

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.11.005

超滤-纳滤双膜工艺处理乌龙江段周期性咸潮水中试

陈寿彬

(福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350000)

摘要: 针对乌龙江段受海水倒灌影响出现的周期性咸潮污染现象,通过中试考察了超滤-纳滤双膜工艺在该种水质下的运行适应性以及膜污染情况。结果表明,双膜工艺在周期性咸潮污染水质情况下具有较好的污染物去除能力,保障出水安全的能力较强。在原水浊度为310 NTU、电导率为5 960 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、 Cl^- 浓度为1 987 mg/L和 SO_4^{2-} 浓度为327 mg/L时,出水各常规水质指标仍能稳定达标,出水浊度保持在0.1 NTU以下,电导率、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 去除率分别达到98.96%、99.32%和99.89%,且在长期运行过程中较为稳定。对其他离子指标如 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 和 F^- 也均能实现较好的去除,平均去除率分别达到97.55%、99.60%和97.68%,且出水中各项微生物指标也均未检出。超滤工艺的膜污染以滤饼层污染为主,污染物堆积在膜表面形成滤饼,并堵塞一部分膜孔。

关键词: 周期性咸潮污染; 双膜工艺; 处理效果; 膜污染

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)11-0024-07

Pilot Study on Double Membrane Process in Water Polluted by Periodic Salt Tides in Wulong River Section

CHEN Shou-bin

(Fuzhou City Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of periodic salt tide pollution in the Wulong River section under the influence of seawater backflow, the pilot study was conducted to investigate the practical operation adaptability of the double membrane process under the condition of periodic salt tide pollution, and to explore the actual membrane fouling situation. The results showed that the double membrane process had a strong ability to remove pollutants and ensure the safety of effluent when the water was polluted by periodic salt tides. When the raw water quality reached the maximum turbidity of 310 NTU, the conductivity of 5 960 $\mu\text{S}/\text{cm}$, the Cl^- concentration of 1 987 mg/L, and SO_4^{2-} concentration of 327 mg/L, the conventional water quality indexes still reached the standard, and the turbidity of the effluent remained below 0.1 NTU. The removal rate of conductivity reached 98.96%, and the removal rate of Cl^- and SO_4^{2-} could reach 99.32% and 99.89% respectively, which were relatively stable in the long-term operation process. Other ion indexes like Fe^{2+} , Mn^{2+} and F^- could be effectively removed, with the average removal rates reaching 97.55%, 99.60% and 97.68%, respectively. All microbial indexes were not detected in effluent. The membrane fouling was mainly caused by cake layer fouling. The polluted substances accumulated on the membrane surface to form filter cake and block part of membrane holes.

Key words: periodic salt tide pollution; double membrane process; treatment effect; membrane fouling

咸潮是沿海城市河口地区普遍存在的一种现象,受季节和天气等影响,在每年会产生周期性的咸潮上溯现象^[1-2]。一方面冬春季的降雨量减少,河流上游的河床水位逐渐降低导致海水倒灌,咸淡水分界不断上移,使得河流上游水体中咸淡水混合,造成全年时间维度上的周期性咸潮污染现象^[3-4];另一方面,一定规律时间内的潮汐涨退潮使河流中咸淡水的混合不断反复,河流水的盐度随涨退潮程度而呈现不断升高和降低的周期性变化趋势,造成短时间内的周期性咸潮污染现象^[5]。咸潮污染会造成水源地水质发生显著改变(如各种盐离子浓度急剧升高),若不在给水厂工艺中得到控制,长期饮用会引起居民的消化系统紊乱、氟斑牙、肾结石甚至各种癌症等疾病^[6-7];长期使用咸潮污染水源进行农业灌溉也会影响土壤的通透性和保水性,从而抑制农作物生长,造成农业产量降低^[8]。

