

序批式膜生物反应器同时脱氮除磷的比较研究

肖景霓, 张捍民*, 代文臣, 杨凤林, 张兴文

(大连理工大学环境与生命学院, 大连 116024)

摘要: 对比了厌氧-好氧(AO)及厌氧-缺氧-好氧(A²O) 2 种运行模式序批式膜生物反应器(SBMBR)对模拟生活污水同时脱氮除磷的性能. 结果表明, 2 种运行模式的 SBMBR 对有机物及氨氮的去除率分别可保持在 90% 和 95% 以上. A²O MBR 具有更强的释磷能力, 其 SP_{RR30}(前 30min 比释磷速率)比 AO MBR 高出 47.5%; 但 SP_{UR30}(前 30min 比吸磷速率)却比 AO MBR 低, 这是导致前者膜出水中 TP 值较后者高的原因之一. 2 个系统内污泥均有反硝化除磷能力, A²O MBR 中 DPAO(反硝化聚磷菌)的比例比 AO MBR 提高了 57%; 硝酸盐为电子受体时单位电子转移所吸收的磷, 前者比后者高 30%. 这 2 个因素双重作用的结果导致了 A²O MBR 反硝化除磷能力的提高. A²O MBR 系统曝气时间减半并没有加重膜污染, 反而该系统的膜污染相对较轻. 膜对有机物有较好的过滤截留作用, 污泥沉降性能对 SBMBR 出水水质影响很小.

关键词: 序批式膜生物反应器(SBMBR); 脱氮除磷; 反硝化除磷; 膜污染; 污水处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)11-2233-06

Comparisons of Simultaneous Phosphorus and Nitrogen Removal in Sequencing Batch Membrane Bioreactors

XIAO Jing-ni, ZHANG Han-min, DAI Wen-chen, YANG Feng-lin, ZHANG Xing-wen

(School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Two SBMBRs run in AO and A²O mode were operated in parallel to compare their ability of simultaneous phosphorus and nitrogen removal. The results showed that the removals of COD and ammonium nitrogen were averaged over 90% and 95%, respectively. A²O MBR has the stronger anaerobic phosphorus release ability; its SP_{RR30} outdoes 47.5% compared to AO MBR. SP_{UR30} of A²O MBR was lower which may attribute to the higher effluent TP content. The ratio of DPAO was enhanced 57% compared to AO MBR. And when nitrate as the only electron acceptor, the phosphorus uptake mass with unit electron transfer was 30% higher in A²O MBR. This two factors lead to the stronger denitrifying phosphorus removal ability of A²O MBR. Furthermore, the membrane fouling was mitigated in A²O MBR though the aerobic time was half to that of AO MBR. The membrane filter function made SBMBR's effluent free of the sludge settlement ability.

Key words: sequencing batch membrane bioreactor (SBMBR); nitrogen and phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal; membrane fouling; wastewater treatment

将膜应用于生物反应器进行污水处理时, 膜最明显的功能就是代替二沉池进行固液分离, 这一组合尽管看似简单, 却给污水处理带来新的突破. 近年来, 膜生物反应器(MBR)由于处理效果好、占地面积少等优点日益受到人们关注^[1, 2]. 笔者在进行传统 MBR 与序批式 MBR (SBMBR) 的对比试验研究中发现, SBMBR 有很好的同时脱氮除磷效果^[3, 4], 因此有必要对 SBMBR 的同时脱氮除磷性能做进一步研究.

将 SBR 与膜法相结合形成的 SBMBR 除了具有一般 MBR 的优点以外, 对于膜组件本身和 SBR 工艺 2 种程序运行都互有帮助^[5]. 间歇的运行方式有助于减缓膜污染. 膜对反应器内污泥混合液起截留过滤作用, 能将污泥微生物完全截留在反应器内, 所以反应器中的微生物能最大限度地增长, 这样生物活性高, 吸附和降解有机物的能力较强. 而世代时

间较长的硝化及亚硝化细菌也能很好地增长, 从而提高硝化能力. 并且进水期的充满状态导致了反应器内氧浓度很快地降低下来, 避免了传统的前置反硝化膜生物反应器中氧可能连续进入反硝化区的弊端. 其次, 脱氮与除磷均需要厌氧(缺氧)、好氧相交替的环境, SBR 式的工作方式为除磷菌的生长创造了条件, 同时也满足了脱氮的需要, 使得单一反应器内实现同时高效去除氮、磷及有机物成为可能. 此外, 对于 SBR 来说, 在传统 SBR 系统中, 活性污泥必要的沉淀时间和清洁水的排水阶段占据了整个循环周期的大部分时间. 利用膜分离可以在反应阶段排水, 同时可以完全免去沉淀阶段所需要的时间. 因

