

黄海海域大规模绿潮成因与应对策略 ——“鳌山计划”研究进展*

颜 天^{1, 2, 3} 于仁成^{1, 2, 3} 周名江^{1, 2, 3} 孙 松^{1, 2, 3①}

(1. 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266071; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071)

摘要 在青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山计划”支持下, 本项目围绕黄海大规模浒苔绿潮的防控减灾, 联合山东和江苏两地多个单位协作攻关, 于 2016 年到 2018 年展开了多学科交叉研究, 通过对绿潮藻浒苔(*Ulva prolifera*)的附着、入海等行为的加密观测, 在大规模浒苔绿潮成因机制和防控策略方面取得了重要进展, 确认了苏北浅滩源地, 确认本海区大量紫菜(*Pyropia yezoensis*)栽培筏架提供的大面积合适附着基、典型的富营养化环境特点以及北向风生流是黄海大规模浒苔绿潮形成的重要条件。本项目解决了以下几方面的问题: 1. 锁定关键时段和海域并开展打捞船与无人机配合打捞; 2. 发现苏北浅滩存在独特浒苔种源; 3. 定量化研究了紫菜筏架拆除时人为去除筏架及缚绳上的附生绿藻量, 明确这一过程大大促进了浒苔大量集中入海, 成为浒苔绿潮形成的重要环节; 4. 定量化研究了浒苔在向北漂移, 生物量和分布不断增加的过程; 5. 依据对浒苔绿潮的源头及其早期发生、发展几个关键过程的科学认识, 提出了设置三道防线进行浒苔绿潮防控的策略以及在苏北浅滩开展浒苔绿潮初始生物量源头控制的具体建议。6. 评价了浒苔绿潮对生态环境和养殖业危害的同时, 关注了高生物量输入对受灾地可能带来生物北侵的生态风险。7. 为保障 2018 年青岛上合峰会, 项目组先期提交了绿潮防控建议, 部署和开展的各项研究和现场调查结果对绿潮的预测防控提供了有力支撑。同时本项目还针对浒苔绿潮灾害的年际变化、马尾藻(*Sargassum* sp.)金潮灾害加剧、南黄海“三潮齐发”的复杂态势等新问题展开了观测与研究, 为进一步制订更科学高效的防灾减灾方案, 阐明全球变化和人类活动影响下的我国近海藻华灾害的演变奠定了基础。

关键词 黄海; 浒苔; 绿潮; 成因; 防控

中图分类号 Q14 doi: 10.11693/hyhz20180700156

大型绿藻形成绿潮, 是世界许多沿海国家近海发生的一种海洋生态灾害。自 2007 年至 2018 年, 由大型绿藻浒苔(*Ulva prolifera*)形成的绿潮在南黄海连年暴发, 对山东、江苏沿岸的旅游、生态环境和海水养殖业造成了巨大危害, 社会关注度极高。每年夏季, 受绿潮影响地区的政府部门都需要投入大量人力、物力, 对沿海一线绿藻进行收集、打捞和处理, 如何应对绿潮问题已经成为地方政府部门每年必须面

对的一项重要任务。针对黄海绿潮问题, 在国家相关部门和地方政府支持下, 国内学者围绕绿潮问题, 在绿潮原因种鉴定、绿潮早期发展过程和绿潮监控技术方面开展了大量研究工作(Sun *et al*, 2008; Han *et al*, 2013; Liu *et al*, 2013; Wang *et al*, 2015; Zhou *et al*, 2015), 为政府部门应对绿潮问题提供了重要支撑。

青岛海洋科学与技术国家实验室高度重视浒苔绿潮灾害问题, 于 2016 年设置了鳌山科技创新计划

* 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目, 2016ASKJ02 号; 中国科学院战略性先导科技专项(A 类)资助, XDA11020304 号; 国家自然科学基金委-山东省联合基金项目, U1606404 号。颜 天, 研究员, E-mail: tianyan@qdio.ac.cn

通讯作者: 孙 松, 博士生导师, 研究员, E-mail: sunsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2018-07-02, 收修改稿日期: 2018-08-15

项目“近海生态灾害发生机理与防控策略”, 对我国近海赤潮、绿潮、水母等生态灾害, 设置六个课题, 开展灾害成因和防控策略研究。在针对黄海绿潮问题设置的课题中, 项目首席孙松研究员组织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、江苏省海洋水产研究所、淮海工学院、中国科学院烟台海岸带研究所、中国水产科学院黄海水产研究所和青岛海大生物集团等单位协作攻关绿潮问题。在鳌山科技创新计划项目和科学院先导专项项目的联合支持下, 项目组通过实施实时观测和实验室分析, 并根据前期重要过程现场数据, 于青岛海洋科学与技术国家实验室召开的 2017 年黄海浒苔绿潮发展态势研讨会上成功预测了当年黄海绿潮规模将显著低于往年, 并提出了设置几道防线进行浒苔绿潮防控的策略(<http://www.qnlm.ac/page?a=5&b=3&c=40&d=3&p=detail>)。2018 年为保障青岛上合峰会, 项目组先期提交了绿潮防控建议, 部署和开展了各项研究和现场调查, 为预测防控提供了有力支撑。在国家和江苏当地部门对江苏浅滩区绿

