

不同运行模式序批式膜生物反应器中污泥特性研究

肖景霓¹, 张捍民^{*1}, 杨凤林¹, 张杰¹, 代文臣²

(1. 大连理工大学 环境与生命学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连迈克环境科技工程有限公司, 辽宁 大连 116001)

摘要: 比较了不同运行模式(AO、AOA及A²O)对序批式膜生物反应器(SBMBR)污泥特性的影响. 结果表明: 运行模式对污泥粒径存在明显的影响, 曝气时间较长的AO MBR及厌氧未引入缺氧段的A²O MBR, 有助于形成紧密而细小的颗粒. 而粒径大且结构松散的污泥耗氧速率较高; 充分的好氧时间则有利于耗氧速率的提高. 好氧吸磷速率受运行方式影响, 且与耗氧速率呈正相关性. 适宜的厌氧阶段时长有助于提高污泥厌氧释磷能力; 缺氧段及其位置的设置对反硝化除磷菌的选择与富集影响较大. 本试验中A²O MBR中反硝化聚磷菌(DPAOs)比例为40.6%, 分别比AO及AOA MBR中提高了0.57和0.34倍. 膜反应器中膜污染主要由膜表面滤饼层导致. 曝气时间只是控制膜污染的因素之一, 膜污染随污泥平均粒径的减小而加重, 运行方式对膜污染也起着不可忽视的作用.

关键词: 脱氮除磷; 膜生物反应器; 反硝化聚磷菌; 污泥特性; 膜污染

中图分类号: X703 **文献标志码:** A

0 引言

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污水处理界的关注^[1]. 而将SBR与膜法相结合形成的序批式膜生物反应器(SBMBR)除了具有一般MBR的优点以外, 还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.

作者在进行SBMBR脱氮除磷性能研究中发现, SBMBR具有很好的同时脱氮除磷效果, 而在不同运行模式下, SBMBR对污染物质的去除表现出不同的特性, 尤其在反硝化除磷性能方面, 呈现出明显的差异^[2,3]. 因此有必要对不同运行模式下SBMBR内除磷污泥的特性做进一步研究.

1 试验部分

1.1 试验装置

AO MBR分别与AOA MBR、A²O MBR并联运行做对比试验研究, 试验装置如图1所示. 反

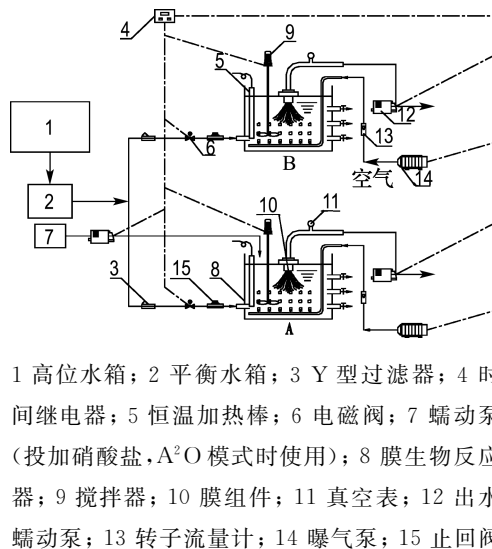


图1 试验装置流程图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental process

应器材质均为有机玻璃, 有效容积10 L. 高位水箱有效容积0.1 m³, 平衡水箱有效容积0.01 m³, 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.装置运行周期均为 2 h,如图 2 所示.反应器均在厌氧阶段的前 10 min 内完成进水,AO 及 A²O 模式为好氧阶段出水,AOA 模式为缺氧阶段出水;每周期的进水量均为 1.67 L,从而控制水力停留时间 t_{hr} 为 12 h,A²O MBR 的缺氧环境通过蠕动泵在厌氧末外加硝酸盐实现,每周期进水碳源与硝酸盐投加量的比(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 0.15 m²,膜孔径 0.1 μm,操作参数见表 1.

