

姚利, 付龙云, 王艳芹, 等. 利用上流式双层厌氧滤器启动厌氧氨氧化研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 133-138.

YAO Li, FU Long-yun, WANG Yan-qin, et al. The Experiment Study of Anaerobic Ammonia Oxidation Start-up by Using the Upflow Double Layer Anaerobic Filter[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2): 133-138.

利用上流式双层厌氧滤器启动厌氧氨氧化研究

姚利^{1,2}, 付龙云¹, 王艳芹¹, 郭洪海^{1*}, 袁长波¹, 张柏松¹, 罗加法³

(1.山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 山东 济南 250100; 2.农业部废弃物基质化利用重点实验室, 山东 济南 250100; 3.新西兰农业科学院鲁亚库拉研究中心, 新西兰 哈密尔顿 3240)

摘要:厌氧氨氧化是一种高效的脱氮处理工艺,但其启动和运行过程困难,高效反应器是解决此问题的有效手段。本文利用改进的上流式双层厌氧滤器开展厌氧氨氧化启动反应的试验研究。在反应器填料上分别接种反硝化污泥、厌氧污泥、混合污泥,通过模拟废水提供自养反硝化条件,并逐步提高基质浓度和水力负荷,促使菌群向厌氧氨氧化反应转变。试验发现,反硝化污泥、厌氧污泥、混合污泥均可启动厌氧氨氧化反应,启动时间分别为42、54 d和45 d。以反硝化污泥为接种物的启动效果最好,启动时间较短且废水氮素去除率高,总氮去除率最高达到82.2%。双层填料的反应器有效提高了厌氧氨氧化的稳定性,该反应器中厌氧氨氧化菌对氨氮、亚硝氮的适宜浓度负荷为270、360 mg·L⁻¹,废水中COD浓度不宜超过150 mg·L⁻¹,系统中存在厌氧氨氧化和甲烷化共存的效应。

关键词:厌氧滤器;厌氧氨氧化;污泥;接种;启动

中图分类号:S141.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)02-0133-06

doi: 10.13254/j.jare.2017.0221

The Experiment Study of Anaerobic Ammonia Oxidation Start-up by Using the Upflow Double Layer Anaerobic Filter

YAO Li^{1,2}, FU Long-yun¹, WANG Yan-qin¹, GUO Hong-hai^{1*}, YUAN Chang-bo¹, ZHANG Bai-song¹, LUO Jia-fa³

(1.Institute of Agricultural Resource and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2.Key Laboratory of Wastes Matrix Utilization, Ministry of Agriculture, Jinan 250100, China; 3.AgResearch, Ruakura Research Centre, Hamilton 3240, New Zealand)

Abstract: Anammox is an efficient nitrogen removal process, but it is difficult to start-up and operate, and an anammox reactor is the efficient way to resolve this problem. The start-up of anammox reactor by upflow anaerobic filter was studied. Denitrifying sludge, anaerobic sludge, and mixed sludge was inoculated on the packing materials, respectively and an autotrophic denitrification condition was provided by the simulated wastewater influent. Along with the gradual increase of matrix concentration and hydraulic load, the microflora was converted to the anaerobic ammonium oxidation (anammox) reaction. The results showed that the anammox reaction could be started by all the three sludge, and the time of start-up of denitrifying sludge, anaerobic sludge, mixed sludge was 42, 54 days and 45 days, respectively. The best result was that inoculated with denitrifying sludge with 82.2% of the total nitrogen removal rate, which started-up quickly and nitrogen was removed efficiently. Double packing effectively improved the stability of anammox process in the reactor, in which the suitable influent concentration loading for the anammox bacteria was 270 mg·L⁻¹ and 360 mg·L⁻¹ for ammonia nitrogen and nitrite nitrogen, respectively, and the COD concentration could not be more than 150 mg·L⁻¹. Furthermore, there was a coexist-effect for anaerobic ammonia oxidation and methanation in this reactor system.

