

SBR 不同沉降时间的污泥特性研究

唐 堂¹, 王 硕^{1,2,3}, 王玉莹¹, 支丽玲¹, 李 激^{1,2,3}

(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009)

摘 要: 对比了投加海藻酸钠与未投加海藻酸钠两种好氧颗粒污泥的培养方式,分析了絮状污泥通过改变沉降时间逐步实现颗粒化过程中污泥特性的变化。结果表明,未投加海藻酸钠(R1)和投加海藻酸钠(R2)的两组反应器分别经过40和20 d可使絮状污泥完全颗粒化,形成的好氧颗粒污泥沉降性能好、污染物去除效能高,且投加海藻酸钠培养的颗粒污泥具有更高的微生物量。在不断缩短污泥沉降时间过程中,胞外聚合物浓度逐渐升高,且以蛋白质类增加为主。随着颗粒形态趋于成熟,胞外聚合物含量维持稳定。另外,海藻酸钠的投加有利于胞外聚合物的增加,同时促进第二信使分泌,加速絮状污泥颗粒化过程。荧光光谱分析发现,两种颗粒污泥图谱峰的位置总体相同,但投加海藻酸钠污泥的EPS荧光强度略高。

关键词: 好氧颗粒污泥; 海藻酸钠; 胞外聚合物; 第二信使

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)03-0085-06

Characteristics of Aerobic Granular Sludge in SBR with Different Sedimentation Time

TANG Tang¹, WANG Shuo^{1,2,3}, WANG Yu-ying¹, ZHI Li-ling¹, LI Ji^{1,2,3}

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China; 3. Jiangsu University Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China)

Abstract: Comparing two methods of cultivating aerobic granular sludge (AGS), the characteristics of AGS in the granulation process in regard to reducing settling time were analyzed. The experimental results showed that it took 40 and 20 days for the formation of AGS in R1 and R2, respectively, and the addition of sodium alginate (R2) was beneficial for the AGS formation. The granules in R2 presented good settling performance, high biomass retention and contaminants removal capacity. Extracellular polymeric substances (mainly proteins) content gradually increased and maintained stability in the formation of AGS. Furthermore, it was found that sodium alginate could facilitate the secretion of the second messenger and accelerate the granulation process through the enhancement of extracellular polymeric substances (EPS). The peaks of AGS and EPS almost coincided according to the fluorescence spectroscopy; however, the fluorescence intensity of AGS in R2 was elevated by the addition of sodium alginate.

Key words: aerobic granular sludge; sodium alginate; extracellular polymeric substances;

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408264); 江苏省2015年度普通高校研究生实践创新计划项目(SJLX15_0564); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP51512)

通信作者: 李激 E-mail: lij@jiangnan.edu.cn

second messenger

污水处理厂进水水质复杂,波动较大^[1],因此快速有效地培养好氧颗粒污泥,解决由培养周期长、颗粒稳定性差而引起的工程应用瓶颈对好氧颗粒污泥技术的推广具有重要意义。海藻酸钠是一种常见的天然多糖类物质,具有较好的黏性和稳定性^[2]。同时,海藻酸钠也存在于细菌中的胞外多糖中,可以促进活性污泥絮体形成并加快生物膜的产生^[3]。因此,利用海藻酸钠制备的颗粒作为污泥微生物载体,对提高生物量、维持颗粒污泥稳定性具有重要作用。目前关于好氧颗粒污泥的研究较多,但大多集中在对污染物的去除效能上,关注颗粒化过程中污泥本身特性的研究较少。

此次,笔者以沉降时间为控制变量,通过对比投加海藻酸钠与未投加海藻酸钠的絮状污泥的颗粒化过程,从污泥特性、污染物去除效果、胞外聚合物(EPS)及第二信使产生与变化趋势等角度分析海藻酸钠对好氧颗粒污泥形成过程的影响。研究活性污泥微生物在海藻酸钠上的快速聚集作用,可为探讨适宜我国水质的好氧颗粒污泥技术及其稳定运行提供理论依据和技术支持。

