

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.002

高碳工业废水作为外加碳源促进污水厂减污降碳

黄 鹏¹, 杨家奇¹, 金泽豪¹, 张旭波², 钱舒昕³, 邹金特^{1,4}

(1. 浙江工业大学 环境学院, 浙江 杭州 310014; 2. 德清县恒丰污水处理有限公司, 浙江 湖州 313200; 3. 浙江德清晟源环境科技有限公司, 浙江 湖州 313200; 4. 浙江工业大学 绍兴研究院, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 城镇污水处理厂大量碳源的投加导致了污水处理成本升高和碳排放量增加。基于批次实验和污水处理厂实际运行,分析了高碳氮比工业废水作为外加碳源的效果和影响。结果表明,高碳氮比工业废水作为外加碳源不会对污泥微生物活性和出水水质造成负面效应;投加高碳氮比工业废水后,污染物去除效率提高,总氮去除率提升14.1%,处理成本降低24.9%,每万吨水碳排放减少1 640 kg。因此,采用高碳氮比工业废水替代传统外加碳源能够实现污水处理厂的减污降碳。

关键词: 高碳氮比工业废水; 城镇污水处理厂; 外加碳源; 总氮去除; 减污降碳

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0007-07

Promoting Pollution Reduction and Carbon Mitigation in Wastewater Treatment Plants by Using High C/N Industrial Wastewater as External Carbon Source

HUANG Peng¹, YANG Jia-qi¹, JIN Ze-hao¹, ZHANG Xu-bo², QIAN Shu-xin³, ZOU Jin-te^{1,4}

(1. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Deqing County Hengfeng Sewage Treatment Co. Ltd., Huzhou 313200, China; 3. Zhejiang Deqing Shengyuan Environmental Technology Co. Ltd., Huzhou 313200, China; 4. Shaoxing Research Institute, Zhejiang University of Technology, Shaoxing 312000, China)

Abstract: The addition of external carbon sources to municipal wastewater treatment plant (WWTP) has led to increased treatment costs and higher carbon emissions. Based on batch experiments and the actual operation of WWTP, the impact of high C/N industrial wastewater as external carbon source was analyzed. The results indicated that the addition of the high C/N industrial wastewater did not negatively affect sludge microbial activity and effluent quality. Since the addition of high C/N industrial wastewater as external carbon source in WWTP, pollutant removal efficiency was improved, the total nitrogen removal rate was increased by 14.1%, costs was reduced by 24.9% and carbon emissions was reduced by 1 640 kg per 10 000 tons of water. In conclusion, substituting traditional external carbon sources with high C/N industrial wastewater enables the reduction of pollution and carbon emissions in WWTPs.

基金项目: 浙江省基础工艺研究计划项目(LY21E080014); 校企合作研发项目(KYY-HX-20230352)

通信作者: 邹金特 E-mail: zoujinte@zjut.edu.cn

Key words: high C/N industrial wastewater; municipal wastewater treatment plant; external carbon source; total nitrogen removal; pollution reduction and carbon mitigation

我国城镇污水处理厂进水有机物浓度普遍较低,无法满足生物脱氮除磷需求^[1]。城镇污水处理厂为了满足日益严苛的排放标准,尤其是总氮的达标排放,不得不投加大量碳源,这导致污水处理成本大幅增加和更加严峻的碳排放问题^[2-3]。

近年来,采用有机物浓度高、可降解性好、氮磷浓度低的废水作为外加碳源被广泛关注,研究表明,采用该方式能够有效提高污水处理系统的稳定性及脱氮效率,降低碳源投加成本^[4-6]。Bu等^[7]采用木薯酒糟及其厌氧发酵液作为序批式反应器外加碳源处理城镇生活污水,对TN的去除率分别为(72.4±3.2)%和(73.2±2.6)%,优于等量乙酸钠的(62.6±3.5)%。Fernández-Nava等^[8]采用饮料工厂的废水进行反硝化测试,反应4~6 h后无硝酸盐残留。段怡彤等^[9]采用A²O工艺处理模拟生活污水,以啤酒废水作为外加碳源,在一定范围内,随着投加量的增加,总氮去除率提高。

