

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.02.025

# 厌氧氨氧化过程中无机碳对脱氮效能的影响

朱彤, 梁启煜, 谢元华, 马永光

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 采用上流式厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)反应器,通过氮去除效能的变化,研究无机碳(inorganic carbon, IC)在厌氧氨氧化过程中的作用及 IC 质量浓度对厌氧氨氧化过程的影响。结果表明:当进水不投加 IC 时,反应器脱氮效能明显下降,当进水 IC 和总无机氮(total inorganic nitrogen, TIN)的质量浓度之比  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  为 0.2~0.4 时,脱氮效能得到恢复并逐步提高。 $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  从 0.4 继续提高至 1.0 时,脱氮效能不再发生明显变化。在  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  为 0.4 的条件下启动新反应器,运行 61 天后氮去除负荷达到  $1.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , ANAMMOX 菌活性明显高于原反应器。表明厌氧氨氧化过程中,IC 主要提供碳源并充当反应催化剂,充足的 IC 供应是提高 ANAMMOX 活性和维持稳定脱氮的必要条件,厌氧氨氧化启动过程中进水 IC 和 TIN 最佳质量浓度之比为 0.4。

**关键词:** 厌氧氨氧化;无机碳;脱氮效能; $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$ ;废水

中图分类号: X 703 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)02-0278-06

## Influence of Inorganic Carbon on Nitrogen Removal Efficiency During the ANAMMOX Process

ZHU Tong, LIANG Qi-yu, XIE Yuan-hua, MA Yong-guang

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHU Tong, E-mail: tongzhu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The influence of inorganic carbon (IC) on anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) process was investigated by evaluating the nitrogen removal efficiency in an up-flow ANAMMOX reactor. Results show that the nitrogen removal efficiency decreases significantly when stop adding IC into influent water. The nitrogen removal efficiency recovers and increases gradually when the mass concentration ratio of influent IC to total inorganic nitrogen (TIN) is 0.2~0.4. Increasing the ratio from 0.4 to 1.0 cannot bring a better nitrogen removal efficiency. When a new reactor was started up with the ratio of 0.4, the achieved nitrogen removal efficiency comes up to  $1.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  after 61 days stable operation. The ANAMMOX bacteria in the new reactor present higher activity than that in the previous reactor. Results suggest that IC provides a suitable carbon source and plays a catalytic role in the ANAMMOX process. Sufficient IC is important to maintain the activity of ANAMMOX bacteria and the stability of the nitrogen removal efficiency. 0.4 is the optimal ratio in the influent for ANAMMOX process.

**Key words:** ANAMMOX; inorganic carbon(IC); nitrogen removal efficiency; the ratio of IC to TIN; waste water

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)是一种高效、经济、可持续的脱氮新技术,是近年来国内外废水处理领域的研究热点。ANAMMOX 菌生长缓慢且对环境条件敏感,有机物、pH 值、温度等因素均对 ANAMMOX 菌有重

要影响。

Chamchoi 等<sup>[1]</sup>发现有机物对 ANAMMOX 菌有抑制作用,化学需氧量 COD 超过  $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时 ANAMMOX 菌完全失去活性。杨洋等<sup>[2]</sup>研究发现,温度、pH 值对 ANAMMOX 菌活性有明显影

响,最佳温度为 30 ~ 35 ℃,最佳 pH 值为 7.5 ~ 8.3. ANAMMOX 菌是一种化能自养菌,以  $\text{CO}_2$  或者  $\text{HCO}_3^-$  为碳源,无机碳 (inorganic carbon, IC) 对 ANAMMOX 菌有重要影响<sup>[3]</sup>. 李祥等<sup>[4]</sup>研究发现, $\text{HCO}_3^-$  对维持反应器 pH 值与脱氮效能十分重要,在厌氧氨氧化反应器启动过程中  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  (表示  $\text{NH}_4^+$  中的 N 元素) 的进水质量浓度最佳比值为 1.13. Liao 等<sup>[5]</sup>研究发现, $\text{HCO}_3^-$  质量浓度从  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  上升到  $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时,ANAMMOX 菌活性提高,增加到  $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时,活性受到抑制. 但现有研究在探讨 IC 对 ANAMMOX 菌活性影响时都没有进行 pH 值的控制,所得到的 IC 实验结果掺杂了 pH 值变化的影响. 虽然 IC 能够在一定程度上减缓 pH 值的变化,但 pH 值对厌氧氨氧化有很大影响<sup>[6-7]</sup>,其作用不应该被忽略.

本研究采用上流式厌氧氨氧化反应器,在控制 pH 值不变的条件下,以反应器脱氮效能和细菌活性变化为评价指标,通过改变进水 IC 的质量浓度,研究 IC 在厌氧氨氧化过程中的作用及其浓度变化对反应的影响,并确定最优 IC 质量浓度,为厌氧氨氧化的实际工程应用提供参考.

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验装置

研究采用两个完全相同的上流式厌氧氨氧化反应器,见图 1. 反应器由有机玻璃制成,直径 234 mm,高 750 mm,有效容积 30 L. 反应器内环装填料架上缠绕帘式纤维填料,有效填充率为  $7.49 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ . 水温通过加热器 (SX-265, 广东金利佳机电有限公司) 实现自动控制, pH 值通过在线监测装置 (SIN-PH160, 杭州联测自动化技术有限公司) 监测并联动控制补液泵进行酸碱调节液的投加. 进水方式由蠕动泵控制,连续进水. 反应器 1 进行 IC 浓度影响实验,反应器 2 进行优化参数验证实验.

### 1.2 实验材料

接种污泥为实验室培养的混合污泥,含有部分 ANAMMOX 细菌,接种后反应器内混合液悬浮固体质量浓度 (mixed liquid suspended solids, MLSS) 为  $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ . 实验原水为人工配水,其中,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  (表示  $\text{NO}_2^-$  中的 N 元素) 分别由  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaNO}_2$  按需配置,为避免采用有机碳源引起反应器内杂菌生长对 ANAMMOX 菌产生抑制, IC 由  $\text{NaHCO}_3$  按需配置.  $\text{KH}_2\text{PO}_4$

$54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , EDTA  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 矿物质元素浓缩液  $2 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ , 微量元素浓缩液  $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ . 矿物质元素浓缩液组成为  $\text{CaCl}_2$   $0.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{KCl}$   $0.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MgSO}_4$   $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NaCl}$   $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 微量元素浓缩液组成为  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$   $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$   $0.014 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $0.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NiCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $0.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $0.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

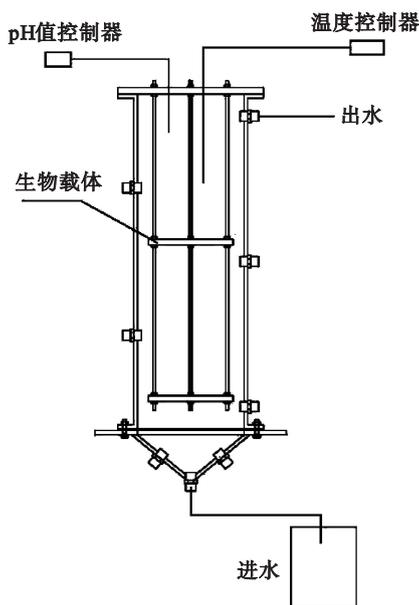


图 1 上流式厌氧氨氧化反应器

Fig. 1 Schematic diagram of up-flow ANAMMOX reactor

### 1.3 实验方法

水质指标按照《水和废水监测分析方法》测定<sup>[8]</sup>. 具体实验方案如下.

#### 1) 连续流反应器实验.

整个实验过程中反应器温度保持在 35 ℃, pH 值控制在  $7.6 \pm 0.1$ , 溶解氧控制在  $0.1 \text{ mg/L}$  以下. 反应器外覆盖黑色遮光材料, 避免光照影响.

反应器启动: 反应器 1 以进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  质量浓度  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  启动, 根据出水情况逐渐提高负荷. IC 浓度由厌氧氨氧化反应方程式中所需 IC 量决定<sup>[9]</sup>, 即保持进水中 IC 质量浓度与总无机氮 (total inorganic nitrogen, TIN) 质量浓度比值  $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}}$  约为 0.05. 当反应器内形成稳定厌氧氨氧化反应时, 视为启动成功.

IC 质量浓度影响实验: 反应器 1 启动成功后进行实验. 实验过程中控制 pH 值为  $7.6 \pm 0.1$ , 温度 35 ℃, 并保持进水氮质量浓度基本不变. IC 质

量浓度按照  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}=0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0$  进行投加, 每个比值条件下进行 5~7 天的实验, 通过进出水氮含量变化来探究 IC 质量浓度对厌氧氨氧化的影响, 并探寻最合适的 IC 质量浓度。

最优 IC 质量浓度验证实验: 在最优 IC 质量浓度条件下启动反应器 2, 在运行的前 30 天除 IC 质量浓度外其余启动条件与反应器 1 均相同, 通过比较两反应在启动过程中进出水差异来验证实验结论。从第 31 天开始, 逐步提高反应器 2 负荷, 通过负荷提升速度, 进一步验证实验结论。

## 2) ANAMMOX 菌活性实验。

分别取反应器 1 运行第 30 天(IC 实验前)和反应器 2 运行第 30 天时的污泥进行定量污泥锥形瓶实验, 通过测定反应基质的浓度变化, 绘制降解速率曲线, 间接比较两个反应器内 ANAMMOX 菌活性, 验证 IC 对厌氧氨氧化的影响和最优 IC 值质量浓度。

细菌活性实验具体方法如下: 从反应器内的填料上刮下部分污泥, 用去离子水冲洗后装入 500 mL 锥形瓶中。初始污泥质量浓度为  $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 加入  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度均为  $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的磷酸盐缓冲液 ( $\text{pH}=7.6$ ) 作为模拟废水, 其余营养物质和 IC 质量浓度均与连续流反应器相同。持续通入  $\text{N}_2$  去除溶解氧, 20 min 后用橡胶塞塞紧。将锥形瓶置于恒温水浴摇床上, 保持温度  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 。定时(0, 6, 12, 24 h)取样, 测定水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的质量浓度, 绘制基质降解速率曲线, 分析细菌活性。

## 2 结果与分析

### 2.1 反应器启动

反应器 1 启动阶段运行 30 天, 整体处理效果如图 2 所示。

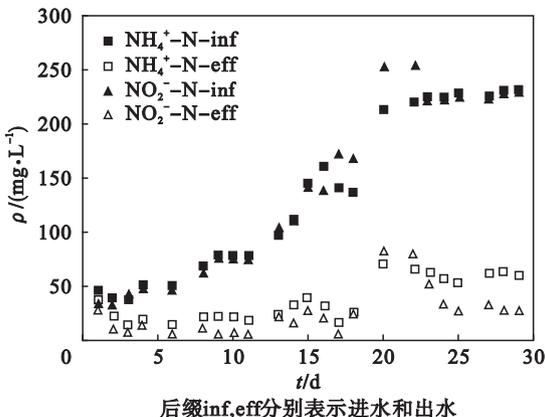


图 2 反应器 1 启动阶段运行情况

Fig. 2 Performance of reactor 1 in the starting period

反应器 1 在进水 TIN 为  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度比为 1:1) 条件下启动, 停留时间为 24 h。由图 2 知出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  基本维持在  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  消耗量之比在 1:1.1 左右, 接近理论值, 说明反应器内的厌氧氨氧化菌开始逐渐适应环境。从启动开始到第 18 天时, 通过增加进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  含量, 氮负荷 (nitrogen loading rate, NLR) 从  $0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  逐渐增加到  $0.34 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度小于  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 总氮去除率在 75% 左右。第 20 天, 为了尽快提高反应器负荷, 将进水 TIN 由  $350 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  提高到  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 结果出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  达到  $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 可能是由于进水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度过高, 达到  $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 抑制了厌氧氨氧化的活性<sup>[10]</sup>。所以第 23 天将进水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  降到  $220 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 缩短停留时间为 20 h, 维持 NLR 在  $0.55 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  左右。随后出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  很快下降至  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 反应器达到稳定状态。此时  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率分别为 80% 和 90%, NLR 为  $0.55 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , 氮去除负荷 (nitrogen removal rate, NRR) 为  $0.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

### 2.2 IC 质量浓度对厌氧氨氧化的影响

在研究 IC 对厌氧氨氧化影响的实验阶段, 将实验开始设为第 1 天。实验过程中反应器 NLR 保持在  $(0.65 \pm 0.5) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , 结果见图 3。

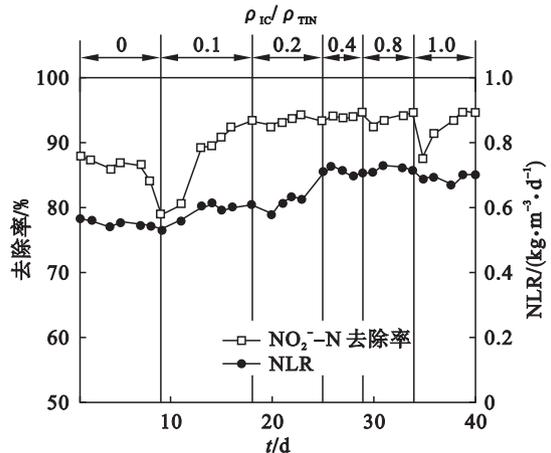


图 3 不同  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  条件下厌氧氨氧化反应器处理情况  
Fig. 3 Performance of the ANAMMOX reactor with different  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$

由图 3 可知, 实验开始阶段, 虽然进水中不再投加 IC, 但反应器中仍有少量残留, 所以最初 3 天  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率只是缓慢下降。随着残留 IC 消耗殆尽,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率明显下降, 在第 7 天仅有 78%。其原因可能是 ANAMMOX 菌对低浓

度的 IC 利用能力不强<sup>[11]</sup>。不额外投加 IC 时,仅依靠空气和自来水中的  $\text{CO}_2$  或  $\text{HCO}_3^-$  作为 IC 源,很难满足生长和维持活性的需求,影响厌氧氨氧化过程的发生,导致脱氮性能下降。从第 8 天开始,IC 按照  $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}} = 0.1$  投加, $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率回升到实验前的水平,达到 90% 左右。当  $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}}$  提高到 0.2 时, $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率进一步提升并稳定在 94% 左右。

为了进一步探究 IC 对厌氧氨氧化脱氮性能的影响,在第 25 天,提高  $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}}$  为 0.4 的同时将 NLR 从  $0.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  增加到  $0.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率没有明显变化,说明此时 IC 质量浓度已满足 ANAMMOX 菌需求,反应器脱氮效能得到提升。这是因为高质量浓度 IC 减缓了基质对 ANAMMOX 菌的抑制<sup>[8]</sup>;同时因为厌氧氨氧化反应会在 ANAMMOX 菌表面释放大量的  $\text{N}_2$ ,影响 ANAMMOX 菌利用  $\text{CO}_2$  或者  $\text{HCO}_3^-$ ,而额外投加的 IC 提高了水中 IC 质量浓度,一定程度上满足了 ANAMMOX 菌的需求<sup>[12]</sup>。当  $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}}$  从 0.4 继续提高到 1.0 时, $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率没有明显变化,仅在  $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}}$  为 1.0 的开始阶段出现下降,但很快恢复并趋于稳定。说明过量 IC 对厌氧氨氧化的脱氮性能没有明显影响。

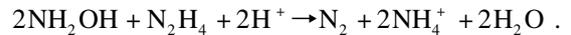
IC 质量浓度对厌氧氨氧化过程有明显影响,因此厌氧氨氧化反应器运行过程中应及时适量投加 IC。目前国内外很多文献报道的 IC 投加量一般固定在  $190 \sim 290 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[13-14]</sup>,而 Kimura 等<sup>[11]</sup>研究表明厌氧氨氧化过程 IC 消耗量和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  消耗量具由一定的比例关系。目前厌氧氨氧化反应中多以某一固定浓度过量投加 IC,增加了成本,造成浪费。本研究中  $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}}$  大于 0.2 时  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率已基本稳定,所以  $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}}$  大于 0.2 即可满足反应需要。若考虑实际操作中可能存在的 IC 流失(以  $\text{CO}_2$  形式逸出,出水携带,填料及污泥吸附等)以及经济因素,应在此基础上适当增加 IC 的投加量, $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}}$  为 0.4 是经济合适的 IC 投加比例。

### 2.3 IC 在厌氧氨氧化过程中的作用

目前研究普遍认为厌氧氨氧化过程中 IC 主要有两个作用:一是为 ANAMMOX 菌的生长提供碳源;二是厌氧氨氧化过程是一个不断消耗  $\text{H}^+$  使 pH 值升高的过程,IC 以  $\text{HCO}_3^-$  形式进入水中,能够充当 pH 缓冲剂,维持适合 ANAMMOX 菌生长的 pH 范围<sup>[15]</sup>。本研究在控制反应器内 pH 值不变的条件下进行,IC 充当 pH 缓冲剂的作用可以被忽略。但 IC 质量浓度的变化

同样引起了反应器脱氮效能的改变,这可能是因为 IC 不仅为细菌生长提供碳源,同时还可能充当了厌氧氨氧化反应的催化剂。

van der Star 等<sup>[16]</sup>研究认为  $\text{N}_2\text{H}_4$  在被氧化成  $\text{N}_2$  的过程中伴随着  $\text{NH}_2\text{OH}$  向  $\text{NH}_4^+$  的转变,其过程可用如下反应方程式表示:



$\text{NH}_2\text{OH}$  和  $\text{N}_2\text{H}_4$  是厌氧氨氧化的中间产物,它们的产生和消耗是连续过程。基于这一假设,如果增加  $\text{NH}_2\text{OH}$  的还原速率,则会导致  $\text{N}_2\text{H}_4$  氧化速率的提高,减少  $\text{N}_2\text{H}_4$  积累;而额外的溶解性 IC 有可能加速  $\text{NH}_2\text{OH}$  的分解,使  $\text{N}_2\text{H}_4$  积累量降低,从而提高了厌氧氨氧化的脱氮效率<sup>[8]</sup>。因此在控制 pH 不变的条件下,IC 在厌氧氨氧化过程中能起到提供碳源和反应催化剂的作用。

### 2.4 最优 IC 质量浓度验证实验

实验得到的最优 IC 投加量应保证  $\rho_{\text{IC}}/\rho_{\text{TIN}}$  为 0.4。通过启动厌氧氨氧化反应器 2 来验证这一结论。反应器 1 与反应器 2 从第 1 天到第 30 天出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  对比情况见图 4。在进水质量浓度相同的情况下,反应器 2 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  含量明显低于反应器 1。特别是在第 20 天后,进水 TIN 质量浓度达到  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  均为  $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),反应器 1 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  明显上升,虽然之后有所下降但仍在  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右,表明反应器处理能力接近饱和。而反应器 2 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  仍保持在  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,说明其处理能力仍有提升空间。这验证了充足的 IC 能促进 ANAMMOX 菌活性提高,维持反应器脱氮效能稳定。

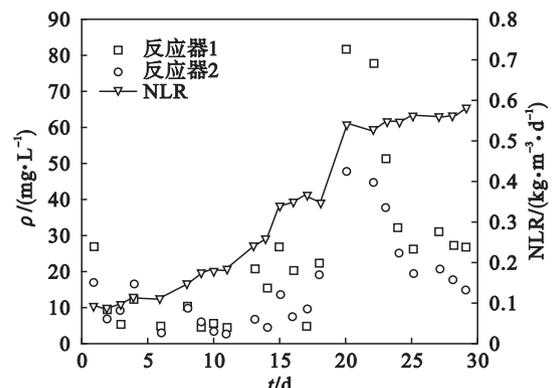


图 4 反应器 1 与反应器 2 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  含量对比  
Fig. 4 Comparison of the effluent nitrite for reactor 1 and reactor 2

为进一步验证 IC 对反应器脱氮效能的影响,反应器 2 负荷继续提高,在第 61 天 NLR 达到  $1.33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ,NRR 达到  $1.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ,进

出水氮的质量浓度如图 5 所示. 反应器 2 在 61 天的运行过程中  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  始终保持为 0.4, 进水 TIN 从  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  上升到  $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 水力停留时间从 24 h 缩短到 12 h. 反应器 2 从第 31 天到第 61 天, 氮去除负荷从  $0.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  快速增加到  $1.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ , 说明投加适量的 IC 能够实现厌氧氨氧化反应器负荷的快速提高, 也验证了  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  为 0.4 适合厌氧氨氧化菌生长并保持良好活性.

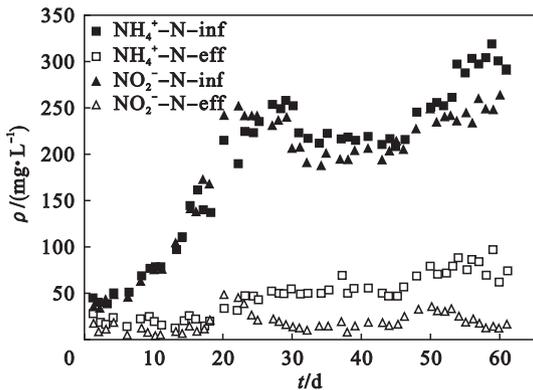


图 5 反应器 2 整体运行情况

Fig. 5 Performance of reactor 2

## 2.5 不同 IC 质量浓度时 ANAMMOX 菌活性比较

IC 对厌氧氨氧化反应的影响可以通过反应器进出水水质的变化来反映, 同时也可以通过检测厌氧氨氧化菌的活性来表征. 运行第 30 天时从反应器 1 和反应器 2 中分别取泥进行活性测试, 得到的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  降解曲线如图 6 所示:  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  质量浓度随时间增加逐渐降低, 降解速度基本保持在 1:1 左右, 符合厌氧氨氧化反应的理论值. 而反应器 1 基质降解速度明显低于反应器 2, 说明反应器 1 的 ANAMMOX 菌活性低于反应器 2. 由于反应器 1 和 2 在启动

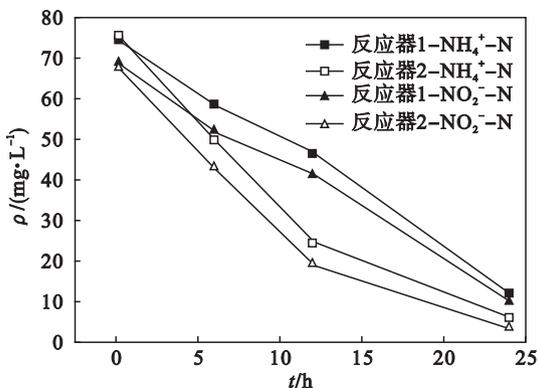


图 6 反应器 1 与反应器 2 基质降解曲线

Fig. 6 Substrate degradation curves of reactor 1 and reactor 2

运行的 30 天内除 IC 投加量不同外, 其余条件均完全相同, 且在活性测试时也保持了与对应的连续流反应器相同的条件, 因此造成活性差异的主要原因应为 IC 质量浓度的不同. 反应器 2 从启动开始就维持  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  为 0.4, 而反应器 1 的  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  仅为 0.05. 这也验证了 ANAMMOX 菌对低质量浓度 IC 利用困难, 充足的 IC 是保证 ANAMMOX 菌活性的必要条件.

## 3 结 论

1) IC 质量浓度对 ANAMMOX 菌脱氮性能有明显影响, 低质量浓度 IC 不易被 ANAMMOX 菌利用. 在不额外投加 IC 时反应器效能迅速下降, 仅 7 天时间就下降了 12%, 恢复 IC 投加后, 反应器效能逐渐恢复.

2) 进水 IC 与 TIN 质量浓度比值  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  达到 0.2 时, 反应器脱氮效能基本稳定,  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  升高到 1.0 时脱氮效能没有明显变化, 过量 IC 对厌氧氨氧化无明显影响. 从反应器需求、IC 流失及经济因素等角度考虑,  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  最优值为 0.4.

3) 在人工控制 pH 值为 7.6 的条件下, IC 质量浓度的变化也引起了反应器脱氮效能的改变, 说明 IC 在厌氧氨氧化过程中起着提供碳源和反应催化剂的作用.

4) IC 对反应器氮去除负荷快速提升和 ANAMMOX 菌活性提高均有积极作用, 在  $\rho_{IC}/\rho_{TIN}$  为 0.4 的条件下启动厌氧氨氧化反应器, 61 天内获得了  $1.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$  氮去除负荷.

## 参考文献:

- [1] Chamchoi N, Nitisoravut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(9): 3331-3336.
- [2] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(4): 691-695. (Yang Yang, Zuo Jian-e, Shen Ping, et al. Influence of temperature pH value and organic substance on activity of ANAMMOX sludge [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4): 691-695.)
- [3] 鲍林林, 茹祥莉, 郭守德, 等. 无机碳对厌氧氨氧化反应的影响[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4): 90-93. (Bao Lin-lin, Ru Xiang-li, Guo Shou-de, et al. Effects of inorganic carbon value on ANAMMOX reactor [J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4): 90-93.)