

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.003

三价铁对藻菌共生体在养殖废水处理中膜污染的影响

孙 晨, 高梦嘉, 陈姝灿, 丁梓尧, 罗 娜, 王铎针, 熊川懿,
田茂芝, 李 昆

(南昌大学资源与环境学院 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西
南昌 330031)

摘 要: 将电场预处理与藻菌共生-膜耦合技术用于畜禽养殖废水处理可实现对碳、氮、磷的高效去除,但膜污染是制约其应用的主要因素之一。基于电场预处理残留铁离子对藻菌共生体膜污染的影响展开研究,通过在藻菌共生体及其分泌的胞外聚合物(EPS)拆分的各组分中加入铁离子使其浓度分别达到15、40、60、150 mg/L,分析铁离子与EPS各组分相互作用对膜污染的贡献和作用机制。结果表明,铁离子对膜污染的影响存在临界点,当铁离子浓度低于临界点时膜污染减轻,反之则膜污染加剧,推测铁离子浓度临界值在40~60 mg/L之间。造成膜污染的是EPS的主要成分酪氨酸类蛋白质,且对膜污染贡献组分最大的是溶解性微生物产物(SMP),SMP与铁离子的结合能力强于其他组分,是EPS膜污染的主要贡献者。铁离子的加入对SMP、微生物絮体(MFR)的完全堵塞模型拟合度影响最大,其拟合 R^2 值变化高达0.324 1和0.371 1。而在松散附着型胞外聚合物(LB-EPS)、紧密结合型胞外聚合物(TB-EPS)中则是对完全堵塞和标准堵塞影响最大,同时也对膜面污染物的分布产生了影响。

关键词: 铁离子; 藻菌共生体; 膜污染; 胞外聚合物; 畜禽养殖废水

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0018-08

Effect of Fe^{3+} on Membrane Fouling in Microalgae-Bacteria Consortia for Swine Wastewater Treatment

SUN Chen, GAO Meng-jia, CHEN Shu-can, DING Zi-yao, LUO Na,
WANG Xin-zhen, XIONG Chuan-yi, TIAN Mao-zhi, LI Kun

(Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resources Utilization <Ministry of Education>,
School of Resource & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The application of electric field pretreatment and microalgae-bacteria consortia-membrane coupling technology in swine wastewater treatment can achieve efficient removal of carbon, nitrogen and phosphorus, but membrane fouling is one of the main problems restricting its application. Based on the effect of residual iron ions in electric field pretreatment on membrane fouling, iron ions were added to the components of microalgae-bacteria consortia and their secreted extracellular polymeric substances (EPS) to reach the concentrations of 15 mg/L, 40 mg/L, 60 mg/L and 150 mg/L, respectively,

基金项目: 江西省自然科学基金资助面上项目(20212BAB203035); 国家自然科学基金资助项目(51768043); 江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2021-S128)

通信作者: 李昆 E-mail: kunli@ncu.edu.cn

and the contribution and mechanism of the interaction between iron ions and EPS components to membrane fouling were studied. The results showed that there was a critical point for the effect of iron ions on membrane fouling. When the iron ion concentration was lower than the critical point, the membrane fouling was reduced, and vice versa. It was speculated that the critical value of iron ion concentration should be between 40 mg/L and 60 mg/L. The reason for membrane fouling was the main component of EPS, tyrosine proteins, and the largest contributor to membrane fouling was soluble microbial products (SMP). The binding ability of SMP to iron ions was stronger than other components, which was the main contributor to EPS membrane fouling. The addition of iron ions had the greatest influence on the fitting degree of the complete clogging model of SMP and microbial flocs (MFR), and the fitting R^2 values were 0.324 1 and 0.371 1. For loosely bound extracellular polymer (LB-EPS) and tightly bound extracellular polymer (TB-EPS), it had the greatest influence on complete blockage and standard blockage models, and also affected the distribution of pollutants on the membrane surface.

Key words: iron ion; microalgae-bacteria consortia; membrane fouling; extracellular polymeric substances; swine wastewater

近年来畜禽养殖业发展迅速,其产生的废水中含有高浓度的有机物、氮、磷等,具有成分复杂、水质波动大、气味恶臭等特点,传统工艺难以处理达标排放。利用藻菌共生体处理废水,可将藻类对氮、磷等营养物的摄取同化能力与细菌对污染物的好氧代谢能力相结合,使两类生物之间产生协同作用。采用基于藻菌共生体-膜耦合技术可以实现污水中碳、氮、磷的高效脱除,并回收氮、磷等资源^[1]。而将电场预处理与该工艺结合则可进一步提升其处理效果,但与此同时,膜污染成为限制其进一步拓展和应用的关键问题之一。

