

水处理中微生物絮凝剂产生菌的选育及应用

程艳茹¹, 龚继文², 封丽^{1,3*}, 张晟¹, 刘异齐¹

(1. 重庆市环境科学研究院, 重庆市生态环境遥感监测大数据应用技术协同创新中心, 重庆 401147;

2. 中煤科工集团重庆设计研究院有限公司, 重庆 400016;

3. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 综述了微生物絮凝剂产生菌筛选和培育方面的研究进展, 介绍了微生物絮凝剂在给水和饮用水、乳化液的油水分离、污水处理等领域的应用, 以及廉价培养基的探索实践。提出针对影响微生物絮凝剂产生菌生长代谢的环境条件开展深入研究, 同时寻找或设计廉价培养基, 降低生产成本, 推动其工业化应用。

关键词: 微生物絮凝剂; 菌种筛选; 菌种培育; 水处理

中图分类号: X172; X703

文献标志码: A

文章编号: 1006-2009(2019)02-0006-05

Breeding and Application of Microbial Flocculant-producing Bacteria in Water Treatment

CHENG Yan-ru¹, GONG Ji-wen², FENG Li^{1,3*}, ZHANG Sheng¹, LIU Yi-qi¹

(1. *Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing Collaborative Innovation Center of Big Data Application in Eco-Environmental Remote Sensing, Chongqing 401147, China;*

2. *CCTEG Chongqing Engineering Co., Ltd, Chongqing 400016, China;*

3. *Materials and Science Engineering Academy, Chongqing University, Chongqing 400044, China)*

Abstract: This paper summarized the research progress of screening and breeding microbial flocculant-producing bacteria, and introduced the application of microbial flocculant in water supply, drinking water, oil-water separation of emulsion and wastewater treatment, as well as the exploration and practice of cheap culture medium. It proposed further research on the environmental conditions for microbial flocculant-producing bacteria's growth and metabolism, finding and designing cheap culture medium, cutting production costs and promoting industrial application.

Key words: Microbial flocculant; Bacteria screening; Bacteria cultivation; Water treatment

目前普遍应用的絮凝剂分为3类^[1-3]:无机絮凝剂,如硫酸铝、聚合氯化铝、氯化铁等;有机合成高分子聚合物,如聚丙烯酰胺(PAM)、聚乙烯等;自然界中存在的絮凝剂,如壳聚糖、海藻酸钠和微生物絮凝剂。前两种传统絮凝剂经济适用、净水效果好,应用最多^[2]。传统混凝/絮凝剂副产物的毒性近年来颇受关注,特别是在食品和饮用水方面^[4]。研究证明,铝盐在饮用水处理中的应用与老年痴呆症有关联^[5-6]。PAM的单体丙烯酰胺是一种致癌和神经毒性物质,很多国家要求将PAM在工业产品中的残留控制在很低的水平^[7]。此

外,聚合物絮凝剂的残留物难以被生物降解^[8],易对环境造成污染。

微生物絮凝剂由 Louis Pasteur 于 1876 年首先报道^[1],其来源广、生产周期短且效率高,不存在副产物有毒和生物难降解等问题,得到了广泛的研究

收稿日期:2018-04-13;修订日期:2018-12-18

基金项目:重庆市基础科研基金资助项目(2015cstc-jbky-01607)

作者简介:程艳茹(1987—),女,河南安阳人,工程师,硕士,从事水环境污染控制研究。

* 通信作者:封丽 E-mail: 1422900120@qq.com

究和应用尝试。然而,由于微生物絮凝剂的低产率和高成本,其实际应用受到很大的限制^[8-9]。因此,微生物絮凝剂的研究重点应为新型高效微生物絮凝剂菌种的筛选和富集,以及廉价培养基质的寻找。今针对微生物絮凝剂产生菌筛选和培育方面的已有研究作综述。

1 微生物絮凝剂产生菌的筛选和培育

微生物絮凝是由微生物生长过程中胞外聚合物的合成而形成的一个动态过程。至今约筛选出 50 多种微生物絮凝剂产生菌^[8],包括红平红球菌^[10]、芽孢杆菌^[11]、肺炎克雷伯菌^[12]、枸橼酸杆菌^[13]、氮单胞菌属^[1]、谷氨酸棒杆菌^[8]、黄曲霉^[12]等。

1.1 目标菌群来源

絮凝剂产生菌涉及范围很广,包括细菌、霉菌、酵母菌、放线菌和藻类。近年来,对于微生物

絮凝作用的研究发现,具有絮凝作用的微生物可以由很多地方筛选,包括土壤、活性污泥^[1]、渗滤液^[14]、河水^[13]、海水^[15]、海洋沉积物^[11]等,其中,土壤和活性污泥是筛选絮凝性菌种的最普遍来源。除了从自然界筛选目的菌种外,还有两种常见方案^[15]:一是从已有菌种选种,利用原有菌株进行单细胞分离,再加以筛选得到优良菌株;二是人工诱变选种,利用物理、化学、生物手段处理微生物细胞,使之发生变异,再从中选择具有优良性状的变异菌种。

1.2 絮凝活性测定

确定絮凝剂产生菌来源后,需要明确筛选具有哪种特征的微生物。关于微生物絮凝性能或效率的测定,实验室常用高岭土测试菌株培养液的絮凝活性,目前采用的方法大多从 Kurane 等^[10]的方法参考或改进而来。絮凝剂产生菌絮凝效率测定方法见表 1。

表 1 絮凝剂产生菌絮凝效率测定方法

Table 1 Determination methods of flocculation efficiency of flocculent bacteria

测试物质	菌种	具体方法	参考文献
高岭土	红平红球菌	在 100 mL 量筒中加入 80 mL 高岭土悬浊液(5 000 mg/L)、10 mL 100 g/L CaCl ₂ 溶液、0.5 mL 絮凝剂,用蒸馏水稀释至 100 mL。用 NaOH 或 HCl 调节 pH 值至 7.0,轻轻混匀后静置 5 min。用分光光度计在波长 550 nm 处测试上清液光密度,计算絮凝效率	[10]
高岭土	克雷伯菌	将过 60 目筛的 0.4 g 高岭土、5 mL 10 g/L CaCl ₂ 溶液和 2 mL 发酵上清液混合于 250 mL 烧杯中,加去离子水至 100 mL,快速搅拌(400 r/min)1 min 后,再慢速搅拌(150 r/min)5 min,静置 5 min。取上清液在紫外分光光度计 550 nm 波长处测定吸光度,计算絮凝效率	[14]
高岭土	杆菌 DP-152	在 100 mL 烧杯中,将 0.1 mL 100 g/L CaCl ₂ 溶液加入 100 mL 高岭土悬浊液(5 000 mg/L)中,磁力搅拌 1 min(300 r/min)。加入培养液(10 μg/L),用 1.0 mol/L NaOH 溶液调节 pH 值至 7.0,然后在 300 r/min 下快速混合 30 s,在 100 r/min 下缓慢混合 1 min,结束后静置 5 min。用分光光度计在波长 550 nm 处测定上清液浊度,计算絮凝效率	[11]
高岭土	枯草芽孢杆菌	配制 100 mL 40 g/L 高岭土悬浊液,加入 2 mL 10 g/L CaCl ₂ 溶液和 2 mL 絮凝剂,静置 5 min 后吸取距液面 5 mm 处的液体。用 721 型分光光度计在 550 nm 波长处测定吸光度,计算絮凝效率	[16]

1.3 目标菌群筛选

对絮凝剂产生菌的絮凝性能测定后,可以确定已经获得具有絮凝性能的菌株。为了进一步探究实际运用的可行性,有必要对菌株纯化。各种微生物在生长代谢过程中对各营养组分的要求不尽相同,可以通过控制培养基的碳源、氮源、能源、生长因子、无机盐等组分筛选目标菌群。部分絮凝剂产生菌筛选条件见表 2^[10,13,17-20]。

