

亚硝酸盐形态对 ANAMMOX 菌活性的影响及抑制规律

朱 强^{1,2,3}, 王 凡^{1,2}, 刘 娜³, 林 兴^{1,2}, 陈方敏^{1,2},
李 祥^{1,2}, 黄 勇^{1,2}

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215002; 2. 苏州科技大学 环境生物技术研究所, 江苏 苏州 215002; 3. 清华苏州环境创新研究院, 江苏 苏州 215163)

摘 要: 采用可实现实时监测和调控 pH 值功能的连续流反应器, 在反应温度为 $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、HRT 为 5.6 h 的条件下, 针对人工模拟废水研究了亚硝酸盐形态和浓度对 ANAMMOX 菌活性的影响及抑制规律。试验结果表明, 当进水氨氮和亚硝态氮的浓度分别为 95.36、257.25 mg/L 时, 将反应器中废水的 pH 值从 7.5 调至 8.25, 经过 139 h 后反应器内的氨氮浓度从 4.67 mg/L 升高至 82.10 mg/L, 抑制了 86.2% 的 ANAMMOX 菌活性。将 pH 值从 8.25 继续调低至 7.5 时, 反应器中离子态亚硝酸盐 (NO_2^-) 浓度降低, 出水中氨氮和亚硝态氮浓度下降, 此时被抑制的 ANAMMOX 菌的活性得到一定程度的恢复, 可见 NO_2^- 才是造成 ANAMMOX 菌活性下降的抑制物。 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 对 ANAMMOX 菌活性的抑制受 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度和抑制时间的影响, 当进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度由 250 mg/L 增加至 1 000 mg/L 时, 达到相同抑制效果所需的时间由 46 h 缩短至 10.5 h。因此, ANAMMOX 菌的活性受抑制程度与进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度、反应温度、反应时间和可对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 形态产生影响的 pH 值有关。

关键词: 亚硝酸盐; 厌氧氨氧化; 游离亚硝酸; 抑制形态; pH 值

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0122-06

Effect of Nitrite Form on ANAMMOX Bacteria Activity and Its Inhibiting Rule

ZHU Qiang^{1,2,3}, WANG Fan^{1,2}, LIU Na³, LIN Xing^{1,2}, CHEN Fang-min^{1,2},
LI Xiang^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215002, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215002, China; 3. Research Institute for Environmental Innovation < Suzhou > Tsinghua, Suzhou 215163, China)

Abstract: The effect of nitrite form and concentration on the activity of ANAMMOX bacteria and its inhibiting rule was studied by feeding simulated wastewater in a continuous flow reactor with real-time monitoring and pH regulation function. The reaction temperature was $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ and HRT was 5.6 h. The results showed that the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in the reactor increased from 4.67 mg/L to 82.10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478284、51408387); 国家重点研发计划项目(2016YFC0401103); 苏州市分离净化材料与技术重点实验室项目(SZS201512)

通信作者: 黄勇 E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn

mg/L after 139 hours and 86.2% ANAMMOX bacteria activity was inhibited when the influent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration were 95.36 mg/L and 257.25 mg/L and pH increased from 7.5 to 8.25. When the pH was adjusted from 8.25 to 7.5, the ionic nitrite (NO_2^-) concentration in the reactor decreased, and the effluent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration declined synchronously. Meanwhile, activity of ANAMMOX bacteria was restored to some extent, which indicated that NO_2^- was the real inhibitor of ANAMMOX bacteria. The inhibition of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ on ANAMMOX bacteria activity was affected by concentration and inhibition time of $\text{NO}_2^- - \text{N}$. When the influent $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration was increased from 250 mg/L to 1 000 mg/L, the inhibition time required to achieve the same inhibition effect was reduced from 46 hours to 10.5 hours. Therefore, the inhibition of ANAMMOX bacteria activity was related to the influent $\text{NO}_2^- - \text{N}$, temperature, reaction time and pH which could affect the form of nitrite.

