

# 厌氧旋转膜生物反应器处理畜禽养殖废水

许美兰<sup>1,2,3</sup>, 李元高<sup>1</sup>, 叶茜<sup>1</sup>, 叶胜<sup>4</sup>, 戴思浩<sup>1</sup>, 蔡佳梓<sup>1</sup>,  
俞观亮<sup>1</sup>

(1. 厦门理工学院 环境科学与工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 福建省农村污水处理与用水安全工程研究中心, 福建 厦门 361024; 3. 厦门市膜技术研发与应用重点实验室, 福建 厦门 361024; 4. 三达膜科技<厦门>有限公司, 福建 厦门 361022)

**摘要:** 采用厌氧旋转膜生物反应器(AnRMBR)处理畜禽养殖废水(以养猪废水为代表), 考察了其除污效果及膜过滤性能。在容积负荷为  $5.68 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  条件下, AnRMBR 系统对养猪废水的 COD 平均去除率为 94.7%, 平均容积产气率为  $1.4 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。当膜通量为  $25.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时, 膜过滤阻力可控制在  $3.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  以下。可见, AnRMBR 系统对养猪废水的处理效果较好, 且膜过滤性能较优。同时, 在 AnRMBR 系统运行的中后期, 污泥浓度上升, 颗粒粒径减小, 对膜过滤性能造成潜在威胁, 这在一定程度上限制了系统膜通量的提高。

**关键词:** 厌氧旋转膜生物反应器; 畜禽养殖废水; 膜污染; 膜通量

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)23-0091-05

## Treatment of Livestock Wastewater by Anaerobic Rotating Membrane Bioreactor

XU Mei-lan<sup>1,2,3</sup>, LI Yuan-gao<sup>1</sup>, YE Qian<sup>1</sup>, YE Sheng<sup>4</sup>, DAI Si-hao<sup>1</sup>, CAI Jia-zi<sup>1</sup>,  
YU Guan-liang<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science & Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Fujian Engineering and Research Center of Rural Sewage Treatment and Water Safety, Xiamen 361024, China; 3. Xiamen Key Laboratory of Membrane Research and Application, Xiamen 361024, China; 4. Suntar Membrane Technology <Xiamen> Co. Ltd., Xiamen 361022, China)

**Abstract:** An anaerobic rotating membrane bioreactor (AnRMBR) was used to treat livestock wastewater (represented by piggery wastewater), and the pollutants removal and membrane filtration performance were investigated. It was indicated that the average COD removal rate of 94.7% and average volumetric biogas production rate of  $1.4 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  were obtained under the loading rate of  $5.68 \text{ kg-COD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  in the AnRMBR. When the membrane flux was  $25.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , the membrane filtration resistance could be controlled below  $3.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ . Therefore, the AnRMBR system was effective in treating piggery wastewater and had excellent membrane filtration performance. At the same time, it was found that sludge concentration increased and particle size decreased during the middle and late oper-

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2017J05029); 福建省科技计划重点项目(2014N0031); 福建省农村污水处理与用水安全工程研究中心开放课题(RST201807)

通信作者: 叶茜 E-mail: yeq@xmut.edu.cn

ational stage of AnRMBR system, which imposed potential threats to the membrane filtration performance, and further increase of the membrane flux was constrained.

**Key words:** anaerobic rotating membrane bioreactor; livestock wastewater; membrane fouling; membrane flux

养殖场所产生的废水具有有机物、氨氮和悬浮物浓度高等特点,处理难度较大,如不经过处理直接排放或农用将引起严重污染<sup>[1~3]</sup>。目前,厌氧技术能够有效处理养殖废水,并可回收沼气和沼液等资源<sup>[4]</sup>。该技术主要包括上流式厌氧污泥床、厌氧膨胀颗粒污泥床和厌氧流化床等高效厌氧反应器。但上述反应器用于处理养殖废水时,易出现污泥颗粒化困难和堵塞等现象<sup>[5]</sup>。近年来,厌氧膜生物反应器因其自身的优势及应用潜力而逐渐受到关注,但膜污染是制约其发展的主要问题。因此,有研究者将可旋转的膜组件引入厌氧膜生物反应器中,以达到强化膜表面剪切力,控制膜污染的目的<sup>[6~8]</sup>。但是,目前采用厌氧旋转膜生物反应器(AnRMBR)处理畜禽养殖废水尚未有相关报道。

