

doi:10.3799/dqkx.2010.067

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

葛黄敏¹, 李前裕^{1,2}, 成鑫荣¹, 郑洪波¹, 贺娟¹

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 澳大利亚阿德莱德大学地球与环境科学学院, 阿德莱德 SA5005

摘要: 对南海北部 MD05-2904 孔 45 m 的连续沉积物中提取的浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* (白色) 进行稳定同位素分析, 得到晚 MIS 8 以来(时间跨度 257 ka, 平均时间分辨率 228 a) 的高分辨率沉积记录。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的频谱分析显示了强烈的岁差(23.4 ka、19.8 ka)、半岁差(11.7 ka、9.9 ka)周期。MD05-2904 孔 MIS 24 时间段的氧同位素记录了格陵兰冰心中发现的 Dansgaard/Oeschger 和 Heinrich 事件。与葫芦洞石笋记录及南海邻区浮游有孔虫氧同位素记录的对比显示了受季风控制的区域因素, 如降雨、河流输入导致的盐度变化等对表层海水组成的影响。氧同位素在 MIS 3、MIS 6 的早期以及 MIS 7.4 偏轻; 而在 MIS 5.5 偏重, 这种现象解释为降雨量和蒸发量共同作用的结果。而末次冰盛期高达 6570 cm/ka 的沉积速率反映了低海平面时孔位离岸距离缩短带来丰富的沉积物源。

关键词: 氧同位素; 地层学; 短期气候事件; 东亚季风; MD05-2904; 南海北部。

中图分类号: P736.22

文章编号: 1000-2383(2010)04-0515-11

收稿日期: 2009-11-08

Late Quaternary High Resolution Monsoon Records in Planktonic Stable Isotopes from Northern South China Sea

GE Huang-min¹, LI Qian-yu^{1,2}, CHENG Xin-rong¹, ZHENG Hong-bo¹, HE Juan¹

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

2. School of Earth and Environment Science, University of Adelaide, Adelaide SA5005, Australia

Abstract: Oxygen and carbon stable isotope records (with an average time resolution of 228 a) were obtained from Core MD05-2904 (19°27.32', 116°15.15', water depth 2066 m), using the mixed-layer dwelling planktonic foraminifer *Globigerinoides ruber* (white). The 45 m core spans from end of MIS 8 to the Holocene, representing the sediment record of the last 257 a. Strong precession periods (23.4 ka and 19.8 ka) were found from spectral analysis of both $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records, following with semi-precession cycles (11.7 ka and 9.9 ka). The high resolution $\delta^{18}\text{O}$ record of MD05-2904 reveals nearly all the Dansgaard/Oeschger and Heinrich events during MIS 2-4, as defined in the Greenland ice core record. A better correlation between MD05-2904 planktonic $\delta^{18}\text{O}$, the Hulu stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record and previously published planktonic $\delta^{18}\text{O}$ records from the SCS suggests that the planktonic $\delta^{18}\text{O}$ record is influenced by monsoon-dominated regional factors, such as rainfall and river discharge related salinity changes. Lighter $\delta^{18}\text{O}$ values in early MIS 3, early MIS 6 and MIS 7.4, and heavier values in MIS 5.5 are due to changes in precipitation and evaporation affected by monsoon. Sedimentation rates increased to 65-70 cm/ka in LGM, indicating more sediments when the site location was closer to the river mouth during glacial at lower sea level.

Key words: oxygen isotope; stratigraphy; millennial scale climate change; East Asian monsoon; MD05-2904; northern South China Sea.

太阳辐射量的季节性变化引起的海陆热量交换,是驱动季风的主要因素,导致海洋表层循环和水文条件的变异、生物生产量及沉积物组成方面的多样性(Wyrtki, 1961; Shaw, 1996; Wang *et al.*, 1999a, 1999b, 1999c; 陈木宏等, 2008a, 2008b; 李前裕等, 2008). 受季风影响,南海在风向、降雨以及陆源输入方面具有明显的季节性转变. 南海对夏、冬季风循环强度和持续时间变化反映灵敏,在陆源输入、大气与海洋循环以及与开放性太平洋的物质交换等方面都有很好的记录(Wang *et al.*, 2000). 从 20 世纪 90 年代开始,南海在研究与东亚季风相关的低纬气候多样性方面的主角地位日益明显.

冬季风主要受控于偏心率(10 万年)和斜率(4 万年)周期,伴随相对较弱的岁差(2 万年)周期,可以指示高纬气候变化的多样性(Wang *et al.*, 1999a; 翦知縯等, 2001; Beaufort *et al.*, 2003); 而夏季风则以强烈的岁差周期为特征(Boulay *et al.*, 2005; Clement *et al.*, 1999). 地质尺度上,亚洲夏、冬季风的强度变化在驱动临近大陆的侵蚀和风化(Clift, 2006)以及海气循环方面起着重要作用.

本次研究利用 MD05-2904 孔的岩心:(1)分析氧碳同位素并建立年代标尺,以寻找反映海陆相互作用的沉积信号;(2)比较氧同位素记录的短期气候变化与高纬冰心和低纬其他海洋记录的异同,了解南海季风区高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征;(3)研究东亚季风在不同阶段引发的降雨和温度变化以及陆源河流输入在该区域的综合作用.

1 材料与方法

MD05-2904 孔 ($19^{\circ}27.32'$, $116^{\circ}15.15'$, 水深 2 066 m)(图 1)取自 2005 年的 Marco Polo 第 1 航次(IMAGES XII). 该孔位于南海北部近珠江口的大陆坡,毗邻 ODP1146 站,在巴士海峡基岩和现代溶跃面之上,岩心总长 44.98 m. 周边陆源淡水输入引发的边缘海放大效应以及高沉积速率的连续记录,使得该站位成为研究高分辨率海陆相互作用以及不同时间尺度季风强度变化的理想材料.

整个柱状样为岩性均一的粉砂质沉积物,除最上层的 20 cm 为棕红色粘土外,大部分呈橄榄灰绿色,其中 2 1202 450 cm 的沉积物颜色较浅. 部分层段有轻微的生物扰动,中下部生物扰动遗迹偶有黄铁矿化现象出现(2 874 cm). 此外,在 543 cm 深度处出现厚约 2 cm 的火山灰(Laj *et al.*, 2005).

