

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.09.005

纳滤膜处理微污染河网水中试研究

蔡孝楠¹, 刘宏远¹, 朱海涛², 孙海平², 张刚², 徐振峰¹

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 嘉兴市水务集团有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 针对嘉兴地区河网水受有机物和氨氮污染,与饮用水水质需求不断提升之间的矛盾,开展了规模为 $1.50\text{ m}^3/\text{h}$ 的纳滤系统中试研究。结果表明,在水温为 $4\sim 33\text{ }^\circ\text{C}$ 、操作压力为 $0.30\sim 0.70\text{ MPa}$ 、系统回收率为 83.0% 的条件下,纳滤系统对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和DOC的去除率均在 88.0% 以上,出水 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和DOC分别降至 0.009 cm^{-1} 、 0.50 mg/L 和 0.50 mg/L 以下;当进水氨氮浓度为 $0.43\sim 2.47\text{ mg/L}$ 时,出水氨氮浓度为 $0.12\sim 0.54\text{ mg/L}$,平均去除率为 82.3% ;纳滤系统出水中未检出《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定的16种消毒副产物,并且荧光性物质几乎被完全去除。与同期试验的臭氧/活性炭工艺出水相比,纳滤系统出水中三氯甲烷、二氯一溴甲烷、二氯乙酸和三氯乙酸生成势分别降低了 78.1% 、 86.9% 、 50.9% 和 59.1% 。当操作压力从 0.30 MPa 增大至 0.50 MPa 时,纳滤系统对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 、DOC和氨氮的去除率基本保持不变;当回流比从0增大至0.35时,系统回收率从 70.9% 上升至 93.0% ,纳滤系统对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和DOC的去除率略有下降,但对氨氮的去除率下降明显;当水温从 $(10\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $(30\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ 时,纳滤系统对 COD_{Mn} 和DOC的去除率略有提高,然而低温更有利于氨氮的去除,但系统回收率较低。

关键词: 纳滤膜; 微污染河网水; 有机物; 氨氮

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)09-0027-06

Treatment of Micro-polluted River Water by Nanofiltration Membrane

CAI Xiao-nan¹, LIU Hong-yuan¹, ZHU Hai-tao², SUN Hai-ping², ZHANG Gang²,
XU Zhen-feng¹

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. Jiaxing Water Investment Group Co. Ltd., Jiaxing 314000, China)

Abstract: In view of the contradiction between organic matter and ammonia nitrogen pollution of river water and demand of continuous improvement of drinking water quality in Jiaxing area, a pilot-scale nanofiltration system with treatment capacity of $1.50\text{ m}^3/\text{h}$ was carried out. When water temperature, operating pressure and recovery rate were $4\sim 33\text{ }^\circ\text{C}$, $0.30\sim 0.70\text{ MPa}$ and 83.0% , the removal rates of UV_{254} , COD_{Mn} and DOC in the nanofiltration system were all more than 88.0% , and UV_{254} , COD_{Mn} and DOC in the effluent decreased to less than 0.009 cm^{-1} , 0.50 mg/L and 0.50 mg/L , respectively. When ammonia nitrogen in the influent was $0.43\sim 2.47\text{ mg/L}$, the effluent ammonia nitrogen was $0.12\sim 0.54\text{ mg/L}$ with the average removal rate of 82.3% . Sixteen kinds of disinfection byproducts stipulated in

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201004)

通信作者: 刘宏远 E-mail: lhyzyy@qq.com

Standards for Drinking Water Quality (GB 5749 - 2006) were not detected in the effluent from nanofiltration system, and fluorescent materials were almost completely removed. Compared with the effluent quality of ozone/activated carbon process operated in the same period, the formation potentials of trichloromethane, dichloromethane, dichloroacetic acid and trichloroacetic acid in the effluent of nanofiltration system decreased by 78.1%, 86.9%, 50.9% and 59.1%, respectively. When the operating pressure increased from 0.30 MPa to 0.50 MPa, the removal rates of UV_{254} , COD_{Mn} , DOC and ammonia nitrogen in nanofiltration system remained basically unchanged. When the reflux ratio increased from 0 to 0.35, the recovery rate of the system increased from 70.9% to 93.0%. The removal rates of UV_{254} , COD_{Mn} and DOC by nanofiltration system decreased slightly, but the removal rate of ammonia nitrogen decreased obviously. When the water temperature increased from $(10 \pm 2) ^\circ C$ to $(30 \pm 2) ^\circ C$, the removal rates of COD_{Mn} and DOC by nanofiltration system increased slightly. However, low temperature was more conducive to the removal of ammonia nitrogen, but the recovery rate of the system was lower.

