

不同盐度下异养氨同化对高盐废水脱氮效能的影响及其机理研究

胡雨轩*, 蹇思余, 黄晓宇, 翟浩凯, 魏金满

重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年3月31日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年5月26日

摘要

高盐废水生物脱氮是水处理领域的难点, 传统硝化-反硝化工艺受盐度抑制严重。研究构建了一种基于异养氨同化(HAA)的序批式生物膜反应器(SBBR), 旨在实现高盐废水的绿色高效脱氮。通过梯度盐度驯化, 系统考察了盐度(3%~7%)对脱氮性能的影响, 并结合16S rRNA高通量测序分析了微生物群落结构演变。结果表明, 当盐度 $\leq 5\%$ 时, 系统对总氮(TN)和氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的去除率分别稳定在86.3%~89.6%和80%以上, COD去除率维持在89.5%~90.0%之间; 盐度升至7%时, TN去除率仍达86.4%。周期实验显示, 在盐度3%条件下, 亚硝酸盐氮在2 h内完全消失, 硝酸盐氮未出现显著积累。微生物群落分析表明, *Halomonas*属为绝对优势菌属, 在盐度3%和7%条件下的相对丰度分别达65.7%和75.6%, 系统中未检测到典型自养硝化菌。文章为高盐废水的低碳处理和氮资源回收提供了新的技术思路, 在盐度耐受性、温室气体减排和工艺简化方面展现出显著优势。

关键词

异养氨同化, 高盐废水, 生物脱氮, SBBR, 微生物群落

Study on the Effect and Mechanism of Heterotrophic Ammonium Assimilation on Nitrogen Removal Efficiency in High-Salinity Wastewater under Different Salinities

Yuxuan Hu*, Siyu Jian, Xiaoyu Huang, Haokai Zhai, Jinman Wei

School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: March 31, 2026; accepted: April 29, 2026; published: May 26, 2026

*通讯作者。

文章引用: 胡雨轩, 蹇思余, 黄晓宇, 翟浩凯, 魏金满. 不同盐度下异养氨同化对高盐废水脱氮效能的影响及其机理研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(5): 868-876. DOI: 10.12677/aep.2026.165086

Abstract

Biological nitrogen removal from high-salinity wastewater remains a significant challenge in the field of water treatment, as conventional nitrification-denitrification processes are severely inhibited by salt stress. In this study, a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) based on heterotrophic ammonia assimilation (HAA) was developed to achieve efficient and green nitrogen removal from high-salinity wastewater. Through gradient salinity acclimation, the effects of salinity (ranging from 3% to 7%) on nitrogen removal performance were systematically investigated, and the evolution of the microbial community structure was analyzed using 16S rRNA high-throughput sequencing. The results showed that at salinities $\leq 5\%$, the removal rates of total nitrogen (TN) and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) stabilized at 86.3%~89.6% and above 80%, respectively, while the COD removal rate remained between 89.5% and 90.0%. Even when salinity increased to 7%, the TN removal rate still reached 86.4%. Batch experiments under 3% salinity demonstrated that nitrite nitrogen was completely removed within 2 hours, and no significant accumulation of nitrate nitrogen was observed. Microbial community analysis revealed that *Halomonas* was the dominant genus, with relative abundances of 65.7% and 75.6% at salinities of 3% and 7%, respectively, while typical autotrophic nitrifying bacteria were not detected in the system. This study provides a novel technological approach for the low-carbon treatment of high-salinity wastewater and nitrogen resource recovery, demonstrating significant advantages in salt tolerance, greenhouse gas emission reduction, and process simplification.

