

DOI:10.13205/j.hjgc.202603016

郑晓英,胡天星,邓雄成,等.典型A²/O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):177-188.

ZHENG X Y, HU T X, DENG X C, et al. Carbon emission accounting, influencing factors, and carbon reduction pathways in typical A²/O process municipal wastewater treatment plants[J]. Environmental Engineering, 2026, 44(3): 177-188.

典型 A²/O 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

郑晓英^{1*} 胡天星¹ 邓雄成^{1,2} 陶加庆¹ 龚忆平³ 姚新宇³ 范毅¹
林涛¹ 陈卫¹ 王大伟¹

(1. 河海大学 环境学院 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098;
2. 苏州市水务局, 江苏 苏州 215011; 3. 苏州市供排水管理处, 江苏 苏州 215004)

摘 要:在全球变暖的背景下,推进污水处理行业减污降碳协同增效势在必行。基于江苏省3座典型A²/O及其改良工艺的城镇污水处理厂(WWTPs)的2023年运行数据,通过排放因子法开展碳排放核算与特征分析,并采用路径分析法,阐明进水特征和运行参数对污水处理厂碳排放的影响。从间接控制角度分别评估光伏发电和水源热泵等措施对污水处理厂的碳减排潜能。结果表明:3座典型污水处理厂的总碳排放强度在0.578~0.671 kg/m³(以CO₂排放当量计,下同),总碳排放量1.889万~2.815万t;间接碳排放放在A²/O污水处理厂碳排放中占比较高(71.7%),其中,电能消耗产生的碳排放贡献最高(53.3%);药剂消耗中,由碳源投加引起的碳排放占比最大,可达药剂碳排放总量的36.9%~59.5%;进水浓度较低的污水厂运行过程需要更多的能耗物耗,产生的间接碳排放较高。此外,典型A²/O工艺污水处理厂的进水水质特征和运行参数对各类碳排放强度均有直接或者间接影响,厂内可积极开展工艺运行参数优化、设备升级改造、智能/慧控制系统应用,以及多种替碳措施等以有效控制碳排放量。以WWTP2为例,利用光伏发电和水源热泵技术,理论上可分别实现22.7%和100.2%的替碳效率,具有较高的碳减排潜能。

关键词:污水处理厂;A²/O;碳核算;路径分析;碳减排

Carbon emission accounting, influencing factors, and carbon reduction pathways in typical A²/O process municipal wastewater treatment plants

ZHENG Xiaoying^{1*}, HU Tianxing¹, DENG Xiongcheng^{1,2}, TAO Jiaqing¹, GONG Yiping³, YAO Xinyu³, FAN Yi¹,
LIN Tao¹, CHEN Wei¹, WANG Dawei¹

(1. Key Laboratory of Comprehensive Management and Resource Development of Shallow Lakes, Ministry of Education, School of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Suzhou Water Authority, Suzhou 215011, China;
3. Suzhou Water Supply and Drainage Management Office, Suzhou 215004, China)

Abstract: Under the context of global warming, it is imperative to advance the synergistic efficiency of pollution reduction and carbon mitigation in the wastewater treatment industry. This study is based on the 2023 operational data from three typical municipal wastewater treatment plants (WWTPs) in Jiangsu Province employing A²/O and its modified processes. Using the emission factor method, carbon emission accounting and characteristic analysis were conducted, and explored the impact of influent characteristics and operational parameters on the carbon emissions of WWTPs through path analysis. From an indirect

收稿日期:2025-07-13; 修改日期:2025-08-08; 接收日期:2025-08-15

基金项目:国家重点研发计划“定向去除抗生素等的氧化-生物协同技术研发与示范”(2022YFC3203702)

*第一作者、通信作者:郑晓英(1976—),女,教授,主要研究方向为污水资源化利用理论与技术。zhxyqq@hhu.edu.cn

control perspective, this study assessed the carbon reduction potential of measures such as photovoltaic power generation and water-source heat pumps. The results indicate that: The total carbon emission intensity of the three typical WWTPs ranged from 0.578 kg/m^3 to 0.671 kg/m^3 , with total carbon emissions between 18890 t and 28150 t. The indirect carbon emissions account for a relatively high proportion (71.7%) of the total carbon emissions in A²/O wastewater treatment plant, with electricity consumption contributing the most (53.3%) to the carbon emissions. The carbon emissions attributed to carbon source dosage accounted for the largest proportion of chemical consumption, reaching 36.9% to 59.5% of the total chemical carbon emissions. The operation of wastewater treatment plants with lower influent concentrations requires higher energy and material consumption, resulting in greater indirect carbon emissions. Furthermore, the influent water quality characteristics and operational parameters of typical A²/O process wastewater treatment plants all have direct or indirect impacts on various types of carbon emission intensities. To effectively control carbon emissions, plants can actively optimize process operational parameter adjustments, implement equipment upgrades and retrofits, adopt intelligent/smart control systems, and implement various carbon-alternative measures. By adopting PV power generation and water-source heat pumps, WWTP2 could theoretically achieve 22.7% and 100.2% carbon displacement rates, respectively, demonstrating significant carbon reduction potential.

Keywords: wastewater treatment plant; A²/O; carbon accounting; path analysis; carbon reduction

0 引言

2023年,全球平均气温较工业化前(1850—1900年)基线高出 1.45°C 。同时,2014—2023年也成为有记录以来平均气温最高的十年^[1],由温室气体排放增加导致的全球变暖已成为威胁人类生存与发展的重大挑战。我国在第75届联合国大会上提出在2030年和2050年分别实现“碳达峰”和“碳中和”的战略决策,是我国在面对全球变暖问题作出的重大承诺。落实“双碳”目标已经成为推动我国经济绿色低碳转型的重要任务。

研究表明,污水处理行业贡献了1%~2%的温室气体排放量,在主要碳排放行业中位居前10^[2-4]。根据《中国生态环境统计年报》,我国年污水处理量从2015年的532.3亿t增长到2023年的939.7亿t,增幅为76.5%。可以预见,随着我国城镇化进程的不断推进,城镇污水处理需求日益增长,污水处理行业碳排放量也将随之增加^[5]。为推动我国污水处理行业高质量发展,国家发展和改革委员会等三部门印发了《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》(以下简称《实施意见》),对全面推进污水处理行业的减污降碳协同增效进行了系统部署。《实施意见》要求相关部门摸排本地处理能力10万t/d以上的污水处理厂能耗和碳排放情况,明确建设改造目标和建设任务。研究表明,污水处理厂具有规模经济效益,规模越大,则处理单位污水的建设及运行成本越低,但处理规模>30万t时,经济规模效益不明显^[6]。此外,作为我国城市污水厂普遍使用的活性污泥工艺,A²/O及其改良工艺的占比超过60%^[7-8],其具有流

程较为简单、工况运行灵活、污染物去除效率高以及便于维护管理的优点^[9-10]。因此,开展针对典型A²/O工艺污水处理厂(规模10万t/d<Q<30万t/d)碳核算及碳减排路径研究对我国“双碳”目标实现具有重大意义。

综上所述,本研究选取江苏省某地3座A²/O及其改良工艺的大型污水处理厂为考察对象,基于排放因子法开展污水处理工艺全过程碳排放核算,分析碳排放来源和影响因素,并提出污水处理系统低碳运行策略,为污水处理行业碳减排提供科学依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 核算对象