Keywords: anaerobic filter; anammox; sludge; inoculum; start-up

收稿日期:2017-09-04 录用日期:2017-11-15

基金项目:山东省农业重大应用技术创新课题“规模化奶牛场废弃物除臭减污资源化关键技术研究与应用”;济南市高校院所自主创新项目(201303056);山东省科技发展计划项目(2016STS001);“海外泰山学者”建设工程专项

作者简介:姚利(1979—),女,硕士,副研究员,主要研究方向为农业废弃物资源化利用。E-mail:nkyyaoli@163.com

*通信作者:郭洪海 E-mail:honghaig@163.com

厌氧氨氧化 (Anaerobic ammonia oxidation, Anammox) 是一种高效的脱氮处理工艺, 在厌氧的条件下, 以亚硝酸氮为电子受体, 氨氮作为电子供体的微生物反应, 最终产物为氮气^[1]。Anammox 细菌的氨氧化过程一方面大大缩短了氨氮氧化还原到氮气的过程, 从而减少了生物脱氮的物质、能量耗费, 另一方面为生物脱氮技术的进步提供了新的发展平台^[2], 与传统的硝化-反硝化工艺相比, 具有能耗低、产泥少、经济高效等优点。虽然利用厌氧氨氧化脱氮有很多优点, 但由于厌氧氨氧化菌生长非常缓慢, 对环境要求高, 使得反应启动和稳定运行面临很多困难, 要求反应器不仅要能够富集微生物, 同时保证微生物尽量不流失^[3]。上流式厌氧滤器 (AF) 中的填料可以附着高浓度的微生物^[4], 在 Anammox 菌群的快速高效富集方面具有很大的潜力, 但反应器结构和填料的选择非常重要, 设计不合理容易发生堵塞。在 Anammox 启动的接种物方面, 有研究表明^[5-6], 利用硝化污泥、反硝化污泥和厌氧污泥都可以成功启动厌氧氨氧化反应, 但启动时污泥性能表现不同, 以厌氧颗粒污泥作为接种物启动 Anammox 反应器的稳定性能明显占优势, 以反硝化污泥作为接种物启动的 Anammox 反应器较易失稳。

本研究对上流式滤器的反应器结构进行了改进, 设置了双层填料层并选择适宜的载体, 接种不同污泥启动厌氧氨氧化反应, 并通过提升进水指标研究其去除负荷, 从而考察该反应器 Anammox 启动过程中功能菌的培育性能和生长条件, 探讨该工艺的最佳运行条件。

1 材料与方法

1.1 试验装置

利用上流式双层厌氧滤器开展厌氧氨氧化反应启动试验。试验装置如图 1 所示, 由厌氧滤器、出水回流池、蠕动泵及配套的管道组成。厌氧滤器由有机玻璃制成, 内径 240 mm, 高 600 mm, 总容积 27.1 L。装置内设有双层填料层, 装填圆盘形塑料填料, 每层装填高度 160 mm, 两层填料间有 80 mm 的间隔层。填料为高效悬浮生化环填料 (购自郑州华康环保材料有限公司), 材质为 HDPE, 直径 25 mm, 厚度 8 mm, 比重 $0.95 \sim 1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 比表面积约为 $1\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, 孔隙率 $\geq 95\%$ 。水流方向为上向流, 装置最上端设有一个出水口和一个集气管。由蠕动泵控制反应器进水, 下部进水的同时上部出水。试验装置置于恒温箱内, 温度控制为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[7]。

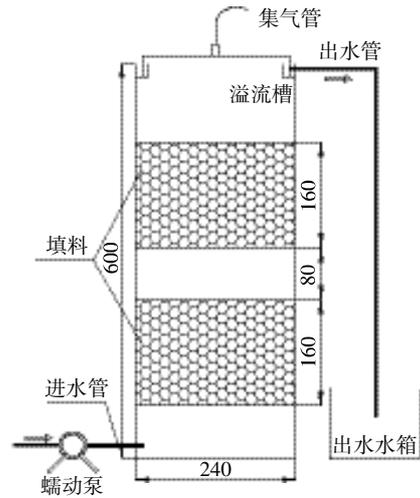


图 1 废水处理试验装置 (mm)

