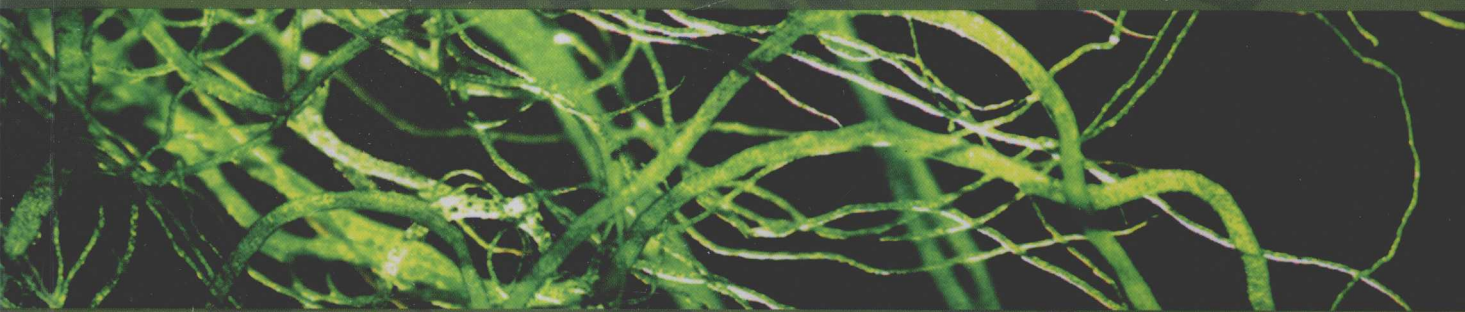


浒苔生态学研究

张惠荣 主编



海洋出版社

内 容 简 介

本书收集了研究大型海洋绿藻——浒苔这一导致 2008 年南黄海突发性海洋灾害的生物科学论文 22 篇,内容包括研究综述,浒苔基础生物学与分子生物学研究,浒苔灾害暴发成因及生消过程研究,浒苔灾害监测、影响评价及资源化利用等 4 个部分,其中含研究论文 18 篇,翻译的有关绿潮灾害的外文文献 4 篇。

本书可供我国高等院校,科研院所从事生物学、海洋学、生态学、环境科学等研究的专业师生参考,亦可为从事海洋学、海洋资源管理与环境保护等部门的科技工作者和管理者参考。

图书在版编目(CIP)数据

浒苔生态学研究/张惠荣主编. —北京:海洋出版社,2009. 10
ISBN 978 - 7 - 5027 - 7591 - 9

I. 浒… II. 张… III. 浒苔 - 生态学 - 文集 IV. Q914. 82 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 192228 号

责任编辑:项 翔

责任印制:刘志恒

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

北京盛兰兄弟印刷装订有限公司印刷 新华书店发行所经销

2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月北京第 1 次印刷

开本:889mm × 1194mm 1/16 印张:13

字数:333 千字 定价:80.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《浒苔生态学研究》编委会名单

主 编：张惠荣

副主编：叶属峰 徐 韧 魏泉苗 翁光明

编 委：张惠荣 徐 韧 叶属峰 魏泉苗 翁光明 国 峰
李爱平 王 丹

前 言

2008 年在我国发生了 4 件令人难忘、广受世界瞩目的大事：一是年初 1 月 10 日以来，在我国南方发生了五十年一遇的特大低温雨雪冰冻灾害，持续时间之长、降温幅度和降水强度之大，覆盖地域之广，历史罕见，此次灾害波及 21 个省（市、区），因灾死亡 107 人，直接经济损失 1 111 亿元；二是 5 月 12 日 14 时 28 分 04 秒发生的 8.0 级四川汶川特大地震，涉及四川（八县）、陕西、甘肃、河南、云南、重庆、湖北、贵州、湖南等省市，造成 69 227 人遇难，17 923 人失踪；三是 5—7 月，在即将开展北京奥运会帆船比赛的青岛海域及整个南黄海海域，发生了一场国内外高度关注的突发性浒苔灾害事件，漂浮物最大分布面积达 12 900 平方千米。山东和江苏两省先后投入数十万人，动用数千艘各类船只和千余台车辆等机械装备进行打捞清理，并在海上布设围网防线 77 千米，青岛附近岸滩上平均堆积厚度达 0.3~1.0 米。至 7 月 15 日，累计清运浒苔共 100 余万吨。四是 8 月 8—24 日在北京举办了第 29 届国际奥林匹克运动会，在“同一个世界、同一个梦想”的主题下，迎来了 204 个国家与地区参赛代表团，中国创造了 51 块金牌、21 块银牌、28 块铜牌的历史性好水平。

在海洋界，浒苔灾害至今令人记忆犹新，同时又心有余悸。2008 年 5 月底以来，黄海中部出现了大面积漂浮浒苔，一种罕见的大型海藻向青岛及周边海域聚集，快速生长，在近海迅速形成巨大的生物量，严重威胁到奥帆赛的正常开展，成为一起受国内外广泛关注的突发性灾害事件。此次浒苔灾害持续时间长，其覆盖面积与密度之大在世界上尚不多见。为了解浒苔的发生发展、积极应对、及时处置与有效控制浒苔灾害，国家和地方及时启动了海洋灾害应急预案，国家海洋局在青岛设立总指挥部，局属及局外各单位开展了积极有效的监视监测、预警预报及预防控制等工作。

