

DOI:10.3724/SP.J.1140.2012.04009

南海北部晚第四纪颗石藻生产力变化及其影响因素

贺娟, 李丽¹, 王慧¹, 赵美训²

(1 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2 中国海洋大学 海洋有机地球化学研究所, 青岛 266100)

摘要:通过对南海北部 MD05-2904 岩心进行有机地球化学分析,以长链不饱和烯酮作为颗石藻生产力的替代性指标,讨论颗石藻生产力的变化及其影响因素。结果显示,260 ka 以来,颗石藻生产力有着明显的冰期/间冰期变化:冰期高,间冰期低;冰阶高,间冰阶低;在轨道尺度上岁差周期明显,反映出太阳辐射、东亚季风对颗石藻生产力在长期尺度上起调控作用;而由于特殊的地理位置,河流输送的营养盐对本区海洋初级生产力的影响可能也较大;与前人研究结果一致,同时认为,在地质历史上沉积速率变化大的区域,对生物标记物的含量和堆积速率的对比讨论,更有利于反映生产力的变化。

关键词:古生产力;冰期/间冰期;东亚季风;岁差;南海北部

中图分类号:P736.22 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2012)04-0009-08

自 Boon 等(1978)在非洲西部 Walvis 海脊首次发现了长链不饱和烯酮(C_{37} - C_{39} alkenones),现已知不饱和烯酮在现代海洋和边缘海沉积物中广泛分布,在整个新生代,至少自始新世以来连续出现。目前认为近代海洋沉积物中广泛存在的长链不饱和烯酮是由 Haptophyceae 中的颗石藻合成,主要包括广泛分布的 *Emiliania huxleyi* 和 *Gephyrocapsa oceanica*。Brassell 等(1986)发现 C_{37} 烯酮不饱和度和冰期间冰期旋回中的 $\delta^{18}O$ 记录变化趋势相似,提出烯酮可作为古表层海水的指标,并给出了最初的不饱和系数定义。此后,许多培养试验和实地测量都验证了 C_{37} 烯酮不饱和度在重建海水表层温度的重要作用^[1]。经过几十年的研究发展,应用长链不饱和烯酮的不饱和度重建古海水表层温度这一方法,已在全世界获得了广泛应用,已经成为微体化石(有孔虫等)氧同位素之后又一古气候变化的重要替代指标。虽然有关其母源生物的一些生态方面,如烯酮产生的季节性,它们在真光带中的垂直分布与营养盐的关系等还需作更多更详细的工作。但烯酮独特的优势使得它在古海洋研究中的应用越来越广泛,如利用烯酮含量估算古初级生产力变化^[2-6]结合氧同位素记录估测古大气的 CO_2 分压^[7-8],和利用特殊种类含量($C_{37:4}$,代表有4个不饱和双键的

C_{37} 长链不饱和烯酮)^[9]或同位素组成^[10]估测古海水盐度。

南海作为西太平洋最大的边缘海之一,相邻大陆上的强烈风化、周边大河的运输以及南北宽阔的陆架和第四纪以来频繁的海平面升降,致使陆架、陆坡的沉积速率非常高。南海北部陆坡东沙群岛是南海海域沉积活动最为活跃的地区之一,发育着高沉积速率堆积体。为此区域的有机地球化学研究工作提供了有利条件。南海气候主要受东亚季风气候系统控制,夏季盛行由海洋吹向大陆的暖湿的西南季风,冬季盛行由亚洲大陆吹向海洋的干冷的东北季风。受东亚季风影响,海盆的表层环流也呈季节性的顺逆时针变化^[11]。已有许多南海现代初级生产力时空变化的相关工作,也有许多重建南海的古生产力研究,如利用各种有孔虫、颗石藻等古生物化石^[12-14]及壳体 Cd/Ca ^[15]、 $\delta^{13}C$ 同位素、有机碳^[16]等方法。基于这些工作,对于控制南海生产力变化的主要因素,目前已达成一部分共识:认为南海表层初级生产力受季风影响,北部的高生产力主要与东北季风有关。在冰期、间冰期尺度上,季风也对古生产力有重要的影响作用,冰期生产力高,间冰期低^[17]。然而,长尺度高分辨率的有机地球化学,特别是生物标记物记录相对较少。

本文通过对南海北部 MD05-2904 岩心沉积物进行长尺度高分辨率的有机地球化学分析,以长链不饱和烯酮作为颗石藻生产力的替代性指标,讨论 260 ka 以来南海北部颗石藻生产力的变化及其影响机制。

基金项目:国家自然科学基金项目(40906026,40976022);上海市科研创新项目(12ZZ031)。

作者简介:贺娟(1980—),女,讲师,从事海洋生物有机地球化学研究。E-mail: hj08@tongji.edu.cn

收稿日期:2012-07-06;改回日期:2012-07-17。 张光威编辑

1 材料与方法

1.1 MD05-2904 钻孔与岩心

MD05-2904 孔位于南海北部东沙以南 ($19^{\circ}27.32'N$ 、 $116^{\circ}15.15'E$, 水深 2 066 m) (图 1), 由中法联合的 MARCO POLO 航次、法国“Marion Dufresne”号科学考察船采获。岩心全长 44.98 m, 为岩性均一的粉砂质沉积, 无明显间断和浊流沉积, 部分层段仅有轻微的生物扰动^[18]。

