

doi: 10.3799/dqkx.2010.003

南海南部 50 万年以来碳酸钙和有机碳记录 及其揭示的东亚夏季风演化

梅 西^{1,2,3}, 张训华³, 郑洪波⁴, 刘 锐³, 黄恩清⁵

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东青岛 266071

4. 南京大学地球科学系表生地球化学研究所, 江苏南京 210093

5. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 为了解南海南部第四纪冰期旋回中表层生产力的变化与东亚夏季风的演化关系, 通过对南海南部 M D05-2897 孔晚第四纪 500 ka 以来碳酸钙和有机碳含量及堆积速率高分辨率的研究发现, 碳酸钙含量及堆积速率表现出明显的冰期—间冰期旋回变化, 而有机碳的含量及堆积速率则主要呈现频率更高的周期性变化。碳酸钙和有机碳含量及堆积速率都在间冰期时增加, 冰期时降低, 反映了间冰期时夏季风的增强导致上升流的加强和营养物质的增加, 促使表层生产力提高。碳酸钙和有机碳含量及堆积速率具有 100 ka 偏心率周期、40 ka 斜率周期、20 ka 岁差和 10 ka 半岁差周期等最为丰富的频谱, 显示出低纬海区对轨道周期响应的特色。碳酸钙和有机碳的堆积速率与北半球低纬夏季日射量吻合较好, 说明岁差相关的北半球低纬夏季太阳辐射量的变化可能是东亚夏季风强度变化的主要控制因素, 而与全球冰量相关的气候变化可能是次要因素。

关键词: 南海南部; 晚第四纪; 东亚夏季风; 轨道驱动; 有机碳; 碳酸钙; 海洋学。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2010)01-0022-09

收稿日期: 2009-06-13

500 000-Year Records of Carbonate and Organic Carbon from the Southern South China Sea and Implication for East Asian Summer Monsoon Evolution

MEI Xi^{1,2,3}, ZHANG Xun-hua³, ZHENG Hong-bo⁴, LIU Rui³, HUANG En-qing⁵

1. Institute of Oceanology, Chinese Academy Sciences, Qingdao 266071, China

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China

4. Institute of Surficial Geochemistry, State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

5. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: In order to understand the relation between surface productivity changes and the evolution of the East Asian summer monsoon during the Quaternary glacial cycles in southern South China Sea, high-resolution study on content and accumulation rate of calcium carbonate and organic carbon of Core MD05-2897 were done to draw the conclusions as follows: the content and accumulation rate of calcium carbonate showed significant glacial-interglacial cycle change while organic carbon mainly showed a higher frequency of the periodic changes. Both of the content and the accumulation rate of calcium carbonate and organic carbon increased in the interglacial periods and decreased in the glacial periods which reflects the enhancement of the summer monsoon in the interglacial periods caused the strengthening of the upwelling currents and the increase of nutrients, the surface productivity increased consequently. The most abundant spectrum periods of 100 ka eccentricity, 40 ka obliquity, 20 ka precession and 10 ka semi-precession indicate the characteristics of the low latitude sea areas responding to the orbital periods. The accumula-

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40676033); 国家重点基础发展计划(No. 2007CB815906); 创新研究群体科学基金(No. 40621063)。

作者简介: 梅西(1981—), 男, 博士生, 主要从事海洋地质与古海洋学研究, E-mail: meassy@gmail.com

tion rate of calcium carbonate and organic carbon were in good agreement with summer insolation of low latitude in the Northern Hemisphere related to precession which may be the main controlling factor of East Asia summer monsoon changes, and climate changes related to the global ice volume is possibly the secondary controlling factor.

Key words: southern South China Sea; Late Quaternary; East Asia summer monsoon; orbital drive; organic carbon; calcium carbonate; oceanography.

南海是西太平洋边缘海的重要组成部分, 它北接中国大陆, 南部属“西太平洋暖池”, 西部通过湄公河、红河等与青藏高原地区发生关联, 东部以巴士海峡与开阔大洋相通。南海沉积物不仅保存了通过湄公河、珠江等河流搬运而来的河流沉积物, 还保存了风尘沉积物, 记录了丰富的古气候和古环境信息。因此, 南海是追溯冰期与间冰期旋回中东亚季风演变的理想场所(汪品先等, 1995)。在南海古生产力的研究中, 浮游有孔虫碳同位素(Thunell *et al.*, 1992)、有机碳通量(翦知湮等, 1999; Fang *et al.*, 2000)、底栖有孔虫(黄宝琦等, 2000)、浮游有孔虫 Cd/Ca 比值和生源蛋白石含量及其堆积速率(Lin *et al.*, 1999; Li *et al.*, 2002; Wang and Li, 2003; Wang *et al.*, 2007)等被用来作为表层生产力的替代指标, 研究南海第四纪表层生产力的演变, 而现代表层生产力的变化与冬、夏季风的变化密切相关(Wiesner *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2000)。目前已经发表的对古生产力研究得较为详细的沉积物柱状样多数分布于南海北部陆架上, 对南海南部的研究相对较少, 尤其是缺乏长时间尺度记录的研究。虽然近几年有所改善, 如对南海东南部 MD97-2142 孔(Chen *et al.*, 1997; Löemark *et al.*, 2009)和南海南部中部的 ODP1143 孔(Liu *et al.*, 2002a, 2008; Wang and Li, 2003; Wang *et al.*, 2007)都进行了较为系统的长时间尺度(500 ka 以上)的古生产力研究, 但在南海西南部还缺乏长时间尺度的古生产力研究, 如 MD97-2151 孔底部年龄仅为 15 万年(Wei *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2006)。

本文通过中法合作“Marco Polo”航次在南海西南部的一个站位沉积物中 50 万年来碳酸钙和有机碳含量及堆积速率的变化, 研究南海西南部第四纪表层生产力的变化及其与东亚夏季风和轨道驱动的关系。

