

# 2017 年春、夏季南黄海西部营养盐的分布特征及其与浒苔暴发的关系\*

王俊杰<sup>1</sup> 于志刚<sup>1</sup> 韦钦胜<sup>2</sup> 董明帆<sup>1</sup> 杨福霞<sup>1</sup>  
李丹丹<sup>1</sup> 高志梅<sup>1</sup> 姚庆祯<sup>1①</sup>

(1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

**摘要** 基于 2017 年 4 月、5 月、6 月和 8—9 月在南黄海西部海域 4 个航次的现场调查, 分析了春至夏季逐月的营养盐分布特征及其影响因素, 初步探讨了营养盐与浒苔绿潮暴发的关系。结果表明: 春至夏季苏北近岸浅水区总体呈现出高温、低盐、高营养盐的特征, 且各理化要素垂向差异不明显; 同时该海域表层水体中的营养盐含量自 4 月至 5 月有所下降, 而后开始上升, 至 8—9 月达到最大浓度。受长江冲淡水的影响, 调查海域西南部表层存在向东北方扩展的低盐、高营养盐水体, 在夏季与苏北海域向外扩展的营养盐高值区连成一体。在调查海域的中部至东北部深水区, 入春后表层海水不断升温, 至夏季于底层形成显著的黄海冷水团, 并在其周围呈现出锋面特征; 受初级生产过程和温跃层的影响, 入春后该海域的上层营养盐浓度总体呈现出下降的趋势并在夏季维持了较低的水平, 而底层营养盐浓度从春季至夏季有所升高且影响范围不断向西南方向扩展, 至 8—9 月达到最大范围。苏北近岸海域丰富的营养盐为入春后大型藻类的生长和暴发提供了重要的物质基础, 而且 5 月南黄海西部相关海域表层营养盐浓度降低与浒苔、马尾藻等大型漂浮藻类暴发对营养盐的吸收利用有关。

**关键词** 营养盐; 浒苔; 苏北近海; 南黄海西部

中图分类号 P731.1 doi: 10.11693/hyhz20180400086

营养盐作为海洋生态系统的物质基础, 其水平和结构对浮游植物生物量和种类组成具有重要影响 (Justić *et al.*, 1995; Tyrrell, 1999), 并进而通过食物网循环作用于生态系统动力学过程。在陆架边缘海区, 陆海相互作用相对强烈, 而且近几十年来, 自然变化和人类活动已导致边缘海营养盐的分布和组成发生了显著变化, 并对海洋环境和生态系统造成了一系列负面影响 (Anderson *et al.*, 2002; Masó *et al.*, 2006; Danielsson *et al.*, 2008)。因此, 研究陆架边缘海营养盐的分布和变化, 对评估近岸环境状况具有重要的意义。

南黄海位于山东半岛成山头与朝鲜半岛长山串

连线以南、长江口北岸启东嘴与济州岛连线以北, 其周边入海河流众多, 除了最南部的长江以外, 还有灌河、射阳河、淮河入海水道等河流入海 (邹娥梅等, 2000; 孙湘平, 2006; 刘志亮等, 2009)。该海区地理位置和环境特殊, 地形由东西两面向中部缓倾, 长江冲淡水东北向扩展、黄海暖流、黄海冷水团及其锋面上升流、黄海沿岸流等共同构成了南黄海特有的环流体系和动力背景场 (苏育嵩, 1989; Lie, 1999; 高生泉等, 2003; 任慧军等, 2005; 秦毅, 2009; 韦钦胜等, 2011b), 并显著影响着营养盐的来源、分布和输运 (Wei *et al.*, 2016)。先前的研究显示, 河流输入、大气

\* 鳌山科技创新计划项目, 2016ASKJ02 号; 国家重点基础研究发展计划, 2017YFC1404402 号; 中央高校基本科研业务费专项, 201822006 号。王俊杰, 博士研究生, E-mail: wangjunjie@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 姚庆祯, 教授, E-mail: qzhyao@ouc.edu.cn

收稿日期: 2018-04-09, 收修改稿日期: 2018-07-05

沉降和沉积物-水界面的营养盐交换对该海域的营养盐水平具有显著影响(刘素美等, 2000; Wei *et al.*, 2015)。东北向扩展的长江冲淡水、苏北近岸河流入海后与海水混合形成的苏北沿岸水和夏季黄海冷水团附近的上升流是近岸海域营养盐的重要来源(王保栋等, 1999; Wei *et al.*, 2016)。受灌河、射阳河以及长江等河流输入的影响, 江苏沿岸海域氮营养盐浓度较高(王保栋等, 2001)。暖季由于温跃层的存在, 黄海中部海域活性营养盐总体呈现出由表层向底层逐渐增加的层化式垂向分布(韦钦胜等, 2011a, c)。

然而, 先前对南黄海营养盐的研究多以季节为时间尺度, 针对春、夏季交替阶段逐月的营养盐分布及其变化规律研究尚不多见。而且, 近 10 年来, 几乎每年春、夏季在南黄海都会大规模暴发浒苔灾害, 对沿海经济尤其是渔业和旅游业造成了巨大损失。在这一背景下, 分析春至夏季不同时间段营养盐的分布

状况具有一定的现实意义。据此, 本文根据 2017 年 4 月、5 月、6 月、8—9 月在南黄海西部所获取的四个航次的资料, 对该海域春至夏季逐月的营养盐分布特征及其影响因素进行分析, 并探讨营养盐与浒苔绿潮暴发的关系, 以期加深对南黄海营养盐生物地球化学过程的认识, 并为探讨营养盐在浒苔暴发过程中的作用提供依据。

## 1 采样及分析方法

### 1.1 采样站点

2017 年春、夏季 4 月 20 日—5 月 1 日、5 月 14—22 日、6 月 9—21 日、8 月 23 日—9 月 26 日利用“科学 3 号”调查船对南黄海西部海域进行了现场调查。各航次采样站位如图 1, 采样站位基本涵盖南黄海西部海域, 采样层次基本一致, 包括 0、5、10、20、30、50m 和底层。

