



氮负荷波动对厌氧氨氧化/反硝化协同脱氮效能影响

王弄潮¹, 王建芳^{1,2,3}, 骆子琛¹, 胡俊彤¹

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏苏州 215009;

2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 江苏苏州 215009;

3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏苏州 215009)

[摘要] 在厌氧折流板反应器(ABR)中探究厌氧氨氧化菌和异养反硝化菌的分步培养,以及进水氮负荷波动对系统性能的影响。结果表明,维持 C/N 为 0.65,逐步提升总氮负荷(NLR),50 d 左右可实现厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮,总氮去除率可达 95.8%。NLR 波动值低于 1.04 kg/(m³·d)时,对工艺脱氮性能无显著影响。负荷变化幅度越大,厌氧氨氧化菌活性受抑制越显著,对反硝化菌基本无影响,负荷波动值达到 2.10 kg/(m³·d)时厌氧氨氧化对氮的去除贡献(C_A)下降至 54.8%,反硝化耦合厌氧氨氧化协同脱氮可有效提升系统的稳定性。胞外聚合物(EPS)对系统负荷波动有较好的响应规律,负荷波动越大,EPS 提高越多,有利于提高系统性能的稳定性。

[关键词] 厌氧氨氧化;反硝化;负荷波动;微生物活性;胞外聚合物

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)01-0068-08

Effect of nitrogen load fluctuation on the synergistic denitrification efficiency of anammox/denitrification

WANG Nongchao¹, WANG Jianfang^{1,2,3}, LUO Zichen¹, HU Juntong¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 3. Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Materials in Jiangsu Universities, Suzhou 215009, China)

Abstract: The effects of stepwise cultivation of anammox bacteria and heterotrophic denitrifying bacteria, and fluctuations in influent nitrogen load on system performance were investigated in an anaerobic baffled reactor. The results showed that the synergistic denitrification of anammox and denitrification could be achieved in about 50 days by maintaining C/N 0.65 and increase the load gradually, and the total nitrogen removal rate could reach 95.8%. Fluctuations in the total nitrogen load below 1.04 kg/(m³·d) had no significant effect on the process denitrification performance. The larger the load variation, the more significant the inhibition of the activity of anammox bacteria, but basically no effect on denitrification bacteria. The lowest contribution of anammox to nitrogen removal decreased to 54.8% when the load fluctuation value reached 2.10 kg/(m³·d). Denitrification coupled with anammox synergistic denitrification can effectively improve the stability of the system. The extracellular polymeric substances have a good response pattern to the system load shock, the greater the load fluctuation, the more EPS, which is conducive to improving the stability of the system performance.

Key words: anammox; denitrification; load fluctuation; microbial activity; extracellular polymeric substance(EPS)

厌氧氨氧化工艺以亚硝酸盐为电子受体,在厌氧条件下将氨氮转化为氮气,无需曝气和外加有机

碳源,污泥产率低,运行操作简单^[1-2],是最有前景的可持续低碳生物脱氮技术,也是实现碳中和、污水处

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51878430)

理产能的重要环节^[3]。近些年,基于厌氧氨氧化的自养脱氮技术在全球被广泛应用于工业废水和城市污水处理^[4-5]。

厌氧氨氧化工艺也存在局限性,如亚硝酸盐与氨氮的比例需严格控制在合理范围内,厌氧氨氧化菌世代周期长,应对负荷冲击的能力相对较弱,反应产生的硝酸盐无法满足日益严格的排放标准,需要进一步反硝化脱氮^[6]。因此,研究者致力于将部分反硝化或反硝化与厌氧氨氧化耦合,实现彻底脱氮^[7-8]。有研究表明^[9-10],厌氧氨氧化菌与反硝化菌共生于同一个反应器内时,若COD浓度过高,异养反硝化菌菌群竞争优势显著强于厌氧氨氧化菌,会与厌氧氨氧化菌竞争底物亚硝酸盐,出现竞争性抑制;所以只有COD处于相对较低的浓度,异养反硝化菌与厌氧氨氧化菌才可能产生协同作用,从而有效提高系统的总氮去除率^[11-12]。由于厌氧氨氧化菌生长速率远低于反硝化菌,维持厌氧氨氧化菌在底物竞争中的优势地位至关重要^[13-15]。两类微生物间的协同培养以及负荷冲击对协同体系效能的影响尚不明确。尤其是在实际废水处理工程中,进水基质浓度波动的情况非常普遍^[16],对反应器的运行调控提出了挑战。

基于此,本研究采用厌氧氨氧化菌和反硝化菌分步培养法,使同一反应器中两类功能微生物协同生长,探究进水总氮负荷(NLR)波动对系统脱氮性能以及厌氧氨氧化菌与反硝化菌活性的影响,及胞外聚合物(EPS)对系统反应活性的响应规律,以期为该工艺的实际工程应用提供技术理论支撑和运行参数。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置

