

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023112002

CSTR:32061.14.hjhx.2023112002

王世豪, 朱易春, 赖雅芬, 等. 溶解氧对短程硝化影响研究进展[J]. 环境化学, 2025, 44(2): 496-506.

WANG Shihao, ZHU Yichun, LAI Yafen, et al. Research progress and application of the effect of dissolved oxygen on partial nitrification[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (2): 496-506.

溶解氧对短程硝化影响研究进展*

王世豪¹ 朱易春^{1**} 赖雅芬¹ 李晓超¹ 田 帅²

(1. 河流源头水生态保护江西省重点实验室, 赣州, 341000; 2. 江西理工大学资源与环境工程学院, 赣州, 341000)

摘 要 短程硝化作为全程自养脱氮、短程硝化耦合反硝化除磷等新型脱氮工艺的关键步骤, 是实现高效生物脱氮的重要环节. 通过控制溶解氧浓度启动及维持短程硝化具有广阔的工程应用前景, 但溶解氧对短程硝化的影响机制具有争议性, 已成为了制约其工程化应用的瓶颈. 论文综述了溶解氧对不同微生物的影响, 着重论述了不同溶解氧下氨氧化细菌酶活性与生化反应的关联性, 指出溶解氧变化使得亚硝酸盐氧化菌失活是其产生竞争性淘汰的根本原因, 并分析了溶解氧变化对全程氨氧化菌的影响, 从而揭示控制溶解氧工艺可以成功启动短程硝化的原因, 并归纳总结了低溶解氧、高溶解氧、间歇曝气三种模式下短程硝化工艺的控制策略, 旨在为溶解氧控制短程硝化的启动及稳定化运行提供参考.

关键词 短程硝化, 溶解氧, 氨氧化微生物, 亚硝酸盐氧化菌, 全程氨氧化菌.

中图分类号 X-1; O6 **文献标识码** A

Research progress and application of the effect of dissolved oxygen on partial nitrification

WANG Shihao¹ ZHU Yichun^{1**} LAI Yafen¹ LI Xiaochao¹ TIAN Shuai²

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Ecological Conservation at Headwater Regions, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, 341000, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, 341000, China)

Abstract Partial nitrification, as a key step of new nitrogen removal processes such as whole-process autotrophic nitrogen removal and partial nitrification coupled with denitrifying phosphorus removal, is an important link to achieve efficient biological nitrogen removal. Starting and maintaining partial nitrification by controlling the concentration of dissolved oxygen has a broad engineering application prospect, but the mechanism of the effect of dissolved oxygen on partial nitrification is controversial, which has become a bottleneck restricting its engineering application. This paper reviews the effects of dissolved oxygen on different microorganisms, focuses on the correlation between enzyme activity and biochemical reaction of ammonia-oxidizing bacteria under different dissolved oxygen, points out that the change of dissolved oxygen inactivation of nitrite oxidizing bacteria is the fundamental reason for their competitive elimination, and analyzes the influence of dissolved oxygen change on the whole ammonia-oxidizing bacteria. In this paper, the

2023 年 11 月 20 日收稿(Received: November 20, 2023).

* 国家自然科学基金(52260004), 江西省高层次人才领军人才培养工程项目和 2023 年江西省研究生创新专项资金(YC2023-S644)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(52260004), Jiangxi Province High Level and hHigh Skill Leading Personnel Training Project and 2023 Jiangxi Graduate Student Innovation Special Fund Project(YC2023-S644).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: zhuych@jxust.edu.cn

reasons for the successful initiation of short-range nitrification by controlled dissolved oxygen process were revealed, and the control strategies of partial nitrification process under three modes of low dissolved oxygen, high dissolved oxygen and intermittent aeration were summarized, aiming to provide reference for the start-up and stabilization of partial nitrification controlled by dissolved oxygen.

Keywords partial nitrification, dissolved oxygen, ammonia oxidizing microorganisms, nitrite oxidizing bacteria, comammox.

碳中和及排放峰值战略的实施促使污水处理向着节能绿色方向发展,由此短程硝化(PN)因其优异的节能降碳效果成为重要研究对象. PN 是指氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)被氨氧化微生物(AOM)氧化为亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)后,不会再被亚硝酸盐氧化细菌(NO_B)氧化为硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$). PN 的实现可缩短反硝化从 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 到 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的步骤,从而节省 25% 的曝气量和 40% 的电子供体^[1]. 然而,在实际运行过程中 PN 难以稳定运行,其根本原因在于难以在维持 AOM 活性的前提下稳定抑制 NO_B 活性.

近年来,学者提出多种方法以维持 PN 稳定运行,如高游离氨(FA)^[2]、高游离亚硝酸盐(FNA)^[3]、短污泥停留时间(SRT)^[4]等方式. 但在实际运行过程中,因处理效果不佳或运行成本较高而无法有效普及,这促使研究者研发新的工艺以在实际运行过程中能较好的维持 PN. 在脱氮过程中,氧气作为其中的电子受体,且在实际操作过程中易于控制,所以众多的研究采用控制溶解氧(DO)来启动并维持 PN. 许多研究讨论了 PN 的启动及稳定运行,但是存在多种繁杂的原因解释且存在一定争议.

对此,本综述从 DO 对 AOM 的影响入手,系统阐述在 PN 过程中 DO 对 AOM 的影响机制,然后分析了 DO 对破坏 PN 菌种的反馈机制,从生物种群富集与演替角度解释控制 DO 启动及维持 PN. 并以此为基础综述了现有以控制 DO 为媒介的 PN 运行工艺,并点明了其优缺点,为实现更高效更稳定的 PN 提供新思路.

1 溶解氧对氨氧化微生物的影响机理(Effect mechanism of DO on AOM)

理想状态的 PN 工艺仅包含由 AOM 主导的氨氧化过程,因此要深入了解 DO 对 PN 工艺的影响,必须深入了解氨氧化过程机理及 DO 在其中所承担的职责. 总的来说, AOM 可分为两类,分别为氨氧化菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA),这两类细菌都可以完成氨氧化过程. 本节从作用机理的角度阐述 DO 在氨氧化过程中所承担的职责及因 DO 变化而引起 AOB 及 AOA 生化反应变化,意图在电子传递层次揭示 DO 在实现及维持 PN 的重要作用.

