

怀磊, 王众, 张守彬, 等. 短程反硝化-厌氧氨氧化工艺的影响因素及研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 17-24, 39.

Huai L, Wang Z, Zhang S B, et al. Research progress and influencing factors of partial denitrification-Anammox processes[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 17-24, 39.

短程反硝化-厌氧氨氧化工艺的影响因素及研究进展

怀磊¹, 王众^{2,*}, 张守彬^{1,*}, 刘勇丽², 崔慧慧³, 刘希平², 夏训峰²

(1. 济南大学土木建筑学院, 山东济南 250022; 2. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012; 3. 生态环境部对外合作与交流中心, 北京 100035)

摘要 【目的】 本文旨在系统梳理短程反硝化-厌氧氨氧化(PDA)工艺的反应机理、影响因素、工艺形式及其在实际工程中的应用现状,明确其技术优势与现存挑战,以期为该工艺的进一步研究与推广应用提供理论依据和方向指导。【方法】 通过文献综述与案例分析相结合的方法,本文深入解析PDA工艺的微生物协同机制,重点分析温度、pH、碳氮比(C/N)等关键因素对工艺效能的影响规律,并对比两段式与一体式PDA工艺的运行特性与适用条件。【结果】 PDA工艺在温度为30~35℃、pH值为7.0~8.5、C/N为2.0~3.0条件下运行效果最佳;两段式工艺操作灵活、适用于多种水质,一体式工艺占地小、成本低但调控难度大。工程实践表明,PDA工艺可实现高效脱氮[总氮(TN)去除率>90%],显著节能降耗。【结论】 通过对PDA工艺的全面综述可知,PDA工艺是一种高效、节能的新型生物脱氮技术,具有广阔的应用前景,但在实际工程中的推广应用仍需解决低温适应性、菌群竞争调控和系统稳定性等关键问题。未来应加强低温菌种开发、碳源精准调控与工程验证研究。

关键词 厌氧氨氧化 短程反硝化 影响因素 工艺形式 微生物

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)05-0017-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.003

Research Progress and Influencing Factors of Partial Denitrification-Anammox Processes

Huai Lei¹, Wang Zhong^{2,*}, Zhang Shoubin^{1,*}, Liu Yongli², Cui Huihui³, Liu Xiping², Xia Xunfeng²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China;

3. Foreign Environmental Cooperation Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035, China)

Abstract [Objective] This paper aims to systematically sort out the reaction mechanisms, influencing factors, process forms, and current application status of the partial denitrification-Anammox (PDA) process, clarifying its technical advantages and existing challenges, with the hope of providing theoretical basis and direction guidance for further research and promotion of this process.

[Methods] By combining literature reviews and case analysis, this paper deeply analyzes the microbial synergistic mechanisms of the PDA process, focusing on the impact of key factors such as temperature, pH, and carbon-to-nitrogen ratio (C/N) on process efficiency, and compares the operational characteristics and applicable conditions of two-stage and integrated PDA processes.

[Results] PDA process operates most effectively under the conditions of a temperature range of 30℃ to 35℃, pH value of 7.0~8.5, and a C/N ratio of 2.0~3.0; the two-stage process is flexible and suitable for various water qualities, while the integrated process has a smaller footprint and lower costs but poses greater difficulty in regulation. Engineering practices indicate that the PDA process can achieve efficient nitrogen removal [total nitrogen (TN) removal rate > 90%], significantly saving energy and reducing

[收稿日期] 2024-08-30

[基金项目] 山东省自然科学基金(ZR2023ME143)

[作者简介] 怀磊(2000—),男,硕士研究生,研究方向为厌氧氨氧化废水脱氮技术,E-mail: 631411680@qq.com。

[通信作者] 王众(1992—),男,助理研究员,主要从事污水生物处理等工作,E-mail: wangzhong@tcare-mee.cn;

张守彬(1980—),男,教授,研究方向为污水生物处理理论与技术,E-mail: cea_zhangsb@ujn.edu.cn。

consumption. [**Conclusion**] Through a comprehensive review of the PDA process, it is evident that PDA is an efficient and energy-saving new biological nitrogen removal technology with broad application prospects, but its promotion and application in practical engineering still need to address key issues such as low-temperature adaptability, microbial competition regulation, and system stability. Future efforts should strengthen the development of low-temperature strains, precise control of carbon sources, and engineering validation research.

Keywords Anammox partial denitrification influencing factor process form microorganism

进入 21 世纪,随着我国城市化进程的迅猛推进,水环境污染问题日趋严峻,其中水体富营养化问题尤为突出。其关键原因在于氮、磷等营养物质的过量排放。以全程硝化-反硝化为核心的传统污水脱氮工艺,普遍存在处理流程冗长、曝气能耗巨大、需额外投加碳源以及运行成本高昂等缺陷,且难以满足日益严苛的污水排放标准,使得高效脱氮成为水处理领域的重大挑战之一。

近年来,厌氧氨氧化技术凭借其在节省曝气能耗与碳源投加、显著削减剩余污泥产量及降低温室气体排放等方面的优势,已成为最具发展前景的新型生物脱氮工艺之一。该工艺的核心反应依赖于亚硝态氮(NO_2^- -N)作为关键底物。然而,常规污水中的 NO_2^- -N浓度通常较低,因此,如何实现污水中 NO_2^- -N的稳定积累成为应用厌氧氨氧化技术的关键前提。

