

低温对 EBPR 系统生物除磷特性的影响

张婧倩, 王淑莹, 唐旭光, 彭永臻

(北京工业大学 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: 以实际生活污水为研究对象, 在 SBR 系统中采用厌氧/好氧运行方式, 考察低温对 EBPR 生物除磷系统除磷特性的短期影响。试验在 20 °C 驯化除磷污泥, 除磷率稳定维持在 90% 以上。随后, 温度分别控制为 15, 10 和 5 °C, 考察低温对 EBPR 系统的短期影响。研究表明: 4 种温度下(20, 15, 10 和 5 °C)的厌氧释磷率分别为 358.5%, 358.5%, 247.8% 和 209.1%; 厌氧阶段挥发性脂肪酸(VFAs)的利用率分别为 100%, 88.9%, 58.4% 和 33.8%; 好氧前 30 min 的吸磷速率分别为 11.67, 6.43, 2.24 和 1.34 mg/(g·h)。温度在 15 °C 时, EBPR 系统仍具备较好的除磷性能; 温度低于 15 °C 后, EBPR 系统的除磷性能恶化; 温度低于 10 °C 时, 聚糖菌的活性受到较大的抑制。

关键词: EBPR 系统; 温度; 除磷率; PAO-GAO 竞争

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2011)09-2882-05

Effect of low temperature on EBPR system

ZHANG Jing-qian, WANG Shu-ying, TANG Xu-guang, PENG Yong-zhen

(Key Laboratory of Beijing Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to investigate the effect of low temperature on EBPR system, an anaerobic/aerobic SBR system was used for treating real domestic wastewater. The system ran at 20 °C, and the phosphorus removal efficiency kept above 90% steadily. Then the system ran in low temperature conditions (15, 10 and 5 °C). The results show that the phosphorus release ratio at the four temperatures (20, 15, 10 and 5 °C) is 358.5%, 358.5%, 247.8% and 209.1% with the VFAs usage ratio at 100%, 88.9%, 58.4% and 33.8% in each case separately in anaerobic phase. And the phosphorus uptake rate of each case is 11.67, 6.43, 2.24 and 1.34 mg/(g·h) during the first 30 min of aerobic phase. According to the experimental results, EBPR system still runs well at 15 °C, and deteriorates at 10 °C and 5 °C. Glycogen accumulating organisms (GAOs) are inhibited obviously below 10 °C.

Key words: EBPR system; temperature; phosphorus removal efficiency; PAO-GAO competition

温度对 EBPR 生物除磷系统的影响可以从 2 个方面来阐述。一方面, 温度降低, 使得聚磷菌的代谢速率降低^[1-3], 其吸放磷速率会受到一定的影响, 在特定的周期时间内, EBPR 系统的除磷效率会有所下降^[3]; 另一方面, 从 PAO(聚磷菌)-GAO(聚糖菌)的竞争角度来说, 低温条件易于 EBPR 系统的稳定运行。这是由

于 PAO 是一种嗜冷性细菌^[4-6], 其在低温条件下对挥发性脂肪酸(VFAs)依然具有较强的利用能力, 而 GAO 对低温的适应能力较弱, 因此, 在低温条件下, 聚磷菌在 PAO-GAO 竞争中占优势, 可有效抑制聚糖菌对 EBPR 系统的不利影响^[7-9]。从已报道的研究结果来看: EBPR 系统在低温条件下运行时不但不会发生恶

收稿日期: 2010-09-19; 修回日期: 2010-12-02

基金项目: 北京高校人才强教计划高层次人才基金资助项目(PHR20090502); 北京市教委科技创新平台项目(PXM2008_014204_050843)

通信作者: 彭永臻(1949-), 男, 山东掖县人, 博士, 教授, 从事污水处理与过程控制、脱氮除磷等研究; 电话: 010-67392627; E-mail: pyz@bjut.edu.cn

化, 其运行效果反而被增强^[10-12]。但是, 在以往的研究中, 多采用配水展开实验, 配水水质与实际污水的水质状况存在较大差距, 得到的结论也与实际污水厂的运行情况存在较大的差异^[12]。在此, 本文作者以实际生活污水为研究对象, 考察低温对 EBPR 系统除磷性能的影响以及对 PAO-GAO 竞争的影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验水质

