

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.015

不同负荷下高氮浓度对BFR厌氧氨氧化的抑制

高丽娟¹, 张 钰², 王 怡², 赵珂鑫², 王玥凝², 柴宝华¹,
庄鹏宇¹, 寇晓梅¹, 罗欣欣¹

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 为研究厌氧氨氧化过程中生物滤柱反应器(BFR)在不同氮负荷下的基质抑制,建立两个平行厌氧氨氧化BFR并改变水力停留时间(HRT)和进水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 浓度,使进水总氮(TN)浓度均大于525 mg/L, TN负荷分别达到1.80和6.30 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, TN去除率均大于80%,探讨不同负荷下高氮浓度对BFR厌氧氨氧化的抑制。在厌氧氨氧化基质抑制试验基础上通过Haldane模型模拟发现,高负荷BFR厌氧氨氧化的最大 NO_2^--N 和 NH_4^+-N 去除速率均高于低负荷BFR的对应值, BFR中高氮浓度长期驯化的厌氧氨氧化菌具有更高的抑制常数,对 NO_2^--N 和 NH_4^+-N 适应性更强。BFR的沿程厌氧氨氧化微生物聚集体研究表明,承受了高氮负荷的进水区微生物能够分泌更多的胞外聚合物(EPS)并形成蛋白质主导的EPS,以保护内部菌种抵御高氮浓度的抑制,从而保证微生物的高活性和高抑制浓度,最终使BFR实现良好而稳定的脱氮性能。

关键词: 厌氧氨氧化; 生物滤柱反应器(BFR); 高氮抑制; 氮负荷; 抑制动力学

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0104-06

Inhibition Effects of High Nitrogen Concentrations on Anammox in BFR under Varying Loading Conditions

GAO Li-juan¹, ZHANG Yu², WANG Yi², ZHAO Ke-xin², WANG Yue-ning²,
CHAI Bao-hua¹, ZHUANG Peng-yu¹, KOU Xiao-mei¹, LUO Xin-xin¹

(1. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: This study investigated substrate inhibition in biofilter reactor (BFR) under varying nitrogen loading conditions during Anammox process. Two parallel Anammox BFRs were operated. The hydraulic retention time (HRT) as well as influent NH_4^+-N and NO_2^--N were systematically adjusted to maintain the influent total nitrogen (TN) above 525 mg/L. Under these conditions, the TN loading rates reached 1.80 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ and 6.30 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, respectively, with corresponding TN removal efficiencies exceeding 80%. The inhibitory effects of high nitrogen concentrations on Anammox activity in BFRs under different nitrogen loading rates were examined. Based on the Anammox substrate inhibition test and Haldane model simulation, it was determined that the maximum NO_2^--N and NH_4^+-N removal efficiencies

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52170172); 陕西省重点产业创新链(群)项目(2021ZDLSF05-04)

通信作者: 王怡 E-mail: wangyi1003@sina.com

in high-load BFR-based Anammox systems were higher than those observed in low-load BFR systems. Anammox bacteria acclimated to high nitrogen concentrations in the BFR for a long time exhibited a higher substrate inhibition constant, indicating enhanced tolerance and adaptability to elevated NO_2^- -N and NH_4^+ -N. Studies on microbial aggregates in the Anammox process within BFRs demonstrated that microorganisms in the influent zone, which was exposed to high nitrogen loading rate, produced elevated levels of extracellular polymeric substances (EPS), particularly protein-rich EPS. This adaptive response helped shield internal microbial populations from the inhibitory effects of high nitrogen concentrations, thereby maintaining high microbial activity and tolerance, and ultimately contributing to stable and efficient nitrogen removal performance in BFR systems.

Key words: Anammox; biofilter reactor (BFR); high nitrogen inhibition; nitrogen load; inhibition kinetics

厌氧氨氧化(Anammox)工艺是厌氧氨氧化菌在缺氧或厌氧环境下利用 NO_2^- 将 NH_4^+ 氧化生成 N_2 的一种化能自养型脱氮工艺,具有脱氮效率高、无需外加碳源、污泥产量低等特点。研究表明^[1],Anammox工艺在处理垃圾渗滤液、厌氧消化液等富氮废水时效果较好,但高氮浓度极易对厌氧氨氧化菌产生毒性抑制,进而影响厌氧氨氧化工艺的运行。此外,不同类型的反应器在进行厌氧氨氧化时受高氮浓度抑制的表现差异较大。如Aqeel等^[2]采用连续流完全混合反应器(CSTR),当进水 NO_2^- -N浓度增加到750 mg/L时,厌氧氨氧化活性才下降;而Song等^[3]发现,高水力负荷下的升流式厌氧污泥床(UASB)在进水 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N分别为325和390 mg/L时,厌氧氨氧化过程就受到抑制。因此,由于基质在反应器内可迅速得到稀释,CSTR表现出较高的抑制浓度;而推流式反应器因基质浓度的梯度变化,理论上很容易在进水区受到严重抑制。

