

述评与讨论

藻酸盐污水处理合成研究现状与应用前景

曹达啟, 王 振, 郝晓地, 仇付国

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室 可持续环境
生物技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 藻酸盐作为一类多糖类物质,不仅可以从海洋褐藻中提取,也是固氮菌与假单胞菌在特定环境下利用有机物合成的高附加值生物聚合物。而污水生物处理过程,特别是被誉为下一代污水处理技术的好氧颗粒污泥,在特定环境条件下可以从其成粒过程分泌出大量的藻酸盐胞外聚合物(EPS)。这就为污水资源化以及神秘的好氧颗粒污泥技术增添了几分工程应用色彩,也为污水中有机物(COD)资源化应用开辟了新途径。简要介绍了藻酸盐的来源与特性,分析微生物纯培养合成藻酸盐过程以及影响因素,总结污水处理过程中合成藻酸盐研究现状,并对藻酸盐与细胞分离、回收予以阐述。

关键词: 藻酸盐; 污水处理; 好氧颗粒污泥; 固氮菌; 假单胞菌; 胞外聚合物(EPS)

中图分类号: X703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)04-0001-06

Research Situation and Application Prospects on Alginate Bio-synthesized from Wastewater Treatment

CAO Da-qi, WANG Zhen, HAO Xiao-di, QIU Fu-guo

(R & D Centre for Sustainable Wastewater Treatment, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: As a natural polysaccharide, alginate is a high value-added biopolymer, which can be extracted not only from brown seaweed, but also could be secreted by azotobacter and pseudomonas with utilizing organic matters under some specific environments. Moreover, aerobic granular sludge, a next generation technology of biological wastewater treatment, could produce a large number of alginate in the form of extracellular polymeric substance (EPS) under some specific environments. For this reason, both resource recovery and engineering application could be accelerated by mysterious aerobic granular sludge, which would open a new approach to converting organic (COD) into resource. With this article, four aspects about alginate are elucidated: 1) sources and properties of alginate; 2) biosynthetic process and controlling factors of alginate production in pure cultures; 3) research and application situation of alginate bio-synthesized from wastewater; 4) separation and recovery of alginate from cells.

Key words: alginate; wastewater treatment; aerobic granular sludge; azotobacter; pseudo-

monas; extracellular polymeric substances (EPS)

资源化与能源化是污水处理的未来发展方向,也是人类可持续发展的必然^[1,2]。今后,单纯处理、净化污水的技术研发将不再扮演主角,代之以回收污水中磷资源,并向着污水处理“碳中和”运行方向迈进的技术^[3]。换言之,“一个中心(可持续)、两个基本点(磷回收与碳中和)将主导未来的污水处理技术^[3]。对此,荷兰已将未来污水处理厂形象地描述为三厂合一模式,即所谓的 NEWs 概念^[4]。“中水”在传统处理工艺被视为“主”产品,而在 NEWs 概念下只不过是一种“副”产品,因为污水中蕴含的营养物质与能源比中水要金贵得多;况且,营养物质(N、P)与能源(COD→CH₄)被回收后水同时得到净化,使中水成为名副其实的副产品^[5]。其实,污水除营养物之外,还有更多有用、价值更高的资源有待开发。例如,美国已着手对污水中贵金属的回收研发^[6];欧洲人则开始研究回收污水中的纤维素^[7],并以污水中有机物(COD)来合成生物塑料成分——PHA^[8],甚至回收具有高附加值的生物聚合物——藻酸盐^[1,9]。其中,在污水处理过程中合成藻酸盐是近年来污水处理研究领域发现的一种特有现象,普遍存在于好氧颗粒污泥工艺之中^[10~14]。

藻酸钠是藻酸盐应用最为广泛的一种形式,是一种具有较高附加值的生物聚合物,通常来源于海带、巨藻等褐藻类海藻植物。因藻酸钠凝胶具有强度高、增稠性好、保水能力强等特点,因此应用广泛。目前,工业获取藻酸钠主要是从海藻中提取,但是生产成本较高,且藻酸钠成分易受季节变化的影响。此外,从海藻中提取藻酸钠还会产生大量生产废水;每生产1 t藻胶及其碘产品通常需要1 200 m³以上的淡水,并消耗大量煤炭、酸、碱等化学品;产生的废水中含有难以回收利用的糖胶、色素、纤维素等有机物,并含有大量无机离子(如Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻等)^[15,16]。

