

## 南海沉积物漫反射光谱反映的 220 ka 以来东亚夏季风变迁

刘连文<sup>1,2</sup>, 郑洪波<sup>1</sup>, 翦知潘<sup>1</sup>

1. 同济大学深海地质国家重点实验室, 上海 200092  
2. 南京大学地球科学系表生地球化学研究所, 江苏南京 210093

**摘要:** 对南海越南岸外“太阳号”95航次 17954 孔 220 ka 以来的沉积样品进行了漫反射光谱分析, 并从中提取  $F1$  和  $F2$  两个主因子及亮度和红度等漫反射光谱特征值, 发现漫反射光谱  $F1$  值和亮度反映了沉积物中的碳酸盐含量, 而漫反射光谱  $F2$  值和红度反映了沉积物中的铁氧化物含量, 后者可用作东亚夏季风的替代性指标。17954 孔沉积物的漫反射光谱  $F2$  值显示, 倒数第二次冰消期东亚夏季风快速增长时间约在 129 ka; 本次工作还发现东亚夏季风在两次冰消期前的氧同位素 2 阶段和 6 阶段晚期各有一个异常强盛的时期。漫反射分析结果显示东亚夏季风主要受控于太阳辐射强度变化, 并明显地受低纬地区气候的影响。

**关键词:** 漫反射光谱; 东亚夏季风; 南海; 铁氧化物; 半岁差。

**中图分类号:** P53

**文章编号:** 1000-2383(2005)05-0543-07

**收稿日期:** 2005-07-17

## Visible Reflectance Record of South China Sea Sediments during the Past 220 ka and Its Implications for East Asian Monsoon Variation

LIU Lian-wen<sup>1,2</sup>, ZHENG Hong-bo<sup>1</sup>, JIAN Zhi-min<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The East Asian monsoon (EAM) is an integral part of the global climatic system. Comparison between marine and terrestrial records can improve our knowledge of the monsoon system and how it responds to changing global conditions. In this paper, reflectance spectroscopy analysis is used to characterize the sediments in core 17954, taken from the South China Sea and representing the past 220 ka. The results show that sediment brightness (factor 1) seems to reflect carbonate contents and its changes are similar to the benthic oxygen isotope. Sediment redness (factor 2), which is related to iron oxide content, seems to monitor paleoclimatic changes in the core. Iron oxide appears to be eroded from catchments and is transported by fluvial means into the SCS. Thus, redness increases (factor 2 decreases) at times of increased precipitation, that is, as monsoon strength increases. Our results indicate that the Monsoon Termination II occurred at ca. 129 ka based on orbital chronology. Two abnormally strong summer events occurred at the intervals just before the last two terminations, which are confirmed by other records around the world. A time series analysis of the factor 2 record indicates a half-precession frequency, which may correlate with the abnormally strong summer monsoon events, suggesting that the tropical ocean had a major effect on the East Asian summer monsoon.

**Key words:** visible reflectance; East Asian summer monsoon; South China Sea; iron oxide; half-precession.

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划项目 (No. G2000078501); 国家自然科学基金项目 (Nos. 90211019, 40303016).

**作者简介:** 刘连文 (1970—), 男, 博士、副教授, 从事地球化学和古环境方面的科研、教学工作。E-mail: liulw@nju.edu.cn

随着 ODP184 航次的实行和航次后研究工作的开展,南海已成为研究西太平洋地区环境演化的重要基地(汪品先等,2003a,2003b,2003c)。中外科学家通过对南海沉积物(包括生物成因的生源物质与来自陆地的陆源物质)的研究,提取了大量的海盆演化、季风变迁等气候和环境演化信息(汪品先等,2003a,2003b,2003c)。与来自生源物质丰富的信息(如有孔虫种属,有孔虫碳、氧同位素等)相比,来自陆源物质的信息相对不足。而来自陆地的信息是研究区域性环境演化的重要组成部分,因此,有必要开展进一步的工作,加强海陆沉积记录对比,以理解气候变化的动力学机制。

