

微藻-膜生物反应器处理劣五类水实验研究

黄 健^{1,2} 唐世刚^{2*}

(1. 宁波职业技术学院乙烯工程副产物高质化利用浙江省应用技术协同创新中心, 宁波 315000;
2. 丽水学院生态学院, 丽水 323000)

摘 要 将微藻添加到膜生物反应器中, 构建微藻-膜生物反应器(A-MBR)污水处理系统。考查了系统对废水中有机污染物、N 和 P 的去除效果以及微藻对膜污染的影响。结果表明: A-MBR 系统对化学需氧量(COD)的去除效率大于 90%, 出水中 COD 含量低于 50mg/L, 达到一级 A 排放标准。A-MBR 系统相比于传统膜生物反应器系统(S-MBR)对总磷去除率平均高 10.1%, 对 NH_4^+-N 去除率也更高。同时, A-MBR 系统过膜压力差(TMP)平均增长速率比 S-MBR 系统下降 19.4%, 表明微藻可有效缓解 MBR 系统膜污染。

关键词 膜生物反应器, 微藻, 膜污染, 劣五类水

Experimental study on the treatment of wastewater by A-MBR

Huang Jian^{1,2} Tang Shigang²

(1. Zhejiang Collaborative Innovation Center for High Value Utilization of Byproducts from Ethylene Project, Ningbo Polytechnic, Ningbo 315000; 2. College of Ecology, Lishui University, Lishui 323000)

Abstract Microalgae was introduced into MBR to construct the microalgae-based membrane bioreactor system (A-MBR). The effects of the system on the removal of organic pollutants, N and P in wastewater and the influence of microalgae on membrane fouling were investigated. The results shown that the removal efficiency of COD in A-MBR system was more than 90%, and the COD content in effluent was lower than 50 mg/L, which conformed the first-class A permitted criteria. Compared with the traditional membrane bioreactor system (S-MBR), the A-MBR system had an average removal rate of total phosphorus of 10.1% and a higher removal rate of NH_4^+-N . At the same time, the average increase rate of membrane pressure difference (TMP) in A-MBR system decreased by 19.4% compared with S-MBR system, indicating that microalgae can effectively alleviate membrane fouling of MBR system.

Key words membrane bioreactor, microalgae, membrane fouling, wastewater

膜生物反应器(MBR)是将膜分离技术和生物反应器相联合的污水处理工艺, 被誉为 21 世纪最具有潜力的污水处理工艺^[1-3]。与传统活性污泥法相比, MBR 工艺可降低污水处理厂运行费用, 同时获得更好的处理效果, 化学需氧量(COD)、 NH_4^+-N 处理效率大大提高, 满足污水回用的标准^[4-7]。

然而, 由于 MBR 水力停留时间长, 硝化细菌大量繁殖, 强化了系统的硝化作用, 抑制了反硝化作用, 导致总氮的处理效率不高。同时, 膜组件易受污染, 导致膜过滤能力降低, 动力消耗增加, 膜的使用时间减少。因此, 提高 N、P 的去除效率和减轻膜组件的污染是 MBR 工艺的重要研究内容^[8-11]。

本研究将微藻与 MBR 耦合, 充分利用 MBR 对有机碳的深度降解以及藻类对 N、P 等营养物质的高效去除优势, 实现高质出水。同时, 藻类光合作用产生 O_2 供好氧细菌利用, 可部分补偿 MBR 高能耗的缺点。通过控制系统中生物性状以降低膜污染, 提高出水水质, 实现新型膜生物处理技术稳定有效运行。

1 实验部分

1.1 反应器设计

本实验 MBR 反应器由有机玻璃做成, 长、宽、高分别为 80cm、50cm、60cm。膜组件采用的是聚偏

基金项目: 浙江省科技厅基础公益研究计划项目(LGF18B060001); 宁波职业技术学院乙烯工程副产物高质化利用浙江省应用技术协同创新中心 2018—2019 年度开放课题(NZXT2018309); 浙江省教育厅项目(Y201636938); 丽水市科技计划资助项目(2017GYX24)

