

渤海中部网采浮游植物种类组成和季节变化*

孙雪梅 徐东会 夏 斌 崔正国 曲克明 江 涛
赵 俊 陈聚法 陈碧鹃^①

(农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室
中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071)

摘要 利用 2013 年 5 月、7 月、11 月和 12 月渤海中部 41 个站位的 4 次综合海上调查所获资料,分析其浮游植物群落结构的季节变化特征。共鉴定出浮游植物 3 门 42 属 87 种。其中,硅藻门 33 属 72 种,甲藻门 9 属 15 种,金藻门 1 属 1 种。渤海中部浮游植物优势种多为硅藻,部分甲藻也表现为优势类群。与历史资料比较发现,主要优势种发生了演替现象,往年优势种浮动弯角藻(*Eucampia zodiacus*)本次调查并未出现,斑点海链藻(*Thalassiosira punctigera*)首次以优势种出现,浮游甲藻的优势地位与往年相比日趋明显。浮游植物细胞丰度 5 月、7 月、11 月和 12 月平均为 200.14×10^4 、 16.32×10^4 、 7.43×10^4 、 12.77×10^4 cell/m³,与同期历史资料相比,5 月偏高,这与菱软几内亚藻(*Guinardia delicatula*)的暴发有关,其他月份相对比较稳定。其群落结构特征中的多样性指数(*H'*)和均匀度指数(*J*)均呈现 7 月>11 月>5 月>12 月的趋势。Spearman 相关性分析结果显示,与浮游植物细胞丰度相关度较高的环境因子是无机氮、磷酸盐、石油烃和 N/P。

关键词 渤海中部;浮游植物;优势种;群落结构

中图分类号 S932.7 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2016)04-0019-09

渤海是一个半封闭式的内海,它包括辽东湾、莱州湾、渤海中部、渤海湾、渤海海峡 5 个部分,其四周几乎被陆地包围,仅东南部的渤海海峡与黄海相通。渤海沿岸入海河流较多,黄河、小清河、辽河等向其注入了大量的淡水和泥沙以及丰富的营养,对浮游植物的生长和繁殖起到重要作用。多年的调查结果显示,渤海的浮游植物物种十分丰富。王家楫 1936 年曾多次对渤海浮游植物种类进行调查和研究(孙军等, 2005),发现其有 400 多个物种,主要是近岸硅藻。近年来,受人类活动的影响,包括城市污水排放、开采石油带来的溢油污染等,渤海的生态环境变得极其脆弱(卞少伟等, 2015)。浮游植物是海洋生态系统中的重要初级生产者,在维护整个生态系统的稳定方面发挥着不可替代的作用,当生态环境发生变化时,其

浮游植物的群落结构可能也会发生相应的改变,分析海洋浮游植物群落结构变化特征成为海洋生态环境监测的一项重要指标。

渤海浮游植物的群落结构变化研究起始于 20 世纪 30 年代,主要集中在物种分类和其生态分布习性方面(王俊等, 2003; 孙萍等, 2008; 尹翠玲等, 2013)。孙军等(2002、2005)的研究表明,渤海的浮游植物群落结构比 40 余年前发生了较大的变化,浮游植物群落由硅藻占绝对优势逐渐转变为硅藻/甲藻共存为主的群落。近年来,研究者开始陆续对其浮游植物群落结构与环境因子的相关性进行综合分析(郭术津等, 2014)。

本研究基于 2011 年发生的渤海溢油事故对渤海浮游植物群落结构的影响,对 2013 年渤海中部浮游植物群落结构的物种组成、优势种演替、细胞丰度以

*农业部溢油专项“渤海生态环境监测与评估”(农办渔[2012]117号)和“应对溢油关键技术专项研究”(2012-NZ-5739)共同资助。孙雪梅, E-mail: sunxm@ysfri.ac.cn

^① 通讯作者: 陈碧鹃, 研究员, E-mail: chenbj@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2015-05-26, 收修改稿日期: 2015-10-14

及多样性等的季节变化特征进行大面积跟踪调查,该研究结果为更好地了解溢油对渤海浮游植物群落的变化及其对生态系统的影响提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查区域