乌龙江段作为福州地区重要的饮用水水源地,其受到的咸潮影响和时间范围逐年加剧,在周期性咸潮时期水厂的现有工艺无法有效应对咸潮污染原水,出现不得不停止运行的情况,严重影响城市水源地水质和居民饮用水安全。此外,水资源短缺也使得咸潮污染水源需要加以利用,因此,适用于周期性咸潮污染情况的组合工艺选择以及工艺运行适应性和稳定性亟需进行研究。传统处理工艺难以应对咸潮水质污染,对氨氮、COD_{Mn}以及微生物等去除能力也有限,药耗量、氯耗量较高,且混凝过程中可能产生铝和丙烯酰胺等副产物,而膜处理工艺具有优异的分选性能,可以有效去除水中的一二价离子,常用于海水、苦咸水淡化等方面。为此,笔者以该种源水为研究对象,构建超滤-纳滤双膜组合工艺进行中试,确定其对各水质指标的控制效果,并通过经典膜污染模型探究膜污染情况,以期应对周期性咸潮污染水质提供工艺选择和运行指导。

1 材料与方法

1.1 试验装置

中试装置整体工艺流程如图1所示。预处理采用一体化絮凝-电气浮装置实现连续快速处理;后续出水经3层石英砂滤料组成的机械过滤器以及50 μm膜孔径的精密过滤器处理后进入核心双膜工艺部分。超滤采用错流过滤方式,两支膜并联安

装,产水通量 $\geq 50 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,膜丝为高透水性、高机械强度的PVDF中空纤维膜丝,其公称孔径为0.03 μm;纳滤部分两支膜串联安装,采用的膜为沃顿科技VNF2-8040卷式膜,基材为无纺布,支撑层为聚砜,涂层为聚酰胺,膜孔径为1~2 nm,截留分子质量为200~500 u,膜单元面积为37.2 m²/支,运行pH范围为3~10,正常使用压力范围在0.48~0.69 MPa,单支膜产水量为1.1 m³/h(25℃)。

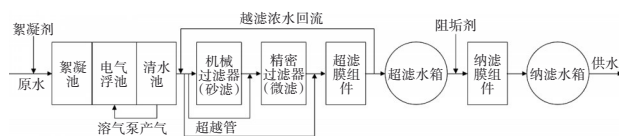


图1 中试工艺流程

Fig.1 Flow chart of pilot-scale test

1.2 原水水质

中试装置安装在福州某水厂取水口附近,原水取自福州市中心城区南侧乌龙江,取水口位于城门镇浚边村乌龙江边,处于下游位置。试验期间出现咸潮污染现象,造成水质发生显著变化,通过对现场中试装置进水的水质检测,得到试验期间的水质指标范围见表1。后续试验主要考察在周期性咸潮污染最不利水质情况下的双膜工艺处理效果。

表1 试验期间原水水质

Tab.1 Quality of raw water during the test

水质指标	常规时期	咸潮时期
浊度/NTU	17.48~37.50	75.1~310
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.090~0.207	0.106~0.256
UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	0.026~0.056	0.030~0.054
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	1.82~4.18	1.72~4.34
电导率/(μS·cm ⁻¹)	66.9~112.3	518~5 960
TDS/(mg·L ⁻¹)	19.0~45.0	120~1 672
氯离子/(mg·L ⁻¹)	0~10	124~1 987

咸潮污染时期原水浊度、电导率、TDS、氯离子浓度等相关指标提升较为显著,氨氮浓度也有小幅升高,而UV₂₅₄和COD_{Mn}浓度则基本未发生变化。一方面主要归因于海水涨退潮造成设备岸边取水口底泥的扰动,使得进水浊度受水位的影响较大,出现75.1~310 NTU的较大波动;另一方面,海水中富含的各类离子通过海水倒灌进入水源地,造成以氯化物为代表的水质指标出现显著升高,氯离子浓度最高达到近2 000 mg/L,严重影响水厂的供水安全。

1.3 分析项目及方法

浊度采用台式浊度仪测定;电导率采用电导率

仪测定;TDS采用便携式TDS测定仪测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾滴定法测定;UV₂₅₄采用紫外可见分光光度计测定;Cl⁻、SO₄²⁻采用离子色谱测定;荧光有机物采用三维荧光光谱仪测定。

2 结果与分析

2.1 对常规指标的控制效果

考察了周期性咸潮污染水质情况下,双膜工艺对浊度、氨氮以及电导率三项常规水质指标的去除效果。咸潮期间原水浊度波动较为显著,这可能是涨退潮所携带的各类颗粒物以及水流对岸边取水口河底沉积泥沙的扰动,使更多的泥沙或颗粒通过取水泵进入中试装置,且取样时的涨退潮情况无法保持完全一致,因此造成浊度的较大差异(见图2)。

