

序批式膜生物反应器(SMBR) 处理生活污水的研究

李继香¹ 王小佳¹ 夏四清^{1*} 段亮² 张彦浩³ 刘洋⁴

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012;

3. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 济南 250101; 4. 美国 HACH 公司, 上海 200335)

摘要 实验模拟生活污水,考察了连续式膜生物反应器(continuous membrane bioreactor, CMBR)和序批式膜生物反应器(sequencing batch membrane bioreactor, SMBR)的膜污染和污染物去除效果。结果表明 CMBR 和 SMBR 出水 COD 的平均浓度分别为 15.42 mg/L 和 13.42 mg/L,对应的去除率为 91.37% 和 92.39%;CMBR 和 SMBR 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度分别为 0.22 mg/L 和 1.12 mg/L,对应的去除率为 99.37% 和 95.63%。稳态时 CMBR 膜污染速率为 1.633 kPa/d,而 SMBR 膜污染速率仅为 0.302 kPa/d。EPS 分析结果表明,SMBR 系统的 SMP 和 LB 各组分浓度均明显低于 CMBR,因而 SMBR 系统膜污染速率远低于 CMBR 系统。

关键词 生活污水 连续式膜生物反应器 序批式膜生物反应器 膜污染 胞外聚合物

中图分类号 X703.1 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2011)01-0023-05

Study on sequencing batch membrane bioreactor treating simulated municipal wastewater

Li Jixiang¹ Wang Xiaojia¹ Xia Siqing¹ Duan Liang² Zhang Yanhao³ Liu Yang⁴

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

3. College of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

4. American HACH Company, Shanghai 200335, China)

Abstract The performance of a continuous membrane bioreactor (CMBR) and a sequencing batch membrane bioreactor (SMBR) was investigated with synthetic wastewater. The results showed that the average effluent COD of CMBR and SMBR were 15.42 mg/L and 13.42 mg/L, respectively, and the corresponding average removal efficiencies were 91.37% and 92.39%, respectively. Simultaneously, the average effluent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ of CMBR and SMBR were 0.22 mg/L and 1.12 mg/L, respectively, and the corresponding average removal efficiencies were 99.37% and 95.63%, respectively. Membrane fouling analysis indicated that the membrane fouling rate of CMBR was 1.633 kPa/d, while that of SMBR was only 0.302 kPa/d in ready state. This can be further elucidated by the higher concentrations of SMP and LB in the CMBR compared to those in the SMBR, resulting in severe membrane fouling.

Key words municipal wastewater; continuous membrane bioreactor; sequencing batch membrane bioreactor; membrane fouling; extracellular polymeric substances

膜生物反应器(MBR)是将膜分离技术与活性污泥法相结合的污水处理工艺,MBR 技术以出水水质好、结构紧凑和产泥率低等特点在污水处理及回用中得到了广泛的应用^[1-5]。连续式膜生物反应器(continuous membrane bioreactor, CMBR)作为一种成熟的工艺,已在很多领域得到了大规模应用^[6]。而序批式膜生物反应器(sequencing batch membrane

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划项目(2009AA062902);
国家“水体污染控制与治理”科技重大专项
(2009ZX07317-608-5);污染控制与资源化研究国家重点
实验室基金项目(PCRR K08005)

收稿日期:2009-11-29; **修订日期:**2009-12-24

作者简介:李继香(1982~),男,博士研究生,主要从事膜生物反应器方面的研究工作。E-mail:jixiangli@yahoo.cn

* 通讯联系人,E-mail:siqingxia@gmail.com

reactor, SMBR)是序批式反应器与膜生物反应器的有机结合,不仅保留了传统 SBR 工艺抗冲击负荷能力强、氧转移效率高、工艺简单、微生物活性高、操作灵活等一系列优点^[7],而且由于膜的高效截留作用可大大提高固液分离效果,缩短 SBR 运行周期,出水水质好。对于同样的设计流量,SMBR 所需膜面积多于 CMBR,在目前膜价格较高的情况下,初期投资较大。但随着膜组件国产化和膜材料的发展,这也将不成为限制 SMBR 应用的瓶颈。并且综合考虑膜污染进程、污染物去除效果和膜组件使用寿命,SMBR 相关的研究还较少。本研究采用国内海南立升公司自主研发的新型 PVC 材料作为膜反应器的膜组件,采用 SMBR 和 CMBR 2 种工艺处理模拟生活污水,对比了 2 种工艺对有机物、氨氮和总氮的去除效果,进一步分析了两者在膜污染方面的差异,探讨 SMBR 工艺用于实际工程的可行性。

