

王黎佳, 孙贤鹏, 张国旺, 等. 基于生物质碳源配比在污水生物脱氮处理的应用[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 93–100.

WANG L J, SUN X P, ZHANG G W, et al. Application of wastewater treatment in denitrification based on biomass carbon source ratio [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 93–100.

基于生物质碳源配比在污水生物脱氮处理的应用

王黎佳¹, 孙贤鹏^{2,*}, 张国旺³, 石 宁¹, 刘旭阳⁴, 刘晓军¹, 包苏俊⁵

(1. 青岛娄山河水务有限公司, 山东青岛 266043; 2. 青岛市排水运营服务中心, 山东青岛 266000; 3. 青岛首创瑞海水务有限公司, 山东青岛 266031; 4. 青岛百发海水淡化有限公司, 山东青岛 266041; 5. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘 要 【目的】为兼顾生物质碳源应用于污水生物脱氮工程中的处理效果及经济效益, 探究其对污水处理过程中活性污泥反硝化作用的影响, 并进行经济效益评估。【方法】文章通过对生物质碳源采用不同复合配比的方式与传统乙酸钠碳源进行脱氮效果对比分析。【结果】生物质碳源、生物质: 乙酸钠质量比为 2: 1 的复合碳源、生物质: 乙酸钠质量比 1: 1 的复合碳源、生物质: 乙酸钠质量比 1: 2 的复合碳源、生物质: 乙酸钠质量比为 1: 3 的复合碳源以及乙酸钠碳源的反硝化脱氮效果依次提升, 但当复合碳源中生物质和乙酸钠的质量比为 1: 2 时, 综合效果最佳, 其硝态氮(NO_3^- -N)和亚硝态氮(NO_2^- -N)的去除率可达 82.9% 和 90.8%, 反硝化速率最高为 6.5 mg NO_3^- -N/(g VSS·h) 和 9.5 mg NO_2^- -N/(g VSS·h)。通过应用于青岛市某城镇污水处理厂的生产性试验进一步验证, 其 NO_3^- -N 的去除率高达 73.9%, 可有效保障硝态氮去除效果的稳定性, 保障出水总氮指标的稳定性, 且出水水质优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 水质排放标准。相较于传统的乙酸钠碳源, 其成本可节约 12.9%。【结论】文章将为城镇污水处理厂的生物反硝化脱氮过程提供一种新颖的生物质碳源利用方式, 实现了生物质废弃物资源循环利用, 为污水处理厂向绿色低碳标杆厂发展提供了技术经验, 具有广泛的应用前景及推广价值。

关键词 生物质碳源 复合配比 反硝化脱氮 生产性试验 经济效益

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)08-0093-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.012

Application of Wastewater Treatment in Denitrification Based on Biomass Carbon Source Ratio

WANG Lijia¹, SUN Xianpeng^{2,*}, ZHANG Guowang³, SHI Ning¹, LIU Xuyang⁴, LIU Xiaojun¹, BAO Sujun⁵

(1. Qingdao Loushanhe Water Co., Ltd., Qingdao 266043, China;

2. Qingdao Drainage Operation Service Center, Qingdao 266000, China;

3. Qingdao Capital Ruihai Water Co., Ltd., Qingdao 266031, China;

4. Qingdao Baifa Seawater Desalination Co., Ltd., Qingdao 266041, China;

5. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] To balance the treatment efficiency and economic benefits of biomass-based carbon sources in biological nitrogen removal engineering for wastewater, this paper compares the denitrification performance of various composite ratios of biomass carbon sources with traditional sodium acetate. [Methods] The effects of different biomass-sodium acetate composite carbon source ratios on activated sludge denitrification were investigated, and an economic benefit assessment was conducted. [Results] The denitrification performance increased in the following order: biomass carbon source < composite carbon source with biomass: sodium acetate (mass ratio, 2: 1) < 1: 1 < 1: 2 < 1: 3 < sodium acetate carbon source. However, the composite carbon source with a

[收稿日期] 2024-04-03

[作者简介] 王黎佳(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为污水治理与资源化利用, E-mail: 93650580@qq.com。

[通信作者] 孙贤鹏(1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为给排水处理技术和生产管理, E-mail: xianpengandyou@163.com。

biomass : sodium acetate mass ratio of 1 : 2 exhibited the optimal comprehensive performance, achieving nitrate-nitrogen (NO_3^- -N) and nitrite-nitrogen (NO_2^- -N) removal rates of 82.9% and 90.8%, respectively, with maximum denitrification rates of 6.5 mg NO_3^- -N/(g VSS·h) and 9.5 mg NO_2^- -N/(g VSS·h). Pilot-scale application at a municipal wastewater treatment plant in Qingdao further verified these findings, with a NO_3^- -N removal rate reaching 73.9%. This ensured stable nitrate removal and effluent total nitrogen concentrations, with effluent quality surpassing the first class A discharge standard of the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002). Compared with conventional sodium acetate, the composite carbon source reduced costs by 12.9%. [**Conclusion**] This paper provides a novel approach for applying biomass carbon sources in the biological denitrification process of municipal wastewater treatment plants, realizing resource recycling of biomass waste. It offers technical experience for developing green, low-carbon benchmark plants and demonstrates broad application prospects and promotion value.