颜色是沉积物最明显的形态特征之一,颜色反射率也是深海大洋钻探的研究中所应用的重要物理指标参数之一(黄维等,2003)。由于不同矿物具有不同的反射光谱特征,通过测量沉积物的反射光谱曲线可以获取沉积物的物质组成变化,如通过颜色反射率可以指示碳酸盐含量变化,进而获得古环境演化信息;Ji *et al.* (2002)提出用漫反射光谱法测定黄土和古土壤中赤铁矿和针铁矿含量变化,认为洛川剖面 2.5 Ma 以来颜色变化与赤铁矿和针铁矿的相对含量有关(Ji *et al.*, 2001)。本次工作采用紫外/可见/近红外光谱仪对南海越南岸外“太阳号”95 航次 17954 孔 220 ka 来的沉积物进行了系统的漫反射光谱分析,其结果表明南海沉积物的漫反射光谱可用于反映碳酸盐和铁氧化物含量等变化,可用于指示东亚夏季风变迁。

## 1 样品采集与分析

样品来自中德合作开展的“太阳号”95 航次在南海越南岸外的 17954 孔(111°31.5'E, 14°47.7'N, 图 1)。该孔位于南海西部夏季上升流区,水深 1 515 m,沉积物岩性比较均一,为灰绿色粉沙质泥,无浊流沉积。柱状样长 1 149 cm,底部年龄约为 220 ka。本次研究采样间隔为 5 cm,共采集了 223 个样品,平均分辨率为 1 ka。该钻孔曾进行过详细的微体古生物和同位素等分析(黄宝琦等,2001; Huang *et al.*, 2003; Jian *et al.*, 2001),为本研究工作提供了较好的年代框架。

漫反射光谱分析参照 Ji *et al.* (2005)的方法,具体方法如下:取少量经研磨后的样品,在玻璃片上加蒸馏水调成泥浆,然后在低温下烘干,供漫反射光

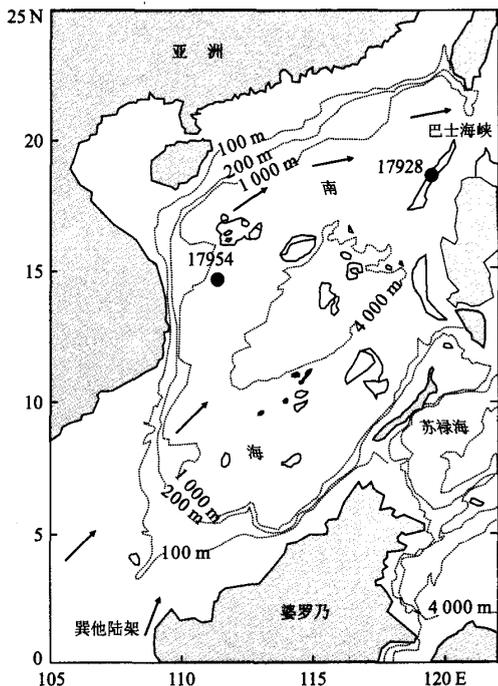


图 1 南海 17954 孔位置

Fig. 1 Location of core 17954 from South China Sea

谱测试。分析在南京大学表生地球化学研究所完成,所用仪器为带反射球装置的紫外/可见/近红外反射光谱仪(型号为 Perkin-Elmer Lambda 900),其分析范围包括近紫外(190~400 nm)、可见光(400~700 nm)和近红外(700~2500 nm),每隔 2 nm 采集一次漫反射光谱强度,漫反射强度是根据标准白板获得的。

