

# 纳滤饮用水厂的膜工艺处理效能与系统运行

贺鑫<sup>1,2</sup>, 王少华<sup>3</sup>, 施立宪<sup>3</sup>, 徐斌<sup>1,2</sup>, 王同春<sup>4</sup>, 唐玉霖<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学水利部长三角城镇供水节水及水环境治理重点实验室, 上海 200092;  
3. 张家港市给排水有限公司, 江苏 张家港 215600; 4. 金科环境股份有限公司, 北京 100102)

**摘要:** 以国内投产最大规模的纳滤水厂为研究对象, 针对“常规工艺+超滤+纳滤”的深度处理工艺, 结合水厂运行实况、进行水质分析和工艺处理效能研究。研究表明纳滤工艺可有效去除原水中的类腐殖酸和类富里酸物质等有机物, 对原水中溶解性有机碳去除率达到 82%。三卤甲烷类消毒副产物 (THMs-DBPs) 生成势实验显示纳滤出水 THMs-DBPs 浓度为 14.45~18.65  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 双膜法工艺出水 DBPs 前体物浓度极低。根据水厂纳滤单元的日常监测维护, 包括进水水质监测、纳滤单元压力变化、膜清洗策略调整, 讨论了纳滤膜饮用水厂的系统运维实践。研究结果可为纳滤膜在饮用水处理应用与推广提供技术参考。

**关键词:** 纳滤膜; 饮用水; 水质; 深度处理

**中图分类号:** TU991

**文献标志码:** A

## Membrane Process Efficiency and System Operation of Nanofiltration Drinking Water Plant

HE Xin<sup>1,2</sup>, WANG Shaohua<sup>3</sup>, SHI Lixian<sup>3</sup>, XU Bin<sup>1,2</sup>, WANG Tongchun<sup>4</sup>, TANG Yulin<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Urban Water Supply, Water Saving and Water Environment Governance in the Yangtze River Delta of Ministry of Water Resources, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Zhangjiagang Water Supply and Drainage Co. Ltd., Zhangjiagang 215600, China; 4. GreenTech Environmental Co. Ltd., Beijing 100102, China)

**Abstract:** This paper focused on the treatment process of "conventional process-ultrafiltration-nanofiltration (NF)" in the largest-scale NF water plant in China as the research object, and considered water plant operation, water quality analysis and process treatment efficiency comprehensively. The result indicated that the NF process effectively removed humic acid-like and fulvic acid-like

substances with a removal rate of about 82% for dissolved organic carbon in raw water. The experiment of trihalomethane disinfection by-products (THMs-DBPs) formation potential showed that the 14.45~18.65  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  of THMs-DBPs concentration in NF permeated water meant an extremely low concentration of DBPs precursor for the water treated by the dual-membrane process. Based on the daily monitoring and maintenance of the NF system, including inlet water quality, pressure changes and the adjustment of membrane cleaning strategies, the practice experience of the NF membrane water plant was discussed. The research provided technical references for the application of NF membranes in drinking water treatment.

**Key words:** nanofiltration membrane; drinking water; water quality; advanced treatment

饮用水处理工艺始终在不断提高完善。从工艺升级看, 传统的“混凝—沉淀—过滤—消毒”四步工艺逐渐走向深度处理工艺。随着工业化进程加剧, 工业制造产生的有机污染物通过人类使用途径和制造过程中不可避免的泄露途径, 导致自然水体和饮用水厂原水中有有机污染物浓度增加<sup>[1]</sup>, 这类污染物很难被传统的饮用水处理工艺去除。多通过前置预氧化、后接臭氧生物活性炭工艺或者膜工艺处理, 以强化对水中溶解性有机污染物的去除, 确保降低此类污染物在饮用水中的风险。同时用户对饮用水水质要求不断提升, 国家《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2022)已于2023年4月1日全面实施, 上海市供水规划(2017—2035)提出2035年将实现饮用水满足直饮要求<sup>[2]</sup>。综上, 饮用水处理工艺的优化至关重要。

收稿日期: 2023-08-06

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3203603)

第一作者: 贺鑫(1997—), 男, 博士生, 主要研究方向为饮用水膜法处理和控制在 E-mail: hexin@tongji.edu.cn

通信作者: 唐玉霖(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城镇供水节水理论与技术。

E-mail: tangtongji@126.com



论文  
拓展  
介绍

饮用水深度处理工艺主要在常规工艺后增设臭氧活性生物炭工艺或者膜法处理。目前在全国范围来看,深度处理中臭氧活性生物炭工艺应用范围最广,但工艺仍存在微生物泄露和氧化过程生成中间体等挑战<sup>[3-4]</sup>。膜法处理工艺主要包括微滤(Microfiltration)、超滤(Ultrafiltration)、纳滤(Nanofiltration, NF)和反渗透(Reverse osmosis)。微滤膜孔径在 $0.02\sim 10\ \mu\text{m}$ ,超滤孔径在 $0.001\sim 0.02\ \mu\text{m}$ ,因不能有效去除水中溶解性有机物(Dissolved organic matter, DOM)而应用受限。NF膜和反渗透膜由于优异的物质分离性能,在饮用水深度处理受到广泛关注。

NF膜截留物质粒径约为 $1\ \text{nm}$ ,介于超滤和反渗透之间<sup>[5]</sup>。NF膜基于膜面和纳米级膜孔内的空间位阻效应、道南效应、介电效应选择性过滤水中溶解性物质<sup>[6-7]</sup>。NF膜能有效去除二价和多价离子、可部分去除单价离子和分子量低于200的物质,分离性能明显优于超滤。NF膜单元运行压力一般为 $3.5\sim 16\ \text{bar}$ ,能耗远低于反渗透膜<sup>[8]</sup>。由于NF膜去除污染物效果好、操作压力低、耗能低等优点,被广泛用于海水淡化、苦咸水地下水脱盐软化、饮用水处理中去除微量有机污染物等<sup>[9-11]</sup>。NF膜产水能够维持一定矿物质水平、保证良好口感,提升饮用水的品质<sup>[6]</sup>。因此,NF膜在饮用水深度处理的应用越来越多。