Keywords biomass carbon source composite ratio nitrogen removal by denitrification and denitrification productive test economic benefit

在传统的生物脱氮工艺中,需要大量可生物利用的有机物作为反硝化过程的碳源^[1]。然而,由于污水处理厂进水中化学需氧量(COD)与碳氮比(C/N)的下降以及总氮(TN)排放标准的日益严格,污水处理厂面临着碳源供应不足的问题^[2-3]。因此,有效地解决城市污水处理厂碳源不足的问题,是提高污水脱氮效率,以实现达标排放的有效途径之一^[4-5]。

目前,针对污水处理厂反硝化碳源不足问题,在实际污水处理工艺中普遍使用传统单一碳源补充,例如甲醇、乙酸钠、葡萄糖等^[6-7]。然而,传统碳源存在安全性差(如甲醇)、价格过高(如乙酸和葡萄糖)、成分较为复杂(如杂酸、杂醇复配)等诸多问题^[8-9],并且处理过程中可能含有毒物质造成二次污染,导致污水处理厂污水处理成本显著提高^[10-11]。近些年,生物质碳源——农业、工业和林业的副产品^[12-13],包括秸秆、稻壳、锯末、造纸和发酵废渣等,作为一种废弃物利用和可再生的碳源,具有绿色无污染特性,COD当量高,并含有微生物利用发酵的小分子有机酸、醇类和糖类,能够提供细胞生命活动所需的能量,具有绿色环保和良好的脱氮效果,因此逐渐被开发利用。例如,钱盘生等^[5]发现利用蓝藻提取物作为反硝化碳源,可使出水TN质量浓度降到15.0 mg/L;王燕等^[14]利用粗甘油生物质碳源实现出水TN质量浓度为5.0 mg/L,但由于缺乏高效合理的碳源搭配,反硝化效果欠佳,硝态氮(NO_3^- -N)大量残余,最高值能达到20.5 mg/L,并且这些试验仅仅局限于小试,生物质作为碳源在实际污水厂使用还缺乏完善的探究以及实际工程应用。因此,亟需相关的研究作为数据和技术支持。

为此,研究通过小试试验考察由生物质和乙酸

钠组成的复合碳源对活性污泥脱氮性能的影响,以乙酸钠碳源作为参照对象,研究生物质碳源以及复合碳源在复合配比(生物质:乙酸钠)为2:1、1:1、1:2、1:3条件下,对活性污泥反硝化性能的影响规律。之后,将优选试验结果应用于实际污水处理厂的生物处理过程中,对比复合碳源和乙酸钠碳源的实际应用效果,并进行了经济效益的综合分析。本研究的结果将为生物质碳源在我国污水处理实际应用工程中提供参考经验。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示,采用6个完全相同的反应器,包括反应装置、曝气装置、温控磁力搅拌器以及溶解氧和温度传感器,有效容积为5 L。其中,一组设为对照组,采用单一乙酸钠碳源,COD当量为20万 mg/L。另5组设为试验组,采用生物质碳源和生物质与乙酸钠按照质量复合配比为2:1、1:1、1:2、1:3组成的复合碳源。其中,生物质碳源某碳源厂家提供,是由挥发性脂肪酸、天然微生物素、多元醇、蔗糖等元素组成的无色透明液体,原材料主要为藻类生物质产品制作过程中产生的衍生物,COD当量为20万 mg/L。为保障试验所用生物质碳源成分稳定,本次试验所用生物质碳源均为同一批次产品。

1.2 试验方法

小试试验采用以 NO_3^- -N和 NO_2^- -N为反硝化电子供体,通过序批式反应器(SBR)反应,处理水量为5 L,投加等量的反硝化碳源,在每个反应周期初始阶段控制COD质量浓度在180 mg/L,保持C/N=6,连续运行10个周期,反应周期为2 h,每隔20 min取样

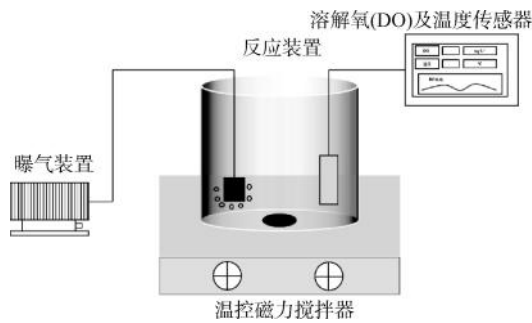


图 1 试验装置

Fig. 1 Test Device

检测,每隔 2 h 进行 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的补充,通过投加硝酸钾(KNO_3)和亚硝酸钠(NaNO_2),控制 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的初始质量浓度为 30 mg/L。反应器内混合液悬浮固体(MLSS)质量浓度为 5 000 mg/L,取自青岛市某城镇污水处理厂生物池缺氧段,试验过程中定期排泥控制 MLSS 为 5 000 mg/L、混合液挥发性悬

