

NAUTOTM 自养脱氮工艺接种启动及稳定运行控制

管勇杰, 吴迪, 周家中, 韩文杰, 孙庆花

(青岛思普润水处理股份有限公司 生物膜研究院, 山东 青岛 266555)

摘要: 基于 MBBR 开发了一种新型全程自养脱氮工艺——NAUTOTM, 采用其处理污泥厌氧消化脱水液, 考察了启动和稳定运行效果。通过接种 CANON 悬浮载体来缩短 NAUTOTM 工艺的启动时间。在接种率为 10% 的情况下, 运行 84 d 后对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率即可达 83.40%, 总氮去除负荷超过 $0.90 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。系统稳定运行超过 300 d, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度低于 30 mg/L , 氨氮和 TN 去除率分别达到 95.06% 和 89.71%, TN 去除负荷最高可达 $1.21 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。对悬浮载体的高通量测序结果显示, NAUTOTM 工艺启动成功后, 氨氧化菌 (AOB) 和厌氧氨氧化菌 (AnAOB) 都是系统中的优势菌种, 稳定运行阶段丰度分别达到 16.80% 和 23.17%, 而主要干扰菌群亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 和反硝化菌 (DNB) 被成功抑制, 反硝化菌丰度仅为 3.66%, 几乎未检测出 NOB。NAUTOTM 工艺启动时间短、运行负荷高、运行控制稳定, 适合于自养脱氮的工程应用。

关键词: 悬浮载体; NAUTOTM; 快速启动; 稳定运行; 自养脱氮; 厌氧氨氧化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)07-0027-06

Start-up by Inoculation and Stable Operation Control of NAUTOTM Autotrophic Denitrification Process

GUAN Yong-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, HAN Wen-jie, SUN Qing-hua

(Research Institute of Biofilm, Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: Based on MBBR process, a new type of autotrophic denitrification process—NAUTOTM was developed. The start-up and stable operation of NAUTOTM used for the treatment of reject water was introduced. The start-up time of NAUTOTM process was shortened by inoculating CANON suspension carrier. The removal rate of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ reached to 83.40% and the TN removal load exceeded $0.90 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ within 84 days after inoculated with only 10% seeding carriers. More than 300 days of stable operation, the concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in effluent was below 30 mg/L , the removal rates of ammonia nitrogen and TN were 95.06% and 89.71%, respectively, and the maximum removal load of TN was $1.21 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. The result of high-throughput sequencing showed that after the successful start-up of NAUTOTM process, ammonia oxidizing bacteria (AOB) and anaerobic ammonia oxidizing bacteria (AnAOB) became the dominant bacterium in the system, and the abundance reached to 16.80% and 23.17% respectively in the stable operation stage. While the main interfering bacterium, nitrite oxidizing bacteria (NOB) and denitrification bacteria (DNB), were successfully inhibited. The abundance of

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106005-04); 青岛市民生科技计划项目(18-6-1-100-nsh)

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

denitrification bacteria was only 3.66%, and almost no NOB was detected. NAUTO™ process has the advantages of short start-up time, high nitrogen removal load and stable operation control, which is suitable for the engineering application.

Key words: suspended carrier; NAUTO™; quick start-up; stable operation; autotrophic denitrification; ANAMMOX

全程自养脱氮(CANON)是指在单个反应器内,利用氨氧化菌(AOB)和厌氧氨氧化菌(AnAOB)的协同作用,通过自养途径脱氮,不消耗有机碳源。目前CANON工艺已经成功应用于高氨氮废水的处理,如电子工业废水^[1]、污泥消化液^[2]和养殖废水^[3]等。截止到2014年,已报道的采用全程自养脱氮工艺的污水处理厂超过了100座^[4],而国内成功启动的工程案例较少。在该工艺应用早期,一般接种普通活性污泥,导致厌氧氨氧化(ANAMMOX)过程启动缓慢。如荷兰鹿特丹DokHaven污水厂的ANAMMOX反应器启动时间长达3.5年^[5],奥地利Strass污水厂的DEMON工艺启动时间为0.5年^[6],北京高碑店污水处理厂厌氧氨氧化中试启动时间为0.5~1年^[7]。所以影响自养脱氮工程广泛应用的瓶颈仍是启动时间过长问题。此外,为抑制系统内硝化细菌(NO_B)的增长,多采用低溶解氧运行,因此负荷较低、系统污泥难持留,需定期补充厌氧氨氧化污泥等问题也影响了该工艺的长期稳定运行。移动床生物膜工艺(MBBR)典型的生物膜分层分布特点,能够有效富集AOB和AnAOB,克服了活性污泥法污泥易流失、系统受冲击易崩溃的问题^[8],是自养脱氮工艺的理想工艺形式之一。笔者采用基于MBBR的CANON工艺处理污水厂污泥消化上清液,旨在为相关技术的工程化应用提供参考。

1 NAUTO™工艺

NAUTO™,即基于MBBR的CANON工艺,在单一反应器内采用纯膜MBBR工艺,使得AOB与AnAOB在悬浮载体上富集。在控制搅拌和曝气条件下,悬浮载体上形成适宜厚度的生物膜,外部好氧、内部缺氧,分别为AOB和AnAOB的生长富集创造良好条件,能够使生物膜内同时发生亚硝化和厌氧氨氧化反应。所用悬浮载体为SPR-Ⅲ型,直径为(25±0.5)mm,高为(10±1)mm,挂膜后密度与水接近,有效比表面积>800m²/m³,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体》(CJ/T 461—2014)行业标准。

2 材料和方法

2.1 试验装置和种源

NAUTO™反应器整体采用不锈钢制作,外部设保温层,总容积为24m³,有效容积为22m³,尺寸为2.0m×3.0m×4.0m,反应器配备了曝气和搅拌系统、温控系统和在线监测系统。试验采用接种启动的方法,反应器内悬浮载体填充率为40%,种源为CANON悬浮载体,占总量的10%,总氮去除容积负荷为0.60kg/(m³·d);其他接种悬浮载体已经过硝化培养,氨氧化负荷为0.65kg/(m³·d),亚硝酸盐积累率>98.50%。

2.2 试验水质

系统进水采用某污水厂厌氧消化后剩余污泥经离心脱水后的脱水液(以下简称消化液),具体水质见表1。消化液有机氮含量较低,故以总无机氮代替总氮。试验过程中未添加任何营养物质,进水BOD₅/COD<0.4,进水碱度/TN>4.5。

表1 消化液水质

Tab. 1 Reject water quality mg·L⁻¹

项目	NH ₄ ⁺ -N	COD	BOD ₅	SS	TN
数值	340~540	100~650	100~180	50~100	360~550

2.3 常规指标分析方法

NH₄⁺-N:纳氏试剂分光光度法;NO₂⁻-N:N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;NO₃⁻-N:紫外分光光度法;碱度:酸碱指示剂滴定法;COD:重铬酸钾法;pH值/DO/ORP/温度:WTW Multi3430离线测定和E+H CM448在线测定;BOD₅:标准稀释法。

2.4 高通量测序

高通量测序通过试剂盒提取微生物基因组DNA,通过1%琼脂糖凝胶电泳检测抽提基因组的完整性,利用Qubit 3.0 DNA试剂盒检测基因组DNA浓度。PCR扩增所用引物为341F/805R。PCR反应体系包括DNA模板(10ng),15μL 2×EasyPfu SuperMix,1μL引物341F(10μmol/L),1μL引物805R(10μmol/L),添加超纯水至30μL。共进行两轮PCR扩增。第一轮PCR扩增程序如下:94℃预

变性 3 min;5 个循环包含 3 个阶段,即 94、45 和 65 °C 下分别保持 30、20、30 s;20 个循环包含 3 个阶段,即 94、55 和 72 °C 下分别保持 20、20、30 s;72 °C 终延伸 5 min。第二轮 PCR 扩增程序如下:95 °C 预变性 3 min;5 个循环包含 3 个阶段,即 94、55 和 72 °C 下分别保持 20、20、30 s;72 °C 终延伸 5 min。PCR 产物进行琼脂糖电泳,通过 DNA 胶回收试剂盒 (SanPrep) 对 PCR 产物进行回收,利用 Qubit 3.0 DNA 检测试剂盒对回收的 DNA 进行精确定量,每个样品 DNA 量取 10 ng,最终上机测序浓度为 20 pmol/L,通过 Illumina MiSeq 平台完成高通量测序。

采用 Usearch10 进行质控和 OTU 聚类^[9]。对高通量测序所得序列进行质控(QC),以去除不符合要求的引物序列、短片段及低质量序列。将所得序列进行相似性分析,并划分操作分类单元(OTU,相似性大于 0.97)。

2.5 研究阶段划分

根据控制手段、出水标准将研究划分为 3 个阶段(如表 2 所示),分别为:适应期(I)、负荷提升期(II)、稳定运行期(III)。整个过程纯膜系统运行,MLSS < 0.3 g/L,反应器内温度在 30 ~ 35 °C。采用逐步增大进水流量的方式提高进水负荷。随着总氮去除负荷的提升,悬浮载体生物量增多,通过控制曝气强度和搅拌转速强化悬浮载体流化,防止因生物膜过厚而堵塞悬浮载体。

表 2 各阶段运行参数

Tab. 2 Operating parameters at each phase

项 目	时间/d	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	进水氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	DO/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
阶段 I	1 ~ 10	0.35	340 ~ 461	1 ~ 1.5
阶段 II	11 ~ 84	0.35 ~ 2.5	437 ~ 518	2 ~ 3
阶段 III	85 ~ 418	2.5	439 ~ 540	3 ~ 4

3 结果与讨论

3.1 NAUTO™工艺的脱氮特性分析

系统运行分为适应期、负荷提升期、稳定运行期 3 个阶段,共运行近 420 d,处理效果及负荷如图 1 和图 2 所示。在阶段 I,为使 CANON 悬浮载体适应新环境,采用低曝气强度的方式运行。因接种的悬浮载体具有较高的总氮去除负荷,因此系统一开始便表现出良好的脱氮效果,TN 去除容积负荷(ARL_V)达到 0.11 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),TN 去除率(NRE)为 54.58%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率(AOE)达到 65.79%,

出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均值分别为 7.25 和 27.95 mg/L。阶段 II,不断提升进水流量,至第 84 天时,TN 去除容积负荷 > 0.90 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),TN 和氨氮去除率分别为 76.67% 和 83.40%,出水亚硝态氮浓度始终低于 6.34 mg/L,系统进入稳定运行期。

