

LUCHAO ZAIHAI FASHENG TIAOJIAN YU FANGKONG JISHU

绿潮灾害发生条件 与防控技术

高振会 杨建强 张洪亮 等 主编



海洋出版社

本论文集由国家海洋局海洋溢油鉴别与损害评估技术重点实验室资助

绿潮灾害发生条件与防控技术

高振会 杨建强 张洪亮等 主编

海洋出版社

2009年·北京

内 容 简 介

该文集收录了部分单位在应对黄海中部大规模绿潮灾害防控方面的应急研究论文 31 篇,是反映近期绿潮灾害防控与业务化运行研究成果的一本重要文献。内容涉及绿潮灾害发生条件与监测、绿潮灾害分子生物学鉴定、绿潮灾害的环境影响、防治技术及消除方法、业务化运行等。

该文集适合科研单位、海洋环境监测部门、海洋环境预报部门、海洋环境保护与海域使用管理部门的科学技术研究人员和有关管理人员,以及有关大专院校师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

绿潮灾害发生条件与防控技术/高振会等主编. —北京:海洋出版社, 2009. 3
ISBN 978 - 7 - 5027 - 7312 - 0

I. 绿… II. ①高… III. 黄海 - 海水污染 - 灾害防治 - 研究 IV. X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 031367 号

责任编辑:白 燕

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

北京画中画印刷有限公司 新华书店北京发行所经销

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:13.5

字数:320 千字 定价:50.00 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

前 言

2008年6月,南黄海海域出现大面积浒苔,其规模之大,世界罕见,浒苔聚集直接危及青岛奥帆赛举行。据调查,此次浒苔灾害影响海域面积近3万平方公里,覆盖面积约650平方公里,其中奥帆赛警戒海域浒苔面积近16平方公里,占该水域面积的32%。南黄海浒苔灾害爆发后,党中央、国务院高度重视,国家海洋局协助山东省(青岛市)、江苏省人民政府积极应对,国家和地方投入了大量人力、物力和财力,经过一个多月的打捞、清运、应急监测、预测及成因分析等工作,最终确保了奥帆赛顺利举行。

海洋大型藻形成的有害藻华称为绿潮(green tides),早在30年前,欧洲就开始爆发绿潮灾害。美国、加拿大、丹麦、荷兰、法国、意大利、日本、韩国和菲律宾等沿岸海域均爆发过绿潮灾害,1997—2001年法国受绿潮危害的滨海城市从60个增加到103个。本次南黄海海域浒苔灾害从发现到结束共持续107天,大面积绿潮聚集可导致浮游植物等推动光照而无法生存,影响海洋生态系统的结构与功能;绿潮藻消亡过程中会释放的大量有机质,将消耗水中溶解氧而造成水体缺氧,威胁海洋动物的生存;此外,大量绿潮藻在海滩堆积,如不能及时清理,容易腐烂发臭,影响滨海景观和生态环境;绿潮藻漂浮海面直接影响海上体育运动、海洋渔业、海水利用、船只通行等。

为科学应对此次浒苔灾害,国家海洋局北海分局组织多家单位,圆满地完成了浒苔监视监测、预测预报及相关环境保障工作,为浒苔防控提供了重要的技术支撑作用,确保了奥帆的顺利举行。在绿潮灾害发生条件与监测、绿潮灾害分子生物学鉴定、绿潮灾害的环境影响、防治技术及消除方法、业务化运行等方面取得了部分研究和进展。该文集是上述应急研究工作的成果之一。

在南黄海浒苔灾害应急研究及业务化保障过程中,得到了国家海洋局科技司、国家海洋局北海分局、中国科学院海洋研究所、国家海洋局第一海洋研究所、中国海洋大学、青岛市海洋与渔业局和其他单位的大力支持,谨此表示衷心感谢。由于时间、条件和水平所限,文集中错误和不当之处在所难免,恳请领导和专家批评指正。

