

DOI: 10.5846/stxb201104130485

郭术津, 孙军, 戴民汉, 刘志亮. 2009 年冬季东海浮游植物群集. 生态学报 2012, 32(10): 3266–3278.

Guo S J, Sun J, Dai M H, Liu Z L. Phytoplankton assemblages in East China Sea in winter 2009. Acta Ecologica Sinica 2012, 32(10): 3266–3278.

2009 年冬季东海浮游植物群集

郭术津¹, 孙 军^{1,*}, 戴民汉², 刘志亮³

(1. 天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457;

2. 厦门大学海洋环境科学教育部重点实验室 厦门大学环境科学研究中心, 厦门 361005;

3. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘要: 2009 年 12 月 23 日—2010 年 1 月 5 日在东海海域(24°00′—32°00′N, 120°00′—128°00′E) 68 个站位进行了水文、化学和生物的综合调查, 应用 Utermöhl 方法对调查海域的浮游植物群集进行了研究。经 284 个浮游植物采水样品的分析, 共发现浮游植物 4 门 67 属 171 种(含 13 个未定种)。浮游植物群集主要由硅藻和甲藻组成, 还有少量的蓝藻和金藻, 物种以沿岸广温型为主, 优势种为: 具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、柔弱伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia delicatissima*)、安哥拉海链藻(*Thalassiosira angulata* = 并基海链藻 *Thalassiosira decipens*) 和细弱海链藻(*Thalassiosira subtilis*) 等。调查浮游植物细胞丰度介于 0.356×10^3 — 142.578×10^3 个/L, 平均值为 14.137×10^3 个/L; 硅藻占浮游植物细胞丰度的比例最大, 介于 0.356×10^3 — 142.578×10^3 个/L, 平均值为 13.023×10^3 个/L; 其次为甲藻, 细胞丰度介于 0.356×10^3 — 11.378×10^3 个/L, 平均值为 1.177×10^3 个/L。调查海域表层浮游植物细胞丰度的平面分布由硅藻刻画, 高值区出现在调查区北部即长江口东北部海域, 甲藻在调查区南部和东南部丰度较高。细胞丰度在水体中的垂直分布趋势为先上升后下降, 最大值出现在 10m 层。从断面分布上看, 细胞丰度在调查区近岸和远岸较高、中部较低。Pearson 相关性分析表明, 调查区浮游植物细胞丰度与磷酸盐和硅酸盐浓度呈显著正相关, 与温度呈显著负相关, 与硝酸盐相关性不明显。

关键词: 浮游植物; 群集结构; 冬季; 东海

Phytoplankton assemblages in East China Sea in winter 2009

GUO Shujin¹, SUN Jun^{1,*}, DAI Minhan², LIU Zhiliang³

1 College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China

2 State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

3 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: Totally 284 phytoplankton water samples were collected in a multidisciplinary investigation in East China Sea (24°00′—32°00′N, 120°00′—128°00′E) from December 23th 2009 to January 5th 2010. Phytoplankton species composition and assemblage structure were studied by Utermöhl method. A total of 171 taxa which belong to 67 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 Cyanophyta and Chrysophyta. Most of the ecotypes of phytoplankton were temperate coastal species, and dominant species were *Paralia sulcata*, *Thalassionema nitzschioides*, *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *Thalassiosira angulata* and *Thalassiosira subtilis* etc. Cell abundance ranged from 0.356×10^3 to 142.578×10^3 cells/L with an average of 14.137×10^3 cells/L, of which Bacillariophyta was the major group ranging from 0.356×10^3 to 142.578×10^3 cells/L with an average of 13.023×10^3 cells/L, followed by Dinophyta, ranging from 0.356×10^3 to 11.378×10^3 cells/L with an average of 1.177×10^3 cells/L. Horizontally, the surface distribution of cell abundance in survey area was mainly

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421202)

收稿日期: 2011-04-13; 修订日期: 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: phytoplankton@163.com

<http://www.ecologica.cn>

dominated by Bacillariophyta and the high value appeared in the sea northeast of Changjiang estuary. Dinophyta mostly concentrated in the southern and southeast part of the survey area where Kuroshio water flowed by. Vertically, the maximum of cell abundance was found in subsurface water, and along with the increase of the depth cell abundance firstly increased then decreased. According to the Pearson correlation analysis, the distribution of phytoplankton cell abundance was positively correlated with phosphate and silicata, negatively correlated with temperature, and nitrate's effect on cell abundance wasn't obvious.

Key Words: phytoplankton; assemblage structure; winter; East China Sea

近年来,人类社会工业的迅速发展、化石燃料的燃烧和森林的大量砍伐等活动引起了大气中的温室气体特别是 CO₂ 浓度的逐年上升,其所带来的“温室效应”在全球范围改变着气候和上层海洋生态系统,影响到了人类的生存环境。浮游植物作为海洋生态系统的初级生产者,通过光合作用吸收 CO₂ 影响着全球的碳循环过程^[1],对海洋碳通量和全球气候的变化有着非常重要的影响。不同的浮游植物物种和类群具有不同的 CO₂ 吸收能力,其碳循环生态过程也不一样,因此研究海洋浮游植物群落结构的变化与全球变化的关系也是当今海洋生态学研究热点^[2]。

中国东海海域受长江冲淡水、苏北沿岸流、闽浙沿岸流、台湾暖流和黑潮等水系影响,水文条件复杂,浮游植物的物种组成、丰度变化及群集结构不同季节呈现不同的特点,一直是我国海洋浮游植物研究的重点区域。国内该海域浮游植物群落研究始于 20 世纪 50 年代,早期的研究主要通过分析浮游植物的网采样品来进行^[3-8],这种方法容易遗漏小粒径的浮游植物,并且不能获得浮游植物的在水体中的垂直分布信息;随后,应用国际通用方法——Utermöhl 方法^[9]来定量研究浮游植物的工作也在东海海域展开,但多集中在长江口近岸海域^[10-17]。国外工作者对东海浮游植物群集也进行了相关研究,Furuya 等对东海冬季 PN 断面浮游植物的群集进行了研究,并将其分为近岸群集和远岸群集两大类^[18];Chiang 等对东海陆架区的硅藻群集进行了不同季节的研究,并分析了群集分布与水团的关系^[19-20];Chen 研究了台湾东北部海域浮游植物的群集结构,分析了上升流对浮游植物群落的影响^[21]。以上研究多把注意力集中于东海部分海域,如长江口近岸、PN 断面和台湾东北部海域,或者只研究浮游植物群落中的硅藻群集,缺乏东海海域大尺度范围浮游植物群落 Utermöhl 方法研究的资料。

本文报道了 2009 年冬季东海海域(24°00′—32°00′N, 120°00′—128°00′E)浮游植物 Utermöhl 方法研究的结果,分析了调查区浮游植物的物种组成、细胞丰度和群落分布特征,并对调查区浮游植物与环境因子进行了 Pearson 相关性分析(Pearson correlation analysis, PCA),以期为相关的生态系统和碳循环研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查站位

2009 年 12 月 23 日—2010 年 1 月 5 日在东海海域(24°00′—32°00′N, 120°00′—128°00′E)设置的 68 个站位上进行了水文、化学和生物的综合调查,根据调查海域水团的不同在采样区设置了 5 个断面(图 1)。

