

## 4 种填料构建生物滤器的硝化动力学与生物膜菌群结构研究

齐亚鹏, 刘超, 徐爱玲, 宋志文\*

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

**摘要:** 选取碳酸钙粉末(TSG)、聚乙烯环(PE)、聚氨酯海绵(PU)和聚碳酸亚丙酯海绵(PPC)作为生物填料, 分别构建 4 种生物滤器(R1~R4), 比较生物填料氧化能力、附着生长生物量, 分析生物滤器硝化性能与底物消耗动力学以及细菌群落结构组成。结果表明, PPC 填料的平均亚硝酸盐氧化速率、平均氨氧化速率和附着生长生物量均高于其他填料; 生物滤器 R1 的平均亚硝酸盐氧化速率和平均氨氧化速率优于其他生物滤器, 生物滤器 R3 的比亚硝酸盐氧化速率和比氨氧化速率优于其他生物滤器。Monod 模型能较好地描述不同生物滤器中底物浓度与降解速率间的关系, 生物滤器 R3 对亚硝酸盐和氨的最大比降解速率( $r_{\max}$ )最高, 分别为 8.26 和 7.21 mg/(L<sup>2</sup>·h)。4 种填料生物膜样本存在较为完整的脱氮微生物体系, 其中 PU 生物膜样本中与氮循环相关的硝化螺旋菌门、亚硝化单胞菌属和硝化球菌属的相对丰度高于其他样本。

**关键词:** 生物滤器; 生物填料; 硝化动力学; 细菌群落组成

中图分类号: X172 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2026)02-0074-09

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.010

## Nitrification kinetics and biofilm flora structure of biofilters constructed with four types of biofillers

QI Yapeng, LIU Chao, XU Ailing, SONG Zhiwen\*

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** CaCO<sub>3</sub> powder (TSG), polyethylene ring (PE), polyurethane sponge (PU) and polypropylene carbonate sponge (PPC) were selected as biofillers to construct four biofilters (R1~R4) respectively. The oxidation capacity and attached-growth biomass of the biofillers were compared, while the nitrification performance, substrate consumption kinetics and bacterial community composition of the biofilters were analyzed. The results showed that the average nitrite oxidation rate, average ammonia oxidation rate and attached-growth biomass of PPC filler were higher than those of other fillers. Biofilter R1 demonstrated superior average nitrite oxidation rate and average ammonia oxidation rate compared to other biofilters, while biofilter R3 demonstrated superior specific nitrite oxidation rate and specific ammonia oxidation rate compared to other biofilters. The Monod model can preferably describe the relationship between substrate concentration and degradation rate in different biofilters. The maximum specific degradation rate ( $r_{\max}$ ) of nitrite and ammonia in biofilter R3 was the

收稿日期: 2024-05-12

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023MC193)

作者简介: 齐亚鹏(1996—), 男, 山东菏泽人。硕士, 研究方向为环境微生物。E-mail: 2495529789@qq.com。

\* 通信作者: 宋志文(1966—), 男, 黑龙江林口人。博士, 教授, 主要从事环境微生物学方面的研究。E-mail: songzhiwen@qut.edu.cn。

highest, which was 8.26 and 7.21 mg/(L<sup>2</sup> · h) respectively. All the biofilm samples from the four fillers harbor relatively complete denitrifying microbial systems. Among these, the relative abundance of *Nitrospira*, *Nitrosomonas* and *Nitrococcus* related to nitrogen cycle in PU biofilm samples was higher than other samples.

**Key words:** biofilter; biofiller; nitrification kinetics; bacterial community composition

近年来,我国水产品进出口和消费水平位居世界前列,随着水产品需求日益增加,水产养殖业必须扩大产能以满足市场需求<sup>[1]</sup>。传统池塘养殖模式主要依赖换水维持养殖水环境的安全,养殖尾水排放量大,水资源消耗严重。实施水产养殖池塘改造升级,提高养殖用水重复利用率,构建环境友好、低碳的水产养殖新模式,将成为协调动物蛋白供给目标与“碳达峰、碳中和”重大国家政策间矛盾的关键。

水产生物养殖过程中产生的氨与亚硝酸盐是主要有毒物质和控制指标。其中非离子氨具有较强脂溶性,在穿透生物细胞膜的同时产生大量自由基,抑制生物体内酶活性<sup>[2]</sup>。亚硝酸盐易与血红蛋白结合形成高铁血红蛋白,长期胁迫下会影响水产生物呼吸功能<sup>[3-4]</sup>。

利用硝化过程将养殖水体中的氨和亚硝酸盐转化为毒性较低的硝酸盐,是一种经济可靠的方法<sup>[5]</sup>。在该过程中,氨氧化微生物(Ammonia-Oxidizing Microorganism, AOM)包括氨氧化古细菌(Ammonia-Oxidizing Archaea, AOA)和氨氧化细菌(Ammonia-Oxidizing Bacteria, AOB),负责将氨转化为亚硝酸盐。亚硝酸盐氧化细菌(Nitrite-Oxidizing Bacteria, NOB)进一步将亚硝酸盐转化为硝酸盐。

生物滤器是循环水养殖系统(Recirculating Aquaculture System, RAS)无机氮转化的主要场所,由于 AOM 和 NOB 为化能自养菌,世代周期长,繁殖速度慢,具有附着生长的特性,因而选择合适的生物填料对于发挥生物滤器性能至关重要<sup>[6-7]</sup>。生物膜的生物量、形态以及微生物群落组成与填料类型关系密切,亲水性强、比表面积大的填料能附着更多微生物<sup>[8]</sup>。碳酸钙粉末(TSG)是生物菌剂常用的载体之一。聚乙烯环(PE)、聚氨酯海绵(PU)和聚碳酸亚丙酯海绵(PPC)作为常见的人工填料,已应用于多种反应器,在废水处理中取得了良好效果。

