

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201706066

AUSB 中置曝气启动连续流全程自养脱氮工艺

张 杰^{1,2}, 成 朔¹, 李 冬¹, 吕育锋¹, 曹瑞华¹, 王艳菊¹

(1.水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室(北京工业大学),北京 100124;

2.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090)

摘 要: 为优化连续流全程自养脱氮工艺的启动,在常温((25±1)℃)下,于中置、底部曝气的两组 AUSB(1#、2#)中比较连续流 CANON 工艺的启动过程,及不同氮负荷(NLR, R_{NL})下脱氮性能的差异.结果表明:1#、2#分别于第 55 天、70 天成功启动低氨氮(90 mg/L)CANON 工艺;在逐步提高 NLR 进程中,二者均在 HRT=6 h 工况下脱氮负荷(NRR, R_{NR})达到该阶段最高水平,分别为 0.280、0.256 kg/(m³·d);实验后期,1#保持高效的脱氮状态,特征值($\Delta\rho(\text{TN})/\Delta\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$)稳定在 7.83,而 2#运行 125 d 后特征值降至 7.49,NOB 活性增强.中置曝气 AUSB 结合同步亚硝化/厌氧氨氧化(SNA)和交替亚硝化/厌氧氨氧化(ANA)双重路径完成自养脱氮,得益于较高的好氧氨氧化菌(AOB)和厌氧氨氧化菌(AnAOB)活性,及对亚硝酸盐氧化菌(NO₃)的有效抑制,实现了较高的总氮去除率,达 74.98%(第 140 天).AUSB 中置曝气可缩短连续流 CANON 工艺的启动时间,并实现长期稳定的自养脱氮.

关键词: CANON; AUSB; 中置曝气; 底部曝气; 常温低氨氮

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)02-0001-07

Development of continuous flow CANON process in the middle-setting aerated AUSB reactor

ZHANG Jie^{1,2}, CHENG Shuo¹, LI Dong¹, LÜ Yufeng¹, CAO Ruihua¹, WANG Yanju¹

(1.Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering(Beijing University of Technology), Beijing 100124, China; 2.State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment(Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

Abstract: To optimize the initiation of continuous flow CANON process, the research compared startup course and nitrogen removal performance under distinct NLR in room temperature ((25±1)℃) between two sets of AUSB reactors, one of which was middle-setting aeration (1#), and the other was bottom-setting aeration (2#). The results showed that 1#, 2# successfully started CANON process treating domestic wastewater with relatively low ammonium concentration (90 mg/L) in 55 d and 70 d respectively. In the progress of increasing nitrogen loading rate gradually, both of them gained the highest nitrogen removal rate, which was 0.280 kg/(m³·d) for 1#, and 0.256 kg/(m³·d) for 2# under the condition of HRT=6 h. In later operation, 1# maintained efficient nitrogen removal status whose eigenvalue ($\Delta\rho(\text{TN})/\Delta\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$) remained around 7.83, however, eigenvalue of 2# decreased to 7.49 after 125 d operation owing to the activity of NOB strengthened. The middle-setting aerated AUSB accomplished a higher total nitrogen removal rate which was 74.98% through the combination with simultaneous nitrification-Anammox (SNA) and alternate nitrification-Anammox (ANA) double pathways, which was ascribed to the enhancement of AOB and AnAOB activity and the effective suppression on NOB. Middle-setting aerated AUSB could shorten starting period of continuous flow CANON process, and furthermore realize long-term stable autotrophic nitrogen removal.

Keywords: CANON; AUSB; middle-setting aeration; bottom-setting aeration; low ammonia at room temperature

基于厌氧氨氧化(ANAMMOX)代谢途径的全程自养脱氮(CANON)工艺,凭借工艺流程简短、无需投加有机碳源、曝气能耗低、污泥产量低等优势,成为污水生物脱氮领域的研究焦点^[1-3].CANON 工艺

将亚硝化与厌氧氨氧化整合于同一单级反应器中实现全程自养脱氮,溶解氧(DO)是该工艺运行中的重要控制参数^[2-4].适当提高 DO 质量浓度虽可增大亚硝化反应速率^[4-5],但 Adriano 等指出当 $\rho(\text{DO}) \geq 0.2 \text{ mg/L}$ 时即对 AnAOB 活性产生抑制^[6].因此,如何控制曝气,在单级反应器中创造既可将硝化反应维持在亚硝化阶段,又可避免对 AnAOB 产生抑制的环境,是 CANON 工艺启动、运行的关键.

有研究表明,间歇曝气于时序上在反应器中所

收稿日期: 2017-06-18

基金 项 目: 北京市市委组织部青年拔尖团队项目
(2014000026833TD02)

作者简介: 张 杰(1938—),男,博士生导师,中国工程院院士;
李 冬(1976—),女,教授,博士生导师

通信作者: 李 冬, lidong2006@bjut.edu.cn

营造的缺氧/好氧环境,可实现 CANON 工艺的快速启动及脱氮性能的优化^[7-9].但间歇曝气仅适用于 SBR 等间歇运行式反应器,无法应用于连续流自养脱氮系统.目前,关于连续流 CANON 工艺的研究,其曝气的设置均使反应器呈全程好氧^[10-15],无法为 AnAOB 提供最适缺氧环境^[4,6].AUSB 作为一种典型的单级连续流反应器,以往研究中以底部曝气方式启动全程自养脱氮^[10,12],而借鉴间歇曝气启动 CANON 工艺的优势,采用 AUSB 中置曝气,于空间上在其内部营造缺氧/好氧环境,为连续流 CANON 工艺的启动及运行提供了新思路.