本文以国内目前最大规模的纳滤饮用水厂——张家港市第四水厂为例,综合调研水厂运行数据和

日常运行维护措施,分析了水厂工艺水质监测数据、各处理单元出水中DOM去除特征和消毒副产物(DBPs)前体物变化情况等。研究表明纳滤水厂产水能够满足《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2022)要求、提升饮用水品质。大型纳滤水厂的成功实践为NF膜在市政饮用水处理领域的应用和推广提供了技术支撑。

## 1 纳滤水厂概况

选取中国江苏省张家港市第四水厂。当地综合考虑经济发展及改善饮用水品质的需要,2018年率先在全国进行大型NF膜饮用水厂工程探索,并于2020年投产使用。张家港市第四水厂纳滤高品质饮用水提标扩建工程荣获“2022全球水奖年度最佳水项目”。水厂使用长江水作为原水,采用“折板混凝—水平沉淀—浸没式超滤—保安过滤器—三段式纳滤—氯消毒”的双膜法深度处理工艺,供水规模达到 $2\times 10^5\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ,水厂处理工艺如图1所示。在水厂沿线处理单元上,使用的处理性药剂包括聚合氯化铝(PAC)、亚硫酸氢钠和有机小分子磷聚合物,分别用作混凝剂、还原剂和阻垢剂,以保证水厂全流程工艺正常运行。水厂核心工艺为超滤膜结合三段式纳滤、中间以微滤膜型保安过滤器为过渡保护装置,出厂水采用超滤产水和纳滤产水按1:1的比例混合。从运行数据来看,水厂出厂水远优于国家《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2022)。

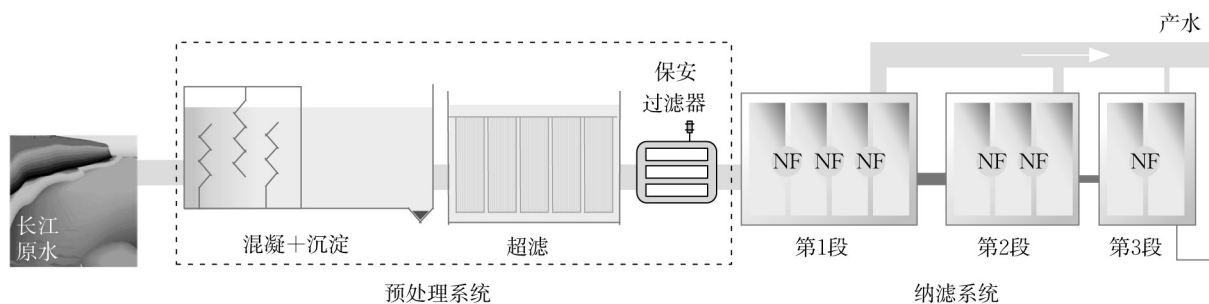


图1 纳滤饮用水厂工艺简图

Fig.1 The treatment process diagram of nanofiltration drinking water treatment plant (NF-DWTP)

整个水厂膜工艺共计10条平行生产线。每条生产线由“超滤池—保安过滤器—三段式纳滤”构成<sup>[12]</sup>。超滤膜池采用LGI2C—2000×110型浸没式聚偏氟乙烯超滤膜,每个膜池内含有2排×7组超滤膜组,日处理水量约 $2\times 10^5\ \text{m}^3$ 。通过每隔2h的气水混合清洗、30d左右的维护性清洗和一年一次的化学恢复性清洗实现超滤膜单元的清洁,以保证产水水质、延长

超滤膜工作年限。部分超滤出水投加还原剂和阻垢剂后流经保安过滤器作为NF膜系统进水。在超滤膜和NF膜中间,设置有压力罐式微滤型保安过滤器,每个压力罐内可安装9根微滤膜芯,膜芯使用时长约1月,根据保安过滤器出水情况适时更换。保安过滤器是连接预处理系统和NF单元的过渡单元,是后续处理的“防火墙”,对于防止预处理后颗粒物的突

然出现和延长 NF 膜的使用寿命非常重要。如果其结垢过程加快或者使用时长缩短,则表明预处理系统出水水质不佳,增加了 NF 膜污染风险<sup>[13]</sup>。NF 膜车间内采用陶氏 NF 270—400/34i 型芳香聚酰胺膜,单个膜片过水面积为 37.2 m<sup>2</sup>,膜组件对运行环境的要求如表 1 所示。每条纳滤生产线设计采用串联 3 段式,前一段浓水为下一段进水,3 段产水汇合。共计 78 支膜壳、分别内含 6 支膜芯元件,第 1 段、第 2 段和第 3 段膜壳比例为 40:25:13。纳滤单元总处理水量约 4 630 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>,总设计回收率为 90%<sup>[14]</sup>。

表 1 NF 膜元件运行环境极限值  
Tab.1 Limit parameters of the operating environment for NF membrane module

运行参数	数值
最高运行压力	600 psi (41Bar)
最高运行温度	45℃
最大给水浊度	1 NTU
游离氯限值	< 0.1 ppm
连续运行 pH 范围	2~11
短时清洗 pH 范围	1~12
最大进水 SDI	5

## 2 材料和方法

### 2.1 取样

按照水厂工艺沿线分布,分别在各处理单元处取得原水(RW)、平流沉淀池出水(SW)、超滤膜单元出水(UW)、保安过滤器出水(CW)、第 1 段纳滤出水(NW1)、第 2 段纳滤出水(NW2)、第 3 段纳滤出水(NW3)和出厂水(EW)。将取得的水样当天送回实验室 4℃下冷藏保存,使用醋酸纤维针孔过滤器(0.45 μm)过滤备用。

### 2.2 溶解性有机物测试

使用三维荧光分光光度计(3D-EEM, F-2700, 日立, 日本)分析水样 DOM。仪器波长扫描速度设置为 12 000 nm·min<sup>-1</sup>, 发射波长  $E_m$  为 220~550 nm, 激发波长  $E_x$  为 220~450 nm, 波长间隔为 5 nm, 以获取水样的三维荧光光谱。所得数据使用 MATLAB 软件中的 drEEM 工具箱处理。在三维荧光图谱中按照分区方法, 区域 I、II、III、IV 和 V 分别代表类芳香族蛋白 I、类芳香族蛋白 II、类富里酸物质、类可溶性微生物副产物物质和类腐植酸物质。水样溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)使用 TOC-VCSH 分析仪(岛津, 日本)测试。

### 2.3 消毒副产物生成潜能实验

将 50 mL 待测水样加入棕色玻璃瓶, 在标准条件下用过量的游离氯对样品进行氯化, 通过 N,N-二乙基对苯二胺比色法和便携式分光光度计(DR1900, HACH, 美国)测量残留氯浓度, 残留氯浓度保持在 3~5 mg·L<sup>-1</sup>, 以确保氯化反应完成。放在水浴锅 25℃避光培育 3d 后, 加入淬灭剂抗坏血酸(摩尔浓度是加氯量的 1.2 倍)淬灭并静置半小时。取氯化后的水样 10 mL 转移含聚四氟乙烯内衬隔膜盖的玻璃瓶, 加入 2 mL 甲基叔丁基醚(MTBE, 气相纯)盖紧。在振荡器 2 400 rpm 下震荡 4 min, 取出静置 3 min 后取上层清液约 600 μL 至气相小瓶待上机测试。使用配备电子捕获检测器(ECD)的气相色谱仪(GC20102, 岛津, 日本)按照美国环境保护局 EPA 551.1 方法检测 THMs—DBPs 浓度, 以研究 DBPs 前体物去除情况<sup>[15]</sup>。

### 2.4 水厂监测数据收集

研究所使用长时间段内的水厂监测数据, 包括浊度、化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)、压力、跨膜压差(TMP)、NF 进水余氯值和淤泥密度指数值(Silt density index, SDI)等由水厂监测系统直接提供。

## 3 结果与讨论

### 3.1 工艺处理效能

在水厂各工艺单元运行过程中, 超滤单元后设置监测点以确定预处理系统出水水质。沉淀池出水和超滤出水浊度如图 2a 所示, 沉淀池出水均值 2.47 NTU, 相比较水厂长江原水浊度(65 NTU 左右)已得到绝大部分去除。超滤膜出水浊度稳定、保持在 0.096±0.016 NTU, 已经远远满足 GB5749—2022 中浑浊度小于 1 NTU 的要求。原水和超滤出水 COD 如图 2b 所示, 原水 COD 保持在 2.07±0.22 mg·L<sup>-1</sup>、超滤出水 COD 为 1.42±0.07 mg·L<sup>-1</sup>, 去除率约 31%。

#### 3.1.1 DOM 去除特征

DOM 广泛存在于自然界水体, 是碳水化合物、多糖、氨基酸蛋白质、脂质、腐殖质和人为制造的有机污染物等不同化合物的复杂混合物<sup>[16]</sup>。水厂日常监测参数对其关注较少, 识别水厂处理工艺 DOM 变化有助于深入了解各工艺处理效能。如图 3 所示, 通过三维荧光分析可以进一步明晰纳滤水厂沿程溶解性有机物变化, NF 膜处理后各区域荧光强度均明



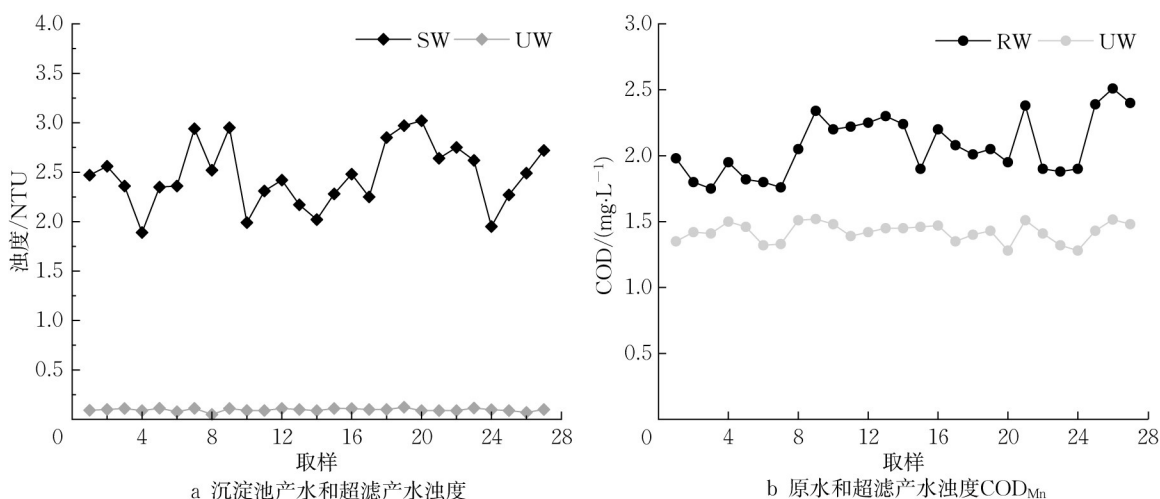


图2 预处理系统产水水质

Fig.2 Water quality of the treated water from pretreatment system

显下降。相比预处理系统各单元出水,EEM荧光物质中的类富里酸物质(III)和类腐植酸样(V)物质在纳滤各段出水明显去除。对于类芳香族蛋白物质(区域I、II)和类可溶性微生物副产物样物质(区域IV),NF膜去除了绝大部分,但相对于NF膜出水中的其他荧光组分物质还有待提高。区域I、II中 $E_m=330\sim380$ 、 $E_x=220\sim240$  nm区域和区域IV的 $E_m=310\sim350$ 、 $E_x=260\sim285$  nm区域附近的强烈荧光峰代表了类酪氨酸、类色氨酸物质和其他可溶性微生物代谢产物<sup>[17]</sup>,说明以蛋白质为主的微生物代谢物仍然是NF膜出水的主要荧光物质。纳滤水厂沿程DOC变化趋势如图4a所示,原水DOC含量 $3.30\pm0.18$   $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,经过超滤后DOC降低至 $2.20\pm0.1$   $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率约33%;经过NF膜处理后DOC含量明显下降,相对原水DOC去除率约82%,说明NF膜对有机物有很好的去除作用。

