

文章编号:1000-582X(2008)06-0683-05

# 两种运行方式下的间歇曝气生物滤池除磷特性

郑蓓<sup>1,2</sup>, 龙腾锐<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030;

2. 中国市政工程中南设计研究院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 厌氧-间歇曝气生物膜系统用于生活污水的生物除磷。研究了运行方式对间歇曝气生物滤池除磷性能的影响。结果表明,与序批运行方式相比,ACF(aerobic continuous feeding)运行方式可以有效提高生物膜除磷系统的净吸磷能力,采用不同于传统反冲洗方法去除生物膜中富集的磷,可以使间歇曝气滤池在长周期条件下保持良好的运行性能,减少滤池的反冲洗频率。ACF方式下,有机物与磷酸盐的分布及变化特征表明间歇曝气池内可能存在着微生物不同种群的空间分布。

**关键词:** 间歇曝气; 生物膜; 生物除磷; 吸磷过程; 污水处理

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

## Characteristics of phosphorus removal in an intermittent aerated biofilter under two operating regimes

ZHENG Bei<sup>1,2</sup>, LONG Teng-rui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute, Wuhan 430010, P. R. China)

**Abstract:** A fixed-film system composed of an anaerobic biofilter and an intermittently aerated biofilter (IABF) was developed for enhanced biological phosphorus removal (EBPR) in the treatment of domestic wastewater. We investigated the influence of the operating regime on the performance of EBPR in IABF. Compared to the sequencing batch regime, net phosphorus-uptake capacity in IABF was improved under the aerobic continuous feeding (ACF) regime. An innovative method that can be used instead of traditional backwashing was applied to IABF for removal of phosphorus from the reactor under the ACF regime. Using this method, a stable performance of EBPR was achieved during long-term operation, with a low frequency of backwashing in IABF. Distribution and variation of organic and phosphorus in IABF may imply spatial distribution of microorganisms in the column of the reactor under the ACF regime.

**Key words:** intermittent aeration; biofilm; biological phosphorus removal; phosphorus uptake; wastewater treatment

在厌氧/好氧生物除磷过程中,聚磷菌在外碳源供给充足的厌氧条件下,快速吸收基质并在体内储存聚羟基链烷酸,同时分解聚磷酸盐释放磷酸盐。

在紧接着的好氧阶段,外碳源已消耗殆尽,这时聚磷菌就利用体内储存的聚羟基链烷酸生长,并从环境中摄取磷酸盐合成新的聚磷酸盐。通过这种生存方

收稿日期:2008-01-12

基金项目:国家十五攻关课题资助项目(2004BA604A01)

作者简介:郑蓓(1973-),女,重庆大学博士,主要研究方向为污水处理理论与技术。

龙腾锐(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65126098;(E-mail)longtengrui@sina.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

式,聚磷菌可以依靠外部基质浓度来平衡自身的生长,使其比那些不具备储能能力的细菌更具有竞争优势,从而得以在厌氧/好氧交替的环境中富集生长<sup>[1]</sup>。

基于此,生物膜除磷过程的研究报道中所采用的试验系统分为两类:一类是序批式反应系统<sup>[2-7]</sup>,即厌氧、好氧过程按时间顺序依次进行;另一类则采用多个反应器串联的连续流系统<sup>[8-11]</sup>,通过周期性改变水流方向和曝气方式在各个反应器中实现厌氧/好氧的交替。在这种周期性调整过程中,原污水总是首先进入厌氧反应器,好氧反应器总是串联在厌氧反应器之后。在这两类系统中,厌氧释磷过程和好氧吸磷过程是在电子供体(基质)和电子受体(氧)在时间上或空间上分离的条件下进行的。

在生物膜反应器中,微生物的附着生长方式决定了生物除磷过程中所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<sup>[10,12-13]</sup>。

