



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202101089

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

王亚军, 张四永, 李金守, 等. 水力停留时间对膜生物反应器膜污染的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2460-2467.

WANG Yajun, ZHANG Siyong, LI Jinshou, et al. Effect of hydraulic retention time on MBR membrane fouling[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(7): 2460-2467.

## 水力停留时间对膜生物反应器膜污染的影响

王亚军<sup>1,2,\*</sup>, 张四永<sup>1</sup>, 李金守<sup>1</sup>, 徐衍超<sup>1</sup>, 常莺娜<sup>3</sup>, 傅大放<sup>1,2</sup>

1. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050

2. 东南大学-蒙纳士大学未来城市联合研究中心, 苏州 215123

3. 甘肃省膜科学技术研究院有限公司, 兰州 730050

第一作者: 王亚军(1979—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 水污染控制。E-mail: wyj79626@163.com

\*通信作者

**摘要** 为考察水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 对膜生物反应器 (membrane bioreactor, MBR) 体系内的混合液特性和膜污染的影响, 对兰州某生活污水处理厂生化尾水进行了浸入式中空纤维 MBR 现场实验。结果表明, 在 HRT 由 6 h 逐渐升高至 12 h 的过程中, 胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 中大分子质量颗粒物的比例、溶解性微生物产物 (soluble microbial products, SMP) 的含量和污泥的 Zeta 电位分布均逐渐增大。同时, EPS 多糖含量、污泥粒径和黏度均出现逐渐降低的趋势, 这些因素可能共同作用导致膜组件的运行时间缩短、过膜压差 (transmembrane pressure, TMP) 快速增大, 最终致使膜污染进程的加快。在 HRT 为 6 h、膜通量  $15 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、污泥质量浓度为  $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下, 中空纤维式 MBR 处理生化尾水可以获得较好的混合液特性和处理效果。

**关键词** 水力停留时间; 膜生物反应器; 膜污染; 溶解性微生物产物; 胞外聚合物

膜生物反应器 (membrane bioreactor, MBR) 作为一种高效污水处理技术, 相较传统活性污泥法, MBR 通过高效的固液分离, 具有混合液微生物浓度高、反应器占地面积小、污泥产量低和更高出水水质等优势<sup>[1-2]</sup>。但膜污染仍是 MBR 进一步发展应用的最大阻碍。早期研究认为活性污泥混合液是膜污染的直接来源, 其中微生物代谢产物, 即胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 与溶解性微生物产物 (soluble microbial products, SMP) 是 MBR 主要的污染物质, 根据 LASPIDOU 的统一理论, EPS 和 SMP 之间存在一定的转化关系。有研究<sup>[3]</sup>表明, EPS 含量可以作为膜污染的指数, 但由于污泥特性复杂以及相互作用, 至今还没有系统性的研究定论。

众多膜污染控制策略相继提出, 包括改性膜材料<sup>[4]</sup>、优化操作条件<sup>[5]</sup> 和改善混合液特性等<sup>[6-8]</sup>。相关的研究主要集中在改性膜材料和投加新物质改善混合液特性方面。但从经济角度出发, 优化操作条件无疑是更好的选择。相关的研究已有很多, 包括曝气量、水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT)、污泥停留时间、有机负荷率等。其中, HRT 被认为是优化 MBR 膜污染的重要操作参数<sup>[9]</sup>, 该参数能有效调节进水中有机物与微生物的接触时间, 并改变 EPS 和 SMP 等混合液特性<sup>[10-11]</sup>,

收稿日期: 2021-01-14; 录用日期: 2021-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41967043); 甘肃省自然科学基金资助项目 (20JR5RA461); 校企合作项目 (lzxr-2019031)

同时影响活性污泥颗粒粒度、Zeta 电位与黏度等混合液特性参数的变化<sup>[12]</sup>。MBR 工艺处理可生化性较好的污水时，过低 HRT(1.2 h) 会促使 MBR 混合液中碳水化合物积累，同时对有机碳去除贡献也小，促使膜的清洗频率和不可逆污染均增高<sup>[13]</sup>。由此可见，针对不同水质，HRT 参数的选取具有差异性，所以，对 MBR 处理生化尾水中 HRT 的合理选取需进一步的探讨。