1.4 影响絮凝剂产生菌生长代谢的培养因素

碳源和氮源及 C/N 比对微生物絮凝剂的产生有重要影响。各菌种对于碳氮源的需求不同,一般来说富含单糖的培养基有利于絮凝剂产生,而

高氮低糖的培养基则会使絮凝剂产量降低^[15]。其他因素如温度、pH 值、无机盐等对絮凝剂产生菌的增殖和活性都有影响。

1.4.1 投加碳源的影响

微生物的增殖对于碳源的要求比较严格,碳源的差别可引起微生物代谢的变化,造成絮凝效果的差异。Kurane 等^[10]研究发现,以葡萄糖、果糖或山梨醇为碳源,微生物絮凝剂的产量变化与微生物的增殖曲线有相同的趋势;若将碳源换为甘露糖、半乳糖、果胶糖、木糖、乳糖、麦芽糖、纤维二糖或蔗糖,则不利于絮凝剂的生产 and 菌种的增殖。Shih 等^[21]关于地衣芽孢杆菌 CGMCC 2876 的

表 2 部分絮凝剂产生菌筛选条件

Table 2 Screening conditions of some flocculent bacteria

菌种	培养基质组成	环境条件	参考文献
红平红 球菌	10 g 碳源、5 g K_2HPO_4 、2 g KH_2PO_4 、0.2 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.1 g NaCl、0.5 g 无机氮和 0.5 g 有机氮源,溶于 1 L 蒸馏水中	pH 值 7.5 温度 30 °C	[10]
柠檬酸 杆菌属 TKF04	基础培养基(BM):1 L 培养基内包含 1.0 g $(NH_4)_2SO_4$ 、1.0 g K_2HPO_4 、0.05 g NaCl、0.2 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、1.0 g $CaCl_2$ 、0.01 g $FeCl_3$ 和 0.1 g 酵母提取物 醋酸丙酸(AP)基质:除 BM 中的物质外,AP 基质中还包含 7.0 g 醋酸钠和 3.0 g 丙酸钠	pH 值 7.2	[13] [17]
无花果 沙雷氏菌	培养基内包含葡萄糖 10 g/L、酵母提取物 0.5 g/L、NaCl 0.1 g/L、 KH_2PO_4 5 g/L;斜面培养基内包含葡萄糖 20 g/L、酵母提取物 0.5 g/L、尿素 0.5 g/L、NaCl 0.1 g/L、 KH_2PO_4 2 g/L、 K_2HPO_4 5 g/L、洋菜 20 g/L	pH 值 7.0 ~ 7.2	[18]
芽孢杆菌 AS-10	多蛋白胨 5 g/L、 $(NH_4)_2SO_4$ 2 g/L、酵母 1 g/L、 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0.7 g/L、NaCl 0.1 g/L、 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.2 g/L、 K_2HPO_4 1 g/L、葡萄糖 1 g/L、琼脂 3 g/L	pH 值 6.5 温度 30 °C	[19]
斜生栅藻	1 L 蒸馏水中包含 1.5 g $NaNO_3$ 、0.04 g K_2HPO_4 、0.075 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.036 g $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 、0.006 g 柠檬酸、0.006 g 柠檬酸铁铵、0.001 g 乙二胺四乙酸二钠盐、0.02 g Na_2CO_3 和 1.0 mL 痕量金属混合 A5。痕量金属混合 A5 的组成为:2.86 g H_3BO_3 、1.81 g $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 、0.222 g $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.39 g $NaMoO_4 \cdot 2H_2O$ 、0.079 g $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 和 49.4 mg $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$,溶解于 1 L 蒸馏水中	pH 值 7.5 温度 (25 ± 1) °C	[20]

