

春季南黄海、东海浮游植物 群落结构与环境因子

郭术津^{1,2,3}, 姚庆祯^{4,5}, 魏传杰^{3,6}, 孙晓霞^{1,2,3,7*}

(1. 中国科学院 海洋研究所胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站, 山东 青岛 266071;

2. 中国科学院 海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中国科学院 海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071;

4. 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;

5. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100;

6. 中国科学院 海洋研究所海洋环境工程中心, 山东 青岛 266071;

7. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 2017 年春季(04-20—05-09)在南黄海和东海海域(119°30′~125°00′E, 26°00′~36°00′N)67 个站位进行水文、化学和生物的综合调查, 使用水采方法研究调查海域的浮游植物群落结构, 并将群落数据与环境因子(温度、盐度和营养盐)进行相关性分析。调查中共鉴定出浮游植物 4 门 55 属 146 种, 主要由硅藻和甲藻组成, 还有少量的金藻和蓝藻, 生态类型以温带近岸性和广布性物种为主。优势物种组成方面, 南黄海和东海海域存在差异, 其中南黄海海域优势物种为诺氏海链藻(*Thalassiosira nordenskioldii*)、太平洋海链藻(*Thalassiosira pacifica*)、微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)和具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)等, 东海海域优势物种为柔弱伪菱形藻(*Pseudonitzschia delicatissima*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)和具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)等。调查区浮游植物细胞丰度为(0.07~547.87)×10³个/L, 平均值为 29.45×10³个/L, 高值区集中在南黄海中部和闽浙沿岸区域, 其中在南黄海中部的 10~30 m 水层发生硅藻水华。与环境因子的相关性分析表明, 南黄海海域浮游植物细胞丰度与硅酸盐和磷酸盐浓度呈现显著正相关性, 与其他环境因子相关性不明显; 东海海域浮游植物细胞丰度与温度和盐度呈现显著负相关性, 与硅酸盐、铵盐和硝酸盐浓度呈现显著正相关性。调查区香农-威纳多样性指数介于 1.05~4.86, 平均值为 2.48, 高值区出现在调查区的北部近岸区域; Pielou 均匀度指数介于 0.02~0.97, 平均值为 0.57, 高值区集中在南黄海北部近岸区域和东海外侧区域。

关键词: 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 春季; 南黄海; 东海

中图分类号: Q948.8

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)03-0476-17

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.010

引用格式: GUO S J, YAO Q Z, WEI C J, et al. Phytoplankton community structure in the southern Yellow Sea and East China Sea and its relationship with environmental factors[J]. Advances in Marine Sciences, 2020, 38(3): 476-492. 郭术津, 姚庆祯, 魏传杰, 等. 春季南黄海、东海浮游植物群落结构与环境因子[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(3): 476-492.

浮游植物是海洋中的初级生产者, 通过光合作用将 CO₂ 转化为有机碳, 启动海洋中的物质循环和能量流动, 并支持渔业生产^[1]。另外, 浮游植物通过“生物泵”将碳向海底运输, 形成碳汇, 参与调节大气 CO₂ 浓

收稿日期: 2019-07-14

资助项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划项目——近海生态灾害发生机理与防控策略(2016ASKJ02-4); 国家自然科学基金项目——胶州湾浮游植物碳输出通量的季节变化和影响因素研究(31700425)和海洋异养细菌对 DMSP/DMS 产生的贡献及驱动硫循环的机制: 以马里亚纳海沟为例(91751202)

作者简介: 郭术津(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋浮游植物生态学方面研究. E-mail: shujin135@qdio.ac.cn

* **通讯作者:** 孙晓霞(1974-), 女, 研究员, 博士, 主要从事海洋浮游生物生态学方面研究. E-mail: xsun@qdio.ac.cn

(高 峻 编辑)

度,进而影响全球气候^[2]。

陆架边缘海仅占全球海洋总面积的 7.6%,却提供全球生物总生产量的 26%和世界渔业总产量的 67%~75%^[1]。另外,陆架边缘海是一个复杂的活跃体系,生产力高,在碳的海洋生物地球化学循环中的作用也十分重要。因此研究陆架边缘海的浮游植物群落结构,有利于我们深入认识和了解陆架边缘海的生物资源状况及其碳循环机制。

黄、东海总面积约 $1.23 \times 10^6 \text{ km}^2$,70%为陆架区,水深一般不超过 200 m,是中国重要的陆架边缘海^[3]。早在 20 世纪 50 年代中国研究人员便开展了黄、东海浮游植物的相关调查研究^[4-9]。早期研究以网采方法为主,不能获得浮游植物在各水层的垂直分布信息;后来以水采方法为主的调查研究也相继展开^[10-13],并积累了大量的宝贵资料,不过多数研究限于黄海或东海海域,将黄、东海作为一个整体区域进行调查研究的报道较少。

为研究目前黄、东海海域浮游植物的群落现状及与环境因子的关系,我们使用水采的方法分析了 2017 年春季南黄海、东海海域的浮游植物群落;同时,对调查海域的温度、盐度和营养盐等理化参数也进行测定,对环境数据和浮游植物群落数据进行相关性分析。希望为南黄海、东海浮游植物相关的生态学研究提供借鉴和参考。

1 材料和方法

1.1 研究区域

搭乘“科学三号”调查船于 2017 年春季(2017-04-20—05-09)在南黄海和东海海域($119^{\circ}30' \sim 125^{\circ}00'E$, $26^{\circ}00' \sim 36^{\circ}00'N$)设置的 67 个站位进行水文、化学和生物的综合调查(具体研究区域和站位设置见图 1,虚线为水深)。从北向南分别选择 A,B,C,D,E 和 F 六条断面,来展示调查区域理化因子和浮游植物的垂直分布趋势。另外,鉴于黄、东海生态系统的差异较大,为将调查区 2 个海域的浮游植物群落特征区别分析,根据黄、东海的分界线以长江口北侧启东角与济州岛之间连线为分界线的准则,将站位 3200-03 和 3200-05 以北的区域划为南黄海区域,2 个站位及其以南的区域划为东海区域。

1.2 样品采集及分析

现场使用便携式美国 Seabird 917Plus CTD 的 Rosette 采水器,在不同水层采集水样,CTD 同时测量温度、盐度和深度等参数。采水深度的设置为水深 0,10,20,30,50 m 和底层。取 500 mL 水样置于大口 PE 样品瓶中,加甲醛溶液固定(终浓度体积分数 1%)。样品遮光置于阴凉处保存。航次结束后 2 个月内,在陆上中国科学院海洋研究所胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站实

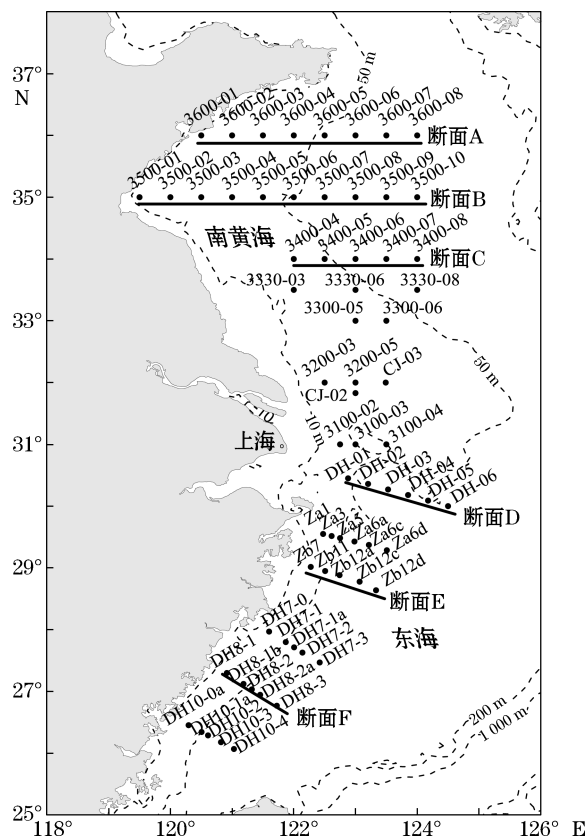


图 1 2017 年春季南黄海、东海调查区域和站位 (●)

Fig.1 Sampling stations (●) in the southern Yellow Sea and East China Sea in spring 2017

实验室完成对浮游植物样品的分析工作。实验室内浮游植物样品按照 Utermöhl 方法进行分析^[14]。取 25 mL 浮游植物亚样品置于 Hydro-bios 的 Utermöhl 计数框内,静置沉降 24 h 后,用日本 Olympus CX-31 倒置显微镜在 200 倍或 400 倍下进行物种鉴定和细胞计数。

营养盐样品采集后立即用浓度为 1 mol/L 的 HCl 溶液处理过的 0.45 μm 醋酸纤维素膜过滤,于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存,用于测定硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)和铵盐($\text{NH}_4\text{-N}$)。营养盐的室内分析采用德国 Bran-Luebbe 公司生产的 Quattro 营养盐自动分析仪完成,各营养盐的检出限分别为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度 0.015 $\mu\text{mol/L}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度 0.003 $\mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度 0.024 $\mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度 0.030 $\mu\text{mol/L}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度 0.04 $\mu\text{mol/L}$ 。

1.3 数据分析

对调查区浮游植物群落结构的香依-威纳多样性指数(Shannon-Wiener diversity index, H')、Pielou 均匀度指数(Pielou's evenness index, J)和各物种的优势度指数(Y)进行了计算^[11-12]:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i, \quad (1)$$

式中 P_i 是样品中第 i 种的细胞丰度与该样品总细胞丰度的比值, S 为该样品总物种数。

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}, \quad (2)$$

式中 S 为样品物种数。

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i, \quad (3)$$

式中 n_i 是第 i 个物种在所有样品中的细胞丰度之和, N 为所有样品的细胞丰度之和, f_i 为该物种在调查区各站位出现的频率。

浮游植物细胞丰度与环境因子的关系采用 Pearson 相关性分析,浮游植物细胞丰度数据与环境参数经过 $\lg(x+1)$ 转换后,应用 SPSS14.0 软件^[15] 计算其相关系数以及显著性水平。

2 结 果

2.1 海区环境特征

调查海域表层温度、盐度和营养盐浓度分布见图 2。调查区表层温度为 $10.64 \sim 24.39\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均值为 $16.36\text{ }^{\circ}\text{C}$; 表层盐度为 $24.23 \sim 34.56$, 平均值为 31.4, 盐度最低值出现在长江口邻近的 3100-03 站位(图 2b)。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度为 $0.08 \sim 24.51\text{ }\mu\text{mol/L}$, 平均值为 $5.70\text{ }\mu\text{mol/L}$, 高值区集中在长江口邻近的外侧站位和闽浙沿岸区域(图 2c)。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度为 $0.03 \sim 0.80\text{ }\mu\text{mol/L}$, 平均值为 $0.14\text{ }\mu\text{mol/L}$, 高值区集中在闽浙沿岸区域(图 2d)。 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度为 $0.30 \sim 25.19\text{ }\mu\text{mol/L}$, 平均值为 $6.12\text{ }\mu\text{mol/L}$, 高值区集中在长江口外侧及闽浙沿岸区域, 另外南黄海中南部也有高值区存在(图 2e)。

调查区断面温度、盐度和硝酸盐浓度分布(图 3)显示, 在南黄海海域温度从表层到底层基本呈逐渐降低趋势, 在断面 A 中部的 3600-04 站位中下层有冷舌现象; 盐度则从近岸到外海呈逐渐升高趋势。断面 A 和 B 的营养盐分布趋势表明南黄海的近岸站位 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度较高; 南黄海中部的 10~30 m 水层存在 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的涌升现象。在东海海域, 除了断面 D 温度呈现从近岸到外海逐渐降低的趋势, 断面 E 和 F 的温度均从近岸到外海呈逐渐升高的趋势。3 条断面盐度均呈从近岸到外海、从表层到底层逐渐升高的趋势。东海海域的 3 条断面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度高值均出现在近岸区域, 且从近岸到外海呈逐渐降低趋势。

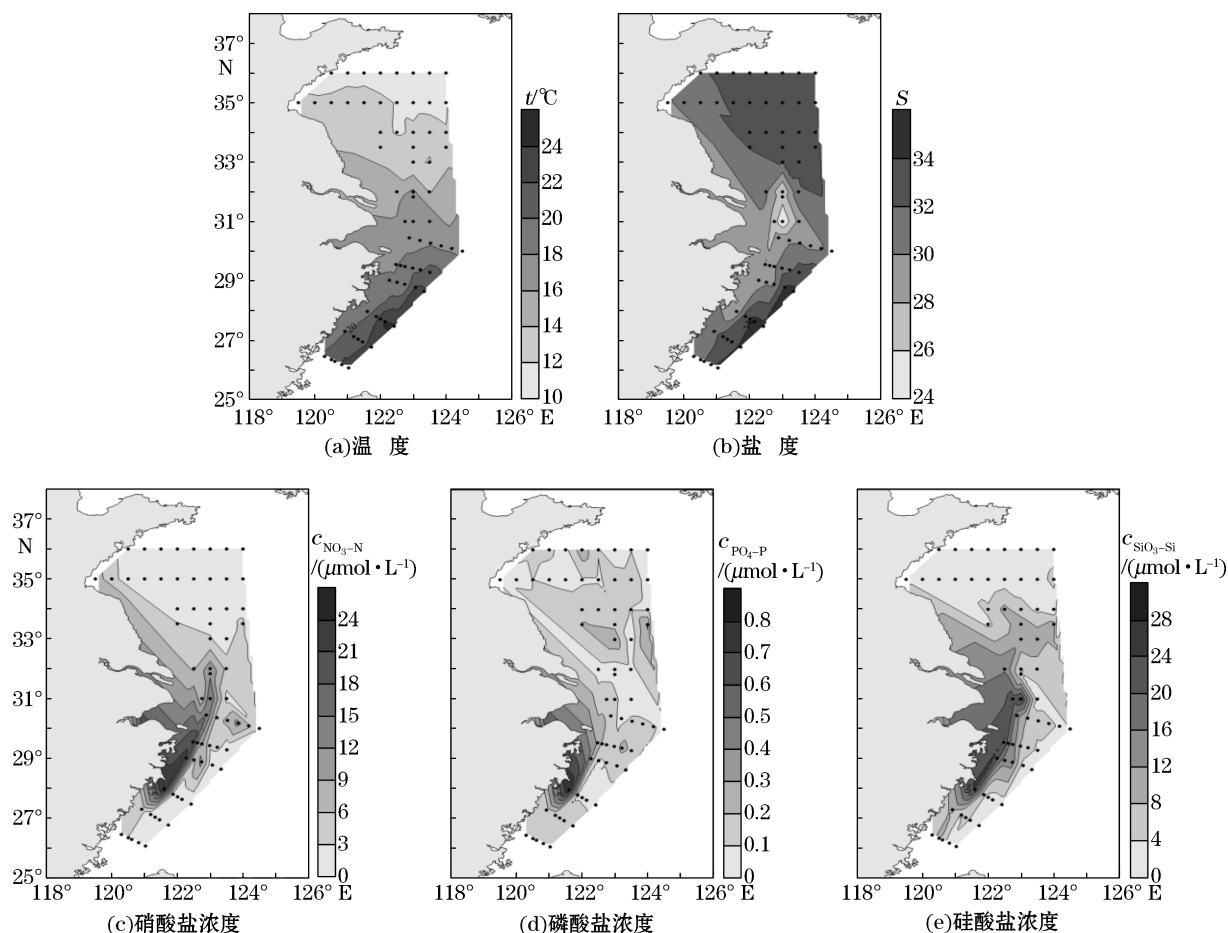


图2 调查区域表层温度、盐度、硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐分布

Fig.2 Distributions of temperature, salinity, nitrate, phosphate and silicate in the surface layer in the study area

2.2 物种组成

通过对 306 个浮游植物样品的分析,共鉴定浮游植物 4 门 55 属 146 种,其中硅藻门 38 属 97 种,甲藻门 15 属 45 种,蓝藻门 2 属 3 种,金藻门 1 属 1 种。硅藻和甲藻是调查区的主要浮游植物功能群,其中硅藻门中角毛藻属(*Chaetoceros*)、圆筛藻属(*Coscinodiscus*)和根管藻属(*Rhizosolenia*)物种最多,甲藻门中角藻属(*Ceratium*)和原多甲藻属(*Protoperidinium*)物种最多。生态类型方面,调查区浮游植物物种以温带近岸性和广布性物种为主,也包含部分暖水性或大洋性物种,如太阳漂流藻(*Planktoniella sol*)、秘鲁角毛藻(*Chaetoceros peruvianus*)、刺尖甲藻(*Oxytoxum scolopax*)和单刺足甲藻(*Podolampas spinifera*)等。

调查区浮游植物优势物种组成(表 1):南黄海海域优势物种以链状硅藻为主,也包含部分甲藻,排名靠前的优势物种为诺氏海链藻(*Thalassiosira nordenskioldii*)、太平洋海链藻(*Thalassiosira pacifica*)、微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)和具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)等;东海海域优势物种同样以链状硅藻为主,包含部分甲藻物种,排名靠前的优势物种为柔弱伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia delicatissima*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)和具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)(同物异名:东海原甲藻 *Prorocentrum donghaiense*)等。可以看出,南黄海和东海海域浮游植物优势物种均以链状硅藻为主,并且 2 个海域前 2 位优势种的优势度要明显高于其他优势种;另外,相较于硅藻,甲藻在 2 个海域的优势度较低。

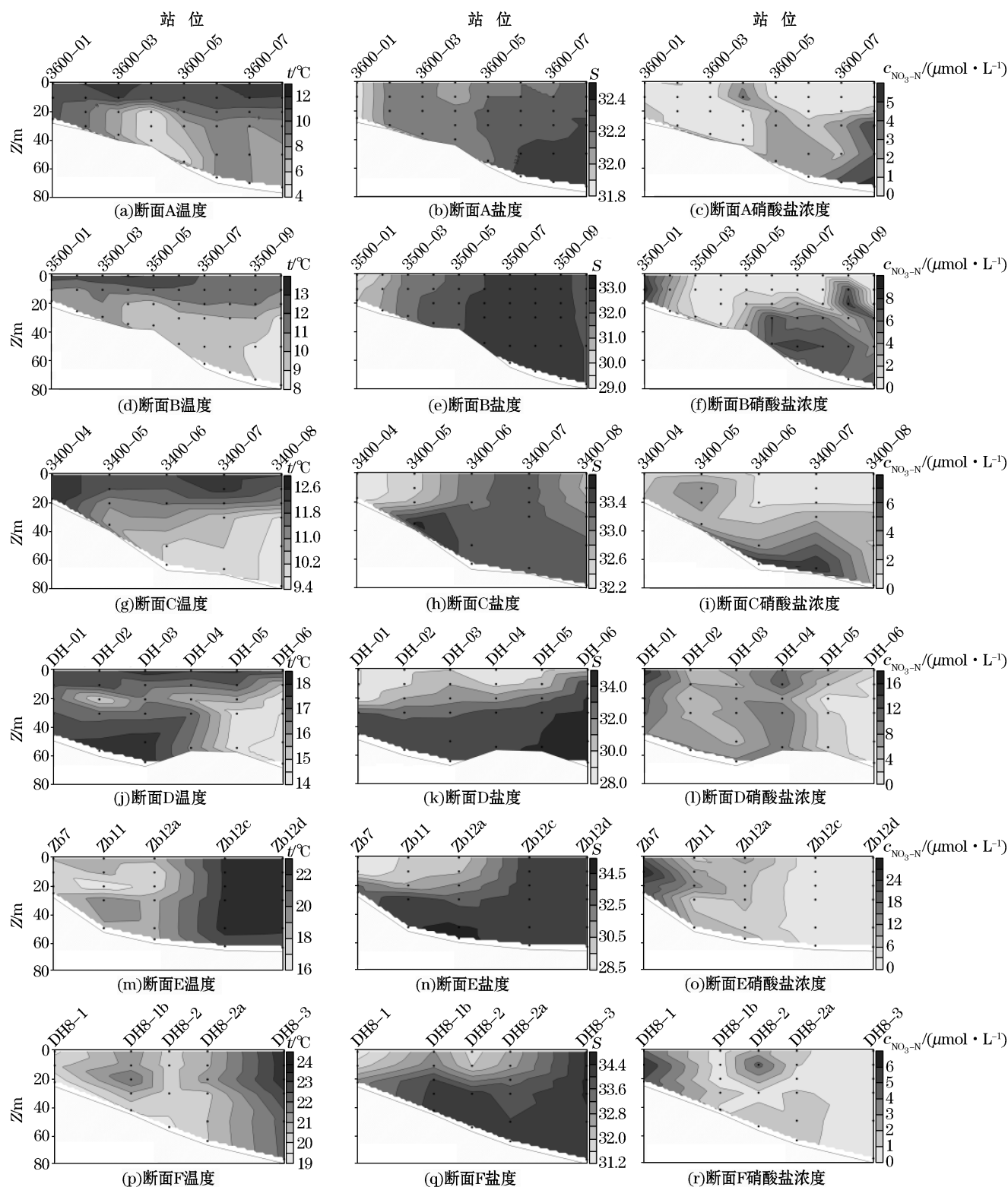


图3 调查区域断面 A,B,C,D,E 和 F 的温度、盐度和硝酸盐浓度分布

Fig.3 Distributions of temperature, salinity and nitrate concentration along section A, B, C, D, E and F in the study area

表 1 调查区南黄海、东海优势度(Y)排名前 10 的浮游植物物种
Table 1 Top 10 dominant phytoplankton species in the southern Yellow Sea and East China Sea
(Ranked according to the dominance index (Y) of each species)

优势度排名	南黄海	Y	东 海	Y
1	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskioldii</i>	0.103 3	柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	0.135 5
2	太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i>	0.091 2	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.089 9
3	微小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>	0.019 5	柔弱角毛藻 <i>Chaetoceros debilis</i>	0.007 9
4	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.015 5	具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>	0.006 3
5	布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>	0.007 8	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	0.003 2
6	海洋环毛藻 <i>Corethron pelagicum</i>	0.006 1	夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	0.003 1
7	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	0.005 5	微小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>	0.001 6
8	简单裸甲藻 <i>Gymnodinium simplex</i>	0.002 8	锥状施克里普藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>	0.001 3
9	裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.	0.001 8	三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>	0.001 3
10	圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i>	0.001 3	刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>	0.001 0

2.3 细胞丰度水平分布

调查区表层、20 m 和 50 m 水层浮游植物细胞丰度分布见图 4。调查区表层浮游植物总细胞丰度为 $(0.07\sim547.87)\times10^3$ 个/L,平均值为 29.45×10^3 个/L;硅藻细胞丰度为 $(0.07\sim544.81)\times10^3$ 个/L,平均值为 22.45×10^3 个/L;甲藻细胞丰度为 $(0.04\sim96.80)\times10^3$ 个/L,平均值为 6.99×10^3 个/L。整体来看,调查区表层有 2 个浮游植物细胞丰度高值区:南黄海中部区域和闽浙沿岸区域(图 4a)。南黄海浮游植物细胞丰度高值集中在 B 断面外侧的 3500-09 站位,优势物种为诺氏海链藻和太平洋海链藻;闽浙沿岸区域优势物种为柔弱伪菱形藻。表层硅藻细胞丰度与浮游植物总细胞丰度的分布趋势一致(图 4b);甲藻细胞丰度高值集中在南黄海中部和浙江沿岸区域(图 4c),其中南黄海中部细胞丰度高值区优势物种为微小原甲藻和简单裸甲藻(*Gymnodinium simplex*),浙江沿岸区域优势物种为具齿原甲藻。调查区 20 m 水层浮游植物细胞丰度高值出现在南黄海中部区域,丰度高值主要由硅藻贡献,优势物种为诺氏海链藻和太平洋海链藻;另外在长江口外侧站位细胞丰度也较高,优势物种为具槽帕拉藻和骨条藻(图 4d~图 4e)。甲藻细胞丰度在 B 断面的 3500-03 站位较高,优势物种为微小原甲藻(图 4f)。在 50 m 水层,浮游植物细胞丰度仍然在南黄海中部出现高值,优势物种为太平洋海链藻和诺氏海链藻(图 4g);硅藻细胞丰度分布与浮游植物总细胞丰度分布一致(图 4h);甲藻细胞丰度较低,最高值出现在 B 断面的 3500-07 站位,优势物种为裸甲藻(图 4i)。

南黄海和东海海域主要优势物种细胞丰度在表层的分布趋势(图 5)显示,在南黄海海域,诺氏海链藻、太平洋海链藻和微小原甲藻的细胞丰度高值区均集中在中部区域(图 5a~图 5c),具槽帕拉藻的细胞丰度高值区则集中在南黄海南部水深较浅的内侧站位(图 5d)。在东海海域,柔弱伪菱形藻细胞丰度高值集中在闽浙沿岸区域,另外在 DH04 站位也出现高值(图 5e);具槽帕拉藻细胞丰度高值区出现在长江口邻近的区域及 DH06 站位(图 5f);柔弱角毛藻和具齿原甲藻的细胞丰度高值均集中于浙江近岸区域,分布趋势比较一致(图 5h)。综上所述,南黄海海域优势物种的细胞丰度高值区集中在南黄海中部,其他区域分布较少;东海海域优势物种的细胞丰度高值区集中在长江口外侧及闽浙沿岸海域,从近岸到外海呈逐渐降低的趋势。

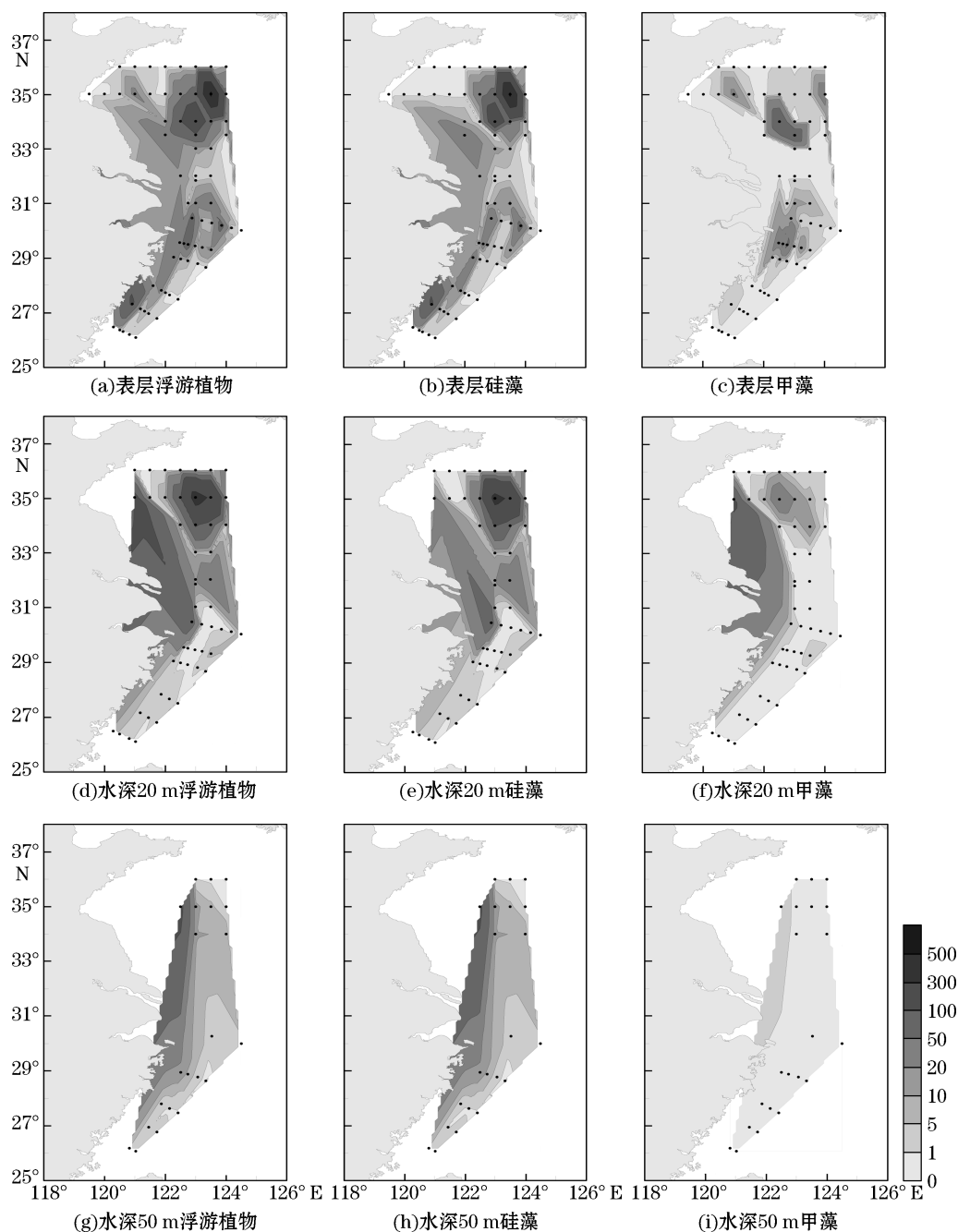


图4 调查区表层、水深20 m和50 m水层浮游植物细胞丰度($\times 10^3$ 个 $\cdot L^{-1}$)分布

Fig.4 Horizontal distributions of phytoplankton cell abundance ($\times 10^3$ cells $\cdot L^{-1}$) in the surface, 20 m and 50 m layer in the study area

2.4 细胞丰度断面分布

调查区各断面浮游植物细胞丰度分布见图6。断面A浮游植物细胞丰度高值区出现在断面外侧的3600-08站位的10~30 m水层,优势物种为布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*)和太平洋海链藻。断面B浮游植物细胞丰度高值区出现在断面外侧的3500-08站位的20~30 m水层,优势物种为诺氏海链藻和太平洋海链藻。断面C浮游植物细胞丰度高值区出现在断面外侧的3400-08站位的30 m水层,优势物种为太平洋海链藻。

海链藻和菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*);另外,位于断面中部的 3400-06 站位的 0 m 和 20 m 水层细胞丰度也较高,优势物种为太平洋海链藻和诺氏海链藻。可以看出,南黄海海域断面 A、B 和 C 浮游植物细胞丰度的高值均出现在外侧,并且在断面 B 外侧站位的 10~30 m 水层出现硅藻水华,最高值已超过 10^6 个/L,近岸区域细胞丰度则较低。

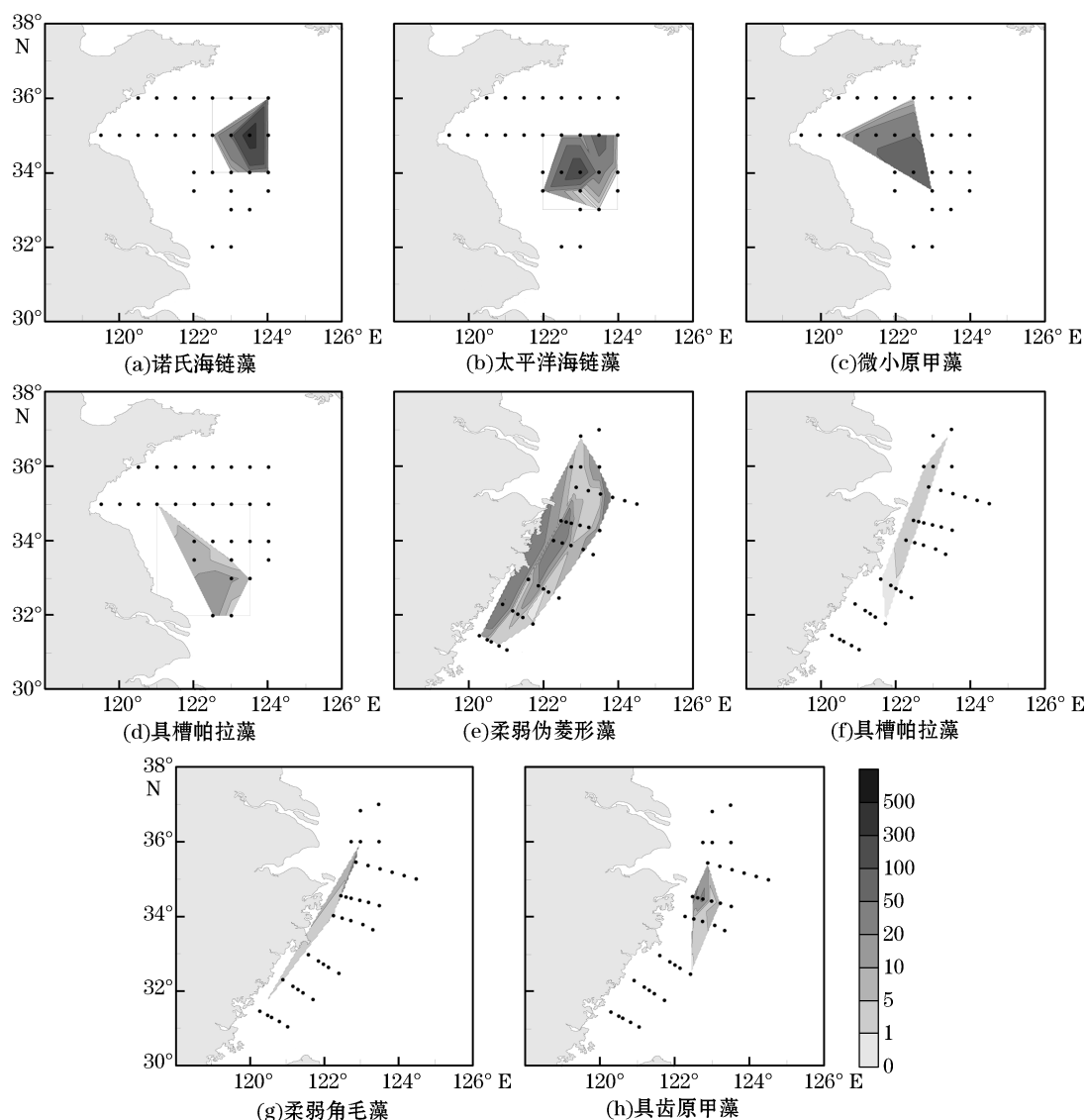


图 5 调查区表层浮游植物优势物种细胞丰度($\times 10^3$ 个 $\cdot$ L^{-1})分布

Fig.5 Horizontal distributions of cell abundance ($\times 10^3$ cells $\cdot$ L^{-1}) of dominant species in the surface water in the study area