本实验采用有机玻璃制成的厌氧折流板反应器,无需大规模改变污水处理厂的构造,有利于工程推广应用。实验装置如图1所示,A1~A3为反应区,内设机械搅拌,使泥水充分混合,A4为污泥沉淀区,污泥回流比为1:2。反应器置于室温环境下,外部用黑色塑料袋全包裹。

为了给异养反硝化提供稳定的底物,同时防止反硝化对厌氧氨氧化活性产生抑制,本研究采用分步法,先启动厌氧氨氧化,待性能稳定后,进一步实

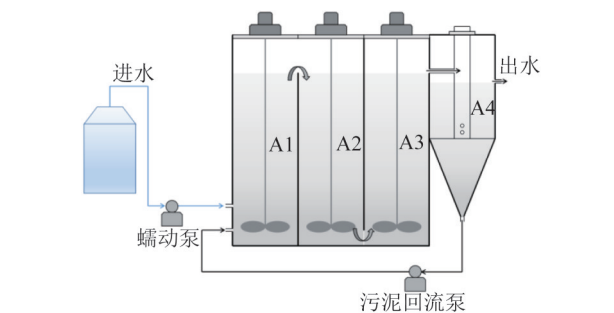


图1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic of the experimental reactor

现异养反硝化。反应器启动时,室温为23.6℃左右,反应器水温度为18.2℃,水力停留时间(HRT)为10 h,进水NLR为0.24 kg/(m³·d)。

1.2 接种污泥及配水

厌氧氨氧化污泥和反硝化污泥按照体积比2:1的比例混合接种,分别取自实验室-4℃条件长期储存的厌氧污泥。接种后混合污泥质量浓度为5 300 mg/L,颜色呈黑色,SVI为103.8 mL/g,沉降性能较差。

本实验采用人工配水,以氯化铵和亚硝酸钠作为氮源,以葡萄糖作为有机碳源,通过投加NaHCO₃调节进水pH,并添加适量的磷酸盐和微量元素^[17]。

1.3 实验方案

本研究分为3个部分,具体实验方案如下:
第1部分为厌氧氨氧化启动,无外加有机碳源。第2部分探究厌氧氨氧化性能提升以及与反硝化协同,进水投加葡萄糖控制C/N为0.65,进水氨氮和亚硝酸盐质量浓度分别逐步提高到235 mg/L和320 mg/L左右,NLR逐渐提高到2.20 kg/(m³·d)左右。两部分实验进水pH始终保持在7.7左右,具体工况见表1。

表1 第1、2部分实验运行工况

Table 1 Operating conditions in part I and II					
实验部分	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	NLR/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	HRT/h	C/N
1	42	58	0.24	10	—
2	42~235	58~320	0.24~2.20	8	0.65

第3部分重点考察进水NLR波动对系统脱氮效能以及功能微生物活性的影响。实验过程中,进水C/N维持在0.65,HRT维持在6 h,pH稳定在7.7左右。该部分分为4个阶段,探讨了4个工况条件下NLR的波动情况,具体工况见表2。

表2 第3部分反应器的运行工况

Table 2 Reactor operating conditions in part III

反应阶段	高氮负荷(NLR _H)/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	低氮负荷(NLR _L)/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	氮负荷波动值(ΔNLR)/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N质量浓度变化/(mg·L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ -N质量浓度变化/(mg·L ⁻¹)
A	2.20	1.80	0.40	235→190	320→260
B	2.20	1.16	1.04	235→130	320→170
C	2.20	0.56	1.64	235→60	320→80
D	2.20	0.10	2.10	235→13	320→16

以24 h为周期,进水NLR以2.20 kg/(m³·d)为基准,改变进水基质浓度。其中前12 h进水NLR降至较低水平,分别为1.80、1.16、0.56、0.10 kg/(m³·d),后12 h进水NLR恢复至2.20 kg/(m³·d)。每种进水负荷波动的工况连续运行28 d,并在每个进水负荷波动工况结束后,反应器在稳定条件下[NLR稳定在2.20 kg/(m³·d)]运行,以探讨进水负荷波动后的系统恢复情况。

1.4 分析方法

NH₄⁺-N采用纳氏试剂法;NO₂⁻-N采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;NO₃⁻-N采用紫外分光光度法;pH采用雷磁PHB-4便携式pH计测定;MLSS和MLVSS采用重量法;EPS提取采用甲醇-NaOH法,其中蛋白质(PN)和多糖(PS)组分分别采用Lowry法和改进苯酚-硫酸法测定^[18]。

1.5 批次实验

为了考察氮负荷波动对污泥中功能微生物活性的影响,在每个进水负荷波动工况末期取出泥样进行批次实验。取一定量污泥,清洗后加入250 mL蓝盖瓶中,加入基质溶液定容至250 mL,经氮气吹脱后密封,置于转速180 r/min的30℃恒温摇床中,使泥水充分混合。间隔一定时间,取上清液测定各态氮素浓度,计算相应物质的转化速率。

