

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 01. 001

两段式PN-SAED工艺实现低碳氮比污水深度脱氮

刘文龙, 应乾鸿, 王佳铭, 孙丽娜, 李 军

(浙江工业大学环境学院 浙江省工业污染微生物控制技术重点实验室, 浙江
杭州 310014)

摘 要: 为解决城市污水主流厌氧氨氧化工艺出水硝态氮积累且易失稳的问题, 构建了两段式短程硝化-厌氧氨氧化耦合内源反硝化(PN-SAED)工艺, 考察了其对于低碳氮比(C/N)污水的深度脱氮性能和微生物菌群结构变化。在进水C/N为 2.60 ± 0.11 时, PN-SAED工艺的出水总无机氮(TIN)浓度为 (2.6 ± 0.5) mg/L, TIN去除率达到 $(94.6 \pm 1.0)\%$ 。典型周期的氮素平衡分析表明, PN和SAED系统对氮素的去除贡献分别为7.3%和92.7%, 其中SAED系统中氮素主要通过厌氧氨氧化途径去除(贡献率达82.2%)。高通量测序数据表明, 投加羟胺可在实现PN系统中亚硝酸盐氧化菌属丰度(*Nitrospira*, 3.1%→0.6%)快速下降的同时, 使氨氧化菌属(*Nitrosomonas*, 0.13%→0.92%)得到富集, 实现稳定短程硝化; 而在SAED系统中 *Candidatus Brocadia* (12.3%) 和 *Candidatus Jettenia* (2.83%) 成为优势厌氧氨氧化菌属, 与内源反硝化菌属 *Candidatus Competibacter* (17.5%) 和 *Denitratisoma* (7.15%) 协同共生, 从而实现对于低C/N城市污水的深度脱氮。

关键词: 短程硝化; 厌氧氨氧化; 内源反硝化; 深度脱氮; 菌群结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)01-0001-08

Achieving Deep Nitrogen Removal via Two-stage PN-SAED Process from Low C/N Ratio Wastewater

LIU Wen-long, YING Qian-hong, WANG Jia-ming, SUN Li-na, LI Jun

(Key Laboratory of Microbial Technology for Industrial Pollution Control of Zhejiang Province,
College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: To address the issue of instability and nitrate accumulation in the effluent of the mainstream anaerobic ammonia oxidation (Anammox) process treating municipal wastewater, this study established a two-stage process combining partial nitrification/Anammox with endogenous denitrification (PN-SAED) process for low carbon to nitrogen (C/N) ratio wastewater treatment, and the deep nitrogen removal performance and changes in microbial community structure were evaluated. The results indicated that, with an influent C/N ratio of 2.60 ± 0.11 , the PN-SAED process achieved an effluent total inorganic nitrogen (TIN) concentration of (2.6 ± 0.5) mg/L, corresponding to a TIN removal efficiency of $(94.6 \pm 1.0)\%$. Nitrogen balance analysis during a typical cycle showed that the contributions of the PN and

基金项目: 浙江省“领雁”研发攻关计划项目(2022C03075); 浙江省基础公益研究计划项目(LQ21E080013); 国家自然科学基金资助项目(52000157)

通信作者: 李军 E-mail: tanweilijun@zjut.edu.cn

SAED systems to nitrogen removal were 7.3% and 92.7%, respectively, with the Anammox pathway accounting for the majority of nitrogen removal (82.2%) in the SAED system. High-throughput sequencing data revealed that the addition of hydroxylamine led to a rapid decline in the abundance of nitrite-oxidizing bacteria (*Nitrospira*, from 3.1% to 0.6%) in the PN system, while enriching ammonia-oxidizing bacteria (*Nitrosomonas*, from 0.13% to 0.92%), achieving stable partial nitrification. In the SAED system, *Candidatus Brocadia* (12.3%) and *Candidatus Jettenia* (2.83%) emerged as the dominant Anammox bacteria, coexisting synergistically with endogenous denitrifying bacteria of *Candidatus Competibacter* (17.5%) and *Denitratisoma* (7.15%), thereby accomplishing deep nitrogen removal from municipal wastewater with a low C/N ratio.

Key words: partial nitrification; Anammox; endogenous denitrification; deep nitrogen removal; microbial community structure

