

# 微生物絮凝剂的制备及其对城市污水厂污泥的脱水

张 峰<sup>1,2</sup> 尹 华<sup>3\*</sup> 叶锦韶<sup>1</sup> 彭 辉<sup>4</sup> 杨思敏<sup>1</sup> 刘 京<sup>1</sup>

(1. 暨南大学环境工程系, 广东省高校水土环境毒害性污染物防治与生物修复重点实验室, 广州 510632;

2. 暨南大学资源环境与可持续发展研究所, 广州 510632; 3. 华南理工大学环境与能源学院, 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006; 4. 暨南大学化学系, 广州 510632)

**摘要** 研究利用甘蔗渣作为廉价原材料制备微生物絮凝剂并探讨其对城市污泥的脱水性能。按 0.5% 最佳接种量接种, 并利用发酵罐进行批式发酵培养, 培养 60 h 后的发酵液具有最佳絮凝效果, 投加量为 5.0 mg/L 时较优, 污泥脱水率从 75.60% 提高到 84.2%, 污泥含水率从 95.82% 降至 76.21%。此时絮凝剂粗产量为 1.16 g/L。培养 108 h 后, 发酵液仍具有显著的絮凝效果, 能使污泥含水率维持在 76.81% 左右。补料发酵实验表明, 恒 pH 培养会抑制微生物分泌絮凝剂, 最佳絮凝效果为 72 h 的发酵液, 投加量 5.0 mg/L, 污泥含水率降至 76.47%。通过补料以及不控制 pH 后, 发酵液絮凝效果迅速上升, 投加不同量的发酵液使污泥的含水率保持在 76.22% ~ 75.60% 之间。综合来说, 补料在能减少原料浪费的同时也可以有效地提高絮凝剂的絮凝效果。

**关键词** 微生物絮凝剂 甘蔗渣 批式发酵 污泥脱水

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2014)05-1927-06

## Microbial flocculant preparation and its application in dewatering of sewage treatment plant sludge

Zhang Feng<sup>1,2</sup> Yin Hua<sup>3</sup> Ye Jinshao<sup>1</sup> Peng Hui<sup>4</sup> Yang Simin<sup>1</sup> Liu Jing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutes, Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Institute of Resources, Environment & Sustainable Development, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education on Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
4. Department of Chemistry, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract** Bioflocculant was produced by using sugarcane bagasse as a cheap raw material to culture *Aspergillus Aspergillus* and its ability to remove water from sewage sludge was studied. The results showed that with the optimum inoculation volume of 0.5%, the lowest moisture content of sludge achieved after 60 h fermentation through batch culture. At the best bioflocculant dosage of 5.0 mg/L, the dewatering rate of sludge increased from 75.6% to 84.2%, and its moisture content decreased from 95.82% to 76.21%, with crude bioflocculant yield of 1.16 g/L. The sludge still kept lower moisture content, remaining about 76.81% after 108 h batch fermentation. The constant pH in the process of fermentation would inhibit *A. sojae* to secrete bioflocculant during fed-batch fermentation. Under this condition, the sludge moisture rate was 76.47% after culturing *A. sojae* for 72 h at the best dosage of 5.0 mg/L. The flocculating effect of fermentation liquid rose rapidly after feeding new culture medium and stopping pH control. The sludge moisture rates under different bioflocculant dosages were kept between 76.22% ~ 75.60%. Generally speaking, feeding new culture could both decrease the waste of raw material and improve the flocculating rate of flocculant efficiently.

**Key words** bioflocculant; sugarcane bagasse; batch fermentation; sludge dewatering

絮凝技术作为一种重要的水体净化手段有着广泛的应用, 但近年来因化学絮凝剂的大量使用而带来的环境及人体健康问题, 使得新型絮凝剂的制备、选择及应用研究越来越受到重视。微生物絮凝剂(microbial flocculant, MBF)是一种天然生物高分子

基金项目: 广州市科技计划项目(2011J4300075); 广州市环保局科技计划项目(穗财建(2012)399号); 番禺区科技局科技计划项目(2010-专-42-06)

收稿日期: 2013-05-22; 修訂日期: 2013-07-01

作者简介: 张峰(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事水污染治理与控制研究工作。E-mail: cbzlem@icloud.com  
\* 通讯联系人, E-mail: huayin@scut.edu.cn

