

基于厌氧氨氧化工艺的生活污水处理氮素去除效率优化研究

鲁战光¹, 张娟^{2*}

(1. 青岛市黄岛区市政公用事业发展中心, 山东 青岛 266400; 2. 青岛诚达工程检测有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要: 针对生活污水处理工艺氮素去除效率低、能耗高的瓶颈问题, 提出基于厌氧氨氧化工艺的生活污水处理氮素去除效率优化方法。设计由厌氧处理单元、半亚硝化反应单元和厌氧氨氧化(ANAMMOX)单元构成的试验装置, 选择接种污泥和人工合成生活污水后, 利用试验装置对人工污水进行处理。选择葡萄糖作为有机碳源, 依据有机碳源添加浓度(依次为 100、150、200、250 mg/L), 将生活污水处理阶段分为 4 个阶段, 在该 4 个阶段内采集处理后的水样进行检测, 计算厌氧氨氧化工艺试验装置反应周期内的水样氨氮、硝态氮浓度和去除率等。结果表明, 该方法对亚硝态氮去除率始终稳定在 100%, 总氮去除率超过 96%, 但氨氮去除率从第 1 阶段接近 100% 逐渐降至第 4 阶段的 89% 左右, 这是因为高浓度有机物抑制了厌氧氨氧化菌活性, 使得反硝化菌在反应中占据主导地位。荧光光谱分析表明, 随着阶段推进, 类蛋白质物质显著增加, 从约 2 000 a.u. 增长至 7 000 a.u. 以上, 类腐殖酸则相对稳定, 且水样处理前化学需氧量在 1 967.9 ~ 2 155.4 mg/L, 处理后降至 223.6 ~ 270.2 mg/L, 其应用效果显著。

关键词: 氨氧化工艺; 生活污水; 氮素去除; 效率优化; 试验装置; 硝态氮浓度

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2026)01-0075-07

Optimization of Nitrogen Removal Efficiency in Domestic Wastewater Treatment Based on Anaerobic Ammonia Oxidation Process

LU Zhanguang¹, ZHANG Juan^{2*}

(1. Huangdao District Municipal Public Utilities Development Center, Qingdao 266400; 2. Qingdao Chengda Engineering Testing Co., Ltd., Qingdao 266400, China)

Abstract: Aiming at the bottleneck problems of low nitrogen removal efficiency and high energy consumption in domestic sewage treatment processes, an optimization method for nitrogen removal efficiency in domestic sewage treatment based on the anaerobic ammonia oxidation process is proposed. This study designed an experimental device consisting of an anaerobic treatment unit, a partial nitrification unit, and an anaerobic ammonia-oxidizing (ANAMMOX) unit. After selecting inoculated sludge and synthetic domestic sewage, the experimental device was used to treat the sewage. With glucose as the organic carbon source, the domestic sewage treatment was divided into four stages based on the added organic carbon source concentrations (100, 150, 200, 250 mg/L). During these four stages, treated water samples were collected and tested to calculate the concentrations of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen, as well as their removal rates, during the reaction cycle of the ANAMMOX-based experimental device. The results showed that this method consistently achieved a 100% nitrite nitrogen removal rate and a total nitrogen removal rate exceeding 96%. However, the ammonia nitrogen removal rate gradually decreased from nearly 100% in the first stage to approximately 89% in the fourth stage, which was attributed to the inhibition of ANAMMOX bacteria (AnAOB) activity by high organic matter concentrations, leading to denitrifying bacteria dominating the reaction. Fluorescence spectroscopy analysis indicated that as the stages progressed, protein-like substances increased significantly, from about 2000 a.u. to over 7000 a.u., while humic-like substances remained relatively stable. The chemical oxygen demand (COD) of the water samples before treatment ranged from 1967.9 to 2155.4 mg/L, and after treatment, it decreased to 223.6 - 270.2 mg/L, demonstrating a sig-

收稿日期: 2025-04-19

作者简介: 鲁战光(1976-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为排水管理。

通信作者: 张娟, E-mail: luzg55@163.com

nificant application effect.

