

述评与讨论

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.18.003

## 饮用水超滤处理中的膜污染及减缓技术研究进展

高倩<sup>1,2,3,4</sup>, 张崇森<sup>3</sup>, 魏样<sup>1,2</sup>, 徐慧<sup>4</sup>, 王东升<sup>4</sup>

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075; 2. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075; 3. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 4. 中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 综述了当前使用超滤工艺处理饮用水的现状及其优势特点,介绍了超滤工艺对不同污染物的去除效果,并总结了造成超滤过程中膜污染的污染物种类及膜污染类型;分析了目前超滤工艺中膜污染出现的主要原因,重点总结了当前减缓膜污染所采取的措施,包括膜前预处理、对膜材料的控制及改性操作、优化膜处理工艺以及对污染的膜进行清洗等。同时对当前饮用水超滤技术的局限性和前景进行分析,为超滤技术在今后饮用水处理领域的主要研究方向提供了思路。

**关键词:** 超滤; 膜污染; 减缓膜污染; 饮用水处理

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)18-0013-06

## Research Progress of Membrane Fouling and Mitigation Techniques in Ultrafiltration Treatment of Drinking Water

GAO Qian<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Chong-miao<sup>3</sup>, WEI Yang<sup>1,2</sup>, XU Hui<sup>4</sup>, WANG Dong-sheng<sup>4</sup>

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd., Xi'an 710075, China; 2. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd., Xi'an 710075, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** This paper introduced the status and advantages of the ultrafiltration process and its effects on the removal of pollutants, and the types of pollutants which caused the membrane fouling and types of membrane fouling were also summarized. The main reasons for the membrane fouling in the current ultrafiltration process were analyzed, and the measures which could be used to reduce membrane fouling were also summarized, including pretreatment method, optimization of membrane materials and operation process, and cleaning of contaminated membranes. At the same time, the limitations and prospects of the ultrafiltration technology for current drinking water treatment were analyzed, which could provide ideas for the main research directions of ultrafiltration in the field of drinking water treatment in the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07501-002、2017ZX07108-002); 国家自然科学基金资助项目(51578441、51778604)

通信作者: 张崇森 E-mail: cmzhang@xauat.edu.cn

future.

**Key words:** ultrafiltration; membrane fouling; membrane fouling mitigation; drinking water treatment

全球经济的快速发展导致饮用水水源的污染问题日益严重,采用传统的水处理工艺已无法满足人民对优质饮用水的要求。超滤(UF)工艺因其价格低廉、节能高效、操作简便、设备简单及二次污染小等独有的优势,在给水处理中的应用越来越广泛<sup>[1-4]</sup>。然而,膜污染问题限制了超滤技术的发展。根据近年来国内外饮用水超滤处理技术的研究进展,从膜污染的成因分类、减缓膜污染技术等方面,对饮用水超滤处理中的最新研究成果进行系统阐述。

## 1 饮用水超滤过程中膜污染诱因分析

### 1.1 污染物种类

根据膜污染物质种类分析,膜污染主要分为以下几类:颗粒物质沉淀堵塞超滤膜形成的颗粒物污染<sup>[5]</sup>;多糖、蛋白质、腐殖酸等造成的有机物污染<sup>[6]</sup>;无机物及沉积物( $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{BaSO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$ 等)造成的无机物污染;生物聚合物,微生物生长、繁殖附着在膜表面上造成的生物污染。

① 颗粒物污染。水体中的颗粒物主要分为可沉降颗粒物(粒径 $>100\ \mu\text{m}$ )、超胶体颗粒物(粒径 $1\sim100\ \mu\text{m}$ )、胶体颗粒物(粒径 $0.001\sim1\ \mu\text{m}$ )及可溶解颗粒物(粒径 $<0.001\ \mu\text{m}$ )。颗粒物造成的膜污染又分为膜孔阻塞和在膜面形成滤饼层两种情况<sup>[7-8]</sup>。其中膜孔阻塞是膜污染最严重的阶段,也是污染的第一阶段,通常情况下,膜孔阻塞分为标准膜孔阻塞、完全膜孔阻塞和中间膜孔阻塞3种情况。颗粒物污染的第二阶段是随着水体中颗粒物的不断增加,膜表面渐渐形成滤饼层,影响膜通量的变化和超滤的效果。有研究<sup>[9]</sup>表明,高浓度的颗粒物沉积在膜表面,会加大跨膜压差导致浓差极化现象,造成严重的膜污染现象。

