

厌氧氨氧化颗粒污泥 UASB 反应器的快速启动

王朝朝^{1,2}, 冀颖^{1,2}, 闫立娜³, 赵丹^{1,2}, 高鹏^{1,2}, 张欢^{1,2},
李思敏^{1,2}

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 河北省水污染控制与生态修复工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038; 3. 河北工程大学 研究生部, 河北 邯郸 056038)

摘要: 利用厌氧氨氧化絮状污泥和厌氧颗粒污泥启动厌氧氨氧化颗粒污泥 UASB 反应器, 通过调整进水基质浓度及上升流速培养富集厌氧氨氧化颗粒污泥。反应器经过 140 d 的运行, 成功培养出厌氧氨氧化颗粒污泥, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除率分别达到 96.41% 和 99.11%, 总氮去除负荷可以达到 $0.26 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 并且 $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 1.32 ± 0.02 和 0.26 ± 0.01 , 符合厌氧氨氧化化学反应计量学规律。反应器启动过程中厌氧颗粒污泥经历了解体、重组, 颜色由黑色变为灰色最终变为红色, 经过 160 d 的运行后形成 1~3 mm 的厌氧氨氧化颗粒污泥。

关键词: UASB 反应器; 厌氧氨氧化颗粒污泥; 富集培养; 化学计量学

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0015-06

Fast Start-up of Anammox Granular Sludge-based UASB Reactor

WANG Zhao-zhao^{1,2}, JI Ying^{1,2}, YAN Li-na³, ZHAO Dan^{1,2}, GAO Peng^{1,2},
ZHANG Huan^{1,2}, LI Si-min^{1,2}

(1. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Engineering Research Centre for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Handan 056038, China; 3. Graduate School, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Anammox granular sludge-based UASB reactor was started with the Anammox floc sludge and the anaerobic granular sludge. The Anammox granular sludge was cultured by adjusting the influent substrate concentration and the upflow velocity. After 140 days of operation, the Anammox granular sludge was cultured successfully, and 96.41% of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and 99.11% of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ were removed respectively, with total nitrogen removal loading (NRR) of $0.26 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ achieved. The ratios of $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}$ to $\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ to $\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were 1.32 ± 0.02 and 0.26 ± 0.01 , respectively, which complied with the chemical reaction stoichiometry of Anammox. During the start-up period of the reactor, the morphology of anaerobic granular sludge underwent the process of disintegration and recombination, and the color changed from black to gray and finally to red, with the Anammox granular sludge of 1~3 mm formed after 160 days operation.

Key words: UASB reactor; Anammox granular sludge; enrichment culture; stoichiometry

1977年,奥地利理论化学家 Broda 预言自然界存在以硝酸盐或亚硝酸盐为氧化剂的氨氧化反应,但过了十多年后,才被荷兰 Delft 大学 Mulder 等人证实,并称之为厌氧氨氧化(Anammox), van de Graaf 等人通过试验证明,厌氧氨氧化是一个厌氧生物反应,反应物是氨和亚硝酸盐,生成物是 N_2 。厌氧氨氧化工艺作为新型脱氮技术已成为国内外的研究热点,此工艺无需曝气,也无需投加有机碳源,具有能耗少、处理成本低、污泥产量低等优点,然而厌氧氨氧化菌倍增时间长,对环境条件极为敏感,导致厌氧氨氧化工艺启动时间较长^[1]。1979年在荷兰首次发现了厌氧颗粒污泥,颗粒污泥的形成使得反应器内可保留高浓度的污泥,且污泥活性较高、抗冲击负荷能力强、处理污水效果较好^[2]。厌氧氨氧化颗粒污泥同时具有厌氧氨氧化菌和颗粒污泥两者的优势^[3],如何快速启动厌氧氨氧化颗粒污泥反应器引起研究者的广泛关注。