生物反应器优化研究中,莫诺(Monod)模型是分析底物消耗动力学的常用手段<sup>[9-10]</sup>。本研究选取不同类型的预挂膜生物填料,分别构建 R1(TSG)、R2(PE)、R3(PU)和 R4(PPC)4 种生物滤器,通过亚硝酸盐(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)和氨(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)的底物浓度批次实验和高通量测序,比较生物滤器的硝化性能并进行底物消耗动力学和生物膜细菌群落组成分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 生物滤器与底物浓度批次实验

图 1 为生物滤器结构示意图,生物滤器直径为 20 cm,高 40 cm,有效容积为 9 L。滤器内配备曝气盘和加热棒。实验过程中,每个生物滤器加入 5 L 人工海水(盐度 28‰)。温度控制在(28±1) °C, pH 为 7.5~8.5,硝化动力学实验过程中溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)的浓度控制在 5.5~7.5 mg/L。

将 4 种预挂膜填料(TSG、PE、PU 和 PPC)分别填充至生物滤器中(表 1),闷曝 3 d 后进行底物浓度批次实验。批次实验过程中设定 17 次不同初始浓度的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,反应 12 h 后测定生物滤器中的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度(0.5~600 mg/L,先 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 后 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)。

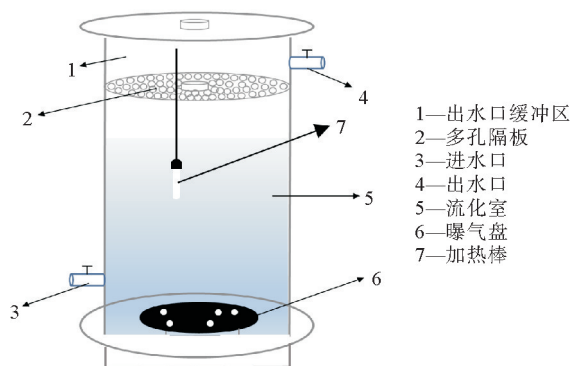


图 1 生物滤器示意

表 1 4 种生物滤器参数

生物滤器	填料类型	规格/mm	比表面积	填充率/%	孔隙率/%
R1	TSG	0.02~0.03	5.53 m <sup>2</sup> /g	50	—
R2	PE	φ10 × 5	500 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	30	>95
R3	PU	10×10×10	2000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	30	>98
R4	PPC	20×20×20	4000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	30	>98

采用 Monod 模型描述底物降解速率与单一限制性底物浓度间的关系:

$$r = r_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (1)$$

式中:  $r$  为比降解速率, mg/(L<sup>2</sup>·h);  $r_{\max}$  为最大比降解速率, mg/(L<sup>2</sup>·h);  $S$  为底物浓度, mg/L;  $K_s$  为半饱和常数, 即  $r = r_{\max}/2$  时的底物浓度, mg/L。

## 1.2 氧化速率、比氧化速率和 AGRS 测定方法

批次实验前通过摇瓶实验测定 3 种预挂膜人工填料(PE、PU 和 PPC)氧化能力, 锥形瓶中分别加入 30%(体积比)预挂膜人工填料, 再分别添加 NH<sub>4</sub>Cl 和 NaNO<sub>2</sub> 使瓶中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 初始浓度均为 100 mg/L, 每 12 h 测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度, 直至检测不出。每只锥形瓶设 3 个平行组。依据数据按式(2)和式(3)计算氨氧化速率(Ammonia Oxidation Rate, AOR)和亚硝酸盐氧化速率(Nitrite Oxidation Rate, NOR):

$$R_{\text{AOR}} = \frac{C_{\text{AN初}} - C_{\text{AN末}}}{t} \quad (2)$$

$$R_{\text{NOR}} = \frac{C_{\text{NN初}} - C_{\text{NN末}}}{t} \quad (3)$$

按式(4)和式(5)计算比氨氧化速率(Specific Ammonia Oxidation Rate, SAOR)和比亚硝酸盐氧化速率(Specific Nitrite Oxidation Rate, SNOR):

$$R_{\text{SAOR}} = \frac{C_{\text{AN初}} - C_{\text{AN末}}}{Vt} \quad (4)$$

$$R_{\text{SNOR}} = \frac{C_{\text{NN初}} - C_{\text{NN末}}}{Vt} \quad (5)$$

式中:  $R_{\text{AOR}}$  为氨氧化速率, mg/(L·h);  $R_{\text{NOR}}$  为亚硝酸盐氧化速率, mg/(L·h);  $R_{\text{SAOR}}$  为比氨氧化速率, mg/(L<sup>2</sup>·h);  $R_{\text{SNOR}}$  为比亚硝酸盐氧化速率, mg/(L<sup>2</sup>·h);  $C_{\text{AN}}$  为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度, mg/L;  $C_{\text{NN}}$  为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度, mg/L;  $t$  为反应时间, h;  $V$  为填料体积, cm<sup>3</sup>。