断面 D 浮游植物细胞丰度高值区出现在近岸 DH-01 站位的 0~20 m 水层,优势物种为柔弱角毛藻和具齿原甲藻。断面 E 浮游植物细胞丰度高值区出现在近岸 Zb7 站位的表层,优势物种为柔弱伪菱形藻。断面 F 浮游植物细胞丰度高值区出现在近岸 DH8-1 站位的表层,优势物种为柔弱伪菱形藻和微小细柱藻(*Leptocylindrus minimus*)。东海海域 3 条断面的细胞丰度高值区均集中在近岸区域,并呈从近岸到外海、从表层到底层呈逐渐降低的趋势。

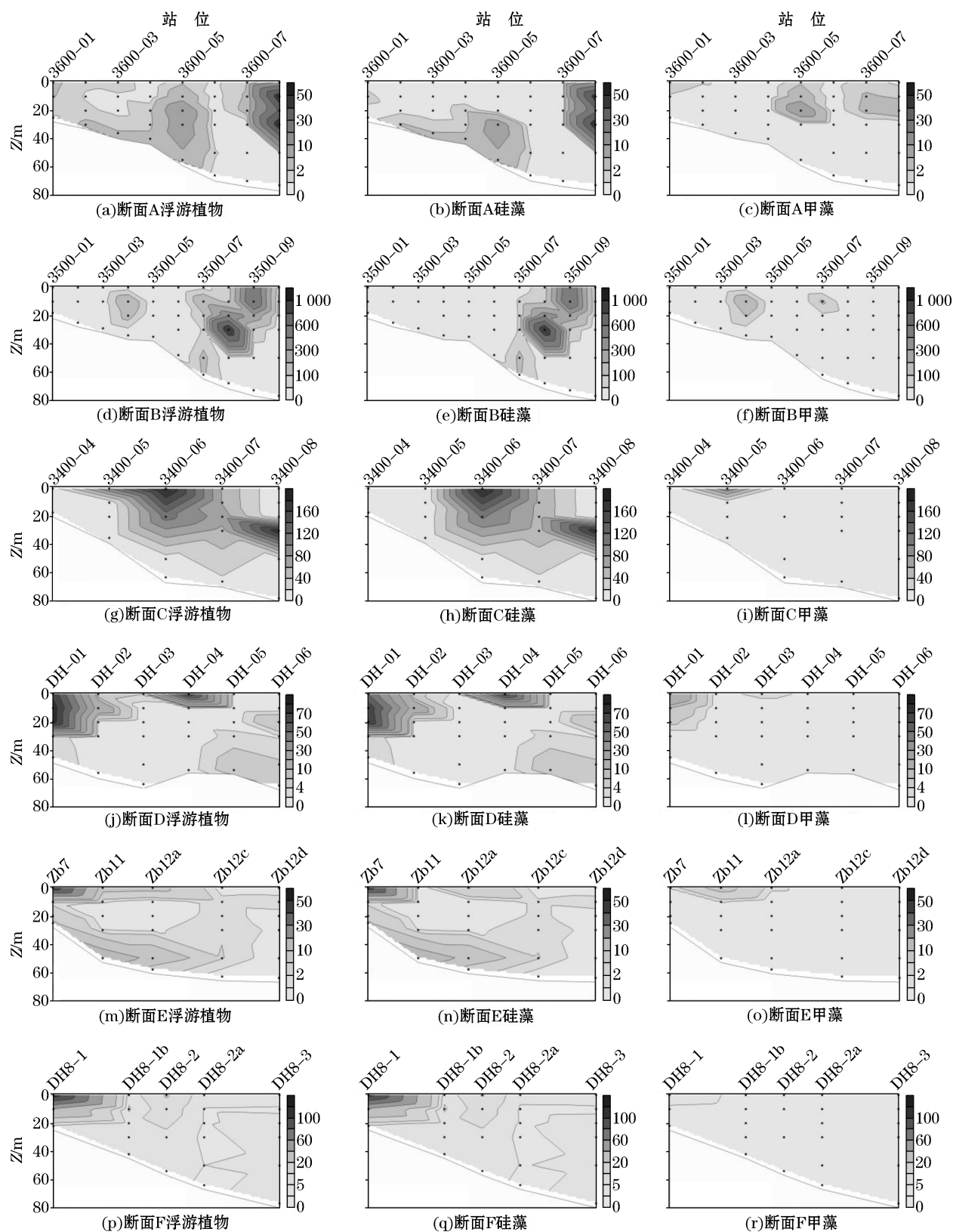


图6 调查区各断面浮游植物细胞丰度($\times 10^3 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$)分布

Fig.6 Transectional distributions of phytoplankton cell abundance ($\times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$) in the study area

2.5 多样性指数和均匀度指数

调查区表层水体浮游植物群落香依-威纳多样性指数(图 7)显示表层为 1.05~4.86,平均值为 2.48,高值区出现在调查区的北部近岸站位,低值区则集中在南黄海南部区域。调查区表层 Pielou 均匀度指数(图 7)为 0.02~0.97,平均值为 0.57,最低值出现在南黄海中部的 3330-06 站位,仅为 0.02,优势物种为微小原甲藻,其细胞丰度占到该站位总细胞丰度的 99%以上;高值区集中在南黄海北部近岸区域和东海外侧区域。

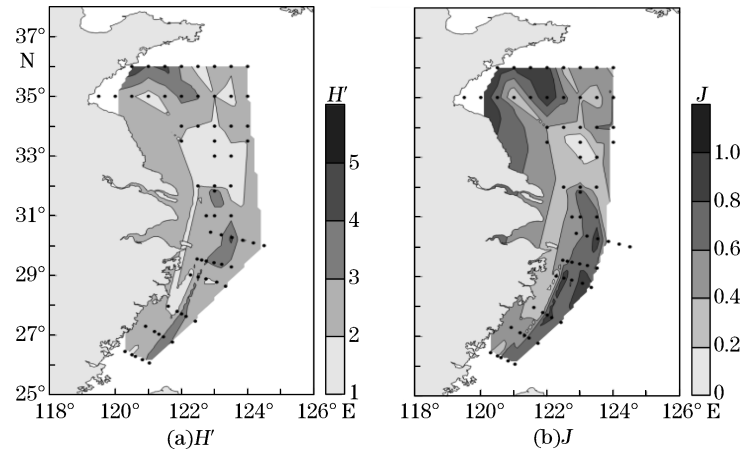


图 7 调查区海域表层浮游植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J)分布
Fig.7 Distributions of Shannon-Wiener diversity index (H') and Pielou's evenness index (J) of phytoplankton community in the surface layer in the study area

2.6 浮游植物细胞丰度与环境因子的关系

调查区表层浮游植物细胞丰度与环境因子相关性分析(表 2)表明,南黄海浮游植物细胞丰度与 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度呈现显著正相关,而与其他环境因子相关性不明显;硅藻细胞丰度与 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈现显著正相关,甲藻细胞丰度则与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈现显著负相关。东海浮游植物细胞丰度与温度和盐度呈现显著负相关,与 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈现显著正相关;硅藻细胞丰度与温度和盐度呈现显著负相关,与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈现显著正相关;甲藻细胞丰度与盐度呈现显著负相关,与 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈现显著正相关。

表 2 调查区域表层浮游植物细胞丰度与环境因子的 Pearson 相关性分析
Table 2 Pearson correlation analysis between phytoplankton cell abundance and environmental factors in the surface layer in the study area

区 域	类 群	t	S	$\text{SiO}_3\text{-Si}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$
南黄海	浮游植物	0.141	0.060	0.184 *	0.074 *	0.100	−0.001	0.149
	硅藻	0.120	0.055	0.198 *	0.108	0.127	0.012	0.190 *
	甲藻	0.121	0.031	−0.060	−0.175 *	−0.135	−0.067	−0.206 *
东海	浮游植物	−0.243 **	−0.425 **	0.182 *	−0.073	−0.024	0.159 *	0.303 **
	硅藻	−0.248 **	−0.344 **	0.122	−0.063	−0.018	0.145	0.252 **
	甲藻	−0.077	−0.361 **	0.222 **	−0.053	−0.024	0.095	0.240 **

注:“*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,“**”表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

3 讨 论

3.1 与历史资料比较

我们的调查结果与同时期历史调查资料的比较(表 3)说明,南黄海海域本次调查主要优势种为诺氏海链藻、太平洋海链藻、微小原甲藻和具槽帕拉藻等(表 1),其中 2 种优势种与 ZHANG S 等在 2014 年的调查结果^[16]一致。2009 年田伟和孙军调查发现具齿原甲藻是首要优势种,主要集中分布在南黄海南部,其次是柔弱伪菱形藻和具槽帕拉藻等^[17],即总体上南黄海春季浮游植物优势物种还是以链状硅藻为主。东海海域本次调查主要优势种为柔弱伪菱形藻、具槽帕拉藻、柔弱角毛藻和具齿原甲藻等(表 1),历史调查资料主要优势种则以具齿原甲藻和骨条藻居多(表 3),这可能跟调查范围的差异有关。历史调查资料的采样范围多集中在长江口及其邻近海域,如赵冉等的调查范围为(121°00′~123°30′E,30°30′~32°30′N)^[11],孙军和田伟的调查范围为(121°00′~123°50′E,30°50′~32°00′N)^[18]。这些区域均是春季发生原甲藻和骨条藻水华的常见区域^[19],而本次调查在长江口邻近区域并没有设置调查站位(图 1)。

调查中南黄海和东海海域浮游植物优势物种均以链状硅藻为主(表 1)。于其他类群比较,链状硅藻物种具有更好的环境适应性,在营养盐丰富的陆架区较容易成为优势类群^[20]。我们认为,首先群体形态可以增加细胞的浮力,使细胞更容易抵御下沉,从而更好地停留在上层水体进行光合作用;其次相较于单细胞,群体形态的细胞在下沉过程中会有更大的细胞营养盐通量^[21];另外群体形态的细胞可以有效抵御浮游动物的摄食^[22]。因此在营养盐较丰富且水动力复杂的黄、东海陆架区域,链状硅藻较易成为优势类群。

3.2 浮游植物细胞丰度与环境因子的相关性

从浮游植物细胞丰度的平面分布来看,调查区春季细胞丰度高值区出现在南黄海中部区域和闽浙沿岸区域(图 4a),这与调查区营养盐的分布趋势相一致(图 2c~图 2e)。研究发现,长江冲淡水 and 黑潮次表层水的涌升是黄、东海海域营养盐的 2 个主要来源^[24]。春季在季风影响下,长江冲淡水有分支南下,形成闽浙沿岸的营养盐高值区(图 2c~图 2e);同时,在南黄海中部区域,从断面 A 和 B 的营养盐分布可以看出次表层水的涌升(图 3c 和图 3f),为该区域上层水体带来充足的营养盐,这与前人的研究结果相似^[25-26]。因此,2 个区域充足的营养盐供应导致了浮游植物细胞丰度的高值现象。

南黄海近岸区域浮游植物细胞丰度较低(图 4a)。断面分布表明断面 A 和 B 近岸站位有硝酸盐浓度的高值(图 3c 和图 3f),但同时水体盐度垂直混合也比较强烈(图 3b 和图 3e)。程君等研究发现,春季南黄海近岸区域由于水深较浅、水体上下混合均匀,浊度较大,透明度不高,浮游植物的生长受到光限制^[27]。因此虽然该区域营养盐浓度较高,浮游植物生长易受到光限制而导致细胞丰度较低。另外,东海海域外侧区域浮游植物细胞丰度随着等深线的加深迅速降低(图 4a),这与营养盐浓度的分布趋势也比较一致(图 2c~图 2e)。研究还表明,东海水层 50 m 以深的陆架区,营养盐含量较低,浮游植物的生长易受到营养盐的限制^[24]。

浮游植物细胞丰度与环境因子的 Pearson 相关性分析表明,南黄海海域硅藻细胞丰度跟 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈显著正相关,甲藻细胞丰度则跟 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈显著负相关(表 2),这种差异可能跟硅藻和甲藻的生存策略差异有关。硅藻的营养型属于完全自养型,在营养盐充足的环境中可以凭借生长优势快速成为优势类群^[28],研究断面 A、B、C 的硅藻细胞丰度的高值区也基本与营养盐浓度的高值区相吻合(图 3c、图 3f、图 3i、图 6b、图 6e 和图 6h),因此硅藻细胞丰度与营养盐浓度呈现显著的正相关,在高营养盐浓度区域占据优势地位。与硅藻相比,甲藻则更能适应寡营养的环境。研究发现,很多甲藻物种具有异养营养行为,在寡营养环境中可以通过摄食其他小型生物补充自身营养需要^[29]。因此当营养盐浓度较低时,甲藻通过异养方式仍具有一定的生存优势,而硅藻则往往由于营养盐限制而导致生物量和优势度降低,这便导致

表 3 调查区域物种丰富度、优势种组成及细胞丰度与历史水采方法调查资料的比较

Table 3 Comparison of species richness, dominant species and cell abundance among historical data in the survey area

位 置	时 间	物种数	优势种	平均细胞丰度 ($\times 10^3$ 个 $\cdot$ L $^{-1}$)	来 源
南	121°00′~124°30′E 33°00′~36°30′N 2009-06	73	具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>	15.94	文献[17]
			柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>		
			具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>		
			菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.		
黄	121°00′~125°12′E 31°12′~39°15′N 2014-05	185	太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i>	14.68	文献[16]
			具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>		
			米氏凯伦藻 <i>Karenia mikimotoi</i>		
			骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.		
海	119°00′~124°00′E 31°00′~36°00′N 2017-04	95	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskioldii</i>	45.75	本研究
			太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i>		
			微小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>		
			具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>		
	121°00′~123°30′E 30°30′~32°30′N 2006-05	77	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	397.94	文献[11]
			具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>		
			骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.		
			米氏凯伦藻 <i>Karenia mikimotoi</i>		
	120°50′~123°59′E 26°50′~34°07′N 2007-05	144	柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	78.9	文献[10]
			具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>		
			中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>		
			圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i>		
东	120°50′~123°59′E 26°50′~34°07′N 2008-05	155	具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>	266.36	文献[23]
			中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>		
			锥状施克里普藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>		
			具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>		
	121°00′~123°50′E 30°50′~32°00′N 2009-04	64	多尼骨条藻 <i>Skeletonema dohrnii</i>	582.2	文献[18]
			具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>		
			菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>		
			尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>		
海	120°00′~127°30′E 25°00′~33°30′N 2011-05	193	具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>	66.94	文献[12]
			柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>		
			骨条藻 <i>Skeletonema</i> sp.		
			具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>		
	122°27′~125°52′E 27°93′~32°05′N 2014-05	105	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	—	文献[13]
			拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia</i> spp.		
			具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>		
	120°00′~125°00′E 25°00′~32°30′N 2017-05	119	柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	12.44	本研究
			具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>		
			柔弱角毛藻 <i>Chaetoceros debilis</i>		
			具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>		

注:表中“—”表示没有数据

两者在与营养盐的相关性上出现了差异(表 2)。在东海海域,硅藻和甲藻细胞丰度则均与盐度呈显著负相关,与 NO₃-N 浓度呈显著正相关(表 2),这与文斐等的研究结果^[30]基本一致。从细胞丰度的分布可以看出,硅藻和甲藻的细胞丰度高值均出现在受长江冲淡水影响明显的闽浙沿岸区域(图 4b 和图 4c),邻近区域水体以低盐度和高营养盐浓度为显著特点(图 2b~图 2e)。因此,在调查区盐度越低、营养盐浓度越高的区域,浮游植物的细胞丰度也往往越高。东海甲藻与 SiO₃-Si 的相关性比硅藻好(表 2),这是因为甲藻丰度的高值区主要集中在长江口外及浙江沿岸区域(图 4c),跟 SiO₃-Si 浓度高值区的分布比较一致(图 2e)。但是,这并不能说明是当地海域高的 SiO₃-Si 浓度支撑了甲藻的生长,因为 NO₃-N 在该区域的浓度也较高(图 2c),很有可能是 NO₃-N 的高浓度造成了该区域甲藻的高丰度。与甲藻不同,东海海域硅藻的丰度高值出现在南侧 F 断面的近岸区域(图 4b),该区域 SiO₃-Si 的浓度并不算太高(图 2e),在 SiO₃-Si 浓度最高的长江口外和浙江近岸区域硅藻丰度则相对较低,所以导致硅藻与 SiO₃-Si 的相关性并不显著。

3.3 南黄海中部春季水华

春季水华在温带和亚极地海域是一个常见的现象,很大程度上影响着当地海域渔业生产量及生源要素的循环^[31]。在南黄海中部,几乎每年春季都会爆发浮游植物水华^[32]。本次调查中南黄海中部也发现了硅藻水华,优势物种为诺氏海链藻和太平洋海链藻,其中在断面 B 的 3500-08 站位的 30 m 水层细胞丰度超过了 10⁶ 个/L(图 6e)。水华发生的位置集中在南黄海水深超过 50 m 的中部区域(图 6b、图 6e 和图 6h),这与前人的观测结果也一致^[33-34]。

从细胞丰度的垂直分布来看,水华区域浮游植物细胞丰度的最高值出现在各站位的 10~30 m 水层(图 6a~图 6c)。以断面 C 的 3400-08 站位为例,浮游植物细胞丰度最大值出现在 30 m 水层(图 6g)。该站位表层的 NO₃-N 浓度为 0.36 μmol/L,PO₄-P 浓度为 0.087 μmol/L。相关的营养盐吸收动力学研究发现,浮游植物生长所需的 NO₃-N 浓度阈值为 1.0 μmol/L,PO₄-P 浓度阈值为 0.1 μmol/L^[35]。因此,该区域表层水体的营养盐浓度较低,不适宜浮游植物的生长,导致浮游植物细胞丰度的最大值不是出现在表层,而是出现在营养盐浓度较高的 30 m 层。我们认为,春季南黄海中部次表层水的涌升携带来充分营养盐,支持了当地海域浮游植物的生长,形成水华;不过次表层水的涌升往往只能达到 10~30 m 的水层,导致浮游植物细胞丰度的最高值集中在水华区域的次表层。

调查中南黄海中部水华区域的优势物种为诺氏海链藻、太平洋海链藻和菱形海线藻等硅藻物种(表 4)。营养盐数据分析表明,水华站位的 Si/N 比值均明显大于 1。

表 4 南黄海中部水华区域各站位细胞丰度、优势物种及 Si/N 比值

Table 4 Cell abundance, dominant species and Si/N values at the bloom stations in the central southern Yellow Sea

站 位	水层/m	细胞丰度 /(×10 ³ 个·L ⁻¹)	优势种	Si/N 比值
3500-09	10	571.16	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskioldii</i> 太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i>	1.38
	20	275.88	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskioldii</i> 太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i>	1.44
3500-08	20	383.81	太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i> 诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskioldii</i>	6.41
	30	1 005.35	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskioldii</i> 太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i>	2.06
3400-08	30	177.19	太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i> 菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	1.90

根据 Redfield 理论, Si 在南黄海中部不是硅藻生长的限制性因素,这也与前人的研究结论^[36]一致。因此,在硅酸盐供应充足的情况下,硅藻可以迅速繁殖,成为南黄海中部春季水华的优势物种。鉴于硅藻细胞死亡后具有较高的沉降速率,形成碳汇。因此,南黄海中部春季硅藻水华及后续的浮游植物碳沉降在该海域碳汇中的贡献值得探索。

4 结 论

我们用水采样品系统地研究 2017 年春季南黄海、东海海域的浮游植物群落结构,对其与环境因子关系进行了分析:

对 306 个浮游植物样品的分析共鉴定浮游植物 4 门 55 属 146 种,硅藻和甲藻是调查区域的主要浮游植物功能群。生态类型方面,调查区浮游植物物种以温带近岸性和广布性物种为主,也包含部分暖水性或大洋性物种。南黄海和东海海域浮游植物优势物种均以链状硅藻为主,其中南黄海主要优势种为诺氏海链藻(*Thalassiosira nordenskioldii*)、太平洋海链藻(*Thalassiosira pacifica*)、微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)和具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)等,东海主要优势种为柔弱伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia delicatissima*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)和具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)等。调查区浮游植物细胞丰度存在 2 个高值区:南黄海中部区域和闽浙沿岸区域。断面分布上,南黄海浮游植物细胞丰度的高值均出现在外侧区域,并且在断面 B 外侧站位的 10~30 m 水层发现硅藻水华;东海浮游植物细胞丰度高值区则集中在近岸区域,且从近岸到外海、从表层到底层逐渐降低。调查区浮游植物细胞丰度的分布趋势主要受营养盐分布影响所致;长江冲淡水南下分支和南黄海次表层水的涌升分别为闽浙沿岸和南黄海中部带来充足的营养盐,从而导致了 2 个区域浮游植物细胞丰度的高值。调查中发现南黄海中部水华区域的浮游植物优势物种以链状硅藻为主,鉴于其较高的沉降速率和碳输出效率,南黄海中部春季硅藻水华在该海域碳汇中的贡献值得后续的深入探索。

致谢:中国科学院海洋研究所“科学三号”科研调查船提供采样平台,中国科学院海洋研究所研究生刘华健、田梓杨和李庆洁进行现场采样。

参考文献 (References):

- [1] HUANG B Q, LIU Y, CHEN J X, et al. Temporal and spatial distribution of size-fractionized phytoplankton biomass in East China Sea and Huanghai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2006, 28(2): 156-164. 黄邦钦, 刘媛, 陈纪新, 等. 东海、黄海浮游植物生物量的粒级结构及时空分布[J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 156-164.
- [2] TURNER J T. Zooplankton fecal pellets, marine snow, phytodetritus and the ocean's biological pump[J]. Progress in Oceanography, 2015, 130: 205-248.
- [3] SHI X Y, ZHANG T, ZHANG C S, et al. Spatial and temporal distribution of particulate organic carbon in Yellow Sea and East China Sea[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(1): 1-6. 石晓勇, 张婷, 张传松, 等. 黄海、东海颗粒有机碳的时空分布特征[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 1-6.
- [4] GUO Y J. The characteristics of Genus *Chaetoceros* Ehrenberg in the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963, 5(4): 222-331. 郭玉洁. 黄海角毛藻属(*Genus Chaetoceros* Ehrenberg)区系的性质[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(4): 222-331.
- [5] MAO X H, LI R X. The distribution and ecological characteristics of planktonic dinoflagellates in the continental shelf of northern East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1984, 6(5): 672-677. 毛兴华, 李瑞香. 东海北部陆架区浮游甲藻的分布及其生态特征[J]. 海洋学报, 1984, 6(5): 672-677.
- [6] LI R X, MAO X H. Dinoflagellates in continental shelf of East China Sea[J]. Journal of Marine Sciences, 1985, 3(1): 41-45. 李瑞香, 毛兴华. 东海陆架区的甲藻[J]. 东海海洋, 1985, 3(1): 41-45.