生物滤柱反应器(BFR)作为典型的推流式生物膜反应器,近年来在厌氧氨氧化处理含氮废水中表现出巨大潜力。Lu等^[4]采用生物滤柱厌氧氨氧化反应器处理低氮浓度废水,在氮负荷率(NLR)为4.86 kg/(m³·d)条件下实现了86.24%的TN去除率;Li等^[5]采用厌氧氨氧化生物滤柱反应器,在NLR为(4.25±0.1) kg/(m³·d)条件下实现了86.42%的TN去除率。然而该类反应器在处理高氮浓度废水时,氮负荷对厌氧氨氧化抑制的影响目前尚未明确,这直接影响到其在高浓度含氮废水处理中的应用。鉴于此,笔者采用BFR进行不同负荷的高氮浓度厌氧氨氧化连续试验,在此基础上探讨不同氮负

荷下的基质抑制差异,并从微生物角度分析其差异的根源,以期BFR厌氧氨氧化工艺处理高氮废水的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

采用两个平行的BFR进行厌氧氨氧化试验,其装置如图1所示。

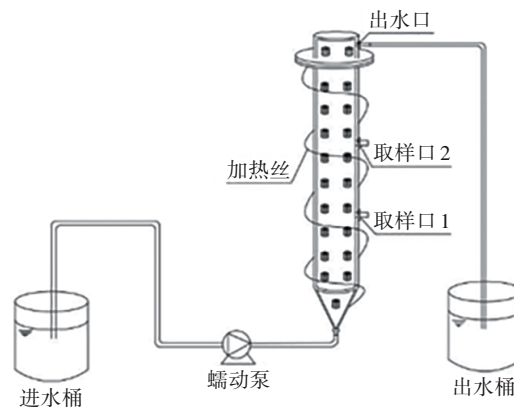


图1 BFR装置示意

Fig.1 Schematic diagram of BFR

反应器内径为5 cm,总高为50 cm,由高为8 cm的锥体和42 cm的柱体两部分构成,工作体积为0.75 L。BFR采用下进上出方式运行,在距进水口20和32 cm处分别设置取样口1和2。反应器内填充K1型有机悬浮填料($D \times H = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$),空隙率为90.45%。BFR外部包裹铝箔纸以避光,缠绕加热丝以控制内部水温为(33±2)℃。

1.2 接种污泥及试验用水

接种污泥均取自实验室厌氧氨氧化反应器,MLVSS为7.10 g/L,接种量为300 mL。

试验采用合成废水, NH_4Cl 和 NaNO_2 分别提供 NH_4^+-N 和 NO_2^--N , 进水 $\text{NO}_2^--\text{N}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 维持在 1.0~1.1。废水中其他组分 $\text{KH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 分别为 0.01、0.01、0.10 g/L, 微量元素 I 和 II 各 1 mL/L^[6]。添加 NaHCO_3 维持进水 pH 为 7.5~8.0。

表1 LL-BFR和HL-BFR的启动及运行条件

Tab.1 Start-up and operating conditions of LL-BFR and HL-BFR

阶段	时间/d		$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$\text{NO}_2^--\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		HRT/h	
	LL	HL	LL	HL	LL	HL	LL	HL
启动	1~34	1~16	50±5	100±2	50±5	100±2	8	8
I	35~82	17~64	150±10	200±10	150±10	200±10	8	8
II	83~139	65~121	250±10	250±10	250±10	250±10	8	8
III	140~202	122~223	300±10	250±10	300±10	275±10	8	4
IV	203~301	224~283	285±10	250±10	315±10	275±10	8	2

1.4 采样和分析

每3 d采集进、出水水样,分析前过0.45 μm 滤膜,采用标准方法测定 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 浓度, pH 和温度分别使用 pH 计 (PHS-3C) 和温度计测定,游离氨 (FA) 和游离亚硝酸 (FNA) 浓度根据 Peng 等^[7] 的方法计算。试验运行结束后,分别取 0~20 cm 和 20~47 cm 区段的生物膜和颗粒污泥,根据 Zhang 等^[8] 的方法测定比厌氧氨氧化活性 (SAA); 按照 Wang 等^[9] 的方法提取 EPS, 采用苯酚-硫酸法测定多糖含量, 采用 Lowry 法测定蛋白质含量。

