

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.20.003

饥饿调控对CANON工艺功能菌影响的研究进展

杨综艺¹, 李 军¹, 张 凯², 孙梦侠³

(1. 北京工业大学城市建设学部 城市污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124; 2. 中节能工程技术研究院有限公司, 北京 100083; 3. 深圳市城市规划设计研究院股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要: 全程自养脱氮(CANON)工艺的启动和运行对环境要求高,相比于实时控制等策略,饥饿调控易于操作,能够减少运行费用,提高短程硝化效果,增强应对底物不足及低温冲击等不利因素的能力。目前,关于饥饿调控CANON工艺的研究主要集中在硝化细菌衰减速率的分析以及环境因素对厌氧氨氧化的作用等方面。但是,当前该领域的动力学研究存在不足,针对多种因素共同作用于CANON工艺的研究存在空白,也缺乏用于预测影响结果的数学模型。基于此,分别总结了饥饿调控对硝化系统和厌氧氨氧化的影响,以及饥饿调控的特点和对受破坏系统的恢复情况,以期后续开展CANON工艺的快速启动和稳定运行的相关研究提供新的探索途径。

关键词: 全程自养脱氮(CANON); 饥饿调控; 硝化细菌; 衰减速率; 探索途径

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)20-0017-08

Research Progress on the Effect of Starvation Regulation on Functional Bacteria of CANON Process

YANG Zong-yi¹, LI Jun¹, ZHANG Kai², SUN Meng-xia³

(1. National Engineering Laboratory of Urban Sewage Advanced Treatment and Resource Utilization Technology, Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. CECEP Engineering Technology Research Institute, Beijing 100083, China; 3. Urban Planning & Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The start-up and operation of the completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process is facing significant challenges due to its stringent environmental requirements and difficulty in achieving efficient nitrogen removal. In comparison to the real-time control and other strategies, starvation regulation offers several advantages, including ease of operation, reduced operating costs, improved short-cut nitrification, and enhanced resilience against adverse conditions like substrate shortage and low temperature shocks. Current research on starvation regulation of CANON process primarily focuses on the analysis of the decay rate of nitrifying bacteria and the effect of environmental factors on Anammox. However, there are gaps in current dynamic studies, as well as a lack of understanding regarding the interaction of multiple factors within the CANON process and the absence of

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX073-001); 北京市自然科学基金资助项目(822039)

通信作者: 李军 E-mail: jgljun@bjut.edu.cn

mathematical models for predicting their effects. Based on this, this paper summarized the effects of starvation regulation on nitrification system and Anammox, as well as the characteristics of starvation regulation and the restoration of the damaged system. This research paves the way for further research on the rapid start-up and stable operation of CANON process.

Key words: completely autotrophic nitrogen removal over nitrite(CANON); starvation regulation; nitrifying bacteria; decay rate; worthy way to explore

与传统脱氮技术相比,自养脱氮工艺因其具有不需要投加外碳源、节省曝气量的特点,成为污水处理发展的焦点。CANON (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite) 工艺作为代表性的自养脱氮技术,自2001年首次被提出以来,备受瞩目。在同一反应器内,好氧氨氧化菌(aerobic ammonia oxidizing bacteria, AerAOB)和厌氧氨氧化菌(anaerobic ammonia oxidizing bacteria, AnAOB)共存,二者协同作用,共同完成自养脱氮。促使 AerAOB 和 AnAOB 的共存是这套工艺成功启动,并达到高效自养脱氮的关键。目前,围绕如何实现启动并稳定运行亚硝化进程和维持厌氧氨氧化作用提出了诸多控制方式。其中,采用间歇曝气控制溶解氧需要精确调控,而投加抑制剂来抑制亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)的活性则会耗费大量药剂,从而增大污水处理的成本。相比于精确调节水质参数,从微生物自身代谢特点出发,研究新型调控策略逐渐成为新兴的研究方向。叶丽红^[1]提出,将无进水底物造成生物活性降低、繁殖速率衰减等影响定义为饥饿胁迫,将连续发生且时长低于7 d的饥饿称为短期饥饿。饥饿调控能够使污水处理系统中的微生物菌群比例、物种数量及活性发生变化。当前,围绕饥饿调节应用于CANON工艺功能菌的研究取得了进展。

1 饥饿调控对硝化作用的影响

1.1 饥饿对亚硝化的促进

研究发现,硝化污泥在长时间的闲置后, NO_2^- -N在启动阶段会产生临时性积累。由此推测,可利用饥饿胁迫加速亚硝化的实现。短期饥饿胁迫对NOB活性的影响相对高于对AerAOB活性的影响。研究表明,饥饿条件下,AerAOB能够维持细胞状态,分子机制表明其具有一系列有利于饥饿条件下生存的生理特征。适度饥饿可促进 NO_2^- -N的积累和亚硝化作用^[2],当饥饿期结束后,处于恢复期的

