

# 从稳定同位素与微体化石看南海南部 末次冰消期古海洋变化之阶段性<sup>\*</sup>

翦知湔

陈民本

(同济大学国家教委海洋地质开放研究实验室, 上海 200092) (台湾大学海洋研究所, 台北)

林慧玲

汪品先

(中山大学海洋地质研究所, 高雄) (同济大学国家教委海洋地质开放研究实验室, 上海 200092)

**摘要** 对南海西南陆坡 SCS-12 柱状样中微体化石进行定量统计以及稳定同位素分析和 AMS  $^{14}\text{C}$  测年, 求取末次冰消期高分辨率的古海洋学记录。约 13 kaBP 以来南海南部的古海洋呈阶段变化, 其中氧同位素  $1/2$  期界线约 12.05 kaBP 和末次冰消期末约 7.70 kaBP 前后为两个快速变化期(终止期  $I_A$  和终止期  $I_B$ ), 其间则为缓慢变化期。据推测, 南海海平面在终止期  $I_A$  之前相对于现代的大致位于 -110m 处, 终止期  $I_B$  之后与现代的相近, 而其间则大致位于 -50 m 附近。与此相应, 12.05 kaBP 以来, 冬季平均表层海水温度和盐度明显增高, 表层古生产力下降; 而约 7.70 kaBP 出现早全新世  $\text{CaCO}_3$  保存峰事件, 翼足类丰度和  $\text{CaCO}_3$  含量显著增多。

**关键词** 末次冰消期 阶段变化 稳定同位素 微体化石 南海

末次冰消期始自 15 kaBP, 结束于 7 kaBP, 延续约七八千年<sup>[1]</sup>。在这短短几千年里, 北半球厚近 3 km 的大陆冰盖融化消失, 世界洋面上升近百米, 大洋  $^{18}\text{O}$  变轻, 大气中  $\text{CO}_2$  浓度增加约  $1/3$ 。这一系列环境变化是如何发生的? 是直线式, 还是分阶段进行, 或者其间还有反复<sup>[1]</sup>? 查明冰消期的过程与机制, 有助于人们理解地球的环境系统, 并对未来的全球变化做出正确的估计和预测。

南海以其高的沉积速率和广泛的碳酸盐沉积, 是进行冰消期高分辨率古海洋学研究的理想海区。近年来, 海-陆系统对于末次冰消期的响应已成为南海诸多研究的主题, 但大多集中在南海北部<sup>[2,3]</sup>, 很少涉及南部<sup>[4]</sup>。实际上, 南海南部拥有世界上最宽广的陆架之一, 冰消期海平面上升中会因海道突然开启或海区面积突然增大而诱发环境突变<sup>[5]</sup>。举例来说, 末次冰消期南海南部的海岸线迁移幅度可达 900 km, 平均每天至少要后退 0.3 m, 如考虑到中间的停顿、甚至反复, 海岸线很可能曾以每天 1m 的速度后撤。这种灾变式的环境, 对于东亚季风气候、对于动植物和人类的生存环境必定带来重大影响。为此, 本次研究选取南海西南陆坡的 SCS-12 柱状样, 来探讨末次冰消期在南海的反映。

1997-06-04 收稿, 1997-08-06 收修改稿

\*国家自然科学基金资助项目(批准号:49576286, 49732060)

## 1 材料和方法

柱状样 SCS-12 系 1985 年“海研号”考察船用库伦堡(Kullenberg)活塞取样管所采集,位于 7°42.0'N, 109°17.9'E, 水深 543 m 的陆坡上部(图 1)。该柱状样总长 120 cm, 岩性为黑灰色粉砂质泥, 按 2.5 cm 的间距和长度, 共取样 48 个。

样品均以标准微体古生物学方法处理。取较粗组分( $> 154 \mu\text{m}$ )划分成具代表性的等分, 从中挑尽浮游及底栖有孔虫和翼足类壳体, 并鉴定统计。然后, 分别计算各门类微体化石的丰度和各属种的相对百分含量, 进而采用浮游有孔虫转换函数计算表层海水冬、夏温度, 并根据浮游有孔虫的最适环境指标<sup>[6]</sup>, 用加权平均法推算表层海水的盐度和磷酸盐磷含量。此外, 还依据底栖有孔虫丰度来估算表层初级生产力<sup>[7]</sup>的变化。

