

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

向 霏, 王汝建, 李建如, 叶 芳

(同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:南海西部越南岸外 MD05-2901 孔沉积物分析显示, 该孔覆盖氧同位素 1—12 期, 底界年龄约为 48 万年。生源组分记录显示表层古生产力冰期高、间冰期低, 体现间冰期海平面下降、陆源物质输入增强的影响。生产力在末次冰期达到最高, 体现末次盛冰期海陆差异增强, 东北风发育对生产力提高的促进作用。碳酸钙含量变化呈现冰期早期含量低、冰消期和间冰期含量高的趋势。其冰消期的高值在 MIS1/2、MIS3/4 和 MIS5/6 分界处, 与浮游有孔虫碳同位素低值对应, 揭示该地区的碳酸钙沉积旋回是“稀释旋回”。同时碳酸钙含量变化领先于同一地区浮游有孔虫氧同位素的变化, 证明低纬海区碳酸钙泵作用对大气二氧化碳浓度和温度有影响。滤波分析结果显示碳同位素存在 23 ka 的岁差周期和偏心率长周期, 生源组分的含量变化显示出典型的岁差周期, 体现南海季风环流的轨道响应, 证明低纬热带过程是调节气候变化的重要因素。

关键词:生源沉积物; 古生产力; 轨道驱动; 越南岸外

中图分类号: P736.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0256-1492(2006)06-0081-09

南海是西太平洋典型的边缘海, 其沉积物保存了丰富的古环境信息, 因而成为古环境研究的热点地区。因其半封闭海盆的特殊地形, 南海表层海水温度、盐度、生产力和海流格局均受到东亚季风的影响^[1]。在季风风向、南海地形及 Ekman 环流的共同作用下, 风驱上升流成为南海上层环流的重要特征之一^[2]。冬季, 干冷的冬季风驱动西太平洋表层海水进入南海, 与南海海水混合后由南海南部流出, 在菲律宾东北部造成冬季上升流区^[3-4]; 夏季, 暖湿的夏季风驱动海水由南部进入南海而从北部流出, 在越南岸外形成上升流区, 这一理论已被模拟结果证实^[5]。

过去, 对南海上升流区的研究主要从海洋微生物古生物学角度出发, 通过重建南海表层海水温度、温跃层深度和古生产力研究南海上升流强度变化和东亚季风演化^[6-8]。最近, 有学者通过遥感、物理-生物地球化学耦合三维数值模式研究, 证实现代南海存在季风驱动的季节性上升流区, 以及上升流驱动的季节性高叶绿素值分布区^[9], 并证实南海确实存在“季风—上升流—浮游生物初级生产力”的相关关

系。

本文的目的是通过南海西部越南岸外上升流区 MD05-2901 柱状样中生源组分的沉积特征和频谱分析结果, 研究这一地区 48 万年以来的古海洋学和古环境变化情况。

1 材料与方 法

本次工作研究的样品是由法国 Marion Dufresne 号科学考察船 2005 年在南海钻取的 CALYPSO 柱状样, 这次考察活动是中法联合 Marco-Polo 航次的第一航段, 同时也是“国际海洋全球变化”计划 (IMAGES) 的第 12 航次。采样站位 MD05-2901 位置为 14°22.50'N、110°44.60'E, 水深为 1 454 m, 柱状样长度 36.49 m (图 1)。该站位位于南海西部现代夏季上升流区, 与中德合作“太阳号”95 航次 17954 站邻近。本文对全部柱状样进行了氧碳同位素、有机碳、蛋白石和碳酸钙含量测定, 并计算了有机碳、蛋白石、碳酸钙和岩石组分的堆积速率 MAR ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ka})$), 计算方法见文献^[10]。其中岩石组分含量的获得利用以下公式:

岩石组分 (%) = 总含量 - 碳酸钙 (%) - 蛋白石 (%) - (1.8 × 有机碳 %)

氧碳同位素测定采样间隔为 8 cm, 共获样品 456 个; 有机碳和碳酸钙测定采样范围为 0.01 ~ 36.41 m, 采样间隔 8 cm, 其中除 13.69 ~ 14.33 m

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目 (G200078500); 国家自然科学基金项目 (40321603, 40576029, 40676030); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资助 (200126); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20040247028)

作者简介:向 霏 (1983—), 女, 硕士生, 主要从事海洋地质与古海洋学研究, E-mail: xiangfeiwa@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-09-20; **改回日期:** 2006-10-28. 周立君编辑

样品缺失外,共得样品 447 个,有机碳分析采用意大利有机元素分析仪 EA1110 型,相对误差为 $\pm 0.3\%$,具体方法见文献[11],碳酸钙由碳酸钙分析仪测定,误差 $\pm 2\%$,方法见文献[12];蛋白石测定采样范围为 3~36.43 m,采样间隔 8 cm,除 13.63~14.35 m 样品缺失外,共获样品 446 个,具体方法见文献[13]。另外,对各项指标进行滤波分析,以研究各指标变化的周期性与驱动因素。样品的平均时间分辨率约为 1 000 a。所有实验均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

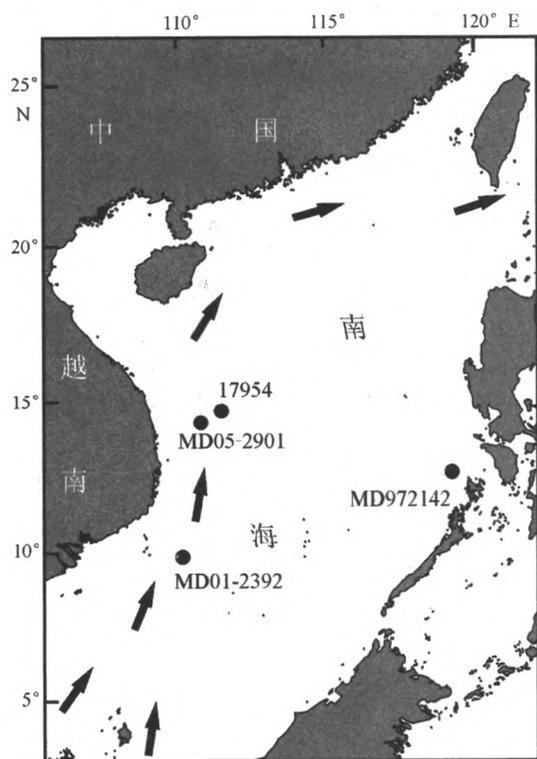


图 1 南海西部 MD05-2901 及邻区站位位置
(箭头代表夏季表层洋流方向)