笔者采用 AnRMBR 系统处理畜禽养殖废水(以养猪废水为代表),考察其对实际养猪废水的处理效果,并分析膜过滤性能和反应器内的厌氧污泥特性,旨在为 AnRMBR 系统处理畜禽养殖废水的实际应用提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验装置及运行方案

图1为 AnRMBR 工艺流程。

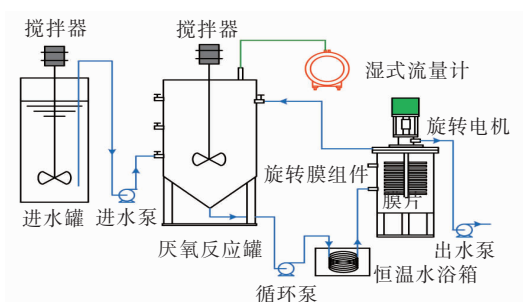


图1 AnRMBR 工艺流程

Fig.1 Flow chart of AnRMBR

AnRMBR 系统主要由进水罐、厌氧反应罐、外置式旋转膜组件和恒温水箱组成。厌氧反应罐的有效容积为 100 L。10 张盘式聚醚砜平板膜平行固定于旋转膜组件内部,其中心在滤液集水管的中心传动轴上。膜的截留分子质量为 150 ku,总过滤面

积为 0.12 m<sup>2</sup>。膜组件上方旋转电机可带动中心传动轴来实现膜片的往复式旋转(正反向交替式旋转)以强化膜表面剪切力。膜片的旋转速度为 150 r/min,往复式旋转周期为 0.5 h。养猪废水经进水泵输送至厌氧反应罐进行厌氧生物降解,反应罐内的厌氧污泥混合液经循环泵先进入恒温水箱加热,以保证反应罐内的温度为(33±2)℃,再进入旋转膜组件,经膜截留的污泥浓缩液返回至厌氧反应罐。膜过滤出水则通过出水泵抽吸排出,抽吸频率为间隔 10 min 抽吸 8 min。

试验用水取自厦门市某养猪场排放的养猪废水。厌氧反应器内接种的污泥来自于厦门市某饮料企业污水处理站的厌氧污泥。采用 PLC 控制系统的运行,具体运行参数见表 1。

表1 AnRMBR 系统的运行参数

Tab.1 Operational parameters of AnRMBR

工况	t/d	膜通量/ (L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	HRT/d	平均容积 负荷/(kgCOD· m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
1	1~16	13.0	3.3	0.77
2	17~29	17.0	2.5	0.68
3	30~35	21.0	2.0	1.34
4	36~46	25.0	1.7	1.84
5	47~51	32.5	1.3	2.12
6	52~70	28.5	1.5	6.25
7	71~98	25.0	1.7	5.68

AnRMBR 系统启动期间,通过逐步提高出水泵抽吸水量即提高运行的膜通量来缩短 HRT,以增加运行负荷,并根据实际膜过滤性能及废水处理效果对运行参数进行适时调整。在工况 6 和 7 条件下,养猪废水因混入较多的猪粪,悬浮物和 COD 浓度较高,导致系统容积负荷大幅度提高。

### 1.2 分析方法

pH 值采用 pH 计测定,COD 采用重铬酸钾法测定,产气量采用湿式流量计测定,污泥浓度采用减重法测定。污泥粒径采用激光粒度仪进行分析,膜过滤性能采用膜过滤阻力来表征。根据 Darcy 定律,膜过滤阻力按式(1)计算。

$$R = \frac{\Delta P}{\mu J} \quad (1)$$

式中,  $R$  为膜过滤阻力,  $\text{m}^{-1}$ ;  $\Delta P$  为跨膜压差,  $\text{Pa}$ ;  $J$  为膜通量,  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\mu$  为滤液粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AnRMBR 系统对废水的处理效果

在厌氧生物处理过程中,最适宜 pH 值为 6.8 ~ 7.2。若 pH 值持续过低,说明反应器内可能出现了酸化现象,此时容积负荷过高。在 AnRMBR 系统启动初期,即使在较低的容积负荷下,反应器内上清液仍频繁出现 pH 值 < 6.8 的情况。这可能是由于此时接种的厌氧微生物尚未适应环境。随着系统运行,容积负荷逐步提高,反应器内的 pH 值逐渐升高。在工况 6 条件下,当平均容积负荷达到 6.25  $\text{kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  时,虽然反应器内上清液曾在第 64 天和第 65 天出现 pH 值分别为 6.4 和 6.6,但此后 pH 值迅速恢复至 7.0 以上,表明系统可耐受高容积负荷。但是,此时系统运行的膜通量高达 28.5  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,膜组件出现了严重的膜污染。因此,考虑膜过滤性能,将第 71 天后的膜通量回调至 25.0  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在此后的约 1 个月内,上清液 pH 值在 7.0 ~ 8.2 范围内波动,表明反应器内未出现酸化现象,可适应 5.68  $\text{kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  的容积负荷。