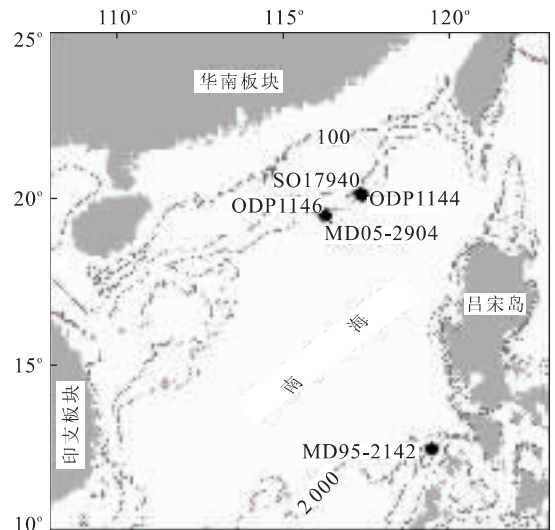


图 1 南海地图和 MD05-2904 孔及相关站位(等值线单位:m)
Fig. 1 Map of the SCS and location of core MD05-2904 and other sites mentioned

MD05-2904 以 2 cm 间隔取样,共得到 2 236 个样品. 样品处理流程如下:烘干,称重(W_1)→浸泡,筛选($360\ \mu\text{m}$)→再次烘干,称重(W_2),保存在玻璃瓶中待用. 本次研究中,以 4 cm 间隔挑取浮游有孔虫 *G. ruber*(白色, $300360\ \mu\text{m}$),共测定了 1 118 个样品的稳定同位素.

将每个挑好的样品置于浓度 99.7% 的酒精中,用超声振荡仪(40 kHz)振荡 3 次(35 s/次),然后将洗净的样品在 $60\ ^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中放置 5 h. 以 40 个样品为一组将其分批放入 Kiel III (Finnigan MAT 252) 质谱仪中,自动取样器把每个样品溶于 $70\ ^{\circ}\text{C}$ 的磷酸,进行稳定同位素测定. 上述测试在同济大学海洋地质国家重点实验室完成.

为了更好地确定末次冰期以来的年龄,本次研究对岩心上部做了 8 个 ^{14}C 测年(表 1). 测年工作在中科院广州地球化学研究所完成. 每个 AMS ^{14}C 年龄先减去 400 a 的表层海水碳储库年龄,然后用 Fairbanks *et al.* (2005)(<http://www.radiocarbon.ideo.columbia.edu/>) 研发的校正程序和数据库将 ^{14}C 测年结果转换成日历年,所得结果分布在 $1.315(\pm 20)\sim 26.649(\pm 187)\text{kaBP}$,并与深度之间存在较好的线性关系(图 2).

采用 Schulz and Mudelsee(2002)开发的“REDFIT”对 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录均作了轨道尺度的频谱分析(该软件能有效减小“红噪音”的影响). REDFIT 的运行参数设置为 $n_{\text{sim}}=1\ 000$, $m_{\text{ctest}}=T$, $\rho_{\text{pre}}=-99.0$, $o_{\text{fac}}=1.0$, $n_{50}=1$, $i_{\text{win}}=0$.

表1 MD05-2904孔AMS¹⁴C测年结果及站位年龄模式选取的控制点

Table 1 AMS¹⁴C results and the total control points of MD05-2904

深度(cm)	年龄(a BP)		调谐目标曲线	备注
	AMS ¹⁴ C年龄	日历年		
15~18	1 421±30	1 315±20		
171~174	6 582±36	7 472±32		AMS ¹⁴ C测年结果采用Faribanks <i>et al.</i> (2005)校正程序转化为日历年,每个控制点的年龄和深度取自测样深度和年龄的中值
299~302	9 756±60	11 189±48		
479~482	13 033±43	15 181±108		
646~649	14 811±80	17 724±215		
762~765	16 275±80	19 397±98		
986~989	21 308±101	25 534±172		
1 082~1 085	22 158±132	26 649±187		
1 387	45 525		MD95-2042	
1 559	55 624		MD95-2042	
1 711	65 188		MD95-2042	
1 791	68 770		MD95-2042	
1 943	81 389		MD95-2042	MIS5.1
2 031	86 820		Hulu+Sanbao δ ¹⁸ O	MIS5.2
2 287	107 500		Hulu+Sanbao δ ¹⁸ O	MIS5.3
2 339	116 200		Hulu+Sanbao δ ¹⁸ O	MIS5.4
2 471	128 940		LR04 Stack	MIS6.0
2 683	140 000		LR04 Stack	MIS6.2
3 043	156 000		LR04 Stack	MIS6.4
3 479	175 000		LR04 Stack	MIS6.5
4 135	240 000		LR04 Stack	MIS7.5
4 323	252 000		LR04 Stack	
4 498	257 000		LR04 Stack	

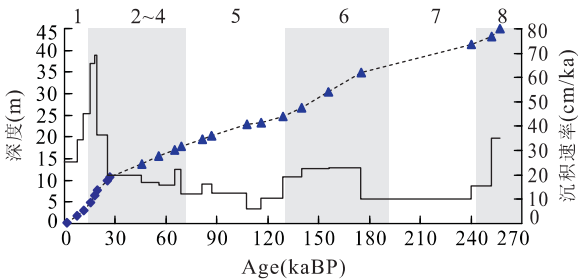


图2 MD05-2904 年龄-深度关系及沉积速率的变化

Fig. 2 Age/depth plot of age controlling points, as well as the liner sedimentary rate (LSR) of MD05-2904

实线代表沉积速率;虚线代表年龄与深度的线性关系;正方形为测年结果,三角形为年龄控制点,数字为氧同位素分期,阴影部分为冰期

2 结果与讨论

MD05-2904 的稳定同位素记录了 MIS 8 晚期至全新世明显的冰期-间冰期旋回,年龄跨度约 257 ka,平均时间分辨率约为 228 a,其中 MIS 1~4: 约 155 a;MIS 5: 约 396 a;MIS 6: 约 208 a;MIS 7~

8: 约 311 a.

2.1 年龄框架

MD05-2904 的年龄框架来自氧同位素地层学和 AMS¹⁴C 测年,用作参考的年代标尺包括 SPEC-MAP (Martinson *et al.*, 1987)、GISP2 (Grootes and Stuiver, 1997)、MD95-2042 (Shackleton *et al.*, 2000)、LR04 (Lisiecki and Raymo, 2005) 以及三宝洞 (Wang *et al.*, 2008). 顶部 0~1 083 cm 的年龄主要依据 AMS¹⁴C 测年,其中 1 083 cm 的 δ¹⁸O 峰值被认为与 GISP2 (Grootes and Stuiver, 1997) 中的 IS 8 (~38.32 ka) 相对应,而该点的 AMS¹⁴C 年龄 ~26.649 ka,此年代框架采用测年结果,但总的来说测年数据提供了上部 1 083 cm 较好的绝对年龄控制点(图 2);1 083~1 943 cm 的控制点通过与经天文调谐的年代标尺 MD95-2042 (Shackleton *et al.*, 2000) 进行对比得到;MIS 5 其他的控制点来自与三宝洞石笋记录 (Wang *et al.*, 2008) 的对比;MIS 6~8 的控制点来自与 LR04 的对比(全球 57 个站位底栖有孔虫氧同位素综合曲线, Lisiecki and Raymo, 2005);沉积