② 有机物污染。天然水体中含有各种成分的有机物(如多糖、蛋白质、腐殖酸等),随着环境污染问题的加重,除天然水体中含有的有机物质外,也包含有人工合成的各种复合有机物<sup>[10]</sup>。有机物污染通常会受到各种因素的影响,包含膜表面及其结构等自身性质,溶液的pH值、离子强度等化学性质,压力、浓度极差、流体边界层性质及性能等操作条件

和动力学影响等。

③ 无机物污染。无机物污染是各种有害的金属离子、盐类、酸、碱性物质及无机悬浮物等沉积在膜的表面因而造成的膜表面结垢现象,属于膜表面的物理破坏。超滤膜在受到无机物污染后,污垢会造成不可逆的孔阻塞且清洗困难,膜的性能将很难恢复<sup>[11-12]</sup>。造成超滤膜无机物污染的主要是碳酸盐类,其中金属类碳酸盐(如Fe、Mg和Ca等)能使膜结垢的强度加大<sup>[8]</sup>。

④ 生物污染。膜上生物在超滤膜表面进行生长、分解、新陈代谢及聚集等活动造成超滤膜的生物污染。有研究表明,当水体中 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}<10$ 时,水中微生物的比例会受到影响,导致水体中硫含量增加,从而进一步加重膜污染<sup>[13]</sup>。

### 1.2 膜污染类型

根据膜污染情况,膜污染分为可消除性污染、不可消除性污染和不可逆性污染3种类型。通过物理清洗(如回流)可以消除的污染称为可消除性污染,而需要经过化学清洗才能消除的污染称为不可消除性污染。不可逆性污染和不可消除性污染实属同一种类型,不同之处在于不可消除性污染由松散污染物附着所致,而不可逆性污染则由孔堵塞和强污染物附着所致,是任何清洗方法都无法消除的长久性污染。饼层结垢常为可消除性污染,而孔堵塞往往为不可消除性污染或不可逆性污染。

## 2 膜污染的减缓方式研究

### 2.1 膜前预处理

混凝及强化混凝工艺常被用作超滤工艺的预处理工艺,超滤与混凝的组合工艺能够有效缓解膜污染,使膜保持较高的通量,同时可以对溶解性有机物和小分子有机物有着较高的去除效果<sup>[14]</sup>。

Dixon等<sup>[15]</sup>的研究表明,混凝预处理能够有效减轻膜污染,增加膜的通透性,对水处理有着良好的处理效果。刘海龙等<sup>[16]</sup>通过实验证明前置强化混凝对后续生物处理有一定的影响,可以去除大量的COD和一定量的TN,同时对胶态、颗粒态的氮和有机氮均有着较高的去除率,不同程度上减轻了后续工艺的膜污染,稳定了水处理工艺的效果。Wang

等<sup>[17]</sup>的研究表明,在膜前预处理的混凝-絮凝过程中添加粉末状活性炭可以提高天然有机物(NOM)的去除率,尤其是对蛋白质物质和类腐殖质物质,这在一定程度上减少了膜表面污染的可能性。在不同混合动力的超滤系统中,组合吸附工艺可以增强混凝预处理的效果,从而进一步缓解膜污染。Yao等<sup>[18]</sup>研究表明,当聚合氯化铝(PAC)设定在最佳投加量(Al含量为0.15~0.25 mmol/L)时,在絮体破碎后再次投加PAC和聚丙烯酰胺(PAM),将会减缓膜污染。实验证明再次投加PAM所产生的絮体平均粒径大于PAC,混凝剂形成絮体的分形维数对膜污染起着重要作用,再次投加的PAM所形成的絮体较PAC的絮体具有更低的有效密度,其在膜表面上表现为饼层更松散且多孔。此外,Yao等<sup>[18]</sup>还研究了膜的可逆污染和不可逆污染。二次投加混凝剂PAC可缓解膜污染,但其所造成的不可逆污染并不会减少。

