

低碳氮比废水自养生物脱氮工艺研究进展

文 / 王 星 上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司合肥分公司

摘要：鉴于传统生物脱氮工艺对碳源的依赖性，其发展面临许多现实问题。为此，自养生物脱氮技术，特别是自养反硝化和厌氧氨氧化技术，成为处理低碳废水的一项颇具潜力的替代策略。本文对自养反硝化和厌氧氨氧化的自养生物脱氮工艺的研究进展进行了全面综述，并探讨了其面临的挑战。剖析了当前工艺应用与操作中的关键要素，从功能微生物的种类及其生理学特性出发，对该过程进行了微观解析。同时，文章分析了现有研究的局限，并展望了未来研究的重点方向。所积累的知识将为自养生物脱氮工艺的实际应用与优化提供宝贵的见解，助力构建高效节能的废水处理与脱氮新系统。

关键词：自养生物脱氮；自养反硝化；厌氧氨氧化技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.113

引言

城市生活污水在汇入下水道之前，通常会经历化粪池的初步处理，降低了污水中的有机物浓度，减轻后续污水处理厂的处理压力。雨水以及地下水等其他水源的混入，污水系统内污染物被稀释，进而减少了抵达污水处理厂有机物的总量。当前，很多地方城市，尤其是一些工业区的污水特点表现为化学需氧量浓度较低，而氮、磷浓度较高，碳氮比（C/N）偏低。这种低碳氮比的污水处理难度较高，往往需要投入很多额外成本才能达到排放标准。因此，寻求减少氮磷排放、更为节能高效的处理工艺成为污水处理一种发展趋势。

在常规生物废水处理过程中，氮和磷的去除往往分别进行。氮的去除主要通过硝化和反硝化作用实现，而磷的生物去除则依赖于厌氧磷释放和好氧/缺氧磷吸收过程。在反硝化和厌氧磷释放过程中，有机碳作为电子供体是必不可少的。然而，对于低碳氮比（C/N）的废水，由于碳源有限，微生物的代谢过程受到碳源不足的限制，导致反硝化和磷释放过程中的电子供体不足，进而影响了N和P的完全去除效率。虽然通过添加额外碳源和增加曝气可以提升氮、磷的去除效率，但这会显著增加废水处理的成本。同时，在传统的污水处理厂中，曝气能耗通常占总能耗的60%，而污泥处理能耗约占运营成本的15%-25%。显然，对于低碳氮比的废水处理，传统的硝化/反硝化工艺难以满足氮和磷的去除率要求。

与传统的异养反硝化工艺相比，自养反硝化技术具有较低的污泥产量和较高的简单元素/离子利用率。这种工艺能够利用氮源和电子供体，如硫化物、硫氰酸盐、氢气等，来去除废水中的氮。

近年来，在环境工程领域，一项创新的生物脱氮技术——厌氧氨氧化（Anammox）——的成功研发引起了广泛关注^[1]。该技术的研究已从实验室阶段跨越至大规模渗滤液处理等实际应用领域，并取得了丰硕的成果。

面对全球能源危机和资源短缺的挑战，污水处理厂的未来发展不仅应强调污染物的高效去除，还应遵循可

持续发展和低碳减排的原则。污水处理厂甚至可以被视为能源和物质回收的关键平台。本文以低碳氮比废水的脱氮处理工艺为对象，介绍了自养反硝化工艺和厌氧氨氧化工艺及其组合工艺的研究进展和应用情况，旨在推动低碳氮比废水的低成本和高效处理技术的发展。

一、自养反硝化脱氮

自养反硝化菌能够利用多种电子供体进行代谢活动，这些供体包括硫、氢气、硫化物、硫氰酸盐、硫代硫酸盐、亚硫酸盐、金属元素及其离子等。在这些微生物中，自养反硝化菌的生物量产量普遍低于其异养同族，这一特性在污泥处理中具有优势，因为它减少了污泥产生量，从而降低了处理成本。然而，需要注意的是，金属元素和离子以及硫及其化合物在特定条件下可能会产生有害的化学物质^[2]。

硫化物（ S^{2-} ）的形态多样性表现为分子硫化氢（ H_2S ）、离子硫化氢（ HS^- ）或自由硫化物（ S^{2-} ），其具体形态取决于环境条件。这种物质因其毒性、腐蚀性特征及特有的恶臭气味，对生态系统构成了显著的威胁。在硫化物浓度增高的环境中，微生物包括自养反硝化菌等关键微生物的消费者，往往会遭受抑制效应。