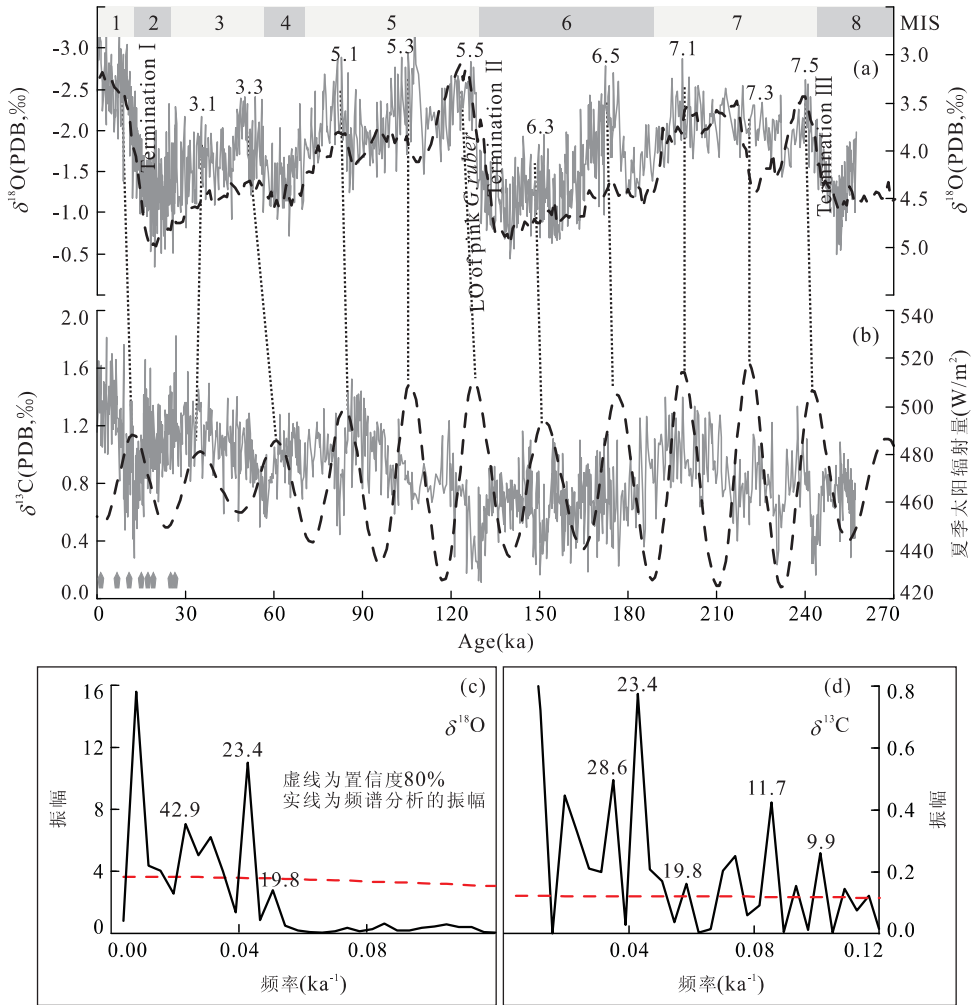


图 3 (a) $\delta^{18}\text{O}$ 年代标尺: 实线 = MD05-2904, 虚线 = LR04, (b) 实线 = MD05-2904 的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录, 虚线 = N21° 的夏季太阳辐射量, (c) 和 (d) 分别为 MD05-2904 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的频谱分析

Fig. 3 (a) Solid line is the age model for the line $\delta^{18}\text{O}$ record of MD05-2904, dashed line is the $\delta^{18}\text{O}$ stack of LR04, (b) solid line is the $\delta^{13}\text{C}$ record of MD05-2904, the dashed line is the summer insolation at N21°, (c) and (d) are the spectrum analysis results of *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of MD05-2904

图 a 中数字代表氧同位素分期; 图 b 中箭头代表 8 个 AMS¹⁴C 测年结果

记录的底部年龄通过沉积速率推算为 257 ka. 对上述方法得到的控制点(表 1)进行线性插值建立起 MD05-2904 孔的年龄框架(图 3).

$\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的频谱结果(图 3)显示强烈的岁差周期(23.4、19.8 ka)和半岁差周期(11.7、9.9 ka). 从生物地层学角度来看, 粉红 *G. ruber* 的未现面出现在 2455 cm(127.4 ka), 与先前关于印度—太平洋地区的研究工作中得到的年龄(120~130 ka)相一致(Thompson *et al.*, 1979).

2.2 $\delta^{18}\text{O}$

与其他边缘海及开放性大洋相比, 南海北部的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录以短期但频繁的负向偏移为特征(图 4) (Wang *et al.*, 1999a; Clemens and Prell, 2003;

Bühring *et al.*, 2004; Oppo and Sun, 2005). 本次研究中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在冰期和间冰期的差值 $\sim \Delta 1.2\text{‰} \sim 2.7\text{‰}$, 而在冰阶和间冰阶的差值 $\sim \Delta 1.01\text{‰} \sim 1.59\text{‰}$. 与邻近孔 ODP1144 ($\Delta 0.4\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$) (图 4) 和 MD97-2141 ($\Delta 0.3\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$) 相比, MD05-2904 明显的大幅度变化主要反映了该站位的地理位置及周边环境的影响, ODP1144 离河口较远, 而 MD97-2141 处于封闭的苏禄海, 均少有外来河流的输入.

2.2.1 千年尺度的变化 冰心研究中发现的快速气候变化(Dansgaard/Oeschger 和 Heinrich 事件)在 MD05-2904 中也有记录(图 4), 分别表现为 $0.69\text{‰} \sim 1.73\text{‰}$ 的负向偏移和 $1.01\text{‰} \sim 1.59\text{‰}$ 的