1.1 DO 对 AOB 的影响机理

在传统硝化过程中, AOB 将氨氮氧化为亚硝态氮,是整个硝化过程的第一步,也是整个硝化过程的限速步骤^[5]. 而在这一步中,氨氮的氧化又可分为两小步,首先是氨氮在氨单加氧酶(AMO)的作用下转化为羟胺(NH_2OH),然后 NH_2OH 在羟胺氧化酶(HAO)的作用下转化为亚硝态氮. 但在 2017 年, CARANTO 等^[6]证明了 NO 为氨氮氧化的中间产物, HAO 将 NH_2OH 氧化为 NO 而不是之前认为的亚硝酸盐. 然后再由一氧化氮还原酶(NOO)将 NO 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$, 但是其中的 NOO 尚未确定. nitrosocyanin(由基因 NcyA 编码)可能为尚未发现的 NOO, 且根据蛋白质组学的比较研究发现, Ncy A 在 3 株不同的 AOB 菌株中高表达,被认为可能是 NOO^[7-8]. 这一创新性的发现对 PN 工艺有着重大而又深远的影响,使得氨氮的氧化被分为三步,其与传统观念的主要区别为,在 HAO 作用下 NH_2OH 转化为 NO 而不是直接转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$, 再经过一氧化氮还原酶(NOO)或 nitrosocyanin(NcyA)的作用下再转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ^[9].

NH_3 在 AMO 的作用下,以一份 O_2 作为电子受体,同时吸收两份 H^+ 及两份电子,从而生成一份 NH_2OH 和一份 H_2O ^[10]. 此过程为氨氧化过程中最重要的一步,若这一步发生变化将对后续反应产生巨大影响. 在短程硝化过程中所有电子的最终归宿为电子受体或新细胞物质^[11]. 新细胞物质的合成又取决于 ATP 合成量,而 ATP 合成量又取决于电子传递数量,若在 PN 过程中电子受体缺失将在一定程度上影响细菌生长.

在低 DO 条件下, 由于电子受体缺失, AOB 可能会利用 NO_2^- -N 作为替代的电子受体, 促使 AOB 进行反硝化作用. 一部分 AOB 具有编码部分反硝化作用所需要的酶: 在 AOB 的基因组中, 人们检测到了编码 NO_2^- 和 NO 还原酶(NIR 和 NOR)的基因, 但是没有检出编码 N_2O 还原酶(NOS)基因^[12]. 这意味着, AOB 进行反硝化的途径终点产物是 N_2O 而不是 N_2 . 目前普遍认为硝化细菌反硝化作用是好氧硝化过程产生 N_2O 的主要途径^[13]. 综上可知, 若当 AOB 被限制 O_2 的获取时, 可能会进行反硝化作用, 使得 AOB 产生的亚硝酸盐及 NO 转化为温室气体 N_2O . 并且反硝化作用对 AOB 的能量代谢并不重要, 但是在高氨氮情况下, 反硝化可能是电子耗散的重要途径^[8, 14]. 这也就说明电子的正常耗散对于 AOB 正常工作有着显著影响, 而氧气充当电子受体, 也就对 AOB 正常工作有着显著影响. 综上所述, O_2 在氨氧化过程中充当电子受体, 当 O_2 缺失时, 可能会促使 AOB 活性下降, 进行反硝化等一系列不良反应, 使得 PN 促使的节能减排效果不理想.

1.2 DO 对 AOA 的影响机理

在传统观念中, 氨氧化过程一般通过 AOB 菌完成, 但在 2004 年, VANTER 等首次在马尾藻海区古菌宏基因组中发现 AMO 基因(amo A)序列^[15]. 这表明, 某些未知的古菌也可能驱动着氨氧化反应. 2005 年, 第一株古菌 *Nitrosopumilus mar-itimus* SCM1 被成功分离并纯培养^[16]. 该菌具有 amo A、amo B 和 amo C 基因, 以 NH_4^+ -N 作为唯一氮源和能源, 并且固定 CO_2 进行无机自养生长, 表明 AOA 与 AOB 具有相似的氨氧化能力. 2007 年, AOA 被划分为一个新的古菌门, 命名为奇古菌(*Thaumarchaeota*)^[17]. 迄今为止, 根据 16S rRNA 基因序列, AOA 被鉴定为 8 个主要类群^[18-19] *Nitrosotalea*, *Nitrosoarchaeum*, *Nitrososphaera*, *Nitrosopelagicus*, *Nitrosopumilus*, *Nitrosocaldus*, *Nitrosotenuis* 和 *Nitrosocosmicus*.

目前关于 AOA 在氨氮氧化过程中的具体作用及相关反应的酶存在诸多猜想. 较多的猜想认为: AOA 的相关氨氮氧化途径与 AOB 类似, 但将 NH_2OH 氧化为 NO 及将 NO 氧化为 NO_2^- -N 的酶均未确定^[20-22]. 图 1 展现了 AOB、AOA、NOB 参与氮素转化的酶及在高低 DO 环境中反应的变化情况. AOA 的 AMO 与 AOB 存在较大差异, 这种差异可能会诱导氨氮氧化时产生不同的副产物^[23].

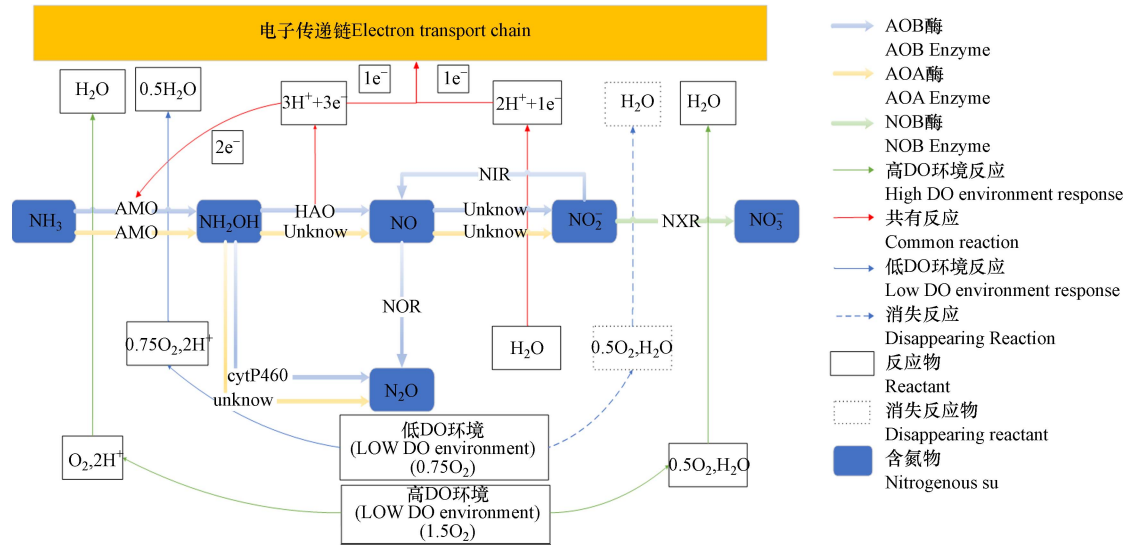


图 1 不同 DO 环境中的硝化过程及硝化细菌反硝化过程

Fig.1 Nitrification process and denitrification process of nitrifying bacteria in different DO environments

AOA 在自然界中分布较广, 且 AOA 对于 DO 适应范围较广(0.1—6.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[24-25]. 低 DO 环境可以促进 AOA 的生长, 且在低氧浓度下 AOA 比 AOB 具有竞争优势^[26]. 表 1 展示了不同环境中 AOB、AOA、NOB 的氧半饱和系数. Xie 等^[34]发现在实际水厂中, AOA 对 DO 和氨氮的半饱和常数低于 AOB, 表明 AOA 比 AOB 更能将氨氧化成亚硝酸盐. AOA 可以适应极低的电子供体/受体条件, 这使得 AOA 可以在低氧条件下清除氨氮^[36]. 这表明, 在低 DO 环境中氨氧化菌的优势菌种可能为 AOA, 且在低 DO 环境中 AOA 有着较高的氨氮亲和力, 故可更加彻底的去除污水中的氨氮, 有利于满足污水排放标准.

