



Anammox 的实现及其应用前景分析

蒙小俊, 龚晓松, 王秋利, 韩 勇

(安康学院旅游与资源环境学院, 陕西安康 725000)

[摘要] 低碳高效的 Anammox 技术在污水处理中对实现“双碳”目标具有潜力, 并为污水处理厂工艺带来技术变革。对传统脱氮和 Anammox 脱氮进行了比较, 指出 Anammox 在节能降耗和温室气体减排中具有优势; 分析了实现短程硝化 Anammox(PNA)和短程反硝化 Anammox(PDA)稳定获得 NO_2^- 的控制策略, 其中游离氨(FA)、温度、DO 和间歇曝气是 PNA 的重点调控因子, 而碳氮比是 PDA 的重要控制因素。基于控制原理, Anammox 技术在多种污水中具有应用前景, 但 PNA 更适合污泥消化液、污泥脱水液和垃圾渗滤液的处理, PDA 则更适合低温、低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的主流污水, 以及城市污水和 NO_3^- 污水混合污水的处理。未来研究的重点在于: 界定适于 PNA 和 PDA 的污水种类, 考察污水组分对 PNA/PDA 的影响及响应, 中试验证各种污水的 PNA/PDA, 改造升级传统脱氮以实现 PNA/PDA。

[关键词] 生物脱氮; Anammox; 节能降耗; 碳达峰; 碳中和

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)04-0045-07

Implementation of Anammox and its application prospect analysis

MENG Xiaojun, GONG Xiaosong, WANG Qiuli, HAN Yong

(School of Tourism and Environment, Ankang University, Ankang 725000, China)

Abstract: Anammox technology with low carbon and high efficiency has the potential to achieve the "carbon peaking and carbon neutrality goals" in wastewater treatment, and brings technological changes to wastewater treatment plant processes. Traditional denitrification and Anammox denitrification were compared, and it was pointed out that Anammox has advantages in energy saving and greenhouse gas emission reduction. The control strategies to achieve stable NO_2^- acquisition by PNA and PDA were analyzed, among which FA, temperature, DO and intermittent aeration were the key control factors of PNA, while carbon-nitrogen ratio was an important control factor of PDA. Based on the control principles, Anammox technology has promising applications in a variety of wastewaters, but PNA is more suitable for the treatment of sludge digestion liquid, sludge dewatering liquid and landfill leachate. While PDA is more suitable for the treatment of mainstream wastewater with low temperature, low $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and mixture of municipal wastewater and NO_3^- wastewater. Future research will focus on defining wastewater types suitable for PNA and PDA, examining the effect and response of effluent components on PNA/PDA, demonstrating PNA/PDA for various effluents in pilot tests, and upgrading traditional denitrification to realize PNA/PDA.

Key words: biological denitrification; Anammox; energy-saving; carbon peaking; carbon neutral

鉴于不同功能的微生物生理代谢特性存在差异, 传统脱氮在不同的反应器中进行, 即通过氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(NO_B)在好氧条件下完成硝化, 然后由异养反硝化细菌(DNB)在缺氧条件下以有机物为电子供体实现反硝化^[1-2]。传统脱氮曝气和污泥处理能耗占污水处理厂运行能耗的 60%~80%, 高水质标准通常需要处理系统消耗大量能源^[3-4]。而污

水处理过程加入的化学药剂会进一步提高其处理成本。此外, 污水处理排放的 CO₂ 占全球 CO₂ 排放总量的 4%, N₂O 排放占 N₂O 总排放量的 21.5%~25%。预计到 2030 年, 污水处理排放的温室气体占全球非 CO₂ 温室气体排放总量的 27%^[5-6]。大量的曝气投资、污泥处理、化学药剂添加和温室气体排放等因素导致污水处理是能源密集型过程, 这与中国面向新型污水处理要求水质

[基金项目] 汉江流域上游面源污染负荷特征与控制对策研究(2021AYKFKT04)

