

论述与研究

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.001

CANON 工艺的快速启动及微生物群落结构研究

杨开亮^{1,2}, 廖德祥¹, 马义平², 吴新锋¹, 许乐平²

(1. 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: 以模拟废水为处理对象,采用以彗星式丝状纤维填料为生物膜载体的序批式生物膜反应器(SBBR),探究全程自养脱氮(CANON)工艺的快速启动情况。通过接种普通活性污泥,采用先严格厌氧富集厌氧氨氧化菌(AnAOB)的策略,耗时39 d成功富集AnAOB,对TN的去除率达到82.3%;通过缩短HRT、递减 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度、控制DO在0.1~0.3 mg/L的方法,运行13 d实现AOB的快速富集。反应器运行78 d成功启动CANON工艺, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN去除率分别为97.3%和83.3%,TN去除负荷达到0.127 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)。高通量测序结果显示,在运行173 d后生物膜中浮霉菌门(*Planctomycetes*)相对丰度由1.99%增至56.44%,而变形菌门(*Proteobacteria*)从65.09%降至13.67%;AOB和AnAOB分别为*Nitrosomonas*和*Candidatus_Jettenia*,相对丰度分别由2.28%和0增至3.37%和41.88%,NOB为*Nitrospira*,相对丰度从3.27%降至0.27%。

关键词: 全程自养脱氮(CANON)工艺; 彗星式丝状纤维填料; 快速启动; 微生物群落结构; *Candidatus_Jettenia*

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2020)23-0001-07

Rapid Start-up and Microbial Community Structure of CANON Process

YANG Kai-liang^{1,2}, LIAO De-xiang¹, MA Yi-ping², WU Xin-feng¹, XU Le-ping²

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Rapid start-up of a completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process for the treatment of simulated wastewater was explored in a SBBR. The system was filled with comet filamentous filter material and seeded with conventional activated sludge. Anaerobic ammonia oxidizing bacteria (AnAOB) were enriched successfully in 39 days by adopting the strategy of strict anaerobic enrichment of AnAOB, and the removal efficiency of TN reached 82.3%. Then, ammonia oxidizing bacteria (AOB) were enriched rapidly in 13 days by shortening the HRT, gradually decreasing the concentration of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and controlling DO between 0.1 mg/L and 0.3 mg/L. The CANON process was successfully started up after 78 days, in which the removal efficiencies of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN were up to 97.3% and 83.3%, respectively, and the TN removal load reached 0.127 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$).

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(511109126); 上海市自然科学基金资助项目(11ZR1415000); 上海市国际科技合作基金资助项目(17230732300)

通信作者: 廖德祥 E-mail: dexiangliao@163.com

High-throughput sequencing showed that the relative abundance of *Planctomycetes* increased from 1.99% to 56.44%, while *Proteobacteria* decreased from 65.09% to 13.67%. AOB and AnAOB were *Nitrosomonas* and *Candidatus_Jettenia* in the biofilm, and their relative abundance increased from 2.28% and 0 to 3.37% and 41.88%, respectively. The nitrite oxidizing bacteria (NOB) were *Nitrospira*, with the relative abundance decreasing from 3.27% to 0.27%.

Key words: completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process; comet filamentous filter material; rapid start-up; microbial community structure; *Candidatus_Jettenia*