表 1 AOB, NOB, AOA 氧半饱和常数

Table 1 AOB, NOB, AOA Oxygen half-saturation constant						
外界条件 External condition		细菌种类 Bacterial species	氧半饱和常数 $K_{O_2}/(mg \cdot L^{-1})$ Oxygen half-saturation constant			文献 References
反应器 Reactor	DO/($mg \cdot L^{-1}$)		AOB	NOB	AOA	
生物滤池	0.2—1.5	—	0.106±001	—	—	[27]
SBR反应器	0.6—5	—	0.22±0.09—0.67±0.12	0.03±0.02—0.45±0.02	—	[28]
SBR反应器	0.5±0.1	<i>Nitrospira</i> (NOB)	0.28±0.026	0.28±0.035	—	[29]
	2.5±0.5		0.064±0.008	—		
连续流反应器	0.4	<i>Nitrosomonas</i> (AOB), <i>Nitrobacter</i> (NOB)	0.033±0.003	0.43±0.08	—	[30]
	0.5	<i>Nitrosomonas</i> and <i>Nitrosomonadaceae</i> (AOB),	0.29 ± 0.04	0.09 ± 0.01	—	[31]
AAO反应器	2	<i>Nitrospira</i> and <i>Nitrobacter</i> (NOB)	0.39 ± 0.05	0.29 ± 0.03		
SBR反应器	0.5	<i>Nitrosomonas</i> (AOB),	0.28	0.085	—	[32]
	2.5	<i>Nitrospira</i> (NOB)	0.489	0.296		
血清瓶	—	<i>DW</i> (AOA)	—	—	0.0928±0.016	[33]
		<i>AC2</i> (AOA)			0.0928±0.0416	
		<i>N.viennensis</i> (AOA)			0.0896±0.0448	
血清瓶	—	<i>Nitrosocosmicus</i> (AOA)	—	—	0.1312±0.08	[34]
血清瓶	—	<i>SCM1</i> (AOA)	—	—	0.10912±0.000416	[35]
		<i>PS0</i> (AOA)	—	—	0.03776±0.00048	

DO 不但影响 AOA 生长与活性, 还会影响其相关酶活性及产物, 使得产生许多副产物, 从而促使 AOA 产生 N₂O. TRIMMER 等^[37] 发现在好氧环境中, N₂O 主要通过 NH₂OH 氧化途径产生. Xie 等^[34] 研究发现 N₂O 是 NH₂OH 氧化生成亚硝酸盐的副产物, 且 NH₂OH 积累促进了 N₂O 的生成. 这都表明, 在好氧环境中, N₂O 的生成与 NH₂OH 有关. 当 DO 不足时, AOA 的类细菌硝化细菌反硝化作用可能是 AOA 生成 N₂O 的主要途径^[38]. 此外, 由于有氧条件的转变引起的电子不平衡 (即缺氧到好氧或其他), N₂O 产量的峰值通常在这样的条件下出现^[23]. 综上所述, AOA 产生 N₂O 的途径较多, 这可归结为其酶功能特性与 AOB 有着巨大差异.

2 溶解氧对破坏 PN 的菌种的影响(Effect of DO on the bacteria that destroy PN)

在实际 PN 反应器中, 虽然 AOM 菌种占据主导地位, 但是其中仍然含有少量的 NOB 或 Comammox, 在长期运行过程中反应器会因二者的过量增殖导致 PN 崩溃. 因此想要使得实际 PN 反应器能长久运行, 必须深入了解能破坏 PN 的菌种的反应机理及溶解氧在其中所承担的职责.

2.1 DO 对 NOB 的影响机理

在理想 PN 中, 并没有 NOB 的参与, 但是实际污泥中含有众多微生物, 其中就包含了 NOB 等可能破坏 PN 过程的微生物, 且 NOB 的活性恢复或过量增殖都有可能 导致 PN 的崩溃. Wang 等^[29] 发现, 当 DO 发生较大变化时, 正是由于 NOB 的活性恢复及增殖导致 PN 的崩溃.

在整个硝化过程中, NOB 的作用是将亚硝酸盐氧化为硝酸盐, 其中 O₂ 作为电子受体, 接受在亚硝酸盐氧化过程中产生的电子及 H⁺. 依据现有研究, 亚硝酸盐的氧化过程仅需 NXR 酶即可进行, 并且反应极易进行且无电子及 H⁺释放. 若要实现短程硝化, 需将 NOB 淘洗出活性污泥控制硝化过程停留在亚硝态氮阶段, 可从动力学角度列式(1)分析 NOB 淘汰, 并以此为根据促使 NOB 淘汰.

$$\frac{dX_{NOB}}{dt} = \mu_{NOB} - b_{NOB} - \frac{1}{SRT}$$

(1)

由动力学方程可知, 实现 NOB 淘汰可以从三个方面着手: 降低生长速率(μ_{NOB}), 提高衰减速率(b_{NOB}), 如施加超声波^[40]、添加 FA^[2]、使 NOB 遭受饥饿^[41] 等, 或提高污泥耗损率(1 / SRT)来实现. 但提

高 b_{NOB} 需要额外的设备或者额外投加药剂,而短 SRT 会造成污泥流失,使得 AOB 菌种数量下降,从而使得脱氮效果下降,不适宜推广.综上所述降低 μ_{NOB} 是一个较为实用的方向,因此列出主要影响 μ_{NOB} 的详细式(2)^[42]:

$$\mu_{\text{NOB}} = \mu_{m,\text{NOB}} \times f \times \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{NO}_2}} \times \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{S_{\text{NO}_2^-} + K_{\text{NO}_2^-}} \quad (2)$$

其中, f 为环境因素(温度, pH, 盐度等)在实际运行中难以控制或费用较高,所以实际运行中主要通过控制 DO 浓度来限制 NOB 对于 O_2 的获取.综上所述, O_2 对于 NOB 的淘汰有重要作用.