Figure 1 Schematic diagram of experimental equipment (mm)

1.2 试验方法

本实验采用 3 种污泥进行接种, 分别为厌氧污泥、混合污泥和反硝化污泥, 厌氧污泥取自山东淄博以牛粪为主要发酵原料的沼气工程, 混合污泥和反硝化污泥均取自济南市水质净化一厂。厌氧污泥 TS 8.9%, VS 45%, 其微生物群落主要由芽孢杆菌、梭菌、乙酸细菌、产甲烷菌等兼性厌氧或专性厌氧异养细菌组成, 并存在少量的反硝化细菌。混合污泥为污水厂脱水污泥, TS 78%, VS 58%, 污泥中含有曝气池污泥、反硝化池污泥和二沉池污泥, 同时存在反硝化细菌和硝化细菌。反硝化污泥中主要微生物为反硝化细菌, 含水率 98.7%, MLSS $3\,500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MLVSS $2\,100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SV% 24%, 经静置 30 min 后取底部沉降污泥备用。

反应器接种 3 种污泥均采用同样的启动策略。先将填料浸泡于接种物中 24 h, 确保填料上粘附一定量的微生物后装填入反应器, 加入营养液至厌氧滤池设计容量。通过蠕动泵对反应器进水, 模拟废水由 NH_4Cl 、 NaNO_2 及营养盐组成。初始阶段进水 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 质量浓度比为 1.0 左右, 然后逐渐提高亚硝酸氮、氨氮浓度比。通过模拟废水浓度调整进水中各污染物指标, 以亚硝酸氮和氨氮同时去除并呈现一定的比例关系 (1.2~1.3:1) 为表征, 判断厌氧氨氧化反应是否启动成功。

由于 Anammox 菌对生长环境极为敏感, 为避免基质抑制作用, 接种 3 种污泥启动厌氧氨氧化反应均采用低负荷低氨氮的策略。启动初始阶段, 模拟废水氨氮和亚硝酸氮浓度均为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 从 21 d 开始逐步增加氨氮、亚硝酸氮浓度, 并提高进水亚硝酸氮/氨氮浓度

比。为确定氮素去除稳定性,以3 d为一个周期测定出水指标,每改变一个负荷,稳定进水指标时间为9 d。

启动时进水速率要考虑到既能顺利挂膜,又确保填料上的生物膜避免过度冲刷,因此选择了初期较低的进水速率,并随着生物膜的生长逐渐增加的策略。启动过程分为3个阶段:在启动的前21 d,每2 d进水1次,每次进水量为反应器容积的1/5~1/4,进水速率为 $10\sim 20\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 池容,回流比2~3:1;22~36 d,每日进水1次,每次新鲜进水量为反应器容积的1/4~1/3,进水速率为 $20\sim 30\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 池容,回流比3~4:1;37~60 d,每日进水2~3次,每次新鲜进水量为反应器容积的1/5~1/4,进水速率为 $20\sim 30\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 池容,回流比4~5:1。试验过程中根据出水水质指标调整进水水质和处理负荷。

模拟废水营养液由以下成分组成:EDTA $5\ 000\sim 10\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MgSO_4 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $500\sim 1\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NaHCO_3 $500\sim 1\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

厌氧氨氧化反应成功启动后,在反硝化污泥启动的装置中,通过调整进水水质及水力停留时间,逐步增加系统脱氮处理能力。在厌氧氨氧化反应稳定的基础上,添加葡萄糖作为外加碳源,并逐步增加废水中葡萄糖浓度,提高厌氧氨氧化菌的耐受性。氨氮、亚硝氮在 90 、 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时分别以 30 、 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的梯度增加,最高值达到 360 、 $480\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时COD以 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 开始逐步增加浓度,最高值达到 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3 水质及监测项目分析方法

