

不同环境下厌氧氨氧化菌对盐度的响应及生物量作用

苏 杨, 杨 宏

(北京工业大学城市建设学部, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

[摘要] 为考察厌氧氨氧化菌在不同环境下对盐度的响应情况, 以及生物量对厌氧氨氧化菌高盐抑制的缓解效果, 研究未添加盐度和添加不同盐度的 SBR 反应器的脱氮性能, 确定起到促进及抑制作用的盐度阈值。通过批次实验考察低盐度对 35、15 °C 厌氧氨氧化污泥的影响, 以及不同污泥量 (4、6、8、10 g/L) 在高盐抑制条件下对基质的降解能力。结果表明, 低于 5 g/L 的盐度对中温和低温系统中的厌氧氨氧化菌均有促进和稳定作用。尤其在低温条件下, 该盐度可提高厌氧氨氧化菌的亚硝氮还原能力, 盐度达到 14 g/L 后出现明显抑制。此外, 生物量为 10 g/L 的厌氧氨氧化颗粒污泥对盐度冲击具有一定耐受度。单位盐度负荷下的比厌氧氨氧化活性 (SAA) 在不同生物量时的变化规律相似。当单位生物量的盐度增至 1.8 kg/kg 时, SAA 为初始数值的 50%。明确了不同环境条件下盐度对厌氧氨氧化菌的响应情况及生物量的缓解策略, 可为厌氧氨氧化菌在含盐废水脱氮工艺中的应用提供参考。

[关键词] 厌氧氨氧化; 盐度; 低温; 颗粒污泥

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)08-0163-07

Response of ANAMMOX bacteria to salinity under different environments and the role of biomass

SU Yang, YANG Hong

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Faculty of Architecture, Civil And Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To investigate the response of anammox bacteria to salinity in different environments and the effect of biomass on mitigation of high salt inhibition of anammox bacteria, the denitrification performances of SBR without and with different salinity additions were investigated to determine the salinity threshold for promotion and inhibition. The effects of low salinity on anammox sludge at 35 and 15 °C and degradation ability of different biomass (4, 6, 8 and 10 g/L) on the substrate under high salinity inhibition conditions were investigated by batch experiments. The results showed that salinity below 5 g/L promoted and stabilized the anammox bacteria in both medium and low temperature systems. In particular, the salinity improved the nitrite degradation ability of anammox bacteria under low temperature, and significant inhibition occurred after salinity reached 14 g/L. In addition, the anammox granular sludge with a biomass of 10 g/L was tolerant to salinity shock. Specific anaerobic anammox activity (SAA) per unit salinity load had similar pattern at different biomass. When the salinity load per unit biomass increased to 1.8 kg/kg, the SAA was 50% of the initial value. The response of salinity to anammox bacteria under different environmental conditions and the mitigation strategy of biomass were clarified, which can provide a reference for application of anammox bacteria in saline wastewater denitrification process.

Key words: anaerobic ammonia oxidation; salinity; low temperature; granular sludge

厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 是一种新型的微生物氮转化途径。厌氧氨氧化菌能够氧化氨氮并生成 N_2 , 无需有机碳源和 O_2 , 减少药剂投加费用和曝气能耗^[1-2]。尽管厌氧氨氧化较常规污水脱氮工艺具有

明显优势, 但厌氧氨氧化菌对环境参数如温度和盐度非常敏感, 阻碍了其进一步应用^[3]。随着工业活动与海水利用程度的增加, 需要处理的含盐含氮废水增多^[4-5]。厌氧氨氧化系统中微生物的菌群结构

可能影响厌氧氨氧化性能及在不利环境下的抵抗能力。因此,考察盐浓度对厌氧氨氧化菌的影响具有重要意义。

厌氧氨氧化相关工艺的最佳温度范围在 30~37 °C,多应用于温度较高的场景(如污泥消化液)^[3]。厌氧氨氧化菌在 15 °C 下的活性仅为 35 °C 的 1/10^[6]。即使具有较高的活性,10 °C 的低温条件下仍需 700 d 的培养才能获得适应低温的厌氧氨氧化菌^[7]。这对厌氧氨氧化菌在低温条件下的脱氮效能提出挑战。