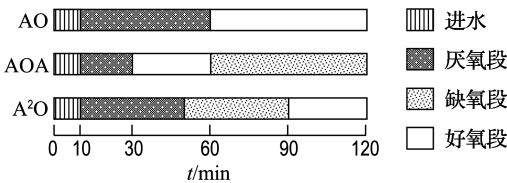


图 2 装置运行周期图

Fig. 2 The operation periods of the three experiment reactors

表 1 SBMBR 系统操作参数

Tab. 1 Operation parameters of the three SBMBRs

运行模式	有效容积/L	t_{hr}/h	t_{sr}/d	曝气量/(L·h ⁻¹)	温度/℃	膜通量/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	(COD/NO ₃ ⁻) _{add}
AO	10	12	15	150	25±1	11.11	—
AOA	10	12	15	150	25±1	11.11	—
A ² O	10	12	15	150	25±1	22.22	6.25

1.2 接种污泥及试验水质

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.在一个反应器中驯化培养后,分至各反应器,使其污泥浓度均为 2 g/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. $\rho(\text{COD})=280\sim460\text{ mg/L}$; $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})=19\sim28\text{ mg/L}$; $\rho(\text{TP})=6.5\sim10\text{ mg/L}$; $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})=0.002\text{ mg/L}$; $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})=0.05\text{ mg/L}$; $\rho(\text{COD})$: $\rho(\text{N})$: $\rho(\text{TP})$ 约为 350:25:9.

1.3 分析方法

采用标准方法分析 COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP、悬浮固体浓度(MLSS)、混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)^[4],其中上清液为泥水混合液经 0.45 μm 膜的过滤液混合液.溶解氧(DO)浓度采用溶解氧分析仪(YSI,USA)测定.

活性污泥颗粒粒径分布采用激光粒度仪(M400L,Lasentec,Redmond,USA)分析测定,测量范围为 1~1 000 μm.由于测定时需将一定量的污泥从系统中取出,测定时的水力条件无法保证与反应器内完全一致.但取样至测定的时间很短,可以忽略粒径在此过程中的变化.

分析取样位置:水质指标检测以每周期膜出

水的混合液为对象;污泥特性分析均在对应的厌氧、缺氧或好氧末取样分析.

1.4 DPAO 比例的计算

按照反硝化聚磷菌(DPAO)在缺氧及好氧条件下具有相同吸磷速率的假设^[5],根据公式 $R_{\text{DPAO}}=q_{\text{an}}/q_{\text{ae}}$ 计算本试验 3 个系统内污泥中 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).

2 结果与讨论

3 个系统均表现出良好的营养物去除性能.通过对试验数据统计分析得出:三者 COD 的平均去除率均在 95%以上,且有 85%以上的 COD 是在厌氧段被去除.AOA 和 A²O MBR 虽然曝气时间为 AO MBR 的一半,但仍保证了良好的氨氮去除效果.3 个系统出水氨氮均可保持在 1 mg/L 以下,平均去除率在 95%以上.SBMBRs 对 TP 也有较好的去除效果,均呈现出明显的厌氧释磷、好/缺氧吸磷的变化趋势,AO、AOA 和 A²O MBR 的厌氧释磷率分别为 25%、53%和 107%;总平均吸磷率分别为 84%、83%和 82%.当系统稳定运行时,对其污泥特性做了如下分析比较.

2.1 污泥粒径分布

3 种运行模式下的 SBMBR 系统的曝气强度

相同,但三者系统内的污泥絮体粒径却存在差异.由图 3 可以看出,AO MBR 中曝气时间最长,相

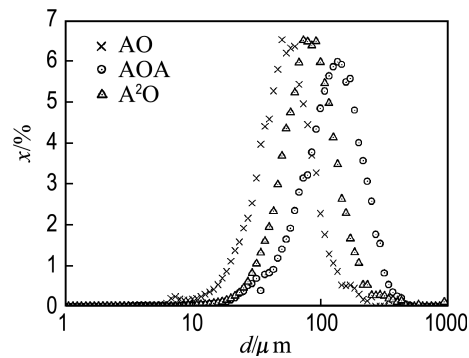


图 3 三系统内污泥粒径分布图

Fig. 3 The particle diameter distribution in the three experiment reactors

应的粒径最小,平均粒径为 59.678 μm .分析原因是由于长时间的曝气提供了充足的好氧环境,更利于污泥形成紧密而细小的菌胶团. AOA 和 A^2O 模式下曝气时间长短一致,但粒径大小却也表现出明显的差异,平均粒径分别为 135.256 μm 和 92.240 μm .导致该结果的原因,分析为运行方