除前置混凝工序外,活性炭吸附也常被用作超滤的预处理方式,活性炭可高效吸附水中的污染物,与超滤工艺的联用能够有效提高水处理系统对有机物的去除率。

Pramanik等<sup>[19]</sup>用两年的时间研究了使用生物活性炭处理水中有机污染物的影响,实验数据证明,使用生物活性炭预处理有效地减少了水中有机污染物,并且通过计算膜污染指数,得出活性炭吸附对减轻膜污染的贡献,该研究表明超滤前使用活性炭预处理可减少膜频繁的清洗,并因此延长膜的寿命。Muhammad<sup>[20]</sup>将颗粒活性炭结合超滤工艺使用到中试水厂中,主要用于去除水中的农药,实践表明使用粒状活性炭(GAC)作为粉末活性炭的替代物,由于其具有较大的粒径而不会进入膜系统。实验采用Langmuir和Freundlich两种吸附模型描述了2,4-D和百草枯在GAC上的吸附过程,结果表明,在GAC/UF混合系统中实现了100%的2,4-D的截留。

## 2.2 使用不同膜材料及膜材料的改性

膜污染是限制膜工业快速发展的重要因素,不少研究者发现膜污染与膜材料有着很大的关系,改变膜材料以及对膜材料进行改性成为了减缓膜污染的主要研究方向。

Iorhemen等<sup>[21]</sup>综述了使用颗粒材料来缓解MBR过程的膜污染,颗粒状介质之间的相互摩擦减

缓了滤饼层的形成,延长了过滤周期,提高了膜过滤通量(提高20%~30%),并将曝气强度降低了50%。Miyoshi等<sup>[22]</sup>研究了不同膜聚合物材料对膜孔径与膜生物反应器膜污染发展之间关系的影响。使用3种不同的聚合物材料——醋酸丁酸纤维素(CAB)、聚乙烯醇缩丁醛(PVB)和聚偏二氟乙烯(PVDF)制备具有不同孔径的膜,并且通过间歇式过滤测试评估每种膜的污染程度。实验结果显示膜聚合物材料可以显著影响膜的污染程度。对于PVDF膜,随着膜孔径的增加,膜污染程度降低。相比之下,具有较小孔隙的CAB膜比具有较大孔隙的CAB膜具有更低的污染倾向。白朗明<sup>[23]</sup>的研究表明采用碳纳米管和纳米纤维素晶体对超滤膜进行改性也可以提升超滤膜的性能。

## 2.3 优化膜处理工艺

在实际研究中发现,超滤与氧化组合工艺、超滤与生物组合工艺均能起到缓解膜污染的作用,这两种混合工艺在饮用水处理中具有很大的应用潜力,同时对有机物有着较高的去除率,在减缓膜污染方面发挥了积极作用。

Yu等<sup>[24]</sup>发现低浓度的臭氧可以显著缓解膜污染,降低膜系统中细菌的浓度,并通过增加亲水性物质的比例来改变溶解有机物质的性质。臭氧可以降低滤饼层中胞外聚合物(EPS)的浓度,如多糖和蛋白质。降低EPS和细菌浓度可导致更薄的滤饼层,还可以通过降低膜孔内有机物质的积累和疏水性减小不可逆污染。Mänttari等<sup>[25]</sup>则研究了利用气相脉冲电晕放电(PCD)氧化超滤组合工艺从木材自溶水解产物中回收半乳甘露聚糖的可能。实验结果表明,PCD氧化可以显著改善木材自溶水解物的可滤性,膜过滤性能有所提高主要是由于氧化可以改变木质素的结构,降低黏度。Guo等<sup>[26]</sup>通过比较臭氧氧化—陶瓷膜—生物活性炭和陶瓷膜—生物活性炭两种组合工艺处理原水来评价氧化结合超滤工艺的优势,并从浊度、氨和有机物的去除效率评估组合工艺的性能。结果表明两种工艺均可去除超过99%的颗粒物,而通过臭氧氧化的工艺后,膜污染明显减少,膜通量增加了25%~30%,与此同时,预臭氧氧化改变了原水组分,影响活性炭中的微生物,从而起到了减小膜污染的效果。而Szymański等<sup>[27]</sup>的研究结果有所不同,Szymański等比较了两种先进的氧化工艺[光催化和紫外线(UV)辐射H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>分解]与超