有鉴于此,研究人员尝试通过纯微生物培养方式,经假单胞菌属或固氮菌属细菌来生物合成藻酸盐^[17]。通过定向调控细菌产藻酸盐之特性,优化培养条件,稳定产胶能力,可以生物合成各种具有特定结构性能的藻酸盐。但是,该方法的缺点是需要投加大量有机营养物作为生产原料,会使得生产成本大幅提高^[17]。近年来,一些研究人员在研发污水处

理技术过程中,发现好氧颗粒污泥成粒过程以及成熟过程始终含有较高含量的藻酸盐^[10~14,18~20]。联想到上述藻酸盐微生物纯培养中需要消耗大量有机添加物,van Loosdrecht 等人率先提出可以利用污水中 COD 来作为细菌生物合成藻酸盐的有机物,并通过好氧颗粒污泥特有的成粒现象来实现藻酸盐定向生产^[1]。这样不仅可拓展藻酸盐生物合成渠道,而且亦可避免微生物纯培养时对有机营养物的需求,更为重要的是这种途径还为污水处理资源化拓展了一条新路,亦可推动好氧颗粒污泥技术的广泛应用。

基于以上分析,首先简要介绍藻酸盐的来源与特性。然后,论述微生物纯培养合成藻酸盐过程,以期了解污水处理过程中藻酸盐产生的原因及影响因素。最后,总结相关文献,并论述好氧颗粒污泥工艺回收藻酸盐的可行性。

1 藻酸盐来源与特性

藻酸盐又名褐藻酸盐、海带胶、褐藻胶、海藻酸盐,是由β-D-甘露糖醛酸残基(β-D-mannuronic acid,记为M)与其同分异构体α-L-古罗糖醛酸残基(α-L-guluronic acid,记为G),通过α(1→4)糖苷键连接而成的线型嵌段共聚物。

藻酸盐最突出的特性是能与二价以上金属离子在温和的条件下形成凝胶,且与二价金属阳离子结合具有一定的选择性,结合顺序依次为:Mg²⁺ < Mn²⁺ < Ca²⁺ < Sr²⁺ < Ba²⁺ < Cu²⁺ < Pb²⁺。藻酸盐与金属的结合能力与藻酸盐的结构组成密切相关,随着G残基增多,藻酸盐与金属的结合能力变强,即与二价金属离子的结合形成凝胶能力依次为:MM区 < MG区 < GG区。

2 藻酸盐纯培养生物合成

利用海洋褐藻生产的藻酸盐,其化学组成随着季节和气候变化而改变,即使在同一株褐藻中,不同部位提取出来的藻酸盐组成成分也不尽相同,这就使得从褐藻中提取的藻酸盐具有结构多样性与性质不稳定性。如上所述,除海洋褐藻外,藻酸盐亦可由两类微生物——固氮菌属和假单胞菌属微生物合成。通过生物工程技术纯培养这两类微生物,可以定向调控细菌合成藻酸盐的特性,从而合成各种具有特定结构、性能稳定的藻酸盐^[17]。当受到外界环境刺激时,固氮菌属和假单胞菌属细菌可能分泌藻

酸盐^[17,21,22],这是导致藻酸盐普遍存在于污水生物处理系统絮状污泥和颗粒污泥中的主要原因。因此,深入揭示固氮菌和假单胞菌合成藻酸盐的特性以及外界刺激合成条件非常重要。

2.1 棕色固氮菌合成藻酸盐

棕色固氮菌与其他固氮菌的区别在于其胞外可形成一层以藻酸盐为主要成分的休眠胞囊,该结构对细胞维持正常生理代谢至关重要^[17]。尽管固氮菌科的褐球固氮菌也可以生物合成藻酸盐,但研究人员主要以棕色固氮菌作为研究对象^[17]。

