

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.002

GAC/DMBR 复合工艺的优化及污水处理效能

张净钰^{1,2}, 杨媛^{1,2}, 胡以松^{1,2}, 臧颖^{1,2}, 王晓昌^{1,2}, 陈荣^{1,2}

(1. 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; 2. 西安建筑科技大学 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: 基于动态膜生物反应器(DMBR),采用批式试验研究了尼龙网膜基材孔径(200、300、500目)和颗粒活性炭(GAC)投加量(0.5、1、2、3 g/L)对GAC/DMBR复合工艺运行效果的影响,并基于优化结果进一步通过连续运行工艺试验考察了其对污水的处理效能。批式试验结果表明,采用不同孔径的膜基材时出水浊度无明显差别,但是200目的膜基材表现出更高的稳定通量[65 L/(m²·h)];当GAC投加量为2 g/L时,GAC/DMBR复合工艺的处理效果和过滤性能最优。连续运行工艺试验结果表明,与空白组(DMBR)相比,GAC/DMBR复合工艺的出水通量显著提升,出水浊度稳定在1 NTU左右,且对污染物的去除效果较好,溶解性胞外聚合物(SEPS)含量降低,污泥性能得到了改善。

关键词: 动态膜生物反应器; 颗粒活性炭; 污水; 过滤性能; 污泥特性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0009-06

Optimization of Granular Activated Carbon and Dynamic Membrane Bioreactor Hybrid Process and Its Wastewater Treatment Efficiency

ZHANG Jing-yu^{1,2}, YANG Yuan^{1,2}, HU Yi-song^{1,2}, ZANG Ying^{1,2}, WANG Xiao-chang^{1,2}, CHEN Rong^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology <Ministry of Education>, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the dynamic membrane bioreactor (DMBR), batch experiments were conducted to study the effect of pore size of supporting material (200 mesh, 300 mesh and 500 mesh) and dosage (0.5 g/L, 1 g/L, 2 g/L and 3 g/L) of granular activated carbon (GAC) on operation of GAC/DMBR process, and long-term experiments were further conducted to verify the wastewater treatment efficiency based on the optimization results. The batch experiments showed that there was no significant difference in effluent turbidity when nylon mesh with different pore size was used. However, a higher stable flux of 65 L/(m²·h) was obtained when nylon mesh with pore size of 200 mesh was used. The treatment efficiency and filtration performance were the best when GAC dosage was 2 g/L. Compared with the control experiment (DMBR), the effluent flux of GAC/DMBR increased significantly during the long-

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ5054); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51508450); 陕西省科技创新团队项目(2019TD-025)

通信作者: 胡以松 E-mail: jeffsion414@163.com

term experiments, and the effluent turbidity remained around 1 NTU. In addition, GAC/DMBR had a better treatment performance with lower soluble extracellular polymeric substances (SEPS) content and improved sludge property.

Key words: dynamic membrane bioreactor; granular activated carbon; wastewater; filtration performance; sludge property

动态膜生物反应器(DMBR)是一种将生物处理和动态膜分离相结合的新型污水处理工艺,采用大孔径廉价材料作为膜基材,通过自生或预涂的方式在膜基材上形成一层稳定的动态膜,实现近于微滤/超滤的过滤效果^[1],因其具有造价低、阻力小、通量大、清洗简单等特点而受到关注。DMBR 中的动态膜是运行初始阶段污泥被截留吸附在膜基材表面而形成的泥饼层,因此其过滤性能受到污泥混合液性质的显著影响^[2],如何调控工艺参数、强化动态膜的过滤性能对 DMBR 的实际应用具有重要意义。