短程硝化与短程反硝化均可作为厌氧氨氧化所需的 NO_2^- -N有效供给途径。其中,短程硝化技术在处理高氨氮废水时能够实现相对稳定的运行,但在以城市污水为代表的低氨氮废水处理中,其短程硝化效果的稳定性则较难维持。相比之下,短程反硝化将硝态氮(NO_3^- -N)不完全还原为 NO_2^- -N,具有调控便捷、效率高且运行稳定等优势,无需实施复杂的控制策略。

越来越多的研究表明,短程反硝化技术以其反应速度快、碳源投加少、污泥产量低、运行稳定性高、适用废水类型广等优势,成为最具研究和应用潜力的厌氧氨氧化过程 NO_2^- -N底物供给技术。目前,短程反硝化与厌氧氨氧化耦合工艺——短程反硝化-厌氧氨氧化(PDA)工艺已在垃圾渗滤液、城市生活污水、制药废水等多种类型的废水处理中得到了成功应用。

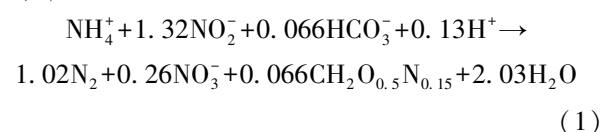
当前,PDA工艺的研究正经历着从实验室小试向中试以及规模化工程应用的快速推进。研究热点高度聚焦于其核心机理与工程化瓶颈问题,主要包

括:(1)功能微生物[如反硝化菌与厌氧氨氧化菌(AnAOB)]的富集策略、相互作用机制及群落结构演替规律;(2)关键工艺参数[如碳氮比(C/N)、温度、pH等]的精准调控及其对亚硝酸盐积累效率和厌氧氨氧化活性的影响;(3)不同工艺构型(两段式和一体式反应器)的适应性、运行效能及长期稳定性比较;(4)复杂水质(如低C/N、低温、含抑制物)条件下的强化策略与抗冲击负荷能力提升^[1]。同时,中试及规模化实践越来越多,尤其是在处理高氨氮废水方面取得了显著进展,为处理主流城市污水在实践方面积累了宝贵经验^[2]。

随着PDA工艺的推广应用,对其工艺影响因素及其作用规律、工艺形式及其工程实践的相关研究日益深入,相关研究成果也越来越多,但针对PDA工艺技术原理、影响因素、工艺形式等进行全面梳理和系统分析的文献还相对较少。鉴于此,本文旨在全面梳理PDA工艺相关文献的基础上,对影响PDA工艺处理效能的各项因素及其作用规律进行全面总结分析,并结合工程应用案例,对比两段式PDA和一体式PDA 2种工艺形式特色及其适用条件,进而探讨PDA工艺的未来发展趋势,以期能为相关学者的研究工作提供有价值的参考^[3]。

1 PDA 工艺的反应机理

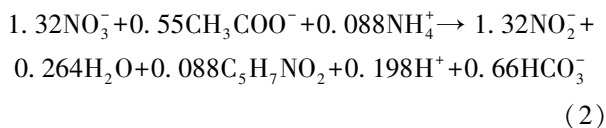
厌氧氨氧化工艺最早于1990年由荷兰代尔夫特理工大学 Kluiver 生物技术实验室开发。该工艺的发现引起了广泛关注,既为废水处理领域带来了新的希望,也对氮循环的理解也产生了深远的影响。其核心反应机理是 AnAOB 会在厌氧或缺氧条件下利用 NO_2^- -N作为电子受体,将氨氮转化为氮气(N_2)并部分生成 NO_3^- -N的过程^[4]。其反应方程式如式(1)。



根据厌氧氨氧化的反应方程式可知,厌氧氨氧

化反应只消耗二氧化碳(CO₂)和碳酸氢根(HCO₃⁻),无须外加碳源,能够有效地节约成本,并且不产生一氧化二氮(N₂O)和碱性物质,能够防止温室气体的产生^[5]。

短程反硝化的反应机理是异养反硝化菌以有机物为电子供体,通过控制溶解氧的浓度来抑制硝化细菌的活性,将NO₃⁻-N的还原过程控制到以NO₂⁻-N为最终产物,不进行进一步还原,在系统中形成NO₂⁻-N积累的现象^[6],其反应方程式如式(2)。



PDA工艺的核心在于高效协同异养反硝化菌与自养AnAOB,在缺氧条件下,使异养反硝化细菌以有机物为电子供体,将NO₃⁻-N转化为NO₂⁻-N,随后,产生的NO₂⁻-N和进水中的氨氮共同作为AnAOB的底物通过厌氧氨氧化反应实现高效脱氮^[7]。在微生物学层面的协同机制包括:(1)短程反硝化菌群为AnAOB提供必需的电子受体(NO₂⁻-N);(2)AnAOB消耗NO₂⁻-N减轻了对短程反硝化菌群的潜在抑制,并利用其产生的部分NO₃⁻-N作为短程反硝化的底物形成内循环;(3)在空间结构上(尤其在生物膜或颗粒污泥中),2类菌群可形成紧密的微生态互作关系,促进底物传递与代谢互补^[8]。PDA反应机理如图1所示。