收稿日期: 2005-11-07; 修订日期: 2005-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578024)

作者简介: 肖景霓(1978~), 女, 博士, 主要研究方向为膜生物反应器在废水处理中的应用. E-mail: jingni_xiao@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhhanmin@126.com

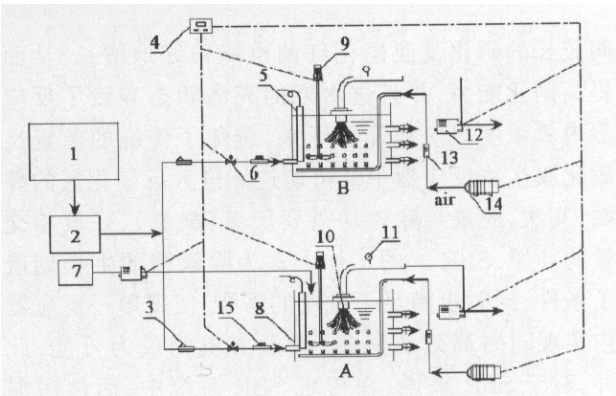
此,序批式膜生物反应器可以减少传统 SBR 的循环时间.

本试验对 SBMBR 在 2 种不同运行方式下[厌氧/好氧交替 MBR(AO MBR)与厌氧/缺氧/好氧 MBR(A²O MBR)]污染物的去除性能及同时脱氮除磷的特性进行了相关研究,以期为膜生物反应器在脱氮除磷的实际工程应用提供一些理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置

AO MBR 与 A²O MBR 并联运行做对比试验研究,试验装置如图 1 所示.2 个反应器材质均为有机玻璃,有效容积 10L.高位水箱有效容积 0.1m³,平衡水箱有效容积 0.01m³,用于利用浮球阀控制反应器水位.进水管道上加装电磁阀,阀前有 Y 型过滤器,并在进水口前设止回阀.反应器中设搅拌器,以保证活性污泥在非曝气阶段处于悬浮状态,泥水混合均匀.由鼓风机曝气,蠕动泵抽吸出水,出水流量恒定.2 个反应器均在厌氧阶段的前 10min 内完成进水,好氧阶段出水;每周期的进水量均为 1.67L,HRT 为 12h.A²O MBR 的缺氧环境通过蠕动泵在厌氧末外加硝酸盐实现,每周期硝酸盐投加量与进水碳源的比(COD/NO₃⁻)_{add}为 6.25.电磁阀、搅拌器、鼓风机和蠕动泵由时间继电器控制,周期性工作.由功率相同的恒温器控制 2 个反应器恒温 25℃±1℃.试验采用外压型聚乙烯中空纤维超滤膜,膜面积 0.15m²,膜孔径 0.1μm,操作参数见表 1.



1. 高位水箱; 2. 平衡水箱; 3. Y-型过滤器; 4. 时间继电器; 5. 恒温加热棒; 6. 电磁阀; 7. 蠕动泵(投加硝酸盐); 8. 膜生物反应器; 9. 搅拌器; 10. 膜组件 11. 真空表; 12. 出水蠕动泵; 13. 转子流量计; 14. 曝气泵; 15. 止回阀

图 1 试验装置流程

Fig. 1 Schematic diagram of experimental process

1.2 接种污泥及试验水质

表 1 操作参数

Table 1 Operation parameters

操作参数	A ² O	AO
有效容积/L	10	10
HRT/h	12	12
SRT/d	15	15
温度/℃	25±1	25±1
周期(T)/min	50(an)+40(anox)+30(ae)	60(an)+60(ae)
膜通量/L·h ⁻¹	3.34	1.67
(COD/NO ₃ ⁻) _{add}	6.25	—

活性污泥取自大连市春柳河污水处理厂回流污泥池,其MLVSS/MLSS为0.58.在1个反应器中驯化培养至4g/L后,分至2个反应器,使其污泥浓度均为2g/L,污泥性状完全一致.

