

张海波, 刘珂, 苏荣国, 等. 2018 年南黄海浒苔绿潮迁移发展规律与营养盐相互关系探究[J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 30–39, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.004

Zhang Haibo, Liu Ke, Su Rongguo, et al. Study on the coupling relationship between the development of *Ulva prolifera* green tide and nutrients in the southern Yellow Sea in 2018[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(8): 30–39, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.004

2018 年南黄海浒苔绿潮迁移发展规律 与营养盐相互关系探究

张海波¹, 刘珂¹, 苏荣国¹, 石晓勇^{1,2*}, 裴绍峰³, 王修林¹, 王国善², 王爽¹

(1. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2. 自然资源部海洋减灾中心, 北京 100194; 3. 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 根据 2018 年 4 月 (春季, 绿潮前期) 和 7 月 (夏季, 绿潮后期) 南黄海营养盐、温度、盐度等水文参数及每日绿潮卫星监测数据, 深入分析 2018 年绿潮的发展规律与营养盐结构特征之间的关系。结果表明: 4 月 25 在江苏南通外海首次发现浒苔绿潮, 8 月中旬在山东半岛近海消亡, 其发展区域集中在 122°E 以西近海, 且快速增殖阶段处在 35°N 以南江苏近海。各组分的营养盐浓度受沿岸径流、冷水团及生物作用等因素影响, 均呈现江苏近海高外海以及北部低的特征。对比绿潮发展和营养盐分布呈现 3 个明显的绿潮-营养盐特征区域: 高营养盐-绿潮快速发展区域 (35°N 以南, 122°E 以西, 江苏近海); 低营养盐-绿潮消亡区域 (35°N 以北, 122°E 以西, 山东半岛外海域) 及 122°E 以东外海无绿潮区域。不同特征区营养盐变化表明, 江苏近岸较高的营养盐含量 ($\text{NO}_3\text{-N} > 6.5 \mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} > 0.27 \mu\text{mol/L}$) 和丰富来源是浒苔萌发和绿潮快速发展的重要物质基础, 为绿潮发展提供了主要的氮、磷生源要素。北部山东半岛南外海较低的营养盐水平 (7 月, $\text{DIN} < 2 \mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} < 0.03 \mu\text{mol/L}$) 是限制绿潮持续发展的重要因素。

关键词: 绿潮; 浒苔; 营养盐; 发展阶段; 南黄海; 时空变化

中图分类号: X55; Q178.53; P76

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)08-0030-10

1 引言

绿潮是由于近海富营养化等因素引发大型绿藻急速增殖聚积的现象, 近些年来成为一种世界范围内的海洋生态灾害^[1-3]。南黄海自 2007 年已连续 13 年 (至 2019) 受到漂浮浒苔 (*Ulva prolifera*) 绿潮的影响^[4], 暴发因素主要分为生物和环境因素。首先浒苔具有快速吸收利用营养盐、繁殖方式多样性、生长速度快

及较强的适应性等优势^[5-7], 成为绿潮优势藻; 其次南黄海近海丰富的营养盐、风和流的作用、适宜的温度光照等环境因素^[8] 使得其成为世界最大规模的绿潮灾害。绿潮灾害生消过程中会占据生存空间, 影响生物多样性、养殖业及旅游观光业, 给生态环境和经济发展带来损害^[9]。

营养盐作为生物生长必需的生源要素, 其含量和结构对群落结构有重要影响^[10]。营养盐超标导

收稿日期: 2020-03-31; 修订日期: 2020-06-02。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC1402101); 中央高校基本科研业务费专项 (201961011); 国家自然科学基金 (41306175); 国家海洋局海洋减灾中心科研项目 (2014AA060)。

作者简介: 张海波 (1990—), 男, 山东省枣庄市人, 博士, 主要从事海洋富营养化、近海生态环境演变研究。E-mail: zhanghb1990@163.com

* 通信作者: 石晓勇, 教授, 主要从事近海水体富营养化, 赤潮、绿潮灾害生消机制研究。E-mail: shixy@ouc.edu.cn

致海水富营养化是赤潮、绿潮等海洋灾害频繁暴发的主要原因^[11-13]。浒苔藻能同时吸收利用多种形态的N、P组分,丰富的营养盐尤其是充足的N源是其生长的重要基础^[14-16]。南黄海属于北太平洋西部半封闭陆架浅海,西南近海受人类活动以及洋流系统等因素影响营养盐含量丰富,北部受季节性冷水团及缺少输入源影响,营养盐含量低^[17]。南黄海绿潮特征为持续时间长(4月底至8月初)、影响范围广(32°~37°N)^[18],从南向北漂移发展过程中经历了复杂的环境,在不同阶段内受到影响因素不同^[19]。

为进一步分析南黄海绿潮发展规律与营养盐区域特征关系,及不同发展阶段营养盐来源。本文根据2018年绿潮发展时空变化及暴发前后营养盐现存变化区域特征,深入分析南黄海营养盐与绿潮相互影响,以期对绿潮发展规律及其生态环境影响做进一步了解。

2 调查区域与分析方法

2.1 调查区域和站位

分别于2018年4月(春季,3月28日至4月4日,绿潮暴发前)和7月(夏季,7月24-30日,绿潮发展后期),搭载国家基金委共享航次——“东方红2”号科考船于南黄海海域进行调查。调查范围集中在32°~36.2°N, 124°E以西海域,包含除海州湾近海外绿潮影响海域(图1)。

2.2 样品采集与分析

现场使用 Seabird 911-Niskin 联用采水和测定温度(T)和盐度(S)参数,春季采集表层、中层和底层水体,夏季采集表层、真光层、中层和底层水体。水样经 GF/F(Whatman, 450°C 灼烧 4 h)过滤后冷冻保存,使用 SEAL-AA3 流动分析仪测定,各营养盐均按照海洋调查规范方法(GB/T 12763.6—2007)测定,其中 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 采用重氮-偶氮法(NO_3^- -N 铜-镉还原), NH_4^+ -N 使用靛酚蓝法, PO_4^{3-} -P 使用磷钼蓝法, SiO_3^{2-} -Si 以硅钼蓝法测定。 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^{2-} -Si 检出限分别为 0.02 $\mu\text{mol/L}$ 、0.02 $\mu\text{mol/L}$ 、0.04 $\mu\text{mol/L}$ 、0.02 $\mu\text{mol/L}$ 、0.03 $\mu\text{mol/L}$ 。溶解无机氮(DIN)为 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 加和。海水总悬浮颗粒物(Total Suspended Particulate, TSP)使用重量法^[20]采集测定。各营养盐平面分布图使用 Surfer 12 绘制。

