

多因素联合富集AOB抑制NOB促进亚硝酸盐积累的研究

环境工程2102班：王雅婷 指导教师：于恒 论文类型：毕业论文

摘要：本研究选取“细菌前置饥饿、游离氨、游离亚硝酸”作为核心调控因素，系统开展不同处理时间与组合方式的活性抑制实验，探究多因素协同调控对菌群活性的影响。结果表明：前置饥饿（24 h）+FA（1 h）+FNA（1 h）的组合处理策略效果最优，可使AOB/NOB活性比值从初始的0.633显著提升至20.9，亚硝态氮积累量达到峰值，同时污泥沉降性能良好，在低温低氨氮条件下实现了NOB的高效抑制与AOB的高效富集，达成亚硝酸盐的稳定且高效积累目标。

关键词：氨氧化细菌；亚硝酸盐氧化细菌；游离氨；游离亚硝酸；饥饿

1 研究背景

1.1 我国水体污染现状

随着我国经济快速发展，工业化与城市化进程加速，污水排放量激增，水体氮、磷污染问题严峻。2023年《中国生态环境状况公报》显示，全国3632个地表水国控断面中，7%为劣V类水质，氮素污染引发水体富营养化、溶解氧消耗及黑臭水体等问题，威胁生态环境与人体健康。我国市政污水普遍呈现低温、低氨氮特性，2020年城市污水处理厂虽达97.53%的处理率，但一级A标准氨氮指标（≤5 mg/L）与地表V类水标准（≤2.0 mg/L）仍有差距，亟需高效脱氮工艺。

1.2 生物脱氮工艺研究现状

生物法因成本低、二次污染少成为主流脱氮技术，但传统硝化-反硝化工艺存在能耗高、碳源需求大等问题。短程硝化-反硝化可节约50%曝气量和63%碳源，厌氧氨氧化(ANAMMOX)无需曝气和外加碳源，是极具潜力的节能工艺。然而，亚硝态氮(NO_2^- -N)作为厌氧氨氧化的关键基质，在低温低氨氮条件下难以稳定积累，NOB与AOB的共生关系及单一调控因素的局限性(如温度、pH调节成本高)制约了工艺稳定性。

2 发展现状

2.1 短程硝化工艺研究进展

1975年Voets首次发现硝化过程中亚硝酸盐积累现象，短程硝化技术通过抑制NOB活性，将硝化控制在亚硝酸盐阶段。与传统工艺相比，其曝气量和碳源需求显著降低，但自然水体中AOB与NOB共生，需通过温度、溶解氧(DO)、游离氨

(FA)、游离亚硝酸 (FNA) 等因素调控实现亚硝酸盐积累。

2.2 短程硝化工艺影响因素

温度：AOB 与 NOB 酶活性对温度适应性不同，12-14°C时 NOB 活性受抑，25-35°C时 AOB 生长速率为 NOB 两倍，高温下短污泥龄可促进亚硝酸盐积累。

溶解氧：AOB 对氧亲和力强（饱和常数 0.25-0.28 mg/L），低 DO (<0.5 mg/L) 可抑制 NOB，但单一 DO 无法彻底抑制。

游离氨与游离亚硝酸：FA ($\geq 10.1 \text{ mg/L}$) 通过改变 NOB 胞内 pH 抑制其活性，FNA ($>0.2 \text{ mg/L}$) 可完全抑制 NOB。但 NOB 对 FA 有适应性，单一因素效果有限。

饥饿处理：AOB 以氨氮为底物，NOB 依赖 CO₂，饥饿条件下 NOB 代谢活性下降，AOB 维持生存优势。前置饥饿可增强对 NOB 的抑制效果。

2.3 多因素联合抑制 NOB 富集 AOB 研究现状

单一因素难以长期稳定控制亚硝酸盐积累，多因素联合调控成为研究热点。彭永臻团队通过 FA 与 DO 联合，在中试规模反应器中实现 450 天稳定短程硝化，亚硝态氮积累率超 98.1%。吕鑑等通过温度 (9-20°C)、DO (5.4 mg/L) 和污泥龄 (30 天) 协同，在 A/O 反应器中实现 70% 的亚硝态氮积累率。

3 相关分析

3.1 实验设计与方法

选取前置饥饿、FA、FNA 作为核心调控因素，采用人工配水 (80 mg/L NH₄⁺-N, 300 mg/L COD) 和实验室硝化污泥 (MLSS 3000 mg/L)，通过批次实验优化处理时间与组合方式。设置前置饥饿 (24 h) +FA (24 h/1 h / 瞬时) +FNA (24 h/1 h / 瞬时) 组合，以及 FA+FNA 与 FNA+FA 顺序处理，测定氨氮、亚硝态氮、硝态氮浓度及 AOB/NOB 活性。

3.2 结果与分析

3.2.1 处理时间优化

24 h 处理组：氨氮和亚硝态氮浓度稳定且高，硝态氮浓度低，表明 NOB 与 AOB 活性被完全抑制。

瞬时处理组：氨氮消耗显著，硝态氮后期快速升高，FA 与 FNA 瞬时处理未有效抑制微生物活性。

1 h 处理组：氨氮持续下降，亚硝态氮先降后升，硝态氮维持低水平。AOB/NOB 活性比值从 0.633 提升至 20.9，前置饥饿 + FA (1 h) + FNA (1 h) 组合有效抑制 NOB 且保留 AOB 活性。

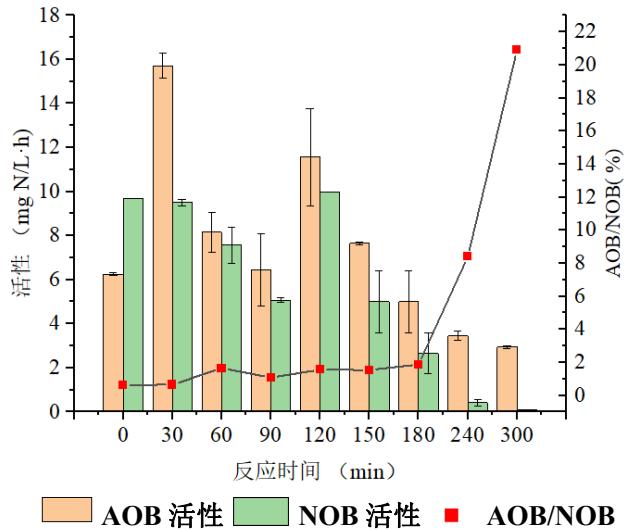


图 3.1 前置饥饿 (24 h) +FA (1 h) +FNA (1 h) 组合处理后 AOB、NOB 活性变化示意图

3.2.2 处理方式优化

FA+FNA 组合：NOB 活性先升后降，AOB 活性相对稳定，AOB/NOB 比值提升至 11.9，亚硝态氮积累峰值出现在 120 min，硝态氮增量仅 9.45 mg/L，污泥沉降性能良好。

FNA+FA 组合：NOB 与 AOB 活性抑制程度相近，比值仅从 0.715 升至 1.512，亚硝态氮积累差，硝态氮增至 35.27 mg/L，污泥沉降性能恶化。

4 研究结论及对策建议

4.1 研究结论

1. 最佳调控策略：前置饥饿 (24 h) +FA (1 h) +FNA (1 h) 组合可使 AOB/NOB 活性比值提升至 20.9，亚硝态氮积累达到峰值，同时污泥沉降性能良好，解决了低温低氨氮条件下 NOB 抑制与 AOB 富集的难题。

2. 作用机制：前置饥饿改变微生物代谢状态，FA 抑制 NOB 酶活性，FNA 进一步强化抑制，三者协同减少亚硝态氮向硝态氮的转化，实现亚硝酸盐高效积累。

4.2 对策建议

1. 工程验证：本研究仅基于实验室批式实验，建议在中试规模污水处理系统中验证前置饥饿 + FA+FNA 组合的稳定性，考察实际污水成分（如有机物、重金属）对效果的影响。

2. 宏基因分析：开展微生物群落结构与功能基因研究，揭示 AOB 与 NOB 在多因素调控下的丰度变化及代谢路径，为精准调控提供分子生物学依据。

3. 参数动态调控：根据进水氨氮浓度实时调整 FA/FNA 投加量与处理时间，避免过长处理时间对 AOB 的过度抑制，可结合在线监测 DO、pH 值实现精准调控。