1 材料与方法

1.1 超滤膜组件性能参数和原水水质

2 套膜生物反应器超滤膜采用海南立升 PVC 合金中空纤维膜,为外压毛细管膜,内外径分别为 0.85 mm 和 1.45 mm,膜孔径为 0.01 μm ,截留分子量为 50 kDa,工作温度为 5 ~ 38 $^{\circ}\text{C}$,进水 pH 值范围为 2 ~ 13。最大跨膜压差为 0.05 MPa,超过时需要进行必要的离线清洗。

实验用水为人工配水,模拟城市污水,原水组成如下:葡萄糖 150 mg/L,淀粉 150 mg/L,尿素 64 mg/L,蛋白胨 28 mg/L, KH_2PO_4 52.8 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 9 mg/L, $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 6 mg/L, FeSO_4 0.3 mg/L, CaCl_2 8 mg/L, NaHCO_3 120 mg/L。进水水质大致如下: $\text{COD} = 183.8 \pm 35.7$ mg/L, $\text{BOD}_5/\text{COD} = 0.57 \sim 0.64$, $\text{NH}_4^+ - \text{N} = 26.1 \pm 2.2$ mg/L, $\text{TN} = 29.3 \pm 4.7$ mg/L。

1.2 实验装置及运行方式

两工艺除运行方式不同外其他操作完全一致,膜生物反应器的工艺流程如图 1 所示。CMBR 和 SMBR 2 套装置膜组件均为竖直放置,以保证膜面冲刷,减缓膜污染。2 套装置水力停留时间(HRT)均为 6 h,膜组件面积分别为 0.0905 m^2 和 0.181 m^2 。CMBR 通过液位计控制进水泵的开启同时保持反应器液位恒定,进水从原水箱流入 MBR 反应器,反应器有效容积 4.3 L。

CMBR 采用间歇抽吸出水(9 min 开/3 min

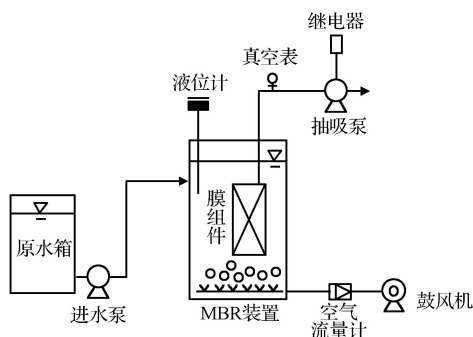


图 1 MBR 装置流程图

Fig. 1 Schematic diagram of MBR system

关),连续运行。SMBR 通过继电器和液位计控制运行工段,每天 8 个循环,每个循环 3 h。三阶段运行:(1)在反应器处于低液位时进水泵启动,进水期 5 min(包括在反应期内);(2)反应期 96 min(缺氧 32 min,好氧 64 min);(3)出水期 84 min。当系统跨膜压差(TMP)超过 50 kPa 时,进行物理清洗或则化学清洗。2 套系统均系统采用恒通量运行(8 L/(h · m^2)),出水采用间歇抽吸运行(9 min 开/3 min 关)。室温运行(9 ± 2 $^{\circ}\text{C}$),曝气强度为 140 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^3)$ 。运行 40 d 内不排泥,MLSS 维持在 4 500 ~ 6 500 mg/L。2 套系统运行期间进行在线维护清洗(每周水力反洗 1 次,每 2 周 0.02% 次氯酸钠在线维护 1 次,每个月 0.2% 次氯酸钠加强在线维护 1 次)。

