

曝气强度对 AOA 膜生物反应器脱氮除磷性能的影响

陈晓旻¹, 薛智勇¹, 肖景霓^{2, 3*}, 张捍民⁴, 杨凤林⁴, 王卫平¹, 洪春来¹, 朱凤香¹

(1. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 2. 大连海洋大学海洋环境工程学院, 大连 116023; 3. 辽宁省高校近岸海洋环境科学与技术重点实验室, 大连 116023; 4. 大连理工大学环境与生命学院, 大连 116024)

摘要:考察了曝气强度为 2.5、3.75 和 5.0 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 条件下, 厌氧/好氧/缺氧序批式膜生物反应器 (AOA MBR) 对模拟生活污水同时脱氮除磷性能的影响. 结果表明, 曝气强度对 AOA MBR 中 COD 的去除无显著影响, 去除效率均在 90% 以上. 氨氮的去除效果随着曝气强度的增加而提高, 3 个曝气强度下的平均去除率分别为 84.7%、90.6% 和 93.8%. TN 的去除率随着曝气强度的增加呈现先上升后下降的趋势, 3 种条件下分别为 83.4%、87.4% 和 80.6%. 系统的反硝化除磷性能亦受曝气强度影响, 3 个曝气强度下系统中反硝化除磷的比例分别为 20%、30.2% 和 26.7%.

关键词:膜生物反应器; 曝气强度; 脱氮除磷; 反硝化除磷; 污水处理

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-2979-07

Effect of Aeration Intensity on the Nitrogen and Phosphorus Removal Performance of AOA Membrane Bioreactors

CHEN Xiao-yang¹, XUE Zhi-yong¹, XIAO Jing-ni^{2, 3}, ZHANG Han-min⁴, YANG Feng-lin⁴, WANG Wei-ping¹, HONG Chun-lai¹, ZHU Feng-xiang¹

(1. Institute of Environmental Resource & Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2. College of Marine Environmental Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 3. Key Laboratory of Nearshore Marine Environmental Research, Dalian 116023, China; 4. School of Environmental & Biological Science & Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The ability of simultaneous phosphorus and nitrogen removal of sequencing batch membrane bioreactor run in anaerobic/oxic/anoxic mode (AOA MBR) was examined under three aeration intensities [2.5, 3.75 and 5.0 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]. The results showed that the averaged removals of COD were over 90% at different aeration intensities. And the higher aeration intensity was, the more ammonia nitrogen removal rate achieved. The removal rates of NH_4^+ under the three aeration intensities were 84.7%, 90.6% and 93.8%, respectively. Total nitrogen removal rate increased with the increasing aeration intensity. But excessive aeration intensity reduced TN removal. The removal rates of TN under the three aeration intensities were 83.4%, 87.4% and 80.6%, respectively. Aeration intensity affected the denitrifying phosphorus ability of the AOA MBR. The ratio of denitrification phosphorus removal under the three aeration intensities were 20%, 30.2% and 26.7%, respectively.

Key words: membrane bioreactor (MBR); aeration intensity; nitrogen and phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal; wastewater treatment

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, 2], 近年来已被广泛应用到生活污水、工业废水、农业废水、畜牧业废水的处理过程中. MBR 工艺不仅能够处理高浓度生活污水、难降解性工业废水, 其在脱氮除磷过程中也具有极大潜力. MBR 可以通过膜的截留作用, 使硝化菌长期停留在好氧池内, 在不增加池容的前提下延长了污泥龄, 满足了硝化菌的生长, 减少了硝化菌的流失. 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^[3].

研究发现, SBMBR 的运行方式是通过限制曝气和半限制曝气方式, 在时间序列上实现厌氧/好氧的组合, 并控制每一部分适宜的时间比例, 可以得到较好的脱氮除磷效果^[4, 5]. 从生物除磷机制可知: 严格的厌氧环境可使聚磷菌充分释磷, 从而可使其在进入好氧环境时能够最大限度地吸磷^[6], 因此 SBMBR 中溶解氧的浓度 (曝气强度) 的控制显得十分重要. 适宜的曝气强度不仅可为除磷和脱氮提供良好的厌/好氧交替环境, 同时也可控制系统的运行费

收稿日期: 2010-11-01; 修订日期: 2011-03-31

基金项目: 浙江省科技计划项目 (2009C33075); 大连海洋大学人才引进项目 (SYJ200801)

作者简介: 陈晓旻 (1978 ~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为废水处理技术, E-mail: xiaoyangchen@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: xiaojingni@dlou.edu.cn

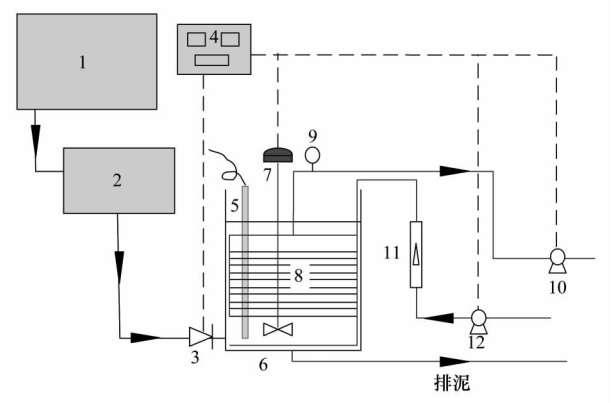
用^[7].但目前 MBR 工艺中关于曝气强度的报道更多的是集中于曝气强度与膜污染之间关系的讨论上^[8~12],对曝气强度与 MBR 中营养物去除的影响的报道还很少^[13, 14].因此有必要对曝气强度对 SBMBR 的同时脱氮除磷性能做进一步研究.

本研究考察了不同曝气强度对单反应器形式的厌氧/好氧/缺氧 SBMBR(AOA MBR)污染物的去除及同步脱氮除磷能力的影响,以期 MBR 强化脱氮除磷能力的实际工程应用提供一些理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示.反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,用于利用浮球阀控制反应器水位.进水管道上加装电磁阀,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.



1. 高位水箱; 2. 平衡水箱; 3. 电磁阀; 4. 时间继电器;
5. 恒温加热器; 6. SBMBR 反应器; 7. 搅拌器; 8. 膜组件;
9. 真空表; 10. 蠕动泵; 11. 转子流量计; 12. 空气泵

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental process

装置运行周期如图 2 所示,反应器在厌氧阶段的前 10 min 内完成进水,缺氧段出水;每周期的进水量为 1.67 L,从而控制系统水力停留时间(HRT)为 12 h.每天运行的第 8 周期(以 0 点开始为第 1 周期)缺氧末进行手动排泥,控制系统污泥龄(SRT)为 15 d.缺氧环境由好氧段产生的硝酸盐实现.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.

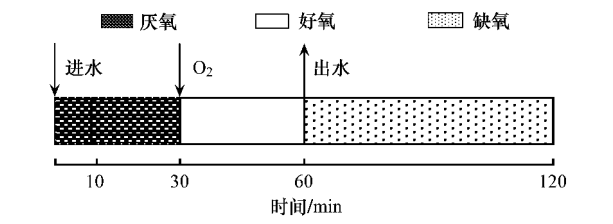


图 2 装置运行周期

Fig. 2 Operation modes of the experiment reactor

表 1 操作参数

Table 1 Operation parameters of AOA MBR

操作参数	数值
有效容积/L	10
HRT/h	12
SRT/d	15
温度/℃	25 ± 1
平均膜通量/L·(m ² ·h) ⁻¹	1.67

试验持续约 4 个月,分别考察曝气强度为 2.5、3.75 和 5.0 m³·(m²·h)⁻¹条件下对营养物的去除效果.曝气强度及溶解氧(DO)的变化见表 2.

表 2 曝气强度及 DO 的变化

Table 2 Changes in aeration indensity and DO concentration of AOA MBR

阶段	运行时间 /d	曝气强度 /m ³ ·(m ² ·h) ⁻¹	DO ¹⁾ /mg·L ⁻¹
I	0 ~ 36	2.5	2.88
II	37 ~ 83	3.75	3.97
III	84 ~ 118	5.0	5.68

1) DO 浓度为好氧段 DO 平稳时的平均值

1.2 接种污泥及试验水质

活性污泥取自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至 4 g/L 后,分至反应器,使其污泥浓度均为 2 g/L.

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,水质组成为 COD: N: TP 约为 350: 35: 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^[15],其中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 营养物去除效果

2.1.1 氮的去除

图 3 为不同运行阶段氮的去除效果.可以看出,在近 4 个月的试验期间内,氨氮的去除效果随着曝气强度的增加而提高.3 个阶段中,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度介于 $18 \sim 33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均浓度为 $27.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率分别为 84.7%、90.6% 和 93.8%.可见,曝气强度增大,氨氮向硝态氮的转化量也随之增加.这一趋势与张胜等^[14]的研究结果相一致,认为曝气强度增加,污泥颗粒变小,

有利于提高氧传递速率和传质效率,进而有利于对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除;而在杨小丽等^[13]的研究中得到随着曝气强度的增加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率出现先上升后缓慢下降的趋势,认为当曝气强度超过一定值后,过高的曝气强度会使微生物内源呼吸加剧,溶解性微生物代谢产物(SMP)增多,抑制微生物活性,而导致去除率下降.

本研究中氨氮的去除效率与曝气时间及曝气强度在一定范围内存在正相关性,但曝气强度过大,会增大能耗,造成浪费.所以曝气强度应控制在能达到出水要求即可.本试验阶段Ⅱ和Ⅲ中,AOA MBR 出水中氨氮均可保持在较低的浓度范围(均低于 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

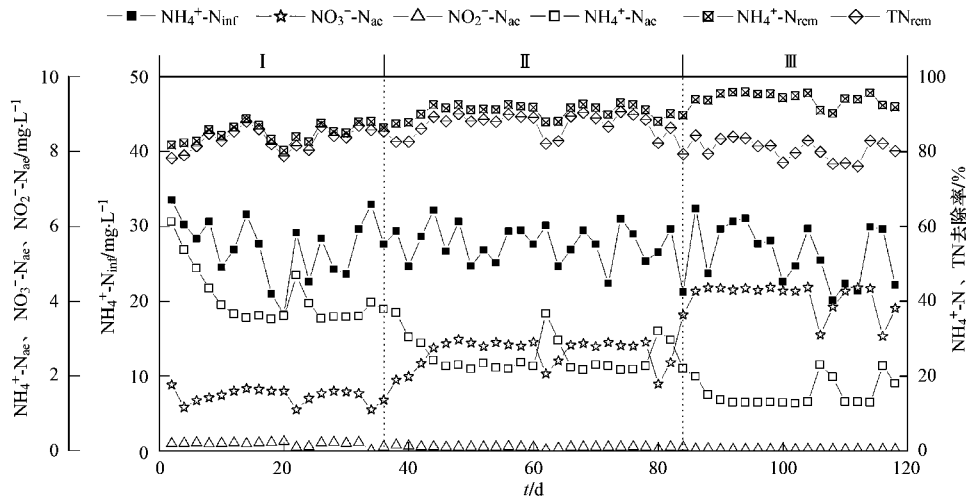


图 3 氮的去除效果
Fig. 3 Time courses of nitrogen removal performance

此外,在该体系中好氧末的硝酸盐浓度也是随着曝气强度的增大而升高,由阶段Ⅰ的 $1.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到阶段Ⅲ的 $4.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.好氧阶段内氨氮转化为硝态氮只是氮形式的转变,就总氮而言并没减少,只有硝态氮进入缺/厌氧池进行反硝化,最终以氮气的形式从污水中吹脱,才能使总氮浓度降低.对于总氮的去除,在运行阶段Ⅰ和Ⅱ中,TN 的去除率随着曝气强度的增加而提高,平均分别为 83.4% 和 87.4%;而在阶段Ⅲ中,当曝气强度进一步提高到 $5.0 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 时,TN 的去除却出现了下降趋势,平均去除率为 80.6%.在张胜及杨小丽等^[13, 14]的研究中也得到了同样的结论. AOA MBR 由于在缺氧阶段出水,使得好氧后系统产生的硝酸盐在缺氧段作为反硝化吸磷的电子受体而被消耗,从而降低了出水中氮的含量,提高了 TN 的去除效果.另外,阶段Ⅲ中系统 TN 的去除率呈现下降趋

势,分析认为曝气强度的增加,提高了溶解氧对污泥絮体的穿透力,却也破坏了混合体系中的厌氧微环境,使好氧段产生的过多的硝酸盐被累积,而使出水中氮的含量升高.

综合 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除,阶段Ⅱ中 $3.75 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 的曝气强度为最佳.

2.1.2 磷的去除

试验过程中,进水 TP 浓度范围为 $7 \sim 11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.图 4、5 分别描述了 AOA MBR 中磷的去除效果及各阶段磷的变化量.结果表明,阶段Ⅰ、Ⅱ中 TP 的去除率分别为: 76.9%、86.1%;阶段Ⅲ中 TP 的去除效果有所降低,其去除率为 57.8%.分析认为,适宜的曝气强度可为聚磷菌(PAOs)在好氧段吸磷提供充足的电子受体,又能为后续缺氧段的反硝化吸磷提供物质保障—— NO_3^- .缺氧段的存在可有效地降低进入厌氧

段 NO_3^- 的量,而使厌氧释磷得到一定程度的保障,而厌氧段的充分释磷则是后续好/缺氧段良好吸磷的前提.但曝气过剩,一方面可能是由于好氧段较高的 DO 浓度使得 PAOs 在好氧段将体内储存的能量物质聚- β -羟基丁酸酯(PHB)消耗殆尽,而在进入缺氧段后 PAOs 则进行内源性释磷,影响了 PAOs 正常

的吸/释磷规律,导致除磷效率降低;另一方面可能由于系统在进入缺氧段后仍有较高的 DO 残留,破坏了 PAOs 反硝化吸磷的环境,且会导致较多的 NO_3^- 进入厌氧段,进一步破坏 PAOs 的厌氧释磷,从而会使得 TP 去除率下降.

从图5可以看出,AOA MBR中3个阶段的厌氧

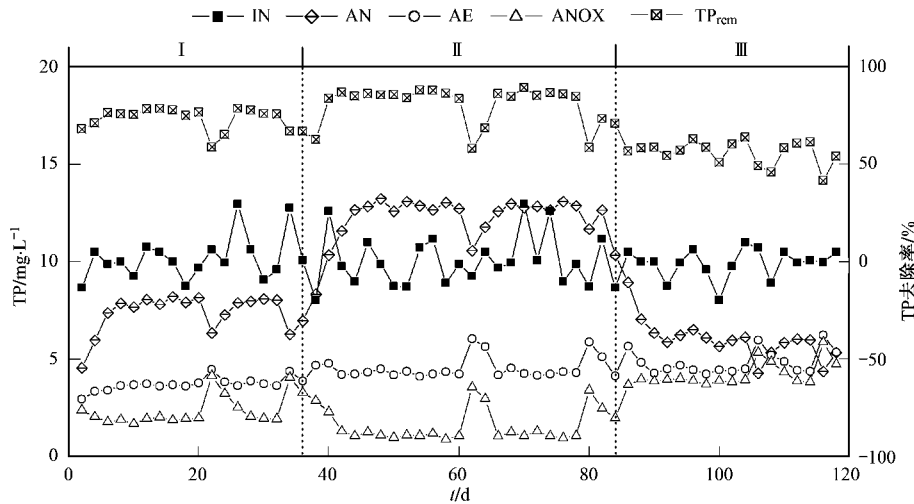


图 4 TP 去除效果

Fig.4 Time courses of TP removal performance

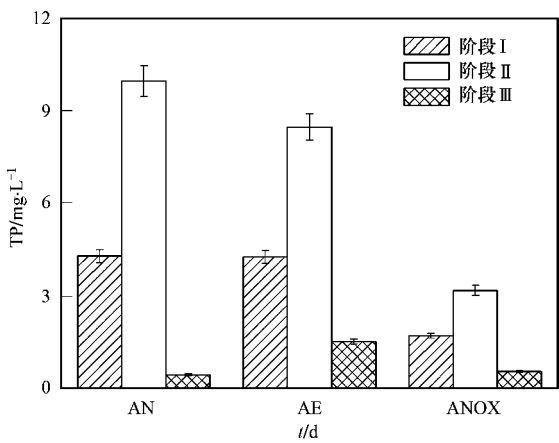


图 5 各阶段上清液磷含量的变化

Fig.5 Variations of TP concentration in supernatant in different stages

释磷量分别为:4.30、9.97 和 0.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.3 个阶段好氧吸磷量分别为:4.27、8.48 和 1.53 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.系统中可明显观察到反硝化吸磷现象,3 个阶段的缺氧吸磷量分别为:1.71、3.18 和 0.56 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别占各阶段吸磷总量的 27.3%、28.7% 和 26.7%.这一结果表明,AOA MBR 具备一定的反硝化除磷能力,且受曝气强度的直接影响.过量曝气会使厌氧

释磷及缺氧吸磷受到抑制,削弱系统的反硝化除磷能力.

图 4 中第 22、34、62、80、106 和 116 d 出现的磷去除突然下降,是因为其前 1 d 进行批试验,从反应器中取出了较多污泥而导致,此影响基本可在 5 d 之内得到恢复.

2.1.3 COD 的去除

本试验中进水 COD 浓度在 280 ~ 450 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,在不同的曝气强度下,反应体系均可获得良好的 COD 去除效果.从图 6 可以看出,试验运行模式下,厌氧末上清液 COD 的浓度均介于 20 ~ 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均在 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,平均去除率在 90% 以上.

研究表明^[16],当 COD 与 O_2 或 NO_3^- 共存时,PAOs 将首先进行释磷,只有当 COD 被消耗殆尽,才会发生过量吸磷过程.本试验中厌氧阶段 COD 被转化为 PHB 而大量去除,为后续的好/缺氧吸磷提供了保障.周期末上清液 COD 浓度基本在 10 ~ 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均去除率约为 92%;膜出水 COD 浓度为出水阶段的平均结果,可保持在 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,去除率提高到 96% 左右,说明膜对 COD 表现出一定的过滤截留作用.

