

1999 年春季渤海中部及其邻近海域的网采浮游植物群落

孙 军¹, 刘东艳², 徐 俊², 陈凯彪²

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国海洋大学海洋生命学院, 青岛 266003)

摘要:研究了 1999 年春季覆盖渤海中部、渤海海峡及其邻近海域 30 个测站两遍大面调查的浮游植物物种及其群落特征, 共发现浮游植物 4 门 33 属 65 种(不包括未定名物种), 以硅藻为主。优势种主要为: 冰河拟星杆藻(*Asterionellopsis glacialis*)、虹彩圆筛藻(*Coscinodiscus oculus-iridis*)、太阳双尾藻(*Ditylum sol*)、刚毛根管藻(*Rhizosolenia setigera*)、布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、膜状缪氏藻(*Meuniera membranacea*)、派格棍形藻(*Bacillaria paxillifera*)、加拉星平藻(*Asteroplanus karianus*)、圆海链藻(*Thalassiosira rotula*)、卡氏角毛藻(*Chaetoceros castracanei*)和尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)。细胞丰度的平面分布主要由浮游硅藻的分布所决定, 其高值区分布在渤海中部靠近渤海海峡处。浮游甲藻在渤海海峡局部区域形成高值区。两遍大面站调查期间渤海浮游植物群落的结构变化较大, 原因主要是春季以小细胞为主体的浮游植物群落物种演替较快, 另外春季的大风过程对浮游植物的群落结构影响较大。两遍大面站调查期间浮游植物细胞丰度呈增长趋势, 温度和硅酸盐浓度的增加是导致调查期浮游植物生长的重要因素。E5 站浮游植物群落的分析表明: 春季浮游植物群落在低营养盐浓度情况下, 即使硅酸盐浓度较低, 磷酸盐和硝酸盐的增加可以促进小细胞硅藻的生长。F4 站浮游植物群落的分析表明: 在较高营养盐浓度情况下, 硅酸盐浓度的增加可以促进大细胞硅藻的生长。

关键词:浮游植物; 渤海; 群落结构; 春季

The netz-phytoplankton community of the Central Bohai Sea and its adjacent waters in spring 1999

SUN Jun¹, LIU Dong-Yan², XU Jun², CHEN Kai-Biao² (1. Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Science, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Marine Life Science College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2003~2016.

Abstract: Features of the phytoplankton community were studied using the netz-phytoplankton data from the Sino-Germany Cooperative Project "Analysis and Modelling of the Bohai Sea Ecosystem". Two station-grid-surveys were carried between 28th April and 11th May 1999 at 30 grid stations in the Bohai Sea to understand the ecosystem structure and functions. Phytoplankton was sampled using the standing net type III (mesh size 76 μ m, the standard sampling tool in Chinese marine phytoplankton studies) with a vertical haul at each grid stations. The phytoplankton samples were preserved in neutral formalin (2% final concentration of formaldehyde) and analysed in the laboratory using a microscope.

A total 4 phyla, including 33 genera and 65 species of phytoplankton (not including unidentified taxa) were commonly

基金项目:中德合作资助项目(BMBF; O3F0189A; O3F0189B); 国家自然科学基金资助项目(40306025; 40206020); 国家自然科学基金重点资助项目(90211021)

收稿日期:2003-06-17; **修订日期:**2004-05-15

作者简介:孙军(1972~), 男, 回族, 甘肃华亭人, 博士, 副研究员, 主要从事海洋浮游植物分类学和浮游生物生态学研究。E-mail: sunjun@ms.qdio. ac. cn

致谢:感谢此次中德合作的相关课题组提供的环境参数, 以及相关调查人员和东方红 II 的全体船员的辛勤外业工作

Foundation item: the Federal Ministry of Education and Science (BMBF), Germany (No. O3F0189A; O3F0189B); National Science Foundation of China(No. 40306025 and 40206020) and the Key Project of National Science Foundation of China(No. 90211021)

Received date:2003-06-17; **Accepted date:**2004-05-15

Biography: SUN Jun, PhD., Associate professor, mainly engaged in marine phytoplankton taxonomy and ecology. e-mail: sunjun@ms.qdio. ac. cn

found in the survey area. The main phytoplankton group was diatoms, but there were also some dinoflagellates, Chrysophyta and Cyanophyta, especially in the Bohai Strait. The dominant species were *Asterionellopsis glacialis*, *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Ditylum sol*, *Rhizosolenia setigera*, *Ditylum brightwellii*, *Skeletonema costatum*, *Meuniera membranacea*, *Bacillaria paxillifera*, *Asteroplanus karianus*, *Thalassiosira rotula*, *Chaetoceros castracanei* and *Pseudo-nitzschia pungens*, etc. Most are neritic species in temperate coastal seas, with a few species belonging to oceanic warm water or oceanic species. Most of dominant phytoplankton species are autochthonous species, which occur mainly locally. *Asteroplanus karianus* and *Chaetoceros castracanei* are allochthonous species, coming via Huanghai Sea Warm Current and the Kuroshiro Current through the North Bohai Strait. Some of these dominant species mentioned above are big-celled with high-carbon-contents, and are key species in spring.

in the Bohai Sea. A study of species population dynamics was necessary to understand the processes of Bohai Sea ecosystem. The dominant species of phytoplankton in the two station-grid-surveys were quite different. There were two possible explanations these phenomena: one is that the dominant phytoplankton species, such as, *Asterionellopsis glacialis*, *Skeletonema costatum* and *Pseudo-nitzschia pungens*, etc., were small-celled, grew faster and the phytoplankton community developed faster. The other reason was that windy events were frequent in Spring, thus the phytoplankton community changed rapidly because of mixing of tychopelagic species in the upper water layer.

Phytoplankton cell abundance in the first station-grid-survey ranged from 0.18×10^4 ind./m³ to 391.15×10^4 ind./m³, the average value was 33.08×10^4 ind./m³; it was high in the East Central Bohai Sea close to the Bohai Strait. Phytoplankton cell abundance in the second station-grid-survey ranged from 0.17×10^4 ind./m³ to 1068.79×10^4 ind./m³, the average value was 73.57×10^4 ind./m³; the horizontal distribution pattern was similar to the first station-grid-survey. Diatom cell abundance in the first station-grid-survey ranged from 0.18×10^4 ind./m³ to 390.07×10^4 ind./m³, the average value was 32.37×10^4 ind./m³; it was also high in the East Central Bohai Sea close to the Bohai Strait. Diatom cell abundance in the second station-grid-survey ranged from 0.17×10^4 ind./m³ to 1067.96×10^4 ind./m³, the average value was 73×10^4 ind./m³; a similar horizontal pattern to the phytoplankton distribution was determined. Dinoflagellate cell abundance in the first station-grid-survey ranged from 0 to 4.21×10^4 ind./m³, the average value was 0.7×10^4 ind./m³; it was high along the A section located in the Bohai Strait. Dinoflagellate cell abundance in the second station-grid-survey ranged from 0 to 5.54×10^4 ind./m³, the average value was 0.58×10^4 ind./m³; it was also high in the Bohai Strait. The horizontal distribution of phytoplankton was quite similar between the two station-grid-surveys, but the species composition and cell abundance changes were rather large. The horizontal distribution of phytoplankton was determined by the diatom distribution pattern. The phytoplankton cell abundance increased between the two station-grid-surveys, they all formed high concentration areas around E5 and F4. After comparison of changes in environmental factors, it was found that diatoms contributed to the most of phytoplankton increment, and the increment of temperature and silicate concentration was the main reason for the phytoplankton growth during the investigation period. Furthermore, a decline in turbidity led to improved water stability, favouring the growth of phytoplankton. The analysis of phytoplankton community changes with environmental factors at station E5 showed that under low nutrient concentrations in ambient water, although the silicate was low, increments of phosphate and nitrate will promote the growth of small-celled diatoms. Similarly, comparative analysis at station F4 showed that under high nutrient concentrations in ambient water, increments of silicate will promote the growth of big-celled diatoms.

Comparison with the same season data in 1982 and 1992, showed major differences. This was because of the fast development of phytoplankton community in spring in the Bohai Sea. Thus, the phytoplankton community data for analysing the Bohai Sea ecosystem in spring is unsatisfactory, more frequent and sophisticated investigations are needed to better understand the system.

