

文章编号:1673-1689(2005)05-0025-05

# MBR 中 SMP 与污泥特性之间的相关性

高方述<sup>1</sup>, 李秀芬<sup>1\*</sup>, 堵国成<sup>1</sup>, 陈坚<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学 生物工程学院, 江苏 无锡 214036; 2. 江南大学 工业生物技术教育部重点实验室, 江苏 无锡 214036)

**摘要:**以模拟生活污水为研究对象,在膜通量恒定的条件下,考察了 MBR(Membrane Bioreactor)内 SMP(Soluble Microbial Product)的积累与污泥特性之间的相关性.结果表明,SMP 可以被微生物降解,SMP 的浓度在反应器中呈先增加后降低.最终趋于稳定的变化趋势,并最终达到其产生—降解的动态平衡.反应器运行初期,絮状污泥的 VSS/SS、污泥比基质降解速率、OUR 和 SVI 迅速下降,分别由初始的 0.913、0.72 kg/(kg·d)、6.78 mg/(g·d)和 108 降至第 24 天的 0.72、0.187 kg/(kg·d)、3.74 mg/(g·h)和 43,之后缓慢上升,至第 40 天左右时基本趋于稳定,但均低于初始值.MBR 中 SMP 的积累与污泥特性密切相关,SMP 的积累降低了污泥的沉降性能和单位质量污泥的微生物含量及其代谢活性,在膜的截留作用下,系统对污染物的总体去除率未因此而受到影响,系统运行稳定.

**关键词:**膜—生物反应器;溶解性微生物产物;污泥特性

中图分类号:TQ 920

文献标识码:A

## Relation of Soluble Microbial Product Versus Sludge Properties in Membrane Bioreactor

GAO Fang-Shu<sup>1</sup>, LI Xiu-Fen<sup>1\*</sup>, DU Guo-Cheng<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1,2</sup>

(1. School of Biotechnology, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China; 2. Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China)

**Abstract:** Domestic wastewater was treated by an integral membrane bioreactor (MBR) under stable membrane flux. Relation of soluble microbial product and sludge properties was investigated during the domestic wastewater treatment by MBR. The results showed that the concentration of SMP in MBR firstly increased, and then declined. SMP can be biodegraded by microorganisms, and its concentration finally reached dynamic equilibrium in MBR. VSS/SS, specific substrate degradation rate, OUR and sludge volume index (SVI) declined during the first 24 days from the beginning values of 0.913, 0.72, 6.78 and 108 to 0.72, 0.187 kg/(kg·d), 3.74 mg/(g·h) and 43, respectively. Afterwards, their values increased slowly and almost stayed at constant after 40 days, but less than the beginning values. In a word, as the concentration of SMP increased, the sludge activity and settling performance were deteriorated before 40 days, and then remained at steady-state. As a result of membrane cut-off, the organic

收稿日期:2004-11-30; 修回日期:2005-01-25.

基金项目:科技部国际合作重点项目(2002DF000006)资助课题.

作者简介:高方述(1971-),男,江苏徐州人,生物工程硕士研究生.\*通讯作者.

substances as well as nitrification and de-nitrification bacteria were effectively kept in MBR, the accumulation of SMP had little influence on the removal efficiency of COD and ammonia nitrogen.

**Key words:** membrane bioreactor(MBR); soluble microbial product; sludge property

近年研究发现,废水生物处理系统在处理低浓度生活污水时,出水中溶解性 COD 的主要成分是溶解性微生物产物(Soluble Microbial Product,简称 SMP)<sup>[1~5]</sup>,SMP 几乎占生活污水出水 COD 的 100 %<sup>[1,2]</sup>。生物处理过程中产生的 SMP 组成复杂,主要包括:腐殖质、多糖、蛋白质、核酸等,很难进行各组分含量的测定,所以通常用总有机碳(Total organic carbon,简称 TOC)来表示反应器中 SMP 的浓度<sup>[2,6,7]</sup>。这些物质随系统出水进入水环境,成为饮用水消毒副产物(DBP)前体的重要来源,也是影响饮用水深度处理效果的潜在因素<sup>[8]</sup>。膜—生物反应器(Membrane Bio-Reator, MBR)中膜的高效截留作用使 MBR 成为一个对微生物来说相对封闭的系统,伴随污水生物处理过程而产生的大分子 SMP 被截留,并在反应器中不断积累,因此 MBR 中 SMP 对污泥活性(或污泥特性)的影响与传统生物处理系统不同,存在放大效应,需予以足够重视。