1.6 计算方法

系统内厌氧氨氧化菌和反硝化菌对氮的去除贡献分别为C_A和C_D,具体计算参照公式(1)~(2)。批次实验中厌氧氨氧化脱氮速率和反硝化脱氮速率分别用q_(TN-AMX)和q_(TN-DEN)表示,见公式(3)~(4)。

$$C_A = \frac{(\Delta NH_4^+ - N) \times (1 + 1.32 - 0.26)}{(\Delta NH_4^+ - N) + (\Delta NO_2^- - N) - (\Delta NO_3^- - N)} \times 100\% \quad (1)$$

$$C_D = 1 - C_A \quad (2)$$

$$q_{(TN-AMX)} = \frac{(\Delta NH_4^+ - N) \times (1 + 1.32 - 0.26)}{t \times MLVSS} \quad (3)$$

$$q_{(TN-DEN)} = \frac{(\Delta NO_2^- - N) - (\Delta NO_3^- - N) - (\Delta NH_4^+ - N) \times (1.32 - 0.26)}{t \times MLVSS} \quad (4)$$

其中,ΔNO₂⁻-N、ΔNH₄⁺-N和ΔNO₃⁻-N分别为NO₂⁻-N、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N变化质量浓度(mg/L),t为反应时间(h),MLVSS表示混合液挥发性悬浮固体质量浓度(mg/L)。

2 结果与讨论

2.1 厌氧氨氧化性能启动

NO₂⁻-N是厌氧氨氧化菌的抑制性底物,当体系中厌氧氨氧化活性相对较低时,过高的NO₂⁻-N浓度会抑制厌氧氨氧化菌活性^[19],采用较低的进水NLR启动有利于厌氧氨氧化污泥驯化^[20]。第1部分为厌氧氨氧化启动,期间反应器性能变化见图2。

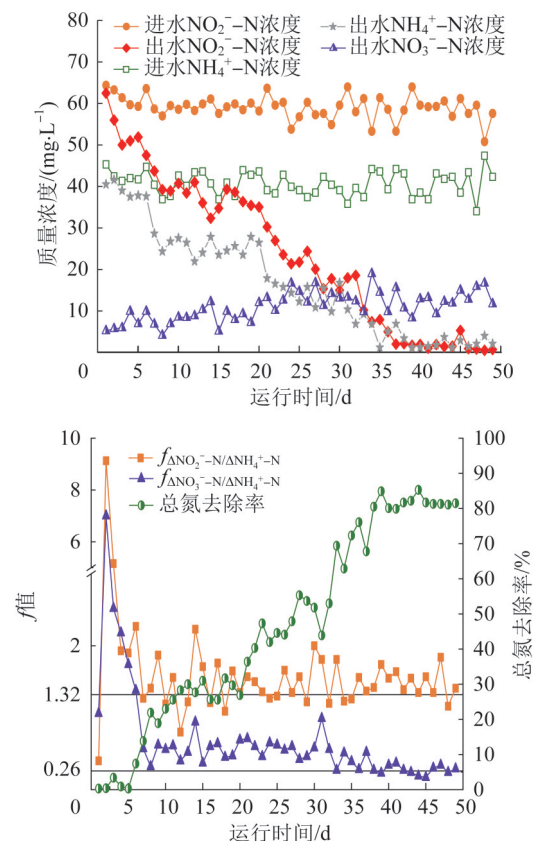


图2 第1部分实验反应器性能变化

Fig. 2 Reactor performance changes of the part I

由图2可知,第6天出现总氮损失,随着反应器的运行,出水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的浓度不断下降,总氮去除率逐渐提升,表明反应器内发生厌氧氨氧化反应。第38天,出水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 质量浓度分别降至3.2、2.0 mg/L,总氮去除率达到80.5%,表明厌氧氨氧化性能启动成功。

f 值为氮素转化比例(即 $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$),启动过程中, $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 分别在1.32和0.26附近波动,符合厌氧氨氧化反应计量关系,表明系统内以厌氧氨氧化脱氮为主^[21]。厌氧氨氧化是嗜酸反应,本研究进水pH控制在7.7左右。随着厌氧氨氧化性能的提升,出水pH逐渐升高,稳定在8.2左右。相对于进水,反应器出水pH提升了0.5左右,这与Huosheng LI等^[22]报道的结果类似。待系统性能稳定后,第45天将HRT调至8 h,系统性能并未出现明显波动,表明系统稳定性较强。

2.2 反应器厌氧氨氧化与反硝化协同效能研究

反硝化菌和厌氧氨氧化菌的生态位不完全一致,过高的有机碳源会导致反硝化菌与厌氧氨氧化菌竞争底物,抑制厌氧氨氧化菌的生长^[23]。王振毅等^[24]认为在上流式厌氧生物滤池反应器中控制C/N为0.5,厌氧氨氧化耦合反硝化的脱氮效果最佳,张诗颖等^[25]认为C/N为1时,采用ABR反应器的系统处理效果最佳。由此可得,较低的C/N并不会影响厌氧氨氧化与反硝化的协同作用,本实验采用介于两者之间的C/N(0.65)促进厌氧氨氧化与反硝化耦合的实现。提高微生物富集度是生物反应器提高负荷冲击耐受度的重要因素,本研究在固定C/N的条件下,通过同比例提高进水氨氮和亚硝酸盐的浓度来提升NLR,促进厌氧氨氧化菌富集的同时,拟探讨厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮效能。

