

南海北部 1144 站中更新世浮游有孔虫 的千年尺度古气候记录

郑 范¹, 李前裕^{2,3}, 陈木宏¹

1. 中国科学院南海海洋研究所, 广东广州 510301

2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

3. 阿德莱德大学地球与环境科学学院, 澳大利亚 SA5005

摘要: 南海北部 ODP 1144 站中更新世气候转型时期的浮游有孔虫在千年尺度上以高频率变化为主要特征。冰期旋回主要周期在 0.9 Ma 由 41 ka 转变为 100 ka, 浮游有孔虫组合也随冰期旋回出现大量的冷水种。据转换函数得出的表层水降温高达 10 °C 发生在 0.9~0.6 Ma 间的转型过渡期, 跨越 MIS22、20、18、16 四大冰期。同时, 温跃层深度呈阶梯式变浅, 在 MIS20 上升至 65 m 左右。所以, 南海北部上层水体环境在中更新世气候转型期出现比末次冰期更重的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 温跃层变浅, 深水种含量降低或消失, 突出了边缘海区南北气候梯度反差和冬季风在冰期增强的讯号。南海南北部的环境差异与东西太平洋的差异, 共同表明低纬过程在气候变化中的重要性。

关键词: 冰期旋回; 中更新世; 气候转型; 冬季风; 浮游有孔虫; 南海。

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2006)06-0780-07

收稿日期: 2006-03-06

A Millennial Scale Mid-Pleistocene Paleoclimate Record of Planktonic Foraminifera from the Northern South China Sea Site 1144

ZHENG Fan¹, LI Qian-yu^{2,3}, CHEN Mu-hong¹

1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

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

3. School of Earth and Environmental Sciences, University of Adelaide, SA 5005, Australia

Abstract: Planktonic foraminifera results from ODP Site 1144 in the northern South China Sea indicate that the Mid-Pleistocene climate transition is characterized by high-frequency changes on the millennial scale. In pace with glacial-interglacial cycles after the dominant glacial cyclicity shifted from 41 ka to 100 ka over the ~0.9 Ma, sudden increases in the abundance of cool-water planktonic foraminifera species became more evident. The SST variations estimated from transfer function show large decreases of up to 10 °C during the four major glacial periods of MIS22, 20, 18 and 16 between 0.9–0.6 Ma. Cooler conditions in glacial times also caused the thermocline depth to shoal in steps to a minimum of about 65 m at MIS20. Therefore, during the Mid-Pleistocene climate transition, the upper ocean water environment in the northern South China Sea was marked by $\delta^{18}\text{O}$ values heavier than the last glacial maximum, a shoaled thermocline, and significant decrease to almost complete absence of several deep-water planktonic foraminiferal species, amplifying the paleoclimatic signals of SST contrasts between the northern and southern South China Sea and a strengthened winter monsoon on the millennial scale. Together with the E-W equatorial Pacific record, the N-S contrasts in the South China Sea demonstrate the significance of low latitude process in climate change.

Key words: glacial cycle; Mid-Pleistocene; climate transition; winter monsoon; planktonic foraminifera; South China Sea.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 4999560, 40476030, 40576031); 国家重大基础研究计划 (No. G2000078500); 中国科学院知识创新项目 (No. KZCX3-SW-220).

作者简介: 郑范(1955—), 女, 助理研究员, 主要从事海洋微体古生物研究. E-mail: zhf@scsio.ac.cn

0 引言

第四纪冰期旋回的主要特征,是气候的主要周期在距今 0.9 Ma 从早期的 40 ka 周期转向晚期的 100 ka 周期,直接影响着现代气候模式的形成与演化(Prell, 1982; Berger *et al.*, 1993). 早期研究大多认为此次气候周期转型是骤变性的,即“中更新世革命(MPR)”,后来的工作都表明周期改变是渐进式的,有几万年的过渡期,即“中更新世气候转型(MPT)”,尽管这种转型是由何种机制引起的尚不清楚(Shackleton, 2000; Wang *et al.*, 2001a, 2001b). 综合研究更多沉积记录将提供线索来解答为什么气候周期会转变,特别是研究那些有良好年龄控制、有足够时间分辨率、有较好覆盖区域的沉积剖面(Wang *et al.*, 2001b).

据统计,平均分辨率达 2~6 ka 的中更新世氧同位素剖面,全球至今只有 5 条,包括南海南部 ODP 1143 孔的长序列剖面(Wang *et al.*, 2001b). 本文试用南海北部 ODP 1144 孔特有的高堆积速率连续沉积物材料,通过分析浮游有孔虫组合的变化,结合浮游氧同位素测试结果,探讨中更新世气候转型在 1 ka 左右尺度上的特征以及冬季风增强的生物指标,为重建西太平洋暖池边缘地区冰期旋回的详细演化历史提供依据.

