

# 混凝沉淀/超滤工艺改善苏州河道水的感官品质

袁文璟<sup>1</sup>, 王朝勇<sup>2</sup>, 刘洁<sup>1</sup>, 何圣兵<sup>1,3</sup>

(1. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 苏州市水务局, 江苏 苏州 215011; 3. 上海生态景观水环境工程技术研究中心, 上海 200031)

**摘要:** 在苏州市姑苏区环城河边开展现场中试,研究了混凝沉淀/超滤组合工艺对河道水的处理效果。试验结果表明,组合工艺对河道水感官品质的提升效果显著,对浊度、色度的去除率分别为94.16%~96.25%、89.69%~93.86%,出水透明度能够达到2.5 m以上。根据运行中跨膜压差的变化可知,组合工艺对于苏州河道水的最佳PAC投加量为20 mg/L。滤后水的颗粒粒径相比原水明显下降,小分子DOM的占比显著上升。通过三维荧光光谱可知,组合工艺对地表水中腐殖酸类物质具有良好的去除效果,这也是色度去除明显的主要原因。

**关键词:** 河道水; 超滤; 混凝沉淀; 感官品质; 色度

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0078-07

## Improving Sensory Quality of River Water by Coagulation Sedimentation/ Ultrafiltration Process

YUAN Wen-jing<sup>1</sup>, WANG Chao-yong<sup>2</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, HE Sheng-bing<sup>1,3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Suzhou Water Affairs Bureau, Suzhou 215011, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Landscape Water Environment, Shanghai 200031, China)

**Abstract:** On-site pilot test was carried out for a river in Gusu District of Suzhou City. The treatment effect of a combined process of coagulation sedimentation and ultrafiltration on river water was studied. The combined process had a significant effect on the improvement of the water quality of the river. The removal efficiencies of turbidity and chromaticity were 94.16%–96.25% and 89.69%–93.86%, respectively, and the effluent transparency could reach more than 2.5 m. According to the change of transmembrane pressure difference during operation, the optimal dosage of PAC for the treatment of river water was 20 mg/L. The size of the water particles after ultrafiltration was significantly lower than that of the raw water, and the proportion of small molecules of DOM increased significantly. The 3D-EEM analysis showed that the combined process had a good removal effect on humic acids in surface water, and it was also the main reason for the obvious removal of chromaticity.

**Key words:** river water; ultrafiltration; coagulation sedimentation; sensory quality; chromaticity

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205-03); 上海市科委科技创新行动计划项目(18DZ2254000)

通信作者: 何圣兵 E-mail: heshengbing@sjtu.edu.cn

苏州市从2011年开始通过干河清淤、控源截污、清水工程<sup>[1]</sup>等系列行动使城区河道水质得到有效改善,目前苏州城区河道水中氮、磷指标基本可以达到地表水Ⅳ类标准,但河道水体感官品质(如浊度、色度、透明度)仍与民众的期望有较大差距,有待进一步提升。常见的提升河道水体感官品质的工艺主要有混凝/沉淀、混凝/气浮等,但这些工艺因为缺少过滤环节,出水中往往会含有残留的絮体等,进入河道后会因为含量的逐渐累积,可能会对河道水的生态系统安全造成负面影响,甚至对人体健康产生潜在的安全风险<sup>[2]</sup>。苏州水务在创建“两个标杆”的实践中,对河道水环境的品质提升提出了高要求,而苏州市姑苏区平江历史片区作为全国著名的旅游景点,其对河道水体的感官高品质有着更为迫切的实际需求。

近年来,膜工艺得到了快速发展,其出水水质优良,对悬浮物、藻类、细菌等去除效果较好,占地面积小,被广泛应用于饮用水的深度处理过程中,可以完全截留水中的细小颗粒物<sup>[3-4]</sup>,但由于运行成本的限制,尚未在河道水处理方面应用。根据苏州平江历史片区的特定需求,笔者采用混凝沉淀/超滤膜组合工艺对苏州市环城河水(平江历史片区河道的补充水源)进行处理,考察工艺对河道水的感官品质提升效果,探索系统的工艺运行参数,研究成果可为后续工程设计和运行提供技术参数,也可为全国其他类似地区打造高品质河道水提供借鉴和参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置与流程