水样分析项目测定中氨氮采用凯氏定氮法(FOSS KJELTEC 2300 凯氏定氮仪), $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用N-(1-萘基)乙二胺光度法^[8];总氮采用流动注射分析法(瑞典 FiaStar 5000 离子连续流动分析仪);pH值采用上海三信 CL200 笔式多功能测试仪测定;COD采用

美国哈希 DR 2800 COD 测定仪测定。

2 结果与讨论

2.1 不同污泥启动厌氧氨氧化反应效果

由图2可见,以反硝化污泥启动初期,反应器出水亚硝氮几乎可以全部去除,氨氮不降反升,总氮去除率处于不稳定的状态。说明反应器中以反硝化反应为主,出水氨氮浓度偶尔会出现高于进水浓度的情况,是由于菌体自溶释放所致。21 d后,氨氮、总氮去除率逐渐增高,第42 d,氨氮、总氮去除率分别达到78.5%、82.2%,亚硝氮/氨氮去除比为1.39,与理论数值1.32接近。同时观察填料上附着的生物膜,细菌颜色由浅褐色转变为红色,说明反应器内主导菌群已由反硝化菌转化为厌氧氨氧化菌,厌氧氨氧化反应启动成功。此后,进一步提高进水水质浓度,最高进水浓度分别为氨氮 $180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、亚硝氮 $240\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此过程中脱氮效率保持稳定,氨氮、总氮的去除率维持在80%、85%以上。

接种厌氧污泥启动厌氧氨氧化反应的驯化过程中(图3),启动前期氨氮、总氮去除率很不稳定,总氮去除率明显高于氨氮去除率,氮素的去除主要是由反硝化作用贡献的。24~54 d,氨氮、总氮去除率缓慢上升,且增长趋势类似,说明以厌氧污泥启动厌氧氨氧化反应稳定性较强。第54 d,氨氮、总氮去除率分别达到77.2%、78.9%,亚硝氮/氨氮去除比达到1.27,去除效率在随后的时间内保持稳定,污泥颜色由黑色逐渐转化为红褐色,厌氧氨氧化反应启动成功。启动稳定后,系统氨氮、总氮的去除率稳定在75%以上。