浮固体(MLVSS)质量浓度为 3 000 mg/L,控制 DO 质量浓度 ≤ 0.3 mg/L,温度为 20 ℃。为保证微生物所需的微量元素,反应器进水取自二沉池出。

在青岛市某城镇污水处理厂进行 30 d 生产性试验,该厂一期采用多段厌氧/好氧(AO)工艺如图 2 所示。该厂处理能力为 10 万 m^3/d ,具体进水指标如表 1 所示。试验期间出水水质 COD、五日生化需氧量(BOD_5)、悬浮物(SS)、TN、氨氮、TP 指标均优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 排放标准。试验具体利用该污水厂一期生物东池、西池 2 条生产线进行乙酸钠和生物质:乙酸钠质量比为 1:2 碳源反硝化性能的对比试验。保证东、西两池的工况相同的前提下,分别在缺氧段投加等量的乙酸钠及生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的碳源。碳源投加及水质取样点如图 2 所示,出水无 NO_2^- -N 检出。

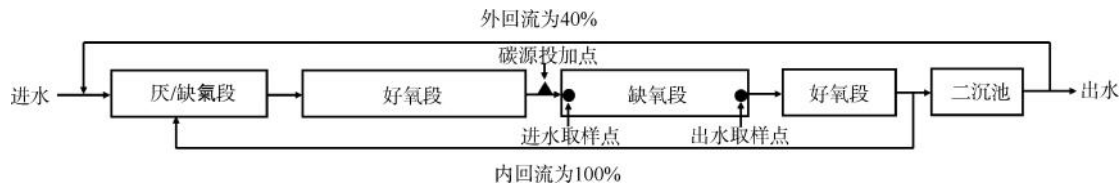


图 2 生化段工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Biological Tanks

表 1 进出水水质主要指标

Tab. 1 Main Indices of Influent and Effluent Qualities

水质类型	COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	BOD_5 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
进水	260.5	103.7	415.3	60.5	48.2	7.6
乙酸钠碳源出水	16.3	3.3	6.7	7.7	2.6	0.2
复合碳源出水	17.5	4.7	6.8	6.8	2.5	0.3

1.3 计算方法

反硝化速率通过 NO_x^- -N 的浓度变化分阶段绘制线性回归方程得出曲线斜率,再依据 MLVSS 推算出该体系的反硝化速率,计算如式(1)^[15]。

$$V = \frac{r}{C_{\text{MLVSS}}} \quad (1)$$

其中:V——反硝化速率, $\text{mg}/(\text{g VSS}\cdot\text{h})$;
r——不同阶段 NO_x^- -N 浓度变化的线性回归方程的斜率绝对值, $\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$;
 C_{MLVSS} ——MLVSS 质量浓度,g/L。

1.4 水质分析方法

进出水质指标 COD、 BOD_5 、SS、TN、TP、 NO_3^- -N

以及 NO_2^- -N,均按照《水和废水监测分析方法》(第四版)测定。

2 结果与讨论

2.1 小试试验不同碳源投加的反硝化性能对比

如图 3 所示,考察不同碳源对 NO_3^- -N 去除的影响。投加乙酸钠碳源出水 NO_3^- -N 平均质量浓度在 4.3 mg/L,明显优于生物质碳源出水 NO_3^- -N 质量浓度为 15.6 mg/L。但当生物质和乙酸钠混合投加,其 NO_3^- -N 的反硝化效果显著提升,生物质:乙酸钠质量比按 1:2、1:3 的比例投加时,出水 NO_3^- -N 的质量浓度为 5.1、4.7 mg/L,反硝化效果要优于质量比为 2:1(13.8 mg/L)和质量比为 1:1(9.8 mg/L),效果

接近乙酸钠碳源。乙酸钠碳源的 NO_3^- -N 平均去除率最高为 85.7%, 其次为生物质:乙酸钠质量比为 1:2 和 1:3 分别为 82.9% 和 84.5%, 均高于生物质 (48.2%)、生物质:乙酸钠质量比为 2:1 (53.9%) 和生物质:乙酸钠质量比为 1:1 (67.3%)。

通过上述试验发现,以 NO_3^- -N 为电子受体时,使用乙酸钠碳源的反硝化效果最优,这是在反硝化脱氮过程中大多数的微生物容易利用乙酸钠这种低分子量的有机化合物作为碳源,从而导致脱氮处理效果最好^[16]。而微生物难以利用生物质中的大分子有机物和碳水化合物,导致单独使用生物质碳源的反硝化效果最差。当生物质和乙酸钠碳源混合投

加, NO_3^- -N 的去除效果也逐渐提升,这得益于在反硝化脱氮过程中涉及多种脱氮基因的调控与蛋白酶的合成,而复合碳源中的乙酸钠作为微生物易利用的碳源为反硝化提供动力,在反应过程中微生物逐步将生物质有机大分子转化为小分子物质而利用的同时,生物质所含的其他微量元素补充了微生物反硝化过程所缺失的营养元素。当生物质和乙酸钠碳源按 1:2 和 1:3 的质量比例投加时,反硝化效果明显高于生物质和复合碳源(生物质:乙酸钠质量比为 1:1、2:1),且接近乙酸钠碳源的处理效果,因此,随着复合碳源中乙酸钠的比例提高, NO_3^- -N 的去除效果越好。