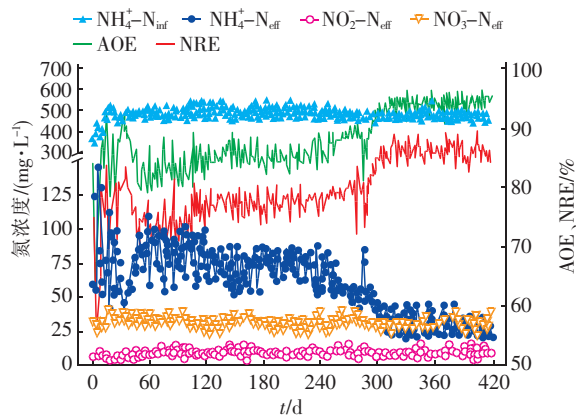


图 1 系统内进出水氮浓度变化

Fig. 1 Nitrogen concentration of influent and effluent

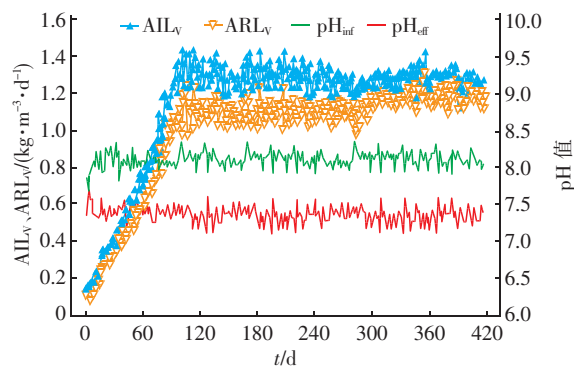


图 2 系统总氮去除负荷和 pH 值变化

Fig. 2 Total nitrogen removal load and pH change in the system

稳定运行期主要考察系统脱氮稳定性以及相关出水水质情况。整个稳定运行期共进行 334 d,期间进水氨氮容积负荷(AIL_V)维持在 1.13 ~ 1.42 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),总氮去除容积负荷 > 1.00 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)。出水氨氮浓度逐步由 100 mg/L 降低至 30 mg/L 以下,最终出水 TN 能够稳定在 70 mg/L 以下,系统对氨氮和 TN 的去除率分别达到 95.06% 和 89.71%,TN 去除负荷最高可达 1.21 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),处理效果高效稳定。

对比国外 CANON 工艺的工程应用^[10](见表 3),最大总氮去除负荷大多小于 1.2 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),而本研究已经达到 1.21 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$),并且,基于

MBBR 的 NAUTO™ 工艺通过进一步增大填充率,可使 TN 容积负荷高达 $1.60 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,对国内自养脱氮工程化应用意义重大。

表3 CANON 工艺的工程应用

Tab.3 Engineering application of CANON process

反应器类型	位置	容积/ m^3	最大容积负荷/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)
气升式反应床	荷兰 Olburgen	600	1.2
SBR	奥地利 Strass	500	0.7
MBR	德国 Ruhrgebiet	660	0.4
SBR	瑞士 Glarnerland	400	0.6
移动床	德国 Hattingen	102	1.0
生物转盘	德国 Mechernich	80	0.6

AOB 及 AnAOB 是承载 NAUTO™ 工艺总氮去除的关键,因此,平衡 AOB 和 AnAOB 活性和数量将影响到整个工艺的稳定性。由于 AOB 和 AnAOB 均为自养菌,而系统的 pH 值会影响 HCO_3^- 和 CO_2 之间转化的平衡关系,从而影响氨氧化菌和厌氧氨氧化菌对无机碳源的利用。同时,所处理的消化液碱度(以 CaCO_3 计)和硬度较高,分别达到 $2\,300 \text{ mg/L}$ 和 0.01 mol/L 。pH 值过高可促进碳酸根的转化,从而容易形成碳酸盐沉淀^[11],附着在悬浮载体的表面后将影响流化效果和基质的传递,进而造成脱氮效果下降。因此,系统 pH 值不宜超过 8.0。如图 2 所示,系统进水 pH 值维持在 8.2 左右,出水 pH 值保持在 7.3~7.6 之间,有效防止了悬浮载体结垢,是保证系统长时间稳定运行的关键。

保证适合的曝气强度供给,是维持生物膜厚度和富集功能种群的关键。曝气强度过小则悬浮载体流化不充分,曝气强度过大则会使生物膜脱落,都会造成脱氮效果降低。运行初期,为了防止生物膜脱落,曝气强度较低,只有 $1.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,随着总氮去除负荷的增加,悬浮载体生物量增多,为避免生物膜过厚,逐步将曝气强度提升至 $6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,以强化悬浮载体的流化过程。并且,系统内通过设置微孔曝气和穿孔曝气,实现了同一 DO 下的不同曝气强度控制,确保了总氮去除负荷的平稳提升。