试验原水为模拟生活污水,由蔗糖、氯化铵、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾及少量MgSO₄·7H₂O、CaCl₂·2H₂O、FeSO₄·2H₂O、氯化钠配制而成,COD 280~460 mg/L;NH₄⁺-N 19~28 mg/L;TP 6.5~10 mg/L;NO₂⁻-N 0.002 mg/L;NO₃⁻-N 0.05 mg/L(COD:N:TP约为350:25:9).

1.3 分析方法

标准方法分析膜出水及各阶段末上清液的COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP等^[6],其中上清液为泥水混合液经0.45μm膜的过滤液.

2 结果与讨论

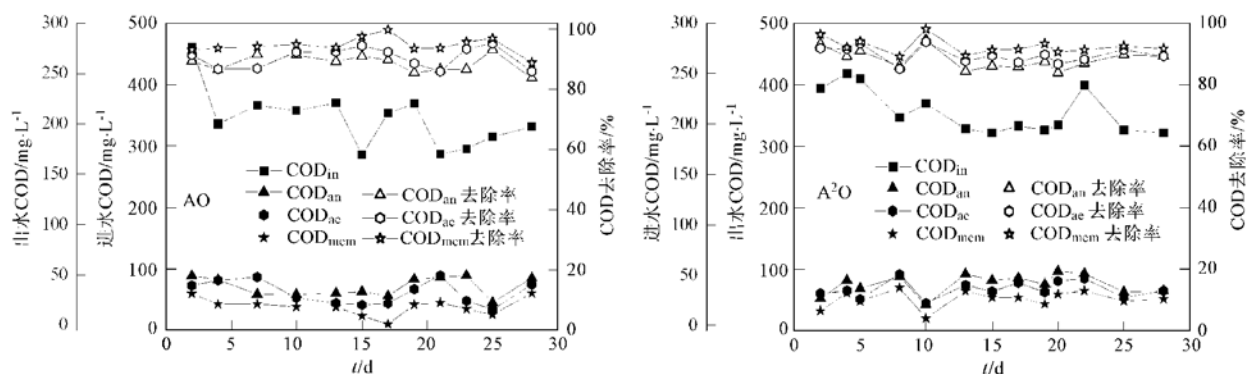
2.1 COD 去除效果

2 个 MBR 对 COD 的去除无明显差异,去除效果较好且很稳定(图 2).厌氧末上清液 COD 均介于 20~50 mg/L 之间,平均在 40 mg/L 左右,平均去除率均在 88% 左右.好氧末 COD 平均去除率约为 90%,膜出水 COD 为好氧段出水的平均结果,去除率提高到 93% 左右,说明膜对有机物具有一定的过滤截留作用.

实验结果表明,COD 的去除基本是在厌氧阶段实现的,即经过厌氧段,系统内的有机底物被消耗殆尽,部分转化为 PHB 被细胞贮存于体内.根据 A²O MBR 系统的运行特性,厌氧末系统内 COD 基本耗尽,保证了后续投加硝酸盐后缺氧段的形成,而缺氧段是反硝化除磷得以进行的保障.

2.2 氮的去除

AO MBR 出水氨氮保持在 1 mg/L 以下,去除率在 95% 以上,平均去除率为 98.0%.出水中硝酸盐含量与亚硝酸盐含量均较低,平均值分别为 1.25 和 0.13 mg/L.氨氮被氧化,但其产物并未产生累积.



下标 in 表示进水, ae 表示好氧末上清液, an 表示厌氧末上清液, mem 表示膜出水, 下同

图 2 COD 去除效果

Fig. 2 COD removal performance of the two MBRs

A²O MBR 在好氧时间仅为 AO MBR 一半的情况下, 仍能保证较好的氨氮去除效果, 出水氨氮亦基本保持在 1 mg/L 以下, 平均为 0.79 mg/L, 平均去除率为 96.5%. A²O MBR 每周期外加一定量的硝酸盐以形成缺氧环境, 其投加总量约为 94 mg/T. 从图 3 可以看出, A²O MBR 缺氧末硝酸盐浓度已降至 3 mg/L 以下, 出水的硝酸盐及亚硝酸盐含量亦很

低, 平均值分别保持在 1.83 和 0.13 mg/L. 表明投加的硝酸盐在缺氧段被利用进行了缺氧吸磷.