编 者

2009年1月

目次

浒苔应急研究工作进展初步分析与对策	杨建强, 高振会, 张洪亮, 等 (1)
青岛浒苔绿潮消长过程及主要环境变化	张洪亮, 张爱君, 李继业, 等 (6)
浒苔对无机氮、磷吸收速率的初步研究	齐衍萍, 冷宇, 张琦, 等 (13)
浒苔的生长特征	杨东方, 高振会, 杨春茹, 等 (19)
温度对浒苔生长影响的初步研究	冷宇, 齐衍萍, 刘一霆, 等 (25)
温度对浒苔光合作用的影响	冷宇, 齐衍萍, 赵升, 等 (31)
应用分子标记技术 RAPD 初步研究黄海绿潮	张继民, 刘霜, 赵建民, 等 (35)
浒苔属和石莼属间的 ITS 序列比较研究	张继民, 刘霜, 刘涛, 等 (40)
黄海绿潮的 ITS 基因序列比较分析	张继民, 刘霜, 赵建民, 等 (47)
绿潮跟踪监测方案设计	宋文鹏, 杨建强, 陈江麟, 等 (52)
绿潮监视监测与实验综合应用平台设计	宋文鹏, 陈生涛, 陈江麟, 等 (58)
绿潮监视监测与应急处置船顶层设计	宋文鹏, 吕海良, 杨建强, 等 (65)
青岛潮间带生物对浒苔摄食的研究	张晓理, 刘一霆, 冷宇, 等 (71)
青岛近岸浒苔灾害应急管理体系的初步研究	郑琳, 崔文林, 李继业, 等 (75)
2008 年南黄海浒苔暴发的海洋背景分析 I	石强, 杨东方 (80)
2008 年南黄海浒苔暴发的海洋背景分析 II	石强, 杨东方 (92)
2008 年南黄海浒苔暴发的海洋背景分析 III	石强, 杨东方 (100)
绿潮研究进展	张静, 熊正, 姚雪, 等 (107)
浒苔漂流聚集绿潮现象的初步研究	姚雪, 马牧, 刘岩, 等 (115)
石莼科海藻系统分类与遗传鉴定研究	刘岩, 于丹, 张静, 等 (122)
浒苔 cDNA 文库构建、EST 测序与功能分析	刘岩, 马牧, 张静, 等 (137)
石莼科海藻 EST 资源的 SSR 信息分析	张磊, 王国良, 刘岩, 等 (144)
浒苔 SSR 富集文库建立及 SSR 标记筛选	王绪敏, 王丽, 于丹, 等 (152)
黄海浒苔 <i>rbcL</i> 、ITS 及 18sRNA 分析	于丹, 刘翠, 姚雪, 等 (161)
黄海漂浮浒苔遗传鉴定及群体遗传结构分析	张静, 刘翠, 刘岩, 等 (169)
2008 年黄海浒苔绿潮灾害遗传溯源初步研究	刘涛, 刘岩, 张继民, 等 (177)

青岛海区浒苔 (<i>Enteromorpha prolifera</i>) 藻际细菌的遗传多样性	
.....	刘翠, 张德超, 刘岩, 等 (184)
2008 年黄海绿潮的特点分析	杨东方, 高振会, 黄宏, 等 (192)
卫星遥感技术在浒苔灾害中的应用	杨东方, 黄宏, 高振会, 等 (196)
浒苔绿潮的发展过程及应急措施	高振会, 杨东方, 李继业, 等 (199)
绿潮监测预警体系的构建	高振会, 杨东方, 李继业, 等 (204)

浒苔应急研究工作进展初步分析与对策

杨建强^{1,2}, 高振会^{1,2}, 张洪亮^{1,2}, 李继业^{1,2},
宋文鹏^{1,2}, 冷宇^{1,2}

(1. 国家海洋局 北海环境监测中心, 山东 青岛 266033; 2. 国家海洋局海洋溢油鉴别与损害评估技术重点实验室, 山东 青岛 266033)

摘要: 在 2008 年青岛浒苔防控工作中, 国家海洋局北海环境监测中心开展青岛近海浒苔水质监测、浒苔室内生态实验、围隔实验、小规模中试等大量工作, 在深入了解国外浒苔防控进展中, 较深入进行了浒苔对环境影响、浒苔生长速度、现场快速消除方法、浒苔死亡后对水质环境影响及关键控制环境因子等方面的研究, 取得了阶段性研究成果, 为浒苔防控发挥了重要作用。本文通过对上述成果的分析, 提出了下步研究工作的设想, 以期对浒苔防控工作提供科学依据。

关键词: 浒苔; 防治; 应急研究

2008 年 5 月在黄海南部暴发的浒苔灾害是我国暴发海域面积最大、危害最为严重的一次绿潮灾害, 由于浒苔在青岛附近海域大规模聚集, 对 2008 年青岛奥帆赛构成极大威胁。国家和地方各级政府投入大量人力、物力和财力开展了许多应急研究, 并进行了一个多月的打捞、清运, 才基本保证了帆船赛的顺利举办。国家海洋局北海环境监测中心作为浒苔防控的一线机构, 开展了环境监测、浒苔室内实验及现场围隔实验等工作, 对浒苔灾害的环境影响, 快速处置及关键控制因子方面进行了大量的较为深入的应急研究, 为浒苔应急指挥部提供了快速有效的决策依据。本文将上述应急研究工作进展进行初步分析, 提出下步工作设想, 以期对将来可能发生的绿潮灾害的有效防控提供科学依据。