关于 NOB 的淘汰根本原因,一直没有较为清晰的理论体系,众多文献是根据表观参数(如 NAR 等)、AOB 与 NOB 的生物活性、菌种丰度等来判断 NOB 是否被淘汰,但这些都是通过观测结果来判断 NOB 是否被淘汰,并未深入研究导致 NOB 淘汰根本原因. YANG 等^[43]发现, NOB 原位活性远远低于异位最大活性.这表明在特定环境中 NOB 活性下降,使得无法获取维持自身活动的能量,从而导致 NOB 淘汰. Hausherr 等^[44]指出, PN 的成功启动主要依靠 NOB 失活,但是 NOB 失活机制尚不清晰.这都表明, NOB 淘汰主要是由于原位活性降低所致.

尽管如此, NOB 可以通过优势种群的转变逐渐适应特殊环境,这将导致 PN 崩溃^[39].这说明, NOB 优势种群转变前由于特殊外界环境使得 NOB 活性下降从而逐步淘汰,然而当 NOB 优势菌种发生变化后,新 NOB 种群可以适应特殊环境,使得 NOB 活性上升,从而导致 NOB 过量增殖,最终导致 PN 崩溃.因此, NOB 淘汰的根本原因是 NOB 菌种无法适应特殊环境,从而导致原位活性下降,造成 AOM 与 NOB 产生活性差,从而引起 NOB 淘汰.

2.2 DO 对全程氨氧化菌的影响机理

硝化过程分为两步,分别是由 AOM 主导的氨氧化过程及由 NOB 主导的亚硝酸盐氧化过程. 2006 年 Coast 等^[45]依据热力学及动力学理论,大胆预测了可能存在可将氨氮氧化为硝态氮的全程氨氧化细菌(Comammox)的存在. 2015 年, Daims 等^[46]及 van Kessel 等^[47]才成功的从不同环境中富集了 Comammox,证明了它的存在. Comammox 的存在极大程度冲击了人们对于生物脱氮的传统观念. Palomo 等^[48]依据 amoA 基因序列,将 Comammox 划分为 clade A 型和 clade B 型.

Comammox 具有高氨氮亲和力和低亚硝态氮亲和力的特点.但是由于富集的 Comammox 菌群较少,暂无文献报道 Comammox 的氧亲和力. Comammox 中存在高氧亲和力的 bd 型末端氧化酶^[48]且 Paul 等^[49]通过控制反应器 DO 浓度($<1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),从而实现 Comammox 的富集.这说明,在低 DO 环境中, PN 的破坏可能是由于 Comammox 的富集.由于这些发现,有研究者认为在高 DO 条件下, Comammox 可能不能在与传统 AOB 的竞争中胜出.然而随着研究的不断深入, Beach 等发现^[50]在低 DO 环境中有些 Comammox 有较高的丰度,但是也有些 Comammox 丰度较低. 2020 年, Sakoula 等^[51]在 50% 氧饱和度的条件下获得了一株全新的 Comammox 富集体,并命名为 *Ca. N. kreffii*.这些都说明不同的 DO 环境中的 Comammox 种类可能不同,且不同种类 Comammox 的特性也可能不同.

Comammox 具备硝化关键功能酶(AMO, HAO 和 NXR)的完整基因组^[46-47],故其可以在单个细菌中将氨氮转化为硝态氮.但是除硝化作用外, Comammox 的基因组有编码亚硝酸盐还原酶基因(nir)而缺少一氧化氮还原酶基因(nor),理论上可在好氧或缺氧环境中产生 NO,但是不能通过生物途径产生 N_2O ^[52].因此在低 DO 环境中, Comammox 为优势菌种的硝化污泥 N_2O 生成量较 AOB 为优势菌种的硝化污泥大幅下降.

3 DO 控制的运行工艺 (DO controlled operation process)

在实际运行工艺中,控制 DO 对启动及维持 PN 有重要影响,基于 DO 控制方法实现 PN 启动及稳定运行是最为便利的方法,以下将通过几种不同基于控制 DO 的策略来说明控制 DO 在实际应用方面对 PN 的影响.

3.1 低 DO 运行工艺

低 DO 条件能有效提高氧传质效果^[53],减少能源消耗,可推动污水处理向节能绿色方向发展.在低

DO 条件下, 维持 AOB 活性的同时选择性抑制 NOB, 从而实现 PN 的启动^[54]. 对于在低 DO 环境中成功启动 PN 的原因, 普遍认为是 NOB 的淘汰, 但是对于 NOB 淘汰的原因暂无统一观点.

低 DO 环境中污泥中 AOB 的氧半饱和常数 (K_{O_2}) 一般低于 NOB^[55], 使得 AOB 优先利用环境中不多的氧气, 使得 NOB 难以获取足够的氧气维持自身的生长所需^[56], 导致活性污泥中 NOB 数量不断下降, 亚硝酸盐氧化速率不断下降, 从而实现短程硝化. 在低 DO 条件下, NOB 的活性与适宜条件下相比有大幅下降^[57]. 也有研究者发现, 运用其他工艺可以在反应器中构造一个低 DO 环境, 从而利用低 DO 环境特点更好的运行 PN. Huang 等^[40]指出, 利用低强度超声波可以增强 AOB 活性, 并产生一个低 DO 环境, 这有利于提升 PN 的运行效率. 刘若男等^[58]指出, 在微氧条件下控制曝气可提升微生物燃料电池脱氮效率. 这说明, 利用低 DO 环境的特点与其他工艺联合可以有效的运行 PN.

在低 DO 环境中可以实现 PN 的启动, 但是在长期运行中, NOB 可以通过优势种群的转化来适应环境, 从而使得 NOB 活性上升, 导致 PN 崩溃^[39, 53]. 通过菌种分析得知, 由于活性污泥中的 NOB 优势种群由 *Nitrobacter* (高 K_{O_2}) 转变为 *Nitrospira* (低 K_{O_2}), 使得 NOB 重新获得较多的氧气, 亚硝酸氧化速率上升. 在低 DO 条件长期运行中, 转变后 NOB 的 K_{O_2} 与 AOB 相近, 使得短程硝化变为全程硝化^[29]. 这表示单凭低 DO 即使实现 PN 也难以长期稳定运行.

在低 DO 条件下, 当 AOB 获取 O_2 困难时, 会进行反硝化, 从而产生温室气体 N_2O . 且该研究表明, 反硝化对 AOB 的能量代谢无关紧要, 但在高氨氮浓度下, 反硝化可能是电子耗散的重要途径^[8]. 随着 DO 升高, AOB 产生的 N_2O 将会减少, 并且溶解氧的改变会影响短程硝化过程 N_2O 的产生途径^[59].

3.2 高 DO 运行工艺

随着研究的不断深入, 许多研究者发现在低 DO 环境中, AOB 的 K_{O_2} 不一定低于 NOB (见表 1), 因此在低 DO 环境中可能无法正常启动 PN, 并且低 DO 条件下运行短程硝化工艺, 即使成功启动了, 在长期运行中, 也会由于 NOB 的优势种群的转变导致短程硝化的破坏^[39], 而低 DO 条件也可能使得 AOB 产生较多的 N_2O , 对此研究者开发了其它启动并维持 PN 的技术.

