

复合碳源对焦化废水反硝化脱氮性能的影响探究

张玉华, 沈天曦, 解万友, 付雪玲

神美科技有限公司, 河北 沧州

收稿日期: 2024年10月14日; 录用日期: 2024年11月14日; 发布日期: 2024年12月24日

摘要

焦化废水成分复杂, 含有大量的酚类、氨氮、苯等有毒有害物质, 难以处理, 又因为其中BOD含量较低, 难以维持生化污泥法中微生物生长繁殖, 更加容易造成反硝化过程中容易碳源不足, 影响后续反硝化脱氮, 因此在生化反硝化脱氮一直是整个行业的难点, 备受焦化行业关注。本文分析研究在焦化废水处理工艺中使用后置反硝化池分别加入乙酸钠与复合碳源, 对比出水中的COD、总氮、吨水处理成本、处理总氮成本, 复合碳源均有较大优势, 达到了降本增效的目的。

关键词

焦化废水, 反硝化脱氮, 复合碳源, 乙酸钠, 后置反硝化

Composite Carbon Source for Exploring the Impact on Denitrification Performance in Coking Wastewater Treatment

Yuhua Zhang, Tianmeng Shen, Wanyou Xie, Xueling Fu

Shenmei Technology Co., Ltd., Cangzhou Hebei

Received: Oct. 14th, 2024; accepted: Nov. 14th, 2024; published: Dec. 24th, 2024

Abstract

Coking wastewater has a complex composition and contains a large amount of toxic and harmful substances such as phenols, ammonia nitrogen, and benzene, which are difficult to treat. Moreover, due to its low BOD content, it is difficult to maintain the growth and reproduction of microorganisms in the biochemical sludge process, making it more prone to carbon source shortage during

文章引用: 张玉华, 沈天曦, 解万友, 付雪玲. 复合碳源对焦化废水反硝化脱氮性能的影响探究[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(6): 1308-1319. DOI: 10.12677/aep.2024.146165

denitrification, which affects subsequent denitrification. Therefore, biochemical denitrification has always been a difficult point in the entire industry and has attracted much attention from the coking industry. This article analyzes and studies the use of post denitrification tanks to add sodium acetate and composite carbon sources in coking wastewater treatment processes. By comparing the COD, total nitrogen, ton water treatment cost, and total nitrogen treatment cost in the effluent, the composite carbon source has significant advantages, achieving the goal of cost reduction and efficiency improvement.

Keywords

Coking Wastewater, Denitrification, Composite Carbon Source, Sodium Acetate, Post Denitrification

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在进水碳源不足的情况时,大多数污水厂会采用外加碳源的形式进行补充 COD,碳源提供电子供体,水中 NOX-N 作为电子受体,进而将水中总氮去除,保证出水达标排放[1]。外加碳源的方式在工业水处理中尤为明显,本文主要针对某钢厂焦化废水处理工艺中两后置反硝化滤池作为研究对象,对复合碳源与乙酸钠进行对比研究,通过平行投加两种液体碳源药剂,进行生产性实验,在实验进行过程中控制反硝化池运行参数一致,保证实验的准确性、统一性[2]。碳源的性能、价格,直接影响到水处理过程中的成本,在研究过程中确定复合碳源的可投加性,进一步节能降耗,达到降本增效的目的。

2. 污水处理工艺、水质简介

1) 湖北某钢厂焦化废水处理站,每天处理水量约为 4000 m³,主要处理工艺为:调节池 + 预处理池 + AAO + 一沉池 + 后置反硝化池 A、B (并联处理) + 再曝气池 + 二沉池,水处理站系统进水主要是全厂的炼焦、煤气净化及焦油加工、粗苯加工过程中排出的含酚、氰、氮等的物质的废水,鉴于上游复杂成分的来水,生化系统进水 COD、TN 则会受进水的影响产生一定的波动,若来水毒性较大,还会造成硝化菌种及反硝化菌种的抑制或死亡现象,对生化系统产生一定的冲击。

2) 后置反硝化池内挂有帘式组合纤维填料,采用生物挂膜的方式进行总氮的去除,后置反硝化 A、B 采取并联方式进行走水,填料组成成分为: PE 中心挂绳、PE 环片、醛化维纶丝花束,适合水处理工艺中沿程各处理阶段 - 厌氧、缺氧、兼氧,在挂膜、脱膜方面有较高优势,适合生物挂膜,增加生物丰度、浓度,有助于处理各项污染物,性价比较高[3]。

