富含聚磷菌的好氧颗粒污泥的培养与特性

由阳[1],彭轶[1],袁志国[2],李夕耀[3],彭永臻[1,3]*

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院,哈尔滨 150090; 2. Advanced Wastewater Management Centre, The University of Queensland, Brisbane 4072, Australia; 3. 北京工业大学环境与能源工程学院,北京 100022)

摘要:以实验室 SBR 反应器为载体,接种普通活性污泥,探讨了富集聚磷菌和培养好氧颗粒污泥同时实现的可行性,以交替负荷的方法培养 2 个月后,富含聚磷菌的好氧颗粒污泥形成. 颗粒形成后逐步改变碳源种类以提供选择压,淘汰系统中存在的聚糖菌. 结果表明,与丙酸相比,乙酸更适合富含聚磷菌的好氧颗粒污泥的生存,以乙酸为碳源,系统吸放磷量更多,颗粒平均粒径更大(2 mm),颗粒的性能指标(沉降速度、含水率、呼吸速率、密度、完整度系数)都相对优于以丙酸为碳源时的情况. 以工艺检测和分子生物学手段双重检测颗粒形成过程,发现颗粒吸放磷能力的逐渐提高伴随着聚磷菌占微生物总量的比例越来越大. 富集培养结束时聚磷菌占总菌的 70 %左右. 实验证明,富含聚磷菌的好氧颗粒污泥具有优异的污染物去除能力,其对 COD 去除率可达 95 %以上,对磷的去除可达 100 %.

关键词:聚磷菌;好氧颗粒污泥;强化生物除磷系统;富集;SBR

中图分类号:X703 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2008)08-2242-07

Cultivation and Characteristic of Aerobic Granular Sludge Enriched by Phosphorus Accumulating Organisms

YOU Yang[1], PENG Yi[1], YUAN Zhi-guo[2], LI Xi-yao[3], PENG Yong-zhen[1,3]

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Advanced Wastewater Management Centre, The University of Queensland, Brisbane 4072, Australia; 3. School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: This research focused on the enrichment of phosphorus accumulating organisms (PAO) and the formation of granular sludge simultaneously. After fed with flocculent sludge the SBR was run for two months for the cultivation of PAO. Then the granular sludge enriched by PAO was found. After that acetate was used instead of propionate to inhibit the glycogen accumulating organisms (GAO). The experiment testified that acetate was beneficial to the growth of the PAO granules. The system could release and take up more phosphorus when it was fed by acetate. Moreover, when the size of the granules became bigger, the performance indexes of the granules, for example the settling velocity, OUR, density, aquiferous rate and integral rate were also improved. On the other hand, the amount of PAO was found to become more and more in this process by the system performance evaluation and FISH analysis. As a result, the ratio of PAO could reach 70 % of the total bacteria. The aerobic granular sludge enriched by PAO showed very good capability of COD and phosphorus removal. The COD removal efficiency could reach about 95 % and phosphorus removal efficiency could reach almost 100 %.

Key words: phosphorus accumulating organisms; aerobic granular sludge; enhanced biological phosphorus removal system; enrichment; SBR

与普通絮体活性污泥相比,颗粒污泥具有众多优势,例如颗粒直径大、SVI 值低、沉降速度高、生物量高等,这些优势使生物反应器可以在非常高的生物量的同时具有非常好的沉降性能[1,2]. 颗粒污泥的形成是微生物体的一种自凝聚现象(auto-immobilization 或 self-immobilization). 1980 年 Lettinga 等[3]首次在升流式厌氧污泥床(UASB)中发现了厌氧颗粒污泥. 近几年来,许多文献报道了各种条件下(厌氧、好氧、厌氧/好氧交替)颗粒污泥的形成[4~12]. 颗粒污泥的产甲醇、酸化、屠宰废水处理、除酚、去除 COD 等效能被广泛研究,但是涉及到营养物去除,特别是磷的去除的却并不多见. Dulekgurgen 等[13]培养的除磷颗粒污泥使反应器容积和沉淀时间减半,并且大大增强了去除 COD 的能力. Lin 等[14]报道了颗粒污泥会随着 P/COD 的增加而减小,而同时颗粒结构会更紧密. Liu 等[15]发现颗粒污泥的元素组成与底物的 P/COD 密切相关,当底物 P/COD 从 1/100 上升到 10/100 时,颗粒对磷的吸收从 1.9 %升高到 9.3 %(细胞干重).

