

好氧颗粒污泥的快速培养研究进展

龙 焙¹, 程媛媛¹, 朱易春¹, 赵 珏¹, 王家辰¹, 张树梅¹, 濮文虹²,
杨昌柱², 程 凯²

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 好氧颗粒污泥(AGS)的培养时间一般在30 d以上。显然,较长的启动时间不利于技术的推广及应用。因此,研究经济、高效的AGS的快速培养策略一直是该领域的热门话题。总结已取得的研究成果发现,现有快速培养策略主要包括四种,即进水中添加钙镁等金属离子、投加絮凝剂或惰性载体、接种部分AGS及投加特殊菌种等促进污泥好氧颗粒化。结果表明,以上策略可有效缩短AGS形成所需时间,一般可将污泥好氧颗粒化的时间控制在30 d甚至20 d以内。然而,现有研究存在以下不足,一是缺乏统一的衡量污泥好氧颗粒化成功的标准,二是污泥快速好氧颗粒化的机理缺乏深入研究,三是现有研究成果缺乏实践检验。因此,后续研究应首先统一AGS培养成功的标准,为研究成果的重复及推广奠定基础。其次,通过捕捉污泥颗粒化过程中的原位信息探索快速颗粒化的机理,为实际应用提供理论指导。最后,借鉴厌氧颗粒污泥的销售及使用经验,探索AGS的产品化途径,并对现有快速培养模式进行整合及改进,在实践中检验其可靠性。

关键词: 好氧颗粒污泥; 快速培养; 培养策略

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)02-0031-06

Research Progress on Rapid Cultivation of Aerobic Granular Sludge

LONG Bei¹, CHENG Yuan-yuan¹, ZHU Yi-Chun¹, ZHAO Jue¹, WANG Jia-chen¹,
ZHANG Shu-mei¹, PU Wen-hong², YANG Chang-zhu², CHENG Kai²

(1. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The cultivation period of aerobic granular sludge (AGS) is usually more than 30 days. Obviously, this long start-up process is not conducive to the popularization and application of AGS technology. Therefore, exploration of rapid cultivation strategies of AGS has always been a hot topic. There are mainly four kinds of rapid cultivation strategies for promoting aerobic granulation according to the existed research results, which were summarized as follows: addition of Ca^{2+} and Mg^{2+} into the influent, usage of flocculator or inert carrier, inoculation of part of AGS and addition of special strains. The results indicated that the above strategies could effectively shorten the period needed for AGS formation. As a result, the aerobic granulation process could be generally controlled within 30 days or even 20 days. However, there are following deficiencies in the existing research: the lack of unified standard for evaluating

the success of aerobic granulation, in sufficient investigation of rapid aerobic granulation mechanism, and not enough practice test on the obtained achievement. Therefore, a unified standard for evaluating the achievement of aerobic granulation should be firstly developed in future research, which desired to lay the foundation for repetition and promotion of the research results. Then, rapid cultivation mechanism could be explored by capturing in situ information during granulation process, which could provide theoretical guidance for practical applications. Finally, based on the experience of the sale and application of anaerobic granular sludge, productization of AGS could be explored by using the experience of sales and application of anaerobic granular sludge. So the existing cultivation strategies could be integrated and improved, whose reliability could be tested in practice.

Key words: aerobic granular sludge; rapid cultivation; cultivation strategy

好氧颗粒污泥(aerobic granular sludge, AGS)是微生物在特殊环境下形成的颗粒状生物聚合体,它具有许多普通活性污泥难以比拟的优点。得益于这些优点,AGS已成为废水生物处理领域中的研究热点。经过二十多年的发展,AGS已在特性、形成条件、内部生物相、处理各类废水的应用等方面积累了大量积极成果。目前国外最新AGS研究成果已实现小范围工程化应用^[1,2],可以预见工程化应用将是AGS技术日后发展的趋势。相比之下,由于种种原因,国内相关研究尚停留在中试水平。然而,十分有限的公开资料显示AGS技术的大规模应用形势并不乐观,主要表现在反应器中始终会共存着相当比例的絮状污泥^[2],这表明AGS的不稳定性仍是限制其大规模工程化应用的瓶颈。虽然研究者们提出了一些增强AGS稳定性的策略^[3],但绝大多数由于控制条件复杂而难以应用于实际。

除稳定性不足以外,AGS技术还有一些棘手的问题需要解决,如:AGS的形成机理不明、反应器形式较单一、形成条件较苛刻且耗时较长等^[4]。具体表现在:污泥好氧颗粒化的机理目前多停留在假说层面,尚未形成能完全诠释AGS的形成过程的公认理论;目前绝大多数的AGS反应器都是采用间歇式运行模式,半连续流^[5]或连续流AGS反应器的研究成果还非常有限^[6]。与这些棘手问题相比,AGS的培养是相关研究的基础,过长的启动时间不仅耗时费力,而且将大大制约技术的发展。在这种形势下,AGS的快速培养逐渐得到重视,研究者们开展了多元化的研究,取得了一些积极的研究成果。

作为AGS的“同胞兄弟”,厌氧颗粒污泥虽早已成功实现工程化应用,但反应器较长的启动时间(通常3~6个月)在工程应用中一直饱受诟病^[7]。

相比之下,AGS培养所需的时间则相对较短。然而,对于实际应用来说,目前好氧污泥颗粒化所需要的时间还是偏长,且存在着启动失败的风险。

1 AGS形成的影响因素及培养方法

1.1 AGS形成的影响因素

AGS形成的影响因素众多,包括水力选择压(沉降时间、水力剪切力、进水方式等)、生物选择压(碳源、容积负荷、C/N比等)以及其他因素(接种污泥、金属离子、温度等)等诸多方面。针对这些影响因素,研究者们进行了大量的研究,并积累了大量试验数据。研究表明:沉降时间是一种非常重要的选择因素,沉淀时间控制在10 min以上时,SBR中会出现AGS,但絮状污泥占绝对优势,只有当沉淀时间<5 min时,反应器内AGS才能处于主导地位。

1.2 AGS培养方法

目前虽已开展了大量的AGS培养研究,但至今还没有形成一种能定量控制的培养模式。选择压法^[7]是目前广泛采用的一种培养方法,其他方法鲜有报道。选择压法主要原理是通过控制筛选条件(如沉降时间、污染物负荷等)促进AGS的形成,根据对沉降时间的调控,该法大致可分为两类:一类是固定沉降时间,二类是逐步缩短沉降时间。通过总结相关文献可知:以模拟废水为基质时,绝大多数研究中AGS的培养需30 d以上,若以实际废水为处理对象,这个过程的耗时则往往更长。

1997年,Morgenroth等首次在SBR中成功培养出AGS,通过逐步缩短水力停留时间及增大换水率,并采用极短的沉降时间(0~1 min),耗时70 d成功实现好氧污泥颗粒化。随后,Beun等在SBR中直接采用极短的沉降时间(2 min)进行AGS的培养,几天后反应器中便出现了AGS。此后,AGS逐

渐成为研究热点,各种特性的 AGS 不断被培养出来。Arrojo 等^[8]采用极短的沉淀时间及逐渐缩短排水时间的策略培养 AGS,60 d 时成熟 AGS 粒径达到 3.5 mm。Corsino 等^[9]利用高盐废水培养 AGS(沉降时间设为 5 min),30 d 后 2 mm 左右的 AGS 在反应器内占主导。

随着研究的深入,研究者们发现固定极短沉降时间的“暴力”排泥方式虽可在数天内筛选出少量 AGS,但也容易造成启动失败,于是纷纷改用逐步缩短沉降时间的方式培养 AGS,使得选择压法的可靠性大大提高。Wan 等^[10]利用碱性高含磷污水培养 AGS,通过逐步缩短沉降时间(20~2 min)于 38 d 内培养出 1 mm 左右的 AGS。由阳等^[11]以模拟污水为基质,培养过程中逐步缩短沉降时间(15~3 min),并交替改变碳源种类,于 56 d 后培养出富含聚磷菌的 AGS。张胜等^[12]研究了厌氧颗粒污泥向 AGS 的转化,当沉降时间从 10 min 降至 5 min 后的第 40 天出现外观近似球状的 AGS。俞汉青团队以实际城市污水培养 AGS,培养过程中不断缩短沉降时间并增大换水率,分别于 120 d^[13]和 160 d 后在中试 SBR 中获得成熟 AGS^[14]。