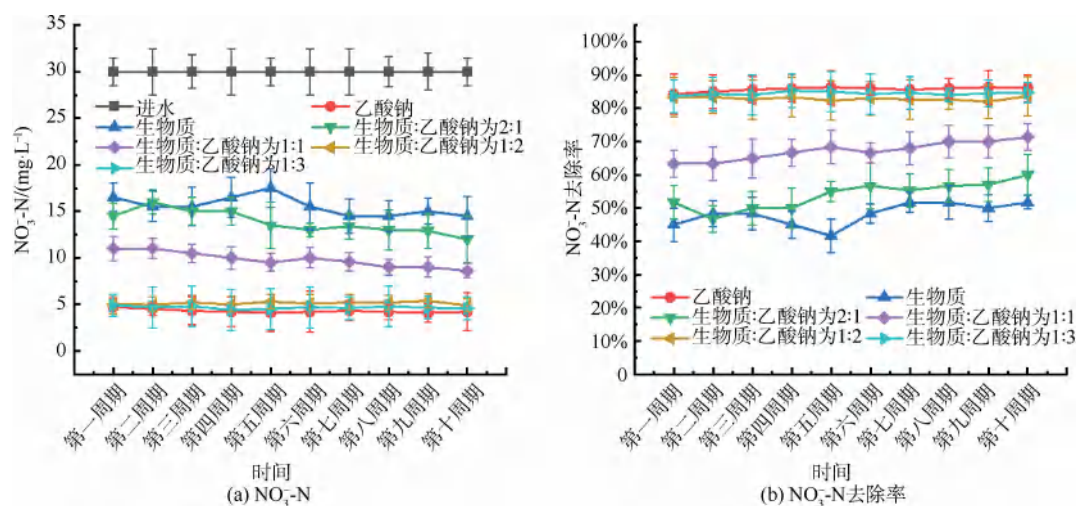


图3 不同碳源对 NO_3^- -N 去除的影响

Fig. 3 Effect of Different Carbon Sources on NO_3^- -N Removal

在反硝化过程中 NO_2^- -N 作为反应中间产物也至关重要,因此,考察不同碳源对 NO_2^- -N 去除效果的影响。由图 4(a) 可知,当投加乙酸钠碳源时,出水 NO_2^- -N 最低质量浓度维持在 2.4 mg/L,但生物质碳源维持在 11.7 mg/L,明显高于乙酸钠碳源。将生物质与乙酸钠碳源混合使用,效果明显优于生物质碳源,并且随着乙酸钠比例增加,出水 NO_2^- -N 浓度也逐渐降低,当生物质:乙酸钠质量比为 1:2、1:3 时,其 NO_2^- -N 的出水质量浓度分别维持在 2.7、2.6 mg/L,低于生物质:乙酸钠质量比为 2:1 (9.9 mg/L) 和 1:1 (6.5 mg/L) 的 NO_2^- -N 出水浓度,接近乙酸钠碳源处理效果。由图 4(b) 可知,乙酸钠和生物质:乙酸钠质量比为 1:3、1:2 的碳源的 NO_2^- -N 去除率分别为 92.1% 和 91.2%、90.8%,明显高于其他碳源。

综上所述, NO_2^- -N 的去除率随着复合碳源中乙酸钠的增加而增加,但当生物质:乙酸钠质量比从 1:2 到 1:3 时,变化不显著,这可能是由于微生物对生物质活性的限制。因此,在反硝化过程中合理的生物质与乙酸钠的配比,有助于提高 NO_2^- -N 的处理能力。

图 5(a) 为不同碳源以 NO_3^- -N 为电子受体的反硝化能力对比,当使用乙酸钠和生物质:乙酸钠质量比为 1:3、1:2 的碳源时, NO_3^- -N 去除效果最好。但不同碳源对 NO_3^- -N 的影响趋势相似,在 0~40 min NO_3^- -N 的浓度迅速下降,40~80 min NO_3^- -N 的浓度下降变慢,而在 80~120 min NO_3^- -N 的浓度下降最慢。图 5(b) 为以 NO_2^- -N 为电子受体的反硝化能力的对比。相较于 NO_3^- -N, NO_2^- -N