1 水质监测成果初步分析

监测范围主要包括青岛市所辖海域, 南至潮连岛, 面积约 1 500 km², 布设 43 个站位, 自 2008 年 5 月 19 日至奥帆赛结束每天监测一次, 监测项目主要是水质要素、生物要素。2008 年 5 月 19 日至 2008 年 7 月 21 日监测海域监测结果显示:

(1) 浒苔灾害发展阶段, 溶解氧平均浓度变化不明显, 均符合功能区海水水质要求;

(2) 浒苔灾害发展阶段, 化学耗氧量平均浓度变化不大, 均符合功能区海水水质要求;

(3) 浒苔灾害发展阶段, 无机氮浓度总体呈下降的趋势, 均符合功能区海水水质要求;

(4) 浒苔灾害发展阶段, 磷酸盐含量总体呈下降趋势, 均符合功能区海水水质要求;

(5) 浒苔大量出现后, 青岛近岸海域营养盐、溶解氧浓度等水质环境指标优于往年, 浒苔生长期对海水水质不会产生不良影响。浒苔生长可消耗营养盐, 在一定程度上可起降低海水营养盐浓度, 改善水质的作用。

2 浒苔生长的限制因子

2.1 光照

试验水体为 1 L, 试验光强分别为 480 lux、270 lux 和 5 lux, 试验浒苔为 5 g; 从实验室培养的浒苔中挑选色泽明亮的绿色藻体, 放入玻璃缸 (试验光强 480 lux) 中培养观察。一天之后藻体仍漂浮于水面, 保持旺盛的生长状态。此时将藻体移至 2 L 的大烧杯中, 加满新鲜海水, 将烧杯放置在避光处 (试验光强 5 lux), 观察浒苔在无光照条件下的生长状态。48 h 之后再烧杯移至光照条件下 (试验光强 270 lux), 观察浒苔的生长状态。

实验结果表明, 浒苔的沉浮主要受藻体间浒苔光合作用产生的氧气所决定, 氧气多, 则浒苔漂浮水表面, 当处于暗光条件下, 浒苔的呼吸用于大于光合作用产生的氧量, 藻体间的氧气被吸收, 则浒苔沉入水底。受光照影响的浒苔的沉降是可逆过程。沉至水底的浒苔并没有死亡, 其显微结构仍然保持正常。此时只要再给予充足的光照, 浒苔仍可重新开始光合作用并恢复生长。

2.2 温度

试验水体为 8 L, 光强为 448 lux, 试验浒苔为 20 g, 海水盐度为 31.310; 实验共设 8 个玻璃缸以养殖浒苔。每个缸中注入海水, 并设为不同的温度梯度 (自室温至 31℃ 共设 8 个温度梯度), 使用加热棒控制缸中的水温。

实验结果表明, 30℃ 的高温在 24 h 之内对浒苔的生长形态没有明显影响, pH 和 DO 浓度测试结果表明, 试验藻体处于良好的生长期。营养盐的测定显示, 浒苔能够迅速消耗水体中的营养物质, 各个缸中浒苔消耗氮、磷的量基本一致, 浒苔对低浓度的营养盐利用率较低。

2.3 营养盐

试验水体为 10 L, 光强 567 lux, 浒苔 20 g, 实验共设 5 个玻璃缸以养殖浒苔。每个缸中注入海水, 置于室温下培养。01 缸中只加入 NH_4Cl ; 02 缸中加入 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 ; 03 缸中只加入 KH_2PO_4 ; 04 缸中不加营养盐, 为浒苔空白对照; 05 缸中不投放浒苔, 为海水空白对照。

实验结果表明, 营养盐浓度可成为浒苔生长的限制性因素。浒苔在吸收水体中氮、磷时, 其间不存在某种比例关系, 也没有因某项营养盐浓度降低而影响另外一类营养盐吸收的限制性因子关系。浒苔吸收各类营养成分时, 可能存在着某个下限阈值, 当营养盐浓度高于这个阈值时, 浒苔能够快速利用吸收, 反之, 低于此浓度时, 浒苔生长将处于受限状态。

