

文章编号: 1000-5641(2019)06-0115-08

新型悬浮填料强化硝化作用试验研究

黄民生^{1,2}, 杨银川^{1,2}, 崔贺^{1,2}, 杨乐^{1,2}, 何岩^{1,2}, 曹承进^{1,2}

(1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241;

2. 华东师范大学 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

摘要: 提出了一种包裹沸石粉与硝化细菌的新型悬浮填料, 用于城镇污水厂的强化硝化模拟试验研究, 并根据有无沸石粉和硝化细菌设计出3组试验装置. 通过监测3组试验装置进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度变化情况评价新型悬浮填料的强化硝化性能, 并结合新型悬浮填料生物膜中的微生物群落多样性来解析其硝化机理. 结果表明: 相比仅包裹沸石粉或硝化细菌的单一悬浮填料, 同时包裹沸石粉和硝化细菌的复合悬浮填料在试验装置中对水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率最高 (68.3%), 且 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均浓度最低 (12.62 mg/L)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均浓度最高 (7.81 mg/L), 表明沸石粉和硝化细菌的组合能够明显提升填料的硝化性能, 且沸石粉对微生物的硝化过程可能具有促进作用; 新型悬浮填料中沸石粉的加入更有利于硝化相关菌属的富集和生长, 从而造成微生物物种多样性的降低; 用于强化硝化的新型悬浮填料的生物膜中的 *Nitrosomonas* 菌属占绝对优势, 从而为体系中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化提供有力保障, 而填料中沸石粉的引入能够进一步促进 *Nitrospira* 菌属比例的提高, 从而减少体系中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累的可能性. 本研究旨在为该填料的工程化应用提供依据和参数.

关键词: 污水处理厂; 悬浮填料; 强化硝化; 沸石粉

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2019.06.011

Experimental study on a new type of suspended filler for enhanced nitrification

HUANG Min-sheng^{1,2}, YANG Yin-chuan^{1,2}, CUI He^{1,2}, YANG Le^{1,2},
HE Yan^{1,2}, CAO Cheng-jin^{1,2}

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: A new type of suspended filler containing zeolite powder and nitrifying bacteria was proposed in this study. The new filler was used in an enhanced nitrification model experiment of wastewater treatment plant (WWTP), in which three devices were designed with combinations of zeolite powder and nitrifying bacteria. The nitrification performance of the new suspended fillers were evaluated by monitoring changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$,

收稿日期: 2018-07-18

第一作者: 黄民生, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水环境治理与修复.

E-mail: mshuang@des.ecnu.edu.cn.

NO_2^- -N and NO_3^- -N concentration in the three devices. The microbial community structure and diversity in the biofilm of the fillers, furthermore, were analyzed to reveal the nitrification mechanism. The results showed that compared with a single suspension filler containing only zeolite powder or nitrifying bacteria, the composite suspension filler containing zeolite powder and nitrifying bacteria had the highest average removal rate of NH_4^+ -N (68.3%), the lowest average concentration of NO_2^- -N (12.62 mg/L), and the highest average concentration of NO_3^- -N (7.81 mg/L). Hence, the study demonstrated that the combination of zeolite powder and nitrifying bacteria can significantly improve the nitrification performance of the filler, and zeolite powder may promote the microbial nitrification process. The addition of zeolite powder in the new suspended filler was more conducive to the enrichment and growth of nitrifying bacteria, resulting in the decrease of microbial species diversity. The *Nitrosomonas* genus in the biofilm of the new suspension filler for enhanced nitrification has an advantage, which provides a strong guarantee for the conversion of NH_4^+ -N in the system. The introduction of zeolite powder in the filler can further promote an increase in the proportion of the *Nitrospira* genus, thereby reducing the possibility of NO_2^- -N accumulation in the system. The purpose of this study was to improve the basis and parameters for the engineering application of new types of suspended fillers.