Key words: Ammonia oxidation process; Domestic sewage; Nitrogen removal; Efficiency optimization; Experimental apparatus; Concentration of nitrate nitrogen

在城市化进程加速大背景下,生活污水排放量持续增长,其中,氮素(如氨氮)的过量排放易引发水体富营养化,导致藻类疯长,水质恶化,严重威胁水生态平衡与饮用水安全^[1-2]。传统的硝化-反硝化脱氮工艺因需消耗大量能源维持好氧环境,且依赖外加碳源满足反硝化需求,存在运行成本高、碳足迹大等弊端,难以契合当前低碳高效的污水处理要求。厌氧氨氧化工艺作为一种革新性的生物脱氮技术,其核心机制是依赖自养微生物的代谢活动,直接以氨氮和亚硝酸盐为反应底物完成生物反硝化过程,最终生成氮气,该工艺污泥产量减少超80%,为生活污水氮素高效去除提供了新路径^[3]。然而,生活污水具有碳氮比低且波动大、水温季节性变化明显、水质复杂等特点,易导致厌氧氨氧化菌活性抑制、污泥流失、亚硝酸盐供应失衡等问题,使得该工艺在污水处理中的氮素去除效率受限,稳定性不足。

国内学者已围绕厌氧氨氧化工艺开展诸多研究。姚望等^[4]提出循环流污水处理方法,该方法在污水进入厌氧区后,利用厌氧菌,污水有机物被水解酸化,释放磷酸盐并产生易降解的挥发性脂肪酸(VFAs),为后续反硝化提供优质碳源。随后,混合液进入变级数缺氧/好氧循环系统,该系统通过动态调节缺氧/好氧阶段的交替次数和循环流量,实现硝化与反硝化的高效协同优化。但硝化菌(长污泥龄)与反硝化菌(短污泥龄)在同一系统中共存时,需通过污泥回流比和排泥策略平衡两者需求。若控制不当,可能导致硝化菌流失或反硝化菌活性受到抑制,影响系统长期稳定性,导致该方法优化效果欠佳。孙世佳等^[5]提出柠檬酸碳源强化的生活污水脱氮优化方法,该方法在厌氧区投入适量柠檬酸,进入变级数缺氧/好氧循环流系统后,柠檬酸代谢产生的还原力与硝态氮高效反应,反硝化速率大幅提高。系统在线监测硝态氮浓度,动态调整柠檬酸投量和循环级数,实现生活污水处理氮素去除效率优化。虽然柠檬酸能为反硝化提供碳源,但可能会改变微生物的生存环境和群落结构,部分微生物可能需要一定时间来适应,在适应过程中可能会影响处理效果的稳定性。刘建伟等^[6]提出强化厌氧反应器设计优化方法,该方法在反应器内,特殊的分区

构造使污水与厌氧微生物充分接触。污水中的有机物先被水解酸化,释放出的碳源为后续反硝化奠定基础。同时,内部的搅拌装置确保混合均匀,促进厌氧氨氧化等反应发生。反应器对水力停留时间精准调控,让氨氮在适宜条件下转化为氮气,进而提升氮素的去除效率,助力生活污水的高效净化。但搅拌装置虽促进混合,却消耗大量能源,还可能破坏微生物聚集体结构,降低微生物活性,影响其对污水中氮素的去除效果。王琪等^[7]提出生活污水典型处理工艺,该方法使用厌氧池内有机物合成PHB,然后将生活污水输送到缺氧池内,进行脱氮处理,再利用好氧池对污水内的磷进行去除,通过不同氧化环境,实现生活污水内氮素去除。但该方法各反应池功能相互影响,水力停留时间及溶解氧控制难度大,参数调节不当易使脱氮除磷效率降低。

面对上述方法在应用中存在的缺陷,此研究基于厌氧氨氧化工艺的生活污水处理氮素去除率优化方法。在农业农村领域,生活污水经处理后可作为农田灌溉水源或水产养殖用水,其氮素含量直接影响作物生长和水体生态平衡。当灌溉水中氨氮浓度超过30 mg/L时,会导致土壤板结和作物烧苗。而当前已有工艺处理后的出水总氮通常大于15 mg/L,难以满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2021)要求。通过厌氧氨氧化工艺将出水总氮控制在小于10 mg/L,不仅可降低农业面临污染风险,还能实现水肥资源化利用。

1 生活污水处理氮素去除效率优化

1.1 试验装置设计

设计厌氧氨氧化工艺试验装置,整个实验装置由厌氧处理单元、半亚硝化反应单元以及厌氧氨氧化ANAMMOX单元3部分组成,其简图如图1所示。

厌氧氨氧化工艺试验装置中的厌氧处理单元采用环形填料UAFB反应器,其填充率为2/3,有效容积达6.9 L,通过温控系统将反应温度恒定维持在36℃。厌氧反应器作为预处理单元,在降解污水中有机物的同时回收甲烷气体,不仅为后续半亚硝化系统创造了适宜水质环境^[8-9],还实现了能源回收。装置的半亚硝化系统采用31℃恒温

