

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.012

曝气方式对低基质CANON工艺的影响

夏琼琼, 尚巍, 郑兴灿, 张文安, 王雅雄, 孙永利, 李鹏峰
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 针对低浓度条件下厌氧氨氧化工艺难以实现对亚硝酸盐氧化菌(NO_B)的抑制,采用连续流悬浮载体一段式全程自养脱氮工艺(CANON),以人工模拟废水为进水,考察了间歇曝气对低氨氮浓度条件下自养脱氮的短期影响,同时分析了反应器内微生物的分布特征。结果表明,当进水NH₄⁺-N浓度为40~50 mg/L时,采用曝气20 min、停止曝气20 min的循环曝气模式,曝气末期溶解氧(DO)浓度控制在1.0~1.3 mg/L,则出水TN、NH₄⁺-N浓度分别为7.8~14.4和1.2~5.9 mg/L;间歇曝气在抑制NO_B活性的同时,提高了NH₄⁺-N的转化率,从而提高了系统的脱氮性能。对填料生物膜样品进行16S rDNA宏基因组高通量测序,发现反应器内脱氮细菌主要为*Proteobacteria*、*Planctomycetes*和*Nitrospirae*;间歇曝气时,NO_B所在的g_*Nitrospira*菌属被较为彻底地抑制;*Candidatus_Kuenenia*对低浓度废水的适应性较强。

关键词: CANON; 悬浮载体; 间歇曝气; 脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0067-07

Effect of Aeration Mode on CANON Process Treating Low Ammonia Nitrogen Wastewater

XIA Qiong-qiong, SHANG Wei, ZHENG Xing-can, ZHANG Wen-an,
WANG Ya-xiong, SUN Yong-li, LI Peng-feng
(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074,
China)

Abstract: It is difficult to inhibit nitrite oxidizing bacteria (NO_B) in anaerobic ammonia oxidation processes for low ammonia nitrogen wastewater treatment. The short-term effects of intermittent aeration on autotrophic denitrification for simulated low ammonia nitrogen wastewater treatment were investigated in a continuous flow one-stage completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) reactor packed with suspended carrier, and the distribution characteristics of microorganisms in the reactor were analyzed. When the influent NH₄⁺-N was 40~50 mg/L, the cyclic aeration mode with on/off of 20 min/20 min was adopted, and the dissolved oxygen (DO) at the end of aeration was controlled at 1.0~1.3 mg/L, the TN and NH₄⁺-N in effluent were 7.8~14.4 mg/L and 1.2~5.9 mg/L, respectively. Intermittent aeration inhibited the activity of NO_B and increased the conversion of NH₄⁺-N, thus improving the denitrification performance of the system. High-throughput 16S rDNA metagenomic sequencing showed that *Proteobacteria*, *Planctomycetes* and *Nitrospirae* were the main denitrification bacteria in biofilm samples

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106005)

通信作者: 夏琼琼 E-mail: xqqwater@126.com

from the reactor. Intermittent aeration completely inhibited g_*Nitrospira* genus belonged to NOB. *Candidatus_Kuenenia* was more adaptable to survive in low ammonia nitrogen wastewater.

Key words: CANON; suspended carrier; intermittent aeration; nitrogen removal

一体式全程自养脱氮工艺(CANON)是在厌氧氨氧化基础上发展起来的新工艺,该工艺将亚硝化与厌氧氨氧化耦合于同一个反应器中,相比传统工艺,无需碳源且曝气量和污泥产量也较低^[1-2]。据统计,全球厌氧氨氧化的实际工程已达110多个,采用CANON工艺形式的占88%,主要用于污泥厌氧消化脱水液、垃圾渗滤液和高氨氮工业废水的脱氮处理^[3-5]。

污水处理主流厌氧氨氧化工艺应用的难点是氨氧化菌(AOB)、厌氧氨氧化菌(AnAOB)的富集和亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻)的抑制。在侧流系统中,通常利用低溶解氧(DO)浓度实现NO₂⁻的抑制^[6-7],但是对于氨氮浓度较低的城市污水系统,AOB的生长速率低于NO₂⁻^[8],当DO浓度太低时,AOB的活性和氨氮的转化率受到影响,并且长期运行后NO₂⁻能够适应较低的DO环境^[9]。而采用间歇曝气可以使NO₂⁻的代谢活动在曝气开始后出现一定时间的滞后,因此更容易实现短程硝化^[10-11]。

