

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.004

# 海绵填料对 AAO—MBR 处理效能及膜污染的影响

王旭东<sup>1,2,3</sup>, 赵童<sup>1,2,3</sup>, 刘琪<sup>1,2,3</sup>, 吕永涛<sup>1,2,3</sup>, 杨永哲<sup>1,2,3</sup>, 王磊<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 陕西省膜分离重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西北水资源与环境生态教育部  
重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 在相同的运行条件下, 分别采用 AAO—MBR 与 AAO—HMBR (投加海绵填料的复合式膜生物反应器) 处理生活污水, 考察投加海绵填料对 AAO—MBR 处理效能及膜污染的影响。结果表明, 两种反应器对生活污水中的 COD、氨氮、TN 均有较好的去除效果, 出水中除 TP 之外的其他指标浓度均能满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准。投加填料后, 反应器对 COD、氨氮、TN 和 TP 的去除率分别由 92.71%、95.08%、41.87%、64.13% 提高至 96.06%、98.34%、59.10%、72.20%; 另外, 膜污染状况也有所改善, 当跨膜压差 (TMP) 达到 26 kPa 时, HMBR 运行了 20 d, 而 MBR 仅运行了 13 d; 在 60 d 的运行过程中, MBR 中的膜组件进行了 4 次清洗, 而 HMBR 中的膜组件仅清洗了 2 次。运行相同时间后, MBR 的膜表面有清晰可见的污染物附着, 而 HMBR 的膜表面仅有少量污染物附着; 红外光谱分析表明, 膜表面滤饼层污染物主要为蛋白质与多糖。

**关键词:** 复合式膜生物反应器; 海绵填料; 生物膜; 膜污染

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)13-0021-06

## Effect of Sponge Filler on AAO – MBR Treatment Efficiency and Membrane Fouling

WANG Xu-dong<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Tong<sup>1,2,3</sup>, LIU Qi<sup>1,2,3</sup>, LÜ Yong-tao<sup>1,2,3</sup>, YANG Yong-zhe<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Lei<sup>1,2,3</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Membrane Separation Technology, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China; 3. Northwest China Key Laboratory of Water Resources and Environment Ecology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Domestic sewage was treated by AAO – MBR and AAO – HMBR (hybrid membrane bioreactor with sponge filler) under the same operational conditions, and effects of adding sponge filler on treatment efficiency and membrane fouling of AAO – MBR were investigated. Both of the reactors had good removal effect on COD, ammonia nitrogen and TN in domestic sewage, and all other indexes except TP in the effluent could meet the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 – 2002). After adding sponge filler, the removal

基金项目: 陕西省重点产业链(群)项目(2017ZDCXL – GY – 07 – 02); 陕西省技术创新引导专项(2018HJCG – 18); 陕西省重点科技创新团队计划项目(2017KCT – 19 – 01)

efficiencies of COD, ammonia nitrogen, TN and TP were increased from 92.71%, 95.08%, 41.87% and 64.13% to 96.06%, 98.34%, 59.10% and 72.20%, respectively. In addition, membrane fouling was improved. When the transmembrane pressure (TMP) reached 26 kPa, HMBR operated for 20 days, while MBR operated for only 13 days. During 60 days of operation, membrane module in MBR was cleaned four times, while the membrane module in HMBR was cleaned only twice. After running for the same time, the membrane surface of MBR had clear visible contaminants, while the membrane surface of HMBR had only a small amount of contaminants. Infrared spectrum analysis showed that the filter cake layer on the membrane surface was mainly proteins and polysaccharides.

