

固相介质投加对 MBR 膜污染及微生物群落的影响

吴伟¹, 李明², 张鹏飞³, 高菲², 吴炜^{3*}

(1. 合肥市水务环境建设投资有限公司, 合肥 230000; 2. 天津工业大学 环境科学与工程学院, 天津 300387; 3. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 膜生物反应器(MBR)在污水处理中应用广泛,但膜污染制约其长期稳定运行。本研究创新性地将光纤布拉格光栅技术(FBG)引入 MBR 流场,系统探究活性炭、聚乙烯醇(PVA)海绵和二氧化硅三种介质对反应器流场特性及群落演替的作用机制。结果表明,提升曝气强度显著增强三种介质表面的流场剪切力,其中 PVA 海绵因三维网状结构使通量提升最显著,活性炭颗粒与二氧化硅次之。PVA 海绵为微生物提供适宜附着位点,可显著提升胞内酶活性,而活性炭颗粒与二氧化硅对酶活性提升作用有限。活性炭加速污染降解菌群增殖,PVA 海绵驱动微生物成膜化以减少生物产物沉积,二氧化硅则依赖剪切力控制污染,对群落结构影响微弱。本研究为优化 MBR 膜污染控制策略提供了理论依据。

关键词: 膜生物反应器(MBR); 膜污染; 固相介质; 微生物群落; 膜面剪切力

中图分类号: TQ028; X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)05-0153-09

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.05.015

随着城市化进程的加速和工业废水排放量的增加,膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)凭借高效的固液分离能力、稳定的出水水质等优势,已成为污水处理领域的核心技术之一^[1-4]。然而,膜污染问题始终制约着 MBR 系统的长期稳定运行。膜污染不仅导致跨膜压差(TMP)升高、膜通量下降,还会显著增加能耗和运行成本,严重时甚至需要频繁更换膜组件^[5],限制了 MBR 技术的规模化应用。因此,如何有效控制膜污染已成为 MBR 工艺优化的核心挑战。

近年来,通过向 MBR 系统中投加固相介质(如填料、活性炭、陶瓷颗粒等)以改善膜污染的研究逐渐成为热点^[6-9]。研究表明,固相介质可通过物理拦截、吸附作用减少污染物向膜表面的迁移,同时为微

生物提供附着位点,促进生物膜形成,进而优化污泥性质并降低膜污染^[10-11]。然而,现有研究多聚焦于单一填料的短期效果,缺乏对不同材质固相介质在复杂工况下,如何影响反应器流场特性及其与膜通量动态关系的系统性探究。此外,固相介质的投加可能通过改变微生物群落结构、酶活性及代谢产物浓度,间接影响膜污染动力学,但其具体调控规律尚未明晰。微生物群落是 MBR 系统功能的核心载体,其代谢活动直接影响污泥特性及污染物迁移转化路径。固相介质的引入会改变微生物的竞争与共生关系,通过微环境优化促进硝化菌与反硝化菌的协同脱氮^[12],或通过代谢产物分泌影响污泥絮体稳定性^[13]。同时,微生物酶活性作为反映微生物代谢功能的关键指标,其与膜污染速率的关联性亦值得

收稿日期: 2025-05-12; 修改稿收到日期: 2025-09-01

基金项目: 上海市“科技行动计划”国际合作课题资助项目(22230730300)

第一作者简介: 吴伟(1985-),男,湖北天门人,工程师,研究方向为污水处理与资源化。* 通讯作者, E-mail: wuwei2@smedi.com

引用本文: 吴伟,李明,张鹏飞,等. 固相介质投加对 MBR 膜污染及微生物群落的影响[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(5): 153-161.

Citation: Wu W, Li M, Zhang P F, et al. Impact of solid-phase media addition on membrane fouling and microbial community in MBR systems[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(5): 153-161.

深入探讨。

在 MBR 膜污染控制中,常规手段为通过向膜池曝气形成气液两相流场:利用气流驱动液体扰动,优化膜表面及周边区域的水动力学环境,借助剪切冲刷作用延缓污染物沉积。而固相介质的投加可通过引入物理冲刷效应改善流场分布,同样能起到缓解膜污染的作用。然而,当前针对固相介质投加条件下流场改善效果的精确原位无损测定方法仍有待完善。光纤传感技术是一种先进的传感技术,利用光纤作为传感元件,通过监测光信号的变化实现对环境参数的测量。其中,光纤布拉格光栅(FBG)在光学传感器中应用场景广泛且测量理想度较高,具有重要的科学意义和使用价值,目前已用于温度、压力、应力、浓度等物理量的测量。FBG 传感器结构简单、质量轻、可弯曲变形,其几何尺度可控制到毫米级以下(直径最小可达 80 μm),能在对外部水力学扰动较小的前提下,测量极限空间内物理量的变化。

本研究创新性地 将 FBG 设计制作成探针,嵌入中空纤维膜组件,构建实时水力学监控系统,实现对 MBR 运行过程中流场剪切力分布的原位动态监测。借助该技术,系统解析不同材质固相介质投加后,流场剪切力的时空分布规律及其对膜污染的影响机制。同时,本研究系统测定了 MBR 体系中微生物酶活性、微生物产物浓度及微生物群落结构的动态变化,深入探究固相介质对微生物代谢活性、产物分

泌及群落演替的调控效应。通过整合流场特性与微生物响应的多维度数据,揭示固相介质与微生物代谢驱动膜污染之间的耦合作用机制,为优化 MBR 工艺的填料选型、投加策略及膜污染控制提供理论依据。