研究表明,微生物分泌的胞外聚合物(EPS)是造成膜污染的重要成分^[2]。而溶解性微生物产物(SMP)的黏附能力是污泥颗粒与膜接触的 3 700 倍^[3],与沉积于膜面的絮体等物质之间相互黏附,可加剧膜污染,可见 EPS 是造成膜生物反应器中膜污染的重要原因^[4-5]。此外,Fe³⁺等发现 EPS 与水可以形成稳定的水凝胶,而金属离子的存在则会影响 EPS 的凝胶机制^[6],如厌氧颗粒污泥的 EPS 会与 Cu²⁺ 形成络合物^[7],从而影响生物膜的稳定性。EPS 与金属离子在膜污染中均起到重要作用,要控制膜污染,除了研究有机污染外,还需研究 EPS 与金属离子结合后产生的膜污染情况。研究发现经过电场预处理后,铁、铝电极对藻菌共生体分泌的 EPS 产生一定的抑制作用,且对膜污染也会有影响^[8]。李久义等^[9]研究发现,随着 Fe³⁺ 的加入, EPS 中的铁离子含

量越来越高,而一价、二价阳离子的含量却越来越低,这不仅说明铁离子与 EPS 具有较强的亲和能力,也说明在 EPS 中存在离子交换作用。

目前针对铁离子与 EPS 的相互作用对膜污染机制的研究较少,两者对藻菌体系的膜污染机制影响尚不清楚。为此,拟考察不同浓度的三价铁离子对藻菌共生体分泌 EPS 以及膜污染的影响,为藻菌-膜耦合技术用于废水处理提供理论支持。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料与设置

藻菌共生体系具有高效脱氮除磷能力,本试验搭建了培养藻菌共生体的反应装置(见图 1),装置由铝架、LED 灯、玻璃管、空气压缩泵、玻璃管和导气管组成。为防止藻菌生物量流失,维持反应器内稳定有效的藻菌共生体系,加入膜技术以将水力停留时间和污泥停留时间分离,达到更高的生物量和处理负荷,进一步强化对污水的高效处理和资源回收利用。为深入了解铁离子与藻菌共生体 EPS 的相互作用对膜污染的影响,采用模拟废水以排除其他因素干扰。水质指标参考课题组经电场预处理后的畜禽养殖废水, COD、NH₄⁺-N、TP、PO₄³⁻-P 分别为 (1 000±35.35)、(552.92±14.58)、(70.50±6.87)、(64.50±3.87) mg/L, pH 为 7.56±0.01。

首先,取培养好的小球藻和活性污泥分别在 4 000 r/min 下离心 10 min,按照干质量比为 1:5(0.3 g/L 小球藻和 1.5 g/L 活性污泥)将小球藻和活性污

泥接种到模拟废水中,启动反应器,培养藻菌共生体,试验温度为室温 25 °C,光照度设定为 4 000 lx,明暗周期比为 12 h:12 h。反应器稳定后提取 EPS。最后,在混合液及提取的 EPS 组分中加入 FeCl_3 ,使 Fe^{3+} 浓度分别为 0、15、40、60、150 mg/L(记作 A~E 组)。此外,为使 Fe^{3+} 与 EPS 充分混合,每组均在加入 FeCl_3 后搅拌 30 min,再进行超滤试验。

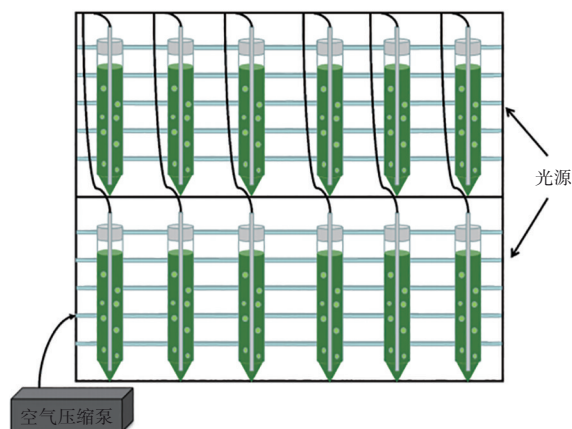


图1 反应器示意

Fig.1 Schematic diagram of reactor

1.2 试验方法

1.2.1 EPS 提取

藻菌体系 EPS 采用三步热提取法提取^[10],分别得到溶解性微生物产物(SMP)、松散结合型胞外聚合物(LB-EPS)、紧密结合型胞外聚合物(TB-EPS)。提取后的剩余沉淀物用 0.05% 的 NaCl 悬浮至原始体积,记为微生物絮体残渣(MFR)^[11]。