1 材料和方法

ODP 1144 站位于东沙群岛海区,20°3.18'N, 117°25.14'E,水深 2 037 m(图 1)(Wang *et al.*, 2000). 在该站位钻井 3 口,合成深度共 519.19 mcd(以下简称 m),终孔地层为早更新世. ODP 1144 站的平均沉积速率高达 49 cm/ka,是南海目前已知沉积速率最高的站位. 所获沉积物主要以源自南海北部大陆架的碎屑成分为主,其次为碳酸盐(10%~20%)和少量生物硅(<5%)(Shao *et al.*, 2001). 浮游有孔虫氧同位素分析表明 500 m 以上的岩心为连续沉积,502 m 左右有一沉积间断(Bühring *et al.*, 2004).

供本文分析的样品选自 ODP 1144 站 300.82~518.11 m 井段,共计取样 475 个,取样间隔多为 30~70 cm,时间分辨率从 300 a~1 500 a 不等,平均为 1 100 a 左右. 所有样品经标准微体古生物方法处理后,从 >0.154 mm 的组分中进行浮游有孔虫的

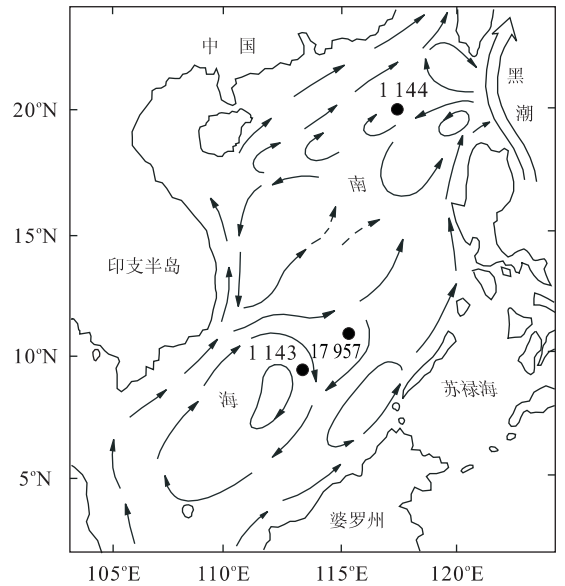


图 1 ODP 1144 站位图(Wang *et al.*, 2000)

Fig. 1 Location of ODP Site 1144 and other site localities in the South China Sea

箭头指示夏季主要表层水流方向

分类鉴定和统计,每个样品鉴定浮游有孔虫平均 430 个左右,统计结果经转换函数 FP-12E(Thompson, 1981)处理,推算古水温变化,并对比浮游有孔虫氧同位素曲线,重点讨论中更新世转型时期浮游有孔虫生物群在不同冰期旋回所反映的气候变化特征.

2 年龄框架

ODP 1144 站的年龄框架主要依据浮游有孔虫氧同位素分析结果(Bühring *et al.*, 2004),并有若干生物事件与火山灰层作为定年辅助. 浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 始现面见于 313 m,在 MIS14 下部,估算年龄为 0.55 Ma. 大量火山玻璃见于 386 m,为印度太平洋地区 0.78 Ma 左右发生的大规模火山喷发的产物(Zhao *et al.*, 1999). *Pulleniatina obliquiloculata* 在 501 m 处由左旋壳向右旋壳改变,代表着该种在 1.6 Ma 左右最新的一次旋向变化(Kennett and Srinivasan, 1983). 小型钙质超微化石 *Gephyrocapsa* (<0.004 mm) 高峰期的末现面在 499.19 m,年龄应为 1.01 Ma,这两桩生物事件表明在 500 m 附近有一跨度达 0.5 Ma 的沉积间断(Wang *et al.*, 2000; Bühring *et al.*, 2004). 为此,1144 站 300.82~500 m 井段代表 0.5~1.01 Ma 时段氧同位素期 MIS14~MIS29 的沉积,平均沉积

