

联氨对 HABR 全程自养脱氮系统的影响

鲍林林^{1,2,3}, 李晓珍^{1,2,3}, 李孙林^{1,2,3}, 蔡俊年⁴, 金彩霞^{1,2,3}

(1. 河南师范大学环境学院 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南 新乡 453007;
2. 河南师范大学 河南省环境污染控制重点实验室, 河南 新乡 453007; 3. 河南师范大学
河南省水处理关键技术国际联合实验室, 河南 新乡 453007; 4. 中油国际管道有限公司,
辽宁 沈阳 110031)

摘要: 为考察联氨作为自养脱氮系统菌群调节剂的可行性,以实验室内运行的 HABR - CANON 反应器为试验装置,研究不同浓度联氨对自养脱氮系统脱氮效能和功能微生物的影响。结果表明,低浓度(1~4 mg/L)联氨可以抑制亚硝酸盐氧化菌(NO₂-OB)的活性,促进厌氧氨氧化菌(AnAOB)的活性,从而提高脱氮效能;高浓度(10 mg/L)联氨对好氧氨氧化菌(AOB)和 NO₂-OB 的抑制作用明显;停止投加联氨后,CANON 系统的脱氮效能可迅速恢复;高浓度(10 mg/L)联氨对 HABR 全程自养脱氮工艺的影响是可逆的,但对 NO₂-OB 的抑制不可逆。对生物膜样品中的优势菌种进行分析发现,AOB 和 AnAOB 为主要的功能微生物。采用低-高-低的联氨投加方式,可以有效抑制自养脱氮反应器内 NO₂-OB 的生长,保证自养脱氮系统的稳定运行。

关键词: 全程自养脱氮; 联氨; 亚硝酸盐氧化菌; 厌氧氨氧化菌; 好氧氨氧化菌

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)05-0026-07

Effect of Hydrazine on Completely Autotrophic Denitrification System of HABR

BAO Lin-lin^{1,2,3}, LI Xiao-zhen^{1,2,3}, LI Sun-lin^{1,2,3}, CAI Jun-nian⁴, JIN Cai-xia^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control <Ministry of Education>, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 3. International Joint Laboratory on Key Techniques in Water Treatment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 4. Sino-Pipeline International Company Limited, Shenyang 110031, China)

Abstract: In order to investigate the feasibility of hydrazine (N₂H₄) to be used as a microbial community regulator in the autotrophic denitrification system, the effects of different concentrations of hydrazine on the denitrification efficiency and functional microorganisms of the autotrophic denitrification system in a HABR-CANON reactor were explored. Low concentration of N₂H₄ (1~4 mg/L) could inhibit the activity of nitrite-oxidizing bacteria (NO₂-OB) and promote the activity of anaerobic ammonia-oxidizing bacteria (AnAOB), so as to improve the denitrification performance. High concentration of N₂H₄ (10 mg/L) could inhibit the activity of ammonia-oxidizing bacteria (AOB) and NO₂-OB obviously, but the denitrification efficiency of the CANON system could be recovered rapidly after stopping the addition of

hydrazine. The effect of high concentration hydrazine (10 mg/L) on the completely autotrophic denitrification of HABR was reversible, but the inhibition of NOB was irreversible. The dominant bacteria of the biofilm samples were analyzed and it was found that AOB and AnAOB were the main functional microorganisms. The growth of NOB could be effectively inhibited and the stable operation of autotrophic denitrification system could be guaranteed by using low-high-low N_2H_4 dosage mode.