物质,是由微生物产生并分泌到细胞外的具有絮凝活性的微生物代谢产物<sup>[1]</sup>。微生物絮凝剂主要应用在处理畜产、屠宰废水,膨胀活性污泥的处理及染料废水的脱色等方面,与其他传统的无机和有机絮凝剂相比,其具有安全、高效、能被生物降解、对环境无害无毒、不产生二次污染等特性<sup>[2,3]</sup>。国内外对微生物絮凝剂的制备及其应用研究越来越关注<sup>[4-6]</sup>,但到目前为止,微生物絮凝剂在实际工程中尚未得到广泛应用。微生物絮凝剂的高制备成本成为制约其发展的关键因素,寻找廉价的可替代原料是解决这一问题的有效手段<sup>[7]</sup>。

污泥是污水处理过程中的副产物,是一种由有机残渣、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的极其复杂的非均质体。污泥水与污泥固体颗粒的结合力很强,比阻值较大,脱水性能较差,这些特点都不利于其储藏、运输和消纳。因此,污泥的脱水技术和脱水效果直接决定了污泥的处置容积和污泥资源化的价值。为了改善污泥脱水的性能,提高机械脱水的效果,需要通过调理来改变污泥的理化性质,减少胶体颗粒与水的亲和力,为固液分离创造条件<sup>[8]</sup>。

本研究以课题组保存的1株高效絮凝剂产生菌酱油曲霉(*Aspergillus sojae*)为实验菌株,以广州市某污水处理厂浓缩污泥为实验样品,考察了利用甘蔗渣作为廉价原材料制备微生物絮凝剂的扩大培养方案,以期为其在污泥脱水中的应用奠定实验基础。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 菌种来源与培养基

菌种为本实验室保存的酱油曲霉(*Aspergillus sojae*)。

种子培养基:蔗糖30 g,NaNO<sub>3</sub> 6 g,K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 1 g,KCl 5.0 mg,MgSO<sub>4</sub> 5.0 mg,水1 000 mL。

甘蔗渣酶解液培养基:90 mL酶解液<sup>[2]</sup>,NaNO<sub>3</sub> 4 g/L,K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 1 g/L,pH 5。

菌体培养条件:将接种后的培养体系置于30℃恒温培养箱130 r/min培养36 h。

甘蔗渣来源及准备:新鲜甘蔗渣来自于广州某糖厂。将新鲜的甘蔗渣取回后烘干,利用粉碎机粉碎,用自来水洗去残糖,抽滤烘干备用。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 絮凝剂粗产品的提取及絮凝活性的测定

将发酵液加入到等体积的丙酮中,在4℃避光

静置24 h后,6 000 r/min离心10 min,对沉淀物用乙醚洗涤2次后,冻干,测定其质量。将微生物絮凝剂粗品分别配置成2.5和5.0 mg/L的溶液。

在500 mL烧杯中加入200 mL 4 g/L高龄土悬浊液(悬浮颗粒粒径为4 μm),加不同量的MBF,150 r/min快速搅拌6 min,50 r/min慢速搅拌3 min,然后静置5 min。取50 mL上清液测定其浊度,同时以蒸馏水作空白对照实验,通过公式确定絮凝率E:

$$E = (A - B) / A \times 100\%$$

式中:

A——对照上清液的浊度(NTU);

B——样品上清液的浊度(NTU)。

#### 1.2.2 污泥脱水性能测定

取200 mL从广州市某污水处理厂采回的浓缩污泥(含水率95.82%,污泥比阻 $4.86 \times 10^{13}$  m/kg),边搅拌边加入絮凝剂,150 r/min快速搅拌3 min,50 r/min慢速搅拌6 min。将絮凝后浓缩污泥倒入装有滤布的离心管中,3 000 r/min离心5 min。离心后,取滤布上的污泥称重,计算脱水率(不加絮凝剂时脱水率为75.60%);将离心后的污泥于103~105℃烘箱中烘干至恒重,测含水率。并根据卡门(Carman)公式测定污泥比阻<sup>[9]</sup>。