1 实验

1.1 实验装置与材料

实验所用活性污泥源自实验室的驯化培养,活性污泥采购自广州市清沃生物科技有限公司。研究采用柱状构型的膜生物反应器作为核心反应装置,其实际直径 7 cm,高 50 cm,有效容积为 1.92 L,采用有机玻璃制成。在反应器底部设有穿孔曝气装置。MBR 内部采用自主设计加工的聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜组件。中空纤维膜丝购买于天津膜天膜科技股份有限公司,外径 2 mm,内径 1.1 mm,孔径为 0.1~0.2 μm 。具体制备流程为:将预制膜丝束一端采用环氧树脂实施末端封闭处理,随后将死端膜插入外径 8.0 mm 的聚氯乙烯(PVC)支撑管内,通过二次注胶工艺实现膜丝与支撑管的密封衔接;膜丝另一端经同样工艺固定于另一根 PVC 管形成密闭流道,最终构建出具有双端封闭结构的膜组件单元。膜组件有效膜面积为 0.012 m^2 。实验用水采用人工配制的模拟生活污水,依据实际污水处理厂进水指标调配而成。实验中所使用的固相介质投加量均为 5 g/L,具体规格如表 1 所示。

表 1 实验投加固相介质规格

Table 1 Specifications of solid-phase media for experimental addition

固相介质	厂商	粒径/mm	几何形状	孔隙率/%	表观密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
颗粒活性炭(GAC)	卡尔冈炭素(苏州)有限公司	1.7	不规则球状	64	0.5
聚乙烯醇(PVA)海绵颗粒	胶州市晓梅清洁品加工厂	2.0	多孔立方体	85	0.1
二氧化硅颗粒	泰州市爱特斯光学材料有限公司	1.7	规则球状	43	2.6

1.2 流场水力学测定和分析方法

本研究采用的 FBG 传感器具有细长微小的感应探针(直径为 0.25 mm),可以直接贴合在膜表面,固相介质的冲击引起探针的形变,探针的形变量会转移成波长信号,经处理后转化成剪切力,从而实现原位无损监测膜面所受流场剪切力,以衡量不同固相介质投加条件下流场的变化情况。

FBG 的波长 λ_B (nm)由以下公式给出:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (1)$$

式中: Λ 表示光栅的周期,nm; n_{eff} 是光纤芯的有效折射率。

当温度保持恒定时,FBG 受到外部应力,光栅周期随着应力的变化而变化。光弹性系数也会引起折射率的变化。光弹性系数的计算公式为:

$$P_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \quad (2)$$

式中: μ 为纤维材料的泊松比; P_e 为纤维的光弹性系数; P_{11} 和 P_{12} 分别为纵向和横向折射率的变化。

光弹性系数 P_e 与波长变化 $\Delta\lambda_B$ 之间的关系为:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e) \epsilon_z \lambda_B = K_e \epsilon_z \quad (3)$$

式中: ϵ_z 为纤维的轴向应变,nm; K_e 是 FBG 的轴向应变敏感系数,可以表示为:

$$K_{\epsilon} = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \right\} \quad (4)$$

当光纤属于标准单模二氧化硅时,可以认为 $P_c = 0.22$,因此 ϵ_z 和 $\Delta\lambda_B$ 的关系由下式给出:

$$\epsilon_z = \frac{\Delta\lambda_B}{0.78\lambda_B} \quad (5)$$

膜面剪切力 σ 和 $\Delta\lambda_B$ 的关系可以用以下公式描述:

$$\sigma = E \cdot \epsilon_z = \frac{E}{0.78\lambda_B} \Delta\lambda_B \quad (6)$$

式中: E 是光栅的弹性模量,它是由材料的固有性质决定的一个固定值,为 68 GPa。

由于 λ_B 是常量,所以引入一个常数参数 $K = E/0.78\lambda_B$,建立一个理论模型,即膜面剪切力 σ 与 $\Delta\lambda_B$ 之间的线性关系。因此,可以得到膜面剪切力和波长变化之间的关系:

$$\sigma = K\Delta\lambda_B \quad (7)$$

基于流场中采集的膜面剪切力及 FBG 测定的剪切次数,可以计算膜面有效剪切力(SF_{eff} , Pa)。

$$SF_{\text{eff}} = K_f \cdot \sigma \quad (8)$$

式中: K_f 为每分钟固相介质对膜面的剪切次数; σ 为监测到的膜面剪切力,Pa。

MBR 系统采用恒压过滤模式运行,跨膜压差维持在 70 kPa,以测定不同条件下的膜通量。实验装置的示意图及实物图分别如图 1(a)和图 1(b)所示。具体操作如下:未投加固相介质及投加不同材质的固相介质后,待反应器稳定运行 8 h,分别在 1 L/min、2 L/min、3 L/min 三种曝气强度[对应单位膜面积曝气强度分别为 $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]下测定流场剪切力与膜通量,同时采集体系内液体,测定微生物胞内酶活性及松散型胞外聚合物(LB-EPS)、紧密型胞外聚合物(TB-EPS)的变化;上述 MBR 体系稳定运行一个月后,送样测定微生物群落结构。