在进入好氧段后, 氨氮被氧化而转化为硝态氮. 由于此刻系统内无有机物存在, 除磷菌则可能在好氧吸磷的同时, 也利用硝化过程中产生硝酸盐为电子受体而吸磷, 同时实现了反硝化, 从而使出水中硝态氮含量保持在较低范围内(图 3).

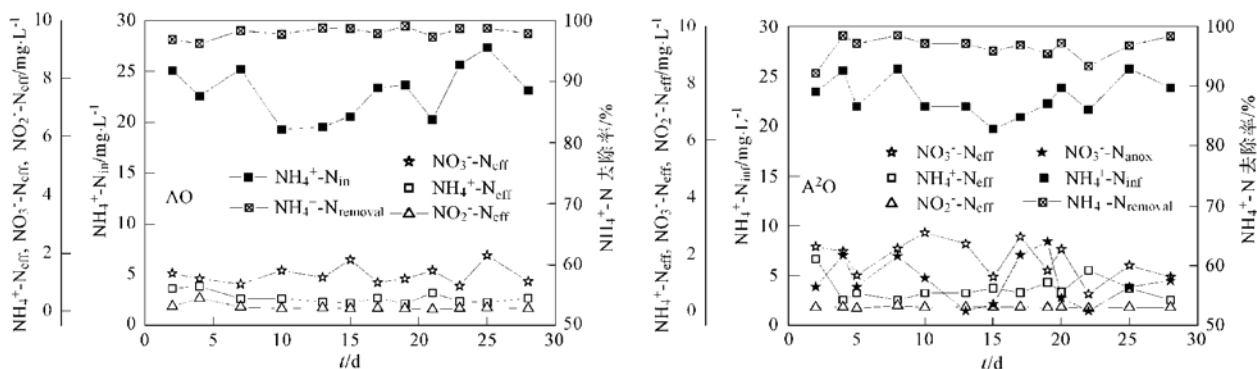


图 3 氮的变化情况

Fig. 3 Nitrogen variation of the two MBRs

2.3 磷的去除

2 个反应器各阶段上清液磷浓度变化及各阶段末污泥含磷率变化见图 4. 可以看出, 2 个反应器均存在较明显厌氧释磷. 进水平均磷浓度为 8.59 mg/L, AO MBR 的厌氧、好氧末上清液及膜出水 TP 平均浓度分别为 10.75、0.59 和 1.72 mg/L. 好氧末磷浓度明显减少, 表明在好氧阶段发生了良好吸磷过程. 相应的厌氧、好氧阶段末平均污泥含磷率为 30.69 和 34.38 mg/g, 也表明发生了厌氧释磷和好氧吸磷现象.

进水平均磷浓度为 7.70 mg/L, A²O MBR 中

厌氧、好氧末上清液及膜出水平均磷浓度分别为 15.95、7.84、0.85 和 2.81 mg/L. 说明在缺氧和好氧这 2 个阶段均有吸磷发生, 这从各阶段末污泥含磷率变化的结果亦可证明(厌氧、缺氧、好氧阶段末平均污泥含磷率分别为 38.98、40.83 和 45.46 mg/g).

由于膜出水监测的为好氧阶段出水的平均值, 从上述分析可知, 厌氧/缺氧末系统含磷量相对较高, 尽管至好氧结束时系统内的磷已基本被吸收, 但膜出水中 TP 浓度必高于好氧末的值.

2.4 吸/释磷试验

上述分析中可以看到, 在进水磷浓度相差不大

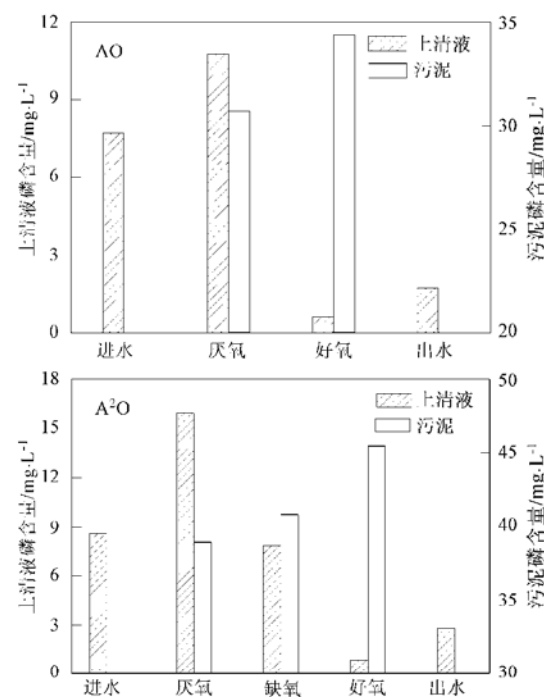


图 4 TP 变化及污泥含磷率

Fig. 4 TP profile and sludge TP content of study

的情况下,A²O MBR 中厌氧释磷量是 AO MBR 中的 4.28 倍;A²O MBR 的膜出水是在进行缺氧吸磷之后开始的,此刻磷的浓度已低于 AO MBR 膜出水的初始 TP 值,但其膜出水 TP 浓度却又高于 AO MBR. 为考查其中原因,进行了吸/释磷试验,并对前 30min 的比释磷速率 (SPRR₃₀) 及比吸磷速率 (SPUR₃₀) 加以讨论,以比较 2 个系统中污泥的吸/释磷能力.

释磷试验测得 SPRR₃₀如图 5 所示. A²O MBR 的 SPRR₃₀为 25.84 mg/(g·h),比 AO MBR 的 17.52 mg/(g·h)高出 47.5%,表明 A²O MBR 系统中的污泥具有更好的释磷能力.

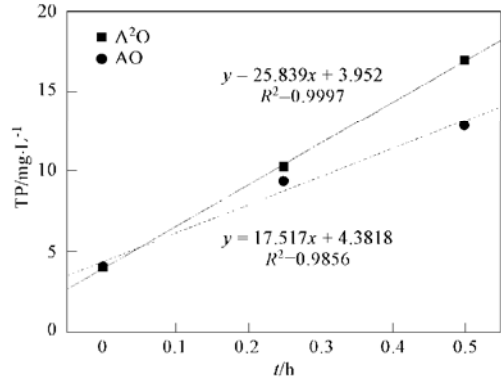
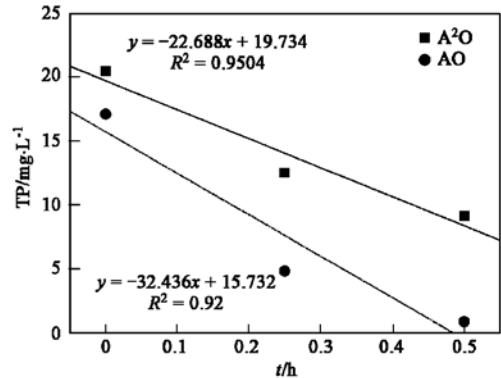


图 5 前 30min 的厌氧比释磷速率

Fig. 5 Specific P-release rates of initial 30 min in the two systems

在吸磷试验中可以看到,A²O MBR 的 SPUR₃₀ [22.69 mg/(g·h)] 比 AO MBR 的 [32.44 mg/(g·h)] 要低 30% (图 6). 由此推断 A²O MBR 膜出水中 TP 值较 AO MBR 高的原因可能是由于 SPUR₃₀前者小于后者所致.



MLVSS: A²O MBR, 2.35 g/L; AO MBR, 2.38 g/L

图 6 前 30min 的好氧比吸磷速率

Fig. 6 Specific P-uptake rates of initial 30 min in the two systems

2.5 DPAO 比例

按照 DPAO 在缺氧及好氧条件下具有相同的吸磷速率的假设^[7],根据公式: $R_{DPAO} = q_{an}/q_{ae}$,计算本试验所采用的 2 个反应器内污泥中 DPAO 占总 PAO 的比例. 式中 R_{DPAO} 为 DPAO 占总 PAO 的比例; q_{an} 为缺氧吸磷速率, mg/(g·h); q_{ae} 为好氧吸磷速率, mg/(g·h).

由表 2 得出在 A²O MBR 和 AO MBR 中,反硝化吸磷量占总吸磷量的比例分别为 40.6% 和 25.9%,即二者 DPAO 比例分别为 40.6% 和 25.9%,前者比后者提高了 57%. 该结果表明,在厌氧末有机物已消耗殆尽时投加硝酸盐引入缺氧段,有利于 DPAO 利用厌氧段体内贮存的有机颗粒于缺氧环境进行反硝化和吸磷,从而使 DPAO 得到富集.