现场中试流程如图1所示,中试装置安装于苏州市姑苏区苏州火车站前环城河边,试验装置包括混凝沉淀箱和浸没式(柱式)超滤装置。

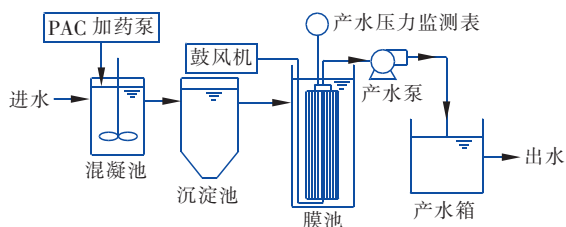


图1 现场中试流程示意

Fig.1 Flow chart of on-site pilot test

混凝沉淀箱由混凝池和沉淀池组成,原水由水泵从环城河道提升至混凝池,聚合氯化铝(PAC)加药桶上设有蠕动泵,均匀地向混凝池中投加PAC

(按纯度为28%的工业级PAC颗粒计),采用搅拌机搅拌,PAC与原水均匀混合后进入沉淀池,沉淀池的水力停留时间为30 min。经过混凝沉淀处理后的水进入后续膜装置。

超滤膜采用PVDF中空纤维膜,装置运行采用PLC控制系统。膜孔径为20~40 nm,其通过微孔结构进行物理分离<sup>[5]</sup>。利用产水泵的抽吸作用,使得混凝沉淀后的水经过膜过滤,到达后续产水箱中。当反冲洗时,产水箱作为反洗水箱使用,反洗水泵从产水箱内部抽水,同时运转鼓风机,进行气水反冲洗,膜装置的一个产水周期为产水、降液位、气洗、气水洗、静置、排空所有时间相加之和,此处设置产水时间为33.5 min,降液位时间为0.5 min,气洗时间为1 min,气水洗时间为1 min,静置时间为2.5 min,排空时间为1.5 min,总计40 min。膜的产水量设定为2.5 m<sup>3</sup>/h,气洗强度设定为10 m<sup>3</sup>/h。

改变PAC投加量,比较混凝沉淀以及超滤膜过滤段对浊度、色度、残余铝等的去除效果,同时监测出水中藻类增殖潜力(AGP)的变化情况。为监测膜污染情况,产水按照40 min为一个周期,从反洗后新的一个周期开始起,前30 min每10 min读一次数,于周期降液位反洗前读一次数,分析跨膜压差的变化。

### 1.2 原水水质

试验原水取自苏州姑苏区环城河的河道水,现场中试从2018年8月持续运行到2019年1月,期间主要水质指标如下:浊度为5.48~8.30 NTU,温度为8~27℃,色度为42.7~64.7度,叶绿素a为2.62~5.48 μg/L,TP为0.21~0.26 mg/L,NH<sub>3</sub>-N为0.065~0.245 mg/L,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N为1.23~1.78 mg/L,TN为1.98~2.60 mg/L,TOC为2.65~4.32 mg/L,透明度为29~65 cm。

### 1.3 分析项目及方法

浊度采用HACH-2100Q便携式浊度仪测定;SS采用笠原理化SSTR-5Z型SS仪测定;粒径采用Beckman纳米粒度分析仪Delsa Nano C测定;色度采用陆恒生物台式色度仪测定;叶绿素a采用植物分类荧光仪PHYTO-PAM测定;DOM分子质量分布采用Waters 2414凝胶渗透色谱仪测定;三维荧光光谱采用日立荧光分光光度计F-7000获得;TP、Al按照分光光度法,使用岛津UV-1800紫外分光光度计测定;TN采用Analytik Jena multi N/C TOC/

TN 分析仪测定;藻类增殖潜力试验步骤为:向锥形瓶中加入 250 mL 水样,接种苏州河道的优势藻种(铜绿微囊藻与小球藻),使用光照恒温培养箱在温度为 26 ℃、光照度为 800 lx 条件下培养 10 d,采用植物分类荧光仪 PHYTO-PAM 测定叶绿素 a 含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对浊度的去除效果

组合工艺对浊度的去除效果如图 2 所示。可以看出,随着 PAC 投加量的增加,混凝沉淀后的出水浊度基本呈下降的趋势。当 PAC 投加量为 20 mg/L 时,沉后水的浊度在 3 NTU 以下,浊度去除率达到 69.9%。当 PAC 投加量达到 25 mg/L 以上时,沉后水的浊度不再随着 PAC 投加量的增加呈下降趋势。试验期间,滤后水的浊度均低于 0.4 NTU,相应的去除率为 94.16%~96.25%。

