

2种典型基质作为碳源对单级好氧生物除磷影响的研究

刘医璘, 王冬波, 李小明*, 杨麒, 邹高龙, 贾斌, 曾恬静, 丁艳, 曾光明

(湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要:以合成废水为研究对象, 比较了SBR单级好氧工艺以2种典型基质(R1:葡萄糖; R2:乙酸钠)作为碳源时的除磷效果, 试验运行方式为瞬时进水→曝气(4 h)→沉淀、静置(8 h)→瞬时出水。结果表明, 在稳定运行中R1磷的去除效率明显高于R2。R1、R2中好氧曝气段反应器中单位混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)的总磷(TP)去除量约为7.2~7.7、3.8~4.6 mg·g⁻¹, 静置期单位MLVSS的TP释放量分别为3.6~3.8、2.7~3.1 mg·g⁻¹。R1反应过程中微生物体内储能物质多β-羟基烷酸盐(PHA)含量并没有明显的变化, 但糖原浓度在曝气30 min时增长到最大值, 曝气结束时微生物体内糖原水平消耗到微生物的原始水平; R2中PHA和糖原在曝气约45 min时均观察到最大的积累量。本研究试验现象表明在R1反应器中糖原作为其好氧段主要的能源物质为其生物代谢提供能量, 而在R2反应器中其主要的能量来源于PHA的分解辅以糖原的水解, 这也表明在单级好氧生物除磷过程中糖原能代替传统厌氧/好氧(A/O)工艺中的PHA成为微生物的能源物质, 且由于R1比R2有更多的糖原的积累, 使得R1中磷的去除效率高于R2。

关键词:单级好氧法; 生物除磷; PHA; 糖原; 聚磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)01-0124-05

Effects of Two Typical Substrates as the Sole Carbon Source on Biological Phosphorus Removal with a Single-stage Oxidic Process

LIU Yi-lin, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, YANG Qi, ZOU Gao-long, JIA Bin, ZENG Tian-jing, DING Yan, ZENG Guang-ming

(College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To investigate the performances of phosphorus removal in a sequencing batch reactor (SBR) with single-stage oxidic process using synthetic wastewater, glucose (R1) and acetate (R2) were fed to two SBRs as the sole carbon source, respectively. The operation run mode was determined to be: influent → aeration (4 h) → settling (8 h) → effluent. The results showed that the performance of phosphorus removal in R1 was higher than that in R2 after steady-operation. Total phosphorus (TP) removed per MLVSS in R1 and R2 were 7.2-7.7 and 3.8-4.6 mg·g⁻¹ during aeration, respectively, but the rate of phosphorus release at the two reactors were 3.6-3.8 and 2.7-3.1 mg·g⁻¹ during the idle zone, respectively. The energy storage of poly-β-hydroxyalkanoates (PHA) was constant nearly in R1 during the whole period, but glycogen was accumulated to the maximum value at 30 minutes of aeration, and then was decreased to the initial level. However in R2, PHA and glycogen were both accumulated at about 45 minutes of aeration. This phenomenon suggested that glycogen is the main energy source for metabolism during aerobic period in R1, and the main energy resource come from the decomposition of PHA and the hydrolysis of glycogen in R2. The facts showed that glycogen could replace PHAs to supply energy for phosphate uptake and polyphosphate accumulation in such a single-stage oxidic process. Since glycogen accumulated in R1 was more than that in R2, the efficiency of phosphorus removal in R1 was higher than that in R2.

Key words: single-stage oxidic process; biological phosphorus removal; poly-β-hydroxyalkanoates (PHA); glycogen; poly-p

在目前的传统生物除磷理论(厌氧-好氧工艺)中, SCVFAs(挥发性短链脂肪酸)是生物除磷基质的最佳选择。研究者普遍认为在生物除磷系统中, 聚磷菌在厌氧段不能够直接吸收利用葡萄糖, 葡萄糖先转化为SCVFAs才能被微生物吸收利用^[1-3]。Liu等^[4]发现在进水中含有葡萄糖将会诱导聚磷菌(GAOs)的大量繁殖, 不利于聚磷菌(PAOs)的优势竞争而影响到生物除磷的效果。这与Cech等^[5]的研究结果一致, 他们也发现在进水中投加葡萄糖会恶化

生物除磷效果。当污水中SCVFAs不足时, 需要向污水中补充有机碳源(SCVFAs)或者投加化学药剂以保证良好的除磷效果, 这大大增加了污水处理的运

收稿日期: 2009-03-01; 修订日期: 2009-08-14

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCENT-0770); 国家自然科学基金项目(50478054); 国际科技合作重点项目(2004DFA06200); 长沙市科技计划重点项目(K051132-72)

作者简介: 刘医璘(1984~), 女, 硕士, 主要研究方向为水污染处理技术与控制, E-mail: liuyihun@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xmli@hnu.cn; xmli121x@hotmail.com

行成本,制约了厌氧-好氧生物除磷工艺的进一步推广与应用。

本研究的前期试验表明^[6-8],在SBR单级好氧工艺中,以葡萄糖作为唯一碳源的反应器中其TP的去除率高达95%以上,并且整个反应周期中微生物体内的PHA没有明显变化.这些都与传统的理论有所区别.此发现能丰富现有的生物除磷理论,并可能开发出一种经济、简单的生物除磷工艺,即通过“一步氧化法”实现有机物与磷的同步去除,具有重要的理论与实践意义.然而,实际废水中成分及其复杂,挥发性脂肪酸、糖类、脂类等同时存在,SBR单级好氧工艺是否也如传统厌氧/好氧生物除磷工艺一样对某种碳源(如葡萄糖)具有单一的依赖性尚不清楚,而这正是决定SBR单级好氧工艺能否成功应用于实际废水处理的关键.因此,本研究分别以葡萄糖和乙酸钠2种典型基质作为两反应器的唯一碳源,探讨其以单级好氧法运行时的除磷效率以及过程中微生物的能量代谢,以期为以后的工程设计提供必要的参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行方法

采用2个(R1和R2)外形相同的有机玻璃制成的SBR反应器,长和宽均为18.0 cm,高35.0 cm,总容积11.3 L,有效容积10 L.用气泵和曝气沙头供气,通过转子流量计控制曝气量,试验装置如图1所示.试验运行采用SBR单级好氧法,运行方式为瞬时进水-好氧曝气(4 h)-沉淀、静置(8 h)-瞬时出水,反应过程中未设厌氧段,每周期末排水5 L,水力停留时间为24 h,污泥停留时间为12 d.两反应器pH均控制在 8.0 ± 0.2 .接种污泥取自长沙市第一污水厂,两反应器初始污泥浓度均为 $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,按上述方式进行驯化培养20 d后,污泥外观呈黄色,活性及沉淀效果均较好,开始试运行。

1.2 污水水质

进水采用合成废水,R1反应器的碳源为葡萄糖,R2反应器的碳源为醋酸钠,每周期两反应器添加碳源浓度均为 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,其它组成均相同(见表1),微量元素成分及浓度参考文献[9].用碳酸氢钠和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 调节pH值,pH值为 8.0 ± 0.2 .试验运行时添加少量金属螯合剂和硝化抑制剂用以排除金属磷以及硝化作用对试验的影响。

1.3 分析方法

TP:钼锑抗分光光度法^[10];MLSS、MLVSS:标准

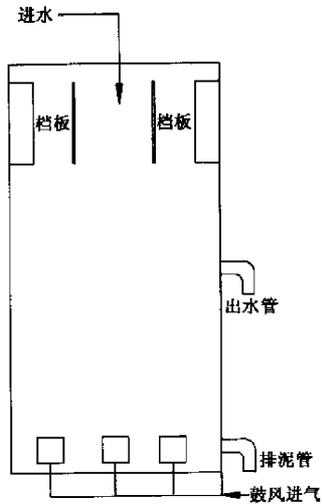


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the experiment equipment

表1 人工模拟废水组成

Table 1 Components of the synthetic wastewater

基质名称	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	基质名称	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
氯化铵	10-15	硫酸镁	5
磷酸二氢钾	40	氯化钙	5
硫酸亚铁	5	微量元素	0.1

方法^[11];糖原:苯酚-硫酸法^[12]。

PHA采用气相色谱法^[13,14]:取活性污泥混合液约50 mL离心后用磷酸盐缓冲溶液清洗并再次离心,样品在 -54°C 、10 Pa条件下冷冻干燥20 h,称取约20 mg冷冻泥加1,2-二氯乙烷2 mL、含有浓盐酸的丙醇2 mL(容积比例为1:4),在 100°C 下加热4 h,萃取完后加入2 mL的去离子水,剧烈振荡20~30 s,使其分相,下层为含有PHB的有机相,中间为活性污泥残渣,上层为水相;取下层PHB相用无水硫酸钠干燥.取 $1 \mu\text{L}$ 含有PHB的有机相用DB-5($30 \text{ m} \times 0.2 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$),气相色谱测定时氮气为载气,流速 1.5 mL/min ;分流比为1:15;FID为探测器;柱子温度变化程序为初始温度 80°C ,维持1 min,后以 45°C/min 的速度增加到 270°C ,维持3 min;检测器温度为 250°C ,注射器温度为 180°C 。

2 结果与讨论

2.1 长期运行中反应器中TP的变化

系统进入稳定运行期后,R1反应器和R2反应器内废水中TP的变化,见图2和图3。

从图2和图3可以看出,两反应器中均观察到明显的过量摄磷现象.R1反应器进水后磷酸盐总浓

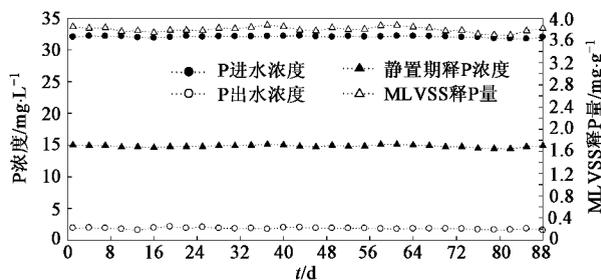


图2 R1反应器中总磷的变化

Fig.2 Changes of TP in R1

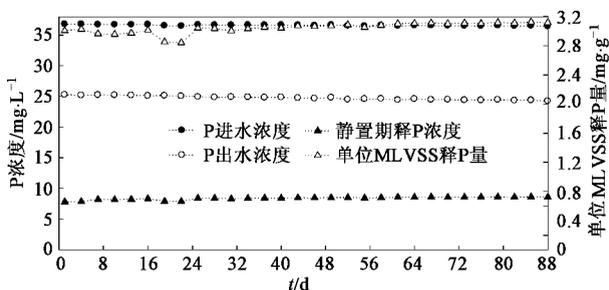


图3 R2反应器中总磷的变化

Fig.3 Changes of TP in R2

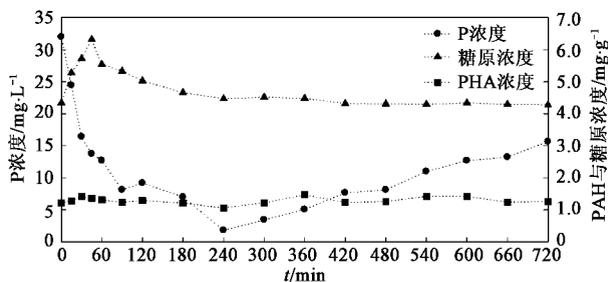


图4 R1反应器典型周期内参数变化

Fig.4 Variety of multi-parameter during the representative cycle in R1

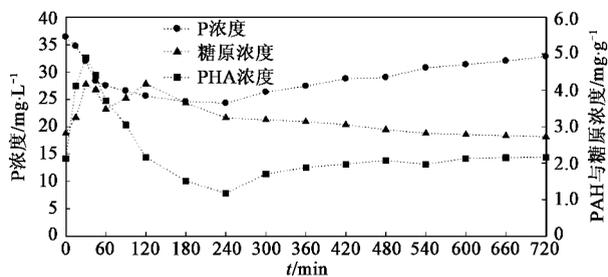


图5 R2反应器典型周期内参数变化

Fig.5 Variety of multi-parameter during the representative cycle in R1

度约稳定在 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,经过 4 h 好氧曝气反应后废水中磷酸盐浓度约为 $1.8 \sim 2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,好氧段磷酸盐去除率稳定在 94% 左右,经过 8 h 静置期后释磷浓度为 $14 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. R2 反应器进水后磷酸盐总浓度为 $36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,经过 4 h 好氧曝气反应后废水中磷酸盐浓度为 $24 \sim 26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,磷酸盐去除率仅为 28%,静置期释磷浓度为 $7 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,R2 反应器的磷去除率明显小于 R1 反应器.当系统进入稳定运行期后,两反应器中的 MLSS 及 MLVSS 浓度并不相等,R1 中 MLSS、MLVSS 浓度分别稳定在 5000 、 $3900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,R2 中 MLSS、MLVSS 浓度稳定在 3000 、 $2600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,这可能与乙酸碳源作为短链脂肪酸比葡萄糖更容易被细胞氧化成 CO_2 有关.因此,R1、R2 中微生物的摄磷能力可以表达为单位 MLVSS 去除磷浓度.R1、R2 中单位 MLVSS 的 TP 去除量为 $7.2 \sim 7.7$ 、 $3.8 \sim 4.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,经过 8 h 的静置后,R1、R2 中单位 MLVSS 的释磷量分别为 $3.6 \sim 3.8$ 、 $2.7 \sim 3.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,说明 R1 中微生物比 R2 中微生物有着更强的摄磷能力.

2.2 R1 和 R2 典型周期内的各参数的变化

从图 4 和图 5 可以看出,R1 和 R2 中储能物质的变化有明显区别.R1 在反应过程中 PHA 含量并没有明显的变化,整个反应周期内基本稳定在 1.2

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右;而糖原质含量在曝气开始至曝气 45 min 内迅速增长至最大值,此后糖原质含量逐渐下降,至曝气结束时反应器内的糖原浓度基本降至反应 0 min 时的水平,且在此后的整个静置期内微生物体内的糖原含量基本维持不变.这表明 R1 中微生物在外碳源消耗殆尽后主要依靠好氧前期快速合成的糖原质作为其主要的能源物质,为微生物的正常代谢和体内聚磷的合成提供能量.与 R1 相比,R2 中储能物质的变化与其它研究者在 A/O 工艺中的试验现象类似^[15,16]除糖原外 PHA 也是微生物利用的主要能源物质之一.从曝气开始至曝气 30 min 时,微生物体内的糖原质和 PHA 含量都快速增长至最大值,从反应 30~90 min 内,细胞内糖原浓度和 PHA 浓度均开始逐渐下降,但是在曝气 2 h 时,反应器内的糖原浓度再次增长达到一个峰值,而 PHA 的含量仍然呈下降趋势.糖原浓度的再次上升可能与 PHA 的供能有关,Lopez 等^[17]研究表明,在营养物质缺乏的好氧阶段,微生物会优先快速分解体内的 PHA 提供其代谢能量.在静止期内,两系统均观察到明显的聚磷水解现象,水相中磷酸盐浓度都有了不同程度的上升.

2.3 R1 和 R2 中聚磷微生物的能量代谢

传统的研究认为^[18~20]在聚磷微生物的新陈代谢过程中,3 种储存的化合物,即聚磷酸盐、糖原和

PHA 起非常重要的作用,微生物代谢的所需能量来源主要为厌氧段聚磷的水解和好氧段 PHA 的分解,而糖原的主要作用是为厌氧条件下 VFA 的转化提供还原力。然而,本研究中系统独特的运行方式以及能量物质的变化(图 4、5)显示,单级好氧生物除磷过程中的聚磷微生物有着与 A/O 工艺中的聚磷菌明显不同的能量代谢。

在 R1 中,微生物在好氧阶段主要依靠好氧前期快速合成的糖原质作为主要能源物质以供微生物的正常生长以及聚磷的合成。Yan 等^[21]的研究更表明,聚磷菌也有可能具有聚糖菌的某些特性,如利用胞内糖原作为其主要能源物质。在静置期内,由于胞内糖原浓度已处于细胞糖原的原始水平,微生物水解体内的 poly-p 产生能量以维持自身的生命,同时以磷酸盐的形式释放以致于水相中磷浓度明显上升,

此推论可以从 R1 中不同时间段的 MLVSS/MLSS 值中得到有力支持(表 2)。R1 中静置期内 MLVSS/MLSS 比值上升表明微生物分解了体内的聚磷^[21]。

在 R2 中,微生物在曝气阶段除了依靠糖原提供能量,好氧前期与糖原同时快速合成的 PHA 的分解也是用以提供微生物生长的主要能源物质之一,且 PHA 的分解产生的能量部分用于糖原的合成使糖原浓度在反应 2 h 时再次增长到一个峰值(图 5),到好氧结束时,微生物体内的糖原浓度也高于细胞的原始水平。在静置期内,由于糖原浓度仍处于较高水平,微生物优先分解糖原用以维持自身的生命,当糖原降至较低浓度后再分解利用其它的能源物质如聚磷等,R2 中静置期内水相中较少的磷释放量及 MLVSS/MLSS 的变化量(表 2)亦说明糖原质和聚磷均为 R2 中微生物提供了能量。

表 2 R1 和 R2 反应器不同时间 MLSS、MLVSS 比较

Table 2 Comparison between R1 and R2 at different times

反应时间 /h	R1 反应器			R2 反应器		
	MLSS	MLVSS	MLVSS/MLSS	MLSS	MLVSS	MLVSS/MLSS
0	4 972	3 878	0.78	3 016	2 548	0.845
4	5 230	4 021	0.769	3 224	2 701	0.838
12	5 124	4 007	0.782	3 042	2 564	0.843

2.4 R1 反应器和 R2 反应器不同基质代谢途径的比较

在传统 A/O 工艺中,多数研究者认为用乙酸等 VFAS 比葡萄糖作为碳源更有利于磷的去除,但是在本研究的长期运行中发现,在以葡萄糖为唯一碳源的反应器中除磷效果远远优于用乙酸钠为唯一碳源的除磷效果。试验推测产生这种差异的原因可能与碳源基质的代谢途径相关。生物化学研究认为^[23,24],葡萄糖在好氧呼吸过程中,主要是经 EMP 途径酵解形成丙酮酸后,进入 TCA 循环参与细胞的代谢过程;而乙酸盐的代谢途径,除了经由乙酸转变成乙酰-CoA 进入 TCA 循环外,还有可能进入乙醛酸循环。因此,乙酸盐参与代谢后产生的 ATP 数量将会少于葡萄糖经酵解后进入 TCA 循环产生的 ATP 数量。本试验研究结果表明,在以葡萄糖为碳源的反应器中,好氧阶段微生物的主要能源物质为糖原,而以醋酸钠为碳源的反应器中,微生物除了利用糖原外,分解胞内的 PHA 也是其代谢的主要能源之一,且从图 4 和图 5 可以看出,R1 反应器合成的可利用糖原浓度明显高于 R2 反应器。这就表明,试验中 R1 反应器中微生物利用糖原作为主要能源物质代谢产生的 ATP 多于 R2,因此当微生物在反应过程中,R1 比 R2

中的微生物能产生更多的 ATP 用以提供微生物吸取外界的磷和反应器内微生物的繁殖。

综上所述,本研究证实了 SBR 单级好氧工艺可以在不同基质作为有机碳源时实现有效的生物除磷,并探讨了不同基质作为有机碳源时影响此工艺除磷效果的机制。虽然 R2 中 TP 的平均去除率只有 28%,但这是研究者为研究磷的最大摄取量而提高进水磷浓度所致,除微生物正常生长和新陈代谢所摄取的磷外,R2 中也有明显的磷过量摄取现象。目前,国内外城市生活污水中进水磷浓度大多在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右甚至只有 $5 \sim 7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[25,26],而 R2 中 $10 \sim 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 TP 去除量则显示,即使以乙酸钠作为唯一碳源,仍然可以使生活污水中的磷得到有效的去除,此工艺对磷浓度相对较低但排放量巨大的生活污水,有着十分明显的优越性。目前,对于本研究中的单级好氧生物除磷机制还有待进一步的研究和探讨,但是本研究的结果对重新认识和补充生物除磷机制将有重要的意义。

3 结论

SBR 单级好氧工艺在以葡萄糖(R1)与乙酸钠(R2)作为唯一碳源时均能够实现生物除磷,但碳源

类型对除磷效果影响很大. 稳定运行后, R1 和 R2 中摄磷量分别为 7.2~7.7、3.8~4.6 mg·g⁻¹. R1 反应过程中 PHA 浓度并没有明显的变化, 而糖原浓度在 30 min 内增长到最大值, 至曝气结束时微生物体内糖原水平消耗到微生物的原始水平. 糖原作为其好氧段主要的能源物质为其生物代谢提供能量. 在 R2 反应过程中, PHA 和糖原均观察到明显的积累现象, 其主要能量来源于 PHA 的分解辅以糖原的水解. 这表明在整个生物除磷过程中糖原也能成为微生物的能源物质, 当糖原不足时, 微生物分解体内的其它能量物质如聚磷等维持细胞生长.

参考文献:

- [1] Randall A A, Benefield L D, Hill W E. The effect of fermentation of products on enhanced biological phosphorus removal, polyphosphate storage, and microbial population dynamics [J]. *Wat Sci Tech*, 1994, **30**(6): 213-219.
- [2] Chen Y, Randall A, McCue T. The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid [J]. *Water Res*, 2004, **38**: 27-36.
- [3] Mullan A, McGrath J, Adamson T, *et al.* Pilot-scale evaluation of the application of low pH-inducible polyphosphate accumulation to the biological removal of phosphate from wastewaters [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, **40**: 296-301.
- [4] Liu T, Mino T, Matsuo T, *et al.* Glycogen accumulating population and its anaerobic substrate uptake in anaerobic-aerobic activated sludge without biological phosphorus removal [J]. *Water Res*, 1996, **30**(1): 75-82.
- [5] Cech J S, Hartman P. Competition between polyphosphate and polysaccharide accumulating bacteria in enhanced biological phosphate removal systems [J]. *Water Res*, 1993, **27**(7): 1219-1225.
- [6] Wang D, Li X, Yang Q, *et al.* Biological phosphorus removal in sequencing batch reactor with single-stage oxic process [J]. *Bioresour Technol*, 2008, **99**: 5466-5473.
- [7] 王冬波, 李小明, 曾光明, 等. 内循环 SBR 反应器无厌氧段实现同步脱氮除磷 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 534-539.
- [8] 王冬波, 李小明, 杨麒, 等. SBR 无厌氧段实现生物除磷 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1867-1873.
- [9] Tay J H, Show K Y, Jeyaseelan S. Effects of media characteristics on performance of upflow anaerobic packed-bed reactors [J]. *Environ Eng*, 1996, **122**(6): 469-476.
- [10] 国家环境保护局. 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, 1989. 96-120.
- [11] 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. 4-26.
- [12] 刘壮, 杨造燕, 王暄. 厌氧快速吸收有机物的启动能源研究 [J]. *中国给水排水*, 2000, **16**: 1-4.
- [13] Takabatake H, Satoh H, Mino T, *et al.* PHA(polyhydroxyalkanoate) production potential of activated sludge treating wastewater [J]. *Wat Sci Tech*, 2002, **45**(12): 119-126.
- [14] Oehmen A, Keller-Lehmann B, Zeng R J, *et al.* Optimisation of poly-β-hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *Chromatography A*, 2005, **1070**(1-2): 131-136.
- [15] Oehmen A, Vives M T, Lu H, *et al.* The effect of pH on the competition between polyphosphate-accumulating organisms and glycogen-accumulating organisms [J]. *Water Res*, 2005, **39**: 3727-3737.
- [16] Tong J, Chen Y. Enhanced biological phosphorus removal driven by short-chain fatty acids produced from waste activated sludge alkaline fermentation [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, **41**: 7126-7130.
- [17] Lopez C, Pons M N, Morgenroth E. Endogenous processes during long-term starvation in activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Res*, 2006, **40**: 1519-1530.
- [18] Janssen J, Meinema K, Roest H, *et al.* Biological Phosphorus Removal Manual for Design and Operation [M]. IWA Publishing, 2002. 8-25.
- [19] Carucci A, Lindrea K, Majone M, *et al.* Different mechanisms for the anaerobic storage of organic substrates and their effect on enhanced biological phosphorus removal [J]. *Wat Sci Tech*, 1999, **39**(60): 21-28.
- [20] Tracy K, Flammino A. Advances in water pollution control: Biological phosphate removal from wastewater [M]. Oxford: Pergamon Press, 1987. 15-26.
- [21] Yan Zhou, Maite P, Raymond J, *et al.* Could polyphosphate-accumulating organisms(PAO) be glycogen-accumulating organisms(GAOs)? [J]. *Wat Res*, 2008, **42**: 2361-2368.
- [22] Lu H B, Keller J, Yuan Z G. Endogenous metabolism of *Candidatus Accumulibacter phosphatis* under various starvation conditions [J]. *Water Res*, 2007, **41**: 4646-4656.
- [23] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2004. 98-104.
- [24] 王镜岩, 朱圣庚, 徐长法. 生物化学(下册 I M). (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2003. 62-112.
- [25] 阮文权, 邹华, 陈坚. 乙酸钠为碳源时进水 COD 和总磷对生物除磷的影响 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(3): 49-52.
- [26] Yu X, Qi Z, Zhang X, *et al.* Nitrogen loss and oxygen paradox in full-scale biofiltration for drinking water treatment [J]. *Water Res*, 2007, **41**: 1455-1464.