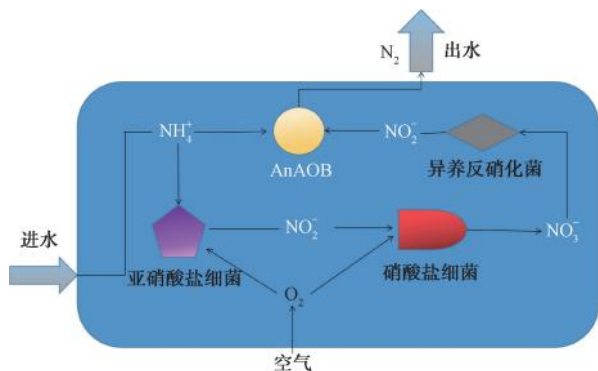


图1 PDA反应机理

Fig. 1 Mechanism of PDA Reaction

2 影响因素

PDA工艺的高效稳定运行依赖于对多种环境与操作参数的精准调控。这些因素不仅直接影响关键功能微生物(AnAOB和反硝化菌)的活性、生长速率及代谢途径选择,还深刻影响着两者之间复杂的

相互作用关系。温度、pH、C/N以及微生物群落的结构与功能,共同构成了决定PDA脱氮效能的核心变量。深入理解各因素的影响规律及其相互作用,是实现工艺优化和工程应用的基础^[9]。

2.1 温度

温度是影响PDA过程的重要因素,AnAOB和反硝化菌的活性都会受到环境温度的影响。有研究^[10]指出,废水中AnAOB的最佳生长繁殖温度为30~40℃,温度过高或过低均会抑制其生命活动,甚至导致其活动的停止。反硝化细菌的最佳生长温度为20~35℃,温度的极端变化可能会导致反硝化细菌细胞膜的物理结构发生变化^[11]。对于短程反硝化过程,其温度的适应范围更广,为10~35℃,在适宜温度范围内随温度升高,反硝化速率逐渐增加。温度的变化对于NO₂⁻-N的积累影响较小,在10~30℃内其最高硝酸盐转化率(NTR)均维持在90%以上^[12]。

关于PDA工艺,目前大量研究^[13]表明其最适温度为30~35℃。虽然高温和低温情况下会严重抑制AnAOB和反硝化菌的活性,但这仍不能满足PDA在多种环境情况下的应用与需求。Zhang等^[14]通过提高盐度浓度的方法来提升厌氧微生物的热稳定性,成功将PDA工艺的适宜温度拓宽至40~50℃。近年来,越来越多的研究者将目光聚焦于中低温环境下PDA工艺优化的研究。Cheng等^[15]对城市河道污泥的对比试验表明,厌氧氨氧化反应速率在冬季呈现显著优势,而反硝化过程则在夏季表现出更高效率,这种季节性的差异为2种工艺的耦合应用提供了新的可能。并且,深入研究发现,当环境温度降至13℃以下时,固定化生物膜体系内的AnAOB仍能维持基础代谢活性,而悬浮态菌群在15℃时即出现活性抑制现象,揭示了生物膜厚度与低温耐受性存在正相关关系。Lotti等^[16]通过系统研究证实,在15~25℃的中低温,厌氧氨氧化与短程反硝化的协同作用可维持稳定效能。虽然自然界内已发现存活于极端低温或高温环境下(85℃和2℃)的AnAOB,但其关键酶活性在非适温条件下均呈现显著衰减的趋势^[17]。因此,探究酶活性与厌氧氨氧化及反硝化耦合的最佳温度条件仍然是一个亟待深入的课题。

2.2 pH

pH是影响PDA过程的重要因素。在反硝化过

程中,反硝化菌和亚硝酸盐还原酶(Nir 酶)都会受到 pH 的影响,当环境中的 pH 较高时,会抑制 Nir 酶的活性,而 Nir 酶是反硝化过程的关键酶,负责将 NO_3^- -N 还原为 NO_2^- -N,从而影响反硝化过程中 NO_2^- -N 的积累。厌氧氨氧化过程的效率受到 pH 的显著影响,主要体现在其对反应底物以及微生物酶系统的活性调控上。此过程的理想 pH 值为 7.5~8.0,超出此范围,无论是过高还是过低,均会导致厌氧氨氧化反应的活性显著下降,进而产生抑制效应^[18]。

PDA 工艺的最适宜 pH 值为 7.0~8.0, AnAOB 的最适 pH 值为 6.7~8.3,对于反硝化菌,最适生长的 pH 值为 6.0~9.0,2 种工艺耦合过程的最适 pH 值一般控制在 8.0, pH 太高或太低均会抑制 2 种菌的活性。还有研究^[19]发现,当 PDA 过程的 pH 值为 7.0~8.5 时,短程反硝化过程也会以较高的效率进行。所以,目前适合 PDA 进行的 pH 值通常保持在 7.0~8.5^[20]。

