

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.03.012

生物接触氧化工艺处理微污染河水脱氮性能与机制

孙广垠¹, 吉钱隆¹, 郭新宇², 窦 淇¹, 李昊伟¹, 张倬玮¹

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 内蒙古大学 生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘 要: 采用自制河流模拟系统,对比了聚氨酯和聚乙烯组合填料生物接触氧化法在改性前后对污染物的去除效果。相比改性前,改性后系统启动挂膜时间由20 d缩短至13 d。系统长期稳定运行结果表明,在填充比为50%和溶解氧(DO)浓度为4 mg/L的条件下,系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、COD的去除率分别提高了10.08%、9.89%、36.93%和17.84%。污染物去除率的提升归因于微生物群落的变化和功能菌群的富集。基于高通量测序技术的生物膜群落分析结果表明,相比改性前,组合改性填料的微生物多样性Ace、Chao和Shannon指数明显升高。变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)和硝化螺旋菌门(Nitrospirae)等成为优势菌门。改性生物膜功能菌群如氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂-oxidizing bacteria)丰度比改性前分别提升了78.7%和36.5%。

关键词: 生物接触氧化; 微污染河水; 改性组合填料; 脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)03-0078-07

Nitrogen Removal Performance and Mechanisms of Biological Contact Oxidation Process for Treating Micro-polluted River Water

SUN Guangyin¹, JI Qianlong¹, GUO Xinyu², DOU Qi¹, LI Haowei¹,
ZHANG Zhuowei¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: A self-constructed river simulation system was employed to evaluate and compare the removal efficiency of pollutants using polyurethane and polyethylene composite packing media in a biological contact oxidation process before and after modification. Following the modification, the system's startup period for biofilm formation was reduced from 20 days to 13 days. During long-term operation, the system achieved enhanced removal efficiencies for $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, TP, and COD under conditions of a 50% filling ratio and dissolved oxygen (DO) concentration of 4 mg/L, with improvements of 10.08%, 9.89%, 36.93%, and 17.84%, respectively. The enhancement in pollutant removal efficiency could be attributed to shifts in microbial community composition and the enrichment of functional microbial populations. The analysis results of biofilm communities based on high-throughput sequencing technology indicated that the microbial diversity indices including Ace, Chao, and Shannon of the composite packing media were

通信作者: 张倬玮 E-mail: zhangzw9292@163.com

significantly increased compared with the pre-modification state. The phyla Proteobacteria, Firmicutes, Bacteroidetes, and Nitrospirae, ect. emerged as the dominant bacterial groups. The abundance of functional bacteria in the modified biofilms, including ammonia-oxidizing bacteria (AOB) and nitrite-oxidizing bacteria (NOB), increased by 78.7% and 36.5% relative to pre-modification levels.

Keywords: biological contact oxidation; micro-polluted river water; modified composite packing media; nitrogen and phosphorus removal

海河流域是华北平原重要水系,在水质净化、气候调节、生物多样性保护等方面具有重要作用。海河流域地表水国控断面劣V类水质断面占比较高,流域整体水质有待提高^[1]。因此,亟须研发河川绿色高效净化工艺,以优化水质、改善沿岸生态状况,并促进水资源的可持续合理利用。生物接触氧化法融合了生物滤池与活性污泥法的优势,将其用于处理微污染河水时,生物膜填料载体对处理效果具有较大影响。聚乙烯与聚丙烯作为填料的载体被广泛应用于水处理工艺。然而,当前技术挑战的核心在于:如何通过针对性改性方法提升填料的生物相容性、表面亲水性及氧传质效率,从而突破生物接触氧化系统对污染物去除效率低的瓶颈。

