

内循环 SBR 反应器无厌氧段实现同步脱氮除磷

王冬波, 李小明*, 曾光明, 杨麒, 廖德祥, 刘精今

(湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要:研究了内循环 SBR 反应器在模拟城市生活污水处理中脱氮除磷的效果. 结果表明, 在曝气时间为 4 h, 曝气开始时 DO 浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值 7~8 时, 反应器对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 均有较好的去除效果, 进水中 COD 浓度、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度、TP 浓度分别由 $170 \sim 260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $8 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到出水的 $4 \sim 48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD、 $\text{TIN}(\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N})$ 的去除率分别为 $89.7\% \pm 6.5\%$ 、70% 左右, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的转化率为 $97.4\% \pm 3.6\%$ 、TP 的去除率为 $95.6\% \pm 4.4\%$. 在本研究的实验过程中反应器进水后未经过传统除磷理论认为所必须的厌氧段而直接曝气, TP 的去除效果仍然良好且运行稳定, 这和传统的理论与研究有所区别.

关键词: SBR; 同步脱氮除磷; 模拟城市生活污水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)03-0534-06

Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal in the Reactor of Inner Loop SBR Without Anaerobic Phase

WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, ZENG Guang-ming, YANG Qi, LIAO De-xiang, LIU Jing-jin

(College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The performance of simultaneous nitrogen and phosphorus removal with an inner loop sequencing batch reactor were investigated by simulated municipal wastewater. The experimental results showed that COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, and TP can be removed efficiently after four hours aeration, during which dissolved oxygen concentration was at 6 mg/L at the beginning of aerobic phase and pH was in the rang of 7~8. The COD and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ as well as TP concentration in the effluent were about at $4 \sim 48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and $0 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, which indicated the removal rate for each item were about $89.7\% \pm 6.5\%$, $97.4\% \pm 3.6\%$, $95.6\% \pm 4.4\%$ when the concentration of influent were about $170 \sim 260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $8 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The removal rate of $\text{TIN}(\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N})$ was also reached about 70%. It was found during the research process that phosphorus removal can be achieved without anaerobic phase, which was conventionally considered as a key phase for phosphorus removal, and this phenomena can not be explained by traditional theory.

Key words: SBR; simultaneous nitrogen and phosphorus removal; simulated municipal wastewater

近年来,氮、磷化合物导致水体污染和水质富营养化的现象日益严重.因此,污水的处理不仅需要从污水中去除 COD,而且还要脱氮除磷.这就要求污水处理系统具备多种处理功能.一般来说,只要污水中没有大量的难降解有机物质, COD 的去除是比较容易实现的,而氮、磷的去除则比较复杂,涉及硝化,反硝化,微生物的释磷和吸磷等过程.每个过程的目的不同,对微生物组成、基质类型以及环境条件的要求也不同,如硝化菌是自养菌,它的生长繁殖速度较慢,而反硝化聚磷菌为异养菌,生长速度较快,它们生长所要求的环境条件差别较大,在传统污水处理中很难在同 1 个反应器中达到良好的同步脱氮除磷效果.因而,针对本研究所处理的低温低氮低 COD 的城市生活污水,如何在 1 个工艺系统中把各种过程尽量以它们各自需要的恰当反应条件结合在一起,以达到良好的脱氮除磷效果是一个重要的课题.

同步脱氮除磷的研究近年来有了一些新的进展:在移动床生物膜 SBR 反应器^[1](MBSBBR)中,经过厌氧段的充分释磷后,硝化、反硝化、除磷和 COD 的降解可同时发生在好养段;卢然超等^[2]利用 SBR 工艺培养出好氧颗粒污泥具有同步脱氮除磷的能力;罗固源等^[3]利用螺旋升流式反应器(SUFR)系统处理低温污水获得了较好的脱氮除磷效果; Satoshi 等^[4]在 SBR 中培养驯化了反硝化聚磷菌(DNPAOs),利用 NO_3^- 代替 O_2 作为电子受体实现了同步脱氮除磷; Zhang 等^[5]采用上升式循环 SBR 反应器,在 2 个

