

影响 UASB 厌氧氨氧化反应器脱氮性能的因素研究

李亚峰,于佳辉,张文文,叶友林

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究溶解氧(DO)、温度、pH 值和水力停留时间(HRT)对 UASB 厌氧氨氧化反应器脱氮性能的影响,寻找快速有效的脱氮处理途径. 方法 试验进水以人工配水的方式模拟城市生活污水,分别考察 UASB 反应器在不同的 DO、温度、pH 值和 HRT 反应条件下,通过检测进、出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的质量浓度,分析 UASB 厌氧氨氧化反应器的脱氮性能,并确定最优环境因素. 结果 在进水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度分别为 50 mg/L 和 66 mg/L、 $\rho(\text{DO}) < 1 \text{ mg/L}$ 、温度为 30~35 °C、pH=7~8、HRT=12 h 的反应条件下,该反应器中的菌种具有最大的生物活性,污水的脱氮效果最优,总氮(TN)去除率维持在 80% 以上. 结论 厌氧氨氧化反应最佳条件的确定,为厌氧氨氧化工艺脱氮性能稳定性的控制起到关键作用.

关键词 厌氧氨氧化;脱氮;UASB;污泥

中图分类号 X703.1 文献标志码 A

Factors on Nitrogen Removal Performance of Anammox UASB Reactor

LI Yafeng, YU Jiahui, ZHANG Wenwen, YE Youlin

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this paper was to investigate the effects of DO, temperature, pH and HRT on the nitrogen removal performance of anammox UASB reactor, to find a fast and effective way for nitrogen removal. Artificial synthetic wastewater was used to simulate urban sewage as influent water of test. The nitrogen removal performance of UASB reactor was investigated to determine the optimal environmental factors under the different DO, T, pH and HRT conditions, by detecting the concentration of the inlet and outlet of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$. The results showed that when the concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ is $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{DO}) < 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $T = 30 \sim 35 \text{ C}$, $\text{pH} = 7 \sim 8$, $\text{HRT} = 12 \text{ h}$, the bacteria in the reactor had the highest biological activity, the nitrogen removal efficiency was the best, and the TN removal rate was above

收稿日期:2017-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51108277);辽宁省教育厅项目(LJZ2016004)

作者简介:李亚峰(1960—),男,教授,博士,主要从事水污染控制理论与技术方面研究.

80%。因此,厌氧氨氧化反应的最佳运行条件,是控制厌氧氨氧化反应稳定性的关键。

Key words: anammox; nitrogen removal; UASB; sludge

厌氧氨氧化指在缺氧或厌氧的环境中,以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 作为电子供体, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 作为电子受体,将氮素转化为 N_2 和少量 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的反应^[1-2]。由于菌种对生存条件的要求极为严格,且生长速度缓慢,直接制约着该工艺的工程化进程。如何实现厌氧氨氧化的快速启动^[3-6],以及该工艺最佳运行条件的确定已成为我国近几年的研究热点^[7-12]。厌氧氨氧化的影响因素主要有污泥的颗粒化程度^[13-14]和污泥生长条件^[15]。笔者采用升流式厌氧污泥床(UASB)反应器,最终实现厌氧氨氧化的启动和稳定运行。通过对系统脱氮性能的影响进行深入研究^[16-19],旨在获得长期且稳定的脱氮效果,确定反应器的最佳运行条件。

1 试验

1.1 试验用水与污泥泥种

以人工配水的方式来模拟城市污水。根据实际污水各污染因子成分,确保进水 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) : \rho(\text{NO}_2^- - \text{N}) = 1 : 1.32$,以 NaHO_3 为唯一碳源,按需配置 MgSO_4 、 KH_2PO_4 和 CaCl_2 ,试验用水水质如表 1 所示。此外,水样中额外加入营养液 A 和 B,确保微生物生长繁殖所必需的微量元素,每升水样中需添加营养液 1 mL。营养液 A: $\rho(\text{EDTA}) = 5.0 \text{ g/L}$, $\rho(\text{FeSO}_4) = 5.0 \text{ g/L}$ 。营养液 B: $\rho(\text{EDTA}) = 15.0 \text{ g/L}$, $\rho(\text{FeSO}_4) = 5.0 \text{ g/L}$, $\rho(\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}) = 0.990 \text{ g/L}$, $\rho(\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}) = 0.430 \text{ g/L}$, $\rho(\text{H}_3\text{BO}_4) = 0.014 \text{ g/L}$, $\rho(\text{CoD}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 0.240 \text{ g/L}$, $\rho(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) = 0.250 \text{ g/L}$, $\rho(\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 0.190 \text{ g/L}$ 。污泥泥种取自抚顺三宝屯污水处理厂 A²/O 工艺曝气池厌氧段,其理化特性如表 2 所示。