**Key words:** hybrid membrane bioreactor; sponge filler; biofilm; membrane fouling

膜生物反应器(MBR)具有固液分离效果好、对有机物和氮的去除效率高、占地面积小等优点;同时,其可实现 SRT(污泥停留时间)与 HRT(水力停留时间)分离,从而获得更高的污泥浓度,众多优势使该技术得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。但膜污染的存在严重阻碍了 MBR 的进一步发展和应用<sup>[3]</sup>,有效控制膜污染对于 MBR 的长期稳定运行尤为关键<sup>[4]</sup>。

有研究表明,生物载体的投加一定程度上可提高 MBR 的处理效果,且对缓解膜污染有显著作用<sup>[5]</sup>。Zhang 等人<sup>[6]</sup>研究表明,粉末活性炭(PAC)的投加可降低 MBR 运行过程中膜的过滤阻力,减小膜污染速率;王芳等人<sup>[7]</sup>发现,向缺氧滤池—膜生物反应器(AF-MBR)中投加一定量的聚氨酯填料,可降低溶解性微生物代谢产物(SMP)和胞外聚合物(EPS)浓度。鉴于此,笔者向 MBR 中投加海绵填料构建复合式 MBR(HMBR),在相同条件下先后运行 AAO-MBR 和 AAO-HMBR,考察投加海绵填料对 AAO-MBR 处理效能、混合液特性及膜污染的影响,以期为 MBR 的实际应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 原水水质和接种污泥

反应器进水为由乙酸钠、磷酸二氢钾、氯化铵、碳酸钠、硫酸镁和氯化钙等配制而成的模拟生活污水。原水水质如下:pH 值为 6~8, COD 为  $(380 \pm 17)$  mg/L, 氨氮为  $(33.24 \pm 3.08)$  mg/L, TN 为  $(35.46 \pm 4.10)$  mg/L, TP 为  $(7.1 \pm 2.2)$  mg/L。

实验用接种污泥为西安市某污水处理厂的二沉池污泥。污泥取回后对其进行驯化培养,每曝气 12 h 后暂停曝气,使污泥沉降分层,将上清液换为原水,培养 30 d 后将其投入运行。

### 1.2 实验装置

实验装置处理流程如图 1 所示。将 AAO 反应

器的好氧区用穿孔隔板隔成两个区域,其中一个区域放置聚氨酯海绵填料,初始投加量为 10% (体积比),另一个区域放置 PVDF 中空纤维膜组件。好氧区底部放置 4 个曝气头,其中两个曝气头用于提供该区域微生物所需溶解氧并使填料在反应器中循环流动,另外两个曝气头用于冲刷膜丝以减缓膜污染进程。在 AAO-MBR 反应器运行的第 2 阶段投加生物填料使其成为 AAO-HMBR。AAO-HMBR 中存在附着性微生物(生物膜)和悬浮性微生物(活性污泥),而 AAO-MBR 中只存在悬浮性微生物(活性污泥)。

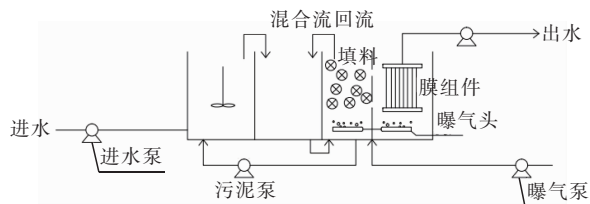


图1 AAO-HMBR 系统示意

Fig.1 Schematic diagram of AAO-HMBR

反应器中厌氧区、缺氧区 and 好氧区的 DO 浓度分别控制在  $(0.1 \pm 0.1)$ 、 $(0.5 \pm 0.1)$  和  $(2.0 \pm 0.9)$  mg/L;反应器由蠕动泵进水,经膜组件出水,出水通量约为  $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,通过时间继电器控制抽停时间,抽 8 min、停 2 min。反应器外设一圈保温层,保持系统温度为  $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。海绵填料为边长 2 cm 的正方体,密度约为  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,孔隙率为 96%~99%,填料挂膜前后的质量分别为 17~60、272~468  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;海绵填料质密,具有比表面积大、易挂膜、易清洗等优点。