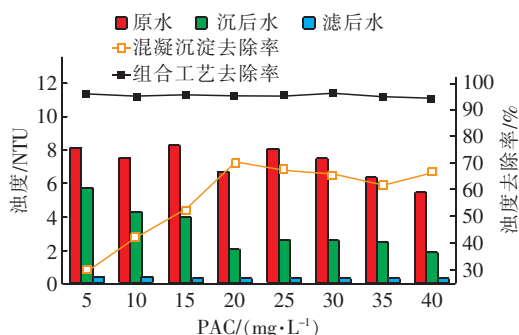


图 2 组合工艺对浊度的去除效果

Fig. 2 Removal effect of turbidity by combined process

图 3 为组合工艺对 SS 的去除效果。

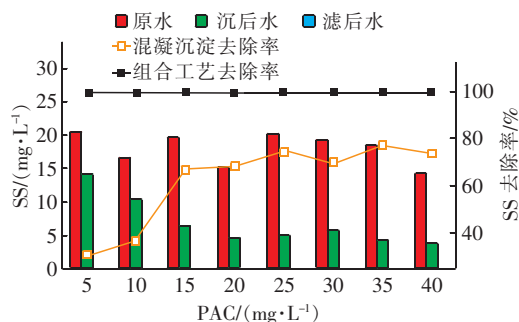


图 3 组合工艺对 SS 的去除效果

Fig. 3 Removal effect of SS by combined process

从图 3 可以看出,随着 PAC 投加量的增加,沉后水的 SS 逐渐下降,整体趋势与浊度的变化过程较为一致。当 PAC 投加量达到 20 mg/L 以上时,沉后水的 SS 浓度基本稳定,对 SS 的去除率可以达到 70% 左右。由于超滤膜的高效截留作用,滤后水的 SS 一直为零。混凝沉淀后,由于 SS 被凝聚成为大

颗粒沉降,因此浊度下降,而 SS 在过滤后基本被去除,因此膜后水的浊度能达到低水平。

在 PAC 投加量为 20 mg/L 的工况下,分析原水、沉后水与滤后水的粒径分布。结果表明,原水的颗粒粒径基本分布在 170~250 nm 与 900~2 000 nm 范围内,沉后水的颗粒粒径在 500~7 000 nm 之间均有分布,而滤后水的颗粒粒径在 1.5~2.5、3~4.5 和 5~6 nm 之间均有分布,且有部分颗粒粒径分布在 33 nm 附近。可以看出,原水中粒径分布在 170~250 nm 的颗粒接近于胶体粒径,其颗粒较小难以沉降;而分布在 900~2 000 nm 处的较大颗粒悬浮物对光线的通过产生较大的阻碍作用,造成原水浊度较高。PAC 对水中胶体物质有良好的电中和作用,对大颗粒悬浮物有优良的吸附-架桥作用<sup>[2]</sup>,水中产生浊度的胶体和悬浮物经过混凝沉淀之后可聚集形成大颗粒,大部分会在沉淀池中得以去除,还有少部分未沉淀的颗粒存在,由于超滤膜的孔径为 0.02~0.04 μm (即 20~40 nm),沉后水中的大颗粒基本全部被截留,只剩下少量粒径分布于 1.5~6 nm 及 30 nm 左右未聚集胶体颗粒会通过膜孔,大部分胶体和全部悬浮物被去除,对浊度的去除效果得到明显提升,超滤膜出水的透明度能够达到 2.5 m 以上。