3) 依据目前近半个月平均水量、后置反硝化池(单池)池容计算其后置反硝化池的 HRT: 现场后置反硝化池单池水力停留时间约为 10 h。

3. 生产性实验方案

3.1. 复合碳源的确定

取好氧池末端泥水混合样,用硝酸钾补加硝态氮源至 71.22 mg/L。取复合碳源 A、B、C 同现场碳源乙酸钠进行对比试验。为避免投加引起的误差,碳源均按体积比稀释 10 倍后备用。分别在同等 COD

浓度(碳源贡献 COD)、不同投加量的梯度下, 对比相同反应时间不同碳源的反硝化速率的影响, 见图 1、图 2。

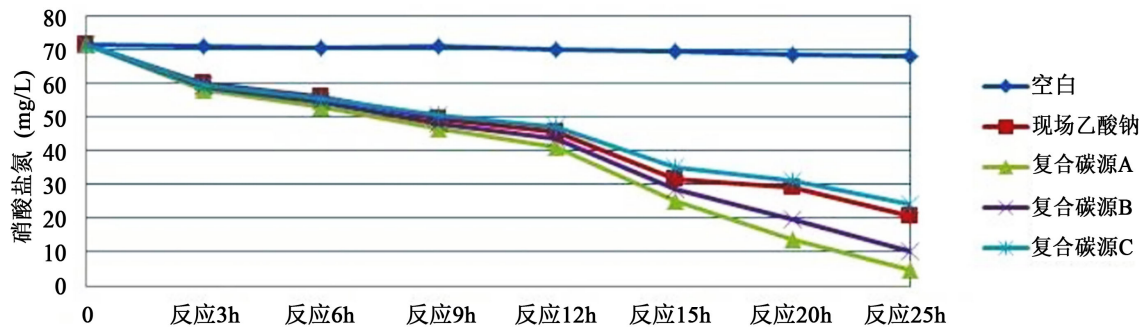


Figure 1. Comparison of denitrification rates
图 1. 脱氮速率对比

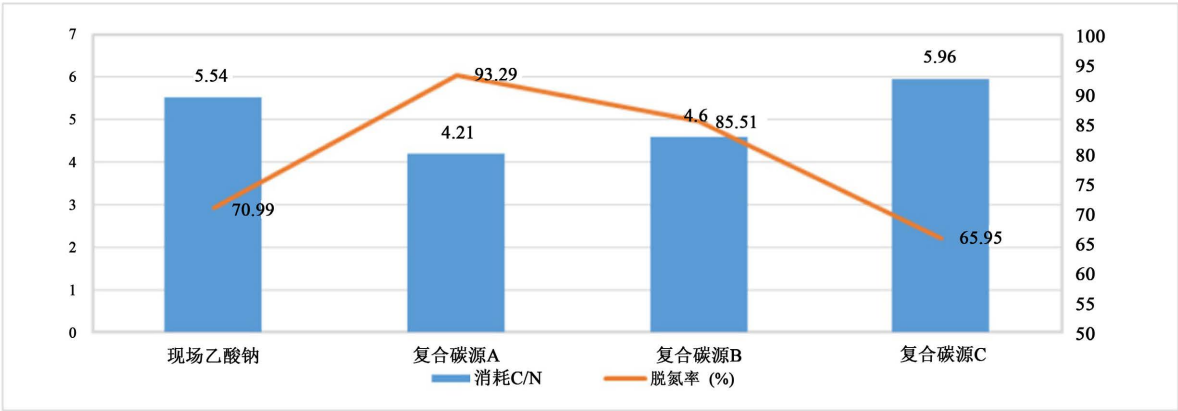


Figure 2. Comprehensive denitrification rate of composite carbon source
图 2. 复合碳源综合脱氮率图

根据前期调研与小试实验, 选取不同复合类型碳源与现场碳源进行对比, 复合碳源 A (100 万 COD) 脱氮效果最优, 经 25 h 反硝化, 脱氮率为 93.29%, 脱氮消耗 C/N 为 4.21, 优于现场碳源。

最终选择此款 100 万 COD 当量的复合碳源 A 进行现场工程实验。

3.2. 复合碳源药剂优势

3.2.1. 反硝化机理优势

复合碳源 A (以下简称复合碳源) 产品由短链醇/酸、营养, 并将多种营养盐、微生物促生药剂、微生物营养因子、糖开环催化剂等有益成分加入其中, 有助于微生物群落生长, 保证微生物的丰富性, 在生化池尤其缺氧池的投加过程中优先满足反硝化菌种的繁殖增长及保持丰度活性所需的能量, 增加反硝化对于碳源的利用率, 有助于反硝化生化体系的维持与优化[4]。

