

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.23.010

有机物存在下 Fe^{2+} 对厌氧氨氧化脱氮性能的影响

严子春^{1,2}, 焦陇珍¹, 唐瑞祥¹

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为分析有机物存在条件下 Fe^{2+} 对厌氧氨氧化生物膜反应器脱氮性能的影响, 在进水 COD 为 90 mg/L、水力负荷为 $0.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的条件下投加 Fe^{2+} , 考察不同 Fe^{2+} 浓度作用下厌氧氨氧化反应器处理效能的变化情况, 并采用最大可能数(MPN)法和高通量测序技术对反应器内的微生物进行分析。结果表明, 在 Fe^{2+} 浓度为 0.15 mg/L 的条件下, 反应器对 TN 的去除率为 82.15%; 当 Fe^{2+} 浓度提高至 1.5、3.0 和 4.5 mg/L 时, TN 去除率分别增加了 4.00%、6.89% 和 7.77%。MPN 法计数结果显示, 反应器底部的反硝化菌数量随着 Fe^{2+} 浓度的增加呈上升趋势; 高通量测序结果表明, 当进水 Fe^{2+} 浓度由 0.15 mg/L 增至 3.0 mg/L 时, 厌氧氨氧化反应器上部生物膜中的厚壁菌门(*Firmicutes*)、浮霉菌门(*Planctomycetota*)和 *Denitratisoma* 属的丰度分别由 7.80%、4.87%、4.59% 增至 10.69%、5.73%、12.25%。一定浓度的 Fe^{2+} 能够通过促进反应器内具有降解有机物、厌氧氨氧化和反硝化作用微生物的生长来提高厌氧氨氧化生物膜反应器在有机物抑制条件下的脱氮性能。

关键词: 有机物; Fe^{2+} ; 厌氧氨氧化; 脱氮; 反硝化; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)23-0068-07

Effect of Fe^{2+} on Nitrogen Removal Performance of Anammox in the Presence of Organic Matter

YAN Zi-chun^{1,2}, JIAO Long-zhen¹, TANG Rui-xiang¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Ferrous ions (Fe^{2+}) were added into the influent to investigate the effects of different ferrous ion concentrations on the treatment performance of Anammox reactor when the influent COD concentration and hydraulic loading rate were 90 mg/L and $0.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and the microbial community in the reactor was analyzed by MPN method and high-throughput sequencing, so as to reveal the effect of Fe^{2+} on nitrogen removal efficiency of Anammox biofilm reactor in the presence of organic matter. When Fe^{2+} concentration was 0.15 mg/L, the reactor demonstrated removal rate of 82.15% for TN. With the increase of Fe^{2+} concentration to 1.5 mg/L, 3.0 mg/L and 4.5 mg/L, the removal rates of TN increased by 4.00%, 6.89% and 7.77%, respectively. The MPN counting results showed that the number of denitrifying bacteria at the bottom of the reactor increased with the increase of Fe^{2+} concentration. The results of high-

基金项目: 甘肃省科技计划项目(20JR2RA0002); 国家自然科学基金资助项目(51568034)

通信作者: 严子春 E-mail: yanzichun@mail.lzjtu.cn

throughput sequencing showed that the abundance of *Firmicutes*, *Planctomycetota* and *Denitratisoma* in the biofilm of the upper part of the Anammox reactor increased from 7.80%, 4.87% and 4.59% to 10.69%, 5.73% and 12.25% respectively when the influent Fe^{2+} concentration increased from 0.15 mg/L to 3.0 mg/L. Specific concentration of Fe^{2+} improved the nitrogen removal performance of the Anammox biofilm reactor under organic matter inhibition by promoting the growth of microorganisms capable of organic matter degradation, Anammox and denitrification in the reactor.