式的不同导致了两种运行模式下系统内生物的代谢活动及菌胶团组成存在差异, A^2O 模式下,由于在厌氧末引入缺氧段,避免了厌氧末残留的少量溶解水解产物(COD)为丝状菌生长创造机会,有助于污泥絮体形成紧密而稳定的菌胶团颗粒.

2.2 污泥比耗氧速率

通过试验观测发现,在相同曝气强度下,不同运行模式中,污泥比耗氧速率 R_{sou} 表现出明显的差异(表 2):AO MBR 中 R_{sou} 最大,为 25.87 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$;AOA 及 A^2O 模式下 R_{sou} 分别为 18.54 和 16.02 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$.分析认为:AO MBR 的运行周期中好氧时间最长,使好氧生物能够得到充分生长,微生物的代谢活性也较强,因而其 R_{sou} 最大;而好氧时长相同的 AOA 和 A^2O 系统中 R_{sou} 则受颗粒大小的影响.粒径较大的 AOA 污泥,颗粒相对松散,使得氧进入污泥颗粒内部需要克服的传质阻力相对较小,可使更多的微生物与氧直接接触,提高对氧的利用速率,从而导致系统中氧的传质速率较高.

表 2 三种运行模式下 SBMBR 系统除磷污泥的 R_{sou} 、 $R_{\text{spr},30}$ 及 $R_{\text{spu},30}$

Tab. 2 R_{sou} , $R_{\text{spr},30}$ and $R_{\text{spu},30}$ of the three SBMBRs operated in different modes obtained in the batch test

运行模式	$R_{\text{sou}}/[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}]$	$R_{\text{spr},30}/[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}]$	$R_{\text{spu},30}/[\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}]$	DPAO 比例/%
AO	25.87(1.29)	17.52(0.70)	32.40(1.30)	25.9
AOA	18.54(0.93)	20.62(1.03)	29.52(1.48)	30.2
A^2O	16.02(0.80)	25.84(1.29)	22.69(1.36)	40.6

注:括号内为标准偏差

2.3 比释/吸磷速率($R_{\text{spr}}/R_{\text{spu}}$)及 DPAO 比例

通过批试验考察了 3 个系统中污泥的前 30 min 厌氧 $R_{\text{spr},30}$ 及好氧 $R_{\text{spu},30}$,并由试验测定了三系统 DPAO 的比例,测定结果如表 2 所示. AO 系统厌氧时间最长,但其内污泥的 $R_{\text{spr},30}$ 却最低,为 17.52 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$;AOA 系统厌氧段时间减半, $R_{\text{spr},30}$ 却有所提高,为 20.62 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$;而厌氧段时长居中的 A^2O 模式下的 $R_{\text{spr},30}$ 最高,为 25.84 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$.基于本工艺试验,AO 模式污泥在进入厌氧区时系统残留的硝酸盐量最多(平均为 1.6 mg/L),这将与 PAO 释磷形成竞争,从而影响了污泥的厌氧释磷性能,且相对过长的厌氧时间导致的二次释磷亦不利于 PAO 释磷能力的提高;而 A^2O 模式中进入厌氧段时系统所残留的硝态氮平均浓度为 1.3 mg/L ,与 AOA 模

式相近,但其厌氧段长度相对 AOA 系统充裕,保证了 PAO 在厌氧段的充分释磷,从而使其释磷能力得到强化.因此,厌氧时间过长或过短对污泥的厌氧释磷均存在影响,控制适宜的厌氧阶段时长是提高污泥厌氧释磷能力的措施之一.

