

厌氧氨氧化脱氮组合新工艺的研究进展、存在问题和展望

唐喜芳¹, 王雅歌¹, 张毅¹, 刘佳怡¹, 付钰琳¹,
陈荣^{1,2,3,4,5}, 王晓昌^{1,2,3,4,5}, 邢保山^{1,2,3,4,5,*}

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 3. 国家城市非传统水资源开发利用国际科技合作基地, 西安 710055;
4. 陕西省污水处理与资源化工程技术研究中心, 西安 710055; 5. 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055)

摘要: 厌氧氨氧化(Anammox)是一种经济高效的脱氮工艺,因其显著优势在废水处理领域得到广泛关注。然而,厌氧氨氧化菌(AnAOB)生长速度缓慢,对操作和环境条件敏感,阻碍了其广泛应用。尽管已经探究开发了不同的控制策略,但仍面临脱氮性能不稳定、出水硝氮需要进一步处理等诸多挑战。由于 Anammox 在废水脱氮应用的重要性和必要性,本文首先介绍了当前基于 Anammox 的生物脱氮系统,鉴于含氮废水中亚硝氮来源不足,可通过短程硝化(PN)或短程反硝化(PD)提供亚硝氮,但系统运行稳定性和脱氮效率仍是 Anammox 工程应用的难点,研究基于 Anammox 的组合新工艺来实现稳定的废水深度生物脱氮尤为重要。为此,本文重点综述了 Anammox 耦合短程硝化反硝化(SPNDA)、人工湿地(CW)、除磷/回收磷工艺、反硝化除硫工艺(SDA)和反硝化型厌氧甲烷氧化(A-DAMO)等脱氮组合系统的最新研究进展。从脱氮性能、影响因素、操作优势、研究进展、应用前景和面临的挑战等展开,与单一的 Anammox 工艺相比,组合工艺能够克服出水含有硝氮的问题(SPNDA、A-DAMO、SDA),减轻有机物对 AnAOB 的抑制(SPNDA、SDA,),回收不可再生资源(HAP),实现清洁环境的同时具有显著的经济效益(A-CW),为 Anammox 工艺的推广应用提供了灵活性,为 Anammox 脱氮组合新工艺的未来研究开发应用明确了方向,同时为开发更低能耗实现高效稳定脱氮工艺,拓宽 Anammox 的工程化推广应用范围提供参考。

关键词: 厌氧氨氧化; 影响因素; 组合工艺; 深度脱氮

DOI: 10.48014/fcws.20230918002

引用格式: 唐喜芳,王雅歌,张毅,等. 厌氧氨氧化脱氮组合新工艺的研究进展、存在问题和展望[J].

中国水科学前沿,2024,2(1):4-15.

专业术语/名称缩写检索表

厌氧氨氧化	Anammox	一氧化二氮	N ₂ O
厌氧氨氧化菌	AnAOB	厌氧甲烷氧化工艺	n-DAMO
好氧氨氧化菌	AOB	厌氧氨氧化-厌氧甲烷氧化组合工艺	A-n-DAMO
亚硝氮氧化菌	NOB	厌氧氨氧化-反硝化除磷组合工艺	DPR

* 通讯作者 Corresponding author: 邢保山, xbswq666@126.com

收稿日期:2023-09-18; 录用日期:2023-12-05; 发表日期:2024-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52100162);中国博士后科学基金资助项目(No. 2021MD703869)。

续表

异养反硝化细菌	DB	反硝化除磷-内源反硝化组合工艺	DP-ED
游离氨	FA	厌氧氨氧化-羟基磷灰石组合工艺	A-HAP
游离亚硝酸盐	FNA	硫自养反硝化组合工艺	SD
水力停留时间	HRT	反硝化除硫和厌氧氨氧化组合工艺	SDA
污泥停留时间	SRT	人工湿地	CW
甲烷	CH4	厌氧氨氧化和人工湿地组合工艺	CW-A
短程硝化工艺	PN	曝气膜生物反应器	MABR
短程硝化和厌氧氨氧化组合工艺	PNA	微生物燃料电池	MFC
短程反硝化工艺	PD	反硝化除磷-内源反硝化-厌氧氨氧化	DP-ED-A
短程反硝化和厌氧氨氧化组合工艺	PDA	藻-短程硝化厌氧氨氧化组合工艺	A-PNA
短程硝化、厌氧氨氧化和短程反硝化组合工艺	SPNAD		

20世纪90年代在荷兰发现的厌氧氨氧化(Anammox)工艺^[1],因其显著的经济和环境优势而被认为是极具成本效益的生物脱氮技术。然而,由于厌氧氨氧化菌(AnAOB)的生长速度较低,且亚硝酸盐供应不足,阻碍了Anammox工艺的快速启动和全面应用,目前,短程硝化(PN)和短程反硝化(PD)通常被认为是Anammox产生亚硝酸盐的两种理想途径,虽然相对于传统的硝化反硝化工艺,PN、PD和Anammox组合工艺(PNA、PDA)均具有显著的节能减排和低碳排放优势,而操作稳定性和参数优化调节一直是突出问题,此外AnAOB对环境操作条件敏感,如高进水有机物、DO温度、水质波动、重金属、抗生素和有机物等均会不同程度的影响AnAOB活性^[2]。在Anammox工艺大规模工程应用中,进一步提高系统性能仍面临挑战,但基于Anammox的脱氮组合新工艺有望克服Anammox单独应用的劣势,与单独的工艺相比,组合工艺利用菌群之间的协同作用可能能够提高脱氮效果和系统稳定性,如PNA与PD组合,硝氮可以通过异养反硝化菌(DB)进一步转化为亚硝氮,并被AnAOB重复利用,从而进一步提高脱氮效率。然而,在组合系统中,许多问题尚未得到解决,不同的工况、不同的反应器配置等对系统性能的影响尚不清楚。目前有关环境操作条件对Anammox、PNA和PDA的组合工艺脱氮性能的影响已有较多的综述^[3-7],但有关基于Anammox的脱氮组合新工艺仍鲜有全面的总结概述,且对其存在的问题和挑战仍需梳理。因此,本文首先综述了Anammox的研究进展及其存在的挑战,然后重点综述了基于Anammox的脱