因此，基于上述研究结果，本实验从强化现有工艺处理能力出发，针对兰州某生活污水处理厂出水水质超标问题，构建处理生化尾水 MBR 工艺，现场开展相关实验研究，梳理运行参数 HRT 与混合液特性参数间相关性，以寻求适宜的 HRT，从而实现 MBR 膜污染控制的工程调控。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验用水来自兰州市某生活污水处理厂实际现场，前期经过厌氧-缺氧-好氧生物脱氮除磷工艺生物处理，生化尾水直接接入中空纤维膜组件小试装置。如图 1 所示，小试装置生化池有效容积 95 L(285 mm×500 mm×670 mm)，膜池有效容积 13 L(40 mm×500 mm×670 mm)，产水池有效容积为 25 L(75 mm×500 mm×670 mm)。其中，膜材料选用聚偏氟乙烯，平均孔径 0.05 μm，膜片有效面积为 1 m<sup>2</sup>，运行最高压力 0.03 MPa。

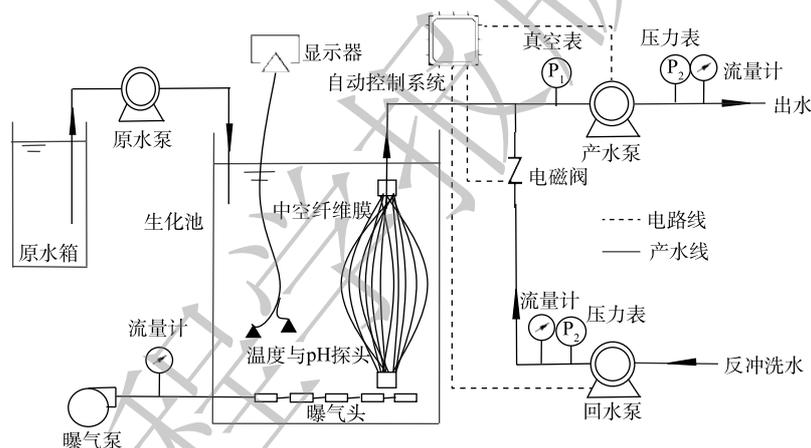


图 1 实验流程图

Fig. 1 Flow diagram of experiment

### 1.2 实验运行条件

实验装置采用自动控制，MBR 的产水模式采用间歇式(运行 10 min，暂停 2 min)产水，产水泵工作 4 h 后，进行 1 次清水反冲洗，反洗时间为 3 min，膜通量为 15 L·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>。实验温度控制在 (20±1) °C，pH 为 7.0~7.5。为考察 HRT 对 MBR 体系内的混合液特性、处理效率以及膜污染的影响，根据已有的实验研究<sup>[14]</sup>，通过调节混合液在反应器中的容量，先后于 6、8 和 12 h 下考察 HRT 对 MBR 的影响，整个运行过程中污泥质量浓度基本保持在 4 000 mg·L<sup>-1</sup> 左右。

### 1.3 分析方法

总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus, TP)、化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD)、氨氮 (ammonia nitrogen, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 和浊度等采用《水和废水监测分析方法》中规定的标准方法检测。EPS 分为松散附着性胞外聚合物 (loosely bound EPS, LB-EPS) 和固着性胞外多聚物 (tightly bound EPS, TB-EPS)，均采用热提取法提取。多糖采用蒽酮-硫酸比色法测定，蛋白质采用 LOWRY 法测定，其中分光光度计使用尤尼柯 UV-2800A 紫外-可见分光光度计。

EPS 分子质量大小通过岛津 LC20 凝胶渗透色谱进行表征，红外光谱测定使用 Niolet IS10 傅里

叶红外光谱仪(美国尼高力公司)测定,污泥粒径测定使用 Mastersizer 2000 激光粒度仪(英国马尔文公司), Zeta 电位测定使用 Zetasizer Nano ZS90 仪(美国赛默飞公司),黏度测定使用 NDJ-1 旋转黏度计(深圳德卡精密量仪有限公司), TMP 通过真空表表征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 HRT 对出水水质影响

