

# 有机负荷对除磷颗粒污泥的培养及特性的影响

张小玲<sup>1</sup>, 刘珊<sup>1</sup>, 陈旭<sup>2</sup>

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710064; 2. 中冶天工上海十三冶建设有限公司, 上海 210900)

**摘要:**采用 SBR 反应器, 以厌氧/好氧方式运行, 控制 SBR 反应器内好氧反应时段饱食期溶解氧水平在 1.0 ~ 2.0 mg/L 之间, 研究有机负荷对除磷颗粒污泥的培养及其除磷特性的影响。结果表明, 当有机负荷(以 COD 计)为 0.482 ~ 0.986 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时, SBR 内的污泥为大量絮体状污泥和少量形状规则的颗粒污泥的混合物; 当将有机负荷提高为 2.218 ~ 2.263 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时, 污泥开始大量生长, 污泥颗粒化进程加快, 而后颗粒污泥形状逐渐不规则, 分解成小碎片; 再次降低有机负荷到 1.113 ~ 1.182 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时, 形状规则, 界面清晰的颗粒污泥开始形成, 最终达到完全颗粒化, 成熟颗粒污泥的颜色呈橙黄色、粒径在 1 ~ 2 mm、污泥的 SVI 值在 20 ~ 22 mL/g 之间。有机负荷的高低也影响到颗粒污泥的除磷效率, 较高的有机负荷 [2.218 ~ 2.263 kg/(m<sup>3</sup>·d)] 条件下, 除磷效率由 99% 不断下降至 78%, 即使再次降低有机负荷到 1.113 ~ 1.182 kg/(m<sup>3</sup>·d), 除磷效率也没有得到恢复。

**关键词:** SBR; 厌氧/好氧; 除磷颗粒污泥; 有机负荷; 除磷效率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)07-2030-06

## Effects of Organic Loading Rate on the Cultivation and Characteristic of Granular Sludge with Phosphorus Removal

ZHANG Xiao-ling<sup>1</sup>, LIU Shan<sup>1</sup>, CHEN Xu<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. CMTC Shanghai Constructuin Co. Ltd., Shanghai 210900, China)

**Abstract:** In an anaerobic/aerobic sequencing batch reactor (SBR), the effect of organic loading rate (OLR) on the formation and phosphorus removal efficiency of granular sludge was investigated under the condition of 1.0-2.0 mg/L of dissolved oxygen (DO) concentration in the period of aerobic feast time in an SBR-cycle. Experiment results showed that the sludge in the SBR was the mixture of a majority of activated sludge floc and a small quantity of round-shaped granular at the OLR of 0.482-0.986 kg/(m<sup>3</sup>·d). Granulation was accelerated at the early time of the OLR of 2.218-2.263 kg/(m<sup>3</sup>·d), while the morphology of granules changed to an irregular shape on the end of the OLR of 2.218-2.263 kg/(m<sup>3</sup>·d). Then the OLR decreased to 1.113-1.182 kg/(m<sup>3</sup>·d), the mature granules were cultivated successfully. The morphology of the mature granules was nearly spherical with a very clear outline. The dimension of granules was 1-2 mm, and the granular sludge had a good settle ability [sludge volume index (SVI) between 20-22 mL/g]. The OLR also had influence on efficiency of phosphorus removal, when the OLR was elevated to 2.218-2.263 kg/(m<sup>3</sup>·d), the efficiency of phosphorus removal declined from 99% to 78%, and could not be recovered even if the OLR was decreased to 1.113-1.182 kg/(m<sup>3</sup>·d).

**Key words:** SBR; anaerobic/aerobic; granular sludge with phosphorus removal; organic loading rate; efficiency of phosphorus removal

好氧颗粒污泥具有沉淀性能好、容积负荷高、生物活性高、耐冲击负荷、能够去除多种污染物等优点, 近 20 年来国内外学者对好氧颗粒污泥的形成机制、培养条件及影响因素、颗粒污泥的性质、结构及微生物多样性等方面进行了大量的研究<sup>[1-6]</sup>, 取得了显著的成果。研究有机负荷对好氧颗粒污泥影响的部分报道见文献<sup>[7-16]</sup>。由此可知, 对于以异养菌为主的好氧颗粒污泥, 有机物是细菌生长的基质, 有机负荷与细菌的生长速率相关, 一般情况下有机负荷越高, 细菌生长越快。好氧颗粒污泥的形成需要较高的有机负荷, 但是过高的有机负荷使得好氧颗粒污泥结构疏松, 不易沉降, 最终导致污泥解体。

文献<sup>[7-16]</sup>所列研究成果中, 水流剪切力主要由曝气提供, 对反应器内的溶解氧未控制。采用曝气和机械搅拌共同提供好氧颗粒污泥形成所需的剪切力条件下, 研究有机负荷对好氧颗粒污泥形成的影响特性鲜见报道。

好氧颗粒污泥与生物膜相似, 都是高浓度微生物体系, 反应器内微生物对氧的需求远高于传统生

收稿日期: 2010-07-20; 修订日期: 2010-11-11

基金项目: 陕西省自然科学基金项目 (SJ08-ZT08); 长安大学中央校基本科研业务费专项 (CHD2009JC001); 国土资源部干旱半干旱地区水资源与国土环境开放研究实验室项目

作者简介: 张小玲 (1976 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水处理与回用, E-mail: zhangxiaoling101@126.com

物处理工艺,颗粒污泥需要高曝气量来满足其形成与结构维持的剪切需求,实验室规模的好氧颗粒污泥反应器曝气量一般在  $1.75 \sim 3.5 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{L})$  之间,这在很大程度上限制了好氧颗粒污泥的工业化放大.同时为了提高好氧颗粒污泥的脱氮效率,也要求降低反应器内的溶解氧水平<sup>[17,18]</sup>.

本研究以曝气和机械搅拌共同提供剪切力,将好氧颗粒污泥对剪切力和溶解氧需求分离,采用较低的曝气量,维持 SBR 内好氧期较低的溶解氧水平 ( $1.0 \sim 2.0 \text{ mg/L}$ ),通过增大搅拌强度,提供形成好氧颗粒污泥所需的剪切力,由此分析有机负荷对好氧颗粒污泥形成过程及其除磷特性的影响.

## 1 材料与方

### 1.1 试验装置

SBR 反应器为有机玻璃圆柱,反应器高径比为 3.29:1;有效容积为 10 L.废水由进水泵提升至 SBR 反应器内;曝气砂盘放在反应器底部,采用空气压缩机曝气,通过转子流量计控制曝气量;排水高度可调,换水比为 60% ~ 70%;反应器温度控制在 26℃ 左右. SBR 运行周期:进水(5 min)、厌氧(搅拌 120 min)、好氧(搅拌 + 曝气 180 min)、沉淀(30 min)、闲置(25 min).

### 1.2 废水水质

人工合成废水的组成及浓度见表 1,微量元素的组成及浓度见表 2.

表 1 人工合成废水组成及浓度表

Table 1 Composition of substitute

组分	浓度
$\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	486 ~ 1 943 mg/L
$\text{NH}_4\text{Cl}$	38 ~ 153 mg/L
$\text{NaHCO}_3$	120 ~ 480 mg/L
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	132 mg/L
微量元素	$1 \text{ cm}^3/\text{g} (\text{NH}_4^+-\text{N})$

### 1.3 分析方法

分析项目及方法见表 3.

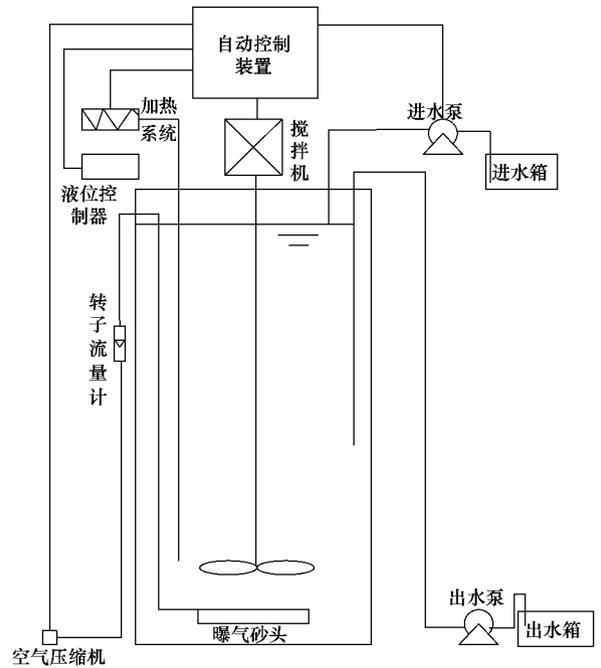


图 1 SBR 系统示意

Fig. 1 Schematic of the SBR system

表 2 微量元素组成及浓度表

Table 2 Composition of the microelement solution

组分	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
$\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	4 890
$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	16 710
$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	3 200
$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	687
$\text{ZnCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	67
$\text{CuCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	74.7
$\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.67

表 3 分析项目及测定方法

Table 3 Analysis and determination methods

项目	分析方法(仪器)	项目	分析方法(仪器)
COD	重铬酸钾法	DO	哈希 Sension™6 便携式溶解氧测定仪
$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	钼锑抗分光光度法	颗粒污泥形态与生物相	光学显微镜与 Canon 佳能数码相机
$\text{NH}_4^+-\text{N}$	纳氏试剂分光光度法	颗粒污泥粒径	显微镜测微尺
$\text{NO}_3^- -\text{N}$	紫外分光光度法	比耗氧速率(SOUR)	哈希 Sension™6 便携式溶解氧测定仪
$\text{NO}_2^- -\text{N}$	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法	除磷颗粒污泥的微观结构	环境扫描电子显微镜(型号 Quanta 200)
MLSS 及 MLVSS	重量法	pH 值	pHS10 酸度计

## 2 结果与分析

本试验 SBR 反应器以厌氧/好氧方式运行,以曝气和机械搅拌共同提供剪切力,采用较低的曝气量,控制 SBR 好氧饱食期溶解氧为  $1.0 \sim 2.0 \text{ mg/L}$ ,研究有机负荷对好氧颗粒污泥形成及除磷特性的影响. 试验控制 3 种不同的有机负荷(以 COD 计,下同)分别为:  $0.482 \sim 0.986 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  (负荷 I)、 $2.218 \sim 2.263 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  (负荷 II) 及  $1.113 \sim 1.182 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  (负荷 III). 在不同的有机负荷阶段分别观察污泥的形态、测定污泥的生物活性、物理

化学特性及其聚磷特性.

### 2.1 有机负荷调控与污泥颗粒化进程

#### 2.1.1 不同有机负荷条件下污泥形态变化

有机负荷控制在  $0.482 \sim 0.986 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  条件下污泥形态变化见图 2, SBR 运行到第 5 d 时,用肉眼可以观察到小米状的颗粒污泥. 随着试验的进行,颗粒污泥的数量、份额、粒径在不断地增大,污泥的颜色由黑褐色逐渐变为浅黄色. 当试验运行到第 35 ~ 40 d 时,颗粒污泥的份额变化不大,稳定在 50% ~ 60% 之间,颗粒粒径变化也不大,稳定在  $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$  之间,污泥颗粒化进程停滞不前.

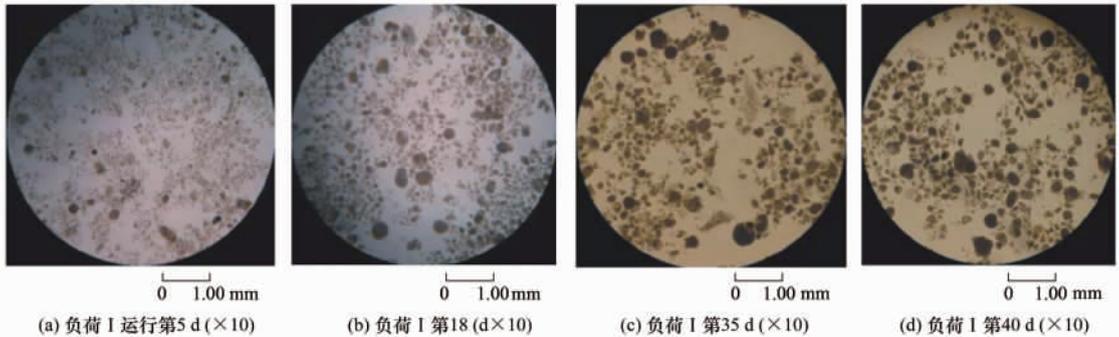


图 2 有机负荷控制在  $0.482 \sim 0.986 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  条件下污泥形态变化

Fig. 2 Morphological observation of sludge in SBR with operation time in the OLR of  $0.482\text{-}0.986 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$

提高进水中乙酸钠浓度, SBR 的容积负荷控制在  $2.218 \sim 2.263 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  之间,颗粒污泥形态变化如图 3 所示. 可以看出,较高有机负荷条件下运行的前 1 周内,活性污泥迅速颗粒化,颗粒污泥的份额高达 90% 以上,粒径主要分布在  $0.8 \sim 1 \text{ mm}$  之间,

污泥的沉降性能明显得到了提高, SVI 值由原来的  $35 \text{ mL/g}$  迅速降低到  $20 \text{ mL/g}$  左右,但随着试验的进行,颗粒污泥形状逐渐不规则,粒径在不断地缩小,反应器内颗粒污泥数量在增加地同时也产生大量的絮状污泥.

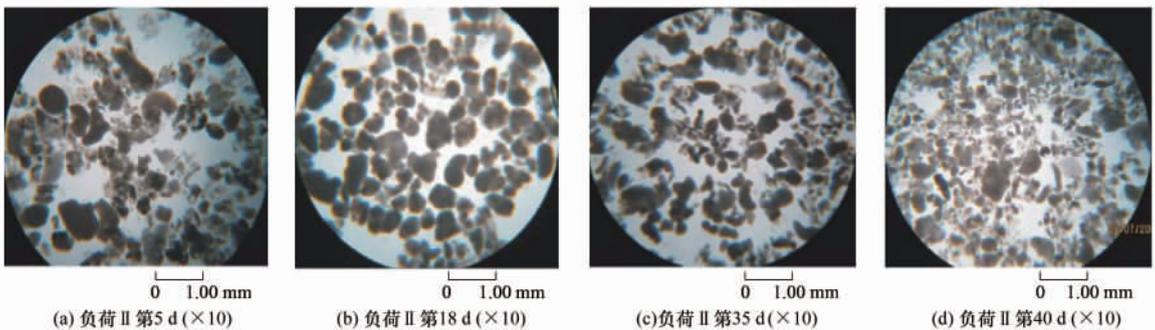


图 3 有机负荷控制在  $2.218 \sim 2.263 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  条件下污泥形态变化

Fig. 3 Morphological observation of sludge in SBR with operation time in the OLR of  $2.218\text{-}2.263 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$

降低进水中乙酸钠浓度, SBR 有机负荷控制在  $1.113 \sim 1.182 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  条件下运行,颗粒污泥的形态变化见图 4. 可以看出,随着试验的运行,颗粒污泥的形状逐渐规则、密实、光滑,趋向于椭球状,颗

粒污泥的粒径逐渐增大,在  $1.113 \sim 1.182 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  负荷下,10 d 内污泥完全颗粒化; 15 d 后,除磷颗粒污泥的粒径稳定在  $1 \sim 2 \text{ mm}$  之间,颜色呈橙黄色,其形态基本上不随运行时间变化,趋近

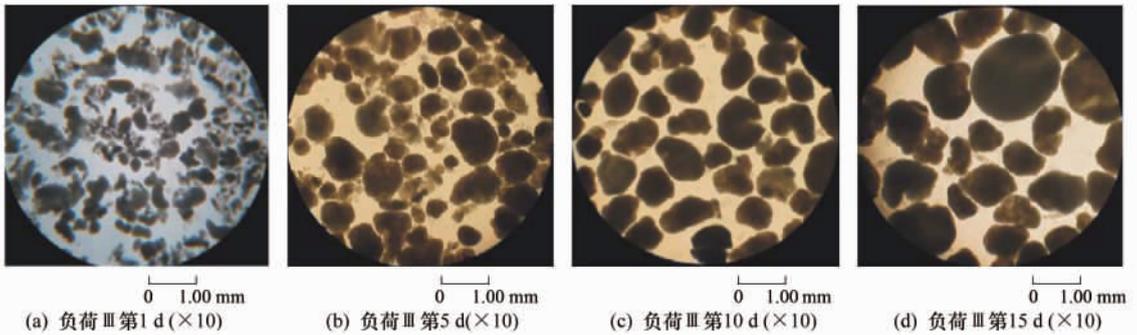


图4 有机负荷控制在  $1.113 \sim 1.182 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  条件下污泥形态变化

Fig. 4 Morphological observation of sludge in SBR with operation time in the OLR of  $1.113\text{-}1.182 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$

于稳定,这时反应器中已经培养出了成熟的除磷颗粒污泥。

### 2.1.2 有机负荷对污泥颗粒化影响分析

(1) SBR 容积负荷为  $0.482 \sim 0.986 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  阶段,微生物的生长速度慢,污泥浓度相对较低,微生物之间相互碰撞的机会较少。在水流剪切力的作用下,微生物自身分泌胞外聚合物,以丝状菌相互缠绕为原始框架,通过胞外聚合物聚集在一起生长,系统中出现了少部分除磷颗粒污泥。

(2) SBR 容积负荷为  $2.218 \sim 2.263 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  阶段,短时间内微生物快速生长,污泥浓度升高,微生物之间相互碰撞的机会大大增加,为污泥颗粒化的产生提供了有利的条件,系统中污泥迅速颗粒化,随着反应器的运行,系统中粒径较大的除磷颗粒污泥开始解体。分析本试验高负荷阶段除磷颗粒污泥解体的原因,可解释为:高有机负荷条件下,粒径较大的颗粒污泥内部得不到 DO 或硝酸盐,微生物活性受到抑制,分泌的胞外聚合物减少,颗粒污泥解体<sup>[11]</sup>。

(3) SBR 容积负荷为  $1.113 \sim 1.182 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  阶段,有机负荷的降低使系统内由富营养状态转为贫营养状态,在与高负荷阶段相同溶解氧饱和度的条件下,反应器内的溶解氧很容易渗透到颗粒污泥内部,颗粒污泥中微生物在适宜的环境条件中快速繁殖,粒径逐渐增大,形状逐渐规则,絮状污泥也逐渐减少,伴随着试验的进行,污泥完全颗粒化。

综上所述,除磷颗粒污泥的形成及稳定性与 SBR 的有机容积负荷有关系,较低的有机负荷不能满足形成除磷颗粒污泥大量的微生物对碳源的需求,污泥颗粒化不完全;较高的有机负荷,污泥颗粒较大,颗粒污泥内部的微生物由于得不到电子受体,活性受到限制,颗粒污泥趋于解体。本试验条件下,

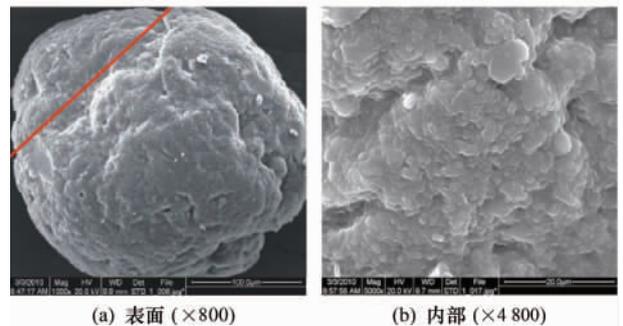
当有机负荷为  $1.113 \sim 1.182 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,污泥颗粒化完全且较稳定。与 Moy 等<sup>[9]</sup>的研究结果比较,形成成熟的除磷颗粒污泥的有机负荷较低。

## 2.2 成熟除磷颗粒污泥特性分析

### 2.2.1 颗粒污泥的理化特性

取培养成熟的除磷颗粒污泥,经过试验测定,成熟除磷颗粒污泥的比耗氧速率 (SOUR) 为  $45.32 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 、MLVSS/MLSS 为 0.91,远高于普通活性污泥的 SOUR [ $21.45 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ]、MLVSS/MLSS (0.52),表明颗粒污泥的生物活性优于普通活性污泥。

图 5 是成熟除磷颗粒污泥的外部及内部电镜扫描照片。从中可见,成熟除磷颗粒污泥外部轮廓清晰,大多数呈球形或椭球形,表面不平整;除磷颗粒污泥表面存在一些孔隙,细菌以球菌为主;内部也有较多的孔隙,但相对于表面有较为密实的结构,微生物主要是球菌,内部和表面的球菌附着在丝状物上,这些丝状物可能为微生物分泌的胞外多聚物及丝状菌。除磷颗粒污泥表面和内部存在的一些孔隙是营养物质和气体传递的通道,也是颗粒污泥内部微生物排放代谢产物的通道。从反应器内取出培养



(a) 图中切线标注为内部电镜扫描照片切面的位置

图5 除磷颗粒污泥外部及内部结构 SEM 观察

Fig. 5 Scan electron microscopic images of granules

的成熟除磷颗粒污泥,然后适度地冲洗之后用显微镜测微尺进行颗粒污泥粒径的测量.除磷颗粒污泥粒径大小主要集中在 1~2 mm.

培养出成熟的除磷颗粒污泥的污泥指数在 20~22 mL/g 之间,远低于普通的活性污泥(100~150 mL/g),沉降速率在 15.6~35.3 m/h 之间.优良的沉降性能保证了除磷颗粒污泥在较高的水力负荷下也不易流失,大大提高反应器的容积负荷.

### 2.2.2 颗粒污泥除磷特性

在除磷颗粒污泥培养过程中,在 SBR 好氧段结束时,定期采样分析除磷颗粒污泥对有机物及磷酸盐的去除能力,结果见图 6 及图 7.

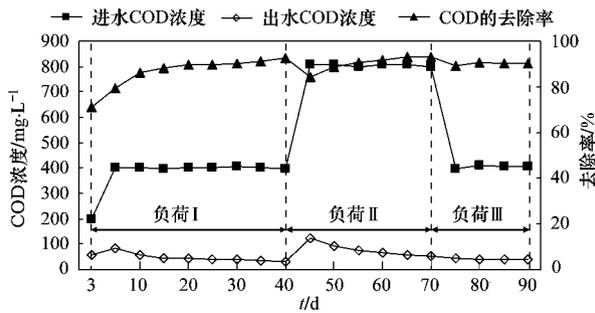


图 6 COD 去除率随试验运行时间的变化

Fig. 6 Changes of the removal efficiency of COD in the SBR

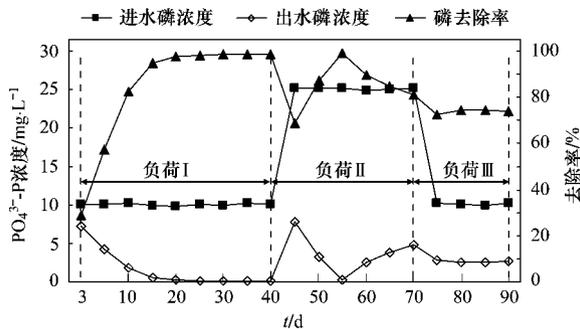


图 7  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率随试验运行时间的变化

Fig. 7 Changes of the removal efficiency of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  in the SBR

(1) 在 0.482~0.986  $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  负荷阶段, COD 的去除率由 71% 逐渐提高到 90% 左右,除磷效率由 25% 逐渐提高到 97% 左右,这是反应器中的聚磷菌的数量和比例不断增加的结果.