Key words: nanofiltration membrane; micro-polluted river water; organic matter; ammonia nitrogen

微污染河网水源水中有机物和氨氮的去除一直是饮用水处理领域的研究热点。施晓帆等^[1]研究表明,传统的混凝沉淀单元对 COD_{Mn} 的平均去除率仅为 22.1%;彭祥等^[2]研究表明,臭氧生物活性炭单元可去除水体中约 36.4% 的 COD_{Mn} ;Kitis 等^[3]采用反渗透技术去除 3 种地表水中的溶解性有机物(DOM),产水规模为 $0.11 \sim 0.16 \text{ m}^3/\text{h}$,出水 DOC 为 $0.10 \sim 0.21 \text{ mg/L}$ 。反渗透膜能高效去除水体中的溶解性有机物,但同时去除了水体中绝大部分的总硬度(钙)等无机盐离子,长期饮用反渗透膜出水不利于人体补充矿物质元素^[4]。嘉兴贯泾港水厂常年的运行数据表明^[5],经过生物预处理、混凝沉淀和臭氧活性炭深度处理工艺,出水 COD_{Mn} 可以稳定低于《浙江省城市供水现代化水厂评价标准》(2018 版)的限值(2 mg/L)。为了全面提升出厂水水质,满足出水 $COD_{Mn} < 0.80 \text{ mg/L}$ 的内控标准,并且能适当保留对人体健康有益的无机盐离子,本研究进行了产水规模为 $1.50 \text{ m}^3/\text{h}$ 的纳滤系统的适用性中试研究,以期为生产性试验提供技术支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验流程如图 1 所示,其中虚线范围的纳滤系统是本研究的对象。纳滤装置采用 7 支同型号的纳滤膜串联,产水规模为 $1.50 \text{ m}^3/\text{h}$,纳滤膜的物理清洗周期为 24 h,清洗水采用纳滤产水,清洗时间为 3 min,冲洗强度为 $1.42 \text{ m}^3/\text{h}$ 。试验采用陶氏 NF90 -

4040 纳滤膜,主要性能参数如下:材质为聚酰胺,有效过滤面积为 7.6 m^2 ,操作压力为 $0 \sim 4.14 \text{ MPa}$,进水 pH 值范围为 $3 \sim 10$,进水最高温度为 $45 ^\circ C$,产水量为 $0.22 \text{ m}^3/\text{h}$ ($25 ^\circ C$)。保安过滤器滤芯型号为 ETHF40 - 20 - PP - 05 - E,过滤精度为 $5 \mu\text{m}$ 。

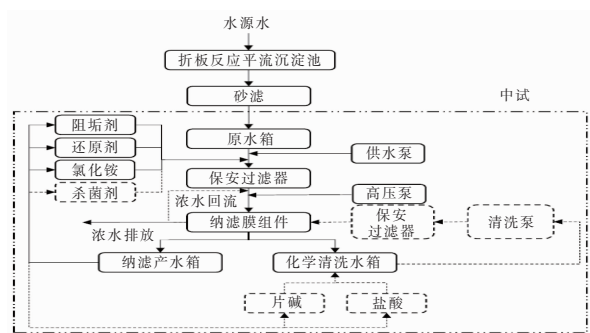


图 1 纳滤工艺流程

Fig. 1 Flow chart of nanofiltration pilot test

1.2 原水水质和目标水质

中试时间为 2018 年 11 月—2019 年 11 月,水源水浊度为 $13.7 \sim 68.1 \text{ NTU}$ (平均值为 29.0 NTU), $NH_4^+ - N$ 为 $0.05 \sim 2.28 \text{ mg/L}$ (均值 0.34 mg/L), COD_{Mn} 为 $3.94 \sim 5.38 \text{ mg/L}$ (平均值为 4.65 mg/L)。试验原水取自嘉兴市某水厂中试砂滤池出水,主要水质参数如表 1 所示。出水水质要求如下:浊度 $\leq 0.1 \text{ NTU}$ [《浙江省城市供水现代化水厂评价标准》(2018 版)], $NH_4^+ - N \leq 0.50 \text{ mg/L}$ [《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)], $COD_{Mn} \leq 0.80 \text{ mg/L}$ (对标千岛湖水厂)。试验期间,为考察纳滤膜对氨

