

黄艳,熊千,崔龙. 四川省某市城镇污水处理厂碳排放及减排策略分析[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 116-130.

HUANG Y, XIONG Q, CUI L. Analysis of carbon emissions and reduction strategies of a Urban WWTP in a City in Sichuan Province[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 116-130.

## 四川省某市城镇污水处理厂碳排放及减排策略分析

黄艳\*,熊千,崔龙

(江西三律生态环境有限公司,江西南昌 330000)

**摘要** 【目的】 污水行业是全球工业领域温室气体(GHG)排放的主要来源之一。为了加快实现我国碳中和目标,减少污水处理厂的GHG排放必不可少。但我国目前仍缺乏系统化的、标准化的高精度污水处理厂GHG排放清单。【方法】 为加快建立污水行业系统化的GHG排放标准,研究以四川省某市城镇污水处理厂为研究对象,采用排放因子法结合灰色关联度,核算2021年—2023年污水处理厂在生化处理阶段、能源消耗阶段、药剂消耗阶段、污泥处置阶段以及尾水排放阶段产生的GHG排放清单,并分析影响污水处理厂GHG排放的主要因素,提出对应减排措施,从而构建规范化GHG排放清单。【结果】 结果表明:药剂消耗阶段和生化处理阶段产生的碳排放约占整体排放的80%,是污水处理厂碳排放的主要来源;尾水外排引起的碳排放是污水处理厂GHG排放的主要影响因素,占整体排放的9.13%。其原因可能是为满足高标准的出水污染物浓度限制,加大化学药剂投加量来降低污水中的污染物浓度,从而造成GHG排放。优化工艺、设备更新以及引进精准加药系统等措施能有效降低污水处理厂GHG排放。【结论】 基于研究可建立1个透明、可核查以及可比较的污水处理厂GHG排放清单,为我国污水行业制定碳中和以及污水绿色管理政策和技术提供指导方针,从而推进我国污水行业的GHG减排,加速实现碳中和目标。

**关键词** 城镇污水处理厂 碳排放 Kaya恒等式 灰色关联度 减排路径

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0116-15

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.013

## Analysis of Carbon Emissions and Reduction Strategies of a Urban WWTP in a City in Sichuan Province

HUANG Yan\*, XIONG Qian, CUI Long

(Jiangxi Sanlu Ecological Environment Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

**Abstract** [Objective] The wastewater treatment industry is one of the main sources of greenhouse gas (GHG) emissions in the global industrial sector. To accelerate the realization of carbon neutrality goals in China, reducing GHG emissions from wastewater treatment plants (WWTPs) is essential. However, it still lacks a systematic, standardized, and high-precision GHG emission inventory for these WWTPs in China. [Methods] In order to accelerate the establishment of a systematic GHG emission standard for the wastewater industry, this study took a urban WWTP in a city in Sichuan Province as the research object, and used the emission factor method combined with the gray correlation to calculate the GHG emission inventory generated by the WWTP in the biochemical treatment stage, energy consumption stage, agent consumption stage, sludge disposal stage, and tailwater discharge stage from 2021 to 2023. The main factors affecting the GHG emissions of WWTPs were analyzed, and corresponding emission reduction measures were proposed to construct a standardized GHG emission inventory. [Results] The result showed that carbon emissions from the reagent consumption stage and the biochemical treatment stage account for about 80% of the overall emissions and were the main source of carbon emissions from WWTPs, and carbon emissions caused by tailwater discharge were the main influencing factors of GHG emissions from WWTPs, accounting for 9.13% of the overall emissions. The reason might be that in order to meet the high standard of effluent pollutant concentration limits, the amount of chemical agents added was increased to reduce the pollutant concentration in wastewater,

[收稿日期] 2024-09-14

[通信作者] 黄艳(1986—),女,硕士研究生,研究方向为污水厂运营精细化管理、节能双碳,E-mail:175846291@qq.com。

thereby causing GHG emissions. Optimizing processes, updating equipment, and introducing precision dosing systems could effectively reduce GHG emissions from WWTPs. [ **Conclusion** ] Based on this study, a transparent, verifiable, and comparable GHG emission inventory for WWTPs can be established, providing guidelines for the formulation of carbon neutrality and green wastewater management policies and technologies in China's wastewater industry, thereby promoting GHG emission reduction in China's wastewater industry and accelerating the achievement of carbon neutrality goals.

**Keywords** urban wastewater treatment plant (WWTP) carbon emission Kaya identity grey correlation emission reduction path

全球气候变化问题日益严峻,碳排放已成为国际社会广泛关注的焦点。在众多碳排放源中,城镇污水处理厂作为城市基础设施的重要组成部分,其在处理污水过程中也伴随着不可忽视的碳排放。城镇污水处理厂在运营过程中消耗大量能源、物料<sup>[1]</sup>,单位产值能耗高,属于能源密集型行业<sup>[2]</sup>。污水处理行业碳排放量占社会总碳排放的1%~2%,是我国十大碳排放行业之一<sup>[3]</sup>。随着我国经济的快速发展,污水处理厂规模在不断增加,出水标准日趋严格。高标准出水虽有助于降低水体黑臭和富营养化的可能性,起到保护水体的作用,但增加了污水处理厂能耗药耗,从而导致碳排放量的增加<sup>[4]</sup>。在保证污水中各污染物稳定达标的前提下,建立全面准确的碳排放核算体系,提出精准有效的减排措施,是污水处理厂开展节能减排项目的关键之一。

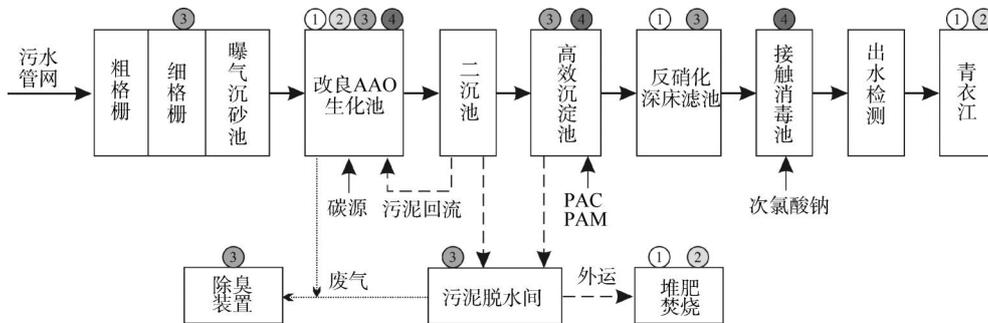
本研究以四川省某市城镇污水处理厂(以下简

称“污水处理厂”)为研究对象,采用2021年—2023年逐月数据构建碳排放核算体系,分析污水处理厂温室气体(GHG)排放变化特征,并运用灰色关联模型分析污水处理厂碳排放的影响因素。结合污水处理运维情况和碳排放特征,提出对应的减排措施,以为同类污水处理厂碳排放核算和节能减排提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象的基本情况

污水处理厂设计规模为5万m<sup>3</sup>/d,采取的工艺为“预处理+改良厌氧/缺氧/好氧(AAO)生化池+二沉池+高效沉淀池+反硝化深床滤池+接触消毒池”(图1),出水水质执行《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)城镇污水处理厂排放标准限值(表1)。污水处理厂未进行CH<sub>4</sub>回收,且不存在外购热力和化石燃料的消耗。



注:①—N<sub>2</sub>O;②—CH<sub>4</sub>;③—CO<sub>2</sub>(电耗);④—CO<sub>2</sub>(药耗)。

图1 污水处理厂工艺流程及碳排放源分布

Fig. 1 Process Flow and Carbon Emission Source Distribution of WWTP

表1 设计进出水水质(单位:mg/L)

Tab. 1 Design Influent and Effluent Quality (Unit: mg/L)

| 项目     | COD | BOD <sub>5</sub> | SS  | TN  | TP   | 氨氮        |
|--------|-----|------------------|-----|-----|------|-----------|
| 设计进水水质 | 300 | 150              | 150 | 40  | 3.0  | 35.0      |
| 设计出水水质 | ≤30 | ≤6               | ≤10 | ≤10 | ≤0.3 | ≤1.5(3.0) |

注:氨氮指标括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。

## 1.2 确认核算边界

本文基于排放因子法对污水处理厂运维阶段产生的碳排放进行核算,核算方法参照《污水处理厂低碳运行评价技术规范》<sup>[5]</sup>(以下简称《规范》),同时基于《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》<sup>[6]</sup>(以下简称《指南》)和《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》<sup>[7]</sup>(以下简称《清单》)加以补充。整体核算包括 2 部分,直接碳排放核算范围为污水处理过程产生的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O;间接碳排放核算的主要范围为电力消耗、药剂消耗、尾水外排以及污泥处理处置产生的 CO<sub>2</sub>。

## 1.3 核算方法及数据来源

### 1.3.1 核算方法

#### (1) 直接碳排放核算

污水处理过程产生的直接碳排放( $E_{直接}$ )核算采用《规范》推荐的方法,计算如式(1)~式(3)。

$$E_{直接} = \sum_{i=1}^t m_{N_2O,i} \times 265 + \sum_{i=1}^t m_{CH_4} \times 28 \quad (1)$$

$$m_{N_2O,i} = Q_{in,i} \times (T_{TNb,i} - T_{TNeb,i}) \times 10^{-6} \times E_{N_2O} E_{N_2O/N_2} \quad (2)$$

$$m_{CH_4,i} = [Q_{in,i} \times (C_{CODra,i} - C_{CODra,i}) \times 10^{-3} - S_i P_{v,i} P_s] \times B_o M_{MCF} - R_{CH_4,i} \times 0.717 \quad (3)$$

其中: $E_{直接}$ ——污水处理厂产生的直接碳排放, kg CO<sub>2</sub> e;

