

水源与饮用水保障

肖峰, 张新宏, 魏月华, 等. 污泥脱水液回流对引江水超滤处理工艺的影响分析[J]. 净水技术, 2024, 43(10): 57-65, 143.

XIAO F, ZHANG X H, WEI Y H, et al. Analysis of impact of dewatered sludge filtrates on UF treatment process for river raw water[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 57-65, 143.

污泥脱水液回流对引江水超滤处理工艺的影响分析

肖峰¹, 张新宏², 魏月华^{1,*}, 张凤涛¹, 田家宇²

(1. 天津市自来水集团有限公司, 天津 300381; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要 水厂排泥水处理过程中会产生大量的污泥脱水液。为避免南水北调引江水资源的浪费, 同时积极推进水厂的“零排放”建设目标, 面向以引江水为水源的超滤处理工艺, 评价了将污泥脱水液回流至原水池进行稀释回用的可行性。考察了不同污泥脱水液/引江原水混合比例下超滤系统的运行特性, 发现当污泥脱水液适当稀释后, 其对超滤净水效果和膜污染的影响急剧降低, 当稀释比例达到 1:800 时, 出水水质与跨膜压增长曲线已接近引江原水直接超滤的情况。试验中引江原水的跨膜压增长速率为 19.7 kPa/d, 而污泥脱水液原液则达到 25.8 kPa/d。当两者以 1:800 比例稀释后, 跨膜压增长速率下降为 21.3 kPa/d, 接近于引江原水。膜表面微观表征结果显示随着稀释比例的提高, 滤饼层厚度、溶解性有机物、特征官能团红外峰强、污染元素相对质量分数均显著降低, 逐渐下降到与原水直接超滤相近的水平。引江原水组的超滤膜滤饼层厚度为 1.77 μm , 而污泥脱水液原液组的滤饼层厚度为 4.00 μm , 污染程度较重。两者按 1:800 比例稀释后的滤饼层厚度降低至 1.82 μm , 污染程度显著降低。研究结果可为南水北调受水城市超滤水厂的“零排放”建设提供参考。但值得注意的是, 污泥脱水液的合理处置与利用问题目前仍处于起步和探索阶段, 未来仍需从水质生物安全性和化学安全性的角度加以系统评估。同时可考虑氧化、吸附、微滤分离等预处理手段, 以提高污泥脱水液回用过程的安全性。

关键词 引江原水 污泥脱水液 超滤 膜污染 回流

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)10-0057-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.10.007

Analysis of Impact of Dewatered Sludge Filtrates on UF Treatment Process for River Raw Water

XIAO Feng¹, ZHANG Xinhong², WEI Yuehua^{1,*}, ZHANG Fengtao¹, TIAN Jiayu²

(1. Tianjin Waterworks Group Co., Ltd., Tianjin 300381, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract A large amount of dewatered sludge filtrates is produced during the sludge treatment in water treatment plant (WTP). In order to avoid the waste of the river raw water in the South-to-North water diversion project, and actively promote the "zero discharge" construction goal of the WTP, the feasibility of recycling the sludge dewatering liquid to the raw water pool for dilution and reuse was evaluated towards the ultrafiltration (UF) using river water as the resource. The operation characteristics of the UF membrane under different sludge dewatering liquid/river raw water mixing ratio were investigated. It was found that when the sludge dewatering liquid was properly diluted, its influence on the UF effluent water qualities and membrane fouling was sharply reduced. When the dilution ratio reached to 1:800, the effluent water quality and transmembrane pressure growth curve was close to the situation of direct UF of river raw water. In this test, transmembrane pressure growth rate of river raw water was 19.7 kPa/d, while the sludge dewatering liquid

[收稿日期] 2024-05-10

[基金项目] 国家自然科学基金(52370035);天津水务集团课题(2023KY-09)

[作者简介] 肖峰(1981—),男,硕士,高级工程师,研究方向为膜法饮用水处理技术,E-mail: 18897409@qq.com

[通信作者] 魏月华(1988—),女,硕士,高级工程师,研究方向为水厂运行管理优化,E-mail: yuehua.wei@tjce.com。

reached 25.8 kPa/d. When the two diluted at the ratio of 1 : 800, the transmembrane pressure growth rate decreased to 21.3 kPa/d, which was close to river raw water were 21.3 kPa/d, which was close to river raw water. The characterization results of membrane surface showed that with the increase of dilution ratio, the thickness of cake layer, dissolved organic matter in cake layer, the infrared peak intensity of characteristic functional groups, and the relative mass fraction of fouling elements were decreased significantly, and gradually dropped to a level similar to that of direct UF of raw water. The thickness of ultrafiltration membrane cake layer in raw water group was 1.77 μm , while the thickness of cake layer in sludge dewatering liquid group was 4.00 μm , and the pollution degree was heavier. The thickness of the cake layer was reduced to 1.82 μm after the two were diluted at the ratio of 1 : 800, and the pollution degree was significantly reduced. The research results can provide reference for the "zero discharge" construction of ultrafiltration WTP in cities receiving water from the South-to-North water diversion project. However, it is worth noting that the rational disposal and utilization of sludge dewatering liquid is still in the initial and exploratory stage, and it needs to be systematically evaluated from the perspective of water quality biosafety and chemical safety in the future. At the same time, pretreatment methods such as oxidation, adsorption and microfiltration separation can be considered to improve the safety of sludge dewatering liquid reuse process.