众多研究表明^[4-11],采用不同的反应器、接种污泥和启动条件均可以成功启动厌氧氨氧化颗粒污泥反应器,然而各反应器的启动时间不尽相同。笔者采用 UASB 反应器,以厌氧氨氧化絮状污泥和厌氧颗粒污泥为种泥,调控温度为 $(33 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、pH 值为 7.3~7.6,并根据反应器的脱氮效能调整进水基质浓度,通过观察颗粒污泥的形成情况来调整上升流速,研究不同基质浓度下系统的脱氮效能以及厌氧氨氧化颗粒污泥形成过程中的形态特征。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行

UASB 试验装置如图 1 所示。

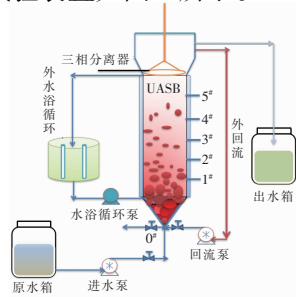


图1 厌氧氨氧化颗粒污泥 UASB 反应器

Fig.1 Schematic diagram of Anammox granular sludge-based UASB reactor

反应器有效容积为 10 L,反应器外设有套筒,套筒外包裹有黑色软性材料,用来保温和避光;该装置设置有外水浴循环,水浴循环水箱内安装有两支加热棒,用以保持反应器内温度为 $(33 \pm 2)^\circ\text{C}$;通过投加 NaHCO_3 调节进水 pH 值为 7.3~7.6;反应器设置外回流,通过调节回流泵的转速控制内部污泥上升流速,进而产生剪切力,使其形成颗粒污泥。原水和回流混合液一同进入主反应器,通过三相分离器进行泥水分离,出水由出水口流入出水箱。

1.2 试验用水及接种污泥

采用连续培养,以厌氧颗粒污泥和厌氧氨氧化絮状污泥为种泥启动厌氧氨氧化颗粒污泥反应器,其中厌氧颗粒污泥为 1 500 mL、厌氧氨氧化絮状污泥为 500 mL。

试验采用人工配水,其中氨氮和亚硝态氮浓度按 1:1.32 配制,起始氨氮浓度为 85 mg/L, NaHCO_3 浓度为 500 mg/L, KH_2PO_4 浓度为 27.2 mg/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 180 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 300 mg/L,微量元素 I、II 投量均为 1 mL/L。其中,微量元素 I: EDTA 和 FeSO_4 均为 5 g/L;微量元素 II: EDTA 为 15 g/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 0.43 g/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 0.24 g/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 为 0.99 g/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 为 0.25 g/L, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为 0.22 g/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 0.19 g/L, $\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 为 0.21 g/L, H_3BO_3 为 0.014 g/L。

1.3 分析项目及方法

每隔 1 d 取样,且水样均经过 0.45 μm 滤纸过滤后测定。其中,氨氮:纳氏试剂分光光度法;亚硝态氮: $\text{N}-(1-\text{萘基})-\text{乙二胺}$ 分光光度法;硝态氮:紫外分光光度法;DO、pH 值:德国 Multi3630 分析仪;MLSS 及 MLVSS:重量法。

1.4 试验方法

采用连续培养,同时进水、回流和出水,按进水氨氮浓度和亚硝态氮浓度的不同分为 5 个阶段和 3 个时期(见表 1),其中阶段 I (1~20 d) 为种泥适应阶段,阶段 II~IV (21~59、60~80、81~140 d) 为厌氧氨氧化颗粒污泥形成期,阶段 V (141~160 d) 为厌氧氨氧化颗粒污泥稳定期。在各阶段保持生长环境不变仅改变进水氨氮和亚硝态氮浓度,反应器 HRT 均为 27 h,通过调节回流泵转速来改变上升流