根据获得的漫反射光谱强度,可以获得一系列的参数。本次工作采取 2 种方法提取漫反射光谱参数:(1)借鉴 Deaton and Balsam (1991)的方法,采用主成分分析方法,根据各个样品在可见光(400~700 nm)范围的反射光谱值,采用 SPSS 软件进行因子分析,可以获得 2 个高于置信度的因子(因子 F1 和因子 F2),两者的变化贡献了所有光谱变化的 99%以上,其中因子 F1 的变化贡献了 98%,因子 F2 贡献了 1%。这样,每个样品都可以获得 2 个因子的得分,这 2 个因子分别反映了沉积物最主要的 2 类物质的变化。(2)在 400~700 nm 波段间,按照 Ji *et al.* (2005)的方法,分别计算样品的红度和亮度值,其中,红度为样品在波长 630~700 nm 间的漫反射强度总和与波长 400~700 nm 间的漫反射强度总和的比值,而 400~700 nm 间的漫反射光谱强度的总和即为亮度(L\*),其变化与常用的亮度参数一

致,不过是根据反射光谱值计算所得的。

## 2 结果与讨论

### 2.1 漫反射分析结果及东亚夏季风代用性指标

作为世界上最大的边缘海,南海保存了大量的通过湄公河、红河和珠江等河流搬运过来的河流沉积物和风尘沉积物等陆源沉积物,其沉积速率高于开放性大洋达到一个数量级。同时,南海沉积物还含有含量变化较大的碳酸盐和蛋白石等生物成因物质,如 17954 孔上部 11 m 沉积物的碳酸盐含量在 11%~36%之间,平均为 23%。沉积物的这些变化在漫反射光谱特征值上将有所体现。

图 2 显示了 17954 孔最近 220 ka 来沉积物的漫反射光谱  $F1$ 、 $F2$ 、红度和亮度值以及碳酸盐含量和底栖有孔虫氧同位素的变化,时间标尺是参照 Jian *et al.* (2001)的方法确定的。从图 2 中可以看出,漫反射光谱  $F1$  变化与亮度变化几乎完全一致, $F1$  值高的样品对应的亮度值大;而漫反射光谱  $F2$  的变化与红度变化几乎完全一致(反相关), $F2$  值高的样品所对应的红度值低。因子分析已表明 17954 孔沉积物的漫反射光谱变化可以用  $F1$  和  $F2$  两个主因子的变化来指示,而  $F1$  与亮度曲线和  $F2$  与红度曲线的高度一致性说明,这两个因子所指示的物理意义是分别与亮度和红度相似的。因此,理解亮度和红度的变化就可以

说明漫反射光谱曲线所反映的环境变化。

亮度是颜色反射率的一个重要指标,反映了样品对可见光的反射能力。研究表明,南海沉积物的亮度反映了其中的碳酸盐含量(黄维等,2003)。从图 2 中可以看出,17954 孔亮度与漫反射光谱  $F1$  的变化和碳酸盐曲线变化基本一致,这一结果显示了碳酸盐含量是南海沉积物组成的最主要变化。海洋沉积物碳酸盐的含量受海洋生产力、陆源物质输入和海水对碳酸盐溶解度等多方面的影响,南海沉积物中碳酸盐的组成就有多种成因,并有“太平洋”型和“大西洋”型等多种碳酸盐分布模式(汪品先等,1995)。亮度和漫反射光谱  $F1$  值在间冰期(MIS1、MIS5 和 MIS7)高,而在冰期相对较低(MIS2~4、6 阶段),呈现“大西洋”型的碳酸盐旋回。从图 2 中还可以看出,南海 17954 孔的亮度和漫反射光谱  $F1$  曲线变化与反映底层水成分变化的底栖有孔虫氧同位素曲线非常吻合,由于反射光谱测试方便快捷快速,在今后的研究中,可以使用漫反射光谱进行初步的地层划分和年代框架的建立。

与亮度和漫反射光谱  $F1$  值不同,红度和漫反射光谱  $F2$  值表现了沉积物的另一特性,其曲线变化也明显与底栖有孔虫氧同位素组成不一样。红度反映的是波长 630~700 nm 间光谱反射率与整个可见光区间光谱反射强度的比值,这一区间是一些铁氧化物的特征反射峰,如赤铁矿的特征反射峰在