图 1(c)为运行过程中监测反应器内流场剪切力的装置。本研究将 FBG 探针设计为 L 形结构,当颗粒或气泡上升过程中垂直撞击探针时,即使受力微弱也可引发探针形变,从而提升测量精度。膜面监测点位设置如图 1(d)所示,以组件底部四根膜丝的中间位置为原点(0 点),具体空间坐标如表 2 所列。通过这样的点位布局,可对不同高度及不同界面的剪切力分布情况进行分析测定,进而实现对流场中膜面所受剪切力情况的全面分析。

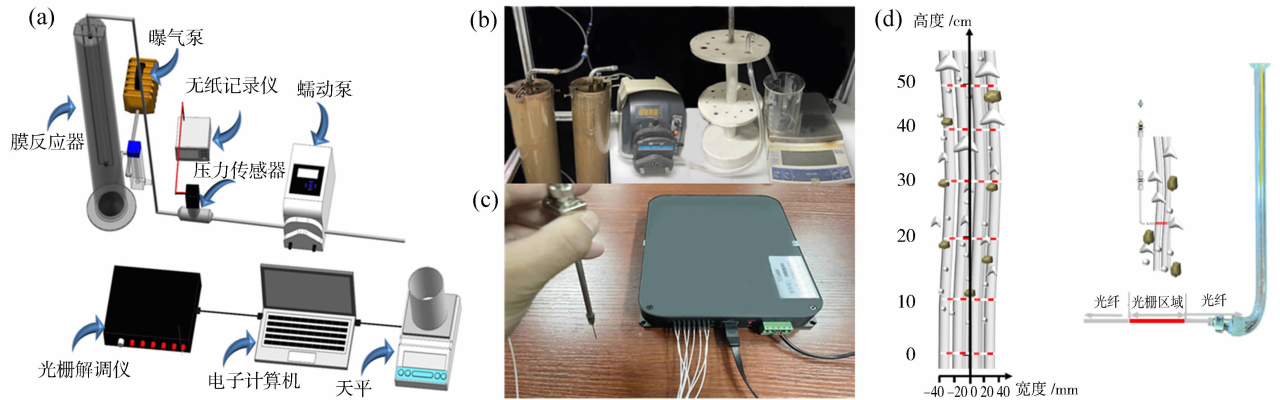


图 1 实验装置示意图(a);实验装置实物图(b);流场剪切力监测装置实物图(c);监测点位设置示意图(d)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup (a); actual photograph of the experimental setup (b); actual photograph of the flow field shear force monitoring device (c); schematic diagram of the monitoring point layout (d)

表 2 剪切力测定空间坐标

Table 2 Spatial coordinate for shear force measurement

高度/cm	空间坐标/(mm, cm)
0	(-40, 0)(-20, 0)(0, 20) (20, 0) (40, 0)
10	(-40, 10)(-20, 10)(0, 10)(20, 10) (40, 10)
20	(-40, 20)(-20, 20)(0, 20)(20, 20) (40, 20)
30	(-40, 30)(-20, 30)(0, 30)(20, 30) (40, 30)
40	(-40, 40)(-20, 40)(0, 40)(20, 40) (40, 40)
50	(-40, 50)(-20, 50)(0, 50)(20, 50) (40, 50)

1.3 胞内酶测定方法

1) 脱氢酶测定方法

在 MBR 中取样后,将样品过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜,于 3 000 r/min 条件下离心 15 min,弃去上清液,用去离子水补充至原体积,反复离心三次。向处理后的样品中加入 0.5 mL 硫酸钠,0.5 mL 0.4%(质量浓度)的氯化三苯基四氮唑(TTC)溶液及 2 mL Tris-HCl 缓冲液(pH 值 7.6),于 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 水浴培养 10 min,

随后在 4 000 r/min 下离心 5 min,在 485 nm 波长处测定吸光度。

2) 蛋白酶测定方法

取 2 mL 0.5%(质量浓度)的酪素溶液,37 °C 预热 5 min 后加入 1 mL 粗酶液,37 °C 水浴反应 15 min,再加入 3 mL 10%(质量浓度)的三氯乙酸,剧烈振荡后以 4 000 r/min 离心 15 min。取上清液 1 mL,依次加入 5 mL 0.55 mol/L 碳酸钠溶液和 1 mL 格林酚试剂,37 °C 水浴显色 15 min,摇匀后在 680 nm 波长处测定吸光度。

3) α -葡萄糖苷酶测定方法

该酶的测定采用上海科艾博生物公司的试剂盒进行。

1.4 微生物群落测定方法

16S 基因测序是当前微生物群落研究中应用最为广泛的方法之一,其通过比较微生物 16S rRNA 基因的序列差异,实现对微生物的识别与分类。本实验中,将三种粒径相近的固相介质分别投加到 MBR 体系中,在介质投加前先提取微生物样品,于 -20 °C 条件下保存以作为对照组;待反应器稳定运行一个月、微生物群落演替达到稳定状态后,提取相应的微生物样品作为实验组。所有样品均委托苏州金唯智生物科技公司进行 16S 基因测序分析,旨在探究固相介质投加后微生物群落在结构及丰度上的差异。

2 结果与讨论

2.1 固相介质对流场剪切力分布的影响

在 MBR 系统中,流场剪切力的分布与强度直接决定膜污染控制效率及生物混合效果。膜污染引发的处理成本攀升与效率下降,是制约 MBR 技术应用的核心问题,而投加固相介质可通过改变流场剪切力分布特征有效减缓膜污染。明晰不同条件下剪切力的分布特点,不仅有助于解析不同固相介质对流场剪切力分布的优化作用,还能针对性强化剪切力冲刷薄弱区域,进而促进膜性能恢复,提升 MBR 系统的稳定性与经济性。本研究创新性引入 FBG 传感技术,针对投加相似粒径(1.7 mm 活性炭颗粒、2.0 mm PVA 海绵颗粒、1.7 mm 二氧化硅颗粒)的流场剪切力分布情况展开分析,探究不同类型固相介质及曝气强度变化对流场剪切力分布的影响特点。