除选择压法外,其他培养方法的报道可谓凤毛麟角。肖蓬蓬等^[15]介绍了一种好氧震荡瓶法培养 AGS,28 d 可基本实现好氧污泥颗粒化。竺建荣团队提出了一种交变负荷调控法^[16],使 OLR 在 0.96、1.92 及 3.84 kg/(m³·d)之间交替变化,并固定 SBR 的沉降时间为 10 min,100 d 时完全实现颗粒化。

2 AGS 的快速培养策略

2.1 进水中添加钙镁等金属离子促进 AGS 的形成

在 AGS 成为研究热点之前,大量研究即发现多价阳离子可以促进厌氧污泥颗粒污泥的形成,它们通过与带负电的细胞之间中和或吸附架桥形成晶核以促进厌氧颗粒化进程。同样,研究表明 Ca²⁺、Mg²⁺ 等阳离子亦可加速 AGS 的形成。刘倩倩等^[17]在进水中添加 10 mg/L 的 Mg²⁺,18 d 后 SBR 中大部分污泥已实现好氧颗粒化。刘绍根等^[18]分别添加 50 mg/L 的 Ca²⁺ 及 Mg²⁺ 进行 AGS 的快速培养,两座 SBR 中 AGS 的比例分别在 19 d(只加 Ca²⁺)及 23 d(只加 Mg²⁺)时超过 50%,而空白对照组所需时间 >35 d。Sajjad 等^[19]通过在进水中添加 50 mg/L 的 Mg²⁺,11 d 时在序批式膜生物反应器中观察到

AGS,16 d 时实现完全颗粒化。Li 等^[20]对比了 SBR 的原水添加了 10 mg/L 的 Mg²⁺ 和未添加 Mg²⁺ 的好氧颗粒化进程,粒径 >0.6 mm 的 AGS 比例超过 15% 所需的时间分别为 18 d 和 32 d。

为揭示金属离子促进 AGS 形成的机理,研究者们尝试从 AGS 中钙镁的存在形态寻找答案。Sajjad 等^[21]通过 X 射线光电子能谱(XPS)及傅立叶变换红外光谱(FTIR)发现 Ca²⁺ 极易与 EPS 中多聚糖的羟基相结合,而 Mg²⁺ 则与蛋白质中的酰胺基强烈吸引,这与 1987 年 Mahoney 等提出的厌氧污泥颗粒化中 Ca²⁺ 及 Mg²⁺ 等金属离子能与带负电荷的细胞相吸引、减少细胞之间的斥力研究结果一致。另外,刘绍根等^[18]研究表明 Ca²⁺、Mg²⁺ 的投加可促进细胞分泌更多的 EPS,而这些 EPS 起到了“生物胶水”的作用,它们通过吸附、架桥等作用促进细胞之间的相互凝聚。根据晶核理论,金属离子形成的无机盐可作为颗粒污泥形成的原始晶核并加速颗粒化的进程,而一些研究也检测到 AGS 核心存在 CaCO₃^[21]或 Ca₅(PO₄)₃(OH)^[22]。虽然添加金属离子促进好氧污泥颗粒化的效果明显,但该策略几乎只适用于小试反应器,对于处理实际废水的中试乃至实际工程如何实施尚需论证。

