

在线混凝/超滤处理太湖水的试验研究

魏永¹, 姚维昊¹, 桂波², 董秉直²

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 超滤试验以太湖水为原水, 采用在线混凝/超滤(CUF)和直接超滤(UF)并行的运行方式, 通量设置为 $75 \sim 90 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 分析跨膜压差(TMP)的变化, 考察对有机物和藻类的去除效果。试验结果表明, CUF 和 UF 都能在高通量下稳定运行, TMP 均不超过 30 kPa, 且 CUF 可以有效降低 TMP; 超滤去除溶解性有机物的能力较弱, 混凝增加了其对小分子有机物的去除效果; 超滤能很好地去藻蓝蛋白和硅藻, 去除率分别在 88.90% 和 82.58% 以上, 混凝可以强化超滤对硅藻的去除, 但对于藻蓝蛋白却相反。

关键词: 在线混凝; 超滤; 有机物; 藻类; 太湖

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0054-05

Treatment of Taihu Lake Water by On-line Coagulation/Ultrafiltration

WEI Yong¹, YAO Wei-hao¹, GUI Bo², DONG Bing-zhi²

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;
2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Taihu Lake water was treated in an ultrafiltration test, and the on-line coagulation/ultrafiltration (CUF) and direct ultra filtration (UF) were operated in parallel. The flux was set at $75 \sim 90 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, changes of transmembrane pressure difference (TMP) were analyzed, and the removal effect of organic matter and algae was investigated. The results showed that both CUF and UF could operate steadily under high flux, and both the TMPs were less than 30 kPa. It was found that the on-line coagulation/ultrafiltration could effectively reduce TMP. The ability of ultrafiltration to remove dissolved organics was weak, and coagulation increased its removal effect on small molecular organics. Ultrafiltration had good removal effect on phycocyanin and diatoms, and the removal rates were higher than 88.90% and 82.58% respectively. Coagulation enhanced the removal of diatoms by ultrafiltration, but it had the opposite effect for phycocyanin removal.

Key words: on-line coagulation; ultrafiltration; organic matter; algae; Taihu Lake

膜法水处理技术在我国已得到广泛的应用^[1], 其中超滤能截留水中 99% 以上的悬浮固体、细菌和病毒, 可替代传统工艺的絮凝池、沉淀池、砂滤池, 从而简化了工艺流程, 且节省自来水厂的占地面积。

混凝是超滤膜常用的预处理工艺之一, 其中在线混凝/超滤(CUF)无需沉淀, 投加混凝剂后直接过膜。李凯等^[2]以佛山沙口水厂进水为原水, 发现超滤膜对浊度和微生物的去除效果不受预处理条件的

影响。陶润先等^[3]的研究表明,处理低温低浊水时,CUF可以提高有机物的去除效果,但对于小分子物质的去除效果不明显。太湖水中藻类较多,采用传统工艺处理时通常需进行预氧化,而预氧化会破坏藻类细胞膜,导致藻毒素等物质释放出来,既增加后续处理工艺的有机负荷,又严重影响供水安全。笔者采用耐污染超滤膜,分别考察 CUF 和直接超滤 (UF) 对有机物及藻类的去除效果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用 Multibore 型聚醚砜七孔中空纤维超滤膜,截留分子质量为 150 ku,过滤面积为 6.5 m^2 ,采用内压死端过滤,恒流过滤 30 min 后水力反冲洗 1 min,每 24 h 采用化学强化反冲洗(CEB)1 次。

藻类分类分析仪以不同颜色的发光二极管作为激发光源,区分藻的类别并计算相应含量,不需要过滤、溶解等任何预处理^[4]。其他检测仪器包括荧光光谱仪、紫外分光光度计、凝胶色谱仪、紫外检测器和多参数水质测定仪。

1.2 试验方法

试验流程如图 1 所示。太湖水先通过 $200 \mu\text{m}$ 的碟式过滤器去除水中的粗大漂浮物(如贝壳、树枝等),以避免对膜产生损伤。试验采用有/无在线混凝两种预处理方式,分别考察 CUF 和 UF 的处理效果。CUF 采用聚合氯化铝为混凝剂,投加量(以铝计)为 4 mg/L ,投加混凝剂后直接过膜。