本研究尝试把强化生物除磷(EBPR)和好氧颗粒污泥工艺结合起来,在培养颗粒污泥的同时富集聚磷

收稿日期:2007-08-16;**修订日期**:2007-11-07

基金项目:国家自然科学基金-海外青年学者合作研究基金项目(50628808);"十一五"国家科技支撑计划重点项目(2006BAC19B03,Z0005186040421)

作者简介:由阳(1979~),女,博士研究生,主要研究方向为污水生物除磷,E-mail:youyang-1979@163.com

* 通讯联系人,E-mail:pyz@bjut.edu.cn

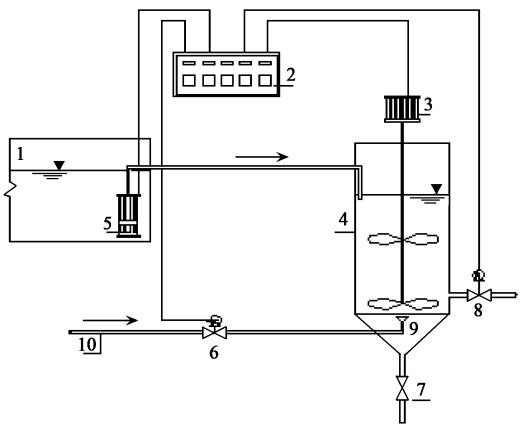
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

菌(PAO),并采用工艺和分子生物学手段双重监测培养过程.富含 PAO 的颗粒污泥兼具生物量高、沉淀速度快和具有卓越的除磷除 COD 功能两方面的特性.所以富含 PAO 的颗粒污泥的形成对于更新现有工艺,提高处理效率,在 PAO 还没有被成功分离的情况下,研究 PAO 的生理特性具有重大意义.

1　材料与方法

1.1　SBR 反应器的运行

试验采用 SBR 反应器,高 70 cm,直径 20 cm,总体积 14 L,有效容积为 10 L,由有机玻璃制成,底部泥斗为圆锥形.由 HA-L 时间程序控制器及附属电子线路实现对运行的自动控制.可以根据实验需要调整运行周期以及进水、曝气、沉淀、排水各阶段的启动、关闭时间.在反应器壁的垂直方向每隔 10 cm 设置一个取样口,反应器底部设有排泥放空管,好氧状态采用空压机曝气,以粘沙块作为微孔曝气头.厌氧状态由配备的搅拌器实现,其作用是在厌氧时通过搅拌使活性污泥处于悬浮状态.夏季,在室温下运行;冬季定为 20 ℃,由一根热交换器保持恒温在(20 ±2) ℃范围内.试验装置见图 1.



1. 配水水箱　2. 控制箱　3. 搅拌器　4. SBR 反应器　5. 潜水泵
6. 电磁阀　7. 排泥管　8. 电动阀　9. 曝气头　10. 压缩空气管

图 1　试验装置示意

Fig. 1　Schematic experimental equipments

SBR 反应器每天运行 4 个周期,每个周期 6 h,每个周期包含 2 min 进水,2.5 h 厌氧搅拌,3 h 好氧曝气,3 min 沉淀和 25 min 闲置.每个周期排水 7 L,进水 7 L,排水比为 7/10.水力停留时间大约为 8.5 h.考虑颗粒生长速度较慢,每天排泥水混合物 1 L,保证污泥龄为 10 d.

1.2　配水和接种污泥

配水采用了 Adrian 等[16]的配方.配水组成见表 1,颗粒污泥培养阶段,初期培养阶段碳源采用丙酸;颗粒形成后碳源中的丙酸逐步被乙酸取代.进水含有 COD 800 mg/L,正磷酸盐(以 PO_4^{3-}-P 计) 53.3 mg/L,即进水 COD/PO_4^{3-}-P 为 15.

表 1　配水成分组成

Table 1　Composition of the feed

培养基	数值	营养液	数值/g·L^{-1}
NH_4Cl/g·L^{-1}	0.106 5	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	1.5
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$/g·L^{-1}	0.171	H_3BO_3	0.15
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$/ g·L^{-1}	0.079 5	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.03
ATU/g·L^{-1}	0.002 1	KI	0.18
蛋白胨/g·L^{-1}	0.048	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	0.12
丙酸/mL·L^{-1}	0.525	$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	0.06
营养液/mL·L^{-1}	0.575	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0.12
pH	7.0	$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	0.15
		EDTA	10

本实验通过碳源的变化提供选择压,抑制聚糖菌的生长,考察了碳源的种类对系统除磷能力和颗粒形态的影响.如表 2 所示,采用了 5 种操作模式使乙酸量逐渐增加,丙酸量逐渐减少,而 COD 总量保持在 800 mg/L不变.每个状态稳定 1～2 个污泥龄.