低盐度对于实验室中温运行的厌氧氨氧化反应器具有正向刺激作用^[8],低温环境下低盐度对厌氧氨氧化菌降解能力的影响尚不清楚。此外,高盐度会降低细胞活性。盐度条件下对厌氧氨氧化菌的增殖不利,导致厌氧氨氧化技术处理含盐废水非常困难。研究表明,当反应体系中的污泥生物量>10 g/L,厌氧氨氧化菌对盐度(30 g/L)的适应时间缩短^[9-10]。生物量在厌氧氨氧化菌适应盐度中发挥的作用也有待进一步研究。笔者选用一系列 SBR 反应器,探究盐度促进或抑制厌氧氨氧化菌的浓度阈值及菌群变化,比较中、低温条件下低盐度对厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响,评估高盐度冲击下厌氧氨氧化菌对生物量的响应规律,以期为厌氧氨氧化工艺处理含盐废水的优化控制提供一定理论参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

接种污泥为实验室储备的厌氧氨氧化颗粒污泥。实验用水为人工配水, NH_4^+-N 、 NO_2^--N 分别由 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NaNO_2 提供,以静置 24 h 后的自来水稀释至目标浓度。

无机培养液包括 1.25 g/L NaHCO_3 、0.15 g/L $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、0.3 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.05 g/L KH_2PO_4 、0.025 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,以及 1 mL/L 的微量元素 I 和 II。微量元素组成^[11]见表 1。基质 pH 由体积分数为 1% 的 H_2SO_4 溶液控制在 7.7~8.0。

UV752N 紫外可见分光光度计(上海佑科仪器仪表有限公司),便携式溶解氧仪(美国 HACH 公司),pHS-3C 型便携式 pH 计(上海仪电仪器有限公司),ZHWY-2102C 恒温振荡器(上海智城分析仪器制造有限公司)。

表 1 微量元素组成

Table 1 Trace element composition and content				
项目	名称	质量浓度/ (g·L ⁻¹)	名称	质量浓度/ (g·L ⁻¹)
I	EDTA	5	FeSO_4	5
II	EDTA	15	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.24
	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.43	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.05
	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.99	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.19
	H_3BO_3	0.014	$\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	0.21
	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.22		

1.2 实验方法

(1)无添加/添加盐度对厌氧氨氧化菌的促进及抑制实验。在 2 L SBR 反应器中培养厌氧氨氧化污泥 12 d,然后等分为 2 部分,即对照组 A0 和含盐组 A1,在有效体积为 1 L 的 SBR 反应器中于 35 °C 下恒温运行。SBR 循环周期为 24 h(注入 5 min,反应 23.5 h,沉降 20 min,出料 5 min),换水比例为 80%。初始进水中氮质量浓度为 225 mg/L [$m(\text{NO}_2^--\text{N}) : m(\text{NH}_4^+-\text{N})=1.2:1$],A1 中的盐逐渐增至 14 g/L,每 2 d 盐度提升 1.0 g/L。

(2)典型中、低温条件下低盐度对厌氧氨氧化颗粒污泥的短期影响实验。设置 4 个有效体积为 0.5 L 的 SBR 反应器,用蒸馏水调节相同的最终污泥质量浓度(以 VSS 计,约 8 g/L)。在恒温振荡培养箱中设置不同的盐度及温度(B1:0、35 °C;B2:5 g/L、35 °C;B3:0、15 °C;B4:5 g/L、15 °C)。初始进水中氮质量浓度为 225 mg/L [$m(\text{NO}_2^--\text{N}) : m(\text{NH}_4^+-\text{N})=1.2:1$],SBR 循环周期为 24 h(注入 5 min,反应 23.5 h,沉降 20 min,出料 5 min),换水比例为 80%,共运行 35 d。

(3)不同生物量下盐度对厌氧氨氧化颗粒的短期抑制实验。设置 4 个有效体积为 0.5 L 的 SBR 反应器(C1、C2、C3、C4),用蒸馏水调节最终污泥质量浓度分别约 4、6、8、10 g/L(以 VSS 计)。初始进水中氮质量浓度为 225 mg/L [$m(\text{NO}_2^--\text{N}) : m(\text{NH}_4^+-\text{N})=1.25:1$],SBR 循环周期为 24 h(注入 5 min,反应 23.5 h,沉降 20 min,出料 5 min),换水比例为 80%,共运行 35 d。此外,盐度以 5.0 g/L 为梯度,由 0 g/L 提升至 20 g/L。

通过测定 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N ,考察盐度、温度及生物量对厌氧氨氧化颗粒污泥的影响。

1.3 比厌氧氨氧化活性

实验运行期间,通过批次测试测定不同盐度梯度的比厌氧氨氧化活性。

从反应器中收集厌氧氨氧化污泥样品,用磷酸盐缓冲溶液(0.1 mol/L,对应 pH 为 7.4)洗涤 3 次以去除残留底物。将 1.0 g/L 的污泥加入工作体积为 100 mL 的血清瓶中。初始 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 质量浓度均为 150 mg/L,在培养基中加入与 SBR 反应器相同的盐度(即 0、5、9、14 g/L 的 NaCl),用体积分数为 1% 的 H_2SO_4 控制培养基 pH 在 7.8 左右。血清瓶通入 N_2 (99.99%) 10 min 以除去氧气,立即用丁基橡胶密封并放入恒温振荡器中,温度为 $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$,转速为 180 r/min。每小时用注射器抽取 5 mL 液体,测定 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 。SAA 按 1.5 方法测定。每项参数重复测定取平均值。

