

石灰软化/超滤组合工艺处理高硬度纳滤浓水

乔沐阳¹, 李星¹, 于海宽¹, 杨艳玲¹, 朱振良², 纪洪杰²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 东营市自来水公司, 山东 东营 257091)

摘要: 构建了活性炭吸附/石灰软化/砂滤/超滤组合工艺(工艺1)和活性炭吸附/石灰软化/超滤组合工艺(工艺2),对比了2种组合工艺对高硬度纳滤浓水的软化效果以及有机物去除效能,表征了活性炭的有机物去除特性,研究了砂滤的 CaCO_3 截留作用以及对膜污染控制的影响。结果表明,2种组合工艺对纳滤浓水均具有良好的软化效能,对总硬度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC及各类溶解性有机物均具有较好的去除效果。活性炭过滤可以显著去除纳滤浓水中的类蛋白质和类腐殖酸质等有机污染物,超滤单元也对类色氨酸和类酪氨酸有一定的去除效果。砂滤可以有效截留软化过程形成的 CaCO_3 沉淀,减缓跨膜压差增长速率。超滤单元均存在不同程度的有机污染和无机污染,超滤单元2的膜孔内存在 CaCO_3 结晶作用,无机污染程度更严重,但对类腐殖质和类酪氨酸等有机污染物具有较好的截留作用, CaCO_3 滤饼层可以提高分子质量为1~10 ku的DOC的截留效果。

关键词: 纳滤浓水; 硬度; 石灰软化; 超滤; 膜污染

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)19-0033-07

Treatment of Nanofiltration Concentrate by Combined Process of Lime Softening/Ultrafiltration

QIAO Mu-yang¹, LI Xing¹, YU Hai-kuan¹, YANG Yan-ling¹, ZHU Zhen-liang²,
JI Hong-jie²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Dongying Waterworks Company, Dongying 257091, China)

Abstract: Two combined processes of activated carbon adsorption/lime softening/sand filtration/ultrafiltration (process 1) and activated carbon adsorption/lime softening/ultrafiltration (process 2) were constructed. The softening effect and organic removal efficiency of the two combined processes were compared, and organic removal characteristics of activated carbon were characterized. Finally, the CaCO_3 retention effect of sand filtration and its influence on membrane fouling control were studied. The results showed that the two combined processes had good softening effect on nanofiltration concentrate, and good removal effects on total hardness, COD_{Mn} , UV_{254} , DOC and various dissolved organic matter were also obtained. Organic pollutants such as protein-like and humic-like substance in nanofiltration concentrate could be effectively removed by activated carbon filtration, and ultrafiltration units had good removal effects on tryptophan-like and tyrosine-like compounds. Sand filtration could effectively retain the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07404-003、2014ZX07406-002); 国家重点研发计划项目(2018YFC0406203)

通信作者: 李星 E-mail:lixing@vip.163.com

CaCO_3 formed in the softening process and slow down the growth rate of the transmembrane pressure. The two ultrafiltration units had both organic and inorganic fouling. Ultrafiltration unit 2 had more serious inorganic fouling because of CaCO_3 crystallization in the membrane pores, but it had better retention effect on organic pollutants such as humic-like and tyrosine-like substances. The formation of CaCO_3 filter cake layer could enhance the retention effect of the ultrafiltration membrane on 1 – 10 ku molecular weight dissolved organic matter.

Key words: nanofiltration concentrate; hardness; lime softening; ultrafiltration; membrane fouling

地下水是我国主要的饮用水水源,硬度超标是地下水存在的重要水质问题^[1]。目前,国内外去除地下水中硬度的方法主要有药剂软化法、离子交换法和膜法等。石灰软化法是一种应用广泛的除硬度方法,常与混凝、过滤、超滤等工艺单元组合使用^[2-4]。石灰软化/超滤组合工艺是一种有效的地下水除硬度工艺^[4],但存在超滤膜污染问题^[5]。超滤/纳滤组合工艺也可有效去除地下水中的硬度、有机物等,但会产生大量浓水,浓水中硬度及有机物等会有不同程度的富集,极大地限制了纳滤浓水的利用,浪费了大量水资源。对纳滤浓水中硬度及有机物进行有效去除可以提高水厂产水率,有利于水资源的再生利用。为此,笔者构建了活性炭吸附/石灰软化/超滤组合工艺和活性炭吸附/石灰软化/砂滤/超滤组合工艺,对纳滤浓水进行处理,考察组合工艺对纳滤浓水的软化作用及有机物去除效果,研究石英砂过滤单元对超滤膜污染的影响,以期在实际工程应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验用水