下面将结合区域荧光积分进一步说明。由图4b可知,纳滤水厂各处理单元出水主要以类蛋白类物质(区域I、II)和类富里酸物质为主。预处理系统出水经NF膜处理后类芳香类蛋白I—酪氨酸物质相对占比增加,由预处理出水的5.2%~5.6%增加到14.4%~16.4%。可溶性微生物产物相对占比由预处理系统的5.1%左右增加至7.8%~8.3%,说明NF膜过滤过程中会产生微生物污染,导致出水微生物代谢物质相对增加。而类富里酸物质和类腐殖酸物质相对占比明显下降,类富里酸物质由预处理出水的35%左右减少到22.8%~29.5%,类腐殖酸物质由预处理出水的14%左右减少到5.9%~7.8%。有研究指出在长江水中腐殖质物质占EEM

总荧光物质的绝大部分<sup>[18]</sup>,水厂采用NF膜能有效降低原水中的腐殖质含量。

### 3.1.2 DBPs生成潜能

溶解性有机物的研究结果表明NF膜能很好去除水中有有机物。为了保证后续供水水质,消毒仍然是确保饮用水生物安全的主要工艺。DBPs是消毒剂与水中有机物反应的生成物,大量研究表明饮用水中DBPs前体有机物浓度过高,消毒后大量生成的DBPs作为“三致”物质会增加饮用水潜在健康风险<sup>[19]</sup>。美国环境保护署(USEPA)规定水中4种THM总量限值为 $80\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[20]</sup>。在GB5749—2022常规指标中规定,饮用水中三氯甲烷(TCM)、一氯二溴甲烷(DBCM)、二氯一溴甲烷(BDCM)、三溴甲烷(TBM)的限值分别为 $0.06\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.06\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[21]</sup>。纳滤水厂沿程各单元THMs—DBPs生成势变化如图5所示,各处理单元THMs—DBPs生成势基本沿水厂工艺生产线逐渐下降。各单元出水4种三卤甲烷类DBPs生成势含量顺序为:TCM>BDCM>DBCM>TBM。原水中TCM生成势浓度为 $89.33\pm5.65\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,经过NF膜处理后降至 $8.28\sim9.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 水平。纳滤出水中THMs—DBPs生成势极低,质量浓度在 $14.45\sim18.65\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 水平。结果表明3段式NF膜工艺处理能够有效去除DBPs前体物,很好地降低后续消毒副产物风险。

