

# 纳滤工艺深度净化微污染水源水厂出水中试研究

张正磊<sup>1</sup>, 张俸志<sup>2</sup>, 周伟伟<sup>1,2</sup>, 成小翔<sup>2</sup>, 朱学武<sup>3</sup>, 丁怀宇<sup>4</sup>

(1. 山东城市建设职业学院 工程管理系, 山东 济南 250103; 2. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 3. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 葫芦岛邦宇科技有限公司, 辽宁 葫芦岛 125200)

**摘要:** 为提高出水水质、保障饮用水安全,探索常规+纳滤复合工艺在微污染水源水处理中的应用,通过中试研究该复合工艺对常规工艺出水水质的提升效果,并对微污染物截留特性进行了综合评价。结果表明,纳滤深度处理工艺可显著提高对 DOC、COD<sub>Mn</sub>、UV<sub>254</sub> 和荧光性有机物的去除效果,同时将出水浊度和颗粒数降至很低的水平。经纳滤处理后,可吸附有机卤化物、可同化有机碳和消毒副产物前驱物的浓度降低了 80% 以上,大大降低了消毒副产物生成量。经检测,微污染水源水厂滤后水中存在微量的多环芳烃和内分泌干扰物,由于检测出的多环芳烃多以疏水性小分子有机物为主,纳滤截留率仅在 50% 左右,而内分泌干扰物则以分子质量较大的溶解性有机物为主,大于纳滤膜膜孔,因而截留率可保持在 95% 以上。纳滤净化出水水质良好,充分保障了出水的化学安全性和生物安全性,因此可作为一种高效的微污染水源水深度处理技术。

**关键词:** 纳滤; 微污染水源水; 消毒副产物; 深度处理; 荧光性有机物

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0037-06

## Advanced Purification of Effluent from Micro-polluted Source Water Waterworks by Nanofiltration

ZHANG Zheng-lei<sup>1</sup>, ZHANG Feng-zhi<sup>2</sup>, ZHOU Wei-wei<sup>1,2</sup>, CHENG Xiao-xiang<sup>2</sup>,  
ZHU Xue-wu<sup>3</sup>, DING Huai-yu<sup>4</sup>

(1. Department of Engineering Management, Shandong Urban Construction Vocational College, Jinan 250103, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 3. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. Huludao Bangyu Technology Co. Ltd., Huludao 125200, China)

**Abstract:** A conventional water treatment process combined with nanofiltration (NF) membrane advanced treatment process was applied in the treatment of micro-polluted source water to improve effluent quality and ensure drinking water safety. The treatment effect of the hybrid system was studied in a pilot test, and the interception characteristics of micro-pollutants were comprehensively evaluated. The results showed that NF advanced treatment process could significantly improve the removal efficiency of DOC, COD<sub>Mn</sub>, UV<sub>254</sub> and fluorescent organic matters, which was also capable to reduce the turbidity and particle counts in effluent to a very low level. After NF purification, the concentrations of absorbable

organic halogens (AOX), assimilable organic carbon (AOC) and disinfection by-product precursors were reduced by more than 80%, which greatly reduced the generation of disinfection by-products (DBPs). A small amount of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and endocrine disruptors (EDCs) were detected in the filtered water. Since the detected PAHs were mainly hydrophobic small molecular organic substances, the rejection rate of the PAHs was only about 50%. Meanwhile, the EDCs were mainly composed of dissolved organic substances with larger molecular weight, whose molecular weights were larger than the nanofiltration membrane pores. Therefore, the rejection rate of EDCs remained above 95%. NF membrane produced high quality effluent, which fully guaranteed the chemical safety and biological safety of the effluent. Thus, it could be used as an efficient advanced treatment technology for the treatment of micro-polluted source water.