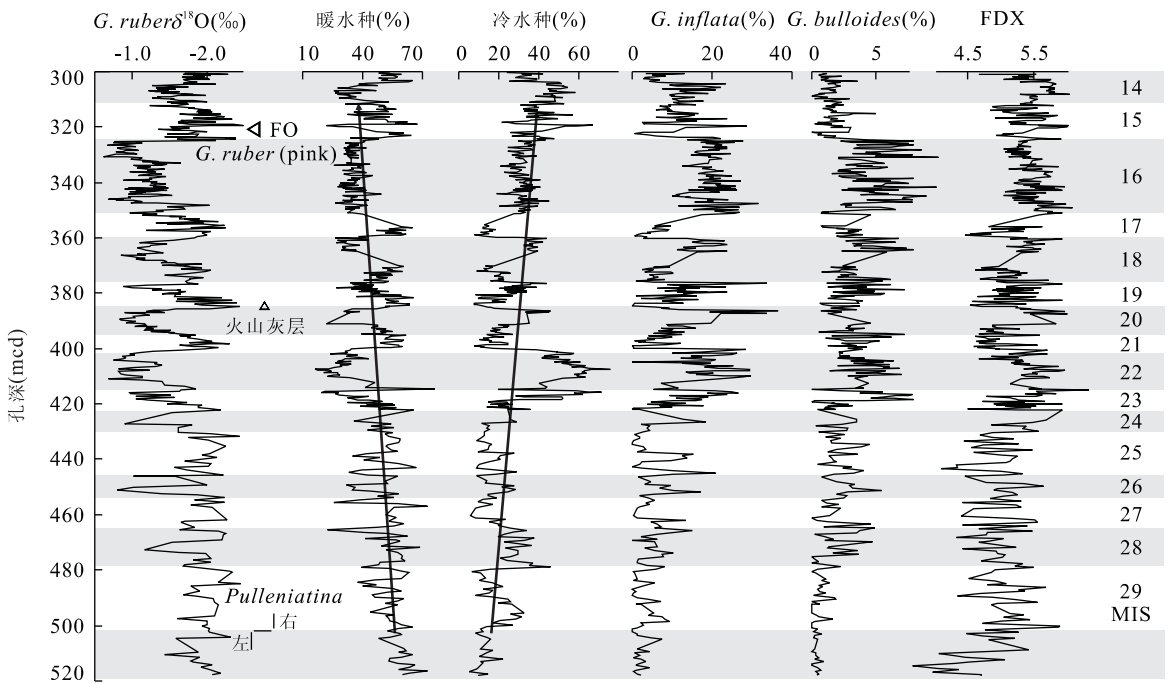


图 2 ODP 1144 站氧同位素分期 MIS14-29(Bühring *et al.*, 2004)、生物/地层事件、主要浮游有孔虫丰度和浮游有孔虫溶解指数

Fig. 2 ODP Site 1144 oxygen isotopic results, showing marine isotope stages (MIS) 14 to 29 (Bühring *et al.*, 2004), faunal-stratigraphic events, abundance of major planktonic foraminifera and FDX

箭头分别代表暖水种群和冷水种群丰度在长尺度上的变化趋势

速率约 40 cm/ka(图 2)。本研究平均 1 ka 的分辨率比南海其他穿越中更新世的钻孔如 17957-2 (5.5 ka, Jian *et al.*, 2000)和 ODP 1143 (~2 ka, Xu *et al.*, 2005) 都高,是目前南海北部中更新世分辨率最高的生物地层剖面。

3 结果与讨论

3.1 长尺度上的逐渐降温

南海北部表层海水温度在过去的 1.01 ~ 0.5 Ma 期间总体上是逐渐下降的,这一长尺度上的气候转型特征主要反映在温暖型种群丰度自 500 m 井段以上逐渐递减,而冷水种群丰度递增(图 2)。作为冷水种的代表,*Globorotalia inflata* 平均丰度由 MIS29 的 3% 上升至 MIS22 的 18%。另一冷水种 *Globigerina bulloides* 也递增达 5%。与此相应,浮游有孔虫溶解指数 FDX 也由底部的 <3.5 上升到顶部的 >5.5,表明底层水体溶解性增强(图 2),很可能如前人研究所指示的是由于高纬区水团侵入的影响。浮游有孔虫的次表层水至深层暖水种包括 *Sphaeroidinella* spp. 和 *Globorotalia tumida* 则不断递减,究其原因可能与水温长期变冷、水体分层减弱

