



厦门大学南强丛书

XIAMENDAXUE NANQIANG CONGSHU

【第五辑】

赤潮控制微生物学

郑天凌 等 / 著



厦门大学出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位



厦门大学南强丛书

XIAMENDAXUE NANQIANG CONGSHU

【第五辑】

赤潮控制微生物学

郑天凌 等 / 著



厦门大学出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

赤潮控制微生物学 / 郑天凌等著. — 厦门: 厦门大学出版社, 2011. 3
(南强丛书. 第 5 辑)

ISBN 978-7-5615-3848-7

I. ①赤… II. ①郑… III. ①海洋微生物-应用-赤潮-污染防治-研究
IV. ①X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 031924 号

厦门大学出版社出版发行

(地址: 厦门市软件园二期望海路 39 号 邮编: 361008)

<http://www.xmupress.com>

xmup@public.xm.fj.cn

厦门集大印刷厂印刷

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 22 插页: 3

字数: 360 千字 印数: 1~2 000 册

定价: 48.00 元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换

《南强丛书》(第五辑)编委会

主任委员:朱崇实

副主任委员:孙世刚 李建发 张 颖

委员:(以姓氏笔画为序)

万惠霖	庄宗明	朱崇实	朱福惠	孙世刚
李建发	李清彪	张 颖	陈支平	陈振明
陈辉煌	陈福郎	洪华生	胡培兆	翁君奕
韩家淮	蒋东明			

总 序

厦门大学由著名华侨领袖陈嘉庚先生于 1921 年创办,有着厚重的文化底蕴和光荣的传统,是中国近代教育史上第一所由华侨出资创办的高等学府。陈嘉庚先生所处的年代,是中国社会最贫穷、最落后、饱受外侮和欺凌的年代。陈嘉庚先生非常想改变这种状况,他明确提出:中国要变化,关键要提高国人素质。要提高国人素质,关键是要办好教育。基于教育救国的理念,陈嘉庚先生毅然个人倾资创办厦门大学,并明确提出要把厦大建成“南方之强”。陈嘉庚先生以此作为厦大的奋斗目标,蕴涵着他对厦门大学的殷切期望,代表着厦门大学师生的志向。

在厦门大学建校 70 周年之际,厦门大学出版社出版了首辑《南强丛书》,共 15 部学术专著,影响极佳,广受赞誉,为校庆 70 周年献上了一份厚礼。此后,逢五逢十校庆,《南强丛书》又相继出版数辑,使得《南强丛书》成为厦大的一个学术品牌。值此建校 90 周年之际,再遴选一批优秀之作出版,是全校师生员工的一个愿望。入选这批厦门大学《南强丛书》的著作多为本校优势学科、特色学科的前沿研究成果。作者中有资深教授,有全国重点学科的学术带头人,有新近在学界崭露头角的新秀,他们都在各自的学术领域中受到瞩目。这批学术著作的出版,为厦门大学 90 周年校庆增添了喜悦和光彩。

至此,本《丛书》已出版了五辑。可以说,每一辑都从一个侧面反映了厦大奋斗的足迹和努力的成果,丛书的每一部著作都是厦大发

展与进步的一个见证,都是厦大人探索未知、追求真理、为民谋利、为国争光精神的一种体现。我想这样的一种精神一定会一辑又一辑地往下传。

大学出版社对大学的教学科研可以起到推动作用,可以促进它所在大学的整个学术水平的提升。在 90 年前,厦门大学就把“研究高深学术,养成专门人才,阐扬世界文化”作为自己的三大任务。厦门大学出版社作为厦门大学的有机组成部分,它的目标与大学的发展目标是相一致的。学校一直把出版社作为教学科研的一个重要的支撑条件,在努力提高它的水平和影响力的过程中,真正使出版社成为厦门大学的一个窗口。厦门大学《南强丛书》的出版汇聚了著作者及厦门大学出版社所有同仁的心血与汗水,为厦门大学的建设与发展作出了一份特有的贡献,我要借此机会表示我由衷的感谢。我期望厦门大学《南强丛书》不仅在国内学术界产生反响,更希望其影响被及海外,在世界各地都能看到它的身影。这是我,也是全校师生的共同心愿。

厦 门 大 学 校 长 朱 崇 实
《南强丛书》编委会主任

2011 年 2 月 26 日

序

郑天凌先生嘱我为其新著《赤潮控制微生物学》作序，盛情难却，只能临时抱佛脚，去网上匆匆学习了一下。发现对近年来几乎人尽皆知的赤潮的历史渊源，依然不是十分的清楚，这可能因为赤潮现象的出现，基本是靠人类的文字记载来承载的。网上详细列出了有关“赤潮”的历史记载就包括了《旧约·出埃及记》和日本腾原时代和镰仓时代的描述，我国清代蒲松龄在《聊斋志异》中的描述以及 1803 年法国人马克·莱斯卡波特对美洲罗亚尔湾地区印第安人根据月黑之夜观察海水发光现象来判别贻贝是否可以食用的描述。而 1831—1836 年，达尔文在《贝格尔航海记录》中记载的在巴西和智利近海海面发生的束毛藻引发的赤潮事件，则应该说是具有一定博物学基础的描述了。但是，严酷的事实是，自 20 世纪下半叶以来，人类经济活动的飞速发展，将各种生活污水和城市废水大量排入江河湖海，使得水体中氮磷含量以不可思议的速度增长，远远超过水体的自净能力，必然造成有毒有害藻类过度繁殖。于是，赤潮的爆发日益加剧，不仅成为当今全球最严重的环境灾害之一，更有愈演愈烈的趋势。

赤潮与微生物有着千丝万缕的关系。它们或为敌人，互相制约；或为朋友，狼狈为奸。若想揭开赤潮的神秘面纱，则不得不重视微生物在其中所扮演的角色。赤潮防治方法中，现有的物理方法、化学方法等远远无法满足需求。微生物作为新兴武器，给予人们新的希望。抑/杀藻细菌、抑/杀藻放线菌、藻类病毒及化感物质等的发现，为人类治理赤潮指出了新的道路。

《赤潮控制微生物学》包括赤潮概论、海洋抑/杀藻微生物的研究及应用、赤潮防治现状及展望等三方面,在让读者全面了解赤潮的基础上,系统地阐述了赤潮的成因及相关的海洋微生物,介绍和展望了海洋抑/杀藻微生物开发与应用等技术,拓展赤潮治理的微生物研究领域。该书是赤潮研究领域中的一部具有系统性、科学性、先进性和实用性等特色的工具书,弥补了相关领域出版物的空缺。它的问世,必将在赤潮的预防及微生物治理赤潮等方面发挥重要的促进作用。

中国微生物学会理事长

中国科学院院士

赵国屏

2010年11月于上海

前言

近年来,我国近海面临海洋环境安全和可持续发展的严峻挑战,中国沿海的渤海湾地区,长江、珠江入海口、南海北部、台湾海峡是赤潮的高发区。我国赤潮呈现发生频率逐年增加,影响范围逐渐增大,有毒藻种增多,持续时间增长四个主要特点,它不仅严重破坏海洋生态系统、制约经济的发展,也严重危害人类的健康!在赤潮生消机制的探讨中,人们越来越多地关注菌—藻相互关系、相互作用的内在规律的揭示。在生物法赤潮防治策略中,“以菌治藻”已成为国际上生物治理有害赤潮的研究热点!至今,国内外的赤潮研究学者普遍认为,“以菌治藻”作为一种清洁的、绿色的、环境友好型的有害藻华控制方法,其应用前景相当广阔。编者多年来从事有害赤潮生防菌质资源的挖掘、研究与利用,旨在寻找高效抑藻、杀藻、裂藻的海洋微生物并积极阐释其调控有害赤潮的原理、途径与方法。

本书聚焦于赤潮生消过程中海洋微生物的特殊地位与作用,其中有许多内容是本书作者们多年来潜心研究的成果。全书共十一章,由三篇组成:第一至第三章为概论,属第一篇,主要介绍赤潮及赤潮成因的研究进展。第四至第九章属第二篇,主要内容是赤潮中的有效抑/杀藻微生物(细菌、放线菌及病毒)及活性成分对有毒赤潮藻的作用过程探讨。第十章独立为第三篇,简要介绍了现今条件下的赤潮防治策略。我们把全书的重点放在第二篇,内容上尽可能地将自己的研究成果同国内外的研究进展相结合。

各章的主要执笔人员是:第一章郑天凌、张金龙、张帮周、黄丽萍;第二章周艳艳;第三章田蕴、杨彩云;第四章吕静琳、郑天凌;第五章张帮周、郑小伟、吕静琳、傅丽君、王宾香、赖其良;第六章林婧、赖其良;第七章李欣毅、郑天凌;第八章蔡雯蔚、黄丽萍、郑天凌;第九章周艳艳、吕静琳、杨彩云;第十

章郑天凌、张金龙。

全书由厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室及近海海洋环境科学国家重点实验室郑天凌教授统稿定稿,吕静琳、周艳艳、张帮周及张金龙等参加了本书的主要审校工作。此外,苏建强、杨小茹、王新、周立红、王宾香博士等的宝贵研究成果为本书的撰写提供了重要的学术支撑,也承蒙李少菁教授的鼎力支持与指导,谨此致谢!我们在编写过程中虽力求系统地反映赤潮与微生物研究的新成就、新动向,但时间紧迫、水平所限,不免仍有不妥及疏漏甚至错误之处,希望广大读者批评指正。

本书是在国家自然科学基金重点项目、主任基金项目和面上项目(40930847, 30940002, 31070442, 40876061);科技部“863计划”(2008AA09Z408);长江学者和创新团队发展计划项目(40821063)的资助研究下完成的,谨致谢忱。

作者谨启

2010年10月

目
录

总 序

序

前 言

第一篇

第一章 赤潮概论	1
第一节 赤潮的定义与分类	1
一、赤潮的定义	1
二、赤潮的判断	2
三、赤潮的分类	3
第二节 赤潮生消的基本过程	5
一、起始阶段	5
二、发展阶段	6
三、维持阶段	7
四、消亡阶段	7
第三节 赤潮的成因	7
一、赤潮生物	8
二、发生赤潮的理化条件	13
三、赤潮发生的营养物质基础	17
四、水文气象因素	22
五、地幔流体	25
六、全球生态变化	25
第四节 中国赤潮的发生概况和发展趋势	26
一、中国赤潮发生的历史概况和总趋势	26
二、近 10 余年中国赤潮的发生概况	36
第五节 赤潮的危害及其防治	40
一、赤潮的危害	41
二、赤潮的预防策略	42
三、赤潮的监测	44

四、赤潮的防治方法	48
第二章 赤潮原因生物类型导论	51
第一节 引发赤潮的浮游微藻	51
一、甲藻门 Pyrrophyta	51
二、硅藻门 Bacillariophyta	63
三、着色鞭毛藻门 Chromophyta Christensen	68
第二节 引发赤潮的原生动物	70
第三节 引发赤潮的蓝细菌	72
一、红海束毛藻 <i>Trichodesmium erythraeum</i>	73
二、薛氏束毛藻 <i>Trichodesmium thiebautii</i>	74
三、汉氏束毛藻 <i>Trichodesmium hildebrandtii</i>	75
第四节 赤潮与生物入侵	75
第三章 海洋中的微生物	79
第一节 海洋古生菌	79
一、古菌的分类	80
二、海洋古菌的分布	80
三、古菌的生态功能	83
第二节 海洋细菌	84
一、海洋中细菌的种类组成	84
二、海洋细菌的分布	84
三、细菌在海洋生态系统中的作用	86
第三节 海洋真菌	87
一、海洋真菌的分类	88
二、海洋真菌的分布	88
三、海洋真菌的生态习性	88
四、海洋真菌的生态作用	89
第四节 海洋病毒	90
一、海洋病毒的主要类群	91
二、浮游病毒的感染与浮游病毒的功能基因	92
三、病毒的分布与丰度	93

四、病毒生物系及在全球生态系统中的作用	93
第五节 藻际环境与海洋特殊生境微生物	94
一、藻际环境微生物	95
二、海洋特殊生境微生物	96
第六节 赤潮发生与微生物的关系	101
一、细菌	101
二、放线菌	104
三、病毒	105
四、真菌	106
五、寄生性原生动物	107
第一篇主要参考文献	108

第二篇

第四章 有毒赤潮藻——塔玛亚历山大藻	118
第一节 塔玛亚历山大藻基本特征	118
一、塔玛亚历山大藻的细胞形态	119
二、塔玛亚历山大藻的生长特征	120
三、塔玛亚历山大藻的分子生物学研究	123
四、塔玛亚历山大藻的代谢特性	124
五、塔玛亚历山大藻的潜在开发价值	125
第二节 塔玛亚历山大藻藻际微生物群落结构	126
一、塔玛亚历山大藻藻际微生物群落结构	127
二、塔玛亚历山大藻藻际细菌溶藻过程	130
三、藻际细菌对赤潮藻作用机制的讨论	134
第三节 无菌藻培养体系的建立	136
一、无菌藻培养体系建立的重要性	136
二、塔玛亚历山大藻无菌藻培养体系的建立	136
三、无菌藻培养体系的应用	137
第四节 藻细胞活性的检测	138
一、FDA 染色法及其条件优化	138
二、其他藻细胞活性检测方法	145

第五章 海洋抑/杀藻微生物研究进展	146
第一节 抑/杀藻菌	146
一、抑/杀藻菌	146
二、抑/杀藻菌的作用方式	152
第二节 海洋抑/杀藻菌菌质资源的研究	155
一、海洋抑/杀藻菌的分离	155
二、海洋抑/杀藻细菌的形态学特征	156
三、海洋抑/杀藻细菌的分子生物学鉴定	157
四、海洋抑/杀藻细菌的生理生化特征	160
五、抑/杀藻细菌的分类鉴定	161
第三节 抑/杀藻活性物质	165
一、抑/杀藻活性物质的种类	165
二、抑/杀藻活性物质的分离	167
三、海洋抑/杀藻细菌的杀藻图谱分析	172
第四节 环境胁迫下赤潮藻程序性死亡探索	174
一、植物细胞的程序性死亡	174
二、藻类细胞的程序性死亡	175
三、单细胞藻类的程序性死亡	177
四、环境胁迫触发微藻 PCD 的研究	179
五、细胞死亡途径的进化保守性	181
六、微藻 PCD 研究展望	181
第六章 海洋抑/杀藻微生物的生物工程	183
第一节 抑/杀藻菌的保种技术	183
一、定期移植保藏法	183
二、液体石蜡保藏法	184
三、沙土管保藏法	184
四、-80℃低温保藏方法	185
五、液氮超低温保藏方法	186
六、冷冻干燥保藏方法	187
七、商业化的保种管保藏方法	188
第二节 抑/杀藻菌的培养条件优化	189
一、单因子实验法	190

二、正交设计	190
三、均匀设计	191
四、响应面方法	193
五、二次回归正交旋转组合法	197
第三节 抑/杀藻菌的固定化工艺	198
一、生物固定化概论	198
二、生物固定化方法	201
三、载体的特点及分类	205
四、生物固定化技术的发展趋势	214
第七章 化感物质调控赤潮	216
第一节 化感作用	216
一、化感作用及其研究与发展历史	216
二、水生生态系统中的化感作用	218
第二节 化感物质	218
一、化感物质及种类	218
二、水生生态系统中的化感物质	219
第三节 化感物质作用的特点与作用模式	220
一、化感物质作用的特点	220
二、化感物质作用的模式	221
第四节 影响化感物质作用的因素	225
一、陆生生态系统	225
二、水生生态系统	225
第五节 化感作用调控赤潮的意义与应用前景	228
一、大型水生植物抑藻作用	229
二、陆生植物抑藻作用	230
三、微藻间的拮抗作用	231
四、细菌的抑藻作用	234
五、化感物质在赤潮控制中的应用前景	235
第八章 藻类病毒多样性与噬藻作用	236
第一节 海洋病毒及其调控效应	236
一、海洋病毒参与生态系统内群落结构的调节	236

二、海洋病毒调控海洋微食物环的物质循环	240
三、海洋病毒介导的生物间遗传物质的转移及共进化	243
四、海洋病毒与 DMS 的归宿	244
第二节 藻类病毒多样性研究方法	245
一、噬藻体扩增引物的研究	246
二、藻病毒扩增引物的研究	246
三、PCR-DGGE	246
四、T-RFLP(末端限制性片段长度多态性)	247
五、基因文库构建	248
第三节 藻病毒的分离与纯化	250
一、双层平板法	250
二、普通光学显微镜法	251
第四节 藻病毒调控赤潮研究进展	252
一、藻类病毒应用于赤潮调控的可能性、有效性及安全性	255
二、对病毒制剂应用于赤潮调控过程的几点认识	255
第五节 抑/杀藻菌噬菌体的研究进展	256
第九章 赤潮高发区藻-菌关系研究	260
第一节 东海赤潮高发区细菌的分布特征及细菌溶藻作用	260
一、浮游细菌在东海赤潮高发区的分布与活性	261
二、藻际细菌对塔玛亚历山大藻溶藻作用	268
第二节 厦门海域异养细菌的活性特征及其与赤潮关系	271
一、厦门海域异养细菌的分布及活性	271
二、厦门海域异养细菌与赤潮生态关系探索	277
三、厦门海域赤潮跟踪调查	280
第三节 厦门海域细菌的 DGGE 分析	283
一、厦门海域细菌在不同季度的 DGGE 分析	283
二、厦门海域细菌在赤潮期的 DGGE 分析	288
第二篇主要参考文献	291

第三篇

第十章 研究展望	331
第三篇主要参考文献	334

第一篇

第一章 赤潮概论



第一节 赤潮的定义与分类

一、赤潮的定义

赤潮(red tide)泛指一定环境条件下一些海洋浮游生物、细菌或原生动物异常增殖或聚集的现象,大都会引起海水变色。赤潮是一个历史沿用名,其实赤潮并非色如其名,它的爆发不一定引起海水变色,即使变色也可使海水呈现多种颜色,而不仅仅是红色。赤潮的颜色取决于形成赤潮时占优势的浮游生物种类。如夜光藻赤潮是粉红色,中缢虫赤潮多为红色,绿色鞭毛藻如眼虫引起的赤潮呈黄绿色,硅藻赤潮则是黄褐色,骨条藻赤潮是灰褐色,赤潮异弯藻赤潮是酱油色,而膝沟藻、裸甲藻、梨甲藻等引起的赤潮有时并不使海水呈现任何特别的颜色。

大多数赤潮是无害的,那些有毒或能导致危害的赤潮又被称为有害藻华(Harmful algal blooms, HABs)或有害赤潮(Harmful red tide),它能通过产生毒素、造成物理损伤、改变水体理化特征等给海洋生态系统、渔业生产、海水养殖,旅游业以及人类健康带来严重威胁。有害藻华拥有巨大的破坏性,加之至今难以预测和控制,因而常被形容为“海洋幽灵”或“海洋癌症”。可见,“赤潮”与“有害藻华”是两个不完全相同的概念,“有害藻华”强调藻华可能导致的危害性,而“赤潮”仅仅指赤潮生物异常增殖或聚集使密度超过