藻源头调控的有力措施下, 2018 年浒苔绿潮整体规模显著降低。

本文将就项目开展以来在绿潮成因、预测预警和防控策略方面形成的科学认识进行汇总, 以期为进一步的科学研究和管理提供科学支撑。

1 浒苔绿潮溯源的生物学、生态学和海洋学研究

项目组自 2016 年 3 月到 2018 年 6 月, 在南黄海和苏北浅滩海域先后组织了 23 个调查航次(图 1, 2), 由山东和江苏两地科学家共同采集样品, 开展海上多船同步联合调查, 应用遥感卫星和无人机与现场调查实施实时观测, 针对不同的调查研究目标和内容, 获取了大量的现场数据和样本, 采用了多种研究技术手段及其组合展开实验室分析。

1.1 高生物量浒苔漂浮藻体源自苏北浅滩

高分辨卫星遥感、多学科现场航次观测和卫星浮标监测结果均表明了黄海浒苔绿潮源自江苏浅滩, 向北漂移输送到山东南岸成灾的过程。

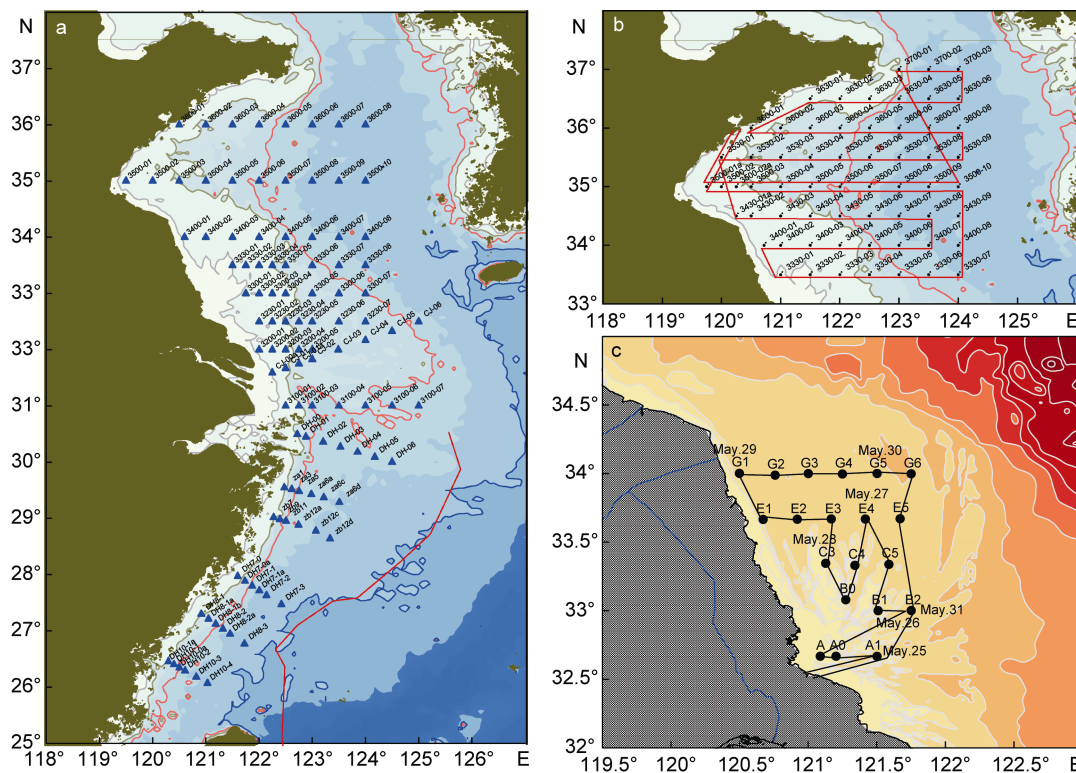


图 1 2016—2018 年项目调查的主要站位

Fig.1 The deployment of major investigation stations in 2016—2018 in (a) the Yellow Sea and the East China Sea; (b) the South Yellow Sea; and (c) the Subei Shoal

