

东海陆架区的颗石藻

栾青杉 孙坚强 左涛 陈瑞盛 王俊*

(农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室

中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘要 利用扫描电子显微镜,研究了2007年5月东海陆架区航次调查的颗石藻物种组成,给出了调查海区的颗石藻物种名录,并拍摄了出现的颗石藻物种的显微图像。本次调查共记录颗石藻物种23种,隶属于9个科、4个目,其中绝大多数为异晶颗石藻 *Heterococcolithophore*,少数为同晶颗石藻 *Holococcolithophore*。从出现频率来看,皮球石科 *Syracosphaeraceae* 的物种居多,特别是条结藻属 *Syracosphaera* 的物种,共出现了7种,占到总物种数的30%之多。赫氏艾密里藻 *Emiliana huxleyi* (Lohmann) Hay & Mohler 和大洋桥石藻 *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner 在本次调查的所有采样站点中都有出现,并且记录了赫氏艾密里藻的3种变型(Type A、Type B/C 和 Type C)。4种新纪录是皮球石科的两异晶颗石藻:历史条结藻 *Syracosphaera histrica* Kamptner 和边孔条结藻 *Syracosphaera marginaporata* Knappertsbusch;具覆球藻科 *Calyptosphaeraceae* 的两种同晶颗石藻:乳突具覆石藻 *Calyptrolithophora papillifera* (Halldal) Heimdal 和粗毛盔球藻 *Corisphaera strigilis* Gaarder,并对它们的形态特征进行了描述。东海陆架区外海受黑潮(Kuroshio)影响的区域,其独特的栖息地环境,有利于颗石藻的快速生长与繁殖,因而出现了较多的颗石藻物种。

关键词 颗石藻 赫氏艾密里藻 物种组成 东海

中图分类号 Q948.1 文献标识码 A 文章编号 1000-7075(2013)03-0001-11

Coccolithophores in the shelf waters of East China Sea

LUAN Qing-shan SUN Jian-qiang ZUO Tao

CHEN Rui-sheng WANG Jun*

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture,

Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-environment,

Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

ABSTRACT The species composition of coccolithophores was investigated based on the survey in shelf waters of the East China Sea during May 2007. By utilizing the scanning electronic microscope, we reported the species list of coccolithophores in this region and photographically demonstrated these species collected in the sampling sites. The results showed that a total of twenty-three species were recorded and affiliated to nine Families, four Orders. Most of these

国家自然科学基金面上项目(40976102)、国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室开放基金(LMEB200702)和“泰山学者”建设工程专项经费(ts200749070)共同资助

* 通讯作者。E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn, Tel: (0532)85836344

收稿日期:2012-06-01;接受日期:2012-12-21

作者简介:栾青杉(1981-),男,博士,助理研究员,主要从事海洋浮游植物分类学与生态学研究。E-mail: luanqs@126.com,

Tel: (0532)85836344-1506

species were heterococcolithophores, and others were holococcolithophores. According to the frequency of occurrences, species of Order Syracosphaeraceae were the most abundant forms, especially the Genus *Syracosphaera*, with seven species in this group, accounting for more than thirty percent of the total species covered by this study. *Emiliana huxleyi* (Lohmann) Hay & Mohler and *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner were found in all of the samples and three types of *E. huxleyi* were examined, including type A, type B/C and type C. Four species of coccolithophores were first recorded from the coastal waters of China Seas. They were: two heterococcolithophores of Family Syracosphaeraceae, *Syracosphaera histrica* Kamptner and *Syracosphaera marginaporata* Knappertsbusch; two holococcolithophores of Family Calyptosphaeraceae, *Calyptrolithophora papillifera* (Halldal) Heimdal and *Corisphaera strigilis* Gaarder. Their morphological characteristics were also described in this paper. The physico-chemical environments in the offshore seawaters of East China Sea were strongly influenced by the current of Kuroshio, providing ideal habitats for the rapid growth and reproduction of coccolithophores, and sustaining relative more species of coccolithophores in these regions.

KEY WORDS Coccolithophore *Emiliana huxleyi* Species composition
East China Sea

颗石藻 Coccolithophore 是海洋中的一类单细胞光合自养浮游生物, 粒径多数小于 10 μm , 少数超过 30 μm 。颗石藻在分类学上属于定鞭藻门 Haptophyta、颗石藻纲 Coccolithophyceae (Silva *et al.* 2007), 其可以通过钙化作用 (Calcification), 利用海水中的 HCO_3^- , 在其细胞表面形成钙质的颗石粒 (Coccolith) 外壳, 主要成分为 CaCO_3 的方解石晶体。由于颗石粒具有独特的光学特性, 双折射 (Birefringence) 和后向散射 (Backscattering), 因此颗石藻的水华过程可以通过水色卫星遥感技术进行监测 (Brown *et al.* 1994; Balch *et al.* 2007)。

颗石藻广泛分布在世界范围内的大洋、开阔海、近海以及内湾, 从低纬度的热带和亚热带的赤道太平洋, 到高纬度的北大西洋等海域都有记录 (Winter *et al.* 1994; Haidar *et al.* 2001)。太平洋海域颗石藻的研究已有很多, 主要集中在生物学及自然地理分布方面, 涵盖形态分类学特征、物种多样性及分布、优势种及其丰度、时空变化等 (Okada *et al.* 1970, 1973, 1975, 1977; Hagino *et al.* 2000; Hattori *et al.* 2004)。中国海域的颗石藻群落研究近些年来也有开展, 包括南海中部、西部、北部和东北部 (Yang *et al.* 2003; Chen *et al.* 2007; 孙军等 2011)、台湾岛东北部和东海陆架区 (Yang *et al.* 2001, 2004)、南黄海 (王俊等 2008) 等。到目前为止, 中国海域共记录颗石藻物种 70 种, 隶属于 4 个目、10 个科, 其中以皮球石科 Syracosphaeraceae 的物种居多 (共发现 21 种) (详见 TaiBNET <http://taibnet.sinica.edu.tw>)。

