

丁亮. 复合碳源在污水处理厂中的应用[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 127-135.

Ding L. Application of composite carbon sources in WWTPs [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 127-135.

复合碳源在污水处理厂中的应用

丁 亮*

(湖州市水务集团有限公司, 浙江湖州 303000)

摘要 【目的】浙江省某污水处理厂目前以乙酸钠作为碳源,为了节省运行成本,亟待选择性价比高的替代碳源。【方法】本文选择安全性好、成本低的5种复合碳源作为小试样品同乙酸钠进行小试试验,筛选出最适合污水处理厂微生物的复合碳源样品,通过在生化池开展复合碳源与乙酸钠的对比投加工程应用试验,主要从碳源投加量、对水质指标的影响、污泥浓度变化和经济效能等方面分析,评价筛选出的复合碳源实际应用效果。【结果】小试试验3号碳源的脱氮效果优于其他碳源,选择其进行工程应用试验;工程应用试验中,在进水水质稳定,出水水质达标的情况下,复合碳源较乙酸钠少投加 22.12 kg/km^3 ;投加了乙酸钠的1号生化处理线平均出水总氮、化学需氧量(COD)、氨氮、总磷质量浓度和pH值分别为6.51、17.08、0.11、0.24 mg/L和7.46,投加了复合碳源的2号生化处理线平均出水总氮、COD、氨氮、总磷质量浓度和pH值分别为6.38、17.31、0.11、0.25 mg/L和7.48;2号生化处理线混合液悬浮固体(MLSS)和混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)均略低于1号生化处理线;经过计算,吨水消耗复合碳源较乙酸钠节省费用42%。【结论】复合碳源在不影响出水水质的情况下完全可以替代乙酸钠,并且投加量更低,生物利用率更好,不增加生化池污泥浓度,在成本方面更有优势,具有良好的应用前景。

关键词 污水处理厂 厌氧-缺氧-好氧(AAO) 复合碳源 乙酸钠 脱氮

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)02-0127-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.013

Application of Composite Carbon Sources in WWTPs

Ding Liang*

(Huzhou City Water Group Co., Ltd., Huzhou 303000, China)

Abstract [Objective] A wastewater treatment plant (WWTP) in Zhejiang Province currently uses sodium acetate as a carbon source. To reduce operating costs, it is urgent to find a more cost-effective alternative carbon source. [Methods] This paper selected five composite carbon sources with good safety and low cost as pilot samples to conduct pilot tests alongside sodium acetate. The aim was to identify the most suitable composite carbon source for the microorganisms in WWTPs. Through comparative application experiments of composite carbon sources and sodium acetate in biochemical tanks, the paper analyzed the actual application effects of the selected composite carbon sources from aspects such as the dosage of carbon sources, their impact on water quality indices, changes in sludge concentration, and economic efficiency. [Results] The denitrification effect of carbon source No. 3 in the pilot test was superior to other carbon sources, leading to its selection for the engineering application test. In the engineering application test, when the influent quality was stable and the effluent quality met the standards, the composite carbon source required 22.12 kg/km^3 less sodium acetate than sodium acetate. The No. 1 biochemical treatment line, which used sodium acetate, had an average effluent mass concentrations of total nitrogen, chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen, total phosphorus, and pH value of 6.51, 17.08, 0.11, 0.24 mg/L and 7.46, respectively. The No. 2 biochemical treatment line, which used the composite carbon source, had an average effluent mass concentrations of total nitrogen, COD, ammonia nitrogen, total phosphorus, and pH value of 6.38, 17.31, 0.11, 0.25 mg/L and 7.48. The mixed liquid suspended solids (MLSS) and mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) of the No. 2 biochemical treatment line were slightly lower than those of the No. 1 biochemical treatment line. After calculation, using the composite carbon source instead of sodium acetate saved 42% of the cost per ton of water. [Conclusion] The composite carbon source can fully replace sodium acetate without compromising effluent quality, with a lower dosage, better biological utilization, and no

[收稿日期] 2025-07-02

[通信作者] 丁亮(1977—),男,高级工程师,主要从事工业水处理、市政给排水等工作,E-mail:15320045@qq.com。

increase in the sludge concentration of the biochemical tank, offering advantages in cost, and has a promising application prospect.

Keywords wastewater treatment plant (WWTP) anaerobic-anoxic-oxic(AAO) composite carbon source sodium acetate denitrification