在低 DO 环境中实现 PN, 是基于同时降低 AOB 与 NOB 的活性的基础上^[60-61], 因为 AOB 对氧气的竞争力高于 NOB, 促使双方发生竞争从而使得 NOB 淘汰. 但是低 DO 仍然在一定程度上降低了氨氧化速率, 基于此在高 DO 环境中能否启动 PN 成为了研究的新方向. 杨庆等^[62]指出在高 DO 条件下长期运行, AOB 的 K_{O_2} ($(0.064 \pm 0.008) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 按 O_2 计算) 远低于在低 DO 条件下培养的 AOB 的 K_{O_2} ($(0.281 \pm 0.026) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 按 O_2 计算). 这说明在高 DO 条件下, 培养的 AOB 的氧亲和力更高, AOB 更具有活性. Jiang 等^[63]在高 DO 条件下成功实现了 AOB 活性的上升及 NOB 活性的抑制. 这表明, 在高 DO 环境中, 只要控制好外界环境完全可以较好的启动 PN 乃至 PN 的稳定运行, 这打破了 PN 只能通过低 DO 启动的局限. 图 2 展示了低 DO、高 DO、间歇曝气等 3 种不同的工艺启动 PN 的原因.

针对高 DO 环境中运行 PN 的特性, 研究者进行了许多的研究. Cui 等^[32]控制接种污泥运行条件等外界因素, 在两个不同的 DO 条件下运行 PN, 探究 DO 浓度对短程硝化长期运行的影响. 在低 DO 条件下 ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 短程硝化性能在运行周期为 100 左右就开始破坏, 到 130 周期就基本转为全程硝化. 而在高 DO 条件下, 短程硝化性能得到良好的维持. 这说明高 DO 对于 PN 稳定运行有一定的优势之处. 杨庆等^[29]指出, 同种污泥在不同 DO 环境中运行 PN, 高 DO 比低 DO 运行更加稳定. 综上所述, 高 DO 下运行 PN, 有利于维持 PN 的稳定. 高 DO 浓度, 由于 AOB 更快适应高 DO 环境, 使得 NOB 在氧气竞争时处在劣势从而导致污泥中的 AOB 大量增殖, NOB 被快速淘汰^[64]. 且在高 DO 环境中, 对于 AOB, 该环境将导致其活性上升使得氨氧化速率维持在较高的水准, 对于 NOB 来说, *Nitrobacter* 更占生长优势, 使得 *Nitrospira* 难以获取优势种群地位, 可能 *Nitrospira* 不在占据生长优势, 是实现及维持 PN 的一个重要原因^[29].

但高曝气将导致水厂运行费用上升, 难以成为主流手段, 且在高 DO 环境中, 将会使得 PN 难以与厌氧氨氧化及反硝化一体化耦合脱氮, 高 DO 将会使一体化 PNA 系统崩溃^[65]. 因此需要研究一种节能环保能稳定运行 PN 的新工艺.

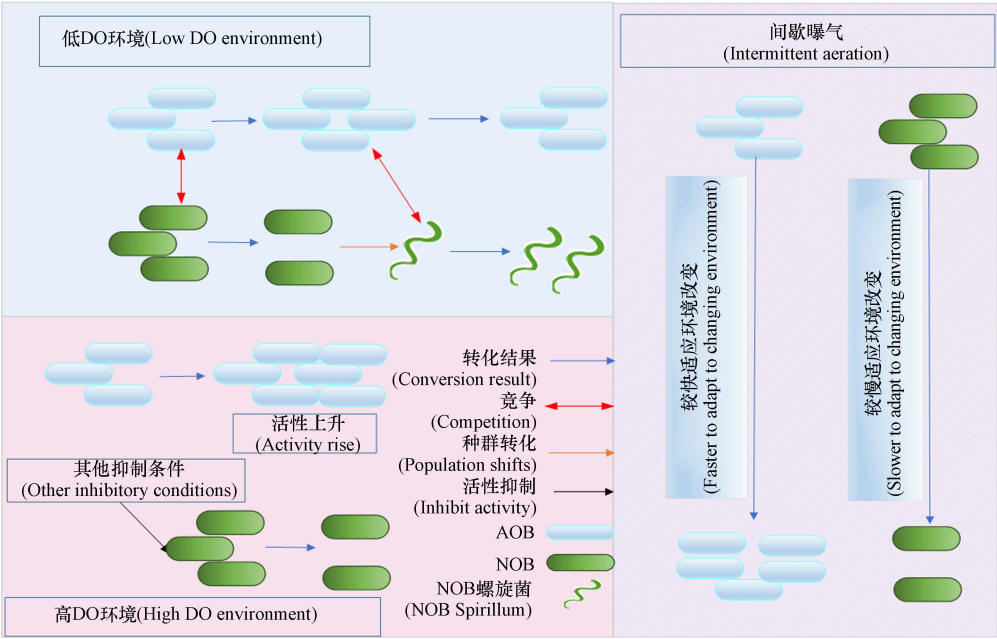


图 2 三工艺机理图
Fig.2 Three process mechanism diagram

3.3 间歇曝气工艺

高 DO 工艺,虽然可以有效的运行短程硝化,但是由于维持高 DO 条件将会使得运行成本上升,与研究短程硝化的初衷不符.由于上述两种工艺的缺陷,并且随着间歇曝气工艺可以有效的抑制 NOB^[66-67]这一特性被发现,间歇曝气启动及维持 PN 受到众多研究者的青睐.

间歇曝气模式,从本质上说就是人为的在一个反应器在不同的时间与空间中营造出不同的 DO 分区,利用 AOM, NOB 的特性,实现 AOM 的增殖与 NOB 的抑制,间歇曝气模式可以很好地启动 PN^[68].探究其可以成功启动 PN 的原因,可归功于其特殊的 DO 分区,在这种特殊的 DO 分区中, AOB 有“饱食饥饿”特性,可以在 DO 浓度发生显著变化之后,迅速适应外界环境的变化,而 NOB 难以及时适应 DO 环境的剧烈变化,使得其逐渐被淘汰^[69-70]. Xie 等^[34]发现,间歇曝气有利于 AOA 的生长.这说明 AOM 都可以较好的适应间歇曝气模式,而 NOB 活性会被抑制,从而实现 PN. 蒋铁锋等^[71]发现, AOB 可以在间歇曝气工艺中提高其产率系数(Y)使得其比增殖速率(μ)及氨氮氧化速率保持相对稳定,而 NOB 并不具备这一特性,使得 NOB 的比增殖速率以及亚硝酸盐氧化速率下降.这是间歇曝气可以成功启动 PN 的直接原因. Xu 等^[72]发现,曝气期 DO 浓度和缺氧期持续时间对 NOB 的抑制有显著影响,低 DO 浓度($0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对 NOB 的抑制作用强于高 DO 浓度($1.5 - 1.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).这说明,在间歇曝气工艺中曝气段 DO 浓度会极大地影响其对 PN 的启动及维持作用. Kornaros 等^[73]表明, NOB 在间歇曝气中,由于 DO 的显著变化引起 NOB 活性地缓慢恢复,是由于控制 NOB 生长的关键酶在缺氧段失活,而在好氧段重新激活较为缓慢,从而使得 NOB 的最大比增长速率下降.

