

# 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\*

孙 军 刘东艳 杨世民 郭 健 钱树本

(青岛海洋大学海洋生命学院 青岛 266003)

†(青岛海洋大学东方红 II 调查船 青岛 266003)

\*\* (青岛海洋大学水产学院 青岛 266003)

**提要** 对渤海调查区浮游植物的群落及其动力学进行了初步研究。结果表明,浮游植物群落主要由硅、甲藻组成,也有少数的蓝藻、绿藻和硅鞭藻出现,其生态类型主要为温带近岸型。粒径大小以微型浮游植物为主,依次为小型浮游植物(包括网采浮游植物)、微微型浮游植物。浮游植物群落的平面分布与各环境因子密切相关,其中水体中化学和生物相互作用所形成的浮游植物团块是其平面分布的主要特征。调查海域存在三个典型的浮游植物区划:渤海海峡区、渤海湾区和黄河河口区。追踪实验的结果表明,调查区浮游植物群落短周期(几天)的变化是由关键种所驱动而非优势种。渤海海峡浮游植物群落的周年变化为双周期型,春季水华主峰出现在 4 月,而秋季次高峰出现在 9 月。春季浮游植物以小型细胞硅藻占优群落为主,秋季以大型细胞硅藻-甲藻联合占优群落为主。群落季节和周年的变化以种类演替(species succession)为主而非种类接替(species sequence)。与历史调查资料相比,1998—1999 年的观测表明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。甲藻的占优以及绿藻在特定时期的普遍出现反映了渤海海区营养盐结构比例变化对海区生态系统结构的影响,氮/磷比率的增加和硅/氮比率的降低是造成这一结果的直接原因。

**关键词** 浮游植物,群落结构,动力学,渤海,粒径结构,赤潮

中图分类号 Q948.885.3

渤海浮游植物的研究较早可以追述到 20 世纪 30 年代(Wang, 1936),但研究的高峰期是伴随着建国后的多次渤海阶段性综合调查展开的(朱树屏等, 1957, 1959; 康元德, 1991; 俞建奎等, 1993; 王俊等, 1998)。早期的工作以分类和研究种的生态分布习性为主(Wang, 1936; 金德祥等, 1965),结果发现渤海的浮游植物以硅藻为主,最主要的为圆筛藻属(*Coscinodiscus*)和角毛藻属(*Chaetoceros*)。其后的工作主要以各种属的数量分布和种群动力学的研究为主(康元德, 1991; 王俊等, 1998),为渔业资源的利用提供依据。由于近 20 多年来的赤潮频发(黄长江等, 2000a, b),对于渤海的浮游植物研究转移到了对赤

\* 国家自然科学基金资助项目,49576298 号;青岛海洋大学海洋生态环境教育部重点实验室开放基金资助;国家基础研究与重点项目,G1999043703 和 2001CB409702 号。孙军,男,出生于 1972 年 8 月,博士生,讲师,E-mail:sunjun@ouqd.edu.cn

潮的研究(Zou *et al.*, 1985),发现渤海的赤潮与渤海富营养化有密切关系。

本研究基于中德合作项目“渤海生态系统的分析与模拟”所获浮游植物资料,对浮游植物在渤海生态系统中的分布和功能及其生态过程进行了研究。研究内容包括:浮游植物的自然组成及其丰度,不同粒级的浮游植物的分布,不同时间周期浮游植物群落的发展及与环境的相互关系,浮游植物群落长周期的演变与赤潮等环境问题的关系。

## 1 材料与方法

采样站位见图1。于1998年9—10月和1999年4—5月在渤海进行两航次水文、气象、化学和生物的综合嵌套式外业调查,考察船为东方红II号。每航次于30个大面站进行两遍调查,期间进行5个连续站和1个追踪站的调查。于每站位进行浮游植物网采样品采集和采水样品分不同水层(至少三层,双样)采集,个别代表海域进行浮游植物定性网采样品采集。1998年7月至1999年9月每月在渤海海峡即蓬莱和砣矶岛(1998年9月移至长岛)两地进行浮游植物网采样品和采水样品的采集。



图1 渤海浮游植物采样站位图

Fig. 1 Stations for phytoplankton sampling in the Bohai Sea

●大面站(grid station); ★连续站(anchor station); □追踪站(drift station); <sup>3</sup> 监测站(monitored station)

网采样品采集按1次由底至表垂直拖网(个别站位补充拖网),采样工具为海洋调查规范(国家技术监督局,1992)所定小型浮游生物网(网口面积为0.1m<sup>2</sup>,筛绢孔径为76μm),网采样品用最终浓度为2%的中性福尔马林固定保存。采水样品由12架rosette系统上的5L Niskin瓶逐层采集,个别站位用HQM-2有机玻璃球盖式采水器采集,采水样品用最终浓度为1%的中性福尔马林固定保存。网采定性样品由Hydro-Bios的20μm手网(HYDRO-BIOS,1997)采集,网采定性样品用最终浓度为2%的中性福

尔马林固定保存。

网采样品分析和计数按海洋调查规范(国家技术监督局,1992),将样品浓缩,取0.25ml亚样品置于本实验室的计数框,在光学显微镜下进行个体计数。采水样品取25ml亚样品置于Hydro-Bios计数框(HYDRO-BIOS,1997),应用Uterm<sup>h</sup>hl方法进行个体计数。