1.1.1 基础信息

本研究选取的3座典型污水处理厂基本情况如表1所示。典型污水处理厂的二级生化处理均采用A²/O或其改良工艺,出水主要污染物指标满足江苏省地方标准DB 32/4440—2022《城镇污水处理厂污染物排放标准》A标准。

1.1.2 运行情况

研究收集统计了3座典型污水处理厂2023年各月进出水水量、水质、耗电量、药剂种类及消耗量等基础运行数据。其中,各厂年均进出水水质、能耗、物耗统计情况如表2和表3所示,进水COD和TN浓度变化如图1所示。总的来看,进水COD和TN浓度季节性变化明显,呈现出“春秋季高、夏季低”的特点。其主要是由于夏季居民用水习惯变化以及雨水汇入等原因,进水污染物浓度降低;而春、秋季用水量与降雨量减少,进水浓度升高。

表 1 污水处理厂基础信息

Table 1 Basic operational information of the wastewater treatment plant

编号	规模/(万 t/d)	主体工艺	药剂种类				消毒方式
			碳源	混凝剂	消毒剂	其他药剂	
WWTP1	12	改良 A ² /O+多级 AO	乙酸钠	聚合氯化铝、PAM	次氯酸钠	氢氧化钠	次氯酸钠+紫外
WWTP2	12	多级 A ² /O	复合碳源	聚合硫酸铁	次氯酸钠	氢氧化钠	次氯酸钠
WWTP3	15	A ² /O	乙酸钠	聚合氯化铝、PAM	次氯酸钠	—	次氯酸钠+紫外

表 2 年均进出水水质统计

Table 2 Influent and effluent water quality mg/L

编号	项目	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$
WWTP1	进水水质	243	102	26.4	2.60
	出水水质	10	1.1	5.4	0.06
WWTP2	进水水质	311	134	29.7	3.47
	出水水质	11	1.4	4.9	0.09
WWTP3	进水水质	432	182	44.0	4.54
	出水水质	20	2.0	7.1	0.06

1.2 核算边界与方法

1.2.1 核算边界

污水处理过程中产生的温室气体一般是指污水中微生物活动产生的化石源 CO₂直接排放、污水处理厌氧区产生的 CH₄直接排放、脱氮过程产生的 N₂O 直接排放以及由化学药剂和电力消耗等引起的 CO₂间接排放^[11]。本研究针对污水处理厂运行过程中的碳排放开展核算,以污水流入污水处理厂为起点、排入接纳水体为终点,包括污水处理过程的直接排放以及运维期间电力和药剂消耗产生的间接排放。此

外,3座污水处理厂产生的污泥在厂内经浓缩脱水后外运至污泥处置单位进行处理,因此由污泥处理处置产生的碳排放不应纳入核算范围。本研究污水处理厂碳排放核算边界如图 2 所示。

1.2.2 核算方法

本研究参考《IPCC2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》^[12]和《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》^[13],确定碳排放核算方法。各类型碳排放强度以 CO₂排放当量计,单位为 kg/m³。

1)化石源 CO₂排放。

$$\text{CES}_{\text{微生物利用}} = \text{MFCF} \times 1.1 \times (B_{\text{in}} + B_{\text{ex}} - B_{\text{eff}}) \times$$
$$(1.47 - 1.42 \times \frac{0.67}{1 + K_d \times \text{SRT}})$$

(1)

式中:CES_{微生物利用}为微生物利用过程 CO₂排放强度,kg/m³(以 CO₂eq 计,下同);MFCF 为化石源 CO₂排放比例,%;B_{in}、B_{ex}、B_{eff}分别为污水处理厂进水、外加碳源、出水的 BOD₅浓度,mg/L;K_d为衰减系数,d⁻¹;SRT 为生

表 3 年能耗、物耗统计

Table 3 Energy and material consumption

编号	电能消耗量/(万 kW·h)	药剂消耗量/t			
		碳源	混凝剂	消毒剂	其他药剂
WWTP1	1288.4	乙酸钠:5169.8	聚合氯化铝:3487.8;PAM:53.5	次氯酸钠:278.6	氢氧化钠:5.9
WWTP2	1468.0	复合碳源:703.4	聚合硫酸铁:1506.3	次氯酸钠:1065.0	氢氧化钠:3.6
WWTP3	1791.5	乙酸钠:3922.2	聚合氯化铝:1827.6;PAM:60.1	次氯酸钠:1067.2	—

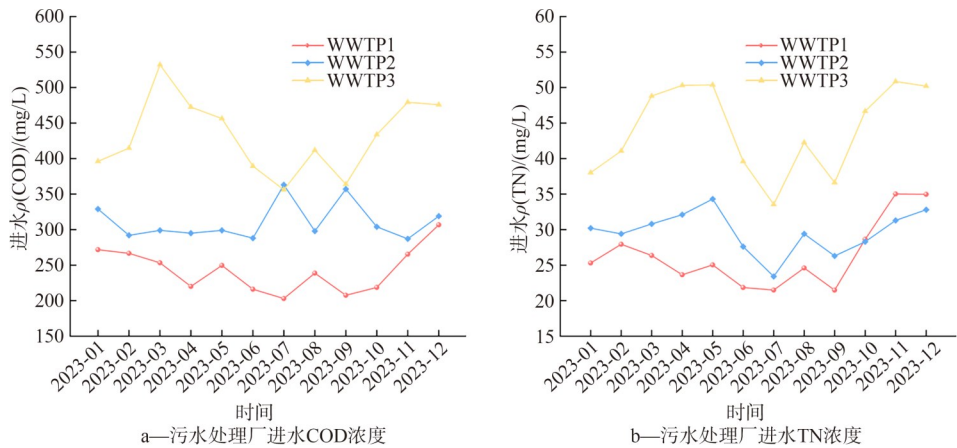


图 1 典型污水处理厂进水水质变化

Figure 1 Variations in influent water quality of typical WWTPs

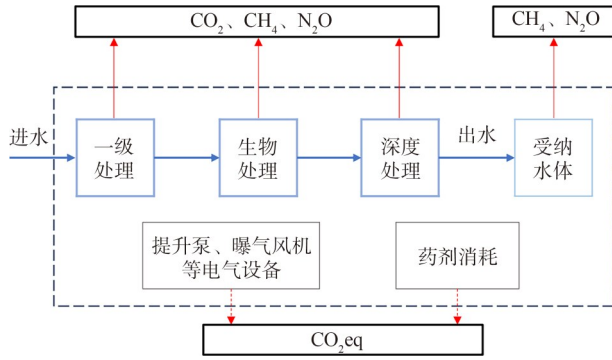


图2 污水处理厂碳排放核算边界

Figure 2 Carbon emission accounting boundary of WWTPs

物固体平均停留时间, d。

$$CES_{\text{内源呼吸}} = 1.947 \times \text{HRT} \times \text{MLVSS} \times K_d \quad (2)$$

式中: $CES_{\text{内源呼吸}}$ 为微生物内源呼吸 CO_2 排放强度, kg/m^3 ; HRT 为生物反应池水力停留时间, d; MLVSS 为生物池混合液挥发性悬浮固体平均浓度, mg/L 。

$$CES_{\text{碳汇}} = 4.49 \times \left[(\text{TKN}_{\text{in}} - \text{TKN}_{\text{eff}}) - (B_{\text{in}} + B_{\text{ex}} - B_{\text{eff}}) \times \frac{0.67}{1 + K_d \times \text{SRT}} \times 0.124 \right] \quad (3)$$