Keywords river raw water dewatered sludge filtrate ultrafiltration (UF) membrane fouling backflow

以地表水为水源的水厂在制水过程中会产生占总水量 3%~8%的排泥水,主要为来自絮凝、沉淀单元和过滤单元的生产废水^[1-2]。在水资源短缺和水环境污染形势日益严峻的背景下,我国各个水司竞相开展了排泥水直接/间接回用的研究与实践,有效提高了水资源的利用效率,已成为供水行业实现节能降耗目标的一条重要途径^[3-6]。对于水源水质较好的水厂,研究人员也考察了排泥水直接回用的可行性。童祯恭等^[3]发现,将排泥水在控制回流比例条件下与原水混合,沉淀后水的浊度、氨氮等指标均符合出水水质标准。陈停等^[7]的研究结果也表明对于低浊水源水,生产废水直接回用可起到强化混凝的作用,且不会恶化出水水质,不会造成水质安全性的下降。然而,为避免污染物的积累,我国大多水厂针对排泥水的处理通常采用“调节→浓缩→脱水→污泥处置”工艺^[5]。其中,浓缩池上清液往往通过回流至水厂净水单元得以再利用;而污泥脱水液则大多直接排入下水道,仅个别水厂尝试将其回流至排泥水收集池进行循环利用^[8-10]。随着我国生态文明建设的持续推进,“零排放”已是水厂未来提标改造的大势所趋,而水厂污泥脱水液的合理处置与利用则是供水行业实现“零排放”环保目标,也是进一步节能、降耗的重要措施。

自 2014 年开始投入运行的南水北调工程为北方缺水城市输送了宝贵的长江水资源,不仅在“水量”上保障了广大北方居民的饮用水安全,更为重要的是,所引长江水(引江水)的水质也非常好。由于引江水中有机物、重金属、藻类等污染物的含量较低,排泥水浓缩处理单元的上清液往往可直接回流

至水厂原水池,经引江原水稀释后再次进入到制水环节。排泥水的脱水处理单元除获得高含固率的污泥外,还会产生一定量的污泥脱水液。以 30 万 m^3/d 规模的水厂为例,每年污泥脱水液产生量在 20 万~30 万 m^3 ,目前通常是将其排入下水道,长期来看不仅会对环境造成污染,同时也会对南水北调水资源造成严重浪费。

超滤技术可有效保障饮用水的生物安全性^[1,4,8]。据统计,目前我国各地已建有超 100 座处理规模大于 1 万 t/d 的超滤水厂,其中包括天津、北京、郑州、石家庄等多座南水北调受水城市。对于以引江水为水源的超滤水厂而言,排泥水处理中产生的污泥脱水液是否也可回流至原水池再利用以进一步提高水资源利用率,其对净水水质以及超滤膜污染会产生怎样的影响。本文围绕以上问题,采用引江原水、污泥脱水液以及两者的混合液开展了系统研究,研究结果可为南水北调沿线城市超滤水厂的运行管理决策以及“零排放”建设提供借鉴与参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用水取自天津某水厂,试验进水分别为:引江水原水、污泥脱水液与引江水混合液(混合比例分别为 1 : 800、1 : 80)、污泥脱水液原液,对应的 4 组反应器分别命名为 A1、A2、A3、A4。超滤膜为聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜,孔径为 0.02 μm ,膜使用前在超纯水中浸泡 24 h。

本试验采用浸没式膜过滤装置,4 组反应器平行运行,每组反应器设置有进水箱、超滤膜池、压力传感器、无纸记录仪和蠕动泵,蠕动泵上安装自动反

冲洗模块,具体如图 1 所示。

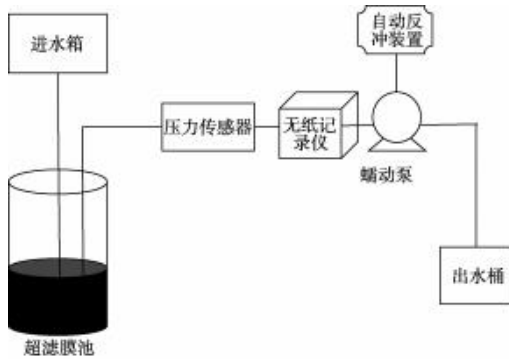


图 1 浸没式超滤系统试验装置

Fig. 1 Experimental Set-Up for Immersed UF System

1.2 试验过程

超滤膜在 $40 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的恒通量下运行,采用抽吸 2 h/反冲洗 5 min 的操作方式,用无纸记录仪记录跨膜压(TMP)随时间的变化情况。每隔 3 d 采用次氯酸钠溶液(500 mg/L)对超滤膜进行化学清洗^[11]。每天对进水以及超滤后的出水水质进行监测,试验结束后对受污染膜样品进行表征分析。

1.3 膜污染阻力

根据串联阻力模型计算不同膜阻力的分布,具体计算如式(1)~式(2)^[12]。

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_c + R_p)} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_r + R_{ir})} \quad (1)$$

$$R_t = R_m + R_c + R_p = R_m + R_r + R_{ir} \quad (2)$$

其中: J ——膜通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;

ΔP ——跨膜压差, Pa;

μ ——动力黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

R_t ——总过滤阻力, m^{-1} ;

R_m ——膜的固有阻力, m^{-1} ;

R_c ——滤饼层阻力, m^{-1} ;

R_p ——膜孔堵塞阻力, m^{-1} ;

R_r ——可逆污染阻力, m^{-1} ;

R_{ir} ——不可逆污染阻力, m^{-1} 。

1.4 分析方法

水样的总有机碳(TOC)质量浓度采用总有机碳分析仪(TNM-LROHS,日本岛津)检测;浑浊度采用浊度仪(2100Q型便携式浊度仪,上海世禄仪器有限公司)测定; UV_{254} 采用紫外-可见分光光度计(UV-5800,上海元析仪器有限公司)检测;金属元素含量采用原子吸收分光光度法进行分析;聚丙烯酰胺(PAM)浓度采用文献方法^[13-14]测定。同时,采用扫描电子显微镜(SEM, S4800,日本日立)对污染膜的微观形貌进行观察,采用傅里叶变换红外光谱仪(FTR, INVENIO S,布鲁克光谱仪器公司)对膜表面官能团进行分析。

2 结果与讨论

2.1 超滤净水效果分析

一般而言,超滤水厂在超滤处理单元之前均设置有混凝、沉淀/澄清、砂滤等预处理环节,以有效去除水中的颗粒物、有机物等污染物质并缓解后续超滤单元的膜污染问题^[15-16]。为更加清晰地揭示污泥脱水液回流对超滤工艺净水效果以及膜污染的影响,本文在“直接超滤”的极端条件下开展了试验研究工作,表 1 展现了 4 种不同进水水质背景下超滤膜的污染物去除情况。