Key words: nitrite; ANAMMOX; FNA; inhibiting form; pH

与传统硝化反硝化脱氮工艺相比,厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 工艺因具有能耗低、不需要外加碳源、节省占地等优点^[1-3],引起了科研人员的关注。亚硝酸盐和氨氮作为 ANAMMOX 的反应物,其浓度的高低可影响 ANAMMOX 反应的稳定性。研究表明,当亚硝酸盐浓度达到一定水平后,反应器中 ANAMMOX 菌的活性会受到抑制^[4-7],脱氮速率也会随之下降^[8],这是导致 ANAMMOX 工艺不能普及的原因之一。Fernández 等人^[9]认为,对 ANAMMOX 工艺有抑制作用的不是离子态的 NO_2^- ,而是游离亚硝酸(FNA);但 Lotti 等人^[5]发现,离子态的 NO_2^- 是 ANAMMOX 工艺的抑制物,不是 FNA。ANAMMOX 菌的活性会受到亚硝酸盐形态的影响,且这种抑制作用的范围广、差异大。目前大多数的研究者只是对此抑制现象进行了简单描述,并未给出合理的解释,在实际工程中遇到此类问题也无从借鉴。pH 值^[10-13]、温度(T)^[14]是影响 ANAMMOX 菌活性的重要因子,而反应环境中亚硝酸盐的形态又受到 pH 值和温度的影响,很多研究者在分析 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度及形态对 ANAMMOX 反应的抑制时,并没有严格控制这些因素的稳定性^[11]。

笔者通过调控反应过程中的 pH 值和温度,分析了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 作为反应基质对 ANAMMOX 菌活性的影响;通过控制不同进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度,研究了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度对 ANAMMOX 菌活性的影响,旨在为 ANAMMOX 工艺的高效脱氮奠定基础。

1 材料与方法

试验采用有效体积为 3 L 的圆柱形玻璃反应

器,如图 1 所示。

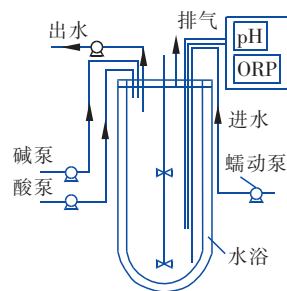


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental reactor

反应器配有可对氧化还原电位(ORP)和 pH 值进行实时监控和传输的装置,反应器内部温度通过恒温加热装置调控,并配有水浴夹套、搅拌桨,将温度稳定控制在 $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。通过蠕动泵控制反应器的进水流量,采用连续流进水方式,水力停留时间(HRT)为 5.6 h。反应器内 pH 值采用 1 mol/L 的 HCl 或 NaHCO_3 调节。

试验装置中接种了 200 mL 表面光滑且呈红色的 ANAMMOX 颗粒污泥,取自课题组长期稳定运行的 ANAMMOX 种泥反应器。

试验用水由人工配制,采用 NH_4Cl 提供氨氮,采用 NaNO_2 提供亚硝酸盐氮,矿物质元素组成为: CaCl_2 (0.136 g/L)、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.3 g/L)、 KH_2PO_4 (0.027 g/L)、 NaHCO_3 (按需投加);微量元素 I 成分为:EDTA (5 g/L)、 FeSO_4 (5 g/L);微量元素 II 成分为: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0.25 g/L)、EDTA (5 g/L)、 $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (0.2 g/L)、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.043 g/L)、 H_3BO_3 (0.014 g/L)、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

(0.24 g/L)、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0.99 g/L)、 $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.22 g/L)。

微量元素 I 的投量为 1.0 mL/L, 微量元素 II 的投量为 1.25 mL/L。采用高纯氮气去除进水中的氧气, 曝气时间为 30 min。

相关水质指标均按照《水和废水监测分析方法》(第 4 版) 进行测定, 水中 FNA 浓度按照式(1)计算。

$$C_{\text{FNA-N}} = C_{\text{NO}_2^- - \text{N}} / [(1 + e)^{-2300/(273 + T)} \times 10^{\text{pH}}] \quad (1)$$

式中, $C_{\text{FNA-N}}$ 为 FNA 的浓度, mg/L; $C_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ 为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度, mg/L; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 亚硝酸盐累积下 ANAMMOX 菌的活性分析

