

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.11.008

双膜系统净化夏季高温湖水中试

张增荣¹, 陈可廷², 钟燕敏³, 刘志远³, 马永恒³, 张民盛³,
刘 博³, 邹 春³, 薛英文²

(1. 上海水业设计工程有限公司, 上海 200092; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北
武汉 430072; 3. 上海市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘 要: 夏季湖水水温高、有机污染物较多,采用常规水处理工艺效果有限,为满足越来越严格的水质标准要求,在武汉市某水厂建立了规模为100 m³/d的双膜(超滤膜+纳滤膜)系统。中试系统进水为该水厂沉淀池或砂滤池出水,分别采用浸没式超滤膜+纳滤膜工艺和压力式超滤膜+纳滤膜工艺,对比不同双膜系统对水质深度净化的效果。结果表明,双膜系统可以有效去除水中的悬浮物和有机物,针对两种中试进水,纳滤膜可将出水浊度控制在0.10 NTU左右,将UV₂₅₄控制在0.005 cm⁻¹以下,对TDS的去除率在20%~30%左右。当进水为沉后水时,在最优方案中,纳滤膜可将出水COD_{Mn}降至0.50 mg/L以下。相较于直接采用超滤膜,臭氧-活性炭预处理工艺+超滤膜处理可以有效降低有机物浓度,缓解纳滤膜污染。混凝+沉淀+臭氧-活性炭预处理+浸没式超滤+纳滤处理工艺对夏季湖水的净化效果更加稳定有效。

关键词: 双膜系统; 夏季湖水; 超滤膜; 纳滤膜; 膜污染

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)11-0049-08

Pilot-scale Dual Membrane System for High Temperature Lake Water Purification in Summer

ZHANG Zeng-rong¹, CHEN Ke-yan², ZHONG Yan-min³, LIU Zhi-yuan³,
MA Yong-heng³, ZHANG Min-sheng³, LIU Bo³, ZOU Chun³, XUE Ying-wen²

(1. Shanghai Water Design & Engineering Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In summer, the performance of conventional water treatment process is poor, because the water temperature of the lake is high and there are many organic pollutants. A dual membrane (ultrafiltration and nanofiltration) system with a treatment scale of 100 m³/d was constructed in a waterworks in Wuhan to cope with the increasingly strict water quality requirements. The influent of the pilot system was the effluent from the sedimentation tank or the sand filter of the waterworks. The performances of the submerged ultrafiltration-nanofiltration process and the pressurized ultrafiltration-nanofiltration process for advanced treatment of water were compared. The dual membrane system effectively removed suspended solids and organic matters from the water. For influent quality of the two pilot systems, the nanofiltration decreased the turbidity in the effluent to approximately 0.10 NTU and the

UV_{254} to less than 0.005 cm^{-1} , and could achieve the TDS removal rate of around 20% to 30%. When the influent was from the sedimentation tank, nanofiltration membrane could reduce effluent COD_{Mn} to below 0.50 mg/L in the optimal scheme. Compared with individual ultrafiltration, the combined process consisting of ozone-activated carbon pretreatment and ultrafiltration effectively reduced the organic matter concentration and mitigated the fouling of nanofiltration membrane. The combined process consisting of coagulation, precipitation, ozone-activated carbon pretreatment, submerged ultrafiltration and nanofiltration was more stable and effective for the treatment of lake water in summer.

Key words: dual membrane system; lake water in summer; ultrafiltration membrane; nanofiltration membrane; membrane fouling

以超滤(UF)为核心技术的组合工艺被称为第三代饮用水净化工艺^[1]。超滤膜孔径一般为 $3\sim 100\text{ nm}$,截留分子质量一般在 $1\sim 500\text{ ku}$ 之间,膜两侧的运行压差一般为 $10\sim 300\text{ kPa}$,能够过滤水中的有机物、水锈、细菌、藻类甚至病毒等杂质^[2],且超滤装置占地面积小、运行管理方便。但由于国内自来水厂中应用的超滤膜孔径较大,对小分子有机物、溶解性离子、病毒等的去除效果有限。根据目前超滤膜厂的水处理经验,适宜的预处理工艺能有效提高超滤膜的水质净化效果^[3]。目前常用的预处理工艺有混凝沉淀^[4]、氧化^[5]、活性炭吸附等,实际应用较多的是混凝沉淀及过滤;而臭氧氧化能使大分子有机物开链分解为小分子物质^[6];活性炭吸附则能有效去除有机物,缓解膜污染^[7]。

近年来,很多研究者考虑将纳滤(NF)工艺应用于自来水处理中。目前常用的纳滤膜孔径在 1 nm 以上,一般为 $1\sim 2\text{ nm}$,其截留分子质量介于超滤膜和反渗透膜之间,约为 $0.1\sim 2\text{ ku}$,是一种允许溶剂分子、某些低分子质量溶质或低价离子透过的功能性半透膜。NF可以进一步去除水中溶解性离子、病毒等,降低后续消毒剂的投加量,从而减少消毒副产物的生成,因此在自来水处理中具有较好的应用前景。目前国内已建成一些双膜(UF+NF)处理工艺水厂,有效解决了诸如西北部地区水源钙、镁离子偏高,硬度超标,饮水口感差,以及沿海城市潮水倒灌导致氯离子浓度超标等问题^[8]。但由于NF孔径较小,如果没有经过合适的预处理,纳滤膜污染将会非常严重。因此,纳滤膜处理工艺对进水水质要求较为严格,这也是目前其难以大规模应用于自来水厂的一个主要原因。国内外的研究显示^[2],将超滤膜作为预处理工艺,可以有效缓解纳滤膜的颗粒