表 1 超滤进出水水质

Tab. 1 Water Qualities of UF Influent and Effluent

水样	浑浊度/NTU	TOC/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$UV_{254}/(\text{cm}^{-1})$	Fe/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	Al/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	Ca/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	TDS/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	PAM/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
A1 进水	1.20±0.12	5.50±0.24	3.75±0.22	0.20±0.03	15.0±8.0	28.0±2.5	135.0±3.4	0
A2 进水	1.30±0.15	6.27±0.29	3.86±0.17	0.23±0.03	18.0±9.0	29.0±2.8	139.0±2.2	0.28±0.08
A3 进水	1.50±0.14	6.51±0.27	3.92±0.28	0.25±0.03	20.0±8.0	32.0±3.0	143.0±3.9	0.73±0.14
A4 进水	9.10±1.24	30.00±0.49	9.45±0.76	0.40±0.04	80.0±15.0	40.0±3.9	199.0±4.6	7.59±0.27
A1 出水	0.18±0.01	3.32±0.34	3.21±0.16	0.15±0.01	10.0±4.0	20.0±1.2	128.0±2.4	0
A2 出水	0.20±0.01	3.52±0.32	3.27±0.11	0.17±0.02	12.0±5.0	20.0±3.1	130.0±2.6	0
A3 出水	0.22±0.02	3.85±0.21	3.28±0.11	0.18±0.02	18.0±5.0	22.0±2.7	135.0±2.3	0
A4 出水	0.40±0.02	10.54±0.46	5.08±0.49	0.24±0.02	25.0±8.0	25.0±2.3	190.0±3.2	0

由表 1 可知,水厂引江水原水水质较好,其浑浊度为 1.20 NTU, TOC 为 5.50 mg/L, UV_{254} 为 3.75

cm^{-1} 。而污泥脱水液中则富集了一定的污染物,浑浊度、TOC、 UV_{254} 分别为 9.10 NTU、30.00 mg/L

和 9.45 cm^{-1} 。根据水厂的实际情况,将污泥脱水液与引江原水按 1:800~1:80 的比例进行混合。由表 1 可知,经稀释后水中污染物的浓度与引江原水相比呈现出按混合比例升高的趋势。超滤膜分离对进水中的颗粒物和有机物均表现出优异的去除效果,A2 和 A3 出水中的浊度、TOC、 UV_{254} 值仅略高于 A1 出水,特别是稀释比例较高的 A2 反应器,其出水污染物浓度与 A1 相比差异并不显著。但对于污泥脱水液原液而言,其超滤后出水中的污染物含量则明显高于其他进水条件。以上结果说明污泥脱水液原液难以通过简单的超滤处理直接进行回用,但与原水按适当比例混合之后,则并不会对出水水质造成明显影响。

污泥浓缩脱水过程中通常使用 PAM 作为高分子絮凝剂,其残留情况是影响污泥脱水液回用的另一个关键因素。如表 1 所示,引江原水中不含 PAM,污泥脱水液原液中 PAM 残余量较高,达到了 7.59 mg/L ,但经与引江原水按 1:80、1:800 比例稀释后,PAM 质量浓度迅速下降至 0.73 mg/L 和 0.28 mg/L 。且经超滤工艺处理后,出水 PAM 质量浓度均为 0,即超滤工艺可凭借其优异的膜孔筛分能力将 PAM 完全截留,进而有效保障出水的水质

安全。

2.2 跨膜压变化

除净水效果外,膜污染也是超滤水厂优化运行与管理策略的一个重要考量因素。图 2、图 3 显示了 4 组反应器在连续运行期间 TMP 的变化情况。图 2 为一个化学清洗周期内的 TMP 增长曲线,运行过程中每 2 h 对超滤膜进行一次水力反冲洗。可以清晰地看出,以污泥脱水液原液为进水的 A4 中超滤膜 TMP 增长最为迅速,仅 2 h 就从 10 kPa 增长到 58 kPa ,经过反冲洗之后,TMP 下降到 18 kPa ;之后的运行中,最高 TMP 值仍然稳步上升(最终稳定在 76 kPa),同时水力反冲洗恢复效率也越来越低,表明污泥脱水液原液中含有较多的造成超滤膜可逆和不可逆膜污染的物质。另一方面,A1、A2、A3 中超滤膜的 TMP 增长规律与 A4 完全不同:其在开始的 2 h 内,TMP 并未有明显增长,随着运行时间的延长,TMP 呈现出缓慢上升的趋势,在大约 60 h 后,TMP 增长趋于稳定,A1、A2、A3 的最高 TMP 分别为 58 、 63 、 68 kPa 。与此同时,运行过程中水力反冲洗效率也仅出现了小幅下降,表明 A1、A2、A3 进水中的污染物以引起超滤膜的可逆污染为主,可通过水力反冲洗有效控制。此外,随着污泥脱水液在原水

