

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.005

超滤+纳滤系统深度净化低温低浊期梁子湖水中试

田 若¹, 钟燕敏², 黄嘉奕², 陈可延³, 刘志远²

(1. 武汉市水务集团有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 上海市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对冬季地表水出现低温低浊的情况,开展了超滤+纳滤双膜系统处理武汉市梁子湖湖水的深度净化中试。结果表明:武汉虽处于我国中部地区,但冬季地表水仍存在低温低浊现象,常规混凝/沉淀/过滤工艺出水浊度等可以达到新国标要求,但 UV_{254} 、总溶解性固体(TDS)等含量仍较高。经过双膜法深度处理后,出水浊度可达到0.1 NTU左右, UV_{254} 达到 0.010 cm^{-1} 以下,TDS在50 mg/L左右。冬季低温对双膜系统的净化效果影响不大。低温期由于原水水质较好,超滤膜可以保持长期稳定运行。由于超滤膜的前处理效果较好,进一步延长了纳滤膜的使用时间。纳滤膜在研究时段内没有进行清洗的情况下,仍能保持较高的膜通量,跨膜压差上升较慢。

关键词: 超滤; 纳滤; 低温低浊水; 中试

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0032-06

Deep Purification Effect of Ultrafiltration+Nanofiltration Double Membrane System on Low Temperature and Low Turbidity Surface Water

TIAN Ruo¹, ZHONG Yan-min², HUANG Jia-yi², CHEN Ke-yan³, LIU Zhi-yuan²

(1. Wuhan Water Group Co. Ltd., Wuhan 430000, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In view of the situation of low temperature and low turbidity of surface water in winter, the ultrafiltration+nanofiltration double membrane system was used in the pilot study to deeply purify the raw water of Liangzihu Lake in Wuhan. The research results showed that although Wuhan is located in the middle of China, the phenomenon of low temperature and low turbidity still exists in the surface water in winter, and the turbidity of the water produced by conventional coagulation, precipitation and filtration process could meet the requirements of the new national standard. However, the contents of UV_{254} and TDS were still high. After the double membrane deep purification treatment, the effluent turbidity could reach about 0.1 NTU, UV_{254} was less than 0.010 cm^{-1} , and TDS was about 50 mg/L. Low temperature in winter had little effect on the water purification effect on double membrane system. The UF membrane could keep stable operation for a long time due to the good quality of raw water in low temperature. Because of the good pre-treatment effect of UF membrane, the service time of NF membrane was further extended. In the study period, NF membrane was not washed, but still maintained high membrane flux, and the rise of transmembrane pressure was very slow.

Key words: ultrafiltration; nanofiltration; low temperature and low turbidity water; pilot-scale test

低温低浊水主要为水温在 0~4 °C、浊度 <30 NTU 的冬季水库水、江河水。武汉市冬季气温低,在 0 °C 左右的时间比较长,湖泊、水库等地表水相对于地下水更易受气温影响,水温也会降低至 0 °C 上下。低温下水体中悬浮物的浓度较低,冬季湖泊地表水中浊度经常处于 10 NTU 左右,同时湖水中微生物活动能力弱,因此也会出现较长时间的低浊水情况。由于低温低浊水具有黏度大、温度低、碱度低等特点,导致混凝效果不好,因此低温低浊水的处理是水处理界的一个难题^[1],传统的处理方式难以取得理想的效果。

近年来许多专家学者对于低温低浊水处理方式的研究取得了不错的进展。目前对低温低浊水的处理工艺主要有优选混凝剂和助凝剂^[2]、泥渣回流^[3]、溶气气浮^[4]、微絮凝接触过滤^[5]、预氧化^[6]、膜技术、高密度沉淀池和组合工艺等^[7-8]。其中,利用超滤膜技术处理低温低浊水的效果很好,出水浊度