**Key words:** nanofiltration; micro-polluted source water; disinfection by-products; advanced treatment; fluorescent organic matter

传统的混凝/沉淀/过滤/消毒净水工艺可有效去除悬浮物、胶体物质以及微生物等,但对溶解性有机物和氨氮等的去除效果不理想,因此,传统净水工艺在微污染水源水处理方面存在很大的局限性。纳滤(NF)技术是一种介于超滤(UF)与反渗透(RO)之间以压力为驱动力的新型膜分离技术,其截留分子量(MWCO)通常在200~1 000 u。NF膜可以通过孔径筛分作用有效截留水中分子量较大的有机溶质<sup>[1]</sup>;此外,商品化的NF膜表面通常带负电荷,因此通过静电排斥作用可以有效去除部分带电荷的有机小分子以及无机盐离子<sup>[2]</sup>。纳滤膜具有操作压力低、产水量大、分离效果好等特点,在苦咸水处理中具有广泛的应用<sup>[3~4]</sup>。由于UF膜孔较大,很难截留水中溶解性的有机物和无机盐离子;而RO膜是无孔结构,其对物质分离无选择性,不仅可以截留几乎全部的有机物,同时去除了水中全部的无机盐离子,其出水不适宜长期饮用。而纳滤的分离性能介于两者之间,在有效去除水中溶解性有机物的同时,保留了对人体有益的无机盐离子,因此更适用于自来水的深度处理。

杭州市某自来水厂以河水为源水,由于受上游工业生产及渔业养殖的影响,水源水质常年为Ⅳ~Ⅴ类,水质较差。为了提高出水水质,减少消毒副产物生成量,该水厂在砂滤池后增设了两级O<sub>3</sub>/BAC深度处理工艺,极大程度地提升了出水水质,但在冬季仍然会出现出水中COD<sub>Mn</sub>与氨氮浓度偏高、无机盐含量较大、口感较差等问题,当地居民迫切希望提高饮用水水质。为此,笔者以该水厂滤后水为研究对象,搭建了纳滤中试平台,探索纳滤深度处理对滤

后水水质的提升效果,系统研究了滤后水中存在的微量污染物种类、含量以及纳滤净化效果,以期对微污染水源水厂的出水水质提升提供技术参考和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验水质

试验原水取自杭州市某水厂,中试时间为2017年10月—2018年12月,水温在10~25℃,由于该水厂水源受到一定程度污染,因而呈现微污染特性。此外,水厂出水还存在偏苦咸、口感较差等问题。试验期间原水主要水质参数如下:pH值为7.6~7.9,浊度为21.7~57.9 NTU,氨氮为2.04~4.17 mg/L,UV<sub>254</sub>为0.062~0.125 cm<sup>-1</sup>,DO为6.0~8.1 mg/L,DOC为3.2~6.3 mg/L,TDS为327~465 mg/L,COD<sub>Mn</sub>为4.2~6.8 mg/L。

### 1.2 试验装置

中试流程如图1所示,主要由生物预处理/混凝/沉淀/砂滤/纳滤工艺单元组成。生物预处理采用生物接触氧化池,3格串联,内部填充50%的圆形悬浮填料,水力停留时间(HRT)为1.5 h;预处理出水进入絮凝/平流沉淀/砂滤系统,絮凝时间为15 min,平流沉淀池流速为12.8 mm/s、HRT为95 min,砂滤池滤速为8.0 m/h,采用表面扫洗加气水反冲洗方式;纳滤系统采用2段串联方式,其中第1段由2支膜组件组成,第2段由1支膜组件组成,第1段浓水作为第2段进水,第1段产水与第2段产水混合后作为出水,整个系统运行压力为0.5 MPa,产水量为150 L/h,产水率为75%,每运行45 min正洗一次,时间为1 min,冲洗强度为350 L/h。

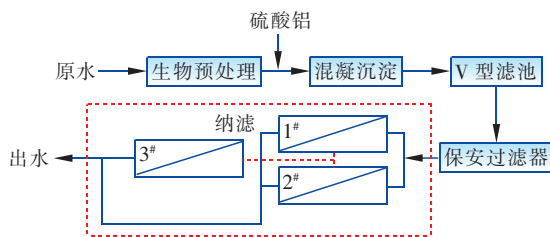


图1 两段式纳滤中试装置示意

Fig.1 Schematic diagram of two-stage nanofiltration pilot process

试验用纳滤膜组件型号为美国陶氏 NF 90 - 4040,主要性能参数如下:材质为聚酰胺,有效过滤面积为  $7.9 \text{ m}^2$ ,平均截留分子质量为  $150 \sim 300 \text{ u}$ ,运行压力范围为  $0 \sim 4.14 \text{ MPa}$ ,进水 pH 值范围为  $3 \sim 10$ ,进水最高温度为  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,产水量为  $7.9 \text{ m}^3/\text{d}$ 。保安过滤器滤芯为 PP 棉,过滤精度为  $0.15 \text{ }\mu\text{m}$ 。