式中: $CES_{\text{碳汇}}$ 为自养硝化细菌吸收 CO_2 产生的碳补偿, kg/m^3 ; TKN_{in} 、 TKN_{eff} 分别为污水处理厂进、出水总凯氏氮浓度, mg/L 。

$$\text{MFCF} = \frac{\text{FCF} \times B_{\text{in}} + B_{\text{ex}}}{B_{\text{in}} + B_{\text{ex}}} \quad (4)$$

$$K_d = 0.05 \times 1.04^{T_b - 20} \quad (5)$$

$$CES_{\text{CO}_2} = \text{MFCF} \times (CES_{\text{微生物利用}} + CES_{\text{内源呼吸}} - CES_{\text{碳汇}}) \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中: CES_{CO_2} 为污水处理化石源 CO_2 排放强度, kg/m^3 ; FCF 为污水处理厂进水中化石源有机物比例, 取 10%; T_b 为水温, $^{\circ}\text{C}$;

2) CH_4 排放。

$$CES_{\text{CH}_4-\text{ww}} = (B_{\text{in}} \times \text{EF}_{\text{CH}_4-\text{ww}} \times 10^{-3} - M_{\text{CH}_4-\text{T}}) \times 28 \quad (7)$$

$$CES_{\text{CH}_4-\text{re}} = B_{\text{in}}'' \times \text{EF}_{\text{CH}_4-\text{re}} \times 28 \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中: $CES_{\text{CH}_4-\text{ww}}$ 为污水处理单元 CH_4 排放强度, $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^3$; $\text{EF}_{\text{CH}_4-\text{ww}}$ 为污水处理单元 CH_4 排放因子, kg/kg (进水每单位质量 BOD_5 产生 CH_4 的质量); $M_{\text{CH}_4-\text{T}}$ 为回收或处理去除的 CH_4 气体量, kg/m^3 (处理单位体积污水回收或处理去除 CH_4 的质量), 本研究所涉及污水处理厂均未进行 CH_4 回收或处理; $CES_{\text{CH}_4-\text{re}}$ 为排入受纳水体后产生的 CH_4 排放强度, $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^3$; B_{in}'' 为排入受纳水体的 BOD_5 浓度, mg/L ; $\text{EF}_{\text{CH}_4-\text{re}}$ 为受纳水体中 CH_4

排放因子, kg/kg (单位质量 BOD_5 排入受纳水体产生 CH_4 的质量); 28 为 CH_4 的全球变暖潜值, kg/kg 。

3) N_2O 排放。

$$CES_{\text{N}_2\text{O}-\text{ww}} = (\text{TN}_{\text{in}} \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}-\text{ww}} \times \frac{22}{14} \times 10^{-3} - M_{\text{N}_2\text{O}-\text{T}}) \times 265 \quad (9)$$

$$CES_{\text{N}_2\text{O}-\text{re}} = \text{TN}_{\text{eff}}'' \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}-\text{re}} \times \frac{22}{14} \times 265 \times 10^{-3} \quad (10)$$

式中: $CES_{\text{N}_2\text{O}-\text{ww}}$ 为污水处理单元 N_2O 排放强度, kg/m^3 ; TN_{in} 为污水处理厂进水 TN 浓度, mg/L ; $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}-\text{ww}}$ 为污水处理单元 N_2O 排放因子, kg/kg N (进水单位质量 TN 产生 N_2O 的质量); $M_{\text{N}_2\text{O}-\text{T}}$ 为回收或处理去除的 N_2O 气体量, kg/m^3 (处理单位体积污水回收或处理去除 N_2O 的质量), 本研究所涉及污水处理厂均未进行 N_2O 回收或处理; $CES_{\text{N}_2\text{O}-\text{re}}$ 为排入受纳水体后产生的 N_2O 排放强度, kg/m^3 ; TN_{eff}'' 为排入受纳水体的 TN 浓度, mg/L ; $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}-\text{re}}$ 为受纳水体中 N_2O 排放因子 (排入受纳水体单位质量 TN 产生的 N_2O 质量), kg/kg ; 22/14 为 1/2 N_2O 与 N 分子的质量比; 265 为 N_2O 的全球变暖潜值, kg/kg 。

4) 电能消耗产生的间接碳排放。

$$CES_d = \frac{E_d \times \text{EF}_d}{Q} \quad (11)$$

式中: CES_d 为运行维护购入电力产生的碳排放强度, kg/m^3 ; E_d 为核算年内总电耗量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; EF_d 为该地区电力排放因子, $\text{kg/kW} \cdot \text{h}$ (消耗单位电能产生的 CO_2 排放当量); Q 为核算年内总处理水量, m^3 。

5) 药剂消耗产生的间接排放。

$$CES_{\text{yj}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\text{yj}} \times \text{EF}_{\text{yj}}}{Q} \quad (12)$$

式中: CES_{yj} 为药剂消耗产生的碳排放强度, kg/m^3 ; E_{yj} 为核算年内第 i 种药剂的消耗量, kg ; EF_{yj} 为第 i 种药剂的排放因子, kg/kg (消耗单位质量药剂产生的 CO_2 排放当量); n 为评价年内使用的药剂种数; Q 为核算年内总处理水量, m^3 。

1.2.3 排放因子

本研究开展碳排放核算所采用的排放因子见表 4。其中, 污水处理过程 CH_4 和 N_2O 排放因子来源于不同文献中污水处理厂实测结果的均值。3 座污水处理厂均位于中国华东地区, 因此电力排放因子选取中国华东区域电网电力排放因子。各类药剂的排放因子取自《城镇水务系统碳核算与减排路径技

术指南》或相关文献。

表4 排放因子取值及来源

Table 4 Emission factors' values and sources

排放类型	名称	取值	数据来源
直接排放	EF _{CH₄-ww}	0.0041 kg/kg	[14-17]
	EF _{CH₄-re}	0.114 kg/kg	[13]
	EF _{N₂O-ww}	0.0069 kg/kg	[14, 18-22]
	EF _{N₂O-re}	0.005 kg/kg	[13]
电能消耗	EF _d	0.7921 kg/(kW·h)	[13]
药剂消耗 (部分)	乙酸钠	0.623 kg/kg	[13]
	甘油	2.0 kg/kg	[23]
	聚丙烯酰胺	1.48 kg/kg	[13]
	聚合氯化铝	0.53 kg/kg	[13]
	聚合硫酸铁	0.4 kg/kg	[13]
	次氯酸钠	0.92 kg/kg	[13]

1.3 路径分析

路径分析是一种基于回归分析的多元统计方法,通过构建路径模型来检验多个变量之间的直接和间接效应,并根据路径系数量化变量间的影响强度,以验证理论框架并探索潜在的作用路径。现有研究指出,进水特征与污水处理过程中的碳排放显著相关^[24],却未考虑污水厂运行参数对于碳排放的影响。因此,本研究以进水COD和TN浓度、C/N、水温以及水量(即进水特征)为自变量,MLVSS、HRT和SRT(即运行参数)为中介变量,通过路径分析探究各因素对于污水厂碳排放强度的直接以及间接影响。

