

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180514001

http://www.yykxjz.cn/

王毅波, 孙延瑜, 王彩霞, 胡晓珂. 夏季渤海网采浮游植物群落和叶绿素 $a$ 分布特征及其对渔业资源的影响. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 42–51

Wang YB, Sun YY, Wang CX, Hu XK. Distribution of the net-phytoplankton community and chlorophyll- $a$  in the Bohai Sea in summer and its impacts on fishery resources. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(5): 42–51

## 夏季渤海网采浮游植物群落和叶绿素 $a$ 分布特征及其对渔业资源的影响\*

王毅波<sup>1,2,3</sup> 孙延瑜<sup>1,2,3</sup> 王彩霞<sup>1,2,3</sup> 胡晓珂<sup>1,2①</sup>

(1. 海岸带生物学与生物资源利用重点实验室 中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264003; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生物学与生物技术功能实验室 青岛 266237; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 本研究基于2015年夏季(6、8月)渤海网采浮游植物和叶绿素 $a$ 调查数据,对渤海浮游植物的种类组成、丰度、多样性以及优势类群的分布特征进行分析。通过与历史数据进行对比发现,渤海浮游植物群落具有以下变化趋势:叶绿素 $a$ 浓度近年来未发生明显变化,但较20世纪80、90年代明显升高,且低值区( $<1.0 \mu\text{g/L}$ )较20年前明显缩小;就优势类群而言,6月角毛藻属(*Chaetoceros*)和圆筛藻属(*Coscinodiscus*)的优势较往年有所减弱,以往在渤海具有突出优势地位的中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)在2015年夏季6、8月均未检测到,甲藻(6月:夜光藻*Noctiluca scientillans*; 8月:三角角藻*Ceratium tripos*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)继续占优,而短柄曲壳藻(*Achnanthes brevipes*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)的优势地位较以往明显上升。浮游植物多样性(Shannon多样性、物种丰富度、均匀度)与往年相比处于适中的水平。渤海浮游植物群落结构的变化主要是由渤海营养盐结构改变引起的,这一变化趋势可能会对渤海食物链结构以及对具有浮游植物食性的经济鱼虾[如斑鲆(*Konosirus punctatus*)、鲆鱼(*Liza haematocheila*)、毛虾(*Acetes chinensis*)]的生长繁殖造成影响,进而影响到渤海渔业资源产量以及生态系统结构和功能。

**关键词** 渤海; 网采浮游植物; 叶绿素 $a$ ; 渔业资源; 分布; 变化趋势

**中图分类号** S931.3 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)05-0042-10

浮游植物是海洋中最主要的初级生产者,也是食物链的基础环节,作为支撑整个海洋生态系统的基础,浮游植物在气候变化、海洋渔业资源和海洋生态系统平衡中起着不可或缺的作用(冷宇等, 2013)。浮游植物是鱼类及贝类等直接或间接的食物,与渔业生产有着十分密切的关系。鱼类可以通过摄食藻类在体内积累多不饱和脂肪酸,因此,浮游植物在鱼类早期生长发育

阶段的营养需求方面发挥重要作用(吕末晓, 2016)。研究海洋中浮游植物群落的种类组成和数量分布状况及变化规律,在了解和掌握海洋生物资源现状、变动规律以及鱼类早期补充机制等方面均发挥重要作用。

渤海是典型的北方温带半封闭海区,浮游植物群落主要由硅藻、甲藻组成,也有少数蓝藻、绿藻和硅鞭藻出现,粒径大小以微型浮游植物为主(孙军等,

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB453300)和中国科学院战略先导专项 A 类(XDA11020403)共同资助 [This work was supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2015CB453300), and the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA11020403)]. 王毅波, E-mail: yibowang@yic.ac.cn

① 通讯作者: 胡晓珂, 研究员, E-mail: xkhu@yic.ac.cn

收稿日期: 2018-05-14, 收修改稿日期: 2018-07-25

2002)。渤海叶绿素 *a* 浓度分布一般为近岸高, 中部低, 季节变化基本呈微弱的双峰形式, 峰值一般出现在春季和夏末秋初, 基本符合温带海域浮游植物生物量变化的一般特征(孙松, 2012)。渤海沿岸众多河流所携带的营养物质, 促进并维持着该海域饵料生物的生长繁殖, 使其成为许多经济鱼虾类的主要产卵场和索饵育肥场, 鱼虾资源曾经十分丰富(康元德, 1991)。但近年来由于环境污染, 由浮游植物暴发引发的赤潮频繁发生, 对海洋动物造成严重威胁, 也对渔业资源造成重大损失。了解渤海海域的初级生产力及饵料基础状况, 对于研究渔业生物补充机制、掌握渔业资源变化趋势至关重要。

本研究基于 2015 年 6、8 月(渔业生物主要繁殖季节)渤海网采的浮游植物和叶绿素 *a* 调查数据, 对渤海浮游植物的种类组成、丰度及分布特征进行调查, 了解渤海海域的初级生产力及饵料基础状况, 并结合渤海浮游植物历史数据, 分析渤海浮游植物群落结构的变化趋势, 探讨其与渤海渔业资源的潜在联系, 旨在为渔业资源的合理利用和可持续发展提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 站位设置与样品采集

在渤海海域共设 94 个采样站位(图 1), 于 2015 年 6 月 11~28 日和 2015 年 8 月 4~22 日分别进行样品采集。浮游植物样品的采集按照《海洋调查规范》(GB/T12763.9-2007)第 9 部分“海水化学要素调查”中的规定, 使用浅水 III 型网(孔径为 76  $\mu\text{m}$ ), 自水体底层至表层垂直拖取。样品用体积分数为 5% 的福尔马林溶液固定保存, 在实验室用 Olympus CX31 显微镜进行分类鉴定和个体计数, 每个样品分析体积为 0.3 ml。另外, 按照《海洋调查规范》(GB/T12763.6-

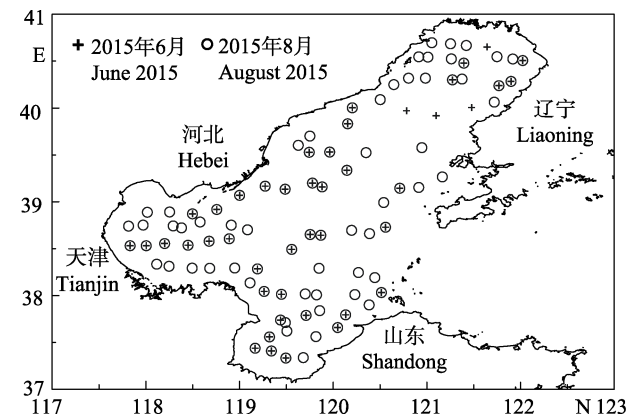


图 1 渤海浮游植物调查站位

Fig.1 Sampling sites of phytoplankton in the Bohai Sea

2007)第 6 部分“海洋生物调查”中规定的方法, 采集每个站位的表层海水经 0.45  $\mu\text{m}$  GF/F 玻璃纤维滤膜抽滤 500 ml, 滤膜置于干燥容器中, 密封保存于  $-20^{\circ}\text{C}$  冰箱中用于叶绿素 *a* 的测定。用 90% 的丙酮萃取后使用叶绿素荧光仪 Turner Trilogy 进行叶绿素 *a* 浓度测定。