自养反硝化过程中，亚硝酸盐和亚硝酸根参与对硫化物的完全氧化和部分氧化。研究表明， S^{2-} 的还原程度受其浓度影响，浓度过高时会导致单质硫（S）的生成。在硫的化合物中，相较于单质硫和硫化物离子，硫代硫酸盐离子的消耗速率更快，这可能是由于硫代硫酸盐离子相对于有毒的硫化物离子来说更容易获取且不具有毒性，而单质硫因传质障碍而不易被微生物所摄取。值得注意的是， NO_3^- 的还原过程是一个多阶段过程，包括将其首先还原为 NO_2^- ，然后进一步将 NO_2^- 还原为 N_2 气体^[3]。

氨基自养反硝化反应的可行性已被证实。在这一过程中，反硝化微生物将氢气（ H_2 ）作为电子供体，将硝酸根离子（ NO_3^- ）还原为氮气（ N_2 ）。氢气的生成途径多样，既可通过电化学过程实现，例如在氰化物生物降解过程中，也可源自生物代谢活动。

在环境微生物生态系统中，已确认存在多种能够进行硫化反硝化作用的微生物，其中包括反硝化硫杆菌属、泛嗜副球菌属、反硝化副球菌属、反嗜副球菌属、硫杆菌属以及贝吉托菌属等。值得注意的是，这些反硝化微生物中，部分属于严格化能自养型，而另一些则为兼性自养型。

二、厌氧氨氧化脱氮

(一) 厌氧氨氧化 (Anammox)

厌氧氨氧化 (Anammox) 过程广泛存在于湿地、湖泊、海洋等自然生态系统中，构成了自然氮循环的关键环节。该过程的发现不仅颠覆了传统观念，即反硝化是自然界中去除无机氮的唯一途径，而且为废水处理领域带来了革命性的概念创新和技术突破。Anammox 细菌，作为一类自养型专性厌氧微生物，利用二氧化碳作为碳源，且无需氧气和有机碳源^[4]。图1展示了 Anammox 工艺的微生物学机理，该过程严格遵循电子供体→微生物→电子穿梭→电子受体的电子传递途径^[5]。

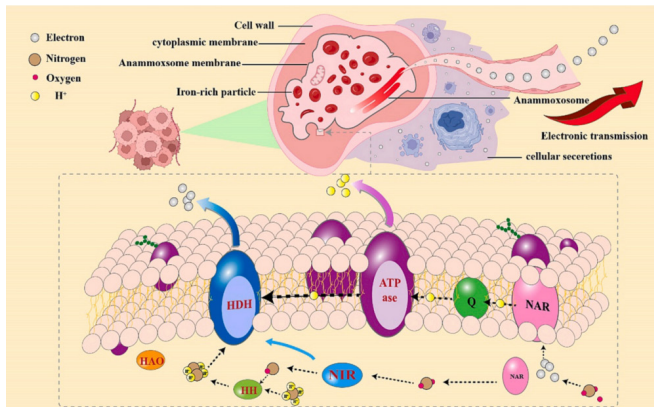


图1 厌氧氨氧化中电子传递机理^[5]

相较于传统脱氮工艺，Anammox 技术能够显著降低曝气能耗约 60%，并完全消除有机碳源的使用，同时有效避免二次污染。Anammox 技术具有污泥产量低、能耗低、氮去除效率高、操作稳定等优点，是一种典型的生物脱氮技术，符合可持续发展的要求。该工艺在深度去除城市污水中难降解氮素方面具有巨大潜力，且在污水处理领域展现出广阔的应用前景。

(二) 部分硝化-厌氧氨氧化 (PN-A) 工艺

部分硝化-厌氧氨氧化 (PN-A) 过程涉及两个关键步骤，(1) 在好氧条件下，氨氮经历部分硝化作用，导致亚硝酸盐的累积；(2) 剩余的氨氮随后在厌氧氨氧化过程中被亚硝酸盐氧化为 N₂。与传统的脱氮工艺相比，PN-A 工艺能够实现约 60% 的曝气耗气量节省，并且不依赖于外加碳源。硝化过程的成功实施依赖于溶解氧 (DO) 的精确控制。通过将 DO 维持在 0.15 ~ 0.18mg/L，可以有效抑制亚硝酸盐氧化菌的活性，长期运行下 PN-A 系统的氮去除率可达 70%。间歇式曝气策略可为控制 DO 供了有效途径。同时，DO 在线控制技术的应用为 PN-A 过程