《水污染防治行动计划》提出:到 2030 年,全国七大重点流域水质优良比例总体达到 75%以上,城市建成区黑臭水体总体得到消除,城市集中式饮用水水源水质达到或优于Ⅲ类比例总体为 95%左右。不断提高的环境标准对污水处理提出了更高的要求,目前,《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 排放标准要求:化学需氧量(COD)质量浓度 ≤ 50 mg/L,总氮(TN)质量浓度 ≤ 15 mg/L,氨氮质量浓度 ≤ 5 mg/L,总磷(TP) ≤ 0.5 mg/L^[1],更有甚出水将达到地表水更高排放标准 COD 质量浓度 ≤ 30 mg/L, TN 质量浓度 ≤ 10 mg/L,氨氮质量浓度 ≤ 1.5 mg/L, TP 质量浓度 ≤ 0.3 mg/L^[2-3]。然而,我国污水普遍存在有机物含量偏低,氮、磷含量偏高,碳氮比(C/N)低特点,采用常规脱氮工艺无法满足反硝化阶段对碳源的需求,导致反硝化过程受阻,大大影响了污水处理的脱氮效果,出水 TN 成为每个污水处理厂达标排放的制约因素。目前,外加碳源是解决污水中 C/N 低的主要方法,常用的外加碳源有甲醇、乙酸、葡萄糖和乙酸钠等^[4-5]。甲醇易燃易爆,有毒性,属危化品,它在存储、加药系统及安全措施投入的成本较高且存在安全隐患;乙酸同样具有易燃易爆的危险性,存在安全隐患;葡萄糖大量使用易引起反硝化细菌大量繁殖,造成污泥膨胀,并且温度降低时葡萄糖会产生结晶,影响系统运行;乙酸钠反硝化速率快,来源广泛,使用安全而被普遍使用,但作为单一短链碳源,碳源利用途径单一,且易被微生物优先利用,长期使用后会导致污水处理系统内微生物反硝化途径单一,酶种类减少,进水含有的其他种类 COD 碳源利用途径受到抑制,进而影响了 TN 的去除效果,增加了碳源投加成本^[6-7]。

针对传统单一碳源的缺点,近年来出现了一些 COD 当量高、易生物利用、投加简便、冬季不易结晶的复合碳源。复合碳源为近几年新兴产品,其由 2 种或 2 种以上的有效碳源组成,有效碳源成分之间须兼容且无化学反应、不存在安全风险的碳源。复合碳源大多数为液体,其成分多样,微生物的适应能力强,是污水处理厂作为外加碳源的选择。徐熊鲲等^[8]在反硝化深床滤池经济脱氮上,对固体三水乙

酸钠、液体乙酸钠和液体复合碳源做应用对比试验,结果表明:3 种碳源均能实现 TN 稳定去除,液体复合碳源较乙酸钠溶液节省 32%的药剂成本,较固体三水乙酸钠节省 62%的药剂成本,复合碳源在投加量和药剂成本上具有较大优势。郑搏英等^[9]研究采用自主研发混合配制的复合碳源,作为外加碳源进行实际污水中 TN 的去除验证,以乙酸钠作为对照,结果表明:复合碳源在污泥系统培养及污水处理上,总体应用效果优于乙酸钠,复合碳源 COD 当量高,投加量少,运行成本低,营养成分丰富,可有效促进微生物的生长繁殖。在补充碳源进行反硝化作用的同时,提高了生化系统的微生物活性,丰富了菌群的多样性,为污泥系统的生长及反硝化过程提供了更加高效的营养型复合碳源。

马瑞良^[10]研究多元醇复合碳源以中试规模应用于乳制品生产废水反硝化脱氮外加碳源试验,并以乙酸钠作为外加碳源进行了对比试验,结果表明:多元醇复合碳源作为外加碳源满足脱氮除磷的需求,成本远低于乙酸钠;混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)较乙酸钠提升 18%~21%,胞外聚合物(EPS)总量较乙酸钠组降低 13.75%,其中溶解型 EPS 占比显著升高,导致污泥沉降性能提升 19.6%,系统内微生物多样性显著高于乙酸钠组,可定向富集脱氮除磷功能菌,从而实现高效脱氮除磷;处理出水中残留的有机物未对哺乳动物细胞产生显著毒性作用,且其生物安全性与传统碳源乙酸钠相当,尾水污染物在可控范围内,重金属浓度远低于阈值。朱艳芳等^[11]研究红薯渣和污泥发酵所得有机酸应用到污水处理外加碳源,结果表明:红薯渣和城市污泥混合发酵产酸比单一污泥发酵效果更好,混合发酵所得有机酸除磷和脱氮的效果优于污泥热碱预处理碳源和乙酸钠。

虽然复合碳源与单一碳源相比有诸多优势,但由于复合碳源相关国家及行业标准还不健全,复合碳源配制成分复杂,品质差距较大,不同配制成分的复合碳源微生物利用度存在较大差异。

浙江省某污水处理厂,设计处理规模为 7.5 万 m^3/d ,采用厌氧-缺氧-好氧(AAO)法处理工艺,2024 年该厂的平均进水量约 6 万 m^3/d ,由于来水

C/N 较低,为保证污水达标排放需加入大量碳源(液体乙酸钠 20 万 COD 当量),为了节省碳源投加费用,急需性价比高的碳源,节省运行成本。考虑到复合碳源的优势,为了科学有效减少污水处理厂碳源投加成本,采用小试试验进行脱氮效果的试验测试,筛选出最适合污水处理厂微生物的复合碳源,然后再进行工程应用试验,并进行经济效能评估。

1 试验材料和方法

1.1 小试试验材料和方法

小试试验在污水处理厂内进行,为了构造高效、

稳定和低成本的复合碳源,选取以微生物利用持久、安全性高、成本低的多元醇与微生物利用率高的短链有机酸为主要核心成分的复合碳源进行试验,通过调配原料比例,形成多元醇:短链有机物质量比分别为 100:0、75:25、50:50、25:75、0:100 的 5 种复合碳源样品,作为小试样品同污水厂的乙酸钠及空白组进行脱氮效果的试验测试,筛选出最适合污水处理厂微生物的复合碳源样品。