及胶体污染。但由于超滤膜对溶解性有机物的截留效果一般,无法有效缓解纳滤膜的有机污染问题,因而需要更为高效的预处理工艺。

《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)对消毒副产物的要求更加严格,全国大部分老水厂均面临升级改造的问题。因此,笔者在目前常规自来水处理工艺(混凝+沉淀+过滤)的基础上,增设了双膜系统以及膜前预处理工艺,并在武汉市某水厂进行规模为 $100\text{ m}^3/\text{d}$ 的中试,研究不同双膜系统对夏季高温湖水的处理效果,并分析不同预处理工艺对双膜系统膜污染的缓解情况,旨在为以地表水作为水源的自来水厂的升级改造提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 原水水质

该水厂进水为梁子湖水,原水投加絮凝剂聚合氯化铝(PAC)后,经网格絮凝池、斜板沉淀池、双虹吸石英砂滤池处理后进入清水池。

中试时间为2021年7月3日—10月13日,处于武汉市高温期,气温达到 $29\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,水温为 $24\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。原水水质指标中 COD_{Mn} 为 $(4.90\pm 2.48)\text{ mg/L}$ 、pH为 8.12 ± 0.46 、总溶解性固体(TDS)为 $(93\pm 7)\text{ mg/L}$ 、浊度为 $(19.9\pm 9.1)\text{ NTU}$ 、 UV_{254} 为 $(0.152\pm 0.062)\text{ cm}^{-1}$,均符合地表水作为水源水的要求。

1.2 试验方案与设备运行参数

1.2.1 试验方案

中试设两条线路:线路一为进水+浸没式超滤膜+纳滤膜;线路二为进水+臭氧+活性炭滤池+压力式超滤膜+纳滤膜。

其中进水又可分为该水厂沉淀池出水(沉后水)和砂滤池出水(滤后水)两类,故分列4种方案进行研究:方案1为沉后水+臭氧+活性炭滤池+压力式

超滤膜+纳滤膜(线路二);方案2为沉后水+浸没式超滤膜+纳滤膜(线路一);方案3为滤后水+臭氧+活性炭滤池+压力式超滤膜+纳滤膜(线路二);方案4为滤后水+浸没式超滤膜+纳滤膜(线路一)。

1.2.2 设备运行参数

① 臭氧接触池的臭氧投加量为1 mg/L,臭氧接触时间为15 min。

② 活性炭滤池中活性炭粒径为12~40目,炭层厚度为2 m,滤速为10 m/h,空床接触时间为12 min。

③ 线路二中超滤膜采用江苏某公司生产的压力式PVDF膜,通量为40 L/h。0.5 h反冲洗1次,水反冲洗60 s、气冲洗60 s、排水45 s、正冲洗30 s,水冲洗强度为87 L/(m²·h),气冲洗强度为7.2 m³/h,回收率约93%。

④ 线路一中超滤膜采用海南某公司生产的浸没式PVDF膜,通量为27.34 L/h。1 h反冲洗1次,气冲洗30 s、气水反冲洗60 s,气冲洗强度为8~12 m³/h,水冲洗强度为30 L/(m²·h),反冲洗10次排空1次,回收率约99%。

⑤ 两套纳滤设备分别采用两家公司生产的纳滤膜,膜通量均为24.5 L/h,采用三段式布置,共42根膜元件,每段膜元件数目之比为4:2:1,回收率为85%~90%(未开第三段浓水循环)。

1.3 检测指标及测试方法

本研究检测的主要指标包括电导率(EC)、水温、TDS、浊度、COD_{Mn}、UV₂₅₄等,EC采用电导率仪测定,浊度采用浊度仪测定,UV₂₅₄采用紫外-可见分光光度计测定,COD_{Mn}参考《水质 高锰酸盐指数的测定》(GB 11892—89)测定,TDS根据EC换算可得,水温通过温度计测定。

2 结果与讨论

方案1和方案2以沉后水为中试进水,试验时间为2021年7月3日—8月16日;方案3和方案4以滤后水为中试进水,试验时间为2021年8月18日—10月13日。

2.1 不同膜工艺对浊度的去除效果

图1为压力式与浸没式超滤膜对沉后水浊度的去除效果。可知,梁子湖水的浊度为9~28 NTU,水厂沉后水浊度为1.19~6.06 NTU,无法达到饮用水水质要求。在方案1中,压力式超滤膜出水浊度为

