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/(m^3·d);实验后期,1#保持高效的脱氮状态,特征值($\Delta\rho(TN)/\Delta\rho(NO_3^-N)$)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(NOB)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 Shuo[1], LI Dong[1], LÜ Yufeng[1], CAO Ruihua[1], WANG Yanju[1]

(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/(m^3·d) for 1#, and 0.256 kg/(m^3·d) for 2# under the condition of HRT=6 h. In later operation, 1# maintained efficient nitrogen removal status whose eigenvalue ($\Delta\rho(TN)/\Delta\rho(NO_3^-N)$) 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 nitritation-Anammox (SNA) and alternate nitritation-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 $\rho(DO)\geq 0.2$ 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.

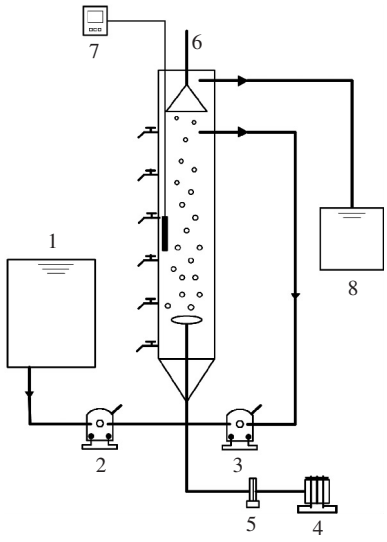
本实验通过中置曝气 AUSB(1#)与底部曝气 AUSB(2#)的对比,研究了 AUSB 中不同曝气位置下全程自养脱氮过程的建立及提高 NLR 后脱氮性能变化的差异,为连续流 CANON 工艺的优化及工程应用提供技术支撑.

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 $(NH_4)_2SO_4$ 和 $NaHCO_3$ 作为 NH_4^+-N 和碱度的来源,并以 $NaHCO_3$ 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		$\rho(NH_4^+-N)$/(mg·L^{-1})	HRT/h	R_{NL}/(kg·m^{-3}·d^{-1})	曝气量/(L·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 NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--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 NO_3^--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、NO_3^--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:$\lambda_1=-\Delta\rho(\mathrm{TN})/(\Delta t\cdot\rho_{\mathrm{MLSS}})$, mg/(g·h);

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

NO_3^--N 比累积速率:$\lambda_3=\Delta\rho(NO_3^-\text{-}N)/(\Delta t\cdot\rho_{\mathrm{MLSS}})$, mg/(g·h).

式中:$\Delta\rho(\mathrm{TN})$、$\Delta\rho(NO_3^-\text{-}N)$分别指反应时间 Δt 内,总氮(TN)、NO_3^--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 NH_4^+-N 质量浓度为 150 mg/L,初始曝气强度设定在 0.06 L/min,如图 2,两组 AUSB 自第 3 天始,氨氮去除率快速提升,出水 NH_4^+-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 L/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($\Delta\rho(\mathrm{TN})/\Delta\rho(NO_3^-\text{-}N)$)稳定在 7.84,接近 CANON 工艺反应式中总氮去除量 $\Delta\rho(\mathrm{TN})$同硝酸盐氮生成量 $\Delta\rho(NO_3^-\text{-}N)$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 NH_4^+-N质量浓度降至 90 mg/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 kg/(m³·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.

