

# 黑曲霉分泌微生物絮凝剂的效果及其絮凝特性

杨思敏<sup>1</sup>, 尹 华<sup>2</sup>, 叶锦韶<sup>1</sup>, 彭 辉<sup>3</sup>, 张 峰<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. 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;  
3. 暨南大学 化学系, 广州 510632)

**[摘要]** 为了降低黑曲霉分泌絮凝剂的培养成本, 提高微生物絮凝剂活性和产量, 优化了培养条件, 获得该菌产絮凝剂的最佳培养条件为: 初始 pH 7 条件下, 25 ℃恒温培养 48 h, 此时制备的絮凝剂对高岭土絮凝率达到 96% 以上。利用红外光谱法分析絮凝剂成分, 推断其主要由多糖、核酸和蛋白质构成。在此基础上研究微生物絮凝剂对污泥脱水和 Cr(VI) 还原能力, 结果显示黑曲霉分泌的微生物絮凝剂对污泥脱水有良好效果, 当其投加质量浓度为 27 mg/L 时, 污泥含水率从 97.1% 降至 78.2%。微生物絮凝剂处理 Cr(VI) 溶液时, 对低质量浓度 Cr(VI) 还原效果较好, 在 pH 值 1~5, 还原能力均较高, 对质量浓度为 20 mg/L 的 Cr(VI) 的还原率均大于 99%。

**[关键词]** 黑曲霉; 微生物絮凝剂; 污泥脱水; 六价铬还原

**[中图分类号]** Q93.31; X52    **[文献标志码]** A    **[文章编号]** 1000-9965(2014)01-0026-06

## Microbial flocculant secretion by *Aspergillus niger* and its flocculation properties

YANG Simin<sup>1</sup>, YIN Hua<sup>2</sup>, YE Jinshao<sup>1</sup>, PENG Hui<sup>3</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>

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

**[Abstract]** To reduce the cultivation cost of microbial flocculant secreted by *Aspergillus niger*, and improve the activity and production of bioflocculant, the culture conditions were investigated. The result showed that under the optimal cultural conditions of initial pH value 7, cultural time 48 h, cultural temperature 25 ℃, the flocculation effect of kaolin suspensions using this bioflocculant was over 96.0%. Infrared spectroscopy observation revealed that the produced bioflocculant was mainly composed of polysaccharides, nucleic acid and protein. The bioflocculant was found as a highly effective dewatering agent of sludge. At the dose of 27.0 mg/L, the moisture content of sludge decreased from 97.1% to 78.2%. When dealing with different concentrations of Cr(VI) solution, the bioflocculant showed better reduction efficiency towards Cr(VI) solution of lower concentration as pH value ranged from 1~5, and the reduction rate of 20 mg/L Cr(VI) exceeded 99%.

**[Key words]** *Aspergillus niger*; Bioflocculant; sludge dewatering; hexavalent chromium reduction

**[收稿日期]** 2013-09-18

**[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-12-06)

**[作者简介]** 杨思敏(1988-), 女, 研究方向: 水污染治理与控制, E-mail: siminyang12344@163.com

通信作者: 尹华, 女, 教授, 研究方向: 环境污染防治与生物修复, E-mail: huayin@scut.edu.cn

微生物絮凝剂是一种由微生物产生的有絮凝活性的次生代谢产物,其主要成分为糖蛋白、多聚糖、蛋白质、纤维素、脂类、糖脂和核酸<sup>[1-2]</sup>。微生物絮凝剂具有高效、安全、生物可降解性等优点<sup>[3-4]</sup>,它可以有效絮凝、沉淀水中的固体悬浮颗粒和胶体物质。作为新型水处理剂和污泥调理剂,其高效、无害化等性能已受到广泛关注<sup>[5]</sup>。尽管微生物絮凝剂独特的优越性已经显示了其广阔的应用前景,但由于制备、成本等原因制约其在实际生产中的广泛应用<sup>[6]</sup>,因此,寻找高效、廉价的微生物絮凝剂产生制备方法并探讨其絮凝特性具有重要的意义。