研究表明,乳糖、葡萄糖、果糖均不利于微生物的增殖和絮凝剂的产生,相反,谷氨酸、柠檬酸和甘油对于微生物的增殖和絮凝剂的产生更加有利。

1.4.2 投加氮源的影响

常用的氮源有蛋白胨、尿素及各种铵盐等,有些可以促进微生物絮凝剂的产生,有些则会限制其产量。研究发现,硝酸铵和氯化铵虽然可以促进细菌增长,但絮凝活性仅相当于使用尿素的 60% ~ 70%^[22]。地衣芽孢杆菌 CGMCC 2876 可以高效利用尿素为氮源,实现絮凝剂产率 > 600 U/mL^[2]。Shih 等^[21] 研究发现,地衣芽孢杆菌 CGMCC 2876 可以有效利用氯化铵作为氮源,却不能利用其他铵盐。与无机氮源相比,采用浓缩牛肉汁和酵母浓缩液作为氮源,对地衣芽孢杆菌 X-14、无花果沙雷氏菌^[18] 絮凝剂的生产更加有利。

Giri 等^[23] 发现,当 C/N 比为 60 ~ 110 时,微生物絮凝剂的活性较好,过高或过低都会导致絮凝剂活性快速下降。Luvuyo 等^[24] 研究发现,当 C/N 比升高至 20:1 时,谷氨酸棒状杆菌絮凝剂 REA-11 的产量大幅升高,而 C/N 比继续升高并不会再促进絮凝剂的增产,甚至会有副作用。

1.4.3 培养 pH 值的影响

絮凝剂产生菌有一个最佳的 pH 值范围,不同絮凝剂产生菌的增殖对于最佳 pH 值范围的要求有差别^[25]。Fujita 等^[13] 研究枸橼酸杆菌絮凝特征时发现,初试的 pH 值在 7.2 ~ 10.0 范围内变化

时,对于菌株影响较小,而在后期絮凝剂的活性或大幅下降。Gong 等^[18] 在对无花果沙雷氏菌絮凝剂生产的研究中发现,pH 值范围 6 ~ 8 对于絮凝剂的生产更加有利。宋永庆等^[22] 发现,屠宰场废水 pH 值超过 8 时有较好的絮凝效果,pH 值为 12 时絮凝效果最佳。

1.4.4 培养温度的影响

温度对于某些微生物絮凝剂的活性影响较大,最大的酶活性只能在最佳的温度条件下获得。Salehizadeh 等^[19] 从活性污泥中分离出一株絮凝剂产生菌,加热时该菌株的絮凝活性随加热时间呈线性下降,加热 8 min 后絮凝剂失活。有的菌种絮凝剂的耐温性非常好,如 pH 值在 3.0 ~ 6.0 范围内的谷氨酸棒状杆菌絮凝剂,于 80 °C 加热 1 h 后,絮凝活性未见明显降低^[8]。肺炎克雷伯菌微生物絮凝剂 MBF-5、球形芽孢杆菌 F6 和根瘤菌 F2 混合产生的絮凝剂,以及甲基杆菌 Obi 和放线菌 Mayor 混合产生的絮凝剂均表现出良好的耐热性^[24,26]。

1.4.5 其他影响因素

不同菌种混合生长,溶解氧浓度、培养基中金属离子、无机盐等因素也会影响微生物絮凝剂产生菌的繁殖代谢,进而影响絮凝剂的生产 and 絮凝效率。赵璇等^[27] 研究发现,含硫无机物对克雷伯氏菌 NIII2 发酵产絮凝剂的活性和性能有一定影响。Yokoi 等^[28] 发现, Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和 Ca^{2+} 对肠杆菌属絮凝剂活性有一定的促进作用,最佳 Fe^{3+} 浓度为