叶绿素粒级分离样品由12架rosette系统上的5L Niskin瓶或HQM-2有机玻璃球盖式采水器逐层采集,应用本实验室的粒级分离装置按>76μm、20—76μm、2—20μm和0.2—2μm逐级分离。>76μm和20—76μm粒级先过滤于76μm和20μm筛绢上再分别转移于0.22μm的混合纤维滤膜上,2—20μm粒级截留于2μm混合纤维滤膜上,0.2—2μm粒级截留于0.22μm混合纤维滤膜上。叶绿素的采样方法参考Parsons等(1984)方法,叶绿素分析和计算方法参见Jeffrey等(1975)三色法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 种类组成

自从王家楫于20世纪30年代对渤海浮游植物的研究开始(Wang, 1936), 经过历次的调查和研究共发现渤海有近432个浮游植物种类, 其中主要是近海硅藻类(约占400种)。

根据本次调查的初步结果共发现浮游植物7门类42属121种。硅藻和甲藻占种类的绝大多数, 其中79种属硅藻门, 36种属甲藻门。硅藻占调查海域种类数量的61.5%—92.1%和细胞丰度的64.6%—99.2%, 甲藻占调查海域种类数量的2.9%—38.4%和细胞丰度的0.8%—48.4%。蓝藻门(微囊藻 *Microcystis* sp.)、绿藻门(四尾栅藻 *Scenedesmus quadricauda*, 单角盘星藻 *Pediastrum simplex*, 卷曲纤维藻 *Ankistrodesmus convolutus*)、针胞藻纲(Raphidophyceae)(赤潮异弯藻 *Heterosigma akashiwo*)、隐藻门(波罗的海隐藻 *Cryptomonas baltica*)和金藻门(小等刺硅鞭藻 *Dictyocha fibula*)的某些种类在个别站位也有出现。

调查区的优势种多为硅藻, 它们是: 偏心圆筛藻(*Coscinodiscus eccentricus*)、浮动弯角藻(*Eucampia zodiacus*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*)、掌状冠盖藻(*Stephanopyxis palmeriana*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)和佛氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)。也有一些甲藻在个别站位可以形成优势, 它们是: 梭状角藻(*Ceratium fusus*)、叉状角藻(*Ceratium furca*)、扁压原多甲藻(*Protoperidinium depressum*)和夜光藻(*Noctiluca scintillans*)。

调查区浮游植物的生态类型多为温带近岸性种类。区系主要由本地种(autochthonous species)和兼性浮游种类(meroplanktonic species)组成。假性浮游种类(tychopelagic species)只在个别水浅区域由风力搅动的再悬浮水体中出现, 如1998年航次一次大风天气后, 第二遍大面站调查中黄河口区有大量的伪菱形藻出现。外源性种类(allochthonous species)只在特定时期出现, 主要是受黄海和黑潮的影响从渤海海峡的北部输入渤海, 但对渤海的浮游植物群落贡献不大。

### 2.2 浮游植物的平面分布

调查区浮游植物的平面分布见图2, 春季和秋季两航次的结果有很大差异。秋季浮游植物细胞丰度的高值区位于黄河口和渤海湾东部两区域, 而春季浮游植物细胞丰度的高值区则分布于渤海海峡靠近渤海中部。春秋两季浮游植物群落在渤海海峡、渤海湾东部和黄河口海域差异较大, 因此将调查区浮游植物群落分为三个区划: 渤海湾区划、黄河口区划和渤海海峡区划。渤海湾区划的浮游植物多为渤海本地种的演替群落, 由于渤海的沿岸流夏秋季在此处是自上而下的, 所以此处的浮游植物群落多受辽东湾的影响。调查期间由于受1998年9月辽东湾特大赤潮的影响, 此区的浮游植物群落为赤潮种类梭状角藻、叉状角藻以及小等刺硅鞭藻、底刺膝沟藻(*Gonyaulax spinifera*)和联营亚历山大藻(*Alexandrium catenella*)所控制。黄河口区划的浮游植物群落由于黄河口冲淡水对其的影响有两个主要特征: 首先是淡水种和半咸水种的存在, 此区浮游植物多有绿藻、蓝藻及一些半咸水硅藻如具槽帕拉藻(*Paralia sulcata = Melosira sulcata*)和颗粒直链藻(*Melosira granulata*)出现。其次, 就是假浮游性种类的占优, 如圆筛藻(*Coscinodiscus* spp.)、伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia* spp.)、海线藻(*Thalassionema* spp.)和齿状藻(*Odontella* spp.)。渤海海

峡区划的浮游植物群落主要为外源性种类和本地种类的混生群落。由黄海暖流余脉所携带的外源性暖水种齿状角毛藻 (*Chaetoceros denticulatus*) 和刚毛根管藻 (*Rhizosolenia setigera*) 等与渤海本地种类浮动弯角藻、冰河拟星杆藻 (*Asterionellopsis glacialis*) 和拟旋链角毛藻 (*Chaetoceros pseudocurvisetus*) 等在中等尺度的扰动下大量生长形成本区划群落。1999年4—5月间,由于黑潮流系和黄海暖流余脉对渤海此时的影响较小,所以在此区划由本地种冰河拟星杆藻和旋链角毛藻占优的网采浮游植物群落在10天之内由  $391.1 \times 10^4$  个/ $m^3$  增加至  $3641.9 \times 10^4$  个/ $m^3$ 。但由于这两个种类个体较小所以在叶绿素的资料中看不出明显变化,这从一方面说明了研究生态系统时只注重集团测量生物量 (bulk measurement biomass) 而忽视对生态系统结构的研究是不够的。

