

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.011

HRT对MF-OMBR工艺处理特性的影响

刘玄宁^{1,2}, 王旭东^{1,2}, 杜书雅^{1,2}, 王磊^{1,2}, 张龙³, 高峰⁴

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省膜分离重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学 网络与信息化管理处, 陕西 西安 710055; 4. 中国建筑设计研究院有限公司, 北京 100044)

摘要: 为探索水力停留时间(HRT)对联合微滤-正渗透膜生物反应器(MF-OMBR)运行性能及膜污染的影响,构建了分置式MF-OMBR装置处理生活污水,考察了HRT分别为5、8和12 h时装置连续运行14 d的效果。结果表明,当反应器HRT从5 h增加到12 h时,盐分积累愈加严重,但整体电导率均小于2.5 mS/cm,处于低盐水平;当HRT分别为5、8和12 h时,正渗透(FO)膜初始通量相差不大,但14 d后通量分别下降了54.8%、49.8%和67.3%。不同HRT条件下,MF-OMBR系统对生活污水的处理效果良好,MF和FO系统对TOC和氨氮的去除率分别达到93.0%和95.6%以上,FO系统对TN和TP的去除率可以达到77.0%和98.7%以上。当HRT为8 h时,MF-OMBR系统的综合效益最佳。不同HRT条件下,FO膜表面有机物均为蛋白质和多糖。当HRT为8 h时,由于FO膜表面污染物负载率降低和溶解性胞外聚合物(SMP)的减少,实现了对膜污染的有效控制。

关键词: 正渗透膜生物反应器; 微滤; 水力停留时间; 盐分积累; 膜污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0075-08

Effect of HRT on Treatment Characteristics of MF-OMBR Process

LIU Xuan-ning^{1,2}, WANG Xu-dong^{1,2}, DU Shu-ya^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, ZHANG Long³, GAO Feng⁴

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Membrane Separation Technology, Xi'an 710055, China; 3. Network and Information Management Division, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

Abstract: A separate microfiltration and forward osmotic membrane bioreactor (MF-OMBR) system was constructed for the treatment of domestic sewage, and its performance of continuous operation for 14 days was investigated when the hydraulic retention time (HRT) was 5 h, 8 h and 12 h, respectively, so as to reveal the effect of HRT on the operational performance and membrane fouling of the combined process. When the HRT of the reactor was increased from 5 h to 12 h, more serious salt accumulation was observed. However, the overall conductivity was less than 2.5 mS/cm, indicating that the salinity was low.

基金项目: 陕西省技术创新引导专项(2018 hJCG-18); 陕西省自然科学基金资助项目(2019JM-596); 陕西省水利厅科技计划项目(2021slkj-6); 西安市科技计划创新项目(20191622515KYPT016JC018)

通信作者: 王旭东 E-mail: xudongw7904@126.com

When the HRT was 5 h, 8 h and 12 h, respectively, there was no significant difference among the initial fluxes of forward osmosis (FO) membrane, whereas the flux decreased by 54.8%, 49.8% and 67.3% respectively after 14 days. Under different HRT conditions, the MF-OMBR system had a good performance for the treatment of domestic sewage. The MF and FO system demonstrated removal rates of more than 93.0% for TOC and more than 95.6% for ammonia nitrogen, and the FO system alone had the removal rates of more than 77.0% for TN and more than 98.7% for TP. The comprehensive benefit of MF-OMBR system was the best when the HRT was 8 h. Under different HRT conditions, the organic compounds on the surface of the FO membrane were protein and polysaccharide. When the HRT was 8 h, the effective control of membrane fouling was realized due to the reduction of contaminant loading rate and soluble microbial products (SMP) on the surface of the FO membrane.

Key words: forward osmotic membrane bioreactor; microfiltration; HRT; salt accumulation; membrane fouling

近年来,联合正渗透(FO)和活性污泥工艺的正渗透膜生物反应器(OMBR)在废水处理和再生领域掀起了一番热潮^[1]。OMBR采用高截留率、致密的FO膜代替传统MBR中用于固液分离的微滤(MF)或超滤(UF)膜,可提供高质量的产品水,且具有低结垢特性^[2-3]。然而,OMBR中原液的浓缩和反向盐渗透会导致生物反应器中盐分积累,对FO膜性能和微生物活性产生不利影响^[4-5]。