中国近海的颗石藻物种多样性研究主要由台湾的学者整理和出版, 已见《2008 台湾物种多样性 II. 物种名录》(邵广昭等 2008)。台湾“中研院”分别于 2002 年和 2004 年建置了台湾物种名录数据库 (TaiBNET) 和全球生物多样性信息网络 (GBIF) 的台湾入口网 (TaiBIF), 用于台湾生物多样性资料的整合及其与国际的接轨, 极大地推动了中国海域物种多样性的研究和发展 (邵广昭等 2010)。本文研究了 2007 年春季东海陆架区的颗石藻群落, 内容包括物种组成、形态学特征及分布状况, 目的主要为: 对出现的颗石藻进行图版展示并给出物种名录; 记录中国海区首次出现的颗石藻物种, 丰富中国近海颗石藻物种多样性的研究。

1 材料与方法

1.1 航次调查

2007 年 5 月 7~14 日, 使用“北斗”号科考船在我国东海陆架区 (120°~126°E, 26°~32°N), 进行了多学科

的综合外业调查(图 1)。在航次调查范围内,共采集了 8 个站点的颗石藻样品,涵盖了从台湾海峡东北部到长江口以东海域,分别为靠近黑潮(Kuroshio)流经的外海站位(S1-3、S5-8)和近岸水域站位(S4)。

1.2 样品采集

颗石藻样品采自表层以下(~2 m)的自然海水,使用 5L 的 Sea-Bird CTD 采水器进行。将 0.5 L 的海水样品,通过真空泵(保持负压<100 mmHg),抽滤到孔径 0.4 μ m、直径 25 mm 的聚碳酸酯核孔滤膜(Millipore, Inc.)上。过滤后的滤膜立刻转移到塑料的皮氏培养皿(Petri dish)中,然后置于-20 $^{\circ}$ C 冰箱中冷冻保存。

1.3 物种分类鉴定

在实验室,获取的颗石藻膜样品在室温下解冻,然后转移到 40 $^{\circ}$ C 的烘箱中,干燥 48 h。小心剪取约 1 cm²的颗石藻滤膜,置于铝桩上面,然后利用离子溅射镀膜台(HITA-CHI IB-3),喷上一层铂金。物种鉴定在扫描电子显微镜(KYKY-2800B)2000 \times 下进行。镜检整张切下的滤膜,以避免稀有种信息的缺失。根据颗石球(Coccosphere)和颗石粒形态学上的差异进行分辨(Okada *et al.*, 1977; Kleijne 1991、1992; Winter *et al.*, 1994; Cros *et al.*, 2000、2002; Kleijne *et al.*, 2002; Young *et al.*, 2003)。当视野中出现颗石粒和较完整的颗石球时,进行显微照片的采集,同时测量脱落的颗石粒的粒长和颗石球的球径。颗石藻物种每细胞的钙板数,通过计数视野正面的细胞上的颗石粒数目,然后乘以 2 获得。

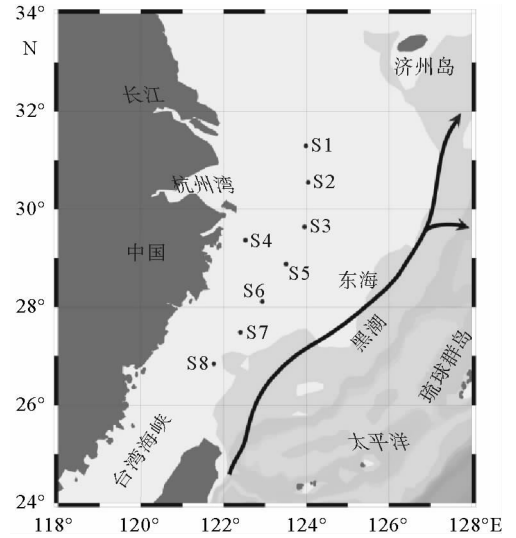


图 1 2007 年春季东海陆架区颗石藻采样站点
Fig. 1 Sampling sites of coccolithophores in the shelf waters of East China Sea in spring 2007

表 1 2007 年春季东海陆架区采样站点基本信息

Table 1 Baseline information of the sampling sites in the shelf waters of East China Sea in spring 2007

站点 Stations	日期(年/月/日)Date (yy-mm-dd)	时间 Time	东经 Longitude (E)	北纬 Latitude (N)	水深 Depth (m)
S1	2007-05-08	02:00	123.99	31.30	49
S2	2007-05-08	08:20	124.04	30.56	51
S3	2007-05-10	20:45	123.95	29.65	67
S4	2007-05-11	16:46	122.53	29.37	36
S5	2007-05-11	03:20	123.52	28.88	76
S6	2007-05-12	00:00	122.93	28.12	78
S7	2007-05-13	06:10	122.41	27.49	86
S8	2007-05-14	20:08	121.76	26.85	84

2 结果

2.1 物种组成

本次调查共记录颗石藻物种 23 种(表 2),其中绝大多数(共 20 种)为异晶颗石藻 Heterococcolithophore,其余 3 种为同晶颗石藻 Holococcolithophore。这些物种隶属于 9 个科、4 个目(圆石藻目 Coccosphaerales、等鞭金藻目 Isochrysidales、皮球石目 Syracosphaerales 和双盘藻目 Zygodiscales),还包括分类未定(Incertae sedis)种。超过半数的物种(12 种)属于皮球石目,并分在 3 个不同的科中:舟管藻科 Calciosoleniaceae 两种;棒

球蔺科 Rhabdosphaeraceae 2 种; 皮球石科 Syracosphaeraceae 8 种。在皮球石科中, 条结藻属 *Syracosphaera* 的物种最多, 共出现了 7 种, 占到总物种数的 30% 之多。

在发现的颗石藻物种中, 优势种主要为赫氏艾密里藻 *Emiliania huxleyi* Lohmann Hay & Mohler 和大洋桥石藻 *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner, 它们在本次调查的所有采样站点中都有出现。其他出现频率较多的物种分别为: 坚硬毛舟藻 *Calciopappus rigidus* Heimdal、历史条结藻 *Syracosphaera histrica* Kamptner、艾氏桥石藻 *Gephyrocapsa ericsonii* McIntyre & Bé、纤细条结藻 *Syracosphaera delicata* Cros、边孔条结藻 *Syracosphaera marginaporata* Knappertsbusch 和乳突具覆石藻 *Calyptrolithophora papillifera* Halldal Heimdal。