### 1.3 实验方法

实验分为两个阶段,第 1 阶段启动 AAO-MBR,稳定运行 60 d 左右;第 2 阶段向反应器中投加海绵填料,采用相同的方法启动 AAO-HMBR,稳

定运行 70 d 左右,二者的处理水量均为 1.323 L/h。两阶段的 HRT 约为 10 h, SRT 为 30 d,污泥回流比为 100%,混合液回流比为 150%。第 1 阶段的 MLSS 和 MLVSS 分别为  $(3\,546 \pm 410)$ 、 $(2\,127 \pm 260)$  mg/L,第 2 阶段的 MLSS 和 MLVSS 分别为  $(3\,400 \pm 410)$  mg/L、 $(2\,300 \pm 270)$  mg/L。运行期间每隔两天检测一次反应器进水和出水水质指标;每天监测跨膜压差(TMP),当 TMP 达到 26 kPa 时,反应器停止运行,对膜组件进行化学清洗。常规水质指标均采用国家标准方法测定,生物膜量采用碱洗法测定。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 COD 的去除效果

COD 的去除效果如图 2 所示。

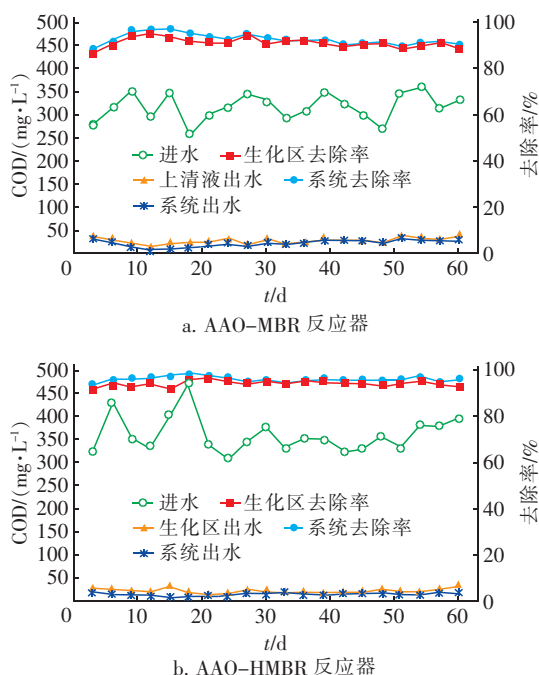


图 2 投加填料前后系统对 COD 的去除效果

Fig. 2 COD removal effect before and after adding filler

由图 2 可以看出,AAO—MBR 和 AAO—HMBR 两种反应器对 COD 均具有良好的去除效果,出水 COD 平均浓度分别为 23.00、14.23 mg/L,二者均达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准;稳定阶段对 COD 的平均去除率分别为 92.71% 和 96.06%,其中,生化区对 COD 的去除率分别为 91.15%、94.04%。这表明,投加填料使 AAO—MBR 对 COD 的去除能力有所提高。尽管两种反应器中的总生物量相当,但由

于 AAO—HMBR 中存在生物膜,生物膜比悬浮污泥具有更高的活性<sup>[8]</sup>,因此投加填料增强了反应器的生物降解能力。同时,生物膜的停留时间高于悬浮污泥,使投加填料之后的系统生物链更长,增强了系统对 COD 去除的稳定性<sup>[9]</sup>。

在 AAO—HMBR 反应器中,膜对 COD 有进一步的去除,但作用微小。在进水水质波动较大时,生化区对 COD 的去除率有所下降,但膜出水 COD 浓度一直较稳定,由此表明,膜组件可以保证出水水质的稳定,反应器具有一定的抗冲击性。