滤结合的出水效果。结果表明,与光解—超滤系统进行比较,改变  $UV/H_2O_2$ —UF 模式中  $H_2O_2$  的浓度范围及光催化剂  $TiO_2$  加载量,使用具有  $ZnO$  分离层的陶瓷膜没有观察到光催化剂或  $H_2O_2$  浓度对渗透通量的显著影响。然而,光催化膜反应器(PMR)和  $UV/H_2O_2$ —UF 系统比光解—UF 系统更不容易结垢,形成的膜污染更少。实验表明,吸附是 PMR 中总有机碳去除的重要阶段,而 UF 主要贡献于光催化剂分离,对总体处理效率影响较小。

## 2.4 对污染膜的清洗

在一个过滤周期内,简单地对膜进行清洗并不能减缓膜污染;在多个运行周期内,膜清洗可以通过洗去可逆污染等恢复膜性能,达到减缓膜污染的效果。清洗的主要目的是消除膜污染并快速恢复膜本身的性能。合适理想的清洗步骤能够有效去除各种污染物质,还可以降低水处理中超滤的成本,因此膜污染的清洗受到广泛关注。

一般来说膜污染清洗的方式有物理清洗和化学清洗。物理清洗通常通过改变物理条件(如水压冲洗、气压冲洗),采用机械的手段除去膜表面的污染物。然而实际应用中,单纯的物理清洗并不能有效地对受污染的膜进行彻底清除,常结合化学清洗处理污染的超滤膜。化学清洗采用酸、碱、酶、表面活性剂、氧化剂等化学药剂使受污染的膜得到清洗。Chang 等<sup>[28]</sup>采用水力清洗的办法对超滤系统在水处理中的表现进行了研究,考察了反洗水的组成对由腐殖酸(HA)污染的超滤膜的水力清洁性能的影响。实验采用的各种类型的反冲洗水包括超滤渗透液、Milli-Q 水、NaCl 溶液、 $CaCl_2$  溶液和 HA 溶液。实验表明,清洗 HA 污染膜方面各种反冲洗水表现出的优势为:NaCl 溶液 > HA 溶液 > Milli-Q 水 > 超滤渗透液 >  $CaCl_2$  溶液。结果还表明,反洗水中  $Ca^{2+}$  的存在会大大降低反洗效率,但  $Ca^{2+}$  在清除污垢中仍起着重要作用。机理分析表明,反冲洗过程可能涉及污垢层溶胀、离子交换、双电层释放和竞争络合,离子交换和竞争络合在分别与  $Na^+$  和 HA 有关的高效液压清洗中起重要作用。而 Motsa 等<sup>[29]</sup>的研究则重点关注了在线渗透反冲洗(OSBW)工艺在膜表面结垢后恢复膜通量的性能。实验使用传统的三醋酸纤维素(CTA)正向渗透(FO)膜研究了反冲洗渗透速率和错流速度对渗透反洗过程清洗效率的影响。用一系列表征技术如微观光谱和电动力学分

析研究清洁过的膜的表面特性。实验结果表明:较高的反冲洗渗透速率和交叉流动速度增加了渗透反洗过程的清洗效率。渗透速率被认为是渗透反洗期间清洗效率的决定因素。膜表面分析表明,即使恢复了 90% 以上的膜通量,膜上仍然有残留的污垢层,可能滞留在多孔支撑层的孔中,并且阻止了完全的渗透通量恢复。Lin 等<sup>[30]</sup>使用超滤系统进行活性炭过滤器反冲洗水的再利用研究,利用 XDLVO 理论和流体动力学相互作用的模型研究膜污染机理。机理表明,最初的膜污染可以通过减少与渗透通量有关的力来缓解。在第二次膜结垢期间,大部分由疏水胶体形成的滤饼层保留在膜表面。增加的阻力主要是造成短程膜污染的界面力,极大地加剧了膜污染。在超滤过滤过程中使用间歇预臭氧化是减轻膜污染最有效的方法,并且化学清洗周期从 15 d 延长至 18 d。

## 3 超滤技术的局限性与发展方向

超滤技术在饮用水处理领域中的应用越来越多,然而其伴随的膜污染问题依旧是现今超滤工艺中不可忽视的潜在问题,同时也是膜处理工艺未来市场的研究重点。为了使超滤及其组合工艺在水处理领域更好地发挥作用,体现超滤的优势技术,进一步推广膜技术,今后应在以下几个方面进行重点研究:①开发更具抗污染性、高膜通量等特点的新型超滤膜,从而缓解膜污染、延长膜寿命。②研究膜污染的内在原因,建立模型深度解析膜污染的根本,从源头控制膜污染。③优化现有超滤工艺,针对不同性质的水采用最佳处理工艺,降低成本,提高超滤处理效率。④不断优化改进膜清洗方式,采用更节能环保的清洗方法,提高膜利用率。

