

盐胁迫条件下好氧颗粒污泥生长模式研究

王耀东, 李志华*, 王晓昌

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要:研究了含盐量分别为 1%、2.5%、5% 条件下颗粒污泥成长特性, 对其表面结构、粒径分布与稳定性进行了评估. 结果表明, 在颗粒成长初期颗粒较为疏松, 粒径和离散度均呈增大趋势; 颗粒成熟后粒径密度增大, 粒径大多稳定在 0.3~0.5 mm 左右. 成熟的颗粒污泥在含盐量 1% 下颗粒孔隙率较大, 离散度较小, 菌胶团细菌占优势, 微生物通过胞外多聚物相互聚集, 其稳定性较好; 而在含盐量 5% 下其孔隙率和离散度呈现相反趋势, 丝状菌占优势, 颗粒通过丝状菌的相互缠绕形成, 其稳定性较差; 但在含盐量 2.5% 下由于菌胶团细菌与丝状菌均未成为优势菌群, 难以维持稳定结构, 颗粒发生膨胀自溶, 其离散度也变大. 研究提出了同质和异质 2 种生长模式, 颗粒粒径分布较窄的成长模式称为同质生长, 其颗粒的生长及基质利用条件基本相同, 故系统稳定; 而颗粒粒径分布较宽的成长模式称为异质生长, 其颗粒生长和基质利用条件差异性强, 故系统不稳定.

关键词:好氧颗粒污泥; 含盐量; 粒径分布; 离散度

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2804-05

Growth Model of Aerobic Granule Under Different Salinities

WANG Yao-dong, LI Zhi-hua, WANG Xiao-chang

(Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The stability of aerobic granules that developed under salinities of 1%, 2.5% and 5%, respectively, was evaluated using microscopic observations and size distribution. It was found that the size of granules increased and the diversity of size distribution became wider during the granulation period, and the size of mature granules distributed mainly in the range of 0.3-0.5 mm. Granules under the salinity of 1% showed high porosity and narrow size distribution and extracellular polymeric substances (EPS) linked the particles in the granules. In contrast, those under the salinity of 5% showed low porosity and wide size distribution and entanglement of filaments formed the frame work of granules. Disintegration of aerobic granules was found under the salinity of 2.5%, and the size distribution was found became wider, which may due to the unbalance growth between floc-forming and filamentous microorganisms. Therefore, it is reasonable to conclude that size distribution could effectively describe the stability of aerobic granules, namely, narrow size distribution indicates stability of aerobic granules. Furthermore, granules under low salinity were predominated by the floc-forming bacteria and thus EPS-linking was the main mechanisms of granulation; on the other hand, those under high salinity were predominated by filamentous microorganisms and thus the entanglements of filaments was the main mechanisms of granulation. Two models have been proposed for the growth of aerobic granules. One is heterogeneous growth of which the granule size distributes in a narrow spectrum and the granules growing with this model are stable because the conditions of growth and substrate utility are similar for all granules. Another is homogenous growth of which the granule size distributes in a wide spectrum and granules with this model are unstable.

Key words: aerobic granule; salinity; size distribution; deviation

作为一种高活性的微生物聚集体, 好氧颗粒污泥具有规则的外形、密实的结构以及良好的沉淀性能. 自 20 世纪 80 年代末开始, 研究者们分别从不同方面对污泥颗粒化进行了探索, 对颗粒化机制做出了多种解释, 但一直未形成统一的成熟理论^[1]. 好氧颗粒污泥是一种区别于活性污泥的生物聚集状态, 其形成取决于各种选择压的共同作用及内部菌群的组成及演替, 由好氧絮体演化为颗粒, 粒径是评价好氧颗粒污泥性状的一个重要参数, 可以很好地描述颗粒的成长过程. 对于粒径的研究始于对活性污泥絮体的物化性质的研究^[2]及污泥膨胀的解释^[3], 研究表明, 进水负荷^[4]、水力剪切力^[5,6]、沉淀时间^[7]、

溶解氧^[8]、水力停留时间^[9]等条件对颗粒污泥粒径有很大的影响. 同时, 粒径与粒径分布也是决定颗粒扩散阻力与反应器内混合程度的 2 个重要的因素, 分别从微观和宏观角度描述了反应器生物生长的整体水平^[10]. 但目前鲜见粒径及其分布对好氧颗粒污泥稳定性影响的报道.

含盐废水是一种常见的废水, 在高含盐条件下

收稿日期: 2007-10-24; 修订日期: 2008-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50621140001, 50708089); 国家高新技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z328)

作者简介: 王耀东(1976~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水和废水的深度处理理论与应用, E-mail: yaodong.w@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: lizhihua@gmail.com

的活性污泥的处理效果会受到较强的抑制, 以往研究发现, 好氧颗粒污泥的层状结构对于有毒废水有着较好的处理效果, 但含盐废水对好氧颗粒的影响目前鲜有报道, 研究好氧颗粒污泥对高含盐废水的影响有着较强的现实意义, 可以解决含盐废水的处理问题. 本试验研究了不同含盐量条件下好氧颗粒污泥的特性, 对不同生长阶段粒径及粒径分布进行分析, 并结合颗粒组成菌群的变化, 探索了好氧颗粒污泥的稳定成长模式.

1 材料与方法

1.1 实验装置及流程

试验采用有机玻璃反应器, 内径 50 mm, 有效容积 2 L, 反应器按 SBR 操作模式进行, 运行周期为 3 h, 各阶段时间分配如表 1 所示. 采用玻璃砂芯从反应器底部进行曝气, 其气体流速为 3 L/min. 通过潜水泵由顶部进水, 在排水期间, 从反应器的中部排水. 每周进出水均为 1 L, 反应器在 25℃ ± 1℃ 的水浴条件下运行.

表 1 反应运行周期/min

Table 1 Sequencing batch operation/min

进水	曝气	沉淀	排水
2	167	5	6

1.2 进水水质及接种污泥

以醋酸钠和葡萄糖作为碳源, 其 COD 为 300 ~ 450 mg/L, TN 为 45 ~ 55 mg/L, TP 为 8 ~ 10 mg/L, 基质中盐度变化如图 1 所示, 接种污泥来自西安市邓家村污水处理厂 A²/O 二沉池的回流污泥.

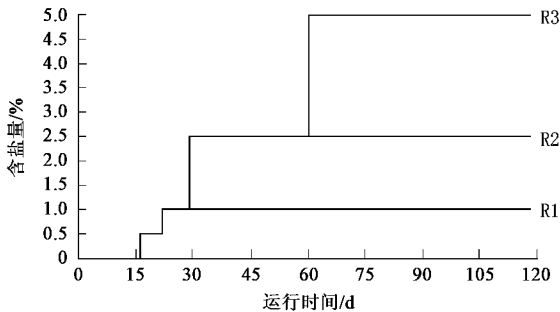


图 1 反应器 R1、R2 与 R3 基质中含盐量的变化

Fig.1 Variation of sodium chloride concentration in the substrate in three reactors R1, R2 and R3

1.3 分析项目及方法

(1) 沉速及孔隙率测定 颗粒污泥的沉速采用自由沉淀法, 颗粒污泥密度采用葡聚糖梯度溶液法

进行. 根据所测得的颗粒沉速与相应颗粒密度以及颗粒尺寸, 按照下式计算孔隙率:

$$v = \sqrt{\frac{4gd(1 - \epsilon)(P_p - P_w)}{3\Omega C_D P_w}} \tag{1}$$

式中, ϵ 为孔隙率; Ω 为流体通过絮体的影响因子 (不可透过 $\Omega = 1$; 可透过 $\Omega < 1$; 在本研究中假定为 1); P_p 为颗粒密度; P_w 为水的密度; g 为重力加速度; C_D 为阻力系数, 根据文献[11]计算.

(2) 粒径及粒径分布测定 在曝气阶段, 取出 1 mL 混合溶液, 对其进行显微镜照相, 为避免照相选取视域的人为误差, 对所有的视域均进行颗粒粒径照相分析, 但颗粒尺寸 < 50 μm 的细小颗粒忽略不计.

(3) 颗粒内部结构的测定颗粒 取出后, 立即采用多聚甲醛进行固定, 固定后的颗粒采用乙腈脱水进行真空干燥, 干燥后的颗粒镀金后采用日立扫描电镜 S3400N 进行其表面结构的观察.

2 结果与分析

2.1 含盐量对好氧颗粒污泥形态的影响

图 2 显示了好氧颗粒污泥在 3 个反应器中的成长情况. 在含盐量低于 1% 时, 各反应器的颗粒污泥均呈现较为疏松的外层结构 (27 d 以前), 当 R2 和 R3 的含盐量提高到 2.5% 时 (27 ~ 63 d), R2 颗粒发生解体, 而 R3 颗粒并未发生解体, 但目前尚不清楚造成这种差异的原因, R3 的含盐量进一步提高到 5% 时, 其颗粒密实度进一步提高, 但此时 R1 中的颗粒内部出现空洞 (80 d).

2.2 含盐量对好氧颗粒污泥孔隙率及沉降性能的影响

不同含盐条件下颗粒的沉淀速度如图 3 所示, 高含盐条件下的颗粒污泥的沉淀速度最大, 对其空隙率计算也表明高含盐条件下的颗粒污泥孔隙率较小 (图 4). 因此, 提高含盐量可有效地提高颗粒的沉淀性能和密实度, 这可能是由于高含盐形成的大浮力对密实颗粒的选择结果. 对好氧颗粒污泥的表面形态观察表明 (图 5), 不同含盐条件下的颗粒内部的微生物组成结构有较大的差异. 目前有 2 种模型解释好氧颗粒污泥的形成^[12,13], 一种模型认为细菌分泌的胞外多聚物 (EPS) 通过架桥作用使生物聚集体具有较大的强度, 从而在水力剪切力的作用下形成密实的颗粒; 另一种模型认为丝状菌的相互缠绕形成好氧颗粒污泥的骨架. 由图 5 可以看出, 在低含盐条件下细菌主要是通过胞外多聚物相互聚集, 而

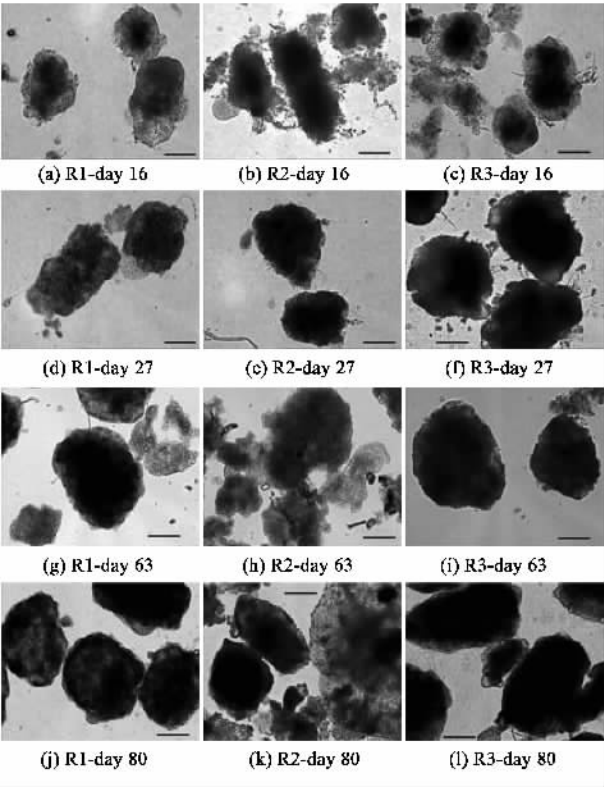


图 2 不同含盐条件下好氧颗粒污泥形态观察(标尺:200 μm)

Fig.2 Microscopic obsrvation of aerobic granules under different sodium chloride concentrations

在高含盐量条件下,颗粒的丝状菌明显增多.因此,在低含盐条件下颗粒污泥的形成主要以第1种模型为主,而在高含盐条件下主要以第2种模型为主,这可能是由于在低含盐条件下细菌活性较高,所分泌的胞外多聚物较多,而在高含盐条件下丝状菌容易成为优势菌群.这可能也是含盐量为 2.5% 条件下颗粒污泥发生解体的原因:一是缺乏丝状菌骨架支

撑;二是缺乏足够的胞外多聚物以形成足够的强度.同时由图 5 可以说明低含盐条件下虽然孔隙率较大,但由于所分泌的胞外多聚物较多,易堵塞传质通道从而发生其内部微生物的水解,造成颗粒空洞,而在高含盐条件下虽然孔隙率较小,但由于微生物以丝状菌为主,胞外多聚物减少,相应的传质阻力减小,传质较通畅,所形成的颗粒较为密实.

