

研究论文

厌氧释磷量和温度对反硝化聚磷的影响

史 静, 吕锡武

(东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了提高双污泥系统的脱氮除磷效率, 以反硝化除磷污泥为研究对象, 采用静态试验进行对比研究, 考察了厌氧释磷量和温度对缺氧反硝化聚磷的影响。结果表明: 在试验范围内, 随着厌氧释磷量的增加, 反硝化聚磷量、净聚磷量和硝氮去除效率增加, 聚磷量与释磷量之比基本不变。在 8、16、28℃ 三种情况下, 均在约 260min 时结束反硝化聚磷, 低温下反硝化聚磷效果显著下降。在各试验条件下, NO_3^- -N 去除量与 PO_4^{3-} -P 去除量均呈良好的线性关系, 系数为 1.002~1.044, 体现了系统中污泥的固有特性。

关键词: 反硝化聚磷; 脱氮除磷; 厌氧释磷; 温度

中图分类号: X 703.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2010) 01-0166-06

Effects of phosphorus release amount and temperature on denitrifying phosphorus removal in a two-sludge system

SHI Jing, LÜ Xiwu

(School of Energy & Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: To improve the efficiency of denitrifying phosphorus removal in the two-sludge process, the effects of phosphorus release amount and temperature on denitrifying phosphorus removal were investigated in parallel batch experiments. The results indicated that as phosphorus release amount increased from $8.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $28.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, phosphorus uptake amount, net phosphorus uptake amount and nitrate removal efficiency increased, but the ratio of uptake amount and release amount remained almost unchanged. At the temperatures of 8°C , 16°C , 28°C , denitrifying phosphorus removal all ended after approximately 260 min reaction. Nitrate and phosphorus removal efficiency decreased at lower temperatures. A good linear relationship between nitrate consumption and phosphorus uptake amount was observed in the experiments with the correlation coefficient ranging from 1.002 to 1.044. This relationship between nitrate consumption and phosphorus uptake amount indicated the sludge intrinsic characteristics.

Key words: denitrifying phosphorus removal; nitrogen and phosphorus removal; phosphorus release amount; temperature

2009-07-06 收到初稿, 2009-08-22 收到修改稿。

联系人: 吕锡武。第一作者: 史静 (1984—), 女, 博士研究生。

基金项目: 江苏省科技厅太湖专项 (BS2007114); 教育部科学研究重大项目 (308010); 江苏省科技支撑计划 (BS2008667)。

Received date: 2009-07-06.

Corresponding author: Prof. LÜ Xiwu, xiwulu@seu.edu.cn

Foundation item: supported by Taihu Lake Pollution Control Program of Jiangsu Science and Technology Department (BS2007114), Major Program on Scientific Research of Ministry of Education (308010) and Key Technology R&D Program of Jiangsu Province (BS2008667).

引 言

传统的生物除磷脱氮工艺（如 A^2/O 工艺）是相对较简单和成熟的工艺，但也存在一些问题，如硝化菌、反硝化菌和聚磷菌在有机负荷、泥龄以及碳源需求上存在着矛盾和竞争，使氮、磷难以在同一系统中同时高效去除^[1-2]。反硝化聚磷双污泥工艺有效地解决了上述问题。该工艺是用厌氧/缺氧环境来代替传统的厌氧/好氧环境，驯化培养出一类以硝酸根为最终电子受体的反硝化聚磷菌（denitrifying phosphorus removing bacteria, DPB），通过其代谢作用同时完成过量吸磷和反硝化，达到脱氮除磷的目的^[3]。DPB 在厌氧段将挥发性有机酸（volatile fatty acid, VFA）以聚- β -羟基丁酸酯（poly- β -hydroxybutyrate, PHB）的形式储存在胞内，经泥水分离后不经过好氧阶段而直接进入缺氧区，在缺氧段以硝氮为电子受体进行反硝化除磷，实现“一碳双用”，从根本上解决了反硝化菌和聚磷菌对碳源竞争的问题；硝化菌和反硝化聚磷菌处于不同的系统，可以充分发挥各自的作用，解决了泥龄的矛盾；有研究表明^[4]，与传统的专性好氧除磷工艺相比，反硝化除磷能分别节省约 50% 碳源、30% 氧消耗量，减少 50% 的剩余污泥量；更适合处理 C/N 较低的污水。

