

多段 A/O-MBBR 系统内厌氧氨氧化菌原位富集强化城市污水脱氮中试研究

李亚霖¹, 杨新慈², 张建华¹, 毕学军^{1,*}

(1. 青岛理工大学 城镇污水处理与资源化国家地方联合工程中心, 青岛 266033; 2. 烟台市环卫管理中心, 烟台 264000)

摘要: 针对传统污水生物脱氮系统内厌氧氨氧化菌富集培养难与运行稳定性差等问题, 以多段 A/O-MBBR 系统为研究对象, 探讨了生物膜中厌氧氨氧化菌原位富集的可能性及其强化城市污水脱氮效能。结果表明, 在多段 A/O-MBBR 系统运行第 1 阶段(1~175 d), 进水碳氮比(C/N)为 5.4 ± 1.2 条件下, 其 TIN 去除率为 $(67.2 \pm 8.4)\%$; 在系统第 2 阶段(176~259 d), 进水 C/N 仅为 3.5 ± 0.8 , 其 TIN 去除率高达 $(81.8 \pm 4.8)\%$; 沿程 COD 和氮浓度分析发现系统内存在厌氧氨氧化现象, 强化了其脱氮效果; 厌氧氨氧化菌丰度与活性分析进一步表明系统内生物膜中形成了厌氧氨氧化菌的原位富集, 厌氧氨氧化菌相对丰度高达 3.84%, 同时其活性高达 $2.10 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ (以 N 计)。系统内生物膜中厌氧氨氧化菌的富集归因于分段进水条件下的低有机负荷、生物膜的有效滞留及其内部的微环境。

关键词: 城市污水; 厌氧氨氧化; 原位富集; 中试; 强化脱氮

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)02-0091-08

Pilot-scale study on in-situ enriching anammox bacteria for enhancing nitrogen removal of municipal wastewater in a multi-stage A/O-MBBR system

LI Yalin¹, YANG Xinci², ZHANG Jianhua¹, BI Xuejun^{1,*}

(1. State and Local Joint Engineering Research Centre of Urban Wastewater Treatment and Reclamation, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;
2. Yantai Environmental Sanitation Management Center, Yantai 264000, China)

Abstract: For the difficulty of enrichment and cultivation of anammox bacteria in traditional wastewater biological nitrogen removal system and poor operation stability, this study investigated the feasibility of in-situ enrichment of anammox bacteria in the biofilm and its efficiency in enhancing the nitrogen removal of municipal wastewater in the multi-stage anoxic/oxic (A/O) moving bed biofilm reactor (MBBR) system. The results showed that the average total inorganic nitrogen (TIN) removal efficiency was $(67.2 \pm 8.4)\%$ in phase I (1-175 d) with the influent C/N of 5.4 ± 1.2 , and it was increased to $(81.8 \pm 4.8)\%$ in phase II (176-259 d) despite the fact that the influent C/N was only 3.5 ± 0.8 . According to the anal-

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(52100050)

作者简介: 李亚霖(1996—), 男, 山东高青人。硕士, 研究方向为城镇污水处理与资源化。E-mail: 1411616050@qq.com。

* 通信作者: 毕学军(1969—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事城镇污水处理与资源化等方面的研究。E-mail: xuejunb@126.com。

ysis of COD and nitrogen concentrations, anammox reaction was observed in the system, which enhanced the nitrogen removal performance. Microbial abundance and activity analysis further indicated that anammox bacteria were enriched in the system during the long-term operation, and anammox bacteria abundance was increased to 3.84%, with its activity of 2.10 mg/(L·h)(by N). The enrichment of anammox bacteria could be attributed to the low organic loading rate under step-feeding condition, effective biomass retention and unique microenvironment of biofilm.

Key words: municipal wastewater; anammox; in-situ enrichment; pilot-scale; enhancing nitrogen removal

近年来,随着水污染控制攻坚战的持续推进,我国城镇水环境质量得到持续改善。目前我国水生态环境保护已由“水污染防治”向“水生态环境保护”转变,并进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的新发展阶段。虽然传统污水生物脱氮处理技术已较为成熟,且在城市污水处理中得到广泛应用,但该技术普遍存在运行能耗高以及外加碳源所导致的高碳排放等问题^[1],其与可持续的污水处理理念相违背。厌氧氨氧化技术因在污水处理节能降耗、绿色环保方面表现出显著优势而受到广泛关注。厌氧氨氧化反应以亚硝态氮为电子受体将氨氮转化成氮气,同时以亚硝态氮为电子供体固定 CO₂ 并产生硝态氮^[2],厌氧氨氧化工艺具有节省碳源、脱氮负荷高、运行成本低和占地面积小等优点,表现出了巨大的应用潜力^[3]。另外,与传统的硝化-反硝化工艺相比,厌氧氨氧化工艺的污泥产量减少了 90%^[4],从而降低了污泥处理成本。厌氧氨氧化工艺已成功应用于高氨氮废水处理^[5],如污泥消化液^[6]、垃圾渗滤液^[7]等。