Key words: phytoplankton; Bohai Sea; community structure; spring

文章编号:1000-0933(2004)09-2003-14 **中图分类号:**Q178.1, Q178.53 **文献标识码:**A

海洋浮游植物是海洋中最重要的初级生产者,它们通过光合作用吸收 CO₂ 释放 O₂,并将太阳能转变为生态系统中可为其它生物类群利用的有机能,维持着地球生态系统的平衡。海洋浮游植物群落及其所支持的生产力在碳通量上^[1]、云反照率 (cloud albedo)^[2]和海水光通量、热通量^[8]上影响着全球气候。所以研究海洋浮游植物群落及其变化^[4~6]与全球变化的关系是当

今海洋生态学的热点。

渤海浮游植物群落结构的研究可以追述到 20 世纪 30 年代^[7],以后研究是伴随着建国后的多次渤海阶段性综合调查展开的^[8~14]。早期的工作以分类和研究种群的生态分布习性为主^[7~10],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*)。其后的工作以渤海浮游植物种群动力学研究为主^[11~14],发现渤海浮游植物的季节分布以春季和秋季两次数量高峰为特征。由于近 20 多年来的赤潮频发,对于渤海的浮游植物研究转移到了对赤潮的研究^[15],发现渤海的赤潮与渤海富营养化有密切关系。最近的生态动力学研究中,初步发现渤海的浮游植物群落较 40 多年前发生了较大的改变^[13, 14],是渤海生态系统对人为活动影响和全球气候变化的响应。尽管相对来说渤海是中国近海浮游植物群落研究资料较为丰富和系统的海区,但以上的研究对深入了解渤海生态系统及其对全球变化的响应还远远不够。本研究基于 1999 年春季中德渤海生态系统动力学项目中所获网采浮游植物资料,对浮游植物群落进行了分析,为更好地了解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

于 1999 年 4 月 28 日到 5 月 11 日在渤海进行水文、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,共 30 个采样站位如图 1。采样进程为两遍大面站调查(1999 年 4 月 28 日到 5 月 1 日为第 1 遍大面站调查时期,其中 E5 站是 4 月 29 日 18:50 采样,F4 站是 4 月 29 日 13:12 采样;1999 年 5 月 7 日到 5 月 11 日为第 2 遍大面站调查时期,其中 E5 站是 5 月 9 日 0:43 采样,F4 站是 5 月 9 日 5:29 采样)中间嵌套 5 个连续站和 1 个追踪站调查^[16]。本文讨论的数据来自两遍大面站调查的结果。

按照海洋调查规范^[17],采样工具为小型浮游生物网(网口直径 37cm,网口面积 0.1m²,网身长 270cm,网目 76μm),采样方式为在每个调查站位自底至表垂直拖网 1 次。样品用 2% 甲醛固定和保存。实验室内浮游植物样品经浓缩,取 0.25ml 亚样品在本实验室的 Palmer-Maloney 型计数框中,于 Olympus BH-2 研究显微镜下进行浮游植物物种鉴定和细胞计数。

物种多样性指数的计算采用香农-威纳指数(H' , Shannon-Wiener index)^[18],其计算公式为:

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

Simpson 多样性指数(D)^[19],其计算公式为:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$$

物种丰富度 Margalef 指数(d_{Ma})^[20],其计算公式为:

$$d_{Ma} = \frac{(S - 1)}{\ln N}$$

物种均匀度指数(J)^[21],其计算公式为:

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

浮游植物优势度(Y)计算公式为:

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

式中, N 为采集样品中所有物种的总个体数, 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; f_i 为该种在各样品中出现的频率。

2 结果与讨论

2.1 物种组成

自从王家楫^[7]对渤海浮游植物的研究开始^[7],经过历次的调查和研究共发现渤海有近 432 个浮游植物物种,其中主要是近海硅藻类(约占 400 种)。

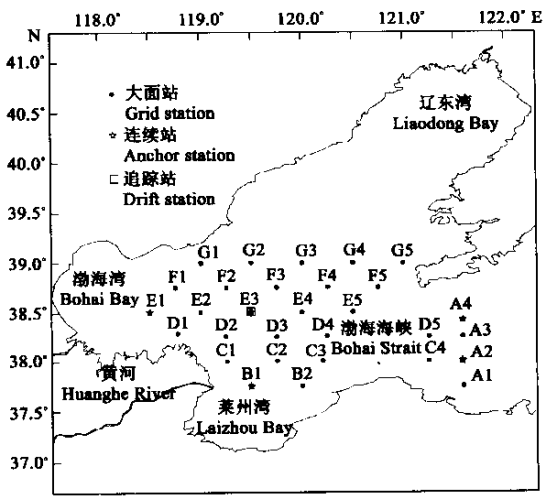


图 1 浮游植物调查站位

Fig. 1 Phytoplankton sampling stations in the Bohai Sea

本次调查的共发现浮游植物 4 门 33 属 65 种(不包括未定名物种),其中硅藻 27 属 56 种(不包括未定名物种),甲藻 4 属 7 种,金藻 1 属 1 种,蓝藻 1 属 1 种。硅藻在物种和数量上都占有优势。在第 1 遍大面站调查中,硅藻占物种数量的 40%~100%,平均为 88%,占细胞丰度的 40%~100%,平均为 91.5%;甲藻占物种数量的 0~60%,平均为 11.7%,占细胞丰度的 0~60%,平均为 8.5%。在第 2 遍大面站调查中,硅藻占物种数量的 62.5%~100%,平均为 90.7%,占细胞丰度的 65.2%~100%,平均为 94.4%;甲藻占物种数量的 0~37.5%,平均为 9.3%,占细胞丰度的 0~34.8%,平均为 5.6%。金藻小等刺硅鞭藻(*Dictyocha fibula*)在个别站位也有出现。而蓝藻铁氏束毛藻(*Trichodesmium thiebautii*)只在渤海海峡出现,该种可能是随黄海暖流余脉进入渤海的外源性物种(allochthonous species)。调查区浮游植物的生态类型几乎都为温带近岸性物种,个别为暖海性物种或大洋性物种,如标志布莱克里亚藻(*Bleakeleya notata*)、秘鲁角毛藻(*Chaetoceros peruvianus*)、豪猪棘冠藻(*Corethron hystrix*)、斯氏几内亚藻(*Guinardia striata*)、印度根管藻(*Rhizosolenia indica*)和粗根管藻(*Rhizosolenia robusta*)(表 1)。

表 1 调查区浮游植物的物种组成*

Table 1 Phytoplankton species composition in survey area

物种 Species		物种 Species	
硅藻门	Bacillariophyta	舟形藻	<i>Navicula</i> spp.
六幅辐洞藻	<i>Actinoptychus senarius</i> (Ehrenberg) Ehrenberge	长菱形藻	<i>Nitzschia longissima</i> (Brébisson) Ralfs
翼茧形藻	<i>Amphiprora alata</i> Kützing	菱形藻	<i>Nitzschia</i> spp.
冰河拟星杆藻	<i>Asterionellopsis glacialis</i> (Castracane) Round	长耳齿状藻	<i>Odontella aurita</i> (Lyngbye) Agardh
加拉星平藻	<i>Asteroplanus karianus</i> (Grunow) Gardner et Crawford	活动齿状藻	<i>Odontella mobiliensis</i> (Bailey) Grunow
派格棍形藻	<i>Bacillaria paxillifera</i> (Müller) Hendey	高齿状藻	<i>Odontella regia</i> (Schultze) Simonsen
标志布莱克里亚藻	<i>Bleakeleya notata</i> (Grunow) Round	中华齿状藻	<i>Odontella sinensis</i> (Greville) Grunow
窄隙角毛藻	<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder	窄细曲舟藻	<i>Pleurosigma affine</i> Grunow
卡氏角毛藻	<i>Chaetoceros castracanei</i> Karsten	具槽帕拉藻	<i>Paralia sulcata</i> (Ehrenberg) Cleve
扁平角毛藻	<i>Chaetoceros compressus</i> Lauder	翼鼻状藻	<i>Proboscia alata</i> (Brightwell) Sundström
旋链角毛藻	<i>Chaetoceros curvisetus</i> Cleve	细弱伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (Cleve) Heiden
丹麦角毛藻	<i>Chaetoceros danicus</i> Cleve	尖刺伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (Grunow ex Cleve) Hasle
柔弱角毛藻	<i>Chaetoceros debilis</i> Cleve	距端假管藻	<i>Pseudosolenia calcar-avis</i> (Schultze) Sundström
密联角毛藻	<i>Chaetoceros densus</i> Cleve	细长翼根管藻	<i>Rhizosolenia alata</i> f. <i>gracillima</i> (Cleve) Grounow
细齿角毛藻	<i>Chaetoceros denticulatus</i> Lauder	复瓦根管藻	<i>Rhizosolenia imbricata</i> Brightwell
双突角毛藻	<i>Chaetoceros didymus</i> Ehrenberg	印度根管藻	<i>Rhizosolenia indica</i> (Péragallo) Ostenfeld
爱氏角毛藻	<i>Chaetoceros eibonii</i> Grunow	粗根管藻	<i>Rhizosolenia robusta</i> Norman
劳氏角毛藻	<i>Chaetoceros lauderi</i> Ralfs	刚毛根管藻	<i>Rhizosolenia setigera</i> Brightwell
洛氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i> Grunow	笔尖形根管藻	<i>Rhizosolenia styliiformis</i> Brightwell
秘鲁角毛藻	<i>Chaetoceros peruvianus</i> Brightwell	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve
拟旋链角毛藻	<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> Mangin	佛氏海线藻	<i>Thalassionema frauenfeldii</i> (Grunow) Hallegraeff
角毛藻	<i>Chaetoceros</i> spp.	菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i> Grunow
豪猪棘冠藻	<i>Corethron hystrix</i> Hensen	诺氏海链藻	<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i> Cleve
星脐原筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> Ehrenberg	圆海链藻	<i>Thalassiosira rotula</i> Meunier
弓束圆筛藻	<i>Coscinodiscus curvatus</i> Grunow	甲藻门	Dinophyta
偏心圆筛藻	<i>Coscinodiscus excentricus</i> Ehrenberg	梭状角藻	<i>Ceratium fusus</i> (Ehrenberg) Dujardin
巨圆筛藻	<i>Coscinodiscus gigas</i> Ehrenberg	大角角藻	<i>Ceratium macroceros</i> (Ehrenberg) Vanhöffen
虹彩圆筛藻	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i> Ehrenberg	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i> (Müller) Nitzsch
圆筛藻	<i>Coscinodiscus</i> spp.	渐尖鳍藻	<i>Dinophysis acuminata</i> Claparède & Lachmann
布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwellii</i> (West) Grunow	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i> (Macartney) Kofoid & Swezy
太阳双尾藻	<i>Ditylum sol</i> Grunow	锥形原多甲藻	<i>Protoperidinium conicum</i> (Gran) Balech
浮动弯角藻	<i>Eucampia zodiacus</i> Ehrenberg	扁平原多甲藻	<i>Protoperidinium depressum</i> (Bailey) Balech
柔弱几内亚藻	<i>Guinardia delicatula</i> (Cleve) Hasle	金藻门	Chrysophyta
斯氏几内亚藻	<i>Guinardia striata</i> (Stolterfoth) Hasle	小等刺硅鞭藻	<i>Dictyocha fibula</i> Ehrenberg
泰晤士旋鞘藻	<i>Helicotheca tamesis</i> (Shrubsole) Ricard	蓝藻门	Cyanophyta
丹麦细柱藻	<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve	铁氏束毛藻	<i>Trichodesmium thiebautii</i> Gomont
膜状缪氏藻	<i>Meuniera membranacea</i> (Cleve) Silva		