永续、能源回收、资源循环和环境友好不符。

2020年9月,中国明确提出CO₂排放力争于2030年前达到峰值,争取在2060年前实现碳中和。传统污水处理行业的间接碳排放主要是生产过程中电力和药剂等的消耗,直接碳排放主要来自生物反应过程中CO₂和N₂O等的逸散。随着世界各国污水排放标准愈加严格,传统脱氮工艺效率不足、能耗巨大及其带来的二次污染问题日益凸显,而Anammox技术彰显出的经济、高效与可持续性,带来颠覆性技术变革^[7]。“双碳”目标使污水处理在新型低碳技术应用方面推动了Anammox、好氧颗粒污泥、碳富集等技术在落地推广^[8]。Anammox是目前最经济高效的污水脱氮技术,是污水处理实现碳减排的主要路径之一。Anammox污水处理技术已成为环境领域的研究热点和前沿,需全面分析如何实现Anammox及其应用前景,以推动该技术在我国的工程应用。

笔者将Anammox同传统脱氮技术进行比对,总结了实现Anammox的控制策略,对Anammox技术应用前景进行分析,以期为加快Anammox在我国应用、助推污水处理实现“双碳”目标提供支持。

1 Anammox 技术优势

厌氧氨氧化菌(AAOB)驱动的Anammox反应以

NO₂⁻-N和NH₄⁺-N为反应所需的基质,污水中主要含有NH₄⁺-N,依据NO₂⁻-N的提供途径则分别形成了基于短程硝化(PN)的Anammox和基于短程反硝化(PD)的Anammox。PN-Anammox(PNA)和PD-Anammox(PDA)是Anammox技术的两种形式。Anammox技术同传统脱氮过程的比较见表1^[7,9-10]。参与传统脱氮反应的功能菌为AOB、NOB和DNB,参与PNA反应的功能菌株为AOB和AAOB,而参与PDA反应的功能菌株为AOB、NOB、DNB和AAOB。PNA和PDA的电子供体分别为NH₄⁺-N, NH₄⁺-N+碳源。理论上传统脱氮、PNA和PDA的脱氮效率分别为100%、89%、100%;但相比传统脱氮,PNA和PDA耗氧分别降低57%、48%,COD消耗分别减少89%、54%,生物污泥分别降低84%、66%,CO₂减排分别为100%、80%,N₂O排放分别减少57%、50%。Anammox脱氮在节能降耗和温室气体减排方面具有显著优势,这归因于AAOB独特的性质^[11]:AAOB为化能自养微生物,脱氮途径是迄今为止最简洁的,脱氮过程无需曝气和有机物,节省能耗和药剂投加,污泥产量少。实验研究中Anammox脱氮(以N计)可达76.7 kg/(m³·d),在主流污水处理中也高达(7.0±0.3) kg/(m³·d)^[12-13]。尽管Anammox技术脱氮优势明显,但如何实现Anammox是该技术应用的前提。

表1 Anammox脱氮与传统脱氮的比较

Table 1 Comparison of Anammox denitrification and tradition denitrification

项目	传统脱氮	Anammox脱氮	
		PNA	PDA
反应式	$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ $\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{NH}_4^+ + 1.37\text{O}_2 + 0.08\text{CO}_2 + 0.02\text{HCO}_3^- \longrightarrow 0.98\text{NO}_2^- + 0.02\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2 + 0.97\text{H}_2\text{O} + 1.96\text{H}^+$	$\text{NH}_4^+ + 1.82\text{O}_2 + 0.13\text{CO}_2 \longrightarrow 0.03\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2 + 0.97\text{NO}_3^- + 0.92\text{H}_2\text{O} + 1.97\text{H}^+$
	$5\text{CH}_3\text{COO}^- + 5\text{H}^+ + 8\text{NO}_3^- \longrightarrow 4\text{N}_2 + 10\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 8\text{OH}^-$	$\text{NH}_4^+ + 1.32\text{NO}_2^- + 0.066\text{HCO}_3^- + 0.13\text{H}^+ \longrightarrow 1.02\text{N}_2 + 0.26\text{NO}_3^- + 0.066\text{CH}_2\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.15} + 2.03\text{H}_2\text{O}$	$\text{NO}_3^- + 0.37\text{CH}_3\text{COO}^- + 0.036\text{H}^+ \longrightarrow 0.036\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2 + 0.97\text{NO}_2^- + 0.37\text{HCO}_3^- + 0.26\text{H}_2\text{O} + 0.19\text{CO}_2$
运行条件	好氧+缺氧	限氧+厌氧	好氧+厌氧
电子供体	碳源	NH ₄ ⁺ -N	碳源+NH ₄ ⁺ -N
功能菌株	AOB+NOB+DNB	AOB+AAOB	AOB+NOB+DNB+AAOB
氮去除率/%	100	89	100
O ₂ 消耗/(g·g ⁻¹)	4.57	1.95	2.39
COD消耗/(g·g ⁻¹)	2.86	0.31	1.31
生物污泥/(g·g ⁻¹)	0.86	0.14	0.29
CO ₂ 排放/(g·g ⁻¹)	3.93	0	0.79
N ₂ O排放	较高	减少57%	减少50%