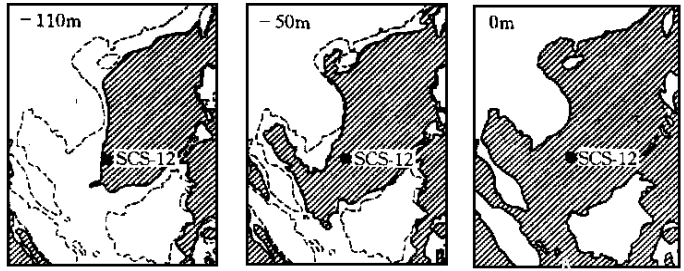


图 1 末次冰消期以来南海海平面变化 3 个阶段的古地理面貌

从各样品中挑出 4~5 枚底栖有孔虫 *Cibicides wuellerstorfi* (Schwager) 壳体(壳径为 300~500  $\mu\text{m}$ ), 在青岛海洋地质研究所用 Finnigan/MAT Delta 型质谱仪进行稳定同位素测试,  $^{18}\text{O}$  和  $^{13}\text{C}$  的精度分别为 0.07‰ 和 0.05‰。再从 30.0~32.5 cm 和 112.5~117.5 cm 深度的样品中挑出浮游有孔虫 *Neogloboquadrina dutertrei* 壳体(壳径  $> 154 \mu\text{m}$ ), 送新西兰 Rafter 放射性碳实验室进行 AMS  $^{14}\text{C}$  测年, 进一步的测年样品正在准备中。此外, 各样品取 1 g 干样, 以常规的酸碱滴定法测定全样的  $\text{CaCO}_3$  含量。

## 2 结果和讨论

### 2.1 地层学

SCS-12 柱状样井深 30.0~32.5 cm 和 112.5~117.5 cm 处的 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄分别为 (7.70  $\pm$  1.10) kaBP 和 (12.64  $\pm$  1.20) kaBP (已扣除 400 a 的海洋与大气间年代差)。根据 *C. wuellerstorfi* 的  $^{18}\text{O}$  曲线, 氧同位素 1/2 期界线位于 77.5~80.0 cm 处, 按照 Martinson 等的  $^{18}\text{O}$  地质年代表, 确定其年龄为 12.05 kaBP<sup>[8]</sup>(图 2)。由于该柱状样  $^{18}\text{O}$  的最大变化幅度为 1.76‰, 已达到世界大洋底栖有孔虫氧同位素的冰后期/冰期变化值, 因而推断柱状样底部相当于末次冰消期的早期, 年龄约 13 kaBP。

该柱状样井深 12.5~20.0 cm 处浮游有孔虫 *Pulleniatina obliquiloculata* 丰度显著变小(接近于 0; 图 3), 而这一最小值带在南海和冲绳海槽具有普遍的地层意义, 年龄为晚全新世约 3~5 kaBP<sup>[9]</sup>。这与根据平均沉积速率(表 1)内插求得的其年龄值约 3.4~4.6 kaBP 相吻合, 因此该柱状样顶部应无明显的沉积缺失。

### 2.2 $^{18}\text{O}$ 与海平面的阶段式变化

末次冰消期, SCS-12 柱状样的底栖有孔虫  $^{18}\text{O}$  呈阶段变化的模式(图 2), 在 12.05 kaBP 和 7.70 kaBP 前后发生快速变轻, 其幅度分别为 0.84‰ 和 0.50‰, 相当于整个冰后期/冰期变