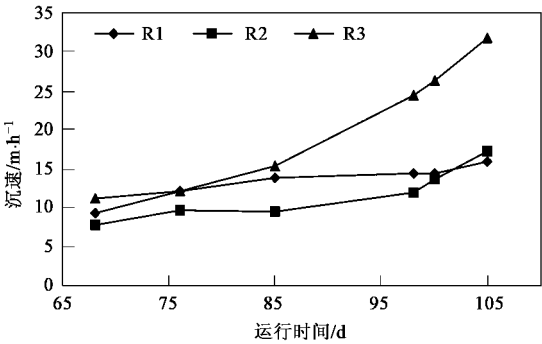


图 3 污泥颗粒沉速变化曲线

Fig.3 Profile of settling velocity of aerobic granules

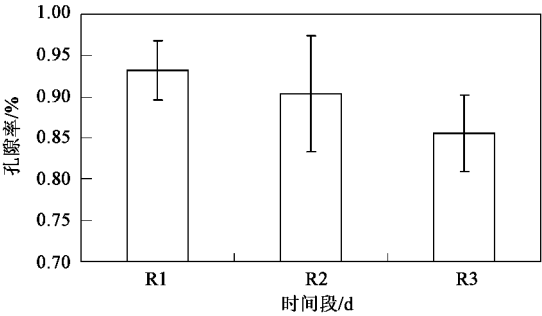


图 4 颗粒污泥孔隙率直方图

Fig.4 Porosity of aerobic granule on the mature period(86-105 d)

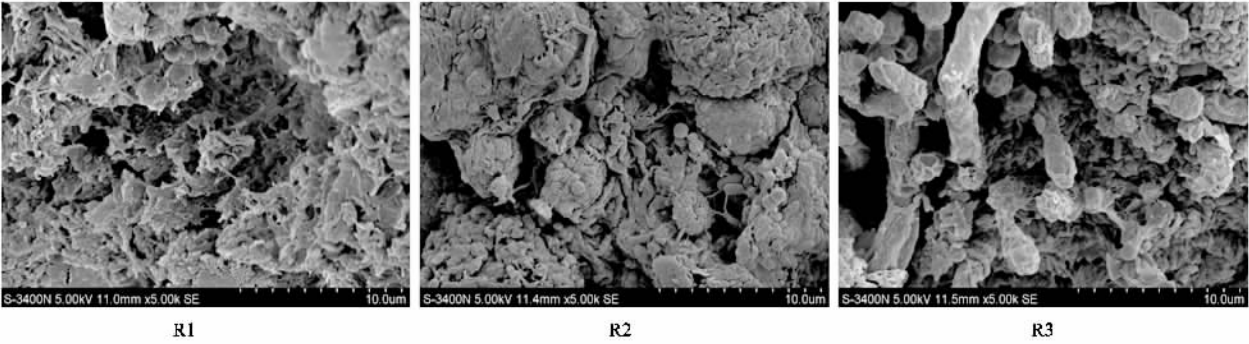


图 5 污泥颗粒表面结构电镜扫描图片(取样时间:90 d)

Fig.5 Surface structure of aerobic granules by scanning electron microscopy observation on day 90

2.3 含盐量对好氧颗粒污泥粒径分布的影响

表 2 描述了好氧颗粒污泥在不同时期的粒径分布情况.可以看出,60d 前所有反应器中的颗粒的粒

径主要分布在 0.2~0.5 mm.在 R1 中颗粒粒径的增加主要集中在 0.5~0.7 mm,而在 R3 中其粒径增加的范围较大,在 0.5~0.7、0.7~1 和 1~2 mm 等范

围均有明显的分布. 因此, 可以认为颗粒在低含盐条件下以同质增长模式为主, 而在高含盐条件下, 则以异质增长模式为主. 采用高斯分布函数对其分布进行描述, 其高斯分布函数为:

$$y = y_0 + \frac{A}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_c)^2}{\sigma^2}}$$

(2)

式中, y 为粒径分布函数; y_0 为 y 轴偏移量; σ 为粒径离散度; A 为常数项; x 为颗粒直径; x_c 为粒径均值. 得到结果如表 3 所示.