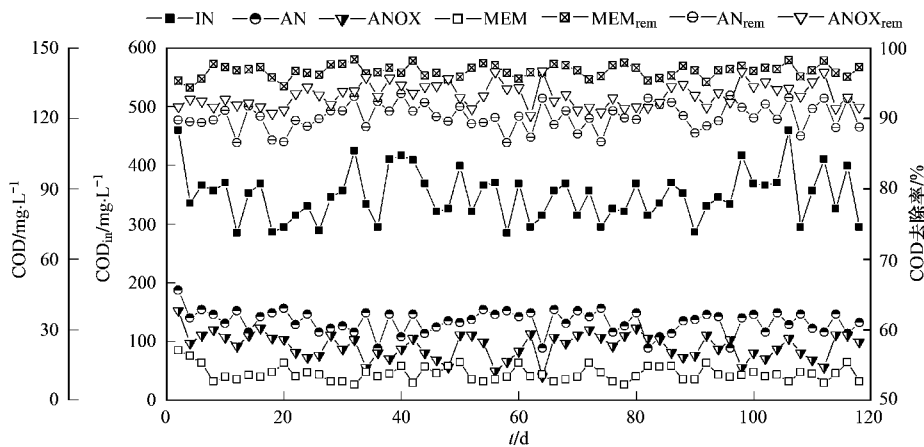


图 6 COD 去除效果

Fig. 6 Times course of COD removal performance

2.2 污染物的去除特性

试验中对系统在每个运行阶段均进行了周期试验,对其污染物的去除特性做了考察,以便清楚了解每周期中污染物随时间的变化情况。

图 7 为 AOA MBR 在 3 个运行阶段中具有代表性的周期试验结果. 系统进水同样在厌氧段前 10 min 内完成,反应器中 COD、氨氮和总磷浓度同样分别呈上升的变化趋势,其中 COD 值亦是在进水完成后达到最大,厌氧段 COD 被消耗同时释磷;好氧段磷被部分吸收,氨氮被转化为硝态氮;在随后的缺氧段,剩余的磷被继续吸收,同时 NO₃⁻ 被消耗. 从图 7 可以看到,在运行的第 I 阶段中,由于曝气强度相对较小,好氧阶段末硝酸盐的量仅为 1.62 mg·L⁻¹ 左右,这样在随后的缺氧段,作为反硝化吸磷的电子受体——硝酸盐的量不足以满足反硝化吸磷的需要,使得该阶段中磷未能充分得以去除,TP 的去除率平均去除率保持在 76.9% 左右;而在阶段 II 中,曝气强度的增加,好氧吸磷能力得到增强,同时好氧末硝酸盐浓度也逐渐提高(平均浓度为 2.76 mg·L⁻¹),增加了缺氧段反硝化吸磷的电子受体的量,使得反硝化吸磷得以充分进行,系统磷的去除率得到提高,平均值达到 86.1%. 由图 4 可以看出,缺氧段吸磷量由阶段 I 的 1.71 mg·L⁻¹ 增加到阶段 II 的 3.18 mg·L⁻¹,缺氧段磷的能力逐步得到强化. 而正由于厌氧之前缺氧段的存在,使硝酸盐因反硝化吸磷而被消耗,从而使厌氧段磷的释放得到保障. 并且,充分的吸磷同时也促进了厌氧释磷能力的增强,阶段 II 中平均释磷量比阶段 I 提高了 2.32 倍. 但在阶段 III 条件下,由于好氧阶段末硝酸盐的量过高

(4.22 mg·L⁻¹),后续缺氧段的反硝化吸磷未能将其全部消耗掉,使大量硝酸盐进入下一周期厌氧段,导致了其对厌氧释磷的抑制,最终使系统除磷能力的下降,阶段 III 中磷的平均去除率仅为 57.8% (图 4).

通过图 7 可以看出,系统中 COD 值在进水完成后达到最大,以阶段 II 为例,AOA MBR 中 COD 最大值为 66.87 mg·L⁻¹. 同时,系统在 COD 边消耗边增加的进水过程中释磷现象较弱,而反应器中总磷浓度的增加主要归因于进水. 随着厌氧段硝酸盐量的大幅减少,反应器中出现明显的释磷趋势,在厌氧段末期系统中总磷浓度达到 12.97 mg·L⁻¹,同时, COD 浓度降至 21.06 mg·L⁻¹. 这充分说明了系统中已经存在一定数量的聚磷菌能够在降解 COD 的同时达到释磷的目的.

2.3 反硝化除磷性能

上述结果表明, AOA MBR 中的污泥已具备了一定的反硝化除磷能力,且其缺氧段的存在对于反硝化和除磷均有益处. 试验测定了不同曝气强度条件下系统污泥的好氧吸磷速率(ASPUR) 和反硝化吸磷速率(NSPUR),对使用不同电子受体的强化生物除磷体系中聚磷菌的反硝化除磷能力做了估计,同时对处于稳定状态的 AOA MBR 反应器反硝化除磷性能作了研究.