* 种名的更改参见孙军等^[22, 23] Phytoplankton species nomenclature changes refer to Sun *et al*^[22, 23]

两遍大面站调查区的优势种列于表 2 和表 3。可以看出两遍大面调查浮游植物群落结构有所变化,但变化不大。优势种全为硅藻,它们是冰河拟星杆藻(*Asterionellopsis glacialis*)、虹彩圆筛藻(*Coscinodiscus oculus-iridis*)、太阳双尾藻(*Ditylum sol*)、刚毛根管藻(*Rhizosolenia setigera*)、布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、膜状缪氏藻

(*Meuniera membranacea*)、派格棍形藻(*Bacillaria paxillifera*)、加拉星平藻(*Asteroplanus karianus*)、圆海链藻(*Thalassiosira rotula*)、卡氏角毛藻(*Chaetoceros castracanei*)和尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)。

表 2 第 1 遍大面站调查区浮游植物优势物种

Table 2 The dominant species in the first station-grid-survey			
物种 Species	占总细胞丰度的比例(%) Percentage in cell abundance	出现频度(%) Frequency in samples	优势度 Dominance
虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	11.27	100.00	0.1127
冰河拟星杆藻 <i>Asterionellopsis glacialis</i>	37.87	26.67	0.1010
太阳双尾藻 <i>Ditylum sol</i>	4.25	60.00	0.0255
刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>	4.26	56.67	0.0241
布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>	2.34	76.67	0.0180
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	4.57	26.67	0.0122
膜状缪氏藻 <i>Meuniera membranacea</i>	2.74	33.33	0.0091
派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>	3.07	16.67	0.0051
加拉星平藻 <i>Asteroplanus karianus</i>	6.33	6.67	0.0042
浮动弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i>	4.06	10.00	0.0041

表 3 第 2 遍大面站调查区浮游植物优势物种

Table 3 The dominant species in the second station-grid-survey			
物种 Species	占总细胞丰度的比例(%) Percentage in cell abundance	出现频度(%) Frequency in samples	优势度 Dominance
冰河拟星杆藻 <i>Asterionellopsis glacialis</i>	60.93	39.29	0.23935
刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>	6.90	67.86	0.04681
虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	3.13	96.43	0.03021
圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i>	4.46	39.29	0.01752
太阳双尾藻 <i>Ditylum sol</i>	1.81	67.86	0.01228
卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i>	1.30	39.29	0.00512
窄细曲舟藻 <i>Pleurosigma affine</i>	0.67	67.86	0.00457
尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	1.13	32.14	0.00364
派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>	2.51	14.29	0.00359
细弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	4.92	7.14	0.00351

以上这些浮游植物优势物种大多数是渤海春季的本地种(autochthonous species),其中的虹彩圆筛藻为假性浮游物种(tychopelagic species),其个体较大、生物量较高^[24],又是渤海春季的优势种,对整个浮游植物的碳库影响较大,所以它可以列为渤海今后应该重点研究的浮游植物关键物种(key species)。其它的物种,如冰河拟星杆藻、尖刺伪菱形藻和派格棍形藻尽管个体较小,但细胞丰度较高,对营养盐生物地球化学循环和食物网结构有较大的影响,对其的研究也不容忽视。

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。一般来说,高的甲藻比率预示着甲藻可以大量生长而导致甲藻赤潮的爆发。调查区浮游植物群落中甲藻:硅藻比率如图 2 所示,第 1 遍大面站调查,其值介于 0~1.5,平均值为 0.176,高值区分布在渤海海峡的 A 断面(图 2a),而第 2 遍大面站调查,其值介于 0~0.53,平均值为 0.076,高值区分布在渤海海峡(图 2b)。两遍大面站调查中甲藻:硅藻比率有所降低,表明甲藻在调查期浮游植物群落的作用有所减轻,低的甲藻:硅藻比率预示此期渤海甲藻赤潮爆发的可能性降低。

同 1982 年^[11]和 1992 年^[12]历史同期浮游植物优势物种资料相比(表 4),渤海春季浮游植物的群落结构变异较大:甲藻在群落中的比例下降,而小细胞个体的硅藻在群落中比例有所增加。变动的原因主要是:(1)春季营养盐浓度较高,小细胞的物种如冰河拟星杆藻、尖刺伪菱形藻和中肋骨条藻在较短的时间内可以有较大的生消过程;(2)春季渤海大风现象比较显著,由大风过程引起的浅水区域底层再悬浮过程会使一些假性浮游物种如圆筛藻属和具槽帕拉藻的细胞丰度快速增高。

2.2 细胞丰度的平面分布

第 1 遍大面站调查区浮游植物细胞丰度介于 0.18×10⁴~391.15×10⁴ 个/m³,平均值为 33.08×10⁴ 个/m³,其平面分布如图 3a 所示,在渤海中部靠近渤海海峡处存在浮游植物细胞丰度的高值区。第 2 遍大面站调查区浮游植物细胞丰度介于 0.17×10⁴~1068.79×10⁴ 个/m³,平均值为 73.57×10⁴ 个/m³,其平面分布如图 3b,在渤海中部靠近渤海海峡处存在浮游植物细胞丰度的高值区。两遍调查中第 2 遍调查中浮游植物细胞丰度比第 1 遍调查中的明显增加,且平面分布模式趋势相同(图 3)。渤海生态动力学模型^[25]和浮游植物群落长周期规律分析^[14]的研究结果也证实了调查期浮游植物生长处于上升趋势这个现

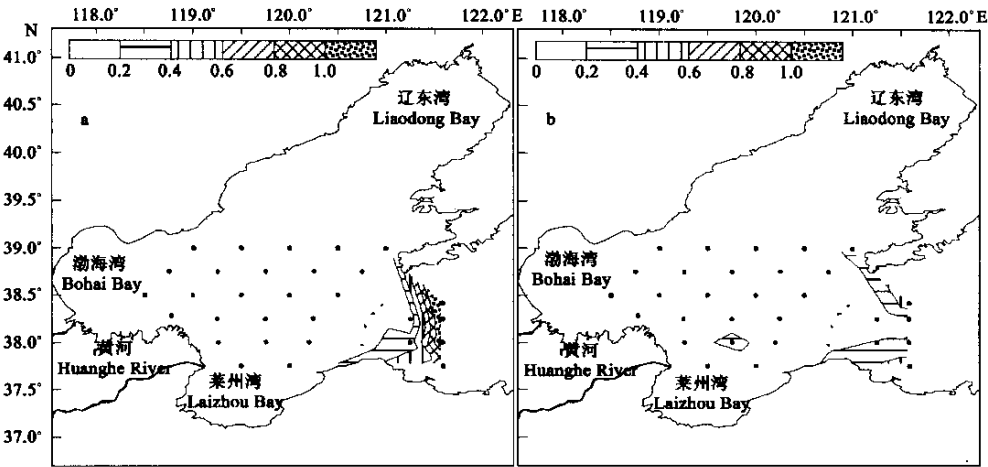


图 2 调查区硅藻：甲藻比率的平面分布

Fig. 2 Horizontal distribution of dinoflagellate: diatom ratio

a. 第 1 次大面站调查 First station-grid-survey; b. 第 2 次大面站调查 Second station-grid-survey; 以下相同 the same below

