

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.005

胞外聚合物与膜污染的相关关系研究进展

李莹^{1,2,3}, 刘强³, 陈卫^{1,2}, 郑兴灿^{2,4}, 郑晓英^{1,2}, 曲吉祥⁵,
杨成方³

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 徐州工程学院 环境工程学院, 江苏 徐州 221018;
4. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 5. 陆军工程大学训练基地, 江苏 徐州 221000)

摘要: 膜生物反应器(MBR)在污水处理技术领域具有独特的优势,然而膜污染的存在仍是制约其发展的障碍。为更全面了解和认识膜污染的过程、形成机制及影响因素,介绍了MBR的主要类型、特点和适用条件,综述了膜污染的机理及控制研究进展,重点分析了膜污染影响因素,尤其是胞外聚合物与膜污染的相关关系,并对膜污染控制机理的研究进程进行了展望,可为开发安全、有效、经济的膜污染控制技术提供参考。

关键词: 膜生物反应器; 膜污染控制机理; 胞外聚合物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0025-06

Advances of Correlation between Extracellular Polymers and Membrane Fouling

LI Ying^{1,2,3}, LIU Qiang³, CHEN Wei^{1,2}, ZHENG Xing-can^{2,4}, ZHENG Xiao-ying^{1,2},
QU Ji-xiang⁵, YANG Cheng-fang³

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes <Ministry of Education>, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China; 4. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 5. Training Base of Army Engineering University of PLA, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Membrane bioreactor (MBR) has unique advantages in the field of wastewater treatment technology. However, the existence of membrane fouling is still a barrier to its development. In order to understand the process, formation mechanism and influencing factors of membrane fouling, main types, characteristics and applicable conditions of MBR were briefly introduced, mechanism and control of membrane fouling were summarized, and the influencing factors of membrane fouling, especially the relationship between extracellular polymers and membrane fouling were emphatically analyzed. In the end, membrane fouling control mechanism was prospected, which aimed to provide a reference for the

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA610004); 国家自然科学基金资助项目(41807368); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 徐州市科技项目(KC19047、KC19105、KC18148); 徐州工程学院科研项目(XKY2018245)

通信作者: 陈卫 E-mail:1522502015@qq.com

development of safe, effective and economical membrane fouling control technology.

Key words: MBR; membrane fouling control mechanism; extracellular polymers

膜生物反应器(MBR)技术与传统的活性污泥法相比具有许多独特的优点,比如出水水质好、容积负荷高、占地面积小、剩余污泥产量少、灵活性高等。另外,排放标准越来越严格、膜成本逐步下降、由缺水引起的城市再生水需求量的急速增长等因素都大大推动了 MBR 技术的广泛研究和应用^[1]。MBR 应用领域非常广泛,然而膜污染仍然是限制膜生物反应器在实际生产中迅速推广应用的关键因素^[2-3],国内外学者对 MBR 的膜污染过程进行了多方面研究,从启动方式、膜材料、运行条件、超滤过程界面微观作用力、群体感应等角度阐述了膜污染机理,但由于膜污染是一个十分复杂的过程,影响因素非常多,其机理至今尚不完全清楚。近二三十年来,研究人员逐渐将关注点转移到胞外聚合物(EPS)与膜污染的相关关系上,一致认为 EPS 是导致膜污染的主要因素^[4-6],并且尝试通过调节 EPS 组分、含量或性质来减缓膜污染过程。为促进 MBR 在国内的研究以及应用,笔者主要针对膜污染研究进展进行了较为细致的分析,包括造成膜污染的主要物质、膜污染类型、EPS 与膜污染的相关关系、群体感应对 EPS 的影响。

1 MBR 主要类型

MBR 主要由膜分离组件及生物反应器两部分组成,通常提到的 MBR 其实是三类反应器的总称,即曝气膜-生物反应器(AMBR)、萃取膜-生物反应器(EMBR)和固液分离型膜-生物反应器(SLSMBR)。我国对 MBR 技术的研究以 SLSMBR 居多,而 AMBR 和 EMBR 类型的相关研究相对较少,直到 2003 年以后国内才有这两种 MBR 工艺的相关报道。本研究着重介绍 SLSMBR,为简单起见,简称为 MBR。