对于 $R_{\text{spu},30}$,好氧段时间最长的 AO 系统的污泥最高,为 32.40 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,AOA 与 A^2O MBR 好氧段时长相同,而 $R_{\text{spu},30}$ 值却相差很多,后者比前者低 23.14%,这一结果与 R_{sou} 结论相似.分析原因主要还是运行方式不同而致. AO 及 AOA 系统聚磷污泥均是在充分释磷后进入好氧段,且此时混合体系中磷的浓度也都相对最高,“饥饿”的 PAO 则会快速而大量吸磷;另外,AO 系统由于污泥 R_{sou} 较高,其利用氧为电子受体的能力相对较强,加之充分的好氧吸磷时间,从而其

$R_{\text{spu},30}$ 值最高,而 A^2O MBR 的好氧段设置在缺氧段之后,污泥首先进行了缺氧吸磷,进入好氧段的污泥已脱离了“饥饿”状态,且混合液体系中磷含量也降低了很多,从而其好氧吸磷能力未能得到最大限度的强化。

试验测定在 AO、AOA 和 A^2O MBR 中,反硝化吸磷量占总吸磷量的比例分别为 25.9%、30.2% 和 40.6%,AOA 和 A^2O MBR 分别比 AO MBR 提高了 17% 和 57%。该结果表明,在增加缺氧段后,有助于对反硝化除磷菌的选择与富集。 A^2O MBR 是在厌氧末有机物已消耗殆尽时投加硝酸盐引入缺氧段,更有利于 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 得到更好的富集。而 AOA MBR 因厌氧后好氧吸磷先发生,消耗了细胞体内贮藏的 PHB(聚 β -强丁酸盐)而影响到后续的反硝化吸磷能力,从而使得 DPAO 富集量偏少。

2.4 污泥含磷率

试验同时对各阶段末污泥含磷率进行了测定,来进一步分析不同运行模式对污泥磷代谢的影响(图 4)。试验得出,AO、AOA 及 A^2O MBR 3 种模式下充分吸磷后(饱和状态)污泥含磷率依次升高,分别为 34.38、38.21 和 45.46 mg/g,表明三系统的除磷能力依次提高。污泥除磷能力由其吸/释磷能力共同决定。从图 4 可以看出,3 个 SBMBRs 中厌氧末的污泥含磷率亦依次提高,但其占充分吸磷后总含磷率的比例却呈下降趋势,分别为 89.27%、87.78% 和 85.75%,表明厌氧释磷能力依次升高,这与 $R_{\text{spr},30}$ 试验结论相符。而三系统污泥的总吸磷量则是依次增加的,分别占污泥饱和含磷量的 10.73%、12.22% 和 14.25%,即三者总的吸磷能力依次增加。经过好氧吸磷,污泥含磷率分别比上一阶段末提高了 12.02%、11.69% 和 11.34%,再次证明了三系统中污泥比好氧吸磷能力依次降低(表 2)。AOA 及 A^2O 系统中的缺氧段同样发挥了积极的吸磷作用,但缺氧段位置的设置对缺氧吸磷能力有着重要影响。从图 4 可以看出, A^2O MBR 中缺氧段的吸磷率比 AOA 系统中提高了 1.47 倍,表明厌氧末引入缺氧段更适宜对反硝化吸磷作用的强化。呈现这一结果的最终因素,仍源于运行模式的影响。AOA 模式由于在好氧末增加了缺氧段,改善了

AO 模式下因好氧末硝态氮残留进入厌氧段而限制厌氧释磷的弊端,强化了除磷效果; A^2O MBR 不仅缺氧段位置的设置有利于反硝化除磷菌的生长,其后续的好氧段对充分除磷也提供了保障。