重金属是一类对生态环境和人类健康危害极大的常见污染物。重金属铬的毒性主要来自六价铬,能造成人体四肢麻木,精神异常,抑制发育,强致突变等<sup>[7-9]</sup>。尽管目前国内利用微生物絮凝剂去除水环境中重金属的研究还较少,但微生物絮凝剂对重金属微污染水体的净化处理具有独特的优势,也已引起了人们的关注。

本研究以筛选出的1株微生物絮凝剂产生菌黑曲霉为实验菌株,对其培养条件进行优化,提高微生物絮凝剂的活性和产量。以广州市某污水处理厂浓缩污泥为实验样品,考察了微生物絮凝剂对其的脱水效果。同时,探讨了该絮凝剂对重金属Cr(VI)的还原效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 菌体培养

絮凝剂产生菌:黑曲霉(*Aspergillus niger*),由本课题组筛选获得。

改良马铃薯琼脂培养基:取去皮马铃薯200 g,切成小块,加水至1 L,煮沸30 min后用双层纱布滤去马铃薯块,并将滤液补足定容至1 L。加葡萄糖20 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3 g, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 1.5 g, VB<sub>1</sub>(硫胺素)8 mg, 琼脂20 g。

发酵培养基:葡萄糖20 g, NH<sub>4</sub>Cl 5 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 2 g, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.2 g, 水1 L, pH 7, 113 ℃灭菌15 min。

絮凝剂粗品的制备:采用平板涂布法在改良马铃薯琼脂培养基上接种菌体,30 ℃培养3 d,用无菌生理盐水涂洗平板,调整孢子浓度,使其浓度达到10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup>/mL。以1:100的接种量接到50 mL发酵培养基中,25 ℃,130 r/min下振荡培养48 h,得到的发酵液即为絮凝剂粗品。于1体积生物絮凝剂加入2倍体积的冷无水乙醇,4 ℃过夜沉淀,取沉淀物,

冷冻干燥至恒重,获得粗提纯样品<sup>[10]</sup>。

### 1.2 药品与试剂

葡萄糖、NH<sub>4</sub>Cl、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、NaCl、重铬酸钾、二苯碳酰二肼、硝酸铅均购自广州化学试剂厂,高岭土购自天津大茂化学试剂厂,均为AR级;广州市某污水处理厂回流污泥:含水率约为96.1%~98.1%。

### 1.3 絮凝率测定方法

称取5 g高岭土溶于1 L双蒸水中,250 r/min搅拌30 min后静置30 min,然后取上层液体用STZ-A24浊度仪测定浊度,并以此作为处理水样,通过6联式搅拌机开展絮凝实验,经快速和慢速搅拌后静置5 min,取50 mL上清液测定浊度,计算絮凝率<sup>[11]</sup>。

$$\text{絮凝率}(\%) = \frac{(A - B)}{A} \times 100\% \quad (1)$$

A:空白的高岭土溶液浊度,B:投加絮凝剂后高岭土溶液浊度。

### 1.4 微生物絮凝菌培养条件优化

将微生物絮凝剂产生菌(*Aspergillus niger*)接种于发酵培养基中,选取葡萄糖、麦芽糖、果糖、乳糖、蔗糖、牛肉膏和可溶性淀粉作为碳源,氯化铵、硫酸铵、硝酸钠、尿素、酵母粉、蛋白胨、硫酸铵+氯化铵(1:1)、硫酸铵+蛋白胨(1:1)、尿素+酵母粉(1:1)和硫酸铵+酵母粉(1:1)作为氮源,分别考察不同碳源、氮源对微生物絮凝剂絮凝效果的影响。

在碳氮源单因素实验基础上进一步开展正交实验,选择影响微生物絮凝剂发酵培养基的碳源、氮源、培养温度、pH值和培养时间等5因素4水平进行实验,以絮凝剂的絮凝率为控制质量指标。其中碳源选取葡萄糖,氮源选取氯化铵,各因素的实验取值见表1。

表1 正交试验影响因素和水平设计

Table 1 Factors and level design of orthogonal tests

水平号	影响因素				
	A:碳源/(g·L <sup>-1</sup> )	B:氮源/(g·L <sup>-1</sup> )	pH值	t/h	T/℃
1	10	3	6	36	25
2	20	4	7	48	28
3	30	5	8	60	30
4	40	6	9	72	33