作者简介: 黄健(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事废水处理及膜分离技术研究。

联系人: 唐世刚。

氟乙烯中空纤维膜。两条间隔 2cm 的微孔曝气条组成连续曝气系统,由空气压缩机提供曝气所需空气。本实验中未添加微藻的处理系统记为 S-MBR,使用微藻的处理系统记为 A-MBR,其装置见图 1。

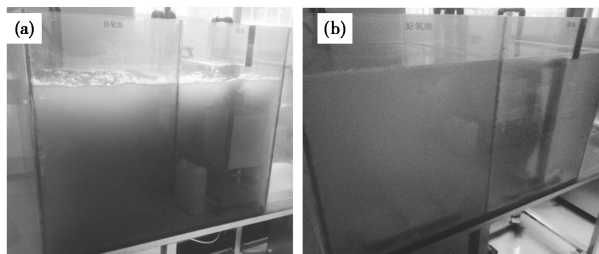


图 1 S-MBR 系统(a)和 A-MBR(b)的系统装置图

1.2 实验用水及水质

本研究中,进水取自丽水某河流,其水质数据见表 1。由表 1 可知,该河段水质为劣五类水。

表 1 实验用水水质

指标	COD	NH_4^+-N	TP	pH
浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	120~ 162(170)	20~ 36(28)	1.2~ 1.8(1.5)	6.8~ 7.9

1.3 藻种来源和污泥来源

微藻(临猗县恒骏生物科技有限公司)添加量为反应器总体积的 10%。所用污泥采集于丽水市污水处理厂曝气池,将所取活性污泥倒入 50L 容器中培养,控制桶内溶解氧浓度为 3~5mg/L,曝气一段时间后排出上清液,加入营养液至 50L,监测活性污泥 pH、温度、溶解氧以及混合液悬浮物浓度(MLSS),经过 25d 培养,使 MLSS 达到 6000mg/L 以上。

1.4 叶绿素含量的测定

取一定量的微藻溶液,离心(5000r/min) 15min,将离心管底部的固体于干燥箱中烘 24h (105℃),研磨。称取 0.02g 固体粉末,加入 5mL 丙酮,震荡 1min 后置于冰浴中超声破碎 1min。取一定量的破碎液在 4000r/min 下离心 15min,于 645nm 和 663nm 下分别测量其吸光度值(OD),按式(1)计算叶绿素含量^[12]。

$$C_{\text{hls}} = 8.02 \times OD_{663} + 20.21 \times OD_{645} \quad (1)$$

式中, C_{hls} 为溶液中叶绿素含量,mg/L。

$$C_{\text{lc}} = \frac{C_{\text{hls}} \times 0.005}{0.02} \quad (2)$$

式中, C_{lc} 为微藻细胞内叶绿素浓度,mg/L。

1.5 溶解性微生物产物(SMP)的测定

从 MBR 反应器中取 5mL 污泥混合液,在

4000r/min 下离心 5min,取上清液用 0.45μm 的滤膜抽滤,即得到 SMP^[12];SMP 溶液主要成分为多糖和蛋白质,其含量分别采用 folin 分光光度法和苯酚-硫酸法测定^[13]。

2 结果与讨论

2.1 废水中有机物去除效果

MBR 技术结合了活性污泥法和膜分离技术的优点,出水水质高。S-MBR 系统和 A-MBR 系统对废水的处理效果见图 2。由图可知,在稳定运行期间,S-MBR 和 A-MBR 两个系统对 COD 的去除率都在 90%左右,其中 A-MBR 系统出水 COD 平均浓度为 13.4mg/L,COD 去除率为 96.5%。S-MBR 系统出水 COD 浓度为 16.2mg/L,COD 去除率为 90.5%。两组系统对 COD 都有很好的去除效果,出水 COD 含量小于 50mg/L,达到一级 A 污水排放标准。