提高进水负荷的过程中,氮的转化和COD的变化见图3。

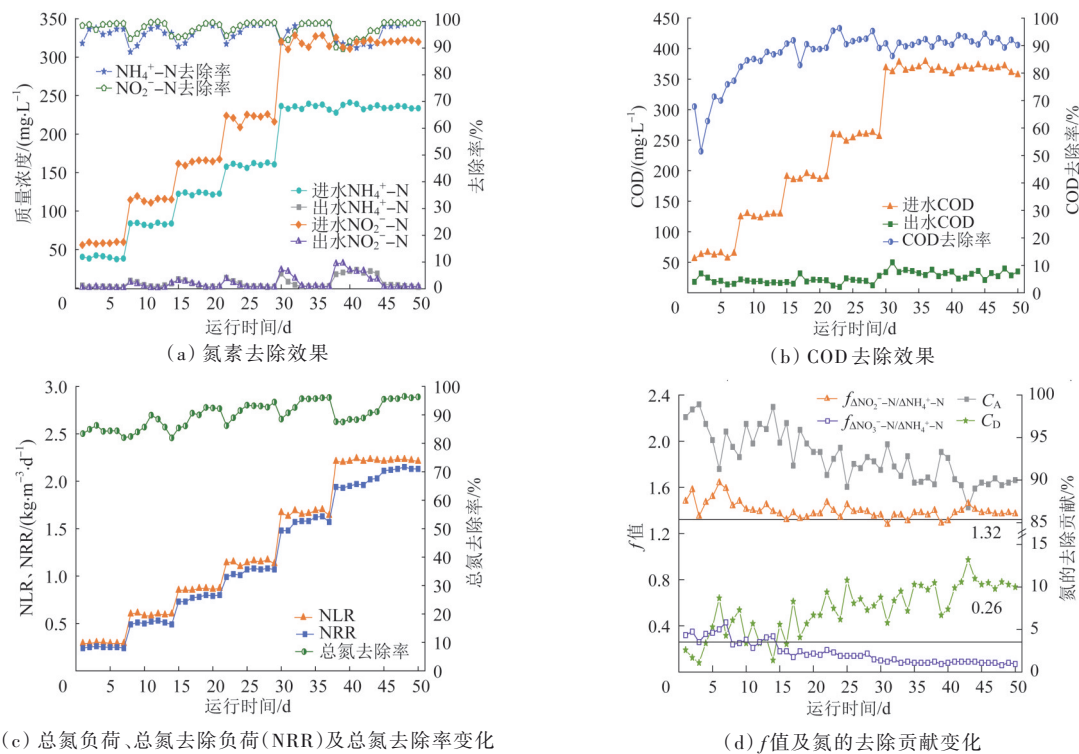


图3 第2部分反应器性能变化

Fig. 3 Reactor performance changes of the Part II

由图3可知,第10天,进水COD为125 mg/L左右,COD去除率85.1%,但此时 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 比值仍在0.26周围波动,说明反应器中尚未出现显著的反硝化,COD的消耗主要由于体系中异养微生物生长^[26]。

随着反应器运行,去除率逐渐升高并稳定在90%左右。第16天,总氮去除率达到90.6%,高于厌氧氨氧化反应的理论值89%。同时 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 下降至0.1左右,远低于0.26,表明系统中有反硝化反应发生。

$\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 仍趋近于 1.32, 且 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除率分别为 95.0% 和 96.3%, 说明反硝化菌的生长基本未对厌氧氨氧化菌活性造成竞争性抑制。

为了抑制亚硝酸盐的毒性, 待进水 NO_2^--N 质量浓度提高至 320 mg/L 后, 在第 37 天, 通过降低 HRT 至 6 h, 提升 NLR 至 2.20 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。反应器运行一周后, 系统脱氮效率达到 95.5%。如图 3(d) 所示, 在提升 NLR 过程中, 反硝化对氮的去除贡献由 2.6%

(第 1 天) 逐渐升高到 11.0% (第 45 天), 厌氧氨氧化菌与反硝化菌协同作用, 有效地提高了总氮去除效能。此时, 系统内的 NRR 几乎与 NLR 一致。

2.3 进水负荷波动对系统效能影响研究

2.3.1 进水负荷波动对系统脱氮效能影响

进水水质波动易导致污水处理系统性能不稳定, 负荷波动对厌氧氨氧化/反硝化协同系统稳定性的影响尚不太明确。本研究考察不同 NLR 波动对脱氮效能的影响, 具体性能变化见图 4。

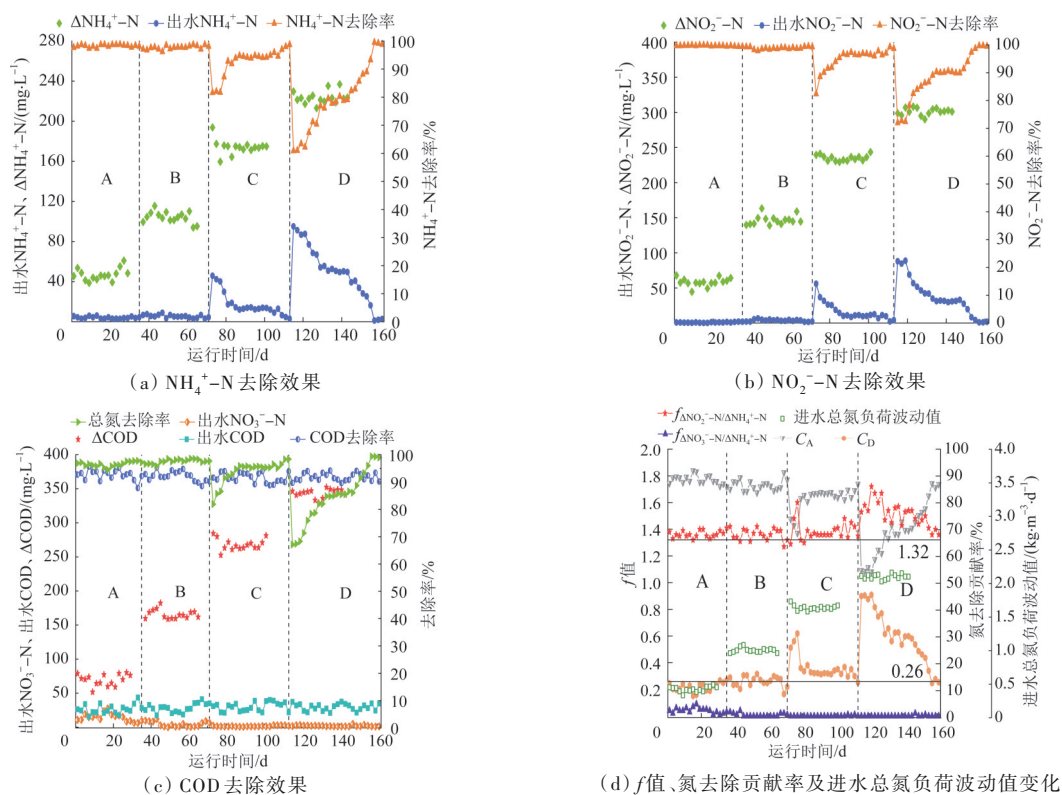


图 4 负荷波动对系统运行效能影响

Fig. 4 Impact of load fluctuations on system operating efficiency

由图 4 可知, A 和 B 阶段, 总氮负荷波动幅度分别为 0.40 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 和 1.04 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 经历 28 d 的水质波动过程, 期间反应器性能并未发生明显变化。 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和总氮的平均去除率分别为 97.2%、99.2% 和 97.1%。 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 一直处于较低水平 (<0.1), $\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 处于 1.32 附近, 表明 A 和 B 阶段负荷波动幅度对厌氧氨氧化和反硝化协同作用的影响较小。

C 和 D 阶段, NLR 波动幅度分别达到 1.64 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 和 2.10 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 系统脱氮性能出现较大幅度的变化。 C 阶段, 进水负荷波动初期, 总氮去除率最高下

降 15.8%。 图 4(c) 显示, 出水 NO_3^--N 浓度未出现上升, 但 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 去除率均出现较为明显的下降 [图 4(a) 和图 4(b)], 系统性能下降可能是由于厌氧氨氧化活性降低引起的。 随着反应器的运行, 系统逐渐适应该工况, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 去除率出现上升趋势, 第 85 天, 总氮去除率恢复至 94.5% 左右, 但相较于 A 和 B 阶段 (均值为 97.1%) 略有下降。 系统在恢复期运行 10 d 后回到负荷波动前水平, 脱氮效能恢复至 98.4% 左右。

D 阶段, 系统性能表现出与 C 阶段相同的趋势, 但本阶段系统性能受到的抑制更为显著。 各形态氮

素的去除率较C阶段下降更多,负荷波动初期总氮去除率下降至70%以下,系统适应该工况耗时19 d,长于C阶段(11 d),在适应该工况后总氮去除率仅能达到85.7%左右,远低于前3个阶段,意味着负荷波动幅度越大,系统活性下降越明显,系统性能也越难以恢复。同时由图4(d)可以看出,第115天,本阶段厌氧氨氧化对氮的去除贡献下降至54.8%,进一步证实了系统性能的下降主要源于厌氧氨氧化的性能受到抑制。 $\Delta\text{NO}_2^-/\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 比值远高于1.32,这是由于 NO_2^-/N 可作为异养反硝化的底物,所以 NO_2^-/N 消耗量略高于 NH_4^+-N ^[27-29],在厌氧氨氧化活性受到抑制时表现更甚。出水硝酸盐浓度一直处于较低水平($< 2 \text{ mg/L}$), $\Delta\text{NO}_3^-/\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 比值也趋近于0,表明系统负荷波动对反硝化性能无显著影响,有效缓解了负荷波动对系统性能的抑制。反硝化性能的稳定性有利于耦合系统应对负荷变化^[30-31],有利于提高协同脱氮效能和系统的稳定性。本阶段,系统在恢复期运行18 d,总氮去除率恢复到96.0%,耗时最长。

