

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.006

纳滤对饮用水消毒副产物前体物的去除性能

陶辉^{1,2}, 陈怿扬^{1,2}, 蒋福春³, 张雪³, 林涛^{1,2}

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 苏州市自来水有限公司, 江苏 苏州 215002)

摘要: 以苏州某水厂沉后水为研究对象,考察了NF90型纳滤膜对不同有机物组分和消毒副产物前体物的截留效果。结果表明,纳滤膜对水中天然有机物(NOM)、三卤甲烷生成势(THMFP)和二氯乙酰胺生成势(DCAcAmFP)的截留率分别达到67.2%、84.1%和52.0%以上。进水pH升高使得纳滤膜对腐殖质降解产物(BB)和低分子有机物(LMW)组分的截留能力下降,进而导致其对消毒副产物生成势(DBPFP)截留率的下降。提高进水Ca²⁺浓度会加快膜面形成致密污染层,增强了纳滤膜对NOM和THMFP的截留能力,但会使亲水性正电LMW组分更易通过纳滤膜,降低膜对DCAcAmFP的截留能力。操作压力对纳滤膜去除NOM及DBPFP的影响较小,但随着回收率的升高,纳滤膜对NOM和DBPFP的截留率明显下降。NF90型纳滤膜在所研究的操作条件下,出水THMs水平远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求,且DCAcAm生成量较低。针对NOM和DBPFP的去除,纳滤系统可采用较高的回收率以提高产水率。

关键词: 饮用水; 纳滤; 天然有机物; 消毒副产物; 三卤甲烷; 二氯乙酰胺

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0038-07

Rejection of Disinfection By-products Precursors by Nanofiltration in Drinking Water Treatment

TAO Hui^{1,2}, CHEN Yi-yang^{1,2}, JIANG Fu-chun³, ZHANG Xue³, LIN Tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes <Ministry of Education>, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Suzhou Water Supply Co. Ltd., Suzhou 215002, China)

Abstract: This paper investigated the performance of NF90 nanofiltration membrane for the rejection of different natural organic matters (NOMs) and disinfection by-products (DBPs) precursors in effluent from sedimentation tank of a water treatment plant in Suzhou. The rejection rates of NOM, trihalomethane formation potential (THMFP) and dichloroacetamide formation potential (DCAcAmFP) in water by nanofiltration were above 67.2%, 84.1% and 52.0%, respectively. Increasing the influent pH decreased the rejection of building blocks (BB) and low molecular weight (LMW) components, and thus resulted in the decrease of the rejection rate of disinfection by-products formation potential (DBPFP). Increasing the influent Ca²⁺ concentration accelerated the formation of a dense fouling layer on the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508704); 苏州市科技发展计划项目(SS201846)

通信作者: 陶辉 E-mail: taohui@hhu.edu.cn

membrane surface and enhanced the rejection of NOM and THMFP. However, high Ca^{2+} concentrations enhanced the penetration of positive hydrophilic LMW components and reduced the rejection of DCAcAmFP. Operating pressure had no obvious effect on rejection of NOM and DBPFP. However, the rejection rates of NOM and DBPFP decreased obviously with the increase of recovery rate. Under the experimental operating conditions, the THMs in effluent from NF90 nanofiltration membrane was much lower than the limits specified in *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006), and the production of DCAcAm was low. For the removal of NOM and DBPFP, the system was suggested to adopt a higher recovery rate to improve the water yield.

Key words: drinking water; nanofiltration; natural organic matter (NOM); disinfection by-products (DBPs); trihalomethane; dichloroacetamide