1 材料、方法和年龄模式

低纬热带海区由于其向高纬输送冰盖生长必需的热量和水汽, 长期以来, 一直受到海洋与气候学家

的关注。无论是现代观测还是深海沉积记录都凸显热带太平洋在全球气候变化中的作用。西太平洋暖池区还是全球海气交换最强烈的区域, 这里的上升气流形成了三大环流, 即横向季风环流、侧向季风环流和沃克环流, 是影响全球气候变化的一个重要区域(田军和汪品先, 2006)。MD05-2897 孔位于南海南部, 并处于西太平洋暖池的范围之内, 适合研究低纬热带地区的气候变化。其具体地理位置是 $08^{\circ}49.53'N$, $111^{\circ}26.51'E$ (图 1), 水深 1658 m, 岩心长 30.98 m, 全柱岩性比较均匀, 无明显浊流沉积, 基本属含钙质和硅质超微化石以及微体化石的粉砂质黏土。船上的样品采集和物理参数的测量结果见 Marco Polo 航次后报告(Laj *et al.*, 2005)。

MD05-2897 孔碳酸钙含量以及总有机碳分析, 按照 8 cm 等间距取样, 共计 387 个样品, 选用德国 Elementar High TOC II 元素分析仪测试, 重复测

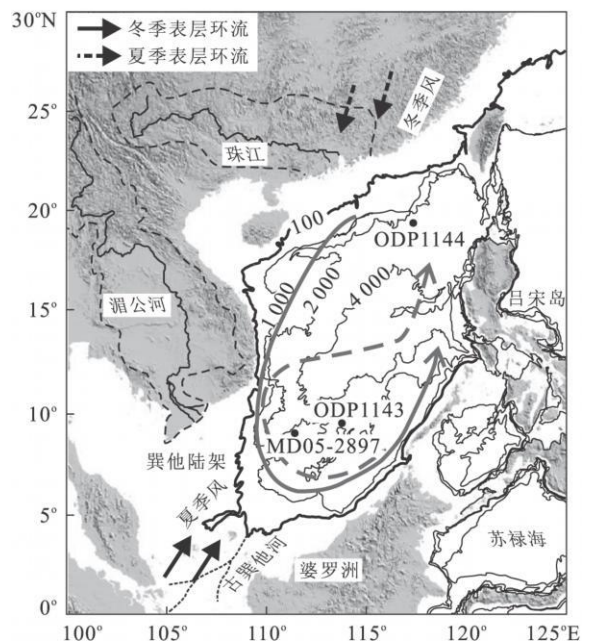


图 1 MD05-2897 孔的位置

Fig. 1 Location of Core MD05-2897. Black solid (dashed) arrows indicate summer (winter) monsoon. 图中实线黑箭头代表夏季风, 虚线黑箭头代表冬季风; 灰色虚线箭头表示夏季表层环流, 灰色实线箭头表示冬季表层环流。100 m 等深线为冰期时海岸线的大致位置。图中还显示了珠江、红河、湄公河的流域和文中涉及的其他钻孔的位置。单位: m

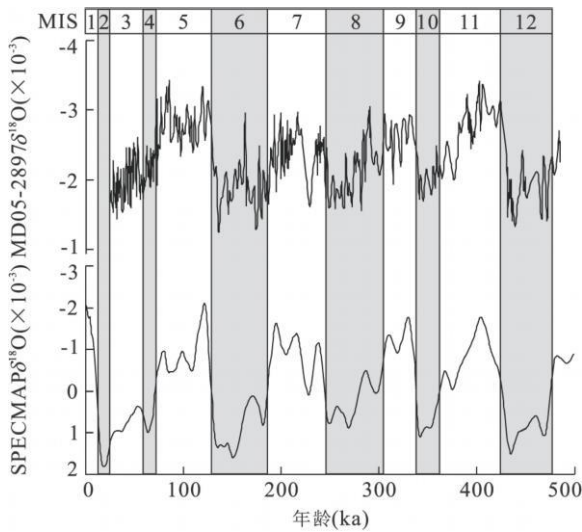


图 2 MD05-2897 孔浮游有孔虫氧同位素地层划分结果
Fig. 2 Oxygen isotope stratigraphy of Core MD05-2897

量的相对误差 $\leq 1\%$, 标准偏差: 绝对误差 $\leq 0.1\%$, 所有实验均在中国科学院地质与地球物理所碳含量分析实验室完成。

测试原理简述如下: 取 0.22 g 样品, 以氧气为载气, 在 1150 °C 高温下充分燃烧, 使所有的碳完全转化为 CO_2 , 进入 TIC 红外检测器, 红外检测器连续检测 CO_2 气体量, 统计 CO_2 气体总量, 根据 CO_2 气体量与 C 质量的函数图式计算 C 质量, 给出样品的 TC (总碳) 含量. 取 0.03 g 样品, 以氧气为载气, 与过量 3% 盐酸溶液反应, 使所有无机碳完全转化为 CO_2 , 进入 TIC 红外检测器, 红外检测器连续检测 CO_2 气体量, 统计 CO_2 气体总量, 根据 CO_2 气体量与 C 质量的函数图式计算 C 质量, 给出样品的 TIC (总无机碳) 含量. TOC (总有机碳) 和 CaCO_3 (%) 分别根据以下公式求取:

$$\text{TOC} = \text{TC} - \text{TIC},$$

$$\text{CaCO}_3(\%) = \text{TIC} \times 100 / 12. \quad (1)$$

本文采用以下方法计算 CaCO_3 以及 TOC 的堆积速率 TMAR ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ka}^{-1}$), 计算方法见文献 (Davies *et al.*, 1995).

$$\text{TMAR} = \text{SR} \times (\text{BD} - P \times \text{WD}) \times \text{wt}\%, \quad (2)$$