### 1.2 统计方法

采用 Microsoft Excel 和 Primer 5.0 软件进行数据统计, 并用 Surfer13 软件绘制分布图。

浮游植物群落多样性指数 Shannon-Wiener 指数  $H'$  (Shannon *et al*, 1949):

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

优势度指数  $Y$  (孙军等, 2004):

$$Y = \sum_{i=1}^{n_i} \times f_i \quad (Y > 0.02 \text{ 时定为优势种})$$

种类丰富度指数  $D$  (Margalef, 1958):

$$D = (S-1) / \log_2 N$$

均匀度指数  $J$  (Pielou, 1966):

$$J = H' / \log_2 S$$

式中,  $S$  为采集样品中的物种总数;  $P_i$  为第  $i$  种的个体数与样品中的总个数的比值;  $n_i$  为第  $i$  种的总个体数;  $N$  为采集样品中所有物种的总个体数;  $f_i$  为该种在各样品中出现的频率。

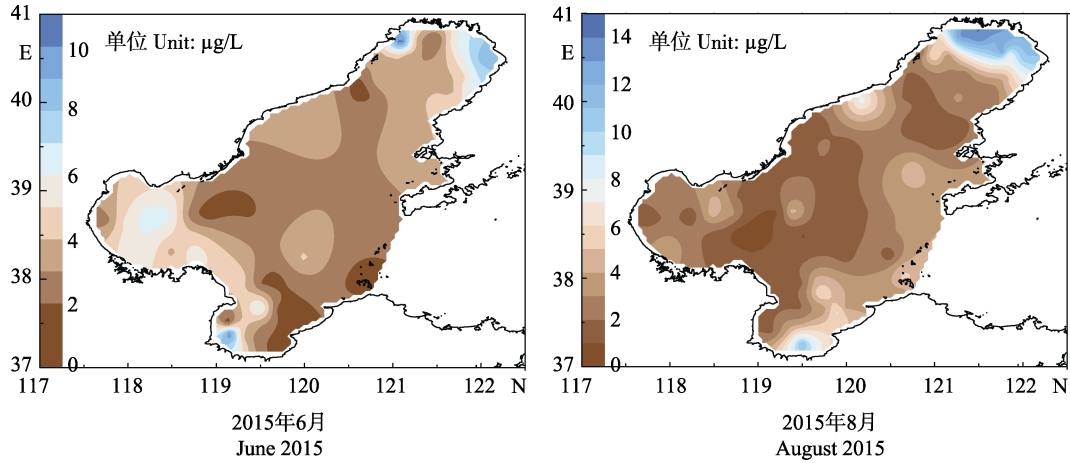
## 2 结果与分析

### 2.1 叶绿素 *a* 浓度及分布特征

渤海表层叶绿素 *a* 浓度在 6、8 月水平相当, 平均值分别为 3.8 和 3.6  $\mu\text{g/L}$ 。6 月, 整个渤海海域表层叶绿素 *a* 浓度的空间分布趋势是山东莱州湾西南部和辽东湾北部最高, 渤海湾中部次之, 渤海中部最低。8 月, 表层叶绿素 *a* 浓度的分布趋势是辽东湾北部和莱州湾南部高于渤海湾和渤海中部(图 2)。

### 2.2 种类组成和丰度

2015 年 6 月共采集浮游植物 2 门 26 属 40 种, 其中, 硅藻 24 属 36 种, 甲藻 2 属 4 种。渤海浮游植物丰度为  $(1.1 \sim 782.9) \times 10^4$  个/ $\text{m}^3$ , 平均丰度为  $45.6 \times 10^4$  个/ $\text{m}^3$ 。莱州湾西南部浮游植物丰度极高, 主要由于该海域出现了丰度高达  $774.1 \times 10^4$  个/ $\text{m}^3$  的短柄曲壳藻 (*Achnanthes brevipes*), 辽东湾东南沿岸是次高值区, 丰度达  $153.9 \times 10^4$  个/ $\text{m}^3$ , 而渤海其他海域浮游植物丰度均低于  $100 \times 10^4$  个/ $\text{m}^3$  (图 3)。各站位中, 硅藻占 31.8%~100%, 平均为 87.1%, 甲藻占浮游植物总丰度的

图2 渤海表层叶绿素 *a* 分布Fig.2 The distribution of chlorophyll-*a* in the surface water of the Bohai Sea

0~68.2%，平均为12.9%。

2015年8月共采集浮游植物3门41属89种，其中，硅藻34属75种，甲藻6属13种，定鞭藻仅1属1种，为小等刺硅鞭藻(*Dictyocha fibula*)。渤海浮游植物丰度为 $(1.2\sim 952.7)\times 10^4$ 个/ $m^3$ ，平均丰度为 $86.9\times 10^4$ 个/ $m^3$ 。8月浮游植物丰度的分布整体上呈现出“三湾高，渤海中心低”的趋势，最高值( $952.7\times 10^4$ 个/ $m^3$ )出现在辽东湾湾顶，其次是渤海湾湾顶(丰度达 $599.0\times 10^4$ 个/ $m^3$ )，莱州湾和秦皇岛沿岸海域丰度也较高(分别可达 $249.3\times 10^4$ 和 $244.8\times 10^4$ 个/ $m^3$ ) (图3)。8月各站位中硅藻占5.0%~100%，平均为72.5%，甲藻占到浮游植物的0~95%，平均为27.3%，相比于6月显著升高，定鞭藻仅出现在少数站位，且丰度很低。

在莱州湾西南部黄河口附近存在一个相对稳定的浮游植物丰度高值区，在6、8月其丰度均在 $200\times 10^4$ 个/ $m^3$ 以上(图4)，而渤海中部浮游植物丰度相对较低且稳定(图3)。2015年6月，黄河口附近浮