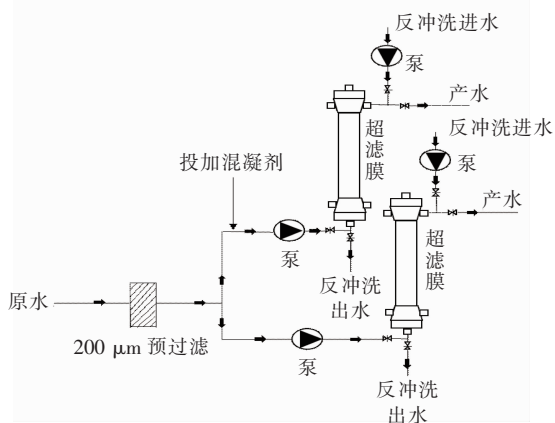


图 1 试验流程

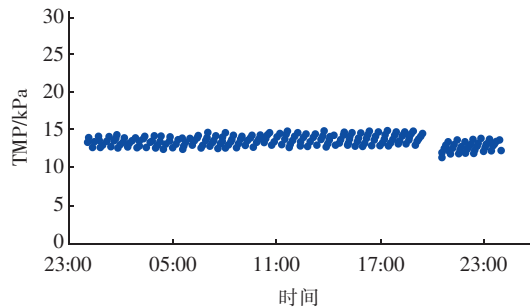
Fig. 1 Flow chart of ultrafiltration process

2 结果与讨论

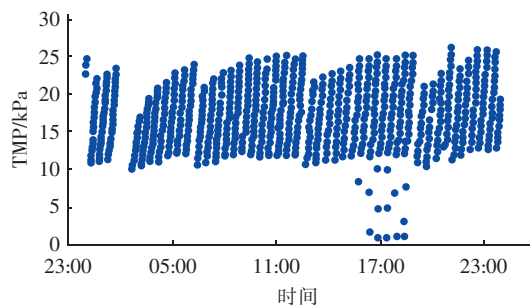
2.1 跨膜压差的变化

试验采用恒定通量分析超滤装置的跨膜压差

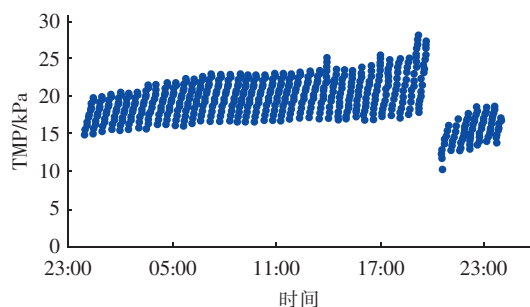
(TMP),以判断运行工况的稳定性。CUF 和 UF 分别均在 75 和 $90 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 两种通量下运行,以分析有无预处理以及通量对 TMP 的影响。图 2 为不同通量下 CUF 和 UF 的 TMP 情况。



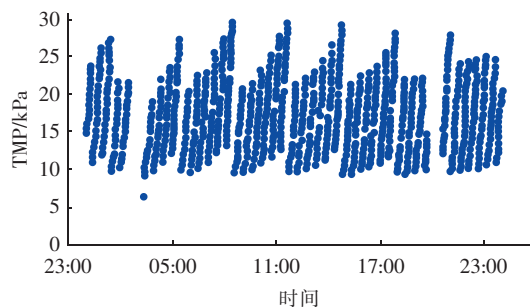
a. $75 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, CUF



b. $75 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, UF



c. $90 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, CUF



d. $90 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, UF

图 2 CUF 和 UF 在不同通量下的 TMP 情况

Fig. 2 TMP of CUF and UF in different fluxes

从图 2(a)、(b) 可以看出,在相同通量下,CUF

的 TMP 明显低于 UF, 可见混凝作为前处理可以降低膜污染^[5-6], 并且 CUF 系统的跨膜压差十分稳定, 在 12 ~ 15 kPa 范围内变化, 每 30 min 一次的水力反冲洗可以有效降低 TMP^[7], 运行 19 h 时 TMP 下降是由于进行了化学强化反冲洗^[8]。在通量为 75 L/(m² · h) 条件下, CUF 系统未出现水力不可逆膜污染现象; 而在 90 L/(m² · h) 条件下, CUF 系统中 TMP 出现了明显爬升的现象, 可见通量升高后, 膜污染的速率加快。经过 19 h 处的化学强化反冲洗后, TMP 急剧下降, 说明膜在 CEB 后恢复了性能, CUF 系统出现了水力不可逆膜污染现象, 但是在 CEB 的作用下, 系统仍能稳定运行。从图 2(b)、(d) 可以看出, UF 的 TMP 变化十分明显, 在 90 L/(m² · h) 的通量下, TMP 的最高值达到 30 kPa, 说明通量升高后, 膜污染速率加快。