根据国家海洋局《关于加强黄海大面积浒苔灾害应急响应工作的通知》和《关于成立国家海洋局应对黄海浒苔灾害前线指挥部的通知》的要求，2008 年 6 月 25 日，国家海洋局东海分局张惠荣局长紧急召开局长专题会，研究部署东海区的浒苔海藻监视监测工作，要求各部门、各单位要克服各种困难、全力以赴地做好浒苔灾害监视监测工作。同时，在江苏连云港市设立了现场指挥部。6 月 23 日至 9 月 15 日，在现场指挥部领导下，分局东海环境监测中心、东海预报中心、中国海监东海航空支队等单位前后开展了连云港、盐城、南通市的浒苔专项社会调查、黄海暴发大型绿藻（浒苔属）的实验室培养试验、南黄海浒苔暴发海域水质调查及其影响评

价、基于卫星遥感影像的浒苔扩散路径预报和航空遥感监视监测等工作。

浒苔 (*Enteromorpha prolifera* J. Ag.) 是一种大型海藻。在国际上, 这种由海洋大型绿藻等海藻大量繁殖所引起的一种异常生态现象称之为“绿潮”(green tides)。“绿潮”的暴发在世界各地屡见不鲜, 已经成为全球性的海洋生态灾害, 但目前还少有对其进行深入的研究报道。早在 30 多年前, 欧洲就开始暴发绿潮灾害。近十多年来, 随着沿岸海域污染的不断加重, 在美国、加拿大、丹麦、荷兰、法国、意大利、日本、韩国和菲律宾等国家沿岸海域均暴发过绿潮灾害。其中, 法国 1997—2001 年, 受绿潮危害的滨海城市从 60 个增加到 103 个。2008 年, 我国黄海发生的浒苔灾害是一起典型的绿潮事件, 但并不是一次偶然事件。2007 年, 黄海也曾经发生过较为严重的浒苔灾害。近年来, 我国北起大连、南到三亚的多个近岸海域也发生了不同规模的绿潮灾害。

根据国内外有关资料显示, 形成绿潮的生物主要是绿藻门 (Chlorophyta) 石莼科 (Ulvaceae) 的石莼属 (*Ulva*)、浒苔属 (*Enteromorpha*)、硬毛藻属 (*Chaetomorpha*) 以及刚毛藻属 (*Cladophora*) 等大型海藻, 其中石莼属 (*Ulva*) 和浒苔属 (*Enteromorpha*) 中的种类是世界沿海暴发绿潮的常见种类。在我国常见的种类有七种: 浒苔 (*E. prolifera* J. Ag.)、肠浒苔 (*E. intestinalis* (L.) Link)、扁浒苔 (*E. compressa* (L.) Grev.)、管浒苔 (*E. tubulosa* Kütz.)、曲浒苔 (*E. flexuosa* (Wulf.) J. Ag.)、条浒苔 (*E. clathrata* (Roth) Grev. Emend. Bliding)、缘管浒苔 (*E. linza* (L.) J. Agardh) [长石莼 *Ulva linza* L.]。这两年在我国黄海海域发生的“绿潮”, 其主要属种是浒苔属的一些种类。

2008 年黄海浒苔灾害规模宏大、持续时间长, 完全出乎人们的预料。为了科学应对这次浒苔灾害, 国家和地方组织了强大的科学研究与应急减灾防灾队伍, 分别从浒苔生物学与生态学、浒苔监视监测与预警报、浒苔应急处置与无害化处理以及资源化利用等方面开展了应急研究与管理工作, 为战胜这次海洋生态灾害提供了必要的科学技术支撑和有效的减灾防灾行动。然而, 由于以前我国近海绿潮暴发较少, 危害程度较低, 较少受到重视, 因此我国国内此项研究基础薄弱。在这次应急过程中, 虽然取得了一些成果, 但更多的是不解之谜。对于这种大型海藻所引起的海洋生态灾害的研究在我国科学界才刚刚拉开序幕。

2008 年南黄海浒苔灾害虽已远去, 但却值得我们反思。至此, 除了赤潮以外, 中国沿海又出现了以大型海藻为代表的另一类新的大型海洋生态灾害——绿潮, 而且在抗击这次南黄海浒苔灾害过程中, 给我们提出了诸多挑战:

1. 南黄海浒苔灾害的源头在何处? 成灾条件是什么? 如何漂移扩散至青岛海域?
2. 浒苔灾害如何监视监测 (发现)、模拟与预警报 (路径漂移)?
3. 如何有效管理浒苔灾害才能实现快速处理与应急管理?

4. 如何实现浒苔的资源化利用?
5. 2008 年浒苔灾害留给我们的基本认识与启发是什么?
6. 南黄海浒苔种类在分类学上如何鉴定?