1 材料和方法

1.1 反应器的运行

SBR反应器由有机玻璃制成,反应器有效高度为100 cm,直径为10 cm,有效体积为4 L。培养周期为4 h,其中进水60 min,曝气170 min,沉淀3~15 min,排水5 min。曝气量为2 L/min,进水通过蠕动泵由反应器底部进入,排水口在反应器中部,保证换水比为50%。接种污泥取自无锡市某污水处理厂生化池,污泥显黑色且呈松散结构。两组相同反应器同时运行,未投加海藻酸钠的反应器为R1,投加海藻酸钠的反应器为R2,R1和R2初始污泥浓度均为2 000 mg/L。进水为人工配水,为了防止各组分互相干扰,进水分3个水箱,进水中的碳源:氮源:自来水=2:2:6。自配水中COD、NH₃-N、PO₄³⁻-P分别为600、60、16 mg/L。其中,NaAc、MgSO₄·7H₂O、KCl分别为8 560、1 804、350 mg/L, NH₄Cl、K₂HPO₄、KH₂PO₄分别为2 240、735、288 mg/L,微量元素^[4]为1 mL/L。

海藻酸钠颗粒制备过程:将0.67 g/L的MgCl₂溶于3%的海藻酸钠溶液中,配制成A液;将1.07

g/L的CaCl₂溶于100 g水中,配制成B液。将B液放在磁力搅拌器上,用针管吸取A液,匀速滴至B液中,低温中速搅拌24 h,倒掉上清液即得粒径小于0.2 mm的海藻酸钠颗粒,并投加到R2中。

1.2 EPS的提取与测定

取一定量(10 mL)污泥混合液,用50 W超声功率作用于污泥悬浮液1 min,以保证污泥呈均质状态。向混合液中加入60 μL甲酰胺和5 mL的NaOH溶液(1 mol/L),并于4℃条件下培养3 h,所得混合液置于离心管中。在4℃、10 000 r/min条件下离心15 min,所得上清液用0.22 μm滤膜过滤,得到污泥的EPS。EPS的蛋白质使用考马斯亮蓝法测定^[5],多糖使用硫酸-蒽酮法测定^[6]。

1.3 污泥荧光光谱分析

采用荧光光谱仪测定好氧颗粒污泥及其EPS中荧光类物质强度,激发光波长为220~600 nm,发射光波长为220~600 nm。好氧颗粒污泥荧光光谱测定方法:取一定量好氧颗粒污泥(15~20 mL)放入烧杯中,加入40~45 mL氨水并搅拌30 min,将混合液置于离心管内,在5 000 r/min下离心5 min,上清液经0.45 μm滤膜过滤,于4℃下保存待测。好氧颗粒污泥EPS荧光光谱测定方法:取已经提取的EPS(1 mL)置于TOC管中,加入39 mL蒸馏水,测定混合液的TOC,根据所测定的TOC值将EPS浓度稀释至1 mg/L以下,于4℃条件下保存待测。

1.4 第二信使的提取与测定

将污泥于-80℃下冻干后,分别取0.2 g污泥溶于15 mL超纯水中,加入15 mg溶菌酶使污泥微生物细胞溶解,将其振荡15 min后于37℃下培养1 h;将样品置于低温离心机中,在9 000 r/min下离心15 min,转移上清液至50 mL离心管中,加入2倍无水乙醇,再次振荡10 s后于4℃下培养1 h;再次将样品置于低温离心机中,在9 000 r/min下离心15 min,取沉淀于37℃下培养3 h,加入3 mL超纯水再次振荡10 s;将混合液移至5 mL离心管中,在12 000 r/min下离心10 min,最后取1 mL上清液,采用高效液相色谱进行测定。