1.1.1 复合碳源性能指标

5 种复合碳源性能指标,如表 1 所示。

表 1 复合碳源检测数据

Tab. 1 Detection Data of Composite Carbon Sources

样品	COD/ (mg · L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg · L ⁻¹)	pH 值	TP/(mg · L ⁻¹)	TN/(mg · L ⁻¹)	硫酸盐/ (mg · L ⁻¹)	氯化物/ (mg · L ⁻¹)	凝固点/°C
1 号碳源	2.25×10 ⁵	1.28×10 ⁵	7.72	0.29	125	4.7	2.5	-34
2 号碳源	2.21×10 ⁵	1.32×10 ⁵	6.72	0.79	96	6.9	6.7	-22
3 号碳源	2.02×10 ⁵	1.22×10 ⁵	6.83	0.97	111	9.0	6.5	-18
4 号碳源	2.09×10 ⁵	1.28×10 ⁵	7.33	0.61	102	6.3	6.8	-19
5 号碳源	2.20×10 ⁵	1.21×10 ⁵	6.70	0.67	94	7.8	8.0	-22

注:BOD₅ 为五日生化需氧量。

根据 5 种不同配比的复合碳源检测数据来看,COD 质量浓度均≥20 万 mg/L,其他指标均满足《废(污)水处理用复合碳源》(HG/T 5960—2021)中表 1 和表 2 的各项指标要求^[12]。

1.1.2 试验材料和测试标准

试验材料:500 mL 烧杯 7 个、九连搅拌器 1 套、1 L 容量瓶 1 个、移液管、洗瓶、洗耳球、玻璃棒等若干。

TN 的测定:《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)。

1.1.3 试验步骤

取样点选在好氧池末端,作为试验泥水样(取 4 L 泥水样),试验在 20~25 °C 的恒定室温中进行,步骤:①测碳源 COD 浓度、泥水样上清液的 TN 浓度;②将摇匀的泥水样分别倒入 7 个 500 mL 烧杯中,每个烧杯倒入 500 mL 泥水样,并标注序号为 1~7 号;③在 320 r/min 缓慢搅拌条件下,分别向 1~6 号烧杯中投加 C/N 约 5 的定量的碳源,7 号烧杯作为空白;④碳源药剂投加后,缓慢搅拌 1~7 号烧杯样品做反硝化反应 3 h,每隔 60 min 从 500 mL 烧杯中取出 20 mL 的小样放入 1~7 号小烧杯中静沉

30 min,取上清液检测 TN;⑤根据空白未加药数据,以及 1~6 号碳源降低去除 TN 数据,计算 1~6 号样品碳源反硝化 C/N。

1.2 工程应用试验方法

通过小试试验,筛选出具有良好脱氮效果的复合碳源,为了更好地评价复合碳源的实际应用效果,自 2025 年 4 月 1 日开始,在生化池正式开展复合碳源药剂与现场用乙酸钠的对比投加试验。

污水处理厂生化系统有 2 条平行处理线,单条线设计处理能力约 3.75 万 m³/d,目前实际处理量为 3 万 m³/d,在进水水质基本相同的情况下进行同时期平行比对试验。其中,一条线投加乙酸钠,另一条线投加复合碳源。依据缺氧池末出水硝酸盐氮和生化系统出水 TN 数据每 4 h 调整一次碳源投加量。其中:在 2025 年 4 月 1 日—2 日是 2 d 的复合碳源适应期,适应期间各项出水指标均正常后进入为期 15 d(2025 年 4 月 3 日—17 日)的稳定试验期。以稳定期的数据为正式试验数据,从脱氮投加量、对水质影响、污泥浓度变化等方面对 2 种碳源进行分析。相关水质指标使用污水处理厂化验设备化验。

为确保试验期间碳源准备充足,预测碳源投加

量如下:反硝化是利用有机物(以 COD 表示)中的电子将硝酸盐(NO₃⁻)中的氮(N)通过一系列中间产物(NO₂⁻、NO、N₂O)还原为氮气(N₂)的生物化学过程。还原硝酸盐氮理论所需的 COD 可用式(1)计算。

$$C_1 = \frac{C_2 E_N M_0}{M_N E_0} \quad (1)$$

其中: C₁——反硝化过程有机物消耗量(以 COD 表示), mg/L;

C₂——硝酸盐氮(NO₃⁻-N)还原量, mg/L;

E_N——还原 NO₃⁻-N 所需电子数, N⁵⁺ 还原为 N, 故取 5;

M_N——N 的摩尔质量, 14 g/mol;

E_O——有机物还原氧所需电子数, O 还原为 O²⁻, 故取 2;

M_O——O 的摩尔质量, 16 g/mol。

由式(1)可知, 还原 1 g NO₃⁻-N(以 N 元素计)理论需 2.86 g COD, 即反硝化的理论 C/N 为 2.86。但在实际运营中, 合适的 C/N 与反硝化池停留时间、回流比、微生物菌落特性和碳源的微生物利用效率等多种因素相关。彭永臻等^[13]通过中试试验研究 C/N 对以 AAO 为主工艺的污水脱氮除磷性能的影响, 结果表明: 在进水 C/N 约 3.3 和 6 时系统的脱氮除磷效果较差, C/N 约 4.5 时系统的脱氮除磷性能最佳。张为堂等^[14]研究 C/N 对以 AAO 为主工艺的运行性能的影响, 结果表明: 结合 TN 和 PO₄³⁻ 的去除特性, 适宜 C/N 为 4.6~6.8。

