

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.23.010

臭氧活性炭-超滤膜核心工艺处理陡河水库水

焦涵薇^{1,2}, 张娟^{1,2,3}, 牛豫海^{1,2}, 张自力^{1,2}, 陈司晗^{1,2}, 李飞⁴

(1. 河北建投水务投资有限公司, 河北 石家庄 050051; 2. 河北省城市水务智能化技术创新中心, 河北 石家庄 050051; 3. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 4. 唐山市曹妃甸供水有限责任公司, 河北 唐山 063200)

摘要: 针对陡河水库微污染水源,分析了臭氧活性炭-超滤膜双深度处理核心工艺的净水效能、组合工艺效果及运行成本。结果表明,臭氧活性炭-超滤膜核心工艺适合处理微污染水库水,超滤膜出水浊度在0.03 NTU以下,高锰酸盐指数达到地表水Ⅰ类。其中,使用次氯酸钠对超滤膜进行维护性清洗(周期约为16 d),跨膜压差通过维护性清洗即可稳定在4~12 kPa,说明炭滤布置在超滤膜前的组合工艺运行效果稳定,超滤膜可截留活性炭以保证出水水质。炭滤布置在超滤前活性炭消耗较快,可通过活性炭碘值的变化来调整。分析该工艺和短流程超滤膜工艺的运行成本发现,次氯酸钠单耗分别为2.5、4.9 mg/L,制水单耗分别为0.18、0.19 kW·h/m³,该工艺药耗和制水电耗较低,长期运行性价比较高。

关键词: 陡河水库; 臭氧活性炭; 超滤膜; 深度处理; 运行效能; 运行成本

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)23-0064-06

Core Process of Ozone-Activated Carbon Coupled with Ultrafiltration Membrane for Treating Water from Douhe Reservoir

JIAO Han-wei^{1,2}, ZHANG Juan^{1,2,3}, NIU Yu-hai^{1,2}, ZHANG Zi-li^{1,2}, CHEN Si-han^{1,2}, LI Fei⁴

(1. HCIG Water Investment Co. Ltd., Shijiazhuang 050051, China; 2. Hebei Provincial Technology Innovation Center for Urban Water Intelligence, Shijiazhuang 050051, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Tangshan Caofeidian Water Supply Co. Ltd., Tangshan 063200, China)

Abstract: An analysis was conducted on the purification efficiency, integrated process performance, and operating costs of the core process involving ozone-activated carbon coupled with ultrafiltration membrane for treating the micro-polluted source water from Douhe Reservoir. The core process of ozone-activated carbon coupled with ultrafiltration membrane technology was suitable for the treatment of micro-polluted reservoir water. The ultrafiltration membrane effluent exhibited a turbidity of less than 0.03 NTU, and the permanganate index met the class I limit for surface water quality specified in the standard. Sodium hypochlorite was employed for periodic maintenance cleaning of the ultrafiltration membrane, conducted approximately every 16 days, which effectively stabilized the transmembrane pressure difference within the range of 4 kPa to 12 kPa. This outcome demonstrated that the integrated

通信作者: 张娟 E-mail: 13739737722@163.com

process, featuring a granular activated carbon filter positioned upstream of the ultrafiltration membrane, operated with high stability. Furthermore, the ultrafiltration membrane effectively retained residual activated carbon particles, thereby ensuring consistent effluent quality. When the carbon filter was placed before the ultrafiltration membrane, the activated carbon consumption was rapid and could be replenished based on changes in its iodine value. The analysis of the operating costs between the present process and the short-process ultrafiltration membrane process indicated that the unit sodium hypochlorite consumption was 2.5 mg/L and 4.9 mg/L, respectively, while the specific energy consumption for water production was 0.18 kW·h/m³ and 0.19 kW·h/m³, respectively. The present process exhibited lower chemical usage and reduced energy consumption, demonstrating superior long-term operational cost-effectiveness.