Key words: organic matter; Fe^{2+} ; Anammox; nitrogen removal; denitrification; microbial community

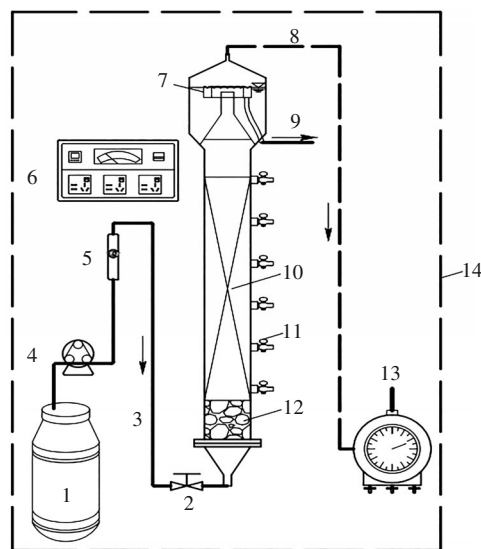
厌氧氨氧化(Anammox)作为一种新型生物脱氮技术,具有无需外加碳源、产泥量低、脱氮效果佳等优点。但是相关研究发现,有机物浓度过高反而会促使反硝化菌与厌氧氨氧化菌竞争底物基质,从而影响厌氧氨氧化反应的进行^[1]。严子春等^[2]发现,当有机物浓度为30和60 mg/L时,反硝化菌与厌氧氨氧化菌协同脱氮提高了反应器的脱氮效果;有机物浓度进一步增加至90 mg/L时,反硝化菌大量增殖使得反应器脱氮性能下降。李亚峰等^[3]发现,当 $\text{COD}>150$ mg/L时,厌氧氨氧化菌对亚硝态氮的竞争能力减弱,使厌氧氨氧化活性受到严重抑制,脱氮性能大幅度降低。因此,提高对有机废水的处理效果是目前研究的重点方向之一。

Fe^{2+} 既是微生物生长所需的微量元素,也是血红素c合成的必要元素之一,且血红素c是厌氧氨氧化代谢过程中的一种重要辅助因子^[4-5]。彭厦等^[6]发现,一定浓度的 Fe^{2+} 可以增加反应器内厌氧氨氧化菌的数量,使得反应器的脱氮性能显著提高,当 Fe^{2+} 浓度为4.48 mg/L时厌氧氨氧化菌的生长速率明显加快。孟显松等^[7]通过短期试验发现,在低温(15℃)条件下,当 Fe^{2+} 浓度为8.96 mg/L时, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除率(分别为79.80%和75.18%)相比于空白组分别提高了14.00%和12.94%。陈翠忠等^[8]发现,适当添加铁可以强化Anammox菌的生长速率,有利于污泥颗粒化,从而提高Anammox菌的活性和污泥的沉降效果。目前关于有机物抑制条件下 Fe^{2+} 是否能提高厌氧氨氧化的脱氮效率鲜有报道。因此,在有机物抑制条件下笔者考察了 Fe^{2+} 浓度对厌氧氨氧化反应器脱氮性能的影响,并分析了 Fe^{2+} 对厌氧氨氧化工艺运行中氮素转化的影响,旨在为后续厌氧氨氧化处理实际污水的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示。本试验采用升流式厌氧氨氧化生物膜反应器,其内径为14 cm,有效容积为12.32 L。底部设置10 cm的鹅卵石承托层,内部装填规格为1.5 cm×1.5 cm×2.5 cm的聚氨酯多孔材料,堆积密度为14.53 mg/cm³,顶部设置三相分离器和集气罩。反应器放置在温度为30~32℃的恒温室内避光培养。反应器进水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和COD浓度分别为(40±2)、(53±2)、90 mg/L,水力负荷为0.1 m³/(m²·h)。



1.进水桶 2.闸阀 3.进水管 4.蠕动泵 5.转子流量计 6.温控仪
7.三相分离器 8.排气管 9.出水管 10.填料 11.取样口
12.鹅卵石层 13.湿式气体流量计 14.恒温室

图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of test device

1.2 试验用水及检测方法

试验采用人工模拟废水, Fe^{2+} 溶液由 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (AR)配制,有机物、 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 分别由食用蔗糖、 NH_4Cl 和 NaNO_2 提供。 Fe^{2+} 、 NH_4^+-N 、

NO_2^- -N、 NO_3^- -N、TN 分别采用邻菲罗啉分光光度法、纳氏试剂分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法、麝香草酚分光光度法、过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定。COD按照《COD光度法快速测定仪技术要求及检测方法》(HJ 924—2017)测定。调节pH为7.11~7.54,微量元素的投加量参照文献[9]。 Fe^{2+} 投加方式:向反应器进水桶投加配制好的 FeSO_4 溶液与原水混合,使其浓度达到预定值。