可以稳定在 0.2 NTU 以下,且有一些超滤处理的实际水厂在运行^[9]。目前,国内外也有一些利用纳滤膜处理低温低浊水的研究,但基本处于实验室研究阶段^[10],尚未进行中试,也没有大型水厂的运行经验。为此,笔者采用超滤+纳滤双膜系统对武汉市梁子湖的冬季低温低浊水进行深度处理,分析其净化效果,以及超滤膜前处理对后续纳滤膜污染的缓解情况,以期为大型水厂应用双膜系统处理低温低浊水提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 中试流程

中试研究在武汉某水厂进行,工艺流程见图 1。该水厂原水为梁子湖水,处理工艺为网格絮凝池+斜管沉淀池+双阀滤池。为了考察低温低浊期超滤膜是否可以取代滤池,中试系统进水采用水厂斜管沉淀池出水(沉后水),考察了压力式超滤膜(线路一)和浸没式超滤膜(线路二)的运行情况。

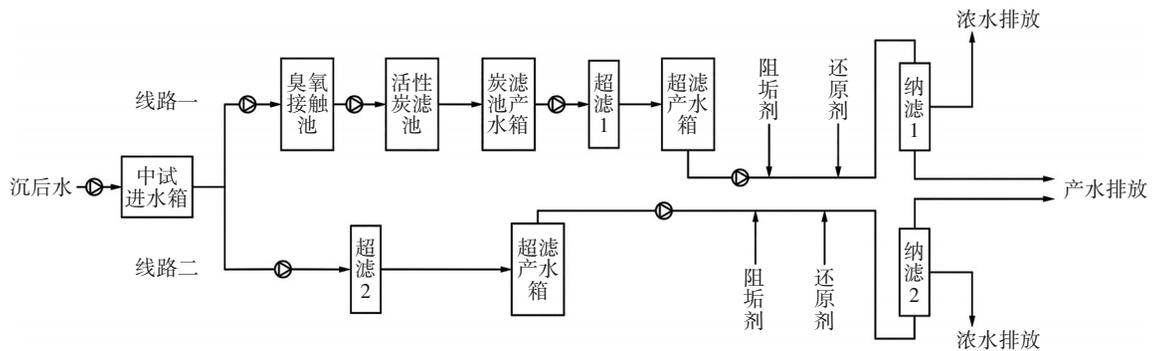


图 1 中试系统工艺流程

Fig.1 Flow chart of pilot-scale system

1.2 中试装置性能参数

① 臭氧-活性炭滤池。臭氧发生量为 9.6 g/h,活性炭罐上部采用 50 目不锈钢钢丝网,罐内装载活性炭 0.58 t、石英砂 0.2 t。承托层为粗石英砂,粒径为 2~4 mm,活性炭粒径为 12~40 目,采用下向流运行。臭氧-活性炭罐设计处理能力为 6.4 m³/h,低温低浊期运行流量为 3.5 m³/h。

② 超滤。超滤 1 采用压力式聚偏氟乙烯(PVDF)亲水超滤膜,单支膜面积为 80 m²,通量为 44 L/(m²·h),回收率 >98%。超滤 2 采用浸没式 PVDF 中空纤维超滤膜,膜面积为 128 m²,过水量为 3.5 m³/h,通量为 27.34 L/(m²·h),跨膜压差 <60 kPa,回收率 >95%。两套超滤装置的设计处理流量均为 6.4 m³/h,低温低浊期运行流量为 3.0 m³/h。

③ 纳滤。纳滤装置分别采用国内两家公司的 DF-2540-R30 纳滤膜元件,表面材料为聚哌嗪均苯三甲酰胺,三段布置方式,段间布置采用 4:2:1,每段 6 芯,单个膜元件为 2.81 m²,设计最大膜通量为 24.6 L/(m²·h),回收率为 90%。纳滤装置设计处理流量为 3.2 m³/h,低温低浊期运行流量为 2.0 m³/h。中试膜元件均采用恒通量运行,通过改变提升泵频率来控制运行通量。