目前有研究认为,SMP 的积累对微生物活性和污泥活性产生一定的影响,但由于研究时间较短,目前无统一观点<sup>[6,9~11]</sup>。目前关于 SMP 对污泥活性的影响的观点主要有两种:一种观点认为 SMP 具有比废水中原有有机物更强的毒性,会抑制微生物活性,包括硝化细菌,最终影响系统对污染物的去除能力及脱氮效果;另一种观点认为 SMP 不仅不会抑制污泥活性,反而会起到刺激作用,尤其是 SMP 中高相对分子质量部分的积累或外部添加,系统微生物量和底物利用率都有所增加。

为了充分确定 MBR 中 SMP 与污泥特性的相关性,作者以一体式 MBR——模拟生活污水为研究体系,通过较长期运行,以 VSS/SS、活性污泥比耗氧速率(OUR)和污泥比基质降解速率以及污泥沉降指数(SVI)等为污泥特性评价指标,系统稳定后跟踪 MBR 中污泥特性随 SMP 浓度的变化情况,进一步了解污泥活性的波动对沉降性能的影响,以期推动 MBR 在污水处理领域的应用深度和广度。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置与方法

实验装置如图 1。膜组件为杭州浙大凯华膜技

术有限公司生产的中空纤维微滤膜,孔径为 0.1  $\mu\text{m}$ ,膜面积为 2  $\text{m}^2$ 。MBR 曝气池的有效容积为 22 L,池体为有机玻璃制成,整个反应器实现全自动控制,给水泵进水,膜组件正下方通过空气泵曝气,以减轻膜污染。在反应器运行期间,反应器运行温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。操作方式为通过改变出水抽吸压力使膜通量维持在  $6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,间歇出水(出水 10 min,停 5 min)。反应器中污泥质量浓度为 11~15  $\text{g}/\text{L}$ ,水力停留时间 4 h。

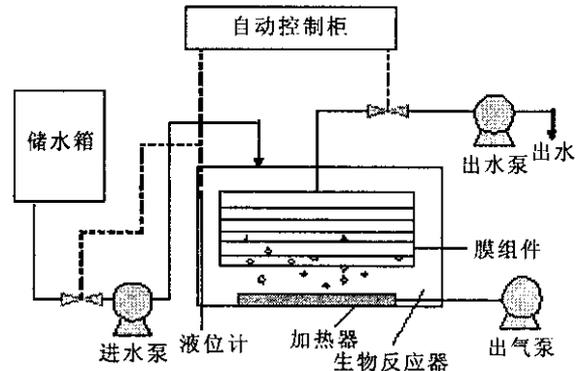


图 1 MBR 实验装置

Fig. 1 Schematic figure of MBR

### 1.2 人工配水的组成

实验用水为人工配制,主要成分为葡萄糖、氯化氨、磷酸二氢钾、硫酸镁、碳酸氢钠和氯化钙等,具体组成见表 1。COD 和氨氮质量浓度分别为 500  $\text{mg}/\text{L}$  和 50  $\text{mg}/\text{L}$  左右,pH 值为 7~7.2。

表 1 人工配水组成

Tab. 1 The component of synthetic domestic wastewater

组成	质量浓度/ ( $\text{mg}/\text{L}$ )	组成	质量浓度/ ( $\text{mg}/\text{L}$ )
葡萄糖	360±10	$\text{CaCl}_2$	18
酵母膏	80±2.5	$\text{NaHCO}_3$	24
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	14	$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	6
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	24	$\text{FeSO}_4$	0.3
$\text{NH}_4\text{Cl}$	60±2		

### 1.3 活性污泥培养与驯化

活性污泥取自无锡狮王啤酒有限公司啤酒废水处理的好氧曝气池。将取用的活性污泥首先进行静沉等预处理后移入反应器,用人工配制的生活污

水在室温下进行曝气驯化培养。驯化期间维持反应器内的 DO 在 3~4 mg/L 左右。自驯化第 2 周起对污泥性能进行检测, 20 d 后发现活性污泥经 2 h 曝气后, COD 去除率达 80 % 以上, 并连续多天维持稳定。对污泥进行生物镜检发现菌胶团密实, 有活跃的钟虫、轮虫等原生生物存在, 说明此时污泥质量良好, 参考有关的研究报道<sup>[12,13]</sup>, 至此视污泥培养驯化成熟。