1.3 分析项目与方法

常规水质项目:MBR 进水、上清液和出水等常规指标参照标准方法测定^[8],COD 采用重铬酸钾回流法, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂比色法,TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用分光光度法, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用紫外分光光度法,MLSS 及 MLVSS 等采用烘干法,每 3 d 测定 1 次。

实验中将 EPS 分为溶解性有机物(SMP)、松散型胞外多聚物(LB)以及固着性胞外多聚物(TB)三部分。每周测定 1 次。其提取方法如下:取 40 mL 曝气后的混合液,置于 50 mL 的加盖离心试管内,在 8 000 r/min 离心 5 min,上清液经 0.45 μm 滤膜过滤测定多糖、蛋白质和 DNA 表征溶解性有机物(SMP);分离 SMP 后的浓缩污泥重新悬浮于 40 mL 0.85% NaCl 溶液中,放置在磁力搅拌器上搅拌均匀,然后超声 8 min,置于摇床上在 150 r/min 水平振荡 10 min,而后在 9 000 r/min 离心 10 min,取上清

液测定多糖、蛋白质和 DNA 表征 LB; 分离 LB 后浓缩污泥重新悬浮于 40 mL 0.85% NaCl 溶液中,放置在磁力搅拌器上搅拌均匀,超声 4 min,80 ℃ 水浴加热 30 min,11 000 r/min 离心 20 min,取上清液测定多糖、蛋白质和 DNA 表征 TB,蛋白质采用 BCA 法,多糖才采用蒽酮-硫酸法,DNA 采用紫外吸收法^[9]。

TMP 通过真空表测量,膜通量通过体积法测量。本实验所使用主要仪器设备包括:恒流泵(保定兰格,BT100-1J)、定时循环控制器(郑州鸿联,TB1021)、玻璃转子流量计(余姚振兴,LZB-10)、电磁式空气泵(浙江森林,ACO-005)和耐震压力表(上海威肯,YN-60)等。

2 结果与讨论

2.1 污染物去除效果

实验期间,监测了 CMBR 与 SMBR 的污染物去除情况,如图 2~图 4 所示。

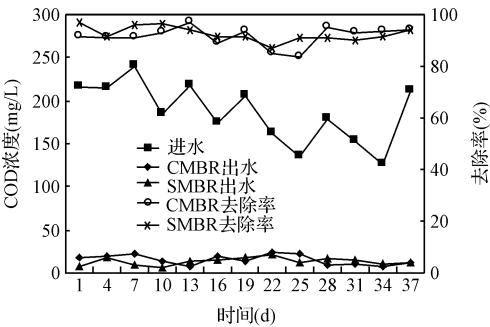


图 2 CMBR 和 SMBR 对 COD 的去除效果
Fig. 2 COD removal effects of CMBR and SMBR

由图 2 可知,在进水 COD 在 126~240 mg/L 之间波动,2 套系统出水 COD 均维持在 20 mg/L 以下。可以看出,两反应器均具有很好的 COD 去除效果。这是由于活性污泥微生物对有机物具有良好的降解作用,同时胶体及悬浮物也被膜截留,保证了良好的有机物去除效果。在 2 套系统共同运行的 38 d 内,CMBR 和 SMBR 出水 COD 的平均浓度分别为 15.42 mg/L 和 13.42 mg/L,对应的去除率为 91.37% 和 92.39%,说明在实验污泥负荷下 2 个系统对 COD 的去除率和抗冲击负荷的能力相当,变化的污泥负荷并未对 SMBR 去除有机物造成影响。但过高的进水有机物浓度可能会对 SMBR 系统的有机物去除效果造成消极影响^[10]。

图 3 反映了 2 套系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果和

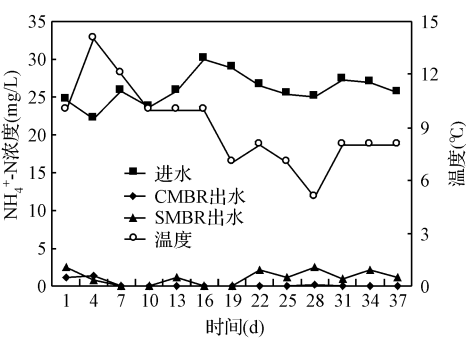


图 3 CMBR 和 SMBR 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果及温度变化情况
Fig. 3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removals of CMBR and SMBR coupled with temperature changes