考察了不同 HRT 条件下 MBR 运行水质变化,结果见表 1。如表 1 所示,随着 HRT 的增加,COD、TP 与浊度的出水数值相应增高,但 TN 的出水质量浓度在 6 h 与 8 h 时变化不大。当 HRT 为 6 h 时,出水中 COD、TP 和浊度的数值最低,分别为  $29.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 0.9 NTU。随着 HRT 延长,出水中污染物质量浓度略有增高。这可能是由于随着 HRT 的延长,混合液中以多糖为主的 SMP 含量增加致使出水中有机物质量浓度也随之增加<sup>[15]</sup>。上清液浊度的增加可能与污泥的絮凝有关,这会对膜污染和去除性能产生影响<sup>[16]</sup>,但出水水质基本均达到一级 A 水质排放标准。

表 1 不同 HRT 下 MBR 进出水水质

Table 1 Water quality of inlet and outlet of MBR at different HRTs

HRT/h	其他水质指标质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )						进水浊度/NTU	出水浊度/NTU
	进水COD	出水COD	进水TP	出水TP	进水TN	出水TN		
6	72.6±2.00	29.2±3.00	1.333±0.22	0.22±0.45	24.84±0.719	18.216±3.21	13.432±1.43	0.9±2.31
8	73.35±0.25	35.2±3.00	1.373±0.12	0.404±0.44	25.443±1.41	24.178±3.22	13.432±1.32	1.2±2.34
12	73.1±0.50	40.8±4.40	1.405±0.14	0.438±0.40	25.717±1.33	24.219±1.09	13.803±0.95	3.5±1.50

### 2.2 HRT 对微生物代谢产物含量的影响

由图 2 可知,当 HRT 为 6 h 时,膜运行时间最长,在运行 27 d 后达到 0.03 MPa。随 HRT 的升高,膜组件运行时间降低,导致 TMP 快速增大,从而加快了膜污染的进程。这也从侧面说明微生物代谢产物对污泥特性起主要作用,是研究膜污染机制的关键<sup>[1, 12, 17-18]</sup>。EPS 是微生物在生长过程中向其外分泌的一种物质,对维持活性污泥稳定性具有重要作用<sup>[11]</sup>,但同时也是造成膜污染的主要原因<sup>[2]</sup>。从结构上区分, TB-EPS 为紧密附着在细胞壁上的胞囊聚合物, LB-EPS 为胶体或溶解松散态物质存在于液相主体中的黏性聚合物,而 SMP 是在微生物降解基质和内源呼吸过程中产生的。以上 3 个指标是影响膜污染的重要指标。

因此,检测了不同 HRT(6、8 和 12 h)下 SMP、LB-EPS 和 TB-EPS 含量的变化,结果如图 3 和图 4 所示。由图 3 可见, SMP、LB-EPS 和 TB-EPS 的特征吸收峰的变化相似,且 HRT 越大,三者的特征吸收峰强度越高。且 TB-EPS 的吸收峰强度大于 SMP 的吸收峰强度。在 EPS 的 FTIR 光谱  $3\ 300\sim 3\ 500 \text{ cm}^{-1}$  处出现了 6N—H 与 O—H 振动<sup>[11, 19]</sup>,同时在  $1\ 020\sim 1\ 120 \text{ cm}^{-1}$  处出现代表多聚糖的 C—O—C 伸缩振动<sup>[11, 20]</sup>,  $1\ 416 \text{ cm}^{-1}$  附近出现  $\text{CH}_2$  伸缩振动,  $1\ 050\sim 1\ 650 \text{ cm}^{-1}$  为蛋白质肽键对应的伸缩振动峰,在  $613.62 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰表明有类似腐殖酸等化合物<sup>[19]</sup>。