2013年5月、7月、11月和12月分别对渤海中部进行4个航次的水文、化学和生物的综合嵌套式外业调查,共设41个站位,站位分布见图1。

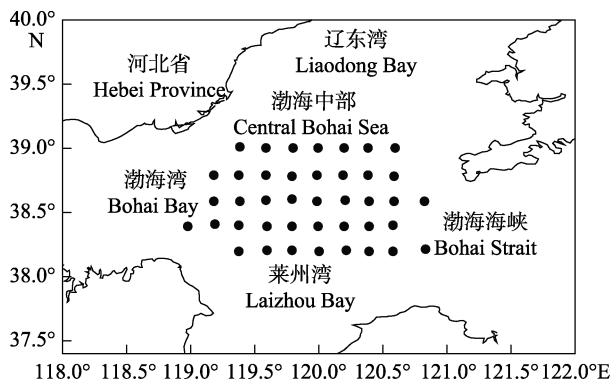


图1 调查区域及站位分布

Fig.1 Surveyed area and sampling stations

1.2 采集方法

样品的采集采用国际标准号20的筛绢缝制的浅水Ⅲ型浮游生物网(网口直径37 cm,网口面积0.1 m²,网身长270 cm,网目76 μm),在每个站位,自底至表垂直拖网取样,将样品固定在2%的甲醛溶液中。在实验室内对浮游植物样品进行浓缩。然后于实验室显微镜下进行种类鉴定和数量统计。水温、盐度、溶解氧(DO)、pH、化学需氧量(COD)等指标多参数水质监测仪进行现场测定。具体操作方法均按中华人民共和国国家标准《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007)和《海洋监测规范》(GB/T17378-2007)中规定的方法执行。

1.3 浮游动物分布与环境因子关系

采用多元统计软件PRIMER V7.0 (Plymouth Routines In Multivariate Ecological Research)软件中的BIOENV程序分析浮游植物细胞丰度与环境因子间的关系(Souissi *et al.*, 2001),用Spearman相关性系数(ρ_s)表示(薛雄志等, 2004)。本研究的环境因子主要有温度、盐度、溶解氧、pH、化学需氧量、磷酸盐、无机氮、氮磷比(N/P)和石油烃。

1.4 数据处理

浮游植物多样性(H')和均匀度(J)的分析方法参

照Shannon等(1963)、Pielou(1969)和孙军等(2004)的方法。

物种多样性指数的计算采用香农-威纳指数(H' , Shannon-Wiener index),其计算公式为:

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

物种均匀度指数(J)采用Pielou的计算公式为:

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

浮游植物优势度(Y)计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

式中, N 为采集样品中所有物种的总个体数; S 为样品中的物种总数; 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; f_i 为该种在各样品中出现的频率,其中以优势度>0.02确定为优势种(徐兆礼等, 1989)。

2 结果与分析

2.1 物种组成

本次调查共鉴定出浮游植物3门42属87种(不包括未定名物种),其中,硅藻门33属72种,甲藻门9属15种,金藻门仅1属1种。硅藻在物种和数量上都占有优势,甲藻在个别站位的数量中占优势。浮游植物的生态类型以温带近岸性物种为主,少数为广温广盐性沿岸种和暖温带浮游性种等,与历史调查资料相符。

5月调查海域共检出浮游植物19属49种(表1),其中硅藻门15属42种,甲藻门4属7种。本次调查的优势种为菱软几内亚藻(*Guinardia delicatula*)(温带近岸种)和刚毛根管藻(*Rhizosolenia setigera*)(广温广盐性沿岸种),优势度见表2。7月调查海域共检出浮游植物36属70种(表1),其中,硅藻门28属56种,甲藻门8属13种,金藻门1属1种。本次调查的优势种包括(1)温带近岸性种:具槽帕拉藻(*Melosira sulcata*)、菱软几内亚藻、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、密连角毛藻(*Chaetoceros densus*)、布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*);(2)暖温带浮游性种:翼根管藻印度变型(*Rhi. acuminata*);(3)广温广盐性种:斑点海链藻(*Thalassiosira punctigera*)、刚毛根管藻、三角角藻(*Ceratium tripos*)、锥形原多甲藻(*Protoperidinium conicum*)、夜光藻(*Noctiluca scientillans*),优势度见表2。11月调查海域共检出浮游植物30属63种(表1),其

