

董剑, 黄凯文, 李爱民, 等. 废弃物载体填料富集 Anammox 菌群脱氮效能及微生物群落[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 104-111, 123.

DONG J, HUANG K W, LI A M, et al. Denitrification efficiency and microflora structure of Anammox based on waste carriers[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 104-111, 123.

## 废弃物载体填料富集 Anammox 菌群脱氮效能及微生物群落

董剑<sup>1</sup>, 黄凯文<sup>2</sup>, 李爱民<sup>2</sup>, 何艳华<sup>1</sup>, 陈敏<sup>1</sup>, 宋联<sup>3</sup>, 王硕<sup>2,4,\*</sup>, 李激<sup>2,4</sup>

(1. 无锡惠联资源再生科技有限公司, 江苏无锡 214171; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江南大学环境与土木工程学院, 江苏无锡 214122; 3. 无锡国联环保科技股份有限公司, 江苏无锡 214171; 4. 江苏省高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏苏州 215009)

**摘要** 【目的】 研究旨在通过使用葫芦壳、螺蛳壳和紫砂材料制备的新型填料, 改善厌氧氨氧化(Anammox)系统在处理高氨氮废水时的快速启动和稳定运行效果, 以期提高脱氮效率并降低工程化应用的难度。【方法】 研究对比了这些新型填料与传统的聚丙烯和聚乙烯填料在 Anammox 系统中的性能, 通过监测氨氮和亚硝态氮的去除效率、硝态氮和总氮的浓度变化, 以及微生物群落结构的变化来评估填料效果。【结果】 研究发现, 新型填料显著提升了 Anammox 菌群的富集速度和脱氮效率。特别是紫砂基填料组, 其出水中硝态氮质量浓度仅为 1.35 mg/L, 总氮质量浓度为 10.92 mg/L, 总氮去除率高达 93.93%, 脱氮速率和脱氮负荷分别提升了 20.93% 和 30.61%。微生物群落分析显示, 紫砂基填料使 *Candidatus\_alsiosphaera* 菌属的相对丰度从 26.26% 提升至 64.75%。此外, 高盐度和难降解有机物如甘油三酯对 Anammox 菌的富集效率和稳定运行有负面影响, 而重金属元素钴和锰的影响较小。【结论】 研究表明, 使用葫芦壳、螺蛳壳和紫砂材料制备的新型填料能有效改善 Anammox 系统的启动和运行, 尤其是紫砂基填料在提高脱氮效率和稳定性方面表现突出, 为高氨氮废水的处理提供了一种低成本、高效率的解决方案。

**关键词** 厌氧氨氧化 高氨氮废水 快速启动 脱氮性能 微生物菌群结构

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)02-0104-09

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.012

## Denitrification Efficiency and Microflora Structure of Anammox Based on Waste Carriers

DONG Jian<sup>1</sup>, HUANG Kaiwen<sup>2</sup>, LI Aimin<sup>2</sup>, HE Yanhua<sup>1</sup>, CHEN Min<sup>1</sup>, SONG Lian<sup>3</sup>, WANG Shuo<sup>2,4,\*</sup>, LI Ji<sup>2,4</sup>

(1. Wuxi Huilian Resources Recycling Technology Co., Ltd., Wuxi 214171, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

3. Wuxi Guolian Environmental Science and Technology Co., Ltd., Wuxi 214171, China;

4. Jiangsu College of Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center, Suzhou 215009, China)

**Abstract** [Objective] This study aimed to enhance the rapid startup and stable operation of anaerobic ammonium oxidation (Anammox) systems for treating high-ammonia nitrogen wastewater by using novel carriers made from calabash shells, snail shells, and purple sand materials, thereby improving denitrification efficiency and reducing the difficulties in engineering application. [Methods]

The study compared the performance of these novel carriers with traditional polypropylene and polyethylene carriers in Anammox systems by monitoring the removal efficiency of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen, changes in nitrate nitrogen and total nitrogen concentrations, and shifts in microbial community structures. [Results] The study found that the novel carriers significantly

[收稿日期] 2023-12-05

[基金项目] 江苏省政策引导类计划(国际科技合作/港澳台科技合作)专项资金(BZ2021030);无锡市科技创新创业资金(M20211003);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022303)

[作者简介] 董剑(1981—),女,硕士,主要从事固废处理处置及污水处理工作,E-mail:njdj\_122@163.com。

[通信作者] 王硕(1984—),男,博士,研究方向为污水和工业废水处理,有机废弃物的定向转化和高值资源化利用,E-mail:shuowang@jiangnan.edu.cn。

improved the enrichment speed and denitrification efficiency of Anammox bacteria. Particularly, the purple sand-based carrier group showed an effluent nitrate nitrogen mass concentration of only 1.35 mg/L and a total nitrogen mass concentration of 10.92 mg/L, with a total nitrogen removal rate as high as 93.93%, and an increase in denitrification rate and load of 20.93% and 30.61%, respectively. Microbial flora analysis revealed that the purple sand-based carrier increased the relative abundance of *Candidatus\_alyosphaera* from 26.26% to 64.75%. Furthermore, high salinity and refractory organic compounds such as triglycerides negatively affected the enrichment efficiency and stable operation of Anammox bacteria, while heavy metal elements like cobalt and manganese had minimal impact. [Conclusion] This study demonstrates that the use of novel carriers made from calabash shells, snail shells, and purple sand materials can effectively improve the startup and operation of Anammox systems, with the purple sand-based carrier showing outstanding performance in enhancing denitrification efficiency and stability, providing a low-cost, high-efficiency solution for the treatment of high-ammonia nitrogen wastewater.