(2) 在 2.218~2.263  $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  负荷运行初期, COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除率与低有机负荷阶段末相比均降低,随着试验的进行, COD 的去除率逐渐提高,最后稳定在 93% 左右,出水浓度 < 60 mg/L,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除率逐渐提高到 99% 左右,这反映了微

生物对环境变化滞后的现象.即刚开始有机负荷的增加,微生物的数量及活性与负荷不匹配,表现为 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率低,而后微生物增殖、活性增强,其降解能力与负荷相匹配,表现为 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率提高.

(3) 在 2.218~2.263  $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  负荷运行后期,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率从试验第 55 d 开始逐渐恶化,最终,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除率降低到 78%. 分析其原因可能是在高有机负荷条件下聚磷菌大量生长,其与聚磷菌在厌氧条件下争夺碳源,这使得聚磷菌好氧吸磷能力下降<sup>[19,20]</sup>,有机负荷再次降低至 1.113~1.182  $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ,除磷率仍不能得到恢复.

### 2.3 SBR 周期内溶解氧的变化

在厌氧结束时,反应器内的乙酸钠浓度已大部分被转化为 PAOs 体内的内碳源 (PHB),然后随着反应的进行,内碳源数量逐渐减小.与此相对应,反应器里微生物的基质利用速率也随着时间的变化而变化.试验过程中,采用固定氧供给模式,即在一个 SBR 好氧时段内维持固定的氧供给速率,在此种情况下,好氧开始后的一个时段内,氧的供给速率小于微生物的基质利用速率,反应器中的内碳源浓度较高而 DO 浓度较低,称为饱食期;在反应后期,相反氧的供给速率大于微生物的消耗速率,反应器中的内碳源浓度较低而 DO 浓度维持在较高的水平,微生物过量的内源呼吸,称为饥饿期. SBR 一个周期内好氧时段的 DO 浓度变化曲线如图 8 所示.

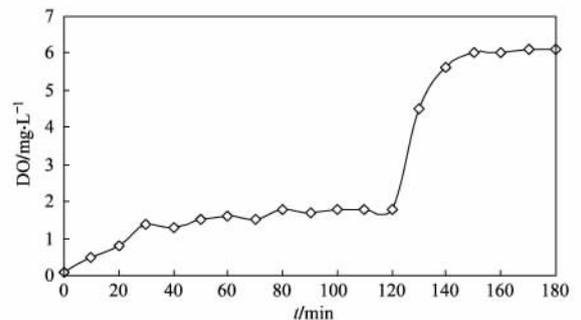


图 8 SBR 一个周期内好氧时段的 DO 浓度变化曲线

Fig. 8 Changes of dissolved oxygen during a cycle of SBR

## 3 结论

(1) 以厌氧/好氧方式运行的 SBR 反应器,好氧饱食期溶解氧控制在 1.0~2.0 mg/L 的条件下,稳定的除磷颗粒污泥形成的有机负荷的范围为 1.113~1.182  $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ .

(2) 较低溶解氧条件下, 成熟除磷颗粒污泥颜色呈橙黄色, 形状为球形或椭球形, 粒径主要集中在 1~2 mm 之间, 污泥指数在 20~22 mL/g 之间, 沉降速率在 15.6~35.3 m/h, 比耗氧速率 (SOUR) 为 45.32 mg/(g·h), MLVSS/MLSS 为 0.91; 经电镜扫描发现, 颗粒污泥表面不平整, 内部与外部均有孔隙, 微生物以球菌为主。

(3) 有机负荷大小对除磷颗粒污泥的除磷能力有重要影响, 较高的有机负荷可能会诱发聚糖菌与聚磷菌的竞争生长, 除磷颗粒污泥除磷能力受到影响, 即使再次降低有机负荷, 除磷能力仍不能恢复。

参考文献:

- [1] Morgenroth E, Sherden T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic granule sludge in a Sequencing Batch Reactor [J]. *Water Research*, 1997, **31**(12): 3191-3194.
- [2] Beun J J, Hendriks A, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic granulation in a sequencing batch reactor [J]. *Water Research*, 1999, **33**(10): 2283-2290.
- [3] Beun J J, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J, *et al.* Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor [J]. *Water Research*, 2002, **36**(3): 702-712.
- [4] Liu Y, Tay J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge [J]. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1653-1665.
- [5] McSwain B S, Irvine R L, Wilderer P A, *et al.* The effect of intermittent feeding on aerobic granule structure [J]. *Water Research*, 2004, **49**(11-12): 19-25.
- [6] Mishima K, Nakamura M. Self-immobilization of aerobic activated sludge—A pilot study of the aerobic upflow sludge blanket process in municipal sewage treatment [J]. *Water Science and Technology*, 1991, **23**(4/6): 981-990.
- [7] Tay J H, Pan S, Tay S T, *et al.* The effect of organic loading rate on the aerobic granulation: the development of shear force theory [J]. *Water Science and Technology*, 2003, **47**(11): 235-240.
- [8] Liu Q S, Tay J H, Liu Y, *et al.* Substrate concentration-independent aerobic granulation in sequential aerobic sludge Simultaneous COD, nitrogen and phosphate removal by blanket reactor [J]. *Environmental Technology*, 2003, **24**(10): 1235-1242.
- [9] Moy B Y P, Tay J H, Toh S K, *et al.* High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, **34**(6): 407-412.
- [10] Zheng Y M, Yu H Q, Liu S J, *et al.* Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(10): 1791-1800.
- [11] Tay J H, Pan S, He Y X, *et al.* Effect of organic loading rate on aerobic granulation. I: Reactor Performance [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, **130**(10): 1094-1101.
- [12] 刘宏波, 杨昌柱, 濮文虹, 等. 有机负荷对颗粒化 SBR 反应器的影响研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1449-1453.
- [13] 王芳, 杨凤林, 张兴文, 等. 不同有机负荷下好氧颗粒污泥的特性 [J]. *中国给水排水*, 2004, **20**(11): 46-48.
- [14] 史晓慧, 刘芳, 刘虹, 等. 进料负荷调控培养好氧颗粒污泥的试验研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(5): 1026-1032.
- [15] 沈仲根, 张丽丽, 陈建孟. 有机负荷影响好氧颗粒污泥特性的研究 [J]. *环境污染与防治*, 2008, **30**(8): 69-72.
- [16] 黄宇, 赵林, 谭欣, 等. 低有机负荷率下聚磷好氧颗粒污泥的培养 [J]. *天津大学学报*, 2010, **43**(5): 440-446.
- [17] Mosquera-Corral A, De Kreuk M K, Heijnen J J, *et al.* Effects of oxygen concentration on N-removal in an aerobic granular sludge reactor [J]. *Water Research*, 2005, **39**(12): 2676-2686.
- [18] De Kreuk M K, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Simultaneous COD, nitrogen and phosphate removal by aerobic granular sludge [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **90**(6): 761-769.
- [19] Bond P L, Keller J, Blackall L L, *et al.* Characterisation of enhanced biological phosphorus removal activated sludges with dissimilar phosphorus removal performances [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4/5): 567-571.
- [20] 郝玉娟, 薛涛, 黄霞. 进水磷碳比对聚磷菌与聚糖菌竞争生长的影响 [J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(17): 95-98.