Key words: Douhe Reservoir; ozone-activated carbon; ultrafiltration membrane; advanced treatment; operation efficiency; operating cost

随着我国水质标准要求不断提高,水厂使用的混凝-沉淀-过滤-消毒常规工艺大多无法满足更高的出水标准。目前国内外对混凝+超滤膜的短流程组合工艺开展了有益探索^[1-2],但短流程超滤膜工艺面临清洗频繁且进水水质和技术要求高等问题,如何选择水处理单元与超滤膜形成优化组合工艺成为热点研究方向之一。将臭氧活性炭与超滤膜进行结合,可充分利用臭氧活性炭技术去除水中臭味物质和有机物,以提高饮用水口感,同时也可利用超滤降低出水浊度,进一步提升水质,是目前城市供水处理工艺中的较优组合^[3]。

笔者以唐山市某水厂常规处理+臭氧活性炭-超滤膜双深度处理长流程工艺为研究对象,分析其净水效能、超滤膜性能及活性炭消耗,将该水厂长流程工艺与较典型的短流程超滤膜工艺进行运行成本分析,可为水厂如何利用原有的水处理单元新建超滤组合工艺提供参考。

1 材料与方法

1.1 水厂设计参数及运行模式

唐山市某水厂一期建设规模为 2.5×10^4 m³/d (自用水量按照 5% 设计),水源为陡河水库水。该水厂采用常规处理+臭氧活性炭-超滤膜双深度处理的长流程工艺(见图1)。该工艺可使出厂水水质远优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,超滤后浊度 ≤ 0.03 NTU。水厂主要处理构筑物包括斜管沉淀池、提升泵房、臭氧接触池、活性炭滤池、超滤膜车间、清水池、反冲洗泵房、臭氧发生器间、二级泵房、综合加药间、污泥处理设施等。综

合加药间使用的药剂包括高锰酸钾、臭氧、聚氯化铝(PAC)、次氯酸钠。

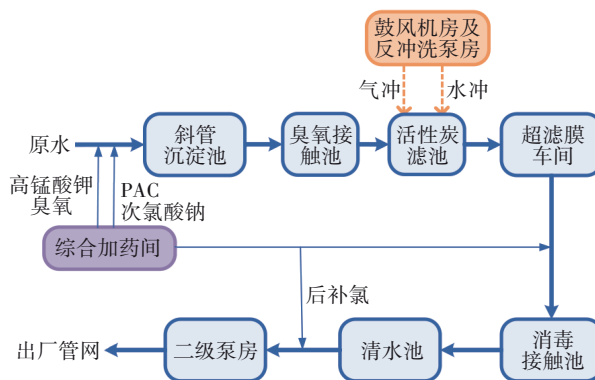


图1 唐山某水厂长流程处理工艺

Fig.1 Long-flow process of a waterworks in Tangshan

本研究重点分析活性炭滤池和超滤池。活性炭滤池于2022年2月投入运行,采用上向流形式,规模为 2.5×10^4 m³/d,4座滤池采用单排布置,编号依次为A、B、C、D,单池过滤面积为48 m²,每池的设计水量为546.875 m³/h,滤池的设计滤速为11.39 m/h,炭接触时间为13.2 min,采用气冲方式,反冲洗周期 ≥ 6 d。

超滤膜车间于2022年2月正式通水运行,共6座膜池,分为2个系列,对称布置。现运行3座膜池,编号依次为A、B、C,总净产水量为 2.5×10^4 m³/d,总膜面积为58 800 m²。每座膜池的尺寸为5.4 m×6.3 m×4.2 m(长×宽×深),单池安装7组膜箱,每组膜组件140支,单池产水流量为364.6 m³/h、反洗水流量为1 568 m³/h、曝气量为1 300 m³/h。

超滤膜池的核心元件为PVDF浸没式超滤膜,

膜箱尺寸为4 625 mm×800 mm×3 140 mm(长×宽×深),公称孔径为0.02 μm,有效膜面积为2 800 m²,干质量为2 100 kg,湿质量为4 300 kg。膜箱设计通量为27.5 L/(m²·h),最大工作温度为40 ℃,适用的pH范围为1~12。膜池气水反冲洗周期为120 min(含气水同时反冲洗1.5 min)。膜池每11次普通反洗后排空,维护性清洗周期约为16 d(第16次排空时),清洗时间为1 h,清洗药剂为次氯酸钠。设计恢复性化学清洗周期为360 d,清洗时间为15 d。目前根据膜情况未进行恢复性化学清洗。

1.2 进水水质及分析方法

陡河水库的水质指标大多符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅱ类及以上标准;但是高锰酸盐指数、COD、总磷和汞则达到了Ⅲ~Ⅳ类标准,总氮指标更是常年超过Ⅴ类标准,有机物有加重趋势,藻类暴发和微生物风险高,属于微污染水库水^[4]。将进厂水水质分为高温期(7月—10月)、中温期(3月—6月)、低温期(11月—次年2月)三种情形,具体见表1。进厂水来自陡河水库,高锰酸盐指数超出Ⅱ类标准时有发生,总氮大多超过地表Ⅴ类,高温期浊度、藻类升高明显,需要依靠双深度处理使出水水质达标。取2022年2月正式连续运行后的数据进行分析。