0.19 NTU左右;方案2中,浸没式超滤膜出水浊度为0.12 NTU左右,较压力式超滤膜出水水质略好。同期水厂滤后水浊度约为1.44 NTU,无法达到饮用水水质要求。由此表明,与普通砂滤工艺相比,无论是压力式超滤膜,还是浸没式超滤膜,对浊度均具有较好的去除效果。

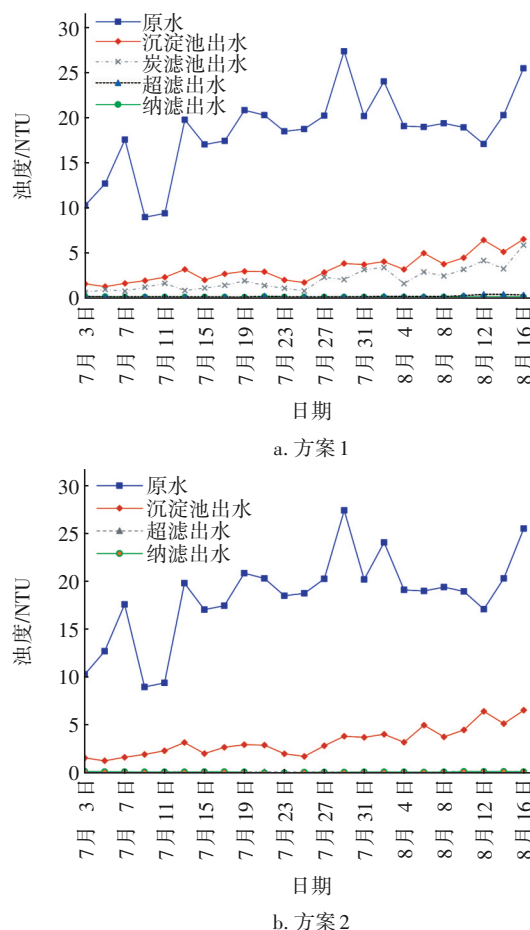


图1 压力式与浸没式超滤膜对沉后水浊度的去除效果
Fig.1 Effect of pressurized and submerged ultrafiltration membrane on removal of turbidity after sedimentation

两种方案中,纳滤膜出水浊度均在0.10 NTU左右,相较于超滤,出水水质进一步提升,但从数据上看,其对浊度的去除效果一般。这是因为纳滤膜之前的超滤膜孔径已足够小,可有效去除绝大部分悬浮物,使得进入纳滤系统的浊度已非常低。

图2为压力式与浸没式超滤膜对滤后水浊度的去除效果。可知,梁子湖水的浊度为11~29 NTU,经混凝+沉淀+砂滤处理后,滤后水浊度约为1.57 NTU,尚达不到饮用水水质标准要求。

方案3中,滤后水经臭氧-活性炭处理后出水浊

度在 1.37 NTU 左右,表明臭氧-活性炭工艺对浊度的去除效果一般。原因是水中较大的悬浮物已被砂滤池截留,滤后水残余的悬浮物粒径较小。而活性炭粒径较大,对悬浮物的截留作用甚微,并且其对悬浮物的吸附效果同样有限。方案3中压力式超滤膜出水浊度约为 0.17 NTU,而方案4则为 0.13 NTU 左右,可知浸没式超滤膜对浊度的去除效果优于压力式超滤膜。两种超滤膜对滤后水浊度的去除率均较高,这表明超滤膜对浊度具有较好的去除效果。两种方案中,纳滤膜出水浊度均在 0.10 NTU 左右,与方案1、2相同,纳滤膜对降低出水浊度的效果一般,原因仍是超滤膜出水浊度已经较低,纳滤膜所能起的作用较小。

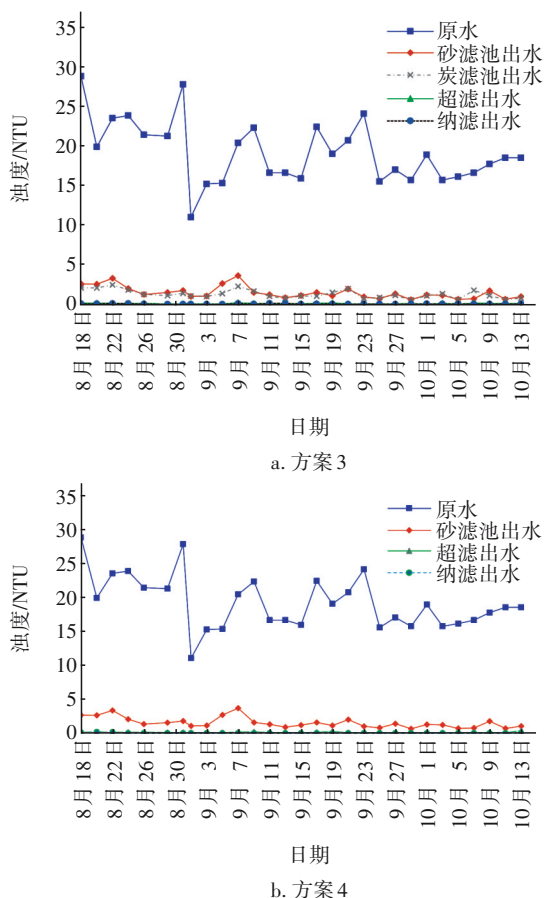


图2 压力式与浸没式超滤膜对滤后水浊度的去除效果

Fig.2 Effect of pressurized and submerged ultrafiltration membrane on removal of turbidity after filtration