表 4 历史同期浮游植物优势物种比较

Table 4 Comparison of phytoplankton dominant species among the same season of historical data sets($\times 10^4$ ind./ m^3)

物种 Species	A. 浮游植物细胞丰度 Phytoplankton abundance, unit						占总细胞丰度的比例 % Percentage to the total abundance %							
	1982 年		1982 年		1983 年		1983 年		1993 年		1999 年		1999 年	
	4.16~4.22		5.6~5.19		4.4~4.18		5.9~5.23		5 月		4.28~5.1		5.7~5.11	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
角毛藻属 <i>Chaetoceros</i> spp.	44.1	13.2	5.5	5.4	190.9	4.9	33.6	6.7	3.6	11.6	22.48	6.39	2.73	3.71
圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i> spp.	20.7	6.2	24.2	23.8	6.8	0.2	6.9	1.4	2.1	7.6	3.79	11.28	2.30	3.13
冰河拟星杆藻 <i>Asterionellopsis glacialis</i>	44.2	13.2	0.3	0.3	27.2	0.7	0.2	0.04	0	0	46.97	37.87	114.10	60.93
具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	24.9	7.4	4.5	4.4	20.2	0.5	7.5	1.5	5.6	20.2	4.78	1.93	0	0
尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	5.2	1.6	11.9	11.7	27.3	0.7	351.2	69.7	2.1	7.6	2.10	1.69	2.59	1.13
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	39.1	11.7	0.9	0.9	2326.8	59.3	0	0	0.1	0.4	5.67	4.57	3.16	0.31
浮动弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i>	—*	—	—	—	—	—	—	—	0	0	13.44	4.06	10.65	1.55
角藻属 <i>Ceratium</i> spp.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.94	0.53	0.19	0.27

* “—”缺乏资料 Means no data

表 5 两遍大面站调查中浮游植物群落细胞丰度及相关环境参数的变化

Table 5 Phytoplankton abundance and environmental factors during the two station-grid-survey

项目 Item	第 1 遍大面站调查 First grid survey	第 2 遍大面站调查 Second grid survey	两遍调查的变化量 Changes between two surveys	变动百分比(%) Percentage of changes
浮游植物细胞丰度($\times 10^4$ ind./ m^3) Phytoplankton abundance	33.08	73.57	40.49	122.4
硅藻细胞丰度($\times 10^4$ ind./ m^3) Diatom abundance	32.37	73.00	40.63	125.5
甲藻细胞丰度($\times 10^4$ ind./ m^3) Dinoflagellate abundance	0.70	0.57	-0.13	-18.6
磷酸盐(μ mol/L) Phosphate	0.34	0.32	-0.02	-5.9
硅酸盐(μ mol/L) Silicate	3.85	4.28	0.43	11.2
硝酸盐(μ mol/L) Nitrate	4.18	3.73	-0.45	-10.8
铵盐(μ mol/L) Ammonia	0.75	0.62	-0.13	-17.3
温度(°C) Temperature	7.607	8.825	1.218	16.0
盐度(psu) Salinity	31.895	31.869	-0.026	-0.1
浊度(NTU) Turbidity	13.25	8.18	-5.07	-38.3

象。硅藻细胞丰度呈上升趋势,而甲藻细胞丰度呈下降的趋势(表 5),所以调查期浮游植物群落的生长主要由硅藻贡献的。比较两遍调查环境因子(相关环境参数由此次中德合作的相关课题组提供,以下相同)的变化发现:温度和硅酸盐浓度的增加是导致

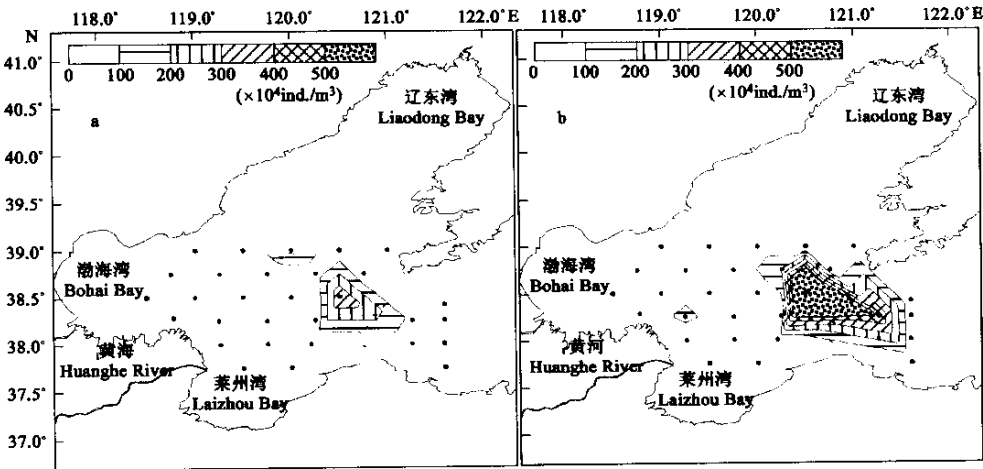


图 3 调查区浮游植物平面分布

Fig. 3 Horizontal distribution of phytoplankton in the survey area

硅藻生长的重要因素,另外,浊度的降低改善了水体的光照条件和水体稳定性,这些都有利于调查区浮游植物的生长^[26]。
进一步对浮游植物细胞丰度和相关环境因子(为配合网采浮游植物细胞丰度资料,进行了水柱积分的平均值处理)进行相

表 6 两遍大面站调查中浮游植物群落细胞丰度及相关环境参数的积矩 Pearson 相关系数 1~2

Table 6 The Pearson correlation coefficient of phytoplankton abundance and environmental factors during the two station-grid-survey

	细胞丰度 Cell abundance		硅藻细胞丰度 Diatom abundance		甲藻细胞丰度 Dinoflagellate abundance	
	Pearson ^{①②}	<i>t</i>	Pearson	<i>t</i>	Pearson	<i>t</i>
细胞丰度 Cell abundance	1					
硅藻细胞丰度 Diatom abundance	1.000 * *	0.000	1			
甲藻细胞丰度 Dinoflagellate abundance	-0.013	0.950	-0.019	0.925	1	
温度 Temperature	-0.096	0.474	-0.096	0.474	0.066	0.750
盐度 Salinity	0.088	0.513	0.085	0.527	0.381	0.055
pH 值 pH value	0.206	0.121	0.204	0.125	0.504	0.009
浊度 Turbidity	-0.070	0.604	-0.069	0.607	-0.191	0.351
溶解氧 Dissolved oxygen	0.458 * *	0.000	0.457 * *	0.000	0.109	0.596
磷酸盐 Phosphate	-0.133	0.319	-0.130	0.330	-0.676 * *	0.000
硅酸盐 Silicate	-0.148	0.267	-0.146	0.276	-0.561 * *	0.003
亚硝酸盐 Nitrite	-0.058	0.668	-0.055	0.681	-0.539 * *	0.004
硝酸盐 Nitrate	-0.102	0.445	-0.099	0.460	-0.605 * *	0.001
铵盐 Ammonia	-0.094	0.482	-0.093	0.486	-0.313	0.120
溶解无机氮 Dissolved inorganic nitrogen	-0.107	0.422	-0.104	0.436	-0.594 * *	0.001
N/P 比率 DIN/DIP ration	-0.042	0.753	-0.04	0.763	-0.459 *	0.018
总溶解氮 Total dissolved nitrogen	-0.203	0.126	-0.201	0.130	-0.390 *	0.049
总溶解磷 Total dissolved phosphorus	-0.118	0.376	-0.115	0.388	-0.635 * *	0.000
溶解有机碳 Dissolved organic carbon	-0.177	0.183	-0.175	0.188	-0.227	0.265
颗粒碳 Particular carbon	-0.038	0.776	-0.038	0.779	-0.159	0.438
颗粒氮 Particular nitrogen	-0.039	0.773	-0.038	0.779	-0.196	0.337
颗粒磷 Particular phosphorus	-0.043	0.747	-0.043	0.749	-0.136	0.507
悬浮物 Suspended particulate matter	-0.046	0.731	-0.046	0.734	-0.174	0.395
叶绿素 <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>	-0.052	0.700	-0.049	0.714	-0.374	0.060
活体荧光值 in vivo fluorescence	-0.006	0.974	-0.003	0.985	-0.217	0.476

①Pearson 为 Pearson 相关系数 Pearson is the Pearson's correlation coefficient;*t* 为双尾 *T* 检验,*n* 为 60 *t* is paired-samples *T* test, number of the cases for analysis is 60; ②* * 表示相关置信度水平小于 0.01 Correlation is significant at the 0.01 level;* 表示相关置信度水平小于 0.05;其它为不相关数据 correlation is significant at the 0.01 level, the others is no obvious correlated

关分析(表 6)发现:调查期浮游植物和硅藻细胞丰度只与溶解氧有较强的相关性,而甲藻与各大量营养盐特别是磷酸盐的相关性都较强。温度和硅酸盐对硅藻的影响,并未从相关分析的数据中体现出来,所以浮游植物海洋学的数据在应用相关分析等统计分析时需要谨慎对待其分析结果。由于海洋学的复杂性和生物学机制的复杂性,应该更倚重于调查为主的定性结果的分析。

两遍调查都在 E5 站出现了浮游植物细胞丰度的高值区。E5 站的环境因子如图 4 所示:E5 站 pH 值和溶解氧值都高于大面站平均值,表示浮游植物的生长良好;磷酸盐、硅酸盐、硝酸盐和铵盐等营养盐浓度都低于平均值,表示浮游植物生长旺盛,对这些营养盐进行了大量的吸收;亚硝酸盐在浮游植物生长过程中比较特殊,一部分可以是来自外源水体中,另外一部分来自浮游植物代谢过程,图 4 中 E5 站亚硝酸盐浓度低于平均值表明渤海浮游植物的亚硝酸盐主要来自细胞周围的水体中;浊度都低于平均值,表明浮游植物生长所需的光环境良好,利于生长。由此推断,E5 站出现浮游植物高值区主要是由于此区的光照条件较好,这说明了春季渤海浮游植物的生长主要受光限制的影响,这和此次叶绿素 a 调查分析的结果是相一致的^[6]。比较两遍大面站调查的结果发现,第 2 遍大面站调查中,所有营养盐的浓度都有所增加,这些是浮游植物细胞丰度第 2 遍比第 1 遍调查中要高的原因之一。另外对 E5 站两遍调查浮游植物群落结构的对比(表 7)表明:群落的细胞丰度的增加主要由小细胞的硅藻冰河拟星杆藻和派格棍形藻所支持,浮游植物群落的生长导致了群落多样性和均匀度的降低;在低营养盐浓度情况下,即使硅酸盐浓度较低,磷酸盐和硝酸盐的增加可以促进小细胞硅藻的生长。

表 7 两遍大面站调查中 E5 站浮游植物群落及其结构指数的变化

项目 Item	第 1 遍大面站调查 First grid survey	第 2 遍大面站调查 Second grid survey	两遍调查的变化量 Changes between two surveys	变动百分比(%) Percentage of changes
冰河拟星杆藻 <i>Asterinellopsis glacialis</i> ($\times 10^4$ ind./ m^3)	289.82	945.16	655	226
浮动弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i> ($\times 10^4$ ind./ m^3)	32.44	21.39	-11	34
角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp. ($\times 10^4$ ind./ m^3)	29.41	26.08	-3	11
刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i> ($\times 10^4$ ind./ m^3)	6.49	13.80	7	113
派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i> ($\times 10^4$ ind./ m^3)	4.87	15.87	11	226
浮游植物细胞丰度 Phytoplankton abundance($\times 10^4$ ind./ m^3)	391.15	1068.79	678	173
物种丰富度 Species richness	30	24	-6	20
香农-威纳多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	1.71	0.96	-0.75	44
辛普森多样性指数 Simpson's diversity index	0.44	0.22	-0.22	51
玛格丽特多样性指数 Margalef's diversity index	1.32	0.99	-0.34	26
均匀度 Evenness	0.35	0.21	-0.14	40

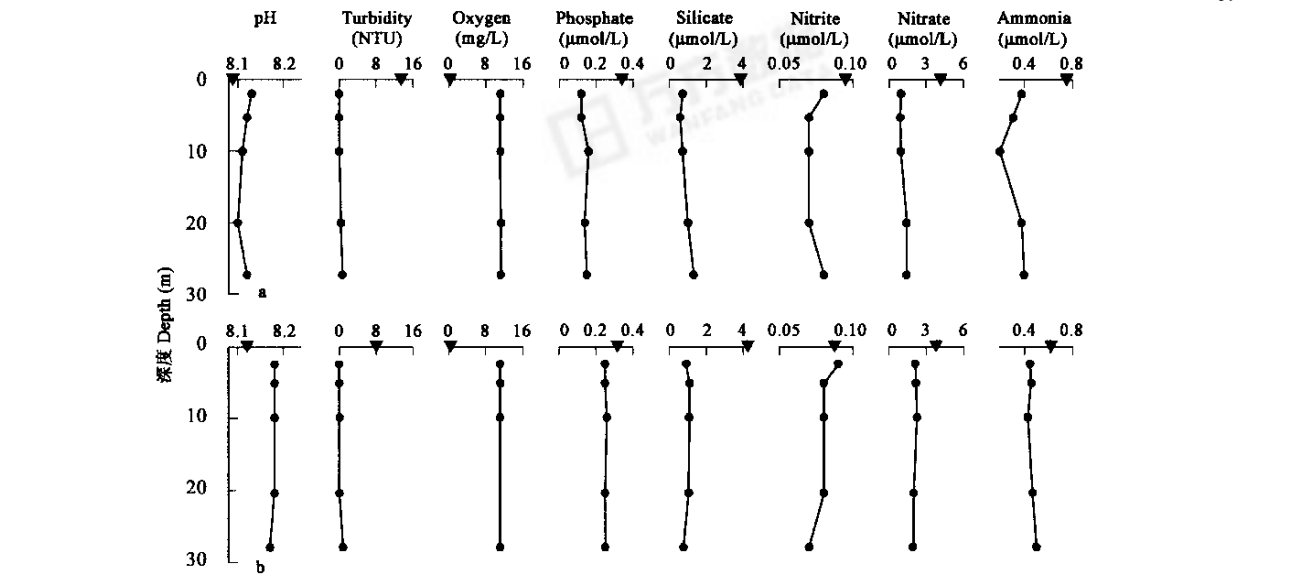


图 4 E5 站环境因子的垂直分布(▼为此次大面站调查的平均值)

同 1982~1983 年历史同期浮游植物细胞丰度(康元德^[11]图 1~6)资料相比较,细胞丰度有所降低(1982 年 5 月为 102×10^4 个/ m^3 ,1983 年 5 月为 504×10^4 个/ m^3),分布趋势不同。同 1993 年历史同期浮游植物细胞丰度(王俊等^[12]图 2)资料相比较,细胞丰度大致相等(1993 年 5 月为 28×10^4 个/ m^3),分布趋势相似。通过这些数据的比较可知渤海浮游植物群落随春季水华期的变动而差异较大,结合近年来的资料^[13, 14],发现渤海浮游植物春季水华期有提前的趋势。由于渤海这方面的资料还远远不够,所以这是否与全球气候变暖或周期性的气候变化(如厄尔尼诺)有关,都有待于进一步研究。

第 1 遍大面站调查区浮游硅藻细胞丰度介于 $0.18\times 10^4\sim 390.07\times 10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 32.37×10^4 个/ m^3 ,其平面分布如图 5a 所示,在渤海中部靠近渤海海峡处存在浮游硅藻细胞丰度的高值区。第 2 遍大面站调查区浮游硅藻细胞丰度介于 $0.17\times 10^4\sim 1067.96\times 10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 73×10^4 个/ m^3 ,其平面分布如图 5b,同第 1 遍大面站调查结果相似,在渤海中部靠近渤海海峡处存在浮游硅藻细胞丰度的高值区。由于调查期间硅藻在整个浮游植物群落中的比重较大,所以硅藻细胞丰度的平面分布也就决定了整个浮游植物细胞丰度的分布。

第 1 遍大面站调查区浮游甲藻细胞丰度介于 $0\sim 4.21\times 10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 0.7×10^4 个/ m^3 其平面分布如图 6a,在渤海海峡南部及其邻近海域存在浮游甲藻细胞丰度的高值区。第 2 遍大面站调查区浮游甲藻细胞丰度介于 $0\sim 5.54\times 10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 0.58×10^4 个/ m^3 其平面分布如图 6b,在渤海海峡及其邻近海域存在浮游甲藻细胞丰度的高值区。渤海春季浮游甲藻基本上不影响浮游植物的平面分布模式。