2 结果与分析

2.1 碳排放核算结果及特征

2.1.1 碳排放总量

3座典型污水处理厂的碳排放总体特征如图3所示。总的来看,间接碳排在A²/O污水处理厂总碳排中占比较高,约为71.7%;直接碳排放占比相对较小,约为28.3%。间接碳排放中,由电能消耗产生的碳排放量占比最高,约为总碳排放量的53.3%,是影响污水处理过程碳排放最关键的因素,这主要是因为污水处理过程的能源活动较为密集^[3],在污水提升、曝气和泥水回流等阶段所使用的大功率设备(例如泵和鼓风机等)会产生大量电能消耗。以WWTP2为例,大功率设备产生的碳排放占电能消耗的58.1%,其中,泵类占比31.2%(包括进水泵9.4%、内回流泵7.6%、外回流泵5.1%、二级提升泵3.1%和出水泵6.0%),鼓风机类占比26.9%(包括生化池鼓风机19.7%和除臭风机7.2%)。在直接碳排放中,N₂O排放比最高,约为总碳排放量的17.5%,化石源

CO₂次之(7.2%),CH₄占比最小(3.6%)。一方面,由于N₂O具有较高的全球变暖潜值(约为CO₂的265倍),折算后的碳排放当量更高;另一方面,在污水厂运行过程中,若存在碳源不足、DO调控较差等情况,会影响生物脱氮效率,导致N₂O的产生量增加^[25-28]。

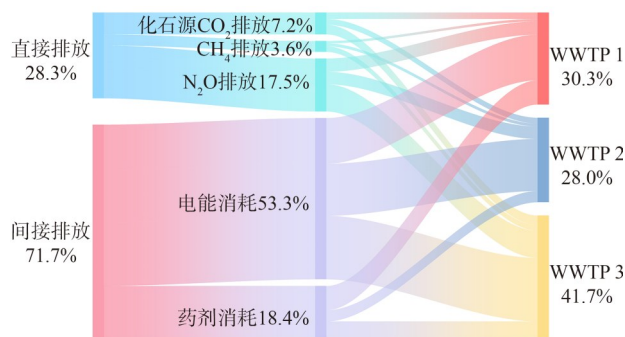


图3 典型污水处理厂碳排放总量特征

Figure 3 Total carbon emission characteristics of typical WWTPs

2.1.2 碳排放强度

图4显示了3座典型污水处理厂月碳排放强度特征。WWTP1、WWTP2和WWTP3的月均碳排放强度分别为0.590, 0.578, 0.671 kg/m³。与其他研究相比,本研究中3座污水厂碳排放强度处于较高水平^[29-32]。一方面,由于当地排水系统实行雨污分流制,污水集中收集率较高,且污水收集管网提质增效工作开展较好,污水处理厂的进水污染物浓度更高(例如,进水均值ρ(COD)为243~432 mg/L,ρ(TN)为26.4~44.0 mg/L);另一方面,3座污水厂出水限值已达到DB 32/4440—2022《城镇污水处理厂污染物排放标准》A标准(高于国家一级A标准),因此工艺运行的直接碳排放和整体运行所需的能耗及物耗间接碳排放也相应增加。由前述核算公式可知:CH₄和N₂O排放强度分别与进水COD和TN浓度呈正相关,WWTP3进水浓度较高,导致直接碳排放强度位于较高水平;而WWTP1虽然进水浓度较低,但却需要投加更多碳源以保证污水处理效率,因此总碳排放强度与WWTP2相差不大。此外,WWTP1和WWTP3的碳排放强度受季节影响明显,而WWTP2的碳排放强度随时间变化波动较小,这主要与WWTP2进水水质全年相对稳定有关。

总的来看,污水处理厂碳排放强度呈现“冬高夏低”的特点。一方面,由于夏季居民用水量增加,污水厂进水水质浓度降低,直接碳排放强度相应降低;另一方面,冬季水温偏低,微生物活性降低,为保证污水处理效率,污水处理厂需要采取投加额外碳源

或者提高生物池曝气量等对策,这些均会增加间接碳排放^[33]。

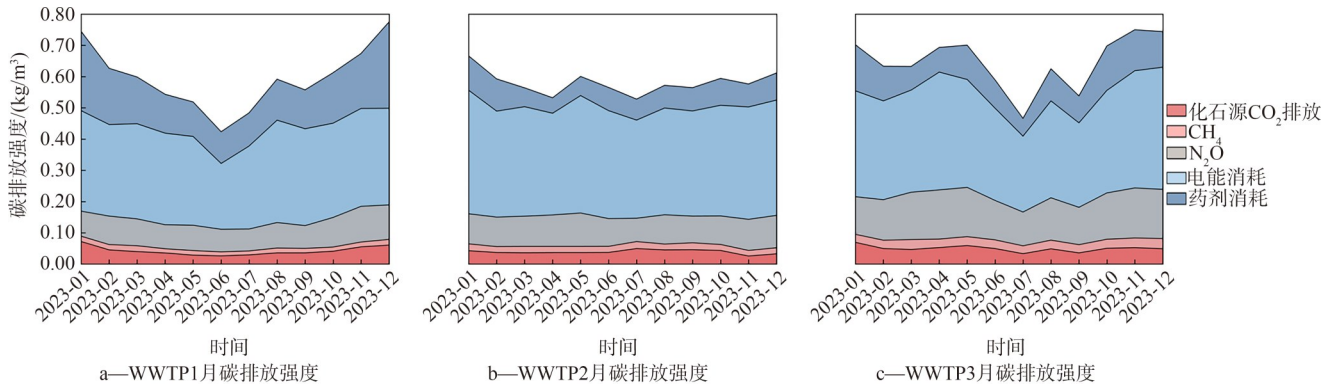


图4 典型污水处理厂月碳排放强度变化

Figure 4 Variations in monthly carbon emission intensity of typical WWTPs

污水处理系统的进水水质、处理工艺、运行管理水平以及药剂选择均会影响电能和药剂的消耗量^[3,34]。本研究统计了3座典型污水厂的年电耗量和药耗量(包括碳源、混凝剂、消毒剂和其他药剂),其产生的碳排放强度如图5a和b所示。可以看出:3座典型厂药剂消耗产生的碳排放强度在0.076~0.155 kg/m³,其中,碳源消耗产生的碳排放强度可达药剂碳排放强度的36.9%~59.5%,是药剂消耗部分的主要碳排放来源;混凝剂和消毒剂分别占比23.6%~35.6%及4.7%~39.0%;其他药剂占比不足0.1%。就碳源消耗而言,WWTP2产生的碳排放强度最低,一是因为其采用分段式进水的多段A²/O工艺,利于碳源的合理分配^[35];二是其使用具有更高脱氮效率的复合碳源(有效成分为甘油和乙酸钠),显著降低了碳源投

加量^[36-37]。而WWTP1由于进水COD和C/N比较低,需要投加更多碳源以保证脱氮效率,由此药剂消耗的碳排放强度也相应最高^[38]。3座污水厂均投加次氯酸钠进行消毒,而WWTP1和WWTP3在此基础上还增加了紫外消毒措施,相比于仅投加次氯酸钠具有更好的消毒效果^[39],且消毒剂投加量更低。此外,WWTP1和WWTP2投加液碱作为中和剂,但其对碳排放产生的贡献极小,可忽略不计。3座典型厂电能消耗产生的碳排放强度在0.295~0.351 kg/m³,间接碳排放强度在0.422~0.448 kg/m³。总体来看,进水浓度较低的WWTP1,后续处理会产生更多药剂消耗,导致其间接碳排放强度较高。因此,推进污水管网提质增效工作,提升污水厂进水污染物浓度,有利于减少污水厂运行过程中产生的间接碳排放。