由图 4 可以看出, EPS 中主要成分为多糖,同时在 TB-EPS 中含有部分蛋白,而 SMP 的主要成

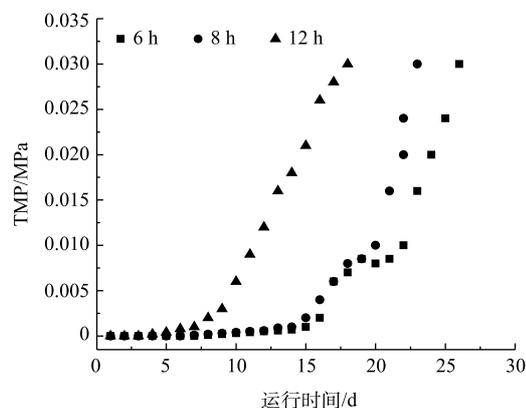


图 2 不同 HRT 下 TMP 变化

Fig. 2 TMP changes at different HRTs

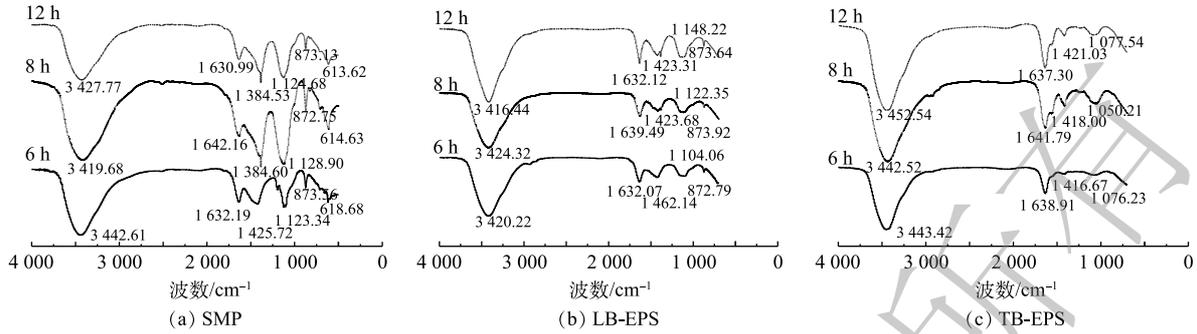


图 3 不同 HRT 下微生物代谢产物的红外光谱图  
Fig. 3 FTIR of microorganism metabolites at different HRTs

分为多糖，蛋白含量极少。由图 4(a) 可见，SMP 含量随着 HRT 的增加呈现上升趋势，这与有的研究成果不一致<sup>[4]</sup>。HRT 为 12 h 时的 SMP 含量要比 6 h 时平均高出 78.2% 左右。这是因为，在保证一定进水营养物质前提下，当 HRT 较长时，反应器能充分降解营养物质，但同时也有可能发生内源呼吸而发生 SMP 的累积。SMP 中多糖含量呈上升趋势，HRT 为 12 h 时的 SMP 多糖含量要比 6 h 时平均高出 80% 左右。这是由于反应器运行延长，微生物不断繁殖代谢能力升高，在进水碳源相对充足的情况下，SMP 中多糖不断累积。SMP 中蛋白质含量呈缓慢上升趋势，HRT 为 12 h 时 SMP 蛋白质含量要比 6 h 时平均高出 50.2 mg·g<sup>-1</sup>。这是由于反应器运行延长，在不能很好满足脱氮反硝化条件下，导致氮源降解受阻，SMP 中蛋白质也不能作为氮源所消耗，因此，蛋白质含量升高。

由图 4(b) 和图 4(c) 可见，LB-EPS 中多糖和蛋白质含量随 HRT 增加呈先上升后下降趋势，TB-EPS 中多糖含量随着 HRT 的增加不断降低，蛋白含量基本保持不变。这是由于伴随着反应器的运行，微生物不断繁殖代谢增强，向体外分泌物增多，可利用营养物质水平降低导致将 EPS 中多糖和蛋白质作为碳源和氮源消耗。而且，EPS 与 SMP 之间存在相互转化、吸附与被吸附的关系<sup>[21]</sup>，二者转化主要成分为多糖。从实验结果得出，微生物优先以 EPS 作为微生物的营养物来源，因此，SMP 应为最主要的膜污染因素<sup>[22]</sup>。