### 1.5 微生物絮凝剂的污泥脱水性能考察

从广州市某污水处理厂采集回流污泥(含水率97.1%),分别取200 mL污泥置于烧杯中,依次投

加不同质量浓度的微生物絮凝剂(Microbial Flocculant *Aspergillus niger*, MFAN),并于300 r/min快速搅拌30 s,60 r/min慢速搅拌1 min. 将絮凝后浓缩污泥转入装有滤布的离心管中,3 000 r/min离心5 min. 测脱水率. 离心后,取滤布上的污泥置于烘箱中,105 °C烘干至恒重,测含水率. 每一处理设2个平行. 利用重量法测定污泥的脱水率和含水率.

$$\text{脱水率}(\%) = \frac{\text{脱水前污泥质量} - \text{脱水后污泥质量}}{\text{脱水前污泥质量}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{含水率}(\%) = \frac{\text{烘干前污泥质量} - \text{烘干后污泥质量}}{\text{烘干前污泥质量}} \times 100\% \quad (3)$$

### 1.6 微生物絮凝剂对Cr(VI)的还原

在250 mL锥形瓶分别投加25 mL的MFAN(0.9 g/L)和不同量的Cr(VI)溶液(500 mg/L),使体系中初始Cr(VI)质量浓度为20~100 mg/L,调节体系pH分别为1~5,加双蒸水定容至50 mL,以130 r/min振荡反应,分别于10、30、60、90、120、180、240 min取样,测定Cr(VI)还原率<sup>[12]</sup>. 以重铬酸钾配制Cr(VI)标准溶液.

$$\text{还原率}(\%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100\% \quad (4)$$

$C_i$ :初始Cr(VI)质量浓度, $C_f$ :最终Cr(VI)质量浓度.

## 2 结果与讨论

### 2.1 产絮凝剂培养条件优化

(1) 不同碳源对絮凝效果的影响 选取几种常见的碳源,分别考察其对微生物絮凝剂的絮凝效果影响,实验结果如表2所示. 从实验数据可知,以葡萄糖为碳源时,黑曲霉发酵液絮凝率最高,达85.9%,这是因为葡萄糖是单糖,可以直接利用. 乳糖是二糖,需要把它分解成半乳糖和葡萄糖,再把半乳糖转化为葡萄糖,才能完全被利用. 因此,最终确定黑曲霉发酵产生絮凝剂的最佳碳源为葡萄糖.

表2 不同碳源对絮凝率的影响

Table 2 Effect of different additional carbon sources on flocculating activity

碳源	絮凝率/%	碳源	絮凝率/%
葡萄糖	85.9	可溶性淀粉	6.9
牛肉膏	78.9	蔗糖	31.4
果糖	65.4	麦芽糖	9.0

(2) 不同氮源对絮凝效果的影响 氮源是构成

微生物细胞和代谢产物中氮元素来源的营养物质,是微生物培养过程中主要原料之一. 为了获得既廉价又有利微生物絮凝剂活性的氮源,我们分别考察了不同氮源对絮凝率的影响,结果列于表3. 分析可知,以氯化铵为氮源时,黑曲霉发酵液絮凝率最高,达82.6%,而当以硫酸铵和蛋白胨1:1加入体系作为氮源时,微生物絮凝剂的絮凝活性最低,只有9.9%. 这是由于氯化铵分解出NH<sub>4</sub><sup>+</sup>离子,离子态的无机氮源比化合态的有机氮更容易被菌株利用,因此,确定氯化铵作为黑曲霉发酵产生絮凝剂的最佳氮源.

表3 不同氮源对絮凝率的影响

Table 3 Effect of different additional nitrogen sources on flocculating activity

氮源	絮凝率/%	氮源	絮凝率/%
氯化铵	82.6	蛋白胨	13.1
硫酸铵	74.7	氯化铵+硫酸铵(1:1)	79.8
硝酸钠	81.4	硫酸铵+蛋白胨(1:1)	9.9
尿素	59.0	尿素+酵母粉(1:1)	74.7
酵母粉	23.1	硫酸铵+酵母粉(1:1)	57.2

(3) 发酵条件的优化 根据单因素实验,选取影响微生物生长的重要环境因素,通过正交实验,优化发酵培养条件,设计方案如表4所示.

