

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.015

# 亚硝态氮充足下乙酸钠对厌氧氨氧化/反硝化的影响

杨京月

(大连市市政设计研究院有限责任公司, 辽宁 大连 116000)

**摘要:** 通过连续流实验,研究了在亚硝态氮充足的条件下乙酸钠有机物对厌氧氨氧化(ANAMMOX)耦合反硝化系统(SAD)的影响。结果表明,当乙酸钠浓度(以COD计)为20 mg/L时,耦合系统脱氮性能良好;而当乙酸钠浓度增至50 mg/L时,ANAMMOX受到严重抑制,系统脱氮性能受到严重影响。进一步通过高通量生物测序研究颗粒污泥的微生物菌群变化。随着乙酸钠浓度的增加,颗粒污泥的主要厌氧氨氧化菌属 *Candidatus Kuenenia* 所占比例由20.42%降为2.30%,厌氧氨氧化菌的生物密度逐渐降低,反硝化菌的生物密度逐渐升高,厌氧氨氧化菌处于劣势。

**关键词:** 厌氧氨氧化; 反硝化; 乙酸钠; 亚硝态氮; 微生物菌群

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0093-06

## Effect of Sodium Acetate on ANAMMOX Coupled Denitrification System with Sufficient Nitrite Nitrogen

YANG Jing-yue

(Dalian Municipal Design & Research Institute Co. Ltd., Dalian 116000, China)

**Abstract:** This paper investigated the effect of sodium acetate on continuous-flow anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) coupled denitrification system (SAD) under the condition of sufficient nitrite nitrogen. When the concentration of sodium acetate (COD) was 20 mg/L, satisfactory nitrogen removal performance of the coupled system was obtained. When the concentration of sodium acetate was increased to 50 mg/L, ANAMMOX was severely inhibited, and the nitrogen removal performance of the system was significantly affected. The change in microbial community of the granular sludge was further analyzed by high-throughput sequencing. With the increase of sodium acetate concentration, the relative abundance of *Candidatus Kuenenia* which was the main ANAMMOX bacteria (AAOB) in granular sludge, decreased from 20.42% to 2.30%, the biological density of AAOB gradually decreased, and the biological density of denitrifying bacteria gradually increased, indicating that the ANAMMOX bacteria was disadvantageous in the system.

**Key words:** anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX); denitrification; sodium acetate; nitrite nitrogen; microbial community

目前,厌氧氨氧化(ANAMMOX)工艺被广泛应用。在有机物存在的环境中,ANAMMOX和反硝化可以协同作用,从而减弱有机物对ANAMMOX的影响,提高脱氮性能<sup>[1-2]</sup>。在耦合系统中,当有机物浓度过高时,会使反硝化活性增强<sup>[3]</sup>,ANAMMOX失去

反应的主导作用,从而破坏耦合系统的平衡,使整体脱氮性能下降。有研究表明<sup>[4-5]</sup>,适当提高亚硝态氮浓度,可有效缓解这种抑制作用。

亚硝态氮作为ANAMMOX和反硝化反应的共同基质,不足时会对脱氮性能产生影响,不利于很好

地反映厌氧氨氧化反应器对有机物的极限承受能力。研究表明<sup>[5]</sup>,保证亚硝态氮充足,以葡萄糖为有机物,当进水葡萄糖浓度(以COD计)为100 mg/L时,颗粒污泥具有良好的厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮活性,而当葡萄糖浓度达到200 mg/L时,颗粒污泥的厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮活性较差。由于不同种类不同浓度的有机物对厌氧氨氧化菌和反硝化菌的影响不同<sup>[6-7]</sup>,因此有必要研究其他有机物在亚硝态氮充足的条件下对厌氧氨氧化耦合反硝化系统的影响。乙酸钠为常见的有机物,相比葡萄糖,其代谢途径较简单、反硝化速率较快<sup>[8]</sup>。为此,笔者利用连续流反应器,在底物亚硝态氮充足的条件下,考察不同浓度乙酸钠对厌氧氨氧化颗粒污泥反应器脱氮性能的影响,并通过皮尔逊相关性分析探讨反应器中不同底物变化量的相关性,同时,采用高通量测序方法考察添加乙酸钠前后颗粒污泥的菌群变化情况,进一步明确不同有机物对耦合脱氮颗粒污泥反应器的抑制特性,以期对相关研究和应用提供借鉴。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验装置