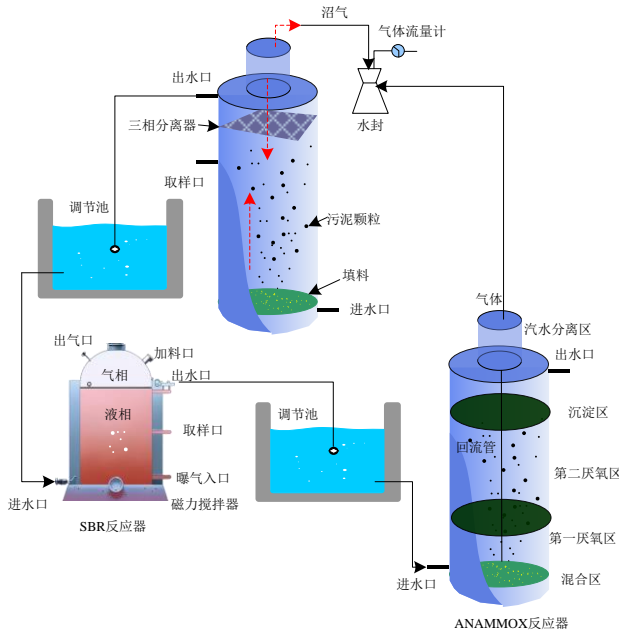


图1 厌氧氨氧化工艺试验装置结构图

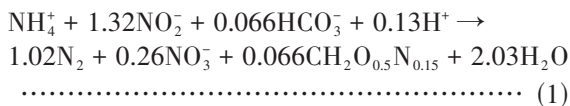
Fig. 1 Structure diagram of anaerobic ammonia oxidation process experimental device

运行的SBR反应器,其有效容积为3.6 L。ANAMMOX单元反应器为上流式厌氧固定床(UAFB)反应器,该反应器通过悬挂式软性填料(比表面积800~1 200 m²/m³)构建生物膜载体,结合上流式流态(上升流速0.5~1.5 m/h),在1.6 L容积内实现ANAMMOX菌的高效富集(生物量达5~15 g VSS/L),较传统悬浮生长系统提升3~5倍脱氮效能。

1.2 接种污泥与人工生活污水合成

厌氧反应器所使用的接种污泥主要来源于当地污水处理厂二沉池的回流污泥,其接种体积为3.5 L,该污泥从污水处理厂取出后^[10],需要放置在室温环境下加盖静置180 d,然后使用自来水对污泥进行清洗,直至清洗后的自来水呈透明色,倒出清水后,再将适量磷酸盐缓冲液倒入污泥内,密封静置24 h后,将其放入厌氧反应器内。SBR反应器和ANAMMOX单元使用的污泥为实验室培养的短程硝化颗粒污泥,接种量为3 L。

试验生活污水为人工配置得到的,在配置过程中,厌氧氨氧化化学计量反应公式如下:



依据公式(1),将NH₄⁺-N和NH₂⁻-N比例设置为1:1.33,进水基质为硫酸铵和亚硝酸钠,电子受体为亚硝酸盐,厌氧氨氧化菌为浮霉菌目,葡萄糖为有机碳源。

配置人工合成生活污水,成分如表1所示。人工合成生活污水内含有微生物生存所需微

表1 人工合成生活污水成分
Table 1 Composition of artificially synthesized domestic sewage

成分 Composition	浓度(mg/L) Concentration
(NH ₄) ₂ SO ₄	按比例添加
NaNO ₂	按比例添加
KHCO ₃	480
CaCl ₂	175
MgSO ₄	125
KH ₂ PO ₄	26.5
Fe ₂ SO ₄ ·7H ₂ O	2.4
葡萄糖	适量
微量元素溶液	适量

量元素,配置微量元素溶液,成分如表2所示。

1.3 生活污水处理氮素去除效率优化过程

表2 微量元素溶液成分
Table 2 Composition of trace element solutions

成分 Composition	浓度(mg/L) Concentration
EDTA	18.500
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.230
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.920
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.240
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.440
Na ₂ SeO ₄ ·10H ₂ O	0.220
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.260
H ₃ BO ₃	0.015
NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.180