以混合污泥启动厌氧氨氧化反应的情况见图4。启动前期氨氮、总氮去除率均维持在较低的水平,氨氮、亚硝氮和硝态氮的降解没有体现出规律。18~45

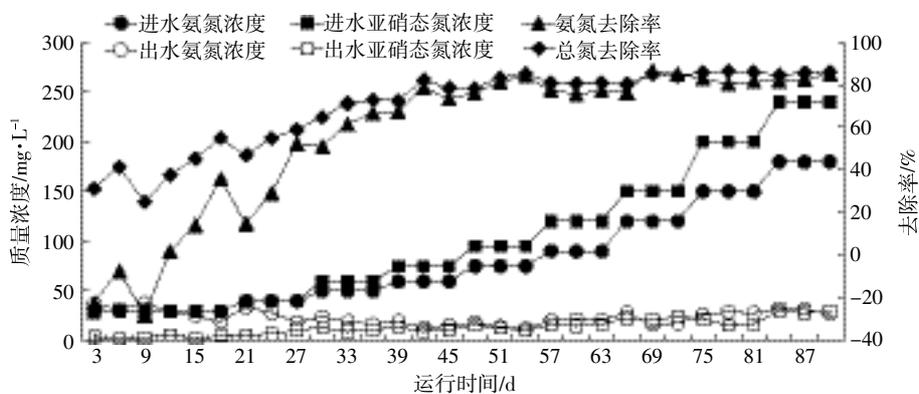


图2 反硝化污泥启动厌氧氨氧化反应过程

Figure 2 Performance of anammox on denitrifying sludge

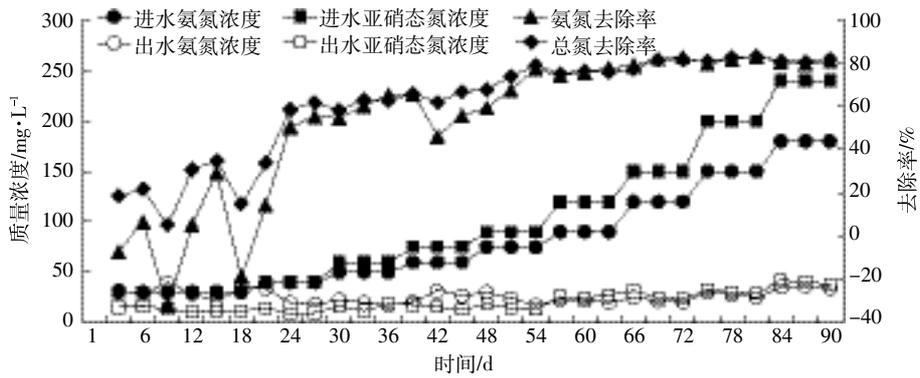


图 3 厌氧污泥启动厌氧氨氧化反应过程

Figure 3 Performance of anammox on anaerobic sludge

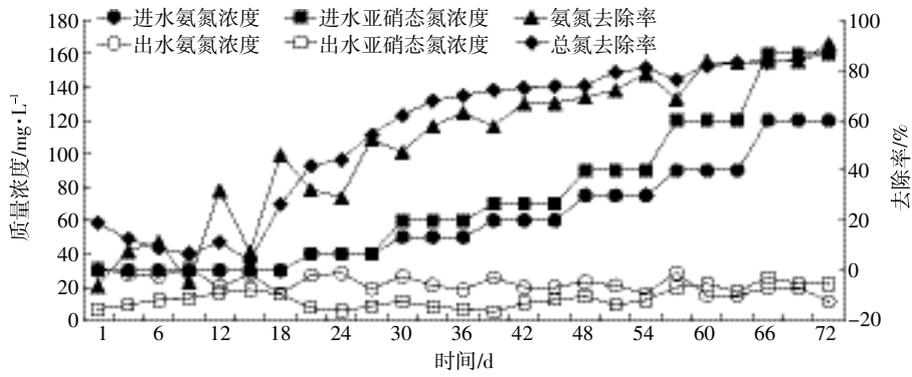


图 4 混合污泥启动厌氧氨氧化反应过程

Figure 4 Performance of anammox on mixed sludge

d, 反应器内总氮和氨氮去除率逐渐增高, 但增长的速率并不一致, 反应器内的菌群处于不断演变过程中。第 45 d, 氨氮、总氮去除率分别达到 66.9%、73.7%, 亚硝氮/氨氮去除比达到 1.43, 去除效率在随后的时间内保持稳定, 污泥颜色由黑褐色逐渐转化为红褐色, 厌氧氨氧化反应启动成功。接种混合污泥启动厌氧氨氧化反应在第 45 d 启动成功。

菌种是生物反应器的核心, 接种污泥的选择对厌氧氨氧化反应器的启动和运行都极为重要。试验表明, 反硝化污泥、厌氧污泥、混合污泥均可成功启动厌氧氨氧化反应, 所需的时间分别为 42、54、45 d。从启动所需时间和总氮去除率进行比较, 3 种污泥启动 Anammox 反应的有效性为: 反硝化污泥 > 混合污泥 > 厌氧污泥。从图 5 可以看出, 以反硝化污泥启动厌氧氨氧化效果最好, 不仅较快启动成功, 启动后对总氮的去除率也较高。由于反硝化细菌和厌氧氨氧化菌都属于厌氧菌, 代谢类型相似, 且污泥中反硝化细菌总量较高, 因此在启动时菌种活性较强, 适应时间较短。混合污泥中由于存在硝化细菌, 可以消耗进水中的溶

解氧, 降低水中的氧化还原电位, 促进系统向厌氧氨氧化适应的条件转变, 因此启动时间也较短。以厌氧污泥进行启动时, 由于污泥中的主要微生物为产甲烷菌, 反硝化细菌不占优势, 因此其扩繁和氨氧化的转化速度较慢, 启动时间最长。