间歇曝气模式除了可以启动 PN 外还有其他优点. 刘宏等^[74]发现,利用间歇曝气模式可以在 PN 崩溃后,较好的实现 PN 的恢复.这说明间歇曝气模式可以有效的恢复 AOB 活性,并且控制好外界条件还可以有效抑制 NOB 活性. Sun 等^[75]发现,间歇曝气模式通过控制曝气时间和 DO 浓度可以提高氮去除率.间歇曝气模式中还有一些特性未进行深入探究,如间歇曝气模式中的 N_2O 排放主要集中在好氧区间且排放特征尚未清晰,需要研究者进一步探究.

4 结论与展望(Conclusion and perspective)

PN 启动工艺及破坏条件繁多,但其根本原因是在反应器中多种微生物相互作用下功能菌电子耗散途径及相关酶活性发生变化. O_2 作为脱氮过程中的重要参与者,在不同的 DO 环境中细菌电子耗散途径及相关酶活性有着显著差异,可利用此差异实现 PN 的启动及稳定运行.

低 DO 环境中, AOB 因缺乏电子受体导致其电子耗散途径及相关酶活性变化, 使其进行反硝化产生 N_2O , 且由于 K_{O_2} 不同导致 NOB 抑制、AOA 代替 AOB 优势地位等变化, 可能发生 NOB 优势种群转化导致 PN 崩溃. 高 DO 环境中, AOB 活性上升使得脱氮效率上升, 此时可通过其他方式抑制 NOB 实现 PN 启动, 其优势为 PN 可以长期稳定运行, 但其曝气成本较高. 间歇曝气模式一定程度上综合以上两种工艺优势, 利用 AOB 较快适应 DO 变化特性实现 PN 启动, 但其参数设置对其效果有较大影响且暂无明确参数设计理论. Comammox 的发现极大的冲击了传统硝化脱氮观念, 但是对 Comammox 对硝化过程的影响特别是对 PN 过程的影响暂时没有进行较为深入的探究. Comammox 虽然能将 NH_4^+-N 转化为 $NO_3^- -N$, 但是在不同 DO 环境中其电子耗散途径及相关酶活性是否发生变化从而导致其可帮助 PN 的启动及稳定运行, 需要研究者进行深入的研究. 本文结合在不同 DO 环境中细菌电子耗散途径及酶活性变化的系统分析, 提出未来可行的研究方向包括:

1) PN 的启动是通过营造 AOM 与 NOB 之间的活性差来实现, 且 NOB 的活性下降主要归功于 NOB 的原位活性下降, 但是对于 NOB 的失活机制暂无一个较为清晰的理论说明. 可从不同 DO 环境中 NOB 的电子耗散途径及相关酶活性的变化角度, 来探究 NOB 的失活机制.

2) 间歇曝气模式从本质看就是在一个反应器内营造 DO 分区, 因此可从 DO 角度探究在不同 DO 环境及 DO 转变过程中, 反应器内部功能菌电子耗散途径及酶活性的变化, 从电子耗散及酶活性角度探究 DO 变化对 PN 启动及维持的作用, 并以此为基础建立间歇曝气的参数选取方法.

参考文献 (References)

- [1] NSENGA KUMWIMBA M, LOTTI T, ŞENEL E, et al. Anammox-based processes: How far have we come and what work remains? A review by bibliometric analysis[J]. *Chemosphere*, 2020, 238: 124627.
- [2] JIANG H, YANG P, WANG Z, et al. Novel insights into overcoming nitrite oxidation bacteria acclimatization problem in treatment of high-ammonia wastewater through partial nitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 336: 125254.
- [3] LIU Y C, ZHU Y L, WU D S, et al. Effect of free nitrous acid on nitrification process: Microbial community, inhibitory kinetics, and functional biomarker[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 371: 128595.
- [4] ZHANG W K, YU D S, ZHANG J H, et al. Start-up of mainstream anammox process through inoculating nitrification sludge and anammox biofilm: Shift in nitrogen transformation and microorganisms[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347: 126728.
- [5] WANG H, YANG M, LIU K, et al. Insights into the synergy between functional microbes and dissolved oxygen partition in the single-stage partial nitrification-anammox granules system[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347: 126364.
- [6] CARANTO J D, LANCASTER K M. Nitric oxide is an obligate bacterial nitrification intermediate produced by hydroxylamine oxidoreductase[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(31): 8217-8222.
- [7] LANCASTER K M, CARANTO J D, MAJER S H, et al. Alternative bioenergy: Updates to and challenges in nitrification metalloenzymology[J]. *Joule*, 2018, 2(3): 421-441.
- [8] STEIN L Y. Insights into the physiology of ammonia-oxidizing microorganisms[J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2019, 49: 9-15.
- [9] SOLER-JOFRA A, PÉREZ J, van LOOSDRECHT M C M. Hydroxylamine and the nitrogen cycle: A review[J]. *Water Research*, 2021, 190: 116723.
- [10] SUZUKI I, DULAR U, KWOK S C. Ammonia or ammonium ion as substrate for oxidation by *Nitrosomonas europaea* cells and extracts[J]. *Journal of bacteriology*, 1974, 120(1): 556-558.
- [11] 彭永臻, 孙洪伟, 杨庆. 短程硝化的生化机理及其动力学 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 817-824.
PENG Y Z, SUN H W, YANG Q. The biochemical reaction mechanism and kinetics of partial nitrification[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 817-824 (in Chinese).
- [12] YU R, KAMPSCHREUR M J, van LOOSDRECHT M C M, et al. Mechanisms and specific directionality of autotrophic nitrous oxide and nitric oxide generation during transient anoxia[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1313-1319.
- [13] NI B J, PENG L, LAW Y, et al. Modeling of nitrous oxide production by autotrophic ammonia-oxidizing bacteria with multiple production pathways[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(7): 3916-3924.
- [14] HINK L, LYCUS P, GUBRY-RANGIN C, et al. Kinetics of NH_3 -oxidation, NO-turnover, N_2O -production and electron flow during oxygen depletion in model bacterial and archaeal ammonia oxidisers[J]. *Environmental Microbiology*, 2017, 19(12): 4882-4896.
- [15] VENTER J C, REMINGTON K, HEIDELBERG J F, et al. Environmental Genome Shotgun Sequencing of the Sargasso Sea[J]. *Science*, 2004, 304(5667): 66-74.
- [16] KÖNNEKE M, BERNHARD A E, deLa TORRE J R, et al. Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon[J]. *Nature*,