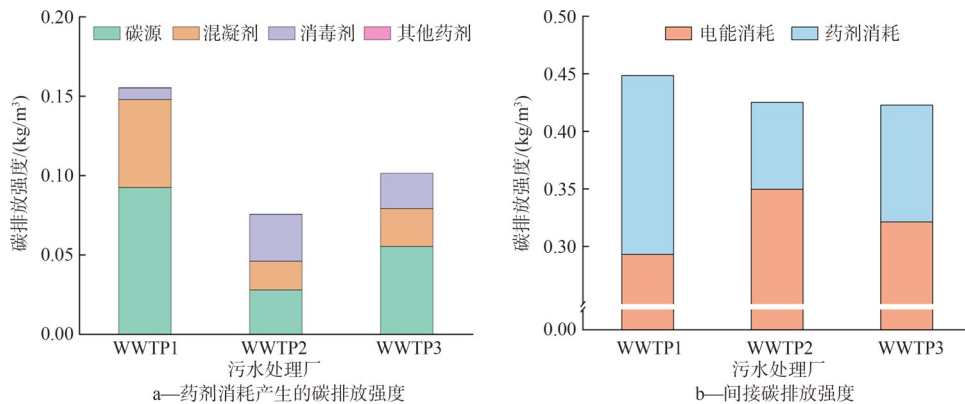


图5 典型污水处理厂间接碳排放强度与药耗碳排放强度

Figure 5 Carbon emission intensity of chemical consumption of typical WWTPs

2.1.3 碳排放的主要影响因素分析

为进一步探讨进水COD、TN浓度、C/N、水温、水量(即进水特征)、混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)、污泥停留时间(SRT)和水力停留时间

(HRT)对污水处理系统碳排放强度的综合影响,本文采用了路径分析法,其结果如图6和表5所示。可以看出:进水TN浓度和温度的上升均会导致N₂O排放强度的增加,路径系数分别为0.993($P < 0.001$)和

0.031 ($P<0.001$)。一方面,作为生物脱氮反应的底物, TN 浓度升高会显著促进 N_2O 的产生;另一方面,一定范围内温度上升会增加由羟胺氧化途径以及亚硝酸盐还原途径产生的 N_2O 排放量^[40]。进水 COD 浓度上升会引起 CH_4 排放量的增加,这主要是因为较高 COD 浓度会促进产甲烷菌的厌氧反应,导致 CH_4 产量增加^[41]。进水 COD、水温 and 进水 C/N 分别通过 SRT 影响化石源 CO_2 排放,其中,进水 COD、水温和进水 C/N

对 SRT 影响的路径系数分别为 0.643 ($P<0.001$)、 -0.354 ($P<0.05$) 和 -0.381 ($P<0.05$), SRT 对化石源 CO_2 排放影响的路径系数为 0.644 ($P<0.001$), 3 条路径的中介效应值分别为 0.414、 -0.228 和 -0.245 。究其原因,进水 COD 浓度升高、C/N 和水温降低时,微生物代谢和增殖速率下降,需要提高 SRT 以确保有机物的充分降解,而 SRT 的延长会促进微生物的内源呼吸作用,显著增加 CO_2 释放量。

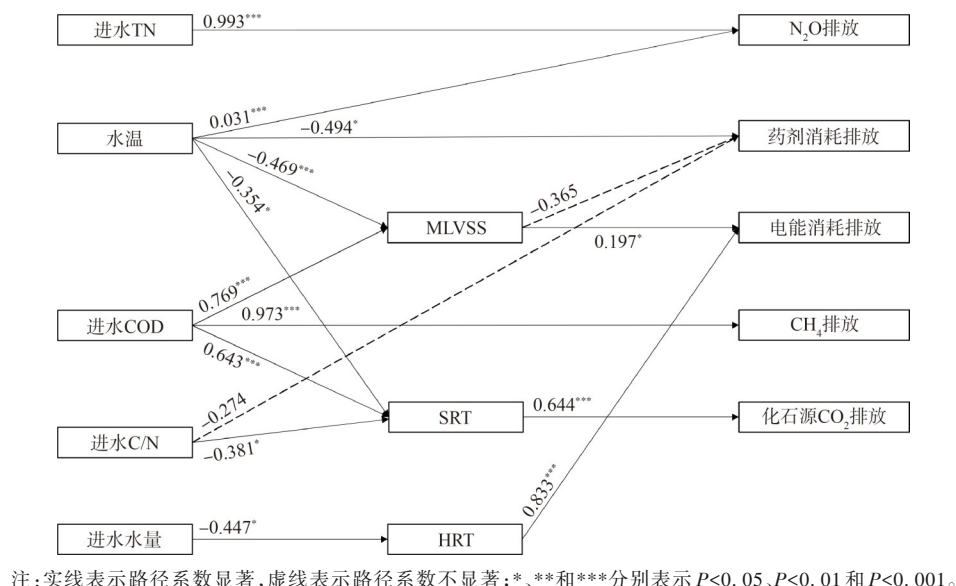


图 6 不同因素对污水处理厂碳排放强度的影响

Figure 6 Impact of different factors on the carbon emission intensity of WWTPs

表 5 中介效应值

Table 5 Mediation effect values

中介模型	中介效应值
进水 COD→MLVSS→电能消耗排放	$0.769 \times 0.197 = 0.151$
水温→MLVSS→电能消耗排放	$-0.469 \times 0.197 = -0.092$
进水 COD→SRT→化石源 CO_2 排放	$0.643 \times 0.644 = 0.414$
水温→SRT→化石源 CO_2 排放	$-0.354 \times 0.644 = -0.228$
进水 C/N→SRT→化石源 CO_2 排放	$-0.381 \times 0.644 = -0.245$
进水水量→HRT→电能消耗排放	$-0.447 \times 0.833 = -0.372$

对于间接排放强度来说,水温的降低会导致药剂消耗产生的碳排放增加,路径系数为 -0.494 ($P<0.05$),这是因为低水温条件下,生物代谢能力降低,污水厂需要增加反硝化碳源和除磷剂的投加量以强化处理效果^[33]。电能消耗产生的碳排放主要受到进水 COD、水温和进水水量的影响。其中,进水 COD 和水温通过 MLVSS 间接影响电耗碳排,中介效应值分别为 0.151 和 -0.092 。这是因为进水 COD 浓度提高为微生物生长提供了更多底物,促进其代谢与增殖,导致 MLVSS 浓度升高;水温降低导

致微生物活性下降,需要污水厂提高 MLVSS 浓度以保证处理效果。而 MLVSS 浓度的上升会影响氧传质效率,需要提高曝气量来维持污水处理的正常运行,从而引起电能消耗的增加^[42]。进水水量通过 HRT 间接影响电耗碳排,中介效应值为 -0.372 。由于污水厂生化池容积相对固定,进水水量的降低会导致 HRT 升高,此时单位污水在生化池的停留时间更长,曝气和搅拌等高耗能阶段产生的电能消耗将会更高。