注: a: 黄东海; b: 南黄海; c: 苏北浅滩

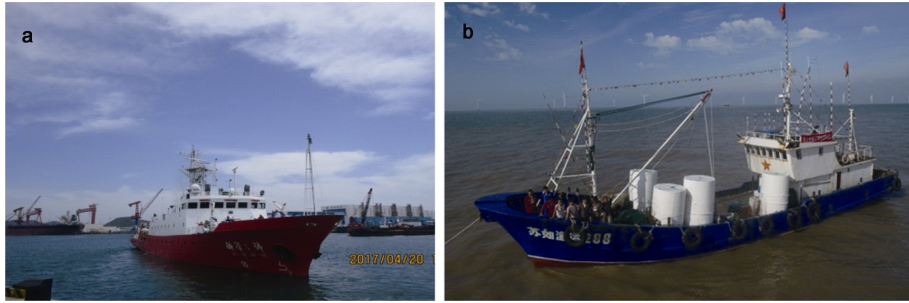


图 2 项目调查所用主要船只

Fig.2 Main research vessels used in the field investigation

注: a: 科学三号; b: 苏如渔 288

图 3 是利用卫星遥感技术和“科学三号”考察船现场调查结果显示的 2016 年 4 月 29 日到 6 月 25 日绿潮的起源与发展, 利用此技术发现最早的漂浮浒苔出现在苏北浅滩, 随着时间漂浮浒苔由南到北的分布范围逐渐增加。

图 4 为 2017 年 5 月下旬卫星漂流浮标轨迹图, 显示了浒苔能够自苏北浅滩到达青岛近海。

1.2 苏北浅滩存在南黄海绿潮优势种独特种源

1.2.1 历年浒苔绿潮的优势种为“漂浮生态型”浒苔

通过对南黄海绿潮优势种浒苔遗传特征的分析表明, 自 2007 年到 2017 年黄海海域十一年来形成大规模绿潮的优势种相同, 而且具有“漂浮生态型”种下水平的共性, 这种“漂浮生态型”又具有有别于我国近海其他的浒苔群体的个性, 在江苏和山东等近岸定生种群中都没有发现(姜鹏等, 2018)。“漂浮生态型”浒苔的发现恰当地体现了南黄海绿潮优势群体的共性与个性, 针对“漂浮生态型”检测而发展的 SCAR 特异分子标记, 为浒苔的溯源提供了有力的技术支持。

1.2.2 苏北浅滩区发现“漂浮生态型”浒苔种源

本项目利用 SCAR 特异分子标记开展溯源研究, 2016 年和 2017 年在南黄海的大规模绿潮的绿藻群体中、苏北浅滩漂浮绿藻群体中、苏北浅滩水体和沉积物的微观繁殖体中均检测到了“漂浮生态型”浒苔, 从生物学角度证明了南黄海浒苔的种源地是苏北浅滩; 2017 年再次在绿潮发生同期采集江苏的岸基定生绿藻, 未检出“漂浮生态型”浒苔, 从种源和生物量两个方面排除了来自岸基定生的可能性。

2 浒苔的附生过程

2.1 “漂浮生态型”浒苔微观繁殖体的时空分布

在浅滩海域水体和表层沉积物中一年四季都存在浒苔和绿藻的微观繁殖体, 夏季的丰度明显降低, 总体以曲浒苔为优势种, 浒苔的微观繁殖体丰度一直相对较低。本项目还进行了浅滩沉积物的垂直采样, 在 17 厘米深层中都有浒苔和绿藻微观繁殖体(刘峰等, 2018), 预示着浒苔等绿藻的微观繁殖体能在条件不

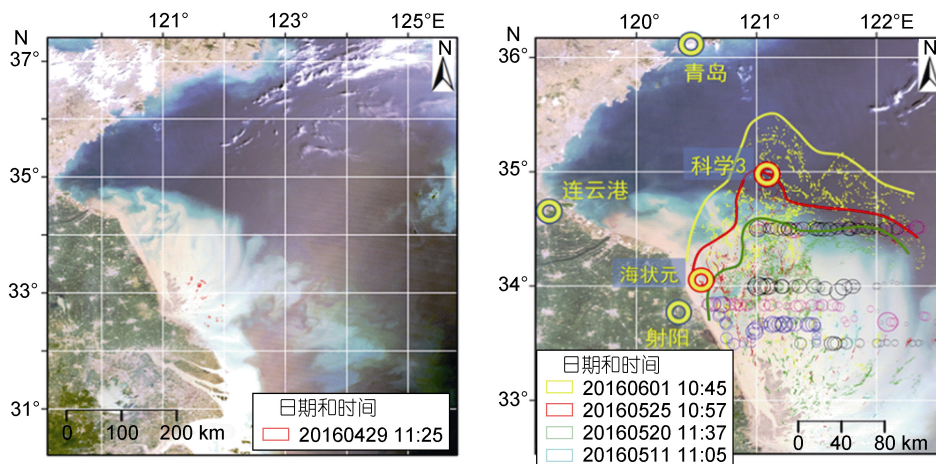


图 3 利用卫星遥感技术和“科学三号”考察船现场调查结果显示的 2016 年绿潮起源与发展(图片来自邢前国)

Fig.3 The origin and development of green tide in 2016 obtained by satellite remote sensing and field investigation results of R/V Science 3 (photos taken by XING Qian-Guo)

