

水环境化学中亚硝化单胞菌的代谢机制、环境调控与应用研究进展

裴凌波¹, 黄 勋², 杜 超¹, 胡佳欢¹, 许 芮¹, 蒋奕冰¹, 莫奕樟¹, 黄彩妹¹, 魏明蓉^{1*}

¹桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林

²广西桂林市恭城瑶族自治县人民政府, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月16日; 录用日期: 2026年4月17日; 发布日期: 2026年5月18日

摘 要

亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas*)作为化能自养型氨氧化细菌(AOB)的核心类群, 在水环境硝化反应中承担关键角色——通过氨单加氧酶(AMO)将氨氮(NH_4^+)氧化为亚硝态氮(NO_2^-), 是全球氮循环与水环境脱氮系统的“限速步骤”。本文系统梳理了亚硝化单胞菌的分类学特征与水环境分布规律, 深入解析其氨氧化代谢机制及关键功能酶(AMO、HAO)的调控逻辑, 重点阐述了水环境化学参数(pH、溶解氧、盐度、抑制剂)、界面作用(生物膜、沉积物微环境)对其活性与群落稳定性的影响, 总结了亚硝化单胞菌在市政污水、工业废水及自然水体修复中的强化技术与应用案例, 最后指出当前极端水环境适配性、复合污染抑制机制、工程化稳定性等研究瓶颈, 展望了合成生物学改造、AI辅助工艺调控等前沿方向, 为水环境氮循环调控与低碳脱氮技术优化提供理论支撑与技术参考。

关键词

亚硝化单胞菌, 氨氧化细菌, 水环境化学, 代谢机制, 脱氮, 环境调控, 生物膜, 低碳水处理

Research Progress on Metabolic Mechanisms, Environmental Regulation and Applications of *Nitrosomonas* in Aquatic Environmental Chemistry

Lingbo Pei¹, Xun Huang², Chao Du¹, Jiahuan Hu¹, Rui Xu¹, Yibing Jiang¹, Yizhang Mo¹, Caimei Huang¹, Mingrong Wei^{1*}

¹School of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²People's Government of Gongcheng Yao Autonomous County, Guilin Guangxi

*通讯作者。

文章引用: 裴凌波, 黄勋, 杜超, 胡佳欢, 许芮, 蒋奕冰, 莫奕樟, 黄彩妹, 魏明蓉. 水环境化学中亚硝化单胞菌的代谢机制、环境调控与应用研究进展[J]. 世界生态学, 2026, 15(2): 266-273. DOI: 10.12677/ije.2026.152028

Received: March 16, 2026; accepted: April 17, 2026; published: May 18, 2026

Abstract

Nitrosomonas, as a core group of chemoautotrophic ammonia-oxidizing bacteria (AOB), plays a crucial role in nitrification in aquatic environments—oxidizing ammonia nitrogen (NH_4^+) to nitrite nitrogen (NO_2^-) via ammonia monooxygenase (AMO), which is the “rate-limiting step” in the global nitrogen cycle and aquatic denitrification system. This paper systematically reviews the taxonomic characteristics and aquatic distribution patterns of *Nitrosomonas*, deeply analyzes its ammonia oxidation metabolic mechanism and the regulatory logic of key functional enzymes (AMO, HAO), and focuses on the influence of aquatic environmental chemical parameters (pH, dissolved oxygen, salinity, inhibitors) and interfacial interactions (biofilm, sediment microenvironment) on its activity and community stability. It summarizes the enhancement technologies and application cases of *Nitrosomonas* in the remediation of municipal wastewater, industrial wastewater, and natural water bodies. Finally, it points out the current research bottlenecks in extreme aquatic environments, mechanisms for inhibiting complex pollution, and engineering stability, and looks forward to cutting-edge directions such as synthetic biology modification and AI-assisted process control, providing theoretical support and technical reference for the regulation of nitrogen cycle in aquatic environments and the optimization of low-carbon denitrification technologies.

