

张海波, 王爽, 尹航, 等. 2018 年南黄海浒苔绿潮发展规律及氮组分的作用探究[J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 40–49, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.005

Zhang Haibo, Wang Shuang, Yin Hang, et al. The development of *Ulva prolifera* green tide and the roles of nitrogen nutrients in it in the southern Yellow Sea in 2018[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(8): 40–49, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.005

2018 年南黄海浒苔绿潮发展规律及氮组分的作用探究

张海波¹, 王爽¹, 尹航², 沙珍霞³, 石晓勇^{1,4}, 苏荣国^{1*}, 裴绍峰⁵,
王国善³, 麻银萍¹

(1. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2. 纽约州立大学石溪分校 海洋与大气学院, 纽约 11790; 3. 青岛大学生命科学学院, 山东 青岛 266071; 4. 自然资源部海洋减灾中心, 北京 100194; 5. 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 年南黄海漂浮态浒苔 (*Ulva prolifera*) 绿潮规模卫星监测数据以及春、夏季 (4 月和 7 月, 绿潮前后) 水文环境要素和氮营养盐等数据, 对 2018 年绿潮发展规律及不同氮组分在其中的作用进行分析。结果表明: 浒苔于 4 月 25 日在江苏南通近海首次发现, 随后其向北漂移增殖扩展在 6 月 29 日达到最大规模, 8 月中旬消失。绿潮漂移区域集中在 122°E 以西近海并呈现两个明显的发展阶段: 35°N 以南江苏近海绿潮快速增殖阶段和 35°N 以北山东半岛外海域绿潮聚积衰退阶段。各氮营养盐组分受径流输入、冷水团以及生物活动等因素影响, 呈现明显的区域和季节特征。不同绿潮阶段受氮营养盐影响不同, 绿潮快速增殖阶段, 丰富的氮营养盐 (总溶解氮 (TDN) > 20 μmol/L 和溶解无机氮 (DIN) > 20 μmol/L) 是浒苔藻快速繁殖生长的物质基础, 此阶段为整个绿潮发展提供了主要的氮支撑且以 DIN 为主要形态。绿潮聚积衰退阶段, 较低的可利用氮 (DIN < 2 μmol/L 和尿素 (urea-N) < 1.5 μmol/L) 不利于浒苔藻持续繁殖生长, 此阶段内有机氮 (如 urea-N) 在绿潮后期的氮支撑中起到重要作用。

关键词: 绿潮; 发展阶段; 氮来源; 尿素; 南黄海; 浒苔

中图分类号: X55; Q178.53; P76

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)08-0040-10

1 引言

绿潮是一种大型绿藻聚积暴发生长, 在世界范围内频发的海洋生态灾害现象, 主要发生在河口、海湾及近海海域, 由石莼属 (*Ulva*)、浒苔属 (*Enteromorpha*)、刚毛藻属 (*Chaetomorpha*) 和硬毛藻属 (*Cladophora*) 等大型绿藻引起^[1-2]。大规模的绿潮会通过消耗营养盐、占据海床或海表等生存空间产生种间竞争, 进而影响生物群落结构和生物多样性。绿潮暴发不仅跟绿潮藻自身生长速度快、适应性强等特点有关, 而且跟温度、光照、水文条件以及气候等

环境要素尤其是水体富营养化有关^[3-7]。

南黄海属于北太平洋西部半封闭陆架浅海, 受径流输入、水团以及沿岸流和暖流组成的洋流系统等因素影响, 尤其西部江苏近海呈现明显富营养化^[8-10]。自 2007 年以来, 海域内持续受到漂浮态绿藻浒苔 (*Ulva prolifera*) 绿潮影响^[11-13], 每年春季 (4 月底) 在江苏近海出现浒苔斑块, 随后在风和流的控制下^[14-15], 浒苔斑块向北漂移并快速增殖形成大规模绿潮^[16], 7 月中下旬在山东半岛近海聚积、沉降消亡^[17-18]。数百万吨浒苔藻体死亡会释放大量的氮、磷要素及含硫物质等^[19], 给近海旅游业和养殖业造成经济及生态损失^[20-22]。

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); 国家海洋局海洋减灾中心科研项目 (2014AA060); 国家自然科学基金 (41306175)。

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: 苏荣国, 男, 教授, 主要从事海洋环境化学过程及风险评估研究, 浮游藻类荧光分类技术研究。E-mail: surongguo@ouc.edu.cn

研究表明, 浒苔在生长繁殖过程中能够同时吸收利用多种形态氮、磷(无机态和小分子有机态)营养盐^[23], 且具有快速吸收储存营养盐能力, 对水体起到净化缓解富营养化的作用^[24-25]。水体中氮营养盐浓度和结构是绿潮发展的重要物质基础^[26-27], 当无机氮浓度较低时, 浒苔会增加对有机态氮吸收利用的亲合性^[23, 26, 28-29]。近些年来工农业、养殖业以及生活废水含氮超标, 通过径流及直排等途径进入近海^[30], 导致近海水体氮超标富营养化严重^[31-32], 水体中氮结构发生明显变化, 有机氮组分如氨基酸、尿素等浓度增加。南黄海绿潮的特点为持续时间长(4月底至8月)漂移范围广(32°~37°N), 从南向北漂移过程中经历从江苏近海到山东半岛外海复杂的水文环境, 从富营养化海域到低营养盐区域。而较多营养盐对绿潮发展影响研究集中在江苏紫菜筏架区或青岛近海小范围海域, 且主要关注无机态营养盐组分, 而对整个绿潮期间不同发展海域不同形态氮营养盐之间关系知之甚少。

为进一步分析南黄海不同形态氮组分与大規模绿潮发展特征的耦合关系, 本文针对2018年南黄海绿潮发展时空规律以及暴发前后(春季和夏季)氮营养盐组分变化, 深入分析不同形态氮组分在不同绿潮阶段中的作用, 以期对浒苔绿潮发展中氮要素来源进一步了解。

2 研究区域和方法

2.1 研究区域

分别于2018年4月(春季, 绿潮暴发前, 3月28日至4月4日)和7月(夏季, 绿潮发展后期, 7月24-30日)搭载国家基金委共享航次“东方红2”号科

考船于南黄海进行调查, 调查范围在32°~36.2°N, 124°E以西海域, 站位如图1b、图1c所示。现场使用Seabird 911-Niskin 联用采水并测定温盐参数, 根据海洋调查规范设置采水层次。

2.2 样品采集与分析

营养盐样品的采集和处理方法均依照《海洋调查规范——海水化学要素》(GB/T 12763.4—2007)所述。水样经GF/F(Whatman, 450°C灼烧4h)过滤后冷冻保存。带回实验室测定, 其中尿素(urea-N)采用二乙酰一肟-盐酸氨基脲法^[33-34], NO₃-N和NO₂-N采用重氮-偶氮法(NO₃-N, 铜-镉还原), NH₄-N使用靛酚蓝法。总溶解氮(Total Dissolved Nitrogen, TDN)经碱性过硫酸钾法(Alkaline Persulphate Oxidation)消化后测定, 消化过程以EDTA作为有机氮回收标准^[35], 测量精度为92%。溶解无机氮(Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN)为NO₃-N、NO₂-N和NH₄-N之和, 溶解有机氮(Dissolved Organic Nitrogen, DON)为TDN减去DIN之差。海水总悬浮颗粒物(Total Suspended Particulate, TSP)使用重量法^[35]采集测定。

表层水体中营养盐减少量估算如下:

$$M = C \times h \times A, \quad (1)$$

式中, M 为减少总物质量(单位: t), C 为绿潮期间营养盐浓度变化(单位: $\mu\text{mol/L}$), h 为表层水团深度(取值3 m), A 为不同阶段区域面积(单位: km^2)。

2.3 浒苔绿潮规模日变化数据来源

2018年绿潮发展过程中浒苔斑块漂移路径、分布面积和覆盖面积(指示浒苔生物量)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

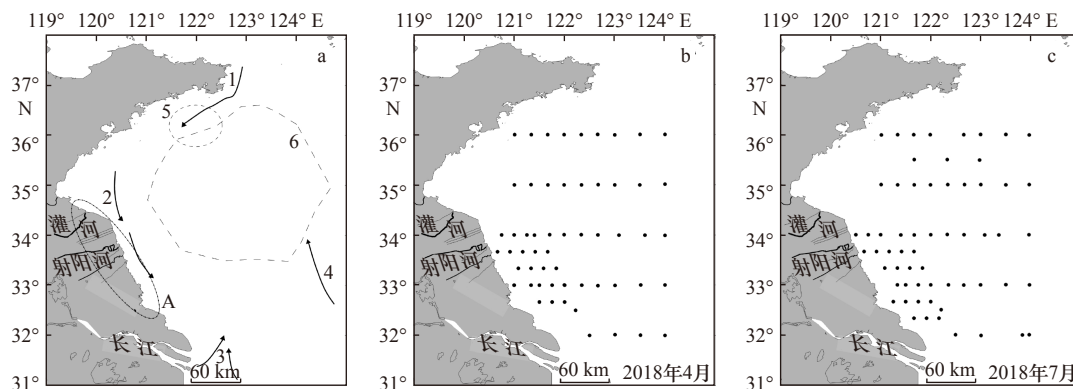


图1 南黄海研究区域洋流系统(a)及站位设置(b, c)

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

解译自 MODIS-TERRA 和 RADARSAT 卫星数据^[36-37]。

3 结果与讨论

3.1 2018 年浒苔绿潮的发展规律

2018 年 4 月 25 日在江苏南通近海首先发现零星的浒苔(图 2b), 在风和海流控制下, 漂浮态浒苔向北漂移并不断增殖, 绿潮规模快速扩展。6 月 29 日, 绿潮分布面积和覆盖面积达到最大(38 046 km² 和 193 km²)。7 月中旬, 大规模绿潮靠近山东半岛发生聚积, 其分布面积迅速减小。8 月中旬, 浒苔藻体沉降-堆积-腐烂基本消失, 发展规模较 2017 年明显增大^[38]。

对绿潮暴发海域和漂移路径分析发现(图 2b), 其发展和影响海域集中在 122°E 以西近海。根据浒苔藻状态分析表明(图 2), 在南部江苏近海以零星分布状态(<100 cm²)浒苔为主^[39], 浒苔颜色较深, 藻体内叶绿素(>1.2 mg/g)及氮、磷元素(氮浓度>40 mg/g, 磷浓度>0.8 mg/g)浓度较高^[40-41]。绿潮向北漂移增殖速率显示(图 2a, 图 2c), 在 35°N 以南江苏近海海域, 浒苔斑块增殖速率较快, 其相对增殖速率达每天 35.9% (5 月 25 至 6 月 3 日, 覆盖面积从 2 km² 扩大到 53 km²), 绿潮处于快速增殖阶段。7 月 23 日后, 大规模聚集态浒苔斑块(长条状大于 100 m 和高聚积态大于 1 km²)完全进入 35°N 以北海域, 藻体呈现浅绿色, 藻体释放孢子分支出现白化, 藻体内叶绿素(约 0.3 mg/g)及氮磷元素(氮浓度<20 mg/g, 磷浓度<0.3 mg/g)浓度较江苏近海明显降低^[40-41], 规模快速减小, 绿潮处于聚积衰退阶段。

3.2 南黄海氮营养盐组分的季节分布特征

春季(2018 年 4 月)南黄海营养盐主要受西部径流输入、沿岸流混合(表 1, TSP>100 mg/L)、北部青岛

冷水团和外海暖流的影响。其中 DIN 浓度范围在 0.62~55.23 μmol/L 之间, 平均值为(8.86±8.71) μmol/L, 约占 TDN 的 63%(图 3, 图 4), 其主要组分为 NO₃-N(占 DIN 的 86%)。表层浓度为(11.56±11.88) μmol/L, 明显高于中层((6.06±3.57) μmol/L)和底层((7.21±3.79) μmol/L), 呈现明显的南部近岸高、北部低(35°N 以北, DIN<2 μmol/L)的区域特征。DON 浓度范围为 1.62~16.8 μmol/L, 平均值为(5.30±2.30) μmol/L, 在 TDN 占比 37%, 垂向各水层差异较小, 在北部和近岸呈现高值, 尤其是在北部低 DIN 区域其浓度高于 6 μmol/L, 是此区域重要的氮循环组分。urea-N 作为重要的小分子有机氮, 浓度范围在 0.15~3.43 μmol/L 之间, 平均为(1.28±0.72) μmol/L, 占水体中 DON 的 24%。春季受水坝截留^[42]及高悬浮物(表 1, 沿岸水 TSP>100 mg/L)吸附等因素影响, 径流输入影响较小, 高值区在中部和北部海域。urea-N 在北部低 DIN 区域表层浓度为(1.47±0.45) μmol/L(表 2), 作为浒苔可直接利用的小分子有机氮^[23], 对于绿潮后期的氮补充起到重要作用。外海黄海暖流影响水团中 urea-N 浓度为(1.18±0.62) μmol/L, 在 DON 中占比达 28%, 是重要的可利用氮组分, 为生物繁殖提供氮要素。

夏季(2018 年 7 月)海表温度为(25.00±1.73) °C, 生物活动剧烈, 同时受大范围黄海冷水团、沿岸径流输入(图 5)及底层再悬浮释放等因素影响, 除 NO₂-N 氮的各形态浓度较春季均明显降低。其中 DIN 平均浓度为(6.09±5.92) μmol/L, 在 TDN 中占比 56%(图 4), 较春季绿潮暴发前浓度降低 2.77 μmol/L, 降幅 31%。高值区在江苏和长江口外海域, 低值区在北部冷水团温跃层上层(图 6, 35°N 以北, DIN<1 μmol/L)。表层和底层受径流输入及底层再悬浮影响浓度明显较

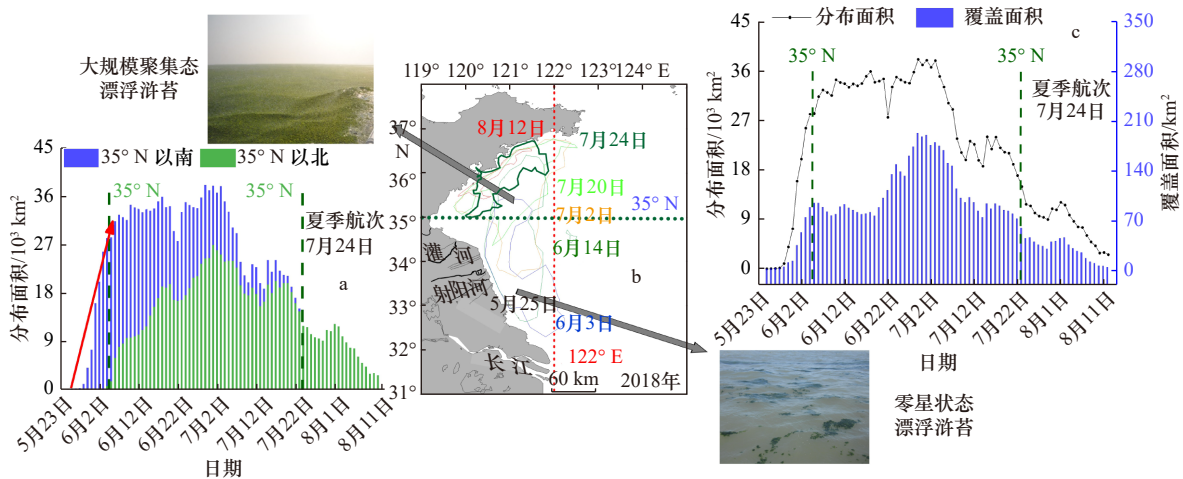


图 2 2018 年南黄海漂浮浒苔绿潮发展变化特征

Fig. 2 The development of floating *U. prolifera* green tide in the southern Yellow Sea in 2018

表1 调查海域春、夏季温度、盐度, 以及氮营养盐组分浓度

Table 1 Salinity, temperature and nitrogen nutrients in the study area of the southern Yellow Sea during spring and summer cruises

特征	2018年4月						
	整体	表层	中层	底层	沿岸水	冷水团	黄海暖流
特征	-	-	-	-	$S < 30$	$T < 6.98$	$S > 33$
样品量/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±1.20	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	1.30±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
DON/μmol·L ⁻¹	5.30±2.30	5.62±2.20	5.08±1.91	5.30±2.72	4.44±1.34	7.20±2.27	4.16±1.20
TDN/μmol·L ⁻¹	14.16±8.83	17.33±11.75	17.52±11.56	18.48±11.36	41.27±10.88	9.86±2.54	10.99±1.75
urea-N/μmol·L ⁻¹	1.28±0.72	1.11±0.69	1.40±0.79	1.42±0.66	0.74±0.45	1.99±0.59	1.18±0.62