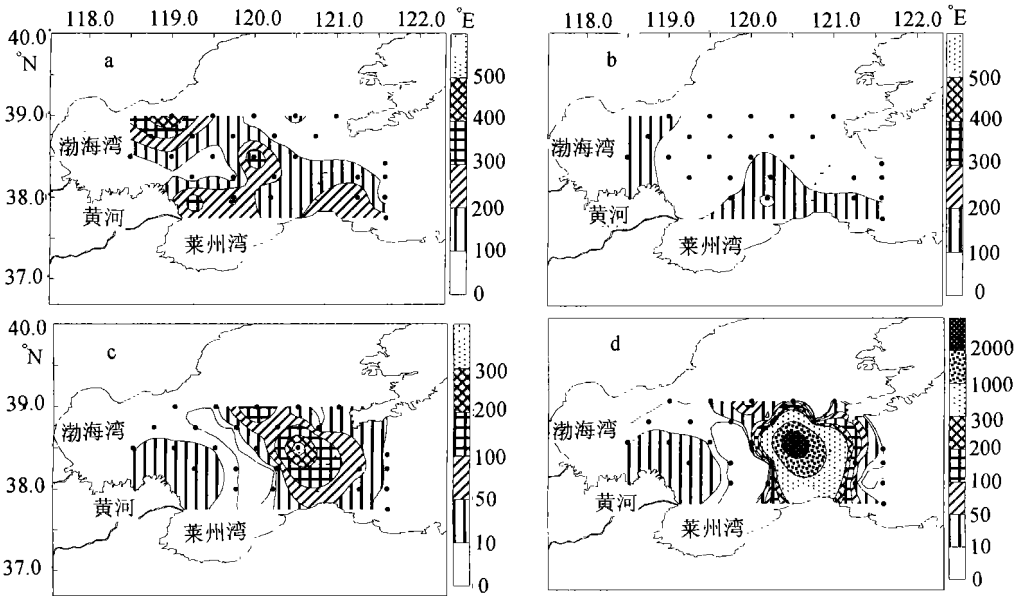


图2 渤海浮游植物细胞丰度平面分布

Fig. 2 The horizontal distribution of phytoplankton abundance in Bohai Sea

- a. 1998年9月第一次大面站浮游植物细胞丰度; b. 1998年10月第二次大面站浮游植物细胞丰度;  
c. 1999年4月第一次大面站浮游植物细胞丰度; d. 1999年5月第二次大面站浮游植物细胞丰度;

(单位:  $\times 10^4$  ind/ $m^3$ )

浮游植物群落结构中硅藻和甲藻所占的比重是一个重要的结构指数。一般来说,高的甲藻比重预示着甲藻可以大量生长而导致赤潮的爆发。如表1所示,1998年秋季甲藻在调查区各站位都出现,而1999年春季甲藻只出现在靠近渤海海峡的部分站位。说明了渤海甲藻是在夏秋季大量繁殖,此时也是大部分赤潮甲藻种类一年中的萌发生长时期,预防和治理赤潮可考虑在此时期加强。春季渤海海峡的甲藻大部分是外源性真性浮游种类,而夏秋季渤海的甲藻多为本地兼性浮游种。

表 1 1998—1999 年调查期渤海浮游植物硅藻和甲藻的丰度( $\times 10^4$  ind/ $m^3$ )

Tab. 1 The cell abundance of diatom and dinoflagellate in the phytoplankton community during the survey

1998—1999 ( $\times 10^4$  ind/ $m^3$ )