从 3 种污泥接种启动反应来看, 厌氧氨氧化反应的启动分为 3 个阶段: 菌落适应阶段、活性迟滞阶段、活性稳定阶段^[9]。第一阶段为接种污泥中细菌的转化与重组, 该阶段中一方面存在接种细菌发挥原有功能, 另一方面不适应控制环境的细菌发生自溶, 符合营养条件的厌氧氨氧化菌落逐渐增长, 本阶段污染物的降解效果可能发生波动; 第二阶段, 厌氧氨氧化菌群大量增殖, 厌氧氨氧化反应逐渐增强, 氮素的降解处于稳步提高的阶段; 第三阶段, 系统中厌氧氨氧化菌群成为主导菌群, 菌落数量保持稳定, 氮素的降解也处于较高水平。

2.2 反硝化污泥启动厌氧氨氧化控制过程

如图 6 所示, 试验采取逐步增加水质浓度、缩短水力停留时间(HRT)的进水方式。启动初期以反硝化

菌为主导,亚硝氮的去除率很高,氨氮的去除很不稳定,进水以较低的水力负荷维持了18 d,促使菌群逐渐向厌氧氨氧化菌群转化。18 d后,随着厌氧氨氧化反应逐渐增强,总氮的去除率超过了50%,开始逐步增加水质氨氮、亚硝氮浓度,并在出水水质稳定的情况下逐步缩短HRT。由于厌氧氨氧化菌的倍增时间较长(11 d),前期保持较长的HRT(48 h)。后期(42 d以后)菌群富集,厌氧氨氧化启动成功后,HRT也随之降低,试验结果表明维持在6~20 h的HRT均可保持较高的脱氮效率。同时由于厌氧氨氧化菌易流失的特性,进水时控制在进水速率为 $20\sim 30\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 池容为宜。第84 d,氨氮、总氮去除率分别达到81.9%、83.8%,HRT为6 h,最大TN去除负荷(以N计)为 $1.408\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

2.3 模拟废水提升负荷及外加碳源后污染物去除效果

在反硝化污泥启动厌氧氨氧化反应稳定之后,保持水力停留时间6 h,逐步提高氨氮、亚硝氮和葡萄糖浓度。如图7所示,提升负荷开始时,系统氨氮、总氮去除率分别由图6启动反应时第90 d的80.1%、

82.8%缓慢上升,在负荷持续提升的过程中,总氮去除率最高达到86.9%(27 d),此后总氮的去除率有所下降。氨氮、亚硝氮进水指标为 $360、480\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,两者出水指标分别为 $10\sim 120、120\sim 130\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总氮去除率降到70%~75%。亚硝酸盐是厌氧氨氧化菌的基质,同时也是抑制剂,浓度过高时会抑制厌氧氨氧化菌的生长。从本实验的结果来看,基质浓度高于 $300、400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,将在一定程度上影响去除效率。该系统中厌氧氨氧化菌对氨氮、亚硝氮的适宜浓度负荷为 $270、360\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在提升负荷的过程中,没有发生失稳现象,说明双层填料的滤器在微生物的固持方面有较好的作用。

厌氧氨氧化菌是一种自养菌,成长的基质为氨氮和亚硝氮,碳源的存在一方面对厌氧氨氧化菌是毒性物质,另一方面将会促进非厌氧氨氧化菌的生长,影响厌氧氨氧化菌的生长空间^[10]。本实验中,在较低浓度的碳源物质存在情况下,对脱氮效果的影响可以接受,同时COD也有一定程度的降解,最高COD降解率达37.8%,说明系统中存在着厌氧产甲烷菌的生物