氮的耐受能力,在原水中人工添加了氯化铵,提高氨氮浓度,表1括号中的数值为试验期间原水未添加氯化铵时的实际值。

表1 试验期间的原水水质

Tab.1 Quality of raw water during the test

项 目	范围	平均值
水温/℃	4 ~ 33	24
浊度/NTU	0.10 ~ 0.43	0.20
pH 值	7.16 ~ 7.96	7.60
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.43 ~ 2.47 (0.02 ~ 0.81)	1.78(0.04)
$\text{NO}_3^- - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.2 ~ 2.7	1.8
电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	341 ~ 651	481
TDS/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	165 ~ 320	233
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.042 ~ 0.084	0.070
$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2.06 ~ 3.28	2.60
$\text{DOC}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2.072 ~ 4.727	3.210
总硬度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	105.11 ~ 184.17	133.32
总碱度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	83.83 ~ 124.17	103.17

1.3 单位产水能耗

采用单位产水能耗评价纳滤系统的性能。

$$N = \frac{W}{Q} \quad (1)$$

式中: N 为单位产水能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; W 为能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q 为产水量, m^3 。其中,能耗采用电表测得,产水量采用流量计测得。

1.4 分析项目及方法

UV_{254} :紫外分光光度计; COD_{Mn} :酸性高锰酸钾滴定法; DOC :岛津 TOC-L 分析仪;氨氮:纳氏试剂分光光度法;浊度:台式浊度仪;pH 值和电导率:HACH 多功能水质分析仪;总碱度:酸碱指示剂滴定法;总硬度:EDTA 滴定法;有机物分子质量:超滤膜法;三维荧光光谱(EEM):F-97 荧光分光光度计;消毒副产物:参考《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006),三卤甲烷生成势和卤乙酸生成势分别为水样在高投氯量(20 mg/L)和长时间(72 h)反应的条件下生成三卤甲烷和卤乙酸的量,采用气相色谱法检测。

2 结果与讨论

试验期间,操作压力为 $0.30 \sim 0.70 \text{ MPa}$,产水量为 $1.40 \sim 1.50 \text{ m}^3/\text{h}$,研究处理效果时纳滤系统回收率为 83.0% 。

2.1 对有机物和氨氮的去除效果

纳滤系统对有机物的去除效果如图2所示。可

知,当进水 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和 DOC 分别为 $0.042 \sim 0.084 \text{ cm}^{-1}$ 、 $2.06 \sim 3.28 \text{ mg/L}$ 和 $2.072 \sim 4.727 \text{ mg/L}$ 时,纳滤系统出水 UV_{254} 始终低于 0.009 cm^{-1} ,平均去除率在 90.0% 以上;出水 COD_{Mn} 可降至 0.50 mg/L 以下,平均去除率在 94.0% 左右;出水 DOC 为 $0.023 \sim 0.471 \text{ mg/L}$,平均去除率在 94.0% 左右。这表明纳滤膜对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和 DOC 具有稳定的去除效果,可以有效降低消毒过程中形成消毒副产物的风险,纳滤膜对有机物的去除机理主要是 Donnan 效应与空间位阻效应作用^[6]。