厌氧氨氧化(Anammox)是一种自养脱氮过程,相较于传统生物脱氮工艺,其代谢过程无需有机物和溶解氧(DO)的参与,且不产生 N_2O ,具有节约曝气能耗和碳源消耗、减少温室气体排放和剩余污泥产量的优点^[1-2]。目前,Anammox技术已成功应用于垃圾渗滤液、污泥消化液等高氨氮废水的处理,并有望推动市政污水处理厂实现能源自给^[3-4]。不过,Anammox的最大理论脱氮率仅为89%,出水中仍然存在11%的硝酸盐氮(NO_3^- -N)无法根除^[5]。为解决Anammox工艺脱氮不彻底的问题,人们采用厌氧氨氧化菌(AnAOB)耦合反硝化菌的方法,利用两类功能细菌的协同作用实现深度脱氮。Anammox/反硝化(SAD)工艺不仅进一步提高了系统的脱氮效率,而且削弱了DO和有机物等对AnAOB的抑制^[6],但在处理实际城市污水时,由于进水 NH_4^+ -N浓度较低且有机物成分复杂,依旧存在AnAOB和反硝化菌竞争导致系统失衡的问题。另外,目前不稳定的 NO_2^- -N来源依然是制约主流Anammox技术应用的瓶颈之一,现有研究主要通过短程硝化和短程反硝化两种途径解决底物获取问题。其中,实现短程硝化的机制主要是通过扩大氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO_B)的活性和丰度差异来实现。羟胺(NH_2OH)作为AOB和AnAOB的中间代谢产物,适量投加能提高菌群活性,而NO_B缺乏羟胺氧化还原酶无法代谢 NH_2OH 消除其负面影响,已被证实是一种实现稳定短程硝化的有效手段。

近年来,为了维持SAD中AnAOB的主导地位,耦合内源反硝化(SAED)成为一种替代方案。在Anammox与SAED耦合系统中发挥内源反硝化作用

的主要是反硝化聚糖菌(DGAOs),它们能够将外碳源转化为内碳源如聚羟基脂肪酸酯(PHAs)后再利用,从而实现降低反硝化速率^[7]、使用单一电子供体^[8]、增强抗冲击负荷能力以及减少污泥产量^[9]等作用,有利于维持AnAOB的主导地位。Lu等^[10]和Zhen等^[11]分别在序批式反应器(SBR)和改良厌氧折流板反应器(mABR)中利用内源反硝化耦合Anammox系统实现了对城市污水中碳、氮污染物的同步高效去除。本团队前期的研究^[12]也证实了在Anammox系统直接引入少量有机物(100 mg/L)可诱发原位内源反硝化作用实现深度脱氮,总无机氮(TIN)去除率由 $(79.07 \pm 2.63)\%$ 提高至 $(97.00 \pm 1.35)\%$ 。不过上述研究均在单一反应器中进行,多功能菌群的共生提高了系统发生失稳的风险,而组合工艺的使用可避免脱氮功能微生物的不当竞争,更利于在实际污水处理中应用。因此,构建短程硝化/Anammox耦合内源反硝化(PN-SAED)组合工艺,从而解决城市污水主流Anammox工艺出水 NO_3^- -N积累且易失稳的问题。

以模拟低C/N城市污水为研究对象,采用 NH_2OH 抑制手段快速启动PN反应器,结合SAED颗粒污泥反应器构建PN-SAED组合工艺,考察其对低C/N城市污水的深度脱氮性能,通过对典型周期数据进行氮素的物料衡算分析,揭示组合工艺的脱氮路径,并通过高通量测序手段探究各反应器中微生物菌群结构的演变。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方式

试验采用两个有效容积为5 L、由有机玻璃制成

的圆柱形SBR反应器建立PN-SAED组合工艺系统(见图1),它由配水箱、PN-SBR、中间水箱、SAED-SBR和出水箱串联而成。其中城市污水从配水箱中分两股分别进入PN-SBR和SAED-SBR,而PN-SBR出水进入中间水箱后由蠕动泵注入SAED-SBR,进行脱氮反应后排入出水箱。采用水浴加热控温,并在反应器上方设置机械搅拌器进行搅拌混合。

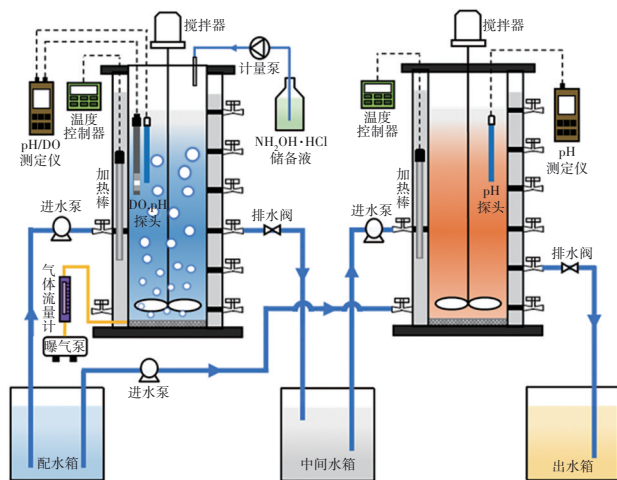


图1 PN-SAED反应器装置示意

Fig.1 Schematic diagram of PN-SAED reactor apparatus

试验分为两部分:PN-SBR短程硝化的启动(0~32 d)和PN-SAED组合工艺的运行(33~64 d)。PN-SBR以厌氧/好氧(An/O)模式运行:进水(城市污水)10 min、厌氧搅拌50 min、好氧曝气(投加 NH_2OH 2 min)180 min、沉淀30 min、排水5 min、闲置85 min。SAED-SBR以厌氧/缺氧(An/A)模式运行:进水(城市污水)5 min、厌氧搅拌55 min、进水(中间水箱)10 min、缺氧搅拌170 min、沉淀10 min、排水5 min、闲置105 min。两个反应器每天均运行4个周期,每周期为6 h,控制PN-SBR好氧段的DO为0.5~1.0 mg/L以及污泥龄为20 d,PN-SBR和SAED-SBR的排水比分别为60%和80%。根据进水 NH_4^+-N 浓度和PN-SBR出水 NO_2^--N 浓度,按照Anammox反应的理论比值($\text{NO}_2^--\text{N}/\text{NH}_4^+-\text{N}=1.32$)调控SAED-SBR的城市污水和中间水箱的进水量,以实现PN-SAED组合工艺的深度脱氮。

