

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.08.017

# MBR-SNAD 工艺处理生活污水效能及微生物特征

张肖静<sup>1</sup>, 李冬<sup>2</sup>, 梁瑜海<sup>2</sup>, 张杰<sup>2,3</sup>

(1. 环境污染治理与生态修复河南省协同创新中心(郑州轻工业学院), 450001 郑州;

2. 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室(北京工业大学), 100124 北京;

3. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨)

**摘要:** 为考察基于膜生物反应器(MBR)的同步亚硝化厌氧氨氧化反硝化(SNAD)工艺处理生活污水的可行性,在 SNAD 工艺稳定运行的 MBR 中逐步加入生活污水,同时微调曝气量及 HRT 等参数,考察生活污水中污染物的去除效果,通过物料衡算计算不同阶段反应器内的脱氮路径,同时通过克隆-测序技术分析了微生物种群特征.结果表明,MBR-SNAD 工艺可以实现生活污水中 C、N 及 SS 的同时高效去除,总氮去除负荷达  $0.65 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,出水氨氮小于  $5 \text{ mg/L}$ ; COD 去除率达 87%,出水 COD 小于  $50 \text{ mg/L}$ ; 浊度去除率达 99%,出水浊度在 1 NTU 以下,SS 在  $10 \text{ mg/L}$  以下,达到城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918—2002)的一级 A 排放标准.反应器中存在约 12%的反硝化脱氮和 88%的全程自养脱氮(CANON),实现了异养脱氮和自养脱氮的协同合作.好氧氨氧化菌、厌氧氨氧化菌和反硝化菌共存于系统内.MBR-SNAD 是处理生活污水的适宜工艺.

**关键词:** 膜生物反应器;同步亚硝化厌氧氨氧化反硝化;全程自养脱氮工艺;生活污水;脱氮;化学需氧量

**中图分类号:** X703.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2015)08-0087-05

## Performance and microbial characteristic of SNAD process for treating domestic sewage in a membrane bioreactor

ZHANG Xiaojing<sup>1</sup>, LI Dong<sup>2</sup>, LIANG Yuhai<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>2,3</sup>

(1. Collaborative Innovation Center of Environmental Pollution Control and Ecological Restoration, Zhengzhou University of

Light Industry, Henan Province, 450001 Zhengzhou, China; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and

Water Environment Recovery Engineering(Beijing University of Technology), 100124 Beijing, China; 3. State Key

Laboratory of Urban Water Resource and Environment(Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China)

**Abstract:** Simultaneously partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process was used for treating domestic sewage in a membrane bioreactor (MBR). Domestic sewage was gradually pumped into the system, removal trend of the pollutants were evaluated via the changing of operational HRT and air flow. The nitrogen removal pathway was analyzed via the mass balance analyze studying, and microbial characteristics via clone-sequencing detection. Results suggested that a simultaneous removal of C, N and SS was achieved in the system, with the nitrogen removal rate to  $0.65 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , effluent ammonia below  $10 \text{ mg/L}$ ; COD removal efficiency to 87%, effluent COD below  $50 \text{ mg/L}$ ; turbidity removal to 99%, effluent turbidity below 1 NTU, and SS below  $10 \text{ mg/L}$ , which met the demand of the first grade A standards of Urban Sewage Disposal Plant Contamination Integrated Discharge Standard (GB18918 - 2002). Denitrification contributed to 12% nitrogen removal while (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) contributed to 88%, and AOB, anammox and denitrifiers coexisted in the reactor.

**Keywords:** MBR; SNAD; CANON; domestic sewage; nitrogen removal; COD

收稿日期: 2014-07-29.

基金项目: 国家自然科学基金(50878003); 郑州轻工业学院博士科研基金(2014BSJJ055).

