

高藻期超滤膜制水中试研究

许航^{a,b}, 陈卫^{a,b}, 杨金虎^b, 潘少林^b, 赵磊^b

(河海大学 a. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室; b. 环境学院, 南京 210098)

摘要:针对太湖高藻期水质特征,以超滤膜为终端处理技术,前端有混凝-沉淀技术、预氧化技术或吸附技术,形成组合工艺进行中试研究。研究表明:混凝-沉淀-超滤膜、高锰酸钾-混凝-沉淀-超滤膜和高锰酸钾-混凝-沉淀-粉末活性炭-超滤膜3组组合工艺出水水质良好,出水浑浊度均低于0.1 NTU,藻类数量控制在 2.5×10^4 个/L左右,其它检测指标达到生活饮用水卫生标准(GB 5749—2006)。高藻水中有机物以疏水性有机物为主,疏水性有机物是造成膜污染的主要因素,有效的超滤膜前段处理技术降低进入膜组件的疏水性有机物,缓解高藻期超滤膜污染。

关键词:超滤膜;组合工艺;高藻期;膜污染

中图分类号:TU99.24 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2012)04-0099-06

Pilot Investigation of Water Production by Ultrafiltration Process during High Algal Period

XU Hang^{a,b}, CHEN Wei^{a,b}, YANG Jinhui^b, PAN Shaolin^b, ZHAO Lei^b

(a. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education;
b. Environmental Science College, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: On account of the characteristics of water in Taihu during high algal period, the pilot investigation was conducted with the combination of ultrafiltration membrane with coagulation, pre-oxidation technology or adsorption technology. The results show that the quality of influent water from the three combination processes: coagulation precipitation-ultrafiltration membrane, potassium permanganate-coagulation precipitation-ultrafiltration membrane, potassium permanganate-coagulation precipitation-power activated carbon-ultrafiltration membrane are preferred, with turbidity lower than 0.1 NTU, algae control in the number of 2.5×10^4 /L, and other measured targets meet the drinking water standards (GB 5749—2006). The organic matter of high algal water mainly includes hydrophobic organic compounds which are major factors leading to membrane fouling. The effective pre-treatment before ultrafiltration membrane can prevent hydrophobic organic compounding into the membrane pore, which will effectively ease the membrane fouling during the high algal period.

Key words: ultrafiltration membrane; combination process; high algal water; membrane fouling

水体富营养化会导致一定时期内藻类疯长,高藻水给饮用水处理带来了一系列的难题。高藻水影响混凝-沉淀工艺的处理效能,堵塞和穿透滤池^[1-3];水中含有大量毒性很强的藻毒素,常规工艺对其处

理能力有限;藻类新陈代谢和腐烂产生的恶臭物质易导致出厂水感官指标下降。目前,针对高藻水的研究还是以藻数量去除,保障常规工艺正常运行为主,相应的研究也集中在增加化学预氧化、投加粉末活性炭

收稿日期:2011-11-07

基金项目:国家博士后基金(20100481083),水体污染控制与治理重大科技专项(2011ZX07410-001)

作者简介:许航(1981-),男,博士后,主要从事水处理技术研究,(E-mail)xuhang810826@sina.com。

陈卫(通信作者),女,教授,博士生导师,(E-mail)cw5826@hhu.edu.cn。

和改善混凝条件等强化藻数量去除的措施^[4-8]。

随着膜技术的快速发展、膜性能的提高和价格的降低,以超滤膜为核心技术的组合工艺将成为第 3 代城市饮用水净化工艺的主要特征^[9]。该技术能有效去除颗粒状物质,包括藻类、隐孢子虫、贾第鞭毛虫、细菌和病毒等微生物,确保饮用水生物安全性。在去除藻类方面,由于膜孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$,而藻类的大小在 $1 \mu\text{m}$ 到几百 μm 不等,因此超滤膜在理论上可以将藻类完全截留。但在应用超滤膜去除藻类的过程中也存在另一个重要问题:藻类属于胶体类物质,易附着在膜表面造成严重的膜堵塞,即膜污染,这直接或间接的影响了超滤技术的应用,特别是在藻类爆发季节,会出现膜通量明显下降或者跨膜压差迅速升高的现象^[10-12]。寻找一种有效的前端处理技术,改善藻类污染对超滤膜的影响,将会大大的扩展超滤膜在饮用水处理领域中的应用。