对比方案1与方案3、方案2与方案4可知,无论以沉后水还是滤后水作为中试进水,超滤膜对浊度的去除效果均较好,出水浊度可以达到新国标要求。超滤膜降低了纳滤系统的进水浊度,缓解了纳

滤膜污染,延长其反冲洗周期,增加使用时间。

对比方案1与方案2、方案3与方案4可知,相较于压力式超滤膜,浸没式超滤膜出水浊度更低且更稳定,原因是后者的滤速低,膜通量小,对污染物的截留效果更好,两种超滤膜的出水浊度均可满足纳滤膜进水要求。而相较于砂滤池,臭氧-活性炭滤池对浊度的去除效果一般,因此仅在常规砂滤池后增加臭氧-活性炭深度处理工艺并不能有效降低出水浊度,仍需在活性炭滤池后增加超滤膜处理系统,才能有效保证出水水质。

2.2 不同膜工艺对有机物的去除效果

当水厂原水为湖水、水库水等地表水时,水体中的有机物是水处理工艺需要去除的主要对象,而 COD_{Mn} 和 UV_{254} 则是反映有机物浓度的综合指标。其中, UV_{254} 反映的是水中天然存在的腐殖质类大分子有机物以及含 $C=C$ 双键和 $C=O$ 双键的芳香族化合物的量。也有研究表明, UV_{254} 与三卤甲烷等消毒副产物的生成呈正相关^[9]。

2.2.1 对 COD_{Mn} 的去除效果

线路一与线路二对 COD_{Mn} 的去除效果见图3,在取样的4个时间点,中试进水为沉后水。

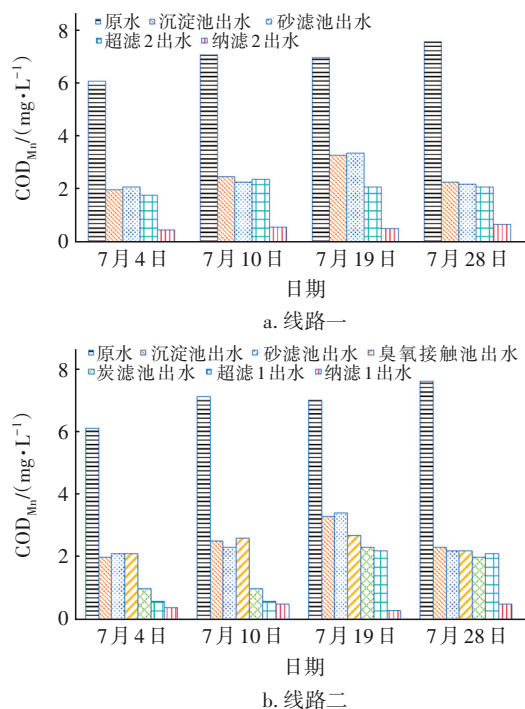


图3 线路一和线路二对 COD_{Mn} 的去除效果

Fig.3 COD_{Mn} removal effect of line 1 and line 2

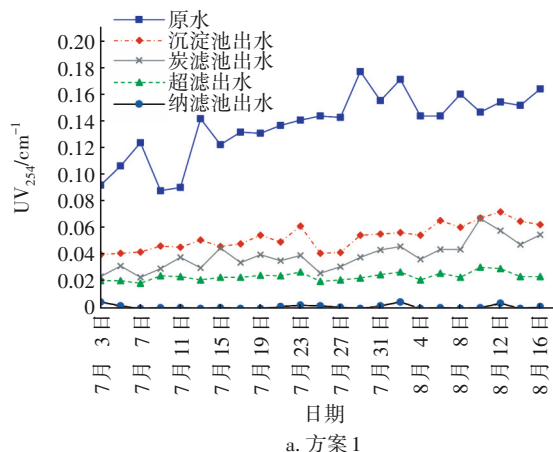
梁子湖水的 COD_{Mn} 为 6.10~7.60 mg/L,均值为 6.95 mg/L,经水厂混凝沉淀处理后, COD_{Mn} 降至

2.00~3.30 mg/L,均值为2.53 mg/L,混凝沉淀对 COD_{Mn} 的去除率约为63.6%。砂滤池出水 COD_{Mn} 为2.10~3.40 mg/L,均值为2.50 mg/L,与沉后水相比,砂滤池对 COD_{Mn} 几乎没有去除效果,这说明不溶于水的颗粒有机物和部分胶体态有机物已在沉淀池中随矾花沉降,传统的物理过程作用不大。