**Keywords** anaerobic ammonia oxidation (Anammox) high ammonia nitrogen wastewater rapid start-up denitrification performance microflora structure

21世纪以来,随着我国工业化进程的推进,各种污染物大量进入天然水体。水体富营养化是我国面临的主要环境污染问题,而水中氮元素含量过高是导致水体富营养化的重要原因之一。工业生产过程中排放的高氨氮废水是水中氮元素的主要来源之一<sup>[1]</sup>。据统计,2022年全国工业源氨氮排放量为1.7万t,农副产品加工业、食品制造业是氨氮废水主要排放行业,其废水中氨氮质量浓度能够达到500 mg/L以上,并且其成分复杂,处理难度较高<sup>[2]</sup>。传统生物脱氮技术处理高氨氮废水时需要消耗大量的能源将氨氮氧化为硝态氮,同时前端氧化处理导致污水中的可生物降解碳源大量减少,通常需要外加碳源,导致处理成本提高,在反硝化过程中还会产生温室气体 $N_2O$ 。因此,传统生物脱氮技术处理高氨氮废水时并不具备优势<sup>[3]</sup>。

厌氧氨氧化(Anammox)工艺由于污泥产量少、能耗低以及不需额外投加碳源等优点广受关注。在厌氧或缺氧条件下,Anammox菌以亚硝酸盐为电子受体,将氨氮转化为氮气和少量硝酸盐。Anammox工艺由于无需有机碳源、能耗低、剩余污泥量少以及温室气体排放较少等优点被认为是未来生物脱氮的重要方法<sup>[4]</sup>。但由于Anammox菌生长缓慢,对环境变化敏感导致其启动难度较大,极大地限制了该工艺在实际工程中的应用<sup>[5]</sup>。因此,如何快速启动Anammox反应器以及如何保持Anammox反应器长期稳定运行等问题亟待解决。

Anammox菌在生物量充足的情况下能够有效抵抗不良环境,但由于Anammox菌的生长速率缓慢,为使反应器内有充足的Anammox菌,需要相对

较长的污泥停留时间<sup>[6]</sup>。微生物固定化技术能够在保持微生物活性的同时提高微生物对外界环境不利因素的抗逆性能,向Anammox系统中添加载体填料,可以增加反应器的内表面积,扩大微生物的生长空间,是维持系统生物量的有效手段<sup>[7]</sup>。但传统的微生物载体填料如聚氨酯、聚丙烯或聚乙烯等,其表面缺乏化学基团修饰,不利于微生物的黏附和成膜,对于提高Anammox的反应活性、促进微生物增殖没有明显作用<sup>[8]</sup>。

为避免传统生物载体富集Anammox菌时的弊端,选择葫芦壳、螺蛳壳和紫砂3种材料用于制备新型微生物载体。葫芦壳属于生物质,在水中通过微生物分解作用可达到自溶的目的<sup>[9]</sup>,葫芦壳制备生物载体不仅可以通过改性使其表明负载亲水基团和亲微生物基团,且由于葫芦壳本身较其他生物质材料更为坚固和稳定,不至于溶解过快,可保证微生物富集所需的时间<sup>[10]</sup>。螺蛳壳的主要成分是碳酸钙,不溶于水,在水中具有稳定性和持久性,同时其特殊的构造使其比表面积较大<sup>[11]</sup>。通过穿孔、打磨等操作可使其密度接近于水,使其在较小的上升流速下达到流化状态。紫砂具有比表面积大、化学性质稳定、成膜性能良好、反冲洗便利、截污能力强等优点,同时可进行表面磁化和有机改性等操作改善其生物富集能力。

综上,本文针对目前Anammox系统启动缓慢、稳定运行难等缺点,选择葫芦壳、螺蛳壳和紫砂3种材料制备新型填料作为微生物载体,并通过对运行条件的调控优化实现工艺的稳定运行。同时,探究不同胁迫条件下微生物群落变化趋势,以期Anammox系统的高效富集和稳定运行提供理论依

据和技术支持。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验装置和运行策略

本研究设计一种具备保温水循环系统的膨胀颗粒污泥反应器 (expanded granular sludge blanket reactor, EGSB) 用于培养 Anammox 菌。反应器运行温度为 34~36 ℃, 溶解氧质量浓度小于 0.1 mg/L, 水力停留时间设置为 24 h, 污泥质量浓度保持在 2 500 mg/L 左右。反应器进水为人工配水, 采用氯化铵(NH<sub>4</sub>Cl)和亚硝酸钠(NaNO<sub>2</sub>)分别提供氨氮和亚硝态氮, 进水水质如表 1 所示, 微量元素组分如表 2 所示。

