

变频控制 DO 条件下温度对中试 SBR 脱氮除磷的影响

顾升波^{a,b}, 王淑莹^{a,b}, 杨培^{a,b}, 李凌云^{a,b}, 李论^{a,b}, 杨庆^{a,b}

(北京工业大学 a. 环境与能源工程学院; b. 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘要:在中试规模 SBR (Sequencing Batch Reactor) 工艺处理实际生活污水过程中, 主要考察变频控制 DO 浓度恒定条件下温度对脱氮除磷及运行费用的影响。结果表明: 温度对系统中 COD 和磷酸盐去除性能影响不明显, 对系统中的氨氮去除影响比较显著。温度在 11~26 °C 范围内, 比氮氧化速率会随着温度的下降而降低。同时, 常温条件 (18~26 °C) 下微生物放磷和吸磷速率几乎维持恒定; 低温条件下 (11~18 °C), 放磷和吸磷速率随着温度下降大幅降低。最后, 考察了不同温度条件下, SBR 曝气阶段耗电量的变化规律, 分析不同温度下变频控制 DO 浓度对 SBR 工艺曝气阶段耗电量的影响, 为 SBR 污水处理厂运行提供理论依据。

关键词: 温度; 中试 SBR; 脱氮除磷; 节能; 变频技术

中图分类号: X703.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)04-0113-05

Effect of Temperature on Nutrient Removal of Pilot-scale SBR Process With DO Control by Frequency Conversion

GU Sheng-bo^{a,b}, WANG Shu-ying^{a,b}, YANG Pei^{a,b}, LI Ling-yun^{a,b}, LI lun^{a,b}, YANG Qing^{a,b}

(a. College of Environmental and Energy Engineering; b. Key Laboratory of Beijing Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: The effect of temperature on nutrient removal performance and operation cost with DO control by frequency conversion was investigated during the long-term operation process of treating realistic domestic wastewater with pilot-scale SBR process. It is found that the temperature has limited influence on the removal efficiency of COD and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, while has obvious impact on ammonia removal. Ammonia oxidation rate decreased sharply with the decrease of temperature when the temperature was from 11 to 26 °C. Meanwhile, phosphorous uptake and release rate of microorganism almost fixed at normal level under temperature (18-26 °C) and decreased sharply at temperature (11-18 °C). Finally, the variation of energy consumption at different temperature was investigated. And the effect of DO control by frequency conversion on the energy consumption of aeration phase was analyzed.

Key words: temperature; pilot-scale SBR; nutrient removal; energy saving; frequency conversion technology

收稿日期: 2009-12-15

基金项目: 国家“十一五”重大科技专项课题 (2008ZX07209-003); 北京市教委项目 (PHR20090502、PXM2008_014204_050843); 北京工业大学学生科技团队建设——指导教师资助项目 (CTD-2009-08); 北京工业大学博士研究生创新计划项目 (bcx-2009-050)。

作者简介: 顾升波 (1982-), 男, 博士生, 主要从事 SBR 污水处理及过程控制研究, (E-mail) gushengbo@emails.bjut.edu.cn。王淑莹 (联系人), 女, 教授, 博士生导师, (E-mail) wsy@bjut.edu.cn。

近 20 年来, SBR 法已经得到广泛应用, 主要用于间歇排放的工业废水和中小型城镇污水的处理^[1-3]。作为污水处理系统的重要运行参数之一, 温度在很大程度上影响着污水处理系统的处理效率。实际污水处理过程中, 温度是随着季节更替而不断变化的, 水温不仅影响着污泥微生物的比增长速率, 活性和沉降性能, 而且会影响曝气装置供氧的传递效率。因此, 冬季运行过程中, SBR 污水处理厂可能会出现硝化效果差, 曝气时间长等现象^[4]。这些现象都不利于 SBR 污水处理的节能降耗。为了能够最大限度地实现节能降耗, 很多污水处理厂开始采用变频技术对鼓风机进行改造, 实现鼓风机的变频控制, 变频控制能够有效地节省曝气阶段供氧量, 避免不必要的能源浪费。杨岸明等^[5]研究了变频控制下中试 SBR 系统在不同恒 DO 水平下的脱氮性能和节能效果, 同时考察了频率作为过程控制参数的可行性。然而, 目前为止还没有关于温度对变频控制条件下 SBR 中试系统脱氮除磷效果影响的研究报道。

试验采用变频技术控制 SBR 工艺曝气阶段 DO 恒定, 在此条件下分别考察温度对中试 SBR 系统的

硝化速率、反硝化速率、吸磷速率、放磷速率、耗电量的影响, 从动力学角度分析温度对 SBR 脱氮除磷性能的影响机理, 并分析了不同温度下变频控制 DO 浓度对 SBR 曝气阶段耗电量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验用水及分析方法

试验所用种泥取自北京某城市污水处理厂, 试验所用生活污水取自北京工业大学家属区化粪池, 该水质 C/N 比较低, 具体水质指标如表 1 所示。系统每天进水量相同。试验启动阶段为期 1 个月, 待系统具有良好生物脱氮功能后开始跟踪测定。

试验中的分析方法均采用中国规定的标准方法^[6]。水样经过过滤后测定, 项目包括 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、COD、碱度等水质指标。TN、TC、TOC 和 TIC 通过 TN/TOC 分析仪 (Multi N/C3000, 德国耶拿) 测定。采用 WTW 测定仪及相应探头在线监测反应器内 DO、ORP 和 pH 值。变频装置利用 ABB 公司 ACS350 型号变频器对回转式鼓风机进行变频控制, 实现 DO 和频率 f 两者之间的闭环控制。

表 1 试验水质特性

项目	pH	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_2^- - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	碱度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
范围	7.0~7.8	160~320	40~80	0.04~0.26	0.12~1.08	50~100	280~400

1.2 试验装置及运行方式

中试装置位于北京工业大学校园内, 反应器容积为 8.8 m^3 , 采用微孔曝气, 如图 1 所示。SBR 反应周期分为 5 个阶段: 进水 0.25 h, 曝气 6~10 h, 搅拌 1~2 h, 沉淀 2 h, 滗水 0.5 h, 闲置阶段。曝气和搅拌阶段随进水水质和温度等因素变化而变化。闲置阶段可长可短, 根据各周期反应阶段长度而相应改变。反应阶段通过实时控制系统进行在线控制。具体运行方式如下: 进水完成后, 启动鼓风机进行曝气, 曝气过程中 DO 与变频器构成了闭环控制回路, 通过 DO 信号 ($4 \sim 20 \text{ mA}$ 电流) 的大小调节风机电机工作频率, 以实现风机鼓风量的自动调节。反应过程中在线检测 DO、pH 值、ORP 及变频器频率 f 。控制系统实时识别出 pH 或频率 f 曲线上指示硝化结束的变化点, 及时停止曝气; 风机关闭之后开启搅拌器, 同时启动加药泵为系统补充外碳源进行反硝化, 搅拌阶段通过识别 pH 曲线上‘硝酸盐峰’变化点控制搅拌时间。反应全部结束之后按照设定的时间进行沉淀, 然后通过滗水器排水, 排水完成后进入

闲置阶段等待进入下 1 个周期。

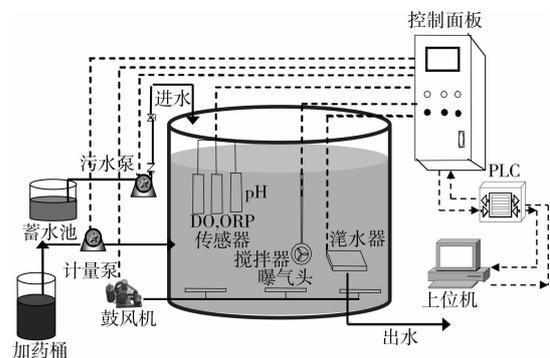


图 1 SBR 中试装置示意图

SBR 系统的平均 MLSS 控制在 2000 mg/L 左右, SRT 为 15~18 d, 变频器的 DO 浓度设定值控制在 2.0 mg/L 水平。由于采用中试规模 SBR 作为研究对象, 反应器液相温度无法采取人为控制方式, 但反应器液相温度随着环境温度的变化而变化, 因此试验中考察的各个温度是通过环境温度变化引起的反应器液相中水温变化而得到的。

2 试验结果与分析

2.1 中试 SBR 处理生活污水脱氮除磷的性能

图 2 是中试 SBR 系统长达 200 d 的长期运行结果。在水温从 26℃ 到 11℃ 范围内变化时, SBR 系统性能仍能维持相对稳定且具有较好的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、COD 去除率, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、COD 平均去除率分别达到 89.7%, 95.4% 和 81.4% 以上。相比之下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率更容易受到温度变化的影响, 在第 95 d 到 115 d 之间, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率急剧下降, 当温度降到 14℃ 以下时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率明显降低, 特别是水温降到 11℃ 时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率降到 47.2% 左右。之后随着温度逐渐回升, 污泥的活性和系统的脱氮性能也逐渐恢复到原来的水平。

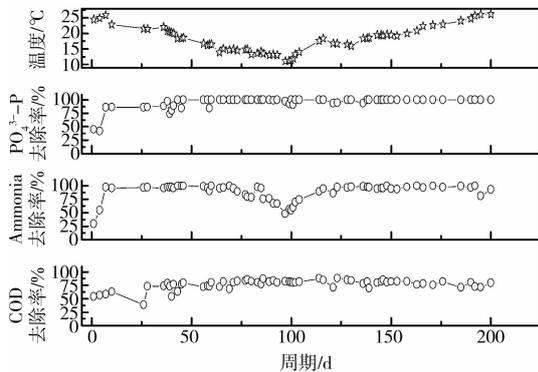


图 2 中试 SBR 脱氮除磷性能随时间的变化规律

2.2 温度对硝化过程的影响

研究表明:生物硝化反应在 4~45℃ 的温度范围内进行, 温度不仅影响硝化菌的比增长速率, 而且影响硝酸菌的活性, 硝化过程对温度的变化最为敏感^[7]。试验中, 温度为 20℃ 时的硝化效率是 11℃ 时的 1.8 倍, 相比之下, Kim D 等^[8]发现 30℃ 时的硝化效率是 10℃ 的 3 倍。由此可见:温度对系统脱氮性能影响很大。

图 3 分别总结了不同温度范围(11~26℃)内比氨氧化速率变化规律, 其中各温度下的比氨氧化速率值均为 SBR 系统运行 10 个周期以上的平均值。参考 Blackburne 等^[9]提出的温度与硝化菌活性的经验关系式, 经过适当修正, 得到与试验数据拟合性较好的拟合方程。

$$\mu_T = 0.044 \times e^{(0.055 \times (T-20))} \quad (1)$$

其中 μ_T 为温度为 T ℃ 时, 系统的比氨氧化速率, 单位 $\text{kgNH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{kgMLSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; T 为反应器液相的水温, 单位℃。

从图 3 中可以看出, SBR 系统的比氨氧化速率

与温度成指数增长关系, 20℃ 时比氨氧化速率是 $0.047 \text{ kgNH}_4^+ - \text{N} \cdot \text{kgMLSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 是 11℃ 时比氨氧化速率的 1.8 倍。相比之下, Kim 等^[10]指出 30℃ 的亚硝化速率是 10℃ 时的 2.6 倍。由此可见, 温度每增加 10℃, 硝化速率大约增加 1 倍。试验结果显示:温度在 11℃~26℃ 之间范围内, 硝化反应受温度的影响很大, 特别是低温(11~18℃)运行条件下, 硝化速率下降从而导致曝气时间的延长, 既增加了曝气阶段的运行费用, 又延长 SBR 系统的周期长度, 降低 SBR 系统的日处理量。

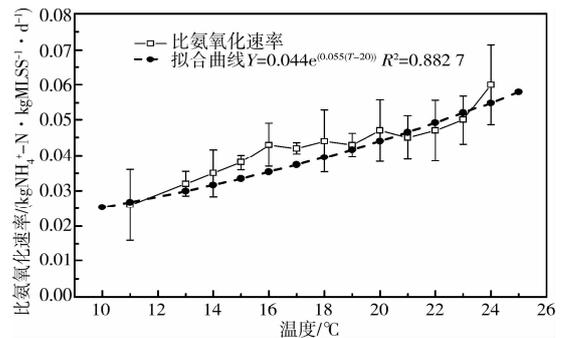


图 3 比氨氧化速率随温度的变化规律

2.3 温度对反硝化过程的影响

温度对反硝化速率的影响由以下方程式表示^[11]:

$$q_{D,T} = q_{D,20} \theta^{(T-20)} \quad (2)$$

式中: $q_{D,T}$ 为温度为 T ℃ 时反硝化速率; $q_{D,20}$ 为 20℃ 时反硝化速率, 单位为 $\text{g NO}_3^- - \text{N} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; θ 为温度系数, 1.03~1.15。根据试验得出的反硝化速率, 利用上式可以得出中试系统的活性污泥的温度系数范围为 0.94~1.19, 平均值为 1.09。

研究表明:温度是制约反硝化反应的一个重要因素, 温度越高, 反硝化菌的活性越好, 对污水中硝酸盐的转化就越好。图 4 总结了不同温度下微生物比反硝化速率的变化规律, 其中各个温度下的比反硝化速率值均为 SBR 系统运行 10 个周期以上的平均值。由图 4 可知, 在投加碳源充足的前提下 SBR 系统的比反硝化速率随着温度的增加而呈指数性增长趋势。利用方程式(2)对图 4 数据进行拟合, 取得较好的拟合效果。图 4 结果显示:20℃ 的比反硝化速率 $0.571 \text{ kgNO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kgMLSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 是 11℃ 时的比反硝化速率的 2.2 倍。这与 Yang 等^[12]研究结果几乎一致, 不同之处在于试验得出的反硝化速率值在 $0.025 \sim 0.663 \text{ kgNO}_3^- - \text{N} \cdot \text{kgMLSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间波动, 是其试验结果的一半。主要原因在于试验采用 SBR 传统硝化工艺, 而 Yang 等^[12]采用短程硝化反硝化工艺。由此可见, 与短程硝化新工艺

相比,传统硝化工艺对温度变化更敏感。

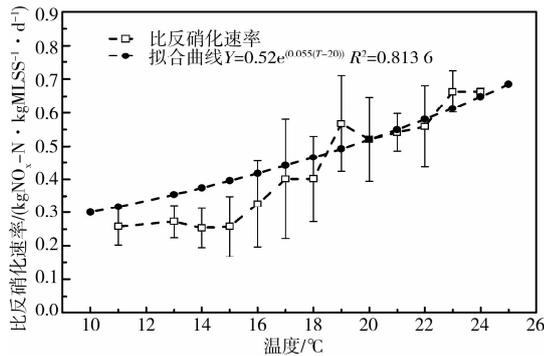


图 4 比反硝化速率随温度的变化规律

2.4 温度对生物除磷过程的影响

温度对释磷速率的影响遵循 Arrhenius 方程^[13],可用如下方程式表示:

$$\ln k = -\frac{Ea}{R} \times \frac{1}{T} + \ln A$$

其中: k 为反应速率常数; Ea 为反应所需的活化能, J/mol; T 为热力学温度, K; A 为频率因子; R 为摩尔气体常数 8.31 J/(K · mol)。

利用试验所得出的释磷速率,进行线性回归分析计算,可以得出活性污泥释磷反应所需要的活化能为 39.51 kJ/mol。一般来说,活化能越大,微生物对温度变化越敏感,即温度波动直接影响微生物生长和代谢过程。

由图 5 可知,在 11℃ 时,微生物的比放磷速率为 0.132 kgPO₄³⁻-P · kgMLSS⁻¹ · d⁻¹,比吸磷速率为 0.016 kgPO₄³⁻-P · kgMLSS⁻¹ · d⁻¹;随着温度的增加,比放磷速率和比吸磷速率逐渐上升,但是温度增加至 20℃ 以后,比放磷速率和比吸磷速率增长缓慢,分别维持在 0.25 kgPO₄³⁻-P · kgMLSS⁻¹ · d⁻¹和 0.05 kgPO₄³⁻-P · kgMLSS⁻¹ · d⁻¹水平不变。姜体胜等^[14]发现随着温度的增加,释磷和吸磷速率变化较小,认为温度对除磷的影响较小。Bao 等^[15]和 Liu 等^[16]分别在 10℃ 和 12.2℃ 条件下获得稳定的除磷效果。然而 Oehmen A 等^[17]却认为活性污泥中的群落结构随着温度而变化,聚磷菌能够通过改变其新陈代谢途径在低温(5℃)条件下达到较高的除磷性能以及在系统活性污泥种群中占据相对优势地位,而在常温(20℃)条件下却无法得到类似结果。由此可见,温度对生物除磷过程的影响机理还需要进一步深入研究。

2.5 温度对曝气阶段耗电量的影响

试验过程中,反应器曝气阶段 DO 浓度通过变

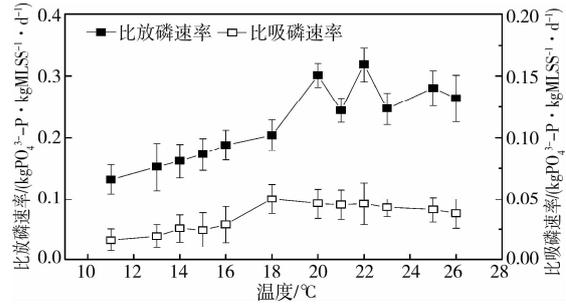


图 5 不同温度下的比吸放磷速率变化规律

频器的变频控制始终维持在 2.0 mg/L 左右。在维持 DO 浓度始终停留在 2.0 mg/L 的前提下,考察温度对中试 SBR 系统曝气阶段能耗的影响。根据不同温度下吨水耗电量的变化规律,进行线性回归分析,得到相关性良好的线性回归方程式,如图 6 所示。在 11~26℃ 温度范围内,温度与 SBR 系统吨水耗电量呈反相关性。主要原因在于低温抑制活性污泥的活性,导致曝气阶段反应时间大大延长,同时低温下氧传递系数下降,引起氧传质速率降低,从而导致风机供氧量增加。因此,温度是影响变频条件下 SBR 系统能耗的重要因素之一。在实际的运行过程中,必须考虑温度的影响,来及时调整 SBR 周期的运行时间。

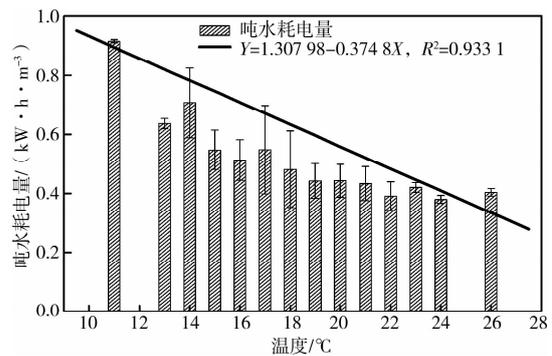


图 6 不同温度下的吨水耗电量的变化规律

3 结论

1) SBR 中试系统在为期 200 d 的运行过程中,水温(11~26℃)范围内,处理时间为 5~8 h 左右,系统维持良好的营养物去除性能,氨氮、磷酸盐和 COD 平均去除率分别达到 89.7%、95.4% 和 81.4% 以上。

2) 与生物除磷和有机物去除过程相比, SBR 系统脱氮过程对温度的变化更为敏感。当水温降低到 18℃ 以下时, SBR 系统脱氮效率开始下降,同时能耗也开始上升。根据 Arrhenius 方程拟合的硝化反硝化经验关系式能较好地预测不同温度下硝化反硝化

速率。

3)水温在 11~26℃ 范围内变化时,SBR 中试系统曝气阶段吨水耗电量随温度增加而逐渐下降,且下降速度减缓。主要原因可能由低温污泥活性下降,引起反应速率下降,从而延长曝气时间,导致曝气费用增加。

参考文献:

- [1] NI B J, XIE W M, LIU S G, et al. Modeling and simulation of the sequencing batch reactor at a full-scale municipal wastewater treatment plant [J]. *Aiche Journal*, 2009, 55(8): 2186-2196.
- [2] RONNER-HOLM SGE, MENNERICH A, HOLM N C. Specific SBR population behaviour as revealed by comparative dynamic simulation analysis of three full-scale municipal SBR wastewater treatment plants [J]. *Water Science & Technology*, 2006, 54(1): 71-80.
- [3] SHAW A, WATTS J, FAIREY A W, et al. Intelligent sequencing batch reactor control from theory, through modeling, to full-scale application [J]. *Water Science & Technology*, 2009, 59(1): 167-173.
- [4] MARTIN R W, BAILLOD C R, MIHELICIC J R, et al. Low-temperature inhibition of the activated sludge process by an industrial discharge containing the azo dye acid black 1 [J]. *Water Research*, 2005, 39(1): 17-28.
- [5] 杨岸明,王淑莹,杨庆,等.变频控制 DO 下 SBR 硝化反应控制参数及节能的中试研究 [J]. *环境工程学报*, 2007, 1(10): 13-17.
- YANG AN-MING, WANG SHU-YING, YANG QING, et al. A pilot scale research on nitrification control parameters and energy saving by applying frequency conversion technology on controlling DO of SBR [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(10): 13-17.
- [6] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002:252-354.
- [7] OBAJA D, MACE S, COSTA J, et al. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor [J]. *bioresource Technology*, 2003, 87: 103-111.
- [8] KIM D, KIM K Y, RYU H D, et al. Long term operation of pilot-scale biological nutrient removal process in treating municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(13): 3180-3184.
- [9] BLACKBURNE R, VADIVELU V M, YUAN Z G, et al. Kinetic characterization of an enrichment Nitrospira culture with comparison to Nitrobacter [J]. *Water Research*, 2007, 41(14): 3033-3042.
- [10] KIM J H, GUO X, PARK H S. Comparison study of the effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification and nitrite accumulation [J]. *Process Biochemistry*, 2008, 43(2): 154-160.
- [11] 郑兴灿,李亚新.污水除磷脱氮技术[M].北京:中国建筑出版社,1998
- [12] YANG Q, PENG Y Z, LIU X H, et al. Nitrogen removal via nitrite form municipal wastewater at low temperatures using real-time control to optimize nitrifying communities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(23): 8159-8164.
- [13] 许保玖,龙腾锐.当代给水与废水处理原理[M].北京:高等教育出版社,1991.
- [14] 姜体胜,杨琦,尚海涛,等.温度和 pH 值对活性污泥法脱氮除磷的影响 [J]. *环境工程学报*, 2007, 1(9): 10-14.
- JIANG TI-SHENG, YANG QI, SHANG HAI-TAO, et al. Effects of temperature and pH on nitrogen and phosphorus removal by activated sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(9): 10-14.
- [15] BAO R L, YU S L, SHI W X, et al. Aerobic granules formation and nutrients removal characteristics in sequencing batch airlift reactor (SBAR) at low temperature [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(2/3): 1334-1340.
- [16] LIU L X, ZHANG B P, WU X H, et al. Simultaneous removal of nitrogen and phosphorous from municipal wastewater using continuous-flow integrated biological reactor [J]. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 2008, 134(3): 169-176.
- [17] OEHMEN A, LEMOS P C, CARVALHO G, et al. Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale [J]. *Water Research*, 2007, 41(11): 2271-2300.

(编辑 胡英奎)