从 3 种预挂膜填料中随机选取 8 块, 在 105 °C 下干燥 8 h 并称重( $m_1$ )。用 1 mol NaOH 去离子水清洗填料, 去除生物质。然后将人工填料烘干并再次称重( $m_2$ )。预挂膜填料附着生长生物量(Attached-Growth Biomass, AGRS)根据填料清洗前后的质量差计算得出, 如式(6)所示:

$$Y_{\text{AGRS}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (6)$$

式中:  $Y_{\text{AGRS}}$  为附着生物量, mg/g。

## 1.3 高通量测序方法

使用土壤 DNA 试剂盒(美国, OMEGA 公司)提取 4 种填料生物膜样本中的总 DNA。使用 P360 微量分光光度计(德国, Nanophotometer)测定总 DNA 纯度和浓度, 采用 Illumina MiSeq 平台进行 16S rRNA 高通量测序。使用 Qiime 软件对所得序列进行过滤处理得到有效序列。根据 97% 的序列相似性, 将有效序列分为不同的操作分类单元(OTU), 基于 OTU 聚类和注释分析结果, 对样本群落结构及多样性进行分析。

## 1.4 分析方法

水样经滤膜(φ0.45 μm, 中国 Newstar 公司)过滤后进行分析。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 测定采用纳氏试剂分光光度

法,  $\text{NO}_2^-$ -N 测定采用盐酸萘乙二胺分光光度法。DO 采用 HQ 30 d 水质分析仪(美国, HACH)测定, pH 采用 pH 计(pH610, 德国 WIGGENS)测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 预挂膜填料的平均氧化速率和 AGBS

PE、PU 和 PPC 3 种预挂膜填料的平均氨氧化速率、平均亚硝酸盐氧化速率和 AGBS 见图 2, a, b, c 表示显著性差异( $P < 0.05$ )。由图 2 可以看出, 3 种填料的平均氨氧化速率、平均亚硝酸盐氧化速率和 AGBS 均依次为  $\text{PPC} > \text{PU} > \text{PE}$ , 表明海绵填料的硝化能力和附着生物量大于聚乙烯填料。SHI 等<sup>[11]</sup>在不同填料生物反应器生物膜培养中发现, 4 种聚氨酯海绵填料的附着生物量相似, 远大于聚乙烯填料, 与本实验研究结果类似。

PU 和 PPC 填料更高的平均氧化速率和 AGBS 归因于其较大的孔隙率、内部复杂的网状空间和粗糙结构以及填料表面的亲水基团(氨基、羧基和环氧基), 在帮助微生物在其表面和内部稳固附着生长的同时有利于水中底物传质和扩散<sup>[12]</sup>, 而聚乙烯填料表面为光滑疏水性结构, 缺乏内部空间, 不利于生物膜形成和底物传质<sup>[13-14]</sup>。

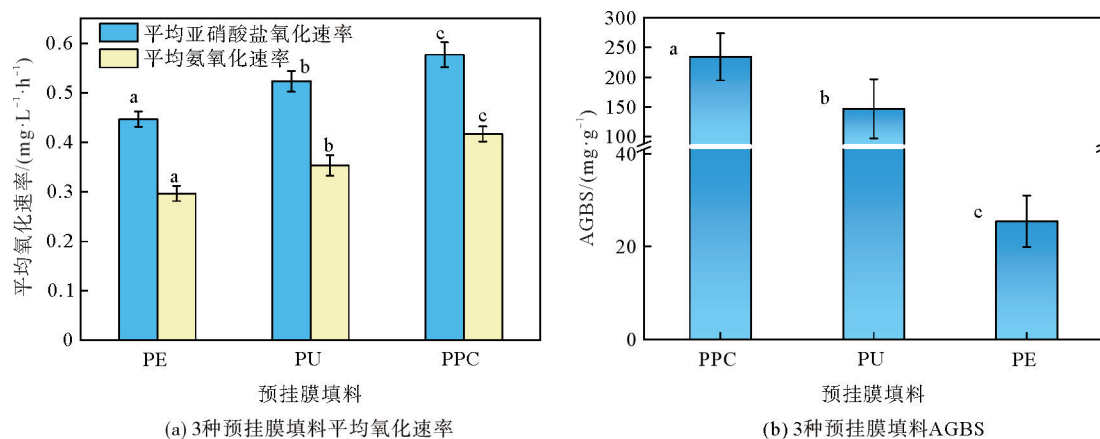


图 2 预挂膜填料的平均氧化速率和 AGBS

### 2.2 底物浓度批次试验

底物浓度批次实验测定 4 种生物滤器对不同初始浓度亚硝酸盐和氨反应 12 h 的去除效果, 结果如图 3 和图 4 所示。由图可以看出, 反应 12 h 的亚硝酸盐和氨浓度均随底物初始浓度的增加而增加。当亚硝酸盐或氨初始浓度为  $0.5 \sim 100 \text{ mg/L}$  时, 4 种生物滤器 12 h 亚硝酸盐去除率和氨去除率均在 94% 以上, BHATTACHARYA 等<sup>[15]</sup>研究发现反应器进水氨浓度为  $900 \text{ mg/L}$  时, 氨去除效率最大, 可达 89%, 表明 4 种生物滤器均具有良好的硝化能力。随着初始底物浓度的增加 ( $100 \sim 600 \text{ mg/L}$ ), 4 种生物滤器的底物去除率大幅下降, 表明其氧化能力已接近稳定状态。