### 1.3 分析项目及方法

COD<sub>Mn</sub>采用高锰酸钾滴定法测定;UV<sub>254</sub>采用紫外可见分光光度计测定;DOC采用总有机碳分析仪测定;三维荧光光谱采用荧光分光光度计测定;水温 and TDS 采用电导率仪测定;pH 值采用 pH 计测定;浊度采用浊度仪测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;DO 采用便携式溶解氧仪测定。

多环芳烃(PAHs)采用岛津 LC-2010A 高效液相色谱仪测定,色谱条件:检测波长为  $254 \text{ nm}$ ,流动相为甲醇/水 ( $80:20$ , 体积比),流速为  $1.0 \text{ mL/min}$ ,水样测定前经 HLB 色谱柱富集。内分泌干扰物(EDCs)采用岛津 GC-2010Plus 气相色谱仪测定,色谱条件:采用 ECD 检测器,检测温度为  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,升温程序为  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  保持  $2 \text{ min}$ ,以  $20 \text{ }^\circ\text{C/min}$  升至  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,保留  $5 \text{ min}$ ,水样测定前经液液萃取富集浓缩。消毒副产物生成势(DBPs)和可同化有机碳(AOC)参照美国环保署水质分析方法 551.1、552.3 进行测定。可吸附有机卤化物(AOX)采用耶拿 MultiX2500 总有机卤素分析仪测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 常规指标的控制效果

作为饮用水中常规的有机污染控制指标,COD<sub>Mn</sub>和 DOC 分别表征可氧化有机物和溶解性有机物含量,而 UV<sub>254</sub>与 SUVA 分别反映了水中含不饱和和碳碳双键、芳香族化合物的含量和有机物亲疏水特性<sup>[5-6]</sup>。试验中,纳滤进水中 COD<sub>Mn</sub>和 DOC 浓度分别为  $(3.20 \pm 0.62)$ 、 $(3.71 \pm 0.73) \text{ mg/L}$ ,单从

COD<sub>Mn</sub>浓度可以看出水厂出水有机物浓度已经超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的限值( $3 \text{ mg/L}$ ),有必要进行深度处理;纳滤出水中 COD<sub>Mn</sub>和 DOC 浓度分别为  $(0.31 \pm 0.09)$ 、 $(0.25 \pm 0.07) \text{ mg/L}$ ,对应的去除率分别为  $90.3\%$  和  $91.6\%$ ,出水有机物含量远低于 GB 5749—2006 的限值。另外,纳滤进水中 UV<sub>254</sub>和 SUVA 值分别为  $(0.09 \pm 0.003) \text{ cm}^{-1}$ 、 $(2.49 \pm 0.43) \text{ L}/(\text{mg} \cdot \text{m})$ ,出水中的相应值分别为  $(0.005 \pm 0.002) \text{ cm}^{-1}$ 、 $(2.25 \pm 1.07) \text{ L}/(\text{mg} \cdot \text{m})$ ,去除率分别为  $94.2\%$  和  $9.2\%$ 。一般来说,SUVA 值越大,说明水中的大分子疏水性有机物含量越高,而 SUVA 值越小说明水中的亲水性成分越多<sup>[7]</sup>。纳滤进水中 SUVA 含量低于  $4.0 \text{ L}/(\text{mg} \cdot \text{m})$ ,说明原水中的有机物以亲水性成分为主,而出水中 SUVA 含量与进水相比变化不大,说明这些物质以小分子为主。由于纳滤进水 UV<sub>254</sub>值已经很低,DOC 和 UV<sub>254</sub>得到同步去除,但相对值变化不大,从而导致 SUVA 降低幅度不明显。纳滤膜对有机物的去除以膜孔筛分效应为主<sup>[8]</sup>,结合各有机物指标的去除效果可以看出,纳滤工艺可以进一步降低水中的有机物含量,保证出水水质的安全性。

