

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.07.001

温度对Anammox-HAP脱氮性能及污泥特性的影响

洪 猛¹, 林驰浩², 王建伟¹, 顾南南², 刘建勇²

(1. 沧州市供水排水集团有限公司, 河北 沧州 053000; 2. 上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200444)

摘 要: 厌氧氨氧化(Anammox)用于城市污水处理存在生物质滞留难、温度波动引起厌氧氨氧化菌(AnAOB)活性降低等问题,采用具有高生物质浓度及更强环境抵抗能力的厌氧氨氧化-羟基磷灰石(Anammox-HAP)颗粒污泥脱氮具有可行性。Anammox-HAP反应器运行了176 d,用于考察不同温度对城污水脱氮性能及污泥特性的影响。首先通过降低总氮(TN)浓度模拟城市污水厂的主流污水并保持氮负荷率(NLR)为3.2 g/(L·d)。在18~35 °C下出水TN稳定低于15 mg/L,在主流高负荷条件下保持优异的脱氮性能;在13~18 °C, TN去除率明显降低,在13 °C降至46.4%。温度提升后, TN去除率在30 °C下最高恢复至77.8%,表明低温导致的AnAOB活性下降可逆。在降温的过程中磷去除率为20.2%,低温条件下HAP性质稳定,但Anammox-HAP颗粒污泥的VSS/TSS随着温度的下降而降低。

关键词: 厌氧氨氧化; 羟基磷灰石; 城市污水; 脱氮; 颗粒污泥特性; 温度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0001-07

Effects of Temperature on Nitrogen Removal Performance and Sludge Characteristics of Anammox-HAP

HONG Meng¹, LIN Chi-hao², WANG Jian-wei¹, GU Nan-nan², LIU Jian-yong²

(1. Cangzhou Water Supply and Drainage Group Co. Ltd., Cangzhou 053000, China; 2. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Anaerobic ammonia oxidation (Anammox) technology has the limitations such as difficulty in biomass retention, and low activity of Anammox bacteria (AnAOB) caused by temperature fluctuations in mainstream municipal wastewater treatment. It is feasible to adopt Anammox-hydroxyapatite (Anammox-HAP) granular sludge with high biomass concentration and stronger environmental resistance to achieve nitrogen removal in mainstream wastewater. An Anammox-HAP reactor had operated for 176 days to treat mainstream wastewater to investigate the nitrogen removal performance and Anammox-HAP granular sludge characteristics at different temperatures. First, mainstream wastewater from municipal wastewater treatment plant by reducing total nitrogen (TN) concentration was simulated, and the nitrogen loading rate (NLR) was kept at 3.2 g/(L·d). At 18~35 °C, the concentration of TN in the effluent was stable lower than 15 mg/L and maintained excellent nitrogen removal performance at high nitrogen load conditions; At 13~18 °C, the removal rate of TN was

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际合作专项(2022YFE0112900)

通信作者: 刘建勇 E-mail: liujianyong@shu.edu.cn

significantly reduced, and the minimum was reduced to 46.4% at 13 °C. After the temperature increased, the removal rate of TN recovered to a maximum of 77.8% at 30 °C, indicating that the decrease in the activity of AnAOB caused by low temperature was reversible. The removal rate of phosphorus in the reactor during decreasing the temperature was 20.2%, and the HAP characteristics were stable at low temperature. However, the VSS/TSS of Anammox-HAP granular sludge decreased with a drop of temperature.

Key words: Anammox; hydroxyapatite (HAP); municipal wastewater; nitrogen removal; granular sludge characteristics; temperature

