

不同丙酸/乙酸对聚糖菌长/短期代谢的影响

姚樱, 陈银广*, 马民, 顾国维

(同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 在 3 个 SBR 反应器 (即 SBR-A, SBR-C 和 SBR-E) 中, 以 3 种不同比例的丙酸/乙酸中长期驯化活性污泥使之富集聚糖菌, 对丙酸/乙酸对聚糖菌的长期和短期代谢的影响进行了研究. 结果表明, 长期高丙酸/乙酸驯化导致聚糖菌厌氧消耗的糖原量和合成的聚 β -羟基烷酸酯 (poly- β -hydroxyalkanoates, PHA) 的量都较少, 在好氧段积累的糖原量和降解的 PHA 的量也较小, 并且对聚糖菌的脱氢酶活性、生长速率及对有机酸的利用能力等都有抑制作用. 当进水中的丙酸与乙酸的碳摩尔数相同时, 单位生物量利用乙酸的速率较丙酸快. 不同丙酸/乙酸对聚糖菌代谢的短期影响的研究表明, 当进水中乙酸浓度突然提高时, 长期以高丙酸/乙酸驯化的聚糖菌可以直接利用乙酸参与代谢, 但长期以低丙酸/乙酸驯化的聚糖菌则无法快速利用丙酸. 提高进水中丙酸/乙酸有可能成为有效抑制聚糖菌生长并提高增强生物除磷系统稳定性的一种策略.

关键词: 聚糖菌; 乙酸; 丙酸; 增强生物除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2007) 09-1970-05

Long-Term and Short-Term Effects of Propionic/Acetic Acid Ratios on Metabolism of Glycogen-Accumulating Organisms

YAO Ying, CHEN Yin-guang, MA Min, GU Guo-wei

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Three activated sludges enriched with glycogen accumulating organisms (GAO) were acclimatized respectively with different ratios of propionic to acetic acid (i.e. biomass SBR-A, C and E). The effect of different ratios of propionic/acetic acid on the metabolism of long-term cultivated GAO was investigated. Cultivated with high propionic/acetic acid ratio, GAO consumed less glycogen and synthesized less poly- β -hydroxyalkanoates (PHA) in the anaerobic phase, and in the aerobic phase accumulated less glycogen and degraded less PHA, and at the same time the microbial growth was lower. When the carbon mole of acetic acid equaled that of propionic acid in the influent, GAO utilized acetic acid faster than propionic acid. Batch tests were carried out with biomass SBR-A and SBR-E to study the transient response of long-term cultivated GAO to short-term change of propionic/acetic acid ratio. The GAO cultivated with a high propionic/acetic acid ratio was able to utilize acetic acid immediately when the concentration of acetic acid in the feed suddenly increased. But when the biomass cultivated with a low propionic/acetic acid ratio was feed with high ratio propionic/acetic acid wastewater, the propionic acid uptake rate was only 41.1% of the rate of the GAO long-term cultivated with high propionic/acetic acid. The sudden increase of propionic/acetic acid ratio could effectively inhibit the metabolism of GAO.

Key words: glycogen accumulating organisms (GAO); acetic acid; propionic acid; enhanced biological phosphate removal (EBPR)

增强生物除磷 (enhanced biological phosphate removal, EBPR) 是一种较经济有效的除磷方法. 在实验室规模的 EBPR 系统以及一些 EBPR 污水处理厂中都发现, 即使是在有利于聚磷菌 (phosphate accumulating organisms, PAO) 生长的条件下, 除磷效果也很差, 其原因可能是聚糖菌 (glycogen accumulating organisms, GAO) 在 EBPR 系统中占有了优势^[1,2]. GAO 被认为在厌氧条件与 PAO 竞争碳源, 吸收如乙酸、丙酸等挥发性脂肪酸 (volatile fatty acid, VFA), 合成聚- β -羟基烷酸 (poly- β -hydroxyalkanoates, PHA), 但在好氧条件不吸收磷及合成聚磷, 对于除磷没有贡献. 因此, 寻找有效抑制 GAO 生长和代谢的方法, 以减少 GAO 在厌氧段与 PAO 竞争有限的 VFA, 对于保证 EBPR 系统的高效性与稳定性具有重

要理论和现实意义^[3].

乙酸和丙酸是废水中常见的 2 种 VFA, 但到目前为止, 文献关于碳源对 GAO 代谢影响的研究大多集中在以乙酸或丙酸为唯一碳源, 鲜见对不同比例的丙酸/乙酸的废水进行研究^[4,5]. 在以往的研究中发现, 污水中丙酸/乙酸会对 EBPR 系统产生影响, 推测可能是由于对其中的 GAO 的代谢产生了影响^[6-8]. 基于此, 本实验研究了不同丙酸/乙酸对富集 GAO 的活性污泥系统的影响, 并着重考察不同丙

收稿日期: 2006-09-07; 修订日期: 2006-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50408039); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2004AA649330); 霍英东教育基金会资助项目 (101080)

作者简介: 姚樱 (1981~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与处理, E-mail: yaoying_dream@yahoo.com

* 通讯联系人, E-mail: yg2chen@yahoo.com

酸/乙酸对 GAO 的长期和短期代谢的影响,以期获得一种有效控制污水生物除磷系统中 GAO 生长和代谢的方法.

1 材料与方法

1.1 活性污泥和进水

接种污泥取自上海某脱氮除磷污水处理厂.进水为人工配水,每天由磷溶液、营养液、微量金属溶液、乙酸与丙酸混合液配制而成,配方基本参照 Smolders 的方案^[9].丙酸/乙酸在 SBR-A、SBR-C 和 SBR-E 中的碳摩尔比值分别为 1 10、1 1 和 10 1,总有机酸碳摩尔浓度为 6.0 mmol/L.

1.2 SBR 反应器的长期运行和 GAO 的富集培养

3 个 SBR 反应器(SBR-A、SBR-C 和 SBR-E)长期运行,用于培养和研究不同丙酸/乙酸长期驯化的 GAO.每个反应器的总容积是 4.5 L,工作容积是 3.5 L.反应器放置在 21 ± 1 恒温室,每天运行 3 个周期,每个周期 8 h(2 h 厌氧、3 h 好氧、3 h 沉淀与闲置).在好氧段最后 10 min 排泥,泥龄控制在 10 d 左右,污泥浓度基本在 3 g/L 左右.为提供一个有利于 GAO 富集的环境,3 个 SBR 反应器的进水 pH 值都维持在 6.8 ± 0.1 ^[12].通过控制进水中的磷浓度富集活性污泥中的 GAO. GAO 的富集过程经历了 3 个阶段:第 1 阶段,进水磷浓度为 20 mg/L, VFA 碳摩尔浓度为 7.2 mmol/L;第 2 阶段,磷浓度降至 10 mg/L, VFA 浓度保持不变;第 3 阶段,磷浓度进一步降至 1.3 mg/L, VFA 碳摩尔浓度为 6.0 mmol/L.废水在厌氧段的起始 pH 值始终控制在 6.8 ± 0.1 .在连续培养 95d 后,污泥中的磷含量(以悬浮固体 SS 计算)大约为 13 mg/g(驯化前为 52 mg/g),厌氧段溶解性正磷的释放量与 VFA 吸收量(碳摩尔量)的摩尔比值小于 0.16,3 个 SBR 中的糖原厌氧降解量与 VFA 吸收量的碳摩尔比值分别为 0.92、0.92 和 0.80.如表 1 所示,这些指标表明 GAO 已在系统中得到了富集^[10].

表 1 判别聚磷菌与聚糖菌富集优势的参数指标^{[10]/mmol mmol⁻¹}

Table 1 Parameter indexes for judging dominance of PAOs and GAOs/mmole mmole⁻¹

参数指标	特征值 范围	聚糖菌 富集	混合菌属	聚磷菌 富集
正磷的释放量 VFA 吸收量	0~0.8	<0.25	0.25~0.5	>0.5
糖原厌氧降解量 VFA 吸收量	0.3~1.2	>0.8	0.6~0.8	<0.6

1.3 批式实验

以 SBR-A 和 SBR-E 中富集的 GAO 进行批式实验,探讨丙酸/乙酸比有较大改变时对 GAO 代谢的影响.550 mL 丙酸/乙酸比分别为 1 10、1 1 和 10 1 的人工配水加到 3 个批式反应器中(简称为 1 号、2 号和 3 号),调节 pH = 6.8,加入从 SBR-A 或 SBR-E 中闲置期取出的沉淀污泥(pH 约 6.9) 150 mL,使每个批式反应器中的泥水混合物总体积为 700 mL.批式实验的厌氧和好氧时间分别为 2 h 和 3 h.

1.4 分析方法

乙酸、丙酸使用配备有 FID 检测器的 Hewlett Packard 5890- II GC 测试;PHA 的测试方法参见文献[11],将测定得到的聚 β 羟基丁酸(poly-β-hydroxybutyrate, PHB)和聚 β 羟基戊酸(poly-β-hydroxyvalerate, PHV)量之和作为总的 PHA 量^[7].采用蒽酮法测试整个反应周期中 GAO 胞内总糖的变化,近似将厌氧始与厌氧末、好氧始与好氧末总糖的差值作为糖原的厌氧消耗量与好氧合成量^[12].

本研究所有乙酸与丙酸吸收速率、PHA 变化量、糖原变化量都按单位 VSS 的生物量利用或消耗各物质的碳摩尔量计. SS(suspended solid)及 VSS(volatile suspended solid)采用重量法测试^[13];脱氢酶活性按文献方法在 492 nm 用分光光度计测定^[14].

2 结果与讨论

2.1 不同丙酸/乙酸对 GAO 代谢和生长的长期影响

实验发现,在 SBR-A、SBR-C 和 SBR-E 中乙酸和丙酸在厌氧 60 min 内都已经消耗完,因此没有外碳源进入到其后的好氧阶段,GAO 在好氧段将利用胞内碳源(如 PHA 和糖原)进行生长和代谢.在厌氧过程中,GAO 吸收 VFA 合成 PHA、降解糖原,而在好氧阶段降解 PHA、合成糖原,1 周期中各种物质的浓度变化如图 1 和图 2.

2.1.1 不同丙酸/乙酸情况下 GAO 对乙酸和丙酸的吸收速率

进一步研究发现,当进水中乙酸和丙酸的碳摩尔数相同时(SBR-C),单位 GAO(按 VSS 计)吸收乙酸和丙酸的起始速率分别为 0.095 6 和 0.086 7 mmol/(g min)(如表 2 所示),吸收乙酸的起始速率比吸收丙酸的起始速率快 10.3%.但当丙酸的碳摩尔数是乙酸的 10 倍时,由于浓度效应丙酸的吸收速率大于乙酸的吸收速率.一些研究者也发现丙酸与其它 VFA 被用来合成 PHA 时的表现不太一样,并提出有可能是 C₃ 链的长度影响了 PHA 的生物合成与

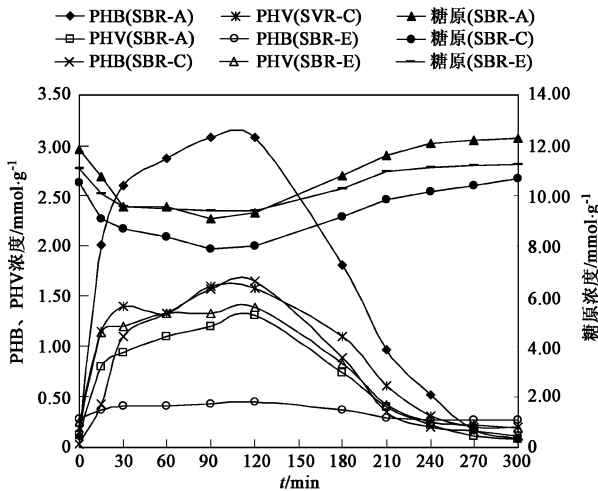


图1 SBR-A、C和E中PHB、PHV和糖原在1个周期中的浓度变化

Fig. 1 PHA, PHV and glycogen concentrations in SBR-A, SBR-C and SBR-E during one cycle

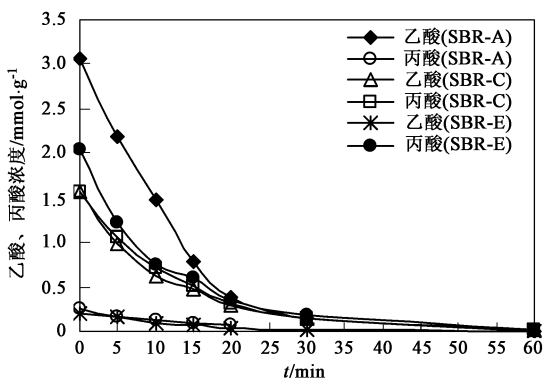


图2 SBR-A、C和E中乙酸、丙酸的浓度变化

Fig. 2 Acetic and propionic acid concentrations in SBR-A, SBR-C and SBR-E

表2 SBR-A、C和E中GAO吸收乙酸、丙酸的起始吸收速率¹⁾/mmol·(g·min)⁻¹

Table 2 Uptake rate of acetic and propionic acids in SBR-A, SBR-C and SBR-E/mmole·(g·min)⁻¹

种类	SBR-A	SBR-C	SBR-E
乙酸	0.152 9	0.095 6	0.011 4
丙酸	0.014 2	0.086 7	0.129 9

1) 吸收速率均为厌氧起始10 min的平均速率

降解^[15,16].

2.1.2 不同丙酸/乙酸对PHA代谢的长期影响

实验结果还表明,进水中乙酸含量较少时PHB的厌氧合成量也较少,在SBR-A和SBR-E反应器中,单位生物量中的PHB厌氧合成量分别为2.97和0.18 mmol/g(如表3所示),这一结果与Hood等的结

果一致^[17].但表3显示,当丙酸浓度较高时,PHV的合成量并没有大幅增加,SBR-A和SBR-E中的PHV合成量非常接近,反而是SBR-C中的较高,为1.39 mmol/g,可能的原因是其它PHA组分[聚β-羟基-2-甲基戊酸(poly-β-hydroxy-2-methylvalerate, PH2MV)或聚β-羟基-2-甲基丁酸(poly-β-hydroxy-2-methylbutyrate, PH2MB)]在这里起到了一定的作用.当进水中含有大量丙酸的情况下,PHA中的PH2MV或PH2MB的含量有较大增加,而合成的PHV含量相应增加不多.

表3 SBR-A、C和E中PHB、PHV的合成量/mmole·g⁻¹

Table 3 Synthesis of PHB and PHV in SBR-A, SBR-C and SBR-E/mmole·g⁻¹

种类	SBR-A	SBR-C	SBR-E
PHB	2.97	1.62	0.18
PHV	1.19	1.39	1.14

2.1.3 不同丙酸/乙酸对糖原代谢的长期影响

糖原不仅是氧化还原平衡中必要的还原力的来源,也是一种重要的能量来源.糖酵解可以同时提供还原力与能量.SBR-A、C和E中单位微生物的糖原厌氧分解量分别为2.54、2.53、1.66 mmol/g,相应的好氧合成量为2.96、2.68、1.84 mmol/g,即进水中乙酸含量较高时糖原的降解和合成量也较大.其原因可能是在GAO的代谢过程中,将每摩尔丙酸转化为丙酰CoA与将每摩尔乙酸转化为乙酰CoA所需要的ATP的量一样,但丙酸为3个碳,乙酸为2个碳,所以每摩尔碳的乙酸转变成乙酰CoA所需要的能量更多一些^[16,18].因此当3个SBR反应器的进水VFA的碳摩尔总数一样时,乙酸含量较高(SBR-A),作为能量来源的糖原的降解量较大;丙酸含量较高(SBR-E),糖原的降解量就较小.

2.1.4 不同丙酸/乙酸对GAO活性的长期影响

在1个周期内(8 h),单位污泥的VSS增量(ΔVSS/MLSS)分别为44.67、30.50和23.68 mg/g(如图3所示),长期以高丙酸/乙酸驯化的GAO的增殖能力较弱.此外,脱氢酶的测试结果也表明(如图4所示),高丙酸/乙酸比驯化的GAO的脱氢酶活性较弱,说明其生物活性和对基质的降解能力都较弱.因此,文献[7,19]报道的丙酸相对于乙酸而言可以改善EBPR运行并抑制GAO的增殖在本研究中被进一步证实.

2.2 不同丙酸/乙酸对GAO代谢的短期影响

2.2.1 丙酸/乙酸短期变化对乙酸、丙酸吸收速率的影响

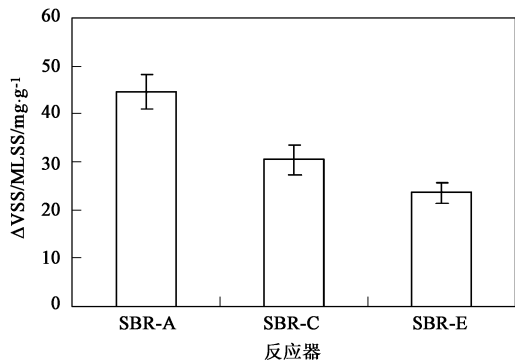


图3 1个周期内单位污泥的 VSS 增量
Fig.3 ΔVSS/MLSS in one cycle

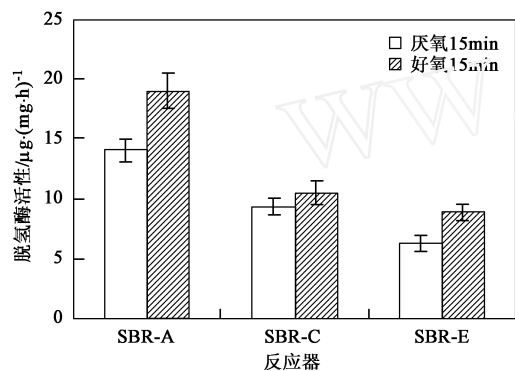


图4 厌氧 15 min 和好氧 15 min 时的脱氢酶活性
Fig.4 Dehydrogenase activity of biomass in the anaerobic and aerobic time

以 SBR-A 和 SBR-E 中的泥为代表,研究进水中丙酸/乙酸发生较大改变时对 GAO 代谢的短期影响. 批式实验结果如表 4~6 所示,2 种用不同丙酸/乙酸长期驯化的 GAO 对进水中的丙酸/乙酸短期变化的反应也不同. 用高丙酸/乙酸驯化的 GAO (即 SBR-E 泥)可以马上利用较大的乙酸进行代谢,对乙酸的吸收速率与长期用高乙酸/丙酸驯化的 GAO 并没有很大区别,这一结果表明,GAO 对于乙酸的吸收利用并不需要长期驯化. 类似的现象在文献[5]

中也有报道. 但对于用高乙酸/丙酸驯化的 GAO (即 SBR-A 泥)在面对高丙酸/乙酸的进水时,对丙酸的吸收速率明显低于 SBR-E 中的 GAO,即0.053 9与0.131 3 mmol/(g·min),仅为 SBR-E 中的 GAO 的 41.1 % (见表 4). 这表明污水中丙酸/乙酸的短期升高有可能成为一种有效控制 GAO 利用有机酸的方法.

2.2.2 丙酸/乙酸短期变化对糖原、PHA 代谢的影响

如表 5 所示,采用相同的进水时,SBR-E 中的 GAO 对糖原的厌氧降解量与好氧合成量明显多于 SBR-A 中的 GAO;但其 PHA 的厌氧合成量与好氧降解量却不一定比 SBR-A 泥中的多. 通过表 6 中糖原的厌氧降解量与 PHA 的厌氧合成量的比值、糖原的好氧合成量与 PHA 的好氧降解量的比值可以发现,SBR-E 泥中的 GAO 进入好氧阶段,外源碳乙酸、丙酸已经消耗完,PHA 成为细胞内主要的碳源,但每克 VSS 的生物量合成的糖原的碳摩尔数大于 PHA 降解的碳摩尔数,有未知碳源进入系统. 原因是进水中含有大量丙酸时,聚糖菌在厌氧段可能合成了一定量的 PH₂MV 或 PH₂MB,在随后的好氧段用降解 PH₂MV 或 PH₂MB 获得的碳源合成糖原. 因此,在以后的研究中需对 PH₂MV 及 PH₂MB 等 PHA 的其它组分进行研究.

表 4 短期进水丙酸/乙酸比变化时 GAO 对乙酸丙酸的吸收速率/(mmol·(g·min) ⁻¹)					
Table 4 Uptake rate of acetic and propionic acids by GAO when the ratio of propionic/acetic acid changed in short-term/(mmol·(g·min) ⁻¹)					
批式反应器	进水丙酸/乙酸	SBR-A 泥		SBR-E 泥	
		乙酸吸收速率	丙酸吸收速率	乙酸吸收速率	丙酸吸收速率
1 号	1 10	0.134 3	0.015 5	0.126 6	0.020 8
2 号	1 1	0.095 4	0.041 4	0.057 2	0.079 2
3 号	10 1	0.010 0	0.053 9	0.012 0	0.131 3

表 5 批式实验中糖原及 PHA 的厌氧和好氧代谢量/mm ^{ol} g ⁻¹								
Table 5 Anaerobic and aerobic synthesis metabolism of glycogen and PHA in batch tests/mm ^{ol} g ⁻¹								
批式 反应器	SBR-A 泥				SBR-E 泥			
	糖原厌氧	PHA 厌氧	糖原好氧	PHA 好氧	糖原厌氧	PHA 厌氧	糖原好氧	PHA 好氧
	降解量	合成量	合成量	降解量	降解量	合成量	合成量	降解量
1 号	2.755	3.972	3.024	4.393	2.867	3.209	3.623	3.119
2 号	1.879	2.897	2.127	3.375	2.124	3.095	3.200	3.033
3 号	1.116	1.862	1.289	2.379	1.754	2.007	2.480	1.943

表 6 批式实验中糖原降解量与 PHA 合成量、
糖原合成量与 PHA 降解量的比值

Table 6 Glycogen degradation/PHA synthesis and glycogen
synthesis/PHA degradation in batch tests

批式 反应器	糖原降解/PHA 合成		糖原合成/PHA 降解	
	SBR-A 泥	SBR-E 泥	SBR-A 泥	SBR-E 泥
	厌氧段	厌氧段	好氧段	好氧段
1 号	0.694	0.893	0.688	1.162
2 号	0.648	0.686	0.630	1.055
3 号	0.599	0.874	0.542	1.277

此外,随着进水中丙酸/乙酸的增大,SBR-A 和 SBR-E 中的 GAO 都表现为糖原降解与合成量、PHA 合成与降解量减小,与长期驯化的结果一致.这意味着当进水中的丙酸/乙酸短期升高时,胞内糖原、PHA 的代谢量降低,GAO 的活性减弱.批式实验的数据同样说明了短期提高进水中的丙酸/乙酸可有效抑制 GAO 的代谢.

3 结论

(1) 进水中的高丙酸含量导致 GAO 胞内 PHB 的合成量较少,但 PHV 的合成量并没有大幅增加.

(2) 对于长期驯化的 GAO,进水中丙酸、乙酸的碳摩尔浓度相同时(在 SBR-C 中),GAO 吸收乙酸的速率比吸收丙酸的速率快 10.3%.

(3) 长期以高丙酸/乙酸驯化的 GAO 厌氧消耗的糖原量和合成的 PHA 的量都较少,在好氧段积累的糖原量和降解的 PHA 的量也较低,GAO 的生物活性和对基质的降解能力都较弱.用高丙酸/乙酸驯化的 GAO 可以马上利用较大的乙酸的进行代谢,对乙酸的吸收速率与长期用高乙酸丙酸比驯化的 GAO 并没有很大区别,GAO 对于乙酸的吸收利用并不需要长期驯化.但用高乙酸/丙酸驯化的 GAO 在面对高丙酸/乙酸比的进水时,对丙酸的吸收速率仅为 SBR-E 中的 GAO 的 41.1%.

(4) 当进水中的丙酸/乙酸比突然升高时,GAO 胞内糖原、PHA 的代谢减慢,活性降低.提高进水中的丙酸含量对 GAO 有抑制作用.提高丙酸/乙酸是一种潜在的有效控制污水生物除磷系统中 GAO 生长和代谢的方法.

参考文献:

[1] Cech J S, Hartman P. Competition between polyphosphate and polysaccharide accumulating bacterial in biological phosphorus removal systems[J]. Water Res, 1993, 27: 1219 ~ 1225.
[2] Saunders A M, Oehmen A, Blackall L L, et al. The effect of GAOs (glycogen accumulating organisms) on anaerobic carbon requirements in full-scale Australian EBPR (enhanced biological phosphorus removal) plants[J]. Water Sci Tech, 2003, 47(11): 37 ~ 43.

[3] Cokgor E U, Yagci N O, Randall C W, et al. Effects of pH and substrate on the competition between glycogen and phosphorus accumulating organisms[J]. J Environ Sci Health, 2004, 39(7): 1695 ~ 1704.
[4] 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.
[5] Pijuan M, Saunders A M, Guisasola A, et al. Enhanced Biological Phosphorus Removal in a Sequencing Batch Reactor Using Propionate as the Sole Carbon Source[J]. Biotech Bioeng, 2004, 85(1): 56 ~ 67.
[6] Chen Y, Liu Y, Zhou Q, et al. Enhanced phosphorus biological removal from wastewater-effect of microorganism acclimatization with different ratios of short-chain fatty acids mixture[J]. Biochem Eng J, 2005, 27: 24 ~ 32.
[7] Chen Y, Randall A A, McCue T. The efficient of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid[J]. Water Res, 2004, 38(1): 27 ~ 36.
[8] 刘燕,行智强,陈银广,等.聚羟基烷酸转化对强化生物除磷影响研究[J].环境科学,2006,27(6): 1103 ~ 1106.
[9] Smolders G J F, Meij J V d, Lossdrecht M C M v, et al. Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process[J]. Biotech Bioeng, 1994, 44(7): 837 ~ 848.
[10] Andrew J S, David J. Enhanced biological phosphorus removal from wastewater by biomass with different phosphorus contents, Part : Experimental Results and comparison with metabolic models[J]. Wat Environ Res, 2003, 75(6): 485 ~ 498.
[11] Comeau Y, Hall K J, Oldham W K. Deter mination of poly-β-hydroxybutyrate and poly-β-hydroxyvalerate in activated sludge by gas-liquid chromatography[J]. Appl Environ Microbiol, 1988, 54: 2325 ~ 2327.
[12] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foa ming[M]. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1993.
[13] APHA. Standard Methods for the Exa mination of Water and Wastewater[M]. Washington, DC, USA: American Public Health Association, 1995.
[14] Blenkinsopp S A, Lock M A. The measurement of electron transport system activity in river biofilms[J]. Water Res, 1990, 24(4): 441 ~ 445.
[15] Comeau Y, Hall K J, Hancock R E W, et al. Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal[J]. Water Res, 1986, 20: 1511 ~ 1521.
[16] Satoh H, Mino T, Matsuo T. Uptake of organic substrates and accumulation of polyhydroxyalkanoates linked with glycolysis of intracellular carbohydrates under anaerobic conditions in the biological excess phosphate removal process[J]. Water Sci Tech, 1992, 26: 933 ~ 942.
[17] Hood C R, Randall A A. A biochemical hypothesis explaining the response of enhanced biological phosphorus removal biomass to organic substrates[J]. Water Res, 2001, 35: 2758 ~ 2766.
[18] Comeau Y, Oldham W K, Hall K J. Dynamics of carbon reserves in biological dephosphatation of wastewater [A]. In: R Ramadri (Ed.), Biological Phosphate Removal from Wastewaters, Advance in Water Pollution Control [C]. Oxford: Pergamon Press, 1987, 4: 39 ~ 55.
[19] Oehmen A, Yuan Z, Blackall L L, et al. Comparison of acetate and propionate uptake by polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms[J]. Biotech Bioeng, 2005, 91(2): 162 ~ 168.