水中浊度和颗粒数与微生物之间存在一定的相关性<sup>[9]</sup>。在试验中,经纳滤处理后,浊度由  $(0.11 \pm 0.05) \text{ NTU}$  降低到  $(0.03 \pm 0.02) \text{ NTU}$ ,去除率为  $70.7\%$ ;颗粒数由  $(62 \pm 6) \text{ 个/mL}$  降低到零,去除率为  $100\%$ ,说明纳滤工艺可以进一步截留水中的微小颗粒,提高出水的生物安全性。碱度和硬度指标直接影响人体健康<sup>[10]</sup>,试验中,纳滤工艺进水的碱度和硬度分别为  $(56.5 \pm 1.6) \text{ mg/L}$ 、 $(58.4 \pm 1.3) \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ,出水相应值分别为  $(4.8 \pm 0.3) \text{ mg/L}$ 、 $(5.6 \pm 0.2) \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ,对应的去除率分别为  $91.2\%$  和  $90.5\%$ 。水中碱度主要由  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{OH}^-$  等阴离子组成,硬度的主要成分为  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ,由于纳滤膜表面带负电荷,较强的静电排斥作用提高了对阴离子的去除<sup>[11]</sup>;而  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的水合半径大于膜孔径,由膜孔筛分作用得以截留去除<sup>[12]</sup>。纳滤膜对碱度和硬度的去除率均在  $90\%$  以上,这与前人的研究结果相似<sup>[13]</sup>,大大降低了出水中的离子浓度,减少了出水苦咸的风险,提升了出水品质。

### 2.2 有机微污染物的控制效果

在本试验中,滤后水中检测出了萘、菲、蒽、苯并



(a) 芘和苊烯等5种多环芳烃,浓度分别为 $(10.4 \pm 0.5)$ 、 $(9.7 \pm 0.6)$ 、 $(8.8 \pm 0.5)$ 、 $(9.5 \pm 0.6)$ 、 $(9.2 \pm 0.4)$  ng/L,经纳滤处理后,相应的污染物浓度有所降低,出水浓度分别为 $(4.4 \pm 0.3)$ 、 $(5.7 \pm 0.5)$ 、 $(5.2 \pm 0.2)$ 、 $(4.9 \pm 0.4)$ 和 $(4.3 \pm 0.7)$  ng/L,去除率为56.5%、44.2%、40.9%、48.3%和53.1%,可以看出,纳滤对多环芳烃的总去除率不到50%。萘、菲、蒽、苯并(a)芘和苊烯等物质的相对分子质量多在200以内,且呈现出较强的疏水性和非极性<sup>[14]</sup>,而纳滤膜的平均截留分子质量为200 u,理论上小于膜孔的物质很容易透过膜而没有截留效果,但试验结果表明,纳滤对这些多环芳烃仍有一定的去除效果,说明膜表面疏水性吸附起着一定的作用。

另外,滤后水中存在着微量的邻苯二甲酸酯、六氯环己烷、滴滴涕、六六六、狄氏剂和七氯等6种内分泌干扰物,其相应的浓度分别为 $(1.9 \pm 0.6)$ 、 $(4.5 \pm 0.4)$ 、 $(1.8 \pm 0.7)$ 、 $(2.5 \pm 0.5)$ 、 $(1.2 \pm 0.3)$ 和 $(4.8 \pm 0.3)$  ng/L,其中六氯环己烷和七氯含量最高,分别占内分泌干扰物总量的26.3%和28.1%。纳滤出水中各污染物浓度均小于0.3 ng/L,总的去除率在95%以上。对于检测出的内分泌干扰物,其相对分子质量大都在300以上,大于膜的有效截留分子质量,仅依靠纳滤膜的孔径筛分效应就可以得到有效去除。尽管出水DOC含量低于0.3 mg/L,但小分子的有毒有害污染物会通过水处理单元进行累积,从而导致水厂末端出水污染物浓度逐渐增加,进而威胁水质安全。因此,在水厂日常运行中应加强各工艺单元的有机微污染物监测,适当增加深度处理单元,提高出水水质。