厌氧氨氧化(Anammox)作为一种自养脱氮技术具有曝气能耗低、无需外加碳源、污泥产量少等优势,被认为是实现城市污水碳中和的关键技术^[1]。然而,厌氧氨氧化细菌(AnAOB)细胞产率低^[2]、易流失的特点导致AnAOB富集培养困难,尤其在主流条件下,低氮浓度进一步降低了AnAOB的生长速率,水量大更易引起生物膜冲刷。通过对Anammox污泥颗粒化有助于在反应器中保留生物量^[3],然而,与侧流厌氧消化液相对较高且稳定的温度不同,主流的温度随着季节的变化而波动,不仅显著影响着AnAOB的活性^[4],而且还容易导致颗粒污泥崩解。低温条件下,机械强度低的厌氧氨氧化颗粒污泥很容易被水力剪切力破碎成絮体随出水流出,进而降低反应器内的生物量浓度和脱氮性能^[5]。以羟基磷灰石(HAP)为内核的Anammox-HAP颗粒显著增强了颗粒污泥的机械性能,尤其在低温条件下,该技术使系统具有更高的生物量截留和抵抗环境冲击的能力,有利于维持高污泥浓度^[6]。Anammox-HAP已经被证明可以在低温下处理含有高浓度氮、磷的厌氧消化出水,在15 °C下氮去除速率(NRR)为 $(8.45 \pm 0.49) \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ^[7],即使在7 °C的极低温下,Anammox-HAP颗粒污泥依然表现出优异的脱氮性能,氮负荷率(NLR)达到了 $3.6 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$,脱氮效率高达84%~92%^[8],这为Anammox技术在主流低浓度、低温条件下的应用提供了可能。鉴于此,通过利用Anammox-HAP处理低氮浓度污水,考察不同温度条件下Anammox-HAP颗粒污泥的脱氮性能及颗粒特性,以评估Anammox-HAP技术用于城市污水主流处理的可行性。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本研究采用的反应器如图1所示,为膨胀颗粒

污泥床(EGSB),有效容积为2 L,顶端设有三相分离器,用于固液气三相分离,防止絮状污泥流失。反应器进水由蠕动泵连续泵入底部进水口,并从顶部回流部分出水来提供上升流速,使反应器达到流化状态。此外,反应器主体设有水浴层,以模拟主流城市污水因季节更替的水温变化过程。

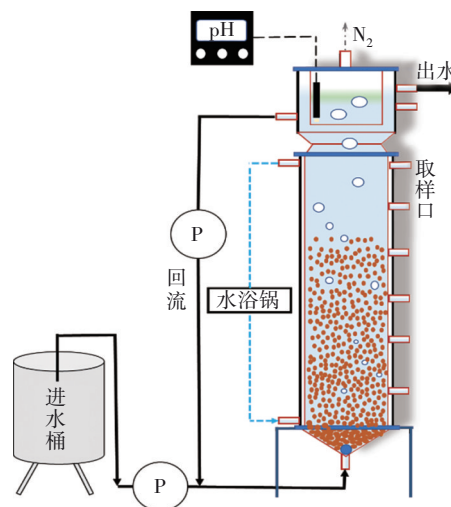


图1 EGSB反应器装置

Fig.1 Schematic diagram of EGSB reactor device

1.2 原水水质和接种污泥

反应器的进水采用人工配水,以氯化铵(NH_4Cl)与亚硝酸钠(NaNO_2)作为进水基质,采用 1.25 g/L 的 KHCO_3 提供无机碳源和碱度,并添加 0.1 g/L 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 0.017 g/L 的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 0.024 g/L 的 Na_2EDTA 和 0.4 mL/L 的微量元素^[9]。进水需要额外添加 KH_2PO_4 和无水 CaCl_2 以促进形成HAP,反应器中添加的无水 CaCl_2 浓度始终为 0.3 g/L ($\text{Ca}^{2+}=100 \text{ mg/L}$), KH_2PO_4 浓度为 0.04 g/L (磷浓度为 10 mg/L)。在运行阶段通过添加 HCl 和 NaOH 来调节进水pH,确保反应器正常运行。