综上所述, 为确保反硝化顺利进行, 本次试验按进水 C/N 为 5 时预测碳源投加量。

2024 年 4 月污水处理厂平均进水 COD、TN 质量浓度分别为 136、32 mg/L。预测碳源投加量可用式(2)计算。

$$M_C = K_2 \frac{(K_1 M_{TN} - M_{COD})}{N} \quad (2)$$

其中: M_C——碳源投加量, kg/km³;

M_{TN}——进水 TN 质量浓度, mg/L;

M_{COD}——进水 COD 质量浓度, mg/L;

K₁——预测进水 C/N, 取 5;

K₂——单位换算常数, 1×10⁶ kg/km³;

N——碳源的 COD 当量, 取 2×10⁵ mg/L,

mg/L。

预估 2024 年 4 月污水处理厂平均进水 COD 和 TN 指标为试验期间指标, 代入式(2)预测碳源投加量为 120 kg/km³, 按每条线处理量为 3 万 m³/d 计算, 乙酸钠和复合碳源投加量预估分别需 3 600 kg/d。

2 结果和讨论

2.1 小试试验结果和讨论

复合碳源和原水厂乙酸钠 COD 实测值, 如表 2 所示。

表 2 复合碳源和乙酸钠 COD 实测值
Tab. 2 Measured COD Values of Composite Carbon Sources and Sodium Acetate

样品	COD/(mg · L ⁻¹)
1 号样品	2.25×10 ⁵
2 号样品	2.21×10 ⁵
3 号样品	2.02×10 ⁵
4 号样品	2.09×10 ⁵
5 号样品	2.20×10 ⁵
6 号样品(乙酸钠)	2.26×10 ⁵

泥水样品补充碳源后初始 COD、反应过程中 TN 和 C/N 等数据, 如表 3 所示。

从 1 h 数据可以看出, 4 号和 5 号碳源的脱氮效果均优于水厂使用的乙酸钠碳源。

从 2 h 数据可以看出, 在第 1 h 去除效果不太理想的 1 号、2 号和 3 号碳源也有了较好的脱氮效果, 5 种复合碳源脱氮效果均优于乙酸钠, 其中 3 号碳源脱氮效果最优。

从 3 h 数据可以看出, 2 号和 4 号碳源脱氮效果略差于乙酸钠, 1 号、3 号和 5 号碳源脱氮效果均优于乙酸钠, 其中仍以 3 号碳源脱氮效果最优。

综上所述, 4 号碳源和 5 号碳源前期脱氮效果好且 C/N 较低, 随着时间延长, 4 号碳源脱氮效果逐渐下降, 5 号碳源脱氮效果维持较好状态; 1 号、2 号碳源和 3 号碳源脱氮潜力较大, 经过驯化或者缺氧池停留时间足够长的情况下反硝化速率逐渐升高, 其中以 3 号碳源脱氮效果较好, 并优于 5 号碳源。

考虑到污水处理厂反硝化池停留时间为 2~3 h, 依据小试试验结果, 3 号碳源更适合本污水处理厂, 因此, 选择其进行工程应用试验。

表3 小试试验数据汇总
Tab. 3 Summary of Small-Scale Test Data

指标	1号烧杯 (1号碳源)	2号烧杯 (2号碳源)	3号烧杯 (3号碳源)	4号烧杯 (4号碳源)	5号烧杯 (5号碳源)	6号烧杯 (乙酸钠)	7号烧杯 (空白)
补充碳源后初始 COD/(mg·L ⁻¹)	112	110	112	114	110	116	29
1 h 后 TN/(mg·L ⁻¹)	19.58	18.86	17.98	14.68	15.42	15.73	21.48
2 h 后 TN/(mg·L ⁻¹)	7.67	8.65	6.98	7.40	7.81	8.04	19.98
3 h 后 TN/(mg·L ⁻¹)	4.24	5.74	3.11	5.20	3.51	4.09	18.42
1 h 去除 TN/(mg·L ⁻¹)	3.02	3.74	4.62	7.92	7.18	6.87	1.12
2 h 去除 TN/(mg·L ⁻¹)	14.93	13.95	15.62	15.20	14.79	14.56	2.62
3 h 去除 TN/(mg·L ⁻¹)	18.36	16.86	19.49	17.40	19.09	18.51	4.18
1 h C ₀ /N	37.06	29.41	24.22	14.39	15.31	16.88	25.89
2 h C ₀ /N	7.50	7.88	7.17	7.50	7.44	7.97	11.08
3 h C ₀ /N	6.10	6.53	5.75	6.55	5.76	6.27	6.94

