

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.004

预涂覆膜重力流超滤工艺的过滤性能与滤饼层特性

王绍铸, 李 星, 冯建勇, 孙亚洲, 路则栋
(北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124)

摘 要: 重力流超滤(GDM)具有操作简单、能耗低、维护少等特点,但稳定膜通量较低、生物滤饼层性能仍需改善。针对GDM生物滤饼层对稳定膜通量作用的关键问题,构建了铝基絮体(ABF)预涂覆GDM(ABF-GDM)工艺,研究了其过滤性能和滤饼层特性,阐明了ABF预涂覆层对生物滤饼层特性的作用机制。ABF-GDM工艺的稳定膜通量为 $6.70\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,比GDM提高了19.22%;滤饼层阻力和膜孔阻力分别为 $2.11\times 10^{12}\text{ m}^{-1}$ 和 $1.99\times 10^{11}\text{ m}^{-1}$,比GDM降低了21.60%和19.37%;稳定阶段对溶解性有机碳和氨氮的平均去除率分别为22.10%和89.81%,比GDM提高了7.48%和5.92%。ABF预涂覆滤饼层可明显提高GDM生物滤饼层的粗糙度和多孔性,并降低胞外聚合物(EPS)含量,其中ABF-GDM的表面孔隙率达34.24%,比GDM高31.22%;EPS中蛋白质和多糖含量分别为 723.40 、 $1\,013.18\text{ mg}/\text{m}^2$,分别比GDM降低22.17%和31.92%。ABF预涂覆层可改变生物滤饼层的微生物群落结构,其中关键菌属的相对丰度变化可直接影响生物滤饼层的形貌结构和生化组分,使得ABF-GDM的滤饼层粗糙多孔性增加、EPS含量降低、稳定膜通量提高。

关键词: 重力流超滤; 预涂覆膜; 铝基絮体; 稳定膜通量; 生物滤饼层

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0021-07

Filtration Performance and Bio-cake Layer Characteristics of Pre-coated Gravity-driven Membrane (GDM)-based Drinking Water Process

WANG Shao-zhu, LI Xing, FENG Jian-yong, SUN Ya-zhou, LU Ze-dong
(Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Gravity-driven membrane (GDM) process has the characteristics of easy operation, low energy consumption, and less maintenance. However, the stable flux is low and the performance of the bio-cake layer still needs to be improved. In this study, focusing on the key issue of the effect of GDM bio-cake layer on stable flux, the Al-based floc (ABF) pre-coated GDM (ABF-GDM) process was constructed. The membrane filtration and bio-cake layer characteristics of the ABF-GDM process were studied, and the mechanism of effect of ABF pre-coated layer on the characteristics of bio-cake layer was elucidated. The results showed that the stable flux of ABF-GDM was $6.70\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, which was 19.22% higher than that of GDM; the cake layer resistance and pore blocking resistance were $2.11\times 10^{12}\text{ m}^{-1}$ and $1.99\times 10^{11}\text{ m}^{-1}$, respectively, which were 21.60% and 19.37% lower than that of GDM. The average removal rates of dissolved organic carbon and ammonia nitrogen at the stable stage were 22.10% and

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52200017)

通信作者: 路则栋 E-mail: luzedong@bjut.edu.cn

89.81%, respectively, which were 7.48% and 5.92% higher than that of GDM. The ABF pre-coated cake layer could significantly improve the roughness and porosity of the GDM bio-cake layer, and reduce the EPS content. The surface porosity of ABF-GDM was 34.24%, which was 31.22% higher than that of GDM. The contents of protein and polysaccharide of EPS were 723.40 mg/m² and 1 013.18 mg/m², respectively, which were 22.17% and 31.92% lower than that of GDM, respectively. The ABF pre-coated layer could change the microbial community structure in the bio-cake layer, and the relative abundance of keystone taxa could directly affect the morphology structure and biochemical components of the bio-cake layer, resulting in the increase of the roughness and porosity of the ABF-GDM bio-cake layer, the decrease in EPS content, and an increase in stable flux.

