

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.17.002

带衬及非带衬MBR膜污染物识别及膜污染差异解析

孙 鹏¹, 虎春生², 焦茹媛³, 张伟军³

(1. 宁夏环保集团有限责任公司, 宁夏 银川 750004; 2. 宁夏厚德环保科技有限公司, 宁夏 银川 750200; 3. 中国科学院生态环境研究中心 工业废水无害化与资源化国家工程研究中心, 北京 100085)

摘 要: 带衬膜和非带衬膜作为膜生物反应器(MBR)中常用的两种膜类型,由于在结构和性能上的不同,其膜污染特征也存在一定的差异。针对应用于黄河上游典型污水厂MBR工艺的带衬膜和非带衬膜,通过扫描电镜、紫外可见吸收光谱、三维荧光光谱及傅里叶变换离子回旋共振质谱等方法对膜污染物进行系统识别,并对污染物种类和形态进行分析,以期获得不同类型膜的污染物质信息特征。结果表明,无论是无机还是有机污染物,两种类型膜中包含污染物质种类相差不大,但是两种膜对不同污染物的选择性具有较明显的差异。总体来说,带衬膜的抗污染能力较强,且带衬组膜丝的污染物主要集中在膜外表面上;对于金属离子含量较高的原水,带衬膜更容易截留金属离子形成无机金属离子膜污染物;两种膜污染物中的有机物类型分布基本一致,均对苯环类、蛋白质类具有较强的截留作用,但带衬膜的截留效果更好,且可以截留更多的微生物代谢产物、木质素等有毒及难降解物质,但由于这些物质主要通过膜孔过滤,易附着于膜孔内,因此需要有针对性地选择膜清洗方式,以保证持续的膜过滤效果。

关键词: 膜生物反应器; 膜污染; 带衬膜; 有机物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)17-0009-07

Identification and Analysis of Membrane Fouling with and without Lining in MBR

SUN Peng¹, HU Chun-sheng², JIAO Ru-yuan³, ZHANG Wei-jun³

(1. Ningxia Environmental Protection Group Co. Ltd., Yinchuan 750004, China; 2. Ningxia Houde Environmental Protection Technology Co. Ltd., Yinchuan 750200, China; 3. National Engineering Research Center of Industrial Wastewater Detoxication and Resource Recovery, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: As the two commonly used membrane types in membrane bioreactor (MBR), membranes with lining and without lining show differences in the membrane fouling characteristics due to the difference in structure and properties. In this study, the fouling in the membrane with and without lining which was used in typical wastewater treatment plants in the upper reaches of the Yellow River were identified by scanning electron microscopy, UV-visible absorption spectrum, three-dimensional fluorescence spectrum and Fourier transform ion cyclotron resonance. The types and forms of the fouling

通信作者: 焦茹媛 E-mail: ryjiao@rcees.ac.cn

were analyzed to obtain the information characteristics of contaminants in different types of membranes. From the results, there was little difference in the types of pollutants contained in these two types of membranes no matter inorganic or organic pollutants, but the selectivity of the two membranes to different pollutants were significantly different. In general, anti-fouling ability of the membrane with lining was strong, and the pollutants of the membrane with lining were mainly concentrated on the outer surface. Specifically, the membrane with lining was easier to trap metal ions and form inorganic metal ion membrane fouling. Moreover, the distribution of organic matter types in the two membrane fouling were basically the same, with good performance of benzene rings and proteins removing, but the membrane with lining showed better interception performance. Besides, it had better effects on soluble microbial products and lignin removal which have more toxic or difficult to degrade in the regular treatment process, but these contaminant were easy to adhere to the membrane pore, and therefore, it was necessary to further select the membrane cleaning method to ensure the continuous membrane filtration effect.