AerAOB受到激活,活性能迅速恢复,而NOB活性恢复速率明显较低。

刘文龙^[3]首次提出利用污泥好氧饥饿处理来快速实现亚硝化的方法。研究表明:活性污泥在饥饿处理后,经过缺/好氧交替运行,可淘洗出NOB,亚硝酸盐积累率(nitrite accumulation percent, NAP)高达95%;好氧饥饿0~7 d时,AerAOB相对丰度线性增加;饥饿时间>7 d时,AerAOB相对丰度逐渐下降。李冬等^[4]采取间歇饥饿法反复抑制污泥中的NOB活性,发现“4 d饥饿+6 d恢复”循环运行的策略可将NOB淘汰出系统,单个周期内,经过6 d的恢复,AOB的活性恢复速率显著高于NOB,经4个周期的运行,NAP高达83.18%。

需要注意的是,饥饿时间过长会对AerAOB造成过度抑制,降低亚硝化效率。陈佼等^[5]发现,经过20 d的饥饿后,AerAOB活性不能完全恢复。Torà等^[6]认为,尽管可通过改善饥饿条件来维持亚硝化污泥系统中的AerAOB活性,但仍难以避免饥饿对AOB造成的抑制伤害。Seuntjens等^[7]报道称,2 d的饥饿可能导致AerAOB/NOB相对活性比增加24%,但连续8 d的饥饿处理则会使AerAOB的活性显著降低。Pijuan等^[8]对比了长期厌氧饥饿和间歇厌氧/好氧饥饿对好氧颗粒污泥结构和活性的影响。在4~5周的饥饿条件下,两种模式中AerAOB对 NH_4^+ -N的去除能力都有下降;相比之下,长期厌氧饥饿则进一步降低了AerAOB的衰减速率,长期厌氧饥饿和间歇厌氧/好氧饥饿时,AerAOB活性分别降低了20%和36%。总体而言,尽管饥饿胁迫调控有利于促进亚硝化进程,但要避免过长时间的饥饿对AerAOB造成的活性抑制,控制饥饿时间是利用饥饿调控实现亚硝化的技术难点之一。

1.2 饥饿对硝化菌群的影响

当前已知的大多数AerAOB属于Proteobacteria亚纲的一个独立分支,不同系统发育类群的AOB受

饥饿影响后的恢复能力不同。利用饥饿调控,可改变硝化污泥的菌群丰度,并能筛选出抗性强的菌种。在污水处理中,*Nitrosomonas*和*Nitrospira*是最常见的属水平上的好氧氨氧化菌^[6]。其中,*Nitrosomonas europaea*对饥饿胁迫的抗性更好,活性恢复快,易富集,具有成为优势菌的特点^[1]。相比于*Nitrosomonas europaea*,*Nitrospira briensis*的活性恢复速度较慢,在饥饿期间,*Nitrospira briensis*的16S rRNA的含量无明显改变,与其他菌相比,始终保持较高水平;而*amoA*和*mRNA*在饥饿期间的表达相对减少,至恢复阶段,*amoA*和*mRNA*的表达同时增加。在饥饿状态下,*Nitrospira briensis*的新蛋白诱导量低于其他菌种,表明该菌种可能有不同的饥饿应激响应模式。硝化作用能为ATP的生成提供电子,因此ATP含量

保留率也可表示饥饿条件下的硝化菌活性^[9]。饥饿调控对硝化污泥的形态也有影响。刘文龙^[3]提出,好氧饥饿处理能将丝状菌大量繁殖的膨胀污泥转化成具有良好沉降性能和短程硝化能力的活性污泥。在饥饿过程中,细胞内部的有机高分子聚合物被消耗,并释放磷酸盐,提高活性成分比例。但汪彩华等^[10]认为,饥饿期长达120 d可使硝化污泥的丝状菌比例增加,絮体结构松散;向污泥中投加NO₂⁻-N有助于使絮体结构更为紧密,维持球菌的优势地位。