表 1 调查海域浮游植物种类名录
Tab.1 List of phytoplankton in the surveyed area

种类 Species	5 月 May	7 月 July	11 月 November	12 月 December	种类 Species	5 月 May	7 月 July	11 月 November	12 月 December
具槽帕拉藻 <i>M. sulcata</i>	+	+	+	+	泰晤士旋鞘藻 <i>Helicotheca tamesis</i>		+		
中心圆筛藻 <i>Coscinodiscus centralis</i>	+		+	+	针杆藻 <i>Synedra</i> spp.			+	+
偏心圆筛藻 <i>Cos. excentricus</i>	+	+	+	+	佛氏海线藻 <i>Thalassionema frauenfeldii</i>			+	+
虹彩圆筛藻 <i>Cos. oculus-iridis</i>	+	+	+	+	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>			+	
栉氏圆筛藻 <i>Cos. granii</i>		+	+	+	舟形藻 <i>Navicula</i> spp.	+			
威利圆筛藻 <i>Cos. weilexii</i>	+	+	+	+	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.		+	+	
星脐圆筛藻 <i>Cos. asteromphalus</i>	+	+	+	+	双壁藻 <i>Diploneis</i> sp.				+
琼氏圆筛藻 <i>Cos. coscinodiscus jonesianus</i>	+	+			唐氏藻 <i>Donkinia</i> sp.		+	+	
辐射圆筛藻 <i>Cos. radiatus</i>	+	+	+	+	羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.			+	+
蛇目圆筛藻 <i>Cos. argus</i>	+				长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i>	+	+	+	+
明壁圆筛藻 <i>Cos. debilis</i>	+		+	+	弯端长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i>	+	+		
巨圆筛藻 <i>Cos. gigas</i>		+	+	+	洛氏菱形藻 <i>Nitzschia lorenzina</i>			+	
圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	+	+	+	+	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	+			
爱氏辐射环藻 <i>Actinocyclus octonarius</i>	+		+	+	尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>		+	+	+
海链藻 <i>Thalassiosira</i> sp.		+	+	+	柔弱拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	+	+	+	+
斑点海链藻 <i>T. punctigera</i>	+	+	+	+	派洛棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>		+		
圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i>	+	+			冰河拟星杆藻 <i>Asterionellopsis glacialis</i>	+	+		+
太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i>	+		+	+	六辐辐射藻 <i>Actinopterychus hexagonus</i>		+	+	+
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>		+	+		中华齿状藻 <i>Odontella sinensis</i>		+	+	+
丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	+	+	+	+	高齿状藻 <i>Odontella regia</i>		+	+	+
翼根管藻印度变型 <i>Rhi. acuminata</i>	+	+	+	+	豪猪棘冠藻 <i>Corethrom hystrix</i>	+	+	+	+
刚毛根管藻 <i>Rhi. setigera</i>	+	+	+	+	掌状冠盖藻 <i>Stephanopyxis palmeriana</i>		+		+
粗根管藻 <i>Rhi. robusta</i>		+			中华半管藻 <i>Hemiaulus sinensis</i>		+		
笔尖根管藻 <i>Rhizosolenia styliformis</i>	+	+	+	+	布氏双尾藻 <i>D. brightwellii</i>	+	+	+	+
卡氏根管藻 <i>Rhizosolenia castracanei</i>		+	+		太阳双尾藻 <i>Pleurosigma sol</i>	+	+	+	+
根管藻 <i>Rhizosolenia</i> sp.		+			尖端曲舟藻 <i>Pleurosigma acutum</i>	+	+	+	+
薄壁几内亚藻 <i>Guinardia flaccida</i>	+	+		+	海洋曲舟藻 <i>Pleurosigma pelagicum</i>	+	+	+	+
柔软几内亚藻 <i>G. delicatula</i>	+	+	+	+	窄细曲舟藻 <i>Pleurosigma affine</i>	+	+	+	+
斯氏几内亚藻 <i>Guinardia striata</i>	+	+		+	波状石丝藻 <i>Lithodesmium undulatum</i>		+		
透明辐杆藻 <i>Bacteriastrium hyalinum</i>		+	+		膜状缪氏藻 <i>Meuniera membranacea</i>		+	+	+

续表 1 Continued Tab. 1

种类		5 月	7 月	11 月	12 月	种类		5 月	7 月	11 月	12 月
Species		May	July	November	December	Species		May	July	November	December
密连角毛藻	<i>Ch. densus</i>	+	+	+	+	短楔形藻	<i>Licmophora abbreviata</i>			+	
圆柱角毛藻	<i>Ch. teres</i>	+	+	+	+	三角角藻	<i>C. tripos</i>	+	+	+	+
窄隙角毛藻	<i>Ch. affinis</i> var. <i>affinis</i>		+	+	+	粗刺角藻	<i>Ceratium horridum</i>		+	+	
洛氏角毛藻	<i>Ch. lorenzianus</i>	+	+	+	+	大角角藻	<i>Ceratium macroceros</i>	+	+	+	+
并基角毛藻	<i>Ch. decipiens</i>		+	+	+	梭角角藻	<i>Ceratium fusus</i> var. <i>schuitii</i>	+	+	+	+
并基角毛藻单胞变型	<i>Ch. decipiens</i>	+	+	+	+	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>			+	+
拟旋链角毛藻	<i>Ch. pseudocurvisetus</i>		+			夜光藻	<i>N. scintillans</i>	+	+	+	+
旋链角毛藻	<i>Ch. curvisetus</i>	+	+	+	+	海洋原多甲藻	<i>Protoperidinium micans</i>		+	+	+
柔弱角毛藻	<i>Ch. debilis</i>	+	+	+		扁平原多甲藻	<i>Protoperidinium depressum</i>	+	+	+	+
窄面角毛藻	<i>Ch. paradoxus</i>		+	+		光原多甲藻	<i>Protoperidinium pellucidum</i>	+	+	+	+
扭角毛藻	<i>Ch. hirundinellus</i>	+				五角原多甲藻	<i>Protoperidinium pentagonum</i>	+	+	+	+
丹麦角毛藻	<i>Ch. danicus</i>	+	+	+	+	锥形原多甲藻	<i>Protoperidinium conicum</i>		+	+	
卡氏角毛藻	<i>Ch. castracanei</i>	+	+	+	+	原多甲藻	<i>Protoperidinium</i> sp.	+	+	+	+
奇异角毛藻	<i>Ch. Paradoxus</i>	+	+	+		斯氏扁甲藻	<i>Pyrophacus steinii</i>		+		
短孢角毛藻	<i>Ch. brevis</i>	+	+	+		裸甲藻	<i>Gymnodinium</i> sp.		+	+	
暹罗角毛藻	<i>Ch. Siamense</i>		+			膝沟藻	<i>Gonyaulax</i> sp.				
冕孢角毛藻	<i>Ch. diadema</i>			+	+	具尾鳍藻	<i>Dinophysis caudata</i>				+
角毛藻	<i>Ch</i> sp.	+	+	+	+	链状亚历山大藻	<i>Alexandrium catenella</i>			+	
蜂窝三角藻	<i>Triceratium favus</i>		+	+	+	小等刺硅鞭藻	<i>Dictyocha fibula</i>			+	+
短角弯角藻	<i>E. zodiacus</i>		+	+	+						