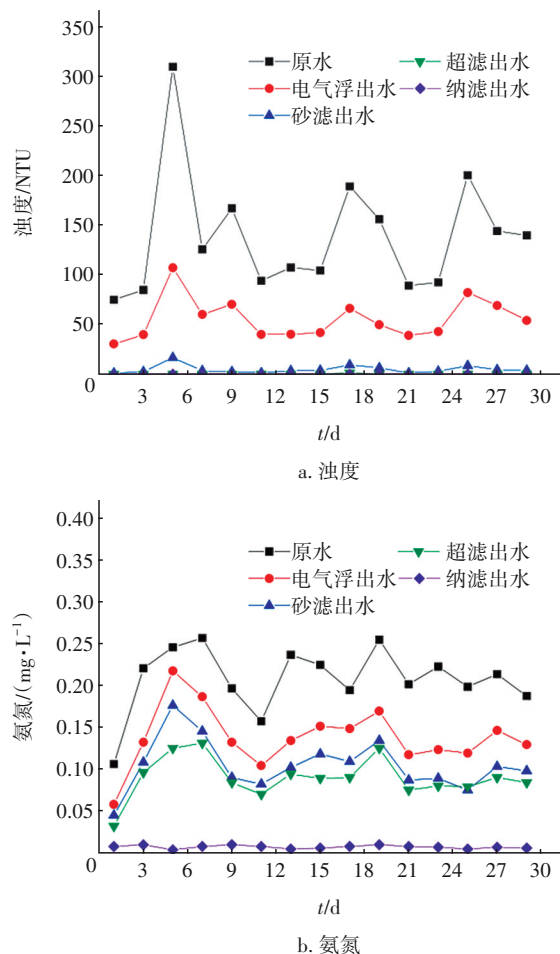


图2 常规水质指标的去除效果

Fig.2 Removal effect of conventional water quality indexes

双膜工艺在应对该时期较高的浊度情况时,各段工艺依旧能够稳定发挥处理作用,经过电气浮装

置以及砂滤后,浊度已得到有效降低,其中电气浮出水浊度保持在30.4~107.4 NTU之间,平均去除率为58.87%,再经过砂滤后平均去除率提高至96.93%,双膜工艺最终出水浊度稳定在0.1 NTU以下,长期试验过程中均未出现超标现象。

咸潮期间原水氨氮浓度在0.106~0.256 mg/L,较常规水质有小幅度的提升。由图2可知,在咸潮期间各工艺的去除效果基本未受其他水质指标突变的影响,其中经过电气浮工艺处理后可实现34.15%的去除率,经过双膜工艺处理后去除率高达99%以上。而针对咸潮时期电导率的显著升高,仅纳滤工艺发挥唯一的无机盐离子去除作用。咸潮污染使原水电导率大幅度提高至4 090~5 960 $\mu\text{S}/\text{cm}$,平均电导率达到4 990 $\mu\text{S}/\text{cm}$,较常规水质时期的92.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 提升了50多倍。但纳滤出水电导率能够稳定保持在29.6~82.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,平均为50.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$,平均去除率达到98.96%。由此可见,双膜工艺能够有效应对周期性咸潮时的水质指标突变,长期运行过程中可保障出水水质安全。

2.2 对荧光有机物的控制效果

针对试验期间出现的咸潮水质情况,将该水质条件下三维荧光光谱中5种不同区域代表的典型溶解性有机物^[9]荧光积分体积与常规水质时的荧光积分体积进行比较,考察对荧光有机物的去除效果,结果如图3所示。

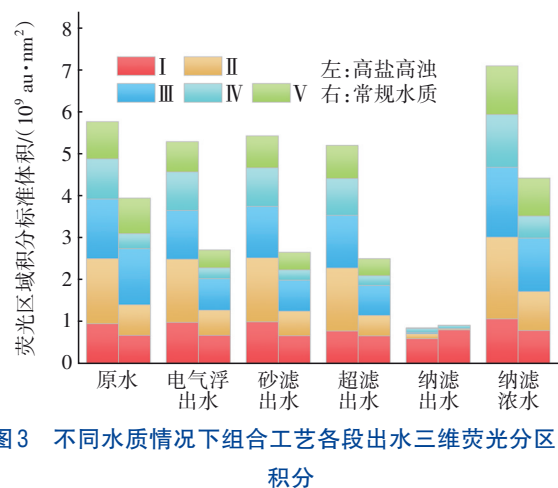


图3 不同水质情况下组合工艺各段出水三维荧光分区FRI积分

Fig.3 Three-dimensional fluorescence partition FRI integral of the effluent from each stage of the combined process under different water quality conditions

与常规水质相比,咸潮高盐高浊水质情况下原水中的有机物总量明显升高,总荧光区域积分标准

体积由 $3.958 \times 10^9 \text{ au} \cdot \text{nm}^2$ 提高至 $5.785 \times 10^9 \text{ au} \cdot \text{nm}^2$ 。其中5个区域所代表的5类物质均有不同程度升高,以Ⅰ+Ⅱ区和Ⅳ区所代表的芳香族类蛋白物质和可溶性微生物代谢产物升高最为明显。Ⅰ区及Ⅱ区荧光区域积分标准体积分别由 0.686×10^9 和 $0.727 \times 10^9 \text{ au} \cdot \text{nm}^2$ 增加至 0.962×10^9 和 $1.553 \times 10^9 \text{ au} \cdot \text{nm}^2$, 分别提高了40.1%和113.6%。由于可溶性微生物代谢产物含量相对较低,使Ⅳ区荧光区域积分标准体积表现出164.9%的最显著提升,由 $0.362 \times 10^9 \text{ au} \cdot \text{nm}^2$ 增至 $0.962 \times 10^9 \text{ au} \cdot \text{nm}^2$ 。Ⅲ区和Ⅴ区代表的类腐殖质物质则基本未发生变化,两种水质情况下的荧光区域积分标准体积差异在10%范围内。

从各工艺段的变化情况来看,尽管原水溶解性有机物总体浓度有一定程度升高,但组合工艺各段的去除效果基本保持稳定,电气浮预处理装置发挥一部分的去除作用,纳滤工艺发挥主要的去除作用,最终实现了对绝大部分溶解性有机物的完全去除,表现为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ区的荧光区域积分标准体积基本为零,仅Ⅰ区所代表的芳香类蛋白物质由于较小的分子尺寸而无法被去除,这也与常规水质情况下的处理效果保持一致,表明以纳滤为核心的组合工艺在咸潮时期依旧能够保证对荧光有机物的稳定、有效去除。

2.3 对氯化物及硫酸盐的控制效果

试验期间海水倒灌所导致的原水中无机盐离子浓度的升高主要表现为氯化物以及硫酸盐离子浓度的显著升高。随着周期性退涨潮造成的海水倒灌,原水无机盐离子浓度发生周期性变化,氯离子和硫酸根离子浓度随退涨潮时间基本呈线性同步增大和减小。试验过程中氯离子浓度最高能够达到1987 mg/L,硫酸根离子浓度最高能够达到327 mg/L,均超过了国家饮用水标准所要求的250 mg/L限值,其中氯化物的超标情况尤为严重。

组合工艺在咸潮水质情况下长期运行期间,每次均在涨潮水位较高时进行取样检测。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 作为典型的无机盐离子,各工艺对其去除效果与电导率的保持一致,仅纳滤工艺段浓度显著降低,表现出唯一的去除效果。试验期间进水氯离子浓度在1055~1987 mg/L,纳滤出水浓度仅为7.12~15.37 mg/L,平均去除率达到了99.32%;进水硫酸根离子浓度在190~327 mg/L,最终纳滤出水浓度仅

为0.19~0.42 mg/L,平均去除率达到了99.89%。上述结果表明,双膜工艺在咸潮时期的高盐水质情况下依旧能够保持稳定的无机离子去除效果,对 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的去除率能够稳定保持在99%以上,可以有效应对周期性咸潮带来的挑战。