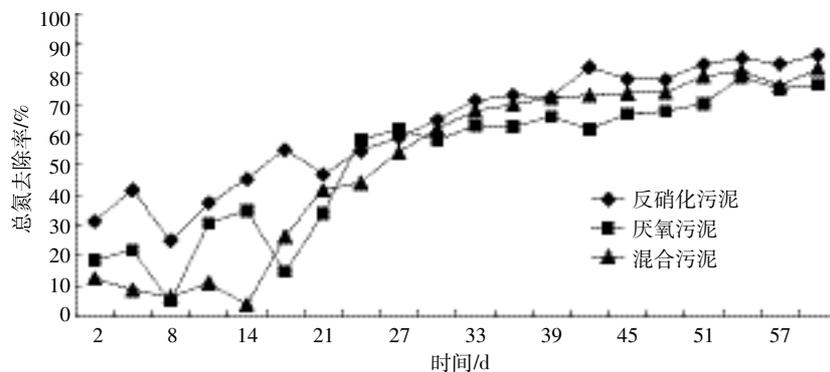


图5 不同污泥启动厌氧氨氧化过程脱氮效果比较

Figure 5 Nitrogen removal effect in anammox process started up by different sludges

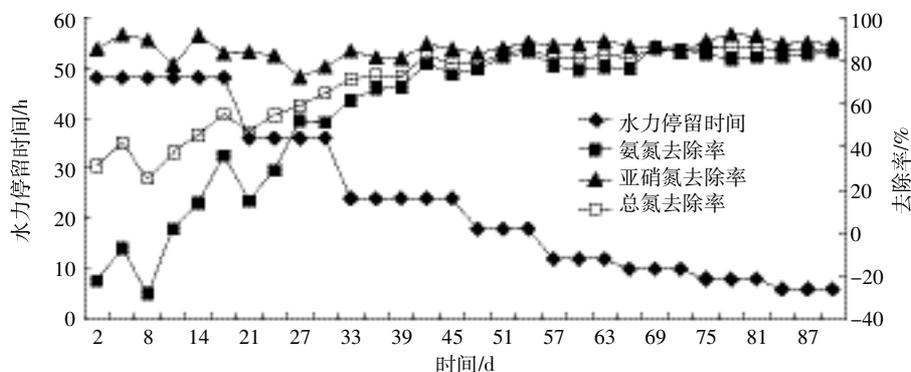


图6 水力停留时间对脱氮效果的影响

Figure 6 Effect of HRT on nitrogen removal efficiency

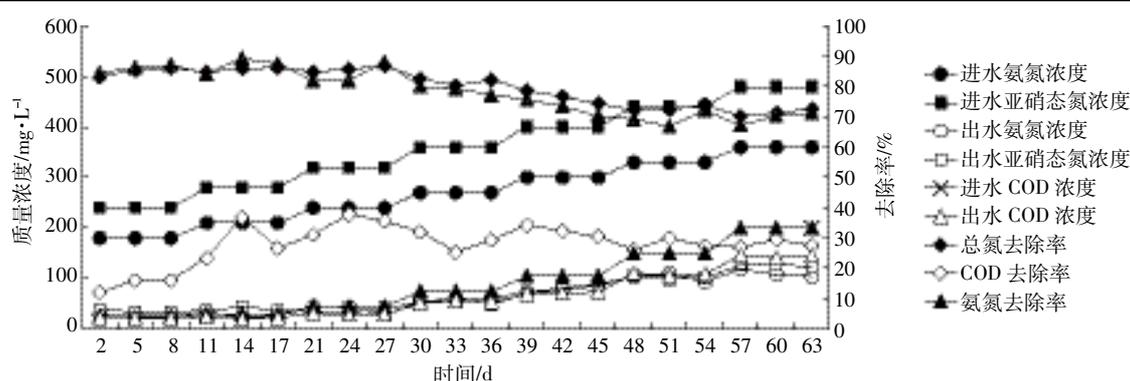


图 7 厌氧氨氧化反应器提升负荷及外加碳源对指标降解率的影响

Figure 7 Effect of lifting load and the addition of carbon source on the target object degradation rate in the anammox reactor

降解作用。但 COD 提高至 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上时,系统的 COD 去除率下降至 30% 以下,同时由于氮素负荷提高的叠加影响,脱氮效率也有所下降。