基于此,提出将高碳氮比工业废水作为城镇污水处理厂的外加碳源,以降低污水处理成本和碳排放量。通过分析高碳氮比工业废水的可生化性以及污泥微生物活性的影响,综合实际城镇污水处理厂投加高碳氮比工业废水的成效、经济效益和碳排放计算,考察其作为外加碳源的可行性,为城镇污水处理厂减污降碳提供一种科学的思路和策略。

1 材料和方法

1.1 城镇污水处理厂概况

某城镇污水处理厂位于浙江省德清县,处理规模为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用CAST工艺,具体工艺流程如图1所示。

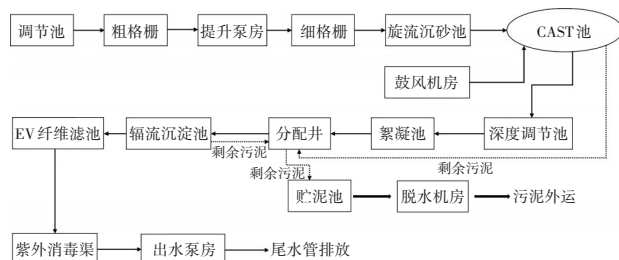


图1 某城镇污水处理厂的工艺流程

Fig.1 Flow chart of a wastewater treatment plant

自2023年5月中旬起,由企业自备运输车将高

碳氮比工业废水运送至污水处理厂调节池,平均投加量约为 $4.60 \text{ m}^3/\text{d}$ (工业废水1)和 $15.89 \text{ m}^3/\text{d}$ (工业废水2)。污水处理厂2022年6月—11月总处理水量为 $231.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,2023年同期总处理水量为 $239.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.2 高碳氮比工业废水水质

高碳氮比工业废水为工业企业进生化池的废水,其中,工业废水1来自某珍珠化妆品企业,水量为 $(4.60 \pm 1.41) \text{ m}^3/\text{d}$;工业废水2来自某酿酒企业,水量为 $(15.89 \pm 1.39) \text{ m}^3/\text{d}$ 。通过现场多次取样分析并结合污水处理厂和工业企业的监测数据,城镇污水处理厂进水以及两种工业废水的水质见表1。

表1 企业生产废水和污水处理厂进水水质

Tab.1 Water quality of the production wastewater and influent of a WWTP

项目	污水厂进水	工业废水1	工业废水2
COD/(mg·L ⁻¹)	32~259	3 320~7 740	2 112~7 852
TN/(mg·L ⁻¹)	5.22~50.4	20.6~36.8	2.49~39.1
NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	1.2~50.3	11.3~19.7	1.3~26.8
TP/(mg·L ⁻¹)	0.4~4.3	0.9~2.8	1.28~13.3
BOD/COD	0.54±0.07	0.37±0.16	0.65±0.03
COD/TN	4.8±0.6	193.4±32.1	259.3±103.5
COD/TP	64.4±45.9	3 252.9±345.4	819.6±472.3

1.3 检测方法

基础水质指标按《水和废水监测分析方法》(第4版)进行分析。其中,COD:重铬酸钾法,NH₄⁺-N:纳氏试剂分光光度法,TN:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,TP:钼酸铵分光光度法。采用比耗氧速率表征污泥的活性,具体方法参考文献[10]。其中测试工业废水1和工业废水2时,分别稀释至COD约300~400 mg/L。通过测定批次实验的污泥浓度(MLVSS),并通过线性回归计算比耗氧速率。NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和COD降解速率的测定参考文献[7]。其中,在测定工业废水的NH₄⁺-N降解速率时稀释至COD约300~400 mg/L,然后投加氯化铵浓溶液使初始NH₄⁺-N浓度约为30 mg/L;测定NO₃⁻-N降解速率时,工业废水稀释至COD约300~400 mg/L,然后向所有实验用水中均投加硝酸钠浓溶液使初

始 NO_3^- -N浓度约为30 mg/L;测定COD降解速率时,工业废水稀释至COD约为400~500 mg/L。实验过程中每隔15~30 min取样,样品经0.45 μm 滤膜过滤后,测定其污染物浓度和MLVSS,通过线性回归的方式计算其降解速率。