0.2 mmol/L, 添加 Na^+ 和 Mg^{2+} 也会增强絮凝剂的活性^[22]。

2 微生物絮凝剂在水处理领域的应用

微生物絮凝剂主要利用其絮凝特性, 具有无机和有机絮凝剂不可比拟的优势, 可用于除浊、除油、去除金属离子、抑制污泥膨胀、促进污泥脱水等。

2.1 给水和饮用水

微生物絮凝剂在给水处理、病原菌去除等方面的效率高于传统的无机和有机絮凝剂, 而且用量少, 应用范围广, 沉淀物过滤性好, 对人体无毒副作用, 是给水和饮用水处理混/絮凝工艺的发展方向。Aguilar 等^[29]发现, 利用微生物絮凝剂处理河水和湖泊水, 絮凝后所产生的胶团大, 沉降快, 上清液剩余浊度低, 除藻效果好。董军芳等^[30]将微生物絮凝剂和硫酸铝以 3:2 的比例混合, 处理 50 L 自来水原水, 4 h 可使光密度值(560 nm)降为 0.068, 浊度降为 3.0, 处理后的水样中溶解性总固体、硫酸盐、氯化物等多项指标达到饮用水国家标准。

2.2 乳化液的油水分离

向一些乳化液中加入特定的絮凝剂, 在一定程度上可使油水分离^[25], 如用 *Alcaligenes latus* 培养物可以将棕榈酸从乳化液中分离出来。在 100 mL 0.25% 乳化液中加入 10 mL *Alcaligenes latus* 培养物和 1 mL 聚氨基葡萄糖后, 在细小均一的乳化液中会形成明显可见的油滴, 下层清液的 COD 值由 450 mg/L 降至 235 mg/L, 去除率为 48%, 远高于有机和无机高分子絮凝剂, 基于此原理有望将微生物絮凝剂应用于海上漏油控制^[31]。

2.3 污水处理

微生物絮凝剂在城市生活污水处理、染料废水脱色、畜产废水处理及电镀行业废水处理中的研究报道很多^[32]。许尤厚等^[33]筛选出的微杆菌属 WX-7 菌株所产絮凝剂能有效去除印染废水的色度和 COD, 脱色率和 COD 去除率分别可达 81% 和 42%。张超等^[34]研究了 6 种絮凝剂对生活污水的处理效果, 实验条件下 COD 的去除率为 92.3%, SS 的去除率为 100%。魏淑梅等^[35]研究了微生物絮凝剂去除废水中 Cd(II) 的最佳条件组合, 发现在最优化条件下 Cd(II) 的去除率高于 99.5%。

3 廉价培养基的探索

实验室大多以葡萄糖、果糖、半乳糖等作为有

机碳源, 以酵母、牛肉膏、蛋白胨和氨基酸等作为有机氮源, 价格较高, 难以实际运用。为了降低微生物絮凝剂的生产成本, 寻找或设计廉价的培养基很有必要。Kurane 等^[36]发现, 含有乙醇的废水可以作为絮凝剂产生菌非常好的碳源。王曙光等^[37]利用酱油酿造废水作为土壤杆菌 LG₅-1 (*Agrobacterium* sp.) 的廉价培养基, 并用 2% 的工业乙醇(75%) 作为补充碳源, 在不外加氮源的条件下获得了产量高、絮凝率高(>95%)、稳定性强的絮凝剂。Kim 等^[17]尝试用 VFAs 作为培养营养源, 以降低微生物絮凝剂的生产成本。Zhao 等^[38]用稻草发酵液培养微生物絮凝剂产生菌, 利用 100 d 的发酵液进行微生物絮凝剂的培养, 获得的最佳絮凝活性高达 92.45%。

以富含碳源或氮源的生产废水作为廉价替代培养基, 是降低微生物絮凝剂生产成本的有益探索^[39]。除了上述废水外, 乳品废水^[40]、味精废水^[12]、糖蜜废水^[39]、猪场废水^[32]、屠宰废水^[41]等也被尝试应用于廉价培养基的替换研究。

4 结语

微生物絮凝剂作为一种新型、高效、无毒、无二次污染的绿色水处理剂, 在废水脱色、去除高浓度有机物、去除金属离子、改善污泥脱水性能等方面有独特的效果。然而, 由于培养费用高、发酵生产工艺不成熟、絮凝效果不稳定等缺点, 微生物絮凝剂还未得到广泛生产和应用。环境条件在微生物絮凝剂的生产过程中尤为重要, 对于影响微生物絮凝剂产生菌生长代谢的环境条件需要开展更加深入、更加贴近实际应用的研究, 同时, 寻找或设计廉价的培养基对微生物絮凝剂产生菌的工业化应用有着重要意义。随着相关领域学者的不断实践和探索, 有望开发出大规模、高产量生产微生物絮凝剂的方法和技术, 使微生物絮凝剂在水处理中的应用更加广泛。

[参考文献]

- [1] OKAIYETO K, NWODO U U, OKOLI S A, et al. Implications for public health demands alternatives to inorganic and synthetic flocculants: bioflocculants as important candidates[J]. Microbiologyopen, 2016, 5(2): 177-211.
- [2] PATHAK M, SARMA H K, BHATTACHARYYA K G, et al. Characterization of a novel polymeric bioflocculant produced from bacterial utilization of *n*-hexadecane and its application in remov-

- al of heavy metals [J]. *Front Microbiol*, 2017, 8 (826): 170 – 184.
- [3] AGUNBIADÉ M O, HEERDEN E V, POHL C H, et al. Flocculating performance of a bioflocculant produced by *Arthrobacter humicola* in sewage waste water treatment [J]. *Bmc Biotechnol*, 2017, 17(1): 51 – 59.
- [4] YANG G, NING W, ZHANG C. Flocculating properties of the novel bioflocculant poly(γ -glutamic acid) and its use in jean dyeing wastewater treatment [J]. *Advanced Materials Research*, 2011 (183 – 185): 125 – 129.
- [5] DOBROWOLSKI R, SZCZES A, CZEMIERSKA M, et al. Studies of cadmium (II), lead (II), nickel (II), cobalt (II) and chromium (VI) sorption on extracellular polymeric substances produced by *Rhodococcus opacus* and *Rhodococcus rhodochrous* [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 225: 113 – 120.
- [6] WALTON J R. Aluminum involvement in the progression of Alzheimer's disease [J]. *Journal of Alzheimers Disease* Jad, 2013, 35(1): 7 – 43.
- [7] ZHAO H, ZHONG C, CHEN H, et al. Production of bioflocculants prepared from formaldehyde wastewater for the potential removal of arsenic [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 172: 71 – 76.
- [8] 王金娜, 杨基先, 王继华, 等. 混合碳源制备生物絮凝剂的絮凝效能及产量预测模型 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(7): 1654 – 1660.
- [9] KUMAR M, SHEVATE R, HILKE R, et al. Novel adsorptive ultrafiltration membranes derived from polyvinyltetrazole-co-polyacrylonitrile for Cu (II) ions removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 301: 306 – 314.
- [10] KURANE R, TOEDA K, TAKEDA K, et al. Culture conditions for production of microbial flocculant by *Rhodococcus erythropolis* [J]. *Agricultural & Biological Chemistry*, 1986, 50(9): 2309 – 2313.
- [11] OKAIYETO K, NWODO U U, MABINYA L V, et al. *Bacillus toyonensis* strain AEMREG6, a bacterium isolated from South African marine environment sediment samples produces a glycoprotein bioflocculant [J]. *Molecules*, 2015, 20(3): 5239 – 5259.
- [12] ALJUBOORI A H, IDRIS A, ABDULLAH N, et al. Production and characterization of a bioflocculant produced by *Aspergillus flavus* [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 127(1): 489 – 493.
- [13] FUJITA M, IKE M, TACHIBANA S, et al. Characterization of a bioflocculant produced by *Citrobacter* sp. TKF04 from acetic and propionic acids [J]. *Journal of Bioscience & Bioengineering*, 2000, 89(1): 40 – 46.
- [14] 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 等. 克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 [J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1183 – 1190.
- [15] 胡勇有, 高宝玉. 微生物絮凝剂 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [16] 王芳, 李秀颖, 朱希坤, 等. 一种微生物絮凝剂及其应用研究 [J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(S1): 172 – 175.
- [17] KIM S M, IKE M, TACHIBANA S, et al. Screening of bacteria capable of producing bioflocculants from acetic and propionic acids [J]. *Japanese Journal of Water Treatment Biology*, 2000, 36(4): 183 – 192.
- [18] GONG W X, WANG S G, SUN X F, et al. Bioflocculant production by culture of *Serratia ficaria* and its application in wastewater treatment [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(11): 4668 – 4674.
- [19] SALEHIZADEH H, SHOJAOSADATI S A. Extracellular biopolymeric flocculants: Recent trends and biotechnological importance [J]. *Biotechnology Advances*, 2001, 19(5): 371 – 385.
- [20] KIM D G, LA H J, AHN C Y, et al. Harvest of *Scenedesmus* sp. with bioflocculant and reuse of culture medium for subsequent high-density cultures [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3163 – 3168.
- [21] SHIH I L, HG Y L L, CHANG Y N, et al. Production of a biopolymer flocculant from *Bacillus licheniformis* and its flocculation properties [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 78(3): 267 – 272.
- [22] 宋永庆, 张龙, 李南华, 等. 絮凝菌的筛选、培养条件优化及对屠宰场废水的处理 [J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(3): 211 – 215.
- [23] GIRI S S, HARSHINY M, SEN S S, et al. Production and characterization of a thermostable bioflocculant from *Bacillus subtilis* F9, isolated from wastewater sludge [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2015, 121: 45 – 50.
- [24] LUVUYO N, NWODO U U, MABINYA L V, et al. Studies on bioflocculant production by a mixed culture of *Methylobacterium* sp. Obi and *Actinobacterium* sp. Mayor [J]. *Bmc Biotechnology*, 2013, 13(1): 62 – 68.
- [25] 李海玲, 陈丽华, 孙万虹, 等. 不同处理对陇东地区油污土壤的降解研究 [J]. *环境监测管理和技术*, 2016, 28(1): 15 – 19.
- [26] ZHAO H, LIU H, ZHOU J. Characterization of a bioflocculant MBF-5 by *Klebsiella pneumoniae* and its application in *Acanthamoeba* cysts removal [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 137(3): 226 – 232.
- [27] 赵璇, 聂麦茜, 聂红云, 等. 含硫无机物对克雷伯氏菌 NIII2 产絮凝剂特性的影响 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(7): 3905 – 3911.
- [28] YOKOI H, YOSHIDA T, MORI S, et al. Biopolymer flocculant produced by an *Enterobacter* sp. [J]. *Biotechnology Letters*, 1997, 19(6): 569 – 573.
- [29] AGUILAR M I, SÁEZ J, LLORÉNS M, et al. Nutrient removal and sludge production in the coagulation-flocculation process [J]. *Water Research*, 2002, 36(11): 2910 – 2919.
- [30] 董军芳, 林金清, 曾颖, 等. 微生物/硫酸铝复合絮凝剂在自来水原水中的应用 [J]. *应用化工*, 2002, 22(2): 35 – 38.
- [31] KURANE R, NOHATA Y. Microbial flocculation of waste liquids and oil emulsion by a bioflocculant from *Alcaligenes latus* [J]. *Agricultural & Biological Chemistry*, 1991, 55(4): 1127 – 1129.
- [32] GUO J, CHEN C. Removal of arsenite by a microbial bioflocculant produced from swine wastewater [J]. *Chemosphere*, 2017, 181: 759 – 766.

(下转第46页)