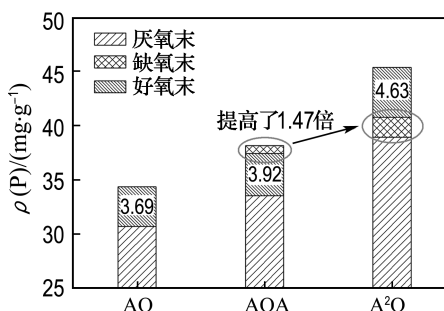


图 4 三种运行模式下各阶段末的污泥含磷率

Fig. 4 Sludge phosphorus content at the end of each stage in three SBMBRs

2.5 反硝化除磷性能

基于上述结果,本文对污泥的反硝化吸磷能力做了对比试验分析。试验得出,除磷污泥在缺氧环境下,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 5)。经线性回归可以看出,AOA 和 A^2O MBR 中污泥的吸磷量与硝酸盐消耗量的比值(1.200 6 和 1.460 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 0.11、0.13 和 0.10 mol/mol,即 A^2O 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更好的强化,从而使其反硝化吸磷能力相对较强。

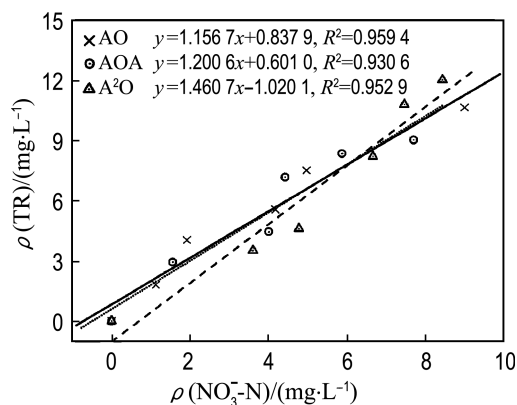


图 5 磷的吸收量与 NO_3^- -N 消耗量间的关系

Fig. 5 The relationship between phosphorus removal and NO_3^- -N consumption

2.6 膜污染情况比较

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 t_{hr} 一定的条件下,过膜压力(p_m)将随着膜污染的加剧而增大.膜过滤过程中膜污染一般用膜污染阻力来表征,根据达西定律

$$J = \Delta p / \mu R_t; R_t = R_m + R_f = R_m + R_c + R_p$$

式中: J 为膜通量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Δp 为膜两侧的压力差, Pa ; μ 为透过液动力学黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; R_t 为总过滤阻力, m^{-1} ; R_m 为膜固有阻力, m^{-1} ; R_f 为膜污染阻力, m^{-1} ; R_c 为滤饼层阻力, m^{-1} ; R_p 为膜孔堵塞和不可逆污染引起的阻力, m^{-1} .

图6为膜污染阻力 R_f 随运行时间的变化曲线.运行初期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, R_f 基本保持不变;随着运行时间的加长,膜表面滤饼层也逐渐形成,这期间 p_m 上升较快,出现了 R_f 的迅速上升;当形成稳定的滤饼层后, p_m 变化渐缓, R_f 呈平缓变化.

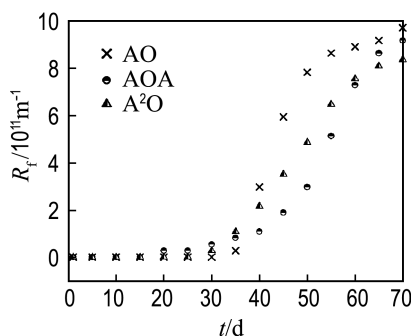


图6 膜污染阻力随运行时间的变化

Fig. 6 The variation of membrane fouling resistances during the operation time

另外从图6还可看出,在 R_f 快速上升阶段, AO MBR 的 R_f 上升速率最快, A^2O MBR 则最为平缓, AOA MBR 中 R_f 最先呈现上升趋势,但其快速上升的拐点却最迟出现.表明 AOA 及 A^2O 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:污泥絮体粒径越大,其形成的滤饼层具有较大的孔隙,滤饼阻力较小.而絮体颗粒变小会使所形成滤饼层的孔隙变小,增大了滤饼层过滤阻力.同时,污泥平均粒径小说明在污泥混合液中存在大量的小颗粒污泥和胶体粒

子,而这部分小粒径颗粒较容易在膜表面沉积.因此,污泥平均粒径越小,膜污染越严重^[6].另外,由于出水蠕动泵抽吸时间减少,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,从而减轻了膜污染.