表 2 2007 年春季东海陆架区颗石藻物种名录

Table 2 Species list of coccolithophores from the shelf waters of East China Sea (ECS) in spring 2007

物种分类	Species taxonomy	SEMP	LS	CL	CD	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
异晶颗石	Heterococcolith												
圆石藻目	Coccosphaerales												
钙盘藻科	Calcidiscaceae												
反仔卵石藻	<i>Oolithotus antillarum</i> (Cohen 1964) Reinhardt in Cohen & Reinhardt 1968	P1. A-B	22	6.8	8.3			+			+		
等鞭金藻目	Isochrysidales												
诺氏棒藻科	Noelaerhabdaceae												
赫氏艾密里藻	<i>E. huxleyi</i> (Lohmann 1902) (Hay <i>et al.</i> 1967)	P1. C-J	20	2.3~3.9	6.4~7.8	+	+	+	+	+	+	+	+
艾氏桥石藻	<i>G. ericsonii</i> McIntyre & Bé 1967	P1. K&O (右)	20	2.1	4.2			+		+	+		+
大洋桥石藻	<i>G. oceanica</i> Kamptner 1943	P1. L-O (左)	24	4.3	9.4	+	+	+	+	+	+	+	+
皮球石目	Syracosphaerales												
舟管藻科	Calciosoleniaceae												
巴西舟管藻	<i>Calciosolenia brasiliensis</i> (Lohmann 1919)(Young <i>et al.</i> 2003)	P2. A-C	—	3.0	—						+		+
穆氏舟管藻	<i>Calciosolenia murraii</i> Gran 1912	P2. D	—	1.3	—			+					
棒球蔺科	Rhabdosphaeraceae												
四棘针刺藻	<i>Acanthoica quattrosipina</i> Lohmann 1903	P2. E-F	28	2.2	5.2			+			+		
梵氏胃甲球藻	<i>Palusphaera vandellii</i> Lecal 1965 emend. Norris 1984	P2. G-H	—	2.0	—						+		+
皮球石科	Syracosphaeraceae												
坚硬毛舟藻	<i>C. rigidus</i> (Heimdal <i>et al.</i> 1981)	P2. I-J	—	1.9	—		+	+		+	+	+	+
纤细条结藻	<i>S. delicata</i> (Cros <i>et al.</i> 2000)	P2. K-L	24	2.6	5.4			+			+	+	+
突钉条结藻	<i>Syracosphaera epigrosa</i> (Okada <i>et al.</i> 1977)	P3. H	22	2.5	5.8						+		
历史条结藻	<i>S. histrica</i> Kamptner 1941*	P3. C	52	3.3	13.1		+	+		+		+	

续表 2

物种分类	Species taxonomy	SEMP	LS	CL	CD	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
边孔条结藻	<i>S. marginaporata</i> Knappertsbusch 1993 *	P3. D	50	1.8	7.5		+	+		+			
瘤状条结藻	<i>Syracosphaera nodosa</i> Kämtner 1941	P3. E-F	30	3.5	9.8								+
欧莎条结藻	<i>Syracosphaera ossa</i> type 1 (Lecal 1966)(Loeblich <i>et al.</i> , 1968)	P3. A-B	24	2.0	5.2						+	+	+
美丽条结藻	<i>Syracosphaera pulchra</i> Lohmann 1902	P3. G	48	5.1	18.9			+					
双盘藻目 Zygodiscales													
螺旋球藻科 Helicosphaeraceae													
卡特螺旋球藻	<i>Helicosphaera carteri</i> (Wallich 1877) Kämtner 1954	P1. S	22	7.5	19.6						+		
瓦氏螺旋球藻	<i>Helicosphaera wallichii</i> (Lohmann 1902) (Okada <i>et al.</i> , 1977)	P1. P-R	—	9.5	—			+		+		+	
分类未定 Incertae sedis													
翼球藻科 Alisphaeraceae													
高氏翼球藻	<i>Alisphaera gaudii</i> HET (Kleijne <i>et al.</i> , 2002)	P3. K	76	1.4	7.3						+		
伞球藻科 Umbellosphaeraceae													
不规则伞球藻	<i>Umbellosphaera irregularis</i> (Paasche <i>et al.</i> , 1955)	P3. I-J	16	10.7	12.7			+					+
同晶颗石 Holococcolith													
分类未定 Incertae sedis													
具覆球藻科 Calyptosphaeraceae													
乳突具覆球藻	<i>C. papillifera</i> (Halldal 1953) (Heimdal <i>et al.</i> , 1980 *)	P3. O-Q	56	2.1	8.7	+	+	+		+			
粗毛盔球藻	<i>Corisphaera strigilis</i> (Gaarder 1962 *)	P3. L-M	48	1.6	6.8						+		
有角贺拉德球藻	<i>Helladosphaera cornifera</i> (Schiller 1913) Kämtner 1937	P3. N	34	1.9	6.4							+	

SEMP: 扫描电子显微镜图版照片; LS: 每细胞钙板数; CL: 颗石粒的粒长(μm); CD: 颗石球的球径(μm); S1-S8: 东海陆架区采样站位; HET: 生活史的异晶颗石藻时期; 分类系统参考 Young 等(2003); 中文名参考邵广昭等(2008)