目前我国饮用水厂多采用液氯或次氯酸钠消毒,其会与水中天然有机物(NOM)反应并生成消毒副产物(DBPs)。虽然二氯乙酰胺(DCAcAm)、卤乙腈等新发现的含氮消毒副产物(N-DBPs)尚未列入《生活饮用水卫生标准》,但研究显示其毒性远高于三卤甲烷(THMs)和卤乙酸^[1]。因此,控制 DBPs(特别是 N-DBPs)的生成对保障饮用水安全尤为重要。近年来,纳滤技术在我国饮用水行业中开始应用,其对水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等二价离子具有良好的去除效果。同时,纳滤膜的截留分子质量一般在 200 u 左右,可以去除水中大部分有机物。但目前对纳滤膜控制 DBPs(特别是 N-DBPs)生成的效果尚不清楚。为此,以苏州某水厂沉后水为研究对象,开展了纳滤技术控制水中 NOM 和 DBPs 生成的研究。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验用平板错流纳滤装置如图 1 所示,主要包括高压隔膜泵、错流纳滤装置、自动电子天平、进水杯和出水杯等,各部分之间由耐压管道连接,进水管及出水管上设置压力表以监测操作压力的变化,浓水出水管上设置调节阀,用以调节浓水出水量(即产水率)。每次改变进水条件时,首先用超纯水

(18.2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$)在装置中循环运行 30 min 以上,对纳滤膜进行预压(预压压力为 0.5 MPa)。试验中通量等数据由记录平台处理存储。试验采用 NF90-400 型纳滤膜,由陶氏 FILMTEC™ 生产,膜材料为聚酰胺复合膜,有效过滤面积为 38.73 cm^2 ,截留分子质量为 200 u,标准操作压力为 0.48 MPa,最高操作压力为 4.10 MPa,操作 pH 为 3~10。

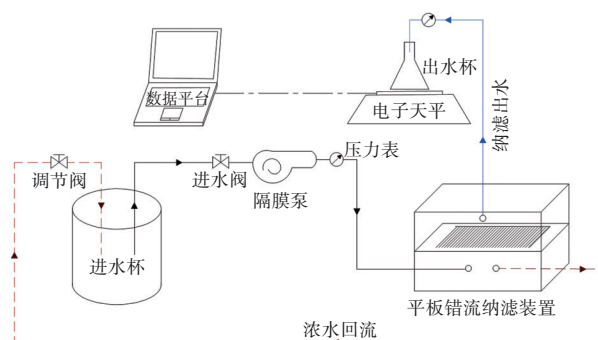


图 1 平板错流纳滤装置示意

Fig.1 Diagram of plate cross-flow nanofilter

1.2 试验进水

本研究以苏州某水厂沉后水为处理对象,为避免水中悬浮物、胶体等对纳滤膜造成污染,沉后水经超滤膜(GPWP04700 型,Millipore)过滤后作为试验进水。该厂水源水及试验进水水质如表 1。

表 1 水源水及试验进水水质

Tab.1 Quality of source water and test influent

项目	pH	氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	硝酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	DOC/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	THMFP/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	DCAcAmFP/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
水源水	8.0	0.12	0.072	0.79	7.56	71.2	6.42
试验进水	7.4	0.05	0.051	0.80	6.93	65.7	8.54

1.3 试验方法

采用盐酸及氢氧化钠溶液调节进水初始 pH 至 3.5、5.4、7.4 和 9.5,采用氯化钙溶液调节进水 Ca^{2+}

浓度至 15、30、45 和 60 mg/L ,研究进水 pH 和 Ca^{2+} 浓度对纳滤膜去除 NOM 和 DBPs 生成势(DBPFP)效能的影响。

设置不同的操作压力(0.4、0.5、0.6、0.7 MPa)和系统回收率(18%、30%、45%、60%),研究操作压力与系统回收率对纳滤膜去除NOM和DBPFP效能的影响。

1.4 分析项目及方法

常规水质指标参照国家标准方法进行检测。

本研究主要考察纳滤对THMs生成势(THMFP)以及DCAcAm生成势(DCAcAmFP)的去除效果,THMFP和DCAcAmFP的测定方法如下:氯化试验以次氯酸钠为氯化剂,加氯量按照式(1)进行计算^[2]。用磷酸盐缓冲液调节样品pH为7.0±0.1,加氯后在(20±1)℃条件下避光反应24 h,再加入过量硫代硫酸钠终止反应,测定THMs和DCAcAm生成量,两者均采用液液萃取-气相色谱法测定。

$$\text{Cl}_2 = 3 \times \text{DOC} + 7.6 \times \text{NH}_3 - \text{N} + 10 \quad (1)$$