2.2 碳减排路径研究

2.2.1 降碳路径研究

典型 A²/O 工艺污水处理厂的碳排放主要来源于 N_2O 排放、电耗以及药耗,因此采取工艺优化调控、设备升级改造、建设智能/慧控制系统,以及在线监测等措施,是降低碳排放量的重要手段。由路径分析结果可知: N_2O 排放强度与进水 TN 浓度呈正相关,在污水处理提质增效的背景之下,进水浓度上升势必会增加污水厂 N_2O 排放。因此,污水厂应采用控制溶解

氧浓度、调控回流比以及优化碳源投加策略等手段,保证工艺运行处于最佳水平,有效降低 N_2O 排放^[43]。电耗是污水处理厂碳排放的最主要来源,一方面污水厂可以采取将老旧设备更换为高效节能设备以及泵组优化运行等措施,提高污水厂的运行能效;例如,通过将传统罗茨风机更换为更为高效的磁悬浮离心式鼓风机,可实现风机节电率29%以上^[44]。另一方面,可通过建设精确曝气系统,利用在线监测仪表实时监控DO、水质浓度等参数,实现精确曝气,进一步降低电耗。对于药剂消耗而言,污水厂可以通过采用绿色低碳药剂以及建设精准加药系统的措施,降低有药剂消耗产生的碳排放。此外,结合前述路径分析结果,在保证工艺正常运行的条件下,适当调整MLVSS、SRT和HRT等参数至最佳范围,有助于降低污水厂运行过程中的碳排放。

2.2.2 替碳路径研究

污水处理厂在开展降碳措施的基础上,还可以通过提升厂内植被碳汇,应用污泥资源化利用、光伏发电和水源热泵等替碳技术,实现能源与资源的循环利用。污水处理厂内的植被通过光合作用吸收 CO_2 ,并将其固定在植物体中,从而形成碳汇。污泥资源化利用通过将剩余污泥转化为沼气、肥料以及建材等产品,或将过程中产生的能量用于发电或产热,实现废弃物的再次利用。光伏发电和水源热泵技术分别利用太阳能以及污水中的热能,为厂区或附近用户提供电能以及热能,可有效降低污水厂的运行成本并降低碳足迹。本研究从上述路径入手,评估各措施的替碳潜能。

1) 厂内植被碳汇。

污水处理厂区内种植的树木、草地等植被,不仅具有净化空气、美化环境的生态效益,还能形成一定的碳汇。本研究参考《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》方法计算由植被产生的碳汇,对于3座典型污水处理厂而言,理论上植被碳汇产生的碳减排率仅为1.6%~4.4%,其碳减排效益有限。此外,厂区内可供新增绿化的空间也有限,难以开展大规模植被种植,其减碳贡献难以大幅度提高。

2) 污泥资源化利用。

剩余污泥是污水处理过程的副产物,其若经过适当的资源化技术处理,可实现从环境负担到宝贵资源的转化。污泥资源化利用措施主要包括干化焚烧、厌氧消化、热电联产以及制取建材等。干化焚烧

通过脱水、干燥将污泥大幅减容,再通过高温焚烧分解污泥中的有机物,从而实现热能回收;厌氧消化在无氧环境下利用微生物将污泥中的有机物质进行降解,最终产生以 CH_4 和 CO_2 为主要成分的沼气;热电联产可将污泥厌氧消化产生的沼气或干化焚烧产热转化为电能和热能,用于发电或供热;此外,还可将污泥经一定处理后制成砖和陶粒等建材,实现资源化利用。以WWTP2为例,该厂全年产泥量达20365.3 t(含水率79.2%),若采取“干化焚烧—热电联产—建材利用”的污泥资源化路线,理论上该过程全年实际产生碳排放量7136.6 t,碳减排量6820.1 t,净碳排放量316.5 t,可实现污泥处理处置过程替碳效率95.6%。

3) 光伏发电。

太阳能是一种清洁的可再生能源。光伏发电技术可以通过光生伏特效应将太阳能直接转化为电能,减少对传统能源的依赖,降低温室气体的排放^[45]。根据国家能源局公布的数据,2024年我国可再生能源发电量达34600亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,其中光伏发电量8341亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占比24.1%^[46]。污水处理厂中的沉淀池和生化池等构筑物上部通常具有较大的闲置空间,可以用来安装光伏板,如此不仅可以降低污水厂的运营成本,还能助力实现碳中和。以本研究WWTP2为例,该污水处理厂所在地区年均总辐照量为 $1335.4\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,根据GB/T 31155—2014《太阳能资源等级总辐射》可知:该地太阳能总辐射年辐照量等级为“丰富”,说明其具有充足的太阳能资源,适宜建设光伏发电项目^[47-48]。考虑在沉淀池和生化池上方安装光伏发电设施,WWTP2初沉池及生化池(合建)平面面积为 13180.2 m^2 ,共2座;二沉池平面面积为 2026.8 m^2 ,共4座,则该厂可用于安装光伏板的面积共计 34467.6 m^2 。参考黄成等^[49]的计算方法,取可利用系数0.8,光伏组件转化效率15%,理论上WWTP2年光伏发电量可达552.3万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,折合碳减排量4375.1 t,实现替碳效率22.7%。

4) 水源热泵。

污水中蕴含巨大的余温热能,是化学能的6~8倍,约占城市废热排放总量的40%^[50-51],具有较高的回收价值。有研究表明,城镇生活污水温度波动小,夏季出水温度低于环境温度,冬季高于环境温度,是可靠的热量交换源^[52]。水源热泵技术能够利用这一特点,实现夏季制冷、冬季制热的效果,助力污水处理

系统碳中和的同时,还可向外输出能量^[53]。目前,水源热泵技术在污水处理系统中的应用已有显著成效:奥地利 Wolfgangsee-Ischl 污水厂将污水转化为工业冷却水,通过水源热泵向区域供热,节省了超过40%的电能消耗^[54];芬兰 Kakolanmäki 污水厂通过 TES 热泵站实现年碳减排量 11402.4 t,仅该措施产生的碳汇即可实现替碳效率 106.4%,碳减排效益明显^[55]。参考郝晓地等^[50,53]研究提出的热能回收公式进行理论计算,当提取温差为 4℃时,水源热泵供热量和制冷量分别为 23408,13837 kJ/m³,替碳强度分别为 1.91,0.33 kg/m³。以 WWTP2 为例,2023 年处理污水总量 3325.8 万 t,碳排放总量 19231.5 t,按照 9 个月供热、3 个月制冷计算,若能每月利用处理水量的 37.5% 进行能量交换向周边建筑供热/制冷,年碳减排量可达 19262.7 t,替碳效率可达 100.2%,即可实现碳中和运行。

综上所述,光伏发电和水源热泵技术具有较高的碳减排潜能,是推动污水处理厂实现碳中和运行的有效手段。对于污泥处理处置而言,污水厂可结合污泥特性及相关技术应用可行性,采取多元化组合方式处理污泥,同时实现资源回收和能源再利用。因地制宜推广各类替碳技术,对污水处理行业实现绿色低碳转型至关重要。

3 结 论

1) A²O 污水处理厂的碳排放以间接碳排放为主,占比 71.7%,直接碳排放占比 28.3%;各类型碳排放来源的贡献顺序为:电能消耗(53.3%)>药剂消耗(18.4%)>N₂O 排放(17.5%)>化石源 CO₂ 排放(7.2%)>CH₄ 排放(3.6%)。3 座典型污水处理厂碳排放强度分别为 0.590,0.578,0.671 kg/m³,其中对于药剂消耗产生的碳排放来说,碳源消耗占比最高,达 36.9%~59.5%。进水浓度较低的污水厂虽直接碳排放较低,但因后续处理需要投加更多药剂,导致间接碳排放较高。