1.4 碳排放评估方法

污水处理厂运行阶段的净碳排放根据《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)计算^[11-14]。

CH_4 直接排放量测算公式如下:

$$M_{\text{CH}_4} = Q \times (\text{COD}_{\text{进水}} - \text{COD}_{\text{出水}}) \times \text{EF}_{\text{COD}} \times 10^{-3} \times f_{\text{COD}} \quad (1)$$

式中: M_{CH_4} 为 CH_4 直接碳排放量,kg; Q 为污水处理量, m^3 ; $\text{COD}_{\text{进水}}$ 和 $\text{COD}_{\text{出水}}$ 分别为进、出水COD浓度,mg/L; EF_{COD} 为处理过程中 CH_4 排放因子,其中CAST工艺取值为0.004 9 kg CH_4 /kgCOD; f_{COD} 为 CH_4 温室效应指数,取值为28 kg CO_2 /kg CH_4 。

N_2O 直接排放量测算公式如下:

$$M_{\text{N}_2\text{O}} = Q \times (\text{TN}_{\text{进水}} - \text{TN}_{\text{出水}}) \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}} \times 10^{-3} \times f_{\text{N}_2\text{O}} \quad (2)$$

式中: $M_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 直接碳排放量,kg; Q 为污水处理量, m^3 ; $\text{TN}_{\text{进水}}$ 和 $\text{TN}_{\text{出水}}$ 分别为进、出水TN浓度,mg/L; $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}$ 为处理过程中 N_2O 排放因子,CAST工艺取值为0.004 6 kg CH_4 /kgCOD; $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 温室效应指数,取值为265 kg CO_2 /kg N_2O 。

CO_2 直接碳排放为工业废水运输过程中化石燃料燃烧,测算公式如下:

$$M_{\text{CO}_2} = C_i \times C_L \times C_F \quad (3)$$

式中: M_{CO_2} 为材料运输碳排放量,kg; C_i 为运输量,t; C_L 为材料运输距离,km; C_F 为运输材料的碳排放因子,运输车辆为中型汽油货车(8 t),取值为0.115 kg/(t·km)。

间接排放过程中电耗碳排放测算公式如下:

$$M_e = f_e \times W_i \quad (4)$$

式中: M_e 为电耗碳排放当量,kg; f_e 为电耗碳排放因子,华东区域取值为0.792 1 kg/(kW·h); W_i 为用于生产运行的外购电量,kW·h。

间接排放过程中物耗碳排放测算公式如下:

$$M = \sum_{g=1}^m (f_g \times M_g) \quad (5)$$

式中: M 为物耗 CO_2 排放当量,kg; f_g 为第 g 种化学药剂的 CO_2 排放因子,聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)、次氯酸钠、葡萄糖和乙酸钠取值分别为1.62、1.50、0.92、1.60、1.60 kg/kg; M_g 为第 g 种化学药剂的使用量,kg; m 为化学药剂种类数量。

2 结果与分析

2.1 高碳氮比工业废水作为外加碳源的可行性

2.1.1 反硝化效果

由表1可知,工业废水1和工业废水2的BOD/COD值分别为0.37和0.65,表明两种废水都具有较好的可生化性。此外,两种工业废水都具有较高的有机物浓度,且碳氮比和碳磷比较高,具备作为外加碳源的潜力。为进一步考察工业废水作为外加碳源的可行性,分别测试了不同废水作为碳源时的反硝化效果。结果表明,在120 min的反应过程中,未投加碳源时空白对照组的 NO_3^- -N浓度保持不变,表明实验过程中没有残余碳源的影响;当以污水处理厂进水作为碳源时反硝化速率最低,仅为(2.85±0.46) mg/(gVSS·h);采用乙酸钠作为碳源时反硝化速率最快,达到了(4.49±0.16) mg/(gVSS·h);当以工业废水1和工业废水2作为碳源时反硝化速率处于两者之间,分别为(3.32±0.10)和(3.76±0.04) mg/(gVSS·h),表明两种工业废水的供给电子能力强于污水处理厂进水,能够作为外加碳源,取得较好的反硝化效果。综上所述,乙酸钠供给电子的能力最强,其次是工业废水1和工业废水2,最差的是污水处理厂进水。