1.3 饥饿调控对硝化的影响因素

饥饿条件下,AerAOB和NOB衰减速率与混合液的温度及DO密切相关^[1-6,11-14],相关研究结果如表1所示。

表1 不同饥饿条件下AOB和NOB的衰减速率

Tab.1 Decay rate of AOB and NOB with different starvation conditions

接种污泥	饥饿前进水氨氮 浓度/(mg·L ⁻¹)	饥饿条件			溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	活性测 试方法	衰减速率/d ⁻¹		NAP/%
		温度/℃	控氧模式	饥饿时间/d			AerAOB	NOB	
混合污泥	100±5	26±2	好氧/厌氧	1	0.18~0.57	NB			71
膨胀硝化污泥	59.92±2.85	29±1	好氧	14	4.94±0.05	NB	0.43±0.06	0.35±0.03	
膨胀硝化污泥	59.92±2.85	29±1	好氧	14	4.94±0.05	SOUR	0.42±0.06	0.36±0.04	
普通硝化污泥	42.01~68.56	29±1	好氧	7	6.0±0.05	NB	0.24±0.02	0.35±0.02	
普通硝化污泥	200	30±0.5	好氧	7	5.0~6.7	SOUR	0.144±0.008	0.306±0.026	
普通硝化污泥	200	30	好氧	7		SOUR	0.14	0.35	
SNAD污泥	100	20	好氧/厌氧	4		NB	0.108±0.003	0.134±0.002	83.18
普通活性污泥	45~50	25±1		10		NB	0.094±0.006	0.105±0.005	80.5
亚硝化污泥	1 350±25	18±2	缺氧	30	<0.1	SOUR	0.11±0.01		98
普通活性污泥		20	缺氧	30		NB	0.10±0.005	0.12±0.023	
短程硝化污泥	275	20±0.5	好氧	8	7.0	NB	0.35		
短程硝化污泥	275	20±0.5	厌氧	14	0	NB	0.031		
生物膜	65~70	20±1	好氧/厌氧	98	0~2(0~30 d) 2~7(31~97 d)	NB	0.035±0.004	0.029±0.002	
普通硝化污泥	8.77	20±0.5	好氧	8	6.0	NB	0.28±0.06	0.22±0.05	
普通硝化污泥		20±0.1	好氧	7	3.0~4.0	SOUR	0.15±0.02	0.15±0.01	

注: NB为硝化批次试验;SOUR为比耗氧速率。

硝化菌适宜温度为5~30℃,低温则会降低硝化菌的活性^[9,15]。已有研究表明,在好氧饥饿条件下,硝化菌为去除氨单加氧酶产生的具有氧化性的物质增强了自身的衰减,因此硝化菌对好氧条件更为敏感。而在厌氧饥饿中,硝化细菌将自身维持在休眠状态,降低代谢速率,以维持硝化功能。Munz等^[11]同样发现,混合液温度为35℃时,厌氧条件下AerAOB衰减速率较低,只有0.03 d⁻¹;若DO浓度达到7 mg/L,衰减速率则高达0.4 d⁻¹。Ye等^[2]将好氧

污泥混合液DO维持在0.2~0.6 mg/L之间,通过抑制NOB活性,实现了NO₂⁻-N的积累。Elawwad等^[12]研究表明,缺氧条件下,饥饿保存97 d的AerAOB生物膜在不到一周之内可实现性能的完全恢复;而厌氧条件下,保存超过4周的AerAOB生物膜必须要先恢复活性;此外,在这两种含氧量不同的条件下,NOB性能的完全恢复都需要7周时间。因此,低浓度DO下的饥饿有利于AerAOB的保藏,同时扩大AerAOB与NOB活性的差异,提高亚硝化性能。

1.4 饥饿调控对硝化菌耐受性的影响

Li等^[16]在不同的宴饥比条件下,成功培养出好氧颗粒污泥。研究发现,在SBR单个周期内宴饥比为1:11的条件下,容易形成较大的污泥颗粒;宴饥比分别为1:7和1:15时,污泥颗粒平均尺寸均相对较小。研究还发现,在不同的宴饥比系统中,均未观察到污泥颗粒分解现象,因此饥饿时间的长短并不是污泥颗粒稳定的先决条件。随着饥饿期的延长,硝化菌表现出较好的硝化活性。较高的宴饥比有利于异养AerAOB的发育,这些AerAOB表现出较高的抗饥饿能力。Nan等^[17]以NAP作为AerAOB和NOB活性比较的依据,考察了游离亚硝酸盐(Free Nitrous Acid, FNA)对饥饿污泥的抑制作用。研究发现,与预饥饿污泥相比,经FNA处理的新鲜污泥其NAP最高,为70%。经FNA处理的好氧预饥饿污泥其NAP最低,为27%。经FNA处理后,AOB和NOB的活性降低程度与处理前呈正相关。以新鲜污泥和好氧预饥饿污泥为例,两种污泥的NOB活性分别为4.24和1.27 mgN/(gVSS·h),经过FNA处理后,新鲜污泥中NOB的活性下降84%,好氧预饥饿污泥中NOB活性仅下降29%,说明饥饿使AerAOB和NOB对FNA产生了耐受性。

