

陶珺. 上海某污水处理厂碳排放特性分析[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 85-93.

TAO J. Analysis of carbon emission characteristics of a WWTP in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 85-93.

上海某污水处理厂碳排放特性分析

陶 珺*

(上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘 要 【目的】 污水处理厂运行过程中直接、间接排放温室气体, 准确核算污水处理厂碳排放强度, 分析排放因子变化规律及特性, 有利于落实减污降碳措施, 实现污水处理厂低碳运行。【方法】 根据《上海市城镇污水处理厂温室气体排放核算指南》(T/SWARTA 001—2023)中的核算方法, 对上海某污水处理厂 2023 年度碳排放量与碳排放强度进行核算, 并分析影响碳排放强度的主要因素。【结果】 某污水处理厂全年碳排放量约为 11 万 t CO₂, 其中污水、污泥处理工艺碳排放量分别为 8 万、3 万 t CO₂, 全厂碳排放强度约为 1.019 kg CO₂/m³, 其中污水、污泥处理工艺碳排放强度分别为 0.717、0.302 kg CO₂/m³。污水处理工艺 N₂O 的直接排放占比为 64.97%, 电能消耗产生的碳排放占比为 26.80%, 污泥处理工艺产生的 N₂O 的直接排放占比为 39.74%, 电能消耗、外购蒸汽产生的碳排放占比为 40.24%。污水处理工艺碳排放强度与进水总氮(TN)浓度、进水化学需氧量(COD)浓度显著正相关, 与污水处理量、进水水温显著负相关; 污泥处理工艺碳排放强度与污泥处理量显著正相关, 与污泥含水率显著负相关。【结论】 污水处理厂运行过程中电能消耗产生的碳排放放在间接排放中占比最高, 通过精确曝气、智慧回流等方式降低电能消耗量, 光伏系统、水源热泵等绿能代替传统能源, 通过尾水再生利用、污泥焚烧残渣资源化利用, 可逐步实现污水处理厂低碳运行。

关键词 污水处理厂 碳排放 减污降碳 排放特征 影响因素

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)12-0085-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.010

Analysis of Carbon Emission Characteristics of a WWTP in Shanghai

TAO Jun*

(Shanghai Chengtong Wastewater Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract [Objective] During the operation of wastewater treatment plants (WWTPs), greenhouse gases are directly and indirectly emitted. Accurately calculating the carbon emission intensity of WWTPs, analyzing the changes and characteristics of emission factors, is beneficial for implementing pollution reduction measures and achieving low-carbon operation of WWTPs. [Methods] According to the accounting method in the *Guidelines for Accounting Greenhouse Gas Emissions from Urban Sewage Treatment Plants in Shanghai* (T/SWARTA 001—2023), the carbon emission and carbon emission intensity of a WWTP in Shanghai in 2023 were calculated, and the main factors affecting the carbon emission intensity were analyzed. [Results] Annual carbon emission of a WWTP was about 110 000 t CO₂, in which the carbon emission of sewage and sludge treatment process were 80 000, 30 000 t CO₂ respectively, and the carbon emission intensity of the whole plant was about 1.019 kg CO₂/m³. The carbon emission intensity of wastewater and sludge treatment processes was 0.717, 0.302 kg CO₂/m³, respectively. The direct emission of N₂O from wastewater treatment process accounted for 64.97%, the carbon emission from electric energy consumption accounted for 26.80%, the direct emission of N₂O from sludge treatment process accounted for 39.74%, and the carbon emission from electric energy consumption and purchased steam accounted for 40.24%. The carbon emission intensity of wastewater treatment process was positively correlated with influent total nitrogen (TN) concentration and influent chemical oxygen demand (COD) concentration, and negatively correlated with wastewater treatment capacity and influent temperature. The carbon emission intensity of sludge treatment process was positively correlated with the amount of sludge treated and negatively correlated with the water content of sludge. [Conclusion] The carbon emissions generated by electricity

[收稿日期] 2024-08-03

[基金项目] 上海市科委课题(21DZ1209804)

[作者简介] 陶珺(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事污水处理工艺管理等工作, E-mail: 313086375@qq.com。

consumption during the operation of WWTPs account for the highest proportion of indirect emissions. By reducing electricity consumption through precise aeration, intelligent reflux and other method, replacing traditional energy with green energy such as photovoltaic systems and water source heat pumps, tail water regeneration and sludge incineration residue resource utilization, low-carbon operation of WWTPs can be achieved.

Keywords wastewater treatment plant (WWTP) carbon emission pollution and carbon emission reduction emission characteristic influencing factor

随着对环境保护认识的不断加深,对于水体环境质量、水污染防治的要求也在逐步提高,污水处理行业迅速发展,其中污水处理设施的规模与污水处理量呈逐渐增加的趋势。根据研究^[1]报告,2020 年全国城镇污水处理量已经达到 791.0 亿 m³,对应的碳排放量为 3 416 万 t CO₂,污水处理行业的碳排放量占社会总排放量的 1%~2%^[2]。根据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》和《上海市城镇污水处理厂温室气体排放核算指南》中碳排放的分类方式,污水处理厂的碳排放主要分为直接排放与间接排放,其中:直接排放主要为处理过程中产生的一氧化二氮(N₂O)、甲烷(CH₄)排放以及化石燃料产生的碳排放,间接排放主要为电力、热力以及药剂等产生