采用液相有机碳有机氮测定仪检测水中的NOM组分。在检测中,将水中溶解性有机碳(DOC)分为疏水性有机碳(HOC)和亲水性有机碳(CDOC),并根据分子质量大小和化学性质将CDOC分为:截留分子质量>10 ku的生物聚合物(BP);截留分子质量>1 ku的腐殖质物质(HS);截留分子质量在0.35~0.5 ku的腐殖质降解产物(BB)以及截留分子质量<0.35 ku的低分子有机物(LMW),包含中性物质和有机酸^[3]。

2 试验结果与分析

2.1 进水特性对NOM和DBPFP去除效果的影响

本部分试验控制纳滤膜操作压力为0.5 MPa、错流流速为0.10~0.12 m/s。工程用纳滤膜组件回收率一般为50%左右(纳滤膜系统回收率多在75%左右),一个纳滤膜组件内安装多个纳滤膜元件,单个元件回收率多在15%~20%。由于试验采用单片式平板膜,因此回收率采用18%以模拟单个工程用膜元件的工况,装置采用批处理运行方式。试验进水为超滤出水,根据LC-OCD的测定结果,其DOC浓度为6.93 mg/L,其中HOC、BP、HS、BB、LMW组分浓度分别为1.36、0.98、1.53、1.59、1.47 mg/L。

2.1.1 pH的影响

改变进水pH可同时改变水中NOM的存在形态和纳滤膜表面的荷电特性,从而改变纳滤膜对水中有机物的截留特性,进而影响纳滤膜对水中DBPFP的去除效果。在本研究中,进水pH对纳滤膜截留

NOM和DBPFP的影响见图2。可知,纳滤膜出水DOC浓度为1.77~2.27 mg/L,对DOC的截留率可达到67.2%~74.5%。纳滤膜对分子质量较大的BP、HS及BB组分具有较好的截留能力,在pH=7.4的中性条件下,截留率分别可达到84.5%、88.6%和88.5%,而对分子质量<0.35 ku的LMW组分截留效果相对较差,截留率为53.4%;当pH升至9.5时,纳滤膜对以上4种组分的截留效果最差,截留率分别为78.7%、86.4%、84.6%、48.6%。另外,纳滤膜对THMFP和DCAcAmFP的去除率分别为84.1%~90.7%和52.0%~71.9%。以上结果表明,纳滤膜对水中NOM和DBPFP具有较好的去除效果。

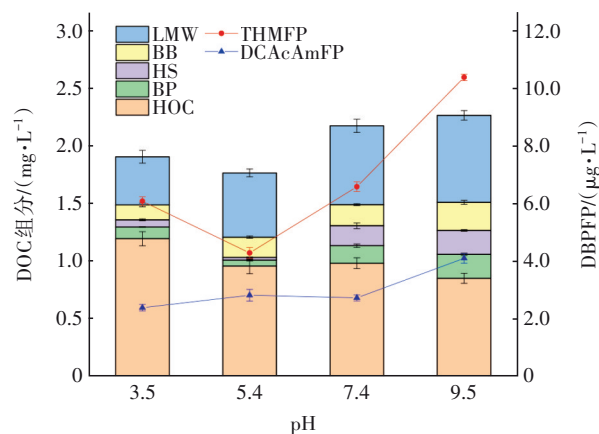


图2 pH对纳滤膜出水NOM组分和DBPFP的影响

Fig.2 Effect of pH on NOM composition and DBPFP of NF membrane effluent

从NOM组分来看,随着进水pH的升高,出水中LMW组分有一定增加,特别是在中性和碱性条件下,出水中的BP和HS组分增加明显。pH对纳滤膜去除DBPFP的影响与对NOM的影响类似。随着pH的升高,纳滤膜对THMFP和DCAcAmFP的去除率分别由90.7%、71.9%降至84.1%、52.0%,最高出水浓度分别为10.4、4.1 µg/L。

根据Ersan等人的研究,pH是影响可电离NOM存在形态的重要因素^[4]。当pH较高时,由于电荷排斥作用,部分可电离的大分子NOM以线型形式存在;而当pH较低时,由于电荷排斥的减少,有机物多呈更紧密的球状胶体形式。而Braghetta等人发现,柔性线型分子比球状胶体分子更容易通过多孔膜^[5]。在本试验中,高pH条件下水中NOM可能多以线型形式存在,降低了其通过膜的阻力,从而降低了纳滤膜对其的去除能力。