Keywords

Heterotrophic Ammonia Assimilation, High-Salinity Wastewater, Biological Nitrogen Removal, SBBR, Microbial Community

Copyright © 2026 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

近年来,越来越多的研究表明,异养氨同化(Heterotrophic Ammonia Assimilation, HAA)在氨同化进程中发挥着举足轻重的作用。异养氨同化过程能将环境中的无机氮源转化为细胞生物体必需的含氮有机物质,且展现出良好的环境适应性和较强的环境耐受能力。其碳源驱动的过程在高盐废水的氮处理领域潜力巨大,能够使嗜盐异养氨同化在单一的好氧异养单元内完成。这一特性不仅避免了常规脱氮过程中间歇性的供氧与有机碳供应、氧化还原状态的变化,以及有害中间产物的生成,还有效降低了无机氮的含量,减少了空气污染的风险,具有绿色低碳的优势。同时,由于异养氨同化菌对高盐环境的抵抗能力强,异养氨同化对于从生物质中回收营养物质意义重大。

在国际范围内,针对高盐废水脱氮的异养氨同化技术已建立起较为完备的研究体系。欧美、日韩等地的科研团队,已成功从高盐环境中筛选出多种具备耐盐及嗜盐特性的功能菌株。现有研究不仅阐明了异养氨同化路径在应对高盐胁迫时的代谢优势,还深入剖析了相关微生物的生理特征、氮素转化机理[1]以及功能基因的调控网络。在工艺开发层面,主要聚焦于序批式反应器(SBR)与膜生物反应器(MBR)及其耦合强化工艺。SBR通过顺序阶段运行:注气、充气、沉降和倾倒,其中沉降阶段对性能产生关键影响,常导致生物质分离不良和丝状污泥膨胀等问题[2]。而MBR及其耦合工艺则在高盐废水处理中展现出显

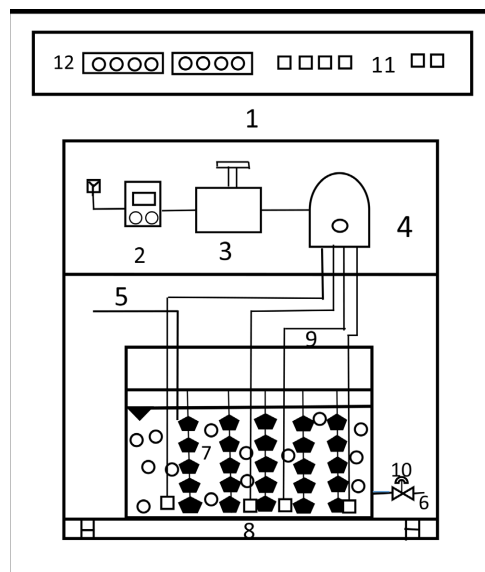
著优势, 实验数据显示, 在盐度介于 2% 至 7% 的环境下, 该技术能实现优异的氨氮去除率及氮素资源化水平。然而, 目前的成果多局限于实验室小试或中试阶段, 缺乏面向实际高盐有机废水处理的长期稳定工程案例。在维持菌群稳定性、工程放大过程中的调控策略以及提升资源化经济效益等方面, 仍面临普遍的技术瓶颈, 尚未构建起可大规模推广的成熟技术体系。相比之下, 国内在该领域的探索虽然起步较晚, 但近年来追赶势头迅猛, 特别是结合食品腌制、发酵等行业产生的高盐有机废水, 形成了独具特色的应用研究方向。国内学者重点围绕耐盐功能菌群的驯化培养、反应器工艺参数的优化以及氮素资源的回收利用开展了大量实证研究。无论是在模拟废水体系, 还是在榨菜加工、腌制食品等实际废水处理中, 均已观测到较为稳定的氨氮去除效果。部分研究通过将异养氨同化技术与生物膜法、序批式反应器等工艺进行耦合, 显著增强了系统的耐盐性能及抗冲击负荷能力。这些研究成果更加贴合国内产业界的实际需求, 在工艺的适配性改造与运行成本控制方面, 积累了诸多具有本土化特征的技术成果。

腌制行业产生的高盐废水具有高 COD、高氨氮、高盐度特征, 处理难度大且资源化潜力突出[3]。高盐环境会显著抑制常规微生物活性, 导致传统生化工艺处理效能大幅下降[4]。序批式生物膜反应器(SBBR)因其良好的挂膜特性与运行灵活性, 在高盐废水处理中应用前景广阔[5]。中高浓度氨氮废水更适合以同化脱氮路径实现氮素高效去除与资源[6]。重庆地区榨菜腌制废水盐度与有机物浓度双高, 属于典型难处理高盐有机废水[7], 采用 ASBBR、SBBR 等生物膜工艺可有效提升系统耐盐性与处理稳定性[8]。

