

COD 进水浓度对 SBMBBR 脱氮除磷效果影响

张耀斌¹, 吴广华¹, 邢亚彬¹, 全 燮^{*1}, 赵雅芝¹, 权伍哲²

(1. 大连理工大学 环境与生命学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连宇都环境工程技术有限公司, 辽宁 大连 116022)

摘要: 研究了序批式移动床生物膜反应器(SBMBBR)中 COD 进水浓度对同步脱氮除磷效果的影响. 维持进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为 10 mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 40 mg/L 左右, COD 浓度为 200~800 mg/L, 研究了反应器的脱氮除磷效果. 结果表明: 厌氧释磷量在 COD 进水浓度为 450 mg/L 时达到最大, 为 61.2 mg/L; 之后, 增加 COD 进水浓度不利于磷的释放. 在厌氧段初期, TN 便有超过 30% 的损失, 可能是因生物吸附造成的. 好氧时 TN 和磷均损失较大, 说明在生物膜上很可能发生了同时硝化反硝化和反硝化聚磷. 一定范围的 COD 浓度能促进 TN 的去除. TN 去除率在 COD 进水浓度为 450 mg/L 时达到最大, 为 87.8%, 氮磷的去除与生物膜的生物量和生物膜厚度密切相关.

关键词: 序批式移动床生物膜反应器; 脱氮除磷; 同时硝化反硝化; 反硝化聚磷

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A

0 引言

传统理论认为生物脱氮过程分为好氧硝化和厌氧/缺氧反硝化, 生物除磷则是通过厌氧放磷、好氧吸磷来完成的. 其中厌氧和好氧是两个彼此独立的过程, 需要由多级反应器完成, 即 A^2O (或 AO) 工艺, 在这种处理工艺中, 需要将好氧后污水回流至厌氧段, 以便进行反硝化和厌氧放磷. SBR 工艺在同一个反应器内实现厌氧与好氧的过程交替, 理论上具备脱氮除磷的基本条件. 但从很多报道来看, 氮磷的去除效果不好, 这是因为 SBR 中好氧之后大部分污水被排放, 使反硝化动能不足, 造成总氮去除效率不高^[1~3]. 而通过优化微生物的生存状态, 在反应器内达到同时硝化反硝化(SND)的微环境, 可能使氮磷去除率得到提高.

生物膜法可以在生物膜内形成溶解氧、有机物的浓度梯度变化, 可以在生物膜的不同深度随时进行硝化反硝化、厌氧释磷、好氧吸磷. 若 SBR 和生物膜法结合, 既可以在整个工艺上实现厌氧、好氧交替, 又可以在生物膜内实现这一过程, 因此可能有更好的脱氮除磷效果.

作为一种新型生物膜工艺, 移动床生物膜反应器(MBBR)受到关注, 该工艺有效克服了生物堵塞、沟流等一般生物膜法的缺点^[4,5], 因此可能比一般生物膜法有更高的处理效率. 本文将 SBR 与 MBBR 工艺结合, 采用序批式移动床生物膜反应器(sequencing batch moving bed biofilm reactor, SBMBBR), 研究 COD 进水浓度对脱氮除磷的影响规律.

1 材料与方 法

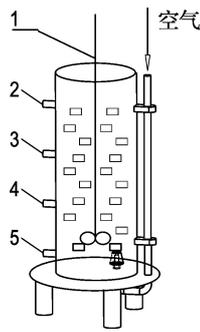
1.1 实验装置

SBMBBR 用有机玻璃管制成($\phi 110 \times 300$), 有效高度为 250 mm. 在反应器壁上垂直方向设置有溢流口、取样口、排水排泥口; 底部靠一侧装有微孔曝气砂头, 采用鼓风曝气, 用转子流量计控制曝气量(如图 1); 同时还配有机械搅拌器, 在厌氧段使反应器内填料和污泥处于均匀混合状态. 反应器所装填填料为改性聚乙烯填料($\phi 10 \times 10$ 的空心圆柱, 内外表面作纹状处理, 空隙率 84%, 在制作时加入某些无机改性材料, 易于微生物生长), 空床填充率为 50%.

收稿日期: 2006-09-24; 修回日期: 2008-04-04.

基金项目: 教育部重大培育基金资助项目(705011).

作者简介: 张耀斌(1967-), 男, 副教授; 全 燮*(1960-), 男, 长江学者奖励计划特聘教授, 博士生导师.



1 搅拌器; 2 溢流口; 3,4 取样口; 5 排水排泥口

图1 序批式移动床生物膜反应器

Fig.1 Sequencing batch moving bed biofilm reactor

按照以下方式运行:瞬间进水→厌氧搅拌(2 h)→好氧曝气(7 h)→沉淀(0.5 h)→排水+少量排泥($t_{sr}=20$ d). 搅拌转速为 100 r/min,曝气量为 $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$. 厌氧和好氧反应时间(t_{hr})共 9 h.

1.2 实验水质

实验采用人工模拟废水,在自来水中分别投加 CH_3COONa (碳源)、 KH_2PO_4 和 NH_4Cl 来达到不同的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度,同时加入 Ca、Mg、Fe、S 等营养盐和微量元素,并投加 NaHCO_3 (浓度为 100 mg/L)维持系统的 pH 在 7~8.

1.3 实验方法

实验中保持进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度 10 mg/L 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 40 mg/L 左右,在 COD 进水浓度 200、450、600 和 800 mg/L 下,分别进行实验. 每改变一次 COD 进水浓度,待系统稳定后测定反应器内 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 等的浓度.

1.4 分析项目及方法

COD:快速重铬酸钾法; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$:钼锑抗分光光度法; $\text{NH}_3\text{-N}$:纳氏试剂光度法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:紫外分光光度法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$:N-(1-萘基)-乙二胺光度法;生物量(VSS):在 105°C 下烘至恒重,测定前后质量差. 溶解氧(DO):采用便携式荧光溶解氧仪(Hach).

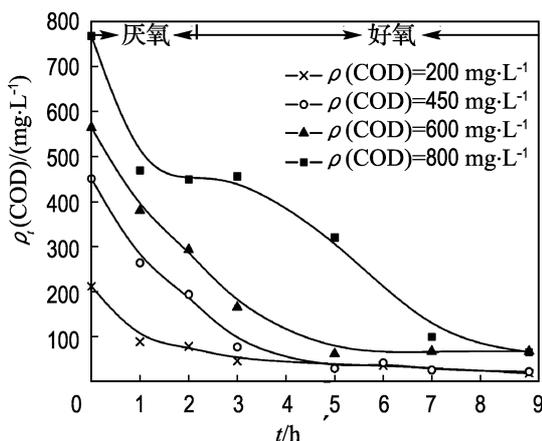
2 实验结果与分析

2.1 COD 进水浓度对除磷的影响

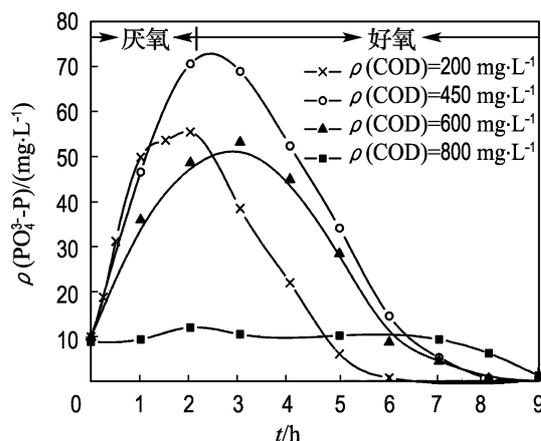
生物除磷包括聚磷菌(PAOs)对磷的厌氧释放和好氧吸收两个过程,许多研究结果均已证明^[6,7],在这两个过程中,有机物浓度对磷的释放、吸收有重要影响. 在厌氧段 PAOs 降解有机物以 PHB(聚- β -强丁酸盐)的形式贮存于体内,同时将体内的聚磷酸水解,以正磷酸的形式释放到水中;在好氧段氧化代谢 PHB 产生能量,用于磷的吸收和聚磷的合成^[8]. 一般认为,厌氧段充分释磷有利于好氧段充分吸磷,而在厌氧段能否充分释磷很大程度上取决于可供利用的有机物浓度.

图 2 为在不同 COD 进水浓度下,反应器内 COD 和磷浓度的变化. 由图 2(a), COD 进水浓度为 200、450、600 和 800 mg/L 时,厌氧段 COD 的去除率分别为 62.9%、57.0%、48.1% 和 41.6%. 进入好氧阶段, COD 浓度继续下降.

由图 2(b),在厌氧阶段由于 PAOs 释磷,磷浓度迅速增加,在厌氧末期达到峰值. 当 COD 进水浓度从 200 mg/L 增加到 450 mg/L 时,释磷量



(a) COD 浓度变化



(b) 磷浓度变化

图2 COD 进水浓度对除磷的影响

Fig.2 The effect of phosphorus removal with different feed COD concentration

从 45.39 mg/L 增加到 61.15 mg/L 之后,增加 COD 浓度,释磷量减少,在 COD 浓度为 800 mg/L 时,几乎观测不到磷的释放.分析原因是: COD 进水浓度较低时(200~450 mg/L),磷释放与有机物消耗一致,即释磷速率取决于可供利用的有机物浓度,有机物被消耗完时,释磷也结束; COD 进水浓度较高时,生物膜内微生物菌种组成发生了变化,PAOs 不再是微生物种群结构中的相对优势菌^[9],表现出吸磷能力的下降.

在好氧反应阶段, COD 进水浓度为 200~600 mg/L 时,各浓度下的吸磷变化大致相同,出水磷的去除率均可达到 95% 以上; COD 进水浓度为 800 mg/L 时,在反应的最后 2 h,磷浓度才开始下降,此时 COD 浓度为 65.2 mg/L,这说明只有有机物浓度较低时,吸磷才会发生^[10].

2.2 COD 进水浓度对脱氮的影响

一般认为,生物脱氮包括硝化和反硝化两个

部分,硝化由自养型的硝化菌(或亚硝化菌)来完成,若系统中有机物浓度较高,异养菌大量繁殖,势必影响硝化作用.反硝化则是由异养菌在缺氧环境中完成的,以有机物为电子受体和营养源,若有机物不足,会抑制反硝化的进行.因此要在同一个反应器中完成硝化反硝化(包括厌氧好氧工艺交替的作用和在生物膜内不同深度随时进行的作用),COD 进水浓度是关键的控制因素.

由图 3(a),厌氧反应开始 15 min 内, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度迅速下降,推测可能主要是微生物的吸附作用造成的.之后的较长时间内, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化缓慢.进入好氧段,有机物浓度明显降低,硝化速率加快, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度开始下降. COD 进水浓度为 200、450、600 和 800 mg/L 时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率分别为 98.6%、94.6%、87.2% 和 73.6%. 测定 DO 显示,好氧开始 1 h 时,以上各浓度的 DO 分别为 6.71、5.63、4.32 和 3.17 mg/L. 可见增加 COD

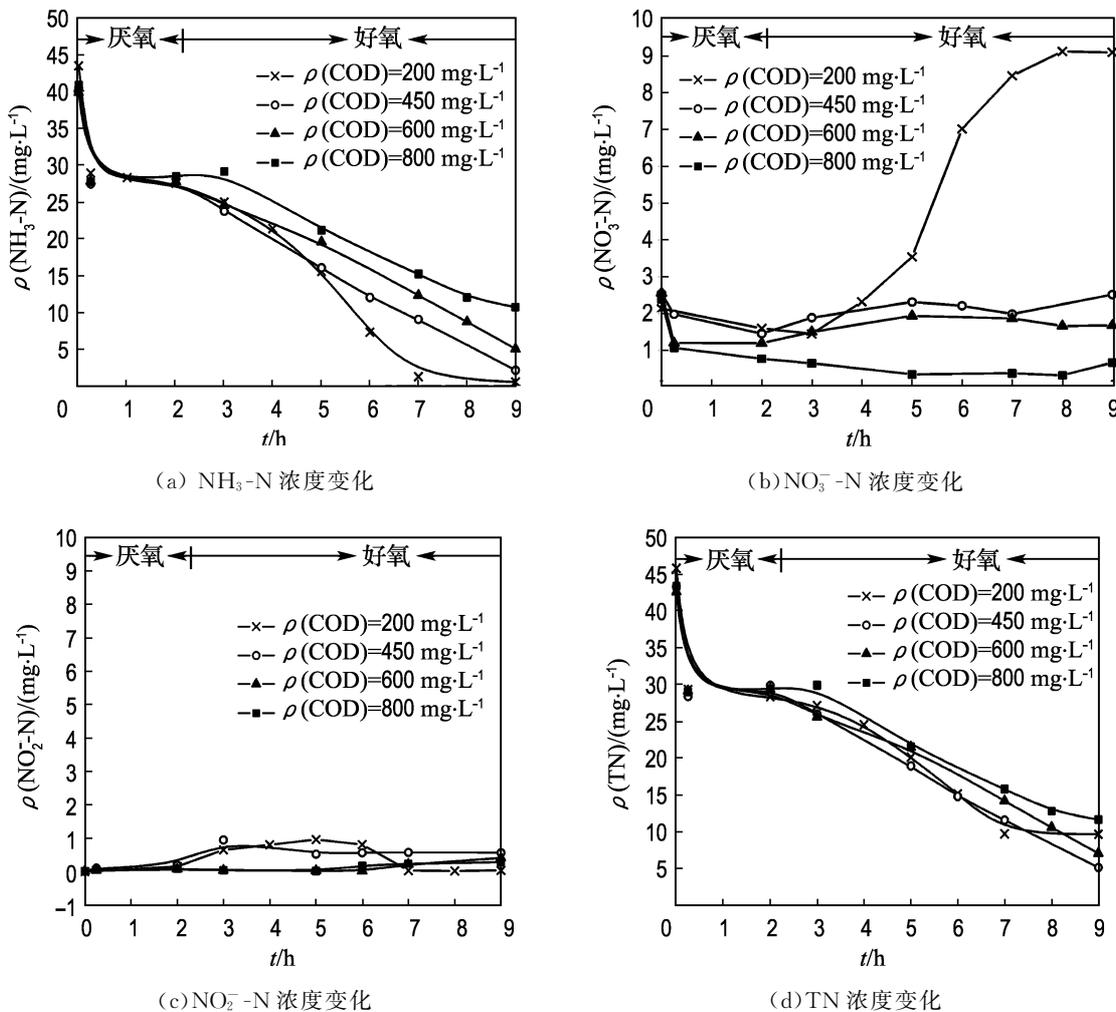


图 3 COD 进水浓度对脱氮的影响

Fig. 3 The effect of nitrogen removal with different feed COD concentration

浓度,导致硝化菌与异养菌竞争 DO,使硝化效果下降.如果提高 COD 的处理能力或增加 DO,将使硝化效果增强.

由图 3(b), NO_3^- -N 浓度在厌氧段处于较低水平.进入好氧段,除 COD 进水浓度为 200 mg/L 时 NO_3^- -N 浓度明显积累外,其他进水浓度下 NO_3^- -N 的积累不明显.结合图 3(b)和图 2(b), COD 进水浓度为 200 mg/L 时,充足的 NO_3^- -N 以及生物膜内部的缺氧环境为反硝化聚磷菌 (DPB) 的生存提供可能. DPB 可在缺氧下以 NO_3^- 为电子受体,起到同时脱氮除磷的作用^[11],因此吸磷过程与反硝化过程同步.由图 2(b)和图 3(d)可以看出,在好氧时, TN 和磷的同步下降表明 DPB 的存在与作用.

由图 3(c)发现, NO_2^- -N 在整个过程中的变化明显小于其他形态氮的变化.在 COD 浓度为 200 和 450 mg/L 时,好氧开始时有 NO_2^- -N 的积累,之后逐渐减少,其浓度减小的原因是在生物膜内部发生了反硝化作用.较高的 COD 进水浓度 (600 和 800 mg/L) 下, NO_2^- -N 的积累不明显.

由图 3(d),微生物在厌氧初期对 NH_3 -N 的吸附使 TN 下降明显,之后变化不大.进入好氧段后, TN 浓度又显著下降,证实了好氧段反硝化作用的存在.生物膜的外层为好氧,为硝化提供条件;生物膜的内层为缺氧,为反硝化提供可能.结合图 3(b)和图 2(a), COD 进水浓度较低时 (200 mg/L),在厌氧段有机物基本被消耗完,合成的 PHB 少;进入好氧反应时,外碳源和 PHB 内碳源均不足,使反硝化受阻,导致 NO_3^- -N 积累, TN 去除率低,此时反硝化成为 TN 去除的速率限制步骤.适当增加进水有机物浓度,可减少 NO_3^- -N 的积累,有利于 TN 去除.但当 COD 进水浓度较高时 (800 mg/L),好氧阶段仍有较多有机物存在,硝化作用减弱,硝化成为 TN 去除的速率控制步骤.因此只有在适当的 COD 进水浓度下,才可达良好的脱氮效果.在本实验中 COD 浓度为 450 mg/L 时,达到最大的 TN 去除率,为 87.8%.

2.3 生物量的变化

该系统采用厌氧/好氧交替的运行方式,生物膜较厚,溶解氧、有机物的浓度梯度分布较好,利于各种功能的微生物附着生长,形成一个功能化的有机体,脱氮除磷效果较好.为了验证这一推测,测定了系统运行过程中的生物量 (VSS, 包括生物膜量和悬浮生物量),结果如图 4 所示.

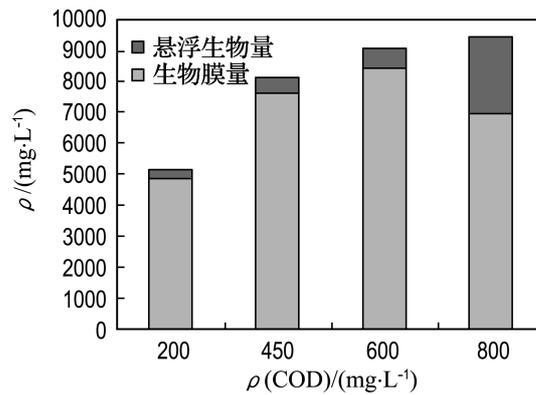


图 4 生物量随 COD 进水浓度的变化

Fig. 4 Biomass variation with different COD concentration

由图 4 可见,随着 COD 进水浓度增加,反应器内的总生物量逐渐增加.当 COD 从 200 mg/L 增加到 600 mg/L 时,生物膜量从 4 930 mg/L 增加到 7 680 mg/L;但 COD 浓度增加到 800 mg/L 时,生物膜量却减少.原因是,当生物膜厚度增加到一定程度时,生物膜内部的微生物活性降低,新陈代谢下降,造成生物膜脱落.另外,虽然 COD 进水浓度为 600 mg/L 的生物膜量比浓度为 450 mg/L 的多,但由于此时较高的有机物浓度阻碍了硝化作用,使其 TN 去除率小于 COD 进水浓度为 450 mg/L 时的 TN 去除率.

3 结 语

上述实验结果表明,单级生物反应器内,在适宜的 COD 进水浓度下,能够实现高效的生物脱氮、除磷.这得益于 SBR 中厌氧与好氧的工艺交替作用以及 MBBR 中生物膜不同深度随时产生的厌氧、好氧条件.而从好氧阶段大幅度的反硝化结果以及磷与 COD、 NO_3^- -N 的浓度变化来看,在好氧段发生了同时硝化反硝化和反硝化聚磷,这些作用的发生是取得高效脱氮除磷的关键.值得一提的是,本实验中取得的最佳脱氮除磷效果时的有机物浓度是 450 mg/L,这与城市污水的有机物浓度接近,预示着在现有的城市污水处理工艺中,利用该技术经过不太复杂的改造就可能实现高效脱氮除磷.

参考文献:

- [1] 郭丽娜,姚 亮,徐秉坤. SBR 工艺硝化脱氮过程研究[J]. 安徽工业大学学报, 2006, 23(2):155-159
- [2] 蒋富海,汪慧贞,张 彪. SBR 法脱氮除磷的影响因

- 素及优化控制策略[J]. 北京建筑工程学院学报, 2006, **22**(1):6-8
- [3] 龙北生, 孙大群, 边德军, 等. 采用两级SBR工艺优化除磷脱氮[J]. 给水排水, 2003, **29**(11):34-37
- [4] 张景丽, 幸福堂. 移动床生物膜工艺特点、研究现状及发展[J]. 工业安全与环保, 2003, **29**(4):13-15
- [5] GIUSEPPE P, ROBERTO C, LUCA P, *et al.* Phosphorus and nitrogen removal in moving-bed sequencing batch biofilm reactors [J]. **Water Science and Technology**, 1999, **40**(4-5):169-176
- [6] JÖNSSON K, JOHANSSON P, CHRISTENSSON M, *et al.* Operational factors affecting enhanced biological phosphorus removal at the waste water treatment plant in Helsingborg, Sweden [J]. **Water Science and Technology**, 1996, **34**(1-2):67-74
- [7] 李 军, 杨秀山, 彭永臻. 微生物与水处理工程:1版 [M]. 北京:化学工业出版社, 2002
- [8] 吕晓辉, 胡龙兴. 移动床生物膜反应器脱氮除磷技术 [J]. 化学工程师, 2004, **9**:20-22
- [9] LIU W T, MINO T, NAKAMURA K, *et al.* Glycogen accumulating population and its anaerobic substrate uptake in anaerobic-aerobic activated sludge without biological phosphorus removal [J]. **Water Research**, 1996, **30**(1):75-82
- [10] 张小玲, 彭党聪, 王志盈, 等. 低DO紊动床内有机物对硝化过程的影响[J]. 中国给水排水, 2002, **18**(5):10-13
- [11] 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

Effect of COD concentration on phosphorus and nitrogen removal in SBMBBR

ZHANG Yao-bin¹, WU Guang-hua¹, XING Ya-bin¹,
QUAN Xie^{*1}, ZHAO Ya-zhi¹, QUAN Wu-zhe²

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

2. Dalian Wedo Environmental Process and Technology Ltd., Co., Dalian 116022, China)

Abstract: The effect of different feed COD concentrations on the removal of phosphorus and nitrogen in a sequencing batch moving bed biofilm reactor (SBMBBR) was studied. The experiments were performed in the concentration of COD varying from 200 to 800 mg/L and the concentrations of nitrogen and phosphorus fixing at 40 mg/L and 10 mg/L respectively. The results show that maximal anaerobic phosphorus release of 61.2 mg/L is obtained in the condition of initial COD concentration of 450 mg/L. Increasing COD concentration is harmful to phosphorus release when COD concentration is higher than 450 mg/L. More than 30% of TN loss is observed in the initial stage of anaerobic due to biological adsorption. High TN and phosphorus removal in the aerobic indicates that simultaneous nitrification and denitrification (SND) and denitrification phosphorus accumulation might occur inside biofilm. A proper extent of COD promotes TN removal. Maximal removal of 87.8% of TN can be achieved at 450 mg/L of initial COD concentration. The removal of nitrogen and phosphorus is closely related to biological amount and thickness of biofilm.

Key words: sequencing batch moving bed biofilm reactor; phosphorus and nitrogen removal; simultaneous nitrification and denitrification; denitrification phosphorus accumulation