本实验为连续流实验,采用有效容积为10 L的UASB厌氧氨氧化颗粒污泥反应器,如图1所示,外部包裹黑色软性材料以避光。

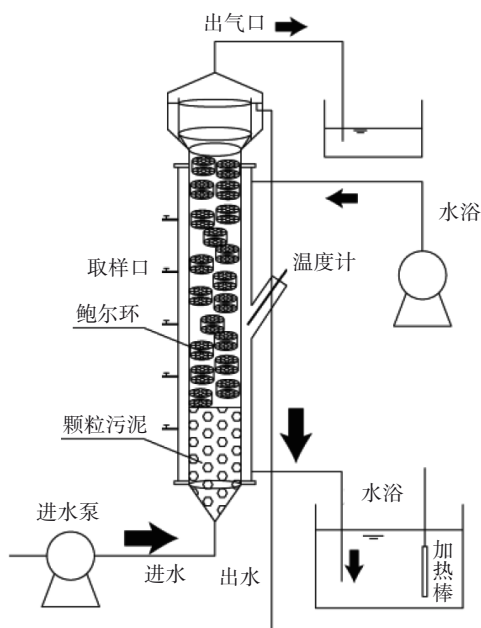


图1 UASB反应器示意

Fig.1 Schematic diagram of UASB reactor

进水由蠕动泵打入反应器底部,通过水浴控制反应器内温度为25℃,水力停留时间(HRT)控制在0.96 h,颗粒污泥上方填充直径为2.5 cm的鲍尔环载体以减少污泥流失。

### 1.2 接种污泥和进水水质

反应器接种4 L厌氧氨氧化颗粒污泥,其挥发性悬浮固体浓度为4 500 mg/L,平均粒径为2 mm。

反应器进水采用人工配水,主要成分为 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{NaNO}_2$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCl}_2$ 、有机物(乙酸钠)和微量元素。 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCl}_2$ 浓度分别为1.25、0.01、0.3和0.005 6 g/L。实验分为4个阶段,各个阶段的进水 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{NaNO}_2$ 、乙酸钠(以COD计)浓度见表1。为了保证底物亚硝态氮充足,在不同阶段相应地提高进水亚硝态氮浓度。

表1 不同运行阶段的进水水质

Tab.1 Influent quality at different operating stages

阶段	时间/d	$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NO}_2^--\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	乙酸钠/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
A	1~30	50±5	66±5	0
B	31~60	50±5	77±5	20
C	61~90	50±5	77±5	35
D	91~120	50±5	77±5	50

### 1.3 分析项目和方法

$\text{NH}_4^+-\text{N}$ :纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^--\text{N}$ :N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^--\text{N}$ :麝香草酚分光光度法;MLSS、MLVSS:重量法;温度:WTW/Multi 3420测定仪。取 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 浓度之和为TN浓度。

采用细菌16S rRNA高通量测序技术分析颗粒污泥的菌群结构及变化。在不同运行阶段从反应器中取颗粒污泥样品(取稳定运行期即阶段A的颗粒污泥样品R1和以乙酸钠为有机物时运行末期即阶段D的颗粒污泥样品R3),送交上海生工生物工程技术服务有限公司进行高通量测序分析。将高通量测序结果得到的有效序列进行聚类分析,采用Usearch软件把相似度为97%的序列归为同一个OTU。将得到的全部OTU与RDP数据库比对,在门和属进行不同分类学水平的菌群结构分析。

### 1.4 计算方法

对反应器中的厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮性能进行分析,具体计算公式如下(下角标AN和DN

分别表示厌氧氨氧化和反硝化):

$$\Delta \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{AN}} = (\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{进}} - \text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{出}}) \times 1.32 \quad (1)$$

$$\Delta \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{DN}} = \Delta \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{总}} - \Delta \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{AN}} \quad (2)$$