3.2.2. 碳源组分优势

作为一种新型复合碳源, 分子量较小、微生物容易代谢, 不同碳源的复合组分更有利于多种微生物的生长及反硝化过程, 组分中的各种微生物促进剂、糖开环催化剂、微生物益生因子能够有效地提高反硝化速率, 以及促进微生物体系反硝化代谢趋势。

3.3. 生产性实验计划

根据历史数据分析，后置反硝化池进水(一沉池出水)总氮在 40~80 mg/L 的区间波动，本次试验加药情况依据进水浓度而做调整，制定如下投加计划表。

投加量及试验初步计划如下表 1 所示，大试期间可根据实际进水浓度情况随时调整。

Table 1. Control plan for carbon source trial chemicals (single series operation)

表 1. 碳源大试药剂控制计划表(单系列运行)

阶段	投加比例	时间计划(天)	现场乙酸钠投加量(吨/天)	现场乙酸钠预计用量(吨)	新碳源投加量(吨/天)	新碳源预计用量(吨)
中试试验 (第一周)	现场碳源 VS 复合碳源(8:2)	2	以实际进水浓度而定	/	以实际进水浓度而定	/
	现场碳源 VS 复合碳源(5:5)	3	以实际进水浓度而定	/	以实际进水浓度而定	/
中试试验 (第二周)	全部替换	8	以实际进水浓度而定	/	以实际进水浓度而定	/
中试试验 (第三周)	全部替换	8	以实际进水浓度而定	/	以实际进水浓度而定	/
合计		21	/	/	/	/

- 备注：
- 1) 现场碳源 COD 当量:经取样检测现场乙酸钠碳源的 COD 当量为 17 万 mg/L,复合碳源 COD 当量 100 万 mg/L;
 - 2) 替换期(7 天),为保证系统的稳定性及微生物的有效适应,初期替换在同等 COD 投加的基础上 * 1.2 系数;
 - 3) 稳定期(7 天),为保证系统的稳定性及微生物的有效适应,在同等 COD 投加的基础上 * 1.1 系数;
 - 4) 新碳源完全替换后根据现场生化段的运行情况逐步增减用量;
 - 5) 替换过程中,单系列运行,以上单沟进水量以 90 m³/h 进行计算,实际进水量以生产来水而定。

3.4. 生产性实验方案

(1) 碳源加药系统

现场需具备至少一套加药系统用于单独储存复合碳源和投加复合碳源，原碳源尽量不与复合碳源混合存放，否则会影响 COD 的当量和碳源使用效果。碳源的加药泵具备流量可调，并且满足碳源的最低和最高流量要求，详见表 2。

Table 2. Experimental equipment and related parameters

表 2. 实验设备及相关参数

机械隔膜泵流量(L/H)	泵头材质 PVC; 流量 40 L/h; 压力 10 Bar; 功率 60 W; 电压 380 V; 品牌 WRS; 型号 MG-40/10
6 mm 管线	200 米
电线	40 米

(2) 大试投加方案

1) 为了避免复合碳源替换过程中对出水造成 TN 波动，本次试验计划采取单系列逐步替换投加(根据现场情况而定)，受系统管路改造限制，复合碳源单独加管线至后置反硝化池(图 3、图 4)；

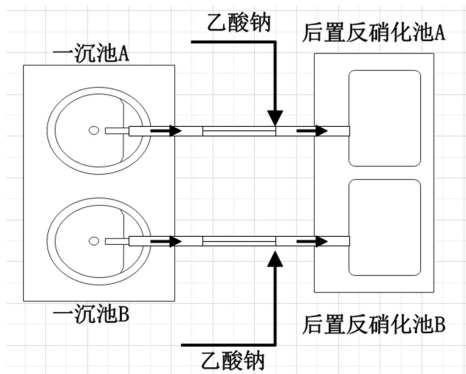


Figure 3. The original dosing point of the system
图 3. 系统原来加药点

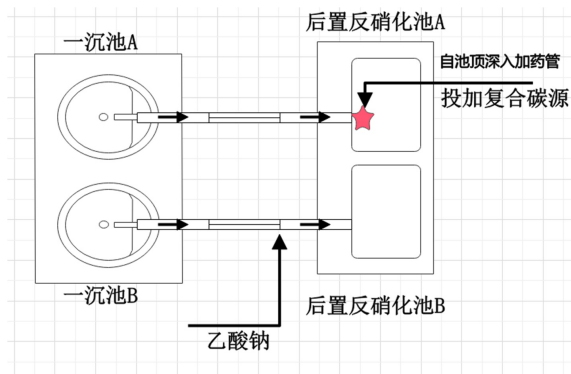


Figure 4. Dosing points of the modified system
图 4. 改造后系统加药点

2) 复合碳源投加技术方案(根据一沉池出水 TN 投加):