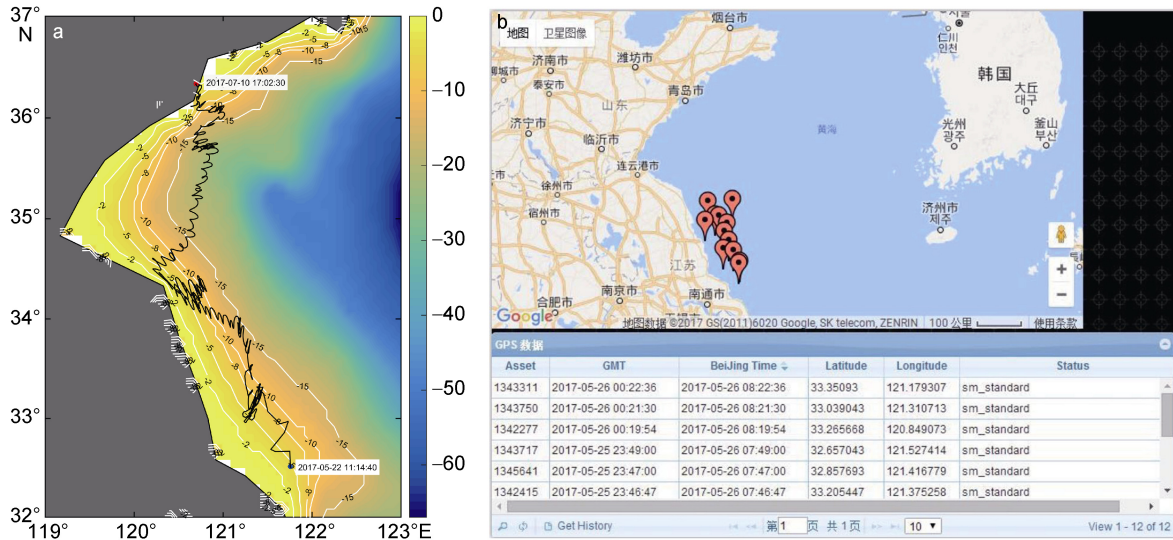


图 4 卫星浮标示浒苔漂移路径

Fig.4 The trajectory of *Ulva prolifera* bloom movement indicated by satellite buoys

注: a: 浮标漂移轨迹; b: 浮标投放起始点

利的情况下休眠, 在条件合适时附着萌发, 发育为成体, 产生孢子囊释放孢子进行大量繁殖(郑阵兵等, 2018)。

2.2 以泥沙为附着基生长

大型藻的生活史中存在必需的固着过程, 本项目进行了浒苔微观繁殖体在泥沙颗粒附着萌发形成绿潮的过程, 在几个航次中通过拖网采样, 发现了由微观繁殖体固着在悬浮泥沙颗粒上生长并发育成苗体的浒苔和其他绿藻, 但与筏架附着的相比, 数量非常少, 不是绿潮高生物量的主要来源(刘峰等, 未发表数据)。

2.3 以紫菜栽培筏架为附着基

在苏北浅滩具有约 35 万亩紫菜(*Pyropia yezoensis*)栽培筏架, 筏架设施绳、竹竿、以及紫菜生长不良的网帘等提供了大量的附着基, 富营养化环境提供了各种藻类生长的物质基础, 常年附生大量绿藻, 一直是影响紫菜栽培的严重问题。绿藻主要为盘苔(*Blidingia minima*)、曲浒苔(*Ulva flexuosa*)、缘管浒苔(*Ulva linza*)、扁浒苔(*Ulva compressa*)等, 浒苔(*Ulva prolifera*)通常不是优势种。

本项目在与之邻近的连云港海域也开展了采样调查, 虽然该海域也有约十万亩栽培紫菜, 但在筏架附生绿藻和水体微观繁殖体中并没有检出“漂浮生态型”浒苔, 该海域每年亦受浒苔绿潮过境困扰, 但并非绿潮源头。苏北浅滩独有的种源和环境条件, 为浒苔绿潮源头的两个重要缺一不可的方面。

2.4 春季是浒苔在筏架上附生的关键时段

自秋冬季开始, 苏北浅滩布施紫菜筏架开始紫菜栽培, 绿藻也随之附着, 养殖户采取涂酸等方法进行绿藻防控, 但很难去除。研究发现通常每年春季, 随水温上升, 绿藻生物量迅速增加, 通常 4 月以前, 筏架上混合绿藻中浒苔的优势度较低, 是以盘苔、曲浒苔等为优势, 4 月中旬、水温在 15°C 时, 浒苔在混合绿藻中优势度不断增加, 到 5 月份时生物量最高能达到绿藻总生物量的 40%以上。秋季有时也能检出浒苔, 通常生物量较低, 而且由于不耐低温, 冬季过后, 浒苔在筏架上基本消失。因此, 四月和五月份是进行浒苔绿潮起始生物量储备的关键时段。

3 浒苔大量集中入海的过程

绿潮是绿藻由附生状态到漂浮状态改变, 占据新的生态位而形成。在苏北浅滩, 春季也是紫菜完成收获后紫菜筏架大量拆除回收的重要时间段, 本项目开展了浒苔在人为和自然两个过程作用下入海量的比较研究。研究表明, 春季筏架拆除过程是造成浒苔和其他绿藻大量集中入海由附生到漂浮的关键过程。

3.1 冬春季筏架回收

2017 年 3 月底和 4 月初, 本项目进行现场调查发现, 在紫菜筏架拆除过程中, 绳上的绿藻量不多, 不做处理直接回收, 但还是有部分绿藻会脱落。另外发现, 近年来附生大量绿藻的紫菜网帘直接回收, 这些绿藻基本不会入海(图 5)。



图 5 紫菜筏架拆除回收过程中绿藻脱落入海(照片来自姜鹏)

Fig.5 Green algae falling into the sea during the withdrawal of *Pyropia* aquaculture rafts (photos taken by JIANG Peng)

注: a: 紫菜筏架拆除回收; b: 2017-3-31, 绳绳收集, 生物量少, 未刷削处理

3.2 人为去除与自然脱落过程的比较

4 月中旬之后, 绳绳上绿藻量增加了几倍, 为便于回收, 绳绳上附生的大量绿藻被去除并遗落浅滩, 然后随潮汐入海(图 6), 这些含有浒苔的绿藻是早期绿潮的源头, 根据定量测定绳绳上绿藻生物量, 估算出

苏北浅滩的整体绿藻入海量为 2.5 万吨; 在自然状况下, 在风浪和潮汐作用下, 绿藻也能脱落入海, 但脱落比例相对较低(张清春等, 2018)。可见, 人为去除过程大大促进了浒苔等绿藻由附生状态到漂浮状态的变化, 浒苔大量集中入海成为浒苔绿潮形成的关键过程。



图 6 绳绳回收过程中人为去除大量绿藻(照片来自张清春)

Fig.6 Large amounts of green algae were removed artificially during the withdrawal of the ropes (photos taken by ZHANG Qing-Chun)

4 浒苔绿潮发生发展过程

4.1 漂浮浒苔在竞争中比例上升

含有浒苔的混合绿藻进入苏北浅滩以及南黄海的海水中, 北向风生流的作用是浒苔绿潮发生发展的重要因素。混合绿藻向北漂移并生长, 生物量迅速增加, 其中浒苔的长距离漂移和漂浮生长能力以及抗逆能力非常强, 在漂浮的混合绿藻中优势度不断增加。

4.2 浒苔生长率

浒苔在漂浮情况下生长速度较快, 绿潮在北向风生流的作用下, 进入南黄海, 由于所处的环境不同, 特别是温度、盐度、浊度、光照强度和营养盐等的变化影响下, 在不同海域浒苔的生长率有明显的变化。在苏北浅滩、南黄海和山东近海等不同海域利用现场

海水进行的船基围隔培养实验, 发现在苏北浅滩外 34° 附近的海域生长率最高, 能接近 30%(韩笑天, 未发表数据)。

4.3 绿潮的年际变异

由于浒苔初始生物量和环境因子的不同, 绿潮的时空分布和总体规模每年存在差异, 2016 浒苔绿潮为暴发规模最大的年份之一, 2017 年浒苔绿潮规模显著低于 2016 年绿潮规模, 2016 年 5 月在浅滩可见大片绿潮, 2017 年同期浅滩绿藻分布零星, 2016 年浅滩现场水平拖网测定的绿藻总生物量为 26 万吨湿重, 而 2017 年只有 0.41 万吨湿重, 在南黄海, 2016 年 5 月早期绿潮的绿藻生物量约为 50 万吨, 而 2017 年同期只有 10 万吨左右, 2017 年南黄海绿潮的整体规模显著低于 2016 年。

2018 年在国家和江苏当地部门对紫菜生产和漂

浮绿藻打捞有力的源头控制下, 浒苔绿潮整体规模进一步显著降低。结合遥感观测资料和现场调查数据, 5月下旬仍有部分绿藻自江苏近岸和苏北浅滩东北侧漂移进入南黄海海域, 并在北纬 35°一线形成可见的漂浮绿藻斑块和条带, 漂浮绿藻生物量最大约为 1.8 吨/平方公里, 低于去年同期水平。

5 大规模浒苔绿潮的危害

5.1 对社会和经济的危害

虽然浒苔本身无毒, 但其百万吨级的高生物量超出了人们的应对能力, 形成了生态灾害。在近岸海域和登陆后的堆积、腐败, 威胁着山东南岸的养殖业、旅游业、甚至核电站的正常运转, 清理打捞耗费大量人力物力, 成为社会普遍关注的问题。

5.2 对生态环境的影响

绿潮后期大量漂浮藻类将在海区沉降, 本项目利用 28-异褐藻甾醇作为标志物, 通过 2015 年 8 月和 2016 年 9 月两个航次的调查, 推测山东半岛东南部附近海域(36°—36.5°N, 122°—124°E)为绿潮藻类的沉降区(耿慧霞等, 未发表数据)。研究表明浒苔暴发沉降后未增加山东青岛崂山湾海域龙盘国家级海洋牧场表层沉积物营养性有机质的含量, 但会显著影响海洋牧场表层小型底栖线虫丰度、桡足类丰度及小型底栖动物总丰度。研究还发现在高温、低氧双因素协同作用下, 刺参的耐受性急剧下降, 因此夏季浒苔腐败会对海区刺参养殖造成巨大影响(林承刚等, 未发表资料)。

高生物量浒苔在由江苏到山东南部沿海成灾过程中, 大量生源要素转移、转化分解产物对环境的影响带来生态环境效应值得关注。经测定得知, 以 400 万吨鲜重浒苔生物量计算, 黄海浒苔绿潮每年能从

海水中吸收固定 36 万吨碳、2.3 万吨氮、400 吨磷和 1.6 万吨硫(丁月旻, 2014)。

5.3 生物北侵的生态风险

本项目从生物北侵的新角度, 研究了浒苔绿潮在山东南部沿海成灾过程中, 大量外来生物输入可能带来的生态风险。针对青岛沿海定生石莼属绿藻开展了周年采集, 总结了其多样性组成及季节变动规律, 在 700 多株样本中, 检出两株“漂浮生态型”浒苔的定生样本(Zhao *et al.*, 2018), 预示目前生物北侵的风险不大。但随着紫菜栽培产业北移, 在山东附近海域的紫菜栽培和其他养殖设施不断增加, 以及气候变化等多种因素影响下, 入侵风险存在增大的可能性, 值得进一步关注。

6 藻类灾害复杂化多样化

6.1 马尾藻金潮灾害加剧

在 2016 年末至 2017 年初漂浮马尾藻(*Sargassum* sp.)大规模侵入江苏紫菜养殖区, 漂浮藻团最大可达 5 亩, 导致设施损毁紫菜绝收, 仅盐城和南通两地的紫菜行业直接损失超过 5 亿元。本项目春季观测到苏北浅滩仍有大量马尾藻在筏架上缠绕堆积(图 7), 在筏架拆除过程中入海, 有相当数量的马尾藻在南黄海海域与浒苔共同漂浮, 某些站位还出现了绿潮、金潮与赤潮共同发生的罕见现象(孔凡洲等, 2018)。马尾藻引发的金潮是典型的大型海藻藻华, 与绿潮和赤潮均属于有害藻华(HABS, Harmful Algal Blooms)的范畴, 近年来, 大型藻藻华灾害绿潮和金潮在全球呈现明显的上升趋势(Smetacek *et al.*, 2013), 在我国表现尤为显著, 近年来马尾藻金潮在夏季往往伴生浒苔绿潮共同肆虐山东半岛南岸以及大连海域, 马尾藻金潮灾害加剧的现象需要引起足够重视。



图 7 2017 年 5 月苏北浅滩的马尾藻(照片来自刘峰)

Fig.7 Brown alga *Sargassum* in the Subei Shoal in May 2017 (photos taken by LIU Feng)

注: a: 马尾藻大量堆积紫菜筏架; b: 漂浮的马尾藻

6.2 马尾藻金潮与浒苔绿潮的相互制约

漂浮马尾藻损坏了大量筏架设施, 侵占了紫菜和浒苔的生长空间, 处于相似生态位的三种大型藻相互作用相互影响, 成为 2017 年南黄海浒苔的整体发生规模显著降低的重要原因之一。模拟实验结果表明, 马尾藻浸出液可显著降低浒苔配子的附着与萌发, 大型藻种群间制约机制在浒苔绿潮规模中的作用值得进一步研究(耿慧霞等, 未发表数据)。

7 综合应对策略

只有掌握南黄海大规模浒苔绿潮的成因机制, 才能制定高效的防控策略, 开展源头治理抓住关键环节, 达到事半功倍的成效。本项目针对南黄海大规模浒苔绿潮成因机制展开了研究和分析, 结合前人的研究表明其成因主要包括以下三个方面: 生物来源和生物量基础、海域富营养化背景所提供充足的物质基础和春夏季南黄海北向风生流的输送作用, 这三个方面缺一不可, 只要能控制其中一个方面即可防控绿潮, 但在这三个方面中, 春夏季的风向无法控制, 富营养化的难题在近期难以彻底解决, 控制生物来源和生物量成为大规模浒苔绿潮防控的主要方面, 如图 8 所示。

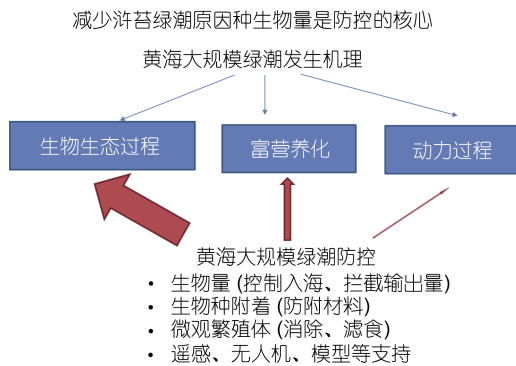


图 8 黄海大规模绿潮发生机理与防控策略

Fig.8 Mechanism of massive formation and the prevention strategy against large-scale green tides in the South Yellow Sea