MBR 是在水处理领域中应用最为广泛、研究最为深入的一类膜生物反应器。根据膜组件与生物反应器的组合方式分类,MBR 的类型有分置式、一体式和复合式。一体式 MBR 在市场上应用居多,主要有循环式和淹没式两种类型。循环式 MBR 运行时部分高浓度污水需要回流,因此能耗较高,但是该工艺产水效率高、布局紧凑、节省空间、膜的清洗及维护比较方便,在工业废水处理工程中应用较多。淹

没式 MBR 由 Yamamoto 等^[7]首次报道,与循环式 MBR 相比能耗相对较低,剩余污泥产量较少,然而由于膜组件浸没在曝气池中,对膜进行清洗及维护相对比较困难。

复合式膜生物反应器(HMBR)是指将一些填料或药剂投加到 MBR 中组合而成的一种反应器,常用的填料类型有聚乙烯型悬浮填料、聚乙烯和醛化纤维的组合填料、软性填料类、弹性立体填料等,投加的药剂类型有生物活性炭、粉末活性炭、ZnO 纳米颗粒等^[8-10]。HMBR 具有处理效果好且稳定、耐冲击负荷、容积负荷高、占地面积小、自动化程度高等优点,近些年关于 HMBR 的研究及应用逐年增多。

2 历年研究热点分析

依据影响因子及文章的被引频次,选取了中国知网、EI、ScienceDirect 数据库中 2003 年—2019 年 150 篇与 MBR 相关的期刊论文进行统计分析,结果如图 1 所示。从时间维度上看,2003 年以来期刊论文数量整体呈增长趋势,2012 年以后论文发表数量出现了突然增长,这个现象的出现和新型膜材料的开发以及先进检测仪器的推广应用密不可分。2016 年以后,国内外 MBR 相关研究一直保持比较高的水平,2019 年的成果相对较少,但是成果的发表具有滞后性,可以预测 MBR 仍然是研究热点。

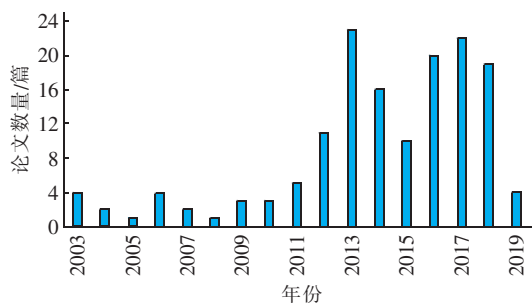


图1 MBR 历年相关期刊论文数量

Fig.1 Chronological distribution of annual journal articles involving in studies of MBR

从主要研究内容与相应期刊论文数量分析结果来看(见图2),MBR 应用领域非常广,如生活污水(MWW)、工业废水/垃圾渗滤液(IWW)、饮用水(DW)^[11],也有对基本原理的研究(FA)^[12]和其他内容研究(others)。其中,MWW 包括社区生活污

水、高速公路服务区污水、船舶生活废水等;工业废水类别有棕榈油废水、制药废水、制革废水、高浓度氨氮废水、老龄垃圾渗滤液废水等。

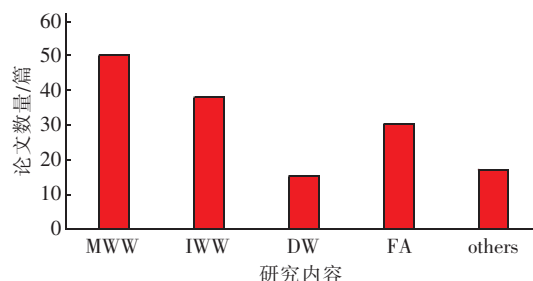


图2 主要研究内容与相应期刊论文数量

Fig.2 Number of papers and research topics

虽然 MBR 应用领域广泛,涉及多达(不限于)17 个行业,但大部分还是集中于生活污水(占比达 33.33%)和工业废水(占比达 25.33%)。说明近十几年来,MBR 的研究热点主要是对城市污水的处理及反应机理分析,其次是对工业废水/垃圾渗滤液的处理。其中对机理的研究主要包括:操作及设计参数的选择和优化、污泥特性分析、微生物特性分析、成本分析、膜污染控制研究。在国内发表的学术成果中,20% 与机理或模型相关。但总的来说,国内膜污染机理或模型的研究规模还较小,而且多数研究是以人工配水为主,与实际生产应用有一定的差异,因此以实际污水为原水、为期较长、规模较大的中试分析更具有指导意义。