- 2005, 437: 543-546.
- [17] CAFFREY J M, BANO N, KALANETRA K, et al. Ammonia oxidation and ammonia-oxidizing bacteria and Archaea from estuaries with differing histories of hypoxia[J]. *The ISME Journal*, 2007, 1(7): 660-662.
- [18] YANG Y C, HERBOLD C W, JUNG M-Y, et al. Survival strategies of ammonia-oxidizing Archaea (AOA) in a full-scale WWTP treating mixed landfill leachate containing copper ions and operating at low-intensity of aeration[J]. *Water Research*, 2021, 191: 116798.
- [19] LIU L T, LI S R, HAN J M, et al. A two-step strategy for the rapid enrichment of Nitrosocosmicus-like ammonia-oxidizing thaumarchaea[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 875.
- [20] JIANG Z, TANG S Y, LIAO Y H, et al. Effect of low temperature on contributions of ammonia oxidizing archaea and bacteria to nitrous oxide in constructed wetlands[J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137585.
- [21] AL-AJEEL S, SPASOV E, SAUDER L A, et al. Ammonia-oxidizing archaea and complete ammonia-oxidizing Nitrospira in water treatment systems[J]. *Water Research X*, 2022, 15: 100131.
- [22] PARK J-G, LEE B, HEO T-Y, et al. Metagenomics approach and canonical correspondence analysis of novel nitrifiers and ammonia-oxidizing archaea in full scale anaerobic-anoxic-oxic (A2/O) and oxidation ditch processes[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 319: 124205.
- [23] WU L, CHEN X M, WEI W, et al. A critical review on nitrous oxide production by ammonia-oxidizing Archaea[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(15): 9175-9190.
- [24] REIGSTAD L J, RICHTER A, DAIMS H, et al. Nitrification in terrestrial hot springs of Iceland and Kamchatka[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2008, 64(2): 167-174.
- [25] ZHANG C L, YE Q, HUANG Z Y, et al. Global occurrence of archaeal amoA genes in terrestrial hot springs[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, 74(20): 6417-6426.
- [26] ZHAO W H, BI X J, BAI M, et al. Research advances of ammonia oxidation microorganisms in wastewater: Metabolic characteristics, microbial community, influencing factors and process applications[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2023, 46(5): 621-633.
- [27] 武文君, 刘秀红, 崔斌, 等. 溶解氧对 Anammox 滤池内功能菌群及活性的影响 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1415-1421.
- WU W J, LIU X H, CUI B, et al. Effect of dissolved oxygen on the community and activities of functional bacteria in anammox biofilter[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(3): 1415-1421 (in Chinese).
- [28] 吴军, 张悦, 徐婷, 等. AOB 溶解氧亲和力低于 NOB 条件下序批反应器中 NOB 淘汰的实现机制 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3583-3590.
- WU J, ZHANG Y, XU T, et al. Mechanisms of partial nitrification in sequencing batch reactor under the condition of AOB oxygen affinity lower than NOB[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12): 3583-3590 (in Chinese).
- [29] 杨庆, 杨玉兵, 杨忠启, 等. 溶解氧对短程硝化稳定性及功能菌群的影响 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3328-3334.
- YANG Q, YANG Y B, YANG Z Q, et al. Effect of dissolved oxygen on the stability and functional microbial communities of the partial nitrification[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(9): 3328-3334 (in Chinese).
- [30] BLACKBURNE R, YUAN Z G, KELLER J. Partial nitrification to nitrite using low dissolved oxygen concentration as the main selection factor[J]. *Biodegradation*, 2008, 19(2): 303-312.
- [31] WANG L, LI B R, LI Y M, et al. Enhanced biological nitrogen removal under low dissolved oxygen in an anaerobic-anoxic-oxic system: Kinetics, stoichiometry and microbial community[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128184.
- [32] CUI B, YANG Q, LIU X H, et al. The effect of dissolved oxygen concentration on long-term stability of partial nitrification process[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 90: 343-351.
- [33] STRAKA L L, MEINHARDT K A, BOLLMANN A, et al. Affinity informs environmental cooperation between ammonia-oxidizing Archaea (AOA) and anaerobic ammonia-oxidizing (Anammox) bacteria[J]. *The ISME Journal*, 2019, 13(8): 1997-2004.
- [34] XIE J H, YAN J, HE H X, et al. Evaluation of the key factors to dominate aerobic ammonia-oxidizing Archaea in wastewater treatment plant[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2021, 164: 105289.
- [35] QIN W, MEINHARDT K A, MOFFETT J W, et al. Influence of oxygen availability on the activities of ammonia-oxidizing Archaea[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2017, 9(3): 250-256.
- [36] ROY D, McEVROY J, BLONIGEN M, et al. Seasonal variation and ex-situ nitrification activity of ammonia oxidizing Archaea in biofilm based wastewater treatment processes[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 244: 850-859.
- [37] TRIMMER M, CHRONOPOULOU P M, MAANOJA S T, et al. Nitrous oxide as a function of oxygen and archaeal gene abundance in the North Pacific[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13451.
- [38] FRAME C H, LAU E, NOLAN E J 4th, et al. Acidification enhances hybrid N₂O production associated with aquatic ammonia-oxidizing microorganisms[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 7: 2104.
- [39] WANG Z Y, ZHENG M, HU Z T, et al. Unravelling adaptation of nitrite-oxidizing bacteria in mainstream PN/a process: Mechanisms and counter-strategies[J]. *Water Research*, 2021, 200: 117239.