特征	2018年7月						
	整体	表层	真光层	中层	底层	沿岸水	冷水团
特征	-	-	-	-	-	$S < 30$	$T < 14$
样品量/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
DON/μmol·L ⁻¹	4.83±2.49	6.12±2.53	4.68±2.22	3.96±2.29	3.55±1.94	6.38±2.45	4.00±2.06
TDN/μmol·L ⁻¹	10.93±6.27	13.93±8.63	8.91±3.46	8.91±3.23	10.33±3.25	23.83±7.82	9.00±2.33
urea-N/μmol·L ⁻¹	0.84±0.57	1.05±0.70	0.73±0.41	0.77±0.43	1.05±0.74	1.57±0.86	0.77±0.54

注: -表示无数据。

高。DON整体浓度在0.3~16.61 μmol/L之间, 平均为(4.84±2.54) μmol/L, 较春季减少约0.46 μmol/L; 垂向分布层化现象明显, 表层中浓度为(6.12±2.53) μmol/L, 受生物释放等因素影响, 浓度较春季上升。urea-N受径流携带的大量的工农业和海水产养殖废水排入影响(表1, 图4), 呈现近海高、远海低的特征, 浓度范围为0.02~4.08 μmol/L, 平均为(0.84±0.57) μmol/L, 占DON的17.4%, 受生物吸收利用等因素影响^[43-44],

较春季减少0.44 μmol/L, 降幅34.4%。表层受江苏沿岸河流和长江冲淡水输入影响((1.05±0.70) μmol/L)浓度明显高于其他水层。

3.3 氮营养盐在浒苔绿潮不同发展阶段中的作用

对比春、夏季间(绿潮暴发前后)绿潮(122°E以西近海)和非绿潮(122°E以东远海)影响海域, 表层氮营养盐变化发现(表2), 122°E以西近海绿潮漂移海域营养盐来源丰富, 各氮组分浓度较高, 其中总可

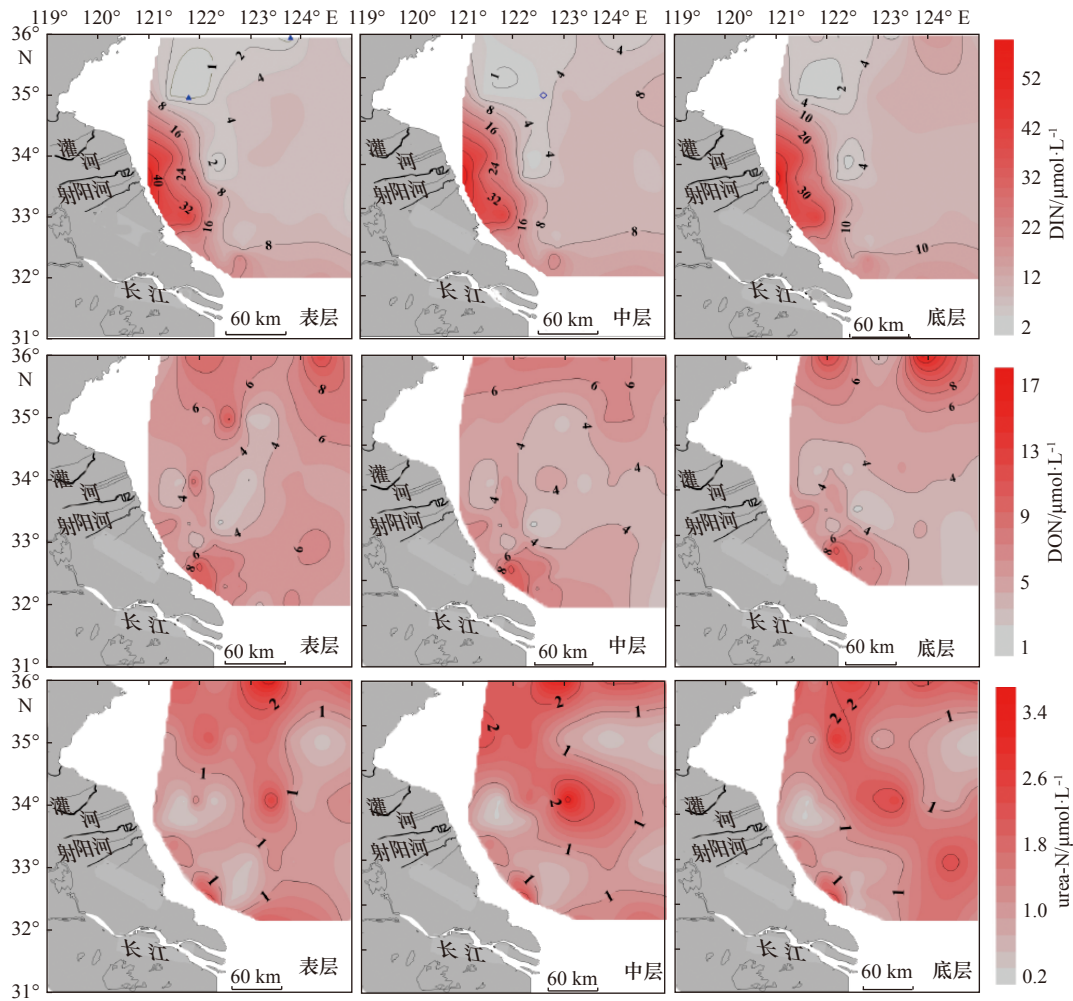


图 3 春季(2018年4月绿潮暴发前)南黄海不同氮营养盐组分的分布特征

Fig. 3 Horizontal distributions of nitrogen nutrients in the southern Yellow Sea in spring (April 2018, before green tides)