因此, 本研究在针对盐度抑制下传统高盐废水硝化-反硝化路径[9]脱氮效率低、处理系统构建困难的问题, 提出了利用异养氨同化进行高盐度废水脱氮[10]的创新性新思路。不仅可以更好地抵抗盐度影响, 还可以对氮进行资源回收利用, 实现高盐废水的低碳绿色处理[11]。

2. 方法与材料

2.1. 实验装置与运行条件



1. 温控培养箱
2. 时控开关
3. 稳压器
4. 空气泵
5. 进水
6. 出水
7. 组合填料
8. 曝气砂头
9. 曝气管
10. 球阀
11. 温控培养箱电源开关
12. 温度显示屏及调节开关

Figure 1. Experimental setup
图 1. 实验装置

如图 1 所示, 本研究采用自制序批式生物膜反应器(SBBR)构建异养氨同化系统。反应器主体为有机玻璃材质, 有效容积 2 L, 内部填充聚酯纤维填料[12] (填充率 30%), 作为生物膜[13]附着载体。反应器

底部设置微孔曝气盘,通过转子流量计控制曝气量,维持溶解氧(DO)浓度为 6.0 mg/L。采用时间控制器实现自动运行,运行周期为 24 h,包括进水 5 min、好氧反应 23 h、沉淀 30 min、排水 10 min、静置 15 min。反应器置于恒温室内,温度控制在 30℃。

2.2. 接种污泥与进水水质

1) 接种污泥来源及特性

实验接种污泥取自重庆市涪陵某榨菜腌制废水处理工程的好氧池活性污泥,该构筑物长期处理高盐、高有机物榨菜生产废水,污泥已具备一定耐盐性与难降解有机物适应能力,与同类榨菜废水处理系统的接种污泥特性一致[14]。

接种污泥主要特性如下:混合液悬浮固体(MLSS) 6500~7500 mg/L,混合液挥发性悬浮固体(MLVSS) 2800~3500 mg/L,MLVSS/MLSS 为 0.42~0.48,污泥沉降比(SV30) 28%~38%,污泥容积指数(SVI) 70~95 mL/g,对实际榨菜废水 COD 去除率为 65%~75%。

接种前,将取回污泥自然沉降 30 min,弃去上清液,用生理盐水洗涤 2 次以去除游离杂质与高浓度附着盐分,随后投加至反应器,控制初始混合液 MLSS 为 3500 mg/L \pm 200 mg/L,该预处理方式可有效减少污泥中残留盐分对后续驯化过程的干扰[15]。

2) 进水水质

实验进水采用重庆涪陵地区实际榨菜腌制废水,水质与涪陵地区典型腌制行业废水特征一致,主要指标平均值为:COD 平均浓度 3000 mg/L、TN 平均浓度 220 mg/L、NH₄⁺-N 平均浓度 80 mg/L、TP 平均浓度 40 mg/L,废水具有高盐、高氮、高有机物、可生化性一般的特点。

实验过程中根据反应器运行状况,适当采用去离子水对原水进行稀释调节,维持进水污染物负荷稳定,减少水质剧烈波动对系统的冲击,该操作可有效避免榨菜废水陈化导致的污泥沉降性能恶化[16]。

3) 污泥驯化方法与判定标准

驯化在实验室序批式反应器中进行,控制运行条件:温度(25 \pm 2)℃,pH 7.0~8.5,溶解氧(DO) 2.0~4.0 mg/L,该运行参数参考了高盐榨菜废水生物处理的常规控制条件[7]。

采用逐步提高实际腌制废水比例的梯度驯化方式,该方法是高盐腌制废水处理中污泥驯化的常用有效策略[17],具体步骤如下:初期采用低浓度榨菜废水与人工配水混合运行,使污泥适应系统环境;随后按体积分数依次以 25% \rightarrow 50% \rightarrow 75% \rightarrow 100% 提升实际废水比例;每个梯度稳定运行 4 d,观察污染物去除效果与污泥性状,无明显抑制后再提升浓度,该梯度设置与柴宏祥等[18]研究中采用的驯化梯度一致。