综上所述, 无论是 CUF 还是 UF, 其在 75 和 90 L/(m² · h) 通量下均能够稳定运行。CUF 可以有效降低跨膜压差, 通量升高以后 TMP 的波动加剧, 但仍都低于 30 kPa。可见, 采用此种超滤膜在高通量 [75 ~ 90 L/(m² · h)] 下处理太湖水具有可行性。

2.2 对有机物的去除效果

图 3 为 CUF 和 UF 对 COD_{Mn} 的去除效果。可以看出, CUF 系统对 COD_{Mn} 的去除效果略好于 UF 系统。分析原因, 超滤主要起筛分的作用, 对于低于截留分子质量的有机物其去除能力较差, 所以对于 COD_{Mn} 难以体现较好的去除效果。

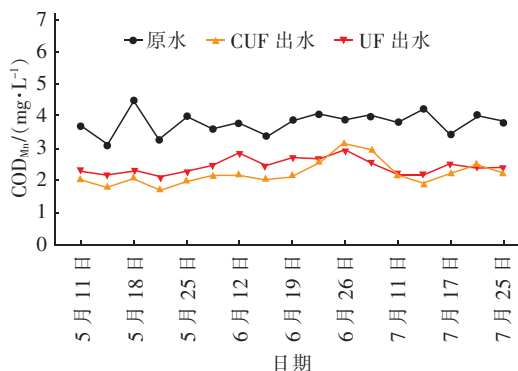


图 3 CUF 和 UF 对 COD_{Mn} 的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of COD_{Mn} by CUF and UF

在三维荧光检测过程中, T、B、C、A 分别代表微生物产物、蛋白质、腐殖酸和富里酸^[9], 本试验使用区域积分法对各区域的强度进行定量分析^[10]。图 4 为原水、CUF 产水和 UF 产水的荧光强度比例。可以看出, 原水中 A 和 B 的荧光强度比例很高, 两者

相加均大于 50%, 可见蛋白质和富里酸为有机物的主要成分, 这是湖泊等封闭水体的典型特征。无论是 CUF 产水还是 UF 产水, 与原水相比均未表现出明显差异。因此, 超滤对于溶解性有机物的去除效果较差。

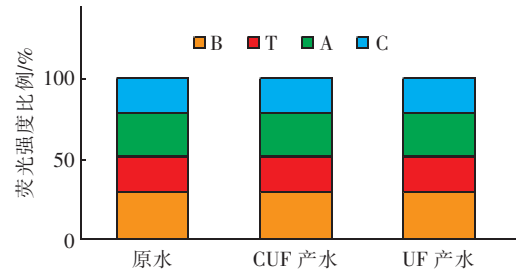


图 4 原水、CUF 产水和 UF 产水的荧光强度比例

Fig. 4 Fluorescence intensity ratio of raw water, CUF permeate water and UF permeate water

图 5 为原水、CUF 产水和 UF 产水的分子质量分布。

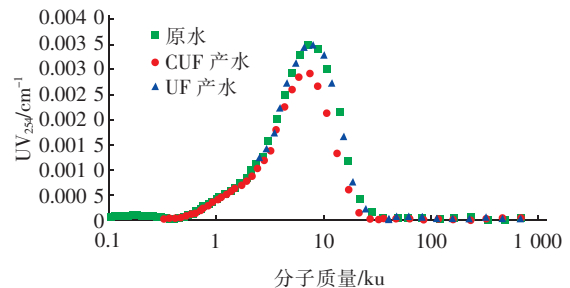


图 5 原水、CUF 产水和 UF 产水的分子质量分布

Fig. 5 Distribution of molecular weight in raw water, CUF permeate water and UF permeate water

从图 5 可以看出, 原水中的主要有机物分子质量集中在 10 ku 左右, CUF 产水在 10 ku 处有所下降, 约降低 20%, 而 UF 产水与原水的区别不明显。可见, 混凝可以增加超滤对小分子有机物的去除效果, 在无混凝条件下, 超滤对于远小于其截留分子质量的有机物的去除作用极弱。

2.3 对藻类的去除效果

图 6 为 7 月和 8 月太湖原水中藻类密度和水温的变化。可以看出, 8 月的藻类密度高于 7 月的, 特别是在 8 月 3 日前后, 藻类密度极高, 约为 330 × 10⁴ 个/L, 这可能与 7 月 15 日以后水温升高有关。8 月 5 日后藻类密度趋于稳定, 约为 175 × 10⁴ 个/L。另外, 藻类密度与水温未表现出明显的相关性。太湖水中藻类密度较高, 所以有必要考察超滤工艺对藻类的去除能力。

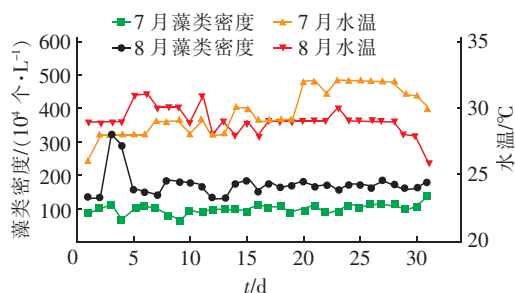


图6 7月和8月太湖原水中藻类密度与水温的变化

Fig. 6 Change of algal density and water temperature in Taihu Lake raw water in July and August

藻蓝蛋白是藻类进行光合作用的重要辅光色素蛋白之一,由藻蓝胆素和脱辅基蛋白中保守性半胱氨酸残基的巯基构成^[11]。在环境监测中,特别是蓝藻水华频发的水域,藻蓝蛋白浓度能较好地表征蓝藻的生物量,是水体富营养化及蓝藻水华监测重点关注的指标。使用藻类分类检测仪分别检测原水、CUF产水和UF产水中藻蓝蛋白的浓度,结果如图7所示。可以看出,CUF系统和UF系统对藻蓝蛋白都有很好的去除效果,去除率均大于88.90%,且UF系统的去除率均略高于CUF。这是一个十分有趣的现象,值得进行深入的探索和探索。推测可能是由于蓝藻属于原核生物,细胞尺寸较小^[12],即使在CUF系统下,絮体也不会明显增加^[3],然而UF系统在前处理的条件下,会出现膜污染特别是膜孔污染,膜孔的缩小无形地增加了过滤效果^[13],因此膜孔的缩小成为控制过滤效果的主要因素,所以出现了UF对藻蓝蛋白的去除率高于CUF的现象。

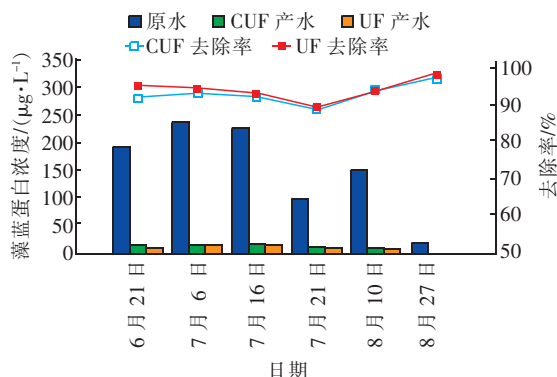


图7 CUF和UF对藻蓝蛋白的去除效果

Fig. 7 Removal efficiency of phycocyanin by CUF and UF

硅藻也是淡水水体中的常见藻种,广泛存在于河流、水库和湖泊中。而在大多数富营养化浅水湖泊中,浮游硅藻的生物量明显少于蓝藻的生物量。

随着浅水湖泊富营养化加剧,湖沼学者也开始把目光集中在藻类非优势种上。图8为CUF和UF对硅藻的去除效果。可以看出,原水中硅藻浓度变化较大,CUF和UF系统均表现出良好的硅藻去除效果,UF对硅藻的去除率>82.58%,CUF对硅藻的去除率>90.39%,可见混凝能提高超滤对硅藻的去除效果。并且CUF和UF对硅藻的去除率与原水中的硅藻浓度表现出一定的正相关性,这可能是因为硅藻浓度较高时,已被截留的藻会形成滤饼层或形成生物聚合物等,从而有利于进一步提高去除率,但是也可能加速膜污染的形成^[14]。

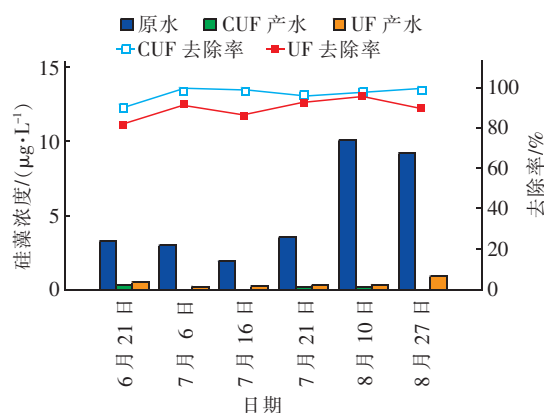


图8 CUF和UF对硅藻的去除效果

Fig. 8 Removal efficiency of diatoms by CUF and UF

3 结论

① 在75和90 L/(m²·h)的高通量条件下,CUF系统和UF系统均能稳定运行,且CUF系统可以有效降低跨膜压差,其TMP均不超过30 kPa。

② CUF和UF对COD_{Mn}均有一定的去除效果;但三维荧光结果显示,两者去除溶解性有机物的能力均较弱。凝胶色谱分析结果表明,混凝可以提高超滤对小分子有机物的去除效果,对于原水中主要集中在10 ku的组分,增加了约20%的去除率。