表 1 试验用水水质

$\rho(\text{NaHO}_3)$	$\rho(\text{NH}_4\text{Cl})$	$\rho(\text{NaNO}_2)$	$\rho(\text{MgSO}_4)$	$\rho(\text{CaCl}_2)$	$\rho(\text{KH}_2\text{PO}_4)$
500	50	66	300	136	30

表 2 污泥泥种特性

Table 2 Physical and chemical characteristics of sludge

pH	颜色	$\rho(\text{MLSS}) / \rho(\text{MLVSS}) / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\varphi(\text{MLVSS}) / \text{MLSS} / \%$	
6.5 ~ 7.0	深褐色	0.416 2	0.312 2	75

1.2 试验装置与方法

试验装置如图 1 所示。UASB 反应器呈圆柱形,由双层有机玻璃制成。该反应器由水浴加热区、反应区和沉淀区 3 部分组成。外部设有水浴加热系统;下部反应区表面裹有黑布,防止光线对氧氨氧化菌产生抑制作用;上部沉淀区,设置三相分离器来实现气液分离,沿柱高设有 5 个取样口。进水水箱放有人工配水,以通入高纯氮气的 30 min 的方式进行脱氧。进水采用蠕动泵加压供水方式,经均匀布水装置由下向上泵入,经三相分离器后,出水采用重力流,而生成的 N_2 则经洗气瓶后直接排入空气。试验观察进、出水氨氮、亚硝态氮及出水硝态氮的质量浓度变化,确定该工艺最佳运行参数。

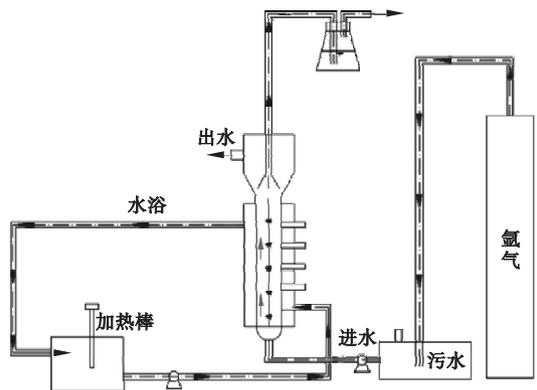


图 1 UASB 反应器装置

Fig. 1 UASB reactor device diagram

1.3 分析方法

试验各项指标均按照国家环保局编写的《水和废水监测分析方法》(第4版)中规定的方法进行检测. 主要测定进、出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度, 进、出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度, 出

水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度(由于进水为人工配置, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 仅存在于出水当中)以及溶解氧(DO)、温度、pH值和水力停留时间(HRT), 具体分析方法如表3所示.

表3 水质检测项目及分析方法

Table 3 Water quality testing items and analysis method

检测项目	分析方法	仪器
COD_{Cr}	快速密闭催化消解法	UV9100 型分光光度计
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	纳氏试剂分光光度法	UV9100 型分光光度计
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法	UV9100 型分光光度计
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	紫外分光光度法	UV9100 型分光光度计
DO	溶解氧分析仪	HACH sension 8 便携式溶解氧测定仪
温度	温度计测定	温度计
pH	便携式 pH 仪	PHS-29A 型酸度计

2 试验结果与分析

2.1 DO对厌氧氨氧化反应的影响

在进水未脱氧的条件下进行菌种的培养, 发现氮的去除率呈下降趋势. 反应运行到15 d时, 氨氮的去除率由60%下降至45%,

脱氮效果降低. 此时, 将进水中通入15 min 氩气进行去氧, 使DO质量浓度小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 较自然水体中 $8 \sim 9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的质量浓度溶解氧有大幅下降, 继续检测脱氮效果, 试验结果如图2所示.