总驯化时长为 16 d,驯化完成判定标准参考现有研究设定[1][3],当系统连续 3 个运行周期满足以下条件时,视为驯化完成,进入正式试验阶段:COD 去除率稳定 \geq 70%、NH₄⁺-N 去除率稳定 \geq 45%、TP 去除率稳定 \geq 50%,污泥沉降性能良好,无明显污泥膨胀、解絮现象。相较于快速提盐驯化,本研究采用的梯度驯化方式更易维持污泥活性与系统稳定性[19]。

2.3. 实验设计

首先通过使用序批式生物膜反应器 SBBR 进行构建该系统。以实际腌制废水作为进水,在容量 2 L 的 SBBR 中分别加入普通污水厂污泥及腌制废水微生物,进行好氧曝气挂膜启动。运行模式在 30℃下,以 24 h 为一周期,全程曝气并控制平台期溶解氧浓度 6 mg/L。其驯化时间根据反应器出水 COD、NH₄⁺-N、TN 去除效果来调整。驯化完成后,逐步提高反应器盐度,并检测日常出水数据。同时,在不同盐度运行稳定条件下,进行周期探究实验,探究氮是否能够通过异养氨同化过程去除。随后利用高通量 16S rRNA 测序技术分析不同盐度下系统的微生物组成情况。

2.4. 分析方法

实验主要的测试方法如表 1 所示：

Table 1. Analytical methods

表 1. 分析方法

序号	分析项目	分析方法
1	COD	重铬酸钾法(HACH-COD)
2	NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂分光光度法
3	NO ₃ ⁻ -N	0.45 μm 滤膜抽滤 - 紫外分光光度法
4	NO ₂ ⁻ -N	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法
5	TN	碱性过硫酸钾 - 紫外分光光度法
6	DO、温度	HACHDO 测定仪
7	盐度	RS232ConductivityMeter-8306