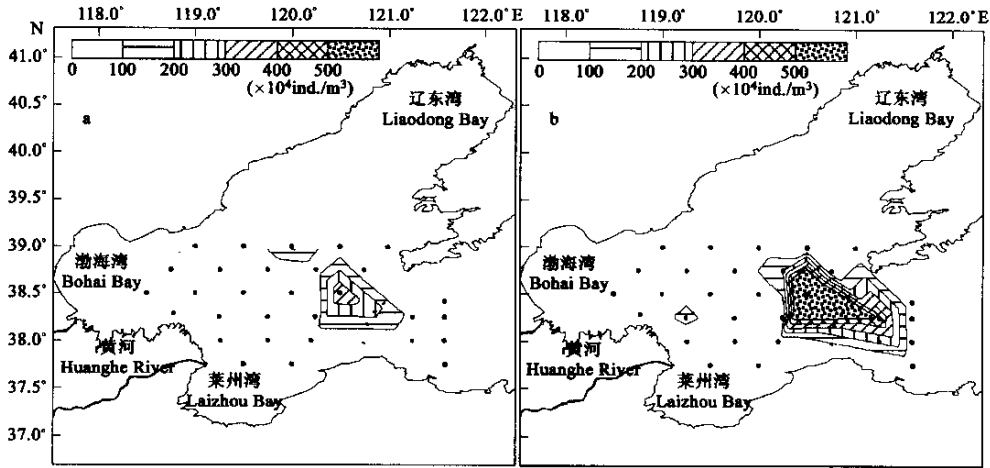


图 5 调查区浮游硅藻的平面分布

Fig. 5 Horizontal distribution of diatom in the survey area

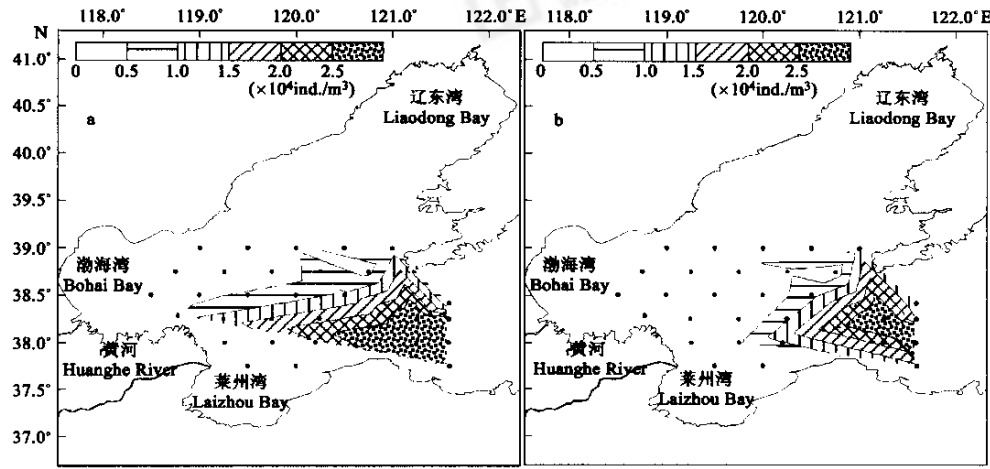


图 6 调查区浮游甲藻的平面分布

Fig. 6 Horizontal distribution of dinoflagellate in the survey area

2.3 优势种细胞丰度的平面分布

当今生海洋生态系统动力学研究如果总是停留在浮游植物生物量打包(bulk measurement)水平的研究是很难深入的^[13, 27, 28],所以最新的重大国际海洋研究计划 OCEANS(Ocean Biogeochemistry and Ecosystems Analysis)中将海洋生态系统中关键种和食物网的研究作为重要的内容研究。此次调查中渤海浮游植物秋季优势种的分布如图 7 和图 8,这为今后此海域浮游植物关键种研究提供基础资料。第 1 遍大面站调查发现,冰河拟星杆藻细胞丰度介于 $0.44\times10^4\sim289.82\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 46.97×10^4 个/ m^3 ,在调查区东北部分布,表明这种藻可能是由黄海暖流余脉带来的外源性物种;圆筛藻细胞丰度介于 $0.73\times10^4\sim5.01\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 2.61×10^4 个/ m^3 ,几乎在整个调查区都有分布,高值区位于渤海湾南部靠近黄河口附近,此处水浅,受春季大风过程的影响,圆筛藻这种生活于底层的假性浮游植物更容易在此类区域出现;刚毛根管藻细胞丰度介于 $0.12\times10^4\sim10.38\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 2.48×10^4 个/ m^3 ,除调查区西北出没有分布,其它区域都有分布,高值区位于渤海湾和渤海海峡;布氏双尾藻细胞丰度介于 $0.06\times10^4\sim5.14\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 1.01×10^4 个/ m^3 ,几乎在整个调查区都有分布,在调查区北部中央区域具有高的细胞丰度;太阳双尾藻细胞丰度介于 $0.07\times10^4\sim21.16\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 2.34×10^4 个/ m^3 ,同布氏双尾藻分布相似,几乎在整个调查区都有分布,高值区位于调查区北部中央区域;加拉星平藻细胞丰度介于 $1.71\times10^4\sim61.14\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 31.42×10^4 个/ m^3 ,只在调查区北部中央区域有分布,明显表明此种是从渤海海峡北部输入的大洋性外来种。

第 2 遍大面站调查发现,冰河拟星杆藻细胞丰度介于 $0.12\times10^4\sim945.16\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 114.1×10^4 个/ m^3 ,在调查区东部分布,细胞丰度高值区位于 E5 站附近;刚毛根管藻细胞丰度介于 $0.09\times10^4\sim103.64\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 7.48×10^4 个/ m^3 ,几乎在整个调查区都有分布,高值区位于渤海海峡;圆筛藻细胞丰度介于 $0.09\times10^4\sim19.62\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 2.39×10^4 个/ m^3 ,在整个调查区都有分布,高值区位于渤海湾南部靠近黄河口附近和 F4 站附近;圆海链藻细胞丰度介于 $0.18\times10^4\sim77.18\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 8.35×10^4 个/ m^3 ,只在调查区中北部分布,在 F4 站附近具有高的细胞丰度;太阳双尾藻细胞丰度介于 $0.06\times10^4\sim20.69\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 1.96×10^4 个/ m^3 ,除渤海海峡外几乎在整个调查区都有分布,高值区位于 F4 站附近;卡氏角毛藻细胞丰度介于 $0.06\times10^4\sim7.5\times10^4$ 个/ m^3 ,平均值为 2.44×10^4 个/ m^3 ,只在调查区中南部分布,高值区位于渤海海峡、E5 和 F4 站附近,表明此种可能是从渤海海峡北部输入的大洋性外来种。上述这些物种中,太阳双尾藻只在渤海海峡以内调查区域分布,表明这种藻是真正意义上的渤海本地种。

第 2 遍大面站调查中,在 F4 站,圆筛藻、圆海链藻、太阳双尾藻和卡氏角毛藻等大细胞硅藻等的生长(表 7)是个有趣的现象。F4 站的环境因子变化示于图 9,可知:除了铵盐,F4 站其它营养盐的浓度都高于平均值;F4 站溶解氧高于平均值,表明浮游植物生长良好,这其中主要是一些大细胞硅藻的贡献(表 8);F4 站 pH 值低于平均值,而浮游植物同样生长良好,这是为什么呢?对比 E5 站小细胞硅藻生长良好(表 6 和图 4)的情况表明,大细胞硅藻可以比小细胞硅藻吸收较少的 CO_2 ,这样水体中 pH 值就低,但浮游植物同样生长良好。另外,从 F4 站浮游植物生长与环境因子的分析可知:在较高营养盐浓度情况下,硅酸盐浓度的增加可以促进大细胞硅藻的生长。

表 8 两遍大面站调查中 F4 站浮游植物群落及其结构指数的变化
Table 8 Phytoplankton community and its structure indices at station F4 during the two station-grid-survey

项目 Item	第 1 遍大面站调查 First grid survey	第 2 遍大面站调查 Second grid survey	两遍调查的变化量 Changes between two surveys	变动百分比(%) Percentage of changes
圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i> ($\times10^4\text{ind.}/\text{m}^3$)	1.62	77.18	75.57	4671
加拉星平藻 <i>Asteroplanus karianus</i> ($\times10^4\text{ind.}/\text{m}^3$)	3.26	24.66	21.39	655
太阳双尾藻 <i>Ditylum sol</i> ($\times10^4\text{ind.}/\text{m}^3$)	2.00	20.69	18.69	933
派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i> ($\times10^4\text{ind.}/\text{m}^3$)	7.86	20.37	12.51	159
圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp. ($\times10^4\text{ind.}/\text{m}^3$)	5.32	19.62	14.30	269
布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i> ($\times10^4\text{ind.}/\text{m}^3$)	4.31	10.29	5.98	139
冰河拟星杆藻 <i>Asterinellopsis glacialis</i> ($\times10^4\text{ind.}/\text{m}^3$)	4.67	8.58	3.91	84
卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castroacanei</i> ($\times10^4\text{ind.}/\text{m}^3$)	1.62	7.50	5.89	364
浮游植物细胞丰度 Phytoplankton abundance($\times10^4\text{ind.}/\text{m}^3$)	39.06	210.43	171.37	439
物种丰富度 Species richness	14	19	5	36
香农-威纳多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	3.16	3.07	-0.10	-3
辛普森多样性指数 Simpson's diversity index	0.87	0.82	-0.05	-6
玛格丽特多样性指数 Margalef's diversity index	0.70	0.86	0.16	22
均匀度 Evenness	0.83	0.72	-0.11	-13