4 种生物滤器的平均氧化速率如图 5 所示。由图可以看出, 生物滤器 R1 的平均亚硝酸盐氧化速率和平均氨氧化速率均显著大于其他 3 种生物滤器( $P < 0.05$ )。生物滤器 R1 中 TSG 填充率(50%)大于其他生物滤器, 可能是 R1 具有更多的附着生长生物量, 能更快地降解亚硝酸盐和氨。有学者也报道了生物量与底物降解速率间的关系, KOWALSKI 等<sup>[16]</sup>研究发现 AOR 与混合液挥发性悬浮固体浓度(Mixed Liquor Volatile Suspended Solids Concentration, MLVSS)成比例增加。LI 等<sup>[17]</sup>研究发现当 MLVSS 从  $0.66 \text{ g/L}$  增加至  $2.7 \text{ g/L}$  时, AOR 增加 3.2 倍( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )。

生物滤器 R2 的平均亚硝酸盐氧化速率和平均氨氧化速率均最小, 与其他生物滤器存在显著性差异( $P < 0.05$ ), 生物滤器 R3 与 R4 间无显著性差异( $P > 0.05$ )。ZHU 等<sup>[18]</sup>在 3 种移动床生物膜反应器(MBBR)氨氧化能力研究中发现, PU-MBBR 的氨氧化速率优于 PP-MBBR 和 PPC-MBBR。生物滤器 R3 的平均氧化速率略高于 R4, 可能与 PU 填料规格更小, 填料内的 DO 浓度不同有关。

