

预加好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响

沈祥信^{1,2}, 李小明^{1*}, 杨麒¹, 曾光明¹, 徐文麒², 廖青¹, 郑滢¹

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 桂林矿产地质研究院, 桂林 541004)

摘要:以活性污泥曝气池中的絮状活性污泥为接种污泥, 采用人工配制的模拟生活污水, 通过观测颗粒形态和粒径的变化, 研究预先加入 15% 成熟好氧颗粒污泥对好氧颗粒污泥形成过程的影响. 对比研究发现, 2 个反应器内小颗粒 (0.1 ~ 0.3 cm) 的形成均较快, 但大颗粒的形成速度相差明显. 培养过程中还能明显观察到丝状菌缠绕和絮状污泥黏附在小颗粒表面. 反应器启动第 1、7、14 d, 污泥平均体积粒径分别从 0.10、0.16 cm 上升到 0.23、0.30 cm, 最终达到 0.28、0.43 cm. 研究结果表明, 预先加入 15% 成熟好氧颗粒污泥, 能加速好氧颗粒污泥在反应器内形成.

关键词:好氧颗粒污泥; 粒径分析; SBR

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2467-06

Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Mature Aerobic Granules

SHEN Xiang-xin^{1,2}, LI Xiao-ming¹, YANG Qi¹, ZENG Guang-ming¹, XU Wen-xin², LIAO Qing¹, ZHENG Ying¹

(1. College of Environmental Science & Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin 541004, China)

Abstract: The effects of additional mature aerobic granules to the formation of aerobic granules were investigated by inoculating activated sludge and feeding synthetic municipal wastewater. The change of granular configuration and diameter was observed during the cultivation process. The average sludge volume diameter rose from 0.10, 0.16 cm to 0.23, 0.30 cm, and finally was up to 0.28, 0.43 cm at the 1st, 7th and 14th day respectively. Small granules with diameter from 0.1 to 0.3 cm had a relative rapid formation speed in both reactors, whereas, the differences of the formation speed of big granules were obvious. There were filamentous bacteria winging and floc sludge adhering to the surface of small granules through cultivation process. The results showed aerobic granules could form more rapidly when 15% mature aerobic granules were put into the reactor.

Key words: aerobic granules; diameter size analysis; SBR

好氧颗粒污泥是近年来发现的在好氧条件下微生物通过自身细胞固定化形成的颗粒, 由于其具有规则的、密实的、坚固的微生物结构, 良好的沉降性能, 较高的微生物量, 以及对有机负荷冲击的应变能力强、能够实现同步脱氮除磷等优点, 具有较好的研究价值和应用前景, 受到了国内外学者的广泛关注^[1~3].

近年来国内外有关好氧颗粒污泥的研究报道众多, 但主要集中在好氧颗粒污泥的特性^[4,5]、脱氮除磷机理^[6,7]以及形成机理^[8,9]的研究上. 好氧颗粒污泥的培养周期很长, 且基本上是由接种普通活性污泥培养出来的, 也有用厌氧颗粒污泥成功培养出好氧颗粒污泥的报道, 但一般从反应器启动到培养出成熟的好氧颗粒污泥需要 1 ~ 2 个月^[10,11]. 如何快速地培养出好氧颗粒污泥已成为其实际应用的一大障碍. 对于预先加入部分好氧颗粒污泥对好氧颗粒污泥形成的影响还未见报道. 本研究采用人工模拟废水, 以 SBR 中好氧颗粒污泥的形成过程为对象, 考

察了预先加入 15% 好氧颗粒污泥和不加好氧颗粒污泥对反应器内好氧颗粒污泥形成的影响, 同时对不同阶段反应器内污泥状态进行显微观察, 在好氧颗粒污泥的形成机理上进行一定的探讨, 以期对好氧颗粒污泥形成的机理及实际应用提供一些有益参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置及方法

试验装置如图 1 所示, SBR 反应器为有机玻璃制成, 长和宽均为 18.0 cm, 高 35.0 cm, 总容积 11.3 L, 有效容积 10 L, 用气泵和曝气沙头供气, 通过转子流量计控制曝气量. SBR 反应器在室温下运行, 各阶段操作变化都通过时间控制器进行控制. 反应器每

收稿日期: 2006-11-17; 修订日期: 2006-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50478054); 长沙市科技计划重点项目 (K051132-72)

作者简介: 沈祥信 (1981 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理, E-mail: sxxandy@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xmli@hnu.cn

天运行 5 个周期,每周期时间为 3.5 h,其中进水 10 min,曝气运行 120 min,静置缺氧 60 min,二次曝气、沉淀及排水 20 min.其余时间闲置.每周期排水 5 L,即反应器每周期处理水量为 5 L.

