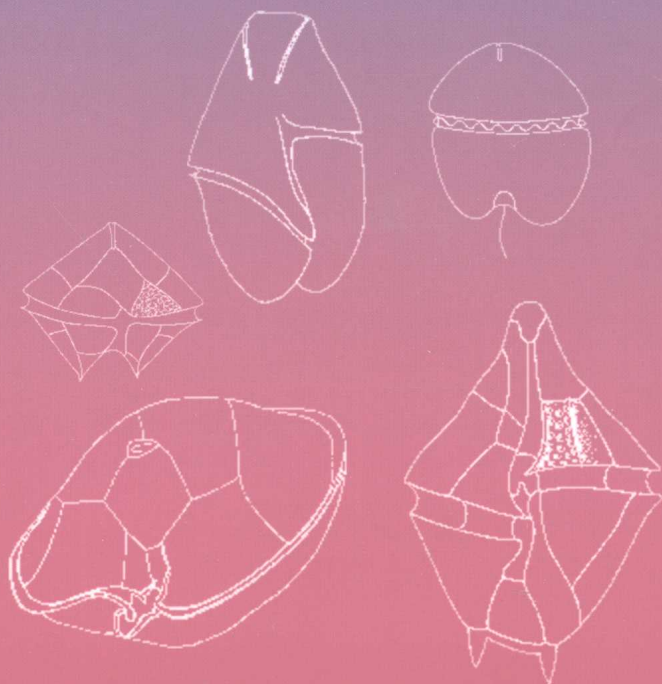


三亚红沙港赤潮及 生物防控研究

彭 明 李春强 主编



三亚红沙港赤潮及 生物防控研究

彭 明 李春强 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

三亚红沙港赤潮及生物防控研究 / 彭明, 李春强主编.
北京: 中国农业出版社, 2009. 2
ISBN 978-7-109-13190-3

I. 三… II. ①彭…②李… III. 红潮-生物防治-研究-
三亚市 IV. X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 198953 号

中国农业出版社出版
(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)
(邮政编码 100125)
责任编辑 石飞华

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 14.5

字数: 236 千字

定价: 50.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

主 编 彭 明 李春强

副 主 编 刘志昕 鲍时翔 王冬梅 方 哲

编著人员 (按姓氏笔画排序)

于晓玲 (中国热带农业科学院)

王冬梅 (中国热带农业科学院)

方 哲 (中国热带农业科学院)

刘志昕 (中国热带农业科学院)

孙海彦 (中国热带农业科学院)

李春强 (中国热带农业科学院)

何远胜 (国家海洋局海口海洋环境监测中心站)

陈 宏 (海南南海热带海洋生物及病害研究所)

周 键 (中国热带农业科学院)

赵平娟 (中国热带农业科学院)

胡朝松 (中国热带农业科学院)

黄 姿 (中国热带农业科学院)

彭 明 (中国热带农业科学院)

鲍时翔 (中国热带农业科学院)

廖文彬 (中国热带农业科学院)

漆雪琳 (中国热带农业科学院)

黎娟华 (中国热带农业科学院)

序

海南省是中国海洋面积最大的省份，所辖海域面积 200 万 km^2 ，南北纵跨 1 800 多 km ，东西横跨 1 000 km ，相当于中国渤海、黄海和东海面积之和的两倍。海南岛海岸线总长 1 528 km ，占全国大陆海岸线的 8.5%。海南岛渔业资源十分丰富。北部湾、三亚、清澜和西沙群岛是海南著名的四大渔场。海南省已记载的各类海洋生物超过 3 000 种。海洋水产在 800 种以上，鱼类就有 600 多种，其中，具有重要价值的主要海洋经济鱼类 40 多种。

海南岛气候属于海洋性热带季风气候，年平均温度 $22\sim 26^{\circ}\text{C}$ ；气温最低月份平均温度仍在 19°C 以上。海南岛的旅游资源得天独厚，终年常绿；四季花开，一年四季皆宜旅游，有“东方夏威夷”之称，也是世界上最大的“冬都”，旅游业成为海南的支柱产业之一。

近几年来，海南赤潮发生趋势在增强，并表现出以下几个特点：一是赤潮发生频率有所增加，由上世纪末的几乎不发生到近几年的时有发生，某些局部海域甚至频繁发生；二是赤潮常年可发生；三是赤潮发生海域增加，以前未出现过的海域近几年也开始发生。

