



中国绿潮

GREEN TIDES OF CHINA

何培民 张建恒 霍元子 蔡春尔 等 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

中国绿潮

何培民 张建恒 霍元子 蔡春尔 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共 15 章,详细介绍了黄海绿潮概况、绿潮藻生物学、光合生理、分子标记、基因组学及表达图谱、地理分布、溯源探索、繁殖体分布特征、漂浮机制、种群演替、暴发机制、预测预警、生态效益、源头防控及资源利用等内容,囊括了当前绿潮研究的主要关键科学问题。本书内容是在绿潮项目组十多年的研究成果基础上精心凝练、补充完善而成。

全书体现了理论与实践相结合,及时反映和应用前沿学科的新技术,内容丰富、图文并茂,可供海洋环境、海洋生态、海洋规划与管理等相关领域研究人员、技术人员、管理人员及科研院所、高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国绿潮 / 何培民等著. —北京: 科学出版社,
2019.11
ISBN 978-7-03-062891-6

I. ①中… II. ①何… III. ①黄海—海水污染—灾害防治—研究 IV. ①X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 251010 号

责任编辑: 陈 露 / 责任校对: 谭宏宇
责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

苏州市越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月 第 一 版 开本: 889×1194 1/16
2019 年 11 月 第一次印刷 印张: 28 1/4 插页 12
字数: 800 000

定价: 220.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

20世纪70年代以来,许多工业化国家海岸带滩涂上附着生长的绿藻、褐藻和红藻等大型海藻生物量大量增加,至90年代,某些大型海藻的生物量在其适宜的生长季节显著快速增加,已经发展成为“绿潮”“金潮”等海洋生态灾害。2000年以来,世界范围内发生“绿潮”灾害事件的海岸带地区不断增加。虽然绿潮对人类没有直接的毒性危害,但是海岸带堆积和近海漂浮的绿潮藻类巨大生物量直接影响着海岸带地区人类活动,特别是滨海旅游业、近岸海水养殖业及航运业等。如果不能被及时清理和移除,这些海岸带堆积或沉降至海底的绿潮藻类在缺氧条件下将会产生有毒性的 H_2S ,也会富集持久性有机污染物(如PCBs),然后经食物链传递,这些都将对已经受损的海岸带生态系统产生更大的负面影响。

世界范围内形成绿潮的大型绿藻种类主要是石莼属(*Ulva*)种类,也包括以前称为浒苔属(*Enteromorpha*)而现在归并入石莼属的种类。石莼属大型绿潮藻属于“机会主义”世界广布种,可在营养盐增加的情况下快速生长。虽然多数石莼属绿潮藻种类需要附着在基质上生长,但是一些种类可在物理扰动或是人类活动等作用下变为漂浮状态。由于漂浮状态的绿潮藻在海洋物理过程驱动下迅速扩张分布,并且在没有附着基质竞争、被捕食者摄食和营养盐持续供应的条件下可异常快速生长繁殖,积累巨大生物量,从而引发绿潮灾害暴发。

在世界范围内,多数海岸带均有绿潮灾害发生。20世纪70年代以来,由于工农业污水及生活污水大量排放入海,欧洲和美国沿岸近岸水体中营养盐含量持续增加,直接导致了近海富营养化。在营养盐浓度较高条件下,绿潮藻将快速生长、增加生物量而引发绿潮灾害。例如,法国布列塔尼(Brittany)沿岸和美国墨西哥湾(Gulf of Mexico)均发生了绿潮。据报道,2009年和2011年,布列塔尼沿岸堆积的绿潮藻在缺氧条件下产生的 H_2S ,已导致野生动物死亡,并严重影响了当地的旅游业,移除和处理的绿潮藻生物量已达100 000 t以上,处理费用为每吨10~150美元。

2008年,我国黄海海域暴发了世界上最大规模的黄海绿潮,主要由石莼属大型海藻浒苔(*Ulva prolifera*)在漂浮状态下快速增殖引发形成。黄海绿潮暴发影响的范围最北可至山东半岛近岸。由于此次黄海绿潮暴发对2008年在青岛举行的奥林匹克运动会帆船比赛产生了很大影响,国家领导人和相关政府部门高度重视,动用了1万多名军民进行清理,共打捞了近120万吨鲜重的浒苔,直接和间接经济损失巨大。2008年至今,我国黄海绿潮灾害连年暴发,其中2009年黄海绿潮影响面积超过60 000 km²,2010年覆盖面积超过了530 km²。因此,如不采取有效治理措施,我国黄海浒苔绿潮暴发将呈现常态化趋势。

自2008年黄海绿潮灾害暴发以来,国家相关部门先后设立了多个重大专项开展黄海绿潮研究,如科技部“十一五”重大专项“浒苔大规模暴发应急处置关键技术研究与应用”,国家海洋公益性行业科研专项项目“黄海绿潮业务化预测预警关键技术研究与应用”,科技部973项目“我国近海藻华灾害演变机制与生态安全”,国家重点研发计划“海洋环境安全保障”重点专项“浒苔绿潮形成机理与综合防控技术

研究及应用”等,重点开展了我国黄海绿潮灾害发生成因、机理、预测预警、防控以及资源化利用技术的研究。

2000年以来,上海海洋大学已开展了浒苔类绿藻生长和繁殖等生物学及生态效应研究。《中国绿潮》是上海海洋大学何培民教授联合国内多家涉海科研和业务化单位的相关科研人员,在国家海洋公益性行业科研专项项目、国家自然科学基金项目、国家海洋局(现并入自然资源部)业务化项目支持下,运用卫星遥感、船舶监测、原位实验、实验生态、分子生物、生理生化、数值模拟等多学科交叉研究方法和手段,对我国黄海数种浒苔类绿潮藻生长、繁殖和光合生理等基础生物学、分子标记和基因组等分子生物学、绿海藻及显微繁殖体时空分布与种质溯源、漂浮浒苔种群演替与漂浮机制、暴发过程与机制、暴发全过程监测与预警、生态效益评价、防控策略与技术、生物质资源化利用等方面深入和系统研究的结晶。