2 饥饿调控对厌氧氨氧化的影响

2.1 饥饿调控对厌氧氨氧化的作用机理

在AnAOB中,常见的功能菌包括 *Candidatus Brocadia*、*Candidatus Jettenia* 和 *Candidatus Kuenenia*。其中, *Candidatus Brocadia* 增殖速率高,生存适应能力强,对饥饿具有更强的自适应性^[18]。

Reeve等^[19]发现,在饥饿时长高达62 d的情况下,AnAOB的微生物群落仅用1 d就完成了厌氧氨氧化功能的恢复,证明AnAOB的活性相当稳定。Ma等^[20]研究了在厌氧和缺氧条件下,AnAOB经历60 d饥饿后的生存机制。宏蛋白质组学表明,以 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* 为优势菌的厌氧氨氧化污泥在经历60 d无氧或缺氧饥饿后,参与主要代谢途径的酶维持了稳定水平,从而使细胞在底物可用时能够恢复代谢活动。此外,与有机化合物利用有关的蛋白质表达上调,增强了利用内碳源生产能源的潜力。对细菌 *nirS*、*hzsA* 和 *hdh* 的mRNA水平的检测发现,在厌氧和缺氧条件下mRNA的衰减速率不同,证明在饥饿期间mRNA丰度的调控促进了细胞在

饥饿条件下的适应和生存^[21]。Wang等^[22]提出,经历长期饥饿后,相比于厌氧氨氧化污泥中细菌类活性的衰减,AnAOB的死亡对厌氧氨氧化反应的阻碍占主导地位,如图1所示。AnAOB死亡后,进行厌氧氨氧化的活性永久不可恢复;而AnAOB活性的衰减可在有利于生长的条件下恢复,然后通过合成新的酶或启动酶活性的方式进行提升。

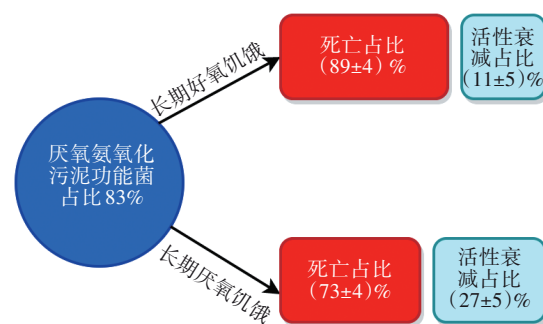


图1 长期好氧和厌氧饥饿条件下厌氧氨氧化菌死亡和活性衰减的比例

Fig.1 Ratio of death and activity decay of AnAOB under long-term aerobic and anaerobic starvation conditions

污泥形态不同,对饥饿胁迫的耐受性不同。相比于絮状污泥,颗粒污泥在饥饿条件下代谢损失小,通过胞外聚合物释放储存的营养物质能减缓菌体的饥饿状况。也有研究表明,厌氧氨氧化颗粒污泥在长期饥饿的条件下逐步解体为絮状污泥,脱氮性能显著下降;且絮状污泥比颗粒污泥恢复速率慢^[23]。李冬等^[24]发现,厌氧氨氧化颗粒污泥在4℃下饥饿保存230 d后,污泥颜色变黑,有刺鼻性气味产生,平均粒径下降至饥饿处理前的38.23%,证明厌氧氨氧化系统基本被破坏。

2.2 环境因素对饥饿调控的影响

2.2.1 不同基质的缺乏

厌氧氨氧化作用的底物是 NH_4^+-N 和 NO_2^--N ,缺失任何一种底物,生物化学作用都无法产生。不同底物的缺失对厌氧氨氧化菌饥饿胁迫的影响效果不同。Wu等^[25]研究发现,不同饥饿胁迫条件下 *Candidatus Brocadia* 菌的衰减程度不同,不同基质的缺乏直接导致厌氧氨氧化菌培养物的饥饿耐受性出现显著区别。厌氧氨氧化菌在不同底物缺失下的存活情况如图2所示。可以看出,在饥饿条件下,底物只有 NH_4^+-N 的抑制作用最显著,其次是 NO_2^--N ,最后是无底物。试验表明,厌氧氨氧化菌在无 NO_2^--N 条件下可以存活4周,无 NH_4^+-N 条件下可以