碳源提供电子供体, 水中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 作为电子受体, 进而将水中总氮去除, 保证出水达标排放。

复合碳源一般采用湿式投加, 若选用复合碳源为外加碳源时, 明确其 COD 当量为 1.0 kgCOD/kg 复合碳源, 复合碳源溶液投加量按下式估算为:

$$\text{MC} = K \times (\text{TNeff} - 0.8 \times \text{TN 限值}) \times Q / (X \times 1000)$$

Mc 为每天复合碳源溶液投加量(kg);

K 为每单位硝态氮转化为氮气所需的 COD 当量, 一般取值范围 $4.5\sim6 \text{ (mg COD/mg N)}$, K 的值取决于投加碳源种类、水力停留时间、进水水质、MLSS(污泥浓度)等; 在实际调控初期, 可取高值, 待出水 TN 稳定达标之后, 继续调整回流量、曝气量等参数, 系统稳定后, 循序渐进下调 K 以降低碳源投加量;

TNeff 为生化系统一沉池出水实测 TN 浓度(mg/L);

Q 为进水量(m^3/d)。

由于微生物对于新碳源需要一定时间的适应, 为了确保出水稳定达标排放, 前期会按照脱氮 C/N 过量投加, 且驯化期间不断监测活性污泥的反硝化速率, 通过对比驯化不同阶段的反硝化速率来表征驯化的终点, 根据出水总氮数据及反硝化速率灵活调整碳源投加量[5]。

3.5. 实验评价方法

1) 主要评价指标

碳投加量，吨水处理成本、去除单位总氮成本。

2) 测定指标、周期

碳源大试数据检测计划如下表 3。

Table 3. Carbon source test data testing plan
表 3. 碳源大试数据检测计划表

序号	分类	测定指标	取样点	测定周期
1	主要指标	进水量、COD _{cr} 、TN	后置反硝化池进水、出水	4 小时一次
2	参考指标	NH ₃ -N、硝态氮、亚硝态氮		4 小时一次

3.6. 应急预案措施

前端活性污泥系统或者后置反硝化在运行过程中，有时会出现异常情况，使处理效果降低，污泥流失，为确保大试过程的稳定运行，现制定如下指标应急解决方案。

3.6.1. 氨氮超标解决办法

氨氮超标原因及解决措施如下表 4。

Table 4. Reasons and solutions for excessive ammonia nitrogen
表 4. 氨氮超标原因及解决措施

可能原因	措施	措施适用条件
曝气不足，需检查好氧池 DO 是否下降 DO 升高，微生物中毒，无法进行硝化反应	增加曝气量，提高好氧池 DO 减少进水或间歇进水、间歇曝气，减小回流或加大排泥	后置反硝化池出水 氨氮升高
碱度不足(出水碱度 < 70 mg/L)	按照 1 mg/L 氨氮对应 7.14 mg 碱度投加碳酸氢钠	
MLSS 低 污泥解体造成硝化细菌流失	减少排泥，提高 MLSS 运行不当曝气过量或污泥中毒等	

3.6.2. TN 超标解决办法

出水氨氮正常，TN 增加或超标，可能原因及解决措施见下表 5。

Table 5. Reasons and solutions for TN exceeding standards
表 5. TN 超标原因及解决措施

可能原因	措施	措施适用条件
进水 TN 升高	1、增加内回流比；增加碳源投加量； 2、试验组可在缺氧池应急投加乙酸钠； 3、若试验组在缺氧池应急投加乙酸钠后，出水 TN 依然有上升的趋势，可适当减少复合碳源的投加量，在进口端增大乙酸钠的投加量。	后置反硝化池出水 总氮升高
缺氧池 DO 增加，影响脱氮反应进行	调小好氧池末端曝气量，降低内回流液 DO；	
碳源不足或投加量偏小	增大碳源投加量；	
MLSS 降低	减少排泥，提高 MLSS	
内回流比偏小	应适当增大内回流量	
有毒有害物质进入，抑制反硝化作用	减少或间歇进水、间歇曝气，减小回流或加大排泥	

3.6.3. COD 超标解决办法

COD 超标原因及解决措施如下表 6。

Table 6. Reasons and solutions for COD exceeding standards
表 6. COD 超标原因及解决措施

可能原因	措施	措施适用条件
溶解氧低	1、增加曝气量，提高好氧池 DO； 2、若 TN 达标，出水 COD 超标，可以适当减少碳源的投加量； 3、若 TN 不达标，出水 COD 超标，1) 增大好氧池溶解氧；2) 减少进水量；3) 两后置反硝化池重新加入乙酸钠碳源，在增加乙酸钠的投加量同时，减少复合碳源的投加量。	后置反硝化池出水 COD 升高
MLSS 低	减少排泥，提高 MLSS	
难降解或有毒物质	减少或间歇进水、间歇曝气，减小回流或加大排泥	