表 2 不同粒径范围的颗粒数量分数分布/%

Table 2 Particle number fraction in different size ranges/%

时间/d	反应器	粒径/mm				
		0~0.2	0.2~0.5	0.5~0.7	0.7~1.0	1.0~2.0
0~18	R1	1.48	91.62	6.89	0	0
	R2	7.8	89.98	2.05	0	0
	R3	4.56	94.67	0.76	0	0
18~30	R1	10.07	75	13.67	0.9	0
	R2	8.73	85.24	5.8	0.24	0
	R3	7.45	84.6	6.72	0.98	0.24
30~60	R1	1.11	51.23	43.58	16.17	0.37
	R2	7.8	89.98	2.05	2.7	0.29
	R3	4.56	94.67	0.76	3.41	0
60~80	R1	0.16	52.86	42.67	4.15	0.16
	R2	3.04	85.68	9.33	1.31	0.65
	R3	0.76	52.92	37.4	6.1	2.8

表 3 高斯曲线描述粒径分布拟合参数/mm

Table 3 Size distribution of aerobic granules fitted using Gauss function/mm

时间/d	R1		R2		R3	
	均值	离散度	均值	离散度	均值	离散度
15	372±11	185±25	364±3	90±6	370±2	116±4
27	406±9	208±20	378±4	146±8	385±4	138±9
63	496±3	204±8	422±18	372±60	482±10	171±23
80	491±2	128±4	395±4	141±8	487±5	153±10

以上过程及其粒径(r)变化特征可用图 6 描述. 反应器中最初是活性污泥絮体的混合系统, 在水流剪切力作用下, 强度较大的絮体逐渐形成泥核, 完成絮体到颗粒的转化, 其粒径相应增大, 但在颗粒形成初期, 仍有大量的絮体存在, 因此颗粒粒径分布呈现发散趋势(15~27 d). 随着选择压的选择作用, 疏松的絮体颗粒逐渐被淘洗出系统^[14], 因此粒径呈现集中分布趋势(27~63 d). 颗粒污泥后期呈现的差异可从菌胶团与丝状菌的竞争及其颗粒污泥的形成机制来解释, 含盐量低的 R1 反应器, 颗粒的活性较强, 菌胶团的分泌物增多, 颗粒之间的连接较好, 较为稳定, 因此粒径分布依然保持在一个较窄的范围; 含盐量高的 R3 反应器, 颗粒的活性差, 因此多聚物

的分泌减少, 但丝状菌成为优势菌群, 由于丝状菌形成的颗粒比菌胶团细菌形成的颗粒在强度上要大得多, 因此大的颗粒往往可以保存下来, 但这一点不能反映在高斯分布函数的离散度上, 主要原因在于高斯分布函数为单峰分布函数, 尚无法描述 2 种以上颗粒同时存在的系统(菌胶团细菌颗粒污泥与丝状菌颗粒污泥).

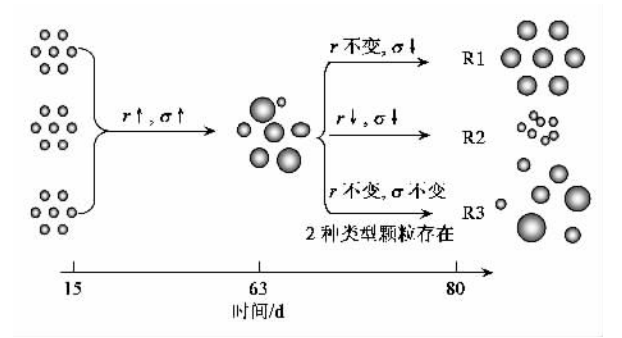


图 6 不同含盐条件下颗粒污泥的粒径交替过程
Fig.6 Variation of size distribution of aerobic granules under different salinities