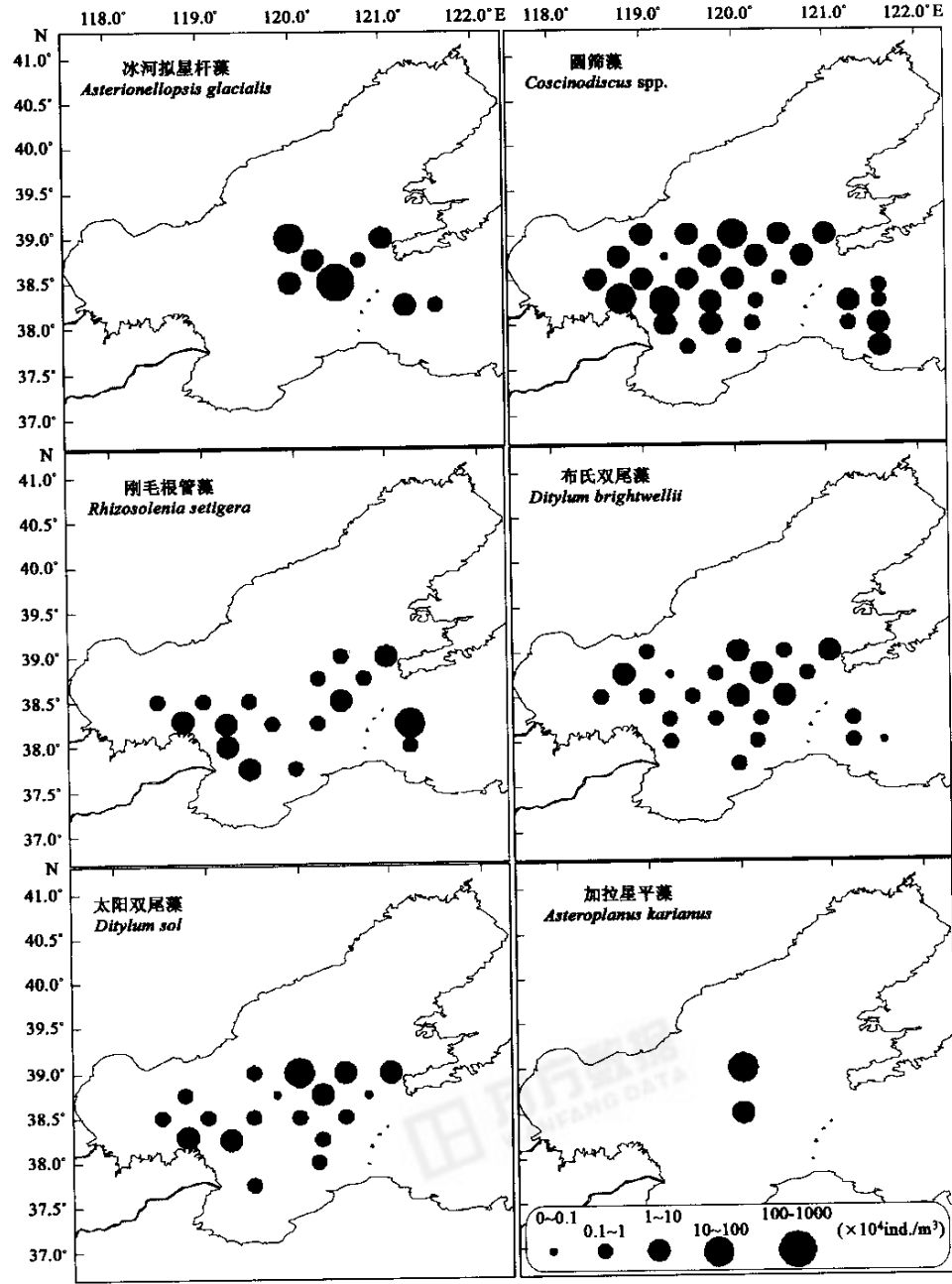


图 7 第 1 遍大面站调查区浮游植物优势种的平面分布

Fig. 7 Horizontal distribution of dominant phytoplankton species during the first station-grid-survey

3 结论

通过对渤海 1999 年春季浮游植物群落特征的分析发现:

- (1)春季渤海的浮游植物主要以硅藻为主,其生态类型多为温带近岸性的渤海本地种。
- (2)本次调查共发现浮游植物 4 门 33 属 65 种,其中硅藻 27 属 56 种,甲藻 4 属 7 种,金藻 1 属 1 种,蓝藻 1 属 1 种。春季渤海浮游植物优势物种为冰河拟星杆藻、虹彩圆筛藻、太阳双尾藻、刚毛根管藻、布氏双尾藻、中肋骨条藻、膜状缪氏藻、派格棍形藻、加拉星平藻、圆筛藻、海链藻、卡氏角毛藻和尖刺伪菱形藻。
- (3)两遍大面站调查期间渤海浮游植物群落的结构变化较大,原因主要是春季以小细胞为主体的浮游植物群落物种演替较

- 快,另外春季的大风过程对浮游植物的群落结构影响较大。
- (4)秋季渤海浮游植物细胞丰度的平面分布由浮游硅藻的分布所决定,其高值区分布在渤海中部靠近渤海海峡处。同 1982 年和 1992 年同期资料相比,浮游植物细胞丰度和平面分布有较大变异。
- (5)调查期间浮游植物细胞丰度呈增长趋势,温度和硅酸盐浓度的增加是导致此期浮游植物生长的重要因素。
- (6)对重点站位 E5 和 F4 浮游植物群落及其与环境因子关系的初步分析表明:在低营养盐浓度情况下,即使硅酸盐浓度较低,磷酸盐和硝酸盐的增加可以促进小细胞硅藻的生长;在较高营养盐浓度情况下,硅酸盐浓度的增加可以促进大细胞硅藻的生长。

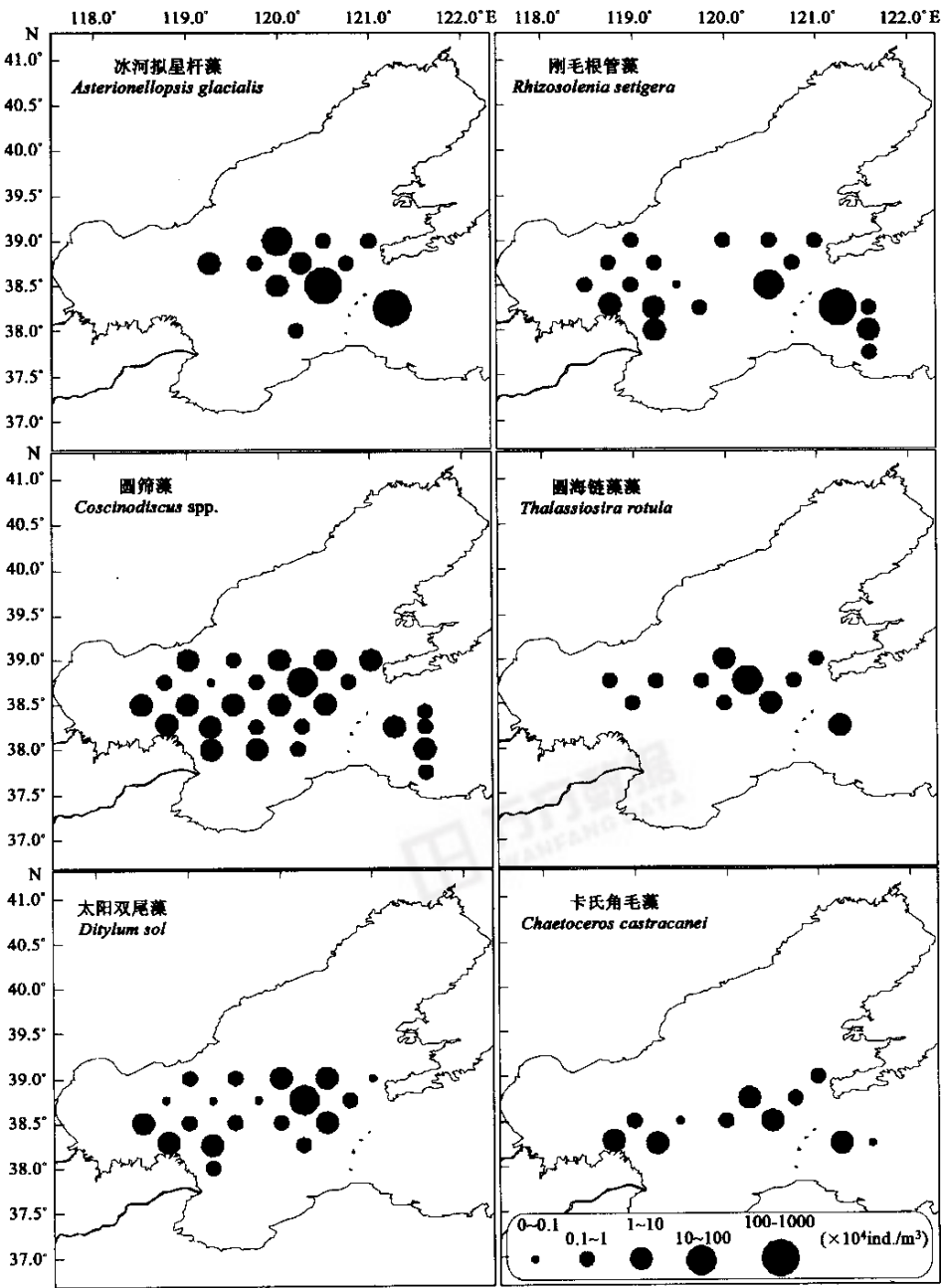


图 8 第 2 遍大面站调查区浮游植物优势种的平面分布

Fig. 8 Horizontal distribution of dominant phytoplankton species during the second station-grid-survey