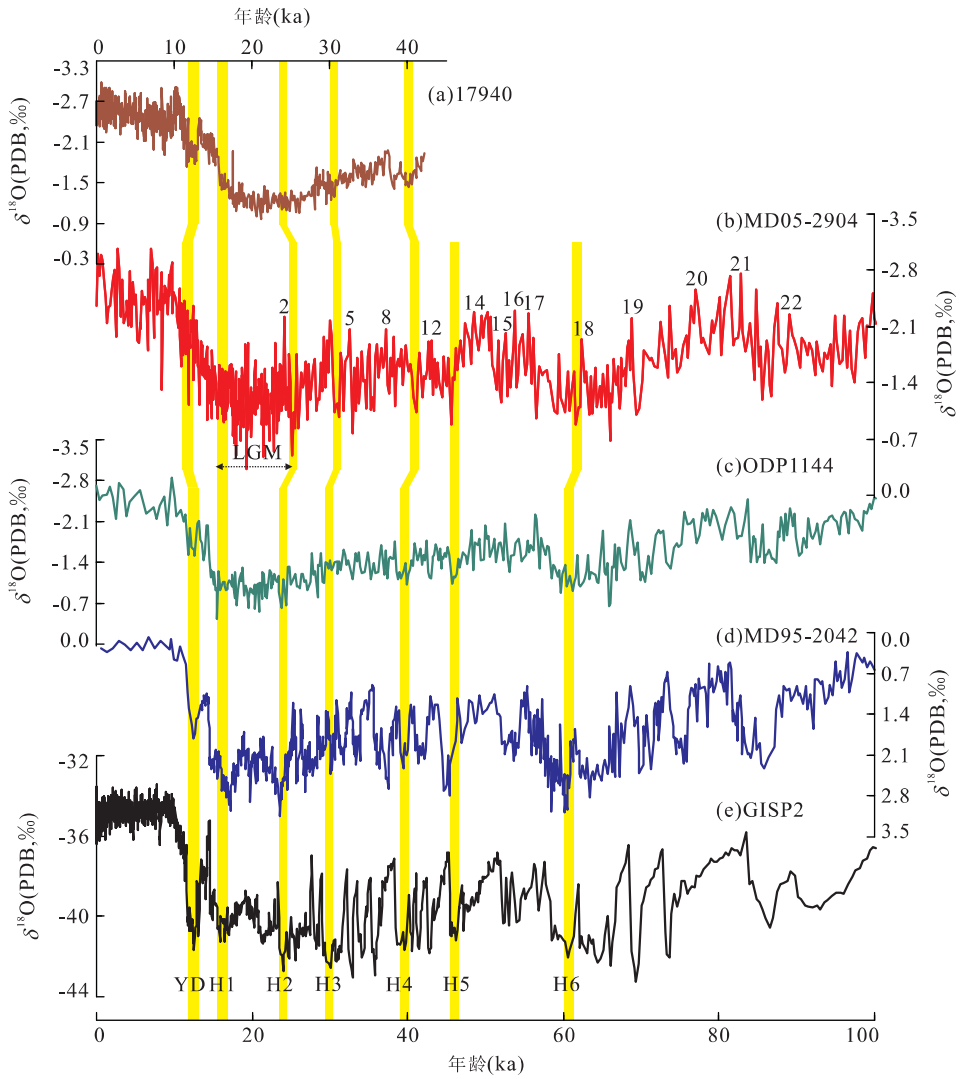


图 4 100 ka 以来 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的对比

Fig. 4 Correlations of $\delta^{18}\text{O}$ records over the last 100 ka

a. 南海北部 17940; b. 本次研究 MD05-2904; c. 南海北部 ODP 1144; d. 北大西洋深海钻孔 MD95-2042; e. 格陵兰 GISP2; YD=新仙女木事件; LGM=末次盛冰期; H1-H6=Heinrich 变冷事件; 数字=D/O 事件

正向偏移. 全新世 $\delta^{18}\text{O}$ 值跨度为 $-3.07\text{‰} \sim -1.89\text{‰}$. 在 9.98、7.41、4.73 和 3.15 ka 分别有 4 次快速变冷事件, 对应了 $\delta^{18}\text{O}$ 约为 1.26‰ 的增值, 时间间隔约 0.8~1.9 ka, 与附近站位的记录一致 (Wang *et al.*, 1999a; Oppo *et al.*, 2003), 可能对应于某些短期气候事件. 367~299 cm 处 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $\Delta 0.75\text{‰}$ 的正向偏移对应着 YD 事件, 可以发现跟邻近 ODP1144 (Bühring *et al.*, 2004) 具类似的双峰结构 (图 4), 年龄范围在 12.66~11.15 ka, 持续时间约 1510 a, 与 Hulu 洞 (1350 ± 100 a) 和格陵兰 (1240 ± 257 a) 的记录接近. 但是与冰心和大洋记录的急剧变冷现象相比, MD05-2904 $\delta^{18}\text{O}$ 关于 YD 的记录不明显, 呈由多次升降组成的一个变冷阶段, 从

SST 结果可知此时温度变幅仅 $1\text{ }^\circ\text{C}$ (贺娟, 2008). 这种现象在南海其他站位也存在 (图 4), 初步理解为南海的沉积过程除了受高纬冰盖的驱动作用, 还受到低纬热带气候变化及近岸作用的影响. YD 之前存在一次明显的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变轻 (399~367 cm), 最小值达 -2.36‰ , 标志着 Bölling/Allerød 变暖事件, 而 $\delta^{18}\text{O}$ 在 16.803 ka 快速增至 $\sim 0.92\text{‰}$, 则接近 H1 变冷事件. 整个 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中的最重值 (-0.33‰) 发生在 19.60 ka, 被认为是代表末次盛冰期 LGM (图 4).

MIS2-5 具明显高频的负向偏移, $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化在 MIS 2、3 为 $\Delta 1.02\text{‰} \sim 1.41\text{‰}$, 在 MIS 4 增至 $\Delta 1.53\text{‰}$, 到晚 MIS 5 则为 $\Delta 1.57\text{‰}$ (图 4), 对应

着 Heinrich 变冷之后,更快的回暖事件,该规律被称为“Bond”周期(Bond *et al.*, 1992, 1993; Bond, 1995). 这种短期 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏移事件不是干扰信号,而是真实的气候变化记录. 从图 4 中可以看到 H2、H3、H4、H6 均出现提前 ~ 1 ka 的现象.

总的来说,MD05-2904 锯齿状的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线包含了丰富的千年尺度变化信息(图 4). 关于千年尺度气候变化的驱动机制,Adkins *et al.* (1997) 将其解释为对北半球高纬地带气候变化的响应. 也有人认为是热带气候和季风系统与北半球的作用,而 ENSO 对热带季风乃至全球性的气候变化上都起着重要的驱动作用(Clement *et al.*, 1999),所以千年尺度的变化被认为是长时间尺度的 El Niño-Southern Oscillation (ENSO) 现象. MD05-2904 的沉积记录具有强烈的岁差周期,反映了低纬热带的主导作用. 但是记录的很多是区域性信号,表明该站位靠近珠江口和台湾海峡的地理位置使得对海平面升降和降雨量变化导致的陆源输入有很灵敏的反应,这一点也得到 Liu *et al.* (2003) 对沉积物组分研究结果的证实.

2.2.2 季风记录 与 SPECMAP 及其他深海记录 如 LR04(Laj *et al.*, 2005)、MD97-2140(Laj *et al.*, 2005)、Bassinot *et al.* (1994) 等相比,MD05-2904 的浮游 $\delta^{18}\text{O}$ 记录包含了一些值得深究的变化(图 5): (1) 一般来说 MIS 5.1、5.3、5.5 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值是逐渐变轻的,但是 MD05-2904 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 MIS 5.5 为 -2.64% ,与 MIS 5.1 (-2.73%) 和 MIS 6.5 (-2.56%) 接近,而比 MIS 5.3 (-3.15%) 和全新世 (-3.07%) 要重得多; (2) MIS 6.5 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻至和 MIS 7.1 接近,上述情况在 ODP1144 (Bühring *et al.*, 2004)、ODP1146 (Clemens and Prell, 2003) 以及 Sanbao 洞(Wang *et al.*, 2008) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中也出现; (3) 小冰期 MIS 7.4 (231.16 ka) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 幅度跟 SPECMAP (Martinson *et al.*, 1987) 的记录相比偏暖,这种反映了区域性特征的偏暖也出现在 ODP1144 (Bühring *et al.*, 2004) 和 ODP1145 (Oppo and Sun, 2005).