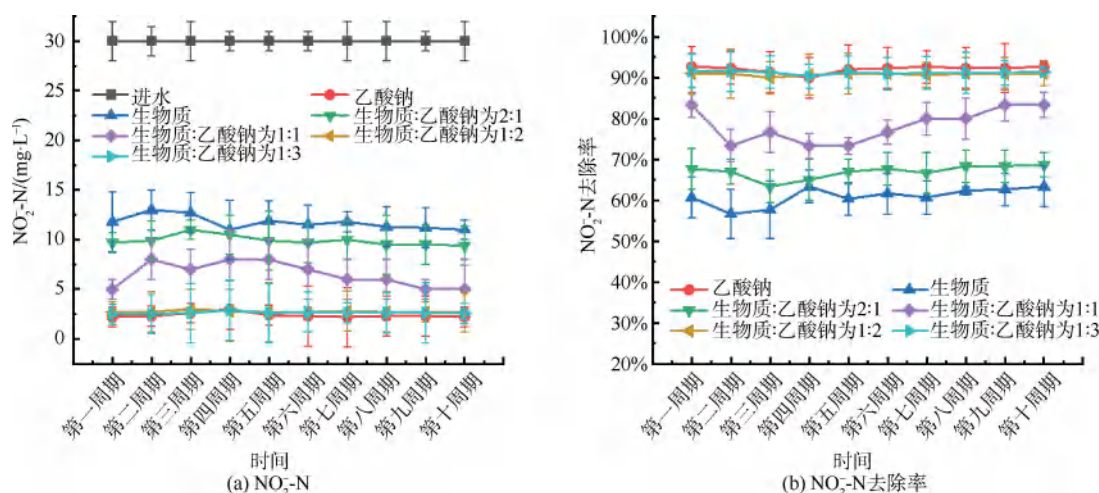


图 4 不同碳源对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 去除的影响

Fig. 4 Effect of Different Carbon Sources on $\text{NO}_2\text{-N}$ Removal

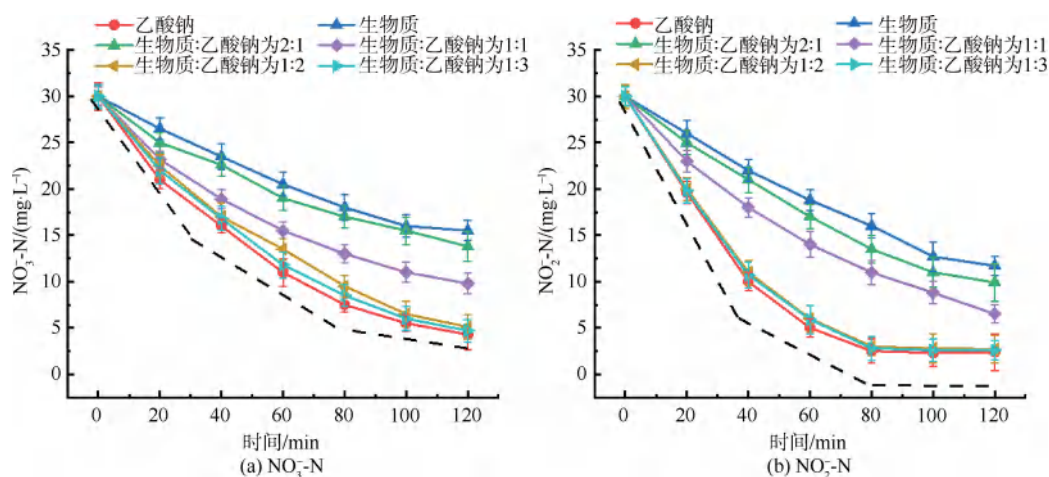


图 5 不同碳源对活性污泥反硝化能力的影响

Fig. 5 Effect of Different Carbon Sources on Denitrification Capacity of Activated Sludge

的去除更彻底,乙酸钠和生物质:乙酸钠质量比为1:3、1:2的碳源效果最优。且不同碳源对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的影响与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 类似,分为在0~40 min $\text{NO}_2\text{-N}$ 去除最快、40~80 min $\text{NO}_2\text{-N}$ 去除变慢以及80~120 min $\text{NO}_2\text{-N}$ 去除缓慢。因此,不同碳源对活性污泥反硝化能力的影响分析,大体可分为3个反应阶段:第一阶段,为底物充足的反硝化速率;第二阶段,为底物缓慢降解的反硝化速率;第三阶段,为底物匮乏一般为微生物内源碳源消耗的反硝化速率。此外,在相同试验条件下,用 $\text{NO}_2\text{-N}$ 作为反硝化电子受体相较于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 反应更彻底,这可能是在反硝化过程中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2\text{-N}$ 为限速步骤,阻碍了后续反硝化的进行。

因此,当直接利用 $\text{NO}_2\text{-N}$ 为电子受体时,更有利于反硝化的进行。

为了更直观比较不同碳源在反硝化过程中的影响,通过反硝化动力学计算出不同碳源的反硝化速率。如表2所示,当以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为反硝化电子受体时,乙酸钠和生物质:乙酸钠质量比为1:3、1:2的最高反硝化速率分别为7.0 $\text{mg}\text{NO}_3\text{-N}/(\text{g}\text{VSS}\cdot\text{h})$ 和6.6、6.5 $\text{mg}\text{NO}_3\text{-N}/(\text{g}\text{VSS}\cdot\text{h})$,均高于生物质:乙酸钠质量比为1:1、2:1和生物质的反硝化速率5.6、3.7 $\text{mg}\text{NO}_3\text{-N}/(\text{g}\text{VSS}\cdot\text{h})$ 和3.3 $\text{mg}\text{NO}_3\text{-N}/(\text{g}\text{VSS}\cdot\text{h})$,并且对比全过程平均反硝化速率同样得出乙酸钠和生物质:乙酸钠质量比为1:3、1:2的反硝化速率最高分别为4.3 $\text{mg}\text{NO}_3\text{-N}/(\text{g}\text{VSS}\cdot\text{h})$

和 4.2、4.2 mg NO₃⁻-N/(g VSS·h)。而以 NO₂⁻-N 为反硝化电子受体时,其反硝化速率趋势与 NO₃⁻-N 电子受体相似。乙酸钠和生物质:乙酸钠质量比为 1:3、1:2 的反硝化速率最高,分别为 10.0 mg NO₂⁻-N/(g VSS·h)和 9.7、9.5 mg NO₂⁻-N/(g VSS·h),全过

程生物质:乙酸钠质量比为 1:3 和生物质:乙酸钠质量比为 1:2 复合碳源的平均反硝化速率与乙酸钠碳源相当,均为 4.6 mg NO₂⁻-N/(g VSS·h),且以 NO₂⁻-N 为反硝化电子受体的反硝化速率要比 NO₃⁻-N 的高。

表 2 不同碳源反硝化速率
Tab. 2 Denitrification Rates with Different Carbon Sources

碳源	时间段/ min	乙酸钠/ [mg NO ₃ ⁻ -N· (g VSS·h) ⁻¹]	生物质/ [mg NO ₃ ⁻ -N· (g VSS·h) ⁻¹]	生物质:乙酸钠 质量比为 2:1/ [mg NO ₃ ⁻ -N· (g VSS·h) ⁻¹]	生物质:乙酸钠 质量比为 1:1/ [mg NO ₃ ⁻ -N· (g VSS·h) ⁻¹]	生物质:乙酸钠 质量比为 1:2/ [mg NO ₃ ⁻ -N· (g VSS·h) ⁻¹]	生物质:乙酸钠 质量比为 1:3/ [mg NO ₃ ⁻ -N· (g VSS·h) ⁻¹]
NO ₃ ⁻ -N	0~40	7.0	3.3	3.7	5.6	6.5	6.6
	40~80	2.1	1.4	1.4	1.5	1.9	2.0
	80~120	0.5	0.4	0.5	0.5	0.7	0.6
	0~120	4.3	2.4	2.7	3.4	4.2	4.2
NO ₂ ⁻ -N	0~40	10.0	4.0	4.5	6.0	9.5	9.7
	40~80	1.9	1.5	1.9	1.8	2.0	2.0
	80~120	0.1	0.7	3.9	0.8	0.1	0.1
	0~120	4.6	3.1	3.4	3.9	4.6	4.6

不同碳源的反硝化速率差距较大,可归因为底物的不稳定性。乙酸钠碳源的反硝化速率最快,这是因为乙酸钠是一种直接利用的底物,很容易被细菌代谢,在反硝化过程中该碳源更易被利用,这就解释了它的高速率和最大反硝化速率^[17]。相反单独的生物质碳源的反硝化速率最低,主要是生物质难以被微生物直接利用,且能够利用单一生物质的微生物比较局限。当使用生物质:乙酸钠质量比为 1:3 和 1:2 的复合碳源时,其反硝化速率与乙酸钠碳源接近,这是由于微生物先利用乙酸钠进行反硝化,同时生物质也同步被分解为可生物利用的小分子形态,最终被微生物所逐步利用,并且随着乙酸钠比例的增加,微生物所适应的时间延长,更有利于反硝化的进行^[18]。因此,当生物质:乙酸钠质量比为 1:3 与 1:2 时,其反硝化速率高于其他碳源,并且与乙酸钠碳源效果相当。但当复合碳源中乙酸钠的比例持续上升到生物质:乙酸钠质量比为 1:3 时,其反硝化速率提高的不明显,这可能是在生物质:乙酸钠质量比为 1:2 时,乙酸钠所提供的响应时间已经满足微生物在此期间适应生物质碳源,因此,导致反硝化速率增加不明显。综上所述,在后续生产

性试验中选用生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的复合碳源进行分析讨论。

2.2 生产性试验复合碳源和乙酸钠碳源的反硝化效果分析

上述小试试验确定了效果优异的生物质:乙酸钠质量比为 1:2 和乙酸钠 2 种碳源,为了进一步验证其实际应用价值,通过生产性试验投加到实际污水厂生物缺氧池中。图 6(a)展示了使用生物质:乙酸钠质量比为 1:2 和乙酸钠 2 种碳源应用于实际污水厂反硝化性能的对比。发现使用生物质:乙酸钠质量比为 1:2、乙酸钠碳源出水 NO₃⁻-N 质量浓度分别为 5.9、5.7 mg/L,2 种碳源的反硝化效果相近,并且 NO₃⁻-N 的去除率也分别高达 73.9%、74.6%,出水均优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 排放水质标准。使用生物质:乙酸钠质量比为 1:2 复合碳源和乙酸钠碳源在实际应用中反硝化效果差不多,主要是乙酸钠先为微生物提供碳源,具有一定的缓冲性能,微生物随着反应过程的进行逐步利用生物质碳源部分,进行后续的反硝化活动。但 2 种碳源的反硝化脱氮效果均低于小试试验,这可能是在实际运行中情况更加复杂,导致处理效果有所降低。并且,为防止投