1.2 接种污泥与试验用水

PN-SBR的接种污泥取自浙江省某污水处理厂的二沉池回流污泥,接种后污泥浓度(MLSS)约为4 000 mg/L。SAED-SBR的接种污泥取自实验室长期稳定运行的SAED颗粒污泥,平均粒径为550

μm ,接种后MLSS约为3 000 mg/L,氮去除负荷为 $(0.61 \pm 0.03) \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。试验采用模拟低C/N城市污水, NH_4^+-N 和COD浓度分别保持在50 mg/L和125 mg/L,为使模拟低C/N污水更接近于实际城市污水,采用乙酸钠和葡萄糖作为组合碳源,浓度(以COD计)分别约为75、50 mg/L,并添加 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 KH_2PO_4 分别为180、300、27 mg/L,以及1 mL/L微量元素。微量元素I的成分包括 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{EDTA} \cdot 2\text{Na}$,浓度分别为9.14、6.39 g/L;微量元素II的成分包括 $\text{EDTA} \cdot 2\text{Na}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 H_3BO_3 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$,浓度分别为19.11、0.25、0.19、0.22、0.014、0.43、0.24、0.99 g/L。

1.3 分析及表征方法

水样经0.45 μm 滤纸过滤以后再测定相关指标。其中,COD:快速消解法, NH_4^+-N :纳氏试剂分光光度法, NO_2^--N :N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法, NO_3^--N :紫外分光光度法,MLSS:滤纸称重法,挥发性悬浮固体浓度(VSS):马福炉燃烧重量法,pH和DO:WTW Multi340i分析仪。

因进水氮负荷较低,可忽略同化作用造成的氮损失,故SAED-SBR系统仅通过Anammox和内源反硝化去除氮,采用Anammox和内源反硝化脱氮贡献率表征两种途径各自的贡献;以比氨氮氧化速率(SAOR)和比 NO_3^--N 生成速率(SNPR)分别表征短程硝化过程中AOB和NOB的活性;通过 NO_2^--N 积累率(NAR)来反映PN-SBR系统的短程硝化效果。

1.4 高通量测序

采集不同运行时间的PN-SBR污泥和SAED-SBR污泥进行高通量测序分析。收集的污泥样品经干燥脱水后,先进行DNA提取,后利用聚合酶链反应对目标基因片段进行扩增,同时回收和纯化该扩增产物,最后将扩增纯化样品进行上机测序。获得数据后,对相似性 $\geq 97\%$ 的序列单元进行Alpha多样性分析。利用QIIME2软件计算样本Alpha多样性指数,选取代表性OTUs在Silva数据库中进行比对,统计门、属水平的群落组成及丰度。

2 结果与讨论

2.1 PN-SBR短程硝化的启动

短程硝化启动过程中PN-SBR的硝化性能以及对COD去除效果变化如图2所示。启动初期,污泥

处于适应阶段,氨氮去除效果较差。随着反应器的运行,污泥的硝化活性逐渐得到恢复,出水 NH_4^+-N 浓度迅速降低,出水 NO_3^--N 开始逐步积累。运行至第16天时,污泥活性基本恢复,稳定后出水 NO_3^--N 浓度达到 $(23.4 \pm 1.2) \text{ mg/L}$ 。在此期间,出水 NO_2^--N 浓度始终较低,NAR 仅为 $(5.1 \pm 2.3)\%$ 。

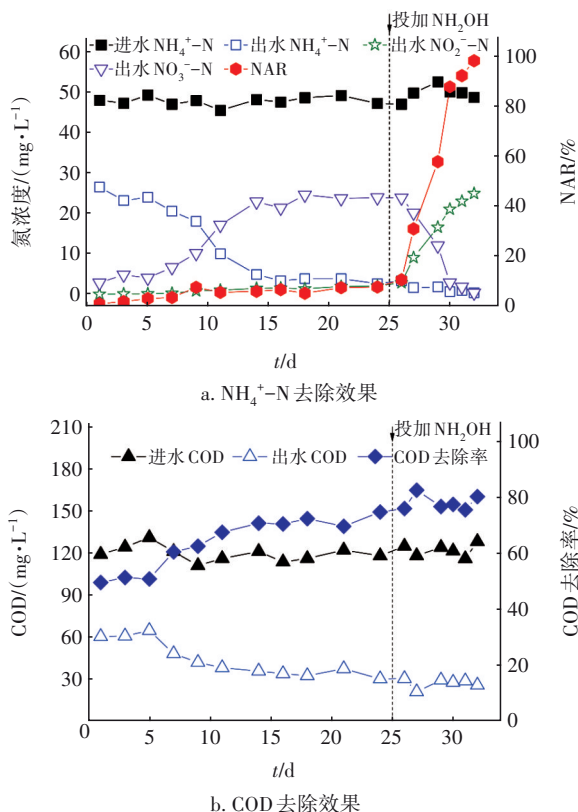


图2 启动过程中PN-SBR对 NH_4^+-N 和COD的去除效果
Fig.2 Removal effect of PN-SBR on NH_4^+-N and COD during startup process