游植物优势种为短柄曲壳藻、夜光藻(*Noctiluca scientillans*)、长菱形藻(*Nitzschia longissima*)；8月，莱州湾浮游植物优势种为角毛藻(*Chaetoceros* sp.)、伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)、圆筛藻(*Coscinodiscus* sp.)。同时发现，2015年夏季莱州湾黄河口附近水体中的溶解无机氮浓度为368.2 µg/L，是渤海其他海域的2.7倍，氮磷比为62.8，是其他海域的2.6倍。

### 2.3 优势类群

整个渤海海域浮游植物优势种存在明显的演替(图5, 表1)。6月，短柄曲壳藻具有突出优势，其丰度高值区主要分布在辽东湾和莱州湾，与总的浮游植物分布趋势相似；底栖性种类具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)高值区位于渤海中部及渤海海峡附近；夜光藻丰度明显低于前两者，其高值区主要位于莱州湾顶、秦皇岛沿岸及渤海中部(图5)。8月，渤海浮游植

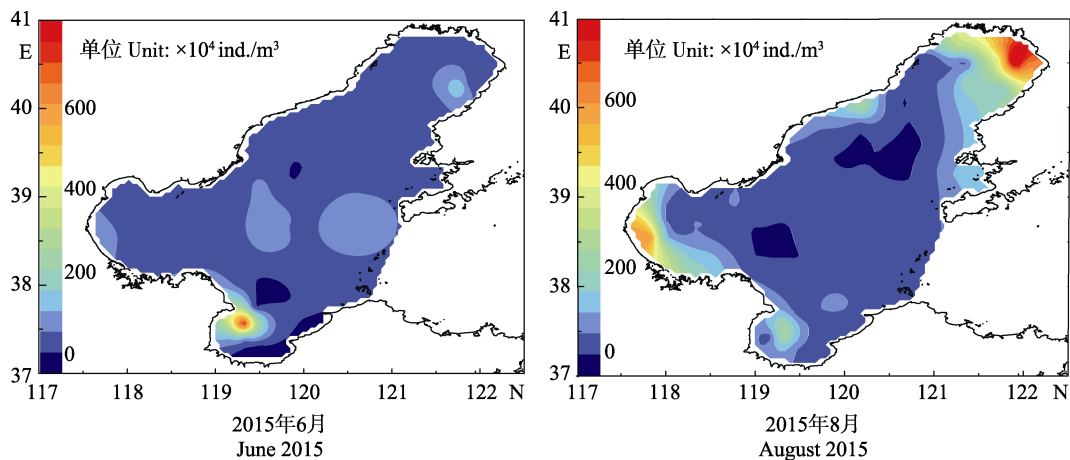


图3 渤海网采浮游植物丰度的水平分布

Fig.3 The horizontal distribution of phytoplankton abundance in the Bohai Sea

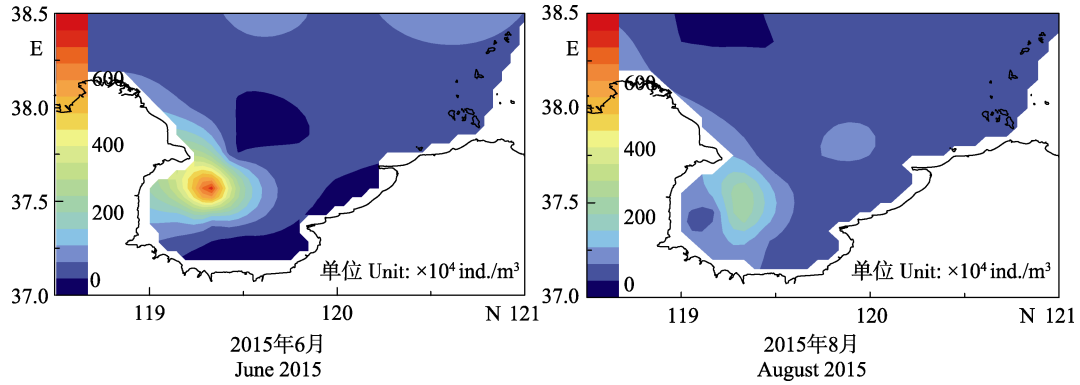


图 4 莱州湾浮游植物丰度的水平分布

Fig.4 The horizontal distribution of phytoplankton abundance in the Laizhou Bay

表 1 渤海海域浮游植物优势种

Tab.1 Dominant phytoplankton species in the Bohai Sea

海域 Area	2015年6月 June 2015		2015年8月 August 2015	
	优势种 Dominant species	优势度 Dominance	优势种 Dominant species	优势度 Dominance
渤海 Bohai Sea	短柄曲壳藻 <i>A. brevipes</i>	0.444	尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	0.097
	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.160	角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.	0.062
	夜光藻 <i>N. scientillans</i>	0.022	伏氏海线藻 <i>T. frauenfeldii</i>	0.059
辽东湾 Liaodong Bay			三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>	0.044
			圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.044
			菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	0.027
			布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>	0.026
	短柄曲壳藻 <i>A. brevipes</i>	0.435	尖刺伪菱形藻 <i>P. pungens</i>	0.286
	具槽帕拉藻 <i>P. sulcata</i>	0.272	菱形海线藻 <i>T. nitzschioides</i>	0.165
	夜光藻 <i>N. scientillans</i>	0.023	伏氏海线藻 <i>T. frauenfeldii</i>	0.077
渤海湾 Bohai Bay	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.022	刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>	0.066
			布氏双尾藻 <i>D. brightwellii</i>	0.057
			角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.	0.045
			高齿状藻 <i>Odontella regia</i>	0.034
	具槽帕拉藻 <i>P. sulcata</i>	0.279	三角角藻 <i>C. tripos</i>	0.156
	短柄曲壳藻 <i>A. brevipes</i>	0.156	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.111
	夜光藻 <i>N. scientillans</i>	0.074	伏氏海线藻 <i>T. frauenfeldii</i>	0.086
莱州湾 Laizhou Bay	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.040	尖刺伪菱形藻 <i>P. pungens</i>	0.060
			丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	0.039
			辐射圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i>	0.024
			角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.	0.024
	短柄曲壳藻 <i>A. brevipes</i>	0.752	角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.	0.197
			伏氏海线藻 <i>T. frauenfeldii</i>	0.078
		丹麦细柱藻 <i>L. danicus</i>	0.070	
		中华半管藻 <i>Hemiaulus sinensis</i>	0.058	
		圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.028	