1.5 基质抑制动力学

采用 Haldane 模型拟合厌氧氨氧化抑制动力学过程, Haldane 模型方程见下式:

$$q = \frac{q_{\max}}{1 + \frac{K_s}{S} + \frac{S}{K_i}} \quad (1)$$

式中: q 为反应速率, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{d})$; $q_{\max}$ 为最大反应

1.3 试验设计

两个 BFR 同时启动, 分别运行 301 和 283 d 直至进水 TN 浓度均达到 525 mg/L 以上, TN 负荷分别达到 1.80 和 6.30 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 并界定前者为低负荷 (LL), 后者为高负荷 (HL), 具体运行条件见表 1。当 TN 去除率稳定大于 80% 后进行静态研究。

速率, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{d})$; S 为基质浓度, mg/L ; K_s 为半饱和常数, mg/L ; K_i 为抑制常数, mg/L 。

连续试验运行结束后, 取 BFR 中 0~20 cm 区段的生物膜和颗粒污泥, 均匀混合后进行基质抑制动力学试验。颗粒污泥和生物膜经磷酸盐缓冲溶液 (PBS) 淘洗数次后分别置于 100 mL 血清瓶中, NH_4^+-N 初始浓度分别设置为 25、50、100、150、300、350、400 和 450 mg/L , NO_2^--N 浓度保持在 100 mg/L , 测定最大 NH_4^+-N 去除速率。采用类似试验测定最大 NO_2^--N 去除速率, 其中 NO_2^--N 初始浓度分别设置为 25、50、100、150、300 和 350 mg/L , NH_4^+-N 浓度保持在 100 mg/L 。

2 结果与讨论

2.1 BFR 的启动与运行

2.1.1 BFR 的脱氮性能

LL-BFR 和 HL-BFR 在各阶段稳定期的平均氮去除率如表 2 所示。

表2 LL-BFR和HL-BFR在各阶段稳定期的平均氮去除率

Tab.2 Average nitrogen removal efficiencies of LL-BFR and HL-BFR during stabilization period of each phase

阶段	$\text{NLR}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$		NH_4^+-N 去除率/%		NO_2^--N 去除率/%		TN 去除率/%	
	LL	HL	LL	HL	LL	HL	LL	HL
启动	0.30±0.02	0.60±0.02	99.45	99.52	97.53	97.05	85.56	89.48
I	0.90±0.02	1.20±0.05	92.09	90.53	98.74	95.24	84.18	84.64
II	1.50±0.02	1.50±0.05	92.28	89.42	96.47	89.39	82.90	80.88
III	1.80±0.02	3.10±0.10	61.55	86.61	71.16	90.23	56.65	81.65
IV	1.80±0.02	6.30±0.10	92.33	86.52	93.00	90.81	82.24	81.76

结合表 1、2 可知, 阶段 I 和 II 通过逐步增加进水 TN 浓度以提升 NLR 至 1.50 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 两反应器

稳定期平均 TN 去除率均保持在 80% 以上, 表明在一定氮负荷下, 厌氧氨氧化菌对较高基质浓度具有

很强的适应性。

阶段Ⅲ,LL-BFR提高进水TN浓度以提升NLR至 $(1.80\pm0.02)\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,HL-BFR降低HRT以提升NLR至 $(3.10\pm0.10)\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。LL-BFR稳定期的平均TN去除率仅为56.65%,而HL-BFR稳定期的平均TN去除率达到81.65%。

阶段Ⅳ,LL-BFR保持进水TN浓度和NLR不变,将进水 NO_2^-/N 调整为1.1,稳定期的TN去除率达到82.24%。HL-BFR继续缩短HRT至2 h使NLR达到 $(6.30\pm0.10)\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,稳定期的TN去除率达到81.76%,表明厌氧氨氧化过程中BFR在高氮负荷下对高浓度氮具有较强的适应性。