NF90膜在pH为7.0及9.5条件下,其表面Zeta电位为负,但碱性条件下负电位仅有小幅提升^[6],对有机物截留的静电作用提升不明显。此外,由图2可知,当pH=9.5时纳滤出水中的BB及LMW组分相比酸性条件下有所增加,这两种组分较小的分子质量及其在碱性条件下更易以线型形式存在的特性可解释这一现象。

腐殖质及其降解物均为THMs的主要前体物,而低分子质量有机物则是DCAcAm的重要前体物^[7]。随着进水pH的升高,由于出水中亲水性HS和BB组分浓度的升高,导致THMFPP总体呈现上升趋势。而纳滤膜对LMW组分的截留能力较差,出水LMW浓度随着pH的升高而增加也导致了出水DCAcAmFP的升高。

2.1.2 Ca^{2+} 浓度的影响

水中 Ca^{2+} 浓度对纳滤膜截留 NOM 和 DBPFP 的影响如图3所示。

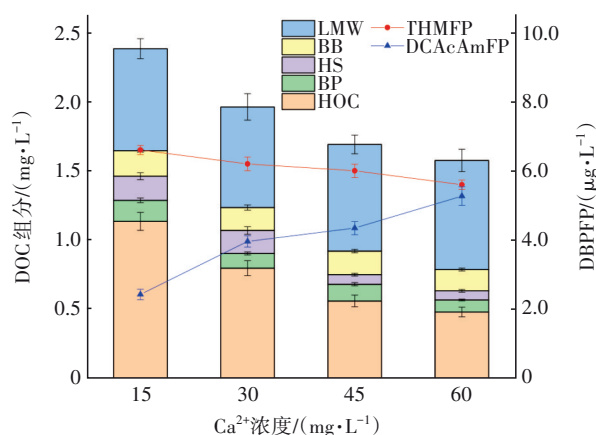


图3 Ca^{2+} 浓度对纳滤膜出水 NOM 组分和 DBPFP 的影响

Fig.3 Effect of Ca^{2+} concentration on NOM composition and DBPFP of NF membrane effluent

随着进水 Ca^{2+} 浓度由15 mg/L升至60 mg/L,纳滤出水DOC由2.38 mg/L降至1.58 mg/L。 Ca^{2+} 对纳滤膜截留 NOM 的影响是多方面的。在试验条件下,NF90膜表面呈负电性, Ca^{2+} 会直接与膜表面部分负电荷结合,从而成为荷负电的腐殖质分子与膜面的桥梁^[8],在膜表面形成络合物;水中带负电的有机物可以通过 Ca^{2+} 的桥接作用,结合成更大的分子^[9],在纳滤过程中易堵塞膜孔,并同前述的膜面络合物形成致密的有机物层;同时, Ca^{2+} 能够增加HS组分的疏水性,使其更易被纳滤膜截留,并加剧污染层的形成^[10];在纳滤过程中,致密污染层的形成可起到

次级膜的作用,间接增强膜对NOM的截留^[11]。如图3所示,该污染层对纳滤膜截留HS和HOC组分有一定的促进作用,但对截留BB组分的影响较小,而部分腐殖质降解产物是THMs的前体物^[12]。因此,虽然DOC浓度随 Ca^{2+} 浓度的升高而明显下降,但是出水THMFPP的下降趋势较为缓慢。

与THMFPP不同,随着 Ca^{2+} 浓度的增加,纳滤出水DCAcAmFP由2.4 μg/L显著升至5.3 μg/L。原因是DCAcAm的前体物以低分子质量亲水性正电有机物为主^[13]。 Ca^{2+} 浓度的升高使膜进水侧的电势升高,可能促进了LMW组分中部分正电性有机物对膜的穿透能力,使得出水中DCAcAm的前体物增加,从而导致高 Ca^{2+} 浓度时纳滤膜对DCAcAmFP去除能力的下降。

2.2 操作条件对 NOM 和 DBPFP 去除效果的影响

纳滤装置的操作条件主要包括操作压力与系统回收率。选取合适的操作压力与系统回收率对平衡系统的经济性与技术性至关重要。试验中通过调节浓水流量和水泵压力来改变装置的操作压力。由于试验采用单片纳滤膜,故系统回收率控制在18%~60%。

2.2.1 操作压力的影响

当纳滤装置回收率恒定为18%时,操作压力对膜通量的影响如图4所示。

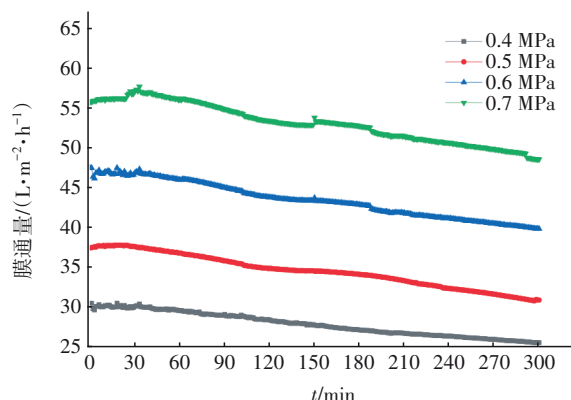


图4 操作压力对膜通量的影响

Fig.4 Effect of operating pressure on membrane flux

由图4可知,随着操作压力由0.4 MPa升至0.7 MPa,纳滤膜通量由30 L/(m²·h)增至56 L/(m²·h),但初始比渗透通量维持在74.6~76.5 L/(m²·h·MPa)范围内,表明纳滤膜运行通量与操作压力成正比。在过滤开始的25 min内,纳滤膜通量较为稳定,25~30 min之后浓差极化效应发生且膜面污染开

始积累,导致膜通量逐渐下降。在运行5 h后,膜通量降为初始膜通量的81%~85%。

操作压力对纳滤膜出水NOM组分和DBPFP的影响如图5所示。随着操作压力的升高,纳滤出水中DOC和DBPFP浓度略有增加,表明操作压力对纳滤膜截留NOM和DBPFP的效果产生了轻微影响。与操作压力为0.4 MPa时相比,当操作压力为0.7 MPa时,出水中DOC、THMFP和DCAcAmFP分别增加了0.26 mg/L、0.28 $\mu\text{g/L}$ 和0.38 $\mu\text{g/L}$,增加幅度远小于进水pH和 Ca^{2+} 的影响,表明操作压力对纳滤膜截留NOM和DBPFP的性能影响相对较小。

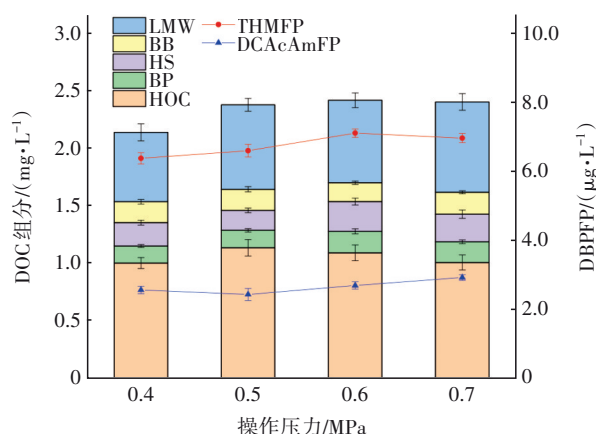


图5 操作压力对纳滤膜出水NOM组分和DBPFP的影响

Fig.5 Effect of operation pressure on NOM composition and DBPFP of NF membrane effluent

2.2.2 回收率的影响

在操作压力恒定为0.5 MPa的条件下,回收率对纳滤膜出水NOM组分和DBPFP的影响如图6所示。可以看出,回收率对纳滤膜截留NOM和DBPFP的影响较大,随着回收率的上升,纳滤膜出水中的NOM和DBPFP增加明显。当回收率由18%升到60%时,出水DOC浓度由2.38 mg/L增至3.24 mg/L,THMFP由6.6 $\mu\text{g/L}$ 增至10.1 $\mu\text{g/L}$,DCAcAmFP由2.4 $\mu\text{g/L}$ 增至3.5 $\mu\text{g/L}$ 。

同时,当回收率由18%增至45%时,出水BB和HS组分增加明显,占出水DOC增量的62%,而LMW组分没有明显变化,此时THMFP有较明显的增加;而当回收率继续增至60%时,水中LMW组分(即低分子有机物)和HOC组分浓度明显增加,两者增量分别占DOC增量的35.6%和36.1%。

随着回收率的提升,由于浓水的回流,膜的进水侧有机物会逐渐积聚,造成膜的进水侧溶质浓度

升高,使其过膜能力提升。此外,回收率的增加会导致膜表面剪切流速的降低,膜面受到的垂直水流压力增大,增加部分有机物透过膜孔的机会^[14],导致膜对部分有机物的截留能力下降。当回收率增至45%时,纳滤膜对HS和BB的截留能力下降明显,出水中THMFP浓度则有明显上升;当回收率增至60%时,LMW和部分HOC组分更易透过纳滤膜,而HS和BB组分由于膜面污染层的形成,膜对其截留能力再次上升,此时出水中DCAcAmFP增加更为明显。

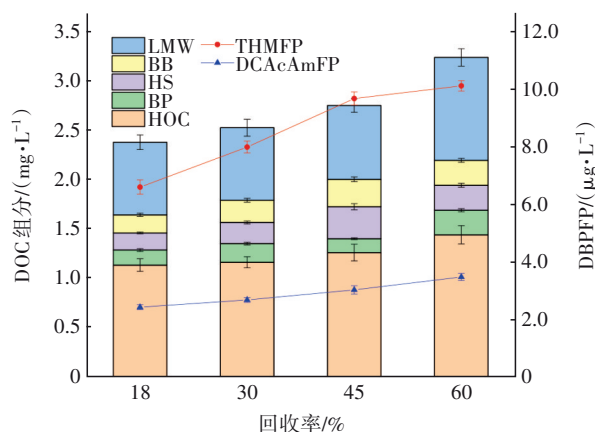
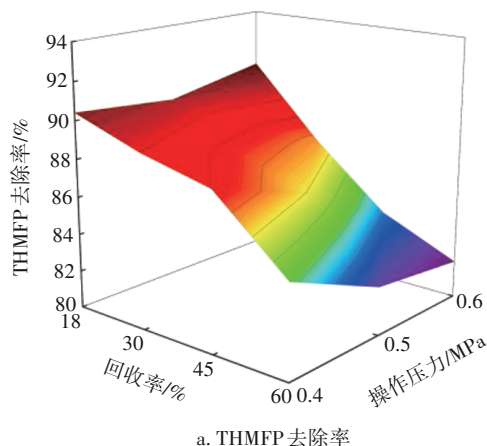


图6 回收率对纳滤膜出水NOM组分和DBPFP的影响

Fig.6 Effect of recovery rate on NOM composition and DBPFP of NF membrane effluent

2.2.3 组合操作条件的影响

上述结果表明,操作压力对纳滤装置出水水质的影响较小,而回收率的升高会降低出水水质。为进一步优化纳滤膜的运行条件,设计多个操作压力与回收率的组合,探讨其对出水水质的影响,设置操作压力分别为0.4、0.5和0.6 MPa,回收率分别为18%、30%、45%和60%,结果见图7。



a. THMFP去除率

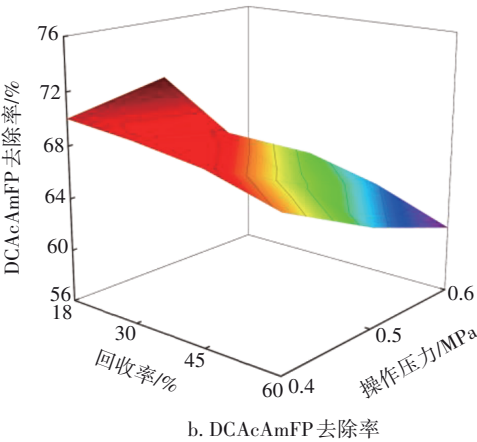


图 7 组合工作条件对纳滤膜截留 DBPFP 的影响
Fig.7 Effect of operation conditions on the performance of NF membrane to reject DBPFP