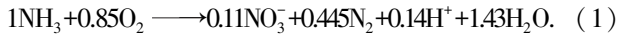
作者简介: 张肖静(1986—),女,讲师;

李冬(1976—),女,教授,博士生导师;

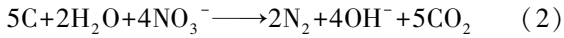
张杰(1938—),男,博士生导师,中国工程院院士.

通信作者: 李冬, bjut\_lidong@163.com.

全程自养脱氮工艺 (completely nitrogen removal over nitrite, CANON) 是近年来在厌氧氨氧化反应的基础上发展起来的,该工艺将亚硝化反应和厌氧氨氧化反应结合在同一个反应器中,在单一系统内完成总氮的去除<sup>[1-2]</sup>,其反应式<sup>[3]</sup>



然而,该工艺的最大总氮去除率仅为 89%,无法实现完全脱氮.此外,该工艺完全不消耗 COD,而不含任何 COD 的废水几乎是没的.因此,在 CANON 工艺的基础上,提出了同步亚硝化厌氧氨氧化反硝化(simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification, SNAD)工艺<sup>[4-5]</sup>.该工艺将反硝化反应



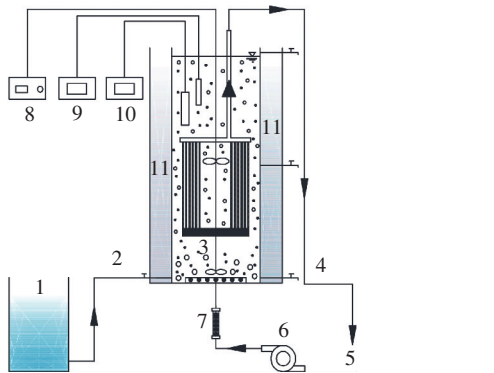
耦合进 CANON 工艺,即将式(2)与式(1)两种反应结合,去除 CANON 反应生成的硝氮,同时消耗一部分 COD,实现碳氮的同时去除<sup>[4, 6]</sup>.SNAD 工艺已经在几个处理高温高氨氮废水的实验室系统中得到成功应用<sup>[5, 7-10]</sup>,目前关于低氨氮废水的研究还较少,尤其是生活污水的研究未见报道.

本文在 MBR 内首先启动了 CANON 工艺,之后通过逐渐加入 COD 转变为 SNAD 工艺,在其稳定运行后逐步引入生活污水,考察了常温下 MBR-SNAD 工艺应用于实际生活污水处理的可行性及系统内的脱氮路径,利用克隆-测序技术分析了处理生活污水的 MBR 系统内的微生物特征,以期为该工艺的应用提供技术指导.

## 1 实验

### 1.1 实验装置

以 SNAD 工艺稳定运行的 MBR 用于处理生活污水,考察污染物去除效果及相应的微生物特征,MBR 反应器装置见图 1.反应器高 40 cm,内径 13 cm,有效体积 3 L.内部放置聚偏氟乙烯中空纤维膜组件(厦门,鲲扬),膜孔径 0.1 μm,有效面积 0.2 m<sup>2</sup>,膜清水通量 36 L/h.反应器底部设曝气环供氧,内部设机械搅拌器混合泥水.连续进水的同时,通过蠕动泵经由膜丝连续抽吸出水.整个反应器置于直径 30 cm 的水浴中,保证恒温 25 °C 运行.实验过程中曝气量为 0.4 L/min 左右,DO 为 0.15 mg/L, HRT 为 3.0~3.1 h.



1—水箱;2—进水泵;3—膜组件;4—出水泵;5—出水;6—鼓风机;  
7—气体流量计;8—搅拌器;9—在线 pH;10—在线 DO;11—水浴

图 1 MBR 反应器装置原理

### 1.2 实验用水

首先以 1/2 生活污水加 1/2 配水的条件运行,其中配水中以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaHCO}_3$  及葡萄糖为主要基质,并添加少量  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、无水  $\text{CaCl}_2$  及微量元素溶液<sup>[11]</sup>,配水中氨氮质量浓度为 100 mg/L, COD 为 400 mg/L.运行 1 个月之后,将进水改为全部生活污水.该生活污水取自某家属区化粪池沉淀后废水,实验期间生活污水水质见表 1.

