

序批式膜生物反应器中反硝化聚磷菌的富集

代文臣¹, 张捍民^{1*}, 肖景霓¹, 杨凤林¹, 张兴文¹, 张新宇²

(1. 大连理工大学环境与生命学院, 大连 116024; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 采用序批式膜生物反应器(SBMBR)对以硝酸盐作为电子受体的反硝化聚磷菌的富集进行了研究. 结果表明, 经过厌氧-好氧和厌氧-缺氧-好氧 2 个阶段的富集, 反硝化聚磷菌占全部聚磷菌的比例从 19.4% 上升到 69.6%, 每周期缺氧段投加硝酸盐氮 120 mg 时, SBMBR 系统运行最为稳定. 稳定运行的 SBMBR 反硝化强化除磷体系具有良好的强化除磷和反硝化脱氮性能, 缺氧段脱氮和除磷效率分别达到 100% 和 84%, 膜出水总磷浓度平均低于 0.5 mg/L, 系统除磷率达到 96.1%. 此外, 氨氮去除率保持在 92.2%, 氨氮被去除的同时并没有发现亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的明显积累.

关键词: 序批式膜生物反应器; 反硝化除磷; 反硝化聚磷菌; 聚磷菌; 硝酸盐

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)03-0517-05

Enrichment of Denitrifying Phosphate Accumulating Organisms in Sequencing Batch Membrane Bioreactors

DAI Wen-chen¹, ZHANG Han-min¹, XIAO Jing-ni¹, YANG Feng-lin¹, ZHANG Xing-wen¹, ZHANG Xin-yu²

(1. School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The enrichment and characteristics of denitrifying phosphate accumulating organisms (DPAO), which are capable of utilizing nitrate as electron acceptor, was investigated in a laboratory-scale sequencing batch membrane bioreactors (SBMBR). The results demonstrated that the proportion of DPAO increased from 19.4% to 69.6% of total phosphate accumulating organisms after anaerobic-aerobic and anaerobic-anoxic-aerobic phases. SBMBR system could operate steadily when 120 mg nitrate was added continuously during the anoxic phase every period. Simultaneous phosphate uptake and biological denitrification with good performance could be obtained in SBMBR operated in steady-state. Nitrate and phosphorus removal efficiency were above 100% and 84% respectively during anoxic phase, however, the effluent TP concentration was low than 0.5 mg/L, the total phosphorus removal efficiency was 96.1%. Furthermore, the ammonium nitrogen removal efficiency of SBMBR could be maintained at 92.2%, and the cumulation of nitrite and nitrate was not observed clearly.

Key words: sequencing batch membrane bioreactor (SBMBR); denitrifying phosphorus removal; denitrifying phosphate accumulating organisms (DPAO); phosphate accumulating organisms (PAO); nitrate

反硝化除磷工艺是被公认的可持续污水处理工艺. 在缺氧条件下, 反硝化聚磷菌(DPAO)能够以硝酸盐氮取代氧作为电子受体, 通过代谢作用同时完成过量吸磷和反硝化过程而达到脱氮除磷的双重目的. 比较传统的专性好氧聚磷菌除磷工艺, 反硝化聚磷菌能分别节省约 50% COD 和 30% 氧的消耗量, 相应减少剩余污泥量 50%^[1~4]; 还可避免 COD 单一氧化至 CO₂, 使释放到大气 CO₂ 量明显降低. 反硝化除磷工艺首先要解决的问题是反硝化聚磷菌的富集. 大多数情况下, 研究者们采用 SBR 反应器对反硝化聚磷菌进行富集, 反硝化聚磷菌占全部聚磷菌的比例从低于 15%, 提高到 60% 以上^[5~7]. 但是长世代周期的硝化菌与短世代周期的聚磷菌在 SBR 单一体系内存在泥龄矛盾, 而且由于好氧时段的减少会导致丝状菌的大量繁殖, 从而影响到固液的有效分离^[8].

本试验采用序批式膜生物反应器(SBMBR)对反

硝化聚磷菌的富集进行了研究, 一方面由于膜的高效截流作用使硝化菌与反硝化聚磷菌共生于同一系统, 从而缓解了传统脱氮除磷工艺中二者的泥龄矛盾; 另一方面, 膜过滤代替二沉池进行固液分离, 不仅操作简单而且出水安全可靠^[9]. 试验还对稳定状态下 SBMBR 的反硝化除磷性能进行了考察, 以为膜生物反应器反硝化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

如图 1 所示, 试验采用 1 套 SBMBR, 反应器材质为有机玻璃, 有效容积 10 L. 高位水箱有效容积

收稿日期: 2006-04-01; 修订日期: 2006-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578024)

作者简介: 代文臣(1979~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为膜生物反应器在废水处理中的应用, E-mail: daiyi1636@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: zhhanmin@126.com

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.反应器在厌氧阶段的前 10 min 内完成进水,好氧阶段出水.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,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.系统缺氧环境通过蠕动泵在厌氧末外加硝酸盐实现,投加方式采用流加 1 h.

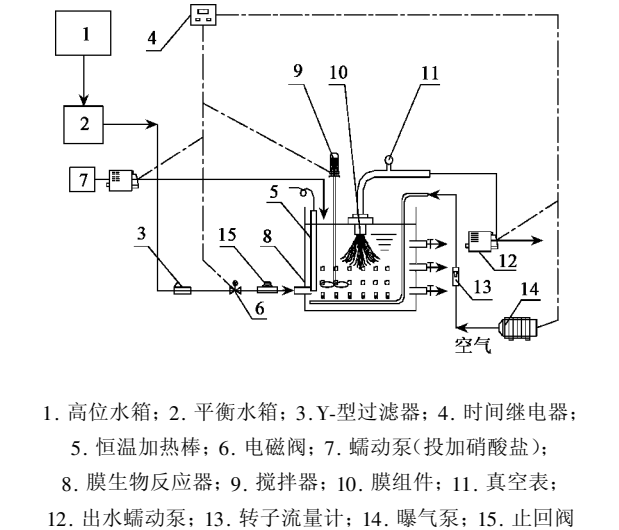


图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental process

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.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,同时投加 NaHCO₃ 来控制进水 pH 值在 6.8~8.0 之间,试验过程中改变进水的 COD 和 TP 含量,并随运行周期(T)改变缺氧段 NO₃⁻-N 投加量,具体变化见表 1.

1.3 试验方法

本研究中对反硝化聚磷菌的富集分为 2 个阶段,操作参数作相应改变,见表 2.交换比 f_B 含义为 SBMBR 每 1 周期中交换的体积与反应器有效容积之比.第 1 阶段使 SBMBR 在厌氧-好氧方式下运行,目的是使系统在此条件下首先具有高效的好氧除磷性能,使聚磷菌(PAO)在活性污泥中占有较多的数

量.该阶段污泥浓度为 4.0 g/L,污泥龄控制在 20 d 左右,好氧段出水 1 h,膜通量控制在 1.67 L/h,共运行 80 个周期.

表 1 进水浓度变化及缺氧段 NO₃⁻-N 投加量变化

试验时间 /周期	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg
1~32	400	30	3	0
33~80	400	30	9	0
81~120	300	30	9	70
121~160	300	30	9	100
161~240	300	30	9	120
241~280	300	30	9	150
281~320	300	30	9	200

表 2 操作参数变化¹⁾

Table 2 Variation of operation parameter

操作参数	第 1 阶段(1~80 周期)	第 2 阶段(81~320 周期)
SRT/d	20	15
HRT/h	12	18
膜通量/L·h ⁻¹	1.67	2.5
f _B /%	16.7	16.7
周期变化/h	1(an)+1(ae)	1(an)+1.5(anox)+0.5(ae)

1)an 表示厌氧段,ae 表示好氧段,anox 表示缺氧段

第 2 阶段采用厌氧-缺氧-好氧的运行方式,在厌氧释磷结束后通过蠕动泵流加硝酸盐 1 h,逐步引入缺氧段.随着系统的稳定运行,硝酸盐氮投加量从最初的 70 mg/周期分别增加到 100 mg/周期、120 mg/周期、150 mg/周期和 200 mg/周期,对反硝化聚磷菌进行选择和富集.该阶段污泥浓度为 3.0 g/L,为了更有利于反硝化聚磷菌的生长,污泥龄控制在 15 d,好氧段出水 0.5 h,膜通量控制在 3.33 L/h,每周出水水量与第 1 阶段相同,即 1.67 L,共运行 240 周期.

1.4 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、NO₃⁻-N 和 TP 等^[11],其中 SBMBR 1 个周期内膜出水收集在烧杯中,混合水样为其出水水样,各阶段末上清液为泥水混合液经 0.45 μm 膜的过滤液.

2 结果与讨论

2.1 DPAO 在 SBMBR 系统中的富集

活性污泥接种初期并没有表现出强化除磷特性,经过第 1 阶段 80 周期的运行后,聚磷菌在序批式膜生物反应器中的数量有所增加.从图 2 可以看出,初始进水总磷浓度为 3 mg/L,进入反应器内稀释

至 10 L,第 1 周期厌氧末上清液总磷浓度仅为 0.51 mg/L,基本没有发生释磷,好氧段膜出水总磷浓度为 0.39 mg/L,总磷去除率只有 23.5%,系统还不具备除磷特性,第 16 周期厌氧末上清液总磷浓度升至 4.31 mg/L,而膜出水总磷浓度与厌氧末相比变化不大,说明前期运行可能出现总磷累积而并非正常释磷,换掉上清液 3 L,恢复运行;到第 32 周期,厌氧末上清液总磷浓度为 1.76 mg/L,厌氧段释磷量为 1.2 mg/L,同时膜出水总磷浓度为 0.86 mg/L,好氧段总磷去除率为 51.1%,在此基础上从第 33 周期提高进水总磷浓度至 9 mg/L,到第 80 周期结束时,厌氧段释磷量达到 3.92 mg/L,膜出水总磷浓度仅为 0.41 mg/L,去除率提高至 89.5%,系统具备了一定的强化除磷性能,这主要归因于随着系统正常运行和总磷浓度的增加,膜生物反应器中的聚磷菌逐步得到富集,在好氧条件下,以游离氧为电子受体,氧化厌氧期间由挥发性脂肪酸(VFAs)同化合成的贮能物质聚 β 羟丁酸(PHB),利用该反应产生的能量,过量吸磷.

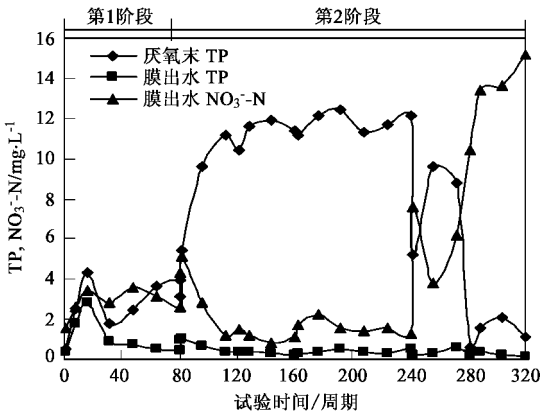


图 2 富集过程中厌氧末 TP、膜出水 TP 及 NO₃⁻-N 浓度变化

Fig. 2 Variations of TP, NO₃⁻-N concentrations in the effluent and TP concentrations at the end of the anaerobic phase

从第 81 周期进入富集 DPAO 的第 2 阶段,为了避免碳源在厌氧段的不完全降解,进水 COD 浓度从 400 mg/L降低为 300 mg/L,同时在缺氧段向系统流加硝酸盐氮 1 h,在厌氧-缺氧-好氧的序批式运行模式下,系统反硝化脱氮除磷性能逐步增强,在最为稳定的 121 周期~240 周期,厌氧末上清液总磷浓度稳定在 11.6 mg/L,厌氧释磷量平均为 8.1 mg/L,膜出水总磷平均浓度仅为 0.37 mg/L.这是由于缺氧吸磷得到明显增强,好氧阶段初期出水的含磷量就已经远小于厌氧末,说明活性污泥中聚磷菌数量提高的同

时,反硝化聚磷菌在聚磷菌中的比例明显增加.

值得注意的是,第 242 和 282 周期的厌氧末出水总磷浓度分别为 5.2 mg/L和 1.2 mg/L,其释磷量很低,而膜出水的硝酸盐氮均有不同程度地积累,分别为 7.6 mg/L和 10.4 mg/L,这主要是因为试验过程中分别在第 241 和 281 周期提高了缺氧段硝酸盐氮投加量,反硝化聚磷菌不能完全利用系统中的硝酸盐氮,硝酸盐氮投加过量直接导致其在好氧末大量积累,并进入下一周期厌氧段,由于反硝化菌利用硝态氮作为最终电子受体进行厌氧呼吸能获得更多的能量,在竞争中有优势,造成有机碳源不能转化为 VFAs,抑制了聚磷菌的释磷和 PHB 的合成,使该阶段的除磷效果降低.图 3 中可以看出,在第 242 和 282 周期缺氧吸磷量和缺氧反硝化量均有很大下降,这一现象支持了硝酸盐与 COD 同时存在将对反硝化除磷带来不利影响的观点.与之相比,第 122 和 162 周期在硝酸盐氮投加量提高后,系统显示出良好的稳定性,释磷和吸磷没有受到影响.说明硝酸盐氮投加量在一定范围内逐步增加会诱导反硝化聚磷菌的生长,提高其在聚磷菌中的数量,从而使硝酸盐氮在缺氧段的利用率提高,避免了过量硝酸盐残留在下一周期影响厌氧释磷.

此外,第 282 周期厌氧末上清液总磷浓度 0.63 mg/L与进水后上清液 0.51 mg/L的总磷浓度相差无几,部分归因于厌氧段硝酸盐氮对释磷的抑制,另一方面原因可能是碳源与硝酸盐同时存在,反硝化聚磷菌会利用部分碳源和硝酸盐氮在厌氧条件下进行同时释磷和吸磷,这与 You 等^[12]在缺氧段投加碳源和硝酸盐后仍观察到反硝化聚磷菌同时释磷和吸磷的现象一致.

图 3 反映了 SBMBR 系统在 DPAO 富集的第 2 阶段,缺氧条件下以硝酸盐氮作为电子受体所吸收的总磷和所消耗的硝酸盐氮的变化情况.在开始投加硝酸盐氮(70 mg/周期)的第 81 周期,就已经观察到明显的反硝化吸磷现象,有 1.34 mg/L的总磷被吸收,同时有 28mg 硝酸盐氮被去除.这也说明了 DPAO 本身就存在于膜生物反应器厌氧-好氧交替运行的强化生物除磷体系中.第 2 阶段前 160 个周期的富集过程中,缺氧段总磷吸收量随硝酸盐氮消耗量的增加而逐步上升,在第 160 周期(NO₃⁻-N 100 mg/周期)和 240 周期(NO₃⁻-N 120 mg/周期),硝酸盐氮消耗量相应比第 120 周期和 160 周期增加 30 mg 和 20 mg,缺氧吸磷量相应上升 2.6 mg/L和 1.4 mg/L.在第 240 周期,单位硝酸盐氮反硝化吸磷达到 0.77 mg/mg,该数值接近于

文献[5]中报道的 0.80 mg/mg.

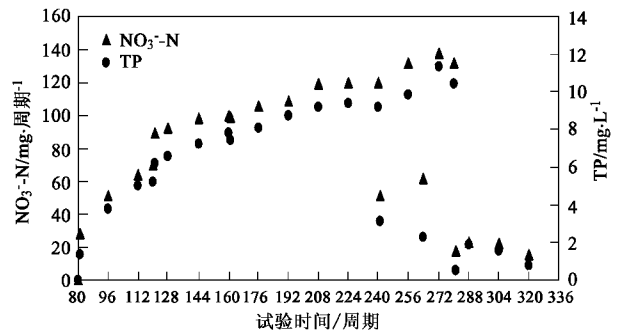


图 3 缺氧段 TP 的吸收量和 NO₃⁻-N 的消耗量变化情况

Fig.3 Variation of TP removal and NO₃⁻-N consumption during the anoxic phase

在 241 周期之后,缺氧吸磷和硝酸盐氮消耗均呈现明显下降趋势,第 281 周期缺氧吸磷仅为 0.51 mg/L,硝酸盐氮消耗 18 mg,远低于投加量,即缺氧段积累硝酸盐氮量为 182 mg,每 1 周期硝酸盐氮的大量积累都会引起下一周期常规反硝化菌和反硝化聚磷菌对碳源的竞争,从而给系统除磷带来不利影响.由此也说明,当硝酸盐氮投加量为 100 mg/周期和 150 mg/周期时,分别导致缺氧段硝酸盐氮不足和累积,而当硝酸盐氮投加量为 120 mg/周期时,系统最为稳定.

Kern-Jespersen 把聚磷菌划分为 2 类:一类仅可以利用氧作为电子受体,而另一类的电子受体可以是氧,也可以是硝酸盐,以硝酸盐作为电子受体的反硝化聚磷菌是聚磷菌中的一部分^[4],按照 DPAO 在缺氧及好氧条件下具有相同吸磷速率的假设^[7],根据公式: $R_{DPAO} = q_{an}/q_{ae}$ 计算本试验所采用的 SBMBR 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 DPAO 缺氧吸磷速率, mg/(g·h); q_{ae} 为 PAO 好氧吸磷速率, mg/(g·h).图 4 反映了富集过程中 DPAO 占总 PAO 的比例和相应缺氧、好氧吸磷速率($SPUR_{30}$)随硝酸盐氮投加量的变化情况,在第 1 阶段富集后期的批试验中,好氧吸磷速率为 33 mg/(g·h),说明反应器已具备良好的好氧吸磷性能,而对应的缺氧吸磷速率仅为 6.4 mg/(g·h),一方面说明系统还没有很好的反硝化吸磷性能,另一方面也说明了 DPAO 在厌氧-好氧运行模式的序批式膜生物反应器中已经存在,其比例为 19.4%.

在进入第 2 阶段以后,随着硝酸盐氮投加量的不断增加,DPAO 比例也在不断提高,硝酸盐氮投加

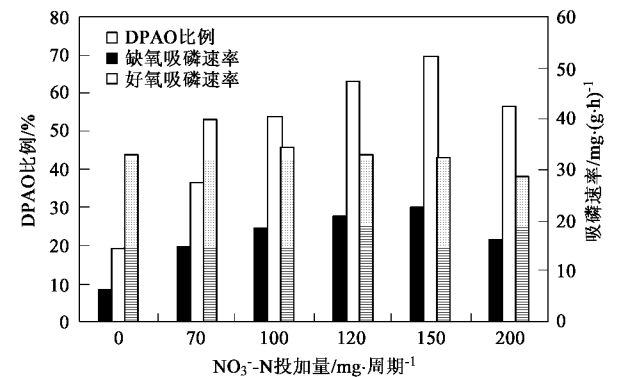


图 4 DPAO 比例与吸磷速率变化

Fig.4 Variation of DPAO proportion and specific P-uptake rates

150 mg/周期时,DPAO 比例达到最大值 69.6%,相应缺氧吸磷速率提高到 22.4 mg/(g·h),由此表明,硝酸盐氮浓度的增加能够促使 DPAO 比例上升,从而提高了缺氧吸磷速率.同时,好氧吸磷速率为 32.2 mg/(g·h),说明经过缺氧驯化的活性污泥在好氧条件下仍然有较好的吸磷性能,这也为聚磷菌能够在缺氧段结束后的好氧段继续吸磷提供了试验依据,从而保证了序批式膜生物反应器的强化除磷性能.值得注意的是好氧吸磷速率在投加硝酸盐氮 200 mg/周期之前的富集过程中,最大值为 39.8 mg/(g·h),厌氧-缺氧-好氧的运行模式并没有对好氧吸磷带来不利影响,Zeng 等假设为 DPAO 在缺氧段利用投加的硝酸盐氮作为电子受体进行反硝化吸磷的同时,好氧聚磷菌(DN-DPAO)由于缺少利用硝酸盐氮作为电子受体时所必须的酶而处于停滞期,到了好氧阶段 DPAO 和 DN-DPAO 都能立刻利用 O₂ 快速吸磷,聚磷菌仍会被富集^[7].由此也说明厌氧-缺氧-好氧的运行模式更有利于提高系统的强化除磷性能.

投加硝酸盐氮 200 mg/周期时,DPAO 比例反而下降到 56.6%,相应缺氧吸磷速率和好氧吸磷速率分别降至 16.2 mg/(g·h)和 28.6 mg/(g·h),由此表明,较高的硝酸盐氮投加量会抑制反应器的反硝化脱氮除磷性能,严重影响 DPAO 在序批式膜生物反应器中的富集.

2.2 SBMBR 反硝化脱氮除磷性能

随着硝酸盐氮投加量的不断增加,SBMBR 体系中反硝化聚磷菌达到了一定数量,在第 160 周期以后,系统进入稳定状态.笔者在第 228 周期进行了周期试验,用来测定 SBMBR 在 1 个循环周期内出水水质的变化情况.周期试验始于厌氧段开始前 20 min,

每间隔一定时间取样,至好氧阶段结束后 20 min 为止,图 5 中的“0”点即为厌氧阶段开始时刻,缺/厌氧阶段的出水水样为手动开启出水泵接取,取得一定数量水样后,再人为将其关闭.

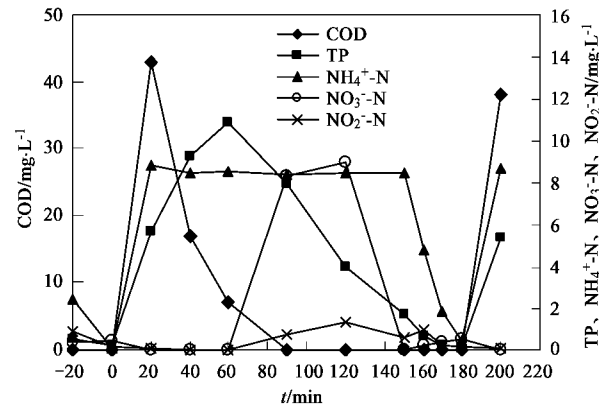


图 5 系统运行第 228 周期的周期试验
Fig.5 Periodic experiment during the 228 T

周期试验中可以看出(图 5),经过 60 min 的厌氧,体系中总磷浓度增加至 10.87 mg/L,由于试验中厌氧段进水需耗时 10 min,此时 COD 含量呈上升态势,进水完成后 COD 浓度明显下降,至厌氧末 COD 基本消耗完毕,去除率达到 98% 以上,保证了后续投加硝酸盐后缺氧段的形成.在缺氧段的前 60 min 流加硝酸盐氮 120 mg,发生同步反硝化除磷,同时观察到体系中有少量亚硝酸盐积累,这说明部分反硝化聚磷菌只能够将硝酸盐还原为亚硝酸盐^[13].缺氧 90 min 后,体系中总磷浓度下降到 1.72 mg/L,缺氧段总磷去除率为 84%,同时体系中亚硝酸盐氮和硝酸盐氮被全部消耗,脱氮效率达到 100%,而亚硝酸盐的逐渐消失也说明了一部分反硝化聚磷菌可以利用亚硝酸盐^[13].在后续的好氧阶段,总磷以更快的速率被去除,好氧末膜出水总磷浓度仅为 0.13 mg/L,系统平均除磷率达到 96.1%.此外,仅为 30 min 的好氧段对氨氮去除良好,好氧末膜出水氨氮浓度仅为 0.42 mg/L,系统氨氮平均去除率保持在 92.2% 以上.更为重要的是,试验中发现好氧段氨氮被去除的同时并没有发现亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的明显积累,认为是由于聚磷菌在好氧吸磷的同时,也利用硝化过程中产生的硝态氮作为电子受体吸磷而实现反硝化,从而使出水中硝态氮含量保持在较低范围内.