本实验通过中置曝气 AUSB(1#)与底部曝气 AUSB(2#)的对比,研究了 AUSB 中不同曝气位置下全程自养脱氮过程的建立及提高 NLR 后脱氮性能变化的差异,为连续流 CANON 工艺的优化及工程应用提供技术支撑.

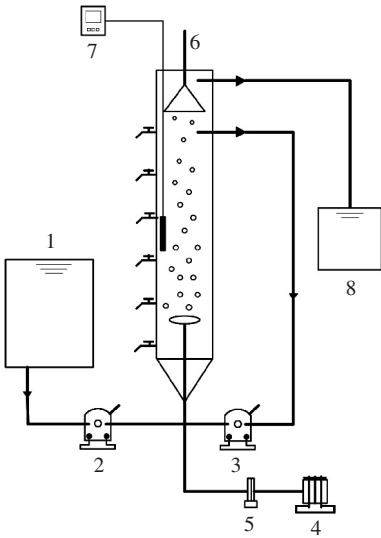
1 实 验

1.1 实验装置

采用两组相同规格的 AUSB(如图 1),由有机玻璃制成,内径 10 cm,有效容积 12 L,总容积 20 L.反应器顶部设倒置漏斗状三相分离器,用以分离液体、污泥和实验过程中产生的气体;外部设有恒温水浴层,保持反应区温度稳定在(25±1)℃;底部放置砾石层,以使进水及回流布水均匀.

曝气装置使用曝气盘,其中,1#曝气盘置于距反应器底部 30 cm 处,2#曝气盘置于反应器底部,由气

泵与气体流量计控制曝气强度.



1—进水箱;2—进水泵;3—回流泵;4—气泵;5—气体流量计;6—三相分离器;7—DO & pH 测定仪;8—出水箱

图 1 中置曝气 AUSB 示意

Fig.1 Schematic of middle-setting aerated AUSB reactor

1.2 接种污泥与实验水质

接种污泥取自实验室运行稳定的厌氧氨氧化絮状污泥,初始污泥质量浓度为 4.56 g/L,实验期间不进行主动排泥.进水采用人工配水,分别以 (NH₄)₂SO₄和 NaHCO₃作为 NH₄⁺-N 和碱度的来源,并以 NaHCO₃调节进水 pH=8.0±0.2.营养液 I、II 提供微量元素^[11],均以 1 mL/L 为单位投加.本实验共进行 145 d,根据进水水质及运行参数的不同,划分为 4 个阶段,见表 1.

表 1 实验期间水质指标及运行参数

Tab.1 Wastewater qualities and operational conditions during the experiment

运行阶段	时间/d		$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	HRT/h	$R_{\text{NL}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)	曝气量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)
	1#	2#				
S1	1~43	1~57	150	18	0.20	0.06~0.10
S2	44~55	58~70	90	11	0.20	0.10
	56~73	71~93		8	0.28	0.12
S3	74~88	94~110	90	6	0.37	0.14
	89~98	111~118		4	0.56	0.16
S4	99~145	119~145	90	6	0.37	0.15

注: R_{NL} (nitrogen loading rate),即进水氮负荷

1.3 分析项目与方法

DO、pH、温度均采用 WTW 便携式测定仪测定,MLSS 采用标准重量法测定.水样分析中 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 指标分别采用纳氏试剂光度法、N-(1-萘基)-乙二胺光度法、紫外分光光度法进行测定^[16].

功能菌动力学活性:通过批次实验测定污泥的单位 MLSS CANON 速率、ANAMMOX 速率和 NO₃⁻-N 比累积速率,以表征 AOB 与 AnAOB 的协同脱氮性能、AnAOB 及 NOB 的活性^[17].具体方法为:取污泥 50 mL

经 0.9% NaCl 溶液反复清洗后,置于 250 mL 锥形瓶中,注入 100 mL 基质溶液.测定 CANON 速率、NO₃⁻-N 比累积速率时,基质溶液分别仅含氨氮、亚硝酸盐氮,初始质量浓度均为 90 mg/L,通过曝气控制 DO 为 0.3 mg/L;测定 ANAMMOX 速率时,使用含氨氮、亚硝酸盐氮的基质溶液,其质量浓度均为 90 mg/L,不曝气.基质溶液中其他组分与进水保持相同,pH=8.0.恒温水浴振荡器温度保持在 25℃,反应 2 h,期间定时取样测定水质指标,并计算比速率值.

CANON 速率: $\lambda_1 = -\Delta\rho(\text{TN})/(\Delta t \cdot \rho_{\text{MLSS}})$, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$;

ANAMMOX 速率: $\lambda_2 = -\Delta\rho(\text{TN})/(\Delta t \cdot \rho_{\text{MLSS}})$, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$;

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 比累积速率: $\lambda_3 = \Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/(\Delta t \cdot \rho_{\text{MLSS}})$, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$.

式中: $\Delta\rho(\text{TN})$ 、 $\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 分别指反应时间 Δt 内, 总氮(TN)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的质量浓度变化, mg/L ; ρ_{MLSS} 为污泥质量浓度, g/L ; Δt 为参数呈线性变化的时间, h .