的碳排放。本文根据《上海市城镇污水处理厂温室气体排放核算指南》推荐的碳排放核算方法与排放因子,对上海某污水处理厂 2023 年度全处理流程碳排放进行核算,分析各项排放因子的占比及其排放规律,为后续污水处理厂落实减污降碳措施提供参考。

1 概述

上海某污水处理厂设计规模为 40 万 m³/d,生物处理采用一体化活性污泥法 (Unitank) 处理工艺,深度处理采用“高效沉淀池+反硝化滤池”的组合处理工艺,出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。污泥处理设施设计规模为 200 t Ds/d,全量处理本厂及片区规划范围内的污泥,污泥处理采用离心脱水+干化+焚烧处理工艺,焚烧残渣外运进行资源化利用,污水处理厂整体工艺流程如图 1 所示。

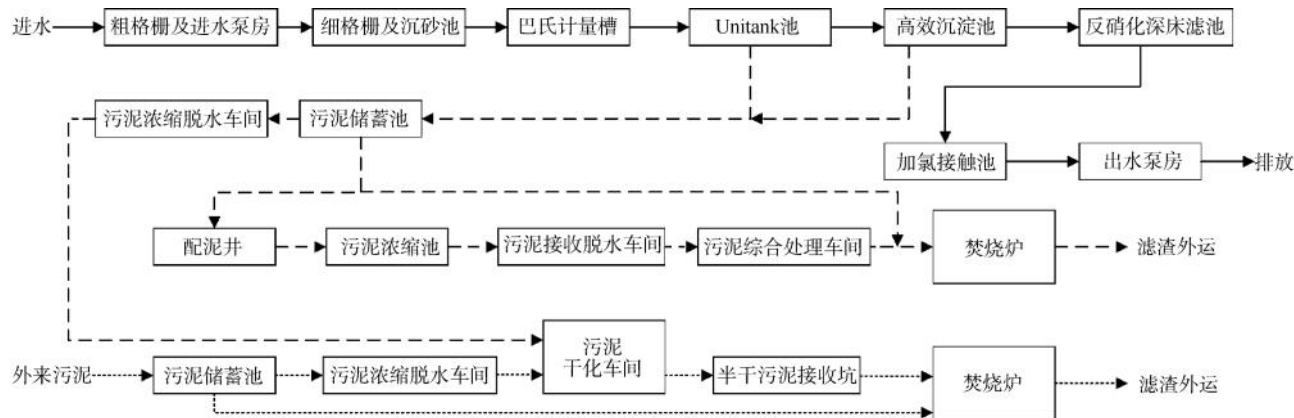


图 1 污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of WWTP

2023 年该污水处理厂处理量为 30.58 万 m³/d,年平均出水化学需氧量(COD)质量浓度为 13 mg/L,五日生化需氧量(BOD₅)质量浓度为 1.2 mg/L,氨氮质量浓度为 0.927 mg/L,总磷(TP)质量浓度为 0.14 mg/L,总氮(TN)质量浓度为 11.2 mg/L,悬浮物(SS)质量浓度为 6 mg/L,出水各项污染物排放浓度远低于一级 A 排放限值,进出水水质情况如表 1 所示。

表 1 污水处理厂进出水水质 (单位:mg/L)

Tab. 1 Water Quality of Influent and Effluent in WWTP (Unit: mg/L)

项目	COD	BOD ₅	氨氮	TP	TN	SS
设计进水	410	210	38	5.5	55	290
设计出水	≤50	≤10	≤5(8)	≤0.5	≤15	≤10
实际进水	218	114	30.6	2.99	43.1	217
实际出水	13	1.2	0.927	0.14	11.2	6

注: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。

2 碳排放核算方法

2.1 核算范围

根据《上海市城镇污水处理厂温室气体排放核算指南》(T/SWARTA 001—2023)^[3],污水处理厂温室气体排放核算范围按照范围 1、范围 2、范围 3 进行划分。范围 1:归属或受控于核算主体自身活动导致的直接温室气体排放。范围 2:核算主体购买电力、蒸汽、热/冷源导致的间接温室气体排放。范围 3:价值链上发生的所有间接排放(范围 2 中未包括的)。采用 2023 年每日生产数据,对污水处理厂污水处理部分、污泥处理部分碳排放分别按照直接排放(范围 1)、间接排放(范围 2)和间接排放(范围 3)进行核算。

2.2 计算方式

本次核算中,范围 1 主要为污水处理产生的 N_2O 、 CH_4 ,污泥处理产生的 N_2O 以及使用柴油、天然气燃烧产生的 CO_2 ;范围 2 主要为污水、污泥处理使用电力产生的 CO_2 ,以及污泥处理外购蒸汽产生的 CO_2 ;范围 3 主要为污水、污泥处理使用的药剂及自来水产生的 CO_2 。具体碳排放计算公式如式(1)~式(6)。

2.2.1 范围 1 的碳排放的计算方式

污水处理 N_2O 直接碳排放量如式(1)。

$$M_{N_2O-WW} = \frac{Q \times (T_{in} - T_{eff}) \times E_{N_2O-ww}}{1000} \times C_{N_2O/N_2} \times f_{N_2O} \quad (1)$$

其中: M_{N_2O-WW} ——污水处理过程中 N_2O 排放量,kg CO_2 -e/d;