目前针对塑料载体介质表面的改性方式主要有聚合物共混、湿化学氧化、薄膜和聚合物接枝等方式^[2]。研究表明,通过聚合物接枝在聚乙烯上^[3]引入氨基官能团($-\text{NH}_2$)和聚乙烯乙二醇等长链聚合物以及制造改性载流子的聚合物弯曲是增加填料载流子表面正电荷或亲水性的有效方法。Mao等^[3]通过对环形聚乙烯填料进行多孔海绵材料表面包覆处理,调控涂层厚度与孔隙结构参数,可显著优化填料的亲水性及生物膜的附着能力,进而提升氮素污染物去除效率。欧日浩等^[4]对聚乙烯填料进行液相氧化和明胶接枝改性,改性后填料表面粗糙度增加,亲水性提高。然而相比于单一填料,组合填料凭借独特的多相分布结构实现了气液传质的动态优化,显著提升了氧转移效率。

笔者采用化学氧化-明胶蛋白接枝及化学氧化-铁离子覆盖两种方法分别对聚氨酯和聚乙烯填料进行改性并作为组合填料,重点探究该体系在生物接触氧化反应器中对受污染河道水体氮磷污染物的协同去除机制,解析微生物群落结构与代谢功能的响应规律,旨在为微污染河流的水质改善提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与运行

试验装置如图1所示。该系统主要由进水桶、生物接触池、曝气泵、蠕动泵、气体流量计等组成。所构建的模拟河道式生物接触氧化反应器为有机玻璃材质,其设计严格遵循天然河道的水力学相似准则。反应器长度为1 200 mm,反应区长度为1 000 mm,进水区和出水区均为100 mm,截面呈梯形,底端宽度为350 mm,顶端扩展至500 mm,有效水层深度为300 mm,并设有100 mm的超高部分,总体有效容积为108 L。

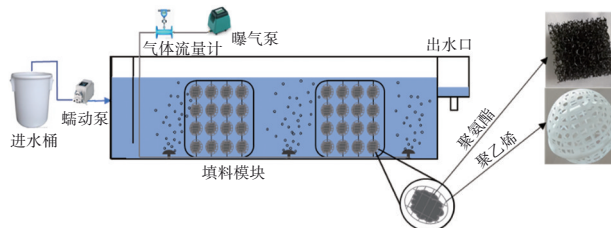


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

试验以河北省邯郸区域内的滏阳河为研究对象。邯郸地域属北温带大陆性季风气候,降雨一般集中在夏季和秋季,可达年降雨总量的近70%,具有春旱秋涝的北方河道代表性季节特点,全年有明显的平水期、丰水期和枯水期。试验中枯水期和丰水期主要根据该流域典型水文站1961年—2020年的逐月径流量资料来界定^[5],最终选择12月、1月、2月为枯水期,7月、8月、9月为丰水期,其余时间为平水期。高温期温度保持在27~30℃,低温期温度保持在3~5℃,水质指标与平水期一致。

试验用水为人工模拟微污染河水,成分包括乙酸钠(0.33~0.63 mmol/L)、亚硝酸钠(0.003 6~0.007 1 mmol/L)、硝酸钾(0.18~0.41 mmol/L)、氯化铵(0.13~0.26 mmol/L)、磷酸二氢钾(0.027~0.055 mmol/L)和碳酸氢钠(1.60 mmol/L)。系统启动期溶

解氧(DO)浓度为 4 mg/L,填充比为 50%,有机负荷(以 COD 计)为 0.001 7~0.001 8 kg/(m³·d)。河水及模拟试验河段平水期、丰水期和枯水期水质情况见表 1。

表 1 河水及模拟试验河段各阶段水质的变化

Tab.1 Variations in water quality characteristics of river water and river sections of simulated experiment at each stage

项 目		pH	COD/(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	水温/℃
平水期河水		6.5~7.5	21.15~38.32	1.86~3.58	4.68~9.25	0.86~1.62	25
模拟河水	平水期	6.5~7.5	30.00~32.00	2.50~2.70	6.70~7.00	1.20~1.40	25
	丰水期	6.5~7.5	20.00~25.00	1.80~2.00	4.43~4.98	0.85~0.94	25
	枯水期	6.5~7.5	35.00~40.00	3.20~3.70	9.00~9.50	1.60~1.70	25

注：采用 *t* 检验分析平水期实际河水与模拟河水 COD、NH₄⁺-N、TP、TN 的差异, *p* 值分别为 0.65、0.06、0.30、0.46。

接种污泥为邯郸市某污水处理厂 A²/O 工艺内回流污泥,污泥混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 为 5 000 mg/L,污泥沉降比为 25%。污泥接种前,用双层纱布过滤,并用超纯水反复淘洗直至将杂质完全去除。

前期试验以聚乙烯网球为外壳,纤维球、聚氨酯和海绵铁为填料内芯组合成填料,考察其对模拟微污染河水中污染物的去除效果。结果显示聚氨酯组合填料系统对 NH₄⁺-N、TN 和 COD 的去除率分别达到 85.3%、65.5%、60.8%,明显高于纤维球组合填料系统(75.0%、55.1%和 46.7%)和海绵铁组合填料系统(65.5%、52.8%和 51.6%)。因此,选择聚氨酯和聚乙烯组合填料并对其进行改性。聚氨酯泡沫材料通过高压喷涂发泡工艺制备而成。聚氨酯在发泡剂、阻燃剂和催化剂的协同作用下发生定向膨胀固化,最终形成具有三维网状结构的轻质多孔复合材料^[6],其内部疏松多孔,比表面积大,可为微生物提供更大的生长空间^[7]。聚氨酯填料的尺寸(长×宽×高)为 5 mm×3 mm×1 mm,密度为 1.65 g/cm³,孔隙率为 98%,比表面积为 3 800 m²/m³;聚乙烯网球规格为 Ø60 mm,质量为 14~15 g,相对密度为 0.93。将填充好的聚乙烯网球串联至钢丝上,每根钢丝所挂聚乙烯网球视为一组填料悬浮串。将相应数量的悬浮串做成模块,以模块化形式投加至生物接触氧化试验装置内。

试验装置采用闷曝排泥法启动,即将冲洗干净的活性污泥接种至反应器内,并加入试验配水至液位最高处。闷曝 24 h 后,模拟河水由底部连续泵入,溢流排出。通过检测进出水中 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 的浓度以及观察填料表面微生物附着生长情况判定装置是否启动成功。

1.2 填料改性方法

化学氧化-明胶蛋白接枝改性:将聚氨酯浸泡于 0.3 mol/L 的酸性 KMnO₄ 溶液(50 ℃)中,KMnO₄、H₂SO₄、H₂O 的体积比为 1:2:18,4 h 后用 6 mol/L 的 HCl 溶液冲洗表面,再用 0.01 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液(PBS)洗涤至中性,然后分别在 37 ℃ 的 5% 戊二醛溶液和 1 g/L 明胶蛋白溶液中浸泡 24 h,完成浸泡后用超纯水充分洗涤,自然晾干,备用。

化学氧化-铁离子覆盖改性:首先,采用上述聚氨酯的改性方法对聚乙烯网球进行化学氧化处理;然后,将处理好的聚乙烯网球浸泡于 0.1 mol/L 的 FeCl₃ 溶液中,在 25 ℃ 恒温条件下处理 1 h 后取出,放入鼓风干燥箱中 25 ℃ 气浴烘干至恒质量,确保 Fe³⁺ 成功负载到聚乙烯网球表面。

1.3 高通量测序

污泥 DNA 采用土壤基因组 DNA 提取试剂盒提取,提取 DNA 后使用微量分光光度计检查 DNA 的浓度和纯度,并评估 DNA 提取效果。引物 340F(CCTACGGGNBGCASCAG)和 805R(GACTACNVGGGTATCTAATCC)用于扩增 16S rRNA 基因的 V3-V4 区,并于 Illumina MiSeq 平台进行高通量测序。测序数据分别使用 Demux(5.4.5 版本)和 Cutadapt(5.1 版本)进行解码处理和引物切除。使用 Vsearch 对序列进行引物匹配、拼接、过滤和嵌合体去除。对上述获得的序列按 97% 的相似度进行归并,生成特征性序列可操作分类单元(OTU)和丰度数据表格。将 OTU 特征序列与 Greengenes 数据库中的参考序列进行比对,获取每个 OTU 所对应的分类学信息。使用 QIIME2(2025.4 版本)软件分别计算每个样本的 Coverage、Ace、Chao、Shannon 和 Simpson 等指数。同时,绘制韦恩图和相对丰度热图。