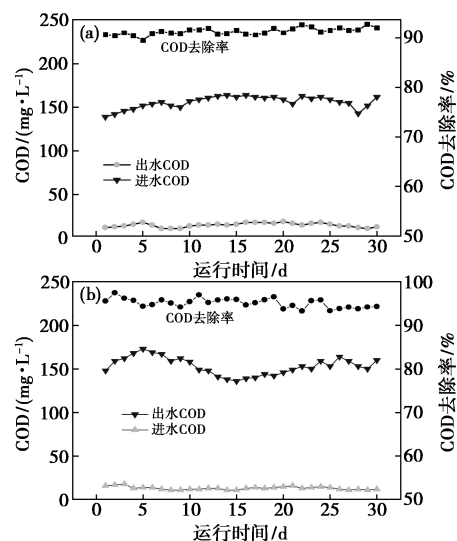


图 2 S-MBR 系统(a)和 A-MBR 系统(b)对废水的处理效果图

因此,A-MBR 比 S-MBR 具有更高的 COD 去除率,其原因可能是,微藻在光线充足时可进行光合作用,产生的 O_2 有利于活性污泥中的微生物降解有机物;当光线较弱时,微藻吸收水中葡萄糖、有机酸等有机物进行生长繁殖,从而提高了 COD 的去除率^[12]。

2.2 对总磷处理效果

时间对 S-MBR 和 A-MBR 系统废水中总磷去除率的影响见图 3。由图可知,投加微藻的 A-MBR 反应器对总磷的处理效率明显高于传统 S-MBR,A-MBR 反应器出水中总磷平均浓度为 0.84mg/L,平

均去除率达 26.4%。而未投加微藻的 S-MBR 系统,出水中总磷平均浓度为 1.08mg/L,平均去除率只有 16.3%。投加微藻的 MBR 系统对于总磷去除率要比传统 MBR 平均高出 10.1%,表明添加微藻能有效提高系统对磷的去除效果。在 A-MBR 系统中,微藻在光照条件下进行光合作用,水中的磷作为营养物质被其快速、过量地摄取,并且将吸收的磷在体内进行积累和合成其他物质,从而提高系统对总磷的去除效果^[14]。

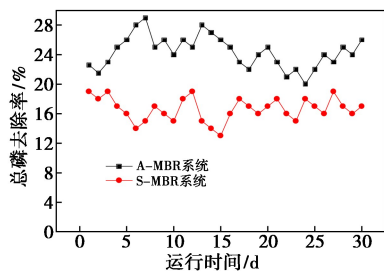


图3 时间对 S-MBR 和 A-MBR 系统废水中总磷去除率的影响

2.3 NH_4^+-N 去除效果分析

S-MBR 系统和 A-MBR 系统对废水中 NH_4^+-N 去除情况见图 4。由图可知,投加微藻的 A-MBR 系统出水 NH_4^+-N 平均浓度为 3.2mg/L,最低浓度为 1.8mg/L,平均去除率达 85.7%,出水水质满足一级 A 排放标准。未投加微藻的对照组 S-MBR,出水 NH_4^+-N 平均浓度为 6.2mg/L,略低于一级 A 排放标准,平均去除率为 73.1%。因此,投加微藻的膜生物反应器对于 NH_4^+-N 处理效率比传统 MBR 平均高 12.6%,添加微藻提高了膜生物反应器对 NH_4^+-N 的处理效果。

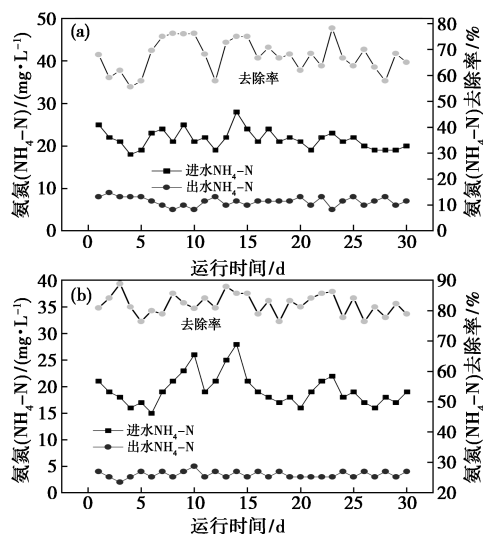


图4 S-MBR 系统(a)和 A-MBR 系统(b)对废水中 NH_4^+-N 的处理效果示意图

在 MBR 系统中,硝化菌的世代周期较长,在系统内大量繁殖,从而形成优势种群,对 NH_4^+-N 具有较好的去除效果。有研究表明,微藻对 NH_4^+-N 的吸收能力大于细菌^[14-15],适当添加微藻有利于 NH_4^+-N 的去除。