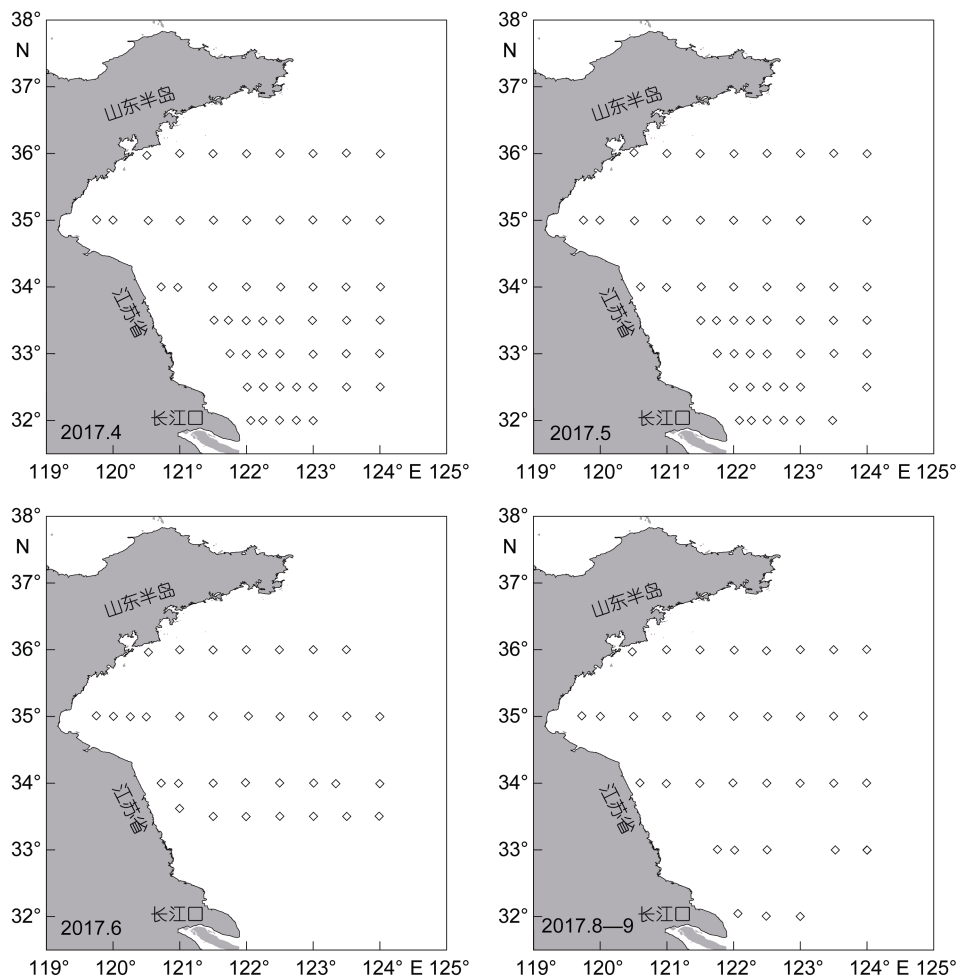


图 1 2017 年 4、5、6、8—9 月南黄海西部海域现场调查站位

Fig. 1 Sampling stations in the western South Yellow Sea in April, May, June, and August-September, 2017

## 1.2 样品采集和分析方法

现场使用 CTD 探头(SBE917 自容式温盐深探测系统)测定温度( $T$ )、盐度( $S$ )和深度,并用 Niskin 采水器采取不同深度的水样。水样采集后,立即用  $0.45\mu\text{m}$  醋酸纤维滤膜过滤(滤膜预先用 1:1000 的盐酸溶液浸泡 24h,然后用 Milli-Q 水洗至中性),滤液分别装入 2 个 100mL 聚乙烯瓶(预先用 1:5 盐酸溶液浸泡 24h 以上,然后用 Milli-Q 水洗至中性)中,一瓶加 2—3 滴氯仿常温保存用于硅酸盐( $\text{SiO}_3\text{-Si}$ )分析,另一瓶  $-20^\circ\text{C}$  冷冻保存用于其他营养盐分析。

样品在实验室中使用 QUATTRO 型营养盐自动分析仪测定(采用国家海洋局标准物质中心生产的营养盐标准系列作为外标质控样);各项目的检测限分别为硝酸盐( $\text{NO}_3\text{-N}$ ):  $0.02\mu\text{mol/L}$ ,亚硝酸盐( $\text{NO}_2\text{-N}$ ):  $0.02\mu\text{mol/L}$ ,氨氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ ):  $0.03\mu\text{mol/L}$ ,磷酸盐( $\text{PO}_4\text{-P}$ ):  $0.01\mu\text{mol/L}$ , $\text{SiO}_3\text{-Si}$ :  $0.04\mu\text{mol/L}$ 。溶解态无机氮( $\text{DIN}$ )= $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 南黄海西部海域春、夏季温度和盐度的分布特征

图 2、图 3 分别给出了 2017 年春、夏季不同航次得到的温度和盐度的平面分布。由图可知,春至夏季江苏近海总体呈现高温、低盐的特征,且各月份表层温、盐度分布和底层较为一致。这与苏北沿岸水的扩展和输运(韦钦胜等, 2012; 张志欣等, 2016)有关。同时,由于该区域水动力较强,也使得表、底层水文要素分布的差异较小。在南黄海西南部(即长江口外东北部)海域,表层存在一个向东北方扩展的低盐水体,从 4 月至 5 月其影响范围不断增大并向外海扩散;至 8 月,部分低盐水可被输运至  $123.5^\circ\text{E}$ 、 $33^\circ\text{N}$  附近海域。该低盐水的形成是一部分长江冲淡水向口门外东北海域扩展所致(王保栋, 1998; 朱建荣等, 2005; 米铁柱等, 2012)所致;同时由于夏季冲淡水的离岸输运,还使得 8 月在  $123.5^\circ\text{E}$ 、 $33^\circ\text{N}$  附近海域产生了一个相对孤立的低盐水团(Wei *et al.*, 2017)。夏季 8 月在调查海域东南部存在一高盐水,其在表、底层均由东南向西北扩展。这主要是台湾暖流北上的结果(张启龙等, 2007)。受黄海暖流残留水(汤毓祥等, 2000)的影响,4 至 5 月调查海域深水区存在一个由东南向西北延伸的高盐水团,该水团与近岸的低盐水之间形成明显的盐度锋面。从春季至夏季,调查海域深水区的底层温度均较低,而表层温度不断升高。夏季,整个