试验用水为山东省某水厂超滤/纳滤组合工艺中纳滤装置产生的浓水,试验期间纳滤浓水的 COD_{Mn} 为2.14~2.64 mg/L、 UV_{254} 为0.016~0.024 cm^{-1} 、DOC为2.46~2.73 mg/L、总硬度(以 CaCO_3 计,下同)为488~560 mg/L、总碱度(以 CaCO_3 计,下同)为478~560 mg/L。

1.2 试验装置与方法

中试装置如图1所示,构建了2种组合工艺,包括活性炭吸附/石灰软化/砂滤/超滤工艺(工艺1)和活性炭吸附/石灰软化/超滤工艺(工艺2)。纳滤浓水由浓水箱经提升泵进入炭滤柱,炭滤出水经提升泵分别进入砂滤柱和超滤单元2,砂滤出水经提升泵进入超滤单元1;在砂滤柱和超滤单元2的进

水管上设置 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加点,进水与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在管道内直接混合。

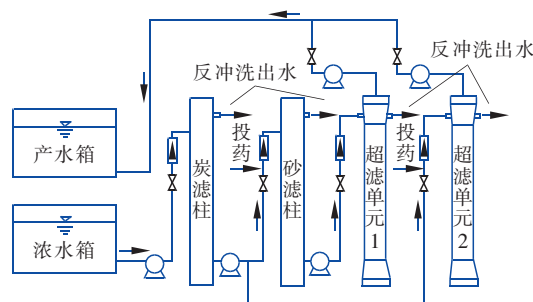


图1 组合工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of combined process

炭滤柱滤层厚度为1.5 m,滤速为14.1 m/h,水力停留时间为6 min,产水量为1 m^3/h 。砂滤柱滤层厚度为1.5 m,滤速为7.1 m/h,水力停留时间为12 min,产水量为0.5 m^3/h 。砂滤柱的运行周期为6 h,反冲洗时间为10 min,反冲洗强度为40 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。超滤单元1和2的运行参数均相同,采用恒通量运行方式,膜通量为30 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,运行周期为120 min,反冲洗时长为5 min,排泥周期为12 h。砂滤柱内石英砂的粒度为20~40目;颗粒活性炭的粒度为8×30目,碘值为1 150 mg/g、亚甲蓝值为150 mg/g。超滤采用浸没式复合PVC超滤膜,膜丝内径为1.00 mm,外径为2.00 mm,平均膜孔径为0.02 μm ,膜组件的有效膜面积为15 m^2 。

1.3 分析项目与方法

总硬度:EDTA滴定法;总碱度:酸碱滴定法;浊度:2100N型浊度仪; UV_{254} :紫外分光光度计;DOC:总有机碳分析仪; COD_{Mn} :酸性高锰酸钾法;三维荧光光谱(EEM):荧光光谱仪。进行超滤膜丝及滤饼层组分分析时,将滤饼层和超滤膜丝用1%的盐酸浸泡2 h后测定浸出液的总硬度、DOC和 UV_{254} 。测定 UV_{254} 、DOC和EEM前,水样要先经过0.45 μm

滤膜过滤。

2 结果与讨论

2.1 石灰软化效果

根据前期小试研究结果,确定 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的最佳投加量为 250 mg/L。2 种组合工艺对纳滤浓水的软化效果如图 2 所示。