厌氧氨氧化菌在传统污水处理厂中普遍存在,即使在曝气池中也可以检测到厌氧氨氧化菌的存在^[8]。然而,厌氧氨氧化菌生长缓慢,城市污水的基质浓度与水温较低,进一步限制了其生长富集^[9]。目前,厌氧氨氧化工艺尚未在城市污水处理中实现大规模推广应用,其主要瓶颈问题为厌氧氨氧化菌难以有效富集,在实际工程中通常无法大量获取厌氧氨氧化污泥。此外,厌氧氨氧化工艺的应用普遍受污水温度、氨氮浓度、有机物浓度等因素的限制^[10],其与短程硝化和短程反硝化等过程的耦合也处于试验阶段^[11]。

针对传统污水生物脱氮系统内厌氧氨氧化菌富集培养难与运行稳定性差等问题,本研究以城市污水为处理对象,探究在多段 A/O-MBBR 系统内原位富集厌氧氨氧化菌强化城市污水脱氮,考察了长期运行过程中系统脱氮性能的变化,分析了系统沿程的 COD 和氮去除特性,结合高通量测序与活性批次试验探究了系统内厌氧氨氧化菌的丰度与活性变化情况,并进一步讨论了厌氧氨氧化菌富集的机制,可为原位富集厌氧氨氧化菌强化城市污水脱氮效能提供一定的理论和技术支撑,促进厌氧氨氧化工艺的推广应用。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方式

本研究多段式 A/O-MBBR 中试系统工艺流程如图 1 所示,其由三段式缺氧/好氧(A/O)工艺组成,总共 10 个反应区,包括 A₁、A₂、A₅、A₆、A₉ 缺氧反应区和 O₃、O₄、O₇、O₈、O₁₀ 好氧反应区。各反应区有效水深 1.4 m,有效容积均为 1.4 m³(1 m×1 m×1.4 m)。缺氧反应区采用机械搅拌方式使填料保持流化状态,好氧反应区采用穿孔管曝气。试验系统采用两点式进水的运行方式,进水点设置在 A₁ 与 A₅ 缺氧反应区。中试系统共有两段硝化液回流,分别由 O₄ 至 A₁ 和 O₈ 至 A₅,按各段进水量,回流比为 100%~200%。A₉ 缺氧反应区投加乙酸钠进行后置反硝化。中试系统各反应区段均投加 K3 型悬浮生物膜载体,其直径为 25 mm、高 10 mm、比表面积为 500 m²/m³。系统内的生物膜载体已经在此前的试验中挂膜完成,载体填充率为 35%。

1.2 试验用水与水质

试验用水取自青岛市某城镇污水处理厂初沉池出水,经气浮强化预处理后进入中试系统,水质条件如表 1 所示。

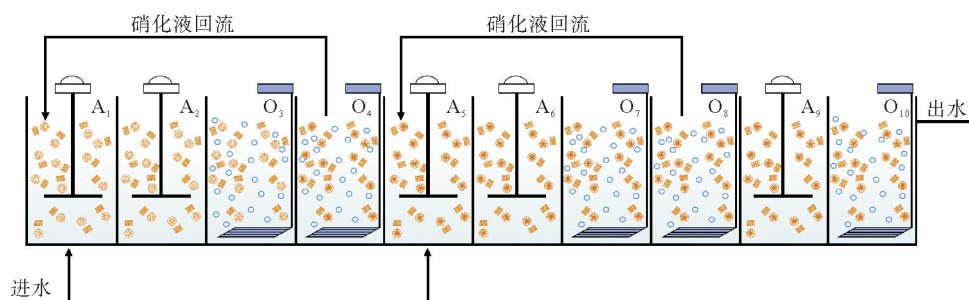


图 1 多段式 A/O-MBBR 中试系统工艺流程示意

表 1 进水水质指标

水质指标	水温/ $^{\circ}\text{C}$	COD/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NH}_4^+\text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	TIN/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	SS/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
范围	11.1~29.5	179.7 \pm 59.0	38.6 \pm 5.7	39.5 \pm 5.7	31.0 \pm 6.0	7.0~9.0

1.3 分析项目与检测方法

1.3.1 常规分析及检测方法

水样经 0.45 μm 滤纸过滤后根据《水和废水检测分析方法》测定 SCOD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、SS、MLSS 和 MLVSS 等。DO、pH、温度采用 WTW pH/DO 3410(德国)仪器在线监测。

1.3.2 高通量测序分析方法

系统内的微生物组成与种群结构变化采用高通量测序技术进行分析。提取的基因组 DNA 经 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测。试验过程中选取细菌 16SrRNA 片段的 V3—V4 区进行聚合酶链式反应(PCR)扩增,特异性引物为 338F (5'-ACTCCTRCGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACCAGGG-TATCTAAT-3')。PCR 产物由中国美吉生物制药技术有限公司按照末端配对法进行测序,测序平台为 Illumina Miseq PE300。最后在 97% 的相似度水平下对获取的全部序列进行 OTUs(Operational Taxonomic Units)划分,用于生物信息统计分析。

