

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.02.001

2014 年春季东海现生颗石藻群落分布及环境影响

刘晓丹, 刘传联, 金晓波

(同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:通过对 2014 年 5 月东海 89 个水样进行颗石藻扫描电子显微镜分析, 得到本海域春季现生颗石藻群落组成及空间分布, 并分析了环境因子对现生颗石藻分布的影响。结果表明: 春季优势种为 *Emiliania huxleyi*、*Gephyrocapsa oceanica*、*Syracosphaera* spp.、*Gephyrocapsa ericsoni* 等。现生颗石藻总量为 0~356.40 cells/mL, 颗石片为 0~2 062.38/mL。现生颗石藻多分布于 0~50 m 水层中, 颗石片在底层多有分布。无论在表层水体还是垂直水体中, 现生颗石藻的分布均呈现近岸到外海、由西北到东南, 丰度升高、多样性增多的趋势, 这与东海复杂水团系统导致的温盐、营养盐等环境因子变化有关。

关键词:现生颗石藻; 群落分布; 环境因子; 东海

中图分类号: P736.22

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)02-0001-10

颗石藻是一类海洋单细胞浮游植物, 细胞体外覆有一层或多层颗石片, 是现代海洋初级生产力的重要组成之一, 可占海洋浮游植物生产量的 15% 以上, 占深海沉积物碳酸盐组分的 25%~77%^[1], 在海洋生态与海洋碳循环中均扮演了重要角色^[2]。因此, 现生颗石藻及其环境响应研究是近年来蓬勃发展的一个领域^[3]。

东海是典型的陆架边缘海, 具有宽广的陆架和多变的环境条件, 纵跨温带和亚热带, 并受东亚季风交替影响, 既有长江口及邻近海域的终年高营养盐区, 也有东部黑潮区的低营养盐区^[4,5], 台湾东北部存在一个很强的上升流, 常以一个冷涡中心形式出现在表层水中^[6]。正因为如此复杂的环境条件, 使得东海海区是陆海相互作用最为复杂的海域。

东海现生颗石藻研究已有不少工作^[7-11], 但多集中在秋季及夏、冬两季^[7], 春季资料较少。本文根据 2014 年 5 月对东海的航次调查资料, 对该海域春季现生颗石藻空间分布及其影响因素进行分析, 旨在丰富和加深对中国近海颗石藻群落分布的认识, 探究环境因子对现生颗石藻分布的影响。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本次研究的样品来自 2014 年 5 月 18 日至 6 月

13 日“科学一号”科考船在东海陆架区(25°~30°N、120°~125°E)进行的基金委多学科综合调查共享航次。详细调查站位及洋流示意图见图 1。

从附有 CTD 的 Rosette 多通道采水器中按不同水层(通常在 <5、20、30、50 m、底层水)采集 500 mL 至 1 L 体积不等的海水, 通过真空泵(负压 < 0.02 MPa)现场抽滤到孔径 0.65 μm、直径 35 mm 的硝酸纤维素滤膜上。样品用清水洗涤, 避免盐结晶沉淀。过滤后, 滤膜通过电热板烘干(<40 °C)固定, 并转移到事前编号的塑料皮氏培养皿中, 然后置于 -20 °C 冰箱中冷冻保存以备实验室分析。

所调查水层温度、盐度、荧光度用 SeaBird CTD 现场测定。在航次调查范围内, 共采集了 24 个站位不同水层的 89 个样品, 最深处达 110 m。

1.2 属种鉴定及统计方法

现生颗石藻采用 XL-30 ESEM 环境扫描电子显微镜进行鉴定, 具体工作如下: 实验室内, 颗石藻滤膜样品于室温下自然解冻后, 小心剪取约 1 cm² 的颗石藻滤膜用双面胶黏于铜片上, 利用离子溅射镀膜台喷上一层铂金。然后将处理好的滤膜置于环境扫描电子显微镜 6000× 下进行鉴定和定量统计。

观察过程中记录所观察视域数, 并分别记录颗石藻和颗石片数目, 以统计各自丰度。在观察过程中, 当出现颗石片和较完整的颗石藻时, 进行扫描电镜照片采集。

颗石藻丰度按以下公式进行计算^[11]:

$$C = \frac{F \times N}{S \times V}$$

基金项目:国家自然科学基金项目(413076047)

作者简介:刘晓丹(1990—), 女, 硕士研究生, 海洋生物专业,

E-mail: 90liuxiaodan@tongji.edu.cn

收稿日期: 2016-04-21; **改回日期:** 2016-08-22. 文凤英编辑

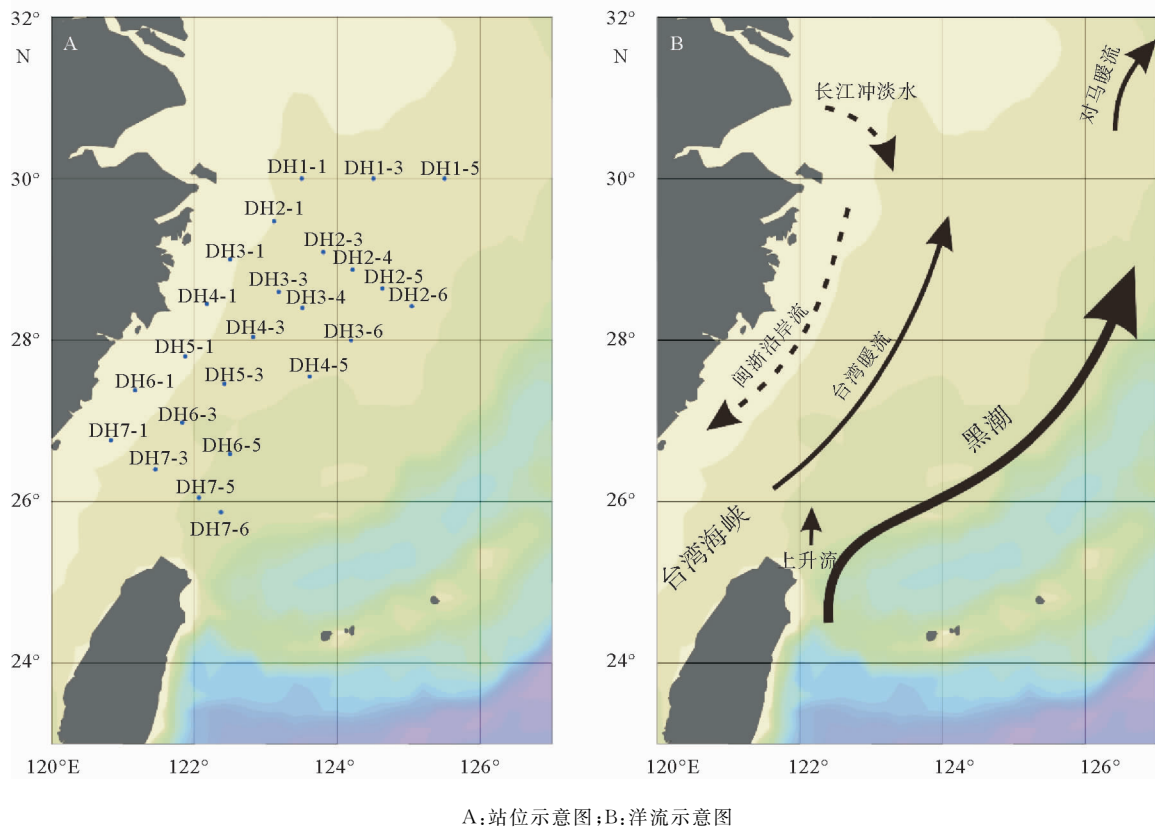


图1 2014年东海春季现生颗石藻采样站位及洋流示意图

Fig. 1 Map showing sampling stations of living coccolithophores in the East China Sea in spring 2014 and ocean currents in the study area