因为深海温度和盐度的均一性和抗干扰性比表层水要好得多,所以底栖有孔虫记录的深海信号比浮游的简单可靠,直接反映了高纬冰盖消长(Lisiecki and Raymo, 2005). MD05-2904 的浮游有孔虫记录跟南海其他浮游记录类似,而该站位的温度信息(贺娟, 2008) 则跟北大西洋的底栖有孔虫的氧同位素以及南极洲的温度信号相一致,类似情况在

Shackleton *et al.* (2000) 的工作中就已发现.

表层海水盐度(SSS)主要受控于区域性的降雨—蒸发平衡,而南海的盐度分布还受到周边河流淡水输入和表层环流的作用. 虽然盐度重建对了解上述气候变化过程有重要意义,但是目前还没有直接代表 SSS 变化的替代性指标,在古海洋学上发展的一些方法均受到许多质疑. 不过本文中还是依据通常的方法得到剩余氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{residual}}$ (图 5), 以间接地了解盐度变化特征,并试图用其解释 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中包含的区域性变化. 从图 5 中可以看出 $\delta^{18}\text{O}_{\text{residual}}$ 与全球海平面变化及温度变化具有很好的一致性,而与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{G. ruber}}$ 的对应关系比较复杂,两者主要呈相反的趋势,但是在氧同位素偏轻的时期(MIS 3.1、MIS 6.5 及 MIS 7.4),两者具有一致的变化趋势.

重复样品测定显示 MD05-2904 在 MIS 5.5 确实存在有如 ODP1146 (Clemens and Prell, 2003) 浮游有孔虫记录及三宝洞(Wang *et al.*, 2008) (图 5) 石笋记录中所存在的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏重事件. 石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录主要反映了受夏季风影响的降雨量变化,而降雨量也通过改变入海河口的径流量来影响边缘海沉积记录中有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化(Wang *et al.*, 1999b). 根据温度曲线可知这一时段的温度很高,对应着强烈的蒸发作用,而通过石笋记录可知中国南部在 MIS 5.5 的降雨量在冰消期之后也没有大幅度增加,这两者比值的变化引起盐度的增加,以此来解释 $\delta^{18}\text{O}$ 值在这一区段的偏重,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{residual}}$ 在这一时期达到整个记录的最重值,可以用来证实上述推断. 而在冰期中的偏暖阶段(MIS 3.1 和 6.5),石笋记录指示了偏高的降雨量,而温度变化则跟全球性的综合记录相一致,没有明显的升温,弱蒸发量和强降雨量的综合作用引起盐度偏低,表现为偏轻的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(图 5). 虽然先前的研究认为,在轨道尺度上,南海的 SSS 变化主要受控于海平面波动,而不是季风降雨的变化(Wang *et al.*, 1999a; Steinke *et al.*, 2006),但是本研究结合附近海域已有的研究结果(Clemens and Prell, 2003; Oppo *et al.*, 2003; Bühring *et al.*, 2004),认为季风带来的降雨量变化是引起低纬热带海域(如南海、苏禄海等)盐度变化的一个具有明显区域性特征的重要因素. 而最新的相关研究则提出降雨型 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的概念(贺娟等, 2008),也认为南海氧同位素受季风带来的降雨影响多于全球性变化的影响,具有特有的区域性.

2.3 $\delta^{13}\text{C}$ 和线性沉积速率

MD05-2904 的 $\delta^{13}\text{C}$ 也以高频快速变化为特征,

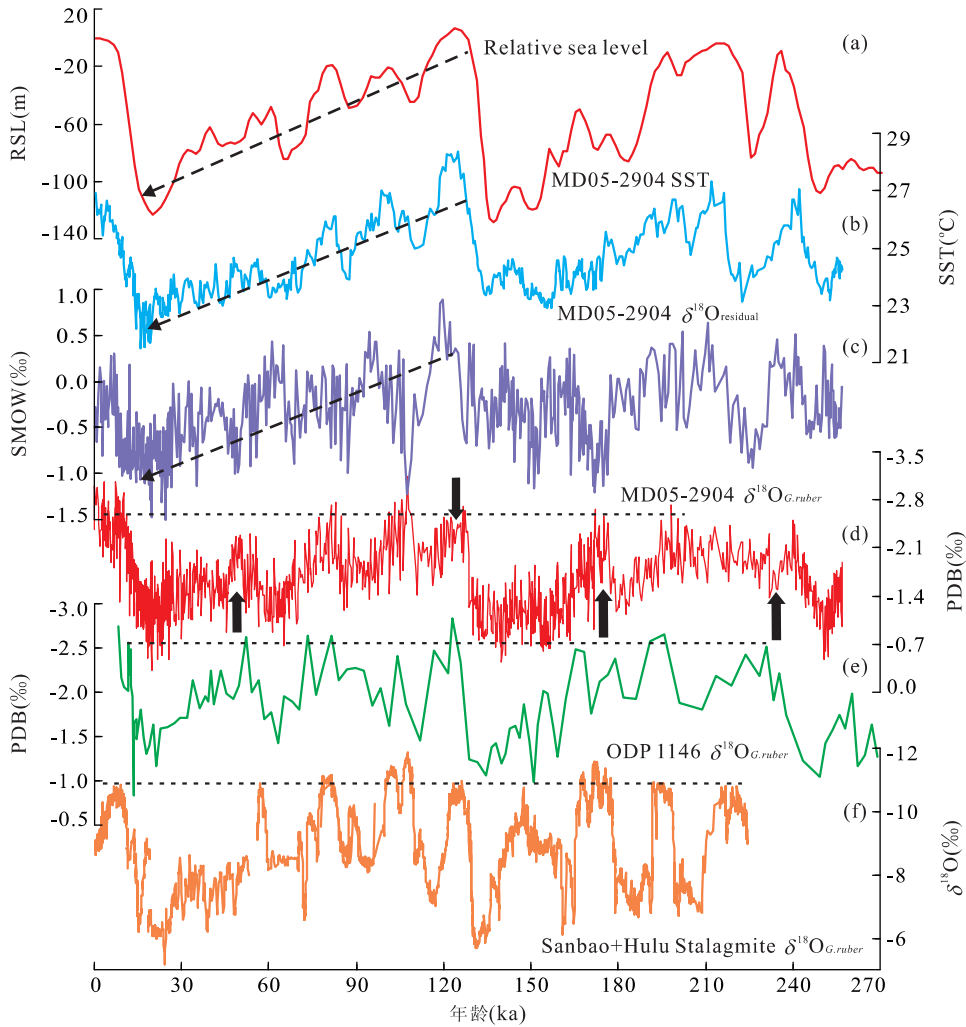


图 5 (a)相对海平面变化(Waelbroeck *et al.*, 2002), (b)通过 U_k^{37} 得出的 MD05-2904 孔的 SST 记录(数据来源于贺娟等, 2008), (c)MD05-2904 剩余氧同位素 $\delta^{18}O_{residual}$ 记录, (d)MD05-2904 $\delta^{18}O_{G,rubber}$, (e)ODP 1146 $\delta^{18}O_{G,rubber}$ (Clemens and Prell, 2003), (f)三宝洞 $\delta^{18}O$ 记录(Wang *et al.*, 2008)