关于OMBR系统中盐分积累问题,其解决办法大致有两个方向:一是优化操作条件,如选择合适的汲取液、采用高选择性FO膜、缩短污泥停留时间(SRT)等;二是将OMBR与其他系统集成^[4]。基于汲取液的选择优化,有研究将无机汲取液与表面活性剂进行了混合,但此过程需要确定最佳表面活性剂浓度,因为较高的表面活性剂浓度可能会增加溶液黏度^[6]。也有研究利用有机溶质作为汲取液,认为有机溶质很容易被生物降解,不会诱导生物反应器中长期盐分的积累,但是Siddique等^[7]和Luo等^[8]研究发现,CH₃COONa作为汲取液时为微生物提供了额外的碳源,会加剧FO膜污染,同时EDTA-2Na的反向扩散抑制了生物量的生长和活性。此外,通过定期排泥来缩短SRT可以缓解盐分积累,但是Wang等^[9]的研究指出,即使在SRT为10 d下运行,其盐度仍然很高,而且频繁的排泥会增加污泥处理成本。基于混合系统的开发,将MF膜与OMBR集成MF-OMBR系统,将出水分至两端(MF侧和FO侧),可有效去除反应器中积累的盐分^[10-12]。但系统的水力停留时间(HRT)会影响污泥混合液特

性,导致膜污染加剧^[13-14],因此有必要进一步研究MF-OMBR中HRT的影响。

基于MF-OMBR系统,笔者优化了多孔MF膜与FO膜之间的通量比,确定了最佳水力停留时间,降低了生物反应器中盐分积累量,确保了MF-OMBR系统两端渗透出水的质量,并尽可能地减少了FO膜污染,以期在实际应用中实现盐分管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

接种污泥:接种污泥取自西安市某污水处理厂(A²O工艺)的终沉池,用模拟的生活污水在MF-MBR系统(此时未安装FO膜组件,用于前期驯化污泥)中驯化1个月,当污泥浓度稳定达到3.5 g/L、污泥沉降比为20%~30%后投入使用。

原水:进水为模拟的生活污水,采用无水乙酸钠作为碳源、氯化铵作为氮源、磷酸二氢钾作为磷源。添加碳酸钙、碳酸镁和七水合硫酸亚铁作为微生物的营养元素。原水TOC、氨氮、TN和TP浓度分别为(109.9±2.65)、(26.39±0.59)、(27.79±0.75)和(3.98±0.28) mg/L,电导率为600~750 μS/cm。

汲取液:选择1.0 mol/L的NaCl溶液作为汲取液,每天更换,以保证足够的渗透压。将装有汲取液的容器放置在电子天平上,并通过与天平连接的计算机实时监测汲取液质量的变化,从而计算出正渗透膜的通量。

实验装置:分置式MF-OMBR装置如图1所示。生物反应器的有效容积约为1.5 L,汲取液池的有效

容积约为0.7 L。将进水连续地泵入MF-OMBR系统,在反应器中设置液位继电器以保持水位恒定,在使用曝气泵为活性污泥微生物提供氧气的同时对系统中MF膜组件进行表面冲刷。实验在室温(28±2)℃条件下运行,期间水温恒定在(24±2)℃,污泥混合液和汲取液的错流速度均为0.25 L/min, SRT为30 d。

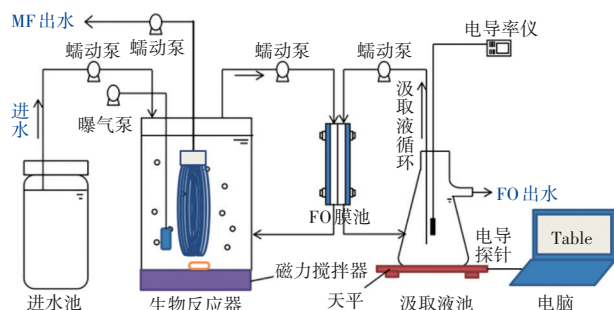


图1 分置式MF-OMBR装置示意

Fig.1 Schematic diagram of split MF-OMBR device

膜材料:微滤膜采用PVDF外压式中空纤维膜组件,膜丝外径为1.6 mm,膜孔径为0.08 μm,有效膜面积约为120 cm²。正渗透膜为三醋酸纤维(CTA)材质,有效膜面积为52.25 cm²,使用前在去离子水中浸泡24 h。

1.2 分析项目及方法

1.2.1 盐分积累模型

HRT的控制:在MF-OMBR系统中从微滤膜和正渗透膜两端出水,在保证FO膜面积不变的前提下,FO端出水流量变化不大,可通过调节MF膜出水泵流量改变生物池HRT。由于FO膜非常致密,所以可溶性化合物不会透过FO膜,因此被生物反应器截留,用污染物停留时间(CRT)表示系统中可溶性化合物的停留时间^[15],原理如图2所示。