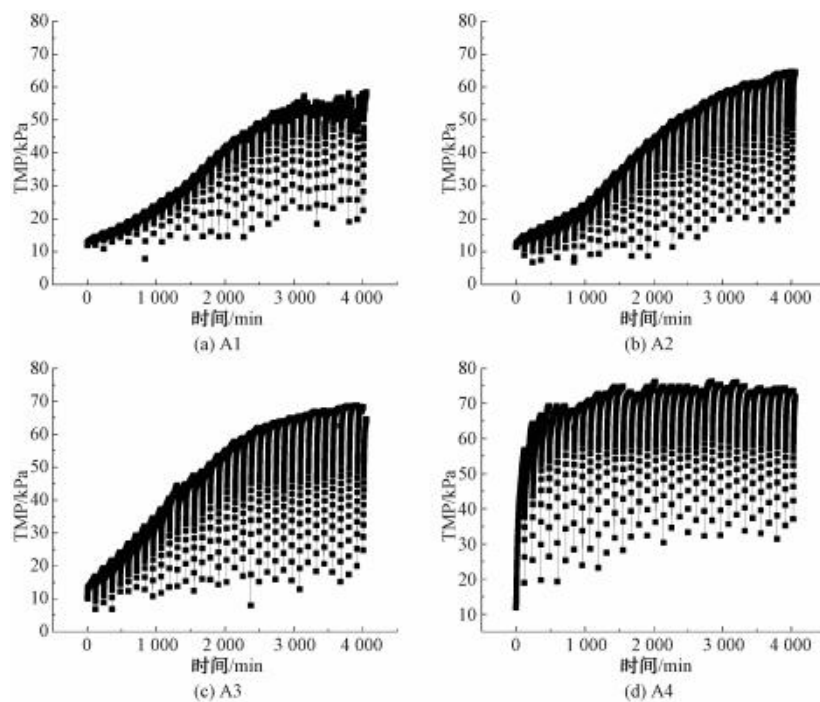


图 2 一个化学清洗周期内超滤膜 TMP 变化

Fig. 2 TMP Variation of UF Membrane during One-Cycle Chemical Cleaning Operation

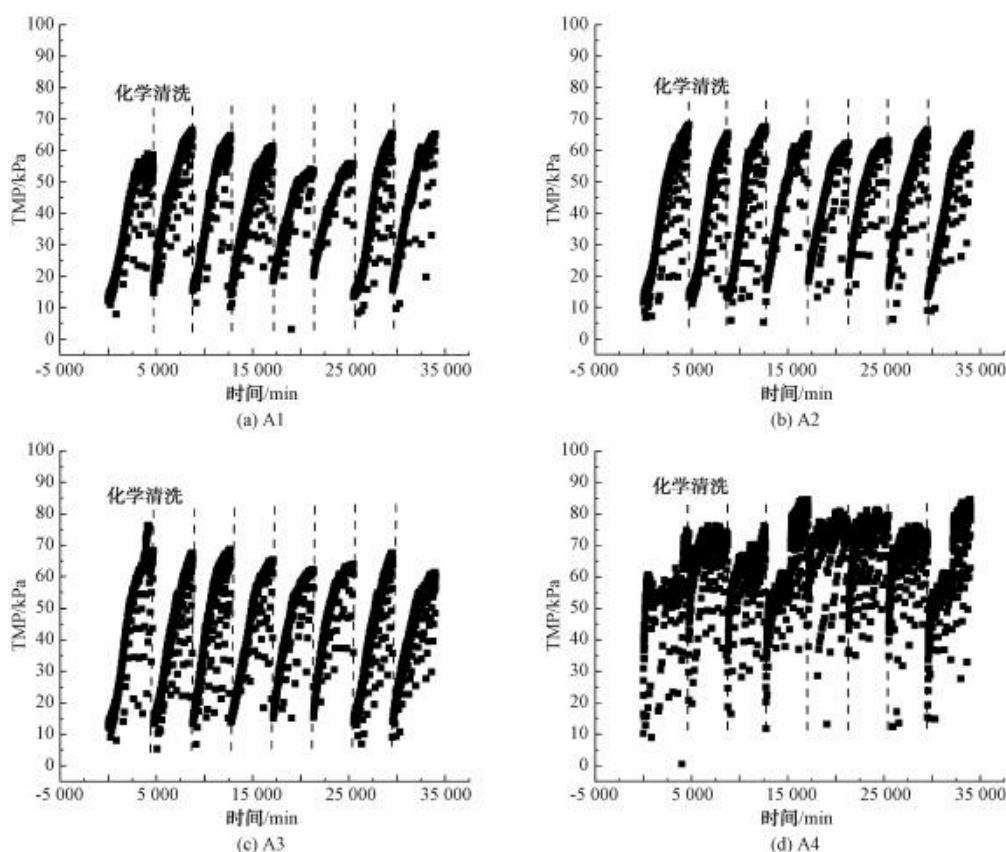


图3 多周期连续运行下超滤膜的 TMP 变化曲线

Fig. 3 Curve of TMP Variation of UF Membrane during Multi-Cycle Continuous Operation

中的稀释比例由 1 : 80 提高到 1 : 800,最高 TMP 值和 TMP 增长速率均可进一步降低,且由图 3 可知,当稀释比例达到 1 : 800 后,A2 的 TMP 增长曲线变得与引江原水 A1 非常接近,表明当稀释比例足够高时,污泥脱水液回流至原水池不会对超滤膜污染造成明显的负面影响。

图 3 为 4 组超滤反应器多周期连续运行情况下的 TMP 变化趋势。在此期间,每 3 d 用次氯酸钠对超滤膜进行化学清洗以去除膜上累积的不可逆污染物,共计运行 8 个化学清洗周期。可见,A4 反应器的超滤膜 TMP 始终在高位徘徊,TMP 增长速率平均高达 25.8 kPa/d;相比之下,A1~A3 超滤膜运行状态平稳,各个化学清洗周期内 TMP 增长均较为缓慢,3 组反应器的平均 TMP 增长速率分别为 19.7、21.3、22.8 kPa/d。与此同时,次氯酸钠化学清洗对 A4 超滤膜的化学清洗效率在第 3 个周期后开始降低(平均恢复率为 84.6%),可能是不可逆污染物过度累积的缘故。而对于 A1~A3 超滤膜,次氯酸钠清洗始终能起到良好的不可逆污染控制效果,3 组