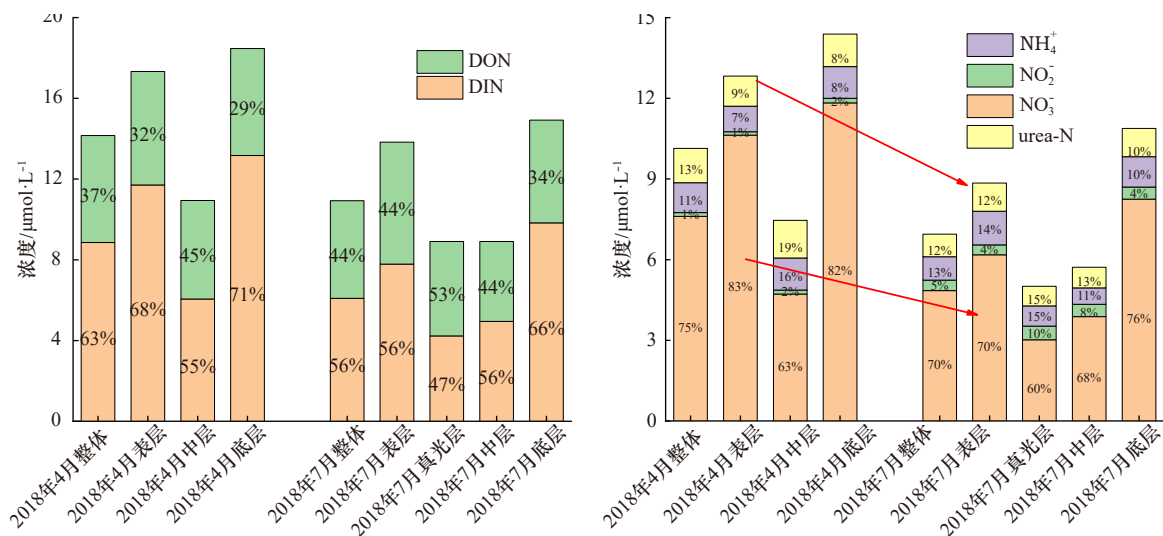


图 4 2018 年南黄海调查区域春、夏季氮营养盐结构特征

Fig. 4 The seasonal variations of nitrogen nutrients in the study area of the southern Yellow Sea in spring and summer 2018

百分数表示占 TDN 的百分比

The percentages represent single composition vs. TDN

表2 调查海域浒苔暴发前后浒苔漂移区域与非浒苔区域表层营养盐浓度变化

Table 2 The variations of nitrogen nutrients in the different phases of green tides in the surface layer of the study area

	浒苔漂移海域(122°E以西)						非浒苔漂移海域	
	122°E以西		35°N以南快速增殖区 (36 000 km ²)		35°N以北聚积衰退区 (24 000 km ²)		122°E以东	
	2018年4月	2018年7月	2018年4月	2018年7月	2018年4月	2018年7月	2018年4月	2018年7月
样品量/ind.	33	33	25	24	8	9	27	29
T/°C	11.80±3.30	23.84±1.09	13.34±1.99	23.63±1.03	7.00±1.10	24.41±1.09	9.58±1.52	26.28±1.34
S	31.03±1.39	30.28±1.19	30.61±1.35	30.01±1.26	32.34±0.07	31.00±0.48	32.56±0.48	31.00±1.37
TSP/mg·L ⁻¹	125.04±100.12	60.66±41.23	159.28±91.24	82.71±30.84	18.03±2.31	14.13±2.54	38.44±38.49	18.08±13.89
NO ₃ ⁻ -N/μmol·L ⁻¹	14.52±14.19	8.46±7.38	18.98±13.51	11.25±6.75	0.59±1.11	1.01±1.11	5.37±3.99	3.72±5.18
NO ₂ ⁻ -N/μmol·L ⁻¹	0.15±0.09	0.38±0.27	0.18±0.08	0.46±0.25	0.04±0.03	0.17±0.21	0.13±0.09	0.38±0.42
NH ₄ ⁺ -N/μmol·L ⁻¹	1.05±0.64	1.43±0.97	1.00±0.69	1.72±0.97	1.20±0.46	0.67±0.39	0.79±0.41	1.05±1.11
DIN/μmol·L ⁻¹	15.72±14.23	10.27±7.78	20.16±13.60	13.43±6.74	1.83±1.15	1.83±1.24	6.28±3.94	5.12±6.38
DON/μmol·L ⁻¹	5.73±2.42	7.17±2.57	5.32±2.35	7.57±2.85	6.96±2.35	6.08±1.10	5.47±1.92	4.93±1.86
TDN/μmol·L ⁻¹	21.85±13.81	17.48±8.67	26.21±13.23	21.07±7.37	8.79±3.06	7.91±1.70	11.75±4.44	10.05±6.63
urea-N/μmol·L ⁻¹	0.97±0.59	1.24±0.60	0.81±0.54	1.52±0.41	1.47±0.45	0.63±0.48	1.25±0.78	0.86±0.75

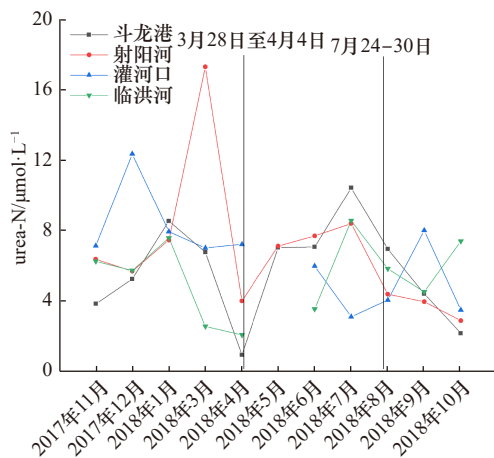


图5 2017-2018年江苏近岸主要入海径流尿素含量逐月变化

Fig. 5 The monthly variations of urea-N in main rivers estuaries along Jiangsu coast from 2017 to 2018

利用氮(DIN组分和小分子有机氮 urea-N等)浓度远高于浒苔持续生长所需的最低氮浓度(6.5 μmol/L)^[45],丰富充足的氮有利于浒苔繁殖生长。绿潮暴发前后表层水体中,DIN浓度降低5.45 μmol/L,降幅37%,且以NO₃⁻-N为主;而DON及其小分子组分 urea-N受径流输入(图4)等因素影响,浓度上升。而非绿潮海域(122°E以东远海),春、夏间DIN浓度降低1.16 μmol/L,降幅18%,且主要为NO₃⁻-N降低;DON浓度增加1.75 μmol/L,但其组分 urea-N降低0.39 μmol/L,说明

在远海除DIN外,尿素作为重要的有机氮组分对浮游植物生长^[46]及细菌群落^[43]发展起到重要作用。两个绿潮特征区域营养盐变化趋势表明,近岸丰富的营养盐来源和浓度为绿潮的暴发提供了物质基础,且浒苔藻能够快速吸收和储存大量DIN,对减轻江苏近海富营养化程度具有重要的意义。

对比绿潮快速增殖阶段和聚积衰退阶段对应的江苏近海和山东半岛外海域营养盐变化发现,35°N以南江苏近海绿潮快速增殖区(图2),受径流输入和混合影响(表2, S<30.7, TSP>80.0 mg/L),氮营养盐浓度较高,其中DIN在绿潮暴发前后浓度降低6.73 μmol/L,降幅66.6%;而DON和 urea-N受径流输入以及生物释放影响浓度上升。估算此区域表层水团中(面积约36 000 km²)主要组分DIN减少约10⁴ t。35°N以北绿潮聚积衰退区,营养盐来源少浓度低(表2, DIN<2 μmol/L, urea-N<1.5 μmol/L),远低于浒苔藻生长最低氮浓度(6.5 μmol/L)^[45],不利于绿潮的发展,绿潮发展期间可利用氮组分NH₄⁺-N和 urea-N分别降低0.53 μmol/L和0.84 μmol/L,估算此区域表层水团中(面积约24 000 km²)减少量分别约530 t和840 t,有机组分 urea-N为主要减少组分,为此区域内绿潮发展的重要氮来源。对比两个绿潮发展阶段表层营养盐减少量表明,在35°N以南江苏近海,DIN是快速增殖的绿潮主要氮吸收组分,且此区域为绿潮提供了主要的氮支

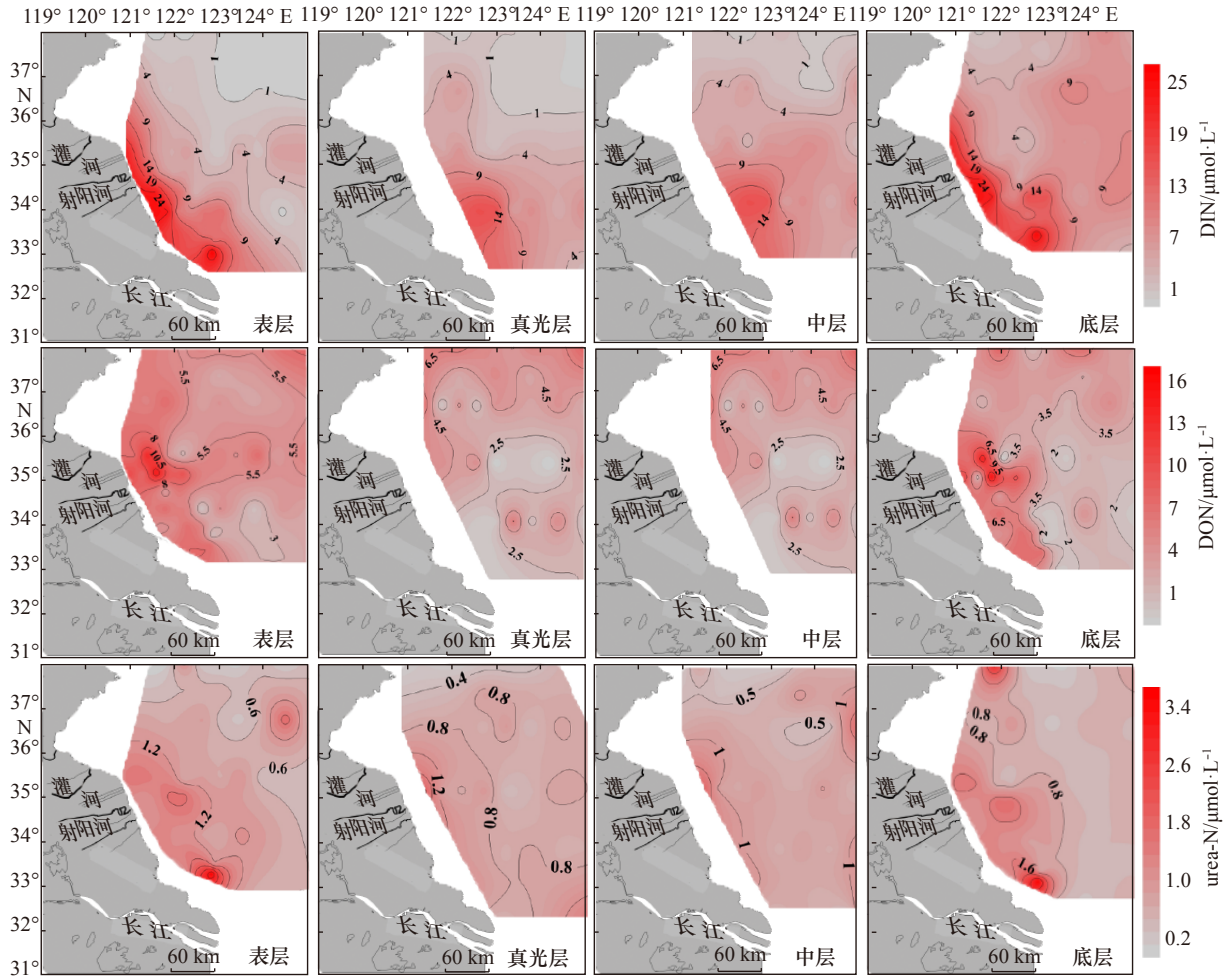


图 6 夏季(2018 年 7 月绿潮后期)南黄海不同氮营养盐组分的分布特征

Fig. 6 Horizontal distributions of nitrogen nutrients in the southern Yellow Sea in summer (July 2018, later of green tides)

撑(占总减少氮的 87%), 浒苔藻体的叶绿素和氮、磷元素含量较高^[40-41]也能支持此论证。35°N 以北低 DIN 特征海域, 浒苔藻对有机氮组分亲和力上升^[23], urea-N 成为此阶段绿潮发展重要的氮支撑组分, 相比较江苏近海(10⁴ t 级), 绿潮在此区域内吸收利用氮总量(1300 t 级)相对较低。

4 结论

(1) 2018 年绿潮发展漂移路径区域在 122°E 以西海域, 呈现明显的阶段和区域特征, 在 35°N 以南江苏

近海绿潮处于快速增殖阶段(相对增殖速率达每天 35.9%), 35°N 以北山东半岛外海域绿潮处于聚积衰退阶段。

(2) 在 35°N 以南江苏近海绿潮快速增殖区域, 营养盐丰富, 充足的氮尤其是 DIN 是浒苔快速繁殖的物质基础, 估算此区域为绿潮发展提供近 87% 的氮支撑。

(3) 35°N 以北山东半岛南部绿潮处于聚积衰退阶段, 表层较低的可利用氮(DIN 和小分子 urea-N)限制浒苔生长, 此阶段有机氮组分在氮支撑中起到重要作用。

参考文献:

- [1] Gladyshev M I, Gubelit Y I. Green tides: new consequences of the eutrophication of natural waters (invited review)[J]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, 12(2): 109-125.
- [2] Fletcher R L. The occurrence of "Green Tides"—a review[M]//Schramm W, Nienhuis P H. *Marine Benthic Vegetation. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996.
- [3] Bastos E, Gouvêa L P, Horta P A, et al. Interaction between salinity and phosphorus availability can influence seed production of *Ulva ohnoi* (Chlorophyta, Ulvales)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 167: 103860.
- [4] Sun Kaiming, Li Ruixiang, Li Yan, et al. Responses of *Ulva prolifera* to short-term nutrient enrichment under light and dark conditions[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 56-62.

- [5] Li Yahe, Zheng Mingshan, Lin Jiajia, et al. Darkness and low nighttime temperature modulate the growth and photosynthetic performance of *Ulva prolifera* under lower salinity[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 85–91.
- [6] Zhao Xinyu, Tang Xuexi, Hu Shunxin, et al. Photosynthetic response of floating *Ulva prolifera* to diurnal changes of *in-situ* environments on the sea surface[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 37(2): 589–599.
- [7] Fort A, Mannion C, Fariñas-Franco J M, et al. Green tides select for fast expanding *Ulva* strains[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134337.
- [8] 姜雪, 张云峰. 江苏灌河入海污染通量与经济增长关系分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(8): 30–33.
Jiang Xue, Zhang Yunfeng. Relationship between economic growth and sea pollution fluxes from Ganhe River[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(8): 30–33.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 高嵩, 马家海, Satoshi S, et al. 2010年中国黄海绿潮藻优势种分子生物学鉴定及形态特征研究[J]. *生态科学*, 2013, 32(6): 703–710.
Gao Song, Ma Jiahai, Satoshi S, et al. Molecular identification of dominant green tide algae in Yellow Sea China 2010, and their morphological characteristics[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(6): 703–710.
- [12] 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.
- [13] Wang Yu, Liu Feng, Liu Xingfeng, et al. Comparative transcriptome analysis of four co-occurring *Ulva* species for understanding the dominance of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea green tides[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2019, 31(5): 3303–3316.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 叶乃好, 张晓雯, 毛玉泽, 等. 黄海绿潮浒苔(*Enteromorpha prolifera*)生活史的初步研究[J]. *中国水产科学*, 2008, 15(5): 853–859.
Ye Naihao, Zhang Xiaowen, Mao Yuze, et al. Life history of *Enteromorpha prolifera* under laboratory conditions[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(5): 853–859.
- [17] 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.
- [18] Geng Huixia, Yu Rencheng, Zhang Qingchun, et al. Tracing the settlement region of massive floating green algae in the Yellow Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(5): 1555–1565.
- [19] 刘湘庆, 王宗灵, 辛明, 等. 浒苔衰亡过程中营养盐的释放过程及规律[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(6): 801–805, 813.
Liu Xiangqing, Wang Zongling, Xin Ming, et al. Study on process of nutrient release during the decay of *Ulva prolifera*[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(6): 801–805, 813.
- [20] Le Luhene E, Réveillac E, Ponsero A, et al. Fish community responses to green tides in shallow estuarine and coastal areas[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 175: 79–92.
- [21] Paumier A, Tatlian T, Réveillac E, et al. Impacts of green tides on estuarine fish assemblages[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 213: 176–184.
- [22] Shan Jingzhu, Li Jingmei, Xu Zhihua. Estimating ecological damage caused by green tides in the Yellow Sea: A choice experiment approach incorporating extended theory of planned behavior[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 181: 104901.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Shi Xiaoyong, Qi Mingyan, Tang Hongjie, et al. Spatial and temporal nutrient variations in the Yellow Sea and their effects on *Ulva pro-*