### 2.3 可吸附有机卤化物和可同化有机碳控制效果

饮用水中的可吸附有机卤化物(AOX)主要来源于消毒过程,在传统氯气、次氯酸钠以及臭氧消毒过程中,水中存在的微量有机物可与消毒剂反应生成氯仿、六氯苯以及三氯乙烯等致癌性的有机卤代物<sup>[15-16]</sup>。可同化有机碳(AOC)是评价饮用水生物稳定性的重要指标,一般该值越大,说明水中细菌生长所需的有机质含量越高,有利于细菌的繁殖<sup>[17]</sup>。在本试验中,纳滤工艺可极大地降低滤后水中的AOX和AOC含量,滤后水中AOX和AOC含量分别为 $(28.5 \pm 1.2)$ 、 $(98.4 \pm 2.1)$   $\mu\text{g/L}$ ,纳滤出水中的含量分别为 $(2.2 \pm 0.5)$ 和 $(13.8 \pm 0.7)$   $\mu\text{g/L}$ ,去除率分别为92.3%和85.8%。纳滤表现出较好的

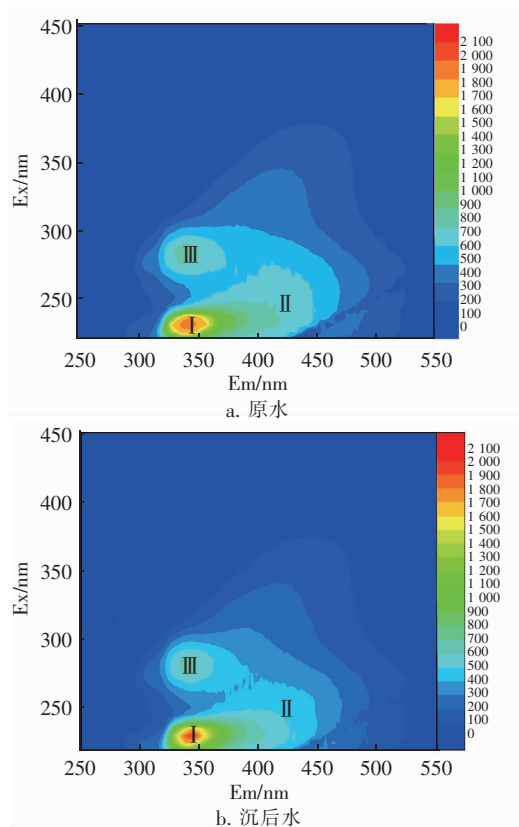
AOX和AOC去除效果,大大降低了微生物繁殖风险,同步提高了出水的化学安全性和生物安全性。

### 2.4 消毒副产物前驱物的控制效果

作为常见的消毒副产物之一,三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)在我国饮用水标准中有着明确的控制限值。测定消毒副产物生成势,提前去除消毒副产物前驱物,对降低最终出水中的消毒副产物含量具有重要的意义。在本试验中,滤后水的三卤甲烷生成势和卤乙酸生成势分别为 $(249.2 \pm 9.5)$ 、 $(786.7 \pm 13.7)$   $\mu\text{g/L}$ ,可以看出卤乙酸生成势明显大于三卤甲烷生成势,主要是由于原水中的亲水性有机物含量较高,消毒后易于生成卤乙酸<sup>[18]</sup>;纳滤出水的三卤甲烷生成势和卤乙酸生成势分别为 $(21.7 \pm 3.4)$ 、 $(148.6 \pm 7.9)$   $\mu\text{g/L}$ ,去除率分别90.8%和81.3%。由于三卤甲烷和卤乙酸的前驱物大都来自水中的大分子天然有机物<sup>[19]</sup>,分子质量大于纳滤膜孔径,可以通过纳滤膜的物理截留作用得以高效去除。