注: C₀/N 为初始 COD 除以去除 TN 的浓度; 去除 TN 越少、C₀/N 越高, 脱氮效果越差。

2.2 工程应用试验结果和讨论

指标如图 1 所示。

2.2.1 稳定期进水水质分析

试验期间进水水质波动较小, COD 质量浓度在

稳定期生化系统进水 COD、氨氮、TP、TN 和 pH

110~200 mg/L, 氨氮质量浓度在 24~45 mg/L, TP

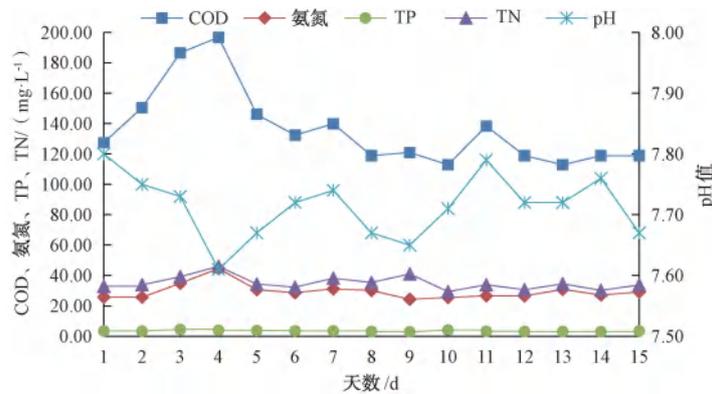


图1 生化系统进水水质指标

Fig. 1 Influent Quality Indices of Biochemical System

质量浓度在 2~5 mg/L, TN 质量浓度在 27~46 mg/L, pH 值在 7.6~7.8。

2.2.2 稳定期乙酸钠和复合碳源投加量分析

稳定期乙酸钠和复合碳源投加量如图 2 所示。

由图 1 和图 2 可知, 试验期间碳源的投加量随进水水质的变化明显, 进水 COD 浓度高、TN 浓度低时碳源投加量减少, 反之则碳源投加量增加, 期间第 6~9 d 碳源投加量显著增加, 分析其原因为进水 C/N 分别为 4.1、3.7、3.4、3.0, C/N 显著降低, 为确保出水 TN 达标, 需添加足够的碳源供微生物进行反硝化脱氮, 依据缺氧池末出水 NO₃⁻-N 和生化系统

出水 TN 数据定时调整碳源投加量, 按复合碳源和乙酸钠 COD 当量为 2×10⁵ mg/L 计算, 第 6~9 d 1 号线的 COD 去除量/TN 去除量分别为 4.98、4.61、4.55 和 4.55, 2 号线分别为 4.94、4.59、4.36 和 4.19, 符合实际运行值。试验期间复合碳源投加量略低于或与乙酸钠投加量持平, 乙酸钠添加了 41 334 kg, 复合碳源添加了 31 392 kg, 总处理水量为 898 758 m³, 按照 2 个系列处理水量相同计算每个系列处理水量为 449 379 m³, 经分析复合碳源平均投加量约 69.86 kg/km³, 乙酸钠平均投加量约 91.98 kg/km³, 复合碳源较乙酸钠约少投加 22.12

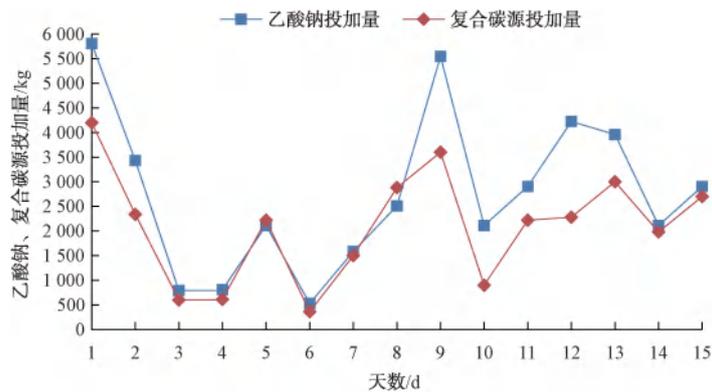


图2 稳定期乙酸钠和复合碳源投加量

Fig. 2 Sodium Acetate and Composite Carbon Sources Dosage in Stable Phase

kg/km³。复合碳源较乙酸钠投加量低,且两者均比预估值低的原因主要为一方面,碳源实际消耗量与进出水的 COD 和 TN 消耗量有直接关系,预估阶段仅以进水水质预测估值略大;另一方面,碳源投加量依据缺氧池末出水 NO₃-N 每 4 h 调整一次,可较为精准地依据脱氮效率调整碳源投加量。

2. 2. 3 稳定期出水水质分析

同时期平行比对试验的 2 条生化处理线,其中投加乙酸钠的处理线为 1 号线,投加复合碳源的处理线为 2 号线。2 条线出水 TN 情况如图 3 所示,出水 COD 情况如图 4 所示,出水氨氮、TP 和 pH 如图 5 所示。