尽管乙酸钠的供给电子能力最强,但乙酸钠作为传统商业碳源,使用过程中会产生额外成本,增加污水处理费用。而采用高碳氮比工业废水作为外加碳源,可以解决工业企业的废水处理问题,由企业负责运输费用,并且会支付污水处理厂一定处理费用,因此是一种更具性价比的方式。

2.1.2 工业废水中有机物的降解

采用污水处理厂活性污泥来降解不同废水中的有机物,结果如图2所示。乙酸钠作为易降解有机物,其降解速率最快,达到了(121.5±3.47) mg/(gVSS·h),在好氧降解0.5 h后COD去除率即可达84.8%。污水处理厂进水COD在好氧1 h后达到稳定,降解速率为(27.89±2.13) mg/(gVSS·h),去除率为(62.4±3.8)%。相比之下,工业废水1的COD降

解速率为 $(45.9 \pm 1.7) \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$, 在好氧降解4 h后COD去除率为 $(70.6 \pm 1.5)\%$, 且残存COD有进一步下降的趋势; 工业废水2的COD降解速率为 $(57.1 \pm 6.0) \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$, 在好氧降解2.5 h后COD去除率为 $(91.0 \pm 0.1)\%$ 。乙酸钠、工业废水1和工业废水2的COD降解速率分别是污水处理厂进水的4.4、1.6和2.1倍。其中乙酸钠作为小分子有机物, 结构简单, 降解速率最快。工业废水1组成较为复杂, 可生化降解有机物含量高。工业废水2为酿酒废水, COD主要为醇类、糖类和有机酸等, 降解速率较快。综上, 两种工业废水中的有机物具备较好的生物可降解性能, 并且以其作为外加碳源不会对污水处理厂出水COD的达标排放产生不利影响。