2 结果与讨论

2.1 连续流 CANON 工艺的启动及脱氮性能

2.1.1 CANON 工艺的启动

S1 阶段进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度为 $150 \text{ mg}/\text{L}$, 初始曝气强度设定在 $0.06 \text{ L}/\text{min}$, 如图 2, 两组 AUSB 自第 3 天始, 氨氮去除率快速提升, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度降低, 至第 15 天, 1#、2# 总氮去除率分别达 36.29% 、 35.23% , 均表现出一定的自养脱氮性能, 两组反应器效果基本相同. 于第 16 天将曝气量增至 $0.10 \text{ L}/\text{min}$, 适当增大曝气量虽可提高 CANON 工艺的总氮去除率^[4], 但曝气强度的提高对接种污泥产生一定冲击, 两组 AUSB 均出现不同程度的污泥流

失现象, 氨氮及总氮去除率虽呈上升趋势, 但脱氮性能极不稳定. 1# 在历经 9 d 污泥适应期后, 污泥流失现象改善, 总氮去除率及脱氮负荷快速提升, 至第 43 天, 特征值 $(\Delta\rho(\text{TN})/\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}))$ 稳定在 7.84, 接近 CANON 工艺反应式中总氮去除量 $\Delta\rho(\text{TN})$ 同硝酸盐氮生成量 $\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 的理论比值 8^[18], 认为该工艺启动成功; 相较而言, 2# 污泥适应期较长 (20 d), 总氮去除率上升平缓, 于第 56 天特征值达 7.73, 成功启动全程自养脱氮工艺. S1 阶段后期, 两组 AUSB 内均观察到了微小的活性污泥颗粒, 保证了对功能菌的有效持留.

为实现低氨氮污水的自养脱氮处理, S2 阶段, 1#、2# 在成功建立全程自养脱氮过程后, 分别于第 44 天、58 天在保持 NLR 不变的基础上将进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度降至 $90 \text{ mg}/\text{L}$. 因 HRT 的改变 (由 18 h 降至 11 h), 本阶段初期两组 AUSB 脱氮效能均发生了不同程度的降低, 后经适应, 1#、2# 自养脱氮性能逐渐提高, 于第 54 天、69 天其总氮去除率达 74.35% 、 66.69% , 脱氮负荷达 0.147 、 $0.137 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 1# 均高于 2#. CANON 工艺启动阶段反应器脱氮性能主要受限于亚硝化^[19], 期间两组 AUSB 出水均未发生亚硝酸盐积累现象.

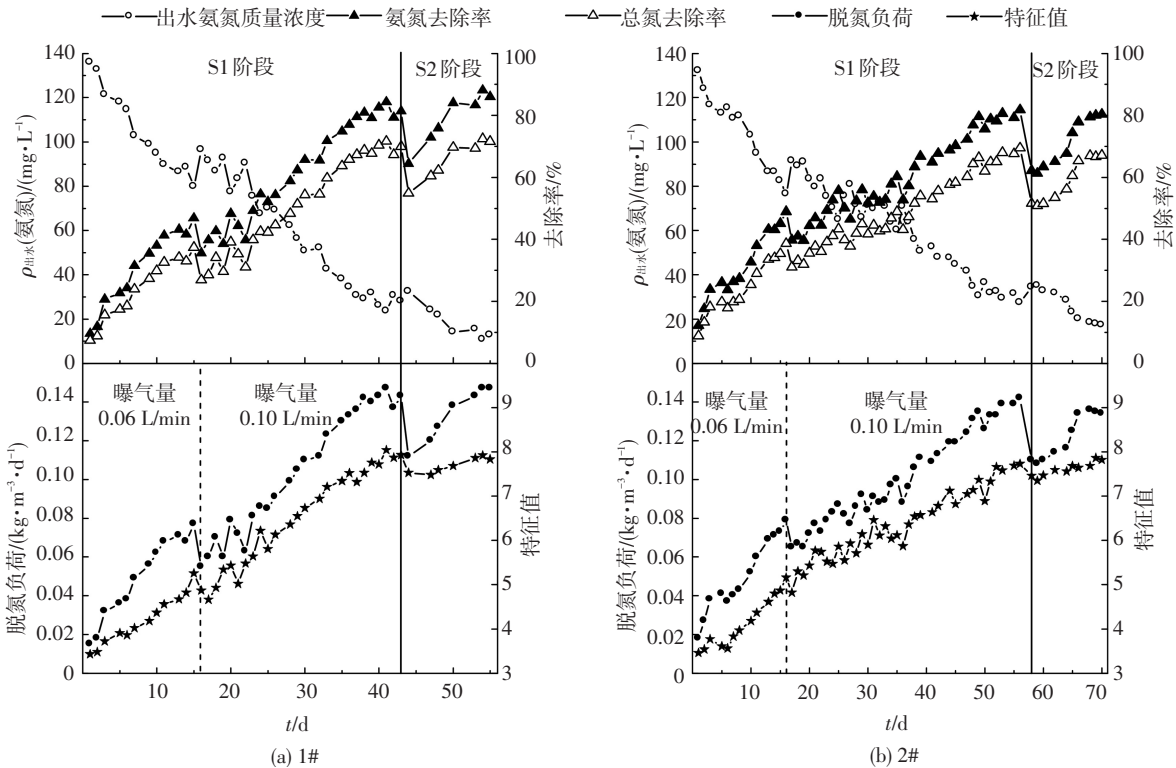


图 2 全程自养脱氮工艺的启动
Fig.2 Start-up of CANON process

2.1.2 连续流 CANON 工艺脱氮性能

为进一步探究反应器脱氮性能, 在 S3 阶段, 逐步缩短 HRT (8~4 h) 以提高进水 NLR, 同时适当增

大曝气强度, 两组 AUSB 总氮去除性能如图 3、4 所示. 由图 3 可知, 随着 HRT 缩至 8、6 h, NLR 升至 0.28 、 $0.37 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 两组 AUSB 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质