### 2.2 氨氮的去除效果

氨氮的去除效果如图 3 所示。

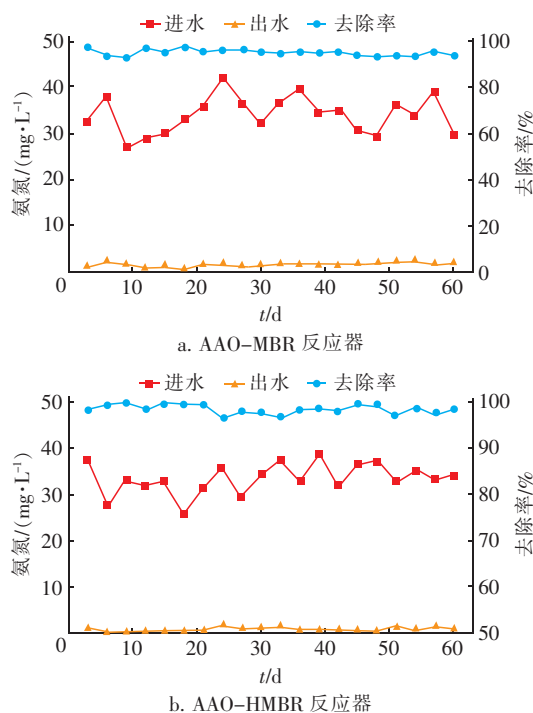


图 3 投加填料前后系统对氨氮的去除效果

Fig. 3 Ammonia nitrogen removal effect before and after adding filler

由图 3 可以看出,AAO—MBR 和 AAO—HMBR 两种反应器对氨氮均具有良好的去除效果,出水氨氮平均浓度分别为 1.67 mg/L 和 0.56 mg/L,均达到了 GB 18918—2002 的一级 A 排放标准;稳定阶段,对氨氮的平均去除率分别为 95.08% 和 98.34%。与 MBR 相比,HMBR 中填料的投加为硝化菌提供了更多的生存空间,存在一些附着态生长的硝化菌,系统中的硝化菌总量得以提高;生物膜的停留时间比悬浮污泥更长,更有利于世代周期长、增殖速度慢的硝化菌生长繁殖。因此,HMBR 中硝化菌的生长比

MBR 中更占优势,呈现出更好的硝化效果,氨氮去除率也更高。

### 2.3 TN 去除效果

TN 的去除效果如图 4 所示。可以看出,AAO—MBR 和 AAO—HMBR 两种反应器的出水 TN 平均浓度分别为 19.92 mg/L 和 13.59 mg/L,稳定阶段的 TN 平均去除率分别为 41.87% 和 59.10%,投加填料之后去除率提高了 17.23%。当填料上的污泥达到一定厚度时,填料上存在着氧浓度梯度,产生由外到内的好氧、缺氧、厌氧状态<sup>[10]</sup>,为微生物创造了更丰富的生存环境。微生物在生物膜外层的好氧环境中进行硝化反应、在内层进行反硝化反应,生物膜的存在促进了同步硝化反硝化作用,提高了反应器的脱氮能力。

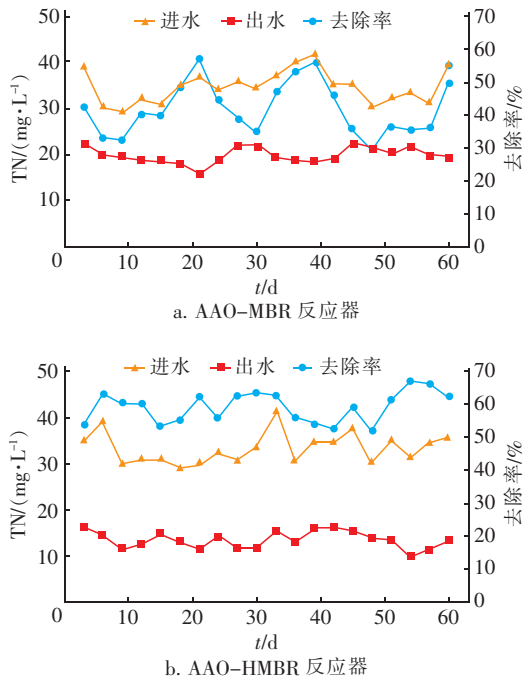


图4 投加填料前后系统对总氮的去除效果

Fig.4 TN removal effect before and after adding filler

### 2.4 TP 去除效果

TP 的去除效果如图 5 所示。可以看出,AAO—MBR 和 AAO—HMBR 两种反应器出水 TP 平均浓度分别为 2.74 mg/L 和 2.02 mg/L,稳定阶段的 TP 平均去除率分别为 64.13% 和 72.20%,投加填料之后去除率提高了 8.07%。这一方面可能与填料上生物膜中的附着性微生物对磷的同化作用有关<sup>[11]</sup>;另一方面,当填料上的生物膜足够厚时,会形成由外层到内层的氧浓度差,因而在最内层呈现出厌氧状态、