有关(Wang *et al.*, 1999; Pflaumann and Jian, 1999)。

3.2 冰期间骤然降温

尽管浮游有孔虫对冰期旋回的响应,在 MIS22 期之前不很明显,但在 MIS22 期及之后,各种丰度及其他指标都对冰期的反映非常明显(图 3)。冷水种群在 MIS22 期 0.9 Ma 附近达到约 70% 的高峰值。据转换函数 FP-12E 计算出的古水温变化也在 MIS22/23 交界达到最高峰,夏季水温 27.5~30 °C,冬季水温 17~28 °C,冬季温差达 11 °C(图 3)。在此之后的几次冰期(MIS22、20、18、16)平均冬夏季温差在 7 °C 之上。降温时间最快、温差最高见于 0.9 Ma 左右的“中更新世革命”处不足 1 ka 的时间段。在其他冰期一间冰期,显著降温时间少则 1.5 ka (MIS17/16 交界),多则 20 ka 以上(MIS21/20 交界)(图 3)。所以,自 MIS22 期骤然降温之后约 300 ka 期间,南海表层始终保持较低的冬季水温,比现在的 24 °C(Wang *et al.*, 1999) 至少低 4~5 °C(图 3)。值得注意的是,虽然据转换函数推测得到的古水温变化在 MIS22 以后与冰期一间冰期旋回的相关很明显,其波动频率与氧同位素曲线在千年尺度上并不完全吻合,主要表现为最低古水温往往并不处于 $\delta^{18}\text{O}$ 最重值点。另外, MIS20-18 期间古水温

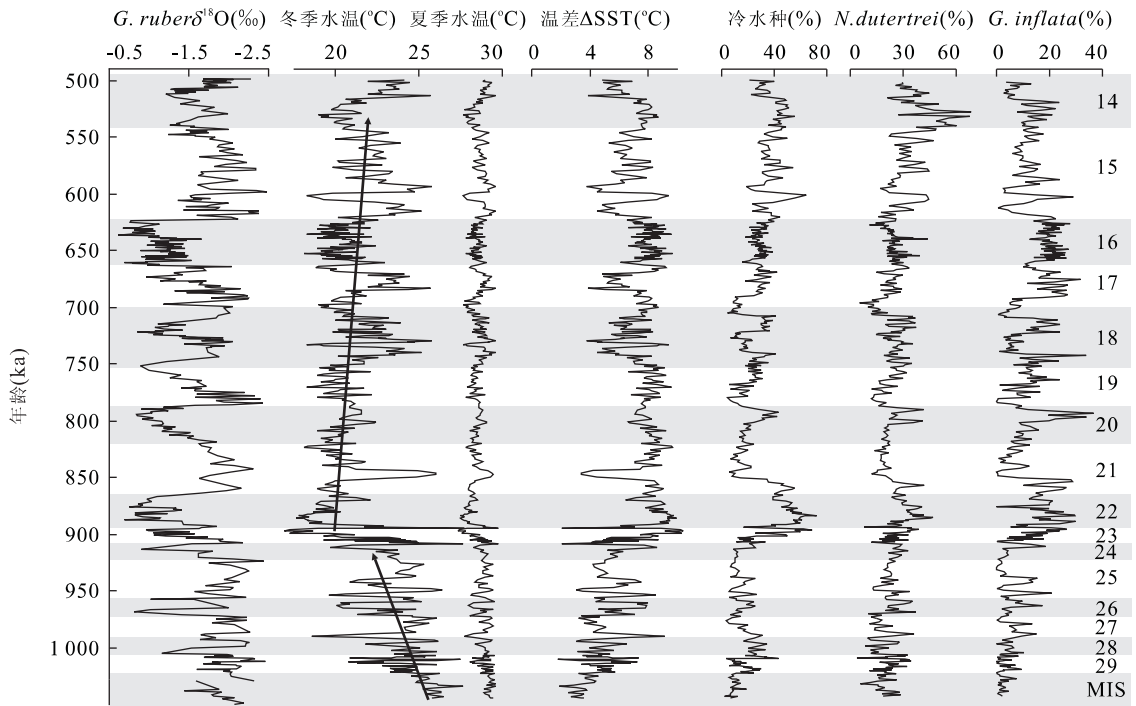


图 3 ODP 1144 站氧同位素年龄与分期,估算冬夏水温及温差和冷水种丰度

Fig. 3 Time plot of $\delta^{18}\text{O}$, the estimated winter and summer SST and their differences ΔSST , and abundance profiles of the cool water species of ODP Site 1144

如箭头所示,冬季水温从 1.01 Ma 以来逐渐降低至 MIS23/22 处的“中更新世革命”,温度波动也达到最大

变化曲线随冰期变化不明显,总体保持一种较低的态势(图 3)。这些不吻合可能是冰期时的强冷水流对浮游生物组合的持续性影响(Wang *et al.*, 1999; Jian *et al.*, 2000; Pflaumann and Jian, 1999),也可能是难溶冷水种的再沉积造成后继间冰期初期的古水温推测偏冷。特别值得一提的是,据 Mg/Ca 比值得到的古水温值也并不总是随氧同位素曲线一致变化的,并且开放西太平洋的 Mg/Ca 资料同样表明 MIS22-23 的古水温都很低,仅 26 °C (De Garidel-Thoron *et al.*, 2005)(图 4)。