### 2.2 对色度的去除效果

组合工艺对色度的去除效果如图 4 所示。

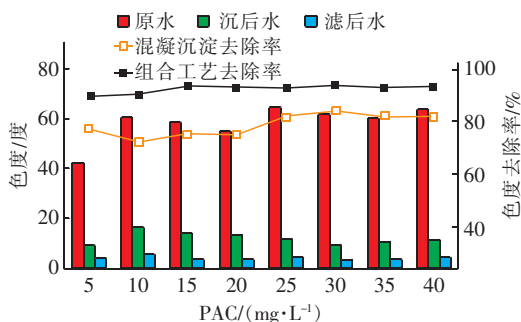


图 4 组合工艺对色度的去除效果

Fig. 4 Removal effect of chromaticity by combined process

从图 4 可以看出,混凝沉淀后,当 PAC 投量 < 25 mg/L 时,对色度的去除率在 75% 左右;当 PAC 投量 ≥ 25 mg/L 后,对色度的去除率基本稳定在 80% 左右。滤后水的色度一直低于 5 度,与原水相比,对色度的去除率为 89.69%~93.86%,去除效果稳定。水中的色度又可以分为表色度与真色度,表色度主要由水中悬浮颗粒物形成,与浊度及 SS 相

关,通过对浊度及SS的分析可以看出,该工艺对表色度有良好的去除效果。

而真色度主要由水中的叶绿素a及腐殖酸类物质产生<sup>[6]</sup>。叶绿素a为评价水体富营养化程度的重要指标,且对水体的色度有较大影响。组合工艺对叶绿素a的去除效果如图5所示。可以看出,当向混凝沉淀段投加PAC后,由于混凝剂的作用,部分叶绿素a被吸附后随着大颗粒而沉淀,因此混凝沉淀对原水中叶绿素a的去除率在50.8%以上。而膜过滤后叶绿素a的去除率可达82.82%~93.06%,这是由于苏州河道中优势藻种为铜绿微囊藻及小球藻,铜绿微囊藻的直径约为2.7 μm,且常形成大小差异较大的藻团<sup>[7-8]</sup>,小球藻直径为3~6 μm<sup>[9]</sup>,均远大于0.02~0.04 μm的膜孔径,因此膜过滤能够有效去除水中的叶绿素a。

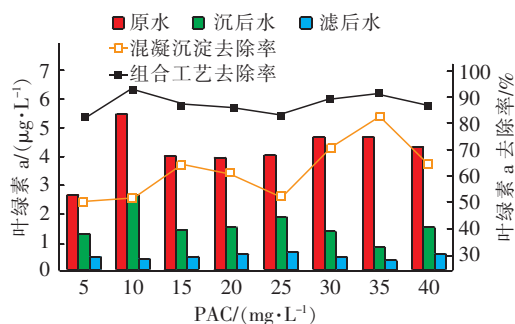


图5 组合工艺对叶绿素a的去除效果

Fig.5 Removal effect of chlorophyll a by combined process

腐殖酸也是水体色度的重要来源之一,在PAC投加量为20 mg/L的工况下,分析原水、沉后水与滤后水的DOM分子质量(见图6)与三维荧光光谱(见图7),其中三维荧光光谱取与腐殖酸相关性较好的区域(类腐殖酸区域,即Ex/Em为350~440 nm/370~510 nm)<sup>[10-11]</sup>。

图7),其中三维荧光光谱取与腐殖酸相关性较好的区域(类腐殖酸区域,即Ex/Em为350~440 nm/370~510 nm)<sup>[10-11]</sup>。

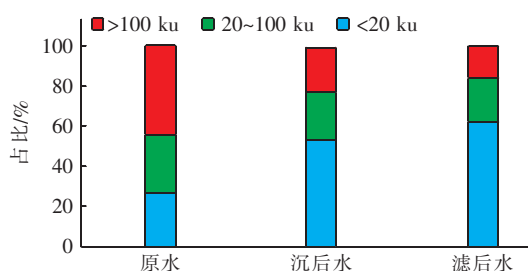


图6 水中DOM的分子质量分布

Fig.6 Distribution of molecular weight of DOM

由图6可知,混凝后,水中大分子的DOM(分子质量>100 ku)占比从44%下降到22%,而小分子DOM(分子质量<20 ku)的占比从27%上升至53%。经膜过滤后,大分子DOM的占比进一步降至16%,而小分子DOM的占比上升到62%。从图7可以看出,原水经混凝沉淀后水中的腐殖酸有所减少,通过超滤膜的截留作用后水中的腐殖酸含量进一步下降。混凝沉淀时,由于颗粒物的凝聚吸附,水中大分子物质沉淀,使得产生色度的腐殖酸大分子物质减少,混凝沉淀对真色度即有一定的去除效果;而通过超滤膜时,其大分子物质占比进一步下降,表明有更多的大分子有机物被截留去除<sup>[12-14]</sup>,其中包括大分子腐殖酸,腐殖酸含量显著降低,真色度进一步下降。悬浮物、叶绿素a与大分子腐殖酸的减少导致出水表色度与真色度减少,总色度明显下降。

