

研究论文

不同碳源类型对生物除磷过程释放磷的影响

侯红勋, 王淑莹, 闫 骏, 彭永臻

(北京工业大学环能学院北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022)

摘要: 厌氧释放磷是生物除磷的重要部分, 释放磷不充分是生物除磷不稳定的主要原因。为了研究碳源种类对厌氧生物除磷的影响, 以 A²/O 氧化沟工艺好氧末端活性污泥为研究对象, 投加乙酸钠、丙酸钠、葡萄糖、甲醇和乙醇等碳源, 在厌氧和缺氧状态下进行释放磷试验研究。结果表明: (1) 在厌氧条件下, 聚磷菌 (PAOs) 以乙酸钠或丙酸钠为碳源释放磷速率很快, 120 min 平均比释放磷速率分别为 290.5 和 236.7 mg P · (g VSS)⁻¹ · d⁻¹; PAOs 利用葡萄糖、乙醇和甲醇释放磷速率较低, 比释放磷速率分别为 49.4、38.8 和 8.91 mg P · (g VSS)⁻¹ · d⁻¹; (2) 在缺氧条件下, PAOs 以乙酸钠或丙酸钠为碳源释放磷速率与厌氧状态下释放磷速率相差不大, 而其他 3 种碳源作用下, PAOs 并不释放磷; (3) 初始 NO₃⁻ 过高时, 乙酸钠作为碳源, PAOs 在释放磷结束后利用 NO₃⁻ 作为电子受体进行反硝化吸收磷。

关键词: 生物除磷; 厌氧释放磷; 碳源; PAOs; NO₃⁻

中图分类号: X 701.3

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 08-2081-06

Effect of different types carbon sources on phosphorus release in enhanced biological phosphorus removal process

HOU Hongxun, WANG Shuying, YAN Jun, PENG Yongzhen

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Phosphorus release (P-release) is one of the important factors in enhanced biological phosphorus removal (EBPR) process, and insufficient P-release usually is the main reason for the instability of EBPR. In order to study the effect of different types of carbon sources on P-release, the effluent activated sludge of the aerobic zone of the anaerobic-anoxic-aerobic oxidation ditch process was used. Different types of carbon sources, such as acetate, propionate, glucose, ethanol and methanol were used. The main test was made through captive test with a 10 L reactor. The results indicated that: (1) In anaerobic conditions, poly P-accumulating organisms (PAOs) released P rapidly with acetate or propionate acting as carbon sources, and the specific P release rate was 290.5 and 236.7 mg P · (g VSS)⁻¹ · d⁻¹, respectively. However with glucose, ethanol or methanol acting as carbon source, P released slowly, the specific P release rate was 49.4, 38.8 and 8.91 mg P · (g VSS)⁻¹ · d⁻¹ respectively. (2) Whereas in anoxic conditions, P release rate was just the same as the anaerobic conditions if acetate or propionate acted as carbon sources. But P was seldom released with glucose, ethanol or methanol acting as

2006-08-09 收到初稿, 2006-10-19 收到修改稿。

联系人: 王淑莹。第一作者: 侯红勋 (1977—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50628808); “十一五” 国家科技支撑重点项目 (2006BAC19B03); 北京市科委国际合作项目; 第四届北京工业大学研究生科技基金项目。

Received date: 2006-08-09.

Corresponding author: WANG Shuying. **E-mail:** wsy@bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50628808).

carbon source in anoxic conditions. (3) PAOs utilized NO_3^- to uptake P after P-release, if original NO_3^- was high enough, and acetate acted as carbon source.