站 位	1998.09.24—1998.09.27		1998.10.02—1998.10.06		1999.04.28—1999.05.01		1999.05.07—1999.05.11	
	硅藻丰度	甲藻丰度	硅藻丰度	甲藻丰度	硅藻丰度	甲藻丰度	硅藻丰度	甲藻丰度
A1	192.52	62.58	92.97	46.32	4.38	3.22	4.38	3.22
A2	17.65	2.35	82.46	6.50	3.39	4.21	3.39	4.21
A3	100.30	0.34	9.98	0.76	2.07	2.73	2.07	2.73
A4	3.31	0.84	1.63	0.12	0.42	0.62	0.42	0.62
B1	247.46	0.95	—	—	4.32	0.00	4.32	0.00
B2	—	—	8.70	144.20	1.09	0.00	1.09	0.00
C1	328.94	25.00	56.77	0.75	36.08	0.00	36.08	0.00
C2	277.82	45.51	103.35	2.74	1.70	0.00	1.76	0.00
C3	72.74	32.36	74.40	1.21	1.80	0.00	1.80	0.00
C4	277.18	14.85	122.78	2.73	12.10	3.46	12.10	3.46
D1	23.52	3.68	63.53	59.85	35.64	0.81	35.24	0.81
D2	38.11	1.37	28.13	1.15	37.66	0.00	37.66	0.00
D3	33.46	17.31	45.45	4.39	2.76	0.00	2.76	0.00
D4	221.04	10.43	215.96	10.13	1.75	0.00	1.75	0.00
D5	128.04	31.48	32.59	1.09	66.51	3.20	66.51	3.20
E1	67.50	7.25	81.35	110.34	7.54	0.00	7.54	0.00
E2	91.84	84.58	31.30	11.67	14.42	0.10	14.42	0.10
E3	31.93	30.04	—	—	8.31	0.00	8.31	0.00
E4	393.28	29.64	87.35	1.39	13.64	0.00	11.94	0.00
E5	92.80	12.18	32.03	3.30	390.07	1.08	3640.86	1.08
F1	66.22	234.23	117.50	14.17	5.13	0.00	5.13	0.00
F2	67.01	126.75	20.16	13.74	0.18	0.00	0.18	0.00
F3	83.32	20.09	79.19	2.90	1.72	0.08	1.72	0.08
F4	35.23	4.50	62.77	4.98	39.06	0.00	39.06	0.00
F5	22.13	6.83	9.55	3.05	8.76	0.35	8.76	0.35
G1	346.02	189.44	141.58	8.74	2.02	0.00	2.02	0.00
G2	—	—	6.14	6.31	1.75	0.00	0.00	0.00
G3	58.95	5.16	63.18	19.18	226.79	0.44	165.64	0.44
G4	112.76	21.43	12.83	4.96	10.24	0.00	10.24	0.00
G5	45.52	6.21	7.42	1.95	29.82	0.80	28.88	0.80

注:—表示缺乏数据

### 2.3 浮游植物群落的粒级结构

调查区浮游植物叶绿素粒级分离的分布见图 3。秋季航次中小型浮游植物( $> 20\mu m$ )为浮游植物群落的主要组分,一般超过 50%,最大的 D1 站达到 78.3%。但微型浮游植物对此期渤海浮游植物的贡献也是显著的。而春季航次浮游植物群落中微型浮游植物所占比例从 57.2% 到 83.1%,可见此时微型浮游植物是最主要的组分。微微型浮游植物也是不容忽略的组分,它的平均比例在秋季和春季分别能占到 21.3% 和 28.4%。调查区浮游植物的粒级特征表明,小细胞的硅藻在营养盐丰富的春季水体中大量繁殖,而大细胞的浮游植物却更容易在营养盐贫瘠的夏季出现。这说明小细胞的浮游植物对于营养盐的吸收速率和生长速率在春季比大细胞的快,而在夏秋季则正好相反。这一结论与 Riegman 等

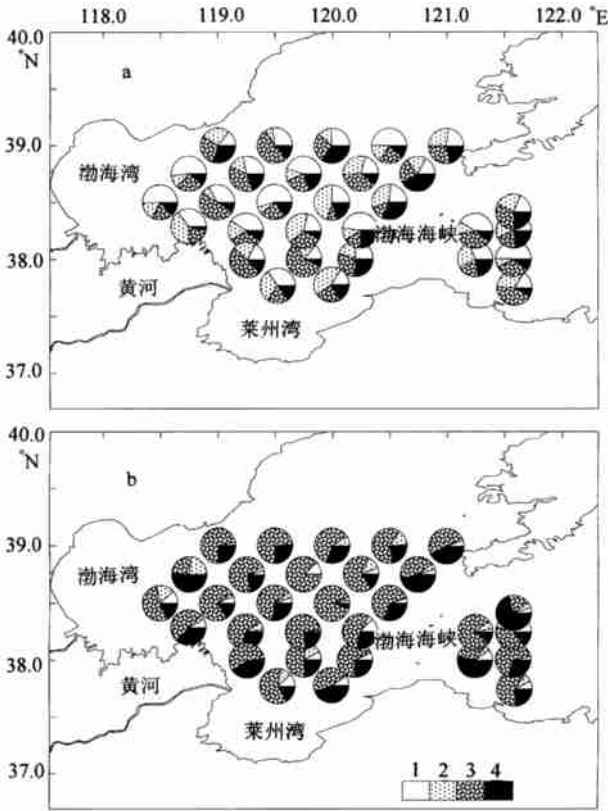


图 3 渤海浮游植物粒级分布

Fig. 3 Phytoplankton size fraction distribution in the Bohai Sea

a. 1998年9月第一次大面站0m 水层; b. 1999年4月第一次大面站5m 水层。1表示>76µm 粒级组分; 2表示20-76µm 粒级组分; 3表示2-20µm 粒级组分; 4表示0.2-2µm 粒级组分

(1998) 在北海的结论相同, 从一个侧面反映了浮游植物的地理和区系分布主要由温度和光照所控制, 同时决定于其对营养盐的需求类型和自身的生长类型。

### 2.4 渤海浮游植物群落的短周期变化过程

为了解调查区浮游植物群落的发展过程, 本研究在渤海中部 E3 站采用了追踪实验方法 (Brockmann *et al.*, 1997)。秋季追踪实验中浮游植物群落中的优势种为梭状角藻, 它能占到浮游植物总碳含量的 55.2% [细胞体积转换生物量 (Sun *et al.*, 2000)], 另外, 偏心圆筛藻、佛氏海线藻、菱软几内亚藻 (*Guinardia flaccida*) 和叉状角藻在此浮游植物群落中也是较重要的组分。经过几天的追踪发现, 浮游植物群落的发展是较显著的, 群落生物量由最初的 7.1mgC/m<sup>3</sup> 增长为 18.0mgC/m<sup>3</sup>。浮游植物的多样性指数计算的结果表明 Shannon-Wiener 指数、Margalef's 指数和 Simpson 指数上下略有波动, 而均匀度指数则略有下降。浮游植物自然