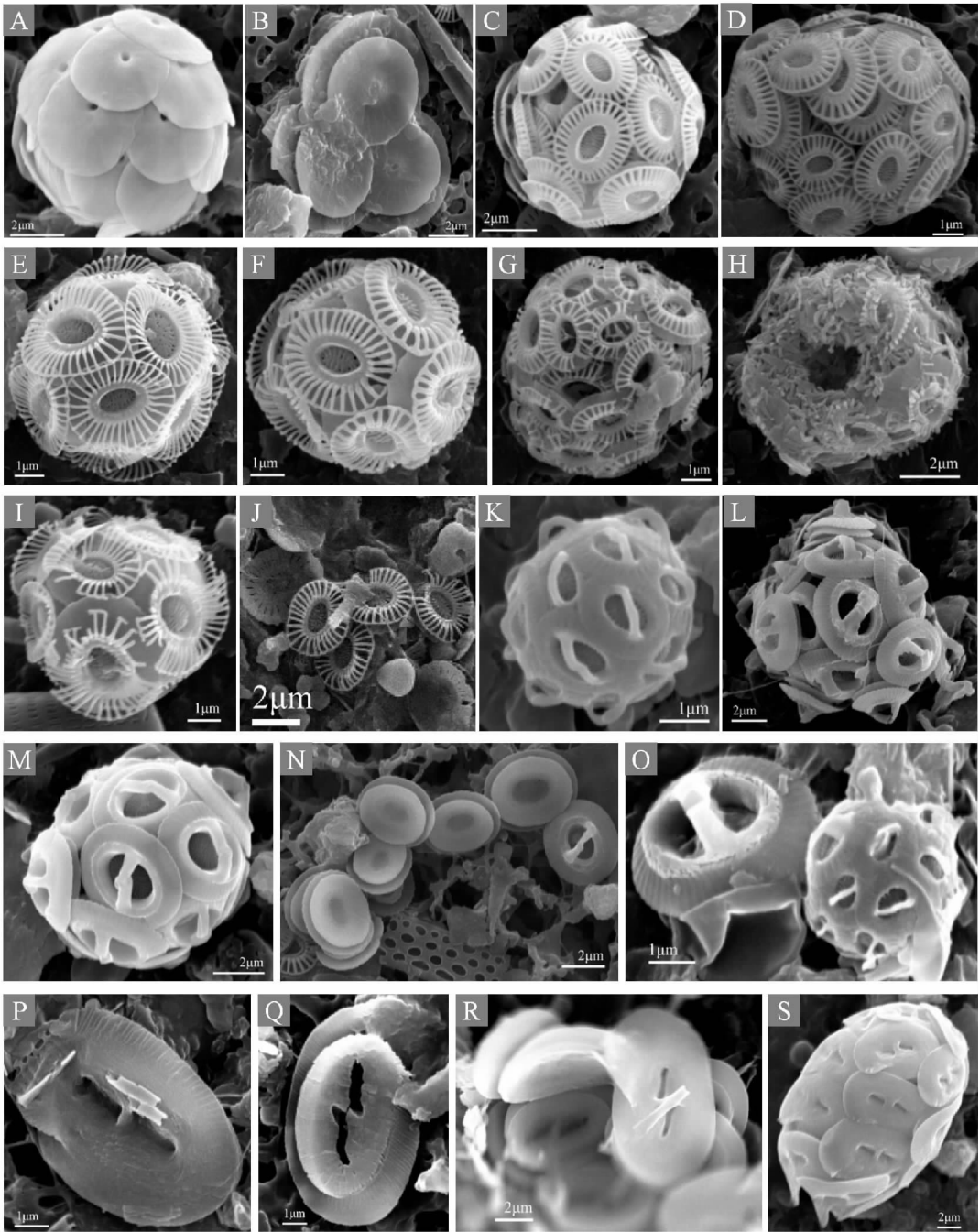
*: 中国海区新纪录颗石藻物种

SEMP, Scanning Electronic Microscope pictures in the plates; LS, The number of plates per cell; CL, Measured coccolith length(μm); CD, Measured coccosphere diameter(μm); S1-S8, Sampling stations in the shelf waters of ECS; HET, Heterococcolithophore stage of life-cycle; Taxonomy refers to the systematic classification scheme outlined by Young *et al.* (2003); Chinese names refer to Shao *et al.* (2008).

*: New recorded species of coccolithophores from the coastal waters of China Seas

2.2 形态特征

本次调查所记录的颗石藻物种,其细胞形状多数为球形(Spherical)或椭球形(Ellipsoidal)。颗石粒以异晶颗石(Heterococcolith)类型存在的物种居多,这种晶体结构类型比小而松散的同晶颗石(Holococcolith)要结实得多。图版 1~图版 3 展示了调查期间发现的 23 种颗石藻的颗石球和颗石粒在扫描电子显微镜下的形态特征。图版 1、图版 2 和图版 3-A~图版 3-K 所示物种为异晶颗石藻,图版 3-L~图版 3-Q 所示为同晶颗石藻。