Key words: enhanced biological phosphorus removal (EBPR); anaerobic phosphate release; carbon source; PAOs; nitrate

引 言

大量富含氮 (N) 和磷 (P) 营养元素的污水排入缓流水体, 导致受纳水体的富营养化问题。因 N 可以通过一系列生化反应被固定为稳定的 N_2 , 相比之下 P 的输入对于富营养化问题更为严重。由于近年来富营养化问题的日益加剧, 许多国家都采取了严格的污水排放标准, 限制对 N、P 营养元素的排放。我国制定的城市污水处理厂污染综合排放标准 GB 18918—2002 也对 N 和 P 提出了更为严格的要求。

生物除磷是利用聚磷微生物具有厌氧释放磷及好氧 (或缺氧) 超量吸收磷的特性, 使磷在好氧或缺氧段的含量降低, 最终通过排放富磷污泥而使磷从废水中削减。近年来强化生物除磷技术 (enhanced biological phosphorus removal, EBPR) 得到了长足发展, 一些新的 EBPR 的污水处理工艺被开发出来, 诸如 A/O (anaerobic aerobic) 工艺、 A^2/O 工艺、5 段 Bardenpho 工艺、Phoredox 工艺和 UCT 工艺等^[1-3]。通过这些工艺研究发现, 成功的 EBPR 需要如下条件^[2]: (1) 一个能够将具有易降解碳源的进水和活性污泥进行混合的厌氧区; (2) 不能有太高的 NO_3^- 进入厌氧区, 因为比聚磷菌 (PAOs) 更具 COD 亲和力的反硝化菌会优先进行厌氧呼吸消耗易降解碳源, 使 PAOs 无法得到足够的碳源; (3) 在厌氧区维持严格的厌氧状态; (4) 使活性污泥经历交替厌氧—好氧循环过程。由上面的 4 个条件可见厌氧区对于 EBPR 是至关重要的。

最近研究发现, 聚磷菌在新陈代谢过程中有 3 种贮存的能源物质, 聚磷酸盐 (Poly-P)、糖原质 (Glycogen) 和聚- β -羟基丁酸 (PHB), 它们对于生物除磷起着非常重要的作用。聚磷菌的最大释放磷量不但取决于可利用的乙酸盐量, 还与细胞内的糖原质和聚磷酸盐量有关^[1]。

近来研究结果表明在生物除磷系统中有两种菌, 分别为在厌氧区摄取易降解有机物释放磷酸盐

的聚磷菌 (polyphosphate accumulating organisms, PAOs) 和在厌氧区摄取易降解有机物而不释放磷酸盐的聚糖菌 (glycogen accumulating organisms, GAOs)^[3-6]。Adrian^[4]用乙酸钠和丙酸钠作为单一碳源通过 SBR 工艺研究 PAOs 和 GAOs 之间的竞争, 结果发现丙酸钠作为碳源更有利于 PAOs 的竞争, 因而取得了稳定的生物除磷效果。对于不适合 PAOs 利用的底物葡萄糖、蛋白胨等单一碳源培养下, 经长期驯化, 这些碳源也能够作为电子受体被 PAOs 利用, 进行厌氧释放磷。

本文主要研究不同单一碳源在缺氧和厌氧状态下, 对城市生活污水长期驯化的具有稳定生物除磷的活性污泥释放磷影响。缺氧环境为没有分子氧但有 NO_3^- 存在的状态, 厌氧环境为既没有分子氧也没有 NO_3^- [7] 存在的状态。采用 A^2/O 氧化沟工艺处理城市生活污水实现稳定的 EBPR, 然后取其好氧末端出水, 静置 2 h, 通过内源反硝化除去剩余的 NO_3^- , 然后加入过量单一碳源, 考察不同单一碳源对厌氧释放磷的影响, 以及加入定量的 NO_3^- , 考察碳源对缺氧释放磷的影响, 及 NO_3^- 对释放磷的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

A^2/O 氧化沟工艺动态试验装置由 3 部分组成: 进水水箱, 带前置厌氧、缺氧选择区的氧化沟反应器和二沉池, 3 部分有效容积分别为 200、280 和 95 L, 试验装置示意图如图 1 所示。

前置厌氧区、缺氧区和氧化沟的水力停留时间 (HRT) 分别为 0.5、1.5 和 18 h, 总污泥回流比为 100%, 其中 30% 回流至厌氧区, 70% 回流至缺氧区。进出水取样位置分别为进水水箱和二沉池出水。进水由储水箱经蠕动泵与回流污泥混合进入前置缺氧区, 混合液经厌氧区后流入氧化沟, 缺氧区和厌氧区分别设搅拌器进行搅拌, 氧化沟内设曝气装置和搅拌推流装置使活性污泥在氧化沟内循环流动, 泥水经二沉池分离后上清液排出系统, 大部分

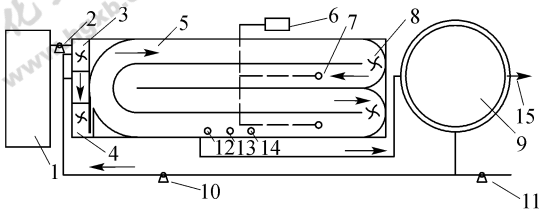


图 1 氧化沟试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oxidation ditch system

- 1—water tank; 2—influent pump; 3—anaerobic zone;
- 4—anoxic tank; 5—oxidation ditch; 6—air pump;
- 7—air diffuser; 8—mixer; 9—secondary clarifier;
- 10—RAS pump; 11—WAS pump; 12—DO probe;
- 13—ORP probe; 14—pH probe; 15—effluent

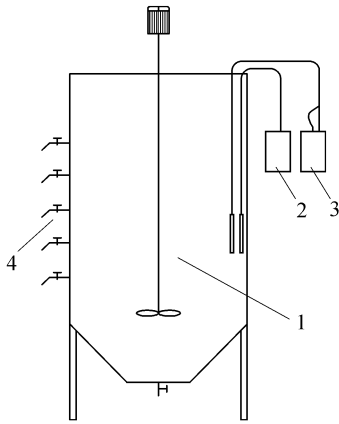


图 2 静态试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

- 1—stirrer; 2—ORP instrument; 3—pH instrument;
- 4—sampling orifice

污泥回流入前置缺氧区，剩余污泥定期排放。静态试验装置为 SBR 反应器，有效容积为 10 L，静态试验装置如图 2 所示。

1.2 活性污泥和试验用水

本研究在北京市某大型氧化沟工艺污水处理厂进行，接种污泥来自该水厂的回流污泥，试验用水取自该水厂的曝气沉砂池。中试用水为城市市政污水。先通过 A²/O 氧化沟中试处理城市市政污水，使活性污泥具有稳定的生物除磷效果。静态除磷试验在氧化沟实现稳定生物除磷的 45~80 d 情况下进行，该阶段中试进水中 COD、NH₄⁺ 和 PO₄³⁻ 的浓度分别为 332~425、45~64 和 5.1~8.4 mg · L⁻¹。静态除磷试验取好氧末端进入二沉池前的活性污泥，该污泥中液相 COD、NO₃⁻ 和 PO₄³⁻ 的浓度分别为 40~50、1.0~3.0 和 0.3~1.0 mg ·

L⁻¹，pH 为 7.4~7.5，MLSS 为 5.5~6.0 g · L⁻¹，VSS 为 3.5 g · L⁻¹，温度 19~22℃。

1.3 检测指标及分析方法

试验中所采用的分析方法均按照国家环境保护总局发布的标准方法^[8]，并且文中给出的试验结果都是经过多次试验得出重现性很好的试验数据。

2 结果与讨论

2.1 5 种碳源对释放磷的影响

为研究 NO₃⁻ 对厌氧区释放磷影响，取氧化沟出口活性污泥静置 2 h，利用内源反硝化除去剩余的 NO₃⁻，然后加入不同碳源进行厌氧释放磷。缺氧释放磷过程则在投加碳源前先投加 KNO₃ 使反应器内 NO₃⁻ 浓度为 15 mg · L⁻¹，缓慢搅拌 120 min，厌氧状态和缺氧状态下 5 种碳源作用下释放磷曲线如图 3 所示。

由图 3 (a) 可见，在厌氧条件下，PAOs 以乙酸钠或丙酸钠为碳源时释放磷速率很快，120 min 平均比释放磷速率分别为 290.5 和 236.7 mg P · (g VSS)⁻¹ · d⁻¹，磷的释放主要集中在前 60 min；PAOs 利用葡萄糖、乙醇和甲醇释放磷速率较低，比释放磷速率分别为 49.4、38.8 和 8.91 mg P · (g VSS)⁻¹ · d⁻¹。

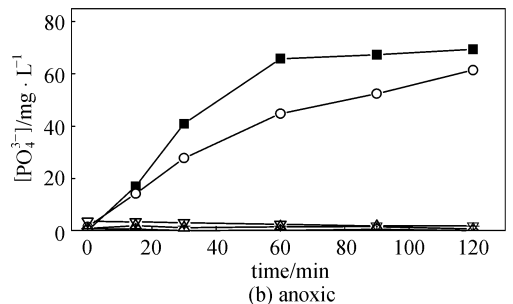
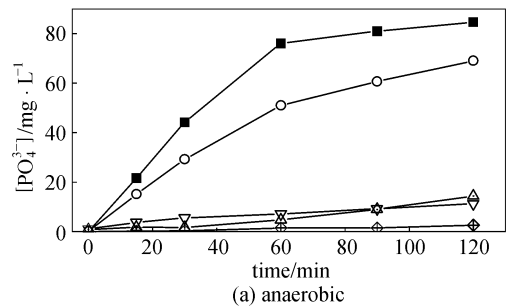


图 3 不同碳源厌氧和缺氧状态液相 PO₄³⁻ 变化曲线

Fig. 3 Profile of P-release during anaerobic and anoxic stage with different carbon resource feed

■ acetate; ○ propionate; △ glucose; ▽ ethanol; ◆ methanol

由图 3 (b) 可见, 在缺氧条件下, PAOs 以乙酸钠或丙酸钠为碳源释放磷速率仍然较快, 比释放磷速率分别为 238.0 和 $210.4 \text{ mg P} \cdot (\text{g VSS})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 与厌氧状态下释放磷速率相差不大。说明用乙酸钠或丙酸钠作碳源时, NO_3^- 对厌氧释放磷影响不大。在缺氧条件下, 葡萄糖、乙醇和甲醇 3 种碳源单独作用下, PAOs 并不释放磷。说明葡萄糖、乙醇和甲醇作碳源时, NO_3^- 会对 PAOs 释放磷产生抑制。

厌氧释放磷的限制因素往往有 3 种: 原水中 VFA、细胞内的糖原质和聚磷酸盐^[1]。乙酸钠和丙酸钠作为碳源时, 前 60 min 释放磷速率较高, 60 min 释放磷已经趋于饱和, COD 仍比较充足 (COD 主要成分为 VFA), 说明 VFA 不是厌氧释放磷的限制因素; 另外本试验采用的活性污泥平均干污泥含磷量在 $4\% \sim 5\%$, 而 60 min 厌氧释放磷量约占污泥干重的 1.3% , 表明胞内聚磷酸盐也不是释放磷的限制因素。所以在足量乙酸钠作为碳源的情况下, 厌氧释放磷的限制因素只能是糖原质。葡萄糖和乙醇作碳源时, 120 min 内释放磷速率较慢但保持恒定, 说明 120 min 释放磷仍未达到终点, 与采用乙酸钠和丙酸钠作碳源时释放磷的情况相比可知, 采用葡萄糖、乙醇和甲醇作碳源释放磷速率较低, 证明释放磷的限制因素为 VFA。

若原水中 VFA 含量较高, 可以采用较短的厌氧停留时间, 若糖类和醇类较高, 可采用较长的厌氧停留时间, 以增加酸化时间, 提高厌氧释放磷总量。原水中 VFA 含量较高时, 厌氧释放磷短期受回流污泥的 NO_3^- 影响较小, 若原水中易降解 COD 中主要成分为糖和醇, 一个严格的厌氧段对于生物除磷是至关重要的。