1.3.3 厌氧氨氧化活性测试

试验在有效容积为 1 L 的反应瓶中进行,采用磁力搅拌器使悬浮载体流化。从系统内取适量载体填料,用蒸馏水清洗后加入到反应瓶中,填充比为 35%。试验开始前,向反应瓶中通入氮气,去除残余的 DO 以保证厌氧环境。随后加入一定量的氯化铵溶液(30 g/L,以 N 计)和亚硝酸钠溶液(30 g/L,以 N 计),使得初始 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均为 15 mg/L,控制水温为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。每隔 30 min 进行取样,分析 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度,测试持续 120 min。厌氧氨氧化活性用比 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降解速率(r_{NH_4})与比 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 还原速率($r_{\text{NO}_2,\text{amx}}$)表示。

2 结果与讨论

2.1 系统长期运行性能

多段 A/O-MBBR 系统在环境温度下运行,水温随季节变化,为 11.1~29.5 $^{\circ}\text{C}$ 。长期运行过程中系统的污染物去除特性如图 2 所示。在运行的第 1 阶段(1~175 d),系统平均进水 COD 浓度为(207.3 \pm 45.4) mg/L,平均进水 TIN 浓度为(38.6 \pm 5.7) mg/L(以 N 计,下同),平均碳氮比(C/N)比为 5.4 \pm 1.2;平均出水 COD 浓度为(37.5 \pm 10.0)mg/L,去除效果良好,平均去除率为(81.7 \pm 4.0)%。同时,进水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被高效去除,平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度仅为(0.7 \pm 0.4) mg/L(以 N 计,下同)。然而,系统的 TIN 去除效果较差,平均出水 TIN 浓度为(12.5 \pm 3.3) mg/L,TIN 去除率为(67.2 \pm 8.4)%。这与其他同类硝化-反硝化系统的脱氮效果相似。大多数传统硝化-反硝化系统在污水 C/N 较低且不添加碳源进行反硝化时脱氮效率较差。有报道称,在进水 C/N 为 2.2 的条件下,连续流 MBBR 反应器的 TIN 去除率仅为(61.39 \pm 10.71)%^[12]。ZHANG 等^[13]的研究表明,在改进的 AAO 工艺中,进水 C/N 为 5.1 的条件下,系统的 TIN 去除率可以维持在 65%左右,出水 TIN 为(13.9 \pm 1.27) mg/L。

