

# 膜-吸附生物反应器处理东江水的中试研究

韩正双<sup>1</sup>, 田家宇<sup>1</sup>, 陈杰<sup>2</sup>, 李凯<sup>1</sup>, 朱春伟<sup>2</sup>, 李圭白<sup>1</sup>

(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<sub>Mn</sub>和UV<sub>254</sub>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NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N也表现出良好的去除效能, 出水NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-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 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), 以膜池底面积计算)、20 L/(m<sup>2</sup>·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-shuang<sup>1</sup>, TIAN Jia-yu<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>2</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, ZHU Chun-wei<sup>2</sup>, LI Gui-bai<sup>1</sup>

(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<sub>Mn</sub> and UV<sub>254</sub>, respectively. During the stable operation period after start-up, the MABR also achieved excellent removal for the influent NH<sub>3</sub>-N and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-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 L/(m<sup>2</sup>·h)), continuous aeration (12.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·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<sup>[1]</sup>. 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<sup>[2-6]</sup>,但是膜污染的控制和膜清洗问题仍然是MBR技术推广应用的一个瓶颈<sup>[7]</sup>. 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<sup>[8]</sup>,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<sup>[9-11]</sup>,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 <sub>Mn</sub> mg·L <sup>-1</sup>	UV <sub>254</sub> cm <sup>-1</sup>	ρ(氨氮) mg·L <sup>-1</sup>
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.

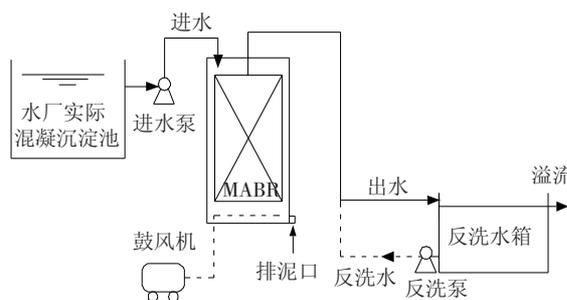


图1 中试系统示意图

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 m<sup>2</sup>,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 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)(以膜滤池底面积计算)的强度进行连续曝气,同时以20 L/(m<sup>2</sup>·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/(m<sup>2</sup>·h),水洗时将曝气强度

提高至15 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·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<sub>Mn</sub>: 酸性高锰酸钾滴定法; UV<sub>254</sub>: 752N紫外可见光光度计; NH<sub>3</sub>-N: 纳氏试剂分光光度法; NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-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<sub>Mn</sub>

试验期间,水厂沉后水、砂滤出水、超滤出水和MABR出水中COD<sub>Mn</sub>的对比如图2所示. 可以看出,试验期间水厂沉后水中COD<sub>Mn</sub>在1.62~4.37 mg/L. 砂滤和超滤对沉后水中COD<sub>Mn</sub>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<sub>Mn</sub>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。

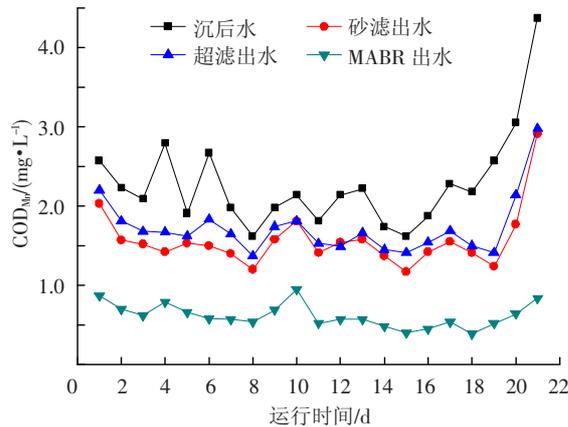


图2 MABR与砂滤、超滤对 $COD_{Mn}$ 去除情况比较

### 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<sup>[12]</sup>,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。

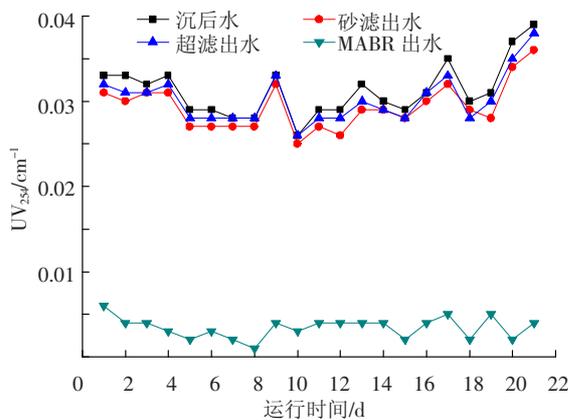


图3 MABR与砂滤、超滤对 $UV_{254}$ 去除情况比较

由图3可以看出,试验期间沉后水中 $UV_{254}$ 在 $0.026 \sim 0.039 \text{ cm}^{-1}$ ,平均为 $0.031 \text{ cm}^{-1}$ 。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 $0.001 \sim 0.003 \text{ cm}^{-1}$ ,平均去除率为6.0%;超滤仅能使沉后水中的 $UV_{254}$ 降低 $0 \sim 0.002 \text{ cm}^{-1}$ ,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 $0.01 \text{ cm}^{-1}$ 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 $NH_3-N$

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 $NH_3-N$ 质量浓度过高的情况,常规工艺难以使出厂水中的 $NH_3-N$ 达标。试验期间,MABR与砂滤、超滤工艺对水中 $NH_3-N$ 的去除效能见图4。

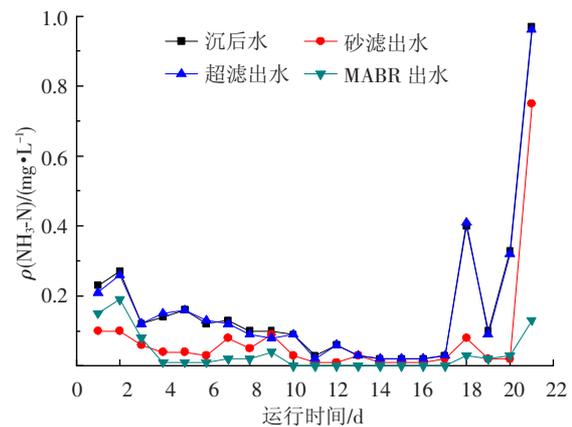


图4 MABR与砂滤、超滤对 $NH_3-N$ 去除情况比较

由图4可知,试验期间沉后水中的 $NH_3-N$ 质量浓度波动较大,水厂砂滤池对沉后水中的 $NH_3-N$ 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 $NH_3-N$ 的能力十分有限,当沉后水 $NH_3-N$ 质量浓度为 $0.97 \text{ mg/L}$ 时,砂滤出水中的质量浓度也高达 $0.75 \text{ mg/L}$ ,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 $NH_3-N$ 几乎没有去除效果,这主要是因为 $NH_3-N$ 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 $NH_3-N$ 的去除情况可以看出,MABR启动较快,启动之后的第4天,其对 $NH_3-N$ 的去除能力即已超过砂滤池。后续运行中,MABR出水中的 $NH_3-N$ 质量浓度一直维持在 $0.2 \text{ mg/L}$ 以下,受沉后水(即MABR进水)中 $NH_3-N$ 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 $NH_3-N$ 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.

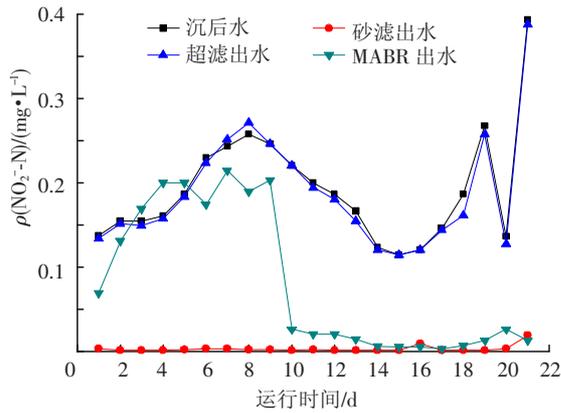


图 5 MABR 与砂滤、超滤对  $\text{NO}_2\text{-N}$  去除情况比较

### 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  $0.51 \text{ kPa}/\text{d}$ . 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.

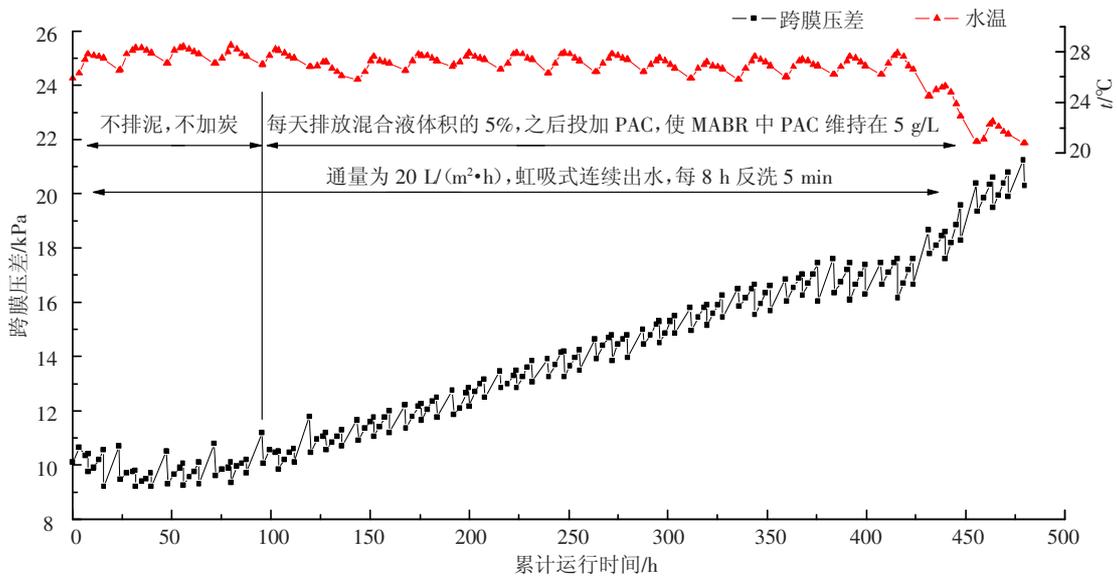


图 6 MABR 跨膜压差和水温变化

## 3 结论

1) MABR 能有效去除沉后水中的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , 平

均去除率为 72.4%, 出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  低于 1.0 mg/L. 同时对水中的  $\text{UV}_{254}$  具有很好的去除效果, 出水  $\text{UV}_{254}$  稳定在  $0.01 \text{ cm}^{-1}$  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)