1.2.2 恒压过滤试验

采用有效体积为 200 mL 的超滤杯(Millipore Amicon8200),在过滤压力为 20 kPa、磁力搅拌转速为 300 r/min 的条件下进行恒压过滤。PVDF 平板超滤膜(SINAP)的孔径为 0.1 μm ,截留分子质量约为 100 ku,有效过滤面积为 28.3 cm^2 。由氮气瓶提供过滤压力,过滤料液从超滤杯上端进入,过膜后流入天平上的烧杯中,电子天平与计算机超级终端连接,每 10 s 记录一次质量变化,再将其换算为膜通量的变化。试验过程中超滤液体积为 80 mL, SMP、LB-EPS、TB-EPS、MFR 组分的平均用时分别为 1 560、588、446、454 s。在超滤试验开始前,对新膜片进行预清洗处理,用纯水预压至纯水通量稳定。

1.3 分析方法

结合 Hermia 理论的 4 种经典膜污染模型对膜通

量衰减曲线进行线性拟合分析,包括:完全堵塞、标准堵塞、中间堵塞、滤饼层堵塞^[12-13]。采用苯酚-硫酸法测定多糖含量^[14],蛋白质和腐殖酸的含量用改进 Lowry 法测定^[15]。

使用 Hitachi F-7000 荧光光谱仪,结合三维荧光平行因子分析法分析 EPS 各组分荧光物质成分。膜面物质使用 FTIR-7600 红外光谱仪进行测定。

2 结果与讨论

2.1 膜通量变化曲线

A、B、C、D、E 等 5 组混合液的归一化膜通量曲线见图 2,它反映了膜通量和滤液体积的变化情况。可知这 5 组的归一化膜通量曲线随着时间的增加都表现出下降的趋势,A、B、C 组的膜污染依次减轻,而 D、E 组的膜污染则依次加重。Mehrnia 等^[16]研究认为铁离子会吸附 EPS,在细胞和絮状物之间产生阳离子架桥作用,增强絮体的强度,在膜面上形成更多的多孔饼层来减轻膜污染。而 D、E 组出现膜污染加重的情况可能是因为投加的铁离子浓度过高,出现了胶体再稳现象。在这 5 组浓度下,C 组的膜污染减轻效果最佳。

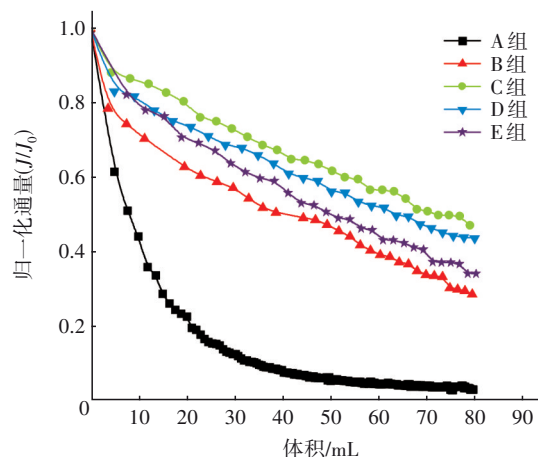


图2 混合液膜通量

Fig.2 Normalized flux of the mixture

图 3 为 SMP、LB-EPS、TB-EPS 及 MFR 的归一化膜通量衰减情况。可以发现在 SMP、TB-EPS 组分中 A、B、C、D 四组呈现出膜污染依次减轻的趋势,而 E 组的最终归一化膜通量介于 B 组与 C 组之间,出现了膜污染突然加重的现象。其次,在 LB-EPS 组分中,A、B、C、D、E 五组的最终归一化通量越来越大,膜污染程度依次减轻。在 MFR 中,A、B、C、D、E 五组的膜通量衰减情况为:从 A 组到 B 组,最终归一

化膜通量显著增大,膜污染明显减轻,但在之后,随着铁离子浓度的增大,最终归一化膜通量反而不断减小,膜污染加重。

Ma 等^[17]研究了 Fe^{3+} 对膜污染的影响,发现在低剂量时膜污染加重,高剂量时膜污染减轻。从各 EPS 组分的衰减曲线可知投加的铁离子浓度存在临界点,在临界点前膜污染随着铁离子浓度的增大而减轻,临界点后膜污染则随着铁离子浓度增大而加重。SMP、TB-EPS、MFR 都出现了以铁离子浓度为临界点产生不同程度膜污染的情况,由此可得铁离子浓度临界值应在 40~60 mg/L 之间。