2.1.2 BFR的进水FA和FNA变化及文献对比

① BFR的进水FA和FNA浓度变化

两个BFR进水FA和FNA浓度变化如表3所示。随着进水氮浓度的提高,LL-BFR中FA和FNA增加,阶段Ⅲ较高的FA和FNA浓度抑制了厌氧氨氧化活性,导致脱氮性能下降;阶段Ⅳ调整进水 NO_2^-/N 值后,FA略有下降而FNA略有升高,厌氧氨氧化菌适应了高FA和FNA浓度抑制,活性恢复。HL-BFR在阶段Ⅰ和Ⅱ的进水FA和FNA与LL-BFR类似,阶段Ⅲ和Ⅳ的进水FA与FNA浓度略低于LL-BFR,但在低HRT、高氮负荷条件下,厌氧氨氧化活性并未受到抑制。

表3 LL-BFR和HL-BFR进水FA和FNA浓度变化

Tab.3 Change of FA and FNA concentrations in LL-BFR and HL-BFR influent

阶段	LL-BFR		HL-BFR	
	FA/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	FNA/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	FA/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	FNA/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
启动	4.57	4.01	7.56	10.92
I	8.32	20.66	10.73	27.89
II	15.89	28.85	15.61	29.01
III	16.66	39.05	14.05	33.31
IV	15.96	40.26	13.33	36.94

② 文献对比

目前研究认为^[10],FA和FNA是厌氧氨氧化菌的实际抑制剂,其抑制浓度与pH、温度和底物浓度有关,相关文献^[10-11]认为FNA对厌氧氨氧化过程的稳定性更为关键。厌氧氨氧化工艺的运行条件和污泥性质差异使得不同研究中FNA抑制阈值的差距较大^[1],以往研究和本研究在连续流推流式反应

器中FNA浓度对Anammox的抑制影响对比见表4。可知,BFR培养的厌氧氨氧化菌对高FNA浓度抑制具有较强的抵抗性及适应性。

表4 FNA浓度对Anammox的抑制影响文献对比

Tab.4 Comparison of literatures about effect of FNA concentration on inhibition of Anammox

反应器类型	温度/ ℃	进水pH	FNA/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Anammox抑制率/%	参考文献
UASB	33	7.5~7.9	17	10	[11]
			26	20	
UASB	35	7.5~7.8	30.79	90	[6]
UASB	35	7.0~8.5	1.50	0	[10]
BFR	33	7.5~8.0	40.26	0	本研究

2.2 BFR厌氧氨氧化基质抑制动力学及参数对比

2.2.1 厌氧氨氧化基质抑制动力学

低负荷和高负荷下分别采用Haldane模型拟合厌氧氨氧化基质抑制动力学,结果如图2、3所示。

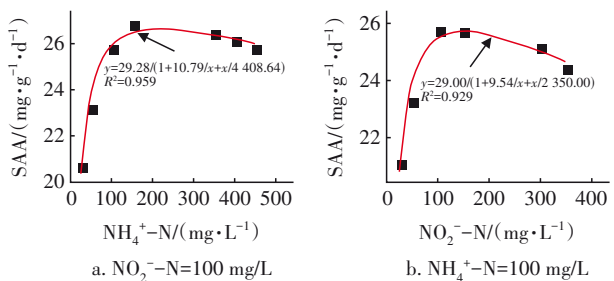


图2 LL-BFR中厌氧氨氧化基质抑制动力学特性

Fig.2 Kinetic properties of Anammox substrate inhibition in LL-BFR

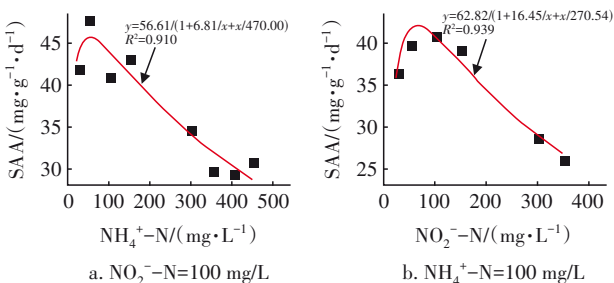


图3 HL-BFR中厌氧氨氧化基质抑制动力学特性

Fig.3 Kinetic properties of Anammox substrate inhibition in HL-BFR

由图2、3可知,Haldane模型能够较好地拟合BFR中两种基质对厌氧氨氧化的抑制动力学。研究认为^[1],亚硝酸盐引起的毒性强于氨氮,因此亚硝态氮的 K_i 一般低于氨氮的 K_i 。本研究中,HL-BFR的氨氮和亚硝态氮抑制常数 K_i 分别为470.00和270.54 mg/L,LL-BFR的氨氮和亚硝态氮抑制常数

