

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2014.15.045

微生物絮凝剂水处理的影响因素及其工艺研究进展*

彭宇浩¹ 邓有鸿¹ 田健^{2△} 毛峰² 李凯² 周洪波²

(1 广东省广州市第二中学 广东 广州 510530; 2 中南大学资源加工与生物工程学院 湖南 长沙 410083)

摘要: 本文对近年来微生物絮凝剂的发展进行了概述,在介绍微生物絮凝剂化学性质的基础上,讨论了与絮凝活性相关的絮凝剂投加量、投加顺序,待处理水体性质和水力条件等因素。重点论述了单一微生物絮凝剂水处理工艺、微生物絮凝剂和助凝剂复配水处理工艺、复合微生物絮凝剂水处理工艺和物理、化学方法和微生物絮凝剂联合水处理工艺。讨论发现结合现有研究成果,开发新的微生物絮凝剂水处理工艺具有重要的工业应用价值。

关键词: 微生物絮凝剂;影响因素;水处理工艺

中图分类号: Q939.9;S7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6273(2014)15-2980-05

Research Progress of the Influencing Factors for Flocculating Effect and the Water Treatment Technologies of Microbial Flocculants*

PENG Yu-hao¹, DENG You-hong¹, TIAN Jian^{2△}, MAO Feng², LI Kai², ZHOU Hong-bo²

(1 Guangzhou No.2 High School, Guangzhou, Guangdong, 510530, China;

2 School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha Hunan, 410083, China)

ABSTRACT: The developments of microbial flocculants in recent years were summarized in this review. It discussed the chemical properties of microbial flocculants and the related factors which influenced the flocculating activity of microbial flocculants, including dosing quantity, dosing sequence, properties of water to be processed and hydraulic conditions. It focused on the water treatment process of microbial flocculants alone, the compounding of microbial flocculants and coagulants, the composite microbial flocculants and the joint treatment of the physical and chemical methods and the microbial flocculants. It had found that exploring new water treatment technologies combined with the existing research results had important value for industrial application.

Key words: Microbial flocculants; Influencing factors; Water treatment processes

Chinese Library Classification (CLC): Q939.9;S7 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2014)15-2980-05

前言

我国是水资源短缺和水污染较严重的国家之一。为了解决水资源不足的问题,一方面需要节约用水,另一方面需要加强对污水的处理。由于工艺简单,处理效果显著,絮凝法在工业废水处理中已经得到了广泛应用。但是,传统絮凝剂往往会导致二次污染,例如广泛使用的无机絮凝剂中的聚合氯化铝会诱发老年痴呆;以聚丙烯酰胺为代表的有机絮凝剂尽管具有适用范围广,絮凝速度快,用量少的优势,但在水中残留单体的难降解性和神经毒性问题也限制了它的应用。因此,开发环境友好,无二次污染,易降解的绿色絮凝剂是未来絮凝工艺的重要研究方向^[1]。微生物絮凝剂作为绿色絮凝剂中的一种,是指“一类由微生物产生的具有絮凝活性的次生代谢产物,可以使水中不易降解的固体悬浮颗粒和胶体颗粒等絮凝、沉淀的特殊高分子代谢产物,是一种高效、安全、能自然降解的新型水处理剂”^[2]。自从1986年Kurane等人^[3]从活性污泥中分离到 *Rhodococcus*

erythropolis S1 菌株,并将其所产糖蛋白开发为成熟的水处理用微生物絮凝剂以来,各国科学家对微生物絮凝剂展开了大量的研究。

根据已有的报道,微生物絮凝剂不仅可以有效地应用于生活废水和工业污水的处理,还可以应用于食品医药行业。例如, *Paenibacillus elgii* B69 菌株产生的絮凝剂不仅对实际废水具有很好的絮凝澄清作用,对于染料废水、重金属污染也具有良好的去除作用^[4]。Carvajal-Zarrabal 等人^[5]利用来源于枯草芽孢杆菌的多聚谷氨酸絮凝剂处理龙舌兰酒糟废水,其浊度和 COD 的去除率达到 70% 和 79.5%。Wan 等人^[6]对 *Solibacillus silvestris* W01 菌株进行发酵培养,得到微生物絮凝剂,将该絮凝剂用于海洋藻类 *Nannochloropsis oceanica* 的沉淀收集,不仅成本低,而且效果显著。Zhao 等人^[7]还将 *Klebsiella pneumoniae* 产生的絮凝剂 MBF-5 应用于水中阿米巴虫囊的去除,经过实验条件的优化,阿米巴虫囊的去除率达到 79.4%,高于相同条件下硫酸铝对于阿米巴虫囊的去除率。

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51074195)

作者简介:彭宇浩(1996-),男,广东省广州市第二中学高三(6)班学生,主要科研兴趣:生物化工技术,电话:13602367895,

E-mail: 13602367895@139.com

△ 通讯作者:田健,硕士研究生,电话:0731-88877216, E-mail: tianjian@csu.edu.cn

(收稿日期:2013-11-28 接受日期:2013-12-25)

但是,目前大部分微生物絮凝剂的应用研究仍停留在实验室阶段,距离大面积推广使用仍有一定差距。究其原因,主要来自于两方面:一是微生物絮凝剂本身絮凝活性低,絮凝处理中受影响因素较多,处理对象单一。例如,*Halomonas sp.* V3a'菌株经过发酵罐放大培养,其絮凝剂产量仅为5.58g/L^[8],而该絮凝剂仅对无机物,染料,重金属等具有絮凝作用,对于大量存在于污染水体中的有机物却没有去除效果。而且不同菌种絮凝剂产量差异大,成本高^[9]。例如,利用优化后的培养基培养 *Azotobacter* J-25 菌株,其絮凝剂的产量仅为1.6 g/L^[10]。二是絮凝工艺粗放,缺少有效的水处理工艺,实际废水处理中所需絮凝药剂投加大,效果不理想。目前,微生物絮凝剂在工业废水^[11-13]、生活废水^[14-17]等的处理中仍然以单一的絮凝剂为主。为了提高絮凝效果,需要加入大量的助凝剂,例如 CaCl_2 等^[4, 18, 19]。尽管助凝剂会提高微生物絮凝剂的水处理效果,但是也会引发废水处理中矾花增多,处理成本增加的问题。

因此,基于微生物絮凝剂的化学性质,探究其水处理工艺的影响因素,开发微生物絮凝剂的水处理工艺显得尤为迫切。

1 微生物絮凝剂的化学性质

微生物絮凝剂的化学性质因其产生菌的不同而不同。由于微生物絮凝剂产生菌的菌种资源丰富,根据其产生菌的不同,微生物絮凝剂可分为四类:真菌类微生物絮凝剂、细菌类微生物絮凝剂、放线菌类微生物絮凝剂和复合微生物絮凝剂^[20]。其中真菌主要有酱油曲霉^[11]、黄曲霉等^[21];产絮凝剂的细菌种类较多,例如芽孢杆菌^[22-24]、克雷伯氏菌^[14, 25, 26]、沙雷氏菌^[15]、假单胞菌^[27]等。复合微生物絮凝剂由我国马放教授最先提出,经过对其絮凝机理和应用领域的不断探索,已经取得了可喜的研究成果^[17]。

目前所发现的微生物絮凝剂主要是由多糖,蛋白质,脂类,糖脂以及糖蛋白组成。而对于絮凝活性有重要影响的因素包括:分子量,糖醛酸含量,表面活性基团及其所带电荷^[2]。多糖类絮凝剂,一般耐热性好、分子量大、性质稳定、受温度等外界影响因素较少。Gong 等人^[15]报道的 *Serratia ficaria* 产生的絮凝剂完全为多糖,不含有蛋白质,100℃水浴处理15分钟,絮凝活性仅下降15%;2010年 Sam 等人^[9]发现了一种嗜盐细菌 *Halomonas sp.* AAD6 能够产生一种多糖絮凝剂,该絮凝剂能够应用于高离子浓度水的处理,例如海水和工业废水的处理;而 Fusconi 等人^[28]发现 *Gordonia polyisoprenivorans* CCT 7137 产生的多糖类絮凝剂以 α -异头物为主,含有羧基化和氨基化的基团,pH 适用范围广,该絮凝剂还具有极强的乳化作用,能够用于石油污染的治理。蛋白质类微生物絮凝剂主要是指多聚谷氨酸及其类似物^[23, 29]。该类微生物絮凝剂耐热性不强,分子量较小,但是由于具有大量的极性氨基酸,使其絮凝活性较高,处理对象较广。Carvajal-Zarrabal 等人^[6]报道了利用枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 产生的多聚谷氨酸絮凝处理龙舌兰酒糟废水,发现其能够有效的去除酒糟废水的 COD 和色度。而大部分的微生物絮凝剂主要是由糖蛋白构成的,具有明显的多糖衍生物或/和羧化物特征。由于分子量分布范围广,分子表面活性基团较多,因此其絮凝活性较高^[20]。例如 Rajab 等人^[21]报道的 *Aspergillus flavus* 产生的糖蛋白类絮凝剂,在 pH 3-7 范围内对

2g/L 的高凝土悬浊液絮凝率高于90%,在温度10-100℃范围内絮凝活性也高于90%。另外,目前还有从活性污泥中提取微生物絮凝剂的报道,由于活性污泥含有大量的胞外多聚物,因此,具有较大的分子量和较高的电荷,能够被作为生物絮凝剂加以开发利用,这为未来絮凝剂的发展和活性污泥的资源化利用开拓了新方向^[30, 31]。

2 絮凝工艺影响因素

探究影响絮凝法水处理工艺的主要因素,对于提高絮凝活性,改善絮凝效果,选择合适絮凝水处理工艺具有重要指导作用。与传统无机、有机絮凝剂相比,影响微生物絮凝剂絮凝活性的因素大体相同,主要体现在投加量,投加顺序,待处理水体性质和水力条件等方面。

2.1 微生物絮凝剂的投加量

在絮凝法水处理工艺中,微生物絮凝剂的投加量是影响絮凝过程的重要因素。大量研究表明,在实际水处理过程中,不仅需要根据待处理水体的性质调整投加量,还要综合考虑水体及絮凝剂两方面的性质,进行实验,获得絮凝剂的最佳用量^[32]。当絮凝剂用量不足的时候,水体中的有机物、悬浮物以及各类杂质不能够完全被结合絮凝,从而导致絮凝效果不够理想。而当其用量过多时,则会导致反混、再稳现象^[2]。Carvajal-Zarrabal 等人^[9]在 PGA(多聚谷氨酸)处理龙舌兰酒糟的试验中发现,悬浮物的去除率依赖于 PGA 的投加量,而 pH 和温度对去除率没有显著影响^[5]。*Staphylococcus cohnii ssp.* 所产絮凝剂的用量在4 mg/L 时絮凝活性达96.6%,而用量超过15mg/L 时,絮凝活性迅速下降^[33]。

2.2 助凝剂以及投加顺序

由于大部分微生物絮凝剂为酸性糖蛋白,其等电点偏酸性。而待处理水体一般为中性偏酸性,含有大量的有机质,因此微生物絮凝剂在这类水体中所带电荷较小,电中和及吸附架桥作用弱,故而不能够取得理想的絮凝效果。因此需要添加适量的助凝剂,加速絮凝过程,提高絮凝效果。同时,由于絮凝过程中会形成大量的矾花,但是往往存在矾花细小、外形蓬松、含水量高的问题。因此,为了进一步压缩体积,提高密度,加速沉降,需要加入一些助凝剂,改善矾花性质,提高絮凝效果。例如, *Staphylococcus cohnii ssp.* 所产絮凝剂所需助凝剂 CaCl_2 的最佳投加量为4.5 mM,在此之上再提高 CaCl_2 的用量,并不能显著提升絮凝效果^[34]。根据已有的报道,可以发现 CaCl_2 , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, FeCl_3 和 AlCl_3 能够作为微生物絮凝剂有效的助凝剂^[2, 32]。这是由于这些无机盐中的二价、三价离子能够增强胶体颗粒等杂质和絮凝剂之间的电中和及吸附架桥作用,从而能够压缩胶体颗粒表面双电层,形成致密的矾花,从而改善絮凝效果^[2, 32, 35]。

同时,根据传统絮凝剂的研究成果,可以发现絮凝剂的投加顺序对于絮凝效果也具有重要影响。例如陈婷等人^[36]发现以聚合氯化铁和聚环氧氯丙烷胺联合处理分散黄和活性艳红模拟染料废水,结果显示先投加聚合氯化铁对于分散黄废水的去除效果较好,而先投加聚环氧氯丙烷胺对于活性艳红废水的脱色效果更理想。对于微生物絮凝剂来说,对于不同的微生物絮凝剂和不同的处理对象,絮凝剂和助凝剂的合理投加顺序差异较大。例如,杨开等人^[37]发现对于城市废水,普鲁兰絮凝剂和聚

合氯化铝适宜同时投加。高宝玉等人^[2]发现调节废水 pH、投加助凝剂和投加絮凝剂的顺序对于淀粉废水的絮凝效果具有重要影响。

2.3 待处理水体成分与环境影响

待处理水体性质对于絮凝效果的影响主要来自于三个方面:水体温度、pH 值和共存无机盐。

水体温度对于絮凝反应,絮体成长和沉降分离具有重要影响。一般随着温度的升高,化学反应加速,水体粘度下降,絮凝剂扩散加快,絮体成长迅速,絮凝效果也随之提高。但是,过高的温度条件下形成的絮体细小,含水量高,体积大,而难以处理^[32,38]。另外,由于大部分微生物絮凝剂由糖蛋白组成,高温往往导致其变性继而丧失絮凝活性。因此,合理的水体温度对于絮凝效果的提高具有重要影响。例如,*Ochrobactium ciceri* W2 所产的絮凝剂在 30-80 °C 范围内能保持于 90% 左右^[39],*Aspergillus flavus* 产生的糖蛋白类絮凝剂,在温度 10-100 °C 范围内絮凝活性都高于 90%。

水体 pH 对于胶体颗粒表面电荷,絮凝剂的性质以及絮凝作用过程都有巨大的影响。当水体为酸性时,胶体颗粒表面吸附大量的正电荷。当水体为碱性时,颗粒吸附的 OH⁻ 增多。一般来说,阳离子型絮凝剂适用于酸性和中性水体,阴离子型絮凝剂适用于中性和碱性的水体,而非离子型絮凝剂适于从强酸性到碱性的环境中使用^[30]。微生物絮凝剂因其组成不同,其 pH 适用范围也不尽相同。例如 *Ochrobactium ciceri* W2 所产的絮凝剂适用范围较宽,在 pH 1-10 范围内都保持早 90% 以上^[39]。*C. reinhardtii* 所产絮凝剂在 pH2-10 都能保持最大絮凝活性。而 *Staphylococcus cohnii* ssp. 所产絮凝剂,仅在 pH6-8 的范围内能够保持较高的絮凝活性^[34]。

共存无机盐对絮体的成长和絮凝活性的提高也有重要的影响。例如,水体中存在的 Ca²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺ 等都能够促进絮体的成长,加速矾花的沉降^[35]。但是,对于微生物絮凝剂来说,由于水体中重金属离子的螯合作用,往往导致其絮凝活性的丧失,因此,在实际处理工艺中,有必要对水体中的共存无机盐展开研究。

2.4 水力条件的影响

絮凝剂加入待处理水体之后需要与胶体颗粒等杂质充分混合,才能发生凝聚絮凝反应。由于絮凝过程以极性基团的电中和及吸附架桥作用为主,因而合适的水力条件具有重要影响。一般采取分段处理工艺,在加入絮凝剂后的第一阶段进行剧烈搅拌,增加絮凝剂与杂质的碰撞接触机会,促进絮凝架桥作用。第二阶段往往采用缓慢搅拌,进一步加强吸附和架桥作用,促使絮体长大^[2]。杨开等人^[37]对微生物絮凝剂普鲁兰和 PAC 复配处理城市废水过程中的水力条件进行考察,发现最优条件为先快速搅拌(250 r/min)1 分钟,再慢速搅拌(60 r/min)10 分钟。

3 微生物絮凝剂水处理工艺研究

在废水处理过程中,合理有效的水处理工艺对于提高絮凝效果,节约处理成本,提高经济效益具有重要作用。综合已有的研究成果,微生物絮凝剂水处理工艺大致可以分为四类:单一微生物絮凝剂处理工艺、助凝剂与微生物絮凝剂复配处理工

艺、复合微生物絮凝剂处理工艺以及物理、化学方法和微生物絮凝剂联合处理工艺。

3.1 单一微生物絮凝剂絮凝工艺

不需要助凝剂的微生物絮凝剂的报道较少,一般该类絮凝剂具有氨基、磺酸基等带正电荷的基团,因此能够有效的吸附待处理水体中的有机质及悬浮物(一般含有负电荷),形成巨大而致密的矾花,最终实现废水的迅速沉降澄清。

Deng 等人^[11]发现 *Aspergillus parasiticus* 能够产生分子量为 3.2×10^5 Da 的蛋白类絮凝剂,该絮凝剂在环境 pH 为 5 的时候,所带氨基质子化,从而能够有效结合带负电荷的染料分子。但是,其絮凝活性取决于絮凝剂用量和水体 pH^[11]。Rajab 等人^[21]报道了 *Aspergillus flavus* 产生的絮凝剂在酸性条件下不需要阳离子作为助凝剂,对于高岭土悬浊液即有 90% 以上的絮凝率^[21]。该絮凝剂的分子量为 2.574×10^4 ,蛋白含量达 28.5%。但当 pH 大于 7 的时候,其絮凝活性逐渐下降,推测这可能是由于该絮凝剂在碱性条件下所带电荷较少,吸附架桥作用弱,而导致其絮凝活性下降。根据这两种无需助凝剂的微生物絮凝剂的报道可以发现,该类絮凝剂的絮凝活性依赖于絮凝剂用量和待处理水体的性质,尤其是水体 pH。其根本原因是由于待处理水体性质影响该类絮凝剂所带电荷的性质和高低,进而影响电中和及吸附架桥作用,最终影响微生物絮凝剂的絮凝效果。

3.2 助凝剂与微生物絮凝剂复配处理工艺

根据目前的研究进展,由多糖、蛋白和糖蛋白组成的大部分微生物絮凝剂含有大量的羟基、羧基等负电荷基团,其表面电荷以负电荷为主,因此絮凝过程需要阳离子,比如 Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, Fe³⁺ 等作为助凝剂,协助微生物絮凝剂实现絮凝沉降作用^[40]。Xia 等人^[19]发现 Ca²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺ 能够极大的促进生物絮凝剂 TJ-F1 的絮凝活性;*Bacillus subtilis* 产生的多聚谷氨酸需要 Ca²⁺ 作为助凝剂^[41],而 *Nannocystis* sp. NU-2 产生的絮凝剂需要 Al³⁺ 和 Fe³⁺ 作为助凝剂^[42]。因此,在实际废水处理工艺中,往往将絮凝剂和助凝剂进行复配,以达到更好的水处理效果。例如,Zhang 等人^[18]发现微生物絮凝剂 TJ-F1 和 P(AM-DMC)复配能够提高活性污泥脱水的稳定性。王兰等人^[43]将微生物絮凝剂 XM09 和氯化铝(PAC)复配处理生活污水,在最佳絮凝条件下,絮凝率达到 91.5%。信欣等人^[44]利用气田废水中筛选得到的絮凝剂产生菌获得絮凝剂,将该絮凝剂与 FeCl₃ 复配,处理外排气田废水,脱色率达 95.3%,COD 去除率达 61.11%。郑丽娜等人^[45]对微生物絮凝剂、化学助凝剂以及絮凝剂复配形成絮体的分形特征进行了研究,发现在复配处理工艺中,无论是对于高浊水还是低浊水,分形维数在 1.4~1.6 时,处理效果和稳定性最优。

但是,微生物絮凝剂对 Ca²⁺ 等助凝剂的大量需求,不仅导致成本增加,还会因矾花量的增加,加重后续处理负荷,这也成为微生物絮凝剂难以推广应用的问题之一。不过也有学者利用这一特点,将微生物絮凝剂应用于重金属污染治理,取得了较好的成果。Salehizadeh 等人^[46]将 *Bacillus firmus* 产生的糖蛋白作为絮凝剂用于重金属离子 Pb²⁺, Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 的去除,去除率分别达到 98.3%, 74.9% 和 61.8%。而 Mao 等人^[47]采用 *Pseudomonas fluorescens* C-2 产生的多聚物作为絮凝剂对铈(II)进行吸附,不仅效果显著,而且还可以将微生物絮凝剂再生并加以

重复利用。

3.3 复合微生物絮凝剂絮凝生产与应用工艺

复合微生物絮凝剂由我国的马放教授首先提出^[17,48]。该类絮凝剂主要来自于两个方面:一是采用廉价培养基,进行混合菌群发酵,得到微生物复合絮凝剂;例如:马放等^[17]采用具有絮凝活性的两株芽孢杆菌混合发酵,发现混合发酵所得絮凝剂的絮凝活性明显高于单一菌株纯培养发酵。Zhao 等人^[49]利用混合菌群对稻草秸秆进行固态发酵,发现由 8 类絮凝剂产生菌发酵得到的絮凝剂混合物的絮凝活性达 92.45%。为了进一步提高絮凝效果,还有将微生物复合絮凝剂和化学絮凝剂联合使用的报道。例如,王琴等人^[50]发现单独使用复合絮凝剂,生活污水中污染物去除率为 60%。但是结合化学絮凝剂联合处理废水,絮凝率高达 98.6%。而且,复合絮凝剂的用量降低 60%~75%,处理后的水体完全可以满足污水、给水处理的要求。

二是对自然环境已有的微生物代谢物进行处理,获得微生物复合絮凝剂。如 Sun 等^[30]发现对活性污泥进行酸解可以制备复合微生物絮凝剂。在 pH=10.5, 复合微生物絮凝剂用量为 3.0%的条件下, 该絮凝剂对于 4g/L 的高岭土悬浊液的絮凝率高达 99.5%。张艳君等人^[51]采用 20 kHz、120 W 的超声波法对 19.4 g/L 活性污泥连续超声 30 s 提取絮凝剂,所得复合絮凝剂对于高岭土悬浊液的絮凝率接近 70%,这不仅降低了絮凝剂生产成本,也实现了活性污泥的资源化利用。李向蓉等人^[52]对从活性污泥中絮凝剂的提取工艺进行研究后发现, 超声波法,树脂法及其联用工艺提取到的絮凝剂主要为蛋白质,同时,先用树脂法,再用超声波法提取效率最高,所得絮凝剂对于高凝土悬浊液的絮凝率达 72.3%。

3.4 物理、化学和微生物絮凝剂联合处理工艺

尽管高效的微生物絮凝剂能够提高絮凝工艺的处理效果,但是,对于成份复杂的难处理废水,仅仅依靠微生物絮凝剂往往难以达到排放标准。因此,结合物理、化学方法,能够提高微生物絮凝剂水处理工艺的水处理效果。例如,Carvajal-Zarrabal 等人^[5]采用 PGA(多聚谷氨酸),NaClO 和沙土过滤联合处理龙舌兰酒糟废水,其悬浮物去除率由 PGA 单独处理的 37%提高至 70%。同时,由于 NaClO 的氧化作用,不仅降低了酒糟废水的色度,也提高了 PGA 絮凝沉降的效果。在化学絮凝沉淀处理技术和生物絮凝吸附处理技术集成研究的基础上,张悦^[53]提出了化学-生物联合絮凝沉淀技术,不仅节省了药剂,还提高了废水处理系统的可靠性和灵活性。尽管有关物理、化学方法和微生物絮凝剂联合处理工艺的报道较少,但是却为微生物絮凝剂的水处理工艺开拓了新的方向。

4 结语与展望

目前,关于微生物絮凝剂水处理工艺的系统报道较少。本文基于微生物絮凝剂的化学性质,对微生物絮凝剂絮凝效果的影响因素及其水处理工艺进行了较为系统的综述。可以发现,在微生物絮凝剂已有的研究成果的基础之上,结合传统的物理、化学水处理方法,开发新的水处理工艺对于废水处理具有重要的意义。

- [1] 唐玉斌,陆柱. 绿色水处理技术的研究与应用进展[J]. 水处理技术, 2002, 28(1): 1-5.
Tang Yu-bin, Lu Zhu. Progress in research and application of green technologies for waster water treatment[J]. Technology of water treatment, 2002, 28(1): 1-5
- [2] 胡勇有,高宝玉. 微生物絮凝剂 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 130-156
Hu Yong-you, Gao Bao-yu. Microbial flocculant[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 130-156
- [3] Kurane R, Takeda K, Suzuki T. Screening for and Characteristics of Microbial Flocculants (Microbiology & Fermentation Industry) [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1986, 50(9): 2301-2307
- [4] Li O, Lu C, Liu A, et al. Optimization and characterization of polysaccharide-based bioflocculant produced by *Paenibacillus elgii* B69 and its application in wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2013, 134(1): 87-93
- [5] Carvajal-Zarrabal O, Nolasco-Hipó lito C, Barradas-Dermitz D M, et al. Treatment of vinasse from tequila production using polyglutamic acid [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 95 (suppl): S66-S70
- [6] Wan C, Zhao X, Guo S, et al. Bioflocculant production from *Solibacillus silvestris* W01 and its application in cost-effective harvest of marine microalga *Nannochloropsis oceanica* by flocculation [J]. Bioresource Technology, 2013, 135: 207-212
- [7] 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: 226-232
- [8] He J, Zhen Q, Qiu N, et al. Medium optimization for the production of a novel bioflocculant from *Halomonas* sp. V3a' using response surface methodology [J]. Bioresource Technology, 2009, 100 (23): 5922-5927
- [9] Sam S, Kucukaskas F, Yenigun O, et al. Flocculating performances of exopolysaccharides produced by a halophilic bacterial strain cultivated on agro-industrial waste[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 1788-1794
- [10] Baoyan H, Jinshao Y, Hua Y, et al. Production and Characteristics of Bioflocculant from *Azotobacter* [C]. Wuhan: Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE), 2011: 1-6
- [11] Deng S, 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(4): 179-186
- [12] Zhang Z, Lin B, Xia S, et al. Production and application of a novel bioflocculant by multiple-microorganism consortia using brewery wastewater as carbon source[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(6): 667-673
- [13] 刘松岩. 微生物絮凝剂在水产养殖污水净化中的应用[J]. 安徽农业科学, 2010(16): 8624-8626
Liu Song-yan. Application of Bio-flocculant in the Wastewater Purification of Aquaculture[J]. JOURNAL OF ANHUI AGRICULTURAL SCIENCES, 2010(16): 8624-8626
- [14] Yue L, Ma C, Chi Z. Bioflocculant produced by *Klebsiella* sp. MYC and its application in the treatment of oil-field produced water [J]. Journal of Ocean University of China, 2006, 5(4): 333-338

- [15] Gong W, Wang S, Sun X, et al. Biofloculant production by culture of *Serratia ficaria* and its application in wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(11): 4668-4674
- [16] Nie M, Yin X, Jia J, et al. Production of a novel biofloculant MNXY1 by *Klebsiella pneumoniae* strain NY1 and application in precipitation of cyanobacteria and municipal wastewater treatment[J]. Journal of Applied Microbiology, 2011, 111(3): 547-558
- [17] 马放, 刘俊良, 李淑更, 等. 复合型微生物絮凝剂的开发[J]. 中国给水排水, 2003, 19(4): 1-4
Ma Fang, Liu Jun-liang, Li Shu-geng, et al. Development of Complex Microbial Flocculant[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(4): 1-4
- [18] Zhang Z, Xia S, Zhang J. Enhanced dewatering of waste sludge with microbial flocculant TJ-F1 as a novel conditioner[J]. Water Research, 2010, 44(10): 3087-3092
- [19] Xia S, Zhang Z, Wang X, et al. Production and characterization of a biofloculant by *Proteus mirabilis* TJ-1 [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(14): 6520-6527
- [20] Salehizadeh H, Shojaosadati S A. Extracellular biopolymeric flocculants: recent trends and biotechnological importance[J]. Biotechnology Advances, 2001, 19(5): 371-385
- [21] Rajab A H, Idris A, Abdullah N, et al. Production and characterization of a biofloculant produced by *Aspergillus flavus*[J]. Bioresource Technology, 2013, 1(147): 489-493
- [22] Xiong Y, Wang Y, Yu Y, et al. Production and characterization of a novel biofloculant from *Bacillus licheniformis*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(9): 2778-2782
- [23] Dey A. Improved Production, Characterization and Flocculation Properties Of Poly-Glutamic Acid Produced from *Bacillus Subtilis*[J]. Journal of Biochemical Technology, 2012, 3(4): 135-140
- [24] Deng S, Bai R, Hu X, et al. Characteristics of a biofloculant produced by *Bacillus mucilaginosus* and its use in starch wastewater treatment[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 60(5): 588-593
- [25] Nakata K, Kurane R. Production of an extracellular polysaccharide biofloculant by *Klebsiella pneumoniae*[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1999, 63(12): 2064-2068
- [26] Dermim W, Prasertsan P, Doelle H. Screening and characterization of biofloculant produced by isolated *Klebsiella sp*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1999, 52(5): 698-703
- [27] Jamil N, Ahmed N, Edwards D H. Characterization of biopolymer produced by *Pseudomonas sp.* CMG607w of marine origin[J]. The Journal of General and Applied Microbiology, 2007, 53(2): 105-109
- [28] Fusconi R, Maria Nascimento Assunção R, de Moura Guimar'es R, et al. Exopolysaccharide produced by *Gordonia polyisoprenivorans* CCT 7137 in GYM commercial medium and sugarcane molasses alternative medium: FT-IR study and emulsifying activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(2): 403-408
- [29] Bajaj I, Singhal R. Poly (glutamic acid)-an emerging biopolymer of commercial interest [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 5551-5561
- [30] Sun J, Zhang X, Miao X, et al. Preparation and characteristics of biofloculants from excess biological sludge[J]. Bioresource Technology, 2012, 1(126): 362-366
- [31] Yu G, He P, Shao L. Characteristics of extracellular polymeric substances (EPS) fractions from excess sludges and their effects on bioflocculability [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(13): 3193-3198
- [32] 肖锦, 周勤. 天然高分子絮凝剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005
Xiao Jin, Zhou Qin. Natural polymer flocculant [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005
- [33] Zhu C, Chen C, Zhao L, et al. Biofloculant produced by *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(5): 1245-1251
- [34] Wong Y, Ong S, Teng T, et al. Production of biofloculant by *Staphylococcus cohnii ssp.* from palm oil mill effluent (POME)[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(7): 3775-3781
- [35] 陈晓阳, 杨翔华, 王洪媛. 微生物絮凝剂菌株的筛选和絮凝活性影响因素的考察[J]. 水处理技术, 2004, 30(3): 144-146.
Chen Xiao-yang, Yang Xiang-hua, Wang Hong-yuan. Screening for microbial bio-flocculant strain and its study of flocculating activity [J]. Technology of Water Treatment, 2004, 30(3): 144-146
- [36] 陈婷, 高宝玉, 岳钦艳. PFC 与 EPI-DMA 复配絮凝处理模拟染料废水的性能研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(1): 103-107
Chen Ting, Gao Bao-yu, Yue Qin-yan. Performance of polyferric-cationic polymer dual-coagulants in treating synthetic disperse yellow and reactive red dyeing wastewater [J]. Journal of Shandong Uiversity(Engineering Science), 2010, 40(1): 103-107
- [37] 杨开, 康健雄, 张永波, 等. 微生物絮凝剂用于污水强化一级处理[J]. 中国给水排水, 2002, 18(2): 43-45.
Yang Kai, Kang Jian-xiong, Zhang Yong-bo, et al. Use of Microbial Flocculant in Enhanced Primary Treatment of Wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(2): 43-45
- [38] 郑怀礼. 生物絮凝剂与絮凝技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
Zheng Huai-li. Biological flocculants and flocculation technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004
- [39] Wang L, Ma F, Lee D, et al. Biofloculants from hydrolysates of corn stover using isolated strain *Ochrobactium ciceri* W2[J]. Bioresource Technology, 2012
- [40] 高宝玉. 水和废水处理用复合高分子絮凝剂的研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30(1): 337-345
Gao Bao-yu. Progress in the research of composite polymeric flocculants for water and wastewater treatment[J]. ENVIRONMENTAL CHEMISTRY, 2011, 30(1): 337-345
- [41] Bajaj I B, Singhal R S. Flocculation Properties of Poly (γ -Glutamic Acid) Produced from *Bacillus subtilis* Isolate[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(5): 745-752
- [42] Zhang J, Liu Z, Wang S, et al. Characterization of a biofloculant produced by the marine myxobacterium *Nannocystis sp.* NU-2 [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 59(4): 517-522
- [43] 王兰, 唐静, 刘云洁. 微生物絮凝剂 XM09 与 PAC 复配处理生活污水[J]. 天津大学学报, 2011, 44(11): 984-988
Wang Lan, Tang Jing, Liu Yun-jie. Combination of Microbial Flocculant XM09 and PAC for Treatment of Domestic Wastewater [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(11): 984-988
- [44] 信欣, 何歆, 崔钊, 等. 新型复合絮凝剂预处理气田废水[J]. 水处理

- overexpression of PRDM14 in breast cancers[J]. Cancer Res, 2007,67(20):9649-9657
- [26] 刘冰冰,张四洋,惠林萍,等.PRDM14 在非小细胞肺癌中的表达及其与临床病理因素的关系[J].中国肺癌杂志,2010,13(9):867-872
Liu Bing-bing, Zhang Si-yang, Hui Lin-ping, et al. Relationship between the expression of PRDM14 in non-small cell lung cancer and the clinicopathologic characteristics[J]. Chin J Lung Cancer, 2010,13(9):867-872
- [27] Zhang T, Meng L, Dong W, et al. High expression of PRDM14 correlates with cell differentiation and is a novel prognostic marker in resected non-small cell lung cancer[J]. Med Oncol,2013,30(3):605
-
- (上接第 2984 页)
- 技术, 2010, 36(10): 100-104
Xin Xin, He Xin, Cui Ke, et al. NOVEL COMPOUND FLOCCULANTS USED FOR GAS FIELD WASTEWATER PRETREATMENT[J]. TECHNOLOGY OF WATER TREATMENT, 2010, 36(10): 100-104
- [45] 郑丽娜, 马放, 南军. 等. 微生物和化学絮凝剂复配形成絮体的分形特征[J]. 中国给水排水, 2008, 24(1): 44-47
Zheng Li-na, Ma Fang, Nan Jun, et al. Fractal Characteristics of Floccs Formed by Combination of Biological Flocculants and Chemical Flocculants[J]. CHINA WATER & WASTEWATER, 2008, 24(1): 44-47
- [46] Salehizadeh H, Shojaosadati S A. Removal of metal ions from aqueous solution by polysaccharide produced from *Bacillus firmus*[J]. Water Research. 2003, 37(17): 4231-4235
- [47] Mao Y, Hu H, Yan Y. Biosorption of cesium (I) from aqueous solution by a novel exopolymers secreted from *Pseudomonas fluorescens* C-2: Equilibrium and kinetic studies [J]. Journal of Environmental Sciences. 2011, 23(7): 1104-1112
- [48] 马放, 段殊悦, 孔祥震, 等. 微生物絮凝剂的研究现状及其发展趋势[J]. 中国给水排水, 2012, 28(2): 14-17.
Ma Fang, Duan Shu-yue, Kong Xiang-zhen, et al. Present Status and Development Trend of Studies on Microbial Flocculants[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(2): 14-17
- [49] Zhao G, Ma F, Wei L, et al. Using rice straw fermentation liquor to produce bioflocculants during an anaerobic dry fermentation process [J]. Bioresource Technology, 2012, 113: 83-88
- [50] 王琴, 王辉, 马放, 等. 复合型生物絮凝剂的应用研究[J]. 工业水处理, 2007, 27(4): 68-71
Wang Qin, Wang Hui, Ma Fang, et al. Research on application of compound bioflocculant[J]. INDUSTRIAL WATER TREATMENT, 2007, 27(4): 68-71
- [51] 张艳君, 张志强, 戴晓晴, 等. 基于剩余污泥的超声法提取微生物絮凝剂[J]. 环境工程学报, 2012, 3: 61
Zhang Yan-jun, Zhang Zhi-qiang, Dai Xiao-qing, et al. Extraction of microbial flocculant from waste sludge by ultrasonic method [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2012, 3: 61
- [52] 李向蓉, 张艳君, 张志强, 等. 从剩余污泥中提取微生物絮凝剂的超声法, 树脂法及其联用研究[C]. 北京: 第六届全国环境化学大会暨环境科学仪器与分析仪器展览会摘要集, 2011
Li Xiang-rong, Zhang Yan-jun, Zhang Zhi-qiang, et al. Ultrasonic extraction method of microbial flocculant from the excess sludge, and its associated research resin method[C]. Beijing: The first session of the Sixth National Environmental Chemistry Conference & Environmental Science Instrument and Analysis Instrument Exhibition abstract set, 2011
- [53] 张悦. 化学-生物联合絮凝的污水强化一级处理工艺[J]. 中国给水排水, 2000, 16(7): 29-32
Zhang Yue. Enhanced Primary Wastewater Treatment with Combined Chemico-Biological Flocculation Process[J]. CHINA WATER & WASTEWATER, 2000, 16(7): 29-32