3.3 上层水体结构变化与冬季风记录

温跃层深度的变化可根据浮游有孔虫的含量变化利用 MAT Andreasen 方法计算得出(Jian *et al.*, 2000; Pflaumann and Jian, 1999)。结果表明,1144 站的温跃层深度在中更新世气候转型期特别是 MIS22-16 区段呈阶段性变浅,在 MIS20 期上升到 65 m 最低值(图 5)。南海南部 17957 孔的记录明显不同,温跃层深度在 MIS20 期之后几乎都一直变浅,在 MIS14 期上升至 120 m 左右(Jian *et al.*, 2000; Pflaumann and Jian, 1999)。这表明,现代南海南部与北部上层水体结构的显著差别可能始于中

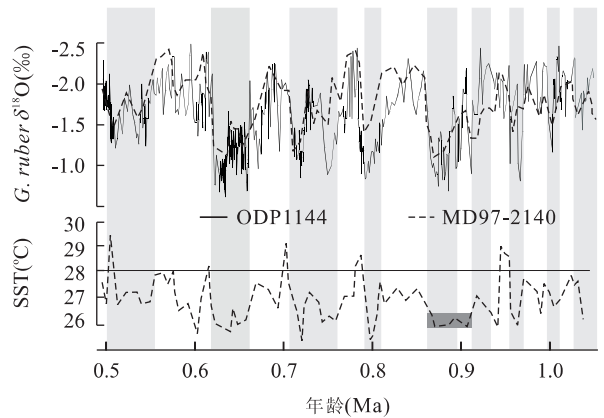


图 4 南海 ODP 1144 站 $\delta^{18}\text{O}$ 与开放西太平洋 MD97-2140 孔 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Mg/Ca 平均水温对比(De Garidel-Thoron *et al.*, 2005)

Fig. 4 Comparison between ODP Sites 1144 $\delta^{18}\text{O}$ and MD97-2140 $\delta^{18}\text{O}$ and Mg/Ca-derived SST from the open West Pacific

更新世气候周期转型。但是,南海南北部上层水体在长尺度上的分异早在 3~2 Ma 期间就已经开始(Li *et al.*, 2004),据分析主要是由于受到当时全球气候大规模变冷、北半球结冰的影响(Ruddiman *et al.*, 1989; Berger *et al.*, 1993; Schmieder *et al.*, 2000)。

