

# 早上新世非洲季风与地中海表层 生产力变化的岁差节律

黄恩清<sup>1</sup>, 田军<sup>1,2</sup>

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 不来梅大学地质科学系与海洋边缘研究中心, 不来梅 D-28359 德国

**摘要:** 地质历史上留下了许多反映非洲季风的记录, 意大利南方晚新生代的海相地层便是其中著名的一例。Cape Spertivento 剖面位于意大利卡拉布里亚半岛, 属于早上新世(5.3~4.8 Ma)地中海泥灰岩—灰岩沉积物。在借鉴前人工作的基础上, 重新为该剖面建立一个精度更高的天文年代标尺。反映古生产力的指标显示, 早上新世在北半球夏季辐射量增大期间, 地中海有机碳含量及其堆积速率增大, C/N 出现高值, 碳酸盐含量及其堆积速率减小, *G. obliquus* 稳定氧碳同位素出现负偏移, 这是非洲夏季风带来的降雨增强的结果。尼罗河泛滥让更多陆源营养物和淡水输入地中海。各个古环境指标的频谱分析结果存在强烈的岁差周期和丰富的半岁差周期, 说明早上新世非洲季风主要受低纬过程控制。

**关键词:** 上新世; 非洲季风; 地中海; 海水表层生产力; 岁差。

中图分类号: P732

文章编号: 1000-2383(2007)03-0313-09

收稿日期: 2006-10-26

## Early Pliocene Precession Rhythm of African Monsoon and Mediterranean Sea Surface Productivity

HUANG En-qing<sup>1</sup>, TIAN Jun<sup>1,2</sup>

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

2. Department of Geosciences and Research Center of Ocean Margins, University of Bremen, D-28359 Bremen, Germany

**Abstract:** The Profile Cape Spertivento, located in the Calabria peninsula of Italy, is composed of the Early Pliocene (5.3–4.8 Ma) Mediterranean marl-clay sediments. Based on the former work, a more accurate astronomically tuned timescale has been reconstructed for the sequence Cape Spertivento in this paper. Paleoproductivity proxies show that during the Early Pliocene, the increases of the Northern Hemisphere summer insolation always concurred with the increases of the organic carbon MAR, the high C/N ratios, the decreases of the carbonate MAR, and the negative excursions of *G. obliquus*  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ , which were probably caused by the enhanced rainfall, resulting from the strengthened African summer monsoon. Moreover, the strong African summer monsoon led to the flooding of the Nile River, increasing the discharge of continental nutrients and fresh water into the Mediterranean Sea. Strong precession and abundant semi-precession cycles are found in the spectrums of the proxy records, implying the tropical forcing of the African monsoon variability during the Early Pliocene.

**Key words:** Pliocene; African monsoon; the Mediterranean Sea; sea surface productivity; precession.

非洲大陆横跨赤道, 西临赤道大西洋, 在大陆和海洋热容量性质差异的驱动下, 发育着机制相对简单的非洲季风。夏季时, 海水升温慢, 海洋上空形成高压, 来自赤道大西洋西南向的湿润气流给北非大陆带来丰富的降水; 冬季时, 北非大陆近地面形成高压, 盛行干燥的东北向的信风。由于低纬地区太阳辐射量变化主要受偏心率调幅的岁差控制, 所以非洲季风强度变化呈现出强烈的岁差周期 (Rossignol-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40476027, 40331002, 40321603); 上海市科委国际合作重点项目; 上海市启明星项目 (A 类, No. 06QA14052); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金 (No. 2005036); 德国 Alexander Von Humboldt 基金。

作者简介: 黄恩清(1984—), 男, 硕士研究生, 从事古海洋与古气候变化的研究。E-mail: enqinghuang@gmail.com

Strick, 1983; Ruddiman, 2000), 这种规律在早上新世尤其明显(Clark *et al.*, 1999). 地质历史上留下了许多反映非洲季风的记录, 例如非洲岸外大西洋、阿拉伯海以及印度洋的风尘通量(Tiedemann *et al.*, 1994; DeMenocal, 1995), 赤道大西洋淡水硅藻沉积变化(Ruddiman, 2000)以及意大利南方晚新生代的海相地层(Rossignol-Strick, 1985).

意大利晚新生代海相地层, 由于其广泛发育的腐泥层和良好的韵律性, 成为上新世地层学研究的热点(Hilgen *et al.*, 2006). 上新世全部 3 个阶的国际层型剖面(GSSP)都位于西西里岛南岸. 意大利上新世海相地层的韵律性及其与地球轨道周期的关系是意大利海相地层研究的最重要成果, Lange-ris、Hilgen 和 Lourens 等人做了大量的工作, 其中 Hilgen 不仅通过腐泥层与岁差、偏心率周期的对比建立了年代序列, 而且提出了地层韵律的编号系统(Hilgen, 1991a, 1991b; Hilgen *et al.*, 1995; Lourens *et al.*, 1996).

本文介绍的 Cape Spertivento 剖面属于早上新世地层, 年代跨度约为 4.8 ~ 5.33 Ma. 美国和意大利学者曾合作对该剖面进行了古地磁年代的测定(Channell *et al.*, 1988), 并探究了其泥灰岩—泥岩沉积旋回的成因(Thunell *et al.*, 1991). 这些工作为该剖面的进一步研究奠定了基础. 近年来低纬热带过程的重要性被逐步揭示出来(汪品先, 2006; 田军和汪品先, 2006), 而 Cape Spertivento 剖面沉积物正是典型的低纬气候过程的产物. 本文拟从地中海表层生产力的地质记录来重建该地区早上新世非洲夏季风的变化状况.

## 1 材料与方法

Cape Spertivento 剖面位于意大利 Calabria 半岛南端(图 1), 整体上由不同碳酸盐含量和不同颜色的泥灰岩与钙质泥岩互层组成, 年代上属于上新世 Zanclean 阶的早中期, 与下部中新世最晚期 Messinian 阶的砾岩沉积物呈完好接触, 因此剖面的基底即为中新统/上新统的分界线, 年龄为 5.33 Ma (Van Couvering *et al.*, 2000; Hilgen *et al.*, 2006).

Spertivento 剖面从 Messinian 阶顶面以上的第 1 韵律向上, 依次观测到第 23 韵律结束. 晚中新世 Messinian 阶顶部为砾岩沉积, 从上新世 Zanclean 阶的第 1 韵律开始进入泥灰岩和钙质泥岩旋回, 第 1~5 韵律的泥灰岩层不发育, 主要发育灰色钙质泥岩层. 从第 6 韵律开始, 发育粉红色泥灰岩层和深灰色钙质泥岩层, 每个泥灰岩和钙质泥岩旋回相当于一个 20 ka 的岁差周期(Channell *et al.*, 1988; Hilgen, 1991a, b). 从第 14 韵律开始, 粉红色泥灰岩层由灰白色泥灰岩层所替代, 岁差周期的岩性组合转变为灰白色泥灰岩与深灰色钙质泥岩. 野外样品采集至第 23 旋回, 相当于年龄段 5.33 ~ 4.8 Ma. 实际分东西两段测制, 西段测第 1~9 韵律, 野外根据露头追踪, 在东段测 10~23 韵律, 合计共 298 个层位. 在剖面上按 10 cm 垂直间隔采样, 共采集 244 个有效样品.

我们测试了全部样品的碳酸盐、有机碳百分含量和干样密度, 并在冲洗烘干后的样品中挑选浮游有孔虫 *Globigerinoides Obliquus* 作稳定氧碳同位

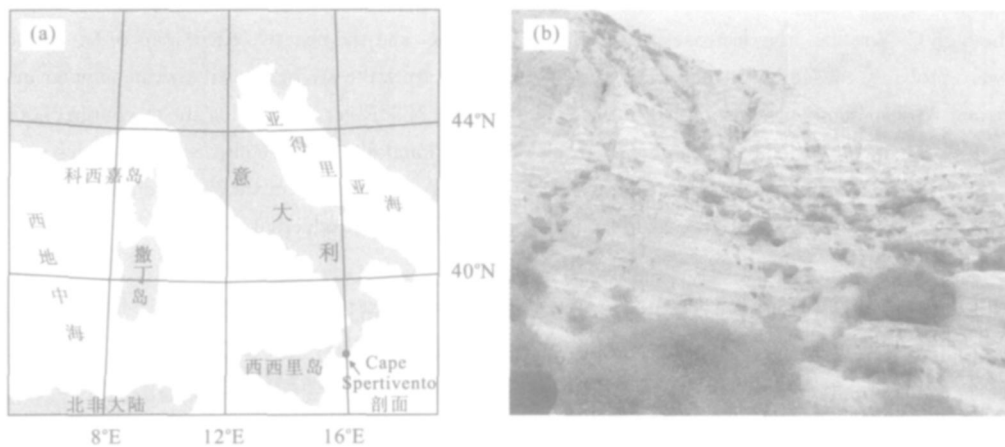


图 1 Cape Spertivento 剖面的地理位置(a); Cape Spertivento 剖面的野外露头照片(b)

Fig. 1 Location map of the Profile Cape Spertivento (a); outcrop of the Profile Cape Spertivento (b)

素分析, 由于地层年代较老, 部分样品中有孔虫壳体碎裂和充填严重, 相应的同位素数据缺失. 碳酸钙含量测试采用气体定量分析原理, 即收集样品与盐酸反应产生的  $\text{CO}_2$  气体, 并量出气体体积, 再换算成样品中的碳酸盐含量, 分析仪器为法国 Controlab 公司生产的 NFP18 ~ 508 碳酸盐分析仪, 该方法误差为 2%. 应用有机元素分析仪 EA1110 测定样品 (已去除碳酸盐) 中有机碳、氮的含量, 测试原理是将样品在  $1000^\circ\text{C}$  高温下燃烧, 在还原铜作用下变成  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$ , 再依据色谱法将物质分离. 该仪器分析误差小于 0.3%. 有孔虫稳定氧碳同位素分析方法参照文献 (田军等, 2004). 干样密度的测试方法如下, 用电子天平称取干燥样品的质量  $M$  (g), 往  $25 \pm 0.5$  mL 的量筒中先注入  $V_1$  mL 的清水, 投入样品后, 液面升高至  $V_2$  mL, 则样品的干样密度为:

$$\rho = M / (V_2 - V_1) \text{ (g/mL)}.$$

所有样品的预处理和测试工作均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成.

## 2 天文调谐的年代标尺

经过 Hilgen、Lourens 等人的努力, 天文调谐方法在意大利海相地层中的应用已经相当成熟 (Hilgen, 1991a, 1991b; Lourens *et al.*, 1996). Cape Spertivento 剖面的地层编码参照西西里岛 Rossello 合成剖面 (Lourens *et al.*, 1996), 并由此得到一个初始的年代框架. 由于本次工作的采样分辨率较高, 在利用前人原理和方法的基础上, 为该剖面重新调谐一个精度更高的年代标尺是有必要的.