Fig. 5 (a) Relative sea level (Waelbroeck *et al.*, 2002), (b) SST records derived from U_k^{37} at MD05-2904 (data from He *et al.*, 2008), (c) residual $\delta^{18}O$ record from the $\delta^{18}O_{G,rubber}$ of MD05-2904, (d) $\delta^{18}O_{G,rubber}$ record in this study, (e) $\delta^{18}O_{G,rubber}$ record in ODP 1146 (Clemens and Prell, 2003), (f) $\delta^{18}O$ record of Sanbao-Hulu caves (Wang *et al.*, 2008)
 a、b、c 中虚线为曲线变化趋势; d、e、f 中虚线指示间冰期时的氧同位素值; 黑色箭头代表本次研究中 $\delta^{18}O$ 的区域性偏移; c 图中剩余氧同位素 $\delta^{18}O_{residual}$ 的计算步骤: 先计算得到 $\delta^{18}O_{water}$, $\delta^{18}O_{water} (SMOW) = 0.27 + (SST(^\circ C) - 16.5 + 4.8 \times \delta^{18}O_{calcite} (PDB)) / 4.8$ (Bemis *et al.*, 1998); $\delta^{18}O_{water}$ 扣掉冰盖效应(Waelbroeck *et al.*, 2002)后即为 $\delta^{18}O_{residual}$

在 257 ka 的记录中呈现出重复旋回, 但有整体变重的趋势(图 3)。 $\delta^{13}C$ 与 $\delta^{18}O$ 一般呈相反的对立关系, 在冰期—间冰期的过渡段变轻, 而在间冰期—冰期的过渡段则变重, 但两者在 MIS 7 出现一致的变化趋势, 可能反映了生产力的变化。粗组分含量曲线(图 6)记录的信号比较单一, 主要是沉积物供给阶段性的变化, 在冰消期出现极高值。

MIS 5.5 的 $\delta^{13}C$ 值在整个记录中最轻, 仅 0.18‰, 与全新世的差值高达 $\Delta 0.29\%$ (图 3)。而粗组分在 MIS 5.5 出现极高值, 比全新世要高出 16%

(图 6), 均指示了这一时期丰富的物源供应。从北纬 21° 的太阳辐射量曲线上可知此时的辐射量(515 W/m²)也比全新世的要高(480 W/m²)(图 3)。除去地理位置上近河口而存在的陆源输入的影响, 我们推测太阳辐射通过影响季风强度的变化也能引发生产力的变化。

MD05-2904 的沉积速率在冰期时较高, 间冰期时则降至 6~13 cm/ka, 最大值约 70 cm/ka, 出现在 Preboreal 和早全新世时期(图 2), 而在 MIS 2~3 则仅为 20 cm/ka。沉积速率的这种变化趋势是

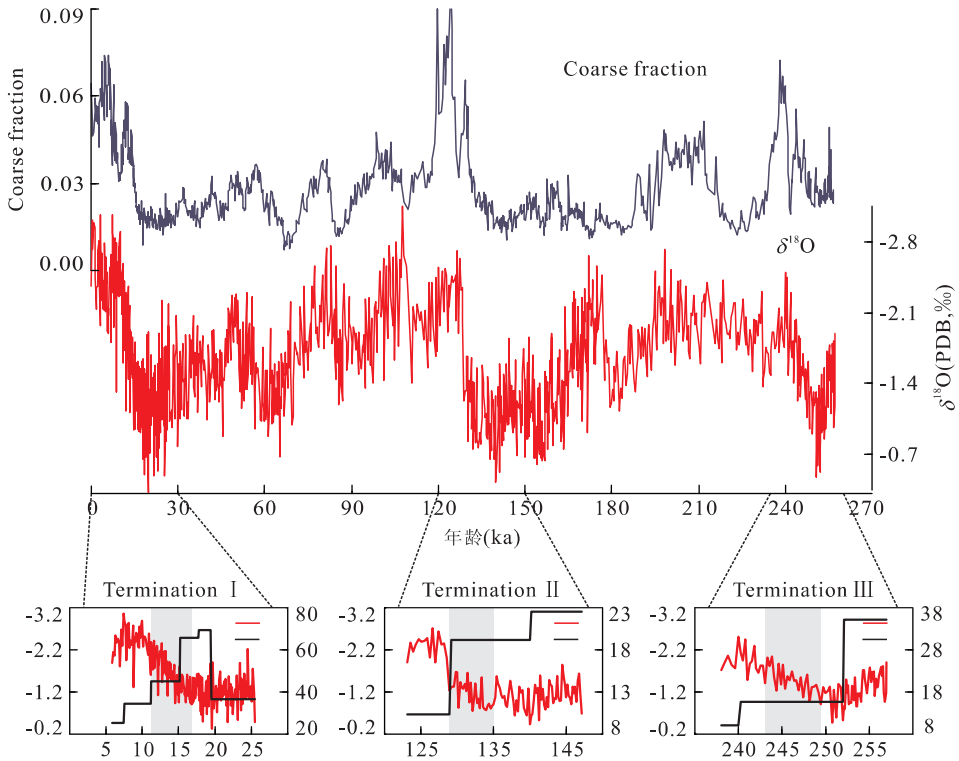


图 6 MD05-2904 粗组分含量及冰消期的沉积速率变化(阴影部分代表冰消期)

Fig. 6 Coarse fraction record of MD05-2904 and the difference of LSR during three Terminations I, II, III

LGM 末期沉积物供应的增多造成的快速堆积。Lüdmann *et al.* (2001) 认为沉积速率可能与随海平面升降而变化的珠江口陆源质的输入有关。随气温增高而上升的海平面, 导致 MD05-2904 所处位置离河口距离增大, 减少了陆源物的输入, 由此引起间冰期和间冰段的低沉积速率。相反, 冰期的高沉积速率则可以解释为低海平面时大面积出露的大陆架带来的丰富陆源供应(汪品先等, 1995)。

257 ka 的记录中包含了 3 次冰消期 Termination I (11.15 ~ 16.93 ka)、II (128.94 ~ 134.99 ka)、III (243.06 ~ 249.45 ka), 持续时间约 6 ka (图 6)。沉积速率在 3 个冰盛期—冰消期的过渡段都出现明显的增长, 在 Termination II 和 III 为 15 ~ 22 cm/ka, 而在 Termination I 则高达 65 ~ 70 cm/ka。