表 1 实验期间生活污水水质

COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	碱度/ (mg · L <sup>-1</sup> )	$\rho(\text{NH}_4^+)/$ (mg · L <sup>-1</sup> )	$\rho(\text{NO}_2^-)/$ (mg · L <sup>-1</sup> )	$\rho(\text{NO}_3^-)/$ (mg · L <sup>-1</sup> )	浊度
192.1~370.1	304.3~638.6	81.1~96.9	0~0.7	0~1.3	14.1~145.0

### 1.3 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;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ : 紫外分光光度法; COD: 5B-3B 型 COD 快速测定仪; 碱度: ZDJ-2D 电位滴定仪; DO、pH、T: WTW 多电极测定仪.

### 1.4 DNA 提取和克隆测序

在实验的最后 1 d 从反应器中取污泥,利用 DNA 提取试剂盒(上海生工)根据说明书步骤提取基因组 DNA,提取出的 DNA 在 0.8% 的琼脂糖凝胶中电泳检测,以检查纯度及长度是否正确.之后利用纯化试剂盒对 DNA 进行纯化,以去除蛋白质等杂质.

对纯化后的 DNA 采用正义引物 27 F (5' - AGAGTTTGATCCTGGCTCAG - 3') 和反义引物 1492 R (5' - GGTTACCTGTTACGACTT - 3') 进行基因组 16SrRNA 的扩增.PCR 扩增条件如下: 94 °C, 5 min; 35 个循环(94 °C, 30 s; 55 °C, 40 s; 72 °C, 90 s); 72 °C, 8 min.之后利用纯化试剂盒(上海生工)将 PCR 产物纯化回收,采用 pMD19-T 克隆系统进行克隆,克隆子送至上海生工公司在 ABI3730 系统上进行测序.共测得 22 个有效序列,有效序列采用 BLAST 工具与 GenBank 数据库中的注册序列进行比对.

## 2 结果与讨论

### 2.1 生活污水中污染物的同时高效去除

在稳定运行的 MBR-SNAD 系统,第 1 阶段(第 6~37 天)首先加入 1/2 的生活污水及 1/2 的人工配水,第 2 阶段(第 38~96 天)则改为全部生活污水,总氮去除效果如图 2 所示.在反应器引入 1/2 生活污水后,出水氨氮最初有几天升高,这可能是由于生活污水中存在的有机物、表面活性剂等,使得微生物不能很快适应水质的变化.同时,总氮去除率和总氮去除负荷( $R_{\text{NR}}$ )也有一定程度的下降.然而,生活污水的引入并没有对该系统造成太大的冲击, $R_{\text{NR}}$ 很快

开始升高,而且一直呈现升高的趋势.运行 1 个月时  $R_{NR}$  基本稳定,出水亚氮和硝氮几乎均检测不到.这些结果表明,反应器里亚硝化、厌氧氨氧化和反硝化很好地完成了相互适应的过程,在同一个系统内协同合作,实现了异养脱氮与自养脱氮的耦合.1 个月后,将进水改为全部生活污水,进水氨氮质量浓度波动较大,然而在两个月的运行期间,反应器均能够保持较高的  $R_{NR}$ ,基本稳定在  $0.65 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,总氮去除率稳定在 93.3%,出水氨氮小于  $5 \text{ mg}/\text{L}$ ,能够达到城市污水一级 A 排放标准.可见,总氮去除率远远高于 CANON 工艺的理论最高去除率,这说明将生活污水引入 CANON 工艺,实现了反硝化与 CANON 工艺的耦合,即 SNAD 工艺,能够提高总氮去除率,进一步增强脱氮效果.