微生物分析方法:在 Fe^{2+} 浓度为0.15和3.0 mg/L条件下,待系统运行稳定后,从反应器自下而上10和40 cm处取4个生物膜样本,分别命名为Fe1_10、Fe1_40、Fe3_10和Fe3_40,采用最大可能数(MPN)法计数^[10],并委托上海美吉生物医药科技有限公司进行高通量测序^[11]。

2 结果与分析

2.1 有机物浓度对脱氮效果的影响

不同有机物浓度条件下,反应器脱氮效果的变化如图2所示。可知,当有机物浓度为0时,反应器出水氮素以 NO_3^- -N为主,TN去除率为83.49%。当有机物浓度为30和60 mg/L时,TN去除率分别提高了6.36%和11.5%。当有机物浓度为90 mg/L时,厌氧氨氧化生物膜反应器的脱氮效果开始下降,TN去除率降低至82.21%。这表明适宜的有机物浓度有利于提高反应器的脱氮效果,浓度过高反而会产生不利影响。鉴于金属离子能增加微生物群落数量并提高反应器脱氮效果^[12],因此通过投加 Fe^{2+} 来缓解脱氮过程中有机物的抑制作用,并确定后续试验有机物浓度为90 mg/L。

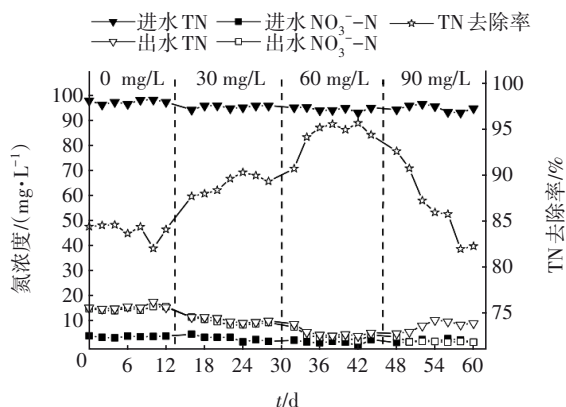


图2 有机物浓度对脱氮效果的影响

Fig.2 Effect of organic matter concentration on nitrogen removal

2.2 亚铁离子对脱氮效果的影响

在进水有机物浓度为90 mg/L、水力负荷为0.1 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 条件下, Fe^{2+} 浓度对脱氮效果的影响如图3所示。由图3(a)可知,当 Fe^{2+} 浓度为0.15 mg/L时,反应器对 NH_4^+ -N的去除效果较差,平均去除率为67.98%。当 Fe^{2+} 浓度增至1.5、3.0和4.5 mg/L时,对 NH_4^+ -N的平均去除率分别提高了9.31%、13.90%和15.66%,说明一定浓度的 Fe^{2+} 会提高反应器对 NH_4^+ -N的去除效果。这是因为 Fe^{2+} 作为催化剂加快了 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N之间的反应,促进了反应器对 NH_4^+ -N的去除^[13]。

