

我国绿潮发生发展机理研究进展

A review on the development mechanism of Green Tide in China

吴玲娟, 曹丛华, 高松, 徐江玲, 白涛, 曹雅静

(山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 国家海洋局北海预报中心, 山东青岛 266033)

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)12-0118-04

绿潮是大型有害藻华, 在全世界各个沿海国家的海湾和河口等海域频频发生。我国黄海海域近6年连续出现大规模绿潮暴发, 对2008年青岛奥运会帆船/板赛和2012年的海阳亚洲沙滩运动会等诸多海上赛事造成了困难, 对水产养殖、滨海旅游、海上交通运输等相关产业的影响尤为严重。为了保证赛事、沿海经济和生态环境可持续发展, 国家相关部门对此给予了高度重视, 启动相应的应急预案, 应对绿潮灾害; 同时启动了多项基金研究和应用项目, 如2008年绿潮专项; 2008年“浒苔大规模暴发应急处置关键技术研究与应用”; 山东省和青岛市相应的科技项目; 2012年启动了国家海洋局公益性项目“黄海绿潮业务化预测预警关键技术研究和应用”。本文将对绿潮发生发展相关内容如溯源、暴发和生长机理、分布特征、漂流聚集机理进行回顾, 并结合绿潮应急监测预警工作现状对研究工作进展进行展望。

1 绿潮溯源研究

溯源研究为进一步研究黄海绿潮发生机制, 在源头上应对绿潮灾害, 提供了很有价值的线索。国内学者根据MODIS卫星图像^[1-3]、来自分子系统学和脂肪酸组成的GCMS分析证据^[4-5]和浒苔样品遗传多样性分析^[6]都表明青岛近海漂浮的浒苔都是从外海漂移过来的。通过分析2008年黄海海洋物理、生物化学资料和绿潮发生过程和条件, 发现长江口附近海域温盐和营养盐适合浒苔生长, 由于流作用以及袋状胶州湾的地理形状, 有利于整个山东半岛沿海浒苔生长集结^[7]。范士亮等^[8]分析2009~2010年黄海绿潮潜在起源区在绿潮发生期间海上连续跟踪观测资料, 发现2009年和2010年黄海漂浮绿潮藻均首先发现于江苏南通小洋口外的太阳岛附近, 发生发展过

程比较相似, 但发生时间、发生规模和漂移路径有所差异; 温度升高与绿潮暴发具有明显相关性。基于藻体形态特征和基因条码比对方法, Liu等^[9]分析2007~2012年江苏自射阳到如东的辐射沙洲水样和泥样, 发现该区域海水富营养化是黄海浒苔绿潮暴发的本质原因。还有学者利用海洋数值模拟方法追溯绿潮来源^[10], 发现2008年绿潮主要来源于黄海南部江苏连云港和盐城近海海域。此外, 还有研究认为2008年黄海绿潮的形成种来源于江苏省紫菜栽培筏架, 绿潮的暴发与江苏省紫菜栽培面积的扩大密切相关^[11-12], 也有认为没有关系^[13]。上述分析都认定黄海绿潮的源头在长江口附近海域, 但还需要进一步证实。

2 绿潮暴发和生长机理研究

研究绿潮暴发和生长机理, 主要从内因和外因入手。内因主要绿潮海藻自身独特的生物学特点, 外因主要包括海水的富营养化, 适宜海藻生长的环境和气候条件等。

2.1 生物学特点

绿潮海藻是具有较高的营养盐吸收能力, 在富营养化环境中可成倍增长, 且光能利用效率高, 具有较强的竞争优势。绿潮海藻的繁殖方式多种多样, 繁殖能力强, 在生活史的任何一个中间形态都可以单独发育为成熟的藻体^[14-17]。同时绿潮海藻的孢子和藻体具有较强的抗胁迫能力^[18], 所以绿潮海藻在一定的海域环境中经常占主导地位^[19]。

收稿日期: 2013-01-18; 修回日期: 2013-05-22

基金项目: 国家海洋局公益性项目(201005018, 201205010)

作者简介: 吴玲娟(1979-), 女, 福建漳州人, 博士, 主要从事海洋环境要素预报和研究, 防灾减灾工作, E-mail: wulingjuan@nmfc.gov.cn

2.2 海水富营养化

富营养化显著特点是海水中营养盐含量很高,氮和磷等营养元素的增多是绿潮海藻生物量增加的物质基础。黄海海域的富营养化主要是由于现代化工农业、畜牧业等的迅速发展沿海及城市居民的不断增多以及近海或沿岸滩涂水产养殖规模的不断扩大而引起的^[20]。