式(2)中: 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 (Laj *et al.*, 2005); WD 为海水密度 $1.025 \text{ g}/\text{cm}^3$; $\text{wt}\%$ 为 CaCO_3 (TOC) 的百分含量; P 为孔隙率, 利用公式(3) (黄维和汪品先, 2006) 获得:

$$P = 0.7263 \times e^{-z/1064} \quad (\text{注: } z \text{ 为海底以下的样}$$

品深度). (3)

MD05-2897 孔岩心的地层年代框架由浮游有孔虫氧同位素曲线建立. 用于氧同位素分析的样品采样间隔为 8 cm, 选用浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* (white), 在同济大学海洋地质国家重点实验室 Finnigan MAT 252 稳定同位素质谱仪上分析. 测试结果转换为 PDB, 平均精度为 $\pm 0.08 \times 10^{-3}$. 通过氧同位素曲线的形态对比, 发现 MD05-2897 孔全新世和末次盛冰期的沉积物缺失, 结合 MD05-2897 上部 6 个 AMS^{14}C 测年值 (黄恩清未发表数据), 将氧同位素曲线与天文调谐的 SPECMAP (Imbrie *et al.*, 1984) 曲线进行形态对比, 选取时间控制点, 建立起该孔的年代框架 (图 2). 结果显示, MD05-2897 孔底部年龄约为 486 ka, 顶部年龄约为 24 ka.

2 结果

MD05-2897 孔的 CaCO_3 含量曲线与 SPEC-MAP 以及各大洋的相应曲线对应良好. CaCO_3 含量曲线形态上基本与浮游有孔虫氧同位素曲线平行 (图 3), 即 CaCO_3 高值对应氧同位素轻值, 呈现典型的“大西洋型”分布模式, 此结果与前人研究一致, 即在碳酸盐溶解面以上, 无论在南海南部还是北部均存在冰期时碳酸盐含量低, 间冰期时碳酸盐含量高的特点, 主要受到陆源物质稀释作用的控制 (Thunell *et al.*, 1992; Wang *et al.*, 1995a; Chen *et al.*, 1997). 值得注意的是, CaCO_3 含量的峰值均出现在冰消期, 即 MIS 12/11、MIS 10/9、MIS 8/7 和 MIS 6/5 分界处, 其中 MIS 6/5 分界处含量达到 41.4%, 最高含量 45.1% 出现在 MIS 10/9 分界处. 为了更好地研究 CaCO_3 含量变化趋势的特点和驱动力, 排除陆源碎屑物稀释作用对这一指标的影响 (Howard and Prell, 1994), 笔者通过计算得出 CaCO_3 堆积速率 (MAR). CaCO_3 堆积速率已经除去陆源物质输入的稀释作用的影响, 可以更加客观的反映 CaCO_3 生产力 (图 3). 观察发现, 其变化与 CaCO_3 含量变化基本一致, 表现出类似的冰期早期低、冰消期高、间冰期整体较高的趋势, 堆积速率整体在 $300 \sim 2500 \text{ mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{ka})^{-1}$ 之间波动. 峰值出现在冰消期, 即 MIS 12/11、MIS 10/9、MIS 8/7、MIS 6/5 和 MIS 4/3 分界处, 这与前人对南海的研究一致 (Thunell *et al.*, 1992; Chen *et al.*, 1997, 2003).

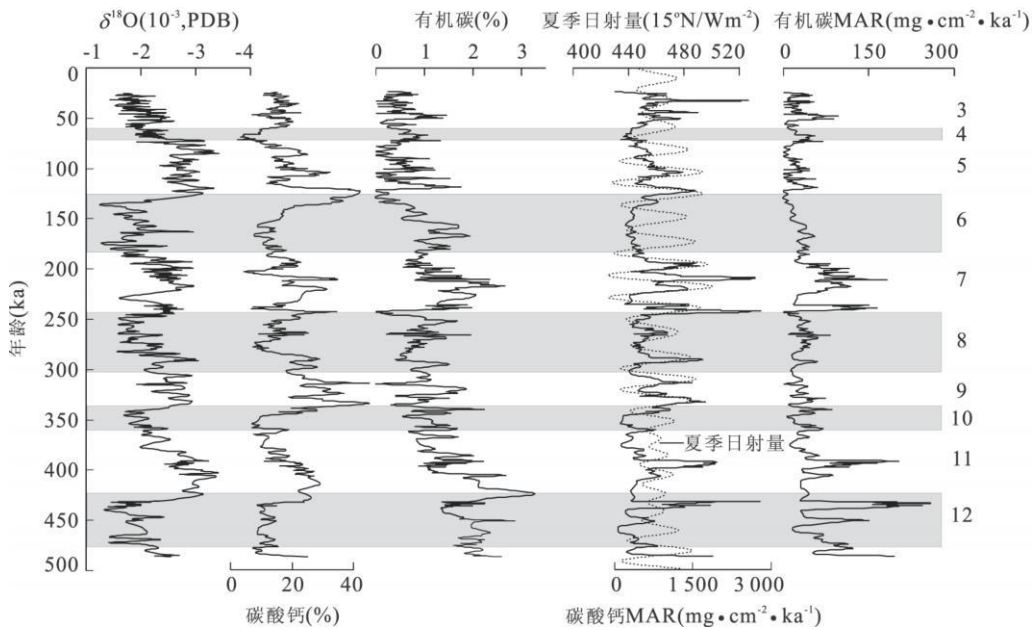


图 3 南海南部 M D05-2897 孔 500 ka 以来浮游有孔虫氧同位素、碳酸钙和有机碳含量、有机碳堆积速率、碳酸钙堆积速率与北半球低纬夏季日射量的对比, 夏季日射量为 15°N 7 月的平均日辐射量(根据 Laskar(1990)方案并运用 Analy serie(Paillard et al., 1996)软件生成)

Fig. 3 Comparison between planktonic foraminifera $\delta^{18}O$, carbonate and organic carbon content, organic carbon MAR, carbonate MAR and the summer insolation of low latitude in the northern hemisphere over the past 500 ka at core M D05-2897. The summer insolation refers to an average insolation during July at 15°N following the Laskar solution (Laskar, 1990), using the Analyserie software (Paillard et al., 1996)

MD05-2897 孔 50 万年以来 TOC 含量在 0 ~ 3.5% 之间波动, 平均值为 1.03%, 在大多数间冰期增加, 冰期降低(图 3). TOC 含量曲线与 CaCO₃ 含量曲线比较, 呈现更加高频的波动. 值得注意的是, TOC 含量的峰值同样主要出现在冰消期, 如 MIS 12/11 分界达到最高值 3%. TOC 的堆积速率值在 0~200 mg · (cm² · ka)⁻¹ 之间波动, 与 TOC 含量的变化趋势相同.

