

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.007

# 超滤膜在大型供水系统的应用分析与建议

张 静<sup>1</sup>, 温 颖<sup>1</sup>, 张周强<sup>1</sup>, 王一帆<sup>2</sup>, 杨非凡<sup>3</sup>, 齐天天<sup>1</sup>

(1. 北京市自来水集团有限责任公司技术研究院 北京市供水水质工程技术研究中心, 北京 100012; 2. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 里贾纳大学, 加拿大)

**摘 要:** 北方大型供水厂A的处理规模为 $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , 水厂B的处理规模为 $8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , 均采用压力式超滤膜深度处理工艺。通过分析两水厂的处理效果, 发现在超滤工艺运行过程中, 当前序工艺采用铁盐混凝剂时, 应注意其可能造成膜孔堵塞; 当采用铝盐混凝剂时, 超滤膜对溶解铝无拦截作用, 应注意铝盐投量与出厂水溶解铝浓度。高藻季节应注意藻类和细菌在膜壳内滋生问题。此外, 当采用次氯酸钠控制膜污染时, 应精准控制出厂水余氯, 使出厂水pH稳定, 避免由于pH波动对管网水质造成的影响。

**关键词:** 超滤; 供水系统; 自来水厂; 消毒副产物前体物

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0047-06

## Application of Ultrafiltration Technology in Large-scale Waterworks and Its Suggestion

ZHANG Jing<sup>1</sup>, WEN Ying<sup>1</sup>, ZHANG Zhou-qiang<sup>1</sup>, WANG Yi-fan<sup>2</sup>, YANG Fei-fan<sup>3</sup>,  
QI Tian-tian<sup>1</sup>

(1. Beijing Engineering Research Center for Drinking Water Quality, Technology Institute of Beijing Waterworks Group Co. Ltd., Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. University of Regina, Canada)

**Abstract:** Both A waterworks with scale of  $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$  and B waterworks with scale of  $8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$  in North China adopt the advanced treatment process of pressurized ultrafiltration. Based on the analysis of the treatment performances of two waterworks, attention should be paid to the blockage of membrane pores in the operation of ultrafiltration process when iron salt coagulant was used in the preceding process. When the coagulant was aluminum salt, the ultrafiltration had no intercepting effect on dissolved aluminum, and attention should be paid to the dosage of aluminum salt and the concentration of dissolved aluminum in effluent. For seasonal algae-laden raw water, attention should also be paid to algae and bacteria growth in the membrane shell. In addition, when sodium hypochlorite was used to control membrane fouling, the residual chlorine in effluent should be accurately controlled to stabilize the effluent pH and avoid the impact of pH fluctuations on the water quality of the pipe network.

**Key words:** ultrafiltration; water distribution system; waterworks; disinfection by-product

通信作者: 张静 E-mail: zj\_zoey@163.com

precursors

南水北调工程缓解了北方水资源紧缺的问题,同时对供水企业现有的水处理技术、工艺也提出了挑战。长距离调水和多水源供水格局使水源水质的变化更为复杂,为提高供水安全性,越来越多的供水厂开始采用超滤工艺<sup>[1]</sup>。超滤工艺不仅能保障出厂水水质,还具有药剂投加少、运行稳定等优点<sup>[2-3]</sup>。但大型水厂在采用超滤工艺时仍存在许多问题,如前序混凝过程中混凝剂的种类和投加量、高藻高溶解性有机物原水等对超滤工艺平稳运行影响较大等。此外,在厂网一体化需求下,还应关注超滤对管网水质的影响,不应把超滤作为水厂供水水质的最后一道保障。笔者对大型水厂超滤工艺进行了分析,并在此基础上提出了一些应用建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 水厂工艺及水样检测

水厂A规模为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用预臭氧—机械加速澄清池—主臭氧—炭砂过滤—超滤—UV—清水池工艺。水样取自水厂炭砂滤池和超滤膜池出水,检测指标主要有浊度、耗氧量、藻密度、pH、残余铁、残余铝、细菌总数、活细菌数、颗粒数、荧光类物质等。细菌总数和活细菌数采用流式细胞仪测定。