2.3 环境因子

绿潮藻能否快速繁殖的决定环境因子包括影响温度、光强、盐度、溶解氧、摄食动物等。绿潮海藻虽是广温广盐性海藻^[21-22],但有其生长最适的温度和盐度范围。在适宜的环境条件下,可以加速营养生长和缩短生殖周期,致使海藻生物量的不断增加,从而导致爆发性生长形成绿潮。也有学者研究认为全球气候变暖以及其导致的海洋酸化有利于绿潮海藻的生长^[23]。

上述三个要素是绿潮藻暴发和生长的必备条件。随着全球气候和海洋环境的不断变化以及绿潮海藻对环境的适应进化,影响绿潮暴发和生长的各种因素变得更复杂。

3 绿潮分布特征研究

国内科学家利用不同卫星遥感图像分析研究黄海绿潮的分布特征和成因。从MODIS卫星图像发现绿潮在黄海多呈条带状分布^[1,24];从合成孔径雷达(SAR)微波遥感图像看出,浒苔条带之间距离大部分为1~1.5 km,这个距离远远大于拉弥尔环流(Langmuir)^[25]50~100 m的尺度,Thorpe^[26]认为这是小的拉弥尔环流条带逐步合并的结果。Qiao^[27]指出浒苔条带基本消除了风场下游海浪中的小尺度波动,风场下游区域水体而不是浒苔本身使得海洋遥感图像出现异常。海洋中浒苔条带的宽度通常不大于10 m,而分辨率为25~30 m的SAR图像中异常条带的宽度是多个像素点。基于遥感图像异常对绿潮量的估算可能会偏高1个量级(10倍)左右,所以单独利用海洋遥感图像判定绿潮在海面的覆盖率存在一定问题。因此人们迫切需要完善海洋绿潮监视监测系统,卫星遥感需紧密结合航空遥感、陆岸巡视等其他监测结果,并实现多源数据充分融合,以更清楚了解绿潮分布情况。

4 绿潮漂流聚集机理研究

国内科学家从生物学和海洋大气环境动力学等

不同角度来研究绿潮漂流聚集现象。梁宗英等^[28]认为光合作用产生的气泡增加了浒苔管状藻体的浮力,从而促进漂浮生长,日生长速率可达到10%~37%;漂浮的浒苔在风场和流场的作用下大面积聚集。张苏平^[2]和衣立等^[29]等分别从黄海水文气象条件变化方面对2008年和2009年绿潮聚集和定向移动进行研究分析,认为风场是绿潮漂动的主要强迫场;导致2009年绿潮推迟暴发的关键因素是黄海西部降水而不是海面温度。通过分析海洋数值模拟结果发现绿潮漂流聚集与海流密切相关^[30];风场驱动下的海洋表层流场年际变化是绿潮漂移路径变异的主要原因^[31]。同时刘志亮等^[32]和李晓^[33]分别分析江苏外海潜标观测和6个Argos表层漂流浮标的海流数据,发现夏季江苏外海存在一支流向比较稳定的北向流,其流向与传统的观点截然相反,并主要受局地风场控制。Lin等^[34]从交叉学科的角度研究绿潮成因和动力机制,发现漂浮浒苔在物种以及种内水平具有高度的遗传均一性,并且推测2008年4~5月在南黄海中部稳定冷涡的发生发展、运动过程与浒苔的漂流聚集密切相关。并提出可以利用冷涡的发生发展和运动来预测绿潮的生消和漂移。该研究为今后绿潮发生发展研究预测提供了关键思路:利用海洋生态环境关键要素预测绿潮的发生发展过程。

5 绿潮应急监测和预警工作现状

自2008年5月31日发现绿潮暴发以来,国内许多相关部门对绿潮开展了多方位的监测和预警工作。国家海洋局北海预报中心2008~2012年绿潮发生期间每天利用TERRA/AQUA-MODIS、SAR COSMO-1/COSMO-2和HY-1B等卫星、航空、船舶、陆岸巡视等多源、多时相监测数据,并开展多源数据融合技术,业务化为绿潮漂移预测模型提供初始场,同时为研究绿潮发生、发展和消亡的机理,以及绿潮溯源等工作提供依据,并建设了集黄海绿潮监测、信息提取与融合、数据收集、预测预警及产品发布等功能于一体的综合业务化系统^[35]。蒋兴伟等^[36]利用海洋遥感卫星数据对2008年绿潮进行的立体动态监测,对绿潮发生发展进行系统的跟踪。北海预报中心连续5年利用黄海绿潮监测结果和大气海洋数值模拟方法,根据政府相关部门需求,对绿潮的漂移轨迹进行应急预测^[30],从2009年开始根据绿潮发生发展情况和《青岛市海洋大型藻类灾害应急处置工作预案》,发布相应的绿潮警报。乔方利等^[37]提出“浒苔