速,产生剪切力,进而促进厌氧氨氧化颗粒污泥的形成。

表 1 不同阶段厌氧氨氧化颗粒污泥反应器运行参数

Tab. 1 Operating parameters of Anammox granular sludge reactor at different stages

| 项 目 | | 流速/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$) | 回流比/% | $\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | $\text{NO}_2^- - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | NLR/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) | NRR/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) |
|-----|-----|---|-------|--|--|---|---|
| 适应期 | I | 3.3 | 85 | 77.34 | 97.26 | 0.16 | 0.13 |
| | II | 3.8 | 100 | 93.27 | 118.25 | 0.20 | 0.17 |
| 形成期 | III | 3.8 | 100 | 140.52 | 181.39 | 0.31 | 0.25 |
| | IV | 4.0 | 100 | 150.82 | 197.23 | 0.33 | 0.26 |
| 稳定期 | V | 4.0 | 100 | 175.46 | 228.30 | 0.40 | 0.33 |

2 结果与讨论

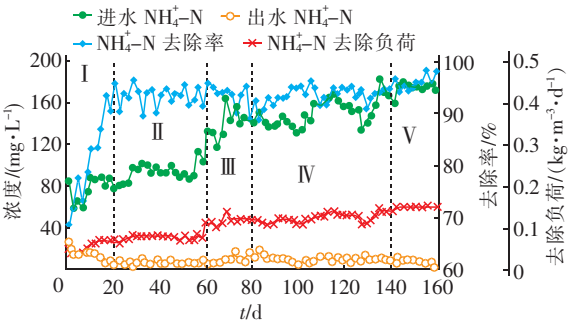
2.1 厌氧氨氧化颗粒污泥反应器的快速启动

阶段 I 为适应期,接种污泥为厌氧氨氧化絮状污泥和厌氧颗粒污泥,在适应期种泥活性得到一定程度的稳定和提高。在该阶段反应器内上升流速为 3.3 m/h,回流比为 85%,起始氨氮浓度为 85 mg/L,氨氮去除负荷达到 0.05 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,氨氮去除率为 68.75%,亚硝态氮去除负荷达到 0.08 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,去除率为 96.12%,总氮负荷(NLR)达到 0.13 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,总氮去除率为 79.36%;反应器运行至第 20 天,系统 NLR 达到 0.18 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,总氮去除负荷(NRR)达到 0.16 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,总氮去除率达到 87.32%(见图 2)。

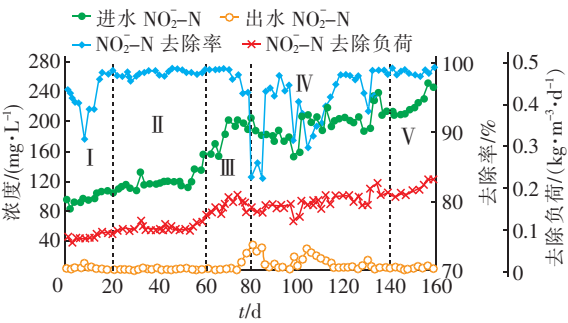
阶段 II ~ IV 为厌氧氨氧化颗粒污泥形成期,接种的厌氧颗粒污泥发生解体,厌氧氨氧化颗粒污泥初步形成。在阶段 II 将上升流速调至 3.8 m/h,回流比增至 100%,当增加进水氨氮和亚硝态氮浓度后,亚硝态氮去除率基本不变,维持在 98% 左右,而氨氮去除率稍有下降,但之后又迅速恢复到 93% 左右,氨氮去除负荷达到 0.08 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,亚硝态氮去除负荷达到 0.12 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,NRR 达到 0.18 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,总氮去除率维持在 85% 左右。在阶段 III 保持其他条件不变,仅增加氨氮和亚硝态氮浓度,氨氮和亚硝态氮去除率分别为 93% 和 95%,去除负荷分别达到 0.12 和 0.14 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,总氮去除率在 83% 左右,NRR 达到 0.24 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。在阶段 IV 将上升流速调至 4.0 m/h,回流比保持 100% 不变,增加氨氮和亚硝态氮浓度分别至 150 和 197 mg/L 左右,氨氮去除率由 93% 下降至 88%,之后又迅速恢复到之前的效果,经过 60 d 的运行后最终达到 96.41%;但增加亚硝态氮浓度之后,亚硝态氮去除率立即由 95% 左右下降至 83.53%,氨氮浓度对厌氧氨氧化效果影响不大,而亚硝态氮对厌氧氨氧