当北非夏季风强盛时, 丰富的降水引起尼罗河泛滥. 河水注入地中海, 一方面使得表层海水淡化, 上下层海水交流被打断, 在海底形成缺氧环境, 另一方面河水带来的营养元素使得海水富含养分. 当某种机制触发了海底密度跃层变化和藻类勃发, 引起生产力剧增, 就会在海底快速堆积大量的有机质和硅质成分, 在地质记录上便留下有机碳含量很高的沉积物. 相反, 当岁差值较大, 北半球夏季辐射量较小, 非洲夏季风减弱, 地中海表层海水贫养, 地质记录中留下的是有机质含量低、碳酸钙含量高的沉积物 (Hilgen, 1991b; Ruddiman, 2000). 根据这个原理, 本文选择 Laskar1990 方法 (Laskar, 1990; Laskar *et al.*, 1993) 计算轨道参数和太阳辐射量的变化, 作为天文调谐的目标曲线. 然后通过以下原理

选取时间控制点 (图 2):

(1) 每个旋回中泥灰岩段碳酸盐含量最高值对应于岁差周期中的高值峰, 即北半球夏季辐射量的最低值;

(2) 每个旋回中钙质泥岩段有机碳含量最高值对应于岁差周期中的低值峰, 即北半球夏季辐射量的最高值;

(3) 对没有出现岩性旋回组合的 Cycle 1 ~ 5, 按照碳酸盐和有机碳百分含量的曲线形态, 也将单个韵律内的碳酸盐含量最高值对应于岁差周期中的高值峰, 有机碳含量最高值对应于岁差周期中的低值峰.

上述原则是建立初始年代框架的基本原理, 但在实际应用中并非简单照搬. 假设在某一特定地质历史时期, 岁差的变化幅度比较小 (如图 2 中的 5220 ka 时间点附近), 北半球夏季辐射值较小, 则地中海海水生产力将减弱, 与此相应, 地质记录中将不会出现有机碳含量较高的泥岩层, 只有当下一个变化幅度较大的岁差峰来临时才会留下有机碳含量高的地层. 根据野外观察, 我们依据岩性的旋回组合给岩层编号, 所以一个岩性旋回有可能对应于两个振幅较弱的岁差周期. 根据与西西里岛 Rossello 合成剖面 (Lourens *et al.*, 1996) 的对比结果, 我们认为 Cycle 6、21 和 22 分别对应于 5320 ka、4870 ka 和 4820 ka 三个时间点附近两个较弱的岁差周期.

综合上述规则, 我们共得到 43 个时间控制点, 基本上每个旋回有两个时间控制点. 再通过线性内插方法, 建立起了 Cape Spertivento 剖面的天文年代框架.

采用数字滤波技术对  $G. obliquus$   $\delta^{18}\text{O}$ 、Corg% 和 Carbonate% 时间序列进行岁差周期上的数字滤波, 并将滤波结果与岁差参数进行匹配 (图 3), 观察两者在相位和振幅上的吻合程度, 从而检验该年代标尺的可靠性. 其中 Corg% 的滤波结果进行了 10 ka 即半个岁差周期的滞后位移, 这是因为 Corg% 的最大值对应于岁差峰的最小值, 呈  $180^\circ$  反相位. 结果表明, Corg%、Carbonate% 和  $\delta^{18}\text{O}$  的滤波结果与岁差曲线在振幅上几乎呈同步变化, 只是相位上有轻微的移动. 在老于 5170 ka 的地层中, Corg% 和  $\delta^{18}\text{O}$  在岁差周期上的滤波曲线, 无论是相位还是振幅, 与岁差曲线的吻合程度均下降, 这与这段时间内较弱的岁差振幅有关, 即所对应的 Cycle 1 ~ 5 岩层没有出现泥灰岩—泥岩旋回.

