

# 好氧颗粒污泥中丝状微生物生长研究

汪善全, 孔云华, 原媛, 董小磊, 竺建荣\*

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

**摘要:**通过在序批式摇床反应器(SSBR)中分别接种絮状活性污泥与厌氧颗粒污泥来处理含盐及淡水 2 种废水并培养好氧颗粒污泥,研究好氧颗粒污泥中丝状微生物的过度生长及可行的控制措施.结果表明,进水水质与接种污泥类型都会影响颗粒污泥中丝状微生物的生长.同是接种好氧絮状污泥的 R1、R3,由于 R1 进水为含盐废水而 R3 为淡水,R1 中颗粒污泥丝状化程度低于 R3,而接种厌氧颗粒污泥并处理含盐废水的 R2 颗粒污泥丝状化程度最低.当好氧颗粒污泥外部出现明显丝状微生物过度生长时,各反应器中颗粒污泥平均丝状化程度  $\Delta$  分别达到  $\Delta_{R1} = 1.4$ 、 $\Delta_{R2} = 1.2$  及  $\Delta_{R3} = 2.0$ .对各反应器颗粒污泥中丝状微生物进行鉴定,R1 颗粒中丝状微生物主要为 *Eikelboom* 0092 及 *Nocardia* spp.,R2 中主要为 *Fungi* spp. 及 *Nocardia* spp.,R3 中主要为 *S. natans* 及 *H. hydrossis*,这几种类型丝状微生物一般出现在污泥龄长、溶解氧浓度低及基质易降解的环境中,但由于好氧颗粒污泥结构不同于传统活性污泥,试验通过控制污泥负荷、污泥龄及曝气量等并不能有效控制颗粒中丝状微生物的过度生长.试验将各反应器进水基质由易降解的葡萄糖配水换为难生物降解废水时,能快速有效地控制颗粒污泥中丝状微生物的过度生长.

**关键词:**好氧颗粒污泥;丝状微生物;SSBR

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)03-0696-07

## Filamentous Overgrowth in Aerobic Granules

WANG Shan-quan, KONG Yun-hua, YUAN Yuan, DONG Xiao-lei, ZHU Jian-rong

(School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Filamentous overgrowth has been observed after aerobic granulation in shaking sequencing batch reactors (SSBR). The factors affecting the filamentous overgrowth in aerobic granules and its possible control methods were investigated. It was found that both the influent and sludge inoculation largely influenced the filamentous overgrowth in aerobic granules. With the same activated sludge inoculation, the filamentous overgrowth in R3 treating fresh wastewater was much more severe than that in R1 treating saline wastewater. The filamentous overgrowth in R2 was the least among the three reactors, which was inoculated anaerobic granules and treated saline wastewater. When the filamentous overgrowth happened at the outer aerobic granules,  $\Delta$  referring the degree of filamentous overgrowth achieved  $\Delta_{R1} = 1.4$ ,  $\Delta_{R2} = 1.2$  and  $\Delta_{R3} = 2.0$ , respectively. Filamentous identification showed that the filamentous microorganisms in R1 mainly composed of *Eikelboom* 0092 and *Nocardia* spp., *Fungi* spp. and *Nocardia* spp. in R2, *S. natans* and *H. hydrossis* in R3. The identified filamentous microorganisms likely occurred in conditions with long SRT, low dissolved oxygen and biodegradable substrates. However, due to the fact that filamentous overgrowth in aerobic granules initiated in the inner part of the granules and acted as frameworks with rod-shape or coccoid bacteria entrapping into in the granulation period, various strategies effectively in dealing with conventional bulking problems including shorting SRT, changing organic loading rate and enhancing aeration *et al*, could not effectively inhibit the filamentous growth in aerobic granules. The filamentous overgrowth was ultimately controlled through changing the substrate from synthetic glucose-rich wastewater to non-biodegradable wastewater.

**Key words:** aerobic granules; filamentous overgrowth; SSBR

目前,好氧颗粒污泥技术已成为国内外研究的热点,它是将生物自絮凝原理应用于好氧反应系统使传统活性污泥在一定工艺条件下实现颗粒化.好氧颗粒污泥具有沉降性好<sup>[1]</sup>、抗冲击负荷<sup>[2]</sup>、可在反应器中滞留较高生物量并能有效脱氮除磷<sup>[3,4]</sup>等优点.但好氧颗粒污泥的培养与应用存在颗粒污泥稳定性问题,其中一个重要引发因素就是颗粒中丝状微生物的生长<sup>[5]</sup>.目前已有大量文献报道了颗粒污泥中出现丝状微生物的生长<sup>[6~10]</sup>,但针对这一问题开展的研究还鲜有报道,并且好氧颗粒污泥自身独特结构使得颗粒污泥中丝状微生物的生长特性有别

于传统活性污泥中丝状微生物的生长.本试验采用不同进水及接种污泥,通过一定的运行条件实现反应器中好氧颗粒污泥丝状微生物的过度生长,并对过度生长的丝状微生物进行了鉴定和生长控制,在此基础上研究并探讨了好的氧颗粒污泥中丝状微生物的生长规律及其可行的控制措施.研究结果对好氧

收稿日期:2007-03-20;修订日期:2007-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50478093);北京师范大学研究基金项目

作者简介:汪善全(1982~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制工程,E-mail: wangshanquan1982@gmail.com

\* 通讯联系人,E-mail: zjrtshua@sohu.com

颗粒污泥的实际应用具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 试验水质及装置

试验进水采用淡水废水及对微生物具有抑制作用的高含盐废水 2 种,进水基质在试验前期为人工葡萄糖配水,总 COD 控制在  $900\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右.含盐废水通过向配得的淡水废水中直接投加定量 NaCl 得到,盐度小于  $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl 时,每次配水盐度增长梯度为  $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl,以后每次盐度增长梯度为  $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl 或  $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl,反应器中盐度变化的具体情况见文献[11].当反应器系统中盐度达到  $13\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl 后,由于颗粒污泥中丝状微生物的过度生长,试验将进水基质由葡萄糖人工配水改为难生物降解 Vc 废水,此时进水总 COD 控制在  $1\,200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右并将盐度稳定在  $35\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  左右.

试验装置为序批式摇床反应器(SSBR)<sup>[12]</sup>,如图 1 所示.试验设 3 个 SSBR 反应器,分别为 R1、R2 及 R3.R1、R2 进水为含盐废水,反应器接种污泥分别为好氧絮状污泥及厌氧颗粒污泥.R3 进水为淡水,接种污泥为好氧絮状污泥.各反应器主体为有效容积 0.5 L 的三角锥形瓶.反应装置采用序批式操作:周期为 12 h,进水 5 min,曝气 710 min,沉降 1 min,出水 4 min.反应装置采用恒温控制,温度为  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,曝气采用振荡充氧,振荡频率为 160 r/min.

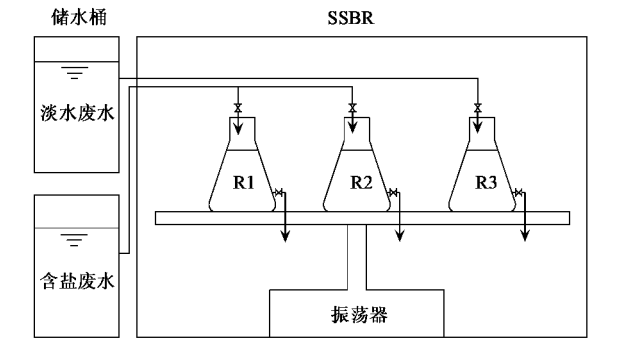


图 1 试验装置

Fig.1 Schematic representation of the bioreactor

1.2 分析方法

污泥观察采用 Olympus 光学显微镜及配套的数码相机进行拍照.好氧颗粒污泥中丝状微生物电镜观察参照文献[13],丝状微生物鉴定主要参照文献[14].

为描述颗粒污泥中丝状微生物过度生长程度,试验引入了“颗粒丝状化程度  $\Delta$ ”这一概念,其测定

方法为:取反应器中颗粒污泥置于盛水的培养皿中使其充分展开,分别测定各颗粒污泥带毛边的直径  $D$  与不计毛边的颗粒粒径  $d$ ,则颗粒丝状化程度  $\Delta = D/d$ . $\Delta$  值越大则颗粒污泥中丝状微生物生长越严重.

GC/MS 分析采用美国 Finnigan 公司 Trace2000 型,Vc 废水样品分析条件为:GC,气相升温条件起始温度  $50^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为  $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,升温至  $290^{\circ}\text{C}$  并保持 10 min,载气为  $\text{N}_2$ ,流速为  $1\text{ mL}/\text{min}$ ;MS,电离方式为 EI 源,电子能源为  $70\text{ eV}$ ,离子源温度为  $200^{\circ}\text{C}$ ,进样口温度为  $250^{\circ}\text{C}$ ,离子扫描范围  $m/z$  为  $35 \sim 1\,000$ ,进样量  $1\text{ }\mu\text{L}$  不分流进样.

1.3 试验启动运行

试验运行分 3 个阶段:颗粒污泥形成阶段 P I ( $1 \sim 15\text{ d}$ )、颗粒污泥中丝状微生物过度生长阶段 P II ( $16 \sim 40\text{ d}$ )及颗粒污泥中丝状微生物生长控制阶段 P III ( $41 \sim 70\text{ d}$ ).各反应器运行条件及在各阶段颗粒丝状化程度如表 1 所示.表 1 中  $\Delta$  值为反应器在各运行阶段末期测定.

表 1 反应器运行比较

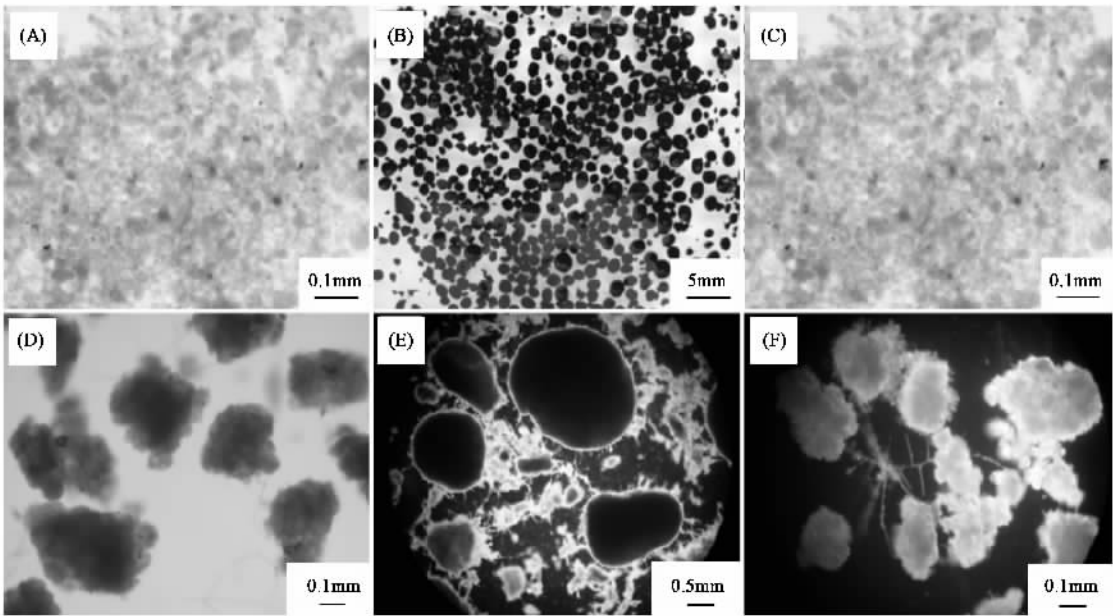
Table 1 Configuration of the reactors

| 阶段    | 项目                                | R1               | R2               | R3               |
|-------|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| P I   | 进水                                | 含盐废水             | 含盐废水             | 淡水废水             |
|       | 接种污泥                              | 普通活性污泥           | 厌氧颗粒污泥           | 普通活性污泥           |
|       | 接种量/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ | 4.8              | 10.6             | 3.8              |
|       | $\Delta$                          | $< 1.05$         | $< 1.05$         | $< 1.25$         |
| P II  | $\Delta$                          | $1.20 \sim 1.50$ | $1.05 \sim 1.30$ | $1.50 \sim 2.50$ |
| P III | $\Delta$                          | $< 1.10$         | $< 1.05$         | $< 1.15$         |

2 结果与讨论

2.1 SSBR 中好氧颗粒污泥的形成

试验中各反应器在污泥接种并运行一段时间后实现了很好的污泥好氧颗粒化,但由于接种污泥的不同,各反应器污泥颗粒化进程不一.接种好氧絮状污泥的 R1、R3 在反应器运行 1 周后即实现了污泥颗粒化,短于一般文献报道<sup>[1,10]</sup>在普通 SBR 反应器中所需的  $15 \sim 30\text{ d}$ .接种厌氧颗粒污泥的 R2 首先经历了厌氧颗粒污泥的解体和向好氧絮状污泥转变的过程,原厌氧颗粒污泥核及部分解体后的颗粒碎片成为后续好氧颗粒化的晶核,R2 在试验的 P I、P II 阶段仍存在少量絮状污泥.R2 中厌氧颗粒污泥向好氧颗粒污泥的转变过程与胡林林等<sup>[15]</sup>的报道结果一致.图 2 所示为各反应器接种污泥及其 P I 末期好氧颗粒污泥.



A、B、C 分别为 R1、R2、R3 的接种污泥，D、E、F 分别为 R1、R2、R3 中好氧颗粒污泥

图 2 各反应器接种污泥及形成的好氧颗粒污泥

Fig.2 Microscopic observation of seed sludge (A, B, C) granular sludge (D, E, F) in R1, R2 and R3

试验中，观察各反应器中颗粒污泥形成过程发现：同一接种污泥的反应器，如 R1、R3，进水水质对其好氧污泥颗粒化的影响不明显，这可能是因为 SSBR 反应器中污泥颗粒化时间太短（1 周左右），但水质对形成的好氧颗粒污泥性质影响较大，特别是颗粒中丝状微生物的生长；接种污泥类型则同时影响好氧污泥颗粒化及形成的颗粒污泥性质。在 P I 阶段末期，R1、R3 反应器均实现完全颗粒化，颗粒粒径分布较均，为 0.3 ~ 0.5mm，但由于 R1、R3 中进水水质的不同导致 2 反应器中颗粒污泥沉降速度及颗粒污泥中丝状微生物的生长程度不同。处理含盐废水（盐度在 10 g•L<sup>-1</sup> NaCl）的 R1 中颗粒污泥平均沉降速度为 45 m•h<sup>-1</sup> 高于处理淡水废水 R3 中颗粒污泥的 37.5 m•h<sup>-1</sup>，这一差别可能是因为 R1 中颗粒污泥的无机盐含量较高。R1 中颗粒污泥丝状化程度低于 R3，R1 中颗粒丝状化程度  $\Delta < 1.05$ ，但 R3 中部分颗粒污泥  $\Delta$  达到 1.2。接种厌氧颗粒污泥并处理含盐废水的 R2 与 R1、R3 的污泥颗粒化过程不同，并由此导致其形成的颗粒污泥性质不同。R2 中厌氧颗粒污泥在反应器启动后先后经历了厌氧颗粒污泥的解体和向好氧絮状污泥转化的 2 个过程，R2 中好氧颗粒污泥有 3 种：以厌氧颗粒污泥核作为新核的好氧颗粒、厌氧颗粒污泥碎片为新核的好氧颗粒以及完全由转化后的好氧絮状污泥形成的好氧颗粒，其形成速度依次是前者快于后者，并且丝状微生物

在前 2 种好氧颗粒中很少出现，这使 R2 中好氧颗粒污泥  $\Delta$  在 3 个反应器中处于最低水平，并且其颗粒污泥的平均沉降速度达到 51.4 m•h<sup>-1</sup>。试验中，各反应器污泥的好氧颗粒化过程不同：R2 中好氧颗粒污泥主要以厌氧颗粒泥核及其碎片为泥核进一步生长，没有观察到丝状微生物在这些颗粒中出现的如 Beun 等<sup>[1]</sup>描述的构架作用，但形成的颗粒污泥存在丝状微生物；R1、R3 中颗粒污泥形成过程相似，如图 3 所示，在整个颗粒污泥形成过程中丝状微生物都起着至关重要的构架和搭接作用，并且由于 SSBR 缺乏普通 SBR 曝气时产生的对颗粒污泥中丝状微生物的剪切作用，因此，接种好氧絮状污泥的 SSBR 中颗粒污泥丝状微生物生长较普通 SBR 严重，但在颗粒污泥形成初期，丝状微生物的构架、搭接作用以及 SSBR 中规则的水力流态都加速了反应器中污泥好氧颗粒化的进程。

2.2 颗粒污泥中丝状微生物的过度生长

试验中，进水水质及接种污泥类型都影响颗粒污泥中丝状微生物的生长。但 SSBR 中规则的水力流态、缺乏因曝气产生的剪切作用等因素可能是导致 SSBR 中颗粒污泥丝状微生物过度生长的主要原因。P II 初期，各反应器中培养得到的颗粒污泥内部都出现了一定程度丝状微生物的过度生长，图 4 为典型的出现丝状微生物过度生长并经载玻片压平后的颗粒污泥照片，但此时丝状微生物还未在颗粒污

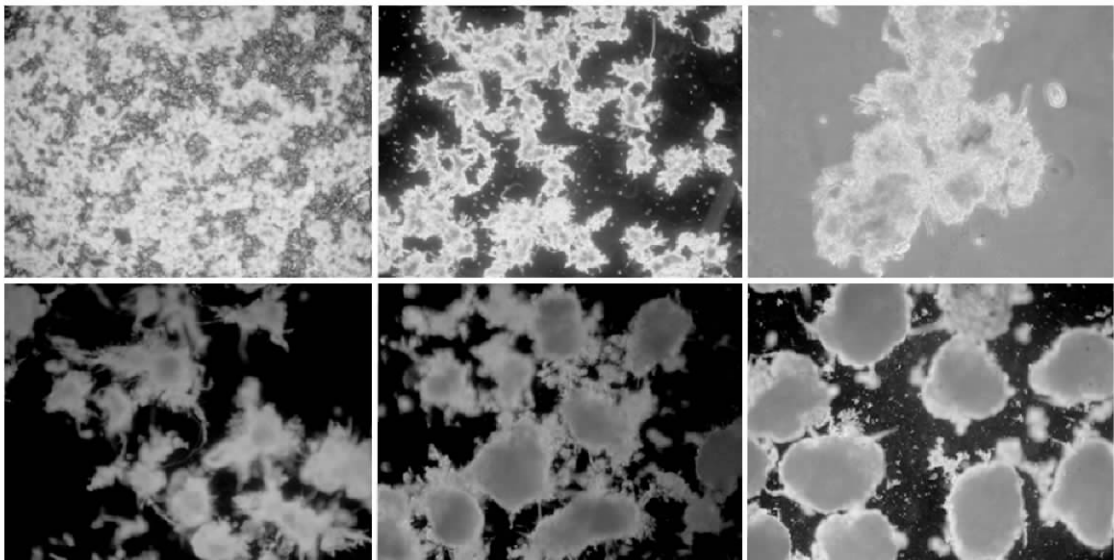
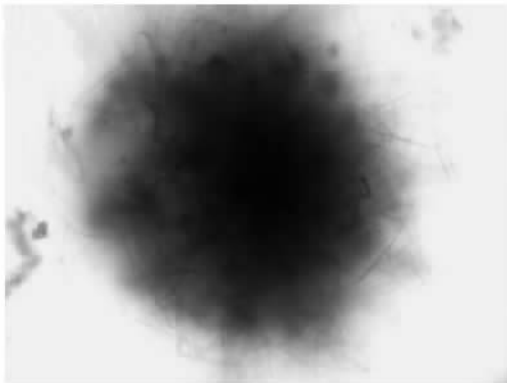


图 3 SSBR 反应器中以絮状污泥接种时好氧颗粒污泥形成过程

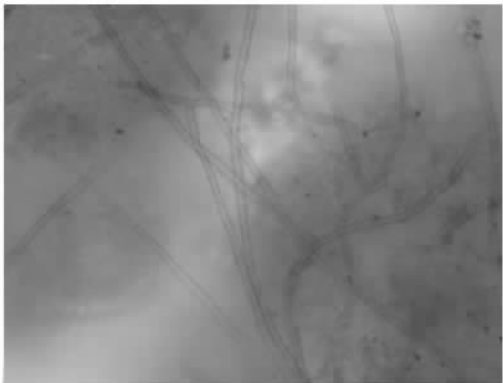
Fig.3 Microscopic observation of the aerobic granulation in SSBR with activated sludge inoculation

泥外部大量出现.试验运行到 PⅡ 末期,各反应器中好氧颗粒污泥外部出现了明显的丝状微生物过度生长,颗粒污泥  $\Delta$  随之增大,各反应器中颗粒污泥平均  $\Delta$  值分别达到  $\Delta_{R1} = 1.4$ 、 $\Delta_{R2} = 1.2$  及  $\Delta_{R3} = 2.0$ .

为研究颗粒污泥中丝状微生物的生长特性并寻求丝状微生物过度生长的控制措施,试验对各反应器中颗粒污泥丝状微生物参照文献[14]的方法并结合电镜进行了鉴定和观察,结果如图 5~图 7 所示.



(A)  $\times 10$



(B)  $\times 40$

图 4 好氧颗粒污泥内部出现的丝状微生物过度生长

Fig.4 Filamentous overgrowth within aerobic granulation

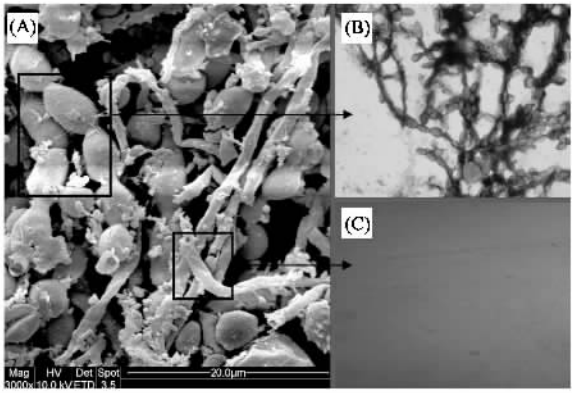
R1 中颗粒污泥丝状微生物[图 5(A)]主要为 *Eikelboom* 0092[图 5(B)]及 *Nocardia* spp.[图 5(C)]2 种,其中 *Eikelboom* 0092 占绝对优势.一般在厌-缺-好氧交替并且污泥龄较长的系统中易出现 *Eikelboom* 0092 型丝状微生物, *Nocardia* spp. 一般在易降解基质并且污泥龄长的系统中出现<sup>[16]</sup>,本试验 R1 中好氧颗粒污泥龄为 48 d.

R2 反应器中丝状微生物[图 6(A)]主要为 *Fungi* spp.[图 6(B)]及少量 *Nocardia* spp.[图 6(C)]

共同组成.其中, *Fungi* spp. 一般在 25℃ 左右、pH 为 6.5~7.0 的潮湿环境下易出现大量生长,本试验所设运行条件与此相合.目前很少有文献报道在普通活性污泥系统中发现真菌的过度生长,但在好氧颗粒污泥中已有报道<sup>[9,10]</sup>.

R3 中丝状微生物[图 7(A)]主要为 *S. natans* [图 7(B)]及 *H. hydrossis* [图 7(C)]. *S. natans* 及 *H. hydrossis* 一般在低溶解氧、易降解基质中出现<sup>[16]</sup>.

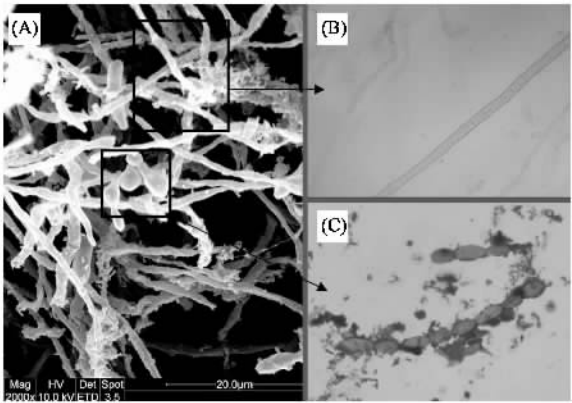
由鉴定结果可知:丝状微生物生长最多的 R1、



(A) 颗粒污泥丝状微生物电镜照片;(B) *Eikelboom* 0092 型纳氏染色;(C) *Nocardia* spp.油镜观察

图 5 R1 中颗粒污泥丝状微生物

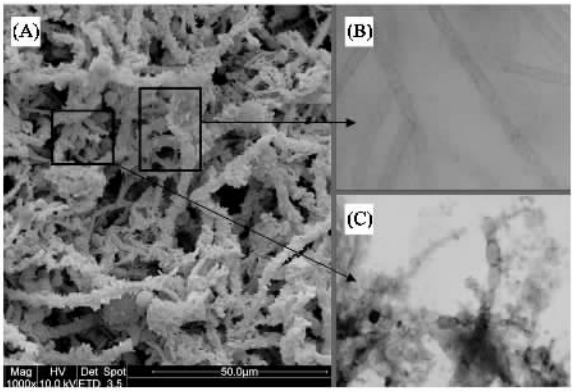
Fig.5 Filamentous microorganisms of aerobic granules in R1



(A) 颗粒污泥丝状微生物电镜照片;(B) *Fungi* spp.观察;  
(C) *Nocardia* spp.纳氏染色

图 6 R2 中颗粒污泥丝状微生物

Fig.6 Filamentous microorganisms of aerobic granules in R2



(A) 颗粒污泥中丝状微生物电镜照片;(B) *S. natans* 油镜观察;  
(C) *H. hydrossis* 纳氏染色

图 7 R3 中颗粒污泥丝状微生物

Fig.7 Filamentous microorganisms of aerobic granules in R3

R3 中颗粒污泥丝状微生物一般出现在污泥龄长、溶解氧浓度低及基质易降解的环境中,但较长污泥龄及颗粒污泥内部溶解氧浓度低是由好氧颗粒污泥结构决定的.另外,丝状微生物生长较少的 R2 中出现的是普通活性污泥法中很少出现过度生长的真菌.因此,好氧颗粒污泥由于其自身结构、性质不同于传统活性污泥系统使得好氧颗粒污泥中丝状微生物的生长也与传统活性污泥中丝状微生物的生长存在很大差异,这就可能导致颗粒污泥丝状微生物过度生长的控制措施与传统活性污泥系统中丝状微生物的控制措施存在很大区别.

2.3 颗粒污泥中丝状微生物的控制

反应器运行 30 d 后,试验开始进行颗粒污泥丝状微生物的生长控制研究.一般情况下,传统活性污泥系统中丝状微生物的过度生长可能由易降解基质、低污泥负荷、低溶解氧、长污泥龄及氮磷缺乏等引起,因此,控制传统活性污泥系统中丝状微生物过度生长一般采取调节系统中污泥负荷、污泥龄、曝气量、氮磷平衡等措施.但在试验中,各反应器中污泥负荷高于丝状菌污泥膨胀的负荷范围 [ $< 0.1 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ]<sup>[17]</sup>;曝气也很充足,反应器中溶解氧在  $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右;好氧颗粒污泥由于自身结构特征导致其污泥龄较传统活性污泥龄长;并且,试验进水为人工配水从而能够保证氮磷平衡.目前,关于丝状微生物生长的引发因素及可能控制措施还不清楚<sup>[5]</sup>,因此,试验尝试了各种控制措施:R1 污泥龄强制调整到 5 d,增加 R2 进水 COD 以提高 R2 中污泥负荷,将 R3 进水由葡萄糖换为实际  $V_c$  废水,同时将各反应器的振荡频率均由 160 r/min 提高到 200 r/min 以提高曝气量.实验观察到 R1、R2 中颗粒污泥丝状微生物进一步过度生长,  $\Delta$  值也在增大.但丝状微生物生长最多的 R3 在基质变换后其颗粒中丝状微生物停止了进一步生长,  $\Delta$  值也稳定在 2.0 左右.因此,试验在 PⅡ 末期迅速将各反应器进水基质由葡萄糖变换为  $V_c$  废水.进水基质变换后,各反应器中颗粒污泥丝状微生物的过度生长均得到了控制,并且颗粒污泥在丝状微生物停止疯长后颗粒粒径也在增大,各反应器实现稳定运行后都能够有效处理  $V_c$  废水<sup>[11]</sup>.PⅢ 末期, R1 中好氧颗粒粒径为 0.5 ~ 2 mm (图 8A)、R2 中粒径为 1.5 ~ 3 mm (图 8B)、R3 为 1.5 ~ 2.5 mm (图 8C),各反应器中  $\Delta$  值分别降到  $\Delta_{R1} < 1.1$ 、 $\Delta_{R2} < 1.05$  及  $\Delta_{R3} < 1.15$ .

PⅢ 阶段运行结果表明:颗粒污泥出现丝状微生物过度生长后,进水基质由易降解人工配水变换

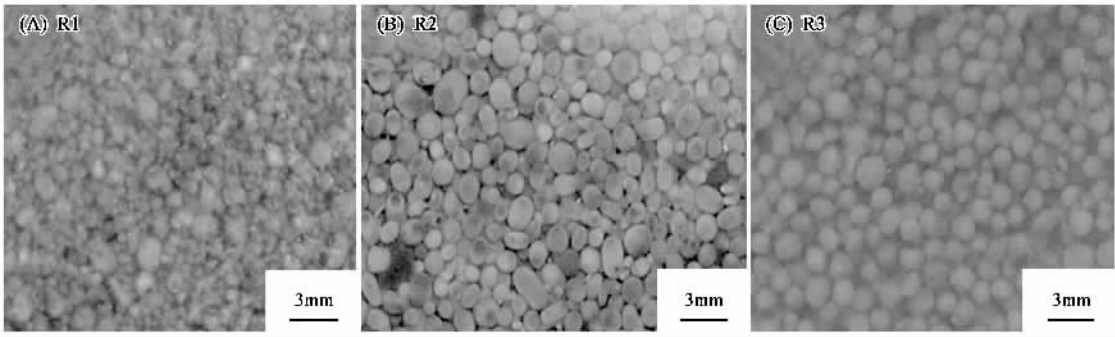


图 8 各反应器 PⅢ阶段颗粒污泥照片

Fig.8 Morphology of granular sludge in reactors at PⅢ

为 Vc 废水可以对颗粒污泥丝状微生物的过度生长进行有效控制,但镜检发现,丝状微生物仍在颗粒污泥中少量存在.为进一步了解基质如何改变来实现控制颗粒污泥中丝状微生物生长,试验对 Vc 废水进行了 GC/MS 分析,图 9 为 Vc 废水色谱图.由 GC/MS 分析获得的质谱数据经计算机标准化合物谱库中检索并参照 Vc 生产过程进行鉴定,结果表明 Vc 废水中有机物主要为 10 个 C 以上的长直链或是苯环结

构的化合物,属于难生物降解物.颗粒污泥中丝状微生物在基质改变后,由于丝状及非丝状微生物在难生物降解废水中最大生长率都较小,使得颗粒污泥内部由于传质限制造成的丝状微生物在低基质浓度环境因其较大比表面积而具有的优势变得不明显,这可能是此试验中将葡萄糖人工配水改为难生物降解的 Vc 废水后颗粒污泥中丝状微生物过度生长得到控制的原因.

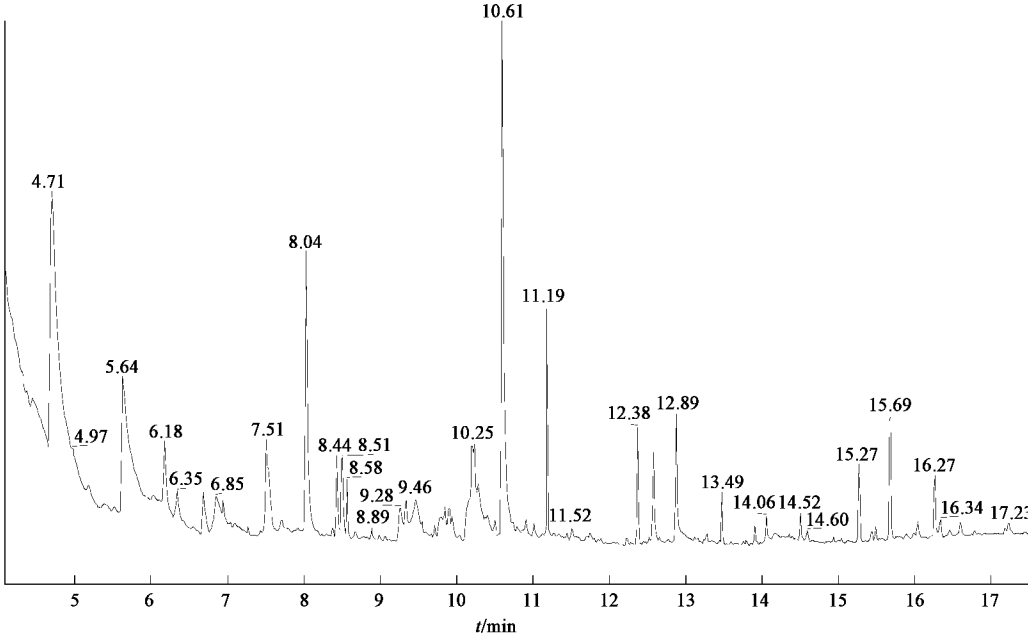


图 9 Vc 废水 GC-MS 分析

Fig.9 Analysis of organic compounds in Vc wastewater by GS-MS

3 结论

(1)进水水质与接种污泥类型都会影响颗粒污泥中丝状微生物的生长.同是接种好氧絮状污泥的 R1、R3,由于 R1 进水为含盐废水而 R3 为淡水,R1

中颗粒污泥丝状化程度低于 R3,而接种厌氧颗粒污泥并处理含盐废水的 R2 颗粒污泥的丝状化程度最低.

(2)当好氧颗粒污泥外部出现明显丝状微生物过度生长时,各反应器中颗粒污泥平均  $\Delta$  值分别达

到 $\Delta_{R1} = 1.4$ 、 $\Delta_{R2} = 1.2$ 及 $\Delta_{R3} = 2.0$ .对各反应器颗粒污泥中丝状微生物进行鉴定: R1 颗粒中丝状微生物主要为 *Eikelboom* 0092 及 *Nocardia* spp., R2 中主要为 *Fungi* spp. 及 *Nocardia* spp., R3 中主要为 *S. natans* 及 *H. hydrossis*.好氧颗粒污泥由于其自身结构、性质不同于传统活性污泥系统,使得好氧颗粒污泥中丝状微生物的生长也与传统活性污泥中丝状微生物生长存在很大差异,这就可能导致控制颗粒污泥中丝状微生物过度生长的措施应区别于传统活性污泥系统中丝状微生物的控制措施.

(3)颗粒污泥出现丝状微生物过度生长后,进水基质由易降解基质变换为难生物降解物可以对颗粒污泥丝状微生物的过度生长进行有效控制,但镜检发现,丝状微生物仍在颗粒污泥中少量存在.

参考文献:

[ 1 ] Beun J J, Hendriks A, van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic granulation in a sequencing batch reactor[J]. *Water Res*, 1999, **33**: 2283-2290.

[ 2 ] 王芳,杨凤林,张兴文,等.不同有机负荷下好氧颗粒污泥的特性[J].*中国给水排水*,2004, **20**(11):46-48.

[ 3 ] 谢珊,李小明,曾光明,等. SBR 系统中好氧颗粒污泥脱氮特性研究[J].*中国环境科学*,2004, **24**(3):355-359.

[ 4 ] Zhu J R, Liu C X, Wilderer P A. Bio-P removal profile of aerobic granular activated sludge (AGAS) from an anaerobic/aerobic SBR system[A]. In: IWA. 1st International Symposium on Aerobic Granule Sludge Workshop[C]. Germany: Munich,2004.

[ 5 ] Liu Y, Liu Q S. Causes and control of filamentous growth in aerobic granular sludge sequencing batch reactors [ J ]. *Biotechnology Advances*, 2006,**24**: 115-127.

[ 6 ] McSwain B S, Irvine R L, Wilderer P A. Effect of intermittent feedingon aerobic granule structure[J]. *Water Sci Technol*, 2004, **49**: 19-25.

[ 7 ] Schwarzenbeck N, Borges J M, Wilderer P A. Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2005,**66**: 711-718.

[ 8 ] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor[J]. *J Appl Microbiol*, 2001,**91**: 168-175.

[ 9 ] Wang F, Liu Y H, Yang F L, *et al.* Study on the stability of aerobic granules in SBAR-effect of superficial upflow air velocity and carbon source[ A ]. In: IWA. 1st International Symposium on Aerobic Granule Sludge Workshop[C]. Germany: Munich, 2004.

[ 10 ] Morgenroth E, Sherden T, van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic Granular Sludge in a Sequencing Batch Reactor[J]. *Wat Res*, 1997,**31**(12): 3191-3194.

[ 11 ] 汪善全,原媛,孔云华,等.好氧颗粒污泥处理高含盐废水研究[J].*环境科学*,2008,**29**(1): 145-151.

[ 12 ] Cai C, Xu F, Liu J, *et al.* Cultivation of aerobic granules in a sequential batch shaking reactor[J]. *Environmental Technology*, 2004, **25**: 937-940.

[ 13 ] 史晓慧,刘芳,刘虹,等.进料负荷调控培养好氧颗粒污泥的试验研究[J].*环境科学*,2007,**28**(5): 1026-1032.

[ 14 ] Eikelboom D H. Filamentous organisms observed in activate sludge [J]. *Water Res*, 1975,**8**: 201-208.

[ 15 ] 胡林林,王建龙,文湘华,等. SBR 中厌氧颗粒污泥向好氧颗粒污泥的转化[J].*环境科学*, 2004,**25**(4): 74-77.

[ 16 ] Wanner J, Grau P. Identification of filamentous microorganisms from activated sludge: a compromise between wishes, needs and possibilities[J]. *Water Res*, 1989,**23**(7): 883-891.

[ 17 ] Knoop S, Kunst S. Influence of temperature and sludge loading on activated sludge settling, especially on *Microthrix parvicella* [J]. *Water Sci Technol*, 1998,**37**: 27-35.