## 3.2 NF膜系统运行和维护

### 3.2.1 NF进水监测

预处理出水水质是否符合NF膜进水要求,对后续三段式纳滤工艺的的稳定运行至关重要。研究选取

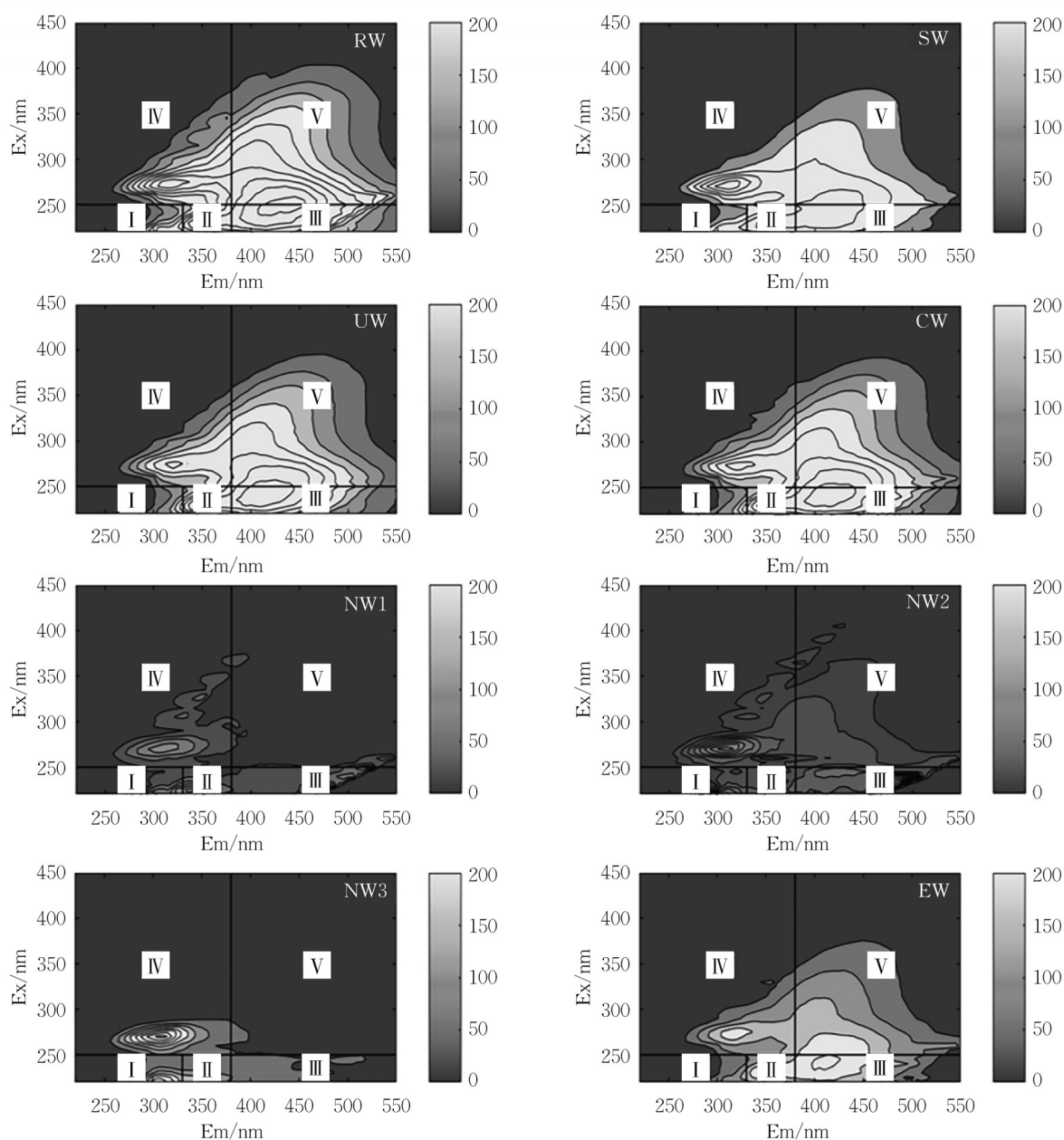


图3 纳滤水厂各处理单元出水三维荧光图谱

Fig.3 3D EEM spectra of each treatment unit of NF-DWTP

了2022年3—8月的保安过滤器出水、即NF膜单元进水的SDI值和余氯值如图6所示,NF进水SDI值均小于NF膜 $SDI_{max}=5$ 限值的要求。对于NF膜而言,SDI值被认为纳滤进水指标的重要参数之一,它反映了水中颗粒、胶体和其他能阻塞膜面及膜孔的物质含量,是检验膜前预处理系统出水是否满足NF进水要求的主要参数,对膜滤系统运行寿命至关重要<sup>[22]</sup>。SDI值越低,进水对NF膜的污染阻塞潜力越小。大多数膜厂家综合经济和效率推荐进水SDI值不高于5<sup>[23]</sup>。在实际膜元件运行过程中,SDI反映水中的颗粒状况,SDI值只能提供最基本的膜运行保

证,未来可增加更加精细的指标衡量进水污染潜力<sup>[24]</sup>。同时必须将NF进水余氯控制在低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,避免NF膜因氧化而性能下降。

### 3.2.2 NF单元运行

对于NF膜单元,除了定期进行水质检测外,整个系统运行的主要监测参数包括水压、水量和温度。研究在一年内对纳滤一段每月进水压力均值( $P$ )、一段TMP、进水温度均值、产水率等参数进行统计。如图7所示,膜组一段进水压力、跨膜压差和产水率受进水温影响较大。在4—11月,进水水温上升,进水压力下降、产水率维持0.9左右的较高水平。特别在7—8

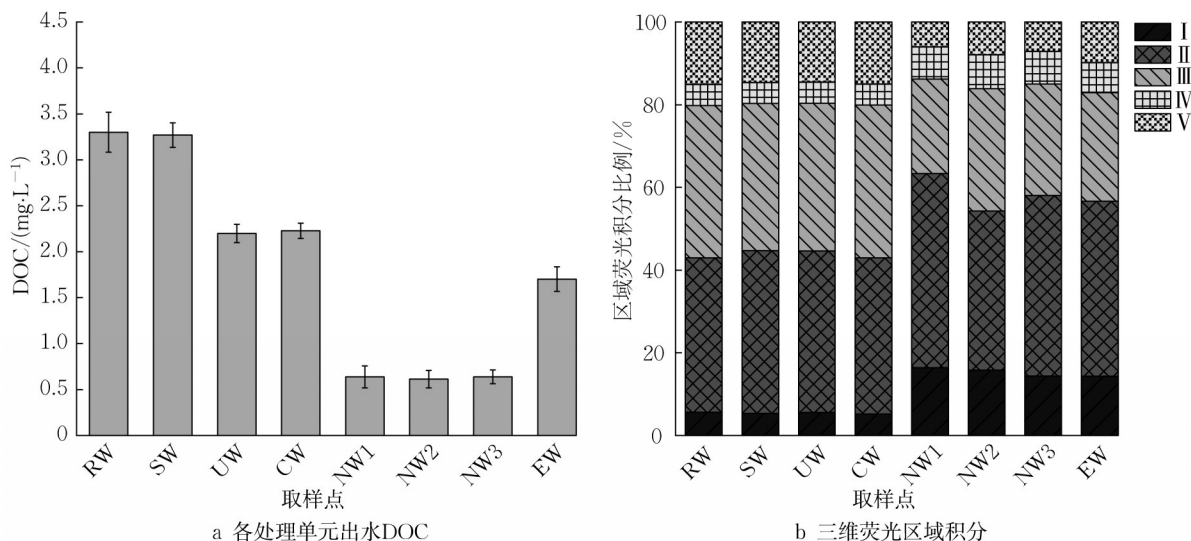


图4 各处理单元出水中DOM去除情况

Fig.4 The DOM removal of the treated water from each treatment unit

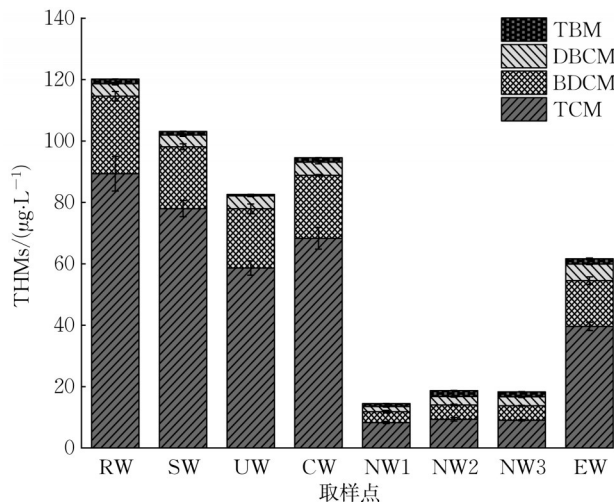


图5 各处理单元出水THMs—DBPs生成潜能

Fig.5 The formation potential of THMs — DBPs of the treated water from each treatment unit

月,跨膜压差下降明显。在12月到次年3月,进水水温降低,进水压力升高、产水率维持在0.85左右的较低水平。这主要是由于NF膜在较低温度下膜通量变小,也会导致跨膜阻力增大,需要增大压力以保证膜通量。此外,温度变化会引起水质的变化,从而调整膜元件清洗策略。水温较高时,需要提高清水清洗频率。同时纳滤一段受腐殖质及前端进水铝盐污染易堵塞,故化学清洗按照一段和二、三段分区冲洗。水温较低的冬季,膜通量衰减,浓水侧浓缩倍率增加导致三段易堵塞,故调整为一、二段和三段分区冲洗。根据水厂数据,纳滤工艺运行过程中用于膜处理电力消耗和处理药剂消耗量如表2所示,消耗主要体现在膜滤水泵能量消耗和膜污染控制两个方面。

### 3.2.3 NF膜污染控制

在纳滤饮用水厂内部,整个处理工艺由预处理系统和NF膜处理系统组成运行。预处理系统的主要功能是:直接去除悬浮颗粒;促进胶体颗粒和溶解有机物的脱稳和凝聚;防止纳滤单元进水携带颗粒物;在NF膜可承受的酸碱度范围内调节进水pH值以提高混凝性能;投加还原剂去除水中残留活性氯;抑制膜上微生物生长并减缓膜结垢和微生物污染<sup>[25]</sup>。预处理工艺通过传统的混凝、絮凝、沉降、砂滤等和微滤和超滤等组合,能够去除水中的大颗粒、浊度、色度、部分有机物和微生物,从而减轻NF膜的处理负荷、降低NF膜污染风险<sup>[26-27]</sup>。相比传统工艺水厂,纳滤单元能否长期稳定运行很大程度取决于预处理出水水质<sup>[28]</sup>。

对于NF膜处理单元,膜滤过程导致膜面逐渐累积和滋生各种物质、逐渐降低膜滤效率,因此NF膜处理系统污染控制是极其重要的。根据水体存在的污染物来源,膜表面污染物可以分为输入性污染物和内生性污染物<sup>[12]</sup>。输入性污染物主要包括来自水体中的外源性污染物(天然有机质、无机离子、杂质颗粒等)和内生性污染物(人工添加的处理药剂和处理构筑物腐蚀而释放的物质);内生性污染物则主要指以微生物繁殖代谢引起并不断增多的微生物污染物,如细菌或藻类等自身繁殖及其代谢产生的物质。因此,原水中广泛存在的天然有机质、预处理过程添加的处理药剂、水中的微生物等均对膜表面污染物形成具有一定贡献率。向NF膜元件投加杀菌剂、阻垢剂和进行定期清洗是目前通用的污染控制策略。

膜表面水垢沉积是纳滤和反渗透等膜处理装置



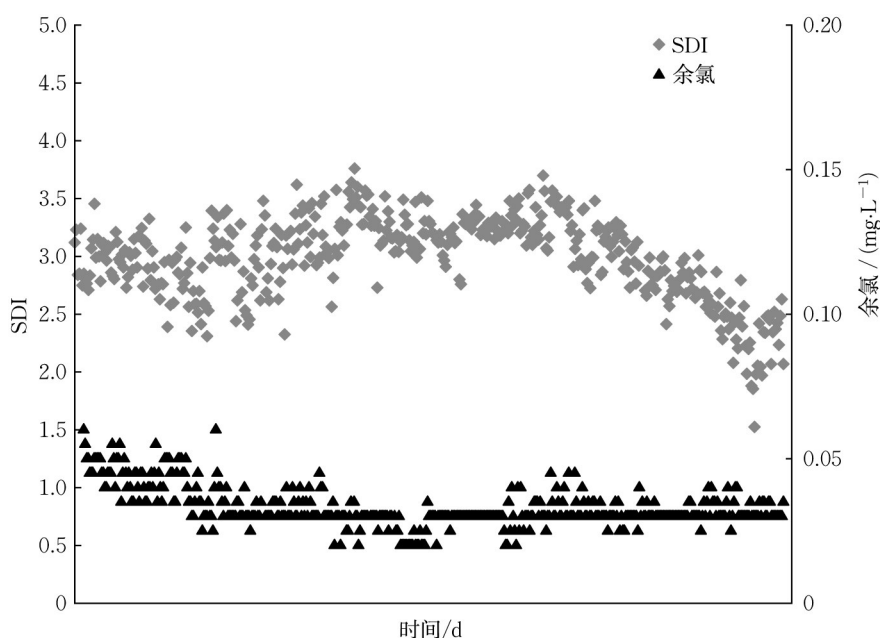


图6 2022年3月~8月NF单元进水SDI值和余氯值监测

Fig.6 The value of SDI and residual chlorine of the NF influent water from May to August 2022.