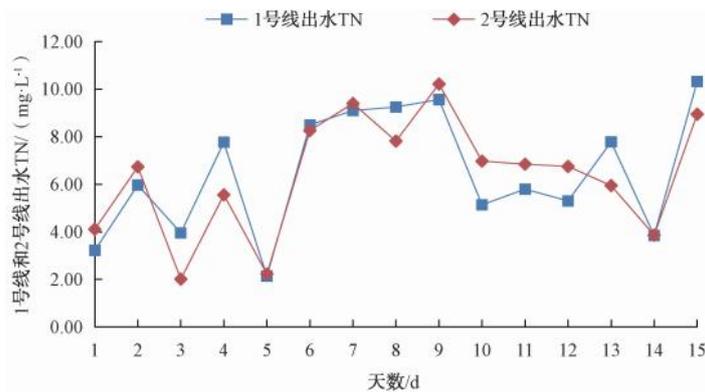


图3 2条生化处理线出水 TN

Fig. 3 Effluent TN of Two Biochemical Treatment Lines

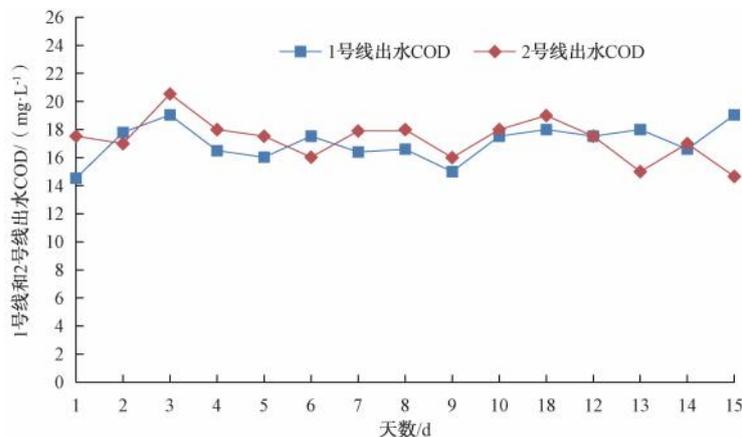


图4 2条生化处理线出水 COD

Fig. 4 Effluent COD of Two Biochemical Treatment Lines

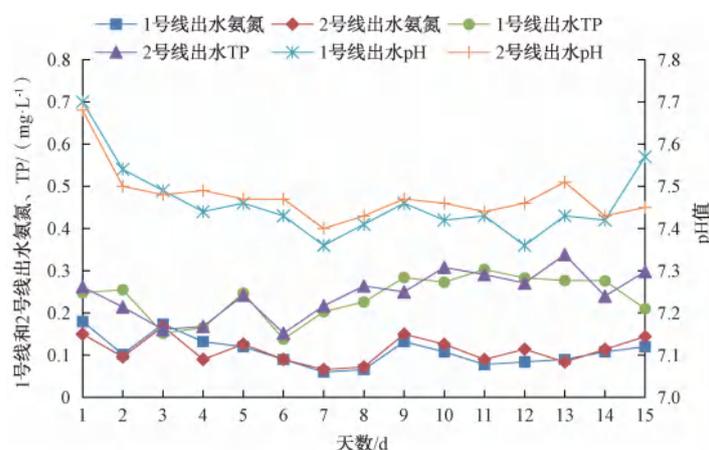


图5 2条生化处理线出水氨氮、TP和pH值

Fig. 5 Effluent Ammonia Nitrogen, TP, and pH Values of Two Biochemical Treatment Lines

由图3可知,试验期间投加了乙酸钠的1号生化处理线出水TN质量浓度在2.13~10.32 mg/L,平均出水TN质量浓度为6.51 mg/L;投加了复合碳源的2号生化处理线出水TN质量浓度在2.01~10.22 mg/L,平均出水TN质量浓度为6.38 mg/L。生化系统投加复合碳源与乙酸钠相比出水TN相差较小。

由图4可知,试验期间投加了乙酸钠的1号生化处理线出水COD质量浓度在14.53~19.04 mg/L,平均出水COD质量浓度为17.08 mg/L;投加了复合碳源的2号生化处理线出水COD质量浓度在14.66~20.54 mg/L,平均出水COD质量浓度为17.31 mg/L。生化系统投加复合碳源与乙酸钠相比出水COD相差较小,同时2号线出水COD稳定无大的波动,说明复合碳源可完全降解,不会对出水COD造成不良影响。

由图5可知,试验期间投加了乙酸钠的1号生化处理线出水氨氮、TP质量浓度和pH值分别在0.06~0.18、0.14~0.28 mg/L和7.36~7.70,平均出水质量浓度分别为0.11、0.24 mg/L,平均出水pH值为7.46;投加了复合碳源的2号生化处理线出水氨氮、TP质量浓度和pH值分别在0.07~0.17、0.15~0.34 mg/L和7.40~7.68,平均出水质量浓度分别为0.11、0.25 mg/L,平均出水pH值为7.48。生化系统投加复合碳源与乙酸钠相比出水氨氮、TP和pH相差较小,同时出水氨氮、TP和pH稳定无大的波动,复合碳源可完全降解,并且可以参与除磷的生化过程,不会对出水氨氮、TP和pH造成不良影

响。

2.2.4 稳定期复合碳源与乙酸钠的生化池污泥浓度分析

试验期间生化池混合液悬浮固体(MLSS)和混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)变化情况如图6所示。

由图6可知,试验期间两生化池污泥浓度的变化基本一致。两生化池污泥浓度相差均较小,2号线MLSS和MLVSS均略低于1号线,说明相比于乙酸钠碳源,复合碳源反硝化脱氮利用率较高,不会额外增加生化池污泥浓度。