AnRMBR 系统中 COD 的变化如图 2 所示。

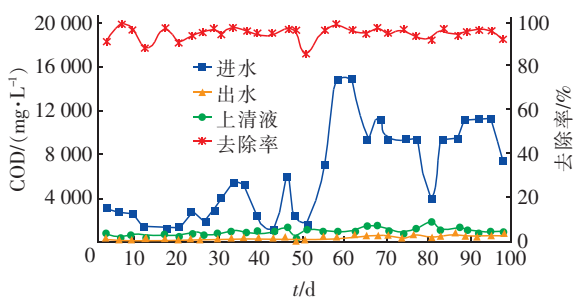


图2 AnRMBR 系统中 COD 的变化

Fig.2 Variation of COD in AnRMBR

由图 2 可以看出,由于膜组件对有机物的截留作用及吸附作用,出水 COD 浓度均低于反应器内上清液的 COD 浓度。随着反应器的运行,容积负荷逐渐升高,出水 COD 总体呈上升趋势,从 34.5  $\text{mg/L}$  上升至 629.6  $\text{mg/L}$ 。但是,容积负荷的提高对 COD 去除率的影响并不显著。工况 1 ~ 6 条件下, COD 平均去除率分别为 93.7%、94.8%、96.1%、95.1%、91.0% 和 96.3%。AnRMBR 系统对养猪废水中

COD 的去除主要通过厌氧微生物降解作用和旋转膜的物理截留作用来实现。从图 2 还可知,膜的截留功能使得系统整体运行效果相对稳定。在工况 7 条件下,出水 COD 可控制在 296.3 ~ 629.6  $\text{mg/L}$  范围内,去除率为 91.5% ~ 96.4%,均高于 90%。相较于文献[9]、[10],本试验的 AnRMBR 系统对养猪废水中 COD 的去除率高,处理效果较好。

### 2.2 产气性能

图 3 为 AnRMBR 系统的产气量变化。可知,随着 AnRMBR 系统的运行,进水容积负荷增加,每日产气量总体呈现上升趋势。第 97 天,当容积负荷为 6.67  $\text{kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  时,产气量达到最高值(445  $\text{L/d}$ )。Song 等人<sup>[10]</sup>在处理养猪废水的研究中也发现了类似规律,即沼气产量与进水容积负荷存在线性关系,产气量在一定程度上会随着容积负荷的增加而增大。在工况 7 条件下,虽然进水水质不稳定导致了产气量有所波动,但是 AnRMBR 系统在该阶段的产气量较高,平均值为 140  $\text{L/d}$ ,即平均容积产气率为 1.4  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,其产气性能与赵青玲<sup>[11]</sup>采用 UASB 处理养猪废水的产气性能类似。

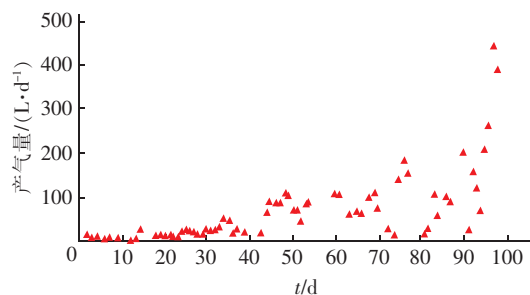


图3 AnRMBR 系统的产气量变化

Fig.3 Variation of biogas production in AnRMBR

### 2.3 膜过滤性能

图 4 为 AnRMBR 系统运行期间的膜过滤阻力。可以看出,在工况 1 ~ 4 期间,除了第 10 天膜过滤阻力突然小幅上升至  $4.27 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  以外,该阶段的膜过滤阻力相对稳定,均能控制在  $1.78 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  以下。这表明 AnRMBR 系统在该阶段并未发生严重的膜污染,膜过滤性能良好。但是,在工况 5 期间,当膜通量从 25.0  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  上升至 32.5  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,膜过滤阻力急剧上升,第 51 天上升至  $17.9 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ,说明膜污染严重。为了控制膜污染的发展,在第 52 天(工况 6)将膜通量降低至 28.5  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,但是此工况下的膜过滤阻力仍呈现上

升趋势,甚至第65天上升至  $82.0 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 。

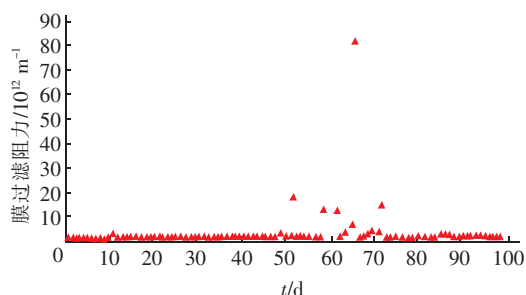


图4 AnRMBR 系统运行期间的膜过滤阻力

Fig. 4 Membrane filtration resistance in AnRMBR

在工况5和6条件下,为保证系统的正常运行,在第51、58、65、71天分别对膜组件进行离线水洗以恢复膜通量。基于工况5和6下膜组件的运行情况,在第71天将系统运行的膜通量恢复至  $25.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,此后膜过滤阻力相对稳定,可控制在  $3.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  以下。可以看出,本试验中当膜通量  $\leq 25.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,AnRMBR 系统的膜组件可以通过自身的往复式旋转来强化膜表面的水力剪切力,从而控制膜污染的发展。因此,该系统在处理养猪废水时,为保证系统的稳定运行,膜通量可维持在  $25.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,此膜通量数值与白玲等人<sup>[6]</sup>采用浸没式厌氧双轴旋转膜生物反应器处理模拟啤酒废水的膜通量水平相同。

## 2.4 厌氧污泥特性

图5为AnRMBR系统运行期间污泥浓度及颗粒粒径的变化。

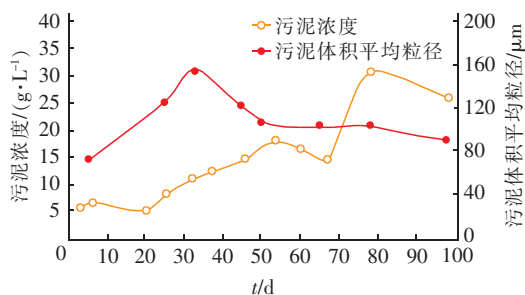


图5 污泥浓度及颗粒粒径的变化

Fig. 5 Change of sludge concentrations and particle size

从图5可以看出,随着系统的运行,污泥浓度逐渐上升,由初始的  $5.9 \text{ g/L}$  上升至  $30.7 \text{ g/L}$ 。AnRMBR 系统启动运行初期,污泥体积平均粒径随着微生物的驯化生长而逐渐增大,但33 d后则呈现下

降的趋势,由  $154.8 \mu\text{m}$  逐渐减小至  $91.2 \mu\text{m}$ 。膜组件长期往复旋转的剪切作用和进水悬浮物的增多可能是导致污泥粒径减小的原因。此外,反应器内重金属的累积也可能是污泥粒径减小的另一诱因。马明海等人<sup>[12]</sup>发现,重金属 Zn、Cu 和 Pb 的投加会导致部分好氧颗粒污泥解体,污泥粒径显著减小。该 AnRMBR 系统处理的废水为养殖废水,含有 Zn、Cu、Pb 和 Cd 等重金属<sup>[13]</sup>,因此随着系统的运行,由于膜截留作用和污泥吸附作用,重金属在反应器内逐渐累积,可能导致了污泥颗粒变小。

Kornboonraksa 等人<sup>[2]</sup>在采用膜生物反应器处理养猪废水时发现,与其他污泥性质相比,污泥浓度和粒径对膜过滤性能具有显著影响。污泥浓度的增加和粒径的减小会加剧膜污染。当 AnRMBR 系统运行至中后期,在污泥浓度上升和污泥粒径减小的情况下,膜过滤性能受到了潜在威胁,此时膜通量的提高将会加大严重膜污染发生的概率。这可能是 47~70 d,当膜通量由  $25.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  分别增加至 32.5 和  $28.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时膜过滤阻力迅速上升的原因。因此,基于污泥特性的变化情况,膜通量的提高应受到限制。在本试验过程中,为了保证良好的膜过滤性能,膜通量最终应控制在  $25.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  以下。

## 3 结论

① 采用 AnRMBR 系统处理以养猪废水为代表的畜禽养殖废水,在  $5.68 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  的容积负荷条件下,AnRMBR 系统对 COD 的平均去除率为 94.7%,平均容积产气率为  $1.4 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,除污效果和产气性能较好。

② 当 AnRMBR 系统的膜通量为  $25.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,膜过滤阻力在  $3.3 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$  以下,表明系统有效控制了膜污染,运行性能稳定。综上所述,AnRMBR 系统能够处理以养猪废水为代表的畜禽养殖废水。

③ 在 AnRMBR 系统运行的中后期,污泥浓度上升,颗粒粒径减小,限制了膜通量的提高。

## 参考文献:

[1] 王刚,海热提,王晓慧,等. UASB/SBBR 处理禽畜养殖废水的启动和稳定运行[J]. 中国给水排水,2014,30(9):21-26.