3 MBR 膜污染与控制机理研究

随着 MBR 运行时间的延长,混合液中的一些无机物、有机物和真菌、细菌、病毒等微生物逐渐在膜孔内部及表面附着沉积,导致膜过滤阻力逐渐增加,从而造成了膜污染。膜污染不但会降低产水速率,而且增加了维护与运行费用。虽然可以通过物理或者化学措施恢复膜通量,但膜污染是无法避免的,因此应当积极探索减缓膜污染的方法,延长膜组件的使用寿命。

3.1 膜污染影响因素分析

在过去的十几年,很多学者对膜污染过程进行了研究、控制与模拟。影响膜污染的因素既有物理化学因素,也有生物因素。尽管很难对膜污染建立一个通用的公式或模型,但学者们认为其影响要素主要有三个:膜组件、生物量和运行条件。经过对文献的梳理分析,总结出了膜污染影响因素之间的相互关系,如图3所示。

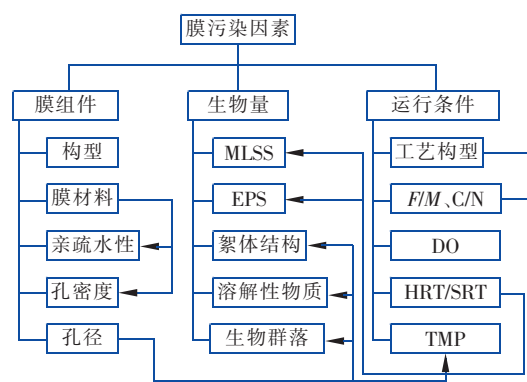


图3 膜污染影响因素之间的关系

Fig.3 Relationship between influencing factors of membrane fouling

目前常用的膜组件类型有中空纤维膜、平板膜、卷式膜和管式膜。膜组件类型对膜污染过程有重大影响,主要影响因素是单位体积膜组件的膜面积。当单位体积膜面积较小时,膜通量大,膜污染较轻且清洗方便,反之则容易受到污染且清洗比较困难。膜的性质(包括膜材料、膜孔径大小和膜表面特征等)对膜污染过程产生的影响不同,亲水性差、孔密度小的膜材料抗膜污染能力强^[13-14],聚偏氟乙烯(PVDF)由于具有较高的疏水性能,且耐磨性好、柔韧性强,比聚砜膜、纤维素膜应用更广^[15]。

运行条件方面,特别是 HRT、SRT 和 DO,能够间接影响反应器内的微生物特性,干扰微生物的生长、繁殖以及群落演变,最终影响微生物的代谢产物;若大分子溶解性代谢产物在 MBR 中大量积累,气-液界面将会增厚,不但会降低氧传递效率,而且还会加剧膜污染^[16]。然而为了增强生物降解效果,需要在反应器中强化传递过程,也就是强化微生物和膜表面的接触,这就促使细菌很容易吸附到膜表面形成生物膜并进一步生长、繁殖。形成生物膜的细菌由于自身代谢和聚合作用会产生大量的 EPS, EPS 是对多种不同类高分子物质的总称,其分子质量范围为 10~30 ku,主要组分为多糖、蛋白质、糖醛酸、腐殖酸、核酸以及脂类等。EPS 普遍存在于活性污泥絮体的内部与表面,是构成污泥絮体的重要组成部分,它的主要作用包括:黏附于细胞表面以维持絮体结构、保护絮体免受不利环境因素的影响、截留水分、吸附并提供营养物质等。一些学者认为, EPS 和溶解性微生物代谢产物(SMP)是导致膜污染的主要物质^[17-18]。

3.2 胞外聚合物分析

EPS 具有复杂性,包括表面电荷、疏水性/亲水性、黏合性能等,这些性能与膜污染关系紧密。关于 EPS 的研究,大致可以分为 4 个阶段。初期,学者们对 EPS 进行了分类,一般分为溶解性 EPS(S-EPS)和附着性 EPS(B-EPS)^[19]。S-EPS 又可分为两种类型:一种是与基质利用有关的产物(UAP),其由新陈代谢直接产生;另一种是与微生物内源代谢有关的产物(BAP),其由微生物自身产生。而 B-EPS 依据依附细胞壁的紧密程度不同,呈现出具有流变性的双层结构分布,内层是紧密附着性 EPS(TB-EPS),外层是松散附着性 EPS(LB-EPS)。