Key words: gravity-driven membrane (GDM); pre-coated membrane; Al-based floc (ABF); stable flux; bio-cake layer

农村分散式供水规模小、用水量不均匀、水源水质波动大,加上缺乏运行管理人员,采用常规城镇供水技术与工艺无法高效、稳定运行。农村分散式净水工艺更适宜采用流程短、净化功能强、能耗低、运维简易的处理技术,早期主要有慢滤、岸滤等技术,近年来以重力流超滤(GDM)为代表的技术得到了快速发展。

GDM工艺的膜表面会形成生物滤饼层^[1],具有稳定的膜通量,同时具有生物净化和膜滤截留功能,可长期连续运行。生物滤饼层是影响GDM稳定膜通量的关键因素,其表面形貌结构的粗糙程度、内部孔隙的发达程度、胞外聚合物(EPS)含量等都会显著影响GDM的稳定膜通量^[2]。改进膜材质、优化滤饼层特性等措施可改善稳定膜通量^[3],其中预涂覆膜是调控生物滤饼层的方式之一^[4]。预涂覆材料和预涂覆方式会影响GDM生物滤饼层结构与特性^[5],常用的涂覆材料主要包括粉末活性炭、沸石、氧化铝、铝基絮体(ABF)等,涂覆方式主要有预沉积、浸没涂覆、层层自组装等。铝基絮体一般由铝基混凝剂水解后形成,可在膜表面形成预沉积滤饼层^[6]。ABF易于现场制备、预涂覆过程简单、结构较松散^[7],同时具有一定的电中和、吸附架桥等絮凝作用^[8]。

笔者构建了ABF预涂覆GDM(ABF-GDM)工艺,研究了其膜通量与膜阻力变化规律和除污效能,分析了生物滤饼层的形态结构和组成成分特性,以及生物滤饼层特性变化的作用机制,以期为GDM净水工艺的优化提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验水质与材料

实验采用配水方式,分别加入腐殖酸、牛血清白蛋白(Sigma-Aldrich公司,美国)、海藻酸钠、氯化铵(麦克林公司,美国),主要水质指标如下:溶解性有机碳(DOC)为1.52~2.08 mg/L,UV₂₅₄为0.071 5~0.092 3 cm⁻¹,氨氮为0.51~0.93 mg/L,浊度为0.92~2.09 NTU,pH为6.5~7.5,水温为12~20℃。

实验采用聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维超滤膜(诺莱,中国),截留分子质量为100 ku,有效膜面积为0.014 m²;混凝剂采用聚合氯化铝(天津光复科技公司)。

1.2 预涂覆铝基絮体膜的制备

取0.03 mol/L磷酸盐缓冲液(pH为7.0)置于六联搅拌机(ZR4-6,深圳中润科技有限公司)上,以300 r/min搅拌1 min后加入10 mg/L的聚合氯化铝,继续以300 r/min搅拌1 min,再以80 r/min搅拌15 min,之后利用蠕动泵以30 L/(m²·h)膜过滤通量进行抽滤,使絮体涂覆在超滤膜上。

1.3 实验装置与方法

实验装置见图1。ABF-GDM工艺和GDM工艺均采用恒压过滤方式,过滤水头为60 cm。两种工艺的膜池容积均为0.5 L,在膜通量稳定阶段过水量分别为(0.093 8±0.007 4)、(0.078 7±0.005 6) L/h,水力停留时间分别为(6.39±0.46)、(5.36±0.45) h。在装置运行期间不采用任何清洗措施,在运行结束时取样分析生物滤饼层形貌结构、EPS组成和微生物群落结构。