与传统生物脱氮工艺相比,全程自养脱氮(CANON)工艺具有曝气量小、无需外加有机碳源、运行成本低、产生污泥量少等优点^[1],被广泛应用于高浓度氨氮废水的处理^[2-4],近年来针对城市生活污水的处理也进行了相关研究^[5-6]。CANON工艺成功启动和稳定运行的核心是将好氧的氨氧化菌(AOB)和厌氧的厌氧氨氧化菌(AnAOB)高效富集,同时抑制亚硝酸盐氧化菌(NOB)的生长。但AnAOB的倍增时间长达11 d^[7],远高于AOB,DO和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度过高时AnAOB活性明显受到抑制^[8-9],导致其启动时间较长^[10]。目前多采用先曝气培养AOB建立亚硝化反应后再富集AnAOB的方法启动CANON反应器^[10-11],接种污泥中通常含有AnAOB^[2,12-13],而接种普通活性污泥快速启动的研究较少,同时CANON工艺快速启动和稳定运行各阶段的微生物群落演替分析方面还少有研究。鉴于此,笔者利用以新型彗星式丝状纤维填料^[14]为生物膜载体的序批式生物膜反应器(SBBR),以污水处理厂普通活性污泥为种泥,先严格厌氧富集AnAOB,然后缩短HRT、逐渐降低进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度以及低曝气培养AOB,探究CANON工艺的快速启动和稳定运行效能;同时利用高通量测序技术分析不同阶段的微生物群落组成变化,以期为CANON工艺的工程应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示,SBBR反应器呈圆柱形,采用有机玻璃制成,内径为22 cm,高度为30 cm,有效容积为8 L,充水比为0.7;以彗星式丝状纤维填料作为生物膜载体,填料堆积体积为1.5 L,材质为聚乙烯,堆积密度为60~80 kg/m³,形状类似于彗星,中间内核将纤维固定,两端呈放射状(如图2所示),内核直径×丝束直径×长度约为2.3 mm×0.43 mm×36 mm,比表面积约为1 100 m²/m³。反

应器顶部设置在线pH和DO电极,加热棒自动控制温度为(35±1)℃。反应器底部安装曝气盘,通过气体流量计调节曝气量,两侧分别安装潜水泵进行搅拌,进出水和pH值调节溶液分别通过蠕动泵控制。为了避免光线对反应器造成影响,装置外部用黑色塑料袋包裹。

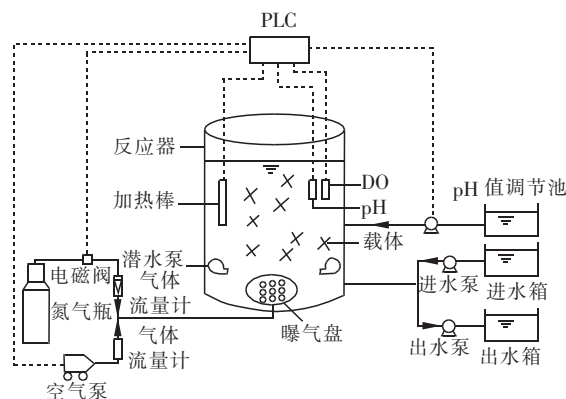


图1 SBBR反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBBR reactor



图2 反应器内的生物膜载体

Fig. 2 Biofilm carrier in reactor

1.2 试验用水和接种污泥

试验采用人工模拟废水,以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NaNO_2 作为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的来源, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为30~500 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度为20~120 mg/L,其他主要成分如下: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为200 mg/L, CaCl_2 为150 mg/L, NaHCO_3 为1 000 mg/L, KH_2PO_4 为87 mg/L。微量元素浓缩液为0.25 mL/

L,组分如下: $\text{FeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 7 500 mg/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 750 mg/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 380 mg/L, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为 440 mg/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 为 150 mg/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为 600 mg/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 600 mg/L, H_3BO_4 为 28 mg/L。

接种污泥为上海临港污水处理厂二沉池的回流污泥,污泥静置 24 h 后,接种下层浓缩污泥 500 mL,其 MLSS 为 41.55 g/L,MLVSS 为 19.24 g/L。

1.3 工艺运行方法及控制

试验分为 3 个阶段,反应器的排水比为 90%,每周期包括进水(0.15 h)、混合反应(11.5 ~ 23.5 h)、静置(0.2 h)、出水(0.15 h)。阶段 I 为 AnAOB 富集阶段,pH 值为 8.0 左右,进水经高纯氮吹脱除氧,控制 DO 在 0.1 mg/L 以下;阶段 II 为 AOB 富集阶段,通过高纯氮气和空气泵启停控制反应器内部 DO 在 0.1 ~ 0.3 mg/L,采用 10% 的 NaOH 溶液控制 pH 值在 7.2 ~ 7.7 之间;阶段 III 为 CANON 工艺负荷提升期,运行方法和阶段 II 相同。反应器启动及稳定运行过程中的参数如表 1 所示。