表 1 进水组分  
Tab. 1 Components of Influent

物质	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	物质	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )
NH <sub>4</sub> Cl	80	CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	5
NaNO <sub>2</sub>	100	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	300
NaHCO <sub>3</sub>	1 000	微量元素 I	1
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	200	微量元素 II	1

表 2 微量元素组分  
Tab. 2 Components of Trace Elements

名称	组分	质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
微量元素 I	乙二胺四乙酸(EDTA)	10
	FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	5
微量元素 II	EDTA	10
	MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.99
	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.25
	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.19
	CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.24
	NaMoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.22
	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.43
	H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub>	0.014
NaWO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.05	

### 1.2 微生物快速富集试验方案

为探究 3 种新型填料对 Anammox 系统启动效率的影响, 试验分组如表 3 所示。将各组填料投入 Anammox 反应器中, 填充率为 25%。试验共进行 5 d, 分别测定总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮等水质指标。

表 3 试验分组  
Tab. 3 Test Grouping

分组	填料
R1	空白
R2	传统聚乙烯填料
R3	传统聚丙烯填料
R4	葫芦壳基新型填料
R5	螺蛳壳基新型填料
R6	紫砂基新型填料

### 1.3 微生物稳定运行试验方案

为探究新型填料对 Anammox 系统在极端环境下的抗胁迫能力, 筛选 1.2 节中表现最为良好的填料开展稳定运行试验, 胁迫条件如表 4 所示。选取不同浓度的盐度、难降解有机污染物甘油三酯和重金属钴和锰投加入体系中, 研究其对脱氮效果和微生物群落的影响。

表 4 胁迫试验组别  
Tab. 4 Stress Test Groups

分组	胁迫条件
C1	0.5% NaCl
C2	1% NaCl
C3	5% MLVSS 甘油三酯
C4	10% MLVSS 甘油三酯
C5	15% MLVSS 甘油三酯
C6	2 mg/L 重金属钴
C7	4 mg/L 重金属钴
C8	2 mg/L 重金属锰
C9	4 mg/L 重金属锰

注: MLVSS 为混合液挥发性悬浮固体。

### 1.4 检测方法和计算方法

每 2 d 采集反应器出水, 水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后根据《水和废水监测分析方法》测定各项水质指标。脱氮速率和脱氮负荷通过测定一段时间内总氮或氨氮的浓度变化, 再结合生物量和反应器容积进行计算。

本研究选取单因子污染指数法<sup>[12]</sup>、内梅罗污染指数法和营养状态指数法<sup>[13]</sup>对反应器出水进行污染物去除效果评估, 具体评估方法如下。

#### (1) 单因子污染指数法

单因子指数法其评价结果是单因子水质指数, 是无量纲数, 表示某种污染物的监测值相对于标准值的程度, 即超标的倍数。单因子污染指数计算如

式(1)。

$$P_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{sj}} \quad (1)$$

其中: $P_{ij}$ ——第*i*种污染物在第*j*点的污染指数;

$C_{ij}$ ——第*i*种污染物在第*j*点的监测平均质量浓度值,mg/L;

$C_{sj}$ ——第*i*种污染物的水质标准值,mg/L。

(2)内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数的计算如式(2)~式(3)。

$$P = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n P_{ij}} \quad (2)$$

$$N = \sqrt{\frac{P^2 + P_{\max}^2}{2}} \quad (3)$$

其中: $N$ ——内梅罗污染指数;

$P$ ——综合污染指数;

$P_{\max}$ ——评价因子污染指数的最大值;

$n$ ——参加评价的污染物项目数。

(3)营养状态指数法

营养状态指数计算如式(4)~式(5)。

$$E_i = \sum_{n=1}^N \frac{E_n}{N} \quad (4)$$

$$E_n = y_{lb} + 10 \times \frac{x_i - x_{lb}}{x_{ub} - x_{lb}} \quad (5)$$

其中: $E_i$ ——营养状态指数;

$E_n$ ——各评价项目赋值;

$N$ ——评价项目个数;

$x_i$ ——指标测定值;

$y_{lb}$ ——该赋分区间的基礎赋值;

$x_{lb}$ 、 $x_{ub}$ ——该赋分区间内该指标的上限和下限值。

营养状态标准具体结果如表5所示。

### 1.5 高通量测序分析

采用16S rDNA高通量测序测定接种污泥和培养后污泥的微生物群落结构。污泥提取脱氧核糖核酸(DNA)后,选取通用引物对V3~V4区进行聚合酶链式反应(PCR)扩增。扩增程序为:95℃预变性3 min,27个循环(95℃变性30 s,55℃退火30 s,

表5 营养状态标准

Tab. 5 Standards of Nutritional Status

营养状态分级	$E_n$	总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )
I(0≤ $E_i$ ≤20)	10	0.02	0.015
	20	0.05	0.035
II(20≤ $E_i$ ≤50)	30	0.10	0.100
	40	0.30	0.300
III(50≤ $E_i$ ≤60)	50	0.50	0.500
	60	1.00	1.000
	70	2.00	2.000
IV(60≤ $E_i$ ≤80)	80	6.00	6.000
	90	9.00	9.000
V(80≤ $E_i$ ≤100)	90	9.00	9.000
	100	16.00	16.000