3. 实验结果与分析

3.1. 高盐异养氨同化系统的运行性能

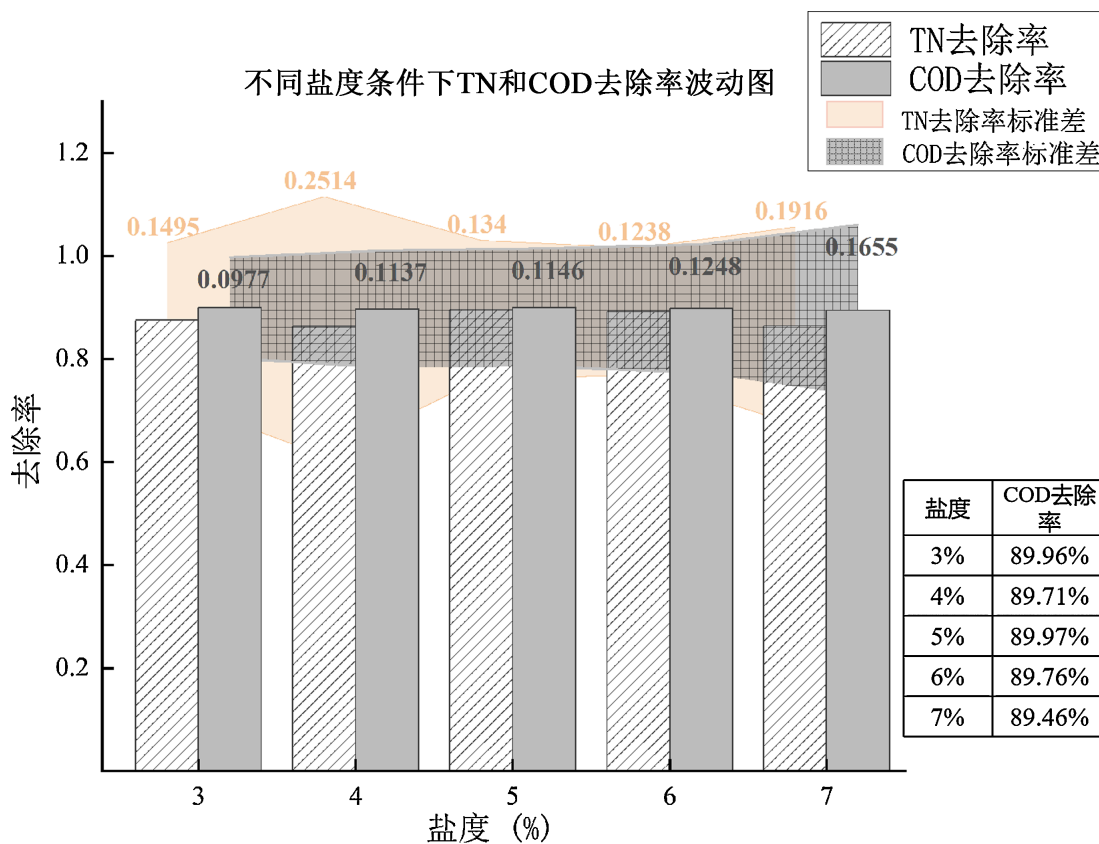


Figure 2. Fluctuation diagram of TN and COD removal rates under different salinity conditions

图 2. 不同盐度条件下 TN 和 COD 去除率波动图

综合不同盐度条件下的 TN 和 COD 去除率波动分析可知(见图 2), 异养氨同化系统在 3%~7% 盐度范围内对高盐废水具有良好的脱氮除碳适配性[20], COD 去除率维持在 80%~90%, TN 去除率虽在 4% 盐度时波动加剧(标准差达 0.2514), 但整体维持在 80% 以上, 7% 盐度下仍保持约 89% 的高效去除。4% 盐度是 TN 去除的波动峰值点, 而 7% 盐度下系统仍能高效运行, 未出现明显效能衰减, 说明工艺耐盐上限可拓展至 7% 及以上。这表明异养氨同化途径可作为高盐废水、脱氮的优选工艺, 后续可通过调控过渡盐度下的微生物群落结构, 进一步提升系统抗盐冲击能力与运行稳定性。

3.2. 微生物群落结构演变

在反应器运行至稳定期后, 分别采集不同盐度条件下的生物膜样品。使用 DNA 提取试剂盒提取样品总 DNA, 利用高通量 16S rRNA 测序技术分析不同盐度下系统的微生物组成情况和异养氨同化功能菌群。

Table 2. Dominant genera under 3% salinity condition

表 2. 3% 盐度条件下主要菌属

菌属名称	相对丰度(%)	门/纲
<i>Halomonas</i>	65.72	Gamma proteobacteria
<i>Planktosalinus</i>	7.69	Bacteroidia
<i>norank_f_Izemoplasmataceae</i>	3.70	Bacilli
<i>unclassified_f_Paracoccaceae</i>	3.17	Alphaproteobacteria
<i>Dietzia</i>	2.49	Actinobacteria
SM1A02	2.27	Phycisphaerae
<i>norank_f_Geminicoccaceae</i>	1.87	Alphaproteobacteria
<i>norank_f_Balneolaceae</i>	1.46	Balneolia
<i>Rhodohalobacter</i>	1.31	Balneolia

如表 2 所示, 盐度 3% 条件下, *Halomonas* 为绝对优势菌属, 相对丰度达 65.72%。次优势菌属包括 *Planktosalinus* (7.69%)、*norank_f_Izemoplasmataceae* (3.70%)、*unclassified_f_Paracoccaceae* (3.17%), 这些菌属多为异养型细菌, 可能参与了有机物的降解及氮代谢辅助过程。其余菌属丰度均低于 3%, 共同构成系统的微生物群落骨架。