3 讨论

3.1 生产力与东亚夏季风的关系

海洋沉积物中的有机碳来源于陆源输入的植物碎屑和海洋生物的有机体, 沉积物中的有机碳含量是与初级生产力密切相关的, 初级生产力也就是有机质的生产速率. 尽管由于沉降和埋藏过程中的分解作用, 仅有很少一部分有机碳最终被保存在沉积物中, 但有机碳堆积速率仍然是古生产力最普遍的一个替代性指标 (Sarnthein et al., 1992). CaCO₃ 和 TOC 的堆积速率有很好的相关性, 这两者都受生产力的控制. 对比研究表明, 这两个指标反映着生

产力的不同方面, TOC 堆积速率反映上部水体总的生产力, 而 CaCO₃ 堆积则仅仅反映钙质有机体的生产量(Ly le, 1988).

前人的研究表明, 晚第四纪以来, 冰期时南海北部冬季风活动加强, 海平面下降, 陆源有机物和风尘输入增加, 初级生产力增加; 间冰期夏季风活动加强, 高海平面, 陆源有机物输入和风尘输入降低, 初级生产力下降 (Higginson et al., 2003; Wang et al., 2007). 这种冰期高生产力的现象在南海东部 (Kuhnt et al., 1999; Liu et al., 2002a)、西部(向 霏等, 2006)和东南部(Chen et al., 2003)的晚第四纪钻孔中均有发现. 而在南海南部, ODP1143 的钙质超微化石堆积速率(刘传联等, 2001)和蛋白石含量及其堆积速率(Wang and Li, 2003; Wang et al., 2007)的变化都反映在冰期降低, 间冰期增加. ODP1143 站位的矿物学和地球化学以及浮游有孔虫群和气候变化的研究结果也显示, 南海南部表层生产力在间冰期高于冰期 (Tamburini et al., 2003). 南部 17957-2 站位放射虫、硅藻和海绵骨针丰度的变化也是在间冰期增加、冰期降低 (Wang and A belmann, 2002).

MD05-2897 孔 CaCO_3 及 TOC 的含量及堆积速率都呈现间冰期高、冰期低的趋势(图 3)。 CaCO_3 含量曲线与氧同位素曲线对应良好, 呈现非常明显的冰期、间冰期旋回, 说明其含量的变化主要受到海平面变化控制。但是, 在 MIS 3, CaCO_3 含量的变化并不遵循这一规律, 其变化趋势甚至跟氧同位素呈现相反的趋势(图 3), 这一现象在南海南部的 SCS15A 孔(Wang *et al.*, 1999), MD97-2142(Chen *et al.*, 2003), MD97-2151 孔(Zhao *et al.*, 2006)中均有发现。造成这一现象的原因可能是在 MIS 3 时, 碳酸盐生产力得到了很大的增加, 减弱了陆源物质的稀释作用, MD97-2151 孔中烯醇丰度数据和 MD97-2151 孔中 TOC 含量及堆积速率也显示在 MIS 3 的时候有着很高的值, 反映了在 MIS 3 时的高生产力(Chen *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2006)。 ODP1143 站由钙质微体化石 *F. profunda* 百分含量建立的初级生产力显示 MIS 3 时的初级生产力也高于 MIS 5(刘传联等, 2005; 郑洪波等, 2008), 1143 站浮游有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 反映了上升流控制的营养水平的变化, MIS 3 的营养水平比相邻的 MIS 2, MIS 4 和 MIS 5 高(郑洪波等, 2008), 而 MD05-2897 孔的 CaCO_3 和 TOC 的堆积速率也显示出在 MIS 3 时的海水表层生产力高于 MIS 5(图 3)。 ODP1143 孔微体古生物的研究发现, 钙质超微化石 *F. profunda* 含量在 MIS 3 比 MIS 4 和 MIS 5 减少, 营养跃层变浅(Liu *et al.*, 2008), 海水初级生产力得到提高。所以 MD05-2897 孔 CaCO_3 含量在 MIS 3 的高值主要是由于营养跃层变浅, 同时 MIS 3 夏季风强盛, 上升流作用加强, 大量的营养物质带到海水表层, 使得 MIS 3 期时的海水表层生产力得到大幅度的提高所导致。

MD05-2897 孔 CaCO_3 及 TOC 的含量及堆积速率都呈现间冰期高、冰期略低的规律, 表现出间冰期时海水表层生产力要高于冰期。 ODP1143 孔钙质超微化石 *F. profunda* 含量 900 ka 来的变化反映出营养跃层在冰期时较浅, 间冰期时较深(Liu *et al.*, 2008), 而南沙 17957 孔的有孔虫转换函数得出的温跃层的变化与 1143 孔营养跃层变化趋势相似, 也是在冰期是较浅, 间冰期时较深(Jian *et al.*, 2000)。也就是说, 温跃层和营养跃层的变化并不是本站位海水表层生产力间冰期高于冰期的原因。

南海南部 ODP1143 孔 2004 年 5 月—2005 年颗粒通量的研究显示, 在夏季风盛行期的 2004 年 8 月和 9 月所有的颗粒通量及初级生产力都显著增