2.2 投加絮凝剂或惰性载体促进 AGS 的形成

基于晶核理论,一些研究者们通过投加混凝剂或惰性载体等作为诱导核,从而加速 AGS 的形成,其中活性炭因具有良好的吸附性能是最常用的载体。刘永军团队^[23~25]在培养前期(前 7 d)反应器排水后投加 20 g/L 的聚合氯化铝(PAC),第 8 天出现了 AGS,25 d 时实现完全颗粒化,对 PAC 投加后的混合策略进行改进,以及将 PAC 改为培养中期(8~14 d)投加后亦取得相似快速培养结果。

Li 等^[26]研究了分别投加颗粒活性炭及粉末活性炭对好氧污泥颗粒化的影响,结果表明:颗粒活性炭的投加大大缩短了好氧污泥颗粒化的进程,而投加粉末活性炭并未明显加速好氧污泥颗粒化;微生物通过在颗粒活性炭上的附着生长,AGS 形成的时间由 6 周缩短至 3 周以内。Zhou 等^[27]研究了低有机负荷下颗粒活性炭对好氧污泥颗粒化的影响,投加了 0.2 mm 的颗粒活性炭的反应器(R2)于 31 d 时成功培养出 AGS,而未投加颗粒活性炭的 R₁ 和投加 0.6 mm 颗粒活性炭的 R₃ 均未观察到明显的污泥颗粒化现象。同样,Li 等^[28]研究投加颗粒活性

炭对以低浓度废水为处理对象时的好氧污泥颗粒化的进程,结果20 d后成功实现好氧污泥颗粒化,而未投加颗粒活性炭的反应器中始终以絮状污泥为主。目前,对于投加的载体是如何促进AGS的形成尚缺乏深入研究,只是推测载体起到了晶核作用。另外,这种培养模式最大的尴尬是所形成的生物聚集体是否能归类为AGS尚值得商榷,毕竟公认的AGS的定义是不依赖于载体而是通过微生物自凝聚形成的生物聚集体。

2.3 接种AGS促进好氧污泥颗粒化

研究表明,接种污泥对好氧污泥颗粒化的进程有明显影响。目前,通过接种不同特性的污泥促进好氧污泥颗粒化已开展了许多研究。研究表明:接种厌氧颗粒污泥并不会明显加速好氧污泥颗粒化进程,且容易出现颗粒的先解体再颗粒化过程^[29];而接种部分成熟AGS或破碎AGS可大大缩短AGS形成所需时间。根据AGS投加时间点的不同,这种培养模式又可分为两种:一是预投加,二是培养过程中投加。Pijuan等^[30]研究了接种不同比例的破碎AGS对好氧污泥颗粒化的影响,发现接种50%破碎AGS的反应器最快可在18 d内实现污泥完全颗粒化,而接种5%的破碎AGS需133 d,未接种时始终没有实现好氧污泥颗粒化。Verawaty等^[31]通过荧光标记探索了接种部分AGS促进好氧污泥颗粒化的机理,荧光显微(EFM)及SEM技术成功观测到絮状污泥黏附接种AGS表面现象,表明接种AGS充当了新颗粒形成的晶核,从而加速了AGS的形成。Long等^[32]首先接种活性污泥,培养过程中逐步缩短沉降时间(25~4 min),待沉降时间缩短至10 min时投加25% (w/w, 相比于反应器内MLSS)的成熟AGS,18 d后于中试规模的SBR中实现污泥完全颗粒化。采用相同策略,当小试SBR的沉降时间缩短至10 min时投加20%的成熟AGS,21 d后成功实现污泥颗粒化^[33]。相比于预接种的培养模式,该模式的培养过程中接种部分AGS可有效保持接种AGS的稳定性,使其不经解体过程直接作为新生颗粒的载体或晶核。

2.4 接种工程菌促进AGS的形成

AGS是微生物自凝聚的产物,而不同菌种的凝聚性能相差较大^[34~36]。因此,利用那些凝聚性能强的菌种来促进AGS的形成值得尝试。Jiang等^[34]研究了投加两种工程菌对活性污泥的好氧颗粒化及苯