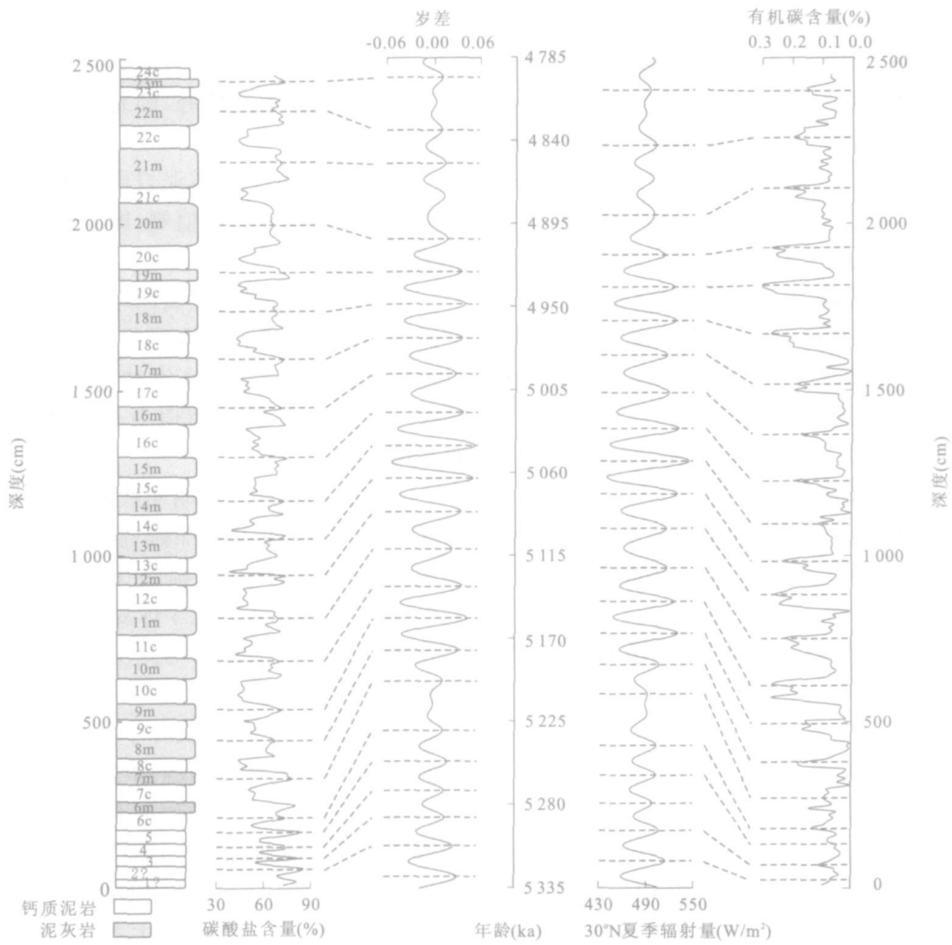


图 2 Cape Spertivento 剖面时间控制点的选取. 夏季辐射量为六月份和七月份太阳辐射量的平均值

Fig. 2 Selection of the time control points for the Cape Spertivento Profile. Note that summer insolation is the monthly mean value of June and July

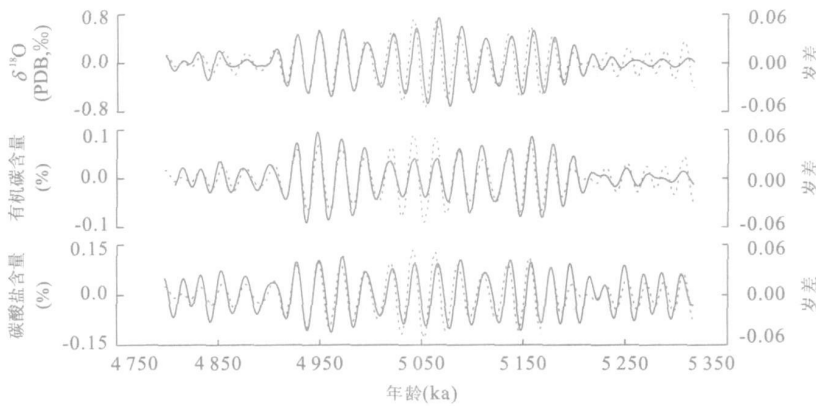


图 3 Cape Spertivento 剖面有机碳、碳酸盐百分含量和 *G. obliquus*  $\delta^{18}O$  在岁差周期上的滤波曲线(实线)与岁差(虚线)的对比. 采用 Blackman-Turkey 带宽滤波方法. 岁差周期上的滤波中心频率为  $0.04762 \text{ ka}^{-1}$ , 带宽为  $0.015 \text{ ka}^{-1}$

Fig. 3 Comparison of filtering records of Corg%, carbonate% and *G. obliquus*  $\delta^{18}O$  at precession band (solid lines) with orbital precession (dashed line). The Blackman-Turkey method was used. The central frequency and band-width are  $0.04762 \text{ ka}^{-1}$  and  $0.015 \text{ ka}^{-1}$ , respectively.

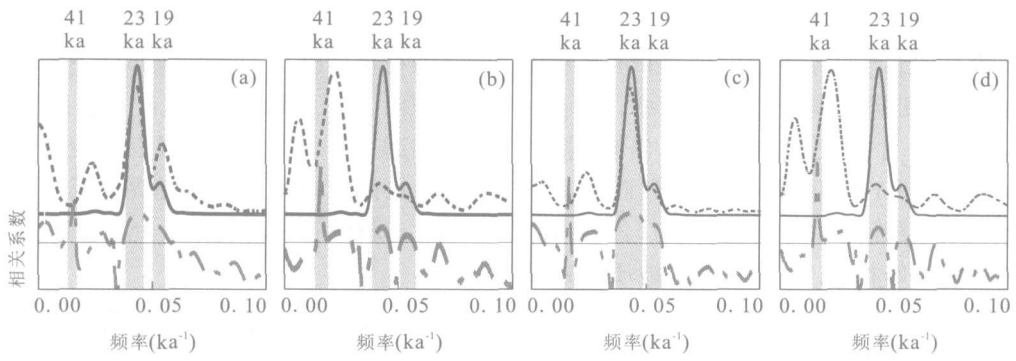


图 4 Cape Spertivento 剖面(a)有机碳、(b)碳酸盐百分含量、(c) *G. obliquus*  $\delta^8\text{O}$  和(d) *G. obliquus*  $\delta^3\text{C}$  与  $30^\circ\text{N}$  夏季辐射量的交叉频谱分析结果. 图中上部实线代表  $30^\circ\text{N}$  夏季辐射量的频谱, 虚线代表各个古环境指标的频谱. 下部点划线代表相关系数的频谱. 水平实线代表 80% 的检验标准. 交叉频谱分析的软件为 ARAND