将人工合成的生活污水、微量元素溶液、厌氧氨氧化等分别放入厌氧氨氧化工艺试验装置运行,其中,SBR反应器运行周期为8 h,污泥浓度控制在3 700 mg/L,反应器内部温度控制在31 °C,进水的pH值控制在8.3~9.0。选择ANAMMOX单元反应器填料为粒径在3.5~5.5 mm的火山石,其内部流速为2.6 m/L,温度32 °C左右,进水控制pH值在9.0左右。

为实现生活污水处理氮素去除效率优化^[11],先让UAFB反应器稳定运行180 d,然后向反应器内添加有机碳源(葡萄糖)浓度分别为100、150、200、250 mg/L,将每个有机碳源浓度划分为一个阶段,每个阶段时间为20 d,因此,有机碳源浓度为

100 mg/L时是第1阶段,有机碳源浓度为150 mg/L时是第2阶段,有机碳源浓度为200 mg/L时是第3阶段,有机碳源浓度为250 mg/L时是第4阶段。

每个碳源浓度阶段采集水样12次(每日1次,间隔36 h),每次取3个平行样,共获得144组有效数据。

1.4 水样检测方法

对生活污水处理氮素去除效率优化效果进行检测时,依据标准《水和废水检测分析方法》进行^[12-13]。

快速消解分光光度法(化学需氧量):在强酸性条件下,以重铬酸钾为氧化剂,硫酸银为催化剂,于165 °C密封消解样品15 min,将水样中有机物和无机还原性物质氧化。通过分光光度计(波长610 nm)测定消解液中未被还原的Cr⁶⁺(黄色)或被还原生成的Cr³⁺(绿色)的吸光度,换算成COD值(单位:mg/L)。

纳氏试剂分光光度法(氨氮):水样中的氨与碘化钾和碘化汞的碱性溶液(纳氏试剂)反应,生成黄棕色胶态化合物(碘化氧汞铵)。在420 nm波长下测定吸光度,浓度与色度成正比(HJ 535-2009标准)。

紫外分光光度法(硝酸盐氮):硝酸根离子在220 nm处有特征紫外吸收峰,通过双波长校正法(220 nm与275 nm)消除有机物干扰。参照标准曲线定量标准(HJ/T 346-2007)。

N-乙二胺光度法(亚硝酸盐氮):在pH值1.7±0.3的磷酸介质中,亚硝酸盐与N-(1-萘基)-乙二胺二盐酸盐生成紫红色偶氮染料,于540 nm波长测定吸光度(GB 7493-87标准)。

过硫酸钾消解-紫外分光光度法(总氮):在碱性条件下(120 °C高压灭菌30 min),过硫酸钾将水样中的有机氮、氨氮、亚硝酸盐氮等全部氧化为硝酸盐氮,再通过紫外分光光度法(220 nm/275 nm)测定总硝酸盐浓度(HJ 636-2012标准)。

按照以上方法,将生活污水处理氮素去除效率优化过程不同阶段水样送到本地实验室进行检测,在检测过程中,按照以下公式计算厌氧氨氧化工艺试验装置反应周期内氨氮浓度、去除率和硝态氮浓度、去除率。

令 $k_{NH_4^+-N-re}$ 表示厌氧氨氧化过程中,氨氮、亚硝态氮和硝态氮转换速率满足关系如下:

$$k_{NH_4^+-N-re} = \frac{k_{NO_2^- - N - re}}{1.32} \dots\dots\dots (2)$$

$$k_{NH_4^+-N-re} = \frac{k_{NO_3^- - N - g}}{0.26} \dots\dots\dots (3)$$

式中, $k_{NO_2^- - N - re}$ 、 $k_{NO_3^- - N - g}$ 分别表示亚硝酸盐消耗速率和硝酸盐生成速率。

在反硝化过程中^[14-15],硝态氮和亚硝态氮转化速率满足关系如下:

$$k_{NO_3^- - N - re} = k_{NO_2^- - N - g} \dots\dots\dots (4)$$

式中, $k_{NO_3^- - N - re}$ 、 $k_{NO_2^- - N - g}$ 分别表示反硝化过程中硝酸盐消耗速率和亚硝酸盐生成速率。

令 $k_{NH_4^+-N-in}$ 、 $k_{NO_3^- - N - in}$ 表示厌氧氨氧化工艺试验反应体系内氨氮、硝态氮输入量,其反应过程中转换关系满足下式:

$$\begin{cases} k_{NH_4^+-N-e} = k_{NH_4^+-N-in} - k_{NH_4^+-N-re} \\ k_{NO_2^- - N - e} = k_{NO_2^- - N - g} - [k_{NO_2^- - N - re} + k_{NO_2^- - N - re(D)}] \\ k_{NO_3^- - N - e} = [k_{NO_3^- - N - in} + k_{NO_3^- - N - g}] - k_{NO_3^- - N - re} \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

