

王晴晴, 贾海云, 周小江, 等. 中小型城镇污水处理厂碳排放现状与削减对策[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 109–121, 155.

Wang Q Q, Jia H Y, Zhou X J, et al. Current situation and solutions of carbon emission reduction for urban WWTPs in small and medium-sized towns [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 109–121, 155.

中小型城镇污水处理厂碳排放现状与削减对策

王晴晴¹, 贾海云², 周小江², 杨 东², 李冬梅^{1,*}

(1. 南京大学盐城环保技术与工程研究院, 江苏盐城 224002; 2. 盐城市清水绿岸净水集团有限公司, 江苏盐城 224000)

摘 要 【目的】 本文旨在系统分析盐城市中小型城镇污水处理厂碳排放特征并构建针对性碳减排策略, 为区域污水处理行业减污降碳协同治理提供理论支撑。【方法】 本文选取江苏省盐城市 32 座典型中小型城镇污水处理厂(处理规模为 $0.05 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 基于《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)》和《污水处理厂低碳运行评价技术规范》, 构建全流程核算模型, 采用生命周期评价法对 2023 年运行数据进行碳溯源量化分析。【结果】 结果表明: (1) 盐城市中小型城镇污水处理厂碳排放呈现显著差异性, 单位处理量碳排放强度介于 $0.29 \sim 11.78 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$, 均值为 $1.38 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$; (2) 电力消耗是主要排放源, 贡献率达 $48\% \sim 97\%$ (均值为 70.4%); 直接温室气体排放占比 $1\% \sim 30\%$, 药剂投加量占比 $3\% \sim 52\%$; (3) 处理规模每增加 $0.05 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 单位碳排放强度下降 41.37% ; 负荷率每提升 20% , 电耗碳排放减少 38.56% , 表明处理规模、运行负荷率及处理工艺是影响碳排放强度的关键因素。【结论】 本文构建“技术减排-能源替代-管理协同”的系统性碳排放削减对策; 技术层面通过系统改造与升级、精准加药及工艺优化降低能耗药耗; 能源路径推广余热利用、光伏与生物质能等可再生能源; 同时强化管理与政策协同。成果可为盐城市制定污水行业碳排放管控清单提供数据支撑, 且本文提出的分级分类差异化减排策略, 亦为长三角及平原河网地区同类污水处理厂实现“双碳”目标提供了可复用的技术-管理协同范式。

关键词 中小型城镇污水处理厂; 碳排放; 碳排放核算; 碳排放削减对策; 减污降碳协同

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)09-0109-14

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.012

Current Situation and Solutions of Carbon Emission Reduction for Urban WWTPs in Small and Medium-Sized Towns

Wang Qingqing¹, Jia Haiyun², Zhou Xiaojiang², Yang Dong², Li Dongmei^{1,*}

(1. Nanjing University & Yancheng Academy of Environmental Protection Technology and Engineering, Yancheng 224002, China;

2. Yancheng Clear Water & Green Banks Water Purification Group Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

Abstract [Objective] This paper systematically analyzes the carbon emission characteristics of small and medium-sized wastewater treatment plants (WWTPs) in Yancheng and proposes targeted carbon reduction strategies, aiming to provide theoretical support for synergistic pollution control and carbon mitigation in regional wastewater treatment systems. [Methods] Thirty-two typical small and medium-sized WWTPs ($0.05 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) in Yancheng, Jiangsu Province, were selected. A full-process carbon accounting model was developed based on the "Technical Guidelines for Accounting of Greenhouse Gas Removal Co-Control in Municipal WWTPs (Trial)" and "Technical Specifications for Low-Carbon Operation Evaluation of WWTPs". Life cycle assessment was applied to quantify carbon footprints using 2023 operational data, enabling systematic analysis of emission profiles across the wastewater treatment lifecycle. [Results] Result revealed three key findings: (1) Carbon emissions of Yancheng's small and medium-sized municipal WWTPs exhibited substantial variability, with unit treatment volume emission intensity ranging from $0.29 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ to $11.78 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ (average: $1.38 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$); (2) Electricity consumption constituted the primary emission source, accounting for 48%

[收稿日期] 2025-05-16

[基金项目] 江苏省水利科技项目(2022037); 盐城市科技项目(YCBK2024025)。

[作者简介] 王晴晴(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为流域水环境治理, E-mail: w18851735981@163.com。

[通信作者] 李冬梅(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水环境治理与生态修复, E-mail: 872749605@qq.com。

-97% of total emissions (average: 70.4%), followed by direct greenhouse gas emissions (1%-30%) and chemical inputs (3%-52%); (3) Economies of scale and operational efficiency significantly influenced emission intensity: each $0.05 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ increase in treatment capacity reduced unit carbon intensity by 41.37%, while a 20% rise in load rate decreased electricity-related emissions by 38.56%. These result highlighted treatment scale, operational load, and process design as critical determinants of carbon emission intensity in WWTPs. [**Conclusion**] This paper establishes a systematic carbon reduction framework integrating technological mitigation, energy substitution, and management coordination. Technologically, system upgrades, precise chemical dosing, and process optimization reduce energy and chemical consumption. The energy pathway promotes renewable alternatives including waste heat recovery, photovoltaics, and biomass utilization. Management-policy synergies are concurrently enhanced. These outcomes provide empirical support for developing carbon control inventories for Yancheng's wastewater sector. Furthermore, the tiered and differentiated strategies establish a replicable technical-management paradigm for similar WWTPs in the Yangtze River Delta and alluvial plains to achieve dual carbon goals.

Keywords small and medium-sized WWTPs; carbon emission; carbon emission accounting; carbon emission reduction solution; synergy of pollution control and carbon emission

随着我国城镇化率与污水排放标准的逐步提高,城镇污水处理厂处在快速发展阶段,其数量和处理能力逐年攀升。与此同时,污水处理过程中释放的二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和一氧化二氮(N_2O)等温室气体排放量逐渐增加^[1]。据相关数据统计,从2009年到2023年,污水处理行业的温室气体排放总量增幅超140%^[2],污水处理厂的碳排放量日益受到关注^[3]。2023年,江苏省生态环境厅等6个部门联合印发《江苏省减污降碳协同增效实施方案》,苏州、常州以及无锡部分地区已开展城镇污水处理厂碳排放测算及低碳管理等工作。本文以盐城市5个区(县)[以下均简写为“YC区(县)、TH区(县)、YD区(县)、DT区(县)、XS区(县)”]共计32座城镇污水处理厂为研究对象,基于《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)》^[4]与《污水处理厂低碳运行评价技术规范》^[5](以下简称“规范”),对2023年污水处理厂碳排放量和碳排放强度进行分析研究,为盐城市污水处理行业碳减排提供理论数据支持,为污水处理协同控制降碳减污提供研究基础。

1 污水处理厂概况

研究对象为盐城市域范围内32座典型中小规模污水处理厂,其中YC-WWTP1[表示YC区(县)的第一座污水处理厂,下同]、TH-WWTP1、DT-WWTP1为中等规模城市污水处理厂,现状处理规模分别为10万、2.4万、5.0万 m^3/d 。YD区(县)内9座乡镇污水处理厂(YD-WWTP1~YD-WWTP9)主要收集镇域内集中生活区的生活污水,采用厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺+转盘滤池工艺,处理规模为1000~2000 m^3/d 。DT区(县)内10座乡镇污水处理厂(DT-WWTP2~DT-WWTP11),现状规模为1000~1250 m^3/d ,采用AAO+滤布滤池工艺。XS区(县)内10座乡镇污水处理厂(XS-WWTP1~XS-WWTP10)现状规模为500~2000 m^3/d ,采用AAO+滤布滤池工艺或生物转盘+人工湿地工艺。2023年盐城市32座中小型城镇污水处理厂化学需氧量(COD)、总氮(TN)进水质量浓度及同期出水质量浓度如表1所示。污水处理厂在运营过程中满足接管标准及排放标准,出水均执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放限值要求。

表1 污水处理厂概况
Tab. 1 Overview of WWTPs

污水处理厂名称	工艺	处理规模/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	进水质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	排放标准
YC-WWTP1	AAO生物反应池+沉淀池+ 磁混凝澄清池+滤布滤池	100 000	COD: 174.9 TN: 25.5	COD: 19.6 TN: 9.7	《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)一级A
TH-WWTP1	反硝化生物滤池+曝气生物滤池	24 000	COD: 137.7 TN: 52.66	COD: 8.26 TN: 5.68	
DT-WWTP1	改进型三槽式氧化沟工艺	50 000	COD: 226.9 TN: 37.2	COD: 21.8 TN: 10.0	

(续表1)

