

聚糖菌颗粒污泥的有机物吸收及胞内储存特性

王 暄¹, 王景峰^{1,2}, 季 民¹, 毕 源¹, 杨造燕¹ (1. 天津大学环境工程系, 天津 300072; 2. 军事医学科学院卫生学环境医学研究所, 天津 300050)

摘要: 采用特殊运行方式的厌氧-好氧 SBR 系统(厌氧后排水), 在乙酸钠、葡萄糖及葡萄糖-乙酸钠混合基质条件下均培养出了稳定的聚糖菌颗粒污泥。通过对典型周期有机物、磷酸盐、胞内糖原及聚β-羟基丁酸(PHB)变化的测定分析, 证明有机基质的种类对于聚糖菌能量利用模式、有机物吸收速率及胞内储存物质种类具有显著的影响。污泥初始胞内糖原水平是有机物吸收数量及吸收速率的关键影响因素, 当糖原水平低于 0.05g/g SS 时, 厌氧有机物去除率与糖原水平直接相关; 而糖原水平高于 0.05g/g SS 时, 厌氧有机物去除率趋于稳定。不同糖原水平污泥厌氧吸收有机物的速率具有明显差异, 在厌氧初期有机物快速吸收阶段, 有机物厌氧吸收速率随胞内糖原水平升高而增加。

关键词: 胞内储存物质; 糖原; 聚β-羟基丁酸(PHB); 厌氧-好氧颗粒污泥; 聚糖菌

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2005)05-0597-05

Characters of organics uptake and intracellular polymer storage of GAOs granular sludge. WANG Xuan¹, WANG Jing-feng^{1,2}, JI Min¹, BI Yuan¹, YANG Zao-yan¹ (1. Department of Environmental Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Institute of Hygiene and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050, China). *China Environmental Science*, 2005,25(5): 597~601

Abstract: Stable glycogen accumulating organisms (GAOs) granules were cultivated in three sequencing batch reactors(SBR), fed with acetate, glucose and glucose-acetate as organic substrate respectively, by means of special alternating anaerobic-aerobic operation mode, i.e. withdrawal after anaerobic period and sludge aeration during aerobic period to suppress the activity of phosphate accumulating organisms(PAOs). Analyzing the variation of organics, phosphate, intracellular glycogen and PHB in typical cycle verified that the sort of organic substrate had marked influence on the energy utilization mode, organics uptake rate and intracellular storage polymer sort of GAOs. Moreover, the initial intracellular glycogen content was the key factor influencing the organics uptake amount and uptake rate. when intracellular glycogen content was below 0.05g/g SS, anaerobic organics uptake efficiencies appeared to be dependent on glycogen content, and organics uptake efficiencies tended to be stable as glycogen content was higher than 0.05g/g SS. In addition, anaerobic organics uptake rate was in great difference with different glycogen content, during fast uptake period in initial anaerobic stage, anaerobic organics uptake rate was increased with intracellular glycogen content increased.

Key words: intracellular storage polymer; glycogen; PHB; anaerobic-aerobic granular sludge; glycogen accumulating organisms (GAOs)

在非稳态条件下活性污泥具有吸收有机物并将之以多聚物形式储存在细胞内的能力, 其中被分辨出的胞内储存物质包括多羟基链烷脂(盐)类(PHAs)、糖原及脂类。最初对于胞内储存物质的研究仅仅局限在生物除磷范围内, 直到 Cech 等^[1]1993 年首次发现同样能累积 PHAs 和糖原的糖原聚集细菌(G 细菌), 研究者开始意识到微生物胞内储存代谢的特殊性与重要性^[2,3]。

将营养物质以多聚物的形式储存于细胞内

是微生物固有的代谢能力, 瞬变的环境条件(非稳态)能激发微生物的这种潜在能力, 可以说储存反应是细胞对于环境(基质浓度)变化最为快捷的适应性调节^[4,5]。

作者采用特殊的厌氧-好氧运行方式, 在乙酸钠、葡萄糖及葡萄糖-乙酸钠混合基质 3 种碳

收稿日期: 2005-03-23

基金项目: 教育部天津大学-南开大学合作项目资助

* 责任作者, 教授, jimin@tju.edu.cn

源 SBR 反应器中均形成了不同粒度的聚糖菌颗粒污泥,并对颗粒污泥的有机物吸收、胞内存储(PHB 和糖原)特性进行系统研究,为生物除磷系统的控制提供理论依据,为开发高效、节能、紧凑的有机物去除工艺提供新的思路.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方式