综上所述,碳源投加稳定期间,1号线和2号线的TN和COD等出水水质指标相差较小,污泥浓度2号线略低于1号线,说明投加2号线的复合碳源在不影响出水水质的情况下完全可以替代原水厂投加的乙酸钠,并且与投加乙酸钠相比不增加生化池污泥浓度,甚至污泥浓度略低,生物利用率更好。

2.3 经济效能评估

在整个试验期间保证进水水质、水量一致,出水水质100%达标情况下,按乙酸钠投加量为91.98 kg/km³,复合碳源投加量为69.86 kg/km³,乙酸钠为1.3元/kg。复合碳源为1元/kg。核算加药成本如下:乙酸钠消耗约0.12元/m³;复合碳源消耗约0.07元/m³;吨水消耗复合碳源较乙酸钠节省42%。

3 结论

(1)通过小试试验研究,从脱氮效果分析筛选出更适合污水处理厂的复合碳源,并在污水厂内进

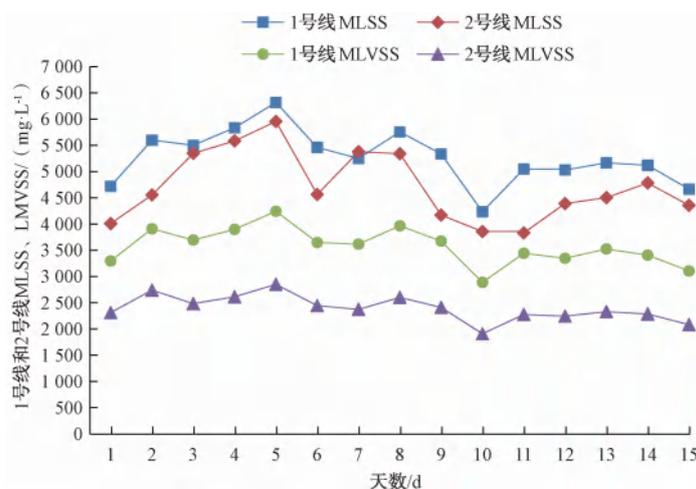


图6 2条生化处理线 MLSS 和 MLVSS 变化

Fig. 6 Changes in MLSS and MLVSS of Two Biochemical Treatment Lines

行工程应用试验,平行对比了投加复合碳源和乙酸钠的效果,结果表明,生化系统投加2种碳源的出水TN和COD等水质指标相差较小,复合碳源的生化池污泥浓度略低,生物利用率更高,完全可以替代原水厂投加的乙酸钠。

(2)通过经济效能分析,复合碳源用量较乙酸钠低且单价便宜,预期水厂碳源成本可进一步降低,吨水消耗复合碳源较乙酸钠节省42%。

(3)复合碳源与乙酸钠相比,在脱氮利用率和成本方面更有优势,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] GB 18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. GB 18918—2002 Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant [S].
- [2] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. GB 3838—2002 Environmental quality standards for surface water[S].
- [3] 闫萍,安莹玉. 城镇污水处理厂原位扩容及提标技术应用现状[J]. 给水排水, 2024, 50(9): 43-49. Yan P, An Y Y. Application status of in-situ expansion and upgrading technology of urban sewage treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(9): 43-49.
- [4] 张民权,刘永,范杰,等. 新型高效复合碳源的制备及其在反硝化脱氮中的应用[J]. 给水排水, 2019, 45(s1): 153-158. Zhang M Q, Liu Y, Fan J, et al. Preparation of a new efficient composite carbon source and its application in denitrification and denitrification [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45 (s1): 153-158.
- [5] 丁晓萍,丁海兵,宁守俭. 一种新型高能碳源的污水处理效能研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(6): 216-220. Ding X P, Ding H B, Ning S J. Wastewater treatment efficiency of a new type of high-energy carbon source [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(6): 216-220.
- [6] 童俊,齐书华,陈银霞,等. 复合碳源应用于光电废水总氮提标[J]. 净水技术, 2024, 43(s2): 101-107. Tong J, Qi S H, Chen Y X, et al. Application of composite carbon source to upgrading standard for total nitrogen removal in photoelectric wastewater [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(s2): 101-107.
- [7] 申响政. 复合碳源与乙酸钠碳源反硝化情况研究性对比试验[J]. 山东化工, 2021, 50(24): 249-256. Shen X Z. Comparative experiment on denitrification of compound carbon source and sodium acetate carbon source [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(24): 249-256.
- [8] 徐熊鲲,戚阳军,蒋沛廷,等. A²/O+反硝化深床滤池在城镇污水处理厂深度经济脱氮的运行优化[J]. 水处理技术, 2024, 50(2): 130-134. Xu X K, Qi Y J, Jiang P T, et al. Operation optimization of advanced and economic nitrogen removal in A²/O+ deep denitrification bed filter process in municipal wastewater treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(2): 130-134.
- [9] 郑搏英,路青,丁鹏佳. 复合碳源在实际污水厂中脱氮应用验证[J]. 河南化工, 2023, 40(3): 45-47. Zheng B Y, Lu Q, Ding P J. Application verification of composite carbon source for denitrification in actual sewage plant [J]. Henan Chemical Industry, 2023, 40(3): 45-47.
- [10] 马瑞良. 多元醇精馏残渣作为反硝化碳源的制备及应用研究[D]. 扬州:扬州大学, 2024. Ma R L. Study on the preparation and application of distillation residue solution as a carbon source for denitrification [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.