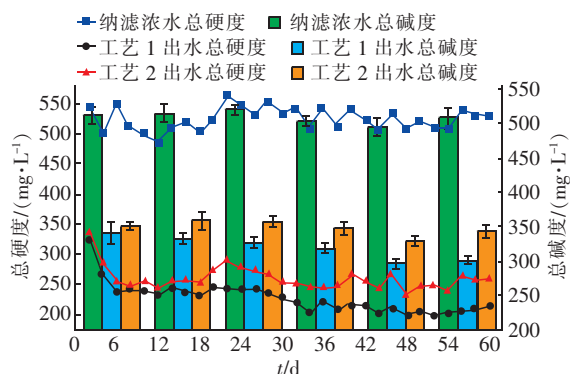


图 2 组合工艺进出水的总硬度及总碱度变化

Fig. 2 Change of total hardness and total alkalinity in influent and effluent of two combined processes

纳滤浓水的总硬度和总碱度分别在 488 ~ 560 mg/L 和 478 ~ 560 mg/L 之间,平均值分别为 524.9 和 506.6 mg/L。在前 6 d,工艺 1 和工艺 2 的出水总硬度均呈快速下降趋势,之后工艺 1 的出水总硬度呈平缓下降趋势,在 40 d 左右达到稳定状态。工艺 1 和工艺 2 的出水总碱度随运行时间基本保持稳定,运行 40 d 后呈平缓下降趋势。在 40 ~ 60 d 的稳定运行阶段,工艺 1 和工艺 2 的出水总硬度平均值分别为 226.6 和 258.2 mg/L,总硬度平均去除率分别为 56.1% 和 50.6%,工艺 1 的出水总硬度比工艺 2 降低了 13.9%,这可能与两种工艺的软化反应条件和反应时间不同有关^[6]。工艺 1 投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 后先经过砂滤柱,有助于软化反应的充分进行^[3],另外适当延长反应时间也有利于软化反应,软化反应时间达到 5 min 后可有更好的软化效果^[7];工艺 1 中砂滤柱的水力停留时间为 12 min,可以保证软化反应进行得更充分,工艺 2 中超滤单元的水力停留时间为 4.2 min,有可能影响软化反应效果。在运行 40 d 后,工艺 1 和工艺 2 的出水总碱度平均值分别为 300.1 和 336.4 mg/L,总碱度平均去除率分别为 39.5% 和 32.2%,工艺 1 的总碱度去除效果优于工艺 2,进一步说明工艺 1 比工艺 2 具有更好的软化效果。

2.2 浊度去除效果

图 3 为 2 种组合工艺各单元进出水浊度的变化情况。纳滤浓水的平均浊度为 0.11 NTU,炭滤出水的平均浊度为 0.95 NTU,相比纳滤浓水有明显增加。超滤单元 1 和 2 的平均进水浊度分别为 0.36 和 306 NTU,可见工艺 1 中的 CaCO_3 在砂滤柱中得到有效去除,工艺 2 中的 CaCO_3 主要在超滤单元中得到去除,因此在石灰软化后设置砂滤可以有效去除 CaCO_3 ,降低超滤单元的进水浊度。超滤单元 1 和 2 的平均出水浊度分别为 0.10 和 0.12 NTU,可见 2 种组合工艺均具有极佳的浊度去除效果。