Q ——污水处理厂处理量, m^3 /d;

T_{in} ——污水处理厂日均进水 TN 质量浓度,mg/L;

T_{eff} ——污水处理厂日均出水 TN 质量浓度,mg/L;

E_{N_2O-ww} ——污水处理过程中 N_2O 排放因子,传统硝化反硝化为 0.035 kg N_2O /(kg TN),kg N_2O /(kg TN);

C_{N_2O/N_2} —— N_2O 与 N_2 分子量之比,取值为 44/28;

f_{N_2O} —— N_2O 的全球变暖潜能,取值为 265。

污水处理 CH_4 直接碳排放量如式(2)。

$$M_{CH_4-WW} = [Q \times (C_{in} - C_{out})/1000 - S \times P \times \rho] \times E_{CH_4} \times f_{CH_4} \quad (2)$$

其中: M_{CH_4-WW} ——污水处理过程中 CH_4 排放量,kg CO_2 -e/d;

C_{in} ——污水处理厂日均进水 COD 质量浓度,mg/L;

C_{out} ——污水处理厂日均出水 COD 质量浓度,mg/L;

E_{CH_4} ——污水处理过程中 CH_4 排放因子,好氧为主处理工艺为 0.004 0 kg CH_4 /(kg COD),kg CH_4 /(kg COD);

S ——污水处理厂产生干污泥量,kg DS;

P ——污水处理厂产生干污泥有机分;

ρ ——污泥中有机物与 COD 的转化系数,取值为 1.42 kg COD/(kg DS),kg COD/(kg DS);

f_{CH_4} —— CH_4 的全球变暖潜能,取值为 28。

污泥处理 N_2O 直接碳排放量如式(3)。

$$M_{N_2O-SS} = M_{SS} \times E_{N_2O-SS} \times f_{N_2O} \quad (3)$$

其中: M_{N_2O-SS} ——污泥处理过程中 N_2O 排放量,kg CO_2 -e/d;

M_{SS} ——污泥焚烧干基量,t DS/d;

E_{N_2O-SS} ——污泥焚烧过程中 N_2O 排放因子,采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐值为 0.99 kg N_2O /(t DS),kg N_2O /(t DS)。

污泥处理 CO_2 直接碳排放如式(4)。

$$M_{CO_2-SS} = \sum_{i=1}^n (M_{rl,i} \times E_{rl,i}) \quad (4)$$

其中: M_{CO_2-SS} ——污水处理厂运行过程中天然气、柴油产生 CO_2 排放量,kg CO_2 -e/d;

$M_{rl,i}$ ——第 i 种燃料消耗量,天然气单位为 $N \cdot m^3$ /d,柴油单位为 kg/d;

$E_{rl,i}$ ——第 i 种燃料排放因子,天然气取值为 2.165 kg CO_2 /($N \cdot m^3$),kg CO_2 /($N \cdot m^3$);柴油取值为 3.096 kg CO_2 /kg,kg CO_2 /kg。

2.2.2 范围2的碳排放的计算方式

污水、污泥处理能耗间接碳排放量如式(5)。

$$M'_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^n (M_{\text{ef},i} \times E_{\text{ef},i}) \quad (5)$$

其中: M'_{CO_2} ——污水处理厂运行过程中电能、蒸汽产生 CO_2 排放量, $\text{kg CO}_2\text{-e/d}$;

$M_{\text{ef},i}$ ——第 i 种能源日消耗量, 电能单位为 $\text{kW}\cdot\text{h/d}$, 蒸汽单位为 t/d ;

$E_{\text{ef},i}$ ——第 i 种能源排放因子, 电能为 $0.42 \text{ kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 蒸汽约为 $168.771 \text{ kg CO}_2/\text{t}$ 。

2.2.3 范围3的碳排放的计算方式

污水、污泥处理药剂、自来水的间接碳排放量如式(6)。

$$M''_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^n (M_{\text{el},i} \times E_{\text{el},i}) \quad (6)$$

其中: M''_{CO_2} ——污水处理厂运行过程中药剂、自来水产生 CO_2 排放量, $\text{kg CO}_2\text{-e/d}$;

$M_{\text{el},i}$ ——第 i 种药剂、自来水消耗量, 药剂单位为 kg/d , 自来水单位为 m^3/d ;

$E_{\text{el},i}$ ——第 i 种药剂、自来水排放因子, 阳离子絮凝剂、阴离子絮凝剂取值为 $1.5 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$, 次氯酸钠取值为 $1.4 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$, 氢氧化钠取值为 $0.84 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$, 聚合氯化铝取值为 $1.62 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$, 尿素取值为 $2.51 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$, 消石灰取值为 $1.74 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$, 其他药剂取值为 $1.6 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$, 自来水取值为 $0.91 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ 。

3 碳排放情况分析

3.1 全厂碳排放

2023年, 污水处理厂全厂碳排放量约为11万 t CO_2 , 其中, 污水、污泥处理工艺碳排放量分别为8万、3万 t CO_2 。全厂碳排放强度约为 $1.019 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$, 其中, 污水、污泥处理工艺碳排放强度分别为 0.717 、 $0.302 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ 。Unitank 处理工艺属于序批式活性污泥(SBR)处理工艺的变形, 根据陈其楠等^[4]的研究, 上海市42座城镇污水处理厂全年污水段碳排放强度按污水处理主体工艺划分进行统计, 污水处理主体工艺为厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺、SBR工艺及其变形、氧化沟工艺及其变形和Bardenpho工艺的污水厂污水处理总碳排放强度分