厌氧氨氧化对  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除比例( $\eta_1$ )和反硝化对  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除比例( $\eta_2$ )的计算方法如下:

$$\eta_1 = \frac{\Delta \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{AN}}}{\Delta \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{总}}} \quad (3)$$

$$\eta_2 = 1 - \eta_1 \quad (4)$$

本实验以氮素的降解速率评价耦合系统的污泥活性及脱氮性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 亚硝态氮足量时反应器的脱氮性能

底物亚硝态氮足量时,乙酸钠浓度对厌氧氨氧化反应器脱氮性能的影响如图2和图3所示。阶段A进水中未添加乙酸钠有机物,反应器具有良好的厌氧氨氧化脱氮性能,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度平均值分别为 1.6、7.3 和 18.1 mg/L,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和 TN 的平均去除率分别为 96.5%、89.5% 和 77.5%。阶段B、C、D进水中分别添加了 20、35 和 50 mg/L 的乙酸钠有机物,为了保证反应器内的底物亚硝态氮足量,进水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度均提高至 77 mg/L 左右,出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度为 8.8~56.7 mg/L,出水 TN 浓度逐渐升高,到阶段D末期(第120天),TN 浓度升至 104.4 mg/L, TN 去除率降为 18.7%,耦合系统的脱氮性能受到严重影响。

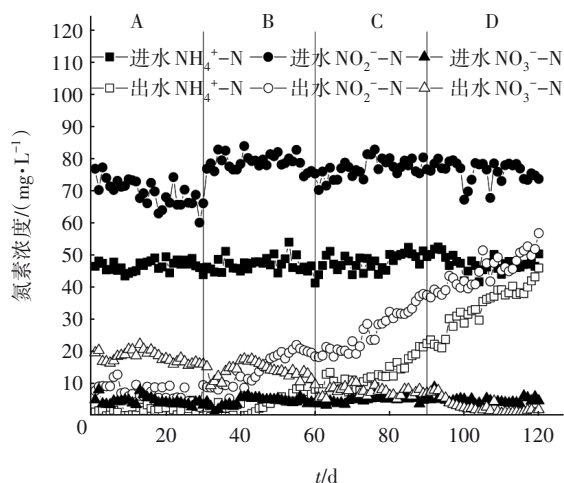


图2 厌氧氨氧化颗粒污泥反应器的脱氮性能

Fig.2 Nitrogen removal performance of ANAMMOX granular sludge reactor

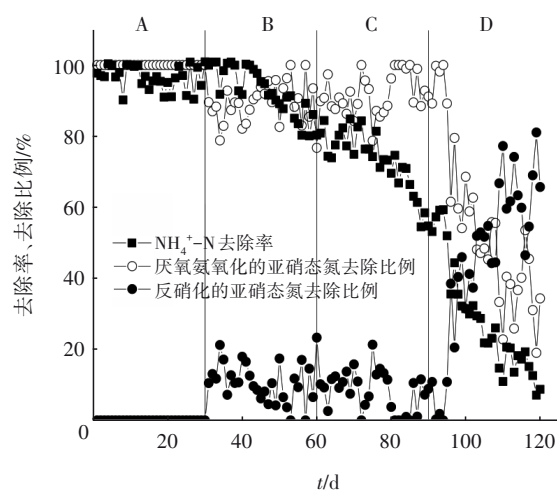


图3 反应器对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率及不同过程对  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除比例

Fig.3  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal rate and nitrite removal ratio via different processes in the reactor

由图3可知,氨氮去除率在阶段B的前12 d(即第31~42天)保持稳定并维持在较高水平(约为98.14%),较阶段A有所提升。但从第43天开始,氨氮去除率开始降低,到阶段D末期,氨氮去除率降到8.74%(第120天)。随着反应的进行,通过厌氧氨氧化去除的亚硝态氮比例显著降低。经过计算,在阶段B,厌氧氨氧化过程消耗的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  比例平均为89.47%,此时ANAMMOX占耦合反应的主要地位,耦合效果良好;阶段C结束时(第90天)为86%左右;在阶段D,厌氧氨氧化消耗的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  比例持续降低,第120天降到34.32%,ANAMMOX失去耦合反应的主导地位,体系中主要为反硝化作用。

