

生物除磷系统中聚糖菌代谢机理的研究进展*

徐伟锋 顾国维 张 芳

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室 上海 200092)

摘要: 强化生物除磷 (EBPR) 被认为是一种最经济、可持续的污水除磷工艺。近年来大量研究报道, 系统中聚糖菌的大量繁殖会使除磷工艺性能变差或完全失败。介绍了聚糖菌的代谢机理和影响聚糖菌与聚磷菌之间竞争的因素 (如进水基质、P/C、pH 值、温度和泥龄等), 便于更好地理解聚糖菌的特性, 从而实现提高生物除磷系统运行的性能与稳定性。

关键词: 生物除磷, 代谢机理, 聚糖菌, 聚磷菌

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-2654 (2006) 04-0149-05

Review on Metabolic Mechanism of Glycogen-accumulating Organisms in Biological Phosphorus Removal System*

XU Wei-Feng GU Guo-Wei ZHANG Fang

(State Key Lab of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: Enhanced biological phosphorus removal (EBPR) is widely accepted as one of the most economical and sustainable processes to remove phosphorus from wastewater. Poor performance or complete failure of EBPR processes has been substantially reported because of the proliferation of glycogen-accumulating organisms (GAOs) in the system. This paper presented the GAOs' metabolic mechanism and the impact factors, such as influent substrate, P/C ratio, pH value, temperature and SRT, on competition between GAOs and PAOs to better understand GAOs' characteristics and improve the performance and reliability of EBPR systems.

Key words: Biological phosphorus removal, Metabolic mechanism, Glycogen-accumulating organisms, Phosphorus-accumulating organisms

强化生物除磷 (EBPR) 被认为是最经济、可持续的污水除磷工艺之一, 该工艺要求厌氧/好氧条件的交替运行以富集聚磷菌 (PAOs)。在厌氧区内, PAOs 通过分解细胞内聚磷化合物获取能量以吸收挥发性脂肪酸 (VFAs), 同时通过降解糖原为合成聚羟基链烷酸 (PHAs) 提供还原力; 在好氧区内, PAOs 则可通过分解厌氧合成的 PHAs 来获取能量, 用于细胞生长、糖原合成、维持能和聚磷合成, 并通过排放剩余污泥达到除磷的目的。但近年来大量研究报道^[1-3], 即使在生物除磷工艺提供良好的运行条件下, 系统也常会出现除磷工艺性能变差或完全崩溃, 其原因之一是系统经常出现一类特殊的微生物, 即聚糖菌 (Glycogen-Accumulating Organisms, GAOs)。本文主要综述了聚糖菌的代谢机理及影响 GAOs 与 PAOs 间竞争的因素, 便于更好地理解 GAOs 的特性, 最终提高 EBPR 系统的运行性能和稳定性。

* 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 50138010)

** 通讯作者 Tel: 021-65026271, E-mail: steve78107@163.com

收稿日期: 2005-09-21, 修回日期: 2005-11-23

1 聚糖菌的代谢特性

Cech 等^[1]在以葡萄糖为碳源的 SBR 试验中发现, 尽管在厌氧阶段葡萄糖已被完全吸收, 但系统并没出现预期的除磷效果; 进一步的研究表明系统中有一类可在体内积累大量糖原, 且这些糖原在厌氧条件下又被大量消耗的微生物, 他们将这类微生物称之为“G-细菌”。Matsuo^[4]在以乙酸、丙酸和蛋白胨为碳源的连续流系统中也遇到了类似情况。为了解释该微生物在厌氧条件下吸收 VFAs 的生化机理, Liu^[2]和 Satoh^[3]对无除磷效果系统中的微生物进行了试验研究, 发现该微生物在吸收乙酸的同时会消耗大量糖原, 胞内 PHAs 含量也增加。此外, 还发现系统中存在着大量的革兰氏阳性和革兰氏阴性球菌, 并通常成四分体排列。他们将这种在厌氧条件下能利用糖原作为能量来源, 又可维持平衡胞内氧化还原电位的微生物称之为聚糖菌。GAOs 与 PAOs 的主要差别在于 GAOs 在厌氧阶段分解体内的糖原获取能量, 用于吸收碳源并合成 PHAs, 但不释磷; 在好氧阶段分解合成的 PHAs 获取能量, 用于合成糖原, 但不合成聚磷化合物。典型的富含 PAOs 与 GAOs 系统中碳源、磷、PHAs 及糖原在厌氧/好氧阶段的变化见图 1 所示。