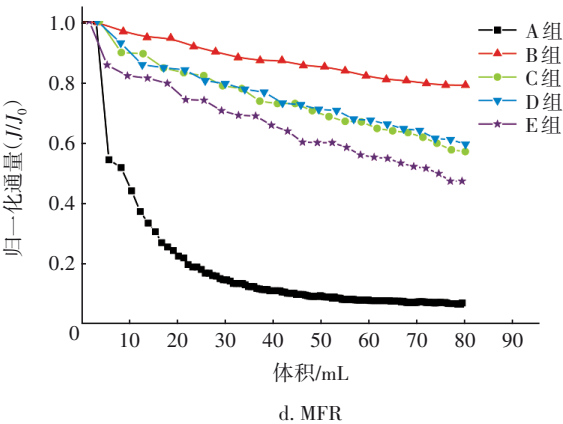
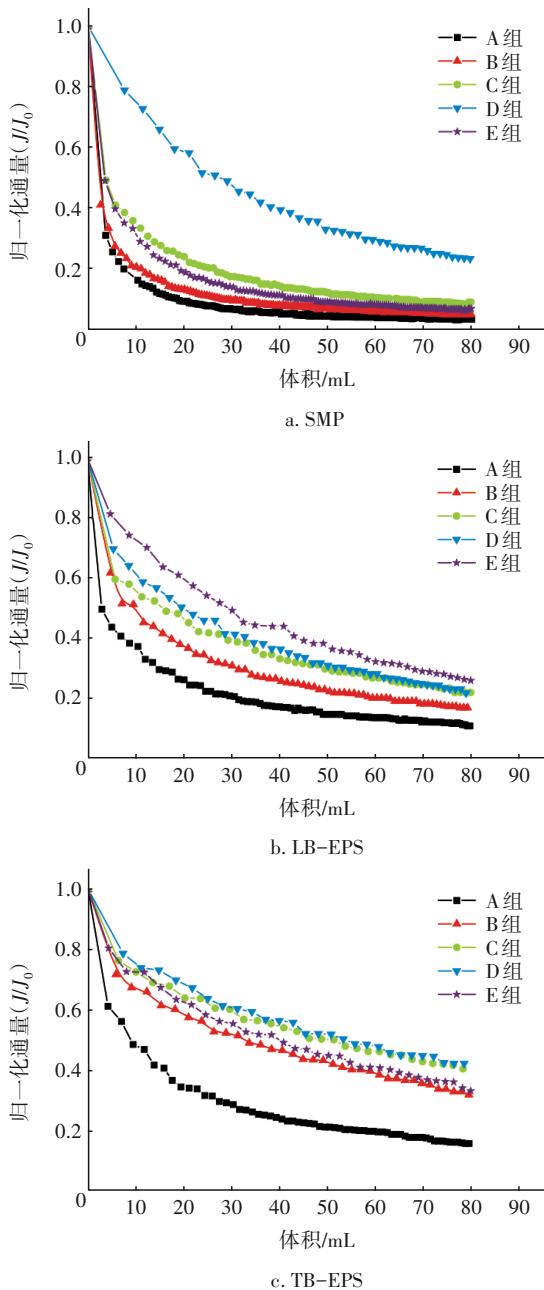


图3 SMP、LB-EPS、TB-EPS、MFR 的归一化通量衰减

Fig.3 Normalized flux attenuation diagrams of SMP, LB-EPS, TB-EPS and MFR

2.2 膜污染模型拟合

为了深入研究膜污染机理,利用膜污染模型进行拟合,表1显示了4种组分的模型拟合结果。

表1 膜污染模型拟合 R^2 值

Tab.1 Membrane model fitting R^2 value

组分	组别	完全堵塞	标准堵塞	中间堵塞	滤饼层
SMP	A 组	0.581 9	0.981 7	0.850 4	0.943 2
	B 组	0.637 2	0.875 1	0.878 9	0.960 8
	C 组	0.775 2	0.756 7	0.933 6	0.984 2
	D 组	0.906 0	0.737 4	0.978 2	0.993 8
	E 组	0.692 7	0.909 0	0.907 2	0.972 1
LB-EPS	A 组	0.783 5	0.894 3	0.916 7	0.973 9
	B 组	0.852 7	0.731 9	0.951 9	0.987 9
	C 组	0.925 2	0.999 3	0.975 2	0.986 1
	D 组	0.919 5	0.969 8	0.980 7	0.993 5
	E 组	0.926 1	0.800 7	0.983 1	0.993 3
TB-EPS	A 组	0.812 7	0.919 0	0.935 2	0.982 8
	B 组	0.953 5	0.984 9	0.982 8	0.986 0
	C 组	0.965 9	0.887 5	0.987 5	0.994 3
	D 组	0.961 7	0.930 1	0.982 0	0.985 8
	E 组	0.940 7	0.968 6	0.981 9	0.988 2
MFR	A 组	0.611 7	0.989 5	0.857 2	0.955 9
	B 组	0.935 2	0.912 6	0.944 2	0.950 0
	C 组	0.984 5	0.996 9	0.987 1	0.980 5
	D 组	0.982 8	0.988 8	0.990 2	0.988 9
	E 组	0.982 3	0.947 3	0.986 5	0.977 4

在 SMP 中,A 组以标准堵塞模型为主,而 B、C、D、E 组均是对滤饼层模型拟合度最好,其中 D 组的滤饼层拟合 R^2 高达 0.993 8。在 LB-EPS 中,A、B、C、D、E 组随着铁离子浓度的增加,先是以滤饼层模型为主,然后变成以标准堵塞模型、中间堵塞模型