1.3 膜系统清洗药剂与清洗程序

① 超滤膜 1 维护性清洗药剂为次氯酸钠(10%)和柠檬酸,分别按 200、1 500 mg/L 投加;5 d 维护性清洗一次,清洗程序包括放空、加药、浸泡、气洗、正洗。当跨膜压差(TMP)比初始值上升 100 kPa 或标准产水量下降 25%~30% 时进行化学清洗;

化学清洗药剂:酸洗为1%~2%柠檬酸(pH=2),碱洗为0.1%氢氧化钠+0.2%次氯酸钠(pH=12)。超滤装置反洗周期为1 800 s;清洗程序包括水反洗60 s、气冲60 s、排水45 s、正冲30 s,回收率约93%。反洗进水压力监测范围为50~250 kPa,水冲洗强度为87 L/(m²·h)。反洗进气压力监测范围为50~150 kPa,反洗进气压在100 kPa以内。

② 超滤2维护性清洗药剂采用浓度为200 mg/L的次氯酸钠,清洗周期为7~30 d,清洗程序为加药-浸泡-反冲洗。恢复性清洗采用浓度为1 000~2 000 mg/L的次氯酸钠,或1.0%~2.0%柠檬酸,清洗程序为加药-浸泡-反冲洗-漂洗-反冲洗-漂洗。反洗周期为60~120 min,其中气冲30 s、气水反冲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次排空一次,回收率约99%。

③ 纳滤膜运行过程中使用的还原剂为亚硫酸氢钠,浓度为44 mg/L,投加量为3 mg/L;阻垢剂为聚丙烯酸,浓度为1 mg/L,投加量为0.15 mg/L。当纳滤膜进水与浓水之间的压差比初始值上升15%、标准掺水量下降10%、标准盐透率增加5%时进行化学清洗,清洗药剂为0.1% NaOH+0.2% NaClO混合液或0.2%柠檬酸。

1.4 梁子湖水质

中试时间为2022年1月11日—2月26日,历时45 d,基本处于武汉市低温期,气温为-3~12℃,水温略高,为2~15℃。原水COD_{Mn}为(4.40±2.05) mg/L, pH为8.35±0.63, TDS为(93±17) mg/L,浊度为(6.3±3.4) NTU, UV₂₅₄为(0.072±0.015) cm⁻¹,各指标均符合地表水作为水源的要求。

1.5 水质检测方法

pH:上海今迈 PHS-3C pH计,温度:温度计, TDS: BDS-200E 分析仪,浊度:哈希 2100Q 浊度仪, SDI:上海华膜 FL47 分析仪, UV₂₅₄: T6 新世纪紫外-可见光分光光度计, COD_{Mn}: 分光光度法, 水压: 数显式压力表, 流量: 电磁流量计。

2 结果与讨论

2.1 对不同水质指标的去除效果

2.1.1 对浊度的去除效果

低温期梁子湖水浊度基本保持在10 NTU以下(3.57~9.70 NTU),属于典型的低温低浊水。经过该水厂的混凝、沉淀工艺处理后,中试系统进水浊

度多数情况下低于2.0 NTU,最高值为2月26日的2.82 NTU,最低值为1月29日的0.36 NTU,满足双膜法处理系统进水浊度应低于2.0 NTU的要求。

活性炭滤池出水浊度较为稳定,最高值为0.45 NTU(2022年1月19日与2月18日),其他时间均低于该值。表明炭滤池对浊度有较好的去除效果,且原水浊度对炭滤池出水浊度的影响不大。超滤1和超滤2出水浊度均稳定在0.2 NTU以下,达到了低于0.3 NTU的武汉市企标要求,说明低温低浊期超滤膜的处理效果较为稳定,不受水温影响。纳滤1与纳滤2出水浊度稳定,且略低于超滤出水浊度,达到0.1 NTU左右,对浊度具有进一步的去除效果。由于超滤膜对浊度的良好去除能力,为后续纳滤膜的长期稳定运行和缓解膜污染提供了帮助。