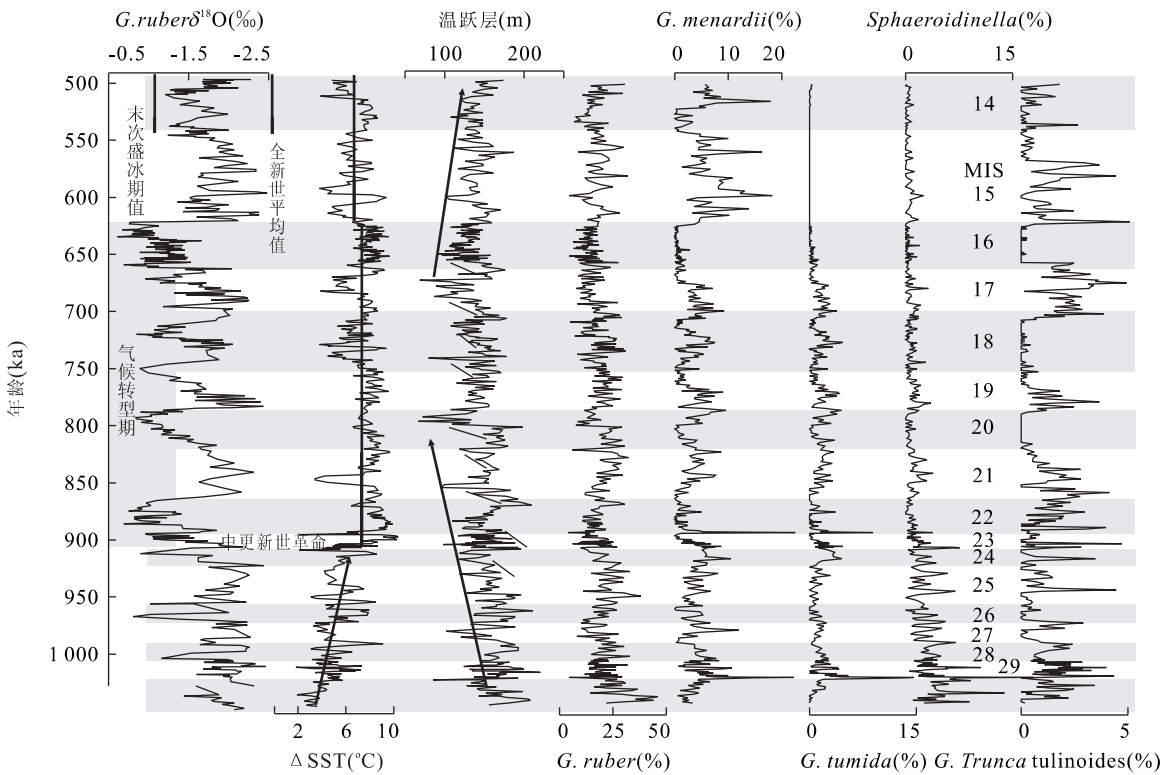


图 5 中更新世气候转型期浮游有孔虫在千年尺度上随冰期旋回变化的主要特征

Fig. 5 Major characteristics of Mid-Pleistocene planktonic foraminifer changes with glacial cycles on a millennial time scale. 箭头指示千年尺度上的主要变化趋势。直线分别表示末次盛冰期 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值, 全新世 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值, 以及不同时间段的表层水温差平均值

在热带水域, 温跃层变浅一般会导致温暖型浮游深水种的丰度增加 (Wang *et al.*, 1999; Jian *et al.*, 2000; Pflaumann and Jian, 1999; Li *et al.*, 2004), 而 1144 站的温暖型深水种包括 *G. tumida* 和 *Sphaeroidinella* 则在 MIS22 期之后不断减少, 连温水种 *G. truncatulinoides* 在 MIS20、18、16 的含量也几乎趋零 (图 5)。这些典型浮游深水种的减少可能并非仅是由于温跃层变化, 相反很可能是因为冬季风增强导致表层和次表层水大规模降温 and 上升流活动增强, 最终造成上层水体分层较差的缘故。

冰期东亚冬季风增强在南海早有记录 (Wang *et al.*, 1999; Jian *et al.*, 2000; Pflaumann and Jian, 1999), 孢粉的分析结果显示冬季风在南海北部增强最明显是在中更新世气候转型的后期 (Sun *et al.*, 2003)。1144 站详细的分析结果表明, 浮游有孔虫含量和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化对中更新世气候转型的响应主要是受冰期旋回冬季风带来的冷水的影响。而位于南海中部的 17957 孔, 浮游深水种 *G. truncatulinoides* 和 *G. tumida* 在中更新世气候转型时期只是略有降低, 利用浮游有孔虫估算的冰期温跃层也保持在 150~200 m 之间, 与现代值相差不大, 表明冬

季风影响相当微弱 (Jian *et al.*, 2000)。同样, 南海南部 ODP 1143 站浮游和底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也反映, 东亚季风在整个更新世时期都比较稳定, 冬季风在中更新世气候转型期增强的信号也不明显 (Tian *et al.*, 2004)。所有这些, 不仅说明在中更新世气候转型时期, 南海南北部表层温度有较大反差, 而且说明两地属不同气候分区, 即北部特别是冰期主要刮冬季风, 南部刮夏季风 (Wang *et al.*, 1999; Jian *et al.*, 2000), 冬季风增强最明显的是在转型后期约 0.6~0.5 Ma 间 (Sun *et al.*, 2003)。

中更新世从 MIS26 至 MIS16 期间, 1144 站的冰期—间冰期 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别较其末次盛冰期和全新世的平均值重约 0.2‰~0.5‰ (图 4) (Bühring *et al.*, 2004)。也就是说, 该站末次盛冰期以来的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录要比中更新世气候转型期相对偏轻。从图 5 可以看出, 南海北部中更新世 $\delta^{18}\text{O}$ 记录所反映的表层水降温程度与转换函数求得的古水温变化基本相似, 降温最强且维持时间最长见于 MIS22 和 MIS16 两大冰期, 前者包含 0.9 Ma 附近的“中更新世革命”, 后者代表更新世的最大冰期即群智冰期 (Günz)。这似乎辅证了中更新世气候转型期全球气