2.3.2 功能微生物活性及EPS变化特征

反应器的运行效能表明,进水氮负荷波动对厌氧氨氧化菌与反硝化菌两类微生物产生了不同的影响。本研究通过批次实验探究氮负荷波动对功能微生物活性的影响,结果见图5。

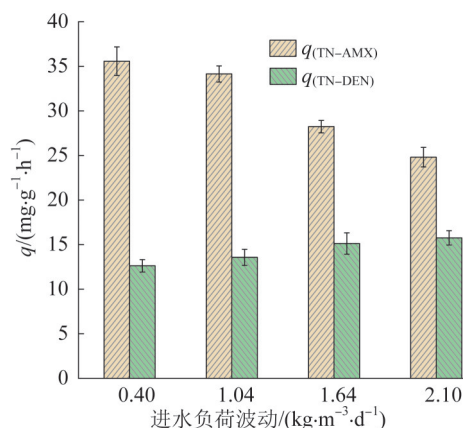


图5 负荷波动工况下厌氧氨氧化和反硝化比降解速率的变化

Fig. 5 Variation of anammox and denitrification ratio degradation rates under fluctuating load conditions

由图5可知,在不同的负荷波动阶段,厌氧氨氧化和反硝化活性的变化有着明显差异。 $q(\text{TN-AMX})$ 从35.57 mg/(g·h)降低至24.11 mg/(g·h), $q(\text{TN-DEN})$ 从12.62 mg/(g·h)增加到16.76 mg/(g·h),厌氧氨氧化菌

和反硝化菌活性变化呈现完全相反的趋势,较高的负荷波动可能导致厌氧氨氧化菌活性被抑制,且负荷波动幅度越大抑制作用越明显。充足的底物浓度促进了反硝化菌的增长,反硝化菌表现出更强的适应性,因此 $q(\text{TN-DEN})$ 是不断升高的,与Shun ZHOU等^[8]的研究结果类似。每个负荷波动阶段, $q(\text{TN-AMX})$ 总是高于 $q(\text{TN-DEN})$,即厌氧氨氧化菌始终处于优势地位,所以在日常出水中,厌氧氨氧化菌对氮的去除贡献一直高于反硝化菌。简而言之,负荷波动会抑制厌氧氨氧化菌活性,从而导致系统性能受损,反硝化菌的高增长率和强适应性有利于加强厌氧氨氧化耦合反硝化系统的稳定性。

EPS是微生物在生长过程中分泌的附着在其表面,用于自我保护和互相黏附的一种黏性物质,其与污泥颗粒化程度有着相关性^[32]。NLR冲击过程中,EPS的变化可以有效反映系统对外界环境变化的适应性。蛋白质(PN)和多糖(PS)是EPS的主要组成部分^[33],两者占EPS总量的90%以上。本研究测定PN和PS,以两者总和代表EPS,结果见表3。

表3 EPS组分的变化

Table 3 Changes in the content of extracellular polymer fractions

时间	阶段	EPS/ (mg·g ⁻¹)	PN/ (mg·g ⁻¹)	PS/ (mg·g ⁻¹)	PN/PS
第1天	负荷波动前	39.8	24.7	15.1	1.6
第31天	A	52.7	33.7	18.9	1.7
第67天	B	60.1	42.9	17.2	2.4
第103天	C	73.5	55.2	18.2	3.0
第145天	D	88.3	68.0	20.2	3.4

由表3可知,微生物通过分泌更多的EPS对抗环境变化带来的负面影响,第145天污泥EPS为88.3 mg/g,约是第1天的2.2倍。同时PN的增长速度相对较快,所以PN/PS从1.6增加到3.4,污泥表面疏水性增强,有利于污泥颗粒化。宋成康等^[34]认为,当受到环境胁迫时,微生物能够通过分泌PN来应对。可以推测,EPS的增长,尤其是PN的增长对耦合系统中菌群的生长及活性维持有重要影响。

3 结论

(1)维持C/N为0.65,通过调控进水基质浓度和HRT的方式,不断提升负荷,有利于在ABR反应器分步实现厌氧氨氧化菌和反硝化菌的培养,50 d左右可实现厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮,总氮去除

率可达95.8%。

(2)该系统稳定性良好,NLR波动值低于1.04 kg/(m³·d)时,对工艺脱氮性能无显著影响。负荷变化幅度越大,系统性能下降越显著,主要是厌氧氨氧化菌活性受损,反硝化菌活性基本不受影响,反硝化耦合厌氧氨氧化协同脱氮可有效提升系统的稳定性。

(3)系统经历进水负荷波动冲击后可恢复,负荷波动幅度越大,系统性能恢复时间越长。EPS和PN/PS对系统负荷冲击有较好的响应规律,氮负荷波动时,微生物分泌EPS,有助于其应对氮负荷波动。

参考文献

- [1] XU Dongdong, DA KANG, YU Tao, et al. A secret of high-rate mass transfer in anammox granular sludge: "Lung-like breathing" [J]. *Water Research*, 2019, 154: 189-198.
- [2] LOTTI T, VAN DER STAR W R L, KLEEREBEZEM R, et al. The effect of nitrite inhibition on the anammox process [J]. *Water Research*, 2012, 46(8): 2559-2569.
- [3] LAURENI M, WEISSBRODT D G, SZIVÁK I, et al. Activity and growth of anammox biomass on aerobically pre-treated municipal wastewater [J]. *Water Research*, 2015, 80: 325-336.
- [4] ALI M, OKABE S. Anammox-based technologies for nitrogen removal: Advances in process start-up and remaining issues [J]. *Chemosphere*, 2015, 141: 144-153.
- [5] LACKNER S, GILBERT E M, VLAEMINCK S E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences: An application survey [J]. *Water Research*, 2014, 55: 292-303.
- [6] FU Liang, DING Jing, LU Yongze, et al. Hollow fiber membrane bioreactor affects microbial community and morphology of the DAMO and Anammox co-culture system [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 232: 247-253.
- [7] CHEN Jing, ZENG Jia, HE Yiran, et al. Insights into a novel nitrogen removal process based on simultaneous anammox and denitrification (SAD) following nitrification with in situ NOB elimination [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 125: 160-170.
- [8] ZHOU Shun, ZHANG Zhi, SUN Zhulong, et al. Responses of simultaneous anammox and denitrification (SAD) process to nitrogen loading variation: Start-up, performance, sludge morphology and microbial community dynamics [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148911.
- [9] 周明俊, 毛天广, 傅金祥, 等. C、N对厌氧氨氧化与反硝化耦合的影响 [J]. *水处理技术*, 2022, 48(2): 57-62.
ZHOU Mingjun, MAO Tianguang, FU Jinxiang, et al. The influence of C, N on anaerobic ammonium oxidation and denitrification coupling [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(2): 57-62.
- [10] ZHANG Bowen, ZHAO Jian, ZUO Jiane, et al. Realizing stable operation of anaerobic ammonia oxidation at low temperatures treating low strength synthetic wastewater [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 75: 193-200.
- [11] ZHAO Yueru, ZHANG Qiong, PENG Yi, et al. Advanced nitrogen elimination from domestic sewage through two stage partial nitrification and denitrification (PND) coupled with simultaneous anaerobic ammonia oxidation and denitrification (SAD) [J]. *Biore-source Technology*, 2022, 343: 125986.
- [12] 赵鑫磊, 邢嘉伟, 付雪, 等. NO₂⁻-N/NH₄⁺-N及COD/NH₄⁺-N对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(6): 2586-2594.
ZHAO Xinlei, XING Jiawei, FU Xue, et al. Effect of NO₂⁻-N/NH₄⁺-N and COD/NH₄⁺-N on anaerobic ammonia oxidation coupled denitrification nitrogen and carbon removal [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(6): 2586-2594.
- [13] 彭永臻, 王锦程, 李翔晨, 等. 氮负荷对短程反硝化耦合厌氧氨氧化生物膜系统脱氮性能的影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(12): 1367-1376.
PENG Yongzhen, WANG Jincheng, LI Xiangchen, et al. Effect of nitrogen loading rates on nitrogen removal performance of partial-denitrification coupling with anammox biofilm system [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(12): 1367-1376.
- [14] DU Rui, PENG Yongzhen, CAO Shenbin, et al. Advanced nitrogen removal with simultaneous Anammox and denitrification in sequencing batch reactor [J]. *Biore-source Technology*, 2014, 162: 316-322.
- [15] 贾方旭, 彭永臻, 杨庆. 厌氧氨氧化菌与其他细菌之间的协同竞争关系 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(6): 1351-1361.
JIA Fangxu, PENG Yongzhen, YANG Qing. Competition and synergism between anammox bacteria and other bacteria [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6): 1351-1361.
- [16] 程军, 张亮, 张树军, 等. 氨氮负荷波动对城市污水短程硝化-厌氧氨氧化工艺硝态氮的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(2): 520-525.
CHENG Jun, ZHANG Liang, ZHANG Shujun, et al. The effects of ammonium loading rate fluctuation on nitrate accumulation in municipal wastewater partial nitrification/anammox (PN/A) process [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(2): 520-525.
- [17] 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 等. HRT对CSTR亚硝化颗粒污泥性能影响 [J]. *环境科学*, 2020, 41(4): 1794-1800.
WANG Jianfang, QI Zekun, QIAN Feiyue, et al. Impact of hydraulic retention time on performance of partial nitrification granular sludge in continuous stirred-tank reactor [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(4): 1794-1800.
- [18] 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 等. 全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析 [J]. *环境科学*, 2020, 41(10): 4653-4660.
QI Zekun, WANG Jianfang, QIAN Feiyue, et al. Analysis of rapid start-up and mixed nutritional nitrogen removal performance of