- [11] 朱艳芳, 刘宏波, 马惠君, 等. 红薯渣和城市污泥混合发酵产酸强化污水脱氮除磷[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 687-691.
Zhu Y F, Liu H B, Ma H J, et al. Sweet potato residue mixed sludge fermentation producing acid to enhance denitrification and phosphorus removal [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(2): 687-691.
- [12] HG/T 5960—2021 废(污)水处理用复合碳源[S].
HG/T 5960—2021 Composite carbon source for sewage and wastewater treatment[S].
- [13] 彭永臻, 潘聪, 孙事昊, 等. 进水碳氮比对中试 AAO-BAF 系统脱氮除磷性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(9): 904-910.
Peng Y Z, Pan C, Sun S H, et al. Effect of influent $\rho(C)/\rho(N)$ on the nitrogen and phosphorus removal performance of pilot-scale AAO-BAF [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(9): 904-910.
- [14] 张为堂, 薛晓飞, 庞洪涛, 等. 碳氮比对 AAO-BAF 工艺运行性能的影响[J]. 化工学报, 2015, 66(5): 1925-1930.
Zhang W T, Xue X F, Pang H T, et al. Effect of C/N on performance of AAO-BAF process[J]. CIESC Journal, 2015, 66(5): 1925-1930.

(上接第 126 页)

- Wang B, He J, Che L L, et al. Utilization of rural domestic sewage as a resource: Progress, dilemmas, and future [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(5): 1255-1264.
- [5] 朱永茂, 刘伟, 张建美, 等. 蔬菜型人工湿地资源化处理农村分散生活污水[J]. 水处理技术, 2024, 50(1): 105-110.
Zhu Y M, Liu W, Zhang J M, et al. Resourceful treatment of scattered domestic sewage in rural areas by vegetable constructed wetland [J]. Water Treatment Technology, 2024, 50(1): 105-110.
- [6] 张文强, 刘璐, 胡飞超, 等. 湖南省农村生活污水产污特征及影响因素分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(21): 55-60.
Zhang W Q, Liu L, Hu F C, et al. Characteristics and influencing factors of rural domestic sewage in Hunan Province [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(21): 55-60.
- [7] 张鼎强, 蔡天洲, 杨帆, 等. 改良 SBR 工艺处理分散式农村生活污水效能研究[J]. 工业水处理, 2023, 43(11): 167-172.
Zhang D Q, Cai T Z, Yang F, et al. Study on the efficiency of improved SBR process for the treatment of dispersed rural domestic wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(11): 167-172.
- [8] 李杉, 马鑫文, 吴勇, 等. 川中丘陵区农村生活污水资源化利用后的土壤养分特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 114-120.
Li S, Ma X W, Wu Y, et al. Soil nutrient characteristics after rural domestic sewage resource utilization in hilly areas of central Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 114-120.
- [9] 汪浩, 王俊能, 陈尧, 等. 我国农村化粪池污染物去除效果及影响因素分析[J]. 环境工程学报, 2021, 15(2): 727-736.
Wang H, Wang J N, Chen Y, et al. Pollutant-removal performance of rural septic tank and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(2): 727-736.
- [10] 张卓群, 杨希, 李焱, 等. 重庆城市住宅小区化粪池进出水水质监测与分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(11): 82-89.
Zhang Z Q, Yang X, Li Y, et al. Monitoring and analysis of septic tank influent and effluent quality in Chongqing urban residential communities [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(11): 82-89.
- [11] 徐路遥, 罗敏, 马玲玲, 等. AAO 工艺+絮凝沉淀处理高 COD 废水[J]. 水处理技术, 2021, 47(3): 98-101, 105.
Xu L Y, Luo M, Ma L L, et al. AAO process+floculation and precipitation treatment of high concentration COD Wastewater [J]. Water Treatment Technology, 2021, 47(3): 98-101, 105.
- [12] 葛聪, 薛晓飞, 穆永杰, 等. 微氧曝气—一段式厌氧氨氧化—反硝化组合工艺处理餐厨沼液[J]. 环境工程学报, 2023, 17(4): 1111-1117.
Ge C, Xue X F, Mu Y J, et al. The treatment of food waste digestate by combined process of micro-oxygen aeration, one-stage anaerobic ammonification and denitrification [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(4): 1111-1117.
- [13] 陈锐, 崔贤程, 黄天寅, 等. 分散式农村生活污水处理设施统一管理研究——以平望镇为例[J]. 给水排水, 2020, 46(9): 15-19, 59.
Chen R, Cui X C, Huang T Y, et al. Research on unified management mode of decentralized rural domestic sewage treatment facilities: A case study of Pingwang Town [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(9): 15-19, 59.
- [14] 高生旺, 黄治平, 夏训峰, 等. 农村生活污水治理调研及对策建议[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 276-282.
Gao S W, Huang Z P, Xia X F, et al. Investigation and countermeasures of rural domestic sewage treatment [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(2): 276-282.