候恶化和北半球冰盖扩张的特征 (Ruddiman and Raymo, 1989; Berger *et al.*, 1993; Schmieder *et al.*, 2000). 不过, 1144 站 MIS22、20、18、16 四大冰期相对末次冰期 MIS2 的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值均大于高纬区记录中的差值, 包括北大西洋 (Ruddiman and Raymo, 1989; Raymo *et al.*, 2004) 和南大西洋的高纬孔位 (Shackleton *et al.*, 1990; Schmieder *et al.*, 2000). 如果说 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的冰期旋回是由高纬区驱动的 (Berger *et al.*, 1993; Berger and Janson, 1994), 那么高纬区的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录应该比低纬区更能反映相对应冰期 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异, 但这些记录并没有如此反映. 当然, 通过高低纬度的差异对比可能无助于查明冰期旋回的控制机制, 因为作为地球最复杂系统之一的气候变化往往不仅受制于轨道变化和水汽传送, 还与高空潜热、风和大洋环流等因素有关 (Aguado and Burt, 2001). 最近的研究发现, 中更新世气候转型期东西赤道太平洋的表层水温梯度增大, 西太平洋暖池区的表层水温在长尺度上相对稳定, 但 MIS22-23 降温明显 (De Garidel-Thoron *et al.*, 2005) (图 4). 这些作者认为东西太平洋赤道区水温的高反差, 可能引起气流作用增强和雨量增加, 从而导致更强的大气与海洋相互作用, 影响低纬热能和在水汽向高纬的输送, 最终导致中更新世气候转型期明显的冰期旋回. 这种解释支持了早先关于气候转型的驱动力可能是来自于低纬区 (Shackleton *et al.*, 2000; Rutherford and D'Hondt, 2000) 或者碳循环变化 (Raymo *et al.*, 1997; Shackleton *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2001a) 的猜想. 尽管 1144 站 (Bühring *et al.*, 2004) 与赤道西太平洋 MD97-2140 孔 (De Garidel-Thoron *et al.*, 2005) 的浮游 $\delta^{18}\text{O}$ 测试值在中更新世时段由于分辨率有差异, 但两地的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线变化趋势是一致的 (图 4), 据此我们认为 1144 站的记录真实反映了中更新世气候转型期高分辨率的主要特征. 浮游 $\delta^{18}\text{O}$ 和生物资料也表明, 代表水温下降的 $\delta^{18}\text{O}$ 变重和冷水种增多早在间冰期晚期就已经开始, 可以证明表层水温梯度增大是因为该站的冰期旋回记录叠加了东亚季风的讯号, 这些讯号由于 1144 站位于边缘海的地理特点得到明显的放大.

4 结论

(1) 通过南海北部 ODP 1144 站下部井段平均

分辨率约 1 ka 的浮游有孔虫分析, 结合浮游有孔虫稳定氧同位素测定结果, 重建了该区中更新世时期千年尺度上的气候变化特征.

(2) 浮游有孔虫对中更新世气候转型的响应, 主要表现在属种丰度随冰期旋回发生明显变化, 在间冰期以表层暖水种为主, 在冰期以次表层和深层冷水种占多. 在 0.9 Ma 处不足 1 ka 的时间里, 冷水种骤然增高达 50%~60%, 估算水温也下降约 11 °C, 与表层水急速变冷和东亚季风增强有关.

(3) 介于 0.9~0.6 Ma 之间的 MIS22-16 期是中更新世气候转型的关键过渡时期. 在 1144 站, 这一时期的冬、夏季平均表层温差达到更新世最高值 7 °C. 在主要冰期时间段里, 不断增强的冬季风导致长时间的海水降温和上层水体变化, 直接影响南海北部浮游有孔虫组合. 在 0.6 Ma 左右, 温水型次表层和深水种含量降低或者从该区完全消失, 与孢粉的记录一致, 共同指示冬季风增强的高峰期.

(4) 南海上层水体的南北分异, 尤其是温跃层的深度变化, 在中更新世气候转型之后明显增强. 冬季风影响南海北部最强, 影响中部和南部较低, 在 MIS22 和 MIS16 两大盛冰期更是如此. 南海上层水体的南北分异说明中更新世气候转型期两地的气温梯度增大, 更大的气温反差在东西赤道太平洋也有记录, 共同表明低纬地区可能通过与高纬的水汽交换直接控制着北半球冰盖的消长和冰期的强弱. 南海北部 1144 站中更新世千年尺度的气候记录突出了边缘海的放大效应, 主要是因为叠加了南北气候梯度反差和冬季风在冰期增强的讯号.

致谢: 分析研究的样品及资料由 ODP 提供.