2.4 对其他指标的控制效果

考察了咸潮污染情况下双膜工艺对重金属离子(铁、锰)、氟离子以及微生物指标的控制效果。重金属污染是水质污染中的严重问题,作为常见的重金属离子,铁、锰的过量摄入会损害身体健康,饮用水中铁、锰含量过高会导致食欲不振、腹泻等疾病^[10-11]。而长期摄入氟离子则可能会引发氟中毒,干扰钙磷代谢,出现氟斑牙等情况^[12]。试验期间双膜工艺出水铁、锰离子浓度分别仅为 (0.021 ± 0.020) 和 $(0.0003 \pm 0.0002) \text{ mg/L}$,相比工艺进水的 (0.866 ± 0.207) 和 $(0.079 \pm 0.021) \text{ mg/L}$,平均去除率分别达到97.55%和99.60%。原水中氟离子浓度较低,为0.20~0.27 mg/L,出水平均氟离子浓度仅有0.0057 mg/L,平均去除率达到97.68%。在微生物指标方面,长期运行过程中双膜工艺出水三项主要的微生物指标(菌落总数、总大肠菌群和大肠埃希氏菌)基本均未检出。

2.5 双膜工艺运行能耗分析

根据设备安装的总电表及分电表分别记录组合工艺整体及各单元的耗电量,并根据实际产水量计算得到单位产水电耗,来考察以纳滤为核心的组合工艺的运行能耗情况。主要耗电单元包括电气浮直流电源、溶气气浮溶气泵、超滤进水增压泵、纳滤进水变频泵以及最前端进水原水泵和其他。双膜工艺在咸潮期间采用的工艺参数:进水流量为5 m³/h,混凝剂投量为10 mg/L,电流密度为4 A/m²,气量为120 mL/min,超滤膜通量为45 L/(m²·h),超滤进水压力为0.042 MPa,纳滤运行压力为0.6 MPa。

经计算,纳滤变频泵、原水泵及其他、溶气泵的单位产水电耗最大,分别为0.502、0.441和0.396 kW·h/m³,其中其他项中包括了混凝剂流量泵、照明、通风及电控等电耗较小的部分。相较于纳滤工艺,超滤进水压力较小,单位产水电耗相对较低,仅为0.147 kW·h/m³;而电气浮单元直流电源由于电流密度较小,同样表现出较低的产水电耗(0.058 kW·h/m³)。通过总电表计算得到整体工艺的单位产水电耗为1.544 kW·h/m³。

2.6 膜污染分析

在膜工艺的实际运行中,膜污染是阻碍其效能的重要因素。膜污染的形成与机理各不相同,与膜孔径大小及其分布状态等都密切相关。采用经典膜污染模型方法对超滤单元的膜污染进行研究,可以更好地分析膜污染的形成机理,进而得到更好的膜污染缓解措施^[13-14]。其中包括完全堵塞、中间堵塞、滤饼层过滤及标准堵塞^[15-16]。

完全堵塞模型中进水的污染物颗粒或分子会沉积并堵塞一部分膜孔,从而导致膜通量逐渐降低,这些物质会以相同的形式附着在膜表面,且无法互相重合叠加。而中间堵塞模型则区别于完全堵塞模型,进水中的污染物颗粒除直接堵塞在膜表面这一情况外,还可以沉积叠加在其他污染物颗粒上。一部分先到达的污染物质附着在膜表面造成膜孔堵塞,而另一部分后到达的污染物质则随机堆叠在污染颗粒上,或是继续堵塞其他膜孔^[17]。滤饼层过滤模型中污染物颗粒堵塞大部分膜孔并形成稳定的滤饼层,后续到达的污染物质只能附着在滤饼层的颗粒表面,使得滤饼层更加均匀,而无法继续堵塞其余膜孔。

上述三种模型对应的膜污染现象主要发生在膜表面,其产生的膜污染往往为可逆污染,通过定期的反冲洗、正冲洗等方式能够较为有效地去除。而第四种标准堵塞模型对应的膜污染则往往发生在膜孔内,进水中的污染物质颗粒或分子与膜接触并进入膜孔结构内,随着污染物质在孔壁上的不断沉积,容易造成膜孔窄化和体积减小等现象,因此该污染大多为不可逆的孔堵塞污染^[18]。