笔者提出了一个由厌氧滤池和间歇曝气生物滤池(IABF)组成的生物除磷系统,用于处理生活污水。IABF通过交替不曝气/曝气操作,提供适宜聚磷菌的生长环境。IABF采用“间歇-连续流相结合、运用非传统除磷方法”的组合运行方式,来改善生物滤池的除磷性能。在该运行方式下,电子供体和电子受体同时存在于好氧过程。笔者通过与序批式运行方式对比分析,探讨IABF在不同运行方式下的生物除磷特性。

## 1 试验系统与方法

### 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挥发性脂肪酸的含量。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。

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(CD)包括厌氧和好氧2个阶段。在一个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

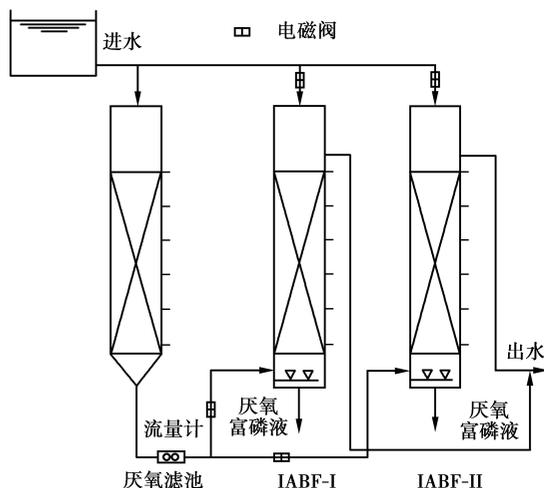


图1 生物膜除磷系统流程示意图

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结束了一个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、好氧连续进进水的运行方式,称为ACF运行方式。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。各池填充填料为酶促生物填料,粒径为4~6 mm。

### 1.3 试验方法

IABF在序批(SB)运行方式下稳定运行3周后,转入ACF方式运行阶段。IABF运行期间运行周期为13~27 d。IABF反冲洗周期根据反应器水力损失情况来确定。ACF各轮次运行条件见表1。试验比较分析IABF在2种运行方式下的特性。试验用水为重庆大学校区学生宿舍生活污水。

表 1 IABF 2 种运行方式下的生物除磷性能比较

运行方式	累计运行 天数/d	IABF 的 CD 历时/h			运行周期内 连续运行 天数/d	T/℃	P <sub>in</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	P <sub>out</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	η <sub>p</sub> /%	η <sub>NP</sub> /%	pH
		厌氧	如氧	合计							
SB	27	4	4	8	14	21.7	4.74	2.19	76.8	51.0	
ACF 运行 方式	RUN1	59	3	5	8	6	24.5	2.93	0.14	82.5	82.5
	RUN2	73	3	5	8	7	24.3	3.32	0.08	84.3	84.3
	RUN3	87	3	5	8	22	27.4	3.36	0.35	90.4	90.4
	RUN4	101	2	4	6	9	30.0	1.87	0.25	78.6	78.6

运行方式	运行 天数	HRT <sup>1)</sup> /h /d	COD 进水 <sup>2)</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	COD 出水 <sup>2)</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	TP 进水 <sup>2)</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	TP 出水 <sup>2)</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	总有机负荷 <sup>2)</sup> /(kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	总磷酸盐负荷 <sup>2)</sup> /(kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
ACF	RUN1	15	25.2					
	RUN2	29	16.9					
	RUN3	43	12.5	270 ± 116	69 ± 29	4.17 ± 1.67	0.36 ± 0.17	1.71 ± 0.39
	RUN4	57	7.1					0.029 0 ± 0.005 7

1)指导 ACF 方式下系统的 HRT;2)均为 ACF 运行期间的平均值±标准偏差。

## 1.4 分析方法

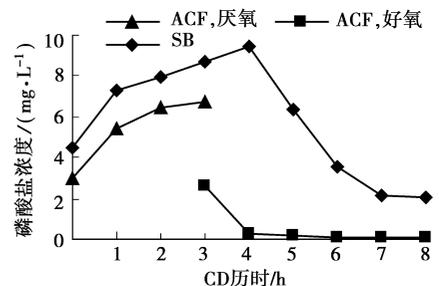
化学需氧量(COD)、溶解性化学需氧量(SCOD)采用 HACH 比色法测定。磷酸盐采用流动注射分析法测定。

## 2 试验结果与讨论

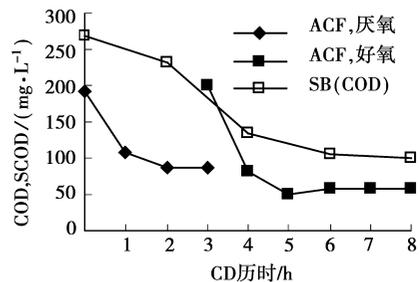
试验期间由于季节的影响,原污水浓度总体呈下降趋势,试验后期进水 COD 浓度低于 200 mg/L。ACF 运行期间,根据水质变化情况阶段性调整流量来控制系统的有机负荷。根据统计结果(见表 1),ACF 运行期间单台 IABF 单位体积填料每日实际的有机物与磷酸盐总负荷比较稳定,波动幅度小于进水浓度。

### 2.1 2 种运行方式下的生物除磷特征浓度曲线

如图 2 所示,在厌氧阶段,2 种运行方式下的释磷曲线变化基本趋势相同。在最初的 1 h 内液相磷酸盐浓度的快速上升伴随着有机物浓度的快速下降;之后磷酸盐浓度上升速度明显减缓,有机物浓度则变化不大。在 ACF 方式下,厌氧末要排出富磷液,因此厌氧过程与好氧过程是 2 个不连续的过程。2 种运行方式的最显著区别就在于好氧阶段初始磷酸盐浓度和有机物浓度。在 ACF 方式的好氧初始阶段,水质条件取决于原污水水质而与厌氧末的反应液浓度无关,相对于 SB 而言是处于贫磷源富碳源的环境。如图 2 所示,磷酸盐和有机物浓度在好氧初始 1 h 内迅速下降,在接下来的连续出水阶段,IABF 出水浓度保持在稳定的低浓度水平上。从运行效果上看,2 种运行方式的显著差别就是 ACF 的好氧出水浓度明显比 SB 的低。



(a) SB运行方式



(b) ACF运行方式

图 2 2 种运行方式下间歇曝气循环周期内浓度特征曲线

### 2.2 磷的去除

#### 2.2.1 好氧磷酸盐负荷与好氧吸磷速率

IABF 不同的运行方式决定了系统的好氧阶段将处于不同的负荷条件。分别对 ACF 方式各轮次,以及 SB 方式稳定运行期间的生物除磷特性做分析。如图 3 所示,ACF 方式下的吸磷速率随进水中磷酸盐负荷的增长而增大,即 IABF 单位体积填料每日实际接纳的磷酸盐的量与相应的磷酸盐摄入量成正比关系。由于 ACF 方式的好氧磷酸盐负荷受进水

浓度及水力负荷的影响显著,所以试验结果表明,生物膜系统在该运行方式下具有良好的吸磷能力,能够很好地适应环境条件的变化。SB 方式下,好氧初始磷酸盐负荷大部分来自于厌氧释磷过程,所以吸磷速率跟厌氧释磷过程关联紧密。

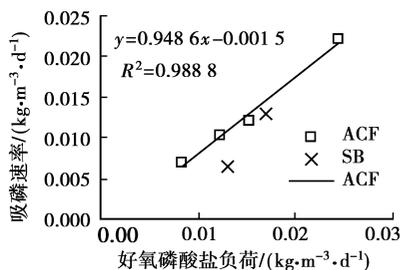


图 3 好氧磷酸盐负荷与吸磷速率的关系

### 2.2.2 好氧吸磷与厌氧释磷

由于季节的影响,RUN4 期间原污水 COD 浓度下降至 200 mg/L 以下,厌氧池出水中易降解有机质的浓度明显下降,这种情况下可以观察到释磷速率相对偏低(如图 4 所示)。总体上,ACF 方式下单位体积填料每日实际的厌氧释磷速率与好氧吸磷速率呈线性正相关。在 SB 方式下,由于连续运行未进行反冲洗,反应器中磷的积累及生物量逐渐增加,释磷速率与好氧吸磷速率随之增大且相互关系符合 ACF 的线性关系。这说明,IABF 的运行方式并不影响厌氧释磷过程与好氧吸磷过程之间的关联关系。只不过在 ACF 方式下,水力负荷的调整使得生物膜表现出能在更大范围内适应环境条件动态变化的能力。

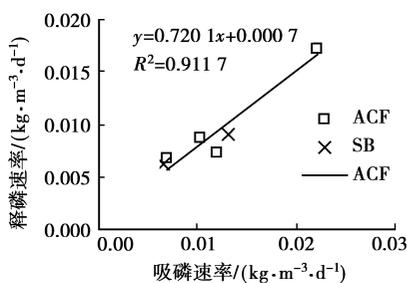


图 4 吸磷速率与释磷速率的关系

### 2.2.3 净吸磷效能

笔者采用好氧吸磷效率来表示单位体积填料的吸磷速率与好氧阶段单位体积填料所接纳的磷酸盐负荷之比;用净吸磷效率表示单位体积填料的净吸磷速率与单位体积填料所接纳的进水磷酸盐负荷之比。SB 方式下,好氧初始污染物负荷来源于厌氧阶段,好氧吸磷效率并不反映有效的磷酸盐去除效率。

就净吸磷效率而言,SB 方式低于 ACF 方式(见表 1)。采用周期性排出厌氧富磷液的方式从系统中转移出生物膜中富集的磷,是 ACF 运行方式控制生物膜中磷含量的主要措施和手段。如表 1 所示,ACF 方式下,连续运行 22 d,出水正磷酸盐浓度为 0.348 mg/L;而 SB 方式下,连续运行 14 d 未进行反冲洗,出水正磷酸盐浓度高达 2.19 mg/L。显然,长时间连续运行使 SB 系统中磷不断积累,从而导致系统吸磷能力下降,限制了生物除磷过程的有效性。而 ACF 方式因为生物膜中富集的磷的移除不依赖于反冲洗操作,所以长运行周期条件下仍能保持良好的运行效果。可见,ACF 运行方式不仅可以有效地控制生物膜中磷的积累,提高生物膜的磷酸盐储存容量和吸磷能力,而且减少了反冲洗频率。

在 ACF 方式下对生物膜系统的磷平衡和水量平衡分析表明,在系统 HRT 为 12.5 h 及 CD 6 h 条件下,进入系统的磷有 47.5% 进入厌氧富磷液的化学处理环节。

### 2.3 好氧有机负荷的影响

在污水处理过程的动态环境中,聚磷菌的储能机制使其具备适应环境的变化能力,因而具有强的生存竞争优势,这被视为是生物除磷系统中聚磷菌富集生存的关键因素<sup>[14-17]</sup>。在 IABF 中,连续进水使得好氧阶段处于较高碳源浓度的环境,然而好氧吸磷速率并没有因此而降低。

对 IABF 填充柱内各取样点的浓度分析显示,沿水流方向柱内存在有机物和磷酸盐的浓度分布。如图 5 所示,在 ACF 运行第 29 日(II),IABF 入口处 SCOD 通量与第 15 日(I)相差不大,但磷酸盐通量有明显增长。柱内有机物通量的削减主要在柱高 0~0.06 m 区域,削减速率随通量的增加而增加,浓度梯度随之增大。这样在后续柱内空间(0.06~0.56 m)始终维持着稳定的低有机质的环境条件。磷酸盐的削减则是在柱高 0.06~0.56 m 的区域内完成的。随着磷酸盐通量的增长,0.26~0.56 m 柱高区域的削减速率迅速增长,增幅超过 0.06~0.26 m 柱高区域,出水浓度得到有效控制。根据试验结果可以推断,在 IABF 柱内沿水流方向可能存在着微生物种群的空间分布,即普通异养菌富集在 IABF 进口区域(0~0.06 m 柱高区域),好氧降解进水中的有机物,从而有效地削弱了好氧有机负荷对填充柱 0.06~0.56 m 区域内富集生长的聚磷菌的冲击。普通异养菌和聚磷菌在 IABF 中的这种空间分布特性是采用 ACF 运行方式的生物除磷过程的一个重要特点。