由图 2 可知,低曝气强度下,三种介质投加体系的流场剪切力强度均有一定提升,且在一定程度上改善了流场剪切分布的均匀性。当曝气强度增至 2 L/min 时,不规则的活性炭颗粒受湍流影响,导致流场剪切力分布均匀性下降,而投加 PVA 海绵和二氧化硅介质时,流场剪切力分布则相对均匀。当曝气强度提升至 3 L/min 时,三种介质投加体系的流场剪切力均进一步增强,且剪切力分布更趋均匀。实验结果显示,二氧化硅固相介质在不同条件下均表现出良好的剪切力分布均匀性;PVA 海绵固相介质在高曝气强度下,剪切力分布也较均匀;活性炭颗粒则因外表不规则导致受力不均,其流场剪切力分布的均匀程度最差。

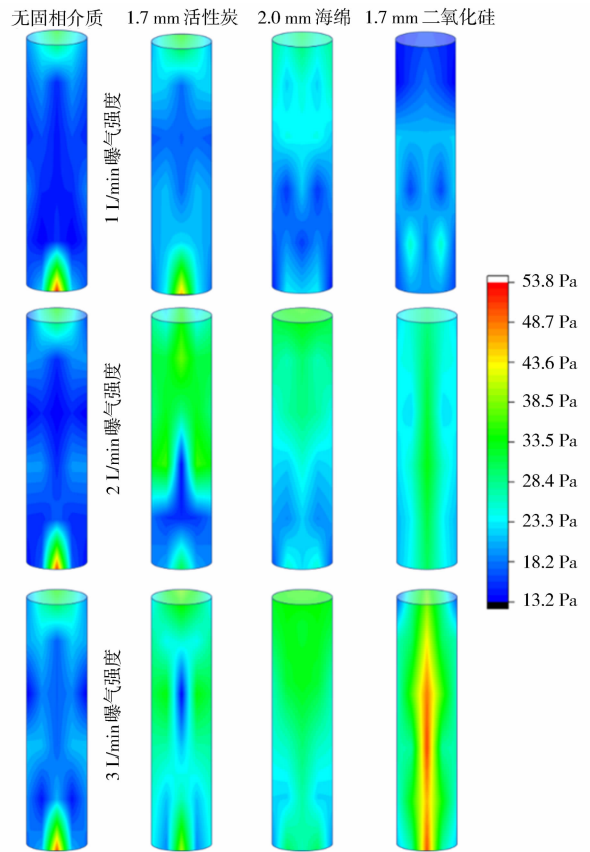


图 2 不同曝气条件下投加固相介质的 MBR 系统流场剪切力分布

Fig. 2 Distribution of flow field shear force in MBR system with solid-phase media under different aeration conditions

2.2 有效剪切力与膜通量的关系

为进一步阐释固相介质对 MBR 膜污染控制性能的综合作用机制,图 3 分析了投加 1.7 mm 活性炭颗粒、2.0 mm PVA 海绵颗粒和 1.7 mm 二氧化

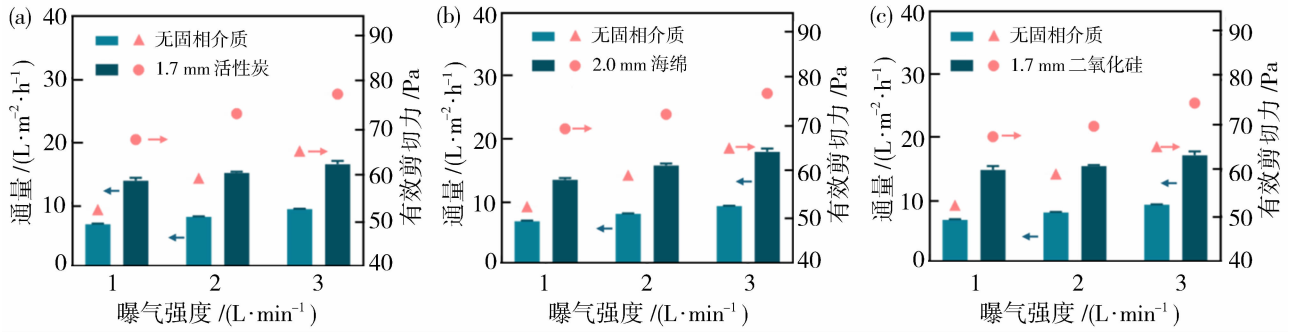


图 3 不同固相介质投加下 MBR 系统中有效剪切力与膜通量的关系:
1.7 mm 活性炭(a); 2.0 mm PVA 海绵(b); 1.7 mm 二氧化硅(c)

Fig. 3 Relationship between effective shear force and membrane flux in MBR system with different solid-phase media:
1.7 mm activated carbon (a); 2.0 mm PVA sponge (b); 1.7 mm silica (c)

硅颗粒的 MBR 系统中,有效剪切力与膜通量的关系。

由图 3 可知,在未投加固相介质的工况下,膜面有效剪切力与曝气强度呈现显著正相关关系。当引入 PVA 海绵颗粒、活性炭和二氧化硅颗粒三种固相介质后,不同曝气强度下膜面有效剪切力均获得显著提升。其中,PVA 海绵颗粒产生的强化效果最为突出,其膜面有效剪切力数值高于活性炭与二氧化硅颗粒体系。这是因为 PVA 海绵吸水饱和后颗粒密度显著增加,上浮过程速度减缓。其到达顶点后,在湍流扰动和重力叠加下迅速下沉,动能增强,对膜面产生的剪切力最显著。活性炭具有较高的固体密度和不规则的颗粒形貌,其表面孔隙丰富、比表面积大,在运动过程中可吸附悬浮态污染物,从而降低膜面污染。然而,活性炭颗粒在流场中的运动轨迹较为无序,其剪切力和清洗效率相比 PVA 海绵较差。二氧化硅颗粒表面光滑、结构致密,既不具备显著的吸附功能,也不易在流场中产生强烈扰动或弹性形变效应。其在水中运动较为规律。

在通量提升方面,三种固相介质的作用效果与膜面有效剪切力变化趋势一致。在曝气强度为 3 L/min 的工况下,相较于无固相介质投加反应器,投加 PVA 海绵颗粒、活性炭和二氧化硅颗粒后,体系稳定通量分别提升约 50%、47% 和 43%。PVA 海绵颗粒凭借其高密度撞击和振荡式剪切机制,对膜面污垢层产生强烈的冲刷与破坏作用,导致通量提升最为显著。其次是二氧化硅颗粒和活性炭颗粒,其在流场中的运动能够产生持续稳定的流体扰动,能够降低局部膜污染并提供一定的冲刷效果,使通量维持在较为稳定的水平。

如图 4 所示,在曝气强度为 3 L/min 的实验条件下,对投加 PVA 海绵的 MBR 系统开展长时间连续运行监测。结果表明,运行前期投加的 PVA 海绵可有效减缓膜污染,使系统维持较高通量;但运行至 15 d 后,膜通量出现较明显衰减。这可能是因为 PVA 材质在长期运行中发生破损,导致其功能逐渐弱化。不过,即便此时,该系统的稳定通量仍显著高于未投加固相介质的 MBR 系统。

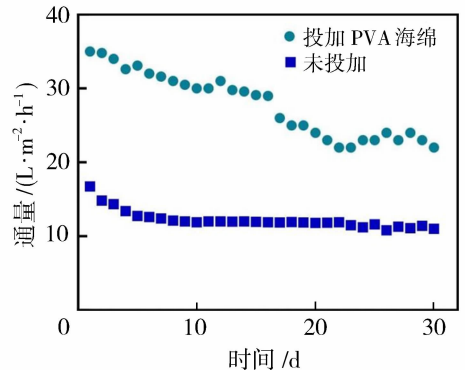


图 4 投加 PVA 海绵的 MBR 系统连续运行通量变化曲线
Fig. 4 Flux variation curve of MBR system with PVA sponge addition during continuous operation

2.3 固相介质对胞内酶活性的影响

在 MBR 中投加固相介质可增加微生物的附着位点,为其提供适宜的生长环境。对微生物胞内酶活性的测定,有助于了解微生物的生长状态,进而明晰固相介质投加对微生物水处理效率的影响。脱氢酶、 α -葡萄糖苷酶、蛋白酶是细胞内普遍存在的三种胞内酶,分别承担着细胞的能量代谢、多糖降解以及蛋白质合成与降解等重要功能,这三种酶的含量已被广泛用于评估细胞的生长代谢状况^[14-15]。因此,本研究通过测定这三种酶的浓

度变化,来表征固相介质投加后对 MBR 体系中微生物活性的影响。

由图 5(a)可知,分别投加三种固相介质后,1.7 mm 活性炭颗粒使体系中脱氢酶含量提升约 50%,2.0 mm PVA 海绵颗粒的提升效果更为显著,达到 110%左右,而 1.7 mm 二氧化硅颗粒的提升效果相对较弱。PVA 海绵颗粒能大幅提高脱氢酶含量,这与其三维网状结构创造的良好微环境密切相关。具有适宜孔隙结构的载体,能为微生物提供稳定栖息场所,促进底物与微生物的接触,进而提升酶活性^[16]。PVA 海绵的结构不仅为微生物提供了稳定的栖息场所,还能促进氧气和营养物质在微生物群

落中的传递,为微生物的能量代谢提供充足保障。图 5(b)显示,在三种固相介质中,PVA 海绵颗粒对 α -葡萄糖苷酶含量的提升效果最佳,提升幅度约 45%,二氧化硅颗粒的作用效果仍最差。PVA 海绵的亲水性及特殊孔隙结构,可能更契合产 α -葡萄糖苷酶微生物的生存需求,促进了酶的合成与积累。图 5(c)则表明,活性炭颗粒与二氧化硅颗粒对蛋白酶含量的提升效果相近,均在 30%左右,而 PVA 海绵颗粒对蛋白酶含量的提升效果依旧最为突出,达到 100%左右。三种固相介质均能在一定程度上提高生物酶活性,反映出投加固相介质对 MBR 系统中微生物代谢功能的积极促进作用。

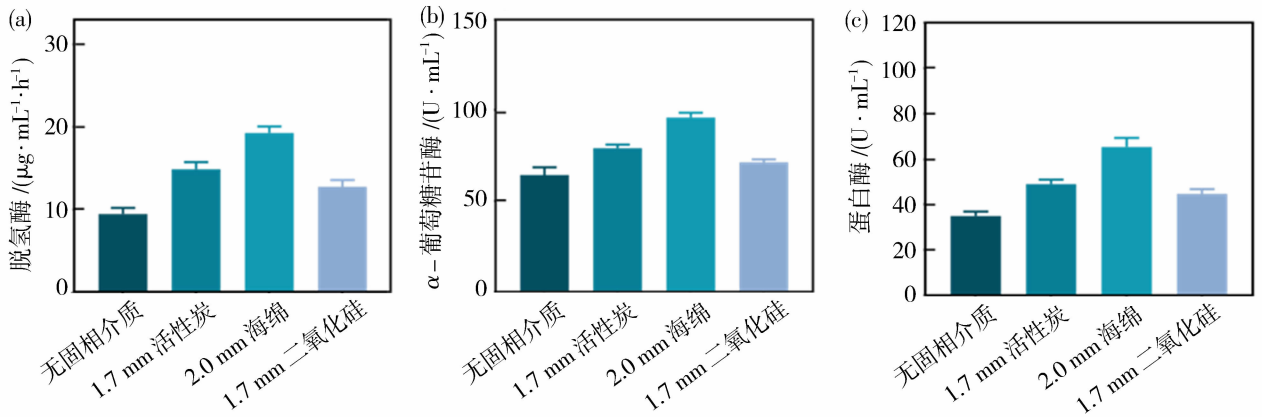


图 5 不同固相介质投加对于 MBR 系统中胞内酶活性的影响:脱氢酶(a); α -葡萄糖苷酶(b);蛋白酶(c)
Fig. 5 Effects of different solid-phase media addition on intracellular enzyme activity in the MBR system: dehydrogenase (a); α -glucosidase (b);protease (c)

上述结果说明,海绵颗粒由于具有三维网状结构,有利于微生物的吸附,能为微生物提供更好的生长环境,有利于微生物代谢,因此其对于三种胞内酶含量的提升效果最明显,这就代表了海绵固相介质投加下微生物的生长状态最好,更有利于在 MBR 系统中通过生物化学活动降低污染负荷,减轻膜污染,增强系统水处理效率。活性炭颗粒因其具有较大的比表面积,也能为微生物提供一定的附着生长位点,因此其也能提升胞内酶的含量,促进微生物生物化学活动,但效果不如 PVA 海绵颗粒。二氧化硅微球虽不能提供微生物生长附着位点,但其投加后使流场更加均匀,微生物分布也更加均匀,这在一定程度上也能增加胞内酶的含量。

2.4 MBR 体系微生物群落分析

固相介质的投加会改变 MBR 系统的流场剪切力分布及强度,这种改变可能进一步影响微生物群

落的演替过程。基于此,针对不同类型固相介质投加的情况,探究 MBR 体系中微生物的演替特征,旨在明确固相介质投加对微生物群落结构产生的具体影响。

由图 6(a)可知,投加 1.7 mm 活性炭颗粒前后,MBR 体系中微生物群落组成发生一定变化:投加后微杆菌科(Microbacteriaceae)微生物的占比有所提升。在 MBR 水处理系统中,Microbacteriaceae 微生物可通过分解水体中的有机物降低系统有机污染负荷^[17]。同时,假单胞菌科(Pseudomonadaceae)微生物的占比也有一定提升,其作用与微杆菌科微生物类似,主要通过降低体系污染负荷减缓膜污染进程,进而提升 MBR 的水处理效率。图 6(b)显示,投加 2.0 mm PVA 海绵后,体系中黄杆菌科(Flavobacteriaceae)微生物的丰度显著增加。该类微生物能促进生物膜的形成,使生物膜包裹在海绵介质

表面,从而减少 LB-EPS 的释放,降低 MBR 系统的污染负荷^[18]。此外,中村氏菌属(*Nakamurella*)微生物的丰度在投加前后也有明显变化,这类微生物对加速生物膜形成同样具有重要作用。对投加 PVA 海绵与未投加 PVA 海绵的 MBR 体系在稳定运行 8 h 后进行取样,测定了体系中 LB-EPS 和 TB-EPS 的含量。结果显示,投加 PVA 海绵可

显著降低体系内 LB-EPS 的含量(约 50%),而 TB-EPS 含量则无明显变化,这一结果印证了上述微生物介导的作用路径。由图 6(c)可知,1.7 mm 二氧化硅因表面光滑,无微孔及三维网状结构,无法为微生物提供附着位点以促进其生长与演替,因此投加前后微生物群落变化微小,群落结构基本保持不变。