实验期间温度变化情况。由于膜生物反应器几乎截留了所有的微生物,且 2 套系统运行期间未排泥,使得亚硝化菌和硝化菌等时代周期较长的微生物得到富集,2 套系统表现出了较好的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果。CMBR 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 维持在 1.4 mg/L 以下;SMBR 出水维持在 3 mg/L 以下,极端低温时(8 ℃)略有升高,可见 SMBR 对温度比 CMBR 敏感,所以低温情况下应考虑延长 SMBR 水力停留时间,保证出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 效果。整个实验期间 CMBR 和 SMBR 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度分别为 0.22 mg/L 和 1.12 mg/L,对应的去除率为 99.37% 和 95.63%,两系统均表现出良好的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果。为了保证膜面冲刷延缓膜污染和微生物生长,2 套系统好氧阶段均维持较高的溶解氧水平(7 ± 1 mg/L),实验期间未出现 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的积累,总氮几乎全部以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 形式存在,说明 2 套系统均实现了完全硝化。

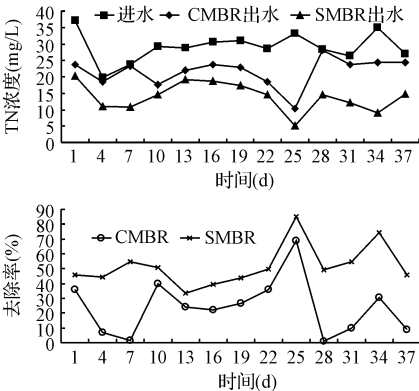


图 4 CMBR 和 SMBR 对 TN 的去除效果
Fig. 4 TN removal effects of CMBR and SMBR

实验结果表明,2套系统TN的去除效果均不太理想,如图4所示。CMBR对总氮的去除率最大为68.6%,最小仅1.02%,平均为25.24%,这主要是由于菌胶团内部的缺氧小环境的存在发生了同时硝化反硝化作用,好氧反硝化菌也可能起到了一定的作用,导致了好氧反应器内的脱氮效果。SMBR对总氮的去除率也偏低,最大值为84.9%,最小值仅有33.3%,平均为52%。这主要归因于碳源不足和污泥沉积。运行过程中SMBR系统的污泥沉降性能较差,SV大部分时间均高于60%,所以没有设置机械搅拌装置,导致在缺氧阶段泥水接触不够充分,从而使总氮去除率较低。虽然SMBR的反硝化效果不甚理想,但仍优于CMBR系统。

2.2 CMBR和SMBR膜污染情况

2套系统运行期间进行在线维护清洗(每周水力反洗1次,每2周0.02%次氯酸钠在线维护1次,每个月0.2%次氯酸钠加强在线维护1次)。当TMP高于50 kPa时,取出膜组件进行必要的物理清洗,去除膜面泥饼层。实验期间监测了CMBR和SMBR 2套系统膜污染情况(图5)。可以看出加强在线维护后,CMBR系统TMP从52 kPa降低到32.5 kPa,SMBR从19.2 kPa降低到14.2 kPa,并没有完全恢复膜组件的透水性能。这主要是为了保证不影响微生物生长和活性,清洗药剂用量灌满膜组件即停止,膜的外表面(尤其是外表面形成的生物凝胶层)则不能充分接触清洗液,仍会存在一定程度的不可逆污染。要完全恢复膜组件性能,仍要进行离线化学清洗。但加强在线维护能够在一定程度上恢复膜污染情况,延长膜组件运行周期。