Key words: completely autotrophic denitrification; hydrazine; nitrite-oxidizing bacteria (NOB); anaerobic ammonia-oxidizing bacteria (AnAOB); ammonia-oxidizing bacteria (AOB)

与传统的硝化反硝化工艺相比,基于厌氧氨氧化(Anammox)原理开发的全程自养脱氮工艺(CANON)是目前最经济、最有应用前景的生物脱氮技术之一^[1]。CANON 工艺可以减少 85% 的需氧量、100% 的碳源和 83% 的污泥产量^[2],其原理是在好氧氨氧化菌(AOB)和厌氧氨氧化菌(AnAOB)的协同作用下,将单一反应器内的 $NH_4^+ - N$ 转化为 N_2 ^[3]。有研究者指出,该工艺在用于实际生活污水的处理过程中存在诸多难点,比如:反应器的快速启动^[4],生物量的高度持留^[5];反应器中亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻)的有效调控^[6],降低出水硝酸盐氮浓度,保证出水水质;脱氮效率与亚硝酸盐同步生成和消耗问题^[6-7]。

AOB、AnAOB 和 NOB 这 3 类功能菌群的有效调控是 CANON 反应器稳定运行的关键^[8]。由于自养反应器启动周期长^[9],当反应器由于某些原因受到冲击,导致功能菌群失调、运行效果不佳时,采取有效措施快速恢复菌群结构就显得尤为重要。已有研究中常用的恢复方法主要有改变进水氨氮负荷^[10]、调整溶解氧浓度^[11]、添加联氨(N_2H_4)^[12-13]等。联氨是 Anammox 反应的中间产物,该反应是先将 $NO_2^- - N$ 还原为 NO,联氨合成酶(HZS)催化 NO 和 $NH_4^+ - N$ 缩合生成 N_2H_4 ,最终 N_2H_4 在联氨脱氢酶(HDH)的作用下转化为 N_2 ^[14]。适量联氨可提供额外的电子供体强化细胞增殖,削弱 $NO_2^- - N$ 对 AnAOB 活性的抑制^[12],同时减少 NO_3^- 的产生,提高 Anammox 反应的氮去除效率^[13,15-16]。但 N_2H_4 又是一种强烈的还原剂,具有毒性,添加过量的 N_2H_4 会使微生物失活,不利于厌氧氨氧化过程^[17]。姚宗豹^[18]在研究 Anammox 新体系外加 N_2H_4 的影响中发现,外加微量 N_2H_4 的 Anammox 反应器能长期稳定运行,与未投加微量 N_2H_4 的情况相比,投加微量 N_2H_4 能提升反应器的脱氮性能,快速恢复

AnAOB 活性。目前对 N_2H_4 的研究主要集中在对 Anammox 反应过程的影响方面,而关于 N_2H_4 对 CANON 工艺功能菌群的影响研究较少。鉴于此,笔者以实验室内运行的 HABR - CANON 反应器为试验装置,研究不同浓度联氨对全程自养脱氮系统脱氮效能和功能微生物的影响,进而考察联氨作为自养脱氮系统菌群调节剂的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方法

试验用 HABR - CANON 反应器如图 1 所示,其有效容积为 32.0 L。该反应器共包含 6 个相互串联的相同单元格,利用导流板将各个单元格分为体积比约为 3 : 1 的大格和小格,在大格内部悬挂易于附着活性污泥的环保组合填料,在小格中安放曝气管和加热棒,控制反应器运行期间适宜的 DO 浓度和温度。在第 1 个进水小单元内进行供氧,相当于对原水进行预曝气,与在进水桶进行预曝气相比提高了供氧效率^[19],节约动力消耗。原水通过连续流蠕动泵进入反应器中,利用水位压差使水流在反应器内呈 S 形流动,在此过程中与生物膜充分接触,利用生物脱氮的途径去除氮素。

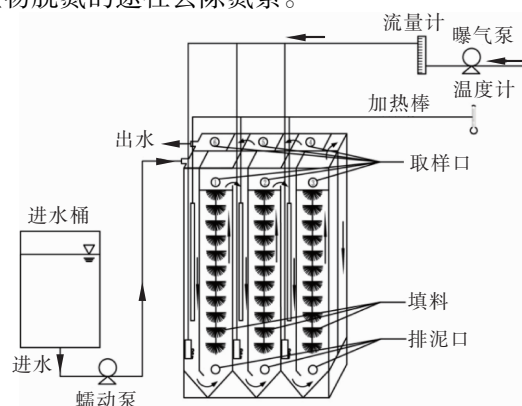


图 1 全程自养脱氮反应器试验装置

Fig. 1 Schematics of completely autotrophic denitrification reactor

1.2 试验水质

试验采用人工配制的模拟废水,由 NH_4Cl 提供基质 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,由 NaHCO_3 提供无机碳源,不改变反应器原本的运行参数,由低到高不断提高 N_2H_4 投加量。整个试验过程控制水温为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$, pH 值为 7.9~8.0,前 3 个格室的曝气量分别为 0.2、0.2、0.1 L/min。试验共分为 5 个运行阶段,进水氨氮平均值均为 42 mg/L、无机碳源平均值均为 15 mg/L,联氨投加量分别为 0、1、4、10、0 mg/L。