Key words: membrane bioreactor; membrane fouling; membrane with lining; organic matter

膜生物反应器(MBR)结合了生物处理与膜分离技术优势,具有较好的固液分离效果,且操作灵活、易于管理,因此被认为是污水再生回用的重要技术之一^[1-2],并得到了广泛关注及应用^[3-4]。膜作为MBR技术的核心组件,其性能和质量直接关系到整个系统的处理效果。目前,市场上主流的MBR膜主要分为带衬和非带衬两大类,它们在结构、性能和应用上存在一定的差异。

膜污染是MBR技术不可避免的问题^[5],不同类型的MBR膜对污染物的选择和膜污染情况也存在显著的不同,当前主要通过物理清洗和化学清洗的方法缓解膜污染^[2]。物理清洗主要针对污染程度较轻的情况,通过人工或机械冲刷去除污染物;当膜污染较严重时,则需要通过化学清洗来实现对膜污染的控制。大多数污水厂主要依据人工经验定期进行膜清洗及更换^[6],操作不具有针对性,由于频繁摩擦容易造成膜寿命减少,并增加能耗和运行成本^[7]。然而,膜污染比较复杂,它包括了胶体污染、无机污染、有机污染、微生物污染及多种污染物的复合污染。因此,在清洗之前正确地识别膜丝污染物,并针对污染物的种类选择最适当的处理方法,可最大程度上起到清洁与保护作用。

针对黄河上游典型污水厂MBR工艺的不同膜类型,对膜污染物进行识别,分析膜丝中污染物的种类及形态,进而揭示不同类型的膜在污染过程中的表现和差异,为MBR膜的选择、优化和应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 污染膜来源及性质

试验所用MBR膜取自西北地区某污水处理厂。该厂主体工艺为“磁混凝+MBR”,进水主要为生活污水及化工、制药等企业排水,其COD为100~250 mg/L, BOD₅为100~150 mg/L,氨氮为8~25 mg/L,总磷为0.9~2.5 mg/L。系统出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。选取该污水厂带衬膜丝及非带衬膜丝聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜进行对比。两种膜均由同一厂家生产,膜材料均采用溶液相转移法制造工艺,其中带衬膜内部采用涤纶编织管作为支撑管以提高膜的机械强度。带衬膜与非带衬膜的孔隙率分别为70%~80%和60%~75%,粗糙度分别为18.1、15.7 nm;平均孔径均在0.1 μm以内,其中带衬膜为0.096 μm,非带衬膜为0.04 μm;采用纯水接触角来评价膜的亲、疏水性,其中带衬膜的纯水接触角为45°,非带衬膜为57°;0.10 MPa下带衬膜的纯水通量为18.6 L/(m²·h),非带衬膜为14.3 L/(m²·h)。在该污水厂,两种膜平行使用,使用时长相同。

1.2 试验方法

1.2.1 MBR的膜污染特征研究

取相同长度的带衬与非带衬膜组件,用液氮冷冻后切开,对污染后的膜表面、横切面、纵切面进行形貌特征分析;采用化学溶解手段获取膜面污染物以进行定性及定量分析,通过预试验,选择0.1%的柠檬酸溶液作为化学溶解药剂,将膜组件浸泡入

50 mL 柠檬酸溶液 24 h,得到含有污染物的溶液,分析其中有机、无机污染物的组成及浓度,识别膜面上的主要污染物类别。有机物数据结果均扣除柠檬酸空白,以避免柠檬酸对有机物分析造成影响。

1.2.2 分析方法

膜面形貌特征采用扫描电镜分析;无机金属元素采用电感耦合等离子体光谱仪测定;有机物分析采用 UV-1900 紫外可见分光光度计进行 190~700 nm 的全波长扫描;采用 Solarix-15T 傅里叶离子回旋共振质谱(FT-ICR MS)分析有机污染物分子组成及类型特征;采用 F-4500 荧光分光光度计分析污染物的结构组成,其中激发波长(λ_{Ex})为 200~450 nm (步长为 5 nm),发射波长(λ_{Em})为 250~500 nm (步长为 2 nm),激发光和发射光狭缝均为 5 nm,扫描速度设置为 12 000 nm/min。

根据文献报道^[8-9],三维荧光光谱可以分成区域 I~V,分别代表酪氨酸类蛋白质、色氨酸类蛋白质、富里酸类物质、溶解性微生物代谢产物、腐殖酸类物质,对应的 $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 分别为 200~250/280~330、200~250/330~380、200~250/380~550、250~280/280~380、250~400/380~550 nm。