1.4 分析项目及方法

COD 采用快速消解分光光度法测定;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法测定;TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;TP 采用钼锑抗分光光度法测定;DO 采用溶解氧测定仪进行检测。

采用扫描电子显微镜(SEM)观察生物膜微观形貌。样品经 2.5% 戊二醛溶液固定后,使用磷酸盐缓冲液清洗三次,随后通过梯度浓度乙醇(50%→70%→80%→90%→100%)及乙酸异戊酯分阶段脱水(每级 10 min),脱水完成后在临界点干燥 2 h,最后进行表面喷金,在 SEM 下观察形貌特征。采用光学显微测量法检测生物膜厚度。

采用比表面孔径分析仪检测填料的比表面积,采用动态接触角测量仪检测填料动态接触角度数,采用 X 射线光电子能谱(XPS)分析填料表面基团,采用微电极检测填料表面附着的生物膜内部 DO。

2 结果与讨论

2.1 填料改性前后对污染物的去除效果

填料改性前后对污染物的去除效果如图 2 所示。改性前后系统分别运行 50 和 28 d,挂膜时间分别为 20 和 13 d。可以看出,改性后填料对各污染物的去除率比改性前均有所提高。相比改性前,改性后的填料系统在丰水期、枯水期、高温期和低温期的 NH₄⁺-N 去除率分别提高了 10.2%、15.9%、9.6% 和 12.5%,TN 去除率分别提高了 9.4%、12.5%、12.5% 和 6.2%,TP 去除率分别提高了 29.9%、30.5%、29.8% 和 30.3%,COD 去除率分别提高了 20.0%、13.8%、20.3% 和 19.4%。受低温影响,TN 去除率在低温期仅提升 6.2%。NH₄⁺-N、TP 和 COD 去除率提升效果不受水文条件的影响。

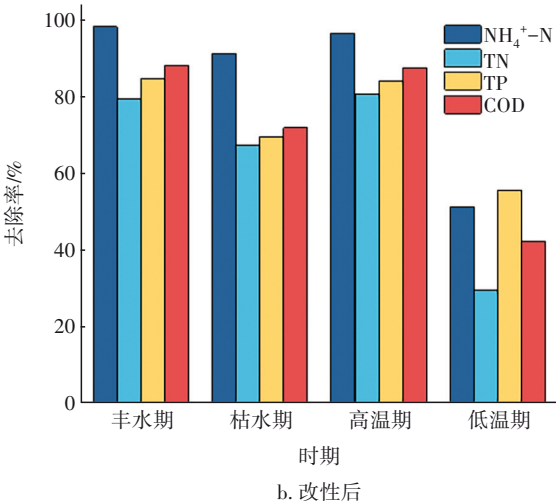
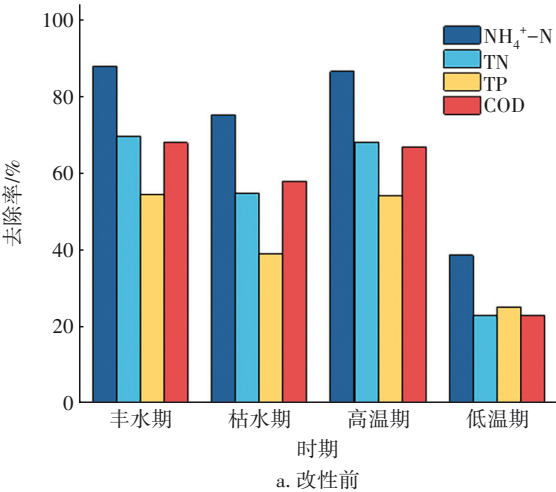


图2 填料改性前后对污染物的去除效果

Fig.2 Removal efficiency of pollutants by packing media before and after modification

2.2 填料改性前后的表面性质

填料改性前后的比表面积、亲水性(以接触角表征)和表面基团元素占比情况见表 2。

表2 填料改性前后比表面积、亲水性和表面基团元素占比情况

Tab.2 Specific surface area, hydrophilicity and elemental composition of surface functional groups of packing media before and after modification

项目	比表面积/ (m ² /g)	接触角/ (°)	表面基团元素占比/%				
			C	O	N	Cl	Fe
聚氨酯	0.384	74.26	84.6	14.0	1.4	—	—
聚乙烯	0.006	78.59	86.5	11.9	1.6	1.9	—
改性聚氨酯	0.445	56.18	76.4	18.4	3.3	—	—
改性聚乙烯	0.008	66.37	63.4	24.7	2.8	4.8	4.3

由表 2 可知,经过改性后聚氨酯比表面积较改性前提高了 15.89%,其动态接触角由改性前的 74.26°降至 56.18°,而聚乙烯的动态接触角也由改性前的 78.59°降至 66.37°,即改性后组合填料表面亲水性均明显提升。填料改性后,聚氨酯表面 C 元素占比较改性前降低了 8.2%,O、N 元素占比分别提高了 4.4% 和 1.9%。这表明聚氨酯表面被酸性高锰酸钾氧化后,结合了空气中的氧。明胶蛋白分子被接枝到填料表面,改变了填料表面 C、O 元素的占比。聚乙烯网球表面出现了 Fe 元素,说明 Fe 元素成功负载到了填料表面。

经 SEM 分析发现,聚氨酯改性后表面粗糙度增

加,骨架的连接处呈现明显凹凸状。聚乙烯改性后表面也变得较为粗糙且出现大量堆积物,这可能是负载的含铁化合物。

通过XPS图谱计算了不同填料样品中C键的占比,结果见表3。可以看出,改性聚氨酯填料C—C键和C—H键占比共下降了56.6%,而C—O键占比增加了52.3%、 $-(C=O)-NH$ 和 $-(C=O)-O-$ 占比增加了1.2%,并且出现了 $-(C=O)-OH$,表明改性后聚氨酯上负载了亲水基团,这使得表面亲水性得以提高,有利于微生物附着生长。此外,蛋白分子中富含的亲水基团经表面接枝引入填料后,显著提高了聚氨酯表层C—O键占比并提升了界面亲水性基团的密度。改性后聚乙烯网球填料C—C键和C—H键的占比共下降了24.7%,而C—O键占比增加了18.9%, $-(C=O)-NH$ 和 $-(C=O)-O-$ 的占比增加了5.9%。说明化学氧化—铁离子覆盖改性通过降低疏水基团占比和提高亲水基团占比在一定程度上提升了聚乙烯网球表面的亲水性。

表3 不同填料样品C键占比

Tab.3 Percentage of C bonds in each packing media sample %

项目	C—C键和C—H键	C—O键	$-(C=O)-NH$ 和 $-(C=O)-O-$	$-(C=O)-OH$
聚氨酯	80.2	11.4	8.4	—
改性聚氨酯	23.6	63.7	9.6	3.1
聚乙烯	81.4	10.9	7.7	—
改性聚乙烯	56.7	29.8	13.6	—

改性聚氨酯填料表层生物量较大,生物膜密实,微生物主要为丝状菌、球菌及杆菌,且丝状菌占据优势。内部生物量和种群结构呈现显著的分层分布特征:从生物膜表面至内部2 mm之间生物量较大,且以丝状菌为主,丝状菌不仅起到降解作用,还充当了载体外层生物膜的支架;内部2~3 mm的生物量显著减少,且以杆菌和球菌为主。分析原因,随着向内部的深入,DO和营养物质的传输受到一定限制,微生物在数量上较表面明显减少。

聚氨酯与聚乙烯组合填料可显著提升系统对 NH_4^+-N 、TN和COD的去除效果,这可能缘于填料表面性质的改变。当聚乙烯网球表面成功负载铁离子后,作为一种微量元素,铁离子可显著提升微生物的代谢活性;其次,聚氨酯经明胶接枝改性后,亲

水性得到提高,比表面积扩大,内部空间增加,填料纵深扩大,更易形成缺氧及厌氧环境,为反硝化菌等功能微生物的附着、生长与繁殖提供了有利条件^[8]。此外,通过在聚乙烯多孔载体表面负载金属铁,构建了铁-碳微电解反应体系。溶解的 Fe^{3+} 离子能够增强微生物代谢活性,其水解产物 $Fe(OH)_3$ 胶体可以通过絮凝作用强化固液分离,具有絮凝沉淀作用^[9],从而提高对COD的去除效果。

2.3 填料改性前后微生物群落结构特征

组合填料表面附着生物膜的群落多样性分析结果见表4。填料附着的生物膜Coverage指数均高于0.99,表明样品检测出的概率高,测序结果能够真实反映样品微生物的总体情况。改性后物种丰富度明显提高。首先,改性填料OTU、Ace、Chao和Shannon等指数均高于改性前的。这或许是因为组合填料改性后,其表面粗糙度增强、亲水基团及沟壑增多,提高了微生物的亲附性和可栖息性,进而强化了微生物的附着。

表4 微生物群落多样性指数

Tab.4 Microbial community diversity indices

项目	OTU	Coverage	Ace	Chao	Shannon	Simpson
聚氨酯	512	0.996	578	546	3.82	0.073
聚乙烯	478	0.995	522	537	4.21	0.044
改性聚氨酯	543	0.996	586	592	5.11	0.034
改性聚乙烯	501	0.995	581	563	4.71	0.037

图4为改性前后OTU共享韦恩图。聚氨酯填料改性前后附着微生物共享OTU为413种,改性后独有OTU为124种。聚乙烯填料改性前后附着微生物共享OTU为443种,改性后独有OTU为61种。

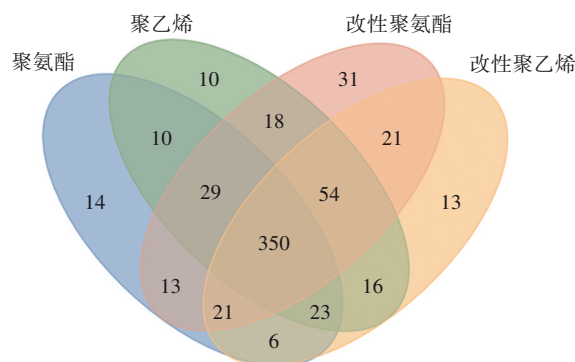


图3 改性前后OTU共享韦恩图

Fig.3 Venn diagram of shared OTU before and after modification groups

改性前后门水平微生物组成如图4所示。可知,改性组合填料共检测出26个菌门,优势菌门为变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、硝化螺旋菌门(Nitrospirae)和浮霉菌门(Planctomycetes)等。Proteobacteria在改性前后聚氨酯填料中的占比分别为69.70%和65.02%,在聚乙烯中的占比分别为65.20%和57.29%。聚氨酯填料中Bacteroidetes丰度由改性前的10.87%提高至14.27%,聚乙烯填料中Firmicutes丰度由改性前的6.73%提高至改性后的15.71%。

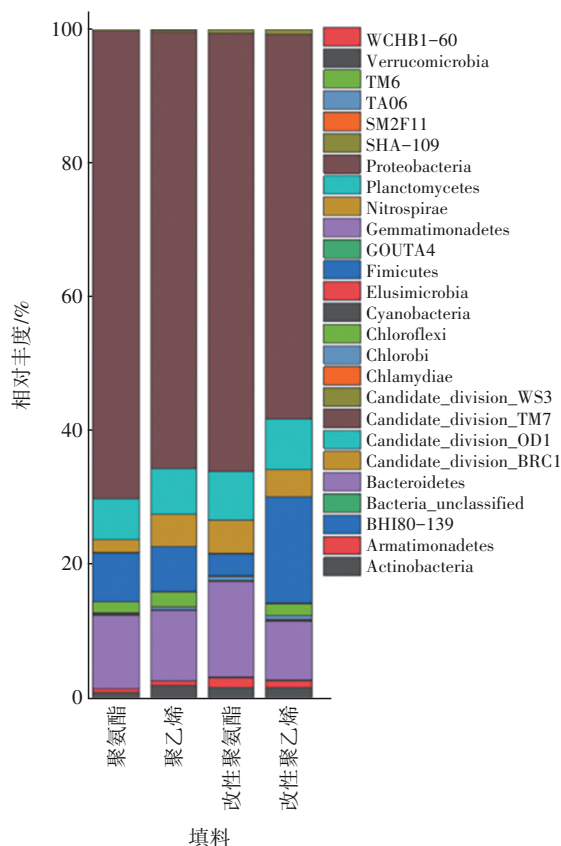


图4 改性前后门水平微生物组成

Fig.4 Microbial composition at phylum level before and after modification groups

改性前后功能菌属的变化如图5所示。可以看出,聚氨酯和聚乙烯两类填料样品在生物膜微生物组成分布上存在显著差异,其中优势菌属的丰度提升效果尤为突出。组合填料改性后,其表面生物膜中亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)的相对丰度由4.94%提高至8.83%,硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)由6.54%提高至8.93%。反硝化菌属丰度未见明显提升(如*Azoarcus*、*Thermomonas*、*Rhodobacter*、*Comamonadaceae*),

仅有芽孢杆菌属(*Bacillus*)从0.67%提高至1.44%。组合填料中硝化菌丰度较改性前显著提高,这可能得益于化学氧化-接枝改性工艺不仅增加了填料的比表面积与表面粗糙度,还优化了DO分布梯度,为世代周期较长的硝化菌提供了适宜的生长环境^[10]。Chen等^[11]发现,铁离子富集*Nitrospira*和反硝化功能菌属,强化了活性污泥同步硝化反硝化作用。Liu等^[12]研究发现,改性聚乙烯填料通过显著富集*Nitrosomonas*和*Nitrobacter*,提高了生物膜反应器处理城市污水的脱氮效率。

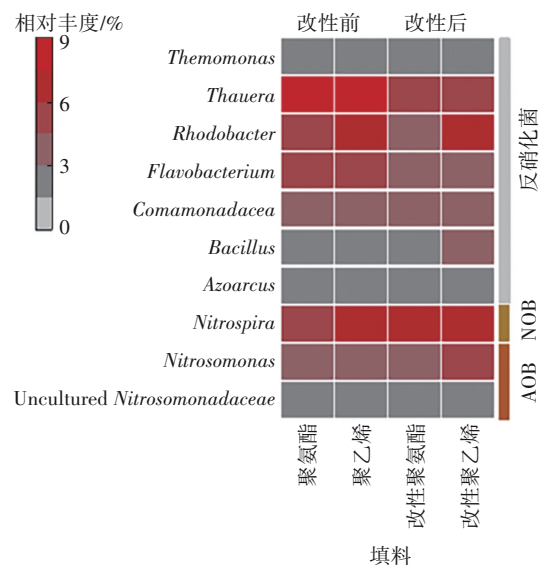


图5 改性前后功能菌属的变化

Fig.5 Variations in functional bacterial genera before and after modification groups

综上所述,从功能微生物菌群在组合填料改性前后的富集位置分布特征来看,AOB与NOB主要聚集于改性聚乙烯填料的表层区域。这类菌群具备的高效氨氧化代谢能力,能够为包裹于内部的改性聚氨酯填料表面NOB的硝化反应供给充足的底物。而NOB通过硝化作用产生的 NO_3^- ,则可作为电子受体被改性聚氨酯内部的反硝化菌利用,最终实现微污染河水中氮与有机物的高效去除。

3 结论

以聚氨酯和聚乙烯为组合填料,对比了填料改性前后构建的生物接触氧化系统对主要污染物的去除性能。改性后的组合填料生物接触氧化装置在运行28 d后,污染物去除率相比改性前提升了6.2%~30.5%。低温会影响TN的去除效果,而 NH_4^+-N 、TP和COD去除率的提升效果不受水文条件

的影响。改性组合填料对污染物去除率的提高可能是由于改性过程影响了填料的比表面积、亲水性和表面基团元素占比。改性后聚氨酯和聚乙烯表面O元素占比分别提高了4.4%和12.8%。此外,改性填料提高了微生物多样性,富集了与氮污染物去除相关的*Nitrosomonas*和*Nitrospira*菌属。

参考文献:

- [1] 冯爱萍,王雪蕾,徐逸,等. 基于DPeRS模型的海河流域面源污染潜在风险评估[J]. 环境科学, 2020, 41(10):4555-4563.
FENG A P, WANG X L, XU Y, et al. Assessment of potential risk of diffuse pollution in Haihe River basin based using DPeRS model[J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4555-4563 (in Chinese).
- [2] MORGAN-SAGASTUME F. Biofilm development, activity and the modification of carrier material surface properties in moving-bed biofilm reactors (MBBRs) for wastewater treatment [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2018, 48(5): 439-470.
- [3] MAO Y J, QUAN X, ZHAO H M, et al. Accelerated startup of moving bed biofilm process with novel electrophilic suspended biofilm carriers [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 315: 364-372.
- [4] 欧日浩,何德文,周康根,等. 移动床生物膜反应器用聚乙烯填料的改性研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2019, 42(2): 65-70.
OU R H, HE D W, ZHOU K G, et al. Modification of polyethylene biocarrier for moving-bed biofilm reactor [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2019, 42(2): 65-70(in Chinese).
- [5] 刘丽. 基于Maan-Kendall检验和小波功率谱分析的滏阳河径流量变化研究[J]. 陕西水利, 2024(4): 29-31, 35.
LIU L. Study on runoff variation of Fuyang River based on Maan-Kendall test and wavelet power spectrum analysis [J]. Shaanxi Water Resources, 2024(4): 29-31, 35 (in Chinese).
- [6] 刘丽艳,姜子健,刘战剑. 二氧化锰改性硅藻土基多孔陶瓷吸附过滤性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2025, 58(4): 406-413.
LIU L Y, JIANG Z J, LIU Z J. Adsorption and filtration performance of manganese dioxide-modified diatomite-based porous ceramics [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2025, 58(4): 406-413 (in Chinese).
- [7] 郑鹏,孙英春,崔兴兰,等. 铬污染场地强化微生物修复技术研究进展[J]. 稀有金属, 2024, 48(11): 1639-1652.
ZHENG P, SUN Y C, CUI X L, et al. Research progress of enhanced microbial remediation techniques for chromium-contaminated sites [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48(11): 1639-1652 (in Chinese).
- [8] 陈红,谢静,成钰莹,等. 零价铁强化生物硝化效能及机理研究[J]. 化工学报, 2021, 72(10): 5372-5383.
CHEN H, XIE J, CHENG Y Y, et al. Study on performance and mechanism of enhanced biological nitrification by zero-valent iron [J]. CIESC Journal, 2021, 72(10): 5372-5383 (in Chinese).
- [9] ZHOU N Q, LUTHER G W, CHAN C S. Ligand effects on biotic and abiotic Fe(II) oxidation by the microaerophile *Sideroxydans lithotrophicus* [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(13): 9362-9371.
- [10] HUANG L, JIN Y, ZHOU D H, et al. A review of the role of extracellular polymeric substances (EPS) in wastewater treatment systems [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(19): 12191.
- [11] CHEN H, ZHAO X H, CHENG Y Y, et al. Iron robustly stimulates simultaneous nitrification and denitrification under aerobic conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(3): 1404-1412.
- [12] LIU T, HE X L, JIA G Y, et al. Simultaneous nitrification and denitrification process using novel surface-modified suspended carriers for the treatment of real domestic wastewater [J]. Chemosphere, 2020, 247: 125831.

作者简介:孙广垠(1974—),男,内蒙古宁城人,博士,教授,主要研究方向为水和废水处理理论与技术。

E-mail:sungy@hebeu.edu.cn

收稿日期:2025-08-31

修回日期:2025-10-15

(编辑:任莹莹)