2.3 C/N

在 PDA 过程中, AnAOB 和反硝化菌会受到 C/N 的显著影响。当 C/N 过大时,过量的碳源会导致 NO_3^- -N 直接被还原为 N_2 ;若 C/N 过小,则短程反硝化反应可能不完全,从而厌氧氨氧化过程提供的电子供体减少,导致其反应速率减慢^[21]。因此,适宜的 C/N 是确保这一耦合工艺稳定运行和高效脱氮的关键因素。Wang 等^[22]在进行的批量测试中发现,在低 C/N(C/N=1.0)下的厌氧氨氧化性能良好。Miao 等^[23]的研究表明,当 PDA 系统进水 C/N 由 1.1 提升至 2.5 时,异养型反硝化菌的生物量呈现显著提升的趋势,而自养型 AnAOB 的增殖则受到明显抑制。这一现象证实, C/N 的调控直接决定了自养型和异养型微生物间的竞争态势,鉴于多数反硝化菌属于异养型,故高 C/N 环境有利于促进反硝化菌的增殖。此外, Miao 等^[23]的进一步研究发现,在处理低 C/N 废水过程中,当 C/N 从 1.0 增加到 2.5 时,反硝化途径对总氮(TN)去除的贡献率呈现递增趋势,同时反硝化功能菌的丰度也呈现持续性积累特征。该发现也为通过碳源投加策略优化菌群配比提供了重要理论依据。Du 等^[24]的研究也同样指出反硝化对 TN 去除的贡献与 C/N 呈正相关,进一步证实了 C/N 对反硝化细菌的影响。

此外, PDA 反应器可接受的 C/N 也与生物膜

的厚度有关。生物膜抗冲击负荷的能力与生物膜的厚薄程度成正比,所以,较厚的生物膜能维持较高的 AnAOB 和反硝化菌活性,即使在较高的 C/N(C/N=10)条件下,依然能保持良好的脱氮率。而当生物膜薄且敏感时,即使低 C/N(C/N=2)的条件下,也可能导致微生物的失活。C/N 对 NO_2^- -N 的积累有显著影响。因此,在处理有机物较少的污水时,必须使用额外的碳源来测定污水中 NO_3^- -N 的含量。在一体式和两段式短程反硝化与厌氧氨氧化耦合工艺的研究^[25]中发现, PDA 工艺的 C/N 应为 2.0~3.0,以便于形成稳定的微生物生存和代谢环境。

3 微生物菌群协同作用

AnAOB 和短程反硝化菌是 PDA 的核心菌群,目前的研究发现,这 2 种菌群确实存在协同作用,对 PDA 工艺有着积极的影响。

由于 2 种菌群的生长条件不同,其产率存在显著差异。研究^[26]表明,在有机物存在的情况下, AnAOB 的生长速率明显低于反硝化菌,在与 AnAOB 争夺 NO_2^- 底物时,反硝化细菌会抑制 AnAOB 的生长。然而后续研究显示, AnAOB 在脱氮过程中的贡献率可高达 95%。这项研究揭示了在 AnAOB 和其他菌种之间可以实现协同代谢的可能性,从而使 PDA 工艺中操作相对较为容易。此外,在 PDA 工艺过程中,观察到反硝化菌与 AnAOB 可能存在共生关系。AnAOB 的丰度控制在 5% 以下,相比之下,反硝化优势菌的比例可高达 67%,构成了主要的微生物群体^[27]。

在 PDA 工艺运行过程中,确保适中的 C/N,维持环境温度稳定于约 30℃,并创造微碱性和缺氧的环境条件,这些因素对构建和维护核心菌群的互利共生关系至关重要。以此方式来增强 PDA 技术的性能^[28]。

4 工艺形式

PDA 的工艺形式一般包括 2 种:一体式、两段式,各具特点,具体工艺试验对比如表 1 所示。两段式包括 2 个反应器,分别进行 NO_2^- -N 的产生阶段和厌氧氨氧化阶段(图 2)。一体式工艺则将短程反硝化和厌氧氨氧化耦合在一个反应器中进行(图 3)^[29]。在选择 PDA 工艺形式时,需根据实际水质条件和具体要求进行合理判断。

4.1 两段式 PDA

为了有效避免 2 类菌种对底物和空间的竞争,并且减少污染物流入后反应器的浓度,两段式工艺将短程反硝化过程和厌氧氨氧化过程放在 2 个独立的反应器中进行^[30]。该耦合工艺具有较强的灵活性,可根据水质条件的差异选择不同的运行条件。两段式工艺可以充分解决 AnAOB 和反硝化菌之间的底物和空间竞争问题,确保有机物被反硝化菌充分利用,从而消除有机物对 AnAOB 活性的负面影响,因此可广泛应用于多种环境中^[31]。此外,控制两段式工艺相对简便,只需根据短程反硝化反应器出水的 NO_2^- -N 浓度来调整进入厌氧氨氧化反应器的 NO_2^- -N/氨氮的比例即可在稳定运行的情况下获得较高的脱氮率。由于其操作简便,灵活性强,目前,两段式工艺的应用相对更为普遍^[32]。

Du 等^[33]采用 SBR + 升流式厌氧污泥床法(UASB)的组合工艺在处理含 NO_3^- -N 和生活污水的混合污水时发现, NO_3^- -N、氨氮和化学需氧量(COD)的去除率分别达到 89.5%、97.6% 和 78.7%,各项指标也均能达到排放标准。Cao 等^[34]利用两段式 PDA 工艺处理城市污水处理厂的二级出水,得出硝酸盐、氨氮、COD 的平均去除率分别达到了 97.9%、95.2%、81.6%。从而充分验证了两段式 PDA 的高效性。