污水处理厂名称	工艺	处理规模/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	进水质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	排放标准
YD-WWTP1~YD-WWTP9	AAO 生化池+转盘滤池	1 000~2 000	COD: 77.48 TN: 27.12	COD: 14.42 TN: 5.89	《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)一级 A
DT-WWTP2~DT-WWTP11	AAO 生化池+滤布滤池	1 000~1 250	COD: 111.71 TN: 28.49	COD: 17.05 TN: 7.07	
XS-WWTP1~XS-WWTP10	AAO 生化池+滤布滤池或 生物转盘+人工湿地	500~2 000	COD: 105.28 TN: 32.12	COD: 10.98 TN: 7.82	

2 碳排放核算边界与方法

2.1 核算边界

污水处理厂的碳排放源主要分为直接排放源和间接排放源。直接排放源为污水在生物处理过程中产生的 CH_4 和 N_2O 。间接排放源来自能耗类(污水提升、鼓风机曝气以及污泥脱水耗电)和物耗类(处理过程中使用的碳源、絮凝剂以及消毒剂等)。本文碳核算边界为污水处理工艺全过程,不包括污泥后续的处理处置。另外,上述污水处理厂均无 CH_4 回收装置、生产运行过程中均未外购热力,未使用化石燃料。因此,污水处理厂的碳排放分为直接碳排放和间接碳排放。

2.2 核算方法

参考相关规范以及《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》^[6] 的相关方法,对污水处理厂碳排放量开展核算。结合各污水处理厂 2023 年度污水处理量、进出水质、运营月报等数据核算年度污水处理厂碳排放量,如式(1)~式(4)所示。

污水处理厂直接碳排放量核算方法如式(1)~式(2)所示。

$$E_1 = [(R_{\text{COD}} - S_G \times \rho_s) \times E_{\text{CH}_4} - W_{\text{CH}_4}] \times G_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

其中: E_1 ——去除城镇污水中 COD 所产生的 CH_4 折算为 CO_2 当量的年排放量, $\text{tCO}_2\text{eq/a}$;
 R_{COD} ——城镇污水处理 COD 年去除量, tCOD/a ;
 S_G ——污泥干物质年产生量, t/a ,通过运营数据统计获取;
 ρ_s ——污泥干物质中有机物质含量, tCOD/t ,根据运营数据统计;
 E_{CH_4} —— CH_4 排放因子,由厌氧降解单位 COD 时 CH_4 的产率系数和修正因子确

定,本文取值为 $0.0075 \text{ tCH}_4/\text{tCOD}$;

W_{CH_4} ——污水处理厂 CH_4 年回收量, tCH_4/a ;

G_{CH_4} —— CH_4 全球增温潜势值,取值为 21。

$$E_2 = R_{\text{TN}} \times E_{\text{N}_2\text{O}} \times C_{\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2} \times G_{\text{N}_2\text{O}} \quad (2)$$

其中: E_2 ——城镇污水处理厂去除 TN 产生的 N_2O 折算为 CO_2 当量的年排放量, $\text{tCO}_2\text{eq/a}$;

R_{TN} ——城镇污水处理厂 TN 年去除量, tN/a ;

$E_{\text{N}_2\text{O}}$ ——污水中单位质量的氮能够转化为 N_2O 的氮量,取值为 $0.005 \text{ tN}_2\text{O-N/tN}$;

$C_{\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2}$ —— $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 相对分子质量之比,即 $44/28$;

$G_{\text{N}_2\text{O}}$ —— N_2O 全球增温潜势值,取值为 310。

污水处理厂间接碳排放量核算方法如式(3)~式(4)所示。

$$E_3 = H \times E_{\text{CO}_2} \times G_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

其中: E_3 ——污水处理设备运行年耗电力产生的 CO_2 排放当量, $\text{tCO}_2\text{eq/a}$;

H ——污水处理设备运行年耗电量, MWh/a ;

E_{CO_2} ——电力 CO_2 排放因子,江苏省取值为 $0.70 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$;

G_{CO_2} —— CO_2 全球增温潜势值,取值为 1。

$$E_4 = \sum (y_i \times E_i) \times G_{\text{CO}_2} \quad (4)$$

其中: E_4 ——污水处理厂污水处理年消耗药剂产生的 CO_2 排放当量, $\text{tCO}_2\text{eq/a}$;

y_i ——某类药剂年使用量, t;
 E_i ——南方某省各类药剂碳排放因子, 聚合硫酸铁为 0.5、醋酸钠溶液为 0.623、阳离子聚丙烯酰胺为 1.5, 次氯酸钠为 0.92;
 G_{CO_2} —— CO_2 全球增温潜势值, 取值为 1。

3 结果与讨论

3.1 碳排放水平现状

综合分析盐城市 32 座污水处理厂碳排放构成及其占比, 如表 2、图 1 所示。电耗碳排放 E_3 以 70.4% 的平均占比成为主要排放源, 其次为药剂碳排放 E_4 (21.4%)、去除 TN 碳排放 E_2 (6.3%) 及去除 COD 碳排放 E_1 (1.9%)。规模差异导致排放结构分

化显著: 3 座中等规模厂 E_2 (17.5%)、 E_4 (36.6%) 占比均高于 29 座小规模(乡镇)污水处理厂 (6.1%、21.9%), 而乡镇厂 E_3 占比达 78.1%, 较中等规模污水处理厂高 14.7 个百分点, 凸显其在核心能耗环节的高排放特征。碳排放总量分布呈现集中化趋势: YC-WWTP1、TH-WWTP1、DT-WWTP1 3 座中等规模污水处理厂贡献了全市 76.0% 的碳排放, 其中 YC-WWTP1 作为集中处理模式代表, 其排放量远超其他区域总和; 区域对比显示, YD 区(县) 厂均碳排放达 290.2 tCO₂eq/a, 显著高于 DT 区(县) 乡镇厂平均水平 (150.3 tCO₂eq/a), 后者略高于 XS 区(县) 乡镇厂 (123.7 tCO₂eq/a), 体现不同处理规模与区域布局对碳排放强度的差异化影响。

表 2 盐城市 32 座城镇污水处理厂碳排放量统计表

Tab. 2 Statistics of Carbon Emissions of 32 Urban WWTPs in Yancheng

区域	污水处理厂名称	处理规模/ (m ³ ·d ⁻¹)	运行负荷率	E_1 / (tCO ₂ eq·a ⁻¹)	E_2 / (tCO ₂ eq·a ⁻¹)	E_3 / (tCO ₂ eq·a ⁻¹)	E_4 / (tCO ₂ eq·a ⁻¹)	总计碳排放量/ (tCO ₂ eq·a ⁻¹)
YC	YC-WWTP1	100 000	86.00%	753.67	1 213.80	5 640.18	1 512.74	9 120.39
TH	TH-WWTP1	24 000	21.70%	33.03	198.48	690.17	645.42	1 567.10
DT	DT-WWTP1	50 000	81.35%	470.65	983.02	2 847.68	1 920.76	6 222.11
	DT-WWTP2~ DT-WWTP11	1 000~1 250	21.00%~71.00%	0.99~4.50	2.78~13.90	79.29~137.62	18.11~39.10	102.94~180.43
YD	YD-WWTP1~ YD-WWTP9	1 000~2 000	36.41%~54.22%	1.11~4.73	8.73~25.98	128.38~228.38	47.53~158.34	199.77~371.98
XS	XS-WWTP1~ XS-WWTP10	500~2 000	3.68%~91.68%	0.10~6.99	0.49~41.97	63.50~194.64	2.50~41.46	71.77~285.06
	合计	205 550	—	1 328.91	2 693.92	12 790.15	5 448.84	22 261.82

注:“运行负荷率”指污水处理厂实际进水水量与设计处理水量的比值,以百分比形式表示。

污水处理厂各碳排放类别总体占比如图 2 所示, 电力消耗>药剂消耗>去除 TN>去除 COD 碳排放量。间接碳排放是污水处理厂碳排放主要来源 (91.8%), 其中电耗碳排放占比 70.4%, 药剂碳排放占比 21.4%。各污水处理厂电耗碳排放占各自总碳排放比例均居首位或次位, 在 44.0%~95.3% 之间。这可能与污水处理工艺中曝气系统、污水提升泵组等高耗能环节密切相关, 使得电耗成为影响碳排放水平的关键因素。

污水处理厂碳排放量分布、碳排放量与处理规模的线性关系如图 3 所示。图 3(a) 展示了不同处理规模的污水处理厂碳排放量分布。整体而言, 不同处理规模污水处理厂碳排放量呈阶梯式增长特征: 0~500、500~1 000、1 000~2 000 m³/d 规模厂平

均碳排放总量依次为 91.95、199.48、231.48 tCO₂eq/a, 而 20 000~100 000 m³/d 中等规模污水处理厂平均碳排放总量骤增至 5 636.53 tCO₂eq/a。图 3(b) 通过线性回归模型揭示了污水处理厂碳排放总量与处理规模的定量关系。分析结果显示, 处理规模与碳排放总量拟合优度 $R^2 = 0.973 8$ ($p < 0.000 1$), 存在显著正相关线性关系, 揭示现有条件下规模扩大直接导致碳排放总量显著增加, 凸显污水处理行业“规模优先”模式带来的气候环境代价^[7]。