Fig. 1 Locations of MD05-2901 and other sites
(Arrows show the direction of sea surface current in summer)

2 地层年代框架

MD05-2901 柱年龄采用同位素形态对比法得出,根据所得氧同位素曲线与现有的标准曲线进行对比,划分氧同位素期次(图 2)。本文采用的对比曲线是 SPECMAP 1982 年热带太平洋的氧同位素曲线^[14],根据对比,MD05-2901 柱沉积物代表 MIS1 至 12 期,地层年龄约为 480 ka,同位素曲线可以反映南海西部上升流区 480 ka 以来冰期-间冰期旋回的主要变化趋势。

3 结果

3.1 生源组分的特征

MD05-2901 孔氧同位素与生源组分各指标对比显示(图 3):碳酸钙含量在 8%~37% 之间波动,平均含量为 23.6%,变化呈现较明显的周期性,总体表现为冰期早期低、冰消期高、间冰期整体较高的特点。为了更好地研究碳酸钙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^[15],按前文所述的方法计算得出碳酸钙堆积速率(MAR)。观察发现,其变化与碳酸钙含量变化基本一致,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 0.053~0.644 之间波动。值得注意的是,碳酸钙含量的峰值均出现在冰消期,即 MIS11/12、MIS9/10、MIS7/8、MIS5/6 和 MIS1/2 分界处,其中 MIS1/2 和 MIS5/6 分界处含量分别达到 29% 和 30.5%,最高含量 37% 出现在 MIS7/8 分界处。与此类似,碳酸钙堆积速率分别在上述各时期达到高值,在 MIS1/2 和 MIS5/6 分界处分别达到 0.2 和 0.17。另一个值得注意的现象是,通过对比碳酸钙含量和氧同位素曲线,可以发现碳酸钙含量的变化先于氧同位素值的变化,这种领先趋势在末次冰期、MIS6、MIS10 和 MIS12 尤其显著。

与碳酸钙含量变化趋势不同,MD05-2901 孔有机碳和蛋白石含量均呈现出冰期高、间冰期低的变化趋势。其中有机碳含量在 0.28%~1.03% 之间波动,平均含量为 0.7%,从柱状样底部到顶部,含量逐渐升高,末次冰期达到最高值,含量变化在这一时期有较大的“飞跃”,特别是在 MIS5 初期,二者同时出现一次剧烈升高,此后有机碳含量逐渐由末次冰期前的 0.45% 上升至最高值,这一值在 MIS1 最低回落至 0.67%。该变化趋势在有机碳堆积速率(MAR)的变化上也有体现,尤其在含量频繁变化的 MIS5 以来,二者变化的相关性尤其显著。蛋白石含量的变化范围为 0.38%~2.88%,平均值为 1.41%,与有机碳含量一样,蛋白石含量也呈现出由底部至顶部逐渐增加的变化趋势,最高值出现在末次冰期,含量值自 MIS5 以来显著增加且变化幅度加大,其堆积速率(MAR)变化也呈现出类似的特点。值得注意的是,有机碳与蛋白石含量的高值同样出现在冰消期。例如在 MIS8 期末,有机碳和蛋白石含量分别达到 0.76% 和 1.48%,二者在

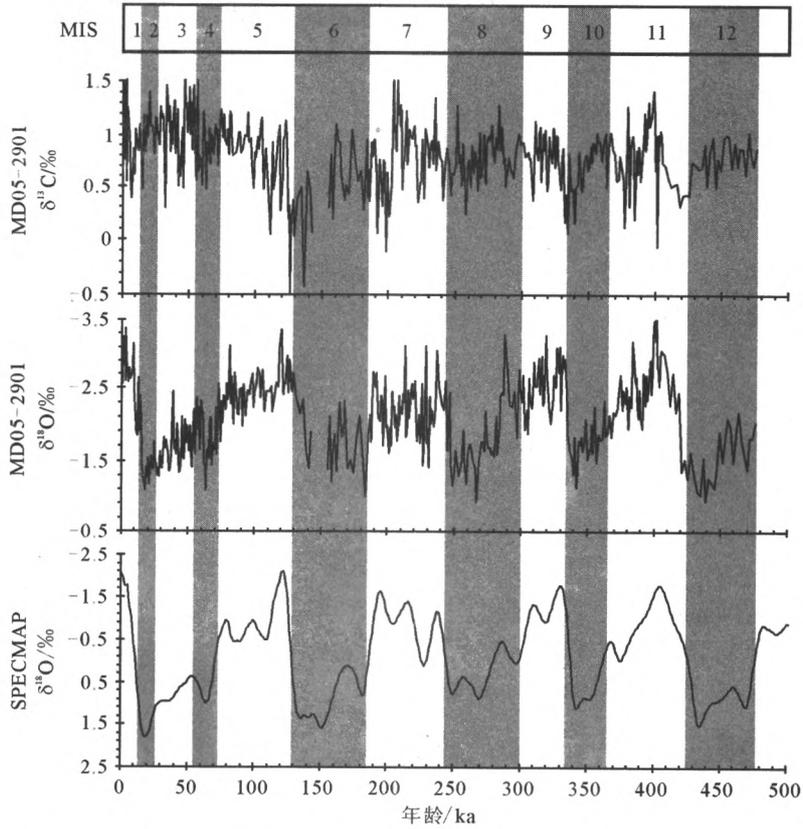


图 2 南海西部 MD05-2901 孔浮游有孔虫氧同位素地层划分(年龄由 SPECMAP 对比得出, 氧、碳同位素数据来自李建如)

Fig. 2 The oxygen isotope stratigraphy of MD05-2901

(The depth age model is determined by comparing the curve of SPECMAP. Oxygen and carbon isotope data are from LI Jian-ru.)