末次冰消期的沉积速率从 LGM 开始剧增至 65 ~ 69 cm/ka, 到 15.18 ka 就开始逐级下降至 45 ~ 34 cm/ka, 高沉积速率的持续时间约 4.5 ka。而 Termination II 的沉积速率主要维持在约 20 cm/ka 左右, 直到 128.94 ka 才开始降至约 10 cm/ka, 持续时间达 10 ka。Termination III 的沉积速率变化跟 Termination II 类似, 平稳地持续了约 11 ka 的低沉积速率 (约 16 cm/ka)。从 MD05-2904 的温度记录 (图 5) 可知, 在 14.79 ka 有一次高达 1.2 °C 的急剧降温, 而在

Termination II 中温度稳定上升, 直到 128.9 ka 才出现一次约 0.2 °C 的降温。可见, 温度差异引发的物源输入综合季风降雨影响, 在沉积过程中起重要作用。

在 MD05-2904 Termination I、II 和 III 对比中, $\delta^{18}\text{O}$ 均出现明显的变轻趋势, Termination II 的 $\delta^{18}\text{O}$ 最重值 (139 ka) 对应于末次冰期的最大冰盛期 (19.6 ka), 而以 130.1 ka 为中心的持续时间约 1330 a 的 $\delta^{18}\text{O}$ 变重过程跟 YD 相一致。但是相对于 Termination II、III, 全新世冰消期的变化周期短, 幅度大, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 高达 2.74‰。这反映了全新世更加频繁的气候变化。冰消期气候回暖, 降雨增多, 陆上风化加剧, 均导致了这个阶段沉积速率的明显增加, 而冰消期时快速增大的粗组分含量也证实了该时期沉积物输入的丰富。

3 结论

(1) MD05-2904 建立了过去 257 ka 的高分辨率氧碳稳定同位素时间标尺, 平均时间分辨率约 228 a, 最高分辨率在 MIS 2, 达到 82 a; (2) 高频、大幅度变化的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 与冰心和石笋中的短尺度气候变化对应良好, 再次证实了低纬热带和高纬地带

气候之间的相关性;(3)稳定同位素记录中出现的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 MIS 6.5 和 3.1 偏轻,在 MIS 5.5 偏重的现象,属于南海陆坡的区域现象,反映了热带季风引发的降雨量变化,温度影响的蒸发量变化及周边陆源输入综合作用的结果,盐度的变化较好地证实了这一说法;(4)跟全新世相比,MIS 5.5 具有明显的 $\delta^{13}\text{C}$ 低值和太阳辐射量高值,推测是低纬热带作用反映的季风信号;(5)末次冰消期沉积速率快速增高,推测是 LGM 时期陆架裸露,有更丰富的物质来源的缘故。

致谢:本次研究所用样品由 International Marine Global Change (IMAGES) 提供。感谢法国极地研究所 (Marion Dufresne) 及马可波罗航次 (MD-147) 全体人员钻取岩心的工作,也感谢中科院广州地化所沈承德的 AMS C^{14} 测定工作。

References

- Adkins, J. F., Boyle, E. A., Keigwin, L., et al., 1997. Variability of the North Atlantic thermohaline circulation during the last interglacial period. *Nature*, 390: 154—156. doi:10.1038/36540
- Bassinot, F. C., Beaufort, L., Vincent, E., et al., 1994. Coarse fraction fluctuations in pelagic carbonate sediments from the tropical Indian Ocean: a 1 500 kyr record of carbonate dissolution. *Paleoceanography*, 9(4): 579—600. doi:10.1029/94PA00860
- Beaufort, L., de, Garidel-Thoron, T., Linsley, B., et al., 2003. Biomass burning and oceanic primary production estimates in the Sulu Sea area over the last 380 kyr and the East Asian monsoon dynamics. *Marine Geology*, 201(1—3): 53—65. doi:10.1016/S0025—3227(03)00208—1
- Bemis, B. E., Spero, H. J., Bijma, J., et al., 1998. Reevaluation of the oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera: experimental results and revised paleotemperature equations. *Paleoceanography*, 13(2): 150—160. doi:10.1029/98PA00070
- Bond, G., Broecker, W., Johnsen, S., et al., 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 365(6442): 143—147. doi:10.1038/365143a0
- Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., et al., 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period. *Nature*, 360(6041): 245—249. doi:10.1038/360245a0
- Bond, G. C., 1995. Climate and the conveyor. *Nature*, 377(6548): 383—384. doi:10.1038/377383a0
- Boulay, S., Colin, C., Trentesaux, A., et al., 2005. Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450 ky: mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 228(3—4): 260—277. doi:10.1016/j.palaeo.2005.06.005
- Bühning, C., Sarnthein, M., Erlenkeuser, H., 2004. Toward a high-resolution stable isotope stratigraphy of the last 1.1 m. y.: Site 1144, South China Sea. *Proc. ODP, Sci. Results*, 184: 1—29.
- Chen, M. H., Zhang, L. L., Zhang, L. L., et al., 2008a. Distributions of radiolarian diversity and abundance in surface sediments of the South China Sea and their environmental implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(4): 431—442 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Zhang, L. L., Zhang, L. L., et al., 2008b. Radiolarian assemblages in surface sediments of the South China Sea and their marine environmental correlations. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 775—782 (in Chinese with English abstract).
- Clemens, S. C., Prell, W. L., 2003. Oxygen and carbon isotopes from site 1146, northern South China Sea. *Proc. ODP, Sci. Results*, 184: 1—8. doi:10.297310dp.proc.sr.184.214.2003
- Clement, A. C., Seager, R., Cane, M. A., 1999. Orbital controls on the El Niño/Southern Oscillation and tropical climate. *Paleoceanography*, 14(4): 441—456. doi:10.1029/1999PA900013
- Clift, P. D., 2006. Controls on the erosion of Cenozoic Asia and the flux of clastic sediment to the ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3—4): 571—580. doi:10.1016/j.epsl.2005.11.028
- Fairbanks, R. G., Mortlock, R. A., Chiu, T. C., et al., 2005. Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50 000 years BP based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals. *Quaternary Science Reviews*, 24(16—17): 1781—1796. doi:10.1016/j.quascirev.2005.04.007
- Grootes, P. M., Stuiver, M., 1997. Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10^{-3} to 10^5 -year time resolution. *Journal of Geophysical Research*, 102(C12): 26455—26470. doi:10.1029/97JC00880
- He, J., 2008. Biomarker records of environment change in the northern South China Sea (MD05-2904 core) since 260 kyr (Dissertation). Tongji University, Shanghai (in Chinese).