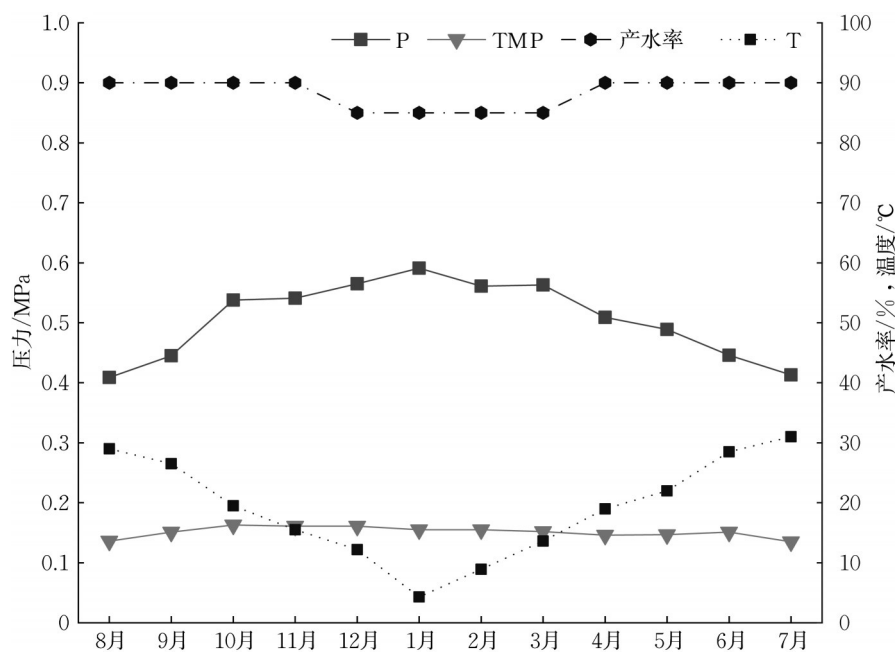


图7 一年内NF膜系统第一段产水管线的水压、TMP、水温 and 产水率变化

Fig.7 The pressure, TMP, water temperature and water production rate of feed water from the first stage of NF membrane system water yield lines within a year.

面对的重要问题。进水中的溶解性盐在膜面浓缩,当进料液中的盐溶液浓度超过其溶解度极限,会在膜面发生沉积结垢。通过实时投加阻垢剂是膜处理过程中减缓膜垢形成的主要控制工艺,该水厂采用聚合小分子有机磷阻垢剂减缓膜结垢进程。另一方面,进水中不可避免的携带微生物,逐渐在膜表面形成独特的“膜上膜”微生物污染<sup>[29]</sup>。由于NF膜不耐氧化性物

质,水厂在NF膜前增设冲击性非氧杀菌系统,灌入杀菌液至充满膜组件浸泡两小时后清水洗净。清洗后连续采水,夏季约7d可见菌落,冬季约12d可见菌落,表明膜表面微生物污染得到有效控制。

NF膜元件的清洗工作分为纳滤物理清洗和化学清洗。物理清洗为常规性清洗,每隔12—24h采用NF产水作为清洗进水进行正向冲洗。根据水厂

表 2 NF 车间电耗和药品消耗量

Tab.2 Electricity consumption and water treatment reagents consumption in the NF workshop

消耗项	消耗量
电力消耗/(kW·h)	≈245/10 <sup>3</sup> t
阻垢剂(聚合有机小分子磷)/kg	≈2.40/10 <sup>3</sup> t
还原剂(亚硫酸氢钠)/kg	≈0.21/10 <sup>3</sup> t
氢氧化钠(30%)/kg	30
单个膜段清洗 乙二胺四乙酸二钠/kg	200
药品消耗量 十二烷基苯磺酸钠/kg	1.0
盐酸(30%)/kg	60

运行经验,NF 物理清洗初期清洗策略参照反渗透膜清洗的设计思路进行,清洗时虽采用 NF 产水进行正向冲洗,但未调节清洗膜段的产水阀门,在实际中发现清洗效果不好。不调整 NF 产水侧流量,清洗水仍然按照该管段的设计回收率进行浓产水分离,冲洗强度和频率不能有效满足 NF 膜,不能有效冲洗出污染物,引起化学清洗频率加快。经过调整工艺,冲洗时关闭或者调小被冲洗段 NF 产水阀门、减少过膜产水分流,使 70%~80% 的冲洗水量在浓水侧水平流动冲洗,保证有效冲洗水流量大于正常运行时浓水侧流量,然后结合反向冲洗。现阶段冲洗效果良好,化学清洗启动正常。化学清洗采用先碱洗再酸洗、先清洗污染严重段再污染较轻段的分区清洗原则,按照“膜元件内部注满清洗液—高流量循环清洗—清洗液浸泡—中和清洗液并排空—清水冲洗膜元件”的清洗步骤进行。

## 4 结论

张家港第四水厂 NF 膜组合工艺是国内首次大规模以微污染地表水为原水的饮用水深度处理工程。研究表明所使用的超滤膜结合 NF 膜工艺能够很好地处理微污染水源。纳滤膜能够明显去除原水中类腐殖酸、类富里酸物质以及其他溶解性有机物。各单元产水的消毒副产物生成潜能实验表明,NF 膜能够有效减少 DBPs 前体物含量,降低后续消毒副产物的风险。水厂成功解决了多项 NF 膜运行维护的技术问题,诸如微生物污染、水温水质变化下的稳定运行、NF 膜的长期维护清洗等,有效保障了 NF 膜系统稳定运行,成功探索出一条高品质饮用水可行技术路径。NF 膜应用还面临膜系统进水污染潜力的精细监控、纳滤段的浓水处理、后续城市供水管网的对应提升等问题,需要在实践中不断探索解决。

## 作者贡献声明:

贺鑫:方案设计,调研取样,实验测试,论文写作;  
王少华:协助调研,论文修改;  
施立宪:协助调研,论文修改;  
徐斌:论文指导;  
王同春:协助调研;  
唐玉霖:方案设计,论文指导修改。