2 Anammox 技术的实现

Anammox脱氮本质上是生物酶促的反应,不同

细菌(AOB、NOB、DNB和AAOB)具有不同的环境敏感性。AOB和AAOB的协同作用以及AOB、NOB、DNB和AAOB的协同作用是实现Anammox技术的

基础^[9]。各功能微生物在PNA和PDA过程中对氮素转化所起的协同作用如图1所示。

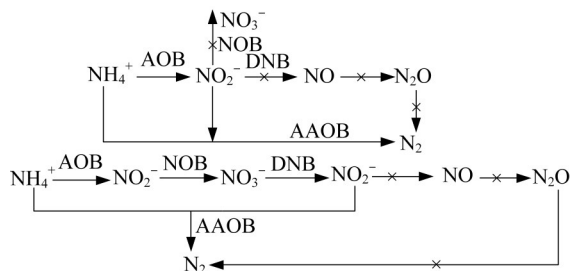


图1 PNA和PDA脱氮过程

Fig. 1 Process of PNA and PDA denitrification

PNA过程在AOB作用下产生 NO_2^- ,而PDA过程在AOB、NOB和DNB共同作用下产生 NO_2^- ,两者产生的 NO_2^- 不进一步发生其他反应,仅与 NH_4^+-N 在AAOB作用下生成 N_2 ;但相比于PNA,PDA发生的是全程硝化。全程硝化比PN容易控制,高效稳定地获得 NO_2^- 决定了PNA和PDA的实现^[14-15]。

NO_2^- 稳定产生的关键是对AOB、NOB和DNB进行定向调控,产生 NO_2^- 的实质就是结合AOB、NOB和DNB不同菌株的生物特性并采取有效措施调控PN和PD过程产生 NO_2^- 。如AOB在高温条件下的生长速率优于NOB,可通过温度选择富集AOB而抑制NOB;控制污泥停留时间(SRT)长于AOB的倍增时间,但短于NOB的倍增时间可以积累 NO_2^- ^[16];低温条件下AOB的最小SRT大于NOB的最小SRT^[17]。因此,若选择温度和SRT策略调控PN,PNA工艺则多用于高温废水的处理(城镇污水侧流工艺中的污泥消化液等)。高浓度 NH_4^+-N 条件下创造了抑制NOB的游离氨(FA)条件。FA常作为控制因子用于处理垃圾渗滤液、污泥消化液和特定的工业废水等,不利于浓度较低的 NH_4^+-N 废水处理,但收集并重新循环侧流消化液中的FA,使其返回主流工艺可实现NOB的抑制。尽管保留出水 $\text{NH}_4^+-\text{N}>2\text{ mg/L}$ 可抑制NOB^[18],但对于排放标准较高要求的废水不适宜。

曝气是最有效的措施之一。在废水处理中所需的DO浓度应结合PN实际情况进行控制。C. PICIOREANU等^[19]和Yong MA等^[20]认为AOB的氧半饱和常数低于NOB的氧半饱和常数,较低的DO有利于实现PN。但Peng BAO等^[21]和P. REGMI等^[22]发现高DO有利于PN并保持其稳定。研究表明,1.5 mg/L DO可以获得 NO_2^- 积累,但在0.5 mg/L低