表 1 试验期间反应器运行参数

Tab. 1 Operation parameters of reactor during test period

阶段	运行时间/d	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NO}_2^- - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	HRT/h	DO/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
I	1 ~ 45	30	39.6	24	<0.1
	46 ~ 55	60	79.2	24	<0.1
	56 ~ 60	90	118.8	24	<0.1
	61 ~ 65	90	118.8	12	<0.1
II	66 ~ 68	90	45	12	0.1 ~ 0.3
	69 ~ 71	90	22.5	12	0.1 ~ 0.3
	72 ~ 78	120	0	12	0.1 ~ 0.3
III	79 ~ 103	180	0	12	0.1 ~ 0.3
	104 ~ 173	300	0	12	0.3 ~ 0.5
	174 ~ 215	500	0	12	0.4 ~ 0.7

1.4 水质分析方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: $\text{N} - (1 - \text{萘基}) - \text{乙二胺}$ 分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$: 酚二磺酸分光光度法; TN: $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度之和; MLSS、MLVSS: 重量法; pH 值: 在线 pH 计; 溶解氧: 在线 DO 计。

1.5 高通量 16S rRNA 测序

1.5.1 样品采集与保存

样品分别是接种污泥、阶段 I (第 65 天) 及阶段 III (第 173 天) 反应器内不同区域采集的生物膜

载体,分别装入无菌塑料离心管,标记为 S1、S2 及 S3,于 -20°C 冰箱保存。

1.5.2 Illumina MiSeq 测序

使用 E. Z. N. A.® soil DNA kit (Omega Bio-tek, Norcross, GA, U. S.) 按照厂家说明书进行具体操作,从样品中提取总 DNA,使用 NanoDrop 2000 验证 DNA 浓度和纯度。选取 16S rRNA 基因 V3 ~ V4 可变区进行 PCR 扩增,使用特异性引物 338F (5' - ACTCCTACGGGAGGCAGCAG - 3') 和 806R (5' - GGACTACHVGGGTWTCTAAT - 3'), Illumina MiSeq 高通量测序由上海美吉生物医药科技有限公司完成。利用 UPARSE 软件,按 97% 的相似度对序列进行操作分类单元 (OTU) 聚类,利用 RDP 分类器对每条序列进行物种分类。

2 结果与讨论

2.1 厌氧氨氧化菌富集

阶段 I (1 ~ 65 d) 反应器采用低基质进水, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度分别为 30 mg/L 和 39.6 mg/L,严格厌氧培养富集 AnAOB,运行期间各形态氮浓度的变化如图 3 ~ 5 所示。试验初期,接种污泥中大部分微生物衰亡裂解释放 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和有机物,导致出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度高于进水,而接种污泥中的反硝化菌发生反硝化反应^[15]使得 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度接近 0。第 21 天时,反应器出现 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 同步去除现象,去除率分别为 32.3% 和 20.7%, TN 去除率达到 26.7%,反应器中出现厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 反应,已有研究表明接种含有 AnAOB 的混合污泥运行 17 d 出现厌氧氨氧化现象^[15]。至第 39 天, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 及 TN 去除率分别达到 98.0%、88.2% 及 82.3%, ANAMMOX 反应快速启动成功。