EGSB反应器的接种污泥来自本课题组培养成

熟的 Anammox-HAP 颗粒污泥,接种污泥体积为 1.4 L(VSS 为 49.1 g/L)。

1.3 反应器运行条件

EGSB 反应器从启动至研究结束共运行了 176 d,表 1 为反应器在各个阶段的运行操作条件。在整个运行期间,首先将总氮浓度从 400 mg/L 降到 70 mg/L,模拟主流低浓度条件,并通过逐步降低 HRT 保持反应器的 NLR 为 3.2 g/(L·d),逐步降低温度考察温度变化对反应器性能的影响。随后提高温度以恢复活性,将 NLR 从 3.2 g/(L·d)降低至 1.7 g/(L·d),直至活性恢复,最终提升 NLR 至降温前水平,考察低温对反应器性能的影响是否可逆。根据反应器的实际运行情况控制进水 NO_2^-/N 值在 1.1~1.3 之间。

表 1 EGSB 反应器各阶段的运行条件

Tab.1 Operating conditions of EGSB reactor in each stage

阶段	时间/d	TN/ (mg·L ⁻¹)	HRT/ h	TP/ (mg·L ⁻¹)	NLR/ (g·L ⁻¹ ·d ⁻¹)	T/°C
I	1~19	400~70	4~0.5	40~10	3.2	35
II	20~100	70	0.5	10	3.2	30~18
III	101~124	70	0.5	10	3.2	18~13
IV	125~176	70	0.5~1	10	1.7~3.2	15~30

1.4 分析项目及方法

每天取反应器出水,经 0.45 μm 滤膜过滤后采用国家标准方法测定氨氮、硝态氮、亚硝态氮、磷酸盐等浓度。为测得不同温度条件下颗粒污泥特性的变化,在 EGSB 反应器不同高度的取样口收集相同体积的颗粒污泥,完全混合后进行颗粒污泥特性分析。采用标准方法测定颗粒污泥的挥发性悬浮固体(VSS)和总悬浮固体(TSS)浓度,颗粒污泥的沉降速度通过沉降实验获得^[10]。

2 结果与讨论

2.1 不同温度下 Anammox-HAP 的脱氮性能

前 19 d(阶段 I)将进水总氮浓度从 400 mg/L 逐渐降低至 70 mg/L,同时缩短 HRT,维持 NLR 在 3.2 g/(L·d),以模拟处理主流城市污水的长期运行性能。在该阶段出水氨氮和亚硝态氮浓度稳定在 5 mg/L 以下,TN 平均去除率达到 85%,平均 NRR 达到 2.7 g/(L·d)。阶段 II 开始保持进水总氮浓度为 70 mg/L,逐步降低反应器温度,直至第 100 天,反应体系温度从 35 °C 降低至 18 °C,出水氨氮和亚硝态氮

的浓度始终低于 5 mg/L,TN 平均去除率为 85.8%,反应器运行依然保持稳定,在主流的低氮浓度条件下保持优异的脱氮性能。两个阶段的出水 TN 浓度均低于 15 mg/L,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。可见,温度的降低对反应器的脱氮性能没有造成影响,然而有研究者报道,温度变化对厌氧氨氧化过程的氮去除效率影响显著^[11]。分析产生这种现象的主要原因可能是反应器内的 Anammox-HAP 颗粒污泥生物量充足,较高的污泥浓度可以抵消温度对 AnAOB 活性造成的负面影响,从而使得反应器在低温下仍能保持高效的脱氮性能。