Table 3. Dominant genera under 7% salinity condition

表 3. 7% 盐度条件下主要菌属

菌属名称	相对丰度(%)	门/纲
<i>Halomonas</i>	75.6	Gamma proteobacteria
<i>Desulfotignum</i>	3.95	Deltaproteobacteria
<i>Alkalispirochaeta</i>	1.84	Spirochaetes
<i>Phaeodactylibacter</i>	1.55	Sphingobacteria
<i>Candidatus_Alysiosphaera</i>	1.44	Alphaproteobacteria
<i>norank_f_Draconibacteriaceae</i>	1.17	Bacteroidia
SM1A02	1.03	Phycisphaerae
<i>Thiohalobacter</i>	1.03	Gamma proteobacteria
<i>Arcobacter</i>	1.02	Epsilonproteobacteria

如表 3 所示, 当盐度升至 7% 时, *Halomonas* 的相对丰度进一步上升至 75.6%, 较盐度 3% 时提高了近 10 个百分点, 表明该菌属在高盐胁迫下具有极强的竞争优势[21]。次优势菌属为 *Desulfotignum* (3.95%), 是一类硫酸盐还原菌, 可能利用进水中的硫酸盐进行硫代谢[22] [23]。其余菌属丰度均低于 2%, 包括 *Alkalispichoeta* (1.84%)、*Phaeodactylibacter* (1.55%) 等。与盐度 3% 相比, 群落多样性显著降低。

微生物群落结构随盐度升高呈现显著演变。在盐度 3% 时, *Halomonas* 丰度为 65.7%, 系统内存在一定多样性的次优势菌群; 当盐度升至 7% 时, *Halomonas* 丰度进一步增至 75.6%, 而次优势菌群丰度普遍下降。这一变化表明, 高盐胁迫强化了对耐盐菌的正向筛选, *Halomonas* 凭借其渗透压调节机制和高效的氨同化能力, 成为系统中的核心功能菌。

Halomonas 是典型的耐盐/嗜盐异养菌[24], 广泛分布于盐湖、海水及高盐工业废水中。该菌属具有异养氨同化能力, 能够利用有机碳源将氨氮直接合成氨基酸和蛋白质。部分菌种还具备异养硝化-好氧反硝化功能, 在高盐条件下仍能高效脱氮[25]。

此外, 16S rRNA 高通量测序结果显示, 盐度 3% 和 7% 条件下, 系统中均未检测到典型自养硝化菌, 进一步表明传统硝化作用在系统中不占主导地位。

3.3. 脱氮路径分析

为明确氨氮的去除路径, 在盐度 3% 条件下开展了探究性实验, 并对实验的结果做出以下分析:

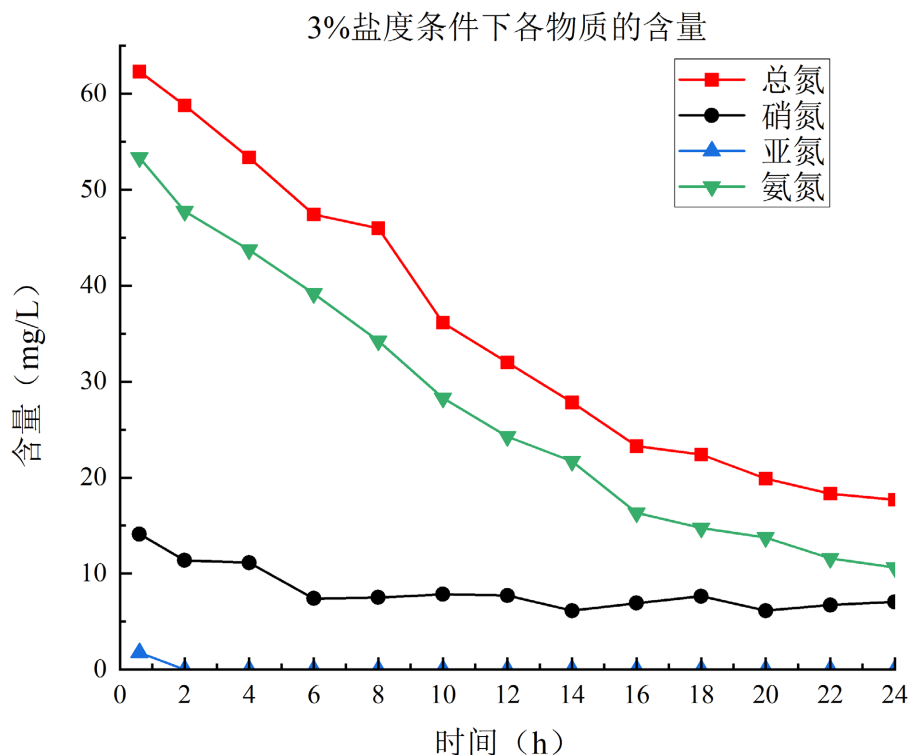


Figure 3. Content of each substance at 3% salinity

图 3. 3% 盐度条件下各物质的含量

根据周期实验结果(图 3), 3% 盐度下, 系统中总氮持续下降。初始约 62 mg/L, 10 小时降至 36 mg/L, 去除率 41.9%, 24 小时降至 18 mg/L, 总去除率 71%。说明异氧氨同化系统在高盐条件下仍能稳定去除总氮。氨氮下降显著, 与总氮趋势一致。初始约 53 mg/L, 16 小时降至 18 mg/L, 去除率 66%, 24 小时

降至 10 mg/L, 总去除率 81%。其高效去除验证了系统在高盐环境下良好的脱氮能力。同时, 整个周期反应过程中, 没有显著的硝氮和亚氮产生, 表明硝化-反硝化路径不是系统去除的主要路径。

同时, 本周期氮的去除特征与微生物群落结构高度吻合。16S rRNA 测序结果显示, 盐度 3% 条件下 *Halomonas* 属相对丰度高达 65.7%, 其作为典型的耐盐异养菌, 具备高效的氨同化能力, 能直接利用有机碳源将氨氮合成细胞物质[26]。本研究中氨氮的持续下降、亚硝酸盐的快速消失以及硝酸盐的低水平波动, 均与 *Halomonas* 的代谢特性一致, 证实了异养氨同化在高盐废水脱氮中的主导作用。

4. 结论与应用前景

与传统生物脱氮技术相比, 本研究构建的异养氨同化系统在以下方面展现出显著优势, 可为腌制菜等高盐废水处理提供新技术方案。SBBR 反应器挂膜特性有利于功能菌群稳定富集, 在高盐环境下仍可维持高效脱氮除碳性能。异养氨同化可实现氨氮直接同化转化, 避免中间产物积累, 契合低碳与资源化理念。针对重庆地区榨菜腌制等高盐有机废水, 本工艺可与 ASBBR 等工艺组合, 进一步提升处理效能与工程适用性。

该系统的主要优势体现在: 一是具有较好的高盐耐受性, 在 5% 盐度条件下仍可保持高效脱氮能力, 适用于腌制废水、海水养殖废水等多种高盐废水处理场景; 二是低碳环保性能较好, 氮素主要通过微生物同化作用转化为胞内生物质, 可降低传统脱氮过程中温室气体的大量排放, 契合绿色低碳水处理的发展方向; 三是氮素资源化潜力较大, 氨氮被固定于微生物菌体中形成富氮生物质, 可通过后续处理途径转化为有机肥料, 一定程度上实现氮素的资源化利用; 四是工艺流程相对简洁, 脱氮过程可在单一好氧单元内完成, 无需大量额外投加碳源, 有助于降低运行管理和设备投资成本。

同时, 该技术在工程应用中仍存在一定局限与优化空间。由于氨同化过程以微生物合成代谢为主, 系统生物质产量较高, 剩余污泥产率相应提升, 对污泥减量化、稳定化及无害化处置提出了更高要求; 此外, 系统高效脱氮仍需充足有机碳源支撑, 外源碳源投加会在一定程度增加运行成本, 影响技术经济性。

未来可通过优化污泥回流策略、强化内源碳源二次利用, 以及开发餐厨垃圾发酵液、农林废弃物水解液等低成本替代碳源, 协同实现污泥减量与运行成本控制。但需认识到, 该技术在推广中仍面临污泥处置压力、碳源优化匹配、长期运行稳定性等技术经济挑战, 需进一步开展中试研究与工程验证, 以逐步提升异养氨同化技术的工程实用性与应用前景。