1.3 测定项目及方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$: 麝香草酚分光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: $\text{N} - (1 - \text{萘基}) - \text{乙二胺}$ 分光光度法; DO 及水温: WTW - Multi 340i 便携式多参数测定仪; pH 值: WTW inoLab pH 计。

在 HABR - CANON 反应器中,基于氮平衡和化学计量特征,采用公式(1)~(4)计算氨氧化速率(AOR)、亚硝酸盐氧化速率(NOR)、厌氧氨氧化速率(ANR)^[20]。

$$\Delta N = \text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{inf}} - (\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{eff}} + \text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{eff}} + \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{eff}}) \quad (1)$$

$$\text{AOR} = \frac{\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{inf}} - \text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{eff}} - \frac{\Delta N}{2.04}}{\text{HRT}} \quad (2)$$

$$\text{NOR} = \frac{\text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{eff}} - \frac{0.26\Delta N}{2.04}}{\text{HRT}} \quad (3)$$

$$\text{ANR} = \frac{\Delta N}{\text{HRT}} \quad (4)$$

式中: $\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{inf}}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{eff}}$ 分别表示进、出水氨氮浓度, mg/L; $\text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{inf}}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{eff}}$ 分别表示进、出水亚硝态氮浓度, mg/L; $\text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{inf}}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{eff}}$ 分别表示进、出水硝态氮浓度, mg/L; HRT 为 12 h。

1.4 微生物多样性和群落结构分析

为了对反应器内的微生物群落结构进行更加全面、深入的研究,减少因取样误差造成的分析结果的差异性,同一时期的污泥样品均取 3 份于 -80°C 冰箱中保存,随后样品送至上海美吉生物公司,采用 MiSeq 高通量测序技术进行分析。PCR 扩增所用到的细菌引物是 338F (ACTCTACGGGAGGCAGCAG) 和 806R (GGACTACHVGGGTWTCTAAT)。