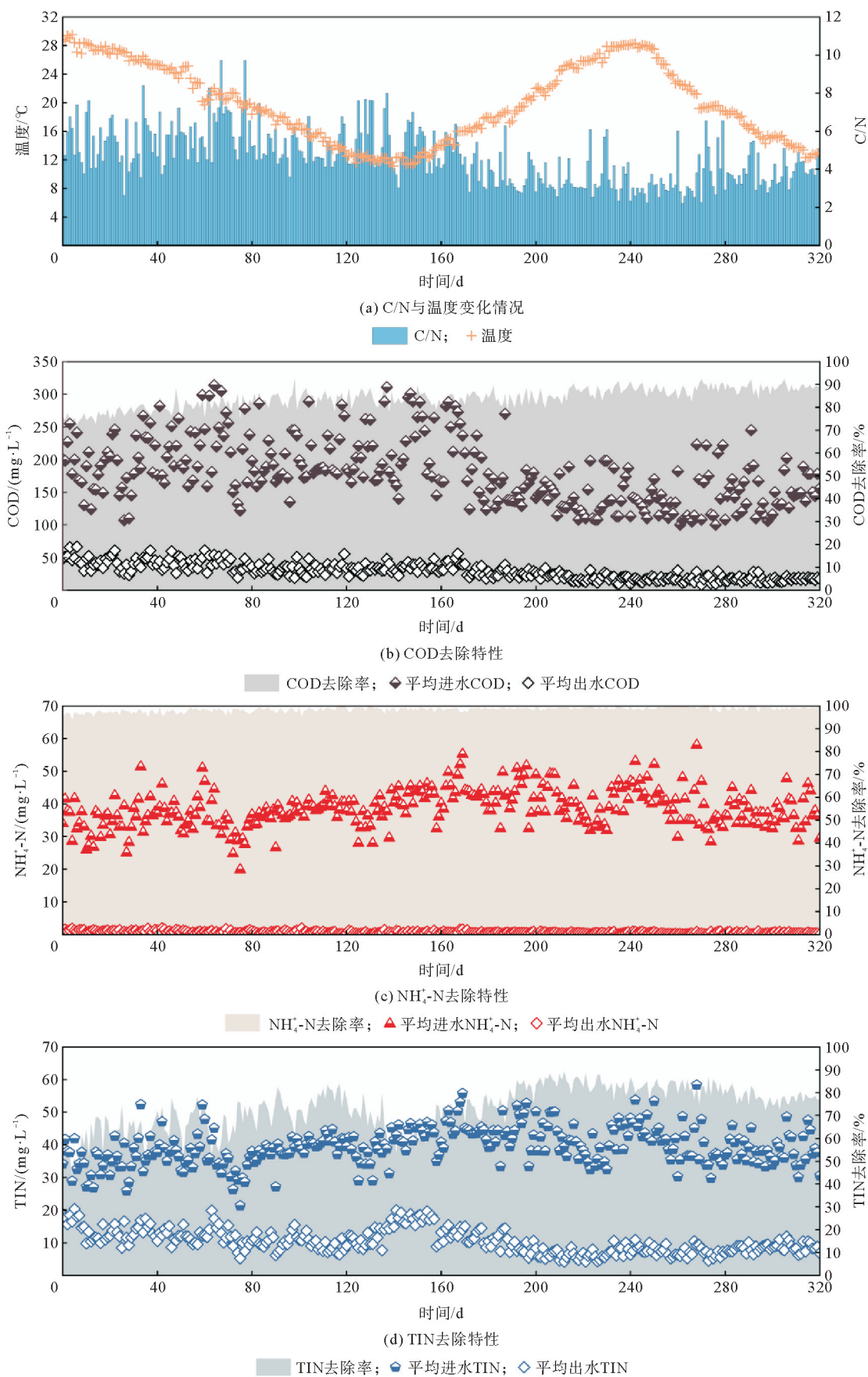


图2 系统污染物去除特性

系统运行至第 2 阶段(176~259 d)时,进水 COD 浓度明显降低,平均为 (145.1 ± 28.2) mg/L,同时 TIN 浓度有所上升,为 (42.5 ± 5.2) mg/L,平均 C/N 降低至 3.5 ± 0.8 。然而,系统的脱氮效果并未受影响,反而有所提高,平均出水 TIN 浓度仅为 (7.8 ± 2.4) mg/L,TIN 去除率高达 $(81.8 \pm 4.8)\%$ 。这表明,系统内除传统的硝化-反硝化脱氮作用外,可能还存在其他的氮去除途径。此外,当系统运行至 296~320 d 时,水温仅为 $12.3 \sim 14.9$ °C,系统在低温条件下仍可保持良好的脱氮效果,平均出水 TIN 浓度为 (8.8 ± 1.4) mg/L。

2.2 系统沿程 COD 和氮浓度变化

为进一步探究系统内氮去除途径的变化,分别在系统运行第 8 天和第 249 天进行沿程取样分析,各反应区污染物沿程变化如图 3 所示。在系统运行的第 8 天,TIN 去除率较低,氮的去除主要发生在缺氧反应区。第 249 天时,系统脱氮效果较好,出水 TIN 浓度低于 7.0 mg/L,在缺氧和好氧反应区均发生了明显的氮去除。其中, A_1 和 A_5 缺氧反应区作为进水点,有机物充足,大量 TIN 被去除。 A_2 和 A_6 缺氧反应区的 TIN 去除量较低,分别为 0.9 和 0.7 mg/L,这是由于碳源匮乏,导致反硝化作用受限。

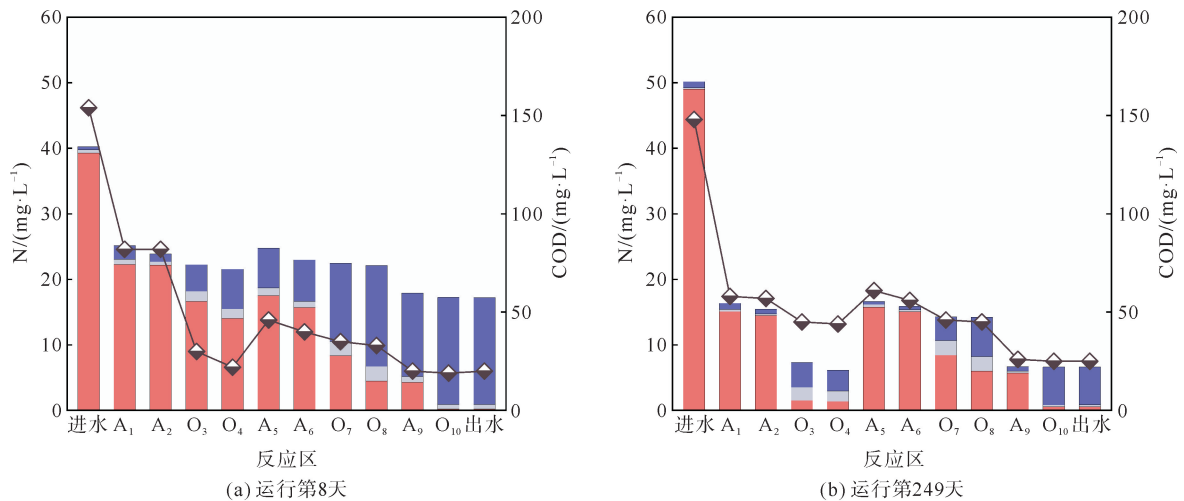


图 3 系统各反应区沿程污染物浓度变化特性

■ $\text{NO}_3\text{-N}$; ■ $\text{NO}_2\text{-N}$; ■ $\text{NO}_4\text{-N}$; ◆ COD

在系统运行的第 8 天和第 249 天,均可观察到好氧反应区存在氮损失的现象,可能是发生了同步硝化-反硝化(SND)或厌氧氨氧化脱氮作用。有研究表明,将 DO 控制在 $2.8 \sim 4.0$ mg/L,生物膜反应器能够实现较好的同步-硝化反硝化效果^[14]。系统好氧反应区中的生物膜内可能存在一定的溶解氧浓度梯度,使得内部形成缺氧环境,从而发生了同步硝化-反硝化作用,有利于提高系统脱氮效果。第 249 天时,好氧反应区氮损失现象更加明显,特别是 O_3 好氧反应区,其出水 TIN 浓度为 7.3 mg/L,氮去除量为 8.1 mg/L,而 COD 减少量仅为 12 mg/L。根据质量平衡分析, O_3 好氧反应区 $\text{NO}_3\text{-N}$ 还原的化学计量学比值 $m_{\text{COD}}/m_{\text{NO}_3\text{-N}} = 1.48$ g,低于理论值 2.86 g。这进一步表明系统脱氮率的提高不仅由于同步硝化-反硝化作用,还可能存在厌氧氨氧化反应。根据化学计量学计算^[15],如果系统内不存在厌氧氨氧化作用,其出水 TIN 将达到 11.2 mg/L,因此,好氧反应区存在一定的厌氧氨氧化脱氮作用。

第 249 天时, A_9 缺氧反应区的脱氮效果也明显提高,其 TIN 减少量为 7.5 mg/L,而第 8 天时该反应区的 TIN 减少量仅为 4.2 mg/L。系统运行第 8 天时 A_9 缺氧反应区的 COD 减少量为 12 mg/L,与理论 COD 消耗量(12 mg/L)相符。第 249 天时,该反应区的 COD 减少量为 19 mg/L,低于去除 7.5 mg/L 的理论 COD 消耗量(22 mg/L),由此可知,缺氧反应区的部分氮损失也是由于厌氧氨氧化作用。

2.3 微生物群落结构变化

采用高通量测序技术分别检测了系统各反应区在运行第 1 天、第 100 天和第 300 天时生物膜的微生物种群结构,其中在门水平上的种群结构分布如图 4 所示,变形菌门(Proteobacteria)、绿弯菌门(Chlo-

roflexi)和拟杆菌门(Bacteroidota)为各样本的主要优势菌门。目前已知的厌氧氨氧化菌在生物学分类上都隶属于浮霉菌门(Planctomycetes)^[16],而系统在运行至第100天时各反应区生物膜样本中浮霉菌门的相对丰度就已经出现明显上升的现象,表明系统内可能富集了一定量的厌氧氨氧化菌。

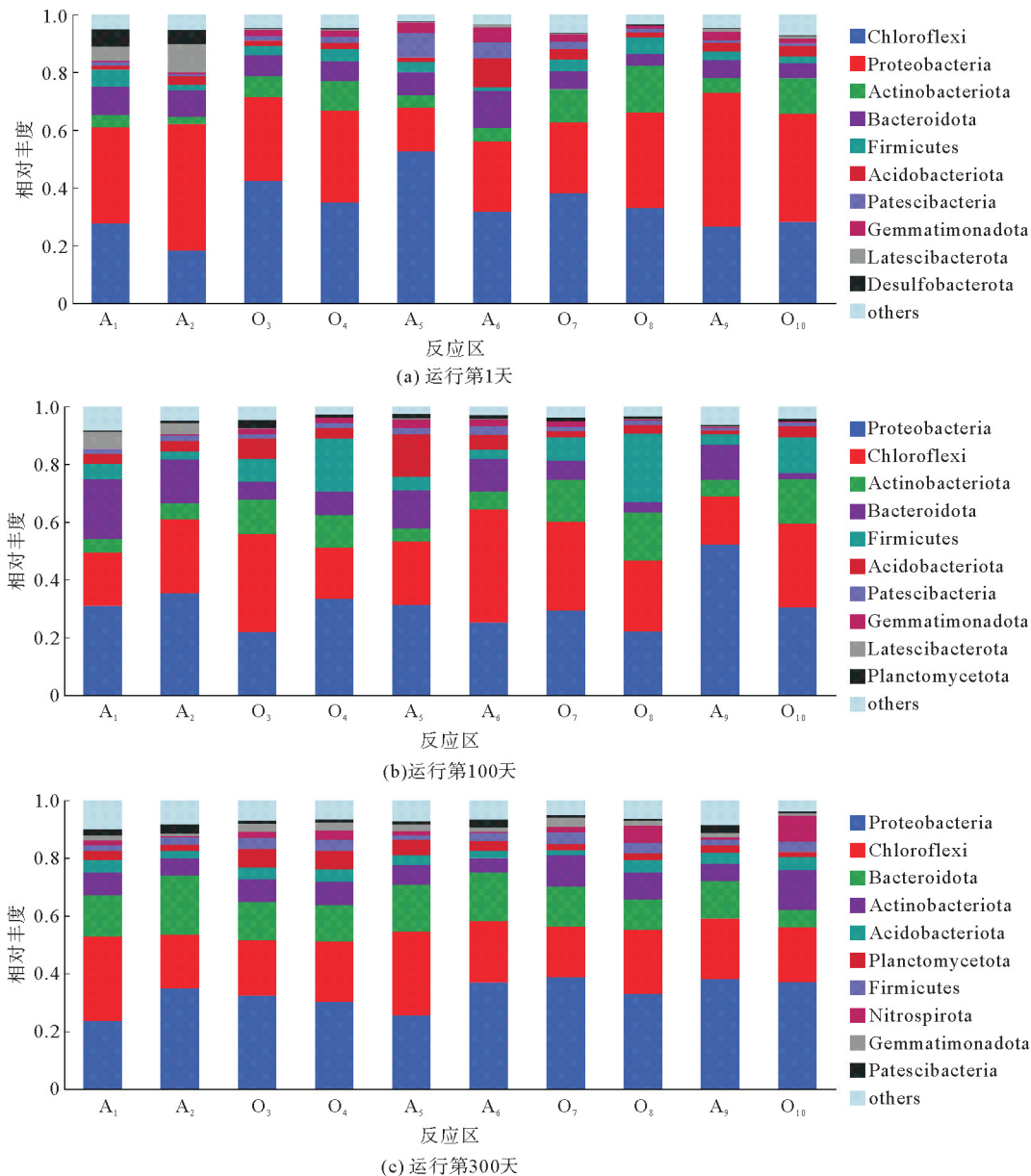


图4 系统在门水平上微生物菌群相对丰度

在属水平上, *Candidatus_Brocadia*、*Candidatus_Kuenenia*、*Candidatus_Scalindua*、*Candidatus_Jettenia* 是检测到的厌氧氨氧化菌,其中 *Candidatus_Brocadia* 所占比例较高,与主流厌氧氨氧化系统内检测到的优势菌属一致^[17]。系统长期运行过程中各反应区厌氧氨氧化菌相对丰度明显增加(图5),厌氧氨氧化菌相对丰度高达3.84%。其中, O₃、O₄ 好氧反应区和 A₅、A₆、A₉ 缺氧反应区的厌氧氨氧化菌相对丰度增加明显。从系统运行的第1天至第300天 O₃、O₄ 好氧反应区中 *Candidatus_Brocadia* 的相对丰度分别由0.09%增加到3.75%和0.03%增加到3.84%。A₉ 缺氧反应区中 *Candidatus_Brocadia* 的相对丰度也由第1天时的“未检出”增加至0.15%,这与系统内氮的去除路径变化相一致。A₁、A₂ 缺氧反应区的厌氧氨氧化菌相对丰度较低,可能是由于COD负荷较高,抑制厌氧氨氧化菌生长。此外, A₅、A₆ 缺氧反应区的厌氧氨氧化菌相对丰度比 A₁、A₂ 缺氧反应区高,因其承担了系统前一段出水中所有硝酸盐的

反硝化负荷,为厌氧氨氧化菌提供亚硝酸盐基质。考虑到好氧反应区硝化作用会产生一定量的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 输送到缺氧区后,可能被还原产生 $\text{NO}_2^- \text{-N}$, 然后被厌氧氨氧化细菌利用,即发生短程反硝化-厌氧氨氧化作用。同理, A_6 缺氧反应区的厌氧氨氧化菌丰度低于 A_5 缺氧反应区,可能是由于 A_6 缺氧反应区长期处于 COD 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 缺乏的低负荷状态,短程反硝化所产生的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 较少。综上所述,系统在长期运行中实现了厌氧氨氧化细菌的原位富集,强化了其脱氮效果。