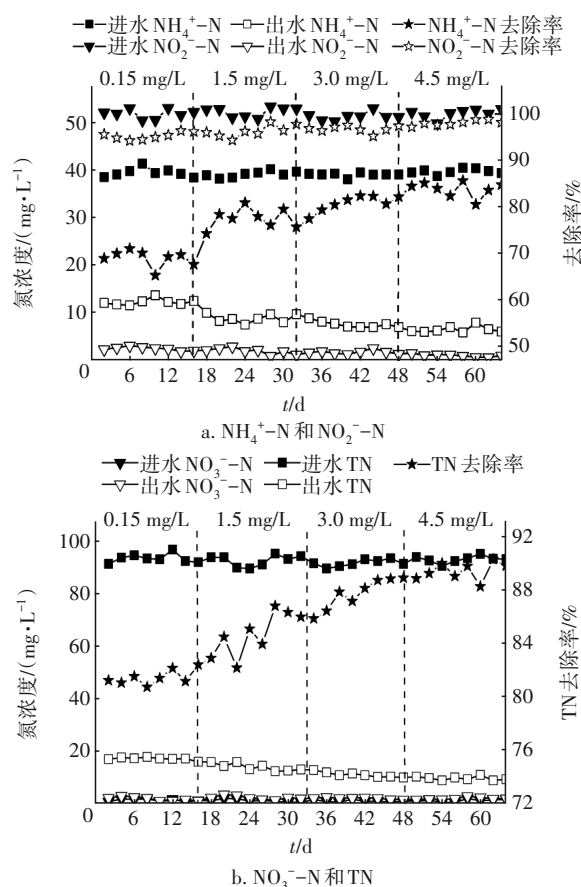


图3 Fe^{2+} 浓度对脱氮效果的影响

Fig.3 Effect of Fe^{2+} concentration on nitrogen removal

由图3(b)可知,当 Fe^{2+} 浓度为0.15 mg/L时,反应器对TN的去除率为82.15%,出水氮素以 NH_4^+ -N为主。当 Fe^{2+} 浓度进一步增至1.5、3.0和4.5 mg/L时,TN去除率分别提高了4.00%、6.89%和7.77%。表明投加适宜浓度的 Fe^{2+} 会提高厌氧氨氧化生物膜反应器的脱氮性能,这是由于投加 Fe^{2+} 补充了反应器内微生物所需的微量元素,提高了亚铁血红素c的含量和功能酶的活性,从而促进厌氧氨氧化

脱氮^[14]。

结合图 3 发现,随着进水 Fe²⁺浓度的提高,反应器出水 NH₄⁺-N 浓度明显下降且 NO₃⁻-N 基本被去除,表明反应器厌氧氨氧化和反硝化作用效果有所提高。此外,相关研究表明^[15],Fe²⁺对厌氧氨氧化菌和反硝化菌的活性存在一定影响,因此有必要考察反应器下部和上部反硝化菌数量和微生物的变化情况。

2.3 亚铁离子对反硝化菌数量的影响

在 Fe²⁺浓度分别为 0.15 和 3.0 mg/L 条件下,反应器自下而上 10 和 40 cm 处生物膜样本反硝化菌 MPN 计数结果见表 1。可以看出,反应器下部反硝化菌数量随 Fe²⁺浓度的增加呈上升趋势。相同浓度条件下,反应器下部的反硝化菌数量比上部增加了 1~2 个数量级。结合效能数据分析可知,投加 Fe²⁺有利于反硝化菌的生长繁殖,从而可提高反应器反硝化脱氮效果。

表 1 不同 Fe²⁺浓度下反硝化菌计数结果

Tab.1 Counting results of denitrifying bacteria at different Fe ²⁺ concentrations			
Fe ²⁺ 浓度/(mg·L ⁻¹)	取样位置	稀释度	细菌数/(CFU·cm ⁻³)
0.15	上部	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁴	3.76×10 ⁷
	下部		1.62×10 ⁸
3.0	上部	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁴	2.74×10 ⁷
	下部		8.06×10 ⁹

2.4 亚铁离子对微生物群落丰度的影响

各样品的文库覆盖率约为 1.00,测序结果能对样品生物膜中微生物群落进行有效分析。当 Fe²⁺浓度从 0.15 mg/L 增至 3.0 mg/L 时,反应器内微生物在 OTU、科水平下的种群数量均有所增加(见表 2),其中上部与厌氧氨氧化脱氮相关的 OTU567 数量从 960 增至 1 405,说明 Fe²⁺会增加反应器内厌氧氨氧化菌的数量。

表 2 生物膜微生物群落丰富度及多样性

Tab.2 Richness and diversity index of biofilm microbial community						
Fe ²⁺ 浓度/(mg·L ⁻¹)	样本名	Shannon 指数	Chao 指数	OTU	OTU567	科水平
0.15	Fe1_10	4.59	937	375	705	281
	Fe1_40	5.04	945	461	960	334
3.0	Fe3_10	4.41	962	409	453	299
	Fe3_40	4.84	1 019	481	1 405	340

Chao 指数用来反映微生物群落的丰富度^[16]。当 Fe²⁺浓度为 3.0 mg/L 时,反应器内与微生物种数呈正相关的 Chao 指数均增加,说明一定浓度的 Fe²⁺会增加反应器内微生物群落的丰富度^[17]。