4.2 一体式 PDA

与两段式工艺相比,一体式工艺将厌氧氨氧化过程和短程反硝化过程合并到同一个反应器中进行,具有操作简单、占地面积小和成本低等优点。同

时,一体化 PDA 工艺在同一反应器内培养和驯化反硝化细菌和 AnAOB,使得部分厌氧氨氧化过程中产生的 NO_3^- -N 可以直接经过短程反硝化过程还原成 NO_2^- -N,然后被厌氧氨氧化过程重新利用。理论上,对于氮的去除率可实现 100%^[35]。一体式工艺的关键在于如何调节反硝化细菌和 AnAOB 的稳定共存,平衡系统内微生物复杂的相互作用,并维持厌氧氨氧化的主导作用。较高的 C/N 会导致污泥中异养细菌大量存在,从而抑制 AnAOB 和氨氧化细菌(AOB)的种群数量和活性,导致氮的去除率降低,因此,目前一体式 PDA 工艺多适用于处理低 C/N 的污水^[36]。

对于一体式 PDA 菌群竞争的关键调控策略主要包括以下几点。(1)精准碳源控制:严格限制 C/N,采用乙酸钠等易控碳源,通过分段投加优化利用率;(2)工艺运行与菌群优化:调控污泥龄(SRT)富集 AnAOB,并结合间歇运行模式抑制系统中的杂菌^[37]。

在良好调控下,一体式 PDA 能够取得优异的效果。Du 等^[33]利用室温条件下的 UASB 反应器来构建一体式工艺,发现适当添加碳源可在反硝化系统中实现 95%的 NO_2^- -N 积累率。Cao 等^[38]以乙酸钠作为碳源,使进水中氨氮质量浓度为 25 mg/L、 NO_3^- -N 质量浓度为 30 mg/L、COD/ NO_3^- -N 为 3 的条件下,实现了对污水 TN 去除率高达 97%的效果。因此,一体式工艺在 PDA 工艺应用方面中展现出了较大的潜力和应用价值。

表 1 两段式与一体式的工艺试验
Tab. 1 Experiment of Two-Stage and Integrated Processes

工艺	反应器类型	C/N	碳源类型	进水氨氮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水 TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NTR	TN 去 除率	厌氧氨氧 化脱氮率	参考 文献
两段式 PDA	序批式活性污泥 反应器(SBR)	2.6	乙酸盐	30.0~70.0	6.0~10.9	80.0%	94.1%		[39]
	SBR	3.0	城市污水/乙酸盐	122.6~349.2	20.0	80.0%	97.8%		[40]
	SBR	2.6~3.0	城市污水+乙酸盐	57.8	3.7~4.6	85.6%	95.2%~ 97.9%	78.2%	[34]
一体式 PDA	SBR	3.0	乙酸盐	25.0	<5.0		97.0%	90.0%	[38]
	序批式生物膜 反应器(SBBR)	2.0~2.5	乙酸盐	151.0~162.0	12.5		93.0%		[41]

注:两段式 PDA 中,厌氧氨氧化和短程反硝化过程用的反应器都为 SBR。

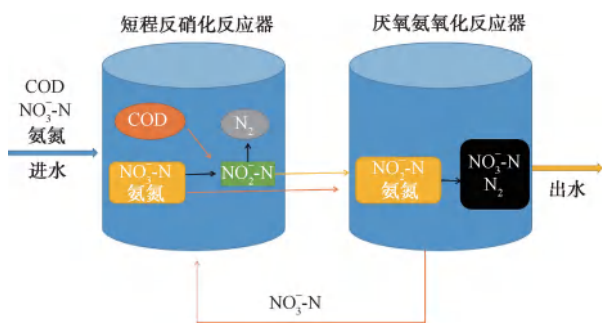


图2 两段式 PDA 工艺原理

Fig. 2 Principle of Two-Stage PDA Process



图3 一体式 PDA 工艺原理

Fig. 3 Principle of the Integrated PDA Process

4.3 工程应用

随着厌氧氨氧化及其耦合工艺研究的不断突破,其在工程领域的应用也日益广泛。2002年,全球首座以厌氧氨氧化工艺为核心单元的污水处理厂在荷兰鹿特丹建成并投入运行,标志着该技术在工程化应用领域取得了重大突破。近年来,我国研究团队在该技术的创新与实践方面不断努力,积极推动厌氧氨氧化及其耦合工艺在污水处理厂的工程应用。例如,浙江大学研究团队^[42]已在浙江省相继建成2座厌氧氨氧化污水处理工程,分别应用于义乌市味精废水与东阳市制药废水的处理中。彭永臻院士团队以实际城市污水和由该城市污水完全硝化产生的硝化液为进水,针对短程反硝化工艺开展了半生产性的中试规模研究。通过精准调控进水配比、动态调节C/N及优化水力停留时间等策略,成功在125 d内实现系统的快速启动,并在连续30 d的跟踪监测中保持亚硝酸盐积累率持续稳定在75%以上。该研究系统揭示了短程反硝化工艺的启动强化机制与长效运行控制规律,更通过工程化验证实证了该技术耦合厌氧氨氧化实现城市污水深度脱氮的可行性^[43]。青岛市某污水处理厂采用PDA工艺对原工艺进行升级改造。改造后,出水TN质量浓度稳定低于8 mg/L,氨氮质量浓度低于0.5 mg/L,无