近期的研究表明,向 DMBR 中投加颗粒物质可以改善活性污泥的性质、提高动态膜的过滤性能及除污能力,应用较多的颗粒物有粉末活性炭、粉煤灰、聚丙烯酰胺、壳聚糖等。颗粒活性炭(GAC)作为一种常用的颗粒材料,投加于 DMBR 中处理生活污水的报道较少。GAC 具有较大的比表面积和抗压性,一方面可以强化污染物的吸附去除,控制膜污染;另一方面可以增加动态膜的孔隙率、改善其结构,提高膜过滤性能^[3];此外,还能够对动态膜产生冲刷作用,延缓污染物在其表面的过度累积^[4]。因此,笔者采用一体式 DMBR,通过批式试验考察膜基材孔径和 GAC 投加量对 DMBR 运行性能的影响,并基于优选结果进一步通过连续运行工艺试验考察 GAC/DMBR 复合工艺的污水处理性能,以期为该工艺的实际应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置及操作条件

批式试验和连续运行工艺试验装置见图1。

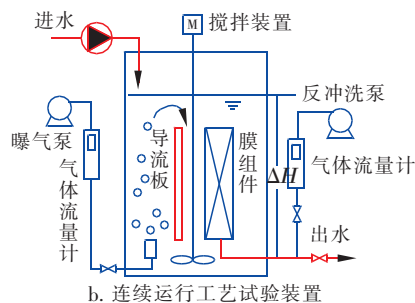
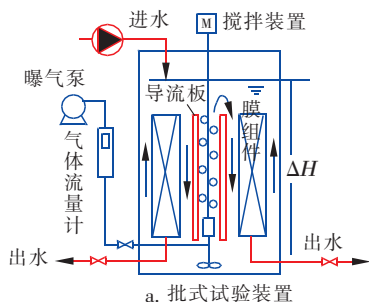


图1 动态膜生物反应器试验装置示意

Fig. 1 Diagram of DMBR test device

批式试验反应器采用有机玻璃制成,长×宽×高=18 cm×10.8 cm×38 cm,有效容积为3.9 L,反应器内对称放置两个平板式膜组件,膜基材采用尼龙网,有效过滤膜面积为0.012 m²。反应器内设置一组曝气头,为活性污泥混合液提供足够的溶解氧(6~8 mg/L)。底部设置搅拌装置,保持 GAC 处于悬浮状态。两个膜组件之间加设导流板,使活性污泥混合液处于循环流动状态和减弱曝气对动态膜表面的冲刷。装置通过液位继电器控制进水泵,通过(20±0.5) cm(1 m 水柱约为9.8 kPa,下同)的水头差实现重力自流出水。

连续运行工艺试验反应器采用有机玻璃制成,长×宽×高=20 cm×10 cm×40 cm,有效容积为4 L,反应器一侧放置一个膜组件,膜组件与批式试验相同,另一侧放置一组曝气头,中心设置搅拌装置,膜组件与曝气头之间设置导流板。进水和出水的控制方式与批式试验相同,水头差为(20±0.5) cm。

1.2 试验方案

试验分为两个阶段,第1阶段为 GAC/DMBR 复合工艺优化的批式试验研究,考察不同膜基材孔径(200、300、500 目)和不同的 GAC 投加量(0.5、1、2、3 g/L)对反应器运行效果的影响,筛选出最佳的膜基材孔径和 GAC 投加量;第2阶段为连续运行的 GAC/DMBR 复合工艺的污水处理效能研究,采用两组动态膜生物反应器平行运行(DMBR 不投加 GAC 作为空白组,GAC/DMBR 投加 2 g/L 的 GAC),考察

投加 2 g/L 的 GAC 对 DMBR 处理污水效能和污泥特性的影响。连续运行以 48 h 左右作为一个单周期,结束时采用气反冲的方式去除泥饼层,恢复膜过滤能力,进行动态膜再生。

1.3 试验用 GAC、接种污泥及进水水质

试验用 GAC 的粒径范围为 200 ~ 500 μm ,用纯水浸泡清洗后使用。接种污泥取自西安市某污水处理厂(主体工艺为 $\text{A}^2\text{O}/\text{MBR}$)的好氧池,驯化 1 周后投入使用。反应器进水为实际生活污水,具体水质如下:浊度为 42.8 ~ 105.6 NTU, COD 为 176 ~ 394 mg/L , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 25.3 ~ 49.1 mg/L , $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 1.2 ~ 4.9 mg/L , $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 为 2.48 ~ 5.90 mg/L , UV_{254} 为 0.24 ~ 0.37 cm^{-1} 。