表1 不同阶段陡河水库原水水质

Tab.1 Raw water quality of Douhe Reservoir at different stages

项 目	高温期	中温期	低温期
温度/℃	17.7~27.5	9.8~26.5	4.1~13.4
浊度/NTU	1.6~56.7	2.1~22.6	1.7~14.0
色度/度	10~25	10~25	10~20
臭和味	霉味一级	霉味一级	霉味一级
pH	7.2~8.3	7.7~8.4	7.5~8.5
高锰酸盐指数/(mg·L ⁻¹)	2.0~4.1	1.9~3.7	2.0~4.4
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0~0.5	0.1~0.3	0.05~0.64
总氮/(mg·L ⁻¹)	1.24~2.47	1.26~4.45	1.64~3.59
藻类/(10 ⁴ 个·L ⁻¹)	747.4~1 737.6	445.4~1 475.3	348.4~463.6
肉眼可见物	细小悬浮物	细小悬浮物	细小悬浮物
菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)	164~4 700	18~280	7~200
总大肠菌群/(CFU·100 mL ⁻¹)	165.2~2 419.6	1~2 419.6	2.0~1 730.9

浊度、颗粒数、余氯、pH、温度分别通过哈希在线仪表测定;跨膜压差(TMP)通过压力变送器计算得出;菌落总数通过平皿计数法测定;总大肠菌群通过酶底物法测定;高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾滴定法测定;UV₂₅₄采用紫外分光光度计测定;色度采用铂钴标准比色法测定;臭和味采用嗅气和尝味法测定;活性炭碘值采用碘吸附值测定法检测。

2 结果与讨论

2.1 净水效能分析

2.1.1 浊度和颗粒数

2023年1月—5月,进厂水浊度在2~60 NTU之间,波动较大,但斜管沉淀池去除了大部分悬浮物,进入双深度处理工艺的水体浊度较低,约为0.5~2.0 NTU。运行结果表明,无论进水浊度如何变化,超滤后浊度始终稳定维持在0.03 NTU以下,经长流程处理后取得了很好的除浊效果。

取炭滤池进出水、超滤池出水数据分析双深度处理工艺对浊度的去除效果,结果表明,双深度处理对浊度的去除率为94.23%~98.56%,平均去除率为(96.39±0.74)%。炭滤池进水浊度为0.40~1.60 NTU,平均值为(0.68±0.16) NTU;炭滤池出水浊度为0.28~1.44 NTU,平均值为(0.58±0.17) NTU;超滤池出水浊度为0.022~0.030 NTU,平均值为(0.023±0.001) NTU。可见双深度处理工艺除浊效果稳定,其中超滤池对浊度的深度去除起关键作用。约有1/5的运行时间出现炭滤后浊度升高的现象,这主要是由于活性炭泄漏造成的颗粒数增加^[5]。在炭滤池后加超滤,平均颗粒数为3.46 CNT/mL,远低于100 CNT/mL,保障了出水水质安全。

2.1.2 生物安全性

因该水厂超滤膜的公称孔径为0.02 μm,而大肠杆菌等微生物的直径通常在0.5 μm以上^[6],因此超滤膜对微生物的去除能力极强。根据水厂水质日报表发现,总大肠菌群均未检出,合格率为100%,菌落总数为0~16 CFU/mL,即使夏季进厂水菌落总数较高,出厂水菌落总数也基本为0,远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)限值,超滤后置能够最大程度地保障出水水质的生物安全性,臭氧活性炭-超滤膜核心工艺有助于保证夏季饮用水的水质安全。

活性炭会通过吸附作用和化学反应消耗余氯,

而超滤膜仅有物理截留作用,不会消耗余氯。该水厂在超滤后、清水池前后采用补氯的方式来保证出厂水余氯。根据日报表数据,出厂水余氯为0.30~1.00 mg/L,均值为0.45 mg/L,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。