需外加碳源,并节省约30%的曝气能耗,每吨水处理成本仅为0.3~0.4元。此外,西安市第四污水处理厂经过多次研究与试验后,对原有的厌氧-缺氧-好氧法(AAO)工艺进行了升级改造,转变为PDA工艺。这一改造不仅使出水水质从一级B标准提升至一级A标准,而且显著降低了出水TN含量,使该厂成为全球第3个实现主流厌氧氨氧化工艺的污水处理厂。鉴于这些成功案例可知,通过对主流污水处理厂进行升级改造,并融入PDA工艺,将有助于提高TN的去除率并降低运营成本^[44]。

5 潜在问题与展望

PDA工艺凭借其显著的技术优势,在处理多种废水中展现出巨大潜力,性能优于传统脱氮工艺。然而,要实现其在市政污水处理,特别是主流工艺中的大规模工程化应用,仍需跨越多个关键障碍^[45]。

当前PDA工艺面临的核心挑战集中体现在微生物效能、系统适应性与工程实践3个层面。在微生物层面,AnAOB的低温活性抑制以及由此导致的漫长启动周期,严重制约了PDA系统在全年尤其是寒冷地区的稳定运行与快速应用。同时,生长缓慢的AnAOB在城市主流污水中难以有效富集和长期持留,成为主流应用的核心瓶颈。在系统适应性层面,高C/N污水极易破坏一体式系统中异养菌-反硝化菌与自养菌AnAOB的平衡,引发对亚硝酸盐底物的激烈竞争,抑制厌氧氨氧化反应。两段式虽可缓解此问题,却增加了流程复杂性。此外,工艺对溶解氧、C/N等参数的精准控制要求高,系统抗水质波动能力也有待提升^[46]。在工程实践层面,PDA工艺的长期运行可靠性与规模化可行性以及在经济方面相较于现有工艺的竞争力仍需更多实践数据的验证^[47]。

所以,对于PDA的工艺的未来突破方向应聚焦于开发耐低温菌种与高效生物膜技术以强化AnAOB的持留;优化碳源调控策略应对高C/N挑战^[14];并且加强在工程实践方面的验证,为PDA的规模化运行积累经验,从而推动该工艺走向规模化应用。

6 结论

本文讨论了短程反硝化与厌氧氨氧化工艺的耦合原理及工艺机理,总结了PDA的影响因素如温度、pH、溶解氧等。此外,文章详细对比分析了两段

式与一体式 PDA 工艺的技术特点、适用条件、工程案例及核心挑战(尤其一体式中的菌群竞争调控问题)。同时,也系统梳理了其工程化面临的核心瓶颈问题,并据此提出了未来研究的重点方向。PDA 工艺展现出显著技术经济优势和工程应用潜力,但在市政污水处理领域的广泛应用,特别是主流工艺的实现,亟须在解决上述成本效益(如缩短启动期、降低控制复杂度)、系统长期稳定性(如低温运行、AnAOB 持留)等关键实际问题上取得突破。未来的研究应着力于这些工程化瓶颈的攻关,并通过更多的工程验证,推动 PDA 工艺从实验室和特定废水处理走向大规模城市污水处理的工程实践。

参考文献

- [1] Gao M C, Sun S F, Shao C T, et al. Engineered stable partial nitrification/endogenous partial denitrification-anammox process for enhanced nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen ratio wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2025, 428: 132466. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132466.
- [2] Zhang X N, Zhu Z X, Zhang X X, et al. Deciphering intricate associations between vigorous development and novel metabolic preferences of partial denitrification/anammox granular consortia within mainstream municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2025, 419: 132074. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132074.
- [3] 叶冬梅. 短程反硝化厌氧氨氧化处理污水实验研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023.
Ye D M. Study on partial denitrification with anaerobic ammonium oxidation process to treat sewage[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2023.
- [4] 高静. 短程反硝化影响因素优化及耦合厌氧氨氧化深度脱氮性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
Gao J. Influencing factors optimization of partial denitrification (PD) and the deep-level denitrification performance research in the coupled PD-ANAMMOX process[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [5] 蒙小俊. 厌氧氨氧化工艺快速启动及应用研究进展[J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(1): 6-10.
Meng X J. Research progress of quick start-up of anaerobic ammonium oxidation process and its application[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2020, 51(1): 6-10.
- [6] 吕昱静. 短程反硝化耦合厌氧氨氧化生物脱氮试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
Lü Y J. Biological nitrogen removal by partial denitrification coupled with anaerobic ammonia oxidation [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [7] 李亚霖. 短程反硝化-厌氧氨氧化强化城市污水脱氮效能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
Li Y L. Study on enhancing nitrogen removal efficiency of municipal wastewater by partial denitrification-Anammox [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.
- [8] Li D, Zeng F X, Yang S W, et al. Simultaneous endogenous partial denitrification/anammox process for low-strength wastewater treatment: Process optimization, nitrogen removal and microbial dynamics [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2025, 213: 109568. DOI: 10.1016/j.bej.2024.109568.
- [9] Im H, Jeong S, Kim H, et al. Mainstream application of the partial denitrification-anammox process for carbon-neutral wastewater treatment: A review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 72: 107558. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107558.
- [10] Tao W D, He Y L, Wang Z Y, et al. Effects of pH and temperature on coupling nitrification and anammox in biofilters treating dairy wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 76-82. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.06.035.
- [11] Brin L D, Giblin A E, Rich J J. Similar temperature responses suggest future climate warming will not alter partitioning between denitrification and anammox in temperate marine sediments [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 331-340.
- [12] Dai B, Zhou J Z, Wang Z B, et al. Microbial and functional resilience of a flocculent sludge-based partial denitrification-anammox system against cold temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2025, 433: 132706. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132706.
- [13] Kowalski M S, Devlin T, di Biase A, et al. Accelerated start-up of a partial nitrification-anammox moving bed biofilm reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2019, 145: 83-89. DOI: 10.1016/j.bej.2019.02.015.
- [14] Zhang Z Z, Zhang Y, Chen Y G. Recent advances in partial denitrification in biological nitrogen removal: From enrichment to application [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 298: 122444. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122444.
- [15] Cheng L, Li X F, Lin X B, et al. Dissimilatory nitrate reduction processes in sediments of urban river networks: Spatiotemporal variations and environmental implications [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 545-554. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.05.093.
- [16] Lotti T, Kleerebezem R, van Loosdrecht M C M. Effect of temperature change on anammox activity [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2015, 112(1): 98-103.
- [17] Pan W T, Liu H, Chen Y Z, et al. Towards the application of mainstream low-carbon anammox wastewater treatment technologies: Strategies, innovations, and prospects [J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2025, 19(2): 8. DOI: 10.1007/s11705-024-2511-4.
- [18] 马瑞婕, 刘永红, 梁继东, 等. 短程反硝化(PDN)-Anammox 生物脱氮工艺研究进展 [J]. *应用化工*, 2022, 51(6): 1775-1780.
Ma R J, Liu Y H, Liang J D, et al. Research progress of PDN-