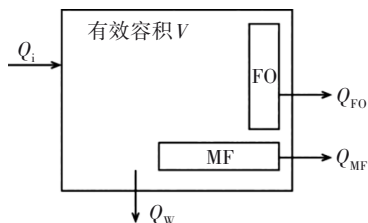


图2 MF-OMBR系统生物反应器流向原理

Fig.2 Flow direction of bioreactor of MF-OMBR system

HRT、CRT计算过程分别见式(1)和式(2)。

$$HRT = \frac{V}{Q} = \frac{V}{Q_{MF} + Q_{FO} + Q_W} \quad (1)$$

$$CRT = \frac{V}{Q_C} = \frac{V}{Q_{MF} + Q_W} \quad (2)$$

式中:HRT为水力停留时间;CRT为污染物停留时间;V为生物反应器有效容积;Q为反应器排出的液体流量;Q_C为反应器排出的污染物流量;Q_{MF}为MF膜的出水流量;Q_{FO}为FO膜出水流量;Q_W为排泥量。

盐分积累因子(CF):生物反应器中盐分积累主要是因为原液浓缩和反向盐渗透,CF的计算过程见式(3)。

$$CF = \frac{CRT}{HRT} = \frac{Q_{MF} + Q_{FO} + Q_W}{Q_{MF} + Q_W} \approx \frac{Q_{MF} + Q_{FO}}{Q_{MF}} = 1 + \frac{Q_{FO}}{Q_{MF}} \quad (3)$$

由此可知,CF的大小主要由Q_{FO}/Q_{MF}值决定。

1.2.2 常规水质分析方法

氨氮、TN、TP参照《水和废水监测分析方法》(第4版)测定,TOC使用TOC分析仪测定。

1.2.3 胞外聚合物的提取及分析

活性污泥中溶解性胞外聚合物(SMP)和附着性胞外聚合物(BEPS)的提取采用加热离心提取法^[13,16]。采用多糖和蛋白质加和的方式表征SMP和BEPs含量,蛋白质的测定采用考马斯亮蓝G250染色法,多糖的测定采用蒽酮试剂法^[16]。

1.2.4 膜污染表征

将正渗透膜裁剪成尺寸为5.0 mm×5.0 mm的正方形后,用于扫描电镜能谱仪(SEM-EDS)和傅里叶变换衰减全反射红外光谱法(FTIR-ATR)分析。采用SEM-EDS分析FO原膜和污染膜的表面形貌以及元素组成,FTIR-ATR用来检测有机官能团,辨别FO膜表面的有机物种类。另外,裁剪大小为15.0 mm×15.0 mm的污染膜片用于对其表面的主要污染物进行量化分析,将膜片置于20 mL的去离子水中,先后搅拌和超声各5 min后过0.45 μm滤膜,测定滤液中有有机物浓度。

2 结果与讨论

2.1 盐分积累情况

不同HRT条件下反应器中电导率的变化如图3所示。可知,生物反应器整体处于低盐水平,电导率先快速上升后逐渐趋于稳定。当HRT为5、8和12 h时,生物反应器稳定电导率分别为1.2、1.25和2.2 mS/cm。这主要归因于MF-OMBR装置中引入

了MF膜,大部分盐分通过MF膜排出,从而缓解了反应器中盐分的积累^[12]。

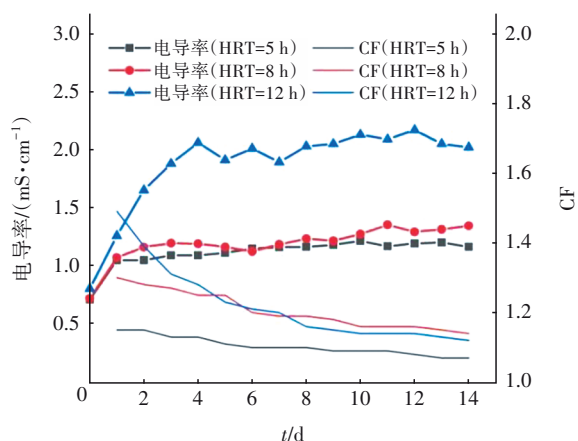


图3 不同HRT条件下反应器中电导率的变化

Fig.3 Change of conductivity in reactor under different HRT conditions

根据盐分积累模型可知,MF-OMBR系统电导率主要由盐分积累因子CF决定, Q_{FO}/Q_{MF} 减小引起CF值减小,生物反应器中的盐分积累减轻,具体参数见表1。

表1 MF-OMBR系统运行关键操作参数

Tab.1 Key operating parameters of MF-OMBR system

序号	FO膜通量/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	MF膜通量/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	HRT/h	CRT/h	Q_{FO}/Q_{MF}	CF值
1	5.94±2.24	16.91±0.02	5.00±0.19	5.54±0.01	0.11±0.04	1.11±0.04
2	6.71±2.22	9.62±0.40	8.01±0.20	9.76±0.41	0.22±0.08	1.22±0.08
3	5.51±2.79	6.10±0.76	11.97±0.24	15.6±1.96	0.30±0.18	1.30±0.18

2.2 MF和FO膜通量的变化规律

不同HRT条件下MF和FO膜通量的变化见图4。由图4可知,不同HRT条件下,FO膜的初始通量约为8.9 L/(m²·h),运行过程中FO膜通量不断下降,HRT为5、8和12 h的14 d膜通量下降率分别为54.8%、49.8%和67.3%。FO膜通量的下降主要归因于FO膜内部的浓差极化(ICP)、盐分累积和膜污染等原因^[17],但因为在MF-OMBR系统中反应器整体处于低盐水平,所以造成通量下降差异的原因是不同HRT产生的ICP现象及膜污染程度的不同。MF膜通量基本稳定且稍有提升,这是由于随着反

应的进行,FO膜通量下降,为了匹配HRT的设定值,需要提升MF膜出水泵转速来加大MF膜通量,属于人为调控。

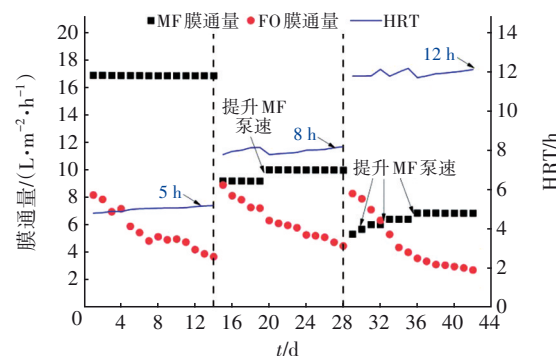


图4 不同HRT条件下MF和FO膜通量的变化

Fig.4 Variation of MF and FO membrane flux under different HRT conditions

2.3 污染物去除效果

2.3.1 对TOC的去除

不同HRT条件下TOC浓度的变化如图5所示。可知,不同HRT条件下,活性污泥上清液、MF出水、FO出水中的TOC表现几乎一致。MF出水的TOC浓度为(8.0±1.9) mg/L(折算为COD约19.8 mg/L);FO出水的TOC浓度为(5.7±0.8) mg/L(折算为COD约14.8 mg/L)。系统对TOC的去除率均可达到93.0%以上,原因是系统对TOC的去除主要依靠微生物降解和两种渗透膜的截留作用^[10-11],通过改变HRT并不能增强反应器对TOC的降解效果。

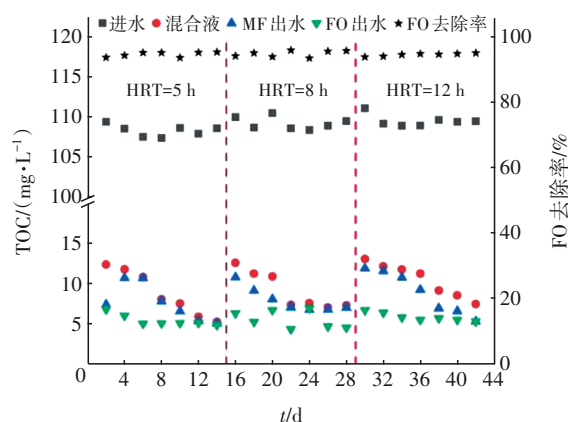


图5 不同HRT条件下TOC浓度的变化

Fig.5 Variation of TOC concentration under different HRT conditions

2.3.2 对氨氮的去除

不同HRT条件下氨氮浓度的变化如图6所示。可知,不同HRT运行条件下反应器内氨氮浓度均较

低, MF和FO出水中的氨氮浓度与混合液相差不多, 约为1.5 mg/L, 系统对氨氮的去除率均可达到95.6%以上。这是由于反应器是单独的好氧环境, 氨氮通过硝化作用转化为硝酸盐, 对氨氮的去除主要依靠微生物降解作用, 两种渗透膜对氨氮的截留效果不明显。

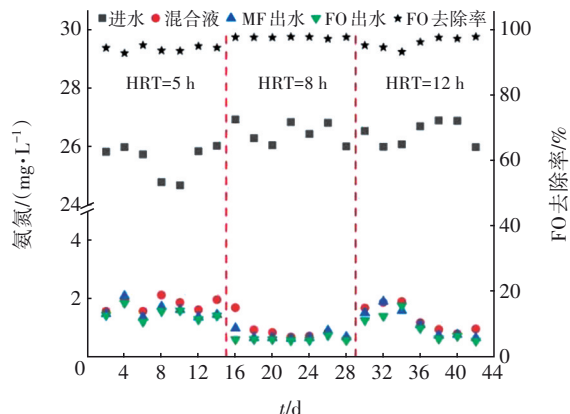


图6 不同HRT条件下氨氮浓度的变化

Fig.6 Variation of ammonia nitrogen concentration under different HRT conditions

2.3.3 对TN和TP的去除

不同HRT条件下TN和TP浓度的变化见图7。由图7可知,随着HRT的增加,生物反应器中TN和TP积累越来越严重,这是由于反应器内缺少反硝化和厌氧释磷过程,无法通过微生物去除TN和TP,再加上FO膜对硝酸盐和磷酸盐的截留作用,导致TN和TP在反应器内积累^[15]。由表1可知,HRT越长, Q_{FO}/Q_{MF} 值越大,进而TN和TP在反应器中积累越多。另外,受到混合液中TN和TP积累的影响,MF出水中TN和TP的浓度也将随之升高,但此时MF出水水质仍可满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)要求,可用于冲厕、车辆冲洗、道路清扫、消防和建筑施工等。而FO膜对TN和TP的去除率分别可达77.0%和98.7%以上,这主要归因于FO膜的致密性和高截留性能,磷酸盐几乎全部被截留在反应器内,由于 NO_3^- 离子半径小于 PO_4^{3-} ,使得FO膜对其截留率略低^[18]。杨应明等人^[16]采用NaCl和EDTA-2Na作为汲取液来运行OMBR,系统对TN和TP的去除率分别可达到71.7%和99.2%以上;Holloway等人^[19]的研究表明,OMBR和UF-OMBR对氮和磷的平均去除率分别超过82%和99%,与本研究获得的结果类似。

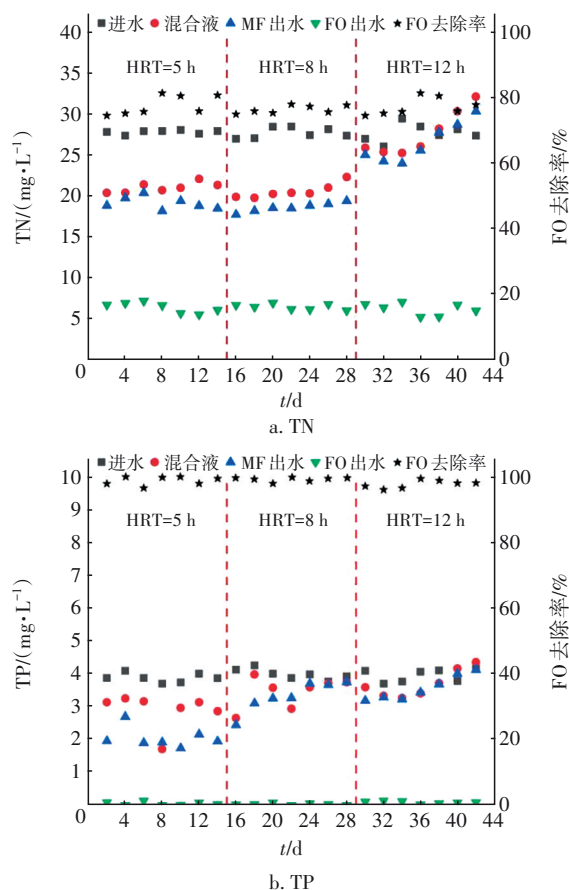


图7 不同HRT条件下TN和TP浓度的变化

Fig.7 Variation of TN and TP concentrations under different HRT conditions

2.4 污泥性质的变化

不同HRT条件下SS、VSS和VSS/SS的变化情况见图8。

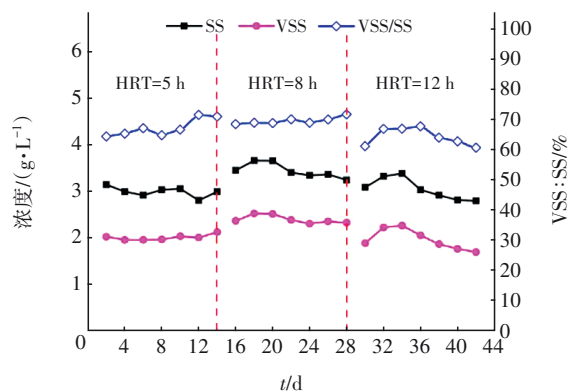


图8 不同HRT条件下SS、VSS和VSS/SS的变化

Fig.8 Variation of SS, VSS and VSS/SS under different HRT conditions

由图8可知,在HRT为5和8 h条件下,VSS/SS稍有增长,最后分别稳定在71.0%和71.7%,微生

物活性提高。分析原因,随着运行时间的延长,反应器中盐分较低且逐步稳定,污泥浓度和微生物活性也不断趋于稳定。而当HRT为12 h时,VSS/SS呈现出先上升后下降的变化趋势,最后稳定在60.7%,这是由于较长的HRT使得营养物质缺乏,微生物进行内源呼吸导致活性降低^[20]。整体看来,在MF-OMBR系统中,VSS/SS的变化波动较小,微生物活性较高。

不同HRT条件下,MF-OMBR系统中SMP和BEPS含量均有差异。相比于5和12 h,HRT为8 h时的SMP浓度较低。分析原因,在较短的HRT条件下,微生物代谢营养物的同时会释放SMP^[20],而当HRT较长时,微生物由于内源呼吸作用产生了SMP的积累^[14],只有当HRT为8 h时,基质被完全降解且SMP也被充分降解,此时SMP量相对较少。而HRT为12 h的BEPS含量明显低于5和8 h的。这是由于当HRT为5和8 h时,微生物在基质分解过程中产生了BEPS和基质利用相关产物(UAP),导致BEPS含量略高。而当HRT为12 h时,较长的HRT导致进水基质不能满足微生物营养所需,此时微生物将产生内源呼吸作用,BEPS中多糖作为碳源而被降解。

2.5 膜污染分析

2.5.1 膜表面污染物FTIR分析

FO原膜和FO污染膜的FTIR光谱图见图9。从图9(a)可知,FO原膜在1 741、1 371、1 224和1 041 cm^{-1} 等处有特征吸收峰,经过14 d运行后原膜的峰消失或减弱。由图9(b)可知,在1 017~1 020 cm^{-1} 处发现多糖的C—O峰,在1 634~1 638 cm^{-1} 和1 532~1 535 cm^{-1} 处发现蛋白质的酰胺 I 峰和酰胺 II 峰^[16]。可见,不同HRT运行条件下在FO膜表面均发生了以多糖和蛋白质为代表物的有机污染。

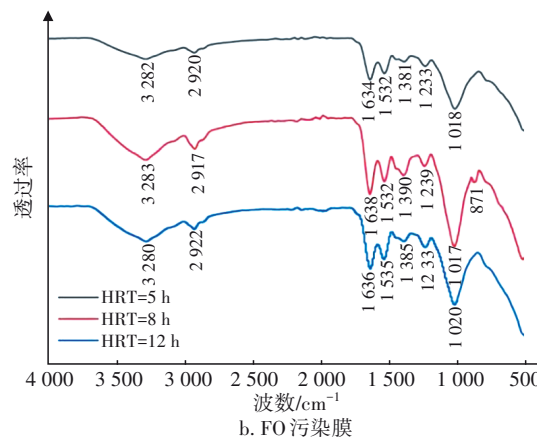
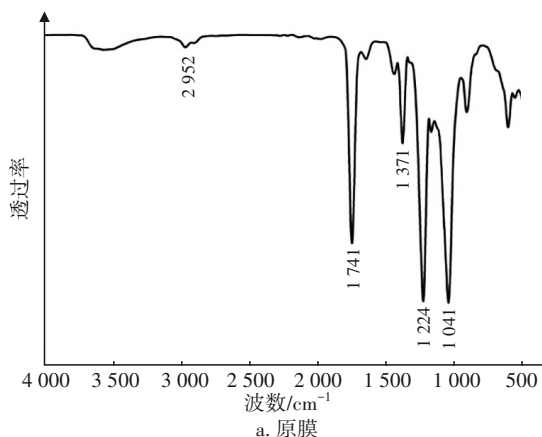


图9 FO原膜和FO污染膜的FTIR光谱图

Fig.9 FTIR spectra of FO original membrane and FO fouled membrane

2.5.2 有机物量化分析

为了进一步确认污染膜表面的有机物浓度,对不同HRT条件下污染膜表面污染层中的蛋白质和多糖进行量化分析。结果显示,HRT为5和12 h的污染膜表面蛋白质含量约为HRT为8 h的3倍,多糖含量约为2倍,可见当HRT为8 h时FO膜表面多糖和蛋白质的含量最少。

当HRT为5、8、12 h时,SMP分别为5.20、4.25、6.70 mg/L,BEPS分别为16.20、15.80、13.50 mg/L。相比于HRT为5和12 h,当HRT为8 h时SMP浓度较低,这归因于在较短的HRT条件下微生物代谢营养物的同时能够释放SMP,而当HRT较长时,微生物发生内源呼吸而使SMP发生累积,只有当HRT为8 h时,基质才被完全降解并且SMP也得到了充分降解,此时系统的SMP量相对较少。与HRT为5和8 h相比,HRT为12 h时表现出相对较低的BEPS浓度,这归因于较长的HRT导致进水基质不能满足微生物营养所需,BEPS中多糖被微生物作为碳源而降解。通过观察BEPS可以发现,12 h时的BEPS含量最低,但有机膜污染并不是最轻的。观察SMP的情况发现,当HRT为5和12 h时,二者SMP含量均为高值,对应有机膜污染也较为严重。因此,FO膜表面有机污染的程度主要取决于反应器内的SMP含量。