#### 1.4 分析方法

分析方法均采用国家标准分析方法<sup>[14]</sup>, 具体分析项目包括: TOC、COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、MLSS、MLVSS、OUR、DO、pH 等。反应器内上清液样品的处理方法参考文献<sup>[6]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 膜生物反应器中 SMP 的积累

反应器上清液和出水 TOC 的变化趋势见图 2。由图 2 可以看出, 随反应器的运行, TOC 呈先升高后降低的变化趋势, 从初始的 9.23 mg/L 逐渐增加至第 26 天的 47.39 mg/L, 其后转为缓慢降低, 40 d 后变化趋于平稳, 基本维持在 21 mg/L 左右。而出水 TOC 的浓度变化趋势较小, 基本维持在 6~10 mg/L。由此可知, 膜的截留作用导致大分子的 SMP 在反应器中不断积累, 运行前期, 微生物不能以逐步积累的 SMP 为底物进行合成代谢, 相反, 组成复杂的 SMP 对微生物的活性造成抑制。随着反应器运行的继续, 微生物逐步得到驯化, SMP 开始被微生物逐步利用, 从而达到其产生与降解的动态平衡, 这说明 SMP 可以被微生物降解。

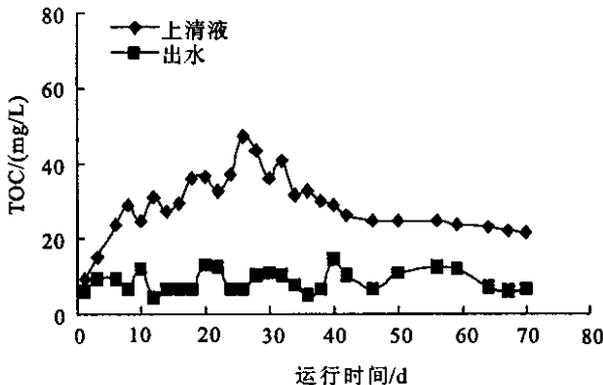


图 2 MBR 中 TOC 随运行时间的变化趋势

Fig. 2 TOC as a function of time in MBR

### 2.2 SMP 对 VSS/SS 的影响

图 3 给出了 MBR 运行中 VSS/SS 的变化情况。从图 3 可以看出, 在运行初期, 反应器中污泥的

微生物含量最高, VSS/SS 为 0.913。随着运行时间的延长, VSS/SS 不断下降, 单位质量污泥中微生物量降低, 在第 24 天降至最低点, VSS/SS 仅为 0.720。随着反应器的继续运行, 系统的 VSS/SS 值开始回升, 运行至第 40 天左右时 VSS/SS 基本趋于稳定, 为 0.870 左右, 但总的来看, 最终的 VSS/SS 低于初始值, 膜生物反应器中 SMP 的积累对污泥的 VSS/SS 产生不利影响, 单位质量污泥中的微生物含量降低。