③ 太湖水中藻类浓度较高,UF和CUF对硅藻和藻蓝蛋白均表现出良好的去除效果,且CUF去除硅藻的效果更好,但是对于藻蓝蛋白的去除效果却相反,这可能与蓝藻细胞尺寸较小以及UF系统具有更为明显的膜污染有关。

参考文献:

- [1] 范小江,张锡辉,苏子杰,等. 超滤技术在我国饮用水厂中的应用进展[J]. 中国给水排水,2013,29(22): 64-70.

- Fan Xiaojiang, Zhang Xihui, Su Zijie, *et al.* Application of ultrafiltration technology in drinking water treatment plants in China[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(22):64-70(in Chinese).
- [2] 李凯, 梁恒, 叶挺进, 等. 在线混凝对浸没式超滤膜出水水质和膜污染的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2013, 29(2):287-291.
- Li Kai, Liang Heng, Ye Tingjin, *et al.* Effect of in-line coagulation on treated water quality and membrane fouling for immersed ultrafiltration[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 29(2):287-291(in Chinese).
- [3] 陶润先, 陈立, 刘景艳, 等. 在线混凝/超滤工艺处理低温、低浊源水的研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(9):67-70.
- Tao Runxian, Chen Li, Liu Jingyan, *et al.* Treatment of low-temperature and low-turbidity source water by in-line coagulation/UF process[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(9):67-70(in Chinese).
- [4] 梁曼, 黄富荣, 何学佳, 等. 荧光光谱成像技术结合聚类分析及主成分分析的藻类鉴别研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(8):2132-2136.
- Liang Man, Huang Furong, He Xuejia, *et al.* Algae identification research based on fluorescence spectral imaging technology combined with cluster analysis and principal component analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(8):2132-2136(in Chinese).
- [5] Ho J S, Ma Z, Qin J J, *et al.* Inline coagulation-ultrafiltration as the pretreatment for reverse osmosis brine treatment and recovery[J]. *Desalination*, 2015, 365:242-249.
- [6] Shen X, Gao B Y, Huang X, *et al.* Effect of the dosage ratio and the viscosity of PAC/PDMDAAC on coagulation performance and membrane fouling in a hybrid coagulation-ultrafiltration process[J]. *Chemosphere*, 2017, 173:288-298.
- [7] Prisciandaro M, di Celso G M. Back-flush effects on superficial water ultrafiltration[J]. *Desalination*, 2010, 256(1/3):22-26.
- [8] Racar M, Dolar D, Kočutić K. Chemical cleaning of flat sheet ultrafiltration membranes fouled by effluent organic matter[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 188:140-146.
- [9] 陈诗雨, 李燕, 李爱民. 溶解性有机物研究中三维荧光光谱分析的应用[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(5):64-68.
- Chen Shiyu, Li Yan, Li Aimin. Application of three-dimensional fluorescence spectroscopy in the study of dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(5):64-68(in Chinese).
- [10] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 37(24):5701-5710.
- [11] 张静, 韦玉春, 王国祥, 等. 太湖水体中藻蓝蛋白的紫外-可见吸收光谱特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5):1297-1301.
- Zhang Jing, Wei Yuchun, Wang Guoxiang, *et al.* UV-vis spectrum characteristics of phycocyanin in water from Taihu Lake[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5):1297-1301(in Chinese).
- [12] 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 等. 混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(5):1781-1787.
- Sun Xiuxiu, Cong Haibing, Gao Zhengjuan, *et al.* Movement characteristics of *Cyanobacteria* under stress of water-lifting aeration[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5):1781-1787(in Chinese).
- [13] Sillanpää M, Ncibi M C, Matilainen A, *et al.* Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review[J]. *Chemosphere*, 2018, 190:54-71.
- [14] Gao W, Liang H, Ma J, *et al.* Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review[J]. *Desalination*, 2011, 272(1/3):1-8.



作者简介:魏永(1975-),男,江苏徐州人,博士,副教授,主要研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: weiyong@cczu.edu.cn

收稿日期:2018-12-31