碳、氮、磷等营养物以及溶解氧会影响棕色固氮菌生产藻酸盐潜能,不同的碳源会影响藻酸盐的生物合成。例如,模拟碳源葡萄糖优于蔗糖;搅拌速度越快,DO 越高将增加藻酸盐产量;无机磷与氮源均有利于合成藻酸盐。氮源缺乏和 C/N 值也将影响棕色固氮菌合成藻酸盐产量及其分子质量^[23]。另外,氧的传递速率与细胞生长速率也将影响生物合成藻酸盐的分子质量;为了抵抗不利环境条件(如氧气或底物缺乏),棕色固氮菌在其细胞表面分泌的藻酸盐分子质量将增大^[24]。通常情况下,棕色固氮菌在生物合成藻酸盐的同时会分泌藻酸盐裂解酶,因此,通过基因工程技术获得不分泌藻酸盐裂解酶的棕色固氮菌,或者抑制藻酸盐裂解酶的分泌,也是促进藻酸盐生产的有效方法。同时,在纯培养过程中,也应该避免因藻酸盐浓度升高、相应培养液粘度增大而带来的搅拌过程所需能耗的增加。

其次,操作条件也将影响藻酸盐的合成。通过改造反应器的类型,例如利用鼓泡反应器能控制生物合成藻酸盐中单体的组成,使得 G 单体占主要成分。利用基于 SBR 两段式发酵工艺可培养棕色固氮菌生产藻酸盐^[25]。两段控制不同 DO 分压,在第一阶段可获得较多生物量,第二阶段则用于生物合成藻酸盐,能显著提高藻酸盐的产量^[25]。另外,也可利用 SBR 反应器与膜组件相结合系统培养棕色固氮菌生产藻酸盐,微生物因膜组件截留而保留在反应器中,藻酸盐则会源源不断地从反应器中得以回收,从而提高藻酸盐的产量;同时,利用细胞固定技术亦可提高藻酸盐的产量,并增加其分子质量。

2.2 假单胞菌合成藻酸盐

在假单胞菌生产藻酸盐的过程中有可能伴随毒性物质的分泌,这使得人们主要研究固氮菌合成藻酸盐。尽管如此,在一些特殊行业,如生物医药领

域,假单胞菌合成藻酸盐却被持续关注^[17,26]。

藻酸盐为假单胞菌生物膜的主要成分之一,其生物合成受到各种环境因素的影响,如氧、高渗透压、乙醇、氮源、磷酸盐等。1986 年 Krieg 等在按 1:1 配比培养类黏型与非类黏型铜绿假单胞菌的实验中观察发现,氧气对类黏型铜绿假单胞菌具有定向选择作用,而非类黏型铜绿假单胞菌对于氧气十分敏感;在恒化培养条件下,非类黏型铜绿假单胞菌在氧气存在的环境压力下可以生物合成藻酸盐。铜绿假单胞菌在微氧环境下生长,主要由两种机制支配:①氧气传输速度下降;②细胞表面多糖荚膜形成^[17]。氯化钠和乙醇对于荧光假单胞菌分泌藻酸盐具有一定的促进作用,即渗透压与脱水性是藻酸盐分泌的诱导因素。温度和搅拌强度也将影响藻酸盐的合成,且存在最佳的温度与搅拌强度值。在荧光假单胞菌的 SBR 发酵实验中,以果糖为营养物比葡萄糖更能促进藻酸盐的生成。

综合以上两类微生物合成藻酸盐情况可知,营养物类型及其浓度、氧含量以及传递速度、培养温度、工艺运行条件等均会影响细菌生产藻酸盐的特性(分子质量与 G/M 值)、产量以及系统所需能耗。此外,这两类微生物大多是在对数增长期内合成藻酸盐。因此,在污水处理过程中合理控制工艺条件,保证污泥中微生物始终处于对数增长期将加速合成藻酸盐的速率。

3 污水处理过程中合成藻酸盐

在一定环境条件刺激下,两类细菌能够分泌高附加值的藻酸盐,况且,固氮菌属和假单胞菌属普遍存在于活性污泥之中,并有可能成为优势种属,这就为污水生物处理过程合成藻酸盐创造了可能性。理论上,只要满足上述环境条件,在混合菌种培养的活性污泥中这两类细菌应该会分泌藻酸盐。事实上,一些文献已经证实了活性污泥中藻酸盐的存在^[10~14,18~20,27]。