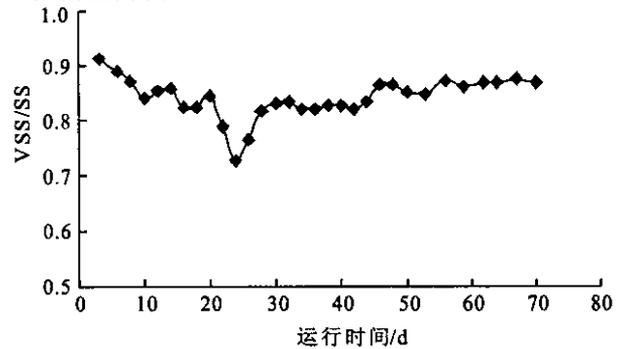


图 3 VSS/SS 随运行时间的变化

Fig. 3 VSS/SS ratio as a function of time in MBR

### 2.3 SMP 对污泥比基质降解速率的影响

污泥比基质降解速率为单位质量的活性污泥每天消耗的有机物的量<sup>[15]</sup>。图 4 为污泥比基质降解速率随运行时间的变化情况。

由图 4 可以很明显地看出, 污泥比基质降解速率总体呈先迅速下降, 后基本稳定或略有回升的趋势。在运行初期, 随着运行时间的延长, 污泥比基质降解速率迅速下降, 由初始的 0.792 kg/(kg·d) 降至 0.187 kg/(kg·d), 单位质量的污泥去除有机物的能力变差。随着运行时间继续延长, 微生物逐步得到驯化, 同样至第 40 天左右时, 污泥比基质降解速率逐渐趋于稳定, 且稳中有升。MBR 中 SMP 的积累对污泥比基质降解速率有一定的影响, 单位质量污泥去除污染物的能力降低。

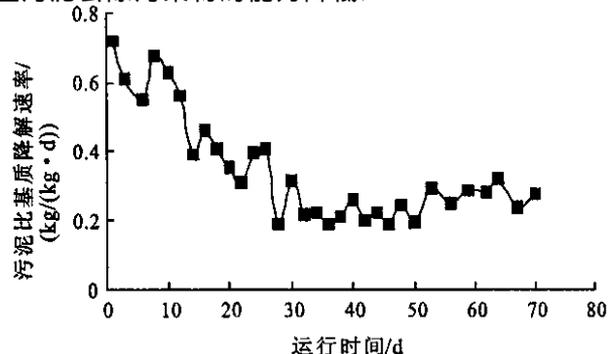


图 4 污泥比基质降解速率随时间的变化

Fig. 4 Specific substrate degraded rate as a function of time in MBR

## 2.4 SMP 对 OUR 的影响

活性污泥比耗氧速率(OUR)<sup>[16]</sup>是评价污泥代谢活性的另一个重要指标,它是指单位质量的活性污泥在单位时间内的耗氧量.计算方法为:

$$\text{耗氧速率(OUR)} = (\text{DO}_0 - \text{DO}_t) (\text{mg/L}) / t (\text{h}) \times \text{MLVSS} (\text{g/L})$$

式中:DO<sub>0</sub>为初始时 DO 值;DO<sub>t</sub>为测定结束 t 时的 DO 值.

图 5 为反应器内活性污泥的 OUR 随运行时间的变化情况.可以看出,在第一阶段,反应器内污泥的 OUR 迅速降低,由初始的 6.78 降至 3.74 mg/(g·h),这就意味着反应器中 SMP 的产生和累积抑制了污泥的活性及异养菌的代谢活动.运行至第 40 天左右时,污泥的 OUR 趋于稳定,变化幅度维持在 3.6~4.2 mg/(g·h).可见,OUR 与污泥比基质降解速率的变化趋势相似,SMP 的积累对污泥的 OUR 有明显的抑制作用,污泥的代谢活性降低.

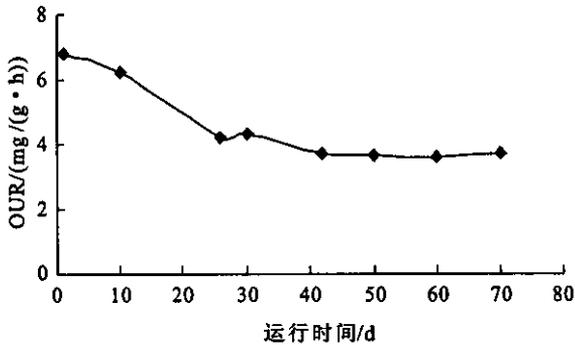


图 5 OUR 随运行时间的变化

Fig. 5 OUR ratio as a function of time in MBR

## 2.5 SMP 对污泥沉降性能的影响

图 6 给出了污泥沉降性能随运行时间的变化情况.在反应器运行初期,污泥的沉降性能良好,此时取一定量的污泥沉降 30 min 后,污泥—水界面清晰,上清液清澈.但随着反应的进行,SMP 逐步累积,对污泥的 SVI 产生了不利影响,SVI 值从 105 迅速降低到 43,污泥沉降性能开始恶化.运行至第 40 天左右时,SVI 值逐步趋于稳定并略有回升,但总体来说,SMP 的累积对污泥的沉降性能有负面效应.累积较高浓度的 SMP(主要成分之一为腐殖酸)时,污泥表面吸附的 SMP 阻碍了微生物对营养物质的吸收,微生物处于内源呼吸状态,抑制了微生物的活性,活性低的污泥结构松散,污泥强度变差,因此污泥的沉降性能恶化.