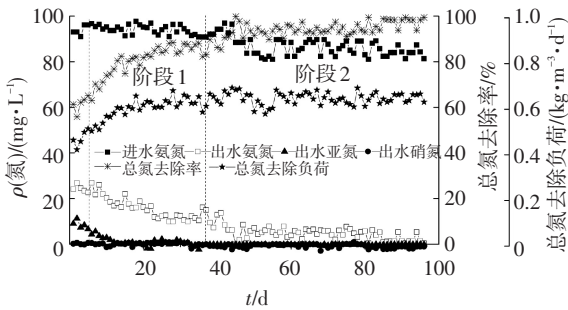


图 2 生活污水中总氮去除效果

生活污水中 COD 的去除效果如图 3 所示,生活污水中 COD 在  $300 \text{ mg}/\text{L}$  左右,质量浓度波动较大,但是出水 COD 一般能保持在  $50 \text{ mg}/\text{L}$  以下,达到城市污水厂的一级 A 出水要求,COD 去除率最终稳定在 87.2% 左右.SNAD 最大的优势是能够利用 COD 反硝化 CANON 反应产生的硝氮,既能提高总氮的去除率,又能减少降解 COD 消耗的溶解氧.之前的一些 CANON 工艺中,根据反应式理论的最大总氮去除率为 89%,实际中都要小于理论值.Chang 等<sup>[12]</sup>的研究得出在常温 CANON 生物滤柱中总氮去除率为 70.14%,而本文稳定在 87.2%.之前的研究均采用先将 COD 去除,再进行 CANON 工艺自养脱氮的方式,或者直接对人工配制的不含 COD 的废水进行研究,总氮去除率均在 80% 以下<sup>[12-13]</sup>.而本文在一个反应器中同时实现了 COD 和总氮的高效去除,总氮去除率稳定在 93.3%,且不需要外加任何物质,具有良好的发展前景.

由图 4 可知,该系统对 SS 具有很好的去除能力,进水浊度在  $14.1 \sim 145 \text{ NTU}$  波动,而出水浊度一直保持在  $1 \text{ NTU}$  以下.这是由于膜组件的高效过滤作用,

膜孔径为  $0.1 \mu\text{m}$ ,绝大部分 SS 均得到有效去除.在城市污水厂中,一般先前设初沉池对 SS 进行去除,再进行生物反应.本实验中,只在配水桶中对生活污水进行简单初沉之后,将大块杂质去除以免堵塞膜孔,之后即进水反应,得到较好的出水水质.如后续接化学除磷装置,则可实现生活污水中所有污染物的同时高效去除.实验结果证明了 MBR-SNAD 系统是处理生活污水的适宜装置,可以有效去除生活污水中的多种污染物,达到污水排放标准.该系统可作为小区回用水装置或者小型工业废水处理装置等,为含氮废水的单独处理提供了一个新思路.