Keywords

Nitrosomonas, Ammonia-Oxidizing Bacteria, Aquatic Environmental Chemistry, Metabolic Mechanism, Denitrification, Environmental Regulation, Biofilm, Low-Carbon Water Treatment

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

亚硝化单胞菌隶属于 β -变形菌门(Betaproteobacteria)亚硝化单胞菌科,典型种属包括 *Nitrosomonas europaea*、*Nitrosomonas eutropha*、*Nitrosomonas oligotropha* 等,其形态与生理特性存在显著差异,是化能自养氨氧化的“启动者”,连接无机氮库与硝化-反硝化/厌氧氨氧化(Anammox)通路,直接影响水环境氮素迁移转化效率。该类菌群广泛分布于市政污水处理厂硝化池、地表水表层水体、水-沉积物界面及工业废水处理系统等多种水环境中,其分布格局主要受氨氮浓度、溶解氧(DO)、pH、温度等水环境化学参数的选择性筛选。水环境化学参数通过直接调控亚硝化单胞菌代谢酶活性,污染物与营养盐的复合作用及界面化学效应,共同影响其群落富集与功能发挥[1]。基于“水环境化学-微生物代谢-工程应用”的交叉视角,本文围绕“分类与分布→代谢机制→环境调控→强化技术→应用场景→挑战与展望”的核心逻辑展开综述,突出水环境化学参数的调控核心地位,为亚硝化单胞菌高效应用于低碳脱氮提供跨学科解决方案[2]。

2. 亚硝化单胞菌的分类学特征与水环境分布规律

2.1. 核心类群与分类学进展

亚硝化单胞菌的经典分类基于形态(短杆状、革兰氏阴性)和生理特征(氨氧化速率、底物亲和力),而

现代分子分类依赖 16S rRNA 基因、功能基因(amoA, hao)序列分析, 推动了 *Nitrosomonas ureae*、*Nitrosomonas communis* 等新型种属的发现与生态定位[3]。根据功能特性可将其划分为高氨亲和型(*N. oligotropha*, 适配低氨水体)、高氨耐受型(*N. eutropha*, 适配高氨废水)、耐盐型(*Nitrosomonas halophila*, 适配高盐环境), 不同功能类群的代谢特性差异使其能适应多样化水环境[4]。从系统发育来看, 亚硝化单胞菌与其他氨氧化细菌共同构成氨氧化功能菌群, 其 amoA 基因与氨单加氧酶(AMO)的结构功能密切相关, 是分类鉴定与群落分析的关键分子标记[5]。

2.2. 不同水环境中的分布差异

在市政污水处理系统中, AO/AAO 工艺硝化池以 *N. europaea* 为优势种, 生物膜反应器中 *N. eutropha* 富集, 污泥消化液处理系统因高氨胁迫, *N. eutropha* 占比可达 60%以上[6]; 自然水环境中, 中营养湖泊表层水体以 *N. oligotropha* 为主导, 水-沉积物界面微氧区 *N. communis* 富集, 低氧高氨地下水则以 *N. ureae* 为优势。极端工业废水环境中, 煤化工高氨废水形成 *N. eutropha* 与耐氨菌株的复合群落, 高盐海产品加工废水则以 *N. halophila* 与盐单胞菌协同体系为主, 低温废水处理系统中 *Nitrosomonas psychrophila* 展现出良好适配性。此外, 在畜禽养殖废水处理系统中, 亚硝化单胞菌作为核心氨氧化菌群, 其丰度与氨氮去除效率呈显著正相关[7]。