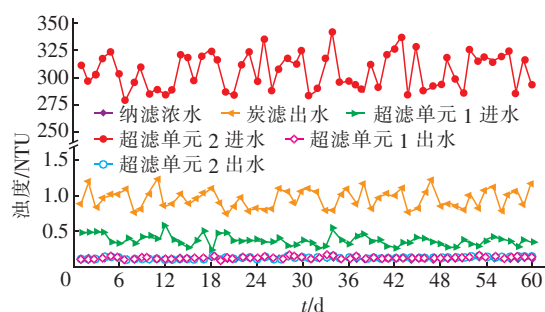


图 3 两种组合工艺中浊度的变化

Fig. 3 Change of turbidity with time in two combined processes

2.3 有机物去除效果

试验测得,纳滤浓水的 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和 DOC 平均值分别为 0.021 cm^{-1} 、2.43 mg/L 和 2.57 mg/L,炭滤出水的 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和 DOC 平均值分别为 0.008 cm^{-1} 、1.62 mg/L 和 1.44 mg/L,平均去除率分别为 58.5%、33.3% 和 43.3%;超滤单元 1 出水的 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和 DOC 平均值分别为 0.005 cm^{-1} 、1.43 mg/L 和 1.19 mg/L,平均去除率分别为 35.6%、11.0% 和 17.0%;超滤单元 2 出水的 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和 DOC 均值分别为 0.005 cm^{-1} 、1.42 mg/L 和 1.11 mg/L,平均去除率分别为 35.6%、11.6% 和 22.6%。可以看出,纳滤浓水中的溶解性有机物经炭滤和超滤处理后逐步得到去除,炭滤单元对有机物的去除效果明显优于超滤单元,这是由于纳滤浓水中的有机物以小分子有机物为主,更有利于活性炭充分发挥吸附作用;另外,超滤单元 2 比超滤单元 1 对有机污染物具有更好的去除效果。综上,工艺 1 及工艺 2 对有机物均具有较好的去除效果, UV_{254} 、 COD_{Mn} 、DOC 的平均总去除率分别达到 53.7%、73.4%、40.9% 以及 56.9%、73.5%、42.4%。

图4为活性炭滤柱、砂滤柱和超滤单元对不同有机物的去除特性。可知,纳滤浓水中主要含有类蛋白质(T_1 区)、类色氨酸(T_2 区)和类络氨酸(B区),并含有少量类腐殖质(A区),其中类蛋白质区域峰值最高,类色氨酸和类络氨酸次之,类腐殖质最低。经炭滤处理后,纳滤浓水中的类蛋白质、类色氨酸、类络氨酸和类腐殖质的吸收峰均出现明显降低,峰值分别降低了67.7%、16.9%、25.9%和40.2%,表明炭滤对类蛋白质和类腐殖质的去除效果优于类络氨酸和类色氨酸。砂滤出水中的类蛋白质、类色氨酸、类络氨酸和类腐殖质的吸收峰峰值分别比炭滤出水升高了4.9%、4.8%、14.1%和7.1%。超滤单元1和2出水中类蛋白质、类色氨酸、类络氨酸和类腐殖质的吸收峰峰值分别比进水降低了13.1%、23.2%、23.9%、11.8%以及4.7%、20.2%、32.2%、61.2%,表明超滤对类色氨酸、类络

氨酸和类腐殖质有一定的去除效果,但对类蛋白质的去除效果不佳。从各类污染物总体去除情况来看,工艺1对有机物的去除效果不如工艺2,尤其是对类腐殖质和类络氨酸的去除效果,这是由于工艺2的软化反应主要在超滤单元进行,可能会在超滤膜表面与有机物形成共沉淀^[8],或者在超滤膜表面形成 CaCO_3 沉淀时包裹、截留了部分有机物,阻止或限制了溶解性有机物透过超滤膜^[9],使得工艺2出水的有机物含量较低;而工艺1中的软化反应主要在砂滤柱中进行,对比图4(b)和(c)可知,石英砂对溶解性有机物的截留作用不明显。综上,经组合工艺1和2处理后,纳滤浓水中类蛋白质、类色氨酸、类络氨酸和类腐殖质的吸收峰峰值分别降低了70.0%、29.2%、37.0%、42.4%和69.1%、32.2%、44.0%、68.9%,可见组合工艺对各类溶解性有机物均有较好的去除效果。