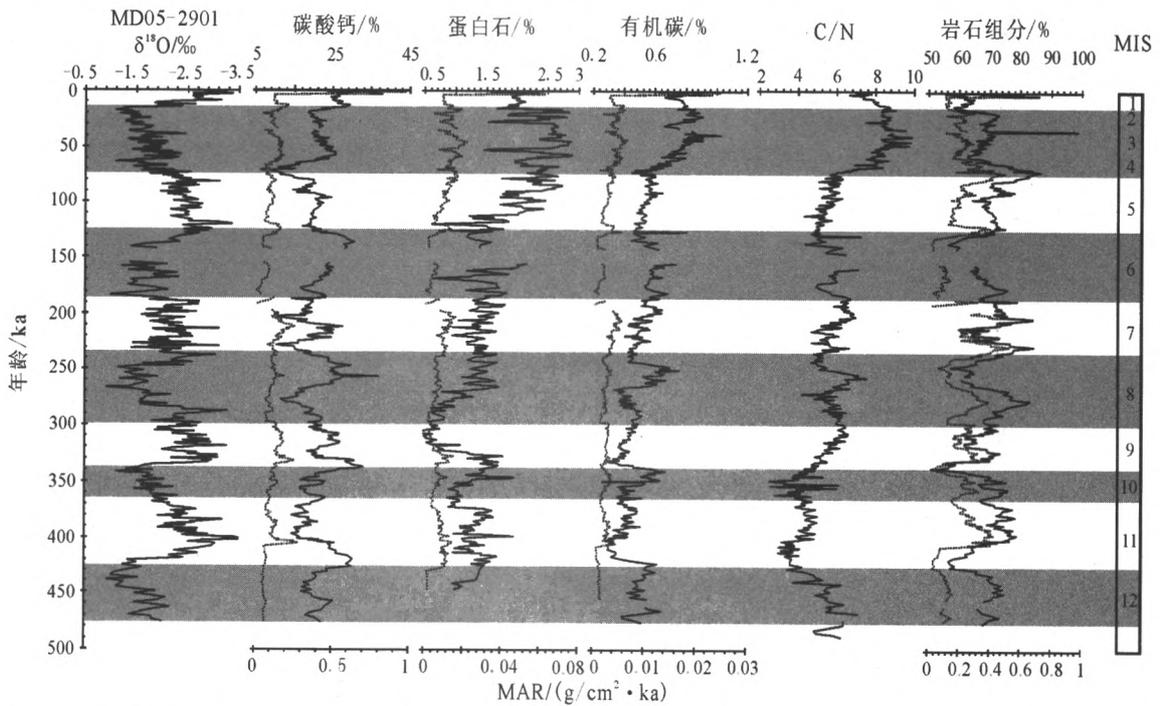


图 3 南海西部 MD05-2901 孔 480 ka 以来浮游有孔虫氧同位素、碳酸钙、生物蛋白石、有机碳、C/N 及岩石组分对比

(实线代表各指标含量, 点线代表堆积速率, 氧、碳同位素数据来自李建如)

Fig. 3 Comparison between planktonic foraminifera $\delta^{18}\text{O}$, carbonate, biogenic opal and organic carbon contents, C/N ratio and lithogenic content over the past 480 ka at core MD05-2901

(The solid lines represent contents of proxies and the dot lines represent MAR of proxies. The grey bars marked with number represent glacial periods. The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ data are from LI Jian-ru.)

MIS6 期末更是达到 0.81% 和 1.77%。

在研究生源组分变化特点之余,通过上文所述公式,计算得出岩石组分含量及堆积速率的变化规律。观察发现,岩石组分含量和沉积速率变化有良好的相关性,二者变化趋势基本一致,呈现明显的周期性,均在间冰期出现高值、冰期出现低值。岩石组分含量和堆积速率与其他生源组分指标互补,从另一方面补充说明沉积物的变化规律。

除上述沉积组分的变化,碳/氮比值也是古环境研究中的参考性指标,可以反映沉积物的来源。通常认为海洋沉积物中 C/N 平均值为 6, C/N 超过 15 时则认为沉积物主要来自陆地^[11]。MD05-2901 孔 C/N 比值多小于 8, 平均值为 6.7, 反映沉积物的主体是海洋自生沉积, C/N 比值的相对变化可以指示陆源沉积物输入的相对高低。MD05-2901 孔 C/N 比值变化最显著的特点是末次冰期具有最高比值, 平均达到 8.3, 反映这一时期陆源输入作用的增强。另外, 与上述生源组分的变化趋势相类似, C/N 比值的高值往往出现在冰消期, 与有机碳含量变化有

很好的相关性,证明在冰消期这一特殊时期,沉积物输入特点和类型都曾经发生过显著的变化。

3.2 滤波分析

为了分析沉积物各组分含量变化的周期性特点,本文采用滤波方法对氧碳同位素、有机碳含量和碳酸钙含量进行滤波分析。将滤波分析结果与太阳轨道各参数(偏心率、斜率、岁差)进行对比,发现 23 ka 的岁差周期是各项指标变化的主要周期(图 4),除氧碳同位素外,碳酸钙、有机碳和蛋白石等生源沉积物含量的变化都存在这一周期。此外,生源沉积物含量变化还可观察到长尺度的 100 ka 偏心率周期(图 5)。值得注意的是,除具备上述岁差和偏心率的周期性变化特征外,碳酸钙含量的变化还存在 40 ka 的斜率周期(图 6)。沉积物各组分间变化的周期性差异,体现控制该地区生源沉积变化的不同驱动力,是研究这一地区环境变化驱动力的有力工具。