如图 7 所示,相比操作压力,回收率的变化对纳

滤膜去除 THMFP 及 DCAcAmFP 的能力影响更显著。在 3 种不同的操作压力下,纳滤膜对 THMFP 及 DCAcAmFP 的去除能力随回收率的增大都呈明显的下降趋势,在操作压力为 0.6 MPa 的条件下,当回收率由 18% 提升至 60% 时,THMFP 去除率由 90.9% 降至 81.9%, DCAcAmFP 去除率由 64.6% 降至 61.1%。

表 2 列出了不同组合操作条件下纳滤膜装置的工作情况、出水 DBPFP 及 THMs 水平。纳滤膜装置在不同的工作条件下,出水的 THMs 水平均小于 0.3,分项化合物出水浓度小于 0.06 mg/L,满足国标规定。而国内现行标准中还没有关于二氯乙酰胺限值的规定,通常考虑将出水二氯乙酰胺浓度维持在较低水平来减小其对人体可能存在的风险。

表 2 组合操作条件下的膜装置工作情况及出水水质

Tab.2 Membrane device working conditions and effluent quality under compared operation conditions

操作压力/ MPa	回收率/%	膜通量/(L·m ⁻² · h ⁻¹)	比渗透通量/ (L·m ⁻² ·h ⁻¹ ·MPa ⁻¹)	日产水量/(m ³ · m ⁻² ·d ⁻¹)	出水 THMFP/ (μg·L ⁻¹)	出水 DCAcAmFP/ (μg·L ⁻¹)	出水 THMs 水平
0.4	18	25.3~29.6	63.3~74.0	0.10~0.12	6.29	2.88	0.13
0.4	30	25.3~29.6	63.3~74.0	0.16~0.19	7.13	2.94	0.14
0.4	45	25.3~29.6	63.3~74.0	0.25~0.29	7.72	3.01	0.15
0.4	60	25.3~29.6	63.3~74.0	0.33~0.38	9.94	3.21	0.16
0.5	18	31.1~37.2	62.2~74.4	0.12~0.14	6.61	2.74	0.14
0.5	30	31.1~37.2	62.2~74.4	0.20~0.24	7.95	3.06	0.16
0.5	45	31.1~37.2	62.2~74.4	0.30~0.36	8.89	3.32	0.17
0.5	60	31.1~37.2	62.2~74.4	0.40~0.48	11.45	3.35	0.21
0.6	18	39.8~46.5	66.3~77.5	0.15~0.18	5.94	2.71	0.13
0.6	30	39.8~46.5	66.3~77.5	0.26~0.30	8.52	3.41	0.17
0.6	45	39.8~46.5	66.3~77.5	0.39~0.45	10.68	3.54	0.20
0.6	60	39.8~46.5	66.3~77.5	0.52~0.60	11.85	3.75	0.22

回收率的提高可显著提升日产水量,并有效降低废水量,当回收率为 60% 时,纳滤膜对 DBPFP 的去除效果明显,且仍能满足水质要求,因此实际应用中可采用高回收率来提升产水量。操作压力对出水水质的影响较小,操作压力升高时,纳滤膜的比渗透通量变化较小,但压力升高可能会加剧膜污染,因此操作压力不宜过高。

3 结论

① NF90 型纳滤膜对水中 NOM 具有良好的截留能力,在回收率为 18%、操作压力为 0.5 MPa 条件下,对 DOC 的截留率可达到 67.2% 以上,对 THMFP 和 DCAcAmFP 两类 DBPFP 的去除率分别可以达到 84.1% 和 52.0% 以上。在 pH=7.4 的中性进水条件

下,纳滤膜对 BP、HS 和 BB 组分的截留率可达到 84.5%、88.6% 和 88.5%,对 LMW 组分的截留率可达到 53.4%。

② 进水 pH 升高会造成纳滤膜对 HS、BB 和 LMW 组分截留能力的下降,从而导致对 DBPFP 的去除率下降。提升进水 Ca²⁺浓度会加快膜面形成致密污染层,增强纳滤膜对 NOM 的截留能力,并小幅提升对 THMFP 的去除效果;但 Ca²⁺浓度的提升使得亲水性带正电 LMW 组分更易通过纳滤膜,成为出水中 DCAcAm 的前体物,导致膜对 DCAcAmFP 的截留能力显著下降。