最外层为好氧状态,这时在好氧池也可以进行聚磷菌的厌氧释磷和好氧吸磷过程<sup>[12]</sup>。

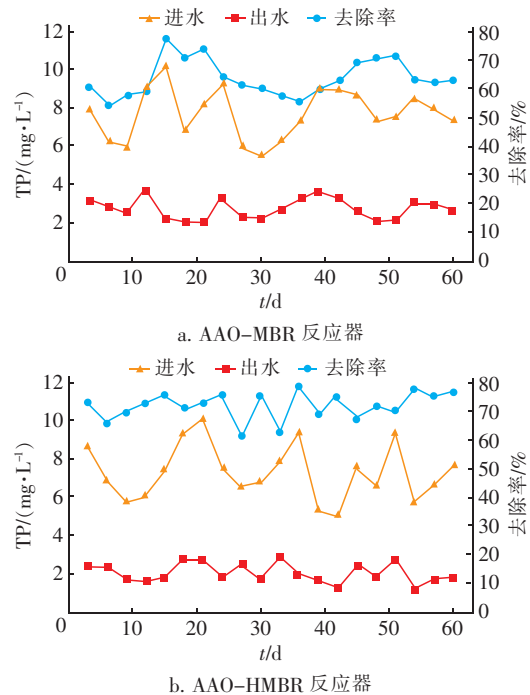


图5 投加填料前后系统对总磷的去除效果

Fig.5 TP removal effect before and after adding filler

出水 TP 浓度未满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,这一方面与 SRT 较长有关;另一方面,生物除磷过程主要依靠聚磷菌在厌氧环境释磷后再于好氧环境中过量吸磷的方式实现,聚磷菌在释磷的同时需要从环境中摄取大量的易降解有机物以实现自身的生长和分裂增殖。由于填料上的厌氧环境位于生物膜最里层,聚磷菌只有在生物膜里层才能实现释磷并摄取易降解有机物,而污水中的易降解有机物大都被混合液中悬浮生长的微生物直接利用,能传递到里层的很少,这限制了生物膜上聚磷菌的生长<sup>[13]</sup>,因此系统的除磷效果并不十分理想。

### 2.5 膜污染特性

#### 2.5.1 TMP 的变化

当 TMP 达到 26 kPa 时,对膜组件进行化学清洗。清洗方式如下:先用清水清洗膜组件表面可脱落的污泥,再将膜组件放在 1% 的 NaClO 溶液中浸泡 2 h,清水冲洗后,将膜组件放在 0.5% 的柠檬酸溶液中浸泡 1 h。经化学清洗后膜组件可恢复初始 TMP,但清洗周期会缩短,相对于 HMBR,MBR 中的膜组件可恢复性更差一些。



两个阶段反应器的 TMP 变化如图 6 所示,当 TMP 第 1 次增长至 26 kPa 时,HMBR 系统运行了 20 d,而 MBR 系统仅运行了 13 d。在投加填料前后分别运行的 60 d 内,对 AAO—MBR 系统的膜组件共清洗了 4 次,对 AAO—HMBR 系统的膜组件仅进行了 2 次清洗。由此可见,填料的投加对膜污染状况有一定的缓解效果。这是因为在投加填料的 HMBR 系统中,污泥一部分生长在填料上,在总污泥浓度不变的情况下,反应器中的悬浮污泥浓度有所下降,因此膜污染速率有所减缓。

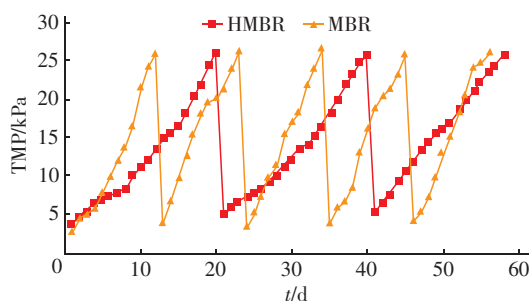


图 6 投加填料前后系统 TMP 的变化

Fig. 6 Change of TMP before and after adding filler

## 2.5.2 膜污染表征

图 7 为膜组件使用前以及两个系统运行相同时间后膜表面的扫描电镜照片(放大 1 000 倍)。可以看出,未使用过的膜表面平滑且无污泥附着,运行 20 d 后,MBR 膜表面有清晰可见的污染物附着,而 HMBR 表面仅有少量污染物附着,膜表面污染程度更低,此时膜的过滤性也比前者更好。

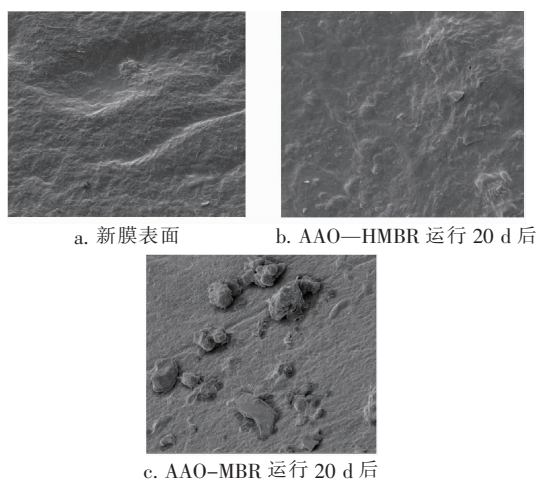


图 7 运行前后膜表面的扫描电镜照片

Fig. 7 SEM images of membrane surface before and after operation

## 2.5.3 AAO—HMBR 膜表面的红外光谱分析

对 AAO—HMBR 运行一段时间后的膜组件外表面泥饼层进行红外光谱分析,结果如图 8 所示。可以看到,在  $3\,280\text{ cm}^{-1}$  处有一宽峰,这是羟基官能团 O—H 键的伸缩振动峰,多糖中往往含有大量羟基;在  $1\,634\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,540\text{ cm}^{-1}$  处的两个尖峰是酰胺 I 带和酰胺 II 带的特征峰,它们都是蛋白质的典型二级结构; $1\,033\text{ cm}^{-1}$  处是 C—O 伸缩振动峰,这是典型的多糖特征吸收峰。由此可见,膜表面的污染物主要为蛋白质与多糖。

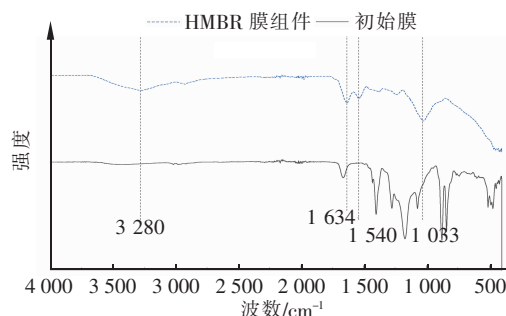


图 8 AAO—HMBR 膜组件表面的红外光谱分析

Fig. 8 Infrared spectrum analysis of membrane surface in AAO—HMBR system

## 3 结论

① 与 AAO—MBR 相比,AAO—HMBR 表现出更好的处理效果,对生活污水中 COD、氨氮、TN、TP 的去除率分别由 92.71%、95.08%、41.87%、64.13% 提高为 96.06%、98.34%、59.10%、72.20%。

② 填料的投加对 MBR 中的膜污染状况有一定的缓解效果。当两种反应器的 TMP 均达到 26 kPa 时,AAO—HMBR 运行了 20 d,而 AAO—MBR 仅运行了 13 d。

③ 运行相同时间后,MBR 膜表面有清晰可见的污染物附着,而 HMBR 膜表面仅有少量污染物附着,膜表面污染程度更低。对 HMBR 反应器的膜组件进行红外光谱分析,结果表明,膜表面滤饼层污染物主要为蛋白质与多糖。

## 参考文献:

- [1] HUANG J, GU Y, ZENG G, et al. Control of indigenous quorum quenching bacteria on membrane biofouling in a short-period MBR [J]. Bioresource Technology, 2019, 283: 261–269.