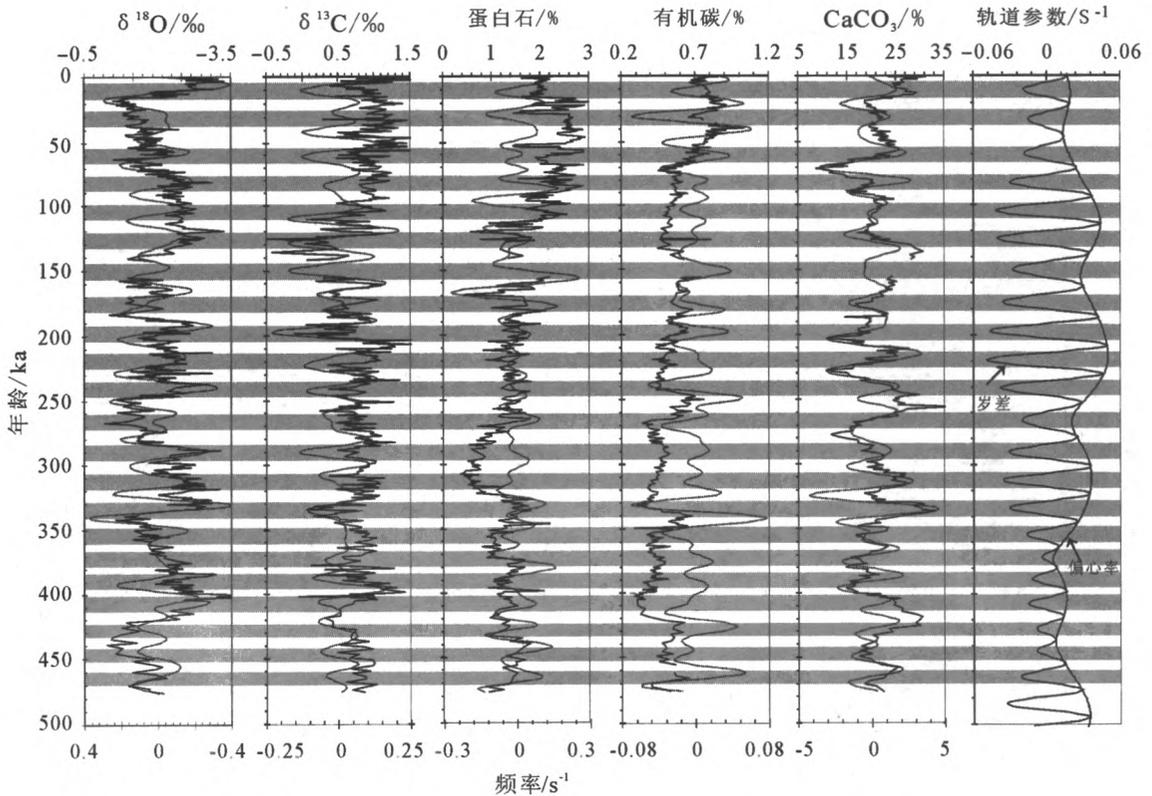


图 4 南海西部 MD05-2901 孔 480 ka 以来生源沉积物岁差周期高斯滤波分析 (实线代表各指标含量,虚线代表滤波分析结果,阴影代表岁差低值)

Fig. 4 Gauss filtering result of biogenic sediments over the past 480 ka at core MD05-2901 (The solid lines show contents of proxies, the dot lines show the filtering data and the shaded zones indicate the low values of Precession parameter.)

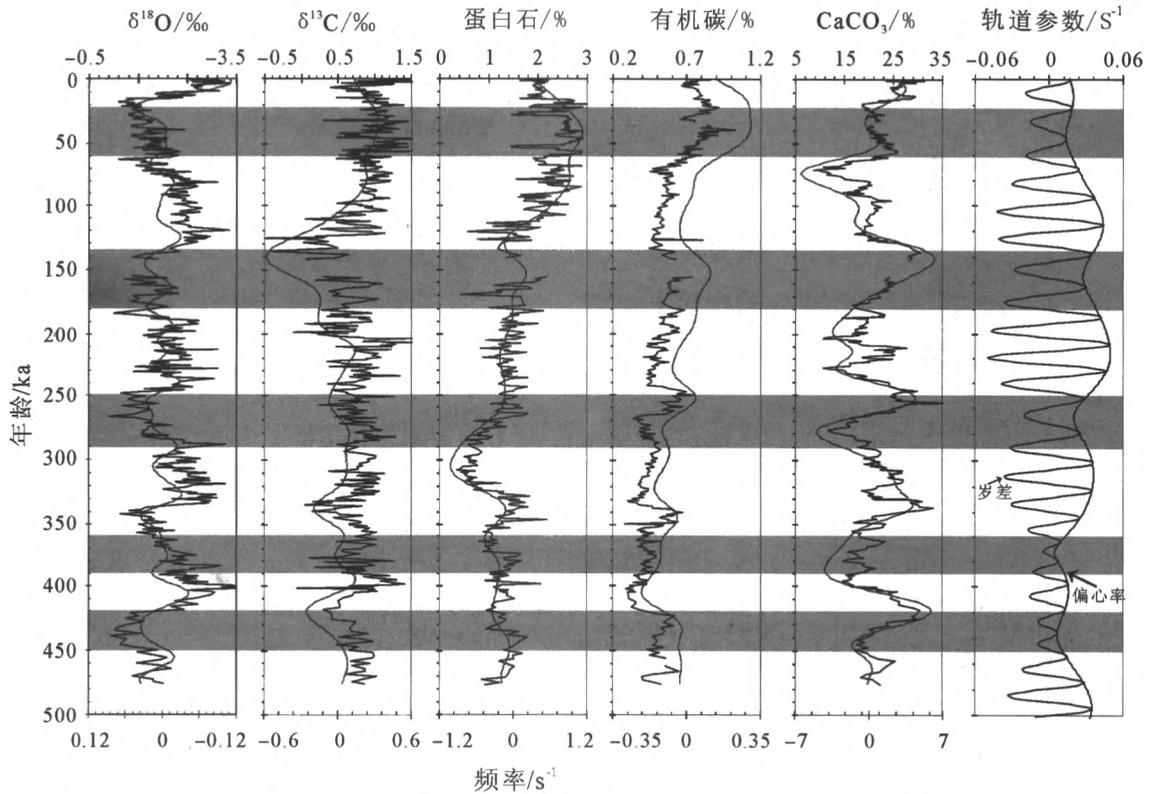


图5 南海西部 MD05-2901 孔 480 ka 以来生源沉积物偏心率周期高斯滤波分析
(实线代表各指标含量,虚线代表滤波分析结果,阴影代表偏心率低值)