本实验采用试验采用北京工业大学家属区排放的实际生活污水, 试验期间其主要水质指标如表 1 所示。

表 1 实际生活污水水质指标

Table 1 Real domestic wastewater characteristics		
项目	范围	平均值
pH	7.20~7.60	7.40
$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	118.00~240.20	161.40
$\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	3.36~9.65	5.75
$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	48.20~57.20	52.70
$\rho(\text{NO}_2^-\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0~0.05	0.01
$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0~1.14	0.50

1.2 实验装置及运行阶段

本试验为实验室小试研究。采用 SBR 有机玻璃反应器, 如图 1 所示。反应器直径为 20 cm, 高为 40 cm, 总容积为 12 L, 有效容积为 10 L。

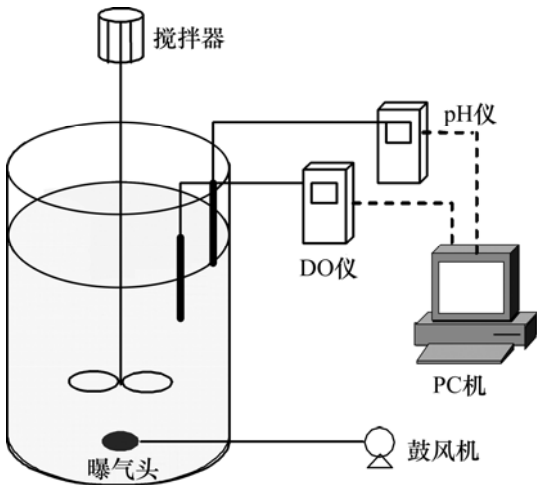


图 1 SBR 反应器示意图

Fig.1 Schematic diagram of SBR reactor

反应器每天运行 2 个周期, 采用瞬间进水方式, 1 个周期包括进水、厌氧 2 h、好氧 2 h、沉淀 0.5 h 和排水 15 min 共 5 个阶段。维持污泥质量浓度 3 g/L, 控制污泥龄为 10 d, 排水比为 80%。反应器配有溶解氧 (DO) 在线监测仪。

试验共分 4 个阶段进行, 不同阶段控制不同的实验温度(20, 15, 10 和 5 ℃), 考察不同温度下聚磷菌的放吸磷特性, 运行工况如表 2 所示。在好氧阶段初期投加烯丙基硫脲(Allylthiourea, 简称 ATU)消除硝化反应对 EBPR 系统的影响^[5]。各工况下的曝气量为 160 L/h。

表 2 实验运行阶段

Table 2 Running phase of experiment		
阶段	周期	温度/℃
I	1~30	20
II	31~40	15
III	41~50	10
IV	51~60	5

1.3 试验水质分析方法

COD 采用 COD 快速测定仪测定; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用抗坏血酸-钼酸铵法测定; VFAs 采用气相色谱法测定; 采用 WTW 测定仪及相应探头在线监测液相内 DO 和温度。

2 实验结果与讨论

2.1 中温条件(20 ℃)下 EBPR 系统驯化

试验污泥在 20 ℃(中温)条件下, 在 SBR 反应器中进行驯化, 驯化持续 30 周期。20 周期后, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度可稳定维持在 0.5 mg/L 以下, 除磷率稳定维持在 90%以上, 如图 2 所示。

20 ℃下, 典型周期(第 27 周期)中 COD, VFA 和 P 的变化规律如图 3 所示。从图 3 可见: 进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度为 7.85 mg/L, 厌氧末 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度为 28.15 mg/L, 厌氧释磷率为 358.5%, 厌氧阶段前 30 min 的释磷速率为 5.37 mg/(g·h); 进水中 VFA 质量浓度为 23.21 mg/L, 在厌氧阶段 60 min 时几乎利用完全(1.34 mg/L), 释磷速率收到底物 VFAs 浓度的限制, 逐渐减小; 吸磷过程在好氧阶段 90 min 时完成, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度为 0.34 mg/L, 好氧吸磷率为 98.7%, 除磷率 95.6%; 好氧阶段前 30 min 的平均吸磷速率为 11.67 mg/(g·h)。