中试针对太湖水的水质特点,研究以超滤膜为核心的终端处理技术,前端有混凝-沉淀技术、预氧化技术或吸附技术形成的组合工艺,考察组合工艺对有机物、藻毒素等污染物的去除效能,结合超滤膜的运行特性,以跨膜压差的变化为主要考察参数,充分利用有机物分级测定有机物表征方法,分析超滤膜污染的主要因素。

1 材料与方 法

1.1 试验流程及方法

试验在无锡市某水厂进行,自建饮用水常规处理中试装置和内压式超滤膜装置。太湖水进入原水箱后,由水泵提升至絮凝反应池,通过计量泵投加混凝剂,沉淀后经过中间水箱调节,此后经保安叠片过滤器后进入超滤膜组件,超滤膜的反洗水从产水箱抽水反洗,反洗浓水排入下水道。各处理单元出水管道设置三通,超滤膜装置可直接取原水、混凝出水或混凝-沉淀出水进行处理,工艺流程见图 1。

进入 4 月份后,随着气温的升高,太湖水原水中藻类数量也逐渐增多。根据原水中藻类数量的变化

及水质变化情况,调整工艺流程进行中试研究。4 月—5 月,原水中藻类数目低于 5×10^7 个/mL 时,采用混凝-沉淀作为超滤膜的预处理工艺,烧杯试验确定混凝剂(聚合氯化铝)最佳投量为 25 mg/L ,形成“混凝-沉淀-超滤膜”组合工艺运行中试装置;5 月—6 月,原水中藻类数量上升为 $6.9 \sim 9.5 \times 10^7$ 个/L,原水箱中投加高锰酸钾(KMnO_4)强化混凝-沉淀效果, KMnO_4 投量 1.0 mg/L ,形成“ KMnO_4 -混凝-沉淀-超滤膜”组合工艺运行中试装置;6 月—8 月,针对高藻水中藻毒素的去除,在中间水箱增投粉末活性炭(PAC),根据烧杯试验确定 PAC 投量为 20 mg/L ,形成“ KMnO_4 -混凝-沉淀-PAC-超滤膜”组合工艺运行中试装置。

1.2 超滤膜装置

试验超滤膜为海南立升膜公司提供的 PVC 合金中空纤维膜,切割有机物相对分子量为 10 万道尔顿,膜有效面积为 40 m^2 。试验期间膜运行通量为 $75 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$,流量 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。超滤膜的过滤和冲洗由可编程控制器(PLC)自动控制,超滤膜装置采用死端式恒流方式运行,水力清洗用水均采用膜过滤水。

1.3 原水水质

表 1 为试验期间原水水质情况。原水浑浊度变化较大,最大值和最小值相差 10 多倍,有机物浓度较高,以疏水性有机物为主, UV_{254} 值变化范围为 $0.054 \sim 0.123 \text{ cm}^{-1}$, COD_{Mn} 浓度变化范围为 $4.51 \sim 8.66 \text{ mg/L}$ 。原水藻数量波动较大,随季节性变化非常明显。

1.4 检测方法

UV_{254} 、DOC、浑浊度和颗粒数分别采用岛津 UV-2550 型紫外可见光分光计、岛津 TOC-VCPH、Hach-2100N 浑浊度仪和 IBR 颗粒计数仪, UV_{254} 和 DOC 检测前均过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜。藻类:采集 1 L 水样,添加鲁格试液固定,沉淀 24 h,将沉淀物混匀定容至 30 mL,制片计数。有机物分级采用固相萃取法(见图 2)^[13]:即调节水样 pH 值后,