- Anammox biological nitrogen removal technology [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(6): 1775-1780.
- [19] Tomaszewski M, Cema G, Ziemińska-Buczyńska A. Influence of temperature and pH on the anammox process: A review and meta-analysis[J]. *Chemosphere*, 2017, 182: 203-214. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.05.003.
- [20] You Q G, Wang J H, Qi G X, et al. Anammox and partial denitrification coupling: A review[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(21): 12554-12572.
- [21] 吴莉娜,王春艳,闫志斌,等. 短程反硝化-厌氧氨氧化在废水中的应用进展[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(10): 3859-3867.
- Wu L N, Wang C Y, Yan Z B, et al. Application progress of partial denitrification-anaerobic ammonia oxidation in wastewater [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(10): 3859-3867.
- [22] Wang B, Peng Y Z, Guo Y Y, et al. Impact of partial nitrification degree and C/N ratio on simultaneous sludge fermentation, denitrification and Anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 219: 411-419. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.07.114.
- [23] Miao Y Y, Peng Y Z, Zhang L, et al. Partial nitrification-anammox (PNA) treating sewage with intermittent aeration mode: Effect of influent C/N ratios[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 664-672. DOI: 10.1016/j.cej.2017.10.072.
- [24] Du R, Cao S B, Wang S Y, et al. Performance of partial denitrification (PD)-Anammox process in simultaneously treating nitrate and low C/N domestic wastewater at low temperature[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 219: 420-429.
- [25] Du R, Cao S B, Li B K, et al. Step-feeding organic carbon enhances high-strength nitrate and ammonia removal via DEAMOX process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 360: 501-510. DOI: 10.1016/j.cej.2018.12.011.
- [26] He S L, Niu Q G, Ma H Y, et al. The treatment performance and the bacteria preservation of anammox: A review[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, 226: 163. DOI: 10.1007/s11270-015-2394-6.
- [27] Du R, Cao S B, Li B K, et al. Simultaneous domestic wastewater and nitrate sewage treatment by DENitrifying AMmonium OXidation (DEAMOX) in sequencing batch reactor [J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 399-407. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.02.013.
- [28] 常根旺,杨津津,李绍康,等. 短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮工艺研究与应用进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(5): 1519-1527.
- Chang G W, Yang J J, Li S K, et al. Research and application progress of partial denitrification coupled with anammox for enhanced denitrification [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(5): 1519-1527.
- [29] 陈浩,杨玉婷,刘文如,等. 一体式短程反硝化-厌氧氨氧化工艺研究进展[J]. *工业水处理*, 2024, 44(5): 14-23.
- Chen H, Yang Y T, Liu W R, et al. Research progress of integrated partial denitrification-anaerobic ammonia oxidation process[J]. *Industrial Water Treatment*, 2024, 44(5): 14-23.
- [30] 王建辉,游庆国,申渝,等. 短程反硝化-厌氧氨氧化耦合脱氮工艺影响因素与调控研究进展[J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1216-1231.
- Wang J H, You Q G, Shen Y, et al. Research advances on influence factors and regulation of Partial denitrification and Anammox coupling denitrification process [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(4): 1216-1231.
- [31] Wu H Y, Bai X L, Li L, et al. Two-stage partial nitrification-denitrification and anammox process for nitrogen removal in vacuum collected toilet wastewater at ambient temperature [J]. *Environmental Research*, 2024, 262: 119917. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119917.
- [32] Al-Hazmi H E, Grubba D, Majtacz J, et al. Combined partial denitrification/anammox process for nitrogen removal in wastewater treatment [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(1): 108978. DOI: 10.1016/j.jece.2022.108978.
- [33] Du R, Cao S B, Li B K, et al. Synergy of partial-denitrification and anammox in continuously fed upflow sludge blanket reactor for simultaneous nitrate and ammonia removal at room temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 274: 386-394. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.11.101.
- [34] Cao S B, Du R, Peng Y Z, et al. Novel two stage partial denitrification (PD)-Anammox process for tertiary nitrogen removal from low carbon/nitrogen (C/N) municipal sewage [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 362: 107-115. DOI: 10.1016/j.cej.2018.12.160.
- [35] Adams M, Issaka E, Chen C J. Anammox-based technologies: A review of recent advances, mechanism, and bottlenecks [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 148: 151-173. DOI: 10.1016/j.jes.2024.01.015.
- [36] Izadi P, Sinha P, Andalib M, et al. Coupling fundamental mechanisms and operational controls in mainstream partial denitrification for partial denitrification anammox applications: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 400: 136741. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136741.
- [37] Du R, Li C, Cao S B, et al. Mechanistic insights into recovery of partial denitrification/anammox under continuous flow: Balancing nitrite supply and microbial competition [J]. *Environmental Research*, 2025, 286: 122754. DOI: 10.1016/j.envres.2025.122754.
- [38] Cao S B, Peng Y Z, Du R, et al. Feasibility of enhancing the DENitrifying AMmonium OXidation (DEAMOX) process for nitrogen removal by seeding partial denitrification sludge [J]. *Chemosphere*, 2016, 148: 403-407. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.09.062.