72℃延展45 s),最后72℃延展10 min。扩增产物利用Illumina公司Miseq PE300平台进行测序(上海美吉生物医药科技有限公司)测序数据采用FLASH和Trimmomatic软件进行优化,后采用UPARSE软件进行操作分类单元(OTU)聚类分析。

## 2 结果和讨论

### 2.1 基于不同填料的Anammox反应器启动

投加不同填料后反应器内氮类物质浓度的变化情况如图1所示,各组反应器对氨氮和亚硝态氮的去除效果均良好,Anammox菌在R4组和R5组填料表面形成致密的生物膜层。各组反应体系中,未投加填料的R1组和投加了传统填料的R2组和R3组氨氮和亚硝态氮浓度在运行1~2 d后便降至0,而投加了新型填料的R4组和R5组也在运行2~3 d后基本完全去除氨氮和亚硝态氮。虽然各组均对氨氮和亚硝态氮去除明显,但R1~R3组出水中硝态氮质量浓度明显增加,最高达到了278.56 mg/L,这导致出水总氮浓度也大幅上升,反应器内出现了严重的硝态氮累积现象。与此相反,投加了3种新型填料的反应体系内虽同样发生了硝态氮累积现象,但程度明显较低。R5组第5 d出水中的硝态氮和总氮质量浓度分别为40.39 mg/L和96.5 mg/L,而R4组和R6组的出水中硝态氮质量浓度分别为0和1.35 mg/L,总氮质量浓度仅为37.02 mg/L和10.92 mg/L。表明投加了传统填料的R2组和R3组与未投加填料的R1组相似,Anammox菌虽然发挥了一定作用,但硝态氮累积导致的总氮浓度上升

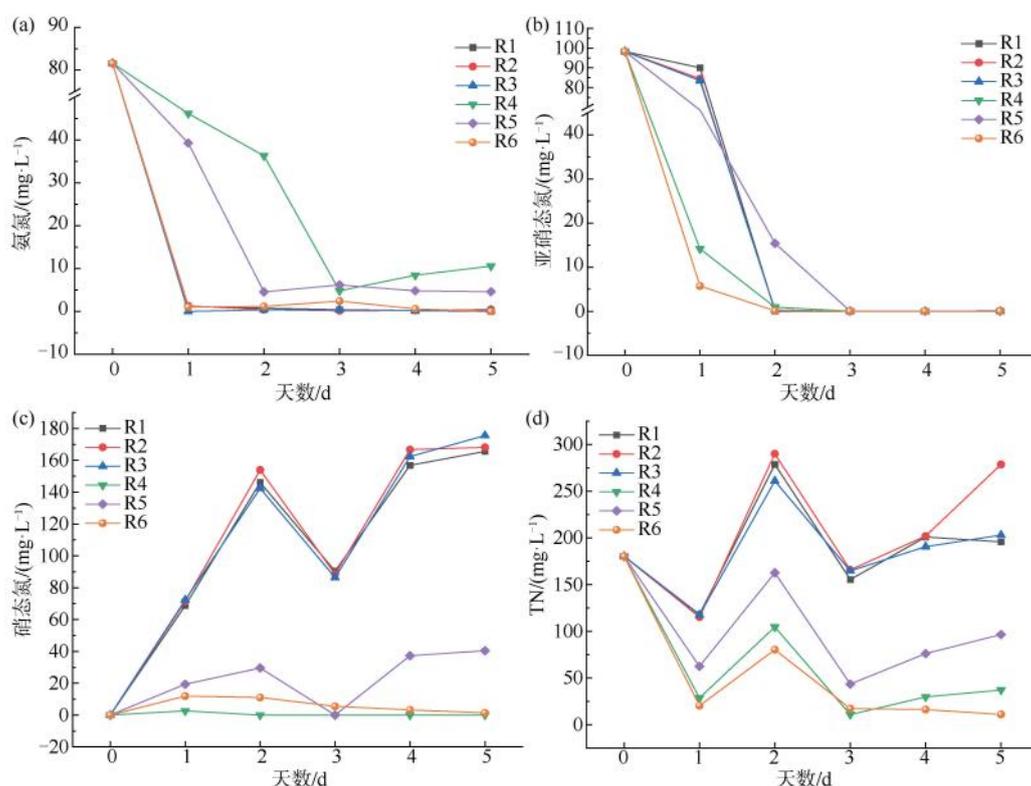


图 1 氮类物质变化趋势

Fig. 1 Variations of Nitrogen Compounds

严重影响反应器运行效果。而投加了新型填料的 R4~R6 组反应器内发生了良好的 Anammox 现象,其中 R5 组效果相对较差,R6 组效果最好。

脱氮速率和脱氮负荷对比如表 6 所示。该对比仅对空白组和表现最良好的紫砂基填料组开展对比,分别记为 G1 组和 G2 组。G1 组和 G2 组反应器内脱氮速率和脱氮负荷差别明显,以总氮和氨氮作为基准进行对比时,G2 组均优于 G1 组。当以氨氮作为基准时,G2 组的脱氮速率和脱氮负荷较 G1 组提升 20.93% 和 30.61%;以总氮作为基准时,G2 组的脱氮速率和脱氮负荷分别提升 25.61% 和