## 2.6 SMP 积累对系统运行稳定性的影响

SMP 的累积对污泥的微生物含量、微生物活

性及沉降性能均有不利影响,那么是否会进而影响系统的稳定性和处理效果呢?图 7、8 给出了系统运行 70 d 污染物的去除情况.

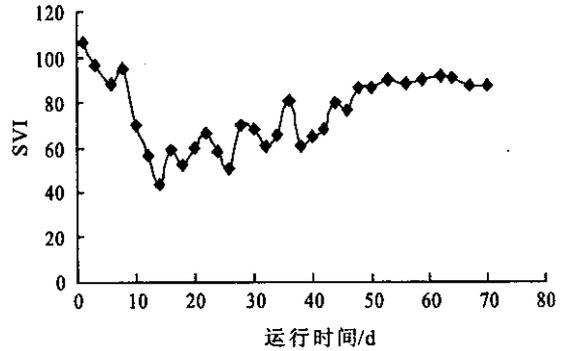


图 6 污泥沉降性能随时间的变化

Fig. 6 The sedimentary ability as a function of time in MBR

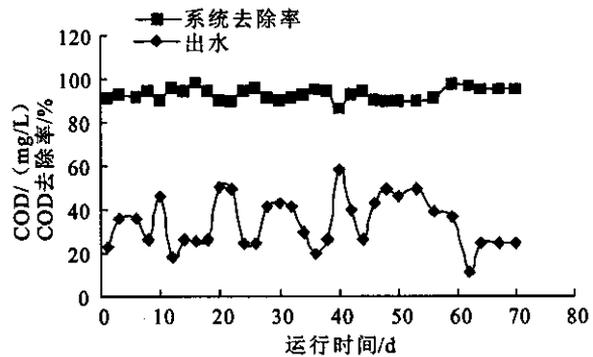


图 7 MBR 中出水 COD 和 COD 去除率的变化趋势

Fig. 7 COD concentration and COD removal as a function of time in MBR

可以看出,在整个运行过程中,反应器出水 COD 呈现出一定的波动,但波动的范围较小,基本在 60 mg/L 以下,去除率在 90 % 以上.尽管 MBR 中 SMP 产生和积累对污泥活性及其沉降性能产生了不利影响,但膜对大分子有机物的截留保证了稳定的出水水质,使该影响不是很大,对 MBR 系统总的 COD 去除率影响不显著,基本维持在 90 % 以上,系统对 COD 的去除性能稳定.

从图 8 可知,由于硝化细菌的世代周期相对较长,所以在反应器运行初期氨氮的去除率较低.但随着运行时间的延长,其去除率不断升高,第 26 天为 77.5 %,此时对进水的 pH 值进行了调节,提高至 7.5,而硝化菌对 pH 值较为敏感,因此氨氮的去除率下降,但之后又开始回升,最大达 90 %.这说明 SMP 积累对世代周期较长的硝化菌和反硝化菌的活性没有产生抑制作用,而膜对硝化/反硝化菌的截留在氨氮的去除方面也起到了积极作用,总体来看,MBR 中氨氮的去除效果稳定.

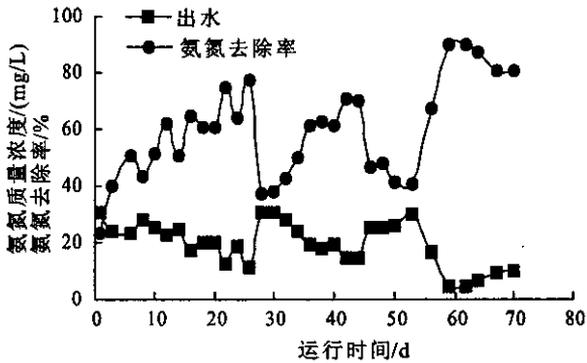


图8 氨氮质量浓度随运行时间的变化

Fig. 8 The concentration of ammonia nitrogen ratio as a function of time in MBR

### 3 结论

1) 污泥在高浓度的 SMP 中有一个逐步驯化并加以利用的过程,所以 MBR 中 SMP 浓度呈先增加后降低的变化趋势,40 d 后达到稳定,此时 SMP 的产生和降解达到动态平衡. SMP 可以被微生物降解.

2) 随着 SMP 的积累,污泥 VSS/SS 先迅速降

低,从初始的 0.913 降至 0.720,而后缓慢上升,但低于初始值,40 d 左右时基本稳定在 0.870. SMP 的初期积累对污泥的 VSS/SS 产生不利影响,单位质量污泥中的微生物量减少.

3) 污泥比基质降解速率和 OUR 先随 SMP 的积累而迅速下降,分别从 0.792 kg/(kg·d) 和 6.78 mg/(g·h) 迅速降至 0.187 kg/(kg·d) 和 3.74 mg/(g·h),此后微生物得到逐步驯化,污泥比基质降解速率和 OUR 不再有明显变化,且稳中有升,40 d 后逐渐趋于稳定,但均低于初始值. SMP 的存在降低了单位质量污泥去除污染物的能力和污泥耗氧速率,污泥代谢活性降低.

4) 随着反应器的运行,污泥的 SVI 值从 105 迅速降低到 43 左右,随后 SVI 值又逐步上升,但始终低于初始值,总体来说, SMP 的累积对污泥沉降性能产生负面影响.

5) 由于 MBR 中膜对大分子有机物和硝化/反硝化菌的截留, SMP 对污泥活性的抑制作用未对系统去除污染物的能力产生影响, MBR 对 COD 和氨氮的去除效果基本稳定.

### 参考文献:

- [1] Duncan J, Barker M, David C, *et al.* A review of soluble microbial product (SMP) in wastewater treatment systems[J]. *Wat Res*, 1999, 33(14): 3063-3082.
- [2] 刘锐,黄霞,范彬,等. 膜-生物反应器中溶解性微生物产物的研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(1): 1-7.
- [3] Chudoba J. Inhibitory effect of refractory organic compounds produced by activated sludge micro-organisms on microbial activity and flocculation[J]. *Water Res*, 1985, 19(2): 197-200.
- [4] Rittmann B E, Bae W, Namkung E, *et al.* A critical evaluation of microbial product formation in biological processes [J]. *Water Sci Technol*, 1987, 19: 517-528.
- [5] Sciener P, Nachaiyasit S. Production of soluble microbial products (SMP) in an anaerobic baffled reactor: composition, biodegradability and the effect of process parameters[J]. *Environ Technol*, 1998, 19: 391-400.
- [6] Xia Huang, Rui Liu, Yi Qian. Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor[J]. *Process Biochemistry*, 2000, 36: 401-406.
- [7] Kenneth H, Carlson, Gary L Amy. The importance of soluble microbial products (SMPs) in biological drinking water treatment[J]. *Wat Res*, 2000, 34(4): 1386-1396.
- [8] S G Lu, T I Mai. A model for membrane bioreactor process based on the concept of formation and degradation of soluble microbial product[J]. *Wat Res*, 2001, 35(8): 2038-2048.
- [9] Chrysi S, Lapidou, Bruce E Rittmann. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass[J]. *Wat Res*, 2002, 36: 2711-2720.
- [10] Zhang B, Yamamoto K. Seasonal change of microbial population and activities in a building wastewater reuse system using a membrane separation activated sludge process[J]. *Wat Sci Tech*, 1996, 34(5): 295-302.
- [11] 王颖,黄霞,袁其朋. 膜-生物反应器处理高浓度有机废水膜污染影响因素的研究[J]. *膜科学与技术*, 2004, 24(1): 1-5.
- [12] 吴荣玲. 活性污泥法的培养驯化及注意事项[J]. *黑龙江造纸*, 2001, (4): 41-43.
- [13] 李健,陈双星. 大型 SBR 工艺启动特点及活性污泥培养驯化[J]. *给水排水*, 2001, 27(5): 30-32.
- [14] 上海环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1999.
- [15] 顾国维,何义亮. 膜生物反应器在污水处理中的研究和应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [16] 上海市环境保护局. 废水生化处理[M]. 上海:同济大学出版社, 1999.