2.1.3 有机物

进厂水高锰酸盐指数为2.00~5.00 mg/L,经臭氧处理后,炭滤池进水高锰酸盐指数为1.05~2.30 mg/L,平均值为1.61 mg/L。炭滤池出水高锰酸盐指数为0.83~1.71 mg/L,平均值为1.26 mg/L,平均去除率为21.52%。超滤池出水高锰酸盐指数为0.78~1.36 mg/L,平均值为0.99 mg/L,平均去除率为16.47%。两级深度处理对高锰酸盐指数的总去除率为15.00%~56.77%,平均去除率为37.99%,出水水质达到地表Ⅰ类。炭滤池进水高锰酸盐指数较低,因此两级深度处理的去除率均不高。其中炭滤池对高锰酸盐指数的去除作用较大,超滤池也有一定的去除作用。超滤池对高锰酸盐指数的去除作用趋于平稳,而炭滤池对高锰酸盐指数的去除作用有所提高。这可能是运行一段时间后,除了吸附和截留作用,超滤膜和活性炭上形成的微生物群也开始分解有机物,所以对高锰酸盐指数均有一定去除作用,且活性炭更利于微生物附着,因此炭滤池对高锰酸盐指数的去除率升高。

在炭滤和超滤双深度处理工艺中,主要依靠活性炭的吸附作用去除 UV_{254} 。炭滤池进水 UV_{254} 为0.008~0.039 cm^{-1} ,平均值为0.022 cm^{-1} ,经炭滤处理后 UV_{254} 降至0.002~0.024 cm^{-1} ,平均值为0.015 cm^{-1} ,去除率为5.88%~88.89%,平均去除率为31.46%。

2.1.4 色度、臭和味

自水厂运行以来,进厂水色度为10~25度,臭和味为霉味一级,经臭氧活性炭工艺处理后炭滤池出水达到了色度<5度,无异臭、无异味,出厂水水质与炭滤池后水质的色度、臭和味相似。因此,臭氧活性炭工艺对色度、臭和味有很好的去除效果,出水感官更好,有利于用户对水质的信任。

2.1.5 pH

进厂水pH在7.71~8.16之间,炭滤池出水pH相比水源水有所下降,经超滤后pH和炭滤池出水类似,在7.51~8.03之间,属于微碱性,符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。炭滤池和超滤

池出水的pH变化趋势相似,且两者相差甚微,说明进膜前后的水没有发生明显的化学变化。

2.2 超滤膜性能分析

该水厂为恒液位运行,在运行期间跨膜压差从未超过12 kPa且具有一定的波动规律,超滤膜维护性清洗周期为16~22 d。取2023年1月—8月每次维护性清洗后当天的跨膜压差分析超滤膜受污染情况,为排除温度的影响,将原始TMP根据文献[1]统一修正到15℃时的TMP。

超滤膜维护性清洗后TMP的变化如图2所示。可知,臭氧活性炭-超滤膜核心工艺运行期间,A膜池TMP一直在6~9 kPa之间波动;B膜池TMP较低,大部分在4~6 kPa之间波动;C膜池的初始TMP为5.31 kPa,在前4次维护性清洗期间,TMP上升较快,第4次清洗后TMP稳定在7~9 kPa之间,维护性清洗后最大TMP为9.21 kPa。经温度修正后,三座膜池的TMP均升高,但幅度仅为4~6 kPa,这说明维护性清洗不能使超滤膜恢复到初始状态,但经过维护性清洗后超滤膜仍可继续正常使用。

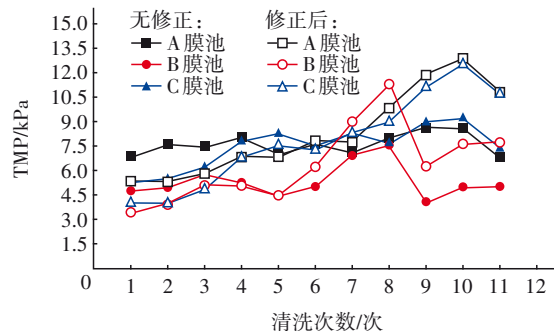


图2 超滤膜维护性清洗后TMP的变化

Fig.2 Variation of TMP after maintenance cleaning of ultrafiltration membrane

综上所述,三座膜池的TMP均较低,且增长幅度较小,说明三座超滤膜池在维护性清洗后均可基本恢复至初始状态。这可能是由于前置炭滤池截留了部分污染物,减小了超滤池负荷,且维护性清洗及时,所以臭氧活性炭-超滤膜核心工艺的跨膜压差值增加较缓慢,超滤膜受到的污染小^[7]。

2.3 活性炭碘值的变化

炭滤单元布置在超滤膜前,会直接面临较高负荷的污染物,长期使用会使活性炭的吸附性能下降,处理效果也随之降低。因此,考察运行期间活性炭的性能变化十分重要。活性炭的碘值越高,说明其吸附性能越好,一般该值不应小于400 mg/g^[8]。