38.96%。污染物去除效果对比如表 7 所示。以总氮和氨氮为基准的单因子污染指数法计算结果表明,G2 组出水的污染物指数较 G1 组下降约 17.95% 和 54.02%。内梅罗污染指数法与单因子指数法计算结果一致,G2 组出水的内梅罗污染指数较 G1 组下降 52.40%。营养状态指数法主要针对样品中污染物造成湖泊富营养化的风险进行评价,G1 和 G2 组的营养状态指数值分别为 76.42 和 64.32,G2 组较 G1 组降低 15.82%。上述结果均表明采用新型生物质填料富集 Anammox 菌群可明显改善污染物去除效果。

表 6 脱氮速率和负荷

Tab. 6 Rate and Load of Denitrification

分组	脱氮速率/ [mg 氨氮·(g MLVSS·h) <sup>-1</sup> ]	脱氮负荷/ [g 氨氮·(m <sup>3</sup> ·h) <sup>-1</sup> ]	脱氮速率/ [mg 总氮·(g MLVSS·h) <sup>-1</sup> ]	脱氮负荷/ [g 总氮·(m <sup>3</sup> ·h) <sup>-1</sup> ]
G1	2.15	10.42	2.46	11.68
G2	2.60	13.61	3.09	16.23

## 2.2 基于不同填料的 Anammox 反应器微生物群落结构分析

为探究不同填料对 Anammox 微生物群落的影响,

对 R1 组和投加新型填料的 R4~R6 组采用高通量测序技术分析了各组不同时间(运行 3、6、9 d 和 12 d,R1-3 指运行了 3 d 的 R1 组)的微生物群落特

表 7 污染物去除效果

Tab. 7 Evaluation of Pollutants Removal

分组	单因子污染指数法(氨氮)	单因子污染指数法(总氮)	内梅罗污染指数法	营养状态指数法
G1	44.29	227.47	187.36	76.42
G2	36.34	104.59	89.18	64.32

征,揭示 Anammox 菌富集过程中优势微生物种群的变化规律。

通过多样性指数分析可以得到群落中物种的丰富度、覆盖度和多样性等信息,结果如表 8 所示。丰富度可以衡量体系中有多少不同的微生物种群,表 8 中基于丰度的覆盖估计值(Ace)、物种丰度(Chao)指数、物种多样性(Shannon)指数和辛普森多样性(Simpson)指数均表征丰富度,Ace、Chao、Shannon 数值越高或 Simpson 数值越小,表明体系中的微生物种群越多。由表 8 可知,R4~R6 组的 Ace、Chao 和 Shannon 等指数普遍高于 R1 组,Simpson 值低于 R1 组,表明投加了新型生物质填料之后其 Anammox 菌丰富度有所提升,而微生物多样性的增加有会提升 Anammox 菌的脱氮效率。不同运行阶段的丰富度指数未表现出显著性变化,表明系统内 Anammox 菌在体系内具有一定的稳定性。

表 8 微生物 Alpha 多样性及丰富度指数

Tab. 8 Alpha Diversity and Richness of Microflora Structure

样本	Ace	Chao	Shannon	Simpson
R1-3	1 068.4	1 067.8	4.664	0.024
R1-6	1 114.1	1 141.6	4.609	0.031
R1-9	1 042.9	1 011.8	4.793	0.020
R1-12	1 015.1	997.0	4.790	0.021
R4-3	1 306.5	1 265.5	5.081	0.016
R4-6	1 260.0	1 245.3	5.118	0.014
R4-9	1 270.2	1 269.0	5.029	0.019
R4-12	1 314.5	1 262.9	5.246	0.014
R5-3	1 281.0	1 250.8	5.078	0.014
R5-6	1 223.6	1 191.3	5.007	0.019
R5-9	1 276.2	1 289.0	4.976	0.022
R5-12	1 281.7	1 288.8	5.052	0.018
R6-3	1 302.6	1 281.4	5.058	0.015
R6-6	1 301.6	1 274.4	5.142	0.017
R6-9	1 305.4	1 296.5	5.120	0.017
R6-12	1 319.8	1 289.3	5.068	0.022

*Candidatus\_allysiosphaera* 菌属为 Anammox 重要

菌属<sup>[14]</sup>,表 9 为该菌群基于属水平的物种相对丰度。当未投加填料时,R1 组内 *Candidatus\_allysiosphaera* 菌相对丰度在培养 12 d 后仅达到 15.17%,与培养 3 d 后的相对丰度相近(15.93%),表明在该微生物系统内该菌属并未发生明显富集现象。相对的,R4 组和 R6 组中 *Candidatus\_allysiosphaera* 菌属具有明显的富集现象,R4-12 组和 R5-12 组内该菌属相对丰度分别达到 29.44%和 26.26%,R6-12 组内最高达到了 64.75%,表明紫砂基填料具备良好的快速富集 Anammox 菌的作用。另外,体系内氨氧化细菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)相对丰度较低,原因在于进水中较高浓度的亚硝态氮。亚硝态氮在体系中会生成游离亚硝酸(free nitrous acid, FNA)。FNA 是亚硝酸盐的质子化形式,是一种一元弱酸,FNA 可以在水溶液中分解形成二氧化氮(NO<sub>2</sub>)、硝氮阳离子(NO<sup>+</sup>)、三氧化二氮(N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)和一氧化氮自由基(NO·)。这些产物会与体系内其他有机物生成多种活性氮中间体,如过氧亚硝酸盐(ONOO<sup>-</sup>)、金属亚硝酰基配合物等<sup>[15]</sup>。这些物质对微生物具有生物毒性,研究<sup>[16]</sup>表明,当 FNA 质量浓度在 4.5 μg/L 时即可使 AOB 和亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)受到抑制。根据计算,本体系内 FNA 质量浓度约为 6 μg/L(35 °C、pH 值=7.5),因此会对 AOB 菌产生抑制,导致其相对丰度较低。

表 9 Anammox 菌基于属水平的物种相对丰度

Tab. 9 Relative Abundance of Anammox in Genus-Level

样品号	相对丰度	样品号	相对丰度
R1-3	15.93%	R4-3	25.87%
R1-6	20.01%	R4-6	13.13%
R1-9	10.96%	R4-9	31.86%
R1-12	15.17%	R4-12	29.44%
R5-3	29.44%	R6-3	26.26%
R5-6	25.62%	R6-6	51.25%
R5-9	46.47%	R6-9	39.64%
R5-12	26.26%	R6-12	64.75%

### 2.3 不同胁迫条件下 Anammox 体系稳定运行研究

为探究不同胁迫因子对 Anammox 反应体系稳定性的影响,在紫砂基填料富集 Anammox 菌群后分别设置盐度、难降解有机物甘油三酯和重金属(钴、

锰)的胁迫条件,各组运行 3 d 后取样测定水质指标和微生物群落结构。

各组运行 3 d 后氮类物质变化趋势如图 2 所示。投加了紫砂基填料富集 Anammox 菌群后,投加了重金属钴和锰的反应体系(C6~C9 组)运行正常,氨氮和亚硝态氮去除效果良好,出水浓度基本在第 1 d 便迅速降至 0,且无硝态氮的累积现象。与此相反,投加了氯化钠和甘油三酯的 C1~C5 组体系基本崩溃,Anammox 菌的脱氮功能受到严重抑制。氨氮和亚硝态氮在 C1~C5 组中经过 3 d 的运行依然未能完全去除,且硝态氮累积严重,总氮去除率均低于 20%,其中 C5 组的总氮浓度最低仅为 9.2%。通过对氮类物质浓度变化进行分析,发现 2% 以上的盐

度即可对体系脱氮性能产生不利影响,具体表现为氨氮和亚硝态氮去除不完全,硝态氮略有累积,C1 组和 C2 组第 3 d 的总氮去除率分别为 19.8% 和 16.5%;投加比为 5% MLVSS 以上浓度的甘油三酯即可使 Anammox 体系崩溃,具体表现为硝态氮严重累积,去除氨氮和亚硝态氮能力完全丧失,因此,Anammox 系统处理餐厨废水等高氨氮废水时应注意隔油预处理的稳定运行;质量浓度为 2 mg/L 以下的  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  不会对 Anammox 体系产生危害,后续将其质量浓度提升至 4 mg/L 以上发现会对体系产生一定的不利影响,具体表现为氨氮和亚硝态氮去除不完全,硝态氮略有累积,但 C6~C9 组各组总氮去除率均在 83.6% 以上。

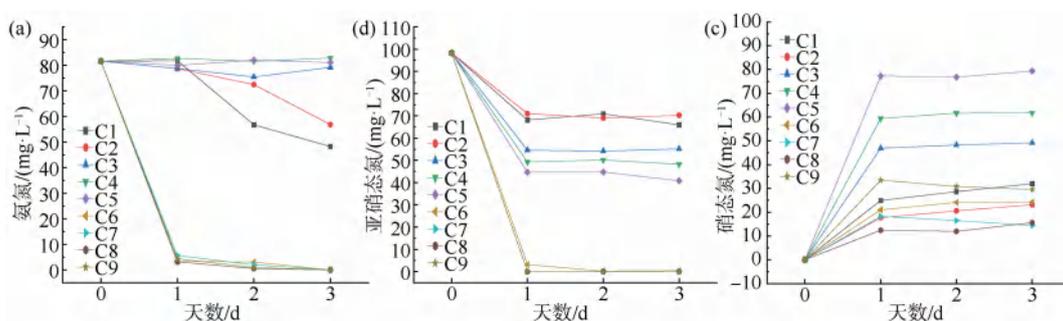


图 2 氮类物质变化趋势

Fig. 2 Variations of Nitrogen Compounds

## 2.4 不同胁迫条件下 Anammox 体系微生物群落结构分析

为探究不同胁迫条件下 Anammox 体系内微生物群落结构的变化,对紫砂基填料富集 Anammox 菌群开展了高通量测序分析,多样性指数分析结果如表 10 所示。各胁迫条件的试验组(C1~C9 组)的 Ace、Chao 和 Shannon 等指数相较于 C0 组(空白组)普遍较高,Simpson 值较低,表明在不同胁迫条件下 Anammox 体系内微生物丰富度有所提升。污泥微生物群落结构会随着环境条件的改变发生变化,但微生物丰富度的提高并不能完全说明 Anammox 系统的效果。整体而言,不同胁迫组 Anammox 菌群丰富度及覆盖度的变化幅度较小,说明该 Anammox 微生物群落结构在不利环境下依然具有稳定性。

基于属水平上的微生物丰度如表 11 所示。C0 组 *Candidatus\_alsiosphaera* 属相对丰度为 15.93%,投加氯化钠的 2 组(C1 和 C2 组)内该菌属相对丰度均有所下降,可知低盐度环境会抑制 *Candidatus\_*

表 10 微生物 Alpha 多样性及丰富度指数

Tab. 10 Alpha Diversity and Richness of Microflora Structure

分组	Ace	Chao	Shannon	Simpson
C0	1 068.4	1 067.8	4.664	0.024
C1	1 180.2	1 183.1	4.689	0.024
C2	1 073.4	1 054.8	4.952	0.018
C3	1 210.9	1 240.1	4.911	0.025
C4	1 168.4	1 176.7	5.016	0.020
C5	1 007.1	995.0	5.010	0.017
C6	1 280.6	1 272.4	5.102	0.017
C7	1 378.6	1 329.0	5.170	0.018
C8	1 281.9	1 268.3	4.930	0.020
C9	1 225.1	1 192.2	4.838	0.022

*alsiosphaera* 属活性,而高盐度环境则会使 *Candidatus\_alsiosphaera* 属和腐霉菌门整体活性均受到抑制,因此高盐度不利于 Anammox 菌的富集。在投加了甘油三酯之后,C3~C5 组内 *Candidatus\_alsiosphaera* 属相对丰度呈上升趋势,表明甘油三酯

会对多种微生物产生危害。因此,结合脱氮效果分析,在本体系内可能发生了 *Candidatus\_allysiosphaera* 属相对丰度虽呈上升趋势,但由于甘油三酯对其他微生物活性的抑制作用,导致部分 Anammox 菌群属失去了脱氮功能。同时,由于甘油三酯对微生物的毒性效应,导致体系内除 Anammox 菌以外的其他菌属也受到毒害,最终导致 *Candidatus\_allysiosphaera* 属相对丰度有所提升,但系统整体的脱氮效果明显下降。低浓度重金属钴和锰对该菌属均不会对 Anammox 菌属产生危害,*Candidatus\_allysiosphaera* 属在体系中占据优势,体系内 AOB 和 NOB 相关菌属相对丰度较低,主要是因为 FNA 的存在会抑制 AOB 和 NOB 菌属活性。

表 11 不同填料下基于属水平的物种相对丰度  
Tab. 11 Relative Abundance of Anammox in Genus-level

分组	相对丰度	分组	相对丰度
C0	15.93%	C5	28.21%
C1	8.16%	C6	51.83%
C2	15.55%	C7	34.24%
C3	39.81%	C8	24.85%
C4	31.27%	C9	46.64%

### 3 结论

(1) 传统聚丙烯和聚乙烯生物载体富集 Anammox 菌群的效率较低,硝态氮累积较为严重。但葫芦壳基填料、螺蛳壳基填料和紫砂基填料的投加均可大幅提升厌氧氨氧化系统的启动效率,在氨氮和亚硝态氮去除效率提升的同时硝态氮未出现累积现象。其中 R6 组出水硝态氮质量浓度为 1.35 mg/L,总氮质量浓度仅为 10.92 mg/L,总氮去除率高达 93.93%。

(2) R4 和 R6 组中 *Candidatus\_allysiosphaera* 菌属具有明显的富集现象,经过 12 d 的培养,该菌属的相对丰度分别达到 29.44% 和 64.75%。进水中较高浓度的亚硝态氮生成的 FNA 会影响体系内 AOB 和 NOB 菌的丰度。

(3) 高盐度和甘油三酯等难降解有机物会影响厌氧氨氧化菌的富集效率和系统的脱氮能力。C5 组的总氮去除率仅为 9.2%。质量浓度为 2 mg/L 以下的  $Co^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$  不会对 Anammox 体系产生危害,但质量浓度提升至 4 mg/L 以上后,发现系统氨氮和亚硝态氮去除不完全,硝态氮略有累积,但总氮去除率

均在 83.6% 以上。

### 参考文献

- [1] 姚程,胡小贞,姜霞,等. 太湖贡湖湾人工湖滨带水生植物恢复及其富营养化控制[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1626-1638.  
YAO C, HU X Z, JIANG X, et al. Macrophytes restoration and its effects on eutrophication control in rehabilitated lakeshore zone of Gonghu Bay, Lake Taihu[J]. 2021, 33(6): 1626-1638.
- [2] 樊沈毅. AnAOB 快速培养及 PN-Anammox 技术在高氨氮工业废水中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.  
FAN S Y. AnAOB rapid culture and application of PN-Anammox technology in high ammonia nitrogen industrial wastewater[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [3] XIAO H K, PENG Y Z, ZHANG Q, et al. Pre-anaerobic treatment enhanced partial nitrification start-up coupled with anammox for advanced nitrogen removal from low C/N domestic wastewater[J]. Bioresource Technology, 2021, 337: 125434. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125434.
- [4] STROUS M, HEIJNEN J J, KUENEN J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. Applied Microbiol Biotechnol, 1998, 50(5): 589-596.
- [5] MA W J, LI G F, HUANG B C, et al. Advances and challenges of mainstream nitrogen removal from municipal wastewater with anammox-based processes [J]. Water Environment Research, 2020, 92(11): 1899-1909.
- [6] 陈文静,陈圣东,梁佳茵,等. Anammox 脱氮工艺启动研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(11): 130-140.  
CHEN W J, CHEN S D, LIANG J Y, et al. Research progress on the rapid startup of Anammox [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(11): 130-140.
- [7] 明大成. Anammox 反应器的快速启动及有机物影响脱氮性能的研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.  
MING D C. Rapid start-up of Anammox reactor and the effect of organics on nitrogen removal [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2008.
- [8] ADAMS M, XIE J X, CHANG Y F, et al. Start-up of Anammox systems with different biochar amendment: Process characteristics and microbial community[J]. Science of the Total Environment, 2021, 790: 148242. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148242.
- [9] 高小宝,马志远,陈晓阳,等. 生物质碳源与非生物质填料组合生态浮床净化水体效果[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 124-129.  
GAO X B, MA Z Y, CHEN X Y, et al. Water purification effect of ecological floating beds with biomass carbon source and non-biomass fillers [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(3): 124-129.

(下转第 123 页)

- mouka smectite and an activated carbon prepared from kola nut shells by chemical activation with zinc chloride (ZnCh) [J]. *Open Journal of Inorganic Chemistry*, 2021, 11(4): 131-144.
- [22] TRUONG V T, KIM D J. Synthesis of high quality boehmite and  $\gamma$ -alumina for phosphorus removal from water works sludge by extraction and hydrothermal treatment [J]. *Environmental Research*, 2022, 212: 113448. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113448.
- [23] AL-RAAD A A, HANAFIAH M M. Removal of inorganic pollutants using electrocoagulation technology: A review of emerging applications and mechanisms [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300: 113696. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113696.
- [24] TEGLADZA I D, XU Q, XU K, et al. Electrocoagulation processes: A general review about role of electro-generated flocs in pollutant removal [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 146: 169-189. DOI: 10.1016/j.psep.2020.08.048.

## (上接第 111 页)

- [10] FOLETTO E L, WEBER C T, PAZ D S, et al. Adsorption of leather dye onto activated carbon prepared from bottle gourd: Equilibrium, kinetic and mechanism studies [J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67(1): 201-209.
- [11] 黄嘉豪, 刘桂文, 朱杰, 等. 改性生物填料载体强化厌氧氨氧化反应器脱氮研究 [J]. *生物加工过程*, 2022, 20(1): 41-49.
- HUANG J H, LIU G W, ZHU J, et al. Performance of anaerobic ammonia oxidation reactor strengthened by modified carriers [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2022, 20(1): 41-49.
- [12] 罗芳, 伍国荣, 王冲, 等. 内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用 [J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(5): 87-89.
- LUO F, WU G R, WANG C, et al. Application of Nemerow pollution index method and Single factor evaluation method in water quality evaluation [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41(5): 87-89.
- [13] 郭洲华, 王翠, 颜利, 等. 九龙江河口区主要污染物时空变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(4): 679-686.
- GUO Z H, WANG C, YAN L, et al. Spatiotemporal variations of main pollutants in Jiulongjiang Estuary [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(4): 679-686.
- [14] GONG X F, WANG B, QIAN X, et al. Performance of the anammox process treating low-strength municipal wastewater under low temperatures: Effect of undulating seasonal temperature variation [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 312: 123590. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123590.
- [15] LI G B, CARVAJAL-ARROYO J M, SIERRA-ALVAREZ R, et al. Mechanisms and control of  $\text{NO}_2^-$  inhibition of anaerobic ammonium oxidation (anammox) [J]. *Water Environment Research*, 2017, 89(4): 330-336.
- [16] 叶炯炯. 厌氧氨氧化附着膜膨胀床反应器失稳机制与调控策略 [D]. 上海: 上海大学, 2020.
- YE J J. Destabilization mechanism and control strategies of the anammox attached film expanded bed reactor [D]. Shanghai: Shanghai University, 2020.