### 2.5 荧光性有机物的控制效果

三维荧光光谱(EEM)可用于水中溶解性有机物成分的测定,不同工艺单元出水中的荧光性有机物含量变化如图2所示。



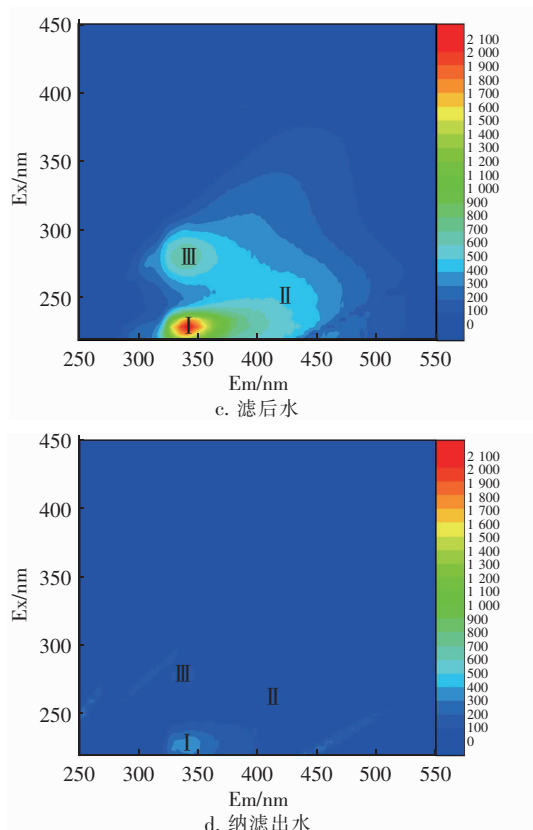


图2 纳滤工艺对荧光性有机物的去除效果

Fig. 2 Removal effect of fluorescent organic matters by NF process

由图2可以看出,原水中有3个特征峰:峰I,  $Ex/Em = 225 \sim 235 \text{ nm}/330 \sim 375 \text{ nm}$ ,表征类芳香族蛋白质;峰II,  $Ex/Em = 240 \sim 275 \text{ nm}/410 \sim 445 \text{ nm}$ ,表征类富里酸和类腐殖酸;峰III,  $Ex/Em = 275 \sim 280 \text{ nm}/340 \sim 360 \text{ nm}$ ,表征类溶解性微生物代谢产物<sup>[20-21]</sup>。很明显峰I强度较大,而峰II和峰III强度相对较小,说明原水中的荧光性有机物以蛋白质类为主,微生物代谢产物以及腐殖酸类物质较少,而芳香蛋白类物质含量与人类活动密切相关,说明原水受到一定程度的有机物污染。经混凝/沉淀/砂滤处理后,各峰相对强度变化不大,说明常规处理工艺对这些物质的去除能力有限。滤后水中峰I、峰II和峰III强度分别为1126、417.3、426.3,经纳滤处理后,各峰强度大幅度下降,分别为136.5、61.4和53.6,去除率分别为87.9%、85.3%和87.4%,说明纳滤对溶解性有机物具有很好的去除效果。

### 3 结论

① 纳滤依靠孔径筛分作用对  $COD_{Mn}$ 、DOC 和

$UV_{254}$  等常规有机污染物指标的去除率可达到90%以上,对荧光性有机物的去除率在85%以上,大大降低了水中溶解性有机物含量;同时,将滤后水中的颗粒数和浊度分别降至零和0.05 NTU以下,对碱度和硬度的去除率保持在90%以上,降低了出水苦咸的风险。

② 常规工艺对消毒副产物前驱物的去除能力有限,但纳滤工艺可大幅度降低消毒副产物含量,出水中可吸附有机卤化物和可同化有机碳含量低至2.2和13.8  $\mu\text{g/L}$ ,对三卤甲烷生成势和卤乙酸生成势的去除率可保持在90%和80%以上,提高了出水的化学安全性和生物安全性。

③ 有机微污染物可在水处理单元逐渐累积,常规工艺无法有效去除,纳滤深度处理可进一步降低有机微污染物浓度,对疏水性小分子多环芳烃的去除率在50%左右,对分子质量较大的内分泌干扰物的去除率可保持在95%以上。

### 参考文献:

- [1] Mohammad A W, Teow Y H, Ang W L, *et al.* Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects [J]. *Desalination*, 2015, 356: 226 – 254.
- [2] Boo C, Wang Y, Zucker I, *et al.* High performance nanofiltration membrane for effective removal of perfluoroalkyl substances at high water recovery [J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 52(13): 7279 – 7288.
- [3] Park S, Nam T, You J, *et al.* Evaluating membrane fouling potentials of dissolved organic matter in brackish water [J]. *Water Res*, 2019, 149: 65 – 73.
- [4] Gai W, Zhao D L, Chung T S. Thin film nanocomposite hollow fiber membranes comprising  $Na^+$ -functionalized carbon quantum dots for brackish water desalination [J]. *Water Res*, 2019, 154: 54 – 61.
- [5] Cheng X, Liang H, Ding A, *et al.* Effects of pre-ozonation on the ultrafiltration of different natural organic matter (NOM) fractions: Membrane fouling mitigation, prediction and mechanism [J]. *J Membr Sci*, 2016, 505: 15 – 25.
- [6] Cheng X, Wu D, Liang H, *et al.* Effect of sulfate radical-based oxidation pretreatments for mitigating ceramic UF membrane fouling caused by algal extracellular organic matter [J]. *Water Res*, 2018, 145: 39 – 49.
- [7] Gray S R, Ritchie C B, Tran T, *et al.* Effect of NOM characteristics and membrane type on microfiltration