## 参考文献:

- [1] Wang X, Ma B W, Bai Y H. Comparison of the effects of aluminum and iron(Ⅲ) salts on ultrafiltration membrane biofouling in drinking water treatment[J]. J Environ Sci, 2018, 63(1): 96-104.
- [2] 任海静, 石春力, 孔祥娟, 等. 饮用水处理领域超滤膜系统评价体系探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(20): 24-28.  
Ren Haijing, Shi Chunli, Kong Xiangjuan, et al. Discussion on evaluation system of ultrafiltration membrane for drinking water treatment[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(20): 24-28 (in Chinese).

- [3] 岳鹏,丁昀,杨庆,等. 超滤技术在城镇给水处理中的研究进展与应用[J]. 净水技术,2017,36(4):36-42.  
Yue Peng, Ding Yun, Yang Qing, *et al.* Research progress and application of ultrafiltration technology in urban drinking water treatment[J]. Water Purification Technology,2017,36(4):36-42(in Chinese).
- [4] 康得军,匡帅,江雪,等. 超滤及其组合工艺在饮用水处理中的应用[J]. 市政技术,2016,34(6):137-140.  
Kang Dejun, Kuang Shuai, Jiang Xue, *et al.* Application of ultrafiltration and combined process in drinking water treatment[J]. Municipal Engineering Technology,2016,34(6):137-140(in Chinese).
- [5] Abdelrasoul A, Doan H, Lohi A, *et al.* The influence of aggregation of latex particles on membrane fouling attachments & ultrafiltration performance in ultrafiltration of latex contaminated water and wastewater [J]. J Environ Sci,2017,52(2):118-129.
- [6] Ao L, Liu W J, Zhao L, *et al.* Membrane fouling in ultrafiltration of natural water after pretreatment to different extents[J]. J Environ Sci,2016,43(5):234-243.
- [7] 王小波,瞿芳术,王昊,等. 超滤膜处理高藻水过程中天然颗粒物对膜污染的影响[J]. 膜科学与技术,2017,37(6):39-45.  
Wang Xiaobo, Qu Fangshu, Wang Hao, *et al.* Effects of natural particles on membrane fouling during algal-laden water treatment using ultrafiltration [J]. Membrane Science and Technology, 2017, 37 (6): 39 - 45 (in Chinese).
- [8] Wang L F, He D Q, Chen W, *et al.* Probing the roles of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in humic acids-induced ultrafiltration membrane fouling using an integrated approach [J]. Water Res,2015,81:325-332.
- [9] 邹瑜斌,陈昊雯,段淑璇,等. 混凝-超滤过程中絮体形态对膜污染的影响[J]. 环境工程学报,2017,11(12):6226-6232.  
Zou Yubin, Chen Haowen, Duan Shuxuan, *et al.* Effect of floc morphology on membrane fouling in a coagulation-ultrafiltration process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2017,11(12):6226-6232(in Chinese).
- [10] Wang H, Ding A, Gan Z D, *et al.* Fluorescent natural organic matter responsible for ultrafiltration membrane fouling: Fate, contributions and fouling mechanisms [J]. Chemosphere,2017,182:183-193.
- [11] Jiang S X, Li Y N, Ladewig B P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies [J]. Sci Total Environ,2017,595:567-583.
- [12] Yan Z S, Liu B, Qu F S, *et al.* Control of ultrafiltration membrane fouling caused by algal extracellular organic matter (EOM) using enhanced Al coagulation with permanganate[J]. Sep Purif Technol,2017,172:51-58.
- [13] Song X Y, Luo W H, McDonald J, *et al.* Effects of sulphur on the performance of an anaerobic membrane bioreactor: Biological stability, trace organic contaminant removal, and membrane fouling[J]. Bioresour Technol, 2018,250:171-177.
- [14] 杨海洋,杜星,甘振东,等. 混凝-助凝-超滤工艺处理地表水膜污染[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(2):13-19.  
Yang Haiyang, Du Xing, Gan Zhendong, *et al.* Membrane fouling on coagulation/aid-coagulation/ ultrafiltration process for drinking water treatment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2017,49(2):13-19(in Chinese).
- [15] Dixon M, Staaks C, Fabris R, *et al.* The impact of optimised coagulation on membrane fouling for coagulation/ultrafiltration process [J]. Desal Water Treat,2013,51(13/15):2718-2725.
- [16] 刘海龙,任宇霞,张忠民. 低温污水前置强化混凝[J]. 环境科学,2018,39(5):2239-2248.  
Liu Hailong, Ren Yuxia, Zhang Zhongmin. Enhanced coagulation as a pretreatment for low temperature wastewater[J]. Environmental Science, 2018, 39 (5): 2239 - 2248(in Chinese).
- [17] Wang H, Qu F S, Ding A, *et al.* Combined effects of PAC adsorption and in situ chlorination on membrane fouling in a pilot-scale coagulation and ultrafiltration process[J]. Chem Eng J,2016,283:1374-1383.
- [18] Yao M, Nan J, Chen T, *et al.* Influence of flocs breakage process on membrane fouling in coagulation/ ultrafiltration process—Effect of additional coagulant of poly-aluminum chloride and polyacrylamide [J]. J Membr Sci,2015,491:63-72.
- [19] Pramanik B K, Roddick F A, Fan L H. Long-term operation of biological activated carbon pre-treatment for microfiltration of secondary effluent: Correlation between the organic foulants and fouling potential [J]. Water Res,2016,90:405-414.