2.5 门水平下亚铁离子对微生物群落的影响

微生物主要菌门的变化见图 4。可知,4 个样本主要的优势菌门有变形菌门(*Proteobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)和浮霉菌门(*Planctomycetota*)。当 Fe²⁺浓度为 3.0 mg/L 时,反应器上部浮霉菌门的丰度值为 5.73%,与 Fe²⁺浓度为 0.15 mg/L 相比增加了 0.86%,表明投加 Fe²⁺会提高反应器上部浮霉菌门的丰度,目前厌氧氨氧化反应器中检测出的浮霉菌门为厌氧氨氧化功能菌^[18-19]。Fe²⁺作用下变形菌门是反应器内相对丰度最高的优势菌门,在 Fe²⁺浓度为 0.15 mg/L 的条件下变形菌门丰度为 41.75%,变形菌门内众多微生物能利用有机物进行异养反硝化脱氮^[20],随着 Fe²⁺浓度的增加,变形菌门的丰度变化不大。

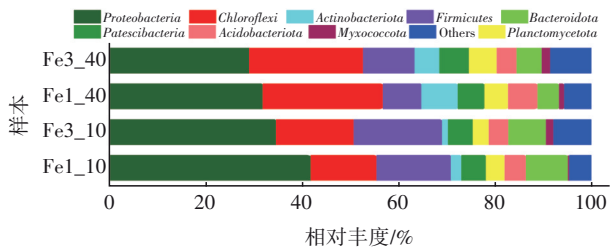


图 4 微生物主要菌门的变化

Fig.4 Change of main phylum of microorganisms

随着 Fe²⁺浓度的增加,反应器内绿弯菌门和厚壁菌门的丰度均有所提高,其中厚壁菌门的丰度值由 7.80% 提高到 10.69%,增加了 2.89%。厚壁菌门可以分解有机物并产生挥发性脂肪酸(VFA)^[21],绿弯菌门在厌氧条件下可以水解有机物且参与生物膜的形成^[22]。Fe²⁺浓度为 3.0 mg/L 时,生物膜中具有降解有机物、厌氧氨氧化脱氮的功能微生物丰度有所增加,使得反应器厌氧氨氧化脱氮能力得以增强^[23]。

2.6 属水平下亚铁离子对微生物群落的影响

微生物主要菌属的变化如图 5 所示。可知,反应器内 *Candidatus_Jettenia* 和 *Candidatus_Brocadia* 是丰度较高的厌氧氨氧化菌属^[24]。当 Fe²⁺浓度为 3.0 mg/L 时,反应器上部 *Candidatus_Brocadia* 和 *Candidatus_Jettenia* 的丰度相比下部分别增加了

0.29%和1.77%, *Candidatus_Brocadia* 能利用水中的硝态氮将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , Fe^{2+} 作为电子供体直接参与厌氧氨氧化氮循环, 增强了微生物的代谢途径, 且提高了 *Candidatus_Jettenia* 的活性和生长速率^[25-26], 使得厌氧氨氧化菌属丰度提高, 厌氧氨氧化菌逐渐占优势, 从而提高了反应器的脱氮效果。与 Fe^{2+} 浓度为 0.15 mg/L 相比, 在 Fe^{2+} 浓度为 3.0 mg/L 的条件下反应器上部 and 下部 *Trichococcus* 的丰度分别增加了 4.45% 和 4.90%, *Trichococcus* 具有兼性厌氧和降解有机物的特点; 反应器下部 *Thauera* 和 *Denitratisoma* 的丰度分别增加了 6.57% 和 4.24%, 上部分别增加了 0.64% 和 7.66%, 二者均可以降解有机物且具有反硝化功能^[27]。

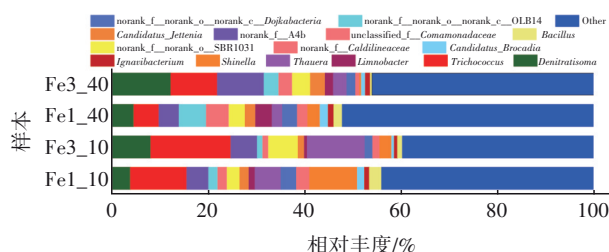


图5 微生物主要菌属的变化

Fig.5 Change of main genus of microorganisms

Fe^{2+} 作用下厌氧氨氧化反应器脱氮效果的提高一方面是因为 Fe^{2+} 能够促进厌氧氨氧化菌和降解有机物微生物的生长, 另一方面其可提高具有异养反硝化功能菌属 (*Denitratisoma*、*Thauera* 等) 的丰度, 从而使得这两种脱氮功能菌在反应器内共存, 形成脱氮效能高且稳定的生物膜。这与效能试验中增加进水 Fe^{2+} 浓度, 厌氧氨氧化生物膜反应器脱氮效果升高的结论相符。