由表4极差数字的不同可以看出各因素的水平改变对实验指标的影响是不同的,极差越大,说明这个因素的水平改变对实验指标的影响越大,这个因素即为主要因素. 实验结果显示影响絮凝率的主要因素是pH值,温度次之,而碳源、氮源和时间对絮凝剂的影响不显著. 综合正交实验结果,微生物絮凝剂的最优培养方案为葡萄糖质量浓度30 g/L、氯化铵质量浓度3 g/L、pH 7、培养时间48 h、培养温度25 °C.

### 2.2 MFAN成分分析

通过提纯,得到MFAN粗提纯物为0.9 g/L,分别采用红外光谱分析法对MFAN成分进行了分析. 图1为MFAN的红外光谱图,其中3 360 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰为糖类的O-H键和-NH的强吸收峰<sup>[13]</sup>,2 925 cm<sup>-1</sup>为饱和C-H键伸缩振动的结果;1 735 cm<sup>-1</sup>、1 636 cm<sup>-1</sup>处振动意味着酰胺类物质的存在,1 636 cm<sup>-1</sup>可能是-COOH<sup>-</sup>的不对称伸缩振动或O-H的变形振动引起的,1 440 cm<sup>-1</sup>和1 230 cm<sup>-1</sup>为羧酸类C-O伸缩和O-H面内弯曲振动<sup>[14]</sup>;1 230 cm<sup>-1</sup>为P=O的吸收峰<sup>[15]</sup>,1 080 cm<sup>-1</sup>处为吡喃糖环特征吸收峰,是糖苷键C-O-C的非对称振动峰. 1 040 cm<sup>-1</sup>为C-O伸缩振动的结果. 综上所

述, MFAN 至少含有羟基、氨基、羧基等对絮凝有利的基团<sup>[15]</sup>. 通过苯酚硫酸测定多糖, 考马斯亮蓝测定蛋白质, 均有颜色的反应, 紫外分光光度法测核

酸, 与红外扫描的结果相符, 说明 MFAN 中含有多糖、少量的核酸和微量蛋白质. 可以初步判断出 MFAN 主要成分是多糖、核酸和蛋白质等物质.

表 4 正交实验方案及结果 L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>)

Tabel 4 Method and results of orthogonal tests

实验号	$\rho$ 葡萄糖/(g·L <sup>-1</sup> )	$\rho$ 氯化铵/(g·L <sup>-1</sup> )	pH 值	t/h	T/℃	絮凝率/%
1	10	3	6	36	25	71.3
2	10	4	7	48	30	75.5
3	10	5	8	54	33	88.1
4	10	6	9	60	35	6.2
5	20	3	7	36	35	91.9
6	20	4	6	60	33	63.8
7	20	5	9	36	30	4.6
8	20	6	8	48	25	92.3
9	30	3	8	60	30	74.1
10	30	4	9	54	25	81.3
11	30	5	6	48	35	88.9
12	30	6	7	36	33	81.4
13	40	3	9	48	33	82.8
14	40	4	8	36	35	89.8
15	40	5	7	60	25	96.2
16	40	6	6	54	30	32.1
均值 X <sub>1</sub>	60.2	80.0	64.0	61.8	85.3	
均值 X <sub>2</sub>	63.2	77.6	86.2	84.8	46.6	
均值 X <sub>3</sub>	81.4	69.5	86.1	73.4	79.0	
均值 X <sub>4</sub>	75.2	54.0	43.8	60.1	69.2	
极差	21.2	27.0	43.5	24.8	38.7	