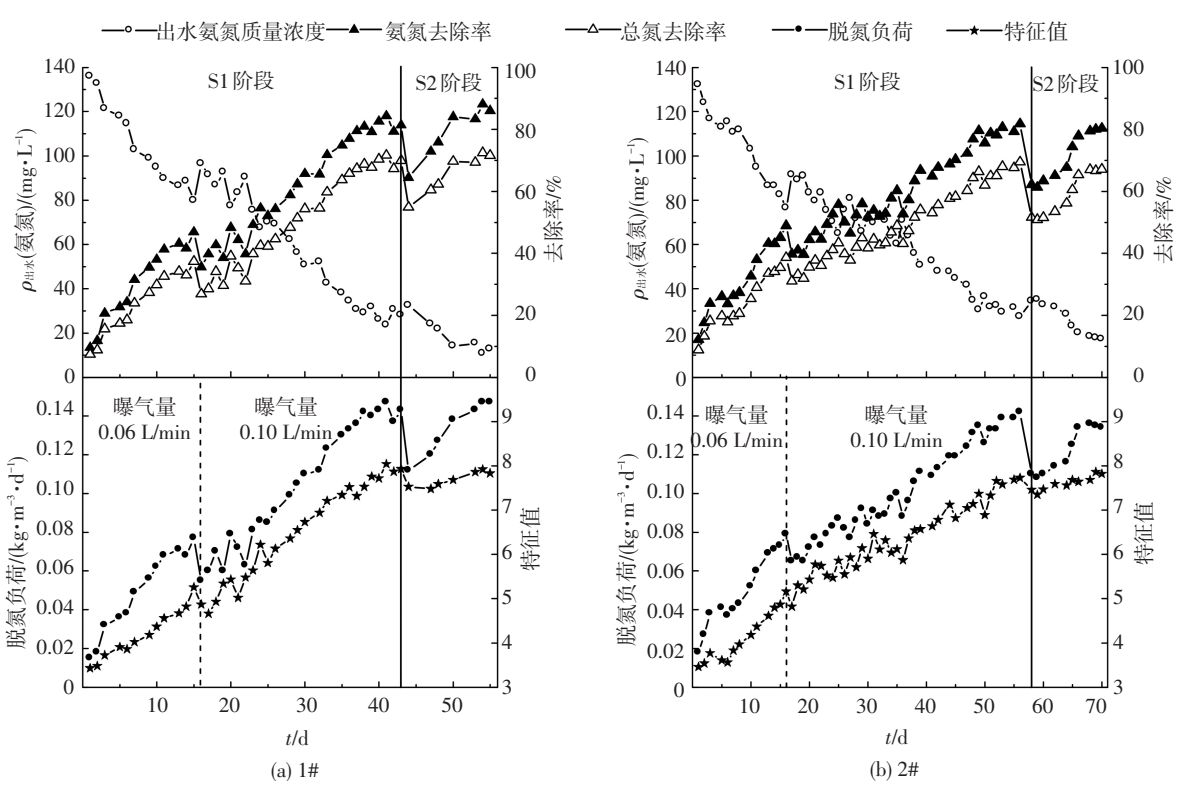


图 2　全程自养脱氮工艺的启动

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 kg/(m³·d),两组 AUSB 出水 NH_4^+-N 质

量浓度均呈先升后降趋势,出水 NH_4^+-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 NO_2^--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 NH_4^+-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 kg/(m^3·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 kg/(m^3·d).HRT=4 h时,1#、2#脱氮负荷降至 0.199、0.161 kg/(m^3·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.

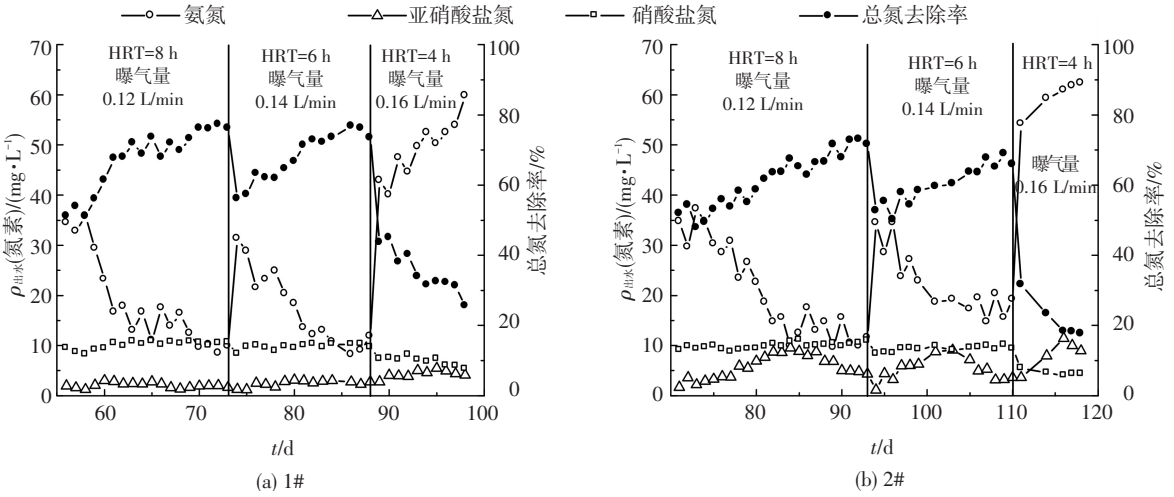


图 3　S3 阶段出水氮素质量浓度及总氮去除率

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

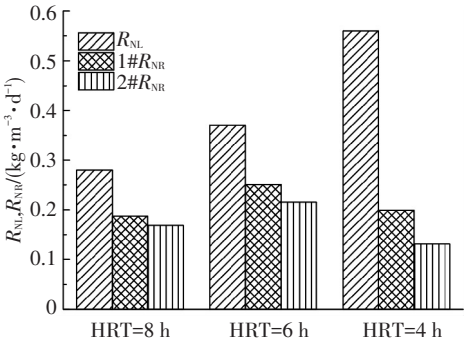


图 4　不同氮负荷下脱氮性能的比较

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±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±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 $\Delta\rho(TN)/\Delta\rho(NO_3^-N)$ 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($\rho(DO)\leqslant 0.3$ 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 $\rho(DO)=(0.07\pm0.02)$ mg/L,曝气盘上方 $\rho(DO)=(0.29\pm0.02)$ mg/L,形成明显缺氧/好氧不同分区,NH_4^+-N 及 TN 沿反应器高程下降.在回流作用下 1#进水 NH_4^+-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,NO_2^--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 $\rho(NH_4^+-N)=10.44$ mg/L、$\rho(TN)=23.48$ 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,NO_3^--N 质量浓度沿程升高,出水 $\rho(NO_3^-N)=10.02$ mg/L.由图 6 可知,2#内部 $\rho(DO)=(0.26\pm0.02)$ 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±0.36) 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.