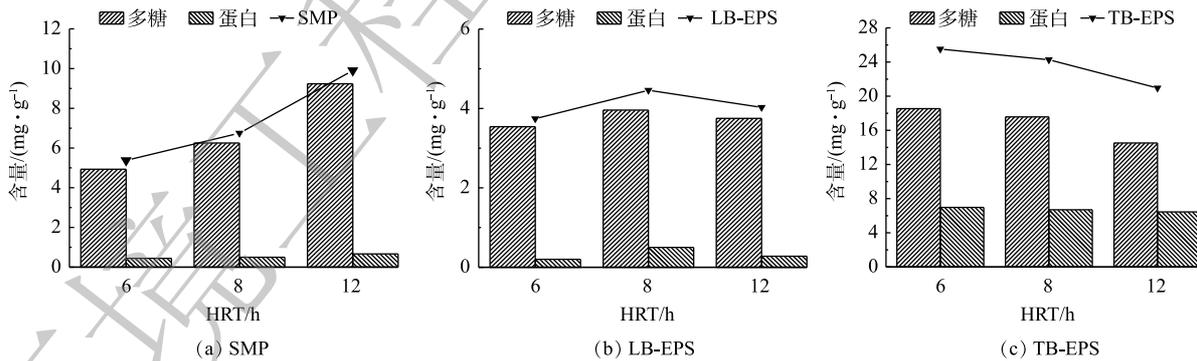


图 4 不同 HRT 下微生物代谢产物分布  
Fig. 4 Distributions of microorganism metabolites at different HRTs

### 2.3 HRT 对微生物代谢产物中颗粒物的分子质量分布的影响

检测了不同 HRT 下 SMP、LB-EPS 与 TB-EPS 中颗粒物的分子质量分布。由图 5 可知，EPS 中颗粒物主要分布在 2~30 kDa，这与 LIN 等<sup>[23]</sup>的研究结果相似。结果显示，在不同 HRT 下，SMP、LB-EPS 与 TB-EPS 三者中颗粒物的分子质量分布呈现不同的变化趋势，SMP 中颗粒物的分子质量分布受 HRT 的影响不显著，而 HRT 对 LB-EPS 与 TB-EPS 中颗粒物的分子质量分布与转化具有重要作用。当 HRT 增至 8 h，分子质量在 6 kDa 以下的颗粒物占比降低，分子质量在 6~10 kDa 的颗粒物

占比约为 20%，同时 TB-EPS 中出现 30% 左右的分子质量在 10~30 kDa 的颗粒物；当 HRT 为 12 h 时，分子质量在 6~10 kDa 的颗粒物占比基本未发生变化，分子质量在 6 kDa 以下的颗粒物占比降低至 30%，同时分子质量在 10~30 kDa 的颗粒物占比增长 30% 左右。有研究表明，大分子质量物质对膜污染的贡献更高<sup>[24]</sup>，结合上述实验结果，所以建议 HRT 控制在 8 h 以内。

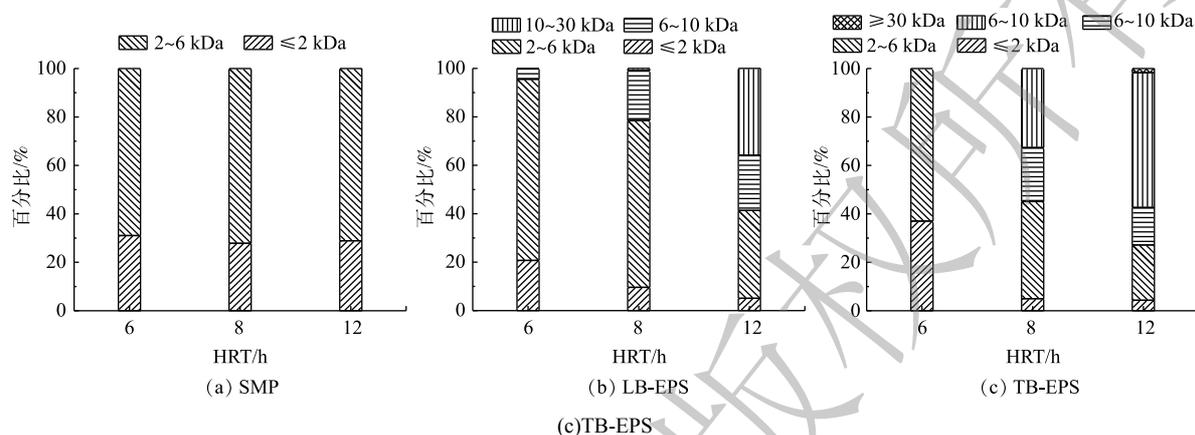


图 5 不同 HRT 下微生物代谢产物中颗粒物的分子质量分布

Fig. 5 Distribution of macromolecular particulate matter of microbial metabolites at different HRTs