3 下沉浒苔对环境影响

实验时间为 2008 年 7 月 14 ~ 30 日, 实验地点在青岛中苑码头, 共三组围隔装置进行实验, 一号围隔加入 10 kg 浒苔 (部分下沉), 二号加入 10 kg 浒苔 (实验开始后第 8 天完全下沉), 三号加入 10 kg 经 60℃ 高温水浸泡后浒苔 (实验开始后第 3 天完全下沉)。围隔实验研究的重点主要是下沉浒苔漂浮情况和对水质的影响。实验结果表明:

(1) 浒苔下沉情围隔现场中的下沉浒苔没有出现上浮现象, 但将已下沉的浒苔捞出在室内进行光照培养 24 h 后, 浒苔完全上浮;

(2) 浒苔完全下沉后围隔内海水中总有机碳的含量持续升高, 说明浒苔下沉后向海水缓慢释放总有机碳;

(3) 硫化物含量首先维持在低水平, 实验第 10 天后突然升高, 其中高温致死浒苔围隔内硫化物的释放是在浒苔完全下沉 (完全下沉时间是实验第 3 天) 后实验后第 8 天, 由前一天的 1.14 $\mu\text{g/L}$ 升高到 883 $\mu\text{g/L}$, 升高了 775 倍;

(4) 微生物的数量也是在实验开始后第 11 天达到最大值, 硫化物的产生与微生物特别是硫化细菌降解浒苔有关。

(5) 浒苔在生长过程中, 消耗水中的氮、磷, 并且吸收水体中 CO_2 , 表现为海水中的磷酸盐, 无机氮浓度降低, pH 值增加。浒苔死亡后, 藻体分解释放磷酸盐、有机碳, 使得围隔中磷酸盐、总有机碳浓度升高。同时, 死亡的藻体在分解过程中需要消耗大量的氧, 使得围隔中溶解氧下降, 化学需氧量升高。

4 浒苔消除化学方法

实验设为浓度 100×10^{-6} 的硫酸铜、浓度 200×10^{-6} 的“84”消毒液、浓度 200×10^{-6} 饱和碘液、空白对照 4 个围隔, 每个围隔内放入 250 g 浒苔。向各围隔内加入不同的化

学药剂,观察浒苔藻体的色泽变化、细胞形态变化,判断浒苔死亡情况。

实验结果表明浓度为 100×10^{-6} 的硫酸铜和浓度为 200×10^{-6} 的“84”消毒液对浒苔具有较好的杀灭作用,浓度为 100×10^{-6} 的硫酸铜在 24 h 时可以使浒苔死亡率达到 100%,浓度为 200×10^{-6} 的“84”消毒液在 2 h 可使 40% 的浒苔变白,在 3 d 后浒苔的死亡率达到 100%。浓度为 200×10^{-6} 饱和碘液在 24 h 浒苔的死亡率仅为 10%,说明碘液对浒苔的杀灭效果不好。对照组浒苔生长良好。“84”消毒液杀灭浒苔进行中试扩大试验,发现“84”消毒液杀灭浒苔的杀灭作用主要集中于表层浒苔。

5 工作设想

由于上述浒苔应急研究是在很短的时间内开展,因而实验方案的设计、实验结果的准确性与精确性均存在一定的问题。为更好地开展浒苔防控应急管理工作,需要在上述初步研究结果的基础上,深入开展浒苔机理研究和业务化支撑技术研究,达到对浒苔灾害的早期发现、跟踪监测、准确预报以及快速处置。

(1) 应着重开展浒苔卫星遥感、航空遥感、浮标监测、船载快速监测以及水下浒苔监测和岸基地波雷达、远程视频监控技术研究,发展基于多源数据的信息融合技术,形成包括卫星、航空、浮标、船载、沿海台站在内的浒苔立体监测技术体系。

(2) 应采用气候模式、生态动力学模式和浒苔漂移模式对浒苔的生长、暴发、迁移及消亡进行预测预警。开展浒苔暴发的趋势性预测技术研究可给出长期(年度)和中期(季节和月尺度)可能出现浒苔灾害的危险区域以及可能暴发程度的预测,以便提前应对;

(3) 应改造研究浒苔监视监测与应急处置船,研究和安装高效的浒苔应急处置装置,集成浒苔快速现场监视监测系统,使该船可对早期浒苔进行有效监视监测和快速打捞处置,对在环境敏感区、经济热点区分布的浒苔进行高效处置。

(4) 应建立浒苔监视监测与实验综合应用平台,在应用平台上集成多种监视监测手段,实现对浒苔可能大规模暴发区的及时有效监测,提高浒苔灾害预测预警水平,为研究浒苔生消机理和生态环境影响提供统一的现场研究环境与实验平台。