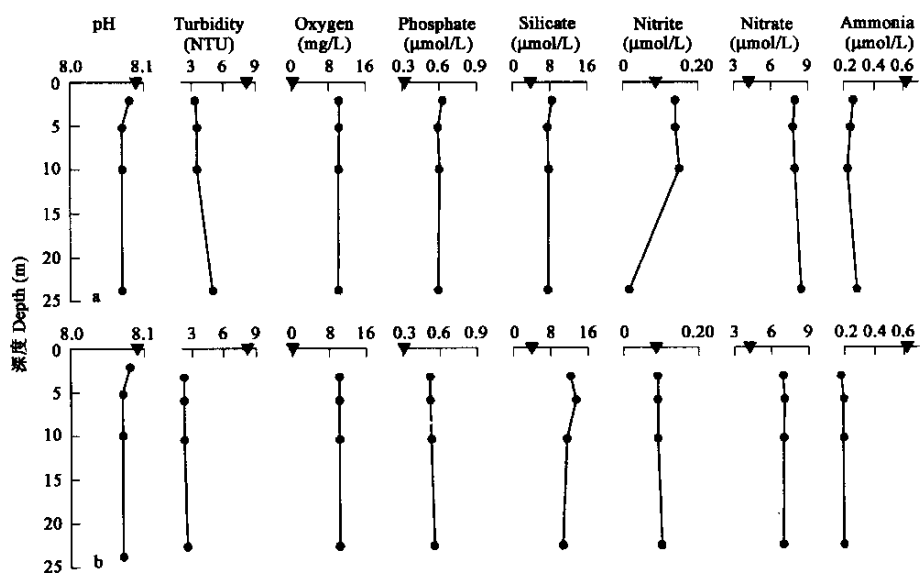


图 9 F4 站环境因子的垂直分布

Fig. 9 Vertical profile of environmental factors at station F4

▼ 为此次大面站调查的平均值 the mean value of this variable during the station-grid-survey

渤海浮游植物群落在不同时相上的变化研究对了解渤海的生态资源状况,研究改革开放以来渤海周边经济发展对渤海生态环境的影响等有重要意义。由于缺乏对渤海系统和连续的生态系统调查工作,渤海生态系统的研究和基础资料还远远不够,今后需要加强这一方面的资料积累。

References:

[1] Sarmiento J L, Toggweiler J R and Najjar R. Ocean carbon-cycle dynamics and atmospheric pCO₂. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 1988, **325**:3~21.

[2] Charlson R J, Lovelock J E, Andreae M O, *et al.* Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud abedo and climate. *Nature*, 1987, **326**:655~661.

[3] Sathyendranath S, Gouveia A D, Shetya S R, *et al.* Biological control of surface temperature in the Arabian Sea. *Nature*, 1991, **349**:54~56.

[4] Wang X and Li W Q. Study on the carbon assimilation rate of phytoplankton in the upwelling region in Minnan-Taiwan bank of fishing ground. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, **12**(3):219~224.

[5] Jiao X Y, Zhu M Y, Wu B L. Studies on the quantum yield of some marine phytoplankton. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, **13**(1):17~24.

[6] Sun J, Liu D Y, Cai X Y, *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.

[7] Wang C C. Dinoflagellata of the Gulf of Pè-Hai. *Sinensia*, 1936, **7**(2):128~171.

[8] Zhu S P, Guo Y J. The decade phytoplankton study in China. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1959, **2**(4):223~232.

[9] The Marine Comprehensive Division of Science and Technology Committee of People's Republic of China, eds. Plankton in the Coastal China Sea Waters. *The Comprehensive Investigation Report of China Seas*. Vol. 8, chapter 10, 1977. 1~159.

[10] State Oceanic Administration of China. The Comprehensive Investigation Report of Chinese Coastal Seas and Beach, *Marine Biology Investigation Report*. Beijing: China Ocean Press, 1992.

[11] Kang Y D. Distribution and seasonal variation of phytoplankton in the Bohai Sea. *Marine Fisheries Research*, 1991, **12**:31~44.

[12] Wang J, Kang Y D. Study on population dynamics of phytoplankton in the Bohai Sea. *Marine fisheries research*, 1998, **19**(1):51~59.

[13] Sun J, Liu D Y, Yang S M, *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.

[14] Sun J, Liu D Y, Yang S B. Preliminary study on the seasonal succession and development pathway of phytoplankton community in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, **20**(2):251~260.

- [15] Zou J, Dong L, Qin B. Preliminary studies on eutrophication and red tide problems in Bohai Bay. *Hydrobiologia*, 1985, **127**: 27~30.
- [16] Sun J, Liu D Y, Wei H. The phytoplankton sampling and analysis strategies in the study of the Bohai Sea ecosystem dynamics. *Oceanologica Sinica*, 2003, **25**(supp. 2):41~50.
- [17] National Technology Administration of China. Marine Biology Investigation. *Criterion of Marine Investigation*. Beijing: China Standard Press, 1992. 17~20.
- [18] Shannon C E, Weaver W. *The mathematical theory of communication*. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949.
- [19] Simpson E H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, **163**: 688.
- [20] Margalef R. Information theory in ecology. *Gen. Syst.*, 1958, **3**:36~71.
- [21] Pielou E C. *An introduction to mathematical ecology*. New York: Wiley-Interscience, 1969.
- [22] Sun J, Liu D Y. The preliminary notion on nomenclature of common phytoplankton in China Seas Waters. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, **33**(3):271~286.
- [23] Sun J, Liu D Y. Notes on the nomenclature of the red tide organism *Eucampia zodiacus* Ehrenberg. *Marine Science*, 2003, **27**(6):45~46.
- [24] Sun J, Liu D Y, Qian S B. Study on phytoplankton biomass I. Phytoplankton measurement biomass from cell volume and plasma volume. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, **21**(2):75~85.
- [25] Wei H, Sun J, Moll A, *et al.* Phytoplankton dynamics in the Bohai Sea-observations and modelling. *Journal of Marine Systems*, 2004, **44**:233~251.
- [26] Jiang W S, Pohlmann T, Sun J, *et al.* SPM transport in the Bohai Sea: field experiments and numerical modelling. *Journal of Marine Systems*, 2004, **44**:175~188.
- [27] Sun J, Liu D Y, Qian S B. Study on phytoplankton biomass III. Estimated bulk measurement biomass of phytoplankton in the Jiaozhou Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, **22**(suppl.):293~299.
- [28] Ocean Studies Board National Research Council. *50 years of ocean discovery*. Washington D C: National Academy Press, 2000. 1~269.

参考文献:

- [4] 王宪, 李文权. 闽南-台湾浅滩近岸上升流区浮游植物碳同化速率的研究. *生态学报*, 1992, **12**(3):219~224.
- [5] 矫晓阳, 朱明远, 吴宝铃. 一些海洋浮游植物量子产值的研究. *生态学报*, 1993, **13**:17~24.
- [6] 孙军, 刘东艳, 柴金玉, 等. 1998~1999 年春秋季节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.
- [8] 朱树屏, 郭玉洁. 我国十年的海洋浮游植物研究. *海洋与湖沼*, 1959, **2**(4):223~232.
- [9] 中华人民共和国国家科学技术委员会海洋综合办公室编. 中国近海浮游生物的研究. 全国海洋综合调查报告, 第 8 册, 1977. 1~159.
- [10] 国家海洋局, 等. 全国海岸带和海底资源综合调查, 海洋生物专业调查报告. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [11] 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.
- [12] 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):51~59.
- [13] 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.
- [16] 孙军, 刘东艳, 魏皓. 渤海生态系统动力学中的浮游植物采样及分析的策略. *海洋学报*, 2003, **25**(增刊 2):41~50.
- [17] 国家技术监督局. 海洋生物调查. 海洋调查规范. 北京: 中国标准出版社, 1992. 17~20.
- [22] 孙军, 刘东艳. 中国海区常见浮游植物种名更改初步意见. *海洋与湖沼*, 2002, **33**(3):271~286.
- [23] 孙军, 刘东艳. 赤潮生物浮动弯角藻名称小记. *海洋科学*, 2003, **27**(6):45~46.
- [24] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 浮游植物生物量研究 I. *海洋学报*, 1999, **21**:75~85.
- [27] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 浮游植物生物量研究 III. *海洋学报*, 2000, **22**(增刊):293~299.