别为 0.59 、 0.71 、 0.56 、 $0.54 \text{ kg CO}_2\text{-e/m}^3$ 。本次核算结果较为一致。

全厂碳排放量中, 直接排放占比为 61.49% , 主要为污水、污泥处理过程中产生 N_2O 和 CH_4 的碳排放; 间接排放(范围2)占比为 30.79% , 主要为污水、污泥处理过程中电力消耗产生的碳排放; 间接排放(范围3)占比为 7.72% , 主要为污水、污泥处理过程中使用药剂产生的碳排放。污水、污泥处理工艺碳排放量如图2所示。

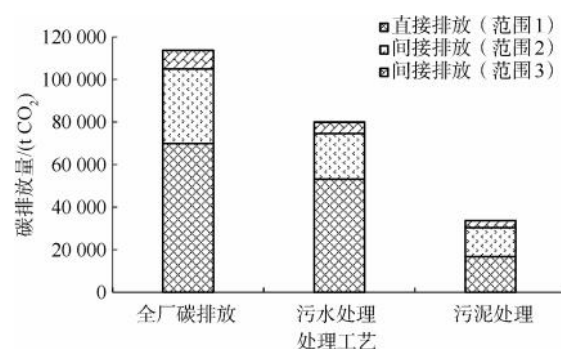


图2 污水处理厂年碳排放量

Fig. 2 Annual Carbon Emissions from WWTPs

3.2 污水处理碳排放

表2为该污水处理厂污水处理工艺碳排放量。其中:直接排放量为53 141 t CO_2 , 占比为 66.44% ; 间接排放量为26 844 t CO_2 , 占比为 33.56% 。对单项碳排放进行分析, 碳排放量最大的为 N_2O 的直接排放, 占比为 64.97% , 其主要为一体化反应池处理过程中产生 N_2O 的碳排放。SBR 及其变形工艺中超 99% 的 N_2O 在进水和曝气阶段生成, 间歇曝气在引起污水中 NH_4^+ 及 NO_2^- 浓度大幅波动的同时易引发瞬时缺氧状态, 氨氧化菌(AOB)活性增强而亚硝酸盐氧化菌(NO)活性被抑制, 促进了 N_2O 生成^[5]; 其次为电能消耗产生的碳排放, 占比为 26.80% , 主要为污水处理过程中水力提升设备、搅拌设备、曝气设备等机械设备运行过程中消耗的电能, 以上两项占污水处理碳排放量的 91.77% , 其他例如 CH_4 的直接排放量、使用药剂产生的碳排放量约占 8.23% 。污水处理工艺碳排放主要为硝化反硝化过程中 N_2O 的直接排放和处理过程中消耗电能的间接排放, 根据北京城市排水集团与深圳水务集团测算, 电力消耗导致的间接排放及脱氮过程中产生的氮氧化物直接排放是温室气体排放量的主要组成, 占排放总量的 $80\%\sim 90\%$ ^[6], 测算结果较为接近。

表 2 污水处理工艺碳排放
Tab. 2 Carbon Emission of Wastewater Treatment Process

排放类别	项目	碳排放量/(t CO ₂)	占比
直接排放(范围 1)	N ₂ O	51 967	64.97%
	CH ₄	1 174	1.47%
间接排放(范围 2)	电能	21 436	26.80%
间接排放(范围 3)	自来水	132	0.16%
	聚氯化铝	1 731	2.16%
	次氯酸钠	688	0.86%
	乙酸钠	2 558	3.20%
	其他药剂	299	0.38%

对污水处理工艺每月的碳排放强度进行分析,其中:6月—9月污水处理碳排放强度均值为 0.646 kg CO₂/m³,较 1月—5月、10月—12月均值 0.763 kg CO₂/m³ 低 15.33%。6月—9月污水处理厂日处理量较高,根据孙强强等^[7]的分析,运行负荷率显著影响污水处理厂碳排放水平,污水处理厂碳排放强度随运行负荷率增高而降低。污水处理厂日处理量增加后,运行负荷接近设计值,各用电设备得以在最佳工况下运行,运行效率得以提升、污水处理电耗得以下降,碳排放强度与单位污水处理电耗呈极

显著正相关^[8],因此,污水处理碳排放强度与污水处理量存在密切联系,污水处理工艺月度碳排放强度如图 3 所示。

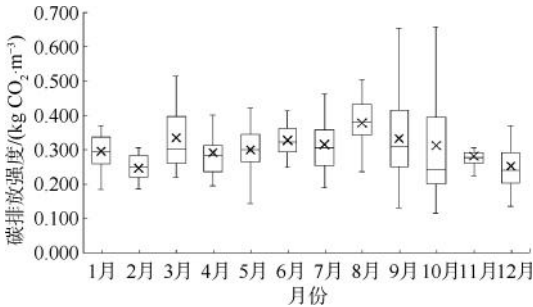


图 3 污水处理工艺月度碳排放强度
Fig. 3 Monthly Carbon Emission Intensity of Wastewater Treatment Process