第二个阶段的研究主要关注于影响 EPS 形成及组分的各种因素,比如膜材料、光照、水质条件、运行工况等^[20-22],分析 EPS 中多糖、蛋白质、腐殖酸对 EPS 含量的影响及它们之间的交互关系。研究发现,B-EPS 和 S-EPS 中的主要组分均是蛋白质。

第三个阶段学者们进一步对蛋白质造成膜污染的机理进行了深入研究,发现蛋白质类型、离子性质和含量等诸多因素均会影响膜污染。米娜、邓东旭等^[23-24]考察了溶菌酶(LYS)、牛血清蛋白(BSA)、LYS+BSA 等 3 种蛋白质溶液的超滤过程,结果表明 LYS 对膜的初期污染以膜孔窄化为主,中期污染由膜孔堵塞和膜孔窄化共同决定;BSA 对膜的初期污染以膜孔堵塞为主,中期污染以膜孔窄化为主;滤饼层过滤是 BSA、LYS 后期膜污染的主要机制。LYS+BSA 二元混合溶液中的 LYS 对膜污染的产生起主导作用。米娜等^[23]的研究发现,不同离子强度条件下,PVDF 表面 BSA 吸附层结构特征存在明显差异,可以通过控制离子强度减缓膜污染进展。此阶段的研究缺乏数学模型支持,定量化描述仍待加强。

近几年群体感应系统在污水处理中的研究备受关注。作为一种控制膜污染的生物手段,群体感应系统的干预包括正向强化和负向削弱两类^[19]。其中正向强化作用可提高生物膜法污水处理中的挂膜速度,提高污水处理效率,促进活性污泥中 EPS 和 SMP 的生成,提高生物膜的产量;而负向削弱作用可以降解生物被膜形成过程中所需要的信号分子,切断生物被膜形成的基因表达过程,有效抑制膜表面生物被膜的形成,防止膜污染。赵畅等^[25]从实际

运行的污水处理厂活性污泥中分离出 5 株具有群体感应淬灭功能的菌株,通过淬灭细菌的群体感应系统来抑制生物膜形成、防止膜生物污染,结果表明投放 SA-HG10 细菌包埋株对过滤膜片上生物膜形成具有明显抑制作用,减缓了膜污染过程。随着聚合酶链反应(PCR)、荧光原位杂交(FISH)、焦磷酸测序等现代分子生物技术的发展,快速准确鉴定细菌的条件已经成熟,一些学者开始对 MBR 中的微生物种群分布情况进行研究^[26-28],然而 EPS 组分和生物群落相关关系并不明朗。

群体感应应用 MBR 中的应用主要集中在 N-酰基高丝氨酸环内酯(AHLs)^[29],有关其他感应信号分子的研究还鲜有报道。另外,群体感应对污、废水污染物处理效果促进作用的相关研究较少,信号分子的作用机制和调控过程中关键菌群的演替规律还需研究,因此需要从微生物学角度拓展和加强膜污染控制机理的研究。

4 结语

主要介绍了 MBR 常用类型、特点及研究热点分布,总结了膜污染产生的机理及控制方法,重点分析 EPS 与膜污染的相关关系。综合分析后可知,目前有关膜污染的研究很多,但其机理至今尚不完全清楚,而且获得的研究结果的原水主要为人工配水,与实际生产应用可能会有一定的差异。因此,建议依托以实际污水为原水,总结无机离子、有机分子、运行条件、操作方式等多种因素对膜污染的影响,探讨如何应用物理法和化学法与群体感应干预相结合,开展为期较长、规模较大的中试对 EPS 与膜污染的相关性研究,以实现污水处理成本最小化、效益最大化、多种防治膜污染方法的协同效果验证。相信随着各种生物技术、现代检测技术的发展和研究的深入,可以逐步解决上述问题,从而为全面理解群体感应对废水处理的调控行为、优化废水处理能力奠定基础。

参考文献:

- [1] 郝晓地,陈峤,李季,等. MBR 工艺全球应用现状及趋势分析[J]. 中国给水排水,2018,34(20):7-12.
HAO Xiaodi, CHEN Qiao, LI Ji, et al. Status and trend of MBR process application in the world[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20):7-12 (in Chinese).