化反应抑制作用较明显^[12],在之后亚硝态氮去除率一直处于波动状态,经过 60 d 的运行,亚硝态氮去除效果才恢复到之前的状态,去除率最终达到 99.11%,总氮去除率为 85% 左右,NRR 达到 0.26 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

阶段 V 为厌氧氨氧化颗粒污泥稳定期,接种的厌氧颗粒污泥全部发生解体,厌氧氨氧化颗粒污泥形成。在此阶段保持其他条件不变,仅增加氨氮和亚硝态氮浓度,总氮去除率在 87% 左右,去除负荷达到 0.33 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,其中氨氮去除率由 96.41% 增至 97.75%,亚硝态氮去除率增至约 99.15%。唐晓雪等^[13]采用 UASB 反应器,以反硝化污泥、厌氧硝化污泥和少量厌氧氨氧化颗粒污泥为接种污泥,经过 100 d 的培养后 NLR 达到 4.0 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,氨氮和亚硝态氮去除率分别为 99.3% 和 98.8%。



a. 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除



b. 对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除

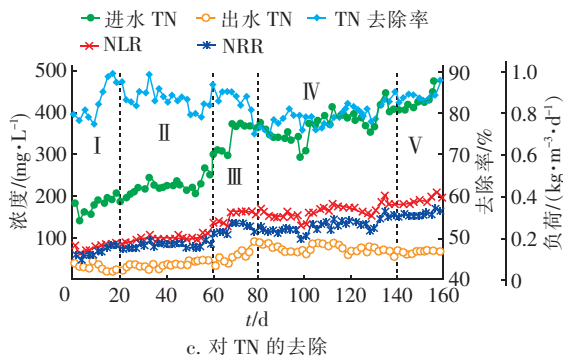
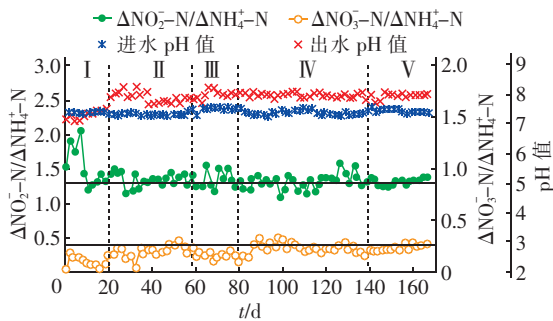


图2 对各种氮的去除效果

Fig. 2 Nitrogen removal during anaerobic granular sludge culture

2.2 启动过程中的化学计量学关系及 pH 值变化

根据厌氧氨氧化化学反应方程式, $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 1.32 和 0.26, 这也是反应器内进行厌氧氨氧化反应的标志之一。试验中两个比值的变化情况如图 3 所示。

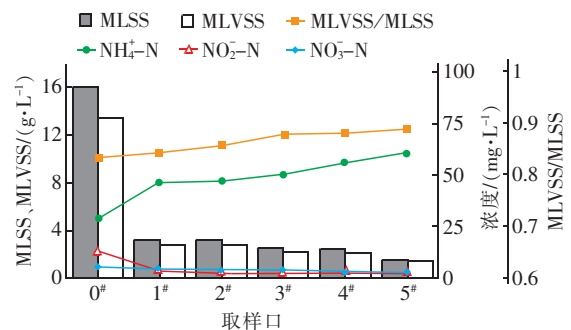
图3 $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及进出水 pH 值变化Fig. 3 Changes of $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and the influent and effluent pH