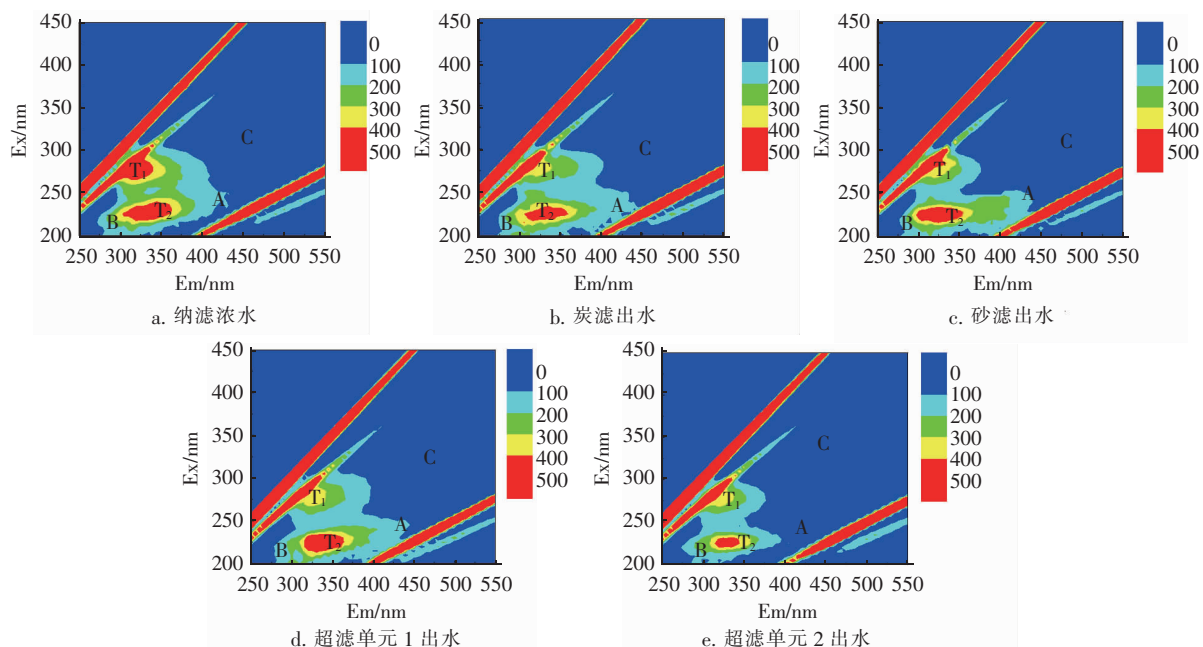


图4 组合工艺各单元进出水的三维荧光特性变化

Fig. 4 Change of EEM characteristics of influent and effluent in each unit of two combined processes

组合工艺各单元进出水的DOC分子质量分布如图5所示。纳滤浓水的DOC平均含量为2.43 mg/L,以分子质量 <1 ku和 >100 ku的DOC为主,含量分别为0.52和1.28 mg/L,分别占DOC总量的23.2%和56.5%。炭滤出水和砂滤出水的DOC含量分别为1.55和1.54 mg/L,分子质量分布特点均与纳滤浓水类似,但含量均有不同程度的减少。经过炭滤处理后,分子质量 <1 、 $1\sim3$ 、 $3\sim10$ 、 $10\sim30$ 、

$30\sim100$ 、 >100 ku的DOC含量分别减少了22.0%、69.7%、0.98%、26.1%、60.0%和43.2%;与超滤进水相比,超滤单元1和2出水中分子质量 <1 、 $1\sim3$ 、 $3\sim10$ 、 $10\sim30$ 、 $30\sim100$ 、 >100 ku的DOC含量分别减少了2.4%、4.4%、3.0%、82.0%、82.4%、44.6%以及1.3%、8.5%、12.7%、85.1%、77.1%、50.2%;组合工艺1和2出水的DOC含量分别为1.29和1.28 mg/L,以分子质量 <1 ku的DOC为

主,分别占 DOC 总量的 75.3% 和 76.6%,说明 2 种组合工艺对分子质量 <1 ku 的 DOC 截留作用有限。

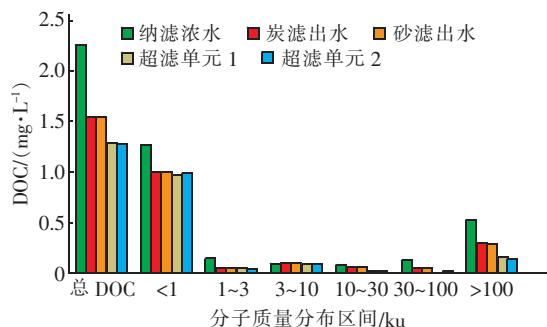


图5 组合工艺各单元进出水的 DOC 分子质量分布

Fig. 5 DOC molecular weight distribution of influent and effluent in each unit of two combined processes