加; 而在冬季风盛行期的 2004 年 11 月—2005 年 2 月都明显降低(Wang *et al.*, 2007)。尽管只获得了一年的数据, 但足以表明南部主要受夏季风的影响和控制。在南海南部, 间冰期时夏季风强盛, 导致南海西部越南岸外的上升流作用加强, 对相邻的南部产生影响, 同时夏季风和降雨带来的陆源有机物的输入增加, 使得表层生产力提高(Tamburini *et al.*, 2003)。

因此, MD05-2897 孔海水表层生产力的高低主要受到东亚夏季风控制, 南海南部间冰期夏季风活动加强, 上升流发育, 并且夏季风和降雨带来的陆源有机物的输入增加, 导致表层生产力提高; 冰期夏季风减弱, 陆源有机物的输入降低, 表层生产力也降低。

3.2 生产力揭示的东亚夏季风演化

东亚古季风的研究主要基于南海沉积物记录与中国黄土—古土壤序列。对起源于亚洲高纬的东亚冬季风的演变规律和驱动机制的深入研究, 揭示出全球冰量和青藏高原抬升对冬季风演变的控制作用(Ding *et al.*, 1995; An *et al.*, 2001; Guo *et al.*, 2002)。对东亚夏季风变化周期和驱动机制的认识仍然存在争议: 一种观点认为东亚夏季风的变化同样受控于全球冰量的变化(丁仲礼和余志伟, 1995), 另一种观点则强调太阳辐射变化对夏季风的控制作用(Clemens *et al.*, 1991; Wang *et al.*, 1999; Liu *et al.*, 2007)。最近也有研究表明, 岁差和斜率相关的北半球夏季太阳辐射量的变化可能是东亚夏季风强度和变化的主要控制因素, 而全球冰量相关的气候变化可能是次要因素(Wang *et al.*, 2007)。东亚夏季风起源于热带海洋, 控制着亚洲东部季节性变化的风力、降雨量、径流量和陆地植被等气候和环境特征(Webster, 1994), 研究其变化规律有重大意义。

由以上生产力与夏季风的关系分析可知, MD05-2897 孔 CaCO_3 和 TOC 的含量及堆积速率受到东亚夏季风所控制, 它们可以反映夏季风的强弱变化, 高值说明夏季风增强, 反之减弱。

CaCO_3 含量及堆积速率值具有明显的冰期—间冰期旋回特征, 频谱分析显示强烈的 100 ka 偏心率周期(图 4), 这是冰盖驱动的特征。 CaCO_3 含量呈现 100 ka 周期可能的主要原因是其受到海平面变化引起的陆源物质输入的稀释作用影响。而 CaCO_3 堆积速率排除了陆源物质的影响, 显示强烈的 100 ka 周期, 说明东亚夏季风与全球冰量确实存在一定联系, 它与黄土中东亚夏季风标志(磁化率)以 100 ka 为主周期的波动是一致的(Kukla *et al.*,

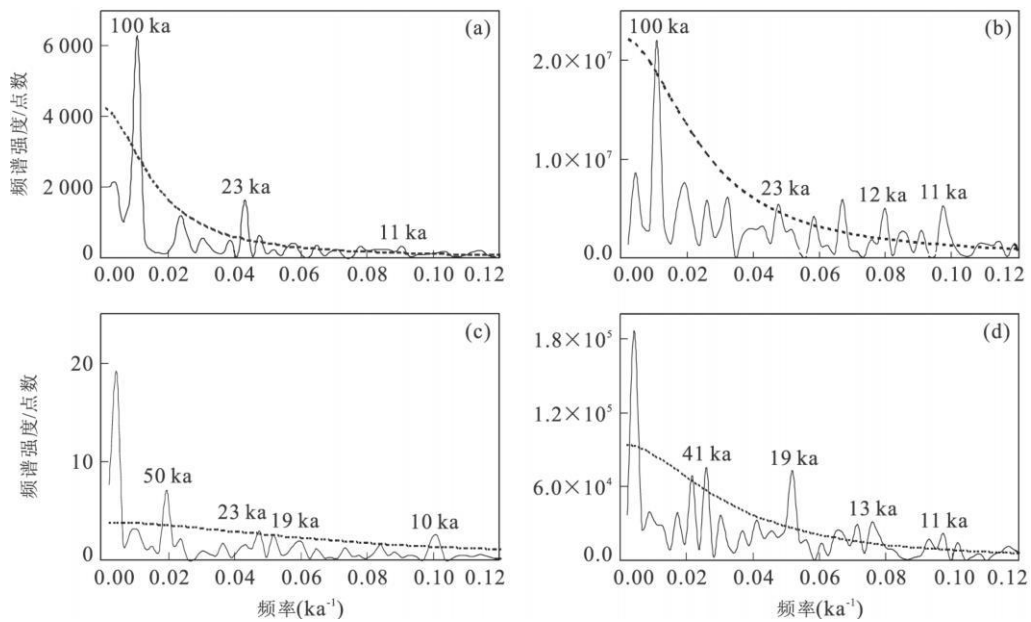


图 4 南海南部 MD05-2897 孔 500 ka 以来碳酸钙含量(a)、碳酸钙堆积速率(b)、有机碳含量(c)和有机碳堆积速率(d)的百分含量时间序列谱分析(虚线代表 90%的检验标准)

Fig. 4 Spectral analysis results of carbonate content (a) and MAR (b), organic carbon contents (c) and MAR (d) over the past 500 ka at core MD 05-2897

1990; Ding *et al.*, 1995). 无论陆地还是海洋的东亚季风记录, 都显示出与冰期旋回的关系, 通常冰期时冬季风强、间冰期时夏季风强. 除了众所周知的黄土-古土壤和冰期旋回的关系外, 近年来, 南海深海的粘土矿物、孢子花粉分析, 或者超微化石和蛋白石所反映的古生产力, 都显示出与冰期旋回相关的轨道周期(Wang *et al.*, 2003a). 除了 100 ka 的偏心率周期, 它们还都具有 23 ka 岁差及 13 ka 和 11 ka 半岁差周期, 这是热带过程的特征, 显示出夏季风演化的低纬海区特色. 讨论低纬过程所指的主要为夏季风, 显示出与冰期旋回明显不同的周期性, 特别是半岁差周期. 无论在南海孢粉或者浮游有孔虫反映的海水上层结构中, 都发现了 1 万年的半岁差周期(田军等, 2004; 田军和汪品先, 2006).