(5) 应研究绿潮灾害发生、发展及消亡后对海洋环境与生态以及社会经济发展的影响,绿潮灾害造成的直接和间接损失,绿潮灾害风险评估,建立海洋环境影响评价与预测、灾害损失评估、风险评价等模式,进行绿潮发生重点海域环境影响评估与预测。

The preliminary analysis and the countermeasure of the *Enteromorpha* emergency research work progresses

YANG Jian-qiang^{1,2}, GAO Zhen-hui^{1,2}, ZHANG Hong-liang^{1,2}, LI Ji-ye^{1,2},
SONG Wen-peng^{1,2}, LENG Yu^{1,2}

(1. North China Sea Environment Monitoring Center, SOA, Qingdao 266033, China; 2. Key Laboratory of Marine Spill Oil Identification and Damage Assessment Technology, SOA, Qingdao 266033, China)

Abstract: In Qingdao's 2008 *Enteromorpha* prevention and control work, the State Oceanic Administration of North China Sea Environmental Monitoring Center (NCSEMC) carried out the Qingdao offshore *Enteromorpha* water surveillance, the *Enteromorpha* indoor ecology experiment, mesocosm experiments, the small scale experiments and many other tasks. After studying the *Enteromorpha* prevention and control progress in other countries, NCSEMC carried out thorough investigations on *Enteromorpha*'s effect on the environment, the *Enteromorpha* growth speed, the effective elimination method on the scene, the impact of dead *Enteromorpha* on water quality, the key factors controlling the environment, etc., and obtained substantial research results. NCSEMC has played a significant role in the prevention and control of *Enteromorpha*. Based on the analysis of the above mentioned research results, this article proposed the plan for further research work, hoping to provide scientific basis for future *Enteromorpha* prevention and control.

Key words: *Enteromorpha*; prevention; emergency research

青岛浒苔绿潮消长过程及主要环境变化

张洪亮, 张爱君, 李继业, 曹丽歆

(国家海洋局 北海环境监测中心, 山东 青岛 266033)

摘要: 2008 年 6~8 月, 青岛近海发生浒苔藻华, 国家海洋局北海分局进行了高频率航空遥感、船舶现场监测, 本文针对藻华消长过程及环境控制因子进行了研究分析, 结果表明: 5 月中旬南黄海中部出现大量漂浮浒苔, 漂浮浒苔随东南季风进入青岛近岸营养盐较丰富的海域开始快速增长, 远岸持续输入和生物量快速增长最终在青岛近海形成浒苔藻华。海水透明度高、营养盐丰富、光照充足和稳定的向岸风是青岛浒苔藻华形成的主要环境控制因子, 而人工打捞、阴雨天光照不足和海水磷酸盐浓度低为浒苔藻华衰退消亡的主要原因。

关键词: 浒苔绿潮; 环境因子; 营养盐

1 引言

近年来, 随着全球气温变暖和海洋环境污染加重, 定生大型绿藻进入漂浮状态暴发性增殖形成绿潮已是世界新型的海洋生态问题, 欧美国家及澳洲等地均有绿潮暴发的报道。2008 年 6、7 月间, 青岛沿海暴发浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 绿潮灾害, 严重时 90% 以上的海面被绿色漂浮浒苔藻团所覆盖, 严重威胁着奥帆赛的顺利进行。浒苔为海洋大型定生藻类, 属绿藻门, 石莼科, 浒苔属, 为广温广盐种类, 在我国沿岸广泛分布^[1]。本文通过分析描述 2008 年青岛浒苔绿潮的消长过程及其主要环境因子的变化情况, 为我国的绿潮研究积累基础资料。

2 材料与方法

黄海中部漂浮浒苔区现场监测于 2008 年 5 月 31 日进行, 监测站位 35°55′30.0″N, 121°06′48.2″E。沿岸浒苔绿潮现场监测于 6 月 22 日至 9 月 15 日进行, 每天监测 1 次, 监测站位见图 1。