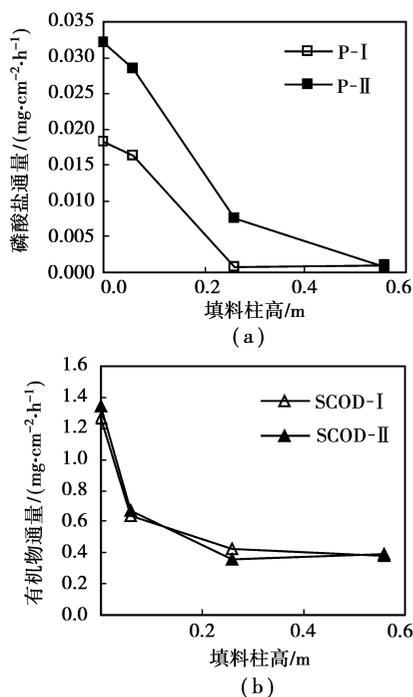


图 5 好氧有机负荷与吸磷过程的关系

### 3 结 论

1) 厌氧预酸化-间歇曝气滤池生物除磷系统可以有效去除生活污水中的磷酸盐。试验期间,进水 COD、TP 平均浓度分别为 270、4.17 mg/L,出水 COD、TP 平均浓度分别为 69、0.36 mg/L。

2) 在 ACF 运行方式下,周期性排出厌氧富磷反应液是 IABF 移除生物膜中富集的磷的主要途径与措施。试验表明,与 SB 方式相比,ACF 方式可以有效提高生物膜除磷系统的净吸磷能力;生物膜系统可以在长运行周期条件下保持良好的运行性能,从而大大减少滤池的反冲洗操作频率,降低运行成本,同时提高污水的处理能力。

3) IABF 生物膜具有良好的适应负荷变化的能力。IABF 的运行方式不影响好氧吸磷过程与厌氧释磷过程间的关联关系。

4) 在 ACF 方式下,根据好氧连续流阶段 IABF 填充柱内有机物与磷酸盐的分布及变化特征,可以推断 IABF 柱内沿水流方向存在着微生物不同种群的空间分布。

#### 参考文献:

[1] MINO T, VAN LOOSDRECHT M C M, HEIJNEN J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process[J]. *Water Res*, 1998, 32(11): 3193-3207.

[2] GARZÓN-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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] FALKENTOFT C, HARREMOËS P, MOSBAEK 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.

[6] GIESEKE 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.

[7] ARNZ 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.

[8] ABEYSINGHE D H, SHANABLEH A, RIGDEN B. Biofilters for water reuse in aquaculture [J]. *Water Sci Technol*, 1996, 34 (11): 253-260.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] FALKENTOFT C M, HARREMOËS P, MOSBAEK H. The significance of zonation in a denitrifying phosphorus removing biofilm [J]. *Water Res*, 1999, 33 (15): 3303-3310.

[13] MORGENROTHER, 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.

[14] VAN LOOSDRECHT M C M, POT M A, HEIJNEN J J. Importance of bacterial storage polymers in bioprocesses [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 35(1): 41-47.

[15] MAJONE M, DIRKS K, BEUN J J. Aerobic storage under dynamic conditions in activated sludge processes- the state of the art [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 39 (1): 61-73.

[16] CARUCCI A, DIONISI D, MAJONE M, et al. Aerobic storage by activated sludge on real wastewater [J]. *Water Res*, 2001, 35(16): 3833-3844.

[17] SEVIOUR R J, MINO T, ONUKI M. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems [J]. *FEMS Microbiol Rev*, 2003, 27: 99-127.