2008 年暴发的大型浒苔灾害吸引了海洋、气象、地学、环保、渔业等多个领域众多科学家的关注,短期内对于绿潮的认识有了突破性的进展。然而,国际上的研究经验表明,目前我国近海的绿潮灾害可能还处于初始阶段,随着近海环境的变化,气候异常不断加剧,绿潮暴发的频率和规模将进一步增加。而且,从我国的研究现状来看,目前对南黄海浒苔灾害的成因、监视监测与预警报、应急处置与管理等方面尚存在较多不解之谜,难以满足浒苔灾害减灾防灾的要求。而且难以满足浒苔灾害减灾防灾的如下要求:“及时发现、准确预报、有效处理、建立体系、综合利用”。鉴于此,由海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室主办,教育部水产种质资源发掘与利用重点实验室、国家海洋局东海环境监测中心、国家海洋局东海预报中心、水域环境生态上海高校工程研究中心承办,2008 年 9 月 22 日在上海组织召开了一次东海区浒苔灾害监视监测阶段性研究学术交流会,来自国家海洋局第一海洋研究所、第二海洋研究所、东海分局、国家海洋环境监测中心以及中国科学院海洋研究所、中国水产科学研究院东海水产研究所、中国海洋大学、上海海洋大学、华东师范大学、宁波大学、西南交通大学 50 余名专家学者出席了学术研讨会,有 19 位浒苔研究专家和一线科技工作者作了主题发言和汇报。这场学术交流会议荟萃了多学科、多角度的学术思想,对浒苔的进一步研究起到了宝贵的指导作用。为此,国家海洋局赤潮重点实验室特整理出若干优秀学术论文,以飨读者。

本书的出版得到了海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室、国家海洋局东海环境监测中心的大力支持。国家海洋局第三海洋研究所周秋麟研究员和上海海洋大学马家海教授为本论文集集中的外文文献的翻译做了大量的审校工作。海洋出版社的项翔也对本书的出版付出了大量的辛勤劳动。在此,谨向为本书出版提供帮助的单位、领导与个人表示诚挚的感谢!

本论文集由张惠荣主编,叶属峰、徐韧、魏泉苗、翁光明副主编,由国家高技术研究发展计划(“863”计划)重点项目“重大海洋赤潮灾害实时监测与预警系统”之课题 1“赤潮现场快速监测与检测技术”(2007AA092001)、“863”计划课题“典型河口、海湾生态系统健康评价模型技术研究及应用示范”(2006AA09Z169)和 2008 年度海洋行业公益性科研经费专项重点项目“海岸带区域综合承载力评估与决策技术集成及示范研究”(200805080)资助出版,是《我国近海绿潮灾害调查及其预测与防治研究》专项研究成果之一。本论文集共收录了 18 篇学术交流论文,加上翻译的 4 篇相关外文文献,内容分为研究综述,浒苔基础生物学与分子生物学,浒苔暴发成因及生消过程,浒苔遥感监测、影响评价及资源化利用等四个部分。希望本论文集的出版,能够对我国绿潮灾害的监视监测与预警报、

基础生物学与海洋学研究、暴发成因与生消过程、影响评价与治理、资源化利用、应急管理辅助决策提供有益的借鉴。由于时间仓促，编者水平有限，书中难免存在错误或不当之处，恳请读者批评指正！

编者

2009 年 2 月于上海

Content 目录

I 研究综述

- “绿潮”的研究现状及展望 马家海 张华伟 张天夫(3)
- 国内外绿潮暴发现状及研究进展 霍元子 田千桃 何培民(12)
- 富营养化河口大型藻类生长的生物地球化学与进化研究
..... JOHN A RAVEN REBECCA TAYLOR(19)
- 布列塔尼海岸的绿潮 Roger H. Charlier Philippe Morand Charles W. Finkl Alexandre Thys(35)

II 浒苔基础生物学与分子生物学研究

- 不同养殖模式下龙须菜对氮、磷的吸收 王铁杆 黄贤克 张 鹏(47)
- 缘管浒苔营养吸收动力学研究 邵魁双 李 珂 巩 宁 李大成(52)
- 南黄海大型绿藻(浒苔属)生态试验的初步研究
..... 任 松 徐 韧 程祥圣 忻丁豪 何培民 刘富平 张丽旭(60)
- 浒苔和条浒苔生长及其氮氮吸收动力学特征的初步研究
..... 田千桃 霍元子 李信书 张寒野 冯子慧 王阳阳 张饮江 何培民(65)
- 我国近海浒苔种类 ITS 与 18S rDNA 序列分析
..... 应成琦 张 婷 霍元子 李信书 田千桃 马家海 徐 韧 王金辉 何培民(74)

III 浒苔灾害暴发成因及生消过程研究

- 突尼斯南湖大型海藻的季节性动力学 Shili, A. Trabelsi, E. B. Ben Maïz, N. (83)
- 浒苔暴发:气候变化和人类活动的响应 李道季 程 辉(92)
- 浙江浒苔及针对浒苔灾害所引发的问题思考 裴鲁青(99)
- 2008 年中国浒苔灾害成因条件和过程推测 徐兆礼 叶属峰 徐 韧(104)
- 南黄海海域浒苔大规模暴发社会调查分析
..... 隋洪波 曹 恋 孙亚伟 李志恩 程祥圣 徐 韧 王金辉 李亿红(113)

IV 浒苔灾害监测、影响评价及资源化利用

- 浒苔多源卫星遥感监测技术研究
..... 刘建强 蒋兴伟 邹 斌 王其茂 唐军武 郭茂华 朱海天 曾 韬 邹亚荣(123)

利用“北京 1 号”和 MODIS 多星资料监测青岛海域浒苔
..... 陈正华 毛志华 龚 芳 张汉松 雷 惠(134)

基于卫星遥感影像的浒苔扩散路径预报研究 堵盘军 肖文军 郑晓琴 陈 钊(141)

MAMS 在浒苔灾害监测中的应用 谢 锋 王 伟 朱云峰(148)

2008 年南黄海浒苔暴发期间水质调查及其对水质影响的初步分析
..... 纪焕红 徐 韧 龚婉卿 秦玉涛 刘材材 张昊飞 程祥圣(158)

2008 年江苏海域浒苔分布与环境因子的关系 陈 东 龚婉卿 纪焕红 叶属峰(167)

浒苔改善海水水质的贡献与作用分析
..... 纪焕红 龚婉卿 秦玉涛 曹 恋 忻丁豪 徐 韧(175)

大型藻类种群及其可持续利用 Philippe Morand Michel Merceron(181)

潜苔生态学研究

I

研究综述



“绿潮”的研究现状及展望

马家海 张华伟 张天夫

(上海海洋大学, 省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要:“绿潮”是由于绿藻等海藻大量繁殖所引起的一种异常生态现象, 对生态环境和社会环境都会造成严重的影响。“绿潮”的暴发在世界各地都屡见不鲜, 但目前还少有对其进行深入研究的报道。本研究介绍了引起“绿潮”的主要海藻种类的形态特征、生活史、应用价值以及分子生物学等方面的研究现状, 并描述了“绿潮”的研究前景, 以期今后“绿潮”的深入研究提供一些基础资料。

关键词:“绿潮”; 绿藻; 研究现状

1 前言

2008年5月以来, 我国黄海海域暴发了大规模的“绿潮”灾害。受害范围之广, 损失之大, 前所未有。绿藻门海藻在富营养化海区沿岸大量繁殖引起的现象在世界各地都屡见不鲜^[1-6], 在欧洲、北美、地中海和热带海域的富营养化内湾和潮间带都很常见。众所周知, 在一些富营养化的海区出现由于浮游生物的异常繁殖, 导致海水变色的现象, 被称为“赤潮”(red tide)。与此相对应, 从潮间带直到浅海区域, 绿藻等海藻异常发生的现象其生物学的术语, 就是我们所说的“绿潮”(green tide)。“绿潮”的成因多种多样, 目前普遍认为是由于生态环境的变化引起的, 水质的富营养化及水域水流交换量过少, 都是“绿潮”暴发的诱因。但是2007年和2008年在我国黄海海域暴发的大规模“绿潮”灾害, 其溯源和成因还有待于进行深入的探讨和研究。

引起“绿潮”的海藻中, 除了绿藻之外, 也夹杂一些褐藻和红藻, 但数量并不很多。“绿潮”中最常见的为石莼科种类(石莼属和浒苔属), 除此之外, 刚毛藻等其他绿藻引发的“绿潮”在地中海和欧洲也曾有过报道。引起“绿潮”的绿藻有较强的光合作用能力, 与其他的海藻相比生长特别快, 能够很快地覆盖海藻的生长区域; 在德国、法国以及意大利的沿海, 由于富营养化严重, “绿潮”暴发十分频繁。据Merrill报道, 在欧洲沿海仅石莼的年产量就达到100万吨以上(干品)。在亚洲, 20世纪70年代日本经济高速发展, 大量的工厂和生活废水引起了部分海区的富营养化。在这些海区, 比其他的海藻生长要快得多的石莼科绿藻, 以压倒性的生长优势迅速繁殖, 形成大规模的“绿潮”。2008年, 在我国黄海海域曾发生的“绿潮”已经造成了各种环境问题; 同时, 海藻腐败发出的异臭也成为严重的社会问题。2008年青岛海域的浒苔异常大暴发^[7-11]甚至影响到奥运会帆船比赛的顺利进行。因此, “绿潮”的影响不仅仅局限在环境方面, 它与我们的社会生活也息息相关。

这两年在我国黄海海域发生的“绿潮”, 其主要属种是浒苔属的一些种类。浒苔属的分类鉴定是非常困难的, 因为浒苔属的外部形态比较单纯, 可供分类的形态特征比较少, 而且这些特

征还会受到外界环境的影响而改变。“变异”是物种的一个普遍规律,浒苔属海藻形态构造的“变异”会给浒苔属的分类造成很大的困难。进入 20 世纪 90 年代,绿藻分类学逐渐导入了分子生物学的手段,通过 DNA 鉴定和比较获得了一些新的信息,浒苔属的分类体系也随之发生了很大的变化。2003 年 Hayden et al.^[12] 提出了浒苔属实际上与石莼属是同物异名。19 世纪以来,藻体中空管状的浒苔属海藻是从细胞为两层、膜状藻体中间不分离的石莼属中分离出来的。而 DNA 序列的分析结果显示,浒苔属一些种与石莼属的 DNA 序列没有明显的差异。也就是说,长期以来被归入浒苔属的某些种实际上应归属石莼属。在我国,有关长石莼和缘管浒苔称谓的争议已经历了 40 多年,曾呈奎等^[13-14] 在《中国经济海藻志》中提到的“长石莼” (*Ulva linza* L.), 在《COMMON SEAWEEDS OF CHINA》改称为缘管浒苔 (*Enteromorpha linza* (L.) J. Agardh.); 2000 年杨君等^[15] 通过对石莼属和浒苔属的绿藻进行 RAPD 分析,提出缘管浒苔与石莼属有较近的亲缘关系,应深入探究其分类地位。从绿藻形态构造和生活史以及目前分子生物学的研究成果来看,缘管浒苔今后应改称长石莼更为妥当^[12,16]。当前,由于对浒苔属的其他种类尚未进行深入的研究,本研究仍沿用原有的分类系统。

2 引起“绿潮”的海藻种类

研究表明,引起“绿潮”的海藻主要为绿藻门石莼属 (*Ulva* Link) 和浒苔属 (*Enteromorpha* Link) 的种类^[17], 另外也有少量的礁膜属 (*Monostroma* Thuret) 海藻存在。浒苔属、石莼属和礁膜属均属于绿藻门石莼目的种类。由于引起我国黄海海域“绿潮”的主要种类为浒苔属,本研究重点对我国常见的浒苔属海藻进行介绍。

浒苔属海藻的藻体呈绿色,管状中空,由一层细胞组成,单条或分枝。体基部的细胞向下延伸出许多假根丝组成的盘状固着器。增殖时产生游孢子和配子进行无性和有性生殖,具有较强的繁殖能力和环境耐受力。在我国常见的种类有 7 种: 浒苔 (*Enteromorpha prolifera* J. Ag.)、肠浒苔 (*Enteromorpha intestinalis* (L.) Link)、扁浒苔 (*Enteromorpha compressa* (L.) Grev.)、管浒苔 (*Enteromorpha tubulosa* Kütz.)、曲浒苔 (*Enteromorpha flexuosa* (Wulf.) J. Ag.)、条浒苔 (*Enteromorpha clathrata* (Roth) Grev. Emend. Bliding)、缘管浒苔 [长石莼 *Ulva linza* L.]。

2.1 浒苔

藻体圆柱形或稍有压扁,管状,分枝较多并能多次分枝。细胞表面观直径 10~19 μm , 年幼藻体细胞呈纵向排列,成年藻体则不甚明确。横断面厚 15~18 μm , 细胞含蛋白核 1 个,偶有 2~4 个,色素体不充满,切面观细胞在单层藻体的中央。一般生长于中潮带的石沼中,也有漂浮种类。全年生长,成熟期一般为 3~6 个月。产于我国南北各地,多见于福建及黄、渤海沿岸,为世界性的温带性种类。

2.2 肠浒

藻体常为丛生,下部较细,圆筒状,上部较粗,无分枝或基部有少数分枝,细胞表面观直径 9~15 μm , 呈不规则排列,横断面厚 14~17 μm , 细胞含蛋白核 1 个,偶有 2~3 个,色素体不充满。内侧细胞壁较厚,切面观细胞位于单层藻体的外侧。经常离开附着基质进行浮游生长。遍布于我国南北各地,北方较多。烂泥沙滩的石砾上生长得特别繁盛,有淡水流入处也能生长,全年各月都能繁殖生长。

2.3 扁浒苔

藻体圆柱形或稍压扁,上部较粗大,下部较细。有许多小分枝,基部分枝较密,上部较疏。

分枝基部略为缢缩,分枝的形状和直径常与主干相似。细胞表面观直径 $10\sim 15\ \mu\text{m}$,在成体呈不规则排列。切面观厚 $10\sim 13\ \mu\text{m}$,细胞壁较薄,具1个蛋白核,色素体不充满,切面观细胞在单层藻体的中央。生活史为典型的同形世代交替。多生长于中、低潮带的岩石、石砾或石沼中,生长季节较短,一般在晚春与秋季之间。常见于我国黄、渤海沿岸,台湾沿岸也有记录。

2.4 管浒苔

藻体深绿色,高可达 $6\sim 18\ \text{cm}$,细长单条,偶尔在基部有小分枝。下部管状或近似圆柱形,上部有时略为压扁,自基部到顶端细胞整齐纵列,有时亦可横列。细胞表面观直径 $11\sim 15\ \mu\text{m}$,方形或长方形,内有蛋白核1个,色素体不充满。体厚 $23\ \mu\text{m}$ 左右。切面观细胞在单层藻体的中央。多见于内湾,特别是半咸水的处所,生于潮间带砂、石、贝壳、木头、竹枝或其他植物体上。几乎全年都可以找到成熟个体,但以春天较多。多见于福建省厦门市附近、广东省、海南省沿岸,为泛亚热带性海藻。

2.5 曲浒苔

藻体为管状,分枝较多,有时较宽,接近于囊状,长可达 $60\ \text{cm}$ 以上,分枝对生或互生,最小分枝有时为单列细胞。体下部细胞纵列,有时呈横向排列,细胞表面观长方形或正方形,大小 $(15\sim 50)\ \mu\text{m}\times(9\sim 25)\ \mu\text{m}$,体厚 $20\sim 24\ \mu\text{m}$ 。叶绿体靠近细胞侧壁呈板状,蛋白核 $1\sim 7$ 个,多数为 $2\sim 4$ 个,色素体充满。切面观细胞在单层藻体的中央或稍靠外侧。多生长于高、中潮带的岩石上或石沼中,几乎全年都有生长。常见于我国广东省大陆和海南岛沿海一带,为泛亚热带性海藻。

2.6 条浒苔

藻体丝状,高 $11\sim 18\ \text{cm}$,圆柱形或压扁,分枝甚多,分枝与主干直径均为 $0.5\sim 1\ \text{mm}$,分枝顶端由多列细胞组成,少有二次分枝。主干基部细胞表面观为多角形或圆形,呈不规则排列。主干中部细胞纵向排列,细胞为长方形或正方形,大小约 $25\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$,含 $2\sim 4$ 个蛋白核。色素体充满或不充满,有时在同一藻体上,主干色素体不充满,分枝色素体充满。体厚 $26\sim 70\ \mu\text{m}$ 。切面观细胞在单层藻体的中央。多生长于中潮带、内湾泥底,潮间带的洼地水沼中生长更繁盛;全年都有生长,但以春季最为繁盛;繁殖季节为 $6\sim 7$ 月。常见于我国浙江、福建沿海一带及台湾、广东大陆和海南岛沿岸,为泛暖温带性海藻。

2.7 长石莼

由于其形态构造介于石莼属和浒苔属之间,该种的归属问题存在一些争论,最初被命名为长石莼,后来更名为缘管浒苔。但近年来随着分子系统学的发展和研究手段的完善,加之形态学方面研究的进步,越来越多的学者倾向或接受将其重新归入石莼属。考虑到原有的分类系统,本研究仍将该种在此加以介绍。其藻体呈绿色,线形至披针形或倒卵型的长带状,高一般 $10\sim 30\ \text{cm}$,最高可达 $90\ \text{cm}$;边缘常有波状皱褶或螺旋状扭曲。叶缘的两层细胞分离而中空。叶片基部逐渐狭细,变为圆柱形中空的柄部。体上部较薄,向下至柄部逐渐加厚。细胞表面观为 $4\sim 6$ 角形,切面观为纵长方形,但成熟部分的细胞则常为方形。其外形和体厚的变异范围很大,但叶片边缘的两层细胞分离而中空和柄部也呈中空两点则为本种的基本特点。通常认为其不具分枝,但 Carl Bliding^[18]与笔者均认为是有分枝的。它是我国沿海常见的种类,北起辽东半岛,南到海南岛,包括台湾岛和北部湾均有生长,属泛暖温带性种类。

3 生活史研究的进展

对藻类生活史的研究,有助于了解其繁殖周期和生活习性。对于有益或有生产价值的藻类,掌握其生活史,将有助于适当增殖或进行大规模生产性的栽培;对于有害藻类可以有针对性地预防和遏制其暴发性的增殖,从而减少损失。

国内对石莼目礁膜属、浒苔属和石莼属的生活史研究相对较少,仅有李伟新等^[19]对其进行了初步的介绍,21世纪初上海海洋大学(原上海水产大学)从石莼目礁膜属的生物学、生态学、分子生物学以及人工育苗栽培等方面进行了相关的研究,取得了一些成果。马家海等^[20]进行了宽礁膜孢子体阶段的相关研究;Hua Wei-hua 等^[21]报道了宽礁膜的生活史;孙彬等^[22]研究了宽礁膜生活史各阶段细胞的超微结构;随后王晓坤等^[23]对浒苔的生活史进行了初步的研究;丁怀宇等^[24]研究了缘管浒苔的单性生殖;嵇嘉民等^[25]报道了孔石莼的同形世代交替。

浒苔属的生活史为同形世代交替型,即在生活史中,孢子体世代的藻体和配子体世代的藻体外形相同,由这两种同形世代的藻体相继出现以延续后代。浒苔的生殖方式分为单性生殖、无性生殖和有性生殖。其生殖细胞分为配子和孢子两类:配子有雌雄之分,有性生殖即雌雄配子结合成合子后发育为孢子体;单性生殖为雌配子或雄配子不经结合直接发育为藻体;无性生殖则为藻体只通过孢子进行繁殖来完成生活史的生殖方式。据 Hiraoka 等^[26]的研究,孢子体的无性生殖方式也有两种:分别是通过放散两鞭毛或四鞭毛的中性游孢子来进行无性生殖的。这些中性游孢子发育成为新的藻体,成熟后仍然依靠两鞭毛或四鞭毛的中性游孢子进行无性生殖。嵇嘉民等^[25]发现孔石莼生活史也为同形世代交替型,配子体成熟后放散具有两根顶生鞭毛的配子,大小不等的雌雄配子结合成合子进而发育成孢子体。孢子体成熟后放散具有四根顶生等长鞭毛的游孢子,直接发育成配子体。Hiraoka 等^[27]发现在多刺石莼的生活史中存在着只依靠四鞭毛的游孢子完成繁殖过程的现象。宽礁膜的生活史则为异形世代交替型。大型的膜状雌雄异体配子体成熟后放散两鞭毛的配子,配子结合后发育成为孢子体;小型的球状孢子体成熟后放散四鞭毛的游孢子,直接发育成配子体。Hua Wei-hua 等^[21]还发现宽礁膜的生活史中存在着合子和孢子囊的二分裂增殖方式,以及一年生配子体和二年生孢子囊等现象。

近年来,对石莼目中礁膜属、浒苔属和石莼属的生殖和生活史的研究已经初步取得了较完整的资料,对生活史中各阶段之间的关系以及与环境的关系也有了初步的认识,这对绿藻的种质鉴定、“绿潮”的溯源及分析其暴发的成因提供了有意义的基础资料。

4 分子生物学研究

“绿潮”作为一种异常的生态现象,除了探讨它的发生与环境的相互关系之外,对引起“绿潮”暴发的海藻进行种类的鉴定以及对其生理生态方面进行研究从而明确“绿潮”暴发的生态学机制,也是十分必要的。

20世纪80年代以来,分子生物学技术在各个研究领域得到了广泛的应用,分子生物学也成为藻类分类学研究的新手段。传统的植物分类学都是建立在表现型性状分析的基础之上的。从分子遗传学的角度来看,表现型不同是基因型差异的反映,分子遗传学的发展为植物系统学的研究开辟了广阔的前景。其基本原理是对不同种类的植物特定DNA序列进行同源性比较并以此探讨它们的系统演化关系,构建系统树。在核糖体DNA中,除了18S rRNA基因和16S rRNA基因外,受到人们普遍关注的还有核糖体DNA的内转录间隔区(internal transcribed spacers,

ITS)。ITS 是核糖体 DNA 中介于 18S 和 28S 之间的内转录间隔区，不同种之间序列的变异性较大，是种类鉴定中较有价值的基因区段。有关浒苔属分类的问题，国内外已有部分学者利用 ITS 法研究分析各种间的亲缘关系，取得了一定的成果。

Satoshi Shimada 等^[28]认为浒苔属和石莼属的外部形态容易受到外界环境的影响而变化，因此外部形态不能成为区分两个属的唯一证据；通过对两个属的 28 个种类进行 ITS 和 5.8S 基因序列分析后认为浒苔属中某些种类应重新归入到石莼属中去。Jaanika blomster^[29]通过对浒苔属 - 石莼属 (*Enteromorpha - Ulva*) 进化史进行分子生物学和形态学的研究后，也认为外部形态、细胞排列和蛋白核的数目等不足以鉴定、区分浒苔属和石莼属，分子生物学分析结果显示这两个属实际上应该归入一个属。有很多学者也都支持这一种观点。分子生物学和系统发育学的相关研究都显示浒苔属和石莼属的外形和发育进程虽有一定的差异，但形态与其在系统发育树中的位置没有固定的联系，这两个属的分类地位还有待进一步研究和商榷。

5 应用价值

5.1 浒苔的营养成分

据何清等^[30]、吉宏武等^[31]分析，浒苔富含碳水化合物、蛋白质、粗纤维及矿物质，同时还含有脂肪和维生素。在浒苔蛋白质中，氨基酸种类齐全，必需氨基酸含量较高。浒苔的脂肪酸组成中，多不饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸的含量分别为 50.5%、12.7% 和 36.8%，其中包括近 4% 的奇数碳原子脂肪酸。表 1 和表 2 分别列出了浒苔的营养成分及蛋白质的氨基酸组成。由此可见浒苔是高蛋白、高膳食纤维、低脂肪、低能量，且富含矿物质和维生素的天然理想营养食品的原料^[32]。

表 1 每 100 克浒苔的营养成分

名称	粗蛋白 /g	脂肪 /g	多糖 /g	粗纤维 /g	灰分 /g	VB ₁ /mg	VB ₂ /mg	VC /mg	Ca /mg	P /mg	Mg /mg	K /mg	Na /mg	Fe /mg	Zn /mg	I /mg
缘管浒苔	27.0	0.9	53.7	10.2	8.2			20.6	299	156	113.3	493	363	146	16	
条浒苔	18.91	0.67	55.69	8.53	9.60	0.06	1.53	3.75	160		144.3		253	12	17	
浒苔精粉	29.9		48.0						600				200			

注：引自林文庭《浒苔的开发与利用》。

表 2 浒苔蛋白质的氨基酸组成

%

氨基酸名称	含量		氨基酸名称	含量	
	缘管浒苔	条浒苔		缘管浒苔	条浒苔
天门冬氨酸 (Asp)	3.38	2.42	异亮氨酸 (Ile) *	1.15	0.81
苏氨酸 (Thr) *	1.47	0.90	亮氨酸 *	2.06	1.37
丝氨酸 (Ser)	1.45	0.74	酪氨酸	0.82	0.44
谷氨酸 (Glu)	3.32	2.17	苯丙氨酸 *	1.50	1.12
甘氨酸 (Gly)	1.87	1.25	赖氨酸 *	1.17	0.95
丙氨酸 (Ala)	2.55	1.78	色氨酸 *	0.43	0.26
半胱氨酸 (Cys)	0.50	0.12	组氨酸 *	0.29	0.23
缬氨酸 (Val) *	1.63	1.27	精氨酸	1.71	0.97
蛋氨酸 (Val) *	0.64	0.41	脯氨酸	1.03	0.73
第一限制氨基酸	赖氨酸	蛋氨酸	氨基酸评分	79	80

注：* 为必需氨基酸。引自林文庭《浒苔的开发与利用》。

5.2 药用价值

我国医籍和民间经验认为,大型绿藻不仅具有丰富的营养价值,而且具有清热解毒、抗菌消炎、降胆固醇、增强机体免疫力、软坚散结、消肿利尿及化疾之功效。据《随息居饮食谱》记载:浒苔“消胆、消瘰癧、泄胀、化痰、治水土不服”;《本草纲目》记有浒苔“烧末吹鼻止衄血,汤浸捣敷手背肿痛”;唐代李珣编《海药本草》中称“石莼主秘不通,五隔气,并小便利,脐下结气,宜煮汁饮之”。

随着研究技术的进步和对浒苔研究的深入,其药用价值进一步显现出来。目前对浒苔多糖等成分的研究和提取工艺都有了很大的进步^[33-35]。徐大伦等^[33]利用浒苔多糖对非特异性免疫功能的体外实验证实,适度的浒苔可明显地促进 T、B 淋巴细胞的增殖反应作用,对抗原提呈细胞活化所致的诱导 IFN- γ 的产生有明显的增强作用。

5.3 食用及其他价值

目前,浒苔深加工产品还较少,主要有浒苔干片、浒苔精粉和浒苔绿藻精等。在世界上,以海藻粉作为水产及畜牧饲料已有几十年的历史。海藻粉含有极为丰富而独特的营养物质,还含有大量生物活性物质,作为饲料添加剂使用,能改进饲料的营养结构并能提高饲料利用率,对多数鳗鱼、虾、蟹有较好的促生长作用,并能增强免疫力,有效地提高幼鳗、虾、蟹的成活率,提高鱼肉的品质,特别是绿藻粉具有芳香气味,是鳗鱼、虾、蟹的良好诱食剂。挪威是世界上最大的海藻粉饲料生产国,美国、加拿大、日本及挪威等国在动物饲料中都加有一定比率的海藻粉^[32]。我国研究还相对较少,但目前除了研发苔条饼等食用产品外,也进行了饲料的研究^[36]。

6 展望

“绿潮”是一把双刃剑。它一方面会对环境和生态系统造成相当大的影响,大量堆积的海藻给周围的环境和居民带来很大的麻烦,腐烂后产生的有害物质也会导致海滩贝类和其他海洋生物的大量死亡,同时被覆盖海区其他海藻由于无法进行光合作用也难以生存。但“绿潮”的暴发也有其有利的一面,引起“绿潮”的海藻在生长过程中大量吸收水体中的氮和磷,对富营养化水体的水质净化会做出贡献。我们一方面以治理“绿潮”为目的,另一方面,也要考虑怎样去利用它。“绿潮”海藻的资源化利用是值得进一步探讨的问题。

由于“绿潮”海藻石莼、浒苔等是分布广、生长快的种类,吸收营养盐的速度也相当快,在含有大量氨氮的水质环境中也能快速生长,且水温对生长速度影响较小,在强光和弱光条件下都能快速吸收营养,因此它们在开放性和封闭性的养殖装置中都能起到净化水质的作用;同时可以把打捞上来的浒苔通过制成食品或作为饲料和肥料来加以应用;可在石莼等海藻大量生长的地方设立加工设施和水质净化设施,通过行政支持使这些设施能够正常的运行,技术能够实用化,国外已有许多成功的例子。另外,它还可以改善和修复生态环境,对大气二氧化碳的吸收和对地球温室效应的抑制也能做出很大的贡献。

近年来,石莼科海藻异常繁殖导致的“绿潮”已经引起了各方面研究者的注意。目前,对于石莼科海藻的研究正在进一步的深入,除了对其形态学和生活史的研究外^[20-27,37],学者们也开始运用生物化学、组织培养、细胞生物学和分子生物学等各个学科的手段对其进行全面的研究^[1,28-29,38]。对于“绿潮”的治理,由于需要考虑到生态环境的平衡等因素,目前除机械打捞外尚无有效的对策和手段。