深水区底层被黄海冷水团所占据(赫崇本等, 1959; 于非等, 2006; 韦钦胜等, 2013),冷水团周围的等值线密集,形成较强的温度锋面。而且,春至夏季,由于上层海水受热增温显著,混合作用会不断减弱,因而在深水区的黄海冷水团海域逐步形成较强的温、密跃层(韦钦胜等, 2011a; 米铁柱等, 2012),这会导致该海域表、底层温差逐月增大。由图 2 可知,4 月调查海域深水区从表至底温度不断降低,此时垂向温差尚较小;至 5 月,表层海水受热增温,从表层至 10m 层温度稍有降低,由 10m 层至底层温度则大幅下降,表底层温差显著增大,且底层冷水团边界明显并向西南方向扩散;6 月,深水区表层温度进一步升高,表层与 10m 层温度差异较小且分布总体一致,但底层与表层海水的温差进一步增大,此时底层冷水团边界处的锋面特征显著;8—9 月,表层温度升至最高,底层冷水团特征也更加明显(强度和影响范围达到最大),且该海域底层与表层的温差亦达到最高。

### 2.2 南黄海西部海域春、夏季营养盐的分布特征及影响因素

图 4、图 5 和图 6 分别为 2017 年春、夏季调查海域  $\text{DIN}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  的平面分布。总体来看,苏北近岸和长江口外东北部海域的营养盐浓度较高,呈现出富营养特征。苏北海域表层水体中的各项营养盐浓度自 4 月至 5 月有所下降,而后开始上升,至 8—9 月达到峰值;其中该海域  $\text{DIN}$  浓度在 4 月最高可达  $20\mu\text{mol/L}$ ,至 5 月降低到最高  $15\mu\text{mol/L}$  左右,而后在 6 月至 8 月上升至  $28\mu\text{mol/L}$  以上; $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度从 4 月的  $0.45\mu\text{mol/L}$  下降至 5 月的  $0.3\mu\text{mol/L}$ ,而后在 6 月至 8 月上升至  $0.6\mu\text{mol/L}$  以上; $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度从 4 月份最高  $23\mu\text{mol/L}$  下降至 5 月份  $20\mu\text{mol/L}$ ,而后在 6 月至 8 月上升至  $22\mu\text{mol/L}$ 。长江口外东北部海域表层的  $\text{DIN}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度显著高于外海,如在 5 月  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  最高浓度可达  $26\mu\text{mol/L}$ , $\text{DIN}$  最高浓度可达  $22\mu\text{mol/L}$ ,而该海域表层  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度则没有呈现出显著高于外海的趋势;在夏季 8—9 月,长江口外东北部海域的营养盐高值区与苏北近海的高值区连成一体,营养盐浓度由岸向外呈梯度降低。由图 4 至图 6 还可以看出,自春季至夏季,调查海域中部到东北部深水区上层中的各项营养盐浓度总体呈下降趋势,并在夏季时维持了较低的浓度水平,如  $\text{DIN}$  浓度基本在  $1\mu\text{mol/L}$  左右, $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度基本在  $0.1\mu\text{mol/L}$  左右, $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度基本在  $1\text{—}2\mu\text{mol/L}$ ;而深水区底层中的营养盐浓度在春季至夏季则具有升高的现象,并在 8

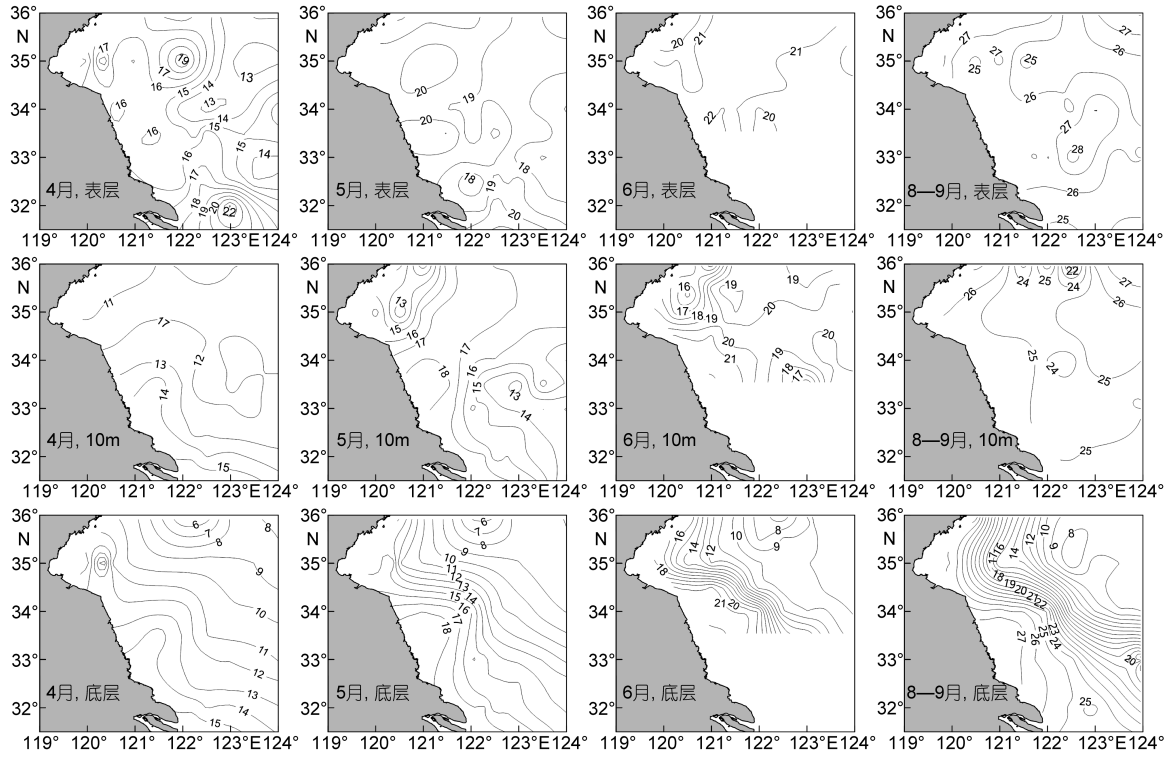


图2 2017年4、5、6、8—9月南黄海西部海域表层、10m、底层温度分布图(单位: °C)

Fig.2 Distribution of temperature in surface, 10m layer, and bottom of the western South Yellow Sea in April, May, June, and August-September, 2017 (unit: °C)