群落的生长是缓慢的, 群落在不断地维持着最大多样性, 而种间的竞争则将弱小的种类排除出群落从而驱动群落的发展。菱软几内亚藻、五角原多甲藻 (*Protoperidinium pentagonum*) 和叉状角藻是缓慢增加的, 而洛氏角毛藻和中华齿状藻 (*Odontella sinensis*) 则呈减少趋势, 其他的种类包括优势种都是略有波动的。所以此自然群落的生长是由关键种菱软几内亚藻、五角原多甲藻和叉状角藻, 而非优势种梭状角藻所驱动的。

### 2.5 浮游植物群落的时间和年周期变化

调查期间浮游植物的季节变化由长岛和蓬莱两地的监测站资料获得, 春秋两季变化由两次主要航次资料获得。调查期间发现渤海海峡浮游植物生物量的季节变化是典型的双周期型, 最高峰在 4 月而次高峰在 10 月 (Sun *et al.*, 2001)。渤海的这一过程主要由温度所控制, 这一点可以在调查区浮游植物生长与温度的关系中看到 (表 2)。其他环境因素对浮游植物生长的影响也是不容忽视的, 如光对浮游植物群落在冬春季就有一定的影响。Riegman 等 (1998) 证实浮游植物群落在光限制和营养盐充足的情况下小细胞比大细胞的硅藻对营养盐的吸收率要高, 而冬春季的浮游植物群落以小细胞的硅藻为主, 从一定程度

上反映了浮游植物生长的光限制。另外从表 2 可知, 随着 Si:N 比率的减小, 浮游植物群落中甲藻的比例也相应增加。

渤海浮游植物群落的发展本质上受两种过程所控制, 它们是种类的演替 (species succession) 和接替 (species sequence) (Gran *et al.*, 1935)。由于渤海水浅, 又是一个半封闭的内海, 不易发生种的接替现象, 所以渤海的浮游植物群落发展主要是种类演替过程 (Sun *et al.*, 2001)。

渤海浮游植物群落发展和温度的变化是密切相关的 (表 2)。根据渤海的温度变化 (邱道立, 1991) 和以往 (朱树屏等, 1959; 康元德, 1991; 王俊等, 1998) 及本研究的浮游植物种群动力学资料, 将浮游植物群落不同时期的优势种列出, 发现有以下种类演替过程: 中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*)、冰河拟星杆藻、具槽帕拉藻 (冬季 2.9℃) → 中肋骨条藻、冰河拟星杆藻、具槽帕拉藻、布氏双尾藻 (春季 10.6℃) → 圆筛藻、布氏双尾藻、刚毛根管藻、浮动弯角藻、耳形齿状藻 (*Odontella rhombus*) (夏季 27.6℃) → 圆筛藻、伪菱形藻、洛氏角毛藻、旋链角毛藻、印度鼻状藻 (*Proboscia indica*)、透明幅杆藻 (*Bacteriastrum hyalinum*)、梭状角藻、叉状角藻 (秋季 14.6℃) (Sun *et al.*, 2001)。

表 2 长岛甲藻硅藻比率、硅氮比率、温度和细胞丰度的周年变化

Tab. 2 Annual variations of dinoflagellate/ diatom ratio, silicate/nitrogen ratio, temperature and cell abundance in Changdao Island

时间(年·月)	温度(℃)	硅氮比率	甲藻硅藻比率	细胞丰度( $\times 10^4$ ind/ $m^3$ )
1998. 09	25.6	5.8	0.044	255
1998. 10	20.2	5.1	0.028	245
1998. 11	15.4	3.1	0.021	149
1998. 12	8.6	2.8	0.030	60
1999. 01	4.4	8.3	0.015	4
1999. 03	4.4	4.8	0.016	56
1999. 04	5.2	11.9	0.012	491
1999. 05	9.2	32.0	0.006	156
1999. 06	15.1	7.2	0.014	137
1999. 07	20.1	22.5	0.013	69
1999. 08	24.5	8.1	0.028	16
1999. 09	25.8	10.3	0.026	65

## 2.6 浮游植物群落的长周期变化

由于过去 40 多年渤海浮游植物群落的研究缺乏应有的空间上的密度和时间上的频度, 所以很难区分浮游植物群落的细微变化。在历史资料和本研究资料的基础上, 本文对渤海浮游植物群落结构从 1958—1999 年的变化进行初步分析, 发现: 浮游植物群落中平均硅藻对总浮游植物细胞丰度的比率在 1982—1983 年、1992—1993 年和 1998—1999 年分别是 0.912、0.915 和 0.868。由于渤海浮游植物群落基本上是由硅藻和甲藻所构成的, 这表明浮游植物群落在近 10 年内由以硅藻为绝对优势转变为硅藻和甲藻的联合占优, 甲藻在显著地增加。Yu 等 (1999) 在研究了渤海近 20 年的营养盐结构变化后发现, 从 1982—1998 年, 氮磷的比率由 1.6 增加到 16.12, 而硅氮的比率则由 13.2 降到 1.32。众所周知, 对于磷的竞争导致群落中大细胞的硅藻被绿藻所代替而对于硅的竞争则导致群落中大细胞的硅藻为大细胞甲藻所替换 (Sommer *et al.*, 1986)。渤海氮磷的比率增加造成调查区部