及滤饼层模型为主,最终变成以中间堵塞和滤饼层模型为主。在TB-EPS中,中间堵塞模型和滤饼层模型的拟合度均很高,其中滤饼层模型的拟合度几乎无变化,最终TB-EPS的拟合模型以标准堵塞模型、中间堵塞模型及滤饼层模型为主。在MFR中,从A组到E组,完全堵塞模型的拟合度有明显增大,MFR在四个模型均有较高的拟合度。

2.3 EPS成分分析

分别测定了各组提取的EPS在超滤前、后的组分及含量,结果见图4,因为EPS的主要组分为多糖、蛋白质和腐殖酸,所以用三者之和代表EPS的总

含量。从EPS组分的总量来看,投加不同浓度铁离子组在超滤前后存在显著差异,在SMP中A、B、C、D组的截留量有序增加,而E组的截留量则突然减小,这种情况与膜通量的衰减曲线一致。在LB-EPS和TB-EPS中,均在B组有最好的截留效果。Lu等^[18]发现EPS的主要成分是蛋白质和多糖,腐殖酸的含量则较少。从单一组分的含量来看,在超滤前蛋白质均是SMP、LB-EPS、TB-EPS的主要成分,LB-EPS和TB-EPS中多糖含量大于腐殖酸含量,而SMP中多糖含量最低。其中每一组中截留量最大的也均为蛋白质,这表明蛋白质是超滤膜的主要污染物。

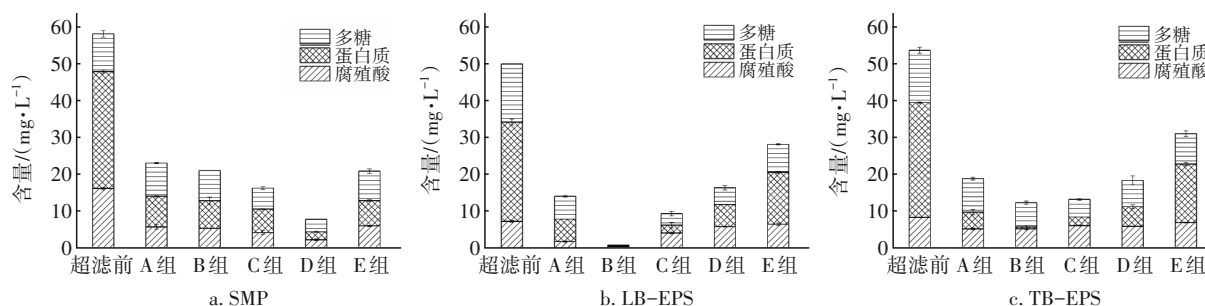


图4 超滤前后SMP、LB-EPS、TB-EPS的多糖、蛋白质和腐殖酸的变化

Fig.4 Change of polysaccharide, protein and humic acid in SMP, LB-EPS and TB-EPS before and after ultrafiltration

为了更加清楚地了解铁离子与EPS各组分相互作用对有机物的影响,对各组超滤前后的三维荧光数据采用平行因子分析法进行主成分分解,确定3组分为最适模型。三维荧光和响应值测定结果显示,组分1分别在激发/发射波长($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$)为200 nm/290 nm和260 nm/290 nm处出现峰值,其荧光特性与酪氨酸类蛋白质类似;组分2出现峰值的激发/发射波长为220 nm/340 nm,荧光特征与色氨酸类蛋白

质相似^[19];组分3出现峰值的激发/发射波长在250 nm/450 nm处,表示腐殖酸类物质^[20]。

最大荧光强度值(F_{max})可表现荧光物质的相对浓度,对比各组 F_{max} 值(见图5),各组SMP、LB-EPS、TB-EPS的主要荧光物质均以酪氨酸类蛋白质为主,经过超滤后,主要下降的物质为酪氨酸和色氨酸类蛋白质,说明这两者是被超滤膜截留的主要蛋白质成分。