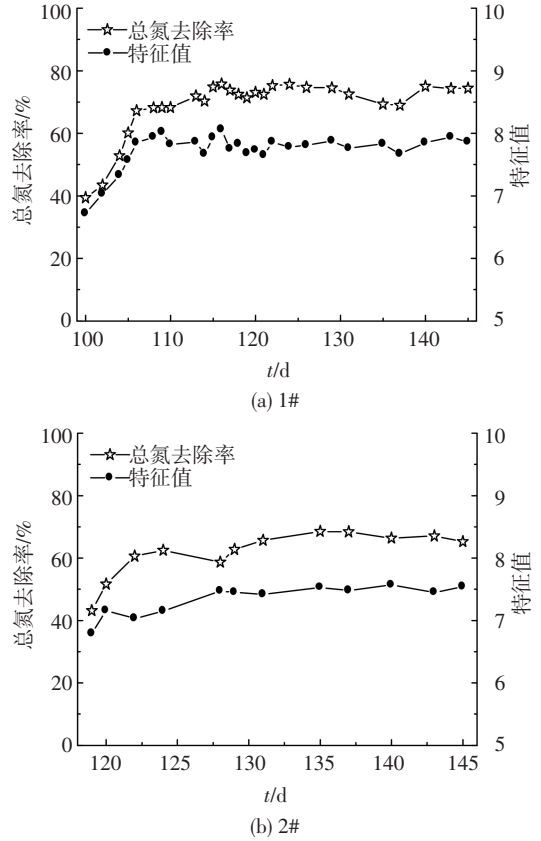
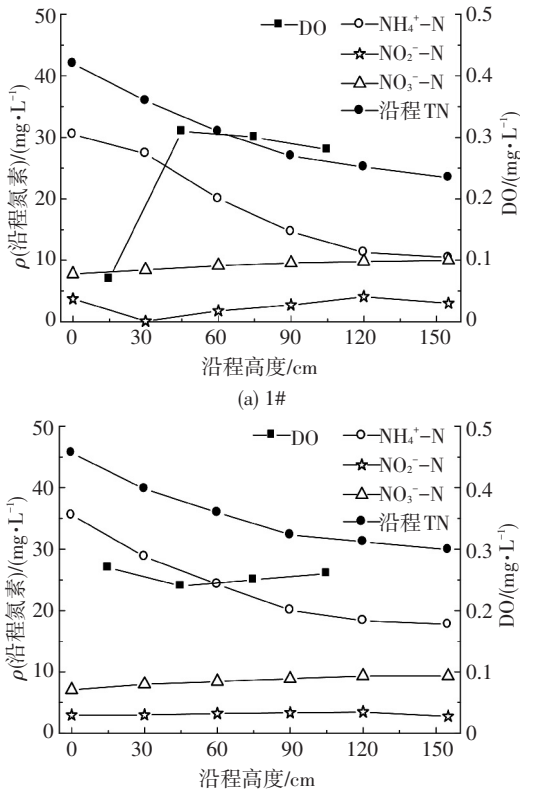


图 5　S4 阶段总氮去除率及特征值

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,$\Delta\rho(NO_3^-N)/\Delta\rho(NH_4^+-N)=0.111$,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 $\Delta\rho(NO_3^-N)/\Delta\rho(NH_4^+-N)=0.216$,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 $\Delta\rho(NO_3^-N)/\Delta\rho(NH_4^+-N)$ 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 $\Delta\rho(NO_3^-N)/\Delta\rho(NH_4^+-N)=0.133$,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})		$\Delta\rho(NO_3^-\text{-N})/\Delta\rho(NH_4^+\text{-N})$	
	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 $\Delta\rho(NO_3^-\text{-N})/\Delta\rho(NH_4^+\text{-N})$ 的计算中,$\Delta\rho(NH_4^+\text{-N})$ 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 NH_4^+-N、NO_2^--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 mg/(g·h),而 2#污泥的 CANON、ANAMMOX 速率分别为 6.03、8.16 mg/(g·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 NO_3^--N 比累积速率分别为 0.46、0.93 mg/(g·h),2#为 1#污泥两倍之多,进一步证实此时 2#中 NOB 活性增强.

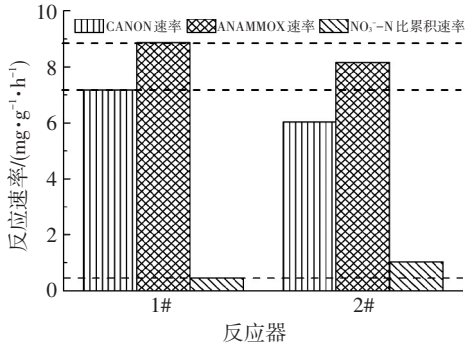


图 7　功能菌动力学活性

Fig.7　Kinetic activities of functional microbes

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.

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/℃	$\rho(NH_4^+\text{-N})$/(mg·L^{-1})	启动时长/d	R_{NL}/(kg·m^{-3}·d^{-1})	R_{NR}/(kg·m^{-3}·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/(m^3 · 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/(m^3 · 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, MEESSCHAERT 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 nitritation/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 nitritation 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 nitritation-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 nitritation-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 nitritation-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 NO_2 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.hjkx.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.

(编辑　刘　彤)