图版 1

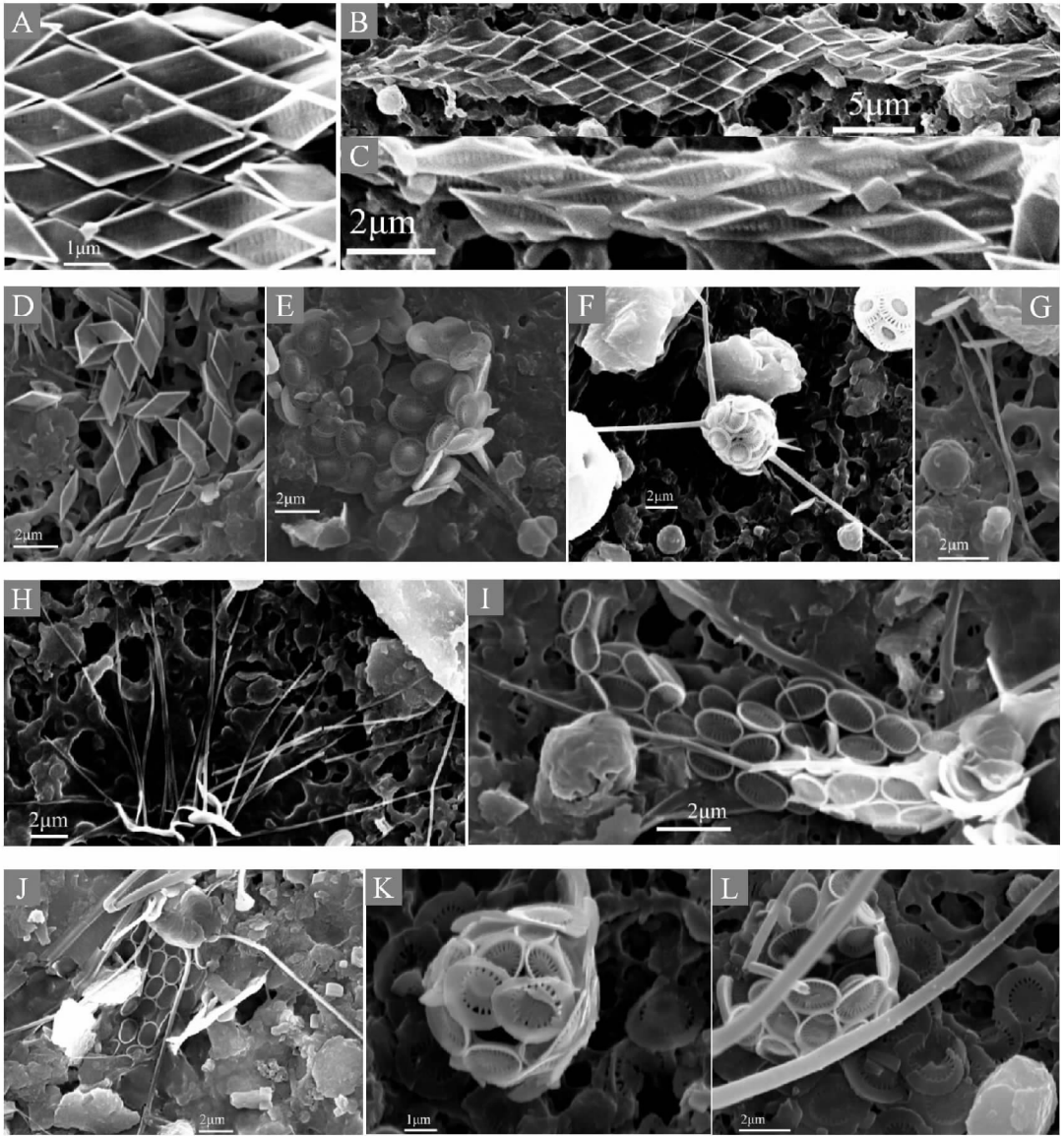
Plate 1

A-B: 反仔卵石藻; C-J: 赫氏艾密里藻 (C-D: Type A; E-F: Type B/C; G: Type C; H: 畸形的细胞; I: 侵蚀的细胞; J: 脱落的颗石粒); K&O (右): 艾氏桥石藻; L-O (左): 大洋桥石藻; P-R: 瓦氏螺旋球藻; S: 卡特螺旋球藻
 A-B: *Oolithotus antillarum*; C-J: *E. huxleyi* (C-D: Type A; E-F: Type B/C; G: Type C; H: malformed cell; I: corroded cell; J: detached coccoliths); K&O (right): *G. ericsonii*; L-O (left): *G. oceanica*;
 P-R: *Helicosphaera wallichii*; S: *Helicosphaera carteri*

电镜下测量到的颗石粒的粒长和颗石球的球径见表 2 所示。不规则伞球藻 *Umbellosphaera irregularis* Paasche、瓦氏螺旋球藻 *H. wallichii* Lohmann Okada & McIntyre 和卡特螺旋球藻 *H. carteri* Wallich Kämtner 的颗石粒粒径较长 ($>7 \mu\text{m}$), 而卡特螺旋球藻、美丽条结藻 *Syracosphaera pulchra* Lohmann 和历史

条结藻的颗石球较大(细胞直径 $> 13 \mu\text{m}$)。可以看出, 尽管某些颗石藻的颗石粒较小, 但是因其细胞相对较大, 每细胞的钙板数较多, 因此可以形成大的颗石球结构。

本研究发现的颗石藻中, 有 4 种为中国海区首次记录的物种(参照 TaiBNET 物种名录——颗石藻部分)。它们是历史条结藻、边孔条结藻、乳突具覆石藻和粗毛盔球藻 *Corisphaera strigilis* Gaarder, 其形态学特征描述如下(Young *et al.* 2003):

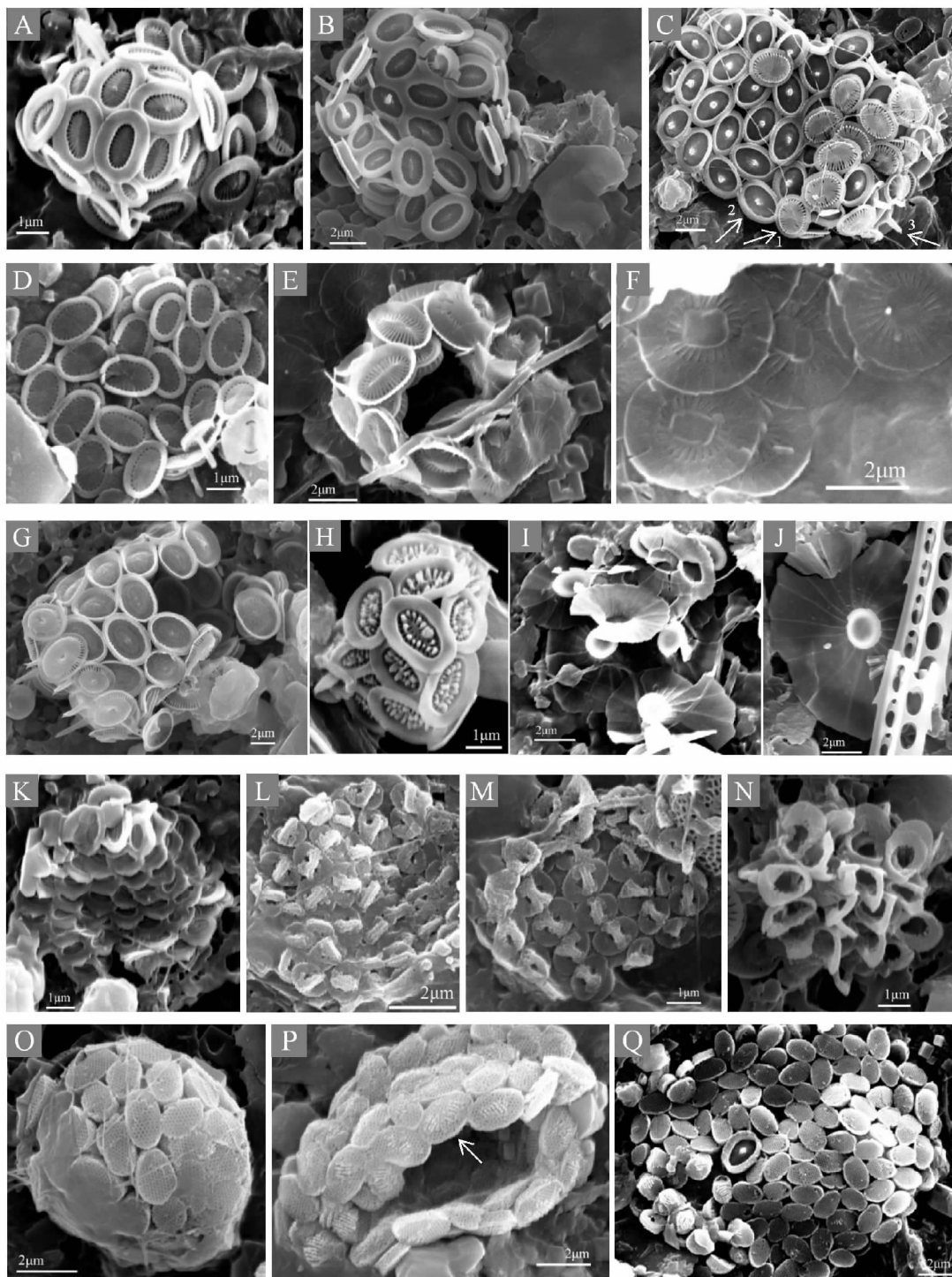


图版 2

Plate 2

A-C: 巴西舟管藻; D: 穆氏舟管藻; E-F: 四棘针刺藻; G-H: 梵氏胃甲球藻; I-J: 坚硬毛舟藻; K-L: 纤细条结藻
 A-C: *C. brasiliensis*; D: *Calciosolenia murrayi*; E-F: *Acanthoica quattrosipina*;
 G-H: *Palusphaera vandellii*; I-J: *C. rigidus*; K-L: *Syracosphaera delicata*

历史条结藻(图版 3-C): 外鞘颗石粒(Exothecal coccolith, 只在条结藻属物种中出现)椭圆、平屋顶形, $\sim 3.3 \mu\text{m}$ 长, 边(Rim)轮缘状, 放射状环形成竖直的墙状结构, 由许多的晶粒(Element)构成, 其间形成肋状的狭缝(箭头 1 所示); 主体颗石粒(Body coccolith)椭圆形, 中心区域具放射状枝条(Lath)结构, 中央突起较低(箭头 2 所示); 环鞭毛颗石粒(Circum-flagellar coccolith)的刺状结构(Spine)充分发展, $\sim 1.3 \mu\text{m}$ 高(箭头 3 所



图版 3

Plate 3

A-B: 欧莎条结藻; C: 历史条结藻; D: 边孔条结藻; E-F: 瘤状条结藻; G: 美丽条结藻; H: 突钉条结藻;

I-J: 不规则伞球藻; K: 高氏翼球藻; L-M: 粗毛盔球藻; N: 有角贺拉德球藻; O-Q: 乳突具覆石藻

A-B: *Syracosphaera ossa*; C: *S. histrica*; D: *S. marginaporta*;

E-F: *Syracosphaera nodosa*; G: *Syracosphaera pulchra*; H: *Syracosphaera epigrosa*;

I-J: *Umbellosphaera irregularis*; K: *Alisphaera gaudii*; L-M: *C. strigilis*;

N: *Helladosphaera cornifera*; O-Q: *C. papillifera*

示);颗石球球径 $\sim 13.1 \mu\text{m}$ 。主要分布在北大西洋、地中海、阿拉伯海和太平洋。

边孔条结藻(图版 3-D):主体颗石粒 $\sim 1.8 \mu\text{m}$ 长,边窄而平滑,枝条起初较窄,去边成环形小孔排列;环鞭毛颗石粒具细而高的刺状突起;颗石球球径 $\sim 7.5 \mu\text{m}$,主要分布在北大西洋、地中海、阿拉伯海和太平洋。

乳突具覆石藻(图版 3-O~Q):主体颗石粒 $\sim 2.1 \mu\text{m}$ 长,远端面(Distal)表面平直,呈六边形的网眼(Mesh)结构;环鞭毛颗石粒在不规则的区域形成平行的微晶列(Strings of crystallites)结构(图 P 箭头所示);颗石球球径 $\sim 8.7 \mu\text{m}$ 。主要分布在北大西洋、地中海、红海、阿拉伯海和印度洋。

粗毛盔球藻(*Corisphaera strigilis* Gaarder 1962,图版 3-L、M):主体颗石粒 $\sim 1.6 \mu\text{m}$ 长,具斜的鲸背状的桥(Whaleback-shaped bridge)结构;环鞭毛颗石粒具同样的桥结构,扩展成叶状;颗石球球径 $\sim 6.8 \mu\text{m}$ 。主要分布在北大西洋、地中海、红海和印度洋。

赫氏艾密里藻作为颗石藻研究的模式种之一,其广泛分布在世界范围的海域,且易形成单一物种的水华现象(Brown 1995)。目前为止,共发现了该种的 5 种变型,分别是:Type A、Type B、Type C、Type B/C 和 Type R。本次调查记录了赫氏艾密里藻的 3 种变型(图版 1-C~图版 1-G):Type A、Type B/C 和 Type C,它们的形态差异描述如下:

Type A(*Huxleyi*,图 C-D):结石(Lith)中等大小, $2.8\sim 3.2 \mu\text{m}$ 长,远端面盾(Shield)的晶粒较为结实,中心区晶粒弯曲;颗石球球径 $7.6\sim 7.8 \mu\text{m}$ 。

Type B/C(图 E-F):结石中等大小, $3.4\sim 3.9 \mu\text{m}$ 长,远端面盾的晶粒纤弱;颗石球球径 $6.4\sim 7.5 \mu\text{m}$ 。

Type C(*Kleijneae*,图 G):结石偏小, $\sim 2.3 \mu\text{m}$ 长,远端面盾的晶粒纤弱,中心区开放,或者被薄板(Thin plate)覆盖;颗石球球径 $\sim 6.9 \mu\text{m}$ 。

2.3 分布特征

本次调查,在水体较深的陆架区外海采样站点,颗石藻群落表现出了较高的物种多样性特征。各站点记录物种数分别为 S3(14 种)、S6(14 种)、S8(10 种)、S5(9 种)、S7(7 种)、S2(6 种)、S1(3 种)和 S4(2 种)。S4 和 S1 是出现物种数较少的两个站点,其中 S4 位于陆架区近岸水域,S1 位于长江口和杭州湾以东海域,其主要受到沿岸流和陆架水的影响,黑潮主流的作用不明显。S4 站只有世界广布种赫氏艾密里藻和大洋桥石藻被记录,而 S1 站除了以上两种外,另有乳突具覆石藻出现。

从颗石藻物种在各站点出现的频率来看,除了赫氏艾密里藻和大洋桥石藻在各站点都有出现以外,其他出现频率较高的物种分别为:坚硬毛舟藻(6 个站)、艾氏桥石藻(4 个站)、纤细条结藻(4 个站)、历史条结藻(4 个站)、乳突具覆石藻(4 个站)、边孔条结藻(3 个站)、欧莎条结藻 *Syracosphaera ossa* (Lecal) Loeblich & Tappan(3 个站)和瓦氏螺旋球藻(3 个站)。不难看出,皮球石科的物种在调查期间出现频率较高,特别是条结藻属的物种。另外值得一提的是,中国海区新纪录的 4 种颗石藻物种中,有 3 种在本次调查中经常出现,特别是新纪录的同晶颗石藻物种乳突具覆石藻。

3 讨论

我国东海陆架广阔、水系众多,邻接西北太平洋。发源于北赤道流的黑潮,从台湾岛的东部经过,沿东海陆架边缘流向东北方,其分支则向东海陆架内部入侵(Hsueh 2000)。黑潮携带的高温、高盐的寡营养水,与东海陆架水相互作用,其混合水所形成的独特的栖息环境,有利于颗石藻物种的快速生长与繁殖,因此出现了较高的物种多样性。

颗石藻作为 K-对策者(K-strategists),对海水中的营养盐具有很高的吸附能力,经常出现在高光照的、稳定而成层(Well-stratified)的以及营养盐缺乏的环境中(Iglesias-Rodríguez *et al.* 2002)。室内(Egge *et al.* 1992)和围隔(Mesocosm)(van der Wal *et al.* 1994)的实验都表明,不同的营养盐策略对赫氏艾密里藻种群的生长率没有影响,其在不同的 N/P 比和营养盐浓度下,都可以达到很高的细胞丰度。现场的研究(Fernández *et al.* 1993)也表明,赫氏艾密里藻的水华经常发生在硝酸盐和磷酸盐浓度很低的海域,其能够利用非硝酸盐态的 N(Palenik *et al.* 1997),且具有对 P 异常的吸收能力(Riegman *et al.* 2000),因此能够

与其他浮游植物(硅、甲藻等)在 N、P 浓度为 nmol/L 范围内的竞争中占得优势。早期的研究中,在台湾岛东北部寡营养的黑潮区海水中,记录的颗石藻物种数最多,达到 41 种(Yang *et al.* 2001),其次为南海东北部和中部的 31 种(Yang *et al.* 2003)、南海北部的 22 种(Chen *et al.* 2007)、南黄海的 11 种(王俊等 2008)以及东海的 10 种(Yang *et al.* 2004)。所记录的优势物种主要为赫氏艾密里藻、大洋桥石藻、条结藻属和伞球藻属 *Umbellosphaera* 的物种。本研究与以往的研究较为一致,除了两种典型的世界广布种以外,条结藻属的物种出现最多。

本研究记录了畸形的(Malformed)和侵蚀的(Corroded)颗石藻细胞(图版 1-H、I),很多文献都提及了颗石藻的这种形态并且解释了其发生的可能原因。Okada 等(1975)和 Yang 等(2004)认为,颗石粒形态产生畸形是由于周围环境中 N 的限制引起的。Kleijne(1990)描述了两种形态的差异并且认为低盐和营养盐缺乏是可能的原因。但是,上升流区的研究则表明,颗石粒的畸形与营养盐的不足并无关系(Giraudeau *et al.* 1993)。本次调查颗石藻的采样站位主要位于靠近黑潮流径的东海外海,受到黑潮表层水的影响,表层海水中的营养盐浓度较低。因此,颗石粒出现畸形的现象可能与表层海水中较低的营养盐浓度有关。此外,本研究中侵蚀的颗石藻与 Kleijne(1990)记录的侵蚀细胞形态也较为一致,这暗示了海水对颗石粒的溶解(Dissolution)作用。

东海陆架区海水理化环境条件多变,在不同的季节,由于颗石藻细胞营养状态和外部环境条件的不同,颗石藻在出现物种数、细胞大小、颗石粒粒长、颗石球球径以及每细胞钙板数等方面都会存在一定的差异。本文作者对 2007 年春季东海陆架区出现的颗石藻物种进行了研究,新记录了皮球石科的两种异晶颗石藻和具覆球藻科 *Calyptrospheraeae* 的两种同晶颗石藻,而以往中国海区的颗石藻调查多集中在夏冬季。今后的颗石藻研究除了走航式调查外,还应该加强定点观测,研究其昼夜变化,并且关注其季节动态。此外,由于颗石藻各物种存在不同的生态适应策略,其在物种组成、多样性以及区域分布等方面也具有更加多样化的特征。因此,在纬度较高的海区,如渤海和北黄海,也应该开展颗石藻的调查工作,以期更加全面地了解颗石藻在中国近海的分布状况,为我国生物多样性研究的发展提供基础资料。

致谢:感谢“北斗”号船员在航次调查和样品采集中的帮助!