## 参考文献:

- [1] YANG Yun, ZHANG Xiangru, JIANG Jingyi, *et al.* Which micropollutants in water environments deserve more attention globally? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(1): 13.
- [2] 上海市水务局. 上海市供水规划 (2017—2035) [S]. 上海: 上海市水务局, 2018.  
Shanghai Municipal Water Affairs Authority. Shanghai water supply planning (2017 — 2035) [S]. Shanghai: Shanghai Municipal Water Affairs Authority, 2018.
- [3] LIM S, SHI J M L, VON GUNTEN U, *et al.* Ozonation of organic compounds in water and wastewater: a critical review [J]. *Water Research*, 2022, 213: 118053.
- [4] KOROTTA-GAMAGE S M, SATHASIVAN A. A review: potential and challenges of biologically activated carbon to remove natural organic matter in drinking water purification process [J]. *Chemosphere*, 2017, 167: 120.
- [5] SRIVASTAVA A, AGHILESH K, NAIR A, *et al.* Response surface methodology and artificial neural network modelling for the performance evaluation of pilot-scale hybrid nanofiltration (NF) & reverse osmosis (RO) membrane system for the treatment of brackish ground water [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278: 111497.
- [6] MOHAMMAD A W, TEOW Y H, ANG W L, *et al.* Nanofiltration membranes review: recent advances and future prospects [J]. *Desalination*, 2015, 356: 226.
- [7] OATLEY D L, LLENAS L, PÉREZ R, *et al.* Review of the dielectric properties of nanofiltration membranes and verification of the single oriented layer approximation [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2012, 173: 1.
- [8] HILAL N, AL ZOUBI H, DARWISH N A, *et al.* A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy [J]. *Desalination*, 2004, 170(3): 281.
- [9] NTHUNYA L N, BOPAPE M F, MAHLANGU O T, *et al.* Fouling, performance and cost analysis of membrane-based water desalination technologies: a critical review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113922.
- [10] AHMAD N N R, ANG W L, LEO C P, *et al.* Current advances in membrane technologies for saline wastewater treatment: a comprehensive review [J]. *Desalination*, 2021, 517: 115170.
- [11] WANG Shichong, LI Lei, YU Shuli, *et al.* A review of



- advances in EDCs and PhACs removal by nanofiltration: Mechanisms, impact factors and the influence of organic matter [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 406: 126722.
- [12] HE Xin, TANG Yulin, WU Haowei, *et al.* Fouling investigation of cartridge filter (CF) used as “firewall” in a nanofiltration drinking water plant [J]. *Environmental Research*, 2022, 212: 113289.
- [13] FARHAT N M, CHRISTODOULOU C, PLACOTAS P, *et al.* Cartridge filter selection and replacement: optimization of produced water quantity, quality, and cost [J]. *Desalination*, 2020, 473: 114172.
- [14] 王少华,施卫娟,贺鑫,等. 纳滤深度处理在饮用水厂的应用与实践[J]. *给水排水*, 2021, 47(10):13.
- WANG S H, SHI W J, HE X, *et al.* Application and practice of nanofiltration advanced treatment in water treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(10):13.
- [15] EPA. Method 551.1. determination of chlorination disinfection byproducts, chlorinated solvents, and halogenated pesticides/herbicides in drinking water by liquid-liquid extraction and gas chromatography with electron-capture detection; revision 1.0 [S]. Cincinnati: EPA, 1995.
- [16] BERG S M, WHITING Q T, HERRLI J A, *et al.* The role of dissolved organic matter composition in determining photochemical reactivity at the molecular level [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(20): 11725.
- [17] SHI W, ZHUANG W E, HUR J, *et al.* Monitoring dissolved organic matter in wastewater and drinking water treatments using spectroscopic analysis and ultra-high resolution mass spectrometry [J]. *Water Research*, 2021, 188: 116406.
- [18] FANG Chao, YANG Xu, DING Shunke, *et al.* Characterization of dissolved organic matter and its derived disinfection byproduct formation along the yangtze river [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(18): 12326.
- [19] RICHARDSON S D, PLEWA M J, WAGNER E D, *et al.* Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research [J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2007, 636(1): 178.
- [20] EPA. Stage 2 disinfectants and disinfection byproducts rule: national primary and secondary drinking water regulations: final rule. federal register 71[S]. Cincinnati: EPA, 2006.
- [21] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 生活饮用水水质标准: GB5749-2022[S]. 北京:中国标准出版社, 2022.
- The State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration Commission. Drinking water quality standards: GB5749 — 2022 [S] Beijing: China Standards Publishing House, 2022.
- [22] JEONG S, VOLLPRECHT R, CHO K, *et al.* Advanced organic and biological analysis of dual media filtration used as a pretreatment in a full-scale seawater desalination plant [J]. *Desalination*, 2016, 385: 83.
- [23] FEO-GARCÍA J, RUIZ-GARCÍA A, RUIZ-SAAVEDRA E, *et al.* Cost assessment in SWRO desalination plants with a production of  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  in Canary Islands [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(48/49): 22887.
- [24] RACHMAN R M, GHAFFOR N, WALI F, *et al.* Assessment of silt density index (SDI) as fouling propensity parameter in reverse osmosis (RO) desalination systems [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(4/6): 1091.
- [25] KIM Y M, KIM S J, KIM Y S, *et al.* Overview of systems engineering approaches for a large-scale seawater desalination plant with a reverse osmosis network [J]. *Desalination*, 2009, 238(1/3): 312.
- [26] CHELLAM S, SARI M A. Aluminum electrocoagulation as pretreatment during microfiltration of surface water containing NOM: a review of fouling, NOM, DBP, and virus control [J]. *Journal of Hazard Mater*, 2016, 304: 490.
- [27] YU Haikuan, CHANG Haiqing, LI Xing, *et al.* Long-term fouling evolution of polyvinyl chloride ultrafiltration membranes in a hybrid short-length sedimentation/ ultrafiltration process for drinking water production [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 630: 119320.
- [28] SUTZKOVER-GUTMAN I, HASSON D. Feed water pretreatment for desalination plants [J]. *Desalination*, 2010, 264(3): 289.
- [29] DE VRIES H J, STAMS A J M, PLUGGE C M. Biodiversity and ecology of microorganisms in high pressure membrane filtration systems [J]. *Water Research*, 2020, 172: 115511.