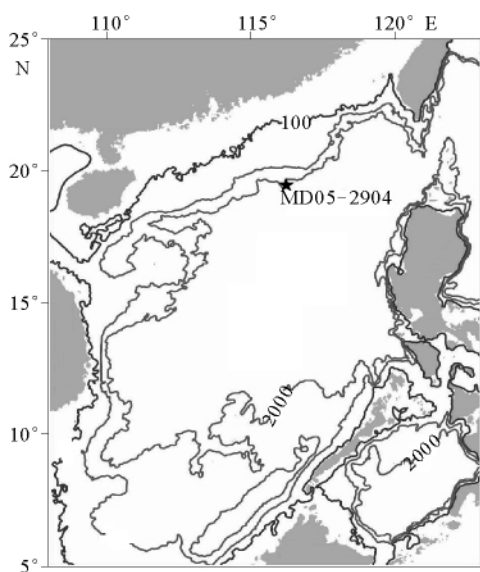


图 1 南海北部 MD05-2904 站位

Fig. 1 Location of core MD05-2904

本次工作的年龄框架,主要是建立在柱状样浮游有孔虫(*Globigerinoides ruber*)的氧同位素^[19]基础上。对比全球底栖有孔虫氧同位素综合曲线 LR04^[20]和北极冰心 NGRIP $\delta^{18}O$ ^[21]曲线,确定主要年龄控制点后,根据线性内插法完成岩心年代框架的建立。现有的年龄框架显示,MD05-2904 孔底部为海水氧同位素 8 期,年龄约为 262 ka,有机样品取样平均分辨率约 500 年,最高可达 120 年。

1.2 有机质萃取分析

本次工作的采样间距为 8 cm,共采集样品 562 个。样品采集后冷冻保存。对海洋沉积物中的有机物分离、定性定量分析、有机质提取、分离方法见 He 等^[22]。冷冻干燥后的沉积物样品研磨后,经甲醇:二氯甲烷(1:3)混合溶液萃取,收集萃取液获得总有机质。吹干后加入 6% KOH 的甲醇溶液,进行

碱水解。再用正己烷萃取,收集上清液后,吹干;过硅胶柱先用正己烷淋洗,收集烷烃组分;再用二氯甲烷(内加 5% 甲醇)淋洗收集醇类、烯酮组分。将收集液分别转移至细胞瓶,吹干。烷烃组分中加入 30 μL 异辛烷,醇类组分衍生化反应后再上气相色谱(Gas Chromatograph, GC)分析。色谱条件:HP-1 J,柱长 50 m,内径 0.32 mm,涂层 0.17 μm 。FID 检测器温度 280 $^{\circ}C$ 。进样口温度:280 $^{\circ}C$ 。采用无分馏进样,载气为 He,流速 1.0 mL/min,五段升温程序。定量采用内标法,通过和内标面积对比,确定化合物含量。部分样品进行气相色谱-质谱联用(Gas Chromatograph-Mass Spectrometer, GC/MS)定性分析:色谱柱 EQUITYTM-5 Capillary Column(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm)。GC 同上,三段升温程序。质谱条件:离子源:EI 源,离子源温度:250 $^{\circ}C$;发射电子能量:70 eV,扫描范围: m/z 50 ~ 650 amu;接口温度:300 $^{\circ}C$,检测器:MS。所有的测试分析工作均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

1.3 堆积速率的计算

南海北部的沉积速率变化大,如末次冰期时变化可达 25~85 cm/ka^[23]。考虑到沉积速率变化引起的陆源物质对海洋有机质的稀释作用,我们计算了堆积速率(表 1),以对比或消除沉积速率和陆源碎屑运输的干扰。本文采用以下方法计算了生物标志物的堆积速率 MAR ($g/(cm^2 \cdot ka)$),计算方法见文献^[24]。

$$MAR = SR \times (BD - P \times WD) \times wt\%$$

SR 为线性沉积速率,单位 cm/ka;BD 为沉积物湿样密度,单位 g/cm^3 ;船上利用 MST(multi-sensor track)仪器测量^[18],WD 为海水密度 1.025 g/cm^3 ;wt% 为物质百分含量;数据来源于文献;P 为孔隙率,利用下面公式^[25]获得:

$$P = 0.7263 \times e^{-z/1.064} \quad (\text{注: } z \text{ 为海底以下的样品深度})$$

2 结果

MD05-2904 柱中检测出两种 C_{37} 长链不饱和烯酮($C_{37:2}$, $C_{37:3}$, 分别代表有 2 个、3 个不饱和双键的 C_{37} 长链不饱和烯酮), $C_{37:3}$ 含量较低,二者之和作为总的长链不饱和烯酮,以下简称为烯酮。本柱沉积物中 C_{37} 烯酮的含量变化大(图 2),从 21 ng/g (4.7 ka, 全新世)到 1 946 ng/g (96.8 ka, MIS 5.2)。自 MIS 8 以来,冰期高、间冰期低,冰阶高、

表 1 南海北部晚第四纪颗石藻含量 (ng/g) 和堆积速率 (g/cm² · ka) 在冰期/间冰期的变化Table 1 Changes in contents (ng/g) and MARs (g/cm² · ka) of C₃₇ alkenones during the glacials/interglacials

	C ₃₇ alkenone 含量			C ₃₇ alkenone 堆积速率		
	平均值	最大-最小	冰期-间冰期	平均值	最大-最小	冰期-间冰期 V
MIS1	191	423		5.6	12.8	
Termination I			~320			~25
MIS2	564	657		34.6	74.7	
MIS3	596	964		25.0	97	
MIS4	634	627		17.2	16.8	
MIS5	921	1520		25.3	94.2	
Termination II			~815			~52
MIS6	979	1455		36.6	62	
MIS7	735	963		18.1	26.3	
Termination III			~945			~28
MIS8	1187	792		32.1	21.1	

间冰阶低的整体趋势明显(表 1)。而且烯酮含量自 MIS 6 期末以来有整体下降趋势。除不完整的冰期 MIS 8、MIS 6、MIS 4 和 MIS 2 的烯酮平均含量逐渐降低,间冰期 MIS5、MIS 3 和全新世的平均含量也依次降低。烯酮含量在 3 个冰消期也显示出巨大的变化(表 1),而且也是依次降低的,从 Termination III 的 945 ng/g,降至 Termination I 的 320 ng/g。同时,每个 MIS 期内的含量波动也非常大,MIS 5 可达 1 520 ng/g,主要与 MIS 5 期内的几次不规律高值有关。

沉积速率在 MIS 5 期前,变化相对较小,变化幅度 6.0~24.8 cm/ka; MIS 5 期时沉积速率变化大,可达 61.4 cm/ka; MIS 3 期末、MIS 2 整体沉积速率增高,可高达 65.4 cm/ka(图 2)。在烯酮含量基础上换算的烯酮的堆积速率显示,它的整体变化趋势与含量的变化趋势一致。变化范围为 6.7~44.3 g/cm² · ka,在冰期和间冰期中的亚期变化也较烯酮含量变化更为显著。但是,烯酮含量自 MIS 6 期以来的下降趋势,在烯酮堆积速率中没有体现。而且堆积速率在 Termination I 和 III 的变化不大, Termination II 时却高近一倍约 52 g/cm² · ka。

采用 AnalySeries 软件 Blackman-Tuckey^[26] 对烯酮含量和堆积速率的频谱分析,结果显示:烯酮含量的岁差周期较弱,23 ka 不明显,只有弱的 19 ka 周期。烯酮堆积速率的岁差周期更为显著一些,23 ka 和半岁差 9.8 ka 明显。同时,堆积速率还显示除了 100 和 41 ka 周期,但限于本记录的时间尺度,不适宜讨论岁差以上的轨道周期。对于含量和堆积速率的频谱分析都显示的 28 ka 周期,Beaufort 等认

为这一周期主要出现在印度-太平洋区域的频谱分析中,起源不是很清楚,被解释为是偏心率和冰期间冰期循环对岁差的相位调制^[27]。两者的差异可能显示了沉积速率对含量的影响,也可能说明除了岁差还有其他影响颗石藻含量变化的重要因素。

3 讨论

3.1 影响分析古生产力变化的因素

生物标志物因其明确的母体来源和地质沉积物中可以较好保存的特性,在古生产力的研究中得到逐步应用。但应用生物标志物解释生产力变化也会受到其他因素的干扰。首先,沉积物中生物标记物含量受保存或降解过程的影响。烯酮的抗降解能力强,而且南海北部的高沉积速率也有利于有机质的保存^[23]。强的降解作用将会导致标记物含量从表层到底层逐渐降低,而在本岩心柱中,老的地层如 MIS 6 中标记物的高含量,且 MIS5 到全新世逐渐降低的趋势,都表明在本次工作中,降解作用至少并没有掩盖掉标记物的生产信息,没有控制生标含量的变化。烯酮的含量变化可以反映颗石藻生产力的变化。其次,生物标志物的产出量目前还不清楚。如烯酮在颗石藻中的含量并不清楚,然而,颗石藻与烯酮一定有一个线性关系。尽管缺少它们之间的这一具体关系的了解,沉积物中的生标含量不能直接计算颗石藻的数量或者它的生产力。但是,在相对稳定的保存条件下,烯酮含量的相对变化主要还是和它的产出也就是颗石藻的含量密切相关。因此,