存活5周,两种底物均缺失的条件下可以存活7周。Carvajal-Arroyo等^[26]则提出,饥饿的厌氧氨氧化颗粒污泥对亚硝酸盐毒性高度敏感,不同饥饿水平的AnAOB对 NO_2^- -N的敏感程度也不同。与低负荷和饥饿的AnAOB相比,已适应高氮负荷的AnAOB对 NO_2^- -N的抑制抗性更强。在工程应用中,应防止微生物因摄食量不足而引发对 NO_2^- -N的高度敏感。汪彩华等^[27]也认为相比于低浓度的亚硝酸盐,高浓度亚硝酸盐使饥饿状态下的厌氧氨氧化菌体产生更严重的死亡自溶现象。底物的限制和饥饿最终导致了污泥中EPS不同的化学成分和含量。已有研究表明,EPS中的蛋白质与多糖的含量比例与污泥沉降能力密切相关,较低的蛋白质与多糖之比(PN/PS)表明污泥的沉降能力较强。

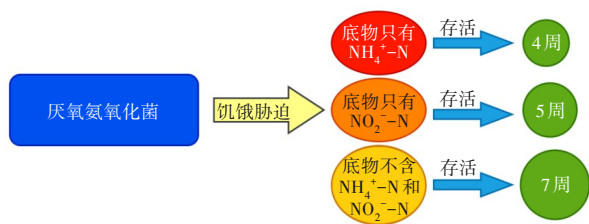


图2 厌氧氨氧化菌在不同底物缺失下的存活情况

Fig.2 Survival of AnAOB in the absence of different substrates

2.2.2 温度

温度对厌氧氨氧化颗粒污泥形态和物理性能有显著影响。低温有利于长期饥饿时结构完整性和颗粒稳定性的维护,不同温度下饥饿保存及恢复后的厌氧氨氧化活性变化^[28-29]如表2所示。Xing等^[28]发现,相比于20℃的环境,将厌氧氨氧化颗粒污泥储存在4℃环境中获得了较低的衰减速率,保持了良好的脱氮能力,饥饿恢复后的PN/PS比值较低。此外,厌氧氨氧化颗粒污泥保存在4℃下的活性恢复性能优于20℃保存。研究还发现,在50 d以上,维持4℃饥饿处理后的厌氧氨氧化颗粒污泥在4 d后可以恢复脱氮性能,8 d内可以完全恢复厌氧氨氧化活性。袁怡等^[30]提出,在饥饿情况下,相比于-20℃的低温保存和30℃的中温保存,在0~15℃自然环境下避光缺氧保存厌氧氨氧化污泥是最经济有效的方法。黄佳路^[29]也发现饥饿温度对污泥表面结构的影响较大,室外冰冻和冷冻储存都不利于厌氧氨氧化污泥的保藏和恢复;利用14~30℃室温,遮光密闭储存厌氧氨氧化污泥15 d,其

比氨氧化活性(Specific Anammox Activities, SAA)高达储存前的90.9%,储存100 d后,AnAOB数量为饥饿处理前的84.03%。综上,温度过低和过高下的饥饿胁迫都对AnAOB的生长造成了更显著的抑制,同时也会延长AnAOB的恢复时间。因此,采用合适的温度进行饥饿处理,有利于AnAOB的保藏,并减少能源消耗。

表2 不同温度下饥饿保藏及恢复后的厌氧氨氧化菌活性变化

Tab.2 Changes in the activity of AnAOB after starvation stress and recovery at different temperatures

初始污泥总氮去除速率NRR/($\text{kgN} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	饥饿条件		饥饿后SAA/($\text{mgN} \cdot \text{g}^{-1} \text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$)	恢复时间/d	恢复后SAA/($\text{mgN} \cdot \text{g}^{-1} \text{VSS} \cdot \text{h}^{-1}$)
	温度/℃	时间/d			
8.10	20	50	5.87	28	0.52
8.24	4	50	5.75	28	0.88
8.21	室内(14~30)	100	2.13	9.5	10.96
8.21	室外(-25~0)	100	-7.71	10	0.38
8.21	-25	100	-0.46	10	1.92

2.3 调控模式对厌氧氨氧化污泥的影响

Ye等^[18]反复对厌氧氨氧化污泥进行短期饥饿和恢复驯化,以提高污泥耐饥饿性能。研究发现,将饥饿期由1 d逐步增加至5 d,提高了厌氧氨氧化污泥系统的耐受性和表现活性。AnAOB对短期饥饿具有耐受性和自适应能力,为了保持厌氧氨氧化工艺的良好性能和重复利用率,应避免超过5 d的饥饿期。Zhang等^[31]研究了间歇性和持续性休息模式对长期饥饿过程中AnAOB内源代谢的影响。与持续休眠细胞相比,间歇休眠细胞的厌氧氨氧化活性明显降低。持续饥饿30 d的厌氧氨氧化颗粒内源衰减系数为 0.0062 d^{-1} ,而每10天提供底物的间歇饥饿方式加速了生物量衰减,衰减系数约 0.011 d^{-1} ,是持续饥饿的2倍左右。