DO条件下未能实现PN^[22-23]。这些差异可能是由不同的废水水质、处理工艺和环境条件形成不同的微生物群落以及关键功能微生物群落之间的竞争引起的^[23]。由于缺氧干扰后抑制NOB的关键酶失活或中间产物(如羟胺)对NOB的抑制,NOB从缺氧状态过渡到有氧状态期间的滞后时间比AOB长,控制DO浓度并结合间歇曝气,AOB活性不断提高,NOB活性逐渐降低并被淘汰,间歇曝气对于PNA是较为有效的控制手段^[24-25]。此外,控制污泥形态、控制pH、控制有机物和侧流补充AOB等均能实现PNA。各种策略具体见图2^[9-10,26]。

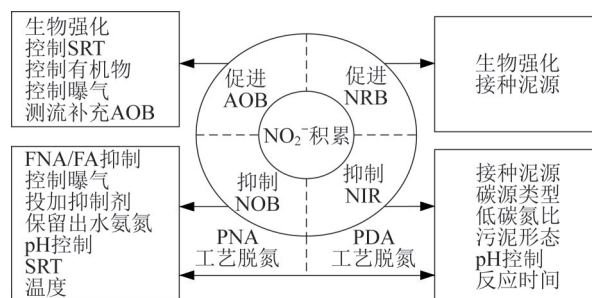


图2 PNA和PDA脱氮过程亚硝酸盐积累策略

Fig. 2 Nitrite accumulation strategy in PNA and PDA denitrification process

值得注意的是,AAOB和AOB均为自养菌,适宜PNA的废水经厌氧处理后出水碳氮比应 <0.5 ^[27];单一策略往往控制效果不佳,需多种策略结合使用。Jun GU等^[28]控制DO为1.5 mg/L,结合间歇曝气, NH_4^+-N 氧化为 NO_2^- 的转化率(NAR)为97%。Han WANG等^[29]控制DO为0.5 mg/L,并控制SRT为4 d,获得的NAR为96%。

完整的DNB反硝化反应需硝酸还原酶(NAR/NAP)、亚硝酸盐还原酶(NIR)、一氧化氮还原酶(NOR)和一氧化二氮还原酶(NOS)参与,将 NO_3^- 还原为 N_2 。在仅以 NH_4^+-N 为基质的废水中(如图1所示),PDA无需对NOB进行控制,且 NO_2^- 止于DNB作用的第一阶段。因此,PD产生 NO_2^- 有两种途径,分别为富集硝酸盐呼吸菌(NRB)和通过酶促反应调节NIR酶的活性,抑制其表达,形成 NO_2^- 还原速率远低于 NO_3^- 还原速率^[9,30]。图2显示,多种策略可以调控PD产生 NO_2^- ^[9-10,26,30]。在众多控制因素中,重点控制的是碳氮比。研究表明,碳氮比(COD/ NO_3^- -N)为2~3.5时反硝化过程有利于 NO_2^- 的积累^[31-33],可以获得较高的 NO_3^- 还原为 NO_2^- 的转化率和AAOB适合的进水

底物。在碳氮比控制中,碳源应优先充分利用污水中的有机物,若污水处理中易于生物降解的COD不足,可以添加外碳源如乙酸钠等^[15]。发酵能够将污水中的碳水化合物和蛋白质水解/发酵成有机酸,补充原废水中易生物降解有机物的不足,从而为PD提供底物^[34]。为实现 NO_2^- -N的快速高效积累,以城市污水直接启动PD时应选取缺氧反硝化污泥作为接种泥源,调控pH为9.0,反应时间30~80 min,能够对DNB产生还原抑制^[35]。

3 Anammox 技术应用前景

3.1 PNA 应用前景分析

依据实现PN的策略,结合AAOB特征控制,PNA可用于污泥液、垃圾渗滤液、畜禽养殖废水、味精废水、城市生活污水、焦化废水和含盐废水等的处

理^[36]。王凡等^[37]利用PNA处理垃圾渗滤液,进水 NH_4^+ -N为600 mg/L、COD<483 mg/L时,TN去除速率达1.88kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),TN去除率可达90.3%。卢欣欣等^[38]采用移动床生物膜反应器处理磷回收后的污泥液,在进水平均 NH_4^+ -N为167.51 mg/L、HRT为22.24 h、DO为0.5 mg/L、温度为24~26 °C的条件下实现了PNA, NH_4^+ -N和TN最大去除率达96%、79.7%;但反应器受DO浓度影响较大,维持稳定的DO浓度对系统的氮去除非常重要。尽管大量实验研究表明PNA可用于多种废水的处理,但全球约75%的PNA装置主要用于侧流条件处理污泥消化液和脱水液,88%的装置作为单级系统运行。国内外的工程案例见表2^[39-40],在主流城市污水、垃圾渗滤液和炼焦煤气废水等处理方面具有应用潜力。