试验通过一定过滤周期内比通量变化情况对双膜工艺超滤段的膜污染进行分析,拟合结果如图4所示。拟合系数(R^2)是评价膜污染堵塞模型的重要指标,其值越接近1,则对应的膜污染模型在运行过程中越占主要地位,即该模型越能够解释膜污染形成的机理。由图4可知,在常规水质情况下,不同过滤周期时滤饼层过滤模型的 R^2 均最高,在40、80和150 min过滤周期下滤饼层过滤的 R^2 分别为0.922 5、0.979 7和0.935 0。而在咸潮时期水质情况下,超滤工艺膜污染模型的拟合结果与常规水质情况的相似,不同过滤周期下滤饼层过滤模型的 R^2 仍保持最高,分别为0.896 4、0.805 4和0.867 0。这一结果表明高盐高浊原水水质变化对超滤单元

膜污染机理未产生明显影响,滤饼层污染在超滤运行过程中可能占据主导地位。这可能是由于咸潮时期原水水质变化主要表现为氯离子、硫酸根离子等无机一二价离子浓度的显著升高,而超滤对这些离子基本没有去除效果,因此其对超滤膜污染影响较小。海水倒灌引起取水口底部泥沙冲动而导致的高浊水中主要为泥沙颗粒等物质,同样在膜前预处理部分得到较好控制。尽管超滤进出水浊度有一定幅度提升,但这可能仅使膜孔堵塞数量少量增加,膜通量小幅降低,未达到改变整体污染机理的程度,使得超滤膜污染仍然以污染物质堆积在膜表面形成滤饼,并堵塞一部分膜孔为主。

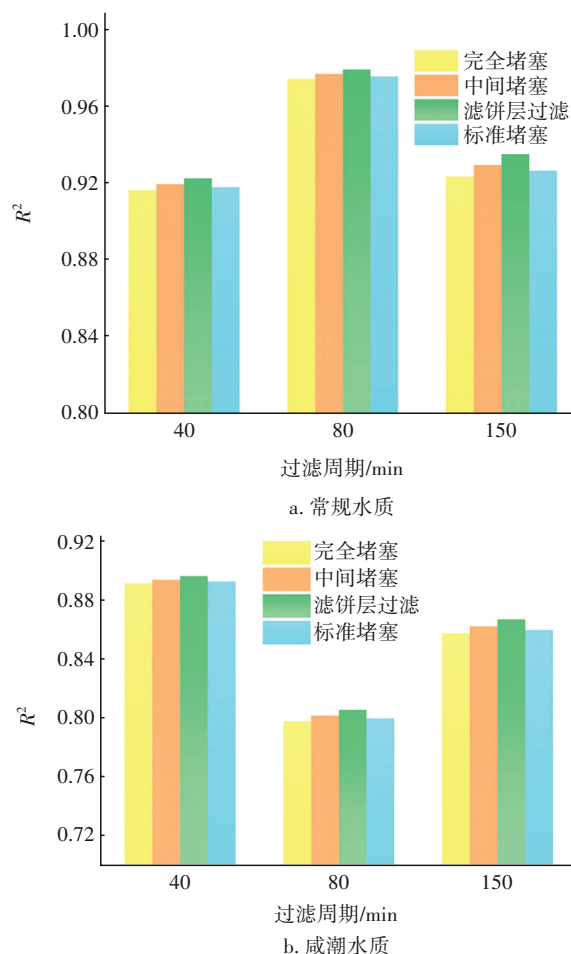


图4 超滤不同过滤周期四种经典污染模型拟合结果

Fig.4 Fitting results of four classical pollution models of ultrafiltration with different filtration periods

对使用后的纳滤膜进行拆解,取出膜片后进行扫描电镜(SEM)和元素分析(EDS),探究纳滤膜上污染物的成分以进一步研究纳滤膜的污染机理。图5为纳滤膜上有机污染物的形态。从图5中红色

方框里可以清楚地看到纳滤膜上面的有机污染物呈颗粒状,其聚合在膜表面从而堵塞膜孔。EDS分析显示,膜表面污染物C、S和O的原子百分含量分别为47.94%、19.76%和15.43%,质量百分含量分别为30.41%、16.69%和26.12%,从而可以推断出有机物在很大程度上引起了膜污染的产生。