2) 污水厂碳排放受到进水特性和运行参数的直接或间接影响。N₂O 排放受进水 TN 和水温的显著正向影响(路径系数 0.993 和 0.031);CH₄ 排放受进水 COD 的显著正向影响(路径系数 0.973);化石源 CO₂ 排放分别受进水 COD、水温和进水 C/N 通过 SRT 的间接影响(中介效应值 0.414、-0.228 和 -0.245);药剂消耗产生的碳排放受温度的显著负向影响(路径系数 -0.494);电能消耗产生的碳排放不仅受到进水

COD 和水温通过 MLVSS 的间接影响(中介效应值 0.151 和 -0.092),还受到进水水量通过 HRT 的间接影响(中介效应值 -0.372)。

3) 从降碳路径来看,污水厂可以采取工艺优化调控、设备升级改造、建设智能控制系统以及在线监测等措施,降低运行期产生的碳排放;从替碳路径来看,光伏发电和水源热泵技术在污水厂碳减排方面具有较高的潜能,可助力污水处理行业实现碳中和。以 WWTP2 为例,光伏发电和水源热泵理论上可分别产生 4375.1 t 和 19262.7 t 的碳减排量,并实现 22.7% 和 100.2% 的替碳效率。

参考文献

- [1] World Meteorological Organization. State of the global climate 2023[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2023.
- [2] LU L, GUEST J S, PETERS C A, et al. Wastewater treatment for carbon capture and utilization[J]. Nature Sustainability, 2018, 1(12):750-758.
- [3] 赵泽佳, 庾豪锐, 谢祥塔, 等. 采用改良 A²O 工艺中型城镇污水处理厂碳排放特征研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2024, 56(1):63-71.
ZHAO Z J, TUO H R, XIE X T, et al. Research on characteristics of carbon emissions in medium-sized urban sewage treatment plants using improved A²O processes[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2024, 56(1):63-71.
- [4] 刘跃廷, 张强, 蒋晓辉, 等. 西安市城镇污水系统碳排放时空特征及其主要驱动因素[J]. 环境工程, 2024, 42(11):40-49.
LIU Y T, ZHANG Q, JIANG X H, et al. Spatial-temporal characteristics of carbon emissions in urban sewage system in Xi'an and its dominant driving factors[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(11):40-49.
- [5] 张宇, 刘刚, 赵欣, 等. 中山市典型污水处理厂碳排放核算研究[J]. 广东化工, 2024, 51(16):138-141.
ZHANG Y, LIU H G, ZHAO X, et al. Research on carbon emission accounting of typical sewage treatment plant in Zhongshan city[J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(16):138-141.
- [6] 褚俊英, 陈吉宁, 邹骥, 等. 城市污水处理厂的规模与效率研究[J]. 中国给水排水, 2004, 20(5):35-38.
ZHU J Y, CHEN J N, ZOU J, et al. Research on the scale and efficiency of urban sewage treatment plants[J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(5):35-38.
- [7] ZHANG J, SHAO Y, WANG H, et al. Current operation state of wastewater treatment plants in urban China[J]. Environmental Research, 2021, 195:110843.
- [8] 章诗璐, 陈悦, 崔朋, 等. 城镇污水厂新兴强化生化处理工艺综述[J]. 净水技术, 2023, 42(7):40-48.
ZHANG S L, CHEN Y, CUI P, et al. Review of emerging enhanced biochemical treatment processes for urban WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7):40-48.

- [9] XIE W, ZENG R J, LI W, et al. A modeling understanding on the phosphorous removal performances of A²O and reversed A²O processes in a full-scale wastewater treatment plant [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(23):22810-22817.
- [10] 叶长兵,周志明,吕伟,等. A²O污水处理工艺研究进展[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(15):135-138.
- YE C B, ZHOU Z M, LÜ W, et al. Research progress on A²O process for sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(15):135-138.
- [11] LI L, WANG X, MIAO J, et al. Carbon neutrality of wastewater treatment: A systematic concept beyond the plant boundary [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(10):4650-4660.
- [12] IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[R]. Geneva: IPCC, 2019.
- [13] 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. Guideline for carbon accounting and emission reduction in the urban water sector [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [14] YAN X, LIN L, LIU J X. Characteristics of greenhouse gas emission in three full-scale wastewater treatment processes [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(2):256-263.
- [15] WANG J, ZHANG J, XIE H, et al. Methane emissions from a full-scale A/A/O wastewater treatment plant [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 102(9):5479-5485.
- [16] HWANG K, BANG C, ZOH K. Characteristics of methane and nitrous oxide emissions from the wastewater treatment plant [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214:881-884.
- [17] REN Y G, WANG J H, LI H F, et al. Nitrous oxide and methane emissions from different treatment processes in full-scale municipal wastewater treatment plants [J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(21/24):2917-2927.
- [18] FOLEY J, HAAS D D, YUAN Z, et al. Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2009, 44(3):831-844.
- [19] SUN S C, CHENG X, LI S, et al. N₂O emission from full-scale urban wastewater treatment plants: a comparison between A²O and SBR [J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67(9):1887-1893.
- [20] WANG J H, ZHANG J, WANG J, et al. Nitrous oxide emissions from a typical northern Chinese municipal wastewater treatment plant [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 32(1-3):145-152.
- [21] WANG Y Y, LIN X M, ZHOU D, et al. Nitric oxide and nitrous oxide emissions from a full-scale activated sludge anaerobic/anoxic/oxic process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 289:330-340.
- [22] WENZEL G, LUZIA V K, LILIANE V, et al. Estimation of countrywide N₂O emissions from wastewater treatment in Switzerland using long-term monitoring data [J]. *Water Research X*, 2021, 13:100122.
- [23] Carboncloud. Climatehub[EB/OL]. [2025-05-08]. <https://apps.carboncloud.com/climatehub/product-reports/id/16243501676>.
- [24] 张志红,尚振欣,蔡辰,等. 南方典型城市污水处理厂碳排放特征及降碳策略研究[J]. *环境工程*, 2024, 42(11):72-80.
- ZHANG Z H, SHANG Z X, CAI C, et al. Carbon emissions characteristics and reduction strategies for typical urban domestic wastewater treatment plants in southeastern China [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(11):72-80.
- [25] CASTELLANO-HINOJOSA A, MAZA-MÁRQUEZ P, MELERO-RUBIO Y, et al. Linking nitrous oxide emissions to population dynamics of nitrifying and denitrifying prokaryotes in four full-scale wastewater treatment plants [J]. *Chemosphere*, 2018, 200:57-66.
- [26] DAI W, ZHAO J, NASRY A A N B, et al. Characteristics of nitrous oxide production under salt stress: a model study [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2020, 95(3):825-833.
- [27] PENG L, NI B J, DIRK E, et al. The effect of dissolved oxygen on N₂O production by ammonia-oxidizing bacteria in an enriched nitrifying sludge [J]. *Water Research*, 2014, 66:12-21.
- [28] YAN X, ZHENG S, QIU D, et al. Characteristics of N₂O generation within the internal micro-environment of activated sludge flocs under different dissolved oxygen concentrations [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 291:121867.
- [29] 陈睿星,肖倩,朱紫薇. 城市污水系统碳排放结构及减排路径研究:以深圳市为例[J]. *给水排水*, 2025, 61(1):49-54.
- CHEN R X, XIAO Q, ZHU Z W. Study on the carbon emission structure and emission reduction path of urban sewage system: taking Shenzhen as an example [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2025, 61(1):49-54.
- [30] 方奕,汤琳,吴晓蔚. 基于实测优化的超大城市城镇污水处理厂碳排放特征研究[J]. *中国环境监测*, 2025, 41(1):10-19.
- FANG Y, TANG L, WU X W. Carbon emission characteristics of urban sewage treatment plants in super-large cities based on monitoring measurement optimization [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2025, 41(1):10-19.
- [31] 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.
- [32] 朱杰,朱跃. 淮河流域某城市污水处理厂碳排放核算及对策研究[J]. *资源节约与环保*, 2025(2):101-105.
- ZHU J, ZHU Y. Carbon emission accounting and countermeasure research for a municipal wastewater treatment plant in the Huaihe River basin [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2025(2):101-105.
- [33] 吴宝利,李鹏峰,张岳,等. 污水处理系统碳排放影响因素及降碳策略研究[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(12):1-12.
- WU B L, LI P F, ZHANG Y, et al. Research on influencing factors and carbon reduction strategies of sewage treatment system [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(12):1-12.
- [34] 王碧云,孙艾林,许雪煌. “双碳”目标下海南地区污水处理厂