本试验以双污泥系统反硝化除磷污泥为研究对

象，利用静态试验研究厌氧释磷量和温度对反硝化聚磷效果的影响，揭示反硝化聚磷的规律，为实际应用提供技术参考。

1 试验材料与方法

1.1 工艺流程

双污泥反硝化除磷工艺流程如图 1 所示。装置采用 PVC 材料制作，厌氧池、缺氧池和好氧池的有效容积分别为 75 L、75 L 和 120 L，快速曝气池的有效容积为 36 L，3 个沉淀池的有效容积均为 72 L。试验进水量为 $15 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.2 接种污泥和试验用水

双污泥系统的接种污泥取自南京市某污水处理厂污泥浓缩池，该厂采用的是 UNITANK 工艺。污泥经过约 3 个月的驯化后表现出良好的反硝化聚磷性能。系统连续运行期间，进水采用人工合成配水，投加乙酸钠、葡萄糖、尿素、磷酸二氢钾和碳酸氢铵等，进水水质如表 1。

1.3 试验方法和检测方法

1.3.1 厌氧段污泥释磷量对反硝化聚磷的影响试验 试验污泥取自上述工艺流程中的终沉池，污泥取出后用超纯水反复清洗，曝气 30 min 后，将污泥分成 5 份，加入乙酸钠作为碳源，在多联磁力搅拌器上先进行厌氧释磷，厌氧段初始 COD 为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，控制不同的厌氧释磷时间，厌氧释磷量

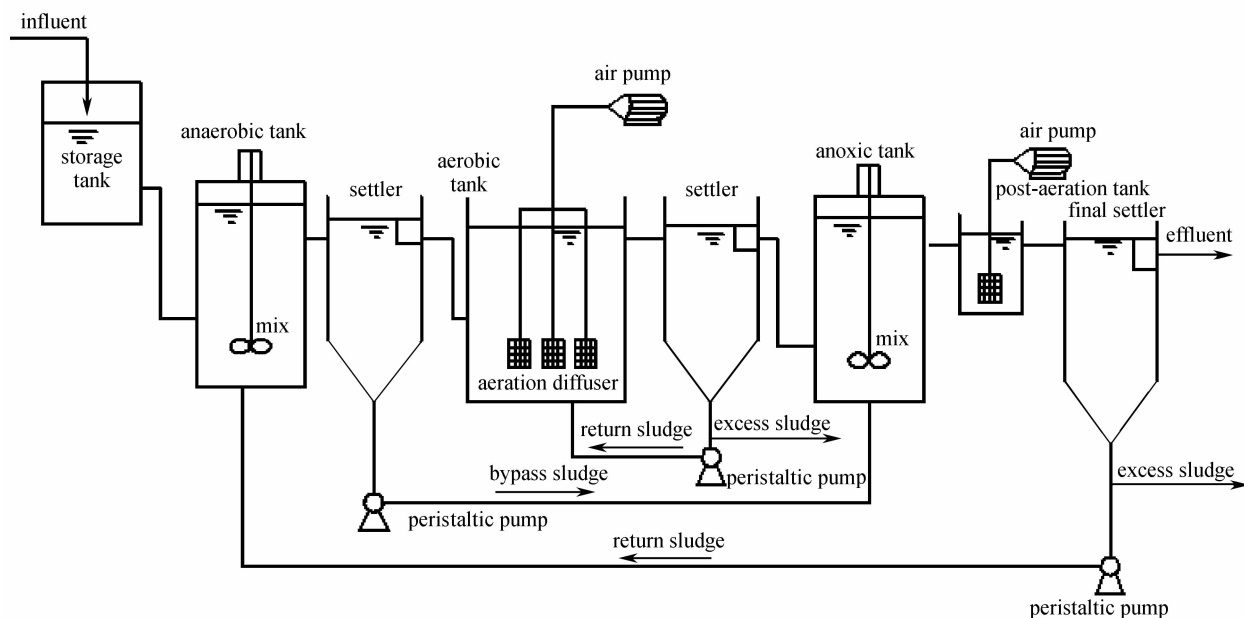


图 1 双污泥反硝化除磷工艺流程图

Fig. 1 Schematic diagram of two-sludge system

表 1 进水水质

Table 1 Characteristics of influent wastewater

Parameters	Range
COD/mg · L ⁻¹	150—237
NH ₄ ⁺ -N/mg · L ⁻¹	23—40
TN/mg · L ⁻¹	40—50
PO ₄ ³⁻ -P/mg · L ⁻¹	4—7

分别为 8.64、12.89、21.07、25.19、28.93 mg · L⁻¹。之后撇去上清液，用超纯水再次对污泥反复清洗，排除外碳源等因素对聚磷的影响。一次性投加磷酸二氢钾及硝酸钾，进行反硝化聚磷试验。PO₄³⁻-P 初始浓度为 (34.7 ± 0.5) mg · L⁻¹，NO₃⁻-N 初始浓度为 (50.8 ± 1.1) mg · L⁻¹，初始 pH 值为 7.2，温度为 28℃，MLSS 为 (4.15 ± 0.05) g · L⁻¹。每间隔一段时间取水样检测，考察水样中 PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 的变化规律。

1.3.2 温度对缺氧反硝化聚磷的影响试验 试验污泥取自上述工艺流程中的终沉池，污泥取出后用超纯水反复清洗，曝气 30 min 后，加入乙酸钠作为碳源，在多联磁力搅拌器上先进行厌氧释磷，释磷结束后将污泥分成 3 份，释磷量为 (30.5 ± 0.2) mg · L⁻¹，用超纯水再次对污泥反复清洗。一次性投加磷酸二氢钾及硝酸钾，进行反硝化聚磷试验。PO₄³⁻-P 初始浓度为 (35.4 ± 0.4) mg · L⁻¹，NO₃⁻-N 初始浓度为 (50.4 ± 0.2) mg · L⁻¹，初始 pH 值为 7.1，MLSS 为 (4.15 ± 0.03) g · L⁻¹。温度分别为 8、16、28℃。低于室温的条件通过在烧杯周围放入适量冰块来延缓温度上升；高于室温的条件则利用多联磁力搅拌器上的自动加热功能来实现。每间隔一段时间取水样检测，考察水样中 PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 的变化规律。

试验测定的指标有：MLSS、COD、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P 等，采用国家环保总局颁布的标准分析方法进行测定^[5]。

2 结果与讨论

2.1 厌氧段污泥释磷量对反硝化聚磷的影响

图 2、图 3 分别为不同污泥释磷量情况下，NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的变化曲线，表 2 对聚磷结果进行了总结。由图 2 可知，在厌氧释磷量分别为 8.64 (1[#])、12.89 (2[#])、21.07 (3[#])、25.19 (4[#]) 和 28.93 (5[#]) mg · L⁻¹ 的情况下，硝氮的

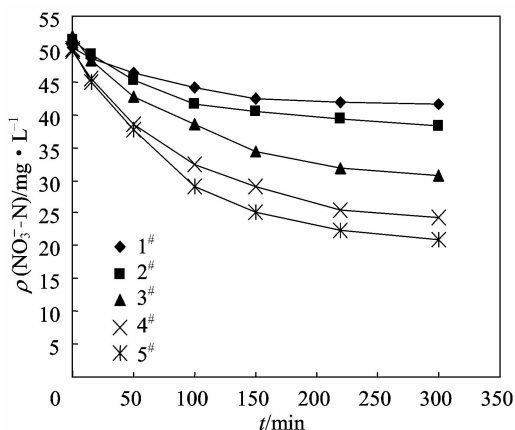


图 2 污泥释磷量对脱氮的影响

Fig. 2 Effect of phosphorus release amount on nitrate nitrogen removal

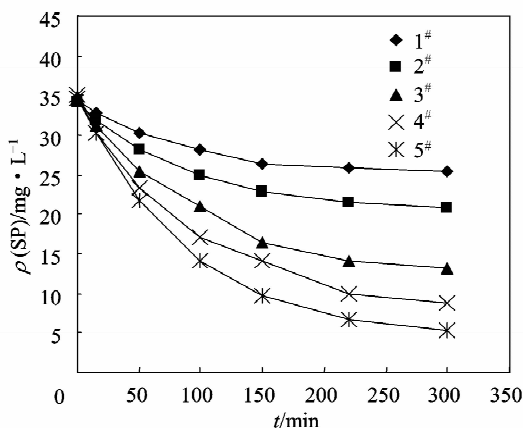


图 3 污泥释磷量对聚磷的影响

Fig. 3 Effect of phosphorus release amount on phosphorus uptake

去除量分别为 8.49、13.17、21.10、25.46、28.98 mg · L⁻¹。硝氮的去除效率随着厌氧释磷量的升高而增加，经计算分别为 16.9%、25.6%、40.7%、51.2% 和 58.0%。从图 3、表 2 可以看出，随着（比）厌氧释磷量的增加，（比）反硝化聚磷量增加，（比）净除磷量（净除磷量 = 聚磷量 - 释磷量）增加，但是聚磷量与释磷量的比值（P 聚/P 释）基本维持不变，约为 1.03。由图 2、图 3 对比可以看出，NO₃⁻-N 的变化曲线和 PO₄³⁻-P 的变化曲线具有相似性，经过曲线拟合发现，5 种情况下，NO₃⁻-N 消耗量 (x) 与 PO₄³⁻-P 去除量 (y) 均呈良好的线性关系： $y = (1.021 \pm 0.019)x$ ， $R^2 \geq 0.99$ 。

有研究表明，厌氧段磷的释放量和胞内 PHB 量呈良好的线性关系^[6-8]，厌氧段磷释放量（不含

表 2 不同释磷量下反硝化聚磷效果

Table 2 Denitrifying phosphorus removal under different phosphorus release amount conditions

Phosphorus release amount /mg · L ⁻¹	Specific phosphorus release amount /mg · (g MLSS) ⁻¹	Phosphorus uptake amount /mg · L ⁻¹	Specific phosphorus uptake amount /mg · (g MLSS) ⁻¹	Net phosphorus uptake amount /mg · L ⁻¹	Specific net phosphorus uptake amount /mg · (g MLSS) ⁻¹	Ratio of uptake amount and release amount /mg · mg ⁻¹
8.64	2.09	8.90	2.15	0.27	0.06	1.03
12.89	3.07	13.27	3.15	0.38	0.09	1.03
21.07	5.13	21.70	5.28	0.63	0.15	1.03
25.19	6.10	25.93	6.28	0.74	0.18	1.03
28.93	7.06	29.82	7.28	0.88	0.22	1.03

无效释磷)的多少在一定程度上反映了 PHB 的储存量^[9-14]。在缺氧段,DPB 利用厌氧段储存在胞内的 PHB 进行磷的吸收。因此在 PHB 为限制因素的情况下,厌氧释磷和缺氧反硝化聚磷可通过 PHB 建立一定的关系,故将聚磷量与释磷量之比进行了分析。

由图 4 可以看出,随着时间的变化,5 种情况下的 P 聚/P 释随时间变化基本相近,且其比值并不随释磷量的变化而变化。分析认为,P 聚/P 释在一定程度上反映了 DPB 在厌氧环境下储存的 PHB 用于聚磷的效率。就其比值来说,P 聚/P 释越接近于 1,单位释磷量的净聚磷量越小。在本系统中,P 聚/P 释较小,这也反映了双污泥系统的聚磷效率较传统脱氮除磷工艺(如 A²/O)低,分析认为可以考虑以下几种方法提高系统除磷量:(1)提高厌氧释磷量。由试验结果可知,厌氧释磷量不仅影响聚磷效果,同时也影响脱氮,这是区别于传统脱氮除磷工艺(如 A²/O 工艺)的主要方面,因此在双污泥系统中充分的厌氧释磷对提高脱氮除磷效率具有非常重要的意义。厌氧段应保证适宜的水力停留时间和充足的碳源,并通过控制污泥回流比尽量减少因污泥回流进入厌氧段的硝酸盐量,保证充分释磷。但同时也要注意厌氧段停留时间不宜过长,避免无效释磷。(2)对反硝化聚磷菌进行进一步的驯化和富集,如通过逐步增加缺氧段硝酸盐量和适当延长缺氧段停留时间来增加其反硝化聚磷能力,提高 P 聚/P 释。

本试验中 NO₃⁻-N 消耗量 (x) 与 PO₄³⁻-P 去除量 (y) 呈良好线性关系,文献[15-18]也得到类似的结论,但线性系数有所不同,分别为 1.51、1.2166、2.0、0.89。两者呈良好线性关系的原因分析如下:在缺氧段反硝化聚磷菌发生的各个主要生化反应(生物量合成、摄磷、糖原合成以及维持

自身新陈代谢)中,磷酸盐的吸收和硝态氮的消耗与 PHB 均呈一定的比例关系,如果 PHB 用于各个生化反应的消耗量呈一定的比例,那么从宏观上来说,磷的吸收量与氮的消耗量应呈线性关系,这与试验结果在表观上均相符。与其他试验结果系数不同的原因,分析认为:(1)由于驯化和培养方法的不同,反硝化聚磷污泥的组成、种类不同,导致对氮、磷的去除能力不同;(2)不同试验条件,受到外界的干扰程度不同,如外碳源的存在会对反硝化聚磷产生抑制,或在不同的 pH、温度条件下导致关键的限制因素发生改变等。

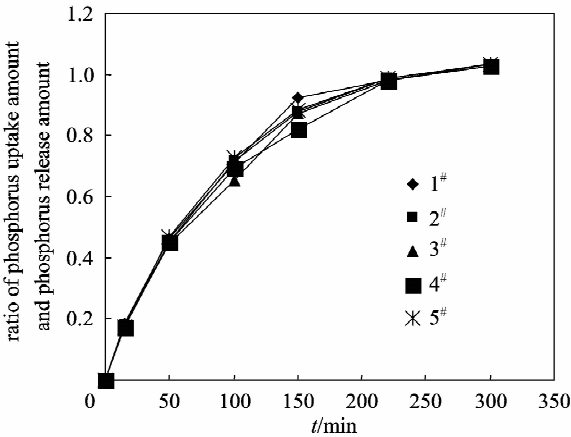


图 4 不同释磷量下聚磷量与释磷量之比曲线

Fig. 4 Ratio of phosphorus uptake amount and release amount under different phosphorus release amount conditions

2.2 温度对反硝化聚磷的影响

图 5、图 6 分别为不同温度下 PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 随时间的变化曲线。由图 5 可知,随温度的增加,污泥的聚磷量增加,分别为 7.69、23.34、31.47 mg · L⁻¹。经计算,在 8、16℃下的聚磷量仅为 28℃下的 24.4%、74.2%,前 260 min