氮组合新工艺,详述了相应的最新研究进展及其存在的问题和挑战,以期为Anammox在诸多含氮废水中大规模工程化推广应用提供参考。

1 厌氧氨氧化常规组合工艺的研究进展

与传统硝化反硝化相比,由于在能源消耗和温室气体排放方面的优势,Anammox被视为环境友好型废水生物脱氮技术。目前Anammox工艺已广泛应用于处理高浓度氨氮废水,如厌氧消化液和畜禽废水等。但AnAOB对环境敏感,通常生长速度低,难以实现高活性的AnAOB富集,水质波动、温度、运行条件、反应器构型等均会对其脱氮效能产生影响。在主流废水处理过程中,采用Anammox技术仍面临亚硝氮来源不足等众多挑战(图1)。此外,由于Anammox的独特代谢途径,电子受体和供体的平衡供应对于有效的Anammox过程是必不可少的。因此,需将Anammox与氮循环其他生物脱氮过程进行组合,以期实现协同深度脱氮。

1.1 短程硝化和厌氧氨氧化组合工艺

好氧氨氧化菌(AOB)将氨氮氧化为亚硝氮,然后AnAOB将剩余的氨氮和亚硝氮转化为氮气,PNA工艺不需要有机碳的投加,减少了曝气需求,降低了成本,然而该工艺面临的主要挑战是进水中有机物对工艺的影响、出水至少含有11%的硝氮、亚硝氮氧化菌(NOB)难以长期持续有效抑制、废水

中有机物难以被利用等问题; NOB 的生长会与 AOB 竞争氧气, 同时与 Anammox 竞争亚硝氮, 不利于氨氮和亚硝氮的平衡供应, 进而降低系统生物脱氮效率。尽管已有大量研究表明可通过低污泥停留时间(SRT)^[8]、游离氨(FA)/游离亚硝酸盐(FNA)^[9]、温度控制^[10]、间歇曝气^[11]、添加抑制物^[12]或酸性 AOB^[13]等方法途径抑制 NOB, 但是在长期运行期间如何保持 PNA 工艺的稳定性、实现高脱氮性能、并将实验室规模升级到工业应用仍存

在诸多挑战和障碍。图 2 展示了一段 PNA 和两段 PNA 应用存在的问题, 如果没有其他氮循环功能菌(如反硝化菌等)的参与, PNA 较难满足所要求的出水目标。同时, 相比两段式 PNA 工艺, 一段式 PNA 工艺具有占地更小等诸多优势, 但仍存在对操作条件敏感, 易失稳的问题, 如何提高一段式 PNA 工艺的长期稳定脱氮性能仍是当前国内外学者关注的热点。