1.5 分析方法

水质、泥质的参数,如COD、NH₃-N、MLSS、SVI采用《水和废水监测分析方法》(第4版)测定。

2 结果与讨论

2.1 MLSS 和 SVI 的变化

设定沉降时间分别为 15、10、8 和 5 min,最终缩减到 3 min(R1、R2 每个沉降时间下分别运行 8 和 4 d)。R1 和 R2 分别通过 40 和 20 d 形成性能稳定的颗粒污泥,即通过控制以沉降时间为变量的选择压^[7],最终形成稳定的好氧颗粒污泥。图 1 为 R1 和 R2 中污泥生物量和沉降性能的变化。

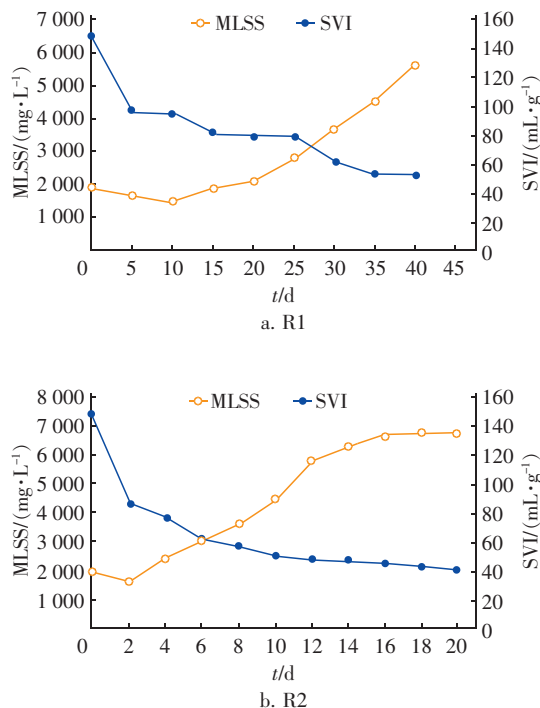


图 1 污泥生物量和沉降性能的变化

Fig. 1 Variations of biomass and settling property of AGS

从图 1 可以看出,在培养初期 R1 和 R2 的污泥浓度均出现下降趋势,这主要是因为初始阶段沉降性能较差的污泥在一定的沉降时间内被筛选出反应器,导致 MLSS 下降。由于外界环境突然改变,大量污泥流失,未被洗出反应器的污泥具有较好的沉降性能。SVI 从初始的 150 mL/g 左右迅速下降到 100 mL/g 以下,之后 SVI 下降变缓。随着反应器的运行,微生物逐渐适应环境,即使在不断缩短沉降时间的情况下,微生物量也会逐步增加且沉降性能得以改善。

当沉降时间减少到 10 min 时,R1 和 R2 中的 MLSS 基本恢复到初始值,并且保持持续增长的趋势。相较于 R1,R2 中的污泥浓度增长较快,且相同时间的污泥浓度一直高于 R1。在好氧颗粒污泥成

熟阶段,R1 和 R2 的 MLSS 可以分别达到 6 000 和 7 000 mg/L,两个反应器中污泥的 SVI 值差别不大。在培养过程中,R2 的沉降性能一直略优于 R1,但最终颗粒形成时,两者的沉降性能接近。

R2 相较于 R1 微生物量增加较快,且沉降性能较好。这主要是由于在 R2 中投加了海藻酸钠小颗粒,在反应器的曝气阶段,海藻酸钠小颗粒可以与活性污泥充分混匀。活性污泥中的微生物能够以海藻酸钠小颗粒为载体,附着在表面。运行初期,由于海藻酸钠的存在,有利于提高污泥的沉降能力,导致排出系统外的污泥较少。同时,海藻酸钠可以促进活性污泥絮体形成并加快生物膜的产生,从而使 R2 中污泥浓度一直高于 R1。随着絮状污泥的颗粒化形成过程,海藻酸钠的投加对污泥沉降性能的影响逐渐减小,最终 R1 和 R2 中好氧颗粒污泥均具有良好的沉降性能。