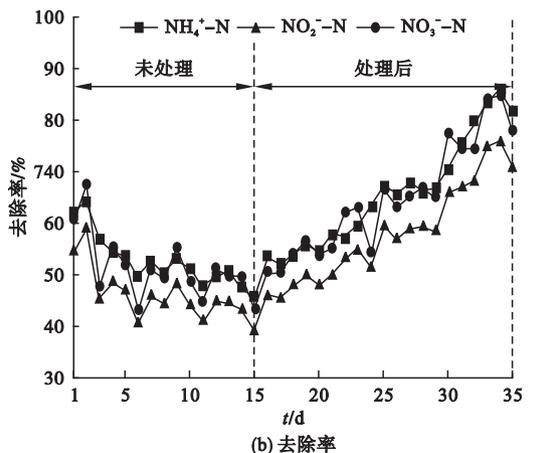
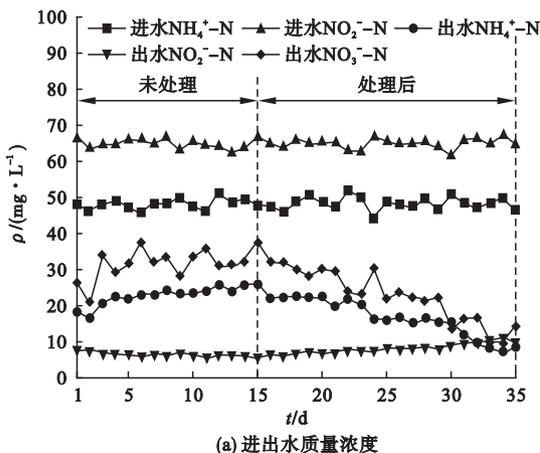


图2 不同氧质量浓度条件下厌氧氨氧化反应的脱氮性能分析

Fig. 2 Nitrogen removal performance in anammox reactor under different oxygen concentration

图2中氮的去除效果总体呈现先下降后上升的趋势, 前半段进水中未进行去氧处理, 氮素的去除效果不理想. 15 d时采取通入氩气的方式进行去氧, 氮的去除率显著升高, 因此可得DO对菌种的抑制作用具有可逆性,

并不能从根本上破坏菌种. 主要原因是: ①氧分子参与生成的某些氧化物或中间产物, 是菌体本身的必需物质, 但质量浓度过高的DO则会导致一些有害物质的生成, 抑制菌种的活性; ②氧气的存在必然导致好氧菌的

滋生,逐渐成为优势菌群,会导致厌氧氨氧化菌繁殖受阻.任玉辉等^[20]通过改变进水中的溶解氧质量浓度,考察 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率,发现当 $\rho(\text{DO}) < 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,氮素去除率可高达 99.7% 和 100%,证实了高 DO 质量浓度的抑制作用.张黎等^[21]发现当 $\rho(\text{DO}) < 0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,厌氧氨氧化菌群的数量能够长期稳定维持较高的水平.综合经济因素与试验装置的复杂程度,笔者将 DO 控制在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,可以有效实现厌

氧氨氧化菌的培养.

2.2 温度对厌氧氨氧化反应的影响

厌氧氨氧化菌作为一种嗜温型细菌,需要探讨其生存的最适温度.控制进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度分别为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值为 7~8,水力停留时间为 12 h,进水中通入 15 min 氩气去氧,将温度依次调整为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,分别稳定运行 7 d 的时间,试验结果见图 3.