1.4 分析方法

参照文献[12]对水质进行分析。 NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定, NO_2^--N 采用 N -(1-萘基)-乙二胺光度法测定, NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定,DO 采用便携式溶解氧仪测定,pH 采用便携式 pH 计测定。

为研究厌氧氨氧化系统的菌群结构对盐度的响应,分别以接种污泥、未添加盐的对照组 A0 及添加 9 g/L 盐度的污泥样本进行高通量测定分析。针对 V3~V4 区的 16S rRNA 采用带特异性引物 341F (CCCTACACGACGCTCTTCCGATCTG (barcode) CCTACGGGNGGCWGCAG)/805R (GACTGGAGTTCCTTGCCACCCGAGAATTCCAGACTACHVGGGTATCTAATCC)^[13] 进行扩增,随后在 Illumina HiSeq 2500 PE250 平台上机测序。选取 OTU 代表序列与数据库 Silva 最新序列比对物种信息,将 OTU 代表序列(97% 相似水平)在门、属水平上分析样品的群落组成与丰度关系。

1.5 参数计算方法

1.5.1 比厌氧氨氧化活性

比厌氧氨氧化活性(SAA)按式(1)计算。

$$\text{SAA} = \frac{(\text{NH}_4^+_{\text{进水}} - \text{NH}_4^+_{\text{出水}} + \text{NO}_2^-_{\text{进水}} - \text{NO}_2^-_{\text{出水}})}{\text{HRT} \times 1000 \times \text{VSS}} \times 24 \quad (1)$$

1.5.2 化学计量比

化学计量比按式(2)、式(3)计算。

$$\text{Rs} = \Delta \text{NO}_2^- : \Delta \text{NH}_4^+ = \frac{\text{NO}_2^-_{\text{进水}} - \text{NO}_2^-_{\text{出水}}}{\text{NH}_4^+_{\text{进水}} - \text{NH}_4^+_{\text{出水}}} \quad (2)$$

$$\text{Rp} = \Delta \text{NO}_3^- : \Delta \text{NH}_4^+ = \frac{\text{NO}_3^-_{\text{出水}} - \text{NO}_3^-_{\text{进水}}}{\text{NH}_4^+_{\text{进水}} - \text{NH}_4^+_{\text{出水}}} \quad (3)$$

式中:SAA——比厌氧氨氧化活性,kg/(kg·d);

Rs——亚硝氮相对氨氮的消耗比例;

Rp——硝态氮相对氨氮的生成比例;

$\text{NH}_4^+_{\text{进水}}$ ——进水氨氮,mg/L;

$\text{NH}_4^+_{\text{出水}}$ ——出水氨氮,mg/L;

$\text{NO}_2^-_{\text{进水}}$ ——进水亚硝氮,mg/L;

$\text{NO}_2^-_{\text{出水}}$ ——出水亚硝氮,mg/L;

HRT——水力停留时间,h;

VSS——污泥质量浓度,g/L。

2 结果与讨论

2.1 盐度对厌氧氨氧化颗粒污泥的双向影响

考察了盐度对厌氧氨氧化颗粒污泥的影响,结果见图 1。

如图 1 所示,实验分为 2 个阶段,第 I 阶段(第 0 天~第 18 天)比较厌氧氨氧化菌在未添加(A0)/添加盐度(A1)环境下的脱氮性能。第 II 阶段(第 19 天~第 34 天)继续考察 A1 提高盐度后的抑制浓度。从第 13 天开始,A1 以 2 d 为单位、1 g/L 为梯度逐渐提升盐度。由于环境改变,A1 的出水基质浓度在第 0 天~第 5 天升高,随后逐渐降低。A0 和 A1 的化学计量比 Rs 在第 3 天分别为 1.15、1.24,与理论值 1.15 相近^[14]。

由图 1(a)、(b)还可知,添加盐度在 5 g/L 以下时,A1 出水始终低于 A0。虽然该盐度下 A1 的氮容积去除负荷(NRR)增幅略微变缓,但至第 I 阶段结束时其仍高于 A0,上述数据表明低盐度有助于厌氧氨氧化系统的效率提升及稳定。NRR 的增长速率可能与不同厌氧氨氧化菌属对盐度的适应性有关。盐度增至 9 g/L 时 A0 出水才首次低于 A1,A1 在 10 g/L 时出现亚硝氮积累, NH_4^+-N 保持在 20.18 mg/L, NO_2^--N 升至 36.12 mg/L,导致 A1 的 NRR 低于 A0,约为 $0.57 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。有研究表明,脱氮性能不会因低盐度(如 8.7 g/L)而被抑制,但盐度超过 10 g/L 后脱氮性能会逐渐变差^[13-14]。本研究中,经过 4 d 的适应期 A1 出水 NO_2^--N 降至 17.41 mg/L,表明只要保证适当的驯化梯度,厌氧氨氧化颗粒污泥能够适应该含盐量的废水。但当盐度升至 14 g/L 时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 都不再降低。至第 II 阶段结束,A1 出水的 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 分别升至 20.04、30.04 mg/L。

进一步考察了 A1 的污泥活性随盐度的变化趋势,如表 2 所示。

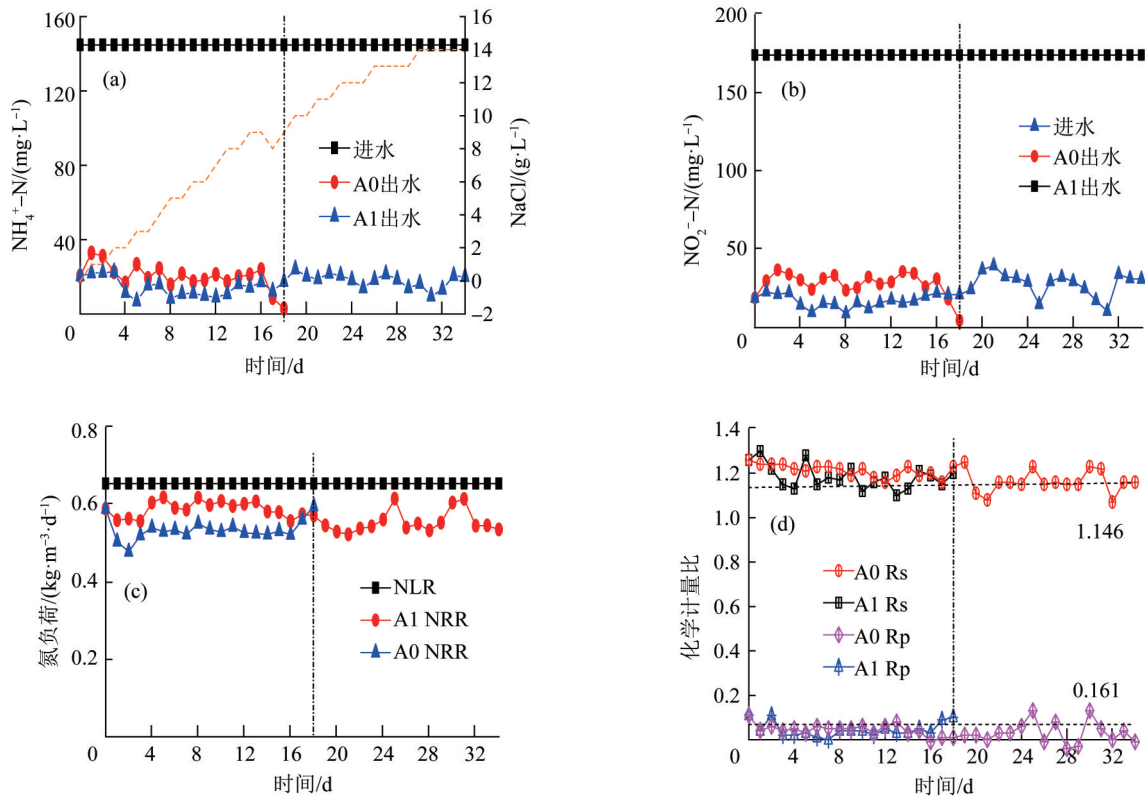
(a) NH_4^+-N ; (b) NO_2^--N ; (c) 氮负荷; (d) 化学计量比 (R_s, R_p)

图1 无/有盐度对厌氧氨氧化颗粒污泥的影响的进出水浓度

Fig. 1 Concentration of inlet and outlet water in the non-salinity/salinity environment

表2 盐度对SAA的影响

Table 2 Specific anammox activity after salinity addition

NaCl投加量/ (g·L ⁻¹)	0	5	9	14
SAA/ (kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.092±0.008	0.109±0.013	0.103±0.010	0.087±0.004

由表2可见,不同盐度条件下SAA经历了先增长后降低的过程,盐度为5 g/L时SAA约为0.11 kg/(kg·d),高于初始状态[0.09 kg/(kg·d)],表明低盐度对提高厌氧氨氧化菌的脱氮性能产生正向刺激作用。盐度为9、14 g/L时,SAA下降且降幅较大。整个实验过程中SAA对盐度的敏感度较高,进一步明确了盐度对厌氧氨氧化菌双向影响的浓度阈值。实验中盐度的正向刺激质量浓度为5 g/L,不宜超过14 g/L。

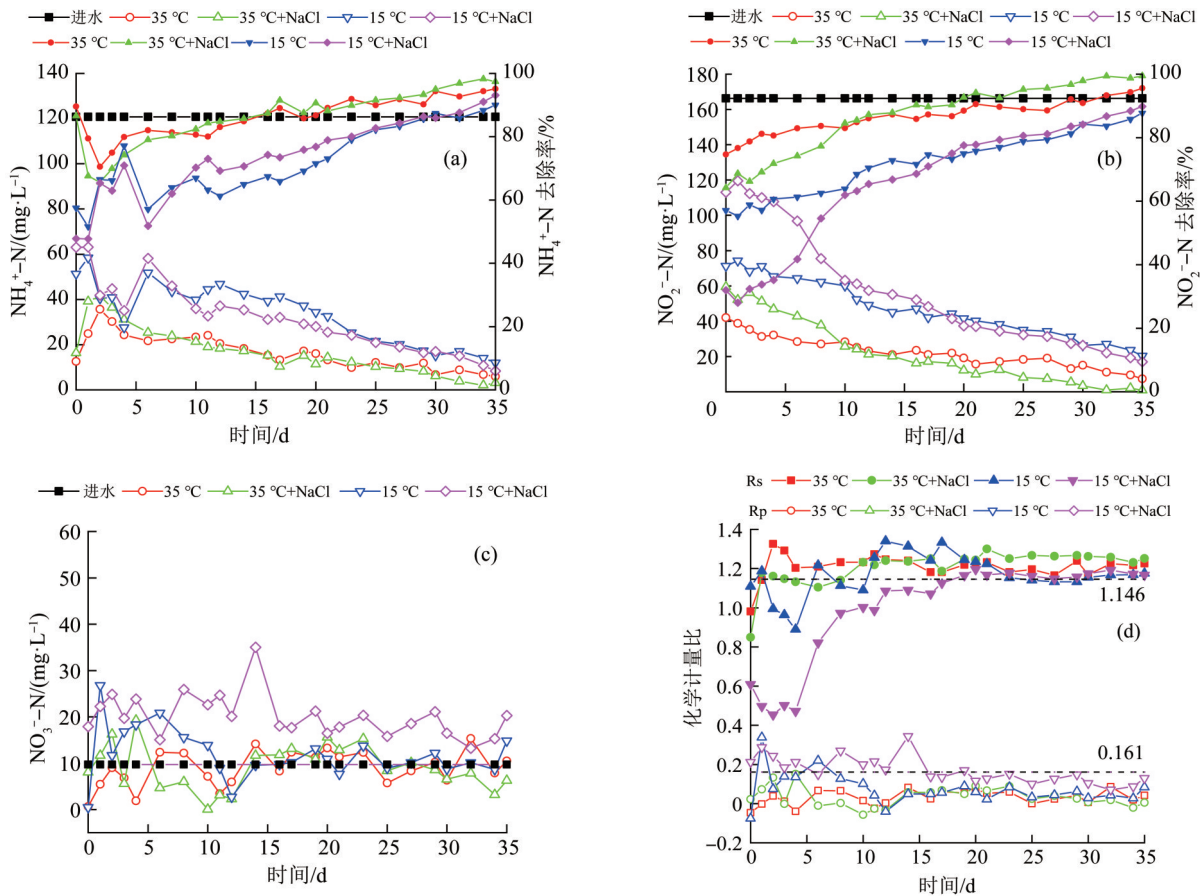
2.2 低盐度对中、低温下厌氧氨氧化颗粒污泥的短期影响

由2.1可知,添加低盐度有助于厌氧氨氧化系统的稳定运行。通过4组批次实验,考察典型低温

(15℃)和中温(35℃)条件下低盐度(5 g/L)对厌氧氨氧化颗粒污泥底物的降解能力是否有促进作用,结果见图2。

由图2可见,经过35 d的运行,启动初期温度对厌氧氨氧化菌的影响明显。无论是否添加盐度,B1和B2的脱氮性能均好于B3、B4(低温条件)。其中,B1、B2的氨氮虽然在0~3 d由12.62、16.31 mg/L短暂上升至30.25、36.38 mg/L,但在第4天迅速下降,比B3、B4提前约5 d。

对于 NO_2^--N ,虽然B1~B4均呈下降趋势,但添加盐度之初B4的出水基质显然高于其他3组。添加盐度的B2、B4的 NO_2^--N 浓度均高于同样温度的对照组B1、B3的 NO_2^--N ,10 d后才实现对盐度的适应。第10天为B1和B2(温度均为35℃)出水 NO_2^--N 的转折点,此后B2出水 NO_2^--N 始终低于B1。而低温下的B4出水 NO_2^--N 用时18 d才低于B3,表明低温使厌氧氨氧化菌的性能下降^[15]。至实



(a) NH_4^+-N 降解情况; (b) NO_2^--N 降解情况; (c) NO_3^--N 生成量变化; (d) 化学计量比 (R_s , R_p)

图2 低温低盐度对厌氧氨氧化颗粒污泥的脱氮性能

Fig. 2 Low temperature and salinity on the nitrogen removal performance of Anammox granular sludge

验结束时, B1~B4 的 NO_2^--N 质量浓度分别为 7.95、0.9、20.34、16.93 mg/L 。李祥等^[16]的研究指出温度 < 15 °C 时, 氮去除速率不足 37 °C 时的 1/3。而本研究中, B4 出水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 低于同温度的 B3 出水, 略高于 35 °C 的 B1 出水, 显示低盐度在低温系统中能够提升脱氮效能。此外, 添加盐度的 B4、B2 出水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 浓度均分别低于同组的 B3、B1 出水, 但 35 °C 时的提升幅度仍高于 15 °C。

本研究和其他研究中, 低于 5 g/L 的盐度可以正向刺激厌氧氨氧化菌^[17], 但在低温条件下厌氧氨氧化菌对盐度更加敏感。在同系列温度条件下, 低浓度的盐主要通过增强亚硝氮的降解能力, 避免低温下亚硝氮积累而引发的基质抑制。出水残留硝态氮也存在不同变化。B2 出水硝态氮先高于 B1 出水, 随后逐渐降至与 B1 出水相似; 而处于低温条件下的 B4 出水 NO_3^--N 始终高于 B3 出水, 约为 B3 的 2~3

倍。图 2(d) 显示, 与 B1 (未加盐度) 相比, 加入低盐度的 B2 在初始阶段更接近理论化学计量比; 15 °C 时, 添加盐度的 B4 在初始状态不稳定的条件下, 恢复效果显著。2 组同温度系列试验结束时更接近理论值。因此认为低温条件下, 低浓度盐同样可以促进厌氧氨氧化工艺的启动及提高稳定性。

2.3 高盐度冲击对不同生物量厌氧氨氧化颗粒污泥的短期抑制

不同于低温低盐度条件下厌氧氨氧化菌活性的提升, 在适温条件下, 高盐度不利于厌氧氨氧化工艺的 stable 运行。针对高盐环境中, 污泥生物量对厌氧氨氧化菌是否有缓解作用进行研究, 结果见图 3。

由图 3 可见, 不同生物量的厌氧氨氧化颗粒污泥对盐度冲击的响应不同, C1~C4 在高盐度环境 (10 g/L) 下均受到抑制。特别地, 当 C1 受到 >5 g/L 的盐度冲击时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的降解速率分别

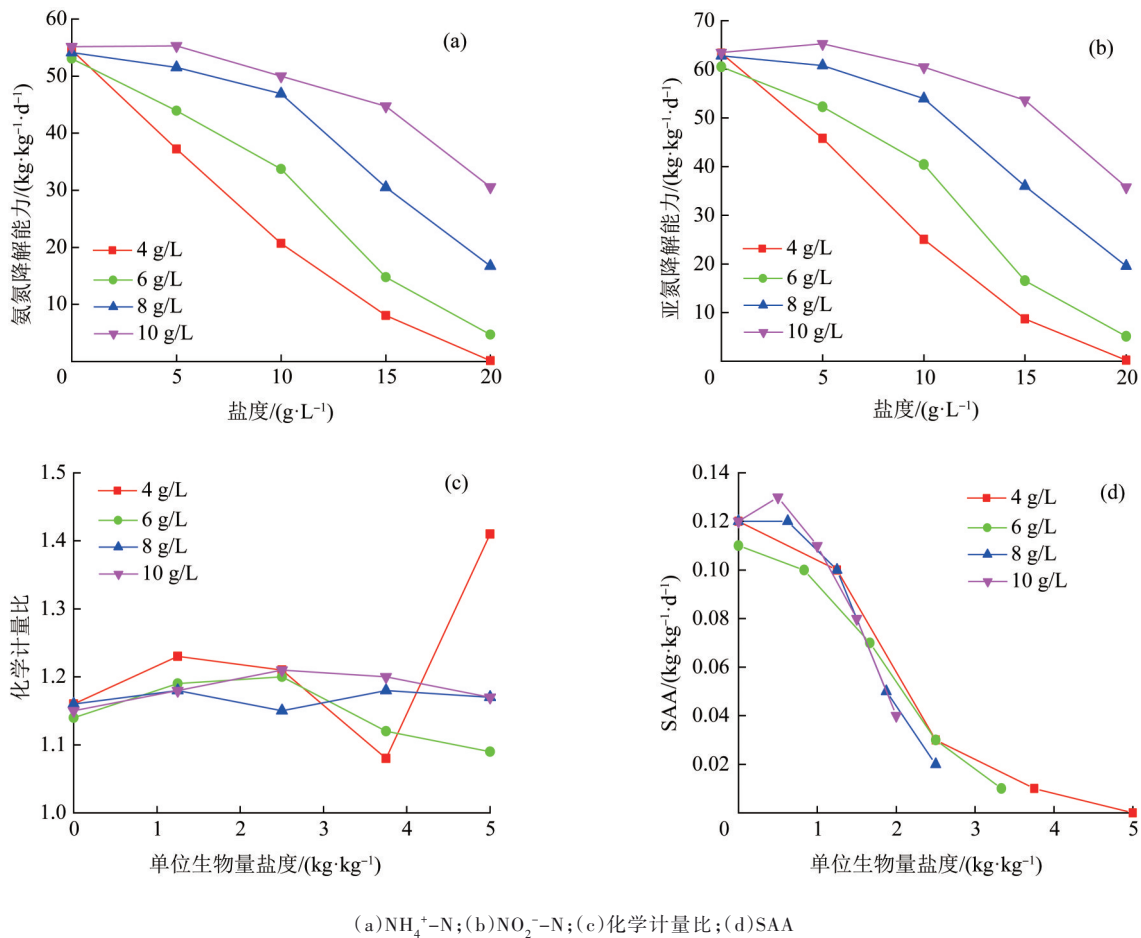


图3 不同生物量厌氧氨氧化颗粒污泥受盐度冲击时的变化情况

Fig. 3 Nitrogen removal performance of granular sludge with different biomass under impact of salinity

降至0.037、0.046 kg/(kg·d),降解情况与2.1中低盐度的促进作用不同,推测可能是由于低生物量对较高盐度梯度耐受性更差。当进水盐度增至20 g/L时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 降解速率的斜率未随盐度的增加而进一步下降,鉴于SAA较低,分析认为盐度为15 g/L时对C1已造成相当程度的抑制。

此外,在高盐度冲击下低生物量反应器的化学计量比显著改变。与其他反应器相比,C1的 $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}:\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}(\text{Rs})$ 随盐度冲击强度的增加波动幅度变大,特别对于15 g/L以上的盐度冲击,Rs迅速增至1.41,偏离稳态值。这可能是由于盐度快速变化导致可溶性有机碳和氨氮增加,促使反硝化过量消耗亚硝酸盐。

实验过程中,生物量对盐度胁迫下的厌氧氨氧化颗粒污泥具有缓冲效应,盐度对厌氧氨氧化颗粒污泥的抑制程度随生物量的增加而降低。Jiachun YANG

等^[10]研究指出,当生物量高于10 g/L,厌氧氨氧化污泥的适应期更短,这可能是C4相对C1~C3活性更高的原因。由图3(d)可见,不同生物量下SAA随盐度的变化规律相似。当单位生物量盐度为1.8 kg/kg左右时,C1~C4的SAA降至初始值的50%;当单位生物量盐度增至2.5 kg/kg时,C1~C4的SAA仅为初始值的16.7%;随着盐度的继续提升,SAA下降速度变缓。因此本研究中,1.8 kg/kg为厌氧氨氧化菌保持活性的单位生物量盐度临界值。B. KARTAL等^[4]指出厌氧氨氧化菌对单位生物量盐度的最大耐受值为4 kg/kg(30 g/L)。

综上可知,高生物量的C4通过降低单位污泥的盐度而增强厌氧氨氧化菌对盐度的耐受度,因而具有更稳定的脱氮性能,且当盐度梯度较高(单次盐度提升值 ≥ 5 g/L)时,基于对盐度耐受度考虑,单位生物量盐度不宜超过1.8 kg/kg。