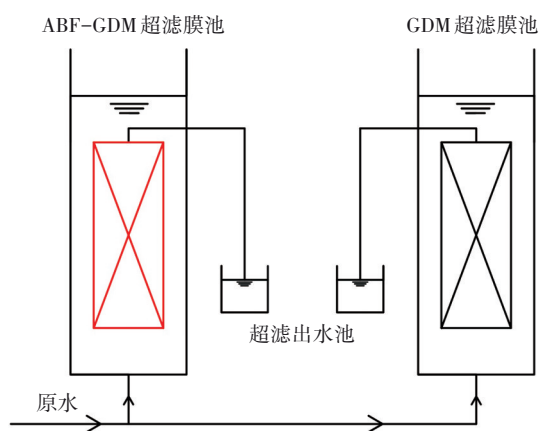


图1 重力流超滤实验装置

Fig.1 Schematic diagram of the GDM system

1.4 检测指标与方法

DOC采用总有机碳分析仪测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法检测;生物滤饼层形貌结构采用Quanta 600 FEG扫描电子显微镜检测;生物滤饼层EPS采用热-超声处理法提取,多糖采用苯酚-硫酸分光光度法检测,蛋白质采用改良Lorry法检测;生物滤饼层的微生物群落结构采用16S rRNA测序技术检测(NCBI登录号:PRJNA1017965);采用电子天平(Denver TP-2102,美国)计量过滤水量,利用体积法计算膜通量;利用ImageJ软件计算生物滤饼层的表面孔隙率,利用SPSS软件进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 膜通量与膜阻力

两种工艺的膜通量变化趋势如图2所示。可见,ABF-GDM与GDM的膜通量变化规律基本一致,大致可分为3个阶段。第I阶段(1~6 d)为膜通量快速下降阶段,ABF-GDM的初始膜通量为 $28.21 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,小于GDM的 $30.29 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;在运行至第6天时ABF-GDM的膜通量下降至 $4.76 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,已明显高于GDM的 $3.21 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。第II阶段(7~40 d)为膜通量波动阶段,ABF-GDM的平均膜通量为 $(6.87 \pm 1.08) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,高于GDM的 $(5.86 \pm 0.73) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。第III阶段(41~85 d)为膜通量稳定阶段,ABF-GDM的平均膜通量为 $(6.70 \pm 0.53) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,高于GDM的 $(5.62 \pm 0.40) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。综上所述,虽然ABF-GDM的初始膜通量低于GDM,相差了7.37%,但在开始运行后ABF-GDM的膜通量则始终高于GDM,在运行至第6天时膜通量差值达 $1.55 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,已相差了32.56%。在运行至第7天

时,膜通量均出现大幅度恢复现象,这可能是滤饼层附着和沉积一定量污染物后,膜通量减小和过滤阻力增加,表面结构发生了突变^[9]。在第II、III阶段,ABF-GDM与GDM的平均膜通量差值分别达 1.01 、 $1.08 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,相差14.70%、16.12%,ABF-GDM的膜通量均明显高于GDM。

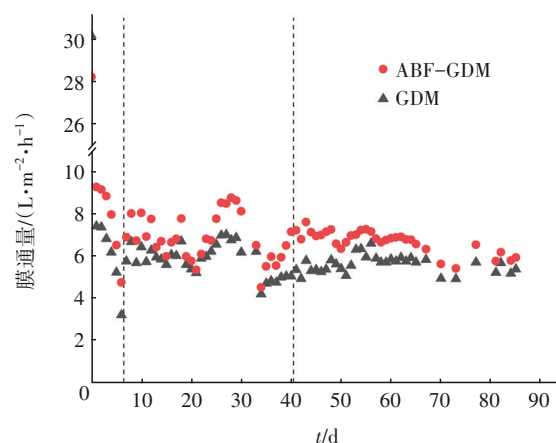


图2 GDM和ABF-GDM的膜通量变化规律

Fig.2 Change in flux of GDM and ABF-GDM process

GDM和ABF-GDM的膜阻力分布如图3所示。ABF-GDM的初始膜阻力为 $6.71 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$,高于GDM的 $6.25 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$,比GDM增加了7.36%,这部分膜阻力差异是由ABF预涂层造成的。

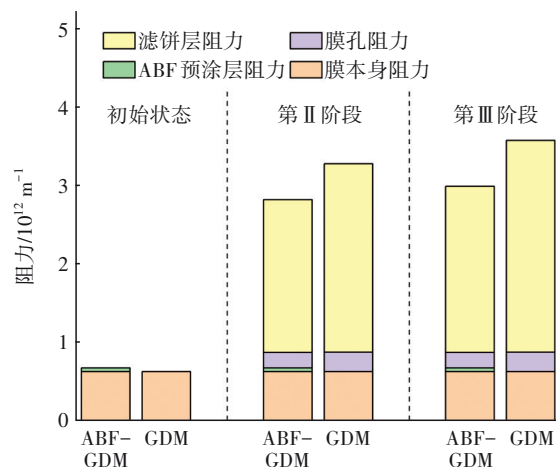


图3 GDM和ABF-GDM的膜阻力分布规律

Fig.3 Membrane resistance distribution of GDM and ABF-GDM

在第II阶段,ABF-GDM的总阻力为 $2.82 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$,小于GDM的 $3.28 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 。在第III阶段,ABF-GDM的总阻力为 $3.00 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$,小于GDM的 $3.57 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 。可见,总阻力差值分别达 0.46×10^{12} 、 $0.57 \times$

10^{12} m^{-1} , 相差 14.15%、16.00%, 有效缓解了有机物对膜表面的污染程度, 尤其在过滤初始阶段具有更显著的改善作用。在第Ⅲ阶段, ABF-GDM 的滤饼层阻力和膜孔阻力分别为 $2.11 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 和 $1.99 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$, 小于 GDM 的 $2.70 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 和 $2.47 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$, 比 GDM 分别降低了 21.60% 和 19.37%, 其中 ABF-GDM 的滤饼层阻力 (占比达 70.87%) 为主要膜阻力, 膜孔阻力 (6.66%) 占比较低, 而 GDM 的滤饼层阻力、膜孔阻力占比分别为 75.63%、6.92%, 膜孔阻力更高, 不可逆膜污染程度更大, 可见预涂覆 ABF 膜可以改变膜阻力分布特性, 为 GDM 在长期运行过程中可能的必要维护和水力清洗提供了可行性。

2.2 除污效能

GDM 和 ABF-GDM 对 DOC 的去除效果见图 4。第Ⅰ阶段 (1~6 d), ABF-GDM 和 GDM 对 DOC 的去除率分别为 $(15.55 \pm 5.88)\%$ 和 $(10.82 \pm 3.55)\%$ 。第Ⅱ阶段 (7~40 d), ABF-GDM 和 GDM 对 DOC 的去除率均呈增加趋势, 这是因为生物滤饼层逐渐形成, 滤饼层中附着生长的微生物可通过生物降解作用去除有机物^[10]。在稳定运行的第Ⅲ阶段 (41~85 d), ABF-GDM 对 DOC 的平均去除率为 22.10%, 比 GDM 高了 7.48%。

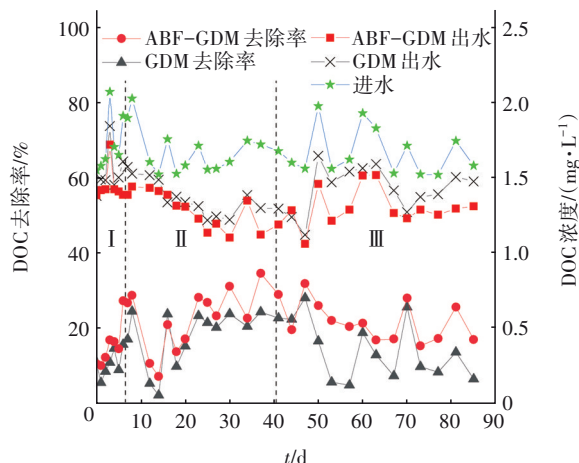


图4 GDM和ABF-GDM对DOC的去除效能

Fig.4 Removal performance of DOC in the GDM and ABF-GDM

GDM 和 ABF-GDM 对氨氮的去除规律如图 5 所示。第Ⅰ阶段 (1~6 d), ABF-GDM 和 GDM 对氨氮的去除率分别为 $(25.09 \pm 11.43)\%$ 和 $(22.18 \pm 8.91)\%$ 。第Ⅱ阶段 (7~40 d), ABF-GDM 和 GDM 对氨氮的去

除率均呈快速增加趋势, 这可能是由于硝化细菌逐渐富集并发挥作用^[11]。在稳定运行的第Ⅲ阶段 (41~85 d), ABF-GDM 对氨氮的平均去除率为 89.81%, 比 GDM 高了 5.92%。可见, 预涂覆 ABF 明显提高了 GDM 工艺对有机物和氨氮的去除效能。

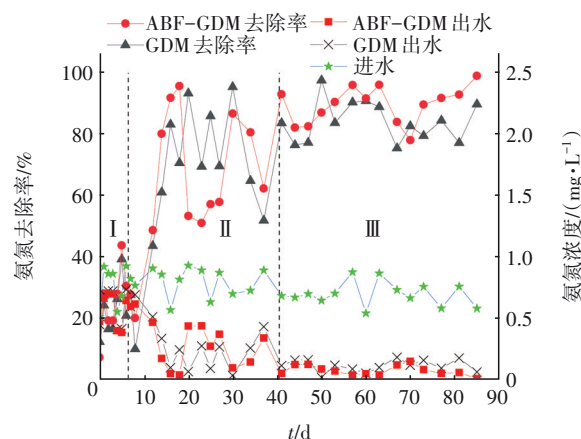


图5 GDM和ABF-GDM对氨氮的去除效能

Fig.5 Removal performance of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the GDM and ABF-GDM

2.3 生物滤饼层的结构与组成特性

2.3.1 生物滤饼层形貌结构

生物滤饼层的 SEM 照片见图 6。

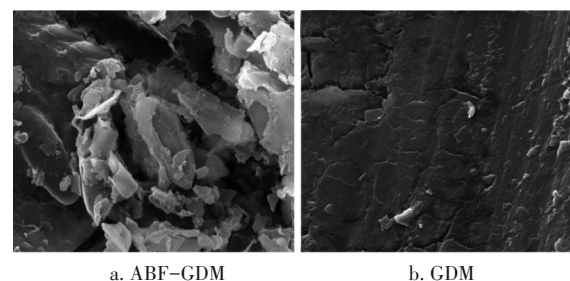


图6 GDM和ABF-GDM生物滤饼层形貌结构

Fig.6 Morphology and structure of bio-cake layer in GDM and ABF-GDM

ABF-GDM 膜表面的生物滤饼层粗糙, 可观察到明显的孔隙和通道结构, 而 GDM 膜表面形成了密实平整的生物滤饼层, 无明显孔隙结构; ABF-GDM 生物滤饼层的表面孔隙率达 34.24%, 比 GDM 高 31.22%。这一方面是由于 ABF 与进水中的颗粒物及有机物产生吸附架桥作用^[8], 增加了生物滤饼层的非均质性; 另一方面, 由于 ABF 能吸附生物聚合物, 而生物聚合物的网状结构有助于形成疏松多孔的生物滤饼层^[12], 使得稳定膜通量得到明显提高。由此表明生物滤饼层的粗糙多孔结构是影响稳定

膜通量的重要因素,对改善稳定膜通量具有积极的作用。

2.3.2 生物滤饼层EPS组成特性

ABF-GDM生物滤饼层EPS中蛋白质和多糖含量分别为723.40、1 013.18 mg/m²,分别比GDM降低了22.17%和31.92%,说明预涂覆ABF可使膜生物滤饼层EPS中蛋白质和多糖含量明显降低,这可能是由于ABF中的铝盐抑制了生物滤饼层中微生物的活性^[13],减少了EPS的分泌量;同时,吸附在ABF上的生物聚合物还可通过官能团结合作用去除EPS中的蛋白质和多糖^[12]。在第Ⅲ阶段,ABF-GDM的滤饼层阻力为 $2.11 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$,相比GDM降低了21.60%,由此推断生物滤饼层的EPS组成特性是影响膜污染的重要因素。EPS中蛋白质和多糖含量越高则膜污染越严重,这是由于蛋白质具有较高的黏性,使得沉积在膜表面的污染物相互黏附和聚集^[14];而多糖易通过配位键与金属离子形成螯合物吸附沉积在膜表面,使得膜表面的生物滤饼层更为致密匀实^[15],同样可加重膜污染。