脱水率=(离心前污泥质量-离心后污泥质量)/离心前污泥质量×100%

含水率=(烘干前污泥质量-烘干后污泥质量)/烘干前污泥质量×100%。

#### 1.2.3 还原性糖及蛋白质含量的测定

还原性糖及蛋白质含量的测定方法分别见参考文献[10]和[11]。

#### 1.2.4 接种量影响

分别于甘蔗渣的培养体系中接入0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和0.5%含水率为97.66%的*A. sojae*菌球,培养36 h后考察接种量对絮凝剂絮凝效果以及粗产量的影响。

#### 1.2.5 发酵实验

批式发酵:以摇瓶实验的接种量作为基础,10 L的发酵罐中加入5 L的甘蔗渣酶解液,同时添加4 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,调节培养基的初始pH值为5后,利用0.4 MPa高压蒸气加热罐体,使得罐压维持在0.1~0.11 MPa之间,罐体温度维持在120℃以上灭菌30 min。灭菌后利用冷却水和搅拌冷却发酵罐至30℃,调节搅拌速率为130 r/min,控制

空气流量为 100 mL/min, 并维持罐压 0.02 MPa 后, 接种培养。

**补料批式发酵:**按批式发酵的条件开展补料批式发酵, 每 12 h 取 80 mL 的样品以测量各项指标, 补料操作见表 1。

表 1 补料批式发酵的实验设计

Table 1 Design of fed-batch fermentation

补料批次	补料体积 (L)	pH	发酵周期 (h)
1	0	5	72
2	1.5	自然 pH	72
3	1.5	自然 pH	60

## 2 结果与讨论

### 2.1 接种量对污泥脱水效果的影响

由图 1(a) 分析可知, 在同一投加量下, 污泥含水率随接种量的增大而降低, 且接种量为 0.5% 时污泥含水率达到最低 (78.86%)。

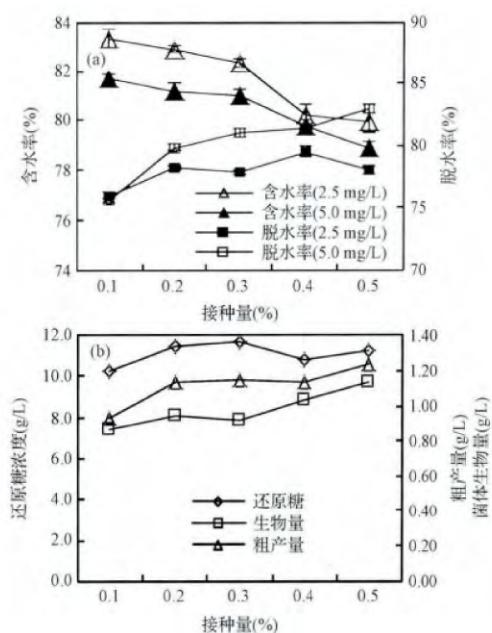


图 1 接种量对 *A. sojae* 生物量、粗产量及污泥脱水效果的影响

Fig. 1 Effects of inoculum concentration on biomass, crude MBF yield and sludge dewatering

在同一接种量下, 污泥含水率随投加量增大而降低, 且含水率最低可达 78.86%。增大絮凝剂投

加量, 污泥含水率变化显著, 投加量为 2.5 mg/L 时污泥含水率介于 83.32% ~ 79.91%, 脱水率在 75.88% ~ 82.47% 之间, 而投加量增加到 5.0 mg/L 时污泥含水率介于 81.66% ~ 78.86%, 脱水率则介于 75.60% ~ 84.88%。

图 1(b) 显示, 随着接种量的增大菌体的生物量也随之增加, 在 0.5% 接种量时达到最大, 干重为 1.67 g/L。对残留的还原性糖浓度分析表明, 不同接种量的发酵液中还原性糖浓度并没有出现明显的变化, 菌体量的增加并没有导致还原性糖减少。粗产量结果显示, 不同接种量下得到的粗产量并没有出现明显的变化, 平均值为  $(1.24 \pm 0.16)$  g/L。

结合残留还原性糖、污泥含水/脱水率以及粗产量等指标显示, 接种量对发酵液中还原性糖的量、粗产量的影响并不大。因此, 以污泥脱水率为指标, 选取投加量为 5.0 mg/L 时絮凝效果最好的接种量为最适接种量, 即 0.5% 的接种量。