Fig. 4 Cross spectral analyses of  $30^\circ\text{N}$  summer insolation with (a) Corg%, (b) Carbonate%, (c) *G. obliquus*  $\delta^8\text{O}$  and (d) *G. obliquus*  $\delta^3\text{C}$  of Cape Spertivento, respectively. The solid lines denote the spectrum of the  $30^\circ\text{N}$  summer insolation and the dashed lines denote those of the proxy records. The dotted lines denote the coherency, and the horizontal solid lines denote the 80% confidence level. We used the “ARAND” package from Brown University to perform the cross spectral analyses

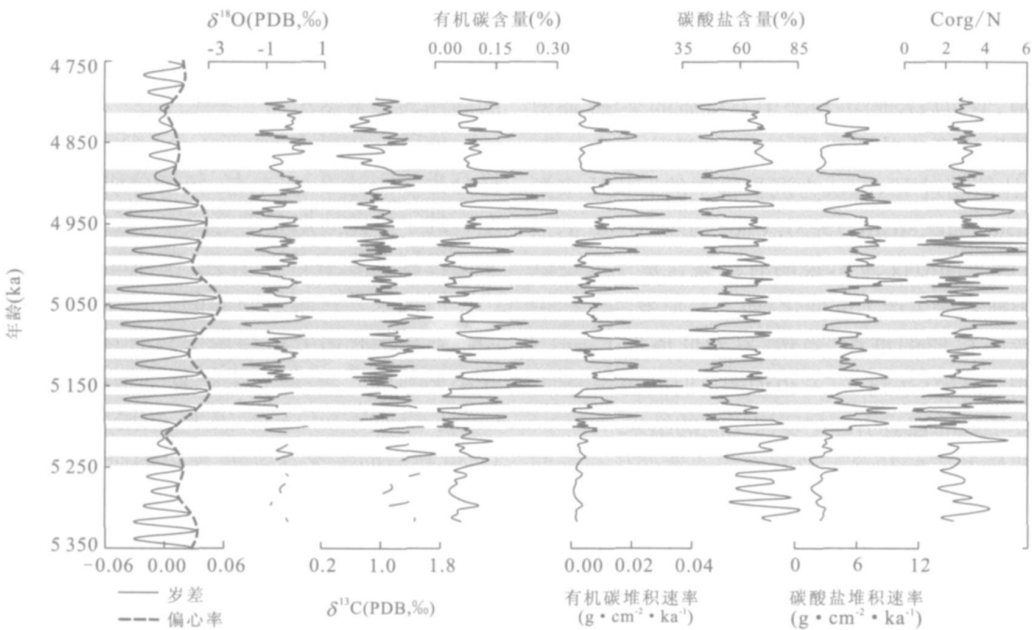


图 5 Cape Spertivento 剖面气候替代性指标与岁差的比较

Fig. 5 Comparison of the proxy records of Cape Spertivento profile with the precession variability

由于意大利上新世海相地层与北非夏季风以及低纬地区夏季太阳辐射量相关, 所以我们采用交叉频谱分析方法来检验  $30^\circ\text{N}$  夏季太阳辐射量与 Cape Spertivento 剖面各项气候替代性指标的相关性 (Corg%, Carbonate%, *G. obliquus*  $\delta^3\text{C}$  和  $\delta^8\text{O}$ , 图 4). 结果表明, 这些指标与夏季辐射量在两个岁差周期(19 ka 和 23 ka)以及斜率周期(41 ka)上都

强烈相关, 尤其以 23 ka 周期最为突出, 说明以岁差周期作为岩层旋回的基本时间单位并选取时间控制点的做法是完全可行的.

### 3 古生产力变化

图 5 所示, 各项古环境指标的周期性变化均与

岁差的振幅变化耦合。在岁差低值期(相当于岩层旋回中的泥岩段),即北半球夏季辐射量及非洲夏季风最强盛的时期,有机碳含量及其堆积速率, Corg/N 出现高值,碳酸盐含量及其堆积速率出现低值, *G. obliquus*  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  值呈现负偏移;而在岁差高值期(相当于岩层旋回中的泥灰岩段),各项古生产力指标的变化正好相反。这种规则的地质记录恰恰是非洲夏季风强弱交替变化的反映。

由于地中海的封闭性,尼罗河的淡水和陆源物供应对海盆内的海水结构和海水生产力有重要影响。当非洲夏季风强盛时,丰富的降水导致淡水和陆源物供应增加,浮游有孔虫 *G. obliquus*  $\delta^{18}\text{O}$  值出现负偏移,这正是地中海表层海水淡化的信号。碳同位素的变化原因较复杂,大洋水体中非有机碳的  $\delta^{13}\text{C}$  值为 0‰,而陆地或海洋沉积物中有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值可负偏移达 -23‰(Raymo *et al.*, 1997),所以初步认为河流输入量的增加减小了海水碳同位素的背景值,导致 *G. obliquus* 的  $\delta^{13}\text{C}$  也出现负偏移。

Corg/N 即为沉积物中有机碳含量与有机氮含量的比值,它可以反映沉积物中有机质的来源。通常海洋浮游生物产生的有机质中 Corg/N 比值为 6,若 Corg/N 比值超过 15,则认为沉积物中的有机质来源于陆地(Stax and stein, 1993)。Cape Spertivento 剖面中 Corg/N 平均值仅为 3,说明有机碳含量主要反映的是地中海表层生产力的变化,而不是尼罗河泛滥带来的陆源有机质的堆积。当然,岁差低值期 Corg/N 比值的相对高值(达到 3.5),也说明这时陆源物增加,是非洲夏季风的强盛引起尼罗河泛滥的结果。