1.4 检测项目与方法

COD:连华试剂法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$:纳氏试剂分光光度法; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$:钼锑抗分光光度法;浊度:便携式浊度仪; UV_{254} :紫外分光光度法;多糖:硫酸-蒽酮法;蛋白质:Folin 酚试剂法;粒径分布:激光粒度仪。

2 结果与讨论

2.1 GAC/DMBR 复合工艺的优化

2.1.1 膜基材孔径的优化

在批式试验中,投加 2 g/L GAC 前后不同孔径膜组件的出水通量和浊度的变化见图 2 和图 3。

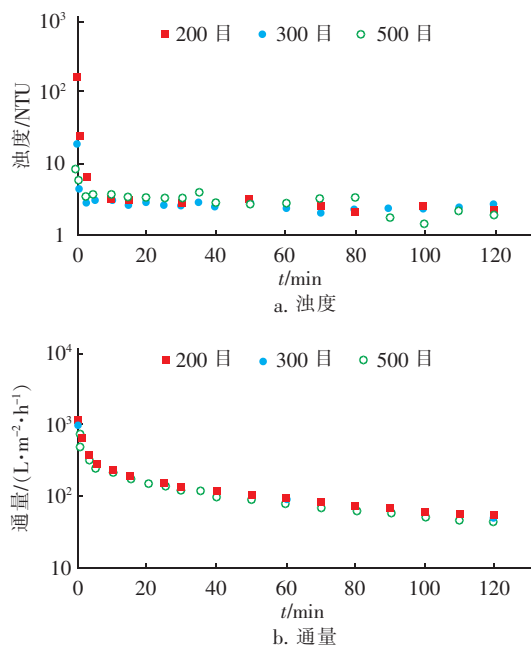


图2 未投加 GAC 时不同孔径膜组件出水浊度和通量的变化

Fig. 2 Change of effluent turbidity and flux for different pore size of nylon meshes (GAC = 0 g/L)

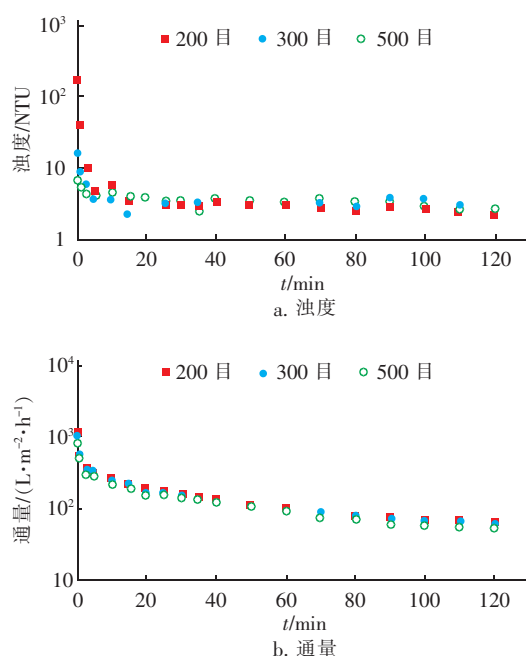


图3 投加 2 g/L GAC 时不同孔径膜组件出水浊度和通量的变化

Fig. 3 Change of effluent turbidity and flux for different pore size of nylon meshes (GAC = 2 g/L)