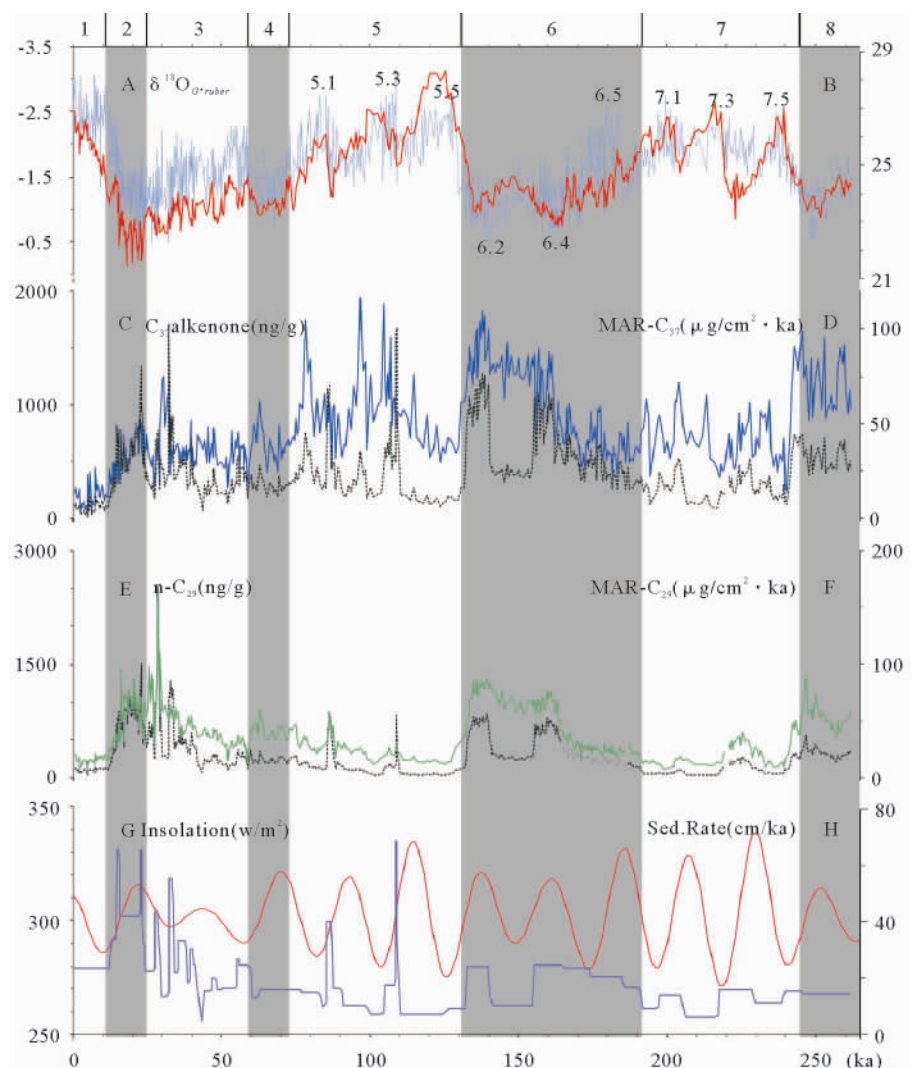


图2 南海北部 MD05-2904 柱中 C_{37} 不饱和烯酮含量(C)和堆积速率(D)以及其他参数:浮游有孔虫 $\delta^{18}O$ (A)^[19], U 温度记录(B)^[22], $n-C_{29}$ 正构烷烃含量(E)和堆积速率(F)^[22], 北纬 20° 一月太阳辐射量(G)和沉积速率变化(H)。
Fig. 2 Contents (D) and MARs (C) of C_{37} alkenones and other proxies in core MD05-2904 during the last 260 ka; planktonic foraminifera *G. ruber* $\delta^{18}O$ (A)^[19], the U_{37}^K SST record (B)^[22], contents (E) and MARs (F)^[22] of $n-C_{29}$ alkanes, insolation ($20^{\circ}N$, January) (G) and sedimentation rates (H).

生物标记物含量的相对变化可以对生产力的变化进行半定量分析。

对于南海北部这样一个特殊的地理位置, 河流运输的陆源物质会影响海洋生物标记物的单位面积/体积密度。冰期/间冰期巨大的沉积速率变化更是会混淆原来的海洋生物标记物含量记录, 如此用烯酮含量直接半定量分析颗石藻生产力的变化, 可能就会有较大的偏差。因此, 我们用烯酮含量和堆积速率互为参考, 来讨论颗石藻生产力的变化。烯酮含量和堆积速率虽然在整体上变化较为一致, 但仍有差异。如 MIS 5 期以来, 烯酮堆积速率并没有显示出烯酮含量逐渐降低的趋势。再如冰消期时, 烯酮含量变化依次降低, 而堆积速率却在 Termina-

tion II 时显示最大的变化, 约是其他两个冰消期 Termination I 和 III 的一倍。还有它们的频谱分析的差异, 都显示出沉积速率的影响与含量和堆积速率对比讨论的重要性。有了堆积速率的对比, MIS 5 期以来烯酮含量逐渐降低的趋势, 可能反映了沉积速率的部分影响。但值得注意的是堆积速率虽然可以对比沉积速率对有机质含量变化的影响, 但它的计算非常依赖于年龄模式。微小的年龄框架的变化, 就可能会影响到堆积速率的计算, 如本岩心柱中 MIS 5 的沉积速率快速变化阶段(图 2)。为了避免这种因为定年误差引起的人为误差, 我们同时讨论烯酮含量和堆积速率两个指标。