③ 操作压力对纳滤膜去除 NOM 及 DBPFP 的影响较小;而随着回收率的升高,纳滤膜对 NOM 和

DBPFP的截留率下降明显。

④ 在本试验条件下,NF90型纳滤膜的出水THMs水平远远低于国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求,且DCAcAm生成量较低。针对NOM和DBPFP的去除,纳滤系统可采用高回收率以充分利用水资源。

参考文献:

- [1] KALI S, KHAN M, GHAFAR M S, *et al.* Occurrence, influencing factors, toxicity, regulations, and abatement approaches for disinfection by-products in chlorinated drinking water: a comprehensive review [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 281: 116950.
- [2] ANDRZEJEWSKI P, KASPRZYK-HORDERN B, NAWROCKI J. N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation during ozonation of dimethylamine-containing waters [J]. *Water Research*, 2008, 42(4/5): 863–870.
- [3] 袁博,郭梦京,郑兴,等. 澜河流域溶解性有机质分子量分级表征及其与水质的相关性[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3773–3782.
- YUAN Bo, GUO Mengjing, ZHENG Xing, *et al.* Molecular weight fractionated characterization of dissolved organic matter and its correlation with water quality in the Bahe River basin, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3773–3782 (in Chinese).
- [4] ERSAN M S, LADNER D A, KARANFIL T. The control of N-nitrosodimethylamine, halonitromethane, and trihalomethane precursors by nanofiltration [J]. *Water Research*, 2016, 105: 274–281.
- [5] BRAGHETTA A, DIGIANO F A, BALL W P. Nanofiltration of natural organic matter: pH and ionic strength effects [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(7): 628–641.
- [6] 李木. 纳滤膜去除水中全氟化合物的效能与机制研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学(深圳), 2019: 28–29.
- LI Mu. Mechanism and Efficiency of Nanofiltration Membrane for Removal of Perfluorinated Compounds in Water [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology (Shenzhen), 2019: 28–29 (in Chinese).
- [7] LI K, FANG F, LIU Q, *et al.* Evolution of membrane fouling and cleaning strategy development in municipal wastewater reclamation by nanofiltration [J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(13): 1967–1978.
- [8] LIN T, ZHOU D J, YU S L, *et al.* The removal process of 2,2-dichloroacetamide (DCAcAm), a new disinfection by-product, in drinking water treatment process and its toxicity on zebrafish [J]. *Chemosphere*, 2016, 159: 403–411.
- [9] WANG Z, ZHAO Y Y, WANG J X, *et al.* Studies on nanofiltration membrane fouling in the treatment of water solutions containing humic acids [J]. *Desalination*, 2005, 178(1/3): 171–178.
- [10] CHANG E E, CHANG Y C, LIANG C H, *et al.* Identifying the rejection mechanism for nanofiltration membranes fouled by humic acid and calcium ions exemplified by acetaminophen, sulfamethoxazole, and triclosan [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 221/222: 19–27.
- [11] LI Q L, ELIMELECH M. Organic fouling and chemical cleaning of nanofiltration membranes: measurements and mechanisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(17): 4683–4693.
- [12] DUBOWSKI Y, GRENBORG-EITAN R, REBHUN M. Removal of trihalomethane precursors by nanofiltration in low-SUVA drinking water [J]. *Water*, 2018, 10(10): 1370.
- [13] ZHANG S S, LIN T, CHEN H, *et al.* Precursors of typical nitrogenous disinfection byproducts: characteristics, removal, and toxicity formation potential [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140566.
- [14] 李惠平. 纳滤膜在高品质饮用水处理中的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020: 53–55.
- LI Huiping. Application Research of Nanofiltration Membrane in Treatment of High Quality Drinking Water [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020: 53–55 (in Chinese).

作者简介:陶辉(1981–),男,安徽寿县人,博士,副教授,主要研究方向为饮用水处理理论与技术及膜技术应用。

E-mail:taohui@hhu.edu.cn

收稿日期:2021-12-15

修回日期:2022-02-21

(编辑:刘贵春)