2.1.2 对UV₂₅₄的去除效果

低温期梁子湖水的UV₂₅₄变化范围为0.057~0.085 cm⁻¹,表明此时原水中大分子有机物较少。经过水厂的混凝、沉淀工艺处理后,中试进水UV₂₅₄为0.028~0.051 cm⁻¹,常规混凝、沉淀工艺对UV₂₅₄的平均去除率为47.59%(见图2)。

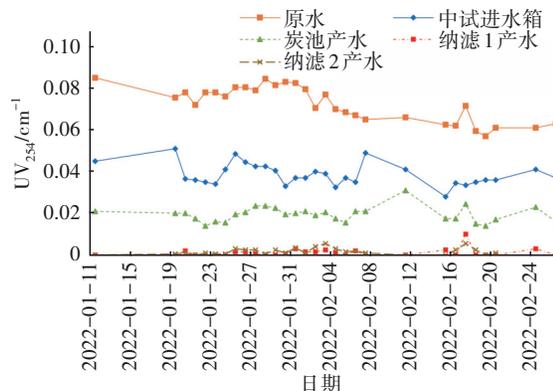


图2 低温低浊期对UV₂₅₄的去除效果

Fig.2 Removal of UV₂₅₄ by different process at low temperature and low turbidity period

运行期间,臭氧-活性炭滤池产水UV₂₅₄在0.014~0.031 cm⁻¹变化,炭滤池对沉后水中UV₂₅₄的去除率达到了46.84%。活性炭对UV₂₅₄的去除主要通过吸附与物理截留^[11],由于进水中有机物含量较少,活性炭基本可以对进水中的有机物进行有效吸附。另外从图2还可以看到,从原水到炭滤池出水,UV₂₅₄的变化趋势基本一致,表明臭氧-活性炭滤池对UV₂₅₄的去除效果与原水水质有关。

超滤1出水UV₂₅₄在0.016 cm⁻¹左右,超滤2出

水 UV_{254} 为 $0.020\sim 0.043\text{ cm}^{-1}$ 。超滤 1 系统对炭滤池出水中 UV_{254} 的去除率为 19.5%。由于超滤膜孔径在 $3\sim 100\text{ nm}$,能截留分子质量介于 $1\sim 500\text{ ku}$ 之间的物质^[12],因此超滤膜对 UV_{254} 的去除机理主要是物理截留。但活性炭预处理去除了水中大多数较大分子的有机物,因此从数据上看超滤对 UV_{254} 的截留去除效果一般。

两套纳滤系统出水 UV_{254} 均稳定在 0.010 cm^{-1} 以下,对 UV_{254} 的去除率分别为 93.24% 和 94.51%。纳滤膜的孔径一般为 $1\sim 2\text{ nm}$,其截留分子质量介于反渗透膜和超滤膜之间,约为 $100\sim 2\,000\text{ u}$ ^[12],因此可以进一步截留分子质量小于 $2\,000\text{ u}$ 的有机物。

与其他季节双膜系统对 UV_{254} 的去除效果相比,低温低浊对双膜系统去除 UV_{254} 的影响不大。

2.1.3 TDS 的变化

根据相关研究可知^[12],臭氧-活性炭滤池与超滤膜对 TDS 的去除率较低,故在此不再分析二者对 TDS 的去除效果。在低温期原水的 TDS 基本稳定在 90 mg/L 左右,最高为 119.5 mg/L (见图 3)。经过水厂混凝、沉淀处理后,中试进水 TDS 普遍高于原水,原因是水厂采用 PAC 作为混凝剂,有一部分细小矾花不能沉淀而流出。