为进一步分析污水处理厂碳排放强度的影响因素,利用 SPSS 软件对碳排放强度、污水处理量、进水水温、降雨量、进水污染物浓度、生物池控制参数、污泥参数等进行相关性分析,分析结果如表 3 所示。污水处理工艺碳排放与污水处理量、降雨量、污泥产生量、进水温度、进水 COD 浓度、进水 TP 浓度、进水 TN 浓度、污泥沉降比为显著相关 ($P<0.001$)。

表 3 污水处理工艺碳排放相关性分析
Tab. 3 Correlation Analysis of Carbon Emission in Wastewater Treatment Process

项目	污水处理量	进水水温	降雨量	进水 COD 浓度	进水 TP 浓度	进水 TN 浓度	生物池混合液悬浮固体 (MLSS) 浓度	污泥产生量	污泥沉降比	污泥有机分
相关系数	-0.648 **	0.224 **	-0.314 **	0.391 **	0.500 **	0.883 **	0.079	-0.218 **	0.196 **	-0.066
显著性	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.131	<0.001	<0.001	0.208

注: * 表示在 0.05 级别相关性显著; ** 表示在 0.01 级别相关性显著。

在上述分析的基础上,挑选出相关系数较高的因素进行多元线性回归(表 4)。分析结果表明,碳排放强度作为因变量,污水处理量、进水水温、进水 COD 浓度、进水 TN 浓度作为自变量时,多元线性回归拟合度较高 ($R^2=0.947$),影响程度由高至低分别为进水 TN 浓度、污水处理量、进水 COD 浓度、进水水温,其中:进水 TN 浓度、进水 COD 浓度为正相关;污水处理量、进水水温为负相关。

对污水处理工艺碳排放强度与进水 TN 浓度之间的关系进行分析,该污水处理厂进水 TN 质量浓度为 19.3~57.8 mg/L,年均值为 43.1 mg/L。通过柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫(KS)检验进水 TN 浓度分

表 4 污水处理工艺碳排放多元线性回归分析
Tab. 4 Multiple Linear Regression Analysis of Carbon Emission from Wastewater Treatment Process

碳排放影响因素	回归分析系数			R^2
	标准化系数 (Beta)	显著性	方差扩大因子 (VIF)	
污水处理量	-0.320	<0.001	1.277	0.947
进水水温	-0.062	<0.001	1.258	
进水 COD 浓度	0.064	<0.001	1.231	
进水 TN 浓度	0.794	<0.001	1.518	

布,其不符合正态分布 ($P<0.001$),偏度-0.943 为左偏态分布,与上海中心城区污水水质特性相一

致^[9]。日进水 TN 质量浓度约 60% 的概率分布在 40~50 mg/L, 具体分布情况如图 4 所示。

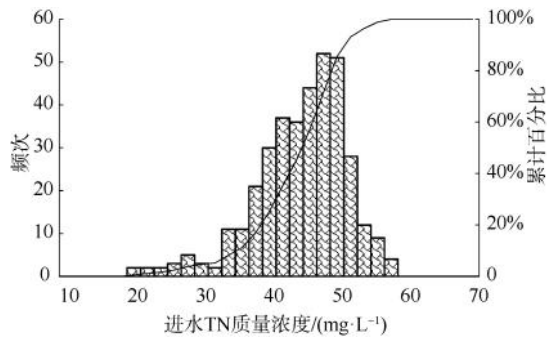


图 4 污水处理厂进水 TN 分布

Fig. 4 Influent TN Distribution in WWTP

由图 5 可知, 污水处理工艺碳排放强度与进水 TN 浓度呈显著线性正相关。污水处理工艺碳排放强度中 64.97% 为一体化反应池硝化反硝化释放 N_2O 产生的碳排放, 碳排放量核算时, 该部分碳排放量通过 TN 去除量与 N_2O 排放因子等计算所得, 一般来说污水处理厂出水 TN 浓度较为稳定较少会产生大幅度波动, 进水 TN 浓度对污水处理工艺碳排放强度有较大影响。

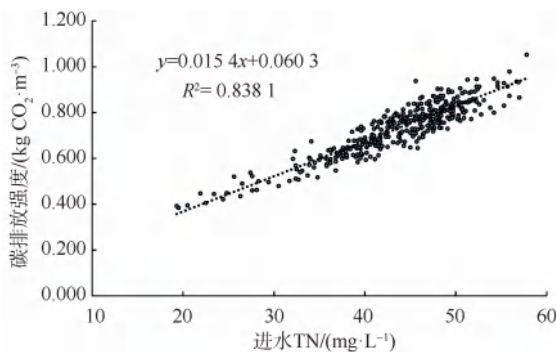


图 5 污水处理厂碳排放强度与进水 TN 关系

Fig. 5 Relationship between Carbon Emission Intensity and Influent TN in WWTP

污水处理厂年均处理量为 30.57 万 m^3 , 日处理量为 14.72 万~49.37 万 m^3 , 其中 60% 的概率分布在 24 万~35 万 m^3 。由于进水不足, 该污水处理厂长期处于较低运行负荷的状态, 平均负荷率为 76.42%, 全年仅有 8% 的天数达到设计处理能力。在低负荷运行的工况下, 污水处理工艺碳排放强度与处理量呈线性负相关(图 6)。分段统计不同处理量区间的污水处理工艺碳排放强度, 负荷率高于 95% (>38 万 m^3/d) 共计 46 d, 平均碳排放强度为