K_i 分别为4 408.64和2 350.00 mg/L,均与前人的研究结果一致^[12],即厌氧氨氧化菌的 NO_2^- -N抑制浓度更低, NO_2^- -N的抑制作用较 NH_4^+ -N更为显著。

2.2.2 厌氧氨氧化基质抑制动力学参数对比

HL-BFR与LL-BFR厌氧氨氧化基质抑制动力学参数对比见表5。可知,分别以 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N

作为抑制剂时,最大 NO_2^- -N和 NH_4^+ -N去除速率均为 $q_{\max(\text{HL})} > q_{\max(\text{LL})}$,表明高负荷可以提高厌氧氨氧化菌的最大比活性,有利于提高富集培养物的代谢潜力。但对抑制常数 K_i 而言,均为 $K_{i(\text{HL})} < K_{i(\text{LL})}$,表明在低负荷下驯化的厌氧氨氧化菌对 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N具有更强的适应性。

表5 HL-BFR与LL-BFR厌氧氨氧化基质抑制动力学参数对比

Tab.5 Comparison of Anammox inhibition kinetics parameters in HL-BFR and LL-BFR

反应器	以 NH_4^+ -N作为抑制剂			以 NO_2^- -N作为抑制剂		
	$q_{\max}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	$K_s/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$K_i/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$q_{\max}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	$K_s/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$K_i/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
LL-BFR	29.28	10.79	4 408.64	29.00	9.54	2 350.00
HL-BFR	56.61	6.81	470.00	62.82	16.45	270.54

2.3 BFR中微生物聚集体的特征

2.3.1 BFR中厌氧氨氧化活性

运行结束后,对反应器不同区段中颗粒污泥和生物膜的SAA进行测定,结果如表6所示。

表6 LL-BFR和HL-BFR不同区段的SAA

Tab.6 SAA in different zones of LL-BFR and HL-BFR

反应器	0~20 cm 区段		20~47 cm 区段	
	生物膜	颗粒污泥	生物膜	颗粒污泥
LL-BFR	17.73	24.82	11.28	5.79
HL-BFR	49.24	47.82	18.26	14.17

由表6可知,相同区段下,HL-BFR中生物膜和颗粒污泥的SAA均高于LL-BFR的对应值,这与基质抑制动力学中的结论一致,即高负荷下厌氧氨氧化菌的活性更高。0~20 cm区段颗粒污泥和生物膜的SAA均显著高于20~47 cm区段的对应值,这与BFR下进上出的推流式运行方式有关,0~20 cm区段承担了大部分的氮负荷,并发挥了主要的氮去除功能。

2.3.2 BFR中生物量的EPS特性

EPS是微生物聚集形成颗粒污泥和生物膜的关键物质,图4为LL-BFR和HL-BFR沿程生物量的EPS组成及含量。可知,0~20 cm区段的EPS总含量明显高于20~47 cm区段,且相同区段下HL-BFR的EPS总含量均高于LL-BFR,这与BFR中SAA的测定结果一致,即在更高的氮浓度和氮负荷下微生物可分泌更多的EPS。EPS的主要组分为PS和PN,其中PN疏水性强,有利于絮体聚集和菌体稳定^[9]。分析EPS组分可知,PN含量明显高于PS含量,且两反应器各区段生物量的PN/PS在3.40~5.70之间,高

PN/PS表明微生物形成了致密的生物膜和颗粒结构,使其在高氮抑制下仍保持高效稳定的脱氮效果。

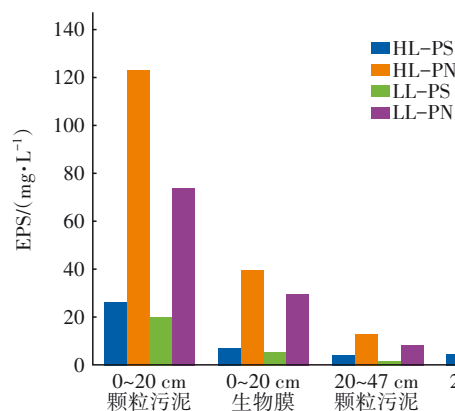


图4 LL-BFR和HL-BFR沿程生物量的EPS组成及含量
Fig.4 EPS composition and contents of biomass along LL-BFR and HL-BFR

综上,BFR进水区段承受了较高的氮负荷和氮浓度,刺激进水区段微生物产生更多的EPS以保护菌体并抵抗抑制,高PN/PS使微生物维持致密和完整的结构,厌氧氨氧化菌在高氮浓度和高氮负荷下可分泌更多的EPS以保证其高SAA。因此,高EPS含量及高PN/PS既是高氮高负荷的结果,又是高效氮去除和抵御高氮抑制的物质基础。