Fig. 5 Gauss filtering result of biogenic sediments over the past 480 ka at core MD05-2901
(The solid lines show contents of proxies, the dot lines show the filtering data and the shaded zones indicate the low values of Eccentricity parameter.)

4 讨论

4.1 古生产力变化

过去在南海开展的工作证明南海受季风影响显著,在冬季和夏季,季风分别驱动反向的洋流体系^[2]。冬季(11—2月)东北季风从东亚大陆和中国沿海地区携带大量冷空气,通过台湾海峡进入南海,使南海表层水温(SST)出现显著的纬度分带;夏季(6—9月)西南季风带来温暖湿润的表层空气,温暖的印度洋表层海水通过巽他陆架向北进入南海南部,夏季表层海水温度(SST)的季节性值较高(28℃)并伴有垂向分带^[10]。模式分析证明风驱表层海水 Ekman 环流冬季在菲律宾西北引起上升流^[3-4],夏季在越南西部引起上升流^[5], MD05-2901 孔所在的南海西部越南岸外即位于现代上升流区。在南海开展的遥感、物理-生物地球化学耦合三维数值模式研究,证明季风驱动上升流引起相应地区的营养物质和浮游植物含量上升^[9](图1)。模式分析

结果证实夏季越南东部沿海、冬季吕宋岛西北部和巽他陆架存在高叶绿素海区,而溶解有机氮含量—叶绿素值—初级生产力存在相关关系^[9]。观测结果显示整个南海海盆初级生产力冬季呈现强烈的峰值,夏季生产力较低,年平均初级生产力为 354 mgC m⁻² d⁻¹^[9]。南海西部沉积捕获器(SCS-SW1)结果显示,该地区每年存在两个沉积物通量高值期,分别是夏季的 8—9 月和冬季的 11—12 月^[16]。因此,南海西部越南岸外上升流区存在气候—营养物质—生产力的季节性相关关系,通过研究生产力替代性指标的变化,能够揭示该地区古气候演化历史。

沉积物中有机碳含量和堆积速率指示从海洋表层输出而降落到海底的有机质丰度^[17-18],因此可以作为衡量古生产力变化的替代性指标。MD05-2901 孔有机碳含量和堆积速率大体呈现冰期高、间冰期低的趋势。以往研究显示,这种冰期有机碳值高的现象在南海南部^[19-20]、北部^[17,21-22]和东部^[9,23]的晚第四纪钻孔中均有发现,本文的工作扩展了上述现象发生的范围,使这一趋势可以看作是南海生产力变化的普遍趋势,验证了 Thunell(1992)指出的大西

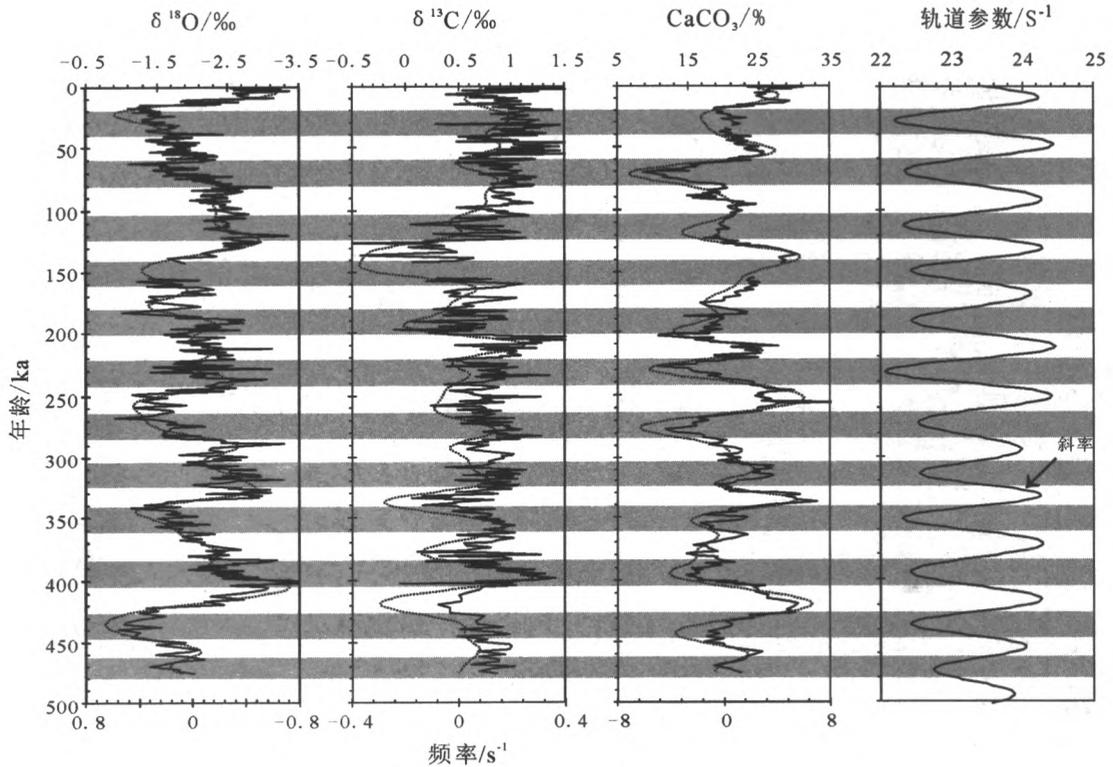


图 6 南海西部 MD05-2901 孔 480 ka 以来生源沉积物斜率周期高斯滤波分析
(实线代表各指标含量,虚线代表滤波分析结果,阴影代表斜率低值)

Fig. 6 Gauss filtering result of biogenic sediments over the past 480 ka at core MD05-2901
(The solid lines show contents of proxies, the dot lines show the filtering data and the shaded zones indicate the low values of Obliquity parameter.)

洋和太平洋中—低纬度海区第四纪晚期普遍存在冰期高生产力的结论。由于现在普遍接受的理论认为底栖有孔虫的丰度和属种组成受海底接受的有机碳通量和海洋表层季节性生产力影响^[24-25]。邻近的 17954 孔通过研究有孔虫属种组合,利用转换函数还原了 220 000 年来的有机碳通量演变历史。结果显示,与 MD05-2901 不同的是,17954 孔 220 000 年来有机碳通量出现 4 次峰值,分别在末次冰消期、MIS3、MIS5.2—5.4 和 MIS6.2—6.4,同时伴有间冰期温跃层深度变浅的现象^[26],说明同时期上升流强度的增加。

与有机碳含量相似,沉积物蛋白石含量变化可以反映表层水生产力的高低,MD05-2901 孔蛋白石含量呈现出的冰期高、间冰期低的变化趋势,与有机碳含量变化趋势一致,那么,造成这种现象及与邻近的 17954 孔差异的主要驱动力是什么?

海水表层生产力的高低受营养盐供应、浮游生物类型及海水化学因素的影响。南海西部越南岸外地区沉积物主要来源于珠江、红河、湄公河及南部的巽他陆架(刘志飞,未发表数据),冰期时南海是半封闭的海盆,海平面下降,古巽他陆架出露^[9],河流输

入增强,更加丰富的营养盐使表层海水生产力提高。与 C/N 曲线对比发现,有机碳含量和堆积速率的高值往往伴随着 C/N 的升高,进一步说明冰期时海平面降低、陆源输入的营养物质增加是导致表层生产力升高的可能原因。同时,南海晚第四纪冰期底栖有孔虫研究证明,这一时期底层水以贫氧富养为特征^[17],有利于有机物的保存。这与晚第四纪南海普遍增强的冬季风作用有关。另一方面,沉积物中蛋白石含量的变化与陆源输入作用密切相关,同时包括风尘输入量、上升流作用和硅质溶解作用都对蛋白石的沉积有影响。MD05-2901 孔蛋白石含量的变化显然受到冰期时河流输入增强带来的大量营养物质影响,但由于硅质溶解作用较复杂以及蛋白石含量的测定精度限制,对该地区硅质沉积的特点及其古海洋学意义还有待于微体古生物学的进一步研究。

值得注意的是,MD05-2901 孔有机碳和蛋白石含量的最高值均出现在末次冰期。末次冰盛期(LGM)东亚大陆表层温度较低,而西太平洋温度较高,海陆温度差异驱动强烈的东北风发育,造成南海海水混合作用加强,海洋表层生产力上升^[9]。这可

能是 MD05-2901 孔末次冰期有机碳和蛋白石含量高的诱因。

与有机碳和蛋白石含量变化趋势不同, MD05-2901 孔碳酸钙含量呈现冰期早期低、冰消期和间冰期高的变化趋势,这种现象也可见于南海东南部的 MD972142^[10]和南海南部的 MD01-2392 孔^[11]。在整个南海深水碳酸盐溶跃面(2 900 m 左右)以上也普遍发生^[21]。沉积物碳酸钙含量和堆积速率的高低主要取决于两个因素:表层水的钙质生物生产量和底层水的保存能力。同时,热带碳酸盐旋回由生产力、溶解作用和稀释作用 3 种因素控制^[17]。一般认为,造成南海碳酸钙这种旋回变化的原因是陆源物质的稀释作用,冰期时海平面降低、陆源物质输入增加是造成这一时期沉积物碳酸钙含量降低的最主要原因。对比南部的 MD01-2392 孔,元素分析结果证明碳酸钙含量的低值对应于陆源物质的增加^[27]。MD05-2901 孔碳酸钙含量变化的另一个重要特征是含量高值均出现在冰消期,特别是 MIS1/2、MIS3/4 和 MIS5/6 分界处,这种冰消期含量增加的现象同样见于有机碳和蛋白石含量。同时,碳酸钙含量的变化领先于氧同位素的变化。传统观点认为冰盖变化引起的海平面升降是导致碳酸钙含量变化的主要因素,南海的研究证明低纬地区碳酸钙含量变化先于氧同位素变化,强调了低纬地区与高纬地区不同的驱动机制。碳酸钙含量在冰消期的高值及含量变化领先于氧同位素很有可能是大洋碳酸钙泵对大气二氧化碳调控作用的结果,碳酸钙含量高值期钙质壳体生产力增高,海水 CO_3^{2-} 浓度降低,大洋碳酸钙泵向大气释放二氧化碳,使大气二氧化碳分压上升,全球气温升高^[25]。同时,通过对比 MD05-2901 孔浮游有孔虫碳同位素曲线可知,碳同位素的三次最低值同样发生在冰消期,与 MIS1/2、MIS3/4 和 MIS5/6 分界处的高碳酸钙含量值对应,这种全球性的变化趋势^[28]可能是由于南极变暖先于北极冰盖变化所致(李建如,待发表),证明低纬地区的气候变化除简单受北半球冰盖的影响外,还存在特有的低纬驱动特点。