3 结论

(1) 低于 5 g/L 的盐度对厌氧氨氧化反应器有正向刺激作用, 盐度为 9 g/L 时反应器的脱氮性能与对照组持平, 盐度高于 14 g/L 后对厌氧氨氧化菌产生抑制。

(2) 低盐度 (5 g/L) 可以保证厌氧氨氧化颗粒系统的稳定运行, 尤其在低温条件下, 主要体现为低温和盐度冲击条件下短程反硝化能力降低, 残留的亚硝氮迅速降低, 硝酸盐积累量增加。

(3) 厌氧氨氧化颗粒污泥对盐度冲击的耐受度与污泥生物量有关。高生物量能够缓解盐度对厌氧氨氧化菌的抑制作用。

参考文献

- [1] 苏杨, 于鹏飞, 傅金祥, 等. 金属离子浓度对 ANAMMOX 污泥颗粒化的影响研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(3): 74-77.
SU Yang, YU Pengfei, FU Jinxiang, et al. Research on the influences of metallic ions concentrations on the granulation of ANAMMOX sludge[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(3): 74-77.
- [2] SU Yang, YANG Hong, WANG Xiaotong, et al. Successful enhancement and related characteristics of anammox bacterial activity by hydraulic supply strategy under limited inoculum[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 41: 102005.
- [3] SHENG Li, LEI Zhen, DZAKPASU M, et al. Application of the anammox-based process for nitrogen removal from anaerobic digestion effluent: A review of treatment performance, biochemical reactions, and impact factors[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 38: 101595.
- [4] KARTAL B, KOLEVA M, ARSOV R, et al. Adaptation of a freshwater anammox population to high salinity wastewater[J]. Journal of Biotechnology, 2006, 126(4): 546-553.
- [5] WEI Qiaoyan, KAWAGOSHI Y, HUANG Xiaowu, et al. Nitrogen removal properties in a continuous marine anammox bacteria reactor under rapid and extensive salinity changes[J]. Chemosphere, 2016, 148: 444-451.
- [6] 宋成康, 王亚宜, 韩海成, 等. 温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥胞外聚合物的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2006-2013.
SONG Chengkang, WANG Yayi, HAN Haicheng, et al. Effect of decreasing temperature on the performance and extracellular polymer substance of anaerobic ammonia oxidation sludge[J]. China Environmental Science, 2016, 36(7): 2006-2013.
- [7] HENDRICKX T L G, KAMPMAN C, ZEEMAN G, et al. High specific activity for anammox bacteria enriched from activated sludge at 10 °C[J]. Bioresource Technology, 2014, 163: 214-221.
- [8] LU Huifeng, LI Yiyu, SHAN Xiaoyu, et al. A holistic analysis of ANAMMOX process in response to salinity: From adaptation to collapse[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 215: 342-350.
- [9] JIN Rencun, MA Chun, MAHMOOD Q, et al. Anammox in a UASB reactor treating saline wastewater[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89(5): 342-348.
- [10] YANG Jiachun, ZHANG Li, HIRA D, et al. Anammox treatment of high-salinity wastewater at ambient temperature[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2367-2372.
- [11] VAN DE GRAAF A A, DE BRUIJN P, ROBERTSON L A, et al. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. Microbiology, 1996, 142(8): 2187-2196.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 258-279.
- [13] LIU Yunman, GUO Jianbo, LIAN Jing, et al. Effects of extracellular polymeric substances (EPS) and N-acetyl-L-homoserine lactones (AHLs) on the activity of anammox biomass[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 129: 141-147.
- [14] LOTTI T, KLEEREBEZEM R, LUBELLO C, et al. Physiological and kinetic characterization of a suspended cell anammox culture[J]. Water Research, 2014, 60: 1-14.
- [15] 周蒙蒙, 杨婉, 谭锡诚, 等. 温度对 UASB 厌氧氨氧化反应器运行性能的影响及其过程动力学特性[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(4): 580-586.
ZHOU Mengmeng, YANG Wan, TAN Xicheng, et al. Effect of temperature on nitrogen removal performance of UASB anammox reactor and process kinetics[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(4): 580-586.
- [16] 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 等. 温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1288-1292.
LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yuhui, et al. Effect of temperature on stability of nitrogen removal in the ANAMMOX reactor[J]. Environmental Science, 2012, 33(4): 1288-1292.
- [17] DAPENA-MORA A, VÁZQUEZ-PADÍN J R, CAMPOS J L, et al. Monitoring the stability of an Anammox reactor under high salinity conditions[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 51(3): 167-171.

[作者简介] 苏杨(1989—), 博士, E-mail: musemicheng@163.com。

[收稿日期] 2022-07-16(修改稿)