酚降解的生物强化效果,7 d后反应器内即观察到200~600 μm 的AGS,23 d后AGS趋于成熟,并指出PG-02菌株表面的黏附蛋白及PG-08的互补性糖受体可与胞外多糖相互缠绕从而发挥凝聚作用。Ivanov等^[35]从AGS中分离出5株絮凝指数超过50%的菌株,考虑到工程菌的安全问题,选择其中的*Pseudomonas veronii* B菌株培养AGS(其他四种菌株均为人类病原细菌),3 d后观察到粒径>0.5 mm的AGS。宋志伟等^[36]对比研究了5个SBAR中不同投加量的絮凝细菌对好氧污泥颗粒化的影响,发现最佳投加量为10 mL/L时AGS形成时间为35 d,而未投加絮凝细菌时需42 d。于广丽等^[37]在SBR利用活性污泥培养AGS的过程中接种厚垣孢子,结果7 d便成功培养出白色的AGS。虽然接种工程菌促进好氧污泥颗粒化的效果明显,但目前这方面的研究还较少,主要是工程菌的筛选复杂且使用成本较高。另外,进入到环境中的工程菌的安全问题是个不可忽视的因素。

3 现有研究的不足

由于AGS形成的影响因素众多,实际操作过程中是不可能统筹照顾到所有影响因素的,以致目前还没有形成一种高效、可靠的快速培养模式。而现有的这些快速培养模式存在着以下不足。

① 缺乏统一的衡量好氧污泥颗粒化成功的标准

目前,尚没有形成一种公认的用于评价污泥颗粒化成功的标准,不同研究者提出的衡量标准还比较单一,主要以粒径及颗粒化率为评价依据。事实上,即便多大粒径的污泥可定义为颗粒污泥亦存在争议。Tiwari等^[38]将粒径>0.34 mm的污泥视为厌氧颗粒污泥,当0.34 mm以上的颗粒比例超过50%时视为培养成功。而Ivanov等^[35]将0.5 mm的污泥视为AGS。Long等^[32,33,39]将粒径>0.3 mm的污泥视为AGS,认为应以AGS在反应器内所占的质量比例作为认定标准,提出当AGS所占比例超过90%时视为培养成功。由于评价标准的多样化,导致各研究结果之间缺乏可比性,且一些研究结论是否可靠值得质疑。另外,除了理化特性外,AGS对污染物的去除效果亦是一个重要考察因素,但在确定好氧污泥颗粒化成功时极少将其纳入。因此,究竟如何衡量成功实现好氧污泥颗粒化仍需系统论证。

② 污泥快速好氧颗粒化的机理缺乏深入研究

目前,好氧污泥颗粒化的机理仍不明晰,大部分的研究只停留在假说层面。在这种形势下,大部分 AGS 快速培养的机理也都是依赖现有假说进行推测,真正在培养过程中捕捉到的原位微观信息还非常匮乏。而已捕捉到的少量原位信息也往往不能代表所有微生物都经历了这一过程,所以会出现新的研究成果与前期结论相悖的情况^[21,22]。由于缺乏理论指导,导致现有多样化的快速培养的模式。因此,究竟是什么机制驱使微生物在短时间内的相互凝聚仍需深入研究。

③ 现有快速培养模式是否适用需实践检验

目前,绝大多数研究成果都来源于运行条件严格控制的小试装置,几乎未见针对处理实际废水的中试乃至实际规模的反应器中快速培养 AGS 的研究报道。由于未考虑放大后的具体实施细节及成本,因此,现有研究成果是否能为实际工程服务仍是未知数。

4 结语

AGS 的快速培养模式主要分为四类,即:进水中添加钙镁等金属离子、投加惰性载体、接种部分 AGS 及投加特殊菌种等。以上策略可有效缩短 AGS 形成所需时间,一般可将好氧污泥颗粒化的时间控制在 30 d 甚至 20 d 以内。然而,现有研究亦存在着不足,故提出以下建议:

① 利用现代生物分析技术,如荧光原位杂交技术(FISH)、激光共聚焦(CLSM)等加强快速培养过程中微生物相的监测,获取好氧污泥颗粒化过程中的微观原位信息,深入阐释快速颗粒化的机理;