表 2 调查海区浮游植物优势种
Tab.2 Dominant phytoplankton species in the surveyed sea

5月 May		7月 July		11月 November		12月 December	
优势种 Dominant species	优势度 Dominant degree	优势种 Dominant species	优势度 Dominant degree	优势种 Dominant species	优势度 Dominant degree	优势种 Dominant species	优势度 Dominant degree
菱软几内亚藻 <i>G. delicatula</i>	0.87	具槽帕拉藻 <i>M. sulcata</i>	0.04	虹彩圆筛藻 <i>Cos. Oculus iridis</i>	0.03	斑点海链藻 <i>T. punctigera</i>	0.69
刚毛根管藻 <i>Rhi. setigera</i>	0.05	斑点海链藻 <i>T. punctigera</i>	0.12	斑点海链藻 <i>T. punctigera</i>	0.66	梭角角藻 <i>C. fusus var.schuttii</i>	0.04
		菱软几内亚藻 <i>G. delicatula</i>	0.23	三角角藻 <i>C. tripos</i>	0.04	大角角藻 <i>C. macroceros</i>	0.04
		洛氏角毛藻 <i>Ch.lorenzianus</i>	0.03	梭角角藻 <i>C. fusus var.schuttii</i>	0.04	夜光藻 <i>N.scientillans</i>	0.09
		密连角毛藻 <i>Ch. densus</i>	0.03				
		翼根管藻印度变型 <i>Rhi. acuminata</i>	0.08				
		刚毛根管藻 <i>Rhi..setigera</i>	0.03				
		布氏双尾藻 <i>D. brightwellii</i>	0.03				
		三角角藻 <i>C. tripos</i>	0.04				
		锥形原多甲藻 <i>P. conicum</i>	0.05				
		夜光藻 <i>N. scientillans</i>	0.03				

中硅藻门 26 属 52 种, 甲藻门 4 属 11 种。本次调查的优势种为(1)广温外洋性种: 虹彩圆筛藻; (2)广温广盐性种: 斑点海链藻、三角角藻、梭角角藻(*C.fusus var.schuttii*), 优势度见表 2。12 月调查海域共检出浮游植物 22 属 50 种(表 1), 其中硅藻门 19 属 41 种, 甲藻门 3 属 9 种。本次调查的优势种为(1)沿岸广布性种: 爱氏辐环藻(*Actinocyclus octonarius*); (2)近岸浮游性种: 扁平原多甲藻(*P. depressum*); (3)广温广盐性种: 三角角藻、梭角角藻, 优势度见表 2。

从表 1、表 2 可以看出, 4 次大面调查过程中浮游植物群落结构有所变化, 但变化不大。优势种多为硅藻, 部分优势种与往年调查结果有所不同。其中, 菱软几内亚藻、布氏双尾藻、三角角藻和梭角角藻在近 20 年的调查中优势度一直很高。斑点海链藻作为一种广温外源性物种, 首次在渤海调查结果中以优势种出现, 其在 7 月、11 月和 12 月中均以优势种大量出现, 在各监测站位中, 占总细胞丰度的均值分别为 11.60%、33.62%、65%。1984—1985 年, 林更铭等(2007)在福建海岸带和台湾海峡调查中, 发现斑点海链藻。