目前针对主流厌氧氨氧化工艺间歇曝气的研究大都采用SBR反应器,而实际工程中连续流反应器应用更为广泛。相关研究表明,利用悬浮填料载体培养微生物的移动床生物膜反应器(MBBR),在AOB和AnAOB的持留方面具有显著优势^[12-14],而且可以连续运行,降低了运行的难度。基于此,笔者采用连续流悬浮载体CANON反应器,以低氨氮浓度废水为研究对象,考察了不同曝气方式下,工艺的脱氮效果、微生物活性和微生物群落的结构特征,旨在为主流厌氧氨氧化工艺的稳定运行提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用上流式完全混合反应器(见图1),其有效容积为32 L(内部直径为30 cm,高为45 cm),材质为不锈钢。反应器采用机械调速搅拌器,曝气装置包括空气泵和砂芯曝气盘,曝气量通过转子流量计控制,依靠加热棒保持水温,进水由蠕动泵控制,曝气时间通过时间继电器控制。反应器内装填

悬浮载体填料(SCR-1型),填料外形尺寸为D25 mm×10 cm,比表面积为450 m²/m³。

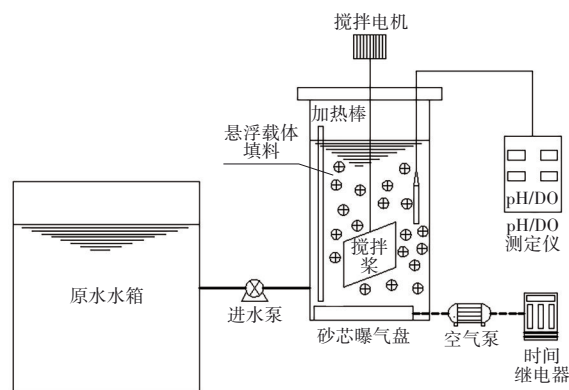


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

1.2 试验用水与接种污泥

试验用水为自配水,以(NH₄)₂SO₄作为氮源, NH₄⁺-N浓度为40~60 mg/L。以NaHCO₃来调节碱度,按照HCO₃⁻与NH₄⁺-N的质量比为1.0~1.5投加。其他成分包括:KH₂PO₄为2.7 mg/L、MgSO₄·7H₂O为30 mg/L、CaCl₂为13.6 mg/L、微量元素I为1 mL/L、微量元素II为1 mL/L。微量元素I储备液的成分:EDTA为5 000 mg/L、FeSO₄为5 000 mg/L。微量元素II储备液的成分:EDTA为15 000 mg/L、ZnSO₄·7H₂O为430 mg/L、CoCl₂·6H₂O为240 mg/L、MnCl₂·4H₂O为990 mg/L、CuSO₄·5H₂O为250 mg/L、Na₂MoO₄·2H₂O为220 mg/L、NiCl₂·6H₂O为190 mg/L、Na₂SeO₄·10H₂O为210 mg/L。

反应器所用的填料来源于处理高氨氮浓度废水的CANON反应器,该反应器已经稳定运行了373 d,进水NH₄⁺-N浓度为360~430 mg/L,采用连续曝气的方式,DO浓度为1.0~1.5 mg/L,氮的容积负荷平均为0.6 kg/(m³·d)。

1.3 试验参数与运行工况

反应器水力停留时间(HRT)为12 h,填料填充率为40%,不考虑温度的影响,控制反应器内部水温为(30.1±2.2) °C, pH为7.0~8.5。试验分为7个阶段,阶段I为连续曝气,阶段II~VII为间歇曝气,

调整DO浓度与曝气时间/非曝气时间的分布,各阶段运行参数见表1。由于采用间歇曝气时,系统DO一直处于变化状态,本试验所述的DO为曝气阶段末期,系统能达到的最高DO值。各阶段具体运行参数见表1。

表1 反应器运行参数

Tab.1 Operating parameters of reactor

试验阶段	运行时间/d	DO/(mg·L ⁻¹)	曝气时间:非曝气时间/(min·min ⁻¹)
I	1~8	0.4~0.6	连续曝气
II	9~18	0.4~0.6	45/45
III	19~30	0.8~1.0	45/45
IV	31~39	1.0~1.3	20/45
V	40~52	1.0~1.3	20/60
VI	53~55	1.3~1.5	20/60
VII	56~64	1.0~1.3	20/20

1.4 AOB、NOB和AnAOB活性测定

参照文献[15]测定AOB、NOB和AnAOB活性。取600 mL填料(堆积体积)放入烧杯中,加入50 mg/L的NH₄⁺-N和10 mg/L的NO₂⁻-N作为底物。将烧杯放入电动搅拌恒温槽内,控制温度为(30.1±0.4)℃。试验开始后,连续曝气,控制反应体系内的DO浓度为6.0 mg/L左右。每隔10 min从系统中吸取30 mL水样,测定水样中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N浓度,反应时间为90 min。测定AnAOB活性时,加入30 mg/L的NH₄⁺-N和40 mg/L的NO₂⁻-N作为底物,用高纯氮吹脱以保证厌氧环境,每15 min取水样测定NH₄⁺-N和NO₂⁻-N浓度,反应时间为150 min。氮素含量测定结束以后,将填料在103~105℃环境下烘干2 h,置于干燥器内直至填料质量恒定。按式(1)~(3)计算填料中AOB活性[SAOR, mg/(mg·h)]、NOB活性[SNPR, mg/(mg·h)]和AnAOB活性[SAA, mg/(mg·h)]。

$$SAOR = [\Delta\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/\Delta t]_{\max}/M \quad (1)$$

$$SNPR = [\Delta\rho(\text{NO}_3^--\text{N})/\Delta t]_{\max}/M \quad (2)$$

$$SAA = [\Delta\rho(\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_2^--\text{N})/\Delta t]_{\max}/M \quad (3)$$

式中: $\Delta\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为NH₄⁺-N质量的变化量,mg; $\Delta\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 为NO₃⁻-N质量的变化量,mg; $\Delta\rho(\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_2^--\text{N})$ 为NH₄⁺-N与NO₂⁻-N质量和的变化量,mg; Δt 为反应时间,h; M 为填料干质量,mg; $[\Delta\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/\Delta t]_{\max}$ 为NH₄⁺-N质量对时间线性拟合的最大斜率; $[\Delta\rho(\text{NO}_3^--\text{N})/\Delta t]_{\max}$ 为NO₃⁻-N质量对

时间线性拟合的最大斜率; $[\Delta\rho(\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_2^--\text{N})/\Delta t]_{\max}$ 为NH₄⁺-N与NO₂⁻-N质量和对时间线性拟合的最大斜率。

1.5 分析项目及方法

水样经0.45 μm滤膜过滤后测定相关参数。其中,NH₄⁺-N采用纳氏试剂比色法测定,NO₂⁻-N采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定,NO₃⁻-N采用紫外分光光度法测定。

1.6 宏基因组测序

为考察不同曝气模式下填料的微生物特性,计划在阶段I~VII分别采集样品,但是考虑到反应器内填料总量有限,且在间歇曝气条件下,仅调整曝气频率和DO浓度,短期内微生物分布情况变化不大,因此只在阶段I和阶段VII采集了填料样品,考察连续曝气和间歇曝气对微生物的影响,取样时间分别为低浓度运行的第5天和第62天,样品编号分别为S2和S3。另外,在试验实施前处理高氨氮废水期间也采集了填料样品,取样时间为反应器稳定运行的第353天,样品编号为S1。每次测定过程都采集了平行双样,将反应器内填料全部取出后分为两组(总计10 L,每组5 L),混合均匀后,分别从中随机抽取10个填料作为样品。

填料样品采集完毕后,送至上海美吉生物科技医药公司进行宏基因组测序。采用E. Z. N. A.® DNA Kit(Omega Bio-tek, Norcross, GA, U. S.)试剂盒进行样品DNA抽提。之后,利用1%琼脂糖凝胶电泳检测DNA的完整性。通过Covaris M220仪器将DNA片段化,筛选约300 bp的片段,利用TruSeq™ DNA Sample Prep Kit试剂盒构建PE文库,产生单链DNA片段后采用HiSeq 3000/4000 PE Cluster Kit进行桥式PCR,最后通过Illumina HiSeq 4000平台,采用HiSeq 3000/4000 SBS Kits进行宏基因组测序。