2 结果与讨论

2.1 各阶段氮素的去除特性

试验期间, HABR - CANON 反应器的运行效能

如图 2 所示。

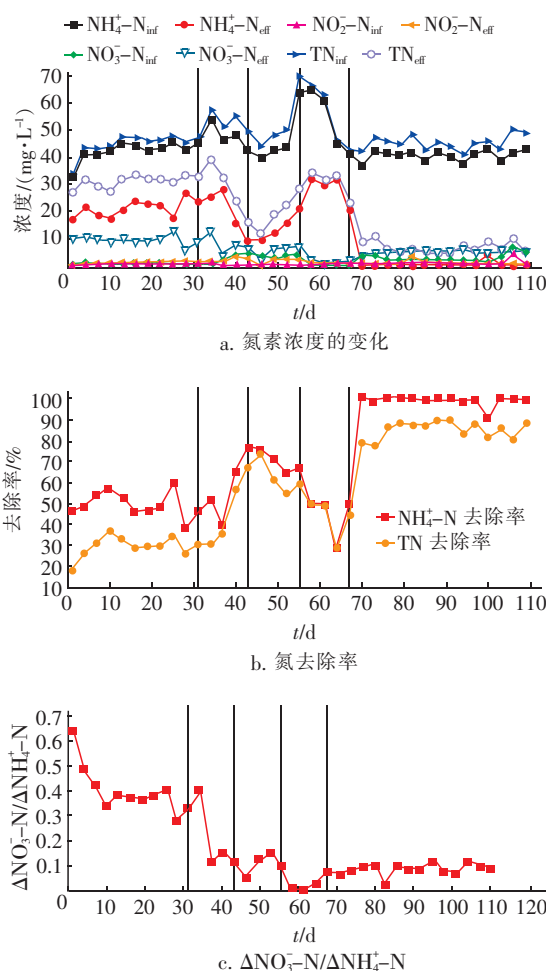


图 2 HABR - CANON 反应器的运行效能

Fig. 2 Operating efficiency of HABR-CANON reactor

第 1 阶段(1~31 d): 未进行恢复试验的阶段。该阶段由于冬季气候寒冷,反应器温度低于设定温度,且由于假期反应器管理不精细造成污泥流失,导致运行明显恶化,性能不稳定。此阶段,进、出水氨氮平均浓度分别为 42、22 mg/L,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度偏高,平均为 12 mg/L,出水 TN 平均浓度为 31 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率低且均小于 60%,反应器运行效果不佳。在 CANON 工艺中,NOB 和 AnAOB 均能利用各自的基质生成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,但氮的去除主要是通过 Anammox 反应来实现的, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 生成量 ($\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$) 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除量 ($\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 的理论比值为 0.11^[16]。试验过程中以 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值作为表征系统内硝化程度的指标,在第 1 阶段, $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值为 0.43,是其理论值的 3.9 倍,大部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被氧化为

$\text{NO}_3^- - \text{N}$, 而且基本没有 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累。这可能有两个方面的原因:一方面,由于低温运行,反应器内的 AOB 活性不佳,造成 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率下降;另一方面,在反应器中,附着于组合填料表面且生长缓慢的 AOB 流失,氨氧化反应受到影响,而由于供气量未变化,反应器内溶解氧充足,NOB 快速生长,导致大部分 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 进一步氧化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,少量的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不能满足 AnAOB 的生长代谢需求,而氮的去除主要是通过 Anammox 反应来实现的,因此导致反应器的脱氮效率下降。此阶段自养脱氮反应器内的主要功能菌群处于失衡状态。

第 2 阶段(32 ~ 43 d):反应器进入恢复阶段。自第 32 天起,增强反应器的保温措施,为了抑制 NOB 活性,投加 1 mg/L 硫酸联氨。由图 2 可知,此阶段出水氨氮平均浓度为 17 mg/L,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均浓度降为 6 mg/L,出水 TN 平均浓度为 21 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 去除率迅速升高, $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值为 0.2。这一结果说明 1 mg/L 的硫酸联氨对 AOB 活性未造成明显影响,轻度抑制了 NOB 活性,促进了 AnAOB 的生长,亚硝化反应和 Anammox 反应增强,促进了反应器脱氮效能的恢复。这与之前的研究结果一致,即 N_2H_4 会抑制 NOB 活性,外加适量 N_2H_4 可快速减弱 NO_2^- 对 Anammox 的抑制^[12],甚至强化 Anammox 过程^[15]。

第 3 阶段(44 ~ 55 d):自第 44 天起,反应器中硫酸联氨的投加量提高至 4 mg/L。由图 2 可知,出水氨氮、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN 平均浓度分别为 12、5、17.5 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率比前两个阶段升高,最高可达到 80%,TN 平均去除率为 60%, $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值为 0.15。第 2、3 阶段的试验结果显示,投加低浓度的硫酸联氨(1 ~ 4 mg/L)对 AOB 的活性未造成明显影响,但可抑制 NOB 的活性, AOB 和 AnAOB 在协同作用下互相促进生长,附着于生物膜外部的 AOB 发生亚硝化反应,利用 O_2 作电子受体,将一部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$;附着于生物膜内部的 AnAOB 在厌氧条件下以亚硝化生成的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为电子受体,与剩余的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 反应,进而转化为 N_2 和少量的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,促进反应器脱氮效能的恢复。