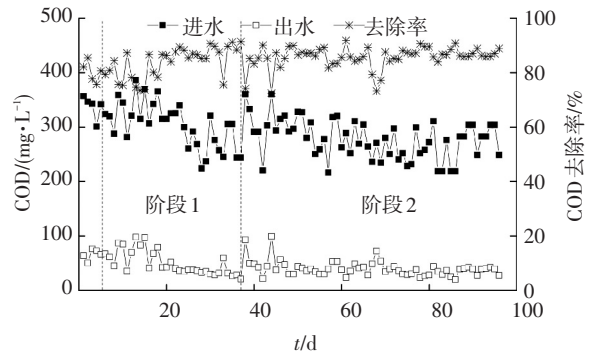


图 3 生活污水中 COD 去除效果

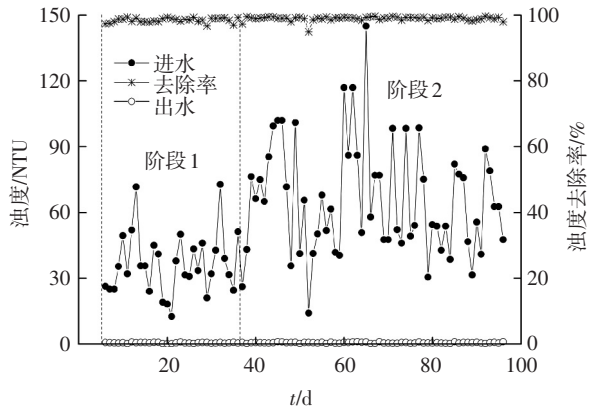


图 4 生活污水中浊度去除效果

### 2.2 脱氮路径分析

在处理生活污水的过程中,  $\Delta p$  (硝氮) 与  $\Delta p$  (氨氮) 比小于 CANON 反应的理论值 0.11,推断反应器内存在反硝化反应.为进一步考察反硝化在生活污水处理系统中的作用,对反应器运行的两个阶段进行脱氮路径分析,其计算基于 CANON 反应式(式(1))和反硝化反应式(式(2)).由于之后的微生物检测中没有检测到 NOB,假设反应器中不存在硝化过程,也不存在由反硝化生成的亚氮<sup>[6, 8]</sup>.选各阶段最后 15 d 的数据进行分析,进出水水质见表 2.

表 2 各阶段稳定期的平均进出水水质

阶段	$\rho_{\text{进水}}(\text{NH}_4^+)$	$\rho_{\text{出水}}(\text{NH}_4^+)$	$\rho_{\text{进水}}(\text{NO}_2^-)$	$\rho_{\text{出水}}(\text{NO}_2^-)$	$\rho_{\text{进水}}(\text{NO}_3^-)$	$\rho_{\text{出水}}(\text{NO}_3^-)$	COD <sub>进水</sub>	COD <sub>出水</sub>
1	94.62	13.12	0.36	0.78	0.36	0.90	294.94	39.82
2	84.96	3.41	0.11	0	1.06	0.06	262.43	32.88

在阶段 1, 反应器出水中亚氮和硝氮均有积累, 亚氮的积累是由 AOB 将氨氮氧化而 anammox 没有及时转化所致. 因此, 在阶段 I 氨氮的转化量分为两部分, 一部分转化为亚氮 (a), 一部分被 anammox (b) 利用. 而转化生成的亚氮又可分为残留在反应器中的部分 (c) 和被 anammox 利用的部分 (d). 由于 anammox 进行厌氧氨氧化反应消耗氨氮和亚氮的摩尔比为 1:1, 被 anammox 利用的亚氮对应的氨氮为 d, 其与 anammox 利用的氨氮之和为参与 CANON 反应的氨氮量. 因此, 氨氮的转化量包括残留在反应器中的亚氮 (c) 和参与 CANON 反应的部分 (b+d).

基于以上分析, 参与 CANON 反应的氨氮为

$$\rho_{\text{进水}}(\text{NH}_4^+) - \rho_{\text{出水}}(\text{NH}_4^+) - (\rho_{\text{进水}}(\text{NO}_2^-) - \rho_{\text{出水}}(\text{NO}_2^-)) = 94.62 - 13.12 - (0.78 - 0.36) = 81.08 \text{ mg/L};$$

根据式 (1), CANON 反应去除的总氮为  $81.08 \times 0.89 = 72.16 \text{ mg/L}$ ;

生成的硝氮为  $0.11 \times 81.08 = 8.92 \text{ mg/L}$ ;

因此, 反硝化消耗的硝氮为  $8.92 + 0.36 - 0.9 = 8.38 \text{ mg/L}$ ;

根据式 (2), 反硝化 1 g 硝氮需消耗 2.86 g COD, 因此, 反硝化消耗的 COD 为  $7.4 \times 2.86 = 21.16 \text{ mg/L}$ ;

COD 总去除量为  $294.94 - 39.82 = 255.12 \text{ mg/L}$ ;