在阶段 I, $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 远大于 1.32, 而 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 小于 0.26, 这是由于存在部分厌氧颗粒污泥解体, 其残留物为反硝化菌提供了有机物而发生反硝化反应, 使得 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 减少, 此时反硝化占主导而厌氧氨氧化效果不显著, 并导致出水 pH 值低于进水 pH 值^[14]。在形成期, 随着厌氧氨氧化作用增强, 其他作用减弱, 厌氧氨氧化反应占据主导, $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别在 1.32 和 0.26 左右浮动, 这与 Ni 等的结果相似^[15]。在稳定期去除的氨氮和亚硝态氮量与硝态氮生成量之比为 1 : (1.32 ± 0.02) : (0.26 ± 0.01), 与理论值基本相同, 表明反应器内进

行的是厌氧氨氧化反应。Li 等人研究表明, 出水 pH 值可以作为 Anammox 反应器性能的直接和有效指标, 出水 pH 值大于进水 pH 值说明厌氧氨氧化活性较高^[16]。

2.3 氮浓度及 MLSS、MLVSS 沿反应器高度的变化

在反应器运行至第 160 天时, 分别从底部和主体取样口取水样和污泥, 测定 MLSS、MLVSS 及三氮含量等指标, 结果见图 4。可见, 0# 的污泥浓度最高, MLSS 达到 16 g/L, 随着高度的增加则 MLSS 逐渐降低, 到 5# 处 MLSS 仅为 1.567 g/L, 其原因如下: ①底部最先接触基质, 营养物充足 (包括充足的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}), Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 可作为颗粒污泥的支撑物, 促进颗粒化进程, 使得底部颗粒污泥浓度高; ②由于上升流速为 3 ~ 4 m/h, 可使得絮状污泥在反应器内上下循环, 较小的絮状污泥随出水流出反应器, 但颗粒污泥会沉淀在反应器底部, 使得底部污泥量大。MLVSS 随着高度的增加呈递减趋势, 而 MLVSS/MLSS 随高度增加而增加, 在 0.83 ~ 0.89 之间变化, Tang 等人^[17]得到的 MLVSS/MLSS 为 0.82 ~ 0.90, 说明底部的无机成分含量比反应器上部高, 分析原因是: 原水由底部进入反应器, 配水中含有的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 首先接触底部, 而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是形成颗粒污泥的重要基质, 故底部无机成分含量高。由于底部污泥量高, 氨氮和亚硝态氮在底部的去除率最大, 随着高度的增加, 营养物及污泥量减少, 导致降解速率变慢; 硝态氮从下到上呈现递增趋势, 且污泥量高时硝态氮生成速率快^[18]。

图4 UASB 反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 MLSS、MLVSS 沿高度的变化Fig. 4 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, MLSS and MLVSS along the height of UASB reactor

2.4 厌氧氨氧化颗粒污泥形态变化

UASB 反应器接种的是厌氧氨氧化絮状污泥和厌氧颗粒污泥, 如图 5(a) 所示, 厌氧氨氧化絮状污

泥外观为红色,厌氧颗粒污泥外观为黑色,粒径在 5 mm 左右。

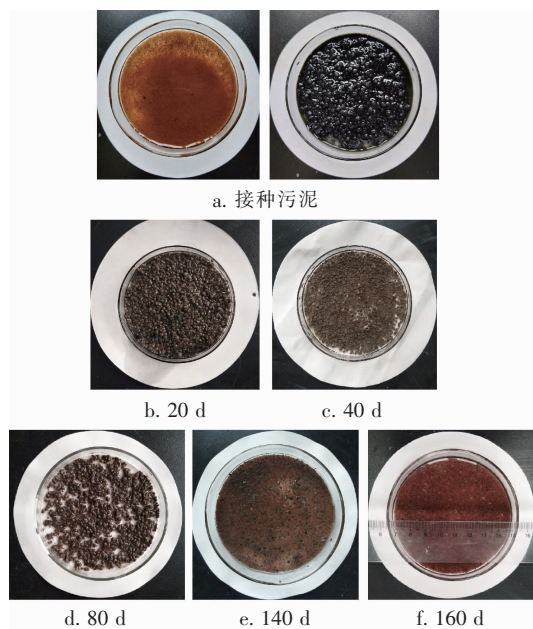


图 5 不同运行阶段厌氧氨氧化颗粒污泥变化

Fig. 5 Variations of Anammox granular sludge at different stages

在阶段 I,部分厌氧颗粒污泥发生裂解,其颜色由黑色变成灰色。在阶段 II 的第 40 天,厌氧颗粒污泥发生解体,颜色由灰色变成红色,这是由于厌氧氨氧化菌丰富的细胞色素 C 附着在厌氧颗粒污泥外表面所致^[19];在第 80 天,有微小红色厌氧氨氧化颗粒污泥形成,厌氧颗粒污泥继续解体。之后通过调大回流泵转速(增大进水流速)以产生更大的剪切力,厌氧氨氧化颗粒污泥继续增大和增殖。至第 140 天时,厌氧颗粒污泥大部分解体,红色的厌氧氨氧化颗粒污泥形成,但其粒径小于 1 mm。

在阶段 V 厌氧氨氧化颗粒污泥继续形成,接种的厌氧颗粒污泥基本解体完全,厌氧氨氧化颗粒污泥富集,且粒径在 1 ~ 3 mm,颜色由红色变为深红色,对氨氮和亚硝态氮的去除率分别达到 98.22% 和 99.22%。

3 结论

① 接种厌氧氨氧化絮状污泥和厌氧颗粒污泥,原水为人工配水,保持水力停留时间不变,通过增加进水基质浓度和流速,在温度为 $(33 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、pH 值为 7.3 ~ 7.6 的条件下,反应器运行 140 d 后培养出厌氧氨氧化颗粒污泥。

② 反应器内接种污泥变化:厌氧颗粒污泥解体,颜色先由黑色变为灰色最后变为红色,厌氧氨氧化絮状污泥被成功驯化为厌氧氨氧化颗粒污泥。反应器运行 140 d 后培养出厌氧氨氧化颗粒污泥,但其粒径小于 1 mm,再经过 20 d 后,厌氧氨氧化颗粒污泥得到进一步的富集和增殖,其粒径为 1 ~ 3 mm。

③ 反应器经过 160 d 的运行,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率分别为 98.22% 和 99.22%,NLR 和 NRR 分别可达 0.43、0.36 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,总氮去除率约为 87%, $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 均值分别为 1.32 和 0.26。

参考文献:

- [1] Mulder A, van de Graaf A A, Robertson L A, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. FEMS Microbiol Ecol, 1995, 16(3): 177 - 183.
- [2] Hulshoff Pol L W, de Castro Lopes S I, Lettinga G, *et al.* Anaerobic sludge granulation[J]. Water Res, 2004, 38(6): 1376 - 1389.
- [3] Tang C J, Duan C S, Yu C, *et al.* Removal of nitrogen from wastewaters by anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) using granules in upflow reactors[J]. Environment Chemistry Letters, 2017, 15(2): 311 - 328.
- [4] 闻刚,李田,徐乐中,等. 基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4324 - 4331.
Lü Gang, Li Tian, Xu Lezhong, *et al.* Quick start-up performance of combined ANAMMOX reactor based on different inoculated sludge types[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4324 - 4331 (in Chinese).
- [5] 刘晓宇,王思慧,薛耀琦,等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的快速培养与形成机理[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1223 - 1227.
Liu Xiaoyu, Wang Sihui, Xue Yaoqi, *et al.* Rapid cultivation and formation mechanism of ANAMMOX granular sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(3): 1223 - 1227 (in Chinese).
- [6] 丛岩,黄晓丽,王小龙,等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的快速形成[J]. 化工学报, 2014, 65(2): 664 - 671.
Cong Yan, Huang Xiaoli, Wang Xiaolong, *et al.* Faster formation of anammox granular sludge[J]. CIESC Journal, 2014, 65(2): 664 - 671 (in Chinese).
- [7] 闻刚,徐乐中,沈耀良,等. 快速启动厌氧氨氧化工艺

- [J]. 环境科学, 2017, 38(3): 1116 – 1121.
- Lü Gang, Xu Lezhong, Shen Yaoliang, *et al.* Quick start-up of anaerobic ammonium oxidation process [J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 1116 – 1121 (in Chinese).
- [8] Yang W, He S L, Han M, *et al.* Nitrogen removal performance and microbial community structure in the start-up and substrate inhibition stages of an anammox reactor [J]. J Biosci Bioeng, 2018, 261(1): 88 – 95.
- [9] 姚芳, 刘波, 王德朋, 等. 不同接种污泥的厌氧氨氧化反应器启动特性及菌群结构演替规律分析 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(7): 2543 – 2551.
- Yao Fang, Liu Bo, Wang Depeng, *et al.* Start-up of ANAMMOX enrichment with different inoculated sludge and analysis of microbial community structure shift [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(7): 2543 – 2551 (in Chinese).
- [10] 赵志宏, 廖德祥, 李小明, 等. 厌氧氨氧化微生物颗粒化及其脱氮性能的研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(4): 800 – 804.
- Zhao Zhihong, Liao Dexiang, Li Xiaoming, *et al.* Cultivation and nitrogen removal characteristics of ANAMMOX granules [J]. Environmental Science, 2007, 28(4): 800 – 804 (in Chinese).
- [11] 宋雨夏, 熊蕾, 柴立元, 等. Anammox 反应器启动过程中颗粒污泥性状变化特性 [J]. 生物工程学报, 2014, 30(12): 1854 – 1864.
- Song Yuxia, Xiong Lei, Chai Liyuan, *et al.* Physicochemical and ecological characteristics of the granular sludge during start-up of Anammox reactor [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2014, 30(12): 1854 – 1864 (in Chinese).
- [12] Jin R C, Yang G F, Yu J J, *et al.* The inhibition of the Anammox process: A review [J]. Chem Eng J, 2012, 197: 67 – 79.
- [13] 唐晓雪, 彭永臻, 徐竹兵, 等. 低基质浓度厌氧氨氧化颗粒污泥反应器的快速启动 [J]. 中南大学学报, 2014, 45(12): 4445 – 4451.
- Tang Xiaoxue, Peng Yongzhen, Xu Zhubing, *et al.* Fast start-up of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) granular reactor treating low-strength wastewater [J]. Journal of Central South University, 2014, 45(12): 4445 – 4451 (in Chinese).
- [14] Tang C J, Zheng P, Chai L Y, *et al.* Characterization and quantification of anammox start-up in UASB reactors seeded with conventional activated sludge [J]. Int Biodeterior Biodegrad, 2013, 82: 141 – 148.
- [15] Ni S Q, Gao B Y, Wang C C, *et al.* Fast start-up, performance and microbial community in a pilot-scale anammox reactor seeded with exotic mature granules [J]. Bioresour Technol, 2011, 102: 2448 – 2454.
- [16] Li H S, Zhou S Q, Ma W H, *et al.* Fast start-up of ANAMMOX reactor: Operational strategy and some characteristics as indicators of reactor performance [J]. Desalination, 2012, 286: 436 – 441.
- [17] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. Water Res, 2011, 45: 135 – 144.
- [18] 李芸. 晚期垃圾渗滤液 MBR 亚硝化与 UASB 厌氧氨氧化耦合脱氮工艺 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- Li Yun. A Coupled System of MBR-nitrification and UASB-Anammox for Mature Landfill Leachate Nitrogen Removal [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [19] 秦永丽, 蒋永荣, 刘成良, 等. Anammox 启动过程中脱氮性能及污泥特性研究 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 121 – 127.
- Qin Yongli, Jiang Yongrong, Liu Chengliang, *et al.* Study of nitrogen removal performance and sludge characteristics during start-up of Anammox [J]. Environmental Science and Technology, 2016, 39(2): 121 – 127 (in Chinese).



作者简介: 王朝朝 (1985 –), 男, 河北邯郸人, 博士, 副教授, 研究方向为污水处理及其资源化。

E-mail: W-Z-Z@163.com

收稿日期: 2018 – 12 – 14