水厂B规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用预氯化—混凝沉淀—砂滤—炭滤—超滤—清水池工艺。在该厂供水区域内选取11个管网采样点,分别在超滤膜运行和停运两种情况下,对采样点以及出厂水的浊度、耗氧量、pH和余氯等水质指标进行检测。两水厂均采用内压式超滤膜。

### 1.2 消毒副产物的测定

水样取自中试装置出水,中试以南水北调水源水为原水,采用搅拌混凝—超滤—出水短流程工艺,规模为45 L/h,超滤采用浸没式超滤膜。取超滤膜进、出水水样后,加入 $\text{NaClO}$ ,使有效氯:DOC为10:1,避光放置48 h后,对三卤甲烷、卤乙酸和含氮消毒副产物进行检测。其中,三卤甲烷采用气相色谱仪(Thermo Fisher, Trace 1300)测定,卤乙酸和含氮消毒副产物采用气相色谱质谱联用仪(Shimadzu, TQ8040)测定。

### 1.3 铁和铝浓度的测定

水样经 $\text{HNO}_3$ 酸化至 $\text{pH}=2$ 后,采用电感耦合等

离子体质谱法测定总铝浓度;水样通过 $0.45 \mu\text{m}$ 膜过滤,经 $\text{HNO}_3$ 酸化至 $\text{pH}=2$ 后,采用电感耦合等离子体质谱法测定溶解铝浓度;采用Ferrozine分光光度法在波长为560 nm下测定总铁浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对浊度的去除

水厂A进、出水浊度随时间的变化如图1所示。2021年1月—7月,水厂进水浊度在0.4~9.0 NTU波动。超滤膜运行后,膜池出水浊度均低于炭池出水,均值从0.25 NTU降至0.098 NTU,通过统计学 $t$ 检验分析,得到的 $P$ 值远小于0.05,具有统计学意义。

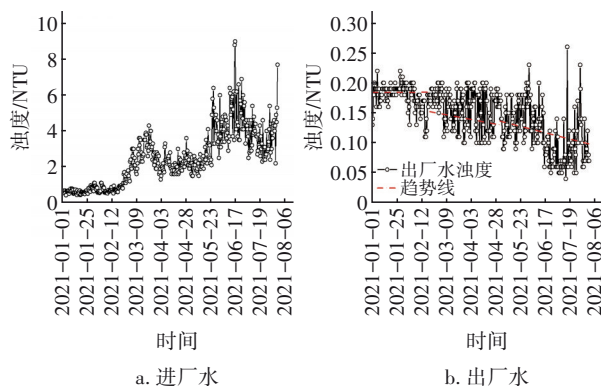


图1 水厂A进、出水浊度的变化

Fig.1 Change in turbidity of influent and effluent from A waterworks

由图1可知,虽然进水浊度逐渐上升,但超滤膜的运行进一步去除浊度,使出厂水浊度出现下降趋势,从未通膜时期(2021年1月)的0.18 NTU降至膜稳定运行时期(2021年6月—7月)的0.09 NTU,且 $P$ 值远小于0.05,表明超滤膜运行时的出厂水浊度显著低于其未运行时。随着超滤膜的运行,水厂浊度去除率的均值从70.8%提高至90.0%。

### 2.2 对耗氧量的去除

图2(a)为水厂A进水耗氧量的变化。可知,2021年1月—5月,进水耗氧量从1.0~2.0 mg/L逐渐升高至1.5~2.5 mg/L。超滤膜未运行时,机械加速澄清池对耗氧量去除效果显著,炭池对耗氧量有少量的去除作用,出厂水耗氧量主要为0.64~0.89 mg/L。超滤膜运行后,出厂水耗氧量主要为0.72~0.90 mg/L,这可能是进水耗氧量升高导致的。

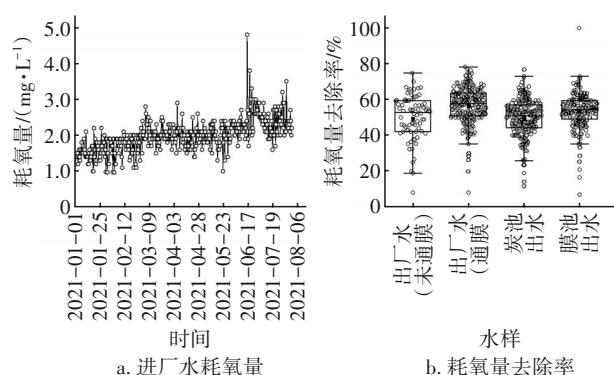


图2 水厂A进水耗氧量以及超滤膜对耗氧量去除率的影响

Fig.2 Oxygen consumption of influent and the influence of ultrafiltration membrane on the removal rate of oxygen consumption in A waterworks