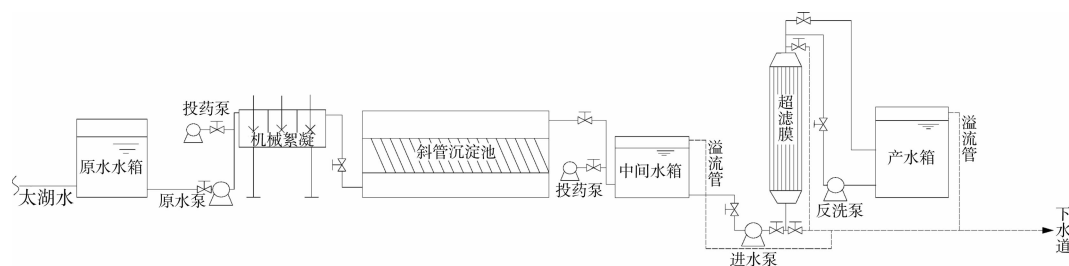


图 1 中试工艺流程图

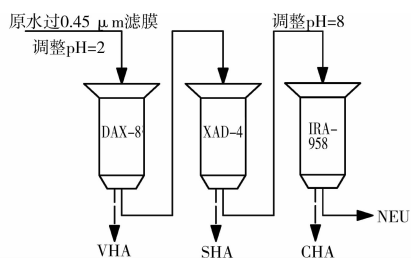


图 2 有机物分级流程图

依次用过 DAX-8、XAD-4、IRA-958 等 3 种树脂,可将水样有机物分成强疏水性(VHA)、弱疏水性(SHA)、亲水极性(CHA)和亲水中性(NEU)4

部分。其它项目测定按《水和废水监测分析方法》(第四版)进行。

2 结果与分析

2.1 组合工艺对污染物的去除效果

试验期间委托无锡市自来水公司水质检测中心做了 6 个水样的全分析,其分别为“混凝-沉淀-超滤膜组合工艺”、“ KM_nO_4 -混凝-沉淀-超滤膜组合工艺”和“ KM_nO_4 -混凝-沉淀-PAC-超滤膜组合工艺”中原水和超滤膜出水,原水编号分别为 Y_1 、 Y_2 、和 Y_3 ,超滤膜产水分别为 C_1 、 C_2 和 C_3 。检测结果见表 2。

表 1 试验期间原水水质

测量值	浑浊度/NTU	氨氮/($mg \cdot L^{-1}$)	UV_{254}/cm^{-1}	$COD_{Mn}/(mg \cdot L^{-1})$	$DOC/(mg \cdot L^{-1})$	藻数量/($个 \cdot L^{-1}$)
最大值	122.3	0.89	0.123	8.66	7.37	2.1×10^8
最小值	10.9	0.13	0.054	4.51	4.61	7.0×10^5
平均值	38.8	0.27	0.098	5.53	5.74	6.1×10^7

表 2 水质分析

	嗅和味	肉眼可见物	浑浊度/NTU	pH 值	氨氮/($mg \cdot L^{-1}$)	亚硝酸盐氮/($mg \cdot L^{-1}$)	$COD_{Mn}/(mg \cdot L^{-1})$	$DOC/(mg \cdot L^{-1})$
国家标准	无	无	≤ 1	6.5~8.5	≤ 0.5	≤ 0.1	≤ 3	—
Y_1	Ⅲ级	绿浊	51.80	7.57	0.16	0.08	5.52	5.76
C_1	无	无	0.08	7.31	0.12	0.04	2.96	3.73
Y_2	Ⅳ级	绿浊	72.30	7.63	0.34	0.42	5.64	5.88
C_2	无	无	0.07	7.34	0.20	0.01	2.72	3.35
Y_3	Ⅳ级	绿浊	115.70	7.71	0.47	0.36	5.74	6.02
C_3	无	无	0.08	7.32	0.22	0.08	2.41	2.90

	$CHCl_3/(\mu g \cdot L^{-1})$	$CHBrCl_2/(\mu g \cdot L^{-1})$	$CHBr_2Cl/(\mu g \cdot L^{-1})$	$CHBr_3/(\mu g \cdot L^{-1})$	藻类/($10^4 \cdot 个 \cdot L^{-1}$)	溶解性藻毒素/($\mu g \cdot L^{-1}$)	六六六/($\mu g \cdot L^{-1}$)	总硬度/($mg \cdot L^{-1}$)
国家标准	≤ 1000	≤ 60	≤ 100	≤ 100	—	≤ 1.0	≤ 5	≤ 450
Y_1	265.83	5.49	6.33	12.71	5000	0.161	< 0.004	110
C_1	164.12	5.56	0.54	12.52	2.37	0.071	—	101
Y_2	258.73	6.02	6.45	13.11	6700	0.182	< 0.004	97
C_2	170.21	5.93	3.21	12.32	2.43	0.087	—	93
Y_3	280.84	5.96	7.01	14.27	11200	5.213	< 0.004	107
C_3	93.47	1.24	0.93	3.21	2.59	0.412	—	95