由图3(a)可知,沉后水直接进入浸没式超滤2, COD_{Mn} 平均值降低至2.10 mg/L,相较于沉后水,只有17.0%的去除率;经纳滤2后降至0.59 mg/L,相较于沉后水,去除率达到76.7%。由图3(b)可知,当臭氧开启时(7月4日及10日),沉后水经臭氧处理后, COD_{Mn} 均略微上升,经活性炭滤池吸附后下降至1.0 mg/L,相较于沉后水(2.25 mg/L),去除率为55.6%;超滤1出水浓度为0.60 mg/L,相较于沉后水,去除率为73.3%。关闭臭氧后(7月19日及28日),活性炭滤池产水 COD_{Mn} 为2.15 mg/L,相较于沉后水(2.80 mg/L),去除率为23.21%;超滤1出水浓度为2.15 mg/L,对 COD_{Mn} 几乎没有去除效果。纳滤1的出水 COD_{Mn} 均值分别为0.45 mg/L(开臭氧)和0.40 mg/L(关臭氧),相差不大,相较于沉后水,去除率达到83.2%。由此可知,超滤2及超滤1(关臭氧)对大分子有机物的去除效果较差,说明臭氧预氧化大分子有机物为小分子,对活性炭滤池及超滤膜去除有机物是极其重要的一步。但两条线路中的纳滤出水 COD_{Mn} 均较低,这是因为纳滤膜对有机物的去除主要依靠膜表面的滤饼层以及膜自身的吸附与截留作用,纳滤膜的孔径极小,对水体中 COD_{Mn} 的去除效果明显。

2.2.2 对 UV_{254} 的去除效果

压力式与浸没式超滤膜对沉后水 UV_{254} 的去除效果如图4所示。



a. 方案1

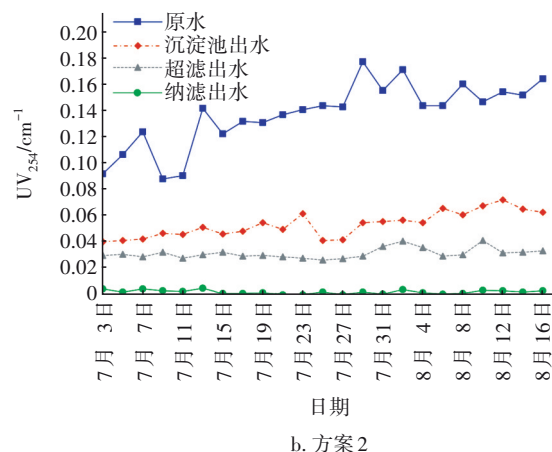


图4 压力式与浸没式超滤膜对沉后水 UV_{254} 的去除效果
Fig.4 Effect of pressurized and submerged ultrafiltration membrane on removal of UV_{254} after sedimentation

由图4可知,梁子湖水的 UV_{254} 为0.089~0.178 cm^{-1} ,混凝沉淀后出水 UV_{254} 降至0.039~0.076 cm^{-1} ,对 UV_{254} 的平均去除率为60.9%。方案1中,臭氧-活性炭滤池出水 UV_{254} 约为0.040 cm^{-1} ,之后的压力式超滤膜出水 UV_{254} 约为0.024 cm^{-1} ,相较于沉后水, UV_{254} 去除率为55.6%。而方案2中,浸没式超滤膜出水 UV_{254} 约为0.032 cm^{-1} ,相较于沉后水, UV_{254} 去除率为40.7%。同期砂滤池出水 UV_{254} 约为0.037 cm^{-1} , UV_{254} 去除率约为31.5%。

对比方案1和方案2可知,超滤膜与砂滤池对沉后水中 UV_{254} 均有一定的去除效果,其中超滤膜的去除效果优于砂滤池;而两种超滤膜中,压力式超滤膜则优于浸没式超滤膜。原因可能在于方案1中沉后水先进入臭氧接触池,一些大分子有机物被氧化分解为小分子,而后活性炭滤池通过吸附去除了部分 UV_{254} 。这也与 COD_{Mn} 的检测结果相同,说明臭氧-活性炭预处理工艺能够提高超滤对有机物的去除效果。两种方案的纳滤膜出水 UV_{254} 均在0.005 cm^{-1} 以下,相较于沉后水, UV_{254} 去除率达90%以上。原因在于纳滤膜的孔径相较于超滤膜更小,可以去除绝大部分的有机物。

以上实验结果表明,混凝+沉淀+超滤工艺对 UV_{254} 的去除主要由混凝和沉淀段完成,此外,膜表面形成的滤饼层对有机物也有一定的去除作用。纳滤膜由于孔径小,对水中有机物具有更好的去除效果,这与上述 COD_{Mn} 的实验结果一致。