式中, C 是颗石藻细胞丰度 (cells/mL); F 是实际过滤面积, 即滤膜有效过滤面积 (mm^2); N 是统计出的细胞总数 (cells); S 是所分析过滤面积, 由扫描电镜视域数决定; V 是过滤水体积 (mL)。

现生颗石藻/颗石片优势度指数 (Y) 按以下公式进行计算^[12]:

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

式中, Y 为物种的优势度, N 为采集样品中所有物种的总个体数, n_i 为第 i 种的总个体数, f_i 则为该种在各样品中出现频率。在本研究中, 将优势度大于 0.1 的物种定为绝对优势种, 大于 0.01 的物种定为主要优势种, 出现频率大于 10% 的物种定为常见种。

为了更为直观地反映颗石藻群落多样性分布, 以观察群落组成的复杂程度, 计算了香农-威纳指数 (Shannon-Wiener Index, H')^[13], 计算公式如下:

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

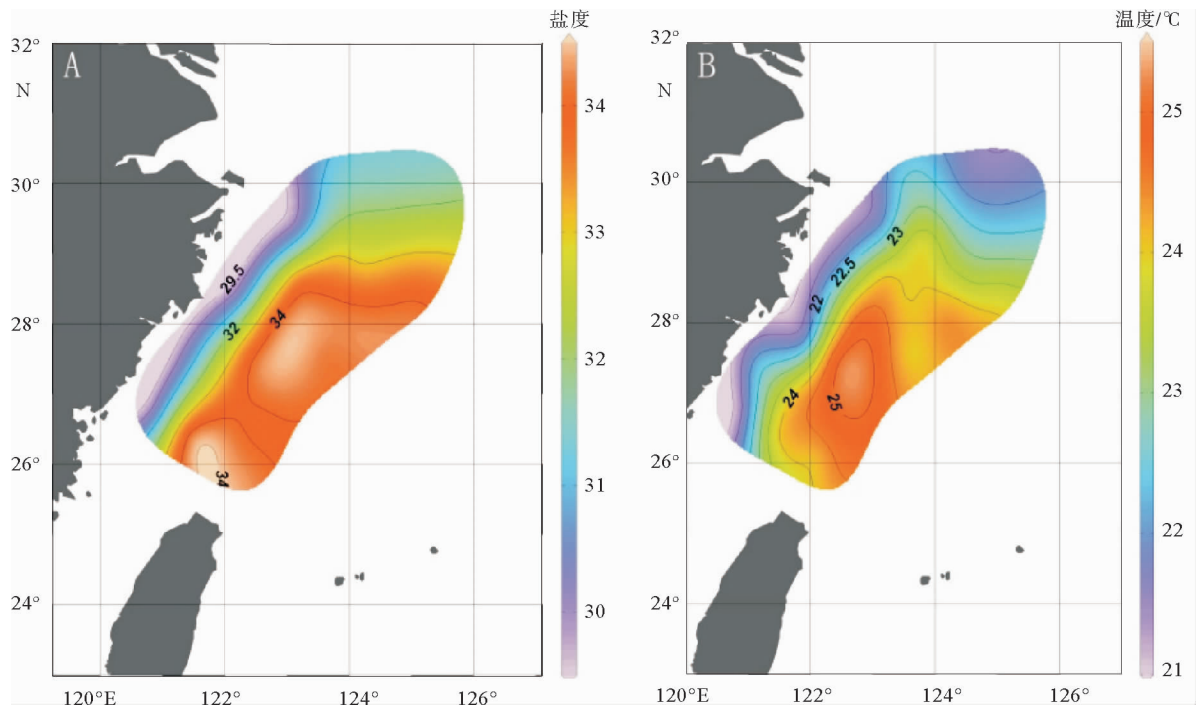
式中, H' 为群落的多样性指数, S 为种数, P_i 为

样品中属于第 i 种的个体的比例, 如样品总个体数为 N , 第 i 种个体数为 n_i , 则 $P_i = n_i/N$ 。香农-威纳指数包含两个成分, 物种数目和均匀性。如果每一个体都属于不同的物种, 群落多样性指数就最大。群落各物种之间, 个体的分配越均匀, 多样性指数就越大。

2 结果

2.1 调查海区水文情况

调查海域表层温度、盐度分布如图 2A、2B。调查海域水温为 14.4 ~ 25.02 °C, 盐度为 29.73 ~ 34.75。表层温度高值区出现在东南部, 在长江口及延伸海区 (30°N) 处受长江冲淡水影响明显, 温度较低。在东海内陆架区 (深度 < 50 m), 表层温度变化剧烈, 等值线密集。表层盐度等值线基本平行于岸线, 由内陆架向外海逐渐增加。



A: 表层温度; B: 表层盐度

图 2 2014 年春季东海表层温度、盐度

Fig. 2 Distribution of surface temperature and salinity in the East China Sea in spring 2014

2.2 现生颗石藻群落组成

本次研究观察到 10 个属共 20 种颗石藻。常见属种为 *Emiliana huxleyi*、*Gephyrocapsa oceanica*、*G. ericsoni*、*Syracosphaera* 属、*Calcidiscus leptoporus*、*Umbellosphaera tenuis*。其中, *E. huxleyi*、*G. oceanica* 颗石片与颗石藻出现频率最多, 颗石藻出现频率分别为 62.921%、56.180%, 在东海春季现生颗石藻中占绝对优势。*G. ericsoni* 和 *Syracosphaera pulchra* 颗石片与颗石藻出现频率也较多。*Syracosphaera* 属出现可分辨的 5 个种, 由于其颗石片较小且形态相近, 在统计其丰度时除 *S. pulchra* 外, 其余均以 *Syracosphaera* 属记。

春季东海表层现生颗石藻多样性(H')平面分布如图 3 所示。各站表层现生颗石藻多样性指数差别较大, 变化范围为 0~2.28, 平均值为 0.74, 最大值位于 DH7-3, 此站位有多个优势种且数目较为相当。由于部分站位表层仅出现一种甚至未发现现生颗石藻, 所以多样指数为 0。可以看出, 调查海域北部及沿岸海域, 除东北部受长江径流影响 DH1-1 站位多样性指数为 0.29, 多样性指数极低, 而在南部海域数值迅速升高, 且分布较为均匀, 最南部断面 DH7 多样性指数最高, 平均值可达 1.67。南部高值区位于调查海域中部, 西部沿岸数值较低, 东部边

缘也出现降低的趋势, 但并不十分明显。春季表层多样性整体呈现由北向南、由近岸向远海升高的趋势。

表 1 2014 年春季东海现生颗石藻常见属种
Table 1 Common living coccolithophores of the East China Sea in spring 2014

属种	出现频率 (f /%)	优势度 Y
<i>Emiliana huxleyi</i>	62.921	0.304 043
<i>Gephyrocapsa oceanica</i>	56.180	0.146 316
<i>Umbellosphaera tenuis</i>	2.247	0.000 037
<i>Helicosphaera carteri</i>	3.371	0.000 110
<i>Umbellosphaera sibogei</i>	1.124	0.000 009
<i>Calcidiscus leptoporus</i>	4.494	0.000 294
<i>Syracosphaera pulchra</i>	25.843	0.022 647
<i>Gephyrocapsa ericsoni</i>	30.337	0.031 555
<i>Calciosolenia murrayi</i>	5.618	0.000 736
<i>Syracosphaera</i> spp *	11.236	0.003 589
<i>Oolithotus fragilis</i>	4.494	0.000 221
<i>Calciosolenia brasiliensis</i>	2.247	0.000 037
<i>Calciosolenia caudatus</i>	1.124	0.000 009
<i>Florisphaera profunda</i>	1.124	0.000 009

表2 2014年春季东海颗石片常见属种

Table 2 Common coccoliths of the East China Sea in spring 2014

属种	出现频率 (f/%)	优势度 Y
<i>Emiliana huxleyi</i>	85.393	0.467 106
<i>Gephyrocapsa oceanica</i>	82.022	0.321 324
<i>Umbellosphaera tenuis</i>	14.607	0.000 264
<i>Helicosphaera carteri</i>	13.483	0.000 168
<i>Umbilicosphaera sibogae</i>	26.966	0.001 356
<i>Calcidiscus leptoporus</i>	24.719	0.001 397
<i>Syracosphaera rotula</i>	1.124	0.000 005
<i>Syracosphaera pulchra</i>	53.933	0.017 246
<i>Discosphaera tubifera</i>	1.124	0.000 001
<i>Gephyrocapsa ericsoni</i>	14.607	0.000 685
<i>Calciosolenia murrayi</i>	6.742	0.000 240
<i>Syracosphaera</i> spp *	13.483	0.000 747
<i>Oolithotus fragilis</i>	6.742	0.000 038
<i>Calciosolenia brasiliensis</i>	1.124	0.000 005
<i>Calciosolenia caudatus</i>	1.124	0.000 003

注: *Syracosphaera* spp * 包括 *Syracosphaera pirus*、*Syracosphaera ampliata*、*Syracosphaera borealis*、*Syracosphaera nodosa*

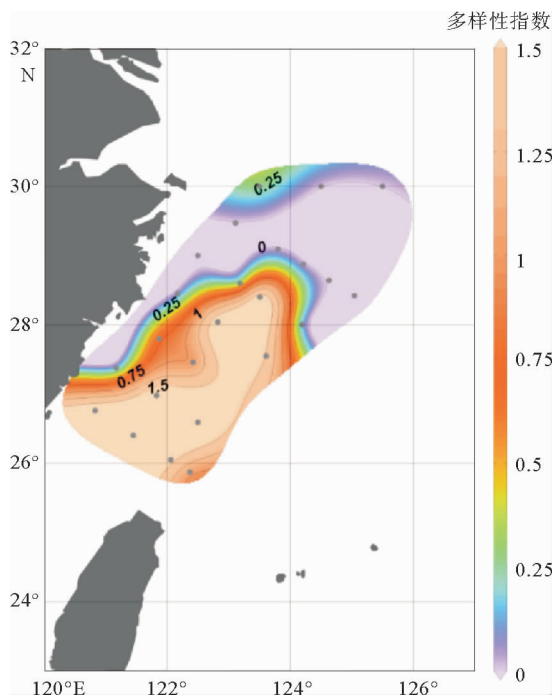


图3 春季东海表层现生颗石藻多样性平面分布

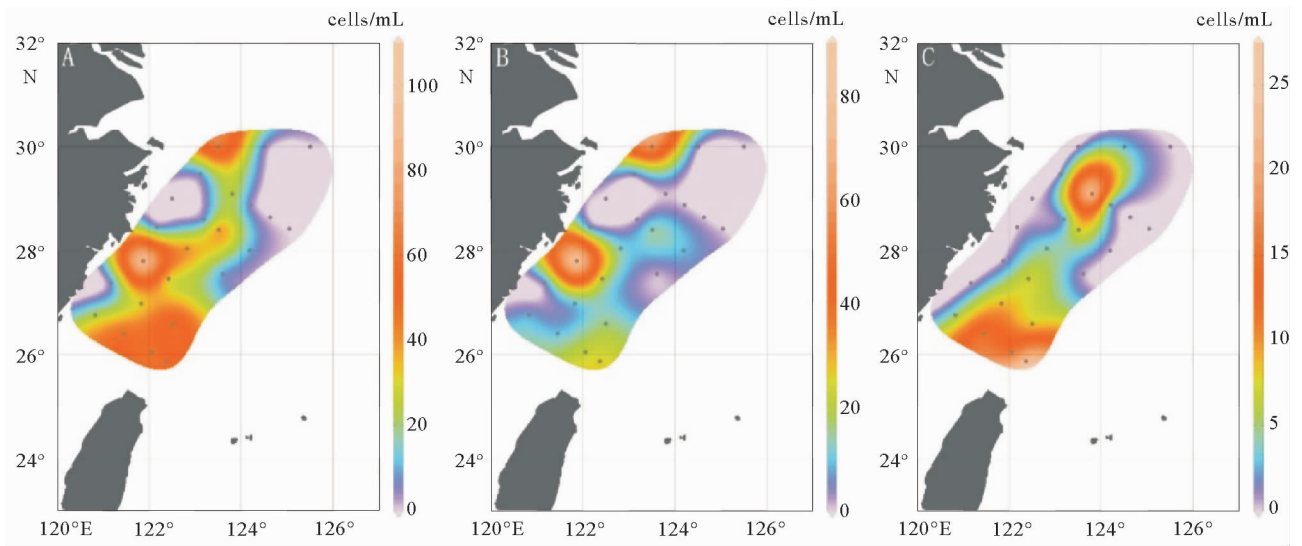
Fig. 3 Shannon-Wiener Index of living coccolithophores in spring surface water

2.3 春季东海颗石藻水平丰度及分布

春季各站位水层中现生颗石藻总量为 0~356.40 cells/mL, 平均值为 29.11 cells/mL; 颗石片为 0~2 062.38/mL, 平均值为 359.55/mL。在各层海水中, 现生 *E. huxleyi* 颗石藻总量为 0~95.04 cells/mL, 平均值为 10.76 cells/mL, 占总量的 37.0%, 颗石片总量为 0~1 447.54/mL, 平均值为 196.52/mL, 占总量的 54.7%; 现生 *G. oceanica* 颗石藻总量为 0~99.79 cells/mL, 平均值为 6.78 cells/mL, 占总量的 23.3%, 颗石片总量为 0~1 145.23/mL, 平均值为 141.5/mL, 占总量的 39.4%。丰度总体呈现由近岸向外海增加的趋势。

在春季调查海域表层水中, 现生颗石藻细胞丰度为 0~104.79 cells/mL (图 4A), 平均值为 24.66 cells/mL, *E. huxleyi* 颗石藻丰度为 0~87.73 cells/mL, 平均值为 12.43 cells/mL, 总细胞丰度与优势种 *E. huxleyi* 细胞丰度最大值均出现在 DH5-1, *G. oceanica* 颗石藻丰度为 0~26.04 cells/mL, 平均值为 5.24 cells/mL, 最大值出现在 DH2-3。在近长江冲淡水流域站位 DH1-3, 总细胞丰度与优势种 *E. huxleyi* 细胞丰度出现较大值 (67.09 cells/mL, 63.73 cells/mL)。表层水中颗石片丰度为 0~1 029.79 /mL (图 5A), 平均值为 259.17/mL, *E. huxleyi* 颗石片丰度为 0~721.19 /mL, 平均值为 40.77/mL, 总颗石片丰度与优势种 *E. huxleyi* 颗石片丰度最大值均出现在 DH1-3。 *G. oceanica* 颗石片丰度为 0~859.27/mL, 平均值为 84.25/mL, 最大值出现在 DH2-3。

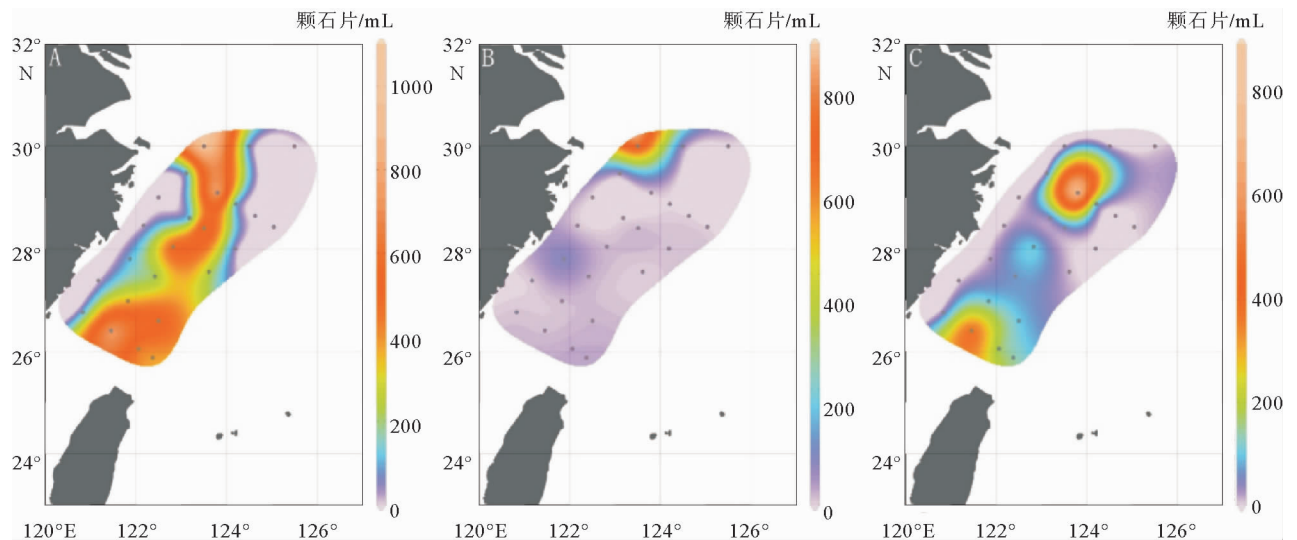
从表层水平分布来看, 在调查海域北部, 现生颗石藻多集中在 123°~124°E, 等值线与经线近似平行, 东北部颗石藻较少; 在调查海域南部, 现生颗石藻多集中在东南部且高值区范围较广。颗石片与现生颗石藻分布大致相同, 颗石片最大值出现在现生颗石藻最大值或极大值区域。其中, 现生 *E. huxleyi* 占极大优势, 多分布于近岸区域且分布较广, 在台湾东北部上升流区域也有极大值; *E. huxleyi* 颗石片分布与现生颗石藻分布区域相同, 但丰度峰值仅位于长江冲淡水海域, 其他区域丰度普遍较低 (<100 /mL)。现生 *G. oceanica* 近岸区域较少, 多分布于远岸低纬地区。虽然在现生颗石藻中 *E. huxleyi* 占绝对优势, 但对颗石片统计发现, *G. oceanica* 远多于 *E. huxleyi*, 前者几乎是后者的两倍。这可能是由于 *G. oceanica* 远端盾长轴平均长度为 5 μm ,



A: 总现生颗石藻; B: 现生 *Emiliana huxleyi*; C: 现生 *Gephyrocapsa oceanica*

图 4 现生颗石藻表层分布

Fig. 4 Distribution of living coccolithophores in the surface water layer



A: 总颗石片; B: *Emiliana huxleyi*; C: *Gephyrocapsa oceanica*

图 5 颗石片表层分布

Fig. 5 Distribution of coccoliths in the surface layer

E. huxleyi 远端盾长轴平均长度为 2.5 (type A) 至 3.5 (type B) μm ^[14], 从而使 *G. oceanica* 溶解程度较低, 保藏程度较好, 而 *E. huxleyi* 颗石多数被溶解, 绝对丰度较低。从调查区域整体来看, 春季表层现生颗石藻群落分布由 *E. huxleyi* 刻画, 颗石片群落分布由 *G. oceanica* 刻画。

2.4 春季东海现生颗石藻垂直分布

颗石藻垂直分布如图 6、7 所示。

断面 DH1 处颗石藻种类较单一, 以 *E. huxleyi*、*G. oceanica* 为主, 且现生颗石藻生物量较低,

仅在最靠近长江口的站位表层出现较多颗石藻, 主要为 *E. huxleyi*, 其余东边两个站位几乎没有现生颗石藻存在, 颗石片浓度也极低。

断面 DH2 颗石藻群落种类较断面 DH1 有所增多, 但仍以 *E. huxleyi* 为主, 颗石藻分布则呈现由近岸向外海增加趋势。除近岸的两个站位现生颗石藻生物量较低外, 其余 3 个站位生物量非常丰富, 最大值可达到 102.64 cells/mL, 同时, 颗石片含量也极高, 最大值为 2 062.38/mL。现生 *G. ericsoni* 在 DH2-4 的 DCM 层 (34 m) 中出现较高丰度, 可达到

26.6 cells/mL。0~30 m 深水层中的颗石片浓度分布与现生颗石藻几乎一致,多为 10 倍的关系,底层水中则积累了大量颗石。

断面 DH3 和断面 DH4 处现生颗石藻丰度与断面 DH2 比较稍有降低。最高生物量为 57.78 cells/mL(DH3-3, 34 m),颗石片浓度变化范围为 0~1 051.78/mL(DH4-5, 90 m)。东部边缘站位现生颗石藻丰度均比西部附近站位低,断面 DH3 这一现象尤为明显。DH3-6 现生颗石藻平均值为 7.98 cells/mL,仅为 DH3-4 的 1/2(18.21 cells/mL)。现生 *G. oceanica* 主要分布在西边几个站位,生物量随离岸距离增大而减少。*Syracosphaera* spp. 在此区域优势度较高,最大值为 27.78 cells/mL(DH4-3, 50 m)。DH3-4 与 DH4-3 两个站位物种组成相同

且最大值均出现在表层,除 *Syracosphaera* spp. 在 DH4-3 处浓度较高外,其余属种丰度变化也十分相似。其中, DH4-5 中, *U. tenuis* 在中下层水中(>50 m)浓度升高。

断面 DH5 现生颗石藻群落生物量在 DH5-1 表层出现最大值(104.788 cells/mL),主要由 *E. huxleyi* 和 *Syracosphaera* spp. 组成。其余水柱样中现生颗石藻丰度较低,平均值仅为 12.92 cells/mL,表现出现生颗石藻群落丰度不均衡性。

断面 DH6 与断面 DH7 处现生颗石藻群落多样性较高。随纬度降低, *E. huxleyi* 和 *G. oceanica* 生物量较北部几个断面有所下降,其他属种如 *Syracosphaera* spp.、*G. ericsoni*、*C. leptoporus*、*O. fragilis* 生物量明显升高。

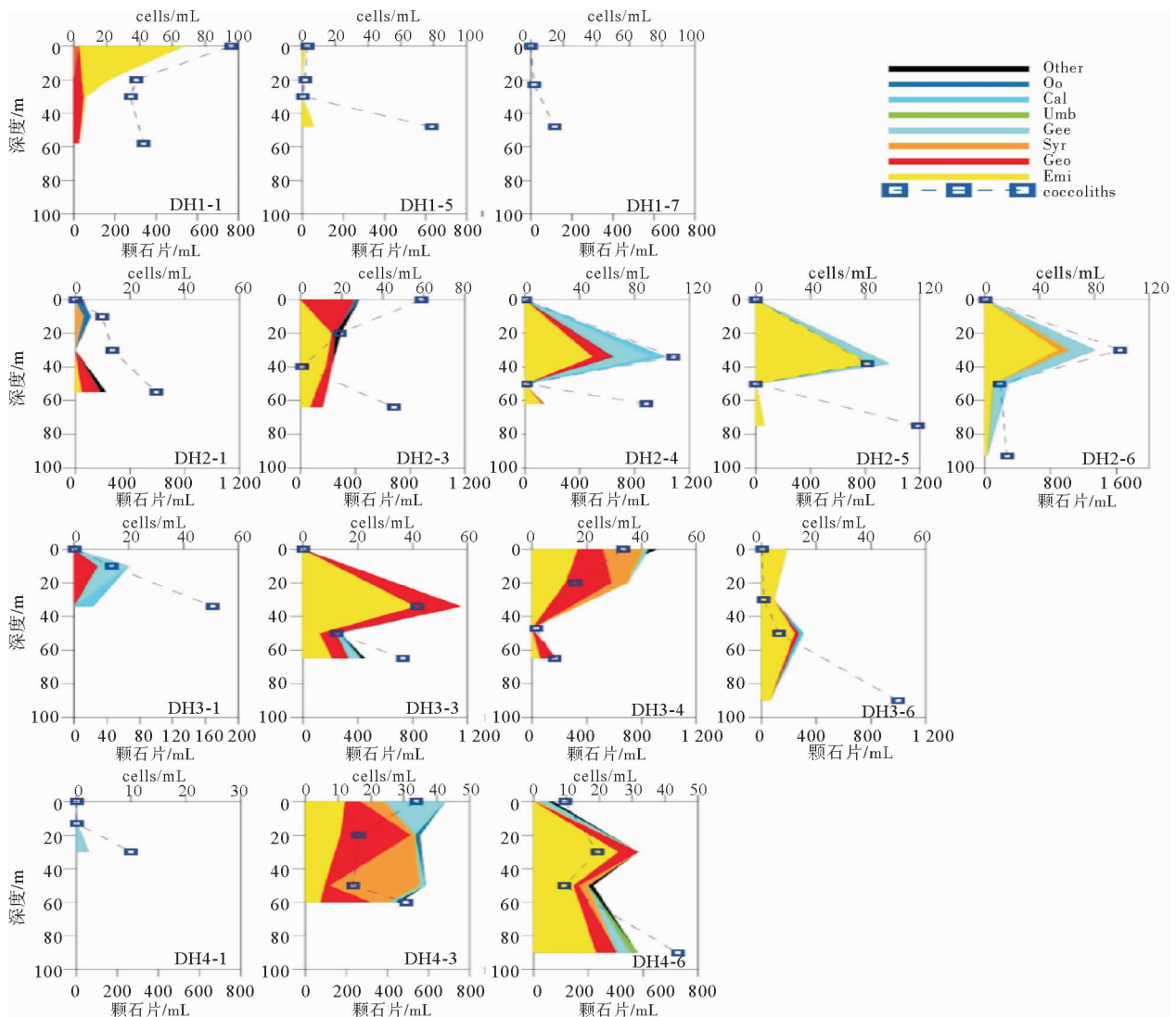


图 6 颗石藻垂直分布(DH1—DH4)

Fig. 6 Distribution of coccolithophores in the sections of DH1—DH4

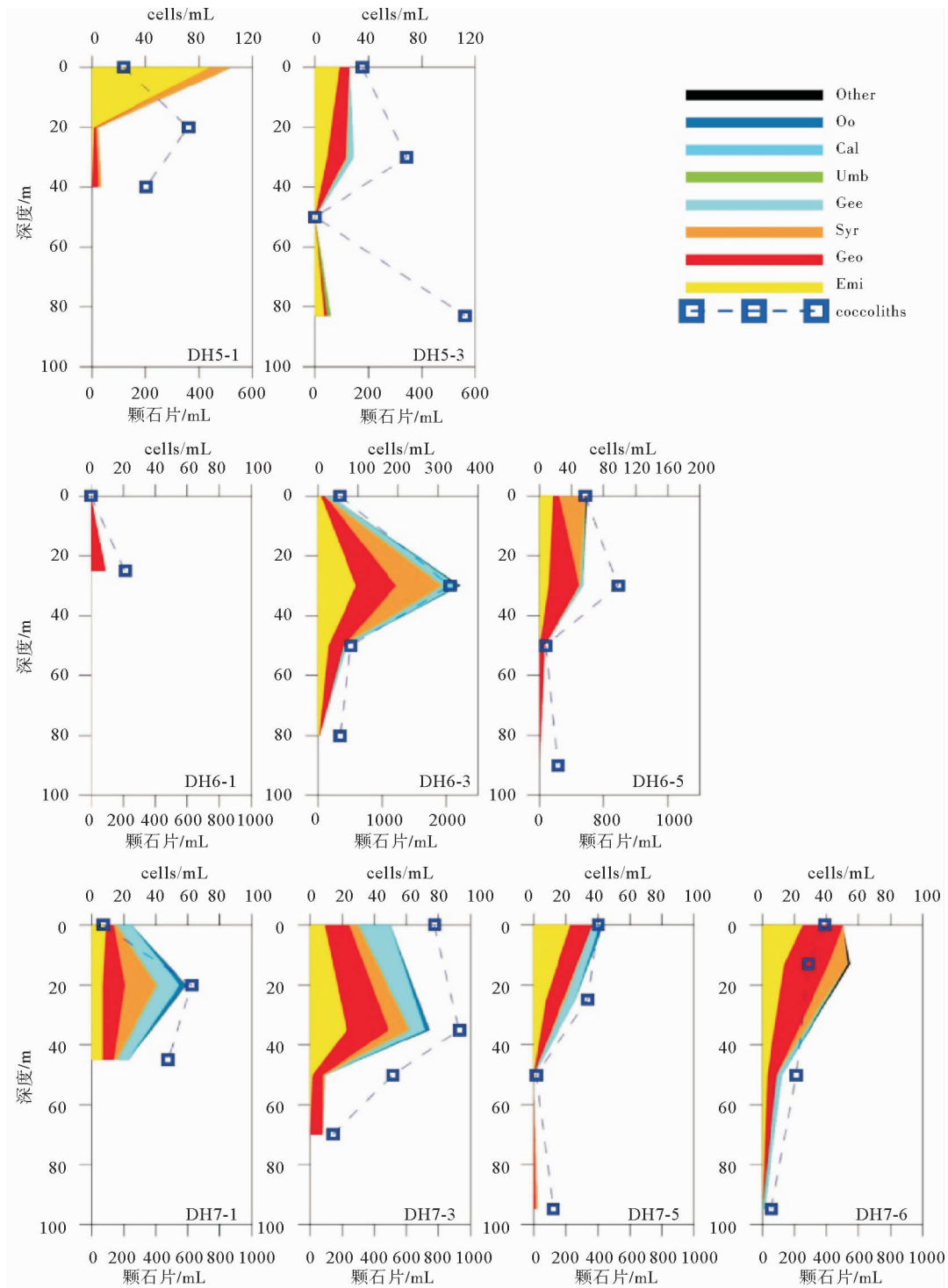


图 7 2014 年春季东海颗石藻垂直分布(DH5-DH7)

Fig. 7 Distribution of coccolithophores in the sections of DH5-DH7

Syracosphaera spp.、*O. fragilis* 多出现在 50 m 以上水层, *G. ericsoni* 主要存在于 0~50 m 水深中,但在 50 m 以下水域中也有出现。在 DH7-6 站位 50 m 水深处甚至出现了 *F. profunda*。这种颗石藻为深水种,生活在低透光带 (>100 m),适应低光强,为亚热带寡营养盐区域的主要颗石藻^[15,16]。因此,

一般在东海陆架区以内不会出现。此处出现的 *F. profunda* 可能是由水团搬运至此。颗石片垂直分布仍与现生颗石藻类似,从 0~50 m 水深层中,浓度增加,随后降低。与北部不同,断面 DH6 与断面 DH7 底层水中颗石片含量较少,未有大量积累。断面 DH6 出现了与断面 DH3 类似的情况,最东部站

位现生颗石藻与颗石片较西部附近站位丰度明显降低。DH6-5 现生颗石藻生物量为 29.81 cells/mL, 仅为 DH6-3 的 1/4(115.14 cells/mL)。

春季现生颗石藻垂直分布不均匀。丰度高值分布在各调查站位中层水(30~50 m)中,表层颗石藻丰度较低,平均丰度为 24.662 cells/mL。通常在深度>20 m 后逐渐增加并达到最高值,随后降低,在底层水中几乎不存在,平均值仅为 9.321 cells/mL。在所有 24 个取样站位中,有 12 个站位的颗石藻最高丰度所在水层为叶绿素最大层(DCM),平均深度 33.5 m,颗石藻丰度为 78.262 cells/mL。

就颗石片而言,底层颗石片密度明显高于表层,前者平均值为 453.847/mL,后者仅为 259.169/mL,而在叶绿素荧光最大水层,颗石片的平均密度可达 475.126/mL。在本次研究中,春季颗石片垂直分布分为两种类型。在近岸站位,除 DH1-1 外,颗石片丰度随水深有逐渐增加趋势,有时在底层略有减少。而在其他大多数站位中上层水(深度>50 m)中,颗石片与现生颗石藻丰度变化十分相似。在对夏季东海颗石藻群落分布研究中也存在这一趋势^[11]。次底层水颗石片含量较少,甚至几乎不存在。在底层水中,颗石片丰度较高,与现生颗石藻丰度差别巨大,最多可为现生颗石藻丰度的 177 倍(DH2-6,93 m),这是现生颗石藻死亡沉降积累和已沉积的颗石片再悬浮所致。

3 讨论与结论

本次调查区域内现生颗石藻种类以 *E. huxleyi* 和 *G. oceanica* 为主,其他常见种还有 *G. ericsoni*、*Syracosphaera* spp.、*C. leptoporus* 等,这与之前的研究近似^[7-10]。

在春季现生颗石藻群落中,随纬度降低,现生颗石藻多样性增加。从纬向剖面来看,从近岸到外海、从表层到中层,现生颗石藻多样性增加。*E. huxleyi* 为大多数水柱样中丰度最高的种,从表层到最深的底层水中均存在。*G. oceanica* 出现频率很高,但与 *E. huxleyi* 相比丰度较低。在北部断面 DH1-DH3 即 28°N、124.19°E 至 30°N、123.5°E 海域中,随离岸距离增大,*G. oceanica* 丰度减少,但在调查区域南部 *G. oceanica* 丰度未有明显降低。其他大多数现生颗石藻,如 *C. leptoporus*、*G. ericsoni*、*O. fragilis* 与 *Syracosphaera* spp., 主要分布在 50 m 以上水层中,但在 50 m 以下水域中 *G. ericsoni* 也有出现。*U. tenuis* 被定义为亚热带到热带的属

种^[17,18],在本次调查中主要出现在低纬 50 m 以下水层中。*Syracosphaera* spp. 和 *C. leptoporus* 出现在上层水体中^[19]。*O. fragilis* 被定义为热带种^[17],在本次调查中同样出现在纬度较低地区。

无论在表层还是垂直水体中,春季东海现生颗石藻的分布均呈现近岸到外海、由西北到东南,丰度升高、多样性增多的趋势,其中,在调查区域东部边缘存在中上层水体生物量骤降的情况。这与东海复杂的水团系统导致的温盐、营养盐及其他环境因子变化有关。

沿岸海域主要受长江冲淡水及沿岸流影响,虽营养盐浓度较高^[6,20],但调查时间正处于长江汛期,强烈的冲淡水作用使沿岸海水温度、盐度普遍较低。因此,现生颗石藻作为海水种丰度较低,仅有 *E. huxleyi* 浓度较高。关于颗石藻生态分布,根据 Margalef^[21] 开创性地提出其与营养盐、浊度关系的二维生态模型,他猜想相较硅藻(多发于高混合度、高营养盐水域)和甲藻(多发于稳定成层、低营养盐水域),颗石藻更倾向于二者之间的水域。根据应对环境的策略可将生物相对分为 r-选择者与 K-选择者,r-选择者繁殖速度快,适应严酷的环境,而 K-选择者生长缓慢,需要优越的生存条件。相对来说,硅藻为 r-选择者,甲藻为 K-选择者,而颗石藻则位于“r”与“K”之间的位置。针对本次研究区域,从近岸到远海浮游植物群落演替规律同此模型中藻类的演替十分相近。沿岸处营养盐浓度最高,浊度也最高,受冲淡水影响盐度较低,因此浮游植物多为硅藻(如近岸低盐性的中肋骨条藻)^[22,23],而现生颗石藻作为海水种丰度较低,仅有可以忍受较低盐度的 *E. huxleyi* 浓度较高。*E. huxleyi* 为 r-选择物种,这类颗石藻对温度容忍度较高,且常在富营养盐水域高发,而其他多数颗石藻为 K-选择物种,不适宜较低温度^[24]。近岸表层水中,*E. huxleyi* 的两个高值区均位于上升流区域:长江口外海区存在着明显的下层高盐冷水的抬升现象^[25],舟山群岛也存在明显的上升流^[26]。上升流使表层营养盐浓度升高,为 *E. huxleyi* 提供有利生存条件。Yang 等^[27] 也发现,对比台湾东北部及太平洋中心,受长江径流影响的海域现生颗石藻物种丰富度极低,其值的增长模式与盐度分布显著相似,现生颗石藻丰度最高处盐度为 32~35,在盐度低于 29 处海域,现生颗石藻基本消失。Bonomo 等^[28] 在对近海岸浅水区环境内颗石藻的分布研究时也发现河水径流是影响此类区域现生颗石藻分布最主要的因素,认为河道径流发育与颗石藻丰度负相关。

在调查海域中部的东海陆架水,冲淡水影响减弱,且受台湾暖流及黑潮支流带来的高温高盐水影响,海水盐度逐渐升高。较近岸,中部海域水温也有所上升。虽营养盐浓度中部海域较近岸降低^[20,29],但在东海为中等浓度^[30],仍适宜多数颗石藻生长,因此,现生颗石藻多样性增多且丰度较高,除 *E. huxleyi* 和 *G. oceanica*, 还出现 *Syracosphaera* spp.、*G. ericsoni*、*C. leptoporus*、*O. fragilis* 等颗石藻。在调查海域东南部也存在现生颗石藻高值区,且物种多样性在此处也有所增加。除温盐适宜外,这还与台湾东北部存在受气旋式冷涡影响的高营养盐区有关^[31]。

在调查海域东部边缘,受黑潮影响,营养盐浓度分布表层和底层有较大差异。黑潮向东海入侵路径在底部呈现营养盐浓度高值带,表层海水营养盐浓度全年处于低值^[20]。东海所观察到的颗石藻多数生活在 0~50 m 水深,少数在 50~75 m,而东部边缘站位平均水深 85 m。因此,中上层水体中现生颗石藻丰度较西部站位有所降低,主要为 *E. huxleyi* 和 *G. oceanica* 生物量的减少,其他属种未有明显变化。

因此,在东海海域,现生颗石藻分布有明显的空间差异性,沿岸海域的现生颗石藻主要受盐度限制,营养盐浓度的影响被削弱。而在中部陆架区,为高盐高营养盐的双重作用。在东部边缘,主要为营养盐限制。调查区域东南部受上升流影响也存在高值区。

致谢:本次研究由国家自然科学基金委项目“东、黄海现代颗石藻及其环境响应”(项目号码:41376047)支持,由科学一号船长及船员提供航次技术支持,特此感谢。

参考文献 (References)

- [1] Winter A, Siesser W G. Coccolithophores[M]. Cambridge University Press, 2006.
- [2] Young J R. Functions of coccoliths[M]// Coccolithophores. Cambridge University Press, Cambridge, 1994: 63-82.
- [3] Frada M, Young J, Cachão M, et al. A guide to extant coccolithophores (Calcihaptophycidae, Haptophyta) using light microscopy[J]. J. Nannoplankt. Res., 2010, 31: 58-112.
- [4] 刘超, 康建成, 王国栋, 等. 东海黑潮区营养盐及其限制作用的月际空间分异[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1375-1381. [LIU Chao, KANG Jiancheng, WANG Guodong, et al. Monthly Spatial Variation of Nutrients and Nutrient Limitation in Kuroshio of East China Sea[J]. Resources Science, 2012, 34(7): 1375-1381.]
- [5] 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. [MI Tiezhu, YAO Qingzhen, MENG Jia, 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.]
- [6] Fan K. On upwelling off northeastern shore of Taiwan[J]. Acta Oceanogr. Taiwan, 1980, 11: 105-117.
- [7] 栾青杉, 孙坚强, 左涛, 等. 东海陆架区的颗石藻[J]. 渔业科学进展, 2013(3): 1-11. [LUAN Qingshan, SUN Jianqiang, ZUO Tao, et al. Coccolithophores in the shelf waters of East China Sea[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013(3): 1-11.]
- [8] 靳少非, 孙军, 刘志亮. 2010 秋季东海今生颗石藻的空间分布[J]. 生态学报, 2013(1): 120-131. [JIN Shaofei, SUN Jun, LIU Zhiliang. The distribution of living coccolithophore in East China Sea in autumn, 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013(1): 120-131.]
- [9] 孙军, 靳少非. 中国近海今生颗石藻物种多样性初步研究[J]. 生物多样性, 2011(6): 787-797. [SUN Jun, JIN Shaofei. Species diversity of living coccolithophores in Chinese sea waters[J]. Biodiversity Science, 2011(6): 787-797.]
- [10] Bai J, Gu X, Feng Y, et al. Autumn living coccolithophores in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(8): 83-94.
- [11] Sun J, Gu XY, Feng YY, et al. Summer and winter living coccolithophores in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Biogeosciences, 2014, 11(3): 779-806.
- [12] Bollmann J, Cortés MY, Haidar AT, et al. Techniques for quantitative analyses of calcareous marine phytoplankton[J]. Marine Micropaleontology, 2002, 44(3): 163-185.
- [13] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication[M]. University of Illinois Press, 2015.
- [14] Young J R, Ziveri P. Calculation of coccolith volume and its use in calibration of carbonate flux estimates[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2000, 47(9): 1679-1700.
- [15] Cortés MY, Bollmann J, Thierstein HR. Coccolithophore ecology at the HOT station ALOHA, Hawaii[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2001, 48(8): 1957-1981.
- [16] Haidar AT, Thierstein HR. Coccolithophore dynamics off Bermuda (N. Atlantic) [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2001, 48(8): 1925-1956.
- [17] Okada H, McIntyre A. Seasonal distribution of modern coccolithophores in the western North Atlantic Ocean[J]. Marine Biology, 1979, 54(4): 319-328.
- [18] Okada H, McIntyre A. Modern coccolithophores of the Pacific and North Atlantic oceans[J]. Micropaleontology, 1977, 1: 1-55.
- [19] Saavedra-Pellitero M, Baumann K H, Flores J A, et al. Biogeographic distribution of living coccolithophores in the Pacific sector of the Southern Ocean[J]. Marine Micropaleontology, 2014, 109: 1-20.
- [20] 王芳, 康建成, 周尚哲, 等. 东海外海海域营养盐的时空分布特征[J]. 资源科学, 2008, 30(10): 1592-1599. [WANG Fang, KANG Jiancheng, ZHOU Shangzhe, et al. Nitrate

- and phosphate conditions and fishery resources in the offshore area of the East China Sea [J]. *Resources Sci.*, 2008, 30(10):1592-1599.]
- [21] Margalef R. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment [J]. *Oceanologica Acta*, 1978, 1(4): 493-509.
- [22] 郭术津, 孙军, 戴民汉, 等. 2009年冬季东海浮游植物群集 [J]. *生态学报*, 2012, 32(10): 3266-3278. [GUO Shujin, SUN Jun, DAI Minhan, et al. Phytoplankton assemblages in East China Sea in winter 2009 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(10): 3266-3278.]
- [23] 吴玉霖, 傅月娜, 张永山, 等. 长江口海域浮游植物分布及其与径流的关系 [J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(3): 246-251. [WU Yulin, FU Yuena, ZHANG Yongshan, et al. Phytoplankton distribution and its relation to the runoff in the changjiang (yangzte) estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3):246-251.]
- [24] Iglesias-Rodríguez M D, Brown C W, Doney S C, et al. Representing key phytoplankton functional groups in ocean carbon cycle models: Coccolithophorids [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4):47-1-20.
- [25] 赵保仁, 任广法, 曹德明, 等. 长江口上升流海区的生态环境特征 [J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(3):327-333. [ZHAO Baoren, REN Guangfa, CAO Deming, et al. Characteristics of the ecological environment in upwelling area adjacent to the Changjiang River Estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(3):327-333.]
- [26] 刘先炳, 苏纪兰. 浙江沿岸上升流和沿岸锋面的数值研究 [J]. *海洋学报*, 1991, 13(3):305-314. [LIU Xianbing, SU Jilan. Numerical simulation of tideinduced upwelling in coastal areas of the East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(3):305-314.]
- [27] Yang T N, Wei K Y, Chen M P, et al. Summer and winter distribution and malformation of coccolithophores in the East China Sea [J]. *Micropaleontology*, 2004:157-170.
- [28] Bonomo S, Cascella A, Alberico I, et al. Coccolithophores from near the Volturno estuary (central Tyrrhenian Sea) [J]. *Marine Micropaleontology*, 2014, 111:26-37.
- [29] 张传松, 王修林, 石晓勇, 等. 东海赤潮高发区营养盐时空分布特征及其与赤潮的关系 [J]. *环境科学*, 2007, 28(11): 2416-2424. [ZHANG Chuansong, WANG Xiulin, SHI Xiaoyong, et al. Seasonal variation and spatial distribution of nutrients and their relationships with harmful algal blooms in coastal area of the East China Sea [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, 28(11):2416-2424.]
- [30] 王保栋. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(7):1122-1126. [WANG Baodong. Nutrient distributions and their limitation on phytoplankton in the Yellow Sea and the East China Sea [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(7):1122-1126.]
- [31] 王玉衡, 董恒霖, 任典勇. 春秋黑潮及其邻近海区化学要素的分布和相互关系的探讨 [J]. *海洋学报*, 1992, 14(3):65-75. [WANG Yuheng, DONG Henglin, REN Dianyong. The distribution and interrelation of Kuroshio chemical parameters in spring and autumn [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(3):65-75.]

DISTRIBUTION PATTERN OF MODERN COCCOLITHOPHORES IN THE EAST CHINA SEA IN SPRING, 2014 AND THEIR RESPONSES TO ENVIRONMENT

LIU Xiaodan, LIU Chuanlian, JIN Xiaobo

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The community of coccolithophores in the East China Sea during the spring (18th May to 13th June) of 2014 are studied in this research. The community composition and spatial distribution of living coccolithophores (LCs) in the survey area are revealed and the influence of environmental factors discussed. 89 plankton samples are analyzed by scanning electronic microscope with *Emiliania huxleyi*, *Gephyrocapsa oceanica*, *Syracosphaera* spp., *Gephyrocapsa ericsoni* as dominant species. The cell abundance of coccolithophores ranges in 0~356.40 cells/mL and the abundance of coccoliths is in the range of 0~2062.38/mL. LCs are mainly distributed in 0 to 50 m water depth. Coccoliths increase rapidly in the deepest water layer. No matter in surface water or vertical water, the LCs cell abundance and diversity index demonstrate a rising tendency both from costal to ocean and from northwest to southeast. Temperature, salt and nutrient concentrations are suggested as the major environmental factors controlling the distribution of LCs in the ECS.

Key words: living coccolithophores (LCs); community distribution; environmental factors; East China Sea