有机碳和碳酸盐含量及其堆积速率变化与近期汪品先(2005)<sup>①</sup>提出的一项新的机理假说相吻合。现代大洋表层海水缺硅,致使硅藻的生产受抑制(李丽和汪品先, 2004)。当非洲夏季风强盛,尼罗河泛滥为地中海带来大量的营养物质和硅元素供应时,硅藻勃发,颗石藻生长受抑制,由于硅藻是有机碳泵的执行者,在地质记录中便留下硅质和有机质的沉积。当非洲夏季风转弱,河流输入物减少,硅元素供应不足,浮游植物群将以贫养的颗石藻为主,大洋碳酸盐泵起主要作用,在地质记录中留下碳酸盐沉积。

所以,这些记录是低纬地区风化作用和生物地球化学过程的结果。非洲季风影响了陆地风化作用

强度和河流输入大洋的硅元素供应量,从而引起大洋浮游植物群以及大洋“生物泵”类型的变化,而大洋沉积雨(rain ratio)中有机碳/无机碳比例的改变,最终引起大洋碳储库的组成发生变化。意大利早上新世地层的记录为这种假说提供了佐证,是强调气候变化的低纬过程机制的一个有力证据。

## 4 非洲季风记录中的轨道周期

### 4.1 Cape Spertivento 剖面的轨道周期分析

为进一步分析非洲季风的周期,对有机碳、碳酸盐含量及其堆积速率、*G. obliquus*  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  等古环境指标进行了频谱分析(图 6)。结果无一例外都显示出强烈的岁差周期,尤其以 23 ka 的岁差峰最为突出。这一方面固然与我们建立该剖面年代标尺的方法相关,另一方面也说明早上新世非洲季风主要受岁差控制。其中 *G. obliquus*  $\delta^{13}\text{C}$  频谱结果比较复杂,显示出与其他指标相反的风格,它的岁差周期较弱(刚刚超过 80% 检验标准),但 43 ka 和 52 ka 的周期却异常突出。

值得一提的是,由于 Cape Spertivento 剖面采样分辨率高达 2 ka 左右,频谱分析中出现的 10 ka 左右的半岁差周期是有意义的。低纬地区半岁差周期的机制存在着许多解释。Ruddiman(2000)曾提出季风记录存在阈值问题的假设。低纬地区夏季太阳辐射量的频谱分析结果中只有强烈的岁差周期,并不见其他周期,但如果把夏季辐射量的高值部分(超过  $490 \text{ W/m}^2$ )提取出来,频谱分析结果则存在 11 ka 左右的半岁差周期。所以地质记录出现半岁差周期,实际上是热带地区的季风系统对太阳辐射驱动的一种非线性响应。非洲夏季风带来降雨,能在地质历史上留下记录,但并不是任意强度的夏季风都能留下记录,必定存在一个阈值,只有超过这个阈值,即振幅较强的岁差周期驱动较强的夏季风,才能留下明显的地质记录。意大利海相地层的记录与这种假说是比较吻合的。Cape Spertivento 剖面 Cycle 6、21 和 22 对应于两个较弱的岁差周期或许正好就是这种表现。Corg%、Carbonate%、*G. obliquus*  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  频谱分析结果中存在丰富的半岁差周期,虽然强度较弱,但应该仍属于对该地区夏季太阳辐射量高值部分的响应。当然,地质记录是各种因素影响下的一种复杂综合体。季风强弱的变化应该都能留下记录,只是季风强度弱时,它的信号已经被别

①汪品先等, 2005。“暖池”区碳循环的演化——《国家重点基础研究发展规划》课题结题总结报告, 同济大学、中国科学院广州地球化学研究所, 4—48。

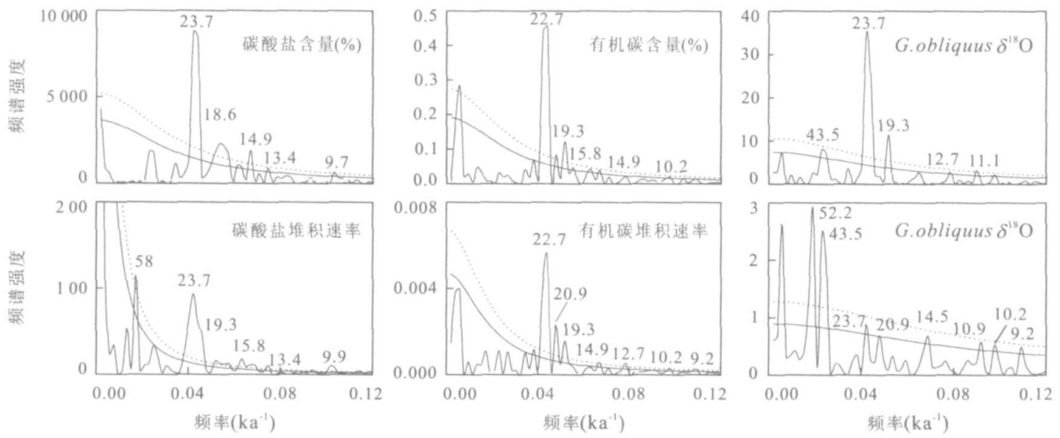


图 6 Cape Spertivento 剖面各个气候替代性指标的频谱分析. 实线和虚线分别代表 80% 和 90% 的检验标准. 图中周期的单位为 ka. 频谱分析的软件为 Redfit35 (Schluz and Mudelsee, 2002)