3 结论

(1)通过在厌氧-好氧过程中外加硝酸盐引入缺

氧段,SBMBR 系统经过 2 个阶段的选择和富集,反硝化聚磷菌占全部聚磷菌的比例从 19.4% 上升到 69.6%.

(2)稳定运行的 SBMBR 反硝化强化除磷体系具有良好的反硝化脱氮除磷和有机物去除特性,膜出水总磷浓度平均低于 0.5 mg/L,除磷效率达到 96.1%,厌氧段 COD 去除率在 98% 以上,缺氧段脱氮和除磷效率分别达到 100% 和 84%.

(3)过多的硝酸盐投加会导致下一周期厌氧段有机碳源被专性反硝化细菌优先利用,影响释磷,从而抑制反硝化聚磷菌的生长,试验表明,流加硝酸盐氮 120 mg/周期时,本试验中的 SBMBR 系统运行最为稳定,低于或高于 120 mg/周期分别会导致硝酸盐不足和积累,不利于反硝化聚磷菌的富集.

参考文献:

[1] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system [J]. Wat. Res., 1996, 30(7): 1702 ~ 1710.

[2] Kuba T, Smolders G, van Loosdrecht M C M, et al. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor[J]. Wat. Sci. Tech., 1993, 27(5-6): 241 ~ 252.

[3] Merzouki M, Bemet N, Delgenes J P, et al. Biological denitrifying phosphorus removal in SBR: effect of added nitrate concentration and sludge retention time[J]. Wat. Sci. Tech., 2001, 43(3): 191 ~ 194.

[4] Kerm-Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic condition[J]. Wat. Res., 1993, 27(4): 617 ~ 624.

[5] 李勇智,王淑滢,吴凡松,等.强化生物除磷体系中反硝化聚磷菌的选择与富集[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 45 ~ 49.

[6] Lee D S, Jeon C O, Pack J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system[J]. Wat. Res., 2001, 35(16): 3968 ~ 3976.

[7] Zeng R J, Saunders A M, Yuan Z, et al. Identification and comparison of aerobic and polyphosphate-accumulating organisms [J]. Biotech. Bioeng., 2003, 83(2): 140 ~ 148.

[8] Ekama G A, Wentzel M C. Difficulties and development in biological nutrient removal technology and modeling[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, 39(6): 1 ~ 11.

[9] Adham S, Gagliardo P, Boulous L, et al. Feasibility of the membrane bioreactor process for water reclamation[J]. Wat. Sci. Tech., 2001, 43(10): 203 ~ 209.

[10] Hu Z R, Wentzel M C, Ekama G A. Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems[J]. Wat. Res., 2002, 36(19): 4927 ~ 4937.

[11] 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. 252 ~ 356.

[12] You S J, Ouyang C F, Lin S F, et al. Anoxic biological phosphorus uptake/release with high/low intracellular polymers[J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, 127(9): 838 ~ 843.

[13] Ahn J, Daidou T, Tsuneda, et al. Metabolic behavior of denitrifying phosphate-accumulating organisms under nitrate and nitrite electron acceptor conditions[J]. J. Biotech. Bioeng., 2001, 92(5): 442 ~ 446.