



广西海域 赤潮研究



GUANGXI HAIYU CHICHAO YANJIU

彭在清 李天深 蓝文陆 编著



海洋出版社

广西海域赤潮研究

彭在清 李天深 蓝文陆 编著

海洋出版社

2017年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

广西海域赤潮研究 / 彭在清, 李天深, 蓝文陆编著.

— 北京: 海洋出版社, 2017. 6

ISBN 978 - 7 - 5027 - 9818 - 5

I. ①广… II. ①彭… ②李… ③蓝… III. ①赤潮 - 污染防治 - 研究 - 广西 IV. ①X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 153998 号

责任编辑: 高朝君 薛菲菲

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

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

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷

2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

开本: 880mm × 1230mm 1/32 印张: 4

字数: 93.2 千字 定价: 38.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093

总编室: 62114335 编辑室: 62100038

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

赤潮是一些海洋微藻、原生动物或细菌在水体中爆发性繁殖或高度聚集而引起海水变色的异常现象。有毒赤潮生物种类发生的赤潮或无毒种类过度爆发性增殖往往会威胁、危害人类健康和生态系统，因而被称为有害赤潮或有害藻华。自 20 世纪 90 年代以来伴随着我国沿海地区经济的高速发展，近岸海域赤潮频发，我国沿海赤潮发生次数和面积最大分别达到了 119 次和 $3.66 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，尽管自 2005 年开始我国沿海赤潮次数和面积总体趋势从上升转为下降，但近 10 年赤潮年均发生次数仍高达 60 次以上，已成为我国重要的海洋生态问题，给我国带来巨大的损失。据《中国海洋环境质量公报（年报）》和《中国海洋灾害公报（年报）》记载，2001—2010 年，中国近海赤潮灾害累计面积达到 16 万 km^2 以上，造成直接经济损失超过 2 亿元人民币；平均每年有 16 254 km^2 的海域遭受赤潮侵袭，造成 3 463.50 万元的直接经济损失。同时我国海洋赤潮生物的种类在不断增加，有毒有害的赤潮藻引发的赤潮增多，对我国海洋生态环境、海水养殖和人类健康造成巨大的威胁。

我国的学者也随着我国沿海赤潮增多、危害增加而自 20 世纪末开始对赤潮开展了系列研究，并取得了创新性成果。在 21 世纪初开始的国家重点基础研究规划“973”项目——“我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”等一系列赤



潮研究项目的支持下,国内学者针对赤潮发生机理、赤潮影响因素、赤潮藻生理生态、赤潮处置以及预警预报等方面进行了大量研究,我国沿海赤潮研究获得了一系列的创新研究成果,为赤潮的监测、预警、预防和管理提供大量基础数据及科学依据。但赤潮是一种复杂的生态异常现象,发生的原因也比较复杂,甚至到目前为止,关于赤潮成因仍没有非常明确的定论,赤潮的预报、控制和治理难度更大,仍有诸多赤潮关键问题有待进一步深入研究。在我国沿海赤潮研究中,研究重点主要集中在赤潮问题严重的东海和渤海,省域上主要集中在浙江、福建、广东三省海域,对北部湾海域的赤潮研究极少。

广西海域是我国大陆岸线上的一片洁净海域,分布着红树林、珊瑚礁、海草床等重要生态系统,一、二类海水比例长期保持在90%左右,海洋生态环境优越,鲜有有害赤潮发生,因而对赤潮的研究很少。1995年广西海域首次被报道发生赤潮,在廉州湾及北海银滩附近海域发现微囊藻赤潮。此后自1995年至2015年间,广西海域共被确切记录和报道的赤潮现象共18次。与长江口以及珠江口等海域相比,广西海域赤潮发生次数较少,频率较低,规模较小,产生的环境危害也较小。

自2008年以来,广西北部湾经济区上升为国家战略,北部湾周边社会经济快速发展,围填海、港口码头建设、港湾工程整治规模加大,电力、石化、造纸、冶金、建材、煤炭等工业蓬勃发展,滨海城市化进程日新月异,给优越的广西海域生态环境带来了前所未有的巨大压力。这导致了广西海域赤潮特征发生了较大变化,广西海域赤潮风险在增加,赤潮的发展出现较多严峻问题,总体上广西海域赤潮呈现出正在加重的趋势。广西海域赤潮发生呈现出的新特征主要表现在频次增加、持续时间变长、有毒

种类增加、规模和范围扩大、危害增加等方面。面对广西海域环境压力明显加大和赤潮趋势的增加,为降低广西海域赤潮发生频率、减少赤潮危害,保护广西海洋生态环境、人类健康需要广西本区域的科学技术支撑,这也是我们开展广西海域赤潮研究的根本原因。

2010年以来,在广西区内外基金项目支持下,我们以广西海域为主要研究区域,在系统掌握我国沿海赤潮研究进展的基础上,结合广西海域的特点,研究了广西海域的环境特征、赤潮发生特点、赤潮影响因素和赤潮过程、赤潮风险及防范对策等,形成了本书的五个章节。本书是我国第一部关于北部湾海域赤潮的研究专著,期望它在促进我国赤潮研究尤其是北部湾赤潮研究与生态保护管理方面起到一定的作用。由于笔者的学术浅薄以及北部湾在赤潮研究方面的极度薄弱,本书难免出现不足和错误,敬请专家学者批评指正。

我衷心感谢国家自然科学基金“北部湾近海工程疏浚磷释放对浮游植物群落结构的影响及其机理研究”(41466001)、广西红树林保护与利用重点实验室开放基金课题“海洋大型贝藻混养对水质和赤潮的调控作用研究”(GKLMC-201504)和广西科技计划项目“河口—近海生态系统变异及环境污染调控技术在广西近岸海域的成果转化与合作研究”(桂科合14125008-2-8)等项目在广西海域的环境、富营养化、赤潮生物、赤潮特征及防范对策研究和本书出版方面给予的资助。

本书是集体劳动的结晶,在撰写过程中,得到了广西红树林研究中心、北海市海洋局、广西海洋环境监测中心站的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!此外还要感谢我的好友及同事杨绍美、陈骁、李天深、蓝文陆等,他们的艰辛劳动为本书的编撰



做出了实质性贡献。特别感谢广西红树林研究中心范航清研究员，他在广西红树林保护与利用重点实验室开放基金课题中给予了大力支持和指导，促成了本书的问世。

彭在清

北海市海洋局高级工程师

北海市政协委员

2017年6月6日 广西北海

目 录

1 我国赤潮研究概况	1
1.1 我国赤潮发生概况	1
1.2 赤潮的影响	3
1.2.1 赤潮的正面影响	3
1.2.2 赤潮的危害影响	4
1.3 赤潮预警预报	5
1.4 赤潮的治理	7
参考文献	10
2 广西海域环境概况	14
2.1 自然环境概况	14
2.1.1 地理位置及范围	14
2.1.2 气象气候特征	15
2.1.3 海域与海湾概况	15
2.1.4 自然资源	22
2.2 环境污染来源概况	24
2.2.1 入海河流	24
2.2.2 市政和工业排污	25
2.2.3 其他污染来源	26



2.3 广西海域环境质量概况	26
2.3.1 海水质量	26
2.3.2 沉积物质量	30
2.3.3 海洋生物体质量	31
参考文献	32
3 广西海域赤潮发生特征	33
3.1 广西海域赤潮发生事件	33
3.2 广西海域赤潮发生的特点	35
3.2.1 广西海域赤潮发生频率变化特征	35
3.2.2 广西海域赤潮事件区域变化	37
3.2.3 广西海域赤潮事件季节变化	38
3.2.4 广西海域赤潮引发种类的组成及演替特征	39
3.3 赤潮生物种类	41
3.3.1 我国近海赤潮生物种类概况	41
3.3.2 北部湾近岸海域赤潮生物种类	44
3.3.3 广西海域已爆发的赤潮生物种类	47
3.3.4 潜在的爆发赤潮生物种类	49
参考文献	51
4 广西海域赤潮的影响因素及其在赤潮中的响应	52
4.1 广西海域赤潮的影响因素	52
4.1.1 自然环境因素	52
4.1.2 营养因素	56
4.1.3 赤潮藻种分布	61
4.1.4 气候水文条件	65

4.2 赤潮过程环境因子变化	68
4.2.1 赤潮发生过程的主要环境因子	68
4.2.2 中肋骨条藻赤潮过程变化	69
4.2.3 球形棕囊藻赤潮过程变化	74
4.2.4 红海束毛藻赤潮过程变化	77
4.3 赤潮与富营养化的关系	78
4.3.1 海域富营养化及其评价方法	78
4.3.2 广西典型海域富营养化分布特征	80
4.3.3 赤潮爆发与富营养化的关系	83
参考文献	87
 5 广西海域赤潮风险分析及防范对策	93
5.1 广西海域赤潮风险分析	93
5.1.1 广西海域赤潮的灾害	93
5.1.2 广西赤潮风险分析	94
5.2 广西富营养化与赤潮风险防范对策	98
5.2.1 富营养化与赤潮环境问题分析	98
5.2.2 富营养化与赤潮风险防范对策	108
参考文献	115

赤潮 (red tide), 通常是指一些海洋微藻、原生动物或细菌在水体中过度繁殖或聚集而令海水变色的现象。短期内微藻数量的增加被称作藻华 (algal bloom), 而能够造成危害效应的藻华现象被称作有害藻华 (harmful algal bloom, HAB), 当前, 科学家们只是延续了早期人们的叫法, 通俗地称有害藻华为赤潮 (周名江等, 2001)。近年来伴随着我国沿海地区经济的高速发展, 赤潮频发已成为我国重要的海洋生态问题, 受到国内学者以及政府部门的关注。目前, 国内学者针对赤潮发生机理、赤潮影响因素、赤潮藻生理生态、赤潮处置以及预警预报等方面进行了大量研究, 为赤潮的监测、预警、预防和管理提供了大量基础数据及科学依据。

1.1 我国赤潮发生概况

根据 2000 年以来的我国海洋环境质量公报, 2001—2016 年我国赤潮发生呈现两个阶段 (图 1.1-1)。从 2001 年至 2004 年, 赤潮发生次数呈上升趋势, 到 2003 年发生次数最高, 为 119 次, 此后赤潮发生次数呈波动下降趋势。赤潮发生累积面积年度变化与发生次数相似, 但累积赤潮面积最大的年份不是赤潮发生次数最多的 2003 年, 而是 2004 年, 累积赤潮发生面积达到 $3.66 \times 10^4 \text{ km}^2$, 从 2005 年开始, 赤潮发生面积呈下降趋势。分析表明, 我国赤潮的发生并非持续上涨, 也有降低和平稳的情况出现, 可能与近年来赤潮研究技术的发展有关, 科学的预防和治理对降低赤潮发生产生一定的作用。

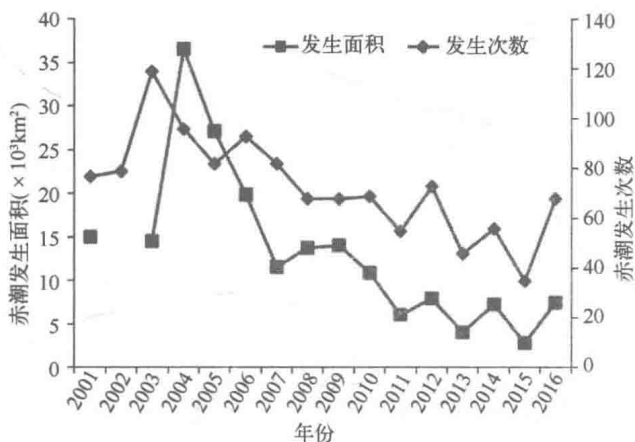


图 1.1-1 我国赤潮发生概况

尽管从总体趋势上来看,赤潮发生的次数及面积有下降的趋势,但近5年(2012—2016年)年均赤潮发生次数仍高达35次以上,赤潮频发仍是我国面临的主要海洋灾害,其中东海的赤潮问题最严重,已经远远超过了南海,而且渤海的赤潮规模增加明显,东海和渤海成为赤潮的重灾区(张青田,2013)。从省份上分析,我国赤潮多发于浙江、福建、广东三省。

另外,赤潮给我国经济带来巨大的损失。据《中国海洋环境质量公报(年报)》和《中国海洋灾害公报(年报)》记载,2001—2010年,中国近海赤潮灾害累计面积达到16万 km^2 以上,造成直接经济损失超过2亿元人民币;平均每年有16 254 km^2 的海域遭受赤潮侵袭,造成3 463.50万元的直接经济损失。而且2012—2016年,中国有毒有害的甲藻和鞭毛藻等引发的赤潮比例高居不下,达到70%以上,也对我国海洋生态环境、海水养殖和人类健康构成了巨大的威胁。

1.2 赤潮的影响

1.2.1 赤潮的正面影响

由于历史的原因,我国习惯使用“赤潮”一词来描述海域水体因高浮游植物生物量而变色的生态异常现象。但是,实际上许多“赤潮”是无害的。在许多情况下,尽管海水会变色,但并不会对海洋生物和人体产生有害影响或带来其他危害。短期内微藻数量的增加造成的藻华(“赤潮”)是正常的生物现象,是指浮游植物总生物量高低的季节变化,每年都会发生,比如在中纬度海域每年都普遍发生的春秋两次藻华。2009年广西近岸海域自动监测浮标监控到廉州湾夏季中肋骨条藻藻华(“赤潮”),经现场调查咨询,渔民称每年均发生类似的现象,说明廉州湾浮游植物水华现象可能一直存在,只是随着监测手段的发展——近岸海域自动监测网络布置,在近几年才监控到藻华现象。

浮游植物是海洋生态系统中重要的初级生产者,启动了海洋初级生产以及渔业生产,在海洋生态系统的物质循环和能量转化过程中起着重要作用。浮游植物藻华(“赤潮”)对整个海域的初级生产水平和各生源要素循环均有重要影响。藻华发生可能是生态系统具有自我调节机制。特别是众多研究结果也已证实,富营养化水体比贫瘠水体更易发生赤潮,这就是为什么赤潮多发生在沿海、沿岸和海湾水域的主要原因。如将海水富营养化认为是恶化了海域水体环境的话,那么,如果赤潮发生的不是有毒事件,又没有使环境恶化到一定的程度,由于赤潮生物的过度繁育,掠夺性、选择性地吸收了环境海水中的营养化成分,致使富营养化水平下降或被“荒漠化”,这恰巧又从更高水平上恢复或优化了



海洋生态环境,因而,赤潮不仅不能被称之为“灾难”,反而有可能成为生态环境的“优化剂”(吴绍渊,2010),从这一点上,赤潮发生的作用从另一方面折射出其有益的一面。另外硅藻浮游植物的大量增殖,在消耗输入营养物质的同时,也提高了海域的初级生产力,为海域渔业生产提供能量基础。因此,适当的藻华(“赤潮”)是有益的。

1.2.2 赤潮的危害影响

有害赤潮的危害效应可以分成四类:对人类健康的影响;对自然和养殖的经济海洋生物的影响;对海洋生态系统的影响;对海洋旅游和娱乐功能的影响等(周名江等,2006)。

在4 000多种海洋浮游微藻中有260多种能形成赤潮,其中70多种能产生毒素。这些赤潮生物分泌赤潮生物性毒素,处于有毒赤潮区域内的鱼贝类摄食这些有毒生物,虽不能被毒死,但生物毒素可在其体内积累,造成鱼类、虾类、贝类污染,如果不慎被人食用,就会引起人体中毒,严重时可导致死亡。如1986年12月我国福建省东山县磁窑村居民误食了赤潮区内采挖的菲律宾蛤仔,造成136人中毒,1人死亡。有害赤潮藻种产生的毒素常见的有麻痹性贝毒、腹泻性贝毒、记忆缺失性贝毒、神经性贝毒、西加鱼毒等。

有害赤潮对自然和养殖的经济海洋生物的影响体现在两个方面。一方面,有害赤潮能够直接作用于海洋经济生物,导致养殖生物大量死亡,带来严重的经济损失;另一方面,有毒赤潮藻种产生的毒素会对这些经济生物造成污染,使人们对水产品食用安全性产生怀疑,间接危害养殖业的发展。因有害赤潮导致的养殖鱼类、贝类、甲壳类生物的大量死亡事件在世界各地都有报道。

如1998年3—4月,发生在广东省沿海的特大赤潮造成海洋生物大量死亡,粤港两地仅网箱养殖鱼类死亡数量就有850余t,直接经济损失高达2亿元以上。

海洋是一种生物与环境、生物与生物之间相互依存、相互制约的复杂生态系统,系统中的物质循环、能量流动处于相对稳定的动态平衡状态。当赤潮发生时这种平衡遭到干扰和破坏,给自然海洋生态系统带来不良影响。有毒赤潮藻种产生的毒素能够经由海洋食物链传递到较高营养级,导致高营养级海洋生物中毒和死亡,如石房蛤毒素、短裸甲藻毒素、软骨藻酸等都曾造成海洋哺乳类或鸟类中毒事件。无毒赤潮也会危害海洋生态系统,在赤潮藻种达到一定密度后,会降低光线透过率,影响海草床或珊瑚礁。而且,在大规模赤潮消退之后,死亡的藻细胞向下沉降,造成底层溶解氧的消耗,使海底出现低氧甚至无氧区,威胁底栖生物的生存。

有害赤潮的发生影响近海的旅游和娱乐功能主要表现在赤潮发生后海水水色发生改变,而且部分赤潮能够产生浮沫、异味等,影响旅游区的景观。

1.3 赤潮预警预报

鉴于赤潮频发对我国沿海地区造成了严重的生态、资源、环境问题和重大的经济损失,为防患于未然,我国很多学者致力于赤潮预警预报,提出了很多赤潮预警预报模式和方法。综合来看,我国赤潮预警预报模式主要分为6种:经验预测法、统计预测法、数值预测法、人工智能预测法、遥感预报法、浮标检测预警预报法。经验预测法主要根据赤潮生消过程中环境因子的变化规律进行预测(王丹等,2013;王修林等,2003),包括气象条



件预测法（张春桂等，2010；陈淑琴等，2006）、潮汐预测法（林祖亨等，1993）、海水透明度预警法（矫晓阳，2001）、叶绿素 a 预警法（矫晓阳，2004）、海水溶解氧以及表观增氧量预警法（贺青等，2008；王正方等，2000）、生物多样性指数法（刘沛然等，1999）等。统计预测法是通过大量赤潮生消过程的监测资料进行多元统计方法分析，找出控制赤潮发生的主要环境因子，并利用一定的判别模式对有害赤潮进行预测，主要有主成分分析法（苏荣国等，2007）、判别分析法（黄秀清等，2000）、多元回归分析（许勇等，2009）、聚类分析法（叶君武等，2010）、演绎结构分析法、时间序列分析法（齐雨藻等，1991）等。数值预测法是根据赤潮发生机理，通过生态动力学数值模型模拟其发生—发展—维持—消亡的整个过程而进行预测的方法（王修林等，2003）。按照模拟对象可分为营养物质收支模型（王寿松等，1997）、赤潮生消过程模型（许卫忆等，2001）、赤潮生态系统模型（陈扬等，2003）。

由于赤潮的发生与各影响因子之间的关系非常复杂，具有一定的非线性和不确定性，而具有较强的非线性逼近能力的人工智能模型，特别是神经网络，在赤潮预测方面得到较好的应用。主要包括前向多层网络（BP 网络）（刘伟，2010）、径向基网络（RBF 网络）（李慧等，2012）、自组织神经网络（杨建强等，2003）、模糊神经网络（王洪礼等，2006）。随着环境监测技术和管理需求的不断发展，近岸海域自动监测浮标已经成为常规的海洋现场监测手段（蔡树群等，2007），其可提供实时、连续的监测数据，是赤潮监测预警中较好的有效监测手段。国内学者利用自动监测网络也实现了对赤潮的跟踪监测及预报，如庄宏儒（2006）利用水质自动监测系统在厦门同安湾实现 1~3 天的提前

预报；吴玉芳（2012）基于自动监测网络叶绿素变化过程建立赤潮预报模式。另外，遥感具有迅速的多时相数据更新能力和多尺度的空间概括能力，可以快速及时地获取区域和全球尺度的海洋参量信息，也为赤潮的预警预报以及发生机理提供了新思路。赤潮卫星遥感探测建立在赤潮生态学及其相应水体光学性质基础上，目前已探索开发了很多方法，如利用叶绿素 a 浓度（王林等，2014；丛丕福等，2006）、海表温度和多光谱变化（殷蕾等，2011；赵冬至等，2003）等。尽管我国在赤潮的预警预测方面取得了不错的进展，但与发达国家相比仍存在不小差距。因此我国迫切需要在开展赤潮发生机理的综合性研究与多元立体监测基础上，结合经验预测、统计预测和模型预测等多种预测技术手段逐步建立起有害藻华综合预警报业务体系（王丹等，2013）。

1.4 赤潮的治理

随着赤潮多发以及影响加重，我国众多专家、学者在灾害性赤潮治理措施方面进行了大量的室内和现场研究工作，赤潮治理措施归纳起来可分为化学方法、物理方法和生物方法。

化学方法是采用最多、发展最快的治理方法，按其作用机理可分为直接灭杀法、凝聚剂沉淀法和天然矿物絮凝法（俞志明等，1993）。直接灭杀法旨在利用化学药品直接杀死赤潮生物，主要包括铜及混合物（赵玲等，2002）以及次氯酸钠等氧化剂（边归国等，2010）等。絮凝剂沉淀法是通过添加一定量的絮凝剂，使赤潮生物凝聚、沉淀而去除的方法。现在使用的絮凝剂主要有无机絮凝剂和有机高分子絮凝剂（曹西华等，2001）。随着对水环境保护要求的日益严格，具有高效、无毒、环境友好等优点的天然矿物絮凝法成为当今赤潮治理，特别是有毒赤潮治理的