- [7] KANG Y D. The characteristics of phytoplankton and its relationship with fishery in Yellow Sea[J]. Progress in Fishery Sciences, 1986, 7(7): 103-107. 康元德. 黄海浮游植物的生态特点及其与渔业的关系[J]. 海洋水产研究, 1986, 7(7): 103-107.
- [8] LIN J M. Planktonic dinoflagellates in East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1994, 16(2): 110-115. 林金美. 东海浮游甲藻类的分布[J]. 海洋学报, 1994, 16(2): 110-115.
- [9] WANG J. Study on phytoplankton in the Yellow Sea in spring[J]. Marine Fisheries Research, 2001, 22(1): 56-61. 王俊. 黄海春季浮游植物的调查研究[J]. 海洋水产研究, 2001, 22(1): 56-61.
- [10] TAN S J, GONG X Z, SUN J, et al. The phytoplankton community in spawning ground of the East China Sea and its adjacent waters in spring[J]. Marine Sciences, 2009, 33(8): 5-10. 谭书杰, 宫相忠, 孙军, 等. 春季东海产卵场及其邻近海域的浮游植物群落[J]. 海洋科学, 2009, 33(8): 5-10.
- [11] ZHAO R, SUN J, SONG S Q. Phytoplankton in the Yangtze River estuary and its adjacent waters in spring 2006[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(4): 421-428. 赵冉, 孙军, 宋书群. 2006 年春季长江口及其邻近水域浮游植物[J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 421-428.
- [12] ZHAO Q B, SUN J, LI D, et al. Seasonal changes of the phytoplankton along hypoxia area and adjacent waters in the East China Sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2366-2379. 赵其彪, 孙军, 李丹, 等. 东海低氧区及邻近水域浮游植物的季节变化[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2366-2379.
- [13] LIN M, LI Y. Interdecadal variation of phytoplankton assemblage in Changjiang River estuary in spring[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(2): 303-311. 林梅, 李扬. 长江口海域春季浮游植物的年纪变化[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(2): 303-311.
- [14] UTERMÖHL H. Zur verfullkonnung der quantitative phytoplankton-methodik[J]. Mitteilungen-Internationale Vereinigung fuer Theoretische und Angewandte Limnologie, 1958, 17: 47-71.
- [15] NORUSSIS M J. SPSS for Windows 7.5: guide to data analysis[M]. Chicago, USA: Prentice Hall, 1997: 135-149.
- [16] ZHANG S, LENG X Y, FENG Y Y, et al. Ecological provinces of spring phytoplankton in the Yellow Sea: species composition[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(8): 114-125.
- [17] TIAN W, SUN J. Later spring phytoplankton community in Southern Yellow Sea in 2009[J]. Marine Sciences, 2011, 35(6): 19-24. 田伟, 孙军. 2009 年晚春南黄海南部浮游植物群落[J]. 海洋科学, 2011, 35(6): 19-24.
- [18] SUN J, TIAN W. Phytoplankton in Yangtze River estuary and its adjacent waters in spring in 2009: species composition and size-fractionated chlorophyll *a* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 235-242. 孙军, 田伟. 2009 年春季长江口及其邻近水域浮游植物——物种组成与粒级叶绿素 *a* [J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 235-242.
- [19] YU R C, ZHANG Q C, KONG F Z, et al. Status, impacts and long-term changes of harmful algal blooms in the sea area adjacent to the Changjiang river estuary[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1178-1186. 于仁成, 张清春, 孔凡洲, 等. 长江口及其邻近海域有害藻华的发生情况、危害效应与演变趋势[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1178-1186.
- [20] JIANG Z B, LIU J J, CHEN J F, et al. Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years[J]. Water Research, 2014, 54: 1-11.
- [21] MUSIELAK M M, KARP-BOSS L, JUMARS P A, et al. Nutrient transport and acquisition by diatom chains in a moving fluid[J]. Journal of Fluid Mechanisms, 2009, 638: 401-421.
- [22] HAMM C, MERKEL R, SPRINGER O, et al. Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection[J]. Nature, 2003, 421: 841-843.
- [23] TIAN W, SUN J, FAN X P, et al. Phytoplankton community in coastal waters of the East China Sea in spring 2008[J]. Advances in Marine Science, 2010, 28(2): 170-178. 田伟, 孙军, 樊孝鹏, 等. 2008 年春季东海近海浮游植物群落[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(2): 170-178.
- [24] WEN T T. Preliminary study of nutrients in Yellow Sea and the East China Sea and the cold eddy northeast of Taiwan[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010: 56-60. 温婷婷. 黄东海营养盐分布特征以及台湾东北部冷涡上升流的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 56-60.
- [25] WANG B D, WANG G Y, LIU F. Distribution features of the chemical parameters in the southern Yellow Sea in spring[J]. Marine Environmental Science, 1998, 17(3): 45-50. 王保栋, 王桂云, 刘峰. 南黄海春季海水化学要素的分布特征[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(3): 45-50.
- [26] MI T Z, YAO Q Z, MENG J, et al. Distributions of nutrients in the southern Yellow Sea and East China Sea in spring and summer 2011 [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(3): 678-688. 米铁柱, 姚庆祯, 孟佳, 等. 2011 年春、夏季黄海、东海营养盐分布特征研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 678-688.
- [27] CHENG J, SHI X Y, ZHANG C S, et al. Temporal and spatial distribution of particulate organic carbon in the Yellow Sea and East China Sea in spring[J]. Environmental Science, 2011, 32(9): 2505-2511. 程君, 石晓勇, 张传松, 等. 春季黄东海颗粒有机碳的时空分布

- 特征[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2505-2511.
- [28] SMAYDA T J. Harmful algal blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 1137-1153.
- [29] SUN J, GUO S J. Dinoflagellate heterotrophy[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 31(20): 6270-6286. 孙军, 郭术津. 甲藻的异养营养型[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 6270-6286.
- [30] WEN F, SUN X X, ZHEN S, et al. Spatial and seasonal variations of chlorophyll *a* and primary productivity in spring and summer in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(3): 438-444. 文斐, 孙晓霞, 郑珊, 等. 2011 年春、夏季黄、东海叶绿素 *a* 和初级生产力的时空变化特征[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(3): 438-444.
- [31] JIN J, LIU S M, REN J L, et al. Nutrient dynamics and coupling with phytoplankton species composition during the spring blooms in the Yellow Sea[J]. *Deep Sea Research, Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 97: 16-32.
- [32] YAMAGUCHI H, ISHIZAKA J, SISWANTO E, et al. Seasonal and spring interannual variations in satellite-observed chlorophyll-*a* in the Yellow and East China Seas: new datasets with reduced interference from high concentration of resuspended sediment[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 59: 1-9.
- [33] XUAN J L, ZHOU F, HUANG D J, et al. Physical processes and their role on the spatial and temporal variability of the spring phytoplankton bloom in the central Yellow Sea[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31: 61-70.
- [34] LIU X, HUANG B Q, HUANG Q, et al. Seasonal phytoplankton response to physical processes in the southern Yellow Sea[J]. *Journal of Sea Research*, 2015, 95: 45-55.
- [35] JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 40: 339-356.
- [36] WANG B D, WANG X L, ZHAN R. Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 58: 127-136.

Phytoplankton Community Structure in the Southern Yellow Sea and East China Sea and Its Relationship With Environmental Factors

GUO Shu-jin^{1,2,3}, YAO Qing-zhen^{4,5}, WEI Chuan-jie^{3,6}, SUN Xiao-xia^{1,2,3,7}

(1. Jiaozhou Bay National Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China;

2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China;

3. Center for Ocean Mega-Science, CAS, Qingdao 266071, China;

4. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

5. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

6. Center of Marine Environmental Engineering, Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China;

7. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A comprehensive survey was carried out in the southern Yellow Sea and East China Sea ($26^{\circ}00' \sim 36^{\circ}00' \text{N}$, $119^{\circ}30' \sim 125^{\circ}00' \text{E}$) during spring, 2017 (04-20—05-09). Phytoplankton community structure was studied with Utermöhl method, and its relationship between phytoplankton community structure and environmental factors was analyzed. A total of 146 taxa belonging to 55 genera of 4 phyla were identified. The phytoplankton community was mainly composed of Bacillariophyta and Dinophyta, and there were also a few species belonging to Chrysophyta and Cyanophyta. Most of the phytoplankton species were neritic species, and dominant species were *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Thalassiosira pacifica*, *Prorocentrum minimum* and *Paralia sulcata* in the southern Yellow Sea and *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *Paralia sulcata*, *Chaetoceros debilis* and *Prorocentrum dentatum* in the East China Sea. Cell abundance ranged from 0.07×10^3 to 547.87×10^3 cells/L with an average of 29.45×10^3 cells/L, and high values appeared in the central southern Yellow Sea and coastal East China Sea. A diatom bloom was observed in the 10~30 m layer in the central southern Yellow Sea. Phytoplankton cell abundance correlated significantly positive with silicate and phosphate concentration in the southern Yellow Sea, and showed a significant negative correlation with temperature and salinity but a significant positive correlation with silicate, nitrate and ammonium concentration in the East China Sea. Shannon-Wiener diversity index ranged from 1.05 to 4.86 with an average of 2.48, and high values appeared in the coastal area of the southern Yellow Sea. Pielou's evenness index ranged from 0.02 to 0.97 with an average of 0.57, and high values appeared in the coastal area of the southern Yellow Sea and offshore area of the East China Sea. This study could provide useful information for phytoplankton related ecological study in the Yellow Sea and East China Sea.

Key words: phytoplankton; community structure; environmental factors; spring; the southern Yellow Sea; the East China Sea

Received: July 14, 2019