	钙/($mg \cdot L^{-1}$)	铁/($mg \cdot L^{-1}$)	铝/($mg \cdot L^{-1}$)	砷/($mg \cdot L^{-1}$)	细菌总数/($CFU \cdot mL^{-1}$)	总大肠菌群/($个 \cdot mL^{-1}$)	粪大肠菌群/($个 \cdot mL^{-1}$)
国家标准	≤ 100	≤ 0.3	≤ 0.2	≤ 0.05	≤ 100	0	0
Y_1	28.7	0.118	0.22	< 0.002	9 300	3 500	220
C_1	26.4	< 0.002	0.067	< 0.002	7	0	0
Y_2	32.1	0.107	0.24	< 0.002	12 300	3 400	240
C_2	25.4	< 0.002	0.070	< 0.002	5	0	0
Y_3	30.1	0.121	0.22	< 0.002	11 900	3 560	242
C_3	26.1	< 0.002	0.068	< 0.002	6	0	0

水质分析结果表明,以超滤膜为核心的组合工艺处理太湖水时,出水水质良好,完全符合生活饮用水卫生标准(GB 5749—2006)。3 组组合工艺出水中,出水浑浊度低于 0.1 NTU,远优于常规工艺。超滤膜出水中藻类数量同前端处理技术无关,出水中藻类数量控制在约 2.5×10^4 个/L。总大肠菌群和粪大肠菌群被完全去除,超滤膜出水中细菌数量也很少,按理论该部分细菌会被完全截留,分析可能是超滤膜产水侧或管道孳生部分细菌,实际生产时可在反洗水中投加适量 NaClO 杀灭细菌。组合工艺也可以对有机物很好的去除,特别是高锰酸钾-混凝-沉淀-PAC-超滤组合工艺出水中藻毒素和消毒副产物等微量物质均大幅下降,六六六均未被检出。铝和铁的去除效果很好,即便是在投加铝盐混凝剂时,铝的去除率也很高。

2.2 超滤膜运行的跨膜压差分析

在通量恒定的情况下,膜的跨膜压差(TMP)为驱动水透过膜所需的压力,为进水压力和过滤压力的差值,表示膜过滤时原料侧与渗透侧的压力差值,从其变化可以了解超滤膜的污染情况及运行效率。超滤膜运行的跨膜压差变化见图 3。

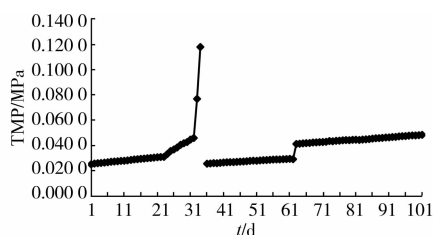


图 3 超滤膜的跨膜压差变化情况

混凝-沉淀-超滤膜组合工艺启动前 23 d 跨膜压差增长稳定,但中试进行 24 d 后跨膜压差增长迅速,为控制跨膜压差增长,中试期间将过滤时间由 45 min 缩短到 30 min,但跨膜压差上升的趋势未见好转,持续上升 1 个星期后,第 33、34 d 跨膜压差猛增至 0.118 MPa,停止中试试验进行化学清洗超滤膜。分析认为,混凝-超滤组合工艺运行后期,原水中藻类数量上升至 0.5×10^8 个/L 以上,由于藻类带负电荷,投加混凝剂后可以降低藻的电荷量,使得藻类易于吸附在絮体表面,但当藻类增多,藻类的电荷量不再有明显变化。絮体对藻类的吸附效能不再有明显改善,并且形成的絮体相对较小,特别是最后 2 d 藻类数量上升至 1.0×10^8 个/L 以上,中间水箱中可明显观察到藻类的絮体,大量藻类黏附在膜表面或者进入膜孔中,形成了难以恢复的膜污染,表现为跨膜压差的迅速上升。

KM_nO_4 -混凝-沉淀-超滤膜组合工艺中跨膜压差上升平缓, KM_nO_4 投加可有效地控制膜污染,改善超滤膜的过滤性能, KM_nO_4 投加强化了混凝-沉淀工艺对藻类的去除,混凝后形成的矾花要比单纯使用聚合氯化铝的大而且密实,沉降性能好,大量藻类和有机物被去除,从而减缓了超滤膜的膜污染。