压力式与浸没式超滤膜对滤后水 UV_{254} 的去除效果见图5。

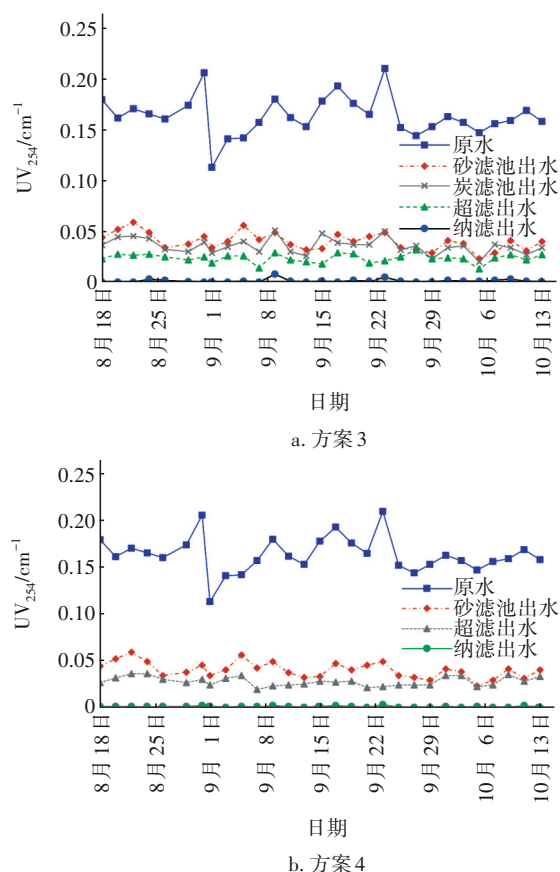


图5 压力式与浸没式超滤膜对滤后水 UV_{254} 的去除效果
Fig.5 Effect of pressurized and submerged ultrafiltration membrane on removal of UV_{254} after filtration

梁子湖水的 UV_{254} 为 $0.113\sim0.210\text{ cm}^{-1}$,混凝沉淀后出水 UV_{254} 降至 $0.038\sim0.091\text{ cm}^{-1}$,对 UV_{254} 的平均去除率为62.2%;砂滤池出水 UV_{254} 为 $0.022\sim0.063\text{ cm}^{-1}$,对沉后水 UV_{254} 的去除率为33.9%。方案3中,活性炭滤池出水 UV_{254} 约为 0.036 cm^{-1} ,对滤后水 UV_{254} 的去除率仅为12.2%,之后的压力式超滤膜出水 UV_{254} 约为 0.024 cm^{-1} ,对滤后水 UV_{254} 的去除率为41.5%。而方案4中,浸没式超滤膜出水 UV_{254} 约为 0.028 cm^{-1} ,对滤后水 UV_{254} 的去除率为31.7%。由方案3可知,相较于砂滤池,臭氧-活性炭对 UV_{254} 并没有进一步的去除效果,原因是砂滤池和活性炭滤池的滤料粒径相仿,未被砂滤池去除的芳香性有机物很难经活性炭滤池进一步去除,因此二者不必串联运行。两种方案中,纳滤出水 UV_{254} 均在 0.005 cm^{-1} 以下,对滤后水 UV_{254} 的去除率达到了87.8%以上。

对比方案1和方案3可知,经砂滤池后再采用臭氧-活性炭滤池工艺,对 UV_{254} 的去除效果并没有

明显提高,反而会增加生产成本。

对比方案2和方案4可知,浸没式超滤膜对沉后水 UV_{254} 有一定的去除效果,但对滤后水中 UV_{254} 去除效果一般,表明砂滤池对 UV_{254} 已经具有较好的去除效果,再通过超滤膜来去除 UV_{254} 的意义不大。

4种方案中纳滤膜对 UV_{254} 的去除效果均较好,采用纳滤膜去除地表水中有机物是合适的选择。

2.3 不同膜工艺对TDS的去除效果

自来水中TDS一般较低,通过国标测定较为复杂。有研究表明,TDS和电导率之间存在一定的相关关系,因此本研究通过检测电导率(DD),采用以下公式换算得到TDS:当 $DD<10\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 时, $TDS=0.5DD$;当 $DD=300\sim800\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 时, $TDS=0.55DD$;当 $DD\geq45\,000\sim60\,000\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 时, $TDS=0.70DD$;当 $DD\geq65\,000\sim85\,000\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 时, $TDS=0.75DD$ 。本研究测得 $DD=300\sim800\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