为进一步确认超滤膜运行对耗氧量的影响,对超滤膜运行前后炭池出水、膜池出水和出厂水数据进行了对比[见图2(b)]。虽然在超滤膜运行期间,出厂水耗氧量增加,但通过对比可知,超滤膜运行后耗氧量的去除率显著高于其未运行时,从49.2%显著升高至56.6%,且 $P$ 值远小于0.05,表明数据具有统计学意义。可见超滤对耗氧量有一定的去除作用,但低于对浊度的去除效果。

### 2.3 对残余铁和残余铝的控制

水厂A采用氯化铁和聚合氯化铝(PAC)两种混凝剂,超滤膜对残余铁和残余铝的控制见图3。

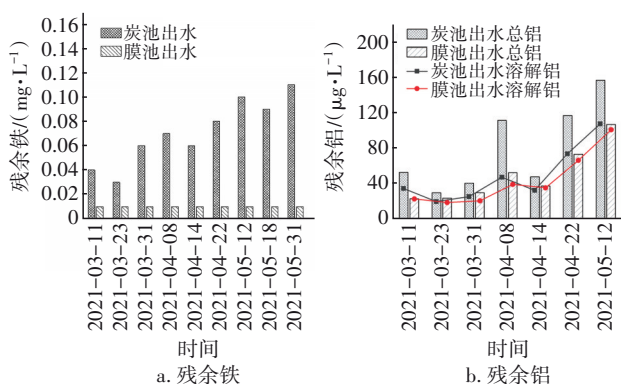


图3 超滤膜对残余铁和残余铝的控制

Fig.3 Control of residual iron and residual aluminum by ultrafiltration membrane

3月—5月随着气温逐渐升高,进水藻密度上升,水厂通常会增大混凝剂投量以控制藻类。由图3可知,随着氯化铁投量增加,炭池出水残余铁浓度持续升高,但经超滤膜过滤后,超滤出水残余铁浓度始终维持在0.01 mg/L左右,得到严格控制。但另一方面,投加的铁越多,被截留的铁也就越多,较

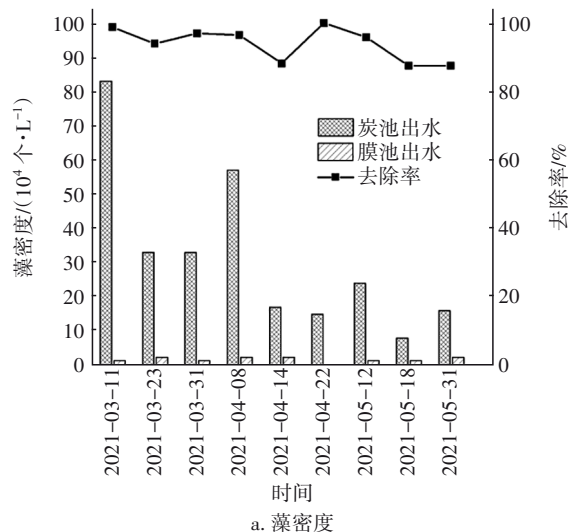
高的铁截留率可能是因为铁吸附在了超滤膜表面,这有可能形成铁氧化物/氢氧化物堵塞超滤膜膜孔<sup>[4]</sup>,从而导致跨膜压差增长、反洗频率增加。特别是对于絮凝—超滤短流程处理工艺,更应控制铁混凝剂投量以减轻膜污染程度。

此外,当藻密度升高时,PAC投量也随之增大,炭池出水总铝浓度逐渐升高,其中溶解铝占总铝的比例高于60%,且随着炭池出水总铝浓度升高而升高。经超滤膜过滤后,超滤出水总铝浓度和炭池出水溶解铝浓度基本一致,而超滤出水中铝几乎全部以溶解态存在,表明超滤膜可有效截留颗粒铝,而对溶解铝无截留作用。因此在絮凝—超滤短流程工艺中,要格外注意出厂水铝浓度。

### 2.4 对藻类、颗粒数和微生物的控制

#### 2.4.1 对藻类、颗粒数的去除

南水北调水源水经过约1 200 km的长途输送,藻类滋生现象比较显著。1月份进水藻密度约为 $150 \times 10^4$  个/L,随着气温升高,进水藻密度逐渐上升,至5月底已经达到 $2 100 \times 10^4$  个/L。图4为超滤膜对藻类和颗粒数的去除效果。在水厂A的净水工艺中,机械加速澄清池对藻类去除起了重要作用,炭池对藻类也有一定的截留作用,炭池出水藻密度主要维持在 $(20 \sim 40) \times 10^4$  个/L。经超滤膜过滤后,膜池出水藻密度降至 $(1 \sim 2) \times 10^4$  个/L,去除率超过87.5%,表明超滤膜对藻类的截留作用显著。值得注意的是,当超滤出水藻密度明显高于日常检测值时,则需留意在压力式超滤膜中是否存在藻类滋生以及膜丝断裂的问题。



a. 藻密度



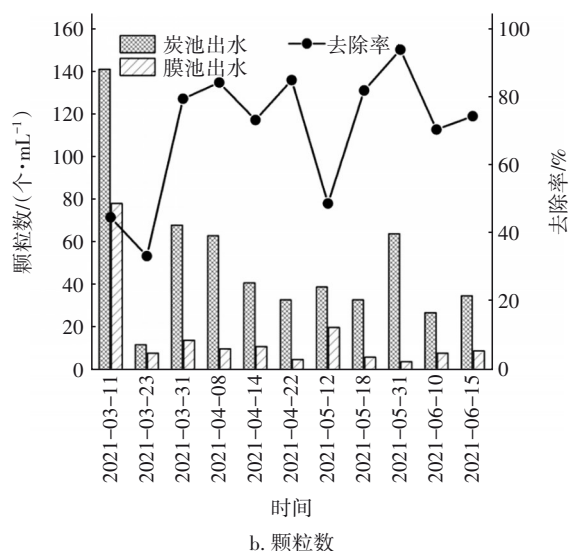


图4 水厂A中超滤膜对藻类和颗粒数的去除效果

Fig.4 Removal of algae and particle numbers by ultrafiltration membrane in A waterworks

超滤膜对颗粒数的去除效果良好,从图4(b)可知,炭池出水颗粒数波动范围大,但经超滤膜后,膜池出水颗粒数显著降低且较为稳定,基本维持在10个/mL左右。

#### 2.4.2 对细菌总数的控制

炭池对有机物的去除主要表现在活性炭吸附以及微生物的降解作用,因此炭池出水通常有细菌检出。本研究炭池出水中细菌总数均值高于 $1\,000\times 10^4$ 个/L,最高可达 $2\,000\times 10^4$ 个/L,其中活细菌数量占细菌总数的60%~70%。经超滤膜过滤后,细菌总数显著下降,均值约为 $25\times 10^4$ 个/L,最高值为 $69\times 10^4$ 个/L,活细菌数量均值约为 $10\times 10^4$ 个/L,表明超滤膜对细菌总数具有显著的控制效果。活细菌数量下降一方面减少了余氯的消耗,另一方面可以减轻管网腐蚀,保持管网水环境稳定。但是超滤出水中死亡的细菌占比较高,还需要考虑其对水质的影响。

#### 2.5 超滤膜对消毒副产物及其前体物的去除

由于三氯甲烷等常见消毒副产物尺寸较小,超滤膜对前序工艺中已生成的消毒副产物截留作用不显著。采用Matlab平行因子分析方法对炭池和膜池出水的数据进行模拟,识别出3种共同荧光组分(见图5),分别是富里酸(组分1)、酪氨酸类芳香族蛋白质(组分2)和腐殖酸(组分3)。

通过对比3种组分荧光强度的变化,判断超滤膜对荧光类物质的截留效果,结果如图6所示。可

知,经超滤膜过滤后,三者的荧光强度有轻微下降,但下降幅度均不显著。

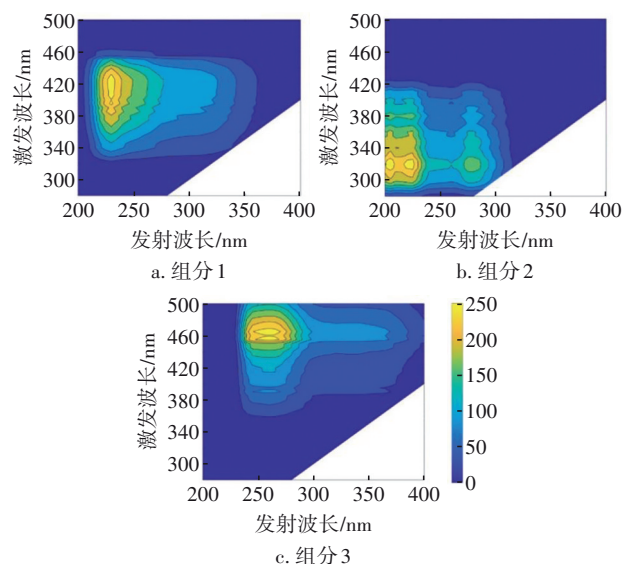


图5 3种组分的三维荧光光谱

Fig.5 Three-dimensional fluorescence spectrum of three components

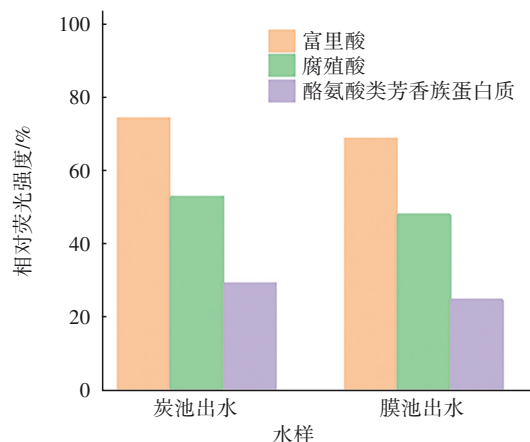


图6 超滤膜对荧光组分的截留效果

Fig.6 Interception effect of ultrafiltration membrane on fluorescent components

本研究还通过检测超滤工艺进、出水三卤甲烷、卤乙酸、含氮消毒副产物的生成势来探究超滤膜对消毒副产物前体物的截留效果,结果如图7所示。其中,三卤甲烷以三氯甲烷(TCM)为主,其次是二氯一溴甲烷(DCBM),一氯二溴甲烷(DBCM)和三溴甲烷(TBM)均未检出,经超滤膜过滤后,前体物浓度无明显变化。超滤膜进水中检测到了 $22.06\,\mu\text{g/L}$ 二氯乙酸(DCAA)和 $5.38\,\mu\text{g/L}$ 三氯乙酸(TCAA),以及少量的一氯乙酸(MCAA)和一溴乙酸(MBAA),

经超滤膜过滤后,超滤膜出水中 DCAA 和 TCAA 分别下降至 13.81 和 1.80  $\mu\text{g/L}$ ,MCAA 和 MBAA 未检出,表明超滤膜对卤乙酸前体物具有约 40% 的截留效果。在超滤工艺进、出水中检测出了一氯乙腈(MCAN)、二氯乙腈(DCAN)、一溴乙腈(MBAN)、二氯乙酰胺(DCAcAm)、三氯乙酰胺(TCAcAm),浓度为 0.2~0.3  $\mu\text{g/L}$ ,说明含有以上含氮消毒副产物的前体物;三氯乙腈(TCAN)未检出,说明不含其消毒副产物前体物;超滤前后检出浓度无明显变化,表明超滤对含氮消毒副产物前体物无截留效果。

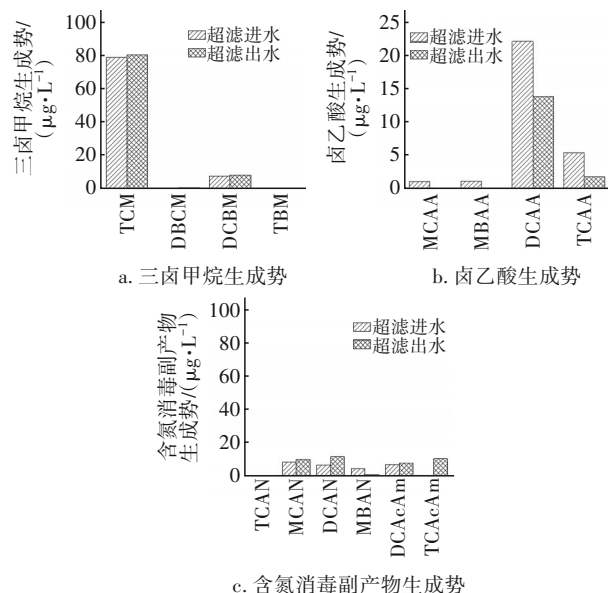


图7 超滤膜对消毒副产物前体物的截留作用

Fig.7 Intercepting effect of ultrafiltration membrane on disinfection by-product precursors

## 2.6 超滤膜清洗对管网水质的影响

水厂B在超滤膜运行时投加少量次氯酸钠来控制膜污染,此过程会对出厂水pH造成一定波动,进一步影响管网水质的稳定。当超滤膜运行时,出厂水pH明显较其停止运行时高。次氯酸钠的投加也影响了余氯值,膜运行条件下出厂水余氯为0.71 mg/L,而超滤膜停止运行时为0.61 mg/L。与原文pH相比,经超滤膜后,出厂水pH波动较大;超滤膜停止运行时,出厂水pH则相对稳定,波动较小。较大的pH波动会对管网环境产生影响,使腐蚀情况发生变化,不利于管网水质稳定<sup>[5]</sup>。因此,建议在超滤膜工艺运行时,要求工艺运行管理精细化,严格把控次氯酸钠投量,以维持出厂水pH稳定。

在水厂B供水区域选择了11个管网点进行采样,观察超滤膜运行和停运时,管网水质的变化情

况。图8为超滤膜对水厂B供水区域管网采样点浊度的影响。可知,对同一管网采样点来说,超滤膜运行期间的浊度均高于停运时。虽然在两种情况下,每一个采样点的浊度差值不大,但是91%的采样点均表现出了相同趋势,表明在超滤膜运行条件下,管网pH波动较大,会造成管网浊度升高。

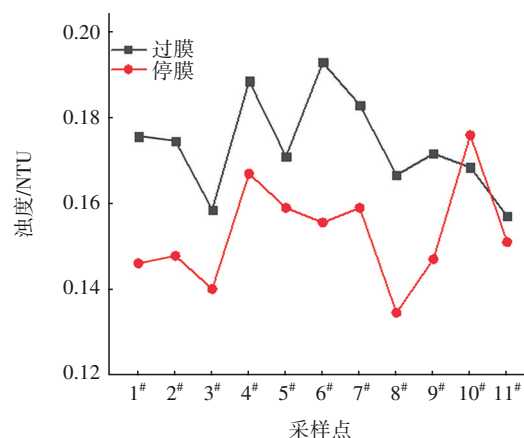


图8 超滤膜对水厂B供水区域管网采样点浊度的影响

Fig.8 Influence of ultrafiltration membrane on turbidity in water distribution system of B waterworks

图9为超滤膜对水厂B供水区域管网采样点余氯的影响。可知,11个管网点在膜运行和停运两种状态下的余氯值接近,而在超滤膜运行时出厂水余氯偏高,这可能是因为超滤膜运行时,出厂水pH波动引起管网水浊度升高,导致管网中余氯消耗量的增加。

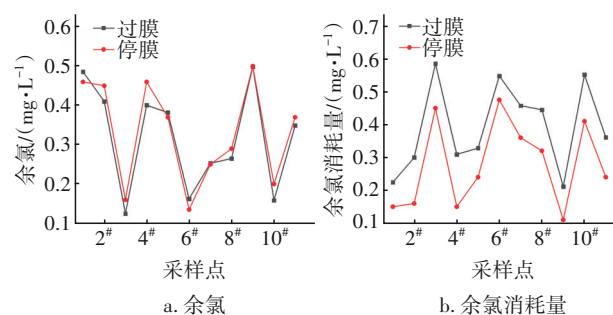


图9 超滤膜对水厂B供水区域管网采样点余氯的影响

Fig.9 Influence of ultrafiltration membrane on residual chlorine in water distribution system of B waterworks

图10为超滤膜对水厂B供水区域管网采样点耗氧量的影响。可知,当超滤膜工艺运行时,管网中耗氧量较低,这一方面是由于超滤膜对耗氧量有一定去除作用,另一方面可能与余氯消耗量高有关。

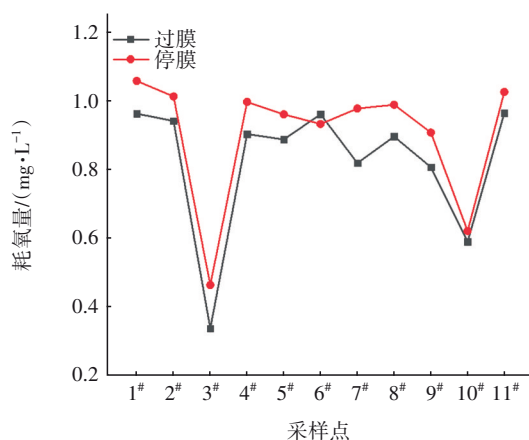


图10 超滤膜对水厂B供水区域管网采样点耗氧量的影响

Fig.10 Influence of ultrafiltration membrane on oxygen consumption in water distribution system of B waterworks

### 3 结论与建议

① 当超滤膜运行时,前序混凝工艺若采用铝盐混凝剂,因超滤膜对溶解态铝几乎无拦截作用,因此需关注出水铝浓度;当采用铁盐混凝剂时,特别是絮凝/混凝—超滤短流程工艺,要格外注意膜污染问题,防止膜表面吸附的铁离子生成铁氧化物/氢氧化物,从而堵塞膜孔。

② 当原水中藻密度较高时,需特别关注膜壳内藻类和细菌滋生问题,应视情况及时反洗并调整反洗条件。

③ 当原水中溶解性有机物浓度较高时,由于超滤膜对其拦截作用较弱,因此需关注出水DOC和消毒副产物浓度。

④ 若采用膜前投加次氯酸钠控制膜污染时,应严格把控次氯酸钠投量,维持出厂水pH稳定,避免由此造成管网水质波动的情况。

### 参考文献:

- [1] 赵新娟,刘伯一. 短流程超滤膜工艺在凌庄水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 71-74.  
ZHAO Xinjuan, LIU Boyi. Application of short process ultrafiltration membrane in Lingzhuang Waterworks[J].

China Water & Wastewater, 2021, 37(10): 71-74 (in Chinese).

- [2] 李宝华. 混凝—超滤工艺处理长江水源适用性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.

LI Baohua. Research on Applicability of Yangtze River Raw Water by Coagulation Ultrafiltration Processes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).

- [3] 谢正威,张玉龙,赵鹏,等. 常规—超滤组合工艺在北京冬奥会集中供水厂设计中的应用[J]. 北京水务, 2022(2): 47-51.

XIE Zhengwei, ZHANG Yulong, ZHAO Peng, et al. Application of conform-ultrafiltration membrane combined process in Beijing Winter Olympic Games waterworks[J]. Beijing Water, 2022(2): 47-51 (in Chinese).

- [4] 朱丹,顾平,王海燕,等. 饮用水超滤膜处理中试中的膜污染控制[J]. 膜科学与技术, 2012, 32(4): 81-86.

ZHU Dan, GU Ping, WANG Haiyan, et al. Membrane cleaning and fouling control in a pilot plant of ultrafiltration for drinking water treatment [J]. Membrane Science and Technology, 2012, 32(4): 81-86 (in Chinese).

- [5] 米子龙,张晓健,王洋,等. 调节pH值和碱度对给水管网铁释放的控制作用[J]. 中国给水排水, 2012, 28(13): 43-46.

MI Zilong, ZHANG Xiaojian, WANG Yang, et al. Control effect of regulating pH and alkalinity on iron release in drinking water distribution system[J], China Water & Wastewater, 2012, 28(13): 43-46 (in Chinese).

作者简介:张静(1990—),女,内蒙古扎赉特旗人,博士,高级工程师,主要研究方向为给水处理。

E-mail:zj\_zoey@163.com。

收稿日期:2022-07-14

修回日期:2022-10-09

(编辑:沈靖怡)