3.1 污水处理系统中的藻酸盐

1992 年 Bruus 等在研究活性污泥絮体脱水性能过程中发现,污泥胞外聚合物与二价离子结合的性质类似于藻酸盐;较之 Mg^{2+} ,絮体污泥对 Ca^{2+} 和 Cu^{2+} 具有较强的亲和力。因污泥中藻酸盐这一特性与从海洋褐藻中提取的藻酸盐十分相似,所以, Bruus 等首次推断在污水生物处理系统中可能存在藻酸盐。王琳和林跃梅^[27]研究表明,在红外光谱分

析鉴定下,从好氧颗粒污泥中提取到占颗粒污泥干质量约35%的细菌藻酸盐。尽管存在红外光谱分析鉴定胞外聚合物与相应提取方法的局限性^[20],但是,毋庸置疑的是多名研究者均声称他们从活性污泥中提取出了藻酸盐^[10~14]。Lin等^[10]从中试规模好氧颗粒污泥处理系统中提取得到占干污泥质量16%左右的藻酸盐,并且通过鉴定得到其中古罗糖残基(GG区)占比约69%。继而,他们还比较了好氧絮凝污泥与好氧颗粒污泥中提取出的藻酸盐物理化学性质之差异;实验结果显示,好氧颗粒污泥较好氧絮凝污泥合成的藻酸盐中古罗糖残基(GG区)更多,这刚好与污泥絮凝的藻酸盐理论一致,因为藻酸盐中GG区比MM区具有更强的成胶能力,从而污泥絮凝成为颗粒状^[11]。Yang等^[12]通过丙烯酸盐模拟废水,研究不同有机负荷(OLR)下好氧颗粒污泥性能发现,OLR突然增加将促进污泥组成微生物,如假单胞菌、梭状芽胞杆菌、索氏菌属、节杆菌属分泌胞外环鸟苷二磷酸(c-di-GMP)等的生长。因c-di-GMP为藻酸盐产生的前体,从而产生大量藻酸盐。但是,他们获得的藻酸盐中并没有发现较丰富的古罗糖残基,这可能是好氧颗粒污泥培养中营养源不同所致。Gonzalez-Gil等^[13]基于核磁共振(NMR)和电离飞行时间质谱(MALDI-TOF MS)鉴定,证实在实际厌氧颗粒污泥反应工艺中藻酸盐实际扮演着微生物胞外聚合物——EPS之角色(主要成分)。Sam等^[14]以合成废水与啤酒废水为处理目标研究了传统絮凝污泥和好氧颗粒污泥中含有的胞外多糖物理化学特性[包括成胶能力、形态学(SEM观察)、凝胶含水率以及基于红外光谱的化学结构],实验得到的结果与商业藻酸钠十分相似。

因藻酸盐作为一种胞外多糖普遍存在于活性污泥中,所以许多研究者在机理研究过程中,通常采用藻酸盐模拟胞外多糖方式进行。例如,Wang等^[28]为模拟絮凝形成过程以及调查污泥的物理化学特性,用藻酸盐和乳胶颗粒模拟制得了污泥,经实验验证获得与实际活性污泥性能类似结论;Li等^[29]在研究好氧颗粒污泥形成机理中,采用藻酸盐作为微生物胞外聚合物(EPS)。进言之,在MBR污水处理工艺中,因胞外分泌物构成了主要的膜污染,所以,众多研究者^[30~32]采用藻酸盐作为模型胞外分泌物(EPS),进行膜分离机理与膜污染去除行为的研究,尝试揭示EPS膜污染机理以及寻求控制膜污染的方法。