3.2 CANON 系数分析

在试验过程中系统的 CANON 特征系数 $R_{\text{Na/A}}$ ($\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 均值为 0.07,小于 0.11 的理论值; $R_{\text{TN/Na}}$ ($\Delta\text{TN}/\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$) 均值为 11.36,大于 8 这一理论值(见图 3)。说明反应器中同时存在反硝化(DN)过程。为了便于反硝化过程分析,假设系

统内亚硝态氮是由硝化过程产生,其余氨氮氧化由 ANAMMOX 路径去除。根据化学计量关系得到反硝化作用对系统去除 TN 的贡献率为 5.11%~7.32%,而厌氧氨氧化对去除 TN 的贡献率则为 92.68%~94.89%。适宜的反硝化作用可以将厌氧氨氧化产生的 NO_3^- 还原为 N_2 ,提高系统的 TN 去除率,对降低出水 TN 浓度具有重要的意义。

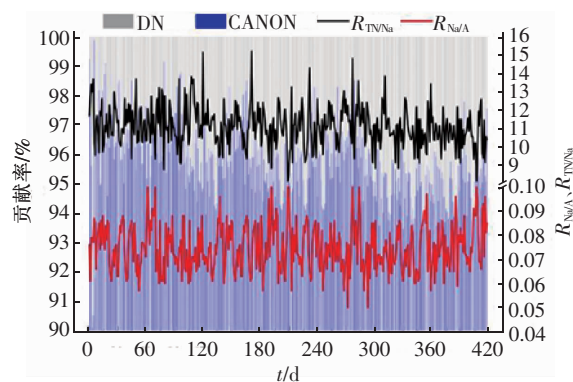


图3 CANON 和 DN 对去除 TN 的贡献率及特征系数

Fig.3 Removal contribution rate of CANON and DN process for TN and characteristic coefficient

3.3 悬浮载体生物膜变化

运行过程中,分别在 1、50、100、200、300 d 取样进行测定,结果见图 4。

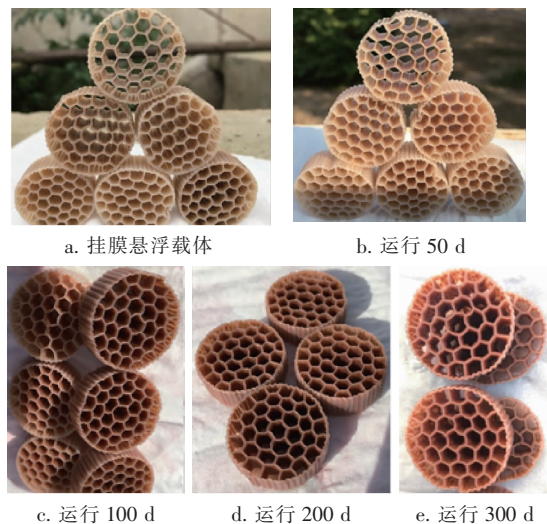


图4 悬浮载体生物膜变化

Fig.4 Biofilm changes on suspended carriers with time

从外观上看,启动初期悬浮载体上生物膜覆盖不均匀,呈浅黄色,可观察到悬浮载体本身的白色;随着时间的增长,悬浮载体表面的生物膜逐渐增多,颜色开始逐渐加深变红,已有 AnAOB 附着;运行至

100 d 悬浮载体所覆的生物膜已经非常明显,呈淡红色;运行至 200 d 生物膜厚度已达 200 μm ,呈暗红色;运行至 300 d,悬浮载体上可观察到明显的红色颗粒。

高通量测序结果显示,从属水平看,在整个运行阶段氨氧化菌 *Nitrosomonas* 和厌氧氨氧化菌 *Candidatus Kuenenia* 一直为系统优势菌属(见图 5),其中,*Nitrosomonas* 作为水生态系统中常见的氨氧化菌,由于对不同水质的广泛适应性而更适合于在 CANON 反应器中生长,郑雪松等人^[12]研究发现 *Nitrosomonas* 属的 AOB 具有一定的高氨氮耐受能力,这为 CANON 反应器受到高氨氮冲击时仍能维持稳定的处理负荷奠定了基础。*Candidatus Kuenenia* 是一种广泛存在于淡水环境中的厌氧氨氧化菌,发现于生物滤池,该菌属由于对不同环境具有较强适应性而广泛存在于厌氧氨氧化反应器中。由于本反应器进水为污泥消化液,通常都含有一定的重金属离子,因此说明此菌属 AnAOB 可能具有一定的重金属耐受性。王敬平^[13]在利用 UASB 反应器处理 Cd^{2+} 及 Cd^{6+} 含量较高的垃圾渗滤液过程中发现的优势 AnAOB 也含有 *Candidatus Kuenenia*,进一步验证了该菌属所具有的重金属耐受性。另外, Yang 等^[14]在室温下运行的 CANON 反应器中发现的优势 AnAOB 也为 *Candidatus Kuenenia*,说明此种属的厌氧氨氧化菌可能对低温环境具有一定的倾向性,但这仍需进一步的研究。

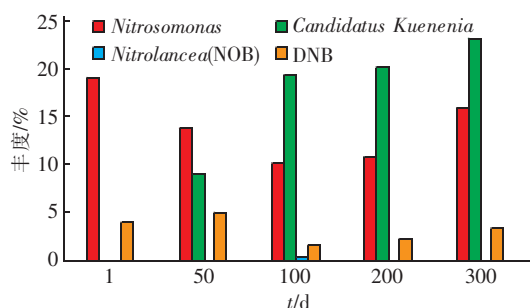


图 5 微生物丰度

Fig. 5 Microbial percentage on suspended carriers

接种启动的第 1 天,悬浮载体上含有大量 AOB,丰度达到 19.00%,是主要的优势菌种;经过 50 d 的培养,系统中 AnAOB 开始积累,AOB 和 AnAOB 共同成为生物膜中的优势菌种,丰度分别为 13.80% 和 9.10%;经过 100 d 的运行,总氮去除负荷已达到 1.05 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,AnAOB 的丰度已达到

19.30%,但 AOB 的丰度降低至 10.10%;稳定运行阶段的第 200 天和第 300 天,AOB 和 AnAOB 始终保持较高的丰度,分别为 10.20%、16.80% 和 20.12%、23.17%。

随着系统运行时间的增加总氮去除负荷稳步提升,悬浮载体生物膜开始逐步变红,AnAOB 丰度逐步增加后趋于稳定,而 AOB 丰度波动较大,在负荷提升期出现了一定程度的降低,而在稳定运行期间又逐步恢复。原因可能是在负荷提升期 AnAOB 数量增加且粘附性高于 AOB,AOB 在悬浮载体生态位的挤占上处于劣势。在稳定运行期控制负荷的进一步提升,导致 AnAOB 的亚硝态氮基质不足,同时提高曝气强度及 DO,AnAOB 丰度趋于稳定而 AOB 丰度逐渐升高。

在生物膜微生物群落的变化中,始终存在一定量的反硝化菌,丰度在 1.56% ~ 5.20%,稳定运行阶段保持在 3.66% 左右。由于污水中存在一定浓度的有机物,且水中又有亚硝态氮以及硝态氮,所以易驯化出反硝化菌,这与宏观检测数据一致。但是有机物的浓度较低,整体上限制了反硝化菌的繁殖,生物膜中几乎未检出 NOB,系统短程硝化控制效果较好。

4 结论

① 采用 10% 的接种率,经过 84 d 后成功启动 NAUTO™工艺,总氮去除容积负荷达到 0.90 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,氨氮去除率为 83.40%;稳定运行期间,系统出水氨氮 < 30 mg/L ,TN < 70 mg/L ,对氨氮和总氮的最大去除率分别为 95.06% 和 89.71%。