通过后者占前者的百分比(NSPUR/ASPUR) 的变化来反映反硝化除磷的能力随运行条件变化的情况^[16],结果如表 3 所示. 结果表明, AOA MBR 中污泥具有明显的反硝化除磷能力,且其反硝化除磷能力在前 2 个运行阶段中,随着试验的进行而逐渐提

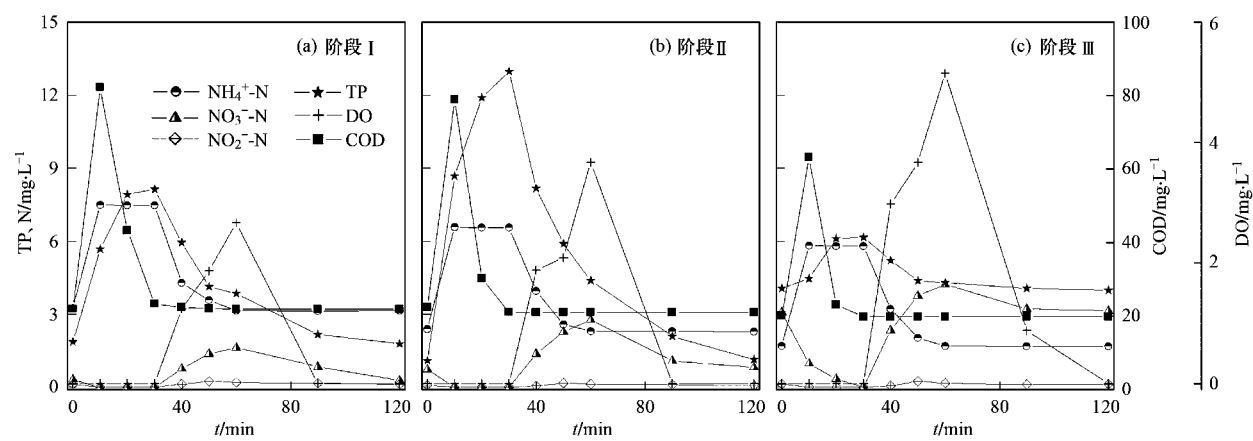


图7 AOA MBR 污染物去除特性

Fig.7 Time courses of nutrients removal characteristics of AOA MBR

高,NSPUR/ASPUR 由阶段 I 的 20% 提高到 30.2% (阶段 II). 而阶段 III 中,由于过量的 NO_3^- 进入厌氧段抑制了厌氧释磷,使 PAOs 的除磷能力亦受到影响,除磷效果显著下降,此时 NSPUR/ASPUR 的比例也受其影响,有所降低,但幅度不大,减小至 26.7%. 该结果表明适宜的曝气强度可使缺氧段获得适宜的 NO_3^- 浓度有助于强化聚磷菌的反硝化除磷能力. 本系统中缺氧段的存在可有效地降低进入厌氧段 NO_3^- 的量,而使厌氧释磷得到一定程度的保障,而厌氧段的充分释磷则是后续好/缺氧段良好吸磷的前提. 从试验结果看,AOA MBR 在本试验中所表现出的反硝化除磷性能 NSPUR/ASPUR (3 个阶段分别为 20%、30.2% 和 26.7%) 基本介于前期研究中采用的 AO MBR (25.9%) 及 A^2O MBR (40.6%) 之间^[17]. 表明 AOA MBR 中缺氧段的引入对系统反硝化除磷性能的提高有一定作用,但系统对 TP 的去除仍主要归功于好氧段的吸磷作用.

表 3 批试验测得 AOA MBR 系统中除磷污泥的 ASPUR 及 NSPUR¹⁾

Table 3 ASPUR and NSPUR of AOA MBR in batch tests

阶段	ASPUR ₃₀		NSPUR ₃₀		比例 ²⁾	
	/mg·(g·h) ⁻¹		/mg·(g·h) ⁻¹		/%	
I	19.9	(1.0)	4.0	(0.2)	20.0	(1.0)
II	29.5	(1.5)	8.9	(0.4)	30.2	(1.5)
III	9.2	(0.5)	2.5	(0.1)	26.7	(1.3)

1) 括号内为标准偏差; 2) 比例为缺氧吸磷速率与好氧吸磷速率之比,即:比例 = (NSPUR/ASPUR) × 100%

综上,系统运行初期的周期试验说明 AOA MBR 反应器已具备一定的脱氮除磷特性,污泥表现出典型的聚磷菌的代谢特征:厌氧阶段释放磷和好氧

(缺氧)阶段超量摄取磷. 曝气强度对磷的去除效果有较大影响,在效果最好的阶段 II 中,AOA MBR 对总磷的去除率可达到 80% 以上,而膜出水平均总磷浓度也高于 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,虽然膜出水为缺氧阶段出水的平均值,较高的出水浓度与出水时间有一定关系,但也反映出系统的脱氮除磷性能仍然有待提高.

3 结论

- (1)曝气强度的变化对 AOA MBR 中 COD 的去除无显著影响,且 90% 以上的 COD 在厌氧阶段被去除,为后续的好/缺氧吸磷提供了保障.
- (2)氨氮的去除效果随着曝气强度的增加而提高,3 个曝气强度下的平均去除率分别为 84.7%、90.6% 和 93.8%.
- (3)TN 的去除率在试验条件下随着曝气强度的提高而呈先上升后下降的趋势. 3 种条件下分别为 83.4%、87.4% 和 80.6%.
- (4)曝气强度对系统反硝化除磷性能存在一定影响. 3 个曝气强度下系统中反硝化除磷的比例分别为 20%、30.2% 和 26.7%.

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] 吕红, 徐又一, 朱宝库, 等. 分体式膜-生物反应器在废水处理中的工艺条件[J]. *环境科学*, 2003, **24**(3): 61-64.

[3] Krampe J, Krauth K. Sequencing batch reactor with submerged hollow fibre membranes for the biomass separation [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(3): 195-199.

[4] 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 Biochemistry*, 2006, **41**(1): 87-95.
- [5] 张捍民, 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.
- [6] Holakoo L, Nakhla G, Yanful E, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal in a continuously fed and aerated membrane bioreactor [J]. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 2005, **131**(10): 1469-1472.
- [7] Ujang Z, Salim M, Khor S. The effect of aeration and non-aeration time on simultaneous organic, nitrogen and phosphorus removal using an intermittent aeration membrane bioreactor [J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(9): 193-200.
- [8] Liu R, Huang X, Wang C, *et al.* Study on hydraulic characteristics in a submerged membrane bioreactor process [J]. *Process Biochemistry*, 2000, **36**(3): 249-254.
- [9] Meng F, Yang F, Shi B, *et al.* A comprehensive study on membrane fouling in submerged membrane bioreactors operated under different aeration intensities [J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, **59**(1): 91-100.
- [10] Menniti A, Morgenroth E. The influence of aeration intensity on predation and EPS production in membrane bioreactors [J]. *Water Research*, 2010, **44**(8): 2541-2553.
- [11] 张海丰, 孙宝盛, 赵新华, 等. 曝气强度对膜生物反应器污泥混合液可滤性的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2777-2782.
- [12] 葛根, 王洪礼, 张海丰. 不同曝气强度下 MBR 污泥混合液可滤性分析[J]. *天津大学学报*, 2009, **42**(10): 913-918.
- [13] 杨小丽, 王世和. 污泥浓度与曝气强度对 MBR 运行的综合影响[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(1): 77-80.
- [14] 张胜, 张铭川, 徐立荣, 等. 膜序批式生物反应器脱氮性能研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2798-2803.
- [15] 国家环境保护局. 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.
- [16] 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.
- [17] 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.