4. 结果与分析

在碳源药剂投加过程中，两后置反硝化池保持稳定运行，生化过程中硝酸盐或亚硝酸盐被还原成氮气释放到空气中，进而达到了去除总氮的目的[6]。碳源作为反硝化细菌工作与生长繁殖必须的因素，不同的碳源对反硝化细菌影响不同[7]。

污水脱氮处理过程中，外加辅助碳源消耗/利用途径包含以下三个方面：

A、反硝化过程的利用：为反硝化与释磷过程提供电子、能量——有效利用，保证脱氮效率[8]；

B、微生物的生长繁殖：好氧异养微生物繁殖生长吸收消耗碳源中有机物——低效无效吸收，增加污泥量[9]；

C、曝气氧化消耗：在工艺中被曝气等因素氧化分解掉——无效消耗，运行成本增加[10]。

在此次针对焦化废水，加入复合碳源与乙酸钠进行对比，评价它们在相同运营条件下的反硝化性能、脱氮成本，两种碳源药剂都能够很好地进行反硝化，提供的 COD 能够很好地被吸收利用，后置反硝化池剩余 COD 不多，但去除总氮，但效率、综合成本有所差异[11]。

4.1. 后置反硝化池出水 COD 数据对比

1) 在初期替换期间，前 5 天，后置反硝化池 A 池投加碳源时，以复合碳源与按照一定比例投加，将现场菌群逐步驯化，以达到稳定替换的目的；

2) 试验期间，一沉池出水(后置反硝化池进水)COD 含量一直在 250 mg/L 至 300 mg/L 之间小幅度波动，后置反硝化池 A 池与 B 池进水水体一致，运行工况一致，能够满足两种碳源平行对比需求；

3) 后置反硝化 A 池投加复合碳源后，出水 COD 稳步下降，波动性较小，基本维持在 50 mg/L~96 mg/L，大部分 COD 数据维持在 90 mg/L 以下，而后置反硝化 B 池出水 COD 使用乙酸钠后，出水 COD 基本在 90 mg/L~120 mg/L，波动较大。

后置反硝化池进出水 COD 如下表 7、图 5。

Table 7. Comparison of COD data for inflow and outflow of post denitrification tank
表 7. 后置反硝化池进出水 COD 数据对比

时间/天	COD (mg/L)		
	一沉池出水	后置反硝化 A 池	后置反硝化 B 池
1	256	96	105
2	280	84	110
3	268	85	98
4	285	89	106
5	264	81	110
6	258	78	98
7	288	87	94
8	276	89	98
9	264	74	96
10	259	71	120
11	276	79	112
12	284	75	95
13	265	71	97
14	284	69	98
15	276	72	109
16	258	65	92
17	265	66	83
18	271	63	97
19	248	60	96
20	273	59	92
21	298	58	109

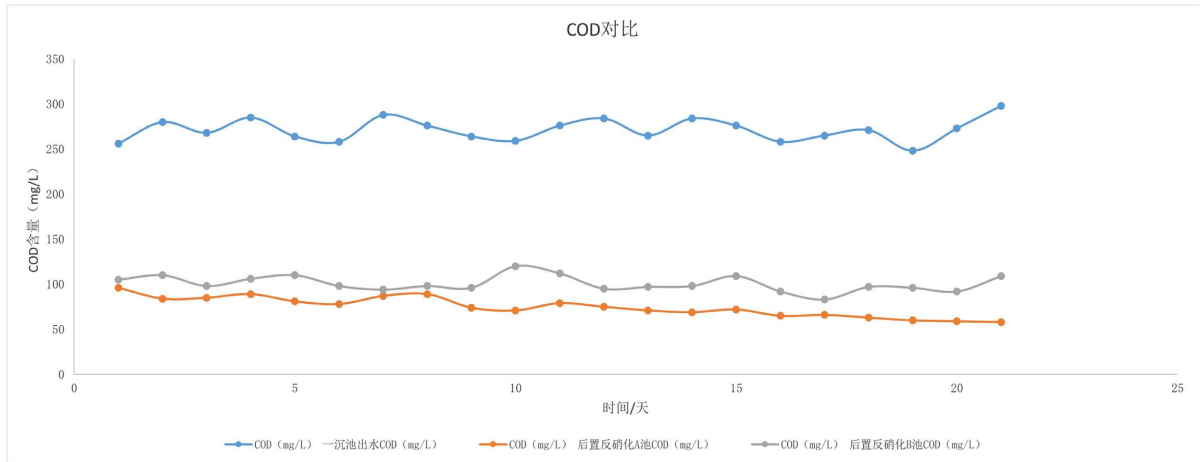


Figure 5. Comparison of COD changes in inlet and outlet water of post denitrification tank
图 5. 后置反硝化池进出水 COD 变化对比