在中间水箱中投加 PAC,形成 KM_nO_4 -混凝-沉淀-PAC-超滤膜组合工艺。其主要目的是控制超滤膜终端出水中藻毒素浓度。一些研究表明^[14-15],投加 PAC 能有效地降低膜过滤阻力。但有研究认为,PAC 会黏附在膜表面,造成膜过滤总阻力增加。但从图 3 分析认为,投加 PAC 后,超滤膜的跨膜压差增长要比前 2 种组合工艺中平缓,但整体跨膜压差要高于前 2 种工艺。这说明投加 PAC 后控制了超滤膜的不可逆污染,超滤膜每个过滤周期经过水力反洗后跨膜压差可有效恢复。Schafer 等^[16]采用扫描电子显微镜对沉积在微滤膜表面的滤饼层进行观察后发现,滤饼层中的悬浮物质粘在有机物中间。有机物会黏附在悬浮固体的表面,当悬浮颗粒被膜截留,沉积在膜表面形成滤饼层时,有机物起着一种“黏合剂”的作用,将固体颗粒黏合成紧密的滤饼层,增加了滤饼层的阻力。投加 PAC 后,固体颗粒增加,但有机物含量和藻类数量并未增加,同时,PAC 还能有效地吸附有机物和阻止藻类黏附在超滤膜的表面,使得滤饼层中的有机物黏合作用减弱,实际上增大了孔隙率,使滤饼层阻力下降。

2.3 不同工艺段有机物极性对超滤膜运行的影响分析

试验期间,在 3 种组合工艺中分别取水样,分析各工序出水及膜反洗水中有机物特性。

2.3.1 混凝-沉淀-超滤膜中有机物极性对超滤膜的污染 图 4 为混凝-沉淀-超滤工艺各工序及膜反洗水中的有机物特性分布情况。原水 DOC 为 5.76 mg/L,其中,VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别为 2.22、0.93、1.14 和 1.47 mg/L,原水中有机物以疏水性有机物为主。混凝-沉淀出水 DOC 降为 4.32 mg/L,混凝-沉淀部分去除的主要是疏水性有机物,疏水性有机物被去除 1.17 mg/L,占去除有机物的 81.3%。超滤膜出水后水中有机物进一步下降到 3.75 mg/L,VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别为 1.03、0.57、1.04 和 1.11 mg/L,超滤膜截留的 VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别为 0.28、0.10、0.01 和 0.10 mg/L,4 种有机物分别占截留有机物的 49.12%、17.54%、1.76% 和 21.58%。由此可见,引起超滤膜的跨膜压差上升主要是 VHA 和 NEU

有机物,CHA 有机物基本不被截留,即不会对跨膜压差的上升有贡献。

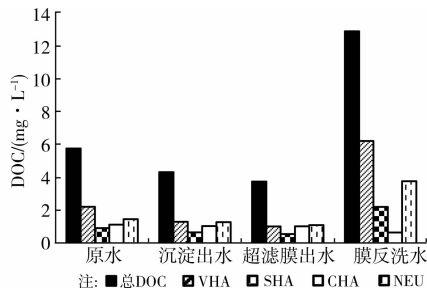


图4 混凝-沉淀-超滤工艺中有机物极性分布

超滤膜过滤是机械压力的作用,迫使溶液中部分有机物和溶剂都趋向透过膜。其中溶剂基本上是畅通无阻,可以全部穿过。但是对有机物来说,由于膜的障壁作用,部分有机物无法通过而被截留在膜的高压侧表面上。截留的有机物随过滤的进行在膜腔内累积,造成膜运行时的跨膜压差上升,部分有机物可通过周期反洗排出膜内腔,使得一部分跨膜压差恢复,另一部分有机物不能被水力反洗清除,会与水中金属离子形成络合物沉积在膜表面,形成不可逆污染,须通过酸洗和碱洗清除。