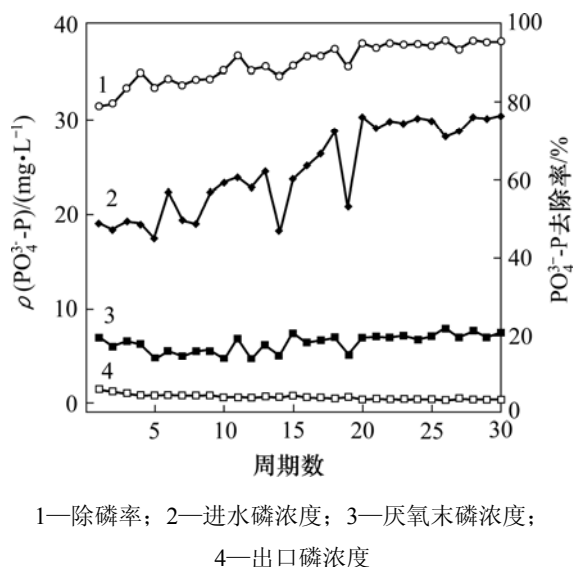


图 2 EBPR 系统驯化过程中除磷率的变化曲线

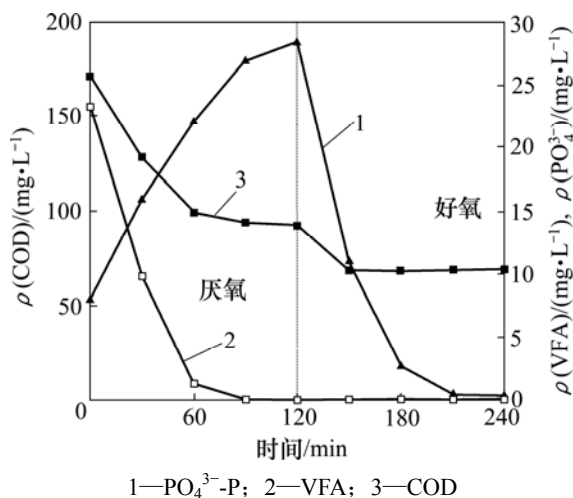
Fig.2 Variety of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ during adjusting range of EBPR system

图 3 20 °C 典型周期中 COD, VFA 和 P 的质量浓度变化规律

Fig.3 Profiles of mass concentration of COD, VFA and P in typical operational cycle at 20 °C

2.2 低温条件下 EBPR 系统的除磷性能

从第 31 个周期开始, EBPR 系统先后在 15, 10 和 5 °C 下运行, 每个阶段持续 10 个周期, 以考察低温对 EBPR 系统的短期影响。3 个阶段的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, COD 和 VFA 质量浓度的典型变化曲线分别如图 4~6 所示, 图 7 所示为 3 个阶段的 DO 质量浓度的比较结果。

从图 4~6 可以看出: 低温(≤ 15 °C)条件下, 聚磷菌的吸放磷速率均较中温条件下的有所下降。15, 10 和 5 °C 3 个阶段典型周期的进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度分别为 6.06, 7.74 和 6.17 mg/L, 厌氧末 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓

度分别为 23.67, 19.18 和 12.90 mg/L; 厌氧释磷率分别为 358.5%, 247.8%和 209.1%, 较 20 °C 时分别下降了 0, 30.8%和 41.6%; 厌氧阶段前 30 min 的释磷速率分别为 3.84, 2.35 和 1.37 mg/(g·h), 较 20 °C 时分别下降了 26.0%, 56.2%和 74.5%; 厌氧阶段 VFAs 的利用率分别为 88.9%, 58.4%和 33.8%。

聚磷菌在 15, 10 和 5 °C 3 个阶段的好氧吸磷率分别为 97.1%, 76.0%和 46.1%, 较 20 °C 时分别下降了 1.0%, 22.9%和 57.8%; 好氧阶段前 30 min 的吸磷速率分别为 6.43, 2.24 和 1.34 mg/(g·h), 较 20 °C 时分别下降了 44.9%, 80.8%和 88.5%。出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度分别为 0.67, 4.60 和 6.95 mg/L, 除磷率分别为 88.9%, 24.0%和 12.6%, 较 20 °C 时分别下降了 7.0%, 74.9%和 112.6%。

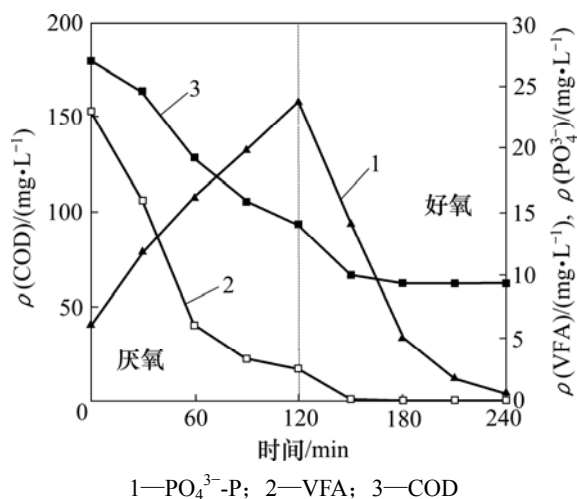


图 4 15 °C 典型周期中 COD, VFA 和 P 质量浓度的变化规律

Fig.4 Profiles of mass concentration of COD, VFA and P in typical operational cycle at 15 °C

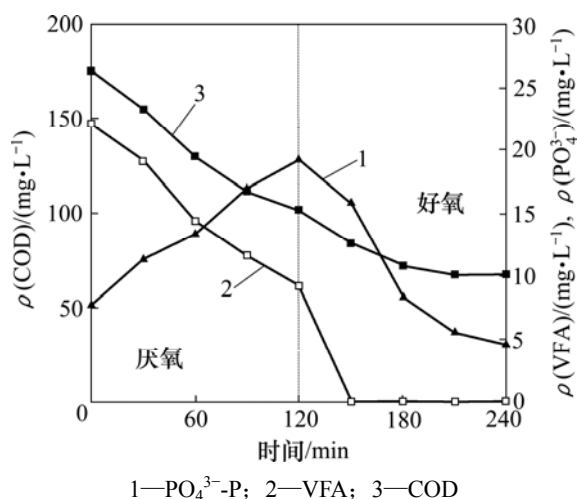


图 5 10 °C 典型周期中 COD, VFA 和 P 的质量浓度变化规律

Fig.5 Profiles of mass concentration of COD, VFA and P in typical operational cycle at 10 °C

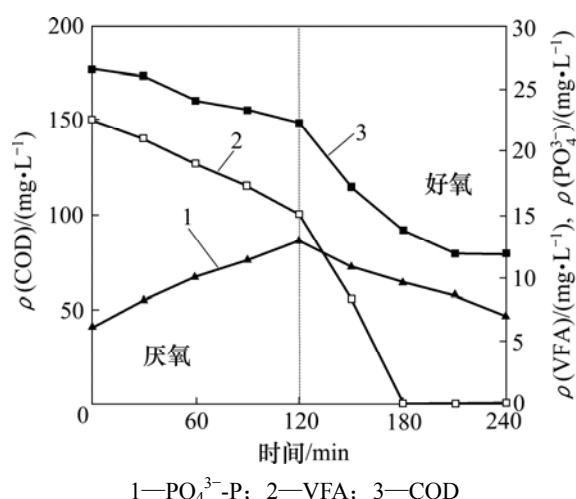


图 6 5 °C 典型周期中 COD, VFA 和 P 质量浓度的变化规律

Fig.6 Profiles of mass concentration of COD, VFA and P in a typical operational cycle at 5 °C

图 7 所示为 4 种温度下典型周期的 DO 质量浓度变化曲线。由图 7 可以看到: 随着温度的降低, DO 质量浓度曲线的上升速率逐渐加快, 且 DO 质量浓度逐渐增大。本试验各个阶段维持恒定曝气量 160 L/h, DO 质量浓度为充氧量质量浓度与耗氧量质量浓度之差, 表明温度越低, 微生物的耗氧速率越低。从侧面反映了聚磷菌在低温条件下的活性受到了抑制。

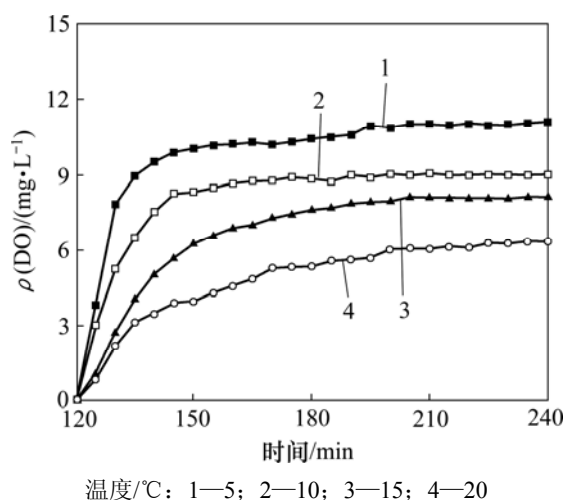


图 7 不同工况的典型周期下 DO 质量浓度变化趋势

Fig.7 Profiles of mass concentration of DO in typical circles of different stages

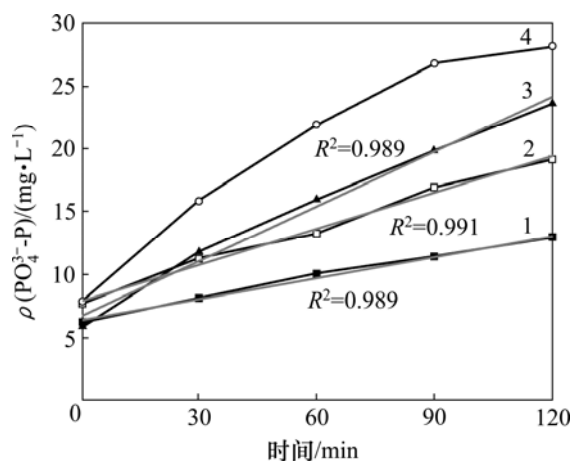
通过比较可以看出: 15 °C 时, EBPR 系统仍有较好的除磷性能, 尽管在聚磷菌的最大吸放磷速率受到了较大影响。但是, 在本试验的周期时间下, 其释磷

率和吸磷率仍然可以保证, 能够取得较好的出水效果。当温度降至 10 °C 及以下时, 聚磷菌的吸放磷速率受到较为严重的抑制, 出水效果严重恶化。

2.3 低温对 PAO-GAO 竞争的影响

在 EBPR 系统中, 聚糖菌(GAO)是造成其运行不稳定的主要原因。GAO 与 PAO 在厌氧条件下竞争有机底物 VFAs, 从而影响 PAO 的释磷量及 PHA 的合成, 使得 EBPR 系统的除磷效率下降。本实验通过分析 VFAs 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度在不同温度下的变化情况, 来推测 PAO-GAO 竞争情况的改变。

图 8 所示为不同工况下磷在厌氧段的变化趋势图。由图 8 可见: 低温(15, 10 和 5 °C)下的释磷曲线与 20 °C 下的不同, 在厌氧阶段, 释磷量与时间几乎呈线性关系。这主要是因为低温条件下的 VFAs 在厌氧段没有降解完, 聚磷菌的释磷速率没有收到底物的限制, 释磷量随时间线性增长。



温度/°C: 1—5; 2—10; 3—15; 4—20

图 8 不同工况下磷质量浓度在厌氧段的变化趋势

Fig.8 Profiles of mass concentration of P in typical circles of different stages in aerobic phase

图 9 所示为不同工况下 VFAs 在厌氧段的变化趋势图。从图 9 可以看出: 在 10 °C 和 5 °C 时, VFAs 的质量浓度也与时间呈较好的线性关系, 但是, 在 15 °C 时, VFA 的质量浓度变化曲线与时间不再呈线性关系, 其变化曲线与 20 °C 时的更为相近; 在厌氧前 30 min 内, 于温度 5, 10, 15 和 20 °C 时释磷量的比为 1:1.7:2.6:3.01, 但 VFAs 利用量的比为 1:1.7:4.5:9.09, 表明在 15~20 °C 时, 厌氧阶段初期的一部分 VFAs 被聚糖菌利用, 聚磷菌和聚糖菌存在一定的竞争; 而在 5~10 °C 时, 聚糖菌的活性受到了一定的抑制, 且由于

释磷量的比与 VFAs 利用量的比相同, 表明聚糖菌的活性在 10 °C 与 5 °C 时没有明显的变化。

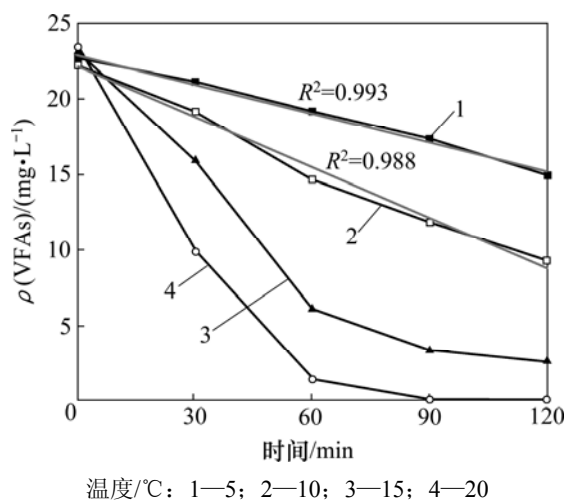


图 9 不同工况下 VFAs 质量浓度在厌氧段的变化趋势
Fig.9 Profiles of mass concentration of VFAs in typical circles of different stages in aerobic phase

3 结论

(1) EBPR 系统的释磷和吸磷速率随着温度的降低而下降。但是, 在周期时间为 4 h(厌氧段和好氧段各 2 h)时, 15 °C 下的 EBPR 系统仍能表现出较好的除磷特性, 而 10 °C 及 5 °C 的 EBPR 系统的吸放磷量受到严重影响, EBPR 系统无法正常运行。

(2) 低温可有效抑制聚糖菌(GAO)的活性。在 5~10 °C 时, GAO 的活性受到较明显的抑制, 且 GAO 在 10 °C 和 5 °C 时的活性没有明显的变化。

(3) 当厌氧阶段 VFAs 不作为限制因素时, 释磷量与时间呈线性增长关系。

参考文献:

[1] Grady C P L Jr, Daigger G T, Lim H C. Biological wastewater

treatment[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1999: 1-1076.

[2] Beatons D, Vanrolleghem P A, Hosten L H. Temperature effects in bio-P removal[J]. Wat Sci & Tech, 1999, 39(1): 215-225.

[3] Damir B, Susanne L M C, van Loosdrecht M. Influence of temperature on EBPR: Process and molecular ecological studies[J]. Wat Res, 1998, 32(4): 1035-1048.

[4] Knoop S, Kunst S. Influence of temperature and sludge loading on activated sludge settling, especially on microthrix parvicella[J]. Wat Sci & Tech, 1998, 37(4/5): 27-35.

[5] Euiso C, Daewhan R, Zuwhan Y, et al. Temperature effects on biological nutrient removal system with weak municipal wastewater[J]. Wat Sci & Tech, 1998, 37(9): 219-226.

[6] Helmer C, Kunst S. Low temperature effects on phosphorus release and up take by microorganisms in EBPR plants[J]. Wat Sci & Tech, 1998, 37(4/5): 531-539.

[7] Panswad T, Dounghchai A, Anotai J. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system[J]. Water Res, 2003, 37(2): 409-415.

[8] Erdal U G, Erdal Z K, Randall C W. The competition between PAOs (phosphorus accumulating organisms) and GAOs (glycogen accumulating organisms) in EBPR (enhanced biological phosphorus removal) systems at different temperatures and the effects on system performance[J]. Wat Sci & Tech, 2003, 47(11): 1-8.

[9] Erdal Z K, Erdal U G, Randall C W. Biochemistry of enhanced biological phosphorus removal and anaerobic COD stabilization[J]. Water Sci & Tech, 2005, 52(10/11): 557-567.

[10] 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.

[11] Henze M, Harrenmoes P, Jansen J L C, et al. Wastewater treatment/biological and chemical processes[M]. 2nd ed. New York: Springer, 1997: 109-115.

[12] Barnard J L, Stevens G M, Leslie P J. Design strategies for nutrient removal plant[J]. Wat Sci & Tech, 1985, 17(11/12): 233-242.

(编辑 杨幼平)