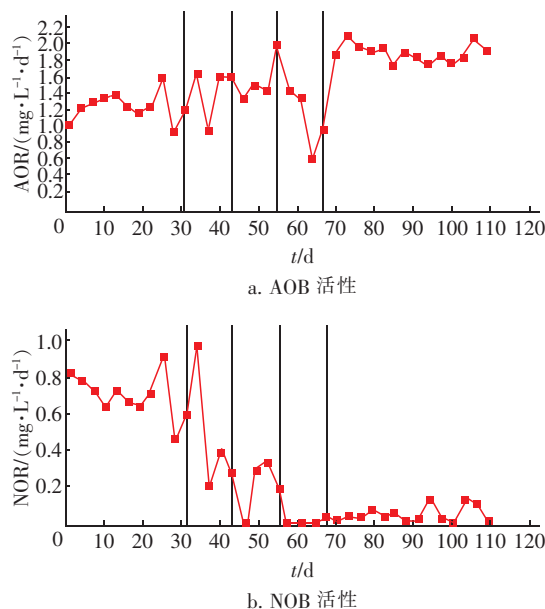
第 4 阶段(56 ~ 67 d):自第 56 天起,继续增大硫酸联氨投加量至 10 mg/L。由图 2 可知,出水氨

氮平均浓度升为 30 mg/L,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均浓度降为 1.5 mg/L,出水 TN 平均浓度为 31 mg/L,氨氮和 TN 平均去除率均骤降为 35% 左右, $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值为 0.09。试验结果显示,高浓度的 N_2H_4 对 AOB 和 NOB 的活性产生了明显的抑制作用, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 生成量显著减少,影响了厌氧氨氧化反应的进行,进而造成反应器脱氮效能明显下降。

第 5 阶段(68 ~ 109 d):由于前一阶段高浓度的联氨造成 AOB 的活性受到抑制,脱氮效率骤降,本阶段对反应器进行恢复,停止投加硫酸联氨。试验结果显示,停止投加硫酸联氨后,反应器的脱氮性能迅速恢复,3 d 后出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 TN 平均浓度分别为 0.54、4.97、1.37、6.8 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率达到 98.7%,TN 去除率为 84.7%。该阶段的 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值为 0.12,接近 CANON 系统的理论值。由此表明,添加高浓度的 N_2H_4 对 AOB 和 NOB 活性产生抑制后,停止投加硫酸联氨, AOB 活性恢复, CANON 系统的脱氮性能得到改善,说明高浓度联氨对 HABR - CANON 工艺的短期抑制是可逆的。在本阶段 AnAOB 和 AOB 成为优势菌种,仅存在少量的 NOB。至此可认为 HABR - CANON 工艺的脱氮性能恢复成功。

2.2 各阶段微生物活性的变化

反应器各阶段 AOB、NOB 和 AnAOB 的活性变化分别用 AOR、NOR 和 ANR 表征,结果如图 3 所示。反应器内各类功能微生物的活性与反应器的运行效能具有明显的对应性。



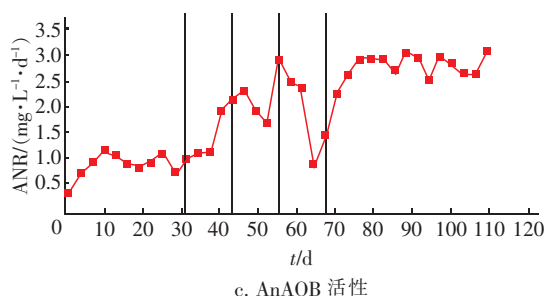


图3 各阶段功能微生物的活性

Fig. 3 Biological activities of functional microorganisms in different stages

NOB 作为自养脱氮反应过程中的一类影响性微生物,很多时候是造成系统脱氮效能恶化的主因。在本研究中,NOR 在第1阶段的数值较高且状态平稳,在第2~4阶段快速降低,在第5阶段趋于平缓。这种变化趋势是因为本试验采用不断增大硫酸联氨投加量的方式来抑制反应器内高活性的NOB。投加1 mg/L 的硫酸联氨,发现对NOB活性的抑制效果不明显;当硫酸联氨的投加量增大到4 mg/L 时,NOR 快速下降至0.4 mg/(L·d);当硫酸联氨的投加量增大到10 mg/L 时,NOB 的活性被完全抑制,并在第5阶段不投加硫酸联氨时未出现增长,抑制具有不可逆性。