表 2　5 种操作模/mg·L^{-1}

Table 2　Operational model /mg·L^{-1}

项目	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 5
丙酸	800	600	400	200	0
乙酸	0	200	400	600	800

SBR 反应器接种的污泥为北京市酒仙桥城市污水处理厂具有除磷功能的絮状污泥.接种量为 4 L,接种污泥浓度为7 500 mg/L.

1.3　分析方法

COD 采用 5B-1A 型快速测定仪;PO_4^{3-}-P 采用氯化亚锡-还原分光光度法;MLSS 采用滤纸重量法;SVI 采用标准方法[17].污泥中的总磷测定采用标准方法,即以过硫酸钾消解后测定正磷酸盐.

颗粒采用奥林巴斯 BX-51 显微镜观察,颗粒污泥的评价指标(平均粒径、沉降速度、密度、含水率、完整率系数等根据 Beun 等[5]的方法测定.OUR 采用 Strathtox 分析仪测定.

PHA 含量的测定采用修正 Bond 等[18]的方法.清洗过的污泥经离心后去除上清液,以冷冻干燥机冻干 24 h 后称重,冻干的污泥放入消解管中,加入 2 mL 氯仿和 2 mL 酯化液(3 %酸化甲醇),放入烘箱中

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

105 ℃消解过夜,冷却后加入 1 mL 蒸馏水剧烈振荡,稳定 30 min 液面明显分层后取出下层,用气相色谱仪分析,色谱为安捷仑 6890 系统.

按照 Crocetti 等[19]的操作方法进行 FISH 分析. 采用 4 % PFA, 4 ℃条件下对污泥样品固定 2～3 h. 对固定后的污泥样品超声分散 10 min,将样品滴加在明胶包被过的载玻片上,空气中干燥后先后浸泡于 50 %、80 %和 98 %的乙醇溶液中脱水 3 min. 杂交缓冲液组成包括 0.9 mol/L NaCl、20 mmol/L Tris-HCl, 1 % SDS 和甲酰胺, pH 7.2. 将荧光标记的寡核苷酸探针溶解于杂交缓冲液中,在 46 ℃下与污泥样品杂交 2 h. 采用的寡核苷酸探针列于表 3. 杂交结束后,采用洗脱缓冲液在 48 ℃下洗脱 20 min. 在干燥后的样品上滴加抗荧光衰减液, 对每个污泥样品随机拍摄 20～25 张照片用于定量分析(IPP7.0 Software).

表 3 Fish 分析中采用的寡核苷酸探针

Table 3 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes used in the experiment

探针	组成	FA/%	荧光标记	检测目标	序列
EUB338		—	FITC	几乎全部 *Eubacteria*	GCTGCCTCCCGTAGGAGT
	PAO462	35	Cy-3		CCGTCATCTACWCAGGGTATTAAC
PAOmix[1)]	PAO651	35	Cy-3	*Accumulibacter phosphatis*	CCCTCTGCCAAACTCCAG
	PAO846	35	Cy-3		GTTAGCTACGGCACTAAAAGG

1) PAOmix 由 PAO462∶PAO651∶PAO846 = 1∶1∶1 以摩尔浓度比配制而成[20]

2 结果与分析

本实验从富集聚磷菌 PAO 同时培养好氧颗粒污泥的角度出发,采用北京酒仙桥污水处理厂的普通活性污泥为接种污泥,根据活性污泥状态的变化,从反应器接种启动到 SBR 反应器污泥床完全颗粒化,并且聚磷菌所占比例的逐步提高,可分为 3 个阶段.

2.1 启动期

SBR 反应器接种污泥后,直接在运行阶段 1 条件下运行 1 个月左右,系统沉淀时间为 15 min,培养初期,污泥结构松散,呈褐色,沉淀性能比较差,污泥指数 SVI 为 120 mL/g, 但是系统具有一定的除磷功能. 实验采用一系列手段培养颗粒污泥,例如提供高搅拌速度以增加水流剪切力,提供曝气量(DO > 6 mg/L)来增加传质,提供高低负荷交替的营养环境(每 2 d 配水 1 次,由于丙酸自身的挥发性,放置了一段时间后的配水的 COD 降解量很大,新鲜配水和 1 d 后的配水的 COD 分别为 800 mg/L 和 600 mg/L, 所以系统是在高低负荷交替的情况下运行). 启动期后期,系统性能发生好转,污泥变为黄色,并且生长速度非常快,系统生物量增加到6 000 mg/L.

2.2 富含 PAO 颗粒污泥形成期

启动 1 个月后,逐渐缩短沉淀时间(15 min),使沉降性能较差的细小分散污泥不断被洗出,虽然剩余污泥排放量大,但是系统仍然可以滞留足够量的活性污泥. 8 个星期后,可以观察到反应器内的污泥状态发生了很大变化,污泥为黄色,形成了细小颗粒,颗粒形状不规则,平均直径小(0.5 mm),内部可见白色的内核,颗粒结构紧密,密度高,形态很像沙滩的细砂,SVI 值锐减到 20 mL/g左右. 颗粒污泥形态见图 2 和图 3.

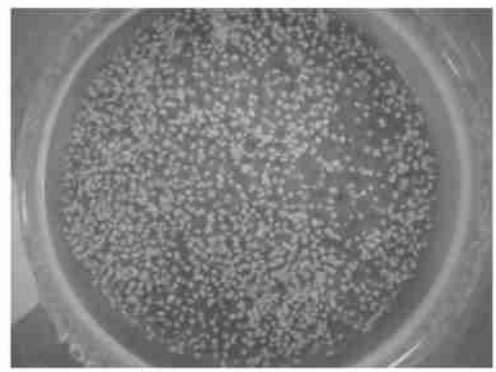


图 2 肉眼观察到的颗粒污泥

Fig. 2 Observation of granular sludge by eyes

此外,扫描电镜图 4 显示了在颗粒内部微生物的分布和组成. 可以看出,颗粒污泥内部聚集了大量的某类微生物,它们呈球状或短杆状,成串出现并聚集在一起,没有鞭毛不能运动,这与文献[21]中报道的聚磷菌 PAO 的外部特征十分相似. 而在这一时期,培养的颗粒污泥对 COD 的去除率可达 95 %,对磷的去除率可达 97 %. 所以推断扫描电镜照片中出现的大量微生物很可能就是 PAO.

图 5 描述了一个典型周期内的系统对污染物的去除情况,以及污泥系统自身多聚物的变化情况.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

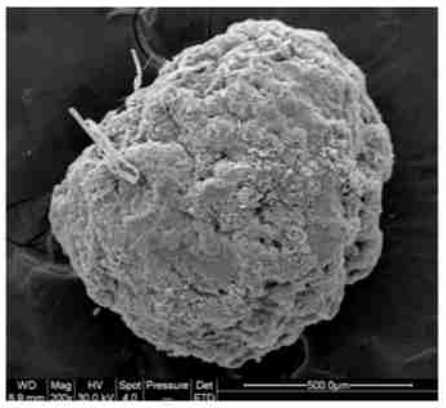


图 3　好氧颗粒污泥的扫描电镜照片(×200)

Fig. 3　Configuration of granular sludge (×200)

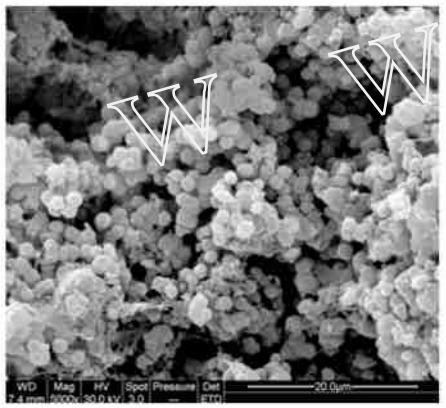


图 4　颗粒内部的微生物(×5 000)

Fig. 4　Bacteria inside the granules(×5 000)

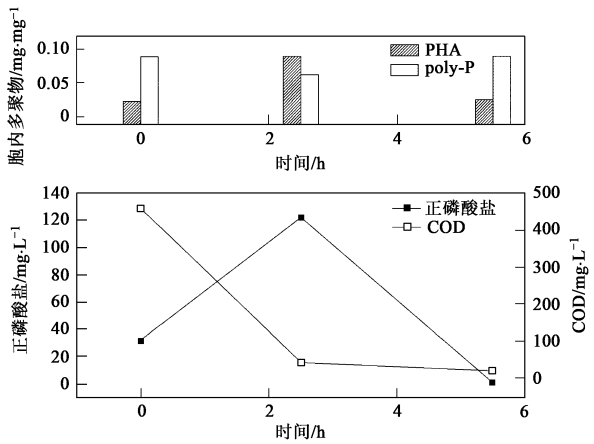


图 5　SBR 系统的典型周期的污染物去除及多聚物合成

Fig. 5　Pollution removal and polymer formation of SBR in a typical cycle

由图 5 可见,强化生物除磷系统中的好氧颗粒污泥已经成功的驯化. 在厌氧阶段,PAO 大量吸收生物可降解的碳源,并且把它们以 PHA 的形式贮存在体内. 这一过程的能量来自于胞内多聚磷酸盐颗粒的水解,然后以正磷酸盐的形式释放到体外. 在接下来的好氧阶段,PAO 利用 PHA 作为能量进行生长并且吸磷. 这些污染物以及多聚物的变化充分说明此时的颗粒污泥已经具备了 PAO 富集污泥的典型特征.

2.3　富含 PAO 的颗粒污泥成熟期

颗粒污泥形成以后,本研究采用 FISH 技术进行了种群结构分析. 分析结果显示,虽然系统内存在一定量的聚磷菌 PAO,但是量不够多,而且系统内还存在着一定量的聚糖菌 GAO,GAO 的生理特性和代谢途径非常相似,它同样在厌氧状态下消耗 COD,在体内合成 PHA,这一过程的能量来自于体内糖原的分解,在接下来的厌氧状态,GAO 分解 PHA,并利用产生的能量生长并合成 PHA. GAO 和 PAO 的唯一不同是 GAO 的代谢不涉及磷,所以它对除磷没有任何贡献,而鉴于两者生态位如此相似,GAO 和 PAO 经常形成竞争关系,在厌氧状态竞争底物. 世界上很多水厂在崩溃了的 EBPR 系统中都发现了 GAO 的存在. 据 FISH 观察,本系统中存在的 GAO 是一类个体直径较小,呈圆形,并且每 4 个聚集在一起的微生物,所以判断它们是最近新发现的一种特殊的 GAO ——*Alphaproteobacteria* GAO,它对 PAO 是一个潜在的威胁,换言之,如果能抑制 *Alphaproteobacteria* GAO,PAO 有可能被进一步富集.

有文献报道,*Alphaproteobacteria* GAO 比较容易代谢乙酸,不太容易代谢丙酸[22,23],而 PAO 对乙酸和丙酸的代谢能力基本相同,所以本实验从第 2 阶段开始,将碳源逐渐改为丙酸,为了不使突然变化导致系统崩溃,分几个阶段逐步递减丙酸,增加乙酸. 图 6 表示了在碳源从丙酸转化成乙酸的过程中 EBPR 系统除磷的情况.

由图 6 可见,随着底物中乙酸含量的增加,系统放磷能力逐渐升高. 厌氧结束时水中正磷酸盐含量从 120 mg/L 增加到 200 mg/L. 同时,系统在厌氧段消耗近乎全部的 COD,说明 COD 在 PAO 厌氧产 PHB,放磷的过程中被全部利用,系统没有剩余的 COD 滞留到好氧段,保证了没有普通异养菌的生长. 这些都证明了 PAO 的活性逐步提高,PAO 的含量逐步增大. 与此同时,好氧段结束时污泥(以 MLSS 计)含磷量也从 0.05 mg/mg升高到 0.15 mg/mg,说明胞内含 poly-P 的污泥比普通污泥量高. 在第 1 阶段和第 5 阶段分别取 2 点:点 1 和点 2,采用 FISH 分析这 2 点的 PAO 占总菌的比例情况,结果如图 7,通过碳源的转化,系统内微生物种群结构发生了明显的

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

变化,点 1 中存在 PAO,但是含量少,大约 40 %左右,而点 2 中的 PAO 已占到总菌数的 70 %～80 %,PAO 进一步被富集,成为系统中的绝对优势种群. 所以,本研究富集 PAO 的过程取得了成功.

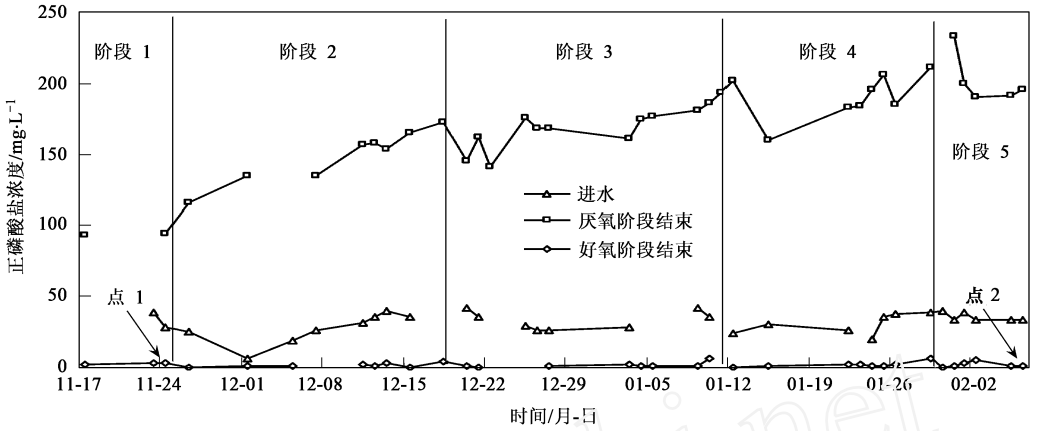


图 6 变换碳源时系统吸放磷情况

Fig. 6 Performance of phosphorus removal of the SBR system

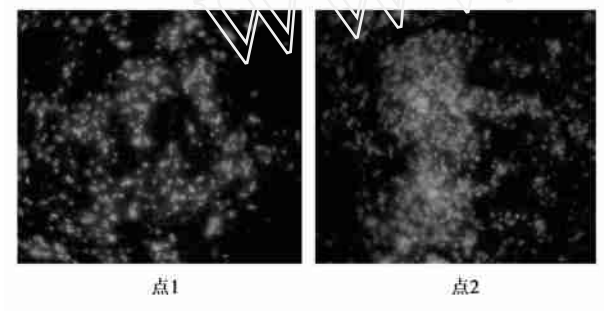


图 7 点 1 和点 2 的 FISH 图

Fig. 7 FISH analysis of point 1 and point 2

另一方面,污泥在点 1 和点 2 的颗粒化程度也表现出了明显的不同,颗粒的大小、形状、结构都发生了质的变化. 点 2 的颗粒污泥大体呈黄白色,中间强度较大,呈黄色,周围呈绒毛状,白色. 这种结构能使其具有良好的沉降,同时又能减少传质阻力并保证活性污泥具有良好的悬浮性. 点 1 和点 2 的颗粒污泥形态比较可见图 8.

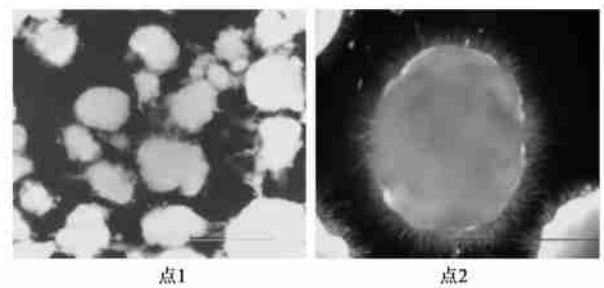


图 8 不同培养阶段的颗粒在显微镜下的照片(×40)

Fig. 8 Image analysis photographs of the granules by microscopy(×40) in different culture period

由图 8 可见,接近 2.5 月的转换碳源培养后,颗粒污泥粒径从 0.5 mm 增长到 2 mm, 成熟的颗粒呈圆形或椭圆形,结构紧密,这对于系统维持稳定的生物量具有重要意义,因为如果颗粒太小,容易从反应器中被洗出,并且由于形不成厌氧或缺氧区,所含的微生物种类减少,影响对废水的处理效果.

与此同时,还检测了颗粒污泥的性能指标,结果如表 4.

表 4 颗粒污泥在不同培养时期的性能指标

Table 4 Performance indexes of the granules in different culture period

指标	点 1	点 2
平均粒径/mm	0.5	2
沉降速率/cm·s^{-1}	0.5	5
OUR/mg·(g·min)$^{-1}$	0.8	18.6
密度/g·cm^{-3}	1.003 4	1.007 5
含水率/%	98	97
完整率/%	68.3	86.9

如表 4,同点 1 相比,点 2 的颗粒污泥具有良好的性能,点 2 的颗粒污泥密度大,含水率低,因此在相同体积下,所含生物量大大增加,并且具有很好的沉降性能,使后续沉降工艺简化,效率明显提高[24]. 同时,点 2 的颗粒具有较高的呼吸速率,说明它们活性高,代谢能力旺盛. 点 2 的颗粒完整率系数高,说明他们抗水流剪切力强,在一定的机械强度下,它们仍保持完整的形态,不会瓦解,所以不会流失出系统,这是颗粒污泥的关键指标.

3 讨论

与普通富含 PAO 的活性污泥相比,富含 PAO 的

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

颗粒污泥具有众多优势.

(1)生物量大　一般的富集 PAO 的 SBR 系统进水比为 2/8[25],而由于颗粒污泥密度大,单位体积系统保有的生物量很高.一般的活性污泥系统生物量为3 000～4 000 mg/L,而颗粒污泥系统可达6 000～8 000 mg/L.如此大的生物量加快污染物的降解速度,同样底物浓度下,SBR 进水比提高到 7/10,系统仍然可以正常运行.

(2)沉淀速度快　一般的富含 PAO 的污泥结构松散,不易沉降,出水中往往会带出悬浮的生物体,污泥龄不好控制,且出水 SS 高,浑浊,而颗粒污泥含水率低,沉降速度快,完整率系数高,出水澄清,几乎检测不到 SS.

(3)抗 COD 变化能力强　普通的富含 PAO 的活性污泥系统,由于系统生物量低,处理能力有限,如果 COD 变化剧烈,尤其是当 COD 大幅提高的情况下,会有一定量的 COD 在厌氧段不能被 PAO 完全利用,而遗留到好氧段,诱发普通异养菌的生长,导致系统 PAO 含量的降低,甚至引起系统崩溃,但是对于颗粒污泥,由于存在传质阻力,颗粒污泥生长较慢.较高的 COD 负荷甚至有助于克服传质阻力,所以只要在较高的 COD 负荷情况下提高水流剪切力,破碎丝状菌,则更有利于形成较为紧密而边界清晰、沉降性能较好的颗粒污泥.

4　结论

(1) 以丙酸为底物,普通絮状活性污泥为接种污泥,在 SBR 中通过缩短沉淀时间,提供水流剪切力,和高溶解氧可以实现富集 PAO 的好氧活性污泥的颗粒化.

(2) 通过改变碳源种类以造成选择压改变了系统的种群结构,聚糖菌 GAO 被淘汰,PAO 进而成为绝对优势种群.

(3) 培养的富集 PAO 的颗粒污泥对污染物有非常强的去除能力,在本实验负荷情况下,对 COD 去除率可达 94 %,磷去除率可达 100 %.

(4) 成熟的富集 PAO 的好氧颗粒污泥平均直径为 2 mm,白色,表面致密,外层有毛状物,在好氧颗粒污泥成熟过程中,含水率和比重降低,表明在试验条件下形成的好氧颗粒污泥在相同干重情况下具有更小的体积和更大的生物量.

(5)与普通的富集 PAO 的活性污泥相比,富集 PAO 的颗粒污泥具有生物量大,沉淀速度快,抗 COD 冲击负荷能力强等众多优点,具有一定的理论和实际意义.

参考文献:

[1] 竺建荣,刘纯新. 好氧颗粒污泥的培养及理化特性的研究[J]. 环境科学,1999,**20**(2):38-41.

[2] 王强,陈坚,堵国成. 选择压法培育好氧颗粒污泥的试验[J]. 环境科学,2003,**24**(4):99-104.

[3] Lettinga G, van Velsen A, Hobma S, *et al*. Use of the UASBR concept for biological WWT, especially for anaerobic treatment[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1980, **22**: 699-734.

[4] Beun J J, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor[J]. Water Research, 2002, **36**(3):702-712.

[5] Beun J J, Van L M, Heijnen J J. Aerobic granulation[J]. Water Science and Technology, 2000, **41**(4): 41-48.

[6] Beun J J, Hendriks A, van Loosdrecht M C M, *et al*. Aerobic granulation in a SBR[J]. Water Research, 1999, **33**(10): 2283-2290.

[7] Kim S H, Choi H C, Kim I S. Enhanced aerobic floc-like granulation and nitrogen removal in a sequencing batch reactor by selection of settling velocity[J]. Water Science and Technology, 2004, **50**(1):57-62.

[8] Qin L, Liu Y, Tay J H. Effect of settling time on aerobic granulation in sequencing batch reactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2004, **21**(1): 47-52.

[9] Hu L, Wang J, Wen X, *et al*. The formation and characteristics of aerobic granules in sequencing batch reactor (SBR) by seeding anaerobic granules[J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(1): 5-11.

[10] 卢然超,张晓建,张悦,等. SBR 工艺污泥颗粒化对生物脱氮除磷特性的研究[J]. 环境科学学报,2001,**21**(5):577-581.

[11] 王芳,杨凤林,刘毅慧,等. SBAR 中好氧污泥颗粒化及其特性[J]. 中国环境科学,2004,**24**(6):725-729.

[12] 杨凤林,王芳,张兴文,等. SBAR 中同步脱氮好氧颗粒污泥的菌种特性[J]. 中国环境科学,2005,**25**(2):218-221.

[13] Dulekgurgen E, Ovez S, Artan N, *et al*. Enhanced biological phosphate removal by granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. Biotechnology Letters, 2003, **25**(9):687-693.

[14] Lin Y M, Liu Y, Tay J H. Development and characteristics of phosphorus-accumulating microbial granules in sequencing batch reactors[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, **62**(4): 430-435.

[15] Liu Y, Lin Y M, Tay J H. The elemental compositions of P-accumulating microbial granules developed in sequencing batch reactors[J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(10):3258-3262.

[16] Oehmen A, Zeng R J, Yuan Z G, *et al*. Anaerobic Metabolism of Propionate by Polyphosphate-Accumulating Organisms in Enhanced Biological Phosphorus Removal Systems[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **91**(1):43-53.

[17] 美国公共卫生协会,美国自来水厂协会,水污染控制联合会编著. 宋仁元等译. 水和废水标准分析方法[M]. (第 15 版). 北京:中国建筑工业出版社,1985.

[18] Bond P L, Erhart R, Wagner M, *et al*. Identification of some of the major groups of bacteria in efficient and nonefficient biological

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

phosphorus removal activated sludge systems [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(9): 4077-4084.

[19] Blackall L L, Crocetti G R, Saunders A M, *et al*. A review and update of the microbiology of enhanced biological phosphorus removal in wastewater treatment plants[J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2002, **81**: 681-691.

[20] Crocetti G R, Hugenholtz P, Bond P L, *et al*. Identification of polyphosphate-accumulating organisms and design of 16S rRNA-directed probes for their detection and quantitation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(3): 1175-1182.

[21] Mino T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process [J]. Water Research, 1998, **32**(11): 3193-3207.

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

[23] Oehmen A, Saunders A M, Vives M T, *et al*. Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources[J]. Journal of Biotechnology, 2006, **123**(1,3): 22-32.

[24] 蔡春光,刘军深,蔡伟民. 胞外多聚物在好氧颗粒化中的作用机理[J]. 中国环境科学,2004,**24**(5):623-626.

[25] Lu H B, Oehmen A, Virdis B, *et al*. Obtaining highly enriched cultures of Candidatus Accumulibacter phosphates through alternating carbon sources[J]. Water Research, 2006, **40**(20): 3838-3848.

2006 年环境科学技术类期刊总被引频次和影响因子排序表[1)]

(中国科学技术信息研究所 2007 年 11 月 15 日发布)

代码	期刊名称	总被引频次			影响因子		
		数值	学科排名	离均差率	数值	学科排名	离均差率
Z027	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES	352	26	- 0.61	0.406	22	- 0.40
Z549	安全与环境学报	563	21	- 0.37	0.744	13	0.11
Z029	长江流域资源与环境	811	12	- 0.09	0.830	11	0.23
Z024	城市环境与城市生态	611	18	- 0.32	0.301	27	- 0.55
Z015	电镀与环保	330	27	- 0.63	0.444	20	- 0.34
Z544	防灾减灾工程学报	99	31	- 0.89	0.348	26	- 0.48
Z013	工业水处理	1 021	10	0.14	0.406	22	- 0.40
Z032	工业用水与废水	288	28	- 0.68	0.207	31	- 0.69
Z010	海洋环境科学	642	15	- 0.28	0.653	14	- 0.03
Z009	化工环保	595	19	- 0.34	0.944	7	0.40
Z017	环境保护科学	274	29	- 0.69	0.246	30	- 0.63
Z005	环境工程	569	20	- 0.36	0.371	25	- 0.45
Z004	**环境科学[2)]**	**2 899**	**1**	**2.24**	**1.310**	**3**	0.95
Z003	环境科学学报	2 362	2	1.64	1.076	5	0.60
Z002	环境科学研究	1 141	8	0.27	1.089	4	0.62
Z025	环境科学与技术	687	14	- 0.23	0.397	24	- 0.41
Z019	环境污染与防治	701	13	- 0.22	0.462	19	- 0.31
Z021	环境污染治理技术与设备	1 503	6	0.68	0.550	16	- 0.18
Z008	农业环境科学学报	1 779	5	0.99	0.879	8	0.31
H784	生态环境	975	11	0.09	0.837	10	0.24
Z023	生态与农村环境学报	627	16	- 0.30	0.838	9	0.25
Z016	水处理技术	614	17	- 0.31	0.268	29	- 0.60
Z007	四川环境	419	25	- 0.53	0.413	21	- 0.39
T953	消防科学与技术	254	30	- 0.72	0.291	28	- 0.57
Z551	植物资源与环境学报	517	23	- 0.42	0.638	15	- 0.05
G129	中国安全科学学报	1 060	9	0.18	0.828	12	0.23
Z030	中国环境监测	445	24	- 0.50	0.480	18	- 0.29
Z001	中国环境科学	2 045	3	1.28	1.062	6	0.58
Z546	中国人口资源与环境	518	22	- 0.42	0.513	17	- 0.24
Z022	资源科学	1 152	7	0.29	1.350	2	1.01
Z012	自然资源学报	1 926	4	1.15	1.675	1	1.49
	平均值	896			0.673		

1) 数据源于:中国科学技术信息研究所. 2007 年版中国科技期刊引证报告(核心版)[M]. 北京:科学技术文献出版社. 2007. 212.

2) 《环境科学》2002～2007 连续 6 年荣获"百种中国杰出学术期刊"称号.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net