

膜-吸附生物反应器处理东江水的中试研究

韩正双¹, 田家宇¹, 陈杰², 李凯¹, 朱春伟², 李圭白¹

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨, hit08hzs@163.com;
2. 苏州立升膜分离科技有限公司, 215152 江苏 苏州)

摘 要: 针对东江原水,以混凝沉淀作为预处理,采用中试试验,通过与传统砂滤及单独超滤工艺对比,研究膜-吸附生物反应器(MABR)的除污染效能,并考察 MABR 的膜污染情况. 结果表明:MABR 对沉后水中有机物的去除能力明显优于传统砂滤和单独超滤,对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的平均去除率分别达 72.4% 和 89.1%;系统启动完成后,MABR 对沉后水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 也表现出良好的去除效能,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度分别稳定在 0.2 和 0.05 mg/L 以下. MABR 在连续曝气(强度为 $12.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,以膜池底面积计算)、 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 通量、每 8 h 反冲洗 5 min 的模式下运行时,膜污染较为严重,跨膜压差平均增长速率为 0.51 kPa/d ,需进一步优化相关参数以减缓膜污染,缩短化学清洗周期.

关键词: 混凝沉淀;膜-吸附生物反应器;砂滤;超滤;除污;膜污染

中图分类号: TU991. 2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0033-05

Pilot-scale study on membrane adsorption bioreactor (MABR) for treating Dong River water

HAN Zheng-shuang¹, TIAN Jia-yu¹, CHEN Jie², LI Kai¹, ZHU Chun-wei², LI Gui-bai¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, hit08hzs@163.com; 2. Suzhou Litree Ultra-filtration Membrane Technology Co. Ltd., 215152 Suzhou, Jiangsu, China)

Abstract: A pilot-scale membrane adsorption bioreactor (MABR) was carried out for the drinking water treatment from Dong River water with coagulation-sedimentation as pre-treatment. During the experiments, the MABR exhibited much higher capacity for organic matter removal as compared with the conventional sand-filtration and ultra-filtration alone, with the average removal efficiencies of 72.4% and 89.1% for COD_{Mn} and UV_{254} , respectively. During the stable operation period after start-up, the MABR also achieved excellent removal for the influent $\text{NH}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$, the effluent concentrations were maintained below 0.2 mg/L and 0.05 mg/L, respectively. In the investigation, the membrane in MABR was operated under the conditions of constant flux ($20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), continuous aeration ($12.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, calculated based on the bottom area of the membrane tank), and backwashing for 5 min after every 8 h of filtration. Under these conditions, obvious membrane fouling was observed for the membrane, with the average trans-membrane pressure development rate of 0.51 kPa/d . To mitigate membrane fouling and to decrease the chemical cleaning time, it is required to further optimize relevant operating parameters of the membrane in MABR.

Key words: coagulation-sedimentation; membrane adsorption bioreactor; sand-filtration; ultra-filtration; pollutants removal; membrane fouling

收稿日期: 2011-02-10.

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX07423-002-4);城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主课题(2010DX01);中国博士后科学基金特别资助项目(201104442);黑龙江省博士后资助经费项目(LBH-Z10129).

作者简介: 韩正双(1985—),男,博士研究生;
李圭白(1931—),男,博士生导师,中国工程院院士.

随着《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的实施,对于东江这类季节性有机物和氨氮质量浓度较高的微污染水源,传统的混凝—沉淀—过滤—氯消毒净水工艺难以有效保障出厂水合格达标.以东江水为水源的东莞市多数水厂对

净水工艺的升级改造需求十分迫切^[1]. 膜生物反应器 (Membrane bio-reactor, MBR) 技术是生物处理和膜技术的有机结合, 具有除污染效率高、出水水质好且稳定等优点. 大量研究表明, MBR 能有效去除微污染水源水中的有机物和氨氮^[2-6], 但是膜污染的控制和膜清洗问题仍然是 MBR 技术广泛推广应用的一个瓶颈^[7]. 将混凝沉淀作为 MBR 的预处理工艺可有效去除水中的颗粒物、胶体和大分子天然有机物^[8], 进而减轻后续 MBR 单元的膜污染. 此外, 在 MBR 中投加粉末炭 (Powdered activated carbon, PAC) 构成膜-吸附生物反应器 (membrane adsorption bioreactor, MABR), 可有效增强系统的除污染效能, 提高反应器内的生物活性, 同时减缓膜污染^[9-11], 但是

目前仍缺乏相关的中试及生产性试验报道.

考虑到我国南方地区大部分时间水温较高, 膜生物反应器技术具有较强的适用性, 针对东江水质特点, 以水厂实际混凝沉淀作为预处理, 在中试试验的基础上考察 MABR 处理东江水的除污染效能及膜污染特性, 以期为东莞市水厂净水工艺的升级改造提供技术参考.

1 试 验

1.1 原水水质

试验原水取自东江东莞段, 由于上游生活污水和工业废水的排放, 水质受到一定程度的污染, 试验期间原水的主要水质指标见表 1.

表 1 原水水质

指标	水温 ℃	浊度 NTU	色度 铂钴色度单位	COD _{Mn} mg · L ⁻¹	UV ₂₅₄ cm ⁻¹	ρ(氨氮) mg · L ⁻¹
均值或范围	20.8 ~ 28.5	8.95 ~ 34.50	<15	2.93 ~ 4.97	0.033 ~ 0.054	0.03 ~ 1.09

1.2 试验装置

东江原水经水厂传统工艺 (高锰酸盐预氧化—混凝—沉淀) 处理后, 由设置于沉淀池集水槽内的潜水泵泵入膜-吸附生物反应器进行处理. 相应的系统示意图见图 1.

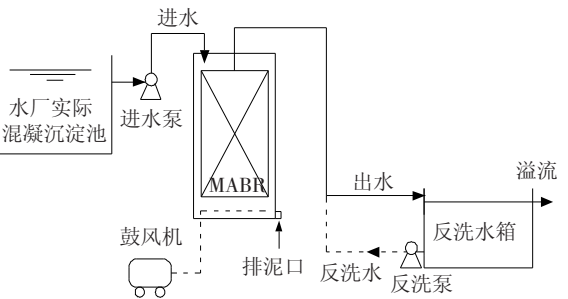


图 1 中试系统示意图

中试系统位于东莞市东城水厂 3 期工程的 2 号沉淀池旁, 高 3.3 m, 长 1.2 m, 宽 0.6 m. 装置底部设置有穿孔曝气管, 通过鼓风机对系统进行曝气. 中试系统内安装有一组帘式中空纤维超滤膜组件, 由海南立升净水科技实业有限公司提供, 膜材质为 PVC 合金, 有效面积为 9 m², 孔径为 0.02 μm.

1.3 试验方法和运行方式

中试系统启动时向膜池内加入 5 g/L 的 PAC, 以 12.5 m³/(m² · h) (以膜滤池底面积计算) 的强度进行连续曝气, 同时以 20 L/(m² · h) 通量连续虹吸出水. 每 8 h 对系统进行时长为 5 min 的反冲洗, 水洗通量为 90 L/(m² · h), 水洗时将曝气强度

提高至 15 m³/(m² · h) (以膜池底面积计算). 系统启动之后的前 4 天不排泥也不投加粉末炭, 第 5 天开始每天排放占膜池有效体积 5% 的混合液, 同时投入 540 g 的 PAC, 使膜池中的 PAC 质量浓度始终维持在 5 g/L, SRT 为 20 d.

此外, 水厂内还另设有一套中试规模的浸没式超滤系统, 所用超滤膜与本试验中的超滤膜孔径和材质均相同. 为了探讨 MABR 相对于单独超滤和传统砂滤工艺的除污染优势, 试验期间每天对水厂沉后水、砂滤出水、超滤出水和 MABR 出水的相关指标进行检测并比较.

1.4 检测指标和方法

COD_{Mn}: 酸性高锰酸钾滴定法; UV₂₅₄: 752N 紫外可见光光度计; NH₃-N: 纳氏试剂分光光度法; NO₂⁻-N: 重氮偶合分光光度法.

2 结果与讨论

2.1 MABR 的除污染效能

2.1.1 COD_{Mn}

试验期间, 水厂沉后水、砂滤出水、超滤出水和 MABR 出水中 COD_{Mn} 的对比如图 2 所示. 可以看出, 试验期间水厂沉后水中 COD_{Mn} 在 1.62 ~ 4.37 mg/L. 砂滤和超滤对沉后水中 COD_{Mn} 均有一定程度的去除作用, 去除率分别在 15.4% ~ 51.8% 和 12.1% ~ 45.1%, 平均去除率分别为 29.9% 和 22.9%; 而 MABR 对沉后水中 COD_{Mn} 的去除效果明显优于砂滤和单独超滤, 其去除率在

55.6%~82.1%,平均去除率高达72.4%,而且出水中的 COD_{Mn} 值几乎不随沉后水水质(即MABR进水)的波动发生变化,均稳定在1.0 mg/L以下。MABR对沉后水中 COD_{Mn} 的高效去除可能是粉末炭吸附和生物降解共同作用的结果。

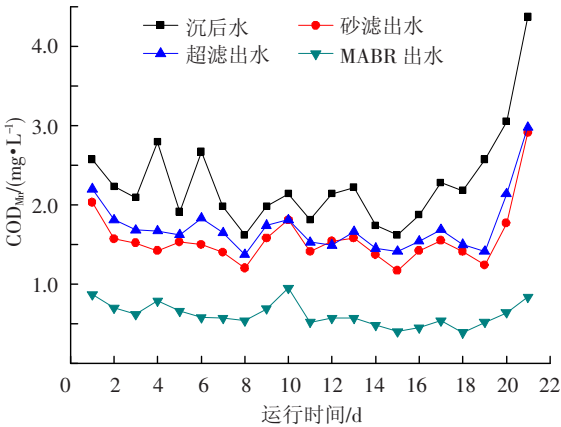


图2 MABR与砂滤、超滤对 COD_{Mn} 去除情况比较

2.1.2 UV_{254}

UV_{254} 通常用于表征水中含有不饱和键如苯环或共轭双键的有机化合物。有研究表明, UV_{254} 与三卤甲烷等消毒副产物的生成势具有较强的相关性^[12],因此,去除水中的 UV_{254} 对于保障饮用水安全、提高供水水质至关重要。试验期间,不同工艺对 UV_{254} 的去除情况见图3。

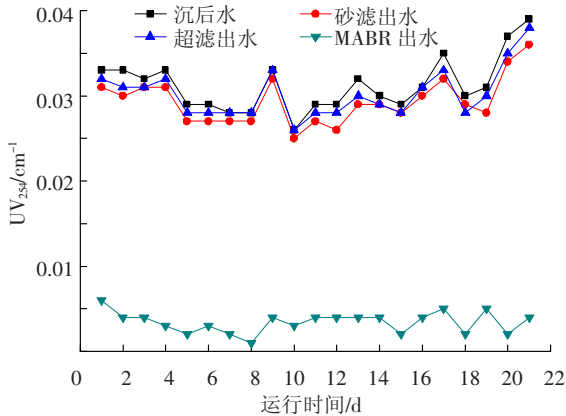


图3 MABR与砂滤、超滤对 UV_{254} 去除情况比较

由图3可以看出,试验期间沉后水中 UV_{254} 在 $0.026\sim0.039\text{ cm}^{-1}$,平均为 0.031 cm^{-1} 。砂滤和超滤对沉后水中 UV_{254} 的去除能力有限,砂滤仅能使沉后水中的 UV_{254} 降低 $0.001\sim0.003\text{ cm}^{-1}$,平均去除率为6.0%;超滤仅能使沉后水中的 UV_{254} 降低 $0\sim0.002\text{ cm}^{-1}$,平均去除率为3.1%;相比之下,MABR对水中的 UV_{254} 具有优良的去除效果,试验期间,MABR出水中 UV_{254} 一直稳定在 0.01 cm^{-1} 以下,平均去除率高达89.1%。

MABR中粉末炭吸附、生物降解以及微孔截

留等作用的协同使得出水中的 UV_{254} 一直保持在较低水平,这就使得后续消毒过程中产生的消毒副产物大大降低,从而有效提高了饮用水的化学安全性。

2.1.3 $\text{NH}_3\text{-N}$

由于上游生活污水和工业废水的不定期排放,东城水厂的水源水中经常出现短时 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度过高的情况,常规工艺难以使出厂水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 达标。试验期间,MABR与砂滤、超滤工艺对水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效能见图4。

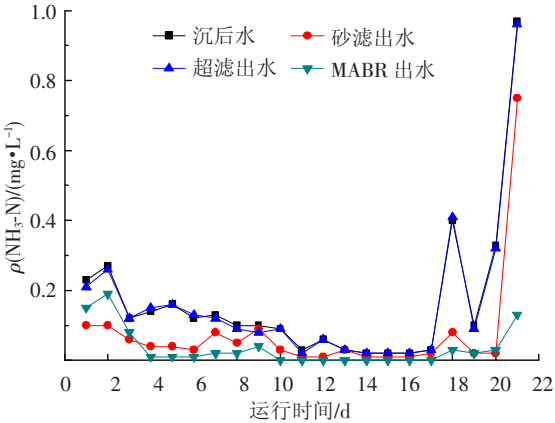


图4 MABR与砂滤、超滤对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除情况比较

由图4可知,试验期间沉后水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度波动较大,水厂砂滤池对沉后水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 表现出一定的去除作用,这可能是由于在长期的运行中,石英砂滤料表面负载了少量生物膜的缘故;但其去除水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的能力十分有限,当沉后水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为 0.97 mg/L 时,砂滤出水中的质量浓度也高达 0.75 mg/L ,超出《生活饮用水卫生标准》GB 5749—2006的限值。而超滤对沉后水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 几乎没有去除效果,这主要是因为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的尺寸远远低于超滤膜孔径,超滤无法对其进行有效截留。

对比MABR与砂滤对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除情况可以看出,MABR启动较快,启动之后的第4天,其对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除能力即已超过砂滤池。后续运行中,MABR出水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度一直维持在 0.2 mg/L 以下,受沉后水(即MABR进水)中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的影响不大。

应当指出,MABR在短期内就能取得良好的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果可能有多方面因素:首先,试验期间水温适宜,细菌繁殖速度快,活性较高;其次,MABR内高浓度的粉末炭可以为生物膜的生长提供足够的载体;再次,本试验中由于设备原因,MABR内装填的膜面积相当小,造成水力停留时间较长,系统对原水水质波动具有较强的调节能

力. 因此, MABR 是否在其他情况下也能实现快速启动并获得良好的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效能, 仍需要进一步的试验验证.

2.1.4 $\text{NO}_2\text{-N}$

试验期间, MABR 与砂滤、超滤工艺对水中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的去除情况如图 5 所示. 可以看出, 超滤对沉后水中的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 几乎没有去除效果, 而砂滤对水中的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 却有很好的去除作用, 出水中的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 质量浓度均维持在 0.02 mg/L 以下. 中试系统启动后, MABR 出水中的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 质量浓度呈现先升高后降低的趋势, 这主要是因为反应器内负责氧化 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的硝化细菌世代时间较长, 造成其成熟过程滞后于负责氧化 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的亚硝化细菌. 自启动运行后的第 10 天开始, 出水中的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 质量浓度一直稳定在 0.05 mg/L 以下.

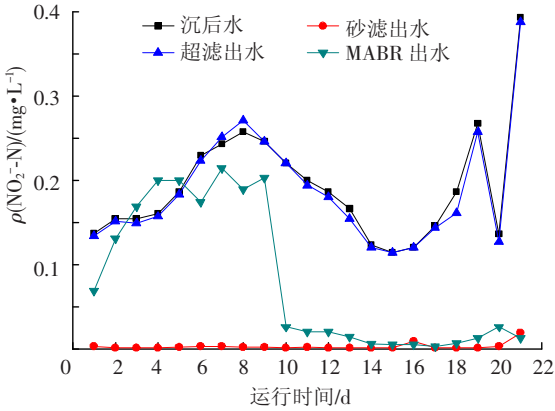


图 5 MABR 与砂滤、超滤对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 去除情况比较

2.2 MABR 的膜污染情况

试验期间, MABR 跨膜压差和水温的变化趋势如图 6 所示. 可以看出, 在以 $12.5\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (以膜滤池底面积计算) 强度下连续曝气、通量为 $20\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、每 8 h 反冲洗 5 min (反洗通量为 $90\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) 的运行模式下, MABR 前 4 天 (96 h) 的跨膜压差几乎不增长, 反冲洗可以有效恢复膜的渗透性. 但是从第 5 天开始, 系统的跨膜压差则表现出逐渐上升的趋势. 从第 5 天 (96 h) 至第 17 天 (408 h), MABR 的跨膜压差平均每天增长 0.51 kPa (以反冲洗后初始运行的跨膜压差计算). 这可能是因为随着运行时间的延长, 系统内的颗粒物和有机物逐渐增多, 同时, 微生物代谢产生的胞外聚合物也在系统内积存, 从而对膜产生了不可逆污染.

同时还可以看出, MABR 的跨膜压差受水温的影响较为显著, 运行末期水温下降后, 系统跨膜压差由第 17 天的 16.65 kPa 急剧上升至第 20 天的 20.3 kPa , 平均每天增长 1.22 kPa .

总体而言, MABR 在连续曝气、通量为 $20\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、每 8 h 反冲洗 5 min 的模式下运行时, 膜污染情况比较严重, 跨膜压差平均增长速率为 0.51 kPa/d . 为满足工程化应用的需求, 需进一步优化相关的运行参数 (如膜通量、反洗周期、曝气量等) 以减缓膜的污染, 缩短化学清洗周期, 实现 MABR 的长期稳定运行.

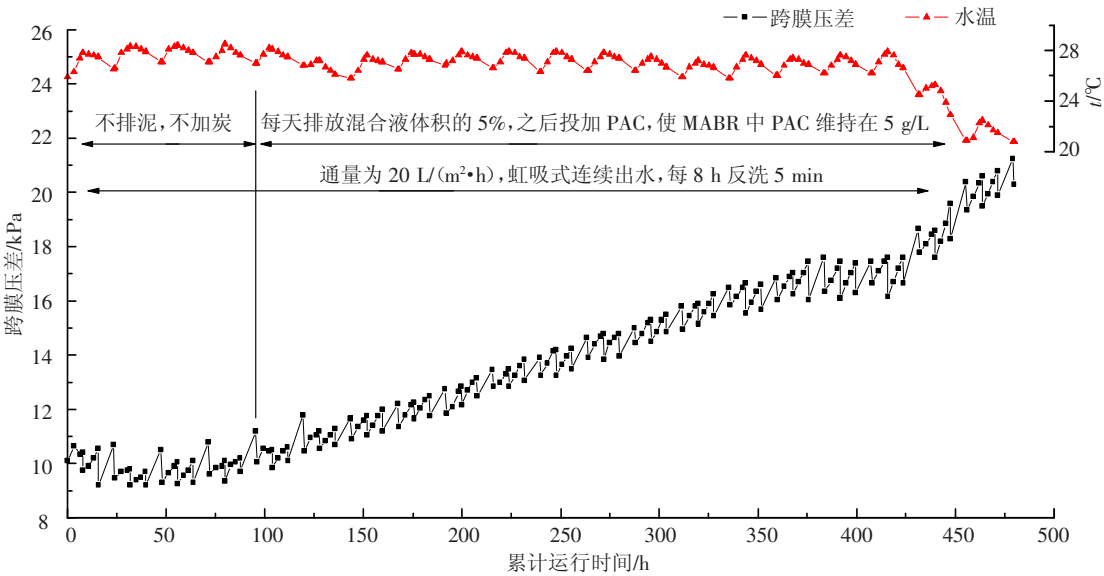


图 6 MABR 跨膜压差和水温变化

3 结 论

1) MABR 能有效去除沉后水中的 COD_{Mn} , 平

均去除率为 72.4% , 出水 COD_{Mn} 低于 1.0 mg/L . 同时对水中的 UV_{254} 具有很好的去除效果, 出水 UV_{254} 稳定在 0.01 cm^{-1} 以下, 平均去除率为

89.1%,明显优于传统砂滤和单独超滤。

2)本试验条件下,MABR启动后经过4 d的运行就能达到良好的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 稳定在0.2 mg/L以下,优于同期砂滤和单独超滤的情况;启动后第10天开始,MABR对沉后水中的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 可达到稳定的去除效果,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度一直稳定在0.05 mg/L以下。

3)在连续曝气、20 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)通量、每8 h反冲洗5 min的模式下运行时,MABR的膜污染较为严重,需进一步优化各运行参数,以达到长期稳定运行的目的。

参考文献:

- [1] 张艳,李圭白,陈杰.采用浸没式超滤膜技术处理东江水的中试研究[J].中国环境科学,2009,29(1):6-10.
- [2] 郝爱玲,陈永玲,顾平.膜生物反应器去除原水中微量苯酚的研究[J].中国给水排水,2006,22(5):102-105.
- [3] LI Xiao-yan, CHU Hiuping. Membrane bioreactor for the drinking water treatment of polluted surface water supplies[J]. Water Research, 2003, 37(19):4781-4791.
- [4] TIAN Jia-yu, LIANG Heng, NAN Jun, *et al.* Submerged membrane bioreactor (sMBR) for the treatment of contaminated raw water[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 148(2/3):296-305.
- [5] WILLIAMS M D, PIRBAZARI M. Membrane bioreactor process for removing biodegradable organic matter from water[J]. Water Research, 2007, 41(17):3880-3893.
- [6] RAVINDRAN V, TSAI H H, WILLIAMS M D, *et al.* Hybrid membrane bioreactor technology for small water treatment utilities: process evaluation and primordial considerations[J]. Journal of Membrane Science, 2009, 344(1/2):39-54.
- [7] BOUHABILA E H, AÏM R B, BUISSON H. Fouling characterization in membrane bioreactors[J]. Separation and Purification Technology, 2001, 1(22/23):123-132.
- [8] MATILAINEN A, VEPSÄLÄINEN M, SILLANPÄÄ M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2010, 159(2):189-197.
- [9] TIAN Jiayu, LIANG Heng, YANG Yanling, *et al.* Membrane adsorption bioreactor (MABR) for treating slightly polluted surface water supplies: as compared to membrane bioreactor (MBR)[J]. Journal of Membrane Science, 2008, 325(1):262-270.
- [10] GUO Wenshan, VIGNESWARAN S, NGO H H. Comparison of the performance of submerged membrane bioreactor (SMBR) and submerged membrane adsorption bioreactor (SMABR)[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(5):1012-1017.
- [11] 田家宇,徐勇鹏,潘志辉,等.膜吸附生物反应器(MABR)用于饮用水去除有机物[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(10):1568-1571.
- [12] EDZWALD J K, BECKER W C, WATTIER K L. Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursors[J]. Journal of the American Water Works Association, 1985, 77(4):122-32.

(编辑 刘 彤)