

2009年冬季南海北部生物标志物对表层浮游植物生物量/群落结构的指示作用

李玉红^{1,2}, 赵美训^{1,2}, 张海龙^{1,2}, 邢磊^{1,2}, 杨红梅^{1,2}, 戴民汉³, 王磊³

1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
2. 中国海洋大学海洋有机地球化学研究所, 山东 青岛 266100;
3. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005

摘要: 生物标志物已被广泛应用于重建浮游植物生产力和群落结构变化。该方法假设之一是生标的含量可以反映表层海水的浮游植物生物量, 但这个假设还缺乏现场观测的充分验证。对2009年冬季南海北部表层海水颗粒物中主要生标做了分析, 利用其含量及比值研究浮游植物的生物量及群落结构的分布。生标含量表明硅藻、甲藻、颗石藻的高值区位于珠江口南部及广东沿岸, 在陆坡区也有高值。生标比值显示硅藻在3个类群中的相对比例最高。其中, 甲藻/硅藻比值高值区位于陆坡区, 这与大洋水(黑潮)的入侵, 带来大量暖水性甲藻有很大关系; 颗石藻/硅藻比值总体趋势与生物量的分布相反, 在近岸少数站位有高值, 向外海逐渐增加, 主要是因为颗石藻更适于寡营养盐的环境。生标结果所指示的生物量及群落结构的分布与前人的调查结果类似, 为利用生标重建此区域的浮游植物生产力和群落结构变化提供了依据。

关键词: 南海北部; 浮游植物; 生物标志物; 生物量; 群落结构

中图分类号: Q178.53 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)04-0096-08

Phytoplankton biomarkers in surface seawater from the northern South China Sea in summer 2009 and their potential as indicators of biomass/community structure

LI Yu-hong^{1,2}, ZHAO Mei-xun^{1,2}, ZHANG Hai-long^{1,2}, XING Lei^{1,2}, YANG Hong-mei^{1,2}, DAI Min-han³, WANG Lei³

1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Institute of Marine Organic Geochemistry, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
3. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract: Biomarkers have been widely used to reconstruct phytoplankton productivity based on the assumption that biomarker contents could reflect phytoplankton productivity in the surface seawater. However, this hypothesis has not been validated with modern survey. In this study, the contents and ratios of three phytoplankton biomarkers in the surface seawater of the northern South China Sea in winter 2009 were analyzed, to indicate spatial distributions of phytoplankton biomass and community structure. The results show high values for diatoms, dinoflagellates and coccolithophorids near the Pearl River Estuary and Guangdong coastal areas. The community structure indicates diatoms are the dominant phytoplankton species in winter. High values of dinoflagellate/diatom ratio occur near the slope area owing to intrusion of the Kuroshio, which favors the growth of dinoflagellates. The coccolithophorid/diatom ratio displays an increasing trend from the Pearl River Estuary to

收稿日期: 2010-11-11; 修订日期: 2011-02-20。卢冰编辑; 林强校对

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB815934、2009CB421201); 国家自然科学基金项目(40776029)

作者简介: 李玉红(1987—), 男, 山西省高平市人, 硕士研究生, 从事海洋有机地球化学研究。E-mail: gohong@yeah.net

通信作者: 赵美训(1959—), 男, 山东省莱阳市人, 教授, 主要从事海洋有机地球化学研究。E-mail: maxzhao@ouc.edu.cn

offshore region due to the advantage of coccolithophorids in oligotrophic environment, which is opposite to the productivity pattern of all biomarkers. These results are consistent with previous studies using phytoplankton cell and pigments, which provides support for the use of biomarker to reconstruct phytoplankton productivity and community structure in the SCS.

Key words: northern South China Sea; phytoplankton; biomarker; biomass; community structure

作为海洋生态系统中主要的初级生产者, 海洋浮游植物生产力和群落结构的变化影响着海洋生物地球化学关键过程, 进而影响全球碳循环及气候变化。充分了解海洋浮游植物群落间演变的机制, 有助于理解气候和环境变迁对海洋浮游植物群落变化的影响以及生物的反馈。

南海是世界上最大的边缘海之一, 面积约 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 平均深度为 1350m。南海物理和生态环境主要受东亚季风控制, 11 月至 4 月盛行东北季风, 6 月到 9 月受西南季风的影响, 因此生产力分布具明显的时空格局, 有陆架高、海盆低、上升流区高等区域性分布趋势以及北部冬季高、南部夏季高的季节性特点^[1-2], 是研究浮游植物生产力和群落结构受控制机制的理想区域。自 20 世纪 80 年代以来, 南海海洋生态系统结构发生了很大变化, 特别是南海北部、珠江口附近海域有害赤潮频发, 面积和持续时间不断扩大, 严重影响了生态环境的健康。人类活动和气候变化对海洋生态环境变化都有影响, 定量区分这两种主要驱动机制需要结合现代过程和历史记录的比较研究。因此, 获得长时间的海洋生态环境变化历史及其规律对我国海洋环境变化机制的研究和环境保护政策的制定都具有重要意义。