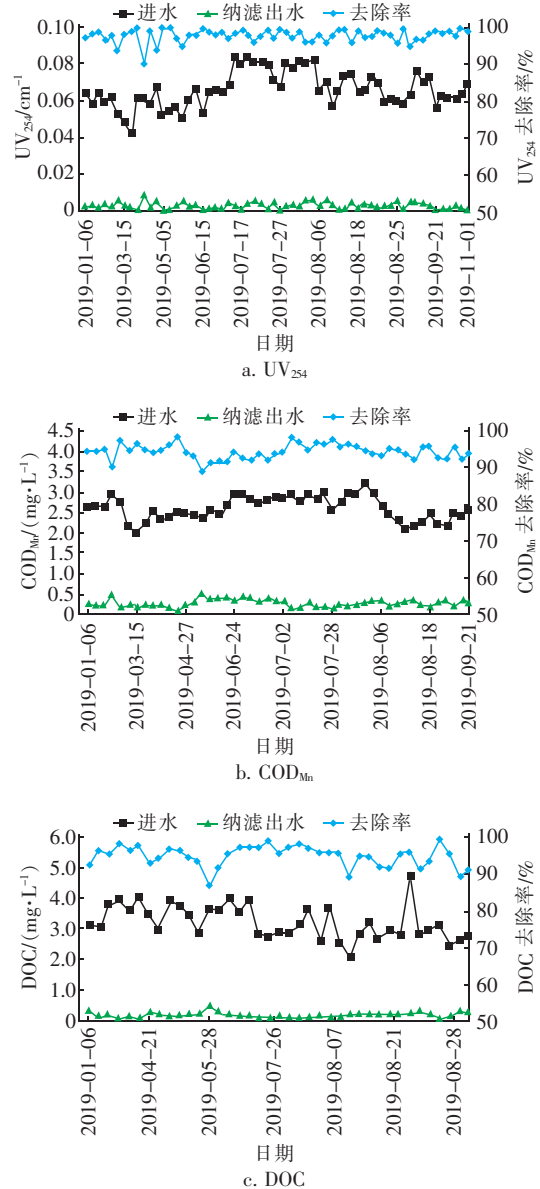


图2 纳滤工艺对有机物的去除效果

Fig.2 Removal effect of organic matter by nanofiltration process

纳滤系统对氨氮的去除效果如图3所示。

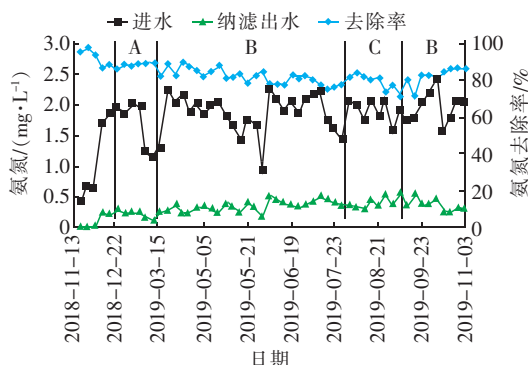


图3 纳滤工艺对氨氮的去除效果

Fig.3 Removal of ammonia nitrogen by nanofiltration process

水温低于10℃(A阶段)时,进水氨氮浓度为1.11~2.00 mg/L,出水氨氮浓度为0.12~0.27 mg/L,平均去除率为88.2%;当水温在10~30℃之间(B阶段)时,进水氨氮浓度为0.97~2.47 mg/L,出水氨氮浓度为0.28~0.52 mg/L,平均去除率为

82.1%;水温高于30℃(C阶段)时,进水氨氮浓度为1.57~2.04 mg/L,出水氨氮浓度为0.31~0.54 mg/L,平均去除率为79.1%。在该运行条件下,水温升高,氨氮去除率下降,低温更有利于氨氮的去除。当水温高于30℃、进水氨氮浓度高于2.00 mg/L时,出水氨氮浓度会超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的限值(0.5 mg/L)。因此,建议水温高于30℃时进行必要的预处理,使进水氨氮低于2 mg/L,或者适当降低系统回收率。

2.2 对不同分子质量区间有机物的去除效果

纳滤系统进水和出水不同分子质量区间内TOC的分布情况如表2所示。可知,纳滤系统进水的有机物主要集中在分子质量<0.5 ku的区间,占84.7%;纳滤膜对于各分子质量区间的有机物均有较好的去除效果,对分子质量<0.5 ku的小分子有机物仍有接近90%的去除率,这可能与有机物尺寸、离子电荷和膜的亲疏水性有关^[7]。

表2 不同分子质量区间内TOC的分布情况

Tab.2 Distribution of TOC in different molecular weight ranges

分子质量/ku		>100	10~100	3~10	1~3	0.5~1	<0.5
进水	TOC/(mg·L ⁻¹)	0.143	0.017	0.079	0.121	0.194	3.077
	各区间TOC占比/%	3.94	0.468	2.18	3.33	5.34	84.7
出水	TOC/(mg·L ⁻¹)	0.008	0.006	0.025	0.002	0.002	0.324
	各区间TOC占比/%	2.07	1.56	6.93	0.409	0.546	88.5
各区间内TOC去除率/%		94.7	66.5	67.9	98.8	99.0	89.5

2.3 对荧光物质的去除效果

三维荧光分析广泛应用于溶解性有机物(DOM)的定性分析。图4中分别为纳滤系统进水和出水所对应的三维荧光分析结果。可知,纳滤系统进水的主要荧光峰集中在区域Ⅳ和Ⅴ,说明进水中含苯环蛋白、溶解性微生物代谢产物和腐殖酸类腐殖质^[8]。经纳滤膜之后,区域Ⅳ和Ⅴ的荧光信号基本消失,说明纳滤膜对含苯环蛋白、溶解性微生物代谢产物和腐殖酸类腐殖质具有良好的去除效果。

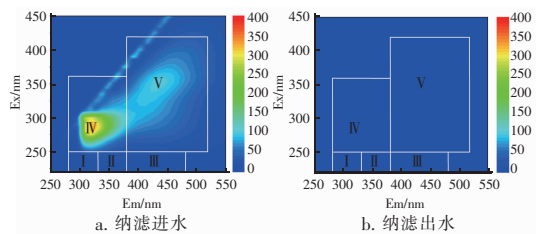


图4 纳滤工艺对荧光性物质的去除效果

Fig.4 Removal effect of fluorescent substance by nanofiltration process

2.4 对消毒副产物及其生成势的去除效果

纳滤系统出水投加次氯酸钠溶液进行消毒(满足出厂水余氯为0.3 mg/L的要求),投加量为0.35 mg/L,反应1 h,出水中未检出《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中规定的16种消毒副产物。将纳滤出水的消毒副产物生成势情况与同期试验的臭氧/活性炭工艺出水进行对比,结果表明,纳滤出水中三氯甲烷、二氯一溴甲烷、二氯乙酸、三氯乙酸的生成势分别为18.5、2.2、39.9、13.6 μg/L,相比臭氧/活性炭出水(84.4、16.8、81.3、33.3 μg/L)分别降低了78.1%、86.9%、50.9%和59.1%;另外,纳滤出水中一氯二溴甲烷、三溴甲烷、三卤甲烷生成势分别为<0.3 μg/L、<6.0 μg/L、0.345,而臭氧/活性炭出水中的相应指标分别为10.2 μg/L、<6.0 μg/L、1.789。由此表明,纳滤膜对消毒副产物前体物具有良好的去除效果。

2.5 其他水质指标

试验期间纳滤出水浊度在0.05 NTU以下,满

足《浙江省城市供水现代化水厂评价标准》(2018版)的要求(浊度 ≤ 0.1 NTU);pH值为5.69~6.55;电导率为22.3~79 $\mu\text{S}/\text{cm}$,总碱度为3.75~15.39 mg/L ,总硬度为1.88~10.02 mg/L ,保留了部分钙、镁离子及其他对人体有益的无机盐离子。

2.6 影响因素分析

2.6.1 操作压力对纳滤系统性能的影响

图5为不同操作压力对纳滤系统性能的影响。可知,在水温为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、无浓水回流的条件下,当操作压力从0.30 MPa增大至0.50 MPa时,纳滤系统对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 、DOC和氨氮的去除率变化不大(采用Origin 7.5对数据进行显著性分析,结果表明, $\text{UV}_{254}: F = 2.136, P = 0.151 > 0.05$; $\text{COD}_{\text{Mn}}: F = 1.885, P = 0.190 > 0.05$; $\text{DOC}: F = 2.767, P = 0.087 > 0.05$; 氨氮: $F = 2.492, P = 0.110 > 0.05$,说明 UV_{254} 、 COD_{Mn} 、DOC和氨氮去除率在不同操作压力条件下差异性不显著),去除率分别为97.8%、93.3%、97.3%和82.0%,但单位产水能耗从0.54 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 升至0.58 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