120 min 内 PAOs 在 5 种碳源厌氧条件下释放磷量, COD 消耗量以及 COD 与释放磷量的比 (COD/P) 如图 4 所示。

由图 4 可见, 5 种碳源在 2 h 厌氧条件下释放磷量和 COD/P 有着较大的差异, 而 COD 的消耗量差别不明显。葡萄糖、乙醇和甲醇作碳源时, 每释放 1 单位的 P 吸收的 COD 远远高于乙酸钠和丙酸钠作碳源时的量。

研究发现, 乙酸钠和丙酸钠作为 VFA 比较适合 PAOs 利用, 而葡萄糖、乙醇和甲醇更适合 GAOs 利用^[5-6]。在厌氧条件下 PAOs 利用易降解有机物释放磷酸盐, GAOs 利用易降解有机物贮存

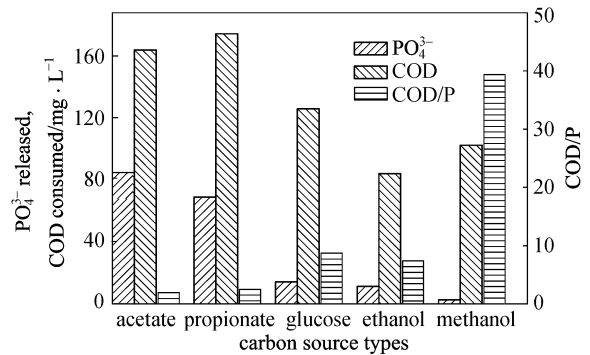


图 4 120 min 内厌氧释磷过程中不同碳源下 PO_4^{3-} , COD 和 COD/P 对比图

Fig. 4 Profile of PO_4^{3-} , COD and COD/P in 120 min in anaerobic conditions

糖原质而不释放磷。根据 PAOs 和 GAOs 的这一差异和图 4 中以葡萄糖、乙醇和甲醇作碳源时, 释放磷不多但 COD 消耗较多的这一现象验证了该活性污泥中既存在着一定量的 PAOs 又存在着一定量的 GAOs。PAOs 利用乙酸钠和丙酸钠能够释放大量的磷酸盐, PAOs 利用葡萄糖、乙醇时也能够释放磷, 但是释放磷速率较低。同时验证了 GAOs 利用葡萄糖、乙醇和甲醇作碳源时, 并不释放磷。

2.2 乙酸钠作为碳源时 NO_3^- 对释放磷的影响

取氧化沟曝气池泥水混合液, 进行厌氧静态试验研究。将混合液静置 2 h, 使其内少量的 NO_3^- 内源反硝化除去。然后分为 3 个试验, 均投加乙酸钠, 折合 COD 为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 试验 I、II 和 III 分别投加 NO_3^- 为 0、15 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。3 个试验分别在 SBR 反应器内缓慢搅拌 2 h, 反应水温为 22°C 。过程中 PO_4^{3-} 、COD 和 NO_3^- 的变化情况如图 5 所示。

由图 5 可见, 足量的 VFA 状态下, 前 60 min NO_3^- 对厌氧释放磷影响不显著, 与图 3 的结果一致。在有 NO_3^- 存在的情况下, PAOs 也能够很好利用乙酸钠释放磷, 60 min 释放磷趋于结束。

在 60 min 后, 试验 I 和 II 释放磷速率均大大降低, 比释放磷速率由 1 h 内的 456 和 $395 \text{ mg P} \cdot (\text{kg VSS})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 降低至 1~2 h 内的 9 和 $4 \text{ mg P} \cdot (\text{kg VSS})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。60 min 时液相中易降解 COD 分别为 165 和 $96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 足量的乙酸钠存在, VFA 不是厌氧释放磷的限制因素, 但是释放磷速率急剧降低, PAOs 体内的 Glycogen 成为释放磷的限制因素^[1]。通常具有生物除磷能力的城市污水

处理厂利用原水作为碳源时，厌氧池中磷酸盐浓度通常为 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，远小于用乙酸钠作为碳源时的释放磷量 $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，实际污水处理过程中原水中的 VFA 往往是释放磷的限制因素。

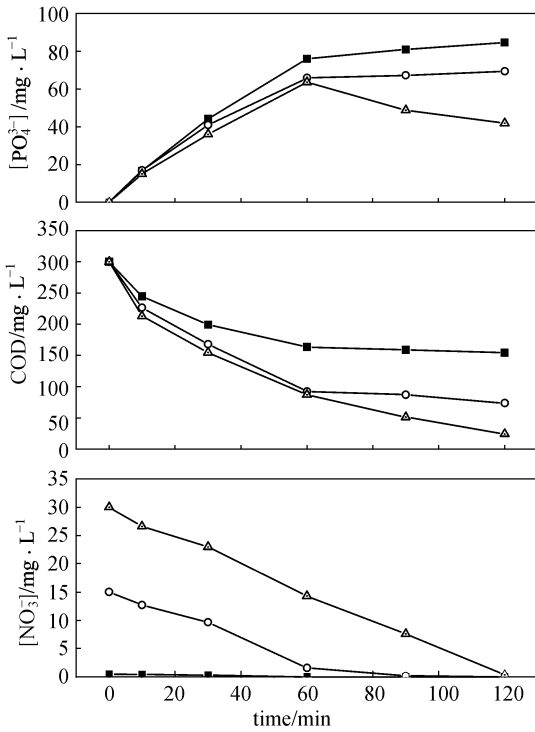


图 5 无氧状态，起始乙酸钠 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， NO_3^- 为 0、15 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 状态下，2 h 内 PO_4^{3-} 、COD 和 NO_3^- 的变化曲线

Fig. 5 Profile of PO_4^{3-} ，COD and NO_3^- in 2h with original NO_3^- feed 0, 15 and $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively and acetate $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in non-aerated conditions
 ■ test I; ○ test II; ▲ test III

在试验 III 中，60 min 后液相中的 PO_4^{3-} 不但不升高，而且开始降低，60 min 时试验 III 中 NO_3^- 为 $14.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，聚磷菌在释放磷结束后利用 NO_3^- 作为电子受体进行反硝化吸收磷反应，故出现了液相中 PO_4^{3-} 不升高反而下降的现象。

Barth 等估计每还原 1 g NO_3^- 需要 4 g BOD^[9]，George 根据物质代谢和细胞分解计算出 rbCOD (readily biodegradable COD) 和还原的 NO_3^- 之间比值为 6.6^[9]。试验 I 和试验 II 中 COD 削减的差值可认为是因反硝化而消耗的碳源。试验 II 中反硝化消耗的 NO_3^- 与其中因反硝化而消耗的碳源之间的拟合曲线如图 6 所示。

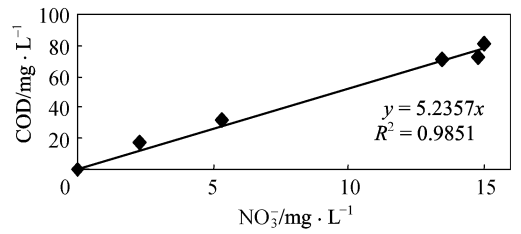


图 6 消耗的 NO_3^- 与反硝化消耗的 COD 关系曲线
 Fig. 6 Profile of NO_3^- to COD depleted via denitrification in test II