- He, J., Zhao, M. X., Li, L., et al., 2008. Biomarker records of environment change and SST records in the northern South China Sea (MD05-2904 core) since 260 kyr. *Chinese Science Bulletin*, 53 (11): 1324—1331 (in Chinese).
- Jian, Z. M., Wang, P. X., Zhao, Q. H., et al., 2001. Late Pliocene enhanced East Asian winter monsoon evidence of isotope and foraminifers from the northern South China Sea. *Quaternary Sciences*, 21(5): 461—469 (in Chinese with English abstract).
- Laj, C., Wang, P. X., Balut, Y., et al., 2005. MD147-Marco Polo IMAGES XIII Cruise Report. Institut Paul-Emile Victor (IPEV, France).
- Li, Q. Y., Zhao, Q. H., Zhong, G. F., et al., 2008. Deep water ventilation and stratification in the Neogene South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Lisiecki, L. E., Raymo, M. E., 2005. A Plio-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20, PA1003. doi: 10.1029/2004PA001071
- Liu, Z., Trentesaux, A., Clemens, S. C., et al., 2003. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea; implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years. *Marine Geology*, 201(1—3): 133—146. doi: 10.1016/S0025—3227(03)00213—5
- Lüdmann, T., Wong, H. K., Wang, P. X., 2001. Plio-Quaternary sedimentation processes and neotectonic of the northern continental margin of the South China Sea. *Marine Geology*, 172(3—4): 331—358. doi: 10.1016/S0025—3227(00)00129—8
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., 1987. Age dating and the orbital theory of the Ice Ages; development of a high-resolution 0 to 300 000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27(1): 1—29. doi: 10.1016/0033—5894(87)90046—9
- Oppo, D. W., Linsley, B. K., Rosenthal, Y., et al., 2003. Orbital and suborbital climate variability in the Sulu Sea, western tropical Pacific. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(1): 1—20. doi: 10.1029/2001GC000260
- Oppo, D. W., Sun, Y., 2005. Amplitude and timing of sea-surface temperature change in the northern South China Sea; dynamic link to the East Asian monsoon. *Geology*, 33(10): 785—788. doi: 10.1130/G21867.1
- Schulz, M., Mudelsee, M., 2002. REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computer & Geosciences*, 28(3): 421—426. doi: 10.1016/S0098—3004(01)00044—9
- Shackleton, N. J., Hall, M. A., Vincent, E., 2000. Phase relationships between millennial-scale events 64 000—24 000 years ago. *Paleoceanography*, 15(6): 565—569. doi: 10.1029/2000PA000513
- Shaw, P. T., 1996. Winter upwelling off Luzon in the north-eastern South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 101(c7): 16435—16448.
- Steinke, S., Chiu, H. Y., Yu, P. S., et al., 2006. On the influence of sea level and monsoon climate on the southern South China Sea freshwater budget over the last 22 000 years. *Quaternary Science Reviews*, 25 (13—14): 1475—1488. doi: 10.1016/j.quascirev.2005.12.008
- Thompson, P. R., Bé, A. W. H., Duplessy, J. C., et al., 1979. Disappearance of pink-pigmented Globigerinoides ruber at 120 000 yr BP in the Indian and Pacific Oceans. *Nature*, 280: 554—558. doi: 10.1038/280554a0
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., et al., 2002. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthonic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews*, 21 (1—3): 295—305. doi: 10.1016/S0277—3791(01)00101—9
- Wang, L. J., Sarnthein, M., Pflaumann, U., et al., 1999a. East Asian monsoon climate during the late Pleistocene; high-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology*, 156(1—4): 245—284. doi: 10.1016/S0025—3227(98)00182—0
- Wang, L. J., Sarnthein, M., Erlenkeuser, H., et al., 1999b. Holocene variations in Asian monsoon moisture; a bidecadal sediment record from the South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 26(18): 2889—2892. doi: 10.1029/1999GL900443
- Wang, L. J., Sarnthein, M., Grootes, P. M., et al., 1999c. Millennial reoccurrence of century-scale abrupt events of East Asian monsoon; a possible heat conveyor for the global deglaciation. *Paleoceanography*, 14 (6): 725—731. doi: 10.1029/1999PA900028
- Wang, P. X., Prell, W. L., Blum, P., et al., 2000. Proceeding of the ocean drilling program, initial reports, South China Sea, Vol 184. Texas A&M University, College Station, TX, USA.
- Wang, P. X., Wang, L. J., Bian, Y. H., et al., 1995. The South China Sea since 150 ka. Tongji University Press, Shanghai (in Chinese).
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2008. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224 000 years. *Nature*, 451: 1090—1093. doi: 10.1038/nature06692

Wyrski, K., 1961. Physical oceanography of the Southeast Asia waters. *Geophysical Research Letters*; 1—195. doi: 10.1029/96JC01064

附中文参考文献

陈木宏,张兰兰,张丽丽,等,2008a. 南海表层沉积物中放射虫多样性与丰度的分布与环境. *地球科学——中国地质大学学报*,33(4): 431—442.
 陈木宏,张兰兰,张丽丽,等,2008b. 南海表层沉积物中放射虫的组合特征与海洋环境. *地球科学——中国地质大学学报*,33(6): 775—782.
 贺娟,2008. 南海北部(MD05-2904 柱样)26 万年生物标记物

记录的古环境变迁(博士学位论文). 上海:同济大学.
 贺娟,赵美训,李丽,等,2008. 南海北部 MD05-2904 沉积柱状样 26 万年以来表层海水温度及陆源生物标记物记录. *科学通报*,53(11): 1324—1331.
 李前裕,赵泉鸿,钟广法,等,2008. 新近纪南海深层水的增氧与分层. *地球科学——中国地质大学学报*,33(1): 1—11.
 汪品先,王律江,卞云华,等,1995. 十五万年来的南海. 上海:同济大学出版社.
 翦知纘,汪品先,赵泉鸿,等,2001. 南海北部上新世晚期东亚冬季风增强的同位素和有孔虫证据. *第四纪研究*,21(5): 461—469.

《地球科学——中国地质大学学报》
 2010 年 第 35 卷 第 5 期 要目预告

青藏高原新生代构造岩相古地理演化及其对构造隆升的响应	张克信等
从青藏高原新生代构造隆升的时空差异性看青藏高原的扩展与形成	王国灿等
青藏高原新生代以来的气候环境演化	洪汉烈等
青藏高原北缘造山带早新生代构造隆升的热年代学证据	王岸等
西藏南部吉隆盆地中新世—早更新世孢粉组合与古环境变化	徐亚东等
西藏南部吉隆盆地中新世—早更新世介形虫动物群	陈奋宁等
西藏吉隆盆地沃马剖面元素地球化学特征及环境指示意义	邱海鸥等
青海循化盆地新近纪磁性地层学及其对青藏高原东北缘隆升的年代学制约	季军良等
青藏高原东北缘循化盆地渐新世—上新世沉积相与沉积演化	张键钰等
青海循化盆地渐新世晚期—中新世沉积地层中常量、微量元素分布对气候演化的响应	叶荷等
青海循化盆地中新统沉积物粘土矿物特征及其古气候指示意义	王粉丽等
青海循化盆地晚更新世沉积序列古气候	韩芳等
柴达木盆地大柴旦地区长山梁古近纪孢粉组合序列与地层对比	路晶芳等
青藏高原东缘都江堰湖相沉积 MIS3a 阶段的快速气候变化记录	林晓等
青藏高原四川若尔盖大骨节病区水环境致病因素	甘义群等
青藏高原拉萨河流域地表径流同位素空间分布特征	余婷婷等
巫山黄土粒度特征及其对成因的指示	李长安等
巫山黄土的磁组构特征及成因	张玉芬等