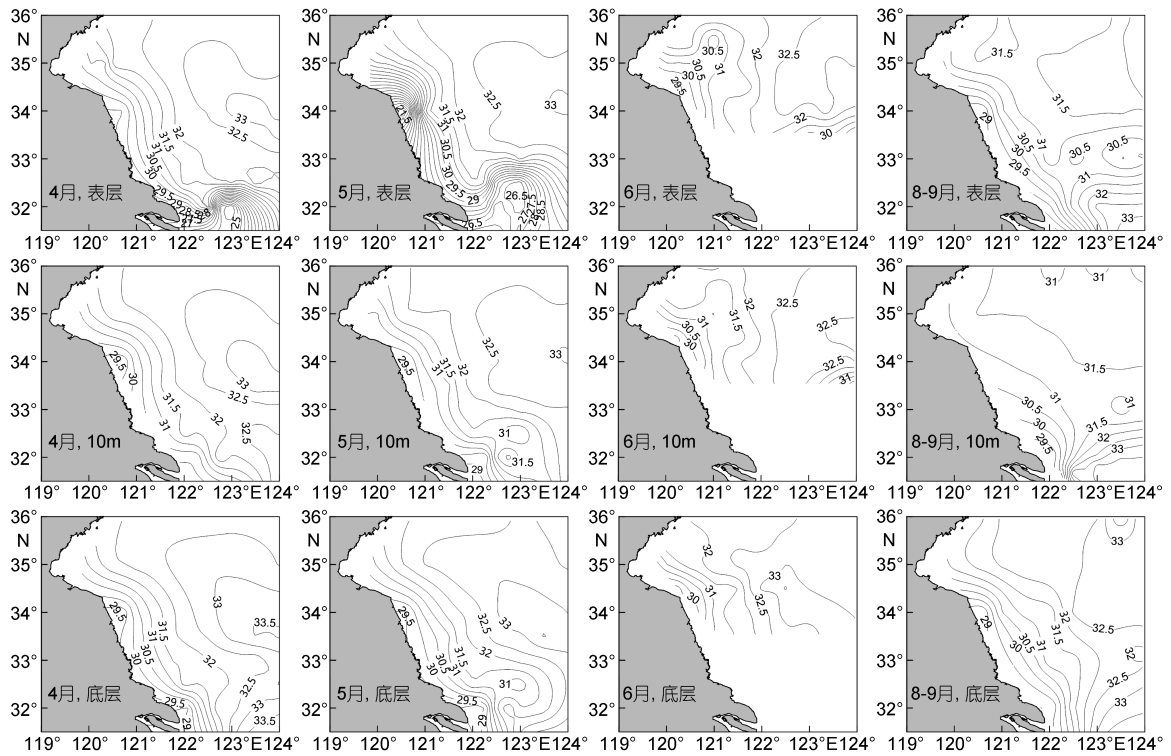


图3 2017年4、5、6、8—9月南黄海西部海域表层、10m、底层盐度分布图

Fig.3 Distribution of salinity in surface, 10m layer, and bottom of the western South Yellow Sea in April, May, June, and August-September, 2017

月维持了较高的浓度水平, 如 DIN 浓度由 4 月的  $10\mu\text{mol/L}$  以下上升至 8 月的  $15\mu\text{mol/L}$  以上,  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度由 4 月的  $0.5\mu\text{mol/L}$  左右上升至  $1.0\mu\text{mol/L}$  以上,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度由 4 月的  $10\mu\text{mol/L}$  左右上升至  $20\mu\text{mol/L}$  以上, 同时深水区营养盐高值区的影响范围从春季

至夏季不断向西南方向扩展, 至 8—9 月达到最大。此外, 由图 4—图 6 还可以看出, 研究海域 10m 层营养盐的分布趋势与表层较为一致, 营养盐高值区亦主要分布在近岸区域, 调查海域中部至东北部的营养盐浓度总体较低。

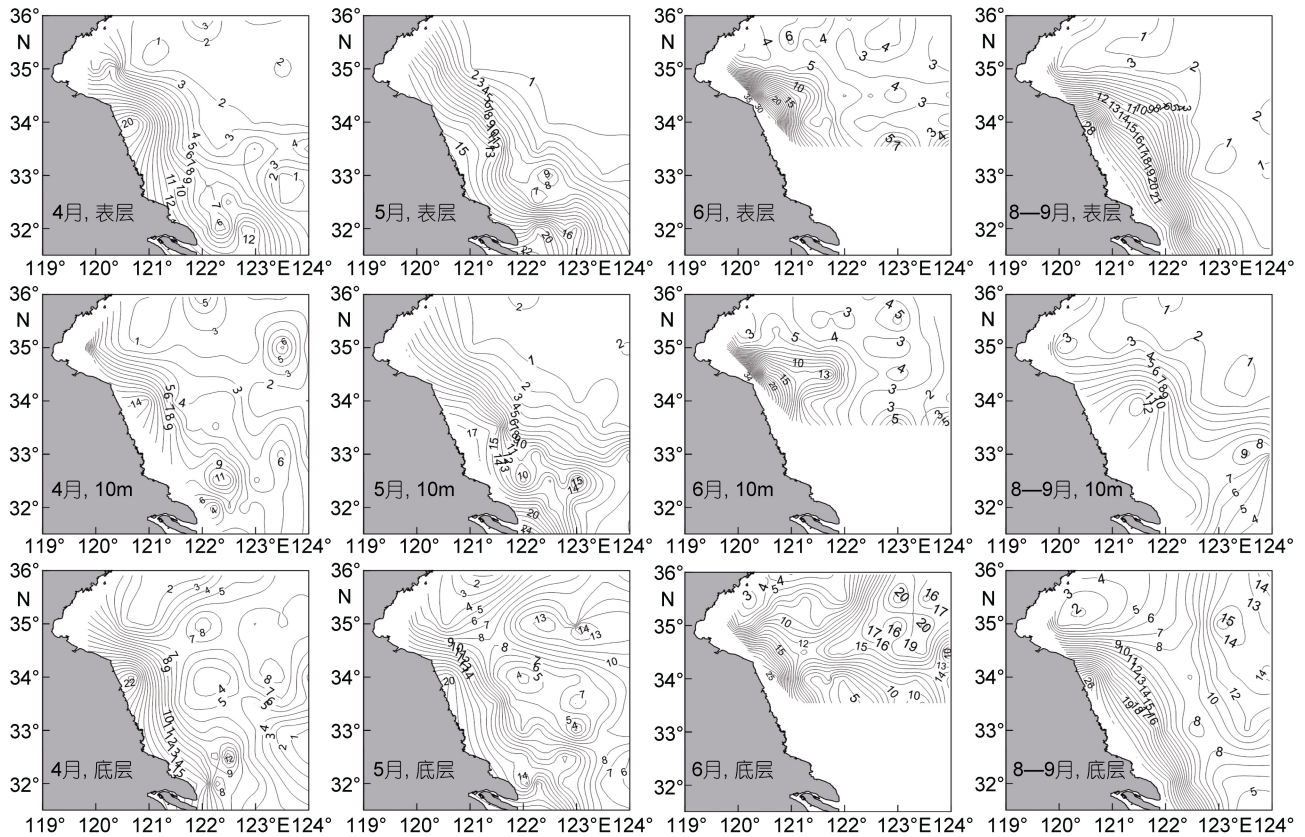


图 4 2017 年 4、5、6、8—9 月南黄海西部海域表层、10m、底层溶解态无机氮分布图(单位:  $\mu\text{mol/L}$ )

Fig.4 Distribution of DIN in surface, 10m layer, and bottom of the western South Yellow Sea in April, May, June, and August-September, 2017 (unit:  $\mu\text{mol/L}$ )

通过对分析南黄海不同航次的温度、盐度和营养盐分布, 可知江苏近岸海域的营养盐高值区与苏北沿岸水的扩展和输运有关。前期研究表明, 苏北沿岸的灌河、射阳河、淮河入海水道等多条入海河流可携入大量陆源营养物质(王婷等, 2011; 高嵩等, 2012; Li *et al.*, 2015), 这些营养盐在沿岸流水作用下不断向外扩展和输运(Wei *et al.*, 2016)。因此, 苏北近岸海域中的营养盐高值区与低盐水区总体相对应。同时, 苏北近海存在的水产养殖也可能是该海域氮、磷营养盐浓度较高的原因之一(Li *et al.*, 2015)。长江口外东北海域中的营养盐高值区是长江冲淡水的输运所致(王保栋, 1998), 而且冲淡水影响区的范围变化也总体对应着营养盐高值区的移动。进一步分析还发现, 在长江

冲淡水影响区, DIN 和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  的浓度较高而  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度较低, 尤其是在 4、5 月份, 这一方面可能与长江输送的营养盐组成与苏北近岸不同有关, 即输送了较多的氮、硅和较少的磷(米铁柱等, 2012); 另一方面, 春季浮游植物大量生长对磷的过度消耗亦会使该区域的  $\text{PO}_4\text{-P}$  呈现出相对缺乏的状态(米铁柱等, 2012; 方涛等, 2013)。春末至夏季, 南黄海中部深水区上层水体中的营养盐浓度总体上不断下降, 底层中的营养盐逐渐升高。这一现象与暖季南黄海中部的初级生产过程和温密跃层密切相关: 入春后, 南黄海中部浮游植物的繁殖会使上层水体中的营养盐含量逐渐降低, 再加之跃层对营养盐垂向输运的阻隔作用在逐渐增强, 上层水体中的营养盐含量往往在夏季降至



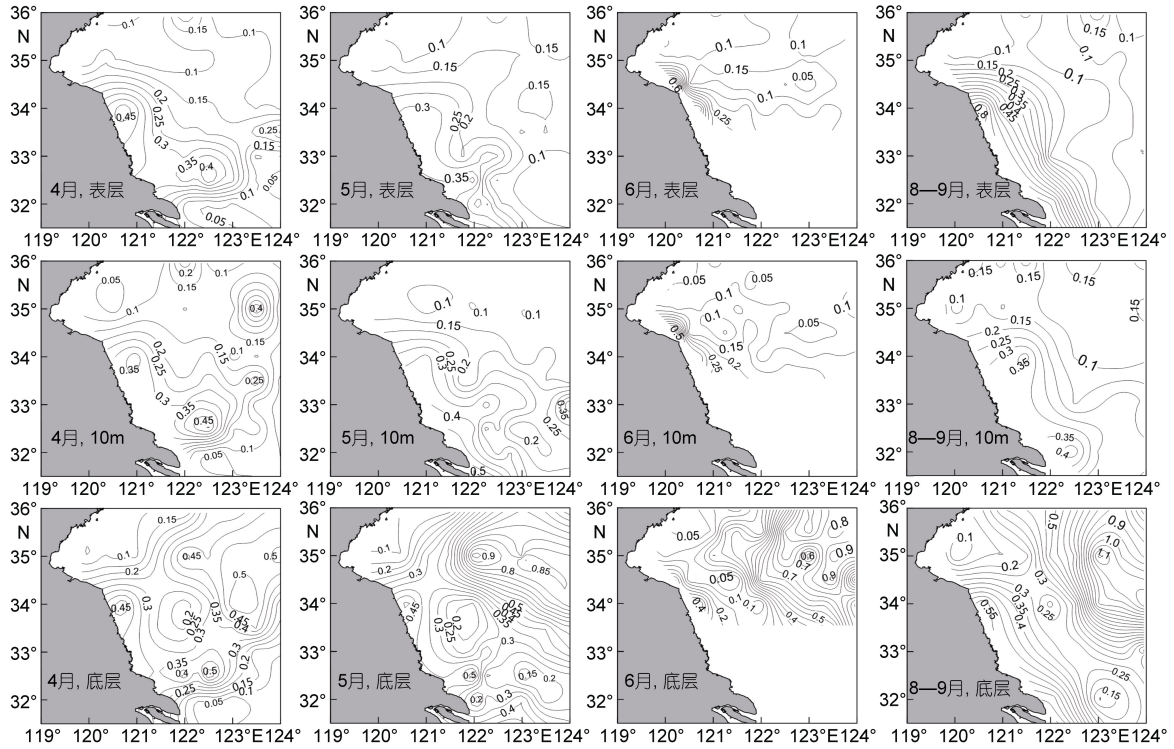


图5 2017年4、5、6、8—9月南黄海西部海域表层、10m、底层 PO<sub>4</sub>-P 分布图(单位: μmol/L)

Fig.5 Distribution of PO<sub>4</sub>-P in surface, 10m layer, and bottom of the western South Yellow Sea in April, May, June, and August-September, 2017 (unit: μmol/L)

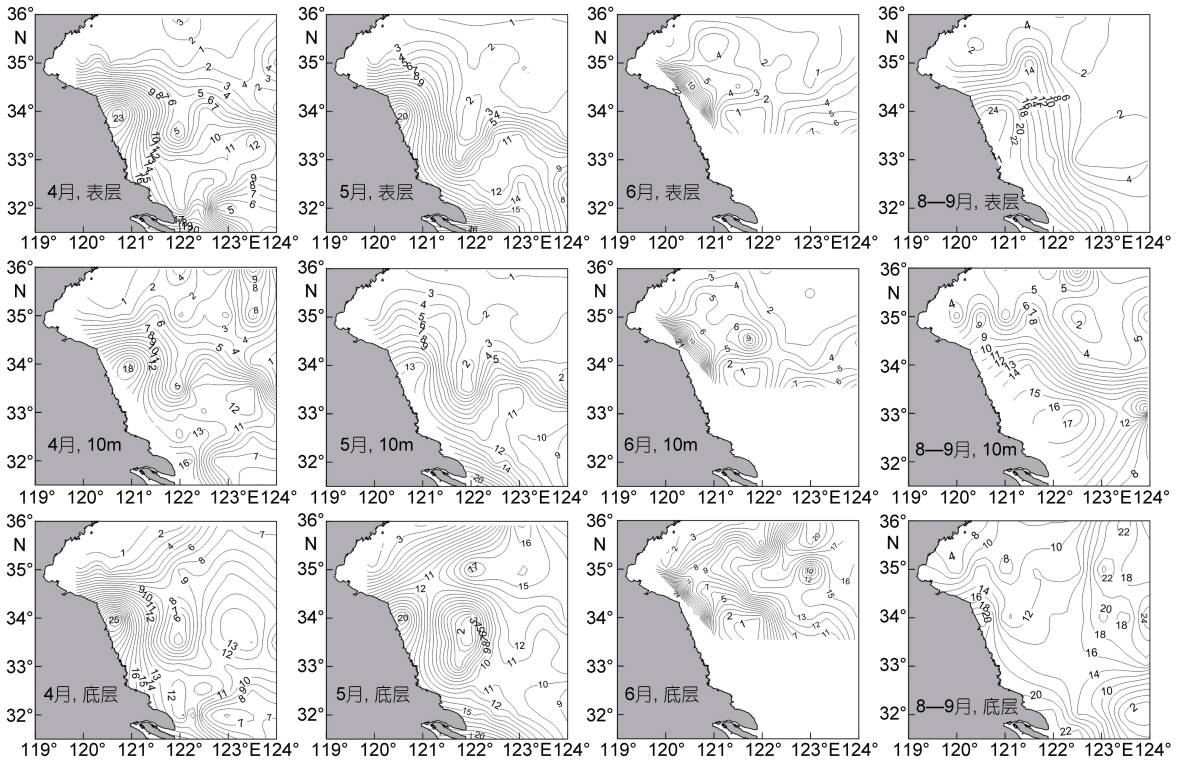


图6 2017年4、5、6、8—9月南黄海西部海域表层、10m、底层 SiO<sub>3</sub>-Si 分布图(单位: μmol/L)

Fig.6 Distribution of SiO<sub>3</sub>-Si in surface, 10m layer, and bottom of the western South Yellow Sea in April, May, June, and August-September, 2017 (unit: μmol/L)

最低; 上层水体中浮游植物的繁殖将促使有机物和生物残体不断向底层沉降, 沉降下来的有机质通过耗氧分解使营养盐在底层得以释放和累积(王保栋, 2000; 韦钦胜, 2016)。受此影响, 底层黄海冷水团海域内的 DIN、 $PO_4\text{-P}$  和  $SiO_3\text{-Si}$  浓度在 4 月至 8—9 月期间不断增高, 且营养盐高值区的范围随冷水团区域的扩展而在水平方向上有所增大。

### 2.3 南黄海营养盐与浒苔绿潮暴发的关系

前期研究表明, 受陆地径流和苏北沿岸流影响, 苏北近岸海域具有较高浓度的营养盐, 为该海域绿潮暴发提供了一定物质基础; 并且春季浮游植物大量增殖、形成藻华的过程对营养盐的大量吸收会导致水体中营养盐浓度有所下降(高嵩等, 2012)。4 月, 苏北近岸海域水体中的绿藻微观繁殖体在紫菜养殖区筏架上附着萌发, 随着水温上升迅速生长, 并在紫菜收割和筏架回收后成为漂浮藻体(韩红宾等, 2015)。5 月, 浒苔开始集中暴发于苏北盐城附近海域(图 7)。此时, 陆源输入的丰富营养盐为近岸水体中浒苔繁殖体的生长和大量繁殖提供了必要的物质基础(王婷等, 2011; 高嵩等, 2012)。由 2017 年 4 月至 5 月表层营养盐的分布变化可知, 在此期间苏北近岸海域表层各营养盐浓度呈降低趋势。这显示了浒苔暴发对营养盐的消耗。6 月, 浒苔从盐城连云港向北漂移, 其影响范围不断扩大, 并向山东半岛南

部海域聚集(图 7)。在此期间, 苏北近岸海域表层营养盐浓度较 5 月有所上升(图 4—6), 表明该海域内营养盐的消耗可能随浒苔向北迁移而有所减弱, 并在陆源持续输入下得到了一定补充。7 月, 浒苔主要分布于  $35^\circ\text{N}$  以北的山东半岛南部海域, 并开始衰退(图 7)。本研究也发现, 8—9 月山东半岛以南和  $35^\circ\text{N}$  以北海域中的表层 DIN 浓度较 6 月明显降低,  $PO_4\text{-P}$  和  $SiO_3\text{-Si}$  浓度亦有所下降, 这可能与前期(6 至 7 月)浒苔在向北迁移过程中对营养盐的吸收利用有关。尽管同期苏北近岸海域营养盐浓度较高, 且较 6 月份有显著上升, 但其距离山东半岛东南侧  $35^\circ\text{N}$  以北海域较远, 难以输送至此; 另外, 夏季该海域强烈的温跃层(韦钦胜等, 2010)也在一定程度上阻止了底层营养盐的垂向输送。因此山东半岛以南和  $35^\circ\text{N}$  以北海域中的表层营养盐被浒苔大量消耗后得不到有效补充, 而这一情况可能又促进了该海域浒苔的消亡。此外, 由 2017 年 4 月 22 日和 5 月 22 日在  $35^\circ\text{N}$  附近海域观测到的大型漂浮藻类的生物量可知, 绿潮生物量由 4 月的 0.0027 吨迅速增加至 5 月的 0.95 吨, 马尾藻生物量则由 0.0029 吨迅速增加至 4.9 吨(孔凡州等, 2018), 此变化与同时期该海域附近上层营养盐的降低总体相对应, 据此推测藻类的大量生长繁殖增加了 2017 年 5 月对南黄海西部海域营养盐的吸收利用。