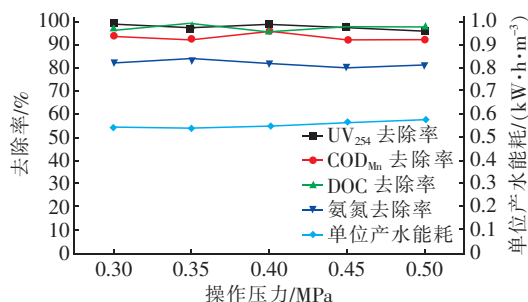


图5 操作压力对纳滤系统性能的影响

Fig. 5 Effect of operating pressure on performance of nanofiltration system

2.6.2 回流比对纳滤系统性能的影响

图6为不同回流比对纳滤系统性能的影响。在操作压力为0.45 MPa、水温为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的条件下,当回流比从0增大至0.35,即系统的回收率从70.9%升至93.0%时,纳滤系统对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和DOC的去除率分别降低了5.95%、4.58%和6.33%;当回流比从0增大至0.19,即系统回收率从70.9%上升至83.0%时,纳滤系统对氨氮的去除率从80.4%下降至71.2%,此时出水氨氮浓度为0.50 mg/L ,若继续提高回流比,出水氨氮浓度将超过限值。在相同的操作压力下,回流比(回收率)的提高会增强溶质分子之间的相互作用,加速膜污

染^[9]。另外,提高回流比会造成浓差极化,使得纳滤系统对氨氮的去除率降低明显。当回流比从0增至0.35时,单位产水能耗先从0.57 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 降至0.54 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 再升至0.57 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,当回流比为0.19即系统回收率为83.0%时,单位产水能耗最低。

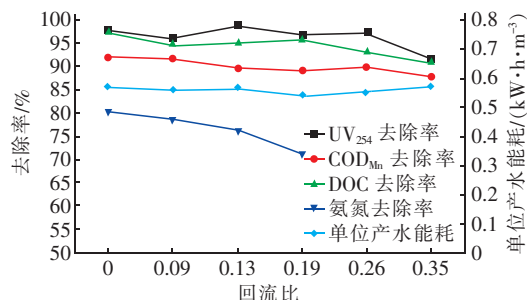


图6 回流比对纳滤系统性能的影响

Fig. 6 Effect of reflux ratio on performance of nanofiltration system

2.6.3 水温对纳滤系统性能的影响

图7为不同水温对纳滤系统性能的影响。

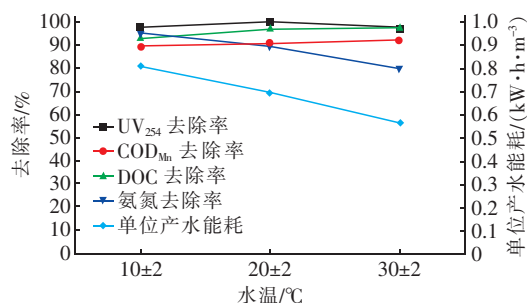


图7 水温对纳滤系统性能的影响

Fig. 7 Effect of water temperature on performance of nanofiltration system

由图7可知,在操作压力为0.45 MPa、无浓水回流的条件下,当水温从 $(10 \pm 2)^\circ\text{C}$ 升高至 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 时,纳滤系统对 COD_{Mn} 和DOC的去除率分别从89.2%和92.7%升至92.1%和97.2%,出水 UV_{254} 为0~0.002 cm^{-1} ,而对氨氮的去除率则从95.0%下降至79.7%。原因可能是,随着水温的提高,纳滤膜孔径会略有增大,出水中小分子有机物增多;同时水的黏度降低,水分子更容易在压力的作用下透过膜,使得产水量增加,在两者的共同作用下,有机物的去除率略有增加。但在 $(10 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水温下,纳滤膜对氨氮的去除效果明显提高,郭晓芳^[10]研究表明,水温降低使得膜孔收缩,进水黏度增大,氨氮在膜内的停留时间延长,有利于通过膜孔的吸

附作用去除。另外,随着水温的升高,单位产水能耗从 $0.81 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 下降至 $0.57 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,主要是因为水温对纳滤膜的产水量影响较大。