2 结果与分析

2.1 不同曝气方式下的处理效果

不同曝气模式下反应器的脱氮性能和填料功能菌的活性如图2所示。可以看出,阶段I采用连续曝气方式,出水的NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度分别为7.1~10.2和21.3~29.8 mg/L,脱氮效率(NRE)的平均值为30.5%。经核算,该阶段约有12.7%的NH₄⁺-N被完全硝化,表明NOB没有被很好地抑制。同时,NH₄⁺-N去除率很低,表明AOB的活性较差。

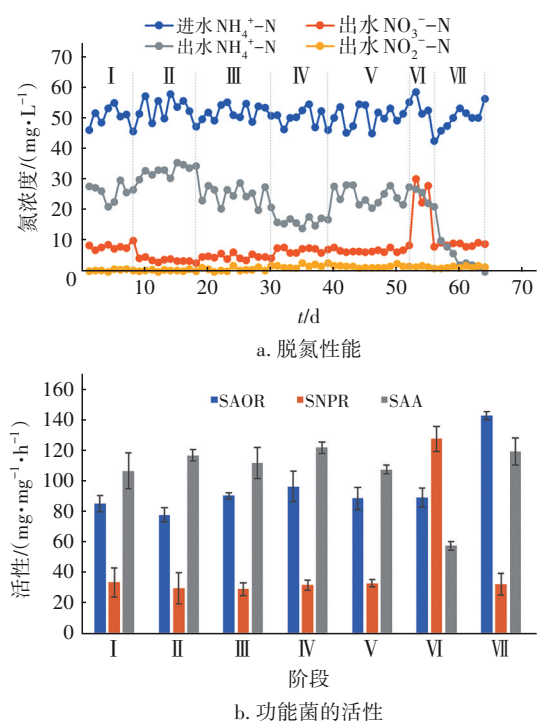


图2 不同曝气模式下反应器的脱氮性能和功能菌的活性

Fig.2 Nitrogen removal performance and activity of functional bacteria in different aeration modes

阶段Ⅱ出水 NO_3^--N 浓度下降到2.8~4.9 mg/L, NH_4^+-N 浓度上升到30.0~35.6 mg/L, NRE为29.6%,表明该阶段DO不足, NH_4^+-N 转化率低是制约脱氮的主要因素。与阶段Ⅰ相比,该阶段SNPR下降了12.82%,SAOR下降了7.89%,意味着间歇曝气对NOB的抑制作用更强。SAA增加了8.70%是由于系统中的DO浓度较小,这对AnAOB的生长是有利的。

阶段Ⅲ将DO提高到0.8~1.0 mg/L时,出水 NH_4^+-N 浓度下降到20.1~29.1 mg/L, NRE提高到40.9%, NO_3^--N 略微增加至4.2~6.4 mg/L, SNPR没有明显变化(每次测定活性时,所取填料不能保证完全相同,当两阶段填料活性相差较小时,测算出的SNPR差异可能无法体现)。可见,在45 min/45 min的间歇曝气模式下,DO浓度为0.8~1.0 mg/L比较合适。阶段Ⅳ将曝气时间缩短至20 min,为保持 NH_4^+-N 的转化率,增加了曝气量,将曝气结束时的DO浓度提高至1.0~1.3 mg/L。结果表明,SAOR增加了7.06%,SNPR增加了13.07%,表明对NOB的抑制没有得到缓解。但是由于 NH_4^+-N 转换率的增加,NRE上升到49.3%。

阶段Ⅴ和阶段Ⅵ延长非曝气时间至60 min,考

察是否能改善对NOB的抑制。但与阶段Ⅳ相比,阶段Ⅴ的SNPR和出水 NO_3^--N 浓度没有明显变化,说明延长曝气时间没有效果。另外,阶段Ⅴ的NRE降至33.9%,SAOR也下降了6.37%。因此,阶段Ⅵ将DO增加至1.3~1.5 mg/L。然而,系统脱氮效果发生了进一步的恶化,平均出水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 分别增加到22.3~26.9和22.6~30.4 mg/L。SNPR从33.1 mg/(mg·h)迅速增加到127.3 mg/(mg·h),与阶段Ⅴ相比,该阶段SAOR没有明显变化,SAA从107.2 mg/(mg·h)下降到57.6 mg/(mg·h)。这可能是由于该阶段高浓度的DO渗透到生物膜的内部,对AnAOB产生了较强的抑制作用,由于AnAOB与NOB竞争 NO_2^--N ^[16],当AnAOB被抑制时,NOB的活性得到较大提高。

阶段Ⅴ和阶段Ⅵ的数据表明,将非曝气时间从45 min延长到60 min是不可取的,曝气阶段结束时的DO不应超过1.3~1.5 mg/L。阶段Ⅶ非曝气时间减少到20 min,DO降低到1.0~1.3 mg/L。与阶段Ⅳ相比,阶段Ⅶ的 NH_4^+-N 转化率明显提高, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的出水浓度分别下降到0.2~10.1和8.2~9.6 mg/L, NRE为76.7%。第Ⅶ阶段的细菌活性表明,调整溶解氧以后,SNPR立即下降到32.7 mg/(mg·h),表明NOB恢复到被抑制状态。该阶段的SAOR达到142.3 mg/(mg·h),高于其他阶段的水平。阶段Ⅶ的脱氮效果较好,在该试验条件下,采用20 min曝气/20 min非曝气的间歇性曝气模式,DO浓度为1.0~1.3 mg/L最合适。

试验期间,除了在阶段Ⅵ系统发生崩溃外,其他各阶段SAA和SNPR的变化并不明显。有研究指出^[17],在高频率开/关曝气的环境中,具有更快的氨氧化率的AOB菌可以被保留,NOB可以更有效地被抑制。本研究中,阶段Ⅶ的开/关曝气频率实际上高于阶段Ⅱ和阶段Ⅲ,而阶段Ⅶ的SNPR值高于阶段Ⅱ和阶段Ⅲ,这主要是受阶段Ⅵ发生崩溃的影响,NOB仍然保持一定的活性。阶段Ⅶ与其他阶段的主要不同表现是SAOR的数值较高。在阶段Ⅰ~Ⅴ, SAA>SAOR>SNPR。然而,阶段Ⅶ中SAOR>SAA>SNPR。这可能是由于该阶段具有较快氨氧化速率的AOB比AnAOB更有竞争力。在生物膜系统中,由于扩散阻力的原因,保持高氨氮转化率至关重要。可见,合理的间歇性曝气模式可提高氨氮和总氮的去除率,同时抑制NOB。

2.2 间歇曝气周期内氮素的变化

利用阶段Ⅲ和阶段Ⅶ分析曝气/非曝气时间的影响,一个曝气/非曝气周期内DO和出水氮素的情况如图3所示。可以看出,整个周期内反应器的DO浓度不断变化,阶段Ⅲ和阶段Ⅶ中,DO浓度超过0.5 mg/L的时间分别为47 min和22 min,均占整个周期约一半的时长。在不同的DO浓度和间歇曝气模式下,虽然反应器为连续进水状态,但由于一个曝气/非曝气周期的时间相对于系统的HRT来说较小,所以曝气和非曝气时段出水氮素浓度整体上变化不大。另外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在曝气阶段出现小幅度下降,在非曝气阶段又略微回升, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的变化规律相反。与阶段Ⅲ相比,阶段Ⅶ出水氮素浓度的变化幅度更小。

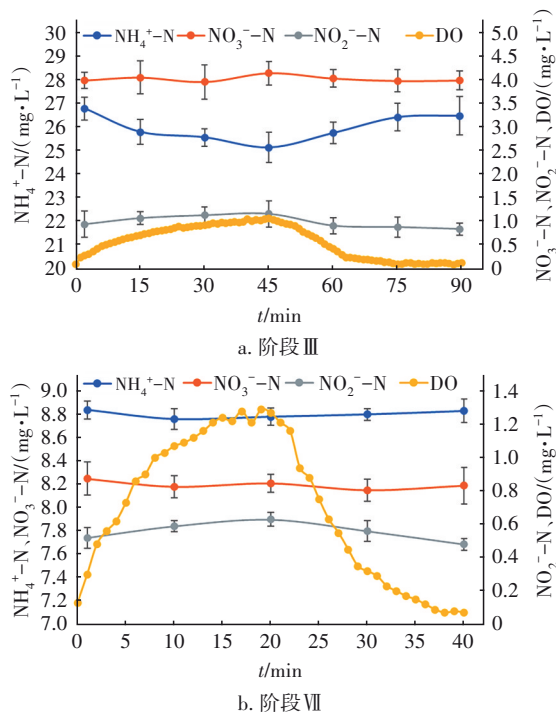


图3 阶段Ⅲ和阶段Ⅶ一个曝气/非曝气周期内DO和出水氮素情况

Fig.3 Change of DO and nitrogen concentration at phase III and VII during one aeration/non-aeration cycle

污水处理过程中,硝化系统中的NOB通常是*Nitrobacter*和*Nitrospira*,由于*Nitrobacter*更适合在 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度较高的环境中生存^[18],所以低氨氮废水中的NOB主要是*Nitrospira*。在有传质阻力的条件下,*Nitrospira*的基质半饱和常数是0.9~1.1 mg/L^[19]。从阶段Ⅲ和阶段Ⅶ中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度情况可以看出,与

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度相比,虽然两个阶段中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均非常低,但是阶段Ⅲ中曝气后 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度达0.94~1.16 mg/L,与NOB的半饱和常数较接近,而在阶段Ⅶ中曝气后 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为0.52~0.63 mg/L,阶段Ⅲ中较高的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度促进了NOB(特别是*Nitrospira*这类贫营养微生物)的生长。从阶段Ⅲ还可以看出,非曝气阶段开始后,15 min内 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度下降较为明显,之后几乎不再继续下降,表明大部分氮的转化在15 min内完成,因此设定过长的非曝气时间对NOB的抑制作用不大,相反会降低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化率,降低AOB活性。事实上,在其他条件下,曝气结束时保持系统NOB抑制状态的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度是不同的。例如,Wang等人^[20]的研究表明, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度约为0.3 mg/L,可能是由于在20~23 °C的较低温度条件下硝化菌的半饱和常数较低。

2.3 菌群结构的特征

系统中门和属水平的微生物丰度如图4所示。变形菌门*Proteobacteria*、浮霉菌门*Planctomycetes*、绿弯菌门*Chloroflexi*、拟杆菌门*Bacteroidetes*以及*Ignavibacteriae*是3个样品中相对丰度较高的菌门。脱氮细菌主要为变形菌门*Proteobacteria*、浮霉菌门*Planctomycetes*和硝化螺旋菌门*Nitrospirae*。变形菌门*Proteobacteria*在3个样品中的丰度分别为38.76%、24.11%、24.77%,样品1的丰度明显高于样品2和3;硝化螺旋菌门*Nitrospirae*在3个样品中的丰度分别为1.16%、2.41%和2.03%,S2的丰度最高;浮霉菌门*Planctomycetes*在3个样品中的丰度分别为23.65%、25.56%和25.74%,差异较小。变形菌门*Proteobacteria*是厌氧系统的常见菌群,几乎涵盖硝化菌中的所有AOB、NOB和异养反硝化菌(HDB),硝化螺旋菌门*Nitrospirae*是一类NOB菌群,浮霉菌门则是AnAOB所在的菌门。3个样品脱氮菌群的丰度数据表明,在高氨氮浓度情况下,AOB和HDB的生长较好,NOB得到了有效控制;在低浓度条件下,NOB被抑制的程度有所减弱,但是整体上仍得到了控制。

属水平上检测出的硝化菌主要包括g_*Nitrospira*和g_*Nitrosomonas*,前者为NOB菌属,后者为AOB菌属。g_*Nitrospira*在S1、S2、S3中的丰度分别为0.76%、2.94%和1.02%。可以看出,S1和S3中NOB被抑制得较为彻底。g_*Nitrosomonas*在S1、S2、S3中的丰度分别为13.06%、5.36%和4.49%,S2和S3差

别不大。选择厌氧氨氧化菌所在的 *Planctomycetes* 门进行分析,结果显示,其中的 *Candidatus_Brocadia*、*Candidatus_Jettenia*、*Candidatus_Kuenenia*、*Candidatus_Scalindua* 属是具有厌氧氨氧化功能菌属。*Candidatus_Brocadia* 在3个样品中的丰度水平没有显著差别;*Candidatus_Jettenia* 在S1、S2、S3中的丰度分别为3.96%、0.79%和0.50%,并且在S1中的丰度最高;*Candidatus_Kuenenia* 在S1、S2、S3中的丰度分别为15.76%、20.51%和21.53%,并且在样品1中的丰度最低。有研究表明,与其他厌氧氨氧化菌属相比,*Candidatus_Kuenenia* 能在低基质环境中保持较高的活性^[21],而 *Candidatus_Jettenia* 适于在高浓度氨氮的环境中生长^[22],与上述结论一致。本研究结果表明,*Candidatus_Kuenenia* 更适合处理低浓度废水。

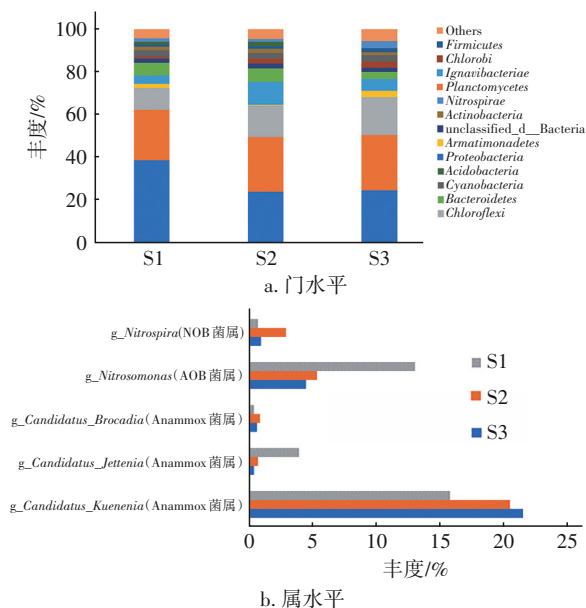


图4 门和属水平的微生物丰度

Fig.4 Microbial abundance at phylum and genus levels

3 结论

① 连续流悬浮载体CANON反应器采用间歇曝气,可以实现中温条件下低氨氮废水的自养脱氮。当进水氨氮浓度为40~50 mg/L、温度为 $(30.1 \pm 2.2)^\circ\text{C}$ 时,最优的曝气模式是:曝气和非曝气时间均为20 min,曝气末期DO为1.0~1.3 mg/L。间歇曝气能通过增加AOB活性而抑制NOB,从而提高系统的TN去除率,间歇曝气时NOB所在的 *g_Nitrospira* 菌属被抑制得较为彻底。

② 本试验仅考察了较短时间内CANON反应器处理低氨氮废水的运行情况,旨在寻找最佳的曝

气模式。虽然试验期间的60 d内NOB基本处于被抑制状态,但是由于运行期间并未控制出水氨氮浓度,长期运行后AOB缺乏底物,在与NOB的竞争中容易被淘汰,因而可能出现系统整体崩溃的风险,需对其进行长期跟踪研究。

参考文献:

- [1] 王亚宜,黎力,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).
- [2] DAIGGER G T. Oxygen and carbon requirements for biological nitrogen removal processes accomplishing nitrification, nitritation, and anammox [J]. Water Environment Research, 2014, 86(3): 204-209.
- [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(15): 292-303.
- [4] MAO N J, REN H Q, GENG J J, et al. Engineering application of anaerobic ammonium oxidation process in wastewater treatment [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2017, 33(8): 153.
- [5] LI J W, LI J L, GAO R T, et al. A critical review of one-stage anammox processes for treating industrial wastewater: optimization strategies based on key functional microorganisms [J]. Bioresource Technology, 2018, 265: 498-505.
- [6] LACKNER S, GILBERT E M, VLAEMINCK S E, et al. Full-scale partial nitritation/anammox experiences: an application survey [J]. Water Research, 2014, 55: 292-303.
- [7] 杨忠启,周家中,韩文杰,等. 基于纯膜MBBR的CANON工艺稳定运行及抗冲击性分析[J]. 环境工程, 2021, 39(8): 15-24,33.
YANG Zhongqi, ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, et al. Stable operation and impact resistance of CANON process based on pure MBBR [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(8): 15-24,33(in Chinese).
- [8] 吴军,张悦,徐婷,等. AOB溶解氧亲和力低于NOB条件下序批反应器中NOB淘汰的实现机制[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3583-3590.