《中国绿潮》是目前国内外对我国黄海浒苔绿潮灾害研究最为深入的一部专著,相信该部专著的出版将会对我国黄海浒苔绿潮灾害暴发预测与预警、防控和资源化利用等方面起到积极推动作用。我见证了上海海洋大学何培民教授团队10余年对黄海绿潮的研究过程,特对作者取得的重大成果和该专著的出版表示热烈祝贺,并推荐给广大读者。

中国工程院院士

2018年12月7日

前 言

随着全球人口增长、科技迅猛发展、城市化进程加速和陆地自然资源日益枯竭,以获取生存空间和自然资源为主要目标的人类用海活动不断加剧,人类生存对海洋的依赖程度越来越高。目前世界上大约 60% 的人口生活在距离海岸线 60 km 的狭长地带,可见人类社会高速发展给海洋环境造成了巨大压力,并对海岸带生态环境可持续发展构成了巨大威胁。这些威胁包括河道侵占、过度倾废、过度捕捞、环境污染、生境破坏、外来种入侵、无控制的旅游活动,以及人类活动引起的全球变暖等。近年来,世界各国近岸海域均出现了不同程度的富营养化状况。陆源氮磷营养盐不断排放为藻类的生长提供了充足的营养,也引起了一系列海洋生态环境问题。赤潮、褐潮频繁暴发已经严重威胁到海洋生态健康,绿潮、金潮暴发也是由海水富营养化直接导致的新型海洋生态灾害。其中,国外大约是从 20 世纪 80 年代开始大规模暴发绿潮,而从 2008 年起我国连续 11 年暴发了世界上最大规模的黄海绿潮。

2007 年黄海绿潮首次发生,当时绿潮最大覆盖面积仅为 21 km²,最大分布面积为 1 500 km²,并未形成大规模暴发性灾害。2008 年夏季,青岛作为奥林匹克运动会帆船比赛的举办地,就在奥运会开幕前 2 个月,黄海海域暴发大规模绿潮灾害,其最大覆盖面积达 650 km²,最大分布面积高达 25 000 km²,震惊世界,时任国家最高领导人胡锦涛总书记多次做出重要批示,并前往青岛绿潮应急指挥部了解绿潮灾害处置工作,应急指挥部也第一时间组建了一支由 1 500 多条渔船、8 000 多名渔民组成的海上打捞船队,并在青岛近岸海域布设围油栏 2.5 万米,防流网 3 万米,防止南黄海海域的绿潮持续漂移进入青岛近岸,这些拦截和打捞绿潮的应急措施为奥林匹克运动会帆船比赛顺利举办提供了有效的保障;7 月 15 日,赛场海域的绿潮已基本清除干净,共计打捞绿潮藻约 120 万吨。黄海绿潮在随后几年也均“如期而至”,严重影响了当地海洋生态环境和生态服务功能,造成了巨大的经济损失,仅 2008 年,绿潮对青岛当地造成直接损失及清除费用高达 13 亿元。目前,绿潮已逐渐演变为我国黄海海域常规化海洋生态灾害。2009 年绿潮最大覆盖面积甚至达到了 2 100 km²。各级政府和海洋局每年动用大量的人力和物力进行绿潮灾害应急处置,造成了数十亿元的经济损失;不仅如此,绿潮严重破坏了我国近海海洋生态环境,给滨海旅游业、航运和水产养殖等海洋经济产业带来了严重的影响。

为摸清绿潮源头、揭示绿潮暴发机制、准确预测绿潮路径、实现业务化预警报,国家海洋局于 2012 年设立海洋公益性行业科研专项项目“黄海绿潮业务化预测预警关键技术研究与应用”(项目编号:201205010),由上海海洋大学何培民教授为首席专家牵头执行。经过 10 余年的研究,我们在黄海绿潮藻生物学、分子基因、最早漂浮海区、绿潮溯源、演替机制、漂浮机制、迁移路径、预警预报、防控策略、资源化利用等方面的研究已取得很大进展。为此我们将研究成果进行凝练提升,编著《中国绿潮》一书。

《中国绿潮》共分为 15 章,第一章由上海海洋大学何培民、国家海洋局东海环境监测中心徐柯执笔撰写;第二章由上海海洋大学张建恒、陈群芳,广东海洋大学崔建军,天津师范大学丁兰平和浙江象山旭文海藻开发有限公司朱文荣撰写;第三章由中国科学院海洋研究所王广策、江苏海洋大学徐军田及上海

市水产研究所冯子慧撰写；第四章由上海海洋大学何培民、中国科学院海洋研究所姜鹏、上海海洋大学徐文婷和蒋婷撰写；第五章由上海海洋大学蔡春尔和蒋婷、中国科学院海洋研究所刘峰、宁波大学徐年军、美国康涅狄格州州立大学林森杰和周玲洁撰写；第六章由上海海洋大学张建恒和马家海、国家海洋局北海环境监测中心宋文鹏与李继业、国家海洋局东海环境监测中心张昊飞和刘材材撰写；第七章由上海海洋大学张建恒、国家海洋局东海环境监测中心刘材材撰写；第八章由上海海洋大学霍元子撰写；第九章由上海海洋大学张建恒撰写；第十章由上海海洋大学何培民、陈丽平、徐文婷和王诗颖撰写；第十一章由上海海洋大学霍元子、宁波大学徐年军撰写；第十二章由国家海洋局北海预报中心高松、黄娟、吴玲娟、李锐和徐江玲撰写；第十三章由上海海洋大学于克锋撰写；第十四章由上海海洋大学于克锋、江苏省海洋水产研究所陆勤勤、国家海洋局东海环境监测中心刘材材撰写；第十五章由中国海洋大学王鹏、上海海洋大学贾睿和蔡春尔、青岛海大生物集团有限公司单俊伟、浙江象山旭文海藻开发有限公司朱文荣撰写。本书得到华大集团、武汉未来组生物科技有限公司、上海迈浦生物科技有限公司的大力支持，以及上海海洋大学刘金林、康新宇、丁晓玮、赵晓惠、庄旻敏、施锦婷、赵莉娟、谷凯、包群婧、文钦琳、赵卉等研究生的大力帮助，在此一并感谢。为了全面叙述我国黄海绿潮发展情况及相关研究的进展，我们力求理论和实践有机结合，做到图文并茂。本书不仅是所有编写人员多年协同努力的成果，也凝聚了参与绿潮研究和关心绿潮研究的有关学者专家的心血和智慧。感谢自然资源部第一海洋研究所丁德文院士给予我们的建设性意见，感谢国家自然资源部、原国家海洋局科学技术司、生态环境保护司等部门领导的关心与支持。

由于时间、精力及作者水平的限制，书中难免存在疏漏之处，敬请同行专家和读者批评指正。

《中国绿潮》编著组

2019年6月

目 录

序 前言

第一章 我国黄海绿潮暴发概况	1
第一节 2008 年我国黄海绿潮突发事件	1
第二节 我国黄海绿潮暴发常态化	4
第三节 我国黄海绿潮暴发危害性	7
第二章 绿潮藻浒苔生物学研究	9
第一节 浒苔类分类地位划分	9
第二节 重要浒苔类绿潮藻形态与管状结构形成	11
第三节 重要浒苔类绿潮藻形态学特征	15
第四节 绿潮藻生殖与生活史	18
第五节 浒苔染色体研究	24
第三章 绿潮藻光合生理研究	26
第一节 绿潮藻浒苔 CCM 机制	26
第二节 绿潮藻浒苔光合系统特性	29
第三节 绿潮藻浒苔光合速率	34
第四节 绿潮藻浒苔叶绿素荧光参数	36
第五节 绿潮藻浒苔对逆境的响应	37
第四章 绿潮藻分子标记与分子鉴定	41
第一节 浒苔类绿潮藻 ITS 和 5S rDNA 序列分析	41
第二节 浒苔类绿潮藻 ISSR 与 SCAR 分子标记	56
第三节 浒苔类绿潮藻 SSR 与 SNP 分子标记	59
第四节 浒苔类绿潮藻荧光定量 PCR 分子快速鉴定技术	66
第五章 绿潮藻基因组及表达图谱研究	70
第一节 黄海绿潮藻浒苔全基因组测序与分析	71
第二节 浒苔类绿潮藻线粒体基因组	74

第三节	浒苔类绿潮藻叶绿体基因组	80
第四节	4种浒苔类绿潮藻高温及高光强胁迫转录组研究	90
第五节	水杨酸对绿潮藻浒苔高温胁迫影响的转录组研究	96
第六章	我国沿海岸基绿潮藻分布调查及地理区系特征	103
第一节	南海海域岸基绿潮藻分布调查	103
第二节	东海海域岸基绿潮藻分布调查	110
第三节	黄海海域岸基绿潮藻分布调查	117
第四节	渤海海域岸基绿潮藻分布调查	124
第七章	黄海绿潮溯源研究	128
第一节	南黄海绿潮暴发早期源头海区确定	128
第二节	南黄海固着绿潮藻分布与调查	139
第三节	南黄海紫菜养殖与漂浮绿潮藻源头关系	158
第八章	黄海近海绿潮藻繁殖体分布特征研究	165
第一节	绿潮藻显微繁殖体与繁殖能力	165
第二节	绿潮藻显微繁殖体种类与数量时空分布特征	167
第三节	黄海海域绿潮藻繁殖体越冬研究	190
第四节	南黄海绿潮藻优势种显微繁殖体度夏机制研究	195
第九章	黄海绿潮优势种漂浮机制	201
第一节	浒苔分枝与气囊形成过程	202
第二节	黄海绿潮浒苔长距离漂浮机制研究	203
第三节	外界生态因子对浒苔漂浮的影响	208
第四节	黄海绿潮漂移过程中藻体状态变化	213
第十章	黄海绿潮早期暴发优势种群演替	217
第一节	黄海绿潮早期暴发浒苔优势种群演替现象	217
第二节	南黄海紫菜养殖筏架固着绿潮藻优势种群演替	218
第三节	南黄海绿潮早期漂浮绿潮藻优势种群演替	236
第四节	黄海绿潮优势种浒苔亚型演替规律	247
第十一章	黄海绿潮暴发生物学机制	249
第一节	外界因子对浒苔类绿潮藻生长的影响	249
第二节	外界因子对绿潮藻浒苔繁殖的影响	281
第三节	海区围隔内绿潮藻浒苔生长动力学	292
第四节	黄海绿潮暴发生物学机制解析	296

第十二章 黄海绿潮发展过程应急预测预警技术·····	301
第一节 黄海绿潮动力环境实时同化预报技术·····	301
第二节 黄海绿潮应急快速漂移预测模型建立·····	306
第三节 绿潮应急漂移预测模型后报实验和结果验证·····	308
第十三章 黄海绿潮对我国近海生态效益研究·····	319
第一节 黄海绿潮藻吸收氮磷动力学研究·····	319
第二节 绿潮藻浒苔对赤潮藻化感抑制作用·····	325
第三节 绿潮藻浒苔光合固碳与防止海洋酸化生态作用·····	334
第十四章 黄海绿潮生态灾害的源头控制·····	350
第一节 绿潮藻灭杀与防止固着技术·····	350
第二节 紫菜养殖筏架固着绿潮藻的清除效果研究·····	359
第三节 黄海绿潮灾害防控与治理措施研究·····	363
第十五章 浒苔资源利用·····	367
第一节 浒苔资源利用现状·····	367
第二节 浒苔深加工技术·····	377
第三节 浒苔生物肥·····	380
第四节 浒苔功能性饲料添加剂·····	384
第五节 浒苔食品·····	386
第六节 浒苔化妆品·····	392
第七节 浒苔能源·····	396
第八节 浒苔造纸·····	399
第九节 绿潮藻生物资源利用展望·····	401
参考文献·····	402

第一章 我国黄海绿潮暴发概况

绿潮(green tide)是一种在世界沿岸国家中普遍发生的有害藻华(Blomster et al., 2002; Anderson et al., 2002),同时也是一种可以造成次生环境危害的生态异常现象(Nelson et al., 2003),其主要由石莼属(*Ulva*)、浒苔属(*Enteromorpha*, 现国际上已归属到石莼属)、刚毛藻属(*Cladophora*)、硬毛藻属(*Chaetomorpha*)等大型定生绿藻脱离固着基后漂浮并不断增殖,而导致生物量迅速扩增形成的藻类灾害,通常发生在河口、潟湖、内湾和城市密集的海岸等富营养化程度相对较高的水域环境中。在20世纪70~90年代,美国(Nelson et al., 2008)、法国(Charlier et al., 2007)、芬兰(Gubelit et al., 2010)、印度(Fletcher et al., 1996)、菲律宾(Largo et al., 2004)、韩国(Kim et al., 2010)、日本(Yabe et al., 2009)等许多国家沿海均发生过较大规模的绿潮,并至今难以防治,成为世界性难题。

自2007年以来,我国黄海海域连续暴发大规模绿潮,最大涉及面积可达58 000 km²,累积覆盖面积可达2 100 km²,绿潮面积之大及形成之快堪称世界之最,对沿岸海洋生态环境和生态服务功能产生严重破坏,造成巨大经济损失,绿潮已经成为黄海夏季的一个常态化发生的海洋灾害(Liu et al., 2009)。

第一节 2008年我国黄海绿潮突发事件

一、2008年黄海绿潮大规模暴发过程

2008年8月8~24日第29届奥林匹克运动会(简称奥运会)在北京隆重举行。第29届奥运会帆船比赛(简称奥帆赛)则在美丽青岛举行,比赛时间定为2008年8月9~23日。

然而,2008年5~7月,在我国青岛近海海域突然暴发了世界上最大规模绿潮(green tide)(图1.1),因整个绿潮暴发过程均处于黄海,故称为黄海绿潮(green tide in Yellow Sea)。后经藻类学专家鉴定,确认绿潮漂浮优势种为浒苔(*Enteromorpha prolifera*) (Ding et al., 2009),是一种单层细胞的管状藻体。根据卫星遥感信息解译,2008年6月底绿潮最大影响面积为25 000 km²,最大累积覆盖面积为650 km² (中国海洋灾害公报,2012)。

2008年5月初,黄海海域开始出现零星斑块漂浮绿潮藻,覆盖面积为6.02 km²,影响范围为465 km²。自5月中旬至5月底,海区总体主导风为西北方向,海上平均风速约5 m/s,因而沿其下风向迅速扩展,绿潮面积不断增加,影响范围迅速扩大,每天平均飘移约18 km,5 d绿潮面积可扩大5倍以上(李大秋等,2008)。5月30日,绿潮影响范围已达

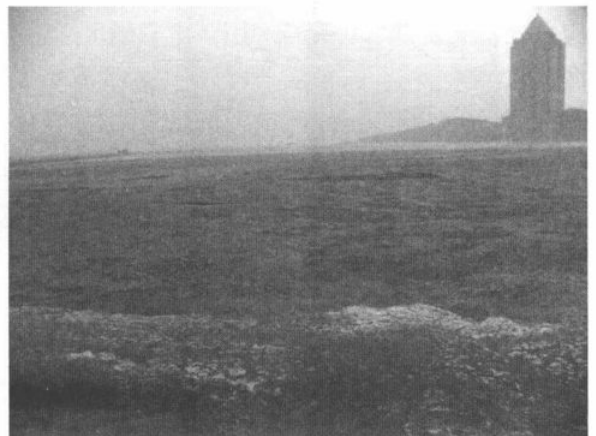


图1.1 2008年青岛绿潮暴发

13 990 km², 覆盖面积已达 397 km²。且在大公岛以东约 60 海里海域出现了大面积漂浮绿潮藻, 在海流和风力作用下绿潮向青岛及山东半岛漂移。5 月 31 日, 最大影响面积约为 13 000 km², 覆盖面积约为 400 km², 且大量漂浮绿潮藻不断漂入青岛近海海域, 主要集中在青岛崂山近海海域, 形成了约 160 km² 的绿潮漂浮密集区。6 月 14 日大量漂浮绿潮藻开始进入青岛近岸海域。6 月 25 日大量漂浮绿潮藻出现在青岛奥帆赛海域。6 月 28 日海面漂浮绿潮藻影响面积已达 24 000 km², 50 km² 奥帆赛海域中已出现 16 km² 绿潮, 形势十分严峻。6 月 28 日开始清理绿潮, 青岛市政府立即在海上组建了一支由 1 500 条渔船、8 000 多名渔民组成的海上打捞队伍, 在岸边组织了近 20 000 人次队伍, 军民共同清除沙滩上堆积的漂浮绿潮藻, 并动用了 200 辆军用卡车运输漂浮绿潮藻至郊外填埋(Gao et al., 2010)。6 月 29 日, 卫星遥感图像显示绿潮分布面积扩展至 25 000 km², 几乎分布到了山东南部黄海沿岸大部分海区。

经过 46 d 的努力奋斗, 终于在 2008 年 7 月 15 日前把奥帆赛场海域的漂浮绿潮藻打捞和清理干净, 共设置了围挡流网和围油栏约 24 km, 共打捞和清除大约 120 万 t 漂浮绿潮藻。赛区海域及近海海域水质仍保持为 I 级标准, 符合赛事要求, 确保了 8 月 8 日奥帆赛开幕式顺利举行。7 月 19 日, 青岛奥帆赛海域经治理后, 绿潮分布面积和密度显著降低, 绿潮漂移方向也由西北转向东北。7 月 20 日, 时任中共中央总书记的胡锦涛同志在青岛奥帆赛场海域浒苔处置工作应急指挥部听取汇报, 并亲临现场查看绿潮藻清除情况。据报道, 2008 年黄海绿潮对山东省和江苏省造成的直接经济损失分别为 12.9 亿元和 0.28 亿元, 仅青岛海水养殖业的损失就高达 3.2 亿元(中国海洋环境状况公报, 2009; 中国海洋灾害公报, 2009)。

二、2008 年黄海绿潮暴发过程卫星遥感资料解析

根据 MODIS(中分辨率成像光谱仪)数据处理结果显示, 2006 年之前我国近海海域均无明显浒苔海藻分布迹象, 只出现零散的漂浮绿潮藻, 海上分布面积很小(李大秋等, 2008)。黄海绿潮是 2007 年首次发生, 初步确认优势种为浒苔类大型海藻(*Enteromorpha*, 现国际上已把 *Enteromorpha* 归为 *Ulva*)。2007 年 6 月最早在我国黄海中部和北部局部海域发现了漂浮浒苔(*U. prolifera*)形成的绿潮, 并影响到黄海沿岸。其绿潮影响面积为 1 500 km², 累积覆盖面积为 21 km²。此次绿潮多呈稀疏带状分布, 过程持续 45 天, 2007 年 8 月 12 日出现北风之后绿潮逐渐消失。青岛沿岸打捞约 6 000 t 绿潮藻(唐启升等, 2010; 李大秋等, 2008)。

2008 年, 青岛海域暴发绿潮影响面积高达 25 000 km², 覆盖面积高达 650 km²(图 1.2), 规模如此之大, 形成速度如此之快, 震惊了全世界。后经 MODIS 卫星图像跟踪分析, 浒苔并非当地污染所致, 而是由青岛以外长江口以北的黄海中部漂移而来。青岛绿潮发生后, 我国海洋生物学家迅速组成应急处理小组, 对绿潮问题进行详细分析。国家科技部更是设立了“十一五”国家科技应急项目“浒苔大规模暴发应急处置关键技术研究与应用”, 由中国水产科学研究院黄海水产研究所、中国科学院海洋研究所、中国海洋大学、国家海洋局第一海洋研究所 4 家单位承担。该项目在绿潮藻浒苔的生物学基础与暴发生态过程、浒苔灾害监测预警、浒苔围捞清除、无害化处理与资源化利用技术等方面取得了重要成果, 提出了一系列科学有效的处置方案, 为浒苔应急处置工作提供科学依据和决策咨询, 为浒苔绿潮生态灾害的防控与治理、浒苔的综合利用提供了理论基础和技术支撑。

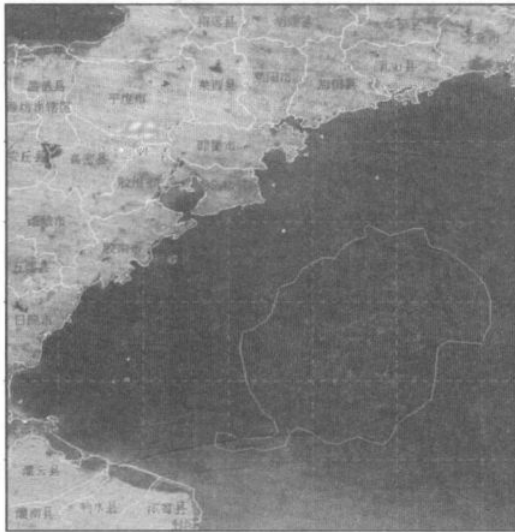
2012~2016 年, 国家海洋局组织设立公益性行业科研专项“黄海绿潮业务化预测预警关键技术研究与应用”, 由上海海洋大学牵头, 国家海洋局北海预报中心、山东科技大学、国家海洋局北海环境监测中心、国家海洋局东海监测中心、中国海洋大学、中国科学院海洋研究所、常熟理工学院、淮海工学院和国家海洋局北海标准计量中心共同承担, 创建了黄海绿潮发生早期预警技术, 研发了黄海绿潮发展过程预测预警系统, 并成功研制了黄海绿潮综合信息平台, 已实现了平台业务化平稳运行, 为黄海绿潮监视监测和预警预报提供了重要理论依据和技术支撑。



2008-05-01



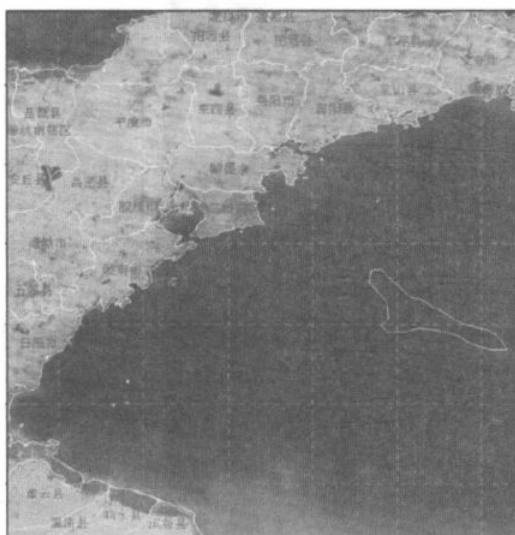
2008-05-20



2008-05-30



2008-06-29



2008-08-07



2008-08-25



扫一扫 见彩图



扫一扫 见彩图



扫一扫 见彩图

图 1.2 2008 年黄海绿潮发生过程(张娟,2009)

第二节 我国黄海绿潮暴发常态化

一、世界范围内绿潮发生概况

绿潮在世界范围内是一种普遍现象,其发生频率和规模也逐年上升。但绿潮主要分布在北温带沿岸海域,其中,美国、欧洲和亚洲太平洋沿岸是绿潮灾害最严重的3个区域(图1.3)。据文献记载(Cotton, 1910),世界上首次暴发的绿潮现象是在北爱尔兰的贝尔法斯特湾,于1905年发生。但当时人们并未对此现象给予大的关注,直至20世纪70年代,绿潮现象在海岸、湖泊、河口频繁暴发,并造成严重损失,此时才引起人们对该现象足够的关注(Fletcher, 1974; Buttermore, 1977; Klavestad, 1978)。Klavestad(1978)报道了挪威地区发生石莼属绿藻引起的绿潮,对挪威地区所暴发绿潮现象的主要诱发种、海水温度、盐度以及发生原因等方面进行了阐述。在意大利也有大规模石莼绿潮暴发现象的报道(Sfriso et al., 1989)。到了20世纪90年代,绿潮已经逐渐成为这些国家沿岸的普遍现象,据统计,当时共有37个国家受到绿潮的侵袭,包括欧洲、北美、南美、亚洲和澳洲沿岸。此后,受绿潮影响地区逐渐增多。进入21世纪后,世界范围内绿潮发生频率和受影响的海域均迅猛增长。如今,绿潮已经逐渐转变为世界范围内一种常态化生态现象。



图 1.3 世界范围内绿潮频繁发生区域

过去30年里,最引人注目的是发生在法国布列塔尼(Brittany)地区的绿潮现象。其实,在绿潮未发生之前,这个地区就有采集绿潮藻用于肥料和牲畜饲料的传统。1977年该地区拉尼翁湾(Lannion Bay)和圣布里厄湾(St Brieuc Bay)暴发绿潮,直到1986年 *Ulva* spp. 绿潮还主要聚集在 Lannion Bay, 10年后的1996年,绿潮的影响范围已经达到了阿基坦(Aquitaine)地区。仅布列塔尼地区 Lannion Bay 每年就需要超过2000辆卡车去清除沿岸的绿潮藻,而其他大部分沿岸的绿潮藻在海岸腐烂或大面积漂浮(Charlier et al., 2007)。

二、2007~2018年我国黄海绿潮暴发概况

1. 我国黄海绿潮暴发总体概况

在我国,自2007年以来,浒苔(*U. prolifera*)绿潮在我国黄海海域连续多年周期性暴发。但是由于



扫一扫 见彩图

2007年的绿潮现场规模较小,当时并未引起人们的广泛关注(Liu et al., 2010)。然而2008年青岛近岸海域大面积、高密度漂浮浒苔聚集形成的绿潮,对海洋环境、景观、生态服务功能以及沿海社会经济造成严重影响,被认为是当时为止世界范围内暴发的最大规模绿潮(Liu et al., 2009; Hu et al., 2010; Wang et al., 2015)。随后,2009~2018年绿潮在黄海海域连年暴发(表 1.1)。

表 1.1 我国黄海绿潮历年发生规模(2018年中国海洋灾害公报)

年 份	最大分布面积/km ²	最大覆盖面积/km ²	年 份	最大分布面积/km ²	最大覆盖面积/km ²
2007	1 500	21	2013	29 733	790
2008	25 000	650	2014	50 000	540
2009	58 000	2 100	2015	52 700	594
2010	29 800	530	2016	57 500	554
2011	26 400	560	2017	29 522	281
2012	19 610	267	2018	38 046	193

2. 2009年我国黄海绿潮暴发情况

2009年3月24日首次在江苏省吕四以东海域发现零星漂浮浒苔,6月4日在江苏省盐城以东约100 km海域处发现漂浮浒苔,分布面积约6 550 km²,覆盖面积约42 km²。随着浒苔的漂移、生长,7月初浒苔的分布面积达到最大,约58 000 km²,实际覆盖面积约2 100 km²,分别比2008年增加132%和223%,主要影响山东省南部近岸海域。进入8月以后,黄海浒苔逐渐减少,至8月下旬,山东近岸海域浒苔消失(中国海洋环境状况公报,2010)。

此次黄海浒苔灾害暴发面积大,持续时间长,对渔业、水产养殖、海洋环境、景观和生态服务功能产生严重影响,山东省直接经济损失为6.41亿元。

3. 2010年我国黄海绿潮暴发情况

2010年4月20日首次在江苏省如东太阳岛以东海域发现零星漂浮浒苔。6月13日在江苏省连云港以东海域发现大面积浒苔,分布面积约为5 500 km²,覆盖面积约183 km²。随着浒苔的漂移、生长,7月初浒苔的分布面积达到最大,约29 800 km²,实际覆盖面积约530 km²,主要影响范围为山东省日照、青岛、烟台和威海近岸海域。进入8月以后,黄海浒苔分布逐渐减少,至8月中旬,山东近岸海域浒苔消失(中国海洋环境状况公报,2011)。

4. 2011年我国黄海绿潮暴发情况

2011年5月27日,在江苏省盐城以东黄海海域发现大面积浒苔,覆盖面积约6.2 km²,分布面积约330 km²。随后,浒苔覆盖面积和分布面积不断扩大,在海流和风的作用下向偏北方向漂移。6月13日,浒苔大规模暴发,分布面积超过5 000 km²。7月6日,浒苔分布面积超过10 000 km²,山东省青岛近岸、薛家岛、灵山岛、大公岛附近海域发现零星浒苔登陆。7月19日,浒苔覆盖面积和分布面积均达到最大值,分别为560 km²和26 400 km²,主要影响范围为山东省日照、青岛、烟台和威海近岸海域。此后浒苔面积有所减小,7月31日覆盖面积为165 km²,分布面积为9 700 km²。进入8月以后,浒苔分布逐渐减少,至8月21日浒苔基本消失(中国海洋环境状况公报,2012)。

5. 2012年我国黄海绿潮暴发情况

2012年5月16日在江苏省盐城外海(120°50'E,34°20'N)通过卫星遥感发现绿潮。进入6月以后,黄海海域绿潮分布面积和覆盖面积持续增长,并逐渐向偏北方向漂移;6月13日绿潮面积达到最大,分布面积为19 610 km²,覆盖面积为245 km²,其中35°N以北的海域绿潮分布面积为16 400 km²,覆盖面积为245 km²。6月15日开始有绿潮陆续在日照至威海沿岸登陆;7月初开始绿潮面积逐渐减小,进入消亡期,8月30日绿潮基本消失。相对于2008~2011年,2012年绿潮分布面积和覆盖面积均比较小(中国海洋环境状况公报,2013)。

2012年,在日照、青岛、烟台、威海等地有绿潮登陆,主要影响了山东省日照至威海近海域,特别是对第三届亚洲沙滩运动会比赛海域(山东烟台海阳)造成很大影响,造成经济损失约3 000万元。

6. 2013年我国黄海绿潮暴发情况

2013年3月22日在江苏省如东沿海海域发现零星漂浮绿潮藻。5月10日在黄海南部海域通过卫星遥感发现绿潮,覆盖面积约 5.5 km^2 ,分布面积约 330 km^2 。5月中下旬开始绿潮的分布面积不断扩大,并持续向偏北方向漂移。5月25~26日,绿潮开始进入连云港海域,6月2日绿潮进入青岛管辖海域。6月5日绿潮开始影响到日照东南沿岸海域,6月9日绿潮逐渐影响到青岛近岸海域,6月24日绿潮开始影响海阳近岸海域。6月27日,绿潮覆盖面积为 790 km^2 ,分布面积为 $28\,900\text{ km}^2$,并开始影响乳山南侧近岸海域。6月30日,绿潮覆盖面积为 665 km^2 ,分布面积为 $29\,733\text{ km}^2$ 。少量绿潮陆续在日照—青岛—海阳—乳山—文登等沿岸登陆。7月,绿潮主体向北偏东方向漂移,影响到荣成附近海域,开始进入衰亡期。7月27日绿潮达到成山头东南侧海域,至8月14日绿潮基本消失(中国海洋环境状况公报,2014)。

7. 2014年我国黄海绿潮暴发情况

2014年4月3日在江苏省如东附近海域发现零星漂浮绿潮藻。初期向北漂移和生长的速度比往年快。5月中下旬,绿潮持续向偏北方向漂移,分布面积不断扩大。6月中旬开始有绿潮陆续影响日照、青岛、烟台和威海近岸海域。7月,绿潮主体北移后,北纬 35° 以南海域仍然有大面积绿潮持续存在,这种现象以往较少出现。7月3日黄海绿潮覆盖面积达到最大值,约 540 km^2 ;7月14日分布面积达到最大值,约 $50\,000\text{ km}^2$,分布面积为近5年来最大。绿潮主体向北偏东方向漂移,7月21日绿潮外缘线已到达成山头东北侧海域。之后绿潮分布面积逐渐减小,进入消亡期;8月中旬,绿潮基本消亡(中国海洋环境状况公报,2015)。

8. 2015年我国黄海绿潮暴发情况

2015年4月13日,在江苏省北部外海发现零星漂浮绿潮藻。5月中下旬,黄海绿潮持续向偏北方向漂移,分布面积不断扩大;6月上旬,开始有黄海绿潮陆续影响山东半岛沿海,分布面积保持在较高水平;6月19日黄海绿潮分布面积达到最大值,约 $52\,700\text{ km}^2$,为5年来最大值。7月4日覆盖面积达到最大值,约 594 km^2 。7月9日之前黄海绿潮密集区分布偏东,烟台海阳和威海乳山、文登海域受黄海绿潮影响偏重,青岛和日照海域受黄海绿潮影响较轻。受超强台风“灿鸿”影响,7月12日后,黄海绿潮密集区分布较历年偏西,烟台海阳和威海乳山、文登海域受黄海绿潮影响大幅减弱,青岛海域受黄海绿潮影响较为严重。7月中下旬,黄海绿潮分布面积逐渐减小,进入衰亡期;8月上旬,黄海绿潮基本消亡(中国海洋环境状况公报,2016)。

2015年6月底,在秦皇岛汤河口至鸽子窝沿岸的浴场发现零星绿潮藻,并在7月份有所增加,8月下旬逐渐减少至消失。

9. 2016年我国黄海绿潮暴发情况

2016年4月10日,在江苏省北部外海发现零星漂浮绿潮藻。根据卫星遥感监测,5月10日,在江苏盐城以东海域发现漂浮的绿潮藻;5月中下旬,绿潮藻持续向偏北方向漂移,分布面积不断扩大;6月中旬开始有绿潮持续影响山东半岛沿海,分布面积保持在较高水平,绿潮密集区主要分布在青岛、烟台及威海的南部附近海域,分布范围较广。6月25日覆盖面积达到最大值,约 554 km^2 ,6月25日分布面积达到最大值,约 $57\,500\text{ km}^2$,为近5年来最大值。7月中下旬,绿潮面积逐渐减小,进入衰亡期。8月上旬,绿潮基本消亡(中国海洋环境状况公报,2017)。

10. 2017年我国黄海绿潮暴发情况

2017年5月18日,在江苏省南通、盐城近岸海域开始发现了成片分布的浒苔,6月中下旬,绿潮主体向东北方向漂移,分布面积不断扩大,有零星浒苔绿潮抵达山东附近海域,覆盖面积于6月15日达到最大值,约 281 km^2 。6月下旬绿潮影响日照、青岛近岸海域、威海苏山岛和靖海卫附近海域,分布面积于6月22日

达到最大值,约 29 522 km²;6 月底,绿潮面积开始逐渐减小,进入消亡期,8 月,绿潮基本消亡。2017 年黄海绿潮覆盖面积和分布面积明显低于往年,其中分布面积较 2016 年减少 49%,覆盖面积减少 44%(中国海洋生态环境状况公报,2017)。

11. 2018 年我国黄海绿潮暴发情况

2018 年 4 月 25 日,在江苏省南通海域发现零星绿潮藻浒苔;4 月 29 日江苏大丰海域出现聚集绿潮藻;5 月上旬绿潮持续向北漂移,面积扩大;5 月 26 日在山东半岛沿岸海域发现浒苔绿潮;6 月 29 日绿潮分布面积和覆盖面积达到最大,分别为 38 046 km² 和 193 km²;7 月下旬浒苔绿潮分布面积和覆盖面积迅速减小,进入消亡期;8 月中旬,绿潮基本消亡。

2018 年,浒苔绿潮具有持续时间较长、分布面积与覆盖面积较小的特点。浒苔绿潮首次发现时间为 4 月下旬,消亡时间为 8 月中旬,消亡时间明显晚于过去三年;最大覆盖面积为 2008 年有观测记录以来最低值,最大分布面积为近 5 年第二低值,仅高于 2017 年的 29 522 km²(中国海洋灾害公报,2018)。

第三节 我国黄海绿潮暴发危害性

赤潮与绿潮共同构成近年来我国近海海域暴发频率较高的两种有害藻华,相比于赤潮,绿潮的发生有其自身的特点,对环境带来的危害与赤潮也不尽相同(Valiela et al., 1997; Morand & Merceron, 2004; Ye et al., 2011)。绿潮作为大型海藻藻华虽然对人体健康和食品安全不会造成直接危害,但是大规模暴发如不能及时清理,藻体便会开始腐烂,消耗水体中大量氧气,并产生恶臭气味,直接对海洋自然生态系统和人工生态系统造成破坏,并造成城市滨海旅游业巨大损失。

根据绿潮状态,可分为 3 种类型。

- 1) 绿潮可大量堆积在近岸浅滩上,称为堆积绿潮(heaped green tide)。
- 2) 大部分绿潮藻漂浮于海表面,称为漂浮绿潮(floating green tide)。
- 3) 绿潮漂移过程中,大部分绿潮藻最终会沉降在海底,称为沉降绿潮(settled green tide)。

这 3 种状态绿潮对海洋生态环境造成危害是不一样的。其中,堆积绿潮主要造成近岸旅游景观破坏、细菌传播、恶臭气味散发等危害;漂浮绿潮主要造成近海养殖渔业、离岸工程损失,以及水体缺氧、水质下降、光照强度降低等危害;沉降绿潮主要造成海底的底栖动物死亡、生物群落失衡等危害。本节将绿潮危害主要归纳为影响近岸旅游景观、造成近海养殖渔业损失、导致海底生态系统失衡三个方面危害并加以阐述。

一、影响近岸旅游景观

青岛地处山东半岛南端,东、南濒临黄海,海域面积为 12 240 km²,滩涂面积为 212.3 km²,等深线 20 m 以下浅水水域面积为 3 255 km²(刘佳等,2017)。广阔的海域空间及海洋生物资源,为青岛市滨海旅游业发展提供了良好的开发基础和环境条件。青岛市是我国著名滨海旅游城市,素有“红瓦绿树,碧海蓝天”之称,曾连续荣获“中国最佳旅游目的地”“最佳休闲城市”“最佳海滨休闲城市”等称号。其中,2015 年全市接待游客总人数 7 200 万人次,旅游总收入达 1 200 亿元,旅游业正逐渐成为青岛经济的支柱型产业。2008 年黄海绿潮大规模暴发直接威胁青岛奥帆赛以及旅游业。6~7 月大量漂浮浒苔不仅覆盖沿海海面,还会随着潮水和风浪上岸堆积,最高可堆积到 1.5 m。夏季烈日和高温条件下,上岸堆积的浒苔开始腐烂变白,严重影响沿岸景观,所有浴场均受到影响。腐烂后产生有害物质,散发难闻气味,造成旅游业重大损失。为了保证奥帆赛顺利进行和恢复滨海美丽风景,至 7