

孙军, 刘海娇, 李欣, 等. 南海北部夏、冬季今生颗石藻分布[J]. 海洋学报, 2015, 37(12): 1—10, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.12.001

Sun Jun, Liu Haijiao, Li Xin, et al. Distribution of living coccolithophores in the northern South China Sea in summer and winter[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(12): 1—10, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.12.001

南海北部夏、冬季今生颗石藻分布

孙军^{1,2*}, 刘海娇^{1,2}, 李欣^{1,2}, 冯媛媛^{1,2}

(1. 天津科技大学 海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 天津科技大学 天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津 300457)

摘要: 本研究对 2009 年南海北部(17°~24°N, 108°~122°E)夏季和 2010 年冬季的颗石藻群落结构进行了描述。颗石藻镜检工作以偏光显微镜为主, 并辅助于扫描电镜进行物种的鉴定与计数, 共鉴定物种 11 属 13 种。总体来说, 冬季的颗石藻细胞丰度明显高于夏季, 夏季细胞丰度介于 $0.3 \times 10^3 \sim 71.8 \times 10^3$ cells/L 之间, 平均丰度 6.0×10^3 cells/L; 冬季介于 $0.3 \times 10^3 \sim 64.4 \times 10^3$ cells/L 之间, 平均丰度 6.7×10^3 cells/L。夏季多样性指数和均匀度指数分别介于 0.30~1.98 和 0.30~0.99 之间, 冬季分别介于 0.51~2.25 和 0.33~0.99 之间。夏季颗石藻细胞表层丰度分布规律不显著, 冬季颗石藻分布高值区位于珠江口的外海站位; 垂直分布上, 颗石藻细胞丰度高值通常出现于次表层水体。调查期间颗石藻类群出现的优势种为纤细伞球藻(*Umbellosphaera tenuis* (Kamptner) Paasche)、赫氏艾密里藻(*Emiliania huxleyi* (Lohmann) Hay et Mohler) 以及大洋桥石藻(*Gephyrocapsa oceanica* Kamptner)。典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)结果表明, 夏季优势种赫氏艾密里藻和大洋桥石藻与大部分环境因子呈正相关关系, 冬季响应特征不同。

关键词: 今生颗石藻; 典范对应分析; 群落结构; 优势种; 南海北部

中图分类号: Q948.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)12-0001-10

1 引言

南海是中国最大的边缘海, 地处热带与亚热带之间, 水温和盐度全年较高, 以热带海洋性气候为特征, 是典型的季风气候区。南海作为开阔的半封闭式海盆, 存在众多复杂的环流和涡旋, 且季节特征明显^[1-5]。

今生颗石藻是海洋中最重要的一类光合自养钙质鞭毛藻, 属于定鞭藻门, 颗石藻纲^[6]。其作为海洋中的重要初级生产者, 在海洋生态系统的物质循环和能量流动中发挥重要作用, 拥有有机碳泵和碳酸盐反向泵的双重机制, 对大气和海区二氧化碳循环

影响重大^[7]。

中国海有关颗石藻的研究多集中于地质沉积物方面, 有关水体中的今生颗石藻研究较少, 相关工作也仅停留于十几年以前的调查, 主要有 Okada 在 1969 年, 杨天南在 1996 年以及 Chen 于 2002—2003 年的调查, 并且这几次大范围的调查发现, 南海今生颗石藻细胞相对丰度不高^[8-11]。然而 Brown 和 Yoder^[12]在 1994 年统计的世界大洋颗石藻水华图中, 南海作为曾经暴发大面积藻华的重要海区还需进行深入细致的研究。

针对以上研究现状, 本研究以珠江口断面、琼东

收稿日期: 2015-05-18; 修订日期: 2015-10-08。

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-1065); 国家重点基础研究发展计划(2015CB954002); 国家自然科学基金(41176136, 41276124)。

作者简介: 孙军(1972—), 男, 甘肃省华亭县人, 教授, 主要从事海洋生态学研究。E-mail: phytoplankton@163.com

上升流区以及吕宋海峡黑潮流经站位为主,进行了夏、冬季今生颗石藻的综合生态调查,以期获得南海今生颗石藻的群落季节变化概况,为南海今生颗石藻年际变化及更大时空尺度的研究提供基础资料。

2 材料方法

2.1 站位

2009 年夏季(8 月 15 日—9 月 1 日)和 2010 年冬季(12 月 20 日—次年 2 月 1 日)在南海北部(17°~24°N, 108°~122°E)分别设置如图 1 所示调查站位,搭载“东方红 2”号科考船,分别进行夏、冬两个航次的水文、化学和生物的现场综合调查。

2.2 样品采集和处理

根据各观测站的水深,用海鸟 CTD(12 个

12LGo-Flo 采水器)于标准层(0 m、10 m、25 m、50 m、75 m、100 m、150 m 和 200 m)进行取样。并用弱碱性福尔马林溶液固定,终浓度为 2%^[13],以防止海水对颗石粒的腐蚀。样品带回实验室内,用混合纤维素酯微孔滤膜(用于偏光镜的观察,孔径 0.2 μm,直径 25 mm)或聚碳酸酯膜(用于扫描电镜的观察,孔径 0.45 μm,直径 25 mm)过滤样品 400 mL,滤膜立即用 pH 8~9 的弱碱性蒸馏水冲洗滤膜(过滤后的滤膜用 200 mL 蒸馏水浸泡 1 h 后,滤掉蒸馏水),以除去盐粒和甲醛结晶,然后置于 40℃ 烘箱中烘干,裁剪成 1 cm² 大小,制成标本。置于扫描电镜 1 000× 倍率或 Motic BA300pol. 偏光显微镜 1 000× 倍率下,进行颗石藻的物种鉴定和细胞计数。

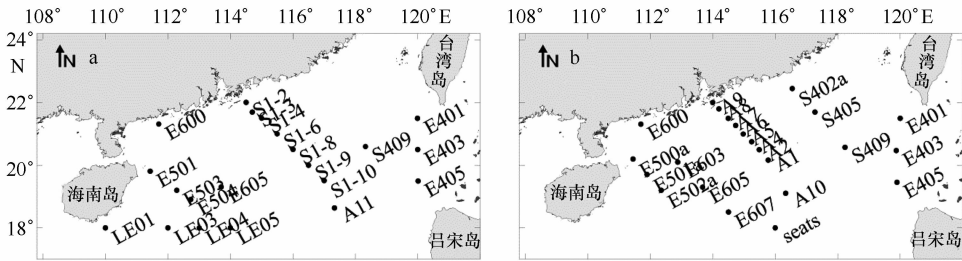


图 1 颗石藻调查站位示意图(a. 夏季;b. 冬季)

Fig. 1 Sampling stations of coccolithophores in the northern South China Sea (a. summer; b. winter)

2.3 颗石藻群落结构分析与计算

颗石藻细胞丰度的换算参照孙军等给出的计算公式^[14]。对颗石藻群落结构进行分析的各项指数分别如下:

物种多样性指数采用香农—威纳指数(Shannon-Wiener index)^[15]:

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

物种均匀度采用 Pielou 均匀度指数^[16]:

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

优势度(Y)计算公式^[17]:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i, \quad (3)$$

式中, N 为采集的所有样品中所有物种的总个数, n_i 为物种 i 在所有样品中的总个体数, $P_i = n_i/N$ 为第 i 物种在样品中的细胞丰度比值, S 为各个样品中的物种数, f_i 为物种 i 在样品中出现的频率。

3 结果与讨论

3.1 南海今生颗石藻物种组成与丰度

南海颗石藻调查共镜检样品 273 个, 鉴定物种 11 属 13 种, 各物种出现频率如表 1 所示。调查期间优势种为纤细伞球藻 (*Umbellosphaera tenuis* (Kamptner) Paasche)、赫氏艾密里藻 (*Emiliania huxleyi* (Lohmann) Hay et Mohler) 以及大洋桥石藻 (*Gephyrocapsa oceanica* Kamptner)。纤细伞球藻是南海常见颗石藻类型, 作为伞球藻属的颗石藻, 常被用来追踪黑潮的历史变化, 是古海洋地质的标志物, 用于追踪黑潮流的远古途径^[9,11], 但该种属易溶解类型, 在沉积物中不常见, 常出现于寡营养海域。赫氏艾密里藻作为广布性种, 广泛分布于世界各大洋^[18], 极易发生藻华, 便于通过遥感技术对其进行监测, 因其广温广盐性, 便于实验室培养, 通常被作为颗石藻的模式物种进行研究。大洋桥石藻为暖水性种, 通常分布于营养盐较高及较温暖的水域, 该种也是水华发生时的常

见物种,因其颗石粒不易溶解且对盐有较高的忍受度,成为沉积物中的常见种^[19]。

表 1 调查区颗石藻物种组成

Tab. 1 Species composition of coccolithophores assemblage in the survey area

中文名/拉丁文	颗石 粒数*	出现频率(f_i)	
		夏季	冬季
细孔钙盘藻 <i>Calcidiscus leptoporus</i> (Murray et Blackman) Loeblich et Tappan	35	0.382	0.317
赫氏艾密里藻 <i>Emiliania huxleyi</i> (Lohmann) Hay et Mohler	17	0.687	0.838
深水花球藻 <i>Florisphaera profunda</i> Okada et Honjo	65	0.015	0.085
大洋桥石藻 <i>Gephyrocapsa oceanica</i> Kamptner	20	0.198	0.415
卡特旋筏球藻 <i>Helicosphaera carteri</i> (Wallich) Kamptner	27	0.641	0.120
反仔卵石藻 <i>Oolithotus antillarum</i> (Cohen) Reinhardt	22	0.099	0.092
盘孔筏球藻 <i>Pontosphaera discopora</i> Schiller	45	0.031	0.014
杆形棒球藻 <i>Rhabdosphaera clavigera</i> Murray et Blackman	26	—	0.007
美丽条结藻 <i>Syracosphaera pulchra</i> Lohmann	20	0.053	0.077
不规则伞球藻 <i>Umbellosphaera irregularis</i> Paasche	18	—	0.014
纤细伞球藻 <i>Umbellosphaera tenuis</i> (Kamptner) Paasche	13	0.641	0.613
迭叶脐球藻 <i>Umbilicosphaera foliosa</i> (Kamptner ex Kleijne) Geisen	17	0.069	0.063
希布格脐球藻 <i>Umbilicosphaera sibogae</i> (Weber-van Bosse) Gaarder	58	0.107	0.197

注: * 参考文献[11,20]; — 表示未检出。

调查期间颗石藻细胞丰度都处于较低的水平,夏季介于 $0.3 \times 10^3 \sim 71.8 \times 10^3$ cells/L 之间,平均细胞丰度 6.0×10^3 cells/L,最大值出现在 S409 站位 200 m 处,最小值出现在 E605 站位的底层样品,总体细胞丰度高值区位于近岸站位,集中于 S409、E504、LE05 等站位;冬季颗石藻细胞丰度在 $0.3 \times 10^3 \sim 64.4 \times 10^3$ cells/L 之间,平均细胞丰度 6.7×10^3 cells/L,细胞丰度于 seats 站位 100 m 处出现最大值,最小值于 E403 号站位 100 m,细胞丰度在外海站位较高,主要

集中于 seats、A1、A4、A10 等站位。

本次南海颗石藻群落结构的调查与之前的调查具有较好的一致性,包括物种组成、优势种和细胞丰度的水平分布及垂直分布等方面(表 2)。赫氏艾密里藻作为一种广布性种,在世界范围内广泛分布,是颗石藻暴发的优势种,细胞丰度可占 80%~90% 的比例,尤其在夏、冬季的南海陆架区,细胞生长更加旺盛^[21]。

表 2 南海北部调查区今生态石藻群落与历史资料的比较

Tab. 2 Comparison for historical data of coccolithophores community in the northern South China Sea

调查 时间	分析 方法	优势种	细胞丰度 / 10^3 cells \cdot L ⁻¹	调查海域	文献 资料
1969 年 6—8 月	偏光	<i>G. oceanica</i> , <i>U. irregularis</i> , <i>E. huxleyi</i>	1.0~66.0	南海南部(表层)	[8]
1996 年 3 月, 1996 年 10 月	SEM	<i>E. huxleyi</i> , <i>G. oceanica</i> , <i>F. profunda</i>	0~25 m; 25~31 150 m; 12~62	南海东北部, 中部	[11]
2002 年 3 月—2003 年 7 月	SEM	冷季: <i>E. huxleyi</i> , <i>G. oceanica</i> , <i>G. ericsonii</i> 暖季: <i>U. irregularis</i> , <i>U. tenuis</i> , <i>D. tubifera</i>	春: 50.7 ± 12.2 夏: 8.4 ± 1.7 秋: 31.5 ± 7.5 冬: 61.8 ± 28.2	南海北部(表层)	[10]

续表 2

调查时间	分析方法	优势种	细胞丰度 / $10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$	调查海域	文献资料
2007 年 8 月	偏光	<i>E. huxleyi</i> , <i>G. Oceanica</i> , <i>F. profunda</i>	0~33.0	南海西部	[14]
2009 年 9 月	偏光	<i>U. tenuis</i> , <i>E. huxleyi</i> , <i>G. oceanica</i>	0.3~71.8	南海北部	本研究
2010 年 2 月	偏光	<i>E. huxleyi</i> , <i>G. Oceanica</i> , <i>U. tenuis</i>	0.3~64.4	南海北部	本研究
2012 年 8 月	偏光	<i>E. huxleyi</i> , <i>U. tenuis</i> , <i>C. leptoporus</i>	0~68.9	南海北部	[22]

3.2 南海今生颗石藻的水平分布

如图 2 所示,夏季和冬季颗石藻细胞丰度的水平分布特征不同。首先冬季颗石藻细胞丰度明显高于夏季,夏季表层颗石藻细胞丰度介于 $0.6 \times 10^3 \sim 15.5 \times 10^3 \text{ cells/L}$ 之间,平均为 $5.6 \times 10^3 \text{ cells/L}$;冬季表层细胞丰度介于 $0.7 \times 10^3 \sim 50.3 \times 10^3 \text{ cells/L}$ 之间,平均值 $8.7 \times 10^3 \text{ cells/L}$;其次,夏季和冬季细胞丰度的分布特点呈现明显的季节性差异,在夏季西南季风盛行时,近岸颗石藻丰度高于外海,但这种水平分布规律并不是非常显著,这或许与南海北部夏季颗石藻

细胞丰度普遍较低相关,镜检颗石粒种类,数量的微小差异便会引起丰度在图示分布上巨大差异,总体来讲,夏季表层颗石藻细胞丰度高值区位于 S409、S1-8、S1-4 站位,细胞丰度分别为 $9.2 \times 10^3 \text{ cells/L}$, $13.7 \times 10^3 \text{ cells/L}$, $15.5 \times 10^3 \text{ cells/L}$ 。而当冬季东北季风盛行时颗石藻细胞丰度的水平分布情况恰好相反,即外海颗石藻细胞丰度明显高于近岸,且这种分布规律较为显著,表层细胞丰度高值区位于 A1、A4、A10、seats 站位,细胞丰度分别为 $50.3 \times 10^3 \text{ cells/L}$, $30.3 \times 10^3 \text{ cells/L}$, $21.2 \times 10^3 \text{ cells/L}$, $10.0 \times 10^3 \text{ cells/L}$ 。

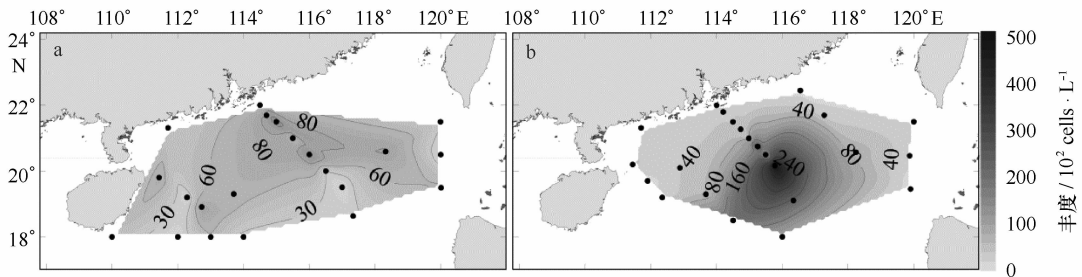


图 2 南海颗石藻细胞丰度的表层分布(a. 夏季;b. 冬季)

Fig. 2 The distribution of coccolithophores cell abundance in surface layer (a. summer; b. winter)

本次调查结果与前人南海颗石藻群落结构进行的调查相比,具有较好的一致性。首先,Okada 和 Honjo 于 1969 年大尺度调查中国南海的颗石藻群落结构发现,颗石藻在南海西部盆地丰度较高,而东部盆地颗石藻丰度处于较低水平,西部和北部陆架区颗石藻细胞丰度也处于较高的水平^[8];1996 年 Yang 等对南海东北部与中部颗石藻群落进行了调查,结果发现由细胞丰度所表现出的地理差异并不显著^[11];而钟权伟和 Chen 在 2002 到 2003 年期间通过多个航次对颗石藻丰度的季节性变化进行的调查同样发现,冬季是南海颗石藻生产力最高的季节,冬季颗石藻丰度明显高于夏季,且冬季则表现为陆架区颗石藻细胞丰度低于海盆区。

3.3 南海今生颗石藻的断面分布

颗石藻的断面分布如图 3 所示,细胞丰度的最大值大多出现在次表层,颗石藻细胞丰度的垂直分布上呈现“斑块”分布模式。夏季颗石藻细胞丰度低于 $10 \times 10^3 \text{ cells/L}$,冬季颗石藻细胞丰度则在 $20 \times 10^3 \text{ cells/L}$ 以下水平,调查海区颗石藻细胞丰度大多处于较低水平,体现了南海较低的生物量以及生产力水平。

图 3a,3d 表示珠江口断面颗石藻的垂直分布,夏季颗石藻丰度分布表现为近岸高于外海站位,颗石藻优势物种为赫氏艾密里藻和大洋桥石藻,对温盐具有广泛的适应范围,加之珠江口附近丰富的陆源营养的输入,使该区的颗石藻丰度保持较高的水平,而冬季

珠江口断面颗石藻丰度的分布呈现出外海高于近岸的趋势;吕宋断面站位数少,夏季丰度高值分布在南北向近岸,冬季丰度最大值出现在底层附近水域(图

3b,e);图3c,f表示海南岛东部断面颗石藻的垂直分布,夏、冬季均呈现出近岸向外海增加的趋势。

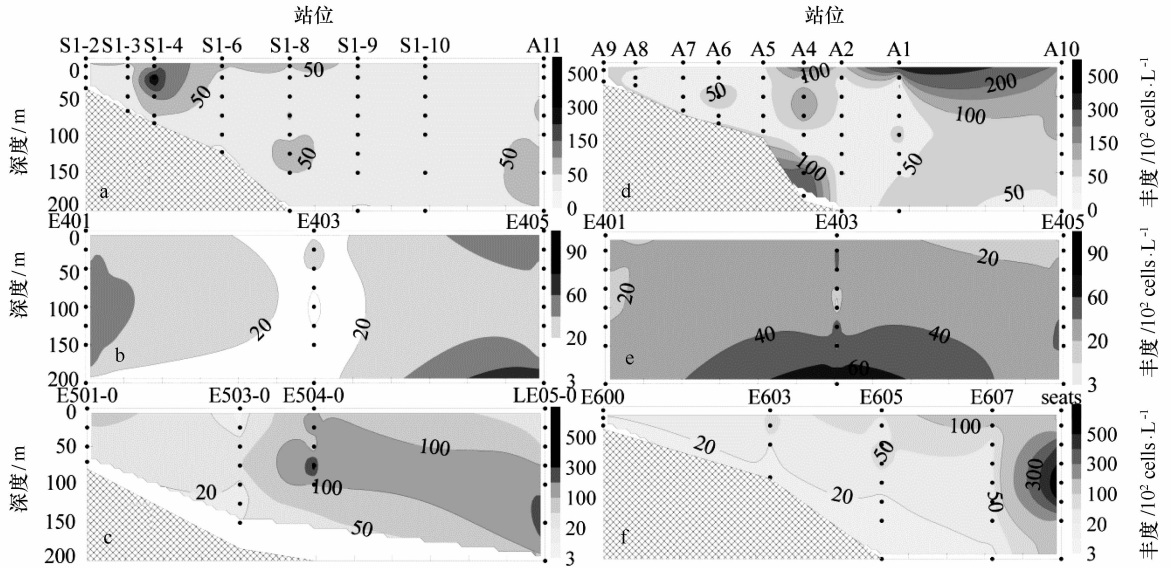


图3 南海北部夏冬季颗石藻垂直分布(a-c. 夏季;d-f. 冬季)

Fig. 3 The vertical distribution of coccolithophores cell abundance in summer and winter

(a-c. summer cruise; d-f. winter cruise)

3.3 南海今生态石藻多样性指数的平面分布

如图4所示,调查期间颗石藻多样性指数(Shannon-Wiener index, H')夏季介于0.30~1.98之间,表层介于0.54~1.85之间,水平分布高值区位于

LE04、S1-6、S1-9 站位, H' 分别为 1.85、1.72、1.56; 冬季介于 0.51~2.25 之间,表层介于 0.76~1.84 之间,水平分布高值区位于 A7 站位, H' 为 1.84。

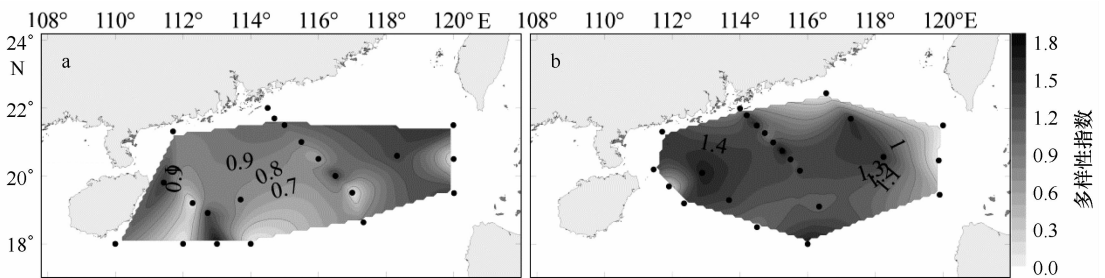


图4 调查区颗石藻群落的多样性指数平面分布(a. 夏季;b. 冬季)

Fig. 4 Horizontal distribution of diversity index in surface water (a. summer; b. winter)

如图5所示,均匀度指数(Pielou's evenness index, J)夏季介于0.30~0.99之间,表层介于0.54~0.98之间,水平分布高值区位于S1-9 站位, J 分别为0.98;冬季介于0.33~0.99之间,表层介于0.56~0.97之间,水平分布高值区位于S405 站位, J 为

0.97。

今生颗石藻多样性指数和均匀度指数在南海的整体分布规律不显著,或许与南海水域开阔,受琼东上升流、黑潮水以及近岸冲淡水的影响,水体稳定性较差有关。

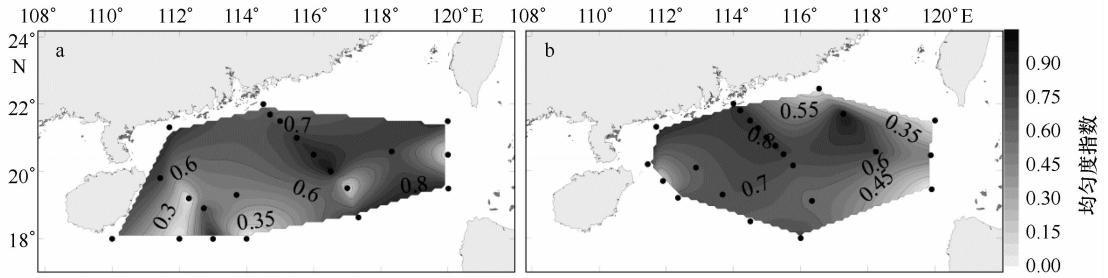


图 5 调查区颗石藻群落均匀度指数的平面分布 (a. 夏季; b. 冬季)

Fig. 5 Horizontal distribution of evenness index in surface water (a. summer; b. winter)

3.4 南海今生颗石藻生物群落结构与环境因子的相关性分析

颗石藻的生长易受光照、水温、盐度、营养盐、 CO_2 浓度、叶绿素 *a* 浓度、混合层深度、水柱层化和硝酸盐跃层等多种因素的影响^[10]。以营养盐为例,赫氏艾密里藻室内培养实验证实,在营养盐相对丰富及营养盐缺乏的初期实验中,充足的营养盐水平及颗石藻本身对磷的高效利用率(较低的磷酸盐水平,可促使赫氏艾密里藻细胞内快速合成酸性磷酸酶)可使其保持较高的生长速度,只是体积较小,且钙化水平较低;而当磷严重受限时,赫氏艾密里藻则出现生长速率较低,细胞体积和钙化水平有所提高的现象。南海冷季时,硝酸盐跃层较暖季浅,赫氏艾密里藻更占优势^[10],本次调查中冬季颗石藻平均丰度(3.0×10^3 cells/L)要高于夏季(2.4×10^3 cells/L)。若氮盐受限时,则颗石藻会很快死亡^[23-26]。赫氏艾密里藻吸收铵盐和硝酸盐的半饱和常数仅为 $0.1 \mu\text{mol/L}$ ^[27]。不

同的颗石藻类别自身的生理及生化结构差异大,繁衍迅速,颗石藻的地球化学通常能反映当地环境变化趋势,沉积物中的化石常作为地层学的重要生物依据,如 Sr/Ca 和 Mg/Ca 比值是重建古环境的可行指标^[28-29]。

由颗石藻细胞丰度与环境因子(水温与营养盐资料由 CHOICE-C 项目组提供)的典范对应分析(CCA)(图 6)可知,夏季 CCA 图中温度、盐度与轴 1 相关性大,相关系数分别为 0.343 和 -0.235 ,且除温度以外,其他环境因子皆与轴 1 呈负相关关系,轴 2 与亚硝酸盐负相关关系最大,系数达 -0.623 。轴 1 与轴 2 的特征根(eigenvalues)分别为 0.144 和 0.04(表 3),加和解释量为 14.203%。优势物种纤细伞球藻与温度呈显著正相关,与除了亚硝酸盐之外的因子负相关关系较大,赫氏艾密里藻和大洋桥石藻大洋桥石藻与大多数因子都有正相关关系。

表 3 CCA 双序图的统计数值

Tab. 3 The statistical values of CCA diagrams

统计参数	夏季		冬季	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
特征根	0.144	0.040	0.053	0.022
百分比	11.127	3.076	6.947	2.830
累积百分比	11.127	14.203	6.947	9.777
方差累计贡献百分数	59.660	76.154	62.119	87.420
物种-环境相关系数	0.575	0.471	0.463	0.355

冬季 CCA 排序图两轴的加和解释量较夏季低,仅为 9.8%(表 3),轴 1、轴 2 特征根分别为 0.053 和 0.022。与夏季相反,大多数环境因子与轴 2 呈负相关关系,温度与轴 2 的正相关系数为 0.658,轴 1 仅与

亚硝酸盐有一定正相关性,系数为 0.262。优势物种赫氏艾密里藻仅与深度和亚硝酸盐相关性较显著,相比夏季,冬季水体混合度高,因此受各项营养盐的限制减少,大洋桥石藻则与盐度和硅酸盐表现出负相关

关系,纤伞球藻与温度正相关性下降,与亚硝酸盐和盐度显现一定正相关性。

调查海区环境错综复杂,不同地点受珠江冲淡水、吕宋海峡水及琼东上升流水影响程度不同,导致夏、冬季颗石藻各物种对环境因子响应特征存在程度及本质上的差异。如钟权伟^[20]的研究表明海盆区与陆架区颗石藻细胞丰度与温度和营养盐的关系就存

在明显差异:海盆区颗石藻细胞丰度与水温、硝酸盐、磷酸盐成正相关,而陆架区颗石藻细胞丰度则与这3种因子的相关性不显著。所以有关颗石藻细胞丰度、物种组成与环境因子的关系,以及它们对环境因子变化的响应机制及其演替方向还需要长期的调查研究来进一步明确。

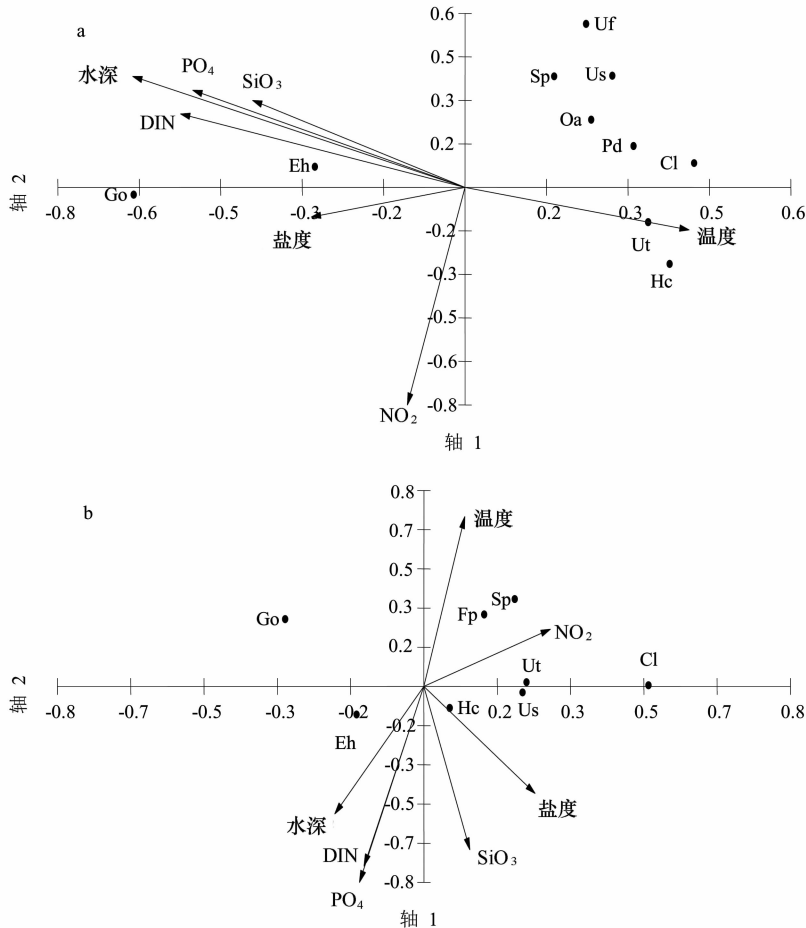


图6 夏、冬季南海北部今生颗石藻群落与环境因子间的典范对应分析(CCA)双序图

Fig. 6 Biplots of the canonical correspondence analysis (CCA) between coccosphere abundance and environmental parameters in summer and winter cruises

a. 夏季; b. 冬季; NO_2 : 亚硝酸盐; SiO_3 : 硅酸盐; DIN: 总无机氮; PO_4 : 磷酸盐; Eh: 赫氏艾密里藻; Go: 大洋桥石藻; Cl: 细孔钙盘藻; Fp: 深水花球藻; Hc: 卡特旋筏球藻; Oa: 反仔卵石藻; Pd: 盘孔筏球藻; Sp: 美丽条结藻; Ut: 纤伞球藻; Uf: 迭叶脐球藻; Us: 希布格脐球藻

a. Summer; b. winter; NO_2 : nitrite; SiO_3 : silicate; DIN: total dissolved inorganic nitrogen; PO_4 : phosphate; Eh: *Emiliana huxleyi*; Go: *Gephyrocapsa oceanica*; Cl: *Calcidiscus leptoporus*; Fp: *Florisphaera profunda*; Hc: *Helicosphaera carteri*; Oa: *Oolithotus antillarum*; Pd: *Pontosphaera discopora*; Sp: *Syracosphaera pulchra*; Ut: *Umbellosphaera tenuis*; Uf: *Umbilicosphaera foliosa*; Us: *Umbilicosphaera sibogae*

4 结论

调查期间共鉴定颗石藻 11 属 13 种,优势种为纤

伞球藻、赫氏艾密里藻以及大洋桥石藻等。冬季颗石藻细胞丰度略高于夏季(研究发现冬季是南海浮游植物保持较高的生产力的阶段),水平分布特征与夏

季不同,且颗石藻细胞丰度分布呈现出明显的区域性,表现出外海站位高于近岸的趋势。这与前人对南海颗石藻群落结构进行的调查相比,具有较好的一致性。垂直分布上,次表层出现丰度最大值。颗石藻细胞丰度大多处于较低水平,体现了南海较低的生物量以及生产力水平。整体来看,颗石藻细胞丰度高值区零散出现在各个水层,呈现“斑块”分布模式,今生颗石藻样品较低的丰度可能影响了对丰度分布的追踪。

调查期间颗石藻多样性指数(Shannon-Wiener index)整体呈现冬季高于夏季,均匀度指数相当,总体处于较低水平。由于多样性指数往往指示群落生长的旺盛与否,较低的多样性指数很好的体现了颗石藻群落个别物种如纤伞全球藻、赫氏艾密里藻和大洋桥石藻处于优势地位的状态。CCA 分析结果表明,不同的颗石藻物种受不同的多种环境因子共同影响,且不同季节间的影响因素及程度不同。

参考文献:

- [1] 吴日升,郭小钢,李立. 1998 年冬季南海的海洋水文特征与环流[J]. 海洋学报,2002,24(增刊 1): 340—351.
Wu Risheng,Guo Xiaogang,Li Li. Winter hydrographic condition and circulation of the South China Sea in 1998[J]. Haiyang Xuebao,2002,24(S1): 340—351.
- [2] 李磊,李凤岐,苏洁,等. 1998 年夏、冬季南海水团分析[J]. 海洋与湖沼,2002,33(4): 393—401.
Li Lei,Li Fengqi,Su Jie,et al. Analysis on water masses in the South China Sea in summer and winter of 1998[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2002,33(4): 393—401.
- [3] 李凤岐,李磊,王秀芹,等. 1998 年夏、冬季南海的水团及其与太平洋的水交换[J]. 青岛海洋大学学报,2002,32(3): 329—336.
Li Fengqi,Li Lei,Wang Xiuqin,et al. Water masses in the South China Sea in summer and winter of 1998 and water exchange between the Pacific and the South China Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao,2002,32(3): 329—336.
- [4] 刘增宏,李磊,许建平,等. 1998 年夏季南海水团分析[J]. 东海海洋,2001,19(3): 1—10.
Liu Zenghong,Li Lei,Xu Jianping,et al. Analysis of water masses in the South China Sea in the summer of 1998[J]. Donghai Marine Science,2001,19(3): 1—10.
- [5] 杨海军,刘秦玉. 南海上层水温分布的季节特征[J]. 海洋与湖沼,1998,29(5): 501—507.
Yang Haijun,Liu Qinyu. The seasonal features of temperature distributions in the upper layer of the South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,1998,29(5): 501—507.
- [6] 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,2011,19(6): 787—797.
Sun Jun,Jin Shaofei. Species diversity of living coccolithophores in Chinese sea waters[J]. Biodiversity Science,2011,19(6): 787—797.
- [7] 孙军. 今生颗石藻的有机碳泵和碳酸盐反向泵[J]. 地球科学进展,2007,22(12): 1231—1239.
Sun Jun. Organic carbon pump and carbonate counter pump of living coccolithophorid[J]. Advances in Earth Science,2007,22(12): 1231—1239.
- [8] Okada H,Honjo S. Distribution of coccolithophores in marginal seas along the western Pacific Ocean and in the Red Sea[J]. Marine Biology,1975,31(3): 271—285.
- [9] Yang T N,Wei K Y,Gong G C. Distribution of coccolithophorids and coccoliths in surface ocean off northeastern Taiwan[J]. Botanical Bulletin of Academia Sinica,2001,42: 287—302.
- [10] Lee Chen Y L,Chen H Y,Chung C W. Seasonal variability of coccolithophore abundance and assemblage in the northern South China Sea[J]. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography,2007,54(14/15): 1617—1633.
- [11] Yang T N,Wei K Y,Chen L L. Occurrence of coccolithophorids in the northeastern and central South China Sea[J]. Taiwan,2003,48(1): 29—45.
- [12] Brown C W,Yoder J A. Coccolithophorid blooms in the global ocean[J]. Journal of Geophysical Research,1994,99(c4): 7467—7482.
- [13] Bollmann J,Cortés M Y,Haidar A T,et al. Techniques for quantitative analyses of calcareous marine phytoplankton[J]. Marine Micropaleontology,2002,44(3/4): 163—185.
- [14] 孙军,安佰正,戴民汉,等. 夏季南海西部今生颗石藻[J]. 海洋与湖沼,2011,42(2): 170—178.

本次南海颗石藻群落结构的调查与之前的调查具有较好的一致性,包括物种种类、优势物种种类、细胞丰度分布等方面。但夏、冬季间的群落差异有别于历史调查,且不同季节颗石藻不同优势物种对环境因子响应特征有异同,为厘清这一关系,未来要进行更多时间尺度的现场生物和同步水文及营养盐资料的综合调查,试图分析影响当地生物群落的生物地球化学及生物地理特征,探讨颗石藻在空间的“斑块”分布机理,优势物种对各营养要素的响应特征,为进一步成功建立更多颗石藻单种模式生物的室内生理培养提供坚实可靠的现场基础数据。

致谢:感谢厦门大学戴民汉教授提供航次营养盐及温度盐度资料。现场采样由宋书群博士、田伟、靳少非、马威、张健和张晓东完成,在此一并感谢!

- Sun Jun, An Baizheng, Dai Minhan, et al. Living coccolithophores in the western South China Sea in summer 2007[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(2): 170—178.
- [15] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379—423.
- [16] Pielou E C. *An Introduction to Mathematical Ecology*[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969.
- [17] 孙军, 刘东艳, 宁修仁, 等. 2001/2002年夏季南极普里兹湾及其邻近海域的浮游植物[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(5): 519—532.
- Sun Jun, Liu Dongyan, Ning Xiuren, et al. Phytoplankton in the Prydz Bay and the adjacent Indian sector of the Southern Ocean during the austral summer 2001/2002[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(5): 519—532.
- [18] Winter A, Jordan R W, Roth P H. *Biogeography of Living Coccolithophores in Ocean Waters*[M]//Winter A, Siesser W G. *Coccolithophores*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [19] Winter A. Paleoenvironmental interpretation of Quaternary coccolith assemblages from the Gulf of Aqaba (Elat), Red Sea[J]. *Revista Española de Micropaleontology*, 1982, 14: 291—314.
- [20] 钟权伟. 南海北部海域钙板金藻群落的时空变异[D]. 台湾: 国立中山大学海洋生物研究所, 2005.
- Zhong Quanwei. Spatial and seasonal changes of coccolithophores communities in the northern South China Sea[D]. Taiwan: The Institute of Marine Biology, National Sun Yat-sen University, 2005.
- [21] Lee Chen Y L. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary production in the South China Sea[J]. *Deep-Sea Research Pttr I: Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(2): 319—340.
- [22] 刘海娇, 孙军, 冯媛媛. 琼东上升流今生活石藻群落研究[J]. *海洋学报*, 2015, 37(12): 27—40.
- Liu Haijiao, Sun Jun, Feng Yuanyuan. Study on modern coccolithophores in coastal region along the east Hainan Island[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(12): 27—40.
- [23] Bratbak G, Levasseur M, Michaud S, et al. Viral activity in relation to *Emiliania huxleyi* blooms: a mechanism of DMSP release? [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 128: 133—142.
- [24] Riegman R, Stolte W, Noordeloos A A M, et al. Nutrient uptake and alkaline phosphatase (EC 3: 1: 3: 1) activity of *Emiliania huxleyi* (PRY-MNESIOPHYCEAE) during growth under N and P limitation in continuous culture[J]. *Journal of Phycology*, 2000, 36(1): 87—96.
- [25] Shiraiwa Y. Physiological regulation of carbon fixation in the photosynthesis and calcification of coccolithophorids[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2003, 136(4): 775—783.
- [26] Eppley R W, Rogers J N, McCarthy J J, et al. Light/dark periodicity in Nitrogen assimilation of the marine phytoplankters *Skeletonema costatum* and *Coccolithus huxleyi* in N-limited chemostat culture[J]. *Journal of Phycology*, 1971, 7(2): 150—154.
- [27] Eppley R W, Rogers J N, McCarthy J J, et al. Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton[J]. *Limnology and Oceanography*, 1969, 14(6): 912—920.
- [28] 陈兰, 伊海生, 胡瑞忠. 藏北羌塘地区侏罗纪颗石藻化石的发现及其意义[J]. *地学前缘*, 2003, 10(4): 613—618.
- Chen Lan, Yi Haisheng, Hu Ruizhong. The discovery of Jurassic coccolithophore in Qiangtang area of northern Tibetan Plateau and its significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 613—618.
- [29] 梁丹, 刘传联. 颗石藻元素地球化学研究进展[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(2): 217—223.
- Liang Dan, Liu Chuanlian. Advances in element geochemistry analysis of coccolith[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2012, 27(2): 217—223.

Distribution of living coccolithophores in the northern South China Sea in summer and winter

Sun Jun^{1,2}, Liu Haijiao^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Feng Yuanyuan^{1,2}

(1. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: According to the samples taken from the northern South China Sea (17°—24°N, 108°—122°E) during 2009 summer and 2010 winter cruise living coccolithophores (LCs) community structure were statistically studied. The LC samples were identified under polarizing microscope, associated with scanning electron microscope (SEM) dealing with the uncertain taxa. A total of 13 taxa belonging to 11 genera were identified. The LCs cell abundance ranged 0.3×10^3 — 71.8×10^3 cells/L in the summer cruise with an average 6.0×10^3 cells/L, and ranged 0.3×10^3 — 64.4×10^3 cells/L in the winter cruise with an average 6.7×10^3 cells/L. The Shannon-Wiener index of LCs in

summer and winter were ranged from 0.30–1.98 and 0.51–2.25, respectively, and Pielou evenness index were ranged from 0.30–0.99 and 0.33–0.99, respectively. The LCs cell abundance was higher in winter than that in summer. In winter LCs abundance was more prevailing in the deep basin as compared to that in the continental shelf, while in summer it was not in that case. Vertically, high cell abundance of LCs were typically distributed in the sub-surface layer. *Umbellosphaera tenuis* (Kamptner) Paasche, *Emiliana huxleyi* (Lohmann) Hay et Mohler and *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner were predominant species in both cruises. *E. huxleyi* and *G. oceanica* were positively correlated with the main environmental factors indicated by canonical correspondence analysis (CCA) in summer, nevertheless, the responding characters varied in winter.

Key words: living coccolithophore; canonical correspondence analysis (CCA); community structure; dominant species; the northern South China Sea