- lifer* blooms[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 36–43.
- [28] 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.
- [29] Xiu Bin, Liang Shengkang, He Xingliang, et al. Bioavailability of dissolved organic nitrogen and its uptake by *Ulva prolifera*: Implications in the outbreak of a green bloom off the coast of Qingdao, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 140: 563–572.
- [30] 王文善. 世界化肥供需概况及我国化肥工业现状[J]. *化肥工业*, 2005, 32(6): 1–5.
Wang Wenshan. General situation of global supply and demand of chemical fertilizers and present status of domestic chemical fertilizer industry[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2005, 32(6): 1–5.
- [31] 伯绍毅, 石金辉, 高会旺, 等. 冬、春季东海气溶胶和雨水中尿素氮的研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 14–22.
Bo Shaoyi, Shi Jinhui, Gao Huiwang, et al. Urea in aerosol and rainwater over the East China Sea in winter and spring[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 14–22.
- [32] 李志林, 石晓勇, 张传松. 春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成[J]. *环境科学*, 2015, 36(11): 3999–4004.
Li Zhilin, Shi Xiaoyong, Zhang Chuansong. Distribution characteristics of urea and constitution of dissolved nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in spring[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11): 3999–4004.
- [33] 钱佐国, 孙明昆, 杨炼锋, 等. 测定海水中尿素的双乙酰单肟法研究[J]. *黄渤海海洋*, 1984, 2(1): 66–71.
Qian Zuoguo, Sun Mingkun, Yang Lianfeng, et al. On the diacetyl monoxime method for determination of urea in seawater[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1984, 2(1): 66–71.
- [34] Mulvenna P F, Savidge G. A modified manual method for the determination of urea in seawater using diacetylmonoxime reagent[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1992, 34(5): 429–438.
- [35] Grasshoff K, Kremling K, Ehrhardt M. *Methods of Seawater Analysis*[M]. 3rd ed. Weinheim: VCH Publisher, 2007.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 自然资源部海洋预警监测司. 2018年中国海洋灾害公报[R]. 北京: 自然资源部, 2018.
Marine Early Warning and Monitoring Division, Ministry of Natural Resources. Bulletin of China marine disaster 2018[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2018.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 黄广勇, 查红, 闻余华. 沿海涵闸典型年入海径流(量)与闸下港道冲淤关系分析[J]. *江苏水利*, 2015, (12): 27–29, 31.
Huang Guangyong, Zha Hong, Wen Yuhua. Analysis of the relationship between the typical annual runoff of coastal culvert and the scour and silt of sluice gate[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2015, (12): 27–29, 31.
- [43] Collier J L, Baker K M, Bell S L. Diversity of urea-degrading microorganisms in open-ocean and estuarine planktonic communities[J]. *Environmental Microbiology*, 2009, 11(12): 3118–3131.
- [44] Solomon C M, Collier J L, Berg G M, et al. Role of urea in microbial metabolism in aquatic systems: a biochemical and molecular review[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2010, 59(1): 67–88.
- [45] 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.
- [46] 黄凯旋, 张云, 欧林坚, 等. 海南岛南北近岸海湾浮游生物对尿素的生物可利用性比较研究[J]. *海洋科学*, 2014, 38(10): 76–82.
Huang Kaixuan, Zhang Yun, Ou Linjian, et al. Comparative study on urea bioavailability by plankton in the southern and northern coastal waters of Hainan Island[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(10): 76–82.

The development of *Ulva prolifera* green tide and the roles of nitrogen nutrients in it in the southern Yellow Sea in 2018

Zhang Haibo¹, Wang Shuang¹, Yin Hang², Sha Zhenxia³, Shi Xiaoyong^{1,4}, Su Rongguo¹, Pei Shaofeng⁵, Wang Guoshan³, Ma Yiping¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. School of Marine and Atmospheric Sciences, Stony Brook University, State University of New York, New York 11790, USA; 3. College of Life Sciences, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 4. National Marine Hazard Mitigation Service, Ministry of Natural Resources, Beijing 100194, China; 5. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the daily satellite monitoring data of floating green tides, and the nitrogen nutrients and hydrological environment parameters were collected in spring (April, before green tides) and summer (July, later stage of green tides) cruises in the southern Yellow Sea (SYS) in 2018, we studied the spatio-temporal variation characteristics of the green tides, and the role of nitrogen nutrients in it. The results showed that the small *U. prolifera* patches were firstly observed in shallow waters off Nantong, Jiangsu Province on April 25, then floated northward and reached its maximum scale on the June 29, followed by decomposition and disappearance in the coast of Shandong Peninsula in the mid-August. The trajectory area of floating green tides was mainly located in the western of 122°E in the SYS, and showed two distinguishable development phases, the rapid growth phase in the south of 35°N, nearshore area of Jiangsu, and the decline phase in the north of 35°N, offshore area of Shandong Peninsula. The nitrogen nutrient components showed regional and seasonal variations, influenced by the freshwater influx, cold water masses, biological activity and other factors. The effects of nitrogen components were different in different development phases of green tides. The rich nitrogen nutrients from a variety of sources (total dissolved nitrogen (TDN) >20 μmol/L and dissolved inorganic nitrogen (DIN) >20 μmol/L) provided sufficient nitrogen for the development of green tides in the dominated form of DIN, and contributed to the fast reproduction and growth of *U. prolifera* in the rapid growth phase. While the *U. prolifera* showed a higher affinity for DON in the decline phase area, the urea-N become main nitrogen source for the development of green tides because of the poor bioavailable nitrogen content (DIN < 2 μmol/L and urea-N < 1.5 μmol/L) condition, which would limit the continuous growth of *U. prolifera*.

Key words: green tides; development phases; nitrogen sources; urea-N; southern Yellow Sea; *Ulva prolifera*