在投加 2 g/L GAC 前后,不同孔径膜组件的出水浊度呈现一致的变化规律:初始浊度较大,运行 5 min 内浊度快速下降,5 min 时均降至 5 NTU 以下,此阶段动态膜快速形成,之后 3 种孔径的膜基材出水浊度无明显差别,最终稳定在 2 NTU 左右。通量方面,运行至 5 min 时,通量随着动态膜的快速形成迅速衰减至初始通量的 20% ~ 35%;120 min 时,未投加 GAC 条件下,200、300、500 目膜组件的通量分别降至 51.3、45.6、43.8 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,投加 2 g/L GAC 条件下,膜组件通量分别降至 65、57.5、48.8 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。综上可知,在投加 2 g/L GAC 前后不同孔径膜组件稳定出水浊度没有明显差异,而孔径为 200 目的膜组件出水通量最大,且投加 2 g/L GAC 后不同孔径膜组件的通量均有所提高。分析认为,GAC 的投加一方面可冲刷动态膜表面,带走部分沉积污染物,另一方面可提高动态膜的孔隙率,改善动态膜结构,从而强化了其过滤性能。

反应器运行结束后测定进出水水质,对比发现不同孔径膜基材 DMBR 对污染物的去除效果无显著差异。未投加 GAC 时,不同孔径膜基材 DMBR 对 COD 的去除率均稳定在 80% 左右,投加 2 g/L GAC

后孔径为200、300、500目的膜基材DMBR对COD的去除率分别提高了12.88%、7.91%、8.69%，说明GAC能够强化对有机物的吸附去除，对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率分别提高了4.5%、3.01%、2.9%，对 UV_{254} 的去除率分别提高了3.16%、1.54%、3.19%，对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率分别提高了6.79%、2.23%、11.79%，说明投加2 g/L GAC对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果改善较为明显。综上认为，尼龙网膜基材的最佳孔径为200目。

2.1.2 GAC投加量的优化

在尼龙网膜基材孔径为200目的条件下，投加不同浓度(0.5、1、2、3 g/L)GAC时DMBR出水浊度和通量的变化如图4所示。

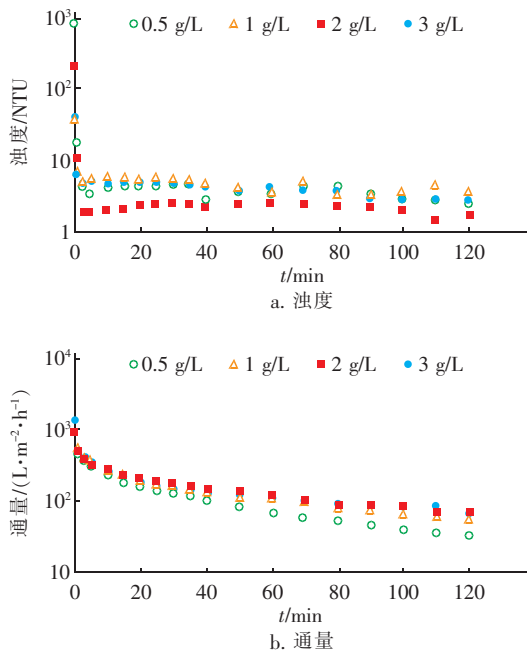


图4 在不同GAC投加量下水浊度和通量的变化
Fig. 4 Change of effluent turbidity and flux under different GAC dosages

反应器运行至5 min时，不同GAC投加量下水浊度均可降至5 NTU以下，其中，当投加量为2 g/L时出水浊度最低，稳定在2 NTU左右。当GAC投加量分别为0.5、1、2、3 g/L时，120 min时通量分别下降至32.5、54.2、69、68.7 L/(m²·h)，投加3 g/L与2 g/L几乎没有变化。因此，GAC的投加量并非越大越好，在选定200目尼龙网作为膜基材时，考虑工艺运行的经济性以及动态膜的过滤性能，确定最佳GAC投加量为2 g/L。