基金项目: “908 专项” 评价研究课题, 赤潮灾害、海洋病原生物和外来生物入侵灾害调查与研究 (908-02-ZH3)。

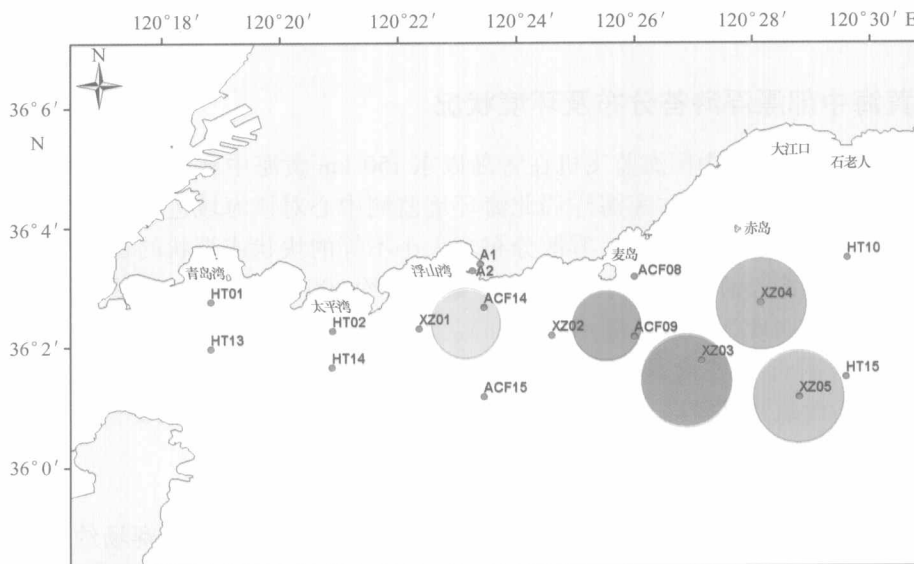


图 1 监测站位图

有些航次在浒苔密集区增加监测站位，个别航次因天气和恶劣海况等原因对监测站位进行临时调整。监测项目有硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、磷酸盐、COD、DO、pH 等，并进行现场浒苔覆盖率观测和浒苔样品采集。水质项目样品采集、分析均按《海洋监测规范》（GB12763-2007）的技术要求进行。大范围浒苔绿潮覆盖率和分布面积资料引用国家海洋局北海分局青岛浒苔情况通报，其资料来源为航空遥感解译和海监船舶现场观测。

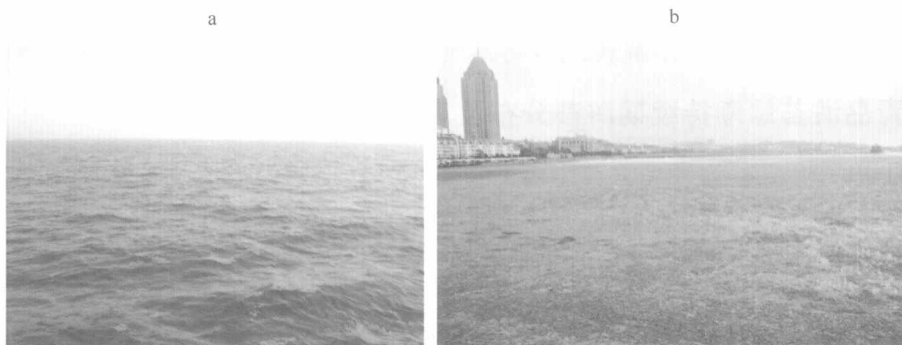


图 2 浒苔绿潮现场照片

a. 2008 年 5 月 31 日黄海中部浒苔分布情况；b. 2008 年 6 月 20 日青岛沿岸浒苔分布情况

3 结果与讨论

3.1 黄海中部漂浮浒苔分布及环境状况

2008年5月30日中国海监飞机在青岛以东150 km 黄海中部海域发现海水颜色异常, 疑是赤潮。5月31日国家海洋局北海环境监测中心对该海域进行了应急监测, 监测结果表明: 该海域水深45 m, 零散分布着大小不等的块状或带状的黄绿色大型漂浮浒苔, 大多数的漂浮浒苔藻团为 $1 \sim 3 \text{ m}^2$, 最大的约 $300 \sim 600 \text{ m}^2$, 漂浮浒苔藻团间隙海水的水色、透明度无明显异常(见图2a)。漂浮浒苔处于存活状态。

漂浮浒苔附近海域营养盐浓度较低, 无机氮浓度为 $55.7 \mu\text{g/L}$, 磷酸盐浓度为 $6.2 \mu\text{g/L}$, 溶解氧浓度较高, 为 8.9 mg/L , 水温 16.44°C , 其他水质要素基本正常。

3.2 青岛沿岸绿潮形成期浒苔分布及环境要素变化

中国海监飞机监视结果表明: 5月30日, 漂浮浒苔距青岛奥帆赛场约150 km, 6月1日漂浮浒苔分布面积约为 $12\,900 \text{ km}^2$, 距青岛奥帆赛场最近距离60.3 km。漂浮浒苔呈条带状分布, 覆盖率不足1%。6月5日, 漂浮海藻异常海域距青岛市距离缩至39 km。6月11日, 漂浮海藻漂移至大公岛附近海域, 接近青岛沿岸。6月15日, 青岛崂山头至薛家岛岸段滩涂高潮线附近出现堆积浒苔。青岛市政府组织数百艘渔船打捞漂浮浒苔, 每天打捞量在数千吨左右, 而青岛沿岸浒苔覆盖率持续增长, 6月19日, 胶州湾口至沙子口近岸3 km 范围内浒苔覆盖率已达20%以上。漂浮浒苔在青岛沿岸海域形成绿潮。

浒苔绿潮形成后, 奥帆赛场海域营养盐浓度明显下降, 浒苔暴发前无机氮含量平均值为 $279.0 \mu\text{g/L}$, 浒苔暴发后6月22日, 无机氮含量平均值为 $177.2 \mu\text{g/L}$, 下降了 $101.8 \mu\text{g/L}$, 浒苔暴发后磷酸盐浓度大幅度下降, 奥帆赛场附近海域平均浓度为 $9.3 \mu\text{g/L}$, 化学耗氧量、溶解氧、pH 等水质指标均符合 I 类海水水质标准。

3.3 青岛浒苔绿潮持续期浒苔分布及环境要素变化

6月19~30日, 为青岛浒苔绿潮的持续期, 这期间沿岸海域浒苔覆盖率保持在30%以上, 见图2b。其中, 6月27~28日, 青岛近岸浒苔密度达到最高峰, 大部分沿岸海域浒苔覆盖率达75%以上, 浮山湾外约1 km 宽, 6 km 长的海面全部被漂浮浒苔所覆盖。

浒苔生长消耗大量营养盐^[2]。6月22~26日绿潮海域无机氮浓度大幅度下降, 平均浓度由 $177.2 \mu\text{g/L}$, 降至 $86.6 \mu\text{g/L}$, 下降了48.9%。磷酸盐也呈下降趋势, 6月28日磷酸盐平均浓度 $2.7 \mu\text{g/L}$, 浒苔藻盖间隙海水中磷酸盐浓度达到 $1.4 \mu\text{g/L}$, 接近植物吸收营养盐浓度的理论低限, 形成磷限制(图3)。6月26日溶解氧和COD 浓度达到最高值。

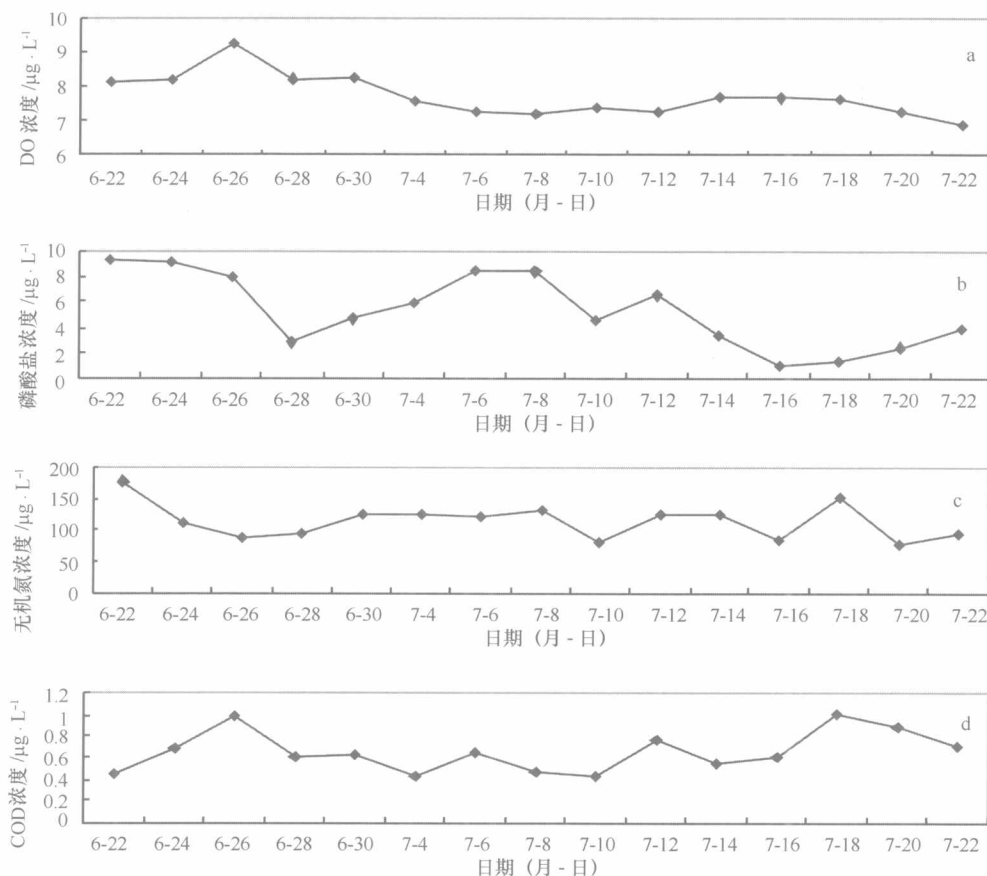


图3 青岛奥帆赛场浒苔绿潮暴发后主要水质指标变化情况

3.4 青岛浒苔绿潮衰退期浒苔分布及环境要素变化

7月2日,青岛沿岸海域浒苔大量下沉,浒苔绿潮进入衰退期。7月3日清晨,青岛沿岸浒苔覆盖度锐减,海面上仅有少量漂浮浒苔,见分布图4。6月30日,青岛沿岸海域浒苔分布面积 500 km^2 ,浒苔实际覆盖面积 94 km^2 。7月2日,浒苔覆盖面积 48.8 km^2 。7月3日下午,船舶监测显示青岛奥帆赛区及邻近海域浒苔密集度已明显减少。7月4日上午,奥帆赛场海域内浒苔分布面积 0.31 km^2 ,占赛场海域总面积的 0.62% ,浒苔实际覆盖面积 0.0155 km^2 ,占赛场海域总面积的 0.031% 。浒苔覆盖面积明显减小。其后的底拖网和潜水调查证实,浒苔沉降至海底。7月1日,青岛地区下雨,2~4日多云。相关的浒苔室内实验已证明,光照强度不足,可引起浒苔下沉^[2-3]。阴雨天气,光照不足是7月5日青岛近海浒苔下降的重要原因之一。

人工打捞效率提高,是青岛近岸浒苔绿潮衰退的又一重要原因,其打捞能力见图5。7月8日,围油栏,高架网防线建成,青岛近岸浒苔明显减少。7月16日,浒苔清除工作取得阶段性胜利,通过省长验收。浒苔消除工作重心转向外围拦截。8月8日,奥帆赛场及邻近海域零星浒苔分布。

6月28日,浒苔绿潮发生区磷酸盐达到最低点,6月30日至7月1日,青岛地区有降雨,且浒苔下沉后,浒苔生物量锐减,营养盐消耗量减小,青岛近海磷酸盐、无机氮浓度逐渐上升,7月4日,磷酸盐平均浓度为 $5.94\text{ }\mu\text{g/L}$,无机氮平均浓度为 $126\text{ }\mu\text{g/L}$ 。从另一角度证实了浒苔绿潮暴发,消耗营养盐,营养盐浓度低可对绿潮起限制作用。

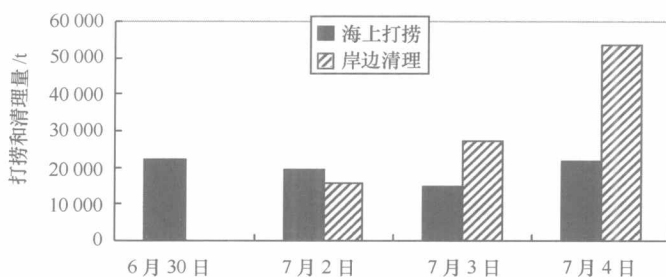


图5 浒苔下沉期间青岛近海浒苔打捞量统计图

4 小结

- (1) 黄海中部漂浮浒苔输送和近岸海域营养盐丰富是形成青岛浒苔绿潮的主要原因。
- (2) 浒苔绿潮生消过程中消耗大量营养盐,导致青岛海域磷酸盐浓度显著下降。
- (3) 人工打捞、浒苔下沉和磷营养盐限制是青岛浒苔绿潮衰退的主要原因。

参考文献

- [1] 王晓坤,马家海,叶道才,等. 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)生活史的初步研究[J]. 海洋通报, 2007,26(5):112-116.
- [2] 吴洪喜,徐爱光. 浒苔实验生态的初步研究[J]. 浙江海洋学院学报,2000,19(3):230-233.
- [3] 王建伟,林阿朋,李艳燕,等. 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)藻体发育的显微观察[J]. 生态科学, 2006,25(5):400-404.