1.2 样品采集与分析

现场使用携带 Seabird 917Plus CTD 的 Rosette 采水器,按照标准层采集水样,CTD 同时测量温度、盐度和深度等理化参数。标准层的设置为 2、15、25、50、75、100、125、150m 和 200m,水深不足 200m 的站位取海底以上 2m 水层。取 250mL 水样置于大口 PE 样品瓶中,加中性甲醛溶液固定(终浓度 1%)。样品带回实验室按 Utermöhl 方法进行分析。取 25ml 浮游植物亚样品于 Hydro-bios 的 Utermöhl 计数框,静置沉降 24h 后,在 AO 倒置显微镜 200 或 400 倍下进行物种鉴定与计数。细胞丰度的统计和误差处理参考孙军等^[9]。营养盐(硝酸盐、亚硝酸盐、硅酸盐、磷酸盐)样品的取样和分析参考《海洋调查规范》^[22]进行测定。

1.3 数据处理

优势度(Y)计算公式如下^[23]:

<http://www.ecologica.cn>

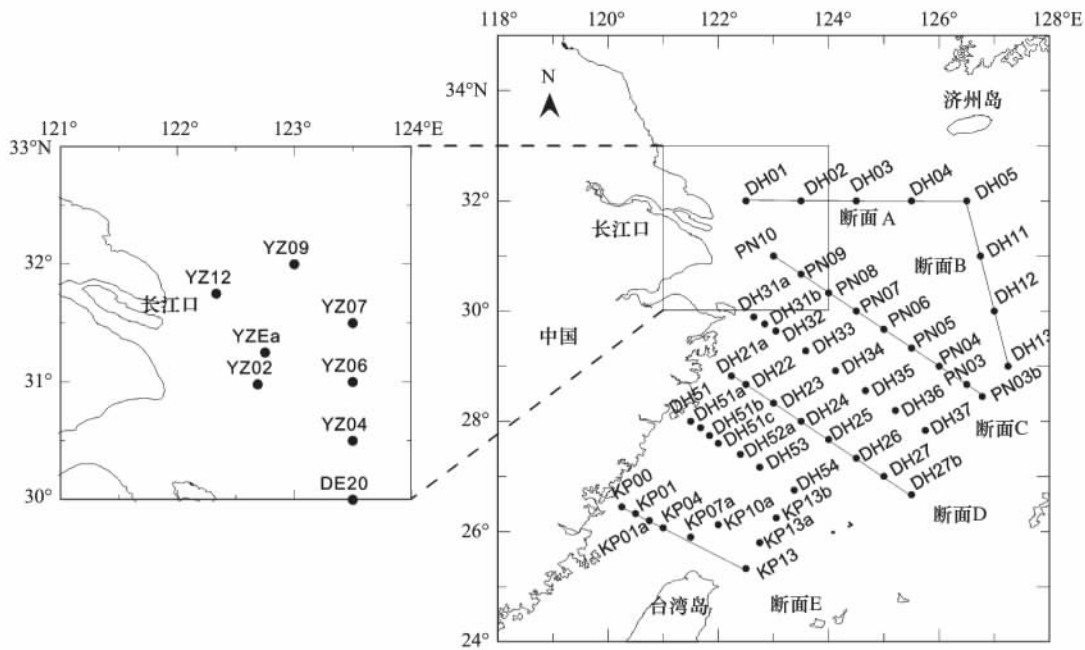


图1 2009年冬季东海调查海域和站位

Fig.1 Study area and sampling stations of ECS in winter 2009

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

式中 n_i 为全部样品中第 i 个种的总细胞丰度; N 为全部样品中所有物种的总细胞丰度; f_i 为第 i 个种在全部样品中的出现频率。

浮游植物与环境因子的关系采用 Pearson 相关性分析, 浮游植物各项指标数据与环境参数经过 $\lg(x+1)$ 转换后, 应用 SPSS14.0 软件计算其相关系数以及显著性水平。

2 结果与分析

2.1 海区环境特征

调查海域表层温、盐度分布见图 2。由图可看出, 调查区冬季表层温、盐度均呈近岸低、远岸高的趋势。由 13°C 等温线和 31psu 等盐线可以看出, 长江口近岸和台湾海峡间狭长的闽浙沿岸海域被低温、低盐的长江冲淡水所占据, 外侧即东部海域受黑潮水影响, 温、盐度较高 ($> 21^{\circ}\text{C}$, $> 34\text{psu}$)。由 15°C 等温线和 34psu 等盐线可以看出, 冬季黑潮水对东海的入侵较其他季节明显, 向西可以越过 124°E 与长江冲淡水混合。本次调查表层硝酸盐浓度存在两个高值区, 一个是长江口与台湾海峡间的闽浙近岸海域, 另一个是长江口东北部即调查区北部海域。调查区北部的硝酸盐高值区首先在长江口北角向东北方向延伸, 在 123°E 右转向东南并成钝水舌形态, 硝酸盐 $6\mu\text{mol/L}$ 等值线影响范围向东可达 125°E , 向南可超过 31°N 。调查区受低温、低盐、高营养盐的长江冲淡水和高温、高盐、低营养盐的黑潮水的影响, 两者决定了东海海域水文的基本格局。

调查区断面温度 (T) 和盐度 (S) 分布见图 3。冬季调查区温、盐度垂直分布比较均匀, 从近岸到远岸逐渐升高。C 断面的近岸 PN10 站位受长江冲淡水影响明显 ($T < 16^{\circ}\text{C}$, $S < 33.8\text{psu}$, $N > 5\mu\text{mol/L}$), 外侧的 PN03 和 PN03b 站位 70m 以上水层受黑潮表层水影响明显 ($T > 21^{\circ}\text{C}$, $S > 34.5\text{psu}$, $N < 1\mu\text{mol/L}$), PN03 站位 70m 以下水层由温度和硝酸盐浓度的分布可看出黑潮水的涌升。D 断面位于调查区中部, 温、盐度分布与 C 断面类似, 近岸的 DH21a、DH22 站位受贴岸南下的长江冲淡水影响明显 ($T < 17^{\circ}\text{C}$, $S < 34\text{psu}$, $N > 6\mu\text{mol/L}$), 远岸的 DH27b 站位受黑潮水影响 ($T > 22^{\circ}\text{C}$, $S > 34.5\text{psu}$, $N < 1\mu\text{mol/L}$)。E 断面位于调查区南部, 近岸站位水体垂直混合均匀, 外侧站位水体存在轻微层化现象, 由断面盐度分布可看出 KP01a 站位的 50m 水层黑潮水对陆架的入侵, 但在温度分布上体现不明显。

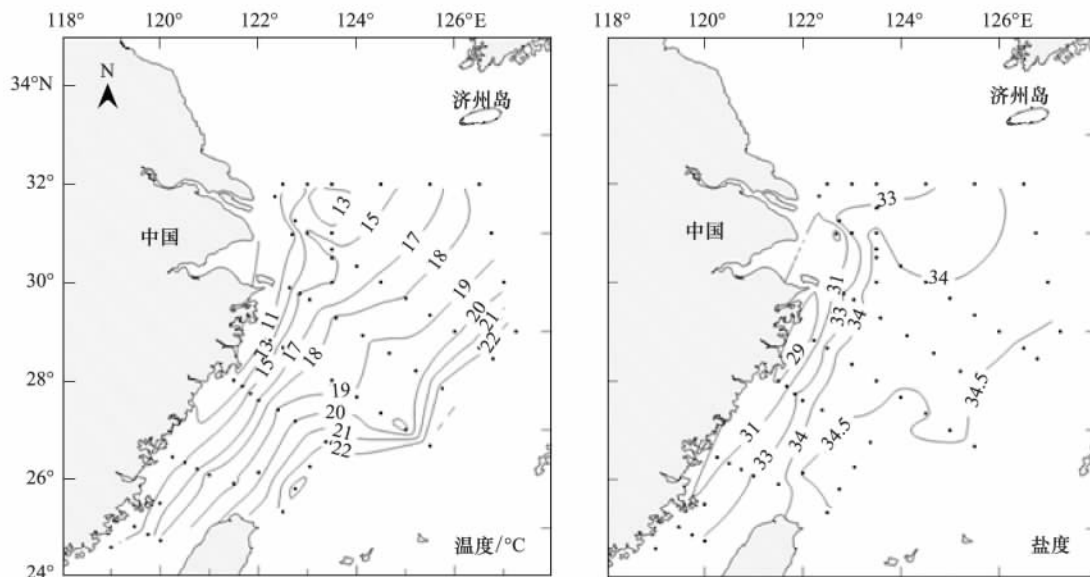


图2 调查海域表层温度和盐度的平面分布

Fig. 2 Distribution of temperature and salinity in surface water in the survey area

