

厌氧预酸化-间歇曝气生物膜系统的生物除磷性能

郑蓓, 龙腾锐

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 采用间歇曝气生物滤池与前置厌氧生物滤池组成的生物除磷系统处理生活污水. 试验考察了水力负荷以及污染物(有机物、磷酸盐)负荷率对系统运行性能的影响. 结果表明, 该系统可以有效去除污水中的有机物和磷酸盐. 系统水力停留时间 HRT 为 23.3~4.6 h, COD 出水平均浓度 68 mg/L, 平均去除率 73.6%; TP 出水平均浓度 0.59 mg/L, 平均去除率 85.2%. 系统具有良好的适应水力负荷及污染物负荷率变化的能力, 运行性能稳定. 间歇曝气池采用不同于传统反冲洗的方法去除生物膜中富集的磷, 使生物膜反应器在长期连续运行条件下保持良好的吸磷能力, 从而延长其运行周期, 减少其反冲洗频率. 前置厌氧滤池对生活污水的预酸化处理, 可以有效提高污水中挥发性脂肪酸的浓度.

关键词: 生物膜; 生物除磷; 间歇曝气; 挥发性脂肪酸

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2008)05-1227-06

Performance of Biological Phosphorus Removal in Anaerobic Pre-fermentation and Intermittent Aerated Biofilm System Treating Domestic Wastewater

ZHENG Bei, LONG Teng-rui

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: A fixed-film system composed of anaerobic biofilter and intermittent aerated biofilter (IABF) was developed for enhanced biological phosphorus removal (EBPR) in treatment of domestic wastewater. Influence of hydraulic, organic, and phosphorus loading on performance of the system was investigated in this study. The result indicates that the system is efficient for the removal of organic and P in the treatment. At a hydraulic retention time of the system of 23.3~4.6 h, the effluent concentration and reduction efficiency of TP and COD are 0.59 mg/L, 68 mg/L in average and 85.2%, 73.6% in average, respectively. A stable performance of EBPR in the system is achieved with a good adaptability of fluctuations of the loadings. An innovative method instead of traditional backwashing was applied to remove P in biofilm from IABF. The use of the method improves P uptake capacity in biofilm during long-term operation without wasting, which prolongs operation duration and reduces backwashing frequency in IABF. Pre-fermentation of domestic wastewater in anaerobic biofilter increases concentration of volatile fatty acids in the influent of IABF.

Key words: biofilm; biological phosphorus removal; intermittent aeration; volatile fatty acids

淹没式固定膜生物滤池一般对磷的去除主要通过过滤层的物理过滤和截留作用, 对溶解态磷的去除效果不好^[1,2]. 通过提供不曝气/曝气交替的环境条件, 可以在生物滤池中富集聚磷菌. 相关报道显示, 生物膜的生物除磷过程研究或采用序批式反应系统^[3~8], 或采用周期性改变水流方向和曝气方式的连续流系统^[9~12]. 但目前生物膜在生物除磷过程中的应用尚处于试验研究阶段. 在生物膜反应器中, 微生物富集的磷必须通过反冲洗途径从系统中移出, 反冲洗的频率和程度决定了磷的去除效果与能耗. 富磷生物膜的移除是生物膜除磷性能的关键性限制因素^[11,13,14].

Comeau 等^[15]认为, 在生物除磷过程中, 厌氧区的作用就是使聚磷菌最大限度地在其体内储存基质. 储存的碳源是好氧阶段聚磷菌生长过程以及合成聚磷酸盐的能量来源. 因此, 应该尽可能地在厌氧

阶段供给易降解有机质以满足其代谢需求. 在实际污水处理系统中, 挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFAs)的含量往往是有限的. 为了改善生物除磷系统的运行, 应当提高原污水中 VFAs 的含量. 一些活性污泥法污水处理厂的实践证实^[16~18], 利用初沉池污泥发酵可以有效提高污水中 VFAs 的含量, 该方法能够稳定和促进生物除磷系统的运行性能.

本研究提出一个由间歇曝气生物滤池(intermittent aerated biofilter, IABF)结合前置厌氧滤池组成的生物除磷系统, 用于处理生活污水. 该系统利用厌氧滤池对原污水进行预酸化处理; 采用非传统反冲洗方法去除生物膜中富集的磷, 使得 IABF 的运行不依赖于反冲洗操作, 从而改善了生物滤池的

收稿日期: 2007-05-29; 修订日期: 2007-07-30

作者简介: 郑蓓(1973~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为污水处理理论与技术, E-mail: grace_zb@163.com

除磷性能. 本研究将探讨该系统的生物除磷运行性能及其主要影响因素.

1 材料与方法

1.1 试验流程

试验流程如图 1 所示. 试验系统由厌氧生物滤池和 IABF 串联组成. 原污水经由污水收集系统首先进入厌氧池. 原污水中的大分子有机物以及被滤层截留下来的颗粒物中的有机成分在厌氧环境下发酵酸化, 可以提高厌氧池出水中 VFAs 的含量. 厌氧池对原污水的预酸化处理可以达到改善水质的目的, 为后续流程中聚磷菌的富集生长提供有利的基质条件.

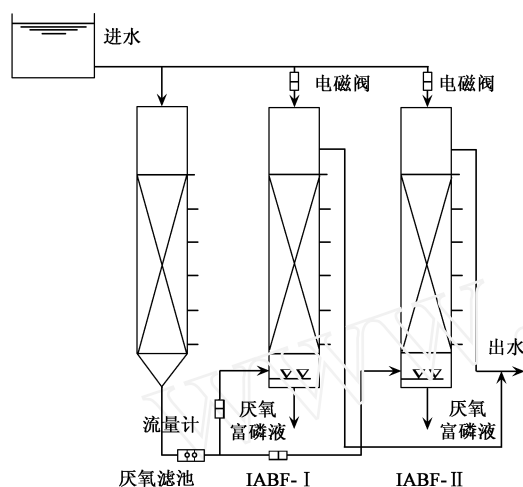


图 1 生物膜除磷系统流程示意

Fig. 1 Schematic of biofilm system for biological phosphorus removal

系统中设有 2 个并列运行的 IABF. 每个 IABF 周期性交替不曝气/曝气操作, 从而在反应器中提供了厌氧/好氧交替的环境, 有利于聚磷菌的富集生长. IABF 的间歇曝气循环周期 (cycle duration, CD) 包括厌氧和好氧 2 个阶段. 在 1 个 CD 历时内, IABF 的运行方式如下: 在厌氧阶段伊始采用快速进水方式, 经厌氧池预酸化处理的污水进入 IABF, 间歇运行. 在厌氧阶段结束时, 聚磷菌释磷作用形成的高浓度含磷液 (即厌氧富磷液) 从反应器中排出, 另采用化学方法单独处理. 在紧接着的好氧阶段, 为了获得稳定的出水, 在好氧阶段初始 1 h 内采用间歇方式运行. 即好氧伊始采用快速进水方式, 原污水直接进入 IABF, 间歇运行. 1 h 后, 开始进入好氧连续流运行阶段, 即厌氧池出水连续进入 IABF, IABF 连续出水. 至好氧阶段结束时, 反应器中的好氧反应液排出. 至此, IABF 结束了 1 个 CD 历时的运行.

2 个 IABF 交替运行. 当 IABF-I 处于好氧连续流运行期间, IABF-II 依次经历厌氧间歇运行和好氧初间歇运行阶段. 当 IABF-I 好氧阶段运行结束时, IABF-II 开始进入好氧连续流运行阶段. 每个 IABF 根据 CD 历时设置周而复始地运行, 整个系统可以实现连续流. IABF 的这种厌氧末排出富磷液、好氧连续进出水的运行方式, 本研究称为 ACF 运行方式 (aerobic continuous feeding regime, ACF). IABF 的运行采用自行设计的继电器控制系统控制.

1.2 试验装置

单个反应器内径 0.09 m, 柱高 1 m, 鹅卵石垫层高 0.06 m, 填料层高 0.5 m, 有效容积 5.2 L. IABF 底部设曝气装置, 厌氧阶段设有循环装置. 各池填装填料为酶促生物填料, 粒径为 4~6 mm.

1.3 试验方法

试验考察了水力负荷及污染物负荷率对系统运行性能的影响. 试验期间系统运行 71 d, IABF 运行周期为 14~22 d. 试验运行条件见表 1. 试验用水为重庆大学校区学生宿舍生活污水.

1.4 分析方法

COD 采用 HACH 公司 COD 比色测量法测定, 使用 HACH 公司 COD 反应器及配套 DR2010 分光光度计. TP 采用钼锑抗分光光度法^[19]. VFAs 测定采用电位滴定联合滴定法^[20], 平行样相对误差 < 4%.

2 结果与讨论

2.1 系统运行结果

试验分 5 个轮次进行, 各轮次进出水平均浓度见表 1. 试验期间进水浓度波动幅度较大, 系统 HRT 调整幅度大, 出水浓度稳定. 只是从 RUN1 进入 RUN2 以及从 RUN2 进入 RUN3 的过程中, 系统 HRT 变化幅度超过 1 倍, 颗粒物带出量明显增加, 出水浓度出现短时升高. 在 1~2 d 内系统出水又重新恢复到原来的低浓度水平. RUN3 和 RUN5 运行期间 HRT 短, TP 出水平均浓度有所升高. 试验期间, COD 进、出水平均浓度分别为 256 mg/L、68 mg/L, 平均去除率 73.6%. TP 进、出水平均浓度分别为 4.3 mg/L、0.59 mg/L, 平均去除率 85.2%.

2.2 IABF 在 ACF 运行方式下的特征浓度曲线

如图 2 所示, 在 ACF 运行方式下, 厌氧过程与好氧过程是不连续的. 厌氧阶段, 最初的 1 h 内 TP 浓度的快速上升伴随着 COD 浓度的快速下降; 之后 TP 浓度上升速度明显减缓, COD 浓度则基本保持不变. 在厌氧末期形成高浓度的磷酸盐溶液最终排出

反应器,可进一步采用化学方法处理.好氧阶段,原水水质决定了好氧初始水质条件,COD 和 TP 的浓度在好氧初 1 h 内迅速下降,之后的连续出水阶段出水保持稳定的低浓度水平.

表 1 系统运行工况及运行参数

Table 1 Operating conditions and parameters in the system					
参数	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5
各轮次历时/d	17	15	11	10	18
温度/℃	21~24.9	22.5~24.1	23.9~27.9	27.2~28.9	28~31.5
HRT/h	23.3	11.5	4.6	8.5	5.1
水力负荷/ $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	1.68	3.46	8.13	4.65	8.39
COD 进水 ¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	307(77)	342(119)	272(64)	232(48)	168(37)
COD 出水 ¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	75(19)	89(24)	79(22)	54(10)	50(11)
TP 进水 ¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5.1(1.3)	5.6(1.3)	4.6(1.1)	4.1(0.53)	2.6(0.45)
TP 出水 ¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.32(0.16)	0.48(0.25)	0.72(0.37)	0.46(0.08)	0.63(0.32)
COD 去除率 ²⁾ /%	71.9	75.5	72.1	76.1	72.2
TP 去除率 ²⁾ /%	89.3	90.4	85.6	87.6	73.3
IABF 的 CD 历时/h	RUN1~3:厌氧 3 h,好氧 5 h,合计 8 h;RUN4~5:厌氧 2 h,好氧 4 h,合计 6 h				
pH	7.96~8.53				

1) 各轮次平均浓度(标准偏差),RUN1~RUN5 数据点数量分别为 14、14、10、10、16;2) 各轮次平均值

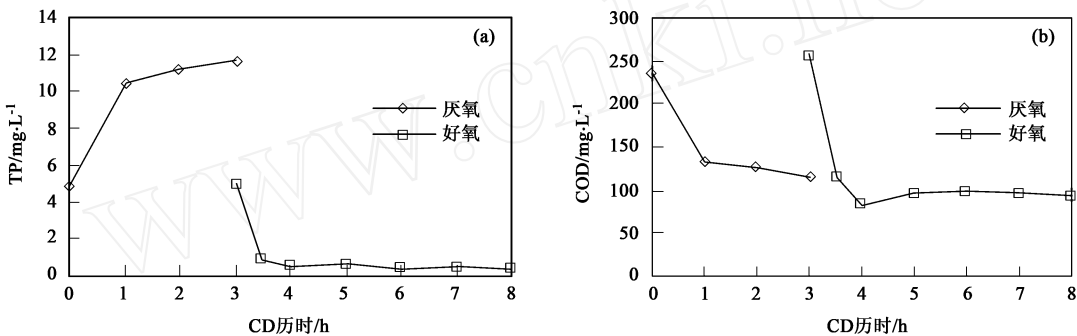


图 2 IABF 在 ACF 运行方式下的特征浓度曲线
Fig. 2 Typical profiles of the ACF regime in IABF

2.3 水力负荷对 IABF 除磷性能的影响

2.3.1 水力负荷对吸磷过程的影响

IABF 各轮次水力负荷与污染物负荷率及其去除速率的关系如图 3 所示.其中磷酸盐负荷(PL)与吸磷速率(PR)分别为好氧连续流阶段单台 IABF 单位体积填料每日实际的磷酸盐负荷与吸磷速率[磷质量/(填料体积×时间)],好氧有机负荷(OL)与去除速率(OR)分别为好氧连续流阶段单台 IABF 单位体积填料每日实际的有机负荷与去除速率[COD 质量/(填料体积×时间)].RUN1~RUN4,排除进水浓度波动的因素,好氧有机负荷与磷酸盐负荷均随水力负荷的增加而增大,有机物去除速率与吸磷速率也相应增大.水力负荷增大,有利于提高液相与生物膜表面之间的传质速率;同时,水力冲刷作用的增强也使得滤层中随出流被带出的颗粒物有所增加.从表 1 可知,RUN1~RUN4 随着水力负荷的显著提高,

TP 出水浓度均值及其波动幅度有所增加,磷酸盐去除率略有下降.数据显示,在试验范围内,IABF 对负荷率的变化具备良好的适应能力,运行性能稳定.而 RUN5 的情况显然与 RUN1~RUN4 不太一致.如图 3 及表 1 所示,虽然磷酸盐负荷与 RUN2、RUN4 相当,但 RUN5 的吸磷速率明显偏低;水力负荷与 RUN3 相当,但 RUN5 在较低磷酸盐负荷条件下,去除效率却有明显下降.可见,这一现象的出现是另有原因的.

2.3.2 水力负荷对厌氧阶段进水水质的影响

采用前置厌氧滤池对生活污水进行预处理,可以提高 IABF 进水中易降解有机质的含量.滤层截留的颗粒物,是厌氧酸化过程有机物的重要来源之一.如图 4 所示,温度范围为 24~27.2℃,厌氧池单位体积填料产酸速率随水力负荷而增大.产酸速率越大,厌氧池出水中 VFAs 含量就增加得越多.根据统计

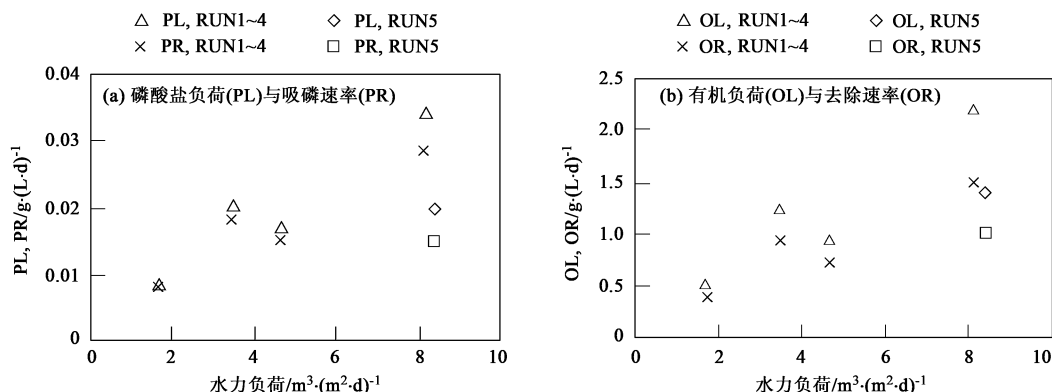


图3 IABF 好氧连续流阶段有机物与磷酸盐的去除

Fig. 3 Removal of organic and phosphorus with aerobic continuous flow in IABF

结果,当进水 COD 浓度在 200~400 mg/L 之间,释磷速率与厌氧进水浓度之间没有明显的关联,释磷过程的典型特征如图 2(a) 所示. 厌氧阶段进水中较为丰富的 VFAs 供给,对 IABF 中聚磷菌的优势生长显然是有利的.