反应器的化学清洗效率均达 90% 以上,说明污泥脱水液与原水按适当比例混合后对超滤膜化学清洗效果的影响不大。

2.3 膜污染阻力分布

为了进一步探究不同进水条件下的膜污染特性,对一个周期内 4 组反应器的膜污染阻力分布情况进行了分析^[17]。如图 4(a) 所示,超滤膜的总阻力 R_t 、孔堵塞阻力 R_p 和滤饼层阻力 R_c 均随污泥浓缩液在进水中所占比例的增大而逐渐增加,特别是孔堵塞阻力,A4 膜比 A1 膜提高了 37.9% ($P < 0.01$);但当稀释比例达到 1 : 800 时,A2 膜与 A1 膜的 R_p 差异不再明显 ($P = 0.245$)。由图 4(b) 可知,超滤过程中形成的膜污染以可逆污染为主,当污泥浓缩液在进水中所占比例提高时, R_t 值呈现出逐渐上升的趋势,同时不可逆膜污染问题也随之加剧,A4 膜的 R_{ir} 与 A1、A2、A3 相比分别提高了 86.7%、73.3%、66.7% ($P < 0.01$)。出现上述现象的原因主要是污泥浓缩液中富集了不同类型的污染物,一方面在膜表面形成更为厚实的滤饼层加剧可逆污染;另一方

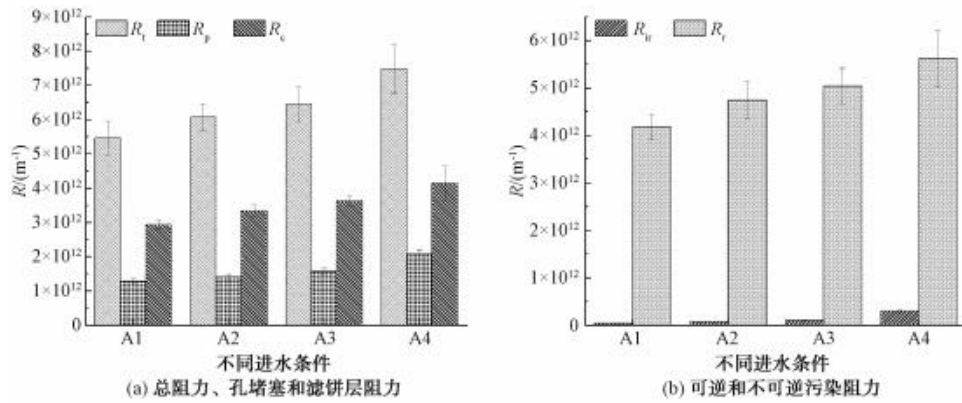


图4 4组反应器的膜污染阻力分布

Fig. 4 Resistance Distribution of Membrane Fouling in Four Reactors

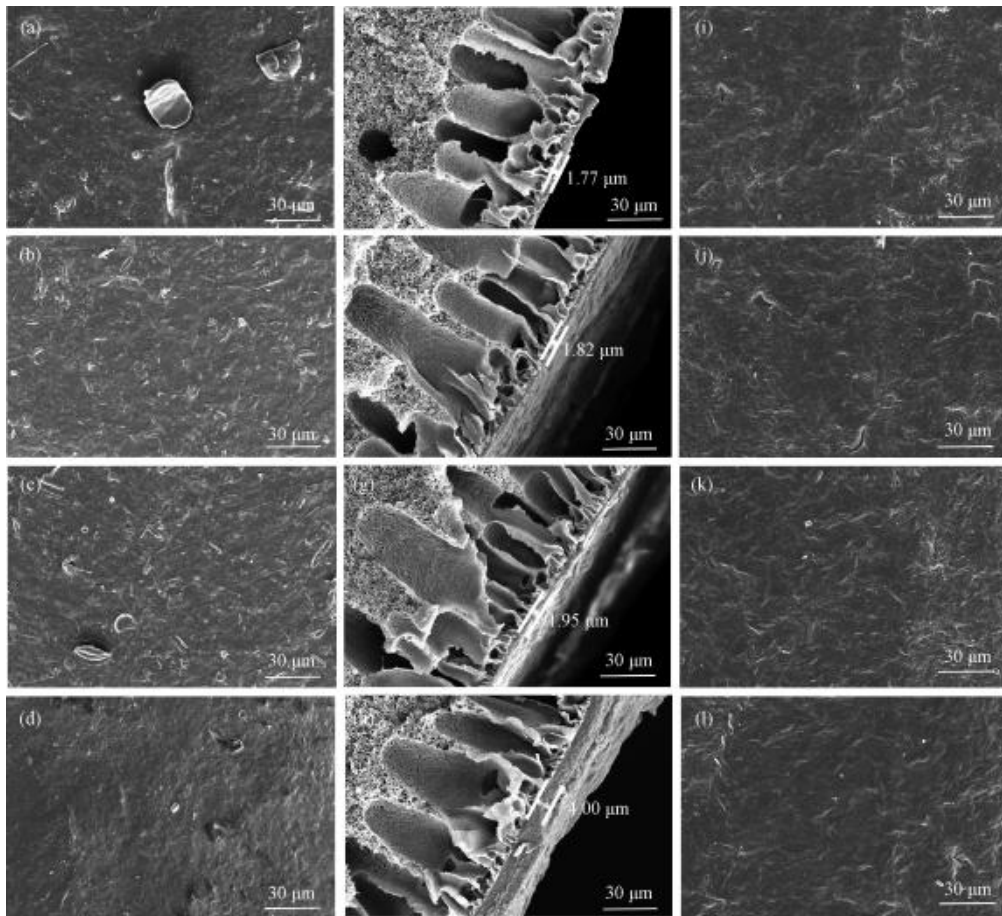
面也有较多的小分子有机物在超滤过程中进入膜孔,形成不可逆性较强的孔内堵塞污染^[18]。

2.4 污染层表征分析

2.4.1 污染层形态结构分析

污染后和化学清洗后膜表面及断面的微观形貌

如图5所示。可以看出,污染后的膜表面均被一层污染层所覆盖,其上面还分布着一些尺寸较大的颗粒性物质,可能是水体本身存在的悬浮物在膜表面截留导致的。通过对比可以发现,A1、A2、A3膜表面的滤饼层平滑、松散,而A4表面形成的滤饼层粗



注:(a)~(d)A1~A4污染后膜表面;(e)~(h)A1~A4污染后膜断面;(i)~(l)A1~A4化学清洗后膜表面。

图5 SEM图

Fig. 5 SEM Images

糙、致密,表明 A4 膜产生了更为严重的膜污染。通过断面 SEM 图对滤饼层厚度进行测量,可见 A4 膜滤饼层厚度高达 4.00 μm ,明显高于 A1 的 1.77 μm 、A2 的 1.82 μm 和 A3 的 1.95 μm 。此结果也进一步说明污泥浓缩液经原水适当稀释后,其对超滤膜污染的影响显著降低,且稀释比例为 1 : 800 的 A2 膜滤饼层厚度非常接近于引江原水直接过滤的 A1 膜。经过化学清洗后,膜表面及断面滤饼层基本消失,暴露出膜表面的原始形貌。因此,可认为化学清洗可以有效清除膜表面污染物,污泥浓缩液按适当比例回流并不会对化学清洗过程产生严重负面影响。

2.4.2 膜表面溶解性有机物(DOM)分析

DOM 是造成膜污染的关键性物质^[19-20],研究中对于 4 组膜表面的滤饼层进行提取,以蛋白、多糖、溶解性有机碳(DOC)为典型指标^[21],分析了不同进水条件下膜表面 DOM 的变化规律。已有研究^[22]表明,蛋白质类物质浓度与膜污染速率正相关,蛋白质浓度越大,膜污染越严重;而多糖属于高黏性物质,其在膜表面的积累会造成复合膜污染效应,加剧膜的可逆和不可逆污染。如图 6 所示,以污泥浓缩液原液为进水的 A4 膜表面所积累的 DOC($P < 0.01$)以及蛋白质($P < 0.05$)、多糖($P < 0.01$)显著高于其他 3 组,这与其较高的 TMP 增长速率具有较好的一致性。污泥浓缩液稀释比例较低(1 : 80)的 A3 膜表面同样呈现出较高的 DOM;而当稀释比例提高到 1 : 800 之后,A2 膜表面的 DOM 明显降低,与引江原水直接过滤的 A1 膜差异不再明显。

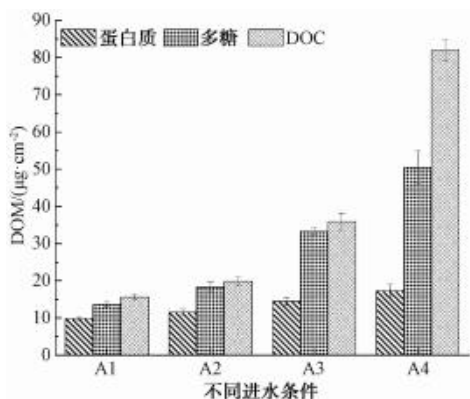


图 6 不同进水条件下膜表面蛋白质、多糖、DOC 的变化

Fig. 6 Changes of Protein, Polysaccharide and DOC on Membrane Surface under Different Influent Conditions

2.4.3 膜表面官能团分析

采用 FTIR 分析膜表面污染层的特征官能团,

结果如图 7 所示。原膜存在 3 个明显的特征峰: 1 402 cm^{-1} 附近是 C—F 的变形振动吸收峰,1 176 cm^{-1} 附近是 C—F 的伸缩振动吸收峰^[23],840 cm^{-1} 处是 PVDF 无定形态的特征吸收峰。在超滤过程中被污染之后,膜表面出现了多个新的特征峰,其中 3 280、2 930、1 034 cm^{-1} 处是与多糖类化合物相关的特征峰,1 640~1 610 cm^{-1} 的特征峰是由蛋白质酰胺二级结构中的 C=O 伸缩振动引起的,与蛋白质类物质的含量密切相关。从特征峰的强度来看,峰强排列顺序为 A4>A3>A2 \approx A1,这一结果与前面的分析结果较为相符。

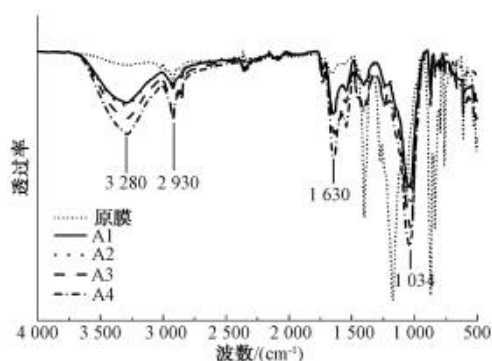


图 7 原始膜和污染膜的 FTIR

Fig. 7 FTIR of Original and Fouled UF Membranes

2.4.4 膜表面元素组成

进一步采用 EDX 对膜表面污染层的元素组成进行分析,结果如表 2 所示。原膜主要由 C、O、F 3 种元素组成,其中 F 元素主要来自于 PVDF 膜材质本身。在反应器中运行之后,膜表面被污染物覆盖,F 质量分数明显降低,而 O、N 的相对质量分数显著提高。O、N 是有机污染物的重要组成元素,这一结果表明膜面污染层中含有大量有机物、特别是含氮有机物(如图 6 中检测的蛋白质类物质)。与此同时,A4 污染膜表面的 F 质量分数低于 A1、A2、A3,而其 N 质量分数则高于 A1、A2、A3,这可能与 A4 膜更为严重的膜污染有关。此外,Fe、Ca、Al 等无机元素也可通过络合、交联等效应参与到膜污染中,表 2 显示各组膜的表面在污染之后均出现了这 3 种元素,而 A4 膜表面的相对质量分数显著高于 A1、A2、A3。结合表 1 的水质分析可知,污泥脱水液中存在较高浓度的 Fe、Ca、Al 元素,其在过滤过程中起到了加剧膜污染的作用。化学清洗后,4 组膜表面的污染物元素质量分数均得以显著降低,达到了与原膜

相似的水平,表明无论是有机还是无机膜污染物质, 均可在化学清洗过程中被有效清除。

表 2 原膜、污染膜和化学清洗膜表面的主要元素的质量分数

Tab. 2 Mass Fraction of Main Elements on Surface of Original, Contaminated and Chemical Cleaning Membranes