2.2 浮游植物物种组成

本次调查通过对 284 个浮游植物样品的分析,共发现浮游植物 4 门 67 属 171 种(含 13 个未定种),其中硅藻门 43 属 114 种,甲藻门 21 属 53 种,蓝藻门 1 属 1 种,金藻门 2 属 3 种,硅藻和甲藻是调查海域的主要浮游植物功能群。调查区浮游植物优势物种见表 1,可以看出冬季具槽帕拉藻优势度明显高于其他物种。调查区浮游植物物种以沿岸广温型为主,受黑潮水影响,调查区外侧海域出现部分暖水性种如菱软几内亚藻 (*Guinardia flaccida*) 和鸟尾藻 (*Ornithocercus* spp.) 等。

表 1 调查区浮游植物优势物种

Table 1 Phytoplankton dominant species in survey area

物种 Taxa	丰度比例 Percentage/%	频度 f_i Frequency	优势度 Y Dominance
具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i> (Ehrenberg) Cleve*	44.69	0.32	0.1432
菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i> Grunow	6.12	0.28	0.0170
柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (Cleve) Heiden*	3.58	0.43	0.0154
安哥拉海链藻 <i>Thalassiosira angulata</i> (Gregory) Hasle	2.57	0.28	0.0071
细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i> (Ostenfeld) Gran	0.04	0.13	0.0061
虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i> Ehrenberg	0.02	0.28	0.0046
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> Lauder	0.02	0.15	0.0037
伏氏海线藻 <i>Thalassionema frauenfeldii</i> (Grunow) Hallegraeff*	0.16	0.17	0.0028
羽状环毛藻 <i>Corethron pennatum</i> Hansen	0.01	0.22	0.0027
相似曲舟藻 <i>Pleurosigma affine</i> Grunow	0.01	0.18	0.0020

* 种名更改参见文献^[26]

调查区物种丰富度、优势种组成和细胞丰度与历史资料比较见表 2,由于往年相当一部分调查集中在长江口近岸海域(30°30′—32°00′N, 121°00′—123°30′E),为增强可比性,本文将该海域的站位数据也拿出来作了比对。比较发现(表 2),冬季无论在长江口近岸还是整个东海海域,具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)均为首要优势种且优势度明显,其他季节则以骨条藻(*Skeletonema* spp.)、柔弱伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia delicatissima*)和菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)为主,而具槽帕拉藻优势度不明显。

<http://www.ecologica.cn>

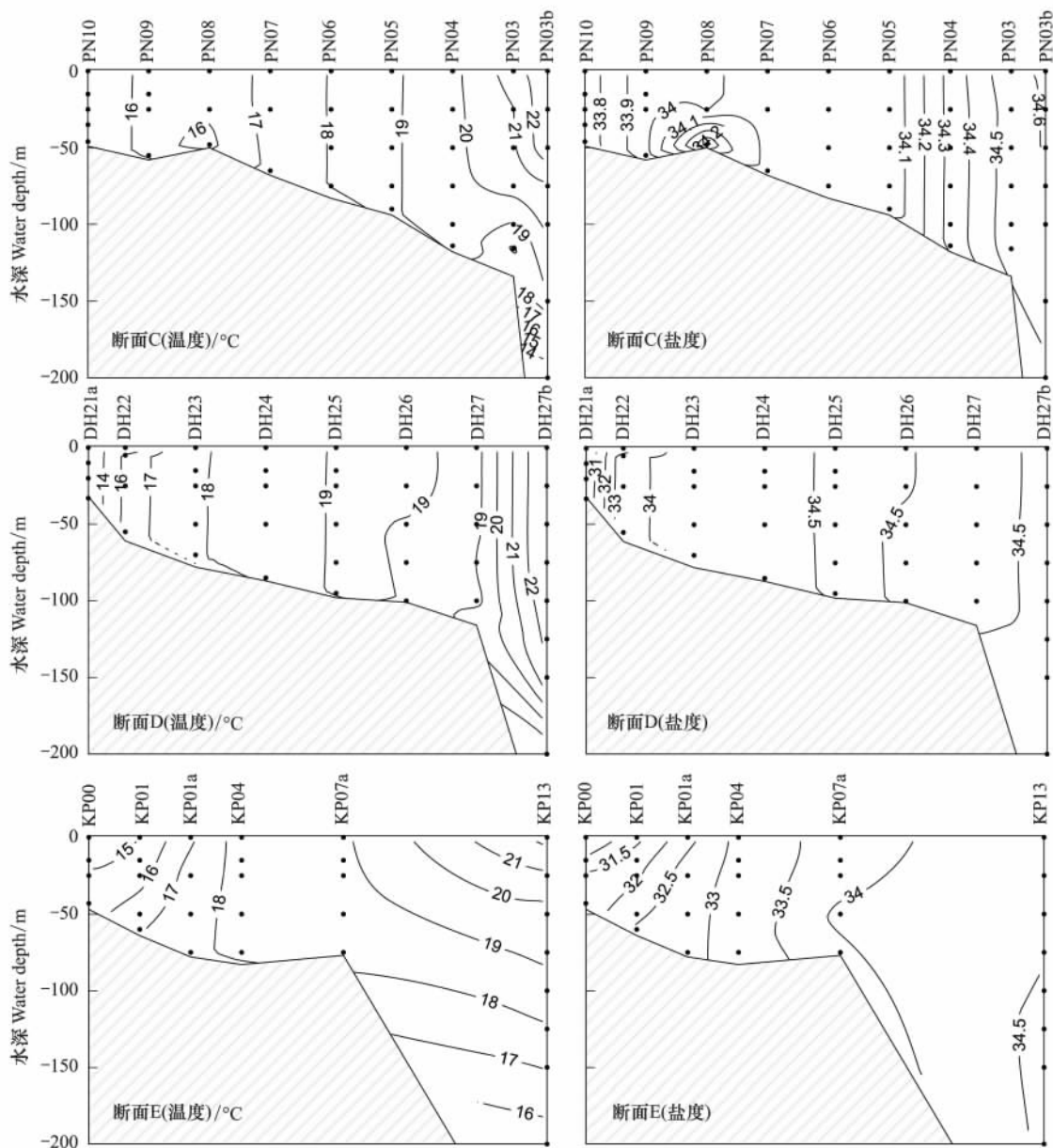


图3 调查区 C、D 和 E 断面温度与盐度分布

Fig. 3 Vertical profiles of temperature and salinity along Section C, D and E in the survey area

2.3 浮游植物细胞丰度特征

2.3.1 细胞丰度的总体特征

调查海域浮游植物的细胞丰度介于 0.356×10^3 — 142.578×10^3 个/L, 平均值为 14.137×10^3 个/L; 硅藻占浮游植物细胞丰度的比例最大, 介于 0.356×10^3 — 142.578×10^3 个/L, 平均值为 13.023×10^3 个/L; 其次为甲藻, 细胞丰度介于 0.356×10^3 — 11.378×10^3 个/L, 平均值为 1.177×10^3 个/L。最优势种具槽帕拉藻的细胞丰度介于 1.067×10^3 — 137.600×10^3 个/L, 平均值为 19.302×10^3 个/L。