表2 PNA污水处理工程案例

Table 2 Project cases of PNA wastewater treatment

	工程	处理对象	脱氮负荷/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)	建设时间
国外	德国 Mechernich 垃圾填埋场渗滤液处理厂	垃圾渗滤液	1.23	1994 年
	荷兰鹿特丹 Sluisjesdijk 污泥处理站	污泥消化液	9.9	2002 年
	德国 Hattingen 污水处理厂	污泥脱水液	0.3~0.4	2002 年
	奥地利 Strass 污水处理厂	污泥脱水液	0.7	2003 年
	荷兰 Lichtenvoorde 制革工业污水处理厂	污泥脱水液	1.0	2004 年
	荷兰 Olburgen 工业污水处理厂	污泥脱水液	1.2	2006 年
	荷兰 Bergen op Zoom 工业污水处理厂	工业废水消化液	0.26	2010 年
	荷兰 Apeldoorn	污泥脱水液	0.41	2010 年
	瑞典 Sjölanda 污水处理厂	污泥脱水液	1.2	2010 年
	新加坡樟宜污水厂	市政污水	0.12	2011 年
	丹麦 Marselisborg 污水厂	市政污水	—	2015 年
国内	台湾垃圾渗滤液处理	垃圾渗滤液	—	2006 年
	安琪酵母公司污水处理	酵母生产废水	2.00	2009 年
	梅花工业园污水处理Ⅱ期	味精生产废水	2.20	2010 年
	山东湘瑞药业有限公司污水处理	玉米淀粉和味精生产废水	1.42	2011 年
	新疆五家渠工业园区污水处理	味精废水	1.98	2011 年
	湖北十堰西部垃圾渗滤液处理	垃圾渗滤液	—	2015 年
	北京高碑店污水处理厂	污泥消化液	—	—

实际废水尤其是工业废水中的化学成分复杂,氮浓度较高,极易影响菌株的生长代谢。PNA 废水处理中应结合水质组分和浓度进行必要的预处理,保证工艺的启动和稳定运行。此外,PNA 工艺在新加坡樟宜污水厂中得到应用,但推广主流应用要解决城市污水低 NH_4^+ -N和低温对AOB的活性抑制,有机物对AAOB的潜在抑制等问题^[7]。PNA至少会产生11%的 NO_3^- -N,导致脱氮效率相对较差,TN可能达不到排放标准要求,需结合反硝化或PDA工艺进行脱氮。Lina Wu等^[41]利用生活污水将COD为

4 000~5 000 mg/L、 NH_4^+ -N为1000~1 300 mg/L的垃圾渗滤液稀释后进行PNA-PDA处理,TN去除率达95%。

3.2 PDA 应用前景分析

PDA可用于多种污水的处理,如生活污水和 NO_3^- -N废水的混合污水、生活污水、垃圾渗滤液和煤气化废水等^[42]。王刚等^[43]通过控制反应器温度在15~25 °C、pH在8.0~8.5、投加少量有机碳源的措施,实现了对PD过程的稳定控制, NO_2^- -N积累率达85.7%,出水TN去除率可达87.0%,出水COD<

28.0 mg/L, NH_4^+-N < 4.8 mg/L。研究表明, PDA以乙酸钠作为外加有机物, 在温度频繁波动(16.3~25.7 °C)、 NH_4^+-N 为57.87 mg/L, COD为176.02 mg/L的主流条件下, $\text{NO}_3^- - \text{NO}_2^-$ 转化率始终保持>90%, 高 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累能力与温度和进水水质变化无关; PDA系统出水水质优良, TN < 5 mg/L^[15]。PDA工艺在城市污水深度处理中也具有优势。Shenbin CAO等^[44]利用两级PDA工艺处理城市生活污水二级出水, 调控出水与城市污水体积比为2.9~6, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率达到97.9%, NH_4^+-N 和COD平均去除率分别为95.2%、81.6%, 出水 TN < 4.0 mg/L。PDA可解决PNA面临的主流污水处理难题, 中试实验和实际污水处理厂的运行结果均表明PD可为Anammox提供稳定的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 。西安第四污水处理厂中Anammox脱氮贡献率可达15.9%^[45-47], PDA有望成为传统城市污水处理的替代工艺, 但如何原位富集功能菌株及对原工艺进行改造等需深入研究。此外, 将工业废水如炸药业、化肥业、金属加工业及核能行业产生的超高浓度 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 废水通过预处理后引入城市污水进行稀释降解, 是未来PDA工艺工程应用的思路^[35], 但工程应用前须全面分析该类废水的化学成分并做相应预处理, 方可引入城市污水PDA工艺。