连续流反应器进水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度分别为 95.36 和 257.25 mg/L, pH 值为 7.5, 反应温度为 $(32 \pm 1)^{\circ}\text{C}$, HRT 通过蠕动泵控制在 5.6 h, 反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度的变化如图 2 所示。

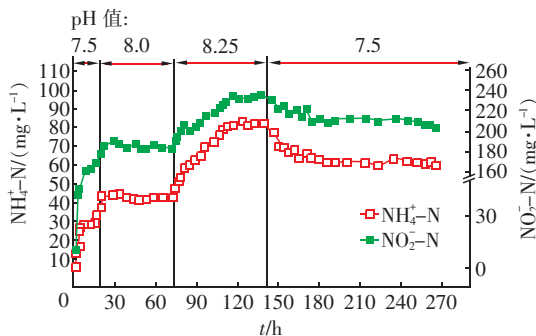


图 2 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度的变化

Fig. 2 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration

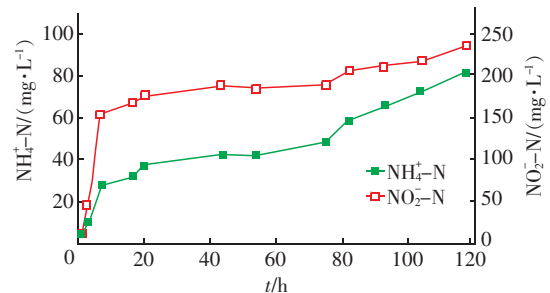
从图 2 可以看出, 反应初期, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和亚硝态氮基本被 ANAMMOX 菌消耗掉, 浓度分别为 4.67 和 10.27 mg/L, 可见选用的 ANAMMOX 污泥具有良好的去除氮的能力。随着装置的运行, 进入反应器内的基质逐渐增多, 反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度不断升高, 经过 7 h 的运行, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和亚硝态氮浓度分别达到 27.69 和 153.93 mg/L, 反应器内部出现了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累现象, 在接下来的 10 h 中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度基本保持不变, 此时对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率为 66.6%, 说明反应器内的 ANAMMOX 菌活性没有继续受到高浓度进水基质的影响, 氮去除效果相对稳定。将 pH 值调至 8.0

后, 经过 42 h 的运行, 反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和亚硝态氮浓度分别达到 43.19 和 182.18 mg/L, 此时对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率为 54.6%, 与 pH 值为 7.5 相比, ANAMMOX 菌对氮的去除率开始下降。而当氨氮浓度为 43.19 mg/L 时, 不会对 ANAMMOX 菌的活性产生影响, 说明影响 ANAMMOX 菌活性的是高浓度的进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 或 pH 值改变后亚硝酸盐的形态。将反应器内的 pH 值继续调节至 8.25, 经过 67 h 的运行, 反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度分别达到 82.10 和 236.03 mg/L, 此时对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率仅为 13.8%, 说明 ANAMMOX 菌活性受到了抑制。

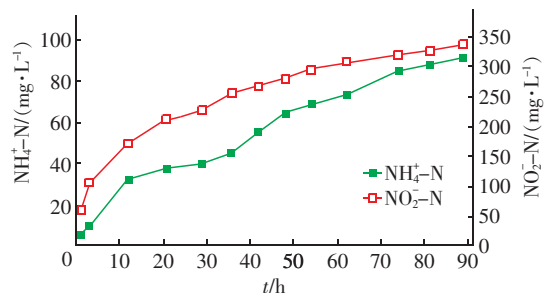
反应器运行至 139 h 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度基本稳定, 此时将 pH 值调低至 7.5, 反应器内部的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度也出现了降低。当运行至 266 h 时, 反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度分别降至 59.77 和 202.93 mg/L, 此时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率恢复至 37.2%, ANAMMOX 菌的活性在一定程度上得以恢复。

2.2 亚硝酸盐对 ANAMMOX 菌活性的抑制

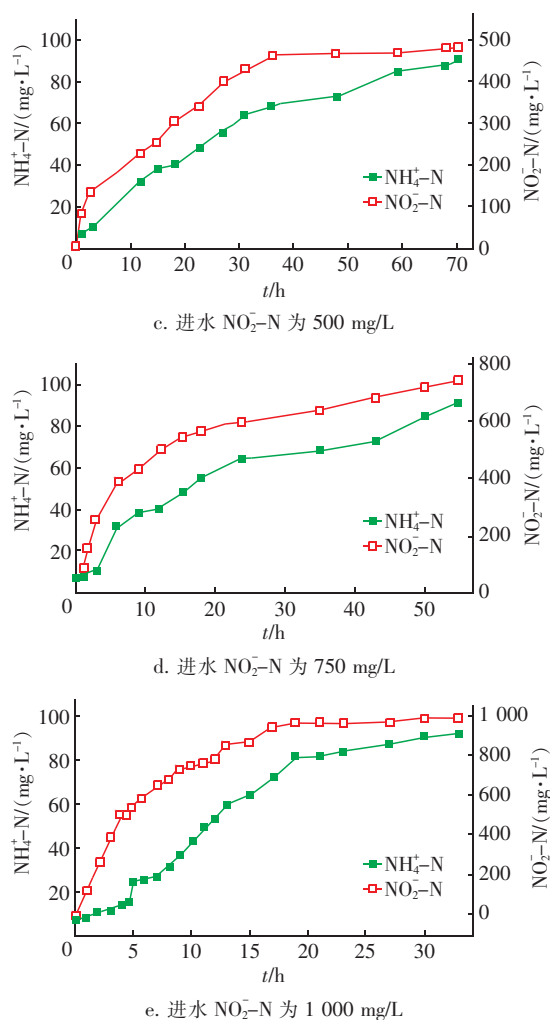
对于稳定运行的 ANAMMOX 反应器, 通过加热控制反应器内部的温度为 $(32 \pm 1)^{\circ}\text{C}$, 将 pH 值控制在 8.0, 保持进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度恒定, 分析不同进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度条件下出水氨氮的变化, 结果如图 3 所示。



a. 进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 250 mg/L



b. 进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 350 mg/L

图3 不同进水 NO_2^- -N 浓度条件下 NH_4^+ -N 的变化Fig.3 Variation of NH_4^+ -N under different NO_2^- -N concentrations

从图3可知,在不同 NO_2^- -N 浓度梯度下,随着反应批次中 NO_2^- -N 浓度的不断提高, NO_2^- -N 浓度逐渐超出了可对 ANAMMOX 菌活性产生抑制作用的耐受浓度,对 ANAMMOX 菌同等的抑制效果(半抑制浓度)所需要的反应时间(抑制时间 t)不同,且达到半抑制效果的 NO_2^- -N 浓度存在差异。从图3(a)可以看出,当进水 NO_2^- -N 浓度为 250 mg/L 时,达到半抑制效果所需的时间为 46 h,此时 NO_2^- -N 浓度为 183 mg/L。当进水 NO_2^- -N 浓度为 500 mg/L 时,达到半抑制效果所需的时间减小至 22.6 h,此时反应器内 NO_2^- -N 浓度为 340 mg/L,见图3(c)。当进水 NO_2^- -N 浓度达到 1 000 mg/L 时,仅需 10.5 h 就达到了半抑制水平,见图3(e)。也就是说,进水 NO_2^- -N 浓度越大,达到半抑制水

平所需要的时间就会越短,即抑制浓度与响应时间存在着一定的函数关系,这种函数关系能通过进水 NO_2^- -N 浓度的高低以及反应时间的长短确定对 ANAMMOX 菌抑制的效果。

3 讨论

3.1 亚硝酸盐抑制形态分析

在亚硝酸盐形态对 ANAMMOX 反应的抑制试验中,控制 pH 值为 7.5 ~ 8.3。过高的 pH 值对 ANAMMOX 菌的抑制作用体现在能够对反应过程中的酶活性以及参与反应的 NO_2^- -N 形态产生影响。本试验中, NO_2^- -N 作为 ANAMMOX 反应的基质之一,在水中常以 NO_2^- 和 HNO_2 的形式存在,且 HNO_2 与 NO_2^- 之间存在电离平衡,见式(2)。



结合式(1)和式(2)可知,pH 值和温度均能够对亚硝酸盐的形态产生影响,且 FNA 浓度随着 pH 值或温度的升高而下降,而 FNA 和 NO_2^- 在水中处于动态平衡,当 FNA 浓度下降时, NO_2^- 浓度会有所升高,而高浓度的 NO_2^- 又会对微生物细胞产生抑制作用^[15-17]。

Fernández 等^[9]认为,当 FNA 浓度低于 6.6 $\mu\text{g/L}$ 时不会对 ANAMMOX 菌的活性产生影响,当 FNA 浓度达到 11 $\mu\text{g/L}$ 时会对 ANAMMOX 菌造成 50% 的抑制,当 FNA 浓度达到 15 $\mu\text{g/L}$ 时会使 ANAMMOX 菌失去活性。图4为 FNA 和氨氮去除率的变化。可以看出,17 h 以后,反应基本达到稳定,此时 FNA 浓度达到 9.53 $\mu\text{g/L}$,调整 pH 值至 8.0, FNA 浓度下降至 3.3 $\mu\text{g/L}$,而此时的氨氮去除率由 66.7% 下降至 54.6%。当反应进行至 72 h 时,进一步调整 pH 值至 8.25, FNA 浓度下降至 2.2 $\mu\text{g/L}$,此时的氨氮去除率明显下降,最低达到 13.8%。在 17 ~ 139 h 过程中,反应器内的亚硝态氮浓度保持在 170 ~ 230 mg/L 之间,此时通过调整 pH 值的大小, FNA 浓度也随之发生变化,这是 FNA 浓度降低的原因。当 FNA 浓度为 2.2 $\mu\text{g/L}$ 时不会对 ANAMMOX 菌产生抑制,又由于亚硝酸盐的形态与 pH 值的关系较为密切, FNA 与 NO_2^- 在反应器中达到电离平衡,当 FNA 浓度从 9.53 $\mu\text{g/L}$ 降至 2.2 $\mu\text{g/L}$ 时,反应器中的 NO_2^- 浓度一直在增高,这也证明了氨氮去除率下降的原因是反应器内部 NO_2^- 浓度升高,即 NO_2^- 是 ANAMMOX 菌的抑制物,这与

Lotti 等人^[5]的报道一致。当反应器运行至 139 h 时,调整 pH 值至 7.5,氨氮去除率明显上升,从 13.8% 升高至 37.2%,抑制作用得到一定的缓解,而在 139 ~ 266 h 的运行时间内,FNA 浓度从 2.2 $\mu\text{g/L}$ 升高至 12.09 $\mu\text{g/L}$,反应器中的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度基本不变,由 FNA 与 NO_2^- 浓度电离平衡可以看出,在 pH 值从 8.25 调整至 7.5 过程中,FNA 不是 ANAMMOX 菌的抑制物, NO_2^- 才是导致 ANAMMOX 菌活性下降的原因。pH 值调整后的氨氮去除率从 13.8% 恢复至 37.2%,也证明了短时间内高浓度的亚硝酸盐不会导致 ANAMMOX 菌活性丧失^[7]。

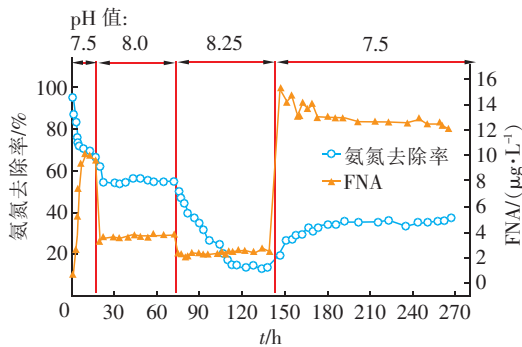


图4 FNA 和氨氮去除率的变化

Fig. 4 Variation of FNA and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal rate

Puyol 等^[6]认为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 对 ANAMMOX 菌的抑制作用是由 FNA 和 NO_2^- 共同导致的,且 NO_2^- 和 FNA 的抑制浓度分别为 561 和 0.117 mg/L ,当 pH 值低于 7.1 时,FNA 对 ANAMMOX 菌的抑制作用贡献率较大;当 pH 值较高时, NO_2^- 对 ANAMMOX 菌的抑制作用贡献率较大。在本试验后期,调整 pH 值至 7.5,虽然 NO_2^- 对 ANAMMOX 的抑制作用减弱,氨氮去除率有所提升,但由于 pH 值为 8.25 时对 ANAMMOX 菌的抑制作用增强,使得反应器内部的亚硝酸盐浓度有所提升,导致后期调整 pH 值后,FNA 浓度较反应初期有所提升,反应并不能恢复至初始 pH 值为 7.5 时的氮去除能力,此时的 FNA 浓度达到 12.09 $\mu\text{g/L}$,这与 Fernández 等人^[9]的研究结果——当 FNA 浓度达到 11 $\mu\text{g/L}$ 时会对 ANAMMOX 造成 50% 的抑制大致相当。

3.2 半抑制水平下 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的抑制规律分析

当进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度分别为 250、350、500、750 和 1 000 mg/L 时,ANAMMOX 菌达到半抑制水平所需的抑制时间分别为 46、35.7、22.6、15.4 和 10.5 h,此时反应器内的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度 (IC_{50}) 分别为

183、257、340、540 和 751 mg/L 。可以看出,随着进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度的升高,达到半抑制水平所需的时间逐渐变短,抑制时间与 IC_{50} 具有明显的相关性。之前的研究中,一般只考虑到 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度的高低会对 ANAMMOX 工艺产生抑制,而忽视了这种抑制水平会受到反应时间的影响,更没有考虑到半抑制水平、半抑制 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度与反应时间的关系,这也是诸多报道中存在的低浓度 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 也会对 ANAMMOX 工艺产生抑制的原因。

将不同进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度下达到半抑制亚硝态氮浓度与抑制时间进行拟合,结果如图 5 所示。可见,两者具有显著的函数关系,且相关系数达到了 0.992。 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 对 ANAMMOX 菌的抑制受亚硝态氮浓度和反应时间的影响,即 $\text{IC}_{50} = F(\text{IC}_{\text{NO}_2^- - \text{N}}, t)$, $\text{IC}_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ 值越小达到 IC_{50} 所需要的反应时间 t 越长。而 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 又是 pH 值和温度 T 的函数,即 $\text{IC}_{50} = F[\text{IC}_{\text{NO}_2^- - \text{N}}(\text{pH}, T), t]$ 。对于一定生物量的 ANAMMOX 菌,脱氮能力相对稳定的情况下,当受到不同浓度梯度的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 抑制后,达到相同的抑制程度(半抑制水平)时,抑制时间存在一定的差异。图 5 的曲线为半抑制临界曲线,曲线上任意一点均表示该状态下达到 IC_{50} 的最小 $\text{IC}_{\text{NO}_2^- - \text{N}}$ 和抑制时间。可见, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 对 ANAMMOX 菌的影响不但与亚硝态氮浓度有关系,还与抑制时间密切相关,即 $\text{IC}_{50} = F[\text{IC}_{\text{NO}_2^- - \text{N}}(\text{pH}, T), t]$,具体半抑制函数关系还有待研究。

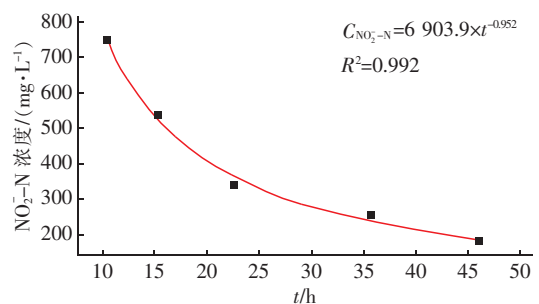


图5 IC_{50} 条件下抑制时间与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度的拟合关系

Fig. 5 Fitting relationship between $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and inhibition time in IC_{50} period

4 结论

① 在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度分别为 95.36 和 257.25 mg/L 条件下,经过 139 h 后,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 82.10 mg/L 时,抑制了 86.2% 的 ANAMMOX 菌活性。通过降低 pH 值,反应器中的

NO_2^- 浓度降低,出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度均出现下降,ANAMMOX 菌活性得到恢复,可见 NO_2^- 才是 ANAMMOX 菌的真正抑制物。