采用 3 套平行运行的 SBR 系统,反应器由双层有机玻璃圆柱制成,有效体积 10 L,径高比 1/4,反应器内外夹层之间采用循环水保温,控制反应器在接近恒温条件下运行.反应器采用特殊的厌氧-好氧运行方式(图 1),即厌氧末排水、好氧污泥曝气,以抑制系统中聚磷菌的生长并富集聚糖菌.SBR 系统由可编程控制器(PLC)控制处理全过程,按照图 1 所示程序运行,根据需要选定运行周期以及各操作阶段的启闭时间.采用潜水泵进水,重力排水,厌氧采用电动搅拌机搅拌,好氧采用微孔曝气器曝气,供气量由转子流量计控制.反应器稳定运行阶段的进水,厌氧搅拌,沉降,排水,污泥曝气,闲置的时间分别为 5,90,5,10,240,10min,周期总长为 360min,体积交换率为 75%,循环次数为 4 次/d,水温为 20~25 .

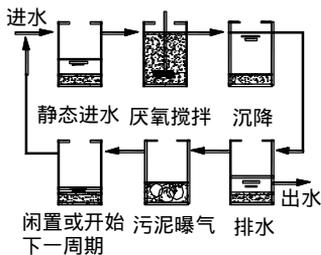


图 1 厌氧-好氧 SBR 运行程序示意

Fig.1 Operation program of anaerobic-aerobic SBR

1.2 进水水质

3 个 SBR 反应器进水分别采用乙酸钠(A)、葡萄糖(G)及葡萄糖-乙酸钠混合基质(GA)作为有机基质,3 种配水主要成分为 A 配水 400mg/L 乙酸钠,G 配水 300mg/L 葡萄糖,GA 配水 100mg/L 葡萄糖与 300mg/L 乙酸钠,其他成分均为(mg/L):

$\text{NH}_4\text{Cl-N}$ 15~20, $\text{KH}_2\text{PO}_4\text{-P}$ 6~8, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 50, CaCl_2 20, KCl 20, MnCl_2 0.1, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.1, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.1, ZnSO_4 0.1.

1.3 分析项目及方法

TOC 采用催化氧化法测定(Shimadzu TOC-V_{CPH},Japan).污泥首先剥离胞外聚合物(EPS)以排除胞外多糖类物质干扰,然后采用热碱及乙醇提取胞内糖原,污泥胞内糖原及液相中葡萄糖均采用蒽酮法测定^[6].胞内聚β-羟基丁酸(PHB)采用次氯酸钠提取,三氯甲烷固定及有机溶剂清洗后,采用硫酸消解紫外分光光度法测定^[7].磷酸盐、SS 及 SVI 均采用标准方法测定^[8].污泥粒径采用激光粒度仪测定(Malvern Mastersizer S long bed, UK).污泥结构及生物相的观察采用光学显微镜及环境扫描电镜.

2 结果与讨论

2.1 颗粒污泥基本特性

接种絮状污泥取自天津市纪庄子污水处理厂污泥回流泵井,随着试验的进行,G、GA 及 A 反应器中先后产生了颗粒污泥.稳定运行阶段,A、G 及 GA 污泥分别呈灰黑色、黄褐色及灰褐色细砂状颗粒,平均粒径分别为 1153,896, 802 μm ,最大粒径可达 2000 μm 左右.光学显微镜下,污泥均呈球形或椭球形、密实且轮廓清晰,扫描电镜下污泥多由球菌组成,基本没有丝状菌.污泥沉降性能良好,SVI 均为 20~30mL/g.

2.2 3 种基质有机物吸收及胞内储存特性

由图 2 可见,在厌氧阶段 A 基质及 GA 基质有机物吸收及胞内储存特性比较相近,伴随着有机物的快速吸收,磷酸盐基本没有释放,胞内糖原含量降低,胞内 PHB 含量增加.而 G 基质则呈现不同的变化规律,伴随着有机物的快速吸收,磷酸盐基本没有释放,而胞内糖原含量在厌氧初期葡萄糖快速吸收阶段增加至一个峰值,待液相中葡萄糖浓度趋于稳定后胞内糖原含量开始降低;胞内 PHB 含量较低并且在有机物吸收过程中没有明显的变化.在好氧阶段,3 种基质中胞内糖原均呈现增长趋势,至好氧末期趋于稳定或略有降

低;A 及 GA 基质污泥胞内 PHB 含量降低,G 基质 中 PHB 含量没有明显变化.

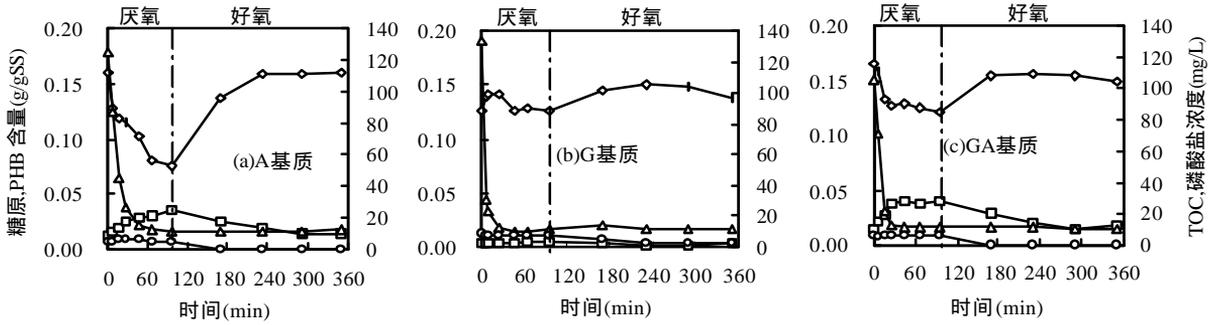


图 2 3 种基质典型周期有机物,磷酸盐,胞内糖原,PHB 变化

Fig.2 Profiles of organics, phosphate and intracellular glycogen and PHB in typical cycle in three SBRs

— — PHB — — 糖原 — — TOC — — 磷酸盐

在厌氧阶段,伴随着有机物的快速吸收,3 种基质 SBR 中均没有明显的磷酸盐释放,表明有机物快速吸收所需的能量并非来自于胞内聚磷的水解.另一方面,伴随着有机物的吸收,胞内糖原呈现出明显的规律性变化,总体上都是厌氧阶段降低,好氧阶段升高.因此,结合以前的研究结果^[9,10],可以认为本系统中微生物的主导代谢模式为在厌氧阶段主要利用胞内糖原酵解产生的能量及还原力吸收有机物并以多聚物形式(PHAs)储存;进入好氧阶段胞内储存多聚物进行好氧代谢,一方面提供能量用于菌体生长,同时合成糖原为下一周期厌氧阶段提供能量储备^[3].

2.3 基质种类对于有机物吸收及胞内储存的影响

3 种基质条件下污泥的有机物吸收及胞内储存特性具有明显差异,表明有机基质的种类对有机物吸收及胞内储存特性具有显著的影响.

表 1 为 A、G 及 GA 基质反应器典型周期(在相近的胞内糖原水平下)厌氧有机物吸收及胞内储存特性参数(根据图 2 计算).在 G 基质反应器中,在厌氧初期伴随着葡萄糖的吸收,胞内糖原增加 13.89mg/gSS,待液相中的葡萄糖浓度趋于稳定后,胞内糖原开始降解,胞内糖原水平降低 13.60mg/gSS,表明在厌氧初期有机物快速吸收阶段,葡萄糖通过基团转位进入细胞所需能量并非由糖原降解来提供,而是一部分葡萄糖通过酵解产能将其余葡萄糖运输进入细胞并合成糖原,待液相中的葡萄糖浓度趋于稳定后,即没有可利用的外部能量时,胞内糖原开始降解产生能量及还原力将糖原酵解产物合成为 PHAs,而测得的厌氧阶段胞内 PHB 合成量很低(1.90mg/gSS),表明以葡萄糖为唯一有机基质时聚糖菌合成的储存多聚物主要组分并非 PHB 而是其他 PHAs^[2].

表 1 三种基质厌氧有机物吸收及胞内储存

Table 1 Anaerobic organics uptake and intracellular polymer storage in three SBRs

基质	吸收有机物 (mgTOC/gSS)	合成糖原 (mg/gSS)	消耗糖原 (mg/gSS)	产生 PHB (mg/gSS)	糖原消耗/基质吸收 (mg/mg)	PHB 合成/基质吸收 (mg/mg)
A	23.89	-	83.80	24.38	3.51	1.02
G	14.90	13.89	13.60	1.90	-	0.13
GA	20.13	-	43.84	25.61	2.18	1.27