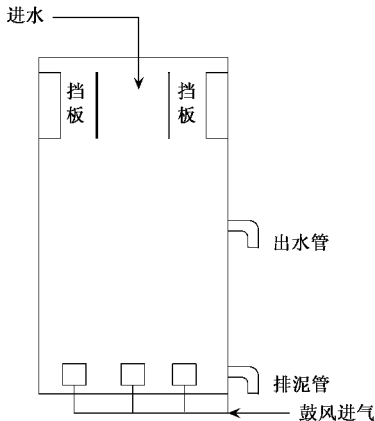


图 1 试验装置示意
Fig.1 Schematic diagram of the experiment installation

1.2 试验用水

试验用水采用人工模拟废水^[12],以葡萄糖为碳源,其组成见表 1.

表 1 人工模拟废水组成/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Components of the synthetic wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
成分	质量浓度	成分	质量浓度
葡萄糖	500 ~ 550	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{NH}_4^+ -\text{N}(\text{NH}_4\text{Cl})$	25	$\text{MnCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{PO}_4^{3-} -\text{P}(\text{K}_2\text{HPO}_4\cdot \text{KH}_2\text{PO}_4)$	5	$\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.5
CaCl_2	42	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	60	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.15
NaHCO_3	130	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	0.18
EDTA	30		

1.3 接种污泥

普通活性污泥取自长沙市第二污水处理厂二沉池,好氧颗粒污泥为本实验室自行培养^[13],驯化后的好氧颗粒污泥 SVI_{30} 为 18.1 mL/g, SVI 为 29.2 mL/g.反应器 R1 接种普通活性污泥,R2 接种污泥干重分别占 15% 和 85% 的好氧颗粒污泥和普通活性污泥.

1.4 分析项目和方法

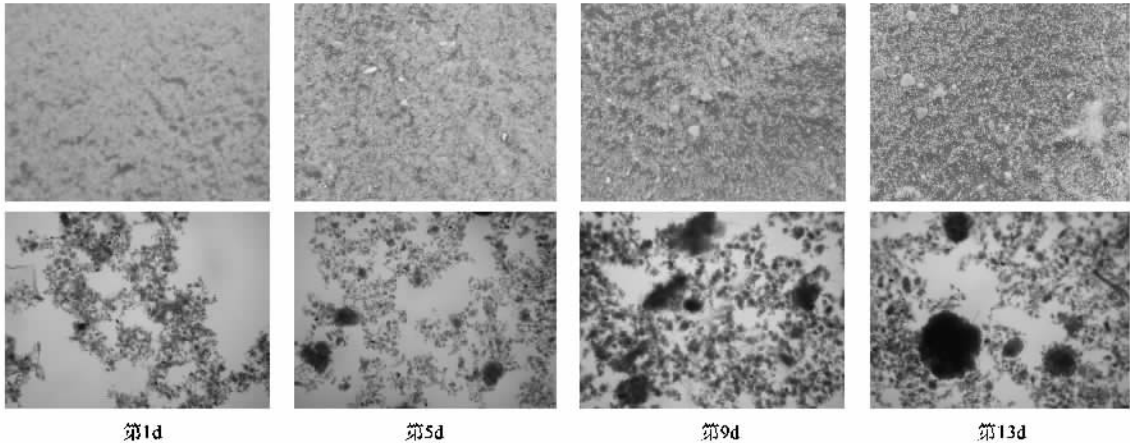
COD 采用微波消解滴定法, $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 采用纳氏试剂分光光度法, $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 采用酚二磺酸分光光度法, SV 、 SVI 、 MLSS 、 MLVSS 采用标准方法^[14];污泥形态通过普通光学显微镜观察.粒径分析采用 Mastersizer2000 粒度分析仪.