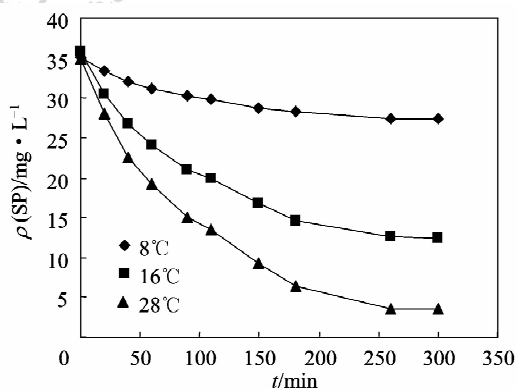


图 5 温度对聚磷的影响

Fig. 5 Effect of temperature on phosphorus uptake

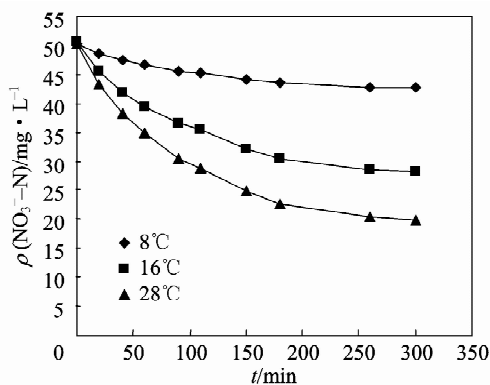


图 6 温度对脱氮的影响

Fig. 6 Effect of temperature on nitrate nitrogen removal

内的平均聚磷速率分别为 1.77、5.39、7.26 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由图 6 可知, 硝氮的消耗量随温度的增加而增加, 分别为 7.49、22.42、30.36 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经计算, 前 260 min 内的硝氮平均去除速率为 1.74、5.14、6.89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 硝氮的去除效率分别为 14.9%、44.3%、60.5%。在各温度下, 聚磷速率和硝氮的去除速率均随时间逐渐变小, 且在约 260 min 时进入平台期。

温度影响生物反应的途径主要有两种: (1) 影响酶催化反应的速率; (2) 影响基质扩散到细胞的速率^[19]。分析认为: 温度的降低有可能影响到缺氧条件下 PHB 的水解反应以及 NO_3^- -N 的传递和反应等, 从而限制了反硝化聚磷。

在温度对反硝化聚磷的影响试验中, 同样发现了 NO_3^- -N 去除量 (x) 与 PO_4^{3-} -P 去除量 (y) 呈良好的线性关系: $y = (1.038 \pm 0.006)x$, $R^2 \geq 0.99$, 且在不同温度下该系数变化不大, 并没有出现随温度的升高 (3~30℃, 10~45℃) 先增加后减少的现象^[20-21], 其原因分析如下: (1) 由于是

混培菌, 有可能不同的系统中所含对温度敏感程度的菌种不同; (2) 由于试验中对污泥进行了反复清洗, 基本消除了外碳源的影响, 从而削弱了普通反硝化菌的作用。另外, 2.1 节与 2.2 节试验中, 线性关系系数分别为 1.021 ± 0.019 和 1.038 ± 0.006 , 两者相近。在无外碳源的干扰下, 该系统中反硝化除磷污泥每去除 1 mg 的氮同时吸收约 1 mg 的磷, 反映了污泥的固有特性。

3 结 论

(1) 随厌氧段污泥释磷量的增加反硝化聚磷量、净聚磷量和硝氮的去除效率增加, 在排除外碳源干扰和以 PHB 为限制条件的情况下, 聚磷量与释磷量之比基本不变。厌氧释磷量不仅对聚磷效果有着重要的影响, 同时还影响脱氮效果, 因此厌氧段应保证适宜的水力停留时间和碳源进行充分有效释磷。

(2) 反硝化聚磷量、速率和脱氮效率随温度的升高而升高, 且均在约 260 min 结束脱氮和聚磷。缺氧段的停留时间应取 260 min 为宜。

(3) 在各试验条件下, NO_3^- -N 去除量与 PO_4^{3-} -P 去除量均呈良好的线性关系, 系数为 1.002~1.044。

References

- [1] Zhang Jie (张杰), Zang Jinghong (臧景红), Yang Hong (杨宏), Liu Junliang (刘俊良). A study on the inherent shortcomings and countermeasures of the A²/O process. *Water & Wastewater Engineering* (给水排水), 2003, **29** (3): 22-25
- [2] Liu Hongbo (刘洪波), Li Zhuo (李卓), Miao Qiangqiang (缪强强), Xiao Sulin (肖苏林), Xia Siqing (夏四清). Comparison between traditional biological nutrient removal process and denitrifying dephosphatation process. *Industrial Water & Wastewater* (工业用水与废水), 2006, **37** (6): 4-7
- [3] Mino T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process. *Wat. Res.*, 1998, **32** (11): 3193-3207
- [4] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system. *Wat. Res.*, 1996, **30** (7): 1702-1710
- [5] State Environmental Protection Administration of China (国家环境保护总局). *Inspects and Analysis Methods of Water*