2.3 浒苔绿潮规模日变化数据来源

2018年绿潮漂移路径、分布面积变化数据收集自自然资源部北海预报中心每日大型藻类预警公报,其结果解译自 MODIS-TERRA 和 RADARSAT 卫星数据^[21-22]。

3 结果与讨论

3.1 2018年南黄海浒苔绿潮的发展特征

2018年4月25日在江苏南通近海首先发现零星漂浮浒苔,随后在适宜光照、温度等^[23]因素影响及风

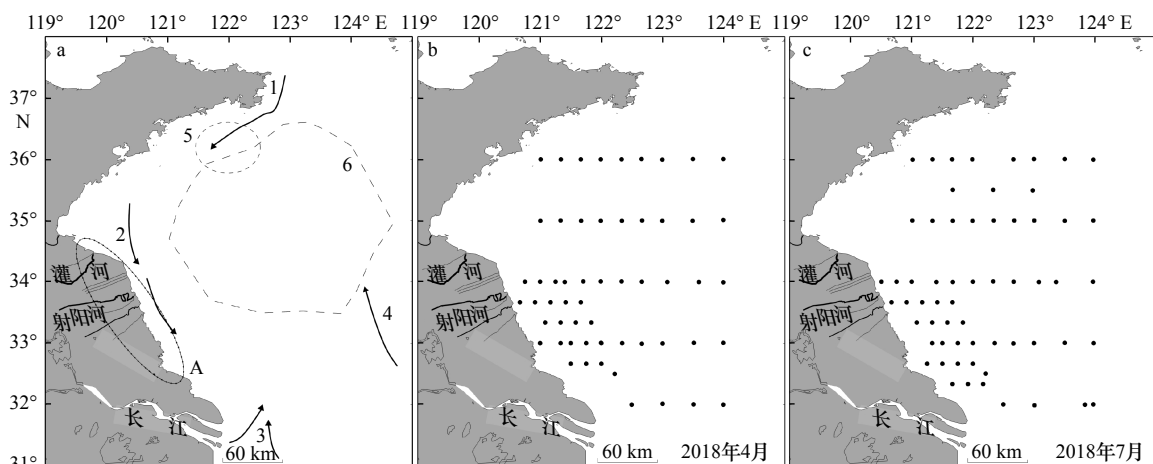


图1 南黄海研究区域洋流系统(a)及站位设置(b, c)

Fig. 1 The current system (a) and sampling stations (b, c) in the study area of the southern Yellow Sea

1. 鲁北沿岸流; 2. 黄海沿岸流和苏北沿岸流; 3. 长江冲淡水-台湾暖流; 4. 黄海暖流; 5. 青岛冷水团(春季); 6. 黄海冷水团(夏季、秋季);
A. 苏北沿岸径流

1. Lubei Coastal Current; 2. Yellow Sea Coastal Current and Subei Coastal Current; 3. Changjiang Diluted Water and Taiwan Warm Current; 4. Yellow Sea Warm Current; 5. Qingdao Cold Water Mass (Spring); 6. Yellow Sea Cold Water Mass (Summer, Autumn); A. Subei Coastal Diluted Water

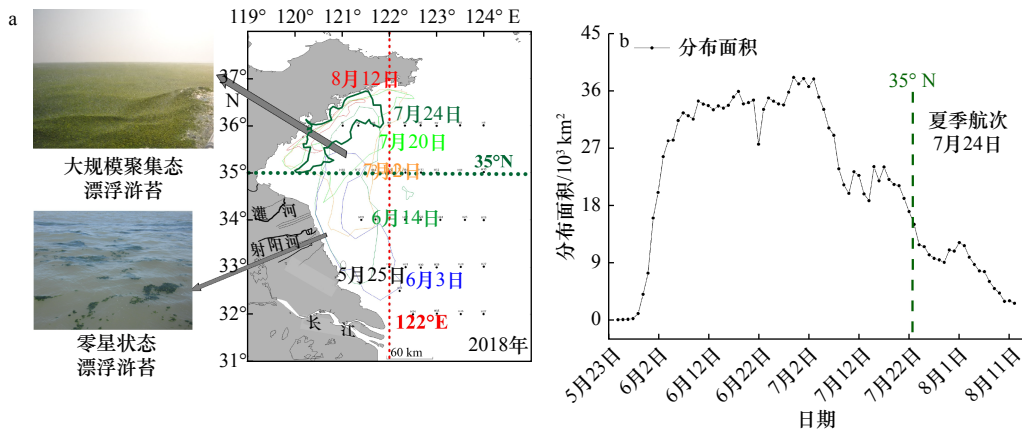


图2 2018年南黄海漂浮浒苔绿潮规模(多边形为绿潮边界范围)和位置发展变化特征
Fig. 2 The development of floating *Ulva prolifera* green tide in the southern Yellow Sea in 2018

和洋流^[6]控制下,向北漂移并不断增殖扩大。5月30日漂移至35°N线附近(图2)。6月29日,绿潮分布面积和覆盖面积达到最大(38046 km²和193 km²)。7月23日后,绿潮完全漂浮至35°N以北海域,随后分布面积不断减小进入消亡期。8月中旬完全消失,持续时间约110余天^[24]。

根据浒苔聚积状态分析,江苏近海绿潮初期以零星状态(<100 cm²)和小的条状(<3 m²)浒苔斑块为主^[25],且藻体呈墨绿色,藻体内叶绿素(1.1~1.4 mg/g)及N、P元素(N>40 mg/g, P>0.6 mg/g,干重)含量较高。当绿潮进入35°N以北山东半岛南部外海,绿潮以长条状(>100 m)和高聚积状态(>1 km²)为主,聚积的浒苔斑块最厚达0.5 m,藻体呈浅绿色,藻体内叶绿素(<0.4 mg/g)和N、P元素(N<20 mg/g, P<0.2 mg/g,干重)含量较江苏近海明显降低^[26-27]。对绿潮暴发海域、规模变化和漂移路径对比分析发现,其发展集中在122°E以西近海,在南部江苏近海绿潮处于快速增长阶段;当绿潮完全进入北部(35°N以北),其规模迅速减小,绿潮处于快速消亡阶段。

3.2 春、夏季绿潮期间南黄海营养盐分布特征

春季南黄海营养盐主要受径流输入^[28]和沿岸流混合(表1, TSP较高)及北部青岛冷水团和东海暖流影响^[29-31],各营养盐均呈现明显的西南江苏近海高、北部区域(约35°N以北)低的分布特征(图3)。其中DIN范围在0.62~55.23 μmol/L之间,平均含量为(8.86±8.71) μmol/L,其主要组分为NO₃-N,约占DIN的85.9%;其中表层受径流输入影响含量为(11.56±11.88) μmol/L,高于中层((6.06±3.57) μmol/L)和底层((7.21±3.79) μmol/L)。PO₄³⁻-P含量在0.01~0.79 μmol/L之间,平均为