AOB 和 AnAOB 作为自养脱氮反应中的主要功能微生物,在系统中具有协同作用。AOR 在第1阶段数值较低,在第2、3阶段增长缓慢,在第4阶段有轻度抑制,至第5阶段达到最大值2.1 mg/(L·d)。投加低浓度的硫酸联氨,对AOB的活性并没有明显影响,AOR 在第2、3阶段增长缓慢,在第4阶段随着联氨浓度的增大,AOB 活性受到抑制,但在第5阶段不投加硫酸联氨时对AOB活性的抑制快速消除,说明联氨对AOB活性的抑制是可逆的。

在第1阶段NOB活性很高时,AnAOB活性很低,而在NOB被抑制的第2阶段AnAOB活性开始增长,并在恢复阶段快速增长并进入平台期。 N_2H_4 所具有的生物毒性能够对AOB和NOB的活性产生抑制作用^[21],但 N_2H_4 作为Anammox反应的中间产物能够削弱 $NO_2^- - N$ 对AnAOB活性的抑制^[12],提高Anammox反应中的总氮去除效率。

2.3 微生物群落结构特征

采用MiSeq高通量测序技术对反应器恢复后的生物膜样品进行测序分析,样品的测序覆盖率在

99%以上,表明样品测序量合理,可以反映出自养脱氮污泥活性恢复后微生物群落的结构特征。通过高通量测序数据分析反应器1、3、6号单元格的生物膜样品,共检测到了39个门、92个纲、216个属,由于新型HABR独特的结构特征,使相互串联的6个单元格彼此之间相互独立,以及 $NH_4^+ - N$ 浓度的逐渐降低和DO浓度的不同,可以为微生物提供不同的生长环境,引起各单元格之间出现微生物种类及含量不同的现象,具体群落结构分析结果如图4所示。

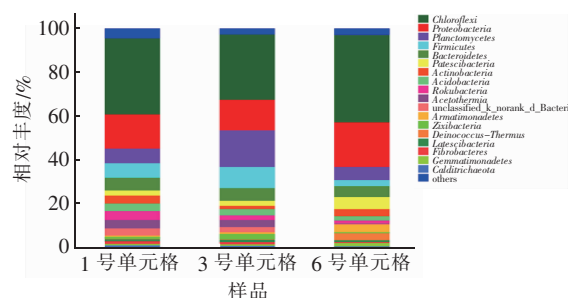


图4 门水平上的微生物种群结构分析

Fig. 4 Analysis of community abundance on phylum level

根据检测结果,在门水平上生物膜样品中的优势菌种分别是:Chloroflexi(绿弯菌门)、Proteobacteria(变形菌门)、Planctomycetes(浮霉菌门)、Firmicutes(厚壁菌门)和Bacteroidetes(拟杆菌门)。

Chloroflexi 属于兼性厌氧菌,出现于自养脱氮系统^[22],能够利用其他微生物(AOB、AnAOB)裂解或细胞溶解产生的一些大分子物质以及丝状纤维网络来强化自身生物膜结构。Proteobacteria 所包含的细菌均属于革兰氏阴性菌,其中大多数为厌氧菌,为多种亚硝化菌属、反硝化菌属等具有脱氮功能的细菌种类^[23]。Planctomycetes 被认为是细菌域最早的分支之一,属于水生细菌,广泛存在于淡水、海水等各种水体环境中,包含了目前已知的所有种类的AnAOB。Firmicutes 常在厌氧系统中检测到。Bacteroidetes 常出现在厌氧环境中,可以将蛋白质以及糖类有机物降解为小分子物质,因此在DO浓度较低的单元格中其含量相对较高。综合以上分析可以发现,反应器活性恢复后污泥中菌群的多样性和丰度与系统中AnAOB的活性关系一致,AOB和AnAOB为主要的功能微生物,共同协作完成氮素的去除。