- and Wastewater (水和废水监测分析方法). 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002
- [6] Ding Caijuan (丁彩娟), Ji Fangying (吉芳英), Gao Xiaoping (高小平), Zhang Liangjin (张良金), Zhang Bin (张斌). Study of the correlation between the transformation of PHB and denitrifying phosphorus absorption in A/ASBR. *Journal of Chongqing Architecture University* (重庆建筑大学学报), 2005, **27** (3): 80-84
- [7] Liu Yan (刘燕), Xing Zhiqiang (行智强), Chen Yinguang (陈银广), Zhou Qi (周琪). Research on polyhydroxyalkanoate form a key aspect to enhanced biological phosphorus transformation. *Environmental Science* (环境科学), 2006, **27** (6): 1103-1106
- [8] Tian Shuyuan (田淑媛), Wang Jingfeng (王景峰), Yang Rui (杨睿), Lang Tiezhu (郎铁柱), Yang Xiuwen (杨秀文). Relationship between PHB and polyphosphate under anaerobic condition and related biochemical mechanisms. *China Water & Wastewater* (中国给水排水), 2000, **16** (7): 5-7
- [9] Guo Jingsong (郭劲松), Huang Tianyin (黄天寅), Long Tengrui (龙腾锐). Interrelationship among the microorganisms in the biological nitrogen and phosphorus removal process. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control* (环境污染治理技术与设备), 2000, **1** (1): 8-15
- [10] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Biological dephosphatation by activated sludge under denitrifying conditions: pH influence and occurrence of denitrifying dephosphatation in a full-scale wastewater treatment plant. *Wat. Sci. Tech.*, 1997, **36** (12): 75-82
- [11] Kuba T, Murnleitner E, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. A metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms. *Biotech. & Bioeng.*, 1996, **52** (6): 685-695
- [12] Smolders G J F, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. A metabolic model for the biological phosphorus removal process. *Wat. Sci. Tech.*, 1995, **31** (2): 79-93
- [13] Murnleitner E, Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal. *Biotech. & Bioeng.*, 1997, **54** (5): 434-450
- [14] Smolders G J F, van der Meij J, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus process: stoichiometry, kinetics and pH influence. *Biotech. & Bioeng.*, 1994, **43** (6): 461-470
- [15] Zou Hua (邹华), Ruan Wenquan (阮文权), Chen Jian (陈坚). Study of using nitrate as electron acceptor in biological phosphorus removal. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2002, **15** (3): 38-41
- [16] Zhang Xiaoling (张小玲), Zhang Liqing (张立卿), Yuan Linjiang (袁林江), Wang Lei (王磊), Wang Zhiying (王志盈). Study on inducement effect of nitrate on denitrifying phosphate accumulating organisms. *China Water & Wastewater* (中国给水排水), 2006, **22** (13): 105-108
- [17] Ji Fangying (吉芳英), Gao Qian (高茜), Yuan Chunhua (袁春华). Effect of temperature and COD on ability of denitrifying phosphorus removal in SBR. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2005, **5** (6): 30-33
- [18] Li Yongzhi (李勇智), Peng Yongzhen (彭永臻), Zhang Yanping (张艳萍), You Weimin (游伟民). Effect of nitrate on denitrifying dephosphatation. *Environmental Pollution & Control* (环境污染与防治), 2003, **25** (6): 323-325
- [19] Leslie Grady C P, Glen T Daigger, Henry C Lim. *Biological Wastewater Treatment*(废水生物处理). 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 73
- [20] Bao Linlin (鲍林林), Li Xiangkun (李相昆), Li Dong (李冬), Kong Xiangji (孔祥吉), Zhang Jie (张杰). Study on influence of temperature and MLSS on denitrifying phosphorus removal system. *Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition* (哈尔滨商业大学学报: 自然科学版), 2008, **24** (4): 400-408
- [21] Li Jie (李捷), Zhang Jie (张杰). Effect of temperature on denitrifying phosphorus removal by A/O process. *China Water & Wastewater* (中国给水排水), 2008, **24** (19): 99-105