量浓度均呈先升后降趋势,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度降低,总氮去除率稳步上升,但相较于 1#,2#出水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度较高,在第 84 天、102 天达 9.54、11.53 mg/L,发生亚硝酸盐积累现象.在 HRT 进一步降至 4 h 后,因污水在反应器内与污泥有效接触时间不够充分^[13],两组 AUSB 出水水质恶化,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度高达 60 mg/L,总氮去除率降至 30% 以下.图 4 比较了不同 NLR 下 1#、2#的平均脱氮

负荷,HRT=6 h 时,1#、2#平均脱氮负荷分别为 0.251、0.215 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,脱氮性能差异较 HRT=8 h 时期显著,其中 1#于第 86 天、2#于第 109 天取得 S3 阶段脱氮负荷的最高水平,分别为 0.280、0.256 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.HRT=4 h 时,1#、2#脱氮负荷降至 0.199、0.161 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,性能变差.S3 阶段,两组 AUSB 中颗粒污泥粒径逐步增大,于反应器内富集了更多微生物,从而实现了较启动阶段更高的脱氮负荷.

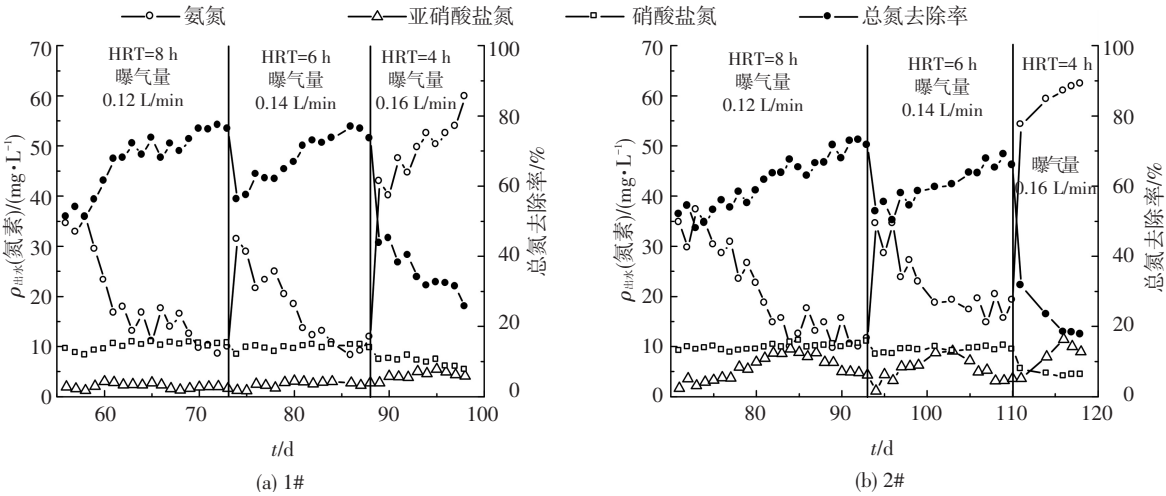


图 3 S3 阶段出水氮素质量浓度及总氮去除率

Fig.3 Effluent nitrogen concentration and TN removal efficiency in the stage S3

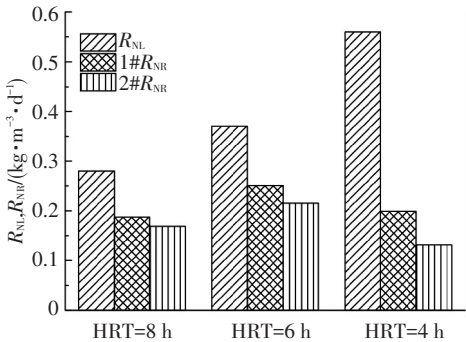


图 4 不同氮负荷下脱氮性能的比较

Fig.4 Comparison of nitrogen removal performance under distinct nitrogen loading rate

出水亚硝酸盐的积累是 CANON 工艺运行中所面临的重要问题,与污泥中功能微生物种群分布密切相关^[3,11].2#出水中亚硝酸盐积累现象或是因该阶段初期 AOB 与 AnAOB 的增殖速率差异所致^[3].HRT 缩短的同时适当增大了曝气强度,虽利于 AOB 氧化氨氮,但底部曝气 AUSB 内部全程好氧状态下,无法为厌氧氨氧化反应的发生及 AnAOB 的增殖提供最适缺氧环境,同时,由于 AnAOB 的增殖速率低于 AOB^[20],在 2#出水中发生了短暂的亚硝酸盐积累现象.但亚硝酸盐的积累为厌氧氨氧化提供了充足的反应基质,促进 AnAOB 增殖,随后亚硝酸盐积累现象消失.而中置曝气 AUSB 中,曝气盘上方好氧

区产生的富余亚硝酸盐基质回流至底部缺氧区,在 AnAOB 作用下得以去除,促进 AnAOB 活性增强的同时避免了亚硝酸盐积累现象的发生^[8],从而更快地适应 NLR 的提高,实现了更高效的自养脱氮.

S4 阶段通过将 HRT 回调至 6 h,如图 5,1#特征值于第 106 天升至 7.85,并在后续 40 d 的运行中平均在 7.83,总氮去除率为 $(71.43 \pm 4.27)\%$,实现了稳定的自养脱氮;而 2#特征值经过缓慢上升,第 125 天后其平均值为 7.49,总氮去除率为 $(63.60 \pm 4.94)\%$.由于 AnAOB、NOB 均可利用自身基质产生硝酸盐氮,运行期间,特征值 $\Delta\rho(\text{TN})/\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 间接反映 NOB 活性,大于 8,或是由于反硝化等作用;小于 8 则说明 NOB 活性增强,且特征值越小,表明 NOB 活性越高^[21].分析认为,2#特征值难以恢复至 8,或是因底部曝气 AUSB 内部长期处于全程好氧状态($\rho(\text{DO}) \leq 0.3 \text{ mg/L}$),NOB 因其优势种属转换适应低溶解氧环境所致^[22];同时表明,1#中特定的缺氧/好氧环境可有效抑制 NOB 的增殖.

2.2 脱氮路径及功能菌动力学活性

2.2.1 脱氮路径的比较

S4 阶段,待两组 AUSB 运行稳定后选取第 140 天,分析沿程氮素去除情况及溶解氧质量浓度变化,如图 6 所示.中置曝气 AUSB 曝气盘下方

0~30 cm处 $\rho(\text{DO}) = (0.07 \pm 0.02) \text{ mg/L}$,曝气盘上方 $\rho(\text{DO}) = (0.29 \pm 0.02) \text{ mg/L}$,形成明显缺氧/好氧不同分区, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及TN沿反应器高程下降.在回流作用下1#进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度被稀释至 30.47 mg/L ,与回流所含的亚硝酸盐基质在底部缺氧环境中得以部分去除, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度降至 0.10 mg/L ,TN去除 6.05 mg/L ;进而于好氧区(30~120 cm),在去除氨氮的同时产生部分富余亚硝酸盐基质,被回流带至底部缺氧区,最终出水 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) = 10.44 \text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{TN}) = 23.48 \text{ mg/L}$.分析认为,底部缺氧区中以厌氧氨氧化为主,氨氮与亚硝酸盐氮同步去除,致使总氮损失;而好氧区中则以亚硝化-厌氧氨氧化方式实现自养脱氮,并伴随部分亚硝酸盐氮的富余,通过回流为底部AnAOB提供反应基质,强化整体自养脱氮性能;不论单一厌氧氨氧化,或是亚硝化-厌氧氨氧化的耦合,均伴随有一定量硝酸盐氮的产生,因此, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度沿程升高,出水 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) = 10.02 \text{ mg/L}$.由图6可知,2#内部 $\rho(\text{DO}) = (0.26 \pm 0.02) \text{ mg/L}$,反应器全程好氧,氨氮及总氮去除曲线较平缓,沿程亚硝酸盐氮质量浓度为 $(3.15 \pm 0.36) \text{ mg/L}$,硝酸盐氮变化则同1#类似,逐渐上升,最终出水氨氮及总氮分别为 17.78 、 30.92 mg/L .中置曝气AUSB出水TN质量浓度较低,脱氮效能更优.

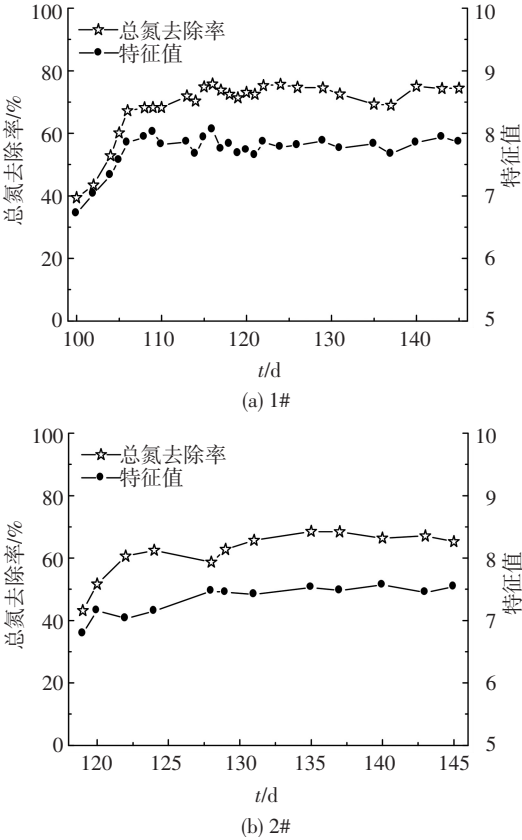
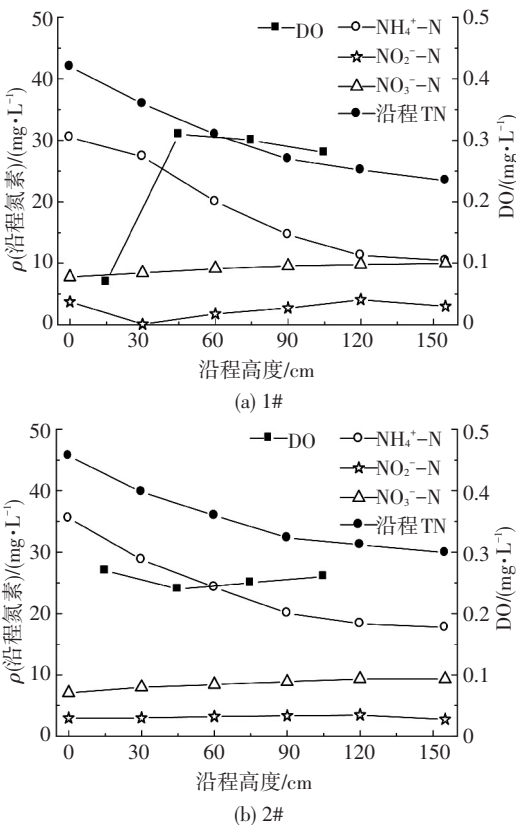


图5 S4阶段总氮去除率及特征值

Fig.5 TN removal efficiency and eigenvalue in the stage S4



注:0、120、155 cm 分别为进水、回流、出水位置,120~155 cm 为三相分离器高度

图6 沿程氮素质量浓度及DO值

Fig.6 Nitrogen concentrations and DO variation along the reactor

为进一步研究两组AUSB中氮素变化规律,对1#、2#内部的脱氮路径进行分析,如表2.1#中好氧区氨氮去除 16.08 mg/L ,同时生成 3.97 mg/L 的亚硝酸盐氮及 1.34 mg/L 硝酸盐氮, $\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) = 0.111$,符合CANON公式中 $0.11:1$ 的化学计量比^[14],表明该区域中以AOB与AnAOB的协同脱氮为主,两者共同完成全程自养脱氮过程,同时伴随小部分亚硝酸盐氮的富余,经回流至底部缺氧区,为厌氧氨氧化提供反应基质.进水及回流所含的氨氮及亚硝酸盐氮,于1#底部缺氧环境中主要通过厌氧氨氧化反应去除,产生 0.67 mg/L 硝酸盐氮,此时 $\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) = 0.216$,小于ANAMMOX反应式中理论值 0.26 ^[1].需要指出的是,Matsumoto等^[23]发现在长期运行的自养硝化污泥中,仍可检出以硝化菌代谢产物和细胞残体作基质的异养菌属,反硝化作用的存在或使1#缺氧区 $\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 小于ANAMMOX反应式理论值 0.26 .由此可知,1#主要通过同步亚硝化/厌氧氨氧化(SNA)及交替亚硝化/厌氧氨氧化(ANA)的联用共同完成氮素去除.底部曝气AUSB中,氨氮共去除 17.21 mg/L ,生成 2.22 mg/L 硝酸盐氮,其 $\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) = 0.133$,大于

CANON 公式中理论值0.11,与所测特征值 7.57 相一致(见图 5),均表明 NOB 活性增强;反应器全程好氧,无特定缺氧区,2#通过同步亚硝化/厌氧氨氧化(SNA)实现自养脱氮。

CANON 工艺是基于有效抑制 NOB 增殖的基础上,依靠 AOB、AnAOB 间稳定的协同作用实现自养脱氮^[14]。然而,低 DO 不足以充分发挥 AOB 的氧化功能,限制自养脱氮负荷的提高^[19];DO 较高时又面

临 NOB 增殖的可能及抑制 AnAOB 活性的矛盾^[4,6],故底部曝气 AUSB 中全程好氧状态下单一 SNA 路径受限于 DO 质量浓度控制,难以进一步实现更高的氮去除效能。而中置曝气 AUSB 在反应器内部于空间上实现了缺氧/好氧的不同分区,联合 SNA 与 ANA 双重脱氮路径,实现了 74.98%的总氮去除率,其中 SNA 占比 47.34%、ANA 占比 27.64%,高于底部曝气 AUSB 中 66.05%的脱氮效率。

表 2 缺氧/好氧不同分区氮素质量浓度变化

Tab.2 Nitrogen concentrations varied between anoxic/aerobic conditions

反应器	氨氮去除/ (mg · L ⁻¹)		亚硝酸盐氮变化/ (mg · L ⁻¹)		硝酸盐氮生成/ (mg · L ⁻¹)		$\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$	
	好氧区	缺氧区	好氧区(生成)	缺氧区(去除)	好氧区	缺氧区	好氧区	缺氧区
1#	16.08	3.10	3.97	3.62	1.34	0.67	0.111	0.216
2#	17.21	—	0.54	—	2.22	—	0.133	—

注:根据 CANON 公式^[14],好氧区 $\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\Delta\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 的计算中, $\Delta\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为氨氮去除量减去亚硝酸盐氮生成量

2.2.2 功能菌动力学活性对比

通过批次实验分别测定了稳定运行阶段第 140 天时,两组 AUSB 中活性污泥对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除效能。由图 7 可知,1#污泥,其单位 MLSS CANON 速率及 ANAMMOX 速率分别为 7.18、8.87 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,而 2#污泥的 CANON、ANAMMOX 速率分别为 6.03、8.16 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,1#均高于 2#,表明中置曝气 AUSB 内 AOB 及 AnAOB 活性较高。然而,1#、2#污泥的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 比累积速率分别为 0.46、0.93 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,2#为 1#污泥两倍之多,进一步证实此时 2#中 NOB 活性增强。