4.2 轨道驱动

为研究 MD05-2901 孔生源沉积及氧碳同位素变化的周期性规律,本文对上述指标进行滤波分析,将结果与太阳轨道周期参数进行对比,发现所有指标的变化均显示 23 ka 的周期。以碳同位素值的变化为例,碳同位素值冰期变轻,间冰期变重, MIS1/2、MIS3/4 和 MIS5/6 分界处存在 3 个最轻值就是

岁差周期的体现,这种变化在亚南极到赤道晚第四纪记录中都有发现^[26,29],是印度—太平洋和南大西洋、南极附近海洋的共同现象,这一现象除受岁差周期的调节外,还受到 40~50 万年的偏心率长周期影响, MIS6 至 MIS2 碳同位素值的变重,就是这种 50 万年长周期的影响^[28]。低纬地区最重要和显著的气候特征就是季风环流,岁差周期和偏心率长周期都是轨道驱动在低纬地区的体现,可以说,大洋碳储库的变化具有典型的热带驱动特点,是季风环流对低纬地区气候调节的重要体现。

碳酸钙含量变化同时具有显著的 40 ka 斜率周期,斜率周期强调了高纬地区对气候的调节作用。证明冰盖消长引起的冰期-间冰期旋回改变了陆源沉积物的输入强度,再次证明稀释作用是影响南海碳酸盐沉积的主要因素。同时,碳酸钙含量变化具有的岁差周期,证明南海碳酸钙沉积同时受到低纬过程的驱动,从而导致碳酸钙含量在冰消期出现高值。

5 结论

南海西部越南岸外 MD05-2901 孔沉积物分析显示,该孔覆盖了氧同位素 1—12 期,地层年龄约 48 万年。氧同位素记录和生源组分变化对比显示,该地区古生产力呈现冰期高、间冰期低的变化趋势,这也是南海古生产力变化的普遍趋势,体现冰期河流输入作用增强导致营养物质供应的增加,海水表层生产力提高。有机碳和蛋白石含量在末次冰期达到最高值,可能是末次冰盛期海陆温度差异增强导致东北风发育,南海海水混合作用加强、表层生产力提高的结果。碳酸钙含量呈现冰期早期低、冰消期和间冰期高的变化特点,与南海南部钻孔分析结果对比显示,造成这一现象的可能原因是冰期时陆源物质输入增加引起的稀释作用。此外,碳酸钙含量在冰消期的高值及相对于氧同位素变化的超前性体现了大洋“碳酸钙泵”对大气二氧化碳含量和温度的调节作用。滤波分析结果显示,碳同位素等生源组分的含量变化与有机碳含量变化相似,都有明显的岁差周期,同时浮游有孔虫碳同位素的变化还具有偏心率长周期,体现低纬地区季风环流的轨道响应,证明影响南海气候演变的因素除北半球冰盖变化的影响外,南极变暖先于北极冰盖变化和热带轨道驱动也是重要因素。

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。

参考文献 (References)

- [1] 郑范,李前裕,陈木宏,等. 南海西南部晚更新世 500 ka 以来的古海洋学特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(5): 534-549. [ZHENG Fan, LI Qian-yu, CHEN Mu-hong, et al. Late Pleistocene Paleoceanographic Characteristics of the southwestern South China Sea since 500 ka[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(5): 534-549.]
- [2] Shaw P T, Chao S Y. Surface circulation in the South China Sea [J]. Deep-Sea Research, 1994, 41: 1 663-1 683.
- [3] Chao S T, Shaw P T, Wu S Y. Deep water ventilation in the South China Sea [J]. Deep-Sea Research, 1996, 43: 445-466.
- [4] Shaw P T. Winter upwelling off Luzon in the Northeastern South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 16 435-16 448.
- [5] Wiesner M G, Zheng L, Wong H K, et al. Fluxes of particulate matter in the South China Sea [C]//Ittekkot V, Schofer P, Honjo S, et al (eds). Particle Flux in the ocean. London: Wiley, 1996: 293-312.
- [6] 黄宝琦, 葛知潜. 越南岸外晚第四纪上升流与东亚夏季风变迁[J]. 第四纪研究, 1999, 19(6): 518-525. [HUANG Bao-qi, JIAN Zhi-min. Late Quaternary coastal upwelling and variations of the East Asian Summer monsoon off the eastern Vietnam coast[J]. Quaternary Research, 1999, 19(6): 518-525.]
- [7] 黄宝琦, 葛知潜, 成鑫荣, 等. 南海晚第四纪上升流区水体结构的变化[J]. 科学通报, 2001, 46 (11): 948-952. [HUANG Bao-qi, JIAN Zhi-min, CHENG Xin-rong, et al. Late Quaternary upper-water column structure in upwelling areas of the South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (11): 948-952.]
- [8] Huang B, Jian Z, Cheng X, et al. Foraminiferal response to upwelling variations in the South China Sea over the last 220 000 years [J]. Marine Micro-Paleontology, 2002, 47: 1-15.
- [9] 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: 1 387-1 412.
- [10] CHEN Min-te, Shiao Liang-Jian, YU Pai-sen, et al. 500 000-year records of carbonate, organic carbon, and foraminifera sea-surface temperature from the southeastern South China Sea (near Palawan Island) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 197: 113-131.
- [11] Stax P, Stein R. Long-term changes in the accumulation of organic carbon in Neogene sediments, Ontong Java Plateau [C]//Proc. ODP Sci. Res., 1993: 573-579.
- [12] Jones A, Kaiteris P. A vacuum gasometric technique for rapid and precise analysis of calcium carbonate in sediments and soils [J]. J. Sediment. Petrol., 1983, 53: 655-660.
- [13] Mortlock R A, Froelich P N, A simple method for the rapid determination of biogenic opal in the pelagic marine sediments [J]. Deep-Sea Research, 1989, 36(9): 1 415-1 426.
- [14] Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, et al. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record [C]//Berger A, Imbrie J, Hays J (eds). Milankovitch and Climate. Holland: D. Reidel, 1984: 269-307.
- [15] Howard W R, Prell W L. Late Quaternary CaCO_3 production and preservation in the South China Sea and Sulu Seas [J]. Paleoceanography, 1994, 9: 453-482.
- [16] 陈建芳. 南海沉降颗粒物的生物地球化学过程及其在古环境研究中的意义 [D]. 同济大学博士学位论文, 2005. [CHEN Jian-fang. Biogeochemistry of Settling Particles in the South China Sea and Its Significance for Paleo-environment Studies [D]. Tongji Univ. Ph D Thesis, 2005.]
- [17] 汪品先, 赵泉鸿, 成鑫荣, 等. 十五万年来的南海 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1995. [WANG Pin-xian, ZHAO Quan-hong, CHENG Xin-rong, et al. South China Sea Since 150 000 Years [M]. Shanghai: Publish House of Tongji University, 1995.]
- [18] 贾国东, 彭平安, 房殿勇, 等. 南海南部约 30 ka 来沉积有机质的生物输入特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 7-11. [JIA Guo-dong, PENG Ping-an, FANG Dian-yong, et al. The characteristics of biogenic input of the sedimentary organic matter in the southern South China Sea for the last 30 ka years [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2001, 21(1): 7-11.]
- [19] Winn K, Zheng L, Erlenkeuser H, et al. Oxygen/carbon isotopes and paleo-productivity in the South China Sea during the past 110 000 years [C]//Jin X, Kudrass H R, Pautot G (eds.). Marine Geology and Geophysics of the South China Sea. Beijing: China Ocean Press, 1992: 154-166.
- [20] Winn K, 郑连福, Stoffer P, 等. 南海北部晚第四纪稳定同位素记录与古生产力 [C]//南海海洋沉积化学过程与地球化学研究. 北京: 海洋出版社, 1993: 100-108. [Winn K, ZHENG Lian-fu, Stoffer P, et al. Stable isotope record and paleoproductivity in the South China Sea during the late Quaternary [C]//ZHENG Lian-fu, CHEN Wen-bin (eds.). Contributions to Sedimentation Process and Geochemistry of the South China Sea. Beijing: China Ocean Press, 1993: 100-108.]
- [21] Thunell R C, MIAO Qing-min. Glacial-Holocene biogenic sedimentation patterns in the South China Sea: Productivity variations and surface water $p\text{CO}_2$ [J]. Paleoceanography, 1992, 7(2): 143-162.
- [22] Hergura J C, Berger W H. Paleoproductivity from benthic foraminifera abundance: Glacial to postglacial change in the west equatorial Pacific [J]. Geology, 1991, 19: 1 173-1 176.
- [23] Kuhnt W, Hess S, Jian Z. Quantitative composition of benthic foraminifera assemblages as a proxy indicator for organic carbon flux rates in the South China Sea [J]. Marine Geology, 1999, 156: 123-185.
- [24] JIAN Zhi-min, HUANG Bao-qi, Wolfgang Kuhnt, et al.