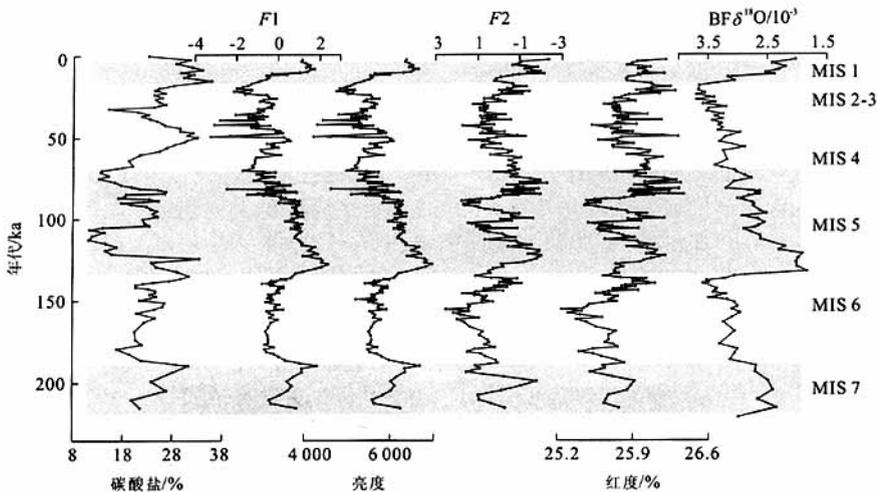


图 2 南海 17954 孔 220 ka 来沉积物漫反射特征值与碳酸盐含量及底栖有孔虫(BF)氧同位素变化

Fig. 2 Redness (factor 2), brightness (factor 1), as well as carbonate contents and benthic  $\delta^{18}\text{O}$  record of core 17954 from South China during the last 220 ka. Oxygen isotopic stages are also labeled at right (Jian *et al.*, 2001)

565 nm 处, 针铁矿的特征反射峰在 515 nm 处。因此, 红度常用来反映沉积物, 如湖泊、黄土等的铁氧化物含量, 如 Ji *et al.* (2005) 成功地应用漫反射光谱方法在亚洲内陆的青海湖用红度指示其沉积物中铁氧化物含量来揭示全新世来东亚季风变化。因此, 笔者认为 17954 孔样品的红度和漫反射光谱  $F_2$  值反映了其中的铁氧化物含量。虽然海洋沉积物中铁氧化物绝对含量并不高, 但由于其相对变化较大而且反射光谱对其敏感, 因此, 使用漫反射光谱可以方便地检测其变化, 在 17954 孔因子分析表明红度变化对整体漫反射光谱的贡献仅次于亮度。

南海海域沉积物中的铁氧化物主要来源于周围陆地输入, 在 17954 孔所在区域, 其陆源物质主要来自湄公河、红河和珠江等流域的输入, 沉积物中铁氧化物的含量反映了这些河流对南海中铁氧化物的输入强度, 因此也反映了源区的气候特征。由于研究区域的气候主要受东亚夏季风控制, 因此, 沉积物的红度和漫反射光谱  $F_2$  值反映的铁氧化物含量就间接地反映了东亚夏季风的强度。季风气候的最主要特点是降水量的巨大变化, 从而影响沉积物物源区化学风化程度和河流对风化产物的输送能力。当东亚夏季风强时, 源区化学风化强度高, 风化产生大量的铁氧化物, 同时, 源区增加的降雨量将更多的风化产物输入南海。因此, 周围流域输入南海的铁氧化物就多, 造成沉积物中铁氧化物含量增多, 在反射光谱上反映出红度较高和漫反射光谱  $F_2$  值较低; 反之, 当东亚夏季风较弱时, 气候干燥寒冷, 则周围流域输入南海的铁氧化物就少, 沉积物的红度就较低, 而漫反射光谱  $F_2$  值就较高。因此, 南海沉积物的红度和漫反射光谱  $F_2$  值可以作为东亚夏季风代用性指标。

## 2.2 漫反射光谱指示的东亚夏季风变迁

东亚夏季风起源于热带海洋, 控制着中国大陆的降水(陈隆勋等, 1991), 研究其变化规律, 有助于对今后气候变化进行预测, 因而具有重要的意义。然而, 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(Ding *et al.*, 1995); 另一种观点则强调太阳辐射的变化对东亚夏季风的控制作用(An *et al.*, 1991; Yuan *et al.*, 2004)。南海 17954 孔漫反射光谱分析结果为研究东亚夏季风的变迁规律提供了新的材料。

对比 17954 孔的漫反射光谱  $F_2$  曲线和底栖有孔虫氧同位素曲线(图 3), 可以发现漫反射光谱  $F_2$

曲线在冰期一间冰期的变化上与氧同位素曲线一致。在间冰期(氧同位素 1, 5, 7), 漫反射光谱  $F_2$  值较低, 显示当时东亚夏季风较强, 陆地输入南海的铁氧化物较多; 而在冰期(氧同位素 2~4, 6), 漫反射光谱  $F_2$  值较高, 显示当时东亚夏季风较弱, 陆地输入南海的铁氧化物较少。这个结果与黄土等其他众多记录是一致的, 显示东亚夏季风受冰期一间冰期气候变化的影响。

在总体呈现冰期一间冰期变化的基础上, 17954 孔漫反射光谱  $F_2$  曲线还显示出明显的 20 ka 岁差周期变化, 如在氧同位素 5 阶段, 漫反射光谱  $F_2$  曲线清楚地显示出 3 个峰, 可分别对应于 5a, 5c 和 5e。对比漫反射光谱  $F_2$  和北纬 30° 的 6 月份的太阳辐射曲线(图 3), 可以看到两者总体是吻合的。虽然本钻孔时间标尺可能存在误差, 对两条曲线进行精细对比没有实际意义, 但仍可以看出, 每个太阳辐射强的时段一般都对应于漫反射光谱  $F_2$  低的时期, 这一结果显示太阳辐射变化对东亚夏季风的控制作用。

17954 孔的底栖有孔虫氧同位素在最后两次冰消期的急剧变化为我们研究这两次冰消期东亚夏季风变化提供了相对准确的时间标尺。从图 3 可以看出, 在倒数第二个冰消期, 漫反射光谱  $F_2$  从最大值(对应夏季风最弱)变化到最小值(对应夏季风最强)的一半的时间大约是 129 ka, 与当地的太阳辐射强度变化相近, 而明显滞后于同期底栖有孔虫氧同位素的变化约 5 ka。同样处于东亚季风区的贵州董哥洞, 其石笋氧同位素约在 129 ka 发生突变(Yuan *et al.*, 2004), 倒数第二次冰消期在南海沉积中的记录与在石笋中的记录是吻合的, 这一结果同样表明太阳辐射变化对东亚夏季风的消长具有控制作用。但与石笋快速突变相比, 17954 孔漫反射光谱  $F_2$  值变化要平缓的多, 其变化斜率与底栖有孔虫氧同位素相似, 这可能是由于海洋沉积物中的铁氧化物和石笋中的氧同位素对东亚夏季风的响应机制不完全相同的缘故。

在氧同位素 6 阶段晚期, 倒数第二次冰期即将结束(约 145~136 ka)时, 17954 孔漫反射光谱  $F_2$  曲线存在一个异常的峰值, 显示当时东亚夏季风异常强盛。这个异常在董哥洞的石笋记录中也有明显的体现, 在约 139~135 ka 期间氧同位素偏负达  $2 \times 10^{-3}$ (Yuan *et al.*, 2004), 同样显示存在一个异常的季风强盛期。与石笋记录相比, 南海沉积记录延续的时间更长(长达 9 ka), 异常也更为显著。倒数第二

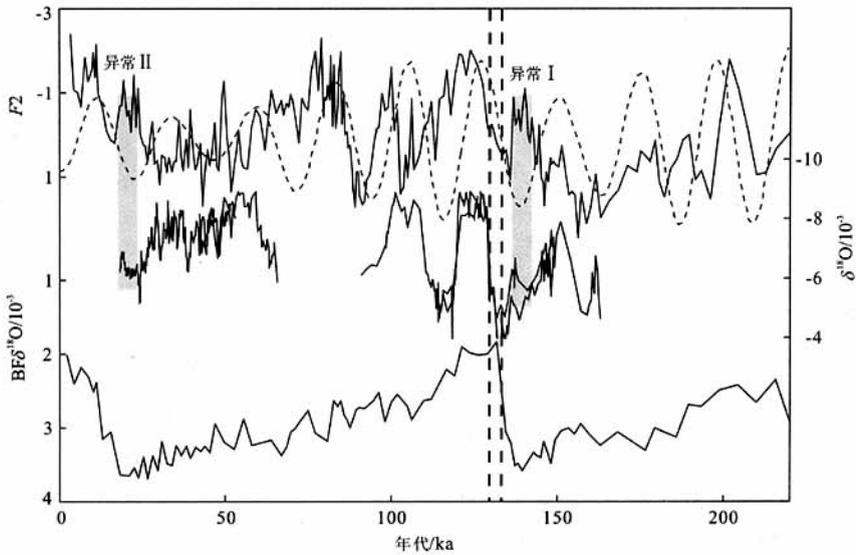


图 3 漫反射光谱指示的 220 ka 以来东亚夏季风变迁

Fig. 3 Comparisons of the factor 2 record (upper) and benthic  $\delta^{18}\text{O}$  record (bottom, Jian *et al.*, 2001) of core 17954 with the stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  record (middle) from Dongge Cave (Yuan *et al.*, 2004). Insolation at  $20^\circ\text{N}$  averaged over the months of June, July, and August is shown for comparison (dashed line). Vertical lines show half-height of factor 2 and benthic  $\delta^{18}\text{O}$  respectively during terminations II

图中上部为漫反射光谱值  $F_2$  和太阳辐射(虚线), 中间为董哥洞氧同位素, 下部为底栖有孔虫(BF)氧同位素

次冰消期前的这一异常现象也在其他大洋的沉积中有所记录, 如在南大洋的 MD97-2120 孔 Mg/Ca 比值温度在约 154~138 ka 期间显示出一个偏高达  $5.7^\circ\text{C}$  的异常高值(Pahnke *et al.*, 2003), 同样的记录也可以在北大西洋(McManus *et al.*, 1999)和热带太平洋(Lea *et al.*, 2000)发现. 由于这个异常发生在氧同位素 6 阶段晚期, 此时的太阳辐射强度正处于低谷, 而且在同时期的南极冰芯中并没有相应的记录. 因此, Pahnke *et al.* (2003)认为这个异常记录是北半球气候变化的产物. 从南海 17954 孔的漫反射光谱  $F_2$  曲线上看, 这种处于太阳辐射强度低谷期的异常强盛夏季风不仅发生在氧同位素 6 阶段晚期, 在氧同位素 2 期等多个时段也同样存在. 如在约 18~24 ka 的氧同位素 2 阶段, 南海 17954 孔的漫反射光谱  $F_2$  曲线显示出一个与氧同位素 6 阶段晚期相似的异常峰, 显示当时东亚夏季风同样呈异常强盛. 由于这些异常期恰好处于岁差变化的两个太阳辐射峰值之间, 因此, 我们认为这有可能是热带地区气候岁差周期在东亚夏季风变迁中的表现. 南海 17954 孔反射光谱  $F_2$  曲线的谱分析表明, 除了显著的 100 ka 偏心率周期外, 还有明显的 20 ka 岁

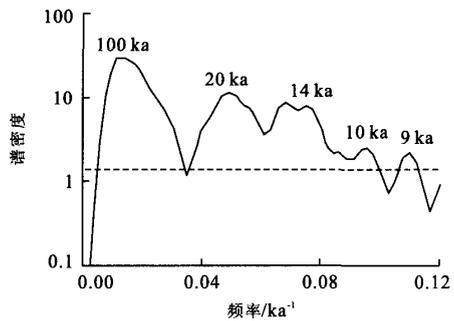


图 4 南海 17954 孔 220 ka 以来漫反射光谱  $F_2$  值谱分析结果  
Fig. 4 Spectral patterns of the factor 2 record from core 17954 during the past 220 ka. Numbers on the graph are spectral peaks in ka above the 90% confidence level (dashed line)

差周期和 14 ka、10 ka 和 9 ka 的半岁差周期(图 4). 由于太阳每年两次直射赤道区, 造成热带地区气候出现 10 ka 左右的半岁差周期(Short, 1991), 因此, 岁差、半岁差周期是热带气候的特征周期. 17954 孔反射光谱  $F_2$  曲线显著的岁差和半岁差周期, 显示了热带气候对东亚夏季风具有深远的影响.

### 3 结论

对南海越南岸外“太阳号”95航次17954孔220 ka来的沉积样品进行室内190~2500 nm漫反射光谱分析,从中提取两个最主要因子(F1和F2)及亮度和红度等特征值,结果表明:反射光谱F1和亮度反映了沉积物中的碳酸盐含量,其变化与底栖氧同位素曲线吻合,可作为地层划分的依据.反射光谱F2和红度反映了沉积物中的铁氧化物含量,其指示了源区化学风化强度,可用作东亚夏季风的替代性指标.

17954孔沉积物的反射光谱F2值记录表明,东亚夏季风主要受控于太阳辐射强度变化.在倒数第二次冰消期东亚夏季风快速增长时间约在129 ka,滞后于底栖有孔虫氧同位素约5 ka.反射光谱F2值记录还显示,东亚夏季风在最后2个冰消期前的氧同位素2阶段和6阶段晚期各有一个异常强盛的时期.谱分析表明,东亚夏季风呈现明显的100 ka偏心率周期、20 ka的岁差和10 ka左右的半岁差周期,表明低纬地区对东亚季风的深远影响.

### References

- An, Z. S., Kukla, G. J., Porter, S. C., et al., 1991. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of central China during the last 130 000 years. *Quaternary Research*, 36: 29–36.
- Chen, L. X., Zhu, Q. G., Luo, H. B., et al., 1991. The east Asian monsoon. China Meteorology Press, Beijing (in Chinese).
- Deaton, B. C., Balsam, W. L., 1991. Visible spectroscopy—a rapid method for determining hematite and goethite concentration in geological materials. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61: 628–632.
- Ding, Z. L., Liu, T. S., Rrtter, N. W., et al., 1995. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800 000 years. *Quaternary Research*, 44: 149–159.
- Huang, B. Q., Jian, Z. M., Cheng, X. R., et al., 2001. Late Quaternary upper-water column structure in upwelling areas of the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 46: 1741–1745.
- Huang, B. Q., Jian, Z. M., Cheng, X. R., et al., 2003. Foraminiferal responses to upwelling variations in the South China Sea over the last 220 000 years. *Marine Micropaleontology*, 47: 1–15.
- Huang, W., Liu, Z. F., Chen, X. L., et al., 2003. Searching physical indicators of carbonate contents of deep sea sediments. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(2): 157–162 (in Chinese with English abstract).
- Ji, J. F., Balsam, W. L., Chen, J., 2001. Mineralogic and climatic interpretations of the Luochuan loess section (China) based on diffuse reflectance spectrophotometry. *Quaternary Research*, 56: 23–30.
- Ji, J. F., Balsam, W. L., Chen, J., et al., 2002. Rapid and precise measurement of hematite and goethite concentrations in the Chinese loess sequences by diffuse reflectance spectroscopy. *Clays and Clay Minerals*, 250: 10–218.
- Ji, J. F., Shen, J., Balsam, W. L., et al., 2005. Asian Monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 61–70.
- Jian, Z. M., Huang, B. Q., Lin, H., et al., 2001. Late Quaternary upwelling intensity and East Asian monsoon forcing in the South China Sea. *Quaternary Research*, 55: 363–370.
- Lea, D. W., Pak, D. K., Spero, H. J., 2000. Climate impact of late quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 289: 1719–1724.
- McManus, J. F., Oppo, D. W., Cullen, J. L., 1999. 0.5 million years of millennial-scale climate variability in the North Atlantic. *Science*, 283: 971–975.
- Pahnke, K., Zahn, R., Elderfield, H., 2003. 340 000-year centennial-scale marine record of southern hemisphere climatic oscillation. *Science*, 301: 948–952.
- Short, D. A., Mengel, J. G., Crowley, T. J., et al., 1991. North GR. Filtering of Milankovitch cycles by earth's geography. *Quaternary Research*, 35: 157–173.
- Wang, P. X., 1995. The history of South China Sea during the past 150 ka. Tongji University Press, Shanghai, 96–107 (in Chinese).
- Wang, P. X., Jian, Z. M., Zhao, Q. H., et al., 2003c. Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep-sea records. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2549–2561.
- Wang, P. X., Tian, J., Cheng, X. R., et al., 2003b. Exploring cyclic changes of the ocean carbon reservoir. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2536–2548.
- Wang, P. X., Zhao, Q. H., Jian, Z. M., et al., 2003c. Thirty million year deep-sea records in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2524–2535.
- Yuan, D. X., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2004. Tim-