② NO_2^- 对 ANAMMOX 菌的抑制受 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度和反应时间的影响,当进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度由 250 mg/L 增加至 1 000 mg/L 时,所需的抑制时间由 46 h 缩短至 10.5 h,且抑制过程中相应的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度增加。

参考文献:

- [1] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences—An application survey[J]. *Water Res*, 2014, 55: 292 – 303.
- [2] Ni S Q, Lee P H, Fessehaie A, *et al.* Enrichment and biofilm formation of Anammox bacteria in a non-woven membrane reactor [J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101 (6): 1792 – 1799.
- [3] Sobotka D, Tuszynska A, Kowal P, *et al.* Long-term performance and microbial characteristics of the anammox-enriched granular sludge cultivated in a bench-scale sequencing batch reactor [J]. *Biochem Eng J*, 2017, 120: 125 – 135.
- [4] Kimura Y, Isaka K, Kazama F, *et al.* Effects of nitrite inhibition on anaerobic ammonium oxidation [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2010, 86(1): 359 – 365.
- [5] Lotti T, van der Star W R L, Kleerebezem R, *et al.* The effect of nitrite inhibition on the anammox process [J]. *Water Res*, 2012, 46(8): 2559 – 2569.
- [6] Puyol D, Carvajal-Arroyo J M, Sierra-Alvarez R, *et al.* Nitrite (not free nitrous acid) is the main inhibitor of the anammox process at common pH conditions [J]. *Biotechnol Lett*, 2014, 36(3): 547 – 551.
- [7] Carvajal-Arroyo J M, Puyol D, Li G B, *et al.* Pre-exposure to nitrite in the absence of ammonium strongly inhibits anammox [J]. *Water Res*, 2014, 48: 52 – 60.
- [8] Bettazzi E, Caffaz S, Vannini C, *et al.* Nitrite inhibition and intermediates effects on Anammox bacteria: A batch-scale experimental study [J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45(4): 573 – 580.
- [9] Fernández I, Dosta J, Fajardo C, *et al.* Short- and long-term effects of ammonium and nitrite on the Anammox process [J]. *J Environ Manage*, 2012, 95(S): 170 – 174.
- [10] Carvajal-Arroyo J M, Puyol D, Li G B, *et al.* The role of pH on the resistance of resting and active anammox bacteria to NO_2^- inhibition [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2014, 111(10): 1949 – 1956.
- [11] He S L, Zhang Y L, Niu Q G, *et al.* Operation stability and recovery performance in an Anammox EGSB reactor after pH shock [J]. *Ecol Eng*, 2016, 90: 50 – 56.
- [12] Rathnayake R M L D, Oshiki M, Ishii S, *et al.* Effects of dissolved oxygen and pH on nitrous oxide production rates in autotrophic partial nitrification granules [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 197: 15 – 22.
- [13] Yin Z X, dos Santos C E D, Vilaplana J G, *et al.* Importance of the combined effects of dissolved oxygen and pH on optimization of nitrogen removal in anammox-enriched granular sludge [J]. *Process Biochemistry*, 2016, 51(9): 1274 – 1282.
- [14] Wu X, Liu S T, Dong G L, *et al.* The starvation tolerance of anammox bacteria culture at 35 °C [J]. *J Biosci Bioeng*, 2015, 120(4): 450 – 455.
- [15] Carvajal-Arroyo J M, Puyol D, Li G B, *et al.* The intracellular proton gradient enables anaerobic ammonia oxidizing (anammox) bacteria to tolerate NO_2^- inhibition [J]. *J Biotechnol*, 2014, 192: 265 – 267.
- [16] Carvajal-Arroyo J M, Puyol D, Li G B, *et al.* Starved anammox cells are less resistant to NO_2^- inhibition [J]. *Water Res*, 2014, 65: 170 – 176.
- [17] Kim T, An J, Lee H, *et al.* pH-dependent ammonia removal pathways in microbial fuel cell system [J]. *Bioresour Technol*, 2016, 215: 290 – 295.



作者简介:朱强(1990 –),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制理论与技术。

E-mail: 756035128@qq.com

收稿日期: 2017-04-18