的优化提供了保障，并在我国进行了中试规模的验证^[6]。

总体而言，PN-A 工艺已被广泛证实为一种利用厌氧氨氧化技术有效去除主流废水中氮素的可行策略。然而，要实现 PN-A 工艺的广泛应用，尚需积累丰富的工程实践经验。此外，开发能够长期稳定实施的亚硝酸盐氧化菌选择性抑制策略，仍是目前技术发展中的一个关键挑战，且被视为未来研究的重要方向。

(三) 部分反硝化-厌氧氨氧化 (PD-A) 工艺

PD (亚硝酸盐阶段反硝化控制) 工艺为厌氧氨氧化技术在主流废水氮素去除中的应用开辟了新的可行路径。PD 工艺涉及在亚硝酸盐阶段对反硝化作用的调控，此阶段不仅为厌氧氨氧化提供底物，还消耗由厌氧氨氧化过程生成的硝酸盐 (占比 11%)。与传统的生物硝化-反硝化工艺相比，PD-A 工艺显著降低了曝气需求 (节省 100%)、减少了外部碳源使用 (节省 80%) 以及降低了污泥产量 (减少 64%)。在中国西安已成功建成一座基于 PD-A 工艺 (处理能力为 250000t/d) 的规模化污水处理设施，充分展示了 PD-A 工艺在主流废水氮素去除方面的巨大应用潜力。COD/N 比是 PD-A 工艺设计中的关键参数，高 COD/N 比值有利于实现完全反硝化，从而增加厌氧氨氧化菌在 PD-A 系统中有效去除氮的可能性。

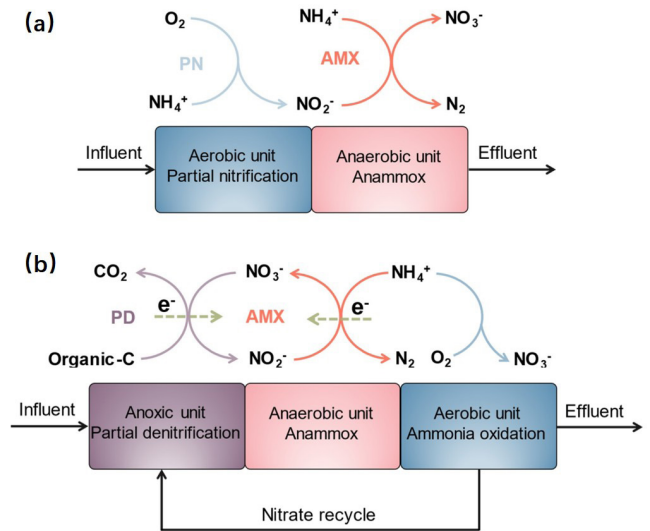


图2 部分硝化-厌氧氨氧化 (a) 和部分反硝化-厌氧氨氧化 (b) 工艺示意图^[7]

鉴于厌氧氨氧化菌作为自养微生物，其生长速率显著低于好氧细菌，因此，确保生物质浓度，尤其是厌氧氨氧化相关生物物质的浓度，对于 PD-A (亚硝酸盐阶段反硝化控制) 工艺的稳定运行至关重要。此外，碳源的可生物利用率是影响 PD-A 工艺性能的关键参数。尽管 PD-A 工艺在低碳废水氮素去除方面展现出显著潜力，但在厌氧氨氧化菌与好氧菌生态位平衡的调控方面，仍存在知识上的空白，这应成为未来研究的焦点。

三、自养生物脱氮应用的未来前景

尽管近年来自养生物脱氮工艺在低碳废水处理领域的应用日益受到重视,并取得了一定的进展,但在其广泛推广和基础机制的理解方面,仍存在诸多挑战尚未克服。以下列举了该应用过程中遇到的若干关键瓶颈及其潜在解决方案:

(1) 功能菌的富集。自养细菌的缓慢生长特性虽然有助于减少残留污泥的生成,但同时这一特性也使得它们在废水处理系统中容易受到淘汰压力。未来的研究应当集中于解析自养细菌的聚集行为及其富集机制,深入探究生物膜和颗粒污泥的形成机理,并为这些复杂过程提供微观层面的解释和操作指导。

(2) 群落相互作用。在同步好氧-厌氧生物处理与厌氧氨氧化等工程应用中,功能微生物群落普遍伴随伴生微生物群落的共生现象,然而,这些伴生微生物群落的生态功能和潜在生态学意义往往未能得到充分重视。通过分析这些互作对过程性能的影响,可以为优化群落结构和提升整体功能奠定坚实的理论基础和实践指导。