混凝-沉淀-超滤工艺中反洗水的 DOC 浓度为 12.87 mg/L,其中 VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别占 48.28%、17.24%、5.17% 和 29.31%,与超滤膜截留有机物的去除率比较发现,超滤膜截留或吸附的亲水性有机物可通过超滤膜的水力反洗排出膜组件,造成超滤膜的不可逆污染的主要是 VHA 和少量的 SHA 物质。

2.3.2 KMnO_4 -混凝-沉淀-超滤膜中有机物极性对超滤膜的污染 图5为原水中投加 KMnO_4 预氧化时各工序及反洗水有机物特性的分布情况。由图5可知,原水 DOC 浓度为 5.89 mg/L,VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别为 2.40、1.02、1.20 和 1.27 mg/L, KMnO_4 预处理后水中有机物浓度下降到 5.11 mg/L,4 种有机物分别被去除 0.43、0.13、0.07 和 0.15 mg/L,疏水性和中性有机物浓度的降低,一定程度上可减缓超滤膜的膜污染。沉淀出水中 DOC 的浓度降为 3.81 mg/L, KMnO_4 -混凝-沉淀工艺对 DOC 的去除率为 35.31%,比单纯的混凝-沉淀工艺上升了 10.31%,主要是提高了疏水性有机物的去除效果。超滤膜出水中 DOC 浓度进一步降为 3.33 mg/L,超滤膜截留的 VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别为 0.25、0.09、0.03 和 0.11 mg/L,分别占截留有机物的 52.08%、18.75%、6.25% 和 22.92%。

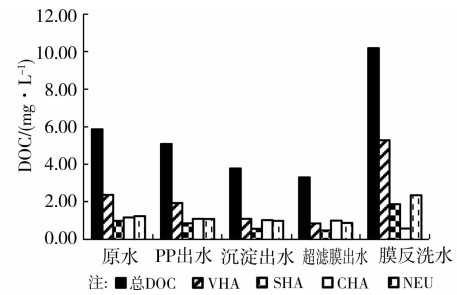


图5 KMnO_4 -混凝-沉淀-超滤工艺中有机物极性分布

KMnO_4 -混凝-沉淀-超滤组合工艺中超滤膜反洗水 DOC 浓度为 10.21 mg/L,VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别占截留有机物的 51.95%、18.70%、6.07% 和 23.31%。与混凝-沉淀-超滤工艺相比,该工艺反洗水中有机物的总浓度下降了 20.67%,而且沉淀或吸附在超滤膜表面的疏水性有机物比例也有所下降,这进一步解释了图3中, KMnO_4 -混凝-沉淀-超滤组合工艺整体跨膜压差为何上升的比后者平稳,同时也验证了疏水性有机物是造成超滤膜不可逆污染的主要因素。

2.3.3 KMnO_4 -混凝-沉淀-PAC-超滤膜工艺中有机物极性对超滤膜的污染 图6为 KMnO_4 -混凝-沉淀-PAC-超滤工艺中各工序及反洗水中有机物特性变化情况。原水 DOC 的浓度为 5.98 mg/L,VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别为 1.53、1.91、0.94 和 1.59 mg/L,经 KMnO_4 -混凝-沉淀处理后,DOC 浓度降为 3.92 mg/L,VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别下降到为 0.75、1.27、0.79 和 1.11 mg/L,亲水性有机物所占比例上升。沉后水中间水箱投加 20 mg/L 的 PAC 后,DOC 浓度下降为 2.87 mg/L,VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别降为 0.70、1.15、0.39 和 0.58 mg/L,不难发现 PAC 去除的有机物主要是亲水性有机物,经过 PAC 吸附后,亲水性有机物被去除 46.32%。组合工艺中超滤膜进一步处理后 DOC 浓度下降了 0.21 mg/L,超滤膜去除的有机物中 VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别占 33.33%、23.81%、19.05% 和 23.81%。PAC 处理后,进入膜组件的有机物浓度大幅下降,随着超滤膜过滤的进行,PAC 在膜内腔的浓度逐渐上升,进一步提高了亲水性有机物的去除。PAC 在机械压力的作用下会在超滤膜内壁上逐渐形成松散的滤饼层,也会阻止疏水性有机物沉积或吸附在超滤膜的表面,降低超滤膜不可逆污染速度,虽然 PAC 在超滤膜的表面形成的滤饼层也会增加超滤膜的过滤压力,但是经过水力冲洗后这部分跨膜压差可很好的恢复。

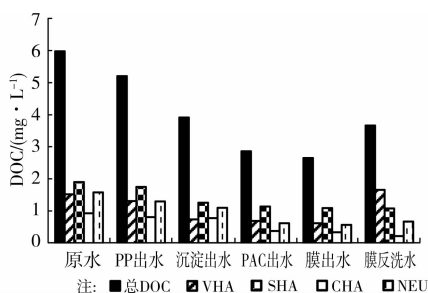


图6 高锰酸钾-混凝-沉淀-PAC-超滤工艺中有机物极性分布

反洗水的 DOC 浓度为 3.67 mg/L, 相对于前 2 种工艺, 有机物浓度下降明显。在超滤膜过滤过程中, 由于 PAC 在膜腔内逐渐累积, 会吸附一些截留在超滤膜内腔的有机物, 所以部分有机物在反洗水中未被检测出, 使得反洗水有机物的浓度较低。反洗水中 VHA、SHA、CHA 和 NEU 分别为 1.67、1.09、0.23 和 0.68 mg/L, 反洗水中有机物主要以疏水性有机物为主。

3 结论

针对太湖水的水质特点, 将混凝-沉淀技术、预氧化技术或吸附技术作为超滤膜的前端处理技术, 形成超滤膜为核心技术的处理高藻水的工艺。研究表明: 组合工艺中, 超滤膜出水浑浊度始终低于 0.1 NTU, 藻类数量控制在 2.5×10^4 个/L 左右, 其它检测指标达到生活饮用水卫生标准 (GB 5749—2006)。混凝-沉淀技术、预氧化技术或吸附技术降低高藻水中疏水性有机物粘附在超滤膜表面或进入膜孔, 有效减缓高藻期膜污染。

参考文献:

- [1] 黎雷, 高乃云, 殷娣娣, 等. 控制饮用水原水中藻类、藻毒素的水厂处理工艺[J]. 中国给水排水, 2008, 24(6): 20-24.
LI Lei, GAO Naiyun, YIN Didi, et al. Treatment processes in waterworks for removal of algae and alga toxins from raw water [J]. China Water and Wastewater, 2008, 24(6): 20-24.
- [2] 陈卫, 李圭白, 邹浩春. 强化混凝除蓝藻除色度效果及成因研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 140-143.
CHEN Wei, LI Guibai, ZOU Haochun. Effect of enhanced-coagulation with PPC on blue-green algae and chroma removal and its causation [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(2): 140-143.
- [3] Han Z G, Chen W, Li L, et al. Combination of chlorine and magnetic ion exchange resin for drinking water treatment of algae [J]. Journal of Central South

University of Technology, 2010, 17: 797-784.

- [4] Chen J J, Yeh H H. The mechanisms of potassium permanganate on algae removal [J]. Water Research, 2005, 39(18): 4420-4428.
- [5] 谢良杰, 李伟英, 陈杰, 等. 粉末活性炭-超滤膜联用工艺去除水体藻毒素的特性研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(7): 92-95.
XIE Liangjie, LI Weiyong, CHEN Jie, et al. Study on removal characteristics of pac-uf integrated process for MCs [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(7): 92-95.
- [6] 刘萍, 曾光明, 黄瑾辉, 等. 强化混凝与超滤组合工艺净化湘江水—采用不同混凝剂的比较[J]. 中国环境科学, 2006, 26(2): 145-149.
LIU Ping, ZENG Guangming, HUANG Jinghui, et al. Combined technique of enhanced coagulation and ultrafiltration on the treatment of the micro-polluted Xiangjiang River source—the comparing studies adopting different coagulants [J]. China Environmental Science, 2006, 26(2): 145-149.
- [7] 贾柏樱, 李广生. 饮用水常规工艺处理高藻原水的应对措施[J]. 供水技术, 2009, 3(6): 33-35.
JIA Baiying, LI Guangsheng. Counter measures for the treatment of high algae source water with conventional process [J]. Water Technology, 2009, 3(6): 33-35.
- [8] 瞿芳术, 梁恒, 雒安国, 等. 高锰酸盐复合药剂预氧化缓解超滤膜藻类污染的中试研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(7): 1366-1371.
QU Fangshu, LIANG Heng, LUO Anguo, et al. Pilot study on the control of algal membrane fouling by preoxidation with potassium permanganate composites [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(7): 1366-1371.
- [9] 李圭白, 杨艳玲. 第三代城市饮用水净化工艺—超滤为核心技术的组合工艺[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 1-3.
LI Guibai, YANG Yanling. The third generation city drinking water purification process—ultrafiltration as the core technology [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(4): 1-3.
- [10] Gao W, Liang H, Ma J, et al. Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review [J]. Desalination, 2011, 272(1/2/3): 1-8.
- [11] 许航, 陈卫, 袁哲, 等. 超滤膜与不同处理工艺组合处理湖泊水的中试研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(3): 149-154.
XU Hang, CHEN Wei, YUAN Zhe, et al. Experimental investigation of ultrafiltration membrane with different pretreatment technology for lake water [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(3): 149-154.