3.2 轨道尺度上的颗石藻生产力变化

南海的有机地质记录较少,仅有的记录中也以总有机质含量为多,而且尺度较短或分辨率较低^[28-32]。同时,沉积物的总有机质来源比较复杂,受陆源物质的影响更大。应用生物标志物可以获得更为清晰明确的古生产力记录。

本岩心柱中烯酮 C_{37} alkenone 记录与其他少数发表的南海烯酮记录一致,如北部的 SO50-31KL^[28]、17940^[33] 和南部 17961^[34]、MD 972151^[35] 和 MD 972142^[36]。与西部 17954^[33] 的差异较大,可能是 17954 位于越南东部上升流地区,其生产力主要由夏季风控制。同时,MIS5 期以来的颗石藻含量下降趋势在南海西南的站位(17961、17954、MD972151)也有记录。整体上,烯酮含量和堆积速率的结果都显示出,颗石藻生产力在冰期高,间冰期低,在冰阶高,间冰阶低的模式。与前人得出的结果一致,认为这也主要反映了季风对海洋生产力的影响。对烯酮含量和堆积速率的频谱分析也说明了这一机制。作为低纬过程,季风的轨道驱动以岁差为主^[37],2 万年的岁差正是 20°N 太阳辐射量的主要周期。如果将烯酮初级生产力指标与北纬 20°N 太阳辐射量进行对比(图 2),可以看到烯酮的含量和堆积速率与太阳辐射量变化有一定的对应关系。太阳辐射量和烯酮堆积速率的交叉频谱分析(图 3B)显示,在岁差周期(23.8 ka)太阳辐射量领

先于烯酮变化。岁差对颗石藻生产力的驱动在其他海区也有报道,如北大西洋^[38]、赤道印度-太平洋^[27]、东赤道太平洋^[39]等,显示了太阳辐射量对颗石藻的长期调控。在南海太阳辐射量通过季风对海洋初级生产力有着重要控制作用。季风对生产力的影响控制应该主要是通过对营养盐的影响。冰期东北季风的盛行,加强了海水混合,提高了中层水的营养盐输送,营养跃层变浅,表层水层中营养盐的充足,同时,加速了营养元素在水体中的循环利用,东北季风还会带来大量的风尘沉积,带来铁、硅等营养元素,刺激了浮游植物的生长^[40]。这一理论的数据模拟也有很好的结果^[41]。而间冰期时,温度高,水体分层作用加强,阻碍了从中下层水体营养盐的输送,同时风尘的输送也减弱,浮游植物的生产力降低,从而控制了浮游植物的整体初级生产力。

3.3 其他影响颗石藻生产力的因素

虽然河流输送营养盐所占比重较小^[41-42]。但南海北部地区有珠江注入,又对海平面变化敏感,冰期/间冰期时海平面变化会影响陆架出露面积和河流运输距离,进而影响陆源营养物质的输送^[43]。以 $n\text{-C}_{29}$ 正构烷烃作为陆源物质输入的替代指标,与烯酮记录进行对比,可以看到烯酮记录和 $n\text{-C}_{29}$ 正构烷烃记录的变化非常类似。而两者交叉频谱分析的结果也说明在岁差和半岁差周期上,两者有很好的相关性,而且 $n\text{-C}_{29}$ 正构烷烃的变化略微领先于烯酮

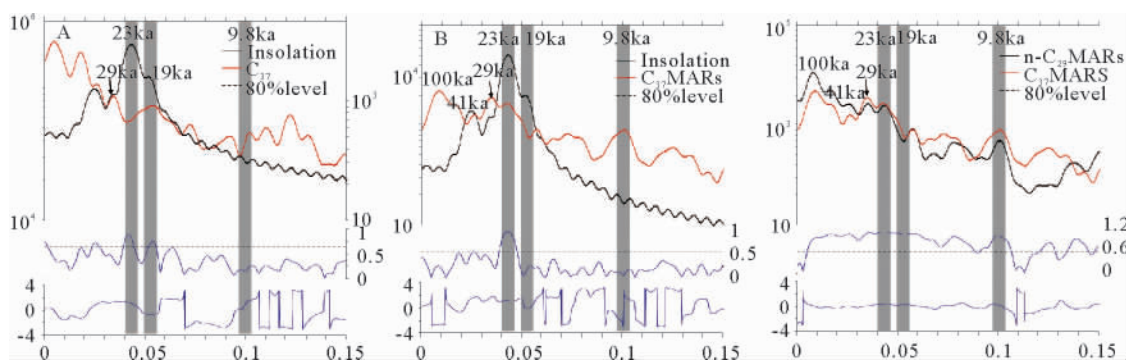


图 3 南海北部 C_{37} 不饱和烯酮和其他参数的交叉频谱分析:烯酮含量(A)、烯酮堆积速率(B)和太阳辐射量(20°N ,一月),和陆源烷烃(C)^[22]的交叉频谱

频谱强度是指数坐标,标记了 80%置信度以上主要的周期;Coherence 谱中水平虚线是代表 80%的置信度;相位分析中正值代表领先,负值代表滞后。

Fig. 3 Cross Blackman - Tuckey spectrum of C_{37} alkenones contents with insolation (A), C_{37} alkenones MARs with insolation (B), and alkenones MARs with $n\text{-C}_{29}$ alkanes (C)^[22] for the past 260 ka using the AnalySeries software package^[26]. Spectral densities are plotted on log scales. The horizontal dashed lines indicate confidence at the 80% level in the coherence spectra. Periods of the main spectral peaks above the 80% confidence level are labeled. Positive phase denotes leading and negative lagging.

的变化(图 3C)。说明陆源物质的输入和海洋初级生产力确实有先后关系,即陆源物质可能作为部分营养盐对此处的海洋生产力起作用。在我们的记录中,对应于全球海平面发生巨幅升降 120 m 的 4 个冰消期^[44],烯酮、 $n\text{-C}_{29}$ 正构烷烃的含量和堆积速率都显示大的变化。此期的颗石藻生产力增高的变化很可能与河流输入陆源营养物质的增减有密切关系。此外,晚 MIS 3 的颗石藻高生产力虽然含量和堆积速率记载也稍有时间差异,但整体还是反映了高生产力的状况。这一高生产力阶段在 ODP1144^[31]和 17961^[34]也有记录。可能跟同期海平面下降^[44],注入南海的淡水增多有关^[15]。

我们也发现南海外的塔斯曼海^[5,45],阿拉伯海^[45]、北大西洋^[4]、赤道太平洋^[46],和日本海^[47]等地,也有 MIS 5 期以来烯酮含量逐渐降低的类似记录。因此,还不能根据本记录中烯酮堆积速率 MIS 5 期以来的不明显变化,断定 MIS 5 期以来表现出的烯酮含量下降是受沉积速率的控制。也可能它们的这一下降趋势反映了烯酮生产者的颗石藻的地质历史演化?这还待今后的进一步对比研究工作。

烯酮含量还显示在 MIS 5 期的有 3 个很显著的生产力增高阶段(104.6、96.8 和 78.2 ka),转换成堆积速率后,仅对应较高的生产力(堆积速率)。而且堆积速率显示的生产力突增阶段变为 108~86 ka,分别对应于沉积速率变化大的 MIS 5.4 和 MIS 5.2 期。参考全球海平面变化^[44]和 $n\text{-C}_{29}$ 烷烃记录,这两个阶段生产力的变化可能和海平面升降、陆源物质输入的增加有关。78.2 ka 的生产力高值在烯酮的含量和堆积速率里都有明显的记录,推测这可能与颗石藻的演化有关。因为 *E. huxley* 大约在 270 ka 出现,但直到 MIS 5 晚期才繁盛^[48]。因此,推测这一生产力高值反映的是烯酮生产者演化的繁盛期。

4 结论

(1)南海北部 MD05-2904 孔的长链不饱和烯酮的含量和堆积速率记录基本与前人研究结果一致,显示:260 ka 以来,颗石藻生产力有明显的冰期高,间冰期低,冰阶高,间冰阶低现象,岁差周期明显。

(2)在轨道尺度上,太阳辐射量通过东亚季风对颗石藻生产力起调控作用;季风对生产力的影响控制主要是通过对营养盐的影响,冰期东北季风的盛行,加强了海水混合,提高了中层水的营养盐输送,

表层水层中营养盐的充足,同时,加速了营养元素在水体中的循环利用,刺激了海洋初级生产力;间冰期相反,东北季风减弱,海洋生产力降低。

(3)特殊的地理位置,河流输送的营养盐对本区海洋初级生产力的影响也较大,结果也体现了生物标记物受沉积速率的影响和堆积速率对年龄框架的高依赖性,对于沉积速率变化大的地理区域,有机质含量和堆积速率综合分析会更有利于生产力变化的讨论。

致谢:本文分析样品由“国际海洋全球变化研究”(IMAGES)计划 2005 年 MARCO-POLO 航次提供,在此向航次全体科学家及工作人员表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] Eglinton T I, Conte M H, Eglinton G, et al. Proceeding of a workshop on alkenone-based paleoceanographic indicators [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystem*, 2001, 2: 2000GC000122.
- [2] Weaver P P E, Chapman M R, Eglinton G, et al. Combined coccolith, foraminiferal, and biomarker reconstruction of paleoceanographic conditions over the last 120 kyr in the northern North Atlantic (591, 231W) [J]. *Paleoceanography*, 1999, 14:336-349.
- [3] Rostek F, Bard E, Beaufort L, et al. Sea surface temperature and productivity records for the past 240 kyr in the Arabian Sea [J]. *Deep-Sea Research II*, 1997, 44: 1461-1480.
- [4] Villanueva J, Grimalt J O, Labeyrie L D, et al. Precessional forcing of productivity in the North Atlantic Ocean [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13: 561-571.
- [5] Calvo E, Pelejero C, Logan G A, et al. Dustinduced changes in phytoplankton composition in the Tasman Sea during the last four glacial cycles [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19, PA2020, doi:10. 1029/2003PA000992.
- [6] Seki O, Ikehara M, Kawamura K, et al. Reconstruction of paleoproductivity in the Sea of Okhotsk over the last 30 kyr [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19, PA1016, doi: 10. 1029/2002PA000808.
- [7] Jasper J P, Hayes J M, Mix A C, et al. Photosynthetic fractionation of ^{13}C and concentrations of dissolved CO_2 in the central equatorial Pacific during the last 255, 000 years [J]. *Paleoceanography*, 1994, 9: 781-798.
- [8] Kohfeld K E, Le Quere C, Harrison S P, et al. Role of marine biology in glacial-interglacial CO_2 cycles [J]. *Science*, 2005, 308: 74-78.
- [9] Rostek F, Ruhland G, Bassinot F C, et al. Reconstructing sea surface temperature and salinity using $\delta^{18}\text{O}$ and alkenone records [J]. *Nature*, 1993, 364: 319-321.
- [10] Englebrecht A C, Sachs J P. Determination of sediment prov-

- enance at drift sites using hydrogen isotopes and unsaturation ratios in alkenones [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, 69: 4253-4265.
- [11] Wang P, Li Q. Biogeochemistry and the Carbon Reservoir. The South China Sea [M]. Springer, 2009: 25-73.
- [12] Jian Z M, Wang L J, Kienast M. Late Quaternary surface paleoproductivity and variations of the East Asian Monsoon in the South China Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 1: 32-40.
- [13] Kuhnt W, Hess S, Jian Z. Quantitative composition of benthic foraminiferal assemblages as a proxy indicator for organic carbon flux rates in the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 123-157.
- [14] Beaufort L, de Garidel-Thoron T, Mix A C, et al. ENSO-like forcing on oceanic primary production during the late Pleistocene[J]. *Science*, 2001, 293: 2440-2444.
- [15] Lin H L, Lai C T, Ting H C, et al. Late Pleistocene nutrients and sea surface productivity in the South China Sea: a record of teleconnections with Northern hemisphere events [J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 197-210.
- [16] Chen M-T, Shiau L-J, Yu P-S, et al. 500 000-Year records of carbonate, organic carbon, and foraminiferal sea-surface temperature from the southeastern South China Sea (near Palawan Island) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 197: 113-131.
- [17] Zhao M, Wang P, Tian J, et al. Biogeochemistry and the Carbon Reservoir. The South China Sea [M]. Springer, 2009: 439-483.
- [18] Laj C, Wang P X, Balut Y, et al. MD147-Marco Polo IMAGESⅢ Cruise Report. France: Institut Paul-Emile Victor (IPEV), 2005.
- [19] 葛黄敏, 李前裕, 成鑫荣, 等. 南海北部晚第四纪高分辨率浮游氧同位素地层学及其古气候信息[J]. *地球科学*, 2010, 35(4): 515-525. [GE Huangmin, LI Qianyu, CHENG Xinrong, et al. Late Quaternary high resolution monsoon records in planktonic stable isotopes from Northern South China Sea [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(4): 515-525.]
- [20] Lisiecki L E, Raymo E M. Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20, PA1003, doi: 10. 1029/2004PA001071.
- [21] North Greenland Ice Core Project (NGRIP) Members. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period [J]. *Nature*, 2004, 431: 147-151.
- [22] He Juan, Zhao Meixun, LI Li, et al. Sea surface temperature and terrestrial biomarker records of the last 260 ka of core MD05-2904 from the northern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(15): 2376-2384.
- [23] Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 245-284.
- [24] Chen M, Shiau L, Yu P, et al. 500000~ year records of carbonate, organic carbon, and foraminiferal sea-surface temperature from the southeastern South China Sea (near Palawan Island) [J]. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, 2003, 197: 113-131.
- [25] 黄维, 汪品先. 南海沉积物总量的统计: 方法与结果 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 465-473. [HUANG Wei, WANG Pinxian. The statistics of sediment mass in the South China Sea: method and result [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 465-473.]
- [26] Paillard D, Labeyrie L, Yiou P. Macintosh program performs time-series analysis [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1996, 77(39): 379, doi: 10. 1029/96EO00259.
- [27] Beaufort L, de Garidel-Thoron T, Mix A C, et al. ENSO-like forcing on Oceanic Primary Production during the late Pleistocene [J]. *Science*, 2001, 293: 2440-2444.
- [28] Huang C Y, Wu S, Zhao M, et al. Surface ocean and monsoon climate variability in the South China Sea since the last glaciation [J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32: 71-94.
- [29] Chen Y-Y, Chen M-T, Fang T-S. Biogenic sedimentation patterns in the Northern South China Sea: An ultrahigh-resolution record MD972148 of the past 150,000 years from the IMAGES III - IPHIS Cruise [J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1999, 10(1): 215-224.
- [30] Chen J, Zheng L, Wiesner M G, et al. Estimations of primary production and export production in the South China Sea based on sediment trap experiments [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(7): 583-586.
- [31] Higginson M J, Maxwell J R, et al. Nitrogen isotope and chlorin paleoproductivity records from the Northern South China Sea: remote vs. local forcing of millennia-and orbital-scale variability [J]. *Marine Geology*, 2003, 201: 223-250.
- [32] Chen Y. L. Spatial and seasonal variations of nitrate based new production and primary production in the South China Sea [J]. *Deep-Sea Research I*, 2005, 52: 319-340.
- [33] Kienast M, Calvert S E, Pelejero C, et al. A critical review of marine sedimentary $^{13}\text{C}_{\text{org-pCO}_2}$ estimates: New palaeorecords from the South China Sea and a revisit of other low-latitude $^{13}\text{C}_{\text{org-pCO}_2}$ records[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2001, 15: 113-127.
- [34] Pelejero C, Grimalt J O, Sarnthein M, et al. Molecular biomarker record of sea surface temperature and climatic change in the South China Sea during the last 140 000 years[J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 109-201.
- [35] Zhao M X, Huang C Y, Wang C C, et al. A millennial-scale $\text{U}_{\text{K}'}^{\text{K}}$ 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: 39-55.
- [36] Shiau L J, Yu P S, Wei K Y, et al. Sea surface temperature, productivity, and terrestrial flux variations of the southeastern South China Sea over the past 800000 years (IMAGES