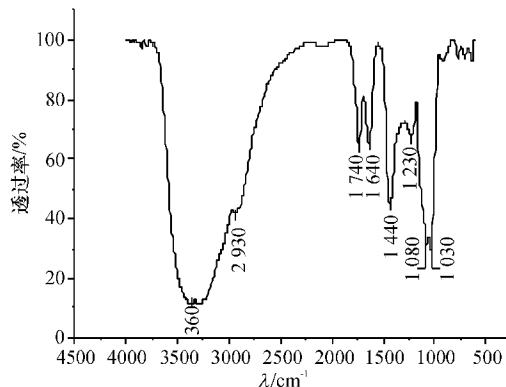


图 1 MFAN 红外光谱图

Fig. 1 Infra-red spectrogram of MFAN

### 2.3 MFAN 对高岭土的絮凝效果

图 2 是不同 MFAN 投加量对高岭土絮凝率的作用, 从图上可知, 当 MFAN 投加质量浓度为 1~9 mg/L 时, 其絮凝效果随着 MFAN 投加质量浓度的增加而提高, 当絮凝剂投加质量浓度达到 9 mg/L 时, 絮凝率达到最大值, 为 96.5%, 之后随絮凝剂投加量增加, 絮凝效果保持稳定. 这可能是因为当继续

加大 MFAN 投加质量浓度, 会使胶粒表面达到再稳现象, 如受到剧烈搅拌, 架桥聚合物从另一胶粒表面脱开, 又卷回原来胶粒所在表面, 造成再稳状态, 所以, 综合考虑生产成本和实验效果, 选取 MFAN 最佳投加质量浓度为 9 mg/L.

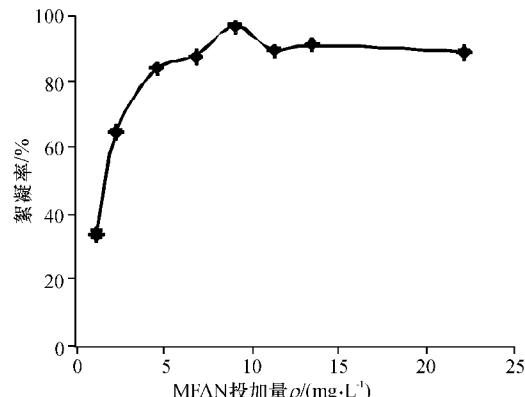


图 2 MFAN 投加量与絮凝效果关系

Fig. 2 Effect of MFAN dosage on flocculation efficiency

### 2.4 污泥脱水能力分析

利用制备的微生物絮凝剂对城市污泥进行脱水

实验,结果如图3所示,每升城市污泥投加27 mg的MFAN,脱水率即可达到82%,污泥滤饼含水率降到最低,为78.2%,污泥脱水后体积缩小至原来的15%左右。当投加质量浓度为9~27 mg/L时,污泥含水率随MFAN投加量的增加明显下降,脱水效果与MFAN投加的质量浓度成正相关。当投加27 mg/L MFAN时,污泥脱水效果最佳;其后随着MFAN投加质量浓度增加,污泥含水率有上升的趋势。其原因可能是微生物絮凝剂与污泥的作用位点有限,随着其投加质量浓度的增加,作用位点逐渐达到饱和状态,过量的微生物絮凝剂在污泥颗粒间形成较稳定的屏障,阻碍了污泥的进一步压缩<sup>[5]</sup>。