1995 年中国厦门海关在船舶的压舱水中也检测到。研究者认为它是由通过压舱水或者自然扩散引入, 其在适宜条件下可以暴发性的繁殖。另外, 菱软几内亚藻, 作为一种外源性赤潮种, 在 5 月和 7 月均大量出现, 在各站位出现频率高达 87.81%和 65.85%, 占细胞丰度的 0—99.22%和 0—80.21%, 其均值分别为 33.62%和 11.86%。本次调查中的优势种同往年浮游植物优势种资料(康元德等, 1991; 孙军等, 2002; 孙萍等, 2008)相比, 渤海秋季浮游植物的优势种变化趋势主要表现在角毛藻属的衰退和浮游甲藻角藻属、圆筛藻属、根管藻属和斑点海链藻的兴起。其中, 硅藻门的圆筛藻属和角毛藻属中的优势种以及甲藻门角藻属中的优势种均为体积大、生物量高的物种, 对整个浮游植物的碳库影响较大。

2.2 细胞丰度的平面分布

5 月调查海域浮游植物的平面分布不均, 浮游植物的数量范围为(2.09—530.10)×10⁴ cell/m³, 平均值为 200.14×10⁴ cell/m³。浮游植物平面分布的格局是数量

密集区出现在 513 号和 514 号站, 占整个调查区域总细胞丰度的 43.02%和 29.02%; 505 号站数量最低, 占总细胞丰度的 0.02%(图 2)。在各监测站点上, 硅藻占细胞丰度的 41.80%–100.00%, 平均为 86.62%; 甲藻占细胞丰度的 0–58.25%, 平均为 13.38%。5 月的浮游植物细胞丰度均值为本年度调查的最高值, 而 1992 年的调查结果显示(王俊等, 1998), 5 月的渤海中部浮游植物细胞丰度基本为全年最低, 约为几十万个/m³, 分析认为这可能与 5 月的赤潮种菱软几内亚藻暴发有关, 其占每个站点细胞数量的 0–99.22%。其中, 有 11 个站点达到 50%以上, 因而增加了这个月的浮游植物细胞丰度值。

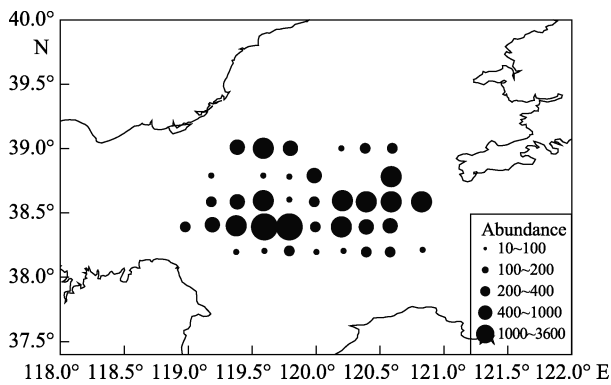


图 2 5 月调查海区表层浮游植物细胞丰度平面分布
Fig.2 Horizontal distribution of phytoplankton cell abundances ($\times 10^4 \text{ cell/m}^3$) in the surface water in May

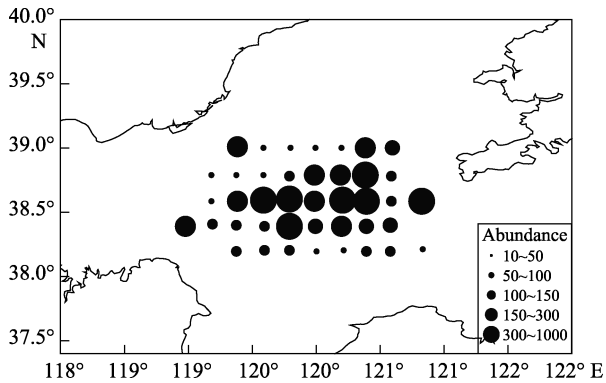


图 3 7 月调查海区表层浮游植物细胞丰度平面分布
Fig.3 Horizontal distribution of phytoplankton cell abundances ($\times 10^4 \text{ cell/m}^3$) in the surface water in July

7 月调查海域浮游植物的数量范围为(1.6–90.46) $\times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 平均值为 $16.32 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$ 。浮游植物平面分布的格局是数量密集区出现在 518 号和 519 号站点, 占整个调查区域总细胞丰度的 9.23%和 13.52%; 504 号站数量最低, 占总细胞丰度的 0.24%。在各监测站点上, 硅藻占细胞丰度的 37.87%–95.32%, 平均为 77.65%; 甲藻占细胞丰度的 4.66%–63.46%, 平均

为 22.28%。7 月的细胞丰度与王俊等(1998)1992 年的调查结果很相近, 渤海浮游植物数量从 7 月开始逐渐增多, 到 8 月达到 $66 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$ 。1998 年 9 月调查结果显示(孙军等, 2004), 渤海中部浮游植物细胞丰度均值为 $168.86 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$ 。可见, 在没有发生赤潮等异常生态变化时, 渤海中部浮游植物的细胞丰度变化相对比较稳定, 这可能与渤海中部水体相对比较稳定, 受沿岸人类活动影响较小有关。