- performance[J]. *Water Res*, 2007, 41 ( 17 ): 3833 – 3841.
- [ 8 ] Childress A E, Elimelech M. Relating nanofiltration membrane performance to membrane charge ( electrokinetic ) characteristics [ J ]. *Environ Sci Technol*, 2000, 34 ( 17 ): 3710 – 3716.
- [ 9 ] Fujioka T, Makabe R, Mori N, *et al.* Assessment of online bacterial particle counts for monitoring the performance of reverse osmosis membrane process in potable reuse [ J ]. *Sci Total Environ*, 2019, 667: 540 – 544.
- [ 10 ] Danby S G, Brown K, Wigley A M, *et al.* The effect of water hardness on surfactant deposition after washing and subsequent skin irritation in atopic dermatitis patients and healthy control subjects [ J ]. *J Invest Dermatol*, 2018, 138 ( 1 ): 68 – 77.
- [ 11 ] Bai L, Liu Y, Bossa N, *et al.* Incorporation of cellulose nanocrystals ( CNCs ) into the polyamide layer of thin-film composite ( TFC ) nanofiltration membranes for enhanced separation performance and antifouling properties [ J ]. *Environ Sci Technol*, 2018, 52 ( 19 ): 11178 – 11187.
- [ 12 ] Cheng S, Oatley D L, Williams P M, *et al.* Characterisation and application of a novel positively charged nanofiltration membrane for the treatment of textile industry wastewaters [ J ]. *Water Res*, 2012, 46 ( 1 ): 33 – 42.
- [ 13 ] Haddad M, Ohkame T, Bérubé P R, *et al.* Performance of thin-film composite hollow fiber nanofiltration for the removal of dissolved Mn, Fe and NOM from domestic groundwater supplies [ J ]. *Water Res*, 2018, 145: 408 – 417.
- [ 14 ] García-Vaquero N, Lee E, Jiménez Castañeda R, *et al.* Comparison of drinking water pollutant removal using a nanofiltration pilot plant powered by renewable energy and a conventional treatment facility [ J ]. *Desalination*, 2014, 347: 94 – 102.
- [ 15 ] De Vera G A, Stalter D, Gernjak W, *et al.* Towards reducing DBP formation potential of drinking water by favouring direct ozone over hydroxyl radical reactions during ozonation [ J ]. *Water Res*, 2015, 87: 49 – 58.
- [ 16 ] De Vera G A, Keller J, Gernjak W, *et al.* Biodegradability of DBP precursors after drinking water ozonation [ J ]. *Water Res*, 2016, 106: 550 – 561.
- [ 17 ] Hu H Y, Du Y, Wu Q Y, *et al.* Differences in dissolved organic matter between reclaimed water source and drinking water source [ J ]. *Sci Total Environ*, 2016, 551/552: 133 – 142.
- [ 18 ] Zhang Y, Chu W, Yao D, *et al.* Control of aliphatic halogenated DBP precursors with multiple drinking water treatment processes: Formation potential and integrated toxicity [ J ]. *J Environ Sci*, 2017, 58: 322 – 330.
- [ 19 ] Huang H, Zhu H, Gan W, *et al.* Occurrence of nitrogenous and carbonaceous disinfection byproducts in drinking water distributed in Shenzhen, China [ J ]. *Chemosphere*, 2017, 188: 257 – 264.
- [ 20 ] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation – emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [ J ]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37 ( 24 ): 5701 – 5710.
- [ 21 ] Carstea E M, Baker A, Bieroza M, *et al.* Continuous fluorescence excitation – emission matrix monitoring of river organic matter [ J ]. *Water Res*, 2010, 44 ( 18 ): 5356 – 5366.



作者简介:张正磊(1963 – ),男,山东平度人,本科,副教授,研究方向为给排水工程技术。

E – mail: zhengleiz2008@163.com

收稿日期:2019 – 03 – 19