ing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, 304: 575-578.

附中文参考文献

陈隆勋,朱乾根,罗会帮,等,1991.东亚季风,北京:气象出版社,28-101.

黄宝琦,翦智潜,2001.南海晚第四纪上升流区上层水体结构的变化,科学通报,46: 948-952.

黄维,刘志飞,陈晓良,等,2003.寻找深海碳酸盐沉积含量的物理标志.地球科学——中国地质大学学报,28(2):

157-162.

汪品先,1995.十五万年来的南海,上海:同济大学出版社,96-107.

汪品先,翦智潜,赵泉鸿,等,2003a.南海演变与季风历史的深海记录.科学通报,48: 2228-2239.

汪品先,田军,成鑫荣,等,2003b.探索大洋碳储库的演变周期.科学通报,48: 2216-2227.

汪品先,赵泉鸿,翦智潜,等,2003c.南海三千万年的深海记录.科学通报,48: 2206-2215.

\*\*\*\*\*

(上接 542 页)

Xu, J., Wang, P. X., Huang, B. Q., et al., 2005. Response of planktonic foraminifera to glacial cycles; Mid-Pleistocene change in the southern South China Sea. *Mar. Micropaleontol.*, 54: 89-105.

Zhao, Q. H., Wang, P. X., 1999. Progress in Quaternary paleoceanography of the South China Sea: A review. *Quat. Sciences*, 6: 481-501 (in Chinese with English abstract).

1-9.

刘志飞, Colin, C., Trentesaux, A., 等, 2004. 南海南部晚第四纪东亚季风演化的粘土矿物记录. 中国科学(D辑), 34: 272-279.

涂霞, 郑范, 陈木宏, 2000. 南海南部 NS63-5 柱样揭示的晚第四纪以来的古海洋学特征. 热带海洋, 19: 36-44.

汪品先, 2005. 新时代亚洲形变与海陆相互作用. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 1-18.

汪品先, 翦智潜, 刘志伟, 1996. 南沙海区盛冰期的气候问题. 第四纪研究, 3: 193-201.

徐建, 汪品先, 黄宝琦, 等, 2004. 南海南部普林虫与“中更新世革命”. 地球科学——中国地质大学学报, 29(1): 7-14.

赵泉鸿, 汪品先, 1999. 南海第四纪古海洋学研究进展. 第四纪研究, 6: 481-501.

附中文参考文献

陈木宏,涂霞,郑范,等,2000.南海南部近 20 万年沉积序列与古气候变化关系.科学通报,45: 542-548.

黄宝琦,翦智潜,成鑫荣,等,2001.南海晚第四纪上升流区海水上层水体结构的变化.科学通报,46: 948-952.

李保华,赵泉鸿,陈民本,等,2001.南沙海区晚第四纪浮游有孔虫演化及其古海洋学意义.微体古生物学报,18: