正后各污染物削减量与碳排放强度相关性 p 值最高达 0.96,相关性表现为 $BOD_5>COD_{Cr}>TN>氨氮>TP>SS$,碳排放强度与 SS 、 TP 削减量没有相关性, COD_{Cr} 削减量与 BOD_5 、 TN 、 TP 、氨氮等污染物削减量相关性均相对较高,这是因为,在常规处理、生物处理单元去除上述污染物同时,也会处理或消耗部分 COD_{Cr} 。

3.2.4 碳排放与耗氧污染物削减关系

耗氧污染物包括 BOD_5 、 TN 和氨氮^[9],将碳源物质修正前后的耗氧污染物削减量,分别与碳排放强度进行拟合(图 13)。结果显示,修正前耗氧污染物削减量与碳排放强度没有相关性($R^2=0.37$),修正后耗氧污染物削减量与碳排放强度有显著相关性($R^2=0.93$)。说明研究碳排放时,同样要考虑碳源对耗氧污染物削减量的影响。耗氧污染物去除过程需要消耗氧气,直接影响曝气、回流过程,增加吨水电耗。修正后的耗氧污染物削减量与吨水电耗、吨水药耗均表现为明显相关性(图 14),说明耗氧污染物削减量越多,对电耗、药耗需求增多,碳排放强度增大。

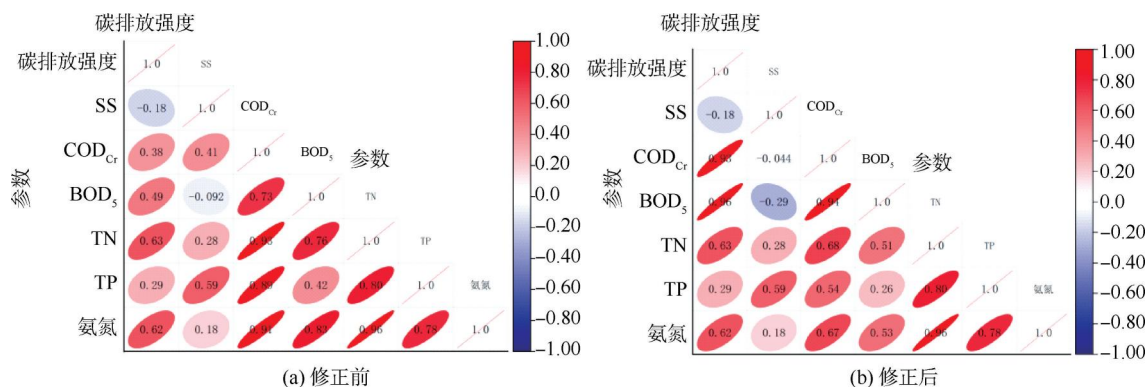


图 12 碳排放强度与污染物削减量的相关性

Fig. 12 Correlation between Carbon Emission Intensities and Pollutants Reduction

3.3 碳中和潜力分析

该运营企业管理的 8 座污水厂采取的碳减排措施包括光伏发电、再生水回用 2 种形式。本文以处理规模及碳排放量最大的污水厂 WWTP1 为例进行碳中和潜力分析(表 6)。

污水厂 WWTP1 利用厂区二沉池、生物池等构筑物上方空间,大面积安装太阳能光伏发电装置,目前已实现全厂覆盖,覆盖面积占厂区 33.4%,平均每日发电 9.3 h。光伏发电年碳减排量为 18 042.02

t CO_2 ,碳减排强度为 0.087 kg CO_2/m^3 ,占该污水厂碳排放的 34%。该污水厂已建再生水年回用量约为 320 万 m^3 ,再生水回用率为 1.61%,用于景观补水、清洗道路、浇灌绿化等。再生水回用年碳减排量为 950 t CO_2 ,碳减排强度为 0.005 kg CO_2/m^3 ,占该污水厂碳排放的 1.9%。污水厂 WWTP1 目前总碳减排量为 18 992.49 t CO_2/a ,总碳减排强度为 0.092 kg CO_2/m^3 ,占该污水厂碳排放的 35.7%,净碳排放强度为 0.166 kg CO_2/m^3 。

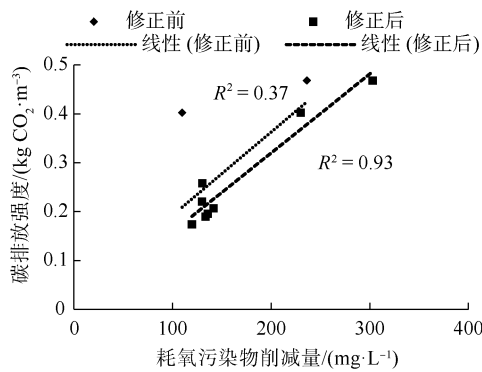


图 13 耗氧污染物削减量与污水厂碳排放强度关系
Fig. 13 Correlation between Carbon Emission Intensities and Oxygen-Demanding Pollutants Reduction

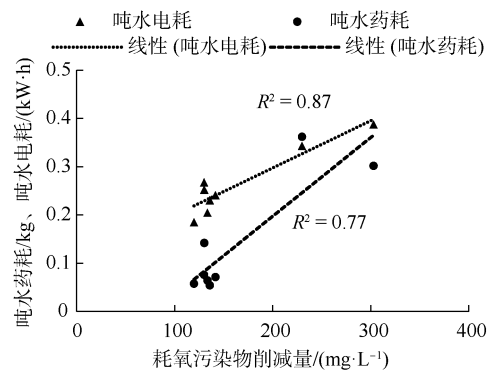


图 14 耗氧污染物削减量与吨水电耗、吨水药耗关系
Fig. 14 Correlation between Oxygen-Demanding Pollutant Reduction and Unit Power and Unit Chemical Consumption

表 6 WWTP1 碳排放潜力分析
Tab. 6 Carbon Emission Potential Analysis of WWTP1

类别	现状		潜力	
	碳排放量/ (t CO ₂ ·a ⁻¹)	碳排放强度/ (kg CO ₂ ·m ⁻³)	碳排放量/ (t CO ₂ ·a ⁻¹)	碳排放强度/ (kg CO ₂ ·m ⁻³)
总碳排放	53 083.05	0.258	53 083.05	0.258
光伏发电减排	18 042.02	0.087	18 042.02	0.087
再生水减排	950.47	0.005	39 603.97	0.193
总减排(光伏发电减排+再生水减排)	18 992.49	0.092	57 645.99	0.280
净排放(总碳排放-总减排)	34 090.56	0.166	-4 562.94	-0.022

目前污水厂 WWTP1 光伏发电装置已全厂覆盖,光伏年发电量达最大限值。厂区再生水回用工程正在扩建,远期规模建成后,再生水回用率可达到 67%,再生水回用年碳减排量可达 39 603.97t CO₂,再生水回用碳减排强度为 0.193 kg CO₂/m³,总碳减排强度可达到 0.280 kg CO₂/m³,WWTP1 厂界范围内(包括污水处理、污泥处理过程),净碳排放强度为-0.022 kg CO₂/m³。远期再生水规模建成后,污水厂 WWTP1 将实现厂区运行碳中和。

这说明,污水厂利用厂区环境和工艺优势,实现厂区运行碳中和目标是可行的。

从运营企业角度,实现碳中和目标可从减碳和替碳 2 个途径进行。减碳途径包括降低药剂消耗,优化药剂投加点,设置精准加药控制系统,提高加药系统效能;提高设备能效,包括对泵组、混合搅拌系统、曝气系统、污泥脱水系统等设备进行优化和改造,提高设备运行效率。替碳途径包括回收能源,加强沼气、热能回收,污水处理过程化学能和热能回收,扩大再生水回用规模;使用清洁能源,利用太阳

能、风能发电,作为实现污水处理碳中和的重要补充。

4 结论

本文基于国内外相关机构提供的模型和参数,对中南地区某运营企业管理的 8 座污水处理厂进行碳排放核算和碳中和潜力分析,主要得到以下结论。

(1) 该运营企业总碳排放量为 1.95×10^5 t CO₂/a,总碳排放强度为 0.25 kg CO₂/m³。8 座污水厂年碳排放量为 7 365.8~53 083.1 t CO₂,碳排放强度为 0.17~0.47 kg CO₂/m³。

(2) 结合相关性分析结果,该运营企业管理的污水厂碳排放强度受工艺类型、污染物削减综合指数、耗氧污染物削减量影响较大,受处理规模影响程度不明显。碳排放强度受电耗、药耗直接影响,能耗高的工艺对应的碳排放强度大,表现为 BAF>AAO+MBR>AAO>氧化沟,BAF 工艺明显高于其余 3 种工艺。在碳排放研究时,有必要考虑碳源物质对研究体系的贡献。碳源物质修正后的污染物削减率综合指数、耗氧污染物削减量越高,对应吨水电耗、吨水

药耗相应增加,碳排放强度越高。处理规模越大,药剂、电力消耗及污染物削减量越多,碳排放量越大,碳排放强度与处理规模大致呈现出污水处理规模效应。

(3)污水厂利用厂区环境和工艺优势,实现厂区运行碳中和目标是可行的。具体可从减碳和替碳两个途径进行。减碳途径主要通过节省电耗、药耗实现,替碳途径主要通过能源回收、开发利用清洁能源实现。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 汪宙峰, 张焱菁, 沈惠龄, 等. 重庆市城镇生活污水碳排放时空分布特征研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(13): 102-108.
WANG Z F, ZHANG Y J, SHEN H L, et al. A Study on the spatial and temporal distribution characteristics of carbon emissions from urban domestic sewage in Chongqing[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(13): 102-108.
- [3] 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.
- [4] 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 carbon emission characteristics and low-carbon operation mode in AAO-based wastewater treatment plants with low C/N influent[J]. China Environmental Science, 2022, 42(11): 5088-5099.
- [5] 曹睿, 封莉, 杜子文, 等. 农村生活污水传统处理与源分离处理碳排放比较[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4648-4655.
CAO R, FENG L, DU Z W, et al. Comparison of carbon emissions from traditional treatment and source separation treatment of rural domestic sewage[J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4648-4655.
- [6] 费伟良, 牛乐, 刘景洋, 等. 工业园区碳排放核算与因素分解实证分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(11): 3744-3753.
FEI W L, NIU L, LIU J Y, et al. Empirical analysis of carbon emission accounting and factor decomposition in industrial park[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(11): 3744-3753.
- [7] 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[EB/OL]. (2022-07-29) [2024-02-09]. <https://cuwa.org.cn/category/tongzhigonggao/3577.html>.
China Urban Water Association. Guidelines for carbon accounting and emission reduction in the urban water sector[EB/OL]. (2022-07-29) [2024-02-09]. <https://cuwa.org.cn/category/tongzhigonggao/3577.html>.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇污水处理厂运营质量评价标准:CJJ/T 228—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China. Standard for operation and maintenance quality assessment of municipal wastewater treatment plant: CJJ/T 228—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [9] 中国环境保护产业协会. 污水处理厂低碳运行评价技术规范: T/CAEPI 49—2022[S/OL]. (2022-07-01) [2024-02-09]. http://www.weboos.cn;8083/assets/basicStandard/std_1615946.pdf.
China association of Environmental protection industry. Technical specification for low-carbon operation evaluation of sewage treatment plant: T/CAEPI 49—2022[S/OL]. (2022-07-01) [2024-02-09]. http://www.weboos.cn;8083/assets/basicStandard/std_1615946.pdf.
- [10] ALEXIS A. Carbon footprint of finnish wastewater treatment plants[D]. Finland: Aalto University, 2020.
- [11] JOHNSTON A H, KARANFIL T. Calculating the greenhouse gas emissions of waterutilities[J]. Journal American Water Works Association, 2013, 105(7): 363-371.
- [12] Intergovernmental Panel on Climate Change. Emission factor database[EB/OL]. [2024-02-09]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/mail.php>.
- [13] 中国城镇供水排水协会. 城镇污水厂碳减排评估标准(征求意见稿)[S/OL]. [2024-02-09]. https://old.cuwa.org.cn/Uploads/file/20230519/20230519155047_85526.pdf.
China Urban Water Association. Standard for carbon reduction assessment of urban wastewater treatment plant[S/OL]. [2024-02-09]. https://old.cuwa.org.cn/Uploads/file/20230519/20230519155047_85526.pdf.
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.
- [15] CRINI G, LICHTFOUSE E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment[J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17(1): 145-155.

(下转第 158 页)

- ZHENG M H, BAI D R, ZHANG T, et al. Distribution characteristics and pollution risk of heavy metals in river sediment of Suzhou water network area, China [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(1):198-209.
- [22] WANG L F, YANG L Y, KONG L H, et al. Spatial distribution, source identification and pollution assessment of metal content in the surface sediments of Nansi Lake, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 140: 87-95. DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.02.008.
- [23] 李淮, 吴玮, 田永静, 等. 苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态[J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 565-572.
- LI H, WU W, TIAN Y J, et al. Particle size distribution and pollutant speciation analyses of stormwater runoff in the ancient Town of Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2): 565-572.
- [24] 向语兮, 王晓, 单保庆, 等. 白洋淀表层沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(6): 2237-2246.
- XIANG Y X, WANG X, SHAN B Q, et al. Spatial distribution, fractionation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40(6): 2237-2246.
- [25] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2017, 38(6): 2355-2363.
- ZHANG J Q, TIAN Q, XU D M, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6): 2355-2363.
- [26] 吴金莲. 北京城市流域底泥重金属形态特征及其生态风险评价[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 321-328.
- WU J L. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of watershed in Beijing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 321-328.
- [27] 韩金龙, 杨兰琴, 王培京, 等. 北京通惠河底泥重金属风险评价及溯源[J]. *人民黄河*, 2022, 44(4): 107-111.
- HAN J L, YANG L Q, WANG P J, et al. Risk assessment and source of heavy metals in the sediment of Tonghui River in Beijing[J]. *Yellow River*, 2022, 44(4): 107-111.
- [28] 刘玮晶, 黄顺生, 金洋, 等. 江苏省中部城镇河流水底泥重金属污染评价及来源分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(2): 97-102.
- LIU W J, HUANG S S, JIN Y, et al. Assessment and source analysis of heavy metal pollution in river sediment of a town in central Jiangsu Province [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2021, 32(2): 97-102.
- [29] 高瑞忠, 张阿龙, 张生, 等. 西北内陆盐湖盆地土壤重金属Cr、Hg、As空间分布特征及潜在生态风险评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2532-2544.
- GAO R Z, ZHANG A L, ZHANG S, et al. Spatial distribution characteristics and potential ecological risk assessment of Cr, Hg, and As in soils of the Salt Lake Basin in northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2532-2544.
- [30] 滕彦国, 倪师军, 林学钰, 等. 城市环境地球化学研究综述[J]. *地质论评*, 2005(1): 64-76.
- TENG Y G, NI S J, LIN X Y, et al. Review on urban environmental geochemistry[J]. *Geological Review*, 2005(1): 64-76.

(上接第 107 页)

- [16] TUMENDELGER A, ALSHBOUL Z, LORKE A. Methane and nitrous oxide emission from different treatment units of municipal wastewater treatment plants in Southwest Germany [J]. *PLOS One*, 2019, 14(1): e0209763. DOI: 10.1371/journal.pone.0209763.
- [17] DESLOOVER J, VLAEMINCK S E, CLAUWAERT P, et al. Strategies to mitigate N₂O emissions from biological nitrogen removal systems[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(3): 474-482.
- [18] ZHANG W, PENG Y, REN N, et al. Improvement of nutrient removal by optimizing the volume ratio of anoxic to aerobic zone in AAO-BAF system[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(11): 2859-2863.
- [19] PENG L, NI B J, YE L, et al. The combined effect of dissolved oxygen and nitrite on N₂O production by ammonia oxidizing bacteria in an enriched Nitrifying sludge[J]. *Water Research*, 2015, 73: 29-36. DOI: 10.1016/j.watres.2015.01.021.
- [20] 孙强强, 陈贻龙. 南方某省城镇污水处理厂碳排放特征[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(10): 3231-3244.
- SUN Q Q, CHEN Y L. Characteristics of carbon emission from municipal wastewater treatment plants in a south-China province [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(10): 3231-3244.