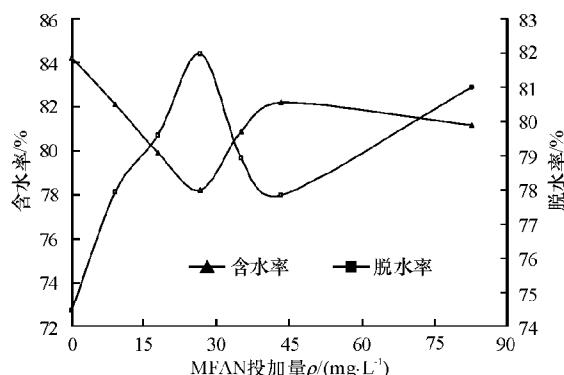


图3 MFAN投加量与污泥脱水效果的关系

Fig. 3 Effect of MFAN dosage on sludge dewatering

## 2.5 MFAN对Cr(VI)的还原性能

利用微生物絮凝剂处理含Cr(VI)溶液,考察其对Cr(VI)的还原能力。由图4可以看出,Cr(VI)质量浓度越低,还原所需时间越短。当Cr(VI)质量浓度为20~60 mg/L时,MFAN在10 min内就几乎还原全部的Cr(VI),如Cr(VI)质量浓度为60 mg/L时,反应10 min Cr(VI)的还原率为97.3%,且随时间延长还原率仍缓慢增加,反应90 min后,98.5%的Cr(VI)被还原并达到平衡。当Cr(VI)质量浓度为80 mg/L,反应120 min,其还原率为97.6%,而当Cr(VI)质量浓度为100 mg/L时,反应240 min,其还原率为98.6%。此外,通过氢氧化铵滴定,溶液没有灰色绿色沉淀生成,说明溶液中残留Cr(VI)已达到还原平衡<sup>[6]</sup>。

溶液的pH值不仅影响铬在溶液中的存在化学形态,而且决定了Cr(VI)的还原率。将有毒的Cr(VI)还原成低毒的Cr(III)需要消耗大量的质子,而且溶液pH越低,还原率越高,Cr(VI)被还原得越彻底<sup>[7]</sup>。因此,本实验通过投加MFAN并调整反应体系的pH值为1、2、3、4和5,研究了溶液初始pH

值对Cr(VI)还原效果的影响。结果如图5所示,在pH值为1~5时,MFAN对20 mg/L Cr(VI)的还原率均大于99%,显示对于低质量浓度Cr(VI)溶液,pH的变化对其还原率影响不大;而随着Cr(VI)质量浓度增加,还原效率受pH的影响逐渐增大,在pH为5时,MFAN对100 mg/L Cr(VI)还原效率为70.4%;而随着pH下降,还原效率不断升高,在pH值为1时还原效率达到98.2%。这是因为,酸性条件下,由于吸附剂和吸附质之间的相互作用<sup>[15]</sup>,随着pH的升高,减少的H<sup>+</sup>使MFAN表面上负电荷更多,增加负电荷和金属去质子化结合位点的作用,另一方面,Cr(VI)转化成Cr(III)需要大量的质子<sup>[17~18]</sup>,导致Cr(VI)还原率降低。由此可见,MFAN对低质量浓度的Cr(VI)的还原效果比较好。

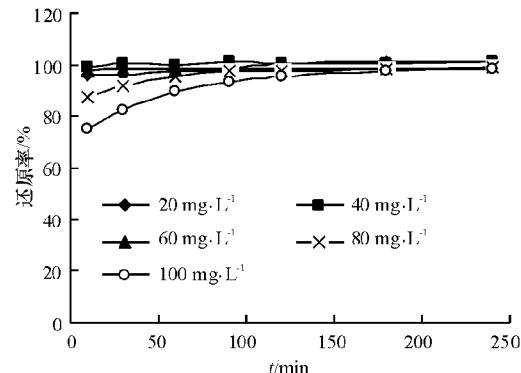


图4 不同反应时间下MFAN对Cr(VI)的还原

Fig. 4 Reduction rate of Cr(VI) by MFAN with increasing time

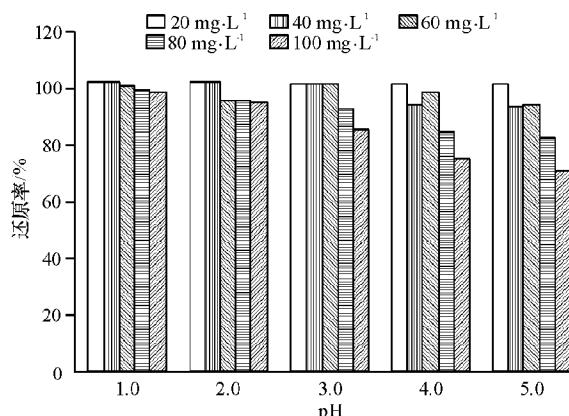


图5 不同pH条件下MFAN对Cr(VI)的还原

Fig. 5 Reduction rate of Cr(VI) by MFAN under different pH

## 3 结论

黑曲霉所产微生物絮凝剂(MFAN)的最佳条件为:培养初始pH值为7、培养时间48 h、培养温度25℃,在此条件下,所产絮凝剂的絮凝率最高,利用

红外光谱扫描等分析方法证明 MFAN 含有多糖、核酸和蛋白质。MFAN 对高岭土具有高效的絮凝能力,投加质量浓度为 9 mg/L 时,絮凝率维持 96% 以上;MFAN 对城市污水厂浓缩污泥具有较好的脱水效果,投加质量浓度为 27 mg/L 时,污泥含水率降至 78.2%,脱水率为 82.0%;MFAN 处理 Cr(Ⅵ) 溶液时,对低质量浓度 Cr(Ⅵ) 还原效果较好,在 pH 值 1~5 范围内,还原能力均较高。

#### [参考文献]

- [1] ZHENG Y, YE Z L, FANG X L, et al. Production and characteristics of a bioflocculant produced by *Bacillus* sp. F19 [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 7686–7691.
- [2] 薛冬, 黄向东, 靳朝喜. 简单芽孢杆菌产高效微生物絮凝剂[J]. 环境工程学报, 2012, 6: 2897–2902.
- [3] ELKADY M F, FARAG S, ZAKI S, et al. *Bacillus mojavensis* strain 32A, a bioflocculant-producing bacterium isolated from an Egyptian salt production pond [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 8143–8151.
- [4] XIONG Y Y, WANG Y P, YU Y, et al. Production and characterization of a novel bioflocculant from *Bacillus licheniformis* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76 (9): 2778–2782.
- [5] 张娜, 尹华, 秦华明, 等. 微生物絮凝剂改善城市污水厂浓缩污泥脱水性能研究 [J]. 环境工程学报, 2009, 3: 525–528.
- [6] 孙鹏轩. 微生物絮凝剂的研究进展及应用现状 [J]. 环境保护与循环经济, 2013, 1: 53–55.
- [7] BAGCHI D, STOHS S J, DOWNS B W, et al. Cytotoxicity and oxidative mechanisms of different forms of chromium [J]. *Toxicology*, 2002, 180: 5–22.
- [8] 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 等. 掷保酵母对含铬废水的生物吸附 [J]. 暨南大学学报:自然科学版, 2005, 6: 401–405.
- [9] KORNGOLD E, BELAYEV N, ARONOV L. Removal of chromates from drinking water by anion exchangers [J]. *Purif Technol*, 2003, 33: 179–187.
- [10] ALJUBOORI A H R, IDRIS A, ABDULLAH N. Production and characterization of a bioflocculant produced by *Aspergillus flavus* [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 127: 489–493.
- [11] 苏晓梅, 张慧芳, 申秀英, 等. 复合菌群产絮凝剂 MAC37 的特征及其在黏合剂废水中的应用 [J]. 环境科学研究, 2012, 25 (3): 340–345.
- [12] GB7467–87 1987, 二苯碳酰二肼分光光度法 [S]
- [13] DENG S B, YU G, TING Y P. Production of a bioflocculant by *Aspergillus parasiticus* and its application in dye removal [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2005, 44: 179–186.
- [14] 李淑芳, 尹华, 秦华明, 等. 酱油曲霉产微生物絮凝剂 MBFA1 的纯化及成分分析 [J]. 化学进展, 2012, 3 (12): 453–457.
- [15] LIU L F, CHENG W. Characteristics and culture conditions of a bioflocculant produced by *Penicillium* sp. [J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2010, 23: 213–218.
- [16] LI Q, LI Y M, HAN S, et al. Optimization of fermentation conditions and properties of an exopolysaccharide from *Klebsiella* sp. H-207 and application in adsorption of hexavalent chromium [J]. *Plos One*, 2013, 8 (1): e53542.
- [17] LIN Y C, WANG S L. Chromium (VI) reactions of polysaccharide biopolymers [J]. *Chemical Engineer*. 2012, 181: 479–485.
- [18] SILVA B, FIGUEIREDO H, QUINTELAS C, et al. Improved biosorption for Cr(Ⅵ) reduction and removal by *Arthrobacter viscosus* using zeolite [J]. *International Bio-deterioration & Biodegradation*, 2012, 74: 116–123.

[责任编辑:刘蔚绥]