类型	C	O	N	F	Fe	Ca	Al
原膜	48.30%	3.29%	-	48.05%	-	-	-
A1 污染	45.89%	24.97%	9.29%	17.87%	0.27%	0.57%	0.52%
A2 污染	45.90%	28.47%	10.12%	13.56%	0.36%	0.63%	0.44%
A3 污染	45.84%	29.64%	10.95%	11.61%	0.57%	0.74%	0.66%
A4 污染	45.79%	26.32%	12.54%	5.05%	6.04%	1.57%	1.86%
A1 清洗	48.88%	4.34%	1.64%	44.12%	0.14%	0.07%	0.47%
A2 清洗	48.34%	3.85%	1.14%	46.03%	0.10%	0.04%	0.33%
A3 清洗	48.37%	4.21%	1.56%	45.30%	0.12%	0.04%	0.39%
A4 清洗	48.88%	3.73%	0.99%	45.64%	0.18%	0.06%	0.35%

3 结论

本研究采用超滤工艺直接处理引江原水、污泥脱水液以及两者的混合液,系统对比了不同进水条件下的超滤膜出水水质以及膜污染特性,评价了污泥脱水液稀释回流的可行性。

(1)污泥脱水液的水质较差,经超滤处理后,出水浑浊度和有机物含量仍较高;与引江原水混合(1:80~1:800)后,超滤膜出水的浑浊度和 TOC 质量浓度明显降低,故从水质角度而言,污泥脱水液回流原水池的影响不大。

(2)污泥脱水液直接超滤会造成严重的膜污染,与引江原水混合后膜污染得以显著减缓,且稀释比例越高、TMP 增长速率越低,当稀释比例达到 1:800 时,TMP 增长曲线逐渐接近引江原水直接超滤的情况。

(3)随着污泥脱水液在引江原水中稀释比例的提高,膜表面滤饼层厚度、溶解性有机污染物均得以显著降低,特别是当稀释比例达到 1:800 时,特征官能团 FTIR 峰强、污染元素相对质量分数均下降到与原水直接超滤相近的水平。此外,应当指出的是,本研究是在进水“直接超滤”的极端条件下得出如上结论,考虑到实际工程应用中超滤之前必然设置混凝、沉淀、砂滤等预处理环节,绝大多数污泥脱水液中的污染物在进入超滤之前会被有效去除,其对超滤膜的影响势必进一步大幅降低。因此,可认为对于以引江水为水源的超滤水厂而言,将污泥脱水液回流至原水池、按适当比例(如>1:800)稀释后回用的方案具

有良好的可行性。

同时需要说明,近年来我国许多大中型水厂都建设了排泥水回用措施,但针对污泥脱水液的合理处置与利用措施仍有待完善,相应的研究工作目前也处于起步和探索阶段。本研究面向以引江水为水源的超滤膜工艺,考察了污泥脱水液直接回流对出水水质以及超滤膜污染行为的影响,仍存在较多不足之处,如还应从致病微生物、微量有毒有机物、生物遗传毒性等角度进一步加强水质安全性的分析。此外,也建议针对污泥脱水液进一步考虑氧化、吸附、微滤分离等预处理手段,以提高其回用过程的安全性。

参考文献

- [1] 吴玮,季倩,许晓毅,等.苏州某自来水厂排泥水处理系统运行优化试验研究[J].给水排水,2022,48(1):56-62.
WU W, JI Q, XU X Y, et al. Experimental study on operation optimization of sludge water treatment system in a waterworks in Suzhou[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(1): 56-62.
- [2] 于大海.上海自来水厂泥渣处置方式的研究探索[J].水资源开发与管理,2022,8(5):57-63.
YU D H. A study and exploration of waste residue management methods in Shanghai waterworks [J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(5): 57-63.
- [3] 童祯恭,奚志成,陈文秀,等.净水厂沉淀池排泥水直接回用的可行性研究[J].应用化工,2023,52(2):646-650.
TONG Z G, XI Z C, CHEN W X, et al. Feasibility study on direct reuse of sludge water from sedimentation tank in water purification plant [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52