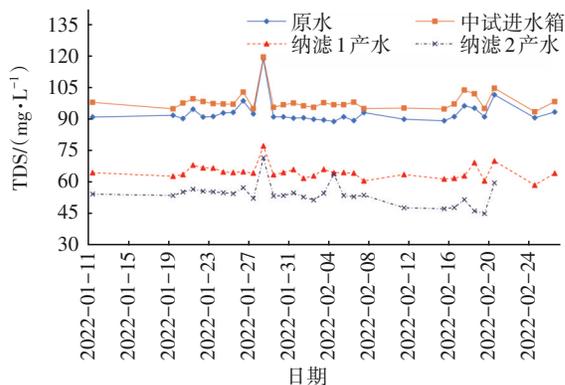


图 3 低温低浊期 TDS 的变化

Fig.3 Change in TDS at low temperature and low turbidity period

臭氧-活性炭池、超滤 1 和超滤 2 出水 TDS 均值分别为 98.0 、 98.0 和 97.4 mg/L ,对 TDS 基本没有去除效果,原因是 TDS 主要由水中离子浓度决定,水中细小的悬浮物由于粒径较小,无法被活性炭滤池和超滤膜有效截留。

两套系统中的纳滤膜对 TDS 的去除效果较好,变化趋势也基本一致。纳滤 1、2 产水的 TDS 变化范

围分别为 $58.45\sim 77.05$ 、 $44.90\sim 71.40\text{ mg/L}$,均值分别为 64.39 、 54.55 mg/L ,去除率分别达到 34.3% 和 44.8%,表明纳滤膜对 TDS 具有极好的去除效果。原因在于纳滤膜孔径较小,可以通过截留等去除部分较为细小的悬浮物和一些高价态的离子,有效降低出水 TDS。

2.1.4 SDI 的变化

低温低浊期超滤系统出水的 SDI 基本稳定在 $0.05\sim 1.5$ 左右(见图 4),明显低于其他季节的 $0.1\sim 4.8$,原因是 SDI 值受温度影响较大,随温度增高而增大,随温度下降而减小。低温低浊期温度低,膜透水性较其他季节弱,15 min 内通过膜片的水量减少,膜片相应会截留更少的污染物质,流速衰减得更慢,SDI 值减小。另外水中的有机物含量也对 SDI 值有影响,低温低浊期超滤产水的有机物含量较其他时间更低,故 SDI 值也较其他时间更低。

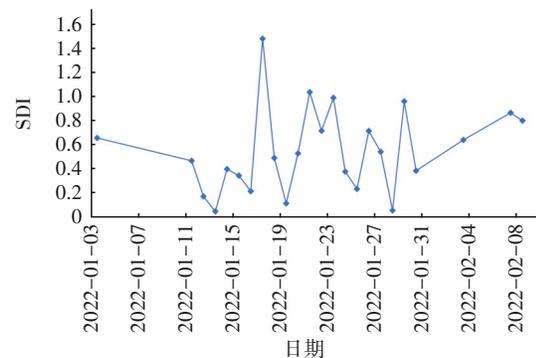


图 4 低温低浊期 SDI 的变化

Fig.4 Change in SDI at low temperature and low turbidity period

2.2 双膜系统运行跨膜压差的变化

低温低浊期中试系统通过控制提升泵频率保持膜通量一定,观察膜装置运行压力随时间的变化。在历时 45 d 的运行中,超滤跨膜压差从 35 kPa 缓慢升至 40 kPa ,增长率仅为 14.3%,小于维护性清洗所规定的 100 kPa 要求,因此在运行期间并未对超滤膜进行维护性清洗,只需进行正常反冲洗,超滤装置就可以稳定运行较长时间。

虽然两套纳滤膜由不同的厂家生产,但性能相同,故只分析纳滤 1 的运行压力变化情况,结果见图 5。可以看到,纳滤 1 的进水压力随进水水质变化有所波动,随着装置运行,膜污染有所累积,进水压力逐渐上升,各段进水压力分别上升了 6.3%、3.9% 和 3.3%,远小于化学清洗所要求的 15%。与此同时纳

