

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.09.005

# 厌氧氨氧化在液氨丝光高氨氮废水处理中的应用

范俊豪<sup>1,2</sup>, 汪晓军<sup>1,2</sup>, 周松伟<sup>2</sup>, 陈振国<sup>1,2</sup>, 陈永兴<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 环境与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 佛山市化尔铵生物科技有限公司, 广东 佛山 528313)

**摘要:** 以纺织液氨丝光高氨氮废水为处理对象,探究厌氧氨氧化工艺对该废水的脱氮工程化应用情况。通过已挂膜填料和污泥连续投加的接种方式,厌氧氨氧化工程化系统仅耗时10 d便完成了启动;通过游离氨(FA)对亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)的选择性抑制,实现了纺织液氨丝光高氨氮废水的稳定亚硝化,平均亚硝态氮积累率达到93%;根据测算,系统的氨氮去除负荷倍增时间仅为9 d,氨氮去除负荷高达0.942 kg/(m<sup>3</sup>·d);通过核算药耗以及电耗可知,厌氧氨氧化工艺对纺织液氨丝光高氨氮废水的处理费用仅为15.6元/kgNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。

**关键词:** 厌氧氨氧化; 液氨丝光废水; 高浓度氨氮; 工程化应用

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)09-0026-05

## Application of Anaerobic Ammonia Oxidation in Liquid Ammonia Light Wastewater Treatment Project

FAN Jun-hao<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-jun<sup>1,2</sup>, ZHOU Song-wei<sup>2</sup>, CHEN Zhen-guo<sup>1,2</sup>,  
CHEN Yong-xing<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Hua An Biotech Co. Ltd., Foshan 528313, China)

**Abstract:** This paper investigated the performance of anaerobic ammonia oxidation process for treating textile liquid ammonia light wastewater with high ammonia nitrogen in a full-scale project. The full-scale system was started in only 10 days by continuous inoculation of biofilm-coated filler and anaerobic ammonia oxidation sludge. Through selectively inhibiting nitrite oxidizing bacteria (NO<sub>B</sub>) with free ammonia (FA), the stable partial nitrification of textile liquid ammonia light wastewater was achieved, and the average nitrite nitrogen accumulation rate (NAR) was 93%. The doubling time of ammonia nitrogen removal load (ARR) of the system was estimated to be only 9 days, and the maximum ARR was 0.942 kg/(m<sup>3</sup>·d). According to the calculation of chemical and power consumptions, the operational cost of anaerobic ammonia oxidation process for treating textile liquid ammonia light wastewater was only 15.6 yuan/kgNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N.

**Key words:** anaerobic ammonia oxidation; liquid ammonia light wastewater; high-concentration ammonia nitrogen; engineering application

液氨丝光处理是纺织行业的新型技术,其处理 时需要用到液氨,但使用过程中一部分氨无法通过

通信作者: 汪晓军 E-mail: cexjwang@scut.edu.cn

回收系统完全收集。为防止氨氮造成的空气污染,广东某纺织企业采用硫酸吸收未能完全回收的氨,形成一股主要成分为硫酸铵的纺织液氨丝光高氨氮废水(TLALW)。该纺织企业污水厂原采用硝化-反硝化工艺处理TLALW,但该工艺曝气能耗高、碳源投加量大且污泥产量高<sup>[1]</sup>。相比于硝化-反硝化工艺,亚硝化-厌氧氨氧化工艺的耗氧量可减少62.5%,使能耗大大降低,碱度药剂耗量也减少了,且无需外加有机碳源、污泥产量低<sup>[2]</sup>。综合以上分析,对于TLALW而言,最佳的处理工艺为亚硝化-厌氧氨氧化。

### 1 工程项目概况

该纺织企业污水厂的硝化-反硝化池的氨氮去除负荷仅为0.300 kg/(m<sup>3</sup>·d),氨氮平均去除率仅为65%<sup>[3]</sup>。在更高的废水排放标准和生产扩大导致的水量增长压力下,该厂不得不寻求更加高效节能的脱氮技术来处理这股废水。

笔者团队于2019年在该污水厂建立了一套30 m<sup>3</sup>/d的TLALW厌氧氨氧化处理中试系统。经过半年调试,该中试系统在进水氨氮为1 000~5 000 mg/L时,氨氮去除负荷(ARR)最高达到2.220 kg/(m<sup>3</sup>·d),处理出水水质稳定,氨氮和总氮平均去除率分别为89%和82%。

在该中试项目成功实施,且处理效果达到预期的基础上,笔者团队与该纺织企业进一步合作,于2021年3月正式启动厌氧氨氧化工艺处理纺织液氨丝光高氨氮废水的工程项目。

#### 1.1 设计水质

该工程设计处理量为400 kgNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/d,池体体积为500 m<sup>3</sup>,设计氨氮去除负荷为0.800 kg/(m<sup>3</sup>·d),设计进水pH为8.0~9.5、氨氮为1 000~5 000 mg/L、总氮为1 000~5 000 mg/L,设计出水pH为6.0~9.0、氨氮为0~300 mg/L、总氮为0~500 mg/L。

#### 1.2 工艺流程

工艺流程如图1所示。TLALW经电磁流量计计量后送入预亚硝化池,利用FA抑制亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)首先实现部分亚硝化,再流入厌氧氨氧化池完成后续的厌氧氨氧化反应,最终实现对TLALW的脱氮处理。本厌氧氨氧化工程化系统在厌氧氨氧化池前端设置预亚硝化池,预先高效地将部分氨氮转化为亚硝态氮,以满足后续厌氧氨氧化

的基质稳定供应要求;而且分两步投加碱度(分别在预亚硝化池和厌氧氨氧化池投加),以避免厌氧氨氧化池内pH过高(厌氧氨氧化污泥最适pH为7.5~8.3)而对厌氧氨氧化污泥产生抑制作用<sup>[4]</sup>。

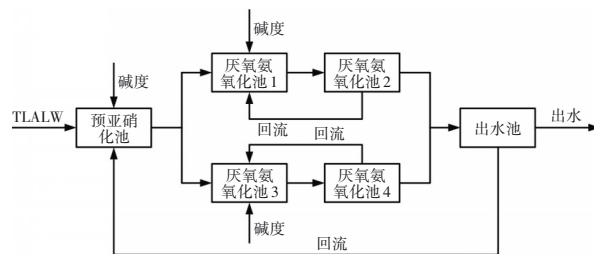


图1 工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process

### 1.3 分析项目与方法

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:纳氏试剂分光光度法;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N:N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:紫外分光光度法;TN:紫外分光光度法;pH:PH-200RS型酸度计。氨氮和总氮去除率、氨氮去除负荷、亚硝态氮积累率、游离氨(FA)等指标的计算参考文献[5]中的方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 启动阶段

本系统启动的关键在于厌氧氨氧化池的启动,其采用的接种方式如下:①将部分中试系统中已富集厌氧氨氧化菌的填料加入池内;②将中试系统中携带厌氧氨氧化剩余污泥的出水泵入池内。接种污泥后通过间歇进水和间歇曝气的方式进行反应池的启动,具体效果如图2所示。

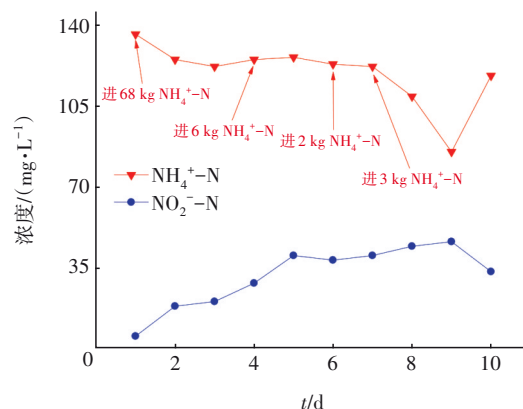


图2 启动阶段系统内主要污染物的浓度变化

Fig.2 Change of main pollutants concentration in system during start-up stage

在第1~5天,池内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐渐降低,而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度逐渐升高,表明系统内的氨氧化菌(AOB)开始进行亚硝化反应;第6天后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的降低速度加快,而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度的升高速度放缓,表明厌氧氨氧化菌(AnAOB)开始进行厌氧氨氧化反应;第10天时系统已经能够以400 L/h的流量开始连续进水,且亚硝化和厌氧氨氧化反应均能进行,即认为系统启动成功。

## 2.2 负荷提升阶段

### 2.2.1 亚硝化

在本工程中,预亚硝化池的亚硝化效果见图3。

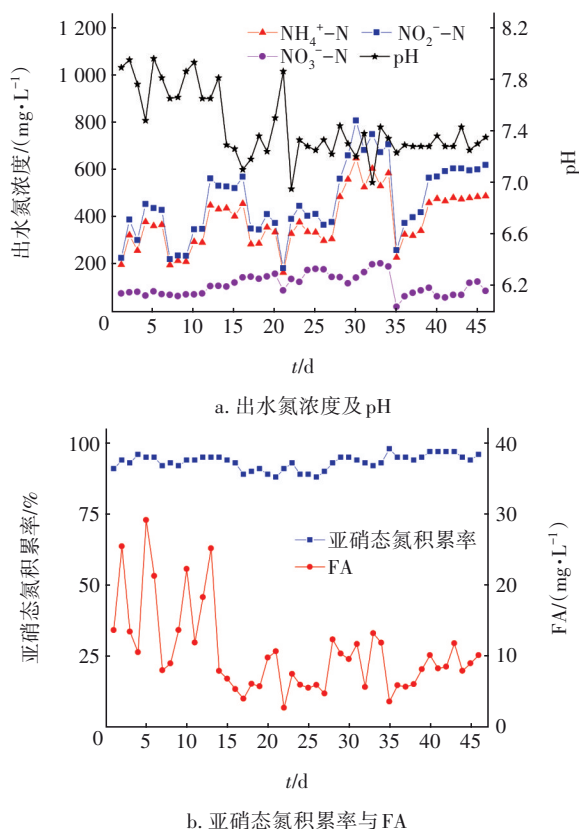


图3 预亚硝化池的亚硝化效果

Fig.3 Nitrification effect of pre-nitrification tank

厌氧氨氧化的前提条件之一是废水中含有合适比例的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,因此,预先实现废水的部分亚硝化尤为重要<sup>[6]</sup>。实现废水稳定亚硝化的关键在于AOB的富集以及NOB的持续抑制或淘汰。通常选择调控和优化以下工作参数:温度、水力停留时间(HRT)、污泥龄、溶解氧(DO)、pH、FA等,以实现NOB的淘洗或抑制<sup>[7]</sup>。而对于高氨氮废水,常用的手段为通过FA对NOB的选择性抑制来实现稳定亚硝化<sup>[8-9]</sup>。由图3可知,在负荷提升阶段,预

亚硝化池内的FA维持在2~30 mg/L,平均亚硝态氮积累率为93%,表明系统在控制合适FA的基础上,实现了对NOB的选择性抑制,最终达到了稳定亚硝化的目的。

### 2.2.2 厌氧氨氧化

工程处理系统的氮负荷和脱氮效果如图4所示。可知,仅运行了46 d系统的氨氮去除负荷即从0.027 kg/(m<sup>3</sup>·d)提升至0.942 kg/(m<sup>3</sup>·d),系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN平均浓度分别为135和276 mg/L,氨氮和总氮平均去除率分别达到了96%和91%。

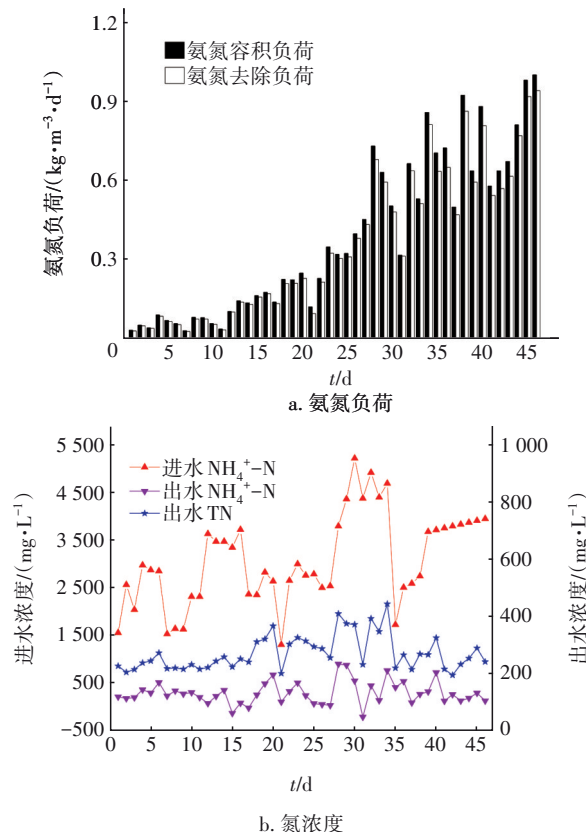


图4 负荷提升阶段的氮负荷与脱氮效果

Fig.4 Nitrogen load and nitrogen removal effect during load lifting stage

在负荷提升阶段,中试系统出水仍泵入系统中以加速微生物的增殖。该阶段系统的氨氮去除负荷倍增周期仅为9 d,与安娜等<sup>[10]</sup>报道的厌氧氨氧化菌理论倍增周期(11 d)相近。此阶段进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在1 308~5 237 mg/L之间大幅度波动,人工调整氨氮容积负荷具有一定的滞后性,当出现较大的氨氮容积负荷波动时系统脱氮性能会略有下降,恢复稳定后系统的氨氮去除负荷能够继续稳定提高。即使氨氮容积负荷波动较大,整个系统的氨氮和总