- WU Jun, ZHANG Yue, XU Ting, *et al.* Mechanisms of partial nitrification in sequencing batch reactor under the condition of AOB oxygen affinity lower than NOB [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12): 3583–3590 (in Chinese).
- [9] LIU G Q, WANG J M. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(10): 5109–5117.
- [10] GE S J, PENG Y Z, QIU S, *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: 95–105.
- [11] GABARRÓ J, AMO E H D, GICH F, *et al.* Nitrous oxide reduction genetic potential from the microbial community of an intermittently aerated partial nitritation SBR treating mature landfill leachate [J]. *Water Research*, 2013, 47(19): 7066–7077.
- [12] ZEKKER I, RIKMANN E, KROON K, *et al.* Ameliorating nitrite inhibition in a low-temperature nitritation–anammox MBBR using bacterial intermediate nitric oxide [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, 14(2): 2343–2356.
- [13] KLAUS S, BAUMLER R, RUTHERFORD B, *et al.* Startup of a partial nitritation–anammox MBBR and the implementation of pH-based aeration control [J]. *Water Environment Research*, 2017, 89(6): 500–508.
- [14] 杨平,周家中,管勇杰,等. 基于MBBR的AAO和Bardenpho工艺改造效果对比[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(7): 11–19.
- YANG Ping, ZHOU Jiazhong, GUAN Yongjie, *et al.* Comparison of AAO and Bardenpho processes transformation effect based on MBBR [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(7): 11–19 (in Chinese).
- [15] KOWALSKI M S, DEVLIN T, DI BIASE A, *et al.* Accelerated start-up of a partial nitritation–anammox moving bed biofilm reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2019, 145: 83–89.
- [16] 李佳,李夕耀,张琼,等. 投加羟胺原位恢复城市污水短程硝化–厌氧氨氧化工艺[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 2789–2795.
- LI Jia, LI Xiyao, ZHANG Qiong, *et al.* *In-situ* restoring domestic wastewater partial nitritation/anammox (PN/A) process by addition of hydroxylamine [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(7): 2789–2795 (in Chinese).
- [17] 李冬,郭跃洲,劳会妹,等. 基于部分硝化的不同曝停频率下脱氮性能的比较[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(8): 8–13.
- LI Dong, GUO Yuezhou, LAO Huimei, *et al.* Comparison of nitrogen removal performances based on partial nitrification at different frequencies of alternating aerobic/anoxic [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(8): 8–13 (in Chinese).
- [18] GE S J, WANG S Y, YANG X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: a review [J]. *Chemosphere*, 2015, 140: 85–98.
- [19] NOWKA B, DAIMS H, SPIECK E. Comparison of oxidation kinetics of nitrite-oxidizing bacteria: nitrite availability as a key factor in niche differentiation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81(2): 745–753.
- [20] WANG W G, WANG Y Y, WANG X D, *et al.* Dissolved oxygen microelectrode measurements to develop a more sophisticated intermittent aeration regime control strategy for biofilm-based CANON systems [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 365: 165–174.
- [21] 毛泓宇,谢丽,陆熙,等. 厌氧颗粒污泥自启动厌氧氨氧化反应特性研究[J]. *环境工程*, 2020, 38(1): 93–98, 104.
- MAO Hongyu, XIE Li, LU Xi, *et al.* Characteristics of anaerobic ammonium oxidation initiated by anaerobic granular sludge [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(1): 93–98, 104 (in Chinese).
- [22] 高超龙,隋倩雯,陈彦霖,等. 进水浓度对厌氧氨氧化脱氮与微生物特性的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(4): 26–34.
- GAO Chaolong, SUI Qianwen, CHEN Yanlin, *et al.* Effects of influent concentration on nitrogen removal and the microbial characteristics of anammox process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(4): 26–34 (in Chinese).

作者简介:夏琼琼(1981–),女,江苏泗洪人,博士,高级工程师,研究方向为污水资源化利用。

E-mail: xqqwater@126.com

收稿日期: 2022-05-13

修回日期: 2022-06-18

(编辑:任莹莹)