2.7 讨论

Fe^{2+} 在厌氧氨氧化过程中的转化途径如图6所示。可以看出, 一方面 Fe^{2+} 会促进反硝化脱氮过程和利用有机碳源进行异养脱氮微生物的生长, Fe^{2+} 浓度为 3.0 mg/L 时反应器上部 *Denitratisoma* 的丰度值较下部增加了 7.66%, 反硝化菌利用厌氧氨氧化所产生的 NO_3^- -N 进行反硝化, 将其直接转化为 N_2 ^[28], 投加 Fe^{2+} 使得厌氧氨氧化和反硝化协同脱氮, 反应器内厌氧氨氧化菌产生的 NO_3^- -N 为反硝化菌所利用^[29], 反硝化菌为厌氧氨氧化菌提供无机碳源和 NO_2^- -N, 两者相互促进, 反硝化菌和厌氧氨氧化菌可共同竞争亚硝态氮和生存空间, 使得对 NO_2^- -N 的

去除较为彻底; 另一方面, 投加 Fe^{2+} 可以增加反应器内厌氧氨氧化菌的数量, *Candidatus_Brocadia* 和 *Candidatus_Scalindu* 能够利用水中的硝态氮将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} , 使 Fe^{2+} 作为电子供体直接参与 Anammox 氮循环, 增强了微生物的代谢途径, 使得厌氧氨氧化脱氮优势得以提高, 同时 Fe^{2+} 会促进反应器内厌氧氨氧化和反硝化的协同作用, 提升了反应器的脱氮效果。

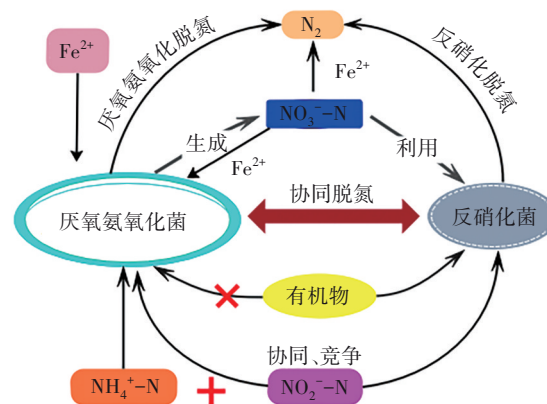


图6 厌氧氨氧化反应中亚铁离子的转化途径

Fig.6 Transformation pathway of Fe^{2+} in Anammox

3 结论

① 在有机物浓度为 90 mg/L 的抑制条件下, 当 Fe^{2+} 浓度为 0.15 mg/L 时, 厌氧氨氧化生物膜反应器对 NH_4^+ -N 和 TN 的去除率分别为 67.98% 和 82.15%; 当 Fe^{2+} 浓度为 1.5、3.0 和 4.5 mg/L 时, 对 NH_4^+ -N 和 TN 的去除率分别提高了 9.31%、13.90%、15.66% 和 4.00%、6.89%、7.77%。可见, 投加一定浓度的 Fe^{2+} 能够明显提高反应器的脱氮效能。

② 当 Fe^{2+} 浓度为 0.15 和 3.0 mg/L 时, 反应器内的优势菌门为变形菌门, 随着 Fe^{2+} 浓度的增加, 反应器上部浮霉菌门、厚壁菌门、*Thauera*、*Denitratisoma* 的丰度值依次增加了 0.86%、2.89%、0.64%、7.66%, 其中浮霉菌门中丰度上升的厌氧氨氧化菌属为 *Candidatus_Jettenia*, 具有反硝化脱氮功能的菌属有 *Thauera*、*Denitratisoma*。 Fe^{2+} 主要通过促进厌氧氨氧化反应器中生物膜的厌氧氨氧化、反硝化脱氮微生物的生长来提高反应器脱氮效果。

参考文献:

- [1] HUBAUX N, WELLS G, MORENROTH E. Impact of coexistence of flocs and biofilm on performance of

- combined nitrification-anammox granular sludge reactors [J]. *Water Research*, 2015, 68: 127-139.
- [2] 严子春,唐瑞祥,吴大冰. 有机物对厌氧氨氧化生物膜反应器脱氮效能及微生物群落的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(4): 1303-1308.
- YAN Zichun, TANG Ruixiang, WU Dabing. Effect of organic matter on nitrogen removal efficiency and microbial community of an anammox biofilm reactor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4): 1303-1308 (in Chinese).
- [3] 李亚峰,于耀滢,杨嗣靖,等. HRT、DO和有机物对厌氧氨氧化脱氮性能的影响研究[J]. *工业水处理*, 2020, 40(8): 27-31.
- LI Yafeng, YU Yaofu, YANG Sijing, *et al.* The impact of HRT, DO and organic matter on the nitrogen removal performance of Anammox [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(8): 27-31 (in Chinese).
- [4] 许婷,梁延周,杜兵. FeSO_4 对厌氧氨氧化微生物活性影响[J]. *环境工程*, 2013, 31(S1): 8-11, 188.
- XU Ting, LIANG Yanzhou, DU Bing. Effects of ferrous sulfate on the activity of Anammox bacteria [J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31 (S1): 8-11, 188 (in Chinese).
- [5] MA H Y, ZHANG Y L, XUE Y, *et al.* Relationship of heme c, nitrogen loading capacity and temperature in Anammox reactor [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 568-577.
- [6] 彭厦,高大文,黄晓丽. 金属离子对厌氧氨氧化反应器效能的影响[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(21): 30-33.
- PENG Xia, GAO Dawen, HUANG Xiaoli. Impact of metal ions of performance of Anammox reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28 (21): 30-33 (in Chinese).
- [7] 孟显松,李军,张硕,等. 低温胁迫下 Fe^{2+} 对厌氧氨氧化脱氮性能影响研究[J]. *水处理技术*, 2020, 46(11): 125-128, 136.
- MENG Xiansong, LI Jun, ZHANG Shuo, *et al.* Study on the effect of Fe^{2+} on denitrification by anaerobic ammonium oxidation under low temperature stress [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46 (11): 125-128, 136 (in Chinese).
- [8] 陈翠忠,额热艾汗,刘洪光,等. 铁对厌氧氨氧化过程及脱氮性能的影响[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44 (5): 14-24.
- CHEN Cuizhong, EREAIHAN, LIU Hongguang, *et al.* Effect of iron on Anammox process and nitrogen removal performance: a review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(5): 14-24 (in Chinese).
- [9] SINDHU L, NIU K L, LIU X L, *et al.* Effect of Fe^{2+} addition on anammox consortia, nitrogen removal performance and functional genes analysis during start-up of anammox process [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 43: 102251.
- [10] JIAO Y, ZHAO Q L, JIN W B, *et al.* Bioaugmentation of a biological contact oxidation ditch with indigenous nitrifying bacteria for in situ remediation of nitrogen-rich stream water [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (2): 990-995.
- [11] SONG J X, CHEN L J, CHEN H D, *et al.* Characterization and high-throughput sequencing of a trichlorophenol-dechlorinating microbial community acclimated from sewage sludge [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 306-313.
- [12] 彭玲,王海月,毛念佳,等. MnO_2 强化厌氧氨氧化工艺启动及其微生物机理研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(4): 1283-1292.
- PENG Ling, WANG Haiyue, MAO Nianjia, *et al.* Cultivation of anammox sludge in an EGSB reactor with MnO_2 powder addition [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4): 1283-1292 (in Chinese).
- [13] YANG Y F, XIAO C C, LU J H, *et al.* $\text{Fe}(\text{III})/\text{Fe}(\text{II})$ forwarding a new Anammox-like process to remove high-concentration ammonium using nitrate as terminal electron acceptor [J]. *Water Research*, 2020, 172: 115528.
- [14] 吕冉,李彬,肖盈,等. 铁对废水微生物脱氮的影响研究进展[J]. *化工进展*, 2020, 39(2): 709-719.
- LÜ Ran, LI Bin, XIAO Ying, *et al.* Research progress on the effects of iron on microbiological nitrogen removal in wastewater [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(2): 709-719 (in Chinese).
- [15] 张黎,胡筱敏,姜彬慧,等. 亚铁离子对厌氧氨氧化反应器脱氮性能的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(12): 1753-1756.
- ZHANG Li, HU Xiaomin, JIANG Binhui, *et al.* Effect of iron ions on denitrification performance in Anammox reactor [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36(12): 1753-1756 (in Chinese).
- [16] KANG D, YU T, XU D D, *et al.* The Anammox process at typical feast-famine states: reactor performance, sludge activity and microbial community [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 370: 110-119.