- 更新改造对策分析及工程实例[J]. 环境工程, 2024, 42(11): 81-89.
- WANG B Y, SUN A L, XU X H. Strategies and project case of wastewater treatment plants renewal and reformation for the dual-carbon goal [J]. Environmental Engineering, 2024, 42(11): 81-89.
- [35] 王洪刚, 纪海霞, 程树辉. 哈尔滨市某污水处理厂提标改扩建工程设计[J]. 中国给水排水, 2024, 40(10): 64-68.
- WANG H G, JI H X, CHENG S H. Design of a wastewater treatment plant upgrading and expansion project in Harbin [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(10): 64-68.
- [36] 何振鑫. 单一碳源及复合碳源在生物反硝化中的脱氮效能研究[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(7): 33-36.
- HE Z X. Study on the denitrification efficiency of single carbon source and composite carbon source in biological denitrification [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(7): 33-36.
- [37] 胡小宇, 朱静平. 3种单一及其混合碳源的生物反硝化脱氮效能[J]. 水处理技术, 2020, 46(1): 57-61.
- HU X Y, ZHU J P. Biological denitrification efficiency of three single and mixed carbon sources [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(1): 57-61.
- [38] 王立军, 高云龙, 蓝杰蕊, 等. 低碳氮比污水处理厂反硝化除磷工艺改造及运行效果[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 196-205.
- WANG L J, GAO Y L, LAN J R, et al. Reconstruction and operational efficiency of denitrification and dephosphorization process with low C/N in a WWTP [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 196-205.
- [39] 许涛, 付雨, 赵学志, 等. 城镇污水处理厂尾水消毒的研究进展[J]. 广东化工, 2025, 52(1): 106-108.
- XU T, FU Y, ZHAO X Z, et al. Research progress of tail water disinfection in urban sewage treatment plants [J]. Guangdong Chemical Industry, 2025, 52(1): 106-108.
- [40] HUMBERT G, SÉBILO M, FIAT J, et al. Isotopic evidence for alteration of nitrous oxide emissions and producing pathways' contribution under nitrifying conditions [J]. Biogeosciences, 2020, 17(4): 979-993.
- [41] 张翔宇, 范业弘, 朱哈彬, 等. 城镇中小规模污水处理厂碳排放分析及碳削减对策[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 107-117.
- ZHANG X Y, FAN Y H, ZHU H B, et al. Carbon emission analysis and carbon reduction strategy of small and medium-scale municipal wastewater treatment plants in cities and towns [J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 107-117.
- [42] 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, 57(11): 37-40.
- LIU F, WANG G H, ZHENG P K. Study on coarse evaluation method for energy-saving in municipal wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(11): 37-40.
- [43] 郝晓地, 杨振理, 于文波, 等. 污水处理过程N₂O排放: 过程机制与控制策略[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1163-1173.
- HAO X D, YANG Z L, YU W B, et al. N₂O emission from the processes of wastewater treatment: mechanisms and control strategies [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1163-1173.
- [44] 程一鸣, 龙海燕, 裴勤. 污水处理厂温室气体排放实证分析及低碳运行策略研究[J]. 给水排水, 2024, 60(S2): 294-298, 304.
- CHENG Y M, LONG H Y, PEI Q. Empirical analysis of greenhouse gas emissions from sewage treatment plants and research on low-carbon operation strategies [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 60(S2): 294-298, 304.
- [45] 杨贵恒, 张黎, 聂金铜, 等. 太阳能光伏发电系统及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- YANG G H, ZHANG L, NIE J T, et al. Solar photovoltaic power generation systems and their applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [46] 国家能源局. 2024年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. [2025-05-17] <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>.
- National Energy Administration. 2024 Grid Operation Status of Renewable Energy [EB/OL]. [2025-05-17] <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>.
- [47] 中国气象局. 2023年中国风能太阳能资源年景公报[EB/OL]. [2025-5-17] https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202402/t20240222_6082082.html.
- China Meteorological Administration. 2023 Annual Report on Wind and Solar Energy Resources in China [EB/OL]. [2025-05-17] https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202402/t20240222_6082082.html.
- [48] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会. 太阳能资源等级总辐射: GB/T 31155—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- National Technical Committee on Meteorological Disaster Prevention and Reduction Standardization. Solar energy resource grade—total solar radiation: GB/T 31155—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [49] 黄成, 薛贵元, 朱寰, 等. 全生命周期下光伏发电和煤电的碳排放及环境效益核算[J/OL]. 环境化学, 1-14. [2025-05-17]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1844.X.20250521.1616.002>.
- HUANG C, XUE G Y, ZHU H, et al. Carbon emissions and environmental benefits accounting of photovoltaic and coal-fired power based on whole life cycle [J/OL]. Environmental Chemistry, 1-14. [2025-05-17]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1844.X.20250521.1616.002>.
- [50] HAO X D, LI J, LOOSDRECHT M C M, et al. Energy recovery from wastewater: Heat over organics [J]. Water Research, 2019, 161: 74-77.
- [51] HEPBASLI A, BIYIK E, EKREN O, et al. A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 88: 700-722.
- [52] HAO X D, LIU R B, HUANG X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China [J]. Water Research, 2015, 87: 424-431.
- [53] 郝晓地, 饶志峰, 李爽, 等. 污水余热热能蕴含着潜在碳交易额[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 7-13.

- HAO X D, RAO Z F, LI S, et al. Potential carbon trading volume of thermal energy contained in wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12):7-13.
- [54] NOWAK O, ENDERLE P, VARBANOV P. Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: lessons learned from Austrian applications [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88:125-131.
- [55] 郝晓地,赵梓丞,李季,等. 污水处理厂的能源与资源回收方式及其碳排放核算:以芬兰 Kakolanmäki 污水处理厂为例[J]. 环境工程学报,2021, 15(9):2849-2857.
- HAO X D, ZHAO Z C, LI J, et al. Analysis of energy recovery and carbon neutrality for the Kakolanmäki WWTP in Finland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 2849-2857.