2.2 低温对 Anammox-HAP 性能的影响及恢复

考虑到主流城市污水冬季水温通常低于 15 °C,进一步考察了更低温度条件下 Anammox-HAP 反应器的脱氮性能,结果见图 2。

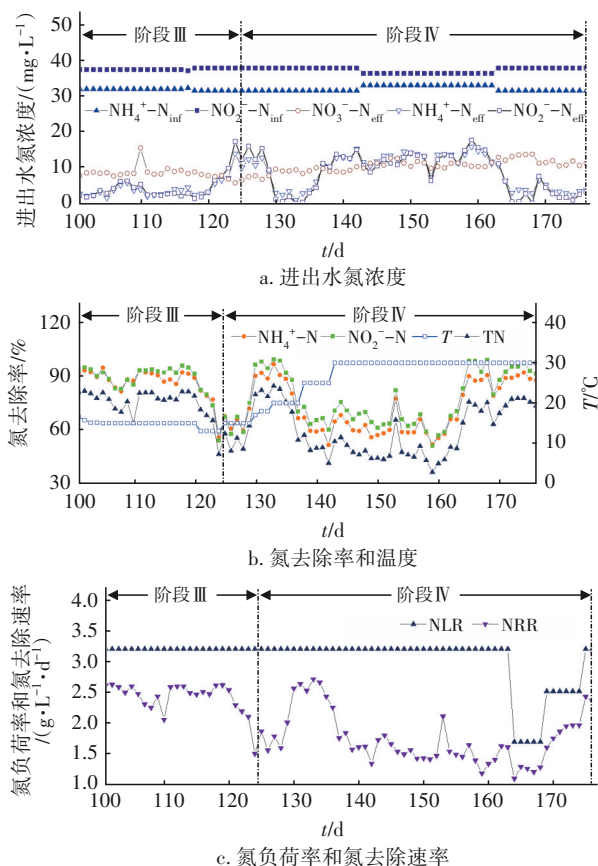


图 2 低温对 EGSB 反应器的影响及性能恢复

Fig.2 Effect of low temperature on EGSB reactor and performance recovery

在第 101~124 天,将反应器温度从 18 °C 降低至 13 °C,TN 去除率在初期变化不大,随着温度的进一

步降低,去除效果迅速恶化,在13℃时降至46.4%。从第125天开始(阶段Ⅳ),通过逐渐提升温度来恢复AnAOB的活性,从而恢复反应器的脱氮性能。当反应器温度提升至30℃时,TN去除率最高可以达到77.8%,表明低温导致的AnAOB活性下降可逆^[12]。但是,TN去除率依然未达到降温前的水平,主要原因可能是降温过程中污泥的流失导致反应器内生物量减少,或者AnAOB活性只有部分被恢复^[13]。

如表2所示,Anammox-HAP颗粒污泥已被广泛应用于厌氧消化液和主流城市污水的研究,相较于絮体污泥和普通的颗粒污泥,Anammox-HAP颗粒污泥具有更高的机械强度,缓解了处理过程中生物

质流失的风险,同时独特的颗粒结构也有利于抵御低温等恶劣环境。在已有的报道中,Anammox-HAP颗粒污泥即使在7℃的极低温条件下,依然表现出优异的脱氮性能且长期保持稳定,将Anammox-HAP和短程硝化耦合的一段式PNA-HAP工艺在主流低浓度条件下的氮去除速率高达0.87 g/(L·d)。在本研究中,温度降低至18℃后实现了2.7 g/(L·d)的高NRR以及优异的氮去除率(85.8%),尽管进一步降低温度至13℃,脱氮性能迅速发生恶化,但是通过升温可以使AnAOB活性逐渐恢复,进一步证明了Anammox-HAP颗粒污泥用于主流城市污水脱氮具有可行性。

表2 Anammox-HAP脱氮性能总结

Tab.2 Summary of nitrogen removal performance of Anammox-HAP

温度/℃	进水TN/(mg·L ⁻¹)	反应器	污泥类型	NRR/(g·L ⁻¹ ·d ⁻¹)	TN去除率/%	运行时间/d
25	1 500	EGSB ^[6]	Anammox-HAP	16.74	83.7 ± 4.8	220
15	625/1 375	EGSB ^[7]	Anammox-HAP	8.45 ± 0.49	>80	250
7	250~260	EGSB ^[8]	Anammox-HAP	0.9~3.1	84~92	>200
25±1	500	ALR ^[14]	PNA-HAP	0.36 ± 0.05	80 ± 6.0	153
25	36~41	ALR ^[15]	PNA-HAP	0.13	63.38	111
25±1	42~375	ALR ^[16]	PNA-HAP	0.87~1.28	63.2~83.9	100
30~18	70	EGSB	Anammox-HAP	2.7	85.8	80
13	70	EGSB	Anammox-HAP	1.5	46.4	25