分海域绿藻的普遍出现。黄河的断流期由 1982 年的 10 天增至 1995 年的 119 天, 其对渤海陆源输入的硅含量锐减, 造成渤海近 20 年硅氮比率的降低。调查期间甲藻在渤海浮游植物群落中的比重增加与硅氮比率减少密切相关。

渤海浮游植物群落中主要优势种在春秋两季从 1958—1999 年是有变化的, 总的趋势是由小细胞硅藻和角毛藻占优到大细胞硅藻联合甲藻占优(表 3)。1958 年到 1963 年春季水华中一直以中肋骨条藻和冰河拟星杆藻占优, 但到 1999 年春季大细胞的硅藻如圆筛藻和布氏双尾藻也是主要和普遍的种类, 而中肋骨条藻则很少出现。秋季的变化就更为明显, 甲藻类梭状甲藻和大细胞硅藻浮动弯角藻出现在优势种类中, 小细胞硅藻菱形海线藻和尖刺伪菱形藻从群落中逐渐淘汰出去。甲藻的占优反映了人为的营养盐输入, 对渤海营养盐结构的改变, 从而导致群落功能群结构的变化。但硅藻中大细胞种类的出现与经典的浮游植物营养盐动力学相悖, 渤海氮营养盐的增加(Yu *et al.*, 1999) 应使分裂快速的小细胞硅藻增加, 但观测的结果却正好相反, 这可能与全球温度升高有关, 须进一步研究。另外一个有趣的现象是渤海近几十年浮游植物群落中角毛藻的衰退, 是否预示受着富营养化的影响有待于进一步研究。

表 3 1958—1999 年渤海浮游植物群落春秋两季水华期的优势种

Tab. 3 The dominant species in autumn and spring bloom of phytoplankton community in Bohai Sea from 1958—1999

	1958—1959 年 (朱树屏等, 1959)	1982—1983 年 (康元德, 1991)	1992—1993 年 (王俊等, 1998)	1998—1999 年 (本文)
秋季	菱形海线藻( <i>Thalassionema nitzschioides</i> )、圆筛藻( <i>Coscinodiscus</i> spp.)	圆筛藻、角毛藻	圆筛藻、角毛藻、浮动弯角藻( <i>Eucampia zaliacis</i> )	圆筛藻、尖刺伪菱形藻( <i>Pseudonitzschia pungens</i> )、角毛藻、梭状角藻( <i>Ceratium fusus</i> )
春季	中肋骨条藻( <i>Skeletonema costatum</i> )、角毛藻( <i>Chaetoceros</i> spp.)	中肋骨条藻、冰河拟星杆藻( <i>Asterionellopsis glacialis</i> )、具槽帕拉藻( <i>Paralia sulcata</i> )	中肋骨条藻、诺氏海链藻( <i>Thalassiosira nordenskioldii</i> )、具槽帕拉藻、冰河拟星杆藻	圆筛藻、布氏双尾藻( <i>Ditylum brightwellii</i> )、刚毛根管藻( <i>Rhizosolenia setigera</i> )

## 2.7 渤海赤潮及其影响

从 1998 年 9 月 18 日—10 月 7 日渤海辽东湾发生了特大规模赤潮, 蔓延 500km。由于它的影响, 调查区西北部甲藻密度增加, 其浮游植物群落的主要种类为梭状角藻、叉状角藻和联营亚历山大藻(*Alexandrium cantenella*)。两次大面站调查的结果, 显示平流输运对浮游植物群落平面分布的影响。调查区浮游甲藻和梭状角藻丰度高值区从第一次大面调查的西北部移至第二次大面调查的西南部。

渤海的赤潮通常被认为是人为营养盐的过多输入所造成的富营养化的结果(Zou *et al.*, 1993)。赤潮的爆发需要有生物学原因, 即赤潮原因生物。了解渤海赤潮种类的自然分布对治理渤海赤潮是有重要意义的。根据渤海的历史资料, 发现渤海的浮游植物赤潮种类多属硅藻, 甲藻中有毒种类占少数(表 4)。