② 借鉴厌氧颗粒污泥的销售及使用经验,探索 AGS 的产品化途径,对现有好氧污泥颗粒化快速培养模式进行整合及改善,在中试甚至实际规模的反应器中进行运用,检验其可靠性。

参考文献:

- [1] 郝晓地,孙晓明,Mark van Loosdrecht. 好氧颗粒污泥技术工程化进展一瞥[J]. 中国给水排水,2011,27(20):9-12.
- [2] Pronk M, Kreuk M K D, Bruin B D, *et al.* Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment[J]. Water Res, 2015, 84: 207-217.
- [3] 唐朝春,简美鹏,刘名,等. 强化好氧颗粒污泥稳定性的研究进展[J]. 化工进展,2013,32(4):919-924.
- [4] Zhang Q G, Hu J J, Lee D J. Aerobic granular processes: Current research trends [J]. Bioresour Technol, 2016, 210: 74-80.
- [5] 龙焙,杨昌柱,濮文虹,等. SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究[J]. 环境科学,2014,35(5):1857-1865.
- [6] 闻香兰,但昭和. 好氧颗粒污泥的连续化研究进展[J]. 化工进展,2015,34(11):4059-4064.
- [7] Lim S J, Kim T H. Applicability and trends of anaerobic granular sludge treatment processes[J]. Biomass Bioenergy, 2013, 60(1):189-202.
- [8] Arrojo B, Mosqueracorrall A, Garrido J M, *et al.* Aerobic granulation with industrial wastewater in sequencing batch reactors[J]. Water Res, 2004, 38: 3389-3399.
- [9] Corsino S F, Campo R, Bella G D, *et al.* Cultivation of granular sludge with hypersaline oily wastewater[J]. Int Biodeter Biodegr, 2015, 105: 192-202.
- [10] Wan C, Lee D J, Yang X, *et al.* Calcium precipitate induced aerobic granulation[J]. Bioresour Technol, 2015, 176: 32-37.
- [11] 由阳,彭轶,袁志国,等. 富含聚磷菌的好氧颗粒污泥的培养与特性[J]. 环境科学,2008,29(8):2242-2248.
- [12] 张胜,孔云华,张铭川,等. 不同基质培养条件下的好氧颗粒污泥特性研究[J]. 环境科学研究,2008,21(2):136-139.
- [13] Ni B J, Xie W M, Liu S G, *et al.* Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater[J]. Water Res, 2009, 43(3):751-761.
- [14] 刘绍根,梅子鲲,谢文明,等. 处理城市污水的好氧颗粒污泥培养及形成过程[J]. 环境科学研究,2010,23(7):918-923.
- [15] 肖蓬蓬,曹德菊,李浩,等. 3 种金属离子对好氧颗粒污泥形成及污染控制影响[J]. 四川农业大学学报,2012,30(3):342-347.
- [16] 李慧琴,涂响,孔云华,等. 交变负荷调控法培养好氧颗粒污泥的试验研究[J]. 环境科学,2010,31(3):743-749.
- [17] 刘倩倩,李小明,杨麒,等. Mg^{2+} 对 SBR 中好氧颗粒污泥培养的影响研究[J]. 中国给水排水,2008,24(17):31-35.
- [18] 刘绍根,孙菁,徐锐. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对好氧污泥快速颗粒化的影响研究[J]. 环境科学学报,2014,18(6):26-28.
- [19] Sajjad M, Kim K S. Influence of Mg^{2+} catalyzed granular sludge on flux sustainability in a sequencing batch