TOC 含量及其堆积速率变化的冰期-间冰期旋回的周期性不如碳酸钙明显(图 3), 频谱分析显示除了具有 41 ka 斜率周期以外, 还具有 23 ka 和 19 ka 岁差周期、以及 13 ka 和 11 ka 半岁差周期, 显示出夏季风演化的低纬海区特色. 此外, TOC 含量还具有 50 ka 的周期, 是主要轨道周期的拍频周期(heterodyne frequency), 例如南海北部 1144 站以及印度季风的替代性标志都发现了很强的 54 ka 周期(Clemens *et al.*, 1991; Tian *et al.*, 2005).

笔者将可作为夏季风指标的 CaCO_3 的堆积速率

和北纬 15° 夏季日射量作对比, 发现两者吻合较好, 尤其在间冰期, 而冰期对应则稍差(图 3). 这是由于东亚季风, 东部与太平洋厄尔尼诺相互影响, 南部与澳洲季风隔海呼应, 西部有青藏高原低压, 北部有西伯利亚高压, 因此季风变化与本区低纬辐射量变化之间, 并不呈简单的线性关系(Wang *et al.*, 2003b). 间冰期的良好对应还是能够说明北半球低纬夏季日射量和夏季风的演化紧密相关, 夏季风在日射量高时强盛, 低时减弱, 指示了夏季风演化的热带驱动.

因此, 笔者采用 CaCO_3 和 TOC 的堆积速率作为东亚夏季风演化的生源标志, 在间冰期时较高, 冰期时较低, 频谱分析显示除了具有冰盖驱动的 100 ka 偏心率周期和 41 ka 斜率周期以外, 还具有 23 ka 和 19 ka 岁差周期、以及 13 ka 和 11 ka 半岁差周期, 与北半球低纬夏季日射量吻合较好, 日射量高时强盛, 低时减弱, 指示了热带驱动的夏季风演化. 本文研究显示, 岁差相关的北半球低纬夏季太阳辐射量的变化可能是东亚夏季风强度变化的主要控制因素, 而全球冰量相关的气候变化可能是次要的控制因素.

4 结论

通过对南海南部 MD05-2897 孔晚第四纪 500 ka 以来 CaCO_3 和 TOC 含量及堆积速率的高分

分辨率分析,取得以下结论:

(1)MD05-2897 孔的 CaCO_3 含量及堆积速率表现出明显的冰期—间冰期旋回变化,而 TOC 的含量及堆积速率则主要呈现频率更高的周期性变化;(2) CaCO_3 和 TOC 含量及堆积速率都在间冰期时增加,冰期时降低,反映了间冰期时夏季风的增强,导致了上升流的加强和营养物质的增加,进而促使表层生产力得以提高;(3) CaCO_3 和 TOC 含量及堆积速率,具有 100 ka 偏心率周期、40 ka 斜率周期、20 ka 岁差和 10 ka 半岁差周期等最为丰富的频谱,显示出低纬海区对轨道周期响应的特色。 CaCO_3 的堆积速率与北半球低纬夏季日射量吻合较好,说明岁差相关的北半球低纬夏季太阳辐射量的变化可能是东亚夏季风强度变化的主要控制因素,而全球冰量相关的气候变化可能是次要的控制因素。

致谢:本文分析研究的样品由“国际海洋全球变化研究”(IMAGES)计划 2005 年 MARCO 航次提供,在此表示感谢;对试验分析中给予指导和帮助的施斌博士和陈国成硕士表示诚挚的谢意。

References

- An, Z. S., Kutzbach, J. E., Prell, W. L., et al., 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411(6833): 62—66. doi: 10.1038/35075035
- Chen, M. T., Huang, C. Y., Wei, K. Y., 1997. 25, 000-year Late Quaternary records of carbonate preservation in the South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129(1—2): 155—169. doi: 10.1016/S0031-0182(96)00063-6
- Chen, M. T., Shiao, L. J., Yu, P. S., et al., 2003. 500 000-year records of carbonate, organic carbon, and foraminifera sea-surface temperature from the southeastern South China Sea (near Palawan Island). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 197(1—2): 113—131. doi: 10.1016/S0031-0182(03)00389-4
- Clemens, S., Prell, W. L., Murray, D., et al., 1991. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon. *Nature*, 353(6346): 720—725. doi: 10.1038/353720a0
- Davies, T. A., Kidd, R. B., Ramsay, A. T., 1995. A time-slice approach to the history of Cenozoic sedimentation in the Indian Ocean. *Sedimentary Geology*, 96(1—2): 157—179. doi: 10.1016/0037-0738(94)00131-D
- Ding, Z. L., Liu, T. S., Rutter, N. W., et al., 1995. Ice-volume forcing of East Asian Winter monsoon variations in the past 800 000 years. *Quaternary Research*, 44(2): 149—159. doi: 10.1006/qres.1995.1059
- Ding, Z. L., Yu, Z. W., 1995. Forcing mechanisms of paleomonsoons over east asia. *Quaternary Sciences*, 1: 63—74 (in Chinese with English abstract).
- Fang, D. Y., Jian, Z. M., Wang, P. X., 2000. Paleoproductivity records for the past 30 ka in the southern Nansha area, the South China Sea. *Chin. Sci. Bull.*, 45(13): 1227—1230. doi: 10.1007/BF02886085
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Han, Q. Z., et al., 2002. Onset of Asian desertification by 22 myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159—163. doi: 10.1038/416159a
- Higginson, M. J., Maxwell, J. R., Altabet, M. A., 2003. Nitrogen isotope and chlorin paleoproductivity records from the northern South China Sea: remote versus local forcing of millennial and orbital-scale variability. *Mar. Geol.*, 201(1—3): 223—250. doi: 10.1016/S0025-3227(03)00218-4
- Howard, W. R., Prell, W. L., 1994. Late Quaternary CaCO_3 production and preservation in the South China Sea and Sulu seas. *Paleoceanography*, 9: 453—482. doi: 10.1029/93PA03524
- Huang, B. Q., Jian, Z. M., Lin, H. L., 2000. Late quaternary changes of paleoproductivity in the northeastern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(2): 65—68 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W., Wang, P. X., 2006. The statistics of sediment mass in the South China Sea: method and result. *Advances in Earth Science*, 21(5): 465—473 (in Chinese with English abstract).
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., et al., 1984. The orbital theory of pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger, A., Imbrie, J., eds., Milankovitch and climate. Holland Reidel D., Holland, 269—307.
- Jian, Z. M., Wang, L. J., Kienast, M., 1999. Late Quaternary surface paleoproductivity and variations of the East Asian monsoon in the South China Sea. *Quaternary Sciences*, 1: 32—40 (in Chinese with English abstract).
- Jian, Z. M., Wang, P. X., Chen, M. P., et al., 2000. Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the southern South China Sea. *Paleoceanography*, 15(2): 229—243. doi: 10.1029/1999PA000431
- Kuhnt, W., Hess, S., Jian, Z. M., 1999. Quantitative composition of benthic foraminifera assemblages as a proxy indicator for organic carbon flux rates in the South China Sea. *Mar. Geol.*, 156(1—4): 123—157. doi: 10.1016/S0025-3227(98)00176-5

- Kukla, G., An, Z. S., Melice, J. L., et al., 1990. Magnetic susceptibility record of Chinese loess. *Trans. R. Soc. Ed. Earth. Sci.*, 81(4): 263—288.
- Laj, C., Wang, P. X., Balut, Y., et al., 2005. MD147-M arco Polo IMAGES XII cruise report. Institut Paul-Emile Victor (IPEV), France.
- Laskar, J., 1990. The chaotic notion of the solar system; a numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus* 88: 266—291. doi: 10.1016/0019-1035(90)90084-M
- Li, J. R., Wang, R. J., Li, B. H., 2002. Variations of opal accumulation rates and paleoproductivity over the past 12 Ma at ODP site 1143, southern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 47(7): 596—598. doi: 10.1360/02tb9137
- Lin, H., Lai, C., Ting, H., et al., 1999. Late Pleistocene nutrients and sea surface productivity in the South China Sea; a record of teleconnections with northern hemisphere events. *Mar. Geol.*, 156(1—4): 197—210. doi: 10.1016/S0025-3227(98)00179-0
- Liu, C. L., Cheng, X. R., Zhu, Y. H., et al., 2002a. Oxygen and carbon isotope records of calcareous nanofossils for the past 1 Ma in the southern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 47(10): 798—803. doi: 10.1360/02tb9180
- Liu, C. L., Wang, P. X., Tian, J., et al., 2008. Coccolith evidence for Quaternary nutricline variations in the southern South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 69: 42—51. doi: 10.1016/j.marmicro.2007.11.008
- Liu, C. L., Zhang, S. Y., Jin, H. Y., et al., 2005. Coccolith evidence of upper ocean water variations for past 1.53 Ma in western Pacific warm pool. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 33(9): 1172—1176 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Zhu, Y. H., Cheng, X. R., 2001. Calcareous nanofossil evidence for variations in Quaternary surface water paleoproductivity in the southern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(4): 61—66 (in Chinese with English abstract).
- Liu, K. K., Chao, S. Y., Shaw, P. T., et al., 2002b. Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea; observations and a numerical study. *Deep-Sea Research*, 49(8): 1387—1412. doi: 10.1016/S0967-0637(02)00035-3
- Liu, Z. F., Zhao, Y. L., Li, J. R., et al., 2007. Late Quaternary clay minerals of Middle Vietnam in the western South China Sea; implications for source analysis and East Asian monsoon evolution. *Science in China (Ser. D)*, 50(11): 1674—1684. doi: 10.1007/s11430-007-0115-8
- Lyle, M., 1988. Climatically forced organic carbon burial in the equatorial Atlantic and Pacific oceans. *Nature*, 335(6190): 529—532. doi: 10.1038/335529a0
- Löemark, L., Steinke, S., Wang, C. H., et al., 2009. New evidence for a glacioeustatic influence on deep water circulation, bottom water ventilation and primary productivity. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 47(1—3): 138—153. doi: 10.1016/j.dynatmoce.2008.08.004
- Paillard, D., Labeyrie, L., Yiou, P., 1996. Analyseries 1.0: a Macintosh software for the analysis of geographical time-series. *Eos* 77: 379. doi: 10.1029/96E000259
- Sarnthein, M., Pflaumann, U., Ross, R., et al., 1992. Transfer functions to reconstruct ocean palaeoproductivity: a comparison. In: Summerhayes, C. P., Prell, W. L., Emeis, K. C., eds., *Upwelling systems; evolution since the Early Miocene*. Geological Society Special Publication Geological Society, London, 411—427.
- Tamburini, F., Adatte, T., Föllmi, K., et al., 2003. Investigating the history of East Asian monsoon and climate during the last glacial-interglacial period (0—140 000 years); mineralogy and geochemistry of ODP sites 1143 and 1144, South China Sea. *Mar. Geol.*, 201(1—3): 147—168. doi: 10.1016/S0025-3227(03)00214-7
- Thunell, R. C., Miao, Q. M., Calvert, S. E., et al., 1992. Glacial Holocene biogenic sedimentation patterns in the South China Sea; productivity variations and surface water $p\text{CO}_2$. *Paleoceanography*, 7(2): 143—162. doi: 10.1029/92PA00278
- Tian, J., Wang, P. X., 2006. Tropical process and its periodicity in the deep sea records. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 747—753 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Pleistocene precession forcing of the upper ocean structure variations of the southern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 14(6): 683—688 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., et al., 2005. Forcing mechanism of the Pleistocene East Asian monsoon variations in a phase perspective. *Science in China (Ser. D)*, 48(10): 1708—1717. doi: 10.1360/01YD0467
- Wang, B., Clemens, S. C., Liu, P., 2003b. Contrasting the Indian and East Asian monsoons; implications on geological timescales. *Mar. Geol.*, 201(1—3): 5—21. doi: 10.1016/S0025-3227(03)00196-8
- Wang, L. J., Sarnthein, M., Pflaumann, U., et al., 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China