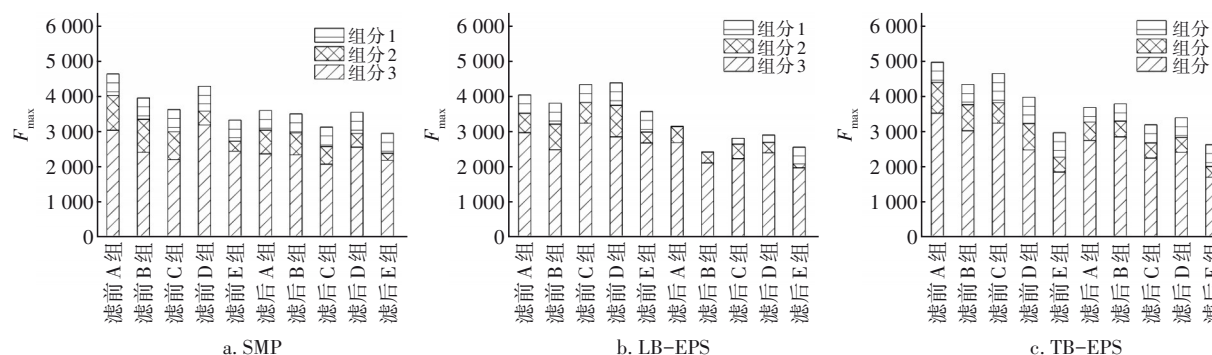


图5 SMP、LB-EPS、TB-EPS平行因子分析法的 F_{max} 值

Fig.5 F_{max} values of SMP, LB-EPS and TB-EPS according to PARAFAC

如表2所示,在SMP中B、C、D组超滤后的铁离子浓度均很低,接近0,而E组的铁离子浓度突然增加;在LB-EPS、TB-EPS、MFR三个组分中呈现出相

似的现象,超滤前后铁离子的变化量改变不大,甚至在LB-EPS及TB-EPS中几乎无变化。

有研究指出多糖与铁容易生成稳定的络合

物^[21],张海丰等^[22]认为将 Fe^{3+} 加入混合液中后,会迅速形成氢氧化铁沉淀,未形成氢氧化铁的 Fe^{3+} 可与EPS发生电中和、架桥作用。对比SMP、LB-EPS、TB-EPS、MFR超滤后三价铁离子的截留量,推测在SMP、LB-EPS、TB-EPS中,一部分铁离子与多糖、蛋白质结合形成络合物,另一部分由于电中和及吸附架桥作用分布于溶液中,结合上文所述EPS中SMP的含量最高,进一步推测可能是SMP中可结合的多糖、蛋白质更多,因此当铁离子浓度在E组水平时,超过了铁离子可结合的临界值,因此超滤后铁离子浓度出现突然增加的情况,而LB-EPS、TB-EPS、MFR中与三价铁离子作用的物质有限,因此三价铁离子的截留量几乎无变化。

表2 超滤后SMP、LB-EPS、TB-EPS、MFR的铁离子浓度

Tab.2 Iron ion concentration of SMP, LB-EPS, TB-EPS and MFR after ultrafiltration $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	B组	C组	D组	E组
SMP	1.220	0.595	0.610	54.840
LB-EPS	0.835	23.995	40.480	131.280
TB-EPS	3.215	28.130	48.375	140.900
MFR	1.590	15.030	34.470	106.680

2.4 膜面化学组分表征

膜片的FTIR光谱如图6所示。由于B、C、D、E的FTIR光谱相似,因此只展示了A组与D组。3 280和2 930 cm^{-1} 处的峰分别与羟基($-\text{OH}$)和碳氢单键($\text{C}-\text{H}$)的拉伸振动有关^[23],1 050 cm^{-1} 处的峰代表的是碳氧单键($\text{C}-\text{O}$),反映了多糖类物质的存在^[24]。1 650和1 550 cm^{-1} 处的峰分别与蛋白质物质的碳氧双键($\text{C}=\text{O}$)和氮氢键($\text{N}-\text{H}$)拉伸振动有关^[23],这对应氨基酸缩合方式组成的蛋白质类物质的多肽链结构。在870 cm^{-1} 处的峰对应于 $-\text{CH}_2$ 化学键的拉伸振动^[25]。此外,LB-EPS、TB-EPS在1 650和1 550 cm^{-1} 处的吸光度明显大于SMP,说明SMP被截留的多糖类物质更多,而LB-EPS和TB-EPS中被截留的主要是多糖类和蛋白质类物质。

由图6还可知,D组的SMP、LB-EPS、TB-EPS光谱图的波峰强度相较于A组有所减弱,这说明D组SMP、LB-EPS、TB-EPS的化学官能团丰度降低了。Nishikawa等人^[26]在使用FTIR光谱研究聚酰亚胺薄膜的分子相互作用时,发现 $\text{C}=\text{O}$ 和 $\text{C}=\text{C}$ 化学键之间存在分子相互作用,两种物质之间相互作用后化学键可能会断裂,化学键的拉伸振动会减弱或

加剧^[27]。这说明一方面铁离子与SMP、LB-EPS、TB-EPS混合后,造成其化学键断裂,随后铁离子与其结合;另一方面,化学键分子作用和静电作用也可能导致官能团的拉伸振动减弱,因而降低了FTIR光谱中化学官能团的丰度。