2.3. 分布驱动的水环境化学因子

氨氮浓度是影响亚硝化单胞菌分布的关键驱动因子, 具体数据如图 1, 阈值范围为 0.1~100 mg/L, 高氨环境(>100 mg/L)中 *N. eutropha* 占绝对优势, 低氨环境(<1 mg/L)则以 *N. oligotropha* 为主。溶解氧(DO)浓度最适范围为 0.5~2 mg/L, 低氧(<0.5 mg/L)会抑制 AMO 活性, 高氧(>3 mg/L)则导致能量代谢效率降低[8]。pH 的最适范围为 7.5~8.5, 酸性条件(pH < 7.0)会通过质子化影响底物结合, 碱性条件(pH > 9.0)则增加游离氨(FA)毒性[9]。温度对分布的影响表现为 15°C~30°C 为活性峰值区间, 低温(<10°C)抑制酶活性与细胞增殖, 高温(>35°C)导致 AMO 结构变性。盐度方面, 淡水种属耐受盐度 < 3‰, 耐盐种属(如 *N. halophila*)可在 10‰ 盐度下保持活性; 营养盐比例(C:N:P = 100:5:1)也显著影响分布, 磷限制会直接降低代谢效率。

微生物类型	代谢途径	适宜环境	分布环境
Nitrosomonas	氨氧化为亚硝酸盐	中温、pH中性环境	淡水、土壤表层
AOA	氨氧化为亚硝酸盐	高温、高盐、低盐等极端环境	深海、热泉等极端环境
Comammox	氨直接氧化成硝酸盐	多样环境(土壤、水体、沉积物)	广泛分布于各自然与人工生态环境

Figure 1. Differences in key physiological and ecological characteristics among *Nitrosomonas*, AOA, and Comammox
图 1. *Nitrosomonas*、AOA 和 Comammox 在关键生理生态特性上的差异表

3. 亚硝化单胞菌的氨氧化代谢机制与功能酶调控

3.1. 核心代谢路径与能量转化

亚硝化单胞菌的氨氧化过程分为三步反应: NH_4^+ 在 AMO 催化下氧化为羟胺(NH_2OH), 随后 NH_2OH

在 HAO 作用下氧化为 NO_2^- ，最后通过细胞色素传递电子至电子传递链，伴随 ATP 合成与 CO_2 固定(卡尔文循环) [10]。该过程的能量代谢特征为化能自养型，每氧化 1 mol NH_4^+ 产生 2 mol ATP，能量转化效率约 15%~20%，核心产物为 NO_2^- ，同时会产生 NO (中间产物，具有环境毒性)和 N_2O (温室气体，是减排调控靶点) [11]。在厌氧或微氧条件下，部分亚硝化单胞菌可利用 NO_2^- 作为电子受体进行厌氧氨氧化反应，显著提高生物脱氮效率。

3.2. 关键功能酶与编码基因

氨单加氧酶(AMO)是核心限速酶，由 amoA、amoB、amoC 基因编码，催化 NH_4^+ 氧化为 NH_2OH ，对铜离子(Cu^{2+})存在依赖，易受重金属、硫脲抑制。羟胺氧化还原酶(HAO)由 hao 基因编码，催化 NH_2OH 氧化为 NO_2^- ，产生的电子供 AMO 反应，最适 pH 为 7.8~8.2。细胞色素 c554/c552 作为电子传递载体，其表达受 DO 浓度调控，直接影响能量转化效率。此外，亚硝化单胞菌基因组中还存在含铜离子的亚硝酸氧化还原酶和 NO 氧化还原酶基因，参与氮代谢的后续过程。amoA 基因作为 AMO 的核心编码基因，其拷贝数与表达水平可直接反映亚硝化单胞菌的氨氧化活性，是环境监测中的关键功能基因标记。如图 2 为 *Nitrosomonas* 氨氧化核心代谢通路与电子传递链流程图。