2 结果与分析

2.1 污泥颗粒外观形态变化

培养周期 4 个阶段 2 个反应器内颗粒污泥形态变化见图 2、3.接种前普通活性污泥呈黑色絮状体,沉降性较差,接种污泥第 1 d,反应器内整体呈黑色,R2 内能明显看到成熟好氧颗粒污泥均匀分布;R1、R2 内污泥平均体积粒径分别为 100.8、163.6 μm .40 倍显微镜下观察,R2 内小颗粒污泥周围富集大量絮状污泥,而且还能观察到少量细小颗粒通过丝状菌相互缠绕,如图 3. 3 d 后,反应器内污泥由黑色变为深灰色,R1 反应器内细小颗粒比启动反应器时明显增多,同时也能观察到小颗粒周围富集絮状污泥.

R2 反应器内颗粒污泥粒径略有增大,且小颗粒通过丝状菌相互缠绕现象略有增加,而 R1 内则无此现象.随着反应器的运行,R1、R2 内污泥逐渐变为淡黄色,随着水力选择压力的逐步加大,R1、R2 反应

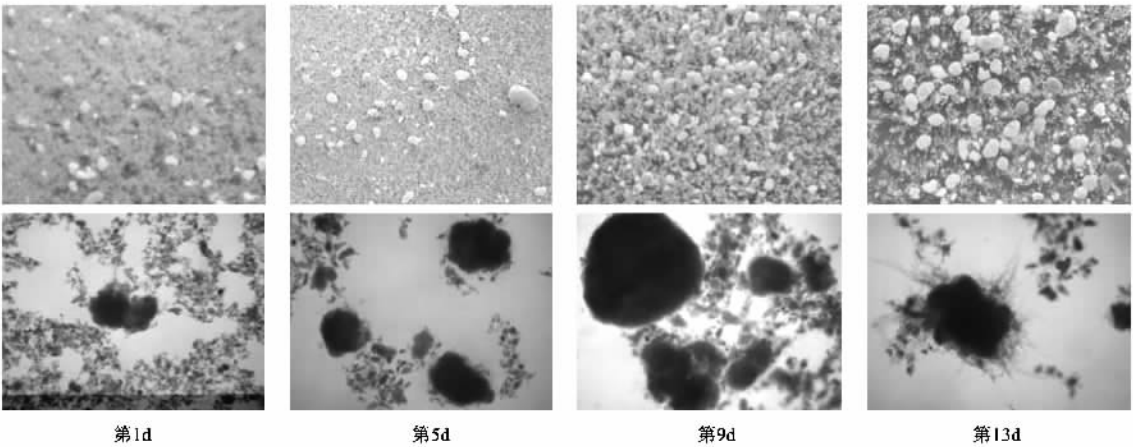


第1d 第5d 第9d 第13d

上行图:原始大小;下行图: $\times 40$ 倍

图 2 R1 内污泥形态变化

Fig.2 Configuration of granular sludge in R1



上行图:原始大小;下行图:×40 倍

图 3 R2 内污泥形态变化

Fig.3 Configuration of granular sludge in R2

器 SVI 分别达到 70.5、42.8 mL/g,较启动前有所降低.第 7 d,R1、R2 内污泥颜色变为黄褐色,颗粒平均体积粒径分别达到 230.4、272.2 μm ,此时,粒径相差不大,这可能与粒径分析过程中高速旋转使得大颗粒破碎有关,实际拍照观察结果差别相当明显.此后,2 个反应器内氧颗粒污泥粒径进一步增大,絮状污泥明显减少,R2 反应器内有一定数量的小颗粒向大颗粒转化,而 R1 内污泥大多停留在小颗粒阶段,形成的大颗粒较 R2 内少,但在显微镜下,R1 内能明显观察到小颗粒周围富集絮状污泥.第 11 d,R1 反应器内发现有少量丝状菌缠绕,如图 4.之后,随着反应器的运行,2 个反应器内颗粒粒径、浓度不断增加,且曝气时,能明显观察到颗粒污泥布满 R2 反应器,R1 则不明显.

目前,对于好氧颗粒污泥的形成机制存在几种

假说,丝状菌缠绕机制认为小颗粒可以通过丝状菌的相互缠绕逐步形成大颗粒,培养过程中能观察到这种现象但并不普遍,而且 R2 较 R1 内发生丝状菌缠绕要普遍且时间要早,这说明缠绕机制的发生还应具备一定的条件,可能与小颗粒的表面物理化学及生化性质有关,这有待进一步研究证实.微生物有附着生长的倾向并且在一定条件下会发生自凝聚,已有研究者提出自凝聚和晶核假说是好氧颗粒形成的 2 种方式^[15,16],培养过程中 2 个反应器内都能观察到小颗粒周围粘附着絮状污泥,小颗粒可以通过不断粘附固定这一过程成为大颗粒,胡林林等^[11]在用厌氧颗粒做为种泥培养好氧颗粒污泥的研究中曾指出:厌氧颗粒经历一个先破碎为小颗粒然后做为好氧颗粒形成的自凝聚原始载体的过程,其培养历时 40 d.本研究直接投加部分好氧颗粒,无须经历颗

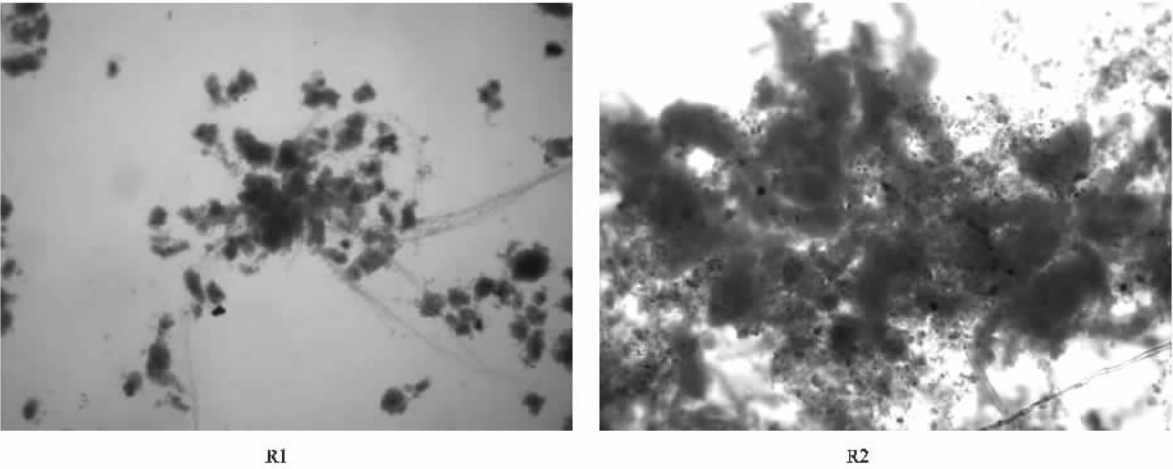


图 4 颗粒污泥通过丝状菌缠绕(×40 倍)

Fig.4 Granules combination through filamentous bacteria winging(×40 倍)

粒破碎及性质的转化,大大地缩短了好氧颗粒培养过程.

2.2 粒径分析

采用 MS2000 型颗粒粒度分析仪对污泥颗粒化过程进行分析,图 5、6 分别是 2 个反应器运行第 1、7 和 14 d 时,污泥的体积粒径分布.反应器启动第 1 d, R1、R2 内污泥平均体积粒径分别为 100.8、163.6 μm ,由于预先投加了 15% 的成熟好氧颗粒, R2 内粒径 $> 208.9 \mu\text{m}$ 和 $> 316.2 \mu\text{m}$ 的颗粒分别占到体积总量的 17.4% 和 9.9%,而 R1 内只占到 9.7% 和 4%; R2 粒径 $> 549.5 \mu\text{m}$ 占到体积总量的 5.5%,而 R1 内为 0.7 d 后,平均体积粒径分别达到 230.4、302.2 μm ,与反应器启动第 1 d 相比, R1、R2 内颗粒粒径 $< 208.9 \mu\text{m}$ 分别下降到 66.0%、48.5%,这可能说明,好氧颗粒形成过程中,小颗粒的形成是一个相对较快速的过程,预先投加颗粒对其形成速度影响不大.第 14 d, R1、R2 内颗粒平均粒径分别达到 281.2、426.0 μm ,此时,肉眼能明显观察到 R2 内大颗粒较 R1 内多,分析过程中污泥高速旋转会导致

颗粒解体,但结果仍能说明一定问题.粒径分析结果显示,第 14 d, R1、R2 内粒径 $> 316.2 \mu\text{m}$ 分别占其体积总量的 30.4% 和 54.2%, $> 630.9 \mu\text{m}$ 分别占 5.2% 和 17.9%;其中 R1、R2 内粒径在 104.7~316.2 μm 分别占其总量的 59.8% 和 40%.第 7 d, 2 个反应器内小颗粒(0.1~0.3 mm)量相差不多,分别占其体积总量的 53.3% 和 50.6%,而到第 14 d, R2 内小颗粒所占百分比比 R1 内下降得要多,且大颗粒所占百分比比较 R1 要明显多,这说明,虽然小颗粒的形成是一个相对较快的过程,但小颗粒向大颗粒的转变需要一个过程,小颗粒可能需要经过一系列的物理化学及生化反应后微生物才能进一步在其表面聚集, R2 内由于预先投加了部分成熟好氧颗粒,其中已有部分小颗粒具备进一步聚集微生物形成大颗粒的条件,因而,虽然 2 个反应器内小颗粒形成速度相差不多,但预先投加 15% 成熟好氧颗粒反应器好氧颗粒形成速度要快,尤其是较大颗粒形成速度较普通活性污泥快.

2.3 污泥物理性质变化及基质利用

本试验历时 14 d.反应器启动时污泥浓度均为 5 000 mg/L,进水 COD 浓度和容积负荷分别为 500 mg/L、2.5 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 不变.反应器中污泥浓度变化如图 7 所示,反应器启动初期, R2 内污泥沉降性能较 R1 好,排泥作用也比 R1 强,因此,运行前期 R1 污泥浓度略有下降,而 R2 内污泥浓度呈上升趋势.3 d 后,逐步缩短沉淀时间,2 个反应器内污泥随之下落.第 10 d,沉淀时间减少至 1.25 min,随后保持不变,此时污泥浓度随反应器运行略有增加,最终稳定在 5 mg/L 左右.运行过程中污泥 SVI_{30} 变化如图 8 所示,整个运行周期内,2 个反应器内 SVI 值都随反应的进行而降低,但 R2 反应器的始终较 R1 低,且反应器启动初期, R2 内污泥的沉降性要优于 R1.从图 8 可以看出,随着反应器的运行,微生物量逐步上升, R2 内生物量较 R1 要略高,这说明随着污泥颗粒化,其生物量会有所增加,颗粒化程度高的生物量也相对要高,这一结论与国内外研究报道相吻合^[16].由图 9 可知,整个运行期间,2 个反应器 COD 去除效果变化很小,稳定在 80%~90%,较好地实现了 COD 的去除.2 个反应器 COD 去除基本没差别,这可能是由于反应器内 COD 负荷较低^[2],该运行方式能较好地处理废水中 COD,受污泥形态影响不大. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化情况见图 10,每周期进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均为 25 mg/L,实际检测发现 R1 内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进水浓度在 30 mg/L 左右, R2 在 23 mg/L 左右,这可能是由于

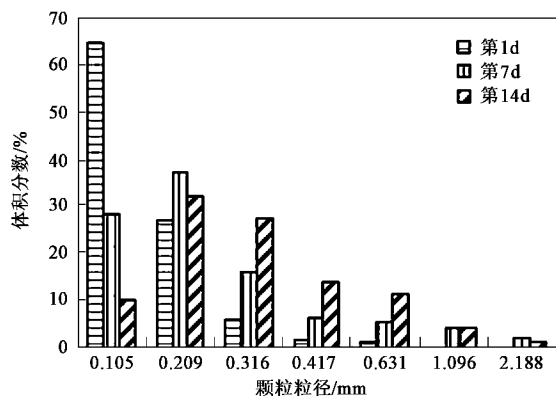


图 5 R1 内颗粒粒径分布变化

Fig.5 Diameter size distribution in R1

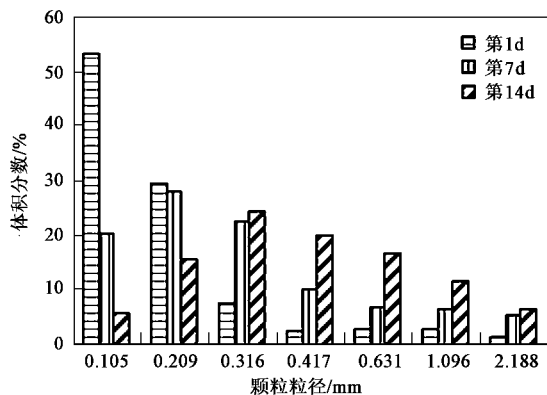


图 6 R2 内颗粒粒径分布变化

Fig.6 Diameter size distribution in R2

R1 内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 出水浓度较 R2 高,且 R2 内颗粒能迅速吸附部分进水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$.由图 11 可知,R2 出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在 0.8 mg/L 左右,而 R1 在 2.0 mg/L 左右,整个检测周期内略有下降.好氧颗粒污泥能实现同步硝化反硝化^[5],研究结果说明 R2 内颗粒污泥同步硝化反硝化性能要优于 R1.

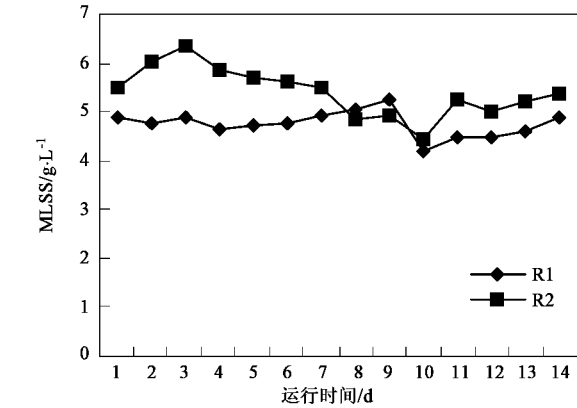


图 7 反应器中污泥浓度变化

Fig.7 Change of sludge concentration in SBR reactor

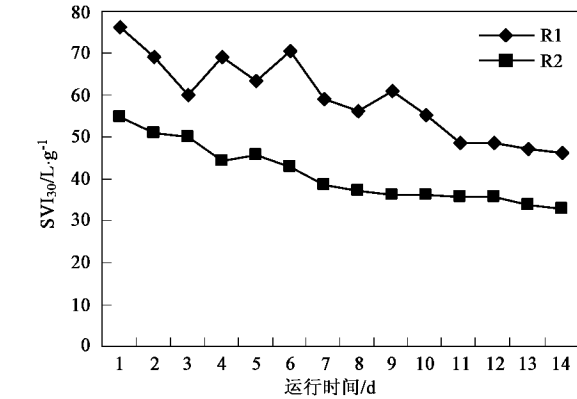


图 8 反应器中污泥 SVI_{30} 变化

Fig.8 Change of sludge SVI_{30} in SBR

3 结论

(1)以普通活性污泥做为主要接种污泥,预先投加 15% 的好氧颗粒污泥能加速好氧颗粒污泥在 SBR 中的形成.

(2)以普通活性污泥做为种泥的好氧颗粒形成可分为 2 个阶段,第 1 阶段是小颗粒(0.10 ~ 0.30 cm)的形成,该阶段历时快,第 2 阶段是小颗粒向大颗粒的转化,这一阶段历时较长.

(3)SBR 中好氧颗粒污泥的形成是自凝聚、晶核假说、丝状菌缠绕等各种机理共同作用的结果,但各

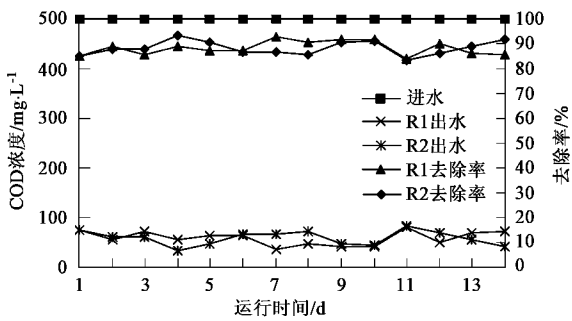


图 9 反应器内 COD 去除情况

Fig.9 COD removal in SBR

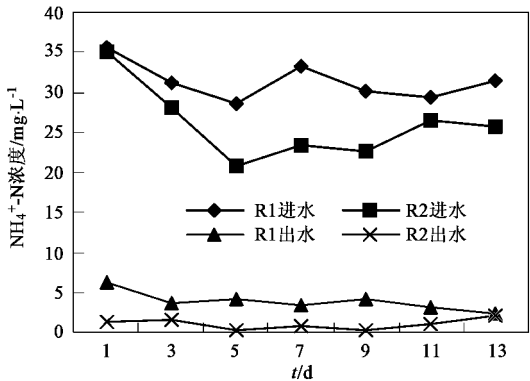


图 10 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进出水浓度

Fig.10 Influent and effluent concentration of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

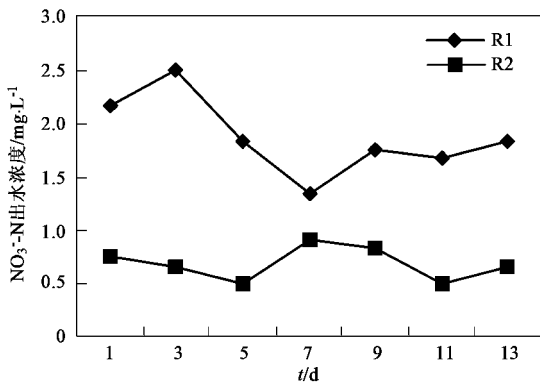


图 11 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 出水浓度

Fig.11 Effluent concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$

种机理在颗粒形成过程中作用的大小尚不清楚,有待进一步深入研究.

参考文献:

[1] Mcswain B S, Irvine R L, Widlerer P A. The influence of settling time on the formation of aerobic granules[J]. Water Science and Technology, 2004, 50 (10): 195 ~ 202.

- [2] Liu Y, Joo-Hwa Tay. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*[J]. 2004, **22**(7): 533 ~ 563.
- [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] Am Jang, Young-Han Yoon, In S Kim, *et al.* Characterization and evaluation of aerobic granules in sequencing batch reactor[J]. *J Biotechnology*, 2003, **105**(1-2): 71 ~ 82.
- [5] Li Y, Liu Y. Diffusion of substrate and oxygen in aerobic granule [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, **27**(1): 45 ~ 52.
- [6] Beun J J, Heijnen J J, van Loosdrecht M C M. N-removal in a granular sludge sequencing batch airlift reactor [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2001, **75**(1): 82 ~ 92.
- [7] Lin Y M, Liu Y, Tay J H. Development and characteristics of phosphorous-accumulating granules in sequencing batch reactor[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2003, **62**(4): 43025.
- [8] Liu Y, Wang Z W, Tay J H. A unified theory for upscaling aerobic granular sludge sequencing batch reactors [J]. *Biotechnol Adv*, 2005, **23**(5): 335 ~ 344.
- [9] Li Z H, Kuba T, Kusuda T. The influence of starvation phase on the properties and the development of aerobic granules[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, **38**(5): 670 ~ 674.
- [10] Zheng Y M, Yu H Q, Sheng G P. Physical and chemical characteristics of granular activated sludge from a sequencing batch airlift reactor[J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(2): 645 ~ 650.
- [11] 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.
- [12] Vishniac W, Santer M. The *Thiobacilli* [J]. *Bacteriological Reviews*, 1957, **21**(3): 195 ~ 213.
- [13] 杨国靖, 李小明, 曾光明, 等. 利用好氧颗粒污泥实现同时除磷脱氮[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(2): 18 ~ 22.
- [14] 国家环保局编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 125 ~ 145.
- [15] 卢然超, 张晓健, 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.
- [16] Wang Q, Du G C, Chen J. Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force[J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39**(5): 557 ~ 563.