表 2 批试验测得 2 个反应器中污泥在缺氧及好氧下的 SPUR₃₀

Table 2 SPUR₃₀ of anoxic and aerobic phase obtained in the batch test

SPUR ₃₀ /mg·(g·h) ⁻¹	缺氧	好氧
AO MBR	8.4	32.4
A ² O MBR	9.2	22.7

2.6 反硝化除磷能力

试验发现,AO MBR 在没有进行缺氧驯化的情况下,亦具有反硝化除磷能力. 对此进行了 2 种污泥反硝化吸磷能力的对比试验.

结果表明,在缺氧环境下,2种污泥磷的吸收量与硝酸盐的消耗量之间均存在良好的线性关系(图7).经线性回归可以看出,A²O MBR 中污泥的吸磷量与硝酸盐消耗量的比值(1.406 7)要比AO MBR 中的(1.156 7)高,硝酸盐为电子受体时单位电子转移所吸收的磷分别为0.13和0.10 mol/mol,前者比后者高30%,即A²O MBR 中污泥在经过缺氧环境的驯化后,PAO 体内利用硝酸盐为电子受体进行吸磷酶得到强化,从而使其反硝化吸磷的能力得到改善.

综上,可以认为A²O MBR 反硝化除磷能力的提高是DPAO 数量增加及PAO 体内具有反硝化吸磷作用的酶经诱导而增加双重作用的结果.

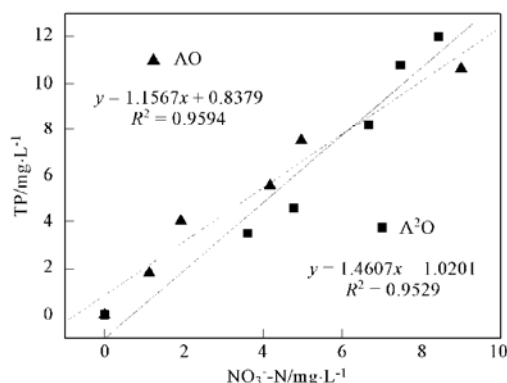


图7 磷的吸收量与NO₃⁻-N消耗量间的关系

Fig. 7 Relationship between phosphorus removal and NO₃⁻-N consumption

2.7 膜污染与污泥性质

试验以蠕动泵抽吸产生真空度来实现反应器出水,控制试验过程出水流量恒定.通过真空表读数反映膜污染状况,即在保证系统HRT一定的条件下,过膜压力(TMP)将随着膜污染的加剧而增大.根据真空表读数可算取2个反应器膜组件的比流量^[8],膜比流量(SMF)的变化能间接反映过膜阻力的变化和膜污染情况.

如图8 9所示,运行初期污泥沉降性能良好,膜过滤压差上升缓慢,膜污染主要以由溶解性大分子粘性物质在膜表面附着引起的污染为主,膜丝表面尚未形成滤饼层,比流量基本保持不变;随着运行时间的加长,污泥沉降性能逐渐恶化,SVI出现一快速上升的过程,膜表面滤饼层也逐渐形成,这期间TMP上升较快,出现了SMF的迅速下降;当形成稳定的滤饼层后,TMP变化渐缓,SMF呈缓慢下降.而由于膜的过滤作用,污泥沉降性能的恶化并未影

响系统出水水质,膜出水一直保持澄清.

另外从图8还可看出,在快速下降阶段,AO MBR 的SMF下降速率要大于A²O MBR,表明A²O MBR 曝气时间减半,并未加重膜污染,相反却有减缓的趋势.分析认为,由于出水蠕动泵抽吸时间减少,使混合液中的物质向膜丝表面运动的时间减短;相应增加了不出水情况下搅拌机对膜丝扰动的时间,即提高了膜丝表面附着物质向混合液方向扩散的可能性,从而减轻膜污染.