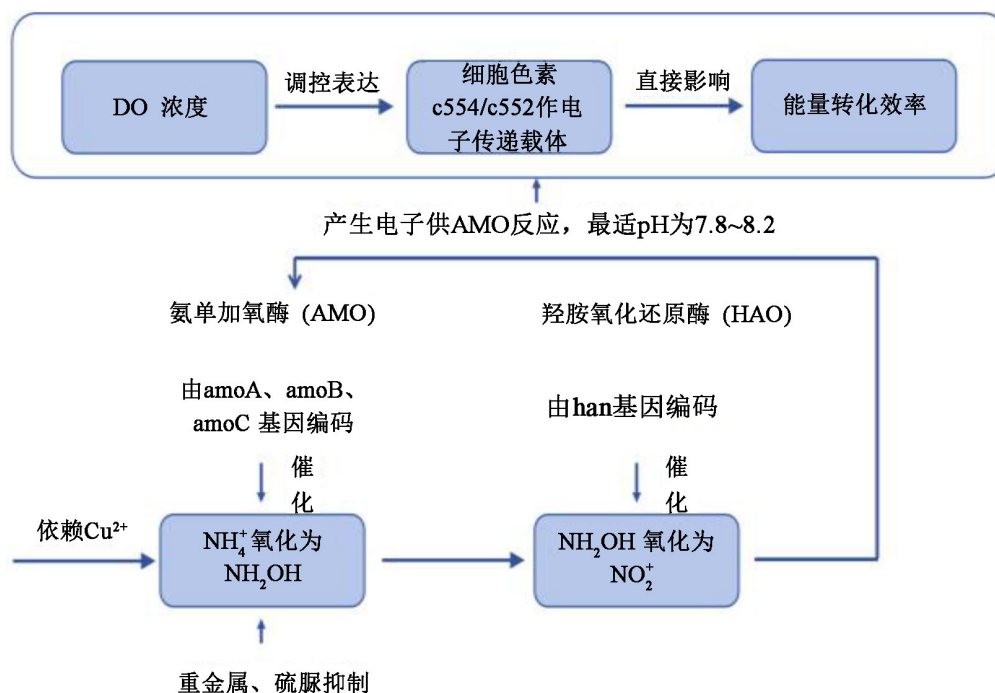


Figure 2. Diagram of the core metabolic pathway and electron transport chain of *Nitrosomonas* ammonia oxidation
图 2. *Nitrosomonas* 氨氧化核心代谢通路与电子传递链图

3.3. 代谢调控的分子机制

底物诱导调控是核心调控方式之一，氨氮浓度 > 1 mg/L 时，amoA 基因表达上调 2~5 倍；低氨环境下，高亲和型 AMO 同工酶激活。环境胁迫调控表现为低氧条件下 HAO 基因表达抑制， N_2O 排放增加；高盐胁迫下，相容性溶质(甜菜碱)合成基因激活，维持酶结构稳定。群体感应调控通过 N-酰基高丝氨酸内酯(AHLs)信号分子介导菌群间代谢协同，提升氨氧化速率。此外，亚硝化单胞菌的代谢还受碳源类型调控，除无机碳外，尿素、甲酸盐等有机碳源也可被其利用，通过脲酶操纵子(ureABCDFG)和尿素运输

系统(urtABCDE)将尿素转化为氨氮后参与硝化反应。

4. 宏观水化学参数 - 界面微环境 - 亚硝化单胞菌的调控逻辑体系

4.1. 宏观水化学参数：界面微环境化学梯度的源头驱动

宏观水环境中的理化参数、污染物与抑制剂、营养盐与离子平衡，是构建界面微环境梯度的基础，其浓度与形态直接决定界面 pH、溶解氧(DO)、营养盐、污染物的梯度分布，为亚硝化单胞菌生理响应奠定环境基础。

基础理化参数直接塑造界面核心化学梯度。pH 调控体现在底物形态与酶活性两方面，最适 pH 下氨氮以 NH_4^+ 形态存在，沿界面形成高效利用的底物梯度；pH 偏离适宜范围，会破坏酶结构、降低底物结合力，抑制代谢。DO 浓度决定界面 DO 梯度格局：DO < 0.5 mg/L 时，界面厌氧区扩大，AMO 酶促反应受限，氨氧化速率降幅超 50%；DO > 3 mg/L 时，外层高氧环境引发电子传递链过载，降低能量代谢效率。温度通过调控膜流动性与酶活性塑造界面温度梯度，20℃~25℃中温区代谢效率最优；<10℃低温抑制酶活与细胞增殖，>35℃高温导致 AMO 酶变性失活。盐度调控界面渗透压梯度，淡水种属在盐度 > 3‰时胞内渗透压失衡，耐盐菌种(如 *N. halophila*)可通过 EPS 合成、离子泵调节，在 8‰盐度下仍保留 60%活性。