Harper等人^[13]研究表明,不同浓度的 NH_2OH 对NOB活性的抑制均显著高于对AOB的抑制,投加低浓度 NH_2OH (10~40 mg/L)可在一定程度上提高短程硝化系统的氨氧化速率(1.3~40倍)。小试结果表明, NH_2OH 浓度由1 mg/L增加到10 mg/L时,NOB的SNPR由85.8%下降到26.0%,而AOB的SAOR仅由94.7%下降到67.9%。在保证AOB活性的前提下,尽可能抑制NOB的活性可实现 NO_2^--N 的快速积累,因此,在PN-SBR的好氧段初期投加5 mg/L的 NH_2OH 。由图2(a)可知,投加 NH_2OH 后实现了对NOB活性的有效抑制,7 d内出水 NO_2^--N 浓度由2.8 mg/L迅速上升至24.9 mg/L,NAR最高达到98.5%,而出水 NO_3^--N 浓度持续降低至0.4 mg/L,

说明通过 NH_2OH 抑制可快速启动PN-SBR的短程硝化。此外,出水 NH_4^+-N 浓度也由 $(3.7 \pm 0.7) \text{ mg/L}$ 进一步下降至 $(1.5 \pm 1.0) \text{ mg/L}$ 。

由图2(b)可知,在第1~16天的污泥活性恢复期内,出水COD浓度从59.9 mg/L降至33.5 mg/L,COD去除率由49.4%逐渐上升到70.3%,随后在69.5%~75.6%之间波动。整个试验过程中进水COD为 $(119.6 \pm 5.0) \text{ mg/L}$,投加 NH_2OH 后,反应器出水COD浓度进一步下降为 $(26.8 \pm 3.1) \text{ mg/L}$,去除率上升至 $(77.9 \pm 2.5)\%$,说明PN-SBR对有机物的去除效果良好。

2.2 PN-SAED组合工艺的运行性能

控制适宜的SAED进水 $\text{NO}_2^--\text{N}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 值对PN-SAED组合工艺实现深度脱氮起关键作用,根据PN-SBR出水 NO_2^--N 浓度,计算得出当短程硝化出水和城市污水进水量分别为2.9 L和1.1 L时能满足SAED进水 $\text{NO}_2^--\text{N}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 值接近1.32,并根据实际脱氮情况进行实时调整。在整个运行过程中,PN-SBR短程硝化性能良好,NAR维持在98.0%以上,出水 NO_2^--N 累积量始终稳定在25.0 mg/L左右,SAED-SBR实际进水 $\text{NO}_2^--\text{N}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 值为 1.38 ± 0.03 左右。在PN-SAED工艺运行过程中,出水 NH_4^+-N 浓度保持在 $(2.6 \pm 0.5) \text{ mg/L}$ 左右,且出水中几乎不含 NO_2^--N 和 NO_3^--N ,因此,PN-SAED组合工艺的TIN去除率达到 $(94.6 \pm 1.0)\%$,取得了较为满意的深度脱氮效果。同时,PN-SAED组合工艺对COD的去除效果良好,在进水COD为 $(125.3 \pm 5.6) \text{ mg/L}$ 时,出水COD为 $(25.2 \pm 1.6) \text{ mg/L}$,平均去除率为 $(79.9 \pm 1.6)\%$ 。

因此,PN-SAED组合工艺在实现低C/N城市污水深度脱氮的同时,可充分利用原水碳源,以内碳源储存的方式去除外源有机物,之后为内源反硝化提供电子供体,最大程度地削减有机物对AnAOB的抑制,进而实现对有机物和氮污染物的同步去除。

2.3 典型周期碳、氮转化机理分析

为探究PN-SAED组合工艺的碳、氮去除途径和贡献,选取系统稳定运行时(60 d)的典型周期数据进行定量分析,结果如图3所示。在PN-SBR的厌氧阶段(0~60 min),上周期残留的 NO_2^--N 在前30 min迅速从24.9 mg/L降为0,其原因在于反硝化菌在厌氧环境下消耗城市污水中的COD(47.3%)还原 NO_2^--N 为 N_2 以及进水的稀释作用;在此期间,

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度保持相对稳定。

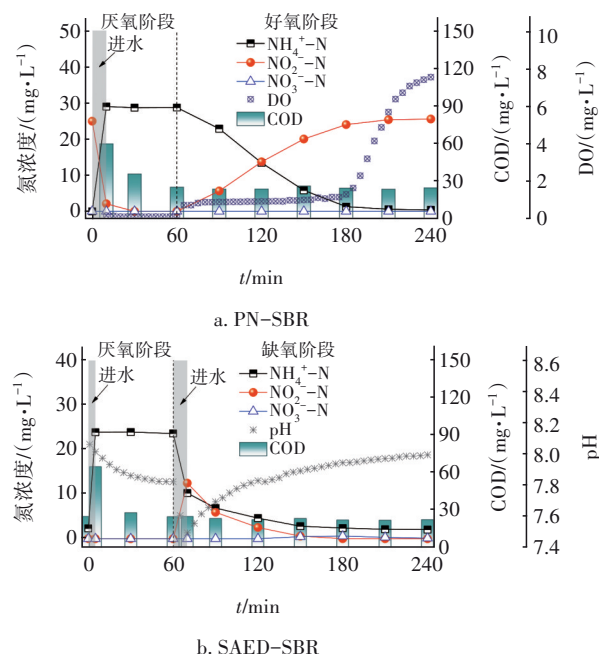


图3 PN-SAED工艺稳定运行时典型周期内氮和COD变化

Fig.3 Variations in nitrogen and COD during a typical cycle in stable operation of PN-SAED process

好氧阶段的前120 min为氮的主要转化期,DO浓度一直维持在0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右;随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被氧化完全,其浓度由28.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至0.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 逐渐得到积累,最终好氧末出水浓度达到25.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。PN-SBR反应器的最后60 min,DO浓度逐渐上升至7.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,然而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 依然没有被检出,而且 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度保持稳定,说明在PN-SBR长期运行过程中,NOB的活性或丰度被 NH_2OH 有效抑制,获得了较好的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累性能。此外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的降解速率[14.362 $\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$]稍快于 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的生成速率[12.468 $\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$],且依据氮物料衡算, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 并没有完全转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,存在一定的损失,其原因可能在于反硝化菌利用厌氧阶段储存的内碳源进行了内源反硝化,降解了部分 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,经计算大概存在10.6%的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 通过反硝化途径被去除(见图4)。

由图3(b)和图4可知,在SAED-SBR的厌氧阶段(0~60 min),大部分COD在前30 min被转化为内碳源储存于胞内,其浓度由69.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 减少至28.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。pH的变化也验证了这一现象,其由初始的8.06下降为7.83,并且在厌氧阶段的最后保持稳定。另外,整个厌氧阶段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度几乎保持不

变, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度始终为零。由于硝化反应会不断消耗碱度,短程硝化出水的pH相对较低,因此缺氧阶段(60~240 min)进水后,反应器中pH下降为7.49,但随着Anammox反应的进行,pH又缓慢回升为8.01;初始 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别为10.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和12.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,缺氧反应120 min后,氮转化几乎达到平衡,AnAOB因缺少底物 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 而无法继续降解 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,最终出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为2.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由于内源反硝化的作用,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度几乎为零,TIN去除率达到94.4%,其中82.2%的氮素去除是通过Anammox途径实现的。进一步分析表明,整个PN-SAED系统的氮去除负荷(以TIN计)为0.074 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,PN-SBR和SAED-SBR系统的TIN去除贡献率分别为7.3%和92.7%。

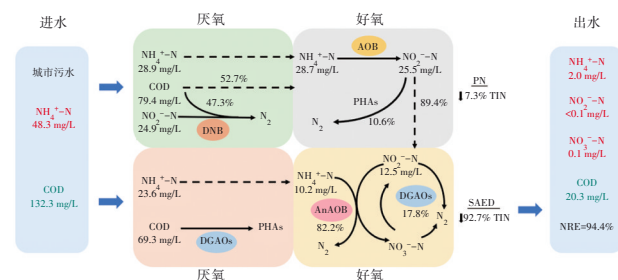


图4 PN-SAED组合工艺的氮和COD去除路径评估

Fig.4 Assessment of nitrogen and COD removal pathways in PN-SAED combined process

2.4 微生物群落结构变化

2.4.1 Alpha多样性指数

为进一步探究PN-SAED组合工艺运行过程中功能菌群的组成结构及其演变,分别对PN-SBR的接种污泥(PN0)、运行至第25天和第62天的污泥(PN25和PN62)以及SAED-SBR组合前后的污泥(AMX32和AMX62)进行高通量测序分析。将PN-SBR的3个污泥样本以最少序列数(44 083条)抽平后,对相似性 $\geq 97\%$ 的序列单元进行Alpha多样性分析,结果见表1。Coverage值均高于0.98,表明测序深度较高,能代表污泥真实特性。Ace和Chao指数大幅降低,表明短程硝化过程中菌群丰度降低,功能微生物被驯化。Shannon指数也呈下降趋势,进一步说明随着短程硝化的成功启动,功能菌群得到富集,微生物多样性降低。对于SAED-SBR而言,由于PN-SBR提供的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 来源较为稳定,表征菌群丰度的Ace和Chao指数变化不大,Shannon指数稍有上升,说明SAED-SBR的微生物种群多样性和

均匀性都较为稳定。

表1 PN-SAED组合工艺不同时期的污泥样品Alpha多样性指数

Tab.1 Alpha diversity index of sludge samples from different stages of PN-SAED combined process

泥样	Ace	Chao	Shannon	Simpson	Coverage
PN0	2 974.6	2 828.0	5.660	0.014	0.987 9
PN25	1 882.9	1 682.5	4.278	0.053	0.987 8
PN62	761.9	720.4	3.522	0.077	0.995 3
AMX32	1 043.8	981.1	3.930	0.054	0.994 4
AMX62	879.3	841.7	4.040	0.045	0.995 6

2.4.2 门水平核心菌群结构演变

PN-SAED组合工艺在门水平的核心菌群结构演变如图5所示。由图5(a)可知,PN-SBR在门水平上的优势菌门分别为 *Proteobacteria* (14.1%~36.1%)、*Patescibacteria* (6.1%~39.8%)、*Chloroflexi* (4.4%~26.8%)、*Actinobacteriota* (9.9%~24.5%)和 *Bacteroidota* (3.3%~6.3%)。与氮去除相关的硝化细菌主要属于 *Proteobacteria* 菌门^[14],其丰度随短程硝化进程的加深呈增长趋势,从微生物角度证实了PN-SBR硝化性能的增强。*Patescibacteria* 普遍存在于含水层环境中且易于进行反硝化,但并不属于短程硝化系统中常见的优势菌门,该菌门在PN-SBR中占据主导地位的原因可能与其超小的细胞体积和较高的比表面积有关,这一特性使得其能够最大限度地利用营养物质^[15]。接种污泥中的优势菌门 *Actinobacteriota* 和 *Chloroflexi* 逐渐被淘洗出短程硝化系统,相对丰度分别从24.5%和26.8%降低为9.9%和4.4%。

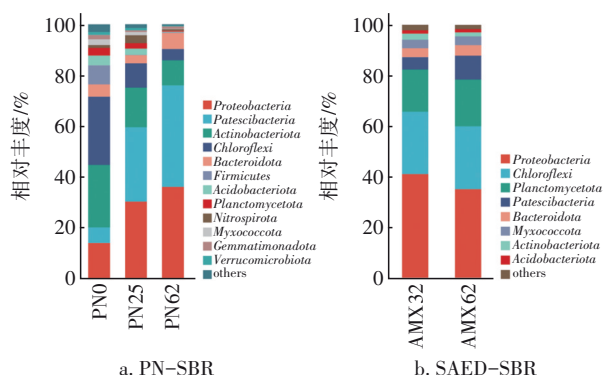


图5 PN-SAED组合工艺在门水平上的核心菌群结构演变
Fig.5 Microbial structure evolution of core flora in PN-SAED combined process at phylum level

图5(b)显示,SAED-SBR在门水平上的优势菌门为 *Proteobacteria*、*Chloroflexi* 和 *Planctomycetota*。

在组合工艺运行期间,反硝化菌门 *Proteobacteria* 的丰度由41.1%降低为35.2%, Anammox 菌门 *Planctomycetota* 的丰度从16.6%增长为18.4%,其他菌门的丰度均未出现明显变化,说明SAED-SBR系统的微生物在处理低C/N城市污水时始终保持稳定,同时说明了该组合工艺性能的稳定。

2.4.2 属水平核心菌群结构演变

PN-SAED组合工艺在属水平的核心菌群结构演变见图6。*Nitrosomonas* 是PN-SBR中的主要AOB菌属,是实现短程硝化的关键。投加 NH_2OH 后并没有抑制AOB,其丰度由0.13%持续增长为0.92%,而主要NOB菌属 *Nitrospira* 的丰度由3.1%削减为0.6%,NOB被抑制确保了 NO_2^- -N 得以高效积累,这与Harper等^[13]和Wan等^[16]的研究结果一致。耐盐耐毒类菌属 *Saccharimonadales* 和 *Micropruina* 能够有效降解城市污水中的有机物^[17],在PN-SBR中得到富集,相对丰度分别增长为33.6%和8.5%。此外,反硝化功能菌由投加 NH_2OH 前的 *Rhodocyclaceae*、*Anaerolineaceae* 和 *Aeromonas* 更迭为投加后的 *Comamonadaceae*、*Ottowia*、*Thauera* 和 OLB8,相对丰度分别增长为10.6%、9.3%、3.8%和3.2%,上述微生物能够在缺氧环境中通过反硝化作用去除上周期残留的 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N,同时消耗原水碳源。另外,反硝化聚磷菌 *Dechloromonas* (0.2%~1.5%) 和 *Acinetobacter* (0.1%~1.41%) 也能在厌氧阶段充分吸收原水碳源储存为PHAs,在后续限氧环境中发挥反硝化作用,这与典型周期中PN-SBR存在氮损失的现象相吻合。

在SAED-SBR中共检测到两种AnAOB优势菌属,分别为 *Candidatus Brocadia* (11.6%~12.3%) 和 *Candidatus Jettenia* (2.78%~2.83%),是系统低碳高效脱氮的保证。而DGAOs优势菌属 *Candidatus Competibacter* 的丰度由25.7%减少为17.5%,分析原因可能与实际运行中碳源种类变化、有机物负荷降低有关。据报道,*Candidatus Competibacter* 主要利用结构简单的挥发性脂肪酸,当模拟城市污水中添加葡萄糖时,其对碳源的利用效率可能有所降低,这需要进一步研究不同碳源对DGAOs内源反硝化的影响。由于内源反硝化功能菌属 *Denitratisoma* 能利用复杂有机物进行生长代谢^[18],丰度仍然保持增加,由5.73%升至7.15%。此外,隶属于 *Chloroflexi* 菌门的SBR1031、A4b和OLB13也是SAED-SBR系

统中的优势菌属,其丰度分别为9.55%~10.1%、5.78%~6.17%和4.26%~6.23%,这类细菌具有降解细胞衰亡结构的能力,普遍共生于Anammox脱氮系统中^[19]。

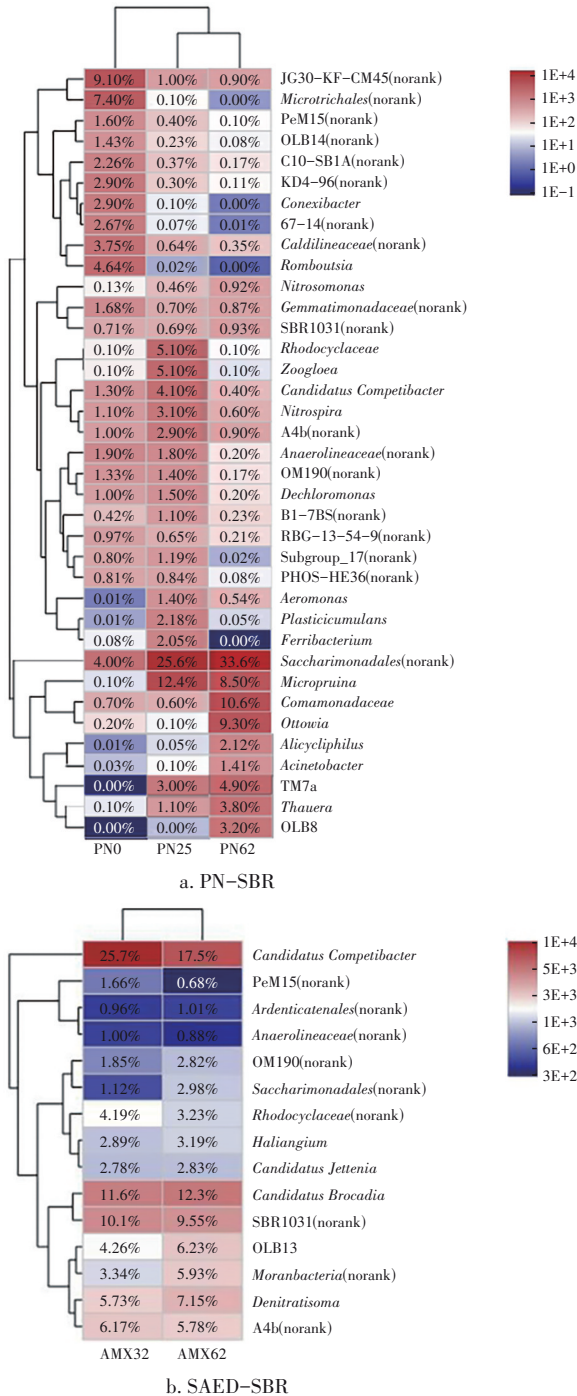


图6 PN-SAED组合工艺在属水平上的核心菌群结构演变
Fig.6 Microbial structure evolution of core flora in PN-SAED combined process at genus levels

综上所述,投加 NH_2OH 后,PN-SBR中NOB被抑制,促进了 NO_2^- -N的积累,同时反硝化功能菌群

丰富,保障了系统的高效脱氮;在SAED-SBR中,AnAOB和DGAOs优势菌属丰度保持稳定。PN-SAED组合工艺可以实现城市污水的深度脱氮,并以Anammox脱氮途径为主导,同时通过异养作用和内碳源储存的方式去除原水中的有机物,与传统生物脱氮工艺相比,理论上节约了62.5%的曝气能耗以及100%的碳源投加,实现了低C/N城市污水的低耗深度脱氮。

3 结论

① 通过 NH_2OH 抑制实现了短程硝化的快速启动,PN-SBR出水 NO_2^- -N浓度为24.9 mg/L,NAR高达98.5%。

② PN-SAED组合工艺在稳定运行条件下,出水 NH_4^+ -N浓度为 (2.6 ± 0.5) mg/L,TIN去除率达到 $(94.6 \pm 1.0)\%$,其中SAED系统中Anammox和内源反硝化途径对氮素的去除贡献分别为82.2%和17.8%。