4.2. 后置反硝化池出水总氮数据对比

- 1) 后置反硝化 A 池前 5 天投加乙酸钠与复合碳源，避免反硝化系统波动较大，造成氨氮超标，一沉池出水总氮由 62.1 mg/L 上涨至 64.2 mg/L，后置反硝化 A 池出水总氮由初始 29.4 mg/L 略微涨至 31.6 mg/L，同时与后置反硝化 B 池进行对比，前 5 天内，两池总氮相差不大，A 池出水总氮略低一些；
- 2) 第 6 天及以后，后置反硝化 A 池开始单独加复合碳源，出水总氮开始稳步降低，无明显波动，稳

定期后基本维持在 30mg/L 以下；

3) 后置反硝化 B 池投加乙酸钠后，出水总氮逐步上升，由初始时 29.6 mg/L 上升至第五天最高点 36.6 mg/L，后续基本维持在 35 mg/L 左右，处于相对较高状态，同一沉池出水总氮升高有一定关系。

后置反硝化池进出水总氮如下表 8、图 6。

Table 8. Comparison of total nitrogen data in the inflow and outflow of the post denitrification tank
表 8. 后置反硝化池进出水总氮数据对比

时间/天	总氮(mg/L)		
	一沉池出水	后置反硝化 A 池	后置反硝化 B 池
1	62.1	29.4	29.6
2	59.3	30.1	31.7
3	65.2	30.7	30.6
4	62.4	31.6	32.4
5	64.2	29.5	36.6
6	63.2	30.2	33.6
7	59.5	31.2	34.4
8	66.7	29.6	35.7
9	64.6	28.5	36.4
10	63.6	29.2	35.5
11	67.4	30.3	34.3
12	64.7	28.4	36.4
13	61.4	27.5	31.8
14	62.8	28.6	35.5
15	63.2	29.7	36.5
16	61.9	27.4	35.9
17	63.5	26.1	31.9
18	64.3	27.9	32.9
19	58.5	26.1	31.9
20	59.1	25.4	35.7
21	59.6	26.1	34.9

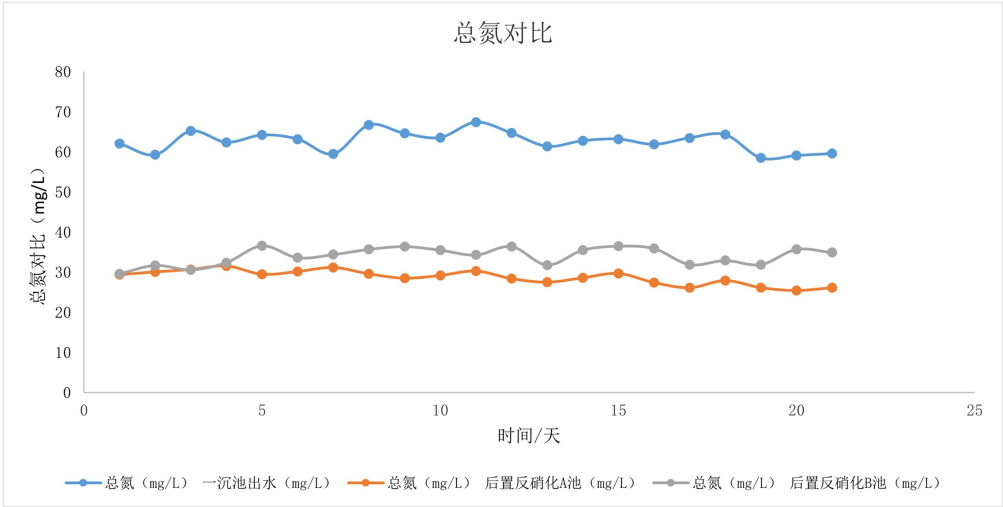


Figure 6. Comparison of total nitrogen changes in inlet and outlet water of post denitrification tank
图 6. 后置反硝化池进出水总氮变化对比

4.3. 后置反硝化池消耗碳氮比数据对比

1) 后置反硝化 A 池反硝化过程整体消耗碳氮比约为后置反硝化 B 池的 64.46%~88.70%，可以认为节省外加 COD 的补充量；

2) 后置反硝化 B 池在整个投加乙酸钠期间，消耗外加碳源碳氮比仍然较高，在 4.97~6.41 之间，平均消耗碳氮比为 5.77，但后置反硝化 A 池仅在加入复合碳源前 7 天内消耗外加碳源碳氮比在 5.07 至 5.86 内波动，自第 8 天以后，消耗碳氮比逐步稳定，在 3.74 至 4.83 内小幅度变化，平均消耗碳氮比为 4.4，为 B 的 76.26%。后置反硝化池两池消耗对比如下图 7。