- [40] HUANG S C, ZHU Y C, ZHANG G M, et al. Effects of low-intensity ultrasound on nitrite accumulation and microbial characteristics during partial nitrification[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135985.
- [41] LIU W L, YANG Q, MA B, et al. Rapid achievement of nitrification using aerobic starvation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(7): 4001-4008.
- [42] WANG Z Y, ZHENG M, DUAN H R, et al. A 20-year journey of partial nitrification and anammox (PN/a): From sidestream toward mainstream[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(12): 7522-7531.
- [43] YANG Y D, JIANG Y M, LONG Y N, et al. Insights into the mechanism of the deterioration of mainstream partial nitrification/anammox under low residual ammonium[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 126: 29-39.
- [44] HAUSHERR D, NIEDERDORFER R, BÜRGEMANN H, et al. Successful mainstream nitrification through NOB inactivation[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153546.
- [45] COSTA E, PÉREZ J, KREFT J U. Why is metabolic labour divided in nitrification?[J]. *Trends in Microbiology*, 2006, 14(5): 213-219.
- [46] DAIMS H, LEBEDEVA E V, PJEVAC P, et al. Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria[J]. *Nature*, 2015, 528: 504-509.
- [47] van KESSEL M A H J, SPETH D R, ALBERTSEN M, et al. Complete nitrification by a single microorganism[J]. *Nature*, 2015, 528: 555-559.
- [48] PALOMO A, PEDERSEN A G, FOWLER S J, et al. Comparative genomics sheds light on niche differentiation and the evolutionary history of comammox *Nitrospira* [J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(7): 1779-1793.
- [49] ROOTS P, WANG Y B, ROSENTHAL A F, et al. Comammox *Nitrospira* are the dominant ammonia oxidizers in a mainstream low dissolved oxygen nitrification reactor[J]. *Water Research*, 2019, 157: 396-405.
- [50] BEACH N K, NOGUERA D R. Design and assessment of species-level qPCR primers targeting comammox[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 36.
- [51] SAKOULA D, KOCH H, FRANK J, et al. Enrichment and physiological characterization of a novel comammox *Nitrospira* indicates ammonium inhibition of complete nitrification[J]. *The ISME Journal*, 2021, 15: 1010-1024.
- [52] KITS K D, JUNG M Y, VIERHEILIG J, et al. Low yield and abiotic origin of N_2O formed by the complete nitrifier *Nitrospira inopinata* [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1836.
- [53] LIU G Q, WANG J M. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(10): 5109-5117.
- [54] HANAKI K, WANTAWIN C, OHGAKI S. Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor[J]. *Water Research*, 1990, 24(3): 297-302.
- [55] MA Y, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant[J]. *Water Research*, 2009, 43(3): 563-572.
- [56] 杜贺, 李冬, 周川, 等. 控制低溶解氧实现亚硝化的稳定性 [J]. *环境科学*, 2010, 31(10): 2365-2369.
DU H, LI D, ZHOU C, et al. Achieving the stability of nitrosation under low DO concentration[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(10): 2365-2369 (in Chinese).
- [57] ZHENG M, LI H J, DUAN H R, et al. One-year stable pilot-scale operation demonstrates high flexibility of mainstream anammox application[J]. *Water Research X*, 2023, 19: 100166.
- [58] 刘若男, 赵博玮, 岳秀萍. 曝气量对微生物燃料电池脱氮的影响 [J]. *环境化学*, 2018, 37(6): 1317-1326.
LIU R N, ZHAO B W, YUE X P. Effect of aeration rate on nitrogen removal by microbial fuel cells[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(6): 1317-1326 (in Chinese).
- [59] 杨玉兵, 杨庆, 李洋, 等. 基于同位素技术的短程硝化过程 N_2O 产生途径 [J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5051-5057.
YANG Y B, YANG Q, LI Y, et al. N_2O production pathways in partial nitrification based on isotope technology[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5051-5057 (in Chinese).
- [60] LU J, ZHANG Y X, WU J, et al. Nitrogen removal in recirculating aquaculture water with high dissolved oxygen conditions using the simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification system[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 305: 123037.
- [61] CHEN Z G, WANG X J, CHEN X Z, et al. Nitrogen removal via nitrification pathway for low-strength ammonium wastewater by adsorption, biological desorption and denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 541-549.
- [62] 杨庆, 杨玉兵, 刘秀红, 等. 不同溶解氧环境下氨氧化菌的氧半饱和常数比较 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(23): 22-26.
YANG Q, YANG Y B, LIU X H, et al. Oxygen half-saturation constants of ammonia oxidizing bacteria (AOB) in nitrification sludge under different dissolved oxygen[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(23): 22-26 (in Chinese).
- [63] JIANG H, PENG Y Z, LI X Y, et al. Advanced nitrogen removal from mature landfill leachate via partial nitrification-Anammox biofilm reactor (PNABR) driven by high dissolved oxygen (DO): Protection mechanism of aerobic biofilm[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 306: 123119.
- [64] CUI H H, ZHANG L, PENG Y Z, et al. Achieving stable nitrification for mainstream anammox by combining nitrite exposure inhibition

- with high DO reactivation[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 46: 102589.
- [65] WANG H, GONG H, DAI X H, et al. Metagenomics reveals the microbial community and functional metabolism variation in the partial nitrification-anammox process: From collapse to recovery[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 135: 210-221.
- [66] MA Y J, PISCEDDA A, deLa C VERAS A, et al. Intermittent aeration to regulate microbial activities in membrane-aerated biofilm reactors: Energy-efficient nitrogen removal and low nitrous oxide emission[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433: 133630.
- [67] LI J P, ELLIOTT D, NIELSEN M, et al. Long-term partial nitrification in an intermittently aerated sequencing batch reactor (SBR) treating ammonium-rich wastewater under controlled oxygen-limited conditions[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, 55(3): 215-222.
- [68] HASSAN M O, GANI K M, KUMARI S, et al. Start-up of partial nitrification by intermittent aeration, pH shocks and sulfide addition in a sequential batch reactor[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2022, 97(8): 2186-2195.
- [69] 周梦雨, 彭党聪, 韩芸, 等. 间歇曝气对部分硝化-厌氧氨氧化处理氨氮废水的影响 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1120-1127.
- ZHOU M Y, PENG D C, HAN Y, et al. Partial nitrification-anaerobic ammonia oxidation for the treatment of moderately concentrated ammonia-nitrogen wastewater: Effect of intermittent aeration on nitrogen removal performance[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1120-1127 (in Chinese).
- [70] 曾薇, 张悦, 李磊, 等. 生活污水常温处理系统中 AOB 与 NOB 竞争优势的调控 [J]. *环境科学*, 2009, 30(5): 1430-1436.
- ZENG W, ZHANG Y, LI L, et al. Competition and optimization of AOB and NOB for domestic wastewater treatment at normal temperatures[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(5): 1430-1436 (in Chinese).
- [71] 蒋轶锋, 陈浚, 王宝贞, 等. 间歇曝气对硝化菌生长动力学影响及 NO_2^- 积累机制 [J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 85-90.
- JIANG Y F, CHEN J, WANG B Z, et al. Effect of intermittent aeration on growth kinetics of nitrifiers and mechanism for NO_2^- accumulation[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 85-90 (in Chinese).
- [72] XU Z Z, ZHANG L, GAO X J, et al. Optimization of the intermittent aeration to improve the stability and flexibility of a mainstream hybrid partial nitrification-anammox system[J]. *Chemosphere*, 2020, 261: 127670.
- [73] KORAROS M, DOKIANAKIS S N, LYBERATOS G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(19): 7245-7253.
- [74] 刘宏, 南彦斌, 李慧, 等. 间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响 [J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 865-871.
- LIU H, NAN Y B, LI H, et al. Effect of aeration rate on shortcut nitrification recovery in intermittent aeration mode[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 865-871 (in Chinese).
- [75] SUN Y P, GUAN Y T, PAN M, et al. Enhanced biological nitrogen removal and N_2O emission characteristics of the intermittent aeration activated sludge process[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2017, 16(4): 761-780.