- [2] LEI Z, YANG S, LI X, *et al.* Revisiting the effects of powdered activated carbon on membrane fouling mitigation in an anaerobic membrane bioreactor by evaluating long-term impacts on the surface layer[J]. *Water Research*, 2019, 167: 115137.
- [3] 叶亮, 郭亚琼, 封峰, 等. 基于节能降耗的 MBR 工艺优化运行措施[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 118–122.  
YE Liang, GUO Yaqiong, FENG Feng, *et al.* Study on optimizing operation for MBR based on energy saving and consumption reduction[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 118–122 (in Chinese).
- [4] 王旭东, 高森, 王莹莹, 等. 在线 NaClO 反洗对倒置 A<sup>2</sup>O—MBR 系统微生物群落的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3208–3215.  
WANG Xudong, GAO Miao, WANG Yingying, *et al.* Effect of on-line NaClO backwashing on microbial communities in an inverted A<sup>2</sup>O – MBR system[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3208–3215 (in Chinese).
- [5] 王晨, 洪耀良, 施国健, 等. 海绵浸没式膜生物反应器在废水处理中的研究进展[J]. *环境工程*, 2017, 35(3): 1–4.  
WANG Chen, HONG Yaoliang, SHI Guojian, *et al.* Research process of sponge-submerged membrane bioreactor in wastewater treatment[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(3): 1–4 (in Chinese).
- [6] ZHANG S, ZUO X, XIONG J, *et al.* Effect of powdered activated carbon dosage on sludge properties and membrane bioreactor performance in a hybrid MBR – PAC system[J]. *Environmental Technology*, 2019, 40(9): 1156–1165.
- [7] 王芳, 李之鹏, 徐仲, 等. AF—MBR 处理海水养殖废水性能及膜污染特性[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1760–1766.  
WANG Fang, LI Zhipeng, XU Zhong, *et al.* Studies on the nitrogen removal performance and membrane fouling characteristics of AF – MBR for mariculture wastewater treatment[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5): 1760–1766 (in Chinese).
- [8] 成英俊, 张捍民, 张兴文, 等. 生物膜—膜生物反应器脱氮除磷性能[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(1): 73–76.  
CHENG Yingjun, ZHANG Hanmin, ZHANG Xingwen, *et al.* The nitrogen and phosphorus removal properties of biofilm – membrane biological reactor [J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(1): 73–76 (in Chinese).
- [9] 袁宏林, 杜于蛟, 李成成, 等. 复合式膜生物反应器处理城市污水特性研究[J]. *西安建筑科技大学学报 (自然科学版)*, 2008, 40(2): 243–248.  
YUAN Honglin, DU Yujiao, LI Chengcheng, *et al.* The characteristic study of hybrid membrane bioreactor used for municipal wastewater treatment[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 40(2): 243–248 (in Chinese).
- [10] PALMARIN M J, YOUNG S. Comparison of the treatment performance of a hybrid and conventional membrane bioreactor for greywater reclamation [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 28: 54–59.
- [11] 刘强, 王晓昌. 复合式膜生物反应器处理城市污水的运行特性[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(5): 136–139.  
LIU Qiang, WANG Xiaochang. Operation characteristics of a hybrid membrane bioreactor in treatment of municipal wastewater [J]. *Environment Science & Technology*, 2010, 33(5): 136–139 (in Chinese).
- [12] 杨猛. 复合式膜生物反应器处理校园生活污水的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.  
YANG Meng. Research on Treatment of Campus Wastewater by Hybrid Membrane Bioreactor [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012 (in Chinese).
- [13] 张捍民, 肖景霓, 成英俊, 等. 强化膜生物反应器脱氮除磷性能对比试验研究[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(2): 242–248.  
ZHANG Hanmin, XIAO Jingni, CHENG Yingjun, *et al.* Comparing experiments on enhancing nitrogen and phosphorus removal in membrane bioreactor[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(2): 242–248 (in Chinese).

作者简介: 王旭东 (1979 – ), 男, 山西吕梁人, 博士, 教授, 主要研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: xudongw7904@126.com

收稿日期: 2020-02-17

修回日期: 2020-04-22

(编辑: 刘贵春)