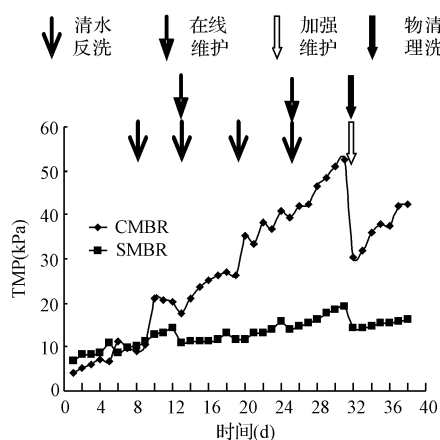


图5 实验期间CMBR和SMBR膜污染趋势

Fig. 5 Changes in TMP of CMBR and SMBR during the operation

由图5可知CMBR稳态时膜污染速率为1.633 kPa/d,而SMBR稳态时膜污染速率仅为0.302 kPa/d。可以看出,CMBR膜污染速率是SMBR的5.4倍,可见SMBR可以有效减缓膜污染,延长膜组件运行周期。SMBR系统膜污染速率小于CMBR系统的原因主要有3个方面。一方面,SMBR系统设置了缺氧段,一些难被好氧微生物降解的高分子有机物可以被缺氧环境中生长的微生物所降解,使有机物的降解更加完全。由于引起膜污染的主要是大分子有机物,所以相对于CMBR,SMBR更有利于减缓膜污染。另一方面,SMBR系统有近一半时间处于停抽阶段,膜面冲刷可以更有效地去除膜面污染物,并且这时膜表面的污泥浓度大于混合液的污泥浓度,浓度梯度的存在使得膜表面形成的滤饼层开始变得疏松并向混合液主体扩散,有利于减缓膜污染。另外,可以由2套反应器内的SMP、LB以及TB水平解释两者膜污染的差异。

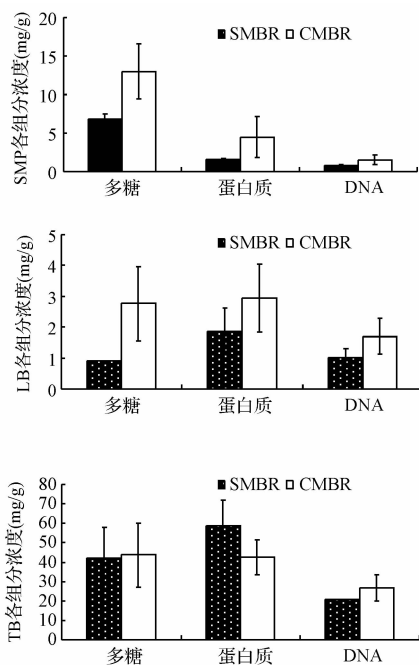


图6 CMBR和SMBR中EPS各组分蛋白质、DNA和多糖浓度

Fig. 6 Protein, DNA and carbohydrate concentrations of EPS in CMBR and SMBR

EPS已经被很多研究者证实对膜污染有着重要影响^[11-12],本实验用多糖、蛋白质及核酸表征EPS,考察了CMBR与HMBR系统中污泥混合液EPS分布水平,如图6所示。由图中可知,CMBR系统的SMP中多糖、蛋白质和核酸分别为SMBR的1.90

倍、2.79 倍、1.79 倍;CMBR 系统的 LB 中多糖、蛋白质和核酸分别为 HMBR 的 3.06 倍、1.56 倍、1.68 倍;CMBR 系统的 TB 中多糖、蛋白质和核酸分别为 SMBR 的 1.04 倍、0.72 倍、1.28 倍。可见 CMBR 系统的 SMP 和 LB 各组分浓度均明显高于 SMBR,而 TB 各组分则相差不大,维持在同一水平。而 SMP 和 LB 浓度过高会引起严重的膜污染,TB 则对膜污染影响不大^[13],所以 CMBR 系统膜污染速率明显高于 SMBR 系统。