3.2 好氧颗粒污泥中藻酸盐及回收可行性

好氧颗粒污泥是通过微生物自凝聚作用形成的颗粒状活性污泥。与普通活性污泥相比,好氧颗粒污泥具有易沉降、不易发生污泥膨胀、抗冲击能力强、能承受高有机负荷、集不同性质的微生物(好氧、兼氧和厌氧微生物)于一体等特点。微生物自絮凝作用本质原因可归结为胞外分泌EPS,而藻酸盐是EPS的主要组成成分^[10,11]。研究已经发现,好氧颗粒污泥特有成粒现象可以实现多糖类EPS——藻酸盐生物合成,所形成的污泥中藻酸盐含量高达15%~20%(污泥干质量)^[9~11]。由此可见,污水合成藻酸盐不仅进一步拓展了污水资源化的渠道,同时也必将推动被誉为下一代污水处理技术^[1]的好氧颗粒污泥工艺之广泛工程应用。

藻酸盐可以在活性污泥中合成,但是它们并不能自行从污泥中“脱颖而出”。这就为污水合成藻酸盐后续分离、回收带来了新的问题。如上所述,藻酸盐实际上是假单胞菌属和固氮菌属这两类微生物所分泌的EPS^[17]。图1^[33]显示了微生物的五个发展阶段,伴随着微生物逐渐繁殖,EPS不断分泌。EPS其实是在特定环境下细菌新陈代谢所分泌的、包裹在细胞壁外的高分子聚合物。EPS具有复杂的化学组成,占总量75%~89%之多的多糖和蛋白质是两种最主要的成分,而核酸、腐殖质、糖醛酸、脂类、氨基酸以及一些无机成分的含量相对较低。

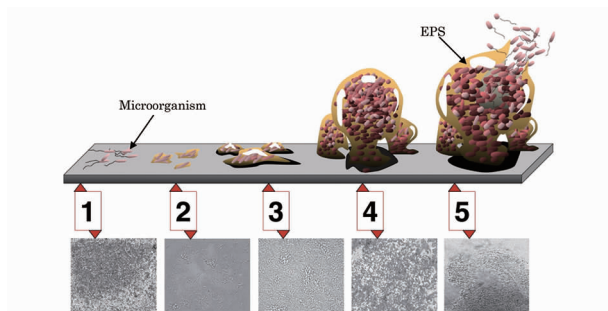


图1 微生物五个发展阶段:微生物繁殖与EPS分泌

Fig.1 Five developmental stages of microorganism: reproduction and EPS secretion

显然,回收污泥中胞外多糖——藻酸盐的关键是首先将微生物菌体与其表面的EPS分离开来。因污水中存在多种二、三价金属离子,所以,活性污泥中藻酸盐往往以非溶解态盐,如钙盐、镁盐、铁盐等形式存在^[29,34]。其次,由于藻酸盐与微生物等悬

浊颗粒表面的电性中和、亲疏水性等作用,藻酸盐也大部分存在于污泥絮体中。因藻酸盐为古罗糖醛酸残基与甘露糖醛酸残基构成,且一价钠盐、钾盐在水中以溶解态形式存在,所以,可以向沉淀的好氧颗粒污泥中加入碱,将藻酸盐转化为藻酸钠或藻酸钾,从而解体颗粒污泥,分离藻酸盐与微生物等悬浊颗粒。根据最新文献资料,研究者均以碱洗为关键步骤,从好氧颗粒污泥中提取藻酸盐^[10~12,14,27]。王琳和林跃梅^[27]利用 Na_2CO_3 将好氧颗粒污泥由凝胶颗粒转化为溶胶,然后参照藻类中藻酸盐的提取方法(如钙凝-酸化法^[35]),分离提取得到了藻酸盐。Lin等^[10,11]、Yang等^[12]和Sam等^[14]将好氧颗粒污泥或活性污泥进行干燥,得到干物质后再加入碱试剂反应,再经反复离心分离、pH调节和乙醇脱水等步骤,最后回收得到藻酸钠固体粉末。

污水合成藻酸盐,尽管目前研究关注点主要集中在好氧颗粒污泥,然而,通过以上论述不难发现,只要环境条件符合,刺激混合微生物污泥培养体系中固氮菌属与假单胞菌细菌分泌藻酸盐,不限于好氧颗粒污泥,絮凝污泥、生物膜甚至厌氧颗粒污泥亦可能生物合成藻酸盐。