(下转第 117 页)

- (4): 768-774.
- YANG Xu, YU Shuili, ZANG Shuying, et al. Efficiency of a subsurface flow constructed wetland in pretreating a micro-polluted drinking water source [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(4): 768-774.
- [10] Langergraber G, Giraldo D, Mena J, et al. Recent developments in numerical modelling of subsurface flow constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13): 3931-3943.
- [11] Ouyang Y, Luo S M, Cui L H. Estimation of nitrogen dynamics in a vertical-flow constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(3): 453-459.
- [12] Trang N T D, Konnerup D, Schierup H, et al. Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: Effects of hydraulic loading rate [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 527-535.
- [13] Saeed T, Sun G. The removal of nitrogen and organics in vertical flow wetland reactors: Predictive models [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 1205-1213.
- [14] Rousseau D P L, Vanrolleghem P A, de Pauw N. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review [J]. *Water Research*, 2004, 38(6): 1484-1493.
- [15] Zhang L, Zhang L, Liu Y, et al. Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater [J]. *Desalination*, 2010, 250(3): 915-920.
- [16] Ong S, Uchiyama K, Inadama D, et al. Performance evaluation of laboratory scale up-flow constructed wetlands with different designs and emergent plants [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(19): 7239-7244.
- [17] Leverenz H L, Haunschild K, Hopes G, et al. Anoxic treatment wetlands for denitrification [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(11): 1544-1551.
- [18] 贾文林, 吴娟, 武爱国, 等. 碳氮比对人工湿地污水处理效果的影响 [J]. *环境工程学报*, 2010, 4(4): 767-770. JIA Wenlin, WU Juan, WU Aiguo, et al. Effect of influent C/N ratio on performance of wastewater treatment in constructed wetlands [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(4): 767-770.
- [19] Boutilier L, Jamieson R, Gordon R, et al. Adsorption, sedimentation, and inactivation of *E. coli* within wastewater treatment wetlands [J]. *Water Research*, 2009, 43(17): 4370-4380.

(编辑 胡英奎)

(上接第104页)

- [12] 孙丽华, 李星, 陈杰, 等. 超滤膜组合工艺处理高藻水库水试验研究 [J]. *工业水处理*, 2010, 30(7): 24-27. SUN Lihua, LI Xing, CHEN Jie, et al. Pilot study of reservoir water treatment with high algae content by UF combined processes [J]. *Industrial Water Treatment*, 2010, 30(7): 24-27.
- [13] Bolto B, Abbt-Braum G, Dixon D, et al. Experimental evaluation of cationic polyelectrolytes for removing natural organic matter from water [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(9): 71-79.
- [14] Shon H K, Vigneswaran S, Kim I S, et al. The effect of pretreatment to ultrafiltration on biologically treated sewage effluent a detailed effluent organic matter (EfOM) characterization [J]. *Water Research*, 2004, 38(17): 1933-1939.
- [15] 董秉直, 张庆元, 冯晶. 粉末活性炭预处理对超滤膜通量的影响 [J]. *环境科学*, 2008, 28(10): 1981-1987. DONG Bingzhi, ZHANG Qingyuan, FENG Jing. Influence of powered activated carbon (PAC) pretreatment on ultrafiltration Membrane flux [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10): 1981-1987.
- [16] Schafer A I, Schwicker U, Fisher M M, et al. Microfiltration of colloids and natural organic matter [J]. *Journal of Membrane Science*, 2000, (7): 151-172.

(编辑 胡英奎)