- [2] MOUSAAB A, CLAIRE C, MAGALI C, *et al.* Upgrading the performances of ultrafiltration membrane system coupled with activated sludge reactor by addition of biofilm supports for the treatment of hospital effluents [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 262: 456 – 463.
- [3] LOULERGUE P, WECKERT M, REBOUL B, *et al.* Mechanisms of action of particles used for fouling mitigation in membrane bioreactors [J]. *Water Research*, 2014, 66: 40 – 52.
- [4] 孙洪伟, 陈翠忠, 高宇学, 等. 碳氮比对活性污泥胞外聚合物的长期影响[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 950 – 958.
SUN Hongwei, CHEN Cuizhong, GAO Yuxue, *et al.* Effect of C/N ratio on extracellular polymeric substance (EPS) in the sequencing batch reactor (SBR) [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(3): 950 – 958 (in Chinese).
- [5] 刘强, 闫军伟, 徐德兰, 等. 基于 EPS 分析的污泥龄对 HMBR 中膜污染的影响与作用机理[J]. *环境工程*, 2018, 36(1): 32 – 36.
LIU Qiang, YAN Junwei, XU Delan, *et al.* Effect and mechanism of sludge retention time on membrane fouling in a hybrid membrane bioreactor on the basis of extracellular polymeric substances analysis [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(1): 32 – 36 (in Chinese).
- [6] SUN J Y, XIAO K, MO Y H, *et al.* Seasonal characteristics of supernatant organics and its effect on membrane fouling in a full-scale membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 453: 168 – 174.
- [7] YAMAMOTO K, HIASA M, MAHMOOD T, *et al.* Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank [J]. *Water Science and Technology*, 1989, 21: 43 – 54.
- [8] 黄丽坤, 王广智, 韩利明, 等. 悬浮载体复合 MBR 工艺处理电镀废水效能研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(7): 2490 – 2497.
HUANG Likun, WANG Guangzhi, HAN Liming, *et al.* Efficiency of electroplating wastewater treatment by suspended carrier integrated with MBR technology [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(7): 2490 – 2497 (in Chinese).
- [9] 刘会应, 冯志江, 吴曼, 等. 复合式膜生物反应器废水处理技术研究进展[J]. *工业水处理*, 2016, 36(1): 7 – 11.
LIU Huiying, FENG Zhijiang, WU Man, *et al.* Research progress in wastewater treatment techniques by using composite membrane bioreactor [J]. *Industrial Water Treatment*, 2016, 36(1): 7 – 11 (in Chinese).
- [10] MEI X J, WANG Z W, ZHENG X, *et al.* Soluble microbial products in membrane bioreactors in the presence of ZnO nanoparticles [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 451: 169 – 176.
- [11] 曹敬华, 郑西来, 潘明霞, 等. 萃取膜生物反应器去除地下水硝酸盐[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 38(4): 574 – 579.
CAO Jinghua, ZHENG Xilai, PAN Mingxia, *et al.* Nitrate removed in groundwater using extractive membrane biological reactors [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 38(4): 574 – 579 (in Chinese).
- [12] PARK D, YUN Y M, KIM H, *et al.* Mechanism of biofouling mitigation on nanofiltration membrane by non-oxidizing biocide [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2017, 99: 102 – 106.
- [13] TIJING L D, WOO Y C, CHOI J S, *et al.* Fouling and its control in membrane distillation: a review [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 475: 215 – 244.
- [14] XU J, WANG Z, WANG J X, *et al.* Positively charged aromatic polyamide reverse osmosis membrane with high anti-fouling property prepared by polyethylenimine grafting [J]. *Desalination*, 2015, 365: 398 – 406.
- [15] 安齐, 张庆印. 聚偏氟乙烯 PVDF 膜的性能研究[J]. *云南化工*, 2018, 45(1): 20 – 22.
AN Qi, ZHANG Qingyin. The properties of PVDF membrane [J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2018, 45(1): 20 – 22 (in Chinese).
- [16] YU D W, CHEN Y T, WEI Y S, *et al.* Fouling analysis of membrane bioreactor treating antibiotic production wastewater at different hydraulic retention times [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(10): 9026 – 9035.
- [17] NOUHA K, KUMAR R S, BALASUBRAMANIAN S, *et al.* Critical review of EPS production, synthesis and composition for sludge flocculation [J]. *Journal of Environment Science*, 2018, 66: 225 – 245.
- [18] TENG J H, ZHANG M J, LEUNG K T, *et al.* A unified thermodynamic mechanism underlying fouling behaviors of soluble microbial products (SMPs) in a membrane bioreactor [J]. *Water Reserch*, 2019, 149: 477 – 487.