- membrane bioreactor system[J]. Chem Eng J, 2015, 281:404–410.
- [20] Li X M, Liu Q Q, Qi Y, *et al.* Enhanced aerobic sludge granulation in sequencing batch reactor by Mg^{2+} augmentation[J]. Bioresour Technol, 2009, 100(1):64–67.
- [21] Sajjad M, Kim K S. Studies on the interactions of Ca^{2+} and Mg^{2+} with EPS and their role in determining the physicochemical characteristics of granular sludges in SBR system[J]. Process Biochem, 2015, 50(6):966–972.
- [22] Manas A, Biscans B, Spérandio M. Biologically induced phosphorus precipitation in aerobic granular sludge process[J]. Water Res, 2011, 45(12):3776–3786.
- [23] 宋雪松, 刘永军, 刘喆, 等. 混凝强化形成好氧颗粒污泥[J]. 环境工程学报, 2014, 8(3):929–934.
- [24] Liu Z, Liu Y J, Kuschik P, *et al.* Poly aluminum chloride (PAC) enhanced formation of aerobic granules: Coupling process between physicochemical-biochemical effects[J]. Chem Eng J, 2015, 284:1127–1135.
- [25] 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, (1):278–284.
- [26] Li A J, Li X Y, Yu H Q. Aerobic sludge granulation facilitated by activated carbon for partial nitrification treatment of ammonia-rich wastewater[J]. Chem Eng J, 2013, 218(3):253–259.
- [27] Zhou J H, Zhao H, Hu M, *et al.* Granular activated carbon as nucleating agent for aerobic sludge granulation: Effect of GAC size on velocity field differences (GAC versus flocs) and aggregation behavior[J]. Bioresour Technol, 2015, 198:358–363.
- [28] Li A J, Li X Y, Yu H Q. Granular activated carbon for aerobic sludge granulation in a bioreactor with a low-strength wastewater influent[J]. Sep Purif Technol, 2011, 80(2):276–283.
- [29] Muda K, Aris A, Salim M R, *et al.* Development of granular sludge for textile wastewater treatment[J]. Water Res, 2010, 44(15):4341–4350.
- [30] Pijuan M, Werner U, Yuan Z. Reducing the startup time of aerobic granular sludge reactors through seeding floccular sludge with crushed aerobic granules[J]. Water Res, 2011, 45(16):5075–5083.
- [31] Verawaty M, Pijuan M, Yuan Z, *et al.* Determining the mechanisms for aerobic granulation from mixed seed of floccular and crushed granules in activated sludge wastewater treatment[J]. Water Res, 2012, 46(3):761–771.
- [32] Long B, Yang C Z, Pu W H, *et al.* Rapid cultivation of aerobic granular sludge in a pilot scale sequencing batch reactor[J]. Bioresour Technol, 2014, 166(8):57–63.
- [33] Long B, Yang C Z, Pu W H, *et al.* Rapid cultivation of aerobic granule for the treatment of solvent recovery raffinate in a bench scale sequencing batch reactor[J]. Sep Purif Technol, 2015, 160:1–10.
- [34] Jiang H L, Tay J H, Maszenan A M, *et al.* Enhanced phenol biodegradation and aerobic granulation by two co-aggregating bacterial strains[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40(19):6137–6142.
- [35] Ivanov V, Wang X H, Stabnikova O. Starter culture of *Pseudomonas veronii* strain B for aerobic granulation[J]. World J Microbiol Biotechnol, 2008, 24(4):533–539.
- [36] 宋志伟, 童龙燕, 潘月军, 等. 絮凝细菌投加量对好氧颗粒污泥性能影响的研究[J]. 环境科学, 2010, 31(5):1263–1268.
- [37] 于广丽, 李平, 王海磊. 好氧颗粒污泥的快速驯化及其动力学研究[J]. 河南师范大学学报:自然科学版, 2011, 39(6):129–132.
- [38] Tiwari M K, Guha S, Harendranath C S, *et al.* Enhanced granulation by natural ionic polymer additives in UASB reactor treating low-strength wastewater[J]. Water Sci Technol, 2005, 39(16):3801–3810.
- [39] Long B, Yang C Z, Pu W H, *et al.* Rapid cultivation of aerobic granular sludge in a continuous flow reactor[J]. J Environ Chem Eng, 2015, 3(4):2966–2973.



作者简介:龙焔(1986–), 男, 湖北黄冈人, 博士, 讲师, 研究方向为废水处理技术与设备。

E-mail:17770132146@189.cn

收稿日期:2017–05–31