0.581 $kg CO_2/m^3$, 负荷率为 70%~80% (28 万~32 万 m^3/d) 共计 56 d, 平均碳排放强度为 0.733 $kg CO_2/m^3$, 低负荷工况与高负荷工况相比, 进水 TN 浓度提高 20.91%, 碳排放强度提高 26.15%, 剔除 TN 提高对碳排放强度的影响, 负荷率降低约提高 8% 的碳排放强度。

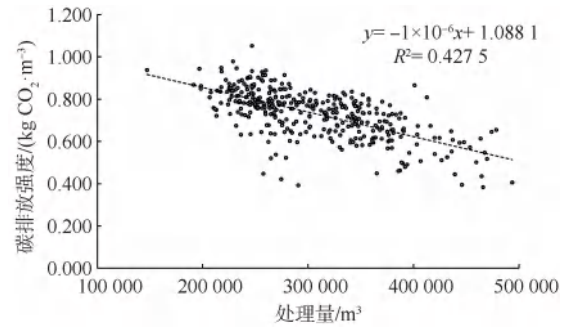


图 6 污水处理厂碳排放强度与处理量关系

Fig. 6 Relationship between Carbon Emission Intensity and Treatment Capacity of WWTP

3.3 污泥处理碳排放

表 5 为该污水处理厂污泥处理工艺碳排放量。其中: 直接排放量为 16 761 t CO_2 , 占比为 49.75%; 间接排放为 16 933 t CO_2 , 占比为 50.25%。对单项碳排放进行分析, 碳排放量最大的为 N_2O 的直接排放, 占比为 39.74%, 主要为污泥焚烧过程中产生 N_2O 的排放; 其次为电能消耗产生的碳排放, 占比为 26.98%; 排第 3 的为外购蒸汽产生的碳排放, 占比为 13.26%, 以上 3 项占污泥处理工艺碳排放量的 79.98%。

表 5 污泥处理工艺碳排放

Tab. 5 Carbon Emission of Sludge Treatment Process

排放类别	项目	碳排放量/(t CO_2)	占比
直接排放(范围 1)	N_2O	13 389	39.74%
	柴油	90	0.27%
	天然气	3 282	9.74%
间接排放(范围 2)	电能	9 091	26.98%
	蒸汽	4 469	13.26%
间接排放(范围 3)	自来水	340	1.01%
	碱液	1 190	3.53%
	石英砂	1 592	4.72%
	其他药剂	251	0.75%

污泥处理工艺月度碳排放强度中(图 7), 2 月最低为 0.249 $kg CO_2/m^3$, 当月日均污泥处理干基量为 90 t DS/d; 8 月最高为 0.384 $kg CO_2/m^3$, 当月平均污

泥处理干基量为 226 t DS/d。6 月—10 月,污泥处理工艺碳排放强度为 0.359 kg CO₂/m³,较其他月份 0.295 kg CO₂/m³ 增加约 21.69%,该部分碳排放强度的增加与污泥处理干基量的增加有较为密切的联系,6 月—10 月污泥处理干基量较其他月份增加约 16.92%。

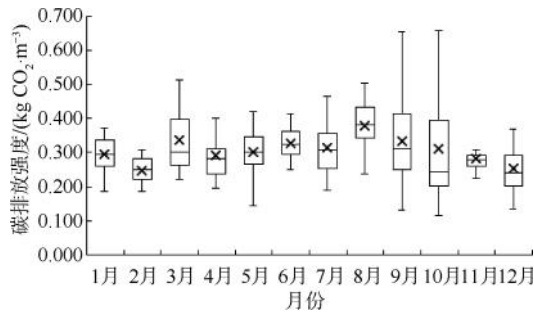


图 7 污泥处理工艺月度碳排放强度
Fig. 7 Monthly Carbon Emission Intensity of Sludge Treatment Process

针对碳排放强度与污泥处理量、污泥有机分、污泥沉降比、污泥含水率进行相关性分析及多元线性回归,结果如表 6、表 7 所示。污泥处理工艺碳排放强度与污泥处理量、污泥含水率显著相关 ($P < 0.001$),其中:污泥处理量为显著正相关,污泥含水率为显著负相关。多元线性回归后污泥处理量对污泥处理碳排放影响较大,其次为污泥含水率。

表 6 污泥处理工艺碳排放相关性分析
Tab. 6 Correlation Analysis of Carbon Emission in Sludge Treatment Process

项目	污泥处理量	污泥有机分	污泥沉降比	污泥含水率
相关系数	0.600**	0.018	-0.083	-0.244**
显著性	<0.001	0.734	0.114	<0.001

注: * 表示在 0.05 级别相关性显著; ** 表示在 0.01 级别相关性显著。

表 7 污泥处理工艺碳排放多元线性回归分析
Tab. 7 Multiple Linear Regression Analysis of Carbon Emission from Sludge Treatment Process

碳排放影响因素	回归分析系数			
	Beta	显著性	VIF	R ²
污泥处理量	0.587	<0.001	1.240	0.394
污泥含水率	-0.088	0.055	1.240	