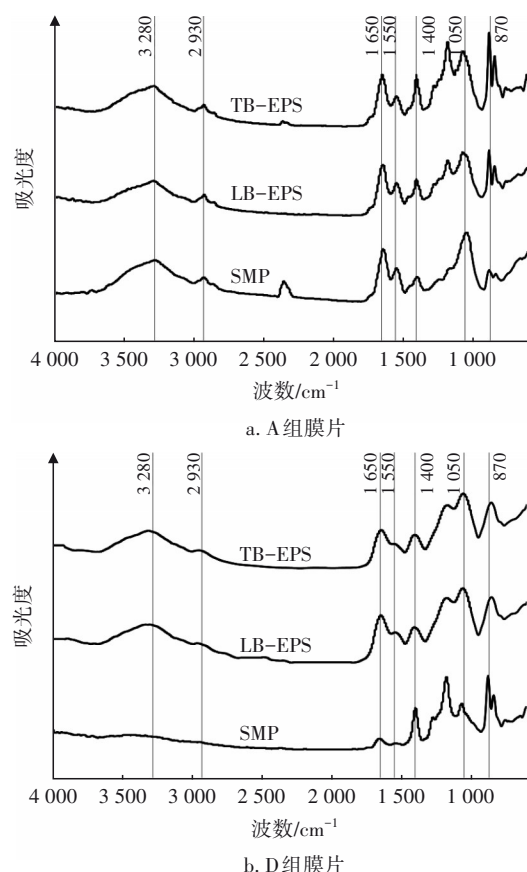


图6 A组和D组膜片的红外光谱

Fig.6 FTIR analysis of group A and D

3 结论

① 从通量衰减曲线可知SMP、TB-EPS、MFR中都出现了以铁离子浓度为临界点产生不同程度膜污染的情况,随着铁离子浓度的增加,膜污染呈现出先减轻后加重的情况,由此可得铁离子浓度临界值在40~60 mg/L 之间。且加入铁离子后对SMP、MFR的完全堵塞模型拟合度影响最大,对LB-EPS、TB-EPS则是完全堵塞和标准堵塞影响程度最大。

② 蛋白质为EPS的主要成分,且在各EPS组分中SMP与铁离子有更强的结合能力。

③ FTIR光谱结果再次证明多糖和蛋白质是污染物的主要成分,加入的铁离子与EPS的相互作用影响了膜面污染物的分布,导致各组分的官能团

丰度降低,影响了通量衰减速率和过滤性能,对膜污染作用机制产生影响。

④ 铁离子会与藻菌共生体产生的EPS发生作用,从而影响膜污染。造成膜污染的原因是EPS的主要成分蛋白质,蛋白质污染物则以酪氨酸类蛋白质为主。SMP与铁离子的结合能力强于其他组分,是EPS膜污染的主要贡献者。

参考文献:

- [1] JEONG Y M, KIM Y J, JIN Y X, *et al.* Comparison of filtration and treatment performance between polymeric and ceramic membranes in anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 199: 182-188.
- [2] 毛鑫,张冰,唐和礼,等. 生物法减缓MBR膜污染的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(18): 34-41.
MAO Xin, ZHANG Bing, TANG Heli, *et al.* Research progress of biological methods to mitigate MBR membrane fouling[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(18): 34-41(in Chinese).
- [3] TENG J, ZHANG M, LEUNG K, *et al.* A unified thermodynamic mechanism underlying fouling behaviors of soluble microbial products (SMPs) in a membrane bioreactor[J]. *Water Research*, 2019, 149: 477-487.
- [4] KUNACHEVA C, SOH Y N A, STUCKEY D C. Identification of soluble microbial products (SMPs) from the fermentation and methanogenic phases of anaerobic digestion[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134177.
- [5] CAO R, ZHOU J, CHEN W. Insights into membrane fouling implicated by physical adsorption of soluble microbial products onto D3520 resin [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020, 28 (2) : 429-439.
- [6] FELZ S, KLEIKAMP H, ZLOPASA J, *et al.* Impact of metal ions on structural EPS hydrogels from aerobic granular sludge[J]. *Biofilm*, 2020, 2: 100011.
- [7] LI G F, MA W J, CHENG Y F, *et al.* A spectra metrology insight into the binding characteristics of Cu^{2+} onto anammox extracellular polymeric substances [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 393: 124800.
- [8] 孙盛进,徐慧,卓梦琼,等. 电场预处理强化微藻处理猪场废水的效果优化研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(8): 3166-3174.
- SUN Shengjin, XU Hui, ZHUO Mengqiong, *et al.* Study on the optimization of the electric field pretreatment for enhanced microalgae treatment of pig farm wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(8): 3166-3174(in Chinese).
- [9] 李久义,吴晓清,陈福泰,等. Fe(III) 对活性污泥絮体结构和生物絮凝作用的影响[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(5): 582-587.
LI Jiuyi, WU Xiaoqing, CHEN Futai, *et al.* Effect of Fe(III) on activated sludge floc structure and bioflocculation [J]. *Journal of Environmental Science*, 2003, 23 (5) : 582-587(in Chinese).
- [10] WANG W, YAN Y, ZHAO Y, *et al.* Characterization of stratified EPS and their role in the initial adhesion of anammox consortia [J]. *Water Research*, 2020, 169: 115223.
- [11] XING J J, WANG H X, CHENG X X, *et al.* Application of low-dosage UV/chlorine pre-oxidation for mitigating ultrafiltration (UF) membrane fouling in natural surface water treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 344: 62-70.
- [12] 李莹,刘强,陈卫,等. 胞外聚合物与膜污染的相关关系研究进展[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(12): 25-30.
LI Ying, LIU Qiang, CHEN Wei, *et al.* Advances of correlation between extracellular polymers and membrane fouling[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(12): 25-30(in Chinese).
- [13] HERMIA J. Constant pressure blocking filtration law application to powder-law non-newtonian fluids [J]. *Institution of Chemical Engineers*, 1982, 60 (3) : 183-187.
- [14] LIU Y, LIU Z, ZHANG A, *et al.* The role of EPS concentration on membrane fouling control: comparison analysis of hybrid membrane bioreactor and conventional membrane bioreactor [J]. *Desalination*, 2012, 305: 38-43.
- [15] ZHENG Y, TANG B, YE J, *et al.* A crucial factor towards a sustainable process for municipal wastewater treatment: fouling effects of different statuses of biomass in the membrane bioreactors with no sludge discharge [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 192: 877-886.
- [16] MEHRNIA M R, AZAMI H, SARRAFZADEH M H. Fouling mitigation in membrane bioreactors using multivalent cations [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, 109C(9): 90-96.