3 结 论

运行模式的不同导致 SBMBR 系统内的污泥菌群及其代谢性能的差异,从而使 SBMBR 污泥的特性有如下不同的表现:

(1)污泥粒径的不同.长时间的曝气,有助于形成紧密而细小的颗粒;厌氧未引入缺氧段,避免了厌氧末残留的少量溶解水解产物(COD)为丝状菌生长创造机会,亦有助于紧密而稳定的菌胶团颗粒污泥絮体的形成.

(2)污泥耗氧速率与好氧时长有关,同时也受污泥颗粒大小及紧密程度的影响.好氧时间长,有利于好氧生物的充分生长,对氧的消耗速率也大;在好氧时长相同的条件下,污泥粒径大、结构松散的污泥,氧的传质阻力小,耗氧速率大.

(3)污泥吸/释磷能力受运行方式影响,好氧吸磷速率与耗氧速率呈正相关性.适宜的厌氧阶段时长有助于提高污泥厌氧释磷能力.本试验中, AO MBR 好氧吸磷能力最强, A^2O MBR 厌氧释磷能力最强.

(4)缺氧段的存在是富集反硝化除磷菌的必要条件.而在厌氧段后引入缺氧段,更有助于对反硝化除磷菌的选择与富集, A^2O MBR 中 DPAO 比例为 40.6%, 分别比 AO 及 AOA MBR 中提高了 0.57 和 0.34 倍.

(5)本试验过程中, AOA 及 A^2O MBR 中好氧时间的减少,并没有加重膜污染,相反却有延缓的趋势.

参考文献:

- [1] ADHAM S, GAGLIARDO P, BOULOS L, *et al.* Feasibility of the membrane bioreactor process for water reclamation [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(10):203-209
- [2] 肖景霓,张捍民,代文臣,等.序批式膜生物反应器同时脱氮除磷的比较研究[J].*环境科学*,2006,

- 27(11):2233-2238
- [3] 张挥民,成英俊,肖景霓,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
(ZHANG Han-min, CHENG Ying-jun, XIAO Jing-ni, *et al.* Study of efficiency of sequencing batch membrane bioreactor in nitrogen and phosphorus removal [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2005, 45(1):22-25)
- [4] 国家环境保护总局水和废水检测分析方法编委会. 水和废水检测分析方法:4版[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002
- [5] WACHTMEISTER A, KUBA T, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Water Research*, 1997, 31(3):471-478
- [6] SHIMIZU Y, OKUNO Y I, URYU K, *et al.* Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. *Water Research*, 1996, 30(10):2385-2392

Sludge characteristics of sequencing batch membrane bioreactors operated in different modes

XIAO Jing-ni¹, ZHANG Han-min^{*1}, YANG Feng-lin¹, ZHANG Jie¹, DAI Wen-chen²

(1. School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Dalian MEC Environmental Technology & Engineering Co. Ltd., Dalian 116001, China)

Abstract: The sludge characteristics of sequencing batch membrane bioreactor(SBMBR) were studied in three different operation modes (AO, anaerobic/aerobic; AOA, anaerobic/aerobic/anoxic and A²O, anaerobic/anoxic/aerobic mode). The results show that operation mode has an obviously effect on particle size. It is beneficial to forming tighter and smaller particle size in AO MBR with longer aeration time and A²O MBR with anoxic phase introduced at the end of anaerobic stage. Higher specific oxygen uptake rate (R_{so}) can be observed for sludge with larger particle size and loose structure. Longer aeration time is also beneficial to improving the value of R_{so} . A suitable length of anaeration time will help to improve the release phosphorus ability of the sludge during anaerobic zone. The choice and enrichment of denitrifying phosphorus accumulating organisms (DPAOs) was greatly influenced by anoxic stage and its location set. In this study, the DPAOs ratio in A²O MBR is 40.6% which is 0.57 and 0.34 times higher than that in AO and AOA MBR, respectively. Membrane fouling is mainly caused by the surface layer cake. Aeration time, sludge particle size and operation mode all play an unignored role for membrane fouling.

Key words: nitrogen and phosphorus removal; membrane bioreactor (MBR); denitrifying phosphorus accumulating organisms (DPAOs); sludge characteristics; membrane fouling