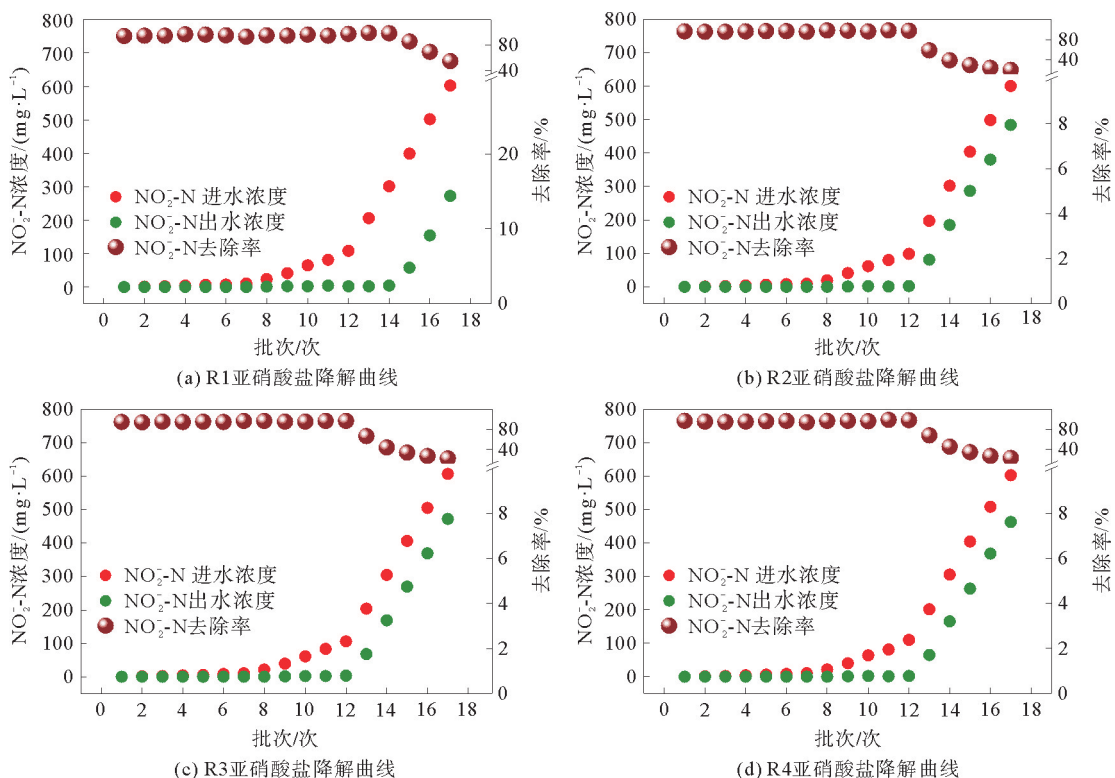


图3 4种生物滤器亚硝酸盐降解曲线

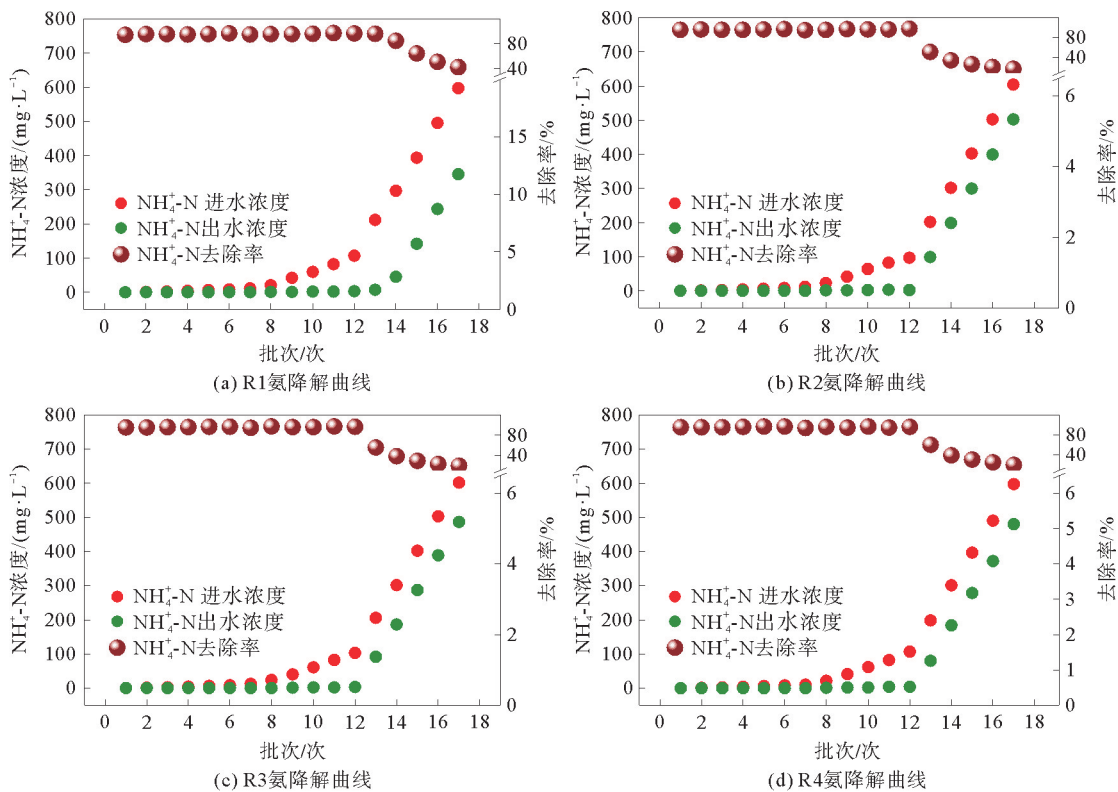


图4 4种生物滤器氨降解曲线

研究表明,填料氧传质能力会影响反应器水处理效果。海绵填料由于其多孔及亲水性,能够阻拦气体并将其剪切成均匀小气泡,增大气液传质面积,减小传质阻力,促进气液间氧传质。此外,海绵填料复杂的内部网状结构会形成不同浓度的DO区域,为不同种类微生物的生长提供有利微环境。

### 2.3 底物消耗动力学研究

Monod 模型对不同底物浓度下的 SAOR 和 SNOR 的拟合结果如图 6 所示。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  初始浓度在 0.5~4.0 mg/L 范围时,4 种生物滤器的 SAOR 与底物浓度呈一级反应;随初始浓度增加曲线呈混合级反应; $\text{NH}_4^+\text{-N}$  初始浓度大于 200 mg/L 时,曲线进入平稳期,呈零级反应。亚硝酸盐拟合曲线表现出相似规律。曲线趋于稳定后,4 种生物滤器的 SAOR 和 SNOR 均依次为  $\text{R3} > \text{R4} > \text{R2} > \text{R1}$ 。ZHANG 等<sup>[19]</sup> 研究表明 MLVSS 增加 7.9 倍,反应器 SAOR 不同温度下分别降低 66%(30 ℃)、56%(20 ℃) 和 31%(10 ℃),与本实验研究结果相似。

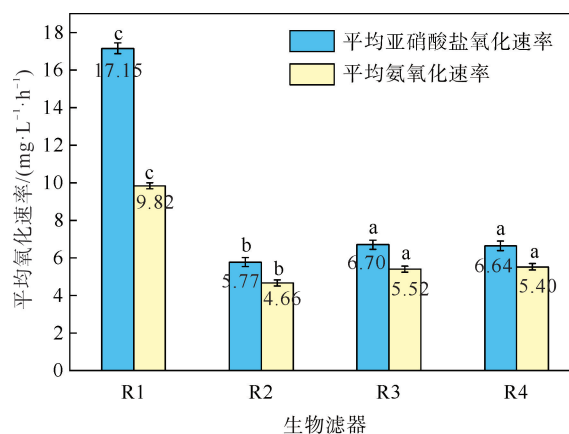


图 5 4 种生物滤器的平均氧化速率

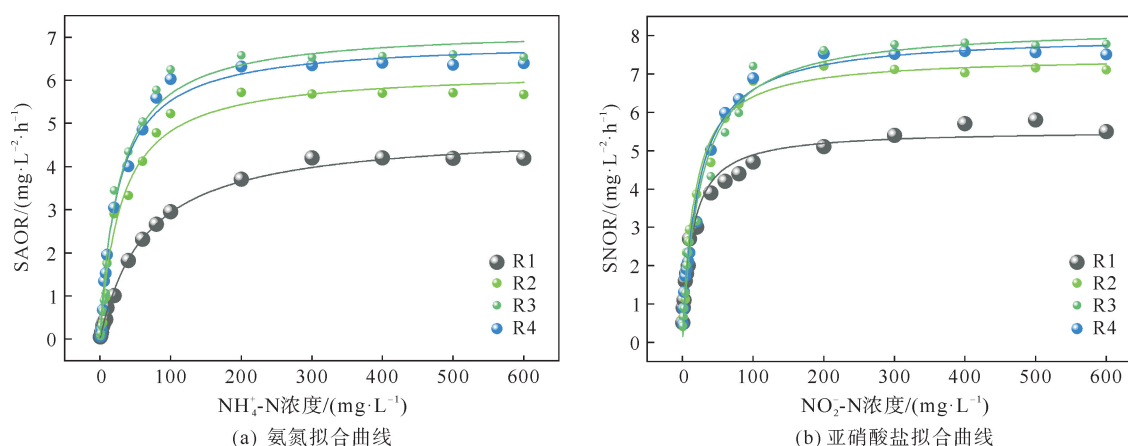


图 6 4 种生物滤器硝化动力学拟合曲线

4 种生物滤器的拟合动力学模型和统计学分析参数见表 2 和表 3。由表可知,  $R^2 \geq 0.97$ ,  $F$  值较高,  $P < 0.001$ , 表明 Monod 模型能较好地描述生物滤器底物浓度与降解速率间的关系。底物半饱和常数 ( $K_s$ ) 反映微生物与底物间的亲和力,  $K_s$  越小, 亲和力越大<sup>[20]</sup>。4 种生物滤器氨拟合曲线动力学参数  $K_s$  值大于亚硝酸盐拟合曲线动力学参数  $K_s$  值, 表明生物滤器中微生物对亚硝酸盐具有更强的亲和力, 即生物滤器中 NOB 丰度高于 AOB。

海绵填料与聚乙烯填料相比具有相似的外层比表面积, 但内部空间远大于聚乙烯填料。R2、R3 和 R4 氨拟合曲线动力学参数  $K_s$  值相差不大, 而 R2 亚硝酸盐拟合曲线动力学参数  $K_s$  值明显小于 R3 和 R4, 可能是 AOB 大多附着于填料外层, 而 NOB 大多定殖在填料内部空间, 这与 THOMAS 等<sup>[21]</sup> 报道的混合硝化反应器研究结果一致。

表 2 4 种生物滤器亚硝酸盐拟合曲线参数与统计学分析

生物滤器 类型	动力学参数		统计学参数		
	$r_{\max}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$K_s/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$R^2$	$F$ 值	$P$ 值
R1	5.53	13.23	0.97	1295	$5.55 \times 10^{-16}$
R2	7.46	16.46	0.99	2927	0
R3	8.26	25.67	0.98	1590	0
R4	8.02	21.82	0.98	1842	$1.11 \times 10^{-16}$

4 种生物滤器亚硝酸盐和氨拟合曲线动力学参数中 R3 的  $r_{\max}$  值(最大 SNOR 和最大 SAOR)均最大,分别为 8.26 和 7.21 mg/(L<sup>2</sup>·h),表明 R3 单位体积填料的氨氧化能力和亚硝酸盐氧化能力优于其他生物滤器。

表 3 4 种生物滤器氨拟合曲线参数与统计学分析

生物滤器 类型	动力学参数		统计学参数		
	$r_{\max}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$K_s/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$R^2$	F 值	P 值
R1	4.84	64.98	0.99	1295	0
R2	6.24	28.61	0.99	2928	$1.11 \times 10^{-16}$
R3	7.21	26.82	0.99	1408	0
R4	6.92	25.39	0.99	1676	$1.11 \times 10^{-16}$

#### 2.4 生物膜样本细菌群落多样性分析

4 种生物膜样本的  $\alpha$  多样性指数见表 4。每个样本的覆盖率均大于 99%,表明检测数据具有可靠性。PU 样本 OTU 数量最多(674 个),PE 样本 OTU 数量最少(578 个),说明 PU 样本细菌多样性高于其他样本。PU 和 PPC 样本 Shan-

表 4 生物滤器生物膜样本  $\alpha$  多样性指数

生物膜样本	OTU	Shannon	Simpson	Ace	Chao	覆盖率/%
TSG	583	4.44	0.020	612.54	610.55	99.82
PE	578	4.43	0.023	614.90	600.70	99.80
PU	674	4.67	0.032	711.55	698.96	99.73
PPC	650	4.74	0.034	687.96	681.44	99.76

non 指数和 Chao 指数较大,PE 样本 Shannon 指数和 Chao 指数最小,表明 PU 样本细菌群落丰富度较大、多样性较高,可能是生物滤器 R3 具有良好硝化性能的原因。

#### 2.5 生物膜样本细菌群落组成

4 种填料生物膜样本细菌群落门和属水平组成情况见图 7。4 种填料生物膜样本共检测到 28 类菌门。优势菌门主要包括变形菌门(Proteobacteria, 28.86%~29.07%)、绿弯菌门(Chloroflexi, 12.38%~27.06%)、拟杆菌门(Bacteroidota, 7.21%~35.38%)和放线菌门(Actinobacteriota, 9.33%~17.72%)。

4 种生物膜样本中变形菌门相对丰度均较大,且样本间差异小。PE 样本中绿弯菌门相对丰度高于其他样本,TSG 样本中拟杆菌门的相对丰度高于其他样本。变形菌门在生物脱氮过程中发挥重要作用;拟杆菌门能降解水体中溶解性有机物(脂类和蛋白质),促进碳水化合物的代谢;放线菌门可通过胞外聚合酶降解水体中有机物,并产生抗生素等抗菌物质。

4 种生物膜样本中均检测到硝化螺旋菌门(Nitrospirota),生物滤器的硝化能力与 Nitrospirota 的数量显著相关<sup>[22]</sup>。TSG、PE、PU 和 PPC 生物膜样本中 Nitrospirota 相对丰度分别为 0.44%、0.78%、1.17%和 1.13%,PU 和 PPC 生物膜样本中 Nitrospirota 相对丰度均高于其他生物膜样本。

4 种生物膜样本共检测到 290 类菌属,优势菌属主要包括 *norank\_f\_JG30-KF-CM45*、*Aquibacter*、分枝杆菌属(*Mycobacterium*)和 *Ruegeria*。亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)是常见的 AOB,具有降解氨和亚硝酸盐的功能;硝化球菌属(*Nitrococcus*)能够将亚硝酸盐转化为硝酸盐<sup>[23]</sup>。PU 样本中 *Nitrosomonas* 和 *Nitrococcus* 的相对丰度(1.39%和 0.68%)均高于其他样本。AOB 和 NOB 被认为是严格的好氧微生物,而 AOA 在缺氧环境中的分布取决于它们的耐受特性,由于 AOB 和 NOB 的氧亲和力常数分别为 0.3~0.5 mg/L 和 0.7~1.8 mg/L<sup>[24]</sup>,因此具有亲水性基团的多孔结构填料更适合世代周期较长的硝化细菌生长,进一步解释了生物滤器 R3 具有最强硝化能力的原因<sup>[25]</sup>。

整体而言,生物膜样本存在较为完整的脱氮微生物体系,但存在许多未分类且相对丰度较大的菌群,表明这些功能性菌群在维持水体氮平衡中同样发挥重要作用<sup>[26]</sup>。

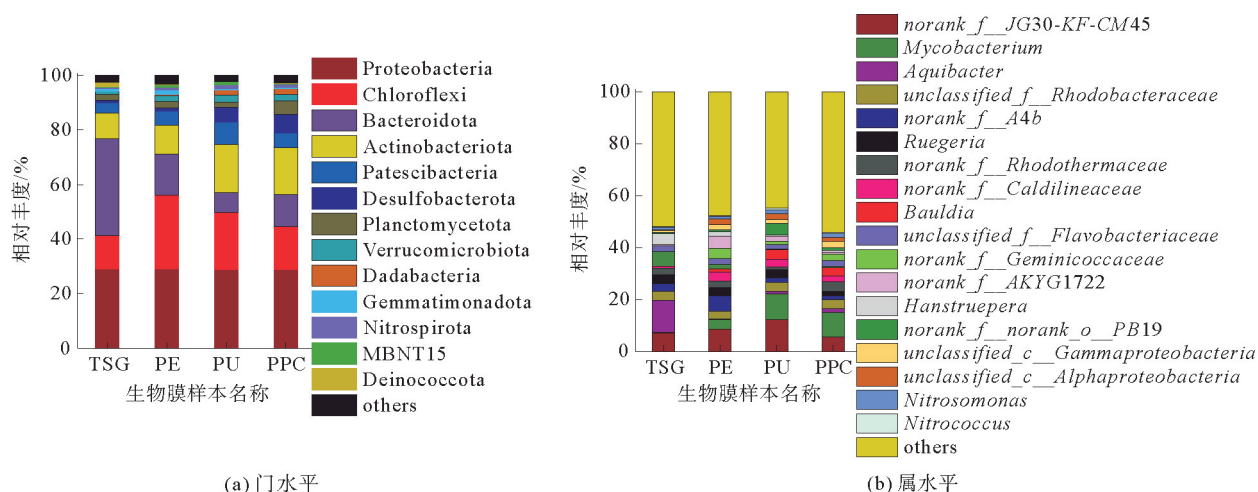


图 7 生物滤器生物膜样本细菌群落组成

### 3 结论

3 种预挂膜填料中 PPC 填料的平均氨氧化速率、平均亚硝酸盐氧化速率和 AGBS 高于其他生物滤器;底物浓度处于 0.5~100 mg/L 范围内,4 种生物滤器均具有良好的硝化能力,其中生物滤器 R1 的平均氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率最高。Monod 模型可较好地描述不同生物滤器底物浓度与去除速率之间的关系,生物滤器 R3 的氨和亚硝酸盐拟合曲线参数  $r_{max}$  值最大。

高通量测序结果表明,拟杆菌门是 TSG 填料生物膜样本的第一优势菌门,变形菌门是其他填料生物膜样本的第一优势菌门;PU 与 PPC 样本间细菌群落组成较为相似,TSG 样本与其他样本间细菌群落组成差异性较大。PU 样本细菌群落多样性和丰富度较高,与硝化功能相关的细菌门水平(Nitrospirota)和属水平(*Nitrosomonas* 和 *Nitrococcus*)的相对丰度高于其他填料样本。

### 参考文献(References):

- [1] TORNO J, NAAS C, SCHROEDER J P, et al. Impact of hydraulic retention time, backflushing intervals, and C/N ratio on the SID-reactor denitrification performance in marine RAS[J]. *Aquaculture*, 2018, 496: 112-122.
- [2] 董学兴, 吕林兰, 赵卫红, 等. 氨氮胁迫与恢复对罗氏沼虾幼虫非特异性免疫的影响[J]. *海洋渔业*, 2018, 40(6): 713-719.  
DONG Xuexing, LV Linlan, ZHAO Weihong, et al. Effects of ammonia-N stress and post-exposure recovery on nonspecific immunity of *Macrobrachium rosenbergii* juveniles[J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(6): 713-719.
- [3] DUTRA F M, FREIRE C A, VAZDOSSANTOS A M, et al. Acute toxicity of nitrite to various life stages of the Amazon River Prawn, *Macrobrachium amazonicum*, Heller, 1862. [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, 97: 619-625.
- [4] DUAN Y F, ZHANG J S, WANG Y, et al. Nitrite stress disrupts the structural integrity and induces oxidative stress response in the intestines of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Experimental Zoology Part A*, 2018, 329(1): 43-50.
- [5] BEMAN J M, SACHDEVA R, FUHRMAN J A. Population ecology of nitrifying archaea and bacteria in the Southern California Bight[J]. *Environmental Microbiology*, 2010, 12(5): 1282-1292.
- [6] 欧阳晶莹, 洪泽, 田野, 等. 氧化铁-多孔陶瓷复合填料在循环水养殖系统中微生物挂膜效率的影响研究[J]. *饲料研究*, 2023, 46(21): 71-75.  
OUYANG Jingying, HONG Ze, TIAN Ye, et al. Study on effect of iron oxide-porous ceramic combined carrier on efficiency of biofilm formation in recirculating aquaculture system[J]. *Feed Research*, 2023, 46(21): 71-75.
- [7] 闫坤朋. 基于不同填料的海水养殖系统水质净化研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.  
YAN Kunpeng. Study on water purification of marine aquaculture system based on different fillers[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [8] ZINADINI S, MASOUD R, FARAHANI M, et al. Fabrication of high-performance antibiofouling ultrafiltration membranes with potential application in membrane bioreactors (MBRs) comprising polyethersulfone (PES) and polycitrate-alumoxane (PC-A)[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 211: 618-627.
- [9] FAEKAH N I, FATIHAH S, MOHAMED Z S. Kinetic evaluation of a partially packed upflow anaerobic fixed film reactor treating