4 结论与展望

污水处理领域碳减排是实现“双碳”目标的重要组成部分, 而基于传统脱氮的污水处理工艺以高耗能达到污染消减和治理的目的, 如满足更高的水质标准要求耗能更大, 工艺更复杂。低碳高效的Anammox技术在实现“双碳”目标中具有优势, 通过多策略控制可高效稳定地获得 NO_2^- 以实现Anammox。目前, 以温度、FA、DO和间歇曝气为控制手段的PNA更适合污泥消化液、污泥脱水液和垃圾渗滤液的处理, 以碳氮比为重点控制因子的PDA则更适合低温、低 NH_4^+-N 的主流污水, 以及生活污水和高浓度 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 污水混合污水的处理。结合污水水质成分和污染物浓度分析, 采用有效的预处理工艺, PNA和PDA在各种污水中具有应用前景。为更快推广并实现Anammox工程应用, 以下问题有待深入研究: (1)更适用PNA和PDA的污水种类的界定; (2)污水组分对PNA/PDA的影响及其响应; (3)各种污水的PNA/PDA中试验证; (4)如何改造升级传统脱氮以实现PNA/PDA。

参考文献

- [1] ZHANG Xiaojing, LI Dong, LIANG Yuhai, et al. Application of membrane bioreactor for completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process [J]. *Chemosphere*, 2013, 93 (11): 2832-2838.
- [2] ZENG Ming, YANG Junfeng, LI Xiaofang, et al. Enhancement of mainstream nitrogen removal via simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification by the gel entrapment technique [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2020, 6 (3): 767-778.
- [3] SCHERSON Y D, CRIDDLE C S. Recovery of freshwater from wastewater: Upgrading process configurations to maximize energy recovery and minimize residuals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8420-8432.
- [4] JI Jiantao, PENG Yongzhen, MAI Wenke, et al. Achieving advanced nitrogen removal from low C/N wastewater by combining endogenous partial denitrification with anammox in mainstream treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270: 570-579.
- [5] 杨庆, 李洋, 崔斌, 等. 城市污水处理过程中恶臭气体释放的研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(7): 2079-2087.
YANG Qing, LI Yang, CUI Bin, et al. Research advances of odor released from municipal wastewater treatment process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(7): 2079-2087.
- [6] KAMPSCHREUR M J, TEMMINK H, KLEEREBEZEM R, et al. Nitrous oxide emission during wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2009, 43(17): 4093-4103.
- [7] 杜睿, 彭永臻. 城市污水生物脱氮技术变革: 厌氧氨氧化的研究与实践新进展 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(3): 389-402.
DU Rui, PENG Yongzhen. Technical revolution of biological nitrogen removal from municipal wastewater: Recent advances in Anammox research and application [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2022, 52(3): 389-402.
- [8] 王凯军, 宫徽. 在生态文明框架下推动污水处理行业高质量发展 [J]. *给水排水*, 2021, 57(8): 1-7.
WANG Kaijun, GONG Hui. Pursue ecological civilization and promote high quality development of wastewater treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 57(8): 1-7.
- [9] ZHANG Meng, WANG Siyu, JI Bin, et al. Towards mainstream de-ammonification of municipal wastewater: Partial nitrification-anammox versus partial denitrification-anammox [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 393-401.
- [10] 刘华光, 董文艺, 王宏杰, 等. 厌氧氨氧化在城市污水脱氮处理中的研究与应用进展 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(5): 1508-1518.
LIU Huaguang, DONG Wenyi, WANG Hongjie, et al. Research and application advances of Anammox in nitrogen removal from municipal wastewater [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(5): 1508-1518.
- [11] 蒙小俊. 基于厌氧氨氧化菌特性的富集策略及培养过程分析 [J].

- 工业水处理, 2022, 42(8): 34-42.
- MENG Xiaojun. Enrichment strategy and culture process analysis based on the characteristics of Anammox bacteria[J]. Industrial Wastewater Treatment, 2022, 42(8): 34-42.
- [12] TANG Chongjian, ZHENG Ping, WANG Caihua, et al. Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge[J]. Water Research, 2011, 45(1): 135-144.
- [13] Cheng Yafei, Zhang Zhengzhen, Li Guifeng, et al. Anammox granules acclimatized to mainstream conditions can achieve a volumetric nitrogen removal rate comparable to sidestream systems[J]. Environmental Science Technology, 2020, 54: 12959-12966.
- [14] MIAO Yuanyuan, PENG Yongzhen, ZHANG Liang, 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.
- [15] DU Rui, CAO Shenbin, ZHANG Hanyu, et al. Flexible nitrite supply alternative for mainstream anammox: Advances in enhancing process stability[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(10): 6353-6364.
- [16] XU Guangjing, ZHOU Yan, YANG Qin, et al. The challenges of mainstream deammonification process for municipal used water treatment[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(6): 2485-2490.
- [17] 赵志瑞, 侯彦林. 半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2834-2842.
- ZHAO Zhirui, HOU Yanlin. Research progress in microbiological characteristics in combined N_2 removal process by partial nitrification and anaerobic ammonium oxidation[J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2834-2842.
- [18] ZHU Guibing, WANG Shanyun, FENG Xiaojuan, et al. Anammox bacterial abundance, biodiversity and activity in a constructed wetland[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(23): 9951-9958.
- [19] PICIOREANU C, VAN LOOSDRECHT M C M, HEIJNEN J J. Modelling the effect of oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor[J]. Water Science and Technology, 1997, 36(1): 147-156.
- [20] MA Yong, PENG Yongzhen, WANG Shuying, et al. Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant[J]. Water Research, 2009, 43(3): 563-572.
- [21] BAO Peng, WANG Shuying, MA Bin, et al. Achieving partial nitrification by inhibiting the activity of Nitrospira-like bacteria under high-DO conditions in an intermittent aeration reactor[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 56: 71-78.
- [22] REGMI P, MILLER M W, HOLGATE B, et al. Control of aeration, aerobic SRT and COD input for mainstream nitritation/denitrification[J]. Water Research, 2014, 57: 162-171.
- [23] ZHOU Xueyang, LIU Xiuhong, HUANG Siting, et al. Total inorganic nitrogen removal during the partial/complete nitrification for treating domestic wastewater: Removal pathways and main influencing factors[J]. Bioresource Technology, 2018, 256: 285-294.
- [24] XU Guangjing, XU Xiaochen, YANG Fenglin, et al. Partial nitrification adjusted by hydroxylamine in aerobic granules under high DO and ambient temperature and subsequent Anammox for low C/N wastewater treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 213: 338-345.
- [25] DENG Shiyun, PENG Yongzhen, ZHANG Liang, et al. Advanced nitrogen removal from municipal wastewater via two-stage partial nitrification-simultaneous anammox and denitrification (PN-SAD) process[J]. Bioresource Technology, 2020, 304: 122955.
- [26] MA Bin, WANG Shanyun, CAO Shenbin, et al. Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances[J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 981-990.
- [27] DAIGGER G T. Oxygen and carbon requirements for biological nitrogen removal processes accomplishing nitrification, nitritation, and anammox[J]. Water Environment Research, 2014, 86(3): 204-209.
- [28] GU Jun, YANG Qin, LIU Yu. A novel strategy towards sustainable and stable nitritation-denitrification in an A-B process for mainstream municipal wastewater treatment[J]. Chemosphere, 2018, 193: 921-927.
- [29] WANG Han, XU Guangjing, QIU Zheng, et al. NOB suppression in pilot-scale mainstream nitritation-denitrification system coupled with MBR for municipal wastewater treatment[J]. Chemosphere, 2019, 216: 633-639.
- [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 Jianhui, YOU Qingguo, SHEN Yu, 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] CAO Shenbin, DU Rui, ZHANG Hanyu, et al. Understanding the granulation of partial denitrification sludge for nitrite production[J]. Chemosphere, 2019, 236: 124389.
- [32] LI Wei, LIN Xiaoyu, CHEN Junjie, et al. Enrichment of denitrating bacteria from a methylotrophic denitrifying culture[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(23): 10203-10213.
- [33] MA Bin, QIAN Wenting, YUAN Chuansheng, et al. Achieving mainstream nitrogen removal through coupling anammox with denitrification[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(15): 8405-8413.
- [34] WANG Bo, PENG Yongzhen, GUO Yuanyuan, et al. Nitrogen removal from wastewater and external waste activated sludge reutilization/reduction by simultaneous sludge fermentation, denitrification and anammox (SFDA) [J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 284-291.
- [35] 张星星, 张钰, 王超超, 等. 短程反硝化耦合厌氧氨氧化工艺及

- 其应用前景研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(5): 1981-1991.
- ZHANG Xingxing, ZHANG Yu, WANG Chaochao, et al. Research advances in application prospect of partial denitrification coupled with anammox: A review[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(5): 1981-1991.
- [36] 张正哲, 金仁村, 程雅菲, 等. 厌氧氨氧化工艺的应用进展[J]. 化工进展, 2015, 34(5): 1444-1452.
- ZHANG Zhengzhe, JIN Rencun, CHENG Yafei, et al. Advances in applications of Anammox process[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(5): 1444-1452.
- [37] 王凡, 陆明羽, 殷记强, 等. 反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3782-3788.
- WANG Fan, LU Mingyu, YIN Jiqiang, et al. Treatment of old landfill leachate via a denitrification-partial nitrification-ANAMMOX process[J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3782-3788.
- [38] 卢欣欣, 王怡, 黄瑞雪. MBBR一体式耦合短程硝化-厌氧氨氧化处理污泥水[J]. 环境工程学报, 2020, 14(7): 1827-1833.
- LU Xinxin, WANG Yi, HUANG Ruixue. Reject water treatment by MBBR coupled with integrated partial nitrificationanaerobic ammonium oxidation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(7): 1827-1833.
- [39] LACKNER S, GILBERT E M, VLAEMINCK S E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences-An application survey[J]. Water Research, 2014, 55: 292-303.
- [40] 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 Yin, WU Jiali, CHEN Yi, et al. Research and application progress of mainstream anammox process[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 16-27.
- [41] WU Lina, LI Zhi, ZHAO Chen, et al. A novel partial-denitrification strategy for post-anammox to effectively remove nitrogen from landfill leachate[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 745-751.
- [42] BAHTIAR F, ZHANG Xingxing, WANG Yuguang, et al. New insight into partial denitrification (PD)-based anammox process and potential engineering application: A review[J]. Journal of Health and Environmental Research, 2020, 6(3): 79.
- [43] 王刚, 高会杰, 郭宏山. 短程反硝化耦合厌氧氨氧化工艺处理煤气化废水[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(9): 147-151.
- WANG Gang, GAO Huijie, GUO Hongshan. Treatment of coal gasification wastewater by partial denitrification coupled with ANAMMOX process[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(9): 147-151.
- [44] CAO Shenbin, DU Rui, PENG Yongzhen, 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.
- [45] 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 Yongzhen, FAN Zeli, DU Rui, 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.
- [46] 李佳, 张亮, 刘杰, 等. 城市污水处理厂缺氧池短程反硝化现象及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 109-117.
- LI Jia, ZHANG Liang, LIU Jie, et al. Investigation of the phenomenon and influencing factor of partial denitrification in anoxic zone of a municipal wastewater treatment plant[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(1): 109-117.
- [47] LI Jianwen, PENG Yongzhen, ZHANG Liang, et al. Quantify the contribution of Anammox for enhanced nitrogen removal through metagenomicanalysis and mass balance in an anoxic moving bed biofilm reactor[J]. Water Research, 2019, 160: 178-187.
- [作者简介] 蒙小俊(1981—), 副教授, 博士。E-mail: yanjiushengmengjun@163.com。
- [收稿日期] 2023-03-10(修改稿)