海上通道”,建议将浒苔海上监测和打捞工作集中到狭窄通道内。绿潮应急监视监测和预测预警工作,已取得丰硕成果。但是现有的预测只做短期漂移,没有考虑长期趋势预测,只考虑绿潮的动力特征,没有考虑绿潮的生消等生态学和绿潮藻的生活习性等方面因素。同时监测现状结合绿潮分布特征可以看出人们迫切需要建立一个集航天遥感、航空遥感、船舶、岸站于一体的监测系统,为科学研究和预警工作提供全面多方位的信息服务。

6 研究展望

绿潮是我国一种新的自然灾害,绿潮发生发展机理研究已取得一系列成果。结合我国近年来监测预警工作现状,研究重点应侧重于为防灾减灾工作服务,着重以下几个领域。

6.1 暴发和生长机理研究

利用海洋绿潮监视监测系统的数据和实验数据,进一步研究绿潮生态学特征,在深入研究过程中,加强对绿潮生活史以及温度、盐度、光照、营养盐浓度变化与微型藻类的竞争机制等对绿潮藻影响的参数化研究,为绿潮生态模型建立提供理论依据。

6.2 漂流聚集机理研究和长期趋势预测

为了长期和短期预测绿潮漂移趋势,可以利用历年的绿潮监测资料,进一步研究绿潮漂流聚集机理和绿潮发生的遥相关因子,发展多学科交叉结合思路,以期利用关键的海洋生态环境要素来预测短期和长期绿潮的生消、漂移路径,并逐步验证。

6.3 生态模型的初步建立

我国绿潮的生态学模型尚未建立,可以借鉴国外绿潮生态模型建立的经验^[38-41],基于绿潮生态学的深入研究,遴选出影响绿潮生消和漂流聚集的主要生态动力学因子,并通过实验室和实地实验结果确定参数,初步建立绿潮生态动力模型,模拟绿潮生消和漂流聚集过程。

参考文献:

- [1] 李大秋,贺双颜,杨倩,等. 青岛海域浒苔来源与外海分布特征研究[J]. 环境保护, 2008, 16: 45-46.
- [2] 张苏平,刘应辰,张广泉,等. 基于遥感资料的 2008 年黄海绿潮浒苔水文气象条件分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(5): 870-876.

- [3] 李三妹,李亚君,董海鹰,等. 浅析卫星遥感在黄海浒苔监测中的应用[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 76-82.
- [4] Jiang P, Wang J F, Cui Y L, et al. Molecular phylogenetic analysis of attached Ulvaceae species and free floating Enteromorpha from Qingdao coasts in 2007[J]. Chin J Oceanol Limnol, 2008, 26: 276-279.
- [5] 杨佰娟,郑立,陈军辉,等. 黄、渤海漂移浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 脂肪酸组成及聚类分析的研究[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(5): 627-632.
- [6] 刘涛,刘岩,张继民,等. 2008 年黄海浒苔绿潮灾害遗传溯源初步分析[C]. 高振会,杨建强,张洪亮,等编. 绿潮灾害发生条件与防控技术,北京:海洋出版社, 2009: 175-183.
- [7] 徐兆礼,叶属峰,徐韧. 2008 年中国浒苔灾害成因条件和过程推测[J]. 水产学报, 2009, 33(3): 430-437.
- [8] 范士亮,傅明珠,李艳,等. 2009-2010 黄海绿潮起源与发生过程调查研究[J]. 海洋学报, 2011, 187-194.
- [9] Liu F, Pang S J, Zhao X B, et al. Quantitative, molecular and growth analyses of *Ulva* microscopic propagules in the coastal sediment of Jiangsu province where green tides initially occurred[J]. Mar Environ Res, 2012, 74:56-63.
- [10] 吴玲娟,曹丛华,黄娟,等. 黄海绿潮应急溯源数值模拟[J]. 海洋科学, 2011, 35(6), 44-47.
- [11] 易俊陶,黄金田,宋建联. 对盐城市沿海 2008 年浒苔发生情况的初步认识[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(增刊): 74-77.
- [12] Liu D Y, Keesing J K, Xing Q G, et al. World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China[J]. Mar Pollut Bull, 2009,58: 888-895.
- [13] 刘峰. 黄海绿潮的成因以及绿潮浒苔的生理生态学和分子系统学研究[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2010: 1-129.
- [14] Littler M M, Littler D S. The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: Field and laboratory tests of a functional form model[J]. Am Nat, 1980, 116: 25-44.
- [15] Kiirikki M, Lehto A. Life strategies of filamentous algae in the northern Baltic Proper[J]. Sarsia, 1997, 82: 259-267.