- complete autotrophic granular sludge[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10): 4653-4660.
- [19] QI Panqing, LI Jin, DONG Huiyu, et al. Performance of anammox process treating nitrogen-rich saline wastewater: Kinetics and nitrite inhibition[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 493-502.
- [20] CAO Shenbin, DU Rui, LI Baikun, et al. High-throughput profiling of microbial community structures in an ANAMMOX-UASB reactor treating high-strength wastewater[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(14): 6457-6467.
- [21] 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 等. 苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(10): 3771-3777.
- YANG Pengbing, LI Xiang, HUANG Yong, et al. Short or long term influence of phenol on nitrogen removal efficiency of ANAMMOX sludge[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(10): 3771-3777.
- [22] LI Huosheng, ZHOU Shaoqi, MA Weihao, et al. Fast start-up of ANAMMOX reactor: Operational strategy and some characteristics as indicators of reactor performance[J]. *Desalination*, 2012, 286: 436-441.
- [23] XU Xiaochen, XUE Yuan, WANG Dong, et al. The development of a reverse anammox sequencing partial nitrification process for simultaneous nitrogen and COD removal from wastewater[J]. *Biore-source Technology*, 2014, 155: 427-431.
- [24] 王振毅, 李欣宇, 赵大密, 等. 厌氧氨氧化耦合反硝化技术反应机理及其影响因素研究进展[J]. *煤炭与化工*, 2021, 44(5): 120-124.
- WANG Zhenyi, LI Xinyu, ZHAO Dami, et al. Research progress on reaction mechanism and influencing factors of anaerobic ammonium oxidation coupled denitrification technology[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2021, 44(5): 120-124.
- [25] 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 等. 厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水[J]. *环境科学*, 2015, 36(11): 4174-4179.
- ZHANG Shiyong, WU Peng, SONG Yinling, et al. Nitrogen removal using ANAMMOX and denitrification for treatment of municipal sewage[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11): 4174-4179.
- [26] SONG Tao, ZHANG Xiaolei, LI Ji, et al. A review of research progress of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification microorganisms (HNADMs) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149319.
- [27] 安芳娇, 赵智超, 黄利, 等. HRT对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(9): 4302-4309.
- AN Fangjiao, ZHAO Zhichao, HUANG Li, et al. Effect of HRT on nitrogen removal using ANAMMOX and heterotrophic denitrification[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(9): 4302-4309.
- [28] 马朝阳, 门高闪, 昌文龙, 等. HRT对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(S1): 31-34.
- MA Chaoyang, MEN Gaoshan, CHANG Wenlong, et al. HRT of anaerobic ammonia oxidation effect of biological denitrification efficiency[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(S1): 31-34.
- [29] 张海芹, 王翻翻, 李月寒, 等. 不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征[J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 2216-2221.
- ZHANG Haiqin, WANG Fanfan, LI Yuehan, et al. Start-up performance of ANAMMOX enrichment with different inoculated sludge in anaerobic baffled reactor[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(6): 2216-2221.
- [30] 吕锋, 周少奇. 水力负荷与低温对厌氧氨氧化与反硝化协同反应器的影响[J]. *化工进展*, 2010, 29(10): 1979-1984.
- LÜ Jiang, ZHOU Shaoqi. Effect of hydraulic loading and low temperature for ANAMMOX-denitrification reactor[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010, 29(10): 1979-1984.
- [31] 孙艳波, 周少奇, 李伙生, 等. ANAMMOX 与反硝化协同脱氮反应器启动及有机负荷对其运行性能的影响[J]. *化工学报*, 2009, 60(10): 2596-2602.
- SUN Yanbo, ZHOU Shaoqi, LI Huosheng, et al. Start-up of ANAMMOX-denitrification reactor and effect of organic loading on its performance of synergistic interaction[J]. *Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China*, 2009, 60(10): 2596-2602.
- [32] XU Jiajia, LI Chao, SHEN Yanwen, et al. Anaerobic ammonium oxidation (anammox) promoted by pyrogenic biochar: Deciphering the interaction with extracellular polymeric substances (EPS) [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: 149884.
- [33] DU Rui, CAO Shenbin, LI Baikun, et al. Synergy of partial-denitrification and anammox in continuously fed upflow sludge blanket reactor for simultaneous nitrate and ammonia removal at room temperature[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 274: 386-394.
- [34] 宋成康, 王亚宜, 韩海成, 等. 温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥胞外聚合物的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(7): 2006-2013.
- SONG Chengkang, WANG Yayi, HAN Haicheng, et al. Effect of decreasing temperature on the performance and extracellular polymer substance of anaerobic ammonia oxidation sludge[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(7): 2006-2013.
- 【作者简介】 王弄潮(1995—), 硕士研究生。电话: 17715191056, E-mail: 845561155@qq.com。通讯作者: 王建芳, 博士, 教授, E-mail: wjf302@163.com。
- 【收稿日期】 2022-11-11(修改稿)