#### 2.4 HRT 对混合液中污泥的影响

1) HRT 对污泥粒径的影响。由图 6 可见，3 种 HRT 运行下，污泥粒径分布均表现出相似规律，污泥粒径主要分布在 0.4~200  $\mu\text{m}$ 。随 HRT 的增大，混合液中污泥粒径呈现逐渐降低的趋势。污泥粒径小于 10  $\mu\text{m}$  的颗粒被认为是造成膜污染的最主要颗粒成分<sup>[17]</sup>，因为污泥粒径越小，污泥颗粒沉积在膜表面，形成泥层的孔隙率低阻力大，膜污染增大<sup>[17]</sup>。当 HRT 为 6 h 和 8 h 时，污泥粒径小于 10  $\mu\text{m}$  的占比分别为 14.46% 和 16.51%；而当 HRT 为 12 h 时，污泥粒径小于 10  $\mu\text{m}$  的占比为 48.7%。这是由于 EPS 中多糖量与颗粒污泥大小成正相关<sup>[4,11]</sup>，这从图 4 的结果中也可以得到验证，即当 HRT 为 12 h 时，TB-EPS 中多糖含量最低。EPS 含量越低，污泥聚集性能越差，污泥粒径越小。

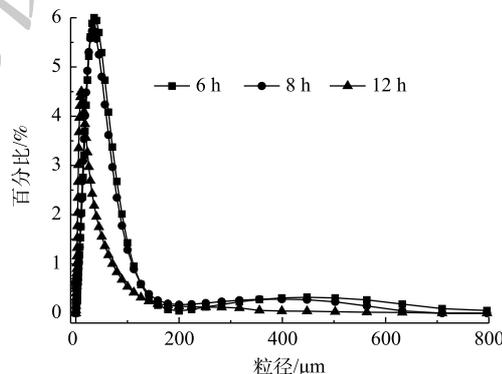


图 6 污泥粒径分布

Fig. 6 Distribution of sludge particle size

2) HRT 对污泥 Zeta 电位和黏度的影响。由图 7 可知，当 HRT 为 6 h 时，Zeta 电位范围最宽，为 -38.11~4.77 mV；当 HRT 为 8 h 时，Zeta 电位值最小，为 -16.79~-0.27 mV，污泥颗粒最为稳定。这从侧面也反映出 HRT 使混合液中 EPS 的含量发生变化，部分 EPS 会作为底物被微生物利用<sup>[25]</sup>。Zeta 电位的变化与微生物新陈代谢所产生的 EPS 有直接关系，EPS 带有大量带负电荷的官能团，其含量与 Zeta 电位成正相关<sup>[26]</sup>，但与膜阻力成负相关<sup>[18]</sup>。

由图 8 可知，当 HRT 为 6 h 时，混合液黏度最高，保持在 6~6.5 Pa·s；随着 HRT 的延长，混合液的黏度降低，当 HRT 为 12 h 时，混合液黏度最低，为 5~5.25 Pa·s。这可能是由于低 HRT 促使丝状菌增长，从而导致黏度较高<sup>[13]</sup>，微生物会产生更多的多糖和蛋白等，也可导致混合液黏度增高<sup>[18]</sup>，因此，黏度可从侧面反映混合液对膜污染的影响程度。