Fig. 6 Spectral analyses of proxy records from the Cape Spertivento Profile. The solid and dashed lines represent 80% and 90% confidence level, respectively. The unit for the periods is ka. We used “Redfit35” (Schluz and Mudelsee, 2002) to perform spectral analyses

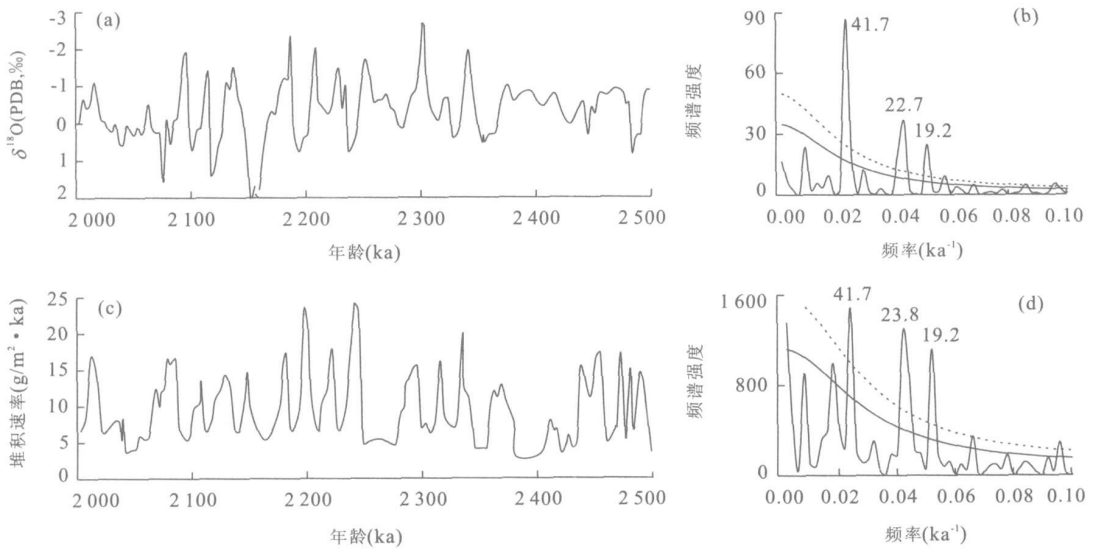


图 7 Rossello 综合剖面 2.0~2.5 Ma *G. ruber*  $\delta^{18}\text{O}$  记录(a)及其频谱分析(b). OOP659 站 2.0~2.5 Ma 风尘通量记录(c)及其频谱分析(d). (c)、(d)中实线和虚线分别代表 80% 和 90% 的检验标准. 图中周期的单位为 ka. 频谱分析的软件为 Redfit35 (Schluz and Mudelsee, 2002)

Fig. 7 2.0–2.5 Ma *G. ruber*  $\delta^{18}\text{O}$  record of the Rossello composite (a) and its spectral analyses (b). 2.0–2.5 Ma dust flux record of the OOP659 Site (c) and its spectral analyses (d). The solid and dashed lines represent 80% and 90% confidence level in (c) (d), respectively. The unit for the periods is ka. We used “Redfit35” (Schluz and Mudelsee, 2002) to perform spectral analyses

的影响因素掩盖了. 低纬地区的半年差周期仍是一个值得深入探讨的问题.

#### 4.2 北半球冰盖形成前后非洲季风的周期变化

北半球冰盖形成之后, 高纬冰盖扩张消融的斜率(4 万年)和偏心率(10 万年)周期作为一种全球信

号, 广泛的叠加在各种地质记录之中. 地质记录中各类轨道周期同时存在, 往往容易让人混淆地质事件的驱动机制. Cape Spertivento 剖面的记录远在北半球冰盖形成之前, 没有高纬信号的干扰, 应该保存了较为“纯净”的低纬过程.

选用 4.8~5.2 Ma 期间 Cape Spertivento 剖面碳酸盐百分含量与 *G. obliquus* 壳体稳定氧同位素作为比较对象, 分别与 2.0~2.5 Ma 期间 Rossello 综合剖面 *G. ruber* 壳体稳定氧同位素 (Lourens *et al.*, 1996) 以及 ODP659 站的风尘通量记录 (Tiedemann *et al.*, 1994) 进行对比。

如图 7, 2.0~2.5 Ma 期间地中海浮游有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  值的频谱分析结果中除了较强的岁差周期外, 还出现了频谱强度很大的斜率周期; 同样 ODP659 站风尘通量的频谱分析结果也同时出现了强烈的斜率周期和岁差周期。而此前 Cape Spertivento 剖面的记录只有强烈的岁差周期(图 6)。说明北半球冰盖形成之后, 非洲季风不再单纯地受低纬地区太阳辐射量变化的驱动, 而是同时受到冰盖旋回周期的驱动。频谱分析结果很清楚地说明了低纬过程的独立性和重要性。DeMenocal (1995) 在总结非洲岸外大西洋以及阿拉伯海的陆源碎屑记录时已经发现非洲季风的演化大致可以划分为以下几个期次, 即 2.8 Ma 以前以岁差周期为主, 2.8~1.0 Ma 期间斜率周期增强, 以及 1.0 Ma 之后, 即中更新世革命以后, 转变成以偏心率为主的 3 个阶段。