2.5.3 膜表面污染物SEM-EDS分析

FO原膜和污染膜的表面形貌如图10所示。可知,原膜活性层表面平整且光滑,14 d后污染膜活性层覆盖了一层污染物,且当HRT为8 h时膜沉积的

污染物最少。

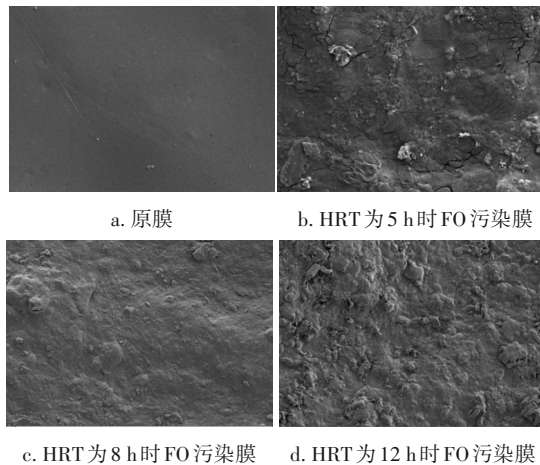


图10 原膜和污染膜的SEM照片

Fig.10 SEM photos of original and fouled membranes

原膜和污染膜的EDS图谱结果表明,原膜主要有C、O两种元素,而污染膜中出现了Na、Mg、Al、Si、P、K、Ca、Fe等新元素,存在于FO膜表面和内孔中。其中,Al、Si、K来自于接种活性污泥,其余元素来自于进水基质,具体元素含量见表2。

表2 FO原膜和污染膜元素分析结果

Tab.2 Elemental analysis results of FO membrane and FO fouled membrane %

元素	FO原膜	不同HRT条件下的污染膜		
		5 h	8 h	12 h
C	62.31	54.54	62.07	55.76
O	36.66	23.67	25.23	21.34
Na	0.50	2.59	2.44	2.27
Mg	—	0.25	0.21	0.29
Al	—	0.05	0.79	1.23
Si	—	0.10	1.36	1.89
P	—	3.77	1.63	4.60
S	—	0.83	0.66	1.25
Cl	0.53	1.53	2.70	3.18
K	—	0.32	0.22	0.33
Ca	—	2.23	1.92	6.38
Fe	—	1.12	0.79	1.20

从表2可以看出,除C、O元素外,当HRT为12 h时,其他元素的相对含量百分比明显高于HRT为8 h的污染膜(除Na外),而HRT为5 h的Na、Mg、P、S、K、Ca、Fe等元素相对含量百分比高于HRT为8 h的污染膜,说明HRT为8 h的FO膜无机污染相对较轻,与形貌分析结果一致,这归因于FO膜活性层的高排斥性和支撑层中的高内部浓差极化水平。

3 结论

① 在MF-OMBR系统中,反应器HRT越大,盐分积累越明显,但整体处于低盐水平。HRT为5、8和12 h的14 d通量下降率分别为54.8%、49.8%和67.3%,造成通量下降差异的原因是不同HRT产生ICP现象及膜污染程度不同。

② 当HRT为5、8和12 h时,MF-OMBR系统对生活污水的处理效果良好,MF和FO对TOC和氨氮的去除率分别达到93.0%和95.6%以上,FO对TN和TP的去除率分别达到77.0%和98.7%以上。当HRT为5 h时,MF低品质出水占比过大,HRT为12 h时需要的构筑物占地面积较大。从技术经济性角度考虑,HRT为8 h较合适。此时MF-OMBR系统可以获得符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)的MF出水和高品质的汲取液(FO出水)。

③ 在MF-OMBR系统中,相比于HRT为5和12 h,当HRT为8 h时SMP平均浓度较低,BEPS平均浓度在HRT为12 h的条件下明显下降。FTIR和量化分析结果表明,HRT不会影响FO膜表面有机物的种类,但不同HRT条件下有机物浓度相差甚远。膜表面主要有机物为蛋白质和多糖,HRT为8 h的污染物浓度远低于5和12 h的,其污染程度主要取决于FO膜表面的SMP含量。

参考文献:

- [1] LEBRON Y A R, MOSER P B, MOREIRA V R, *et al.* Osmotic membrane bioreactor (OMBR) in refinery wastewater treatment: the impact of a draw solute with lower diffusivity in the process performance [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 406:127074.
- [2] ACHILLI A, CATH T Y, MARCHAND E A, *et al.* The forward osmosis membrane bioreactor: a low fouling alternative to MBR processes [J]. Desalination, 2009, 239(1/3): 10–21.
- [3] PARVEEN F, HANKINS N. Comparative performance of nanofiltration and forward osmosis membranes in a lab-scale forward osmosis membrane bioreactor [J]. Journal of Water Process Engineering, 2019, 28: 1–9.
- [4] SONG X Y, XIE M, LI Y, *et al.* Salinity build-up in osmotic membrane bioreactors: causes, impacts, and potential cures [J]. Bioresource Technology, 2018, 257: 301–310.

- [5] JANG D, HWANG Y, SHIN H, *et al.* Effects of salinity on the characteristics of biomass and membrane fouling in membrane bioreactors [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 141: 50–56.
- [6] NGUYEN N C, CHEN S S, NGUYEN H T, *et al.* Innovative sponge-based moving bed-osmotic membrane bioreactor hybrid system using a new class of draw solution for municipal wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2016, 91: 305–313.
- [7] SIDDIQUE M S, KHAN S J, SHAHZAD M A, *et al.* Insight into the effect of organic and inorganic draw solutes on the flux stability and sludge characteristics in the osmotic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 249: 758–766.
- [8] LUO W H, HAI F I, PRICE W E, *et al.* Evaluating ionic organic draw solutes in osmotic membrane bioreactors for water reuse [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 514: 636–645.
- [9] WANG X H, CHEN Y, YUAN B, *et al.* Impacts of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling in a submerged osmotic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 161: 340–347.
- [10] PATHAK N, LI S, KIM Y, *et al.* Assessing the removal of organic micropollutants by a novel baffled osmotic membrane bioreactor–microfiltration hybrid system [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 262: 98–106.
- [11] ZHU W J, WANG X H, SHE Q H, *et al.* Osmotic membrane bioreactors assisted with microfiltration membrane for salinity control (MF-OMBR) operating at high sludge concentrations: performance and implications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 337: 576–583.
- [12] WANG X H, YUAN B, CHEN Y, *et al.* Integration of micro-filtration into osmotic membrane bioreactors to prevent salinity build-up [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 167: 116–123.
- [13] 王亚军, 张四永, 李金守, 等. 水力停留时间对膜生物反应器膜污染的影响 [J]. *环境工程学报*, 2021, 15(7): 2460–2467.
WANG Yajun, ZHANG Siyong, LI Jinshou, *et al.* Effect of hydraulic retention time on MBR membrane fouling [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(7): 2460–2467 (in Chinese).
- [14] HUANG Z, ONG S L, NG H Y. Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling [J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 705–713.
- [15] QIU G L, ZHANG S, RAGHAVAN D S S, *et al.* Towards high through-put biological treatment of municipal wastewater and enhanced phosphorus recovery using a hybrid microfiltration-forward osmosis membrane bioreactor with hydraulic retention time in sub-hour level [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 219: 298–310.
- [16] 杨应明, 王旭东, 刘玄宁, 等. 汲取液 EDTA-2Na 对正渗透 MBR 运行性能的影响 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(11): 9–16.
YANG Yingming, WANG Xudong, LIU Xuanning, *et al.* Effect of EDTA-2Na draw solute on operating performance of forward osmosis MBR [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(11): 9–16 (in Chinese).
- [17] LAY W C L, ZHANG J S, TANG C Y, *et al.* Factors affecting flux performance of forward osmosis systems [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 394/395: 151–168.
- [18] QIU G L, TING Y P. Direct phosphorus recovery from municipal wastewater via osmotic membrane bioreactor (OMBR) for wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 170: 221–229.
- [19] HOLLOWAY R W, WAIT A S, SILVA A F D, *et al.* Long-term pilot scale investigation of novel hybrid ultrafiltration-osmotic membrane bioreactors [J]. *Desalination*, 2015, 363: 64–74.
- [20] 作海燕, 李开明, 陈中颖, 等. 水力停留时间对 MBR 中溶解性微生物产物生成的影响 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(3): 1086–1090.
WU Haiyan, LI Kaiming, CHEN Zhongying, *et al.* Influence of hydraulic retention time on formation of soluble microbial products in MBR [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(3): 1086–1090 (in Chinese).

作者简介: 刘玄宁(1997–), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为膜法水处理理论与技术。

E-mail: xuanningliu@163.com

收稿日期: 2022-03-04

修回日期: 2022-05-09

(编辑: 任莹莹)