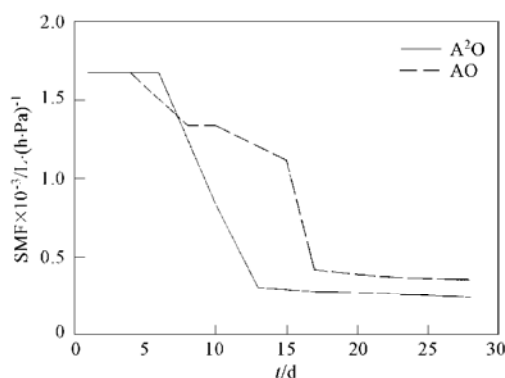


图8 恒流状态下膜的比流量随时间的变化

Fig. 8 Variations of specific membrane flux with time under fixed permeate flux

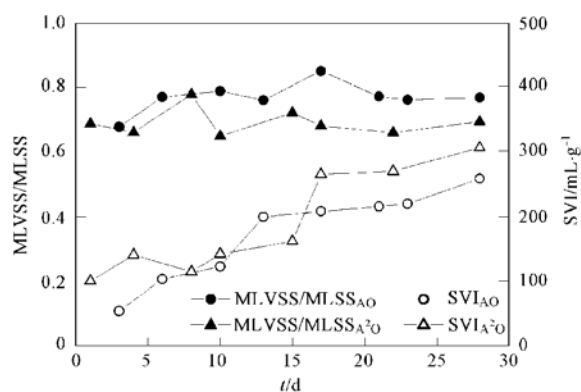


图9 MLVSS/MLSS 和SVI 随时间的变化

Fig. 9 Variations of MLVSS/MLSS and SVI with time during the operation time

试验过程中污泥活性(MLVSS/MLSS)变化不大,AO 池污泥活性相对好些,基本保持在0.7~0.8之间,平均为0.77;A²O 略差,在0.65~0.8之间,平均为0.69.污泥膨胀并没有使污泥活性明显降低,由于膜的截留过滤作用,有机物被很好地截留在反应器内,COD 的去除不受污泥膨胀的影响(图2).污泥膨胀后系统仍能保证良好的氨氮去除效果,这与傅金祥等^[9]的研究结果相反,分析原因是本试验

过程中系统在好氧阶段的 DO 浓度始终控制在 2 mg/L 以上, 对保障硝化效果有一定的作用(图 3)。

3 结论

(1) AO 与 A²O 2 种运行模式下 SBMBR 对有机物和氨氮均有良好的去除效果. 系统平均去除率分别在 90% 和 95% 以上. 膜对有机物有一定的过滤截留作用, 出水 COD 不受污泥膨胀的影响. 在较好地控制好氧段 DO 浓度的情况下, 污泥膨胀对氨氮的去除也无显著影响.

(2) 吸/释磷试验结果表明, A²O MBR 的 SPRR₃₀ 比 AO MBR 高出 47.5%, 具有更强的释磷能力. A²O MBR 的 SPUR₃₀ 比 AO MBR 低是导致 A²O MBR 膜出水中 TP 值较 AO MBR 高的原因之一.

(3) A²O MBR 系统内污泥的反硝化除磷能力高于 AO MBR. 其反硝化除磷能力的提高是 DPAO 数量增加及 PAO 体内反硝化吸磷酶经诱导而增强双重作用的结果.

(4) A²O MBR 系统曝气时间的减少并没有加重膜污染, 反而该系统的膜污染相对较轻. 膜对有机物有较好的过滤截留作用, 污泥沉降性能对

SBMBR 出水水质影响很小.

参考文献:

- [1] Adham S, Gagliardo P, Boulos L, *et al.* Feasibility of the membrane bioreactor process for water reclamation[J]. *Wat. Sci. Tech.*, 2001, **43**(10): 203~ 209.
- [2] 吕红, 徐又一, 朱宝库, 等. 分体式膜-生物反应器在废水处理的工艺条件[J]. *环境科学*, 2003, **24**(3): 61~ 64.
- [3] Zhang H M, Xiao J N, Cheng Y J, *et al.* Comparison between a sequencing batch membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor[J]. *Process Biochem.*, 2006, **41**(1): 87 ~ 95.
- [4] 张捍民, 成英俊, 肖景宽, 等. 序批式膜生物反应器脱氮除磷性能研究[J]. *大连理工大学学报*, 2005, **45**(1): 22~ 25.
- [5] Krampe J, Krauth K. Sequencing batch reactor with submerged hollow fiber membranes for the biomass separation[J]. *Water Sci. Technol.*, 2001, **43**(3): 195~ 199.
- [6] 国家环保局编. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [7] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M. *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge[J]. *Wat. Res.*, 1997, **31**(3): 471~ 478.
- [8] 顾平, 周丹, 杨造燕. 应用膜生物反应器处理生活污水的研究[J]. *中国给水排水*, 1998, **14**(5): 6~ 8.
- [9] 傅金祥, 苏锦明, 朴芬淑, 等. 一体式膜生物反应器的污泥膨胀控制[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(4): 46~ 47.