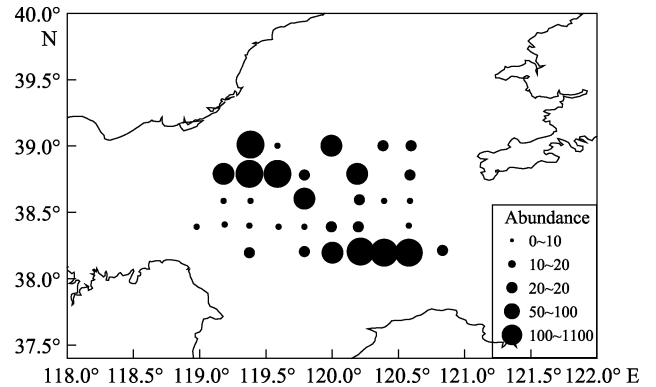


图 4 11 月调查海区表层浮游植物细胞丰度平面分布
Fig.4 Horizontal distribution of phytoplankton cell abundances ($\times 10^4 \text{ cell/m}^3$) in the surface water in November

11 月调查海域浮游植物的数量范围为(0.11–102) $\times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 平均值为 $7.43 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$ 。数量密集区出现在 539 号和 540 号站点, 占整个调查区域总细胞丰度的 33.39%和 11.12%。522 号站数量最低, 占总细胞丰度的 0.04%(图 4)。在各监测站点上, 硅藻占细胞丰度的 23.26%–100.00%, 平均为 64.29%; 甲藻占细胞丰度的 1.24%–81.40%, 平均为 35.71%。该月甲藻在浮游植物中的比率的较其他有所升高。2011 年 11 月渤海的浮游植物细胞丰度调查结果显示均值为 $4.36 \times 10^3 \text{ cell/m}^3$ (郭术津等, 2014), 可见, 2013 年比 2011 年的细胞丰度有了显著增加。

12 月调查海域浮游植物的数量范围为(0.36–55.53) $\times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 平均值为 $12.77 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$ 。数量密集区出现在 535 号、536 号、537 号和 538 号站点, 占整个调查区域总细胞丰度的 10.60%、5.28%、6.11%和 6.89%。503 号站数量最低, 占总细胞丰度的 0.07%。在各监测站点上, 硅藻占细胞丰度的 40.78%–98.38%, 平均为 83.41%; 甲藻占细胞丰度的 2.76%–59.75%, 平均为 16.59%。

浮游植物群落结构中甲藻和硅藻所占的比率是一个重要的结构指数, 甲藻中的赤潮种较多, 高的甲藻比率预示着甲藻可以大量生长而导致赤潮的暴发(孙军等, 2004)。本研究调查结果显示, 5 月甲藻/硅

藻比率为 0-1.39, 平均值为 0.21; 7 月甲藻/硅藻比率为 0.05-1.68, 平均值为 0.34; 11 月甲藻/硅藻比率为 0.01-3.50, 平均值为 0.72; 12 月甲藻/硅藻比率为 0.03-1.47, 平均值为 0.23。11 月甲藻/硅藻比率较高, 虽然没有出现甲藻赤潮, 可能是整个浮游植物群落的细胞丰度还未达到赤潮暴发的浓度, 但这种群落结构预示一旦条件成熟, 此区域就有可能发生赤潮。

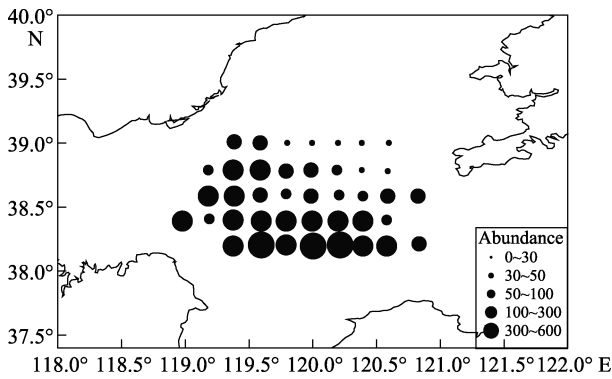


图 5 12 月调查海区表层浮游植物细胞丰度平面分布
Fig.5 Horizontal distribution of phytoplankton cell abundances ($\times 10^4$ cell/ m^3) in the surface water in December

2.3 群落多样性特征

浮游植物的多样性和均匀度能够反映浮游植物群落结构的特征, 为研究海域内浮游植物与生态环境的关系提供依据。多样性指数通常用于反映群落结构的复杂程度。越复杂的群落, 对环境的反馈功能越强, 从而使群落结构得到较大的缓冲, 趋于稳定(徐宗军等, 2011)。均匀度指数(Pielou index) 代表群落内物种分布的均匀程度, 是群落是否成熟和稳定的特征之一。

5 月调查海域浮游植物多样性指数的变化范围为 0.17-2.45, 平均值为 1.49; 均匀度为 0.02-0.90, 平均值为 0.59。7 月调查海区浮游植物多样性指数的变化范围为 0.94-3.01, 平均值为 2.45; 均匀度为 0.31-0.92, 平均值为 0.79。11 月调查海域浮游植物多样性指数的变化范围为 0.27-2.81, 平均值为 1.77; 均匀度为 0.09-0.86, 平均值为 0.63。12 月调查海域浮游植物多样性指数的变化范围为 0.64-2.13, 平均值为 1.34; 均匀度为 0.25-0.77, 平均值为 0.49。从分析结果可以看出, 7 月的浮游植物多样性最高, 其次是 11 月、5 月和 12 月。2000 年秋季渤海浮游植物多样性结果为 0.47-4.04(孙军等, 2005), 2005 年夏末渤海湾浮游植物的多样性结果为 1.59-2.98, 均值为 2.32(孙萍等, 2008), 本次调查的多样性结果较 2000 年偏低, 比 2005 年调查结果稍高, 说明渤海浮游植物群落结构在本年度调查中存在一定的波动, 但整体变化不大。均匀度指数和多样性指数具有非常相似的整体分布特征, 也是呈现 7 月 > 11 月 > 5 月 > 12 月的趋势, 这一趋势与 2005 年的调查结果相吻合。

2.4 浮游植物丰度与环境因子关系

将 5 月、7 月、11 月和 12 月每个站位的 9 个环境因子[温度、盐度、DO、pH、COD、磷酸盐(Dissolved inorganic phosphorus, DIP)、无机氮(Dissolved inorganic nitrogen, DIN)、氮磷比 N/P 和石油烃含量(Petroleum Hydrocarbons, PHCS)]与细胞丰度进行 Spearman 相关性分析。结果显示, 单因子环境参数中, 5 月、7 月、11 月、12 月与细胞丰度相关度最高的均为无机氮, Spearman 相似性系数(ρ_s)见表 3。双因子参数中 4 个月相关度最高的分别是无机氮/石油烃组、无机氮/石油

表 3 浮游植物细胞丰度与环境因子的 Spearman 相关性分析
Tab.3 Spearman analysis of correlation between phytoplankton abundance and environmental factors

月份 Month	因子 Factor	相关性最高因子 Most relevant factor	Spearman 相似性系数 ρ_s
5 月 May	单因子组 Single factor group	无机氮 DIN	0.536
7 月 July		无机氮 DIN	0.606
11 月 November		无机氮 DIN	0.598
12 月 December		无机氮 DIN	0.760
5 月 May	双因子组 Two-factor group	无机氮/石油烃 DIN/PHCS	0.552
7 月 July		无机氮/石油烃 DIN/PHCS	0.819
11 月 November		磷酸盐/无机氮 DIP/DIN	0.639
12 月 December		磷酸盐/无机氮 DIP/DIN	0.800
5 月 May	三因子组 Three-Factor group	磷酸盐/无机氮/石油烃 DIP/DIN/PHCS	0.569
7 月 July		无机氮/氮磷比/石油烃 DIN/N/P/PHCS	0.837
11 月 November		磷酸盐/无机氮/氮磷比 DIP/DIN/N/P	0.642
12 月 December		磷酸盐/无机氮/氮磷比 DIP/DIN/N/P	0.802

烃组、磷酸盐/无机氮组以及磷酸盐/无机氮组,三因子参数中4个月相关度最高的分别是磷酸盐/无机氮/石油烃组、无机氮/(N/P)石油烃组、磷酸盐/无机氮/(N/P)组和磷酸盐/无机氮/(N/P)组。可见,与本次调查的4个月的细胞丰度相关度最高的是无机氮含量,在双环境因子和三环境因子组合中均出现了石油烃、磷酸盐和N/P。张翠霞等(2014)曾在文中指出,营养盐是影响浮游植物优势物种丰度的主要因素,本次相关性分析结果也显示,影响浮游植物群落结构的主要环境因子是无机氮。另外,在双因子组合中出现石油烃含量,说明石油烃含量与细胞丰度的相关性也很高,其对群落结构的形成能够发挥一定的作用。

3 结论

(1) 2013年渤海的浮游植物以硅藻为主,其生态类型多为温带近岸种和广布种,少数为暖海性物种和大洋性物种。从浮游植物的细胞丰度和多样性分析结果可以看出,该年度调查的浮游植物群落结构比较稳定,说明2011年的渤海溢油污染并没有对其造成影响。