三亚作为以生态农渔业和旅游业为主的滨海城市，赤潮发生对海洋渔业和旅游业的影响很大，传统的物理、化学防治方法不能满足资源保护（特别是旅游资源保护）的要求，因此，研究探索赤潮生物防控非常重要。

全球气候变暖，人类活动加剧，对海洋生态系统带来越来越大

的影响。伴随着赤潮在海南发生趋势的增强，也使该地区赤潮研究从无到有，且逐渐深入。中国热带农业科学院热带生物技术研究所以集聚了一支海洋、环境、生物技术、微生物、水产等方面的学者，在科技部科研院所社会公益研究专项的支持下，以海南三亚为试点，对赤潮的发生机理及生物防控等方面进行了多年的研究，并综合国内外其他海域特别是热带亚热带海域赤潮的研究成果，撰写了《三亚红沙港赤潮及生物防控研究》一书。该书的出版无疑对今后海南赤潮的深入研究以及热带港湾赤潮防治的探讨具有重要的意义。

本人作为一个长期从事海洋生物学的科技人员，十分关注该领域的研究进展，很高兴看到海南的科技工作者在热带海洋赤潮研究所作的贡献，十分乐意与他们分享研究中的苦与乐。

相建海

2008年7月26日

前 言

赤潮已成为一种全球性的海洋灾害。赤潮的发生频率和范围在全球海域有扩大的趋势，而热带亚热带海域赤潮发生一直频繁，且在某些海域（如非洲）有扩大的趋势。在中国，东海赤潮发生范围和频率在不断扩大，其原因与东海沿岸城市化和工业化速度较快有关；南海也是赤潮的多发海域，而且部分海湾（广西、海南）有增加迹象。海南岛附近海域以前赤潮发生相对较少，但 2006 年在琼州海峡、三亚部分养殖海湾大面积爆发赤潮，给水产养殖、海洋渔业带来较大损失，而且影响海滨景观，对海南滨海旅游业敲响了警钟。

海口、三亚作为以生态农渔业和旅游业为主的海滨城市，赤潮发生对旅游业的影响很大，传统的物理、化学防治方法不能满足旅游资源保护的要求，因此，探索赤潮生物防控非常重要。三亚红沙港地处海南省三亚南部，地理位置介于东经 $109^{\circ}31'$ ~ $109^{\circ}35'$ ，北纬 $18^{\circ}13'$ ~ $18^{\circ}16'$ 之间；红沙港东、西、北三面环山，南面为榆林湾，为深入内陆的狭长型港湾；该海域及沿岸养殖业发达，池塘养殖面积很大，是一个典型的热带半封闭型养殖港湾。本书综合了科技部科研院所社会公益研究专项基金“热带港湾赤潮可持续防控研究与应用”的部分成果，阐述了三亚红沙港环境状况和赤潮发生，综述了热带亚热带海域的赤潮发生情况，并就赤潮的生物防控作了较为详细的阐述。以热带亚热带港湾为对象，着重从大型海藻、红树林、滤食性贝类和微生物等方面入手，对赤潮的生物防控进行全面的研

究及介绍。最后提出和阐述了赤潮生物防控的理论和热带港湾赤潮综合防控策略。本书的许多内容是依据作者的研究调查资料整理完成，由于研究的时间较短，许多内容尚待深入和扩展，但鉴于当前国内在该领域资料的需求，作者将一些阶段性研究结果汇集成册。

本书的出版得到了科技部科研院所社会公益研究专项基金(NO. 2004DIB3J074)的资助，以及中国热带农业科学院热带生物技术研究各位领导的大力支持，谨此致谢！中国科学院海洋研究所的相建海研究员在百忙之中为本书作序，使本书增色不少，深表感谢！书中许多章节是在众多同事和学生的共同努力下完成的，如崔百明、张秀春、郑银英、孙建波、曾长英、朱白婢等，在此一并表示最诚挚的感谢！

