

中国东部陆架边缘海网采浮游植物 种类组成和季节变化

周茜茜^{1,3} 陈长平¹ 梁君荣¹ 高亚辉^{1,2*}

1 (厦门大学生命科学学院滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 福建厦门 361102)

2 (厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建厦门 361102)

3 (国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 361005)

摘要: 为揭示中国东部陆架边缘海浮游植物群落季节变化规律, 根据2006年6–7月、2007年1–2月、2007年11月和2009年4–5月在中国东部陆架边缘海域(25.00°–39.00° N, 118.00°–129.00° E)进行的综合采样调查, 对调查海域网采浮游植物(网孔直径77 μm)的物种多样性和分布特征进行了研究。4个航次共鉴定出浮游植物4门70属257种(不包括未定名种), 其中硅藻是主要功能群, 其次是甲藻, 主要的优势种为骨条藻(*Skeletonema* spp.)、细弱海链藻(*Thalassiosira subtilis*)、囊状海链藻(*T. scrotiformis*)、伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)、菱形海线藻(*T. nitzschioides*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、旋链角毛藻(*C. curvisetus*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)和夜光藻(*Noctiluca scintillans*)。浮游植物细胞丰度为 0.02×10^4 – $31,350.21 \times 10^4$ cells/m³, 最低值出现在冬季黄海海域, 最高值出现在春季长江口邻近海域。4个季节的浮游植物细胞密度呈现春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季的趋势, 浮游植物各生物多样性指数的等值线均呈现西北–东南走向。

关键词: 浮游植物, 细胞密度, 多样性, 中国东部陆架边缘海

Species composition and seasonal variation of netz-phytoplankton in the eastern marginal China seas

Qianqian Zhou^{1,3}, Changping Chen¹, Junrong Liang¹, Yahui Gao^{1,2*}

1 School of Life Sciences, and Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102

2 State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102

3 Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen, Fujian 361005

Abstract: The abundance and seasonal variation of phytoplankton were studied in the eastern marginal China seas (25.00°–39.00° N, 118.00°–129.00° E). Based on surveys in June and July 2006, January and February 2007, November 2007 and April and May 2009, we analyzed the species composition, community structure, and cell density of netz-phytoplankton (mesh size 77 μm). A total of 257 phytoplankton species were identified, belonging to 70 genera and 4 classes. Bacillariophyta was the dominant functional group, followed by Pyrrophyta. The dominant species were *Skeletonema* spp., *Thalassiosira subtilis*, *T. scrotiformis*, *Thalassionema frauenfeldii*, *T. nitzschioides*, *Paralia sulcata*, *Chaetoceros lorenzianus*, *C. curvisetus*, *Pseudo-nitzschia pungens* and *Noctiluca scintillans*. The cell density of the phytoplankton ranged from 0.02×10^4 cells/m³ in the Yellow Sea in winter to $31,350.21 \times 10^4$ cells/m³ in the Yangtze River in spring. Overall phytoplankton cell density showed the following seasonal trend: spring > summer > autumn > winter.

Key words: phytoplankton, cell density, diversity, eastern marginal China seas

浮游植物是海洋生态系统中最主要的初级生产者, 也是海洋生物资源的重要组成部分, 在海洋

生态系统的物质循环和能量流动中起着极其重要的作用(高亚辉, 2001)。海洋浮游植物群落结构是生

收稿日期: 2014-05-28; 接受日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(41276128, 41476116)和国家重点研究基础发展计划 973 项目(2010CB428704)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: Gaoyh@xmu.edu.cn

态系统研究的重要内容和生态系统容纳量的重要指标,也是生物多样性评估的重要依据。近年来,研究者发现海洋浮游植物群落结构变化很大程度上受到潮流和季风影响(Canini *et al.*, 2013)。因此,浮游植物已成为海洋生态系统研究和全球变化研究中的重要对象之一。

中国东部陆架边缘海包括由朝鲜半岛、九州岛、琉球岛链和台湾岛包围的渤海、黄海和东海,是世界上最宽的陆架浅海之一(黄宗国和唐森铭, 1995)。东部陆架边缘海明显的季节变化形成了独特而复杂的环流系统,特定的地理环境特点导致了独特的生态学特征,复杂的海洋动力学过程决定了该海域的海洋环境结构,同时对生物多样性也产生很大影响。有关东部陆架边缘海的浮游植物物种多样性研究主要集中在东海陆架区(俞建奎等, 1983; 毛兴华和李瑞香, 1984; 王丹等, 2008; 王磊等, 2013)及琉球群岛附近海域(杨清良等, 1999; 孙军等, 2000; 刘东艳等, 2000; Sun *et al.*, 2000),并且在时间和空间上比较分散(俞建奎和李瑞香, 1992; 杨清良, 1998; 高亚辉等, 2003; 孙军等, 2004; 郭术津等, 2012)。本研究对中国东部陆架边缘海浮游植物分布进行了较大空间尺度(25.00°–39.00°N, 118.00°–129.00° E)的调查,分析了该海域浮游植物种类组成、细胞密度和生物多样性分布特征。

1 方法

1.1 调查海域

搭载中国海洋大学“东方红2号”科学考察船,于2006–2009年在中国东部陆架边缘海海域(25.00°–39.00° N, 118.00°–129.00° E)进行了4个航次的浮游植物采样调查,时间分别为2006年6月25日至7月15日(夏季)、2007年1月21日至2月14日(冬季)、2007年11月1日至11月25日(秋季)和2009年4月27日至2009年5月21日(春季)。调查海域和站位见图1。

1.2 样品采集与种类鉴定

浮游植物的样品采集、处理和分析均按照《海洋调查规范第6部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)进行(国家技术监督局, 2007)。根据调查站位的水深,浮游植物样品采用小型浮游生物网(网口直径37 cm,网口面积0.1 m²,孔径0.077 mm,网长280 cm)从底到表垂直拖网采集。样品保存于5%福尔马林海水溶液中,静置沉淀24 h,用虹吸管

吸去上清液,取0.1–0.3 mL用计数框在Olympus BH-2型显微镜下进行鉴定(郭玉洁和钱树本, 2003; 林永水, 2009; 程兆第等, 2012, 2013)和计数(每次镜检标本数不少于500个)。

1.3 数据处理与统计分析

浮游植物群落结构分析采用浮游植物种类数(S)、Shannon-Wiener 指数(H') (Shannon & Wiener, 1949)、丰富度(D) (Margalef, 1958)和均匀度(J) (Pielou, 1966)来表征(孙军和刘东艳, 2004)。

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

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

$$D = \frac{(S - 1)}{\log_2 N} \quad (3)$$

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i \quad (4)$$

n_i 为第*i*种的总个体数, $P_i = n_i/N$ 为第*i*种在样品中的数量比率, S 为总种数, f_i 为该种在各样品中出现的频率, N 为全部样品中的总个体数。

浮游植物群落结构分析采用Primer v.5.29软件运算,浮游植物细胞丰度在调查海区的平面分布应用Golden Software Surfer 10.0软件作图。

2 结果

2.1 调查海区浮游植物种类组成

调查海区共获得287个网采浮游植物样品,初步鉴定出4门70属257种(不包括未定名种),详见附表1。附表1的浮游植物种类名录修订参考文献孙军和刘东艳(2002)和马新等(2013)。其中硅藻门54属183种,占总种数的71.85%;甲藻门14属70种,占26.71%;金藻门1属2种,占0.72%;蓝藻门1属2种,占0.72%。该海区浮游植物主要优势种为囊状海链藻(*Thalassiosira scrotiformis*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)、细弱海链藻(*Thalassiosira subtilis*)、骨条藻(*Skeletonema* spp.)和夜光藻(*Noctiluca scintillans*)。各优势种出现频率和优势度见表1。

2.2 调查海区浮游植物生态类群

调查海域浮游植物根据其分布特征和生态性



图1 中国东部陆架边缘海浮游植物调查站位图

Fig. 1 Survey area and phytoplankton sampling stations in the eastern marginal China seas

质可分为以下3个类群:

(1)广温类群。该类群对温度适应范围较广, 根据其对应盐度的不同要求可再分为两类: 一是广温广盐种, 是一些适温适盐范围很广的世界广布种, 如菱形海线藻、尖刺伪菱形藻、夜光藻, 这些物种在本海区颇为常见, 且在数量上占优势; 二是广温高盐种, 如细弱海链藻、翼鼻状藻纤细变型(*Proboscia alata* f. *gracillima*)等, 主要分布于调查海区的外海海域。

(2)暖水类群。该类群适宜生活的水温较高, 根据其对应盐度的不同要求可再分为3类: 一是暖水广盐类群, 如二齿双管藻(*Amphisolenia bidentata*)、歧分新角藻(*Neoceratium carriense*)、洛氏角毛藻、印度角毛藻(*Chaetoceros indicum*)等; 二是暖水高盐种, 属于高温、高盐的热带大洋性种类, 代表种有丛毛辐杆藻(*Bacteriastrum comosum*)、秘鲁角毛藻(*C. peruvianus*)、异角角毛藻(*C. diversus*)、热带戈斯藻(*Gossleriella tropica*)、马西里亚新角藻(*Neoceratium massiliense*)等, 该生态类型中的有些

甲藻类可作为黑潮的指示种, 如鸟尾藻属(*Ornithocercu* spp.)和梨甲藻属(*Pyrocystis* spp.)物种; 三是暖水近岸种, 适应高温低盐生境, 如拟旋链角毛藻(*C. pseudocurvisetus*)、琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*)、角状弯角藻(*Eucampia cornuta*)等。

(3)暖温类群。该类群种类较少, 根据它们对盐度的不同要求可再分为两个类群: 一是暖温近岸类群, 一般出现在秋、冬两季受闽浙沿岸流影响较大的近岸海区, 代表种有扭链角毛藻(*C. tortissimus*)、短孢角毛藻(*C. brevis*)和柔弱几内亚藻(*Guinardia delicatula*); 二是暖温高盐类群, 如笔尖根管藻(*Rhizosolenia styliformis*)、大西洋角毛藻(*C. atlanticus*)和由上升流带来的圆头新角藻(*Neoceratium gravidum*)等种类。

2.3 调查海区浮游植物细胞丰度的分布

调查海区浮游植物细胞丰度范围为 $0.02 \times 10^4 - 31,350.21 \times 10^4$ cells/m³, 随季节不同而有差异, 4个季节的平面分布趋势各不相同(图2)。

春季, 浮游植物细胞密度高值区出现在东海长

表1 东部陆架边缘海浮游植物优势物种

Table 1 The composition of dominant phytoplankton species in survey area

优势种 Dominant species	丰度比例 %	出现频率 Frequency (fi)	优势度 Dominance (Y)
囊状海链藻 <i>Thalassiosira scrotiformis</i>	67.32	0.13	0.09
具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	44.56	0.67	0.30
尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	40.09	0.75	0.30
洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	28.13	0.58	0.16
菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	4.56	0.89	0.04
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	3.24	0.23	0.01
伏氏海线藻 <i>Thalassionema frauenfeldii</i>	3.09	0.20	0.01
细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i>	2.04	0.34	0.01
骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp. ^①	1.86	0.30	0.01
夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	23.52	0.31	0.07

^①目前大多数历史资料将东部陆架边缘海的骨条藻归为中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*),但新近研究表明,东海海域的骨条藻为中肋骨条藻和多恩骨条藻(*S. dohrnii*)的混合物(孙军和田伟, 2011),因此本文中统一暂定为骨条藻(*Skeletonema* spp.)。

^②*Skeletonema* was identified as *Skeletonema costatum* in most references about the eastern marginal China seas. However, Sun & Tian (2011) found the *Skeletonema* within the East China Sea were mixture of *Skeletonema costatum* and *S. dohrnii*. In this paper, we classified them as *Skeletonema* spp.

江口邻近海域。优势种为囊状海链藻、尖刺伪菱形藻和夜光藻。东海浙江沿岸(25.41°–31.50° N, 120.50°–126.14° E)海域C1002站位囊状海链藻细胞密度高达 1.05×10^8 cells/m³(附图1),集中分布在调查海区的南部区域,而渤海海峡、黄海及东海北部未检测到该种。尖刺伪菱形藻在整个东部陆架边缘海分布均匀,渤海海峡、黄海和东海各站位均有分布,但在长江口邻近海域的第四、五断面(30.15°–33.76° N, 122.05°–125.13° E)密度骤然升高, C0403站位高达 3.13×10^8 cells/m³(附图2)。夜光藻仅出现在调查海域的近岸,高值区主要分布在山东半岛沿岸、长江口和浙闽沿岸水域(附图3)。

夏季浮游植物细胞密度高值区出现在东海以东的济州岛附近海域,细胞密度高达 1.02×10^6 cells/m³,东海中部海域细胞密度最低。优势种为洛氏角毛藻、旋链角毛藻和尖刺伪菱形藻。

秋季浮游植物细胞密度高值区出现在山东半岛以南的黄海海域,细胞密度高达 1.01×10^7 cells/m³,

最低值出现在东海外海海域。优势种为笔尖根管藻、细弱海链藻和骨条藻。

冬季浮游植物细胞密度高值区出现在东海长江口邻近海域,细胞密度高达 1.01×10^6 cells/m³,黄海中部海域细胞密度最低。优势种为笔尖根管藻和骨条藻。

2.4 调查海区浮游植物群落多样性的分布

春季,黄渤海水域浮游植物种类数基本在15种以内,仅在济州岛西部和西南部种类数量略高,约18种左右。在东海,浮游植物种类数呈现明显西北–东南逐渐升高的趋势。黄渤海水域Shannon-Wiener指数较低,而东海外海及东海近岸水域较高。浮游植物东部陆架边缘海均匀度与丰富度分布趋势与Shannon-Wiener指数和种类数的分布趋势一致;群落多样性均呈明显的西北少、东南多的趋势(图3A)。

夏季,浮游植物种类数较春季明显减少,但黄海的种类数仍基本在15种以内。整体上来看,调查水域浮游植物种类数呈现由北向南递增的趋势,但在长江口附近海域出现一个高值区。黄渤海水域Shannon-Wiener指数较低,东海外海及东海近岸水域较高。东部陆架边缘海Shannon-Wiener指数、均匀度和丰富度的趋势基本一致(图3B)。

秋季,浮游植物种类数比夏季明显升高,但仍比春季低,东海外海海域种类数明显比春夏两季增多。东海外海及东海近岸Shannon-Wiener指数水域较高。东部陆架边缘海Shannon-Wiener指数、均匀度和丰富度的分布均呈现由近岸逐渐向外海延伸的趋势,渤海海峡水域各指数明显减小,生物多样性分布趋于一致,呈现东海外海>东海近岸>黄渤海海的趋势(图3C)。

冬季,种类数等值线向东南方向延伸,黄海、东海大致以20种等值线为界。黄海种类数的纬向梯度变化较小,而东海变化很大,且存在明显的跨陆架梯度。东海浮游植物多样性明显高于黄海海域。东部陆架边缘海各多样性指数的等值线仍然呈现由西北向东南延伸,并往沿岸方向递减的趋势(图3D)。

3 讨论

3.1 浮游植物种类组成与生物多样性的变化

自1959年的全国海洋综合调查开始至今的研究显示,我国东部陆架边缘海的浮游植物群落结构

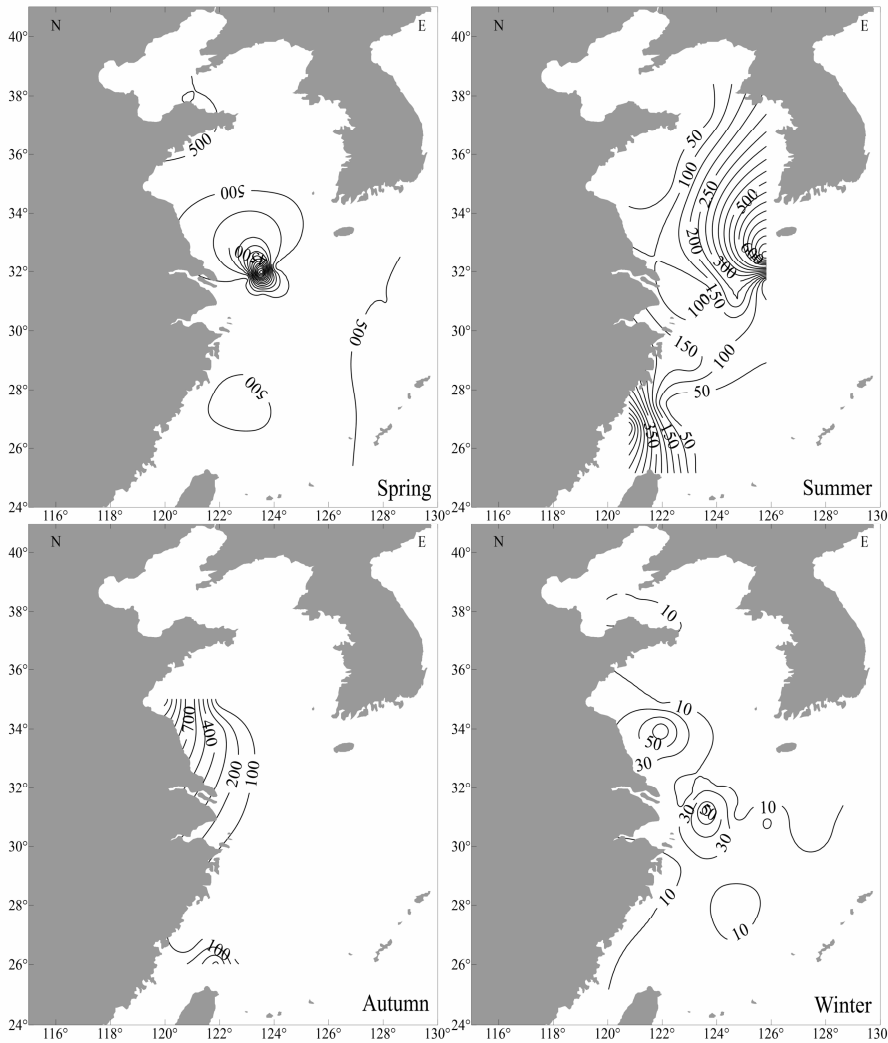


图2 中国东部陆架边缘海浮游植物细胞密度的平面分布(单位: $\times 10^4 \text{ cells/m}^3$)
 Fig. 2 Cell density distribution of phytoplankton community of the eastern marginal China seas ($\times 10^4 \text{ cells/m}^3$)

组成并没有明显变化, 一直是硅藻占主导地位, 其次是甲藻(表2)。本研究发现, 调查海域浮游植物以广温性类群为主, 其次是暖水类群, 与历史资料的结果一致(俞建奎等, 1983; 俞建奎和李瑞香, 1992), 这是由于该海域的浮游植物群落主要受低盐沿岸水系、黄海中部水系和黑潮暖流水系3种性质不同水系的影响。

从物种多样性的平面分布来看, 调查海域东南部由于受到黑潮分支对马暖流的影响, 浮游植物种类数最多, 且以广布种为主, 其次为暖水种; 而西南部由于受长江冲淡水 and 暖流外海水的影响, 种类数少于东南部。黄海和东海的浮游植物存在明显差异。东海的浮游植物多样性显著高于黄海并呈现自远海向近岸方向逐渐降低的趋势。夏季各多样性指数在约123° E存在一个北向的舌状突(图4)。台湾暖流大体沿123° E北向流动, 直指长江口, 且夏季在

西南季风的作用下暖流轴偏东, 强度较大(苏育嵩, 1986)。由此推断, 夏季东海浮游植物多样性指数等值线的北向舌状结构是由台湾暖流造成的。

3.2 优势种的变化

东部陆架边缘海浮游植物优势种组成存在明显的季节变化。春、夏季均有尖刺伪菱形藻, 秋、冬季均有笔尖根管藻和骨条藻, 4个季节均有尖刺伪菱形藻和菱形海线藻。角毛藻在调查海区的夏季占主要优势, 海链藻则在春季占主要优势。历史资料显示, 20世纪50年代以来我国东部陆架边缘海浮游植物群落结构以角毛藻(*Chaetoceros*)—骨条藻(*Skeletonema*)为主。自1997年开始的中国海浮游生物资源的调查研究至今, 浮游植物优势种中开始出现海链藻(*Thalassiosira*), 群落结构呈现角毛藻—骨条藻—海链藻的现象。也就是说, 东部陆架边缘海浮游植物群落结构呈现角毛藻—骨条藻逐渐向角毛藻

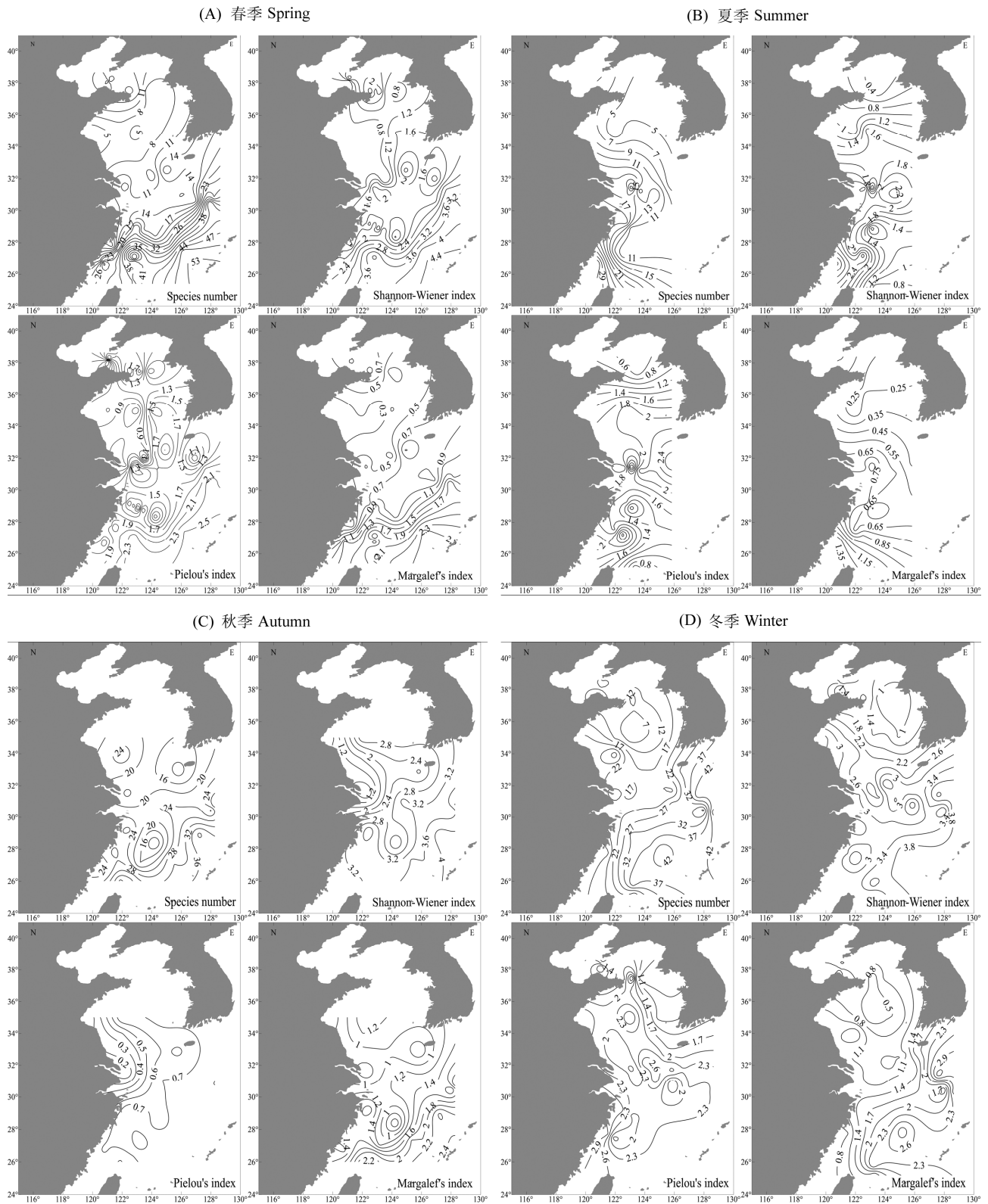


图3 中国东部陆架边缘海春季(A)、夏季(B)、秋季(C)和冬季(D)浮游植物生物多样性的平面分布

Fig. 3 Distribution of phytoplankton diversity indices in spring (A), summer (B), autumn (C) and winter (D) in the eastern marginal China seas

表2 东部陆架边缘海浮游植物丰度和优势种与历史资料比较

Table 2 Comparison among historical data of phytoplankton cell abundance and dominant species in the survey area

采样时间 Sampling time	调查范围 Sampling location	物种数 Species number	种类组成 Species composition	优势种 Dominant species	平均丰度 Average abundance ($\times 10^6$ cells/m ³)	参考文献 Reference
1958–1959	28.00°–41.00° N, 117.67°–124.50° E	205	硅藻187种, 甲藻38种, 绿藻2种, 黄藻、金藻和蓝藻各1种	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp. 菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i> 窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> 扁面角毛藻 <i>C. compressus</i> 聚生角毛藻 <i>C. socialis</i> 双突角毛藻 <i>C. didymus</i>	11.20	全国海洋综合调查报告, 1977 ^①
1977. 10–11	30.08°–34.00° N, 124.08°–129.00° E	259	硅藻157种, 甲藻102种	角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp. 热带顾氏藻 <i>Goslerella tropica</i>	–	俞建奎等, 1983; 毛兴华和李瑞香, 1984
1989. 4–5	29.00°–34.00° N, 126.00°–129.01° E	256	硅藻138种, 甲藻118种	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> 洛氏角毛藻 <i>C. lorenzianus</i> 短刺角毛藻 <i>C. messanensis</i> 扁面角毛藻 <i>C. compressus</i> 拟旋链角毛藻 <i>C. pseudocurvisetus</i> 菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	–	李瑞香和俞建奎, 1992; 俞建奎和李瑞香, 1992
1996. 5	18.00°–26.00° N, 120.00°–130.00° E	184	硅藻93种, 甲藻84种, 蓝藻5种, 金藻1种, 黄藻1种	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp. 掌状冠盖藻 <i>Stephanopyxis palmeriana</i> 洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i> 短刺角毛藻 <i>C. messanensis</i>	0.02	杨清良等, 1999
1997. 7	23.50°–33.00° N, 122.50°–130.50° E	473	硅藻216种, 甲藻246种, 蓝藻5种, 金藻4种, 绿藻2种	洛氏角毛藻 <i>C. lorenzianus</i> 翼鼻状藻 <i>Proboscia alata</i> 菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i> 扁面角毛藻 <i>Chaetoceros compressus</i> 尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> 距端假管藻 <i>Pseudosolenia calcar-avis</i> 拟旋链角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>	–	孙军等, 2000; 刘东艳等, 2000; Sun et al., 2000
1997–2000	23.50°–33.00° N, 118.50°–128.00° E	187	硅藻150种, 甲藻44种, 蓝藻5种	细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i> 拟旋链角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> 并基角毛藻 <i>C. decipiens</i> 洛氏角毛藻 <i>C. lorenzianus</i> 翼鼻状藻纤细变型 <i>Proboscia alata</i> f. <i>gracillima</i> 骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp. 菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i> 掌状冠盖藻 <i>Stephanopyxis palmeriana</i> 中华齿状藻 <i>Odontella sinensis</i> 圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.	0.69	王云龙等, 2005
2006. 11–12	24.00°–32.00° N, 120.00°–127.00° E	145	硅藻114种, 甲藻24种, 金藻6种, 蓝藻1种	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i> 圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i> 丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i> 斯氏几内亚藻 <i>Guinardia striata</i> 尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> 铁氏束毛藻 <i>Trichodesmium thiebattii</i>	4.92	王丹等, 2008
2006–2009	25.00°–39.00° N, 118.00°–129.00° E	257	硅藻199种, 甲藻74种, 金藻1种, 蓝藻2种	尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> 洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i> 旋链角毛藻 <i>C. curvisetus</i> 菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i> 伏氏海线藻 <i>T. frauenfeldii</i> 具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i> 细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i> 囊状海链藻 <i>T. scrotiformis</i> 骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp. 夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	3.00	本研究 This study

①中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室(1977) 全国海洋综合调查报告(第八册)——中国近海浮游生物的研究。

—骨条藻—海链藻过渡的趋势,而尖刺伪菱形藻和菱形海链藻则一直是该海域的主要优势种(表2)。

3.3 潮流对浮游植物细胞密度的影响

东部陆架边缘海浮游植物细胞密度的季节变化表现为春、夏高,秋、冬低(图2)。

春季,海水营养盐因冬季的对流混合而大量补充,随着日照增加,水温升高,浮游植物大量繁殖,全年中细胞密度最高,高值区分布在黄海、东海近岸和长江口邻近水域。夏季,由于黑潮水入侵陆架势力较弱,边界偏东(苗育田等,1998),长江径流强盛,使得黄海混合水团向东南延伸,从而携带大量营养盐向东南方向行进(米铁柱等,2012),进而使得浮游植物细胞密度高值区向东南方向转移至东海以东济州岛附近海区。秋季水温下降,光照逐渐减弱,但随着季节性跃层的逐渐消失,对流混合增加,使得水体营养盐得到补充,而秋季黑潮水入侵陆架的势力介于夏、冬两季之间(苗育田等,1998),黄海混合水团入侵不明显,致使浮游植物高值区出现在山东半岛以东的黄海海域。冬季由于水温低,日照条件弱,使浮游植物的细胞密度达到全年最低,同时黑潮水入侵陆架势力最强,边界偏西(苗育田等,1998),长江冲淡水回缩,使得黄海混合水团向西南方向移动(王保栋,1998),浮游植物细胞密度高值区转移至东海近岸和长江口邻近海区。因此,潮流是影响东部陆架边缘海浮游植物细胞密度的主要因素之一。

3.4 温度、盐度对浮游植物细胞密度的影响

浮游植物的生长受温度、盐度、光照等环境因素的影响。通过对东部陆架边缘海浮游植物细胞丰度与环境因子之间的线性回归分析发现,2006年夏季浮游植物细胞密度与温度(t)显著相关($y = -1,184,908x_t + 3 \times 10^7$, $0.5 < R = 0.703 < 0.8$); 2007年冬季浮游植物细胞密度与盐度(s)显著相关($y = -79,040.7x_s + 2 \times 10^6$, $0.5 < R = 0.732 < 0.8$); 2007年秋季浮游植物细胞密度与盐度(s)的相关性极其显著($y = -512,052x_s + 2 \times 10^7$, $0.8 < R = 0.980 < 1$); 2009年春季浮游植物细胞密度与盐度(s)显著相关($y = -413,051x_s + 1.02 \times 10^6$, $0.8 < R = 0.870 < 1$)。由此可见,4个季节浮游植物细胞密度除夏季外,其余3个季节都与海水盐度相关性极其显著,说明影响夏季中国东部陆架边缘海浮游植物生物量的主要环境因素是温度,而春、秋和冬季则主要是盐度。可见,温

度和盐度是影响东部陆架边缘海浮游植物细胞密度的主要因素。

3.5 春季调查海域赤潮的研究

根据Adachi(1972)的赤潮判断标准,春季调查海域中浙江沿岸发生囊状海链藻赤潮,长江口邻近海域发生尖刺伪菱形藻赤潮。囊状海链藻是陈国蔚和钱树本(1984)报道的一个新种,该种首次出现在东海东北部,奄美诸岛西北方海域(郭玉洁和钱树本,2003),之后在对中国海的浮游植物调查中未见记录,直到2009年春季该种于浙江沿岸发生大规模赤潮。另外,有研究显示2009年赤道中东太平洋4月以后进入暖水相位,6月爆发了一次厄尔尼诺事件(艾婉秀等,2010),导致西太平洋表层海温最高增温达 3°C 以上(陈锦年等,2011)。我们对中国东部陆架边缘海囊状海链藻细胞密度与平均水温、平均盐度进行了相关性分析,结果表明,2009年春季浮游植物细胞密度与水温(t)显著相关($y = -414x_t + 1.02 \times 10^6$, $0.8 < R = 0.870 < 1$)。由此推断,造成囊状海链藻突然大规模爆发的原因与2009年的厄尔尼诺现象导致海水温度升高有关。

参考文献

- Adachi Rokuro (1972) Taxonomic studies on red tide algae. *Mie Prefecture Fisheries of Minute*, 9(1), 1–149. (in Japanese)
- Ai WX (艾婉秀), Sun LH (孙林海), Song WL (宋文玲) (2010) Ocean and atmospheric circulation anomalies in 2009 and their impacts on climate in China. *Meteorological Monthly* (气象), 36(4), 101–105. (in Chinese with English abstract)
- Canini ND, Metillo EB, Azanza RV (2013) Monsoon-influenced phytoplankton community structure in a Philippine mangrove estuary. *Tropical Ecology*, 54, 331–343.
- Chen GW (陈国蔚), Qian SB (钱树本) (1984) *Thalassiosira scrotiformis* sp. nov. from the East China Sea. *Journal of Shandong College of Oceanology* (山东海洋学院学报), 14(4), 74–78. (in Chinese with English abstract)
- Chen JN (陈锦年), Wang HN (王宏娜), Wang DX (王东晓), Zuo T (左涛) (2011) Variational characteristics analyses of the El Nino event in 2009/2010. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报(中文版)), 33(6), 29–38. (in Chinese with English abstract)
- Cheng ZD (程兆第), Gao YH (高亚辉), Liu SC (刘师成), Wang DZ (王大志), Chen CP (陈长平), Liang JR (梁君荣), Li Y (李扬), Qi YZ (齐雨藻) (2013) *Flora Algarum Marinarum Sinicarum, Tomus. V. Bacillariophyta No. III. Pennatae II. Naviculales, Naviculaceae, Cymbellaceae, Auricu-*

- laceae, Gomphonemaceae* (中国海藻志 第五卷 硅藻门 第三册 羽纹纲 第II分册 舟形藻目、舟形藻科、桥弯藻科、耳形藻科、异极藻科) (eds Cheng ZD (程兆第), Gao YH (高亚辉)). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Cheng ZD (程兆第), Gao YH (高亚辉), Liu SC (刘师成), Wang DZ (王大志), Chen CP (陈长平), Liang JR (梁君荣), Qi YZ (齐雨藻) (2013) *Flora Algarum Marinarum Sinicarum, Tomus V. Bacillariophyta, No. II. Pennatae I. Diatomales, Achnanthes, Phaeodactylales, Eunotiales* (中国海藻志 第五卷 硅藻门 第二册 羽纹纲 第I分册 等片藻目、曲壳藻目、褐指藻目、短缝藻目) (eds Cheng ZD (程兆第), Gao YH (高亚辉)). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Gao YH (高亚辉) (2001) Studies on taxonomy, ecology and bioactive products of marine microalgae. *Journal of Xiamen University (Natural Science)* (厦门大学学报(自然科学版)), **40**, 566–573. (in Chinese with English abstract)
- Gao YH (高亚辉), Yu QB (虞秋波), Qi YZ (齐雨藻), Zou JZ (邹景忠), Lu DD (陆斗定), Li Y (李扬), Chen CP (陈长平) (2003) Species composition and ecological distribution of planktonic diatoms in the Changjiang River estuary during spring. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **14**, 1044–1048. (in Chinese with English abstract)
- Guo SJ (郭术津), Sun J (孙军), Dai MH (戴民汉), Liu ZL (刘志亮) (2012) Phytoplankton assemblages in East China Sea in winter 2009. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **32**, 3266–3278. (in Chinese with English abstract)
- Guo YJ (郭玉洁), Qian SB (钱树本) (2003) *Flora Algarum Marinarum Sinicarum, Tomus V. Bacillariophyta No. I. Centricae* (中国海藻志 第五卷 硅藻门 第一册 中心纲) (eds Guo YJ (郭玉洁), Qian SB (钱树本)). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Huang ZG (黄宗国), Tang SM (唐森铭) (1995) Biodiversity in China's seas and sustainable use. In: *Advances in Biodiversity Studies* (生物多样性研究进展: 首届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集) (eds Qian YQ (钱迎倩), Zhen RD (甄仁德)), pp. 150–153. Chinese Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese with English abstract)
- Li RX (李瑞香), Yu JL (俞建鑫) (1992) The distribution of dinoflagellates in the Kuroshio region of the East China Sea and their function as indicators of water systems. In: *Proceedings of the Study on Kuroshio* (4) (黑潮调查研究论文选(四)) (eds Su JL (苏纪兰), Chen ZS (陈则实), Yu GH (余国辉)), pp. 182–190. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Lin YS (林永水) (2009) *Flora Algarum Marinarum Sinicarum, Tomus VI. No. I. Dinophyceae, Ceratiaceae* (中国海藻志 第六卷 甲藻门 第一册 甲藻纲 角藻科). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Liu DY (刘东艳), Sun J (孙军), Qian SB (钱树本) (2000) Planktonic dinoflagellates in Ryūkyū-guntō and its adjacent waters: species composition and their abundance distribution in the summer of 1997. In: *Oceanography in China* (12) (中国海洋学文集(12)) (ed. Qi JM (齐济美)), pp. 170–182. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Ma X (马新), Li RX (李瑞香), Li Y (李艳), Pan YL (潘玉龙) (2013) Historical development and some emendations of dinoflagellate taxonomy. *Biodiversity Science* (生物多样性), **21**, 19–27. (in Chinese with English abstract)
- Mao XH (毛兴华), Li RX (李瑞香) (1984) Distribution and ecological characteristics of the planktonic dinoflagellates in the northern shelf of the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报(中文版)), **6**, 672–677. (in Chinese with English abstract)
- Margalef R (1958) Information theory in ecology. *Yearbook of the International Society for the Systems Sciences*, **3**, 36–71.
- Mi TZ (米铁柱), Yao QZ (姚庆祯), Meng J (孟佳), Zhang XL (张晓琳), Liu SM (刘淑民) (2012) Distributions of nutrients in the Southern Yellow Sea and East China Sea in spring and summer 2011. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), **43**, 678–688. (in Chinese with English abstract)
- Miao YT (苗育田), Yu HH (于洪华), He DH (何德华), Wang CS (王春生) (1998) Characteristics of water type distribution and seasonal variation in the Southern East China Sea. *Marine Science Bulletin* (海洋通报), **17**(5), 1–9. (in Chinese with English abstract)
- Pielou E (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, **13**, 131–144.
- Shannon C, Wiener W (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- Su YS (苏育嵩) (1986) A survey of geographical environment, circulation systems and the central fishing grounds in the Huanghai Sea and East China Sea. *Journal of Shandong College of Oceanology* (山东海洋学院学报), **16**(1), 12–27. (in Chinese with English abstract)
- Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳) (2002) The preliminary notion on nomenclature of common phytoplankton in China Seas waters. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), **33**, 271–286. (in Chinese with English abstract)
- Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳) (2004) The application of diversity indices in marine phytoplankton studies. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报(中文版)), **26**(1), 62–75. (in Chinese with English abstract)
- Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳), Qian SB (钱树本) (2000) Planktonic diatoms in Ryūkyū-guntō and its adjacent waters: Species composition and their abundance distribution in the summer of 1997. In: *Oceanography in China* (12) (中国海洋学文集(12)) (ed. Qi JM (齐济美)), pp. 158–169. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳), Xu J (徐俊), Chen KB (陈凯彪) (2004) The netz-phytoplankton community of the cen-

- tral Bohai Sea and its adjacent waters in spring 1999. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **24**, 2003–2016. (in Chinese with English abstract)
- Sun J (孙军), Tian W (田伟) (2011) Phytoplankton in Yangtze River estuary and its adjacent waters in spring in 2009: species composition and size-fractionated chlorophyll *a*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **22**, 235–242. (in Chinese with English abstract)
- Sun J, Liu DY, Yin Y, Cai XY, Qian SB (2000) The standing crop distribution and species composition of phytoplankton near Ryūkyū-guntō water and its correlation with the water mass in summer 1997. In: *Proceedings of China-Japan Joint Symposium on Cooperative Study of Subtropical Circulation System* (eds Su JL, Yuan YC), pp. 189–217. China Ocean Press, Beijing.
- The State Bureau of Quality and Technical Supervision, P. R. C. (国家技术监督局) (1992). *The Specification for Marine Monitoring-Part 6: Marine Biological Survey* (海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查 (GB/T 12763.6-2007)). China Standard Press, Beijing. (in Chinese)
- Wang BD (王保栋) (1998) On the extension and nutrient transportation of the Changjiang River diluted water. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas* (黄渤海海洋学报), **16**(2), 42–48. (in Chinese with English abstract)
- Wang D (王丹), Sun J (孙军), An BZ (安佰正), Ni XB (倪晓波), Liu SM (刘素美) (2008) Phytoplankton assemblages on the continental shelf of East China Sea in autumn 2006. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **19**, 2435–2442. (in Chinese with English abstract)
- Wang L (王磊), Zhong C (钟超), Liu X (柳欣), Huang BQ (黄邦钦) (2013) The comparative study on the diurnal variations of phytoplankton community between the northeastern South China Sea and the East China Sea in summer. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报(中文版)), **35**(6), 170–177. (in Chinese with English abstract)
- Wang YL (王云龙), Shen XQ (沈新强), Li CH (李纯厚), Yuan Q (袁骥), Gui CS (归从时), Li CS (李长松) (2005) *Plankton of the Chinese Continental Shelf and Adjacent Waters* (中国大陆架及邻近海域浮游生物). Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. (in Chinese)
- Yang QL (杨清良) (1998) Characteristics of *Trichodesmium* distribution in waters over continental shelves of the South Huanghai Sea and the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报(中文版)), **20**(5), 93–100. (in Chinese with English abstract)
- Yang QL (杨清良), Lin GM (林更铭), Lin JM (林金美) (1999) A preliminary study on ecology of phytoplankton in the subtropic gyre zone during the spring of 1996. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报(中文版)), **21**(5), 120–128. (in Chinese with English abstract)
- Yu JL (俞建銮), Li RX (李瑞香) (1992) The distribution characteristics of planktonic diatoms in the Kuroshio and its adjacent areas of the East China Sea in spring of 1989. In: *Proceedings of the Study on Kuroshio (4)* (黑潮调查研究论文选(四)), (eds Su JL (苏纪兰), Chen ZS (陈则实), Yu GH (余国辉)) pp. 173–181. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Yu JL (俞建銮), Zhang ZY (张子云), Cheng ZD (程兆第) (1983) The distribution of planktonic diatoms in the shelf of the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报(中文版)), **5**, 519–525. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 孙军 责任编辑: 周玉荣)

附录 Supplementary Material

附表1 中国东部陆架边缘海网采浮游植物种类名录

Table S1 List of phytoplankton species in the eastern marginal China seas
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-103-1.pdf>

附图1 中国东部陆架边缘海春季囊状海链藻细胞密度的平面分布(单位: $\times 10^4$ cells/m³)

Fig. S1 Cell density distribution of *Thalassiosira scrotiformis* in the eastern marginal China seas in spring
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-103-2.pdf>

附图2 中国东部陆架边缘海春季尖刺伪菱形藻细胞密度的平面分布(单位: $\times 10^4$ cells/m³)

Fig. S2 Cell density distribution of *Pseudo-nitzschia pungens* in the eastern marginal China seas in spring ($\times 10^4$ cells/m³)
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-103-3.pdf>

附图3 中国东部陆架边缘海春季夜光藻细胞密度的平面分布(单位: $\times 10^4$ cells/m³)

Fig. S3 Cell density distribution of *Noctiluca scintillans* in the eastern marginal China seas in spring ($\times 10^4$ cells/m³)
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-103-4.pdf>