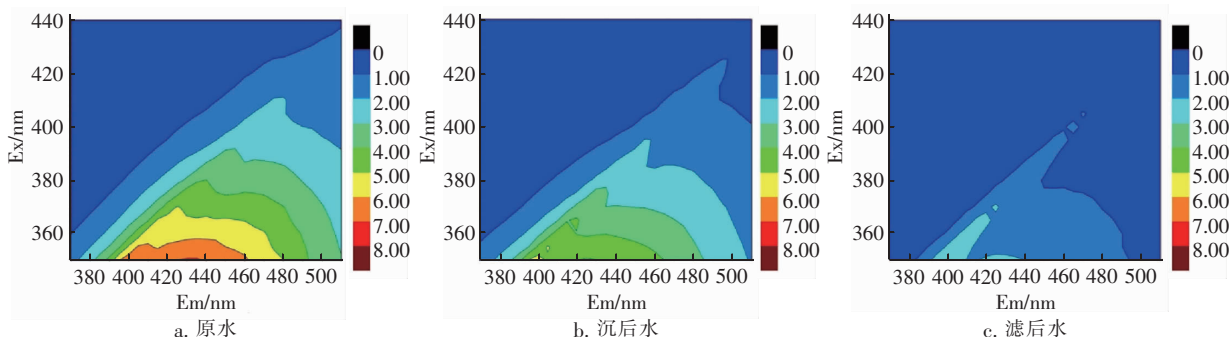


图7 原水、沉后水和滤后水的三维荧光光谱

Fig.7 Three-dimensional fluorescence spectrum of raw water, settling water and filtered water

### 2.3 出水残余铝

河道水中铝含量的增加会对人体健康造成安全风险,同时也可能会对生态系统产生毒性效应,这种

不利影响已经引起了人们的广泛关注。目前世界上许多国家和地区都对饮用水中残余铝含量制定了严格的限制标准<sup>[15]</sup>,为降低河道水中铝含量升高的可

能性及其造成的负面影响,考察了投加混凝剂后,沉后水和滤后水中残余铝的含量,结果见表1。可知,原水中基本不含铝。当投加 PAC 并沉淀后,由于沉淀不彻底,除过量残留的铝盐混凝剂外,部分铝随着未沉淀的絮体成为颗粒吸附结合态铝,有研究显示还有部分与大分子物质结合成有机态铝<sup>[15]</sup>。沉后水中残余铝的含量较高。而经过超滤膜拦截后,混凝沉淀后未沉降的轻小含铝絮体及其他与有机大分子结合的铝会被超滤膜截留,出水铝含量下降至较低水平。

表1 原水、沉后水、滤后水中残余铝含量

Tab.1 Residual aluminum content in raw water, settling water and filtered water  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

PAC 投加量	原水	沉后水	滤后水
5	0.00	0.18	0.04
20	0.01	0.25	0.02
35	0.00	0.33	0.06

## 2.4 藻类增殖潜力分析

藻类增殖潜力试验是一种可以有效预测水体藻类增殖的方法,目的是预测水体中浮游植物的生物量能够达到的峰值。在 PAC 投加量为  $20 \text{ mg/L}$  的工况下,原水、沉后水和滤后水的 AGP 试验结果如图8所示。

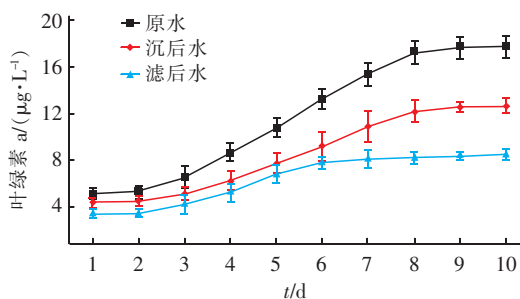


图8 原水、沉后水和滤后水中藻类增殖情况

Fig.8 Algae proliferation of raw water, settling water and filtered water

由图8可知,当等量藻被接种水样中以后,第1天和第2天为接种藻类(铜绿微囊藻及小球藻)的适应期,此时藻类基本无生长,第3天开始,藻类开始加速生长,到第9天时原水中叶绿素a达到  $17.67 \mu\text{g/L}$ ,之后基本不再上升,曲线趋于平稳;沉后水的叶绿素a在第9天达到  $12.64 \mu\text{g/L}$ ,之后也基本不再上升。而滤后水则于第6天叶绿素a达到  $8.22 \mu\text{g/L}$ 后曲线即趋于平稳。原水中藻类增殖速率以及可达到的峰值均高于沉后水和滤后水,沉后水和