③ 高通量测序分析表明,PN-SBR投加 NH_2OH 后,NOB菌属*Nitrospira*被有效抑制,丰度由3.1%削减为0.6%,而AOB菌属*Nitrosomonas*得到富集,丰度由0.13%增至0.92%;SAED-SBR中AnAOB菌属*Candidatus Brocadia* (12.3%)和*Candidatus Jettenia* (2.83%)与内源反硝化菌属*Candidatus Competibacter* (17.5%)和*Denitratisoma* (7.15%)之间表现出稳定的协同共生关系。

参考文献:

- [1] XU R, CUI H, FAN F, *et al.* Combination of sequencing batch operation and A/O process to achieve partial mainstream anammox: pilot-scale demonstration and microbial ecological mechanism[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(37): 13887-13900.
- [2] WU P, CHEN J, GARLAPATI V K, *et al.* Novel insights into Anammox-based processes: a critical review[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 444: 136534.
- [3] HAN M, VLAEMINCK S E, AL-OMARI A, *et al.* Uncoupling the solids retention times of flocs and granules in mainstream deammonification: a screen as effective out-selection tool for nitrite oxidizing bacteria[J]. Bioresource Technology, 2016, 221: 195-204.
- [4] 陈加波,周鑫,张泽乾,等. 一体化厌氧氨氧化工艺研究进展[J]. 中国给水排水,2024,40(2):18-25.

- CHEN Jiabo, ZHOU Xin, ZHANG Zeqian, *et al.* Research advances of integrated anaerobic ammonium oxidation (Anammox) processes: a review [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40 (2) : 18–25 (in Chinese).
- [5] LIU Y, LIU W, LI Y, *et al.* Layered inoculation of anaerobic digestion and anammox granular sludges for fast start-up of an anammox reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 339: 125573.
- [6] YUE H, ZHANG Y, HE Y, *et al.* Keystone taxa regulate microbial assemblage patterns and functional traits of different microbial aggregates in simultaneous anammox and denitrification (SAD) systems [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121778.
- [7] ZHUANG J L, SUN X, ZHAO W Q, *et al.* The anammox coupled partial-denitrification process in an integrated granular sludge and fixed-biofilm reactor developed for mainstream wastewater treatment: performance and community structure [J]. *Water Research*, 2022, 210: 117964.
- [8] JI J, PENG Y, MAI W, *et al.* Achieving advanced nitrogen removal from low C/N wastewater by combining endogenous partial denitrification with anammox in mainstream treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270: 570–579.
- [9] XIAO R, NI B J, LIU S, *et al.* Impacts of organics on the microbial ecology of wastewater anammox processes: recent advances and meta-analysis [J]. *Water Research*, 2021, 191(6): 116817.
- [10] LU W, MA B, WANG Q, *et al.* Feasibility of achieving advanced nitrogen removal via endogenous denitrification/anammox [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 325: 124666.
- [11] ZHEN J, WANG Z B, NI B J, *et al.* Synergistic integration of Anammox and endogenous denitrification processes for the simultaneous carbon, nitrogen, and phosphorus removal [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58 (24): 10632–10643.
- [12] 刘文龙, 王佳铭, 李军. 耦合内源反硝化实现厌氧氨氧化工艺深度脱氮[J]. *中国环境科学*, 2023, 43 (4) : 1735–1743.
- LIU Wenlong, WANG Jiaming, LI Jun. Coupled endogenous denitrification for deep nitrogen removal by anaerobic ammonia oxidation process [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43 (4) : 1735–1743 (in Chinese).
- [13] HARPER W F, TERADA A, POLY F, *et al.* The effect of hydroxylamine on the activity and aggregate structure of autotrophic nitrifying bioreactor cultures [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, 102 (3) : 714–724.
- [14] FENG C, LOTTI T, LIN Y, *et al.* Extracellular polymeric substances extraction and recovery from anammox granules: evaluation of methods and protocol development [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 374: 112–122.
- [15] TIAN R, NING D, HE Z, *et al.* Small and mighty: adaptation of superphylum *Patescibacteria* to groundwater environment drives their genome simplicity [J]. *Microbiome*, 2020, 8: 1–15.
- [16] WAN X Y, XIAO P Y, ZHANG D J, *et al.* The kinetics for ammonium and nitrite oxidation under the effect of hydroxylamine [J]. *Water Science and Technology*, 2016, 73(5): 1067–1073.
- [17] LUO J Y, HUANG W X, ZHU Y, *et al.* Influences of different iron forms activated peroxydisulfate on volatile fatty acids production during waste activated sludge anaerobic fermentation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135878.
- [18] CAO S B, DU R, LI B K, *et al.* High-throughput profiling of microbial community structures in an ANAMMOX-UASB reactor treating high-strength wastewater [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 100(7): 6457–6467.
- [19] CHU Z R, WANG K, LI X K, *et al.* Microbial characterization of aggregates within a one-stage nitrification-anammox system using high-throughput amplicon sequencing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 262: 41–48.
-
- 作者简介: 刘文龙(1990—), 男, 浙江长兴人, 博士, 朝晖特聘副研究员, 主要从事污水处理与资源化研究。
- E-mail: lwl2019@zjut.edu.cn
- 收稿日期: 2024-06-26
- 修回日期: 2024-08-03

(编辑: 李德强)