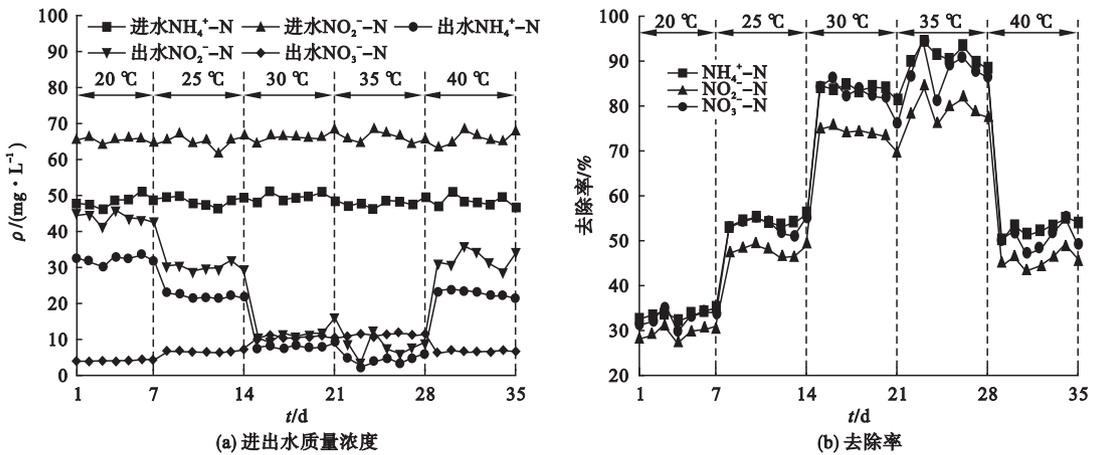


图3 不同温度条件下厌氧氨氧化反应的脱氮性能分析

Fig. 3 Nitrogen removal performance in anammox reactor under different temperature conditions

5种不同的温度环境中培养厌氧氨氧化菌种, $30 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下去除率均大于 80%. 温度较低时,去除率与温度呈正相关,随着温度的升高,菌种繁殖速率远高于衰灭速度,蛋白活性增强,酶促反应加速,因而去除效果逐渐增强.但温度过低时,会直接导致细胞膜的凝胶化,营养物质的跨膜运输受阻,酶促反应速度降低也会导致整体菌体的失活,无法达到较好的处理效果.温度过高,直接导致蛋白酶变性,氮的去除效果将不复存在,恰好解释了图 3 中高温环境下的斜率远大于低温时的斜率.李祥等^[22]在探讨温度对厌氧氨氧化反应的影响试验中也证实了这一点,证明该菌种最适宜生存温度为 $26 \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}$,反应器具有稳定的脱氮效能.笔者认为将

反应温度控制在 $30 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 有助于菌种的繁殖生长,保证菌种活性的同时,将能耗也维持在较低水平,符合节能减排大环境的需要,综合能源消耗的经济性^[23],将温度设为 $(33 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 最佳.

2.3 pH 值对厌氧氨氧化反应的影响

为探讨 pH 值对于整个工艺脱氮性能的影响,将进水氨氮和亚硝态氮质量浓度设置为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,温度控制在 $(33 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$,水力停留时间为 24 h,进水通入氩气去氧,利用盐酸和氢氧化钠调节 pH 值分别为 5、6、7、8、9、10,分别稳定运行 7 d,以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率为衡量标准(见图 4).

从图 4 中可以看出, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$

与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率均呈现先增长后下降的趋势, pH 值在 7 ~ 8 出现峰值. 分析原因, pH 值过低导致 FA(游离氨)质量浓度过低, FNA(亚硝酸)质量浓度过高, 抑制该反应的进行; 而 pH 值过高则造成不可逆的抑制作用甚至反应完全停止, FA 质量浓度过高, 破坏了厌氧氨氧化菌的电解平衡, 此时 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 呈现负增长趋势, 反硝化作用逐渐起到主

导作用. 此外, 李亚峰等^[24]在考察 pH 值对厌氧氨氧化的影响试验中发现, 在 HRT 为 48 h, 温度为 30 °C 的条件下, pH 值为 8 时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率可高达 84.31% 和 88.43%, 为探究最佳 pH 值提供了理论依据. 为获得较高的去除率, 同时不破坏系统的酸碱平衡, pH 值在 7 ~ 8 有助于反应的进行, 偏碱性去除效果更佳.