物群落中尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)的优势最突出,其丰度高值区集中在辽东湾顶和渤海湾顶,最高丰度达  $338.1 \times 10^4$  个/ $m^3$ ;角毛藻(*Chaetoceros*

sp.)主要分布在秦皇岛沿岸海域,辽东湾和莱州湾局部海域角毛藻丰度也较高;伏氏海线藻和圆筛藻的高值区相似,都位于辽东湾顶和渤海湾西南部。三角角



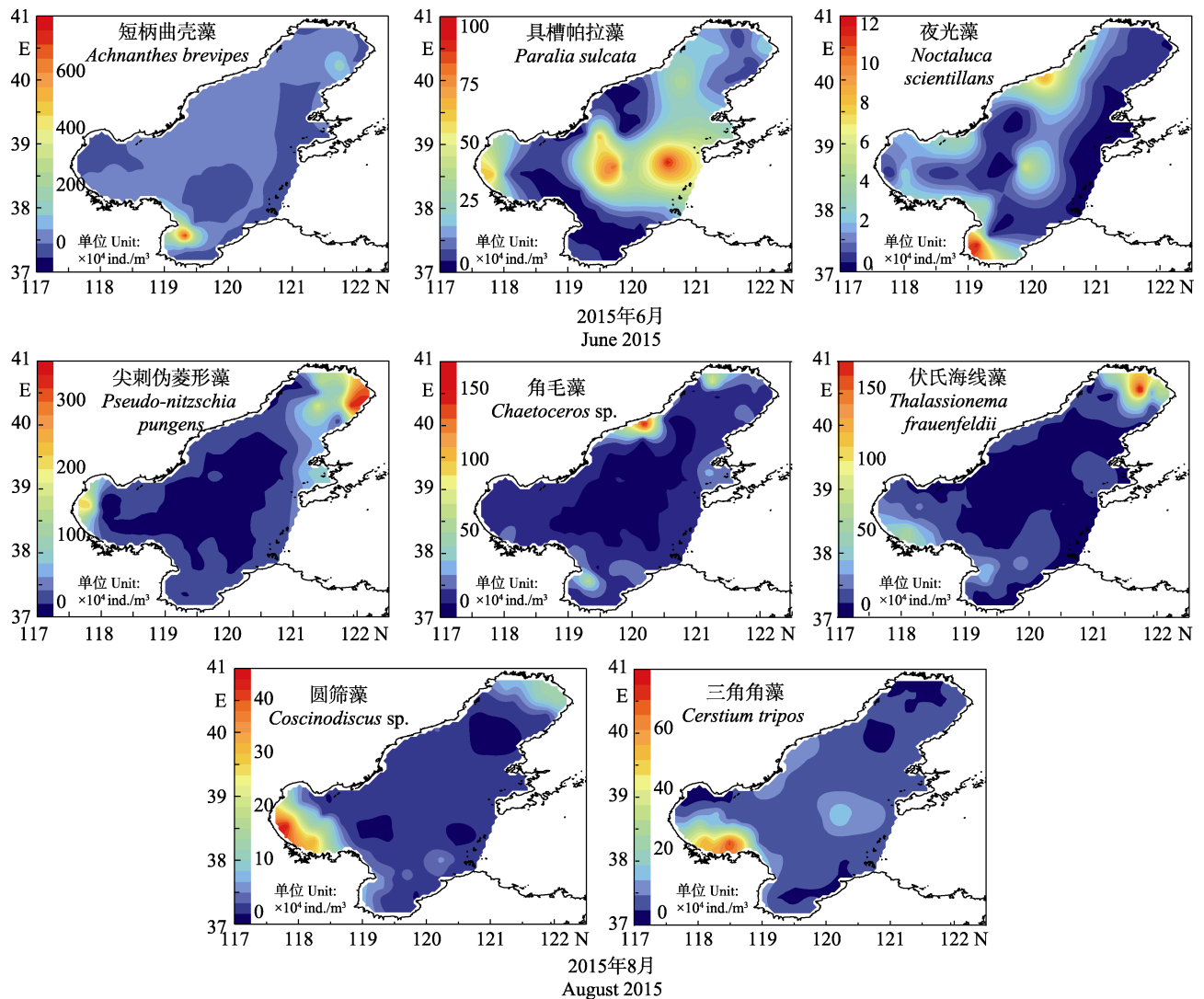


图5 渤海浮游植物主要优势种丰度水平分布

Fig.5 Horizontal distribution of dominant phytoplankton species in the Bohai Sea

藻(*Cerastium tripos*)主要集中分布在渤海湾南部。8月优势物种空间分布的共同点是都集中分布于三湾内。

从属水平上看,渤海浮游植物6~8月占优势的属也发生了明显更替。6月,占总丰度比例最高的属依次是曲壳藻属(*Achnanthes*, 61.0%),帕拉藻属(*Paralia*, 29.4%),夜光藻属(*Noctiluca*, 3.2%),圆筛藻属(*Coscinodiscus*, 2.0%),角毛藻属(*Chaetoceros*, 1.5%),菱形藻属(*Nitzschia*, 1.0%)。8月,丰度最高的属依次是伪菱形藻属(*Pseudo-nitzschia*, 24.3%),海线藻属(*Thalassionema*, 18.7%),角毛藻属(*Chaetoceros*, 13.9%),细柱藻属(*Leptocylindrus*, 7.9%),圆筛藻属(*Coscinodiscus*, 7.2%),角藻属(*Cerastium*, 6.4%)。其中,圆筛藻属和角毛藻属在6、8月都有较高的优势,但在8月的优势较6月显著升高。6月,夜光藻属是优势最显著的甲藻类群,而8月则转换为角藻属。

## 2.4 浮游植物多样性

渤海浮游植物多样性指数见表2,与历史调查数据相比,Shannon多样性、均匀度和丰富度指数适中。6月渤海浮游植物Shannon多样性和均匀度指数较高的区域集中在渤海湾口、莱州湾口和秦皇岛沿岸,8月则集中在渤海湾北侧、莱州湾口和秦皇岛沿岸,渤海中部及辽东湾口的多样性始终较低。物种丰富度的分布特征有所不同,秦皇岛沿岸海域始终是高值区(图6)。

## 3 讨论

### 3.1 渤海浮游植物群落结构的变化趋势

叶绿素 $a$ 是估算浮游植物生物量的重要指标。本研究中,渤海叶绿素 $a$ 浓度与近年来报道的数值相当(张莹等, 2016; 周艳蕾等, 2017),较20世纪80、90年

表 2 渤海浮游植物多样性指数  
Tab.2 Diversity index of phytoplankton in the Bohai Sea

月份 Month	Shannon 多样性 Shannon diversity ( $H'$ )		物种丰富度 Richness ( $D$ )		均匀度 Evenness ( $J$ )	
	范围 Range	均值 Average	范围 Range	均值 Average	范围 Range	均值 Average
6 月 June	0.117~2.725	1.473	0.333~1.147	0.572	0.041~1.000	0.522
8 月 August	0.772~4.030	2.637	0.605~2.421	1.305	0.186~0.896	0.651

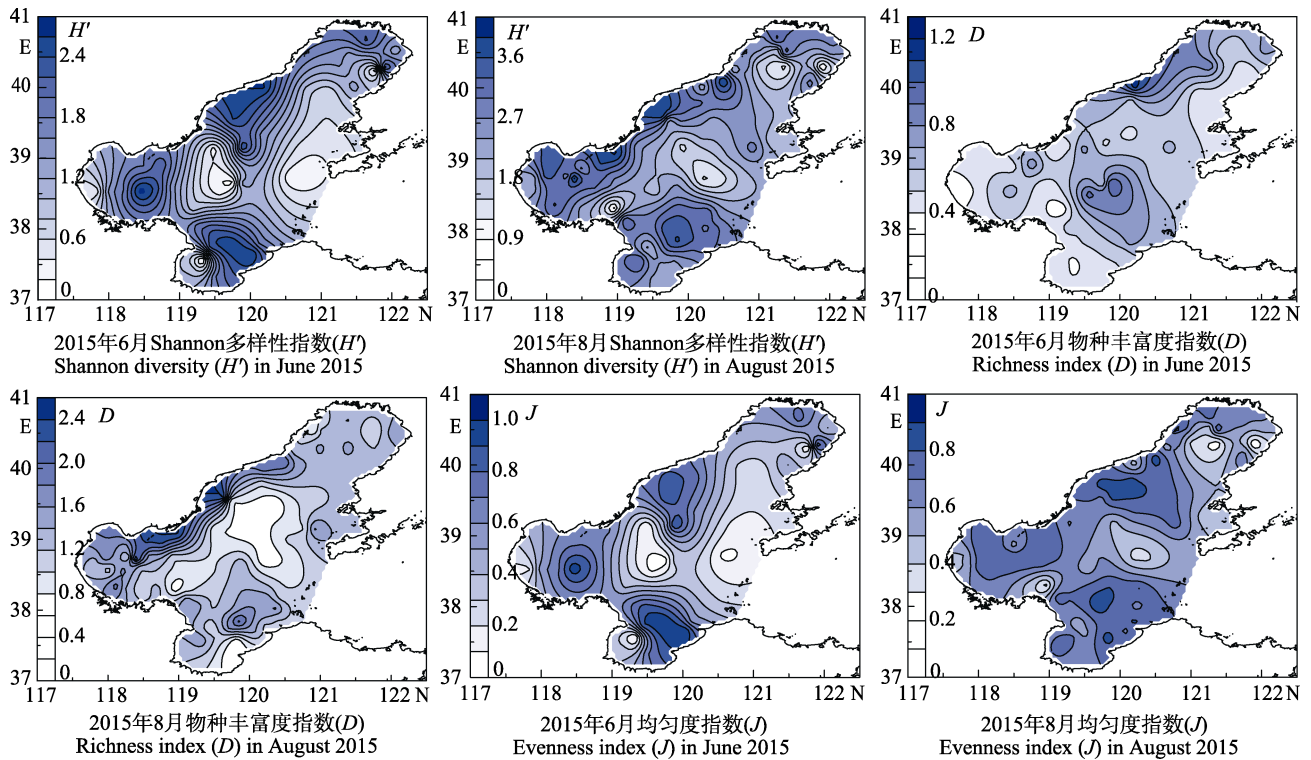


图 6 渤海海域浮游植物多样性指数的水平分布

Fig.6 Horizontal distribution of diversity indices of phytoplankton in the Bohai Sea

代有所上升(吕培顶, 1984; 费尊乐等, 1988; 孙军等, 2003)。与上述 20 世纪 80、90 年代渤海叶绿素数据相比还发现, 本研究中叶绿素 *a* 的低值区明显缩小, 浓度低于 1.0  $\mu\text{g/L}$  的区域十分有限(图 2)。该现象与营养盐的分布格局改变有关(图 7), 近些年来, 沿岸排污、海水养殖等造成的局部营养盐浓度改变是造成渤海浮游植物生物量升高、分布特征改变的重要原因之一(孙松, 2012)。2015 年夏季渤海表层叶绿素 *a* 的空间分布呈“三湾高, 渤海中部低”的趋势, 秦皇岛附近海域叶绿素 *a* 浓度也较高(仅在 8 月), 渤海湾较莱州湾和辽东湾低, 这一趋势与近 20 年的同期历史数据基本一致(郭全, 2005; 许士国等, 2015)。

2015 年夏季渤海浮游植物总丰度较 20 世纪 80 年代的数值偏低(康元德, 1991), 但与 1992 年以来历史数据(丰度偏高年份除外)相比, 差异不显著。2015 年夏季渤海莱州湾黄河口附近存在一个相对稳定的浮游植物丰度高值区。莱州湾内浮游植物丰度的周年变

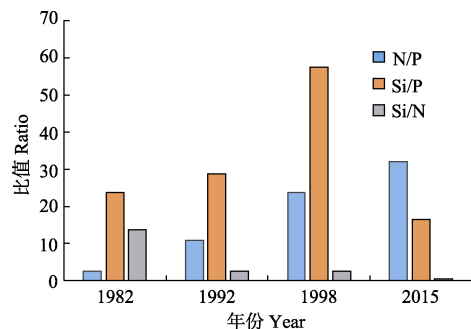


图 7 渤海营养盐结构变化

Fig.7 The variation of nutrient structure in the Bohai Sea

1982~1998 年营养盐数据来源于蒋红等(2005), 为各年 5、8、10 月渤海表、底层平均值; 2015 年数据来源于本研究调查数据, 为 2015 年 8 月渤海表、中、底层平均值

The data of 1982~1998 are from Jiang *et al* (2005), representing the average values of the surface and bottom layers of the Bohai Sea in May, August and October of each year. The data of the year 2015 are from our study, representing the average values of the surface, middle and bottom layers in August, 2015

化与黄河径流量的变化密切相关,8月是径流量高峰,黄河径流作为营养物质的输入源,对浮游植物的生长起到重要作用(马媛,2006)。本研究 and 冷晓云(2016)的研究结果均显示,2015年夏季莱州湾黄河口区域的溶解无机氮浓度和氮磷比都明显高于渤海其他海域,这可能是该区域在夏季形成稳定的浮游植物丰度高值区的原因。

就优势类群而言,2015年渤海浮游植物同往年相比发生了一定的变化(表3)。2015年6月,角毛藻属和圆筛藻属丰度分别占浮游植物总丰度的1.5%和2.0%,优势较往年有所下降;具槽帕拉藻继续占优;而在以