式中, $k_{NO_2^- - N - re(D)}$ 表示反硝化过程中亚硝酸盐消耗速率; $k_{NO_2^- - N - re(D)}$ 、 $k_{NO_2^- - N - e(D)}$ 、 $k_{NO_3^- - N - e}$ 分别为氨氮、亚硝态氮和硝态氮表观速率。

在上述反应过程中抑制各个物质表观消耗和生成速率,即可依据公式(2)~公式(5)计算得到厌氧氨氧化工艺试验装置反应周期内氨氮去除速率和去除率、硝态氮去除率和去除速率。

2 结果与分析

使用所提方法对添加有机碳源(葡萄糖)浓度不同阶段的生活污水水样进行检测,以进水口氨氮浓度和出水口氨氮浓度作为衡量指标,分析使用厌氧氨氧化工艺对生活污水处理氮素去除效率优化效果,测试结果如图2所示。

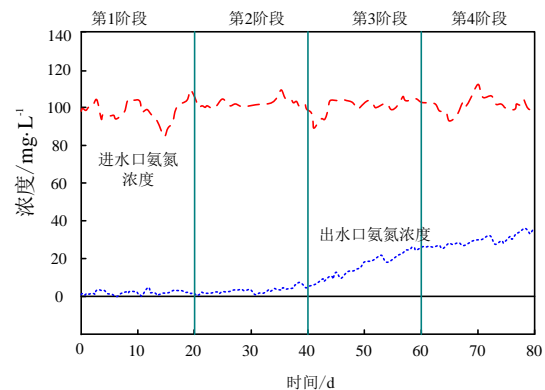


图2 不同阶段进水口与出水口氨氮浓度
Fig. 2 Ammonia nitrogen concentration at different stages of inlet and outlet

图2展示了使用厌氧氨氧化工艺处理生活污水时,不同阶段进水口和出水口氨氮浓度随时间的变化情况。在整个过程中,进水口氨氮浓度始终处于较高水平,波动幅度较大,在各阶段均维持在80~120 mg/L,说明进水氨氮浓度不稳定。而出水口氨氮浓度初始较低且变化平缓,随着时间推进,在第3、4阶段有上升趋势,但仍远低于进水口浓度,该阶段出水口氨氮浓度上升原因:该阶段厌氧氨氧化均与反硝化菌随着反应时间的增加开始争夺基质,反硝化作用增强抑制了厌氧氨氧化菌的活性,导致出水口氨氮浓度增加。上述结果表明,厌氧氨氧化工艺对生活污水中氮素去除有一定效果,不过随着时间推移及有机碳源浓度变化,工艺的脱氮稳定性可能受到挑战,后续需进一步优化以保障处理效果。

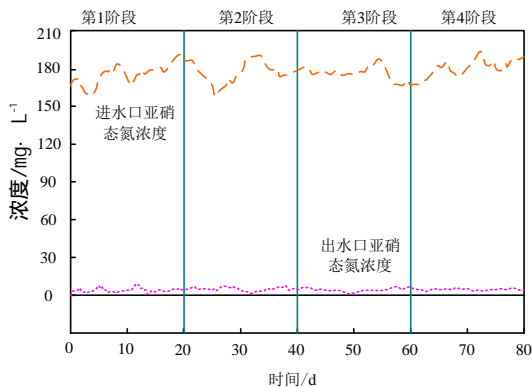


图3 不同阶段进水口与出水口亚硝态氮浓度

Fig. 3 Nitrous nitrogen concentration at different stages of inlet and outlet

以进水口亚硝态氮浓度和出水口亚硝态氮浓度作为衡量指标,分析使用厌氧氨氧化工艺对生活污水处理氮素去除效率优化效果,测试结果如图3所示。

图3显示,不同阶段进水口亚硝态氮浓度较高,波动范围大致在150~210 mg/L,在各阶段均有明显起伏,显示出进水亚硝态氮含量不稳定。而出水口亚硝态氮浓度始终维持在极低水平,几乎趋近于0,且变化极为平缓。这清晰表明厌氧氨氧化工艺对亚硝态氮有着极强的去除能力,能高效将进水的高浓度亚硝态氮降至极低水平,在生活污水亚硝态氮的脱除方面表现卓越,该工艺在控制亚硝态氮含量、提升生活污水氮素去除效率上效果显著且稳定。