3 结论

(1) 利用厌氧滤器启动厌氧氨氧化反应,试验发现,接种反硝化污泥、厌氧污泥、混合污泥均可启动厌氧氨氧化反应,总氮去除率分别于第 42、54、45 d 达到 82.2%、78.9%、73.7%。3 种污泥启动厌氧氨氧化反应的有效性为:反硝化污泥>混合污泥>厌氧污泥。

(2) 上流式双层滤器对 Anammox 菌有较好的固持作用,在高负荷下稳定性强,反应器对氨氮、亚硝氮的适宜浓度负荷分别为 270 、 $360 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(3) 废水中含有少量碳源对厌氧氨氧化反应的抑制程度是可以接受的,系统中同时存在厌氧氨氧化和甲烷化效应,废水中 COD 浓度不宜超过 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,处理废水时可以通过增加回流实现最佳处理条件。

参考文献:

[1] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, et al. The se-queencing batch reactor as a power tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1998, 50(5): 589-596.

[2] 王 惠, 刘研萍, 陶 莹. 厌氧氨氧化菌脱氮机理及其在污水处理中的应用[J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 2019-2028.

WANG Hui, LIU Yan-ping, TAO Ying. The biochemical mechanism and application of anammox in the wastewater treatment process[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7): 2019-2028. (in Chinese)

[3] 袁 青, 黄晓丽, 高大文. 不同填料 UAFB-ANAMMOX 反应器的脱氮性能[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(3): 301-308.

YUAN Qing, HUANG Xiao-li, GAO Da-wen. Comparison of nitrogen removal in UAFB-ANAMMOX reactors with different carriers[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(3): 301-308. (in Chinese)

[4] 齐京燕, 李旭东, 曾抗美, 等. 厌氧氨氧化反应器研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(5): 748-752.

QI Jing-yan, LI Xu-dong, ZENG Kang-mei, et al. Progress in research of anaerobic ammonium oxidation reactors[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, 13(5): 748-752. (in Chinese)

[5] 唐崇俭, 郑 平, 陈建伟, 等. 不同接种物启动 Anammox 反应器的性能研究[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(8): 683-688.

TANG Chong-jian, ZHENG Ping, CHEN Jian-wei, et al. Performance of anammox bioreactors started up with different seeding sludges[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(8): 683-688. (in Chinese)

[6] 胡宝兰, 郑 平, 胡安辉, 等. Anammox 反应器的启动及其菌群演变的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 107-110.

HU Bao-lan, ZHENG Ping, HU An-hui, et al. Start-up of anammox reactor and evolution of bacterial colonies[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(7): 107-110. (in Chinese)

[7] 李小霞, 陆燕勤, 杨小平, 等. UASB 反应器中厌氧氨氧化菌的影响因素研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(12): 2788-2792.

LI Xiao-xia, LU Yan-qin, YANG Xiao-ping, et al. Influencing factors of anaerobic ammonium oxidation in up-flow anaerobic sludge bed reactor[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(12): 2788-2792. (in Chinese)

[8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第 4 版)[M]. 北京: 中国科学出版社, 2002.

State Environmental Protection Administration of China (SEPA). Methods for monitoring and analysis of water and wastewater (Fourth Edition) [M]. Beijing: Chinese Science Press, 2002. (in Chinese)

[9] 阳广凤, 沈李东, 马 春, 等. 新型厌氧氨氧化反应器脱氮性能及过程动力学特性的研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(10): 2138-2145.

YANG Guang-feng, SHEN Li-dong, MA Chun, et al. Performance and process kinetics characteristics of anammox baffled reactor[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(10): 2138-2145. (in Chinese)

[10] 朱 杰, 黄 涛, 范兴建, 等. 厌氧氨氧化工艺处理高氨氮养殖废水研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(5): 1442-1447.

ZHU Jie, HUANG Tao, FAN Xing-jian, et al. Treatment of anammox technique on treating high concentration poultry wastewater[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(5): 1442-1447. (in Chinese)