反应器运行结束后测定进出水水质，结果表明，

当GAC投加量为0.5、1、2、3 g/L时，COD去除率均在80%以上，其中，GAC投加量为2 g/L时COD去除率最高，为88.30%；对 UV_{254} 的去除效果无明显差别，均稳定在60%左右； $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别为52.18%、49.46%、56.17%、63.66%，随着GAC投加量的增加去除效果提升较为明显； $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率呈先升后降的趋势，在GAC投加浓度为2 g/L时去除率最高。

2.2 GAC/DMBR复合工艺的运行性能

基于上述批式试验结果，认为在尼龙网膜基材孔径为200目、GAC投加量为2 g/L时GAC/DMBR的过滤性能和除污性能最优，因此在此条件下开展连续运行工艺试验研究。

2.2.1 污水处理性能

连续运行反应器出水浊度和通量的变化如图5所示。

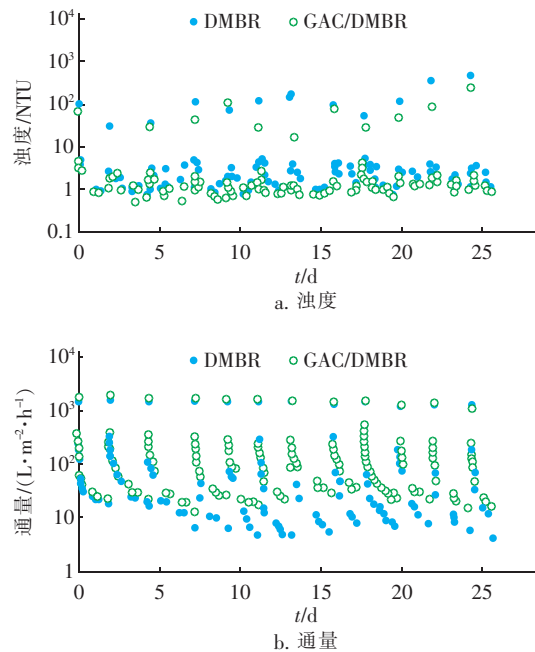


图5 连续运行时DMBR和GAC/DMBR出水浊度和通量的变化

Fig. 5 Change of effluent turbidity and flux of DMBR and GAC/DMBR during long-term operation

在浊度方面，单个运行周期初始浊度均较高，DMBR为29.7~457 NTU，GAC/DMBR为16.1~222 NTU；运行至5 min时，DMBR出水浊度降至5 NTU以下，GAC/DMBR降至3 NTU以下，说明形成的动态膜对颗粒物具有高效截留作用，此后两个反应器的出水浊度缓慢降低；GAC/DMBR的出水浊度

整体低于 DMBR,且在运行结束时浊度可稳定在 1 NTU 左右。在通量方面,DMBR 在单个运行周期初始通量为 $1\,230 \sim 1\,650 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,GAC/DMBR 为 $1\,140 \sim 1\,740 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,运行结束时 DMBR 通量维持在 $4 \sim 22 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,GAC/DMBR 通量维持在 $13 \sim 35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,表明投加 GAC 后能够显著提升膜通量,改善 DMBR 的过滤性能。这是因为:① GAC 的投加能够吸附膜污染物,减缓膜污染;② GAC 在水力作用下对膜表面有冲刷作用,能够带走动态膜上沉积的污染物;③ GAC 能够提高动态膜的抗压缩性,增大孔隙率,改善动态膜的结构。观察单个运行周期的初始通量发现,两个反应器的动态膜经过 2 min 的气反冲再生后,初始通量没有明显变化,说明形成的动态膜通过简单清洗即可恢复过滤性能,再生过程相对简便。