- D972142)[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, 19, 363-376.
- [37] Ruddiman W F. *Earth's Climate: Past and Future* [M]. Freeman & Co., N Y. 2001, 1-465.
- [38] Villanueva J, Grimalt J O, Labeyrie L D, et al. Precessional forcing of productivity in the North Atlantic Ocean[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(6): 561-571.
- [39] Ivanova E V, Beaufort L, Vidal L, et al. Precession forcing of productivity in the Eastern Equatorial Pacific during the last glacial cycle[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 40: 64-77.
- [40] Duce R A, Liss P S, Merrill J T, et al. The atmospheric input of trace species to the world ocean [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1991, 5: 193-259.
- [41] 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 Part I*, 2002, 49: 1387-1412.
- [42] Chen Y L. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary production in the South China Sea [J]. *Deep-Sea Research Part I*, 2005, 52: 319-340.
- [43] Pelejero C. Terrestrial n-alkane input in the South China Sea: high resolution records and surface sediments [J]. *Chemical Geology*, 2003, 200: 89-103.
- [44] Lea D W, Martin P A, et al. Reconstructing a 350 ky history of sea level using planktonic Mg/Ca and oxygen isotopic records from a Cocos Ridge core [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1-3): 283-293.
- [45] Rostek F, Bard E, Beaufort L, et al. Sea surface temperature and productivity records for the past 240 kyr in the Arabian Sea. *Deep Sea Research II*, 1997, 44: 1461-1480.
- [46] Rickaby R E M, Bard E, Sonzogni C, et al. Coccolith chemistry reveals secular variations in the global ocean carbon cycle? [J] *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 253: 83-95.
- [47] Fujine K, Tada R, Yamamoto M. Paleotemperature response to monsoon activity in the Japan Sea during the last 160 kyr [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280: 350-360.
- [48] Conte M H, Thompson A, Lesley D, et al. Genetic and physiological influences on the alkenone/alkenoate versus growth temperature relationship in *Emiliania huxleyi* and *Gephyrocapsa oceanica* [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 51-68.

LATE QUATERNARY COCCOLITH PRODUCTIVITY IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA

HE Juan¹, LI Li¹, WANG Hui¹, ZHAO Meixun²

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

2 Institute of Marine Organic Geochemistry, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: We present hereby the C_{37} long chain alkenones record from the Core MD 05-2904 located in the northern South China Sea. The C_{37} alkenones was applied to assess the haptophytes productivity variations. The content and Mass Accumulation Rates (MARs) of the C_{37} alkenones indicate that during the last 260 ka, the productivity of the haptophytes has generally followed a glacial/ interglacial pattern with high values in glacials, and low values in interglacials. And three high productivity intervals are identified in MIS 2, 4 and MIS 6. There were precession signals in both records. All these display a close link between East Asian winter monsoon and paleo-productivity, and on the orbital scale, marine productivity was controlled by insolation and monsoon variations, mainly through nutrients mechanism. And for the northern SCS, sea level changes and river transportation may also play an important role. These results are consistent with other reports. We also notice that, with consideration of both contents and MARs of biomarker, we can better decipher biomarker record, especially for those areas with big fluctuations in sedimentation rates.

Key words: paleo-productivity; glacial/interglacial; East Asia Monsoon; precession; northern South China Sea