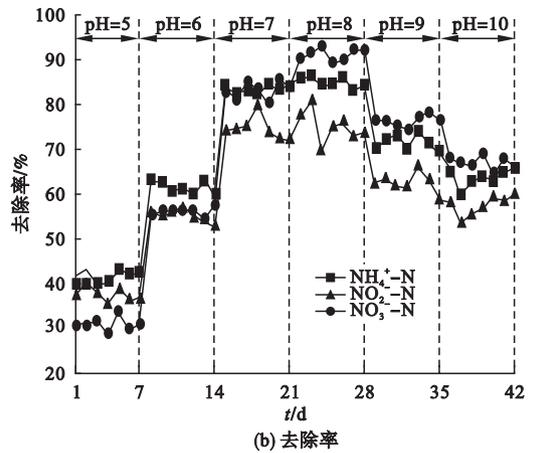
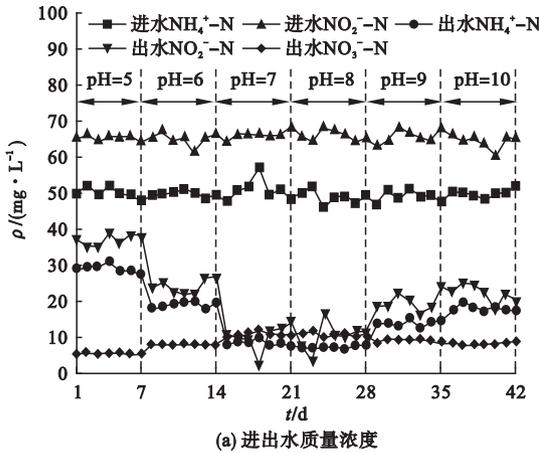


图 4 不同 pH 值条件下厌氧氨氧化反应的脱氮性能分析

Fig. 4 Nitrogen removal performance in anammox reactor under different pH conditions

2.4 HRT 值对厌氧氨氧化反应的影响

反应器的进水方式采用蠕动泵加压进水, 通过调整转速控制水力停留时间. 试验中将进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度设置为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度控制在

30 ~ 35 °C, pH 值控制在 7 ~ 8, HRT 分别为 3 h、6 h、12 h、24 h、48 h 条件下运行 7 d, 检测 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 与 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 大小, 去除效果如图 5 所示.

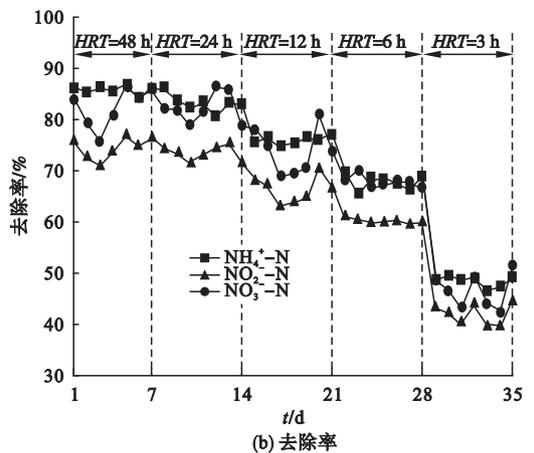
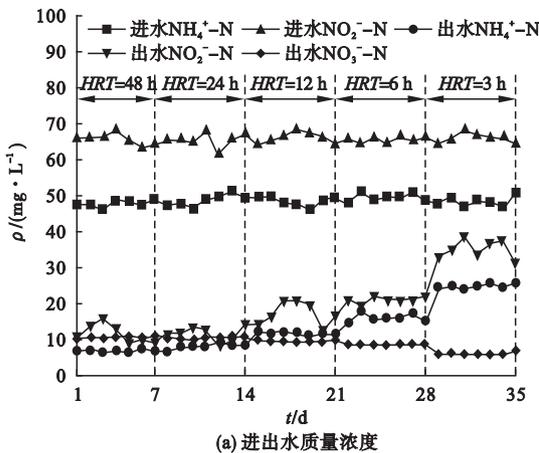