从动力学角度考虑, 粒径大小与有机负荷大小、水力剪切力以及基质中的 N/COD 也有着一定的关系, 粒径不同, 对于基质、营养、溶解氧的吸收均不同^[15], 有关好氧颗粒污泥成长的动力学模型也推导出高有机负荷与剪切力可以作为决定粒径增大与减小正反两方的驱动力^[16], 而基质中的 N/COD 则决定了微生物群体数量的变化. 各种选择压的综合作用, 使得好氧颗粒污泥在相似条件下形态的相似性, 较大的颗粒营养不足易形成颗粒空洞, 在较强的水力冲刷力下破碎, 而菌群之间的相互作用也决定了颗粒成长的均匀性, 外部环境的失衡很容易导致粒径大小的不一, 反过来看, 较为稳定的生长环境则易于形成成长模式较为一致的颗粒, 形成相似的粒径及小的离散度^[17]. Qin 等^[18] 提出沉淀时间与好氧颗粒污泥形成之间的关系, 沉淀时间越长, 越有利于好氧颗粒污泥与悬浮絮体以混合状态共存; 沉淀时间越短, 越有利于选择出沉淀性能好的细菌, 同时有利于微生物的自絮凝作用, 形成稳定的好氧颗粒污泥. 而在这种条件下培养出的颗粒, 具有相近的形态与孔隙率, 即沉淀时间越短, 其离散度越小.

3 结论

(1)采用粒径分布可有效表征颗粒的稳定性. 在好氧颗粒形成初期, 粒径较小, 颗粒形状不规则, 有泥核产生; 在颗粒成长期, 颗粒粒径变大, 外部形态

逐渐球形化,变得密实,离散度变大;在颗粒成熟期,粒径基本不变,但稳定状态下颗粒粒径分布的离散度变小,粒径范围集中,不稳定状态下颗粒粒径分布的离散度变大,粒径范围分散,但随着颗粒的完全解体,其粒径与离散度均变小.需要指出的是高斯函数仅能描述单峰分布情况即单一颗粒类型的颗粒污泥系统,尚无法描述 2 种以上颗粒同时存在的系统.

(2)低含盐量下好氧颗粒成长稳定,孔隙率大,以胞外多聚物架桥模型为主,属于同质生长模式;高含盐量下的好氧颗粒在一定阶段内生长良好,状态较为稳定,颗粒较密实,但成熟期后开始出现较多大粒径颗粒,并呈分散式增长,以丝状菌相互缠绕模型为主,属于异质生长模式.

参考文献:

[1] Liu Y, Tay J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2004, **22**: 533-563.

[2] Andreas D A. Physical and chemical properties of activated sludge floc [J]. *Water Research*, 1993, **27**: 1707-1714.

[3] 王凯军. 活性污泥膨胀的机理与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 89-96.

[4] 王芳, 杨凤林. 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.

[5] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules [J]. *Apply Microbial Biotechnology*, 2001, **57**: 227-233.

[6] Liu Y, Tay J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge [J]. *Water Research*, 2002, **36**: 1653-1665.

[7] 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.

[8] Britt-Marie W N, Peter B. The effect of dissolved oxygen concentration on the structure, size and size distribution of activated sludge flocs [J]. *Water Research*, 1999, **33**: 391-400.

[9] 王芳, 杨凤林. 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.

[10] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 1999. 435-437.

[11] Majumder A K, Bamwal J P. A Computational Method to Predict Particles Free Terminal Settling Velocity [J]. *IE (I) Journal-MN*, 2004, **85**: 17-19.

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

[13] Liu Y Q, Liu Y, Tay J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, **65**: 143-148.

[14] McSwain B S, Irvine R L, Wilderer P A. The influence of settling time on the formation of aerobic granules [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **50**: 195-202.

[15] Yang S F, Liu Q S, Tay J H, *et al.* Growth kinetics of aerobic granules developed in sequencing batch reactors [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2004, **38**: 106-112.

[16] Tay J H, Pan S, Tay S T L, *et al.* The effect of organic loading rate on the aerobic granulation: the development of shear force theory [J]. *Water Science and Technology* 2003, **47**: 235-240.

[17] 占新民. 含盐有机废水生物处理特性研究[D]. 北京: 清华大学, 1999. 83-85.

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