

研究论文

不同碳源类型对活性污泥 PHA 贮存及转化的影响

黄惠珺¹, 王淑莹¹, 王中玮¹, 郭建华², 彭永臻¹

(¹ 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;

² 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 采用经乙酸钠驯化培养的具有吸放磷功能的活性污泥, 考察了不同碳源类型对厌氧底物贮存和转化的影响。碳源包括乙酸/丙酸= 1/2、乙酸/丙酸= 2/1、丙酸、甲醇、乙醇、葡萄糖、淀粉及生活污水。试验结果表明, 以乙酸和丙酸为碳源时, 系统的底物贮存量较大, 其中进水乙酸/丙酸= 1/2 条件下系统内 PHA 及 PHB 含量最多, 为 $6.0 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $4.25 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$, 而乙酸/丙酸= 2/1 条件下 PHV 含量最多, 为 $3.69 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ 。系统可以利用甲醇、乙醇、葡萄糖、淀粉及生活污水作为碳源物质进行底物贮存, 贮存物以 PHB 为主, 但贮存量较乙酸及丙酸低。以乙酸及丙酸为碳源时, 磷的释放量随着丙酸含量的增加而升高, 丙酸为单一碳源条件下, 磷的释放量达到最大值, 为 $16.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。以淀粉及生活污水为碳源时释磷量小, 为 $3.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $6.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而甲醇、乙醇及葡萄糖为碳源时考察的活性污泥没有表现明显的释磷特性。

关键词: 强化生物除磷; 碳源; 底物贮存; PHA; 聚磷菌

中图分类号: X 703.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157(2010)06-1510-06

Effect of various types of carbon source on biochemical storage and substrate transformation of activated sludge

HUANG Huijun¹, WANG Shuying¹, WANG Zhongwei¹, GUO Jianhua², PENG Yongzhen¹

(¹ Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; ² School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: It was investigated that the effect of type of carbon sources, including acetic acid/propionic acid= 1/2, acetic acid/propionic acid= 2/1, propionic acid, methanol, ethanol, glucose, starch and domestic wastewater, on anaerobic substrate storage and conversion of activated sludge domesticated cultured with sodium acetate with removing phosphorus. The results showed that with acetic and propionic acid as carbon source, the system's storage capacity for substrate was larger, in which the maximum values of PHA, PHB and PHV was of the $6.0 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$, $4.25 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ and $3.69 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ (at acetic acid/propionic acid = 2/1), respectively. When methanol, ethanol, glucose, starch and domestic sewage were used as carbon source for substrate storage, the stored substance was mainly PHB, but their capacity lower than that of acetic and propionic acid. The release of phosphorus increased

2009-11-16 收到初稿, 2010-02-23 收到修改稿。

联系人: 王淑莹。第一作者: 黄惠珺 (1987-), 女, 硕士研究生。

基金项目: 北京高校人才强教计划高层次人才项目 (PHR20090502); 国家“十一五”重大科技专项课题项目 (2008ZX07314-008-01); 北京工业大学研究生科技基金项目 (yjkj 2009-2777)。

Received date: 2009-11-16.

Corresponding author: Prof. WANG Shuying, wsy @ bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing Municipality (PHR20090502) and the National Key Science and Technology Special Projects (2008ZX07314-008-01).

with propionic acid content in combined acetic and propionic acid and reached the maximum $16.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ at propionic acid as sole carbon source. With starch and domestic sewage as a carbon source, the phosphorus release was small, $3.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $6.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, while methanol, ethanol and glucose as carbon source the activated sludge showed no significant phosphorus release features.

Key words: enhanced biological phosphorus removal; carbon source; substrate storage; poly- β -hydroxyalkanoates; phosphorus accumulating organisms

引 言

强化生物除磷 (EBPR) 系统是通过厌氧好氧交替运行的模式来达到磷去除的目的, 该系统中经常存在两种菌——聚磷菌 (PAO) 和聚糖菌 (GAO)^[1]。在厌氧条件下, PAO 和 GAO 利用聚磷和糖元分解所产生的能量, 消耗环境中的挥发性脂肪酸 (VFA) 合成聚- β -羟基烷烃 (PHA) 类物质, 系统中磷浓度上升; 在好氧条件下, PAO 分解所贮存的 PHA 产生能量, 从外界环境中将磷酸盐过量吸收于体内合成, 并通过排泥从而达到除磷的目的, 与此同时 GAO 只消耗 ATP 并不吸磷。可见, VFA 的利用及 PHA 物质的贮存在生物除磷过程中发挥着重要作用, 而 GAO 的大量存在是生物除磷过程中的一大阻碍^[2]。GAO 与 PAO 的数量分布在不同 EBPR 系统中差别很大, 而碳源 (VFA 物质) 类型的不同对 EBPR 系统中的菌种变化有选择作用^[3], 是造成 EBPR 系统种群结构差异的一个重要影响因素。因此, 对不同碳源类型对底物贮存及其转化影响的研究很有必要。

乙酸和丙酸为污水处理过程中最主要的 VFA 物质^[4]。近年来, EBPR 的研究主要集中于乙酸及丙酸对 PAO 与 GAO 的竞争的影响方面, 对其他碳源的研究较少。大多数研究认为与以乙酸为单一碳源相比, 污水中丙酸含量的升高虽然会导致 EBPR 系统释磷量以及 PHB 与 PHA 合成量的降低, 但吸磷速率、PHV 与 PH2MV 含量上升, 最终能够提高 EBPR 系统的除磷性能^[4-9]。而对于 PAO、GAO 代谢速率的问题上各研究结果不一, 有报道称 PAO 代谢乙酸的速率较快^[2], 也有研究表明 PAO 代谢丙酸速率更快^[8], 还有学者认为两者的速率相近^[10]; 而大多数研究认为未经驯化的 GAO 代谢乙酸的速率明显大于丙酸^[3], 但有研究证明仍有更易利用丙酸的 GAO 的存在^[11]。

可见, 碳源的浓度与类型对吸收速率、PAO

与 GAO 的竞争及 EBPR 除磷效果影响仍存在争议。本文主要研究不同乙酸/丙酸比例以及以甲醇、乙醇、葡萄糖、淀粉及生活污水作为碳源条件下, 在厌氧状态下未经驯化的活性污泥底物贮存和磷浓度的变化情况。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行方式

主反应器为 SBR 反应器, 有效容积 25 L, 每周进进水 12.5 L, 排水比为 1:2; 采用瞬时进水及先缺氧后好氧模式运行 SBR 反应器, 每周周期时间为 7 h, 包括缺氧搅拌时间 3 h, 好氧曝气时间 3 h, 沉淀 50 min 以及排水和闲置时间 10 min; 采用机械搅拌器使系统混合均匀; 采用鼓风曝气, 曝气量恒定为 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; 反应过程中不控制 pH 值的变化。

小试试验在 2 L 抽滤瓶中进行, 每个小反应器内加入主反应器污泥 600 ml 与 600 ml 含有不同碳源的污水混合后进行反应; 采用磁力搅拌器进行搅拌, 其转速为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$; 反应过程在密闭状态下进行, 总反应时间为 3 h; 在不同时间取样品进行 PHA、COD 及 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的测定。

主反应器及小试反应器内 MLSS 浓度均为 $2500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。

1.2 试验水质

主反应器采用人工配水, 以乙酸钠为单一碳源, 其成分包括: $\text{NaAc } 6.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($300 \text{ mg COD} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{NH}_4\text{Cl } 2.14 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($30 \text{ mg N} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{KH}_2\text{PO}_4 0.48 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($15 \text{ mg P} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{KCl } 0.48 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 0.10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O } 0.37 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以及微量元素 $1 \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$ 。微量元素中含有微生物生长所需的各种微量元素, 其成分为: $\text{EDTA } 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O } 0.12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 0.06 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O } 0.12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,

$\text{KI } 0.18 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O } 0.03 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,
 $\text{H}_3\text{BO}_3 0.15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O } 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

小试试验分别采用 7 种不同碳源配水及实际校园生活污水。7 种碳源为：乙酸/丙酸 = 1/2，乙酸/丙酸 = 2/1，丙酸，甲醇，乙醇，葡萄糖及淀粉；除了生活污水 COD 外，所有进水均含 COD $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， NH_4^+-N 为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，其他成分与主反应成分一致，COD：N：P = 100：5：1。实际污水取某高校家属区化粪池，小试试验时其 COD 为 $220 \sim 320 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， NH_4^+-N $45 \sim 55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 检测指标及分析方法

COD_{Cr} 采用重铬酸钾法测定； $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 采用分光光度法测定；MLSS 和 MLVSS 采用滤纸重量法测定。按照 Oehmen 的操作方法改良后进行 PHA 测定^[11]。采用 Agilent 6890N 型气相色谱以及 Agilent DB-1 型气相色谱柱测定。使用 3-羟基丁酸与 3-羟基戊酸混合物（95%：5%，Fluka, Buchs SG, Switzerland）为聚-β-羟基丁酸（PHB）和聚-β-羟基戊酸（PHV）的标准物质，2-羟基己酸（Sigma Aldrich）为聚-β-羟基-2-甲基戊酸（PH2MV）的标准物质。VFA 采用气相色谱法测定。每 0.9 ml 水样中加入 0.1 ml 10% 的磷酸后气相色谱测定，采用 Agilent 6890N 型气相色谱及 DB-WAXter 型色谱柱，检测器为 FID 检测器，检测温度为 220℃。

2 试验结果与讨论

2.1 主反应器底物贮存及除磷特性

主反应器采用乙酸为单一碳源进行培养，培养稳定后系统表现出了除磷特性，但与本实验室其他反应器的放磷量相比略显低^[12]。图 1 为主反应器典型周期内底物贮存及磷酸盐变化情况。

在厌氧阶段，VFA（乙酸）快速下降，在 30 min 内即被完全消耗，而与此同时， $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度以及 PHB 与 PHV 含量呈上升趋势，但 PHB 的增长速率及增长量明显高于 PHV；在好氧阶段，系统中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度、PHB 和 PHV 含量都所降低，但周期结束时，仍有 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 PHB 的剩余。系统中没有检测到 PH2MV 的存在，具体平均数值见表 1。

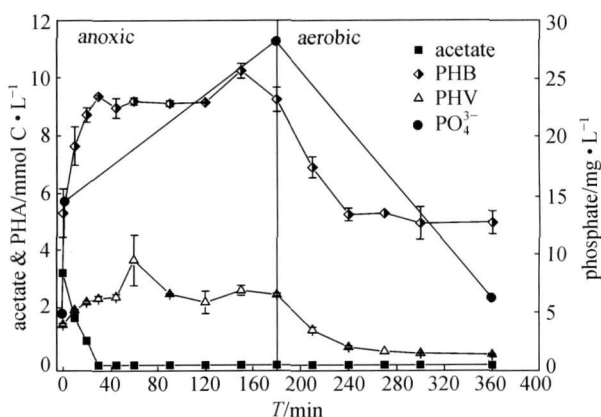


图 1 主反应器 PHA 贮存及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 变化情况

Fig 1 Accumulation of PHA and phosphate performance in SBR system

表 1 初始阶段各反应器乙酸利用以及底物贮存情况

Table 1 Substrate uptake and PHA storage in SBR system

PHB /mmolC · L ⁻¹	PHV /mmolC · L ⁻¹	PHA /mmolC · L ⁻¹	PHB/PHA
4.96	1.19	6.14	81%
PHV/PHA	HAc uptake /mmolC · L ⁻¹	PHB/HAc	P released /mg P · L ⁻¹
19%	4.52	1.10	13.7

Note: PHA = PHB + PHV + PH2MV.

表 1 数据表明，在缺氧段，系统中 PHA 的最大合成量为 $6.14 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ ，其中 PHB 含量为 $4.96 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ ，占 81%，剩余均为 PHV，没有检测到 PH2MV 的存在。乙酸作为 VFA 物质在缺氧段被完全消耗，PHB 合成量与乙酸的消耗量比值较高，为 1.10，但系统中的除磷特性并不很好，缺氧段释磷量及好氧段吸磷量分别为 $13.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $21.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，磷的去除率为 57%。Oehmen 等^[13]认为在以乙酸为单一碳源的条件下，PAO 只产生 PHB，而 GAO 合成约 73% 的 PHB 及 25% 的 PHV。在主反应器内合成的 PHA 中 PHV 仅占 19%，则系统中 GAO 所合成的 PHB 约为 75%，占总 PHB 含量的绝大部分，可见系统中 GAO 较 PAO 处于优势竞争状态。

2.2 不同碳源下底物贮存特性

采用乙酸/丙酸 = 1/2，乙酸/丙酸 = 2/1，丙酸、甲醇、乙醇、葡萄糖、淀粉及实际生活污水 8 种不同水质对主反应器内的活性污泥进行底物贮存小试，除生活污水外所有进水 COD：N：P = 100：5：1，总反应时间为 3 h。对其间不同时间

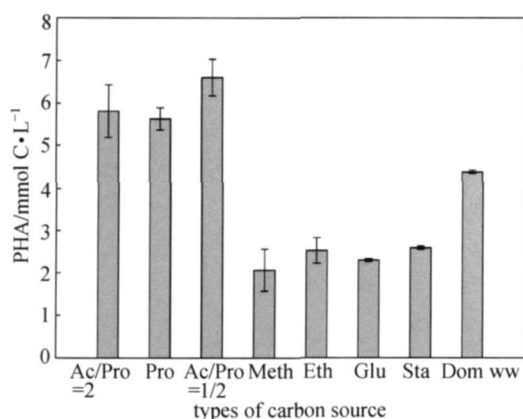


图 2 不同碳源类型条件下 PHA 贮存情况

Fig. 2 PHA storage with various types of carbon source

点底物贮存情况进行分析, 结果表明, 不同碳源条件下 PHA 含量均随着时间的延长而增长, 但增长量及增长速率因碳源的不同而变化。

不同碳源条件下 PHA 贮存量如图 2 所示。进水乙酸/丙酸=1/2、乙酸/丙酸=2/1 及丙酸为单一碳源条件下, 系统的 PHA 量较高, 为 $6.0 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5.81 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $5.63 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其他碳源条件下, PHA 合成量虽然较乙酸及丙酸低, 但仍有 PHA 增长趋势, 证明这些碳源能够被活性污泥系统作为 VFA 物质利用而贮存于体内。不同碳源条件下 PHB 及 PHV 变化如图 3、图 4 所示。

图 3 及图 4 显示在 COD 值相同的情况下, 进水为乙酸/丙酸=1/2, 乙酸/丙酸=2/1 及丙酸条件下 PHB 及 PHV 贮存量较大, 其中进水乙酸/丙酸=1/2 时 PHB 最多, 而乙酸/丙酸=2/1 条件下 PHV 最多, 其最值分别为 $4.25 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $3.29 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$ 。较多研究认为以乙酸为碳源时, 贮存物质主要为 PHB^[3,14], 而当同时使用乙酸与丙酸两者为碳源时, 随着进水中丙酸的含量增加, EBPR 系统中 PHB 的合成量下降, 而 PHV 及 PH2MV 的含量增加^[7,9]。在本试验中, 主体反应器采用乙酸为单一碳源, 贮存物质主要为 PHB, 为 $4.96 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$, 占 PHA 总量的 81%, 与大多数研究结果一致。小试试验中, 同时采用丙酸及乙酸为碳源时, PHB 的含量并没有随着丙酸成分的增加而降低, 其最低值在乙酸/丙酸=2/1 条件下获得, 为 $2.52 \text{ mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$; 而 PHV 的含量最值与丙酸的浓度也无正相关关系, 在丙酸为单一碳源时, PHV 并没有取得最值, 为 2.55

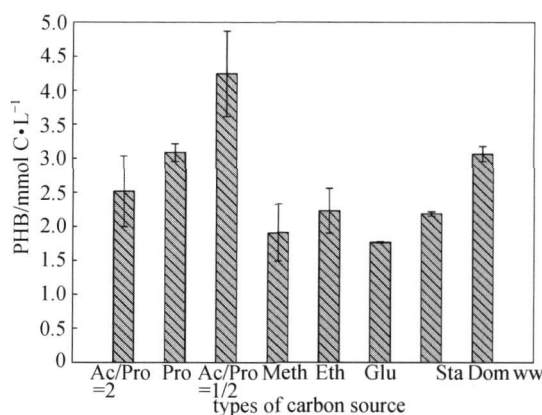


图 3 不同碳源类型条件下 PHB 贮存情况

Fig. 3 PHB storage with various types of carbon source

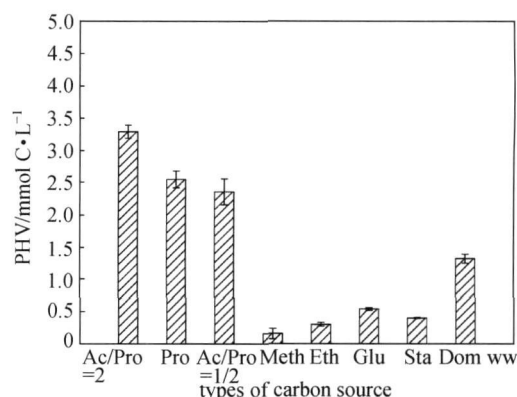


图 4 不同碳源类型条件下 PHV 贮存情况

Fig. 4 PHV storage with various types of carbon source

$\text{mmolC} \cdot \text{L}^{-1}$, 与其他相关研究结果存在较大差异。这可能与接种污泥和污泥驯化的过程不同有关, Pijuan 等的试验结果主要在碳源的长期培养下获得, 而本试验为碳源的短期影响。

各碳源条件下底物贮存及释磷情况见表 2。从表 2 中的数据可知, 乙酸/丙酸=2/1 以及丙酸为碳源时, 系统内 PHB 与 PHV 的贮存量较为相近; 而其他碳源条件下贮存物质主要为 PHB, 甲醇、乙醇及淀粉尤其明显, PHB 分别占 PHA 总量的 92%、88% 与 85%; 而以实际生活污水为进水条件下, PHB 及 PHV 分别占总量的 70% 和 30%。Beccari 等^[14]的研究表明乙醇作为碳源时能贮存 PHA, 但其贮存量较乙酸低; Pijuan 等^[7]认为葡萄糖为碳源时, 系统内只贮存 PHB 及 PHV。本试验及主反应器的结果与上述结论相符合。其他碳源较乙酸及丙酸为碳源条件下, 底物贮存量要低, 可能是由于底物贮存过程 VFA 物质都需先转化为一 CO—基团才能够被利用^[1], 乙酸与丙酸中直接含有该基团, 而其他碳源则需要转化后间接被利

表 2 不同碳源类型条件下底物贮存及释磷情况

Table 2 PHA storage under different carbon source conditions

Carbon source	PHB /mmolC · L ⁻¹	PHV /mmolC · L ⁻¹	PH A /mmolC · L ⁻¹	PHB /PH A	PH V /PH A	VFA uptake rate /mg COD · (mg MLSS · h) ⁻¹	P released /mg P · L ⁻¹
acetic acid/ propionic acid= 2/ 1	2 52	3 29	5 63	44%	56%	0 0594	11 03
acetic acid/ propionic acid= 1/ 2	4 25	2 36	6 0	71%	39%	0 0648	13 65
propionic acid	3 09	2 55	5 81	54%	46%	0 0231	16 53
methanol	1 91	0 16	2 07	92%	8%	0 0093	- 1 99
ethanol	2 23	0 30	2 53	88%	12%	0 0035	- 1 86
glu cose	1 77	0 54	2 3	77%	23%	0 0211	- 4 13
starch	2 19	0 40	2 59	85%	15%	0 0154	3 56
dom estic wastew ater	3 07	1 32	4 38	70%	30%	0 0190	6 75

用，因此消耗能量多，贮存量较少^[15]。

2 3 不同碳源下释磷特性

小试试验结果显示，丙酸为碳源条件下释磷量最大，为 16. 53 mg · L⁻¹；以乙酸、丙酸混合碳源时，系统中释磷量随丙酸比例的增加而增长，乙酸/ 丙酸= 2/ 1 及乙酸/ 丙酸= 1/ 2 情况下，释磷量分别为 11. 03 mg · L⁻¹与 13. 65 mg · L⁻¹。多数研究认为，乙酸、丙酸同时为碳源的条件下，进水中丙酸的比例增加会导致 EBPR 系统中释磷量的降低^[6, 8, 10]，而 Oehmen 等^[3]的研究表明，以丙酸为单一碳源时能够获得较大的释磷量，与试验结果相似。除乙酸及丙酸外，进水采用其他碳源时系统的释磷量都较低，甲醇、乙醇及葡萄糖甚至出现了磷浓度微量降低的情况。磷浓度的微量降低可能与微生物在吸收底物时的同化作用有关，也不排除微生物胞外物质对磷的吸附作用。侯红勋等^[16]的研究表明，以乙酸钠或丙酸钠为碳源时释放磷速率相差不大，而以葡萄糖、乙醇和甲醇为碳源时 PAOs 并不释放磷。

3 结 论

- (1) 考察了活性污泥对 8 种不同组成的碳源的底物贮存能力，结果表明，进水乙酸/ 丙酸= 1/ 2 时 PHA 及 PHB 含量最多，而乙酸/ 丙酸= 2/ 1 条件下 PHV 含量最多。
- (2) 系统可以将甲醇、乙醇、葡萄糖、淀粉作为底物物质用于内含物的贮存，但贮存量较乙酸及丙酸低，且以 PHB 为主。
- (3) 以乙酸及丙酸为碳源时，磷的释放量随着丙酸含量的增加而升高，丙酸为单一碳源条件下，磷的释放量最多。以淀粉及生活污水为碳源情况下

微量释磷，甲醇、乙醇及葡萄糖为碳源时系统并不释磷。

References

[1] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, Yuan Z G, Keller J, Blackall L L, Reis M A M. Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale. *Water Research*, 2007, 41 (11): 2271-2300

[2] Oehmen A, Yuan Z G, Blackall L L, Keller J. Comparison of acetate and propionate uptake by polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, 91 (2): 162-168

[3] Oehmen A, Yuan Z, Blackall L L, Keller J. Short term effects of carbon source on the competition of polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms// 3rd IWA Conference on Sequencing Batch Reactor Technology. Noosa, Australia, 2004

[4] Chen Y G, Randall A A, McCue T. The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid. *Water Research*, 2004, 38 (1): 27-36

[5] Li Hongjing (李洪静), Chen Yinguang (陈银广), Gu Guowei (顾国维). Effect of propionic to acetic acid ratio on biological nitrogen and phosphorus removal with low energy consumption. *China Environmental Science (中国环境科学)*, 2008, 28 (8): 673-678

[6] Li H J, Chen Y G, Gu G W. The effect of propionic to acetic acid ratio on anaerobic/aerobic (low dissolved oxygen) biological phosphorus and nitrogen removal. *Bioresource Technology*, 2008, 99 (10): 4400-4407

[7] Pijuan M, Casas C, Baeza J A. Polyhydroxyalkanoate synthesis using different carbon sources by two enhanced biological phosphorus removal microbial communities. *Process Biochemistry*, 2009, 44 (1): 97-105

[8] Liu Yan (刘燕), Chen Yinguang (陈银广), Zheng Hong (郑弘), Zhou Qi (周琪). Effect of different ratios of

- propionic to acetic acid on phosphorus removal by an enriched culture of phosphorus accumulating organisms *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2006, 26 (8): 1278-1283
- [9] Yagci N, Cokgor E U, Artan N, Randall C, Orhon D. The effect of substrate on the composition of polyhydroxyalkanoates in enhanced biological phosphorus removal *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2007, 82 (3): 295-303
- [10] Pijuan M, Saunders A M, Guisasola A, Baeza J A, Casas C, Blackall L L. Enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor using propionate as the sole carbon source *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, 85 (1): 56-67
- [11] Oehmen A, Keller-Lehmann B, Zeng R J, Yuan Z G, Keller E. Optimisation of poly-beta-hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems *Journal of Chromatography A*, 2005, 1070 (1/2): 131-136
- [12] Tang Xuguang (唐旭光), Wang Shuying (王淑莹), Yuan Zhiguo (袁志国), Zhao Chenhong (赵晨红). Study of unified SBR process for biological phosphorus removal in domestic wastewater *Journal of Beijing University of Technology* (北京工业大学学报), 2009, 35 (1): 119-124
- [13] Oehmen A, Saunders A M, Vives M T, Yuan Z G, Keller H. Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources *Journal of Biotechnology*, 2006, 123 (1): 22-32
- [14] Beccari M, Dionisi D, Giuliani A, Majone M, Ramadori R. Effect of different carbon sources on aerobic storage by activated sludge//5th Seminar on Activated Sludge Modelling Kollekolle, Denmark, 2001
- [15] Third K A, Newland M, Cord-Ruwisch R. The effect of dissolved oxygen on PHB accumulation in activated sludge cultures *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, 82 (2): 238-250
- [16] Hou Hongxun (侯红勋), Wang Shuying (王淑莹), Yan Jun (闫骏), Peng Yongzhen (彭永臻). Effect of different types carbon sources on phosphorus release in enhanced biological phosphorus removal process *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, 58 (8): 2081-2086