2.2 EPS 的变化

由于 EPS 具有粘附性,因而被认为在好氧颗粒污泥的形成过程中发挥了重要作用,微生物细胞分泌的 EPS 与生物吸附和微生物聚集密切相关^[8]。EPS 能够通过架桥作用使微生物群体形成三维结构,可更好地促进生化反应的完成,微生物颗粒结构也随之坚固^[9]。图 2 为 R1 和 R2 中 EPS 的变化。

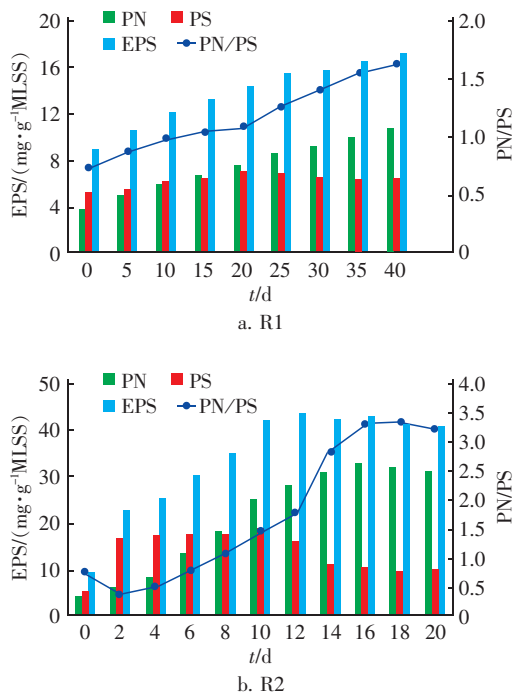


图 2 EPS 的变化

Fig. 2 Variations of EPS

由图2可知,相较于接种污泥,R1和R2中EPS均出现大幅增长,分别从8.9和9.1 mg/gMLSS增加到17.8和41.6 mg/gMLSS。EPS的增加主要体现在蛋白质(PN)的增加上,多糖(PS)含量的变化规律存在差异。R1和R2的PN/PS值从0.7分别增加到1.7和3.3。不同于R1中PN/PS值的持续增长,R2中PN/PS值波动较大,前期从0.7下降到0.3,随后快速增长至3.3并趋于稳定。PN/PS值的升高表明,好氧颗粒污泥强度逐渐增大并构成了稳定结构。王亚利等人^[9]发现,在颗粒形成过程中,PN/PS值增大会使污泥表面疏水性增加,而细胞表面疏水性的增加与颗粒污泥的形成密切相关,随着絮状污泥颗粒化,反应器中污泥稳定性也逐渐提高。

对比R1和R2,R1中EPS增长了8.9 mg/gMLSS,而R2中EPS增长了32.5 mg/gMLSS。这主要是由于海藻酸钠对微生物的活性和生长具有促进作用,同时海藻酸钠颗粒也为污泥微生物的生长提供了附着载体,进而使R2中EPS增加。R1和R2中蛋白质类物质分别增加了7.5和28.2 mg/gMLSS,占各自EPS增量的84%和87%。有研究表明,EPS中蛋白质类物质浓度增加是絮状活性污泥颗粒化的重要因素,有利于保持颗粒污泥的稳定性^[10]。PN可以通过静电作用降低细胞表面电荷与细胞间的排斥力,有利于微生物的凝聚;同时,蛋白质中氨基酸的疏水性基团在微生物的凝聚过程中也具有重要作用^[11]。

另外,R1中多糖基本维持不变,而R2中出现多糖先大幅增加后逐渐减小的现象,可能是由于:①在反应器运行过程中,一部分海藻酸钠颗粒混杂在污泥中而被当作EPS提取出来;②海藻酸钠作为一种多糖类物质可以被污泥微生物吸收,从而使污泥整体的多糖含量升高。