3 结论

① 两个BFR在进水TN均大于525 mg/L、NLR分别为1.80和6.30 kg/(m³·d)时,均实现了超过80%的TN去除率,表明BFR能够承受较高的FNA抑制,且高于大部分文献报道的抑制阈值。

② 采用Haldane模型拟合BFR中厌氧氨氧化基质抑制动力学,结果表明, NO_2^- -N对厌氧氨氧化

菌的抑制常数更低,抑制作用更明显。高负荷下厌氧氨氧化菌具有更高的最大 NO_2^- -N及 NH_4^+ -N去除速率,生物活性更强;低负荷下厌氧氨氧化菌受高氮浓度的长期驯化,具有更高的抑制常数,对基质具有更强的适应性。

③ BFR微生物在进水区段(0~20 cm)的SAA和EPS含量远高于后续区段(20~47 cm)的对应值,各区段均形成高PN/PS(3.40~5.70)结构,表明在高氮浓度和高氮负荷下,微生物分泌高PN/PS的EPS以形成稳定的微生物结构,因此进水区段实现了高SAA,保证了BFR实现高效去除氮并可抵御高浓度氮对进水区微生物的抑制。

参考文献:

- [1] 姜元臻,周松伟,汪晓军,等. 厌氧氨氧化组合工艺处理老龄垃圾渗滤液工程研究[J]. 中国给水排水, 2025, 41(3): 78-83.
- JIANG Yuanzhen, ZHOU Songwei, WANG Xiaojun, *et al.* Treatment of aged landfill leachate via Anammox combined process [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(3): 78-83(in Chinese).
- [2] AQEEL H, LISS S N. Autotrophic fixed-film systems treating high strength ammonia wastewater[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11:551925.
- [3] SONG Y, ALI M, FENG F, *et al.* Performance of a high-rate anammox reactor under high hydraulic loadings: physicochemical properties, microbial structure and process kinetics [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(4): 1197-1210.
- [4] LU X X, WANG Y, WANG W H, *et al.* Characteristics of rapid-biofiltering anammox reactor (RBAR) for low nitrogen wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2020, 318: 124066.
- [5] LI B J, WANG Y, WANG W H, *et al.* High-rate nitrogen removal in a continuous biofilter anammox reactor for treating low-concentration nitrogen wastewater at moderate temperature [J]. Bioresource Technology, 2021, 337: 125496.
- [6] NIU Q, HE S, ZHANG Y, *et al.* Process stability and the recovery control associated with inhibition factors in a UASB-anammox reactor with a long-term operation [J]. Bioresource Technology, 2016, 203: 132-141.
- [7] PENG L, QIU H L, LI S J, *et al.* The mitigation effect of free ammonia and free nitrous acid on nitrous oxide production from the full-nitrification and partial-nitrification systems [J]. Bioresource Technology, 2023, 372: 128564.
- [8] ZHANG T Q, WEI N, WU G X. Autotrophic nitrogen removal and potential microbial interactions in anammox systems with different ammonia and organic carbon concentrations[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 37: 101493.
- [9] WANG Y N, DONG S R, OUYANG H L, *et al.* Tertiary treatment of municipal wastewater in an IBFR dominated by PD/A with unique niche [J]. Chemosphere, 2024, 353: 141563.
- [10] ZHANG Y, HE S, NIU Q, *et al.* Characterization of three types of inhibition and their recovery processes in an anammox UASB reactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2016, 109: 212-221.
- [11] MA H, NIU Q, ZHANG Y, *et al.* Substrate inhibition and concentration control in an UASB-Anammox process [J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 263-272.
- [12] 王朝朝,张凯,闫立娜,等. 膜生物反应器 Anammox 的快速启动及其抑制动力学[J]. 中国给水排水, 2017, 33(17): 19-25.
- WANG Zhaozhao, ZHANG Kai, YAN Lina, *et al.* Rapid start-up and inhibition kinetic characteristics of Anammox in a membrane bioreactor [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(17): 19-25(in Chinese).

作者简介:高丽娟(1984-),女,山西临汾人,硕士,教授级高工,主要研究方向为污泥污水处理及资源化利用。

E-mail:1654465680@qq.com

收稿日期:2024-12-26

修回日期:2025-02-09

(编辑:沈靖怡)