2.4 生物滤饼层微生物群落结构

在门水平上,ABF-GDM和GDM中拟杆菌门(*Bacteroidota*)和变形菌门(*Proteobacteria*)的相对丰度较高,其中ABF-GDM中的相对丰度分别达到38.68%和22.68%,分别比GDM高5.22%和5.87%。酸杆菌门(*Acidobacteriota*)、浮霉菌门(*Planctomycetota*)、芽单胞菌门(*Gemmatimonadota*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、疣微菌门(*Verrucomicrobiota*)和硝化螺菌门(*Nitrospirota*)的相对丰度较低,在ABF-GDM中的相对丰度分别为10.48%、8.31%、4.80%、4.02%、1.59%和1.75%,在GDM中的相对丰度分别为9.73%、8.75%、4.45%、3.33%、2.89%和2.29%,其余菌门的相对丰度均小于1.0%。

在属水平上,ABF-GDM和GDM中的优势菌属均为碱铁杆菌属(*Ferruginibacter*),其相对丰度分别可以达到31.97%和22.74%(如图7所示)。ABF-GDM中的unclassified_f_Blastocatellaceae、norank_f_Gemmatimonadaceae、空洞菌属(*Cavicella*)和Planctopirus的相对丰度较高,分别为4.97%、4.07%、3.16%和3.14%,比GDM高了1.25%、1.05%、1.20%和1.86%。可以看出,预涂覆ABF改变了膜生物滤饼层中的微生物群落结构。

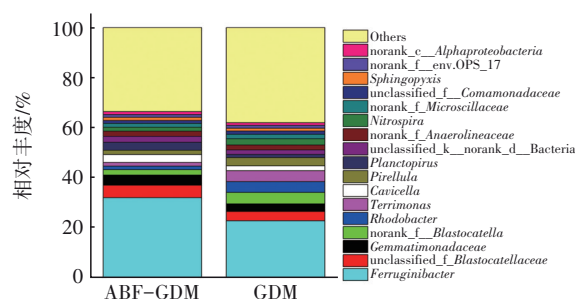


图7 生物滤饼层在属水平上的微生物群落结构

Fig.7 Microbial community structure at the genus level of bio-cake layer

2.5 微生物群落与生物滤饼层特性的构效关系

微生物群落与生物滤饼层结构和组成的相关性分析结果如图8所示。红杆菌属(*Rhodobacter*)和小梨形菌属(*Pirellula*)与EPS中多糖和蛋白质含量呈强正相关关系($r > 0.8$),与表面孔隙率呈强负相关关系($r < -0.8$),这是因为*Rhodobacter*产生的信号分子可提高其他菌属的EPS分泌量^[16],*Pirellula*可分泌黏附性脂多糖类物质^[17],使得菌群间相互紧密粘连,降低了生物滤饼层的表面孔隙率^[18]。此外,Planctopirus与EPS中蛋白质含量呈强负相关关系;芽枝菌属(*Blastocatella*)、土生单胞菌属(*Terrimonas*)与EPS中多糖含量呈强正相关关系,与表面孔隙率呈强负相关关系,也都会不同程度地影响生物滤饼层特性^[19]。

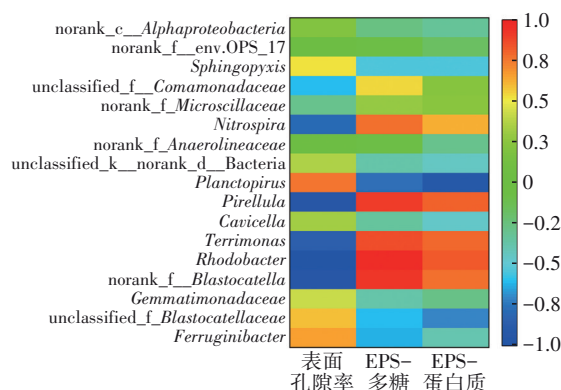


图8 生物滤饼层中微生物群落和生物滤饼层结构与组成的相关性

Fig.8 Correlation analysis of microbial community, structure and composition of bio-cake layer

以上表明,*Rhodobacter*、*Blastocatella*、*Terrimonas*和*Pirellula*是影响表面孔隙率和EPS多糖含量的关键菌属;*Rhodobacter*、*Pirellula*和Planctopirus是影响EPS蛋白质含量的关键菌属。从图7可以看出,

ABF-GDM 的 *Rhodobacter*、*Blastocatella*、*Terrimonas* 和 *Pirellula* 相对丰度分别为 1.46%、2.16%、1.43% 和 1.76%，比 GDM 低 2.85%、2.46%、2.90% 和 1.56%，而 *Planctopirus* 的相对丰度为 3.14%，比 GDM 高 1.86%。可见，预涂覆 ABF 改变了关键菌属的相对丰度，影响了生物滤饼层的形貌结构和 EPS 组成特性。

3 结论

① 预涂覆 ABF 可提高稳定膜通量，有效降低膜阻力。在稳定运行阶段，ABF-GDM 的滤饼层阻力和膜孔阻力分别为 $2.11 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 和 $1.99 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ ，比 GDM 降低了 21.60% 和 19.37%，其中滤饼层阻力为主要的膜阻力，占比达 70.87%；ABF-GDM 的稳定膜通量为 $6.70 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，比 GDM 提高了 19.22%。

② 预涂覆 ABF 可提高除污效能。在稳定运行阶段，ABF-GDM 对 DOC 和氨氮的平均去除率分别为 22.10% 和 89.91%，比 GDM 提高了 7.48% 和 5.92%。

③ ABF-GDM 生物滤饼层具有显著的粗糙表面，呈现出明显的孔隙和通道结构。ABF 预涂覆层可增加生物滤饼层的粗糙度和表面孔隙率，降低 EPS 含量。ABF-GDM 生物滤饼层的表面孔隙率为 34.24%，比 GDM 高 31.22%；EPS 中蛋白质和多糖含量分别为 723.40、1 013.18 mg/m^2 ，比 GDM 降低了 22.17% 和 31.92%。

④ *Rhodobacter*、*Blastocatella*、*Terrimonas* 和 *Pirellula* 是影响滤饼层表面孔隙率和 EPS 多糖含量的关键菌属；*Rhodobacter*、*Pirellula* 和 *Planctopirus* 是影响 EPS 蛋白质含量的关键菌属。ABF 预涂覆改变了关键菌属的相对丰度，其中 ABF-GDM 的 *Rhodobacter*、*Blastocatella*、*Terrimonas* 和 *Pirellula* 相对丰度分别为 1.46%、2.16%、1.43% 和 1.76%，比 GDM 低 2.85%、2.46%、2.90%、1.56%；*Planctopirus* 的相对丰度为 3.14%，比 GDM 高 1.86%。

⑤ ABF 预涂覆层可改变生物滤饼层的形貌结构和生化组分，显著提高稳定膜通量，降低滤饼层阻力和不可逆膜污染阻力，使得 GDM 具有更佳的运行状态，提高了维护可行性。

参考文献：

[1] 宋丹，刘彩虹，程巍，等. 重力驱动微滤膜给水处理

工艺特性与除污效能 [J]. 中国给水排水，2020，36 (3): 22-26.

SONG Dan, LIU Caihong, CHENG Wei, et al. Characteristic and pollutants removal efficiency of gravity-driven microfiltration membrane water treatment process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (3): 22-26 (in Chinese).

[2] 梁恒，唐小斌，王金龙，等. 无清洗重力驱动超滤工艺净水效能及机理 [J]. 哈尔滨工业大学学报，2020，52(6): 103-110.

LIANG Heng, TANG Xiaobin, WANG Jinlong, et al. Performance and mechanisms of gravity-driven membrane filtration for water treatment without cleaning [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52 (6): 103-110 (in Chinese).

[3] PRONK W, DING A, MORGENROTH E, et al. Gravity-driven membrane filtration for water and wastewater treatment: a review [J]. Water Research, 2019, 149: 553-565.

[4] SONG D, ZHANG W, CHENG W, et al. Micro fine particles deposition on gravity-driven ultrafiltration membrane to modify the surface properties and biofilm compositions: water quality improvement and biofouling mitigation [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 393: 123270.

[5] SHAO S, FENG Y, YU H, et al. Presence of an adsorbent cake layer improves the performance of gravity-driven membrane (GDM) filtration system [J]. Water Research, 2017, 108: 240-249.

[6] 薛文静，李文江，刘娟，等. 一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 [J]. 环境科学，2019，40(2): 730-737.

XUE Wenjing, LI Wenjiang, LIU Juan, et al. Purification efficiency and mechanism of integrated Al salt flocculation-ultrafiltration membrane process [J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 730-737 (in Chinese).

[7] 李文江，于莉芳，苗瑞，等. 一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 [J]. 环境科学，2018，39(3): 1248-1255.

LI Wenjiang, YU Lifang, MIAO Rui, et al. Removal efficiency and mechanism of removal by humic acid of the integrated flocculation-ultrafiltration process [J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1248-1255 (in Chinese).

[8] MA B, LI W, LIU R, et al. Multiple dynamic Al-based

- floc layers on ultrafiltration membrane surfaces for humic acid and reservoir water fouling reduction [J]. *Water Research*, 2018, 139: 291–300.
- [9] AKHONDI E, WU B, SUN S, *et al.* Gravity-driven membrane filtration as pretreatment for seawater reverse osmosis: linking biofouling layer morphology with flux stabilization[J]. *Water Research*, 2015, 70: 158–173.
- [10] SHAO S, FENG Y, YU H, *et al.* Presence of an adsorbent cake layer improves the performance of gravity-driven membrane (GDM) filtration system [J]. *Water Research*, 2017, 108: 240–249.
- [11] 何强, 左庆扬, 陈子惟, 等. 预沉积生物炭强化重力驱动超滤膜处理受污染地表水的效能研究[J]. *环境科学*, 2023, 43(3): 1122–1130.
- HE Qiang, ZUO Qingyang, CHEN Ziwei, *et al.* Pre-deposition of biochar layer improves the performance of gravity-driven membrane (GDM) filtration system for polluted surface water treatment [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43 (3) : 1122–1130 (in Chinese).
- [12] ZHANG L, GRAHAM N, DERLON N, *et al.* Biofouling by ultra-low pressure filtration of surface water: the paramount role of initial available biopolymers [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 640: 119740.
- [13] DU P, LI X, YANG Y, *et al.* Regulated-biofilms enhance the permeate flux and quality of gravity-driven membrane (GDM) by in situ coagulation combined with activated alumina filtration [J]. *Water Research*, 2022, 209: 117947.
- [14] DING Y, MA B, LIU H, *et al.* Effects of protein properties on ultrafiltration membrane fouling performance in water treatment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 77: 273–281.
- [15] DESMOND P, BEST J P, MORGENROTH E, *et al.* Linking composition of extracellular polymeric substances (EPS) to the physical structure and hydraulic resistance of membrane biofilms [J]. *Water Research*, 2018, 132: 211–221.
- [16] ZHANG Z, YU Z, WANG Z, *et al.* Understanding of aerobic sludge granulation enhanced by sludge retention time in the aspect of quorum sensing [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 272: 226–234.
- [17] JENKINS C, KEDAR V, FUERST J A. Gene discovery within the planctomycete division of the domain bacteria using sequence tags from genomic DNA libraries [J]. *Genome Biology*, 2002, 3: 1–11.
- [18] HUANG Y, LIU Y, FAN K, *et al.* Influence of powdered activated carbon on gravity-driven ultrafiltration for decentralized drinking water treatment: insights from microbial community and biofilm structure [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 313: 123451.
- [19] FENG J, LI X, LU Z, *et al.* Enhanced permeation performance of biofiltration-facilitated gravity-driven membrane (GDM) systems by in-situ application of UV and VUV: comprehensive insights from thermodynamic and multi-omics perspectives [J]. *Water Research*, 2023, 242: 120254.

作者简介:王绍铸(1999–),男,广东湛江人,硕士研究生,主要研究方向为分散式给水处理技术。

E-mail:wangshaozhu@emails.bjut.edu.cn

收稿日期:2023-11-30

修回日期:2023-12-22

(编辑:李德强)