已有许多研究者利用不同指标重建了不同时间尺度的南海浮游植物生产力和群落结构变化记录。这些重建同时也证明很多指标存在各自的不足, 如沉积物中碳酸钙、蛋白石含量等存在不同程度的溶解效应^[3], 总有机碳和生源 Ba 含量存在陆源的冲淡效应^[4-5], 甲藻类浮游植物化石在沉积物中难以保存。

甾醇和烯酮是浮游植物细胞膜的组成成分, 具有来源明确, 在地质环境中相对稳定的特点, 作为生标已被广泛应用于示踪海洋环境和生态变化。生标方法在南海的研究结果发现, 南海生产力和浮游植物群落结构在冰期、间冰期存在地域性差异。利用多个生标的研究结果显示, 南海北部冰期生产力高于间冰期, 但是冰期—间冰期浮游植物群落结构相对稳定^[6]。根据烯酮含量的变化估算, 南海北部颗石藻的生产力冰期高, 间冰期低, 末次冰期生产力是全新世的近 4 倍^[7]。而在南海南部, 冰期—间冰期

的生产力变化还存在争议。胡建芳等^[8]指出南沙海区过去 3 万年来表层生产力主要以硅藻为主, 且末次冰期生产力高于全新世; 南海西南 MD972151 柱状样的烯酮含量显示生产力无明显的冰期—间冰期变化规律^[9]; 有限的数据显示冰期颗石藻生产力高, 间冰期硅藻生产力高^[10]。可以看出, 由于生标应用的区域性限制及记录的匮乏, 目前对南海不同海区长时间尺度生产力及群落结构变化还不清楚。与长时间尺度生产力变化记录相比, 现代环境过程的研究较少, 珠江口及邻近海域表层沉积物中浮游植物的甾醇类生标揭示, 河口到内陆架海域的生产力呈现由低到高的趋势^[11]; 通过对南海 77 个表层沉积物站位的分析, 发现硅藻、甲藻和颗石藻 3 个主要浮游植物类群生标的高值主要分布在近岸海区、越南外部及巽他陆架北部的 2 个上升流区等高生产力区, 与生产力的空间分布基本一致^[12]。

尽管已有广泛的应用, 生标准确重建浮游植物生产力和群落结构变化仍受几种因素的制约^[13]。其中, 浮游植物生标在其母源细胞中含量的研究不多, 生标含量与营养盐含量等其他环境因子的关系也不明确。在现代海洋环境中, 表层海水中生标与浮游植物生物量及生产力之间的关系的研究也不多^[14-15]。

本文通过测定南海北部陆架区表层海水中 3 个主要浮游植物类群(硅藻、甲藻、颗石藻)的生标含量, 与现代海洋调查资料进行对比, 验证这一区域生标对海洋浮游植物生物量及群落结构变化的指示性。所测的生标为硅藻生标菜子甾醇、甲藻生标甲藻甾醇、颗石藻生标烯酮, 这些生标现代过程的研究将为进一步应用生标重建南海古生产力及群落结构提供依据。尽管甲藻、颗石藻也有可能产生菜子甾醇, 但在南海北部, 甲藻、颗石藻所占浮游植物的丰度很低(<3%), 所以可以用菜子甾醇来指示硅藻。

1 材料及方法

1.1 调查海域

位于热带亚热带的南海北部陆架海域范围大约为 $18^\circ\text{—}23^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ\text{—}118^\circ\text{E}$, 拥有宽广的大陆架和复杂的水文环境。南海属于典型的寡营养盐海域,

其真光层中硝酸盐和磷酸盐浓度常低于检测限^[16]。但在南海北部陆架区由于有珠江水的注入, 温度、盐度、营养盐等要素有明显的梯度, 河口及近岸的生产力均较高^[17]。珠江是中国径流量仅次于长江的第二大河, 年平均淡水输入量达到 $10524\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 径流量有明显的季节性特点, 80%的径流量是集中在4月到9月西南季风盛行的季节^[18]。南海北部分别通过吕宋海峡、台湾海峡与西太平洋和东海相连, 可以与西菲律宾海的深层海水通过吕宋海峡进行交换, 黑潮也通过吕宋海峡进入南海^[19], 形成西南向的沿大陆坡的黑潮分支(图 1)。在冬季东北季风盛行时, 广东沿岸流沿靠近大陆的位置流向西南, 南海暖流逆风向经过海南岛东北部的大陆架/大陆坡通过台湾海峡最终进入东海(图 1)^[20], 在夏季西南季风盛行时, 广东沿岸流流向东北。同时, 在科氏力的作用下, 珠江口以东区域产生上升流。在季风和海流的