在本实验中,以乙酸钠为有机物,保证系统内  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  充足,提高乙酸钠浓度,短期内对厌氧氨氧化细菌没有影响(阶段B前12 d),但继续驯化则导致氨氮去除率降低。当乙酸钠浓度为20 mg/L时,系统的脱氮性能良好,但ANAMMOX活性受到部分影响;当乙酸钠浓度增至50 mg/L时,ANAMMOX受到严重抑制,耦合系统的脱氮性能变差。而在以往的研究中<sup>[5]</sup>,以葡萄糖为有机物、当COD浓度为50 mg/L时,系统的脱氮性能良好且ANAMMOX活性并未受到影响;当COD浓度升高到200 mg/L时,系统脱氮性能开始明显降低,ANAMMOX活性出现明显抑制。分析原因,这主要与葡萄糖和乙酸钠的代谢不同有关,相比葡萄糖,乙酸钠为小分子有机物,代谢较为简单,对厌氧氨氧化细菌影响较大<sup>[9]</sup>。Zheng



等<sup>[10]</sup>的研究表明,在相同C/N下,分别以葡萄糖和乙酸钠为有机物时系统对氨氮的去除量分别为31.1、15.0 mg/L,乙酸钠对厌氧氨氧化的抑制更强烈;刘常敬等<sup>[11]</sup>通过连续流和血清瓶批式实验发现,从TN去除率来看,在苯甲酸钠、邻苯二酚、间苯二酚、丙酸钠、乙酸钠5种有机物中,乙酸钠对耦合反应器的影响最大,TN去除率最低;而张诗颖等<sup>[12]</sup>在厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮的研究中,提高有机物乙酸钠浓度后,出水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度大幅上升,厌氧氨氧化细菌活性大大降低。

## 2.2 微生物观察和菌属分析

### 2.2.1 各阶段颗粒污泥形貌变化

图4为各阶段颗粒污泥的照片。阶段A颗粒污泥呈鲜艳的砖红色,从阶段B至阶段D,颗粒污泥黑色区域逐渐增加。颗粒污泥的粒径也随着有机物浓度的增加而逐渐减小,这与以葡萄糖为碳源时的结果相同<sup>[5]</sup>。

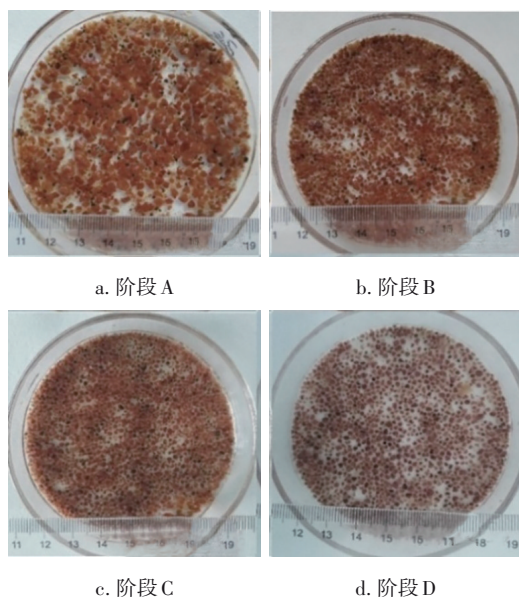


图4 各阶段的颗粒污泥照片

Fig.4 Photos of granular sludge at each stage

### 2.2.2 微生物高通量测序结果分析

图5(a)和(c)为R1和R3颗粒污泥在门水平上的菌群分布特性。在2个样品中 *Proteobacteria* 均为优势菌群,添加有机物后R3中 *Proteobacteria* 的丰度高于R1。 *Proteobacteria* 门中包含大多数的反硝化细菌,系统中添加有机物后,反硝化菌比例增多<sup>[13]</sup>。而在R3中 *Planctomycetes* 和 *Acidobacteria* 的占比与R1相比均有所降低, *Planctomycetes* 门中包含了已知