(3) 代谢途径。尽管氨氧化菌和厌氧氨氧化细菌的核心代谢途径已被阐明,但在代谢多样性和代谢网络耦合方面,仍存在显著的认知缺口。随着分子生物学技术的进步,包括宏基因组学、亚转录组学、蛋白质组学等先进技术,在厌氧氨氧化和同步好氧-厌氧生物处理系统中,揭示了更多未知的代谢途径。这些发现为该工艺在推广应用以及新技术的研发提供了重要的理论支持和科学依据。

(4) 营养条件建设。自养条件的构建构成了自养生物氮还原过程的关键前提。尽管已验证一些策略,如多硫化物的调控等,但这些策略的长期稳定性尚需进一步优化。在厌氧氨氧化领域,污水处理系统中亚硝酸盐的稳定供应问题依然存在。此外,可以考虑多种亚硝酸盐供应技术的集成应用,因为已有研究指出,微生物群落结构的多样性有助于维持系统的整体宏观稳定性。

(5) 关键参数。在先前讨论的关键工艺参数,如pH、温度、底物浓度比等的基础上,有必要对各种参数对工艺性能的综合效应进行深入研究。此外,探索能够更精确反映生物处理系统原位状态的有效参数亦至关重要。

(6) 环境条件。功能性微生物的生物活性与环境参数紧密关联,其中不仅包括pH、温度等传统环境因子,还应当重视由低碳废水中特定污染物引起的条件变化,如抗生素、重金属、盐度等特征性污染物。这些污染物的存在对微生物活性产生显著影响,因此在评估工艺性能的同时,必须关注特征污染物的迁移转化路径,以防止二次污染的发生。在自养生物氮还原系统中,环境条件的空间异质性往往被低估,然而,反硝化作用的空间

分布以及微生物群落结构的差异性客观存在的。因此,在研究功能性细菌的空间分布和相互作用的同时,深入探究环境条件,对于设施的设计和优化至关重要。

传统污水处理设施向环境中排放大量的温室气体,如以CO₂为主的温室气体,对全球气候变化产生了负面影响。而自养生物脱氮技术在降低温室气体排放(包括CO₂和N₂O)方面展现出显著的优势。因此,自养生物脱氮技术在推动全球污水处理行业的可持续发展方面展现出巨大的应用潜力和战略意义。

结语

本文对自养生物脱氮过程的研究进展及所面临的挑战进行了系统性的综述,重点涵盖了自养反硝化和厌氧氨氧化等关键工艺。该技术为低碳废水的处理开辟了一条极具潜力的途径。鉴于主流城市污水中碳源不足的问题,可以考虑实施自养反硝化、部分硝酸盐氨氧化(PN-A)和完全硝酸盐氨氧化(PD-A)等先进工艺。此外,由于自养细菌的增殖速率较慢,这些工艺有助于最大限度地降低剩余污泥的产量。提升工艺的稳定性与效率仍是当前亟待解决的问题。为优化自养生物脱氮工艺,建议深入研究功能微生物的群落动态演替及其代谢途径,以提供理论支持。为了促进该技术的推广应用,积累工程实践经验并获取关键运行参数将成为未来研究的焦点。总结而言,在碳减排和可持续发展的大背景下,自养生物脱氮工艺展现出显著的技术优势,理应成为污水处理领域未来发展的关键方向之一。

参考文献

- [1] 盖书慧,张宁,张雁秋.新型脱氮工艺-厌氧氨氧化(ANAMMOX)[J].环境科学与管理,2009,34(04):
- [2] 李文泉,南贵珍,商静静.污水处理厂尾水硫自养反硝化人工湿地脱氮效果[J].净水技术,2023,42(8):94-100
- [3] 宋孟.硫自养人工湿地强化污水厂尾水深度脱氮研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [4] 郑冰玉,张树军,张亮,等.一体化厌氧氨氧化工艺处理垃圾渗滤液的性能研究[J].中国环境科学,2014,34(07):1728-33.
- [5] Statiris, E., Hadjimitsis, E., Noutsopoulos, C., and Malamis, S. (2021). Thiosulphate driven autotrophic denitrification via nitrite using synthetic wastewater. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 96, 1675-1681.
- [6] 武灵瑶.短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理生活垃圾沼液的脱氮特性研究[D].广州:广州大学,2022.
- [7] Zhang, Q.; Xu, X.; Zhou, X.; Chen, C. Recent Advances in Autotrophic Biological Nitrogen Removal for Low Carbon Wastewater: A Review. *Water* 2022, 14, 1101.