作用下, 珠江所输送的营养盐的量及空间分布都具有明显的季节性。珠江水在冬季所输送的营养盐较少且会向西偏移, 而在夏季所输送的营养盐较多且会偏向东^[21]。再加上上升流的影响, 导致珠江口生产力夏季高于冬季而且高值偏向珠江口的东部^[22]。而在受珠江影响较少的陆架区, 生产力主要受季风对上层水的混合影响, 强的冬季风能把更多的营养盐带到表层。乐凤凤等^[23]和孙军等^[24]分别报道了2004年南海北部海域夏季和冬季浮游植物, 结果显示冬季的细胞丰度($206 \times 10^3\text{dm}^{-3}$)大约是夏季($115 \times 10^3\text{dm}^{-3}$)的两倍, 其中硅藻门在细胞丰度上占绝对优势(约 97%), 其次为甲藻门(约 2%), 金藻门的颗石藻虽然丰度不高(约 0.1%), 但在南海北部也广泛分布。3种生标所指示的3个类群占浮游植物细胞丰度的 97%以上, 由此可以用其来指示浮游植物的生物量和群落结构的变化。

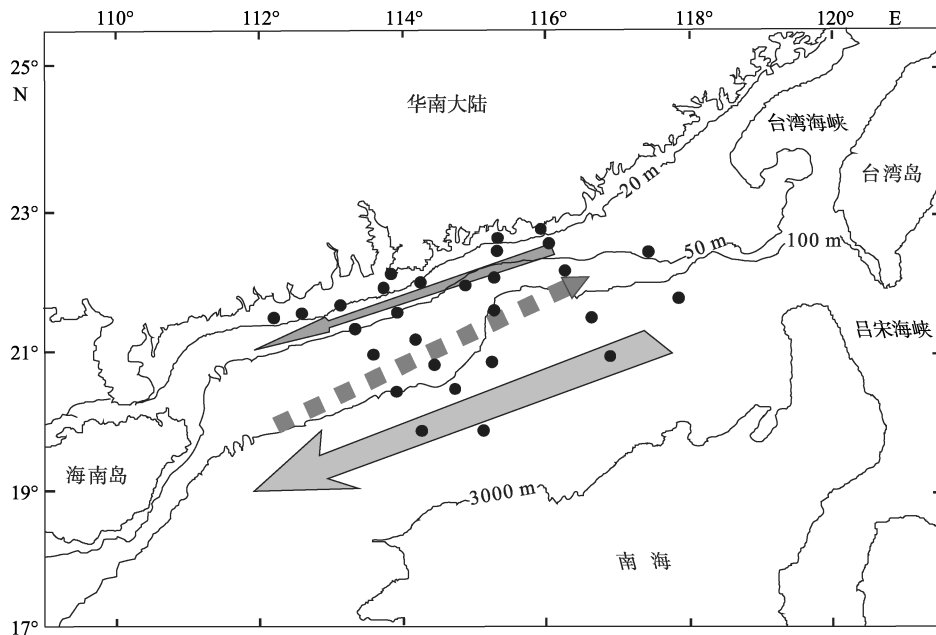


图 1 采样站位()及南海北部冬季环流图

细箭头代表广东沿岸流; 粗箭头代表黑潮在南海的分支; 虚线箭头代表南海暖流。修改自 Wang^[20]

Fig. 1 Sampling stations () and winter surface circulation of the continental shelf of northern SCS

1.2 采样及分析

本文样品采自2009年1月厦门大学国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“中国近海碳收支、调控机理及生态效应”(CHOICE-C) Pilot 航次, 共采集29个站位的表层海水(0—5m)颗粒物(图 1)。使用经450℃灼烧4h后的Whatman(GF/F)玻璃纤维膜(直径为150mm, 孔径为0.7 μm)过滤表层海水, 记录海水体积, 将滤膜放入自制铝箔袋中-20℃冷冻保存。在实验室冷冻干燥样品, 将滤膜剪碎置于

Teflon 管中, 加入 $n\text{-C}_{19}$ -醇作为内标, 二氯甲烷/甲醇(3:1)溶液超声萃取4次, 萃取液经氮气吹干后加入 KOH 甲醇溶液皂化水解后放置过夜, 然后进行硅胶柱层析得到中性组分, 氮气吹干浓缩后经 BSTFA 衍生化后上机分析。样品使用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, 型号为 Thermo trace GC ultra and DSQ II MS)定性分析, 用 Agilent 6890N 气相色谱定量分析(图 2)。所用色谱柱为 HP-1 (50m \times 320 μm \times 0.17 μm), GC 的初始炉温设为 80℃,

其程序升温过程为: 以 $25 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $200 \text{ }^\circ\text{C}$, $4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $250 \text{ }^\circ\text{C}$, $1.8 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, $5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $310 \text{ }^\circ\text{C}$ 并保持 5min。氢气为载气, 流速

$1.3\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样口和检测器温度均为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 采用手动进样方式。生标含量由其峰面积与内标峰面积对比计算得到。

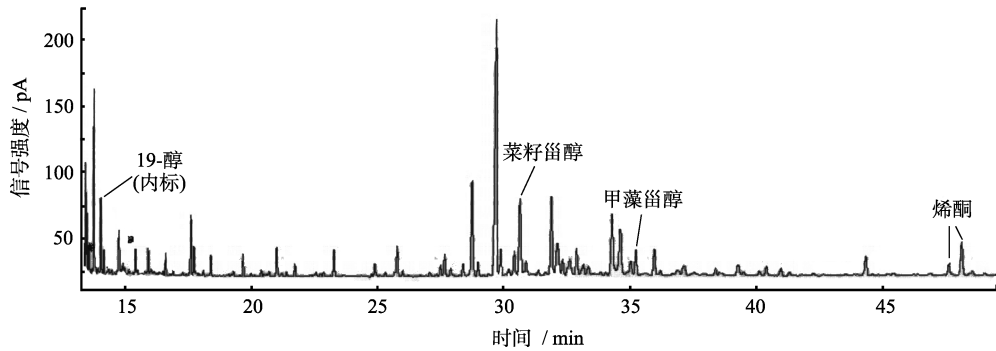


图 2 生物标志物气相色谱图

Fig. 2 A typical gas chromatogram showing retention times of brassicasterol, dinosterol and $C_{37:2}+C_{37:3}$ alkenones ($n-C_{19}$ -alkanol as IS)

2 结果讨论

2.1 浮游植物生物标志物含量及生物量分布

南海北部调查区冬季表层海水温度范围为 $17.5\text{--}24.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 近岸向外海逐渐增高, 等温线大致

平行于海岸线(图 3); 盐度范围为 $31.0\text{‰}\text{--}34.3\text{‰}$, 最低值位于珠江口偏西, 这与冬季盛行的东北季风将冲淡水吹至西边有关; 由珠江口向外逐渐增高, 可能受到了通过吕宋海峡入侵的黑潮高盐水的的影响。表层海水颗粒物生标的含量分布如图 4:

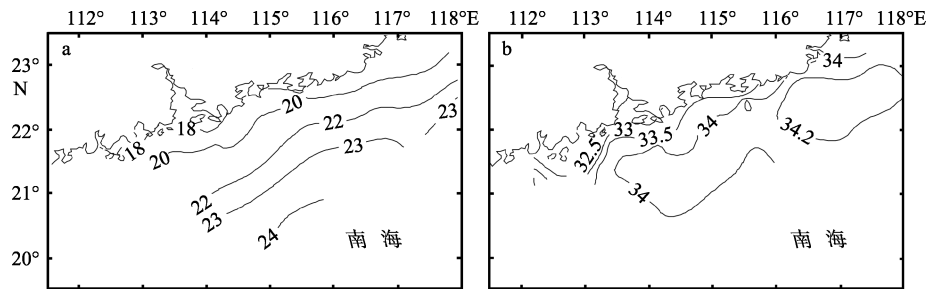


图 3 南海北部表层海水温盐分布图

a. 温度(单位: $^\circ\text{C}$); b. 盐度(单位: ‰)

Fig. 3 Distribution of temperature and salinity in the surface water of the northern SCS during the CHOICE-C Pilot cruise

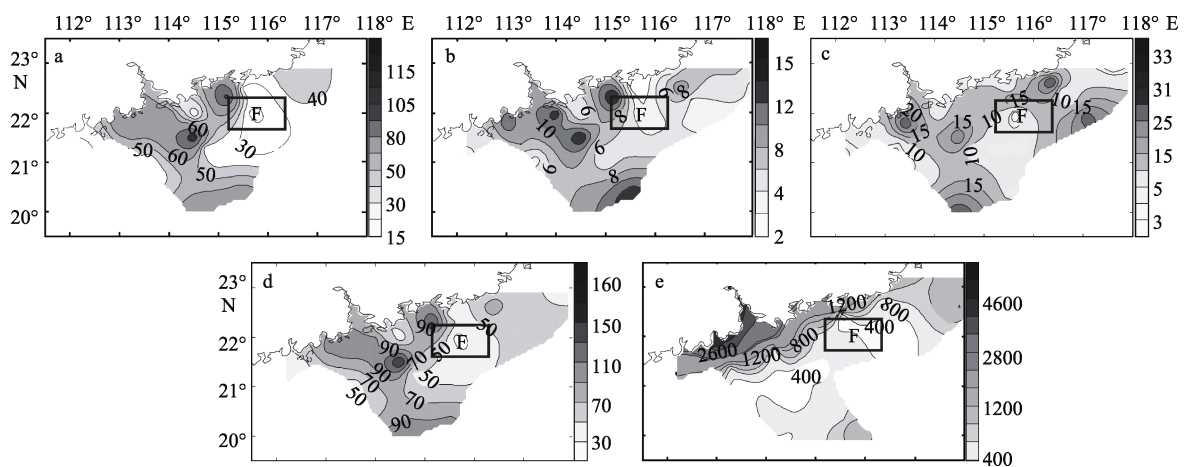


图 4 南海北部表层海水中生物标志物和叶绿素 a 的含量(单位: $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)分布

a. 菜籽甾醇; b. 甲藻甾醇; c. 烯酮; d. 生物标志物的总和; e. 表层叶绿素 a; F 为图中方框, 指 22°N 、 116°E 附近海域

Fig. 4 Spatial distribution of the contents (units: $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) of biomarkers and chlorophyll a in surface seawater of the northern SCS

菜子甾醇的含量最高, 其范围为 $18.6\text{—}118.8\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 甲藻甾醇含量范围为 $2.6\text{—}15.4\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 烯酮含量范围为 $2.1\text{—}35.1\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。菜子甾醇、甲藻甾醇和烯酮 3 种生标含量的空间分布相似, 有 3 个高值区, 第 1 个出现在珠江口南部及广东沿岸的近岸区; 第 2 个在研究区域的东北部; 第 3 个在研究区域的南部的陆坡深水区 ($>400\text{m}$), 在东南部 F 区为低值区。3 种生标总量范围为 $23.8\text{—}158.9\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其空间分布趋势与 3 种生标含量的分布相似, 有 3 个高值区, 低值区在东南部的 F 区。同航次表层 ($0\text{—}5\text{m}$) 海水叶绿素 a 含量的范围为 $209\text{—}4370\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 高值在珠江口及广东沿岸的近岸区, 低值区同样位于 F 区。所以, 3 种生标的总量与叶绿素 a 分布趋势大致相同, 都是在珠江口及广东沿岸附近有高值, 由近岸向外海逐渐降低, 在外海又达到高值。由于叶绿素 a 含量是指示生物量和生产力的最常用指标, 生标含量与叶绿素 a 含量的空间分布相似, 通过线性分析得到两者相关性 $R=0.42(P<0.05)$, 说明南海北部表层水颗粒物中的生标含量基本可以反映浮游生物生物量。生标含量与生物量-生产力的这种对应关系与在阿拉伯海^[18]和南大洋的克罗泽海台^[19]所得到的关系一致。

本航次生标及叶绿素 a 含量所揭示的生物量-生产力空间分布格局与已发表的结果基本一致。海表叶绿素遥感图像显示, 南海北部的表层叶绿素浓度从近岸向深海方向递减, 其中高值 ($>10\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 出现在珠江口附近^[25]。陈纪新等^[26]通过对藻类特征色素的分析得出叶绿素总量和硅藻的生物量在珠江河口达到最高值, 沿着陆架向外海方向生物量逐渐降低。有很多研究者分别通过卫星遥感反演^[2]、细胞计数^[24]、 ^{14}C 示踪法^[1]、光合色素法^[27]也证实了在南海北部陆架区生产力由近岸向外海逐渐降低这一现象。南海北部生产力高值区集中于珠江口, 主要是由于富营养盐的珠江冲淡水的输入, 刺激浮游植物生长。南海是典型的寡营养盐海域, 生产力主要是由营养盐控制的^[2, 28], 而且南海北部大部分海域被认为受珠江营养盐输入的控制^[29]。近年来由于珠江三角洲附近人类活动的增加, 如农业、渔业, 生活污水的大量排放, 使得珠江水中硝酸盐 (约为 $100\mu\text{mol}$) 和硅酸盐 (约为 $150\mu\text{mol}$) 的含量很高^[30-31]。另外, 受东北季风的影响, 近岸海水在冬季垂直混合加强, 温跃层被打破, 表层营养盐得到补充^[32]。在调查区域的东北部, 还观察到了另一个生物量的高值, 这是由于冬季东北季风将东海具有较丰富营养盐的沿

岸流吹向西南, 经台湾海峡进入南海^[33]。在研究区域的南部也有一个高值, 这是由硅藻、甲藻、颗石藻的共同分布格局决定的, 通过对比可以看到颗石藻在其中的比例在增加。研究区域东南部 F 区的生物量较低, 是因为具有高温、高盐、寡营养盐特点的黑潮水在冬季通过吕宋海峡进入南海北部^[34], 并沿着大陆架向西流动^[35], 而且在珠江口东南部, 中心位置约 21°N 、 116°E 附近, 已经常年观察到了反气旋暖涡的存在^[33, 36], 该水团同样具有寡营养盐的特点^[1]。

以上的比较显示, 表层海水中颗粒物的生标含量基本反映了该区域的生物量-生产力空间变化趋势, 但是生标结果需要与其它参数所获得的结果进行进一步比较, 尤其是证明生标的信号能有效地保留在沉积物中^[12], 以使生标方法可以定量反演生产力变化。

2.2 生物标志物比例及浮游植物群落结构分布

本文通过 3 种生标的比例来反映浮游植物的群落结构变化, 从而研究南海北部陆架-陆坡区生态结构的分布及对营养盐等环境因子的响应。图 5 是浮游植物生标比值分布图。甲藻甾醇/菜子甾醇比值范围为 $0.07\text{—}0.20$, 与生标总量分布趋势大致相反, 呈现由近岸向外海升高的趋势, 最高值位于南部陆坡区, 另外在珠江口附近站位和研究区域的东北有次高值。烯酮/菜子甾醇比值范围为 $0.07\text{—}0.79$, 在珠江口及广东沿岸和外海都有高值, 在大部分站位烯酮/菜子甾醇比值与生标总量 (生物量) 成反比。

从图 5 可以看出, 其他 2 种生标相对于菜子甾醇的比值在大部分区域都很小, 计算得到菜子甾醇占 3 种生标总量中的比例范围为 $51.2\%\text{—}81.7\%$, 分布趋势与生标总量的分布趋势对应。生标比值显示硅藻在调查海域为优势类群, 这与东北季风导致的南海北部陆架区的上下水层混合加强, 底层富营养盐水的涌升以及珠江河口附近高的营养盐输入密切相关。Qiu 等^[37]对此区域的研究也显示硅藻占浮游藻细胞丰度的比例最高可达 86% , 藻类特征色素法^[27]和细胞计数法^[24]对此区域冬季的研究结果均显示硅藻在此区域为优势种群, 高值位于珠江口南部及广东近岸海区, 而且呈现向外海逐渐降低的趋势。

甲藻甾醇/菜子甾醇比值整体趋势呈现由近岸向外海升高的趋势, 在珠江口和沿岸少数站位有高值, 可能是因为营养盐氮磷比的变化而影响硅

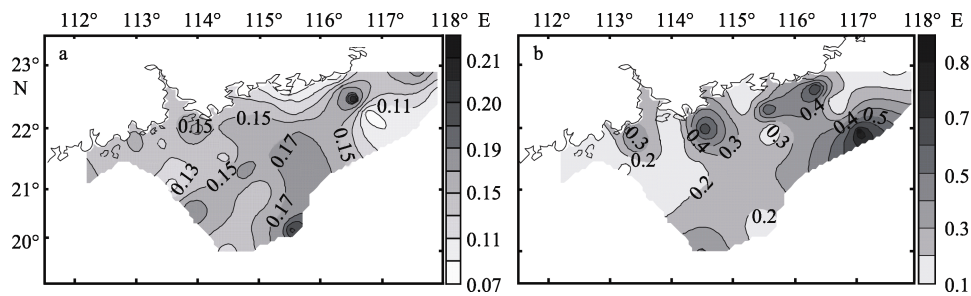


图5 南海北部表层海水中3种生物标志物含量的比值及分布

a. 甲藻甾醇/藻子甾醇; b. 烯酮/藻子甾醇

Fig. 5 Spatial distribution of ratio and total contents of the three biomarkers in the surface seawater of the northern SCS.

藻和甲藻的相对竞争优势。在磷相对缺乏的情况下,硅藻的生长受到限制^[38],浮游植物的优势藻可由硅藻转变为甲藻^[1, 39]。由于沿岸水中拥有极高的氮磷比值,远远超过了浮游植物生长所需的氮磷比值(16:1),使得珠江口邻近海域的浮游植物生长处于P限制的状态^[40-41],导致了甲藻/硅藻比值在河口附近有高值,这种现象与Wang等^[42]于1997—1998年用细胞计数法对于大亚湾的调查一致。南海陆架区受黑潮水的影响,使得近海性浮游硅藻物种丰度减少,而大洋暖水性浮游甲藻则显著增加^[2],所以在受河流影响较少而大洋水影响较大的陆架区,甲藻/硅藻比值逐渐升高。甲藻/硅藻比值的这种分布趋势被乐凤凤等^[23]于2004年用细胞计数法对南海北部的调查证实。

烯酮/藻子甾醇比值总体上有向外海增加的趋势,但在珠江口及广东沿岸少数站位存在高值,最高值出现在外海的东北部海域。之前的研究显示在低营养盐的环境中,颗石藻占较高的比例^[24, 43],由于颗石藻具有相对较小的体积,比表面积更大,在低营养盐环境下相对于硅藻等形态较大的藻类具有竞争优势^[44]。再加上高温高盐的黑潮水的入侵,导致了颗石藻在外海占有较高的比例。由于目前对南海现代过程生标的研究还较缺乏,近岸少数站位存在高的烯酮/藻子甾醇比值的原因还不清楚。

因此,将来还需要更多的站位和不同季节的数据对南海生标比值的分布及其影响因素进行更深入的分析。

3 结论

1)表层海水颗粒物中生标指标揭示,冬季南海北部陆架—陆坡区表层海水中的硅藻、甲藻、颗石藻量在珠江口南部、广东沿岸和陆坡区都有高值;3种生标总和所指示的生物量的趋势与叶绿素a的趋势相近。3种生标的空间分布与前人用其他方法对此区域浮游植物的调查结果是一致的;珠江的输入和东北季风引起水体混合加强导致营养盐的变化是造成这种分布的主要原因。

2)生标比值显示,冬季南海北部硅藻在3个类群中的相对丰度最大。甲藻/硅藻比值整体趋势向外逐渐升高,最高值区位于陆坡区,这与大洋水(黑潮)的入侵,带来大量暖水性甲藻有很大关系。颗石藻/硅藻比值与生物量的总体分布趋势相反,在外海生物量的低值区该比值有高值,这与颗石藻在低营养盐环境下有竞争优势有关。

3)生标法所得到的生物量—生产力和浮游植物群落结构空间分布与其他方法所得到的结果一致,为生标重建此区域的浮游植物生物量与群落结构提供了证据。

参考文献

- [1] NING XIUREN, CHAI FEI, XUE HUI, et al. Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: C10005.
- [2] LIU K K, CHAO S Y, SHAW P T, et al. Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea: observations and a numerical study [J]. *Deep Sea Research*, 2002, 49(8): 1387-1412.
- [3] RAGUENEAU O, TREGUER P, LEYNAERT A, et al. A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26(4): 317-365.
- [4] PAYTAN A, GRIFFITH E M. Marine barite: Recorder of

- variations in ocean export Productivity [J]. *Deep Sea Research II*, 2007, 54(5-7): 687-705.
- [5] ZHAO MEIXUN, MERCER J L, EGLINTON G, et al. Comparative molecular biomarker assessment of phytoplankton paleoproductivity for the last 160 kyr off Cap Blanc, NW Africa [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(1): 72-97.
- [6] HE JUAN, ZHAO MEIXUN, LI LI, et al. Biomarker evidence of relatively stable community structure in the northern South China Sea during the last glacial and Holocene [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, 19(4): 377-387.
- [7] 李丽, 王慧, 汪品先. 南海北部 17937 岩心四万年来古环境变化的分子有机地球化学记录[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2008, 33(6): 793-799.
- [8] HU JIANFANG, PENG PING'AN, JIA GUODONG, et al. Biological markers and their carbon isotopes as an approach to the paleoenvironmental reconstruction of Nansha area, South China Sea, during the last 30 ka [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(10): 1197-1204.
- [9] ZHAO MEIXUN, HUANG C, WANG C, et al. A millennial-scale U^{K}_{37} sea-surface temperature record from the South China Sea (8° N) over the last 150 kyr: Monsoon and sea-level influence [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 236(1-2): 39-55.
- [10] SHIAU L, YU P, WEI K. Sea surface temperature, productivity, and terrestrial flux variations of the south-eastern south china sea over the past 800000 years(IMAGESMD972142) [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, 19(4): 363-376.
- [11] HU JIANFANG, PENG PING'AN, CHIVAS A R. Molecular biomarker evidence of origins and transport of organic matter in sediments of the Pearl River estuary and adjacent South China Sea [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(9): 1666-1676.
- [12] 赵美训, 赵晓晨, 陈建芳, 等. 南海表层沉积物生物标志物的分布特征及古生产力重建意义[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(3): 45-53.
- [13] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5-6): 213-250.
- [14] WAKEHAM S G, PETERSON M L, HEDGES J I, et al. Lipid biomarker fluxes in the Arabian Sea, with a comparison to the equatorial Pacific Ocean [J]. *Deep-Sea Research II*, 2002, 49: 2265-2301.
- [15] HERNANDEZ M T, MILLS R A, PANCOST R D. Algal biomarkers in surface waters around the Crozet Plateau [J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(8):1051-1057.
- [16] GONG G, LIU K K, LIU C T, et al. The chemical hydrography of the South China Sea west of Luzon and a comparison with the West Philippine Sea [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1992, 3(4): 587-602.
- [17] WANG HUI, JIN QIHUA, GAO SHAN. A preliminary study on the response of marine primary production to monsoon variations in the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 27(5): 21-35.
- [18] 赵焕庭. 珠江河口演变[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 1-357.
- [19] SHAW P T, CHAO S Y. Surface circulation in the South China Sea [J]. *Deep Sea Research I*, 1994, 41(11-12): 1663-1683.
- [20] WANG DONGXIAO, HONG BO, GAN JIANPING, et al. Numerical investigation on propulsion of the counter-wind current in the northern South China Sea in winter [J]. *Deep Sea Research I*, 2010, 57(10): 1206-1221.
- [21] DONG LIXIAN, SU JILAN, LAI A W, et al. Seasonal variation and dynamics of the Pearl River plume [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1761-1777.
- [22] GAN JIANPING, LI LI, WANG DONGXIAO, et al. Interaction of a river plume with coastal upwelling in the northeastern South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(4): 728-740.
- [23] 乐凤凤, 孙军, 宁修仁, 等. 2004 年夏季中国南海北部的浮游植物[J]. *海洋与湖沼*, 2006, 37(3): 238-248.
- [24] 孙军, 宋书群, 乐凤凤, 等. 2004 年冬季南海北部浮游植物[J]. *海洋学报*, 2007, 29: 132-145.
- [25] 郝翎, 宁修仁, 刘诚刚, 等. 南海北部初级生产力遥感反演及其环境调控机制[J]. *海洋学报*, 2007, 29(3): 58-68.
- [26] 陈纪新, 黄邦钦, 刘媛, 等. 应用特征光合色素研究东海和南海北部浮游植物的群落结构[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(7): 738-746.
- [27] HUANG BANGQIN, HU JUN, XU HONGZHOU, et al. Phytoplankton community at warm eddies in the northern South China Sea in winter 2003/2004 [J]. *Deep Sea Research II*, 2010, 57: 1792-1798.
- [28] CHEN Y L L, CHEN H Y, KARL D M, et al. Nitrogen modulates phytoplankton growth in spring in the South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 527-541.
- [29] HUANG BANGQIN, LAN WENLU, CAO ZHENRUI, et al. Spatial and temporal distribution of nanoflagellates in the northern South China Sea [J]. *Hydrobiologia*, 2008, 605(1):143-157.
- [30] YIN KEDONG, QIAN PEIYUAN, WU M C S, et al. Shift

- from P to N limitation of phytoplankton growth across the Pearl River estuarine plume during summer [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 221: 17-28.
- [31] DAI MINHAN, ZHAI WEIDONG, CAI WEIJUN, et al. Effects of an estuarine plume-associated bloom on the carbonate system in the lower reaches of the Pearl River estuary and the coastal zone of the northern South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1416-1423.
- [32] XUE HUIJIE, CHAI FEI, XU DANYA, et al. Characteristics and seasonal variation of the coastal currents in the South China Sea [J]. *Oceanography in China*, 2001, 13: 64-75.
- [33] SU JILAN. Overview of the South China Sea circulation and its influence on the coastal physical oceanography outside the Pearl River Estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1745-1760.
- [34] NITANI H. Beginning of the Kuroshio [J]. *Kuroshio: Physical Aspects of the Japan Current*, 1972: 129-163.
- [35] SHAW P. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine Sea water into the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C1): 821-827.
- [36] LI LI, POHLMANN T. The South China Sea warm-core ring 94S and its influence on the distribution of chemical tracers [J]. *Ocean Dynamics*, 2002, 52(3): 116-122.
- [37] QIU DAJUN, HUANG LIANGMIN, ZHANG JIANLIN, et al. Phytoplankton dynamics in and near the highly eutrophic Pearl River Estuary, South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(2): 177-186.
- [38] EGGE J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? [J]. *Journal of Marine Systems*, 1998, 16(3-4): 191-198.
- [39] RICHARDSON K. Harmful or exceptional phytoplankton blooms in the marine ecosystem, advances in marine biology [M]. London: Academic Press, 1997: 301-385.
- [40] XU JIE, YIN KEDONG, HE LEI, et al. Phosphorus limitation in the northern South China Sea during late summer: Influence of the Pearl River [J]. *Deep Sea Research I*, 2008, 55: 1330-1342.
- [41] YIN KEDONG, SONG XIUXIAN, SUN JUN, et al. Potential P limitation leads to excess N in the pearl river estuarine coastal plume [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1895-1907.
- [42] WANG ZHAOHUI, QI YUZAO, CHEN JUFENG, et al. Phytoplankton abundance, community structure and nutrients in cultural areas of Daya Bay, South China Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, 62(1-2): 85-94.
- [43] RIEGMAN R, STOLTE W, NOORDELOOS A, et al. Nutrient uptake and alkaline phosphatase (EC 3 : 1 : 3 : 1) activity of *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) during growth under N and P limitation in continuous cultures [J]. *Journal of Phycology*, 2000, 36(1): 87-96.
- [44] CHISHOLM S W. Phytoplankton size [M] // FALKOWSKI P G, WOODHEAD A D. Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea. New York: Plenum Press, 1992: 213-237.