往调查中优势不明显的短柄曲壳藻在2015年6月成为渤海第一优势物种。2015年8月,角毛藻属、圆筛藻属以及角藻属甲藻(主要是三角角藻)继续占优,尖刺伪菱形藻的优势较往年更为突出,成为8月渤海的第一优势种。

孙军等(2002)在对1998~1999年渤海中部及渤海海峡网采浮游植物的分析中发现,渤海浮游植物群落由20世纪80年代硅藻占绝对优势逐渐转变为硅藻-甲藻共同占优势。本研究观测到渤海甲藻的优势有增无减,尤其在8月渤海中部和渤海湾口,共有22个站位的浮游植物群落中甲藻占比达50%以上。这是由

表3 本次调查数据与渤海网采浮游植物历史数据的对比  
Tab.3 Comparison of phytoplankton community information from this study and historical data

时间 Time	丰度 Abundance ( $\times 10^4$ ind./m <sup>3</sup> )	群落组成 Community composition	优势种 Dominant species	数据来源 Reference
1982-06	78.0		圆筛藻属、角毛藻属、具槽直链藻 <i>Coscinodiscus</i> sp., <i>Chaetoceros</i> sp., <i>Melosira sulcata</i>	康元德(1991)
1982-08	474.0		角毛藻属、圆筛藻属 <i>Chaetoceros</i> sp., <i>Coscinodiscus</i> sp.	
1992-08	66.0	21 属 52 种 21 genera, 52 species	浮动弯杆藻、角毛藻属 <i>Eucampia zoodiacus</i> , <i>Chaetoceros</i> sp.	王俊等(1998)
2000-08~ 09	118.6	35 属 64 种 35 genera, 64 species	偏心圆筛藻、三角角藻、浮动弯角藻、圆海链藻、梭状角藻、劳氏角毛藻 <i>Coscinodiscus excentricus</i> , <i>Ceratium tripos</i> , <i>Eucampia zoodiacus</i> , <i>Thalassiosira rotula</i> , <i>Ceratium fusus</i> , <i>Chaetoceros lauderi</i>	孙军等(2005)
2005-08	1083.4	48 属 114 种 48 genera, 114 species	中肋骨条藻、拟旋链角毛藻、菱形海线藻、旋链角毛藻、叉状角藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> , <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Ceratium furca</i>	孙萍等(2008)
2011-06	24.2	19 属 28 种 19 genera, 28 species	夜光藻、具槽帕拉藻、圆筛藻、尖叶原甲藻 <i>Noctiluca scientillans</i> , <i>Paralia Sulcata</i> , <i>Coscinodiscus</i> sp., <i>Prorocentrum triestinum</i>	杨阳等(2016)
2013-07	16.3	36 属 70 种 36 genera, 70 species	柔弱几内亚藻、斑点海链藻、翼根管藻印度变型、锥形原多甲藻、三角角藻 <i>Guinardia delicatula</i> , <i>Thalassiosira punctigera</i> , <i>Rhizosolenia acuminata</i> , <i>Protoperdinium Conicum</i> , <i>Ceratium tripos</i>	孙雪梅等(2016)
2015-06	45.6	26 属 40 种 26 genera, 40 species	短柄曲壳藻、具槽帕拉藻、夜光藻 <i>Achnanthes brevipes</i> , <i>Paralia Sulcata</i> , <i>Noctiluca scientillans</i>	本研究 This study
2015-08	86.9	41 属 89 种 41 genera, 89 species	尖刺伪菱形藻、角毛藻、三角角藻、圆筛藻、菱形海线藻、布氏双尾藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> , <i>Chaetoceros</i> sp., <i>Ceratium tripos</i> , <i>Coscinodiscus</i> sp., <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Ditylum brightwellii</i>	

于近30年来,渤海溶解性无机氮和溶解性无机磷发生了很大变化,致使渤海浮游植物的生长由20世纪80年代早期的氮限制、20世纪80年代末期的氮-磷

共同限制转变为20世纪90年代以来的磷限制,引起浮游植物生长和浮游植物群落结构的改变(孙军等,2002)。渤海海水中氮浓度的增加、磷浓度的降低导

致更易受磷限制的角毛藻属优势地位下降, 而更易受氮限制的角藻属浮游植物优势地位升高, 这不利于高营养级渔业资源生物生长(许思思, 2011)。

### 3.2 浮游植物群落结构变化对渔业生物基础饵料的影响

海洋浮游植物是海洋中的初级生产者和海洋食物网的基础环节, 作为浮游动物及游泳动物直接或间接的饵料, 其种类组成与数量变动将会导致渔业资源总量和资源结构的一系列变化。

由于近年来渤海硅浓度的降低和氮磷比的升高, 渤海叶绿素 *a* 浓度的升高以及浮游植物群落中硅藻、甲藻相对组成的变化可能导致渤海渔业资源结构的改变。硅藻支撑着渤海的重要渔业资源生物, 其食物链为硅藻→浮游动物→中小型鱼类→游泳动物食性鱼类; 甲藻支撑的资源生物经济价值不大, 并且食物链长度较短, 其食物链为甲藻→浮游动物→大型水母, 其中水母类较少被上层捕食者利用(苏纪兰等, 2002; 张锦峰等, 2014)。随着硅藻优势地位的降低和甲藻优势地位的升高, 硅藻支撑的食物链被削弱, 甲藻支撑的食物链被增强, 进而导致渤海高营养级渔业资源结构的变化, 即高营养级渔业资源生物群落的衰退以及大型水母类等低营养级、低经济价值生物的大量繁殖(许思思, 2011; 张锦峰等, 2014)。同理, 渤海叶绿素 *a* 浓度尽管在近 20 年呈现升高的趋势, 但是初级生产力中支撑渔业资源的有效部分可能并没有增加, 这种变化将对渔业资源总生物量及生态系统结构和功能造成影响。

斑鲆(*Konosirus punctatus*)为我国近海中上层鱼类, 进入幼鱼期后开始兼食浮游植物和浮游动物, 为混合食性(张波等, 2012; 吕末晓, 2016)。高彦洁(2016)报道了斑鲆为 2015 年夏季渤海莱州湾仔稚鱼的优势种类, 吕末晓(2016)通过研究同期采集的莱州湾斑鲆幼鱼食物组成发现, 甲藻在斑鲆幼鱼食物组成中占更高的比重, 认为这一现象可能与夏季环境中甲藻丰度明显增多有一定关系。鲆鱼(*Liza haematocheila*)广泛分布于沿海及河口沿岸一带, 在我国渤海南部和黄海中部种群数量最多。据卞晓东等(2018)报道, 2015~2017 年, 鲆鱼成为春季和春夏季渤海仔稚鱼第一优势种。鲆幼鱼主要摄食浮游动物, 当体长达 23 mm 以上转以藻类和有机碎屑为摄食饵料, 其中, 以底栖硅藻为主。鲆鱼对饵料的适应性很强, 其对饵料的选择与环境中饵料的分布和数量密切相关, 比较倾向于摄食环境中细胞丰度比例高的物种(吕末晓, 2016), 其广食性的特征可能是鲆鱼适应近年来渤海浮游植物