由于作者水平有限，加之成书仓促，本书在编撰过程中难免出现错漏和不足之处，恳请同行专家和读者批评指正。

作 者

2008年9月于海口

目 录

序 前言

1 赤潮	1
1.1 赤潮概念	1
1.1.1 赤潮生物	2
1.1.2 赤潮的分类	3
1.1.3 赤潮灾害分级	5
1.2 赤潮的发生	6
1.2.1 赤潮判断	6
1.2.2 赤潮生消过程	7
1.2.3 赤潮发生原因	8
1.3 赤潮的危害	14
1.4 赤潮的防治	17
1.4.1 物理方法	17
1.4.2 化学方法	17
1.4.3 生物方法	19
参考文献	19
2 热带港湾赤潮研究概述	21
2.1 中国南海主要港湾赤潮发生概况	21
2.1.1 珠江口	21
2.1.2 大鹏湾	23
2.1.3 大亚湾	24
2.1.4 北部湾	27
2.1.5 湛江港	29

2.1.6 琼州海峡	30
2.1.7 香港	31
2.1.8 南海赤潮发生的主要特点	35
2.2 国外热带海域赤潮发生概况	36
2.3 热带海域的主要赤潮生物及毒素	40
2.3.1 热带海域的主要赤潮生物	40
2.3.2 热带地区的赤潮毒素	41
参考文献	44
3 三亚红沙港环境特征	49
3.1 红沙港自然环境概况	49
3.1.1 地形地貌	49
3.1.2 入海河流	50
3.1.3 水文气象	50
3.2 海水污染状况	51
3.2.1 海水营养状况的调查	51
3.2.2 海水细菌污染状况的调查	59
3.3 红沙港污染物来源及养殖状况	61
3.3.1 养殖排污	62
3.3.2 生活排污	65
3.3.3 船舶排污	65
3.4 红沙港浮游生物生态特征	66
3.4.1 浮游植物种类组成与分布	66
3.4.2 浮游植物种类丰富度的时空分布	69
3.4.3 浮游植物数量的时空分布	70
3.4.4 叶绿素 a 的时空分布	70
3.4.5 浮游植物群落多样性、均匀度的时空分布	72
3.4.6 红沙港海域浮游植物群落结构评价	73
参考文献	73
4 三亚红沙港赤潮的引发种类	75
4.1 红沙港赤潮生物的组成与演替	75
4.1.1 红沙港赤潮生物的组成	75
4.1.2 红沙港赤潮生物种类的季节演替	78

4.2 赤潮引发种类的生物学特征.....	78
4.2.1 硅藻门 (Bacillariophyta)	79
4.2.2 甲藻门 (Dinophyta)	86
4.2.3 着色鞭毛藻门 (Cryptophyceae)	89
4.2.4 蓝藻门 (Cyanophyta)	89
4.3 红沙港中肋骨条藻赤潮生消与环境因子的关系	90
4.3.1 赤潮现象	91
4.3.2 赤潮发生过程中各环境要素的变化	91
4.3.3 赤潮与营养盐的关系	95
4.3.4 赤潮与铁的关系	95
4.3.5 赤潮与温度、盐度的关系	96
参考文献	97
5 大型海藻在赤潮防治中的作用研究	99
5.1 大型海藻	99
5.2 大型海藻与赤潮藻间的相互作用	101
5.2.1 大型海藻与海洋微藻间的生存竞争	101
5.2.2 大型海藻分泌物对赤潮藻的抑制作用	103
5.3 大型海藻对富营养化海湾的修复作用研究	105
5.3.1 富营养化海湾的形成及危害	105
5.3.2 大型海藻的生物修复作用	106
5.3.3 大型海藻对海水的净化研究	109
5.4 利用大型海藻防治赤潮需要注意的问题	115
参考文献	116
6 红树林在赤潮防治中的作用	119
6.1 红树林简介	119
6.1.1 红树林的概念	119
6.1.2 红树林的树种与分布	119
6.1.3 海南岛红树林	121
6.2 红树林的生态适应性	122
6.2.1 特殊的繁殖方式——胎萌	122
6.2.2 高度发达和特化的根系	122
6.2.3 茎叶的特殊结构与功能	124

6.3 红树林的生态效益	124
6.3.1 保护海岸	125
6.3.2 净化空气	125
6.3.3 净化水质	125
6.4 红树植物的化感作用与化感物质	130
6.4.1 红树林的化感作用	130
6.4.2 红树林的化感物质	135
参考文献	136
7 滤食性贝类在赤潮防控中的作用	140
7.1 滤食性贝类摄食对环境的影响	140
7.1.1 滤食性贝类摄食对浮游植物群落的影响	140
7.1.2 滤食性贝类摄食对海洋浮游动物的影响	143
7.2 滤食性贝类的生物沉积、呼吸和排泄作用对环境的影响	144
7.2.1 滤食性贝类的生物沉积作用	144
7.2.2 滤食性贝类的呼吸和排泄与营养盐再生	146
7.3 环境因素对滤食性贝类滤水摄食生理的影响	147
7.3.1 贝类摄食行为的调节	147
7.3.2 影响滤食性贝类滤水率(摄食率)的因素	147
7.3.3 滤食性贝类摄食选择性和消化吸收的调节	153
7.4 贝类的养殖容量	154
7.4.1 养殖容量的概念	154
7.4.2 贝类养殖容量的研究	155
7.5 滤食性贝类在赤潮生物防控中的可行性研究	157
7.5.1 沟纹巴非蛤对富营养化海水中叶绿素 a 清除及其对氮磷含量的影响	158
7.5.2 影响巴非蛤滤水率的因素	163
参考文献	168
8 微生物在赤潮防治中的作用研究	173
8.1 微生物与赤潮藻类间的相互作用	173
8.1.1 正相互作用	173
8.1.2 负相互作用	174
8.2 溶藻病毒	175

8.2.1 蓝藻病毒	175
8.2.2 真核微藻病毒和病毒类粒子	176
8.3 溶藻真菌(微藻拮抗真菌)	177
8.4 溶藻细菌	177
8.4.1 溶藻细菌的种类	178
8.4.2 溶藻细菌的溶藻方式及作用机理	182
8.5 反硝化微生物	184
8.5.1 氮素循环	185
8.5.2 反硝化除氮机理	186
8.5.3 反硝化微生物的种类	187
8.5.4 反硝化细菌的应用	188
8.6 藻间化感作用	190
8.6.1 藻间化感作用的三类效应	190
8.6.2 藻间化感物质	191
8.7 微生物治理赤潮的研究与展望	192
参考文献	193
9 热带港湾赤潮综合防控策略	199
9.1 控制海洋污染,减少赤潮发生	199
9.1.1 加强沿海管理,严格控制海洋污染物的排放	199
9.1.2 实行生态养殖,减少养殖业自身污染	201
9.2 完善赤潮监管体系,深化赤潮可持续防控研究	203
9.2.1 完善赤潮监管体系	203
9.2.2 深化赤潮可持续防控研究,实现可持续生产	204
参考文献	215

1 赤潮

1.1 赤潮概念

赤潮 (red tide) 是海水中某些微藻、原生动物或细菌在一定环境条件下爆发性增殖或聚集而引起水体变色的一种生态现象。赤潮最早是因海水变红而得名, 实际上它并不一定都是红色, 现在已成为各种类型赤潮的统称。

藻华 (algal bloom) 也称水华 (water bloom) 或藻花 (water-flower), 是指水体中藻类大量繁殖的一种现象, 习惯上将水体中藻类达到一定密度后的藻华也称作赤潮。也有人认为, 不一定要产生藻类的浮游物, 只要引起水的颜色变化即为水华现象。

由于不同种类的藻类所含的光合作用色素不同, 它们引起的水色变化和在水面形成的漂浮物的颜色也有所不同, 因此, 发生赤潮时, 海水颜色除了会变成红色, 还会随形成赤潮的优势浮游生物种类、数量的不同而呈现出多样性。如微囊藻等一些蓝藻门的种类所含的光合色素为叶绿素 a 和藻胆素, 它们形成的水华漂浮物和水体的颜色多为蓝绿色; 绿藻门中的衣藻所含的光合色素为叶绿素 a 和叶绿素 b, 它所形成的水华漂浮物常为绿色或黄绿色; 硅藻门中的藻类, 如小环藻等, 则含有叶绿素 a 和叶绿素 c, 还含有较多的墨角藻黄素等褐色素, 它们形成的水华常为黄褐色等; 夜光藻形成的赤潮为粉红色; 有些甲藻类形成的赤潮为褐色; 鞭毛藻形成的赤潮为墨绿色; 蓝藻形成的赤潮为黄绿色等。值得指出的是, 某些微藻 (如膝沟藻、裸甲藻、梨甲藻等) 引起的赤潮有时并不引起海水呈现任何特别的颜色。在一个水体中形成赤潮的微藻种类有多有少, 有的赤潮只有 1~2 种, 也有的赤潮有多种, 但其中最占优势的种类常为 1~2 种, 水华形成的颜色就是由其中占最大优势的藻类颜色所决定。

相当一部分赤潮或藻华是无害的, 它们自生自灭。然而, 近年来赤潮发生频率急剧增加, 赤潮规模不断扩大, 对沿海经济造成了巨大的损失, 并危害着人类生存环境, 故目前称这类赤潮为有害藻华 (harmful algal blooms, HABs), 为了符合习惯也将其称为有害赤潮。特别是有些有毒赤潮生物, 如

膝沟藻、裸甲藻、梨甲藻、塔玛亚历山大藻等,即使这些藻细胞的密度并不一定使海水呈现任何特别的颜色,但由于它们含有或分泌一些毒素活性物质,即使在一个相对低密度下,对水环境也是极为有害的,因而也称作有害赤潮。

1.1.1 赤潮生物

能够大量繁殖并引发赤潮的生物统称为赤潮生物,也称赤潮原因生物或赤潮构成种。海洋浮游性单细胞藻类是引发赤潮的主要生物,在4 000多种海洋浮游微藻中有260多种能形成赤潮,其中有70多种能产生毒素。迄今,人们所发现赤潮生物绝大多数是甲藻和硅藻,少数为原生动物和细菌。

形成赤潮的浮游藻类主要集中在甲藻、硅藻、针胞藻和定鞭藻等门类中,其中以甲藻类和硅藻类所占的种类最多。常见的赤潮硅藻种有:中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、尖刺菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*)、丹麦圆柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、拟旋链角毛藻(*Chaetoceros pseudocurvisetus*)、中华盒形藻(*Biddulphia sinensis*)、浮动弯角藻(*Eucompia zoodiacus*)等。常见的赤潮甲藻种有:夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)、微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)、短裸甲藻(*Gymnodinium breve*)、链状裸甲藻(*Gymnodinium catenatum*)、米金裸甲藻(*Gymnodinium mikimotoi*)、叉状角藻(*Ceratium furca*)等。另外,属于针胞藻纲的赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)和属于定鞭藻纲的棕囊藻(*Phaeocystis pouchetii*)也是常见的赤潮藻种。

藻毒素是由海洋微藻产生的一类特殊生物活性物质的总称。赤潮藻类毒素在结构上差别很大,既有简单的氨基酸类物质,也有复杂的多醚类化合物。由于大部分毒素最早是从摄食有毒微藻的贝类和鱼类体内发现的,因此这些毒素往往被称作贝毒或鱼毒。根据所产毒素不同主要有以下几类:麻痹性贝毒(paralytic shellfish poisoning, PSP)、腹泻性贝毒(diarrhetic shellfish poisoning, DSP)、神经性贝毒(neurotoxic shellfish poisoning, NSP)、记忆缺失性贝毒(amnesic shellfish poisoning, ASP)和西加鱼毒(ciguatera fish poisoning, CFP)。这5种毒素中,以麻痹性贝毒和腹泻性贝毒因在世界范围内分布广、危害大而受到重视。产生麻痹性贝毒(PSP)的藻种有链状亚历山大藻(*Alexandrium catenella*)、塔玛亚历山大藻(*A. tamarense*)、微小亚历山大藻(*A. minutum*)、链状裸甲藻(*Gymnodinium catenatum*)等。产生腹

泻性贝毒 (DSP) 的赤潮藻类主要是尖鳍藻 (*Dinophysis acuta*)、渐尖鳍藻 (*D. acuminata*)、圆鳍藻 (*D. rotundata*)、利马原甲藻 (*Prorocentrum lima*) 等。产生记忆缺失性贝毒 (ASP) 的藻种有多列拟菱形藻 (*Pseudonitzschia multiseries*) 和伪柔弱拟菱形藻 (*P. pseudodelicatissima*)，它们多为硅藻中拟菱形藻属的一些种类。神经性贝毒 (NSP) 主要由甲藻中的短凯伦藻 (*Karenia brevis*) 产生。西加鱼毒 (CFP) 由某些有毒的底栖或附着甲藻产生，如剧毒甘比甲藻 (*Gambierdiscus toxicus*) 等。

1.1.2 赤潮的分类

依据赤潮的成因、发生海域、范围、频率及引发赤潮的生物种类等方面，从不同的角度对赤潮的分类有：

(1) 外海型和近岸、河口、内湾型赤潮

依据赤潮发生海域的不同，可将赤潮分为外海（或外洋）型和近岸、河口、内湾型赤潮。

外海型赤潮，是指在外海或洋区上出现的赤潮，它们大多出现在上升流区或水团交汇处，那里的营养物质比较丰富。有些种类自身还有固氮能力，在水体缺乏无机氮营养盐时，还可直接利用大气中的氮气 (N_2)。外海型赤潮最常见和最具代表性的种类是蓝藻门中的束毛藻 (*Trichodesmium* sp.)，在中国主要分布于东海以南水域。

近岸、河口、内湾型赤潮，分别指发生在近岸区、河口区或内湾区等水域的赤潮。我国辽东湾、大连湾、胶州湾、杭州湾、深圳湾及黄河口、长江口、珠江口、厦门港等海域发生的赤潮均属于此类。能在近岸、河口或内湾区域形成赤潮的生物种类很多，且具有一定的地区性差异。其中，广泛分布于中国沿海的主要种类有中肋骨条藻、夜光藻、原甲藻属 (*Prorocentrum*) 和裸甲藻属 (*Gymnodinium*) 的一些种类。

(2) 原发型和外来型赤潮

依据赤潮生物种类的来源不同，可将赤潮分为原发型和外来型赤潮。

所谓原发型赤潮，是指在某一海域具备了发生赤潮的各种理、化条件时，某种赤潮生物就地爆发性增殖所形成的赤潮。此类赤潮地域性明显，通常也可持续较长时日，如果环境条件没有明显改变，甚至可以反复出现。有些海域还可发现它每天只在某一特定时间内出现，这应视其为同一起赤潮的时间延续，而不应认为是每天发生一起赤潮。如果赤潮生物发生更替，则另当别论。一般

而言,在内湾所发生的赤潮,大多是属于原发型赤潮。

外来型赤潮,则是属外源性的,即赤潮并非是在原海域形成,而是在其他水域形成后,由于外力(如风、浪、流等)的作用而被带到该海区的。这类赤潮往往来去匆匆,持续时间短暂,或者还具有“路过性”的特点,因而有可能将同一起赤潮的迁移误认为是发生在不同地点的两起赤潮。外来型赤潮最常见的是束毛藻赤潮,在中国东南沿海的福建平潭岛几乎年年可见,当地群众称其为“东洋水”或“东洋涨”,即指它是从东面大洋而来的。

(3) 单相型和双相型和复合型赤潮

依据赤潮发生时优势生物种类的数量不同,可将赤潮分为单相型、双相型和复合型赤潮。单相型赤潮亦称单种型赤潮,是指发生赤潮时,只有一个赤潮生物种占绝对优势(总细胞数的80%以上)。

双相型赤潮是指有两种赤潮生物共存并同时占优势而形成的赤潮。

如果赤潮中有3种或3种以上的赤潮生物,且每种细胞数都占有总细胞数的20%以上,为复合型赤潮。

大多数赤潮属于单相型赤潮,双相型赤潮仅占少数,至于复合型赤潮,目前还很罕见。

(4) 有毒型和无毒型赤潮

依据赤潮生物是否含毒素,可将赤潮分为有毒型和无毒型赤潮。

有毒型赤潮,是指由某些体内含有毒素或能分泌毒素的赤潮生物为主形成的赤潮。有毒型赤潮一旦形成,可对赤潮区的生态系统、海洋渔业、海洋环境以及人体健康造成不同程度的毒害。

无毒型赤潮,是指由体内不含毒素且不分泌毒素的赤潮生物为主形成的赤潮。无毒型赤潮对海洋生态、海洋环境、海洋渔业也会产生不同程度的危害,但基本不产生毒害作用。

(5) 无害赤潮、有害赤潮、鱼毒赤潮和有毒赤潮

为了便于在赤潮爆发时有效预警赤潮灾害,以及赤潮结束后评估其经济损失情况,江天久等依据赤潮生物的性质和对养殖水体的破坏程度,将赤潮分为无害赤潮、有害赤潮、鱼毒赤潮和有毒赤潮四类。

无害赤潮,是指海洋中某些赤潮藻数量增加的自然现象,引起赤潮的生物对养殖的水产品和人类没有毒性,一般对海洋生物没有不利影响,甚至由于这些藻类数量的适量增加会促进养殖水产品的增长。但值得注意的是,赤潮的发生是典型的海洋生态失衡的结果,赤潮发生时肯定会对海洋中其他生物的生长