当水厂连续运行时,由于活性炭不断吸附水中的杂质,其碘值必然下降。水厂每季度测定一次活性炭碘值,经过近2年的运行,臭氧活性炭-超滤膜核心工艺A、B、C、D四座滤池活性炭的碘值从1 005 mg/g分别降低至685、670、669、710 mg/g。四座滤池的活性炭碘值一直在降低,降低的速率约为25~30 mg/(g·月),为了避免活性炭被严重破坏,并导致其吸附能力迅速下降,水厂应对使用2年后的活性炭加大检测频率,判断是否需要更换。

2.4 运行成本分析

邢台市某水厂采用混凝+超滤膜短流程工艺(简称短流程超滤膜工艺),处理规模为 2×10^4 m³/d,水厂进水浊度为0.19~20 NTU,出水浊度为0.12~0.32 NTU,主要的投加药剂包括PAC和次氯酸钠。短流程超滤膜工艺的膜处理车间共运行了10座膜池,膜池的气水反冲洗周期为107 min(过滤时间为90 min)。为减少膜污染,水厂进行低通量运行[约10 L/(m²·h)],维护性清洗周期为5 d,可维持超滤膜TMP在10 kPa左右,因此运行8年仅进行了2次化学性清洗。该短流程超滤膜工艺的处理水量、进水质与该水厂长流程工艺相似,因此对两者进行运行成本分析。

对比该水厂工艺与短流程超滤膜工艺2022年正式投产后的药剂成本,结果表明,该水厂的平均处理水量为 73×10^4 m³/月,PAC消耗为15.0 mg/L,维护性清洗时次氯酸钠消耗为2.5 mg/L;短流程超滤膜工艺的平均处理水量为 60×10^4 m³/月,PAC消耗为16.5 mg/L,维护性清洗时次氯酸钠消耗为4.9 mg/L。可见,短流程超滤膜工艺与该水厂工艺混凝剂用量相似,但次氯酸钠用量约为长流程工艺的2倍。短流程超滤膜工艺化学性清洗使用次氯酸钠、氢氧化钠、盐酸、亚硫酸钠、柠檬酸,单次药剂用量分别为6 000 kg(10%原液)、7 306 kg(30%原液)、6 667 kg(30%原液)、640 kg(固体)、750 kg(固体),按水量为 2×10^4 m³/d计算,化学性清洗药剂的投加量分别为0.21、0.25、0.23、0.022、0.026 mg/L,数值均很小,可忽略不计。综上所述,该水厂长流程超滤膜工艺比邢台短流程超滤膜工艺的药剂少,尤其是用于维护性清洗的次氯酸钠。

水厂运行过程中,取水和配水的电量占全厂电量的80%~90%,该水厂制水电量约占全厂电量的15%。含有超滤膜的工艺中,制水电耗主要是反洗

电耗和维护性清洗电耗。考虑到该工艺超滤膜污染较轻,化学性清洗及维护性清洗周期较长,需要进行综合核算。对比2022年该水厂工艺与邢台短流程超滤膜工艺的制水电耗发现,该水厂工艺的制水总量和供水总量分别为 773.67×10^4 、 750.09×10^4 m³,年制水电耗为 142.78×10^4 kW·h,制水单耗为0.18 kW·h/m³;短流程超滤膜工艺的制水总量和供水总量分别为 759.58×10^4 、 743.06×10^4 m³,年制水电耗为 146.39×10^4 kW·h,制水单耗为0.19 kW·h/m³。可见,在相似制水量下,短流程超滤膜工艺的制水电耗略高于该水厂长流程工艺,这可能是其反洗和维护性清洗电耗较高所致,且该水厂工艺的用电量包括了臭氧活性炭工艺的用电量,若仅考虑超滤膜工艺用电量,则可能差值更大。华北地区某水厂以当地水库水为水源,采用高密度沉淀池-V型滤池-超滤-臭氧活性炭的长流程工艺,全年电耗为 $1\ 160\times 10^4$ kW·h^[9],远高于该水厂长流程工艺。综上所述,该水厂使用长流程超滤膜工艺在电耗方面并未增加水厂的运行负担。

3 结论

① 针对微污染水源,适宜采用臭氧活性炭-超滤膜核心工艺,臭氧活性炭工艺主要去除色度、臭和味、有机物,超滤主要去除浊度、颗粒物及微生物,出水平均浊度为0.023 NTU,平均颗粒数为3.46 CNT/mL,高锰酸盐指数低于2.00 mg/L,微生物达标率为100%,色度<5度,无异臭、异味,保证了出水水质达标和用水安全性。

② 在臭氧活性炭-超滤膜核心工艺中,炭滤池对UV₂₅₄的平均去除率为31.46%,炭滤池出水偶尔出现浊度升高的现象,超滤池对浊度的平均去除率达到96.39%,通过维护性清洗可维持跨膜压差在4~12 kPa之间。炭滤池布置在超滤膜前可去除膜前有机物,避免活性炭流失,延缓超滤膜跨膜压差的升高时间。

③ 在臭氧活性炭-超滤膜核心工艺中,活性炭降低的速率约为25~30 mg/(g·月),建议使用2年以上时进行加密检测,避免出现活性炭失效、出水水质不达标的情况。

④ 该水厂长流程超滤膜工艺和短流程超滤膜工艺PAC消耗相似,次氯酸钠消耗分别为2.5、4.9 mg/L,制水单耗分别为0.18、0.19 kW·h/m³,该

水厂长流程超滤膜工艺药耗少、电耗略低,作为处理微污染水源水的工艺性价比较高。

参考文献:

- [1] 郑钊, 裘建平, 操家顺. 微污染水库水超滤膜处理工艺的试验研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 89-93.
ZHENG Zhao, QIU Jianping, CAO Jiashun. Experimental study on ultrafiltration membrane process for treatment of slightly-polluted reservoir water [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 89-93 (in Chinese).
- [2] 张娟, 牛豫海, 张自力, 等. 超滤膜短流程工艺处理南水北调原水的运行效能[J]. 中国给水排水, 2020, 36(23): 37-41.
ZHANG Juan, NIU Yuhai, ZHANG Zili, *et al.* Operational efficiency of short-flow ultrafiltration process treating water from South-to-North Water Diversion Project [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(23): 37-41 (in Chinese).
- [3] 赵加斌. 基于上海市高品质供水的水厂设计思考[J]. 净水技术, 2023, 42(S1): 281-288.
ZHAO Jiabin. Design consideration of WTP based on Shanghai high quality water supplying [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(S1): 281-288 (in Chinese).
- [4] 杨威, 雷晓玲, 王忠运, 等. 直接超滤工艺处理微污染水库水的工程实践[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 42-45.
YANG Wei, LEI Xiaoling, WANG Zhongyun, *et al.* Engineering practice of direct ultrafiltration process for treatment of lightly polluted reservoir water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 42-45 (in Chinese).
- [5] 曾庆品, 李星, 杨艳玲, 等. 活性炭/超滤工艺提升和保障二次供水安全性研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(15): 44-48.
ZENG Qingpin, LI Xing, YANG Yanling, *et al.* Improvement and guarantee of secondary water supply safety by using activated carbon/ultrafiltration process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(15): 44-48 (in Chinese).
- [6] 郭彩荣, 王为民, 张岩岗, 等. 膜分离技术在饮用水处理的应用[J]. 广东化工, 2024, 51(2): 84-86.
GUO Cairong, WANG Weimin, ZHANG Yangang, *et al.* Application of membrane separation technology in drinking water treatment [J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(2): 84-86 (in Chinese).
- [7] 宋佳临, 王明远, 张逸, 等. 不同超滤组合工艺处理南水北调水源水效能及膜污染[J]. 中国给水排水, 2024, 40(13): 28-33.
SONG Jialin, WANG Mingyuan, ZHANG Yi, *et al.* Treatment efficiency and membrane fouling analysis of different ultrafiltration combined processes for source water of the South-to-North Water Diversion Project [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(13): 28-33 (in Chinese).
- [8] LAM H Y, ROY P K, CHATTOPADHYAY S. Thermal degradation in edible oils by surface enhanced Raman spectroscopy calibrated with iodine values [J]. Vibrational Spectroscopy, 2020, 106: 103018.
- [9] 路旭龙, 崔建国, 张峰. 基于多线程运行控制的高效节能型净水工艺[J]. 工业水处理, 2016, 36(1): 103-105.
LU Xulong, CUI Jianguo, ZHANG Feng. Highly efficient and energy-saving water treatment process based on multi-thread operation control [J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(1): 103-105 (in Chinese).

作者简介:焦涵薇(1997-),女,河北石家庄人,硕士,工程师,主要从事给水厂及污水厂投资和运营管理工作。

E-mail:492182056@qq.com

收稿日期:2024-09-18

修回日期:2024-10-21

(编辑:任莹莹)