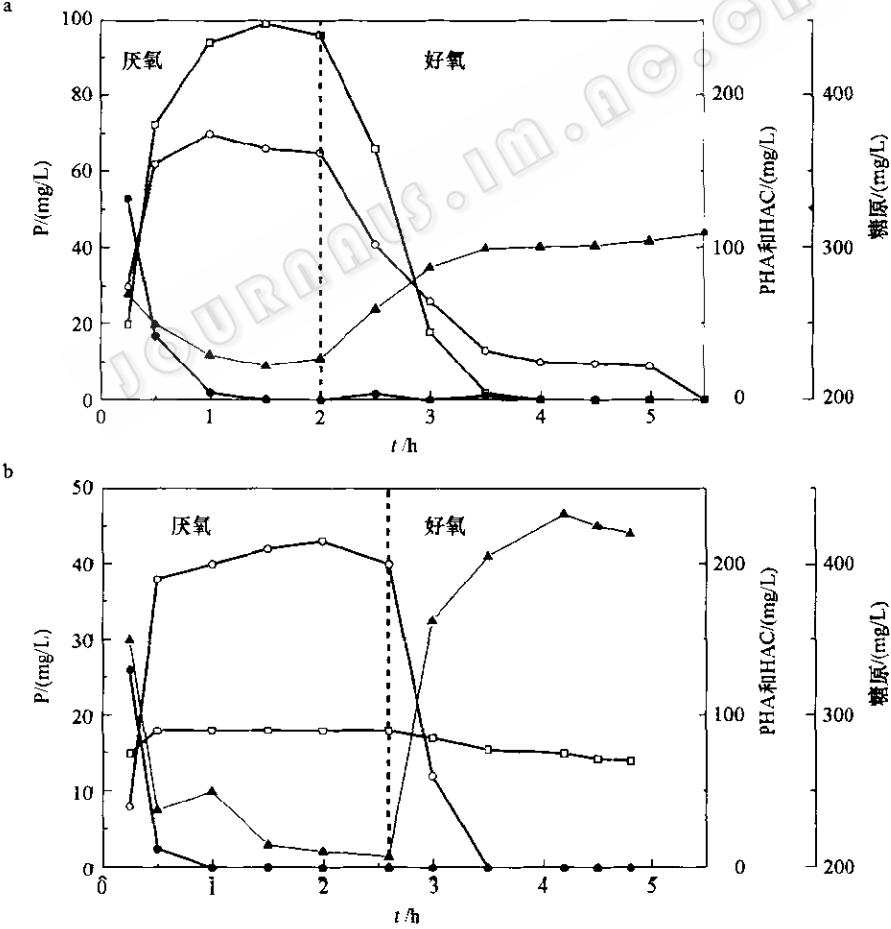


图 1 富集 PAOs (a) 和 GAOs (b) 污泥中磷、乙酸、PHAs 和糖原在厌氧/好氧循环内的变化^[5]

—□— P, —○— PHA, —●— HAC, —▲— 糖原

近年来, GAOs 代谢途径引起了众多学者的研究兴趣。大量研究表明 GAOs 在厌氧条件下降解糖原为 VFAs 合成 PHAs 提供所需的能量和 $\text{NADH} + \text{H}^+$, 在随后的好氧条件下 GAOs 氧化胞内 PHAs 以便于微生物的生长繁殖和糖原再生。目前对 GAOs 代谢机理还不是十分清楚, 但通过大量的理论和实践研究, 人们得出了基本认可的代谢机理^[6,7]。

(1) 在厌氧条件下, GAOs 首先通过糖酵解 (EMP) 途径分解糖原产生整个代谢反应所需的高能物质 ATP、丙酮酸和部分 $\text{NADH} + \text{H}^+$ 。该途径所产生的 ATP 用于以下两个过程: 将乙酸从胞外转运到胞内; 活化乙酸为乙酰辅酶 A。然后, 一部分丙酮酸转变为乙酰辅酶 A, 并生成 CO_2 和其余部分 $\text{NADH} + \text{H}^+$; 另一部分丙酮酸则通过丙酮酸-琥珀酸途径 (该途径主要是平衡胞内氧化还原电位) 和消耗 $\text{NADH} + \text{H}^+$ 转变为丙酰辅酶 A。最后, 上述过程生成的乙酰辅酶 A 和丙酰辅酶 A 聚合成 PHAs (PHB + PHV)。

Filipe 等^[8]还对 GAOs 吸收乙酸过程的动力学与计量学参数进行了详细研究, 结果表明动力学与计量学参数均受环境 pH 值的影响, 即当 pH 升高时 GAOs 吸收乙酸的速率会降低, 糖原消耗量和 PHV 在 PHAs 中所占比例也相应增加, 此外吸收单位乙酸所耗的糖原量也增加, 这是由于随着 pH 值的升高乙酸透过细胞膜所需能量增大引起的。

(2) 在好氧条件下, GAOs 氧化胞内贮存的 PHAs 产生微生物生长繁殖和糖原再生过程所需的能量。PHAs 首先被异化代谢为乙酰辅酶 A 和丙酰辅酶 A, 然后 GAOs 利用这两种产物进行以下过程: ① 糖原合成: 乙酰辅酶 A 通过乙醛酸循环聚合为草酰乙酸, 随后通过糖原异生作用合成为糖原; 丙酰辅酶 A 合成为磷酸烯醇丙酮酸, 再通过糖原异生作用合成为糖原。② 三羧酸循环 (TCA): 乙酰辅酶 A 直接经三羧酸循环 (TCA) 生成 CO_2 , 丙酰辅酶 A 则需转变为丙酮酸后通过脱羧作用生成乙酰辅酶 A, 此后进入 TCA 循环生成 CO_2 。③ 氧化磷酸化: PHAs 分解形成的 $\text{NADH} + \text{H}^+$ 通过电子传递磷酸化作用产生 ATP。④ 微生物的生长繁殖与维持: GAOs 利用代谢生成的乙酰辅酶 A 和丙酰辅酶 A 进行合成代谢; 细胞维持过程所需能量来源于分解 PHAs。GAOs 厌氧和好氧代谢途径具体见图 2 所示。

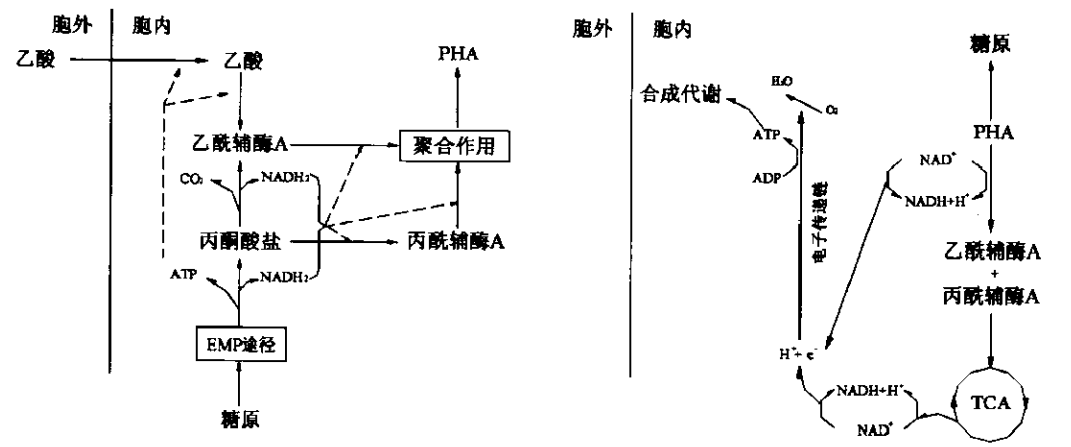


图 2 GAOs 的厌氧和好氧代谢途径

2 影响因素的研究

从现阶段的研究成果来看, PAOs 和 GAOs 在厌氧段会互相竞争同一类有机基质, 即 VFAs^[1,2,9]。然而, 进水中 VFAs 的浓度较低, GAOs 的存在将会极大影响生物除磷工艺的除磷能力, 因而研究影响两者之间竞争的因素对于优化 EBPR 系统的稳定运行相当重要。目前为止这方面的研究工作虽然做得还不是很多, 但也取得了一定的成果。

2.1 进水基质类型 Pijuan 等^[10]以丙酸为碳源进行了 SBR 工艺的除磷试验研究, 结果表明丙酸能选择性地富集 PAOs, 使 GAOs 处于竞争劣势。Liu 等^[2]发现含有葡萄糖和乙酸的进水基质会降低微生物胞内贮存糖原和聚磷的厌氧利用, 表明外碳源可以替代胞内糖原并可作为厌氧条件下合成 PHAs 的还原动力和能源, 可见进水中含有葡萄糖会诱导 GAOs 的大量繁殖。这与 Cech 等人的研究结果一致^[1], 他们也发现在进水中投加葡萄糖会恶化生物除磷效果。然而, Matsuo 等人^[4]得出了相反的试验结果, 他们认为当进水中只含有葡萄糖或同时含有乙酸和葡萄糖时, 系统仍具有良好的除磷效果。总之, 进水基质类型对两种微生物的影响尚无定论, 需作进一步研究。

2.2 P/C 比例 Liu 等^[11]考察了不同进水 P/C 比对 A/O 反应器中 GAOs 和 PAOs 的生长情况, 结果表明进水 P/C 比是影响两者竞争的一个关键因素, 它比基质类型本身的化学特性更为重要。当进水中含有足够的磷酸盐时 (P/C 重量比为 20/100), PAOs 会在体内积累高浓度的聚磷化合物 (含量达 8%); 镜检发现微生物细胞大多呈杆状或棒状, 同时 PAOs 吸收乙酸的速率随着进水中乙酸浓度的升高而加快, 从而使 PAOs 比 GAOs 更具有竞争优势。当进水 P/C 低至 2/100 时, 在厌氧条件下 PAOs 会彻底消耗完胞内聚磷化合物, 污泥含磷量低于 2%, 这限制了 PAOs 吸收乙酸的能量来源; 镜检发现微生物细胞大多成四分体排列, 并且不含有聚磷内含物, 从而导致 PAOs 在系统中处于竞争劣势。当进水 P/C 介于两者之间时, 由于 PAOs 体内贮存的能量库在厌氧条件下不足以完全吸收乙酸, 此时 GAOs 可吸收系统中过剩的乙酸, 致使这两类种群可稳定地共存于同一系统中。上述现象表明, 在高 P/C 时, 活性污泥中富含 PAOs; 而当 P/C 降到 2/100 时, 则 GAOs 占主导地位。究其原因在于, PAOs 在厌氧阶段需要分解体内聚磷为吸收乙酸和合成 PHAs 提供能量, 而 GAOs 仅需分解糖原来提供能量和还原力。

2.3 pH 值 Filipe^[6,8,12]研究表明, pH 值是决定生物除磷系统中 PAOs 和 GAOs 竞争优势的关键参数之一。在厌氧区内, GAOs 吸收乙酸的速率随 pH 值升高而降低, 同时糖原的消耗也相应增加; 而 PAOs 吸收乙酸的速率基本不受 pH 值变化的影响。Filipe 等^[12]还根据试验得出 pH 为 7 时 GAOs 吸收乙酸的速率为 0.15 C-mmol/(C-mmol·h), Brdjanovic^[9]测得 pH 为 7 时 PAOs 吸收乙酸的速率为 0.085 C-mmol/(C-mmol·h)。可见, 中性条件下 GAOs 吸收乙酸的速率较 PAOs 要快, 致使 GAOs 在生物除磷系统中占据一定的竞争优势。在好氧区内, GAOs 的生长速率、PHAs 消耗速率和吸磷速率却不受 pH 值的影响, 而在低 pH 值 (6.5) 条件下这些速率均会显著下降。综上所述, GAOs 在低 pH 值为 6.5~7.0 时占据竞争优势, PAOs 则在 pH 值为 7.0~7.5 处于竞争优势。

Jeon 等^[13]也考察了 SBR 系统中 pH 值对生物除磷的影响, 结果表明当 pH 值控制

在 7 时 GAOs 占优势; 当不控制 pH 值时, PAOs 会随着系统中 pH 值的升高占据生长优势, 从而实现良好的生物除磷。因而, 他们认为可通过调节 pH 值来控制这两种种群之间的竞争。但 Schuler 等^[14]试验结果表明 pH 为 7 时 PAOs 的生长占优势。出现以上相反试验结果的原因可能是不同学者研究的微生物种群不完全一致造成的。

2.4 其它影响因素 Whang 等^[15]的研究结果表明, PAOs 与 GAOs 之间的竞争还受污水处理厂运行温度的影响, 进而影响生物除磷系统运行的稳定性。当温度为 20℃ 时, PAOs 的生长占优势; 而温度为 30℃ 时, 情况正好相反, 通过镜检发现 GAOs 大量繁殖。Erdal 等^[16]的研究结果也表明低温条件下这两类微生物对进水有机基质的竞争程度会降低, 则会增加系统中 PAOs 的数量和提高 EBPR 的性能。此外, Matsuo 等人^[4]认为增大厌氧/好氧水力停留时间的比例也会导致 GAOs 的竞争力提高; 过长或过短的污泥停留时间 (SRT) 会使 GAOs 大量繁殖和干扰 PAOs 的生长, 最终使生物除磷性能恶化。

3 结语

在 EBPR 系统中同时存在着 GAOs 与 PAOs, 实现强化生物除磷的方法之一是寻求抑制 GAOs 而不抑制 PAOs 活性的合适条件, 以防止生物除磷效果的恶化, 所以充分了解影响这二类微生物之间相互竞争的影响因素, 对于提高系统除磷效率及稳定性有重要意义。到目前为止, 尽管人们对聚糖菌的代谢机理及影响聚糖菌与聚磷菌之间的竞争机制还没有完全理解, 但国外的研究表明通过控制进水基质、P/C 比例、pH 值、环境温度和泥龄等因素, 实现抑制 GAOs 的大量繁殖是可能的, 但还不是很成熟。因而, 详细研究 GAOs 的代谢机理与生理特性和通过分子技术进一步分析 EBPR 系统中种群的动力学便于人们更深层次的理解和进一步优化 EBPR 的稳定运行。

参考文献

- [1] Cech J S, Hartman P. *Water Res*, 1993, **27** (7): 1219 ~ 1225.
- [2] Liu W T, Mino T, Matsuo T, *et al.* *Water Res*, 1996, **30** (1): 75 ~ 82.
- [3] Satoh H, Mino T, Matsuo T. *Water Sci Technol*, 1994, **30** (6): 203 ~ 211.
- [4] Matsuo Y. *Water Sci Technol*, 1994, **28** (1): 127 ~ 136.
- [5] Saunders A M, Oehmen A, Blackall L L, *et al.* *Water Sci Technol*, 2003, **47** (11): 37 ~ 44.
- [6] Filipe C D M, Daigger G T, Grady C P L. *Biotechnol Bioeng*, 2001, **76** (1): 17 ~ 31.
- [7] Raymonon J Z, VanLoosdrecht M C M, Yuan Z G, *et al.* *Biotechnol Bioeng*, 2003, **81** (1): 92 ~ 105.
- [8] Filipe C D M, Daigger G T, Grady C P L. *Water Environ Res*, 2001, **73**: 223 ~ 232.
- [9] Brdjanovic D, van Loosdrecht M C M, Hooijmans C M, *et al.* *Environ Eng*, 1997, **123** (2): 144 ~ 154.
- [10] Pijuan M, Saunders A M, Guisasaola A, *et al.* *Biotechnol Bioeng*, 2004, **85** (1): 56 ~ 67.
- [11] Liu W T, Mino T, Nakamura K, *et al.* *Water Res*, 1996, **31** (6): 1430 ~ 1438.
- [12] Filipe C D M, Daigger G T, Grady C P L. *Water Environ Res*, 2001, **73**: 213 ~ 222.
- [13] Jeon C O, Lee D S, Lee M W, *et al.* *Water Environ Res*, 2001, **73**: 301 ~ 306.
- [14] Schuler A J, Jenkins D. *Water Sci Technol*, 2002, **46** (4/5): 171 ~ 178.
- [15] Whang L M, Park J K. *Water Sci Technol*, 2002, **46** (1/2): 191 ~ 194.
- [16] Erdal U E, Erdal Z K, Randall C W. *Water Sci Technol*, 2003, **47** (11): 1 ~ 8.