- low-strength synthetic rubber wastewater[J]. *Heliyon*,2020,167:235-241.
- [10] TANG C,SUN P,YANG J, et al. Kinetics simulation of Cu and Cd removal and the microbial community adaptation in a periphytic biofilm reactor[J]. *Bioresource Technology*,2019,276:199-203.
- [11] SHI W,TIAN Z,WANG Y, et al. Effects of biocarrier type and size on the performance of nitrification and simultaneous nitrification and denitrification[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*,2023,11(3):110000.
- [12] PLATTES M,LAHORE H M F. Perspectives on the Monod model in biological wastewater treatment[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*,2023,98(4):833-837.
- [13] LIU T,LI Q,WU N, et al. Enhancing the formation of simultaneous nitrification and denitrification (SND) biofilm and nitrogen removal performance using two-units IFFAS process filled with surface-modified carriers[J]. *Biochemical Engineering Journal*,2022,179: 108316.
- [14] SHI J X,WANG J,WAN N, et al. Treatment of phenols and  $\text{NH}_3\text{-N}$  with activated carbon and polyurethane carrier in biological enrichment reactor[J]. *Journal of Cleaner Production*,2022,369:133251.
- [15] BHATTACHARYA R,MAZUMDER D. Evaluation of nitrification kinetics for treating ammonium nitrogen enriched wastewater in moving bed hybrid bioreactor[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*,2021,9(1):104589.
- [16] KOWALSKI M S,DEVLIN T R,BIASE A D, et al. Controlling cold temperature partial nitrification in moving bed biofilm reactor[J]. *Chemosphere*,2019,227:216-224.
- [17] LI H Y,ZHANG Y,YANG M, et al. Effects of hydraulic retention time on nitrification activities and population dynamics of a conventional activated sludge system[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*,2013,7(1):43-48.
- [18] ZHU L,YUAN H Z,SHI Z, et al. Metagenomic insights into the effects of various biocarriers on moving bed biofilm reactors for municipal wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*,2022,813:151904.
- [19] ZHANG Y K,WANG S Y,GU S B, et al. The combined effects of biomass and temperature on maximum specific ammonia oxidation rate in domestic wastewater treatment[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*,2021,15(6):123-134.
- [20] 周利,王茂伟,高静思,等. 氮、磷浓度对伪鱼腥藻生长及光合生理的影响[J]. *环境工程*,2020,38(11):110-116.  
ZHOU Li,WANG Maowei,GAO Jingsi, et al. Effects of nitrogen and phosphorus concentrations on growth and photosynthetic physiology of *Pseudanabaena* SP. [J]. *Environmental Engineering*,2020,38(11):110-116.
- [21] THOMAS W A,BOTT C B,REGMI P, et al. Evaluation of nitrification kinetics for a 2.0 MGD IFAS process demonstration[J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*,2009(15):2246-2265.
- [22] 谢晴帆,俞楠,张妮,等. 微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征[J]. *环境科学*,2023,44(7):3997-4005.  
XIE Qingfan,YU Nan,ZHANG Ni, et al. Change in granulation potential and microbial enrichment characteristics of sludge induced by microplastics[J]. *Environmental Science*,2023,44(7):3997-4005.
- [23] 李青,成小英. 不同填料生物反应器中脱氮微生物群落比较分析[J]. *安全与环境学报*,2017,17(6):2360-2365.  
LI Qing,CHENG Xiaoying. Discriminative analysis of denitrifying microbial communities in bioreactors with different materials as biofilm carriers[J]. *Journal of Safety and Environment*,2017,17(6):2360-2365.
- [24] GUIASOLA A,JUBANY I,BAEZA J A, et al. Respirometric estimation of the oxygen affinity constants for biological ammonium and nitrite oxidation[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*,2005,80:388-396.
- [25] 陈小红,郑惠东,仇登高,等. 基于高通量测序的不同填料生物滤池细菌群落结构分析[J]. *海洋环境科学*,2023,42(4):550-557.  
CHEN Xiaohong,ZHENG Huidong,QIU Denggao, et al. Analysis of bacterial community structure in biofilters with different fillers using high-throughput sequencing[J]. *Marine Environmental Science*,2023,42(4):550-557.
- [26] 李倩,胡廷尖,辛建美,等. 应用 16S rRNA 基因文库技术分析 3 种生物填料上生物膜的细菌群落组成[J]. *大连海洋大学学报*,2016,31(4):384-389.  
LI Qian,HU Tingjian,XIN Jianmei, et al. Analysis of bacterial community compositions in three biological filter media by 16S rRNA gene library[J]. *Journal of Dalian Ocean University*,2016,31(4):384-389.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)