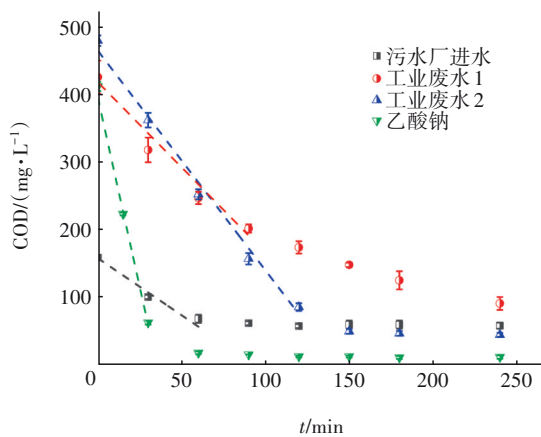


图2 不同废水中COD的降解情况

Fig.2 Degradation of COD in different wastewater

2.1.3 对污泥活性和硝化作用的影响

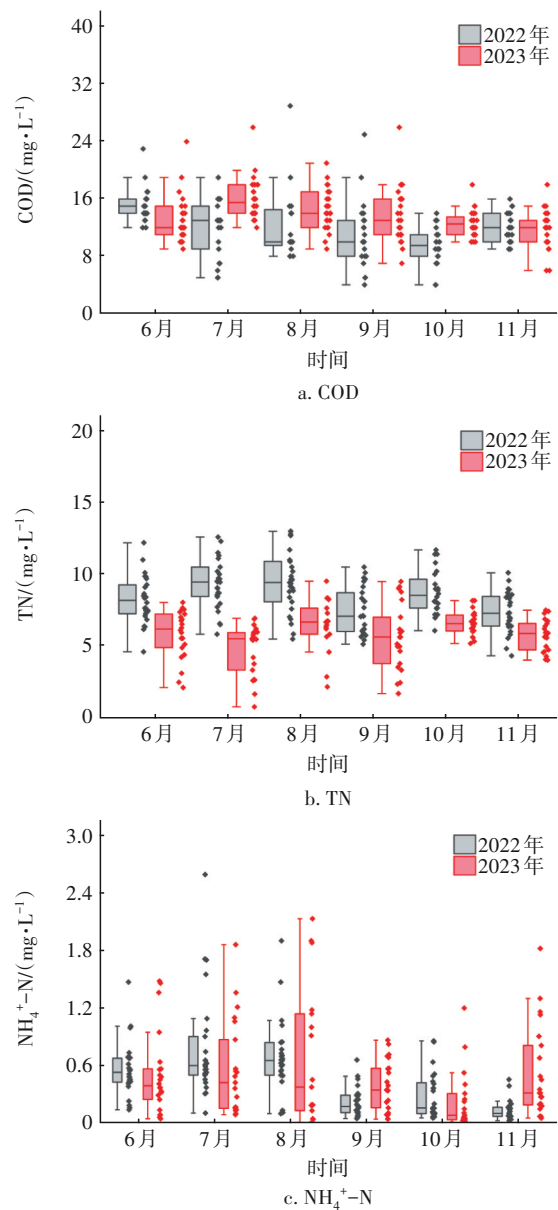
当以污水处理厂进水为底物时比耗氧速率仅为 $(5.38 \pm 0.08) \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$, 而以工业废水1和工业废水2为底物时, 其比耗氧速率分别为 (12.63 ± 0.31) 和 $(15.41 \pm 0.45) \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$, 显著高于以污水处理厂进水为底物时的比耗氧速率。这一结果表明, 工业废水1和工业废水2对污水处理厂活性污泥的活性不仅没有抑制作用, 而且还能提高其活性, 这主要是由于工业废水1和工业废水2中的有机物更容易被污泥微生物降解, 从而表现出较高的比耗氧速率。

当以污水处理厂进水为底物时 NH_4^+-N 降解速率为 $(1.75 \pm 0.01) \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$, 与以工业废水1和工业废水2为底物的 (2.01 ± 0.26) 和 $(1.60 \pm 0.09) \text{ mg}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ 相近, 表明工业废水1和工业废水2对污水处理厂活性污泥的硝化速率无显著影响。

2.2 投加工业废水后污水处理厂的运行效果

2.2.1 污水处理厂出水水质

该污水处理厂在2023年5月中旬开始投加工业废水1和工业废水2作为外加碳源。为分析投加工业废水对污水处理厂出水水质的影响, 对比了2022年6月—11月(未投加工业废水)和2023年6月—11月(投加工业废水)出水COD、TN、 NH_4^+-N 和TP的情况, 结果见图3。投加工业废水前后的平均出水COD、 NH_4^+-N 和TP浓度分别为 (14 ± 3) 、 (0.54 ± 0.50) 、 $(0.25 \pm 0.15) \text{ mg/L}$ 和 (12 ± 4) 、 (0.47 ± 0.38) 和 $(0.14 \pm 0.09) \text{ mg/L}$, 两者没有显著性差异, 表明投加工业废水对出水COD、 NH_4^+-N 和TP的达标排放没有影响。



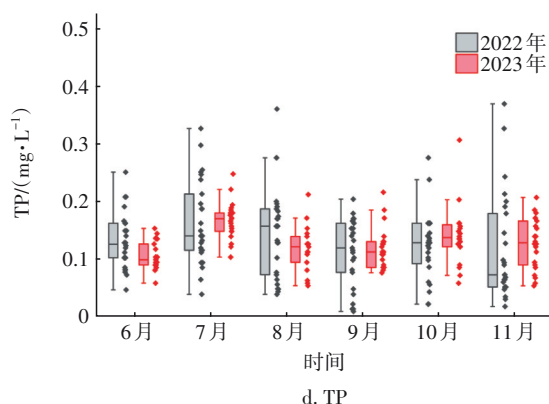


图3 污水处理厂出水水质情况

Fig.3 Effluent quality of wastewater treatment plant

2022年6月—11月污水厂平均出水TN浓度分别为 (8.43 ± 1.65) 、 (10.07 ± 1.76) 、 (8.20 ± 2.12) 、 (7.40 ± 1.67) 、 (8.73 ± 1.52) 和 (7.38 ± 1.45) mg/L, 均高于2023年6月—11月的平均出水TN浓度 (5.81 ± 1.75) mg/L, 这表明投加工业废水作为外加碳源后, 污水处理厂的脱氮效果得到了显著提升。在进水TN浓度相差不大的情况下[分别为 (26.06 ± 8.30) 和 (26.76 ± 8.37) mg/L], 投加工业废水后出水TN浓度显著下降可能与工业废水的生物可降解性有关。工业废水1和2的COD降解速率和作为碳源的反硝化速率均低于乙酸钠, 表明其与乙酸钠相比具有缓释特性, 能够减少碳源的无效消耗, 从而提高脱氮效率。相关文献也有类似报道, 如Fernández-Nava等^[8]采用木薯酒糟厌氧发酵液作为碳源时, 相比采用乙酸钠作碳源的TN去除率提高了10%。