从图 5 还可以看出,2 种组合工艺中炭滤和超滤单元对分子质量 >10 ku 的 DOC 均具有一定的去除效果,炭滤、超滤单元 1 和超滤单元 2 对其去除率分别为 44.0%、55.9% 和 57.9%。纳滤浓水中分子质量 <3 ku 的 DOC 主要被炭滤去除,经炭滤处理后分子质量 <3 ku 的 DOC 含量减少了 27.4%,而超滤单元 1 和 2 对分子质量 <3 ku 的 DOC 去除效果不佳,去除率仅为 3.1% 和 2.3%。炭滤、超滤单元 1 和超滤单元 2 对分子质量为 3~10 ku 的 DOC 去除效果较低,去除率分别为 1.0%、4.8% 和 13.5%。对比 2 种组合工艺出水中 DOC 的分子质量分布特点可以发现,工艺 2 出水中分子质量为 1~10 ku 的 DOC 含量略低于工艺 1,根据三维荧光测定结果,这部分有机物可能为类腐殖质和类络氨酸。

2.4 跨膜压差的变化

2 种组合工艺中超滤单元在运行期间的跨膜压差(TMP)变化如图 6 所示。可知,超滤单元 1 和 2 的跨膜压差均呈现出先缓慢增加、后快速增加、再缓慢增加的变化趋势。在第 1~8 天,超滤单元 1 和 2 的跨膜压差均缓慢增长,仅分别增长了 1.5 和 0.5 kPa。超滤单元 1 的跨膜压差在第 8~24 天明显增加,增长速率达 0.57 kPa/d,跨膜压差平均为 15.4 kPa;在第 24~52 天再次呈缓慢增加趋势,增长速率为 0.13 kPa/d,跨膜压差平均值为 20.7 kPa;在第 52~60 天则呈现接近稳定趋势,此时跨膜压差平均值为 23.4 kPa。超滤单元 2 的跨膜压差在第 8~50 天也呈现明显增加趋势,增长速率达 0.47 kPa/d,跨膜压差平均值为 19.9 kPa;在第 50~60 天则呈现持续稳定趋势,此时跨膜压差平均值为 29.4 kPa。在

稳定阶段,超滤单元 1 的跨膜压差比超滤单元 2 的跨膜压差平均低 6.0 kPa。

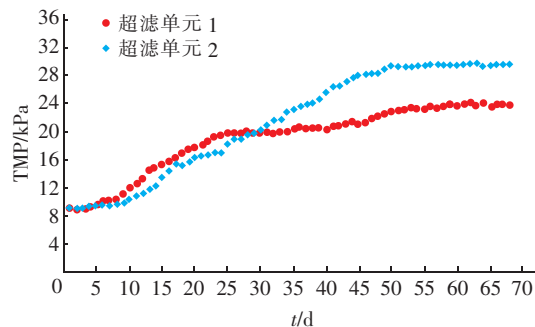


图6 组合工艺中超滤单元的跨膜压差变化

Fig. 6 Change of transmembrane pressure of ultrafiltration unit in two combined processes

在运行期间超滤单元的跨膜压差出现上述变化趋势,可能是由于在初始运行阶段,超滤膜表面截留的 CaCO_3 较少,造成的跨膜压差变化不明显;当 CaCO_3 在超滤膜表面沉积到一定程度后,都会先后形成滤饼层,导致跨膜压差快速增长;但组合工艺 1 的软化反应过程主要在砂滤柱中进行并得到截留,超滤膜截留的主要是残余 CaCO_3 沉淀物,可形成较疏松的滤饼层;组合工艺 2 的软化反应过程主要在超滤单元中进行,膜表面形成一定的滤饼层后,会在滤饼层中或者膜孔中产生 CaCO_3 结晶沉淀作用^[10],导致滤饼层逐渐变得致密、膜孔变小,使得跨膜压差持续增加到更高程度。超滤单元 1 表面截留的 CaCO_3 沉淀物所形成的滤饼层较疏松,对膜污染有一定的缓解作用^[11],因此跨膜压差较小。另外, CaCO_3 易在载体表面发生结晶沉淀^[10],也会对超滤膜造成一定程度的无机污染^[12]。