由于找到了苏北浅滩是大规模浒苔绿潮的源头, 使得浒苔绿潮有可能成为目前唯一能够得到有效控制的近海生态灾害, 从苏北浅滩着手开展浒苔绿潮的源头整治将是最有效的绿潮防控策略。本项目具体开展了以下几个方面研究和现场工作:

7.1 降低浒苔源头生物量

由于绿藻附着也是妨碍紫菜生长、影响紫菜产品品质的问题, 减少筏架上绿藻的附着量对于紫菜栽

培和绿潮防控都有重要意义。本项目开发了防附着涂料和防附着材料并在现场进行了应用(图 9, 10), 制订了《条斑紫菜冷藏网操作技术规范》国家标准。本项目进行了筏架 2016 年和 2017 年绿藻回收情况调查, 并建议在尽可能在 4 月以前回收紫菜筏架, 以降低浒苔附着基面积。



图 9 防绿藻附着涂料的开发与应用

Fig.9 Development and application of coating materials against green algae attachment



图 10 筏架防附着材料的筛选与应用

Fig.10 Selection and application of anti-adhesion materials for building aquaculture rafts

另外, 本项目还开展实验室和现场实验, 利用改性粘土和贝类滤食的滤食作用能够显著地降低微观繁殖体的数量, 以及利用中华原钩虾进行摄食浒苔的效率研究。

7.2 控制入海浒苔生物量、开展早期资源化利用

4 月份中旬以后, 在紫菜筏架回收过程中, 如果将从绳上去除的大量绿藻(含浒苔)收集起来, 减少

入海量, 将大大降低浒苔的初始生物量, 是目前比较可行的控制环节。本项目研究了苏北浅滩的浒苔营养成分, 为开展早期的资源化利用提供支撑, 开发研制了双藻菌露产品、双藻糖肽产品、浒苔多糖锌、浒苔多糖硒等绿藻农用制品。

7.3 打捞区前置

由于处于苏北浅滩区的漂浮绿藻前期生物量低、分布范围相对也小, 因此, 如能将绿潮打捞区前置, 在苏北浅滩区开展漂浮绿藻的控制性打捞, 结合前面的措施, 有可能有效控制浅滩区绿藻入黄海的数量, 从而控制黄海绿潮规模。四月左右在苏北浅滩内部署拦截浒苔, 五月左右打捞区前置在苏北浅滩外盐城附近海域, 将大大减轻山东南岸的打捞压力。

本项目 2016 年结合卫星遥感锁定黄海绿潮浒苔合适打捞地点: 苏北浅滩外盐城附近海域、时间窗口期: 5 月 11 日到 5 月 25 日, 并利用无人机 2016 年 5 月 18 日—6 月 3 日随青岛海大生物海状元号作业(图 11), 在苏北浅滩外盐城附近海域开展观测与打捞浒苔 1040 吨, 并进行遥感同步验证, 从验证与指导打捞的角度看, 本次行动中多源遥感任务达到了预期的效果, 为展开大规模打捞行动提供了宝贵的现场指导经验。



图 11 “海状元”号在苏北浅滩外盐城附近海域打捞与加工浒苔

Fig.11 Onboard salvage and processing of *Ulva prolifera* on vessel *Hai Zhuangyuan* in the nearshore water of Yancheng near the Subei Shoal

7.4 “三道防线”的防控策略

要做好综合防控的关键是江苏与山东的配合与协调, 科学监测、预警预报与防控系统方案相结合, 项目组提出的“三道防线”的总体防控策略如下:

苏北浅滩区养殖筏架上的定生浒苔是南黄海绿潮的主要种源。通过多种途径减少苏北浅滩区养殖筏架上定生浒苔的附着量和入海量, 实现绿潮种源的源头削减, 是绿潮防控的第一道防线, 也是最有效的

一道防线。

苏北浅滩出现的浒苔在 34° — 35° N 附近存在聚集期, 在此期间浒苔生长速度很快。因此, 在苏北浅滩区开展漂浮绿藻的控制性打捞工作, 将绿藻打捞区前置, 有效降低输出到黄海的早期绿潮规模, 是绿潮防控的第二道防线, 也是海上打捞的最关键区域。