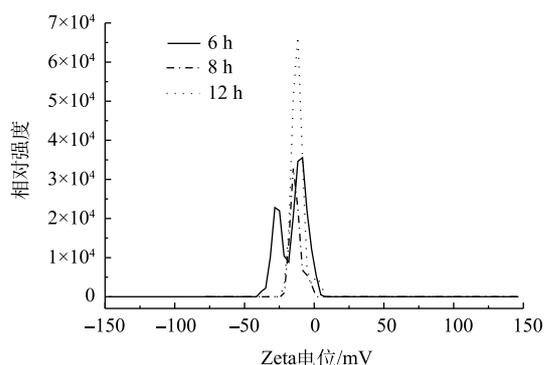


图 7 不同 HRT 下污泥 Zeta 电位相对强度

Fig. 7 relative strength of Zeta potential of sludge at different HRTs

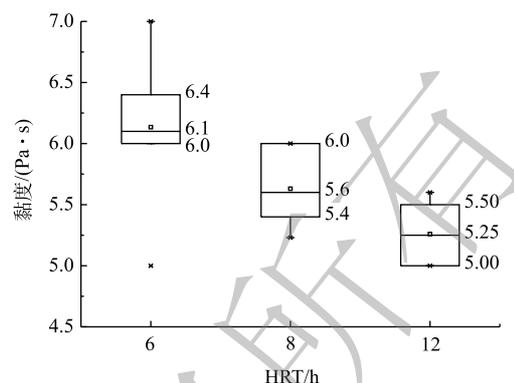


图 8 不同 HRT 下混合液黏度

Fig. 8 Viscosity of mixture at different HRTs

### 3 结论

1) 在 HRT 为 6 h、膜通量  $15 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、污泥质量浓度为  $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  条件下，MBR 处理生化尾水可以获得较好的混合液特性和处理效果。

2) 随着 HRT 的逐渐延长，会使膜组件运行时间缩短，从而影响微生物代谢行为，微生物代谢产物的大分子质量颗粒物的比例和 SMP 含量随之增加，EPS 多糖含量和污泥粒径的降低共同作用于膜阻力，导致 TMP 快速增大，加快膜的污染进程。

3) 污泥 Zeta 电位的升高和污泥黏度的降低导致污泥凝聚力和传质能力变弱，从而降低了其处理效果。

4) HRT 对微生物代谢和膜污染进程有着重要调控作用，通过优化 HRT 可以较为简便地改善膜污染程度。

### 参考文献

- [1] WANG Z, WU Z, TANG S. Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor[J]. *Water Research*, 2009, 43(9): 2504-2512.
- [2] 李俊霞, 郭冀峰, 李继香. 有机负荷和温度对膜生物反应器膜污染的影响[J]. *水处理技术*, 2020, 46(6): 45-49.
- [3] VILLAMIL J A, MONSALVO V M, LOPEZ J, et al. Fouling control in membrane bioreactors with sewage-sludge based adsorbents[J]. *Water Research*, 2016, 105: 65-75.
- [4] HUANG Z, ONG S L, NG H Y. Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: Effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling[J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 705-713.
- [5] HAN W Q, WANG L J, SUN X Y, et al. Treatment of bactericide wastewater by combined process chemical coagulation, electrochemical oxidation and membrane bioreactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(2/3): 306-315.
- [6] LIU Y, LIU Q, LI J, et al. Effect of magnetic powder on membrane fouling mitigation and microbial community/composition in membrane bioreactors (MBRs) for municipal wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 249: 377-385.
- [7] NG C A, SUN D, BASHIR M J, et al. Optimization of membrane bioreactors by the addition of powdered activated carbon[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 138: 38-47.
- [8] REMY M, POTIER V, TEMMINK H, et al. Why low powdered activated carbon addition reduces membrane fouling in MBRs[J]. *Water Research*, 2010, 44(3): 861-867.

- [9] DENG L, GUO W, NGO H H, et al. Biofouling and control approaches in membrane bioreactors[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 221: 656-665.
- [10] 仵海燕, 李开明, 陈中颖, 等. 水力停留时间对MBR中溶解性微生物产物生成的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(3): 1086-1090.
- [11] 宿程远, 王恺尧, 李伟光. 水力停留时间对双循环厌氧反应器处理中药废水污泥特性的影响[J]. *化工学报*, 2015, 66(5): 1897-1903.
- [12] FALLAH N, BONAKDARPOUR B, NASERNEJAD B, et al. Long-term operation of submerged membrane bioreactor (MBR) for the treatment of synthetic wastewater containing styrene as volatile organic compound (VOC): Effect of hydraulic retention time (HRT)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178(1/2/3): 718-724.
- [13] KHAN M M, TAKIZAWA S, LEWANDOWSKI Z, et al. Combined effects of EPS and HRT enhanced biofouling on a submerged and hybrid PAC-MF membrane bioreactor[J]. *Water Research*, 2013, 47(2): 747-757.
- [14] 赵艳晓, 王新华, 李秀芬. 耦合微滤膜的正渗透膜生物反应器的构建及其运行性能[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 1981-1986.
- [15] MENG F, SHI B, YANG F, et al. Effect of hydraulic retention time on membrane fouling and biomass characteristics in submerged membrane bioreactors[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2007, 30(5): 359-367.
- [16] NGUYEN L N, HAI F I, NGHIEM L D, et al. Enhancement of removal of trace organic contaminants by powdered activated carbon dosing into membrane bioreactors[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(2): 571-578.
- [17] 凌琪, 张贤芳, 伍昌年, 等. 投加改性粉煤灰和PAC对MBR运行效果的影响对比[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(11): 93-96.
- [18] ZHAO B, CHEN H, GAO D, et al. Cleaning decision model of MBR membrane based on Bandelet neural network optimized by improved Bat algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 91: 106211.
- [19] 李彬, 王志伟, 安莹, 等. 膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 643-650.
- [20] CROUEË J, BENEDETTI M F, D. VIOLLEAU, et al VIOLLEAU, et al. Characterization and copper binding of humic and nonhumic organic matter isolated from the South Platte River: Evidence for the presence of nitrogenous binding site[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37: 328-336.
- [21] 王金翠, 孙宝盛. 胞外聚合物与溶解性微生物产物的关系[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(11): 18-20.
- [22] TENG J, SHEN L, XU Y, et al. Effects of molecular weight distribution of soluble microbial products (SMPs) on membrane fouling in a membrane bioreactor (MBR): Novel mechanistic insights[J]. *Chemosphere*, 2020, 248: 126013.
- [23] LIN H, WANG F, DING L, et al. Enhanced performance of a submerged membrane bioreactor with powdered activated carbon addition for municipal secondary effluent treatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(3): 1509-1514.
- [24] 王红雨, 齐鲁, 陈杰, 等. 颗粒物粒径和有机物分子量对超滤膜污染的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(5): 1993-1998.
- [25] 时文歆, 段英随, 张冰, 等. 凹凸棒土-MBR组合工艺处理微污染水源水的效能与机理[J]. *膜科学与技术*, 2016, 36(2): 96-101.
- [26] 孙楠, 谌燕丽, 张颖. 投加HCPA对UF-MBR处理低温高色高氨氮水源水效能与膜污染控制的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1339-1348.

(责任编辑: 曲娜)

## Effect of hydraulic retention time on MBR membrane fouling

WANG Yajun<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Siyong<sup>1</sup>, LI Jinshou<sup>1</sup>, XU Yanchao<sup>1</sup>, CHANG Yingna<sup>3</sup>, FU Dafang<sup>1,2</sup>

1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. SEU-Monash Joint Research Center for Future Cities, Suzhou 215123, China

3. Gansu Membrane Science and Technology Research Institute Co. Ltd., Technology, Lanzhou 730050, China

\*Corresponding author, E-mail: wj79626@163.com

**Abstract** In order to investigate the effects of hydraulic residence time (HRT) on the mixed liquid characteristics and membrane fouling in a membrane bioreactor (MBR) system, an immersive hollow fiber MBR was used to conduct field experiments treating the biochemical tail water from a wastewater treatment plant in Lanzhou. The results showed that the proportion of macromolecular mass particulate matter in extracellular polymeric substances (EPS), concentration of soluble microbial products (SMP) and Zeta potential distribution of sludge increased gradually when HRT increased from 6 hours to 12 hours. At the same time, the decreasing trends occurred for the concentration of EPS polysaccharide, sludge particle size and viscosity, and their combined effects led to the reduction of the running time and the rapid increase of the transmembrane pressure (TMP), finally the process of membrane fouling was accelerated. Good mixed liquid characteristics and treatment effect were obtained when the biochemical tail water was treated by hollow fiber MBR under the conditions of HRT of 6 hours, membrane flux of  $15 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  and sludge mass concentration of  $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

**Keywords** hydraulic retention time; membrane bioreactor; membrane fouling; soluble microbial products; extracellular polymeric substance