4 结语

藻酸盐作为一类多糖类物质,不仅可以从海洋褐藻中提取,也是一些细菌在特定环境下利用有机物合成的高附加值生物聚合物。研究发现,假单胞菌或棕色固氮菌在营养物、溶解氧、温度以及工艺条件等刺激作用下可以分泌大量藻酸盐,而污水生物处理过程中假单胞菌或棕色固氮菌是普遍存在的。这就为从污水处理过程中合成藻酸盐奠定了理论基础,也为污水资源化开辟了新路。

许多实验已经发现,好氧颗粒污泥特有的成粒过程可分泌较多含量(达污泥干质量的15%~20%)的藻酸盐,这不仅为污水处理合成藻酸盐奠定了应用基础,也为其作为下一代污水处理技术增添了几分资源化色彩。藻酸盐因可与二、三价金属离子(如钙离子)结合形成凝胶,所以,成为颗粒污泥中形成藻酸盐的主要原因。

藻酸盐作为一种胞外聚合物(EPS),其分泌形成后,与细胞分离、回收将制约从污水处理过程中合成藻酸盐的工程应用。因此,研究藻酸盐与细胞有效分离的方法就变得非常重要,这将是今后污水处理合成藻酸盐研究的一个重要攻关方向。

参考文献:

- [1] van Loosdrecht M C M, Brdjanovic D. Anticipating the next century of wastewater treatment: advances in activated sludge sewage treatment can improve its energy use and resource recovery[J]. *Science*, 2014, 344(6191): 1452-1453.
- [2] 郝晓地. 污水处理碳中和运行技术[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [3] 郝晓地, 张健. 污水处理的未来:回归生态文明[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(20): 1-8.
- [4] 郝晓地, 金铭, 胡沅胜. 荷兰未来污水处理新框架——NEWs及其实践[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(20): 7-15.
- [5] 郝晓地. 可持续污水-废物处理技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
- [6] Paul W, Sungyun L, Yu Y, et al. Characterization, recovery opportunities, and valuation of metals in municipal sludges from U. S. wastewater treatment plants nationwide[J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(16): 9479-9488.
- [7] Ruiken C J, Breuer G, Klaversma E, et al. Sieving wastewater-cellulose recovery economic and energy evaluation[J]. *Water Res*, 2013, 47(1): 43-48.
- [8] Guest J S, Skerlos S J, Barnard J L, et al. A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(16): 6126-6130.
- [9] van der Roest H, van Loosdrecht M C M, Langkamp E J, et al. Recovery and reuse of alginate from granular Nereda sludge[J]. *Water* 21, 2015, (4): 48-48.
- [10] Lin Y M, de Kreuk M K, van Loosdrecht M C M, et al. Characterization of alginate-like exopolysaccharides isolated from aerobic granular sludge in pilot plant[J]. *Water Res*, 2010, 44(11): 3355-3364.
- [11] Lin Y M, Sharma P K, van Loosdrecht M C M. The chemical and mechanical differences between alginate-like exopolysaccharides isolated from aerobic flocculent sludge and aerobic granular sludge[J]. *Water Res*, 2013, 47(1): 57-65.
- [12] Yang Y C, Liu X, Wan C L, et al. Accelerated aerobic granulation using alternating feed loadings: Alginate-like exopolysaccharides[J]. *Bioresour Technol*, 2014, 171: 360-366.
- [13] Gonzalez-Gil G, Thomas L, Emwas A H, et al. NMR and MALDI-TOF MS based characterization of exopolysaccharides in anaerobic microbial aggregates from full-scale

