

东海浮游植物数量分布与优势种

罗民波^{1,2}, 陆健健¹, 王云龙^{2,*}, 沈新强², 晁 敏²

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062

2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业部海洋与河口渔业重点开放实验室, 上海 200090)

摘要:根据 1997~2000 年东海 23°30′~33°N、118°30′~128°E 海域 4 个季节海洋调查资料, 运用定量、定性方法, 探讨了东海浮游植物总丰度的平面分布、季节分布及变化的动力学机制, 同时还探讨了东海浮游植物优势种的生态学特征和对温盐环境适应特征。结果表明: 东海浮游植物总丰度有明显的季节分布, 秋季总丰度达到 4 季最高峰, 均值为 $211.91 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$, 夏季次之 ($50.40 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$), 冬季 $11.34 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$, 春季 ($2.01 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$) 最低。春夏季东海近海 (I 和 III) 高于外海 (II 和 IV), 秋冬季东海北部外海 (II) 高于近海 (I), 南部近海 (III) 高于外海 (IV)。4 季共出现优势种 ($Y \geq 0.02$) 11 种, 冬季的主要优势种为洛氏角毛藻和细弱海链藻, 春季的主要优势种为洛氏角毛藻和夜光藻, 夏季以拟弯角毛藻和细长翼根管藻为主要优势种, 秋季优势种仅为聚生角毛藻。浮游植物的聚集强度指数为较大正值, 聚集作用明显。从全年的逐步回归分析结果看, 温度是影响浮游植物总丰度季节分布的主要因子, 盐度是次要因子。浮游植物的 11 个优势种之间生存环境适应比较, 洛氏角毛藻和中华盒形藻生长温度幅度较大, 可以在 12~28℃ 水温增长, 因而春、夏和冬季都成为优势种。中肋骨条藻适合生长的水温范围都较小, 仅为 22~28℃。聚生角毛藻更小, 仅 21~25℃。洛氏角毛藻和中华盒形藻生长温盐度和高分布区温盐度范围比聚生角毛藻和中肋骨条藻都广, 而秋季数量却低于聚生角毛藻。

关键词: 东海; 浮游植物; 数量分布; 优势种

文章编号: 1000-0933(2007)12-5076-10 中图分类号: Q178, Q179 文献标识码: A

Horizontal distribution and dominant species of phytoplankton in the East China Sea

LUO Min-Bo^{1,2}, LU Jian-Jian¹, WANG Yun-Long^{2,*}, SHEN Xin-Qiang², CHAO Min²

1 State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2 Key and Open Laboratory of Marine and Estuarine Fisheries, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5076~5085.

Abstract: This article discusses the horizontal distribution and dominant species of phytoplankton in the East China Sea. The ecological characteristics of phytoplankton and their adaptability to the environment were also considered. Oceanographic investigation was carried out in the East China Sea (23°30′–33°N and 118°30′–128°E) in four seasons from 1997 to 2000. It was found that the total abundance showed obvious seasonal variations. It peaked in autumn with a mean value of $211.91 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$, followed by summer ($50.40 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$). The lowest abundance occurred in spring ($2.01 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$). 4 seasons excluding winter, the mean density of phytoplankton was over $100 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$. For the

基金项目: 科技部社会公益研究专项资金项目 (2005DIB3J021); 国家自然科学基金重点项目 (50339040)

收稿日期: 2006-11-07; **修订日期:** 2007-04-29

作者简介: 罗民波 (1972~), 男, 河南省罗山县人, 博士生, 主要从事海洋生态学研究. E-mail: minbl@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yunlong_wang@citiz.net

Foundation item: The project was financially supported by Special Society Research Fund in Public Welfare From the Ministry of Science and Technology of China (No. 2005DIB3J021) and the Key Research Program of National Natural Science Foundation of China (No. 50339040)

Received date: 2006-11-07; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: LUO Min-Bo, Ph. D., candidate, mainly engaged in marine ecology. E-mail: minbl@163.com

horizontal distribution, abundance in summer and spring was higher in nearshore than in offshore areas of the East China Sea. In autumn and winter, abundance in the offshore of the north was higher than in the nearshore, while in the south this was reversed. The aggregation characteristics of phytoplankton were obvious from multivariate regression analysis. Over the 4 seasons, phytoplankton abundance showed a significant correlation with the water temperature. Eleven dominant species were observed in 4 investigated seasons, in which *Chaetoceros lorenzianus* and *Thalassiosira subtilis* dominated in winter, *Chaetoceros lorenzianus* and *Noctiluca scientillans* in spring, *Chaetoceros pseudocurvisetus* and *Rhizosolenia alataf. gracillima* in summer and only *Chaetoceros socialis* in autumn. Temperature was found to be a major influencing factor whereas salinity was a minor one. Comparing their adaptability, *Chaetoceros lorenzianus* and *Biddulphia sinensis* can survive in a wider temperature range (12 – 28℃), which enables them to dominate in spring, summer and winter, while *Skeletonema costatum* survive in a relatively narrow temperature range (22 – 28℃) and the temperature range for *Chaetoceros socialis* was even more narrow (21 – 25℃). The indicator species in the East China Sea can be categorized into two different groups, according to their abundance and aggregation characteristics. One is marked by the occurrence of the species, and the other is marked by the presence of their high abundance area. *Chaetoceros lorenzianus*、*Stephanopyxis palmeriana*、*Rhizosolenia robusta*、*Rhizosolenia calcar-avis* contribute to the offshore warm current species.

Key Words: horizontal distribution; dominant species of phytoplankton; East China Sea

东海浮游植物属东海主要初级生产者,是东海环境变化的重要指示生物,是东海生态环境评估的重要内容,亦是东海生态系统食物网的重要环节。全球和区域性环境变化,对环境敏感的浮游植物的变化,越来越受到重视。长江口及邻近水域浮游植物的生态分布特征呈现不稳定状态,海区浮游植物总量主要受控于中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、圆筛藻属(*Coscinodiscus*)等个别优势种,外海高盐水系入侵程度加强,与春季浮游植物高值的形成有着密切的关系^[1],赤潮浮游植物种类多^[2],中肋骨条藻是长江口最重要的优势种,长江口海域甲藻胞囊密度较其他海域大,反映了本海区赤潮发生的频繁性^[3]。东海(28°~32°N,127°E以西)浮游甲藻类有122种,分隶于13科17属。其中高温高盐种占82.8%,广温广盐种占15.6%,低盐近岸种占1.6%。东海浮游甲藻细胞总量的季节分布,以夏初6月份为最高峰,冬季1月份为最低谷期,并对其生态特性以及与水文环境因素的关系进行了描述与讨论^[4]。

浙江沿岸夏季浮游植物种类多,组成复杂,沿岸广布种和偏暖、暖水种为主要种类^[5]。顾新根进行对马渔场冬季浮游植物的分布研究中认为暖流种和冷水种的分布反映不同水系的配置情况^[6]。2002年4~5月对东海(长江口)海域进行了综合调查,分析了海区叶绿素a和初级生产力的分布特性,结果表明春季东海浮游植物以微型和微微型(<20 μm)占优势,其对海区叶绿素a的贡献为64%,超微型浮游植物(<5 μm)占浮游植物生物量的27%^[7]。总结近20a来东海区赤潮发生特点,认为夜光藻和中肋骨条藻的赤潮发生频率最高,分别占55%和27%^[8]。LU Dou-Ding对东海有毒浮游植物种类组成进行过研究^[9]。根据赤潮生物细胞密度法及其增长速率和其它理化的环境要素,并结合卫星遥感实时监测,对浙北海域的夜光藻等引发的赤潮进行了试验性预警和实时预测,认为春夏季是浙北海域赤潮多发季节^[10]。

浮游植物生物量的季节分布与多种因素有关,是使海洋生命资源组成在大范围变动的一些主要促进因子,并在海洋生态系统中经常发生变化^[11]。东海海域受长江口、杭州湾冲淡水,沿岸流、台湾暖流和黑潮的影响,生态系统有较大的动态变化特性,东海浮游植物群落结构具有较强的时空分布特性,在中国东海区域,尚未见在大范围海域对浮游植物完整的生态学研究报道。

利用1997~2000年东海区(23°30′~33°N、118°30′~128°E)较大尺度海洋调查资料,主要探讨东海浮游植物数量的变化特征,通过分析优势种的变化揭示浮游植物数量的动力学过程。同时通过对优势种生态类型的分析,研究其作为暖流指示种的科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究海域及取样方法

调查区为东海 23°30'~33°00'N、118°30'~128°00'E 海域。1997~2000 年利用“北斗号”调查船,分别进行春(1998.3~5)、夏(1999.6~8)、秋(1997.10~11)、冬(2000.1~2)4 个航次的海洋综合调查,调查站位设置见图 1。台湾海峡海域冬季没有调查。为了对浮游植物与其相应生态环境的关系作详细地分析比较,本研究沿着 29°30'N 和 125°E 将东海地主要部分分成 4 个海区,即:Ⅰ北部近海(29°30'~33°N、123°30'~125°E)、Ⅱ北部外海(29°30'~33°N、125°~128°E)、Ⅲ南部近海(25°30'~29°30'N、120°30'~125°E)、Ⅳ南部外海(25°30'~29°30'N、125°~128°E),再加上 V 台湾海峡(23°30'~25°30'N、118°~121°E),共计 5 个海区。从图 1 可见,东海外海(Ⅱ,Ⅳ)主要受黑潮暖流的影响。台湾暖流对东海近海(Ⅰ,Ⅲ)有一定的影响。但不同的季节,影响的程度不同。

共采集浮游植物样品 508 个,样品采集和室内处理均按照《海洋调查规范》进行^[12]。用标准浮游植物小网(口径 37cm、筛绢 JP80、网长 270cm、网目孔径 0.077mm)由底至表层垂直拖曳采集,实验室内鉴定到种并按个体计数法计数($\text{cell} \cdot \text{m}^{-3}$)。

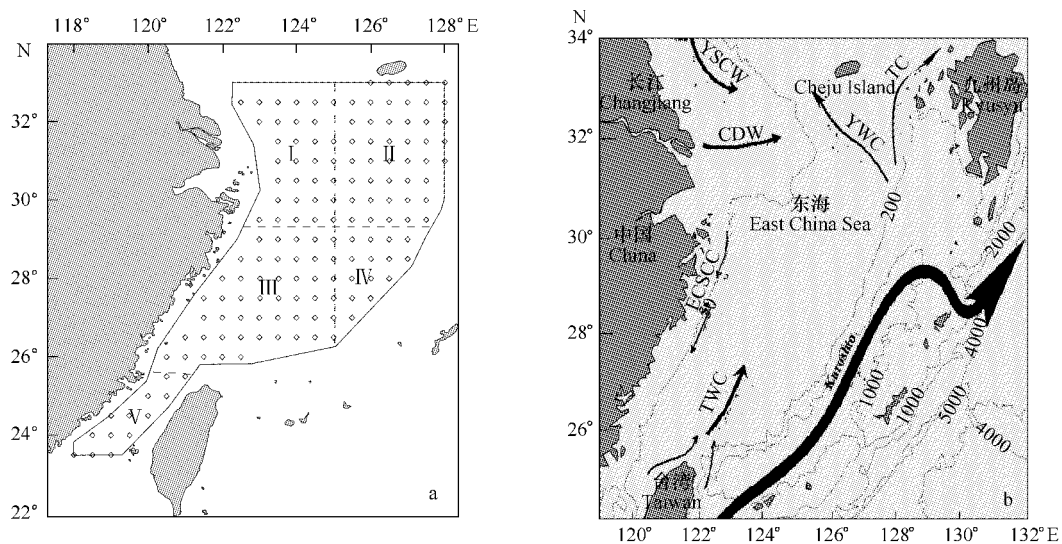


图 1 采样站位(a)及东海海流简介(b)^[13]

Fig. 1 Location of sampling stations (a) Seasonal circulation pattern (b) in the East China Sea^[13]

1.2 数据处理

本文的出现率,是指该种出现的站位数占总站位数的百分数。

本文的优势度(Y)采用如下公式计算:

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

式中, n_i 为第 i 种的丰度, f_i 是该种在各站位中出现率, N 为总丰度。取优势度 $Y \geq 0.02$ ^[14] 的种类为优势种。

此外,由于浮游植物优势种在东海分布的非均匀性,本文引入不同的聚集强度测度显示优势种种群分布的聚集特性。各聚集强度测度的计算公式如下^[15]:

$$\begin{aligned} \text{丛生指标(index of clumping)} & I = V/\bar{X} - 1 \\ \text{平均拥挤(mean crowding)} & \bar{X}^* = (V - \bar{X} + \bar{X}^2) / \bar{X} \\ \text{聚块性指标(index of patchiness)} & \frac{\bar{X}^*}{\bar{X}} = (V - \bar{X} + \bar{X}^2) / \bar{X}^2 \end{aligned}$$

扩散性指标(index of dispersion) $I_d = (V - \bar{X} + \bar{X}^2) / \bar{X}^2 \times N / (N - 1)$

式中, V 是样本的方差, $\bar{X}$ 是样本的均值。根据上述公式可以看出, 这些聚集强度指标是从不同的侧面估计浮游植物空间格局非随机程度的统计量。从数理统计角度讲就是估计 $V/\bar{X}$ 的统计量。从统计意义上讲, 以上聚集强度指数为正值时, 说明浮游植物空间格局非随机程度较大, 即有一定聚集。正值数值越大, 聚集强度越高。但从聚集强度指数的实际意义上看, 当以上 4 个聚集强度指数都为正数时, 说明浮游植物有聚集分布特征。

2 结果

2.1 浮游植物总丰度的季节分布

总丰度分布有非常明显的季节分布。秋季总丰度达到 4 季最高峰, 均值为 $211.91 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$, 夏季次之 ($50.40 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$), 冬季 $11.34 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$, 春季 ($2.01 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$) 最低。春夏季东海近海 (I 和 III) 高于外海 (II 和 IV), 秋冬季东海北部外海 (II) 高于近海 (I), 南部近海 (III) 高于外海 (IV) (表 1)。

表 1 东海各海区浮游植物平均丰度的季节分布

Table 1 Seasonal variation of phytoplankton abundance in the East China Sea

季节 Season	丰度 Abundance ($\times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$)					I-IV 均值 I-IV mean	全区均值 area mean
	I	II	III	IV	V		
春 Spring	2.53	0.90	1.37	0.35	15.43	1.29	4.12
夏 Summer	51.93	9.67	28.45	0.30	71.37	22.59	32.34
秋 Autumn	128.73	431.91	4.01	0.74	7.91	141.35	114.66
冬 Winter	6.83	17.01	0.49	0.29	*	6.15	*
平均 Mean	47.51	114.87	8.58	0.42	*	42.84	*

2.2 浮游植物的优势种

2.2.1 生态特征分析

东海 4 季共出现优势种 11 种 ($Y \geq 0.02$)。冬季的主要优势种为洛氏角毛藻 ($Y = 0.07$) 和细弱海链藻 ($Y = 0.07$), 出现频率分别为 81.54% 和 33.85%; 春季的主要优势种为洛氏角毛藻 ($Y = 0.05$) 和夜光藻 ($Y = 0.049$), 出现频率均为 31.58%; 夏季以拟弯角毛藻 ($Y = 0.11$) 和细长翼根管藻 ($Y = 0.18$) 为主要优势种, 出现频率分别为 24.07% 和 80.56%; 秋季优势种仅为聚生角毛藻 ($Y = 0.14$), 出现频率为 17.12%。冬春季的共同优势种为洛氏角毛藻和中华盒形藻, 其余季节间无共同优势种。

2.2.2 适温适盐特征的分析

为分析优势种的适温适盐特征, 分别将聚生角毛藻、洛氏角毛藻、中华盒形藻和中肋骨条藻的丰度对相应区域的温度和盐度作图 (图 2 ~ 图 5)。可得, 聚生角毛藻分布的温度范围为 $21 \sim 25^\circ\text{C}$, 高分布区温度范围 $23 \sim 25^\circ\text{C}$, 盐度范围为 $28 \sim 34$, 高分布区盐度变动范围为 $32 \sim 34$ 。洛氏角毛藻分布的温度范围为 $12 \sim 28^\circ\text{C}$, 高分布区温度区间 $25 \sim 28^\circ\text{C}$, 盐度区间为 $19 \sim 35$, 高分布区盐度区间 $32 \sim 35$ 。中华盒形藻分布的温度区间为 $8 \sim 28^\circ\text{C}$, 高分布区温度区间 $14 \sim 18^\circ\text{C}$, 盐度范围在 $28 \sim 35$, 高分布区盐度区间 $32 \sim 34$ 。中肋骨条藻分布的温度区间为 $10 \sim 28^\circ\text{C}$, 高分布区温度范围 $26 \sim 28^\circ\text{C}$, 盐度区间为 $19 \sim 35$, 高分布区盐度范围在 33 附近。

2.2.3 优势种分布聚集特征

浮游植物的聚集强度指数均为正值, 且值较大, 聚集强度大, 聚集作用明显 (表 2)。

3 讨论

3.1 总丰度平面分布、季节分布特征及与浮游动物变化关系

由图 6 可见, 春季浮游植物总丰度最低, 平均丰度为 $2.01 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$, 高丰度区出现于东海北部近海中部、北部外海外部、南部近海区域, 台湾海峡中部区域为最高区域。夏季, 高丰度分布区主要分布区于东海北部近海和台湾海峡北部。秋季, 浮游植物丰度在秋季多呈带状分布。在长江口以东 $30^\circ 30' \text{N}$ 、 $122^\circ 30' \sim$

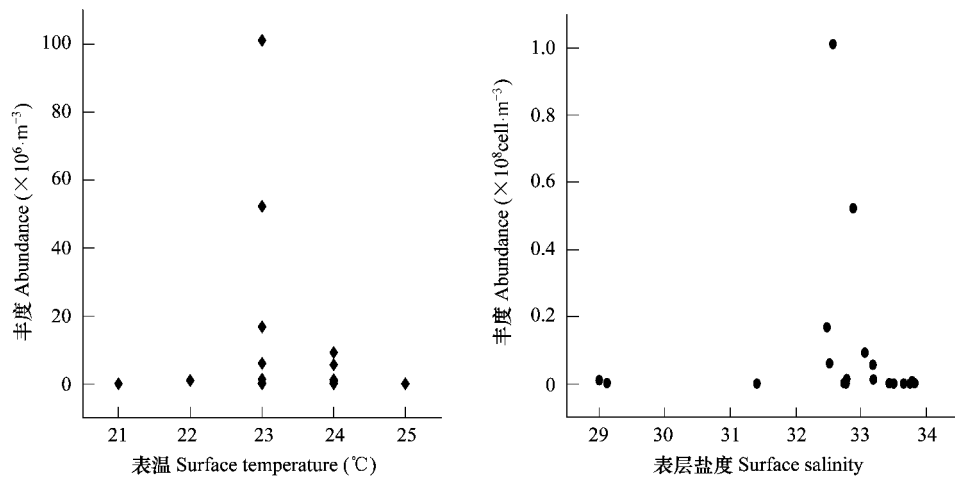


图2 聚生角毛藻丰度与表层温(°C)盐关系

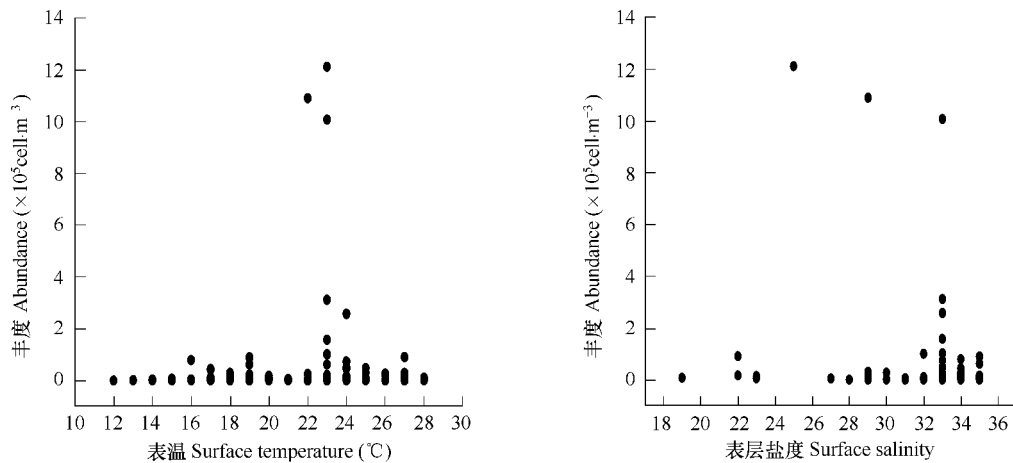
Fig. 2 Relationship between *Chaetoceros socialis* abundance and surface temperature(°C) and salinity

图3 洛氏角毛藻丰度与表层温(°C)盐关系

Fig. 3 Relationship between *Chaetoceros lorenzianus* abundance and surface temperature(°C) and salinity

128°00'E 海域出现了 1 个较高丰度分布带。另外在东海南部近海外缘也有 1 个较高丰度分布带,呈东北向西南走向,台湾海峡近台湾水域出现较高丰度。冬季,高丰度区主要位于东海北部外海,北部近海 31°00'N、124°00'E 海域和东海北部近海、外海与东海南部相邻部分地区出现高丰度。

在水温较低的冬季,浮游植物的丰度最低,大部分水域浮游植物的丰度在 $0.1 \times 10^4 \sim 100 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$;春季水温上升,在沿岸带出现丰度为 $10 \times 10^4 \sim 100 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 30 ~ 60 海里宽的带状浮游植物增长区,外海区丰度在 $1 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$;夏季浮游植物长江口与杭州湾海域迅速增长,丰度在 $100 \times 10^4 \sim 1000 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$,长江口以北吕泗渔场区出现大于 $1000 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$ 的浮游植物暴发区;秋季浮游植物增生带继续北移,在吕泗渔场和大沙渔场出现大于 $1000 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$ 的浮游植物高密度区,舟山渔场浮游植物的丰度在 $100 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右,春夏秋冬台湾海峡的浮游植物丰度大于 $100 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$,浮游植物数量普遍较高。

浮游植物季节变化在 3 大海区的同步调查中存在一定差异,4 季平均值以南海最高 ($87.2 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$),东海次之 ($68.9 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$),黄海最低 ($12.2 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$)。

在东海同步航次 4 个季节浮游动物的研究中,浮游桡足类是浮游动物中数量最多、分布最广、最为重要的一类,是水域食物链中的一个重要环节,在海洋生物生态学和海洋生物资源调查中都具有重要的意义,其数量

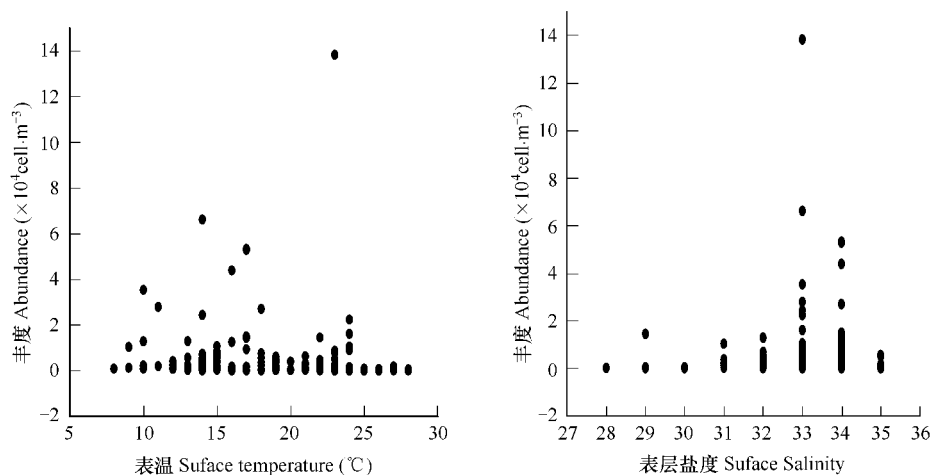


图4 中华盒形藻丰度与表层温(°C)盐关系

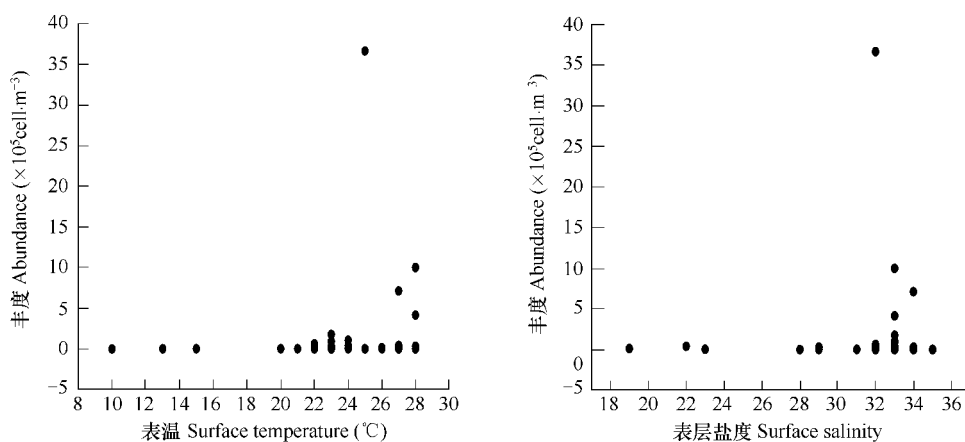
Fig. 4 Relationship between *Biddulphia sinensis* abundance and surface temperature(°C) and salinity

图5 中肋骨条藻丰度与表层温(°C)盐关系

Fig. 5 Relationship between *Skeletonema costatum* abundance and surface temperature(°C) and salinity

占东海浮游动物总量的 55.5%;浮游桡足类动物丰度,4 季的分布趋势为秋季($56.16 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$) > 夏季($21.31 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$) > 冬季($11.07 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$) > 春季($7.07 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$)^[16],此变化与浮游植物 4 个季节分布即秋季($211.91 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$) > 夏季($50.40 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$) > 冬季($11.34 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$) > 春季($2.01 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$)的变化趋势一致。

3.2 总丰度的变化与海流的关系

由图 6 所示,冬季,由于台湾暖流的影响,在东海北部外海区形成较高的浮游植物聚集区,东海沿岸流起源于长江口和杭州湾一带,来源于长江和钱塘江径流入海的冲淡水,沿岸向南流动^[17],水温较低,沿岸带浮游植物数量低;春季东海沿岸流水温上升,沿岸带浮游植物迅速增长,台湾海峡海域在台湾暖流和东海沿岸流的作用下形成较高密度的浮游植物聚集区;

夏季东海沿岸流水平流幅大,扩散较远,挟带较多的营养物质,与台湾暖流的共同作用下,在长江口、杭州湾海域及外延 100 ~ 150 海里的海域形成较高浮游植物聚集区。秋季,东海沿岸流向东北向流动,并将水舌向东推移,在台湾暖流的推进作用下,在北部近、外海出现浮游植物高密度区。

海流在浮游植物数量变化中起到重要的作用,亦为浮游植物丰度平面分布变化特征形成的重要因素。

3.3 总丰度变化与温、盐等环境因子的关系

利用多元逐步回归分析方法筛选表层、5m 层、10m 层、20m 层、30m 层、50m 层水温(T)和盐度(S)与水深

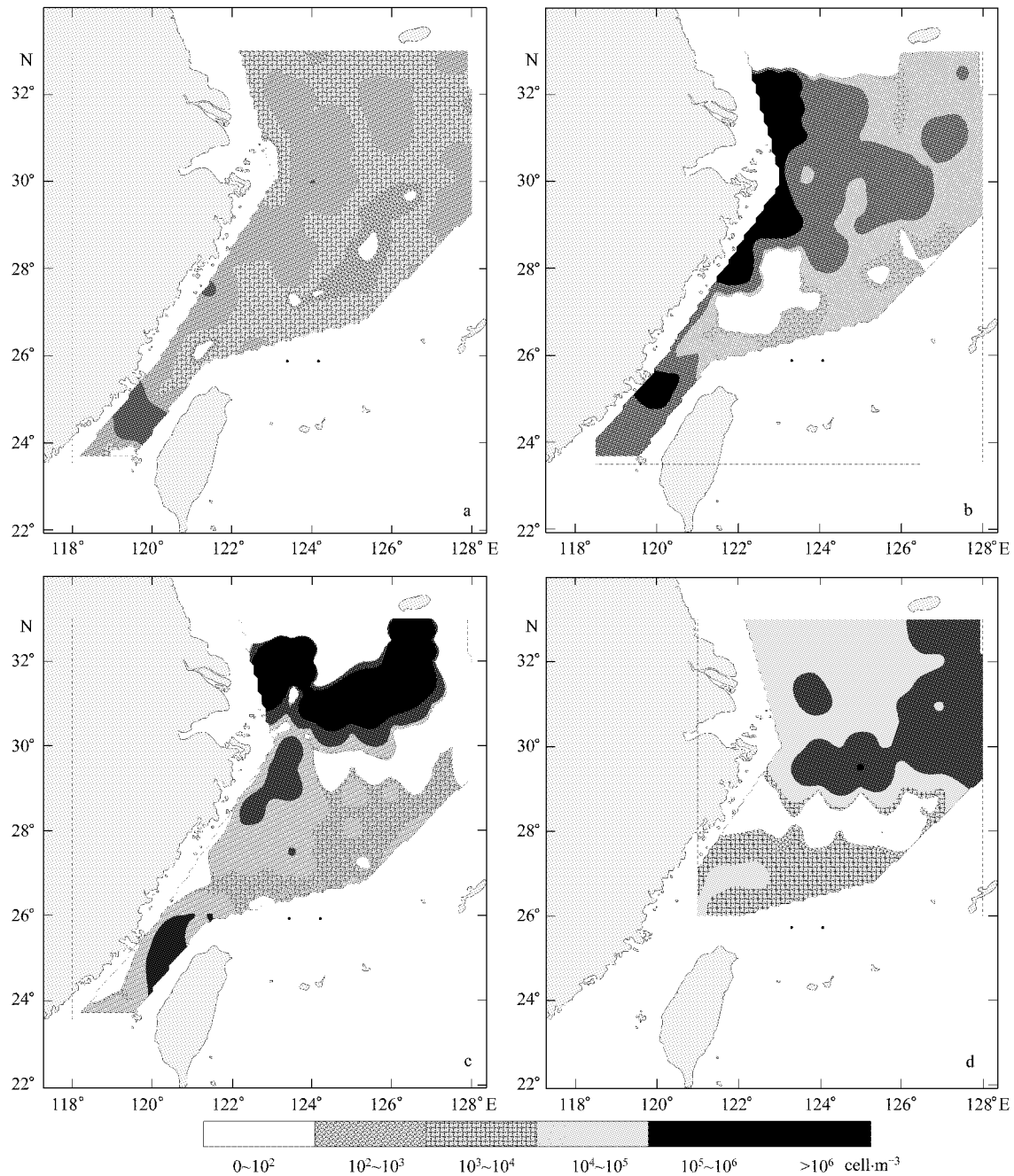


图6 东海浮游植物丰度平面分布

Fig. 6 Horizontal distribution of phytoplankton abundance in the East China Sea

a. 春 Spring; b. 夏 Summer; c. 秋 Autumn; d. 冬 Winter

(H)中对总丰度(Y)影响显著的环境因子。结果表明,4个季节中,春、秋和夏季浮游植物丰度的变化与温度的相关关系显著。其中,春季丰度与水深(H , 30 ~ 170m)的方程式为 $Y = 22896.65128.53H$,夏季丰度与水温(11 ~ 28℃)和盐度(24 ~ 35)的方程式为 $Y = -3321885 + 32196 T_{20} - 224231 S_{10} + 300014.7 S_{30}$,秋季丰度与盐度(28 ~ 35)的方程式为 $Y = -10228572.59 + 6660685.32 S_0 + 9020554.67 S_5 - 21204062.88 S_{10} - 54784854.86 S_{20} + 71397004.83 S_{30} - 10787789.09 S_{50}$ (表3)。然而,冬季浮游植物丰度的变化与温盐环境因子相关关系不显著。

表 2 浮游植物优势种的聚集强度

Table 2 Aggregated intensity of dominant species of phytoplankton

优势种 Dominant species	春 Spring				夏 Summer			
	I	$\frac{\bar{X}^*}{\bar{X}}$	I_{δ}	$\bar{X}^*$	I	$\frac{\bar{X}^*}{\bar{X}}$	I_{δ}	$\bar{X}^*$
洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	620058.8	218.5	217.5	622909.3	1142541	75.7	74.7	1157844
夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	169112.5	54.9	53.9	172250.5				
中华盒形藻 <i>Biddulphia sinensis</i>	31847.6	23.4	22.4	33271.5				
拟弯角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>					73890696	323.4	322.4	74119864
细长翼根管藻 <i>Rhizosolenia alataf</i>					1363138	13.1	12.1	1476212
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>					6156364	112.5	111.5	6211591
优势种 Dominant species	秋 Autumn				冬 Winter			
	I	$\frac{\bar{X}^*}{\bar{X}}$	I_{δ}	$\bar{X}^*$	I	$\frac{\bar{X}^*}{\bar{X}}$	I_{δ}	$\bar{X}^*$
聚生角毛藻 <i>Chaetoceros socialis</i>	338710336	192.8	191.8	340476320				
北方劳德藻 <i>Lauderia borealis</i>					137555.4	19	18	145201.7
并基角毛藻 <i>Chaetoceros decipiens</i>					41135	9	8	46283.9
菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>					11148.7	4	3	14814.7
洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>					52846.9	6.7	5.7	62192.4
细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i>					1389917	63.8	62.8	1412037
中华盒形藻 <i>Biddulphia sinensis</i>					33987.6	6.2	5.2	40579.7

表 3 浮游植物总丰度与水深、温度和盐度的相关性分析

Table 3 Regression analysis between abundance of phytoplankton and depth, temperature and salinity

季节 Season	回归方程 Regression equation	n	r	F	p
春 Spring	$Y = 22896.65 - 128.53 H$	105	0.243	5.037	0.028
夏 Summer	$Y = -3321885 + 32196 T_{20} - 224231 S_{10} + 300014.7 S_{30}$ $Y = -10228572.59 + 6660685.32 S_0 + 9020554.67 S_5$	109	0.660	18.787	0.000
秋 Autumn	$-21204062.88 S_{10} - 54784854.86 S_{20} + 71397004.83 S_{30}$ $-10787789.09 S_{50}$	108	0.758	12.836	0.000

利用逐步回归方法对东海浮游植物总丰度变化与环境因子的关系进行筛选,结果与季节分布的分析结果吻合,也就是说,从整个全年的逐步回归分析结果看,温度是影响浮游植物总丰度季节分布得主要因子(β 值为 0.169)。由于水温是影响浮游植物数量的主要因子,而春季到夏季又是水温变化的季节,所以春夏季浮游植物数量的变化与温度呈现明显的相关性。盐度在东海区域变化范围和变化程度较温度小,大部分海域在 28 ~ 35 之间变化,盐度小范围的变化对浮游植物的影响程度较小,然而,秋季浮游植物的丰度与盐度变化关系显著。

浮游植物的数量分布和季节变化与水文、化学、叶绿素、浮游动物等生态环境要素有着非常密切的关系。春季东海浮游植物数量随海区水温的上升而增多,至夏、秋季出现数量高峰期。夏季南海海域的水温较高,有利于浮游植物生长、繁殖,所以该季节平均数量在黄海、东海和南海三大海区中最高。浮游植物平面分布状况表明,调查期间浮游植物数量密集区通常形成于营养盐含量丰富的河口区附近、不同海流的交汇区和出现上升流的海区。在南海各海区中台湾浅滩海域的数量最丰富,浮游植物的多样性高,反映了该海区浮游植物数量受到上升流的影响较大。盐度决定了海区浮游植物种类的区系分布范围,海区营养盐含量高低则直接导致浮游植物数量的增减。在营养盐季节变化上,黄海除冬季为氮限制潜在性富营养外,其他季节均属于贫营养水平,因此,黄海浮游植物数量较低在一定程度上与黄海的贫营养有关。

3.4 优势种环境适应的比较

比较图 2 ~ 图 5 所示的浮游植物优势种所适应的生存环境,可以发现:由于洛氏角毛藻、中华盒形藻能够

在水温较低的冬春季出现,说明其在低温幅范围有较强的适应性,中华盒形藻属近岸低盐生态类型,洛氏角毛藻属大洋性暖水种,能适应夏季的较高水温,成为夏季的优势种,洛氏角毛藻在东海海洋生态系统中具有重要的组成承接作用,是建群种,属广盐性近岸种的赤潮浮游植物中肋骨条藻同时获得迅速增长,秋季浮游植物数量大幅度上升,但优势种类单一,仅为聚生角毛藻,秋季海洋环境促进聚生角毛藻的迅速增长,成为优势种群,聚生角毛藻在冬、春、夏 3 季均未出现,聚生角毛藻属于大洋性暖水种,由暖流带入而迅速增长形成优势种,夜光藻属世界性赤潮生物,具暖温广盐特性,春季主要发生于南部近海、外海的上部区域。以上分析还说明,浮游植物的优势种具有高温高盐的环境适应特征。其分布与台湾暖流和黑潮暖流势力有密切的关系。特别是,这两个大洋性暖水优势种较高丰度区的出现常常作为暖流在该水域势力较强并且已经维持一段时间的指示。

3.5 聚集特性的比较

浮游植物在东海分布不均匀,聚集强度指数均为较大的正值,浮游植物出现较强的聚集特征,由于浮游植物各优势种适应的温盐度范围相对较窄,春季聚集强度位于前 3 位的浮游植物分别为优美旭氏藻 *Schroederella delicatula* (1439507)、北方娄氏藻 *Lauderia borealis* (754321.6) 和洛氏角毛藻 *Chaetoceros lorenzianus* (620058.8),春季 *I* 的平均值为 65114.5;夏季为拟弯角毛藻 *Chaetoceros pseudocurvisetus* (73890696)、中肋骨条藻 *Skeletonema costatum costatum* (6156364) 和旋链角毛藻 *Chaetoceros curvisetus* Cleve (2174450),夏季 *I* 的平均值为 908691.7;秋季分别为聚生角毛藻 *Chaetoceros socialis* (338710336)、拟弯角毛藻 *Chaetoceros pseudocurvisetus* (25391638) 和并基角毛藻 *Chaetoceros decipiens* (16331181),秋季 *I* 的平均值为 2925140.3,冬季的分别为细弱海链藻 *Thalassiosira subtilis* (1389917)、拟弯角毛藻 *Chaetoceros pseudocurvisetus* Mangin (323152.1) 和膜状舟形藻 *Navicula membranacea* Cleve (264600.5),冬季 *I* 的平均值为 47596.03;*I* 值以秋季最高,夏季次之,冬季最低,聚集强度变化有明显的季节波动性。

3.6 与渔场的关系

浮游植物在冬季的数量较少,生产力低。夏秋季浮游植物的数量上升,较高数量分布区位于吕泗渔场、大沙渔场和舟山渔场区域。以秋季浮游植物的聚集更为明显,秋季该水域是台湾暖流、东海沿岸流和黄海冷水团的交汇处,是多种经济鱼类的索饵场。由此可见,夏、秋季浮游植物东海近海形成的较高丰度聚集区对渔场的形成有直接影响和实际生产意义。

3.7 作为指示种的意义

对海洋环境变化指示种的研究,已经有不少的报道。在对芬兰湾沿岸水域的硅藻研究中,Kaarina Weckström 等发现一些浮游植物在特殊营养盐环境中丰度非常高^[18]。东海的指示种就其数量和聚集特征不同可以分为两大类,其一是该种的出现即可作为水环境变化标志的指示种,其二是该种高丰度分布区作为水环境变化标志的指示。作为东海重要的指示种类群,浮游植物是后一种指示种,这一类浮游植物往往对水环境的变化特别敏感,适温适盐范围狭窄,多为大洋性暖水种。在冬春季水温较低等环境不利的条件下,普遍难以生存,即便环境条件合适,因为种群增长率较低,数量较少,难以形成较高的聚集强度,分布均匀。但这类指示种可以显示暖流的长期变化。外海暖水类群,洛氏角毛藻、掌状冠盖藻、粗根管藻、距端根管藻等属于外海暖水性类群^[19]。掌状冠盖藻春季分布于台湾海峡,夏季随着台湾暖流的加强,分布于台湾海峡和东海南部近海鱼山列岛以南的浙江沿海,秋季主要分布于鱼山列岛以南的浙闽沿海,冬季分布区进一步向黑潮方向移动,在东海北部外海济州岛以南的对马暖流区密集。

References:

- [1] Wang Y L, Yuan Q, Shen X Q. Ecological character of phytoplankton in spring in the Yangtze River estuary and adjacent waters, *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(3):300–306.
- [2] Wang J H. HAB alga nearby Changjiang Estuary. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(2):37–41.
- [3] Gu H F, Fang Q, Li R X, et al. Preliminary study on dinoflagellate cysts in Changjiang River Estuary. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2004, 35(5):413–423.

- [4] Lin J M. Distribution of planktonic dinoflagellate in the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(2): 110—115.
- [5] Jing H W, Xu H X, Yao H F, *et al.* Distribution Features of Phytoplankton in Inshore Waters of the Zhejiang during the Summer. *Journal of Zhejiang Ocean University*, 2005, 24(3): 231—235.
- [6] Gu X G. Study on the Distribution and Ecology of Phytoplankton on Tsushima Fishing Ground in Winter. *Marine Fisheries*, 1994, 16(2): 55—58.
- [7] Zhou W H, Huo W Y, Yuan X C, *et al.* Distribution features of chlorophyll a and primary productivity in high frequency area of red tide in East China Sea during Spring. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(7): 1055—1059.
- [8] Ye S F, Huang X Q. HABs in East China Sea: Surveillance and monitoring. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(2): 10—14.
- [9] Douding L, Jeanette G, Yu Z Q, *et al.* Morphological and genetic study of *Prorocentrum donghaiense* Lu from the East China Sea, and comparison with some related *Prorocentrum* species. *Harmful Algae*, 2005, 4(3): 493—505.
- [10] Douding L, Gobel J, Wang C S, Liu Z S. Monitoring of harmful microalgae and nowcasting of red tides in Zhejiang coastal water. *Donghai Marine Science*, 2000, 18(2): 33—44.
- [11] Kenneth S. The Large Marine Ecosystem Concept: Research and Management Strategy for Living Marine Resources. *Ecology Applied*, 1991, 1(4): 349—360.
- [12] Government Technical Supervision Office. Ocean study standard (GB12763.6-91). Beijing: China Standard Press, 1991.
- [13] Xu Z L. Characteristics for distribution of pelagic Ostracods in the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(2): 101—108.
- [14] Xu Z L. Ecological characters of the *Eucalanus subcrassus* population in the East China Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1151—1158.
- [15] Zhao Z M, Zhou X Y. Introduction to ecology. Chongqing: Chongqing Branch of Scientific and Technical Documents Publishing House, 1984. 108—119.
- [16] Xu Z L, Jiang M, Chao M, *et al.* Quantitative distribution of pelagic copepods in the East China Sea. *Journal of Fisheries of China*, 2003, 27(3): 258—264.
- [17] Lei Z Y. Environment handbook of China Sea. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1988. 472—510.
- [18] Kaarina W, Steve J. Coastal diatom-environment relationships from the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Journal of Phycology*, 2005, 42: 21—35.
- [19] Gu X G, Yuan Q, Shen H T, *et al.* The Ecological study on phytoplankton in maximum turbidity zone of Changjiang estuary. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1995, 2(1): 16—27.

参考文献:

- [1] 王云龙, 袁骐, 沈新强. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征. *中国水产科学*, 2005, 12(3): 300~306.
- [2] 王金辉. 长江口邻近水域外的赤潮生物. *海洋环境科学*, 2002, (21)2: 37~41.
- [3] 顾海峰, 方琦, 李瑞香, 等. 长江口甲藻孢囊的初步研究. *海洋与湖沼*, 2004, 35(5): 413~423.
- [4] 林金美. 东海浮游甲浮游植物的分布. *海洋学报*, 1994, 16(2): 110~115.
- [5] 金海卫, 徐汉祥, 姚海富, 等. 浙江沿岸夏季浮游植物分布特征. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2005, 24(3): 231~235.
- [6] 顾新根. 对马渔场冬季浮游植物的分布生态研究. *海洋渔业*, 1994, 16(2): 55~58.
- [7] 周伟华, 霍文毅, 袁翔城, 等. 东海赤潮高发区春季叶绿素 a 和初级生产力的分布特征. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1055~1059.
- [8] 叶属峰, 黄秀清. 东海赤潮及其监视监测. *海洋环境科学*, 2003, 22(2): 10~14.
- [10] 陆斗定, Gobel J, 王春生, 等. 浙江海区赤潮生物监测与赤潮实时预测. *东海海洋*, 2000, 18(2): 33~44.
- [12] 国家技术监督局. 海洋调查规范(GB12763.6-91). 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [13] 徐兆礼. 东海浮游介形类(Ostracods)分布特征. *海洋学报*, 2006, 28(2): 101~108.
- [14] 徐兆礼. 东海亚强真哲水蚤种群生态特征. *生态学报*, 2006, 26(4): 1151~1158.
- [15] 赵志模, 周新远. 生态学引论. 重庆科学技术文献出版社, 1984, 108~119.
- [16] 徐兆礼, 蒋玫, 晁敏, 等. 东海浮游桡足类的数量分布. *水产学报*, 2003, 27(3): 258~264.
- [17] 雷宗友. 中国海洋环境手册. 上海: 上海交通大学出版社, 1988. 472~510.
- [19] 顾新根, 袁骐, 沈焕庭, 等. 长江口最大浑浊带浮游植物的生态研究. *中国水产科学*, 1995, 2(1): 16~27.