

文章编号: 1006-4710(2011)03-0329-05

# 好氧颗粒污泥的培养及其特性研究

刘玉玲, 高升, 白凯

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 以西安市第三污水处理厂普通絮状活性污泥为接种污泥, 采用人工配制的模拟生活污水, 在 SBR 反应器中进行好氧颗粒污泥培养实验研究。在温度为室温, pH 为 7.0 左右, 曝气时间为 150 ~ 180 min, 沉淀时间 9 ~ 120 min, 曝气量为 0.3 ~ 0.5 m<sup>3</sup>/h 的实验条件下, 成功培养出了好氧颗粒污泥, 其颜色为浅黄色, 粒径为 1 ~ 2 mm, SVI 为 40 mL/g 左右, MLSS 为 6 515 mg/L, 平均沉降速度达到 18.42 m/h。好氧颗粒污泥中含有大量的原生动物和后生动物, 且成群出现, 对 COD、TN 和 TP 的去除率分别达到 95%、96% 和 98%。

**关键词:** 好氧颗粒污泥; 培养; MLSS; SVI; 沉降速度; 去除率

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

## Research on Aerobic Granular Sludge of Its Cultivation and Characteristics

LIU Yuling, GAO Sheng, BAI Kai

(Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The experimental study of aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor (SBR) was performed using a synthetic domestic wastewater and ordinary flocculent activated sludge as inoculation sludge. The conditions under which the successful cultivation of aerobic granular sludge is conducted are as follows: the temperature is room temperature, pH is about 7.0, aeration time is 150 ~ 180 min, sludge settling time is 9 ~ 120 min, and aeration rate is 0.3 ~ 0.5 m<sup>3</sup>/h. The aerobic granular sludge has yellow appearance, with a size of 1 ~ 2 mm, SVI of 40 mL/g or so, and MLSS of 6 515 mg/L. The average settling velocity is up to 18.42 m/h. Aerobic granular sludge contains large amounts of protozoa, emerging in groups. The removal rates of COD, TN and TP are up to 95%, 96% and 98% respectively.

**Key words:** aerobic granular sludge; cultivation; MLSS; SVI; settling velocity; removal rate

好氧颗粒污泥技术是近几十年来发展起来的一种新型微生物自固定化技术, 是在好氧污水处理系统中培养出来的颗粒状微生物自凝聚体<sup>[1-2]</sup>。与厌氧颗粒污泥相比, 好氧颗粒污泥在处理低浓度有机废水时比较稳定, 且启动时间比厌氧颗粒污泥短很多, 通过特定的培育手段可以实现污泥颗粒化。这种颗粒污泥具备微生物种群的多样性, 在降解有机碳的同时, 还具有优良的脱氮除磷等功能<sup>[3]</sup>。因此, 本研究以西安市第三污水处理厂普通絮状活性

污泥为种泥, 采用人工配制的模拟生活污水, 在 SBR 反应器中进行实验研究。

## 1 实验方法

### 1.1 接种污泥和试验用水

本实验采用接种培养法在 SBR 反应器中进行。接种污泥取自西安市第三污水处理厂二沉池, 为普通絮状活性污泥; 实验用水采用自配的模拟生活污水。接种活性污泥主要指标、模拟废水水质指标以

收稿日期: 2010-12-14

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室基金资助项目(2010SJ078); 陕西省教育厅基金资助项目(09JK649); 陕西省重点学科建设资金资助项目(106-00X907)。

作者简介: 刘玉玲(1969-), 女, 陕西合阳人, 博士, 副教授, 研究方向为水污染控制理论与技术。E-mail: liuyuling@xaut.edu.cn。

及西安市第三污水处理厂水质指标分别见表1、表2、表3。

表1 接种活性污泥主要指标

Tab.1 Key indicators of seed activated sludge

项目	指标	项目	指标
MLSS	5.744 g/L	比重	1.001 2
SV	95%	含水率	99.1 ~ 99.3%
SVI	165 mL/g	外观	絮状
沉降速度	2.52 m/h	颜色	黑色

表2 模拟废水水质指标<sup>[4]</sup>

Tab.2 Wastewater water quality indicators

成分	浓度/ (mL/g)	微量元素液	浓度/ (μg/L)
COD(C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> )	300 ~ 600	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	3 000
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(NH <sub>4</sub> Cl)	5 ~ 10	MnSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	26
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(NaNO <sub>3</sub> )	5 ~ 10	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	50
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P(KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	1 ~ 2	CuCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	7
微量元素液	0.4 ml/L	ZnCl <sub>2</sub>	24
		CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	15
		AlCl <sub>3</sub>	60
		EDTA	50
		H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	20
		钼酸铵	21

表3 西安市第三污水处理厂水质指标<sup>[5]</sup>

Tab.3 Water quality of the third sewage treatment plant in Xi'an

指标	COD/ (mg/L)	BOD/ (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 浓 度/(mg/L)	TP 浓度/ (mg/L)
进水水质	390	200	20	4
出水水质	60	20	8	1.5
去除率	84.6%	90%	60%	62.5%

## 1.2 实验装置

SBR 反应器由有机玻璃圆筒制成,其结构见图1。SBR 反应器总容积为 11.8 L,有效容积为 9.0 L,反应器高 125 cm,有效高度 95 cm,直径为 11 cm。排水口设置在距底部 75 cm 处,在圆筒上每隔 10 cm 设一个取水口。反应以 180 ~ 240 min 为一个周期,其中进水 1 min,好氧段 150 ~ 180 min,沉淀时间为 9 ~ 120 min,出水 2 min,鼓风机曝气量为 0.3 ~ 0.5 m<sup>3</sup>/h,换水率为 20%,通过时间控制器对泵和鼓风机进行控制,并通过液位继电器控制液位。曝气量由转子流量计控制,上升气速为 0.88 ~ 1.47 cm/s。

在曝气阶段,反应器中 DO 浓度维持在 2 mg/L 以上,温度为室内温度。

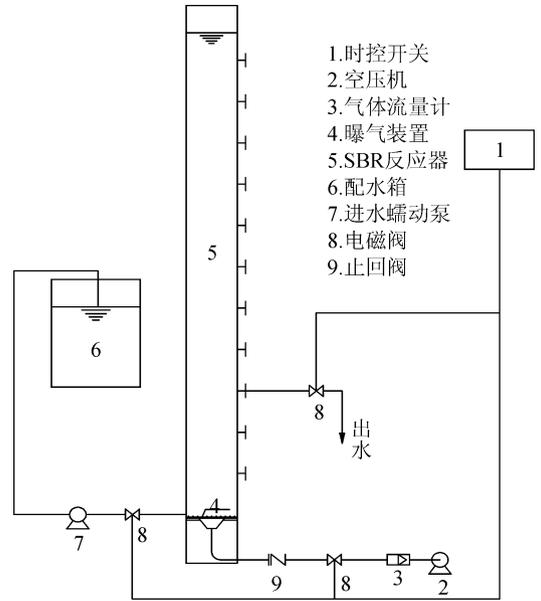


图1 实验装置简图

Fig.1 Experimental setup diagram

## 1.3 分析项目与分析方法

根据水质监测分析方法标准<sup>[6-7]</sup>,实验测定分析方法见表4。

表4 水质分析项目与方法

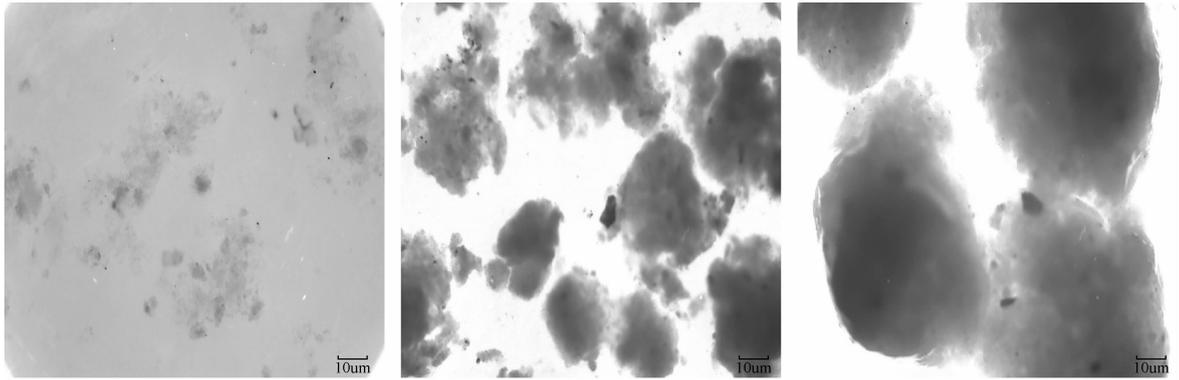
Tab.4 Water quality analysis items and methods

分析项目	测试方法	分析项目	测试方法
COD	重铬酸钾法	DO	JPB-607 便携式溶解氧仪
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	沉降速度	重力沉降法
TP	钼酸铵分光光度法	温度	温度计
SV	体积法	粒径	显微镜测量
SVI	体积法	污泥形态	显微镜观察
MLSS	重量法	微生物相	显微镜观察

## 2 好氧颗粒污泥特性分析

### 2.1 好氧颗粒污泥的物理特性

在实验过程中,用数码光学显微镜对反应器中颗粒污泥的形成过程进行观察,其变化见图2。可见,随着培养时间的进行,絮状污泥凝聚成为细小不规则的颗粒污泥初体,逐渐转化成形饱满,个体较大的颗粒污泥,最终形成椭球形、边界较清晰的成熟的颗粒状污泥,颜色为浅黄色,粒径约为 1 ~ 2 mm。



(a) 培养10天后的污泥

(b) 培养30天后的污泥

(c) 培养50天后的污泥

图2 好氧颗粒污泥形成过程

Fig.2 Formation of aerobic granular sludge

## 2.2 好氧颗粒污泥的生化特性

污泥指数(SVI)、污泥沉降比(SV)是反应污泥性能的两个非常重要指标。通过实验,这些指标随着培养过程的变化如图3,图4所示。

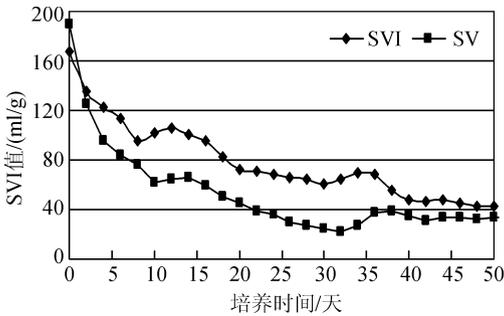


图3 污泥指数随培养时间的变化

Fig.3 Sludge index vs. cultivating time

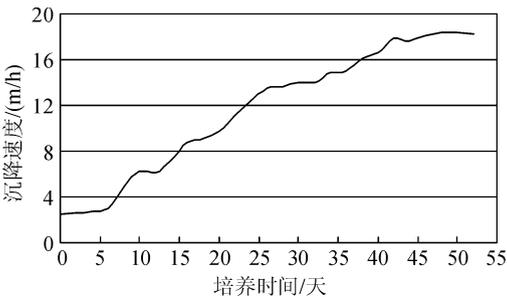


图4 污泥沉降速度随培养时间的变化

Fig.4 Sludge settling velocity vs. cultivating time

如图3所示,随着反应器的启动,污泥的SVI值迅速降低。通过逐步提高COD容积负荷,减少运行周期时间、降低沉降时间等手段,污泥性能得到了很大改善,生物活性和沉降能力大为提高,污泥浓度升高,SVI值降低。在整个污泥形成阶段,SVI值没有明显减小,而是稳定在40 mL/g左右。如图4所示,实验以颗粒的平均沉降速度来表征颗粒的沉降性能,沉降速度由最初的2.52 m/h增加至50天后的18.42 m/h,颗粒污泥逐渐成长为球形或椭球形的饱满颗粒。通过实验发现,好氧颗粒污泥的沉降速度

与颗粒大小和结构有密切关系<sup>[8]</sup>。

经过约50天的培养,好氧颗粒污泥的性能达到比较稳定的状态。SBR系统对模拟生活污水的处理效果如图5、6、7所示。图5中好氧颗粒污泥在整个形成和成熟阶段COD去除率由最初的73%增加至稳定的95%左右,由于好氧颗粒污泥的沉降性能良好,微生物丰富,出水中悬浮物质少,水质澄清,故出水COD一般都在30 mg/L以下。图6是好氧颗粒污泥对TN的去除效果,可以看出对TN最初的去除率并不是很高,污泥经过驯化培养以后其去除率逐渐上升,最后稳定在96%左右,脱氮效率如此高,首先可能与好氧颗粒污泥的分层结构和微生物的多样性有很大关系,其中包括了硝化反硝化、短程硝化反硝化、厌氧氨氧化、好氧反硝化和好氧反氨化等一系列生物反应。在好氧颗粒表面,亚硝化菌和硝化菌将NH<sub>3</sub>-N氧化成NO<sub>2</sub>-N和NO<sub>3</sub>-N;在颗粒污泥的中间层进行反硝化,将NH<sub>3</sub>-N转变成N<sub>2</sub>;在颗粒的内部,当存在外碳源时,反硝化菌将NO<sub>2</sub>-N和NO<sub>3</sub>-N转变为N<sub>2</sub>释放;当缺乏有机碳源时,厌氧氨氧化菌又能以NH<sub>3</sub>-N为电子供体将NO<sub>2</sub>-N和NO<sub>3</sub>-N还原为N<sub>2</sub><sup>[9]</sup>。其次,传统污水处理技术一般控制C/N为100:5(20:1),而本实验中C/N控制为300:5(60:1),较高的C/N也是好氧颗粒污泥对TN去除率高的原因。

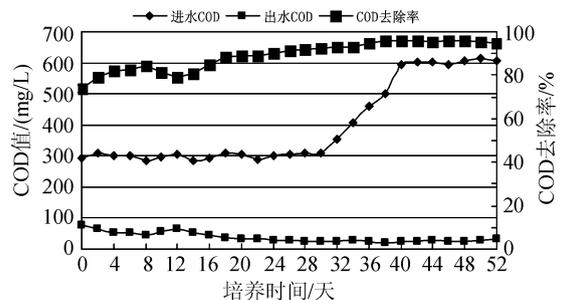


图5 COD去除效果随培养时间的变化

Fig.5 COD removal vs. cultivating time

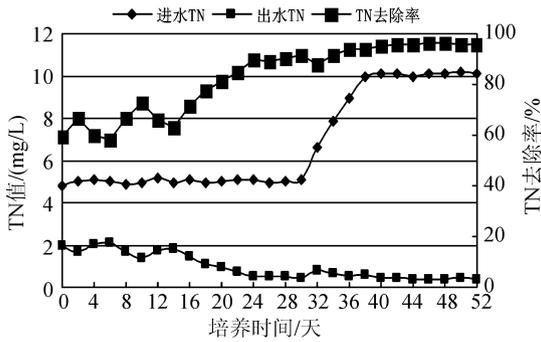


图6 TN去除效果随培养时间的变化  
Fig. 6 TN removal vs. cultivating time

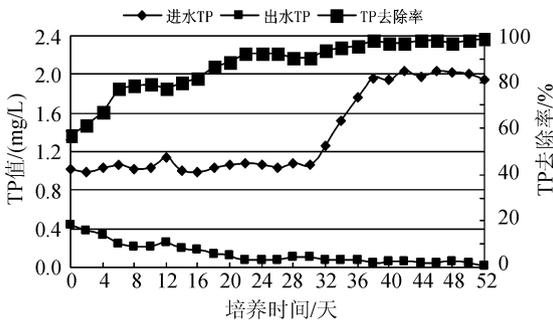


图7 TP去除效果随培养时间的变化  
Fig. 7 TP removal vs. cultivating time

图7是好氧颗粒污泥对TP的去除效果,可以看出TP最初的去除率为56%左右,当好氧颗粒污泥成熟时,其去除率达到稳定的98%。首先,这是好氧颗粒污泥的自身结构特点以及氧扩散梯度的存在使污泥颗粒由外到内形成好氧区、缺氧区和厌氧区,为除磷微生物提供了合适的生长环境。同时由于好氧颗粒污泥可以发生聚磷菌除磷,处于好氧颗粒污泥内层缺氧区的DPB(反硝化聚磷菌)利用体内贮存的有机碳源以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 作为电子受体降解在解体内贮存PHB的同时将 $\text{NO}_3\text{-N}$ 转化为 $\text{N}_2$ 释放,同时DPB会过量吸收磷酸盐并贮存于体内形成聚磷酸盐。当颗粒污泥被排出系统时,细胞体内的聚磷酸盐以及颗粒污泥中沉淀的磷最终随废弃污泥排出系统<sup>[9]</sup>,从而造成磷的高去除率。

### 2.3 好氧颗粒污泥的生物相特性

污泥培养过程中MLSS在不同阶段呈现不同变化。如图8所示,在污泥驯化阶段,由于系统沉降时间逐渐降低,所以MLSS也会出现下降。污泥很快就能适应新的培养条件,沉降性能不断提高,污泥增殖速度高于沉降时间降低引起的排泥损失,因而总体呈现不断增加的趋势,由3681 mg/L增加到了6515 mg/L。沉降时间减少造成的选择压使得系统中存留下来的污泥都是沉降性能好的污泥,但是絮状污泥的沉降性能存在极限,达到一定程度后,只有

通过自凝聚形成密度更大,沉降性能更好的颗粒污泥,才能在降低沉降时间时免于被淘汰出系统。

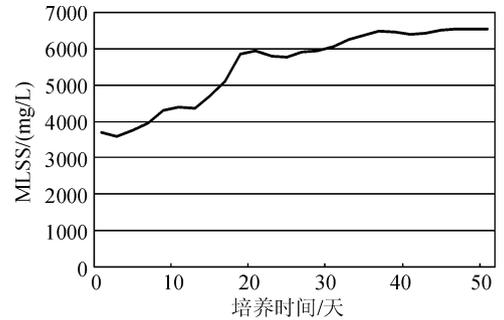


图8 MLSS随培养时间的变化

Fig. 8 The change of MLSS vs. cultivating time

普通絮状活性污泥初期含有杆菌,球菌和丝状菌及少量的原生动物、后生动物。随着实验的进行,好氧颗粒污泥的不断成熟,聚集了越来越丰富的微生物相,除了初期的杆菌,球菌和丝状菌之外,同时在颗粒污泥的表面和周围出现了大量的原生、后生动物,如图9所示。这些微生物嵌套在颗粒污泥周

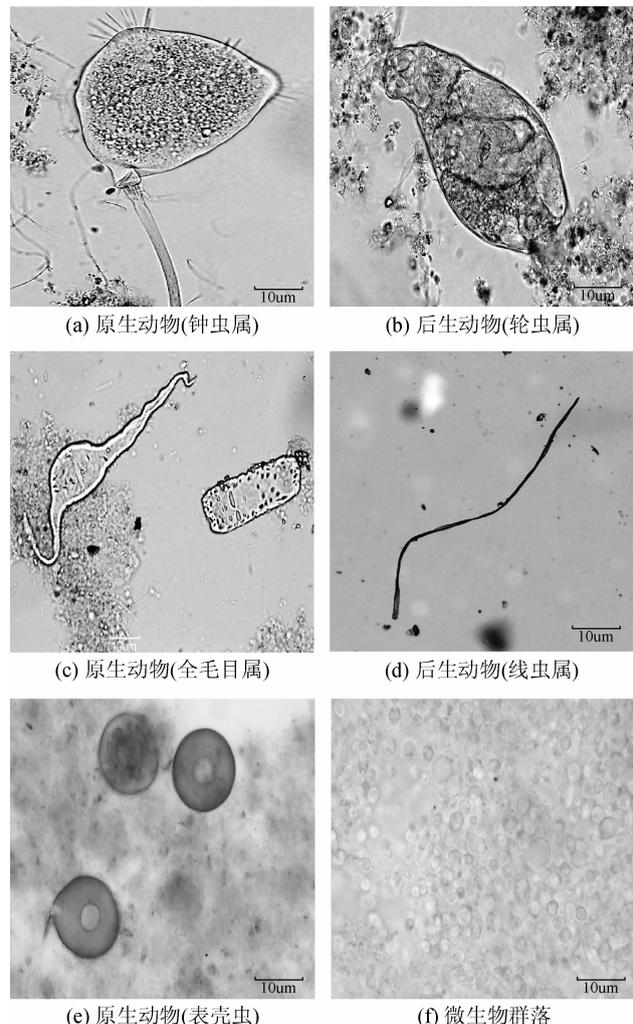


图9 微生物相

Fig. 9 Microbes

围的空间,并不停地吞食细菌和固体食物颗粒<sup>[10]</sup>。颗粒污泥周围的液体中有很多草履虫、变形虫、水蚤、线虫和衣藻游动,在光学显微镜下观察到各种原生动物和后生动物形态以及形成的菌胶团。好氧颗粒污泥中丰富的微生物对废水中污染物的去除起着重要作用。

### 3 结 论

1)实验采用接种培训法,在SBR反应器中,经过约50天的时间培养出了表面光滑、轮廓清晰、结构密实、沉降性能较好的好氧颗粒污泥。其颜色为浅黄色,粒径大多数在1~2 mm,SVI在40 mL/g左右,平均沉降速度达到18.42 m/h。

2)模拟生活污水COD、TN和TP浓度分别为600 mg/L, 10 mg/L和2 mg/L,运行周期为4 h时,颗粒污泥对COD、TN和TP的去除率分别达到95%、96%和98%,远远地高于第三污水处理厂絮状污泥的去除率。

3)反应器中MLSS值高达6 515 mg/L,好氧颗粒污泥中含有大量的原生动物和后生动物,并且成群的出现。

### 参考文献:

- [1] 杨麒,李小明,曾光明,等. SBR系统中同时硝化反硝化好氧颗粒污泥的培养[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 94-99.  
Yang Qi, Li Xiaoming, Zeng Guangming, et al. Cultivation of simultaneous nitrification and denitrification aerobic granular sludge in SBR system [J]. Environmental Science, 2003, 24(4): 94-99.
- [2] 阮文权,陈坚. 同步脱氮好氧颗粒污泥的特性及其反应过程[J]. 中国环境科学, 2003, 23(4): 380-384.  
Ruan Wenquan, Chen Jian. The character and the reaction process of simultaneous nitrification and denitrification aerobic granular sludge [J]. China Environmental Science, 2003, 23(4): 380-384.
- [3] 杨麒,李小明,曾光明,等. 好氧颗粒污泥实现同步硝化反硝化[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(1): 40-42.  
Yang Qi, Li Xiaoming, Zeng Guangming, et al. Realization of simultaneous nitrification and denitrification aerobic granular sludge [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003, 16(1): 40-42.
- [4] 李晓玲,彭党聪. SBR中颗粒污泥反硝化除磷试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2009.  
Li Xiaoling, Peng Dangcong. Denitrifying Phosphorous Removal by Granular Sludge in SBR Process [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture Technology, 2009.
- [5] 郑琴,陈利平,卫东,等. 西安第三污水处理厂工程可行性研究的思路[J]. 中国市政工程, 2004, 6(6): 39-41.  
Zheng Qin, Chen Liping, Wei Dong, et al. Reasonableness and advancement of design of Xi'an No. 3 sewage treatment plant project [J]. China Municipal Engineering, 2004, 6(6): 39-41.
- [6] 国家环保局编委会. 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, 1997.
- [7] 顾夏声,黄铭荣. 水处理工程[M]. 第一版. 北京:清华大学出版社, 1985.
- [8] 梁梦晓,倪晋仁. SBR中好氧颗粒污泥的培养及特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 502-512.  
Liang Mengxiao, Ni Jinren. Cultivation and characteristics of aerobic granular sludge in sequencing batch reactor [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(4): 502-512.
- [9] 李亚新. 活性污泥法理论与技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
- [10] 刘绍根,梅子鲲,谢文明,等. 处理城市污水的好氧颗粒污泥培养及形成过程[J]. 环境科学研究, 2010, 23(7): 918-923.  
Liu Shaogen, Mei Zikun, Xie Wenming, et al. Cultivation and granulation process of aerobic granular sludge applied to treat municipal wastewater [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(7): 918-923.

(责任编辑 李虹燕)