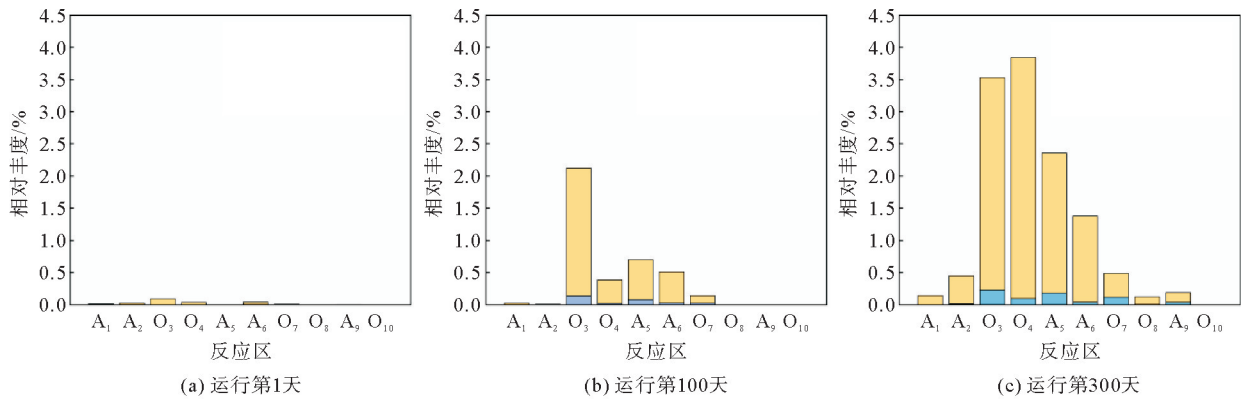


图 5 系统各反应区厌氧氨氧化菌属的相对丰度

■ *Candidatus_Brocadia*; ■ *Candidatus_Kuenenia*; ■ *Candidatus_Jettenia*; ■ *Candidatus_Scalindua*

2.4 厌氧氨氧化菌活性分析

在系统运行的第 1 天和第 300 天,分别从各反应区内取适量的生物膜载体进行厌氧氨氧化活性测试。在系统运行的第 1 天并未检测到厌氧氨氧化活性,第 300 天时各反应区的厌氧氨氧化活性如图 6 所示。可以看出,各反应区厌氧氨氧化活性存在差异化, O_3 、 O_4 好氧反应区和 A_5 、 A_6 缺氧反应区的厌氧氨氧化菌活性较高,比 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降解速率分别为 2.10、1.96、1.69 和 1.77 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ (以 N 计,下同)。此外,各反应区的 $r_{\text{NO}_2^-, \text{amx}}/r_{\text{NH}_4}$ 为 1.31~1.44,与厌氧氨氧化反应的理论值相近。这进一步验证了厌氧氨氧化菌在系统内有所富集,并可发挥一定脱氮作用,从而强化了系统脱氮性能。

2.5 厌氧氨氧化菌原位富集机制

有研究表明,有机物不利于厌氧氨氧化菌的生长^[18],而系统采用两点进水的方式使得 A_1 、 A_5 缺氧反应区以外的其他反应区均处于较低的有机负荷下,大部分 COD 被去除,就减少了有机物对厌氧氨氧化菌的抑制作用和反硝化菌的竞争,利于缺氧反应区中厌氧氨氧化菌的生长。系统为纯膜 MBBR 反应器,各反应区中投加的微生物载体有利于生长速率缓慢的厌氧氨氧化细菌的生长和滞留^[19-20],并且好氧反应区的生物膜内可能存在一定的缺氧微环境,可为厌氧氨氧化菌创造合适的生长环境^[21]。*Candidatus_Brocadia* 为系统内检测到的主要厌氧氨氧化菌属,这是一种 r 型生长策略的菌属,其生长速率较快^[22],这也与厌氧氨氧化菌的原位富集有关。综上所述,多段 A/O-MBBR 系统内生物膜中厌氧氨氧化菌的富集归因于分段进水条件下的低有机负荷、生物膜的有效滞留及其内部的微环境。

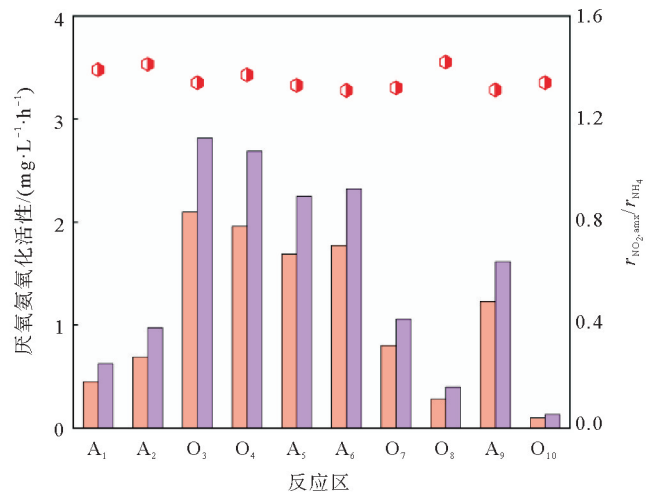


图 6 第 300 天时系统各反应区厌氧氨氧化活性

■ 比 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降解速率 (r_{NH_4}); ■ 比 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 还原速率 ($r_{\text{NO}_2^-, \text{amx}}$); ● $r_{\text{NO}_2^-, \text{amx}}/r_{\text{NH}_4}$