(2) 渤海中部5月浮游植物细胞丰度最高,与历史资料相比也有所偏高,这与菱软几内亚藻急剧增多有关,其他月份浮游植物的细胞丰度值整体比较稳定。

(3) 与历史同期相比,浮游植物优势种的组成发生了变化。往年优势种浮动弯角藻本次调查并未出现,三角角藻和菱软几内亚藻再次成为优势种;近些年来浮游甲藻类的优势地位越来越明显,本次调查中,甲藻中的三角角藻、梭角角藻、大角角藻、锥形原多甲藻和夜光藻成为渤海中部的优势种,这些种类均为赤潮种,一旦条件合适随时可能暴发甲藻赤潮。

(4) Spearman相关性分析结果显示,与浮游植物细胞丰度相关度较高的环境因子是无机氮、磷酸盐,石油烃和N/P。

参 考 文 献

- 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
- 卞少伟,孙韧,梅鹏蔚,等. 2013年春夏季天津近岸海域浮游植物的群落结构. 水生态学杂志, 2015, 36(1): 47-52
- 尹翠玲,张秋丰,石海明,等. 2011年渤海湾近岸海域网采浮游植物群落. 海洋湖沼通报, 2013(3): 152-160
- 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
- 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
- 孙军,刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. 海洋学报, 2004, 26(1): 62-75
- 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
- 张翠霞,陈婷,黄晓,等. 2011年夏季北黄海浮游植物群落. 海洋湖沼通报, 2014(1): 81-93
- 林更铭,杨清良. 台湾海峡小型浮游植物的物种多样性和分布特征. 生物多样性, 2007, 15(1): 31-45
- 徐兆礼,陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐渔场的关系. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13-15
- 徐宗军,孙萍,朱明远,等. 南海北部春季网采浮游植物群落结构初步研究. 海洋湖沼通报, 2011(2): 100-106
- 郭术津,李彦翘,张翠霞,等. 渤海浮游植物群落结构及与环境因子的相关性分析. 海洋通报, 2014, 33(1): 95-105
- 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): 31-44
- 薛雄志,杨喜爱. 近岸海域污染的生态效应评价. 海洋科学, 2004, 28(10): 75-81
- Margalef, DR. Perspectives in ecological theory. Chicago: University of Chicago Press, 1968, 1-111
- Pielou, EC. An introduction to mathematical ecology. New York: Wiley-Inter-Science, 1969
- Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication Urbana. IL: University of Illinois Press, 1949, 144
- Wang CC. Dinoflagellata of the gulf of Pê-Hai. Sinensia, 1936, 7(2): 128-171

(编辑 江润林)

Species Composition and Seasonal Variation of Netz-Phytoplankton in the Central Bohai Sea

SUN Xuemei, XU Donghui, XIA Bin, CUI Zhengguo, QU Keming, JIANG Tao,
ZHAO Jun, CHEN Jufa, CHEN Bijuan^①

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture,
Shandong Provincial Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-environment,
Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

Abstract The community structure of phytoplankton could be affected by environmental factors, such as water temperature, salinity, total nitrogen, and total phosphorus. Changes in environmental factors may be associated with alteration in the community structure of phytoplankton. To investigate the consequences of oil spill in the Bohai Sea in 2011, here we analyzed features of phytoplankton community structure using data obtained in the comprehensive investigation at 41 stations within the central Bohai Sea in May, July, November and December 2013. The sampling and measuring methods followed the Specifications for Oceanographic Surveys and Specifications for Marine Monitoring. A total of 87 phytoplankton species were found, including 72 species of diatom in 33 genera and 15 species of pyrrophyta in 9 genera. There was another species of chrysophyta in 1 genus. Diatoms were the dominant phytoplankton species, while some dinoflagellates species also accounted for a large portion in the community. Compared to the historical data in the same season, there was an obvious shift in the community structure. *Eucampia zodiacus*, a previous dominant species, were not found in this survey; however, *Thalassiosira punctigera* appeared for the first time as a dominant species. The dominance of planktonic dinoflagellate became increasingly evident. The average cell abundance was 200.14×10^4 cell/m³, 16.32×10^4 cell/m³, 7.43×10^4 cell/m³ and 12.77×10^4 cell/m³ in May, July, November and December respectively. The cell abundance in May was higher compared to the historical data probably due to the outbreak of *Guinardia delicatula*, and in other month it was relatively stable. The diversity index and evenness index of the community structure followed the order July > November > May > December. The Spearman analysis revealed that changes in the nutrient structure of the central Bohai Sea was responsible for the shift in community structure, and that the spilled petroleum also might have affected the community structure. Because the phytoplankton community structure was generally consistent with results from other investigations, it was most likely unchanged after the oil spill in 2011.

Key words Central Bohai Sea; Phytoplankton; Dominant species; Community structure

^① Corresponding author: CHEN Bijuan, E-mail: chenbj@ysfri.ac.cn