表 4 渤海中的赤潮浮游植物种类

Tab. 4 The red tide species in Bohai Sea

蓝藻(Cyanobacteria)	硅藻纲(Bacillariophyceae)	甲藻纲(Dinophyceae)
<i>Trichodesmium erythraeum</i>	<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	<i>Alexandrium catenella</i>
	<i>Coscinodiscus wailesii</i>	<i>Ceratium furca</i>
金藻纲(Chrysophyceae)	<i>Eucampia zodiacus</i>	<i>Ceratium fusus</i>
<i>Dictyocha fibula</i>	<i>Guinardia delicatula</i>	<i>Ceratium tripos</i>
	<i>Guinardia striata</i>	<i>Dinophysis acuminata</i>
硅藻纲(Bacillariophyceae)	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Dinophysis fortiii</i>
<i>Asterionella glacialis</i>	<i>Leptocylindrus minimus</i>	<i>Gonyaulax digitale</i>
<i>Ceratium pelagicum</i>	<i>Rhizosolenia styliformis</i>	<i>Gonyaulax spinifera</i>
<i>Chaetoceros affinis</i>	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Noctiluca scintillans</i>
<i>Chaetoceros atlanticus</i>	<i>Thalassionema nitzschoides</i>	<i>Prorocentrum compressum</i>
<i>Chaetoceros curvipes</i>	<i>Thalassiosira decipiens</i>	<i>Prorocentrum micans</i>
<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	<i>Protoperidinium conicum</i>
<i>Chaetoceros diadema</i>	<i>Odontella aurita</i>	<i>Protoperidinium pellucidum</i>
<i>Chaetoceros didymus</i>	<i>Rhizosolenia setigera</i>	<i>Protoperidinium pentagonum</i>

### 3 结论

3.1 渤海调查区浮游植物群落主要由硅藻和甲藻组成,但个别站位和特定时期也有少量蓝藻、绿藻、金藻和隐藻等出现。

3.2 渤海调查区浮游植物的生态类型主要为温带近岸型。渤海浮游植物群落主要由本地种所组成,从黄海暖流余脉和黑潮的外来种只在特定时间和地点上对渤海浮游植物群落有所贡献。

3.3 渤海调查区浮游植物群落从粒级分离结果来看,微型浮游植物在渤海生态系统中占有很重要的地位,其次为小型浮游植物,微微型浮游植物也是不容忽视的类群。

3.4 渤海调查区浮游植物群落的平面分布与各环境因子密切相关,水体中化学和生物的相互作用所形成的浮游植物团块是其平面分布的主要特征,但平流输运和扰动对浮游植物群落的团块分布在局部海域也起一定的作用。调查海域存在三个典型的浮游植物区划:渤海海峡区、渤海湾区和黄河河口区。

3.5 调查区浮游植物群落短周期的发展过程是由关键种所驱动。

3.6 渤海海峡浮游植物群落的周年变化为典型的双周期型,春季水华主峰出现在4月而秋季次高峰出现在9月。春季浮游植物以小细胞硅藻占优群落为主,秋季以大细胞硅藻-甲藻联合占优群落为主。

3.7 渤海浮游植物群落季节和周年的变化主要是种类演替过程。

3.8 与历史资料相比1999年的观测表明,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演变趋势。甲藻的占优以及绿藻在特定时期的普遍显示反映了渤海海区营养盐结构比例变化对海区生态系统结构的影响,氮/磷比率的增加和硅/氮比率的降低是造成这一结果的直接原因。

3.9 甲藻的突出一定程度上反映了渤海的富营养化程度在加剧。渤海近年来的赤潮频

发与人类活动所造成的营养盐结构比例变化密切相关。

渤海调查区浮游植物群落不同空间和时间尺度上的变化与其周围的环境因子变化密切相关,会根本改变渤海生态系统的结构以致影响人们对渤海生态系统的可持续利用,甚至对全球的气候变化也会有一定的影响。人为的富营养化而导致的赤潮只是渤海生态系统中各种变化的一个方面。如何进一步系统和深入地研究渤海生态系统是今后艰巨的任务。单纯的“集团测量生物量”、化学分类(chemotaxonomy)和模型是不能发现和解释何时、何地、为什么和哪一个种类在改变着渤海浮游植物的种类演替,不利于深入和系统地研究渤海生态系统。由于浮游植物种类计数方法其过程需要专业知识又比较复杂,所以在采用此方法进行生态系统研究时有一定的难度,但它是现今惟一的一种能鉴定到种的阶元的方法[尽管最近有用流式细胞仪或细胞浮筒(CytoBuoy)进行分类学(Davey *et al*, 1999; Dubelaar *et al*, 1999)和应用轮廓图(silhouette)对较大细胞进行分类的],因此浮游植物种群动力学的研究也是生态系统研究中不可缺少的环节之一。