Keywords: wastewater treatment plant (WWTP); suspended filler; enhanced nitrification; zeolite powder

0 引 言

城镇污水处理厂硝化效率的提升是目前研究的热点问题^[1]. 参与硝化作用的微生物类群(硝化细菌)是一类化能自养型细菌, 因其具有能量利用率低、增殖缓慢、生长易受环境影响等特点导致硝化效率提升难度大^[2-3]. 据报道, 通过对 2013 年全国 11 座城市 122 家污水处理厂尾水监测发现, 约 1/6 的污水厂尾水氨氮(NH_4^+ -N)浓度未能满足城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918—2002)的一级 A 排放标准^[4]. 由此可见, 亟需强化现有城镇污水处理厂生物处理工艺的硝化作用.

目前, 污水厂强化硝化的主要方式有优化反应器运行参数(溶解氧、污泥龄等)、接种更高效的硝化细菌和提高微生物浓度等^[5]. 但相关研究表明, 当反应器中溶解氧达到一定浓度后, 其提升效果并不明显^[6]; 增加污泥龄需要增大相应构筑物的容积, 不利于已有污水厂的升级改造^[7]; 而在反应器外部单独培养的硝化细菌并不一定能很快适应污水处理系统环境, 所以接种更高效的硝化细菌也不易达到强化硝化的目的^[8]. 相比上述几种强化硝化方式, 在反应器中添加填料或其他固定化方式, 可以增加硝化细菌的浓度, 从而提升污水处理的硝化效率^[9]. 已有研究表明, 沸石粉在生物脱氮处理工艺中既可作为生物膜载体, 又对水体中的氨氮(NH_4^+ -N)有良好的吸附作用^[10], 但将沸石粉和悬浮填料、硝化细菌结合进行强化硝化的研究目前还鲜见报道.

鉴于此, 本研究提出了一种包裹沸石粉与硝化细菌的新型悬浮填料, 用于城镇污水厂的强化硝化模拟试验研究, 并根据填料有无沸石粉和硝化细菌的组合设计出 3 组试验装置. 通过监测 3 组试验装置进出水氨氮(NH_4^+ -N)、亚硝氮(NO_2^- -N)和硝氮(NO_3^- -N)的浓度变化情况评价新型悬浮填料的强化硝化性能, 并结合新型悬浮填料生物膜中的微生物群落多样性

解析其强化硝化机理, 以期为该填料的工程化应用提供依据和参数.

1 材料与方 法

1.1 试验装置及运行参数

本试验于 2015 年 7 月 8 日—8 月 25 日在实验室进行. 试验装置 (见图 1) 均由 PVC 板焊接而成, 尺寸均为 80 cm × 30 cm × 40 cm, 前半部分曝气区有效容积为 50 L, 后半部分为沉淀区. 试验采取蠕动泵连续进水, 溢流水, 由加热棒调节反应器温度, 由小型曝气泵维持溶解氧 (DO) 浓度. 根据新型悬浮填料有无沸石和硝化细菌的组合设计出 3 组试验装置 (见图 1), 各装置均在 HRT 为 12 h、曝气量 1.5 L/min (维持 DO 浓度 > 2.0 mg/L) 和水温 20~30 °C 的条件下连续运行. 各装置填料参数见表 1.

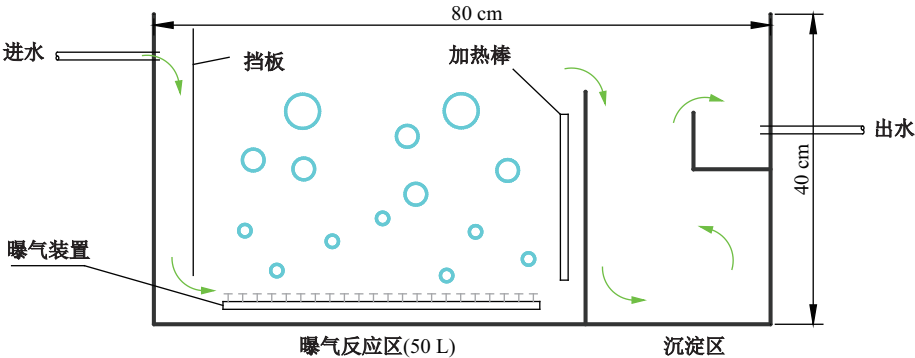


图 1 悬浮填料强化硝化实验装置

Fig. 1 Experimental device for enhanced nitrification of suspended fillers

表 1 悬浮填料强化硝化实验各装置运行参数

Tab. 1 Operating parameters of various devices for enhanced nitrification

编号	装置内填料组成
装置 1	悬浮填料包裹 100 g 沸石粉和 4 L 硝化细菌混合液, 填料填充率 20%
装置 2	悬浮填料包裹 100 g 沸石粉, 填料填充率 20%
装置 3	悬浮填料包裹 4 L 硝化细菌混合液, 填料填充率 20%