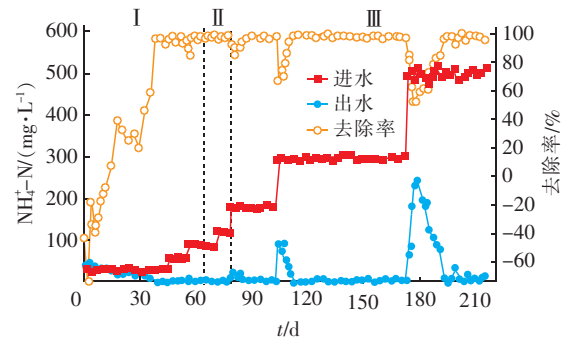


图 3 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变化

Fig. 3 Change of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration

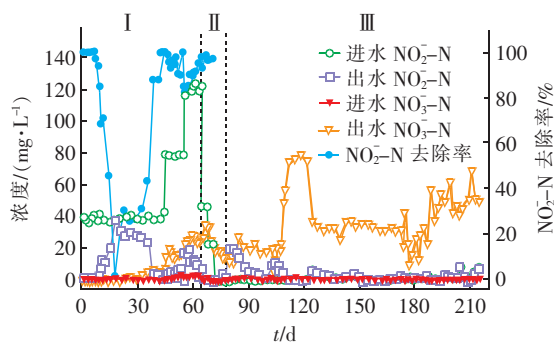
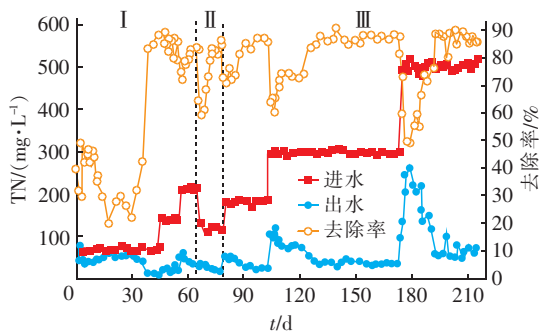
图4 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化Fig. 4 Change of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentrations

图5 TN 浓度的变化

Fig. 5 Change of TN concentration

在稳定运行阶段,从第48天起逐步提高进水基质浓度,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度小幅波动,运行几个周期后对两者的去除率保持稳定,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度逐渐升高,如图6所示, $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值逐渐接近理论值0.26^[7],反应器内ANAMMOX反应持续加强。为了进一步提高反应器的去除负荷,从第61天起将HRT缩短到12 h,对TN的去除率超过81.4%并缓慢增长,表明反应器内AnAOB活性较好。

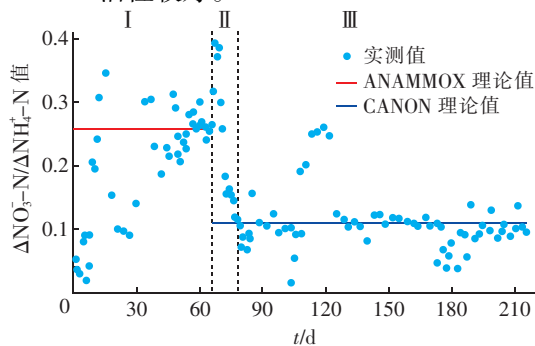


图6 底物去除比例的变化

Fig. 6 Change of substrate removal ratio

2.2 氨氧化菌快速富集

阶段II(66~78 d)的目的是富集CANON工艺中的AOB,同时抑制NOB的生长。运行至第66天,控制DO在0.1~0.3 mg/L区间富集AOB,并逐渐降低进水中的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度, $\text{NO}_2^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值依次降低到0.5(66~68 d)、0.25(69~71 d)和0(72~78 d),同时提升 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度至120 mg/L左右(72~78 d)。从图3~6可以看出, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率稳定在96.6%以上, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度逐渐降至0, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度先小幅升高后快速下降,第72~78天TN平均去除负荷和平均去除率分别为0.127 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)和83.3%,接近CANON工艺的最大TN去除率89%^[16],同时 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值也逐渐接近理论值0.11^[16],表明反应器成功启动CANON工艺。反应器在13 d内完成了AOB的高效富集,并成功抑制NOB活性,AOB的富集时间远低于其他研究报道^[11]。其原因是丝状纤维填料具有丝状结构特征,比表面积大,有利于微生物快速富集,同时严格控制DO浓度,抑制NOB与AOB竞争DO,促进了AOB快速增长。

2.3 负荷提升期间的脱氮性能

CANON工艺启动成功后,为进一步提高反应器的脱氮能力,保持HRT为12 h,在第79、104、174天进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度分别提高到180、300、500 mg/L。从图3可以看出,每次提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度之后,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度明显增大,且进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度增幅越大,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度就越高,例如第174天进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度提高到500 mg/L后,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度快速升高,运行至第179天时高达242.9 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率降至52.6%,TN去除率降至49.3%;而出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度未出现大幅上升,保持在较低浓度。其原因是AOB对高浓度基质敏感,大幅提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度后,系统内AOB遭受到冲击产生抑制作用,导致出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高,转化的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 较少,AnAOB缺乏充足的底物进行ANAMMOX反应,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度也小幅下降^[2],最终造成出水TN浓度明显上升,TN去除率急剧下降。从图3~5可以看出,反应器继续运行几天后,AOB逐渐适应,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度快速下降,ANAMMOX反应增强,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度逐渐上升,TN去除率快速升高,反应器的脱氮性能得到

恢复并保持稳定;在第 193~215 天,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN 的平均浓度分别为 10.73、2.97、50.97、65.17 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 平均去除率分别达到 97.9% 和 87.0%,非常接近 CANON 工艺的最大 TN 去除率 89%^[16],表明系统脱氮效果良好, TN 平均去除负荷从启动成功时的 0.127 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$) 提高到 0.548 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)。此外,从图 6 可以看出,每次提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度之后,系统的 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值均会偏离理论值较远,但是随着反应器脱氮性能的恢复与稳定, $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值逐渐接近理论值 0.11^[16]。

2.4 启动期间和负荷提升期间的微生物变化

SBBR 中微生物群落结构的门水平变化如图 7 所示。

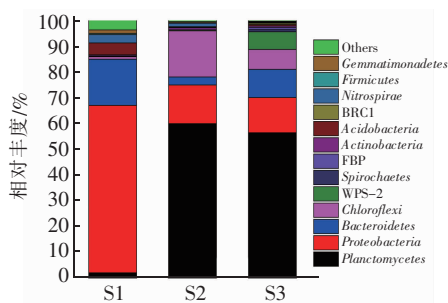


图 7 SBBR 中微生物群落结构门水平分布

Fig. 7 Distribution of microbial community structure in SBBR on phylum level

反应器接种污泥运行 65 d 后,浮霉菌门 (*Planctomycetes*) 和绿弯菌门 (*Chloroflexi*) 的相对丰度分别从 1.99% 和 0.98% 增长到 59.98% 和 17.93%,而变形菌门 (*Proteobacteria*) 和拟杆菌门 (*Bacteroidetes*) 分别从 65.09% 和 17.94% 下降到 15.03% 和 3.10%。有研究报道,大部分 AnAOB 属于浮霉菌门^[15], AnAOB 富集阶段浮霉菌门相对丰度大幅提高,同时反应器 TN 去除率超过 80%,与微生物群落结果变化一致。丰度亦大幅增加的绿弯菌门是兼性厌氧菌,有助于 AnAOB 的聚集^[17],其外形为丝状结构,有利于生物膜的形成^[18],还能将衰亡的 AnAOB 作为有机碳源^[19]。提升进水基质浓度运行至第 173 天,主要脱氮功能菌门 *Planctomycetes* 和 *Proteobacteria* 的相对丰度略有下降, *Chloroflexi* 的相对丰度从 17.93% 降低到 7.77%,而 *Bacteroidetes* 则从 3.10% 上升到 10.96%,研究表明 *Bacteroidetes* 为丝状结构,对生物膜的形成有促进作用^[18]。此外,

WPS-2 的相对丰度从 0.06% 提升至 6.85%,该菌种在其他反应器也出现过^[5],但具体功能目前还不明确。

微生物群落结构的属水平变化如图 8 所示,反应器中仅检测出一种 AnAOB,为 *Candidatus_Jettenia*,第 65 天其相对丰度从接种污泥的 0 增长到 46.29%,负荷提升后的第 173 天其相对丰度略下降到 41.88%,但其相对丰度始终占据绝对优势,与张铃敏等人^[12]研究 CANON 工艺恢复时,两个 SBR 中 *Candidatus_Jettenia* 相对丰度分别为 46.68% 和 49.98% 的试验结果一致。未检出其他研究中常见的 *Candidatus_Brocadia* 和 *Candidatus_Kuenenia* 两种 AnAOB^[15,20-21]。*Planctomycetes* 门下的 SM1A02 相对丰度高达 13.11%,第 173 天增长至 14.45%,在其他研究中也发现^[22],但其功能有待研究,可能是未来的 AnAOB^[22]。*Nitrosomonas* 是系统中唯一检出的 AOB,由于 ANAMMOX 阶段的缺氧环境,其相对丰度由 2.28% 降低到 0.17%,第 173 天上升到 3.37%,保证了短程硝化的稳定运行。NOB 菌属为 *Nitrospira*,其相对丰度从 3.27% 下降到 1.38%,第 173 天降低到 0.27%,表明 NOB 已经被淘汰。此外,属于 WPS-2 门的 *norank_f_WPS-2* 相对丰度从 0.06% 增加到 0.36%,并且随后增至 6.85%,但有关其功能的研究报道较少。

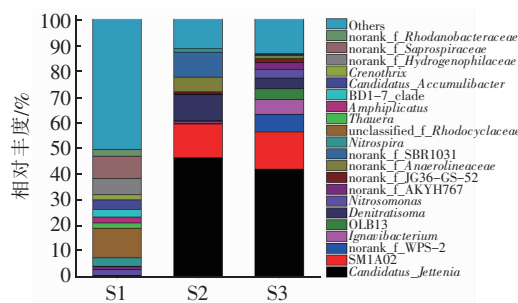


图 8 SBBR 中微生物群落结构属水平分布

Fig. 8 Distribution of microbial community structure in SBBR on genus level

3 结论

① 采用以彗星式丝状纤维填料为生物膜载体的 SBBR,接种普通污泥,在低基质和严格厌氧条件下,运行 39 d 成功启动 ANAMMOX 反应, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 及 TN 去除率分别达到 98.0%、88.2% 及 82.3%;控制 DO 在 0.1~0.3 mg/L 之间,分步降低进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度,运行 13 d 成功启动亚硝化过

程,并成功将 NOB 从系统中淘汰。

② 彗星式丝状纤维填料独特的丝状结构特征以及较大的比表面积,有利于微生物附着繁殖,加速了 AnAOB 和 AOB 的富集生长,反应器运行培养 78 d 即实现快速启动 CANON 工艺,进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 浓度分别为 119.8 和 120.4 mg/L 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率分别达到 97.3% 和 83.3%,TN 去除负荷达到 0.127 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)。

③ 负荷提升期间,AOB 相较于 AnAOB 对高浓度基质敏感,提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度后,系统内 AOB 遭受到冲击产生短期抑制作用,导致反应器脱氮性能下降;反应器继续运行数个周期后,AOB 逐渐适应,系统脱氮性能逐渐恢复,但恢复周期随进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的递增而延长。

④ 高通量测序结果发现,AnAOB 富集期间,浮霉菌门(*Planctomycetes*)和绿弯菌门(*Chloroflexi*)相对丰度大幅提升,分别从 1.99% 和 0.98% 增至 59.98% 和 17.93%,而变形菌门(*Proteobacteria*)和拟杆菌门(*Bacteroidetes*)分别从 65.09% 和 17.94% 降至 15.03% 和 3.10%。运行 65 d 反应器中仅检出一种 AnAOB 即 *Candidatus_Jettenia*,相对丰度从 0 增至 46.29%,AnAOB 实现快速高效富集;负荷提升期间,*Candidatus_Jettenia* 的相对丰度略降至 41.88%。*Nitrosomonas* 是系统中唯一检出的 AOB,相对丰度从 AnAOB 富集期间的 0.17% 升至负荷提升阶段的 3.37%;NOB 菌属为 *Nitrospira*,相对丰度从最初的 3.27% 持续降至 0.27%。

参考文献:

- [1] Siegrist H, Salzgeber D, Eugster J, et al. Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal[J]. Water Sci Technol, 2008, 57(3): 383 - 388.
- [2] 耿忠轩,张立秋,吕玮,等. CANON 工艺处理老龄垃圾渗滤液的研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(17): 19 - 25.
Geng Zhongxuan, Zhang Liqiu, Lü Wei, et al. Treatment of aged landfill leachate by CANON process[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(17): 19 - 25 (in Chinese).
- [3] 王子凌,信欣,王锴,等. CANON 工艺处理猪场沼液的启动及微生物种群结构分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 3945 - 3953.
- Wang Ziling, Xin Xin, Wang Luo, et al. Start-up and microbial communities analysis of CANON process for the treatment of anaerobic digester liquor of swine wastewater (ADLSW) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(10): 3945 - 3953 (in Chinese).
- [4] Nhat P T, Biec H N, Mai N T T, et al. Application of a partial nitrification and anammox system for the old landfill leachate treatment [J]. Int Biodeter Biodegr, 2014, 95 (Part A): 144 - 150.
- [5] Zheng Z, Huang S, Bian W, et al. Enhanced nitrogen removal of the simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) biofilm reactor for treating mainstream wastewater under low dissolved oxygen (DO) concentration [J]. Bioresour Technol, 2019, 283: 213 - 220.
- [6] Malovanyy A, Trela J, Plaza E. Mainstream wastewater treatment in integrated fixed film activated sludge (IFAS) reactor by partial nitrification/anammox process [J]. Bioresour Technol, 2015, 198: 478 - 487.
- [7] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1998, 50(5): 589 - 596.
- [8] Strous M, Van Gerven E, Kuenen J G, et al. Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) sludge [J]. Appl Environ Microbiol, 1997, 63(6): 2446 - 2448.
- [9] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. Appl Environ Microbiol, 1999, 65(7): 3248 - 3250.
- [10] 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]. Environmental Science, 2009, 30(6): 1689 - 1694 (in Chinese).
- [11] 李思敏,左富民,吴坤茹. 石英砂-海绵填料 CANON 反应器的快速启动研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(3): 100 - 104.
Li Simin, Zuo Fumin, Wu Kunru. Rapid start-up of CANON reactor filled with quartz sand/sponge carrier [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(3): 100 - 104 (in Chinese).