综上所述,多段 A/O-MBBR 系统内生物膜中厌氧氨氧化菌的富集归因于分段进水条件下的低有机负荷、生物膜的有效滞留及其内部的微环境。

3 结论

1) 在多段 A/O-MBBR 系统运行第 1 阶段(1~175 d),进水 C/N 为 5.4 ± 1.2 条件下,其 TIN 平均去除率为 $(67.2 \pm 8.4)\%$;在系统第 2 阶段(176~259 d),进水 C/N 仅为 3.5 ± 0.8 ,系统 TIN 去除率高达 $(81.8 \pm 4.8)\%$ 。

2) 根据系统沿程 COD 和氮浓度的变化分析,好氧反应区和缺氧反应区均存在额外氮损失,系统内存在一定的厌氧氨氧化作用,强化了脱氮效果。

3) 长期运行过程中,多段 A/O-MBBR 系统内生物膜中形成了厌氧氨氧化菌的原位富集,厌氧氨氧化菌相对丰度高达 3.84%,同时其反应活性高达 $2.10 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 。

4) 多段 A/O-MBBR 系统内生物膜中厌氧氨氧化菌的富集归因于分段进水条件下的低有机负荷、生物膜的有效持留及其内部的微环境。其中,分段进水条件下的低有机负荷可减少有机物对厌氧氨氧化菌的抑制作用,系统各反应区中投加的载体有利于厌氧氨氧化细菌的持留,且生物膜内部的微环境可为厌氧氨氧化细菌创造合适的生长环境。

参考文献(References):

- [1] 郭振涛,李红卫,赵英杰. 基于改良 A²/O 和 MBBR 组合工艺的污水处理试验研究[J]. 青岛理工大学学报,2017,38(4):77-81.
GUO Zhentao, LI Hongwei, ZHAO Yingjie. Research on sewage treat technology on a combination of the improved A²/O and MBBR[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2017, 38(4): 77-81.
- [2] WANG L, GU W, LIU Y C, et al. Challenges, solutions and prospects of mainstream anammox-based process for municipal wastewater treatment[J]. Science of the Total Environment, 2022, 820: 153351.
- [3] 刘丽娅,刘丹丹,莫华荣,等. 城镇污水生物脱氮除磷研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 49-59.
LIU Liya, LIU Dandan, MO Huarong, et al. Research progress of biological nitrogen and phosphorus removal in municipal wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 49-59.
- [4] ALI M, OKABE S. Anammox-based technologies for nitrogen removal: Advances in process start-up and remaining issues[J]. Chemosphere, 2015, 141: 144-153.
- [5] LACKNER S, GILBERT E M, VLAEMINCK S E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences: An application survey[J]. Water Research, 2014, 55: 292-303.
- [6] XU X, WANG G, ZHOU L, et al. Start-up of a full-scale SNAD-MBBR process for treating sludge digester liquor[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 343: 477-483.
- [7] HASSAN G K, EL-GOHARY F A. Evaluation of partial nitrification/anammox process for reduction of pollutants from sanitary landfill leachate[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2021, 232: 1-12.
- [8] WANG S, PENG Y, MA B, et al. Anaerobic ammonium oxidation in traditional municipal wastewater treatment plants with low-strength ammonium loading: Widespread but overlooked[J]. Water Research, 2015, 84: 66-75.
- [9] 王胤,吴嘉利,陈一,等. 主流厌氧氨氧化工艺的研究与应用进展[J]. 净水技术, 2021, 40(11): 16-27.
WANG Yin, WU Jiali, CHEN Yi, et al. Research and application progress of mainstream anammox process[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 16-27.
- [10] POOT V, HOEKSTRA M, GELEIJNSE M, et al. Effects of the residual ammonium concentration on NOB repression during partial nitrification with granular sludge[J]. Water Research, 2016, 106: 518-530.
- [11] REN Z Q, WANG H, ZHANG L G, et al. A review of anammox-based nitrogen removal technology: From microbial diversity to engineering applications[J]. Bioresource Technology, 2022, 363: 127896.
- [12] LEYVA-DÍAZ J C, MUÑOZ M M, GONZÁLEZ-LÓPEZ J, et al. Anaerobic/anoxic/oxic configuration in hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor for nutrient removal from municipal wastewater[J]. Ecological Engineering, 2016, 91: 449-458.
- [13] ZHANG S H, HUANG Z J, LU S J, et al. Nutrients removal and bacterial community structure for low C/N municipal wastewater using a modified anaerobic/anoxic/oxic (mA²/O) process in North China[J]. Bioresource Technology, 2017, 243: 975-985.
- [14] ZHANG X, WU P, MA L, et al. A novel simultaneous partial nitrification and denitrification (SPND) process in single micro-aerobic sequencing batch reactor for stable nitrite accumulation under ambient temperature[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 425: 130646.

(下转第 123 页)