- (2): 646-650.
- [4] 李鼎, 董慧峪, 李海华, 等. 混凝-超滤工艺处理饮用水厂滤池反冲洗水和排泥水的效能[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3169-3177.
- LI D, DONG H Y, LI H H, et al. Efficacy of coagulation-ultrafiltration treatment for filter backwash water and sedimentation sludge water from drinking water treatment plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3169-3177.
- [5] 马宏锐. 佛山某水厂排泥水处理系统工况优化及安全回用[J]. 净水技术, 2023, 42(10): 190-195.
- MA H R. Working condition parameters optimization and safe reuse of sludge wastewater treatment system of a WTP in Foshan [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 190-195.
- [6] 王洪刚. 沉淀-气浮-深度处理联用工艺排泥水处理系统设计[J]. 净水技术, 2024, 43(5): 182-187, 203.
- WANG H G. Design of sludge water treatment system with combined processes of sedimentation-air floatation-advanced treatment [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5): 182-187, 203.
- [7] 陈停, 崔福义, 徐叶琴, 等. 净水厂生产废水回用强化混凝处理低浊水及安全性[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 21-25.
- CHEN T, CUI F Y, XU Y Q, et al. Drinking water treatment plant streams recycle for strengthening coagulation efficiency of low turbidity water and its water quality safety evaluation [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 21-25.
- [8] 何嘉莉, 李家耀, 庾明辉, 等. 不同给水厂排泥水处理工艺对比分析[J]. 给水排水, 2023, 59(10): 1-5, 14.
- HE J L, LI J Y, YU M H, et al. Comparative analysis of sludge water treatment process in different waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(10): 1-5, 14.
- [9] 吴胜华, 葛能强, 周平. 自来水厂排泥水处理零排放技术[J]. 中国给水排水, 2015, 31(18): 119-122.
- WU S H, GE N Q, ZHOU P. Zero emission technology for sludge water treatment in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(18): 119-122.
- [10] 缪柳. 净水厂生产废水零排放对水质安全性的影响[J]. 资源节约与环保, 2023(8): 1-4.
- MIAO L. Effect of zero discharge of wastewater from water purification plant on water quality safety [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2023(8): 1-4.
- [11] SHI W, GAO F, LI X, et al. High zeolite loading mixed matrix membrane for effective removal of ammonia from surface water [J]. Water Research, 2022, 221: 118849. DOI: 10.1016/j.watres. 2022. 118849.
- [12] TIAN J, PAN H, BAI Z, et al. Alleviated membrane fouling of corundum ceramic membrane in MBR: As compared with alumina membrane [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(6): 108949.
- [13] 唐曼. 采油用聚丙烯酰胺在黑钙土中的吸附规律研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- TANG M. Study on adsorption of polyacrylamide for oil production in chernozem [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [14] 田云福. 矿井水处理过程中聚丙烯酰胺残量的检测研究 [J]. 山西化工, 2022, 42(1): 244-246.
- TIAN Y F. Study on determination of polyacrylamide residue in mine water treatment [J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(1): 244-246.
- [15] 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 H K, LI X, ZHOU Z W, 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.
- [16] 张栋杰, 李星, 于海宽, 等. 混凝沉淀/超滤处理给水厂生产废水及回用可行性[J]. 中国给水排水, 2023, 39(15): 45-50.
- ZHANG D J, LI X, YU H K, et al. Treatment of production wastewater from drinking water treatment plant by coagulation-sedimentation/ultrafiltration technology and feasibility of reuse [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(15): 45-50.
- [17] YANG J X, LIU Y T, ZHAO J, et al. Controlling ultrafiltration membrane fouling in surface water treatment via combined pretreatment of O₃ and PAC: Mechanism investigation on impacts of technological sequence [J]. Science of the Total Environment, 2023, 895: 165168. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2023. 165168.
- [18] LIU X Y, CHEN Y B, FU J, et al. A review of combined fouling on high-pressure membranes in municipal wastewater reuse: Behaviors, mechanisms, and pretreatment mitigation strategies [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 485: 150135. DOI: 10.1016/j.cej. 2024. 150135.
- [19] LIU J N, DUAN L, GAO Q S, et al. Three-dimensional fluorescence characteristics analysis of DOMs in water treated by the ultrafiltration-reverse osmosis process [J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 398: 124297. DOI: 10.1016/j.molliq. 2024. 124297.

(下转第 143 页)

预期效果等进行边界条件和水质监测周期的合理确定,避免其他在建项目对研究区域的影响,同时也应避免分析成果对应的工程措施与在建项目冲突或重复。

参考文献

- [1] 沙桐,王洋,汪聪,等. 南方水系发达区域村镇水环境综合治理关键技术与示范[J]. 净水技术, 2022, 41(10): 115-119, 129.
- SHA T, WANG Y, WANG C, et al. Crucial technologies and demonstration of comprehensive treatment of water environment in villages and towns in southern developed water system areas[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(10): 115-119, 129.
- [2] 刘园. 流域水环境的污染源调查[J]. 水力发电, 2022, 46(9): 23-27, 36.
- LIU Y. Investigation of pollution sources for water environment in a river basin[J]. Water Power, 2022, 46(9): 23-27, 36.
- [3] 赵尚玉,郑小慎,叶怡. 滨海新区地表水水质评价与污染源分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(2): 107-116.
- ZHAO S Y, ZHENG X S, YE Q. Surface water quality evaluation and pollution source analysis in Binhai new area[J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(2): 107-116.
- [4] 刘佳嘉,周祖昊,陈松,等. 考虑城市管网的分布式水文模型子流域划分及编码研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(6): 49-54.
- LIU J J, ZHOU Z H, CHEN S, et al. Study on urban pipeline network-considered division and coding of sub-watershed for distributed hydrological model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(6): 49-54.
- [5] 陆圣杰,朱海,徐洁如,等. 连续弯曲河道点源污染物输运特性三维数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 16-26.
- LU S J, ZHU H, XU J R, et al. Three-dimensional numerical simulations of transport characteristics of point source pollutant in a sinuous open channel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 16-26.
- [6] 李民康,冀鸿兰,罗红春,等. 流凌条件下弯道水力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 41-49.
- LI M K, JI H L, LUO H C, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 41-49.
- [7] 杨金凤,冯爱萍,王雪蕾,等. 海河流域农业面源污染潜在风险识别方法[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4782-4781.
- YANG J F, FENG A P, WANG X L, et al. An identification method of potential risk for agricultural non-point source pollution in the Haihe River Basin [J]. China Environmental Science, 2021, 41(10): 4782-4781.
- [8] 陶园,徐静,任贺靖,等. 黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 257-264.
- TAO Y, XU J, REN H J, et al. Spatiotemporal evolution of agricultural non-point source pollution and its influencing factors in the Yellow River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 257-264.
- [9] 冉蛟,向蓉,肖克彦. 多邛海主要入湖河流氮、磷入湖污染负荷特征研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(9): 1213-1217.
- RAN J, XIANG R, XIAO K Y. Study on the characteristics of nitrogen and phosphorus pollution load in main inflow rivers of Qionghai Lake[J]. Environmental Pollution and Control, 2023, 45(9): 1213-1217.

(上接第 65 页)

- [20] ZHAO J, JIANG T X, CHENG Y, et al. The influence of micro-flocculation on membrane fouling during ultrafiltration of dissolved organic matter[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 56: 104361. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104361.
- [21] 魏钿. 厌氧-好氧-MBR 工艺对膜污染控制及有机物去除特性的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
- WEI T. Study on membrane fouling control and organic matter removal by anaerobic-aerobic-MBR bioreactor [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [22] 邹慧. 典型有机物引起的超滤膜污染机理及控制策略研究 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2023.
- ZOU H. Study on mechanism and control strategy of ultrafiltration membrane fouling caused by typical organic matters [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2023.
- [23] 王天一. 混凝超滤处理滤池反冲洗废水的效能及优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- WANG T Y. Study on the efficiency and optimization of coagulation ultrafiltration treatment of filter backwash wastewater [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.