污泥处理工艺碳排放强度与污泥处理量呈显著线性正相关(图 8),2023 年日均污泥处理量 140 t

DS,其中负荷高于 95%(>169 t DS/d)共计 98 d,平均碳排放强度为 0.386 kg CO₂/m³,负荷率为 70%~80%(125~142 t DS/d)共计 43 d,平均碳排放强度为 0.316 kg CO₂/m³,处理量提高 67.02%碳排放强度增加 22.19%,这与污泥处理量提高后设备高负荷运行,电耗下降有联系。

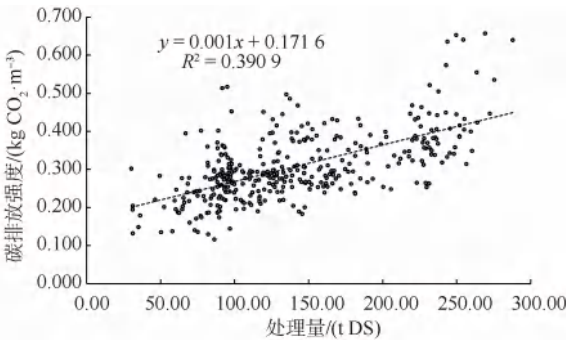


图 8 污泥处理工艺碳排放强度与处理量关系
Fig. 8 Relationship between Carbon Emission Intensity and Treatment Capacity in Sludge Treatment Process

4 结论与建议

(1)上海某污水处理厂采用 Unitank+高效沉淀池+滤池处理工艺,全年碳排放量约为 11 万 t CO₂,其中污水、污泥处理工艺碳排放量分别为 8 万、3 万 t CO₂,全厂碳排放强度约为 1.019 kg CO₂/m³,其中污水、污泥处理工艺碳排放强度分别为 0.717、0.302 kg CO₂/m³。

(2)污水处理工艺主要碳排放为硝化反硝化过程中 N₂O 的直接排放(占比为 64.97%)和污水处理设施设备电能消耗产生的间接排放(占比为 26.80%)。污泥处理工艺主要碳排放为污泥干化焚烧产生的 N₂O 的直接排放(占比为 39.74%),设施设备电能消耗产生的间接排放(占比为 26.98%)和外购蒸汽产生的间接排放(占比为 13.26%)。

(3)污水处理工艺碳排放强度与进水 TN 浓度、进水 COD 浓度显著正相关,与污水处理量、进水水温显著负相关,其中:碳排放强度受进水 TN 浓度和污水处理量影响最大。污泥处理工艺碳排放强度与污泥处理量显著正相关,与污泥含水率显著负相关,其中碳排放强度受污泥处理量影响最大。

(4)Unitank 工艺具有时序和间歇曝气的特点,其工况随时序变化短时间内剧烈变化,通过长期连续在线监测系统测定 Unitank 工艺 N₂O 排放因

子^[10-11],能够提高污水处理厂碳排放核算的精准性。

(5)污水处理厂运行过程中电能消耗产生的碳排放放在间接排放中占比最高。从减污降碳角度出发,一方面可以通过精确曝气、智慧回流等方式降低电能消耗量,另一方面可以通过光伏系统、水源热泵等绿能代替传统能源^[12-13]。此外,污水处理厂尾水的再生利用以及污泥焚烧残渣的资源化利用,也是污水处理厂实现低碳运行的重要途径^[14]。

参考文献

- [1] 佚名. 2022 中国城镇污水处理碳排放研究报告 [J]. 城乡建设, 2023(4): 60-67.
Unknown. Research report on carbon emissions from urban wastewater treatment of China in 2022 [J]. Urban and Rural Development, 2023(4): 60-67.
- [2] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考 [J]. 给水排水, 2021, 47(3): 1-5.
DAI X H, ZHANG C, ZHANG L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(3): 1-5.
- [3] 上海市排水行业协会. 上海市城镇污水处理厂温室气体排放核算指南: T/SWARTA 001—2023 [S/OL]. (2023-12-28) [2024-08-03]. <https://www.ttbz.org.cn/StandardManage/Detail/100437>.
Shanghai Water Reclamation Trade Association. Guidelines for accounting greenhouse gas emissions from urban sewage treatment plants: T/SWARTA 001—2023 [S/OL]. (2023-12-28) [2024-08-03]. <https://www.ttbz.org.cn/StandardManage/Detail/100437>.
- [4] 陈其楠, 龚昊泽, 吕燕. 上海市城镇污水处理厂温室气体排放规律 [J]. 净水技术, 2024, 43(s1): 142-149, 221.
CHEN Q N, GONG H Z, LÜ Y. Greenhouse gas emission rules analysis from municipal WWTPs of Shanghai City [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(s1): 142-149, 221.
- [5] 张亦蓁, 刘辉, 钱晓雍. 城镇污水处理厂 N₂O 排放: 排放特征及控制措施 [J]. 环境工程, 2024, 42(4): 9-21.
ZHANG Y L, LIU H, QIAN X Y. N₂O emission from municipal wastewater treatment plants: Emission characteristics and control strategies [J]. Environmental Engineering, 2024, 42(4): 9-21.
- [6] 许君清, 汪正然, 李光明. “双碳”背景下的水务行业可持续发展前景探析 [J]. 净水技术, 2023, 42(10): 1-6, 195.
XU J Q, WANG Z R, LI G M. Exploration of sustainable development prospect of water industries under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” goals [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 1-6, 195.
- [7] 孙强强, 陈貽龙. 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.
- [8] 钱晓雍, 胡静, 李丹, 等. 上海城镇污水处理厂温室气体排放核算及其特征 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(21): 39-44.
QIAN X Y, HU J, LI D, et al. Calculation and characteristics of greenhouse gas emission from urban wastewater treatment plants in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(21): 39-44.
- [9] 张岩. 上海中心城区城镇污水水质特性分析 [J]. 净水技术, 2023, 42(11): 101-111.
ZHANG Y. Analysis of influent quality characteristics of urban wastewater in Shanghai central districts [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 101-111.
- [10] 王沁意, 盛扬悦, 宋宁宁, 等. 污水处理过程 CH₄ 与 N₂O 排放监测研究进展 [J]. 环境工程, 2023, 41(10): 51-60.
WANG Q Y, SHENG Y Y, SONG N N, et al. Progress of CH₄ and N₂O monitoring in full-scale wastewater treatment process [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(10): 51-60.
- [11] 熊鹏宇, 钱晓雍, 王丽花, 等. 全覆盖污水处理厂 N₂O 排放实测及本地化因子测算 [J]. 中国给水排水, 2024, 40(15): 28-35.
XIONG P Y, QIAN X Y, WANG L H, et al. Measurement of nitrous oxide emission and localization factor determination in a fully covered wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(15): 28-35.
- [12] 吴娇. 上海某污水处理厂碳排放分析及减碳路径探索 [J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 135-140.
WU J. Carbon emission analysis and carbon reduction exploration of a WWTP in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s1): 135-140.
- [13] 齐浩然, 尹明山, 唐兆国, 等. 城镇污水处理厂节能减碳实现路径与技术探讨 [J]. 净水技术, 2023, 42(10): 16-27, 53.
QI H R, YIN M S, TANG Z G, et al. Discussion on realization path and technology of energy conservation and carbon reduction in urban WWTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 16-27, 53.
- [14] 谢琤琤, 刘刚. 城市污水处理厂碳中和路径解析 [J]. 环境工程, 2023, 41(9): 181-186.