- reactors[J]. Sci Rep,2015,doi:10.1038/srep14316.
- [14] Sam S B, Dulekgurgen E. Characterization of exopolysaccharides from floccular and aerobic granular activated sludge as alginate-like-exoPS [J]. Desalin Water Treat,2016,57:2534-2545.
- [15] Li G J, Zhang Z J. Anaerobic biological treatment of alginate production wastewaters in a pilot-scale expanded granular sludge bed reactor under moderate to low temperatures[J]. Water Environ Res,2010,82(8):725-732.
- [16] 李陶陶. 褐藻胶生产节能减排关键技术点的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.
- [17] Rehm B H A. Alginates: Biology and Applications[M]. Münster: Springer,2009.
- [18] Lin Y M, Wang L, Chi Z M, et al. Bacterial alginate role in aerobic granular bio-particles formation and settleability improvement[J]. Sep Sci Technol,2008,43(7):1642-1652.
- [19] Seviour T, Pijuan M, Nicholson T, et al. Gel-forming exopolysaccharides explain basic differences between structures of aerobic sludge granules and floccular sludges[J]. Water Res,2009,43(18):4469-4478.
- [20] Seviour T, Yuan Z G, van Loosdrecht M C M, et al. Aerobic sludge granulation: a tale of two polysaccharides[J]. Water Res,2012,46(15):4803-4813.
- [21] Celik G Y, Aslim B, Beyatli Y. Characterization and production of the exopolysaccharide (EPS) from *Pseudomonas aeruginosa* G1 and *Pseudomonas putida* G12 strains[J]. Carbohydrate Polymers,2008,73(1):178-182.
- [22] 钱飞跃,王琰,王建芳,等. 好氧颗粒污泥中凝胶型聚多糖的特性研究进展[J]. 化学通报,2015,78(4):320-324.
- [23] Zapata-Velez A M, Trujillo-Roldan M A. The lack of a nitrogen source and/or the C/N ratio affects the molecular weight of alginate and its productivity in submerged cultures of *Azotobacter vinelandii* [J]. Ann Microbiol,2010,60(4):661-668.
- [24] Diaz-Barrera A, Pena C, Galindo E. The oxygen transfer rate influences the molecular mass of the alginate produced by *Azotobacter vinelandii* [J]. Appl Microbiol Biotechnol,2007,76(4):903-910.
- [25] Mejía M A, Segura D, Espín G, et al. Two-stage fermentation process for alginate production by *Azotobacter vinelandii* mutant altered in poly-β-hydroxybutyrate (PHB) synthesis[J]. J Appl Microbiol,2010,108(1):55-61.
- [26] Wang Y, Hay I D, Rehman Z U, et al. Membrane-anchored MucR mediates nitrate-dependent regulation of alginate production in *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Appl Microbiol Biotechnol,2015,99(17):1-13.
- [27] 王琳,林跃梅. 好氧颗粒污泥中细菌藻酸盐的提取和鉴定[J]. 中国给水排水,2007,23(24):88-91.
- [28] Wang L L, Chen S, Zheng H T, et al. A new polystyrene-latex-based and EPS-containing synthetic sludge [J]. Frontiers Environ Sci Eng,2012,6(1):131-139.
- [29] Li Y, Yang S F, Zhang J J, et al. Formation of artificial granules for proving gelation as the main mechanism of aerobic granulation in biological wastewater treatment [J]. Water Sci Technol,2014,70(3):548-554.
- [30] Meng S J, Liu Y. Alginate block fractions and their effects on membrane fouling [J]. Water Res,2013,47(17):6618-6627.
- [31] Meng S J, Winters H, Liu Y. Ultrafiltration behaviors of alginate blocks at various calcium concentrations [J]. Water Res,2015,83:248-257.
- [32] Xin Y, Bligh M W, Kinsela A S, et al. Effect of iron on membrane fouling by alginate in the absence and presence of calcium [J]. J Membr Sci,2016,497:289-299.
- [33] Monroe D. Looking for chinks in the armor of bacterial biofilms [J]. Plos Biology,2007,5(11):2458-2461.
- [34] Kończak B, Karcz J, Miksch K. Influence of calcium, magnesium, and iron ions on aerobic granulation [J]. Appl Biochem Biotechnol,2014,174(8):2910-2918.
- [35] 秦益民. 海藻酸[M]. 北京:中国轻工业出版社,2008.



作者简介:曹达啟(1988-),男,江西都昌人,工学博士,博士后,主要研究方向为可持续污水处理技术与膜分离技术。

E-mail: caodaqi@bucea.edu.cn

收稿日期:2016-04-10