2.4 反应器脱氮性能恢复后氮素的沿程变化

HABR-CANON 反应器脱氮性能恢复后氮素

的沿程变化如图 5 所示。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度沿程下降,总去除率达到了 96%,其中前两个格室对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率较高,分别为 34% 和 38%,各个单元格去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的能力整体呈降低的趋势。由于 AOB 在亚硝化阶段氧化 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 产生的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 被 AnAOB 作为基质进行 Anammox 反应而被快速消耗,使前两个格室中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累量远小于亚硝化反应中 1:1 的理论值。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 产生量较少,仅由进水中的 1.27 mg/L 升至出水中的 4.81 mg/L,表明反应器中未出现 NOB 的明显富集,NOB 的活性基本被完全抑制。

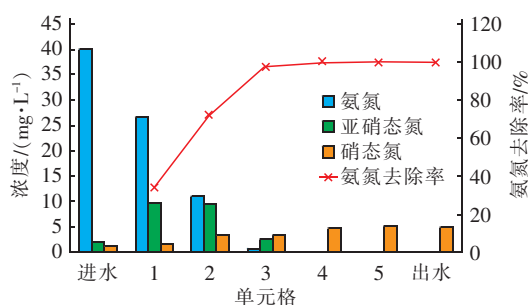


图 5 反应器各单元格的氮素变化

Fig. 5 Change of nitrogen concentration in each unit of reactor

3 结论

① 通过投加硫酸联氨来调控自养脱氮系统内的功能菌群,可快速恢复 HABR - CANON 反应器的脱氮性能。运行数据和微生物群落分析表明,联氨作为自养脱氮系统的菌群调节剂是完全可行的。

② 低浓度(1~4 mg/L)的 N_2H_4 对 AOB 的活性未造成明显影响,轻度抑制了 NOB 的活性,有效促进了 AnAOB 的生长,从而提高了反应器的脱氮效能。高浓度(10 mg/L)的 N_2H_4 对 AOB 和 NOB 活性产生了明显的抑制作用。停止投加硫酸联氨后,AOB 的活性快速恢复,同时 AnAOB 保持较高的活性,使自养脱氮系统的脱氮效能迅速恢复,说明高浓度(10 mg/L)的联氨对 HABR - CANON 工艺的短期抑制是可逆的,但对 NOB 活性的抑制不可逆。

③ 在脱氮性能恢复的稳定阶段, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度沿程下降,总去除率达到了 96%,且前两个格室对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果最好。综合考虑微生物的活性以及沿程氮素的变化规律发现,前 3 个格室内亚硝化反应和 Anammox 反应同时存在,而后 3 个格室主要进行 Anammox 反应。

参考文献:

- [1] Liu S, Yang F, Xue Y, *et al.* Evaluation of oxygen adaptation and identification of functional bacteria composition for anammox consortium in non-woven biological rotating contactor [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(17): 8273 - 8279.
- [2] Hu Z, Lotti T, van Loosdrecht M, *et al.* Nitrogen removal with the anaerobic ammonium oxidation process [J]. *Biotechnol Lett*, 2013, 35(8): 1145 - 1154.
- [3] Jetten M S M, Horn S J, van Loosdrecht M C M. Towards a more sustainable municipal wastewater treatment system [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 35(9): 171 - 180.
- [4] 杨瑞丽, 王晓君, 吴俊斌, 等. 厌氧氨氧化工艺快速启动策略及其微生物特性 [J]. *环境工程学报*, 2018, 12(12): 3341 - 3350.
Yang Ruili, Wang Xiaojun, Wu Junbin, *et al.* Rapid start-up strategy and microbial characteristics of anammox process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(12): 3341 - 3350 (in Chinese).
- [5] 孙庆花, 吴迪, 周家中, 等. CANON 中试反应器启动及性能优化 [J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3169 - 3178.
Sun Qinghua, Wu Di, Zhou Jiazhong, *et al.* Start-up and performance optimization of a CANON pilot reactor [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3169 - 3178 (in Chinese).
- [6] Xiao P, Lu P, Zhang D, *et al.* Effect of trace hydrazine addition on the functional bacterial community of a sequencing batch reactor performing completely autotrophic nitrogen removal over nitrite [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 175: 216 - 223.
- [7] Chang Q, Wang W, Chen J, *et al.* Keeping a completely autotrophic nitrogen removal over nitrite system effective in treating low ammonium wastewater by adopting an alternative low and high ammonium influent regime [J]. *Biomed Res Int*, 2018. DOI:10.1155/2018/9536761.
- [8] 沈明玉, 吴莉娜, 李志, 等. 厌氧氨氧化在废水处理中的研究及应用进展 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(6): 16 - 21.
Shen Mingyu, Wu Lina, Li Zhi, *et al.* Research and application progress of anaerobic ammonium oxidation in wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(6): 16 - 21 (in Chinese).
- [9] 鲍林林, 韩朝丽, 马慧, 等. 折流板生物膜自养脱氮反应器的启动特性 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(19):