2.3 AUSB 中置曝气自养脱氮机理及优势分析

中置曝气 AUSB,于其内部空间上营造出缺氧/好氧环境,通过回流使活性污泥往返流动于缺氧/好氧不同分区之间,缺氧区中 AOB 活性受抑制,污泥进入好氧区后,历经“饥饿”的 AOB 可更多地利用氨氮氧化产生的能量,实现其快速富集^[24];AOB 活性的增强,为 AnAOB 供给了充足的亚硝酸盐基质,底部缺氧区的存在,提供了厌氧氨氧化高效反应所需的低溶解氧环境,保证了 AnAOB 在与 NOB 竞争亚硝酸盐基质的过程中其优势地位,实现了较高的总氮去除率,并在一定程度上起到了抑制 NOB 的作用;同时,缺氧/好氧分区强化了 CANON 污泥所处环境中溶解氧的波动,于低氨氮水质中达到了抑制 NOB 的效果^[25-26]。对比本文 AUSB 底部曝气方式,中置曝气 AUSB 启动 CANON 工艺用时更短,在后续逐步提高进水氮负荷过程中,更易适应 NLR 的改变,实现了更高的脱氮负荷,且长期运行稳定性高。相比以往单级连续流 CANON 工艺的研究^[10-12,15],AUSB 中置曝气具有启动历时短,自养脱氮性能较佳等优点,如表 3 所示。此外,中置曝气 AUSB 中特定的缺氧/好氧环境可有效改善全程好氧状态下长期运行使 NOB 产生适应性增殖的不足,提高 CANON 工艺运行稳定性。

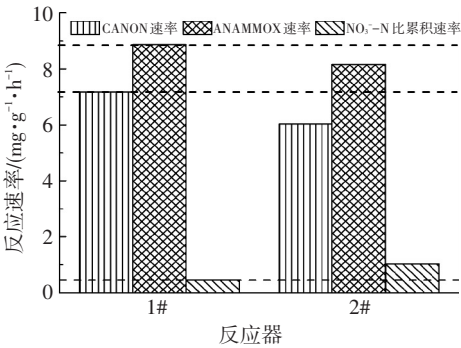


图 7 功能菌动力学活性

Fig.7 Kinetic activities of functional microbes

表 3 不同单级连续流反应器中 CANON 工艺启动时长及脱氮性能比较

Tab.3 Comparison of CANON process starting duration and performance of autotrophic nitrogen removal in different single-stage continuous flow reactors

反应器	污泥形式	接种污泥	温度/ ℃	$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	启动时长/ d	$R_{\text{NL}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$	$R_{\text{NR}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$	文献
UASB	颗粒污泥	厌氧氨氧化	35±1	350	285	0.233	0.205	[10]
UMABR		厌氧氨氧化	25±1	70	190	0.105	0.085	[11]
AUSB		亚硝化+厌氧氨氧化	30±1	110	85	0.371	0.234	[12]
BCR		亚硝化+厌氧氨氧化	35	400	233	0.179	0.135	[15]
AUSB(1#)		厌氧氨氧化	25±1	90	55	0.370	0.287	本文
AUSB(2#)					70		0.259	

注:UMABR,upflow membrane-aerated biofilm reactor;BCR,bubble column reactor

3 结 论

1)中置、底部曝气 AUSB 在分别历经 55 d、70 d 后成功建立低氨氮水质条件下全程自养脱氮过程,脱氮负荷达 0.147、0.137 kg/(m³·d),中置曝气 AUSB 启动时间更短。

2)S3 阶段,中置、底部曝气 AUSB 均获得了较启动阶段更高的脱氮负荷,在 HRT=6 h 时分别达到了 0.280、0.256 kg/(m³·d),中置曝气 AUSB 可更快适应 NLR 的提高,实现更优的脱氮性能。

3)底部曝气 AUSB 在 NLR 提高初期出现了出水亚硝酸盐积累现象,并在后续 S4 阶段长期运行中其特征值降至 7.49,NOB 活性增强;而中置曝气 AUSB 没有发生亚硝酸盐的积累,特征值保持在 7.83,自养脱氮性能稳定。

4)中置曝气 AUSB 较底部曝气,其污泥中 AOB 及 AnAOB 活性更高,借助同步亚硝化/厌氧氨氧化(SNA)与交替亚硝化/厌氧氨氧化(ANA)双重脱氮路径,总氮去除率达 74.98%,高于底部曝气 AUSB 中单一 SNA 路径下所达到的 66.05%的总氮去除率,脱氮性能更佳;同时有效抑制了 NOB 的增殖,运行稳定性更高。