### 2.2 批式发酵

图 2(a) 显示, 当絮凝剂投加量为 2.5 mg/L 时, 污泥含水率的变化趋势和出现最低含水率时的发酵时间基本与摇瓶培养时的一致, 即污泥含水率随投加量增大而降低, 最低含水率为 60 h 的发酵液, 降到 76.90%, 之后再缓慢回升, 脱水率在 60 h 时上升至 82.47%, 此后趋于平缓。与摇瓶培养相比, 该投加量下, 60 h 后的污泥含水率下降的幅度均比摇瓶的高, 表明扩大培养后, 在发酵后期微生物絮凝剂的絮凝效果有所提高。当投加量增加至 5.0 mg/L 时, 含水率均比 2.5 mg/L 时的含水率略有下降, 最低的含水率依然为 60 h 的发酵液, 降到 76.21%, 下降了 19.61%, 此时脱水率为 84.2%, 提高了 8.6%。

根据图 2(b) 可知, 在发酵 12 h 时还原性糖浓度略有升高, 这可能是由于酶解液中的纤维二糖被菌体分解所导致; 12 ~ 96 h 不断减少, 96 h 后基本不变。这与摇瓶发酵中还原性糖的变化趋势基本一致。以还原性糖浓度为横坐标、发酵时间为纵坐标作图后拟合发现其基本符合线性关系, 斜率为  $-0.128, R^2 = 0.9848$ 。通过比较斜率显示, *A. sojae* 在发酵罐中对还原性糖的消耗速率约为摇瓶 (斜率为  $-0.0755, R^2 = 0.8254$ ) 时的 2 倍。残留的还原性糖还显示, 当发酵时间为 108 h 时, 发酵液中的还原性糖被消耗了 1/2。

总体来说, 扩大培养对甘蔗渣发酵液的絮凝效

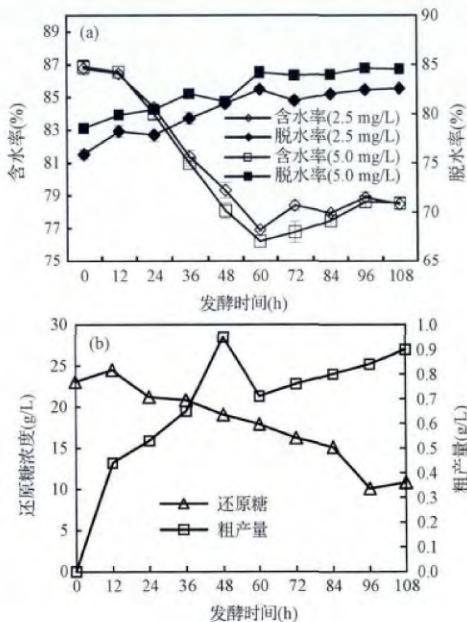


图2 批式发酵培养对还原性糖、粗产量及污泥脱水效果的影响

Fig. 2 Effects of batch fermentation on reducing sugars, crude MBF yield and sludge dewatering

果基本没有影响,而且粗产量略高于文献报道值<sup>[12,13]</sup>,培养108 h后发酵液依然保持比较优的絮凝效果。

### 2.3 补料批式发酵

实验分为3个阶段,周期为204 h。在实验的第一阶段(前72 h)控制pH等于5,使A. sojae在恒pH条件下培养,用污泥的含水/脱水率来表征絮凝效果。结果显示恒pH培养条件下所得到的发酵液的絮凝效果并不理想,污泥最低含水率只降到76.47%,脱水率提高到85.73%。此时所产生的絮体小且沉淀速度慢。对不同发酵时间产生的絮凝剂进行粗提取,发现在72 h时,粗产量达到最大为1.03 g/L。粗产量虽高但对污泥脱水效果不佳,说明该粗产品中有效成分较少,杂质相对较多。

图3(a)发酵液中蛋白质含量测定结果显示,恒pH培养条件下,蛋白质的含量在72 h内持续减少,并没有出现先减少后增大的趋势,恒pH有可能影响了A. sojae分泌某些功能性蛋白,从而影响A. sojae分泌微生物絮凝剂。