2.3.2 细胞丰度的平面分布

调查海域浮游植物细胞丰度表层分布见图 4。本次调查表层浮游植物细胞丰度介于 0.711×10^3 — 106.667×10^3 个/L, 平均值为 15.541×10^3 个/L; 硅藻所占比例较大, 介于 0.711×10^3 — 105.955×10^3 个/L, 平均值为 13.185×10^3 个/L; 其次为甲藻, 介于 0.356×10^3 — 3.556×10^3 个/L, 平均值为 1.373×10^3 个/L。本次调查,

表层浮游植物细胞丰度的平面分布主要由硅藻刻画, 高值区出现在调查区北部即长江口东北部海域 ($>60 \times 10^3$ 个/L) (图 4a b), 附近海域主要优势种为具槽帕拉藻, 在 DH03 站位丰度高达 100.978×10^3 个/L, 占到了总浮游植物细胞丰度的 90%; 甲藻细胞丰度较低, 主要集中在调查区南部和东南部, 优势物种为鸟尾藻、科氏角藻 (*Ceratium furca*)、尖甲藻 (*Oxytoxum* spp.) 和裸甲藻 (*Gymnodinium* spp.) 等。

表 2 调查海域物种丰富度、优势种组成及细胞丰度与历史资料比较

Table 2 Comparison of species richness, dominant species and cell abundance among historical data in survey area

位置 Location	时间 Time	物种数 Richness	优势种 Dominant species	丰度 Abundance ($\times 10^3$ 个/L)	方法 Method	参考文献 Reference
24°00'—32°00'N 120°00'—128°00'E	2009-12— 2010-01	171	参考表 1	13.552	Utermöhl	本文
30°30'—32°00'N 121°00'—123°00'E	2009-12— 2010-01	77	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i> 菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i> 柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> 骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp. 虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	28.245	Utermöhl	本文
30°30'—32°30'N 121°00'—123°30'E	2006-02—03	116	具槽帕拉藻 <i>P. sulcata</i> 离心列海链藻 <i>Thalassiosira excentrica</i> 圆海链藻 <i>Th. rotula</i> 辐射圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i>	9.149	Utermöhl	[17]
26°00'—34°00'N 121°00'—126°00'E	2006-06	130	具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i> 米氏凯伦藻 <i>Karenia mikimotoi</i> 尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> 柔弱伪菱形藻 <i>P. delicatissima</i> 锥状斯克里普藻 <i>Scrippsiella trochooides</i> 具槽帕拉藻 <i>P. sulcata</i>	147	Utermöhl	[10]
30°30'—32°30'N 121°00'—123°00'E	2006-08	134	脆指管藻 <i>Dactyliosolen fragilissima</i> 中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	290.92	Utermöhl	[12]
24°00'—32°00'N 120°00'—127°00'E	2006-11—12	145	菱形海线藻 <i>T. nitzschioides</i> 圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i> 丹麦圆柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i> 斯氏几内亚藻 <i>Guinardia striata</i> 尖刺伪菱形藻 <i>P. pungens</i>	4.92	Utermöhl	[11]
30°30'—32°30'N 121°00'—123°30'E	2006-11	94	圆海链藻 <i>Th. rotula</i> 骨条藻 <i>S. spp.</i> 虹彩圆筛藻 <i>C. oculus-iridis</i> 旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i> 具槽帕拉藻 <i>P. sulcata</i> 柔弱伪菱形藻 <i>P. delicatissima</i>	4.39	Utermöhl	[13]
30°30'—32°30'N 121°00'—123°30'E	2005-02—03	130	具槽帕拉藻 <i>P. sulcata</i> 中肋骨条藻 <i>S. costatum</i> 圆海链藻 <i>Th. rotula</i> 标志布莱克里亚藻 <i>Bleakeleya notata</i> 辐射圆筛藻 <i>C. radiatus</i> 离心列海链藻 <i>Th. excentrica</i>	10.1	Utermöhl	[16]
30°30'—32°30'N 121°00'—123°30'E	2005-09	98	多尼骨条藻 <i>Skeletonema dohrnii</i> 尖刺伪菱形藻 <i>P. pungens</i> 柔弱几内亚藻 <i>Guinardia delicatula</i> 翼鼻状藻细长变型 <i>Proboscia alata</i> f. <i>gracillima</i> 柔弱伪菱形藻 <i>P. delicatissima</i>	256.4	Utermöhl	[14]
30°30'—32°30'N 121°00'—123°30'E	2005-11	95	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i> 具槽帕拉藻 <i>P. sulcata</i> 菱形海线藻 <i>T. nitzschioides</i> 圆海链藻 <i>Th. rotula</i>	2.04	Utermöhl	[15]