以总氮、氨氮和亚硝态氮去除率作为衡量指标,验证所提方法不同阶段对生活污水处理氮素去除效率,测试结果如图4所示。

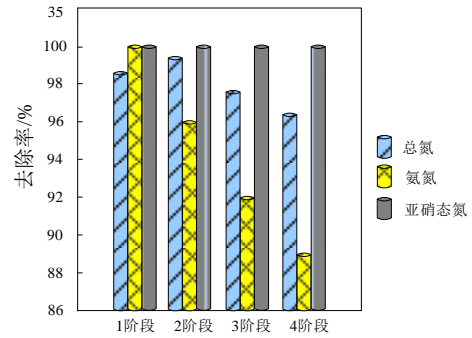


图4 不同阶段生活污水处理氮素去除效率

Fig. 4 Nitrogen removal efficiency of domestic sewage treatment at different stages

从图4中可以看出,总氮去除率在第1~2阶段较高且接近,第3~4阶段虽有下降但仍超96%,表现相对稳定。氨氮去除率从1阶段近乎100%逐渐下滑,至4阶段降至约89%,降幅明显,其原因为该阶段氨氮与总氮去除率出现下降趋势,主要是由于反硝化菌在高浓度有机物环境下占据代谢优势,而厌氧氨氧化菌的生物活性受到显著抑制所致;而亚硝态氮去除率在各阶段都近乎100%,波动极小。总体而言,该方法对亚硝态氮去除效果稳定突出,总氮去除较稳定,氨氮去除率则随阶段推进显著降低。

对不同阶段厌氧氨氧化反应器出水样本进行荧光光谱测定,使用平行因子法对荧光光谱测定值进行解析,得到不同阶段水样内类蛋白质、类腐殖酸物质和类富里酸物质荧光强度得分,依据该荧光强度得分,分析所提方法生活污水处理氮素去除效率优化效果,测试结果如图5所示。

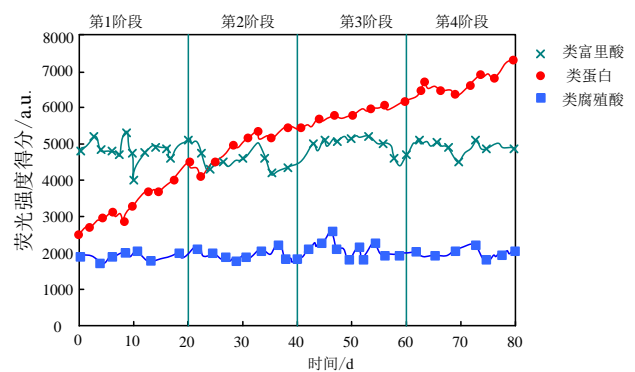


图5 不同阶段水样内物质荧光强度得分

Fig. 5 Fluorescence intensity scores of substances in water samples at different stages

图5展示了不同阶段水样内类蛋白质、类富里酸和类腐殖酸物质的荧光强度得分变化。类蛋白质从第1阶段至第4阶段整体呈显著上升趋势,从

约 2 000 a.u. 增长至 7 000 a.u. 以上, 增长态势明显, 其原因在于水质中有机物浓度较高时, 异养菌会吸收大量有机物, 然后不断增殖并分泌出较多的胞外微生物, 这些胞外微生物能够使类蛋白的荧光峰值上升。类富里酸在第 1 阶段数值较高, 后续呈波动变化, 于 4 000 ~ 6 000 a.u. 间起伏, 第 3、4 阶段有所下降; 类腐殖酸荧光强度得分较低, 始终在 2 000 a.u. 左右波动, 变化幅度较小。整体来看, 不同物质在各阶段呈现出不同的变化特征, 类蛋白增长趋势突出, 类富里酸先高后降, 类腐殖酸则相对稳定。

以 8 份人工合成生活污水样本作为实验对象, 使用本文方法对该 8 份人工合成生活污水进行处理, 以化学需氧量作为衡量指标, 验证所提方法应用效果, 测试结果如表 3 所示。

表 3 处理前后水样内化学需氧量 mg/L
Table 3 Chemical oxygen demand mg/L in water samples before and after treatment

水样编码 Water sample code	处理前 Before treatment	处理后 After treatment
1	1 981.3	270.2
2	2 136.9	264.5
3	1 996.5	254.1
4	2 054.5	231.2
5	2 155.4	240.1
6	1 967.9	228.9
7	2 034.4	226.7
8	2 009.5	223.6