滤后水中藻类增殖速率相仿,但沉后水达到的峰值要大于滤后水。同时测定原水、沉后水、滤后水中TN和TP含量,结果见表2。

表2 原水、沉后水和滤后水中TN和TP的含量

Tab.2 Content of TN and TP in raw water, settling water and filtered water

项 目	TN/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	TP/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	N/P 值
原水	2.10	0.25	8.4
沉后水	1.95	0.14	13.92
滤后水	1.86	0.08	23.25

有研究表明,当N/P值  $>16$  时,磷对藻类的促进作用比氮更为明显<sup>[16]</sup>,即磷更倾向于成为限制藻类生长的主要因素。由表2可知,混凝沉淀/超滤工艺各段对TN的去除效果并不明显,但对TP的去除效果明显,这是由于大部分TP存在于悬浮颗粒物之中,在混凝沉淀段会随着絮凝作用凝聚成大颗粒沉淀,余下的吸附于残留絮体上的TP也会被超滤膜截留,导致出水TP下降明显,N/P值升高。滤后水的N/P值为23.25,大于16,因此磷成为主要的限制因素,从而限制了藻类的繁殖。这也说明超滤膜工艺可将接纳水体富营养化的风险降低,抑制河道水体的藻类增殖。

## 2.5 跨膜压差

采用膜技术过程中,为了降低膜污染、减少膜的化学清洗、延长膜的使用周期,通常会采用前处理控制进膜的水质。例如,佛山新城浸没式超滤膜水厂使用的颗粒活性炭-超滤工艺<sup>[17]</sup>、中试处理滦河水采用的混凝-超滤工艺<sup>[18]</sup>等。本试验采用混凝沉淀/超滤工艺处理苏州河道水,由于超滤膜试验中超滤膜采取恒产水量运行,可通过监测跨膜压差的变化来间接表示膜污染情况,并根据跨膜压差的变化选择PAC最佳投加量。

该试验分析了6个运行周期的跨膜压差,当PAC投加量为  $5 \text{ mg/L}$  时,周期开始计时到第6个周期反冲洗结束后,其跨膜压差上升了  $2.1 \text{ kPa}$  (见图9);当PAC投加量为  $10 \text{ mg/L}$  时,6个周期后跨膜压差上升了  $1.0 \text{ kPa}$ ;当PAC投加量为  $15 \text{ mg/L}$  时,6个周期后跨膜压差上升了  $0.2 \text{ kPa}$ ;当PAC投加量为  $20 \text{ mg/L}$  时,6个周期后跨膜压差基本没有变化。当PAC投加量为25、30、35和  $40 \text{ mg/L}$  时,跨膜压差均未升高。

悬浮物及有机物是引起超滤膜污染的重要因

素<sup>[19-20]</sup>,其在水中的存在会导致跨膜压差的上升,跨膜压差的变化可以间接反映膜污染情况,且与超滤膜装置的运行能耗密切相关。原水经混凝沉淀预处理后,部分大分子以及大颗粒物质被去除,可减轻膜污染,延长化学清洗周期。根据试验监测数据,当PAC投加量为20 mg/L时,跨膜压差在连续6个运行周期后没有上升。综合考虑运行能耗与处理效果,PAC投加量为20 mg/L是组合工艺处理苏州环城河道水的适宜投加量。