### 参 考 文 献

- 王 俊, 康元德, 1998. 渤海浮游植物种群动态的研究. 海洋水产研究, 19(1): 51—59
- 朱树屏, 郭玉洁, 1957. 烟台、威海鲈鱼渔场及其附近海区角毛硅藻属的研究. 海洋与湖沼, 1(1): 27—94
- 朱树屏, 郭玉洁, 1959. 我国十年的海洋浮游植物研究. 海洋与湖沼, 2(4): 223—232
- 邱道立, 1991. 渤海水团分析. 海洋水产研究, 12: 1—9
- 国家技术监督局, 1992. 海洋生物调查. 海洋调查规范. 北京: 中国标准出版社, 17—22
- 金德祥, 陈金环, 黄凯歌, 1965. 中国海洋浮游硅藻类. 上海: 上海科学出版社, 1—230
- 俞建奎, 李瑞香, 1993. 渤海、黄海浮游植物生态的研究. 黄渤海海洋, 11(3): 52—29
- 黄长江, 董巧香, 2000a. 1998年春季珠江口海域大规模赤潮原因生物的形态分类和生物学特征 I. 海洋与湖沼, 31: 197—204
- 黄长江, 董巧香, 2000b. 1998年春季珠江口海域大规模赤潮原因生物的形态分类和生物学特征 II. 海洋与湖沼, 31: 233—238
- 康元德, 1991. 渤海浮游植物的数量分布和季节变化. 海洋水产研究, 12: 31—44
- Brockmann U H, Raabe T, Nagel K *et al*, 1997. Measurement strategy of PRISMA: design and realisation. Mar Ecol Prog Ser, 156: 245—254
- Davey H M, Jones A, Shaw A D *et al*, 1999. Variable selection and multivariate methods for the identification of microorganisms by flow cytometry. Cytometry, 35: 162—168
- Dubelaar G B J, Geritzen P L, Beeker A E R *et al*, 1999. Design and first results of cytoBuoy: a wireless flow cytometer for *in situ* analysis of marine and fresh waters. Cytometry, 37: 247—254
- Gran H H, Braarud T, 1935. A quantitative study of the phytoplankton in the Bay of Fundy and the Gulf of Maine (including observations on hydrography, chemistry and turbidity). J Biol Bd Can, 1: 279—467
- HYDRO-BIOS, 1997. Apparatebau GmbH. D-24154 Kiel-Holtentau, Germany, 1—27
- Jeffrey S W, Humphrey G F, 1975. New spectrophotometric equations for plants, algae and natural phytoplankton. Biochem. Physiol. Pflanzen (BPP), 167: 191—194
- Parsons T R, Mañá Y, Lalli C M, 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Oxford: Pergamon, 1—173
- Riegman R, Noordeloos A A M, 1998. Size-fractionated uptake of nitrogenous nutrients and carbon by phytoplankton in the North Sea during summer 1994. Mar Ecol Prog Ser, 173: 95—106
- Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W *et al*, 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. Archiv

f Hydrobiologie, 106: 433—471

- Sun J, Liu D Y, Qian S B, 2000. Estimating biomass of phytoplankton in the Jiaozhou Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 19: 19—31
- Sun J, Liu D Y, Qian S B, 2001. Preliminary study on the seasonal succession and development pathway of phytoplankton community in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 20(2): 251—260
- Utermohl H, 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitteil. Int. Verein. Theor. Angew. Limnol.*, 9: 1—38
- Wang C C, 1936. Dinoflagellata of the Gulf of P - Hai. *Sinensia*, Nanking, 7(2): 128—171
- Yu Z G, Zhang J, Yao Q Z *et al.*, 1999. Nutrients in the Bohai Sea. In: Hong G H, Zhang J, Chung C S ed. *Biogeochemical Processes in the Bohai and Yellow Sea*. Seoul: The Dongjin Publication Association, 11—20
- Zou J, Dong L, Qin B, 1985. Preliminary studies on eutrophication and red tide problems in Bohai Bay. *Hydrobiologia*, 127: 27—30

## THE PRELIMINARY STUDY ON PHYTOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE IN THE CENTRAL BOHAI SEA AND THE BOHAI STRAIT AND ITS ADJACENT AREA

SUN Jun, LIU Dong-Yan, YANG Shi-Min, GUO Jian<sup>1</sup>, QIAN Shi-Ben

*(Marine Life Science College, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)*

<sup>1</sup>*(Dong Fang Hong II Research Vessel, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)*

<sup>2</sup>*(Marine Fishery College, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)*

**Abstract** Phytoplankton species composition and species succession were analyzed in 1998—1999 during 2 nestle investigation cruises in the Central Bohai Sea, the Bohai Strait and adjacent waters, and two monthly monitoring stations at Penglai and Changdao for 15 months. The results show that diatoms and dinoflagellates are the major components of phytoplankton community in the survey region, with cyanobacteria, green algae and siliconflagellates being also common found in some stations. The ecotype of these phytoplankters is temperate and neritic species; some warm oceanic species can be imposed from the Yellow Sea and distributed near the Bohai Strait. The size fractional features of phytoplankton community in the survey area show that nanophytoplankton was a major component and the picophytoplankton was also important (i. e., it accounted for 21.3% and 28.4% biomass separately in autumn 1998 and spring 1999). The horizontal distribution of phytoplankton in the survey area has a close relationship with physical-chemical conditions in ambient waters. Three phytoplankton provinces can be discerned at the Huanghe Estuary, north of Bohai Bay and the Bohai Strait. Short-term (days) development of phytoplankton community in the central Bohai Sea depends on the species changes of the dominant species but the key species. Annual variations of the phytoplankton community in the Bohai Strait show a typical double-peak cycle in the north hemisphere. The higher cell abundance peak is in April and the lower peak in September. In spring, the phytoplankton community is mainly made of small cell diatoms, and in autumn the phytoplankton community is characterized by big cell diatoms coexisting with dinoflagellates. The species succession was the major process of seasonal changes of phytoplankton community development pathway in the Bohai Sea. Long-term observations from 1958—1999 in the Bohai Sea show that the replacement of diatom by dinoflagellates is the main feature of phytoplankton community changes in recent years, which is indicated by N/P ratio increment and Si/N ratio decrement. Red tides are inescapable in the Bohai Sea due to the anthropogenic nutrient input and drying up of the Huanghe River.

**Key words** Phytoplankton, Community structure, Dynamics, Bohai Sea, Size fraction, Red tides