其余的 COD 去除则由异养菌氧化完成, 即  $255.12 - 21.16 = 233.96 \text{ mg/L}$ ;

总氮去除量为  $\rho_{\text{进水}}(\text{NH}_4^+) + \rho_{\text{进水}}(\text{NO}_2^-) + \rho_{\text{进水}}(\text{NO}_3^-) - (\rho_{\text{出水}}(\text{NH}_4^+) + \rho_{\text{出水}}(\text{NO}_2^-) + \rho_{\text{出水}}(\text{NO}_3^-)) = 94.62 + 0.36 + 0.36 - (13.12 + 0.78 + 0.9) = 80.54 \text{ mg/L}$ .

所以, 反硝化占总氮去除的比例为  $8.38 / 80.54 = 10.4\%$ ; 厌氧氨氧化所占的比例为  $72.16 / 80.54 = 89.6\%$ .

在阶段 2, 出水中亚氮和硝氮均为 0. 进水中的亚氮由 CANON 反应转化, CANON 反应生成的硝氮及进水中的硝氮则均由反硝化反应转化.

因此, 参与 CANON 反应的氨氮和亚氮总和为

$$\rho_{\text{进水}}(\text{NH}_4^+) - \rho_{\text{出水}}(\text{NH}_4^+) - (\rho_{\text{进水}}(\text{NO}_2^-) - \rho_{\text{出水}}(\text{NO}_2^-)) = 84.96 - 3.41 + 0.11 - 0 = 81.66 \text{ mg/L}.$$

根据式 (1), CANON 反应去除的总氮为  $81.66 \times 0.89 = 72.68 \text{ mg/L}$ ;

生成的硝氮为  $0.11 \times 81.66 = 8.98 \text{ mg/L}$ .

因此, 反硝化消耗的硝氮为  $8.98 + 1.06 - 0.06 = 9.98 \text{ mg/L}$ ;

反硝化消耗的 COD 为  $9.98 \times 2.86 = 28.55 \text{ mg/L}$ ;

COD 总去除量为  $262.43 - 32.88 = 229.55 \text{ mg/L}$ ;

其余的 COD 去除则由异养菌氧化, 即  $229.55 - 28.55 = 201 \text{ mg/L}$ ;

总氮去除量为  $\rho_{\text{进水}}(\text{NH}_4^+) + \rho_{\text{进水}}(\text{NO}_2^-) + \rho_{\text{进水}}(\text{NO}_3^-) - (\rho_{\text{出水}}(\text{NH}_4^+) + \rho_{\text{出水}}(\text{NO}_2^-) + \rho_{\text{出水}}(\text{NO}_3^-)) =$

$$84.96 + 0.11 + 1.06 - (3.41 + 0 + 0.06) = 82.66 \text{ mg/L}.$$

所以, 反硝化占总氮去除的比例为  $9.98 / 82.66 = 12.07\%$ ; 厌氧氨氧化所占的比例为  $72.68 / 82.66 = 87.93\%$ .

由上述结果可知, 在处理全部生活污水阶段, 反应器中反硝化比例高达 12.44%, 而 SNAD 工艺中反硝化的理论最大比例仅为 11%. 出现该差异的原因是进水中含有少量硝氮, 而这部分硝氮也被反硝化转化, 因此增加了反硝化比例. 同时, 该阶段的结果说明, 系统内的 COD 大多通过好氧化去除, 经反硝化去除的 COD 不足 30 mg. 因此, 在实际应用中, 可以首先前接厌氧产能工艺, 将生活污水中大部分 COD 转化为能源, 出水进入 MBR-SNAD 系统进行氨氮去除和 COD 的进一步去除, 从而实现能源回收和低耗脱氮.