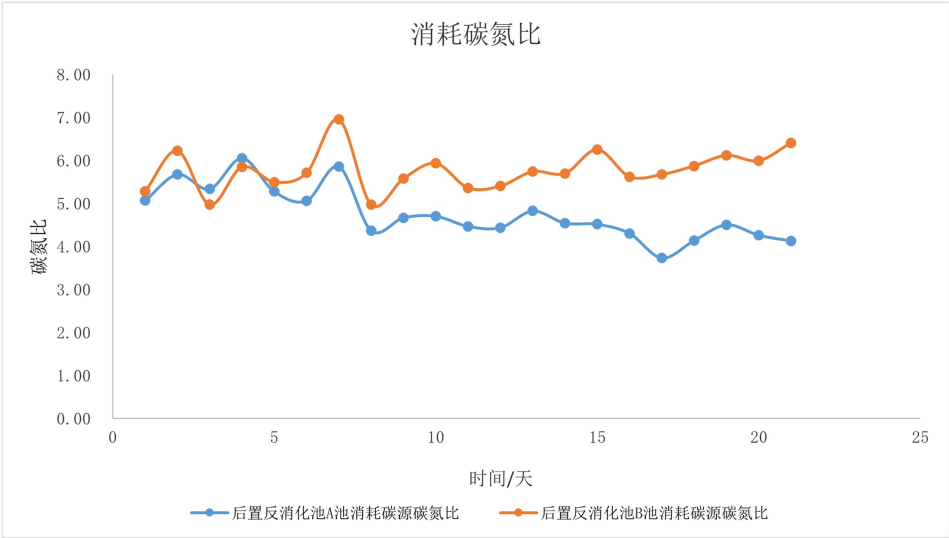


Figure 7. Comparison of consumption between two post denitrification tanks
图 7. 后置反硝化池两池消耗对比

4.4. 后置反硝化池反硝化成本对比分析

1) 后置反硝化 A 池前 5 天混合乙酸钠进行投加，逐步驯化过程中，吨水成本较后置反硝化 B 池节省 0.11 元/吨水~0.17 元/吨水，第 6 天开始，后置反硝化 A 池全部使用复合碳源开始，吨水成本节省 0.38 元/吨水~0.52 元/吨水，节省 44.88%~56.55%，大幅度降低吨水成本；

2) 同理按照去除每公斤总氮来计算，前 5 天驯化期，后置反硝化 A 池较后置反硝化 B 池会节省 10.29%~15.78%的成本，自第 6 天开始，后置反硝化 A 池节省 13.08 元/kgTN~21.17 元/kgTN，节省比例 50.58%~64.09%；

3) 综合两种成本比较方式，在后置反硝化 A 池完全投加复合碳源的情况下，能够大幅度降低处理成本，达到降本增效的效果(表 9、图 8)。

Table 9. Cost comparison data
表 9. 成本对比数据

时间(天)	吨水成本分析(元/吨水)		成本分析(元/kgTN)	
	后置反硝化 A 池	后置反硝化 B 池	后置反硝化 A 池	后置反硝化 B 池
1	0.77	0.88	14.55	27.21
2	0.78	0.88	16.30	32.07
3	0.74	0.89	15.33	25.62

续表

4	0.74	0.90	17.38	30.14
5	0.73	0.89	15.15	28.33
6	0.48	0.87	14.54	29.42
7	0.48	0.90	16.82	35.84
8	0.47	0.87	12.54	25.62
9	0.48	0.90	13.40	28.74
10	0.46	0.92	13.51	30.56
11	0.48	0.91	12.83	27.63
12	0.46	0.84	12.74	27.84
13	0.47	0.88	13.85	29.58
14	0.45	0.89	13.05	29.36
15	0.43	0.96	12.97	32.22
16	0.43	0.90	12.36	28.97
17	0.40	0.92	10.72	29.23
18	0.43	0.95	11.88	30.26
19	0.42	0.90	12.93	31.52
20	0.41	0.88	12.24	30.88
21	0.40	0.91	11.86	33.03