图 5 不同 HRT 条件下厌氧氨氧化反应的脱氮性能分析

Fig. 5 Nitrogen removal performance of anammox under different HRT conditions

在大量试验数据处理的基础之上,选取 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除率与总氮 (TN) 去除率作为参考数值进行分析. 图 5 中易得出三条折线均呈现降低的趋势, HRT 与去除率呈正相关, 12 h 为一个转折点, 斜率均发生较大变化. 分析其原因: ①水力停留时间越短, 部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 未进行反应, 直接排出, 造成去除率低下; ②水力停留时间越短, 导致进水中氮的容积负荷过高, 对厌氧氨氧化菌的抑制效果明显, 导致去除效果不佳. 当 HRT 大于 12 h 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率均已经在 75% 以上, 且不再有较大的提高, 对于整个工艺的处理效率等有较大影响. 综合经济与市场分析, 确定最佳的 HRT 为 12 h.

3 结 论

(1) 厌氧氨氧化菌对于 DO 非常敏感, 采取措施之后, 反应器的脱氮性能逐渐得到恢复. 因此, DO 对厌氧氨氧化菌活性的抑制作用是可逆的. 工艺运行中一般在进水中投入足够氩气进行去氧.

(2) 当试验环境温度分别为 20 °C、25 °C、30 °C、35 °C 和 40 °C 时, 厌氧氨氧化反应器的脱氮性能有着显著的差别. 在 30 ~ 35 °C 的条件下厌氧氨氧化菌具有最高的活性, 此范围内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 TN 的去除率均高于 80%, 过高或过低都会影响反应器的脱氮性能, 高温可造成不可恢复的危害, 且考虑到能源消耗与去氮效果, 温度控制在 $(33 \pm 1)^\circ\text{C}$ 最佳.

(3) 探究厌氧氨氧化菌生存环境的最适宜 pH 值, 在 7 ~ 8 时脱氮效果较好, 氮的去除率可稳定在 80% 左右, 且偏碱性去除效果更佳.

(4) 通过调整蠕动泵的转速来控制水力停留时间, 当 $HRT > 12$ h 时, 氮的去除率稳定在 75% 以上, 综合经济效益与处理效率, 确定反应器稳定运行的最佳 HRT 为 12 h.

参考文献

- [1] HYOKWAN B, KYUNGSOON P, YUNCHUL C, et al. Distribution of anammox bacteria in domestic WWTPs and their enrichments evaluated by real-time quantitative PCR[J]. Process biochemistry, 2010, 45(3): 323 - 334.
- [2] KARLSSON R, KARLSSON A, BACKMAN O, et al. Identification of key proteins involved in the anammox reaction[J]. Fems microbiology letters, 2009, 297(1): 87 - 94.
- [3] ISAKA K, DATE Y, SUMINO T, et al. Ammonium removal performance of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria immobilized in polyethylene glycol gel carrier[J]. Applied microbiology & biotechnology, 2007, 76(6): 1457 - 1465.
- [4] 阎刚, 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.)
- [5] 朱玲利. 磁性颗粒诱导厌氧氨氧化菌富集及自营养脱氮体系快速启动研究[D]. 济南: 济南大学, 2016.
(ZHU Lingli. Magnetic particles induce anaerobic anammox bacteria enrichment and the autotrophic nitrogen removal system quickly start [D]. Jinan: University of Jinan, 2016.)
- [6] VAN W R, ABMA W R, BLOMMERS D, et al. Start-up of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam[J]. Water research, 2007, 41(18): 4149 - 63.
- [7] 李祥, 黄勇, 袁怡. ASBBR 反应器厌氧氨氧化反应稳定性研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(1): 101 - 105.
(LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi. Study on the stability of ASBBR anaerobic ammonium oxidation[J]. Technology of water treatment, 2010, 36(1): 101 - 105.)
- [8] 魏琛, 陆天友, 钟仁超, 等. HRT 及氮素负荷对厌氧氨氧化系统的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 749 - 755.
(WEI Chen, LU Tianyou, ZHONG Renchao, et al. Influence of HRT and nitrogen load on an anammox system [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2010, 30(4): 749 - 755.)
- [9] RUIZ G, JEISON D, CHAMY R. Nitrification