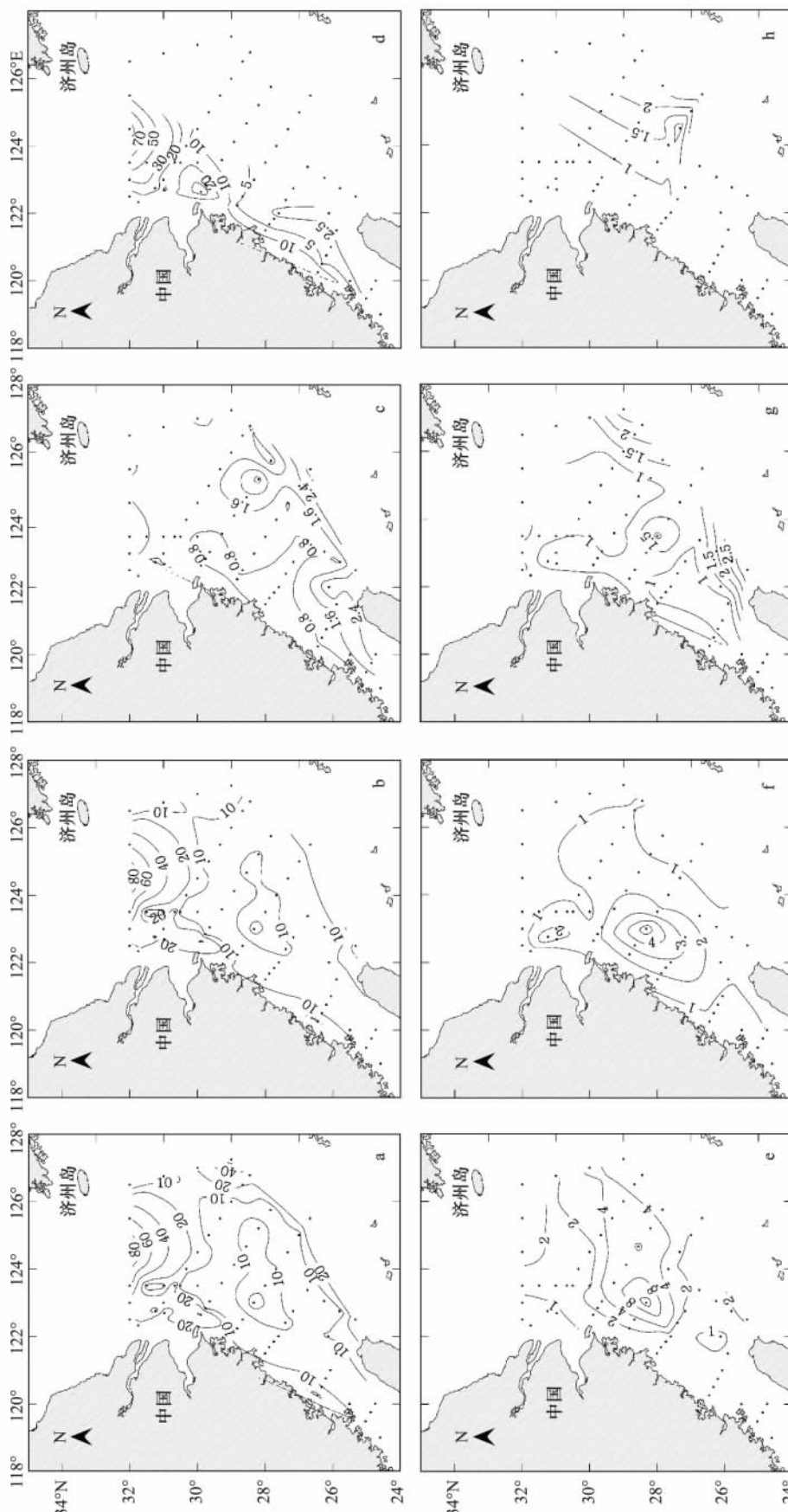


图4 调查海域表层浮游植物细胞丰度($\times 10^3$ 个/L)分布
 Fig.4 Horizontal distribution of phytoplankton cell abundance ($\times 10^3$ 个/L) in surface water in survey area.
 a. 浮游植物 Phytoplankton; b. 硅藻 Bacillariophyta; c. 甲藻 Dinophyta; d. 具槽帕拉藻 *Paralia sulcata*; e. 菱形海线藻 *Thalassionema nitzschoides*;
 f. 柔弱伪菱形藻 *Pseudo-nitzschia delicatissima*; g. 安哥拉海线藻 *Thalassiosira angulata*; h. 细弱海线藻 *Thalassiosira subtilis*

2.3.3 细胞丰度的垂直分布

调查海域浮游植物细胞丰度的垂直分布见图 5。冬季浮游植物细胞丰度在水体中的垂直分布趋势为先上升后下降, 最大值出现在 10m 层。主要优势种具槽帕拉藻和菱形海线藻细胞丰度的最大值均出现在 10m 层, 由于两者在细胞丰度和频度上的绝对优势, 其垂直分布刻画了浮游植物和硅藻的垂直分布。甲藻细胞丰度较低, 对细胞丰度总体分布影响不大。

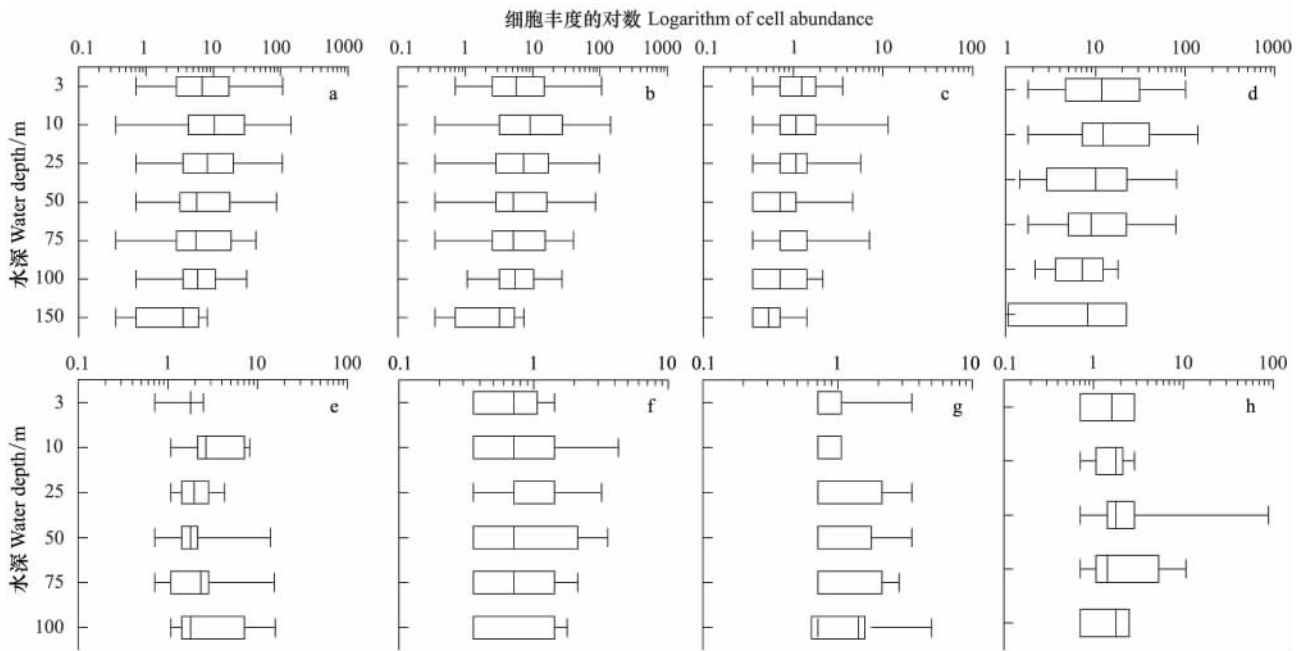


图 5 调查海域浮游植物细胞丰度在水层中的垂直分布的 Box-Whisker 作图

Fig. 5 Vertical distribution of phytoplankton cell abundance in survey area in Box-Whisker plot

2.3.4 细胞丰度的断面分布

调查海域浮游植物细胞丰度的断面分布见图 6。

A 断面浮游植物细胞丰度介于 1.067×10^3 — 142.578×10^3 个/L, 平均值为 45.904×10^3 个/L; 硅藻细胞丰度介于 1.067×10^3 — 142.578×10^3 个/L, 平均值为 44.351×10^3 个/L; 甲藻细胞丰度介于 0.356×10^3 — 1.777×10^3 个/L, 平均值为 0.651×10^3 个/L。断面浮游植物细胞丰度在水体中的垂直分布较均匀, 在 DH03 站位的 15m 层出现细胞丰度最高值, 优势种为具槽帕拉藻。

B 断面浮游植物细胞丰度介于 1.067×10^3 — 70.000×10^3 个/L, 平均值为 11.609×10^3 个/L; 硅藻细胞丰度介于 1.067×10^3 — 20.267×10^3 个/L, 平均值为 6.827×10^3 个/L; 甲藻细胞丰度介于 0.356×10^3 — 1.778×10^3 个/L, 平均值为 0.948×10^3 个/L。B 断面浮游植物细胞高值出现在 DH13 站位的表层, 优势种为铁氏束毛藻 (*Trichodesmium thiebaultii*)。

C 断面浮游植物细胞丰度介于 1.422×10^3 — 34.133×10^3 个/L, 平均值为 12.944×10^3 个/L; 硅藻细胞丰度介于 1.067×10^3 — 33.067×10^3 个/L, 平均值为 11.319×10^3 个/L; 甲藻细胞丰度介于 0.356×10^3 — 2.133×10^3 个/L, 平均值为 0.970×10^3 个/L。C 断面浮游植物细胞丰度高值区出现在受长江冲淡水影响明显的 PN10 和 PN09 站位, 优势种为具槽帕拉藻; 在外侧的 PN03b 站位也出现了细胞丰度高值, 优势种为铁氏束毛藻。

D 断面浮游植物细胞丰度介于 0.356×10^3 — 40.533×10^3 个/L, 平均值为 8.967×10^3 个/L; 硅藻细胞丰度介于 0.711×10^3 — 27.022×10^3 个/L, 平均值为 7.920×10^3 个/L; 甲藻细胞丰度介于 0.356×10^3 — 3.556×10^3 个/L, 平均值为 1.081×10^3 个/L。断面存在两个细胞丰度高值区, 一个是近岸的 DH23 和 DH24 站位上层水体, 优势种为菱形海线藻和柔弱伪菱形藻; 另一个是远岸的 DH27b 站位, 优势种为菱形海线藻和铁氏束毛藻。

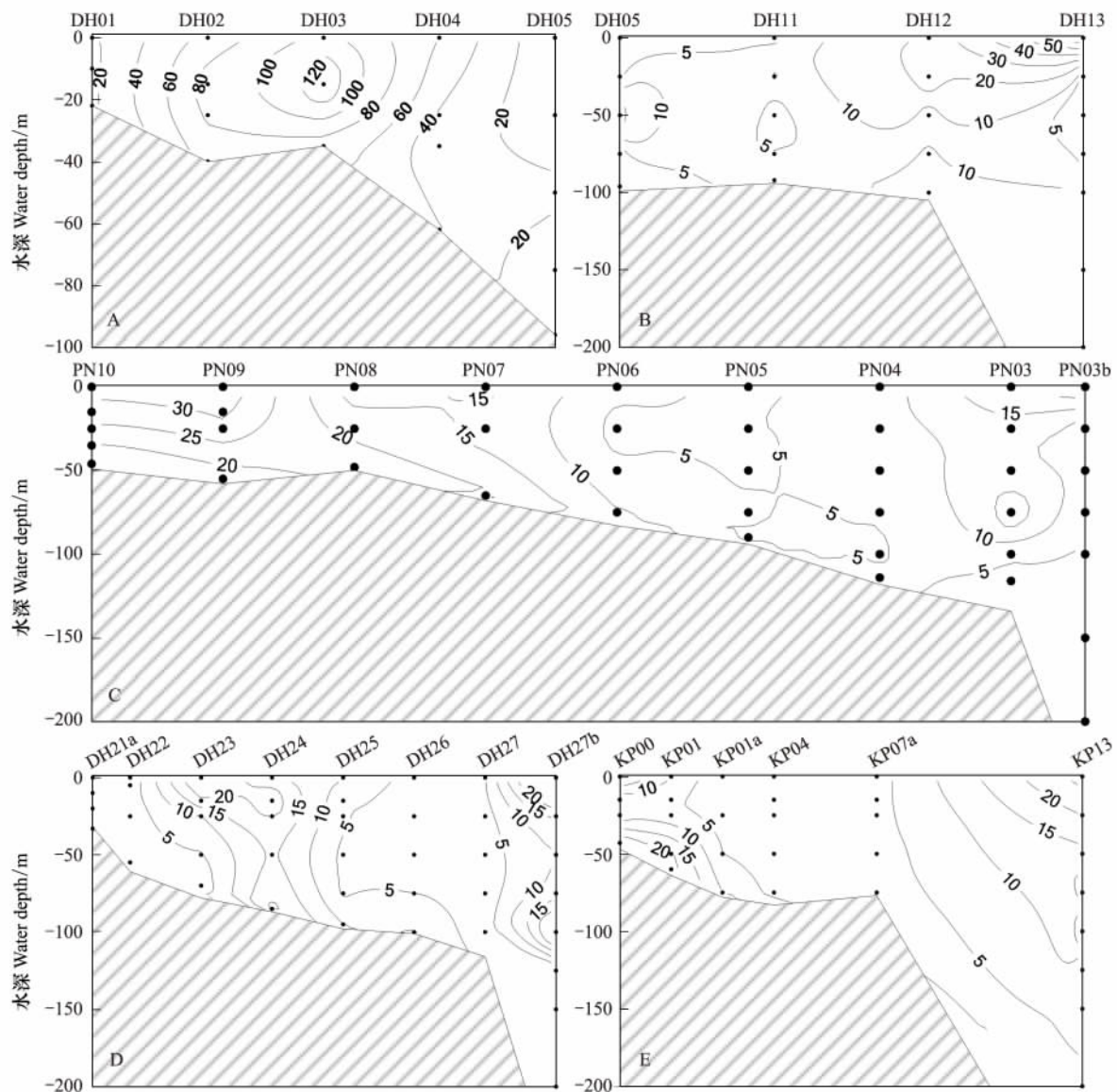


图 6 调查海域浮游植物细胞丰度(×10³个/L) 断面分布

Fig. 6 Section distribution of cell abundance of phytoplankton in survey area

A—E 表示断面

E 断面浮游植物细胞丰度介于 $0.356 \times 10^3 - 27.733 \times 10^3$ 个/L, 平均值为 8.075×10^3 个/L; 硅藻细胞丰度介于 $0.356 \times 10^3 - 25.956 \times 10^3$ 个/L, 平均值为 7.483×10^3 个/L; 甲藻细胞丰度介于 $0.355 \times 10^3 - 3.200 \times 10^3$ 个/L, 平均值为 1.079×10^3 个/L。断面存在两个细胞丰度高值区, 一个是近岸的 KP00 和 KP01 站位底层, 优势种为具槽帕拉藻; 另一个是外海的 KP13 站位表层, 优势种为角毛藻 (*Chaetoceros* spp.)。

2.4 Pearson 相关性分析

调查海域浮游植物细胞丰度与环境因子的 Pearson 相关性分析结果见表 3。冬季调查区浮游植物细胞丰度与温度、磷酸盐和硅酸盐相关性明显, 与温度显著负相关, 与磷酸盐和硅酸盐显著正相关, 与硝酸盐和盐度相关性不明显。硅藻细胞丰度与温度和盐度呈显著负相关, 与硅酸盐和磷酸盐呈显著正相关。甲藻细胞丰度与硝酸盐呈显著负相关, 与其他环境因子相关性不明显。首要优势种具槽帕拉藻细胞丰度与环境因子的关系与浮游植物总丰度类似, 即与温度负相关, 与磷酸盐和硅酸盐显著正相关。

表 3 浮游植物细胞丰度与环境因子的 Pearson 相关性

Table 3 Pearson correlation analysis between phytoplankton cell abundance and environmental factors

物种 Species	温度 Temperature	盐度 Salinity	硅酸盐 Silicate	磷酸盐 Phosphate	硝酸盐 Nitrate
浮游植物 Phytoplankton	-0.225 **	-0.090	0.163 *	0.162 **	0.088
硅藻 Bacillariophyta	-0.250 **	-0.112 **	0.188 **	0.188 **	0.111
甲藻 Dinophyta	0.169	0.104	0.185	-0.234	-0.181 *
具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	-0.317 **	-0.060	0.262 *	0.338 **	0.139
菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	0.101	0.136	-0.215	0.245 *	0.277
柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	0.089	0.222 **	-0.206 *	-0.195	-0.228 **
安哥拉海链藻 <i>Thalassiosira angulata</i>	0.189	0.179	-0.196	-0.211	-0.201
细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i>	0.218	0.137	-0.283	-0.275	-0.206

* *. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * . 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

3 讨论

本次调查表层硝酸盐浓度存在两个高值区,一个是长江口与台湾海峡间的闽浙近岸海域,另一个是长江口东北部即调查区北部海域,这与附近海域的环流情况尤其是长江冲淡水的扩展途径有关。研究发现,冬季长江冲淡水出河口后主体受东北季风影响贴岸南下,少部分冲淡水左转扩展至长江口东北部,与贴岸南下的苏北沿岸流高营养盐水混合后一起向东南方向扩展,从而在东海北部海域形成营养盐高值区^[27-28]。冬季调查海域水体温、盐度垂直混合均匀(图 3),这主要因为季风强烈,东海大陆架水体的垂直混合均匀所致。资料显示,E 断面外侧即台湾东北部海域存在常年的上升流行为^[29],水体温度一般较低,本次调查并不明显,这可能与附近海域冬季水体温度降低有关^[30]。

与历史资料比较发现(表 2),具槽帕拉藻和骨条藻为冬季长江口近岸海域(30°30'—32°00'N,121°00'—123°30'E)的固定优势种,其他优势种如菱形海线藻、伪菱形藻、离心列海链藻和辐射圆筛藻等则交替出现。由于长江径流量在冬季的减小,本次调查骨条藻优势度并不明显。东海海域具槽帕拉藻在冬季优势度极为明显,这早在 Furuya 等人的研究中便已有体现^[18],本次调查在 DH03 站位的 3m 和 15m 水层其细胞丰度分别高达 137.600×10^3 个/L 和 100.978×10^3 个/L,占到了各自水层总浮游植物细胞丰度的 93.51% 和 87.65%。该物种在冬季主要分布在长江口东北部和闽浙沿岸等近岸海域,调查区中部和外侧分布较少(图 4d)。Shim 和 Cho 等人研究也发现,具槽帕拉藻更容易在近岸海域聚集^[32-33],这种分布趋势与其底栖种的生活习性是分不开的。具槽帕拉藻在 $1.6 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的低光照强度下适宜进行细胞分裂^[34],因此该藻对光照强度的要求较低;另外,具槽帕拉藻的分布与海水的透明度和温度有着较大的相关性,Asaoka 等人指出该物种容易聚集于透明度 <10m、温度 <15℃ 的水体^[31]。长江口东北部及闽浙沿岸海域,受长江冲淡水影响明显,水体温度较低(图 2a);同时长江冲淡水含有大量颗粒物,加上强烈的季风引起的水体扰动,上层水体中的泥沙含量大大增加,导致水体透明度降低,使得具槽帕拉藻在水体上部也得以繁殖(图 5d)。另外,水体扰动所带来的将具槽帕拉藻自下而上的输送作用也不可忽视。关于具槽帕拉藻生理机制方面的报道较少,但该物种由于其在冬季广泛的、高丰度的分布,对东海海域的物质循环和能量流动有着重要的影响。

东海海域浮游植物群落不同季节存在菱形海线藻、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)和柔弱伪菱形藻等几种常见的优势物种(表 2)。可以看出,这些物种以广温广布型为主,即使海区的环境不利于其生长,如低光强或寡营养盐,这些物种也能以较低的生物量广泛分布于整个海区;当水体环境利于浮游植物生长,如有陆源淡水汇入时,某些物种便会大量繁殖,演化成水华群集。由浮游植物细胞丰度在调查区近岸和远岸海域较高、在调查区中部较低的特点(图 4,图 6),可以将调查区浮游植物分成三部分:位于长江口近岸和闽浙沿岸海域的近岸群集,位于调查区外侧的东海-黑潮群集及占据剩余大部分东海海域的近海群集。近岸群集以具槽帕拉藻为主要优势种,东海-黑潮群集以铁氏束毛藻、科氏角藻和裸甲藻等为优势种,而近海群集则以菱形海线藻和伪菱形藻为优势种(图 4e, f)。

浮游植物细胞丰度与环境因子的 Pearson 相关性分析显示,浮游植物及主要优势种具槽帕拉藻和菱形海线藻的细胞丰度与磷酸盐呈现较好的正相关性,而与硝酸盐相关性不明显(表 3)。长江水的 $\text{DIN}/\text{PO}_4^{3-}$ 比值在 20—5000 范围内^[35],远远超过了 Redfield 系数($\text{N}/\text{P}=16$),因此在受长江冲淡水影响的东海海域很可能存在无机氮的相对过剩和无机磷的相对缺乏。王保栋等研究发现,在南黄海南部尤其是西南部、东海近岸及长江口以东海域,一年四季均有过量无机氮的存在, N/P 比值很高(>30),其过量无机氮面积可占整个黄、东海海域总面积的 $1/4—3/4$ ^[36],因此对于这些海域磷很可能是浮游植物的生长限制因素,本研究一定程度上也支持了这种推论。另外,浮游植物细胞丰度与硅酸盐的正相关性也较好,这主要是因为本次调查浮游植物的细胞丰度受硅藻刻画,硅藻对营养盐的偏嗜性很大程度上影响着浮游植物与营养盐的相关性。应该认识到,这只是一个季度的资料,而且同一海域的 N、P 营养盐限制是有季节性变化的,其他季节的浮游植物生长的限制性状况如何,还需要后续的研究积累。

4 结语

关于 2009 年冬季东海浮游植物群集可以获得以下几点认识:

- (1) 调查区浮游植物群集主要由硅藻和甲藻组成,优势物种为具槽帕拉藻、菱形海线藻、柔弱伪菱形藻、安哥拉海链藻和细弱海链藻等。
- (2) 调查区浮游植物细胞丰度的平面分布由硅藻刻画,高值区出现在调查区北部即长江口东北部海域,主要优势种为具槽帕拉藻;调查区外侧黑潮流经海域细胞丰度也不低,主要优势种为铁氏束毛藻。
- (3) 冬季调查区浮游植物细胞丰度在水体中的垂直分布比较均匀,随水深变化不明显。
- (4) Pearson 相关性分析显示,冬季东海海域浮游植物细胞丰度与磷酸盐和硅酸盐呈显著正相关性,与硝酸盐相关性不明显。

目前,东海海域大范围尺度不同季度浮游植物 Utermöhl 方法的研究有限,关于其不同季度间浮游植物优势物种的更替行为和营养盐限制因素尚不明朗,有待深入研究。

致谢:实验室何青、田伟、李欣和张健参与现场水样采集工作,特此致谢。

References:

- [1] Hugh W D, Deborah K S, Ken O B. Upper ocean carbon export and the biological pump. *Oceanography*, 2001, 14(4): 50–58.
- [2] Sarmiento J L, Toggweiler J R, Najjar R. Ocean carbon—cycle dynamics and atmospheric $p\text{CO}_2$. *Philosophical transactions of the royal society*, 1988, 325: 3–21.
- [3] Guo Y J, Yang Z Y. Phytoplankton ecological study on continental shelf in East China Sea in summer, 1976. *Studia Marina Sinica*, 1982, 19: 11–32.
- [4] Yu J L, Zhang Z Y, Chen Z D. Distribution of planktonic diatom on continental shelf of East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1983, 5(4): 519–525.
- [5] Mao X H, Li R X. Distribution and ecological feature of planktonic dinoflagellates on the northern continental shelf of East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1984, 6(5): 672–677.
- [6] Li R X, Mao X H. Dinoflagellates on the continental shelf of East China Sea. *Dong Hai Hai Yang*, 1985, 3(1): 41–55.
- [7] Qian S B, Chen G W. The ecological studies on the phytoplankton. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1986, 16(2): 26–55.
- [8] Guo Y J, Yang Z Y. Quantitative variation and ecological analysis of phytoplankton in the estuarine area of the Changjiang River. *Studia Marina Sinica*, 1992, 33: 167–189.
- [9] Sun J, Liu D Y, Qian S B. A quantitative research and analysis method for marine phytoplankton: An introduction to Utermöhl method and its modification. *Advances in Marine Science*, 2002, 20(2): 105–112.
- [10] Wang D, Sun J, Zhou F, Wu Y. Phytoplankton of Changjiang (Yangtze River) estuary hypoxia area and the adjacent East China Sea in June 2006. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(6): 619–627.
- [11] Wang D, Sun J, An B Z, Ni X B, Liu S M. Phytoplankton assemblages on the continental shelf of East China Sea in autumn 2006. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2435–2442.
- [12] Zhao R, Bai J, Sun J, Wang D, He Q. Phytoplankton assemblages in the Yangtze River Estuary and its adjacent water in summer. *Transaction of*

- Oceanology and Limnology ,2009(2) : 88-96.
- [13] Zhao R , Sun J , Bai J. Phytoplankton assemblages in Yangtze River Estuary and its adjacent water in autumn ,2006. Marine Sciences ,2010 ,38 (4) : 32-39.
- [14] Lun Q S , Sun J. Feature of phytoplankton assemblages in Yangtze River estuary and its relationship with environmental factors in summer 2005. Acta Ecologica Sinica ,2010 ,30(18) : 4967-4975.
- [15] Luan Q S , Sun J. Phytoplankton assemblage of the Yangtze river estuary and its adjacent waters in autumn ,2005. Resources and environment in the Yangtze basin ,2010 ,19(2) : 203-207.
- [16] He Q , Sun J , Luan Q S , Song S Q , Shen Z L , Wang D. Phytoplankton assemblage in Yangtze River estuary and its adjacent waters in winter time. Chinese Journal of Applied Ecology ,2007 ,18(11) : 2559-2566.
- [17] He Q , Sun J , Luan Q S , Yu Z M. Phytoplankton in Changjiang estuary and adjacent waters in winter. Marine Environmental Science ,2009 ,28 (4) : 361-365.
- [18] Furuya K , Kurita K , Odate T. Distribution of phytoplankton in the East China Sea in the winter of 1993. Journal of Oceanography ,1996 ,52: 323-333.
- [19] Chiang K P , Chen Y T , Gong G C. Spring distribution of diatom assemblages in the East China Sea. Marine Ecology Progress Series ,1999 ,186: 75-86.
- [20] Chiang K P , Chou Y H , Chang J. Winter distribution of diatom assemblages in the East China Sea. Journal of Oceanography ,2004 ,60: 1053-1062.
- [21] Chen Y L. Summer phytoplankton community structure in the Kuroshio current-related upwelling northeast of Taiwan. Terrestrial , Atmospheric and Oceanic Sciences ,1992 ,3(3) : 305-320.
- [22] State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T 12763. 4-91. Marine Chemistry Investigation , Protocol for Marine Investigation , Beijing: Standards Press of China ,1991: 1-54.
- [23] Sun J , Liu D Y. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies. Acta Oceanologica Sinica ,2004 ,26(1) : 62-75.
- [24] Ter Braak C F J. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. Ecology ,1986 ,67: 1167-1179.
- [25] Pielou E C. The interpretation of ecological data. John Wiley & Sons , New York ,1984.
- [26] Sun J , Liu D Y. The preliminary notion on nomenclature of common phytoplankton in china seas water. Oceanologia et Limnologia Sinica ,2002 ,33(3) : 271-286.
- [27] Wang B D. On the extension and nutrient transportation of the Changjiang river diluted water. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas ,1998 ,16(2) : 42-47.
- [28] Wang B D , Zang J Y. Distributions and transportation of nutrients in Changjiang river estuary and its adjacent sea areas. Acta Oceanologica Sinica ,2004 ,24(1) : 54-58.
- [29] Chern C S , Wang J. On the mixing of waters at a northern offshore area of Taiwan. Terrestrial , Atmospheric and Oceanic Sciences ,1990 ,1(3) : 297-306.
- [30] Liu K K , Gong G C , Lin S. The year-round upwelling at the shelf break near the northern tip of Taiwan as evidenced by chemical hydrography. Terrestrial , Atmospheric and Oceanic Sciences ,1992 ,3(3) : 243-276.
- [31] Asaoka O. Distribution of *Melosira sulcata* (Ehrenberg) Kützing , a diatom species , in the seas west of Japan. Oceanography ,1980 ,31: 1-13.
- [32] Shim J H , Cho B C. The intertidal benthic diatom community in the vicinity of Incheon , Korea. Journal of the Oceanological Society of Korea ,1984 ,9(1) : 135-150.
- [33] Choi J K , Shim J H. The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay , Yellow Sea. 3. Phytoplankton composition , standing crops , tychopelegic plankton. Journal of the Oceanological Society of Korea ,1986 ,21(3) : 156-170.
- [34] Saijo Y , Iizuka S , Asaoka O. Chlorophyll maxima in Kuroshio and adjacent area. Marine Biology ,1969 ,4 ,190-196.
- [35] Zhang J. Nutrient elements from some selected North China estuaries: Huanghe , Luanhe , Daliaohe and Yalujiang//Zhang J , ed. Biogeochemical study in the primary estuaries of China. Beijing: China Ocean Press ,1996 ,205-217.
- [36] Wang B D , Zhan R , Zang J Y. A preliminary study on the nutrient limitation of phytoplankton growth in the Huanghai Sea and the East China Sea. Acta Oceanologica Sinica ,2003 ,25(2) : 190-195.

参考文献:

- [3] 郭玉洁,杨则禹. 1976 年夏季东海陆架区浮游植物生态的研究. 海洋科学集刊,1982 ,19: 11-32.
- [4] 俞建奎,张子云,程兆第. 东海大陆架浮游硅藻的分布. 海洋学报,1983 ,5(4) : 519-525.

- [5] 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. 海洋学报,1984,6(5): 672-677.
- [6] 李瑞香,毛兴华. 东海陆架区的甲藻. 东海海洋,1985,3(1): 41-55.
- [7] 钱树本,陈国蔚. 长江口及济州岛邻近海域综合调查研究报告. 山东海洋学报,1986,16(2): 26-55.
- [8] 郭玉洁,杨则禹. 长江口浮游植物的数量变动及生态分析. 海洋科学集刊,1992,33: 167-189.
- [9] 孙军,刘东艳,钱树本. 一种海洋浮游植物定量研究分析方法——Utermöhl 方法的介绍及其改进. 黄渤海海洋,2002,20(2): 105-112.
- [10] 王丹,孙军,周锋,吴莹. 2006年6月长江口低氧区及邻近水域浮游植物. 海洋与湖沼,2008,39(6): 619-627.
- [11] 王丹,孙军,安佰正,倪晓波,刘素美. 2006年秋季东海陆架浮游植物群集. 应用生态学报,2008,19(11): 2435-2442.
- [12] 赵冉,白洁,孙军,王丹,何青. 2006年夏季长江口及其邻近水域浮游植物群集. 海洋湖沼通报,2009(2): 88-96.
- [13] 赵冉,孙军,白洁. 2006年秋季长江口及其邻近水域浮游植物群集. 海洋科学,2010,38(4): 32-39.
- [14] 栾青杉,孙军. 2005年夏季长江口水域浮游植物群集特征及其与环境因子的关系. 生态学报,2010,30(18): 4967-4975.
- [15] 栾青杉,孙军. 2005年秋季长江口及其邻近水域浮游植物群集. 长江流域资源与环境,2007,31(3): 445-450.
- [16] 何青,孙军,栾青杉,宋书群,沈志良,王丹. 长江口及其邻近水域冬季浮游植物群集. 应用生态学报,2007,18(11): 2559-2566.
- [17] 何青,孙军,栾青杉,俞志明. 冬季长江口及其邻近水域的浮游植物. 海洋环境科学,2009,28(4): 361-365.
- [22] 国家质量技术监督局. GB/T 12763.4-91. 海洋调查规范——海水化学要素观测. 北京: 中国标准出版社,1991: 1-54.
- [23] 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.
- [26] 孙军,刘东艳. 中国海区常见浮游植物名更改初步意见. 海洋与湖沼,2002,33(3): 271-286.
- [27] 王保栋. 长江冲淡水的扩展及其营养盐的运输. 黄渤海海洋,1998,16(2): 42-47.
- [28] 王保栋,藏家业. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径. 海洋学报,2004,24(1): 54-58.
- [35] 张经. 若干北方河口中营养要素——黄河、滦河、大辽河、鸭绿江//张经. 中国主要河口的生物地球化学研究. 北京: 海洋出版社,1996, 205-217.
- [36] 王保栋,战闰,藏家业. 黄海、东海浮游植物生长的营养盐限制性因素初探. 海洋学报,2003,25(2): 190-195.