- [16] Lin A P, Shen S D, Wang J W, et al. Reproduction diversity of *Enteromorpha prolifera*[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50: 622-629.
- [17] Gao S, Chen X, Yi Q, et al. A strategy for the proliferation of *Ulva prolifera*, main causative species of green tides, with formation of sporangia by fragmentation[J/OL]. *PLoS ONE*, [2010-04-15] <http://doi: 10.1371/journal.pone.0008571.g001>.
- [18] Taylor R, Fletcher R L, Raven J A. Preliminary studies on the growth of selected "green tide" algae in laboratory culture: effects of irradiance, temperature, salinity and nutrients on growth rate[J]. *Bot Mar*, 2001, 44: 327-336.
- [19] 叶乃好, 张晓雯, 毛玉泽, 等. 黄海绿潮浒苔生活史的初步研究[J]. *中国水产科学*, 2008, 15(5): 853-857.
- [20] 李瑞香, 吴晓文, 韦钦胜, 等. 不同营养盐条件下浒苔的生长[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(2): 211-216.
- [21] 王建伟, 阎斌伦, 林阿朋, 等. 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)生长及孢子释放的生态因子研究[J]. *海洋通报*, 2007, 26(2): 60-65.
- [22] 夏斌, 马绍赛, 崔毅, 等. 黄海绿潮(浒苔)暴发区温盐、溶解氧和营养盐的分布特征及其与绿潮发生的关系[J]. *渔业科学进展*, 2009, 30(5): 94-101.
- [23] Wu H Y, Zou D H, Gao K S. Impacts of increased atmospheric CO₂ concentration on photosynthesis and growth of micro and macro algae[J]. *Sci China*, 2008, 51: 1144-1150.
- [24] Hu C, He M X. Origin and off shore extent of algae in ol mpic sailing area[J]. *EOS AGU Trans*, 2008, 89(33) : 302-303.
- [25] Langmuir I. Surface motion of water induced by wind[J]. *Science*, 1938, 87: 119-123.
- [26] Thorpe S A. Spreading of floating particles by Langmuir circulation[J]. *Mar Pollut Bull*, 2009, 58: 1787-1791.
- [27] Qiao F L, Dai D J, Simpson J, et al. Banded structure of drifting macroalgae[J]. *Mar Pollut Bull*, 2009, 58: 1792-1795.
- [28] 梁宗英, 林祥志, 马牧, 等. 浒苔漂流聚集绿潮现象的初步分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(4) : 601-604.
- [29] 衣立, 张苏平, 殷玉齐. 2009 年黄海绿潮浒苔爆发与漂移的水文气象环境[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(10): 15-23.
- [30] 黄娟, 吴玲娟, 高松, 等. 黄海绿潮应急漂移数值模拟[J]. *海洋预报*, 2011, 28(1): 25-32.
- [31] 乔方利, 王关锁, 吕新刚, 等. 2008 与 2010 年黄海浒苔漂移输运特征对比[J]. *科学通报*, 2011, 56(18): 1470-1476.
- [32] 刘志亮, 胡敦欣. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系[J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 2-7.
- [33] 李晓, 中国东部近海夏季环流特征及其动力机制[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2010.
- [34] Lin H Z, Peng J, Zhang J X, et al. Genetic and marine cyclonic eddy analyses on the largest macroalgal bloom in the World[J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 5996-6002.
- [35] 白涛, 黄娟, 高松, 等. 黄海绿潮应急预测系统业务化研究与应用[J]. *海洋预报*, 2013, 30(1): 51-58.
- [36] 蒋兴伟, 刘建强, 邹斌, 等. 浒苔灾害卫星遥感应急监视监测系统及其应用[J]. *海洋学报*, 2009, 31(1): 52-64.
- [37] 乔方利, 马德毅, 朱明远, 等. 2008 年黄海浒苔暴发的基本状况与科学应对措施[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26: 409-410.
- [38] Arousseau P. Les flux d'azote et de phosphore provenant des bassins versants de la rade de Brest: Comparaison avec la Bretagne[J]. *Océanis*, 2001, 27(2): 137-161.
- [39] Cugier P, Le Hir P. Development of a 3D hydrodynamical model for coastal ecosystem modelling, application to the plume of the Seine River (France) [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2000, 55: 673-695.
- [40] Perrot T, Dion P, Populus J, et al. A predictive approach to the mapping of fucoïd beds using spot magery and a digital elevation model[C]//Anderson R J, Brodie J A, Edvar O, et al. Eighteenth International Seaweed Symposium. Germany: Springer, 2004: 23-27.
- [41] Biber P D, Harwell M A, Jr Cropper W P. Modelling the dynamics of three functional groups of macroalgae in tropical seagrass habitats [J]. *Ecological Modelling*, 2004, 175, 25-54.

(本文编辑: 梁德海)