4种方案对TDS的去除效果见图6、7。

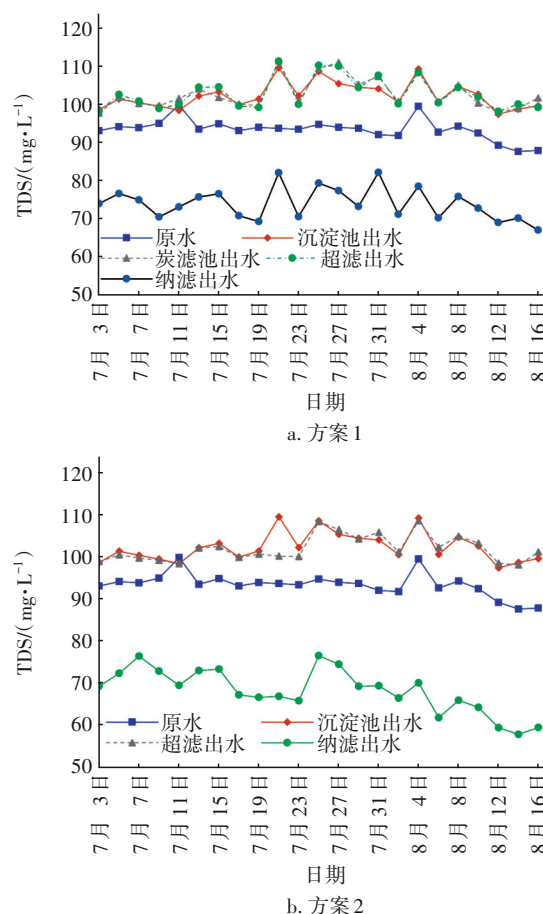


图6 压力式与浸没式超滤膜对沉后水TDS的去除效果
Fig.6 Effect of pressurized and submerged ultrafiltration membrane on removal of TDS after sedimentation

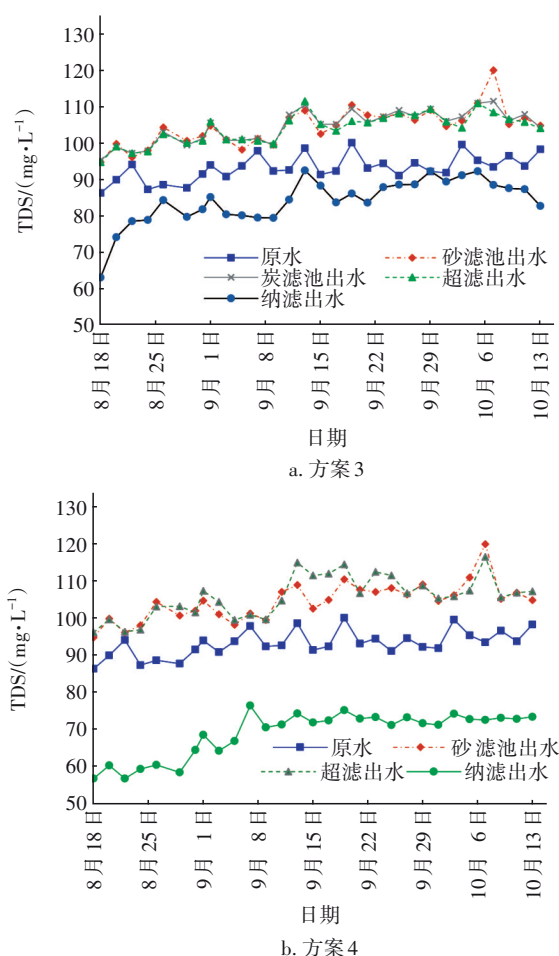


图7 压力式与浸没式超滤膜对滤后水TDS的去除效果
Fig.7 Effect of pressurized and submerged ultrafiltration membrane on removal of TDS after filtration

由图6可知,梁子湖水的TDS为87.63~99.85 mg/L,均值为93.38 mg/L。混凝沉淀出水TDS升至97.63~111.03 mg/L,均值为102.71 mg/L,这可能是因为在混凝过程中加入了一定量PAC,导致铝离子浓度增大,增加了水中的TDS。

方案1中沉后水、炭滤池出水和超滤膜出水的TDS曲线几乎重合,而同样的,方案2中浸没式超滤膜出水TDS与沉淀池出水几乎没有区别。同期砂滤池出水TDS均值为102.52 mg/L,这表明无论是砂滤、炭滤,还是超滤工艺,对TDS均几乎没有去除效果。而方案1中,纳滤出水TDS均值为73.88 mg/L,对沉后水TDS去除率为28.1%;方案2中,纳滤出水TDS均值为68.15 mg/L,对沉后水TDS去除率为33.6%。相较于超滤膜,纳滤系统对TDS具有一定的去除效果。原因在于超滤膜孔径较大,几乎无法截留溶解性离子,而纳滤膜孔径较小,可以去除部

分离子,有效降低出水TDS。

由图7可知,梁子湖水TDS为86.35~100.10 mg/L,均值为93.26 mg/L。混凝沉淀出水TDS均值升至104.58 mg/L,砂滤池出水TDS均值为105.14 mg/L,均与上一试验阶段相仿,说明水源及水厂出水TDS较为稳定。

方案3中炭滤池出水TDS约为104.56 mg/L,压力式超滤膜出水TDS约为104.04 mg/L。相较于方案1,方案3增加了砂滤处理,但对TDS的去除几乎没有影响。方案4中浸没式超滤膜出水TDS均值为105.79 mg/L,同样与砂滤池出水几乎没有区别。而方案3中,纳滤出水TDS均值为84.22 mg/L,对滤后水TDS的去除率为19.9%;方案4中纳滤出水TDS均值为68.99 mg/L,对滤后水TDS的去除率为34.4%。

对比方案1与方案3、方案2与方案4可知,增加砂滤工艺并不会增强对TDS的去除效果,反而会因为处理流程与管线的延长,降低了后续纳滤膜对TDS的去除效果。

对比4种方案中超滤膜与纳滤膜对TDS的去除效果可知,纳滤膜能有效去除水体中部分溶解性离子,几乎在所有方案中,纳滤系统对沉后水TDS的去除率均在20%~30%左右。