3 饥饿调控在CANON工艺中的应用

在启动、恢复和运行CANON工艺中,饥饿调控都有应用价值。采用厌氧氨氧化消耗恢复期积累的 NO_2^- -N,可避免 NO_2^- -N对AOB的抑制作用,促进亚硝化的进行^[32]。Pedrouso等^[33]利用CANON工艺处理含氮浓度高达300 mg/L的人工配水,工艺经反复饥饿和恢复后,没有产生对脱氮不利的影响,总

氮去除率维持在90%以上。在经过长达15 d的饥饿处理后,工艺性能能够迅速恢复,并且对氮浓度高达120 mg/L的厌氧消化回水具有良好的效果。

饥饿处理也有助于因过量曝气而受破坏的CANON工艺的恢复。阮蓉蓉^[34]首次提出冰点下(-4~-2℃)原位饥饿处理过量曝气的污泥。污泥经18 d饥饿后,短程硝化性能完全恢复,NAP从过量曝气时的低于25%提高至94.97%,污泥中AnAOB活性仍高达95%以上。

李冬等^[35]探求了不同污泥量的间歇饥饿调控对CANON工艺启动的影响(见表3),采用污泥整体间歇饥饿对接种污泥中AerAOB、NOB和AnAOB三种功能菌的抑制作用最强,这种策略使CANON工艺的处理效果受到影响;采用部分污泥间歇饥饿对NOB的抑制效果最差;对颗粒污泥进行水力筛分,排出絮状污泥,将絮状污泥进行饥饿处理,能有效抑制NOB的活性,启动CANON工艺的时间最短,总氮去除率最高。刘名扬^[36]以3 d饥饿和3 d恢复为一周期来运行CANON工艺,对实际低 NH_4^+-N 生活污水的处理效果表明,采用部分污泥间歇饥饿启动的CANON工艺以SBR方式运行,稳定脱氮时曝停比为2:1,总氮去除率为82.07%。反应器运行期间,水力筛分好/缺氧强化间歇饥饿的策略成功抑制了异养菌的增殖,自养脱氮贡献率高达86.09%。

表3 不同污泥量下间歇饥饿启动CANON工艺

Tab.3 Start-up of the CANON process by intermittent starvation of different sludge amounts

需经饥饿处理的污泥	饥饿时间/d	工艺启动时间/d	第70天颗粒污泥粒径/ μm	第70天总氮去除率/%
只有絮状污泥	2	44	404.465	73.63
50%污泥	2	66	359.355	71.56
全部污泥	2	58	306.097	67.40

综合来说,饥饿调控有利于CANON工艺的快速启动和维持稳定运行。可通过饥饿调控将全程硝化污泥转化成半量亚硝化污泥,接种厌氧氨氧化污泥后启动CANON工艺。在CANON工艺运行期间,利用饥饿调控维持稳定运行,实现低温低氨氮生活污水的处理。在运行中,通过反复饥饿和恢复也能提高CANON工艺功能菌对无底物条件的耐受能力。如遇过量曝气而受破坏的CANON系统,也可通过饥饿调控恢复工艺的运行。

4 总结与展望

4.1 总结

不同的饥饿调控方式会引发微生物产生不同的代谢机制,厌氧氨氧化菌通过相对较低的维持能量需求,拥有更有利的生存策略,以确保在营养有限的系统中生存。此外,硝化系统中NOB更易于被淘汰出系统,使AerAOB成为优势菌种,促进亚硝化运行。如何基于AOB和NOB不同的适宜生长条件,改变饥饿调控的环境因素,促使NOB的淘洗,降低饥饿对AOB的不利影响,是目前需要研究的问题。此外,CANON工艺中厌氧氨氧化是实现脱氮的关键步骤,降低饥饿胁迫对AnAOB的抑制效果是维持CANON工艺效率的关键。

4.2 展望

① 短程硝化产生的 NO_2^--N 作为厌氧氨氧化的前驱物,对CANON工艺脱氮效率起到控制作用。为避免饥饿处理后,恢复期内氮负荷的突然增大对AerAOB的毒性作用,应采用逐渐增加曝气量的策略,逐步提升亚硝化能力,同时避免过高的溶解氧对AnAOB的抑制。此外,当前还缺乏饥饿条件下多种环境因素共同作用对CANON工艺影响的研究。

② 在污水处理厂进行饥饿调控时,需要特别注意的是,导致负荷不足或饥饿的关键条件包括废水流动的季节性变化、生物反应器的规模和生物质储存情况。可利用活性污泥1号模型(ASM1)对CANON工艺运行进行模拟,制定精确的调控策略。