连续运行时进水和出水污染物浓度如表 1 所示。两个反应器对 COD 的去除率均在 90% 左右,GAC/DMBR 对 COD 的平均去除率较 DMBR 提升了

2.2%,分析认为,连续运行过程中足够的溶解氧浓度($6 \sim 8 \text{ mg/L}$)保证了好氧微生物较高的活性,对有机物的降解吸附性能较好,GAC 在一定程度上也强化了对有机物的去除^[2]。两个反应器对氨氮的去除率均在 95% 以上,这是因为动态膜的高效截留作用,使得大部分微生物截留在反应器内,有利于世代周期较长的微生物(如硝化菌和亚硝化菌)生长繁殖^[5],充足的曝气量为硝化菌营造的好氧环境也可提高系统的硝化能力。 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率提高了 5.2%,说明 GAC 可以改善 DMBR 对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效能。作为膜优势污染物,溶解性有机物(DOM)主要包括多糖、蛋白质和腐殖酸,投加 GAC 后反应器对 UV_{254} 、多糖、蛋白质的平均去除率分别提高了 3.9%、19%、11.8%,这是因为 GAC 的投加一方面可以吸附溶解性有机物,另一方面 GAC 对分子氧具有较高的亲和力^[6],改善了原有微生物的生长条件,强化了微生物对 DOM 的降解吸附,微生物生长繁殖加快也可提高对有机物的利用率。

表 1 连续运行时进水和出水污染物浓度

Tab. 1 Pollutants concentration in influent and effluent during long-term operation

项 目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{UV}_{254}/$ cm^{-1}	蛋白质/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	多糖/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水	285.8 ± 79.9	35.8 ± 5.9	1.6 ± 0.5	5.0 ± 0.8	0.29 ± 0.05	19.00 ± 0.63	5.91 ± 1.66
DMBR 出水	30.5 ± 4.6	0.74 ± 0.33	27.6 ± 3.3	4.1 ± 0.7	0.13 ± 0.02	15.37 ± 5.1	5.10 ± 1.69
GAC/DMBR 出水	25.8 ± 4.5	0.52 ± 0.27	41.9 ± 3.6	3.9 ± 0.4	0.11 ± 0.01	14.43 ± 5.3	3.99 ± 2.46

2.2.2 污泥特性分析

胞外聚合物(EPS)是主要的膜污染物质,可分为溶解性 EPS(SEPS)和结合型 EPS(BEPS),其成分主要包括多糖、蛋白质、核酸等聚合物,在本试验中,EPS 含量采用多糖和蛋白质近似表示,如图 6 所示。

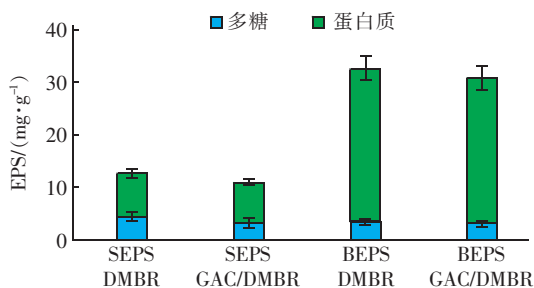


图 6 污泥混合液中 EPS 的含量

Fig. 6 EPS content in sludge mixtures

有研究发现,在连续运行中 SEPS 可降低动态膜的孔隙率,对动态膜污染有重要影响^[7]。由图 6 可知,相比 DMBR,投加 GAC 后污泥混合液中的

SEPS 含量降低,推测有以下原因:①有研究表明,GAC 较大的比表面积可有效吸附高分子有机物和胶体物质^[8];②投加 GAC 后改善了微生物生长环境,使微生物分泌的 EPS 量减少;③混合液中溶解性有机物、GAC 和污泥黏附在一起形成更大的絮体,并能够吸附 SEPS,降低其含量。因此,投加 GAC 可降低混合液的 SEPS 含量,改善污泥特性,减缓膜污染,这也是 GAC/DMBR 通量增大的原因之一。

DMBR 和 GAC/DMBR 运行结束时测得污泥的平均粒径分别为 64.52 、 $61.56 \mu\text{m}$,远高于接种污泥的平均粒径($26.81 \mu\text{m}$),这是因为,一方面污泥絮体会随着微生物的生长繁殖不断增大,另一方面在成膜过程中粒径小于膜基材孔径的污泥透过尼龙网排出,使得污泥粒径分布向着更大的范围移动。然而 GAC/DMBR 中污泥混合液的平均粒径小于 DMBR 的,与设想结果不一致,分析认为,在流动混合液中 GAC 与污泥絮体之间的相互摩擦碰撞使得