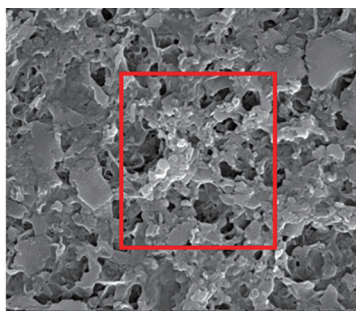


图5 纳滤膜有机污染物SEM照片($\times 50\,000$)

Fig.5 SEM image of organic contaminant on nanofiltration membrane ($\times 50\,000$)

图6为纳滤膜上无机盐结垢污染物的形态,其中Al、Fe、Ca、Mg、Si的质量百分含量分别为22.75%、3.28%、0.47%、1.04%和30.21%,原子百分含量分别为19.06%、1.33%、0.26%、0.97%和24.32%。从图6可以看出无机盐结垢容易形成块状晶体,在纳滤过程中,溶解性盐通常会被浓缩4~10倍,从而引起纳滤膜表面附近的无机盐浓度超过某些难(微)溶性盐的溶解度,进而形成无机盐结垢,一旦形成无机盐结垢便会堵塞纳滤膜膜孔,导致其通量下降。针对这些有机污染物与无机盐离子引起的膜污染,采用3%的HCl+3%的NaOH进行化学清洗,清洗以后膜通量恢复率可达99.42%。

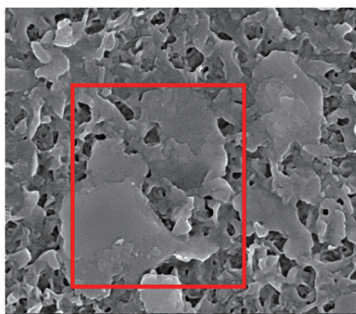


图6 纳滤膜无机盐结垢SEM照片($\times 50\,000$)

Fig.6 SEM image of nanofiltration membrane inorganic salt scaling contaminants ($\times 50\,000$)

3 结论

① 中试期间乌龙江段受周期性咸潮污染影

响,原水水质发生较大变化,进水浊度、氨氮和电导率值最高分别达到310 NTU、0.256 mg/L和5 960 $\mu\text{S}/\text{cm}$,氯离子和硫酸根离子浓度最高分别达到1 987、327 mg/L。经双膜工艺处理后,出水浊度稳定低于0.1 NTU,氨氮基本完全被去除,对电导率、氯离子和硫酸根离子的平均去除率分别达到98.96%、99.32%和99.89%,双膜工艺能够有效应对周期性咸潮污染水质。

② 咸潮期间原水中有机物总量明显升高,其中芳香类蛋白质和可溶性微生物代谢产物增加明显,类腐殖质物质则基本未发生变化。双膜工艺能够实现对绝大部分溶解性有机物的完全去除,并有效控制铁离子、锰离子、氟离子以及微生物,保障出水水质安全。

③ 咸潮污染情况下超滤工艺膜污染未发生显著改变,滤饼层污染占主导地位。而纳滤膜污染以一些有机污染物和无机盐结垢为主,这些污染物质可通过化学清洗去除。

参考文献:

- [1] 彭晓旭,陈寿彬. 饮用水深度处理工程中的膜工艺设计要点[J]. 中国给水排水,2023,39(14):96-101.
PENG Xiaoxu, CHEN Shoubin. Key points of membrane process design in drinking water advanced treatment project[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(14): 96-101(in Chinese).
- [2] LI R, GAO L, PAN C, *et al.* Detecting the mechanisms of longitudinal salt transport during spring tides in Qiantang Estuary [J]. Journal of Integrative Environmental Sciences, 2019, 16(1): 123-140.
- [3] 林炜杰,余希林,杨海燕. 我国咸潮入侵研究现状与未来发展趋势[J]. 中国水运, 2022, 22(9): 94-96.
LIN Weijie, YU Xilin, YANG Haiyan. Research status and future trend of salty tide invasion in China [J]. China Water Transport, 2022, 22(9): 94-96 (in Chinese).
- [4] 宋晓飞,石荣贵,孙玲晏,等. 珠江口磨刀门盐水入侵的现状与成因分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(1): 7-15.
SONG Xiaofei, SHI Ronggui, SUN Lingyan, *et al.* Status and cause of saltwater intrusion in Modaomen, Pearl River estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(1): 7-15(in Chinese).
- [5] 戚志明,包芸. 珠三角咸水入侵变化趋势及其动力因

- 素影响分析[J]. 广东广播电视大学学报, 2009, 18(3): 43-47.
- QI Zhiming, BAO Yun. Change trend and dynamic factors of saltwater intrusion in the Pearl River Delta[J]. Journal of Guangdong Open University, 2009, 18(3): 43-47(in Chinese).
- [6] PAK C Y C, ZERWEKH J E, ANTICH P. Anabolic effects of fluoride on bone[J]. Trends in Endocrinology and Metabolism, 1995, 6(7): 229-234.
- [7] ORTIZ J M, SOTOCÁ J A, EXPÓSITO E, *et al.* Brackish water desalination by electrodialysis: batch recirculation operation modeling [J]. Journal of Membrane Science, 2005, 252(1): 65-75.
- [8] HE K, YANG Y, YANG Y, *et al.* HYDRUS simulation of sustainable brackish water irrigation in a winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain [J]. Water, 2017, 9(7): 536.
- [9] 于海宽, 李星, 周志伟, 等. 大型超滤水厂预处理流程的除污效能及膜污染特性[J]. 中国给水排水, 2023, 39(13): 54-59.
- YU Haikuan, LI Xing, ZHOU Zhiwei, *et al.* Pollutants removal efficiency of pretreatment process and its membrane fouling behaviors in a large-scale ultrafiltration water treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(13): 54-59(in Chinese).
- [10] EMBABY M A, ABDEL MONIEM S M, FATHY N A, *et al.* Nanocarbon hybrid for simultaneous removal of arsenic, iron and manganese ions from aqueous solutions [J]. Heliyon, 2021, 7(10): e8218.
- [11] ALIJANIGALANGASHI M, MASOUMI KOJIDI S F, SOURAKI B A. Removing iron, manganese and ammonium ions from water using greensand in fluidized bed process[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 39: 101714.
- [12] DENG J, MA Z, QIN Q, *et al.* A residue reutilization strategy on fluorine-containing water purification [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 371: 133613.
- [13] YAN Z, YANG H, QU F, *et al.* Application of membrane distillation to anaerobic digestion effluent treatment: identifying culprits of membrane fouling and scaling [J]. Science of the Total Environment, 2019, 688: 880-889.
- [14] SRISURICHAN S, JIRARATANANON R, FANE A. Mass transfer mechanisms and transport resistances in direct contact membrane distillation process[J]. Journal of Membrane Science, 2006, 277(1/2): 186-194.
- [15] 武慧. 晶须状莫来石陶瓷膜的结构设计及水处理性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- WU Hui. Design and Performance of Whisker-structured Mullite-based Ceramic Membranes for Water Treatment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021(in Chinese).
- [16] 马文结. 改性陶瓷膜制备及其催化单过硫酸盐缓解膜污染效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- MA Wenjie. Preparation of Modified Ceramic Membrane and Its Performance of Alleviating Membrane Fouling through Catalyzing PMS In-situ Oxidation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019(in Chinese).
- [17] 方凡. 藻菌共生体在畜禽养殖废水处理中的超滤膜污染机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- FANG Fan. Investigation of the Mechanism of Ultrafiltration Membrane Fouling for Treatment of Livestock Wastewater by Algal-Bacteria Symbiosis [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020(in Chinese).
- [18] LU D, ZHANG T, MA J. Ceramic membrane fouling during ultrafiltration of oil/water emulsions: roles played by stabilization surfactants of oil droplets [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(7): 4235-4244.

作者简介:陈寿彬(1978-),男,福建福州人,工学学士,高级工程师,注册公用设备工程师(给排水),主要从事市政给水工程设计工作。

E-mail:69440443@qq.com

收稿日期:2023-11-29

修回日期:2023-12-19

(编辑:李德强)