注: 本次试验装置中填充率为 20% 时, 悬浮填料数量为 25 只

本次试验所用硝化污泥取自上海市天山污水厂二沉池, 硝化细菌经富集培养 (配方见表 2) 后转移至有效容积为 120 L 的大型培养装置内扩培^[11]. 本试验中新型悬浮填料的制作方法为: 将大块无纺布裁剪成 6 cm × 10 cm 的小块, 将小块无纺布沿窄边卷起成圆柱状, 用尼龙扎带两端扎实形成卷式柱状填充物. 该悬浮填料接种硝化细菌的方法为: 以 0.5 cm 厚无纺布材料为滤布, 利用真空抽滤装置对硝化细菌混合液 (加入沸石粉) 进行过滤, 使富集培养污泥与沸石粉的混合物截留于无纺布中, 继而按照悬浮填料的制作方法完成后续步骤. 在悬浮填料中加入沸石粉 (材质为天然斜发沸石粉) 的方法为: 将一定质量的沸石粉均匀抛洒在 0.5 cm 厚无纺布表面, 然后重复悬浮填料的制作方法完成后续步骤.

实验开始阶段, 分别在各装置内加入 2 L 硝化细菌混合液, 加速装置内填料的挂膜. 其中硝化细菌混合液 MLSS 为 62.8 mg/L. 试验进水为人工配水, NH₄⁺-N 浓度为 47.20~56.30 mg/L, NO₃⁻-N 浓度为 0.79~1.70 mg/L, NO₂⁻-N 浓度为 0.30~0.93 mg/L.

表 2 硝化细菌富集培养基基本配方

NaCl/g	FeSO ₄ ·7H ₂ O/g	KCl/g	MgSO ₄ ·7H ₂ O/g	Na ₃ PO ₄ /g
0.100	0.100	0.050	0.050	2.300
MnSO ₄ ·7H ₂ O/g	CaCl ₂ /g	Na ₂ CO ₃ /g	NH ₄ CO ₃ /g	H ₂ O/L
0.167	0.062	23.420	20.000	50.0

1.2 指标检测与数据分析

试验运行期间, 对 3 个装置的出水进行采样 (采样周期为 24 h), 采集水样 (约 1 L) 后, 装入黑色采样瓶并立即检测, 如需隔夜放置, 则应放置于 4 °C 冷藏箱. 水样的 NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法; NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法; NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法; 具体分析方法参照文献[12]. 无特别说明外, 所有试剂均为分析纯, 实验用水为新鲜去离子水, 在测定过程中设置空白样与平行样, 保证实验数据的可靠性.

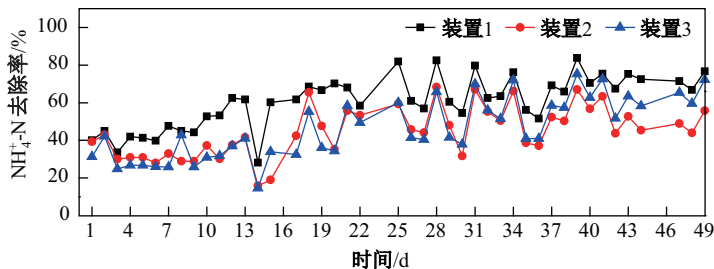
在试验系统运行结束后, 对装置 1、装置 2 和装置 3 中的悬浮填料生物膜样品进行采集和微生物高通量测序.

本研究涉及到的数据采用 Microsoft Excel 2007、SPSS 22 和 Origin 2016 等软件处理.

2 结果与讨论

2.1 NH₄⁺-N 去除效果分析

本研究的 3 组试验装置从 2015 年 7 月 8 日运行至 8 月 25 日, 共计 49 d. 由图 2 可知, 各装置对 NH₄⁺-N 的去除率整体均呈现先增加后趋于平稳的趋势, 主要原因是试验初期硝化细菌处于适应阶段, 生长较缓慢, 随着运行时间的推移, 填料生物膜日趋成熟, 系统对污水的硝化性能也逐渐趋于稳定. 运行期间装置 1、装置 2 和装置 3 的平均 NH₄⁺-N 去除率分别为 68.3%、51.1% 和 55.3%. 装置 1 对 NH₄⁺-N 的去除率在系统整个运行期间均高于装置 2 和 3, 其原因主要是装置 1 的悬浮填料中沸石粉对 NH₄⁺-N 的吸附作用与硝化细菌的硝化作用共同促进了水体中 NH₄⁺-N 的去除及转化^[13]. 装置 2 对 NH₄⁺-N 的去除率小于装置 1, 推测原因是装置 2 的悬浮填料未接种硝化细菌, 自然挂膜条件下硝化细菌难以成为微生物群落中优势菌种, 继而限制了该填料对水体中 NH₄⁺-N 的去除性能. 装置 3 对 NH₄⁺-N 的去除率小于装置 1, 推测原因是该装置的填料中缺乏沸石对 NH₄⁺-N 的吸附, 导致硝化反应底物不足, 反应效率未达到最优^[14]. 运行前期装置 2 对 NH₄⁺-N 的去除效果整体好于装置 3, 但是随着运行时间的推移 (28 d 后), 装置 3 对 NH₄⁺-N 的去除率逐渐高于装置 2, 主要原因是装置 2 的填料中沸石粉对 NH₄⁺-N 的吸附在试验后期趋于饱和. 装置 3 的填料仅接种了硝化细菌, 因此其对 NH₄⁺-N 的去除主要依靠硝化细菌对 NH₄⁺-N 的转化作用, 随着运行时间推移, 其填料生物膜中的硝化细菌逐渐成为优势菌种, 致使其对 NH₄⁺-N 的去除率呈现由小变大且逐步稳定的趋势.

图 2 装置 1—3 NH₄⁺-N 去除率变化情况Fig. 2 Change in removal rate of NH₄⁺-N in the three devices

2.2 NO_2^- -N 浓度变化情况分析

由图3可以看出, 系统运行前期, NO_2^- -N 积累量整体较小, 其原因可能是试验初期亚硝酸菌生长缓慢导致 NH_4^+ -N 转化为 NO_2^- -N 受阻. 运行期间装置1至3的平均 NO_2^- -N 浓度分别为 12.62 mg/L、17.1 mg/L 和 16.89 mg/L. 运行前期, 3 个装置间并无明显差异, 至 21 d 后装置1中的 NO_2^- -N 浓度逐渐低于装置2和3, 表明装置1更有利于硝化作用的进行, 主要原因可能是填料中沸石粉为硝酸细菌提供了有利生长环境, 使填料内部硝酸细菌维持较高密度, 提高了 NO_2^- -N 转化为 NO_3^- -N 的能力, 降低了该装置中的 NO_2^- -N 积累率^[15]. 装置2中 NO_2^- -N 浓度高于装置1, 主要原因是悬浮填料未接种硝化细菌, 且填料卷式柱状结构并不利于硝酸细菌在填料内部的迁移, 而装置3中 NO_2^- -N 浓度高于装置1, 可能是由于该装置中无沸石粉填料, 不利于硝酸细菌附着生长. NO_2^- -N 累积情况不同主要由填料结构及其内部组成的差异造成, 填料组成与结构可以有效地改变亚硝酸细菌和硝酸细菌生长微环境, 进而影响其组成比例, 造成装置间 NO_2^- -N 浓度的差异.

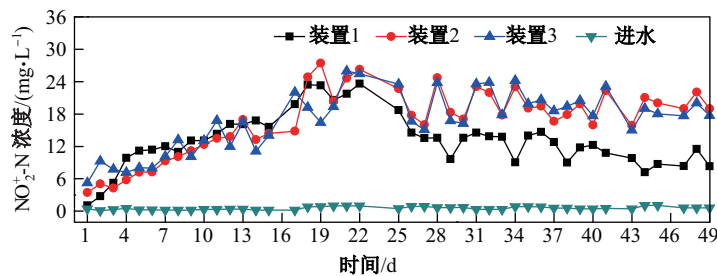


图3 装置1—3 NO_2^- -N 浓度变化情况

Fig. 3 Change of NO_2^- -N concentration in the three devices

2.3 NO_3^- -N 浓度变化情况分析

从图4可以看出, 装置1—3的平均 NO_3^- -N 浓度分别为 7.81 mg/L、4.82 mg/L、4.80 mg/L, 进水平均浓度为 1.31 mg/L. 总体而言, 装置的进水 NO_3^- -N 浓度较为稳定, 3 个装置出水的 NO_3^- -N 浓度在试验运行前期及中期波动较大, 试验运行后期均趋于平稳. 试验运行期间, 装置1、2和3中的 NO_3^- -N 浓度均明显高于进水, 表明3个装置均发生了微生物硝化作用. 除第4天外, 装置1的 NO_3^- -N 浓度均高于装置2和装置3, 说明其硝化效果最佳, 可能因为该装置的填料中沸石对微生物的硝化过程具有促进作用^[13], 推测填料中的沸石可以为硝化细菌提供生长场所, 而且沸石对 NH_4^+ -N 的吸附可以为硝化反应提供充足的底物, 导致装置1中 NO_3^- -N 浓度高于其他装置.

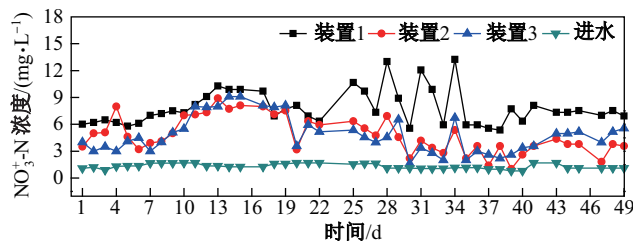


图4 装置1—3以及进水 NO_3^- -N 浓度变化情况

Fig. 4 Change of NO_3^- -N concentration in the three devices

综上所述, 装置1硝化效果最好, 其原因可能是采用“沸石粉-硝化细菌”新型悬浮填料对污水进行强化硝化过程中, 沸石粉自身吸附 NH_4^+ -N, 并可为硝化相关菌种提供生长载体, 从而更有

利于其表面生物膜上硝化反应的发生. 以下将通过微生物群落及多样性解析进一步佐证上述结果与分析情况.

2.4 微生物群落结构及其多样性

在实验系统运行结束后, 对3个装置中悬浮填料的生物膜样品进行采集和高通量测序, 得出试验运行后期装置填料中微生物的群落结构及其多样性, 从而解析填料对污水强化硝化的微生物作用机制.

2.4.1 微生物群落多样性

对装置1、装置2及装置3中的填料生物膜样本进行高通量测序, 共得到111 120条优质序列, 并以97%相似度划分, 共得到11 990个OTU分类单元. 样品文库的覆盖率(Coverage)大于90%, 说明测序结果能够较准确地反映样品生物特性.

Shannon和Simpson指数用来反应物种的多样性, Shannon指数越高, Simpson指数越小表示其物种越丰富, ACE和Chao1指数用来反应物种丰度, 也是用来估计OTUs数目的指数^[16]. 结果表明, 3个生物膜样品中的Shannon指数大小排序为样品2 < 样品1 < 样品3, 对应地, Simpson指数大小排序为样品2 > 样品1 > 样品3. 说明, 样品3的微生物多样性最高, 其次是样品2, 样品1最低. 原因可能是装置1的填料中沸石粉的加入更有利于个别单一菌属的富集和生长, 从而造成微生物物种多样性的降低^[17]. 样品2的填料只加入了沸石粉, 而没有接种硝化细菌菌液, 所以其物种多样性较小的原因可能是自然挂膜条件下填料生物膜生长缓慢, 不利于微生物的富集和生长所致. 而装置3的填料只接种了菌液, 未加入沸石粉, 该环境可能更加有利于多种微生物的生长, 从而导致其微生物多样性的提高. 生物膜样品的ACE和Chao1指数大小排序为样品2 < 样品1 < 样品3, 与Shannon指数的大小排序一致, 表明本研究的强化硝化系统中微生物的物种多样性与物种丰度呈大小一致的趋势. 通常, 对于相似体系的微生物群落而言其物种多样性与物种丰度成正比.

2.4.2 微生物群落结构

为了揭示试验装置生物膜样品中的微生物菌群结构, 将97%相似水平的OTU代表序列在属水平上进行分类统计(见图5). 分析发现在该反应器系统中*Nitrosomonas*菌属(亚硝化单胞菌属)、*Candidatus_Brocadia*菌属以及*Nitrospira*菌属(硝化螺旋菌属)为主要优势菌属.*Nitrosomonas*菌属(亚硝化单胞菌属)在装置1—3中所占的比例分别为13.2%、4.1%和21.9%, 该菌属可在好氧条件下将水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ^[18]. *Candidatus_Brocadia*菌属在装置1—3中的占比分别为6.3%、4.0%和7.9%, 该菌属是浮霉菌目下属的一个菌属, 浮霉菌目下属的细菌一般都是专性好氧菌^[19], 这从侧面反映出填料上的微生物均处于有利于硝化作用的好氧环境中. *Nitrospira*菌属(硝化螺旋菌属)在装置1—3中的占比分别为16.3%、1.7%和3.5%, 该菌属可在好氧条件下将水体中的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[20].

以上结果表明, 装置1的填料中沸石粉的引入促进了生物膜中*Nitrospira*菌属的比例, *Nitrospira*菌属能够将水体中*Nitrosomonas*菌属代谢生成的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 及时转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 因而装置1中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的积累率最低. 装置2因在试验启动时未在填料中接种硝化细菌菌液, 因而其填料生物膜中的*Nitrospira*菌属及*Nitrosomonas*菌属的比例均较少, 这也是装置2的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较低的原因. 装置3的填料中硝化相关菌属主要是*Nitrosomonas*菌属, 而*Nitrospira*菌属的比例较少, 因而该填料中的微生物将水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 之后, 难以将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 进一步转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 这也解释了为何装置3在 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累率高于装置1.

综上, 用于强化脱氮的新型悬浮填料在接种硝化细菌菌液后, 填料生物膜中的*Nitrosomonas*菌属占优势, 从而为体系中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化提供有力保障, 而填料中沸石粉

的引入能够进一步促进 *Nitrospira* 菌属比例的提高,从而减少体系中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 积累的可能性.

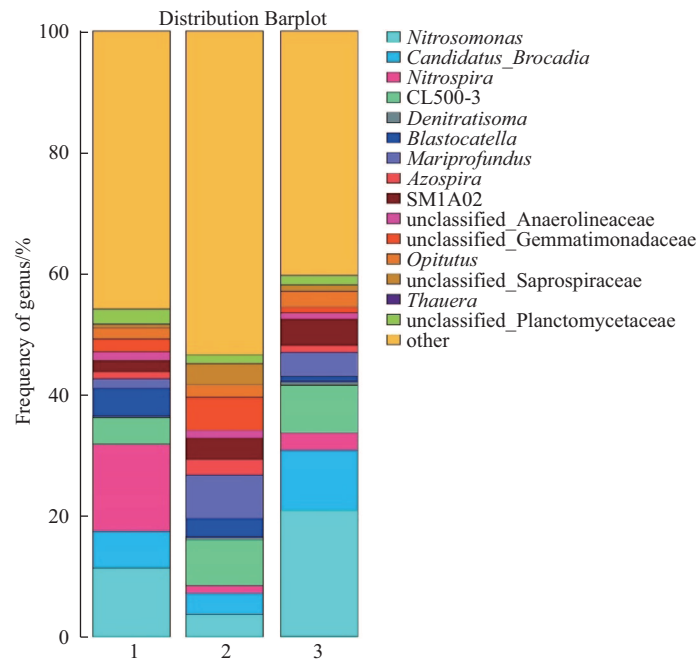


图5 试验装置填料生物膜样本在属水平面上的群落组成

Fig. 5 Bacterial community composition at the genus level of the filler biofilm sample used in the experiment

3 结 论

(1) 通过监测3组试验装置进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度变化情况可知, 相比仅包裹沸石粉或硝化细菌的单一悬浮填料, 包裹了沸石粉和硝化细菌的复合悬浮填料在试验装置中对水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率最高 (平均68.3%), $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度最低 (平均12.62 mg/L)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度最高 (平均7.81 mg/L), 表明沸石粉和硝化细菌的组合能够明显提升新型悬浮填料的硝化性能, 且沸石粉对微生物的硝化过程可能具有促进作用.

(2) 通过对填料生物膜样品的微生物群落多样性分析可知, 新型悬浮填料中沸石粉的加入更有利于硝化相关菌属的富集和生长, 而造成微生物物种多样性的降低, 至于其形成机理还有待于进一步研究.

(3) 用于强化硝化的新型悬浮填料的生物膜中的 *Nitrosomonas* 菌属占绝对优势, 从而为体系中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化提供有力保障; 而填料中沸石粉的引入能够进一步促进 *Nitrospira* 菌属比例的提高, 从而减少体系中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 积累的可能性.

[参 考 文 献]

- [1] 周振, 唐建国, 张爱平, 等. 城镇污水处理厂强化硝化技术现状分析 [J]. 中国给水排水, 2013, 20: 5-8.
- [2] 刘秀红, 彭永臻, 马涛, 等. 硝化类型对污水脱氮过程中 N_2O 产生量的影响 [J]. 中国环境科学, 2007(5): 633-637.
- [3] 王小菊, 何春平, 王震, 等. 高效硝化细菌的筛选及特性研究 [J]. 中国环境科学, 2013(2): 286-292.
- [4] 赵银慧, 李莉娜, 景立新, 等. 污水处理厂氮排放特征 [J]. 中国环境监测, 2015(4): 58-61.
- [5] 魏继林, 彭党聪, 聂玲, 等. 硝化菌添加强化硝化实验研究 [J]. 水处理技术, 2014(7): 111-115.

- [6] GEMAEY K V, JJORGENSEN S B. Benchmarking combined biological phosphorus and nitrogen removal wastewater treatment processes [J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(3): 357-373.
- [7] 周海东, 刘勤亚, 张业健. 泥龄应用中有关问题的探讨 [J]. *污染防治技术*, 2003(2): 13-16.
- [8] BOUCHEZ T, PATUREAU D, DABERT P, et al. Ecological study of a bio augmentation failure [J]. *Environ Microbiol*, 2000(2): 179-190.
- [9] 刘少敏, 储磊, 朱敬林. 固定化硝化细菌去除生活污水中的氨氮 [J]. *环境工程学报*, 2014(10): 4261-4266.
- [10] 陈彬. 沸石强化生物脱氮工艺试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [11] 沈萍, 陈向东. 微生物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 李运林. 生物沸石填料去除城市污水厂二级出水中氨氮的试验研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [14] 刘富龙. 氨氮浓度对硝化反应影响的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [15] SVEHLA P, JENICEK P, HABART J, et al. Use of the accumulation of nitrite in biological treatment of waste water [J]. *Chemicke Listy*, 2009, 103(3): 255.
- [16] CHEN Y, ZHAO Z, PENG Y, et al. Performance of a full-scale modified anaerobic/anoxic/oxic process: High-throughput sequence analysis of its microbial structures and their community functions [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 220: 225-232.
- [17] 魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 等. 表流湿地细菌群落结构特征 [J]. *环境科学*. 2016(11): 4357-4365.
- [18] GUNDERSEN K. Preservation of nitrosomonas [J]. *Nature*, 1957, 179(4563): 789.
- [19] MANORU OSHIKI, KAORI SHINYAKO-HATA, HISASHI SATOH, et al. Draft genome sequence of an anaerobic ammonium-oxidizing bacterium, "*Candidatus Brocadia sinica*" [J]. *Genome Announcements*, 2015, 3(2): 1-2.
- [20] DAIMS H, WAGNER M. Nitrospira [J]. *Trends in Microbiology*, 2018, 26(5): 462-463.

(责任编辑: 张 晶)