收稿日期: 2006-03-17; 修订日期: 2006-04-12

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCENT-0770); 国家自然科学基金项目(50478054); 国际科技合作重点项目(2004DFA06200); 长沙市科技计划重点项目(K051132-72)

作者简介: 王冬波(1981~),男,硕士,主要研究方向为水污染处理技术与控制, E-mail: wwww44339745@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: xmli@hnu.cn; xmli121x@hotmail.com

反应区分别培养硝化菌和反硝化聚磷菌实现了同步脱氮除磷等.无论是传统的除磷工艺还是最新的除磷研究,在反应过程中都设立了厌氧段,聚磷菌在厌氧段水解聚磷,以磷酸盐的形式释放到水中,同时获得能量将污水中易降解的挥发性脂肪酸合成 PHB 作为后续好养段的能源物质.传统的研究表明,厌氧段是生物除磷必不可少的阶段.本文介绍了内循环 SBR 反应器同步脱氮除磷的实验研究,在采用内循环 SBR 反应器处理城市生活污水的脱氮除磷过程中,进水后未经过厌氧段而直接曝气,仍能达到良好的除磷效果.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行方法

内循环 SBR 反应器采用有机玻璃制作,由内桶和外桶组成,内外桶底部相连,内桶直径为 8 cm,外桶直径为 15 cm,高约 70 cm,总体积约为 12L.反应器内桶曝气,污水在内桶与外桶间循环流动(实验装置见图 1).实验运行采用瞬时进水→曝气(4 h)→沉淀(0.5 h)→瞬时出水→静置(1 h)的方式,不设厌氧段,好氧采用鼓风曝气,曝气开始时 DO 浓度为 6 mg•L⁻¹左右.接种活性污泥取自长沙市第一污水处理厂,最初反应器中接种活性污泥浓度为 3 000 mg•L⁻¹左右,按上述方式进行驯化培养,约 7 d 后污泥外观呈黄褐色,活性及沉淀效果均较好,第 15 d 开始试运行.

1.2 污水水质

进水采用合成废水,碳源主要采用葡萄糖,氨氮

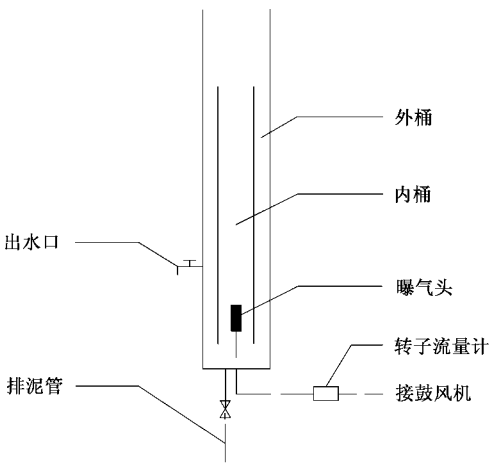


图 1 内循环 SBR 反应器
Fig.1 Reactor of inner loop SBR

主要采用氯化铵,以磷酸二氢钾模拟水中溶解性磷酸盐,并加碳酸氢钠调节 pH 值,使 pH 值控制在 7~8 之间.具体成分如表 1 所示.

1.3 分析方法^[6]

COD: 重铬酸钾法; NH₄⁺-N: 纳氏试剂光度法; NO₃⁻-N: 酚二磺酸光度法; NO₂⁻-N: N-(1-萘基)-乙二胺光度法; TP: 钼锑抗分光光度法.

2 结果与分析

2.1 长期运行中 COD、TIN、TP 的变化

约 14 d 反应器内活性污泥的驯化基本完成, COD、TIN 和 TP 的变化如图 2~图 4 所示.

由图 2~图 4 可以看出,反应器在长期运行中

表 1 进水成分

Table 1 Synthetic wastewater

药品名称	葡萄糖	氯化铵	磷酸二氢钾	碳酸氢钠	硫酸镁	氯化钙	硫酸亚铁
浓度/mg•L ⁻¹	200~300	20~25	8~15	175~200	20	15	5

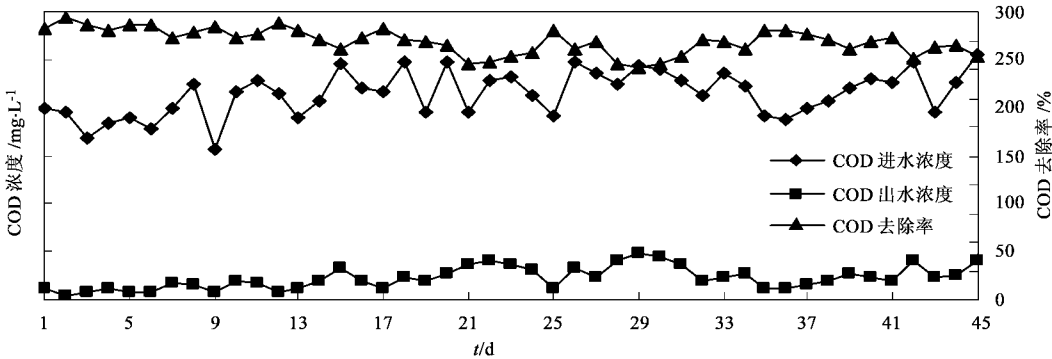


图 2 COD 浓度变化及去除效率

Fig.2 Variety of concentration and the efficiency of removal of COD

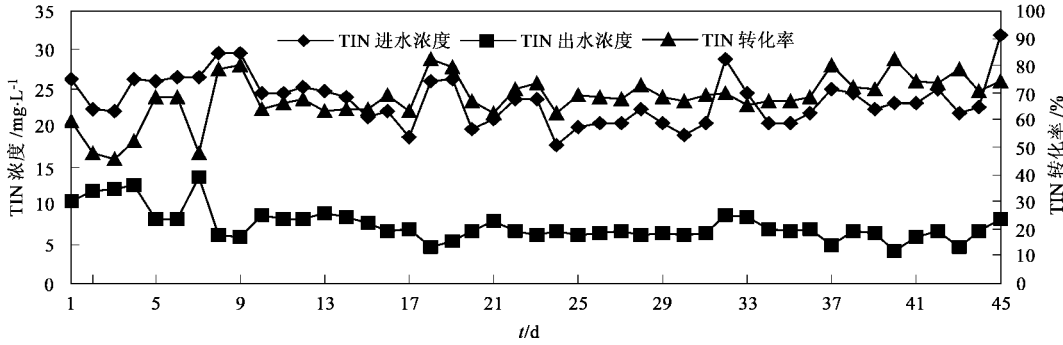


图 3 TIN 浓度变化及去除率

Fig.3 Variety of concentration and the efficiency of removal of TIN

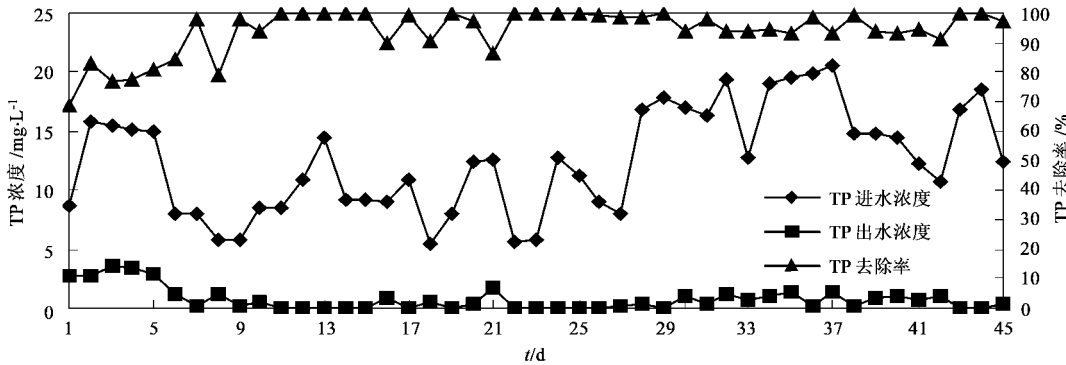


图 4 TP 浓度变化及去除率

Fig.4 Variety of concentration and the efficiency of removal of TP

COD、TIN、TP 的去除率基本稳定.进水 COD 浓度为 $150 \sim 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 COD 浓度降到 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,去除率能达到 80% 以上.TIN 的进水浓度在 $20 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,出水浓度为 $4 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率为 70% 