XIE Z Z, LIU G. Road map for custructing carbon neutral wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering,

2023, 41(9): 181-186.

(上接第 30 页)

[46] 贺君, 张腾达, 裴宪, 等. 一种新型曝气生物滤池填料的研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(3): 14-16.

HE J, ZHANG T D, PEI X, et al. Study on a new biological aerated filter filler[J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(3): 14-16.

[47] 蔡云龙, 臧维玲, 姚庆祯, 等. 四种滤料去除氨氮的效果[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(2): 138-142.

CAI Y L, ZANG W L, YAO Q Z, et al. Effects of removing ammonia with four filters [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(2): 138-142.

[48] 常青, 吕名云. 含油废水接触过滤处理中滤料性能的研究[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(3): 52-54.

CHANG Q, LÜ M Y. Study on properties of filter media in oil-latent sewage treatment by contact flocculation [J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(3): 52-54.

[49] 李丛宇, 方月英, 薛璐璐, 等. 锰砂滤料负载纳米零价铁去除水与废水中 Sb(V) 的试验 [J]. 净水技术, 2020, 39(3): 64-70.

LI C Y, FANG Y Y, XUE L L, et al. Experiment of Sb (V) removal from water and wastewater by manganese sand filter loaded with nano-zero-valent iron [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(3): 64-70.

[50] 梁灿钦. 生态过滤坝修复污染水体的研究 [J]. 广东化工, 2022, 49(22): 155-158.

LIANG C Q. Study on remediation of polluted waters by ecological filter dam [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(22): 155-158.

[51] 王兴召, 吴佩, 张祥菊, 等. 基于生态过滤技术的某溢流口水污染治理的研究 [J]. 环境科学导刊, 2024, 43(4): 44-49.

WANG X Z, WU P, ZHANG X J, et al. Research on water pollution control of the overflow outlet based on ecological filtration technology [J]. Environmental Science Survey, 2024, 43(4): 44-49.

[52] 喻凯, 丁瑞, 陈宇, 等. 生态滤坝对水体浊度的净化效果研究 [J]. 水利规划与设计, 2025(8): 67-70.

YU K, DING R, CHEN Y, et al. Research on the purification effect of ecological filter dam on water turbidity [J]. Water Resources Planning and Design, 2025(8): 67-70.

[53] 宋德生, 于鲁冀, 曾科, 等. 原位生态净化集成系统对二级生化尾水的处理效果 [J]. 环境工程, 2018, 36(12): 1-5.

SONG D S, YU L J, ZENG K, et al. Treatment effect on in-situ ecological purification integraed system on the secondary biochemical tail water [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(12): 1-5.

[54] 张迎颖, 李敏, 潘吴意, 等. 生态沟渠对农田退水污染物的净化效能及其配置规模 [J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(1): 105-116.

ZHANG Y Y, LI M, PAN W Y, et al. Purification efficiency of pollutants in farmland runoff by the ecological ditch and its configuration scale [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2025, 44(1): 105-116.

[55] 李敏, 张迎颖, 王岩, 等. 不同强化处理措施生态沟渠的净化效果对比分析 [J]. 江苏农业学报, 2025, 41(3): 526-536.

LI M, ZHANG Y Y, WANG Y, et al. Comparative analysis of purification effect of ecological ditches with different enhanced treatment measures [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2025, 41(3): 526-536.