- 28-32.
- Bao Linlin, Han Chaoli, Ma Hui, *et al.* Start-up characteristics of baffled biofilm autotrophic denitrification reactor[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(19): 28-32 (in Chinese).
- [10] Third K A, Paxman J, Schmid M, *et al.* Treatment of nitrogen-rich wastewater using partial nitrification and Anammox in the CANON process [J]. *Water Sci Technol*, 2005, 52(4): 47-54.
- [11] 张姚, 韩海成, 王伟刚, 等. 溶解氧对 CANON 颗粒污泥自养脱氮性能的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(12): 4501-4510.
- Zhang Yao, Han Haicheng, Wang Weigang, *et al.* Impact of dissolved oxygen on autotrophic nitrogen removals of the granular sludge in a CANON process [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(12): 4501-4510 (in Chinese).
- [12] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1999, 65(7): 3248-3250.
- [13] Zekker I, Kroon K, Rikmann E, *et al.* Accelerating effect of hydroxylamine and hydrazine on nitrogen removal rate in moving bed biofilm reactor [J]. *Biodegradation*, 2012, 23(5): 739-749.
- [14] Strous M, Pelletier E, Mangenot S, *et al.* Deciphering the evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome [J]. *Nature*, 2006, 440(7085): 790-794.
- [15] Hu A, Zheng P, Mahmood Q, *et al.* Characteristics of nitrogenous substrate conversion by anammox enrichment [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(2): 536-542.
- [16] Yao Z B, Cai Q, Zhang D J, *et al.* The enhancement of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) by N_2H_4 addition [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 146(10): 591-596.
- [17] 蔡庆, 丁佳佳. N_2H_4 强化厌氧氨氧化机理及动力学特性[J]. *水处理技术*, 2015, 41(5): 73-77.
- Cai Qing, Ding Jiajia. The mechanism and dynamic characteristic of N_2H_4 enhancing anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(5): 73-77 (in Chinese).
- [18] 姚宗豹. Anammox 新体系: 外加 N_2H_4 的影响、NO 的脱出和 Fe(III) 氧化 NH_4^+ [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- Yao Zongbao. Novel Anammox Systems: Effect of Hydrazine Addition, Removal of NO and Ferric Ammonium Oxidation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese).
- [19] 韩朝丽. CANON 工艺快速启动及自养脱氮污泥活性恢复研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2018.
- Han Chaoli. Rapid Start-up of CANON Process and Activity Recovery of Autotrophic Denitrification Sludge [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2018 (in Chinese).
- [20] Wang S, Liu Y, Niu Q, *et al.* Nitrogen removal performance and loading capacity of a novel single-stage nitrification-anammox system with syntrophic microgranules [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 236: 119-128.
- [21] Tomlinson T G, Boon A G, Trotman C N A. Inhibition of nitrification in the activated sludge process of sewage disposal [J]. *J Appl Bacteriol*, 1966, 29(2): 266-291.
- [22] Vazquez-Padin 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.
- [23] Felföldi T, Jurecska L, Vajna B, *et al.* Texture and type of polymer fiber carrier determine bacterial colonization and biofilm properties in wastewater treatment [J]. *Chem Eng J*, 2015, 264: 824-834.



作者简介: 鲍林林 (1980 -), 女, 吉林长春人, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水深度处理与 water 环境修复技术。

E-mail: baolinlin226@163.com

收稿日期: 2019-08-01