- Sea. *Mar. Geol.*, 156(1-4): 245-284. doi: 10.1016/S0025-3227(98)00182-0
- Wang P. X., 1999. Response of western Pacific marginal seas to glacial cycles; paleoceanographic and sedimentological features. *Mar. Geol.*, 156(1-4): 5-39. doi: 10.1016/S0025-3227(98)00172-8
- Wang P. X., Jian, Z. M., Zhao, Q. H., et al., 2003a. Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep sea records. *Chinese Science Bulletin*, 48(23): 2549-2561. doi: 10.1360/03w d0156
- Wang P. X., Wang, L. J., Bian, Y. H., et al., 1995a. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea; surface circulation and carbonate cycles. *Mar. Geol.*, 127(1): 145-165. doi: 10.1016/0025-3227(95)00008-M
- Wang P. X., Zhao, Q. H., Cheng, X. R., et al., 1995b. South China Sea since 150 000 years. Publishing House of Tongji University, Shanghai (in Chinese).
- Wang R., Abelmann, A., 2002. Radiolarian responses to paleoceanographic events of the southern South China Sea during the Pleistocene. *Mar. Micropaleontol.*, 46(1): 25-44. doi: 10.1016/S0377-8398(02)00048-8
- Wang R. J., Jian, Z. M., Xiao, W. S., et al., 2007. Quaternary biogenic opal records in the South China Sea; linkages to East Asian monsoon, global ice volume and orbital forcing. *Science in China (Ser. D)*, 50(5): 710-724. doi: 10.1007/s11430-007-0041-9
- Wang R. J., Li, J., 2003. Quaternary high-resolution opal record and its paleoproductivity implication at ODP site 1143, southern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48(4): 363-367. doi: 10.1360/03tb9077
- Wang R. J., Lin, J., Zheng, L. F., 2000. Siliceous microplankton fluxes and seasonal variations in the Central South China Sea during 1993-1995; monsoon climate and El Niño responses. *Chinese Science Bulletin*, 45(23): 2168-2172. doi: 10.1007/BF02886323
- Webster, P. J., 1994. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. *Review of Geophysics*, 32(4): 427-476. doi: 10.1029/94RG01873
- Wei G. J., Huang C. Y., Wang C. C., et al., 2006. High-resolution benthic foraminifer $\delta^{13}\text{C}$ records in the South China Sea during the last 150 ka. *Mar. Geol.*, 232: 227-235. doi: 10.1016/j.margeo.2006.08.005
- Wiesner, M. G., Zheng, L., Wong, H. K., 1996. Fluxes of particulate matter in the South China Sea. In: Ittekkot, V., Schafer, P., Honjo, S., et al., eds., Particle flux in the Ocean. John Wiley and Sons, New York, 91-154.
- Xiang, F., Wang, R. J., Li, J. R., et al., 2006. High resolution records of biogenic components and their paleoceanographic implications in the upwelling area of the South China Sea of eastern Vietnam over past 480 ka. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(6): 81-89 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. X., Huang C. Y., Wang C. C., et al., 2006. A millennial-scale U37K' sea-surface temperature record from the South China Sea (8°N) over the last 150 kyr: monsoon and sea-level influence. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 236(1-2): 39-55. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.11.033
- Zheng H. B., Yang, W. G., He, J., et al., 2008. Marine isotope stage 3 (mis 3) of South China Sea. *Quaternary Sciences*, 28(1): 68-79 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁仲礼, 余志伟, 1995. 第四纪时期东亚季风变化的动力机制. *第四纪研究*, 1: 63-74.
- 黄宝琦, 翦知湔, 林慧玲, 2000. 南海东北部晚第四纪古生产力变化. *海洋地质与第四纪地质*, 20(2): 65-68.
- 黄维, 汪品先, 2006. 南海沉积物总量的统计: 方法与结果. *地球科学进展*, 21(5): 465-473.
- 翦知湔, 王律江, Kienast, M., 1999. 南海晚第四纪表层古生产力与东亚季风变迁. *第四纪研究*, 1: 32-40.
- 刘传联, 祝幼华, 成鑫荣, 2001. 南海南部第四纪表层海水古生产力变化的钙质超微化石证据. *海洋地质与第四纪地质*, 21(4): 61-66.
- 刘传联, 张拭颖, 金海燕, 等, 2005. 暖地区 1.53 Ma 以来上层海水变化的颗石藻证据. *同济大学学报(自然科学版)*, 33(9): 1172-1176.
- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 2004. 更新世南海南部上层海水结构变化的岁差驱动. *自然科学进展*, 14(6): 683-688.
- 田军, 汪品先, 2006. 深海记录中的热带过程及其周期性. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(6): 747-753.
- 汪品先, 赵泉鸿, 成鑫荣, 等, 1995b. 十五万年来的南海. 上海: 同济大学出版社.
- 向霏, 王汝建, 李建如, 等, 2006. 越南岸外上升流区 48 万年来高分辨率的生源组分记录及其古海洋学意义. *海洋地质与第四纪地质*, 26(6): 81-89.
- 郑洪波, 杨文光, 贺娟, 等, 2008. 南海的氧同位素 3 期. *第四纪研究*, 28(1): 68-79.