2.3 第二信使的变化

环二鸟苷酸(c-di-GMP)作为好氧颗粒污泥的第二信使,对其形成及稳定具有重要影响^[12]。有研究证实^[13],c-di-GMP参与调节细菌的运动性、胞外聚合物的产生和控制生物膜的形成过程。Wan等人^[12]发现,当破坏c-di-GMP结构减少其含量时,EPS的分泌将大大减少,最终可导致好氧颗粒污泥解体。

c-di-GMP的变化规律表明,R1和R2中接种污

泥的c-di-GMP含量为42 $\mu\text{g/gMLVSS}$,处于较低水平。随着沉降时间的不断缩短,R1和R2中c-di-GMP的含量都呈现先增加后降低的变化趋势。R1中c-di-GMP含量前期增长较为缓慢,当沉降时间从8 min缩短到5 min时,c-di-GMP含量迅速增加,最高值为635 $\mu\text{g/gMLVSS}$,增量为382 $\mu\text{g/gMLVSS}$,此时颗粒污泥已完全形成,随后c-di-GMP迅速降低,并最终维持在168 $\mu\text{g/gMLVSS}$ 左右。R2中c-di-GMP含量增幅较为稳定,当沉降时间为8 min时,c-di-GMP含量达到最高值,为409 $\mu\text{g/gMLVSS}$,低于R1中的最高值。随着好氧颗粒污泥成熟,R2中c-di-GMP含量最终维持在139 $\mu\text{g/gMLVSS}$ 左右。相较于R1前期增长缓慢的情况,R2中c-di-GMP含量前期增长迅速,沉降时间为10 min时,含量达到246 $\mu\text{g/gMLVSS}$,而R1沉降时间缩短到8 min才接近此浓度,表明通过海藻酸钠强化好氧颗粒污泥的培养对c-di-GMP的分泌有明显的促进作用,絮状污泥颗粒化时间明显缩短。R2中c-di-GMP含量最高值远低于R1,主要是由于投加海藻酸钠小颗粒可以作为污泥微生物的载体,有利于微生物凝聚,所以在分泌较低含量c-di-GMP的情况下,R2也可以形成颗粒污泥。

通过CORREL解析c-di-GMP含量分别与EPS含量和PN含量之间的相关性。结果表明,R1中c-di-GMP与EPS、PN的相关系数分别为0.849 8、0.902 9,R2中相应的相关系数分别为0.953 3、0.966 4。可见,c-di-GMP与EPS、PN均具有较高的相关性,同时证实了c-di-GMP在颗粒化过程中的重要作用。相较于R1,R2的相关性更高,说明投加海藻酸钠后,促进了第二信使的快速分泌与传递,有利于颗粒污泥的形成。

2.4 对污染物的去除效果

图3为污泥颗粒化过程中对污染物的去除效果。可以看出,在R1、R2运行初始阶段,由于活性污泥被接种至新的环境,微生物活性迅速降低,两者对COD的去除率均处于较低水平。随着反应器的运行,活性污泥逐渐适应外界环境,在污泥颗粒化过程中,其对COD的去除效果逐步改善,使出水COD均降低至50 mg/L左右,去除率接近90%。R1运行前期,颗粒化污泥对COD的去除率略高于R2,R1对COD的去除率可迅速达到80%以上,而R2对COD的去除率达到80%以上则需要更长的时间。

最终由于颗粒污泥的形成,两者对 COD 的去除效果差异较小。R1 和 R2 对氨氮的去除效果基本相似,在反应器运行初期,均是对氨氮的去除率出现下降现象,出水氨氮高达 20 mg/L 以上。其原因可能是初始阶段大量污泥被排出,系统中生物量减少,微生物硝化活性降低,对氨氮的去除效果变差。随着生物量的增加,且微生物逐渐适应运行环境,对氨氮的去除率逐渐升高。当好氧颗粒污泥形成时,R1 和 R2 对氨氮的去除率分别为 83% 和 79%,并仍存在升高趋势。

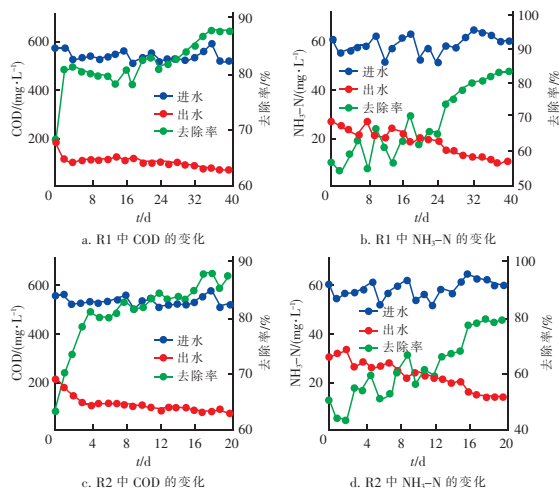


图 3 R1 和 R2 对污染物的去除效果

Fig. 3 Contaminants removal efficiencies of AGS from R1 and R2

2.5 三维荧光光谱分析

图 4 为絮状污泥和好氧颗粒污泥的荧光光谱分析。可以看出,各样品中主要涉及两种荧光吸收峰: Peak A (Ex/Em : 220 ~ 230/340 ~ 350 nm), 芳香族蛋白质类; Peak B (Ex/Em : 270 ~ 280/340 ~ 350 nm), 溶解性微生物产物。活性污泥及其 EPS 中包含溶解性微生物产物,说明接种的活性污泥具有良好的生物活性。但污泥及其 EPS 中蛋白质类物质含量极低,可能是由于接种絮状污泥受外界环境的影响,仅维持正常的生长代谢活性,对 EPS 中蛋白质类物质分泌较少。但经 R1 和 R2 培养后的好氧颗粒污泥及其 EPS 中不仅含有溶解性微生物产物,同时还包含大量蛋白质类物质,此现象说明在颗粒化过程中 EPS 内蛋白质类物质含量逐渐升高及其稳定存在是活性污泥颗粒化的重要因素。好氧颗粒污泥中溶解性微生物产物的荧光强度相较于絮状污泥也有所提高,表明颗粒污泥中的微生物经过一段时间的

培养驯化,可较好地适应生长环境,提高微生物的菌群活性,同时对污水中的污染物具有良好的去除效果。R1 中好氧颗粒污泥 EPS 图谱峰的位置与 R2 的大体相同,说明投加海藻酸钠对 EPS 的成分和污泥特性影响较小。但 R2 中污泥的 EPS 荧光强度略高于 R1,说明投加海藻酸钠可以促进微生物分泌更多的 EPS,强化颗粒污泥的形成。

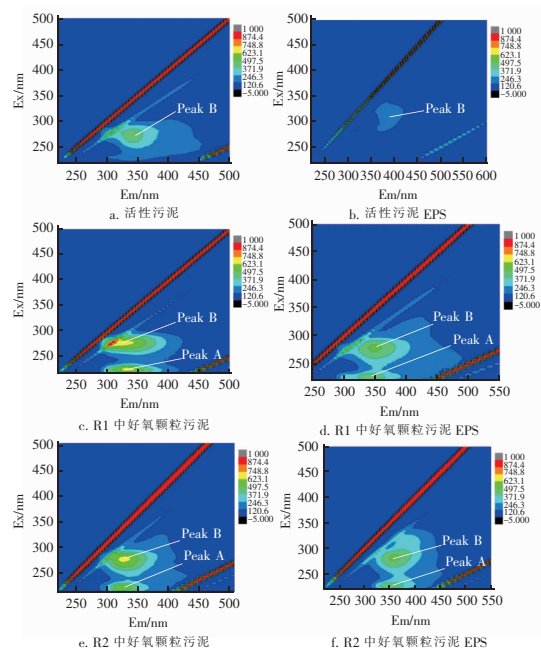


图 4 絮状污泥和好氧颗粒污泥的荧光光谱分析

Fig. 4 EEM of floc sludge and AGS

3 结论

① 未投加海藻酸钠的絮状污泥经过 40 d 可实现颗粒化;而在海藻酸钠的强化作用下,絮状污泥仅需 20 d 即可实现颗粒化。并且两种培养方式得到的好氧颗粒污泥均具有密实的结构、良好的沉降性能和高效的污染物去除能力。