- [17] QIAO S, BI Z, ZHOU J T, *et al.* Long term effects of divalent ferrous ion on the activity of Anammox biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 142: 490–497.
- [18] 杨瑞丽, 王晓君, 吴俊斌, 等. 厌氧氨氧化工艺快速启动策略及其微生物特性[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(12): 3341–3350.
- YANG Ruili, WANG Xiaojun, WU Junbin, *et al.* Rapid start-up strategy and microbial characteristics of anammox process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(12): 3341–3350 (in Chinese).
- [19] KONG X, YU S Y, FANG W, *et al.* Enhancing syntrophic associations among *Clostridium butyricum*, *Syntrophomonas* and two types of methanogen by zero valent iron in an anaerobic assay with a high organic loading [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 257: 181–191.
- [20] 韦愿, 王华琴, 王敦球. 无机碳在厌氧氨氧化系统中的迁移转化[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(6): 1322–1328.
- WEI Yuan, WANG Huaqin, WANG Dunqiu. Migration and transformation of inorganic carbon in the Anammox system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(6): 1322–1328 (in Chinese).
- [21] ANTWI P, LI J Z, BOADI P O, *et al.* Dosing effect of zero valent iron (ZVI) on biomethanation and microbial community distribution as revealed by 16S rRNA high-throughput sequencing [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 123: 191–199.
- [22] ZHAO Y P, LIU S F, JIANG B, *et al.* Genome-centered metagenomics analysis reveals the symbiotic organisms possessing ability to cross-feed with anammox bacteria in anammox consortia [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(19): 11285–11296.
- [23] 马建业, 荣宏伟, 王竞茵, 等. MBR中厌氧氨氧化菌群落结构及膜污染性能研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(9): 7–14.
- MA Jianye, RONG Hongwei, WANG Jingyin, *et al.* Microbial community composition and membrane fouling performance of anaerobic ammonia oxidation membrane bioreactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(9): 7–14 (in Chinese).
- [24] LIU L J, JI M, WANG F, *et al.* Insight into the influence of microbial aggregate types on nitrogen removal performance and microbial community in the anammox process: a review and meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136571.
- [25] OSHIKI M, SHIMOKAWA M, FUJII N, *et al.* Physiological characteristics of the anaerobic ammonium-oxidizing bacterium ‘*Candidatus Brocadia sinica*’ [J]. *Microbiology*, 2011, 157(6): 1706–1713.
- [26] PENG M W, GUAN Y, LIU J H, *et al.* Quantitative three-dimensional nondestructive imaging of whole anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2020, 27(3): 753–761.
- [27] 郑林雪, 李军, 胡家玮, 等. 同步硝化反硝化系统中反硝化细菌多样性研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1): 116–121.
- ZHENG Linxue, LI Jun, HU Jiawei, *et al.* Analysis of denitrifying bacteria community composition in simultaneous nitrification and denitrification systems [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(1): 116–121 (in Chinese).
- [28] 靳翱玮, 廖方新, 孙远博, 等. 序批式运行 Anammox 颗粒污泥的有机碳源胁迫效应[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(3): 14–20.
- JIN Aowei, LIAO Fangxin, SUN Yuanbo, *et al.* Stress of high concentration organic carbon source on Anammox granular sludge under sequencing batch operation [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(3): 14–20 (in Chinese).
- [29] 张晓航, 付巢, 付昆明. 不含有机碳源条件下 CANON 工艺的脱氮性能[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(17): 9–18.
- ZHANG Xiaohang, FU Chao, FU Kunming. Nitrogen removal performance of CANON process without organic carbon sources [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(17): 9–18 (in Chinese).

作者简介: 严子春(1970–), 男, 甘肃古浪人, 博士, 教授, 主要研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: yanzichun@mail.lzjtu.cn

收稿日期: 2022-03-23

修回日期: 2022-05-06

(编辑: 任莹莹)