2.4 不同纳滤膜的运行流量变化

为验证不同预处理工艺对纳滤膜污染的缓解情况,对方案1和方案2的纳滤装置(分别为纳滤1与纳滤2)的运行流量进行20 d的连续监测。结果表明,两套纳滤装置在开始时流量接近,均为3.0 m³/h左右。随着运行时间延长,膜污染逐渐累积,膜通量逐渐下降。纳滤1的膜通量在前15 d基本保持稳定,后5 d开始下降,最终降低了20%。纳滤2的膜通量在20 d内匀速下降,最终膜通量下降了38%。

由2.1节可知,纳滤2的前处理为浸没式超滤膜,相较于纳滤1的前处理压力式超滤膜而言,对浊度的去除效果更好,但纳滤2的膜通量下降程度反而高于纳滤1。再由2.2节可知,方案1采用了臭氧+活性炭预处理工艺,该工艺可以将一些大分子有机物氧化分解为小分子,经活性炭滤池后被吸附去除。因此,通过两个纳滤装置的膜通量变化情况进一步证明,臭氧-活性炭预处理工艺可以有效减少后续纳滤膜孔堵塞,缓解膜污染。

3 结论

① 超滤膜对浊度去除效果较好,出水浊度可保持在0.2 NTU以下。相较于压力式超滤膜,浸没式超滤膜出水浊度更稳定,且去除效果更好。

② 相较于直接使用超滤膜,臭氧-活性炭预处理工艺联合超滤膜处理可以有效降低水中 COD_{Mn} ,同时缓解纳滤膜污染。

③ 纳滤膜对 COD_{Mn} 去除效果较好,臭氧-活性炭预处理+超滤+纳滤工艺可使出水 COD_{Mn} 降至0.50 mg/L以下,满足新国标要求。

④ 超滤膜对 UV_{254} 的去除效果一般,在不同进水情况下,纳滤膜则能去除87.8%以上的大分子有机物,因此,纳滤膜是降低水厂出水 UV_{254} 的必要选择。

⑤ 采用臭氧-活性炭进行预处理,并结合浸没式超滤膜与纳滤膜的工艺能够达到理论最优效果,在不经砂滤池,直接以沉后水为进水情况下对污染物也具有较好的去除效果,可降低运行费用。

参考文献:

- [1] 于海宽,李星,周志伟,等. 大型超滤水厂预处理流程的除污效能及膜污染特性[J]. 中国给水排水, 2023, 39(13): 54-59.
YU Haikuan, LI Xing, ZHOU Zhiwei, *et al.* Pollutants removal efficiency of pretreatment process and its membrane fouling behaviors in a large-scale ultrafiltration water treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(13): 54-59(in Chinese).
- [2] ANG L W, MOHAMMAD W A, HILAL N, *et al.* A review on the applicability of integrated/hybrid membrane processes in water treatment and desalination plants [J]. Desalination, 2015, 363: 2-18.
- [3] PETERS C D, TONY R, VITALY G, *et al.* Retention of natural organic matter by ultrafiltration and the mitigation of membrane fouling through pre-treatment, membrane enhancement, and cleaning—a review [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 44: 102374.
- [4] HIDAYAH E N, CHOU Y C, YEH H H.

Characterization and removal of natural organic matter from slow sand filter effluent followed by alum coagulation [J]. Applied Water Science, 2018, 8(1): 1-7.

- [5] MONNOT M, LABORIE S, CABASSUD C. Granular activated carbon filtration plus ultrafiltration as a pretreatment to seawater desalination lines: impact on water quality and UF fouling [J]. Desalination, 2016, 383: 1-11.
- [6] MIAO R, YANG Z H, FENG Y Y, *et al.* Mechanism of pre-ozonation in control of protein fouling of ultrafiltration membranes: synergistic effect between ozone oxidation and aeration [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 41: 102038.
- [7] GUO Y Q, LIANG H, BAI L M, *et al.* Application of heat-activated peroxydisulfate pre-oxidation for degrading contaminants and mitigating ultrafiltration membrane fouling in the natural surface water treatment [J]. Water Research, 2020, 179: 115905.
- [8] 高雪,陈才高,刘海燕,等. 国内代表性纳滤水厂评估指标体系与运行效果分析[J]. 净水技术, 2022, 41(1): 53-57.
GAO Xue, CHEN Caigao, LIU Haiyan, *et al.* Evaluation index system and operation effect analysis of representative nanofiltration waterworks at home [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(1): 53-57(in Chinese).
- [9] IRIARTE-VELASCO U, ÁLVAREZ-URIARTE I J, GONZÁLEZ-VELASCO R J. Enhanced coagulation under changing alkalinity-hardness conditions and its implications on trihalomethane precursors removal and relationship with UV absorbance [J]. Separation and Purification Technology, 2007, 55(3): 368-380.

作者简介:张增荣(1982-),男,浙江宁波人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: zhangzengrong@smedi.com

收稿日期:2022-10-03

修回日期:2023-01-21

(编辑:沈靖怡)