- [20] Muhammad Z. Removal of pesticides from water using granular activated carbon and ultrafiltration membrane—A pilot plant study[J]. *J Encapsulat Adsorpt Sci*, 2013, 3(3):71–76.
- [21] Iorhemen O T, Hamza R A, Tay J H. Membrane fouling control in membrane bioreactors (MBRs) using granular materials[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 240:9–24.
- [22] Miyoshi T, Yuasa K, Ishigami T, *et al.* Effect of membrane polymeric materials on relationship between surface pore size and membrane fouling in membrane bioreactors[J]. *Appl Surface Sci*, 2015, 330:351–357.
- [23] 白朗明. 碳纳米管和纳米纤维素晶体对超滤膜性能的提升研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.  
Bai Langming. Study on Improvement of Ultrafiltration Membrane Properties by Carbon Nanotubes and Nano-Cellulose Crystals [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).
- [24] Yu W Z, Graham N J D, Fowler G D. Coagulation and oxidation for controlling ultrafiltration membrane fouling in drinking water treatment; Application of ozone at low dose in submerged membrane tank [J]. *Water Res*, 2016, 95:1–10.
- [25] Mänttari M, Al Manasrah M, Strand E, *et al.* Improvement of ultrafiltration performance by oxidation treatment in the recovery of galactoglucomannan from wood autohydrolyzate [J]. *Sep Purif Technol*, 2015, 149:428–436.
- [26] Guo J N, Hu J Y, Tao Y, *et al.* Effect of ozone on the performance of a hybrid ceramic membrane-biological activated carbon process [J]. *J Environ Sci*, 2014, 26(4):783–791.
- [27] Szymański K, Morawski A W, Mozia S. Effectiveness of treatment of secondary effluent from a municipal wastewater treatment plant in a photocatalytic membrane reactor and hybrid UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – ultrafiltration system [J]. *Chem Eng Process*, 2018, 125:318–324.
- [28] Chang H Q, Liang H, Qu F S, *et al.* Towards a better hydraulic cleaning strategy for ultrafiltration membrane fouling by humic acid: Effect of backwash water composition [J]. *J Environ Sci*, 2016, 43(5):177–186.
- [29] Motsa M M, Mamba B B, Thwala J M, *et al.* Osmotic backwash of fouled FO membranes: Cleaning mechanisms and membrane surface properties after cleaning [J]. *Desalination*, 2017, 402:62–71.
- [30] Lin T, Zhang J N, Chen W. Recycling of activated carbon filter backwash water using ultrafiltration: Membrane fouling caused by different dominant interfacial forces [J]. *J Membr Sci*, 2017, 544:174–185.



作者简介:高倩(1992–),女,陕西铜川人,硕士,研究方向为水质净化与水的再生利用。

E-mail:gaoqian7879@163.com

收稿日期:2018–11–14

节水就是开源,就是增效,就是减排,就是降损