参考文献:

- [1] 叶丽红. 基于饥饿胁迫的自养脱氮性能优化及微生物特性研究[D]. 北京:北京工业大学, 2019.
YE Lihong. The Performance Optimization and Microbial Characteristics of Autotrophic Nitrogen Removal Process with Starvation Stress [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019(in Chinese).
- [2] YE L H, LI D, ZHANG J, *et al.* Start-up and performance of partial nitrification process using short-term starvation [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 276: 190-198.
- [3] 刘文龙. 饥饿处理快速实现低C/N生活污水短程硝化及污泥特性研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015.
LIU Wenlong. Starvation Treatment Speeds up Establishment of the Nitrite Pathway in Treating Low C/N Ratio Domestic Wastewater Plus Study on Sludge

- Characteristics [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015(in Chinese).
- [4] 李冬, 刘志诚, 徐贵达, 等. 基于间歇饥饿的SNAD工艺运行[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 337-344.
- LI Dong, LIU Zhicheng, XU Guida, *et al.* Effects of intermittent starvation on the operation of the SNAD process [J]. Environmental Science, 2020, 41 (1) : 337-344(in Chinese).
- [5] 陈佼, 陆一新, 张建强, 等. 饥饿对人工快速渗滤系统硝化性能的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38 (12): 4704-4712.
- CHEN Jiao, LU Yixin, ZHANG Jianqiang, *et al.* Impact of starvation on the nitrification performance of constructed rapid infiltration systems[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38 (12) : 4704-4712 (in Chinese).
- [6] TORÀ J A, LAFUENTE J, BAEZA J A, *et al.* Long-term starvation and subsequent reactivation of a high-rate partial nitrification activated sludge pilot plant [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (21): 9870-9875.
- [7] SEUNTJENS D, VAN TENDELOO M, CHATZIGIANNIDOU I, *et al.* Synergistic exposure of return-sludge to anaerobic starvation, sulfide, and free ammonia to suppress nitrite oxidizing bacteria [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52 (15): 8725-8732.
- [8] PIJUAN M, WERNER U, YUAN Z G. Effect of long term anaerobic and intermittent anaerobic/aerobic starvation on aerobic granules [J]. Water Research, 2009, 43(14): 3622-3632.
- [9] 汪彩华, 郑平, 唐崇俭, 等. 硝化污泥保藏特性的研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 560-566.
- WANG Caihua, ZHENG Ping, TANG Chongjian, *et al.* Influence of storage on the characteristics of nitrifying sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31 (3): 560-566(in Chinese).
- [10] 汪彩华, 郑平, 胡安辉. 硝化产物对硝化细菌混培物保藏特性的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1663-1668.
- WANG Caihua, ZHENG Ping, HU Anhui. Influence of nitrification product on the preservation characteristics of mixed nitrifying culture [J]. China Environmental Science, 2011, 31(10): 1663-1668(in Chinese).
- [11] MUNZ G, LUBELLO C, OLESZKIEWICZ J A. Modeling the decay of ammonium oxidizing bacteria[J]. Water Research, 2011, 45:557-564.
- [12] ELAWWAD A, SANDER H, KAPPELMEYER U, *et al.* Long-term starvation and subsequent recovery of nitrifiers in aerated submerged fixed-bed biofilm reactors [J]. Environmental Technology, 2013, 34 (8) : 945-959.
- [13] MUNZ G, LUBELLO C, OLESZKIEWICZ J A. Factors affecting the growth rates of ammonium and nitrite oxidizing bacteria [J]. Chemosphere, 2011, 83: 720-725.
- [14] MANSER R, GUJER W, SIEGRIST H. Decay processes of nitrifying bacteria in biological wastewater treatment systems [J]. Water Research, 2006, 40: 2416-2426.
- [15] 张自杰. 排水工程(下册)[M]. 第5版. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- ZHANG Zijie. Sewerage Engineering (Volume 2) [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015(in Chinese).
- [16] LI D, ZHANG S R, LI S, *et al.* The nitrogen removal of autotrophic and heterotrophic bacteria in aerobic granular reactors with different feast/famine ratio [J]. Bioresource Technology, 2019, 272: 370-378.
- [17] NAN X, MA B, QIAN W T, *et al.* Achieving nitrification by treating sludge with free nitrous acid: the effect of starvation [J]. Bioresource Technology, 2019, 271: 159-165.
- [18] YE L H, LI D, ZHANG J, *et al.* Resuscitation of starved anaerobic ammonium oxidation sludge system: impacts of repeated short-term starvation [J]. Bioresource Technology, 2018, 263: 458-466.
- [19] REEVE P J, MOUILLERON I, CHUANG H P, *et al.* Effect of feed starvation on side-stream anammox activity and key microbial populations [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 171:121-127.
- [20] MA X, WANG Y Y. Anammox bacteria exhibit capacity to withstand long-term starvation stress: a proteomic-based investigation of survival mechanisms [J]. Chemosphere, 2018, 211: 952-961.
- [21] MA X, WANG Y Y, ZHOU S, *et al.* Endogenous metabolism of anaerobic ammonium oxidizing bacteria in response to short-term anaerobic and anoxic starvation stress[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 313: 1233-1241.
- [22] WANG Q L, SONG K, HAO X D, *et al.* Evaluating death and activity decay of Anammox bacteria during anaerobic and aerobic starvation [J]. Chemosphere,