污水处理厂直接碳排放特性、间接碳排放特性如表 3、图 4。在直接碳排放方面, 如图 4(a) 所示, 32 座污水处理厂中去除 TN 环节 E_2 的碳排放占比均超过 50%, 表明该过程对直接碳排放贡献最为显著; 区域分布上, YD 区(县) 9 座污水处理厂直接碳

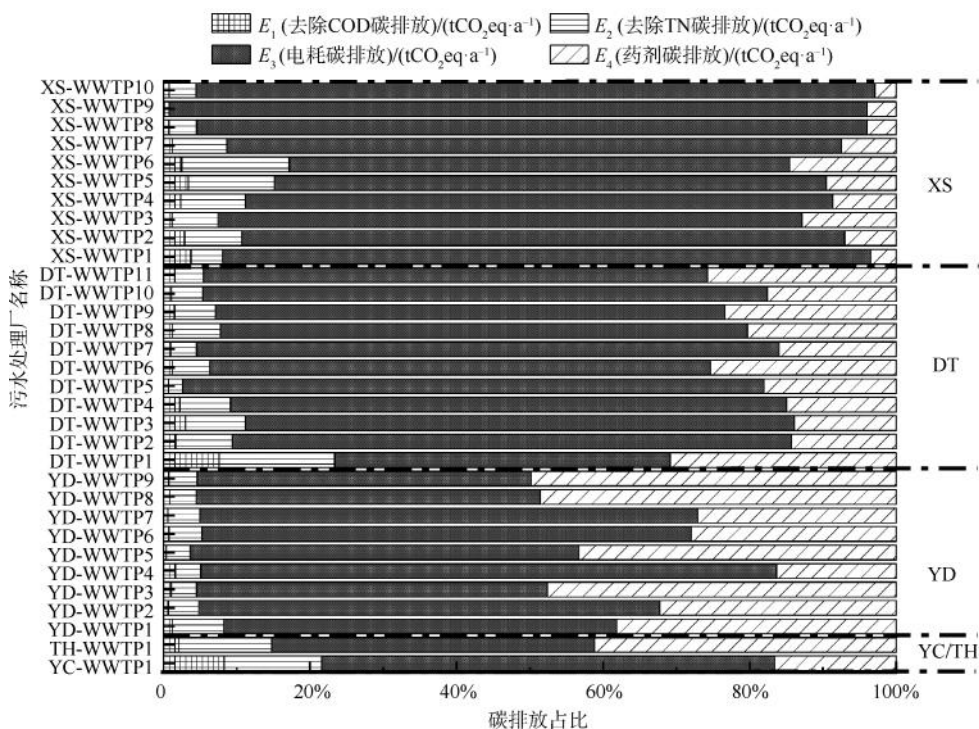


图 1 盐城市 32 座污水处理厂碳排放占比情况

Fig. 1 Carbon Emission Proportions of 32 WWTPs in Yancheng

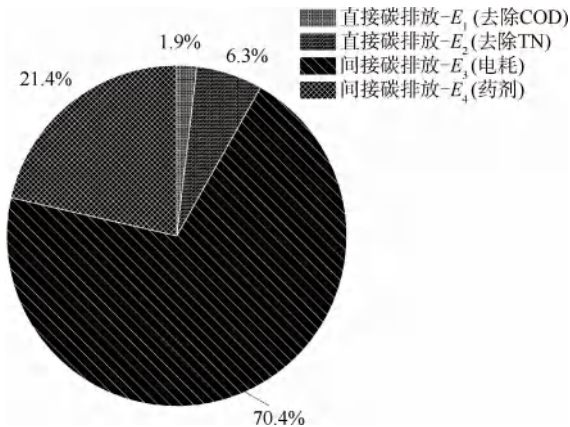


图 2 污水处理厂不同类别碳排放占比

Fig. 2 Carbon Emission Proportions by Category in WWTPs

排放总量 (134.95 tCO₂eq/a) 及单厂均值 (15.0 tCO₂eq/a) 居首, XS 区(县) (129.52 tCO₂eq/a, 13.0 tCO₂eq/a) 次之, DT 区(县) (105.7 tCO₂eq/a, 10.6 tCO₂eq/a) 最低。在间接碳排放方面, 以电力消耗碳排放 E_3 为主导(平均占比 77%), 反映出曝气、泵送等设备运行的高能耗影响[图 4(b)]。部分小规模污水处理厂(500 m³/d) 如 XS-WWTP1、8、9 的 E_3 占比极高(96%), 排放结构单一; 而中等规模厂(如 YC-WWTP1、DT-WWTP1、TH-WWTP1) 的电力消耗 E_3 与药剂碳排放 E_4 总量显著高于其他区域, 呈现高处理规模、高 E_3 和 E_4 碳排放的特点。如图 5 所示, 间接碳排放量及直接碳排放量均与处理规模呈显

表 3 盐城市 32 座污水处理厂直接与间接碳排放特性统计表

Tab. 3 Statistics of Direct and Indirect Carbon Emission Characteristics of 32 WWTPs in Yancheng

区域	污水处理厂	直接碳排放特性			间接碳排放特性		
		直接碳排放总计/ (tCO ₂ eq·a ⁻¹)	E_1 碳排放占比	E_2 碳排放占比	间接碳排放总计/ (tCO ₂ eq·a ⁻¹)	E_3 碳排放占比	E_4 碳排放占比
YC	YC-WWTP1	1 967.47	38%	62%	7 152.92	79%	21%
TH	TH-WWTP1	231.51	14%	86%	1 335.59	52%	48%
DT	DT-WWTP1	1 453.67	32%	68%	4 768.44	60%	40%
	DT-WWTP2~DT-WWTP11	3.77~16.95	16%~28%	72%~84%	97.4~163.55	73%~84%	16%~27%
YD	YD-WWTP1~YD-WWTP10	9.98~30.52	10%~32%	68%~90%	189.79~341.46	48%~83%	17%~52%
XS	XS-WWTP1~XS-WWTP10	0.58~48.95	14%~46%	54%~86%	66~236.1	82%~97%	3%~18%

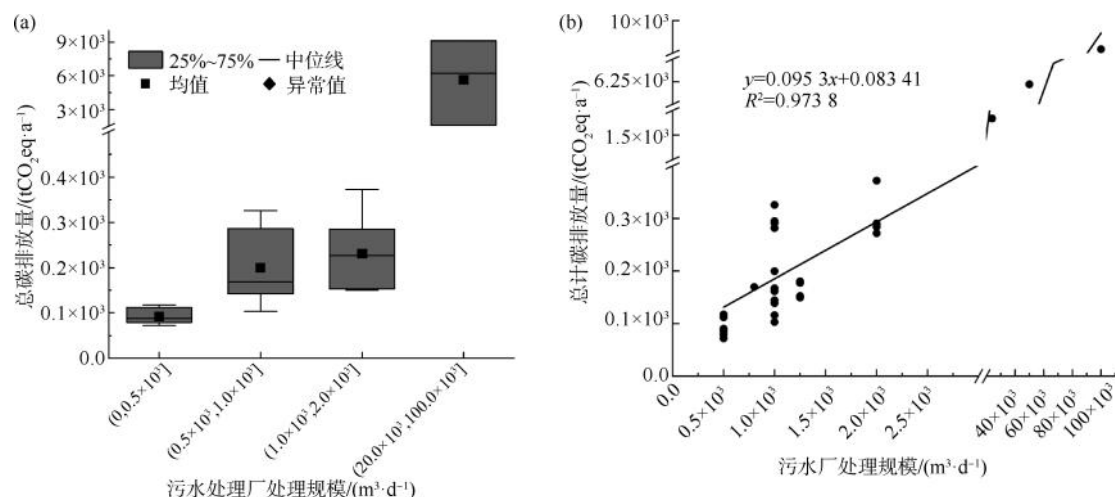


图3 污水处理厂 (a) 碳排放量分布; (b) 碳排放量与处理规模的线性关系

Fig. 3 (a) Carbon Emission Distribution; (b) Linear Relationship between Carbon Emission and Treatment Capacity of WWTPs

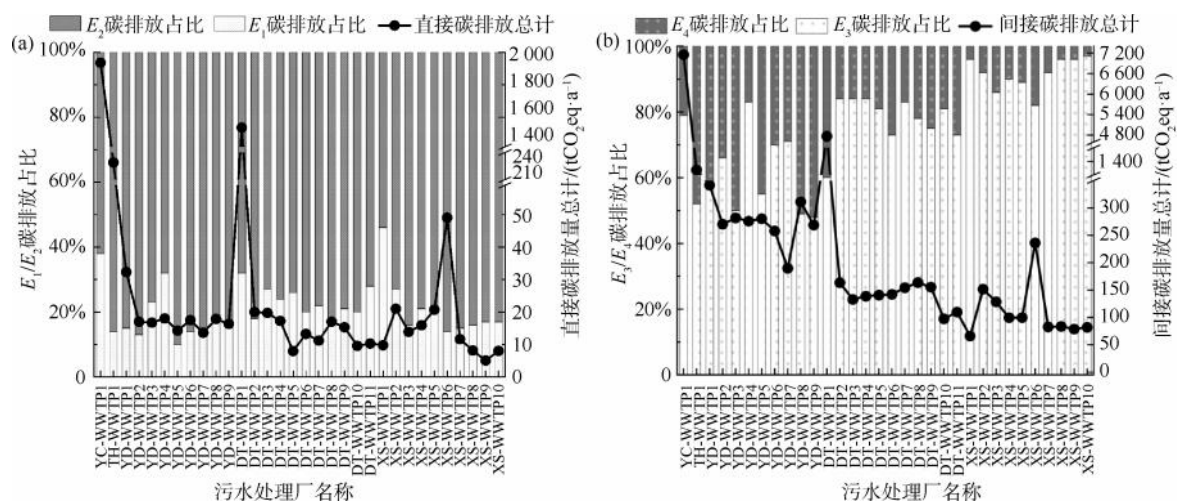


图4 污水处理厂 (a) 直接碳排放特性; (b) 间接碳排放特性

Fig. 4 (a) Direct Carbon Emission Characteristics; (b) Indirect Carbon Emission Characteristics of WWTPs

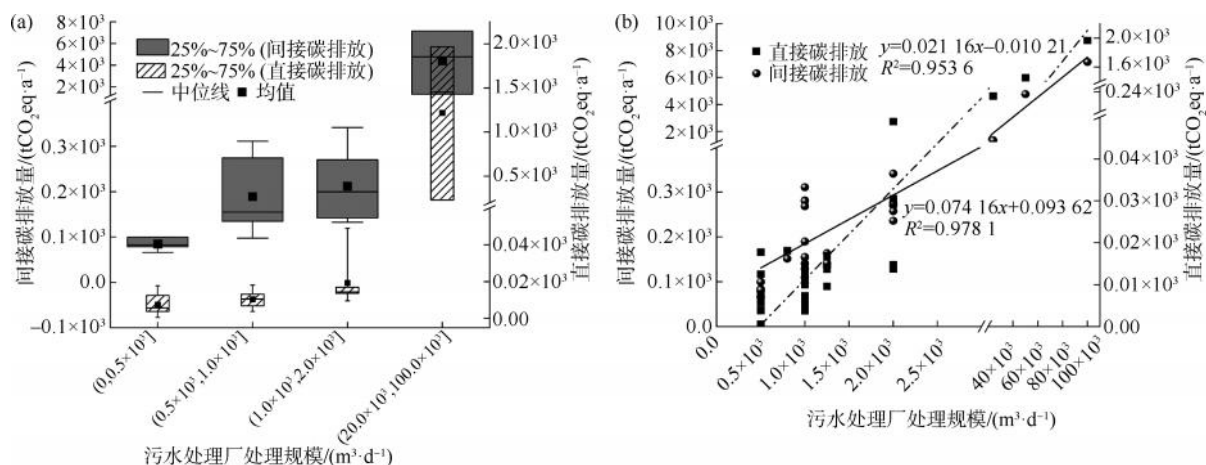


图5 污水处理厂 (a) 直接/间接碳排放量分布; (b) 直接/间接碳排放量与处理规模的线性关系

Fig. 5 (a) Distribution of Direct and Indirect Carbon Emissions; (b) Linear Relationship between Carbon Emissions and Treatment Capacity of WWTPs

著正相关[$R^2=0.978\ 1$ (间接碳排放), $R^2=0.953\ 6$ (直接碳排放)], $p<0.000\ 1$ 。整体而言,处理规模与能源相关环节是影响污水处理厂直接与间接碳排放的关键因素,其中 E_2 主导直接碳排放、 E_3 主导间接碳排放,不同区域及规模的污水处理厂碳排放特征存在明显差异。

3.2 碳强度排放现状

金维钰等^[8]研究发现,截至 2020 年,我国城镇污水处理厂吨水平均排放强度为 $0.589\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,华东地区吨水平均排放强度为 $0.5\sim0.8\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ 。经本次调研统计,盐城市 32 座污水处理厂平均碳排放强度为 $1.38\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,强度范围为 $0.29\sim$

$11.78\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,显著高于全国及华东地区平均水平(表 4)。具体而言:(1)重点区域分化显著。YD 区(县)9 座污水处理厂排放强度为 $0.78\sim1.85\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,DT 区(县)污水处理厂为 $0.46\sim2.20\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,其中 DT-WWTP5 达 $2.20\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$;(2)极端值特征突出。XS 区(县)呈 $0.43\sim11.78\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ 宽幅分布,其中 XS-WWTP9 以 $11.78\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ 远超区域均值($1.98\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$)5.9 倍;(3)中等规模厂表现分化。YC-WWTP1($0.29\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$)、DT-WWTP1($0.42\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$)碳排放强度达到优等水平,TH-WWTP1($0.89\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$)接近华东地区上限。

表 4 盐城市 32 座污水处理厂总碳排放强度统计表

Tab. 4 Statistics of Total Carbon Emission Intensity of 32 WWTPs in Yancheng

区域	污水处理厂	总碳排放量/($\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$)	总处理水量/($\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)	总碳排放强度/($\text{kgCO}_2\text{eq}\cdot\text{m}^{-3}$)
YC	YC-WWTP1	9 120.39	31 548 700	0.29
TH	TH-WWTP1	1 567.10	1 757 800	0.89
DT	DT-WWTP1	6 222.11	14 847 255	0.42
	DT-WWTP2~DT-WWTP11	102.94~180.43	65 700~322 115	0.46~2.20
	YD-WWTP1~YD-WWTP9	199.77~371.98	171 600~364 292	0.78~1.85
	XS-WWTP1~XS-WWTP10	71.77~285.06	6 725~661 608	0.43~11.78
	盐城市 32 座污水处理厂吨水平均排放强度			1.38
	全国城镇污水处理厂吨水平均排放强度			0.59
	华东地区城镇污水处理厂吨水平均排放强度			0.5~0.8

如图 6 所示,盐城市 32 座中小型污水处理厂碳排放强度分布特征显示:仅 6 座污水处理厂(占比 18.8%)低于全国城镇污水处理厂吨水平均排放强度($0.59\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$);6 座污水处理厂(占比 18.8%)碳排放强度在全国平均水平与华东地区平均水平之间;12 座污水处理厂碳排放强度集中于 $0.8\sim1.38\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,占比最大(37.5%);9 座污水处理厂碳排放强度高于区域均值($1.38\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$),占比 28.1%。总体而言,盐城市污水处理厂碳排放强度较高,整体呈现“两极分化+中部集中”特征,YD、DT 与 XS 区(县)污水处理厂尤为突出,其单位污水处理碳效率较优等水平(YC-WWTP1, $0.29\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$)相差 1.5~40 倍,凸显出工艺能效低下与管理粗放等系统性缺陷,亟须制定碳排放削减对策。

(1)处理规模。图 7 为污水处理厂总碳排放强度分布和总碳排放强度与电耗碳排放强度的线性关

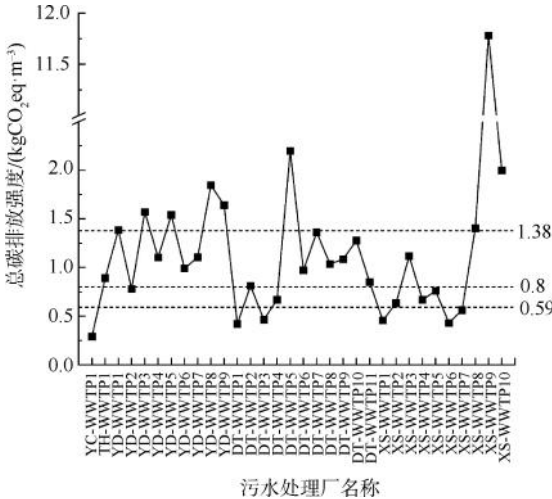


图 6 盐城市 32 座污水处理厂总碳排放强度分布折线图
Fig. 6 Line Chart of Total Carbon Emission Intensity Distribution of 32 WWTPs in Yancheng

系。如图 7(a)所示,污水处理厂碳排放强度呈现显著规模效应,总碳排放强度随处理规模增大呈阶梯

递减规律。具体而言:当处理规模小于 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,平均总碳排放强度达 $2.52 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$;当处理规模增至 $500 \sim 1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,平均碳排放强度下降至 $1.35 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$;规模进一步提升至 $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 后,强度进一步降低至 $0.86 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,即处理规模每增加 $500 \text{ m}^3/\text{d}$,单位碳排放强度下降 41.37% ;当处理规模达到 $20\,000 \sim 100\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,

平均碳排放强度继续降至 $0.53 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,表明处理规模是影响碳排放强度的关键因素之一^[9-10]。图 7(b)进一步分析了电耗碳排放强度与总碳排放强度的相关性。线性回归分析显示,二者呈现显著正相关关系($R^2=0.984\,9$, $p<0.000\,1$),说明电耗碳排放是总碳排放的主要贡献因子,控制电耗水平对降低污水处理厂整体碳排放具有关键意义。

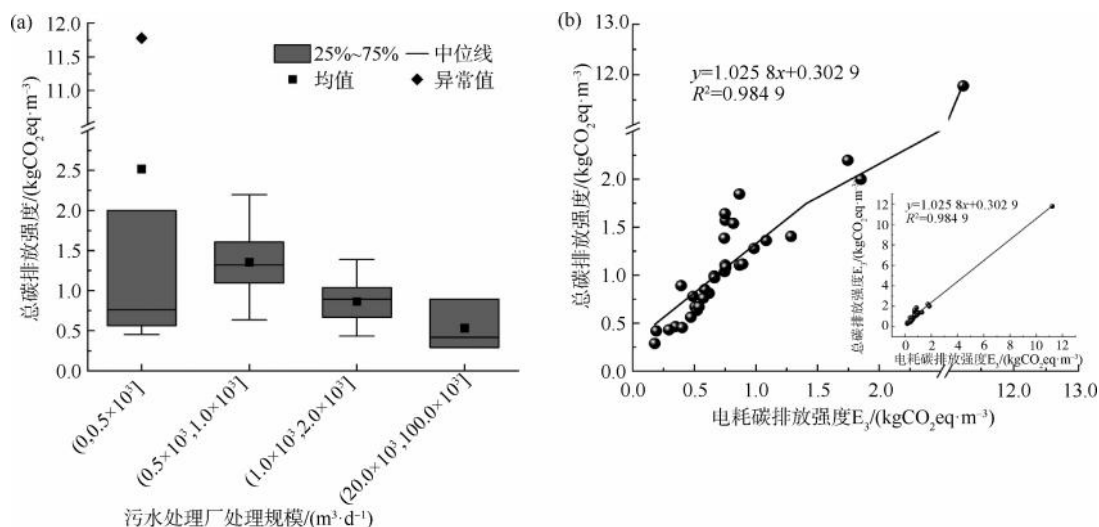


图 7 污水处理厂 (a) 总碳排放强度分布; (b) 总碳排放强度与电耗碳排放强度的线性关系
Fig. 7 (a) Total Carbon Emission Intensity Distribution; (b) Linear Relationship between Total Carbon Emission Intensity and Carbon Emission Intensity of Power Consumption of WWTPs

(2) 运行负荷率。图 8 为不同运行负荷率污水处理厂总碳排放强度和电耗碳排放强度分布。运行负荷率对污水处理厂碳排放强度的影响规律如图 8 (a) 所示,研究表明总碳排放强度随运行负荷率提升呈现显著下降后趋稳的变化趋势。当运行负荷率

低于 20% 时,仅 XS-WWTP9 污水处理厂因运行负荷率极低 (3.68%) 导致设备低效运行,其碳排放强度高达 $11.78 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$,较研究样本均值 ($1.38 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$) 超出 754%,凸显极低负荷对碳排放的显著负面影响;负荷率在 20%~40% 平均碳排放强

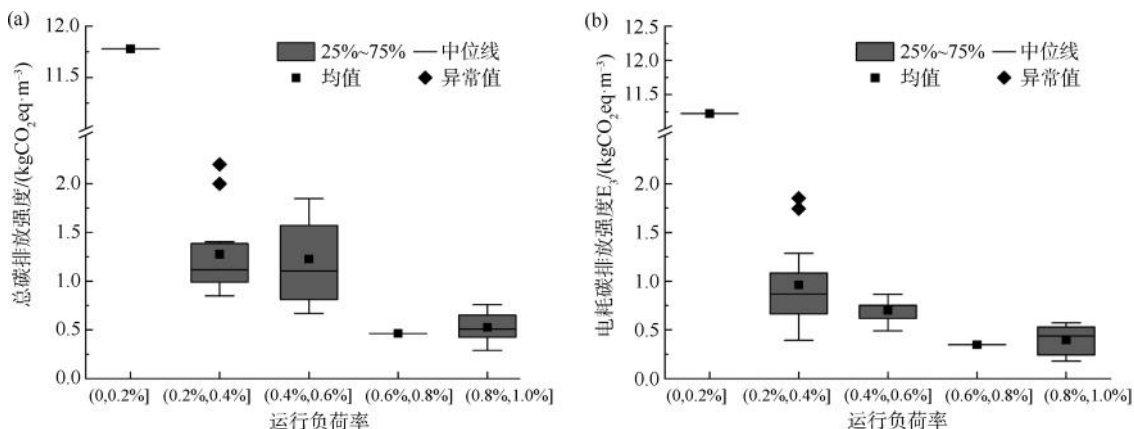


图 8 不同运行负荷率污水处理厂 (a) 总碳排放强度; (b) 电耗碳排放强度分布

Fig. 8 (a) Total Carbon Emission Intensity; (b) Carbon Emission Intensity Distribution of Power Consumption of WWTPs with Different Operation Load Rates

度降至 $1.36 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$, 但 DT-WWTP5 ($2.20 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$, 负荷率为 21.00%) 和 XS-WWTP10 ($2.00 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$, 负荷率为 23.45%) 仍表现出较高的碳排放强度; 负荷率提升至 40%~60% 时, 平均碳强度平缓下降至 $1.23 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$; 仅 DT-WWTP3 处于 60%~80% 负荷率, 其碳排放强度骤降至 $0.46 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$, 而负荷率达到 80%~100% 时平均碳强度小幅回升至 $0.53 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$ 。图 8(b) 进一步分析了不同运行负荷率下电耗碳排放强度的变化规律, 研究显示负荷率每提升 20%, 电耗碳排放强度下降 38.56%。这是由于所研究的污水处理厂均使用定频设备。在低负荷率 (<40%) 下, 设备利用率低导致电耗较高, 使得碳排放强度较高。随着运行负荷率提高 (40%~80%), 设备利用率提升, 电耗效率优化, 碳排放强度显著降低。当运行负荷率接近污水处理厂设计值时 (80%~100%), 设备得以充分利用, 运行效能最高, 设备运行效能达到最优, 电耗水平降至最低, 碳排放强度亦处于最低水平。上述结果表明, 提升运行负荷率对降低污水处理厂电耗及整体碳排放具有关键作用。

(3) 处理工艺

不同污水处理工艺因进水方式、处理水量、曝气量、污水/污泥回流等方面的不同, 能耗有较大差异, 直接影响处理单位体积污水产生的电耗碳排放, 进而导致碳排放强度的差别。本研究对盐城 32 座中小型污水处理厂碳排放强度按所使用处理工艺进行了分类统计分析, 因碳排放强度同时也受处理水量和运行负荷率等因素影响, 为更合理地比较不同处理工艺碳排放水平, 参考《污水处理厂低碳运行评价技术规范》中方法对碳排放强度进行了加权修正处理。如图 9 所示, 不同污水处理厂的碳排放强度受处理工艺影响明显。具体特征如下: ①“AAO 生物反应池+磁混凝”工艺展现出最优碳减排性能。其总碳排放强度 ($0.09 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$) 及间接碳排放强度 ($0.03 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$) 均为最低, 主要归因于磁混凝强化了固液分离效率, 较传统工艺减少约 40% 污泥回流量, 从而显著降低泵送能耗及关联碳排放; ②氧化沟工艺受限于推流器持续运行及高污泥回流需求, 其总碳排放强度 ($0.13 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$) 与间接碳排放强度 ($0.04 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$) 呈现升高趋势; ③“AAO 生化池+滤布滤池/转盘滤池”工艺因混合

液回流比较高, 间接碳排放强度较氧化沟工艺进一步增加至 $0.11 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$, 总碳排放强度达 $0.17 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$; ④“反硝化生物滤池+曝气生物滤池”因多级滤池水头损失大及高频反冲洗需求, 总碳排放强度达 $0.21 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$, 而间接碳排放强度 ($0.09 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$) 低于“AAO 生化池+滤布滤池/转盘滤池”工艺。⑤“生物转盘+人工湿地”工艺间接排放强度 ($0.36 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$) 及总碳排放强度 ($0.43 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$) 均为最高, 间接排放强度成为推高总碳排放的核心主导因素。这一现象主要归因于生物转盘系统的能耗刚性特征, 其转盘驱动装置在有机物负荷波动时需提高转速以维持处理效率, 导致单位能耗显著增加^[11]; 同时, XS 区 (县) 人工湿地为水平流构造, 易因基质堵塞或水力负荷超限而形成局部厌氧区域, 从而进一步提高碳排放强度^[12]。

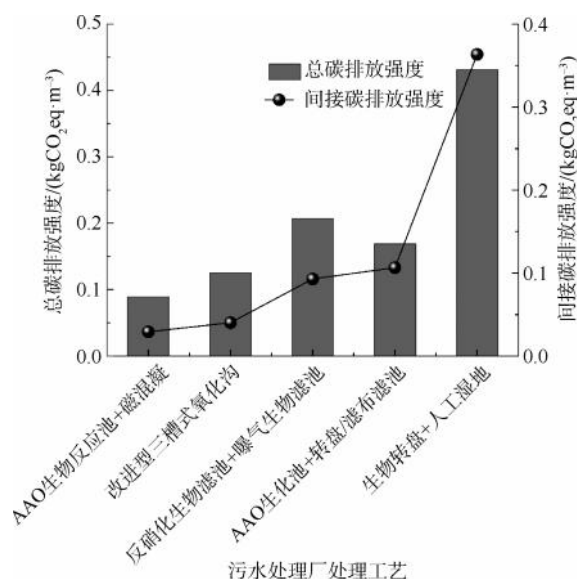


图 9 不同处理工艺污水处理厂总碳排放强度和间接碳排放强度

Fig. 9 Total Carbon Emission Intensity and Indirect Carbon Emission Intensity of WWTPs with Different Treatment Processes

3.3 小结

(1) 在碳排放水平现状方面, 处理规模与能源相关环节是影响污水处理厂直接与间接碳排放的关键因素, 其中去除 TN 环节 (E_2)、电力消耗 (E_3) 分别对 2 类排放贡献突出, 不同区域及规模的污水处理厂碳排放特征存在明显差异。

(2)在碳强度排放现状方面,污水处理厂碳排放强度随处理规模增大呈阶梯递减规律,随运行负荷率提升呈现显著下降后趋稳的变化趋势,不同处理工艺碳排放强度对比显示,生物转盘+人工湿地>反硝化生物滤池+曝气生物滤池>AAO 工艺>氧化沟类工艺>AAO 生物反应池+磁混凝工艺。

(3)从区域分布来看,3 座中等规模污水处理厂碳排放总量由高到低顺序为 YC-WWTP1>DT-WWTP1>TH-WWTP1,而碳排放强度排序与碳排放总量相反,为 TH-WWTP1>DT-WWTP1>YC-WWTP1;3 个区县的小规模污水处理厂中,碳排放总量排序为 YD 区(县)>DT 区(县)>XS 区(县),碳排放强度则呈现 XS 区(县)>YD 区(县)>DT 区(县)的特征。这种碳排放总量与强度的反向排序,反映出污水处理厂处理规模、工艺效率与区域污水特性对碳排放的综合影响。

(4)总体而言,盐城市 32 座中小型城镇污水处理厂碳排放强度相较全国城镇污水处理厂与华东地区吨水平均排放强度均较高,整体呈现“两极分化+中部集中”特征,YD、DT 与 XS 区(县)污水处理厂尤为突出,亟须制定碳排放削减对策。

4 城镇污水处理厂碳排放削减对策

盐城市是全国首批、江苏省唯一的碳达峰试点城市,同时在省委、省政府的支持下正着力构建绿色低碳发展示范区,其城镇污水处理厂实现减污降碳协同效能对长三角地区生态保护与绿色协同发展具有重要示范价值。研究显示,电力消耗是盐城市中小城镇污水处理厂碳排放的主要来源,也是碳减排的核心环节。基于“技术减排-能源替代-管理协同”的系统思维,可通过三大战略路径实现盐城市城镇污水处理厂碳排放总量的有效削减,如表 5 所示。

表 5 盐城市中小型城镇污水处理厂碳排放削减对策

Tab. 5 Carbon Emission Reduction Countermeasures for Small and Medium-Sized Urban WWTPs in Yancheng

类型	策略	责任部门	技术内容
碳减排路径	系统改造与设备升级	设计规划部门与运营部门	推广“微孔曝气+精准曝气控制”智能系统,提高氧利用率,实现基于进水水质数据的曝气量闭环调控
	优化药剂投加		加装计量装置与电磁控制阀门,动态调控药剂投加量;实施多点位药剂投加布局,提高药剂利用率
	处理工艺分级优化		氧化沟工艺调控运行参数;反硝化生物滤池+曝气生物滤池工艺可优化滤料级配与反冲洗策略;逐步升级或淘汰高碳排放工艺,试点应用多模式 AAO 耦合短程硝化-厌氧氨氧化工艺
替碳路径	余热资源化利用	管理部门与运营部门	结合盐城厂网分布实施分级应用,中等规模污水处理厂采用“厂内自用+3 公里辐射”模式;规模较小的污水处理厂优先满足厂内需求
	光伏发电系统构建		污水处理厂可利用厂房屋顶、沉淀池上方、空地等区域安装光伏板,构建分布式太阳能发电系统
	生物质能高效转化与利用		污泥厌氧消化技术将有机污泥转化为高浓度沼气,经脱硫、脱水提纯后,可接入热电联产(CHP)系统用于发电或供热
管理与政策层面	管理优化与政策协同	管理部门及政府部门	管理优化层面,构建标准化运维体系;政策协同层面,推行碳配额交易与绿色信贷双轨机制及绿色信贷政策

4.1 碳减排路径分析

盐城市中小型城镇污水处理厂碳减排潜力分析如表 6 所示。

(1)系统改造与设备升级。曝气系统作为污水处理核心能耗环节,其控制水平直接影响盐城市 32 座污水处理厂的整体能效与出水水质。目前盐城市 32 座污水处理厂平均电力能耗占比达 70.4%,且普遍面临进水水质水量波动大、传统穿孔管曝气响应滞后、氧利用率低等问题,实施曝气总量精准控制尤

为迫切。基于此,盐城市中小型污水处理厂可推广“微孔曝气+精准曝气控制”智能系统:以氧利用率达 25%~35%的微孔曝气器替换传统穿孔管,加装溶解氧(DO)在线监测系统,配套升级鼓风机为变频机型,实现基于进水 COD、氨氮动态数据的曝气量闭环调控。工程应用案例显示,改造后曝气环节节能率达 10%~20%,日均节电 2 960 kWh,每立方米处理水碳减排为 0.029 kg,全市污水处理厂年累计可减排 1 557 t CO₂^[12-15]。

(2)优化药剂投加。当前,盐城市中小型污水处理厂碳源投加系统普遍采用人工手动操作模式,依赖粗放式流量控制且缺乏精准计量手段,导致药剂利用率不足与碳排放强度偏高的双重问题。盐城市 32 座污水处理厂药剂碳排放占比达 21.4% (其中 3 座中等规模污水处理厂高达 36.6%、29 座乡镇级污水处理厂平均为 21.9%)。对此,建议盐城市在现有投加系统中加装耐腐蚀型计量装置与电磁控制阀门,通过信号传输模块将运行数据接入中央控制系统,结合 COD、氨氮等水质分析数据动态调控碳源、混凝剂等药剂投加量,实现药剂投加量的远程精准调控;同时,在 YD、DT、XS 等重点区(县)试点预处理段精准预投、生化段在线反馈、深度处理段协同补充的多点位药剂投加布局,提高药剂利用率,最终实现单位处理水量药剂消耗总量的降低。预计实施后盐城市 32 座中小型污水处理厂可实现单位处理水量药剂消耗降低 10%~25%,减少药剂相关碳排放约 950 t/a。

(3)处理工艺分级优化。不同污水处理工艺之间碳排放亦有差距,以本研究盐城市 32 座中小型污水处理厂为例,氧化沟工艺、反硝化生物滤池+曝气生物滤池、AAO 生化池+滤布滤池/转盘滤池及生物转盘+人工湿地工艺碳排放强度较 AAO 生物反应

池+磁混凝工艺高出 1.4~4.8 倍。针对高碳排放工艺,提出分级优化路径:①运行参数调控。对于 DT-WWTP1 的氧化沟工艺可以通过优化运行模式和曝气量,调控二沉池污水溶解氧含量,以此减少丝状菌的繁殖,并采用间歇曝气模式削减回流液溶解氧对厌氧释磷的抑制效应,减少曝气能耗。②能效提升改造。反硝化生物滤池+曝气生物滤池工艺(如 TH-WWTP1)可以通过优化滤料级配与反冲洗策略,降低运行成本和碳排放。③低碳工艺升级。对于工艺落后、碳排放强度较高的污水处理厂(如 XS-WWTP7~XS-WWTP10)可逐步升级或淘汰“AAO 生化池+滤布滤池/转盘滤池”与“生物转盘+人工湿地”工艺。试点应用多模式 AAO 工艺,基于碳氮比响应机制动态切换运行模式[标准 AAO/倒置 AAO/改良 UCT(University of Cape Town)工艺],强化内源碳源利用率^[16-17];同时深度耦合短程硝化(partial nitrification)-厌氧氨氧化 Anammox 工艺(PN/A 工艺),在好氧段设置 DO 梯度控制区实现协同脱氮,相比传统工艺曝气能耗可削减约 40%,完全消除外加碳源需求,可大大降低单位脱氮成本^[18]。建议纳入盐城市污水处理设施节能降碳建设重点项目,优先在新洋港、串场河沿线高环境敏感区污水处理厂推广,为长三角地区低碳水务提供“盐城样本”。

表 6 盐城市中小型城镇污水处理厂碳减排潜力分析

Tab. 6 Analysis of Potential Carbon Emission Reduction of Small and Medium-sized Urban WWTPs in Yancheng

碳减排路径	指标	改造前	改造后
系统改造与设备升级	曝气氧利用率	<15%	25%~35%
	总碳排放强度/(kgCO ₂ eq·m ⁻³)	1.38	1.35
	单位能耗/(kWh·m ⁻³)	0.35~0.45	0.28~0.32
	碳减排潜力分析	实现日均节电 2 960 kW·h,年累计碳减排 1 557 t	
优化药剂投加	药剂碳排放占比	21.4%	17.7%
	碳减排潜力分析	年减少药剂碳排放约 950 t	
处理工艺分级优化	运行参数调控	优化运行模式和曝气量,减少曝气能耗	
	能效提升改造	优化滤料级配与反冲洗策略	
	低碳工艺升级	试点应用多模式 AAO 工艺,耦合 PN/A 工艺,曝气能耗可削减约 40%	

4.2 替碳路径分析

如表 7 所示,针对盐城市 32 座中小型污水处理厂能源自给率不足的现状,通过整合余热资源化利用、分布式光伏发电及生物质能高效转化技术,构建多能互补协同供能网络。

(1)余热资源化利用。盐城市 32 座污水处理

厂处理规模覆盖 0.05×10⁴~10×10⁴ m³/d,其中主城区污水处理厂日均流量超 5×10⁴ m³,且市域生活污水四季温度稳定在 12~22℃,冬暖夏凉的特点使其具备作为稳定冷热交换源的天然优势。有研究数据表明,污水中蕴藏的热能显著高于化学能,实际可回收热能达到化学能的 9 倍之多^[19]。依托污水水源

热泵技术,通过高效换热器提取或排放污水中的热量,可直接应用于周边建筑的供暖与制冷系统。研究表明,该系统可实现 55% 的一次能源节约率,降低 15% 的年运行成本,在减少化石能源消耗的同时,同步削减 CO₂、二氧化硫等污染物排放,兼具能源效益与环境效益^[20]。在应用模式上,建议结合盐城厂网分布实施分级应用:主城区(中等规模)污水处理厂可采用“厂内自用+3 km 辐射”模式,余热供厂区办公楼供暖、曝气池保温及周边社区、工业企业使用;处理规模较小的乡镇污水处理厂优先满足厂内需求,如鼓风机房降温、污泥脱水机房供暖。此模式不仅可实现污水系统自身的碳中和目标,更能通过能量外输形成“负碳排水系统”,为盐城市城镇水务领域碳中和目标的实现提供本土化路径。

(2)光伏发电系统构建。盐城市拥有丰富的太阳能资源与广阔的开发利用空间,其年平均累积日照为 2 338.8 h,年太阳总辐射量在 4 500~5 000 MJ/m² 之间,且 32 座污水处理厂中 60% 分布于地势开阔的乡镇区域,厂房屋顶、二沉池及氧化沟上方空闲面积较大,具备规模化布局分布式光伏的资源与场地条件。以 YC-WWTP1 污水处理厂(处理规模为 10×10⁴ m³/d)为例,现有可铺设面积约为 1.9 万 m²,若采用单晶硅组件,基于光伏系统综合效率 82%、年等效利用小时数 1 200 h 进行测算,年发电

量约达 309.3 万 kW·h,满足污水处理厂 38% 的用电量(2023 年实际电耗为 804.3 万 kW·h),实现部分用电碳中和目标。预计总装机容量约为 3.09 MW,年均可实现碳减排约 2 472 t。这一举措不仅实现了污水处理厂在能源利用上的“资源最大化”,也为盐城市污水处理厂的低碳转型提供了“投资小、见效快”的本土化路径,成为城镇水务领域可再生能源应用的典型范式^[21]。

(3)生物质能高效转化与利用。城市污水中含有的有机物为能量丰富的物质其中的 COD 所蕴含的能量高达 13~14 kJ/g,但在传统处理工艺中该部分能量主要通过微生物矿化作用以 CO₂ 形式散失,未能实现资源化利用。结合盐城市 32 座中小型城镇污水处理厂 2023 年污泥处理实际情况(年产干污泥 5 567 t),若推广污泥厌氧消化技术,可将有机污泥转化为高浓度沼气,经脱硫脱水提纯后接入 CHP 系统用于发电或供热。该技术不仅可弥补处理过程中的能源消耗,还可产生额外的能源供应:如美国 Sheboygan 污水处理厂采用此技术实现 80% 能源自给,近零能耗运营^[22]。每吨干污泥发电 500~800 kW·h,CO₂ 减排约 1.2 t。对照盐城本地数据测算,全系统推广后可实现碳减排约 6 680.4 t,形成“污泥处理-能源回收-碳减排”的良性循环体系^[23]。

表 7 盐城市中小型城镇污水处理厂替碳潜力分析

Tab. 7 Analysis of Potential Carbon Substitution of Small and Medium-sized Urban WWTPs in Yancheng

替碳路径	替碳潜力分析
余热资源化利用	实现 55% 的一次能源节约率,降低 15% 的年运行成本
光伏发电系统构建(以 YC-WWTP1 污水处理厂为例)	年发电量约达 309.3 万 kW·h,年均可实现碳减排约 2 472 t
生物质能高效转化与利用	全市 32 座污水处理厂推广后可实现年碳减排约 6 680.4 t

4.3 管理优化与政策协同

针对当前盐城市 32 座中小型城镇污水处理厂普遍存在的运维管理效能不足与政策激励机制缺位问题,需从标准化管理体系建设与市场化政策工具创新两方面协同推进。在管理优化层面,针对中小型厂人员配置紧凑的特点,制定差异化岗位标准,建立周期性技能培训考核制度,同步编制契合盐城污水水质特征的预处理段格栅调度、生化池曝气变频控制等关键工序操作指南,构建覆盖“人员-工艺-设备”的三维标准化运维体系,预计可降低 15%~20% 的非必要能耗与药剂损耗。在政策协同层面,紧扣盐城碳达峰试点城市建设要求,创新推行碳配

额交易与绿色信贷双轨机制:参照中山大学提出的“环境供应链管理”^[24],建立区域污水处理厂碳配额分配制度,允许盐都、东台等污泥处理量较大的厂区将盈余配额通过江苏碳排放权交易中心进行市场化交易,形成“多减多得”的减排激励;同步实施绿色信贷政策,对采用低碳技术的污水处理厂提供低于基准利率 20% 的融资支持和优先审批通道,重点破解中小型厂技术改造的资金瓶颈。通过将标准化运维体系与地方政策工具的双向联动,为污水处理厂低碳转型提供制度解决方案。

5 结论

(1)2023 年盐城市 32 座污水处理厂碳排放总

量为 71.77~9 120.39 tCO₂e/a,其中电耗为碳排放主要来源。碳排放强度较为分散,为 0.29~11.78 kgCO₂e/m³,相对全国或华东地区城镇污水处理厂吨水平均碳排放强度较高。

(2)结合碳排放强度分布及线性回归分析结果,盐城市污水处理厂碳排放强度受处理规模、运行负荷率及处理工艺因素影响较大。总碳排放强度随着处理规模增大呈现阶梯式递减趋势。运行负荷低的污水处理厂设备运行效率低,电耗碳排放强度较高,导致总碳排放强度较高。采用高能耗处理工艺的污水处理厂碳排放强度较高,不同处理工艺整体碳排放强度大致为生物转盘+人工湿地>反硝化生物滤池+曝气生物滤池>AAO 工艺>氧化沟类工艺>AAO 生物反应池+磁混凝。

(3)基于盐城市全国碳达峰试点城市定位及污水处理厂电力主导型碳排放特征,遵循“源头减量-过程控制-末端回收”思路,构建系统性碳削减策略:①技术减排路径,通过精准曝气控制、低碳工艺升级等优化全流程能耗与药剂投加,降低生产环节碳强度;②可再生能源替碳,依托污水余热、光伏及生物质能技术构建多能互补网络,减少化石能源依赖;③管理与政策协同,建立标准化运维体系提升效能,结合碳配额交易、绿色信贷等政策形成制度赋能。

参考文献

[1] 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. DOI: 10.1016/j.watres.2015.05.050.

[2] 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.

[3] 闫旭,邱德志,郭东丽,等.中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征[J].环境科学,2018,39(3):1256-1263.

Yan X, Qiu D Z, Guo D L, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment plants in China [J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1256-1263.

[4] 生态环境部.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)[R/OL]. 2018-04-08. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/201804/t20180410_629682.html. Ministry of Ecology and Environment. Technical guideline for synergistic control of pollutants removal and greenhouse gas accounting in municipal wastewater treatment plants (Trial) [R/OL]. 2018-04-08. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/201804/t20180410_629682.html.

[5] T/CAEPI 49—2022 污水处理厂低碳运行评价技术规范[S]. T/CAEPI 49—2022 Technical specification for low-carbon operation evaluation of wastewater treatment plants[S].

[6] IPCC. 2006 年国家温室气体清单指南(2019 修订版)[R]. 日本:IGES, 2019.

IPCC. 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories (2019 Refinement)[R]. Japan: IGES, 2019.

[7] 王朔,陆云平,刘树洋,等.苏州市污水处理厂碳排放研究[J].环境工程,2023,41(10):173-184.

Wang S, Lu Y P, Liu S Y, et al. Carbon emissions of urban and industrial sewage treatment plants of Suzhou [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(10): 173-184.

[8] 金维钰,白雪,史怡,等.中国城镇污水处理厂温室气体排放趋势及驱动因子识别[J].环境科学研究,2024,37(3):650-660.

Jin W Y, Bai X, Shi Y, et al. Research on trend and driving factors of greenhouse gas emissions from urban wastewater treatment plants in China [J]. Environmental Science Research, 2024, 37(3): 650-660.

[9] Ranier E, D' onghia G, Ranieri F et al. Performance of wastewater treatment plants in emission of greenhouse gases[J]. Bioresource Technology, 2024, 404:130897. DOI:10.1016/j.biortech.2024.130897.

[10] Crini G, Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment [J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17(1): 145-155.

[11] 胡宁.生物转盘+组合人工湿地对城镇受污染河水的修复效果研究[D].重庆:西南大学,2023.

Hu N. Research on the restoration effects of rotating biological contactors combined with constructed wetlands on polluted urban river water[D]. Chongqing: Southwest University, 2023.

[12] Wu H M, Zhang J, Guo W S, et al. Secondary effluent purification by a large-scale multi-stage surface-flow constructed wetland: A case study in northern China [J]. Bioresource Technology, 2018, 249:1092-1096. DOI:10.1016/j.biortech.2017.10.099.

[13] 顾潇.“精确曝气控制系统+光伏”在低碳污水厂中的应用[J].净水技术,2024,43(10):176-184.

Gu X. Application of "precise aeration control system + photovoltaic" in low-carbon WWTP [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 176-184.

[14] 于怀星,袁丁,何梓灏.短程精准曝气智能控制系统在污水处理厂中的应用[J].环境工程,2023,41(11):165-171.

Yu H X, Yuan D, He Z H, et al. Application of short-range precision aeration and intelligent control system in sewage treatment plant [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(11): 165-171.

[15] 南京大学.一种维持活性污泥系统溶解氧稳定所需曝气量的预测方法:中国 202410644303.0[P]. 2025-01-03.

Nanjing University. Prediction method for aeration demand required to maintain dissolved oxygen stability in activated sludge systems: CN 202410644303.0[P]. 2025-01-03.

[16] 陶冶.多模式 AAO 工艺在小型城镇污水处理厂的应用[J].中国环保产业,2022,(1):22-25.

(下转第 155 页)

- deterioration of concrete in gravity sewers[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(7): 74–80.
- [7] 沈加子, 李继, 韩慧丽, 等. 城市排水管道缺陷检测技术与智能识别综述: 方法、对比与应用展望[J]. *净水技术*, 2025, 44(6): 6–16.
- Shen J Z, Li J, Han H L, et al. Overview of defect inspection technology and intelligent identification for urban drainage pipelines: Methods, comparisons, and application prospects[J]. *Water Purification Technology*, 2025, 44(6): 6–16.
- [8] 李克亮, 杜建, 陈爱玖, 等. 污水管道混凝土微生物腐蚀机理、影响因素和模拟试验方法综述[J]. *材料导报*, 2025, 39(7): 104–114.
- Li K L, Du J, Chen A J, et al. Review of mechanisms, influencing factors, and simulation test methods of microbiologically influenced corrosion of concrete in sewage pipelines[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(7): 104–114.
- [9] Lin P Y, Yuan X, Liu T, et al. Degradation of concrete sewer pipes under coupling of corrosion and loads: I. experimental study[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 483: 141760. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141760.
- [10] 孔丽娟, 张蓓, 沈英明, 等. 强化污水对水泥砂浆腐蚀的交流阻抗研究[J]. *混凝土*, 2017(2): 98–102.
- Kong L J, Zhang B, Shen Y M, et al. AC impedance study of the cement mortar corrosion induced by artificial intensified sewage[J]. *Concrete*, 2017(2): 98–102.
- [11] 荣辉, 於成龙, 马国伟, 等. 污水环境下混凝土的微生物腐蚀研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(5): 988–999.
- Rong H, Yu C L, Ma G W, et al. Research progress on microbial corrosion of concrete in sewage environment [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(5): 988–999.
- [12] Jiang G M, Sun X Y, Keller J, et al. Identification of controlling factors for the initiation of corrosion of fresh concrete sewers[J]. *Water Research*, 2015, 80: 30–40. DOI: 10.1016/j.watres.2015.04.015.
- [13] Jiang G M, Keller J, Bond P L. Determining the long-term effects of H_2S concentration, relative humidity and air temperature on concrete sewer corrosion[J]. *Water Research*, 2014, 65: 157–169. DOI: 10.1016/j.watres.2014.07.026.
- [14] Sun X Y, Jiang G M, Bond P L, et al. A novel and simple treatment for control of sulfide induced sewer concrete corrosion using free nitrous acid[J]. *Water Research*, 2015, 70: 279–287. DOI: 10.1016/j.watres.2014.12.020.
- [15] Grandclerc A, Guéguen-Minerbe M, Nour I, et al. Impact of cement composition on the adsorption of hydrogen sulphide and its subsequent oxidation onto cementitious material surfaces [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 576–586. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.003.
- [16] Grengg C, Mittermayr F, Ukrainczyk N, et al. Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: A review[J]. *Water Research*, 2018, 134: 341–352. DOI: 10.1016/j.watres.2018.01.043.

(上接第 121 页)

- Tao Y. Application of multi-mode AAO process in small municipal wastewater treatment plants [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022, (1): 22–25.
- [17] 赵静, 刘少非, 颜弔, 等. 大型污水厂多模式 AAO 工艺处理效果分析与优化控制[J]. *能源与节能*, 2020, (8): 79–83.
- Zhao J, Liu S F, Yan M, et al. Effect analysis and optimization control of multi-mode AAO process treatment in large-scale sewage treatment plant [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2020, (8): 79–83.
- [18] 吕利平, 李航, 庞飞, 等. 交替好氧/缺氧短程硝化反硝化工艺处理低 C/N 城市污水[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(6): 1529–1536.
- Lü L P, Li H, Pang F, et al. Alternating aerobic/anoxic short-cut nitrification and denitrification process for treating low C/N urban sewage [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(6): 1529–1536.
- [19] Hao X D, Li J, Van Loosdrecht M C M, et al. Energy recovery from wastewater: heat over organics[J]. *Water Research*, 2019, 161: 74–77. DOI:10.1016/j.watres.2019.05.106.
- [20] Zhang Q L, Yang Y X, Zhang X C, et al. Carbon neutral and techno-economic analysis for sewage treatment plants [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 26: 102302. DOI:10.1016/j.eti.2022.102302.
- [21] 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(增刊1): 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.
- [22] 郝晓地, 魏静, 曹亚莉. 美国碳中和运行成功案例——Sheboygan 污水处理厂[J]. *中国给水排水*. 2014, 30(24): 1–6.
- Hao X D, Wei J, Cao Y L. A successful case of carbon-neutral operation in America: Sheboygan WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(24): 1–6.
- [23] 范秀磊, 袁博, 李学强, 等. 青岛麦岛污水处理厂污泥消化及热电联产运行管理经验[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(2): 22–25.
- Fan X L, Yuan B, Li X Q, et al. Experience of sludge digestion and cogeneration operation management in Qingdao Maidao sewage treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(2): 22–25.
- [24] 李彪, 夏西强, 李秋月. 碳配额下碳交易对碳减排效应的影响及协调机制研究[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(8): 250–261.
- Li B, Xia X Q, Li Q Y. Research on the influence of carbon trading on carbon emission reduction effect and coordination mechanism under carbon quotas [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 32(8): 250–261.