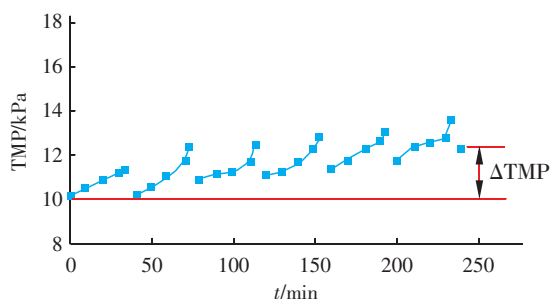


图9 PAC投加量为5 mg/L时跨膜压差的变化

Fig.9 Change of transmembrane pressure under PAC dosage of 5 mg/L

### 3 结论

① 混凝沉淀/超滤组合工艺对苏州环城河道水的浊度有良好的去除效果,经过滤后对浊度的去除率能保持在94%以上,水中胶体及悬浮物在混凝沉淀段被凝聚成大颗粒,膜的截留作用使得大颗粒物质被明显去除,出水中颗粒物质的粒径均在40 nm以下。

② 采用超滤膜工艺处理沉淀后的出水,能够进一步削减颗粒物并降低腐殖酸含量,从而降低色度、提高透明度、改善水体感官效应,对色度的去除率能保持在89.5%以上,出水水质稳定。

③ 综合考虑膜污染情况与处理效果,当PAC投加量为20 mg/L时,跨膜压差在6个周期内不再上升,因此混凝沉淀前处理段可选取20 mg/L为最适合处理苏州河道水的PAC投加量。

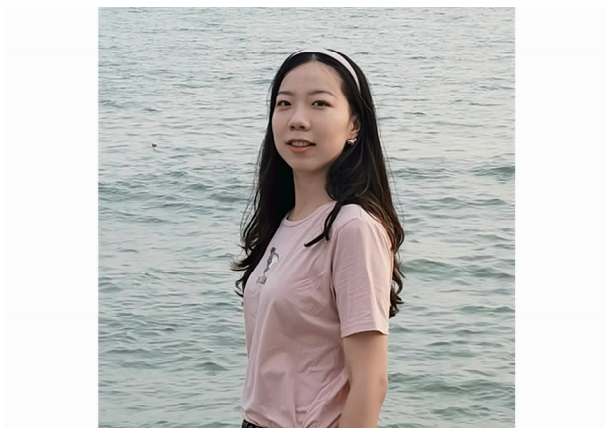
④ 结合现场中试结果可知,混凝沉淀/超滤工艺对浊度、色度、悬浮物、叶绿素a及絮凝残体等均有良好的净化效果,可降低出水中铝的含量,降低对河道水生态系统安全造成负面影响的几率。同时能够有效削减出水中TP含量,降低藻类的增殖潜力。出水水质可满足苏州市平江历史片区打造高品质景观水体的特定需求,在全国有着类似高品质景观水

需求的场合具有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 黄溢. 苏州东北街河水生态修复试验效果研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2016.  
Huang Yi. Study on Effect of Ecological Restoration Experiment of Northeast Street River in Suzhou[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016(in Chinese).
- [2] 宋连朋. 混凝沉淀法处理景观水体污染水的试验研究[D]. 天津:河北工业大学,2012.  
Song Lianpeng. An Experimental Study for Polluted Landscape Water Treatment Using Coagulation Sedimentation Process[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012(in Chinese).
- [3] Xia S J, Li X, Liu R P, *et al.* Study of reservoir water treatment by ultrafiltration for drinking water production[J]. *Desalination*, 2004, 167: 23-26.
- [4] 何柳东,林亚凯,闫博,等. 浸没式PVDF超滤膜在大型再生水厂的中试研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(1): 73-76.  
He Liudong, Lin Yakai, Yan Bo, *et al.* Pilot application of submerged PVDF ultrafiltration membrane in reclaimed water plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(1): 73-76(in Chinese).
- [5] 付宛宜,吴启龙,张锡辉,等. 超滤膜及其组合工艺在饮用水处理中的应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(22): 1-6.  
Fu Wanyi, Wu Qilong, Zhang Xihui, *et al.* Application of ultrafiltration and its combined process in drinking water treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(22): 1-6(in Chinese).
- [6] 舒欣欣,庞维海,张华,等. 某污水处理厂出水色度超标原因分析[J]. 给水排水, 2018, 44(7): 41-46.  
Shu Xinxin, Pang Weihai, Zhang Hua, *et al.* Analysis of causes for excessive color of effluent of municipal treatment plant[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(7): 41-46(in Chinese).
- [7] 范帆,李文朝,柯凡. 巢湖市水源地铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)藻团粒径时空分布规律[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 213-220.  
Fan Fan, Li Wenchao, Ke Fan. Spatio-temporal distribution of *Microcystis aeruginosa* colony diameters in the water source region of Chaohu City[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(2): 213-220(in Chinese).
- [8] 卢青青,张娟,尹立红,等. 灵菌红素对铜绿微囊藻生