根据 Lapidou 等的 EPS 理论^[14],EPS 包括 UAP (utilization-associated products) 和 BAP (biomass-associated products)。由于 CMBR 和 SMBR 系统进水相同,出水水质也相当,所以由于基质代谢产生的 UVP 2 套系统相当;SMBR 内存在有机物浓度梯度,而 CMBR 系统中有机物浓度始终维持在同一低浓度水平,在同等曝气强度下,CMBR 系统内源呼吸较为严重,因而 CMBR 由于内源呼吸而产生的 BAP 高于 SMBR 系统,导致 CMBR 系统的整体 EPS 水平高于 SMBR 系统,从而导致了较为严重的膜污染。

3 结 论

(1)CMBR 和 SMBR 对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均有较好的去除效果。CMBR 和 SMBR 出水 COD 的平均浓度分别为 15.42 mg/L 和 13.42 mg/L,对应的去除率为 91.37% 和 92.39%;CMBR 和 SMBR 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度分别为 0.22 mg/L 和 1.12 mg/L,对应的去除率为 99.37% 和 95.63%。

(2)由于设置了缺氧段,SMBR 对总氮的去除率优于 CMBR,但由于碳源不足和污泥沉积,SMBR 对总氮的去除率也偏低,最大值为 84.9%,最小值仅有 33.3%,平均为 52%,但仍优于 CMBR 系统。

(3)相对于 CMBR 系统,SMBR 系统膜污染速率很低,CMBR 稳态时膜污染速率为 1.633 kPa/d,而 SMBR 稳态时膜污染速率仅为 0.302 kPa/d。在膜材料价格较低情况下,可以考虑采用 SMBR 工艺,有效减缓膜污染,延长运行周期。

(4)EPS 分析结果表明,SMBR 系统的 SMP 和 LB 各组分浓度均明显低于 CMBR,从而导致 SMBR 系统膜污染速率低于 CMBR 系统。

参 考 文 献

- [1] Jefferson B., Laine A. L., Stephenson T. Membrane bioreactors and their role in wastewater reuse. *Water Sci. & Technol.*, **2000**, 41(1):197-204
- [2] Judd S. The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment. Oxford: Elsevier, **2006**
- [3] Liu R., Huang X., Chen L. J. Operational performance of a submerged membrane bioreactor for reclamation of bath wastewater. *Process Biochem.*, **2005**, 40(1):125-130
- [4] 吴志超,尹星,王志伟,等. 浸没式膜-生物反应器污泥组分对膜污染的影响. *环境工程学报*, **2009**, 3(1): 93-97
- [5] 蔡亮,杨建州,王林权,等. 不同膜组件应用于重力出水式膜生物反应器的性能比较. *环境工程学报*, **2009**, 3(10): 1763-1766
- [6] 顾国维,何义亮. 膜生物反应器——在污水处理中的研究和应用. 北京:化学工业出版社, **2002**
- [7] Bae T. H., Han S. S., Tak T. M. Membrane sequencing batch reactor system for the treatment of dairy industry wastewater. *Process Biochemistry*, **2003**, 39(2): 221-231
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版). 北京:中国环境科学出版社, **2002**
- [9] Wang Z. W., Wu Z. C., Tang S. J. Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Water Res.*, **2009**, 43(9):2504-2512
- [10] Lobos J., Wisniewski C., Heran M., *et al.* Sequencing versus continuous membrane bioreactors: Effect of substrate to biomass ratio (F/M) on process performance. *J. Membr. Sci.*, **2008**, 317(1): 71-77
- [11] Zhang G. J., Ji S. L., Gao X., *et al.* Adsorptive fouling of extracellular polymeric substances with polymeric ultra-filtration membranes. *J. Membr. Sci.*, **2008**, 309(1): 28-35
- [12] Malamis S., Andreadakis A. Fractionation of proteins and carbohydrates of extracellular polymeric substances in a membrane bioreactor system. *Bioresource Technology*, **2009**, 100(13): 3350-3357
- [13] Shuang Liang, Cui Liu, Lianfa Song. Soluble microbial products in membrane bioreactor operation: Behaviors, characteristics, and fouling potential. *Water Res.*, **2007**, 41(1):95-101
- [14] Lapidou C. S., Rittmann B. E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass. *Water Res.*, **2002**, 36(11):2711-2720