(0.30±0.18) μmol/L;东部深层水受暖流^[30]影响呈现高值,垂向分布从表层向底层逐渐升高。SiO₃²⁻-Si含量在0.26~28.07 μmol/L之间,平均含量为(8.47±5.6) μmol/L,同DIN和PO₄³⁻-P分布趋势相同,垂向分布为表层受近岸混合影响含量((9.49±6.8) μmol/L)最高,其次为受再悬浮影响的底层((8.07±4.39) μmol/L),中层((7.24±4.23) μmol/L)最低。

夏季各营养盐组分较春季下降明显,分布同春季类似,整体呈现西南近海高、北部低的特征。受大范围的温跃层影响,北部真光层以上营养盐被消耗利用而得不到及时补充,含量较低,而中层以下受冷水团以及底层再悬浮释放^[32]等因素影响,营养盐含量高。其中DIN平均含量为(6.09±5.92) μmol/L,较春季降低30.9%,高值区集中在江苏和长江口外海域,低值区在北部冷水团上层海域,DIN含量在1 μmol/L以下,不利于漂浮浒苔的生长^[33],表层受沿岸水影响含量较高,垂向从真光层向底层逐渐上升(图4,表1)。PO₄³⁻-P平均含量为(0.19±0.21) μmol/L,较春季下降36.7%。受浒苔及浮游微藻等对P吸收储存^[34]及温跃层限制影响,表层和真光层含量((0.13±0.17) μmol/L和(0.10±0.13) μmol/L)明显低于中层和底层((0.21±0.19) μmol/L和(0.36±0.23) μmol/L),同DIN类似北部表层含量低于0.03 μmol/L,较低的磷不利于生物光合作用。SiO₃²⁻-Si平均含量为(7.33±6.36) μmol/L,较春季下降13.4%,降幅低于DIN和PO₄³⁻-P,其分布特征同DIN和PO₄³⁻-P类似,高值区集中在受长江、江苏近岸径流影响海域,低值区在北部冷水团上层。

对比春、夏季调查海域内营养盐结构特征发现(表1),春季各营养盐比值均偏离Redfield比值^[35],其

表1 南黄海调查海域春、夏季不同水团中温度 (T)、盐度 (S)、营养盐浓度

Table 1 Salinity, temperature, nutrient concentrations in different water-masses of the study area in the southern Yellow Sea during spring and summer

	2018年4月						
	整体	表层	中层	底层	沿岸水	冷水团	黄海暖流
特征	-	-	-	-	$S < 30$	$T < 6.98^\circ\text{C}$	$S > 33$
样品数/个	-	59	59	59	8	19	17
$T/^\circ\text{C}$	9.21±2.60	10.77±2.87	8.06±1.51	7.96±1.58	14.11±1.2	5.64±0.92	9.38±1.11
S	32.19±1.04	31.71±1.33	32.55±0.44	32.6±0.50	29.12±0.90	32.36±0.08	33.28±0.25
TSP/mg·L ⁻¹	70.42±85.14	85.14±89.78	51.87±74.19	70.46±90.06	106.75±17.12	17.99±2.54	32.15±27.61
NO ₃ ⁻ -N/μmol·L ⁻¹	7.61±8.75	10.48±11.8	4.72±3.71	5.75±3.94	33.77±10.59	1.16±1.18	5.91±1.41
NO ₂ ⁻ -N/μmol·L ⁻¹	0.14±0.10	0.14±0.09	0.15±0.10	0.15±0.11	0.20±0.04	0.07±0.05	0.22±0.11
NH ₄ ⁺ -N/μmol·L ⁻¹	1.11±0.66	0.94±0.56	1.19±0.73	1.3±0.69	1.18±1.00	1.65±0.50	0.70±0.34
DIN/μmol·L ⁻¹	8.86±8.71	11.56±11.88	6.06±3.57	7.21±3.79	35.15±10.58	2.89±1.35	6.83±1.45
PO ₄ ³⁻ -P/μmol·L ⁻¹	0.30±0.18	0.25±0.17	0.32±0.17	0.35±0.19	0.47±0.17	0.12±0.10	0.47±0.10
SiO ₃ ²⁻ -Si/μmol·L ⁻¹	8.52±5.59	9.49±6.80	7.24±4.23	8.07±4.39	20.85±4.66	2.26±2.14	10.17±1.49
N/P	42.47±69.29	59.7±77.94	23.05±14.48	37.11±82.74	80.5±29.99	63.13±114.49	14.54±1.67
Si/N	1.13±0.62	1.13±0.81	1.17±0.46	1.08±0.36	0.61±0.09	0.70±0.45	1.54±0.32
Si/P	34.16±37.47	44.74±41.22	22.5±8.19	30.05±44.86	50.16±26.33	31.52±63.13	22.46±5.69

	2018年7月						
	整体	表层	真光层	中层	底层	沿岸水	冷水团
特征	-	-	-	-	-	$S < 30$	$T < 14^\circ\text{C}$
样品数/个	-	61	35	39	61	15	43
$T/^\circ\text{C}$	20.20±6.85	25.00±1.73	23.69±3.35	16.32±6.29	14.23±6.98	24.79±1.64	9.84±1.72
S	31.63±1.26	30.6±1.32	31.69±0.65	32.44±0.61	32.47±0.55	28.66±0.82	32.7±0.24
TSP/mg·L ⁻¹	27.46±24.99	38.56±37.13	19.76±8.88	19.88±8.23	25.32±12.53	70.98±47.07	19.39±4.15
NO ₃ ⁻ -N/μmol·L ⁻¹	4.85±5.29	6.18±6.87	3.02±3.93	3.88±3.86	5.67±3.62	15.18±6.03	4.37±3.08
NO ₂ ⁻ -N/μmol·L ⁻¹	0.39±0.47	0.37±0.34	0.51±0.62	0.46±0.57	0.46±0.54	0.45±0.32	0.13±0.15
NH ₄ ⁺ -N/μmol·L ⁻¹	0.87±0.82	1.25±1.05	0.75±0.54	0.61±0.48	0.66±0.57	1.82±1.41	0.50±0.46
DIN/μmol·L ⁻¹	6.09±5.92	7.79±7.60	4.23±4.75	4.95±4.47	6.78±3.94	17.45±6.32	5.00±2.93
PO ₄ ³⁻ -P/μmol·L ⁻¹	0.19±0.21	0.13±0.17	0.10±0.13	0.21±0.19	0.36±0.23	0.31±0.23	0.37±0.23
SiO ₃ ²⁻ -Si/μmol·L ⁻¹	7.33±6.36	6.58±5.96	6.51±7.73	7.96±6.86	10.38±6.04	12.67±6.01	7.44±3.92
N/P	58.23±72.72	84.9±65.10	71.52±110.12	32.5±34.9	28.19±26.13	87.4±54.9	17.84±20.49
Si/N	2.30±3.40	1.91±2.43	3.85±6.23	1.95±1.01	1.62±0.44	0.74±0.38	1.75±0.74
Si/P	75.23±99.38	97.83±134.98	100.48±85.99	51.87±46.58	42.24±34.95	65.48±57.29	27.00±21.25

注: -表示无数据。

中受径流输入影响的沿岸水(低盐高营养盐)和北部青岛冷水团(低温低营养盐),呈现较高的N/P比值和低Si/N,而在黄海暖流影响水团(高PO₄³⁻-P)各营养盐

结构较符合Redfield比值。夏季受径流输入影响较春季明显(表1,盐度降低),但受生物活动等因素影响各营养盐含量较春季降低明显,而营养盐比值较春

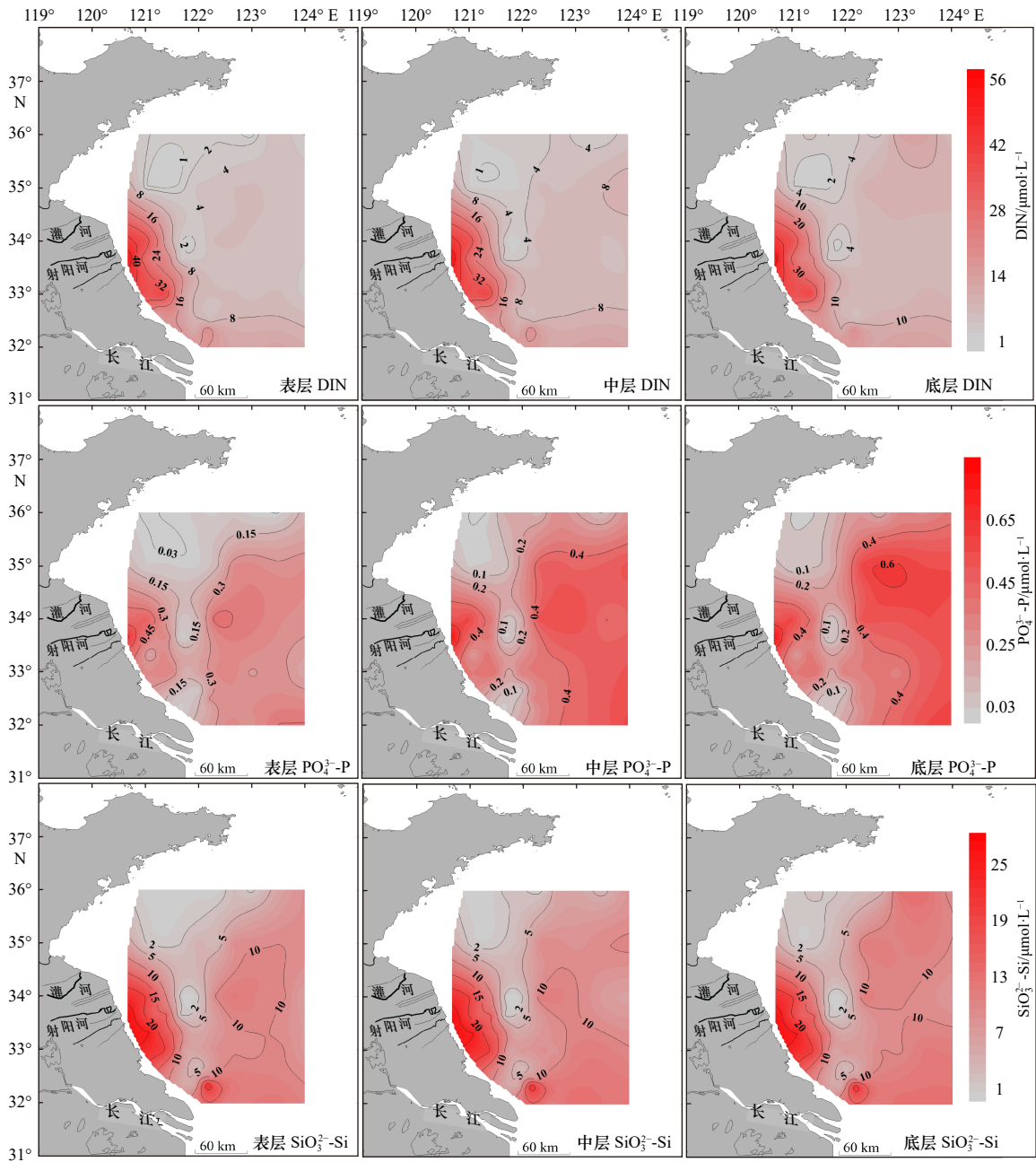


图3 春季(2018年4月)南黄海各水层营养盐分布

Fig. 3 Horizontal distributions of nutrients in the southern Yellow Sea in spring (April 2018)

季明显升高偏离 Redfield 比值。表层和真光层内受生物吸收利用和温跃层影响,各营养盐含量较低,原子比值较高。沿岸水受径流输入影响,N/P 比值达(87.40±54.90),较高的 N/P 比值有利于浒苔偏向 N 吸收的特性^[33, 36-37]。

3.3 南黄海绿潮暴发迁移与营养盐结构等环境参数之间相互关系

南黄海绿潮优势藻种浒苔是一种广温、广盐、耐干露的大型绿藻,营养盐吸收速率较快^[38]。当营养盐丰富时有“过度消费”吸收储存的作用,是重要的营养

盐储库^[34, 39]。

对比绿潮发展过程中(春、夏季)表层营养盐分布特征和绿潮的漂移发展区域(图2至图4),呈现3个明显的绿潮-营养盐结构特征海区。(1)35°N以南122°E以西江苏近海,呈现高营养盐-绿潮快速发展特征;(2)122°E以西35°N以北山东半岛外海域,呈现明显的低营养盐-绿潮聚积衰退的特征;(3)122°E以东外海非绿潮影响区域。