的厌氧氨氧化菌的所有属<sup>[14]</sup>,其比例降低也是添加有机物后反应器中厌氧氨氧化活性降低的主要原因。另外,在2个样品中 *Bacteroidetes* 的比例变化不大,且都含有 *Chloroflexi* 和 *Firmicutes* 门。以上6类门水平的微生物占比之和在2个样品中均超过94%,因此,在本实验中添加有机物后,颗粒污泥中的微生物种类在门水平上变化不大。

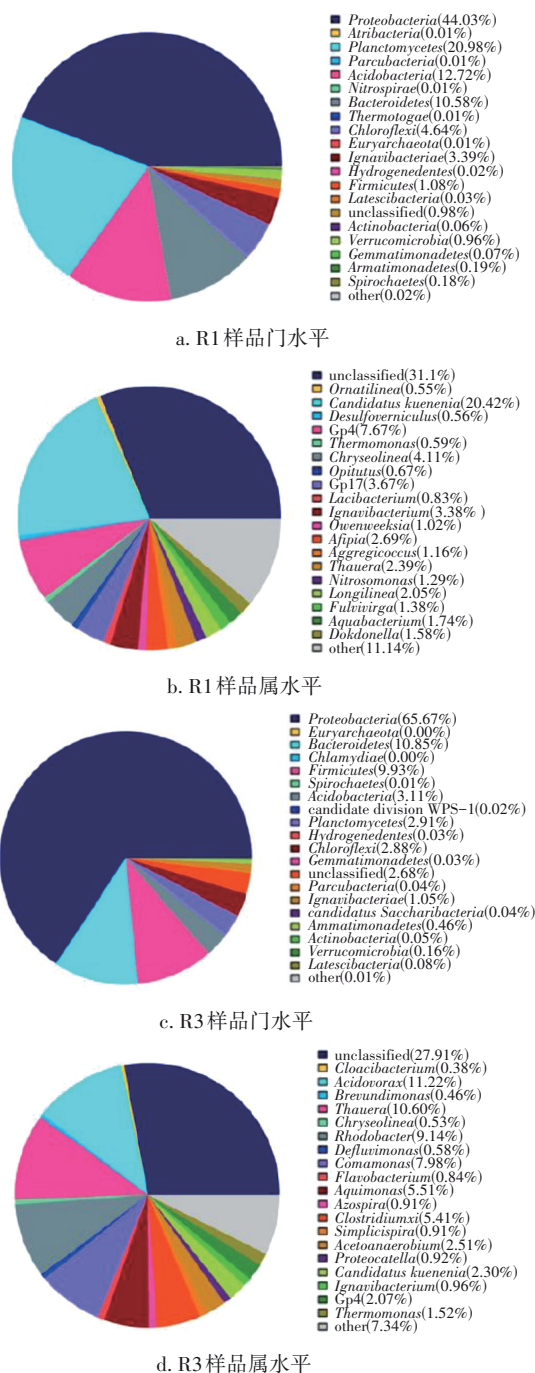


图5 高通量测序结果

Fig.5 High-throughput sequencing results

图5(b)和(d)为R1和R3颗粒污泥在属水平上的菌群分布特性。可知,R1和R3颗粒污泥的主要厌氧氨氧化菌属都为 *Candidatus Kuenenia*, 所占比例分别为20.42%和2.30%,表明在厌氧氨氧化反应器中加入乙酸钠后,经过一段时间的培养驯化,并未改变厌氧氨氧化菌属,原因可能是 *Candidatus Kuenenia* 菌属的基质耐受力较高<sup>[15]</sup>。但随着有机物浓度的不断提高,在阶段D, *Candidatus Kuenenia* 菌属所占比例均比初始的稳定运行阶段(阶段A)有所降低。Liang等<sup>[16]</sup>在厌氧氨氧化反应器中添加乙酸钠后, *Candidatus Kuenenia* 菌的数量下降明显,与本研究的结果相一致。

R1中具有反硝化特性的菌属有 *Thauera* (2.39%)、*Thermomonas* (0.59%)、*Aquabacterium* (1.74%)、*Longilinea* (2.05%)和 *Ignavibacterium* (3.38%)等,相对丰度较低。与R1相比,R3新增了多种反硝化菌属,且相对丰度较高。

根据细菌相对丰度的不同,可将富集的细菌分为三大类:①所占比例高于13%,称为富集的优势菌;②所占比例为1%~13%,称为富集的主要菌;③所占比例为0.2%~1%,称为富集的稀有菌。由图5可知,R1中优势菌属为厌氧氨氧化菌属,R3中优势菌属为反硝化菌属。随着有机物的添加,颗粒污泥中反硝化菌所占比例不断增加,丰度较高,厌氧氨氧化菌处于劣势,严重影响了整体脱氮效果,这与系统氮素变化及颗粒污泥外观变化相一致。

Du等<sup>[17-18]</sup>通过高通量检测 DEAMOX 系统中菌群结构的变化,发现在门水平上 *Proteobacteria* 一直为优势菌门,在属水平上 *Thauera* 在整个菌群中占较大优势,这与本研究的结果一致。但在他的研究中,检测出的主要厌氧氨氧化菌属为 *Candidatus Brocadia*,而在本研究中,厌氧氨氧化耦合反硝化系统中的厌氧氨氧化菌属为 *Candidatus Kuenenia*。分析原因,可能是由于反应器运行方式及进水水质不同,使得厌氧氨氧化菌属有所差异。

### 3 结论

① 当底物亚硝态氮足量且进水中有机物乙酸钠浓度为20 mg/L时,厌氧氨氧化颗粒污泥反应器可实现良好的耦合脱氮性能,厌氧氨氧化活性受到部分影响。系统对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率和厌氧氨氧化对  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的去除比例均先升高后降低,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$

去除率为80.28%~98.14%,厌氧氨氧化对  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的去除比例为76.70%~100%,平均为89.47%。

② 当底物亚硝态氮足量且进水中有机物乙酸钠浓度为35~50 mg/L时,厌氧氨氧化颗粒污泥反应器的耦合脱氮性能明显下降,厌氧氨氧化活性受到较强的抑制。当乙酸钠浓度为50 mg/L、反应器运行至第120天时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率降至8.74%,厌氧氨氧化过程的  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  去除比例为34.32%。

③ 稳定运行期即阶段A和以乙酸钠为有机物时运行末期即阶段D的颗粒污泥中主要厌氧氨氧化菌属都为 *Candidatus Kuenenia*, 所占比例分别为20.42%和2.30%。随着有机物浓度的增加,颗粒污泥中厌氧氨氧化菌的生物密度逐渐降低,反硝化菌的生物密度逐渐增加,厌氧氨氧化菌处于劣势。

### 参考文献:

- [1] 杨京月,李军,郑照明,等. 有机物对SAD的影响及其数学模拟[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4516-4523.  
YANG Jingyue, LI Jun, ZHENG Zhaoming, et al. Effect of organic compounds on the SAD and its mathematical simulation [J]. China Environmental Science, 2018, 38(12): 4516-4523 (in Chinese).
- [2] 赖杨岚,周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化的协同作用特性研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(13): 6-10.  
LAI Yanglan, ZHOU Shaoqi. Study on synergism characteristics of ANAMMOX and denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(13): 6-10 (in Chinese).
- [3] 姚俊芹,刘志辉,胡芬,等. 投加有机物提高ANAMMOX反应器脱氮效果的研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(23): 66-68.  
YAO Junqin, LIU Zhihui, HU Fen, et al. Improvement of nitrogen removal efficiency in ANAMMOX reactor by adding organic matter [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(23): 66-68 (in Chinese).
- [4] 杨洋,左剑恶,沈平,等. 温度、pH值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 691-695.  
YANG Yang, ZUO Jian'e, SHEN Ping, et al. Influence of temperature, pH value and organic substance on activity of ANAMMOX sludge [J]. Environmental Science, 2006, 27(4): 691-695 (in Chinese).

- [5] 杨京月,郑照明,李军,等. 厌氧氨氧化耦合反硝化底物竞争抑制特性[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2947-2953.  
YANG Jingyue, ZHENG Zhaoming, LI Jun, *et al.* The inhibitive characteristics by substrate competition of the anammox coupling denitrification process [J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 2947-2953 (in Chinese).
- [6] 陈重军,汪瑶琪,姜滢,等. 有机物对连续流 Anammox 脱氮及微生物群落影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(12): 5049-5055.  
CHEN Chongjun, WANG Yaoqi, JIANG Ying, *et al.* Effects of organic matter on nitrogen removal and microbial community in Anammox reactor [J]. China Environmental Science, 2019, 39(12): 5049-5055 (in Chinese).
- [7] LI J L, LI J W, PENG Y Z, *et al.* Insight into the impacts of organics on anammox and their potential linking to system performance of sewage partial nitrification-anammox (PNA): a critical review [J]. Bioresource Technology, 2020, 300: 122655.
- [8] 郑照明,李军,杨京月,等. 不同C/N比和碳源种类条件下的SNAD生物膜脱氮性能[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1331-1338.  
ZHENG Zhaoming, LI Jun, YANG Jingyue, *et al.* The nitrogen removal performance of the SNAD biofilm with different C/N ratios and carbon sources [J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1331-1338 (in Chinese).
- [9] GE S J, PENG Y Z, WANG S Y, *et al.* Nitrite accumulation under constant temperature in anoxic denitrification process: the effects of carbon sources and COD/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N[J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 137-143.
- [10] ZHENG Z M, LI Y, LI J, *et al.* Effects of carbon sources, COD/NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N ratios and temperature on the nitrogen removal performance of the simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) biofilm [J]. Water Science and Technology, 2017, 75(7/8): 1712-1721.
- [11] 刘常敬,李泽兵,郑照明,等. 不同有机物对厌氧氨氧化耦合反硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 87-94.  
LIU Changjing, LI Zebing, ZHENG Zhaoming, *et al.* Effect of different organic matters on anammox coupling denitrifying [J]. China Environmental Science, 2015, 35(1): 87-94 (in Chinese).
- [12] 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 (in Chinese).
- [13] 王春香,刘常敬,郑林雪,等. 厌氧氨氧化耦合脱氮系统中反硝化微生物研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(13): 19-22.  
WANG Chunxiang, LIU Changjing, ZHENG Linxue, *et al.* Study on denitrifying bacteria in anaerobic ammonium-oxidation coupled with denitrification system [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(13): 19-22 (in Chinese).
- [14] GONZALEZ-MARTINEZ A, OSORIO F, MORILLO J A, *et al.* Comparison of bacterial diversity in full scale anammox bioreactors operated under different conditions [J]. Biotechnology Progress, 2016, 31(6): 1464-1472.
- [15] ISANTA E, BEZERRA T, FERNÁNDEZ I, *et al.* Microbial community shifts on an anammox reactor after a temperature shock using 454-pyrosequencing analysis [J]. Bioresource Technology, 2015, 181: 207-213.
- [16] LIANG Y H, LI D, ZHANG X J, *et al.* Nitrate removal by organotrophic anaerobic ammonium oxidizing bacteria with C2/C3 fatty acid in upflow anaerobic sludge blanket reactors [J]. Bioresource Technology, 2015, 193: 408-414.
- [17] DU R, CAO S B, LI B K, *et al.* Simultaneous domestic wastewater and nitrate sewage treatment by denitrifying ammonium oxidation (DEAMOX) in sequencing batch reactor [J]. Chemosphere, 2017, 174: 399-407.
- [18] DU R, CAO S B, WANG S Y, *et al.* Performance of partial denitrification (PD)-ANAMMOX process in simultaneously treating nitrate and low C/N domestic wastewater at low temperature [J]. Bioresource Technology, 2016, 219: 420-429.

作者简介:杨京月(1993-),女,河北唐山人,硕士研究生,主要从事污水处理方面的工作。

E-mail: yangjingyue@sina.com

收稿日期:2021-12-24

修回日期:2022-03-28

(编辑:刘贵春)