结合还原性糖、粗产量、污泥含水率等结果显

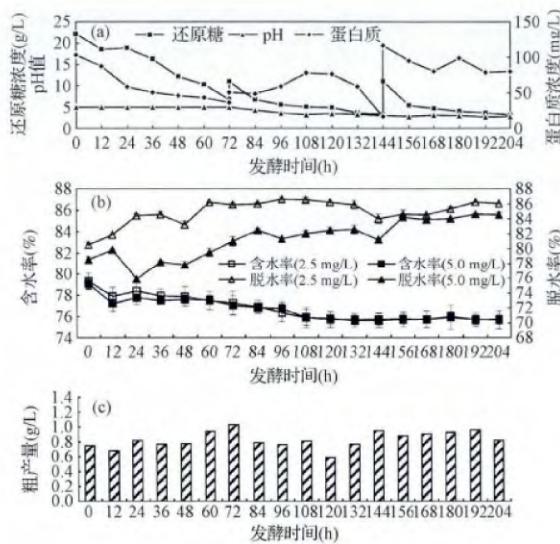


图3 补料批式发酵培养条件对还原性糖、粗产量及污泥脱水效果的影响

Fig. 3 Effects of fed batch fermentation on reducing sugars, crude MBF yield and sludge dewatering

示,恒pH为A. sojae提供了一个较为稳定的环境,加快了A. sojae对还原性糖的利用,但同时抑制了A. sojae分泌高效的微生物絮凝剂。A. sojae在发酵过程中pH的自然下降可能对诱导酱油曲霉分泌发酵微生物絮凝剂有着重要的作用。

为了进一步证实pH对A. sojae分泌微生物絮凝剂的影响,在实验的第2阶段(第72小时)第一次补料加入1.5 L新鲜的无菌甘蔗渣酶解液并调节pH为5后,发酵过程中不再控制pH。实验结果显示,第一次补料后,体系中还原性糖浓度由原来的7.37 g/L上升至10.48 g/L,再经72 h的发酵培养后,到第2阶段末期(第144 h),还原性糖浓度降至2.12 g/L。在不调节pH的环境下,发酵液的pH不断下降,还原性糖的消耗速率(斜率为-0.1085,  $R^2 = 0.9026$ )开始减慢,这可能是受碳源浓度以及pH共同影响的结果。

结合图3(b)、(c)实验结果显示,在第1次补料后的72 h中,发酵液自48 h时出现较高的絮凝活性,48 h后含水率基本维持稳定,此后污泥含水率均维持在76%以下。使污泥含水率最低的发酵时间集中在这1阶段的第72小时。在72 h时,增大絮凝剂投加量,污泥含水率呈先减小后增大的趋势,其最佳投加量为5.0 mg/L的发酵液,此时污泥含水率下降20.2%,降到75.59%,污泥脱水率由75.6%

提高到 84.21%，升高 8.6%。

图 3(c) 粗产量结果表明，在实验的第 1 阶段（前 72 小时），体系中粗产量随发酵时间延长而增加并在第 72 小时达到最大（0.92 g/L）；从第 1 次补料后，粗产量开始下降，第 2 阶段末期（第 144 小时）时才有所回升，并且在实验第 3 阶段趋于平稳。粗产量总体趋势为先增大，后减小然后再增大，而絮凝活性的趋势则是随着时间推移逐步增大。在实验前期粗产量虽然有所增加，但其中有絮凝效果的成分比重偏低，说明 *A. sojae* 可能在前期向周围环境分泌了一些作为后续合成微生物絮凝剂原料的中间体，而这些中间体本身没有絮凝活性。

在实验的第 3 阶段（144 h）向发酵罐中继续补加 1.5 L 已灭菌的甘蔗渣酶解液，还原性糖浓度由原来的 2.12 g/L 上升至 6.16 g/L。经过 72 h 培养后，残留的还原性糖浓度进一步降低，在第 3 阶段末期（204 h）的发酵液中，还原性糖浓度仅为 1.16 g/L。还原性糖的消耗速率进一步减慢（斜率为 -0.0796,  $R^2 = 0.8945$ ）。pH 值的变化基本与第一次补料变化相似。

取每个阶段末的发酵液对其进行絮凝活性测定，实验结果如表 2 所示。第 1 阶段絮凝率为 72.31%，而第 2、3 阶段发酵液絮凝率分别达到 98.42% 和 99.30%，远高于第 1 阶段。在第 2、3 阶段不控 pH 值时，发酵液 pH 值在 2.8~3.2 之间，MBF 能保持较好的絮凝效果。出现这种现象的原因可能是当 pH 值呈酸性时，溶液中 H<sup>+</sup> 浓度较高，导致中和污泥颗粒表面负电荷、降低颗粒表面 Zeta 电位的能力增强，因此保持了较高的絮凝率。

表 2 发酵液 pH 值对絮凝活性的影响

Table 2 Effect of fermentation broth pH on flocculation activity

实验阶段	絮凝活性(%)	
	MBF = 2.5 mg/L	MBF = 5.0 mg/L
第 1 阶段(pH 5)	68.45	72.31
第 2 阶段(自然 pH)	97.65	98.42
第 3 阶段(自然 pH)	98.82	99.30

综合上述实验发现，发酵过程中恒 pH 调节会抑制 *A. sojae* 分泌高效微生物絮凝剂。通过补料能够促进 *A. sojae* 分泌性能更好的絮凝剂，并使粗产量在一定程度上有所增长。

## 2.4 不同絮凝剂污泥脱水性能的比较

实验中测得浓缩污泥的比阻为  $4.86 \times 10^{13} \text{ m/kg}$ ，回流污泥的比阻为  $2.51 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 。在浓缩污泥中投加 5.0 mg/L MBF，一定压力下抽滤测得污泥比阻为  $8.34 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ ，接近回流污泥比阻的数量级，表明所使用的 MBF 可明显地降低污泥的比阻。同样条件下，PAM 调理后的污泥比阻为  $1.03 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ ，PAC 调理后的污泥比阻为  $6.30 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ ，比 MBF 作用的污泥比阻都要高一个数量级，可见该 MBF 对污泥的调理作用要优于 PAM 和 PAC。

分别投加 5.0 mg/L 的 MBF、PAC 和 PAM 于 200 mL 浓缩污泥中进行脱水实验，实验结果如图 4 所示，与对照相比，投加 MBF 后污泥的脱水率由 75.6% 提高到 84.21%，升高 8.6%；污泥含水率从 95.82% 降低到 75.59%，下降 20.2%。而相同条件下，PAC 和 PAM 作用的污泥脱水率分别提高 0.7%、4.7%，其污泥含水率分别降低 10.1% 和 17.6%。进一步证实该 MBF 对污泥的调理作用要优于 PAM 和 PAC。

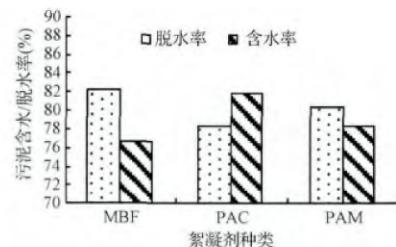


图 4 不同絮凝剂对污泥脱水效果的影响

Fig. 4 Effects of different flocculants on sludge dewatering

微生物絮凝剂与 PAC、PAM 具有类似的结构参数，即特性粘度相近，极性相同（都含有带负电荷的—COO—基团）<sup>[14]</sup>。不同的是聚合单体，微生物絮凝剂聚合以后末端极性基团离聚合物主链较远，烃链较长，—COO—基团之间的排斥导致聚合物发生弯曲的程度较小，聚合物可以得到较好的伸展，因此相比 PAC、PAM，其絮凝、脱水性能较好<sup>[15,16]</sup>。

## 3 结 论

(1) 最适接种量为 0.5% (m/v)。含水率最低可达 78.86%，脱水率可提升至 84.88%。

(2) 对 *A. sojae* 进行批式发酵发现，扩大培养对发酵液的絮凝效果基本没有影响，培养 108 h 后，发酵液依然具有比较高的絮凝效果，但是产量不高。

(3) 在补料批式发酵过程中, 恒 pH 培养会抑制 *A. sojae* 分泌絮凝剂, 此时最低污泥含水率只能降到 76.47%, 脱水率提高到 85.73%。通过补料以及不控制 pH 后, 能使 *A. sojae* 重新分泌微生物絮凝剂, 提高单位质量絮凝剂的絮凝活性, 污泥含水率均维持在 76.22%~75.60% 之间。

### 参考文献

- [1] Buthelezi S. P., Olaniran A. O., Pillay B. Production and characterization of bioflocculants from bacteria isolated from wastewater treatment plant in South Africa. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2010, 15 (5): 874-881
- [2] 冯绮澜, 尹华, 秦华明, 等. 利用甘蔗渣制备微生物絮凝剂的预处理方法研究. *环境工程学报*, 2011, 5 (6): 1268-1272
- Feng Q. L., Yin H., Qin H. M., et al. Research on the pretreatment method of sugarcane bagasse for production of bioflocculant. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5 (6): 1268-1272 (in Chinese)
- [3] Xia S. Q., Zhang Z. Q., Wang X. J., et al. Production and characterization of a bioflocculant by *Proteus mirabilis* TJ-4. *Bioresource Technology*, 2008, 99 (14): 6520-6527
- [4] Zhang Y., Ding J., Gong S. Preparation of molecularly imprinted polymers for vanillin via reversible addition-fragmentation chain transfer suspension polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 128 (5): 2927-2932
- [5] Zhang Z. Q., Lin B., Xia S. Q., et al. Production and application of a novel bioflocculant by multiple-microorganism consortia using brewery wastewater as carbon source. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19 (6): 667-673
- [6] Gomes M. P. S., Costa M. Determination of the critical concentration of partially hydrolyzed polyacrylamide by potentiometry in an acidic medium. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 128 (3): 2167-2172
- [7] 马放, 段悦, 孔祥震, 等. 微生物絮凝剂的研究现状及其发展趋势. *中国给水排水*, 2012, 28 (2): 14-17
- Ma F., Duan S. Y., Kong X. Z., et al. Present status and development trend of studies on microbial flocculants. *China Water & Wastewater*, 2012, 28 (2): 14-17 (in Chinese)
- [8] Hans S., Daan C., Olivier T., et al. Optimization of sewage sludge conditioning and pressure dewatering by statistical modelling. *Water Research*, 2008, 42 (4-5): 1061-1074
- [9] 周立祥. 固体废弃物处理处置与资源化. 北京: 中国农业出版社, 2007
- [10] 赵凯, 许鹏举, 谷广烨. 3,5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖含量的研究. *食品科学*, 2008, 29 (8): 534-536
- Zhao K., Xue P. J., Gu G. Y. Study on determination of reducing sugar content using 3,5-dinitrosalicylic acid method. *Food Science*, 2008, 29 (8): 534-536 (in Chinese)
- [11] 杨玉芳. 蛋白质含量测定方法. *明胶科学与技术*, 2007, 27 (2): 98-101
- Yang Y. F. The various methods for determining different proteins. *The Science and Technology of Gelatin*, 2007, 27 (2): 98-101 (in Chinese)
- [12] 叶何兰, 叶锦韶, 钟子嘉. 微生物絮凝剂的污泥脱水性能研究. *环境化学*, 2009, 28 (3): 414-417
- Ye H. L., Ye J. S., Zhong Z. J., et al. Study on sludge dewatering using microbial flocculant. *Environmental Chemistry*, 2009, 28 (3): 414-417 (in Chinese)
- [13] 吴涓, 费文砚. 微生物絮凝剂的絮凝特性及其脱色能力的研究. *生物学杂志*, 2008, 25 (2): 30-32, 10
- Wu J., Fei W. Y. Study on flocculating characteristics and decolorization of bioflocculant. *Journal of Biology*, 2008, 25 (2): 30-32, 10 (in Chinese)
- [14] 魏晓金. 微生物絮凝剂在废水处理中的应用研究. 武汉: 武汉科技大学硕士学位论文, 2005
- Wei X. J. Study on the application of microbial flocculants in wastewater treatment. Wuhan: Master Dissertation of Wuhan University of Science and Technology, 2005 (in Chinese)
- [15] Lu W. Y., Zhang T., Zhang D. Y., et al. A novel bioflocculant produced by *Enterobacter aerogenes* and its use in defecating the trona suspension. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, 27 (1): 1-7
- [16] Feng D. L., Xu S. H. Characterization of bioflocculant MBF3-3 produced by an isolated *Bacillus* sp. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2008, 24 (9): 1627-1632