第三道防线是在青岛近岸组织有效打捞, 根据风、流和浒苔生长状况模拟浒苔的漂浮路径和分布区域, 指导海上打捞。

综合上述, 本项目在浒苔绿潮来源、成因危害、监控处置和防控策略等方面都取得了一些重要的进展, 在研究中同时发现了一些新的情况, 如浒苔灾害的年际变化、马尾藻金潮加剧、大型藻灾害的演变与相互制约, 三潮齐发的复杂态势等, 为浒苔绿潮的预测、防控和减灾提出了新的挑战, 因此进一步掌握浒苔灾害的关键过程和机制, 制订更科学高效的防灾减灾方案, 对于保护海洋生态环境、养殖业、旅游业等沿海经济发展十分必要。另外, 一些科学问题也亟待开展深入细致的研究, 如浒苔“漂浮生态型”对环境变异的适应特性及其分子机制、绿藻在附着和漂浮状态的演替和竞争过程与机制等, 对于阐明全球变化和人类活动影响下的我国近海藻华灾害的演变具有重要科学意义。

参 考 文 献

- 丁月旻, 2014. 黄海浒苔绿潮中生源要素的迁移转化及对生态环境的影响. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 82—84
- 孔凡洲, 姜 鹏, 魏传杰等, 2018. 2017 年春季夏季黄海 35° N 共发的绿潮、金潮和赤潮. 海洋与湖沼, 49(5): 1021—1030
- 刘 峰, 刘兴凤, 金 柘等, 2018. 苏北浅滩沉积物中的大型绿藻微观察殖体的垂直分布和物种多样性. 海洋与湖沼, 49(5): 983—990
- 张清春, 孔凡洲, 颜 天等, 2018. 苏北浅滩养殖筏架附生绿藻入海过程在黄海绿潮形成中的作用. 海洋与湖沼, 49(5): 1014—1020
- 郑阵兵, 高 山, 王广策, 2018. 2017 年绿潮浒苔(*Ulva prolifera*)生理特征及孢子囊形成情况分析. 海洋与湖沼, 49(5): 999—1005
- 姜 鹏, 赵 瑾, 2018. 黄海绿潮浒苔漂浮生态型的发现与启示. 海洋与湖沼, 49(5): 959—966
- Han W, Chen L P, Zhang J H, *et al*, 2013. Seasonal variation of dominant free-floating and attached *Ulva* species in Rudong coastal area, China. Harmful Algae, 28: 46—54
- Liu D Y, Keesing J K, He P M, *et al*, 2013. The world's largest macroalgal bloom in the Yellow Sea, China: Formation and implications. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 129: 2—10

- Smetacek V, Zingone A, 2013. Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504(7478): 84—88
- Sun S, Wang F, Li C L, *et al*, 2008. Emerging challenges: Massive green algae blooms in the Yellow Sea. *Nature Precedings*, <http://precedings.nature.com/documents/2266/version/1c>
- Wang Z L, Xiao J, Fan S L, *et al*, 2015. Who made the world's largest green tide in China?—an integrated study on the initiation and early development of the green tide in Yellow Sea. *Limnology and Oceanography*, 60(4): 1105—1117
- Zhao J, Jiang P, Qiu R, *et al*, 2018. The Yellow Sea green tide: A risk of macroalgae invasion. *Harmful Algae*, 77: 11—17
- Zhou M J, Liu D Y, Anderson D M, *et al*, 2015. Introduction to the special issue on green tides in the Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 3—8

MECHANISM OF MASSIVE FORMATION AND PREVENTION STRATEGY AGAINST LARGE-SCALE GREEN TIDES IN THE SOUTH YELLOW SEA

YAN Tian^{1, 2, 3}, YU Ren-Cheng^{1, 2, 3}, ZHOU Ming-Jiang^{1, 2, 3}, SUN Song^{1, 2, 3}

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract This “Green Tide” Project funded by the “Aoshan Program” of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology has been carried out in Shandong and Jiangsu provinces in 2016—2018, focusing on the disaster mitigation of green tides (induced mainly by *Ulva prolifera*) in the south Yellow Sea. Significant progress has been made on the mechanism of formation and the strategy of mitigation of the green tides in multidisciplinary studies, during which more than 20 cruises in the South Yellow Sea were conducted and multiple research methods applied, including on-site investigation, satellite remote sensing, and simulation experiment, etc. The results show that the massive floating *U. prolifera* could be traced back to the offshore aquaculture areas in Subei Shoal, North Jiangsu. Under appropriate conditions of temperature and nutrition supply, *U. prolifera* could grow quickly and move into Qingdao offshore regions by favorable winds and oceanographic conditions. The green tide outbreaks are closely due to the unique nature of *U. prolifera* for bloom-forming, favorable ambient conditions of the Subei Shoal, and massive aquaculture activities in the origination areas. Based on the key factors of the origination, the algal attachment / de-attachment, the early stage of the green tide formation, the environmental and ecological impacts, and the prevention strategy by three front lines setup have been suggested to mitigate the green tide development from the offshore areas of Subei Shoal to the Shandong Peninsula, and countermeasures were proposed to minimize the algal biomass at the source area of the Subei Shoal.

Key words the Yellow Sea; *Ulva prolifera*; green tides; formation mechanism; prevention strategy