- [12] 张铃敏,常青龙,史勤,等. CANON 工艺短程硝化恢复调控及微生物种群结构变化[J]. 中国环境科学, 2019,39(6):2354-2360.
- Zhang Lingmin, Chang Qinglong, Shi Qin, *et al.* The recovery regulation of a CANON system and variations in the microbial community [J]. China Environmental Science, 2019,39(6):2354-2360 (in Chinese).
- [13] Vázquez-Padín J R, Pozo M J, Jarpa M, *et al.* Treatment of anaerobic sludge digester effluents by the CANON process in an air pulsing SBR [J]. J Hazard Mater, 2009,166(1):336-341.
- [14] 杨开亮,占志强,王莹,等. 厌氧氨氧化菌活性的快速恢复及运行[J]. 上海海事大学学报, 2017,38(4):84-87.
- Yang Kailiang, Zhan Zhiqiang, WANG Ying, *et al.* Rapid activity recovery and operation of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2017, 38 (4): 84 - 87 (in Chinese).
- [15] 汪瑶琪,张敏,姜滢,等. 厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征[J]. 环境科学, 2017,38(12):5184-5191.
- Wang Yaoqi, Zhang Min, Jiang Ying, *et al.* Start-up and characteristics of the microbial community structure of ANAMMOX [J]. Environmental Science, 2017, 38 (12):5184-5191 (in Chinese).
- [16] Slikkers A O, Derwort N, Gomez J L C, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor [J]. Water Res, 2002,36(10):2475-2482.
- [17] Chen C, Huang X, Lei C, *et al.* Effect of organic matter strength on anammox for modified greenhouse turtle breeding wastewater treatment [J]. Bioresour Technol, 2013,148:172-179.
- [18] Guo F, Zhang T. Profiling bulking and foaming bacteria in activated sludge by high throughput sequencing [J]. Water Res, 2012,46(8):2772-2782.
- [19] Kindaichi T, Yuri S, Ozaki N, *et al.* Ecophysiological role and function of uncultured *Chloroflexi* in an anammox reactor [J]. Water Sci Technol, 2012, 66 (12):2556-2561.
- [20] 陈彦霖,隋倩雯,姜黎安,等. 厌氧氨氧化菌快速富集培养及微生物机制解析[J]. 中国给水排水, 2018,34(13):26-31.
- Chen Yanlin, Sui Qianwen, Jiang Li'an, *et al.* Quick enrichment of ANAMMOX bacteria and microbial community mechanism analysis [J]. China Water & Wastewater, 2018,34(13):26-31 (in Chinese).
- [21] Liu W, Yang D, Chen W, *et al.* High-throughput sequencing-based microbial characterization of size fractionated biomass in an anoxic anammox reactor for low-strength wastewater at low temperatures [J]. Bioresour Technol, 2017,231:45-52.
- [22] Yin T, Te S H, Reinhard M, *et al.* Biotransformation of Sulfuramid (N-ethyl perfluorooctane sulfonamide) and dynamics of associated rhizospheric microbial community in microcosms of wetland plants [J]. Chemosphere, 2018,211:379-389.



作者简介:杨开亮(1982-),男,安徽宁国人,博士研究生,工程师,主要研究方向为水污染治理与控制。

E-mail:klyang@shmtu.edu.cn

收稿日期:2020-02-24