- Late Quaternary upwelling intensity and east monsoon forcing in the South China Sea [J]. *Quaternary Research*, 2001, 55: 363-370.
- [25] 刘志飞,徐建,田军,等. 南海第四纪冰期旋回中的碳酸盐泵 [J]. *科学通报*, 2003, 48(9): 962-968. [LIU Zhi-fei, XU Jian, TIAN Jun, et al. "Carbonate pump" during Quaternary Glacial/Interglacial cycles in the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(9): 962-968.]
- [26] Ninnemann U S, Charles C D. Regional difference in Quaternary Subantarctic nutrient cycling: Link to levels [J]. *Paleoceanography*, 1997, 12: 560-567.
- [27] 乔培军,邵磊. 南海南部末次冰期以来的沉积物特点及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(2): 73-78.
- [QIAO Pei-jun, SHAO Lei. Characteristics of sediments in the southern South China Sea since the Last Glaciation and their paleoenvironmental significance[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2003, 23(2): 73-78.]
- [28] Curry W B, Crowley T J. The ^{13}C of equatorial Atlantic surface water: Implications for ice age $p\text{CO}_2$ levels [J]. *Paleoceanography*, 1987, 2: 489-517.
- [29] 李建如,汪品先. 南海 20 万年来的碳同位素记录 [J]. *科学通报*, 2006, 51(12): 1 482-1 486. [LI Jian-ru, WANG Pin-xian. A 200-ka carbon isotope record from the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(12): 1 482-1 486.]

HIGH-RESOLUTION RECORDS OF BIOGENIC COMPONENTS AND THEIR PALEOCEANOGRAPHIC IMPLICATIONS IN THE UPWELLING AREA OF THE SOUTH CHINA SEA OFF EASTERN VIETNAM OVER PAST 480 ka

XIANG Fei, WANG Ru-jian, LI Jian-ru, YE Fang

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the study of sediment samples from core MD05-2901 which is in the upwelling area in the South China Sea off eastern Vietnam, we obtained high-resolution records of biogenic components over the past 480 000 years. The records provide us paleoproductivity and paleoceanographic information associated with East Asian monsoon system. There were high total organic carbon (TOC) and high biogenic opal content during the glacial periods, and low TOC and low biogenic opal content occurred during interglacial periods. This indicates the intensified terrigenous sediment input during glacial periods, which is due to the low sea level. Particularly, both the TOC and biogenic opal content reached their maximum values during the last glacial period, which shows high productivity in this area caused by the strong northeast wind during the last glacial maximum (LGM). The variation of carbonate concentration displayed opposite trend to TOC and opal, and high value occurred during the deglaciation periods, indicating that CaCO_3 cycle in this area was influenced by terrigenous dilution and the effect of "Carbonate pump" caused the high CaCO_3 content during deglaciation periods. Moreover, the variations in paleoproductivity proxies exhibit a distinct cyclicity with a frequency of nearly 23 000 years, mainly responding to precession cycles, suggesting an influence of low latitude process, such as the monsoon climate in the South China Sea.

Key words: biogenic sediments; paleoproductivity; orbital-forcing; South China Sea