左右,由于反应过程中没有反硝化所需要的纯厌氧环境,反硝化主要通过反应前半段外桶的缺氧环境、曝气结束时的沉淀阶段及整个反应过程中微生物内部的缺氧环境来实现,导致 TIN 的去除率只有 70% 左右.TP 的进水浓度在 $8 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水浓度在 $0 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,去除率能达到 90% 以上.因此,内循环 SBR 反应器对 COD、TIN、TP 均有较好的去除效果,对低温低氮低 COD 的城市生活污水和其他废水有着重要意义.

2.2 典型周期内 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、TIN 及 TP 的变化

经过约 30 d 的运行,得到内循环型 SBR 反应器 1 个典型运行周期中 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、TIN 及 TP 的变化如图 5、6 所示.

2.2.1 典型周期内 COD 的变化

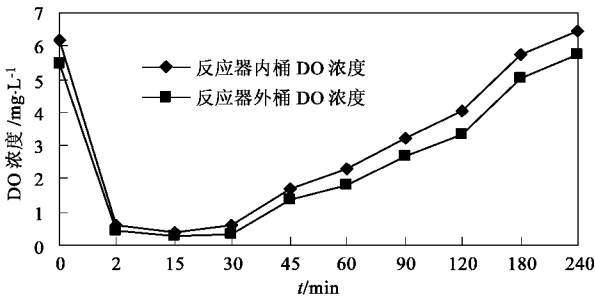


图 5 典型周期内外桶 DO 浓度变化

Fig.5 Variety of DO concentration with inside and outside barrel of the reactor in the representative cycle

从图 6 可以看出,COD 在曝气前 15 min 内降解迅速,15 min 后 COD 浓度下降较为缓慢,最终 COD 出水浓度为 $26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,COD 去除率为 88%.因为在曝气开始阶段,反应器中微生物能够快速吸附废水中有机物,而后才进行分解氧化,有机物一部分被微生物合成细胞物质,一部分成为微生物的代谢产物.

2.2.2 典型周期内 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、TIN 的变化

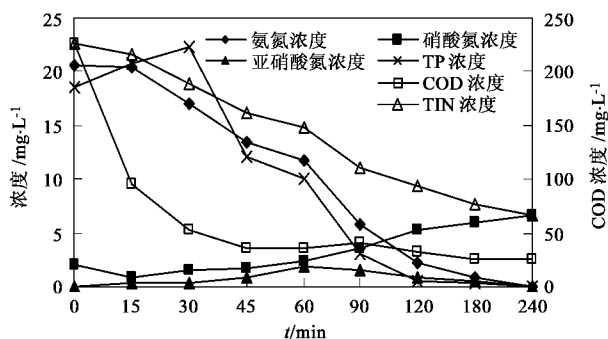


图6 典型周期内各参数的变化

Fig.6 Variety of multi-parameter in the representative cycle

TIN 的去除主要是由好养硝化菌的硝化作用和异氧反硝化菌的反硝化作用共同实现, NH_4^+ -N 在好氧硝化菌的作用下转化为 NO_2^- -N, 进而转化为 NO_3^- -N, 而异氧反硝化菌利用内外桶溶解氧差及微生物内部的溶解氧浓度梯度差产生的缺氧环境将 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 还原成 N_2 而从污水中去除。从图 6 得知, 在典型周期的整个曝气阶段, TIN 呈平缓下降的趋势, 进水 TIN 浓度为 $22.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TIN 浓度为 $6.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在曝气前 15 min 内 NH_4^+ -N 转化速率较慢 [转化速率为 $0.0145 \text{ mg} \cdot (\text{min} \cdot \text{L})^{-1}$], NO_3^- -N 呈缓慢下降的趋势, 并有少量 NO_2^- -N 产生, 这是由于曝气开始时, 废水中有机污染物较多, 反应器内溶解氧浓度在 2 min 内迅速降低 (DO 浓度从 $6.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 见图 5), 发生了反硝化反应, 硝化反应受到抑制; 在 15 ~ 60 min 内 NH_4^+ -N 的降解速度最快 [转化速率为 $0.190 \text{ mg} \cdot (\text{min} \cdot \text{L})^{-1}$], NO_3^- -N、 NO_2^- -N 均有增加, 说明 NH_4^+ -N 进行亚硝化反应生成 NO_2^- -N, 部分 NO_2^- -N 进而发生硝化反应生成 NO_3^- -N, 而 TIN 浓度下降了约 $6.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明反应器内还发生了反硝化反应, 部分 NO_3^- -N 在反硝化菌的作用下还原成了 N_2 而从污水中除去, NO_2^- -N 在 60 min 时积累最多 ($1.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 此时内外桶 DO 浓度分别为 $2.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 在 60 ~ 120 min 内, 反应器内外桶溶解氧在 $1.78 \sim 4.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最适合硝化反应发生的溶解氧条件, 但由于废水中 42.5% 的 NH_4^+ -N 在前 1 h 已被转化, 废水中 NH_4^+ -N 浓度不高 (60 min 时 NH_4^+ -N 浓度为 $11.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。因此, 在 60 ~ 120 min 内 NH_4^+ -N 的降解速度有所降低 [转化速率为 $0.160 \text{ mg} \cdot (\text{min} \cdot \text{L})^{-1}$], NO_2^- -N 缓慢下降至 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, NO_3^- -N 上升较多 ($5.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), TIN 浓度依然下

降较多 ($5.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 说明整个反应器虽然属于好氧环境, 但由于曝气不均匀, 加上微生物内部存在溶解氧浓度梯度, 反应器中仍有反硝化反应发生, 仍有部分 NO_3^- -N 还原成了 N_2 而从污水中除去; 随着曝气时间的增加, 溶液中 DO 浓度较高, NH_4^+ -N 全部硝化为 NO_3^- -N, NO_2^- -N 也被转化为 NO_3^- -N, 反硝化反应较为缓慢, 最终出水中只有 NO_3^- -N ($6.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), NH_4^+ -N 转化率达到 100%, TIN 去除率 70.85%。说明在内循环 SBR 反应器中, 即使在反应过程中没有单独的厌氧反硝化过程, 反硝化菌仍能通过反应前半段外桶的缺氧环境、曝气结束时的沉淀阶段及整个反应过程中微生物内部的缺氧环境进行反硝化反应, 脱氮效果仍然达到较好水平。

2.2.3 典型周期内 TP 的变化

磷的去除主要是靠聚磷菌在好养条件下将污水中磷酸盐以聚磷的形式储存在体内, 在曝气结束时排除剩余的富磷污泥来实现。内循环 SBR 反应器对磷的去除效果非常良好 (见图 6), 进水中 TP 浓度为 $18.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水中 TP 浓度接近于 0。反应器在瞬时进水后, 没有经过厌氧搅拌而直接曝气, 反应器中磷浓度呈先上升而后迅速下降的趋势, 在曝气开始后 15 min、30 min 时 TP 浓度分别为 $20.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $22.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 30 min 后污水中磷浓度迅速降低, 45 min 时 TP 浓度为 $12.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此后 TP 浓度随曝气时间的增加而逐渐降低, 在 120 min 时 TP 浓度降为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 120 min 后磷浓度降低较为缓慢, 180 min 时 TP 浓度为 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经过约 240 min 的曝气后, 出水中磷浓度接近于 0。说明本研究所驯化的活性污泥对磷的去除效果不同于传统的 SBR 反应器, 也和传统的除磷理论有所区别。

3 讨论

从脱氮除磷 30 多年的历史可以看到, 随着氮、磷污染数量的上升, 越来越多的国家和地区立法对氮、磷制定了排放标准, 且出水的排放标准越来越严格, 如对氮的排放标准由考核 NH_4^+ -N 转为考核总氮。而本实验中出水的 NH_4^+ -N 浓度虽然接近于 0, 但仍有大量的 NO_3^- -N 存在, 为适应日趋严格的污水排放标准, 反应装置和运行方式仍需进一步研究和改进。

Levin 等^[7]在 60 年代研究了磷的吸收与释放, 进而提出了生物除磷理论, 认为生物除磷是通过 Emden-Meyerhof 途径和三羧酸循环来实现,

Harold^[8]、Nichols^[9]的研究丰富和发展了生物除磷理论,认为聚磷的产生是微生物对厌氧抑制的一种响应,同时发现聚 β -羟基丁酸(PHB)对微生物在厌氧区的生存起着重要作用, Wentzel^[10]等提出了 Comeau/ Wentzel 模型,认为乙酸盐的部分氧化通过 TCA 循环产生还原动力,此后经过大量的实验研究,逐渐形成了目前传统的生物除磷理论.传统的生物除磷理论认为^[11],生物除磷主要通过聚磷菌在厌氧条件下释放磷,在有氧的条件下过量摄取磷,并通过排除富磷污泥达到除磷目的.聚磷菌属于兼性异氧细菌,在厌氧环境中且没有 DO 和大量 NO_3^- 存在的前提下,聚磷菌将细胞中聚磷水解成正磷酸盐以获得能量,并利用污水中易降解的有机物,如挥发性脂肪酸(VFA),合成储能物质聚 β -羟基丁酸(PHB)存于细胞中;在好氧环境中,聚磷菌以游离氧为电子受体,氧化细胞内储存的 PHB,并利用该反应产生的能量,过量地从污水中摄取磷酸盐,合成高能物质 ATP,其中一部分转化为聚磷,作为能量物质储存于细胞中.由于好氧环境下摄取的磷远大于厌氧环境下释放的磷,因此通过排放富磷污泥可以达到高效的生物除磷.传统的研究表明^[12],在废水生物除磷中,聚磷菌厌氧释放磷是好氧吸收和除磷的前提,厌氧段磷的释放量越大则出水磷浓度就越低,要实现生物除磷,反应周期中就必须设立厌氧段,本研究中出现的实验现象则不能用传统的理论进行解释.由于本研究中没有设独立厌氧段,因此没有释放大量的磷,虽然在曝气前段约 30 min 内有磷的释放,但其量($3.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 见图 6)与进水浓度相比很少,也和传统的研究不符.研究认为,磷的释放量应是进水磷浓度的 3 ~ 5 倍,否则就不能达到较高的去除效果,如当进水 TP 浓度 $< 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 TP 的释放量 $< 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 TP 浓度很难达到 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下;当进水 TP 浓度在 $2 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时 TP 的释放量为 $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 TP 浓度基本都在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.即按照传统的研究结果,即使本实验中在曝气前段有少量磷的释放,也不可能具有较高的去除率.就本研究中未经过厌氧段而实现较高除磷效率的实验现象,其原因尚不明,一种可能的解释是本研究反应器中的聚磷菌,对释磷的厌氧环境要求并不像传统的聚磷菌严格,在曝气前段约 30 min 的低溶解氧(DO 浓度在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,见图 5)环境下,水解细胞中的聚磷,并利用废水中易降解的有机物合成 PHB,实现磷的部分释放(COD 浓度由 $226 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 浓度由 $18.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 22.31

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 见图 6),这与文献研究 SRT 及碳源浓度对厌氧/好氧交替运行 SBR 工艺活性污泥中 PHB 的影响所得的实验现象相似^[13];也可能是本研究驯化的活性污泥中聚磷菌除磷方式和传统的除磷理论有所区别.针对出现的与传统除磷工艺与理论相悖的实验现象,明确其具体原因,具有重要的意义,有待进一步研究.

4 结论

(1)内循环型 SBR 反应器能够实现城市生活污水的一体化脱氮除磷.在曝气时间为 4 h,曝气开始时 DO 浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值 7 ~ 8 时,反应器对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TIN、TP 均有较好的去除效果,进水中 COD 浓度、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度、TP 浓度分别由 $170 \sim 260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $8 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到出水的 $4 \sim 48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 的去除率达到 $89.7\% \pm 6.5\%$ 左右, TIN 的去除率在 70% 左右, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的转化率为 $97.4\% \pm 3.6\%$ 、TP 的去除率为 $95.6\% \pm 4.4\%$.

(2)反应过程没有经过厌氧释磷而直接曝气,仍能够实现良好的除磷效果,磷的变化呈先升高后迅速下降的趋势,和传统的研究结果不同,具体原因尚有待进一步研究,可能是本研究所驯化的聚磷菌比较特别,对释磷的厌氧环境要求并不像传统的聚磷菌严格,在曝气前段约 30 min 的低溶解氧环境下,水解细胞内的聚磷,并利用废水中易降解的有机物合成 PHB,实现磷的部分释放;也可能是本研究驯化的活性污泥中有不同于常规聚磷菌的其他菌种,其除磷方式和传统的除磷理论有所区别.

(3)温度在 $5 \sim 30^\circ\text{C}$,曝气开始时 DO 浓度在 $5 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值在 7 ~ 8 范围内变化时,对磷的去除效果在本研究中似乎没有太大影响.

参考文献:

- [1] Pastorelli G, Canziani R, Pedrazzi L, et al. Phosphorus and nitrogen removal in moving-bed sequencing batch biofilm reactors [J]. Wat. Sci. Tech., 1999, 40(4): 169 ~ 176.
- [2] 卢然超, 张晓健, 张悦, 等. SBR 工艺污泥颗粒化对生物脱氮除磷特性的研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(5): 577 ~ 581.
- [3] 罗国源, 季铁军, 豆俊峰. SUFR 系统在低温影响下处理效果的实验分析[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 512 ~ 518.
- [4] Satoshi Tsuneda, Takashi Ohno, Koichi Soejima, et al. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, 27: 191 ~ 196.

- [5] Zhang Zhiyong, Zhou Jiti, Wang Jing, *et al.* Integration of nitrification and denitrifying dephosphatation in airlift loop sequencing batch biofilm reactor[J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**: 599 ~ 608.
- [6] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 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] Levin G V, Shapiro J. Metabolic uptake of phosphorus by wastewater organisms[J]. *WPCF*, 1965, **37**(6): 800 ~ 821.
- [8] Harold F M. Inorganic polyphosphates in biology structure metabolism and function[J]. *Bacteriological*, 1966, **30**(4): 774 ~ 794.
- [9] Nichols H A, Osborn D W. Bacterial stress: prerequisite for biological removal of phosphorus[J]. *WPCF*, 1979, **51**(3): 557 ~ 569.
- [10] Wentzel M C, Dold P L, Ekama G A, *et al.* Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge system Part III: Kinetic Model[J]. *Water SA*, 1989, **15**(2): 89 ~ 102.
- [11] Pijuan M, Guisasola A, Baeza J A, *et al.* Aerobic phosphorus release linked to acetate uptake: Influence of PAO intracellular storage compounds[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, **26**: 184 ~ 190.
- [12] 方茜, 张可方, 张朝升, 等. SBR 法处理低碳城市污水的除磷规律[J]. *中国给水排水*, 2004, **20**(8): 43 ~ 46.
- [13] 吴光学, 管运涛. SRT 及碳源浓度对厌氧/好氧交替运行 SBR 工艺活性污泥中 PHB 的影响[J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 126 ~ 130.

欢迎订阅 2007 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想,理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国工程索引 EI;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2007 年为 16 开本,40 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号: CN11-1895/X 国际标准刊号: ISSN 0250-3301

国外发行代号: M 0205 国内邮发代号: 2-821

编辑部地址: 北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编: 100085

电话: 010-62941102; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn