

南黄海绿潮暴发与硝酸盐及水文环境因子的关系*

潘俊^{1, 2, 3, 4} 于非^{1, 2, 3, 5, 6} 魏传杰^{1, 2, 3, 4} 任强^{1, 2, 3, 5}
孙淑慧^{1, 3, 4} 李靖^{1, 3, 7}

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071; 4. 中国科学院海洋研究所海洋环境工程中心 青岛 266071; 5. 中国科学院海洋环境与波动重点实验室 青岛 266071; 6. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室 青岛 266237; 7. 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071)

摘要 为了解浒苔绿潮的发展态势、马尾藻分布区与漂移状况, 本文基于 2016—2017 年浒苔暴发季(春末夏初)在黄海绿潮潜在起源区获取的多航次及参考 2015 年布放定点潜标的环境因子资料, 通过高频的精细化硝酸盐监测, 对影响黄海浒苔绿潮的起源和发生发展过程中的重要环境要素进行了分析。结果表明: 不同年份, 黄海浒苔绿潮具有相似的发生发展过程, 两个年度的黄海表层硝酸盐分布趋势有差异; 年际变化上, 2017 年绿潮规模较上一年度显著偏小, 该年度出现的黄海赤潮、金潮对绿潮规模有一定抑制作用。

关键词 黄海; 绿潮; 春末夏初; 环境因子

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20171200327

绿潮是某些大型绿藻(如浒苔)在适宜的环境条件下, 爆发性增殖或高度聚集的一种有害生态现象, 也被视作和赤潮一样的海洋灾害, 绿潮多出现在富营养化的海域中(Nelson *et al.*, 2008, Shi *et al.*, 2015), 2017 年南黄海有赤潮、绿潮、金潮三潮并存的新现象。从国家海洋局的海洋环境公报中显示自 2003 年起 DIN 含量在南黄海采样的过半站位大于 $14\mu\text{mol/L}$ (Liu *et al.*, 2013)。水体中 DIN 的组分大部分是 NO_3^- -N, 两者之间比值在 0.8—1(高高等, 2012)。室内实验表明, 浒苔对氮磷元素具有快速吸收的能力, 而且对 N 的吸收需求比 P 的吸收更高(Li *et al.*, 2011; 吴婷等, 2013)。

基于海水在 190—370nm 的紫外吸收特征, Sakamoto 等(2009)利用光谱反卷积技术通过改进的光学系统和内置智能采样调节系统研制一款无需化学试剂的水下硝酸盐分析仪 SUNA (Submersible Ultraviolet

Nitrate Analyzer), 可在高浊度、高 CDOM(有色溶解有机物)等更多特殊环境下进行硝酸盐测量分析。相对传统方法具有准确性高、实时性强和采样频率高(1Hz)等特点, 对于传统方法是一种有益的补充, 广泛应用到各种观测平台如 Argo(Liu *et al.*, 2016a)、Glider(Johnson *et al.*, 2017), 并为模式提供基础数据。

近几年国内针对绿潮暴发的研究进行了国家重点项目的布局, 如国家重点研发计划重点专项“浒苔绿潮形成机理与综合防控技术研究及应用”(王宗灵等, 2018), 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目“近海生态灾害发生机理与防控策略”。热点问题主要体现在黄海绿潮起源与发生过程、浒苔的关键生物学特征与绿潮暴发的环境驱动机制, 以及绿潮减灾防灾技术上的不足, 依据现场调查和卫星遥感数据, 评估前置打捞行动对黄海绿潮规模的

* 鳌山科技创新计划项目, 2016ASKJ02-04 号; 国家自然科学基金项目, 41806164 号, 41376031 号, U1406401 号; 中国科学院战略性先导科技专项项目, XDA11020301 号。潘俊, 博士研究生, E-mail: panjun@qdio.ac.cn

通讯作者: 于非, 博士生导师, 研究员, E-mail: yuf@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-12-28, 收修改稿日期: 2018-05-09

控制作用等。浒苔的暴发受多种因素的影响, 目前, 关于近岸海域富营养化如何驱动浒苔暴发性增殖并形成绿潮、南黄海水动力如何驱使漂浮浒苔聚集与长距离运移等还缺少透彻的了解。本文依托青岛国家实验室与中国科学院先导专项联合航次针对浒苔分布面积进行了扩大范围的调查, 利用调查数据分析浒苔暴发区的水文、典型营养盐背景场, 可以为绿潮暴发的管理和决策提供依据。

1 材料与方法

1.1 站位

结合以往调查经验, 5 月份的浒苔主要分布在苏北浅滩附近, 调查重点在 122.5°E 以西海域, 并结合调查船舶(“科学三号”)的条件尽可能的在近岸调查以及加密观测。6 月份浒苔已向北移动并应进行黄海跨区域联防联控, 故铺开调查区域到整个南黄海海区。根据这个站位设计原则, 在 2016 年、2017 年共执行了 3 个航次(2016 年 5 月 15 日—27 日, 2016 年 6 月 18 日—7 月 7 日, 2017 年 6 月 9 日—21 日), 附采样站位图(图 1)并分别标注每年度的专有站位及 2 个年度的共性站位, 所有站位均有 SUNA 测定的硝酸盐数据。

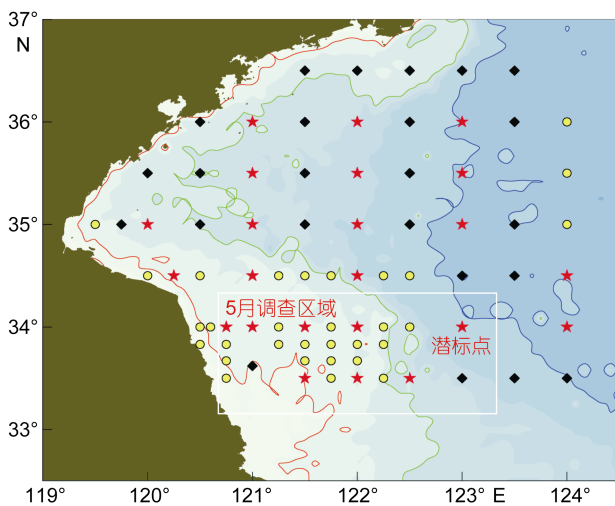


图 1 南黄海浒苔航次调查站位及潜标示意图

Fig.1 Map of the sampling deployment

注: ●: 2016 年专有调查站位; ◆: 2017 年专有调查站位; ★: 2016、2017 年共有调查站位; 红线: 10m 等深线; 绿线: 30m 等深线; 蓝线: 70m 等深线

1.2 采样方法

3 个航次均使用美国海鸟的 CTD(型号: SBE911) 获取温度、盐度、浊度等环境要素数据; 现场用 CTD 的采水器采取不同深度的水样。水样采集后, 立即用

GF/F 滤膜(Waterman)过滤。滤液分装至 100mL 聚乙烯瓶(经 1 : 5 盐酸溶液浸泡 24h, 去离子水洗至中性等预处理), 在 -20°C 冷冻保存, 用于硝酸盐分析。样品于实验室内采用 San⁺⁺ SKALAR-1000 型营养盐自动分析仪(model: SA 3000/5000 chemistry unit) 测定, 采用国家海洋局第二海洋研究所标准物质中心生产的营养盐标准系列作为外标质控样; 硝酸盐(NO₃-N)检测限为: 0.02μmol/L。

SUNA 安装在 CTD 采水器架上, 其中 SUNA 的供电单元是由 60 节 1# 电池安装到电池仓中对 SUNA 供电, 与 CTD 独立并联中, 可同时同地进行相关环境要素测量便于分析同时空数据。SUNA 数据输出速度为 1s/个数据, 将 CTD 的温盐资料也按此时间间隔处理数据, 从而与 SUNA 的数据达到时空的匹配, 总体是 0.6—1m/个数据。SUNA 测量原理是通过使用稳定的紫外光源(氙灯)、传感探头和精密光谱仪实现测量, 光学传感系统测量原位吸收光谱(硝酸盐在 217—240nm 光谱区间具有明显的吸光度), 使用嵌入式处理器进行算法(最小二乘拟合法)计算, 从而实现实时的硝酸盐浓度测量。笔者曾参考多位专家(Zielinski *et al*, 2011; Johnson *et al*, 2017)对 SUNA 的使用经验在它文中详细介绍 SUNA 的室内标定、利用实时温-盐数据校正、探讨苏北高浊度对测量结果的影响, 并与同航次使用传统方法获得的硝酸盐数据大量对比, 证明南黄海获取 SUNA 测量结果的可信性(潘俊等, 2017)。

潜标点采用坐底式海床机布放, 针对关注的科学问题选择布放点, 主要设备为 ADCP(300K)、CTD、DO 及释放器。海流数据依托坐底式海床基潜标中的 ADCP 收集, 布放时可利用船载的测深仪进行站位的水深实时观测, 合理设置设备的量程范围, 各测量层的厚度为 2m/层, 计划布放周期为半年以上, 设置的采样时间为 30min/次。使用 Edge tech(型号: 8242XS) 作为主释放器将海床基布放到海底。回收时, 声学释放装置将潜标并联机构中的释放器 Edge tech(型号: PORT MFE)释放从而将主浮体回收。使用 WinADCP 读取原始数据并初步处理, 输出为流速、回波强度、相关性、数据良好率百分比等。因换能器探头面附近及水底边界附近(约 2m)水域存在盲区, 需对数据进行质量控制: 如数据良好率大于 90%, 采取前后 7 层作中值滤波, 盲区数据借助指数剖面, 插补表层或底层的平均流速等。以上步骤用来保障数据的可信性。

CTD 与 SUNA 的原始数据分别处理成 1m/层的

数据,使用 ODV 作图软件将相关环境因子制图,网格区域使用 DIVA gridding 插值。将 WinADCP 输出的原始数据,使用 MATLAB(R2015a)编程进行质量控制并对观测期间的流速、流向制图,综合分析各环境因子的制图并开展研究工作。

2 结果与讨论

2.1 漂浮浒苔的分布概述

黄海绿潮历年的发生发展过程相似,分为几个阶段:只有零星绿藻;绿潮小斑块逐渐生长聚集为条带状;发生大斑块的绿潮藻漂浮;规模性绿潮形成等(范士亮等,2012)。紫菜养殖活动结束后,每年4月中旬养殖户开始回收养殖筏架的竹竿和梗绳,在此过程中,他们采用机械方式清理梗绳上的附生绿藻(其中每年产生的附生浒苔约有7000t),并弃置滩涂。浒苔涨潮时随潮水入海漂浮,成为大规模绿潮的最初来源(Wang *et al.*, 2015)。黄海南部近岸养殖筏架上的浒苔数量可能会影响绿潮发生规模(Liu *et al.*, 2016b),浒苔具有适应力强、生长速率高、漂浮能力强的显著特点(王宗灵等,2018)。2015年,黄海沿岸海域浒苔绿潮分布面积为52700平方公里,较近5年(2010—2014年)平均值增加了48%;最大覆盖面积(594平方公里)比近5年平均值略大(550平方公里)。

现场调查是研究浒苔绿潮发生发展过程最直接的手段。2016年由“科学三号”执行的4月调查航次(4月18日)发现在34°N, 121°E海区出现零星的漂浮绿藻,分布面积于6月28日达到最大值,绿潮覆盖面积约536平方公里,分布面积约57212平方公里(2016年北海区绿潮信息,网址 <http://www.ncsb.gov.cn/n1/n127/n139/n39/n47/171201150318785638.html>),较2015年的最大分布面积增加了9%,为近年来最大值。2017年绿潮的影响明显小于2016年,分布面积于6月25日达到最大值(约23018平方公里),绿潮覆盖面积约187平方公里(2017年北海区绿潮信息,网址: <http://www.ncsb.gov.cn/n1/n127/n139/n39/n48/171201150431364557.html>)。

2.2 硝酸盐平面及断面分布

受陆地径流和苏北沿岸流的影响,调查海域西部硝酸盐的含量较高;近岸区 $\text{NO}_3\text{-N}$ 都大于 $30\mu\text{mol/L}$,中央海域的硝酸盐含量最低,调查海区表层营养盐随着浒苔面积的扩大而逐渐下降。5月硝酸盐浓度的低值区则出现在南黄海东南部($123^\circ\text{—}124^\circ\text{E}$, $33^\circ\text{—}34^\circ\text{N}$),值得注意的是本航次在 121.5°E

附近海域还存在一个 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的低值带,与韦钦胜等(2011)在该海区的观测结果有差异(图2)。6月的硝酸盐浓度最低值出现在南黄海中部海区($122^\circ\text{—}124^\circ\text{E}$, $34^\circ\text{—}36^\circ\text{N}$)(图3,4),这是由于苏北沿岸流(东南流向)将低营养盐的海水推至该区域(刘志亮等,2009;卢健等,2014)。6月份后长江冲淡水与台湾暖流增强,它们顶托苏北沿岸水继续向北推进,削弱其对营养盐向东南方向输送的能力,而东北向的输运态势增强(米铁柱等,2012)。黄海南部近岸海域无机氮含量充足,有利于浒苔生长,由此可推断调查海区近年来明显增

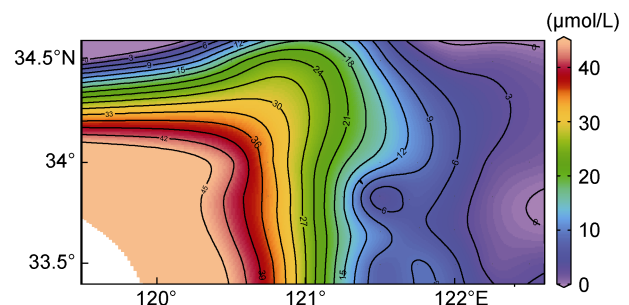


图2 2016年5月表层硝酸盐($\mu\text{mol/L}$)

Fig.2 The surface distribution of nitrate($\mu\text{mol/L}$) in May

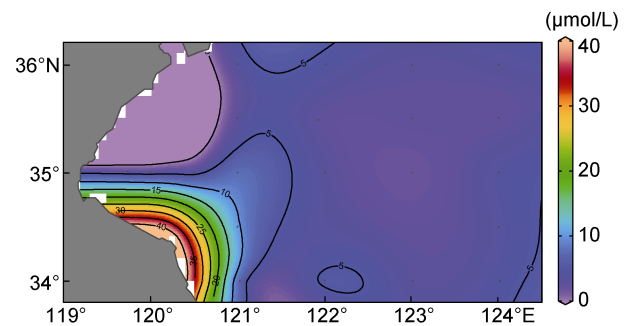


图3 2016年6月表层硝酸盐($\mu\text{mol/L}$)

Fig.3 The surface distribution of nitrate($\mu\text{mol/L}$) in June 2016

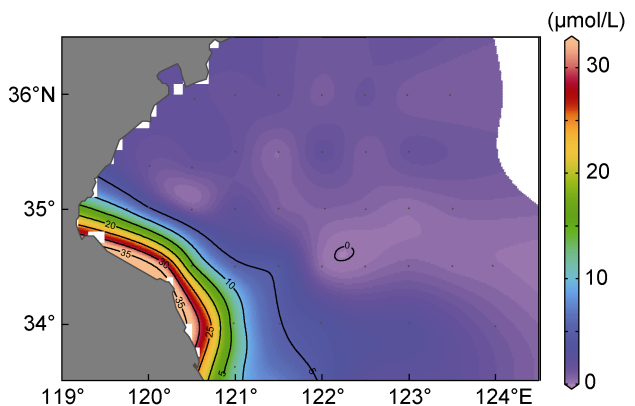


图4 2017年6月表层硝酸盐($\mu\text{mol/L}$)

Fig.4 The surface distribution of nitrate($\mu\text{mol/L}$) in June 2017

加的无机氮是浒苔绿潮在南黄海暴发、扩张及维持的主要因素之一。

5 月, 34.5°N 断面中近岸海域全水层受强潮流的影响混合均匀, NO₃-N 呈垂向均匀分布, 调查海域中的近岸浅水区(120.4°—121.3°E) NO₃-N 浓度较调查海区西侧(120°—120.4°E)高, 主要是由陆地径流扩散和苏北沿岸水对营养盐的输入所致(图 5)。浅水区向深水区过渡的海域(121.5°—122°E)为陆架锋区, 黄海陆架锋与冷水团边界区域(锋区)的锋面上升流对营养盐的断面分布也会产生显著的影响, 表层水体的营养盐受浮游植物等繁殖消耗, 富含硝酸盐的底层水体上涌或沿坡爬升也为调查海区西部沿岸流向东南的物质输送提供了一定的基础和来源。受地形作用诱导, 混合增强, 导致了黄海锋区的剪切不稳定, 从而将近底层的高营养盐涌升至跃层附近(韦钦胜等, 2010, 2011)。

研究 35°N 断面的营养盐的垂向分布发现(图 6): 水深>40m 的海域, 硝酸盐多数是在温跃层以下水体中积累; 而在水深<40m 的海域, 温跃层附近的硝酸盐有向上层扩散的趋势, 与韦钦胜等(2011)在该海区的观测结果近似。在 6 月, 35°N, 123°E 处存在强的营养盐跃层: 水深 30—40m 处, 营养盐浓度从 4μmol/L 骤升至 14μmol/L, 梯度为 1μmol/(L·m)。该营养盐跃层在温跃层以下, 强温跃层阻碍了硝酸盐向上的迁移, 进一步影响营养盐在全水层的混合, 导致上层水体消耗后无法得到有效的补充。受采样条件的限制, 传统的方法整个水层通常采集 5—6 个水深层次的样品并进行分析, 在南黄海本次调查属首次高频观测, 空间分辨率为亚米级。

2.3 其他水文环境因子与绿潮分布关系

浒苔作为黄海漂浮绿海藻优势种, 对营养盐具有很高的吸收效率, 广温广盐且光能利用效率高, 可保持指数生长速度, 漂浮浒苔强大的繁殖和生长能力是绿潮暴发的主要原因之一(Wang *et al*, 2015)。

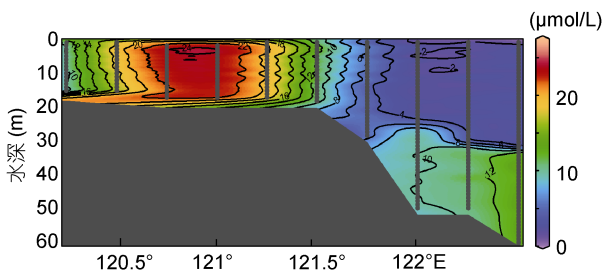


图 5 2016 年 5 月 34.5°N 硝酸盐(μmol/L)断面分布(●为获取数据点)

Fig.5 The profile of distribution of nitrate (μmol/L) at 34.5°N in May, 2016

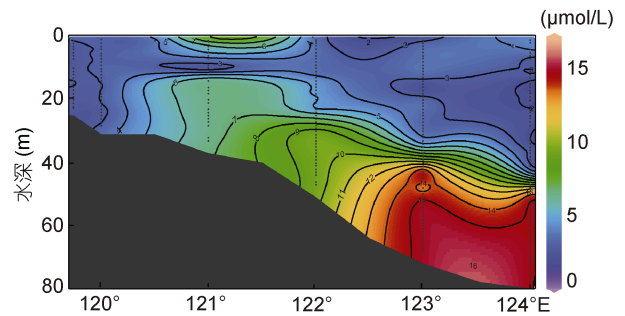


图 6 2016 年 6 月 35°N 硝酸盐(μmol/L)断面分布

Fig.6 The profile of distribution of nitrate(μmol/L) at 35°N in June, 2016

2.3.1 温度 分析 5、6 月份航次的 CTD 的温度数据发现, 水温升高的速率和区域温差不断扩大。5 月份表层温度呈现近岸高远岸低、南部高于北部的特点。6 月水温继续保持较高的上升速率, 调查海区的平面温差最高在 5.5°C。在 34.75°—35.25°N 调查海区中, 119.5°—120.5°E 表层温度呈现近岸低于外海的特征, 近岸受鲁北沿岸流的影响温度较低(图 7), 2017 年 6 月的表层温度外海区域(123.5°—124°E)与近岸温度相似(18.5—19.5°C), 呈现中间海区温度较近岸、外海高

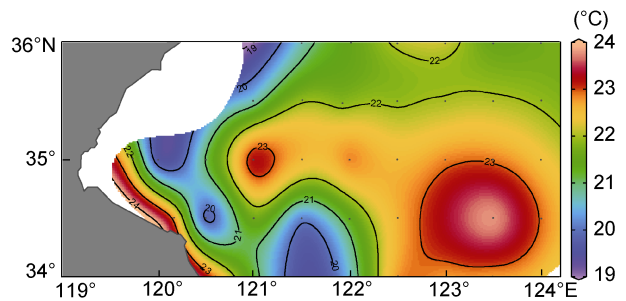


图 7 2016 年 6 月表层温度

Fig.7 The surface distribution of temperature in June 2016

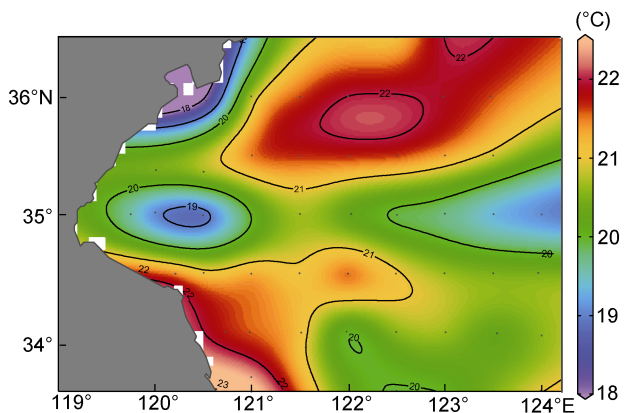


图 8 2017 年 6 月表层温度

Fig.8 The surface distribution of temperature in June 2017

(20—21°C)(图 8)。两个月份的海区温度的平面分布以及浒苔的现场增殖情况,进一步验证了两个月份的温度在浒苔最适生长温度区间(18—23°C)(王建伟等, 2007), 这表明温度是调控黄海绿潮暴发的关键环境因子。

2.3.2 盐度 分析 2016—2017 年的 3 个航次的 CTD 盐度数据发现, 调查海区盐度平面分布受河流淡水输入的影响, 由近岸向外海明显升高(图 9, 10)。江苏近岸河流众多, 较大的入海河流有射阳河、灌河等, 对江苏近海的盐度分布、物质输入和生态环境具有重要影响。该调查海区的盐度均处于浒苔藻体适宜生长的盐度范围(16—40)之内(王建伟等, 2007)。2016 年 6 月份 123°E 以西表层盐度呈现近岸低远岸高的特点, 在 34.5°N, 123.5°E 附近表层盐度有低值区, 原因是调查期间该海区出现强降雨, 由表层到 15 米层均呈现低盐区, 近岸盐城市遭遇强冰雹和龙卷风双重灾害(图 9)。

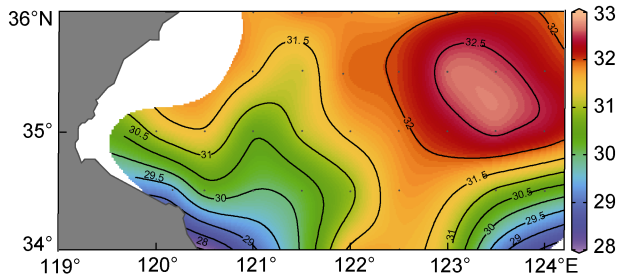


图 9 2016 年 6 月表层盐度

Fig.9 The surface distribution of salinity in June 2016

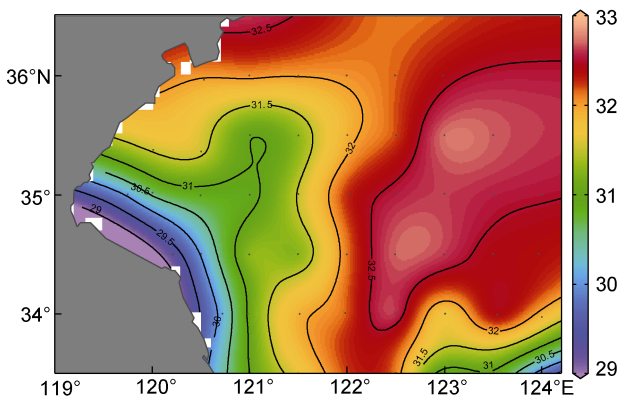


图 10 2017 年 6 月表层盐度

Fig.10 The surface distribution of salinity in June 2017

2.3.3 海流 南黄海环流主要有黄海西部沿岸流、苏北沿岸流以及陆架锋, 共同构成了特有的环流体系和背景场, 它们相互耦合, 影响该海域的物质输运和扩散及海洋生物地球化学过程, 并制约近海对污

染物的净化能力。数值模拟研究采用黄海南部流场和风场相结合的方法, 模拟漂浮绿潮的漂移过程。黄海大条带状漂浮绿藻宽度近十米, 长度数公里, 主要发现在 34°—36°N 区域, 其中 2009 年发现最大的条带宽约 8m, 长度超过 20km。进入海州湾外海域以后, 漂浮绿藻逐渐聚集成大斑块。对于 2015 年在 34°N, 123°E 布放的坐底海床基潜标, 分析 ADCP 海流计的观测数据显示(图 11), 5、6 月份的苏北沿岸流及其东侧的表层海流, 受夏季盛行的南风 and 东南风影响, 基本为北-东北向, 流速在 0.1—0.3m/s, 并产生了物质运输效应, 与他人模式的研究结果相似(于晓杰, 2011), 该观测资料可以为绿潮区的高分辨率精细化海流预报模式提供有益的验证。其他实测的资料也发现离江苏海岸约 40km 外(水深约 30m)的站点上几乎全水深都存在北向流(刘志亮等, 2009)。李曰嵩等(2014)、黄容等(2013)通过对浒苔漂移路径的研究发现其主要受表层海流与海面风的共同影响, 浒苔漂移方向通常位于海表环流方向和海面风夹角之间。

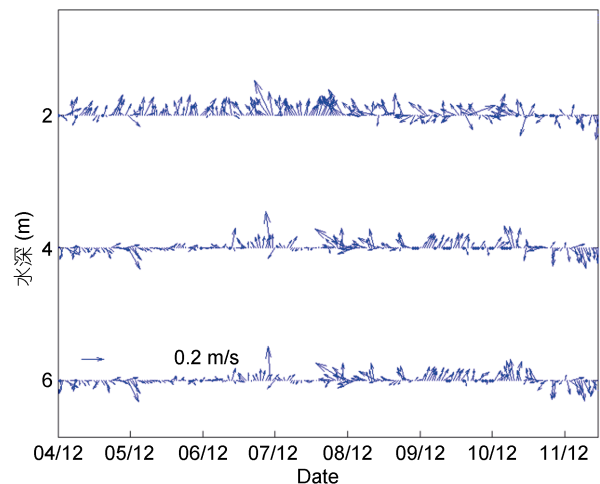


图 11 2015 年 34°N 海床基潜标 ADCP 表层海流长时间观测序列

Fig.11 Profile of current at 34°N in 2015
注: ADCP 位置: 34°N, 123°E, 水深 68m

值得注意的是 2017 年黄海出现赤潮、绿潮及金潮的三潮齐发的生态灾害, 与 2016 年相比, 浒苔绿潮暴发规模明显减小, 持续时间缩短。2017 年 5 月 17 日, 连云港市邻近海域发现有有毒链状裸甲藻及无毒中肋骨条藻的双相赤潮, 面积 100 平方公里。金潮灾害是漂浮状态的马尾藻暴发性增殖造成的, 同绿潮一样, 大规模的马尾藻生物量会对生态健康和经济发展带来严重的破坏性影响, 成为世界上广泛关

注的生态现象, 漂浮马尾藻在我国海域的分布面积和生物量正逐步增加, 金潮成为继赤潮、绿潮之后, 威胁我国沿海的又一灾害类型(Liu *et al.*, 2018)。营养繁殖是造成铜藻暴发性增殖的重要原因, 铜藻中空气囊的存在提高了藻体的浮力, 导致铜藻能够随海水漂浮。大量马尾藻在近岸聚集腐烂, 致使紫菜养殖区受灾, 紫菜大量减产甚至绝收, 同时对浒苔的大量繁殖产生了抑制作用。笔者现场调查发现, 2016 年在黄海也出现了较大斑块马尾藻的分布, 与 2017 年不同的是, 2016 年的马尾藻的大量出现在 123°E 以东的海域, 而在 122.5°E 以西浒苔大量繁殖的区域马尾藻没有出现, 浒苔没有生物的竞争性抑制作用, 从而暴发性增殖。2017 年马尾藻在近岸大量繁殖, 从而对浒苔的暴发产生了生物抑制性。

两个年度的硝酸盐的横向运输略有不同, 2017 年近岸海域硝酸盐含量较 2016 年低, 其高硝酸盐水舌的西北向扩展范围强于 2016 年并可延伸至山东半岛南部近岸海域, 而东北向弱于上一年度(图 5, 6)。两个年度的盐度数据(图 11, 12)能较好的反映出高硝酸盐水舌分布受淡水输入的影响较大。以盐度 30 的低盐水为例, 2017 年已延伸至 35°N 以北, 而 2016 年尚达不到该处; 同时 2017 年的盐度 32.5 的高盐水较上一年度分布范围扩大, 122°E 以东即有高盐水, 从而对低盐的淡水输入产生一定的压制, 使 2017 年河流入海的低盐水较 2016 年整体向西北向延伸, 可能是 2017 年浒苔暴发量较低的原因之一。

3 结论

利用监测、调查等途径对黄海绿潮暴发区环境因子及漂浮绿藻进行观测, 为绿潮防控提供科技支撑, 对海洋污染防治、生态保护、环境修复为主体的环境管理体系提供决策服务。本文依托新型调查设备获取了温度、盐度、定点海流及高时空分辨率的硝酸盐资料。春末夏初的温、盐适宜绿潮快速生长, 海流主体向北流动, 硝酸盐在近岸浓度高; 外海由于浒苔的快速吸收浓度较低, 锋面区可使近底层高浓度硝酸盐涌升。年际变化上, 硝酸盐的分布格局在 2 个年度上有区别, 对浒苔的生成及规模的变化有一定影响; 其他环境因子变化不显著。2017 年出现“三潮”齐发, 绿潮的规模显著降低, 生物的竞争与抑制作用不容忽视, 黄海金潮、赤潮在一定程度上影响了绿潮的规模。

致谢 感谢“科学三号”全体船员, 以及中国科学

院环境工程中心顾秋青工程师、尹航工程师与张艳胜、何源首。

参 考 文 献

- 于晓杰, 2011. 南黄海西部夏季环流及其对浒苔漂移影响的数值研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 王宗灵, 傅明珠, 肖洁等, 2018. 黄海水域绿潮研究进展. 海洋学报, 40(2): 1—13
- 王建伟, 阎斌伦, 林阿朋等, 2007. 浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 生长及孢子释放的生态因子研究. 海洋通报, 26(2): 60—65
- 韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨等, 2011b. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质运输的影响. 地球科学进展, 26(2): 145—156
- 韦钦胜, 刘璐, 战闰等, 2010. 夏季南黄海海水化学要素的分布特征及影响因素. 中国海洋大学学报, 40(1): 82—88
- 韦钦胜, 葛人峰, 臧家业等, 2011a. 夏季南黄海跨锋断面的生态环境特征及锋区生态系的提出. 海洋学报, 33(3): 74—84
- 卢健, 张启龙, 李安春, 2014. 苏北沿岸流对浒苔暴发及漂移过程的影响. 海洋科学, 38(10): 83—89
- 刘志亮, 胡敦欣, 2009. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系. 海洋学报, 31(2): 1—7
- 米铁柱, 姚庆祯, 孟佳等, 2012. 2011 年春、夏季黄海、东海营养盐分布特征研究. 海洋与湖沼, 43(3): 678—688
- 李曰嵩, 潘灵芝, 肖文军等, 2014. 风对黄海绿潮藻漂移的影响. 海洋环境科学, 33(5): 772—776
- 吴婷, 赵乐毅, 刘浩涤等, 2013. 浒苔对营养盐影响的初步研究. 海洋环境科学, 32(3): 347—352
- 范士亮, 傅明珠, 李艳等, 2012. 2009—2010 年黄海绿潮起源与发生过程调查研究. 海洋学报, 34(6): 187—194
- 国家海洋局北海分局, 2017. 北海区绿潮信息. <http://www.ncsb.gov.cn/n1/n127/n139/n39/index.html>
- 高嵩, 石晓勇, 王婷, 2012. 浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究. 环境科学, 33(7): 2204—2209
- 黄容, 马艳, 郭丽娜等, 2013. 2008—2011 年浒苔影响青岛的海面风观测资料特征分析. 海洋预报, 30(2): 30—35
- 潘俊, 于非, 任强等, 2017. 基于光学传感器在南黄海硝酸盐调查中的使用初探. 海洋科学, 41(12): 9—16
- Johnson K S, Plant J N, Coletti L J *et al.*, 2017a. Biogeochemical sensor performance in the SOCCOM profiling float array. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(8): 6416—6436
- Johnson K S, Plant J N, Dunne J P *et al.*, 2017b. Annual nitrate drawdown observed by SOCCOM profiling floats and the relationship to annual net community production. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(8): 6668—6683
- Li J P, Zhao W H, 2011. Effects of nitrogen specification and culture method on growth of *Enteromorpha prolifera*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 29(4): 874—882
- 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

- Liu F, Liu X F, Wang Y *et al*, 2018 Insights on the *Sargassum horneri* golden tides in the Yellow Sea inferred from morphological and molecular data. *Limnology and Oceanography*, <http://dx.doi.org/10.1002/lno.10806>
- Liu X, Levine N M, 2016a. Enhancement of phytoplankton chlorophyll by submesoscale frontal dynamics in the North Pacific Subtropical Gyre. *Geophysical Research Letters*, 43(4): 1651—1659
- Liu X Q, Wang Z L, Zhang X L, 2016b. A review of the green tides in the Yellow Sea, China. *Marine Environmental Research*, 119: 189—196
- Nelson T A, Haberlin K, Nelson A V *et al*, 2008. Ecological and physiological controls of species composition in green macroalgal blooms. *Ecology*, 89(5): 1287—1298
- Sakamoto C M, Johnson K S, Coletti L J, 2009. Improved algorithm for the computation of nitrate concentrations in seawater using an in situ ultraviolet spectrophotometer. *Limnology and Oceanography-Methods*, 7(1): 132—143
- Shi X Y, Qi M Y, Tang H J *et al*, 2015. Spatial and temporal nutrient variations in the Yellow Sea and their effects on *Ulva prolifera* blooms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 36—43
- 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
- Zielinski O, Voß D, Saworski B *et al*, 2011. Computation of nitrate concentrations in turbid coastal waters using an *in situ* ultraviolet spectrophotometer. *Journal of Sea Research*, 65(4): 456—460

RELATIONSHIP BETWEEN GREEN TIDE OUTBREAK AND NITRATE AND HYDROLOGICAL ENVIRONMENTAL FACTORS IN THE SOUTH YELLOW SEA

PAN Jun^{1, 2, 3, 4}, YU Fei^{1, 2, 3, 5, 6}, WEI Chuan-Jie^{1, 2, 3, 4}, REN Qiang^{1, 2, 3, 5}, SUN Shu-Hui^{1, 3, 4}, LI Jing^{1, 3, 7}

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 4. *Center for Marine Environmental Engineering, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 5. *CAS Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 6. *Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*; 7. *CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*)

Abstract Based on the data of environmental factors from multiple voyages and fixed-point buoy about the green tide in the Yellow Sea during the spring to summer in 2016—2017. We focus on the recent progress on the origin and development process of the Yellow Sea green tides. The drifting and distribution of *Sargassum horneri* were surveyed by multi-disciplinary scientific investigation and research. In the present paper, we analyzed the key biological features of the causative algae and the main environmental factors affecting blooming and drifting of the green algae. The results showed that the bloating green algae of developmental processes were similar, while the impact weaker than 2016, while the impact obvious weaker than 2016, the “Red tide” and “Brown tide” exist at the same time and the trace of nitrate have different. Both of them in the Yellow Sea have certain inhibitory effects on the scale change of the green tide. By analyzing the environmental background of the Subei coastal and the South Yellow Sea to provide in-site data support, we concerned about the causes of the early development of the green tide and the changes in the scale of the green tide. These results can provide decision-making service for environmental management system of marine pollution prevention, ecological protection, and environmental restoration.

Key words the Yellow Sea; Green tide; late spring and early summer; environmental factor