- with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration [J]. *Water research*, 2003, 37(6): 1371 - 1377.
- [10] 欧阳海. 部分亚硝化耦合厌氧氨氧化处理垃圾渗滤液研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
(OUYANG Hai. Study on treatment of landfill leachate by partial nitrification coupled with anaerobic ammonium oxidation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.)
- [11] FIGUEROA M, VAZQUEZ-PADIN J R, MOSQUERA-CORRAL A, et al. Is the CANON reactor an alternative for nitrogen removal from pre-treated swine slurry [J]. *Biochemical engineering journal*, 2012, 65(15): 23 - 29.
- [12] 吕晨. 亚硝化-厌氧氨氧化单级完全自养脱氮工艺性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
(Lü Chen. Performance of single-stage completely autotrophic nitrogen removal via nitrification / anaerobic ammonium oxidation pathways [D]. Changchun: Jilin University, 2014.)
- [13] 林剑波. ASBR型厌氧氨氧化反应器启动及污泥颗粒化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
(LIN Jianbo. Study of start-up of anaerobic ammonium oxidation reactor and its sludge granulation in ASBR [D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.)
- [14] 于鹏飞, 周明俊, 孙明, 等. 氮负荷对厌氧氨氧化污泥颗粒化的影响[J]. *水处理技术*, 2016, 42(7): 25 - 29.
(YU Pengfei, ZHOU Mingjun, SUN Ming, et al. Fabrication of ZIF-8/PAN ultrafiltration membranes versus in situ growth for dye wastewater treatment [J]. *Technology of water treatment*, 2016, 42(7): 25 - 29.)
- [15] ZHU W, ZHANG P, YU D, et al. Nitrogen removal performance of anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) in presence of organic matter [J]. *Biodegradation*, 2017, 28(2/3): 159 - 170.
- [16] 唐崇俭. 厌氧氨氧化工艺特性与控制技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
(TANG Chongjian. Characteristics and control strategies of anaerobic ammonium oxidation process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.)
- [17] ZHANG T, WANG Q, YE L, et al. Effect of free nitrous acid pre-treatment on primary sludge biodegradability and its implications [J]. *Chemical engineering journal*, 2016, 290: 31 - 36.
- [18] 李媛. 厌氧氨氧化工艺启动和运行特性及其受抑机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
(LI Yuan. Start-up and performance characteristics of anaerobic ammonium oxidation process and its repressed mechanisms [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.)
- [19] VADIVELU V M, KELLER J, YUAN Z. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched nitrobaeculture [J]. *Water research*, 2007, 41(4): 826 - 834.
- [20] 任玉辉, 王科, 李相昆, 等. 常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(11): 4218 - 4223.
(REN Yuhui, WANG Ke, LI Xiangkun, et al. Influence of alkalinity and DO on anammox bioreactor at normal temperature and low substrate concentration [J]. *Environmental science*, 2014, 35(11): 4218 - 4223.)
- [21] 张黎, 胡筱敏, 姜彬慧. 低基质浓度下 pH 和 DO 对厌氧氨氧化反应效能的影响[J]. *环境工程*, 2015, 33(6): 59 - 62.
(ZHANG Li, HU Xiaomin, JIANG Binhui. Effect of pH and DO on anaerobic ammonium oxidation reaction performance under lower pollutants concentration [J]. *Environmental engineering*, 2015, 33(6): 59 - 62.)
- [22] 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 等. 温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33(4): 1288 - 1292.
(LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yuhui, et al. Effect of temperature on stability of nitrogen removal in the anaerobic ammonium oxidation reactor [J]. *Environmental science*, 2012, 33(4): 1288 - 1292.)
- [23] YANG J C, ZHANG L, HIRA D, et al. Anammox treatment of high-salinity wastewater at ambient temperature [J]. *Bioresource technology*, 2011, 102(3): 2367 - 2372.
- [24] 李亚峰, 张文静, 马晨曦. pH 值和 DO 对厌氧氨氧化脱氮性能的影响[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(4): 715 - 720.
(LI Yafeng, ZHANG Wenjing, MA Chenxi. Effects of alkalinity and dissolved oxygen on anammox at normal low temperature and medium [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2013, 29(4): 715 - 720.)