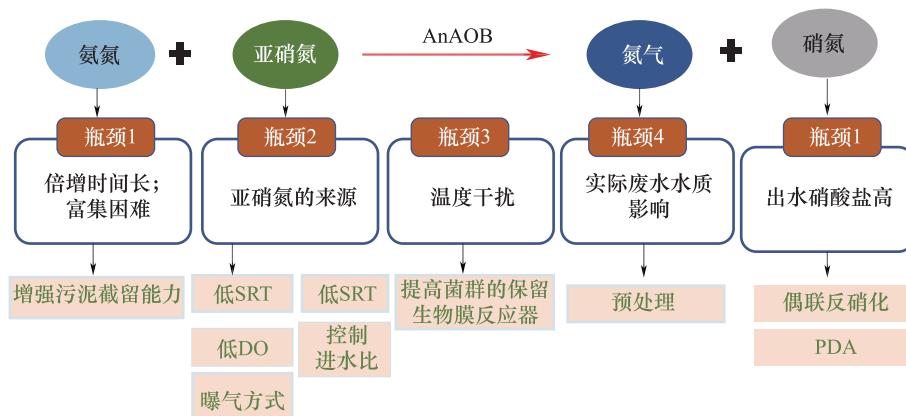


图 1 纯厌氧氨氧化工艺技术瓶颈

Fig. 1 The bottleneck of pure anaerobic ammonia oxidation process

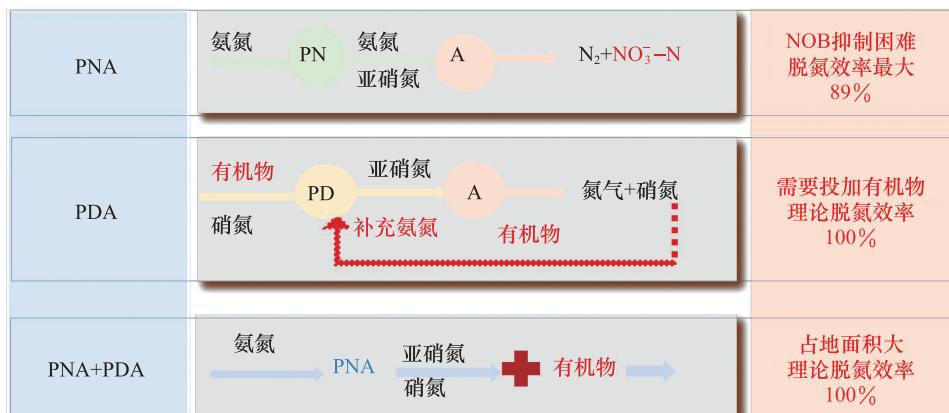


图 2 基于厌氧氨氧化常规组合工艺技术瓶颈

Fig. 2 The bottleneck of conventional combination process based on anaerobic ammonia oxidation

1.2 短程反硝化和厌氧氨氧化组合工艺

亚硝氮可由 PD 过程提供, PDA 能够同时去除硝氮和氨氮, 是一种实现深度生物脱氮可行的方法。在 PDA 工艺中, 可实现高达 100% 的曝气节能和 60% 的有机碳减排, 为低成本高效处理氨氮和硝

氮提供了一种很有前景的替代方案^[14]。从氮去除和避免有机物的影响方面来看, PDA 较 PNA 更具优势。然而, 废水可能含有难生物降解的有机物难以被短程反硝化菌利用, 需要投加容易降解的外源有机碳源(图 2), 并且需要同时均衡 AnAOB 与 DB 的平衡。PDA 工艺是一种节能经济的脱氮工艺, 但

内部颗粒中的异养反硝化被认为是一氧化二氮(N_2O)排放的潜在原因^[15]。由于 N_2O 强大的温室气体变暖潜力,使得PDA系统中 N_2O 生成途径及能源回收研究显得至关重要,未来仍需开发有效的 N_2O 抑制方法或气体收集净化方法。

2 厌氧氨氧化组合新工艺的研究进展

2.1 短程硝化、厌氧氨氧化和反硝化

已有报道采用PN、Anammox和反硝化组合工艺处理含氮废水^[16],但大多研究是在单独的反应器中建立的,并依次组合,这增加了总体积、基础设施成本和操作程序。因此将其在单个反应器中组合(SPNAD工艺),已成为最近新的研究热点,也为Anammox工艺的实际应用提供了一种更有前景的方法。

2.1.1 短程硝化、厌氧氨氧化和短程反硝化组合工艺

SPNAD结合多种脱氮途径,以降低去除有机物的成本并提高脱氮性能,能去除PNA反应器中剩余的氨氮和产生的硝氮来实现高脱氮率,将有机物浓度保持在合适的范围内,以实现AOB、AnAOB和DB之间的平衡,有望通过各种微生物生长和相互作用之间的协同作用进行工程应用。该工艺对于进水比值没有严格要求,从而为Anammox工艺的最佳进水比提供了灵活性。NOB或Anammox阶段产生的硝氮可经DB转化为亚硝氮,进而提供给AnAOB,从而减轻有机物对自养菌的抑制,NOB活性可被持续抑制,而无需精细或复杂的调控,理论上可将脱氮效率提高到100%。

2.1.2 短程硝化、厌氧氨氧化和短程反硝化组合工艺的存在的问题和应用前景

Zhang等^[17]采用SPNDA处理氨氮和硝氮废水,可实现97.6±0.5%的总氮去除,出水总氮浓度仅为3.4mg/L。Li等^[18]采用曝气膜生物反应器(MABR)通过SPNAD处理主流废水,氨氮、总氮和COD的去除率分别可达100%、88.03%和93.42%。PN/A/PD工艺与MABR技术相结合,有望突破主流Anammox工艺的瓶颈,实现低成本低碳排放废水脱氮。然而,与异养菌相比,AnAOB

的生长速率低,可能会面临冲刷流失的风险。因此,需要进一步研究AnAOB的有效持留途径或反应器构型升级从而实现稳定的脱氮性能。此外,不利条件下(如氧气和有机物暴露)会导致AnAOB活性降低,为了控制SPNAD过程实现有效脱氮,系统中污染物的去除途径以及微生物之间的相互作用,不同进水有机物浓度下SPNAD系统的脱氮机理有待进一步研究。同时,微生物之间复杂的相互作用和调控方法也需进一步探究。

2.2 人工湿地和厌氧氨氧化

人工湿地(CW)类似于自然湿地,包括大型植物、基质和微生物种群三个关键成分,是一种可持续且成本效益高的废水处理技术^[19]。硝化/反硝化过程通常被认为是传统人工湿地最大限度去除氮的主要机制,但是由于有限的碳源,CW中总氮的去除效率低(通常在40%—70%)、波动大^[20]、产生温室气体甲烷(CH₄)和N₂O。这表明仍需通过组合其他工艺实现持续创新来优化升级现有的CW系统。Anammox工艺作为一种环境友好、可持续的生物脱氮技术,没有外部碳源需求,曝气的能源成本较低、污泥产量较低并且产生的温室气体少,将CW与Anammox组合或许能够克服传统CW与硝化反硝化脱氮温室气体排放高、能源需求大和经济效益差的缺点。