由图 6 可见，在试验 II 中，反硝化的 NO_3^- 与因反硝化消耗的 COD 呈较好的相关关系，方程为

$$\text{COD} = 5.2 \text{ NO}_3^- \quad (1)$$

试验 I 和 III 中前 60 min 消耗的 COD 之差与试验 III 中反硝化的 NO_3^- 有着同样的关系，即消耗的 COD 与反硝化的 NO_3^- 之比为 5.2，即为本研究的 COD/ NO_3^- 。而试验 I 和 III 中 60 min 以后消耗的 COD 之差与试验 III 中削减 NO_3^- 的比值为 3.9。试验 III 中 60 min 后还原单位 NO_3^- 而消耗 COD 的量小于 60 min 前还原单位 NO_3^- 而消耗 COD 的量。可以推断聚磷菌体内贮存的糖原质充当了反硝化的碳源，进行了反硝化吸收磷。反硝化除磷是在除磷的过程中不以分子氧为电子受体，而以化合态氧为电子受体释放磷的现象。反硝化除磷能够使碳源首先为释放磷利用，然后为反硝化利用，使碳源二次利用，从而节省碳源。Saito 等^[10]通过好氧和缺氧吸收磷研究表明，好氧吸收磷的能力强于缺氧吸收磷的能力，缺氧吸收磷不会影响随后的好氧吸收磷。

3 结 论

(1) 在厌氧条件下，PAOs 以乙酸钠或丙酸钠为碳源释放磷速率很快，120 min 平均比释放磷速率分别为 290.5 和 $236.7 \text{ mg P} \cdot (\text{g VSS})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ；PAOs 利用葡萄糖、乙醇和甲醇释放磷速率较低，比释放磷速率分别为 49.4 、 38.8 和 $8.91 \text{ mg P} \cdot (\text{g VSS})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(2) 在缺氧条件下，PAOs 以乙酸钠或丙酸钠为碳源释放磷速率与厌氧状态下释放磷速率相差不大；而葡萄糖、乙醇和甲醇作为碳源作用下，PAOs 并不释放磷。

(3) NO_3^- 过高时，PAOs 在释放磷结束后能够利用 NO_3^- 作为电子受体进行反硝化吸收磷。正

常反硝化 1 g NO_3^- 需要 5.2 g COD, 而反硝化吸收磷过程 1 g NO_3^- 反硝化仅消耗 3.9 g COD, 反硝化吸收磷能够使碳源重复利用, 节省碳源。

4 建 议

原水中 VFA 含量较高时, 厌氧释放磷受回流污泥的 NO_3^- 影响较小, 可采用厌氧—缺氧—好氧工艺, 能够实现反硝化除磷, 使碳源二次利用; 若原水中易降解 COD 中主要成分为糖类和醇类, 宜采用缺氧—厌氧—好氧工艺, 为释放磷提供一个严格的厌氧环境。

References

- [1] Janssen P M J, Meinema K, van der Roest H F. Biological Phosphorus Removal; Manual for Design and Operation. London: IWA Publishing of Alliance House, 2002: 14-15
- [2] Robert J S Seviour, Takashi Mino, Motoharu Onuki. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003 (27): 99-127
- [3] Adrian Oehmen, Teresa Vives M, Lu Huabing, Yuan Zhiguo, Jurg Keller. The effect of pH on the competition between polyphosphate-accumulating organisms and glycogen-accumulating organisms. *Water Research*, 2005 (39): 3727-3737
- [4] Adrian Oehmen, Aaron M Saunders, Teresa Vives M, Yuan Zhiguo, Jurg Keller. 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
- [5] Carucci A, Lindrea K, Majone M, Ramadorit R. Different mechanisms for the anaerobic storage of organic substrates and their effect on enhanced biological phosphate removal (EBPR). *Wat. Sci. Tech.*, 1999 (39): 21-28
- [6] Damir Brdjanovic, Mark C, van Loosdrecht M, Christine M Hooijmans, Takashi Mino, Guy J Alaerts, Joseph J Heijnen. Innovative methods for sludge characterization in biological phosphorus removal systems. *Wat. Sci. Tech.*, 1999 (39): 37-43
- [7] Rikke L M, Raymond J Z, Valerio G. Challenges for simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in microbial aggregates: mass transfer limitation and nitrous oxide production. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, **52** (3): 329-338
- [8] National Environmental Bureau Complier Committee. Inspects and Analysis Methods of Water and Wastewater. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Publishing House, 2002: 200-281
- [9] Metcalf & Eddy Inc. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2003: 776-805
- [10] Saito T, Brdjanovic D, Mark C, van Loosdrecht M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms. *Water Research*, 2004 (38): 3760-3768