## 5 结论

本文运用沉积韵律与岁差周期的关系建立起了 Cape Spertivento 剖面的天文年代标尺。带宽数字滤波、交叉频谱分析等时间序列分析方法的结果证实了该年代标尺的可靠性。剖面各个古环境指标分析结果对应良好。在岁差低值期, 北半球较强的太阳辐射量驱动较强的非洲夏季风。与此同时, 地中海的有机碳堆积出现高值, 碳酸盐堆积出现低值, Corg/N 比值呈现高值, *G. obliquus*  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  值出现负偏移, 均说明此时尼罗河泛滥, 输入大量的陆源物和营养物, 硅质生物生产力出现高值, 钙质生物生产力受抑制。在岁差高值期, 各个指标的变化规律与上述相反频谱分析和对比结果进一步说明了早上新世非洲季风周期受岁差控制, 强度也受偏心率调幅的岁差控制, 是一种较为单纯的低纬过程。

致谢: 野外样品的采集由汪品先教授、刘志飞教授、田军副教授和李建如博士在意大利完成, 其间意大利 Padova 大学的 Domenico Rio 教授和 Luca 博士全程陪同并指导采样, 李前裕教授指导鉴定有孔虫, 成鑫荣教授和杨守业教授分别完成了同位素和

有机碳含量的测试工作, 实验工作得到了叶芳的帮助, 在此一并致谢。

## References

- Channel, J. E. T., Rio, D., Thunell, R. C., 1988. Miocene/Pliocene boundary magnetostratigraphy at Capo Spertivento, Calabria, Italy. *Geology*, 16: 1096–1099.
- Clark, P. U., Alley, R. B., Pollard, D., 1999. Northern hemisphere ice-sheet influences on global climate change. *Science*, 286: 1104–1111.
- DeMenocal, P. B., 1995. Plio-Pleistocene African climate. *Science*, 270: 53–59.
- Hilgen, F. J., 1991a. Astronomical calibration of Gauss to Matuyama sapropels in the Mediterranean and implication for the geomagnetic polarity time scale. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 226–244.
- Hilgen, F. J., 1991b. Extension of astronomically calibrated (polarity) time scale to the Miocene/Pliocene boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 107: 349–368.
- Hilgen, F. J., Brinkhuis, H., Zachariasse, W. J., 2006. Unit stratotypes for global stages: The Neogene perspective. *Earth Science Reviews*, 74: 113–125.
- Hilgen, F. J., Krijgsman, W., Langereis, C. G., *et al.*, 1995. Extending the astronomical (polarity) time scale into the Miocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 136: 495–510.
- Laskar, J., 1990. The chaotic motion of the solar system; A numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus*, 88: 266–291.
- Laskar, J., Joutel, F., Boudin, F., 1993. Orbital, precessional, and insolation quantities for the earth from –20 Myr to +10 Myr. *Astron. Astrophys.*, 270: 522–533.
- Li, L., Wang, P. X., 2004. Marine “bio-pumps”: Biomarkings of marine phytoplankton. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24: 73–79(4) (in Chinese with English abstract).
- Lourens, L. J., Antonarakou, A., Hilgen, F. J., *et al.*, 1996. Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical time scale. *Paleoceanography*, 11: 391–413.
- Raymo, M. E., Oppo, D. W., Curry, W., 1997. The Mid-Pleistocene climate transition: A deep sea carbon isotopic perspective. *Paleoceanography*, 12: 546–559.
- Rossignol-Strick, M., 1983. African monsoons, an immediate climate to orbital insolation. *Nature*, 304: 46–49.
- Rossignol-Strick, M., 1985. Mediterranean Quaternary sapropels, an immediate response of the African monsoon to variation of insolation. *Palaeogeography, Palaeocli-*



- matology, Palaeoecology*, 49: 237–263.
- Ruddiman, W. F., 2000. Earth's climate: Past and future. W. H. Freeman and Company, New York, 174–209.
- Schluz, M., Mudelsee, M., 2002. REDFIT: Estimating red noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computer & Geoscience*, 28: 421–426.
- Stax, R., Stein, R., 1993. Long-term changes in the accumulation of organic carbon in Neogene sediments, Ontong Java plateau. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 130. Ocean Drilling Program College Station, TX, 573–579.
- Thunell, R., Rio, D., Sprovieri, R., *et al.*, 1991. Limestone-marl couplets: Original of the early Pliocene Trubi marls in Calabria, southern Italy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61: 1109–1122.
- 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): 1–7 (in Chinese with English abstract)
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Stable isotope equilibrium test between benthic foraminifer *Cibicides* and *Unigerina* at ODP Site 1143 southern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Tiedemann, R., Sarnthein, M., Shackleton, N. J., 1994. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic  $\delta^8\text{O}$  and dust flux records from Ocean Drilling Program Site 659. *Paleoceanography*, 9: 619–638.
- Van Couvering, J. A., Castorini, D., Cita, M. B., *et al.*, 2000. The base of the Zanclean Stage and of the Pliocene series. *Episodes*, 23(3): 179–187.
- Wang, P. X., 2006. Orbital forcing of the low-latitude process. *Quaternary Sciences*, 26(5): 694–701 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 李丽, 汪品先, 2004. 大洋“生物泵”——海洋浮游植物生物标志物. *海洋地质与第四纪地质*, 24(4): 73–79.
- 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): 1–7.
- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 2004. 南海 ODP1143 站底栖有孔虫 *Cibicides* 和 *Unigerina* 稳定同位素值的均衡试验. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(1): 1–6.
- 汪品先, 2006. 低纬过程的轨道驱动. *第四纪研究*, 26(5): 694–701.