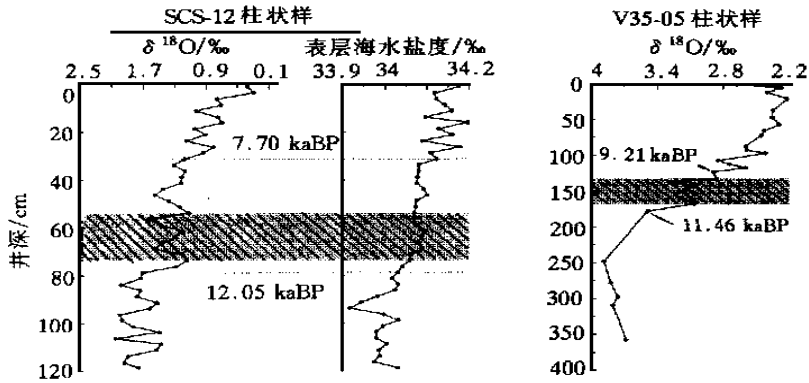


图 2 SCS-12 柱状样的  $^{18}\text{O}$  和表层海水盐度曲线及其与南海南部 V35-05 柱状样<sup>[4]</sup>的  $^{18}\text{O}$  曲线的比较

阴影区示新仙女木期

化幅度的近 1/2 和 1/3; 而其间则为  $^{18}\text{O}$  值稳定阶段, 甚至还有反复. 实际上, 末次冰消期海洋沉积  $^{18}\text{O}$  曲线呈阶段性, 在世界许多海区都有报道, 已经不容置疑<sup>[10,11]</sup>. Duplessy 等 (1981) 根据  $^{18}\text{O}$  曲线提出末次冰消期经历了 3 个阶段: 快速消融的终止期  $I_A$  与终止期  $I_B$ , 和其间所夹的停顿甚至冰盖增长期<sup>[10]</sup>. 对于后一次终止期 ( $I_B$ ) 的年龄, 意见比较一致——约 10~7 kaBP; 而对于早一次终止期 ( $I_A$ ) 的年龄, 意见十分分歧, 但最近将各处  $^{18}\text{O}$  曲线汇总的结果, 认为是 14~12 kaBP<sup>[11]</sup>. 因此我们认为 SCS-12 柱状样中  $^{18}\text{O}$  发生快速变轻的时间段即 12.05 kaBP 和 7.70 kaBP 前后, 分别相当于终止期  $I_A$  和终止期  $I_B$ .

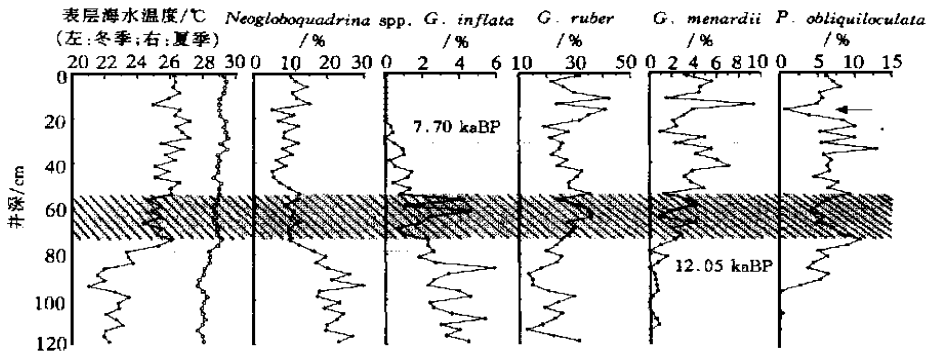


图 3 SCS-12 柱状样的表层海水温度和浮游有孔虫属种的相对丰度变化.

阴影区示新仙女木期. 箭头示晚全新世约 3~5 kaBP 的 *P. obliquiloculata* 丰度最小值带<sup>[9]</sup>

由于晚第四纪表生型底栖有孔虫 *C. wuellerstorfi* 的  $^{18}\text{O}$  变化主要反映两极冰盖体积的消长和海平面的升降, 而 SCS-12 柱状样中该种的  $^{18}\text{O}$  曲线在末次冰消期呈阶段性, 应说明海平面也呈阶段式回升, 在 12.05 kaBP 和 7.70 kaBP 前后快速上升, 其间则为缓慢回升或停顿期. 这一点得到了巴巴多斯珊瑚礁区海平面上升记录的证实, 在近 12 kaBP 和 9 kaBP 海平面分别快速上升了 24 m 和 28 m<sup>[12]</sup>.

以往研究表明, 末次盛冰期南海海平面下降了约 100~120 m<sup>[5]</sup>. 本文取中间值, 假定末

次冰消期开始时海平面相对于现代的位于 - 110 m 处. 根据  $^{18}\text{O}$  从终止期  $I_A$  之前的最重值 (2.05‰) 变轻至柱状样顶部样品 (0 ~ 2.5 cm) 的 0.37‰, 可计算出在 12.05 kaBP 和 7.70 kaBP 前后南海海平面分别快速上升了约 55 m 和 33 m. 如果采用终止期  $I_A$  之前、终止期  $I_A$  与  $I_B$  之间和终止期  $I_B$  之后的平均值 (分别为 1.77‰, 1.29‰ 和 0.77‰), 则可非常粗略地估计终止期  $I_A$  与  $I_B$  之间海平面位于 - 50 m 附近. 也就是说, 末次冰消期以来南海大致有 3 种不同的古地貌: 即终止期  $I_A$  之前 (- 110m)、终止期  $I_A$  与  $I_B$  之间 (约 - 50m) 和终止期  $I_B$  之后 (约 0 m) 的状况 (图 1).

终止期  $I_A$  之前南海海平面位于 - 110 m, 南部大片陆架出露, 从而 SCS-12 柱状样所在位置离岸线非常近 (图 1). 当时河流携带的大量陆源物直接注入到陆坡上部, 不仅大大增加了 SCS-12 柱状样的沉积速率 (高达 61.4 cm/ka), 而且也将  $\text{CaCO}_3$  含量稀释至平均仅 5.4% (表 1; 图 4). 经过终止期  $I_A$  的海平面快速上升, 海平面大致位于 - 50 m 附近, 该柱状样离河口距离变远, 大部分陆源物卸在了陆架上, 从而沉积速率锐减了约 5/6, 平均为 10.9 cm/ka. 至终止期  $I_B$  之后, 该柱状样离河口距离更远, 沉积速率降至平均 4.1 cm/ka, 仅为终止期  $I_A$  之前的 1/15 (表 1).

表 1 SCS-12 柱状样沉积速率分段计算表

| 时段                   | 沉积速率<br>/ cm. ka <sup>-1</sup> | $\text{CaCO}_3$ / % | $\text{CaCO}_3$ 沉积速率<br>/ cm. ka <sup>-1</sup> | 非 $\text{CaCO}_3$ 沉积速率<br>/ cm. ka <sup>-1</sup> |
|----------------------|--------------------------------|---------------------|--|--|
| 终止期 $I_B$ 之后         | 4.1                            | 15.2                | 0.6  | 3.5  |
| 终止期 $I_A$ 和 $I_B$ 之间 | 10.9                           | 8.2                 | 0.9  | 10.0   |
| 终止期 $I_A$ 之前         | 61.4                           | 5.4                 | 3.3  | 58.1   |

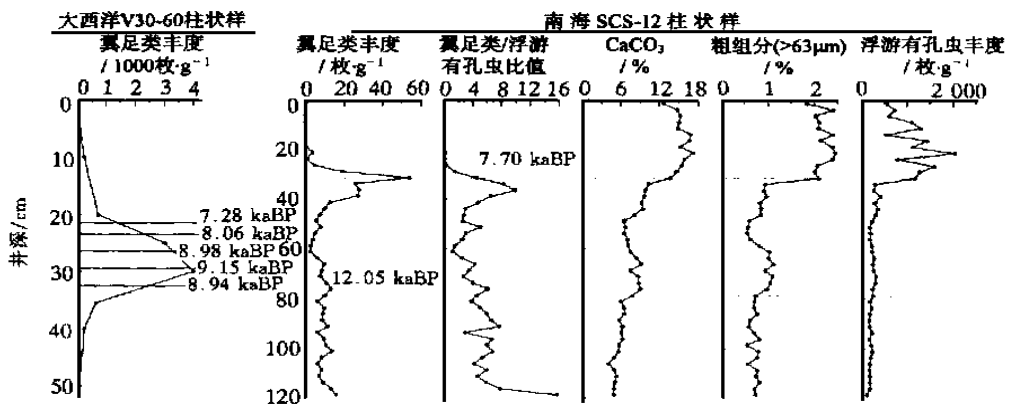


图 4 北大西洋 V30-60 柱状样的翼足类丰度<sup>[14]</sup>及其与南海南部 SCS-12 柱状样的翼足类丰度、翼足类/浮游有孔虫比值、 $\text{CaCO}_3$  含量、粗组分和浮游有孔虫丰度的比较

根据浮游有孔虫的最适盐度指标<sup>[6]</sup>, 采用加权平均法求得 SCS-12 柱状样的表层海水盐度变化, 发现也呈阶段式升高 (图 2), 这进一步说明随着海平面阶段式的回升, 该柱状样离湄公河口距离变远, 受淡水的影响也就越来越小.

### 2.3 终止期 $I_A$ 的表层海水温度和古生产力巨变

终止期  $I_A$  之前, SCS-12 柱状样含有极丰富的温水型浮游有孔虫 *N. dutertrei*, *Neoglobor*

*quadrina pachyderma*, *Globorotalia inflata*, 而热带浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber*, *Globorotalia menardii*, *P. obliquiloculata* 等种则含量显著降低(图 3). 采用浮游有孔虫转换函数 FP-12E 计算 SCS-12 柱状样的冬、夏表层海水温度<sup>[2]</sup>: (1) 终止期  $I_A$  之前的冬、夏表层海水温度为 21.1 和 27.7 , 较今(25.8 和 28.6 ) 分别低 4.7 和 0.9 , 而冬、夏温差高达 6.6 , 说明季节性较今(2.8 ) 强得多. (2) 末次冰消期冬、夏表层海水温度的显著回升发生在终止期  $I_A$  约 12.05 kaBP 前后, 变化幅度分别为 4.0 和 1.4 (图 3), 远大于西太平洋同纬度区的数值<sup>[2]</sup>, 可见南海南部亦经历了较显著的冰期-冰后期表层海水温度变化.

采用 Herguera 等的公式<sup>[7]</sup> 定量估计 SCS-12 柱状样的表层初级生产力. 终止期  $I_A$  之前的表层初级生产力 PP 平均高达  $175.4 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ , 相当于终止期  $I_A$  之后的约 2~4 倍(图 5). 而且, 采用加权平均法推算的表层海水磷酸盐磷含量<sup>[6]</sup>, 在终止期  $I_A$  之后明显降低(图 5); 底栖有孔虫指示沉积物富有机碳和底层水低溶解氧含量的 *Uvigerina peregrina*, *Melonis barleeanus*, *Globobulimina* spp. 和 *Chilostomella oolina* 等种的百分含量也在终止期  $I_A$  之后显著减少(图 5), 都说明在终止期  $I_A$  表层古生产力急剧下降. 推测经终止期  $I_A$  的海平面上升, 大量陆源营养元素再不能直接注入陆坡上部, 从而表层磷酸盐磷含量降低, 表层古生产力下降.

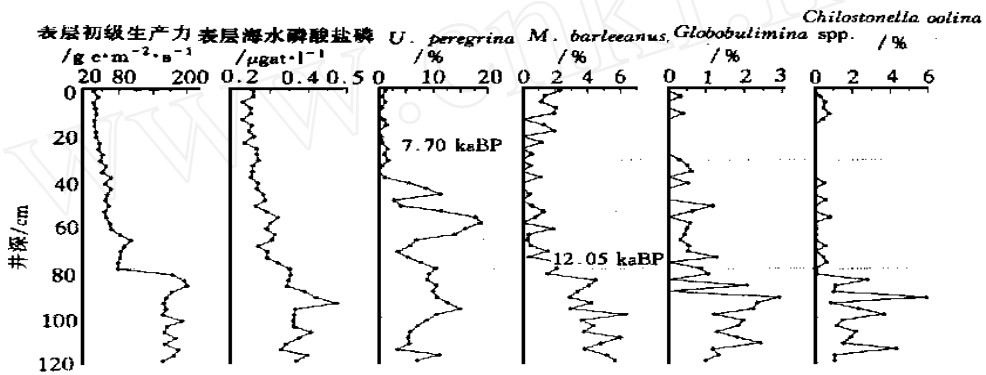


图 5 SCS-12 柱状样中指示表层古生产力变化的浮游及底栖有孔虫标志

实际上, 在终止期  $I_A$  约 12.05 kaBP 前后, 表层海水温度显著回升, 表层古生产力急剧下降, 也广见于南海其他海区和苏禄海<sup>[2,3,13]</sup>, 在此绝非偶然、个别现象.

#### 2.4 终止期 $I_B$ 的 $\text{CaCO}_3$ 保存峰事件

Broecker 等(1993)指出: 南极 Byrd 冰芯揭示气泡中  $\text{CO}_2$  含量在全新世早期约 10.0~7.0kaBP 有一低谷, 而大西洋深海沉积中翼足类丰度或  $\text{CaCO}_3$  含量都在相近的时间(约 8.5 kaBP 前后)有一高峰(图 4), 说明全新世早期由于植被、土壤发育, 大气  $\text{CO}_2$  减少, 导致深海  $\text{CO}_3^{2-}$  离子浓度增加, 碳酸盐溶跃面加深, 出现碳酸盐保存高峰, 这是继大洋碳酸盐溶跃面在末次冰期后上升背景上出现的回返事件<sup>[14]</sup>.

南海 SCS-12 柱状样在终止期  $I_B$  约 8.8~6.5 kaBP 期间, 翼足类丰度有一个显著的高值带, 翼足类/浮游有孔虫比值也在这一时间段达到峰值(图 4). 以往的研究亦表明南海南部和苏禄海的翼足类保存峰一直延续到全新世温暖期约 6~7 ka 前<sup>[13,15]</sup>. 由于文石质的翼足类壳体较方解石质的浮游有孔虫壳体易溶, 说明这一时期碳酸盐溶解作用显著减弱.

尽管  $\text{CaCO}_3$  沉积速率由终止期  $I_A$  前的  $3.3 \text{ cm/ka}$  一直降为终止期  $I_B$  后的  $0.6 \text{ cm/ka}$ , 但

由于陆源稀释物大量减少,  $\text{CaCO}_3$  含量却不断增加. 这其中终止期  $I_B$  约 7.70 kaBP 前后  $\text{CaCO}_3$  含量的显著增大(超过 12%, 表 1 和图 4), 很难用非  $\text{CaCO}_3$  沉积速率的变化来完全解释, 应与当时  $\text{CaCO}_3$  保存较好也有关系.  $\text{CaCO}_3$  的这种变化特征也反映在粗组分百分含量 ( $> 63 \mu\text{m}$ ) 和浮游有孔虫丰度曲线上(图 4). 因此, SCS-12 柱状样在终止期  $I_B$  约 7.70 kaBP 前后, 翼足类丰度和  $\text{CaCO}_3$  含量显著增大, 说明早全新世  $\text{CaCO}_3$  保存峰事件<sup>[14]</sup> 在南海也有反映, 可能具有全球性.

## 2.5 新仙女木事件?

新仙女木事件(Younger Dryas Event)是约 11~10 kaBP 期间的 1 次短暂气候变冷, 以往仅见于北大西洋及其两侧的欧美陆地<sup>[16]</sup>. 近年来, 在日本海、东海、南海及其邻近的苏禄海也有新仙女木事件的报道<sup>[3, 16]</sup>, 可见这一事件具有全球性.

从图 2 可以看出, SCS-12 柱状样的井深 52.5~75.0 cm(约 11.6~9.8 kaBP)之间, 底栖有孔虫的氧同位素变重, 其幅度(约 0.58‰)相当于冰消期和终止期  $I_A$  的约 1/3 和 2/3. 特别是, 可以分为 3 段: 2 次变重和其间所夹的一次短暂变轻(图 2). 这一点不仅可从南海南部 V35-05 柱状样(7°11'N, 112°05'E, 水深 1953 m)的底栖有孔虫 *Cibicides* 的氧同位素曲线上<sup>[4]</sup> 得到证实(图 2), 亦与中国内陆沙漠/黄土过渡带中湖沼沉积记录的新仙女木期东亚气候经历了干冷、温凉、干冷的变化相对应<sup>[17]</sup>. 在这段时间内, SCS-12 柱状样中温水型浮游有孔虫 *Neogloboquadrina* spp. 和 *G. inflata* 等种的含量又突然增多, 相应地, 冬季表层海水温度也下降了约 1.6℃(图 3), 相当于冰消期变化幅度的 26%, 季节温差也从变冷期前的 3.1℃ 增大为 4.3℃. 实际上, 南海北部 V36-06-3 柱状样在新仙女木期间, 也有相似的变化, 但变化幅度较南部的大<sup>[3]</sup>.