- 长及产毒能力的抑制作用[J]. 环境与职业医学, 2016,33(2):97-102.
- Lu Qingqing, Zhang Juan, Yin Lihong, *et al.* Inhibitory effect of prodigiosin on growth and toxin-producing capability of *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2016,33(2):97-102 (in Chinese).
- [9] 卢金锁,张博,张旭. 不同光强下小球藻纵向沉降及悬浮特性研究[J]. 海洋科学, 2013,37(9):54-60.
- Lu Jinsuo, Zhang Bo, Zhang Xu. *Chlorella vulgaris* vertical migration characteristics in different light intensity[J]. Marine Sciences, 2013,37(9):54-60 (in Chinese).
- [10] 华建良,倪先哲,桂波,等. 在线混凝/超滤膜高通量处理太湖水的效果与机理[J]. 中国给水排水, 2018, 34(3):37-41.
- Hua Jianliang, Ni Xianzhe, Gui Bo, *et al.* Mechanism and effects of online coagulation as UF pretreatment for treatment of Taihu Lake water at high flux[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(3):37-41 (in Chinese).
- [11] 宋晓娜,于涛,张远,等. 利用三维荧光技术分析太湖水体溶解性有机质的分布特征及来源[J]. 环境科学学报, 2010,30(11):2321-2331.
- Song Xiaona, Yu Tao, Zhang Yuan, *et al.* Distribution characterization and source analysis of dissolved organic matters in Taihu Lake using three dimensional fluorescence excitation-emission matrix [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010,30(11):2321-2331 (in Chinese).
- [12] Li X H, Li J X, Wang J, *et al.* Experimental investigation of local flux distribution and fouling behavior in double-end and dead-end submerged hollow fiber membrane modules[J]. Journal of Membrane Science, 2014,453:18-26.
- [13] Zhang W X, Ding L H, Luo J Q, *et al.* Membrane fouling in photocatalytic membrane reactors (PMRs) for water and wastewater treatment: A critical review [J]. Chemical Engineering Journal, 2016,302:446-458.
- [14] Shen Y X, Xiao K, Liang P, *et al.* Characterization of soluble microbial products in 10 large-scale membrane bioreactors for municipal wastewater treatment in China [J]. Journal of Membrane Science, 2012, 415/416:336-345.
- [15] 闫龙芳. 环境样品中铝的形态分析[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2008.
- Yan Longfang. Speciation Analysis of Aluminium in Environmental Samples [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008 (in Chinese).
- [16] 韦桂秋. AGP 试验在珠江口监测的应用[D]. 青岛:中国海洋大学, 2006.
- Wei Guiqiu. Application of Algal Growth Potential Experiment Carried at the Pearl River Estuary Monitor [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006 (in Chinese).
- [17] 邹振裕,黄明珠,罗永恒,等. 佛山新城浸没式超滤膜水厂设计经验及运行调试实践[J]. 中国给水排水, 2016,32(22):98-102.
- Zou Zhenyu, Huang Mingzhu, Luo Yongheng, *et al.* Design experience and operation practice of waterworks with submerged ultrafiltration membrane in Xincheng District, Foshan City [J]. China Water & Wastewater, 2016,32(22):98-102 (in Chinese).
- [18] 冯颜颜. 混凝-超滤工艺处理滦河水试研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
- Feng Yanyan. Pilot Study of Luanhe River Water Treatment by a Coagulation-Ultrafiltration Membrane System [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 (in Chinese).
- [19] Chang H Q, Liu B C, Luo W S, *et al.* Fouling mechanisms in the early stage of an enhanced coagulation-ultrafiltration process [J]. Front Environ Sci Eng, 2015,9(1):73-83.
- [20] Meng F G, Zhang S Q, Oh Y, *et al.* Fouling in membrane bioreactor: An updated review [J]. Water Res, 2017, 114:151-180.



作者简介:袁文璟(1995-),女,安徽蚌埠人,硕士研究生,研究方向为水污染控制。

E-mail: ywj1027@sjtu.edu.cn

收稿日期:2019-05-05