群落结构的变动, 在渤海仔稚鱼种类中优势度上升的主要原因。毛虾(*Acetes chinensis*)是我国黄渤海的重要渔业资源之一, 在渤海渔业经济中占有重要位置。渤海毛虾的主要渔场分布在渤海湾南部和莱州湾西部(仲崇峻等, 2001), 分布在该区域的毛虾在渤海中西部深水区越冬后, 从 3 月下旬开始向近岸移动进入黄河口附近, 5 月中旬以后大中型毛虾先后接近沿岸区产卵, 6 月为产卵盛期(仲崇峻等, 2001)。毛虾主要摄食浮游植物, 以硅藻为主, 且具有显著的选择性。春、夏季渤海的圆筛藻是游向近岸索饵、生殖的毛虾的重要饵料基础, 毛虾的摄食强度与圆筛藻的数量变动和分布密切相关(康元德, 1991; 王俊等, 1998)。本研究中, 6 月圆筛藻在整个渤海的优势度较往年偏低, 尤其是在莱州湾, 短柄曲壳藻以极高的优势度成为单一优势种, 这一趋势不利于毛虾的生长繁殖, 因此是影响渤海毛虾捕获量的一个重要因素。

**致谢:** 感谢陈玉林、路阳同学在样品采集和检测过程中的贡献, 感谢航次全体成员在海上作业过程中给与的帮助。

## 参 考 文 献

- Bian XD, Wan RJ, Jin XS, *et al.* Ichthyoplankton succession and assemblage structure in the Bohai Sea during the past 30 years since the 1980s. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(2): 1-15 [卞晓东, 万瑞景, 金显仕, 等. 近 30 年渤海鱼类种群早期补充群体群聚特性和结构更替. *渔业科学进展*, 2018, 39(2): 1-15]
- Fei ZL, Mao XH, Zhu MY, *et al.* The study of productivity in the Bohai Sea I. Distribution and seasonal variation of chlorophyll-*a*. *Acta Oceanologica Sinica*, 1988, 10(1): 99-106 [费尊乐, 毛兴华, 朱明远, 等. 渤海生产力研究 I. 叶绿素 *a* 的分布特征与季节变化. *海洋学报*, 1988, 10(1): 99-106]
- Gao YJ. Studies on community structure of ichthyoplankton in Laizhou Bay. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2016 [高彦洁. 莱州湾海域鱼卵仔稚鱼群落结构初步研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2016]
- Guo Q. Features in distributions of nutrients and chlorophyll and eutrophication assessment in the Bohai Sea in summer. Master's Thesis of Ocean University of China, 2005 [郭全. 渤海夏季营养盐和叶绿素分布特征及富营养化状况分析. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2005]
- Jiang H, Cui Y, Chen BJ, *et al.* The variation trend of nutrient salts in the Bohai Sea. *Marine Fisheries Research*, 2005, 26(6): 61-67 [蒋红, 崔毅, 陈碧鹃, 等. 渤海近 20 年来营养盐变化趋势研究. *海洋水产研究*, 2005, 26(6): 61-67]
- Kang YD. Distribution and seasonal variation of phytoplankton in the Bohai Sea. *Marine Fisheries Research*, 1991(12): 31-54 [康元德. 渤海浮游植物的数量分布和季节变化.