2.5 膜污染特性

在运行 60 d 后取 2 种组合工艺的超滤膜丝及滤饼层进行组分测定,结果如图 7 所示。可以看到,经 HCl 浸泡后,各组浸出液中均含有总硬度,且超滤膜的滤饼层和膜孔内均含有 CaCO_3 。超滤单元 1 截留的 CaCO_3 总量仅为超滤单元 2 的 16.2%,说明砂滤可以有效缓解 CaCO_3 进入超滤单元。超滤单元 1 截留的 CaCO_3 主要分布于膜孔内部,占总含量的 55.6%;超滤单元 2 则主要分布于滤饼层中,占总含量的 82.7%。超滤单元 2 膜孔内的 CaCO_3 含量比超滤单元 1 增加了 47.9%,表明超滤单元 2 在膜孔内发生了 CaCO_3 结晶作用,在膜柱内进行软化反应加剧了膜污染。超滤单元 1 和 2 的滤饼层中的

有机物含量高于膜孔内部,说明有机物对超滤膜造成的膜污染阻力同时存在膜孔阻塞阻力和滤饼层阻力,且以滤饼层阻力为主。对比各组浸出液中的有机物含量可知,超滤单元2中膜孔阻塞和滤饼层截留的DOC、UV₂₅₄含量分别比超滤单元1增加了37.6%、65.5%和24.7%、52.8%,说明运行后期的超滤单元2虽然膜污染程度较严重,但对有机污染物具有较好的截留作用。

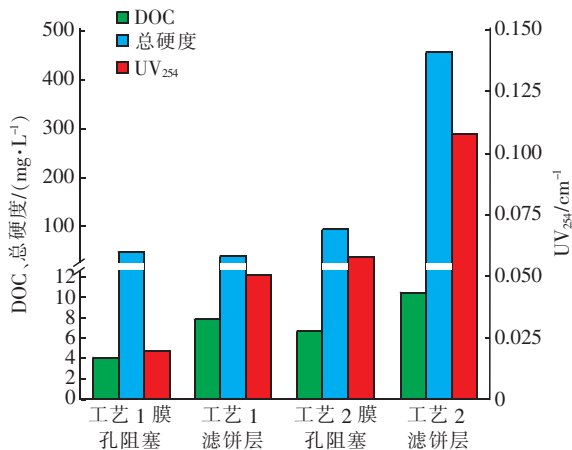


图7 膜污染特性分析

Fig. 7 Analysis of membrane fouling characteristics

3 结论

① 构建了活性炭吸附/石灰软化/砂滤/超滤组合工艺(工艺1)和活性炭吸附/石灰软化/超滤组合工艺(工艺2),对纳滤浓水中的硬度、UV₂₅₄、COD_{Mn}和DOC均具有良好的去除效果;2种工艺均能有效去除纳滤浓水中多种类型的有机污染物,类蛋白质、类色氨酸、类酪氨酸和类腐殖质含量显著降低,出水浊度、硬度、COD_{Mn}等水质指标均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求,极大地提高了纳滤浓水的利用率。

② 活性炭对纳滤浓水中的有机污染物有显著的去除效果,对UV₂₅₄、COD_{Mn}和DOC的去除率分别为58.5%、33.3%和43.3%,对类蛋白质、类色氨酸、类酪氨酸和类腐殖质的去除率分别为67.7%、16.9%、25.9%和40.2%,有效缓解和避免了纳滤浓水的有机物富集和超标风险。

③ 石灰软化可显著降低纳滤浓水的总硬度,工艺1和工艺2出水总硬度分别为226.6和258.2 mg/L;在石灰软化后设置砂滤可有效去除CaCO₃沉淀,大幅度降低了超滤单元的进水浊度;在膜柱内进