3 结论

① 纳滤膜对受有机物和氨氮污染的河网水有良好的处理效果,能有效去除水中的消毒副产物前体物,降低生成消毒副产物的风险;纳滤出水中含苯环蛋白、溶解性微生物代谢产物和腐殖酸类腐殖质等荧光性物质几乎被完全去除;当进水氨氮低于 2 mg/L 时,纳滤出水氨氮在 0.5 mg/L 以下,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。

② 操作压力在 $0.30 \sim 0.50 \text{ MPa}$ 范围内变化时,纳滤系统对有机物和氨氮的去除效果变化不大;增大回流比,能提高纳滤系统的回收率,但会降低系统对有机物和氨氮的去除效果;水温从 $(10 \pm 2)^\circ\text{C}$ 上升至 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 时,纳滤系统对有机物的去除率略有提高,但对氨氮的去除率下降,低温更有利于氨氮的去除。

参考文献:

- [1] 施晓帆,张燕,魏冬,等. 湖州饮用水源的工艺处理效能研究[J]. 科技通报,2018,34(6):263-267.
SHI Xiaofan, ZHANG Yan, WEI Dong, *et al.* Treatment process efficiency analysis of drinking water sources in Huzhou[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(6):263-267 (in Chinese).
- [2] 彭祥,张晓,曹勋,等. 臭氧生物活性炭与膜组合工艺在某水厂深度处理工艺中的应用[J]. 净水技术, 2018,37(4):77-81.
PENG Xiang, ZHANG Xiao, CAO Xun, *et al.* Application of combined processes of ozone-BAC and membrane in advanced treatment of a water treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2018,37(4):77-81 (in Chinese).
- [3] KITIS M, KILDUFF J E, KARANFIL T. Isolation of dissolved organic matter (DOM) from surface waters using reverse osmosis and its impact on the reactivity of DOM to formation and speciation of disinfection by-products[J]. Water Research, 2001, 35(9):2225-2234.
- [4] VITORIA I, MARANER F, FERREIRA-PEGO C, *et al.* The calcium concentration of public drinking waters and bottled mineral waters in Spain and its contribution to satisfying nutritional needs[J]. Nutricion Hospitalaria, 2014,30(1):188-199.
- [5] 朱海涛,徐兵,沈莉萍,等. 嘉兴市贯泾港水厂工艺运行介绍[J]. 给水排水,2009,35(3):28-31.
ZHU Haitao, XU Bing, SHEN Liping, *et al.* Jiaying Guanjing Harbor Water Treatment Plant processing operation introduction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009,35(3):28-31 (in Chinese).
- [6] CHON K, CHO J. Fouling behavior of dissolved organic matter in nanofiltration membranes from a pilot-scale drinking water treatment plant: an autopsy study[J]. Chemical Engineering Journal, 2016,295:268-277.
- [7] FAN L, HARRIS J L, RODDICK F A. Influence of the characteristics of natural organic matter on the fouling of microfiltration membranes[J]. Water Research, 2001, 35(18):4455-4463.
- [8] BRIDGEMAN J, BIEROZA M, BAKER A. The application of fluorescence spectroscopy to organic matter characterisation in drinking water treatment [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2011,10(3):277-290.
- [9] 朱学武,成小翔,谢柏明,等. 超滤/纳滤组合工艺的运行与优化[J]. 中国给水排水,2017,33(5):10-15,21.
ZHU Xuewu, CHENG Xiaoxiang, XIE Baiming, *et al.* Operation and optimization of ultrafiltration/nanofiltration hybrid membrane process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5):10-15, 21 (in Chinese).
- [10] 郭晓芳. 超滤+纳滤工艺对地表水中污染物的处理效能及工艺优化控制研究[D]. 苏州:苏州科技学院,2014.
GUO Xiaofang. Study on Removal Efficiencies of Pollutants in Surface Water Treatment and Process Optimization of Ultrafiltration + Nanofiltration [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2014 (in Chinese).

作者简介:蔡孝楠(1993-),男,浙江湖州人,硕士研究生,主要研究方向为水处理技术。

E-mail:949543277@qq.com

收稿日期:2020-08-09

修回日期:2020-09-09

(编辑:刘贵春)