② EPS 含量在颗粒化过程中增加明显,其中蛋白质类物质在 EPS 增量中占比较大,同时海藻酸钠的投加有利于增加 EPS,并加速颗粒污泥的形成。

③ 海藻酸钠的投加可以刺激第二信使 c-di-GMP 的分泌,好氧颗粒污泥形成时,c-di-GMP 含量最高。海藻酸钠强化凝聚作用使絮状污泥在较低的 c-di-GMP 含量下也可以形成结构稳定的好氧颗粒污泥。

④ 荧光光谱分析发现,R1 和 R2 中的颗粒污泥图谱峰位置大致相同,但投加海藻酸钠污泥的 EPS 荧光强度略高;相较于接种污泥,两种好氧颗粒

污泥均出现蛋白质类物质波峰,说明蛋白质类物质在颗粒化过程中具有重要作用。

参考文献:

- [1] 邱勇,施汉昌,曾思育,等. 污水处理厂自动控制系统的
全流程策略与方法[J]. 中国给水排水,2011,27
(2):16-19.
- [2] 邓靖,谭兴和,刘雨华,等. 增稠剂和交联剂对海藻酸
钠膜性能的影响[J]. 食品研究与开发,2010,31
(10):18-21.
- [3] Windhues T, Borchard W. Effect of acetylation on physi-
co-chemical properties of bacterial and algal alginates in
physiological sodium chloride solutions investigated with
light scattering techniques[J]. Carbohydrate Polymers,
2003,52(1):47-52.
- [4] 杨贺棋,刘永军,刘喆,等. 不同操作条件下好氧颗粒
污泥特性及污染物去除特性研究[J]. 水处理技术,
2015,41(2):37-41.
- [5] 刘美,王湛. 胞外聚合物对膜污染的影响[J]. 水处
理技术,2007,33(10):7-13.
- [6] Adav S S, Lee D J. Extraction of extracellular polymeric
substances from aerobic granule with compact interior
structure[J]. J Hazard Mater, 2008, 154(1/3):1120-
1126.
- [7] Adav S S, Lee D J, Show K Y, et al. Aerobic granular
sludge: Recent advances[J]. Biotechnol Adv, 2008, 26
(5):411-423.
- [8] Deng S, Wang L X, Su H J. Role and influence of extra-
cellular polymeric substances on the preparation of aero-
bic granular sludge[J]. J Environ Manage, 2016, 173:
49-54.
- [9] 王亚利,刘永军,刘喆,等. 聚合氯化铝投加时间对好

氧颗粒污泥的形成和胞外聚合物的影响[J]. 化工进
展,2015,34(1):278-284.

- [10] Caudan C, Filali A, Spérandio M, et al. Multiple EPS in-
teractions involved in the cohesion and structure of aero-
bic granules[J]. Chemosphere, 2014, 117:262-270.
- [11] 王福琨,刘永军,宋雪松,等. 颗粒污泥破碎一再形成
过程中微生物胞外聚合物(EPS)的变化及其与污泥
特性的相关性分析[J]. 环境化学,2013,32(12):
2233-2242.
- [12] Wan C L, Zhang P, Lee D J, et al. Disintegration of aer-
obic granules: Role of second messenger cyclic di-GMP
[J]. Bioresour Technol, 2013, 146:330-335.
- [13] 唐堂,王硕,蒋志坚,等. 群感效应与信号分子在污泥
颗粒化过程中的作用研究进展[J]. 应用与环境生物
学报,2016,22(4):718-724.



作者简介:唐堂(1993-),男,江苏盐城人,硕士,主要研究方向为好氧颗粒污泥形成机理。

E-mail: Ttang630@163.com

收稿日期:2017-08-23

发挥水资源的多种功能,
协调好生活、生产经营和生态环境用水