加的碳源未消耗彻底,导致出水 COD 超标,因此,考察实际过程中 COD 的变化。如图 6(b) 所示,使用生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的复合碳源出水 COD 维持在 23.8 mg/L,略高于使用乙酸钠碳源出水 COD 为 20.6 mg/L,且 COD 去除率为 86.4%,低于乙酸钠碳源的 88.3%,但出水均优于《城镇污水

处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 排放标准。从工程试验结果来看,生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的复合碳源投加在城镇污水处理厂中,具有和乙酸钠碳源相似的脱氮效果,因此,在实际污水厂生物反硝化过程中生物质:乙酸钠质量比 1:2 的复合碳源可以替代乙酸钠碳源。

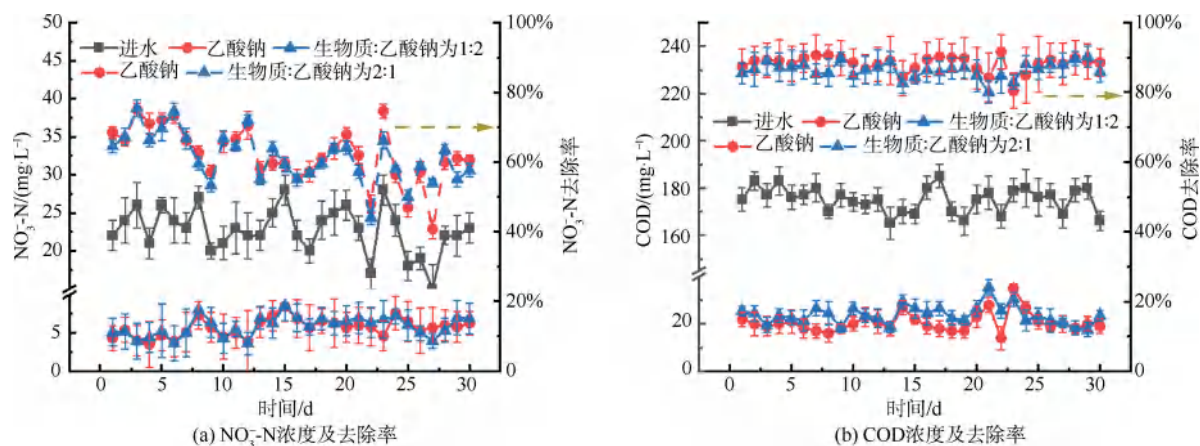


图 6 碳源类型对活性污泥反硝化脱氮和 COD 去除的影响

Fig. 6 Effect of Carbon Source Types on Performance of Activated Sludge Denitrification and COD Removal

2.3 经济效益

乙酸钠单价为 1 540 元/t,而生物质碳源为 960 元/t。生物质:乙酸钠质量比为 1:2 和乙酸钠碳源平均投加单耗为 200 kg/kt,其处理成本生物质:乙酸钠质量比为 1:2 复合碳源为 0.27 元/t,低于单纯乙酸钠碳源成本为 0.31 元/t。因此,污水处理厂使用生物质:乙酸钠质量比 1:2 的复合碳源,相较于乙酸钠碳源成本可以降低 12.9%。综合考虑,使用生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的复合碳源与乙酸钠碳源的生物反硝化脱氮效果相近,其反硝化速率也接近乙酸钠碳源,而且生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的复合碳源不仅价格比乙酸钠碳源便宜,还将工业废物循环利用,节约废物处置成本,为污水处理厂增添了效益收入。综上,生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的复合碳源有望于替代目前乙酸钠碳源使用。

3 结论

(1)生物质和乙酸钠碳源混合使用有利于脱氮性能的提升,当生物质:乙酸钠质量比为 1:2 时,综合效果最好,且在小试试验中对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 去除率高达 82.9%和 90.8%。其最高反硝化速率常数为 6.5 mg $\text{NO}_3^- \text{-N}/(\text{g VSS} \cdot \text{h})$ 和 9.5 mg $\text{NO}_2^- \text{-N}/$

(g VSS·h)与单独乙酸钠碳源[7.0 mg $\text{NO}_3^- \text{-N}/(\text{g VSS} \cdot \text{h})$ 和 10.0 mg $\text{NO}_2^- \text{-N}/(\text{g VSS} \cdot \text{h})$]相近。

(2)生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的复合碳源,适用范围广,即使在实际污水处理厂 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率也保持在 73.9%,与乙酸钠(74.6%)效果相似,出水优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 排放水质标准。

(3)生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的复合碳源相较于乙酸钠碳源成本可以缩减 12.9%,并且生物质废物处置成本也可为污水处理厂增添效益收入。

(4)综合考虑工艺工况不完全对等的因素,生物质:乙酸钠质量比为 1:2 的复合碳源有望代替乙酸钠作为污水处理的碳源使用。

参考文献

- [1] PAN Y, SUN R Z, WANG Y, et al. Carbon source shaped microbial ecology, metabolism and performance in denitrification systems [J]. Water Research, 2023, 243: 120330. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120330.
- [2] DU R, LI C, LIU Q T, et al. A review of enhanced municipal wastewater treatment through energy savings and carbon recovery to reduce discharge and CO_2 footprint [J]. Bioresource Technology, 2022, 364: 128135. DOI: 10.1016/j.biortech.

2022. 128135.
- [3] 孟红旗,李红霞,赵爱平,等. 市政污水厂典型 A²O 工艺低碳运行的系统性评估 [J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1174–1180.
- MENG H Q, LI H X, ZHAO A P, et al. Systematic evaluation of low-carbon operation of typical A²O processes in municipal sewage plant [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1174–1180.
- [4] CHENG H Z, MA S J, LIAO K W, et al. Effect of external carbon source type on effluent dissolved organic nitrogen characteristics in postdenitrifying moving bed biofilm reactors: Chemical molecular and microbial insights [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 466: 143338. DOI: 10.1016/j.cej.2023.143338.
- [5] 钱盘生,方佳丽,冯梓恒,等. 新型生物质碳源的制备及其污水脱氮除磷效果 [J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 3108–3114.
- QIAN P S, FANG J L, FENG Z H, et al. Preparation of a new biomass carbon source and its application in wastewater denitrification and phosphorus removal [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 3108–3114.
- [6] 田亮,黄锐,杜冬云,等. 低 C/N 比 CANON 工艺脱氮机制分析 [J]. 环境科学与技术, 2023, 46(10): 104–111.
- TIAN L, HUANG R, DU D Y, et al. Nitrogen removal mechanism analysis of CANON process at low C/N [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(10): 104–111.
- [7] CHEN H, YE Q H, WANG X L, et al. Applying sludge hydrolysate as a carbon source for biological denitrification after composition optimization via red soil filtration [J]. Water Research, 2024, 249: 120909. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120909.
- [8] 王伟,赵中原,张鑫,等. 不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 [J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4717–4726.
- WANG W, ZHAO Z Y, ZHANG X, et al. Effects of external carbon sources on ultimate nitrogen removal performance and microbial community in secondary effluent treating process [J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4717–4726.
- [9] LI J N, FENG Y J, QIU Y, et al. Recovery of electron and carbon source from agricultural waste corn cob by microbial electrochemical system to enhance wastewater denitrification [J]. Science of the Total Environment, 2023, 878: 162926. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162926.
- [10] ZHANG J, PENG Y, LI X, et al. Feasibility of partial-denitrification/anammox for pharmaceutical wastewater treatment in a hybrid biofilm reactor [J]. Water Research, 2022, 208: 117856. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117856.
- [11] 王宝宗,罗宗强,张倩,等. BDP(生物倍增)工艺应用于污水处理厂的提标改造 [J]. 水处理技术, 2023, 49(11): 142–146, 156.
- WANG B Z, LUO Z Q, ZHANG Q, et al. The application of BDP (biological double-efficiency process) in the upgrading of sewage treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(11): 142–146, 156.
- [12] 连晋仕,王茹,邓良伟,等. 新型高效同步脱氮工艺处理餐厨废水厌氧消化液的工程试验 [J]. 环境工程, 2024, 42(10): 17–25.
- LIAN J S, WANG R, DENG L W, et al. A practical project on treatment of food wastewater anaerobic digestate using a full-scale highly efficient single-stage nitrogen removal process [J]. Environmental Engineering, 2024, 42(10): 17–25.
- [13] GUO B L, LI G Q, XU H B, et al. Enhanced denitrification performance in iron-carbon wetlands through biomass addition: Impact on nitrate and ammonia transformation [J]. Science of the Total Environment, 2024, 914: 169913. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.169913.
- [14] 王燕,李激,支尧,等. 新型生物质碳源强化脱氮效果及微生物菌群分析 [J]. 环境工程, 2022, 40(9): 63–68, 117.
- WANG Y, LI J, ZHI R, et al. Denitrification enhancement effect and microbial flora analysis of a new biomass carbon source [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(9): 63–68, 117.
- [15] 周圆,支丽玲,郑凯凯,等. 城镇污水处理厂活性污泥反硝化速率的影响因素及优化运行研究 [J]. 环境工程, 2020, 38(7): 100–108.
- ZHOU Y, ZHI L L, ZHENG K K, et al. Influencing factors and optimization analysis of denitrification rate in urban wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 100–108.
- [16] JIANG J J, LIANG D H, HU Y Y. Solid slow-release carbon sources improve the simultaneous nitrification and denitrification processes in low carbon resource wastewater [J]. Bioresource Technology, 2022, 365: 128148. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128148.
- [17] 李聪,杜睿,彭永臻. 不同聚集形态短程反硝化耦合厌氧氨氧化系统脱氮性能与碳源利用特性 [J]. 环境工程, 2023, 41(9): 1–9.
- LI C, DU R, PENG Y Z. Nitrogen removal efficiency and carbon source utilization characteristics of partial denitrification coupling anammox processes with different sludge aggregation modes [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(9): 1–9.
- [18] FU X R, HOU R R, YANG P, et al. Application of external carbon source in heterotrophic denitrification of domestic sewage: A review [J]. Science of the Total Environment, 2022, 817: 153061. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153061.