### 2.3 生活污水处理系统中的微生物特征

该生活污水处理系统运行稳定后, 取泥样进行微生物群落组成分析, 克隆测序结果见表 3. 可以看出, 克隆 1、2、3 均属于亚硝化单胞菌 (*Nitrosomonas*), 属于 AOB, 在该系统内主要负责氨氮的好氧化. 而克隆 4 为厌氧氨氧化库氏菌 (*Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*), 属于 anammox 菌<sup>[14]</sup>, 主要负责将 AOB 生成的亚氮和剩余的氨氮转化为氮气排放. 克隆 5 和 6 属于反硝化菌, 同时克隆 7 也具有反硝化功能<sup>[15]</sup>, 负责将 anammox 生成的硝氮转化为氮气, 实现 TN 的进一步去除. 由此可见, 在测得的 22 个有效序列中包含有 1/3 的脱氮功能菌, 因此, 脱氮菌仍然是系统内的优势微生物, 该系统是以脱氮为主体的反应系统, 这与反应器表现出高效的脱氮性能一致. 另一方面, 3 个 AOB 的序列均属于亚硝化单胞菌, 说明 AOB 群落较单一, 从侧面也证明了是自养脱氮为主体的工艺, 因为自养脱氮系统对于亚硝化单胞菌具有优先选择性. 同时, 3 种脱氮菌的共存也证明了反硝化与 CANON 工艺的成功耦合, 即 SNAD 工艺的成功实现. 3 种微生物在该系统内协同作用, 完成了 COD 和 TN 的同时去除.

反应器内 COD 的去除主要是由好氧异养菌和厌氧反硝化菌两类细菌完成. 由 2.2 节的计算过程可知, 通过反硝化去除的 COD 很少, COD 的去除大部分由好氧异养菌完成. 好氧异养菌的分类很多, 且很多细菌均具有该能力, 因此, 目前没有很好的微生物学方法对其进行鉴定或者划分. 在这 22 个序列中, 有 12 个序列属于变形菌门, 证明了变形菌门的优势地位, 此外还包含一些与未培养的序列相似度较高的序列. 克隆 22 为菌胶团, 证明反应器内主要是以活性污泥法为主体的生态系统.

表 3 16S rRNA 的克隆-测序结果

克隆	最相似种属	相似度/%	登录号	所属细菌类群
1	<i>Nitrosomonas europaea</i>	99	NR_074774	$\beta$ -proteobacteria
2	<i>Nitrosomonas</i> sp.	99	HF678378	$\beta$ -proteobacteria
3	<i>Nitrosomonas</i> sp.	99	HF678378	$\beta$ -proteobacteria
4	<i>Candidatus Kuenenia stuttgartiensis</i>	97	KF429801	Planctomycetia
5	<i>Thiobacillus denitrificans</i>	91	NR_025358	$\beta$ -proteobacteria
6	<i>Thiobacillus denitrificans</i>	94	NR_074417	$\beta$ -proteobacteria
7	<i>Hydrogenophaga</i> sp.	99	AB636293	$\beta$ -proteobacteria
8	<i>Dexia gummosa</i>	89	KC428629	$\beta$ -proteobacteria
9	<i>Azoarcus</i> sp.	87	AB241406	$\beta$ -proteobacteria
10	<i>Thauera</i> sp.	92	NR_074711	$\beta$ -proteobacteria
11	<i>Lysobacter</i> sp.	92	JX964994	$\gamma$ -proteobacteria
12	<i>Raoultella ornithinolytica</i>	99	NR_102983	$\gamma$ -proteobacteria
13	<i>Polyangium sorediatum</i>	96	GU207880	$\delta$ -proteobacteria
17	<i>Thermanaerotherix daxensis</i>	91	HM596746	Anaerolineae
21	<i>Acidobacteria bacterium</i>	95	GU187032.1	Acidobacteriales
14	uncultured bacterium	99	HQ640560	Bacteria
15	uncultured bacterium	99	JX875902	Bacteria
16	uncultured bacterium	99	JX875902	Bacteria
18	<i>Ornatilinea apprima</i>	99	AB445105	Bacteria
19	<i>Caldilinea tarbellica</i>	96	HQ640588	Bacteria
20	<i>Litorilinea aerophila</i>	99	AB445105	Bacteria
22	filamentous symbiotic bacterium of <i>Methylobacterium</i> sp.	92	AB112774	Bacteria