各特征海区在绿潮发展期间表层环境要素以及营养盐变化表明(表2)。南黄海122°E以西绿潮漂移

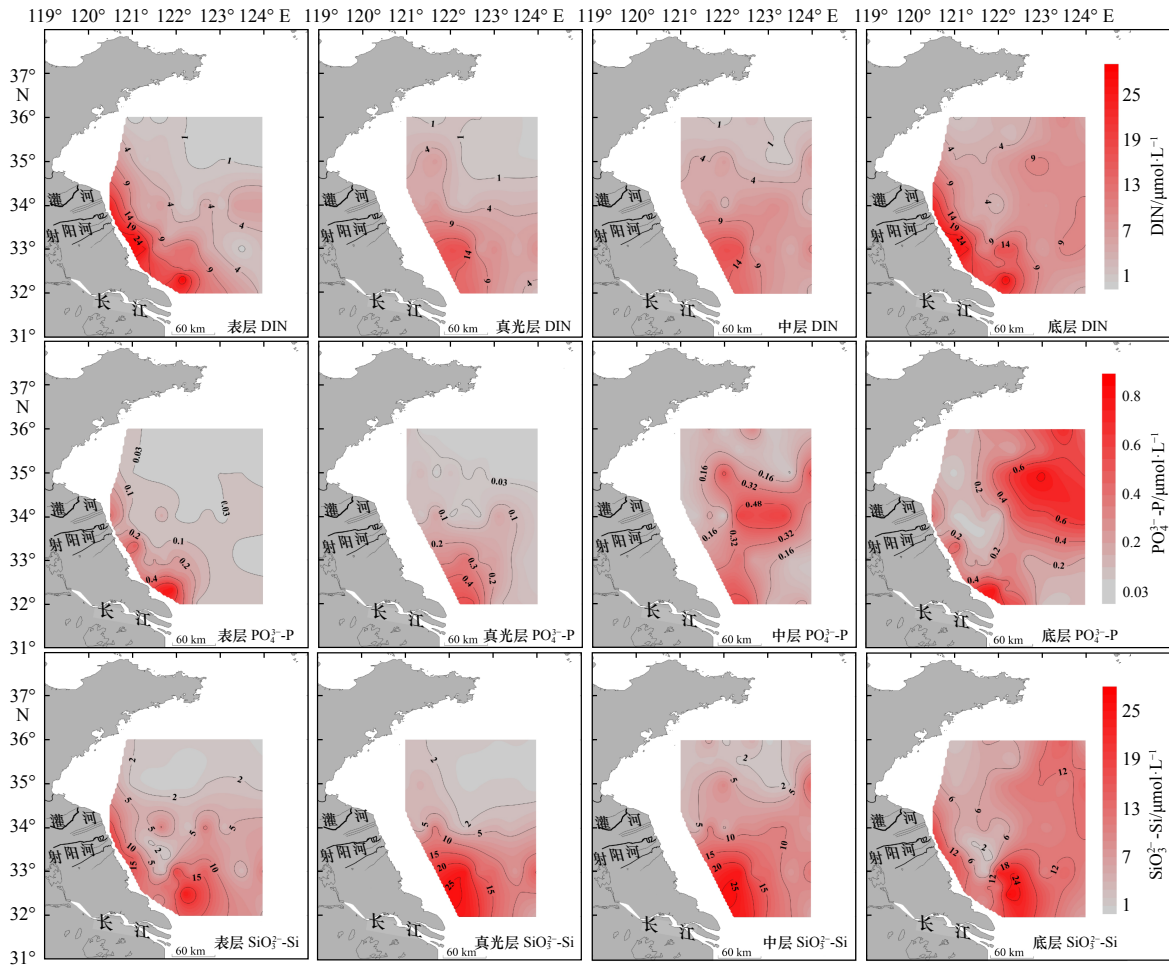


图4 夏季(2018年7月)南黄海各水层营养盐分布

Fig. 4 Horizontal distributions of nutrients in the southern Yellow Sea in summer (July 2018)

发展区域内(图5),受径流输入^[28]、养殖废水排放^[40]、大气沉降^[41]以及混合等因素影响,较122°E以东外海,水体悬浮颗粒物较高,具有较高的DIN,尤其是组分 NO_3^- -N含量和N/P比值,有利于漂浮态浒苔的生长^[42],其中DIN在绿潮前后含量降低 $5.45 \mu\text{mol/L}$,且以 NO_3^- 为主,降幅37%, PO_4^{3-} -P降低 $0.05 \mu\text{mol/L}$,幅度为23%,减少量的 $\Delta\text{DIN/P}$ 比值为109。而122°E以东外海非浒苔绿潮区域,主要受黄海暖流和冷水团等洋流体系影响,水体透明度高,春夏间DIN,含量减少 $1.16 \mu\text{mol/L}$,幅度为18%, PO_4^{3-} -P降低 $0.21 \mu\text{mol/L}$,幅度为72%,其减少量的 $\Delta\text{DIN/P}$ 比值为5.5,远小于西部近岸浒苔绿潮影响海域。

对比35°N南北两个绿潮特征区域发现(图5),在35°N以南江苏近海受陆源输入影响,绝大部分海域超过II类水质标准,甚至超过V类水质;同时受径流输入、大气沉降及上升流^[41,43]等输入影响,营养盐含

量保持较高水平,尤其是春季绿潮前期 NO_3^- -N和 PO_4^{3-} -P含量明显高于浒苔藻生长的限制浓度 $6.5 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.27 \mu\text{mol/L}$ ^[33],有利于漂浮浒苔的快速生长。绿潮前后N组分 NO_3^- -N明显减少,约 $7.73 \mu\text{mol/L}$, PO_4^{3-} -P降低 $0.05 \mu\text{mol/L}$,幅度为18%。7月下旬大规模的高聚集态绿潮漂移至35°N以北低营养盐区域,DIN和 PO_4^{3-} -P明显(4月绿潮前期的 $(1.83 \pm 1.15) \mu\text{mol/L}$ 和 $(0.05 \pm 0.01) \mu\text{mol/L}$,7月绿潮在此区域的 $(1.83 \pm 1.24) \mu\text{mol/L}$ 和 $(0.02 \pm 0.01) \mu\text{mol/L}$)低于浒苔藻持续生长的最低浓度,限制绿潮的发展。较江苏近海绿潮快速增殖阶段,N、P组分降低值和幅度较低(DIN值和幅度分别降低 $6.73 \mu\text{mol/L}$ 和33%, PO_4^{3-} 值和幅度分别降低 $0.05 \mu\text{mol/L}$ 和18%),说明绿潮发展中营养盐来源主要来自江苏近海,北部较低的营养盐可能是限制绿潮继续发展的重要因素,浒苔体内氮磷元素以及叶绿素含量较江苏近海明显降低也证明了此假设^[26-27]。

表 2 调查海域绿潮暴发前后浒苔漂移区域与非浒苔区域表层营养盐对比

Table 2 The variations of nutrients and hydrological parameters of surface layer in different development phases area of green tides

调查海域表层	浒苔绿潮漂移海域					
	122°E以西海域			35°N以南高营养盐区域		
	2018年4月	2018年7月	变化量/%	2018年4月	2018年7月	变化量/%
样品数/个	33	33		25	24	
$T/^\circ\text{C}$	11.80±3.30	23.84±1.09	12.04/108	13.34±1.99	23.63±1.03	10.29/77
S	31.03±1.39	30.28±1.19	-0.75/2	30.61±1.35	30.01±1.26	-0.60/2
$\text{TSP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	125.04±100.12	60.66±41.23	-64.38/51	159.28±91.24	82.71±30.84	-76.57/48
$\text{NO}_3^-/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	14.52±14.19	8.46±7.38	-6.06/42	18.98±13.51	11.25±6.75	-7.73/41
$\text{NO}_2^-/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.15±0.09	0.38±0.27	0.23/153	0.18±0.08	0.46±0.25	0.28/156
$\text{NH}_4^+/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	1.05±0.64	1.43±0.97	0.38/36	1.00±0.69	1.72±0.97	0.72/72
$\text{DIN}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	15.72±14.23	10.27±7.78	-5.45/37	20.16±13.60	13.43±6.74	-6.73/33
$\text{PO}_4^{3-}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.22±0.19	0.17±0.20	-0.05/23	0.28±0.19	0.23±0.21	-0.05/18
N/P	81.9±90.18	97.91±60.73	16/19	92.64±99.58	91.17±55.59	-1.47/2
调查海域表层	浒苔绿潮漂移海域			非浒苔漂移海域		
	35°N以北低营养盐区域			122°E以东外海		
	2018年4月	2018年7月	变化量/%	2018年4月	2018年7月	变化量/%
样品数/个	8	9		27	29	
$T/^\circ\text{C}$	7.00±1.10	24.41±1.09	17.41/249	9.58±1.52	26.28±1.34	16.7/174
S	32.34±0.07	31.00±0.48	-1.34/4	32.56±0.48	31.00±1.37	-1.56/5
$\text{TSP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	18.03±2.31	14.13±2.54	-3.9/22	38.44±38.49	18.08±13.89	-20.36/53
$\text{NO}_3^-/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.59±1.11	1.01±1.11	0.42/71	5.37±3.99	3.72±5.18	-1.65/31
$\text{NO}_2^-/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.04±0.03	0.17±0.21	0.13/325	0.13±0.09	0.38±0.42	0.25/192
$\text{NH}_4^+/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	1.20±0.46	0.67±0.39	-0.53/44	0.79±0.41	1.05±1.11	0.26/33
$\text{DIN}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	1.83±1.15	1.83±1.24	0/0	6.28±3.94	5.12±6.38	-1.16/18
$\text{PO}_4^{3-}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.05±0.01	0.02±0.01	-0.03/60	0.29±0.14	0.08±0.10	-0.21/72
N/P	48.34±38.44	115.9±73.25	67.56/140	33.78±47.56	68.7±66.74	34.92/103

在浒苔暴发前后营养盐结构变化特征说明,大面积暴发的浒苔绿潮具有快速和大量吸收 DIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的特征^[15,44],且吸收的 DIN/P 比值较高,对减轻江苏近海氮超标的富营养化状况^[45]具有十分重要的意义。

4 结论

2018 年绿潮发现时间早,规模在 6 月 29 日达到最大,持续时间约 110 d。其漂移路径集中在 122°E 以西海域,快速增殖阶段在江苏南部近海,聚积沉降阶段在 35°N 以北山东半岛外海域。

南黄海海域受径流输入、水团、外海暖流以及生物吸收利用等因素影响,春季混合均匀,夏季受冷水团温跃层影响垂向差异明显。各营养盐除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 组分整体呈现江苏近岸高北部(约 35°N 南北)及远海低的特征。

江苏近海丰富的营养盐含量和来源是浒苔绿潮形成和发展的重要物质基础和营养盐来源。山东半岛外海域较低的营养盐水平是限制绿潮继续发展的重要因素。

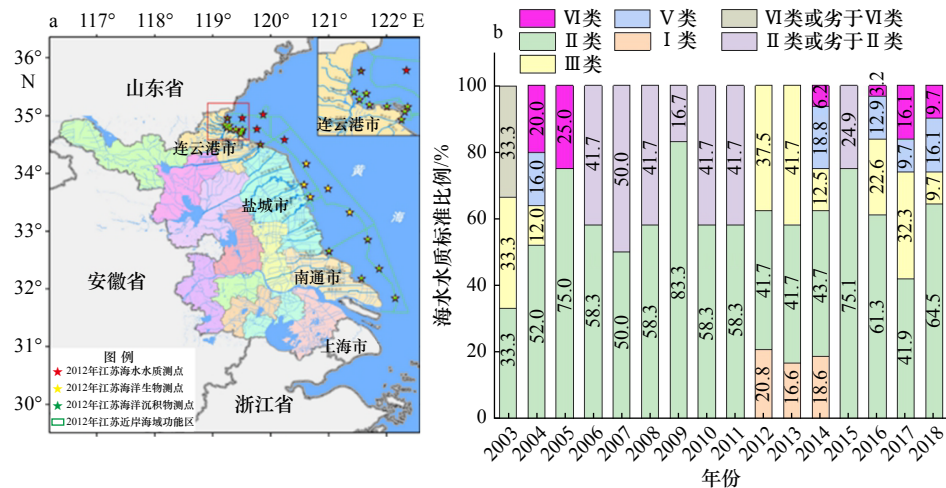


图5 2003–2018年江苏近岸海水主要观测站点(a)和水质标准分布(b)

Fig. 5 The sampling stations (a) and the water quality in coastal area of the Jiangsu Province during 2003–2018 (b)

海水水质标准 (GB 3097—1997)

Sea water quality standard (GB 3097—1997)

参考文献:

- [1] Zhou Mingjiang, Liu Dongyan, Anderson D M, et al. Introduction to the special issue on green tides in the Yellow Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 3–8.
- [2] Hiraoka M, Ohno M, Kawaguchi S, et al. Crossing test among floating *Ulva* thalli forming 'green tide' in Japan[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 512(1): 239–245.
- [3] Charlier R H, Morand P, Finkl C W, et al. Green tides on the Brittany coasts[J]. *Environmental Research, Engineering and Management*, 2007, 3(41): 52–59.
- [4] Zhao Jin, Jiang Peng, Liu Zhengyi, et al. The Yellow Sea green tides were dominated by one species, *Ulva (Enteromorpha) prolifera*, from 2007 to 2011[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(19): 2298–2302.
- [5] 王宗灵, 傅明珠, 肖洁, 等. 黄海浒苔绿潮研究进展[J]. *海洋学报*, 2018, 40(2): 1–13.
Wang Zongling, Fu Mingzhu, Xiao Jie, et al. Progress on the study of the Yellow Sea green tides caused by *Ulva prolifera*[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(2): 1–13.
- [6] Gao Shan, Chen Xiaoyuan, Yi Qianqian, et al. A strategy for the proliferation of *Ulva prolifera*, main causative species of green tides, with formation of sporangia by fragmentation[J]. *PLoS One*, 2010, 5(1): e8571.
- [7] Zhao Xiaohui, Cui Jianjun, Zhang Jianheng, et al. Reproductive strategy of the floating alga *Ulva prolifera* in blooms in the Yellow Sea based on a combination of zoid and chromosome analysis[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 584–590.
- [8] 卢健, 张启龙, 李安春. 苏北沿岸流对浒苔暴发及漂移过程的影响[J]. *海洋科学*, 2014, 38(10): 83–89.
Lu Jian, Zhang Qilong, Li Anchun. The influence of Subei coastal current on the outbreak and drift of *Enteromorpha prolifera*[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(10): 83–89.
- [9] Stokral M, Kroeze C, Wang Mengru, et al. Reducing future river export of nutrients to coastal waters of China in optimistic scenarios[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 517–528.
- [10] Liang Zhongyao, Wu Sifeng, Chen Huili, et al. A probabilistic method to enhance understanding of nutrient limitation dynamics of phytoplankton[J]. *Ecological Modelling*, 2018, 368: 404–410.
- [11] Anderson D M, Cembella A D, Hallegraeff G M. Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 143–176.
- [12] Wei Qinsheng, Wang Baodong, Yao Qingzhen, et al. Physical-biogeochemical interactions and potential effects on phytoplankton and *Ulva prolifera* in the coastal waters off Qingdao (Yellow Sea, China)[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 38(2): 11–23.
- [13] Shi Xiaoyong, Qi Mingyan, Tang Hongjie, et al. Spatial and temporal nutrient variations in the Yellow Sea and their effects on *Ulva prolifera* blooms[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 36–43.
- [14] Chen Lei, Li Chaolun, Zhou Konglin, et al. Effects of nutrient limitations on three species of zooplankton[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(4): 58–68.
- [15] Li Hongmei, Zhang Yongyu, Chen Jing, et al. Nitrogen uptake and assimilation preferences of the main green tide alga *Ulva prolifera* in the Yellow Sea, China[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2018, 31(1): 625–635.
- [16] 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.

- Li Ruixiang, Wu Xiaowen, Wei Qinsheng, et al. Growth of *Enteromorpha prolifera* under different nutrient conditions[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(2): 211–216.
- [17] Wang Baodong, Wang Xiulin, Zhan Run. Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 58(1): 127–136.
- [18] Li Dongxue, Gao Zhiqiang, Song Debin, et al. Characteristics and influence of green tide drift and dissipation in Shandong Rongcheng coastal water based on remote sensing[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 227: 106335.
- [19] Zhang Haibo, Su Rongguo, Shi Xiaoyong, et al. Role of nutrients in the development of floating green tides in the southern Yellow Sea, China, in 2017[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 156: 111197.
- [20] 祝陈坚. 海水分析化学实验[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2006.
Zhu Chenjian. Experiment of Seawater Analytical Chemistry[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2006.
- [21] Xu Qing, Zhang Hongyuan, Cheng Yongcun. Multi-sensor monitoring of *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea using different methods[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10(2): 378–388.
- [22] Qi Lin, Hu Chuanmin, Xing Qianguo, et al. Long-term trend of *Ulva prolifera* blooms in the western Yellow Sea[J]. *Harmful Algae*, 2016, 58: 35–44.
- [23] Sun Xiao, Wu Mengquan, Xing Qianguo, et al. Spatio-temporal patterns of *Ulva prolifera* blooms and the corresponding influence on chlorophyll-*a* concentration in the southern Yellow Sea, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640-641: 807–820.
- [24] 自然资源部海洋预警监测司. 中国海洋灾害公报[R]. 北京: 自然资源部, 2008–2019.
Marine Early Warning and Monitoring Division, Ministry of Natural Resources. Bulletin of China marine disaster[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2008–2019.
- [25] 吴孟泉, 郭浩, 张安定, 等. 2008年—2012年山东半岛海域浒苔时空分布特征研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1312–1318.
Wu Mengquan, Guo Hao, Zhang Anding, et al. Research on the characteristics of *Ulva prolifera* in Shandong Peninsula during 2008–2012 based on MODIS data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1312–1318.
- [26] Zhang Jianheng, Huo Yuanzi, Zhang Zhenglong, et al. Variations of morphology and photosynthetic performances of *Ulva prolifera* during the whole green tide blooming process in the Yellow Sea[J]. *Marine Environmental Research*, 2013, 92: 35–42.
- [27] 丁月旻. 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[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014.
Ding Yuemin. Impacts of *Ulva (Enteromorpha) prolifera* in the green tide on the Yellow Sea ecological environment—implications from migration and transformation of biogenic elements[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [28] 马洪瑞, 陈聚法, 崔毅, 等. 灌河和射阳河水质状况分析及主要污染物入海量估算[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(3): 92–99.
Ma Hongrui, Chen Jufa, Cui Yi, et al. Analysis of water quality and assessment of major pollutants input to the sea from the Guan River and Sheyang River[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(3): 92–99.
- [29] 靳姗姗, 孙俊川, 魏泽勋. 渤海沿岸流季节变化对青岛冷水团影响的初步分析[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(3): 317–328.
Jin Shanshan, Sun Junchuan, Wei Zexun. Effects of the seasonal variability of the Bohai Sea coastal current on the Qingdao Cold Water Mass[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(3): 317–328.
- [30] 赵胜, 于非, 刁新源, 等. 黄海暖流的路径及机制研究[J]. *海洋科学*, 2011, 35(11): 73–80.
Zhao Sheng, Yu Fei, Diao Xinyuan, et al. The path and mechanism of the Yellow Sea Warm Current[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(11): 73–80.
- [31] Zhang Qilong, Liu Xingquan, Cheng Minghua, et al. Characteristics and formation causes of Qingdao Cold Water Mass[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2002, 20(4): 303–308.
- [32] Fu Mingzhu, Sun Ping, Wang Zongling, et al. Structure, characteristics and possible formation mechanisms of the subsurface chlorophyll maximum in the Yellow Sea Cold Water Mass[J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 165: 93–105.
- [33] Wang Changyou, Su Rongguo, Guo Laodong, et al. Nutrient absorption by *Ulva prolifera* and the growth mechanism leading to green-tides[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 227: 106329.
- [34] 吴晓文, 李瑞香, 徐宗军, 等. 营养盐对浒苔生长影响的围隔生态实验[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(4): 538–544.
Wu Xiaowen, Li Ruixiang, Xu Zongjun, et al. Mesocosm experiments of nutrient effects on *Enteromorpha prolifera* growth[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(4): 538–544.
- [35] Redfield A C. The influence of organisms on the composition of sea-water[J]. *Sea*, 1963, 40(6): 640–644.
- [36] Zheng Mingshan, Lin Jiajia, Zhou Shidan, et al. Salinity mediates the effects of nitrogen enrichment on the growth, photosynthesis, and biochemical composition of *Ulva prolifera*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(19): 19982–19990.
- [37] Li Hongmei, Zhang Yongyu, Han Xiurong, et al. Growth responses of *Ulva prolifera* to inorganic and organic nutrients: Implications for macroalgal blooms in the southern Yellow Sea, China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26498.
- [38] 齐明燕. 浒苔(*Ulva prolifera*)及缘管浒苔(*Ulva linza*)对不同形态氮营养盐的吸收利用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Qi Mingyan. Study on the uptake of different nitrogen by *Ulva prolifera* and *Ulva linza*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [39] 李俭平. 浒苔对氮营养盐的响应及其氮营养盐吸收动力学和生理生态研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011.
Li Jianping. The response to nitrogen nutrient, and the uptake kinetics mechanism of nitrogen and ecophysiological analysis of *Enteromorpha prolifera*[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [40] 商兆堂, 蒋名淑, 濮梅娟. 江苏紫菜养殖概况和气候适宜性分析[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(13): 5315–5319.
Shang Zhaotang, Jiang Mingshu, Pu Meijuan. Analysis of the general situations of laver culture in Jiangsu Province and its climatic suit-

- ability[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(13): 5315–5319.
- [41] Qi Jianhua, Shi Jihui, Gao Huiwang, et al. Atmospheric dry and wet deposition of nitrogen species and its implication for primary productivity in coastal region of the Yellow Sea, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 600–608.
- [42] Li Hongmei, Zhang Yongyu, Tang Hongjie, et al. Spatiotemporal variations of inorganic nutrients along the Jiangsu coast, China, and the occurrence of macroalgal blooms (green tides) in the southern Yellow Sea[J]. *Harmful Algae*, 2017, 63: 164–172.
- [43] Wei Qinsheng, Wang Baodong, Yao Qingzhen, et al. Hydro-biogeochemical processes and their implications for *Ulva prolifera* blooms and expansion in the world's largest green tide occurrence region (Yellow Sea, China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 257–266.
- [44] 胡劲召, 齐丹, 徐功娣. 浒苔对富营养化海水中氮磷去除效果的研究[J]. 海南热带海洋学院学报, 2017, 24(5): 27–30, 41.
Hu Jinzhao, Qi Dan, Xu Gongdi. Enteromorpha's N-P removal efficiency in the eutrophicated seawater[J]. *Journal of Hainan Tropical Ocean University*, 2017, 24(5): 27–30, 41.
- [45] 张艾芹, 江辉煌, 顾正平, 等. 江苏近岸海域表层海水中营养盐组成、分布及季节变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 2018(2): 49–59.
Zhang Aiqin, Jiang Huihuang, Gu Zhengping, et al. Composition, distribution and seasonal variation of surface seawater nutrients in Jiangsu coastal waters[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(2): 49–59.

Study on the coupling relationship between the development of *Ulva prolifera* green tide and nutrients in the southern Yellow Sea in 2018

Zhang Haibo¹, Liu Ke¹, Su Rongguo¹, Shi Xiaoyong^{1,2}, Pei Shaofeng³, Wang Xiulin¹,
Wang Guoshan², Wang Shuang¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. National Marine Hazard Mitigation Service, Ministry of Natural Resources, Beijing 100194, China; 3. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the nutrients and hydrological environment parameters collected during April (spring, before green tides) and July (summer, later stage of green tides) cruise, and the daily satellite monitoring data of green tides in the southern Yellow Sea (SYS) in 2018, we studied the spatio-temporal variations of the floating *Ulva prolifera* green tide and its relationship with nutrients. The results showed that small scales of floating *U. prolifera* patches were firstly observed in the coastal area of Nantong, Jiangsu Province on April 25, and decomposed and disappeared in the coast of Shandong Peninsula in the mid-August. The trajectory area of floating green tides was mainly in the western of 122°E in the SYS, and the rapid growth phase of green tides existed in the south of 35°N, nearshore area of Jiangsu Province. Nutrients showed regional characteristics of high values in the coastal area of Jiangsu Province and low values in the offshore of the northern and eastern parts of the study area, which influenced by the Yellow Sea Cold Water Mass, freshwater influx, biological uptake and utilization, and other factors. Compared with the development trend of green tides and distributions of nutrients, there were three distinct characteristic zones with different nutrients conditions and stages of green tides: the coastal area of Jiangsu Province (south of 35°N, east of 122°E), characterized with high-value nutrients and rapid growth of green tides; the offshore area of Shandong Peninsula (north of 35°N, east of 122°E), characterized with low nutrients and dissipation phase of green tides; the east sea of 122°E, characterized with no green tides. The nutrients variations in different characteristic zones indicated that rich and sufficient nutrients ($\text{NO}_3^- \text{-N} > 6.5 \mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4^{3-} \text{-P} > 0.27 \mu\text{mol/L}$), and continuous nutrients inputs were the main factors contributing the germination and rapid growth of *U. prolifera*, and provided main N, P elements for the development of green tides in the coastal area of Jiangsu Province. The poor nutrients ($\text{DIN} < 2 \mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4^{3-} \text{-P} < 0.03 \mu\text{mol/L}$ in summer) might be the limiting factor limiting the continuous development of green tides in the offshore ocean of the Shandong Peninsula.

Key words: green tides; *Ulva prolifera*; nutrients; development phases; southern Yellow Sea; spatio-temporal variations