- [19] MENG F G, ZHANG S Q, OH Y, *et al.* Fouling in membrane bioreactors; an updated review [J]. *Water Research*, 2017, 114: 151–180.
- [20] 李定昌, 王琦, 高景峰, 等. 不同粒径成熟好氧颗粒污泥 EPS 的三维荧光光谱特性 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(7): 26–31.
- LI Dingchang, WANG Qi, GAO Jingfeng, *et al.* Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of extracellular polymeric substances of mature aerobic granular sludge with different particle sizes [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(7): 26–31 (in Chinese).
- [21] 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 等. 温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 [J]. *环境科学*, 2017, 38(11): 4648–4655.
- SUN Hongwei, CHEN Cuizhong, WU Changfeng, *et al.* Effect of temperature on nitrogen removal performance and the extracellular polymeric substance (EPS) in a sequencing batch reactor (SBR) [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4648–4655 (in Chinese).
- [22] 李冬, 田海成, 梁瑜海, 等. 水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(2): 6–12.
- LI Dong, TIAN Haicheng, LIANG Yuhai, *et al.* Effect of water quality of influent on the content of extracellular polymeric substances in anammox granule sludge [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(2): 6–12 (in Chinese).
- [23] 米娜, 王磊, 苗瑞, 等. 不同离子强度下蛋白质在 PVDF 膜面吸附行为评价 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(2): 109–113.
- MI Na, WANG Lei, MIAO Rui, *et al.* Evaluation on adsorption behaviour of protein on PVDF membrane surface under different ionic strengths [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(2): 109–113 (in Chinese).
- [24] 邓东旭, 王磊, 李兴飞, 等. 超滤过程中蛋白质带电性对水合作用的影响机制 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(8): 78–82.
- DENG Dongxu, WANG Lei, LI Xingfei, *et al.* Effect mechanism of protein electrical property to hydration in ultrafiltration [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(8): 78–82 (in Chinese).
- [25] 赵畅, 王文昭, 徐期勇. 群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 [J]. *环境科学*, 2016, 37(12): 4720–4726.
- ZHAO Chang, WANG Wenzhao, XU Qiyong. Isolation of quorum quenching bacteria and their function for controlling membrane biofouling [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4720–4726 (in Chinese).
- [26] INFANTE C D, CASTILLO F, PEREZ V, *et al.* Inhibition of *Nitzschia ovalis* biofilm settlement by a bacterial bioactive compound through alteration of EPS and epiphytic bacteria [J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2018, 33: 1–10.
- [27] GIENTKA I, BZDUCHA-WROBEL A, STASIAK-ROZANSKA L, *et al.* The exopolysaccharides biosynthesis by *Candida* yeast depends on carbon sources [J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2016, 22: 31–37.
- [28] 刘嘉, 左薇, 张军, 等. MBR + 蠕虫反应器膜污染特征及微生物群落结构 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(2): 32–36.
- LIU Jia, ZUO Wei, ZHANG Jun, *et al.* Analysis of membrane fouling and microbial community structure in an MBR + worm reactor [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(2): 32–36 (in Chinese).
- [29] 张海丰, 于海欢. 基于群体淬灭理论 MBR 减缓膜污染研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(3): 764–769.
- ZHANG Haifeng, YU Haihuan. Research progress on membrane fouling reduction based on quorum quenching theory in membrane bioreactor [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(3): 764–769 (in Chinese).

作者简介: 李莹 (1988–), 女, 山东枣庄人, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为水处理技术。

E-mail: ly131015@163.com

收稿日期: 2020–12–02

修回日期: 2021–01–24

(编辑: 任莹莹)