参考文献

- [1] MA Bin, WANG Shanyun, CAO Shenbin, et al. Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 981–990. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.10.074.
- [2] HULLES W.H. V, VANDEWEYER H.J.P, MEESCHAERT B.D, et al. Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 162(1): 1–20. DOI: 10.1016/j.cej.2010.05.037.
- [3] LACKNER S, GILBERT E.M, VLAEMINCK S.E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences: An application survey[J]. *Water Research*, 2014, 55(10): 292–303. DOI: 10.1016/j.watres.2014.02.032.
- [4] CEMA G, PLAZA E, TRELA J, et al. Dissolved oxygen as a factor influencing nitrogen removal rates in a one-stage system with partial nitrification and Anammox process[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 64(5): 1009–1015. DOI: 10.2166/wst.2011.449.
- [5] ZUBROWSKA-SUDOL M, YANG J, TRELA J, et al. Evaluation of deammonification process performance at different aeration strategies [J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(6): 1168–1176. DOI: 10.2166/wst.2011.356.
- [6] JOSS A, DERLON N, CYPRIEN C, et al. Combined nitrification-anammox: Advances in understanding process stability [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(22): 9735–9742. DOI: 10.1021/es202181v.
- [7] GILBERTE M, AGRAWAL S, BRUNNER F, et al. Response of different *Nitrospira* species to anoxic periods depends on operational DO [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(5): 2934–2941. DOI: 10.1021/es404992g.
- [8] MIAO Yuan, ZHANG Liang, LI Baikun, et al. Enhancing ammonium oxidation bacteria activity was key to single-stage partial nitrification-anammox system treating low-strength sewage under intermittent aeration condition[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 231: 36–44. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.045.
- [9] MA Bin, BAO Peng, WEI Yan, et al. Suppressing nitrite-oxidizing bacteria growth to achieve nitrogen removal from domestic wastewater via anammox using intermittent aeration with low dissolved oxygen [J].

- Scientific Reports*, 2015, 5: 13048. DOI: 10.1038/srep13048.
- [10] LI Xiaojin, SUNG S. Development of the combined nitrification-anammox process in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor with anammox granules[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 281: 837–843. DOI: 10.1016/j.cej.2015.07.016.
- [11] LI Xiaojin, SUN Shan, BADGLEY B.D, et al. Nitrogen removal by granular nitrification-anammox in an upflow membrane-aerated biofilm reactor [J]. *Water Research*, 2016, 94: 23–31. DOI: 10.1016/j.watres.2016.02.031.
- [12] ZHANG Daijun, CAI Qing, CONG Liying. Enhancing autotrophic nitrogen removal over nitrite by trace NO₂ addition to an AUSB reactor [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, 85(2): 204–208. DOI: 10.1002/jctb.2288.
- [13] WANG Lan, ZHENG Ping, CHEN Tingting, et al. Performance of autotrophic nitrogen removal in the granular bed reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123: 78–85. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.07.112.
- [14] QIAN Feiyue, WANG Jianfang, SHEN Yaoliang, et al. Achieving high performance completely autotrophic nitrogen removal in a continuous granular sludge reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, 118: 97–104. DOI: 10.1016/j.bej.2016.11.017.
- [15] VARASR, GUZMAN-FIERRO V, GIUSTINIANOVICH E, et al. Startup and oxygen concentration effects in a continuous granular mixed flow autotrophic nitrogen removal reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 190: 345–351. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.086.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] BASIN J.P, KLEEREBEZEM R, DEZOTTI M, et al. Measuring biomass specific ammonium, nitrite and phosphate uptake rates in aerobic granular sludge [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(10): 1161–1168. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.07.050.
- [18] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 好氧条件下 CANON 工艺的启动研究 [J]. *环境科学*, 2009, 30(6): 1689–1694. FU Kunming, ZHANG Jie, CAO Xiangsheng, et al. Study of CANON process start-up under aerobic conditions [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 30(6): 1689–1694. DOI: 10.13227/j.hjks.2009.06.039.
- [19] CHOS, FUJII N, LEE T, et al. Development of a simultaneous partial nitrification and anaerobic ammonia oxidation process in a single reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 652–659. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.031.
- [20] ZHANG Lei, NARITA Y, GAO Lin, et al. Maximum specific growth rate of anammox bacteria revisited [J]. *Water Research*, 2017, 116: 296–303. DOI: 10.1016/j.watres.2017.03.027.
- [21] 胡石, 甘一萍, 张树军, 等. 一体化全程自养脱氮(CANON)工艺的效能及污泥特性[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(1): 111–117. HU Shi, GAN Yiping, ZHANG Shujun, et al. Performance and sludge characteristics of the CANON process [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(1): 111–117.
- [22] LIU Guoqiang, WANG Jianmin. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(10): 5109–5117. DOI: 10.1021/es304647y.
- [23] MATSUMOTO S, KATOKU M, SEAKI G, et al. Microbial community structure in autotrophic nitrifying granules characterized by experimental simulation and analyses [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, 12(1): 192–206. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2009.02060.x.
- [24] 高春娣, 王惟肖, 李浩, 等. SBR 法交替缺氧好氧模式下短程硝化效率的优化 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 403–409. GAO Chundi, WANG Weixiao, LI Hao, et al. Optimization of efficiency on partial nitrification under the mode of alternating anoxic/oxic in sequencing batch reactor [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(2): 403–409.
- [25] GE Shijian, PENG Yongzhen, QIU Shuang, et al. Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process [J]. *Water Research*, 2014, 55(2): 95–105. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.058.
- [26] PENG Dangcong, BERNET N, DELGENES J.P, et al. Effect of oxygen supply methods on the performance of a sequencing batch reactor for high ammonium nitrification [J]. *Water Environment Research*, 2000, 72(2): 195–200. DOI: 10.2175/106143000X137284.