2.2.2 污水处理厂外加碳源量计算

污水处理厂主要采用乙酸钠和葡萄糖作为外加碳源, 并根据进水TN浓度调整投加量。2023年6月—11月, 补充工业废水1和工业废水2作为外加碳源, 以期减少乙酸钠和葡萄糖的投加量。将各种外加碳源转化成COD来计算每个月的投加量, 结果见图4。由于工业废水的投加, 2023年6月—11月的乙酸钠投加量显著低于2022年同期。此外, 在进水TN浓度相差不大的情况下, 2023年6月—11月的总碳源投加量低于2022年同期, 同时平均TN去除率提高了14.1%。有研究表明, 采用发酵液、工业废水和农业食品废水等作为碳源时, 微生物有更多的能量进行反硝化和磷的吸收, 可取得更高的氮、磷去除效率^[8,15-16]。碳源的种类和数量对脱氮效果有着显著影响, 其中慢速生物降解碳源的水解速

率成为微生物生长的限制因素, 控制着反硝化速率。综上所述, 采用有机物降解速率低的工业废水作为碳源, 能减少碳源的无效消耗, 提高反硝化脱氮效率, 从而减少外加碳源的投加量。

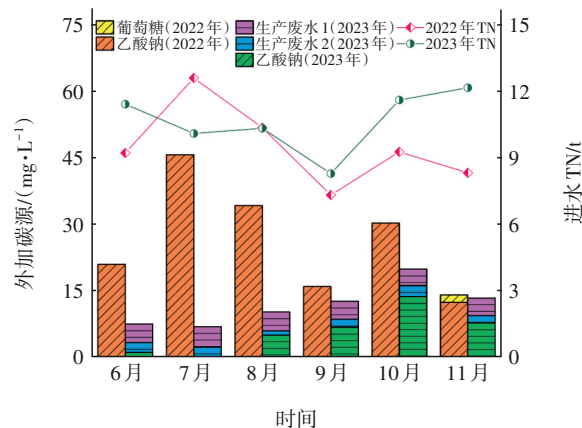


图4 污水处理厂碳源投加量和进水TN情况

Fig.4 Carbon source dosage and influent TN in a WWTP

2.3 经济成本计算

为评估采用工业废水作为碳源对污水处理成本的影响, 综合分析了外加工业废水后污水处理成本的主要影响因素: 药剂成本(碳源、絮凝剂)、电力消耗、剩余污泥处置、企业自建设备处理工业废水及工业废水的运输。

根据污水处理厂提供的数据, 乙酸钠(液体)和葡萄糖的市场价格分别为750和1300元/t, 絮凝剂(以聚合氯化铝为主)和消毒剂(次氯酸钠)的价格分别为2400和7600元/t。2022年6月—11月, 乙酸钠和葡萄糖总的投加费用为297057元; 而投加工业废水后, 2023年同期乙酸钠和葡萄糖的投加费用降低至66435元。此外, 由于废水处理量的提高, 其他化学药剂费从2022年的88348元增加至2023年的102083元, 电力消耗从2022年的266214元增至2023年的326612元(污水处理厂提供)。污泥处置成本主要包含运输、药剂和水电成本, 合计280元/t。投加工业废水后, 外加碳源总量减少, 污泥处置量由2022年的1070.3t降低到2023年的875.9t, 污泥处置成本由299684元降低到245252元, 共降低54432元。投加工业废水后, 该污水处理厂6月—11月总处理成本由2022年的95.2万元降至2023年的74.0万元, 降幅达22.2%。平均单位处理成本由0.41元/m³减少至0.31元/m³, 降幅达24.9%。综上所述, 采用高碳氮比工业废水作为污