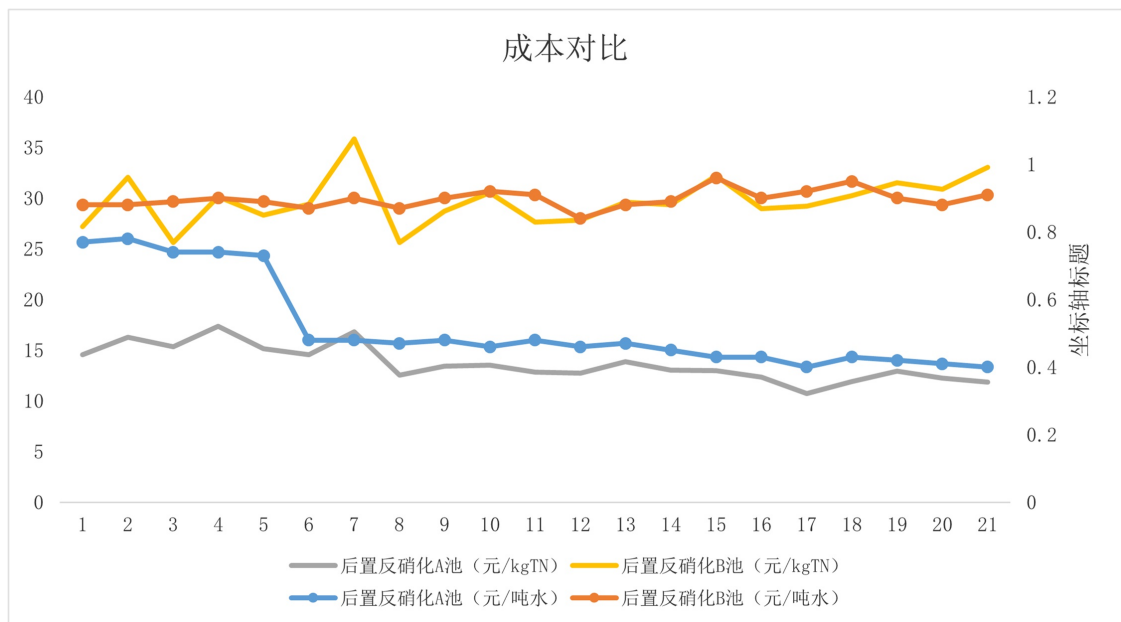


Figure 8. Comparison of processing costs

图 8. 处理成本对比

5. 结论

通过后置反硝化 A 池、B 池，投加不同碳源进行生产试验，系统稳定后可以看出：

1) 后置反硝化 A 池投加复合碳源后，对比后置反硝化 B 池，出水 COD 含量进一步降低为 23.36%~46.79%，能够将 COD 充分利用，减少 COD 对后续出水的影响，总氮能够进一步降低为 9.30%~28.85%；

2) 后置反硝化 A 池全部使用复合碳源开始，吨水处理成本节省 0.28 元/吨水~0.46 元/吨水，节省

44.39%~67.46%，去除总氮成本节省 8.46 元/kgTN~20.9 元/kgTN，节省比例 35.13%~76.01%，吨水成本均大幅度降低。

参考文献

- [1] 魏国瑞, 李国良. 宝钢焦化废水处理新工艺探索[J]. 燃料与化工, 2001, 32(1): 34-36.
- [2] 杨巧林, 奚小英, 陈娜, 张静, 刘曦, 杜鹃. 外加碳源对污水厂异常进水时的强化脱氮效果[J]. 中国给水排水, 2011, 27(3): 106-108.
- [3] 王威, 王玮, 齐继光, 王云忠, 杨翠华, 曲克明. 3种滤料的生物挂膜及硝化反硝化性能[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 301-305.
- [4] 王国瑞, 马凯, 沈天曦, 祖利朝, 李雁鸿. 多核碳源与常规单一类型碳源的实际应用研究[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(1): 62-77.
- [5] 余琴芳, 章诗璐, 杜敬, 刘佳. 反硝化生物滤池碳源选择与运行方式优化研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(9): 113-117.
- [6] 杨珊, 石纹豪, 王晗, 等. 外加碳源影响水体异养反硝化脱氮的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(8): 54-58, 86.
- [7] 马勇, 彭永臻, 王淑莹. 不同外碳源对污泥反硝化特性的影响[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(6): 820-824.
- [8] 王淑莹, 侯红勋, 许春生, 等. 以甲醇作为外碳源的生物反硝化[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(11): 1521-1526.
- [9] 冯延申, 黄天寅, 等. 反硝化脱氮新型外加碳源研究进展[J]. 现代化工, 2013, 33(10): 52-57.
- [10] 邓林, 王庆, 潘倩, 等. 新型复合碳源去除工业综合园区废水中硝酸盐试验研究[J]. 天津科技, 2020(4): 43-46.
- [11] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水, 2010, 36(11): 125-128.