基金项目

重庆科技大学土木与水利工程学院大学生科技创新训练计划项目(CKTM-2504)。

参考文献

- [1] 刘治廷, 商亮, 郭嘉, 等. 氨同化菌群对污泥堆肥氮素转化影响机制的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2024, 52(12): 57-62.
- [2] 高春娣, 焦二龙, 李浩, 等. SBR 工艺低溶解氧丝状菌污泥膨胀成因及控制方法[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(12): 1880-1886.
- [3] 宋伟龙, 蔡毅, 王新华. 高盐度腌制菜废水处理与资源化现状与发展趋势[J]. 水处理技术, 2025, 51(10): 109-117.
- [4] 冯青原, 杨英, 吴亮, 等. 盐度对 SBBR 反应器生物群落结构的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(11): 30-40.
- [5] 朱红旭, 刘艳冰, 熊国焕, 等. 序批式生物反应器处理生活污水应用研究[J]. 云南冶金, 2023, 52(S1): 127-133.
- [6] 史大林. 中高浓度氨氮废水同化脱氮效能与机制[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2023.
- [7] 吴绮桃. 超高盐榨菜腌制废水处理技术试验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2007.

- [8] 柴宏祥. 常温 ASBBR 反应器处理高盐高浓度有机榨菜废水效能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [9] 张影, 曹猛, 王先涛, 等. 盐度提升方式对超高盐榨菜废水脱氮系统构建影响[J]. 中国给水排水, 2026, 42(3): 115-121.
- [10] 赵海霞, 石恺, 付林, 等. 生物滤池脱氮除磷的强化及其对含盐废水的处理[J]. 山东大学学报(工学版), 2012, 42(2): 83-89+107.
- [11] 王彤, 汪涵, 周明达, 等. 污水脱氮功能微生物的组学研究进展[J]. 微生物学通报, 2021, 48(12): 4844-4870.
- [12] 郑照勇, 史绪川, 刘淑杰, 等. 三维固定化生物膜反应器处理农村污水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2025, 41(9): 101-108.
- [13] 郝晓地, 王崇臣, 张瑜. 生物膜法污水处理技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [14] 周健, 吴绮桃, 龙腾锐, 等. 高盐榨菜腌制废水处理微生物系统构建研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(15): 17-20, 25.
- [15] 陈曦. 生物电化学体系处理高盐榨菜废水效能及微生物群落结构研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2025.
- [16] 李哲, 周健, 曾朝银. 榨菜废水水质特性及其对活性污泥沉降性能的影响[J]. 给水排水, 2005, 31(11): 57-60.
- [17] 魏炜, 等. SBR 工艺处理高盐腌制废水的启动方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(3): 546-552.
- [18] 柴宏祥, 胡学斌, 何强, 等. 投加甜菜碱对 ASBBR 处理榨菜废水效能的影响[J]. 中国给水排水, 2010, 26(15): 10-13.
- [19] 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春. 提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3413-3421.
- [20] 郝晓地, 李军, 王淑莹. 污水生物脱氮除碳理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [21] 刘昊, 张悦, 居润霖, 等. 甜菜碱增强延长盐单胞菌高盐适应性的代谢机理解析[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(6): 774-782.
- [22] 张颖. 火山岩无机矿物材料絮凝剂的开发与应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- [23] 徐卫华, 刘云国, 曾光明, 等. 硫酸盐还原菌及其还原解毒 Cr(VI)的研究进展[J]. 微生物学通报, 2009, 36(7): 1040-1045.
- [24] 谢卓斌, 王芸, 蒋刚强, 等. 一株中度嗜盐异养硝化-好氧反硝化盐单胞菌 5505 的分离和氮转化特性[J]. 生物工程学报, 2025, 41(6): 2467-2482.
- [25] 马洪婧, 刘鹰, 慕欣廷, 等. 耐盐高效好氧反硝化菌 *Halomonas* sp. HRL-11 的分离鉴定及反硝化性能[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(2): 227-234.
- [26] 王特. *Halomonas* sp. B01 SND 脱氮特性及其耐盐脱氮机理研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2020.