2.4 微藻-膜生物反应器膜污染因素研究

2.4.1 叶绿素含量变化

研究发现,叶绿素 a 浓度与溶液中微藻密度存在一定的关系,叶绿素 a 可以作为表征微藻生物量的一个指标^[16]。在投加了微藻的膜生物反应器中,如果藻类大量繁殖,将引起严重的膜污染,从而堵塞膜孔,造成通量下降。A-MBR 中叶绿素 a 浓度的变化情况见图 5。由图可知,在 A-MBR 反应器内,叶绿素 a 的浓度在 1.8~2.3mg/L 内变化,表明微藻细胞密度维持在一定范围,微藻的增长和衰亡速率基本持平,系统内微藻生物量处于较稳定状态,具有较好的光合反应能力,有效避免了微藻过量繁殖对膜组件的污染。

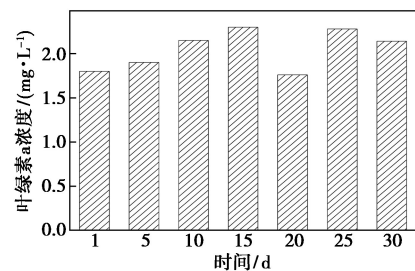


图5 A-MBR 中叶绿素 a 的浓度变化情况图

2.4.2 SMP 对膜污染的影响

废水中溶解性微生物产物是造成膜污染的关键因素,在膜生物反应器运行过程中,降低 SMP 的浓度有利于减轻膜污染。图 6 显示了系统运行过程中 SMP 的浓度变化情况。由图可知,A-MBR 系统内 SMP 浓度先减少后增加,由最初的 2.5mg/g VSS 最终稳定在 2.8mg/g VSS,平均浓度为 2.5mg/g VSS。而在 S-MBR 系统内,SMP 浓度由最初的 3.1mg/g VSS 最终稳定在 4.2mg/g VSS,SMP 平

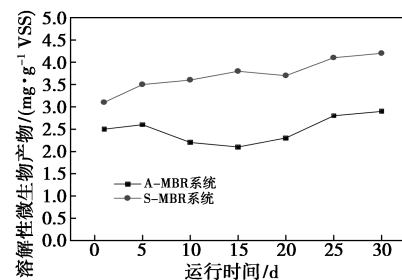


图6 S-MBR 系统和 A-MBR 系统中 SMP 的浓度变化情况图

均浓度高达 3.7mg/g VSS, A-MBR 系统内 SMP 的浓度相比于 S-MBR 减少了 32.4%。Liu 等^[17]在研究 MBR 膜污染过程中发现, SMP 含量增加会导致膜污染加剧。系统中藻类生长所产生的代谢物质以及死亡的藻类被细菌分解, 同时藻类充分利用细菌所降解的有机物, 从而导致溶液中 SMP 浓度减少, 有利于减轻膜污染。

2.4.3 过膜压力差(TMP)变化规律

在 MBR 运行过程中, 随着膜污染的加重 TMP 值会增加, TMP 可以用来表征膜污染程度^[18]。实验中 S-MBR 系统和 A-MBR 系统在运行 16d 内 TMP 随时间的变化情况见图 7。由图可知, S-MBR 和 A-MBR 系统的 TMP 随时间逐步增加, 表明在系统运行过程中, 膜组件受到的污染越来越严重。在整个运行过程中, 未清洗膜组件, TMP 持续增加。到第 16d, S-MBR 和 A-MBR 系统的 TMP 分别达到 51.6kPa 和 40.6kPa。A-MBR 系统 TMP 平均增长速率为 2.5kPa/d, 而 S-MBR 系统 TMP 平均增长速率为 3.1kPa/d, A-MBR 系统相比下降了 19.4%, 进一步说明微藻的加入可以缓解 MBR 系统的膜污染。

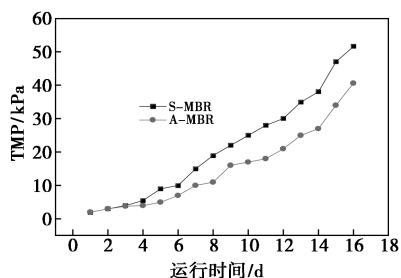


图 7 S-MBR 系统和 A-MBR 系统在运行 16d 内 TMP 随时间的变化情况图

3 结语

本实验研究了传统膜生物反应器(S-MBR)与微藻-膜生物反应器(A-MBR)对劣五类水的处理效果。结果表明, S-MBR 和 A-MBR 两个系统对 COD 的去除率都在 90%左右, 两组系统对于 COD 都有很好的处理率, 出水中 COD 含量小于 50mg/L, 达到一级 A 排放标准。A-MBR 系统对于总磷去除率要比传统 MBR 平均高出 10.1%, 对 NH_4^+-N 去除效果也明显优于 S-MBR。

在一个反应期内, A-MBR 系统内 SMP 浓度明显低于 S-MBR。同时, A-MBR 系统 TMP 平均增长速率比 S-MBR 系统下降了 19.4%, 表明微藻可

有效缓解 MBR 系统膜污染。

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(10): 7-12.
- [2] 黄艳玲, 卢杰, 蔡锦源, 等. PVDF/PET 平板式复合膜的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2012, 40(9): 34-37.
- [3] Xiao K, Liang S, Wang X M, et al. Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: a critical review[J]. Bioresource Technology, 2019, 271: 473-481.
- [4] Garcia F Y, Ortiz I. Biodegradation of emerging organic micropollutants in nonconventional biological wastewater treatment: a critical review[J]. Environmental Engineering Science, 2018, 35(10): 1-25.
- [5] Yang X F, Crespia M, López-Grimaua V. A review on the present situation of wastewater treatment in textile industry with membrane bioreactor and moving bed biofilm reactor[J]. Desalination and Water Treatment, 2018, 103: 315-322.
- [6] Amarasiri M, Kitajima M, Nguyen Thanh H, et al. Bacteriophage removal efficiency as a validation and operational monitoring tool for virus reduction in wastewater reclamation: review[J]. Water Research, 2017, 121: 258-269.
- [7] Meng F, Zhang S, Oh Y, et al. Fouling in membrane bioreactors: an updated review[J]. Water Research, 2017, 114: 151-180.
- [8] 杨爱军, 于玉彬, 白新征, 等. 低能耗复合膜生物反应器处理畜禽废水的研究[J]. 膜科学与技术, 2018, 38(1): 88-96.
- [9] 于潘芬, 张文哲, 于晓, 等. 厌氧膜生物反应器在污泥厌氧消化中的应用[J]. 环境工程, 2018, 36(11): 35-39.
- [10] 谢珊, 欧阳科, 叶欣怡, 等. 间歇式膜生物反应器处理垃圾渗滤液研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(11): 112-115.
- [11] 余智勇, 文湘华. 厌氧膜生物反应器中亲疏水性有机物的膜污染特征[J]. 中国环境科学, 2018, 38(7): 2471-2476.
- [12] 崔皓. 微藻-膜生物反应器系统运行效果研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [13] Magwaza L S, Opara U L. Analytical methods for determination of sugars and sweetness of horticultural products—a review[J]. Sci Horticulture, 2015, 184: 179-192.
- [14] Praveen P, Guo Y, Kang H, et al. Enhancing microalgae cultivation in anaerobic digestate through nitrification[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 354: 905-912.
- [15] 李春, 王胜威, 张磊, 等. 膜生物反应器中小球藻生物膜生长与代谢的光调控特性[J]. 环境工程学报, 2018, 12(2): 670-676.
- [16] 林源, 张瀚丹. 微藻生长的影响因素[J]. 北京农业, 2015(19): 190-191.
- [17] Liu J, Liang X W, Yang C X, et al. Tracing membrane biofouling to the microbial community structure and its metabolic products: an investigation on the three-stage MBR combined with worm reactor process[J]. Bioresource Technology, 2019, 278: 165-174.
- [18] 刘久清, 刘婉蓉, 李新海, 等. 传统帘式和海藻式 MBR 法处理印染废水的研究[J]. 膜科学与技术, 2010, 30(2): 89-92.

收稿日期: 2019-02-25

修稿日期: 2019-04-23