滤1的一段到二段跨膜压差(跨膜压差1-2)和二段到三段的跨膜压差(跨膜压差2-3)分别上升了7 kPa和5 kPa,运行较为稳定,膜污染积累速度缓慢。因此在低温低浊运行期间,并不需要进行纳滤膜的化学清洗,只需要在正常运行过程中投加相应的还原剂与阻垢剂,纳滤系统就可长时间稳定运行。

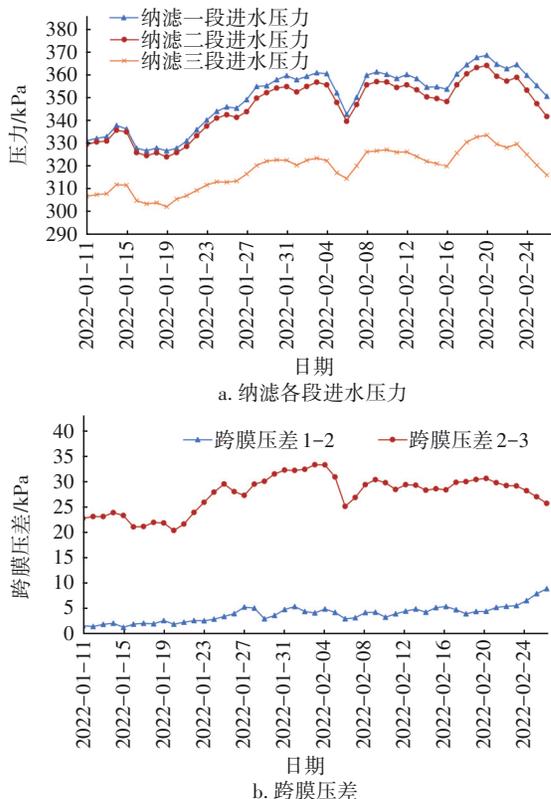


图5 纳滤膜运行压力与跨膜压差的变化

Fig.5 Change in operating pressure and transmembrane pressure of nanofiltration membrane

3 结论

① 在低温季节,梁子湖原水的浊度、 UV_{254} 与TDS等较其他季节要低很多。超滤膜对浊度和 UV_{254} 的去除效果稳定,不受水温影响。超滤系统出水浊度 <0.2 NTU,达到武汉市企标要求(<0.3 NTU)。但超滤对 UV_{254} 与TDS的去除率较低,原因在于活性炭预处理已经去除了大部分大分子有机物,而超滤膜孔径较大,对有机物的去除效果并不明显,且无法有效截留水中离子,因此无法降低TDS。

② 纳滤系统可进一步去除超滤出水中的浊度,出水浊度稳定在0.1 NTU左右;纳滤出水 UV_{254} 均稳定在 0.010 cm^{-1} 以下,对 UV_{254} 的去除率达到93.24%,与其他季节相比,低温对纳滤膜去除 UV_{254} 的影响不大。两套系统中的纳滤膜对TDS的去除

率均在20%以上。

③ 在低温低浊期运行的45 d内,超滤膜与纳滤膜的跨膜压差均未达到化学清洗压差要求,无需进行化学清洗。

④ 在低温低浊期,双膜法工艺可直接处理后水,而不需要使用滤后水作为进水,从而节省运行费用;超滤膜只需进行正常的反冲洗,纳滤膜只需投加还原剂与阻垢剂,双膜系统即可在较长时间内保持较高的膜通量且运行稳定。

参考文献:

- [1] 汪志永,戴红玲,周政,等. 低温低浊水处理技术的研究与应用[J]. 水处理技术,2016,42(10):20-23.
WANG Zhiyong, DAI Hongling, ZHOU Zheng, et al. Research and application of low temperature and low turbidity water treatment technology [J]. Technology of Water Treatment, 2016,42(10):20-23(in Chinese).
- [2] ZHANG P, LIAO L, ZHU G. Performance of PATC-PDMAAC composite coagulants in low-temperature and low-turbidity water treatment [J]. Materials, 2019, 12(17):2824.
- [3] 王建伟,孙力平,姜春杰,等. 再生水泥渣回流强化混凝沉淀工艺研究及影响因素分析[J]. 水处理技术,2009,35(7):80-82.
WANG Jianwei, SUN Liping, JIANG Chunjie, et al. Study on enhanced coagulation/sedimentation process by recycling sludge for regenerate water reuse [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(7):80-82(in Chinese).
- [4] 时玉龙,罗从伟,马军,等. 壳聚糖促进气浮工艺处理低温低浊淮河原水[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(8):27-32.
SHI Yulong, LUO Congwei, MA Jun, et al. Dissolved air flotation process promoted by chitosan for treatment of low temperature and low turbidity of Huaihe River raw water [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018,50(8):27-32(in Chinese).
- [5] 刘国才. 悬浮球填料接触絮凝工艺用于处理低温低浊水[J]. 中国给水排水,2012,28(20):109-111.
LIU Guocai. Suspended ball-filler contact flocculation process for low-temperature and low-turbidity water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(20):109-111(in Chinese).
- [6] 刘晓军,王启山,张怡然,等. 预臭氧化工艺处理低温低浊水的应用研究[J]. 水处理技术,2013,39(5):

- 73-75.
- LIU Xiaojun, WANG Qishan, ZHANG Yiran, *et al.* Application research on pre-ozonation for treatment of low temperature and low turbid water [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(5):73-75(in Chinese).
- [7] 王涛,张俊,王坪,等. 基于高效絮凝沉淀池与翻板滤池组合工艺的工程案例[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(3):1043-1050.
- WANG Tao, ZHANG Jun, WANG Ping, *et al.* Engineering case based on the combination process of high-efficiency flocculation sedimentation tank and shutter filter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(3):1043-1050(in Chinese).
- [8] 王安爽,李梅,王永磊,等. 混凝气浮与混凝沉淀工艺处理低温低浊水水库水试验对比[J]. *工业安全与环保*, 2015, 41(10):7-9.
- WANG Anshuang, LI Mei, WANG Yonglei, *et al.* Test comparison between coagulation-DAF and coagulation-sedimentation processes for treatment of low temperature and turbidity reservoir water [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2015, 41(10):7-9 (in Chinese).
- [9] 傅金祥,卢善文,曲明,等. 超滤膜直接过滤处理低温低浊水的试验[J]. *净水技术*, 2014, 33(5):68-72.
- FU Jinxiang, LU Shanwen, QU Ming, *et al.* Experiment of water treatment of direct filtration under low temperature and low turbidity with ultrafiltration membrane process [J]. *Water Purification Technology*, 2014, 33(5):68-72 (in Chinese).
- [10] 王佳,陈钊宇,杨平. 膜法处理低温低浊水技术综述[J]. *资源开发与市场*, 2011, 27(10):874-876.
- WANG Jia, CHEN Zhaoyu, YANG Ping. Review of water treatment for low temperature and low turbidity by using membrane technology[J]. *Resources Development & Market*, 2011, 27(10):874-876(in Chinese).
- [11] 高佩玥,叶辉,张东,等. 饮用水厂中试生物活性炭柱启动期判定指标[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(15):43-49.
- GAO Peiyue, YE Hui, ZHANG Dong, *et al.* Evaluation index of startup period of pilot-scale biological activated carbon filter in drinking water treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(15):43-49 (in Chinese).
- [12] ANG W L, MOHAMMAD A W, 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.

作者简介:田若(1986-),女,湖北武汉人,硕士,工程师,主要研究方向为市政给排水运营管理、技术创新等。

E-mail:25572658@qq.com

收稿日期:2023-03-09

修回日期:2023-04-26

(编辑:李德强)

全面推进水生态环境保护和修复 打造水清岸绿、河畅湖美的美丽家园