References

- Aguado, E., Burt, J., 2001. Understanding weather and climate. 2nd Edition. Prentice Hall, Indiana USA.
- Berger, W. H., Bickert, T., Jansen, E., et al., 1993. The central mystery of the Quaternary ice age. *Oceanus*, 36: 53-56.
- Berger, W. H., Jansen, E., 1994. Mid-Pleistocene climate shift—The Nansen connection. *Geophys. Monograph*, 84: 291-311.
- Bühring, C., Sarnthein, M., Erlenkeuser, H., 2004. Toward a high-resolution stable isotope stratigraphy of the last 1.1 million years: Site 1144, South China Sea. *Proc. ODP Sci. Results*, 184: 1-29.
- De Garidel-Thoron, T., Rosenthal, Y., Bassinot, F., et al.,

2005. Stable sea surface temperatures in the western Pacific warm pool over the past 1.75 million years. *Nature*, 433:294—298.
- Jian, Z. M., Wang, P. X., Chen, M., et al., 2000. Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the southern South China Sea. *Paleoceanography*, 15:229—243.
- Kennett, J. P., Srinivasan, M. S., 1983. Neogene planktonic foraminifera: A phylogenetic atlas. Hutchinson Ross Publ. Co., New York.
- Li, B. H., Wang, J., Huang, B., et al., 2004. South China Sea surface water evolution over the last 12 Myr: A south-north comparison from ocean drilling program sites 1143 and 1146. *Paleoceanography*, 19: PA1009, doi: 10.1029/2003PA000906.
- Pflaumann, U., Jian, Z., 1999. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and western Pacific: A new transfer technique to estimate regional sea-surface temperatures. *Mar. Geol.*, 156(1—4):41—83.
- Prell, W. L., 1982. Oxygen and carbon isotope stratigraphy of the Quaternary of Hole 502B: Evidence for two modes of isotopic variability. *Init. Repts. DSDP*, 68: 455—464.
- Raymo, M. E., Oppo, D. W., Curry, W., 1997. The mid-Pleistocene climate transition: A deep sea carbon isotopic perspective. *Paleoceanography*, 12:546—559.
- Raymo, M. E., Oppo, D. W., Flower, B. P., et al., 2004. Stability of North Atlantic water masses in face of pronounced climate variability during the Pleistocene. *Paleoceanography*, 19: PA2008, doi: 10.1029/2003PA000921.
- Ruddiman, W. F., Raymo, M. E., Martinson, D. G., 1989. Pleistocene evolution: Northern hemisphere ice sheet and North Atlantic Ocean. *Paleoceanography*, 4: 353—412.
- Rutherford, S., D'Hondt, S., 2000. Early onset and tropical forcing of 100 000 year Pleistocene glacial cycles. *Nature*, 408:72—75.
- Schmieder, F., Von Döbenek, T., Bleil, U., 2000. The Mid-Pleistocene climate transition as documented in the deep South Atlantic Ocean: Initiation, interglacial and terminal event. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 179 (3—4): 539—549.
- Shackleton, N. J., 2000. The 100 000 year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*, 289:1897—1902.
- Shackleton, N. J., Berger, A., Peltier, W. R., 1990. An alternative calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Trans. Royal. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, 81:251—261.
- Shao, L., Li, X. H., Wei, G. J., et al., 2001. Provenance of a prominent sediment drift on the northern slope of the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 44: 919—925.
- Sun, X., Luo, Y., Huang, F., et al., 2003. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian monsoon. *Mar. Geol.*, 201:97—118.
- Thompson, P. R., 1981. Planktonic foraminifera in the West North Pacific during the past 150 000 years: Comparison of modern and fossil assemblages. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 35:241—279.
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Development of the East Asian monsoon and North Hemisphere glaciation: Oxygen isotope records from the South China Sea. *Quat. Sci. Rev.*, 23:2007—2016.
- Wang, L., Sarnthein, M., Erlenkeuser, H., et al., 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Mar. Geol.*, 156:245—284.
- Wang, P. X., Prell, W. L., Blum, P., et al., 2000. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports 184, College Station, TX.
- Wang, P. X., Tian, J., Cheng, X. R., et al., 2001a. Carbon reservoir changes preceded major ice-sheet expansion at the mid-Brunhes event. *Geology*, 31:239—242.
- Wang, P. X., Tian, J., Cheng, X. R., 2001b. Transition of Quaternary glacial cyclicity in deep-sea records at Nansha, the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 44:926—933.
- Xu, J., Wang, P. X., Huang, B., et al., 2005. Response of planktonic foraminifera to glacial cycles: Mid-Pleistocene change in the southern South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 54:89—105.
- Zhao, Q. H., Jian, Z. M., Li, B. H., 1999. Microtektites in the Middle Pleistocene deep-sea sediments of the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 42:532—535.