- 2018, 201:25-31.
- [23] 万章弘, 彭书传, 岳正波, 等. 饥饿对厌氧氨氧化污泥颗粒化及污泥形态的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13(11): 2570-2575.
- WAN Zhanghong, PENG Shuchuan, YUE Zhengbo, *et al.* Effects of starvation on granulation and morphology of Anammox sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(11): 2570-2575 (in Chinese).
- [24] 李冬, 刘名扬, 张杰, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2957-2965.
- LI Dong, LIU Mingyang, ZHANG Jie, *et al.* Long-term storage and rapid activity recovery of Anammox granular sludge[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2957-2965 (in Chinese).
- [25] WU X, LIU S T, DONG G L, *et al.* The starvation tolerance of Anammox bacteria culture at 35 °C [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2015, 120 (4): 450-455.
- [26] CARVAJAL-ARROYO J M, PUYOL D, LI G B, *et al.* Starved Anammox cells are less resistant to NO₂⁻ inhibition[J]. Water Research, 2014, 65: 170-176.
- [27] 汪彩华, 郑平, 唐崇俭, 等. 间歇性饥饿对厌氧氨氧化菌混培物保藏特性的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33 (1): 36-43.
- WANG Caihua, ZHENG Ping, TANG Chongjian, *et al.* Effects of intermittent starvation on preservation characteristics of Anammox bacteria [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33 (1): 36-43 (in Chinese).
- [28] XING B S, GUO Q, JIANG X Y, *et al.* Long-term starvation and subsequent reactivation of anaerobic ammonium oxidation (Anammox) granules [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 287: 575-584.
- [29] 黄佳路. 厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- HUANG Jialu. Research on Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Sludge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).
- [30] 袁怡, 黄勇, 李祥, 等. 长期保藏对厌氧氨氧化污泥脱氮性能的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(5): 2051-2056.
- YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, *et al.* Influence of long-term preservation on nitrogen removal capabilities of ANAMMOX sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8 (5): 2051-2056 (in Chinese).
- [31] ZHANG Z Z, BUAYI X, CHENG Y F, *et al.* Anammox endogenous metabolism during long-term starvation: impacts of intermittent and persistent modes and phosphates [J]. Separation and Purification Technology, 2015, 151: 309-317.
- [32] 刘文龙. 城市污水主流厌氧氨氧化连续流工艺的脱氮除磷效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- LIU Wenlong. Nitrogen and Phosphorous Removal in Mainstream ANAMMOX Continuous Process Treating Municipal Wastewater [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).
- [33] PEDROUSO A, TOCCO G, VAL DEL RIO A, *et al.* Digested blackwater treatment in a partial nitrification-anammox reactor under repeated starvation and reactivation periods [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118733.
- [34] 阮蓉蓉. 城市污水短程硝化/厌氧氨氧化/反硝化一体化工艺与技术[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- RUAN Rongrong. Technology of single stage partial nitrification, ANAMMOX and Denitrification Process Treating Real Municipal Sewage [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [35] 李冬, 刘名扬, 任纪元, 等. 基于不同污泥量间歇饥饿的CANON工艺启动研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3607-3614.
- LI Dong, LIU Mingyang, REN Jiyuan, *et al.* Research on CANON process startup based on intermittent starvation of different sludge amount [J]. China Environmental Science, 2021, 41 (8): 3607-3614 (in Chinese).
- [36] 刘名扬. 基于水力筛分间歇饥饿的CANON工艺启动及稳定运行研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
- LIU Mingyang. Research on Start-up and Stable Operation of CANON Process Based on Hydraulic Screening and Intermittent Starvation [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021 (in Chinese).

作者简介: 杨综艺(1997-), 男, 北京人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理及资源化。

E-mail: yangzongyi@126.com

收稿日期: 2021-06-15

修回日期: 2021-08-29

(编辑: 丁彩娟)