- 海洋水产研究, 1991(12): 31–54]
- Leng XY. The distribution of nutrients and phytoplankton biomass in north China Sea. Master's Thesis of Tianjin University of Science & Technology, 2016 [冷晓云. 中国北方近海营养盐分布与浮游植物生物量. 天津科技大学硕士研究生学位论文, 2016]
- Leng Y, Zhao S, Liu S, *et al.* Distribution characteristics of phytoplankton in the estuary of Yellow River during summer. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(6): 41–46 [冷宇, 赵升, 刘霜, 等. 黄河口海域夏季浮游植物的分布特征. *水生态学杂志*, 2013, 34(6): 41–46]
- Lv MX. Study on the diet composition of juvenile of *Liza haematocheila* and *Konosirus punctatus* and its relationship with ambient phytoplankton. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2016 [吕末晓. 鲮、斑鲮幼鱼食物组成及其与环境浮游植物的关系研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2016]
- Lv PD, Fei ZL, Mao XH, *et al.* Distribution of chlorophyll-*a* and estimation of primary production in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1984, 6(1): 90–98 [吕培顶, 费尊乐, 毛兴华, 等. 渤海水域叶绿素 *a* 的分布及初级生产力的估算. *海洋学报*, 1984, 6(1): 90–98]
- Ma Y. Preliminary study about the effect on the ecological environment of Estuary of Yellow River and its adjacent area caused by the change of Yellow River runoff. Master's Thesis of Ocean University of China, 2006 [马媛. 黄河入海径流量变化对河口及邻近海域生态环境影响研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2006]
- Margalef R. Information theory in ecology. *General Systems*, 1958, 3: 36–71
- Pielou EC. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13(1): 131–144
- Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949, 1–114
- Su JL, Tang QS. II Processes of the Bohai sea ecosystem dynamic. In: Study on ecosystem dynamics in coastal ocean. Beijing: Science Press, 2002 [苏纪兰, 唐启升. 中国海洋生态系统动力学研究 II 渤海生态系统动力学过程. 北京: 科学出版社, 2002]
- Sun J, Liu DY, Yang SM, *et al.* The preliminary study on phytoplankton community structure in the central Bohai Sea and the Bohai Strait and its adjacent area. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 461–471 [孙军, 刘东艳, 杨世民, 等. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群落结构的初步研究. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 461–471]
- Sun J, Liu DY, Chai XY, *et al.* The chlorophyll *a* concentration and estimating of primary productivity in the Bohai Sea in 1998–1999. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 517–526 [孙军, 刘东艳, 柴金玉, 等. 1998–1999 年春秋渤海中部及其邻近海域叶绿素 *a* 浓度及初级生产力估算. *生态学报*, 2003, 23(3): 517–526]
- Sun J, Liu DY, Xu J, *et al.* The netz-phytoplankton community of the central Bohai Sea and its adjacent waters in spring 1999. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2003–2016 [孙军, 刘东艳, 徐俊, 等. 1999 年春季渤海中部及其邻近海域的网采浮游植物群落. *生态学报*, 2004, 24(9): 2003–2016]
- Sun J, Liu DY. Net-phytoplankton community of the Bohai Sea in the autumn of 2000. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(3): 124–132 [孙军, 刘东艳. 2000 年秋季渤海的网采浮游植物群落. *海洋学报*, 2005, 27(3): 124–132]
- Sun P, Li RX, Li Y, *et al.* The net-phytoplankton community structure of the Bohai Sea in late summer, 2005. *Advances in Marine Science*, 2008, 26(3): 354–363 [孙萍, 李瑞香, 李艳, 等. 2005 年夏末渤海网采浮游植物群落结构. *海洋科学进展*, 2008, 26(3): 354–363]
- Sun S. Regional oceanography of China seas—Biological oceanography. Beijing: China Ocean Press, 2012 [孙松. 中国区域海洋学——生物海洋学. 北京: 海洋出版社, 2012]
- Sun XM, Xu DH, Xia B, *et al.* Species composition and seasonal variation of netz-phytoplankton in the central Bohai Sea. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(4): 19–27 [孙雪梅, 徐东会, 夏斌, 等. 渤海中部网采浮游植物种类组成和季节变化. *渔业科学进展*, 2016, 37(4): 19–27]
- Wang J, Kang YD. Study on population dynamics of phytoplankton in the Bohai Sea. *Marine Fisheries Research*, 1998, 19(1): 43–52 [王俊, 康元德. 渤海浮游植物种群动态的研究. *海洋水产研究*, 1998, 19(1): 43–52]
- Xu SG, Fu YZ, Kang PP. Seasonal and interannual variations of Chlorophyll *a* in Bohai Sea. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(6): 898–903, 924 [许士国, 富砚昭, 康萍萍. 渤海表层叶绿素 *a* 时空分布及演变特征. *海洋环境科学*, 2015, 34(6): 898–903, 924]
- Xu SS. Decline mechanisms of fishery resources in the Bohai Sea under anthropogenic activities. Doctoral Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2011 [许思思. 人为影响下渤海渔业资源的衰退机制. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士研究生学位论文, 2011]
- Yang Y, Sun J, Guan XY, *et al.* Seasonal variation of netz-phytoplankton community in Bohai Sea. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(2): 121–131 [杨阳, 孙军, 关翔宇, 等. 渤海网采浮游植物群集的季节变化. *海洋通报*, 2016, 35(2): 121–131]
- Zhang B, Li ZY, Jin XS. Functional groups of fish assemblages and their major species in the Bohai Sea. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(1): 64–72 [张波, 李忠义, 金显仕. 渤海鱼类群落功能群及其主要种类. *水产学报*, 2012, 36(1): 64–72]
- Zhang JF, Gao XL, Zhuang W, *et al.* Analysis of long-term changes in fishery resources and environment in the Laizhou Bay. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2014(3): 82–90 [张锦峰, 高学鲁, 庄文, 等. 莱州湾渔业资源与环境变化趋势分析. *海洋湖沼通报*, 2014(3): 82–90]
- Zhang Y, Wang YJ, Wang YQ, *et al.* Spatial distribution and correlation of environmental factors and chlorophyll-*a* concentrations in the Bohai Sea during the summer of 2013.

Marine Science Bulletin, 2016, 35(5): 571–578 [张莹, 王玉珏, 王跃启, 等. 2013 年夏季渤海环境因子与叶绿素 *a* 的空间分布特征及相关性分析. 海洋通报, 2016, 35(5): 571–578]

Zhong CJ, Zeng XQ, Ren YP, *et al.* Study on the fishery biology of the *Acetes chinensis* Hansen caught in coastal waters of Laizhou Bay and Huanghe Estuary. Transaction of Oceanology and Limnology, 2001(1): 31–36 [仲崇峻, 曾晓

起, 任一平, 等. 莱州湾、黄河口水域毛虾渔业生物学特征的研究. 海洋湖沼通报, 2001(1): 31–36]

Zhou YL, Zhang CS, Shi XY, *et al.* Distribution characteristics of chlorophyll *a* and its influencing environmental factors in Bohai Sea and Yellow Sea. China Environmental Science, 2017, 37(11): 4259–4265 [周艳蕾, 张传松, 石晓勇, 等. 黄渤海海水中叶绿素 *a* 的分布特征及其环境影响因素. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4259–4265]

(编辑 马瑾艳)

## Distribution of the Net-Phytoplankton Community and Chlorophyll-*a* in the Bohai Sea in Summer and Its Impacts on Fishery Resources

WANG Yibo<sup>1,2,3</sup>, SUN Yanyu<sup>1,2,3</sup>, WANG Caixia<sup>1,2,3</sup>, HU Xiaoke<sup>1,2①</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Biology and Bioresource Utilization, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003; 2. Laboratory for Marine Biology and Biotechnology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** Phytoplankton are the major primary producers in the ocean and play a crucial role in the marine food chain. Understanding the dynamics of the marine phytoplankton community can provide insights into the succession process and current status of marine fishery resources. Based on the net-phytoplankton samples collected from the Bohai Sea in the summer (June and August) of 2015, we studied the phytoplankton community composition, diversity, abundance, and dominant taxa in the Bohai Sea. Compared with historical data, the phytoplankton community structure in the Bohai Sea was changed markedly. The chlorophyll-*a* concentration had changed slightly during recent years, but was much higher than that in the 1980s and 1990s, and the regions with lower values (<1.0 μg/L) were much smaller than those 20 years ago. In terms of the dominant taxa, the dominance of the genera *Chaetoceros* and *Coscinodiscus* was found to be slightly decreased, whereas the species *Skeletonema costatum*, which had been an important dominant species in the Bohai Sea, was not observed in the two months of summer in 2015. In contrast, *Paralia sulcata* and Pyrrophyta (*Noctiluca scientillans* in June and *Ceratium tripos* in August) were still dominant in the Bohai Sea, and the abundance and dominance of *Achnanthes brevipes* and *Pseudo-nitzschia pungens* was higher than those in the years before 2015. The diversity indices (Shannon diversity and species richness and evenness) of phytoplankton were at a moderate level. Such a trend was mainly caused by the significant change of the nutrient structure in the Bohai Sea. This may change the structure of the marine food chain and influence the growth and reproduction of commercial fishes and shrimps (e.g., *Konosirus punctatus*, *Liza haematocheila*, and *Acetes chinensis*) that feed on phytoplankton. Consequently, this will have potential impacts on fishery production and the structure and function of the ecosystem in the Bohai Sea.

**Key words** Bohai Sea; Net-phytoplankton; Chlorophyll-*a*; Fishery resources; Distribution; Changing trend

① Corresponding author: HU Xiaoke, E-mail: xkhu@yic.ac.cn