行软化反应会导致在膜孔内发生CaCO₃结晶作用,超滤单元2的膜孔内CaCO₃含量比超滤单元1增加了47.9%。

④ 超滤单元对类色氨酸、类酪氨酸和类腐殖质具有一定的截留效果,但对类蛋白质的去除效果不佳。超滤单元对分子质量>10 ku的DOC具有良好的去除作用,对分子质量<3 ku的DOC截留效果有限。超滤单元2对类腐殖质和类酪氨酸的去除效果优于超滤单元1,对分子质量为1~10 ku的DOC也有更好的截留效果。

⑤ 超滤单元1与2的跨膜压差具有类似的增长规律,但超滤单元1的跨膜压差增长幅度较小,具有较好的膜污染控制作用,而超滤单元2具有较好的有机污染物截留作用,膜孔阻塞和滤饼层截留的DOC、UV₂₅₄分别比超滤单元1增加了37.6%、65.5%和24.7%、52.8%。

参考文献:

- [1] 刁徐笑,孙长虹,陈淑峰,等. 城市地下水污染防治研究进展[J]. 水处理技术,2015,41(9):14-18,23.
Diao Xuxiao, Sun Changhong, Chen Shufeng, et al. Progress in research on contamination prevention of urban groundwater[J]. Technology of Water Treatment, 2015,41(9):14-18,23(in Chinese).
- [2] 张程,刘成,胡伟. 复配药剂软化法对地下水中硬度的去除效能研究[J]. 中国给水排水,2014,30(7):43-46.
Zhang Cheng, Liu Cheng, Hu Wei. Performance of combined chemicals in decreasing hardness of groundwater[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(7):43-46(in Chinese).
- [3] 陈涛. 用石灰软化—絮凝法处理地下水水源硬度试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
Chen Tao. Study on Treatment of Hardness of Underground Water Source Using Lime Softening - Flocculation Process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012(in Chinese).
- [4] 徐文博,王东升,段晋明,等. 高硬度富锶地下水的软化沉淀—超滤膜联用工艺[J]. 环境工程学报,2012,6(10):3443-3448.
Xu Wenbo, Wang Dongsheng, Duan Jinming, et al. Treatment of high hardness and strontium-rich groundwater by chemical softening-ultrafiltration process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,

- 2012,6(10):3443-3448(in Chinese).
- [5] Kweon J H, Lawler D F. Fouling mechanisms in the integrated system with softening and ultrafiltration[J]. Water Res, 2004, 38(19):4164-4172.
- [6] 杨力. 高硬度地下水处理技术研究[D]. 重庆:西南大学, 2012.
- Yang Li. High Hardness Groundwater Treatment Technology Research [D]. Chongqing: Southwest University, 2012(in Chinese).
- [7] 智奥帆. 化学结晶循环造粒法去除水中硬度的试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- Zhi Aofan. Experimental Study on the Removal of Hardness in Water by Chemical Crystallization Cycle Granulation [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018(in Chinese).
- [8] Hsu S, Singer P C. Application of anion exchange to control NOM interference on lime softening [J]. J AWWA, 2009, 101(6):85-94.
- [9] Randtke S J, Thiel C E, Liao M Y, *et al.* Removing soluble organic contaminants by lime-softening [J]. J AWWA, 1982, 74(4):192-202.
- [10] 赵月兰, 鄢琳, 吴城锋, 等. 沉淀回流对石灰软化法去除地下水硬度的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4):1829-1834.
- Zhao Yuelan, Yan Lin, Wu Chengfeng, *et al.* Influence of sediment recirculation on hardness removal from groundwater by lime softening process [J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(4):1829-1834 (in Chinese).
- [11] Galjaard G, Kruithof J C, Scheerman H, *et al.* Enhanced pre-coat engineering (EPCE) for micro- and ultrafiltration: steps to full-scale application [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2003, 3(5/6):125-132.
- [12] Comstock S E. Physical - Chemical Treatment of Groundwater and Membrane Concentrate to Decrease Membrane Fouling Potential [D]. Gainesville: University of Florida, 2011.



作者简介: 乔沐阳(1993-), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要从事地下水中硬度去除工艺及理论研究。

E-mail: qiaomuyang@yeah.net

收稿日期: 2019-03-11

节约每一滴水,
回收每一滴水,
让每一滴水多循环一次