$m_{N_2O}$ ——污水处理厂产生的直接 N<sub>2</sub>O 排放量, kg N<sub>2</sub>O;

$m_{CH_4}$ ——污水处理厂产生的直接 CH<sub>4</sub> 排放量, kg CH<sub>4</sub>;

265——N<sub>2</sub>O 的全球变暖潜能, kg/kg;

28——CH<sub>4</sub> 的全球变暖潜能, kg/kg;

$t$ ——评价周期内日历数, d;

$m_{N_2O,i}$ ——第  $i$  d N<sub>2</sub>O 直接排放量, kg;

$Q_{in,i}$ ——污水生物处理单元第  $i$  d 进水量, m<sup>3</sup>;

$T_{TNb,i}$ ——污水生物处理单元第  $i$  d 平均进水 TN 质量浓度, mg/L;

$T_{TNeb,i}$ ——污水生物处理单元第  $i$  d 平均出水 TN 质量浓度, mg/L;

$E_{N_2O}$ ——N<sub>2</sub>O 排放因子, kg/kg;

$E_{N_2O/N_2}$ ——N<sub>2</sub>O/N<sub>2</sub> 分子量之比, 为 44/28;

$m_{CH_4,i}$ ——第  $i$  d CH<sub>4</sub> 直接排放量, kg CH<sub>4</sub>;

$C_{CODra,i}$ ——污水处理厂第  $i$  d 平均进水 COD 质量浓度, mg/L;

$C_{CODra,i}$ ——污水处理厂第  $i$  d 平均出水 COD 质量浓度, mg/L;

$S_i$ ——污水处理厂第  $i$  d 产生的干污泥量, kg DS;

$P_{v,i}$ ——污水处理厂第  $i$  d 干污泥的有机分, 取 15%<sup>[8]</sup>;

$P_s$ ——污泥中的有机物与 COD 的转化系数, 取 1.42 kg/kg;

$B_o$ ——厌氧过程降解单位 COD 时 CH<sub>4</sub> 的产率系数, 取 0.25 kg/kg;

$M_{MCF}$ ——污水处理过程 CH<sub>4</sub> 修正因子, 取 0.003;

$R_{CH_4,i}$ ——第  $i$  d CH<sub>4</sub> 回收体积, m<sup>3</sup>;

0.717——标准状况(1 个标准大气压和温度 0)下 CH<sub>4</sub> 的密度, kg/m<sup>3</sup>。

#### (2) 间接碳排放核算

生产运行过程中使用外购电力引起的电耗间接碳排放( $E_{电力}$ ), 采用《规范》推荐的方法核算, 核算如式(4)。

$$E_{电力} = \sum_{i=1}^t f_e W_i \quad (4)$$

其中: $E_{电力}$ ——运行期间使用电能产生的间接温室气体排放量, kg CO<sub>2</sub> e;

$W_i$ ——第  $i$  d 净外购电力量, kW·h;

$f_e$ ——外购电力 CO<sub>2</sub> 排放因子, kg/(kW·h)。

生产过程中消耗的化学药剂引起的药耗间接碳排放( $E_{药剂}$ ), 采用《规范》推荐的方法核算, 核算公式如式(5)。

$$E_{药剂} = \sum_{g=1}^m f_{c,g} M_{cg,i} \quad (5)$$

其中: $E_{药剂}$ ——运维期间药剂消耗产生的间接碳排放, kg CO<sub>2</sub> e;

$f_{c,g}$ ——第  $g$  种化学药剂排放因子, kg/kg;

$M_{cg,i}$ ——第  $i$  天使用的第  $g$  种化学药剂

的质量,kg;

$m$ ——化学药剂种类数量。

污泥处理处置过程中引起的间接碳排放( $E_{\text{污泥}}$ )采用《指南》推荐的方法核算,核算公式如式(6)~式(8)。

$$E_{\text{污泥}} = (m_{\text{C-N}_2\text{O}} + m_{\text{in-N}_2\text{O}}) \times 265 \quad (6)$$

$$m_{\text{C-N}_2\text{O}} = M_{\text{SS-c}} E_{\text{N}_2\text{O-c}} \times 10^{-3} \quad (7)$$

$$m_{\text{in-N}_2\text{O}} = M_{\text{SS-in}} E_{\text{N}_2\text{O-in}} \times 10^{-6} \quad (8)$$

其中: $E_{\text{污泥}}$ ——运行期间污泥处理处置间接碳排放,kg CO<sub>2</sub> e;

$m_{\text{C-N}_2\text{O}}$ ——污泥堆肥产生的间接 N<sub>2</sub>O 排放量,kg;

$m_{\text{in-N}_2\text{O}}$ ——污泥焚烧产生的间接 N<sub>2</sub>O 排放量,kg;

$M_{\text{SS-c}}$ ——进行堆肥处理的污泥干重(以 SS 计),kg/a;

$E_{\text{N}_2\text{O-c}}$ ——堆肥中 N<sub>2</sub>O 排放因子,kg/kg;

$M_{\text{SS-in}}$ ——进行焚烧处理的污泥干重(以 SS 计),kg/a;

$E_{\text{N}_2\text{O-in}}$ ——污泥焚烧中 N<sub>2</sub>O 排放因子,kg/kg。

尾水外排引起的间接碳排放( $E_{\text{尾水}}$ )采用《指南》推荐的方法核算,核算如式(9)~式(11)。

$$E_{\text{尾水}} = m_{\text{w-N}_2\text{O}} \times 265 + m_{\text{w-CH}_4} \times 28 \quad (9)$$

$$m_{\text{w-N}_2\text{O}} = Q_{\text{out}} T_{\text{TNinw}} E_{\text{N}_2\text{O, re}} \times 22/14 \times 10^{-3} \quad (10)$$

$$m_{\text{w-CH}_4} = Q_{\text{out}} B_{\text{inw}} E_{\text{CH}_4, \text{re}} \times 10^{-3} \quad (11)$$

其中: $E_{\text{尾水}}$ ——运行期间尾水间接碳排放,kg CO<sub>2</sub> e;

$m_{\text{w-N}_2\text{O}}$ ——尾水排入受纳水体产生的间接 N<sub>2</sub>O 排放量,kg;

$m_{\text{w-CH}_4}$ ——尾水排入受纳水体产生的间接 CH<sub>4</sub> 排放量,kg;

$Q_{\text{out}}$ ——尾水排放量,m<sup>3</sup>;

$T_{\text{TNinw}}$ ——排入受纳水体平均 TN 质量浓度,mg/L;

$E_{\text{N}_2\text{O, re}}$ ——受纳水体中的 N<sub>2</sub>O 排放因子,kg/kg;

$B_{\text{inw}}$ ——排入受纳水体的平均处理出水 BOD<sub>5</sub> 质量浓度,mg/L;

$E_{\text{CH}_4, \text{re}}$ ——受纳水体中的 CH<sub>4</sub> 排放因子,kg/kg。

### (3) 碳排放总量核算

污水处理厂的碳排放总量采用《规范》推荐的方法核算,核算如式(12)。

$$E_{\text{总}} = E_{\text{直接}} + E_{\text{电力}} + E_{\text{药剂}} + E_{\text{污泥}} + E_{\text{尾水}} \quad (12)$$

### (4) 碳排放强度核算

碳排放强度采用《规范》推荐的方法核算,核算如式(13)。

$$I_j = E_j / Q_{\text{in}} \quad (13)$$

其中: $I_j$ —— $j$  排放源碳排放强度,(kg CO<sub>2</sub> e)/m<sup>3</sup>;

$E_j$ —— $j$  排放源碳排放量,kg CO<sub>2</sub> e;

$Q_{\text{in}}$ ——总进水量,m<sup>3</sup>。

### 1.3.2 活动水平数据来源

活动水平数据来源于污水处理厂 2021 年—2023 年在线监测的每日生产报表,数据包括进出水量、进出水污染物浓度、耗电量、药剂消耗量、干污泥产量、排水量等,基础数据如表 2 所示。聚丙烯酰胺(PAM)阳离子用于污泥脱水,PAM 阴离子用于高效沉淀池去除悬浮物(SS)和总磷(TP)。葡萄糖和亚硫酸氢钠用量较少,为便于分析本次核算将葡萄糖(用于补充碳源)归类到碳源,亚硫酸氢钠(用于消毒)归类到次氯酸钠。

### 1.3.3 排放因子数据来源

本文采用的排放因子主要取用《规范》中的参考值,部分排放因子由《指南》和《清单》加以补充,排放因子数据及来源如表 3 所示。

## 1.4 碳排放影响因素分析

### 1.4.1 Kaya 恒等式

Kaya 模型是由学者 Kaya 在 1989 年第 1 次联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的研讨会上首次提出,该模型描述了人口、经济、能源等的内在因素对环境所产生的影响。模型数学表达式如式(14)。

$$C' = P' \times \frac{G'}{P'} \times \frac{E'}{G'} \times \frac{C'}{E'} \quad (14)$$

其中: $C'$ ——CO<sub>2</sub> 的排放量;

$P'$ ——代表人口规模;

$G'$ ——代表国民生产总值;