Wang Gang, Hai Reti, Wang Xiaohui, et al. Start-up and



- steady operation of UASB/SBBR for treating high strength livestock wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(9): 21–26 (in Chinese).
- [2] Kornboonraksa T, Lee S H. Factors affecting the performance of membrane bioreactor for piggery wastewater treatment [J]. *Bioresour Technol*, 2009, 100(12): 2926–2932.
- [3] 沈瀚, 王亮, 李明德, 等. 填料型 A/O 工艺处理养猪废水中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(7): 121–125.
- Shen Han, Wang Liang, Li Mingde, *et al.* Pilot-scale study on piggery wastewater treatment by anoxic/oxic process modified with packings [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(7): 121–125 (in Chinese).
- [4] 孙建平, 郑平, 胡宝兰. 多种抗生素对畜禽废水厌氧消化的联合抑制 [J]. *环境科学*, 2009, 30(9): 2619–2624.
- Sun Jianping, Zheng Ping, Hu Baolan. Combined effect of antibiotics on anaerobic digestion of piggery wastewater [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(9): 2619–2624 (in Chinese).
- [5] Dereli R K, Ersahin M E, Ozgun H, *et al.* Potentials of anaerobic membrane bioreactors to overcome treatment limitations induced by industrial wastewaters [J]. *Bioresour Technol*, 2012, 122: 160–170.
- [6] 白玲, 蓝伟光, 万金保, 等. 浸没式厌氧双轴旋转膜生物反应器的开发 [J]. *中国给水排水*, 2009, 25(7): 73–74, 78.
- Bai Ling, Lan Weiguang, Wan Jinbao, *et al.* Development of submerged anaerobic double-shaft rotating membrane bioreactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(7): 73–74, 78 (in Chinese).
- [7] 周保昌, 陆晓峰, 卞晓锴, 等. 浸没式厌氧膜生物反应器的研发及其除污效能 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(15): 29–31.
- Zhou Baochang, Lu Xiaofeng, Bian Xiaokai, *et al.* Development of submerged anaerobic membrane bioreactor and its pollutant removal efficiency [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(15): 29–31 (in Chinese).
- [8] Ruigómez I, Vera L, González E, *et al.* A novel rotating HF membrane to control fouling on anaerobic membrane bioreactors treating wastewater [J]. *J Membr Sci*, 2016, 501: 45–52.
- [9] Lim S J, Fox P. A kinetic evaluation of anaerobic treatment of swine wastewater at two temperatures in a temperate climate zone [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(4): 3724–3729.
- [10] Song M, Shin S G, Hwang S. Methanogenic population dynamics assessed by real-time quantitative PCR in sludge granule in upflow anaerobic sludge blanket treating swine wastewater [J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(1): S23–S28.
- [11] 赵青玲. UASB 处理养猪废水条件下污泥颗粒化影响因素研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2004.
- Zhao Qingling. Studies of the Influential Factors of Sludge Granulation in the UASB Reactor on Treating Pig-farm Wastewater [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2004 (in Chinese).
- [12] 马明海, 彭书传, 徐圣友, 等. 重金属对好氧颗粒污泥性能的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(2): 159–161.
- Ma Minghai, Peng Shuchuan, Xu Shengyou, *et al.* Effect of heavy metal on property of aerobic granular sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(2): 159–161 (in Chinese).
- [13] 廖玉华, 程群鹏, 邓芳, 等. 半焦吸附养殖废水中的重金属 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(4): 1842–1846.
- Liao Yuhua, Cheng Qunpeng, Deng Fang, *et al.* Adsorption of heavy metals in swine wastewater using bio-char [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(4): 1842–1846 (in Chinese).



作者简介: 许美兰 (1982–), 女, 福建泉州人, 博士, 讲师, 主要研究方向为废水资源化处理技术。

E-mail: brooke@xmut.edu.cn

收稿日期: 2018–05–12