2.2.1 厌氧氨氧化-人工湿地组合工艺

考虑到Anammox显著的优势,Joseph等^[21]构建了Anammox、生物炭反应器和CW组成的三级综合处理系统处理垃圾渗滤液,氨氮、亚硝氮和硝氮的处理效率分别为100%、98.7%和98.2%,其中,Anammox单元对氨氮和亚硝氮的去除率分别为94%和99%。此外,将微生物燃料电池(MFC)嵌入Anammox综合人工湿地中,形成A-CW-MFC系统是一种潜在的生态技术解决方案,能够用于生物发电、脱氮、同时降解其他有机污染物,实现清洁环境的同时具有显著的经济、环境和社会效益^[22]。

2.2.2 厌氧氨氧化-人工湿地组合工艺存在的问题和应用前景

Anammox和CW这两个“经济绿色”处理技术

相结合,是一种极具应用前景的废水脱氮技术。但目前对 A-CW 的研究尚处于起步阶段,且仍存在诸多挑战,硝化反硝化仍旧被认为是 CW 中脱氮效率贡献高的主要工艺。因为低碳和节能减排的处理需求,深入了解 A-CW 系统集成脱氮的潜力和存在的问题是当前研究的重点。需要研究各种操作策略和耦合技术对提高 A-CW 系统总氮去除率和温室气体减排的可能性,如优化操作条件和设计参数,溶解氧、温度、pH、C/N 比、有机负荷率、水力负荷率、HRT、CW 类型、植被类型和基质材料等,在不影响 CW 处理效率的基础上,最大化 Anammox 过程实现高效的总氮去除。此外,需要研究不同的 CW 类型和各种 Anammox⁺ 工艺进行集成以实现高效的氮去除目标。同时,外源添加不同类型生物炭、信号分子和基质类型等,以加强整体污染物去除过程。此外,基于 A-CW 种的复杂代谢过程在基于 A-CW 组合系统中的影响也需进一步研究。

2.3 厌氧氨氧化与除磷/回收磷组合工艺

2.3.1 厌氧氨氧化-反硝化除磷组合工艺

过量的氮磷释放会导致水体富营养化继而破坏水生生态系统,因此探索同时去除氮磷的新方法显得十分必要。通过聚磷菌(PAOs)实现生物除磷是一种有效的除磷方法^[23],可以有效地减少化学除磷剂的用量。其中,部分 PAOs/糖原积累生物(GAOs)被鉴定为反硝化菌,因为它们可以通过内源还原硝氮或亚硝氮,可以缓解 Anammox 过程中产生的硝氮,提高系统生物脱氮深度。因此,A-反硝化除磷(DPR)相结合已成为近年来的研究热点,但仍需要进一步优化其操作参数和调控策略,如 COD/N、水力停留时间(HRT)和 SRT 的优化,以及氮和磷负荷的调节以维持微生物相互作用的稳定性。

2.3.2 厌氧氨氧化-羟基磷灰石组合工艺

有研究表明,一种新型的 A-羟基磷灰石(HAP)颗粒对实际废水中抑制剂具有更强的抗性和弹性^[24]。同时,A-HAP 可以同步完成脱氮和磷回收,从废水中有效回收不可再生的磷资源,具有较高的经济和环境效益。具有 HAP 核心的 AnAOB 已被证明具有优异的沉降性和优异的机械

强度。最近的研究也证明了基于 A-HAP 组合工艺的可行性^[25,26]。

2.3.3 厌氧氨氧化与除磷/回收磷组合工艺存在问题和应用前景

HAP 形成受到 pH、无机碳、钙离子和反应物浓度的影响。因此,对于含有不同水平复杂化合物的真实废水,脱氮能力和磷回收潜力可能是完全不同的,在进一步探索中可能需要进行实验来评估处理不同类型废水时的最佳环境因素和操作条件,评估其脱氮能力和磷回收潜力。A-HAP 形成的机制尚不完全清楚,需要研究不同 EPS 的作用、钙添加的最低要求、无机矿物在造粒过程中的作用、HAP 形成对颗粒沉降性的影响等。此外,要将颗粒污泥应用于污水处理厂,需要进一步了解造粒循环的机制,以支持颗粒的可持续增殖,从而维持大规模操作。

2.4 厌氧氨氧化与脱硫组合工艺

2.4.1 硫自养反硝化工艺

硫自养反硝化(SD)在全球氮、硫循环中发挥着至关重要的作用。在自然水体中缺乏电子受体亚硝氮,而硫氧化菌(SOB)以还原态硫(S^{2-} , S^0 和 $S_2O_3^{2-}$)为电子供体将硝氮转化为亚硝氮^[27]。将 SD 与 Anammox 组合(SDA)以消除 Anammox 产生的硝氮,亚硝氮作为 AnAOB 的潜在底物可以避免其对 SD 的抑制,SOB 为自养菌,生长速度和生物量产量与 AnAOB 相当^[28],可以实现 SOB 和 AnAOB 的共培养,实现稳定高效的脱氮效能。

2.4.2 硫自养反硝化-厌氧氨氧化工艺

已有研究探索 SDA 用于脱氮的可行性,探索了合适的进水特性(例如硫源、硫氮比)、反应器配置和操作策略^[29-31]。但由于优势菌属和反应器构型以及运行参数等的不同导致最适 S/N 有较大差异。此外,pH、HRT 和 COD 等参数均可影响亚硝氮的积累^[27]。自养脱氮系统 SDA 无需投加有机碳源,并能够消除废水中的有毒含硫化合物,实现 SDA 可以减少碳排放,并简化废水处理。

2.4.3 厌氧氨氧化与脱硫组合工艺存在问题和应用前景

已在实验室规模上对 SDA 工艺的可行性和稳

定性进行了研究^[32]。然而,硫化物对 Anammox 生物量的毒性机制尚不清楚。需要对 SDA 工艺在大规模实际废水处理中的性能进行评估,以验证其适用性。此外,功能菌的生长缓慢,富集时间长,如何实现快速启动和富集是当前研究的重点,需要进行动力学研究、微生物分析、模型评估和更大规模的研究,以更好地了解 SDA 工艺的动力学并优化操作条件。

2.5 厌氧氨氧化和厌氧甲烷氧化组合工艺

2.5.1 厌氧氨氧化-反硝化型厌氧甲烷氧化

Anammox 组合反硝化型厌氧甲烷氧化(A-n-DAMO)过程可同步实现污水深度脱氮及 CH₄ 减排。n-DAMO 古菌和 n-DAMO 细菌以 CH₄ 作为电子供体和碳源,以硝氮/亚硝氮作为电子受体进行厌氧甲烷氧化过程^[33],将硝氮、亚硝氮转化为亚硝氮或氮气,AnAOB 进一步实现完全脱氮,不需要严格控制亚硝氮与氨氮的比值,对于污水波动具有较强的稳定性。对于降低水处理碳排放、实现生物脱氮技术绿色升级具有重要意义。

2.5.2 厌氧氨氧化-厌氧甲烷氧化组合工艺存在问题及应用前景

A-n-DAMO 功能微生物生长缓慢,菌群相互作用交互作用机制尚不清晰。Liu 等^[34]研究发现了与传统认知不同的 n-DAMO 细菌代谢途径,在 RNA 水平表达了完整的从硝氮还原到氮气的基因,因此需要进一步研究 n-DAMO 细菌和 n-DAMO 古菌的微生物代谢机理,为调节功能菌群协同高效脱氮的关键调控方法提供理论依据。此外,由于 CH₄ 溶解度差,这通常被认为是一个限速步骤,可显著影响 n-DAMO 和 Annamox 工艺。

有研究在中空纤维膜生物膜反应器中成功富集 n-DAMO 微生物和 AnAOB,并建立共培养系统^[35]。微生物附着在纤维表面并形成生物膜,缩短传质过程,缓解 CH₄ 转移的限制,被认为是促进 n-DAMO 中 CH₄ 利用的有效方法。此外,颗粒污泥系统保持较高的生物质浓度和较长的固体停留时间,能为生长缓慢的 n-DAMO 微生物提供足够的时间。因此,通过构建生物膜系统或形成颗粒污泥使 n-DAMO 细菌、n-DAMO 古菌和 AnAOB 根据不同

的动力学参数和基质类型在生物膜中的传输方向形成独特的生态位,为 n-DAMO 微生物的培养和保留提供理想的解决方案。

2.6 其他厌氧氨氧化组合新工艺

DP(反硝化除磷)-ED(内源反硝化)-A 可以在缺氧条件下协同脱氮除磷,该技术在低 C/N 的条件下,充分利用细胞内碳源充当电子供体,实现氮和磷的同时消除^[36];藻、硝化菌和 AnAOB 组合有望在减少曝气和碳排放的情况下从废水中去除氮,藻类作为光合生物可以减少二氧化碳排放,为硝化作用提供氧气,并可实现资源回收,有研究报道了利用 A(藻)-PNA 工艺,在没有曝气的情况下,实现了有效的自养脱氮^[37]。但是菌藻共生体系的微生物代谢、能量转化和交互作用以及 AnAOB 如何适应长期光照的内在机制仍然需要进一步探究。

Anammox 因其高效经济的显著优势与各种工艺组合实现废水深度处理,为了保证组合系统有效工作,操作条件和环境条件是十分关键的。尽管已有研究表明 Anammox 组合新工艺可以通过各种策略启动,但从实验室规模的操作转向工业规模的操作并不容易。为了控制和稳定废水深度脱氮应用中的 Anammox 组合新工艺,需要更多的研究来探究不同组合新工艺在长期运行中实现稳定性能的关键参数,包括显著影响 AnAOB 的因素,如温度、pH、盐度、基质浓度和抑制物等的影响。此外,为有效地将 Anammox 整合于多流程系统实现多污染物去除协同脱氮,仍需深入揭示 AnAOB 与其他功能菌群之间的竞争和共生机制,探明不同微生物代谢及其产物与菌群功效之间的关系,明晰通过自动控制或反馈系统保持 AnAOB 和其他关键功能菌群之间平衡的可行性。

3 结论

Anammox 可以灵活地与 PN、PD、反硝化、CW、回收磷、脱硫和 n-DAMO 等工艺相结合,解决基于 Anammox 应用时出水硝氮残留、有机物抑制和脱氮效率难以进一步提高等难题。开辟了可持续废水脱氮的处理前景。本文重点阐明基于 Anammox 与其组合所得到的新工艺(图 1),并探讨了

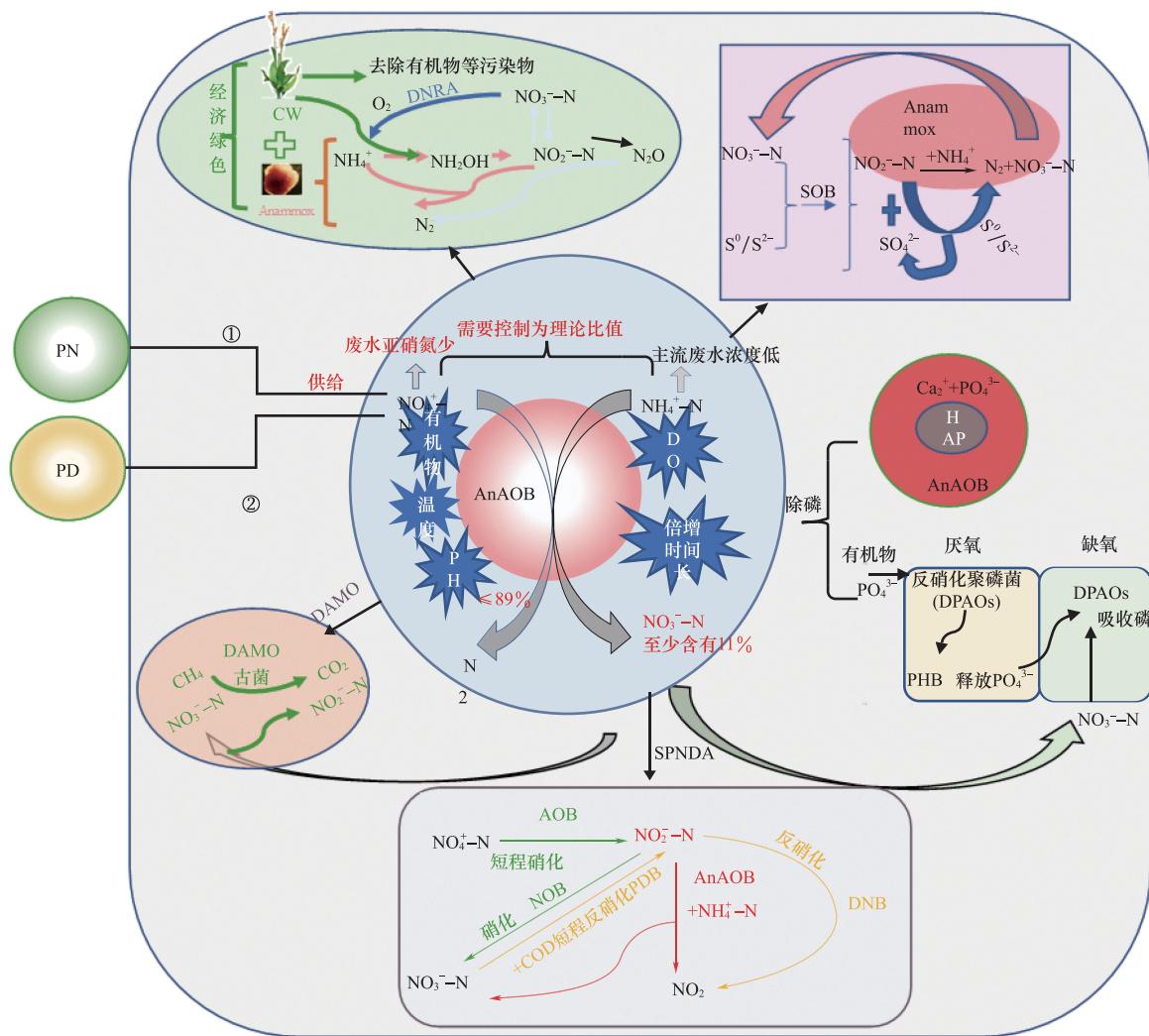


图 3 基于厌氧氨氧化工艺的不同组合脱氮新工艺

Fig. 3 New process of nitrogen removal based on different combinations of anaerobic ammonia oxidation process

基于 Anammox 组合新工艺的脱氮效率、应用前景以及未来的研究重点,有助于促进对 Anammox 组合工艺的全面理解,开辟了更可持续的废水脱氮处理前景。基于 Anammox 的组合脱氮工艺在深度脱氮和经济方面的潜力,需要进一步研究不同的工况和反应器配置对组合系统性能和微生物的影响,构建更有效功能微生物群落,尤其是在低氮浓度和高 C/N 比下以 AnAOB 有效持留为核心的脱氮组合新工艺,以确保基于 Anammox 系统的稳定性,实现资源回收、深度脱氮、长期高效稳定运行,为 Anammox 的大规模应用奠定基础。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, et al. Full-scale partial nitritation/anammox experiences - An application survey[J]. Water Research, 2014, 55:292-303.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.032>
- [2] Laureni M, Weissbrodt D G, Szivák I, et al. Activity and growth of anammox biomass on aerobically pre-treated municipal wastewater[J]. Water Research, 2015, 80:325-336.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.026>
- [3] Kosgey K, Zungu P V, Kumari S, et al. Critical review of process control strategies in anammox-mediated nitrogen removal systems[J]. Journal of Environmental Chemical

- Engineering, 2022, 10(4):108068.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108068>
- [4] Cao S, Koch K, Duan H, et al. In a quest for high-efficiency mainstream partial nitritation-anammox(PN/A) implementation: One-stage or two-stage? [J]. Science of The Total Environment, 2023, 883:163540.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163540>
- [5] Li J, Li J, Peng Y, et al. Insight into the impacts of organics on anammox and their potential linking to system performance of sewage partial nitrification-anammox (PN/A): A critical review[J]. Bioresource Technology, 2020, 300:122655.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122655>
- [6] Al-Hazmi H E, Maktabifard M, Grubba D, et al. An advanced synergy of partial denitrification-anammox for optimizing nitrogen removal from wastewater: A review [J]. Bioresource Technology, 2023, 381:129168.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129168>
- [7] Ahmad H A, Ahmad S, Gao L, et al. Energy-efficient and carbon neutral anammox-based nitrogen removal by coupling with nitrate reduction pathways: A review[J]. Science of The Total Environment, 2023, 889:164213.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164213>
- [8] Laureni M, Weissbrodt D G, Viliez K, et al. Biomass segregation between biofilm and flocs improves the control of nitrite-oxidizing bacteria in mainstream partial nitritation and anammox processes[J]. Water Research, 2019, 154:104-116.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.051>
- [9] Duan H, Ye L, Lu X, et al. Overcoming nitrite oxidizing bacteria adaptation through alternating sludge treatment with free nitrous acid and free ammonia[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(4):1937-1946.
DOI:[10.1021/acs.est.8b06148](https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06148)
- [10] Schaefer S C, Hollibaugh J T. Temperature decouples ammonium and nitrite oxidation in coastal Waters[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(6):3157-3164.
DOI:[10.1021/acs.est.6b03483](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03483)
- [11] Wu J, Kong Z, Luo Z, et al. A successful start-up of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) coupled mainstream partial nitritation-anammox(PN/A) system: A pilot-scale study on in-situ NOB elimination, AnAOB growth kinetics, and mainstream treatment performance[J]. Water Research, 2021, 207:117783.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117783>
- [12] Gao F, Zhang H, Yang F, et al. The effects of zero-valent iron(ZVI) and ferroferric oxide(Fe_3O_4) on anammox activity and granulation in anaerobic continuously stirred tank reactors(CSTR)[J]. Process Biochemistry, 2014, 49(11):1970-1978.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.07.019>
- [13] Hu Z, Liu T, Wang Z, et al. Toward energy neutrality: Novel wastewater treatment incorporating acidophilic ammonia oxidation[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(11):4522-4532.
DOI:[10.1021/acs.est.2c06444](https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06444)
- [14] Cao S, Du R, Peng Y, 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:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.160>
- [15] Okabe S, Oshiki M, Takahashi Y, et al. N_2O emission from a partial nitrification-anammox process and identification of a key biological process of N_2O emission from anammox granules[J]. Water Research, 2011, 45(19):6461-6470.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.09.040>
- [16] Wang J, Liang J, Ning D, et al. A review of biomass immobilization in anammox and partial nitrification/anammox systems: Advances, issues, and future perspectives[J]. Science of The Total Environment, 2022, 821:152792.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152792>
- [17] Zhang X, Wu P, Xu L, et al. A novel simultaneous partial nitritation, denitrification and anammox (SPNDA) process in sequencing batch reactor for advanced nitrogen removal from ammonium and nitrate wastewater [J]. Bioresource Technology, 2022, 343:126105.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126105>
- [18] Li M, Li Y, Wang N, et al. Achieving efficient nitrogen removal in a single-stage partial nitrification-anammox-partial denitrification (PN/A/PD) membrane aerated biofilm reactor(MABR)[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 49:103100.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103100>
- [19] Valipour A, Ahn Y. Constructed wetlands as sustainable ecotechnologies in decentralization practices: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(10):18000-18015.

- search,2016,23(1):180-197.
DOI:10.1007/s11356-015-5713-y
- [20] Wang J, Wang Y, Bai J, et al. High efficiency of inorganic nitrogen removal by integrating biofilm-electrode with constructed wetland: Autotrophic denitrifying bacteria analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 227: 7-14.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.046>
- [21] Joseph S M R, Wijekoon P, Dilsharan B, et al. Anammox, biochar column and subsurface constructed wetland as an integrated system for treating municipal solid waste derived landfill leachate from an open dumpsite[J]. *Environmental Research*, 2020, 189:109880.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109880>
- [22] Srivastava P, Yadav A K, Garaniya V, et al. Electrode dependent anaerobic ammonium oxidation in microbial fuel cell integrated hybrid constructed wetlands: A new process[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 698:134248.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134248>
- [23] Zhang Y, Qiao Y, Fu Z. Shifts of bacterial community and predictive functional profiling of denitrifying phosphorus removal-Partial nitrification-Anammox three-stage nitrogen and phosphorus removal before and after coupling for treating simulated wastewater with low C/N [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451:138601.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138601>
- [24] Ma H, Xue Y, Zhang Y, et al. Simultaneous nitrogen removal and phosphorus recovery using an anammox expanded reactor operated at 25°C[J]. *Water Research*, 2020, 172:115510.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115510>
- [25] Chen Y, Guo Y, Feng G, et al. Key factors improving the stability and the loading capacity of nitrogen removal in a hydroxyapatite (HAP)-enhanced one-stage partial nitritation/anammox process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452:139589.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139589>
- [26] Song Y, Ma Z, Du R, et al. Microbial commensalism-assisted fast acclimation of HAP-anammox granules to dewatered liquid of dry methane fermentation [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344:126238.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126238>
- [27] Wang L, Yuan Y, Song Y. Condition of accumulating nitrite and sulfur on sulfide autotrophic denitrification [J]. *Environmental Science&Technology*, 2013, 36(12):20-23,43.
- [28] Ali M, Oshiki M, Awata T, et al. Physiological characterization of anaerobic ammonium oxidizing bacterium ‘*Candidatus Jettenia caeni*’[J]. *Environmental Microbiology*, 2015, 17(6):2172-2189.
DOI:<https://doi.org/10.1111/1462-2920.12674>
- [29] Deng Y, Wu D, Huang H, et al. Exploration and verification of the feasibility of sulfide-driven partial denitrification coupled with anammox for wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2021, 193:116905.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116905>
- [30] Yuan Y, Li X, Li B. Autotrophic nitrogen removal characteristics of PN-anammox process enhanced by sulfur autotrophic denitrification under mainstream conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 316:123926.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123926>
- [31] Wang T, Guo J, Song Y, et al. Efficient nitrogen removal in separate coupled-system of anammox and sulfur autotrophic denitrification with a nitrification side-branch under substrate fluctuation[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 696:133929.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133929>
- [32] Liu H, Zeng W, Li J, et al. Effect of $S_2O_3^{2-}$ -S addition on Anammox coupling sulfur autotrophic denitrification and mechanism analysis using N and O dual isotope effects[J]. *Water Research*, 2022, 218:118404.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118404>
- [33] Fan S, Xie G, Lu Y, et al. Development of granular sludge coupling n-DAMO and Anammox in membrane granular sludge reactor for high rate nitrogen removal [J]. *Environmental Research*, 2020, 186:109579.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109579>
- [34] Liu T, Hu S, Yuan Z, et al. Microbial stratification affects conversions of nitrogen and methane in biofilms coupling anammox and n-DAMO processes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57 (11): 4608-4618.
DOI:10.1021/acs.est.2c07294
- [35] Ding J, Zeng R J. Fundamentals and potential environmental significance of denitrifying anaerobic methane oxidizing archaea [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 757:143928.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143928>
- [36] Huang W, Zhou J, He X, et al. Simultaneous nitrogen

- and phosphorus removal from simulated digested pigery wastewater in a single-stage biofilm process coupling anammox and intracellular carbon metabolism [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 333: 125152.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125152>
- [37] Manser N D, Wang M, Ergas S J, et al. Biological nitrogen removal in a photosequencing batch reactor with an algal-nitrifying bacterial consortium and anammox granules[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2016, 3(4): 175-179.
DOI: 10.1021/acs.estlett.6b00034

Research Progress, Problems and Future Prospects of A New Combined Anaerobic Ammonia Oxidation and Nitrogen Removal Process

TANG Xifang¹, WANG Yage¹, ZHANG Yi¹, LIU Jiayi¹, FU Yulin¹,
CHEN Rong^{1,2,3,4,5}, WANG Xiaochang^{1,2,3,4,5} XING Baoshan^{1,2,3,4,5,*}

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an 710055, China; 3. International Science & Technology Cooperation Center for Urban Alternative Water Resources Development, Xi'an 710055, China; 4. Engineering Technology Research Center for Wastewater Treatment and Reuse, Shaanxi Province, Xi'an 710055, China; 5. Key Laboratory of Environmental Engineering, Shaanxi Province, Xi'an 710055, China)

Abstract: Anaerobic ammonium oxidation (Anammox) is a cost-effective and efficient process for nitrogen removal, which has attracted widespread attention in the field of wastewater treatment due to its significant advantages. However, the slow rate of growth of anaerobic ammonium oxidizing bacteria (AnAOB) and its sensitivity to operational and environmental conditions hinder its wide application. Although various control strategies have been explored and developed, the application of Anammox process still faces many challenges, including unstable nitrogen removal performance and the necessity for additional treatment of effluent nitrate nitrogen. Due to the importance and necessity of Anammox in wastewater denitrification, this paper first introduces the present biological denitrification system based on Anammo. In view of the insufficient source of nitrite nitrogen in nitrogen-containing wastewater, nitrite nitrogen can be provided by partial nitrification (PN) or partial denitrification (PD), however, the stability of system operation and efficiency of denitrification are still the difficulties in Anammox engineering applications. It is especially crucial to study the combined new processes based on Anammox to achieve stable deep biological nitrogen removal from wastewater. Therefore, this paper focuses on latest research progress in Anammox coupled simultaneous partial nitrification, denitrification and anammox (SPNDA), constructed wetland (CW), phosphorus removal/recovery process, sulfur denitrification removal (SDA) and denitrifying anaerobic methane oxidation (A-DAMO). The nitrogen removal performance, influencing factors, operation advantages, research progress, application prospects and challenges are reviewed. Compared with the single Anammox process, the combined process offers several advantages, including overcoming the issue of nitrate in the effluent (SPNDA, A-DAMO, SDA), alleviate the inhibition of organic matter on AnAOB (SPNDA, SDA), recover non-renewable resources (HAP), and achieve a clean environment with significant economic benefits (A-CW), providing flexibility for the promotion and application of Anammox process. The study outlines future directions

for researching, developing, and applying the Anammox combined nitrogen removal process, and at the same time provides as a reference for lowering energy consumption, achieving efficient and stable nitrogen removal processes, and broadening the scope of engineering application.

Keywords: Anaerobic ammonia oxidation; influencing factors; coupling process; deep nitrogen removal

DOI: 10.48014/fcws.20230918002

Citation: TANG Xifang, WANG Yage, ZHANG Yi, et al. Research progress, problems and future prospects of a new combined anaerobic ammonia oxidation and nitrogen removal process[J]. Frontiers of Chinese Water Sciences, 2024, 2(1):4-15.

Copyright © 2024 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