水处理厂外加碳源具有显著的经济效益。

工业废水1和工业废水2运输至污水处理厂处理(分别约为827.9、2 859.3 t),其运送成本(油耗以15 L/100 km计算,工业废水1和工业废水2的运送距离分别为10、7.7 km)分别为9 106.8和24 218.3元。此外,企业运送工业废水需向污水处理厂支付6元/m³的处理费。企业1和企业2的吨水费用分别为17和14.5元/m³。但根据企业提供的数据并参考相关文献,高碳氮比工业废水由企业自己处理时,包括废水处理设施的初始投资、12.5元/m³的折旧费以及4元/m³的运营费用,总计成本约为16.5元/m³。因此,运输工业废水至污水处理厂,对于企业1而言运营成本没有明显差异,企业2则可以降低约2元/m³的处理成本。

2.4 碳排放核算

根据IPCC的指导方法,污水处理厂的温室气体排放分为直接排放和间接排放。直接排放主要存在于有机物厌氧消化或好氧化降解过程中,以及在硝化和反硝化脱氮过程中产生的温室气体,如CH₄、N₂O和CO₂。间接排放是指与污水处理厂操作相关的碳足迹,主要为电力和化学品的消耗。通过计算得到污水处理厂的碳排放情况如表2所示。相较于2022年,2023同期处理量提高了8.1×10⁴ m³,CH₄直接碳排放小幅度上升,伴随着TN去除率的提高,可以观察到N₂O直接碳排放量显著增加。工业废水采用车辆运输过程中,存在化石燃料燃烧产生的化石碳,2023年新增CO₂直接碳排放2 940 kg。电耗间接碳排放是污水处理碳占比最高的部分,由于污水处理量的提高,污水处理厂的耗电量也随之增加,碳排放量由2022年的298 772 kg提升至2023年的366 631 kg。化妆品、酿酒等企业废水中的有机物主要来源于生物质而非化石碳,作为外加碳源使用后产生生物源CO₂,不视作附加碳排放^[17]。所以污水处理厂采用工业废水作为外加碳源后,乙酸钠类商业碳源的投加量明显降低,促使物耗碳间接排放从192 793 kg减少到85 208 kg。2022年6月—11月的碳排放总量为571 757 kg,每万吨水碳排放为24 691 kg;在使用工业废水作为外加碳源后,2023年同期总碳排放量减少至552 433 kg,每万吨水碳排放为23 051 kg。

综上所述,使用高碳氮比工业废水作为外加碳源后,每万吨水处理的碳排放减少1 640 kg。将高

碳氮比工业废水作为外加碳源能显著降低药剂费用和碳排放量,是一种污水处理厂减污降碳的有效方法。

表2 污水处理厂碳排放计算

Fig.2 Carbon emissions of wastewater treatment plant

项目	2022年6月—11月		2023年6月—11月	
	排放量/kg	占比/%	排放量/kg	占比/%
CH ₄ 直接碳排放	31 046	5.4	36 447	6.6
N ₂ O直接碳排放	49 145	8.6	61 195	11.1
CO ₂ 直接排放	—	—	2 940	0.5
电耗间接碳排放	298 772	52.3	366 631	66.4
物耗间接碳排放	192 793	33.7	85 208	15.4

3 结论

① 高碳氮比工业废水作为外加碳源不会影响污泥微生物活性,也不会对污水处理厂出水达标排放造成不利影响。

② 投加高碳氮比工业废水作为外加碳源可以有效提高污水的脱氮效率,平均TN去除率提高14.1%。

③ 污水处理厂投加高碳氮比工业废水作为外加碳源时,单位处理成本由0.41元/m³减少至0.31元/m³,降幅达24.9%,且处理万吨水的碳排放量减少1 640 kg。

参考文献:

- [1] ZHENG Q, MA Y, WAN J, *et al.* Hydrolysate derived from sugarcane bagasse by hydrothermal and enzymatic treatment as an external carbon source for wastewater nitrogen removal [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 59: 105039.
- [2] 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实验 [J]. *环境工程*, 2022, 40 (6): 212-218.
WU Yuxing, WANG Xiaodong, CHEN Ning, *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 (in Chinese).
- [3] 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 Xiaohu, ZHANG Chen, ZHANG Linwei, *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 (in Chinese).
- [4] 付昆明, 杨宗玥, 刘凡奇, 等. 碳源种类对农村污水反硝化过程脱氮效果的影响 [J]. *环境工程学报*, 2020, 14 (9): 2331–2338.
- FU Kunming, YANG Zongyue, LIU Fanqi, *et al.* Effect of carbon sources on nitrogen removal in denitrification process of rural wastewater [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14 (9): 2331–2338 (in Chinese).
- [5] SWINARSKI M, MAKINIA J, CZERWIONKA K, *et al.* Comparison of the effects of conventional and alternative external carbon sources on enhancing the denitrification process[J]. *Water Environment Research*, 2009, 81 (9): 896–906.
- [6] HE J X, ZHOU S F, HUANG S B, *et al.* Pretreated corn husk hydrolysate as the carbon source for aerobic denitrification with low levels of N_2O emission by thermophilic *Chelatococcus daeguensis* TAD1[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227 (4): 1–12.
- [7] BU F, HU X, XIE L, *et al.* Cassava stillage and its anaerobic fermentation liquid as external carbon sources in biological nutrient removal [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2016, 16 (4): 304–316.
- [8] FERNÁNDEZ-NAVA Y, MARAÑÓN E, SOONS J, *et al.* Denitrification of high nitrate concentration wastewater using alternative carbon sources [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173 (1/3): 682–688.
- [9] 段怡彤, 刘方婧, 陈昊, 等. 啤酒废水作为 A^2/O 工艺外加碳源的可行性研究 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42 (10): 3009–3013.
- DUAN Yitong, LIU Fangqian, CHEN Hao, *et al.* Research on feasibility of beer wastewater as an external carbon source to enhance nitrogen and phosphorus removal in the A^2/O process [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42 (10): 3009–3013 (in Chinese).
- [10] PARK S, CHO K, LEE T, *et al.* Improved insights into the adaptation and selection of *Nitrosomonas* spp. for partial nitrification under saline conditions based on specific oxygen uptake rates and next generation sequencing [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153644.
- [11] 王洪臣, 陈加波, 张景炳, 等. 《污水处理厂低碳运行评价技术规范》标准解读及案例展示 [J]. *环境工程学报*, 2023, 17 (3): 705–712.
- WANG Hongchen, CHEN Jiabo, ZHANG Jingbing, *et al.* Standard interpretation and case presentation *Technical Specification for Low-carbon Operation Evaluation of Sewage Treatment Plant* [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17 (3): 705–712 (in Chinese).
- [12] 张岳, 葛铜岗, 孙永利, 等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37 (9): 65–74.
- ZHANG Yue, GE Tonggang, SUN Yongli, *et al.* Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37 (9): 65–74 (in Chinese).
- [13] ZHOU X X, YANG F, FENG D X, *et al.* Analyzing greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment plants using pollutants parameter normalizing method: a case study of Beijing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376: 134–143.
- [14] PARRAVICINI V, SVARDAL K, KRAMPE J. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants [J]. *Energy Procedia*, 2016, 97: 246–253.
- [15] FENG X C, BAO X, CHE L, *et al.* Enhance biological nitrogen and phosphorus removal in wastewater treatment process by adding food waste fermentation liquid as external carbon source [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2021, 165: 1078–1091.
- [16] LIANG Y F, HUANG Z C, PANG Z R, *et al.* A municipal wastewater treatment plant “drinking beer” for reduction of cost and carbon emission [J]. *RSC Advance*, 2023, 13 (29): 20113–20123.
- [17] LI L Q, WANG X H, MIAO J Y, *et al.* Carbon neutrality of wastewater treatment—a systematic concept beyond the plant boundary [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2022, 11: 100–118.

作者简介: 黄鹏(1999–), 男, 浙江丽水人, 硕士, 主要研究方向为废水生物处理及资源化。

E-mail: hp15857866657@163.com

收稿日期: 2024-06-17

修回日期: 2024-07-30

(编辑: 李德强)