- [17] MA B W, DING Y Y, LI W J, *et al.* Ultrafiltration membrane fouling induced by humic acid with typical inorganic salts[J]. *Chemosphere*, 2018,197:793-802.
- [18] LU M, XI J Y, YEUNG M. Degradation of extracellular polymeric substances (EPS) extracted from activated sludge by low-concentration ozonation [J]. *Chemosphere*, 2016,147:248-255.
- [19] TAHIR M, QUANG V L, MUHAMMAD B A, *et al.* Fate and role of fluorescence moieties in extracellular polymeric substances during biological wastewater treatment: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,718:137291.
- [20] 刘丽贞,黄琪,吴永明,等. 鄱阳湖 CDOM 三维荧光光谱的平行因子分析[J]. *中国环境科学*, 2018,38(1):293-302.
- LIU Lizhen, HUANG Qi, WU Yongming, *et al.* Parallel factor analysis of three-dimensional fluorescence spectra of CDOM in Poyang Lake [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38 (1) : 293-302 (in Chinese).
- [21] 肖雄,彭梅,杨娟. 土党参多糖铁配合物的制备及其理化性质 [J]. *食品科学*, 2015,36(17):13-16.
- XIAO Xiong, PENG Mei, YANG Juan. Preparation and physicochemical properties of polysaccharide-iron complex [J]. *Food Science*, 2015, 36 (17) : 13-16 (in Chinese).
- [22] 张海丰,于海欢. 铁系混凝剂的投加对膜生物反应器运行效能的影响[J]. *化学通报*, 2015, 78 (9) : 792-797.
- ZHANG Haifeng, YU Haihuan. Effect of iron-based coagulant addition on the operation efficiency of membrane bioreactor [J]. *Chemical Bulletin*, 2015,78 (9) : 792-797(in Chinese).
- [23] ZHOU S Q, SHAO Y S, GAO N Y, *et al.* Characterization of algal organic matters of *Microcystis aeruginosa*: biodegradability, DBP formation and membrane fouling potential[J]. *Water Research*, 2014, 52:199-207.
- [24] LI K, WANG J X, LIU J B, *et al.* Advanced treatment of municipal wastewater by nanofiltration: operational optimization and membrane fouling analysis[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016,43:106-117.
- [25] MASAMI F, TATSUMI K J, SEIYA N G. Degradation characteristics of humic acid during photo Fenton processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001,35(18):3683-3690.
- [26] NISHIKAWA Y, NAKANO T, NODA I. Molecular interaction of polyimide films probed by using soft-pulse dynamic compression ATR time-resolved infrared and double Fourier-transform based 2D-IR spectroscopy[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2014, 72:79-89.
- [27] XIAO J, DI N, LIU G, *et al.* The interaction of N-butoxypropyl-N'-ethoxycarbonylthiourea with sulfide minerals: scanning electrochemical microscopy, diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy, and thermodynamics [J]. *Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects*, 2014, 456: 203-210.

作者简介:孙晨(1997-),女,江西吉安人,硕士,主要研究方向为废水资源化。

E-mail:897442610@qq.com

收稿日期:2023-01-08

修回日期:2023-03-11

(编辑:李德强)

深入实施乡村振兴战略,促进人水和谐