表 3 展示了 8 份人工合成生活污水样本处理前后的化学需氧量。但仅从该表无法直接看出对氮素去除效率的优化情况, 因表中无氮素相关指标。从化学需氧量数据看, 处理前化学需氧量在 1 967.9~2 155.4 mg/L, 处理后降至 223.6~270.2 mg/L, 说明本文方法对降低污水中有机物含量效果显著, 生活污水内氮素去除优化效果好。

3 讨论与结论

本研究通过厌氧氨氧化工艺试验装置, 对生活污水的氮素去除效率进行了深入探究。实验结果不仅验证了该工艺在氮素去除上的高效性, 也揭示了其在实际应用中可能面临的挑战。首先, 从氮素去除的角度来看, 亚硝态氮去除率始终稳定在 100%, 这一结果充分展示了厌氧氨氧化工艺在亚硝态氮转化上的卓越性能。同时, 总氮去除

率超过 96%, 也证明了该工艺在整体氮素去除上的有效性。然而, 值得注意的是, 氨氮去除率随有机碳源浓度的增加而有所下降, 从最初的接近 100% 降至约 89%。这一现象提示在实际应用中, 需要严格控制有机碳源的浓度, 以避免对厌氧氨氧化菌的活性产生抑制, 从而影响氨氮的去除效果。进一步联系实际, 生活污水的成分复杂多变, 有机碳源浓度波动较大。因此, 在实际应用厌氧氨氧化工艺时, 需要充分考虑这一因素, 通过优化工艺参数或结合其他预处理技术, 来确保氮素去除的稳定性和高效性。此外, 化学需氧量 (COD) 的显著降低也表明了厌氧氨氧化工艺在有机物去除方面的潜力。然而, 在实际应用中, 还需要综合考虑 COD 去除与氮素去除之间的平衡, 以避免因过度追求氮素去除而忽视 COD 去除, 导致水质不达标。

综上, 本研究搭建了由厌氧处理单元、半亚硝化反应单元和厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 单元构成的试验装置, 开展了基于厌氧氨氧化工艺的生活污水处理氮素去除效率优化研究。结果表明, 亚硝态氮去除率稳定在 100%, 总氮去除率超 96%, 但氨氮去除率从近 100% 降至约 89%。这是因高浓度有机物抑制了厌氧氨氧化菌活性, 使反硝化菌占据主导。荧光光谱分析显示, 类蛋白质物质显著增加, 类腐殖酸相对稳定。化学需氧量数据表明该工艺对有机物去除效果显著。然而, 工艺长期稳定性受有机物浓度影响, 需进一步优化控制策略。未来可结合其他工艺或智能控制技术提升稳定性, 探索实际污水复杂水质的影响, 为该工艺推广应用提供参考。

参考文献:

- [1] 赖安兴, 王洪伟, 谢珂, 等. 长江中下游湖泊沉积物厌氧铁氨氧化过程及脱氮贡献[J]. 湖泊科学, 2024, 36(6): 1743-1756.
LAI A X, WANG H W, XIE K, et al. The feammox mechanism within lake sediments in the middle and lower Yangtze River basin and its contribution to nitrogen removal[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36 (6): 1743-1756. (in Chinese)
- [2] 王振, 王宁, 高磊, 等. 基于电极氨氧化的全程自养脱氮工艺的运行性能[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(4): 883-890.
WANG Z, WANG N, GAO L, et al. Operational performance of a completely autotrophic nitrogen removal process based on electrode-dependent ammonium oxidation[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(4): 883-889. (in Chinese)

- [3] 陈小锋,王润竹,陈静,等.太湖沉积物中厌氧铁氨氧化过程[J].湖泊科学,2023,35(5):1604-1612.
CHEN X F, WANG R Z, CHEN J, et al. Ferric iron reduction coupled to anaerobic ammonium oxidation in the sediments of Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(5): 1604-1612. (in Chinese)
- [4] 姚望,蒋剑虹,唐清畅,等.一体化厌氧-变级数缺氧/好氧循环污水处理装置中试研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2024,47(4):97-103,142.
YAO W, JIANG J H, TANG Q C, et al. Pilot study on integrated anaerobic-variable stage anoxic/aerobic circulating flow wastewater treatment device[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2024, 47(4): 97-103, 142. (in Chinese)
- [5] 孙世佳,李茹莹,孙邓威.柠檬酸碳源强化低C/N校园生活污水脱氮性能[J].环境科学学报,2024,44(8):170-180.
SUN S J, LI R Y, SUN D W. Enhanced nitrogen removal for low C/N ratio campus domestic wastewater using citric acid as additional carbon source[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(8): 170-180. (in Chinese)
- [6] 刘建伟,魏泽冉,田洪钰,等.农村生活污水处理的强化厌氧反应器设计优化及应用[J].中国给水排水,2024,40(7):85-90.
LIU J W, WEI Z R, TIAN H Y, et al. Optimization of enhanced anaerobic reactor design and its application for rural domestic sewage treatment[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(7): 85-90. (in Chinese)
- [7] 王琪,黄懿,张媛柯,等.山地农村生活污水典型处理工艺效果研究[J].环境科学与技术,2024,47(专刊):214-220.
WANG Q, HUANG Y, ZHANG Y K, et al. Study of typical treatment technology of domestic sewage in mountainous rural areas[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(z1): 214-220. (in Chinese)
- [8] 阚和科,王云川,黄文升,等.厌氧-缺氧/滴滤/介质滤床处理油气站场生活污水[J].中国给水排水,2024,40(2):120-125.
KAN H K, WANG Y C, HUANG W S, et al. Domestic sewage treatment of oil and gas station by a combined process of anaerobic-anoxic/pulse trickling filter/medium filter bed[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(2): 120-125. (in Chinese)
- [9] 巩彧玄,张頔,于博洋,等.磁分离技术处理污水的研究现状[J].东北农业科学,2022,47(5):146-150.
GONG Y X, ZHANG D, YU B Y, et al. Development status of magnetic separation technology for wastewater treatment[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(5): 146-150. (in Chinese)
- [10] 范荣桂,关怀远,张玛格.PN/A工艺应用于主流城市污水处理的研究进展[J].应用化工,2023,52(3):880-884,891.
FAN R G, GUAN H Y, ZHANG M G. Development of PN/A process applied to mainstream municipal sewage[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(3): 880-884. (in Chinese)
- [11] 冯婉仪,李家麟,段晨雪,等.污水处理系统中厌氧氨氧化细菌的富集策略[J].北京工业大学学报,2024,50(2):207-215.
FENG W Y, LI J L, DUAN C X, et al. Recent progress of anammox bacteria enrichment strategies in wastewater treatment[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(2): 207-215. (in Chinese)
- [12] 黄勇,黄文慧,顾晓丹,等.城市污水中部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺NOB抑制策略的研究进展[J].环境工程学报,2023,17(4):1075-1083.
HUANG Y, HUANG W H, GU X D, et al. Research progress of NOB inhibition strategy of partial nitrosation-anammox process in municipal wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(4): 1075-1083. (in Chinese)
- [13] 王宝玉,朱武卫,付文震,等.厌氧氨氧化工艺在主流污水处理中的应用及其调控研究进展[J].水处理技术,2024,50(1):20-25.
WANG B Y, ZHU W W, FU W Z, et al. Application of anaerobic ammonia oxidation process in mainstream wastewater treatment and its regulation research progress[J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(1): 20-25. (in Chinese)
- [14] 吴宇伦,李泽敏,成晓倩,等.基于机器学习的短程硝化/短程反硝化-厌氧氨氧化工艺脱氮性能预测与关键参数识别[J].环境工程,2024,42(9):180-190.
WU Y L, LI Z M, CHENG X Q, et al. Prediction of nitrogen removal performance and identification of key parameters of partial nitrification/partial denitrification-anammox process based on machine learning[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(9): 180-190. (in Chinese)
- [15] PELLERIN A, THOMAZO C, ADER M, et al. Iron-mediated anaerobic ammonium oxidation recorded in the early archaean ferruginous ocean[J]. Geobiology, 2023, 21(3): 277-289.
- [16] 高星爱,张頔,王飞虎,等.固定化脱氮菌及COD降解菌协同作用对养殖污水处理效果的分析[J].东北农业科学,2024,49(4):94-98.
GAO X G, ZHANG D, WANG F H, et al. Analysis of the synergistic effect of immobilized denitrification bacteria and cod degrading bacteria on the treatment of aquaculture wastewater[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(4): 94-98. (in Chinese)
- [17] 王荣红,范小龙,毛迪,等.郑州某大型污水处理厂运行经验及工艺调控分析[J].工业水处理,2024,44(2):201-206.
WANG R H, FAN X L, MAO D, et al. A large-scale wastewater treatment plant operation experience and process control analysis in Zhengzhou[J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(2): 201-206. (in Chinese)

(责任编辑:朴红梅)