污染物与抑制剂的宏观浓度，决定界面抑制梯度的强弱。重金属抑制具有特异性：Cu²⁺ > 1 mg/L 时竞争 AMO 活性中心，Cd²⁺、Pb²⁺破坏细胞膜完整性，均大幅降低氨氧化速率。有机污染物中，四环素、磺胺类抗生素抑制 amoA 基因表达，PFAS、卤代烃损伤 HAO 酶结构，酚类 > 50 mg/L 直接引发细胞凋亡[1]。自代谢产物游离亚硝酸(FNA) > 0.1 mg/L 时，同步抑制 AMO 与 HAO 酶，形成产物反馈抑制。富里酸(FA)作用呈浓度依赖性：25.3~65.1 mg/L 低浓度下可被伴生菌降解供能，>65.1 mg/L 高浓度下抑制氮转化基因表达，干扰代谢[12]。

营养盐与离子平衡构建界面营养与离子梯度。氮源形态直接影响代谢效率，纯氨氮基质下效率最高；尿素需水解为氨氮才能利用，氨氮 + 硝酸盐混合氮源会使代谢速率下降 10%~20%。磷浓度 < 0.1 mg/L 时，ATP 合成不足、amoA 基因表达下调，补加磷酸盐可提升氨氧化速率 30%~50%。离子强度异常会干扰细胞代谢：>0.5 mol/L 高离子强度破坏细胞膜通透性，<0.01 mol/L 低离子强度阻碍底物扩散。此外，硫化物与 Fe³⁺反应生成 FeS 沉淀，覆盖菌体阻碍传质，抑制氨氧化活性。

4.2. 界面微环境化学梯度：宏观参数与微生物响应的中间枢纽

水环境界面(生物膜 - 水体、沉积物 - 水体、人工载体界面)是连接宏观环境与微生物的核心载体，宏观参数塑造的各类界面梯度，直接决定亚硝化单胞菌的富集位点、代谢效率与菌群互作模式。

生物膜 - 水体界面是亚硝化单胞菌的主要富集区。宏观参数造就生物膜内外 DO 梯度(外层 2~3 mg/L，内层 0.1~0.5 mg/L)，适配菌体微氧代谢特性，使其大量富集于内层微氧区。菌体分泌的 EPS 可调节界面亲疏水性，吸附氨氮与 AMO 辅因子 Cu²⁺，形成局部底物富集区，让氨氧化效率远超游离菌体 2~3 倍。生物膜层间污染物浓度存在差异，内层污染程度更低，为菌体提供稳定代谢环境，伴生菌还能在表层降解大分子有机物，供给小分子营养。

沉积物 - 水体界面梯度呈垂直分布。表层 0~2 cm 沉积物氨氮浓度高，配合表层有氧、深层厌氧的 DO 梯度，促使亚硝化单胞菌与反硝化菌形成功能菌群，氨氧化产物 NO₂ 直接被反硝化菌利用，减少 FNA 累积与抑制作用。沉积物界面 pH 梯度(表层 7.5~8.0，深层 6.5~7.0)，能进一步缓解 FNA 毒性，维持菌体活性[13]。界面离子强度、硫化物浓度梯度，也会通过影响细胞膜通透性、传质效率，调控菌体代谢。

人工载体(生物陶粒、活性炭)依靠表面官能团吸附菌体，结合宏观参数形成局部高浓度菌群，提升系统抗冲击能力。泥膜共生体系中，生物膜是亚硝化单胞菌的主要栖息场所，其生物量与系统脱氮效率呈

显著正相关。

4.3. 微生物生理响应与群落演替：调控逻辑的最终落地

界面微环境梯度直接作用于亚硝化单胞菌，引发针对性生理响应，同时驱动菌群互作，最终推动群落演替，实现菌体与环境的适配，保障氮循环稳定运行。

界面梯度直接调控菌体生理代谢。DO 梯度精准调控 AMO 酶活性，内层 0.1~0.5 mg/L 微氧区氨氧化效率最高，过高或过低 DO 都会抑制代谢。适宜 pH 梯度(7.5~8.0)能提升底物利用率，缓解 FNA 的反馈抑制。稳定的氨氮、磷酸盐梯度，可上调功能基因表达，提升能量合成效率；反之则会限制菌体代谢。盐度与离子强度梯度通过影响渗透压、细胞膜通透性，调控菌体存活与增殖，耐盐菌种可通过自身调节适应高盐环境。界面污染物达到阈值后，会损伤菌体结构、抑制酶活，甚至引发细胞死亡。

界面梯度驱动菌群互作，进而引发群落演替。协同互作是核心模式：亚硝化单胞菌为厌氧氨氧化菌 (Anammox) 提供 NO_2^- ，构建短程硝化 - 厌氧氨氧化工艺，大幅降低能耗；菌体氨氧化过程提升溶解氧，助力聚磷菌好氧吸磷，实现脱氮除磷协同。竞争互作主要体现在与亚硝化古菌(AOA)竞争氨氮、与聚糖菌(GAOs)竞争磷源，低氨环境下 AOA 占优，高氨环境下亚硝化单胞菌占优，GAOs 过量增殖会造成菌体营养限制。抑制互作表现为反硝化菌产生的 N_2O 、硫化菌产生的 H_2S ，分别抑制 HAO、AMO 酶活性。此外，厌氧绳菌科等伴生菌可降解有害物质、供给营养，减轻菌体代谢压力，维持群落稳定。

5. 亚硝化单胞菌的强化技术与工程应用

5.1. 菌株改良与功能强化

基因工程改造通过 CRISPR-Cas9 介导 *amoA* 基因过表达，可使氨氧化速率提升 40%~60%；导入耐盐基因(*betA*)，能显著增强高盐废水适配性。驯化筛选是获得耐逆菌株的有效手段，梯度胁迫驯化(高氨、高盐、低温)可显著提升菌株耐受性，如低温驯化菌株在 5℃ 下氨氧化速率提升 2 倍，高氨驯化菌株耐受氨氮浓度达 500 mg/L。合成生物学设计通过人工构建“亚硝化单胞菌-Anammox 菌”代谢通路，优化 NO_2^- 传递效率，强化短程硝化 - 厌氧氨氧化协同。此外，从污染水体中筛选土著亚硝化单胞菌并进行驯化，可提升其在实际水体中的适应能力与脱氮效果。

5.2. 工艺调控与强化策略

环境因子精准调控是核心工艺优化方向，短程硝化工艺中 DO 浓度控制在 0.8~1.2 mg/L，pH 维持 7.8~8.2，通过 FA/FNA 调控(FA = 0.1~1 mg/L)抑制硝化杆菌，富集亚硝化单胞菌。预处理耦合技术包括高级氧化(UV、Fenton)降解有机抑制剂，提升亚硝化单胞菌活性；超声预处理破碎污泥絮体，促进氨氮传递。载体固定化技术中，生物炭、石墨烯负载亚硝化单胞菌可提升菌群滞留率 30%~40%；海藻酸钠 - 聚乙烯醇包埋固定，能增强抗冲击能力。此外，在曝气池前增设调节池可稳定进水氨氮浓度，减少水质波动对亚硝化单胞菌的冲击。

5.3. 典型应用场景

图 3 为短程硝化 - 厌氧氨氧化等典型工艺的流程图，在市政污水处理中，短程硝化 - 厌氧氨氧化工艺(亚硝化单胞菌 + Anammox 菌)处理市政污水，氨氮去除率 > 95%，能耗降低 50%；MBR 反应器中生物膜富集亚硝化单胞菌，处理尾水氨氮 < 0.5 mg/L。工业废水处理方面，高氨煤化工废水(氨氮 1000~5000 mg/L)采用两段式工艺(亚硝化单胞菌预处理 + Anammox 深度处理)，氨氮去除率 > 90%；高盐海产品加工废水(盐度 5%~8%)采用耐盐亚硝化单胞菌 + 盐单胞菌复合体系，氨氧化速率达 0.8 kgN/(m³·d)。自然

水体修复中，湖泊富营养化治理可原位投加固定化亚硝化单胞菌，将水体氨氮浓度从 5~10 mg/L 降至 < 1 mg/L；地下水氨污染修复通过注射亚硝化单胞菌与溶解氧，实现原位氨氧化。此外，亚硝化单胞菌在畜禽养殖废水处理中也展现出良好应用前景，菌株 AH-7 在稀释灭菌养殖废水中 5 天氨氮降解率达 92.59%。

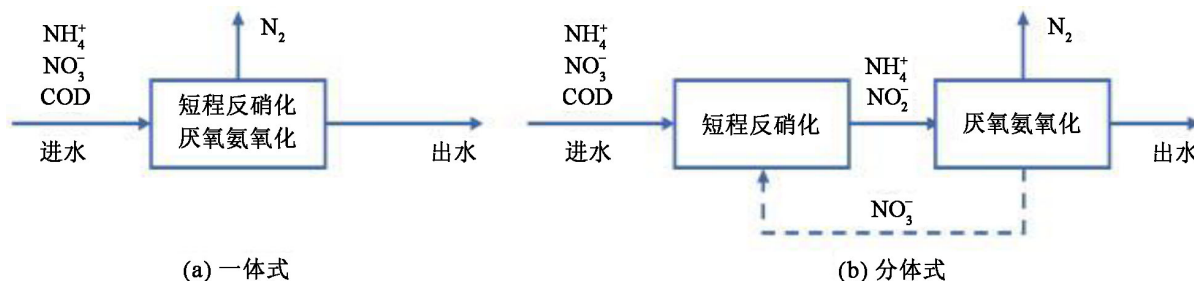


Figure 3. Flowchart of typical processes such as short-cut nitrification-anaerobic ammonium oxidation
图 3. 短程硝化 - 厌氧氨氧化等典型工艺的流程

6. 研究挑战与未来展望

6.1. 当前研究瓶颈

机制解析层面：极端水环境(<5℃低温、>10%高盐、高毒)下，亚硝化单胞菌的酶活性调控、细胞膜流动性维持等耐逆机制不明；复合污染物(抗生素 + 重金属)协同抑制路径(如基因抑制与细胞膜损伤叠加效应)解析不足，N₂O 排放的分子调控路径(如 nos 基因表达、电子传递链关联)未完全阐明。

技术应用层面：水质波动(氨氮骤升、pH 突变)易致亚硝化菌群崩溃，抗冲击调控技术不成熟；耐逆菌株规模化培养需复杂条件、成本偏高；短程硝化中 FNA 抑制浓度受多参数协同影响，精准调控难度大。

检测评估层面：低丰度(<1%)亚硝化单胞菌快速定量检测(现有 qPCR 灵敏度不足)、AMO 活性原位监测技术不成熟；与 AOA、Comammox 的生态位竞争机制(如不同氨氮、DO 条件下优势切换)不清，缺乏复合脱氮系统优化依据。

6.2. 未来发展方向

机制深化：结合宏基因组、转录组等多组学技术，解析极端环境下耐逆相关基因(EPS 合成、离子泵基因)调控路径；利用 AFM、XPS 技术揭示界面吸附、EPS 微观结构等界面调控机制；探索亚硝化单胞菌与噬菌体互作，为菌群稳定提供支撑。

技术创新：合成生物学构建多功能工程菌(导入氨氧化与污染物降解基因)，实现脱氮与净化协同；AI 辅助调控采用随机森林、神经网络模型，基于宏观、界面、微生物三类监测数据，预测反应效率、FNA 抑制及菌群崩溃风险，输出 DO、pH 等精准调控参数；利用玉米秸秆等农业废弃物改性制备低成本生物炭载体，提升菌体吸附能力。

应用拓展：研发亚硝化-MFC 耦合技术，实现脱氮与产能协同；推动短程硝化 - 反硝化工艺规模化应用，适配低碳源污水；开发耐逆复合菌剂，用于湖泊、河流等自然水体氨氮原位修复。

标准建立：制定亚硝化单胞菌菌剂性能评估标准(明确活菌量、氨氧化速率等核心指标)；建立 AMO 活性、代谢速率原位检测规范，确保检测结果准确可比。

7. 结论

亚硝化单胞菌作为水环境氨氧化的核心功能微生物，其代谢活性与群落稳定性直接决定氮循环效率

与脱氮工艺效能。本文从水环境化学视角,系统总结了亚硝化单胞菌的分类分布、代谢机制、环境调控规律及强化技术,明确了水环境化学参数(pH、DO、盐度)与界面作用对其的核心调控作用。该类菌群通过 AMO、HAO 等关键酶介导的氨氧化反应,在市政污水、工业废水、自然水体修复等场景中展现出显著应用价值,其强化技术(菌株改良、工艺调控、载体固定化)为低碳脱氮提供了有效解决方案。当前研究仍面临极端环境适配性、工程化稳定性等瓶颈,未来需通过多学科交叉(微生物学、水环境化学、合成生物学、AI 技术)深化机制研究与技术创新,推动亚硝化单胞菌在低碳脱氮与水环境修复中的规模化应用,为全球氮循环调控与水环境保护提供高效解决方案。

参考文献

- [1] 郭万茹. 脱氮微生物选育优化及其在黑臭水体修复中的应用[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [2] 朱海东, 朱卫兵. 污水处理新型生物脱氮工艺研究进展[J]. 应用化工, 2026, 55(1): 171-174+179.
- [3] 耿宏, 任峻明, 周文明, 等. 氨氧化微生物的生理代谢机制及在水处理系统中的分布研究进展[J]. 工业水处理, 2025, 45(6): 88-97.
- [4] 陈亚平, 叶宏, 王娟. 亚硝化单胞菌的分离鉴定及其降解特性的研究[J]. 环境科学与技术, 2007(9): 24-25+35+116.
- [5] 刘志培, 刘双江. 硝化作用微生物的分子生物学研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2004(4): 521-525.
- [6] 孙昊飞, 李家麟, 孙召强, 等. 泥膜共生体系强化高氨氮工业废水短程硝化厌氧氨氧化脱氮的中试研究[J/OL]. 环境工程, 1-17. <https://link.cnki.net/urlid/11.2097.X.20250903.0922.006>, 2026-01-06.
- [7] 孙宏, 张恒, 王新, 等. 畜禽养殖废水来源的自养氨氧化菌筛选及氨氮去除效果研究[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(9): 171-176.
- [8] 王碧军, 闫心, 付月宝. 生物脱氮原理与研究进展[J]. 天津化工, 2025, 39(6): 13-15.
- [9] 付昆明, 廖敏辉, 任奕, 等. 污水短程硝化影响因素的对比分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 24-29.
- [10] 李小鹏, 张代均, 曹琳, 等. 氨氧化菌在污水生物处理中的作用[J]. 中国给水排水, 2004(5): 24-27.
- [11] 何志仙. 污水生物脱氮过程中 N₂O 的产生与相关酶活性研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [12] 张舰艇, 豆全浩, 张莉. 基于微生物互作的厌氧氨氧化工艺富里酸降解机制研究[J]. 环境科学研究, 2025, 38(12): 2746-2755.
- [13] 张婷, 张亮, 张璐晶, 等. 短程反硝化厌氧氨氧化生物膜技术在分散式污水处理的应用研究[J]. 给水排水, 2025, 61(5): 49-54+60.