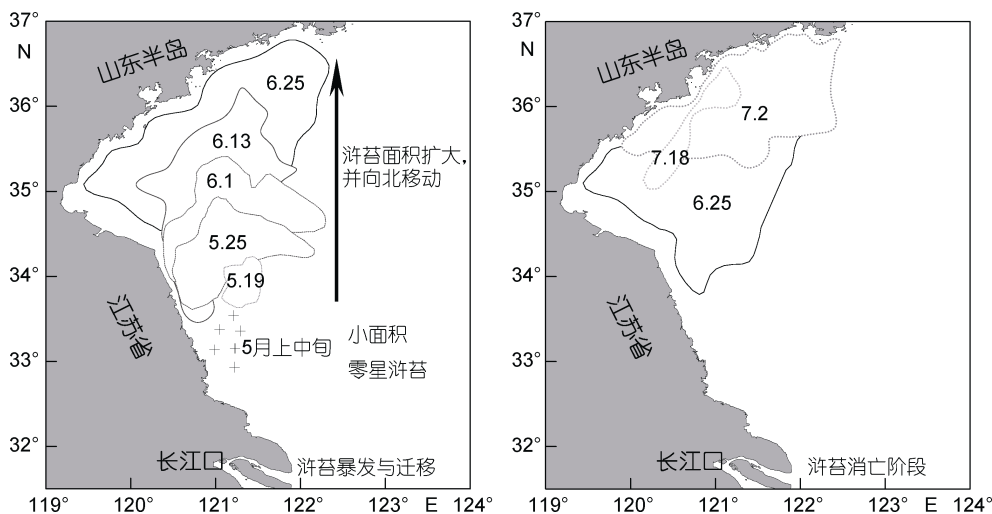


图 7 2016 年春、夏季浒苔绿潮不同发展阶段示意图(改绘自王萌等, 2017)

Fig. 7 The distribution and drift path of green tide in spring and summer, 2016 (modified from Wang *et al.*, 2017, the number indicates the date of remote sensing)

注: 图中数字为卫星图片拍摄日期

## 3 结论

通过对 2017 年 4 月、5 月、6 月、8—9 月南黄

海西部 4 个航次调查资料的分析, 得到如下结果:

(1) 春至夏季江苏近岸海域总体呈现出高温、低

盐的特征,各要素垂向差异不明显。在长江冲淡水影响下,调查海域西南部表层存在向东北方扩展的低盐水体,且从4—8月不断向外海扩散;受台湾暖流北上所致,夏季8月在调查海域东南部有一高盐水,其在表、底层均由东南向西北扩展;4—5月调查海域深水区存在由东南向西北延伸的黄海暖流残留水,并与近岸低盐水之间形成明显的盐度锋面;夏季整个深水区底层被黄海冷水团所占据,其周围的温度锋面特征显著。

(2) 苏北近岸和长江口外东北部海域中的营养盐浓度较高,其与苏北沿岸水和长江冲淡水的扩展及输运有关;苏北海域表层水体中的各项营养盐浓度自4月至5月有所下降,而后开始上升,至8—9月达到最大浓度;夏季苏北近海与长江口外东北部海域中的营养盐高值区连成一体,营养盐浓度由近岸向外海呈梯度降低。受初级生产过程和温跃层影响,春至夏季调查海域中部深水区上层营养盐浓度总体呈下降趋势并在夏季维持了较低的浓度水平,而深水区底层的营养盐浓度有所升高且影响范围不断向西南方向扩展,至8—9月达到最大范围。

(3) 苏北近岸海域丰富的营养盐为入春后大型藻类的生长和暴发提供了重要的物质基础,而且5月南黄海西部相关海域表层营养盐浓度的降低与浒苔、马尾藻等大型漂浮藻类暴发对营养盐的吸收利用有关。

致谢 中国海洋大学乔玲、陈阳阳、张梅、马曼曼、李思琦同学协助进行现场采样,“科学3号”调查船全体人员为调查工作提供了大量帮助和支持,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

于非,张志欣,刁新源等,2006. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析. 海洋学报, 28(5): 26—34

王萌,郑伟,李峰,2017. Himawari-8 气象卫星黄海浒苔动态监测. 应用气象学报, 28(6): 714—723

王婷,石晓勇,张传松等,2011. 2008年黄海浒苔绿潮暴发区营养盐浓度化及分布特征. 海洋通报, 30(5): 578—582

王保栋,1998. 长江冲淡水的扩展及其营养盐的输运. 黄渤海海洋学报, 16(2): 41—47

王保栋,2000. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系. 海洋学报, 22(6): 47—54

王保栋,王桂云,刘峰,1998. 南黄海春季海水化学要素的分布特征. 海洋环境科学, 17(3): 45—50

王保栋,王桂云,郑昌洙等,1999. 南黄海营养盐的平面分布及横向输运. 海洋学报, 21(6): 124—129

王保栋,刘峰,战闰,2001. 黄海生源要素的生物地球化

学研究评述. 黄渤海海洋, 19(2): 99—106

韦钦胜,2016. 南黄海及长江口外海域化学水文学特征、机制和生态响应研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文

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输运的影响. 地球科学进展, 26(2): 145—156

韦钦胜,于志刚,葛人峰等,2013. 黄海西部沿岸冷水在夏季南黄海西部底层冷水形成和季节演变过程中作用的化学水文学分析. 海洋与湖沼, 44(4): 890—905

韦钦胜,葛人峰,李艳等,2012. 夏季江苏近海水文学要素特征及其对沿岸水东北向扩展的指示. 海洋学报, 34(5): 197—204

韦钦胜,葛人峰,李瑞香等,2011a. 南黄海西部 36°N 断面生态环境特征及其季节变化. 海洋学报, 33(5): 61—72

韦钦胜,傅明珠,葛人峰等,2010. 南黄海冷水域 35°N 断面化学水文学特征及营养盐的季节变化. 环境科学, 31(9): 2063—2074

韦钦胜,臧家业,魏修华等,2011c. 秋季南黄海西部营养盐的分布及其与环流场的关系. 海洋学报, 33(1): 74—82

方涛,贺心然,冯志华等,2013. 灌河口邻近海域春季浮游植物的生态分布及其营养盐限制. 生态学报, 33(15): 4567—4574

孔凡洲,姜鹏,魏传杰等,2018. 2017年春、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

朱建荣,王金辉,沈焕庭等,2005. 2003年6月中下旬长江口外海区冲淡水和赤潮的观测及分析. 科学通报, 50(1): 59—65

任慧军,詹杰民,2005. 黄海冷水团的季节变化特征及其形成机制研究. 水动力学研究与进展, 20(S1): 887—896

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

刘素美,张经,陈洪涛,2000. 黄海和东海生源要素的化学海洋学. 海洋环境科学, 19(1): 68—74

米铁胜,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

汤毓祥,邹娥梅,李兴宰等,2000. 南黄海环流的若干特征. 海洋学报, 22(1): 1—16

孙湘平,2006. 中国近海区域海洋. 北京: 海洋出版社, 276—280

苏育高,1989. 黄、东海地理环境与环流系统分析——长江口及济州岛邻近海域综合调查研究报告(第二章). 青岛海洋大学学报, 19(1): 145—158

邹娥梅,郭炳火,汤毓祥等,2000. 1996年春季南黄海水文特征和水团分析. 海洋学报, 22(1): 17—26

张志欣,郭景松,乔方利等,2016. 苏北沿岸水的去向与淡水来源估算. 海洋与湖沼, 47(3): 527—532

张启龙,王凡,赵卫红等,2007. 舟山渔场及其邻近海域水团的季节特征. 海洋学报, 29(5): 1—9

秦毅,2009. 江苏近海的环流动力研究进展. 科学技术与工程, 9(12): 3389—3394

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

高生泉,林以安,金明明等,2003. 山东半岛以南水域营养盐的时空分布及其与鱼产卵场的关系. 海洋学报, 25(S2): 157—166

韩红宾,华梁,霍元子等,2015. 黄海绿潮暴发前江苏紫菜养殖海域绿藻显微繁殖体分布特征. 上海海洋大学学报,



- 24(3): 365—374
- 赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友等, 1959. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨. 海洋与湖沼, 2(1): 11—15
- Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M, 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 25(4): 704—726
- Danielsson Å, Papush L, Rahm L, 2008. Alterations in nutrient limitations—Scenarios of a changing Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, 73(3—4): 263—283
- Justić D, Rabalais N N, Turner R E, 1995. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 30(1): 41—46
- Li H M, Zhang C S, Han X R *et al*, 2015. Changes in concentrations of oxygen, dissolved nitrogen, phosphate, and silicate in the southern Yellow Sea, 1980—2012: sources and seaward gradients. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 44—55
- Masó M, Garcés E, 2006. Harmful microalgae blooms (HAB); problematic and conditions that induce them. *Marine Pollution Bulletin*, 53(10—12): 620—630
- Lie H J, 1999. On the Huanghai (Yellow) Sea circulation: a review by current measurements. *Acta Oceanologica Sinica*, 18(3): 355—374
- Tyrrell T, 1999. The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production. *Nature*, 400(6744): 525—531
- Wei Q S, Yao Q Z, Wang B D *et al*, 2015. Long-term variation of nutrients in the southern Yellow Sea. *Continental Shelf Research*, 111: 184—196
- Wei Q S, Yu Z G, Wang B D *et al*, 2016. Coupling of the spatial-temporal distributions of nutrients and physical conditions in the southern Yellow Sea. *Journal of Marine Systems*, 156: 30—45
- Wei Q S, Yu Z G, Wang B D *et al*, 2017. Offshore detachment of the Changjiang River plume and its ecological impacts in summer. *Journal of Oceanography*, 73(3): 277—294

## DISTRIBUTIONS OF NUTRIENTS IN THE WESTERN SOUTH YELLOW SEA IN SPRING AND SUMMER OF 2017 AND THEIR RELATIONSHIP WITH *ULVA PROLIFERA* OUTBREAKS

WANG Jun-Jie<sup>1</sup>, YU Zhi-Gang<sup>1</sup>, WEI Qin-Sheng<sup>2</sup>, DONG Ming-Fan<sup>1</sup>, YANG Fu-Xia<sup>1</sup>,  
LI Dan-Dan<sup>1</sup>, GAO Zhi-Mei<sup>1</sup>, YAO Qing-Zhen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

**Abstract** Based on the on-site survey of four voyages in the western South Yellow Sea in April, May, June, and August-September 2017, the distribution characteristics of nutrients and their impact factors from spring to summer were analyzed. The relationship between nutrients and *Ulva prolifera* outbreak was explored. The results show that in the Subei (North Jiangsu) coastal area in spring-summer, there was a trend of temperature rising, salinity decreasing, and nutrient concentrations increasing in horizontal directions but no significant vertical difference was presented. The nutrient concentrations in the surface of Subei coastal area decreased from April to May and then reached the peak point in August-September. The shallow water area near the north of the Changjiang (Yangtze) River in the spring to summer was characterized by high temperature, low salinity, and high nutrient contents, while the vertical difference of physical and chemical elements was not obvious. At the same time, the nutrient contents in the surface water of the sea area declined from April to May, and then rose to the peak concentrations in August-September. Affected by the Changjiang River Dilute Water, low-salinity and high-nutrient saline waters formed, expanded to the northeastern and southwestern parts of the sea area, and integrated into the nutrient-rich areas that extended outward off the northern Jiangsu. In the deep-water area from the central to the northeast of the surveyed sea area, the surface seawater was heating up after the spring, and a significant Yellow Sea Cold Water Mass was formed in the bottom layer in the summer with a frontal feature around the cold water mass. Affected by the primary production and the thermocline, after the spring, the nutrient concentrations in the upper layers of the sea area showed a downward trend and maintained a low level in the summer, while the bottom nutrient concentrations increased from spring to summer and the influence range continued to expand southwestward. The maximum range was reached in September. The rich nutrients in the coastal waters of the northern Jiangsu provided an important material basis for the growth and outbreak of macroalgae after spring, and the reduction of surface nutrient concentrations in the relevant sea areas in the western South Yellow Sea in May was related to the absorption and utilization of nutrients by the large-scale outbreaks of floating algae such as *U. prolifera* and *Sargassum* sp.

**Key words** nutrients; *Ulva prolifera*; Subei coastal area; the western South Yellow Sea