(下转第 39 页)

2014. 10. 064.
- [7] Kim J O, Choi J, Lee S, et al. Evaluation of hydrocyclone and post-treatment technologies for remediation of contaminated dredged sediments[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166: 94-102. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.10.009.
- [8] 谢苗, 朱响, 张保国. 水力分级旋流器工艺参数匹配优化研究[J]. *机械科学与技术*, 2024, 43(6): 1006-1015.
- Xie M, Zhu Y, Zhang B G. Study on process parameter matching optimization of hydrocyclone [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2024, 43(6): 1006-1015.
- [9] 张保国. 水力分级旋流器分离性能及参数匹配研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- Zhang B G. Hydroclassification cyclone separation performance and parameter matching study [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [10] 郭广东, 邓松圣, 张福伦. 操作参数对固-液-液三相水力旋流器分离效率的影响[J]. *石油矿场机械*, 2010, 39(5): 17-19.
- Guo G D, Deng S S, Zhang F L. Effects of operating conditions on separation efficiency of three-phase solid-liquid-liquid hydrocyclones[J]. *Oil Field Equipment*, 2010, 39(5): 17-19.
- [11] 梁政. 固液分离水力旋流器流场理论研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- Liang Z. Theoretical study on flow field of solid-liquid separation hydrocyclone[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [12] Kim J O, Choi J, Lee S, et al. Evaluation of hydrocyclone and post-treatment technologies for remediation of contaminated dredged sediments[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166: 94-102. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.10.009.
- [13] 王伟. 水力旋流器固-液分离的 CFD 模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- Wang W. Simulation of solid-liquid separation in hydrocyclone by applying CFD[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [14] 崔宝玉. 水力旋流器流场及分离过程的数值试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- Cui B Y. Numerical study on flow field and separating process of hydrocyclone[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [15] 韩婕, 刘阿龙, 彭东辉, 等. 数值研究液-液水力旋流器内颗粒浓度分布特性[J]. *化工机械*, 2011, 38(6): 725-729.
- Han J, Liu A L, Peng D H, et al. Numerical simulation of particle concentration distribution in liquid-liquid hydrocyclones [J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2011, 38(6): 725-729.

(上接第 24 页)

- [39] Du R, Peng Y Z, Cao S B, et al. Advanced nitrogen removal from wastewater by combining Anammox with partial denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179: 497-504. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.043.
- [40] Cao S B, Du R, Niu M, et al. Integrated anaerobic ammonium oxidization with partial denitrification process for advanced nitrogen removal from high-strength wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 221: 37-46. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.08.082.
- [41] Zhang H Y, Du R, Cao S B, et al. Mechanisms and characteristics of biofilm formation via novel DEAMOX system based on sequencing biofilm batch reactor [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2019, 127(2): 206-212.
- [42] 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 Y, Wu J L, Chen Y, et al. Research and application progress of mainstream anammox process[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(11): 16-27.
- [43] 彭永臻, 范泽里, 杜睿, 等. 为耦合厌氧氨氧化产生 NO_2^- 的城市污水中试研究[J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46(4): 329-337.
- Peng Y Z, Fan Z L, Du R, et al. Pilot-scale study on producing NO_2^- for Anammox with municipal wastewater [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46(4): 329-337.
- [44] 吴莉娜, 闫志斌, 李进, 等. 厌氧氨氧化在城市生活污水处理中的应用[J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46(4): 421-430.
- Wu L N, Yan Z B, Li J, et al. Application of anaerobic ammonia oxidation in municipal domestic sewage treatment plants [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46(4): 421-430.
- [45] Du R, Cao S B, Zhang H Y, et al. Flexible nitrite supply alternative for mainstream anammox: Advances in enhancing process stability [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(10): 6353-6364.
- [46] Majtacz J, Al-Hazmi H E, Xu X B, et al. Removal of nitrogen from wastewater: Unsolved problems and possible solutions with partial denitrification/Anammox systems [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 156131. DOI:10.1016/j.cej.2024.156131.
- [47] Chen H, Tu Z, Wu S, et al. Recent advances in partial denitrification-anaerobic ammonium oxidation process for mainstream municipal wastewater treatment [J]. *Chemosphere*, 2021, 278: 130436. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130436.