### 3 结 论

1) MBR-SNAD 工艺适宜处理生活污水,可实现 C、N 及 SS 的同时高效去除。总氮去除负荷达到 0.65 kg/(m<sup>3</sup>·d),出水氨氮小于 5 mg/L; COD 去除率达 87%,出水 COD 小于 50 mg/L; 浊度去除率达 99%,出水浊度小于 1 NTU。

2) 处理生活污水的 MBR-SNAD 工艺中主要存在好氧氨氧化、厌氧氨氧化和反硝化多种脱氮路径,其中自养脱氮比例为 88%,异养反硝化比例为 12%。

3) 系统内脱氮微生物为亚硝化单胞菌、厌氧氨氧化库氏菌和反硝化菌,3 种微生物协同作用完成了 COD 和 TN 的同时去除。

### 参 考 文 献

- [1] THIRD K A, SLIEKERS A O, KUENEN J G, et al. The CANON system (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2001, 24(4): 588-596.
- [2] KARTAL B, KUENEN J G, VAN LOOSDRECHT M C M. Sewage treatment with Anammox[J]. *Science*, 2010, 328(5): 702-704.
- [3] SLIEKERS A O, DERWORT N, CAMPOS-GOMEZ J L, et al. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. *Water Research*, 2002, 36(10): 2475-2482.
- [4] KUMAR M, LIN J G. Co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen and carbon removal: strategies and issues[J]. *J Hazard Mater*, 2010, 178(1/2/3): 1-9.
- [5] CHEN H, LIU S, YANG F, et al. The development of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in a single reactor for nitrogen removal[J]. *Bioresour Technol*, 2009, 100(4): 1548-1554.

- [6] LAN C J, KUMAR M, WANG C C, et al. Development of simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in a sequential batch reactor[J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(9): 5514-5519.
- [7] KELUSKAR R, NERURKAR A, DESAI A. Development of a simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonia oxidation and denitrification (SNAD) bench scale process for removal of ammonia from effluent of a fertilizer industry[J]. *Bioresour Technol*, 2013, 130: 390-397.
- [8] WANG C C, LEE P H, KUMAR M, et al. Simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and denitrification (SNAD) in a full-scale landfill-leachate treatment plant[J]. *J Hazard Mater*, 2010, 175(1/2/3): 622-628.
- [9] DAVEREY A, HUNG N T, DUTTA K, et al. Ambient temperature SNAD process treating anaerobic digester liquor of swine wastewater[J]. *Bioresour Technol*, 2013, 141: 191-198.
- [10] DAVEREY A, SU S H, HUANG Y T, et al. Nitrogen removal from opto-electronic wastewater using the simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and denitrification (SNAD) process in sequencing batch reactor[J]. *Bioresour Technol*, 2012, 113: 225-231.
- [11] VAN DE GRAAF A A, DE BRUIJN P, ROBERTSON L A, et al. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor[J]. *Microbiology-UK*, 1996, 142: 2187-2196.
- [12] CHANG X, LI D, LIANG Y, et al. Performance of a completely autotrophic nitrogen removal over nitrite process for treating wastewater with different substrates at ambient temperature[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(4): 688-697.
- [13] 付昆明,左早荣,仇付国. 陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 995-1001.
- [14] 郑平,张蕾. 厌氧氨氧化菌的特性与分类[J]. *浙江大学学报:农业与生命科学版*, 2009, 35(5): 473-481.
- [15] 梁丽华,左剑悉. 现代非培养技术在反硝化微生物种群结构和功能研究中的应用[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(4): 599-605.

(编辑 刘 彤)