$E'$ ——代表能源消费总量。

表2 污水处理厂活动水平数据  
Tab. 2 Activity Level Data of WWTP

| 项目   | 2021年<br>均值 | 2022年<br>均值 | 2023年<br>均值 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| 进水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )     | 62 759      | 57 959      | 57 257      |
| 出水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )     | 59 047      | 55 289      | 55 000      |
| 进水 COD/(mg·L <sup>-1</sup> )               | 173. 79     | 164. 14     | 208. 04     |
| 出水 COD/(mg·L <sup>-1</sup> )               | 9. 09       | 9. 04       | 10. 31      |
| 进水 BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | 80. 97      | 88. 17      | 113. 58     |
| 出水 BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | 1. 97       | 1. 63       | 1. 22       |
| 进水氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )                 | 14. 98      | 15. 91      | 15. 11      |
| 出水氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )                 | 0. 14       | 0. 14       | 0. 06       |
| 进水 SS/(mg·L <sup>-1</sup> )                | 70. 31      | 75. 22      | 104. 56     |
| 出水 SS/(mg·L <sup>-1</sup> )                | 1. 67       | 1. 92       | 2. 58       |
| 进水 TP/(mg·L <sup>-1</sup> )                | 1. 97       | 2. 17       | 2. 30       |
| 出水 TP/(mg·L <sup>-1</sup> )                | 0. 03       | 0. 02       | 0. 02       |
| 进水 TN/(mg·L <sup>-1</sup> )                | 20. 50      | 20. 30      | 22. 07      |
| 出水 TN/(mg·L <sup>-1</sup> )                | 4. 45       | 5. 57       | 5. 49       |
| 干污泥量/(kg·d <sup>-1</sup> )                 | 7 553. 16   | 8 145. 61   | 8 594. 91   |
| 焚烧干污泥量/(kg·d <sup>-1</sup> )               | 1 288. 47   | /           | /           |
| 堆肥干污泥量/(kg·d <sup>-1</sup> )               | 6 264. 69   | 8 145. 61   | 8 594. 91   |
| 耗电量/[ (kW·h) ·d <sup>-1</sup> ]            | 12 433      | 12 261      | 13 044      |
| PAM 阳离子用量/(kg·d <sup>-1</sup> )            | 23. 40      | 17. 53      | 16. 99      |
| PAM 阴离子用量/(kg·d <sup>-1</sup> )            | 15. 57      | 11. 58      | 20. 14      |
| 聚合氯化铝(PAC)用量/(kg·d <sup>-1</sup> )         | 1 935. 64   | 3 234. 11   | 2 944. 49   |
| 碳源用量/(kg·d <sup>-1</sup> )                 | 2 693. 53   | 2 532. 14   | 2 356. 79   |
| 次氯酸钠用量/(kg·d <sup>-1</sup> )               | 2 008. 93   | 2 042. 41   | 1 960. 66   |

表3 排放因子数据

Tab. 3 Data of Emission Factors

| 排放源        | 排放因子   | 数值       | 排放因子数据来源               |
|------------|--|----------|------------------------|
| $E_{直接}$   | $N_2O/[kg N_2O-N \cdot (kg TN)^{-1}]$                      | 0. 016   | 《污水处理厂低碳运行评价技术规范》      |
|            | $N_2O$ 温室效应指数/[ $kg CO_2 \cdot (kg N_2O)^{-1}$ ]           | 265      |                        |
|            | 污泥中的有机物与 COD 的转化系数/[ $kg COD \cdot (kg DS)^{-1}$ ]         | 1. 42    |                        |
|            | 厌氧过程降解单位 COD 时 $CH_4$ 的产率系数/[ $(kg CH_4) \cdot COD^{-1}$ ] | 0. 25    |                        |
|            | 污水处理过程 $CH_4$ 修正因子   | 0. 003   |                        |
| $E_{CH_4}$ | $CH_4$ 温室效应指数/[ $kg CO_2 \cdot (kg CH_4)^{-1}$ ]           | 28       |                        |
|            |  |          |                        |
| $E_{电力}$   | 电力/[ $kg CO_2 \cdot (kW \cdot h)^{-1}$ ]                   | 0. 125 5 | 《2021 年省级电力平均二氧化碳排放因子》 |
| $E_{药剂}$   | PAM/[ $(kg CO_2) \cdot kg^{-1}$ ]                          | 1. 5     | 《污水处理厂低碳运行评价技术规范》      |

## 1. 4. 2 Kaya 恒等式拓展

对污水处理厂运维过程产生的  $E_{直接}$ 、 $E_{电力}$ 、 $E_{药剂}$ 、 $E_{污泥}$  和  $E_{尾水}$  进行 Kaya 恒等式拓展,其表达式如式(15)。

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 = \frac{C_1}{E} \times \frac{E}{P} \times P + \frac{C_2}{P} \times P + \frac{C_3}{P} \times P + \frac{C_4}{P} \times P + \frac{C_5}{P} \times P = I_1 Q_1 P + Q_2 P + Q_3 P + Q_4 P + Q_5 P \quad (15)$$

其中: $C$ ——污水处理厂碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$C_1$ ——直接碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$C_2$ ——电耗间接碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$C_3$ ——药耗间接碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$C_4$ ——污泥处理处置间接碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$C_5$ ——尾水间接碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$E$ ——去除污染物总量,t;

$P$ ——进水规模,m<sup>3</sup>;

$I_1$ ——去除每 m<sup>3</sup> 污染物的质量,t;

$Q_1$ ——去除每 m<sup>3</sup> 污染物的碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$Q_2$ ——处理每 m<sup>3</sup> 污水消耗的电力碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$Q_3$ ——处理每 m<sup>3</sup> 污水消耗的药剂碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$Q_4$ ——每 m<sup>3</sup> 尾水外排碳排放量,t  $CO_2 e$ ;

$Q_5$ ——每 m<sup>3</sup> 污泥处理处置碳排放量,t  $CO_2 e$ 。

(续表3)

| 排放源             | 排放因子  | 数值      | 排放因子数据来源                         |
|-----------------|---|---------|----------------------------------|
| $E_{\text{药剂}}$ | 乙酸钠/[ $(\text{kg CO}_2) \cdot \text{kg}^{-1}$ ]       | 1.6     |                                  |
|                 | 次氯酸钠/[ $(\text{kg CO}_2) \cdot \text{kg}^{-1}$ ]      | 0.92    |                                  |
|                 | PAC/[ $(\text{kg CO}_2) \cdot \text{kg}^{-1}$ ]       | 1.62    |                                  |
|                 | 葡萄糖/[ $(\text{kg CO}_2) \cdot \text{kg}^{-1}$ ]       | 1.6     |                                  |
| $E_{\text{污泥}}$ | $\text{CH}_4/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$        | 0.99    | 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》 |
|                 | $\text{N}_2\text{O}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$ | 0.000 9 |                                  |
|                 | 污泥中干物质含碳比例(CF)  | 30%     |                                  |
| $E_{\text{尾水}}$ | $\text{CH}_4/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$        | 0.114   | 《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》             |
|                 | $\text{N}_2\text{O}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$ | 0.005   |                                  |

污水处理厂各过程碳排放量及其影响因素如表 4 所示。

表 4 污水处理厂 CO<sub>2</sub> 排放量及其影响因素  
Tab. 4 CO<sub>2</sub> Emissions and the Influencing Factors in WWTPs

| 变量符号  | 2021 年     | 2022 年     | 2023 年     |
|---|------------|------------|------------|
| $C/(\text{t CO}_2 \text{ e})$                         | 7 558      | 7 891      | 7 948      |
| $C_1/(\text{t CO}_2 \text{ e})$                       | 2 520      | 2 129      | 2 350      |
| $C_2/(\text{t CO}_2 \text{ e})$                       | 570        | 562        | 598        |
| $C_3/(\text{t CO}_2 \text{ e})$                       | 3 465      | 4 153      | 3 947      |
| $C_4/(\text{t CO}_2 \text{ e})$                       | 335        | 339        | 306        |
| $C_5/(\text{t CO}_2 \text{ e})$                       | 669        | 709        | 748        |
| $E/\text{t}$  | 4 108      | 3 564      | 4 415      |
| $P/\text{m}^3$  | 22 861 300 | 21 070 044 | 20 905 716 |
| $I_1/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$                  | 7.417 20   | 7.173 51   | 6.652 10   |
| $Q_1/[(\text{t CO}_2 \text{ e}) \cdot \text{m}^{-3}]$ | 0.002 17   | 0.002 04   | 0.002 57   |
| $Q_2/[(\text{t CO}_2 \text{ e}) \cdot \text{m}^{-3}]$ | 0.000 30   | 0.000 32   | 0.000 34   |
| $Q_3/[(\text{t CO}_2 \text{ e}) \cdot \text{m}^{-3}]$ | 0.001 80   | 0.002 37   | 0.002 29   |
| $Q_4/[(\text{t CO}_2 \text{ e}) \cdot \text{m}^{-3}]$ | 0.000 18   | 0.000 19   | 0.000 18   |
| $Q_5/[(\text{t CO}_2 \text{ e}) \cdot \text{m}^{-3}]$ | 0.000 35   | 0.000 40   | 0.000 43   |

1.4.3 灰色关联分析

灰色关联分析是通过计算灰色关联度来反映 2 个因素之间的关联程度,利用灰色关联度顺序来描述各因素之间关系的强弱次序<sup>[9]</sup>。本研究运用灰色关联分析法分析污水处理厂碳排放与各影响因素之间相关联程度,进而为下一步提出具有针对性的节能减排措施对策提供科学依据。具体计算过程如下。

(1)将表 4 中的  $C$  作为参考数列,用  $Y$  表示, $Y=Y(k), k=1, 2, \dots, n$ ;

(2)将表 4 中的  $P, I_1, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  和  $Q_5$  作为比较数列,用  $X_i$  表示, $X_i=X_i(k), k=1, 2, \dots, n, i=1, 2, \dots, m$ 。

(3)对现有数据进行无量纲化处理,得到初值化序列,计算如式(16)。

$$X_i = \frac{X_i(k)}{X_i(1)} \quad k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m \tag{16}$$

(4)计算关联度系数,计算公式如式(17)。

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |Y(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |Y(k) - X_i(k)|}{|Y(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |Y(k) - X_i(k)|} \tag{17}$$

其中: $\varepsilon_i(k)$  ——  $X_i$  对  $X_i$  关于  $k$  指标的关联度系数;

$\rho$  ——分辨系数,通常  $\varepsilon \in [0, 1]$ ,由于  $\rho$  的取值对最终结果无影响,为方便计算,本次  $\rho$  取 0.45。

(5)计算各因素与污水处理厂碳排放间的关联程度,计算如式(18)。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad k=1, 2, \dots, n \tag{18}$$

其中: $r_i$  ——各影响因素;

$n$  ——计算周期内年份数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污水处理厂运维阶段碳排放整体特征分析

#### 2.1.1 年度碳排放量及碳排放强度分析

##### (1) 年度碳排放量分析

如表5所示,2021年—2023年污水处理厂碳排放量整体呈上升趋势,各年度排放总量分别为7 557.98、7 891.44 t CO<sub>2</sub>e和7 848.69 t CO<sub>2</sub>e。各年度排放量中  $E_{\text{药剂}}$  分别占比45.84%、52.63%和

49.01% [图2(a)、图2(b)、图2(c)],3年累积排放量中  $E_{\text{药剂}}$  占比最高,达总排放量的49.21% [图2(d)],是污水处理厂的主要排放源。随着我国污水处理厂对氮、磷等污染物管控标准日渐严苛,为保障出水污染物浓度符合要求,通常需要投加大量外部碳源和化学除磷剂<sup>[10]</sup>,药剂的消耗引发GHG的排放,从而促使  $E_{\text{药剂}}$  成为污水处理厂碳排放的主要来源。

表5 污水处理厂碳排放核算结果(单位:t CO<sub>2</sub>e)  
Tab. 5 Carbon Emission Accounting Results of WWTPs (Unit: t CO<sub>2</sub>e)

| 项目    | $E_{\text{总}}$ | $E_{\text{直接}}$ | $E_{\text{电力}}$ | $E_{\text{药剂}}$ | $E_{\text{尾水}}$ | $E_{\text{污泥}}$ |
|-------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2021年 | 7 557.98       | 2 519.69        | 569.52          | 3 464.84        | 335.19          | 668.74          |
| 2022年 | 7 891.44       | 2 128.93        | 561.65          | 4 153.18        | 338.59          | 709.10          |
| 2023年 | 7 848.69       | 2 350.34        | 597.51          | 3 846.26        | 306.38          | 748.21          |
| 合计    | 23 298.11      | 6 998.96        | 1 728.68        | 11 464.28       | 980.16          | 2 126.05        |

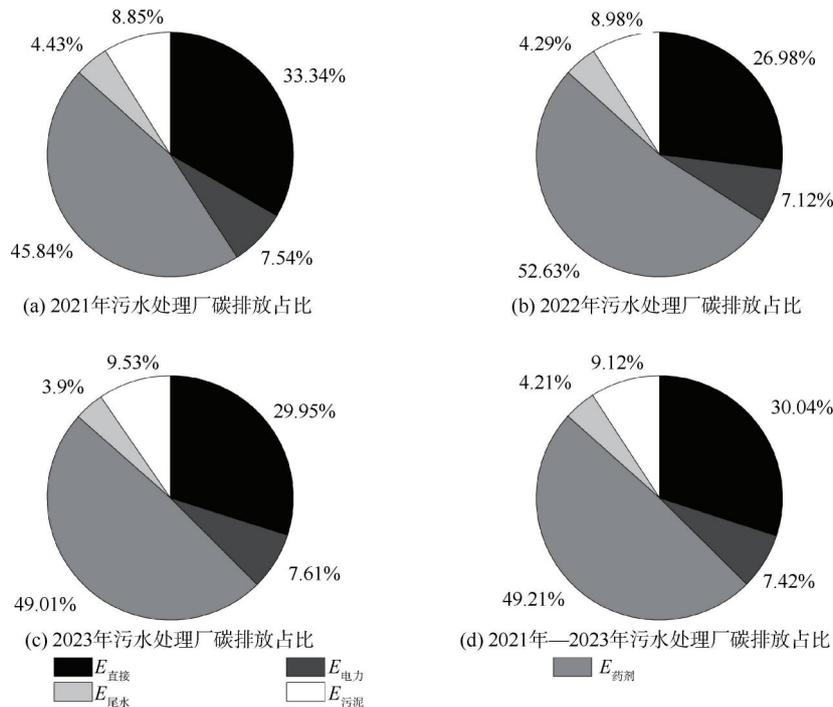


图2 污水处理厂各年度碳排放量占比分布

Fig. 2 Proportion Distribution of Carbon Emissions from WWTPs in Each Year

3年累积排放量中  $E_{\text{直接}}$  仅次于  $E_{\text{药剂}}$ , 占总排放量的30.04% [图2(d)]; 2021年—2023年度排放量中  $E_{\text{直接}}$  分别占比33.34%、26.98%和29.95% [图2(a)、图2(b)、图2(c)], 是污水处理厂碳排放的重要来源。N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的排放通常与污水中TN和COD 2种污染物浓度有关<sup>[11]</sup>。如图2所示, 相较于其他2年, 2022年  $E_{\text{直接}}$  占比显著降低, 其原因是

2022年TN和COD的平均进水浓度明显降低(表2)。电力消耗、污泥处理处置以及尾水外排引起的排放占比较少, 仅占累积排放量的7.42%、9.12%和4.21% [图2(d)]。

##### (2) 年度碳排放强度分析

如图3所示, 2021年—2023年污水处理厂碳排放强度整体呈上升趋势, 从2021年的0.330

(kg CO<sub>2</sub>e)/m<sup>3</sup> 升至 2023 年的 0.374 (kg CO<sub>2</sub>e)/m<sup>3</sup>, 增幅为 13.33%, 主要由 E<sub>药剂</sub> 强度的升高引起。各年度 E<sub>药剂</sub> 强度呈现先升后降的趋势, 整体增幅

为 22.00%, 其中 2022 年排放强度最高为 0.197 (kg CO<sub>2</sub>e)/m<sup>3</sup>(图 3)。其余过程的碳排放强度年度变化并不明显。

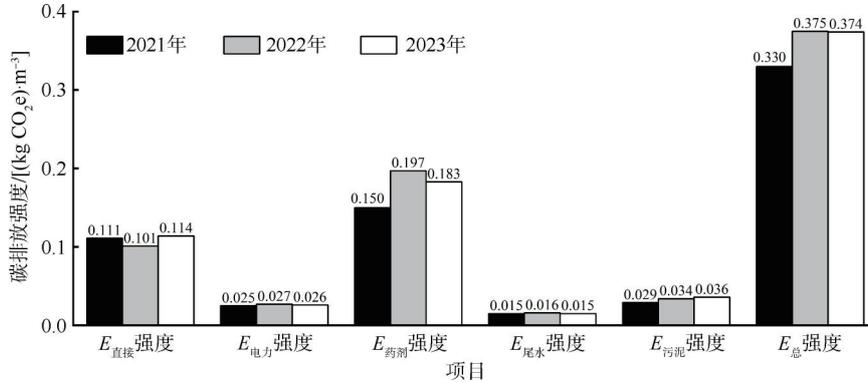


图 3 2021 年—2023 年碳排放强度特征

Fig. 3 Carbon Emission Intensity Characteristic from 2021 to 2023

2.1.2 月度碳排放量及碳排放强度特征分析

本文核算了 2021 年—2023 年污水处理厂逐月碳排放量及碳排放强度, 各年度逐月碳排放特征如图 4 所示, 2021 年碳排放量季节性波动较为明显, 排放低值出现在 2 月, 峰值出现在 12 月; 2022 年各

因素逐月排放特征受季节波动较小, 月数据波动不大, 温室气体排放高峰期主要集中在上半年度; 相反, 2023 年碳排放量较高的月份集中在 10 月—12 月。

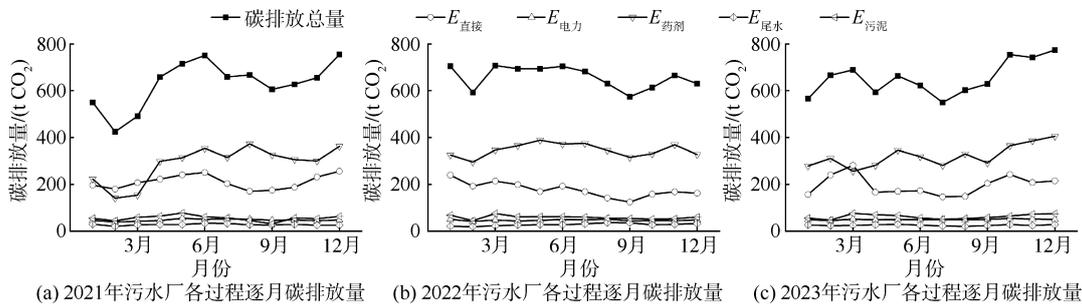


图 4 2021 年—2023 年各过程逐月排放特征

Fig. 4 Monthly Emission Characteristics of Each Process from 2021 to 2023

2021 年 2 月污水处理厂排放量为 425.02 t CO<sub>2</sub>e, 碳排放强度为 0.27 (kg CO<sub>2</sub>e)/m<sup>3</sup>(表 6)。污水处理厂各因素逐月特征显示(图 5), 2 月污水进水量较低[图 5(d)], 减少了 E<sub>药剂</sub>、E<sub>尾水</sub> 以及 E<sub>污泥</sub> 的排放[图 4(a)], 从而降低了月度碳排放量。2021 年 12 月排放量为 754.36 t CO<sub>2</sub>e, 排放强度为 0.4 (kg CO<sub>2</sub>e)/m<sup>3</sup>(表 6), 进水污染物浓度的升高[图 5(a)], 需要加大药剂的使用[图 5(c)], 以去除污水中的污染物, 从而导致碳排放量升高。

2022 年 3 月碳排放最高, 排放量为 707.16 t CO<sub>2</sub>e(表 6); 最低排放月份为 9 月, 排放量为 574.40 t CO<sub>2</sub>e(表 6), 主要由 E<sub>直接</sub> 的变化所引起。

在确保出水水质稳定的情况下, COD 和 TN 进水浓度的升高会导致 E<sub>直接</sub> 增加, 3 月 COD 和 TN 进水浓度处于高峰期, 9 月 COD 和 TN 进水浓度最低[图 5(b)], 是影响 2022 年月度排放存在差异的关键因素。

2023 年排放峰值出现在 12 月, 碳排放量为 773.49 t CO<sub>2</sub>e, 排放强度为 0.47 (kg CO<sub>2</sub>e)/m<sup>3</sup>(表 6)。冬季温度较低时微生物间的黏性降低, 活性污泥难以凝结, 污泥沉降性能下降, 为避免影响出水水质, 需要额外投加药剂以提升污泥沉降效率<sup>[12]</sup>, 此时药剂消耗阶段排放量升高[图 4(c)], 导致月度碳排放量上升。7 月排放量最低, 为 549.91 t CO<sub>2</sub>e

表6 污水处理厂逐月碳排放特征

Tab. 6 Monthly Carbon Emission Characteristics of WWTPs

| 月份  | 碳排放量/(t CO <sub>2</sub> e) |        |        | 碳排放强度/[(kg CO <sub>2</sub> e)·m <sup>-3</sup> ] |       |       |
|-----|----------------------------|--------|--------|---|-------|-------|
|     | 2021年                      | 2022年  | 2023年  | 2021年   | 2022年 | 2023年 |
| 1月  | 549.91                     | 704.4  | 566.09 | 0.33  | 0.38  | 0.34  |
| 2月  | 425.02                     | 592.5  | 666.25 | 0.27  | 0.39  | 0.44  |
| 3月  | 490.75                     | 707.16 | 688.98 | 0.27  | 0.41  | 0.4   |
| 4月  | 658.47                     | 694.14 | 592.9  | 0.35  | 0.41  | 0.32  |
| 5月  | 715.26                     | 693.93 | 662.88 | 0.35  | 0.37  | 0.34  |
| 6月  | 750.29                     | 704.08 | 622.09 | 0.38  | 0.41  | 0.34  |
| 7月  | 659.43                     | 682.13 | 549.91 | 0.31  | 0.38  | 0.29  |
| 8月  | 667.15                     | 630.47 | 601.93 | 0.32  | 0.34  | 0.33  |
| 9月  | 605.44                     | 574.40 | 628.51 | 0.32  | 0.33  | 0.37  |
| 10月 | 626.86                     | 613.16 | 753.77 | 0.31  | 0.35  | 0.43  |
| 11月 | 655.04                     | 665.13 | 741.9  | 0.35  | 0.38  | 0.48  |
| 12月 | 754.36                     | 629.93 | 773.49 | 0.4   | 0.36  | 0.47  |

(表6),其主要原因是 $E_{直接}$ 较低。

### 2.1.3 药剂间接碳排放特征分析

如表7所示,2021年—2023年药剂消耗量及碳排放量整体呈上升趋势,药剂消耗量由2021年的2 437.14 t上升至2023年的2 664.16 t,增幅为9.32%;碳排放量由3 464.84 t上升至3 846.26 t,增幅为11.01%(表7)。其中PAC消耗量及碳排放量整体呈上升趋势,其余药剂均呈下降趋势。如图6所示,PAC消耗量增长52.12%,碳排放量增长34.26%。这是由于TP的平均进水质量浓度由2021年的1.97 mg/L上升至2023年的2.30 mg/L(图7),用于降低污水中TP浓度的PAC用量也随之增多<sup>[13]</sup>。

2022年消耗药剂量为2 865.79 t,较2021年同比增长17.59%;碳排放量为4 153.18 t CO<sub>2</sub> e,同比增长19.87%(表7和图8)。TP平均进水浓度的上

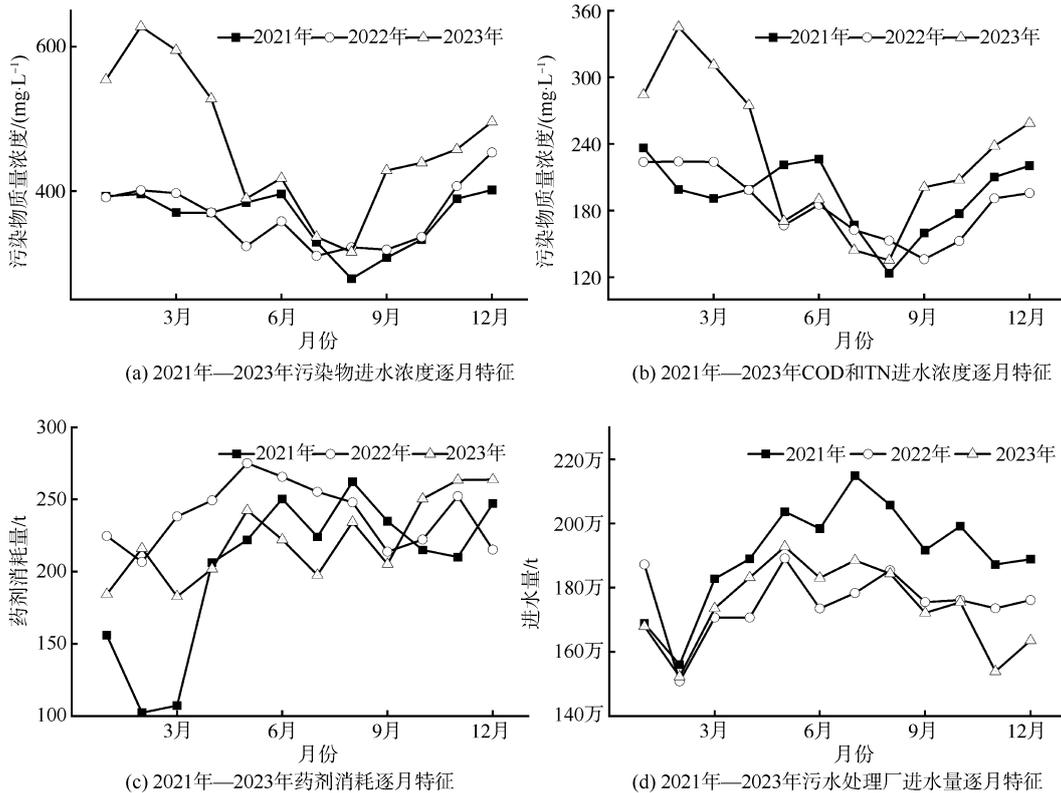


图5 2021年—2023年污水处理厂各因素逐月特征

Fig. 5 Monthly Characteristics of Various Factors in WWTPs from 2021 to 2023

升促使PAC消耗量及碳排放量增加(表7和图7),是药耗量与碳排放量上升的主要原因。

2023年药剂消耗量较2022年同比下降7.04%,碳排放量同比下降7.39%(图8),PAC与碳

源投加量降低是药耗量及碳排放量下降的主要原因。如图8所示,PAC消耗量及碳排放量同比下降8.96%和9.43%,PAC除用于去磷外还用于污泥沉降,低温情况下污泥沉降性能下降,使得二沉池的泥

表 7 污水处理厂药剂消耗量及碳排放量

Tab. 7 Chemical Consumption and Carbon Emissions of WWTPs

| 项目   | 消耗量/t    |          |          | 碳排放量/(t CO <sub>2</sub> e) |          |          |
|------|----------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|
|      | 2021年    | 2022年    | 2023年    | 2021年                      | 2022年    | 2023年    |
| PAM  | 14.23    | 10.63    | 13.55    | 21.34                      | 15.94    | 20.33    |
| PAC  | 706.51   | 1 180.45 | 1 074.74 | 1 144.55                   | 1 922.33 | 1 741.08 |
| 碳源   | 983.14   | 927.23   | 860.23   | 1 573.02                   | 1 483.57 | 1 376.37 |
| 次氯酸钠 | 733.26   | 745.28   | 715.64   | 725.93                     | 737.83   | 708.48   |
| 合计   | 2 437.14 | 2 865.79 | 2 664.16 | 3 464.84                   | 4 153.18 | 3 846.26 |

水分离,影响出水效果<sup>[12]</sup>,适当增加 PAC 的使用能有效避免污泥流失,确保出水水质稳定。数据显示,2022 年冬季进水量较 2023 年更高[图 5(d)],需要沉降的污泥量增加,是影响 PAC 投加的主要原因。碳源消耗量及碳排放量同比下降 7.23%(图 8),通常碳源投加受进水 BOD<sub>5</sub> 浓度与进水 TN 浓度比值(BOD<sub>5</sub>/TN)的影响,当 BOD<sub>5</sub>/TN 较低时往往会导致出水氨氮超标<sup>[14]</sup>,为了满足污水处理厂出水水质达标,需向生物处理系统中投加额外的有机碳源来

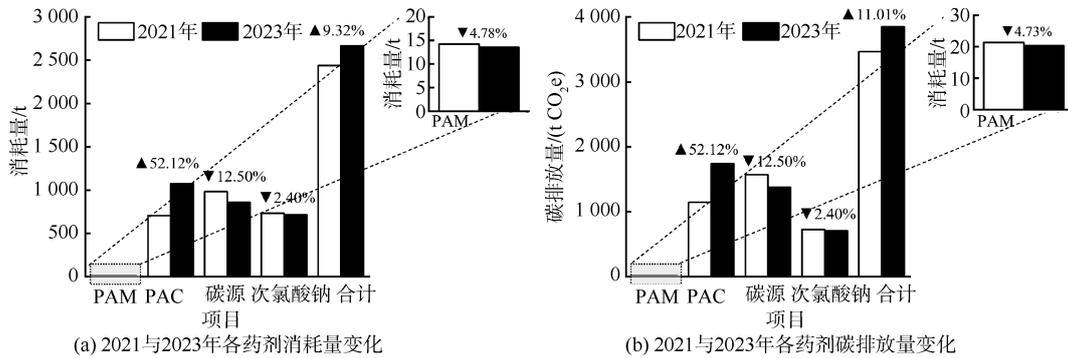


图 6 2021 年—2023 年各药剂消耗量及碳排放量变化图

Fig. 6 Changes of Consumption and Carbon Emissions of Various Chemicals from 2021 to 2023

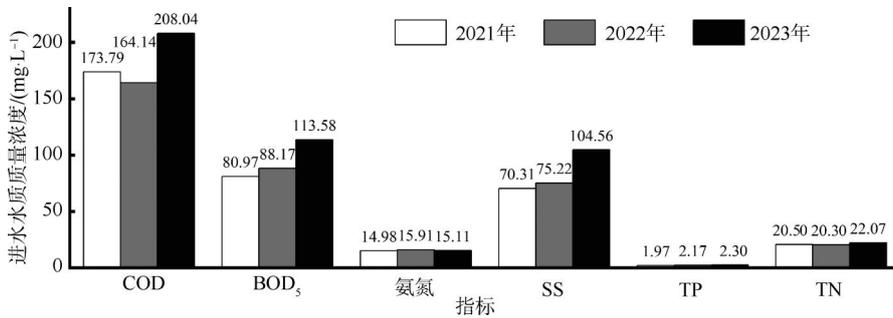


图 7 2021 年—2023 年污染物进出水水质浓度

Fig. 7 Pollutants Influent and Effluent Quality Concentrations from 2021 to 2023

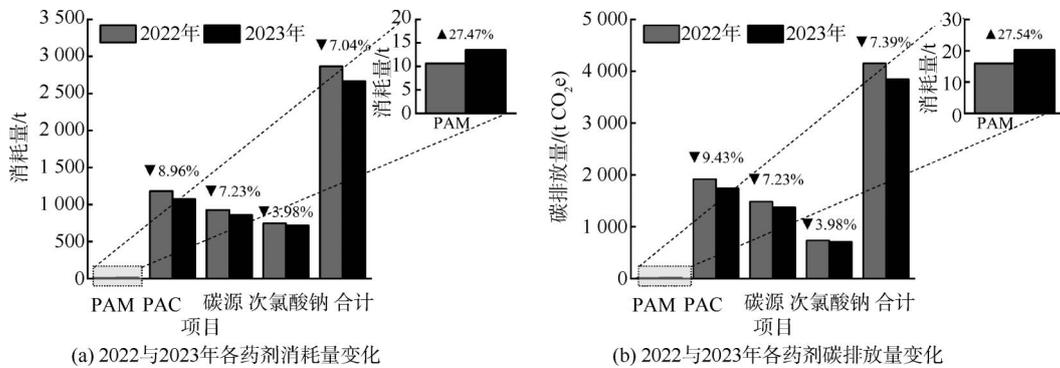


图 8 2022 年—2023 年各药剂消耗量及碳排放量变化

Fig. 8 Changes of Consumption and Carbon Emissions of Various Chemicals from 2021 to 2022

提高氨氮去除率<sup>[14-15]</sup>。2023年  $BOD_5/TN$  (为 5.15) 较 2022 年  $BOD_5/TN$  (为 4.34) 有所增加,减少一定程度的碳源投加,仍可保障出水浓度达标。相反,PAM 消耗量及碳排放量呈上升趋势,消耗量同比增长 27.47% [图 8(a)]。这是由于 2023 年的 SS 平均进水浓度增加(图 7),用于处理污水中 SS 的 PAM 阴离子使用量也随之升高,由 2022 年的 4.23 t 升至 2023 年的 7.35 t (图 6)。

## 2.2 污水处理厂运维阶段碳排放主要影响因素分析

表 8 为灰色关联度分析结果,结果显示  $\gamma_6 > \gamma_4 > \gamma_2 > \gamma_3 > \gamma_1 > \gamma_7 > \gamma_5$ , 即与污水处理厂碳排放关联程度最高的因素为每  $m^3$  尾水外排碳排放量 ( $Q_4$ ), 其次为处理每  $m^3$  污水消耗的电力碳排放量 ( $Q_2$ ) 和去除每  $m^3$  污染物 (COD、TN) 的量 ( $I_1$ ), 随后是去除每  $m^3$  污染物的碳排放质量 ( $Q_1$ ) 和进水规模 ( $P$ ), 最后为每  $m^3$  污泥处理处置碳排放量 ( $Q_5$ ) 和药剂间接碳排放强度 ( $Q_3$ )。  $E_{尾水}$  主要受污水处理厂的出水量、 $BOD_5$  出水浓度以及 TN 出水浓度影响,三者通常与污水处理厂的设计出水标准密切相关,为改善我国水污染的问题,污水处理厂开始提升出水水质排放标准<sup>[4]</sup>,直接影响  $Q_4$ ,改变污水处理厂的 GHG。  $I_1$  与污染物进出水浓度差异值呈正相关,出水标准的提升会进一步加剧污染物进出水浓度差异值,促使  $I_1$  升高,为改善水质满足出水标准,需加大药剂投加量,从而引起  $E_{药剂}$  的升高,最终影响污水处理厂的 GHG。进水污染物浓度会增加污水处理厂电力消耗,是  $Q_2$  升高的主要原因。

表 8 灰色关联度计算结果

Tab. 8 Grey Correlation Calculation Results

| 因素    | 关联程度定义     | 关联程度    |
|-------|------------|---------|
| $P$   | $\gamma_1$ | 0.656 6 |
| $I_1$ | $\gamma_2$ | 0.684 6 |
| $Q_1$ | $\gamma_3$ | 0.671 8 |
| $Q_2$ | $\gamma_4$ | 0.791 2 |
| $Q_3$ | $\gamma_5$ | 0.556 2 |
| $Q_4$ | $\gamma_6$ | 0.809 4 |
| $Q_5$ | $\gamma_7$ | 0.649 8 |

## 3 减排路径分析

### 3.1 处理工艺优化

尽管 AAO 工艺是市政污水处理厂中应用最广

泛的生物污水处理工艺<sup>[16-18]</sup>,能有效控制污水中的污染物浓度,但工艺过程中产生的 GHG 排放较高,难以实现污水处理厂“碳中和”目标。本污水处理厂核算结果表明,AAO 工艺中的 GHG 主要来源于  $E_{直接}$  和  $E_{药剂}$ ,  $E_{直接}$  与污水中 TN 和 COD 浓度有关(表 2 和图 2),而除磷剂与碳源的投加是影响  $E_{药剂}$  的主要因素(图 8)。

通常污水中缺乏充足的碳源<sup>[19-20]</sup>,从而阻碍了反硝化和除磷的有效率<sup>[21-22]</sup>,通过优化工艺来提升污水中碳源利用率不仅能有效促进反硝化<sup>[23-24]</sup>,减少  $N_2O$  排放,还能促进除磷有效率,减少对外部碳源以及除磷剂的依赖,从而降低  $E_{药剂}$ 。将水解酸化池作为 AAO 的预处理单元,通过水解酸化池提升污水中碳源的利用是目前较为广泛的优化措施<sup>[25]</sup>。水解酸化池能促进有机物的水解和酸化,提高污水中的挥发性脂肪酸(VFAs)的浓度,而 VFAs 是反硝化和生物除磷的关键碳源。相较于传统的水解酸化池,由连续搅拌槽反应器(CSTR)和布介质过滤器组成的创新厌氧过滤器水解酸化池(AnF)能更好地控制和维持高浓度的污泥产量<sup>[26]</sup>,适当的污泥浓度可以提高微生物活性<sup>[27-28]</sup>,从而加速有机物的分解,减少生化处理阶段的 GHG 排放。

### 3.2 降低电力消耗

本污水处理厂曝气系统采用传统的罗茨鼓风机进行曝气,这类风机的效率低、耗电多,生产成本高<sup>[29]</sup>。污水处理厂主要电耗来自曝气系统,能耗约占污水处理厂总能耗的 50%<sup>[30]</sup>。采用高效的空气悬浮风机或磁悬浮风机替代罗茨鼓风机,能有效降低曝气系统的能耗<sup>[29,31-32]</sup>。除设备更新,采用精确曝气技术,也是有效降低曝气系统能耗的有效手段之一<sup>[30,33]</sup>。利用污水处理厂厂区屋顶和污水构筑物上方的空间,安装分布式太阳能发电设施,能有效减少火电使用带来的碳排放<sup>[34]</sup>。

### 3.3 降低药剂消耗

本污水处理厂药剂采用人工隔膜计量泵的方式进行投加,这种方式难以确保药剂均匀、连续和稳定地注入<sup>[35]</sup>,影响污水处理效果,造成药剂浪费,增加运维成本和碳排放。而基于前馈、反馈及数学预测模型的自动控制技术和智能加药技术<sup>[36]</sup>,能有效降低污水处理厂药剂的消耗。例如,基于实时监测在线数据的碳源投加智能控制算法,碳源(乙酸钠)日均投加量降低了 21.2%<sup>[37]</sup>,而采用出水动态反馈自