氮平均去除率依然分别保持在91%~99%和85%~95%,并没有出现程军等<sup>[11]</sup>报道的进水氨氮浓度降低导致总氮去除率和去除负荷大幅降低,以及李媛<sup>[12]</sup>报道的进水氨氮浓度升高导致FA过高而对系统产生抑制的情况,这表明本系统具有较强的抗冲击能力。

### 2.3 稳定运行阶段

在吸取了进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度波动较大的调控经验后,为系统增加了一套基于氨氮容积负荷的进水自控系统和基于pH的碱度自动投加系统,以实现根据进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度自动调节进水流量和投加碱度。稳定运行阶段系统的氨氮容积负荷和pH分别设置为 $0.880\text{ kgN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 和 $7.50\sim 7.60$ ,取其中30 d的运行数据进行分析,结果如图5所示。

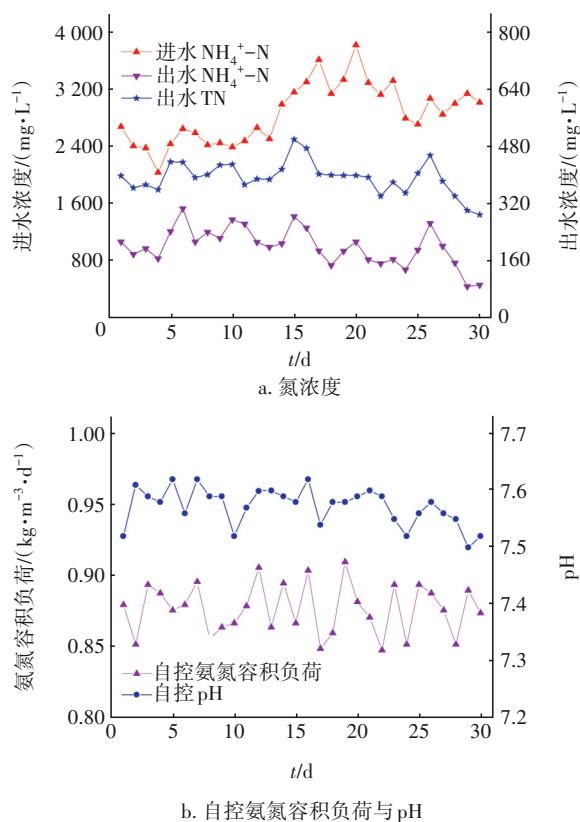


图5 稳定运行阶段系统的脱氮效果与自控效果

Fig.5 Nitrogen removal effect and automatic control effect of system during stable operation stage

从图5(a)可以看出,当进水氨氮浓度为 $2\ 028\sim 3\ 811\text{ mg/L}$ 时,系统出水氨氮和总氮浓度分别为 $86\sim 298$ 、 $299\sim 434\text{ mg/L}$ ,氨氮和总氮去除率分别为88%~97%和84%~90%,均达到了设计出水水质要求。由此可见,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度波动并未对系统运行性能

产生影响,这体现了预亚硝化-厌氧氨氧化工程化系统处理TLALW的稳定性与可靠性。此外,相比于该污水厂改造前的氨氮容积负荷 $[0.462\text{ kgN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})]$ <sup>[3]</sup>,本系统在氨氮容积负荷为 $0.880\text{ kgN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 的条件下稳定运行,这表明预亚硝化-厌氧氨氧化工艺能够高效稳定处理TLALW。

在自控系统控制下系统的运行效果如图5(b)所示。在30 d的运行时间内,自控系统控制下的实际氨氮容积负荷与目标氨氮容积负荷之间的平均误差小于1%,表明对于TLALW这类氨氮浓度波动较大的废水,采用自控进水系统有助于维持系统氨氮容积负荷的稳定,有效降低了进水氨氮波动对系统的冲击。系统内pH在 $7.50\sim 7.65$ 之间波动(预设值为 $7.50\sim 7.60$ ),通过自控系统来投加碱度既有利于维持系统的稳定,又能降低控制池内pH所需的人力成本。

### 2.4 成本核算

系统的处理费用主要为化学药剂费和电费,其中化学药剂耗料主要为碳酸氢钠。取稳定运行的某个月份(30 d)进行成本核算:碳酸氢钠的使用量为 $74.89\text{ t}$ ,其单价按 $2\ 500\text{ 元/t}$ 计,则费用为 $187\ 225\text{ 元}$ ;耗电量为 $22\ 471.03\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,电价按 $0.665\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计,则费用为 $14\ 943.2\text{ 元}$ ;以上两项费用合计 $202\ 168.2\text{ 元}$ ,系统对TLALW中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的实际处理量为 $12\ 944\text{ kg}$ ,则系统处理TLALW的费用为 $15.6\text{ 元}/\text{kgNH}_4^+\text{-N}$ ,相比于原硝化-反硝化工艺(成本为 $40.5\text{ 元}/\text{kgNH}_4^+\text{-N}$ )节省了61%的成本,不仅为该纺织企业节省了大量处理成本,还大大降低了二氧化碳排放量和能源消耗,具有节能减排的经济效益和良好的社会效益。

### 3 结论

① 通过采用投加中试系统中已富集厌氧氨氧化菌的填料以及携带厌氧氨氧化剩余污泥的出水等措施,可实现预亚硝化-厌氧氨氧化工程化系统的快速启动。

② 通过FA对NOB的选择性抑制可以实现对TLALW的稳定亚硝化,平均亚硝态氮积累率可以达到93%。

③ 亚硝化-厌氧氨氧化工程化系统实现了倍增周期仅为9 d的负荷快速增长阶段,最高氨氮去除负荷可达到 $0.942\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

④ 本方法适用于纺织液氨丝光高氨氮废水的高效低碳脱氮,处理费用仅为15.6元/kgNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG F Z, PENG Y Z, MIAO L, *et al.* A novel simultaneous partial nitrification Anammox and denitrification (SNAD) with intermittent aeration for cost-effective nitrogen removal from mature landfill leachate [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313: 619-628.
- [2] 王亚宜, 黎立, 马骁, 等. 厌氧氨氧化菌的生物特性及CANON厌氧氨氧化工艺[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(6): 1362-1374.  
WANG Yayi, LI Li, MA Xiao, *et al.* Bio-characteristics of anammox bacteria and CANON anammox process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6): 1362-1374 (in Chinese).
- [3] 陈浩, 杜希, 邱孝群, 等. 液氨丝光废水控制技改工程实例[J]. *环境科技*, 2017, 30(5): 41-44.  
CHEN Hao, DU Xi, QIU Xiaoqun, *et al.* Control example of liquid ammonia light wastewater [J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 30(5): 41-44 (in Chinese).
- [4] 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 (in Chinese).
- [5] CHEN X Z, WANG X J, CHEN X K, *et al.* Salt inhibition on partial nitrification performance of ammonium-rich saline wastewater in the zeolite biological aerated filter [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 280: 287-294.
- [6] WANG Z, PENG Y Z, MIAO L, *et al.* Continuous-flow combined process of nitrification and ANAMMOX for treatment of landfill leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214: 514-519.
- [7] 付昆明, 廖敏辉, 任奕, 等. 污水短程硝化影响因素的对比分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 24-29.
- [8] FU Kunming, LIAO Minhui, REN Yi, *et al.* Comparative analysis of factors influencing short-cut nitrification in wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 24-29 (in Chinese).
- [9] DING S Z, BAO P, WANG B, *et al.* Long-term stable simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process treating real domestic sewage using suspended activated sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 339: 180-188.
- [10] WEI D, NGO H H, GUO W S, *et al.* Partial nitrification granular sludge reactor as a pretreatment for anaerobic ammonium oxidation (Anammox): achievement, performance and microbial community [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 269: 25-31.
- [11] 安娜, 马晨曦. 厌氧氨氧化菌的特性及富集培养方法的研究进展[J]. *辽宁化工*, 2014, 43(6): 727-730.  
AN Na, MA Chenxi. Research progress in Anammox bacteria enrichment and culture methods [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2014, 43(6): 727-730 (in Chinese).
- [12] 程军, 张亮, 张树军, 等. 氨氮负荷波动对城市污水短程硝化-厌氧氨氧化工艺硝态氮的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(2): 520-525.  
CHENG Jun, ZHANG Liang, ZHANG Shujun, *et al.* The effects of ammonium loading rate fluctuation on nitrate accumulation in municipal wastewater partial nitrification/anammox (PN/A) process [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(2): 520-525 (in Chinese).
- [13] 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: 7-8.
- [14] LI Yuan. Start-up and Performance Characteristics of Anaerobic Ammonium Oxidation Process and Its Repressed Mechanisms [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 7-8 (in Chinese).

作者简介: 范俊豪(1999-), 男, 广东梅州人, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物脱氮技术。

E-mail: 1442043943@qq.com

收稿日期: 2022-01-10

修回日期: 2022-04-25

(编辑: 刘贵春)