RUN5 期间,受季节因素影响进水 COD 浓度持续低于 200 mg/L,加之水温高,厌氧细菌代谢活跃,尽管水力负荷高但厌氧池的产酸作用不明显. 在这种条件下,释磷过程初期的磷酸盐浓度线性增长过程受到基质浓度的抑制. 有报道显示,生物除磷系统长期在低浓度条件下运行,厌氧阶段聚羟基链烷酸 (polyhydroxyalkanoate, PHA) 的储存就会因为基质摄取不足而下降^[21]. 而较低的 PHA 储量对吸磷过程的影响可能引起吸磷速率下降^[22]. 所以,过低的进水浓度对生物除磷过程是不利的.

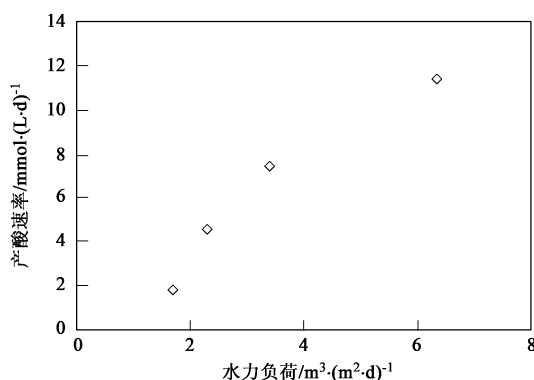


图4 水力负荷与厌氧池产酸速率

Fig. 4 Hydraulic loading and VFAs production rate in anaerobic biofilter

2.4 IABF 的净吸磷能力

在 ACF 运行方式下, IABF 主要通过以液态磷酸盐的形式周期性向系统外转移生物膜中富集的固态

磷,从而使生物膜处于较低含磷状态,以获得较大的储磷容量. 因此, IABF 的吸磷能力即为 ACF 运行方式下,从反应器中移出单位质量磷酸盐所获得的净吸磷能力 (net P uptake/anaerobic P removal, NPU/ANPR),数值上可以用好氧阶段净吸磷速率与厌氧阶段释磷速率之比来表示.

好氧阶段,磷酸盐摄入量随负荷的增大而增加,聚磷酸盐含量和 PHA 的消耗随之增加. 在厌氧阶段,聚磷菌需要摄取足够量的基质来恢复 PHA 的储量,相应的释磷量会增大. 因此,厌氧过程与好氧过程间的相互关联使得系统能够根据负荷的变化做出相应的响应. 如图 5 所示, RUN1~RUN4 的 NPU/ANPR 与好氧磷酸盐负荷呈线性正相关. 这表明,采用 ACF 方式不仅可以使生物膜反应器在长周期连续运行条件下保持良好的吸磷能力,并且可以很好地适应负荷率的变化.

从图 5 中还可看出, RUN5 的 NPU/ANPR 值明显偏高,比磷酸盐负荷与 NPU/ANPR 线性关系的对应值高出 13.5%. 受基质浓度的限制释磷速率下降,但吸磷速率的下降幅度却较之为低,因此 RUN5 的

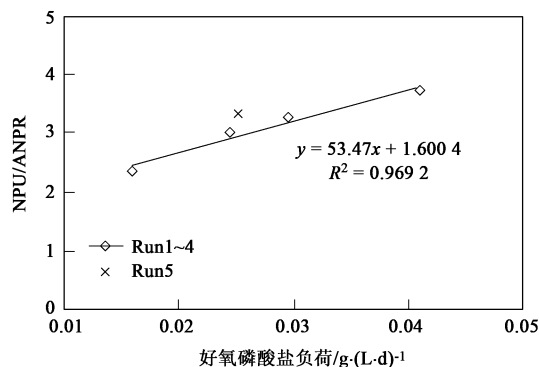


图5 好氧磷酸盐负荷与 NPU/ANPR

Fig. 5 P loading in aerobic phase and NPU/ANPR

NPU/ANPR 比值偏高. 这样在连续运行期间, 磷在生物膜相中的累积速率就会因为磷酸盐的摄入量偏高而偏大. 所以与磷酸盐负荷相当的 RUN2、RUN4 相比, RUN5 的出水浓度升高(见表 1).

2.5 IABF 的 CD 设置与除磷性能

结合表 1 和图 3, 比较 RUN2 与 RUN4, 在负荷相当的条件 下, 采用 8 h 或 6 h 周期设置 IABF 的除磷性能没有明显差异. 在低进水浓度条件下, 采用 6 h 的 CD 设置可以避免或至少可以减少因为基质供给不足引起的无效释磷的发生.

2.6 生物膜除磷系统比较

文献中生物膜除磷系统的主要运行参数列于表 2 中(部分数据为文献值换算后的结果). 与 2 台生物滤池串联的连续流系统相比, 本研究的试验系统在较大的水力负荷以及较高的有机负荷运行条件下, 磷的去除效果好. 与厌氧/好氧 SBR 系统相比, 本研究的试验系统由于有机负荷高, COD 去除率相对较低, 但磷的去除率较高. 同时从表 2 中还反映出, 传统生物膜除磷系统采用频繁地反冲洗可以提高磷的去除效果. 本研究采用周期性移出厌氧富磷液的

表 2 文献中的生物膜除磷系统主要运行参数

Table 2 Operation parameters in biofilm phosphorus removal systems in literatures								
生物膜系统特征	周期 历时/h	有机负荷 /g · (L · d) ⁻¹	水力负荷 /m ³ · (m ² · d) ⁻¹	磷去除 率/%	COD 去除 率/%	反冲洗 周期/d	污水来源	文献来源
2 台生物滤池串联: 交替 流向, 单台交替曝气	4~6 6	1.06	0.3	29~41 29	76~82 60	约 1 周	合成污水	[10] [9]
固定床厌氧/好氧 SBR	4~6			79.2~81.9	94.3~95.2	1	合成污水	[23]
固定床厌氧/好氧 SBR	8	0.552~0.635		54.3~73.0	75.8~85.0		合成污水	[4]
固定床厌氧/好氧 SBR	8	1.0		71	89	2~3	市政污水	[8]
移动床厌氧/好氧 SBR	6	0.9		50	90		合成污水	[24]
厌氧滤池-交替运行的 IABF 连续流系统	6~8	1.92~8.20	1.68~8.39	77.5~90.4	71.9~76.1	14~22	生活污水	本研究

方法去除生物膜中富集的磷, 磷的去除效果好, 而反冲洗频率远远低于文献值.

3 结论

(1) 厌氧预酸化- IABF 生物除磷系统可以有效去除生活污水中的有机物与磷酸盐. 试验期间, HRT 为 23.3~4.6 h, COD 进、出水平均浓度分别为 256 mg/L、68 mg/L, 平均去除率 73.6 %. TP 进、出水平均浓度分别为 4.3 mg/L、0.59 mg/L, 平均去除率 85.2 %.

(2) 试验考察了水力负荷以及污染物(有机物、磷酸盐) 负荷率对 IABF 生物除磷系统性能的影响. 结果表明, 系统具有良好的适应负荷变化的能力, 运行性能稳定.

(3) 试验研究表明, ACF 方式厌氧末周期性移出富磷反应液, 可以有效去除生物膜中富集的磷, 使生物膜反应器在长期连续运行条件下保持良好的吸磷能力, 从而延长了 IABF 的运行周期, 减少了反冲洗频率.

(4) 前置厌氧滤池可以有效提高污水中易降解基质浓度, 产酸速率随水力负荷而增大, 但在低浓度

进水条件下厌氧池的产酸作用不明显.

(5) 试验表明, 长期在低浓度条件下运行对 IABF 的生物除磷过程不利.

参考文献:

[1] 龙腾锐, 方芳, 郭劲松. 变速生物滤池处理城市污水的效能研究[J]. 中国给水排水, 2002, 18(1): 13-18.

[2] 龙腾锐, 赵娟, 郭劲松, 等. 缺氧变速生物滤池 + SASBR 处理城市污水试验研究[J]. 水处理技术, 2002, 28(5): 269-273.

[3] Garza-Zúñiga M A, González-Martínez S. Biological phosphorus and nitrogen removal in a biofilm sequencing batch reactor[J]. Water Sci Technol, 1996, 34(1-2): 293-301.

[4] Muñoz-Colunga A, González-Martínez S. Effects of population displacements on biological phosphorus removal in a biofilm SBR[J]. Water Sci Technol, 1996, 34(1-2): 303-313.

[5] Morgenroth E, Wilderer P A. Modeling of enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch biofilm reactor[J]. Water Sci Technol, 1998, 37(4-5): 583-587.

[6] Falkenroft C, Harremoës P, Mosbæk H, et al. Stability of a lab-scale biofilm for simultaneous removal of phosphorus and nitrate[J]. Water Sci Technol, 2001, 43(1): 335-342.

[7] Geseke A, Arnz P, Amann R, et al. Simultaneous P and N removal in a sequencing batch biofilm reactor: insights from reactor- and microscale investigations[J]. Water Res, 2002, 36(2): 501-509.

- [8] Amz P, Arnold E, Wilderer P A. Enhanced biological phosphorus removal in a semi full-scale SBBR[J]. *Water Sci Technol*, 2001, **43**(3): 167-174.
- [9] Abeysinghe D H, Shanableh A, Rigden B. Biofilters for water reuse in aquaculture[J]. *Water Sci Technol*, 1996, **34**(11): 253-260.
- [10] Shanableh A, Abeysinghe D, Hijazi A. Effect of cycle duration on phosphorus and nitrogen transformations in biofilters[J]. *Water Res*, 1997, **31**(1): 149-153.
- [11] Shanableh A, Hijazi A. Treatment of simulated aquaculture water using biofilters subjected to aeration/non-aeration cycles[J]. *Water Sci Technol*, 1998, **38**(8-9): 223-231.
- [12] Pak D, Chang W. Factors affecting phosphorus removal in two biofilter system treating wastewater from car-washing facility[J]. *Water Sci Technol*, 2000, **41**(4-5): 487-492.
- [13] Falkentoft C M, Harremoës P, Møsbæk H. The significance of zonation in a denitrifying phosphorus removing biofilm[J]. *Water Res*, 1999, **33**(15): 3303-3310.
- [14] Morgenroth E, Wilderer P A. Controlled biomass removal-the key parameter to achieve enhanced biological phosphorus removal in biofilm systems[J]. *Water Sci Technol*, 1999, **39**(7): 33-40.
- [15] Comeau Y, Hall K J, Hancock R E W, *et al.* Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal[J]. *Water Res*, 1986, **12**(20): 1511-1521.
- [16] Skalsky D S, Daigger G I. Wastewater solids fermentation for volatile acid production and enhanced biological phosphorus removal Source[J]. *Water Environ Res*, 1995, **67**(2): 230-237.
- [17] Ewa L, Magnus C, Karin J, *et al.* Carbon and phosphorus transformations in a full-scale enhanced biological phosphorus removal process[J]. *Water Res*, 1997, **11**(31): 2693-2698.
- [18] Magnus C, Ewa L, Karin J, *et al.* Increasing substrate for polyphosphate-accumulating bacteria in municipal wastewater through hydrolysis and fermentation of sludge in primary clarifiers[J]. *Water Environ Res*, 1998, **70**(2): 138-145.
- [19] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002. 243-248.
- [20] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京:中国轻工业出版社, 1998. 519-521.
- [21] Lopez C, Pons M N, Morgenroth E. Endogenous processes during long-term starvation in activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal[J]. *Water Res*, 2006, **40**(8): 1519-1530.
- [22] Petersen B, Temmink H, Henze M, *et al.* Phosphate uptake kinetics in relation to PHB under aerobic conditions[J]. *Water Res*, 1998, **32**(1): 91-100.
- [23] Chiou R J, Ouyang C F, Lin K H. The characteristics of phosphorus removal in an anaerobic/aerobic sequential batch biofilter reactor[J]. *Water Sci Technol*, 2001, **144**(1): 57-65.
- [24] Helness H, Adegard H. Biological phosphorus removal in a sequencing batch moving bed biofilm reactor[J]. *Water Sci Technol*, 1999, **40**(4-5): 161-168.