2.3 Anammox-HAP颗粒污泥的稳定性

2.3.1 磷浓度变化

图3为反应器长期运行过程中进出水磷浓度及其去除率的变化。运行初期(前10 d),将进水磷浓度从40 mg/L降至10 mg/L,并在后续维持不变。前10 d反应器的磷去除率从63%降至22%,主要归因于总氮浓度的降低使得反应器内pH下降,而HAP结晶过程需要较高的pH,进而导致磷的去除率降低。第10天以后,反应器在运行过程中磷的平均去除率为20.2%。磷的减少可能并不是由于钙磷矿化,羟基磷灰石在形成过程中主要受到pH和温度的影响(两者影响着HAP的 K_{sp} 值),该反应体系的pH平均值为7.8,温度处于较低水平,该反应条件下不易形成HAP。虽然HAP可以在没有任何前体的情况下直接在低磷酸盐浓度下形成,但其形成之前通常会出现其他更可溶性的矿物相,具体取决于pH和水质情况^[17-18]。反应器中减少的磷可能来源于微生物的消耗,磷不仅是微生物生长繁殖所必需的元素,同时也是细胞膜及遗传物质的重要组成元

素。值得注意的是,反应器在长期运行过程中,没有出现出水磷浓度高于进水磷浓度的现象,说明反应器中的颗粒污泥并未受到温度的影响释放无机组分。HAP作为一种化学性质稳定、溶解性低的无机矿物,解体过程需要低pH、高反应温度以及较长的反应时间^[19],本研究体系的环境条件并不利于HAP的溶解。

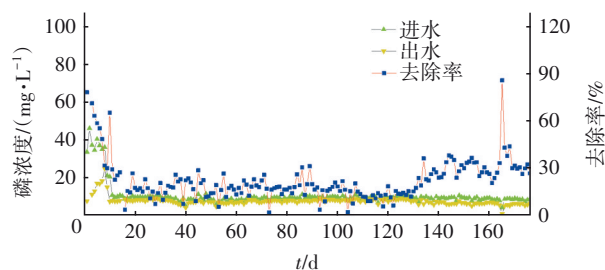


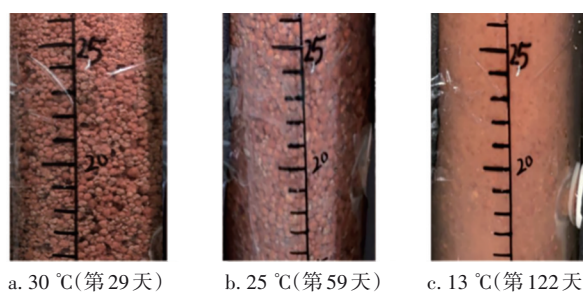
图3 EGSB反应器长期运行过程中进出水磷浓度及其去除率的变化

Fig.3 Change of phosphorus concentration and its removal rate during operation of EGSB

2.3.2 颗粒污泥表观形态变化

图4显示了在不同温度条件下Anammox-HAP

颗粒污泥系统运行过程中表观形态的变化。运行初期,接种的具有高脱氮性能的 Anammox-HAP 颗粒污泥呈血红色,污泥颗粒饱满且轮廓清晰。从阶段 II 开始,温度从 35 °C 降至 30 °C,运行 10 d 后,颗粒污泥的颜色和形状并未发生明显变化。在 25 °C 下运行 25 d 后,颗粒污泥的红色明显减弱,轮廓开始模糊,部分颗粒表面的生物膜厚度减小。反应器运行至 13 °C 时,颗粒污泥的颜色由原来的血红色变为橘黄色,且反应器内出现大量的絮状污泥,颗粒污泥上的微生物大部分脱落,颗粒污泥转而以 HAP 沉淀物的无机形式存在。这表明在低温低浓度条件下,AnAOB 的活性降低,微生物的新陈代谢速率减慢,颗粒上的部分微生物逐渐溶解死亡,进而导致颗粒表面的生物膜变薄。此外,低温条件下微生物的活性和胞外聚合物(EPS)分泌量降低,影响了厌氧氨氧化菌的聚集,导致颗粒污泥的稳定性变差,反应器的上升流速则加速了生物膜的脱落过程。



a. 30 °C (第 29 天) b. 25 °C (第 59 天) c. 13 °C (第 122 天)

图 4 不同温度下反应器内颗粒污泥的表观形态变化

Fig.4 Apparent morphology change of granular sludge in the reactor at different temperatures

2.3.3 Anammox-HAP 颗粒污泥浓度变化

图 5 为不同温度条件下 Anammox-HAP 颗粒污泥的 TSS 及 VSS 变化情况。与较高温条件下的 Anammox-HAP 颗粒污泥相比,随着水温的降低,Anammox-HAP 颗粒污泥的 TSS 和 VSS 明显降低,而 VSS 受到温度的影响更显著。在温度从 35 °C 降低至 15 °C 的过程中,颗粒污泥 TSS 浓度从 272.49 g/L 减少至 208.94 g/L,但是颗粒污泥中 HAP 无机组分在不同温度下的浓度变化并不显著,即使在低温低浓度下,颗粒污泥中的 HAP 内核不易溶解,在 13 °C 的条件下反应器内颗粒污泥的平均沉降速度为 317.3 m/h,说明低温下颗粒污泥的沉降性能良好。Anammox-HAP 颗粒污泥浓度的变化主要体现在低温条件下生物质持留能力的减弱。在 35 °C 下,

Anammox-HAP 颗粒污泥的 VSS 为 47.09 g/L,而随着时间的逐步下降,反应体系内的 VSS 显著减少,在 15 °C 下仅为 16.39 g/L。这表明在低温低浓度条件下,AnAOB 的新陈代谢速率变慢,部分微生物逐渐溶解死亡,颗粒污泥表层生物膜的厚度变薄,EPS 含量也显著降低,导致微生物的聚集性能变差,反应器较大的上升流速(4.8 m/h)导致了生物膜的进一步脱落。随着温度的降低,颗粒污泥的 VSS/TSS 值从 17% 降到了 8%,表明反应器对生物量的持留能力逐渐降低。在后续恢复温度的过程中,由于降温导致了反应器内生物质浓度只有降温前的 34.8%,因此在相同氮负荷条件下,反应器经过低温后处理能力无法恢复到降温前水平,在实际应用中需考虑补充污泥或降低负荷以满足处理要求。

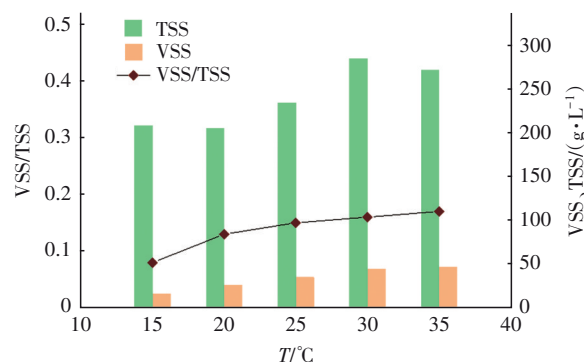


图 5 不同温度下反应器内颗粒污泥 VSS 和 TSS 的变化

Fig.5 Change of VSS and TSS of granular sludge in the reactor at different temperatures

2.4 Anammox-HAP 用于主流城市污水处理优势

自然界中可以检测到 Anammox 细菌生存的温度范围非常广泛,甚至在 -5~4 °C 的河流和海洋沉积物中(主要菌属为 *Kuenenia*、*Brocadia*、*Jettenia*),以及 60~80 °C 的温泉等极端环境中均有发现(主要菌属为 *Kuenenia*、*Brocadia*、*Scalindua*)^[20]。然而,温度对厌氧氨氧化菌的活性影响显著,以 *Kuenenia* 菌属为例,其最佳生长温度为 35 °C,当温度降至 10 °C 和 7 °C 时,只剩下 7.5% 和 4.2% 的最大比厌氧氨氧化菌活性^[7]。考虑到城市污水的温度随着季节的变化而波动以及实际处理效率需求,在污水处理工艺中对厌氧氨氧化菌活性有着更高的要求,研究表明从污水处理厂污泥中富集得到的 7 个厌氧氨氧化菌属中有 4 个(*Kuenenia stuttgartiensis*、*Brocadia*、*Jettenia* 和 *Anammoxoglobus*)可以在 10~35 °C 的温度范围内运行^[21],但它们的最佳生长温度通常在 30~40 °C,意

味着在污水温度较低条件下只能保留较低的活性。在本研究中,用于处理不同温度低浓度含氮废水的接种污泥中的厌氧氨氧化菌属以 *unclassified Brocadiaceae* 为主,相对丰度到达了 82.80%^[9],该厌氧氨氧化菌属对低温的适应能力尚不明确,但考虑到接种污泥的母反应器在 35℃ 条件下运行,且有关低温条件下运行厌氧氨氧化的研究中尚未发现 *unclassified Brocadiaceae* 属为优势菌属,因此在城市主流污水低温条件下,其活性可能和其他常见的厌氧氨氧化菌属一样无法满足实际处理需求。众多研究已经证明了低温下厌氧氨氧化菌虽然活性低,但是通过足够的生物质保留时间可以补偿低温引起的厌氧氨氧化菌活性损失。造粒是一种显著提升污泥持留能力的有效措施,但是在 10℃^[22] 和 12.5℃^[23] 的低温下长期运行,除了导致污泥活性受到相当大的抑制,还会引起颗粒崩解。通过将具有高无机组分的 Anammox-HAP 颗粒代替纯 Anammox 颗粒污泥可以显著增强颗粒的机械性能,更好的沉降性能意味着污泥不易随出水流出而导致生物质减少,减少低温引起的脱氮性能恶化。本研究在温度从 35℃ 降至 18℃ 时,对 Anammox 的脱氮性能没有明显的影响,而当温度从 18℃ 降至 13℃ 时,TN 去除率从 85% 降至 46.4%。表明较多的生物量可以抵消温度降低对 AnAOB 活性造成的不利影响,从而确保反应器的稳定性。然而温度过低,AnAOB 活性的进一步下降引起 EPS 减少,EPS 就像胶水一样,在微生物聚集过程中起到重要作用,低温下可能无法维持 Anammox 颗粒的结构和大小,同时使颗粒污泥自身的稳定性下降^[7],导致了在较高的上升流速下,颗粒污泥中的生物质在水力剪切力下变为絮状污泥,并随出水流出反应器造成污泥流失。可见,颗粒污泥强度对于保持、减轻或防止崩解至关重要,尤其在冬季低温条件下,利用 Anammox-HAP 颗粒代替纯 Anammox 颗粒污泥是一种保持 Anammox 稳定运行的有效途径。

3 结论

① 在 18~35℃ 以及 3.2 g/(L·d) 的高负荷条件下反应器出水 TN 浓度 < 15 mg/L,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准。

② 在 13~18℃,反应器的 TN 去除率明显降

低,在 13℃ 降至 46.4%。随着温度提升至 30℃,TN 去除率最高达到 77.8%。表明由低温导致的 AnAOB 活性下降是可逆的。

③ Anammox-HAP 反应器在降温的过程中磷平均去除率为 20.2%。在低温条件下,HAP 内核不易形成和溶解,颗粒污泥性质稳定,但低温导致了反应器对生物量的持留能力逐渐降低。

参考文献:

- [1] 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 (in Chinese).
- [2] TERADA A, ZHOU S, HOSOMI M. Presence and detection of anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) bacteria and appraisal of anammox process for high-strength nitrogenous wastewater treatment: a review [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2011, 13(6): 759-781.
- [3] ADAMS M, XIE J, KABORE A, et al. Research advances in anammox granular sludge: a review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2022, 52(5): 631-674.
- [4] LOTTI T, KLEEREBEZEM R, VAN LOOSDRECHT M C. Effect of temperature change on anammox activity [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2015, 112(1): 98-103.
- [5] WANG Y, XIE H, WANG D, et al. Insight into the response of anammox granule rheological intensity and size evolution to decreasing temperature and influent substrate concentration [J]. Water Research, 2019, 162: 258-268.
- [6] MA H, XUE Y, ZHANG Y, et al. Simultaneous nitrogen removal and phosphorus recovery using an anammox expanded reactor operated at 25℃ [J]. Water Research, 2020, 172: 115510.
- [7] MA H, ZHANG Y, XUE Y, et al. Efficient phosphorus recovery by enhanced hydroxyapatite formation in a high loading anammox expanded bed reactor at 15℃ [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 425: 130636.
- [8] SONG Y, LIN L, NI J, et al. Architecture of HAP-