参 考 文 献

- 王俊,左涛,陈瑞盛. 2008. 黄海球石藻的种类组成. 海洋水产研究, 29(5): 137-138
- 孙军,安佰正,戴民汉,李铁刚. 2011. 夏季南海西部今生颗石藻. 海洋与湖泊, 42(2): 170-178
- 邵广昭,彭镜毅,吴文哲. 2008. 2008 台湾物种多样性 II. 物种名录. 台北: 行政院农业委员会林务局, 67-68
- 邵广昭,赖昆祺,林永昌,柯智仁,李瀚,洪铃雅,陈岳智,陈丽西. 2010. 台湾生物多样性资料整合之经验与策略. 生物多样性, 18(5): 444-453
- Balch W, Drapeau D, Bowler B, Booth E. 2007. Prediction of pelagic calcification rates using satellite measurements. *Deep-Sea Research II* 54(5-7): 478-495
- Brown CW. 1995. Global distribution of coccolithophore blooms. *Oceanography* 8(2): 59-60
- Brown CW, Yoder JA. 1994. Coccolithophorid blooms in the global ocean. *Journal of Geophysical Research* 99(C4): 7467-7482
- Chen YLL, Chen HY, Chung CW. 2007. Seasonal variability of coccolithophore abundance and assemblage in the northern South China Sea. *Deep-Sea Research II* 54(14-15): 1617-1633
- Cros L, Fortuño JM. 2002. Atlas of Northwestern Mediterranean Coccolithophores. *Scientia Marina* 66(S1): 1-186
- Cros L, Kleijne A, Zeltner A, and 2 others. 2000. New examples of holococcolith-heterococcolith combination coccospheres and their implications for coccolithophorid biology. *Marine Micropaleontology* 39(1-4): 1-34
- Egge JK, Aksnes DL. 1992. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition. *Marine Ecology Progress Series* 83: 281-289
- Fernández E, Boyd P, Holligan PM, Harbour DS. 1993. Production of organic and inorganic carbon within a large-scale coccolithophore bloom in the northeast Atlantic Ocean. *Marine Ecology Progress Series* 97: 271-285
- Giraudeau J, Monteiro PMS, Nikodemus K. 1993. Distribution and malformation of living coccolithophores in the northern Benguela upwelling system off Namibia. *Marine Micropaleontology* 22(1-2): 93-110
- Hagino K, Okada H, Matsuoka H. 2000. Spatial dynamics of coccolithophore assemblages in the Equatorial Western-Central Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology* 39(1-4): 53-72
- Haidar AT, Thierstein HR. 2001. Coccolithophore dynamics off Bermuda (N. Atlantic). *Deep-Sea Research II* 48: 1925-1956

- Hattori H, Koike M, Tachikawa K and 2 others. 2004. Spatial variability of living coccolithophore distribution in the Western Subarctic Pacific and Western Bering Sea. *Journal of Oceanography* 60(2): 505-515
- Hsueh Y. 2000. The Kuroshio in the East China Sea. *Journal of Marine Systems* 24: 131-139
- Iglesias-Rodríguez MD, Brown CW, Doney SC and 5 others. 2002. Representing key phytoplankton functional groups in ocean carbon cycle models; Coccolithophorids. *Global Biogeochemical Cycles* 16: 1100, doi:10.1029/2001GB001454
- Kleijne A. 1990. Distribution and malformation of extant calcareous nannoplankton in the Indonesian Seas. *Marine Micropaleontology* 16(3-4): 293-316
- Kleijne A. 1991. Holococcolithophorids from the Indian Ocean, Red Sea, Mediterranean Sea and North Atlantic Ocean. *Marine Micropaleontology* 17(1-2): 1-76
- Kleijne A. 1992. Extant Rhabdosphaeraceae (coccolithophorids, class Prymnesiophyceae) from the Indian Ocean, Red Sea, Mediterranean Sea and North Atlantic Ocean. *Scripta Geologica* 100: 1-63
- Kleijne A, Jordan RW, Heimdal BR and 3 others. 2002. Five new species of the coccolithophorid genus *Alisphaera* (Haptophyta), with notes on their distribution, coccolith structure and taxonomy. *Phycologia* 40(6): 583-601
- Okada H, Honjo S. 1970. Coccolithophoridae distributed in Southwest Pacific. *Pacific Geology* 2(1): 11-21
- Okada H, Honjo S. 1973. The distribution of oceanic coccolithophorids in the Pacific. *Deep-Sea Research* 20(4): 355-374
- Okada H, Honjo S. 1975. Distribution of coccolithophores in marginal seas along the western Pacific Ocean and in the Red Sea. *Marine Biology* 31(3): 271-285
- Okada H, McIntyre A. 1977. Modern coccolithophores of the Pacific and North Atlantic Oceans. *Micropaleontology* 23(1): 1-55
- Palenik B, Henson SE. 1997. The use of amides and other organic nitrogen sources by the phytoplankton *Emiliana huxleyi*. *Limnology and Oceanography* 42(7): 1544-1551
- Riegman R, Stolte W, Noordeloos AAM, Slezak D. 2000. Nutrient uptake and alkaline phosphate (EC 3 : 1 : 3 : 1) activity of *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) during growth under N and P limitation in continuous cultures. *Journal of Phycology* 36(1): 87-96
- Silva PC, Thronsen J, Eikrem W. 2007. Revisiting the nomenclature of haptophytes. *Phycologia* 46(4): 471-475
- van der Wal P, van Bleijswijk JDL, Egge JK. 1994. Primary productivity and calcification rate in blooms of the coccolithophorid *Emiliana huxleyi* (Lohmann) Hay et Mohler developing in mesocosms. *Sarsia* 79(4): 401-408
- Winter A, Siesser WG. 1994. Coccolithophores. Cambridge: Cambridge University Press 1-242
- Winter A, Jordan RW, Roth PH. 1994. Biogeography of living coccolithophores in ocean waters. In: Winter A, and Siesser WG. Coccolithophores. Cambridge: Cambridge University Press, 161-410
- Yang TN, Wei KY, Chen LL. 2003. Occurrence of Coccolithophorids in the Northeastern and central South China Sea. *Taiwania* 48: 29-45
- Yang TN, Wei KY, Gong GC. 2001. Distribution of coccolithophorids and coccoliths in surface ocean off northeastern Taiwan. *Botanical Bulletin of Academia Sinica* 42: 287-302
- Yang TN, Wei KY, Chen MP and 4 others. 2004. Summer and winter distribution and malformation of coccolithophores in the East China Sea. *Micropaleontology* 50(S1): 157-170
- Young JR, Geisen M, Cros L and 4 others. 2003. A guide to extant coccolithophore taxonomy. *Journal of Nannoplankton Research (Special Issue 1)*: 1-125