注: - 为未发生或无法用该值表示该代谢结果

在 A 及 GA 基质反应器中,厌氧阶段伴随着有机物的吸收,胞内糖原水平均有所降低,胞内 PHB 含量增加,相对于单独的 A 基质污泥吸收单位基质需要消耗糖原 3.51mg/mg,GA 基质污泥吸收单位基质消耗糖原 2.18mg/mg,表明 A 基质为唯一有机基质时,聚糖菌主要利用胞内糖原降解产生的能量及还原力以主动运输形式将有机基质吸收到胞内并以 PHB 形式储存,而当基质中有葡萄糖存在时,聚糖菌则同时利用糖类基质及胞内糖原酵解产能,因此 GA 混合基质中污泥吸收单位基质消耗糖原少于 A 基质。

基质种类不同,厌氧吸收速率也有所差异.图 2 中 3 种基质污泥具有相近的胞内糖原水平,而 A、G 及 GA 污泥在厌氧初期快速吸收阶段去除 88.04%,86.09% 及 87.75% 的有机物,分别需要 45,10,25min 左右,相应的 3 种基质污泥厌氧快速吸收阶段的有机物吸收速率分别为 0.52, 1.41,0.79mgTOC/(gSS min).其中,G 的厌氧吸收最为迅速,A 的吸收最为缓慢,而 GA 基质中因为葡萄糖的加入,比单独的 A 基质吸收速率有所提高.在 GA 基质中,典型周期厌氧阶段 2 种基质利用情况如图 3 所示,其中 TOC-葡萄糖以所测得的葡萄糖浓度计算而得(理论值 0.4mgTOC/mg 葡萄糖).厌氧初期(5min)随着液相中 TOC 的减少,TOC-葡萄糖迅速下降,约占总 TOC 减少量的 72%,占总葡萄糖量的 68%左右,可见 2 种基质同时存在时污泥优先利用葡萄糖。

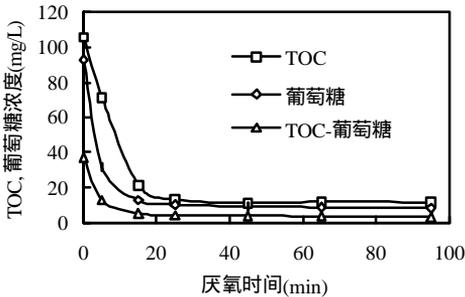


图 3 GA 基质 SBR 中厌氧阶段基质利用情况
Fig.3 Profiles of anaerobic TOC and glucose in GA SBR

2.4 胞内糖原水平对于厌氧有机物吸收的影响

以 A 基质为例,在反应器运行过程中,厌氧有机物去除率与污泥胞内初始糖原水平之间关系如图 4 所示.由图 4 可见,当胞内糖原水平较低时 (<0.05g/gSS),厌氧有机物去除率随糖原水平提高而显著提高;当糖原水平较高时 (>0.05g/gSS),随着糖原水平的提高,厌氧有机物去除率较为稳定,只是略有提高.这表明在本试验采用的有机负荷下,当胞内糖原水平 >0.05g/gSS 时,胞内糖原水平不再是厌氧有机物吸收的限制性因素。

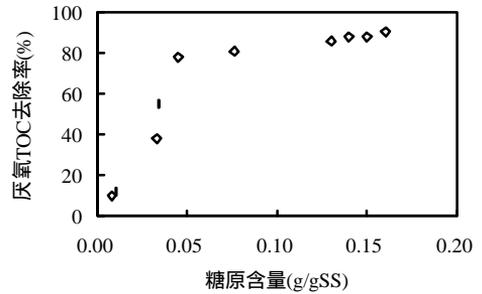


图 4 A 基质 SBR 胞内糖原水平对厌氧有机物去除率影响
Fig.4 Effect of intracellular glycogen to anaerobic organics uptake efficiency in A SBR

A 基质 SBR 反应器中,不同初始糖原水平污泥厌氧有机物吸收情况如图 5 所示。

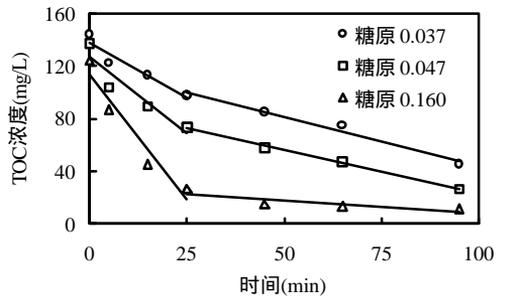


图 5 A 基质 SBR 胞内糖原水平对厌氧有机物吸收速率影响
Fig.5 Effect of intracellular glycogen to anaerobic organics uptake rate in A SBR

由图 5 可见,不同糖原水平污泥厌氧吸收有

机物的速率具有明显差异,但也具有共同的特征,即厌氧初期速度较快,厌氧中后期速度减慢.根据有机物厌氧吸收特征分段拟合有机物厌氧吸收曲线,线性回归参数及相关系数如表 2 所示.由表 2 可见,线性回归参数根据胞内糖原水平的不同而有所不同.其中,参数 A 代表了不同糖原水平污泥不同阶段的有机物厌氧吸收速率.在厌氧初期有机物快速吸收阶段(25min 之前),有机物厌氧吸收速率随胞内糖原水平升高而增加.

表 2 A 基质厌氧有机物吸收速率分段线性拟合参数

Table 2 Subsection linear regression of anaerobic organics uptake rate in A SBR

胞内糖原水平 (g/gSS)	厌氧初期(25min 之前)			厌氧中后期(25~90min)		
	A	B	R ²	A	B	R ²
	[mg/(L·min)]	(mg/L)		[mg/(L·min)]	(mg/L)	
0.037	-1.6970	138.31	0.9176	-0.7439	118.56	0.9785
0.047	-2.3064	127.05	0.8873	-0.6594	89.22	0.9969
0.160	-3.8161	113.77	0.9369	-0.1921	27.59	0.7178

注: C(TOC) = A · t + B; R² 为线性回归相关系数

3 结论

3.1 采用特殊运行方式的厌氧-好氧 SBR 系统,在乙酸钠、葡萄糖及葡萄糖-乙酸钠混合基质条件下成功抑制了聚磷菌生长而使聚糖菌得以富集,并形成一定粒径的颗粒污泥.

3.2 有机基质种类对于有机物吸收及胞内储存特性具有显著影响,当基质中含有糖类时,聚糖菌可能优先利用糖类作为一种外部能量来源.

3.3 污泥胞内糖原水平对于有机物吸收数量及吸收速率均有着显著影响.当糖原水平较低(<0.05g/gSS)时,厌氧有机物去除率与糖原水平直接相关;而糖原水平高于 0.05g/gSS 时,厌氧有机物去除率可达 80% 以上,糖原水平不再是有机物吸收的限制性因素.不同糖原水平污泥厌氧吸收有机物的速率具有明显差异,在厌氧初期有机物快速吸收阶段,有机物厌氧吸收速率随胞内糖原水平升高而增加.

参考文献：

- [1] Cech J S, Hartman P. Competition between polyphosphate and polysaccharide accumulating bacteria in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *Wat. Res.*, 1993,27(7):1219-1225.
- [2] Liu W T, Mino T, Nakamura K, *et al.* Internal energy-based competition polyphosphate- and glycogen-accumulating bacteria in biological phosphorus removal reactors-effect of P/C feeding ratio [J]. *Wat. Res.*, 1997,31(6):1430-1438.
- [3] Zeng R J, van Loosdrecht M C M, Yuan Z. A metabolic model for glycogen accumulating organisms in anaerobic/aerobic activated sludge systems [J]. *Biotechnol. Bioeng.*, 2003,81(1):92-105.
- [4] Majone M, Massanisso P, Ramadori R. Comparison of carbon storage under aerobic and anoxic conditions [J]. *Wat. Sci. Technol.*, 1998,38(8-9):77-84.
- [5] Carucci A, Majone M, Ramadori R, *et al.* Biological phosphorus removal with different organic substrates in an anaerobic/aerobic sequencing batch reactor [J]. *Wat. Sci. Technol.*, 1997,35(1):161-168.
- [6] 宁正祥. 食品成分分析手册 [M]. 北京:中国轻工业出版社, 1998.25-28.
- [7] 河野哲郎,佐藤伸. 活性污泥微生物の細胞貯蔵物質(PHB)の測定方法 [J]. *用水と廃水*,1987,29(3):32-35.
- [8] 国家环境保护局.水和废水监测分析方法 [M]. 第 3 版.北京:中国环境科学出版社,1989.
- [9] 杨造燕,刘 颀,陈思源.厌氧快速吸收有机物的两种能量来源研究 [J]. *中国给水排水*,1998,14(5):1-3.
- [10] 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(5):1-4.

作者简介：王 暄(1975-),女,天津人,天津大学环境学院环境工程系在读博士研究生,主要研究方向为水污染控制理论与技术.发表论文 5 篇.