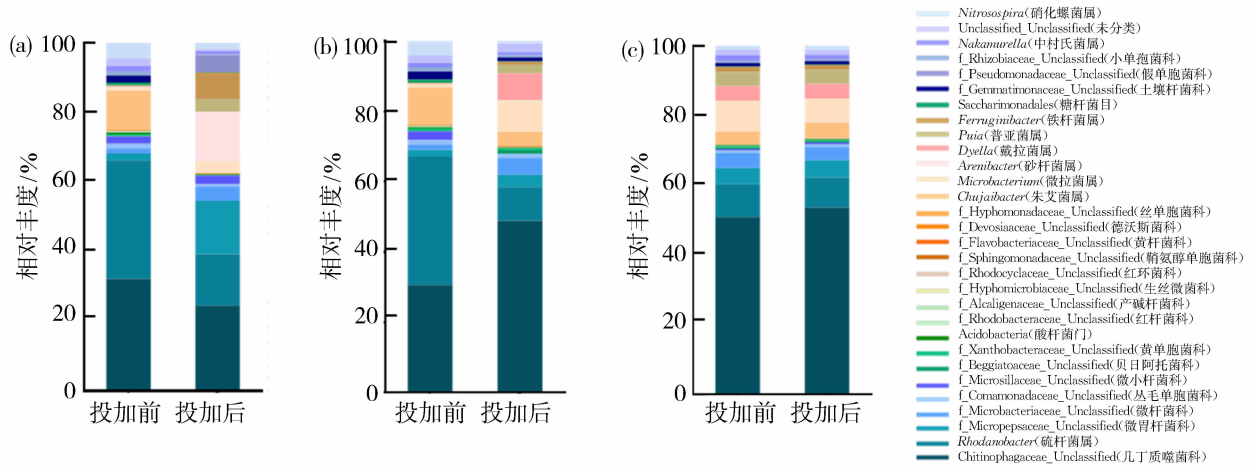


图 6 不同类型固相介质投加条件下 MBR 体系中微生物演替的变化:

1.7 mm 活性炭(a);2.0 mm PVA 海绵(b);1.7 mm 二氧化硅(c)

Fig. 6 Changes in microbial succession in MBR system under different solid-phase media addition:

1.7 mm activated carbon (a);2.0 mm PVA sponge (b);1.7 mm silica (c)

进一步分析可见,活性炭投加条件下,随着剪切力增加,微生物演替朝着降低水体污染负荷、减缓膜污染、提升水处理效率的方向进行;PVA 海绵投加时,剪切力提升促使微生物演替向加快成膜速度、减少微生物代谢产物、减轻膜污染、提高 MBR 运行效率的方向发展;而二氧化硅投加条件下,剪切力提升并未对微生物演替产生显著影响。由此表明,在投加比表面积大、能提供微生物附着位点且适宜微生物生长的固相介质时,剪切力可影响微生物演替;而对于不利于微生物生长的固相介质,剪切力的改变则难以影响微生物演替进程。

3 结论

本研究分析了不同固相介质投加条件下对 MBR 系统的影响,围绕固相介质强化流场分布与提升通量、对胞内酶活性及微生物群落结构的作用展开探讨,结论如下:

1) 流场剪切力与膜通量变化方面,投加 1.7 mm 活性炭颗粒、2.0 mm PVA 海绵颗粒和

1.7 mm 二氧化硅颗粒的 MBR 系统,流场有效剪切力均显著提升,且分布均匀性均有改善。其中,活性炭颗粒因形貌不规则,其剪切力分布均匀度较其他两种介质低。当曝气强度提升至 3 L/min 时,三种介质体系的膜通量分别提升 47%、50% 和 43%,与剪切力变化趋势一致,且 PVA 海绵颗粒的通量提升最为显著。

2) 胞内酶活性影响方面,固相介质投加后,MBR 系统中微生物胞内酶活性均有提升。具体而言,投加 2.0 mm PVA 海绵颗粒使脱氢酶、 α -葡萄糖苷酶、蛋白酶含量分别增加 110%、45% 和 100%;1.7 mm 活性炭颗粒使上述酶含量分别提升 50%、24% 和 30%;1.7 mm 二氧化硅颗粒的提升效果最弱,仅使三种酶含量分别增加 35%、8% 和 28%。这表明 PVA 海绵的三维网状结构能为微生物提供优质生长位点,显著增强代谢降解能力,从而降低污染负荷。

3) 微生物群落演替方面,不同固相介质导致微生物朝不同方向演替:1.7 mm 活性炭颗粒投加后,

微杆菌科 (Microbacteriaceae) 和假单胞菌科 (Pseudomonadaceae) 等污染物降解菌占比提升, 加速污水降解并减轻膜污染; 2.0 mm PVA 海绵颗粒使黄杆菌科和中村氏菌属 (*Nakamurella*) 等成膜微生物丰度增加, 通过减少 LB-EPS 释放减轻生物污染; 1.7 mm 二氧化硅颗粒投加前后, 微生物群落结构基本不变, 主要依赖剪切力控制膜污染。

本研究明确了 PVA 海绵在强化流场均匀性、提升膜通量及促进微生物代谢方面的优势, 为 MBR 系统中固相介质的选型提供了具体参考。在高有机负荷污水处理场景中, 优先选用 PVA 海绵可使系统运行效率提升, 同时延长膜组件寿命, 具备经济与环境效益。但需注意的是, 本研究尚未对 PVA 海绵的工程应用缺陷进行系统评估, 包括其机械强度不足可能导致的破碎风险、长期运行中潜在的堵塞问题等关键工程化指标。后续研究需围绕上述问题展开, 并结合材料单价、更换周期等参数, 构建全生命周期成本核算模型, 全面对比不同固相介质的经济适用性及耐用性差异。

参考文献:

- [1] Attallah O A, Al-Ghobashy M A, Nebsen M, *et al.* Assessment of pectin-coated magnetite nanoparticles in low-energy water desalination applications[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, 25(19): 18476-18483.
- [2] Zhou T, Guo J, Zhang S, *et al.* Metabolic products comparison in autotrophic and heterotrophic nitrogen removal: Insights into membrane fouling [J]. *Water Res*, 2025, 282: 123619.
- [3] Razmjou A, Liu Q, Simon G P, *et al.* Bifunctional polymer hydrogel layers as forward osmosis draw agents for continuous production of fresh water using solar energy[J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47 (22): 13160.
- [4] 欧阳卓明, 罗凡, 孙先昌, 等. 基于 BioWin 对 AAO-MBR 工艺的生物除磷优化[J]. *中国给水排水*, 2025, 41(7): 82-88.
- [5] Skouteris G, Hermosilla D, López P, *et al.* Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review[J]. *Chem Eng J*, 2012, s198/199: 138-148.
- [6] Taheri M, Fallah N, Nasernejad, B. Comparison of high-concentration azo dye removal by long HRT in MSBRs' bioaugmented with GAC and sponge media[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2023, 30(1): 1201-1215.
- [7] Hartanto Y, Yun S, Jin B, *et al.* Functionalized thermo-responsive microgels for high performance forward osmosis desalination[J]. *Water Res*, 2015, 70: 385-393.
- [8] 王亚军, 徐衍超, 张四永, 等. 曝气协同粉末活性炭调控 MBR 运行[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(17): 71-78.
- [9] 王旭东, 赵童, 刘琪, 等. 海绵填料对 AAO-MBR 处理效能及膜污染的影响[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(13): 21-26.
- [10] Liu Y N, Zhang X B, Ngo H H, *et al.* Specific approach for membrane fouling control and better treatment performance of an anaerobic submerged membrane bioreactor[J]. *Bioresource Technol*, 2018, 268: 658-664.
- [11] 肖霄. 添加填料对减缓 MBR 膜污染的影响及作用机制[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2018.
- [12] Wang K M, Shen Y, Jiang S F, *et al.* The effect of different static biocarriers on process performance, membrane fouling and microbial community in submerged membrane bioreactor treating municipal wastewater under high and low carbon/nitrogen ratios [J]. *J Water Process Eng*, 2022, 47: 102709.
- [13] Alighardashi A, Pakan M, Jamshidi S, *et al.* Performance evaluation of membrane bioreactor (MBR) coupled with activated carbon on tannery wastewater treatment [J]. *Member Water Treat*, 2017, 8(6): 517-528.
- [14] Molina-Muñoz M, Poyatos J M, Rodelas B, *et al.* Microbial enzymatic activities in a pilot-scale MBR experimental plant under different working conditions [J]. *Bioresource Technol*, 2010, 101(2): 696-704.
- [15] 任治印. 生活污水处理厂中抗性基因的分布特征及等离子体/CaO₂ 对污泥中抗性基因的去除工艺[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2023.
- [16] Shi J, Liang Z X, Dai X H. Enhanced biological phosphorus and nitrogen removal by high-concentration powder carriers: Extracellular polymeric substance, microbial communities, and metabolic pathways [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2023, 30: 4010-4022.
- [17] Silva A F, Antunes S, Saunders A, *et al.* Impact of sludge retention time on the fine composition of the microbial community and extracellular polymeric substances in a membrane bioreactor [J]. *Appl Microbiol Biot*, 2016, 100(19): 8507-8521.
- [18] Sinahroy A, Kim S H, Kim S H. Effect of electrooxidation pretreatment on treatment efficiency,

membrane fouling and microbial community of a
membrane bioreactor treating sludge dewatering

wastewater[J]. Process Saf Environ, 2024, 191(Part
A): 466-477.

Impact of solid-phase media addition on membrane fouling and microbial community in MBR systems

WU Wei¹, LI Ming², ZHANG Pengfei³, GAO Fei², WU Wei³

- (1. Hefei Water Environment Construction Investment Co., Ltd., Hefei 230000, China;
2. School of Environmental Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Membrane bioreactor (MBR) is widely used in wastewater treatment, but membrane fouling restricts their long-term stable operation. This study innovatively introduced fiber Bragg grating (FBG) technology into the MBR flow field, and systematically explored the action mechanisms of three media, namely activated carbon, PVA sponge and silica, on the flow field characteristics and community succession of the reactor. The results showed that increasing aeration intensity significantly enhanced the flow field shear force on the surface of the three media. Among them, the PVA sponge, due to its three-dimensional network structure, led to the most significant increase in flux, followed by activated carbon particles and silica. The PVA sponge provided suitable attachment sites for microorganisms, which could significantly improve intracellular enzyme activity, while activated carbon particles and silica had limited effects on enhancing enzyme activity. Activated carbon accelerated the proliferation of pollution-degrading microbial communities; the PVA sponge drove the film formation of microorganisms to reduce the deposition of biological products; silica controlled pollution relying on shear force and had a weak impact on the community structure. This study provides a theoretical basis for optimizing MBR membrane fouling control strategies.

Key words: membrane bioreactor (MBR); membrane fouling; solid-phase medium; microbial community; shear force

(上接第 152 页)

solution, the feed solution flow rate was 12 L/h, and the temperature was 27 °C. At this time, the membrane flux was 6.938 L/(m² · h), and the reverse solute diffusion flux was 0.235 mol/(m² · h). Chemical cleaning with NaOH, NaClO and citric acid had good effects, among which 5% (mass fraction) citric acid had the best cleaning effect on the apple juice-contaminated membrane, with a membrane flux recovery rate of 83.67%. This article aims to provide technical references for the application of FO technology in the field of fruit juice concentration.

Key words: forward osmosis membrane; zwitterionic; apple juice; concentration; membrane cleaning