- anammox granules contributed to high capacity and robustness of nitrogen removal under 7 °C [J]. *Water Research*, 2021, 206: 117764.
- [9] JI S, GU N, LI Y, *et al.* Rapid proliferation of anaerobic ammonium oxidizing bacteria using anammox-hydroxyapatite technology in a pilot-scale expanded granular sludge bed reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362: 127845.
- [10] LIANG L, LUO J, XIAO X, *et al.* Granular activated carbon promoting re-granulation of anammox-hydroxyapatite granules for stable nitrogen removal at low phosphate concentration [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150359.
- [11] LI M, SONG Y, SHEN W, *et al.* The performance of an anaerobic ammonium oxidation upflow anaerobic sludge blanket reactor during natural periodic temperature variations [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122039.
- [12] MA B, PENG Y, ZHANG S, *et al.* Performance of anammox UASB reactor treating low strength wastewater under moderate and low temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 129: 606–611.
- [13] ZHU W, LI J, DONG H, *et al.* Nitrogen removal performance and operation strategy of anammox process under temperature shock [J]. *Biodegradation*, 2017, 28 (4): 261–274.
- [14] CHEN Y, FENG G, GUO G, *et al.* Nitrogen removal by a hydroxyapatite-enhanced micro-granule type one-stage partial nitrification/anammox process following anaerobic membrane bioreactor treating municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 348: 126740.
- [15] GUO Y, LUO Z, RONG C, *et al.* The first pilot-scale demonstration of the partial nitrification/anammox-hydroxyapatite process to treat the effluent of the anaerobic membrane bioreactor fed with the actual municipal wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 151063.
- [16] GUO Y, XIE C, CHEN Y, *et al.* Achieving superior nitrogen removal performance in low-strength ammonium wastewater treatment by cultivating concentrated, highly dispersive, and easily settleable granule sludge in a one-stage partial nitrification/anammox-HAP reactor [J]. *Water Research*, 2021, 200: 117217.
- [17] MAGRÍ A, COMPANY E, GICH F, *et al.* Hydroxyapatite formation in a single-stage anammox-based batch treatment system: reactor performance, phosphorus recovery, and microbial community [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(7): 2745–2761.
- [18] WANG L, NANCOLLAS G. Calcium orthophosphates crystallization and dissolution [J]. *Chemical Reviews*, 2008, 108(11): 4628–4669.
- [19] 钱功明, 王俊, 孙星月, 等. Fe^{3+} 对羟磷灰石溶解特性的影响 [J]. *矿物学报*, 2017, 37(Z1): 49–52.
QIAN Gongming, WANG Jun, SUN Xingyue, *et al.* Effect of Fe^{3+} on dissolution behavior of hydroxyapatite [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(Z1): 49–52 (in Chinese).
- [20] TOMASZEWSKI M, CEMA G, ZIEMBIŃSKA-BUCZYŃSKA A. Influence of temperature and pH on the anammox process: a review and meta-analysis [J]. *Chemosphere*, 2017, 182: 203–214.
- [21] GILBERT E M, AGRAWAL S, KARST S M, *et al.* Low temperature partial nitrification/anammox in a moving bed biofilm reactor treating low strength wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8784–8792.
- [22] LI G, HUANG B, CHENG Y, *et al.* Determination of the response characteristics of anaerobic ammonium oxidation bioreactor disturbed by temperature change with the spectral fingerprint [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719: 137513.
- [23] 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.

作者简介:洪猛(1987–),男,河北青县人,硕士研究生,工程师,研究方向为市政污水处理。

E-mail:hongmeng1117@126.com

收稿日期:2022-11-03

修回日期:2023-01-03

(编辑:李德强)