2 结果与讨论

2.1 膜运行情况对比

两种膜的运行条件一致,在线恢复清洗采用 1 000 mg/L 次氯酸钠,清洗频率为 1 次/周。图 1 为两种膜运行一年的产水通量变化情况。

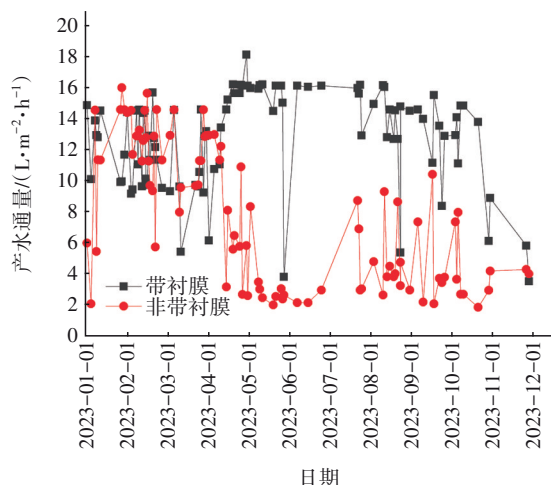


图1 两种膜的产水通量随运行时间的变化

Fig.1 Variation of water production flux of two membranes with operating time

在使用初期两种膜的产水通量相差不大,基本在 10~15 L/(m²·h) 范围浮动,随着使用时间的延长,非带衬膜的产水量率先出现下降,下降率达到 50% 以上;而带衬膜则运行相对平稳,运行 10 个月左右开始出现产水量的下滑,下降率接近 50%。总体来说,带衬膜的性能更为优越。

2.2 污染膜表面形态分析

采用扫描电镜观察带衬组与非带衬组新膜与污染膜清洗前的膜丝内外表面及横截面,结果如图 2 所示。对比新膜,带衬膜表面膜孔均大于非带衬膜,带衬膜由于支撑材料的加入,横截面可看到明显的铁丝状缠绕,而非带衬膜则较为平滑。对比污染膜,相比于非带衬膜,带衬膜外表面更粗糙,其上有凸起状和团状物质,说明膜表面黏附的污泥已形成生物膜;带衬与非带衬膜的膜丝内表面形态存在较大差异,其中带衬膜丝依旧可以清晰地观察到内表面的膜孔,而非带衬膜丝膜孔基本被覆盖。对比横截面图,带衬膜表面平滑度相对较低,可能是由于形成了滤饼层;带衬膜与非带衬膜内部均可见污染物附着。综上,带衬组膜丝的抗污染性要强于非带衬组,且带衬组膜丝的污染物主要集中在膜外表面上。这与长期运行数据结果具有一定对应性。

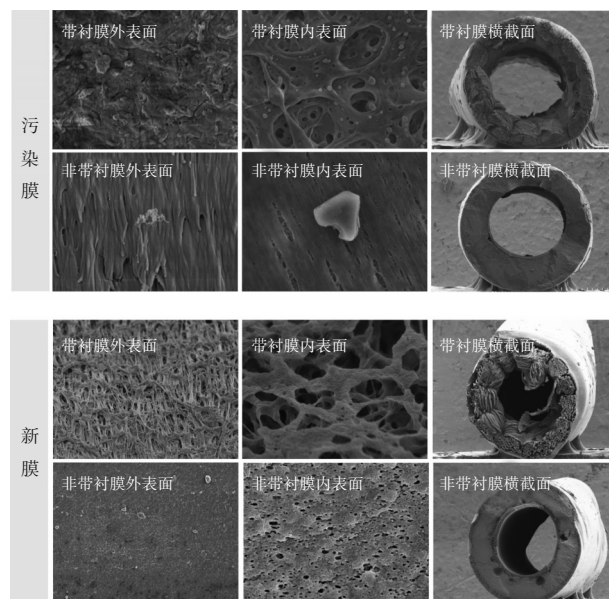


图2 带衬与非带衬新旧膜丝内外表面及横截面形态对比

Fig.2 Morphology comparison of inner and outer surfaces and cross section between new and old membranes with and without lining

2.3 污染膜表面无机金属元素组成

扫描电镜显示膜表面存在晶体物质,进一步通过能谱分析得到晶体物质的主要构成元素包括Al、Fe、Ca、Mg、Zn等(见表1),且两种膜丝表面Al、Fe、Zn含量均较高,说明原水中的这些金属离子在常规处理中较难被去除。

表1 带衬与非带衬组膜表面金属元素组成

Tab.1 Mental elements on the membrane surface with and without lining %

元素	归一化质量分数		原子比	
	带衬	非带衬	带衬	非带衬
O	46.39	45.21	66.82	66.47
Al	14.23	9.65	12.14	8.41
Fe	9.19	17.89	3.78	7.51
Zn	14.64	12.51	5.19	4.52
Ca	7.46	3.48	4.30	2.05
Mg	8.09	11.26	7.77	11.04

为了明确污染物中金属元素含量,通过化学清洗对污染物进行收集并进行ICP-OES检测,结果见图3。总体来说,带衬膜污染物中镁离子浓度显著高于非带衬膜,除镁离子外,两种膜中金属离子污染物浓度排序为: $C(\text{Fe}) \approx C(\text{Al}) > C(\text{Zn}) > C(\text{Ca})$,该结果与EDS能谱分析具有一定的对应性。此外,带衬膜污染物中的金属离子浓度明显高于非带衬膜,说明带衬膜更容易形成金属膜污染物,这可能是由于带衬膜形成的滤饼层更粗糙,因此具有更大的比表面积,有利于对金属离子的进一步吸附。同时也说明,带衬膜更容易截留原水中的金属离子。

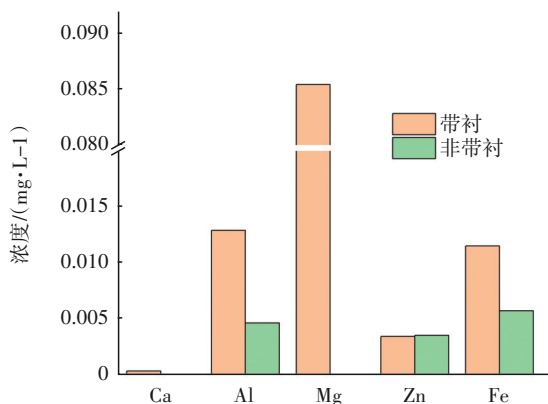


图3 带衬与非带衬组膜丝无机污染物组成对比

Fig.3 Comparison of inorganic pollutants of membrane with and without lining

2.4 污染膜表面有机物组成分析

一般来说,溶解性有机物造成的膜污染相对更

为严重^[10],其占比在30%~50%之间。有机物更容易在膜表面形成凝胶层,导致膜的透水性能下降,降低MBR系统的处理效率^[11]。因此,着重进行了两种膜有机污染物的定性及定量对比。

2.4.1 紫外响应有机污染物典型基团分析

首先对两种膜表面污染物进行紫外全扫描(UV-vis)分析,结果表明,其有机物类型基本一致,出峰位置均在190~250 nm范围内(见图4)。通过peakfit软件进行分峰拟合,两种膜的有机污染物紫外吸收主要包含两个峰,其中波长在208 nm位置的峰较为显著,表明存在含有苯环结构的有机物^[12];此外,在224 nm处出现一个相对较弱的峰,代表共轭双键物质的存在。虽然两种膜表面具有紫外吸收的有机污染物类型一致,但带衬膜表面苯环结构有机物紫外出峰峰值相对较高,说明带衬膜对苯环类有机污染物具有更强的截留作用。

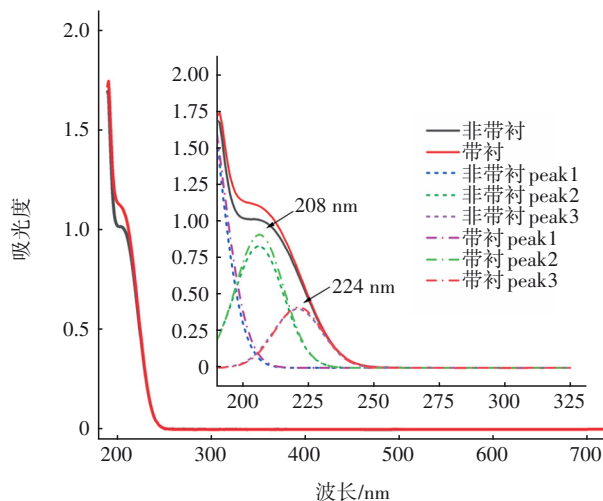


图4 带衬与非带衬膜表面有机物UV-vis紫外全扫描检测结果

Fig.4 UV-vis spectrum of organic compounds on the surface of membrane with and without lining

2.4.2 有机物来源分析

研究表明,在污水处理过程中,多糖、蛋白质和肽类等溶解性有机物可以吸附在膜孔内壁和膜表面,造成严重的膜污染^[11, 13]。三维荧光光谱技术被广泛应用于有机物来源解析^[14-15],是分析具有荧光响应的有机物组分的重要手段之一。因此,通过三维荧光光谱对两种膜的有机物来源进行分析。结果表明,两种膜污染物中具有荧光响应的有机物类型相近,主要为酪氨酸类蛋白质和色氨酸类蛋白质^[9, 16],均为微生物代谢过程中重要的氨基酸类。

其中,酪氨酸类蛋白质被认为可生物降解,而色氨酸类蛋白质则不具备生物降解性^[17-18]。

为了对不同类别有机物的荧光响应进行定量对比,进一步通过荧光区域整合法(FRI)^[8]将特定荧光区域的积分体积进行加和,归一化后得到特定荧光区域有机物的相对含量,结果如图5所示。可以看出,两种类型膜污染物中蛋白质类占绝大部分(区域I、II的物质总量占总物质的70%以上),特别是带衬膜,其芳香类蛋白质占比达59%,而色氨酸类蛋白质所占比例相差不大,因此,带衬膜更容易截留酪氨酸类蛋白质。此外,带衬膜的污染物中,溶解性微生物代谢产物(区域IV)所占比例相比非带衬膜有所提升,虽然含量仍比较少,但微生物代谢产物同芳香类蛋白质作为微生物代谢的重要产物,被认为是二沉池出水有机物中最具有代表性的成分^[13, 19],同时,微生物代谢产物也被认为具有更高的毒性^[13]。

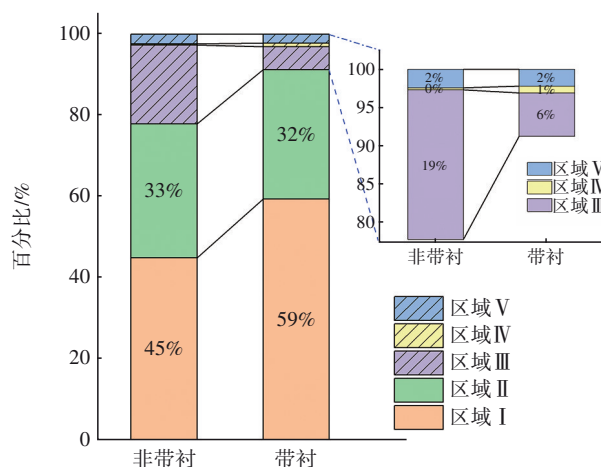


图5 带衬与非带衬膜表面有机物荧光区域积分比例分布

Fig.5 Distribution proportions of fluorescence region integral of membrane with and without lining

2.4.3 有机污染物分子组成及分类解析

上述分析显示,不同类型膜表面有机污染物来源及类别存在一定差异,为此,进一步通过FT-ICR MS分析,从分子层面获得有机物组成及分类信息。带衬膜丝及非带衬膜丝分别检测到1 725和1 630个不同分子组成的溶解性有机物(DOM)化合物分子式,并重点关注 van Krevelen 空间 6 个离散区域^[20-21],分别为:脂质($H/C=1.5\sim2.0$, $O/C=0\sim0.3$)、蛋白质($H/C=1.5\sim2.2$, $O/C=0.3\sim0.67$)、木质素($H/C=0.7\sim1.5$, $O/C=0.1\sim0.67$)、不饱和碳氢化合物($H/C=0.7\sim1.5$, $O/C=0\sim0.1$)、糖类($H/C>1.5$, $O/C>$

0.67)和缩合芳香化结构($H/C=0.2\sim0.7$, $O/C=0\sim0.67$)。总体来说,两种类型膜的有机污染物在化学组成上具有相似性,均覆盖上述6个离散区域,但有机化合物比例存在差异(见图6)。其中带衬膜的有机物占比排序为:木质素(54.67%)>缩合芳香结构(16.41%)>蛋白质(11.48%)>脂质(5.74%)>不饱和碳氢化合物(2.55%)>糖类(2.03%);而非带衬膜中有机物占比排序为:木质素(20.86%)>脂质(20.49%)>蛋白质(16.50%)>缩合芳香结构(12.21%)>不饱和碳氢化合物(8.16%)>糖类(2.88%)。可见,除木质素和脂质外,两种类型膜中其他有机物占比相差不大(占比差异<10%)。其中,带衬膜的木质素占比远超非带衬膜,而非带衬膜中脂质占比要显著高于带衬膜。

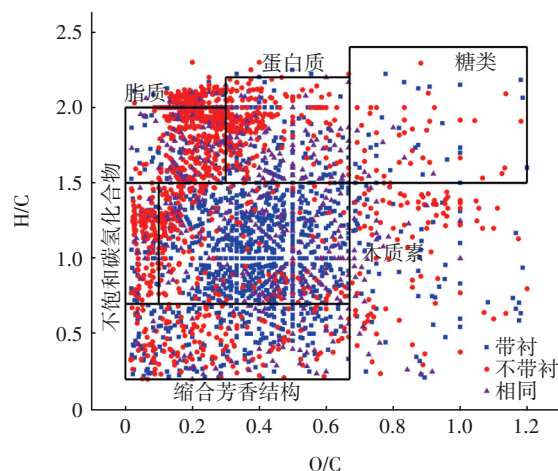


图6 带衬与非带衬膜表面有机物组成 van Krevelen 图

Fig.6 Van Krevelen diagram of organic matter composition of membrane with and without lining

带衬膜污染物中较高的木质素含量表明带衬膜易产生木质素有机污染。这可能是由于带衬膜具有相对较大的膜孔结构(见图2),对于木质素这种分子质量较大、结构复杂的物质^[22],更容易进入带衬膜丝膜孔内部形成膜污染;相反,脂质通常具有较小的分子质量和较简单的结构,因此更容易通过非带衬膜的膜孔,这也是造成两种膜有机污染物类型占比差异的原因。木质素由于其稳定的三维立体结构,在水体中具有高度的稳定性和生物难降解性^[23],因此是污水处理难点。由于带衬膜对木质素具有较强的截留作用,因此,若搭配有效的膜清洗方法,使用带衬膜可有效降低出水木质素含量。

3 结论

① 带衬组膜丝的抗污染性能要强于不带衬

组膜丝,且带衬组膜丝的污染物主要集中在膜外表面上。

② 带衬膜更容易截留金属离子而形成无机金属离子膜污染。

③ 两种膜对苯环类和蛋白质类有机物均有较强的截留作用,而带衬膜的截留效果更好,同时还可以截留更多的微生物代谢产物、木质素等有毒及难降解类物质。

④ 金属离子及有机物主要通过膜孔过滤去除,因此易附着于膜孔内,因此需要有针对性地选择膜清洗方式,以保证持续的膜过滤效果。

参考文献:

- [1] 曾涛,赵杰. 基于膜分离技术在污水处理中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(3): 69-73.
ZENG Tao, ZHAO Jie. Application of membrane separation technology in sewage treatment [J]. Environmental Science and Management, 2021, 46(3): 69-73(in Chinese).
- [2] 王小兵,林岳. 循环经济产业园废水零排放的工艺优选与实践[J]. 中国给水排水, 2022, 38(22): 116-122.
WANG Xiaobing, LIN Yue. Optimization and practice of wastewater zero discharge process in a circular economy industrial park[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(22): 116-122(in Chinese).
- [3] LARES M, NCIBI M C, SILLANPAA M, *et al.* Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology [J]. Water Research, 2018, 133: 236-246.
- [4] WEI C H, SANCHEZ-HUERTA C, LEIKNES T, *et al.* Removal and biotransformation pathway of antibiotic sulfamethoxazole from municipal wastewater treatment by anaerobic membrane bioreactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 380: 120894.
- [5] BARRETO C M, GARCIA H A, HOOIJMANS C M, *et al.* Assessing the performance of an MBR operated at high biomass concentrations [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 119: 528-537.
- [6] BUER T, CUMIN J. MBR module design and operation [J]. Desalination, 2010, 250(3): 1073-1077.
- [7] 张会娟. MBR污染智能识别方法及应用研究[D]. 北京:北京工业大学, 2020.
- ZHANG Huijuan. The Study and Application of Intelligent Identification Method for Membrane Fouling of MBR[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [8] CHEN J, LEBOEF E J, DAI S, *et al.* Fluorescence spectroscopic studies of natural organic matter fractions [J]. Chemosphere, 2003, 50(5): 639-647.
- [9] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(24): 5701-5710.
- [10] 郝爱玲,张光辉,张颖,等. MBR、MCR处理微污染水的膜污染比较[J]. 中国给水排水, 2004, 20(7): 49-53.
HAO Ailing, ZHANG Guanghui, ZHANG Ying, *et al.* Comparison of membrane fouling between membrane bio-reactor (MBR) and membrane coagulation reactor (MCR) for micro-polluted raw water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(7): 49-53 (in Chinese).
- [11] NI B J, RITTMANN B E, YU H Q. Soluble microbial products and their implications in mixed culture biotechnology [J]. Trends in Biotechnology, 2011, 29(9): 454-463.
- [12] 岳文慧,刘吉宝,郭建宁,等. 污泥热水解厌氧消化滤液处理工程溶解性有机物变化特征[J]. 中国环境科学, 2023, 43: 1-10.
YUE Wenhui, LIU Jibao, GUO Jianning, *et al.* Characteristics of dissolved organic matters in the treatment of the dewatering liquor of anaerobic digestion pretreated by thermal hydrolysis [J]. China Environmental Science, 2023, 43: 1-10 (in Chinese).
- [13] 熊雪君. 二沉池出水有机物混凝机制与膜污染控制研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.
XIONG Xuejun. Study on the Coagulation Mechanism and Membrane Fouling Control of Effluent Organic Matters Obtained from Wastewater Treatment Plant[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019 (in Chinese).
- [14] JIN P K, JIN X, BJERKELUND V A, *et al.* A study on the reactivity characteristics of dissolved effluent organic matter (EfOM) from municipal wastewater treatment plant during ozonation[J]. Water Research, 2016, 88: 643-652.
- [15] CUI X C, ZHOU D D, FAN W, *et al.* The effectiveness

- of coagulation for water reclamation from a wastewater treatment plant that has a long hydraulic and sludge retention times: a case study[J]. *Chemosphere*, 2016, 157: 224–231.
- [16] ZHEN G Y, LU X Q, WANG B Y, *et al.* Synergetic pretreatment of waste activated sludge by Fe (II)-activated persulfate oxidation under mild temperature for enhanced dewaterability [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 124: 29–36.
- [17] JIA X, ZHU C W, LI M X, *et al.* A comparison of treatment techniques to enhance fermentative hydrogen production from piggery anaerobic digested residues[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38 (21): 8691–8698.
- [18] SUN J, GUO L, LI Q Q, *et al.* Three-dimensional fluorescence excitation–emission matrix (EEM) spectroscopy with regional integration analysis for assessing waste sludge hydrolysis at different pretreated temperatures [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 24061–24067.
- [19] SHON H K, VIGNESWARAN S, SNYDER S A. Effluent organic matter (EfOM) in wastewater: constituents, effects, and treatment [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2006, 36(4): 327–374.
- [20] HOCKSDAY W C, PURCELL J M, MARSHALL A G, *et al.* Electrospray and photoionization mass spectrometry for the characterization of organic matter in natural waters: a qualitative assessment[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 7: 81–95.
- [21] HERTKORN N, BENNER R, FROMMBERGER M, *et al.* Characterization of a major refractory component of marine dissolved organic matter [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(12): 2990–3010.
- [22] 杨洁. 甲醇/碱水热体系制备小分子木质素及其机理研究[D]. 南京:南京林业大学,2022.
- YANG Jie. Study on Preparation and Mechanism of Small Molecule Lignin by Methanol/Alkali System [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022 (in Chinese).
- [23] 陈双双. SBBGR中好氧颗粒污泥降解木质素衍生物的研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- CHEN Shuangshuang. Study on Degradation of Lignin Derivatives by Aerobic Granular Sludge in Sequencing Batch Biofilter Granular Reactor (SBBGR) [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022 (in Chinese).

作者简介:孙鹏(1988–),男,宁夏银川人,硕士,高级工程师,主要从事水处理技术和污泥处理处置研究。

E-mail:734672357@qq.com

收稿日期:2024-03-15

修回日期:2024-05-06

(编辑:李德强)

坚持山水林田湖草沙一体化和系统治理,
构建从山顶到海洋的保护治理大格局