

A/O SBR 中同步硝化反硝化除磷颗粒污泥的富集

王景峰^{1,2}, 王 暄^{1,3}, 季 民¹, 卢 珊¹, 杨造燕¹

(1 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 2 军事医学科学院 卫生学环境医学研究所, 天津 300050; 3 天津工业大学 中空纤维膜材料与膜过程教育部重点实验室, 天津 300160)

摘 要: 以聚糖菌颗粒污泥为接种污泥, 在厌氧 好氧 SBR 中成功富集了具有同步硝化反硝化除磷效果的颗粒污泥。结果表明, 培养过程中, 污泥总磷含量、厌氧释磷量及磷酸盐去除率的提高表明反应器中聚磷菌逐渐替代聚糖菌成为优势菌种; 培养末期颗粒污泥的粒径为 600~1 000 μm , SVI 为 48 mL/g, 有机物主要在厌氧阶段被去除并以胞内聚合物 (PHB) 的形式储存, 厌氧阶段对 TOC 的去除率为 87%, 对 TOC 的总去除率为 90%, 对磷酸盐的去除率为 95.6%; 氮的去除是在好氧条件下经同步硝化反硝化完成的, 且 PHB 为主要的反硝化碳源, 对氨氮的去除率为 99.3%, 对总氮的去除率为 85.5%。

关键词: 好氧颗粒污泥; 胞内储存物质; 聚糖菌; 同步硝化反硝化除磷

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2006)17-0100-05

Enrichment of Granular Sludge for Simultaneous Nitrification, Denitrification and Phosphorus Removal in Anaerobic - Aerobic SBR

WANG Jing-feng^{1,2}, WANG Xuan^{1,3}, JI Min¹, LU Shan¹, YANG Zao-yan¹

(1 School of Environment Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2 Institute of Hygiene and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050, China; 3 Key Lab of Hollow Fiber Membrane Materials and Membrane Process <Ministry of Education>, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: By seeding glycogen accumulating organisms (GAOs) granular sludge, granular sludge capable of simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal was successfully cultivated in an anaerobic - aerobic sequencing batch reactor. During the enrichment process, the increase in the phosphorus content of granular sludge, the amount of anaerobic phosphorus released and the phosphorus removal rate indicates that dominant organisms in the granular sludge gradually change from GAOs to phosphorus accumulating organisms (PAOs). Cultivated granular sludge is 600 - 1 000 μm in diameter, and 48 mL/g in SVI. Organic substances are mostly absorbed and stored as intracellular polymer PHB during the anaerobic period. The anaerobic TOC and total TOC removal rates are 87% and 90% respectively, and the phosphorus removal rate is 95.6%. Moreover, nitrogen is removed via simultaneous nitrification and denitrification during successive aerobic periods. Intracellular storage polymer PHB is used

基金项目: 教育部天津大学—南开大学合作项目

as the carbon source for denitrification. The removal rates of ammonia nitrogen and total nitrogen are 99.3% and 85.5% respectively.

Key words: aerobic granular sludge; intracellular storage polymer; glycogen accumulating organisms; simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal

聚糖菌(GAOs)可以在厌氧阶段吸收有机物并以胞内聚合物的形式储存而不以胞内聚磷作为能量来源,因此其存在往往导致生物除磷效果的恶化,即使在严格控制的实验室条件下,这一现象也时有发生^[1]。因此一直以来对聚糖菌的研究多从提高生物除磷系统稳定性的角度出发,以生物除磷系统为研究主体和研究起点,探讨聚糖菌的存在对除磷效果恶化的影响以及决定聚糖菌与聚磷菌竞争的因素等^[2,3],而对于能否从稳定的聚糖菌系统转化为聚磷菌系统的研究尚不多见。笔者以具有一定同步硝化反硝化能力的聚糖菌颗粒污泥作为接种污泥^[4],在A/O SBR中对具有同步脱氮除磷能力的颗粒污泥进行富集,并对其脱氮除磷特性进行研究。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方式

试验采用的SBR反应器由双层有机玻璃圆柱制成,有效体积为10 L,径高比为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。SBR系统由可编程控制器(PLC)控制进水、厌氧、好氧、沉降、排水及闲置等过程,并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,厌氧搅拌采用电动搅拌机,好氧曝气则采用微孔曝气器,供气量由转子流量计控制,排水采用重力出水方式。SBR系统的运行参数:进水为5 min,厌氧搅拌为90 min,好氧曝气为240 min,沉降为5 min,排水为10 min,静置为10 min。体积交换率为75%,泥龄为2025 d。

1.2 接种污泥

以实验室另一个SBR反应器中培养的聚糖菌颗粒污泥为接种污泥^[4],接种颗粒污泥呈灰黑色细砂状外观,粒径为800~1500 μm。光学显微镜下观察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。污泥沉降性能良好,SVI为2030 mL/g。

1.3 试验水质

试验中SBR反应器系统先后采用乙酸钠(配水I)及乙酸钠与葡萄糖混合基质(配水II)作为有机

基质,氯化铵及磷酸二氢钾作为氮源及磷源。其中配水I中的CH₃COONa为400 mg/L,配水II中CH₃COONa为300 mg/L,葡萄糖为60 mg/L。两种配水中NH₄⁺-N和PO₄³⁻-P浓度均相同,分别为30、(610) mg/L,其他成分:MgSO₄·7H₂O为50 mg/L, CaCl₂为20 mg/L, KCl为20 mg/L, MnCl₂为0.1 mg/L, FeSO₄·7H₂O为0.1 mg/L, CuSO₄·5H₂O为0.1 mg/L, ZnSO₄为0.1 mg/L。

1.4 分析项目及测定方法

TOC采用催化氧化法测定(Shimadzu TOC-VCPH),氨氮采用纳氏试剂法测定,硝酸盐氮、亚硝酸盐氮采用多离子测定仪(Hanna C200)测定。污泥首先在80℃水浴中加热30 min,混合离心后弃掉上清液,以剥离胞外聚合物(EPS)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,并采用蒽酮法测定。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(Varian Cary100)。磷酸盐、SS及SVI均采用标准方法测定^[5],污泥胞内总磷含量采用过硫酸钾消解后以标准方法测定^[5],污泥结构及生物相的观察采用光学显微镜(江南XS-18)及环境扫描电镜(Philips XL30),溶解氧采用溶氧仪测定(Hanna HI-9145)。

2 结果与讨论

2.1 接种污泥中微生物的聚糖菌特征

接种污泥在典型周期内有机物、磷酸盐、胞内糖原及PHB的变化如图1所示。

由图1可以看出,在厌氧阶段,伴随着有机物的快速吸收、胞内聚合物(PHB)的储存,磷酸盐并无明显的释放,表明有机物快速吸收及胞内储存所需能量并非来自于胞内聚磷的水解,这意味着颗粒污泥中聚磷菌的含量(代谢活性)很低。而另一方面,伴随着有机物的吸收,胞内糖原却呈现出明显的规律性变化:厌氧阶段其含量降低,好氧阶段则升高。这表明有机物的吸收与胞内储存的过程与胞内糖原代谢相偶联,即颗粒污泥中微生物呈现典型的聚糖菌特征。

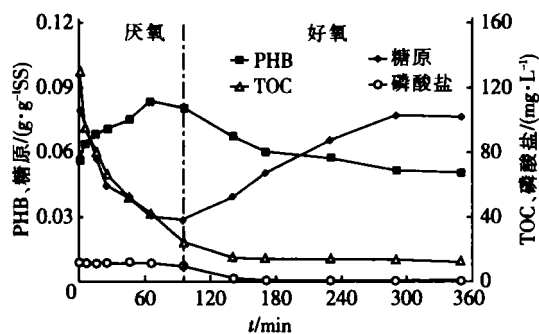


图 1 接种污泥典型周期内有机物、磷酸盐、糖原及 PHB 的变化

Fig 1 Variation of TOC, phosphate, intracellular glycogen and PHB during typical cycle of seeding sludge

2.2 同步脱氮除磷颗粒污泥的培养

2.2.1 除磷能力的获得

由于试验 SBR 反应器的运行方式与接种污泥所在反应器的运行方式 (即厌氧末排水、好氧污泥曝气) 有所不同, 导致好氧阶段的氮、磷负荷有所增加。故对接种污泥进行了 41 d 的驯化培养, 污泥胞内聚合物含量及 SVI 变化见图 2, 运行效果见图 3。

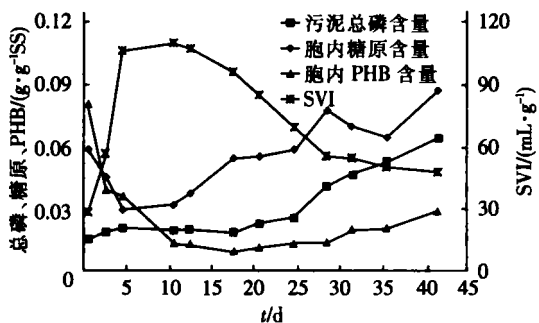


图 2 培养过程中胞内聚合物含量及 SVI 变化

Fig 2 Variation of sludge intracellular polymers content and SVI during cultivation process

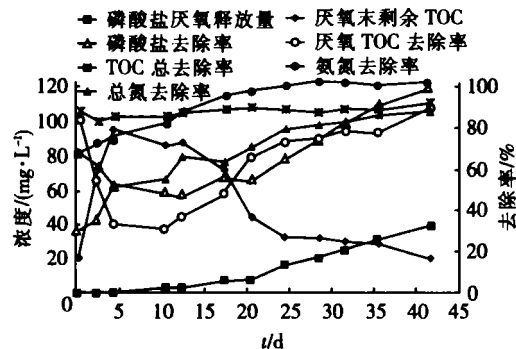


图 3 培养过程中污染物去除特征

Fig 3 Characteristics of pollutant removal during cultivation process

由图 2 可知, 接种污泥中总磷的含量很低 (0.016 g/gSS), 基本无胞内聚磷的储备^[6], 这就意味着无法以聚磷为能量来源吸收有机物。由于好氧阶段磷负荷的增加导致对少量磷酸盐的吸收, 故污泥中总磷含量呈增加趋势, 第 4 天时增至 0.021 g/gSS , 而胞内糖原含量则显著降低, 第 4 天时其含量由接种时的 0.059 g/gSS 降至 0.030 g/gSS 。分析认为这主要是因为好氧阶段磷酸盐的吸收与储存消耗了部分 PHB 降解所产生的能量, 进而影响了好氧阶段糖原的合成所致。结合图 3 可以看出, 随着胞内糖原含量的降低, 厌氧阶段对有机物的吸收能力逐渐减弱, 第 4 天时对 TOC 的去除率仅为 31.8%, 且胞内 PHB 的含量也不断降低, 第 4 天时其含量降至 0.037 g/gSS 。分析其原因是污泥中总磷含量的提高还不足以为厌氧有机物的吸收提供能量, 糖原仍是主要的能量来源, 而其含量的降低必然对下一周期厌氧有机物的吸收及 PHB 的储存带来消极影响, 故导致厌氧有机物的去除率及 PHB 的含量呈下降趋势。

此外, 镜检发现絮状污泥中夹杂着部分颗粒状污泥, 并出现部分丝状菌, 污泥沉降性能降低, 第 4 天时 SVI 由接种时的 28.0 mL/g 增至 105.5 mL/g 。这是由于厌氧有机物吸收能力的下降导致进入好氧阶段的溶解性有机物增加, 这就为以溶解性有机物为基质的异养菌的快速增殖提供了有利条件, 使其在与聚糖菌、聚磷菌的竞争占据优势, 并导致颗粒污泥出现部分解体。

通过以上分析可以看出, 厌氧段对有机物吸收能力的恢复是避免系统运行效果恶化的关键所在, 鉴于以糖类物质为基质更容易体现厌氧段对有机物的吸收效果并恢复糖原水平^[7,8], 因此在运行第 10 天改变进水水质, 在 SBR 系统进水中添加部分葡萄糖。由图 2 和图 3 可知, 随着进水水质的改变, 胞内糖原的含量有所增加, 第 28 天时胞内糖原含量增至 0.078 g/gSS , 与此同时污泥总磷含量缓慢升高, 厌氧释磷量也有所增加, 第 28 天时厌氧释磷量达到 21.3 mg/L , 厌氧阶段对 TOC 的去除率提高至 70.2%, 这就有效抑制了丝状菌的快速生长, 故污泥沉降性能好转, SVI 降为 55.0 mL/g , 镜检显示密实的细小颗粒污泥重新占据优势。

在之后的培养运行中, 胞内糖原含量变化不大 (维持在 0.07 g/gSS 左右), 但污泥总磷含量迅速上

升,第 41 d时达 0.063 g/gSS,厌氧释磷量也增至 39.7 mg/L;对磷酸盐、有机物的去除率也随之上升,在第 41天时分别达到 95.6%和 87.0%。这表明颗粒污泥中已经由以糖原为能源的聚糖菌占优体系逐渐转化为以聚磷为能源的聚磷菌体系。

2.2.2 脱氮能力的提高

前期的研究表明^[4],接种的聚糖菌颗粒污泥具有一定的同步硝化反硝化能力,并且系统中反硝化碳源为胞内储存物质 PHB,反硝化聚糖菌是系统反硝化能力的来源,同时也表明尽管颗粒污泥中反硝化能力充足,但 SBR系统特殊的运行方式限制了对总氮去除效率的提高。由图 2和图 3可知,由于好氧阶段氨氮负荷的提高,污泥中微生物的硝化能力逐步提高,第 4天对氨氮的去除率升至 74.1%。此后对氨氮去除率的增速减缓,至第 10天仅增至 79.5%。分析认为这是由于厌氧段对有机物的吸收能力降低,使进入好氧阶段的溶解性有机物浓度较高,抑制了亚硝化菌及硝化菌的繁殖,从而制约了颗粒污泥硝化能力的提高。

接种初期,对总氮的去除率呈下降趋势,至第 4天去除率降至 49.7%,而在之后的运行中,系统的反硝能力略有升高,第 10天时的去除率增至 53.1%。这是由于厌氧段对有机物吸收能力的降低导致进入好氧阶段的溶解性有机物浓度较高,这为普通反硝化菌以外源基质进行反硝化提供了可能,故对 TN的去除率略有上升。

第 10天改变进水有机基质,随着厌氧有机物的吸收及胞内储存能力的恢复以及污泥性状的好转,硝化效果与反硝化效果均稳步提高,第 41天对氨氮的去除率和总氮的去除率分别达到 99.3%、85.5%。

2.3 培养末期颗粒污泥的脱氮除磷特性

培养末期, SBR中颗粒污泥在典型周期内的有机物、磷酸盐、胞内糖原、PHB及氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总氮的变化如图 4所示。

由图 4可以看出,在厌氧阶段,伴随着有机物的快速吸收、胞内聚合物的储存,磷酸盐释放量显著增加,表明快速吸收有机物及胞内储存所需的能量主要来自于胞内聚磷的水解,好氧阶段,随着胞内储存物质 PHB含量的降低,液相中磷酸盐浓度显著降低;此外,胞内糖原含量也呈现出厌氧阶段降低、好

氧阶段升高的规律性变化,这表明厌氧阶段由糖原降解为胞内储存过程提供还原力。根据目前公认的生物除磷模型^[9],颗粒污泥中微生物呈现典型的聚磷菌特征。

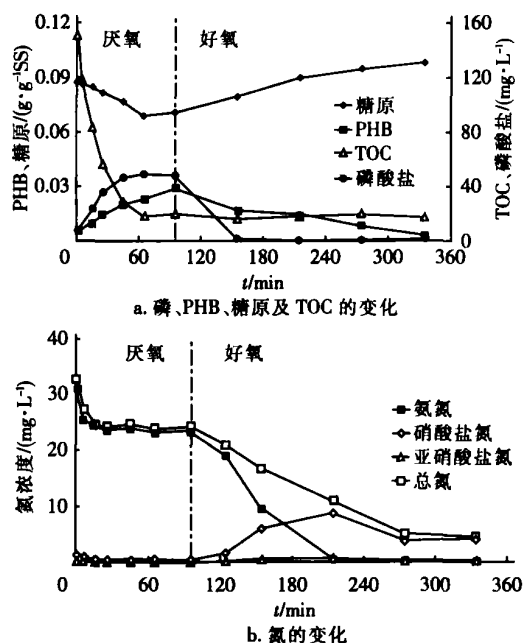


图 4 培养末期反应器内各基质的转化过程

Fig 4 Transformation process of substrates in reactor during final cultivation phase

由图 4还可以看出,好氧阶段的硝化速率较快,这是由于大部分有机物在厌氧阶段被吸收并以 PHB形式储存,使进入好氧阶段的溶解性有机物较少所致。但是随着氨氮的去除,却没有显著的硝酸盐、亚硝酸盐的累积,表明系统中发生了同步硝化反硝化。此外,由图 4还可以看出,好氧阶段随着经由 SND的除氮,基本没有溶解性基质被去除,而胞内 PHB含量呈同步降低趋势,这表明 SND过程中反硝化的碳源来自于胞内储存物质 PHB。

综上所述,以具有一定 SND能力的聚糖菌颗粒污泥为接种污泥,经过 41 d的驯化就可获得具有同步硝化反硝化除磷能力的颗粒污泥,在单级厌氧/好氧 SBR中实现了有机物及氮、磷的同步去除,表明聚磷菌、亚硝化菌、硝化菌及反硝化菌共存于颗粒污泥中,颗粒污泥独特的结构特征(因氧传质限制而形成的好氧区、厌氧区)为不同种类、不同环境需求的微生物提供了一个共生的微生态系统,在此系统中不同微生物间形成了相互协作、互为共生的

关系,构成具有同步去除有机物及氮、磷功能的反应体系。在培养末期,颗粒污泥粒径达到 6001 000 μm ,SV I 为 48 mL/g,系统厌氧阶段对 TOC 的去除率为 87.0%,对 TOC 的总去除率为 90%,对磷酸盐的去除率为 95.6%;氮是在好氧条件下经由 SND 去除的,对氨氮的去除率为 99.3%,对总氮的去除率为 85.5%。

3 结论

① 以具有一定 SND 能力的聚糖菌颗粒污泥为接种污泥,经过 41 d 的培养就可获得具有同步硝化反硝化除磷能力的颗粒污泥,在单级厌氧/好氧 SBR 中实现了对有机物、氮和磷的同步去除。

② 培养过程中,污泥总磷含量、磷酸盐厌氧释放量及磷酸盐去除率的提高,表明颗粒污泥中已经由以糖原为能量来源的聚糖菌占优体系逐渐转化为主要以聚磷为能量来源的聚磷菌体系。

③ 在培养末期,颗粒污泥粒径为 6001 000 μm ,SV I 为 48 mL/g,有机物主要在厌氧阶段被去除并以胞内聚合物 PHB 的形式储存,厌氧阶段对 TOC 的去除率为 87.0%,对 TOC 的总去除率为 90.0%,对磷酸盐的去除率为 95.6%,氮是在好氧条件下经由 SND 去除的,并且反硝化碳源主要来自于胞内储存物质 PHB,对氨氮的去除率为 99.3%,对总氮的去除率达 85.5%。

参考文献:

- [1] Liu W T, Mino T, Matsuo T, *et al*. Glycogen accumulating population and its anaerobic substrate uptake in anaerobic-aerobic activated sludge without biological phosphorus

removal[J]. *Water Res*, 1996, 30 (1): 75 - 82

- [2] Filipe C D M, Daigger G T, Grady Jr C P L. A metabolic model for acetate uptake under anaerobic conditions by glycogen accumulating organisms: stoichiometry, kinetics, and the effect of pH[J]. *Biotechnol Bioeng*, 2001, 76 (1): 17 - 31.
- [3] 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]. *Water Res*, 1997, 31 (6): 1430 - 1438
- [4] 王景峰,王暄,季民,等. 聚糖菌颗粒污泥基于胞内储存物质的同步硝化反硝化[J]. *环境科学*, 2006, 27 (3): 81 - 85
- [5] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 (第 3 版) [M]. 北京:中国环境科学出版社,1997.
- [6] Zeng R J, Yuan Z, Keller J. Enrichment of denitrifying glycogen accumulating organisms in anaerobic/anoxic activated sludge system[J]. *Biotechnol Bioeng*, 2003, 81 (4): 397 - 404
- [7] 刘延华. 活性污泥糖类物质含量与其除磷能力的关系[J]. *环境科学学报*, 1999, 19 (1): 16 - 21
- [8] 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
- [9] Mino T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process[J]. *Water Res*, 1998, 32 (11): 3193 - 3207.

电话: (022) 27406057

E-mail: jimin@tju.edu.cn

收稿日期: 2006 - 04 - 04

珍惜水,保护水,实现人与自然和谐共处
贯彻执行《中华人民共和国水土保持法》