动控制加药系统,实现节约除磷剂 16%<sup>[38]</sup>,基于化学除磷模型和在线传感器的智能控制加药优化系统,实现节约除磷药剂达到 40%~50%<sup>[39]</sup>,以神经网络为基础两段式 PAC 投药量预测模型,实现 PAC 药剂量的节约<sup>[40]</sup>。此外利用新兴人工智能(AI)形成最优算法模型对加药系统进行精细化控制,也能有效降低药剂消耗以及设备的能耗<sup>[41]</sup>。改变落后药剂投加模式,是降低药剂消耗和碳排放的有效手段之一。

### 3.4 热能回收和水资源化利用

我国各大城市的污水排热量占城市总排热量的 10%~16%,呈现逐年增加的趋势<sup>[42]</sup>。城市污水流量稳定,冬暖夏凉<sup>[43]</sup>,温度波动小,除满足厂区需求制冷和制热外,还可扩大输出范围<sup>[44]</sup>。而污水厂处理的中水或二级出水进入能提升热泵系统的安全性<sup>[45]</sup>,满足作为水源热泵系统利用的水源<sup>[46]</sup>。如污水热能利用列入政府“核证减排量(CRE)”,能帮助污水处理厂间接实现“碳中和”运行目标和“扭亏为盈”<sup>[47]</sup>。

研究表明,我国城市和县镇公共供水系统全生命周期的单位供水量碳排放量为 0.294~0.335 kg CO<sub>2</sub>e<sup>[48]</sup>,如按照尾水 10 000 m<sup>3</sup>/d 的资源化利用规模进行估算,每年能减少供水系统碳排放量为 1 164 t CO<sub>2</sub>e。通过对污水处理厂污水中的热源和尾水的资源化利用,不仅能减少水资源的消耗,还能带来可观的减排效益,是有效的节能降碳措施之一。

## 4 结论

(1)年度碳排放核算结果显示,污水处理厂碳排放量及碳排放强度整体呈上升趋势,主要由  $E_{\text{药剂}}$  的增长引起。进水污染物浓度的增加是药剂消耗增长的主要原因。对各年度逐月碳排放量的分析表明,其主要受进水量、污染物进水浓度及温度影响。随着进水量的降低,与之关联的药剂投加量、尾水外排量以及污泥处置量均相应减少,进而降低  $E_{\text{药剂}}$ 、 $E_{\text{尾水}}$  以及  $E_{\text{污泥}}$  的排放[图 4(a)],碳排放总量也随之降低;污染物进水浓度的升高通常需要增加药剂的投入[图 5(a)、图 5(c)],以确保出水浓度达标,从而促使  $E_{\text{药剂}}$  增长,引起碳排放总量升高;温度较低时,污泥中的微生物活性减弱,活性污泥凝结及沉降速率减缓,使得对絮凝药剂的依赖程度加剧,引发  $E_{\text{药剂}}$  增加,进而造成碳排放总量上升。

(2)分析各因素与污水处理厂碳排放量的关联程度发现,单位尾水外排的碳排放是影响污水处理厂 GHG 排放的主要因素。随着国家及地方层面对污水厂污染物排放浓度要求的持续提升,污水处理厂面临着更为严苛的尾水外排标准,未达标的深度处理工艺往往伴随着更多的能源消耗以及大量的药剂使用<sup>[4]</sup>,这一过程直接或间接导致 GHG 的增加。合理制定排污标准,优化处理工艺、降低电力和药剂消耗,以及开展热能回收和水资源化利用等措施,能促使污水处理厂在削减污染物的同时,有效控制 GHG 增量,以契合可持续发展的多元需求。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 周曼. 某污水处理厂碳排放核算研究[J]. 广东化工, 2022, 49(5): 132-134.  
ZHOU M. Study on carbon emission accounting of a sewage treatment plant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(5): 132-134.
- [4] 郭怡. 高标准出水对污水厂实现双碳目标的影响及减排对策分析[J]. 净水技术, 2022, 41(s2): 111-114, 126.  
GUO Q. Impact of high standard effluent on the realization of carbon peak and carbon neutrality target of WWTP and analysis of emission reduction measures [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s2): 111-114, 126.
- [5] 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]. 北京: 中国标准出版社, 2022.  
China Association of Environmental Protection Industry. Technical specification for low-carbon operation evaluation of sewage treatment plant: T/CAEPI 49—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [6] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳排放核算与减排路径技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.  
China Urban Water Association. Guidelines for carbon accounting and emission reduction in the urban water sector [M]. Beijing:

- China Architecture & Building Press, 2022.
- [ 7 ] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [EB/OL]. [ 2024-09-14 ]. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- [ 8 ] 张翔宇, 范业弘, 朱晗彬, 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.
- [ 9 ] 周珊珊, 马海彬, 门国明. 基于灰色关联分析的公共建筑工程碳排放评价[J]. 华北科技学院学报, 2023, 20(4): 89-95.
- ZHOU S S, MA H B, MEN G M. Carbon emission evaluation of public building projects based on grey correlation analysis[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2023, 20(4): 89-95.
- [ 10 ] 赵莎, 刘文, 冯玲玲, 等. 化学药剂在城镇污水处理厂脱氮除磷中的应用研究[J]. 山东化工, 2022, 51(5): 243-245.
- ZHAO S, LIU W, FENG L L, et al. Application of chemical agents in nitrogen and phosphorus removal in urban sewage treatment plant [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(5): 243-245.
- [ 11 ] XI J R, GONG H, ZHANG Y J, et al. The evaluation of GHG emissions from Shanghai municipal wastewater treatment plants based on IPCC and operational data integrated methods (ODIM) [J]. Science of the Total Environment, 2021, 797: 148967. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148967.
- [ 12 ] 杨德信, 韦树妮. 北方城市污水处理厂冬季污泥的特性[J]. 化工管理, 2019(7): 38-39.
- YANG D X, WEI S N. Characteristics of winter sludge from wastewater treatment plants in northern cities [J]. Chemical Engineering Management, 2019, (07): 38-39.
- [ 13 ] 陈智超, 陈坤, 杨承峰, 等. 磁混凝工艺在山东某污水处理厂提标改造中的应用[J]. 工业水处理, 2023, 43(3): 181-185.
- CHEN Z H, CHEN K, YANG C F, et al. Application of magnetic coagulation process in upgrading and renovation of a sewage treatment plant in Shandong [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(3): 181-185.
- [ 14 ] 邹杰. 污水处理厂碳源投加对除磷脱氮效果的研究[J]. 化工管理, 2016(12): 193-193.
- ZOU J. Effect of carbon source dosing on phosphorus and nitrogen removal in wastewater treatment plant [J]. Chemical Enterprise Management, 2016(12): 193-193.
- [ 15 ] 朱苏鹏, 郭海娟, 马放, 等. 东北地区某城镇污水处理厂碳源投加策略分析[J]. 环境保护科学, 2024, 50(3): 82-88.
- ZHU S P, GUO H J, MA F, et al. Strategy analysis of carbon source addition in a municipal sewage treatment plant in Northeast China[J]. Environmental Protection Science, 2024, 50(3): 82-88.
- [ 16 ] HU J, YIN R, WANG J, et al. Data driven multiple objective optimization of AAO process towards wastewater effluent biological toxicity reduction [J]. NPJ Clean Water, 2024, 7(1): 61. DOI: 10.1038/s41545-024-00361-2.
- [ 17 ] QU J H, WANG H C, WANG K, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13: 1-7. DOI: 10.1007/s11783-019-1172-x.
- [ 18 ] ZHANG Q H, YANG W N, NGO H H, et al. Current status of urban wastewater treatment plants in China [J]. Environment international, 2016, 92: 11-22. DOI: 10.1016/j.envint.2016.03.024.
- [ 19 ] WANG L, GU W, LIU Y, et al. Challenges, solutions and prospects of mainstream anammox-based process for municipal wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2022, 820: 153351. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153351.
- [ 20 ] ZHAO M, FU Q, YANG Y, et al. Change the original microbial community structure in the hydrolysis acidification tank to enhance the COD removal performance of oily wastewater [J]. Water Science and Technology, 2021, 84(6): 1477-1486.
- [ 21 ] LU J Y, WANG X M, LIU H Q, et al. Optimizing operation of municipal wastewater treatment plants in China: The remaining barriers and future implications [J]. Environment International, 2019, 129: 273-278. DOI: 10.1016/j.envint.2019.05.057.
- [ 22 ] WEI Q, ZHANG J, LUO F, et al. Molecular mechanisms through which different carbon sources affect denitrification by *Thauera linaloolentis*: Electron generation, transfer, and competition [J]. Environment International, 2022, 170: 107598. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107598.
- [ 23 ] ZHANG C, ZHANG L, LIU J, et al. Achieving ultra-high nitrogen and phosphorus removal from real municipal wastewater in a novel continuous-flow anaerobic/aerobic/anoxic process via partial nitrification, endogenous denitrification and nitrite-type denitrifying phosphorus removal [J]. Water Research, 2024, 250: 121046. DOI: 10.1016/j.watres.2023.121046.
- [ 24 ] CHEN Y, ZHANG Y, ZHANG L, et al. Applicability of two-stage anoxic/oxic shortcut nitrogen removal via partial nitrification and partial denitrification for municipal wastewater by adding sludge fermentation products continuously [J]. Chemosphere, 2022, 287: 132053. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132053.
- [ 25 ] LIU H, HAN P, LIU H, et al. Full-scale production of VFAs from sewage sludge by anaerobic alkaline fermentation to improve biological nutrients removal in domestic wastewater [J].

- Bioresource technology, 2018, 260; 105–114. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.03.105.
- [26] ZHAO J, AO Z D, QIU L Q, et al. Enhanced wastewater treatment with an AnF-AAO system for improved internal carbon source utilization[J]. Chemosphere, 2024, 363; 142836. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142836.
- [27] ZHAO Y, WU J, YUAN X, et al. The effect of mixing intensity on the performance and microbial dynamics of a single vertical reactor integrating acidogenic and methanogenic phases in lignocellulosic biomass digestion [J]. Bioresource technology, 2017, 238; 542–551. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.04.080.
- [28] TRAD Z, VIAL C, FONTAINE J P, et al. Modeling of hydrodynamics and mixing in a submerged membrane bioreactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 282; 77–90. DOI: 10.1016/j.cej.2015.01.119.
- [29] 王秋景, 姚艳萍, 韩雪军, 等. 磁悬浮鼓风机在造纸废水处理项目中的应用[J]. 中国造纸, 2022, 41(s1); 57–59.
- WANG Q J, YAO Y P, HAN X J, et al. Application of magnetic suspension blower in papermaking wastewater treatment project [J]. China Pulp & Paper, 2022, 41(s1); 57–59.
- [30] 赵剑文. 精确曝气技术在污水处理中的研究进展及应用[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(7); 186–188.
- ZHAO J W. Research progress and application of precision aeration technology in wastewater treatment[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(7); 186–188.
- [31] 于洪波, 高佳. 空气悬浮风机在城镇污水处理中的应用[J]. 冶金管理, 2020(13); 144–145.
- YU H B, GAO J. Application of air suspension fan in urban wastewater treatment[J]. China Steel Focus, 2020(13); 144–145.
- [32] 杜志军. 磁悬浮离心鼓风机在污水厂中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2021(1); 58–60.
- DU Z J. Application of magnetic suspension centrifugal blower in wastewater treatment plant[J]. New Technology & New Products of China, 2021(1); 58–60.
- [33] 王世平, 王艺霖. A<sup>2</sup>/O 中精确曝气控制的节能分析与评估[J]. 水处理技术, 2016, 42(11); 113–117.
- WANG S P, WANG Y L. Analysis and evaluation of energy saving about accurate aeration control technology in A<sup>2</sup>/O process [J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(11); 113–117.
- [34] 李美艳, 彭建雄, 杨卓, 等. 分布式光伏发电系统在小型污水处理厂的应用探索[J]. 天津科技, 2023, 50(2); 49–53.
- LI M Y, PENG J X, YANG Z, et al. Application of distributed photovoltaic power generation system in small wastewater treatment plants[J]. Tianjin Science & Technology, 2023, 50(2); 49–53.
- [35] 吕武轩. 水处理工艺过程自动加药系统[C]//中国科学技术协会. 提高全民科学素质、建设创新型国家—2006 中国科协年会论文集(下册). 北京: 科学出版社, 2006; 3467–3471.
- LÜ W X. Automatic system for water treatment process [C]// China Association for Science and Technology. Improve the Scientific Literacy of the Entire Population and Build An Innovative Country—Proceedings of the 2006 Annual Conference of the China Association for Science and Technology (Volume 2). Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 2006; 3467–3471.
- [36] 杨一夫, 夏阳光. 污水处理外加碳源与除磷药剂减量控制技术研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(11); 49–56.
- YANG Y F, XIA Y G. Research progress on control technology for dosage reduction of external carbon and phosphorus removal chemicals in wastewater treatment processes [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11); 49–56.
- [37] 吴宇行, 王晓东, 陈宁, 等. 典型城镇污水处理厂碳源智能投加控制生产性试验[J]. 环境工程, 2022, 40(6); 212–218, 271.
- WU Y X, WANG X D, CHEN N, et al. Full-scale study of an intelligent carbon dosing control system in a typical urban wastewater treatment plant [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6); 212–218, 271.
- [38] 邱勇, 李冰, 刘垚, 等. 污水处理厂化学除磷自动控制系统优化研究[J]. 给水排水, 2016, 52(7); 126–129.
- QIU Y, LI B, LIU Y, et al. Optimal control of chemical precipitation of phosphorous in wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(7); 126–129.
- [39] 袁飞, 姜晓先, 卫鸣志, 等. 污水处理厂化学除磷智能控制系统的研究与应用[J]. 中国环保产业, 2023(2); 67–72.
- YUAN F, JIANG X X, WEI M Z, et al. Research and application of intelligent control system for chemical phosphorus removal in wastewater treatment plant [J]. China Environmental Protection Industry, 2023(2); 67–72.
- [40] 刘斌, 周迅, 张曾, 等. 水厂智能絮凝加药量预测模型研究[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(1); 105–108, 124.
- LIU B, ZHOU X, ZHANG Z, et al. Research of prediction model for intelligent flocculation dosage in Waterworks [J]. Automation & Instrumentation, 2023, 38(1); 105–108, 124.
- [41] 何秋杭, 陈奕彤, 乔金岩, 等. 基于月排放数据的北京 3 座区级污水处理厂年碳排放特征[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9); 2827–2840.
- HE Q H, CHEN Y T, QIAO J Y, et al. Characterization of annual carbon emissions of three district-level wastewater treatment plants in Beijing based on monthly emission data [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9); 2827–2840.
- [42] 刘如玲, 宋鹏, 戴卫东. 青岛市团岛污水处理厂污水源热泵技术应用[J]. 中国给水排水, 2015, 31(12); 86–89.
- LIU R L, SONG P, DAI W D. Application of wastewater-source

- heat pump technology in qingdao tuandao wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(12): 86-89.
- [43] 黄雄虎, 顾敦罡, 陆嘉麒, 等. 污水源热泵技术在城市污水热能回收中的应用现状与研究进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(3): 922-928.
- HUANG X H, GU D G, LU J L, et al. Application and research progress of wastewater source heat pumps in municipal wastewater heat recovery[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(3): 922-928.
- [44] 高海霞. 污水处理厂污水污泥处理碳减排路径分析[J]. *清洗世界*, 2024, 40(1): 14-16.
- GAO H X. Analysis on carbon emission reduction path of wastewater sludge treatment in wastewater treatment plant[J]. *Cleaning World*, 2024, 40(1): 14-16.
- [45] 徐辉, 齐方琪, 宋昊祥, 等. 低温城市污水应用污水源热泵现状分析[J]. *智能城市*, 2019, 5(7): 138-139.
- XU H, QI F Q, SONG H X, et al. Application status of wastewater thermal power in severe cold areas[J]. *Intelligent City*, 2019, 5(7): 138-139.
- [46] 胥晓瑜. 关于在水厂和污水厂中使用水源热泵技术的新思路[J]. *净水技术*, 2018, 37(s2): 121-124.
- XU X Y. New ideas on the use of water source heat pump technology in water plants and sewage plants [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(s2): 121-124.
- [47] 郝晓地, 饶志峰, 李爽, 等. 污水余温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.
- [48] 张怀宇. 我国公共供水系统温室气体排放与碳减排探讨[J]. *给水排水*, 2023, 49(11): 16-24.
- ZHANG H Y. Discussion on greenhouse gas emission and carbon reduction of China's public water supply systems[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(11): 16-24.

## (上接第 104 页)

- [12] CHEN G H, LOOSDRECHT M C V, EKAMA G A, et al. *Biological wastewater treatment: Principles, modeling and design* [M]. London: IWA Publishing, 2020.
- [13] 林忠军, 李胜. 清远市东城污水处理厂分区组团地下式总体设计[J]. *中国市政工程*, 2014(3): 80-82, 108-109.
- LIN Z J, LI S. The overall design of partition group underground layout type of Dongcheng wastewater treatment plant in Qingyuan [J]. *China Municipal Engineering*, 2014(3): 80-82, 108-109.
- [14] 于翔, 李捷. 广州城市污水厂进水水质组分和模型参数的测定[J]. *净水技术*, 2019, 38(8): 89-93.
- YU X, LI J. Determination of influent quality components and model parameters for urban WWTP in Guangzhou [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(8): 89-93.
- [15] 吴正运, 唐燕华, 刘一帆, 等. 国内外高速公路服务区污水处理现状与分析[J]. *交通节能与环保*, 2022, 18(5): 104-109.
- WU Z Y, TANG Y H, LIU Y F, et al. Current status and analysis of wastewater treatment in expressway service area at home and abroad [J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 2022, 18(5): 104-109.
- [16] 周德柱, 刘煌, 胡燕, 等. 高速公路服务区污水处理现状问题及应对策略浅析[J]. *公路交通技术*, 2020, 36(6): 131-136.
- ZHOU D Z, LIU H, HU Y, et al. Analysis on the current problems and countermeasures of sewage treatment in expressway service area [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2020, 36(6): 131-136.
- [17] LIU Y W, NGO H H, GUO W S, et al. The roles of free ammonia (FA) in biological wastewater treatment processes: A review [J]. *Environment International*, 2019, 123: 10-19. DOI: 10.1016/j.envint.2018.11.039.
- [18] BALMELLE B, NGUYEN K M, CAPDEVILLE B, et al. Study of factors controlling nitrite build-up in biological processes for water nitrification[J]. *Water Science and Technology*, 1992, 26(5/6): 1017-1025. DOI: 10.2166/wst.1992.0543.
- [19] JIANG Y S, POH L S, LIM C P, et al. Effect of free ammonia inhibition on process recovery of partial nitrification in a membrane bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 6: 152-158. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.02.014.
- [20] ZUO Z Q, SONG Y R, REN D H, et al. Control sulfide and methane production in sewers based on free ammonia inactivation [J]. *Environment International*, 2020, 143: 105928. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105928.
- [21] 孟宪超, 胡正义, 刘小宁, 等. 小便器尿液源头分离及其磷资源回收关键技术的研究[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, 31(1): 61-66.
- MENG X C, HU Z Y, LIU X N, et al. Phosphorus recovery from urine automatically collected from urinal based on source separation of urine from flushing water [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 31(1): 61-66.
- [22] 徐冬喜. 高速公路服务区给水排水设计[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(7): 60-61.
- XU D X. Characteristics and treatment technology of sewage in expressway service area [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18(7): 60-61.