② 通过控制 pH 值和曝气强度,有效防止了悬浮载体结垢和生物膜过厚,保证了系统在高负荷下长期稳定运行。

③ 在稳定运行阶段,悬浮载体上 AOB 和 AnAOB 的丰度分别可达 16.80% 和 23.17%,系统内几乎不存在 NOB,反硝化菌丰度在 1.56% ~ 5.20%,系统表现出稳定高效的脱氮效果。

④ 采用 NAUTO™,通过接种启动法,启动时间短,总氮去除容积负荷高,运行控制简便,适用于相关工艺的启动和运行。

参考文献:

- [1] Daverey A, Su S H, Huang Y T, et al. Partial nitrification and anammox process: a method for high strength

- optoelectronic industrial wastewater treatment[J]. *Water Res*, 2013, 47(9): 2929 – 2937.
- [2] Cho S, Fujii N, Lee T, *et al.* Development of a simultaneous partial nitrification and anaerobic ammonia oxidation process in a single reactor [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(2): 652 – 659.
- [3] 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]. *Biochem Eng J*, 2012, 65: 23 – 29.
- [4] Susanne L, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences—An application survey[J]. *Water Res*, 2014, 55(10): 292 – 303.
- [5] 王元月, 魏源送, 张树军. 厌氧氨氧化技术处理高浓度氨氮工业废水的可行性分析[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(9): 2359 – 2368.
- Wang Yuanyue, Wei Yuansong, Zhang Shujun. Feasibility analysis of anammox for treating high strength ammonia industrial wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(9): 2359 – 2368 (in Chinese).
- [6] Picioreanu C, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Modelling the effect of oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 36(1): 147 – 156.
- [7] 张亮. 高氨氮污泥消化液生物脱氮工艺与优化控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Zhang Liang. Development and Optimization of the Nitrogen Removal of High Ammonium Sludge Dewatering Water[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [8] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration[J]. *Water Res*, 2003, 37(6): 1371 – 1377.
- [9] Edgar R C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST[J]. *Bioinformatics*, 2010, 26(19): 2460 – 2461.
- [10] 陈重军, 王建芳, 张海芹, 等. 厌氧氨氧化污水处理工艺及其实际应用研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 521 – 527.
- Chen Chongjun, Wang Jianfang, Zhang Haiqin, *et al.* Research progress in anammox wastewater treatment system and its actual application [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3): 521 – 527 (in Chinese).
- [11] 付昆明, 王会芳, 左早荣, 等. 生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2926 – 2933.
- Fu Kunming, Wang Huifang, Zuo Zaorong, *et al.* Analysis of precipitation formation in biofilm CANON reactor and its effect on nitrogen removal [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2926 – 2933 (in Chinese).
- [12] 郑雪松, 龚钢明. 全程自养脱氮系统中氨氧化菌关键种群的变迁[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(11): 9 – 12.
- Zheng Xuesong, Gong Gangming. Changing of dominant species in ammonia-oxidizing population for deammonification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(11): 9 – 12 (in Chinese).
- [13] 王敬平. 厌氧氨氧化反应器微生物群落多样性分析及 Cd^{2+} 、 Cd^{6+} 对其脱氮性能的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- Wang Jingping. Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor and Effect of Cd^{2+} , Cd^{6+} on Its Performance[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [14] Yang Y, Zhang L, Han X, *et al.* Determine the operational boundary of a pilot-scale single-stage partial nitrification/anammox system with granular sludge [J]. *Water Sci Technol*, 2016, 73(9): 2085 – 2090.



作者简介: 管勇杰(1987 –), 男, 山西朔州人, 硕士, 主要研究方向为污水生物脱氮技术。

E-mail: 18562803126@163.com

收稿日期: 2018 – 12 – 27