

国家自然科学基金项目资助

微生物絮凝剂

◎ 胡勇有 高宝玉 著



化学工业出版社

国家自然科学基金项目资助

微生物絮凝剂

胡勇有 高宝玉 著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

微生物絮凝剂/胡勇有, 高宝玉著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 7
ISBN 978-7-5025-9104-5

I. 微… II. ①胡…②高… III. 微生物-絮凝剂
IV. TQ047. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 082429 号

国家自然科学基金项目资助

微生物絮凝剂

胡勇有 高宝玉 著

责任编辑: 刘兴春

文字编辑: 张春娥

责任校对: 陈 静 宋 夏

封面设计: 史利平

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 9 1/4 字数 174 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9104-5

定 价: 29.80 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

早在 1995 年,我就萌发了开展微生物絮凝剂研究工作的念头,查阅了国外相关的文献,发现早期的基础研究工作及框架主要是日本的学者完成,欧美学者的工作主要在微生物絮凝剂的分子生物学方面,而我国除了王镇和王孔星报道过相关研究外,几乎还是空白。于是,我将初期的想法和思路分别向我的几位恩师清华大学王占生教授、中国科学院生态研究中心汤鸿霄院士和同济大学的顾国维教授征求意见,对此,他们给予了热情地支持和鼓励,并给予了我很多建设性意见,坚定了我们开展微生物絮凝剂研究工作的信心。在此,我对三位恩师表示衷心的感谢。

在研究工作初期,广东省环保局和广州市环保局给予了我们最早的资助,1999 年分别资助了“生物絮凝剂的研制”和“微生物絮凝促进厌氧污泥颗粒化”两个课题,“生物絮凝剂的研制”2003 年 4 月通过了广东省环保局组织的专家鉴定。随后在 2001 年我们得到了国家自然科学基金委员会在微生物絮凝剂研究方面的第一个资助“微生物絮凝剂的研制及其净化作用机理的研究”(50078022)。本书所涉及的内容正是在这些资助下完成的。在此,我对国家自然科学基金委员会、广东省环保局和广州市环保局表示衷心的感谢。

在研究过程中我们还得到了中国科学院生态研究中心曲久辉研究员、国家自然科学基金委员会的王春霞研究员、李大鹏研究员和中国科技大学的俞汗青教授的鼓励和支持,在与他们的探讨中受益匪浅。在此,对鼓励和支持我们工作的学者们表示衷心的感谢。

本书所有研究工作都浸透着课题组全体成员的辛勤汗水,无一不是课题组全体教师和研究生的刻苦钻研和辛勤劳动的结晶。他们是浦耀武副教授、吴纯德副教授、谢磊博士和程建华博士等课题组老师,已经毕业的成文博士、王劲松博士、肖继波博士、高键硕士、江锋硕士、黄晓武硕士、晏晓敏硕士和在读的博士生:朱刚利、刘立凡、伍建东。特别是在最初的微生物絮凝剂产生菌筛选和选育阶段,有过许多次的失败,当得到菌种时,大家的喜悦和兴奋,遇到挫折时,大家的坚韧和迎难而上的努力,多少个不眠之夜,至今历历在目。本书记载着我们经过三千多个日日夜夜的艰苦努力在微生物絮凝剂研究方面取得的一些成果。然而此时,我们更愿意将这些研究工作与国内外同仁共享。本书以作者课题组自 1997 年以来选育的微生物絮凝剂产生菌:曲霉属

烟曲霉 (*Aspergillus fumigatus*) HHE-A8, 曲霉属杂色曲霉 (*Aspergillus versicolor*) HHE-A26, 青霉属产紫青霉系 (*Penicillium purpurogenum*) HHE-P7、HHE-P24、HHE6, 青霉属圆弧青霉系 (*Penicillium cyclopium*) HHE-P21 以及所获得的相关研究成果为主, 叙述了微生物絮凝剂的基础理论和应用研究。并提出了在我们对微生物絮凝剂探索研究、实践过程中的一些个人观点和研究心得。由于受人力、物力和时间的限制, 本书并未能囊括微生物絮凝剂研究领域的所有内容, 书中为一家之长、一孔之见, 难免有不当和疏漏之处, 望读者见谅。我们希望此书能够起到抛砖引玉的作用, 并愿意与国内外感兴趣的研究者共同推进微生物絮凝剂的研究工作, 使之尽快实现应用。

可喜的是, 近年来, 国内很多兄弟院校和科研院所微生物絮凝剂方面开展的研究工作已经取得了很多新的成果, 在研究思路和方法上有了新的重大突破, 推动着微生物絮凝剂研究的进步和实际应用。在本书中, 我们仅用了少量的篇幅在相应的章节对他们的工作做了简介, 并未能较全面地介绍他们卓越的研究成果, 引为遗憾。在此, 也对本书中引用过的文献的作者致以谢意。

胡勇有

2006 年 7 月 6 日于华南理工大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 微生物絮凝剂概述	2
1.1.1 微生物絮凝剂的概念	2
1.1.2 微生物絮凝剂的特点	2
1.1.3 微生物絮凝剂的种类	2
1.2 微生物絮凝剂的研究背景	4
1.2.1 国外微生物絮凝剂的研究现状	4
1.2.2 国内微生物絮凝剂的研究现状	5
1.3 微生物絮凝剂的研究发展趋势	6
第 2 章 微生物絮凝剂产生菌的筛选和培养	9
2.1 微生物絮凝剂产生菌的筛选和纯化	9
2.1.1 微生物絮凝剂产生菌的选种	9
2.1.2 微生物絮凝剂产生菌的筛选和诱变	9
2.1.3 微生物絮凝剂产生菌的纯种分离	11
2.2 微生物絮凝剂产生菌的鉴定	12
2.3 微生物絮凝剂产生菌的培养条件	15
2.3.1 絮凝剂产生菌的培养条件	15
2.3.2 絮凝剂产生菌的扩大培养	16
2.4 絮凝剂产生菌的廉价培养基筛选	19
2.4.1 酒精废水作廉价培养基	21
2.4.2 猪场废水作廉价培养基	29
2.4.3 酒精废水和猪场废水混合作廉价培养基	37
2.4.4 糖蜜废水作廉价培养基	38
第 3 章 微生物絮凝剂的产出和影响因素	44
3.1 微生物絮凝剂的产生与收获	44
3.1.1 微生物絮凝剂在培养液中的分布	44
3.1.2 微生物絮凝剂的收获与纯化	45
3.2 微生物絮凝剂产生的基因调控	46
3.3 微生物絮凝剂产生的影响因素	46

3.3.1	絮凝剂产生菌的生长对絮凝剂产生的影响	46
3.3.2	培养基的组成对絮凝剂产生的影响	47
3.3.3	接种量对絮凝剂产生的影响	52
3.3.4	装液量对絮凝剂产生的影响	53
3.3.5	pH 值对絮凝剂产生的影响	53
3.3.6	温度对絮凝剂产生的影响	54
3.3.7	表面活性剂对絮凝剂产生的影响	55
3.3.8	其他因素对絮凝剂产生的影响	57
第 4 章	微生物絮凝剂的化学组成和化学结构	58
4.1	微生物絮凝剂的化学组成	58
4.1.1	微生物絮凝剂中的糖类物质	58
4.1.2	微生物絮凝剂中的蛋白质	60
4.1.3	微生物絮凝剂中的核酸及其他物质	61
4.2	微生物絮凝剂的化学结构	62
4.2.1	微生物絮凝剂中的化学基团	62
4.2.2	微生物絮凝剂的相对分子质量	65
4.2.3	微生物絮凝剂的微观结构	67
第 5 章	微生物絮凝剂的絮凝特性和作用机理	68
5.1	微生物絮凝剂的絮凝特性	69
5.1.1	投加量范围对微生物絮凝剂絮凝活性的影响	69
5.1.2	pH 值对微生物絮凝剂絮凝活性的影响	70
5.1.3	温度对微生物絮凝剂絮凝活性的影响	74
5.1.4	金属离子对微生物絮凝剂絮凝活性的影响	75
5.1.5	MBF7 对高岭土悬浊液的絮凝作用模型	78
5.2	微生物絮凝剂的作用机理	80
5.2.1	絮凝剂的一般絮凝作用机理	80
5.2.2	微生物絮凝剂的絮凝作用机理	81
5.3	影响微生物絮凝剂絮凝效果的因素机理分析	83
5.3.1	pH 值对微生物絮凝剂絮凝效果的影响	85
5.3.2	CaCl ₂ 对微生物絮凝剂絮凝效果的影响	86
5.3.3	絮凝剂产生菌菌体对微生物絮凝剂絮凝效果的贡献	97
第 6 章	絮凝剂产生菌的发酵动力学	100
6.1	发酵动力学方程	100
6.2	HHE-P7 产絮凝剂进程	103

6.3	菌体生长动力学	104
6.4	絮凝剂合成动力学	105
6.5	底物消耗动力学	105
6.6	小结	107
第7章	微生物絮凝剂生物技术的应用与意义	108
7.1	废水的絮凝净化	108
7.1.1	微生物絮凝剂对建材废水的絮凝净化	109
7.1.2	微生物絮凝剂处理淀粉废水	114
7.1.3	微生物絮凝剂处理餐饮废水	117
7.1.4	污水的脱色处理	119
7.1.5	微生物絮凝剂对城市污水的絮凝效果	120
7.1.6	微生物絮凝剂与聚合氯化铝、聚合硫酸铁的絮凝效能的比较	121
7.1.7	微生物絮凝剂在其他污水处理领域的应用	122
7.2	促进厌氧污泥颗粒化	123
7.2.1	生物絮凝促进厌氧污泥颗粒化理论	124
7.2.2	不同絮凝剂对絮状厌氧污泥生物絮凝效果的研究	125
7.2.3	UASB 处理低浓度废水时连续投加方式下生物絮凝促进厌氧污泥 颗粒化的研究	132
7.2.4	微生物絮凝剂 MBF21 促进厌氧污泥颗粒化机制	138
7.2.5	生物絮凝促进厌氧污泥颗粒化模型	139
7.3	微生物絮凝剂在其他领域的应用	142
参考文献		144

第 1 章 绪 论

随着人类经济活动的不断发展和生活水平的日益提高，相应产生出越来越多的各种生产生活废弃物，对环境造成了巨大的破坏作用。废水、废气、固体废弃物三大公害污染物中以废水的危害尤为突出，世界各国对于由污染而引起的水环境质量恶化现象十分重视，各种污水处理方法不断地被开发应用，其中污水的絮凝处理得到了广泛的认可和推广，絮凝剂也被广泛地应用于给水净化、工业用水与废水及城市污水处理以及污泥脱水等水处理工艺中，而且在发酵工业后处理、食品工业、选矿等领域的固液分离中也得到了较好的应用。

传统的絮凝剂主要有无机絮凝剂、人工合成有机高分子絮凝剂和天然高分子絮凝剂三大类。

无机絮凝剂主要以铁盐和铝盐为代表，但其在使用过程中的安全性和给环境造成的潜在的二次污染越来越引起人们的重视。如在实际应用中使用无机絮凝剂会导致处理后的水中残留金属离子，同时产生大量的含铁和铝等的污泥，处理处置难度大。此外，铁盐有一定腐蚀性，而且容易残留铁离子，使被处理后的水带有颜色，影响水质感观。铝盐的摄入与目前日益增多的老年性痴呆症的引发有直接关系，随着全球性人口老龄化趋势的日益明显，人们对铝系絮凝剂在给水处理中的使用安全性提出了质疑。

人工合成的有机高分子絮凝剂，如聚丙烯酰胺等本身没有毒性，但其难于降解，其积累将造成二次污染；单体丙烯酰胺的残留也是一个令人担忧的问题，这类高聚物的残余单体具有“三致”效应（致畸、致癌、致突变），许多国家已禁止或限量使用此类絮凝剂。

有机合成高分子絮凝剂往往需要进行化学改性，而且其絮凝效能大都不如合成高分子絮凝剂，在研究和应用上有较大的局限性。因此当前亟待研究开发高效、无毒、无二次污染、经济实用的新型絮凝剂。

天然生物高分子絮凝剂对人体无害，可以被生物降解，对生态环境无不利影响，远比无机絮凝剂与有机合成高分子絮凝剂安全。因此而成为新型絮凝剂开发研究的热点，其中微生物絮凝剂即属于这类新型絮凝剂。

1.1 微生物絮凝剂概述

1.1.1 微生物絮凝剂的概念

微生物絮凝剂是一类由微生物产生的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。按照其来源归类，微生物絮凝剂仍属于天然生物高分子絮凝剂。

1.1.2 微生物絮凝剂的特点

与常见的无机絮凝剂和有机合成高分子絮凝剂相比，微生物絮凝剂具有许多独特的优点，主要体现在以下几个方面。①无毒无害，安全性高。经小白鼠安全性试验证明，微生物絮凝剂能用于食品、医药等行业的发酵后处理。②易被微生物降解，无二次污染。微生物絮凝剂主要是一些微生物的次生代谢产物，如糖蛋白、黏多糖、蛋白质、纤维素和 DNA 等，这些物质都具有很好的可生化性，所以不会像无机絮凝剂和有机合成高分子絮凝剂那样产生二次污染。③适用范围广，脱色效果独特。微生物絮凝剂对多种废水有理想的絮凝效果，与无机絮凝剂和有机合成高分子絮凝剂相比，微生物絮凝剂处理污水后，更易于固液分离，沉淀物生成量少，而且在污水脱色、污泥脱水等方面效果独特。④某些微生物絮凝剂的 pH 值稳定，热稳定性好，用量小。⑤来源广泛，生产周期短。因为微生物的繁殖速度快，适应范围广，转化能力强，并且可以生成絮凝剂的微生物种类繁多，所以微生物絮凝剂的生产周期短而且来源多。

由于微生物絮凝剂具有微生物的某些特性，同时也具有天然有机高分子絮凝剂的特性，可以克服无机絮凝剂和有机合成高分子絮凝剂所固有的缺陷，最终实现水处理后的无污染排放，因而微生物絮凝剂的研究正成为当今世界絮凝剂研究的热点与新的发展方向。有研究者预言，微生物絮凝剂可能取代传统絮凝剂，并在水处理理论和技术领域产生重大革新，将会对水处理理论和技术的发展产生深远的影响。

1.1.3 微生物絮凝剂的种类

微生物絮凝剂产生菌来源广泛，种类多。至今发现的具有絮凝性的微生物达 32 个种，其中细菌 18 种，分别为粪产碱菌属 (*Alcaligenes faecalis*)、协腹产碱杆菌 (*Alcaligenes latus*)、渴望德莱菌 (*Alcaligenes cupidus*)、芽孢杆菌属

(*Bacillus* sp.)、棒状杆菌 (*Corynebacterium brevicale*)、暗色孢属 (*Dematium* sp.)、草分枝杆菌属 (*Mycobacterium phlei*)、红平红球菌 (*Rhodococcus erythropolis*)、铜绿假单胞菌属 (*Pseudomonas aeruginosa*)、荧光假单胞菌属 (*Pseudomonas fluorescent*)、粪便假单胞菌属 (*Pseudomonas faecalic*)、发酵乳杆菌 (*Lactobacillus fermentum*)、嗜虫短杆菌 (*Brevibacterium insectiphilum*)、金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*)、土壤杆菌属 (*Agrobacterium* sp.)、环圈项圈蓝细菌 (*Anabaenopsis circularis*)、厄式菌属 (*Oerskovia* sp.) 和不动细菌属 (*Acinetobacter* sp.)；真菌 9 种，分别为酱油曲霉 (*Aspergillus sojae*)、棕曲霉 (*Aspergillus ochraceus*)、寄生曲霉 (*Aspergillus parasiticus*)、赤红曲霉 (*Monascus anka*)、拟青霉属 (*Paecilomyces* sp.)、棕腐真菌 (brown rot fungi)、白腐真菌 (white rot fungi)、白地霉 (*Geotrichum candidum*) 和粟酒裂殖酵母 (*Schizosaccharomyces prombe*)；放线菌 5 种，分别为棒象虫诺卡菌 (*Nocardia re-strirea*)、红色诺卡菌 (*Nocardia rhodnii*)、石灰壤诺卡菌 (*Nocardia calcarca*)、灰色链霉菌 (*Streptomyces griseus*) 和酒红链霉菌 (*Streptomyces vinaceus*)。目前在细菌、放线菌、真菌、藻类中均有发现，见表 1-1。

表 1-1 一些能产生絮凝剂的微生物

微生物种类		絮凝剂主要成分	微生物种类		絮凝剂主要成分
细菌	<i>Agrobacterium</i> sp.		放线菌	<i>Nocardia amarae</i>	蛋白质
	<i>Rhodococcus erythropolis</i>	蛋白质		<i>Nocardia restrica</i>	
	<i>Alcaligenes latus</i>			<i>Nocardia calcarea</i>	
	<i>Alcaligenes cupidus</i>	酸性聚多糖		<i>Nocardia rhodni</i>	
	<i>Corynebacterium</i> sp.	聚多糖		<i>Streptomyces vinaceus</i>	
	<i>Hydrocarboncalastus</i>	蛋白质		<i>Streptomyces griseus</i>	
	<i>Corynebacterium brevicale</i>			<i>Eupenicillium crustaceus</i>	
	<i>Dematium</i> sp.			<i>Circinella sydowi</i>	
	<i>Mycobacterium phlei</i>			<i>Monascus anka</i>	
	<i>Pseudomonas</i> sp.	黏多糖		<i>Geotrichum candidum</i>	
	<i>Pseudomonas stutzeri</i>		真菌	<i>Sordaria fimicola</i>	
	<i>Pseudomonas faecalis</i>			<i>Paecilomyces</i> sp.	聚半乳糖胺
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>			<i>Aspergillus sojae</i>	多聚糖胺、蛋白质、有机酸
	<i>Pseudomonas fluorescens</i>			<i>Aspergillus ochraceus</i>	
	<i>Bacillus</i> sp.			<i>Aspergillus parasiticus</i>	
	<i>Methylobacterium</i>			<i>Hansenula anomala</i>	蛋白质
	<i>Lactobacillus fermentum</i>	蛋白质		<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	多肽
	<i>Flavobacterium</i> sp.	蛋白质		<i>Phorimidium</i> sp.	磺酸异多糖、脂肪酸、蛋白质
	<i>Staphylococcus aureus</i>		藻类	<i>Anabaenopsis circularis</i>	酸性聚多糖
	<i>Zoogloea</i> sp.	氨基多糖		<i>Chlamydomonas mexicana</i>	
	<i>Kluyveromyces marxianus</i>	多肽		<i>Calothrix desertica</i>	
	<i>Kluyvera cryocrescens</i>				

这些已经鉴定的絮凝性微生物大量存在于土壤、活性污泥和沉积物以及污水中,从这些微生物中分离出来的絮凝剂不仅可以用于处理废水和改进活性污泥的沉降性能,还能用在微生物发酵工业中进行微生物细胞和产物的分离。

由这些絮凝剂产生菌所产生的絮凝剂种类很多,早期最有代表性的絮凝剂有3个:①Nakamura用酱油曲霉生产出的絮凝剂AJ7002;②H. Takagi用拟青霉属微生物生产出的絮凝剂PF101;③Kurane等用红平红球菌生产出的絮凝剂NOC-1。随着微生物絮凝剂研究的技术与手段的不断提高,近年来开始有大量的新的微生物絮凝剂的报道,对微生物絮凝剂的组成、结构的了解不断加深,并且对微生物絮凝剂的絮凝特性和作用机理的认识也不断深入。

1.2 微生物絮凝剂的研究背景

1.2.1 国外微生物絮凝剂的研究现状

微生物絮凝剂的研究开发与应用日益引人注目,应用前景极为广阔。美国、日本、英国、法国、德国、俄罗斯、芬兰、葡萄牙、以色列、韩国、伊朗和中国等十几个国家对微生物絮凝剂进行了大量的研究,取得了许多标志性的研究成果,为微生物絮凝剂的工业应用展示了良好的前景。

Louis Pasteur (1876)最早报道了酵母菌能絮凝微生物的现象,20年以后,Bordet (1899)发现有的细菌具有同样的作用。虽然美国科学家 Butterfield (1935)最早从活性污泥中筛选到了絮凝剂产生菌,但直到1976年,Nakamura等人从霉菌、细菌、放线菌、酵母菌等214种菌株中,筛选出19种具有絮凝能力的微生物,微生物絮凝剂的研究工作才真正开始。此后,不少研究者陆续报道了絮凝剂产生条件、作用机理,产絮凝剂的基因控制,絮凝剂的纯化、性质及应用等方面的研究工作。国外有关微生物絮凝剂代表性产品的报道有:Nakamura等(1976)以酱油曲霉AJ7002 (*Aspergillus*)为原料生产的AJ7002微生物絮凝剂。H. Takagi (1985)研究了拟青霉属(*Paecilomyces* sp. I-1)生产的PF101絮凝剂,对枯草杆菌、大肠杆菌、啤酒酵母、血红细胞、活性污泥、纤维素粉、活性炭、硅藻土、氧化铝等有良好的絮凝效果;Kurane等(1986)利用红平红球菌(*Rhodococcus erythropolis*)生产的NOC-1絮凝剂,对大肠杆菌、酵母菌、泥浆水、河水、粉煤水、活性炭粉水、膨胀污泥、纸浆废水、畜产废水等均有极好的絮凝和脱色效果;Bar和Shilo (1987)发现一些海底蓝细菌(蓝藻)如*Anabaenopsis circularis* Pcc 6720和*Phorimidium* sp. J-1菌能产生数量可观的胞外絮凝剂;1991年,Toeda和Ulane从土壤中分离出一株产碱杆菌Al-

caligenes cupidus AL201, 该菌在含有蔗糖的培养基中生长并分泌絮凝物质; Yokoi 等分别在 1997 年和 1998 年分离出 *Enterobacter* sp. 和 *Pseudomonas* sp., 这两株菌所产絮凝剂对有机悬浮液和无机悬浮液的絮凝效果都很好; Jin-Ho Jang 等在 2001 年筛选出高效的絮凝剂产生菌 *Citrobacter* sp.; Salehizadeh 等 (2002) 利用 *Bacillus firmus* 产生的絮凝剂处理染料废水、酵母废水, 获得了良好的絮凝效果。目前, 在日本和美国已有多种牌号的生物絮凝剂的粉末制品和生物活液销售, 将它们用于废水处理, 能快速清除下水道淤塞和解决污泥膨胀等问题。

1.2.2 国内微生物絮凝剂的研究现状

我国在微生物絮凝剂的研究和应用方面与国外相比虽有很大差距, 起步较晚, 但近年来取得了很大的进展, 有越来越多的研究者从事微生物絮凝剂的相关研究。邓德丰等从废水处理厂的废水中分离到的 C-62 细菌菌株产生微生物絮凝剂, 该絮凝剂对于猪粪尿废水和红豆加工场废水具有良好的絮凝作用。王镇等 (1995) 筛选出不含质粒的 4 株菌 (*Sporolactobacillus* GC3, *Arthrobacter* SB6, *Pseudomonas* SB8, *Aeromonas* GC24), 在最适培养条件下, 这 4 株菌所产絮凝剂产量可达 0.5~0.9g/L, 对高岭土的絮凝活性达 7~9 (1/OD₅₅₀), 而且絮凝范围广, 对果汁、血细胞悬液、泥浆水、染液等均具有很好的絮凝效果和较好的絮凝速度。张本兰 (1996) 从活性污泥中筛选到微生物絮凝剂菌株 *Alcaligenes* 8724, 将其用于处理造纸黑液和氯霉素等有色废水, 具有良好的絮凝脱色能力。李志良等 (1997) 筛选获得 6 株微生物絮凝剂产生菌, 其发酵离心上清液对造纸黑液、皮革废水、偶氮染料废水、电镀废水、石油化工废水等的化学需氧量 (COD) 去除率为 55%~98%, 对悬浮物、色度、浊度的去除率在 90% 以上。庄益源等 (1997) 分离筛选出 6 株对直接深棕和直接黑有良好絮凝脱色作用的菌株。陆茂林等 (1997) 筛选到絮凝剂产生菌 JIM-89 和 JIM-127。邓述波等 (1999) 筛选的絮凝剂产生菌 A-9 处理淀粉废水有较好的絮凝效果。黄民生等 (1999) 筛选到 Q3-2、Q-1、Q-2、Y-1 菌株。柴晓利等 (2000) 筛选到 *Azomonas* sp.。宫小燕等 (2001) 筛选到 *Bacillus* sp. B-2。尹华等 (2003) 筛选到 J-25 等微生物絮凝剂产生菌。马放等 (2003) 首次提出复合型微生物絮凝剂的开发, 研究结果表明, 采用廉价的原料——纤维素作为底物进行发酵是可行的。李剑 (2004) 从土壤中筛选得到一株微生物絮凝剂产生菌 GL23, 经 BIOLOG 菌种鉴定仪鉴定该菌株为产气肠杆菌 (*Enterobacter aerogenes*)。该菌能够利用乳品废水作为培养基生产微生物絮凝剂。作者等就微生物絮凝剂的组成、结构、絮凝原理以及应用等方面进行了系统的研究。但是我国微生物絮凝剂尚未

达到商品化生产与应用的水平。

1.3 微生物絮凝剂的研究发展趋势

尽管国内外针对微生物絮凝剂开展了许多研究工作，人们对微生物絮凝剂独特的优越性已逐步形成了共识，微生物絮凝剂已经显示了广阔的应用前景，但目前微生物絮凝剂还难以在实际生产中得到推广，原因如下。

(1) 大多数微生物絮凝剂的絮凝效果低于有机合成的高分子絮凝剂 有机合成的高分子絮凝剂的相对分子质量可高达上千万，且可以设计出分子链上带有一种或一种以上功能基团的高分子，因此絮凝效果好。而微生物絮凝剂的产生受多种因素影响，分子链和基团有一定的局限性，且相对分子质量普遍不高。

(2) 微生物絮凝剂产量低，絮凝活性弱，用量较大 大多数微生物絮凝剂的用量为 1.0~20.0mL/L，处理特殊废水用量更高，说明培养液中絮凝剂的浓度低。这主要是因为：①菌株产絮凝剂的能力低；②未达到菌株产絮凝剂的最佳培养条件（包括培养基和培养环境条件）；③未达到絮凝剂絮凝的最佳条件。

(3) 原材料价格高 一般絮凝剂产生菌的最佳碳源是葡萄糖和果糖，最佳氮源是酵母膏、牛肉膏、酪蛋白等，这些昂贵原材料的使用使絮凝剂的生产成本较高。因此为了降低成本，必须寻找廉价原料来代替高价原料，开发低成本培养基。

总的来说，所筛选出的絮凝剂产生菌的菌株还不够多，而且主要也是针对某菌产生絮凝剂的研究，归纳、共识性方面的内容欠缺。对微生物产生絮凝剂的规律、絮凝剂的絮凝规律、絮凝剂的结构、絮凝机理还缺乏深入、细致的研究和系统的总结。因此，有必要进一步筛选出更多产生絮凝剂的微生物，并且要对微生物絮凝剂进行系统深入的基础研究，以丰富其内容。同时，完善概念、深化认识，形成完整的理论体系。此外，筛选培养微生物絮凝剂产生菌的廉价培养基也是一条重要途径，开发高效廉价的微生物絮凝剂，推动微生物絮凝剂在废水处理中的应用。

在国内，微生物絮凝剂的研究和应用尚处于起步阶段，应该加快对微生物絮凝剂的研究、应用和开发，使之尽早应用于我国的水处理领域。今后微生物絮凝剂的研究将主要在以下几方面展开。

(1) 继续选育高效絮凝剂产生菌 选育高效微生物絮凝剂产生菌，以增加种类、提高絮凝活性、降低絮凝剂用量，是微生物絮凝剂能否在工业上推广应用的关键。

(2) 组建高效产絮凝剂工程菌 微生物絮凝剂研制与开发的实践已经表明：

仅靠从自然环境中分离筛选絮凝剂产生菌，成本高，难以实现规模生产和应用。而利用现代分子生物学技术获得的高效絮凝基因，通过转基因技术，构建高产絮凝剂的工程菌，实现定向选育、定向构建产絮凝剂能力极高的超级工程菌株，以期实现微生物絮凝剂的大规模生产是必要的也是可行的。

(3) 寻找可替代廉价培养基 虽然对微生物絮凝剂的研究比较多，但是可应用于实际生产的产品很少，其主要原因是培养成本太高，因此探讨直接利用废弃物或高浓度有机无毒废水培养微生物絮凝剂产生菌，降低生产成本，寻找新的废物综合利用的途径势在必行。目前国内外在这方面的探索研究水平还不高，如 Kurane (1994) 采用米糠、鱼肉和葵花子粉、豆饼作为培养红平红球菌来产生微生物絮凝剂的氮源，具有与酵母膏相同的效果，但培养基价格下降 2/3；他还以乙醇为碳源培养菌种产絮凝剂。有些微生物絮凝剂产生菌还可以降解自然界或人工合成的高分子物质，如解烃棒杆菌 (*Corynebacterium hydrocarbodastus*) 可以利用煤油生长并产生絮凝剂。另外，徐斌 (2001) 利用鱼粉废水培养假单胞菌 GX-1 产生较高效的絮凝剂。尹华等 (2003) 利用味精废水和少量葡萄糖 (10g/L) 培养固氮菌 J-25 产絮凝剂。但是，对其他含碳源丰富的废物或废水，如糖蜜废水、酒精废水，以及含氮源丰富的废水如猪场废水，却未见以其作为微生物絮凝剂产生菌培养基的报道。刘晖等也报道过絮凝剂产生菌 HHE-P7 利用橘水废水作廉价培养基的絮凝特性研究。

同时，随着微生物技术的发展，微生物絮凝剂分子生物学的研究也将日益深入，利用基因工程技术和生化工程技术相结合，组建高效微生物产絮凝工程菌，达到有效提高微生物产絮凝剂效率的目的，并研究适用于工业化规模微生物絮凝剂生产的方法。

(4) 改进微生物絮凝剂的提纯方法 传统的微生物絮凝剂提纯方法较为复杂，不利于降低产品的价格，因而改进微生物絮凝剂的提纯方法，也可以降低其生产成本。

(5) 深入研究微生物絮凝剂的作用机理，深化完善微生物絮凝的理论 不同的微生物分泌的絮凝剂性质不同，而且微生物絮凝剂的成分也很复杂，为了减少微生物絮凝剂研制和开发中的盲目性，寻找廉价的培养基和控制絮凝剂发挥作用的最优条件，需要对特定絮凝剂和胶体颗粒的组成、结构、电荷、构象、各种反应条件及其影响因子做更深入细致的研究，在系统深入研究的基础上准确揭示微生物絮凝剂的作用机理，以指导研制絮凝效果更好的新型的微生物絮凝剂。深入研究微生物絮凝剂的絮凝特性及作用机理，分析探讨絮凝剂成分对不同水质废水的絮凝作用原理，归纳总结出其共性与特性，以便根据不同的废水水质研制具有针对性的高效微生物絮凝剂，既能明显提高絮凝效果，还可大大降低絮凝剂的投

加量，从而降低废水净化处理成本。

(6) 开发复合型微生物絮凝剂 目前的研究重点只放在微生物絮凝剂本身的开发上，并未进行复合型微生物絮凝剂的研究。对于复合型的解释为：其一，所采用的菌种不单一，多株菌共同作用产生絮凝剂，且不全是絮凝菌，有用来分解底物的分解菌；其二，底物没有完全分解，在絮凝过程中，也能起到一定的促进作用；其三，在应用过程中与一定量的无机絮凝剂或有机高分子絮凝剂配合使用，可达到更好的絮凝效果。因此今后重点也应放在开发廉价的复合型微生物絮凝剂上。

(7) 拓展微生物絮凝剂的应用，强化絮凝作用 通过深化微生物絮凝剂的基础理论研究，指导微生物絮凝剂的应用，优化微生物絮凝剂絮凝的工艺参数，提高微生物絮凝剂的絮凝效果。研究微生物絮凝剂与其他絮凝剂的配合使用，也是微生物絮凝剂应用的发展方向之一。已有试验表明，若把水处理工程中的微生物与可产生絮凝作用的微生物配合使用，可以互补，既可缩短处理流程，也可减少絮凝剂的投加量。

微生物絮凝剂具有絮凝、吸附等多种功能性，如对重金属和染料有一定的吸附能力，可以利用微生物絮凝剂对重金属废水、染料废水进行吸附、解吸，从而达到回收贵金属、重金属和染料的目的。

在废水处理方面，利用微生物絮凝剂达到生物增强作用，改善和增强污水生化处理效率，降低处理成本。如利用微生物絮凝剂产生菌对生物的絮凝作用，不仅可以增强污水生物处理池中的生物量积累，还可以促进厌氧污泥和好氧污泥颗粒化，增强污泥的耐负荷能力，显著提高污水处理效率。针对不同污水采用特定的絮凝剂产生菌。某些微生物絮凝剂产生菌既有絮凝的作用，又有生物降解的作用，这样就可以起到絮凝和降解的双重作用。如利用可生物降解酞酸酯的絮凝剂产生菌处理含酞酸酯的污水，用同化淀粉能力强的絮凝剂产生菌处理淀粉废水，可以获得絮凝和生物降解的双重效果，有效去除污水特定组分，这是其他污水处理方法所无法比拟的。

第2章 微生物絮凝剂产生菌的筛选和培养

2.1 微生物絮凝剂产生菌的筛选和纯化

2.1.1 微生物絮凝剂产生菌的选种

(1) 从自然界选种 目前,微生物絮凝剂产生菌广泛存在于自然界中,土壤和活性污泥被认为是筛选微生物絮凝剂产生菌的最佳场所。现在报道的高活性絮凝剂产生菌大部分是从土壤和活性污泥中筛选得到的。土壤是微生物生活的最适宜环境,它具有微生物所需要的一切营养物质和微生物进行生长繁殖及生命活动的各种条件。土壤中的微生物数量巨大、类型最多,它是人类利用微生物资源的主要来源。也有的微生物絮凝剂产生菌是从活性污泥中筛选,活性污泥本身是一个主要由细菌、真菌、原生动物、轮虫构成的非纯种微生物培养体。

(2) 从已有菌株中选种 实验室或生产上用的菌种,在长期人工培养条件下,细胞个体间会有很大的差别;有的细胞会退化,有的则可能稳定,甚至发生变异,提高了生长性能。所以为了选育优良菌种,也可以利用原有的菌株,进行单细胞分离,分出新的菌株,再加以比较和筛选,从而得到优良菌株。*Aspergillus sojae* 就是从实验室已有菌种中筛选而得到的。

(3) 人工诱变选种 人工诱变选种就是人为地利用物理化学手段处理微生物细胞,使之产生突变,再从中选出具有优良性状的变异菌株。这类用于诱变的理化因素,叫做诱变剂。人工诱变的操作方法可分为三步,即微生物细胞悬浮液的制备、诱变剂的处理和变异菌株的筛选。远藤隆一等用 N -甲基- N' -硝基- N -硝基胍处理一种能产生絮凝剂的微生物,获得了5株不产生絮凝剂的突变株,并得到其中一种突变株的能产生絮凝剂的回复突变株。

2.1.2 微生物絮凝剂产生菌的筛选和诱变

所培养的微生物菌株必须经过初筛和复筛,进行性能测试,最终才能获得理想菌株。絮凝处理对象种类很多,如高岭土悬浊液、大肠杆菌悬浮液、活性污泥、粉煤水、粪尿水、土壤悬浊液、印染废水、色素等。实验室最常用高岭土悬