污泥粒径增大困难,但 GAC/DMBR 在粒径为 256 ~ 1 512 μm 范围内的体积分数明显大于 DMBR,表明活性污泥能够以 GAC 作为骨架相互结合形成更大的污泥絮体。

3 结论

① 在批式试验中,投加 2 g/L GAC 后,不同孔径膜基材 DMBR 的过滤性能均有所改善,其中 200 目膜基材的过滤性能最好。当 GAC 投加量为 2 g/L 时,GAC/DMBR 的运行性能最好。

② 连续运行过程中,相比空白组(DMBR),GAC/DMBR 可获得更高的通量和更好的出水水质。

③ GAC 的投加可降低污泥混合液中的 SEPS 含量;GAC 与污泥絮体的碰撞摩擦导致 GAC/DMBR 的污泥絮体平均粒径小于 DMBR 的,但是 GAC 可以改变污泥的总体粒径分布。

参考文献:

- [1] 程刚,朱雷,许颖,等. 厌氧动态膜生物反应器中动态膜形成及其运行周期的影响因素分析[J]. 环境工程学报,2018,12(5):1408-1415.
Cheng Gang,Zhu Lei,Xu Ying,et al. Analysis on factors influencing formation of dynamic membrane and operational cycle in anaerobic dynamic membrane bioreactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2018,12(5):1408-1415(in Chinese).
- [2] Liang S,Qu L,Meng F,et al. Effect of sludge properties on the filtration characteristics of self-forming dynamic membranes (SFDMS) in aerobic bioreactors: Formation time,filtration resistance, and fouling propensity [J]. J Membr Sci,2013,436:186-194.
- [3] 杨恒,肖惠群,夏四清. 颗粒活性炭对 A/O—MBR 处理垃圾渗滤液的影响[J]. 工业水处理,2016,36(12):47-50.
Yang Heng,Xiao Huiqun,Xia Siqing. Influences of GAC on the treatment of landfill leachate by A/O-MBR[J]. Industrial Water Treatment,2016,36(12):47-50(in Chinese).
- [4] 马金霞,王世和,沈倩宇. 投加颗粒活性炭对膜生物反应器过滤特性的影响[J]. 中国给水排水,2010,26(3):87-89.
Ma Jinxia,Wang Shihe,Shen Qianyu. Effects of granular activated carbon addition on MBR filtration performance [J]. China Water & Wastewater,2010,26(3):87-89(in Chinese).
- [5] 孙琪媛,胡以松,王晓昌. PAC—DMBR 复合工艺的运行特性及处理效果研究[J]. 水处理技术,2017,43(11):112-115,120.
Sun Qiyuan,Hu Yisong,Wang Xiaochang. Research on operation characteristic and treatment efficiency of PAC-DMBR hybrid process [J]. Technology of Water Treatment,2017,43(11):112-115,120(in Chinese).
- [6] Skouteris G,Saraj D,Melidis P,et al. The effect of activated carbon addition on membrane bioreactor processes for wastewater treatment and reclamation - A critical review[J]. Bioresour Technol,2015,185:399-410.
- [7] Hu Y S,Wang X C,Tian W R,et al. Towards stable operation of a dynamic membrane bioreactor (DMBR): Operational process, behavior and retention effect of dynamic membrane [J]. J Membr Sci,2016,498:20-29.
- [8] Hu A Y,Stuckey D C. Activated carbon addition to a submerged anaerobic membrane bioreactor: Effect on performance, transmembrane pressure, and flux [J]. J Environ Eng,2007,133(1):73-80.



作者简介:张净钰(1994—),女,河南荥阳人,硕士研究生,研究方向为膜法污水资源化技术。

E-mail:zjy18202987287@163.com

收稿日期:2019-11-15