尽管精确的测年有待开展, 但我们相信 SCS-12 柱状样的 52.5~75.0 cm(约 11.6~9.8 kaBP)间  $^{18}\text{O}$  和有孔虫所揭示的短期气候回返是新仙女木事件在南海西南部的反映. 但以往的西太平洋新仙女木期  $^{18}\text{O}$  位移仅见于浮游有孔虫而不见于底栖有孔虫曲线, 而现在 SCS-12 和 V35-05<sup>[4]</sup> 柱状样中 *Cibicides* 的氧同位素曲线上也有反映. 看来, 这一现象有待进一步研究取得解释.

## 3 结论

南海南部末次冰消期古海洋之阶段变化, 既有全球变化的影响, 也受到南海古地理、古海洋变化的控制.

末次冰消期 SCS-12 柱状样的  $^{18}\text{O}$  和南海南部海平面呈阶段式变化, 其中 12.05 kaBP 和 7.70 kaBP 前后是快速变化期, 分别对应于终止期  $I_A$  和终止期  $I_B$ , 其间则为缓慢变化期. 据此推断, 终止期  $I_A$  之前, 南海海平面相对于现代的大致位于 -110 m 处, 终止期  $I_B$  之后与今相当, 而其间则大致位于 -50 m 附近, 从而引起一系列环境指标的变化. 如末次冰消期以来沉积速率呈阶段式的下降, 表层海水盐度则呈阶段式的升高; 终止期  $I_A$  约 12.05 kaBP 以来, 表层海水温度显著升高, 表层古生产力下降; 而在终止期  $I_B$  约 7.70 kaBP 前后, 翼足类丰度和  $\text{CaCO}_3$  含量显著增大, 出现早全新世  $\text{CaCO}_3$  保存峰事件. 此外, SCS-12 柱状样的底栖有孔虫  $^{18}\text{O}$  和表层海水温度等亦记录了约 11.6~9.8 kaBP 期间的新仙女木事件.

## 参 考 文 献

- 1 Ruddiman W F, Wright H E Jr. Introduction. In: Ruddiman W F, Wright H E Jr, eds. North America and Adjacent Ocean during the Last Deglaciation. Colorado: Geol Soc Amer, 1988. 1 ~ 12
- 2 Wang L, Wang P. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: glacial ~ interglacial contrasts in an enclosed basin. *Paleoceanography*, 1990, 5(1): 77 ~ 90
- 3 王律江, 卞云华, 汪品先. 南海北部末次冰消期及快速气候回返事件. *第四纪研究*, 1994, 1: 1 ~ 12
- 4 Broecker W S, Andree M, Klas M, et al. New evidence from the South China Sea for an abrupt termination of the last glacial period. *Nature*, 1988, 333: 156 ~ 158
- 5 汪品先. 西太平洋边缘海对我国冰期干旱化影响的初步探讨. *第四纪研究*, 1995, 1: 32 ~ 42
- 6 BÉA W H. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In: Ramsay A T S, ed. *Oceanic Micropaleontology*. London: Academic Press, 1977. 1: 1 ~ 100
- 7 Herguera J C, Berger W. Paleoproductivity from benthic foraminifera abundance: glacial to postglacial change in the west-equatorial Pacific. *Geology*, 1991, 19: 1 173 ~ 1 176
- 8 Martinson D G, Piasias N G, Hays J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300 000-year chronostratigraphy. *Quat Res*, 1987, 27: 1 ~ 29
- 9 翦知湓, 李保华, Pflaumann U, 等. 西太平洋晚全新世变冷事件. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(5): 461 ~ 466
- 10 Duplessy J C, Delibrias G, Turon, et al. Deglacial warming of the northeastern Atlantic Ocean: Correlation with the paleoclimate evolution of European continent. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1981, 35: 121 ~ 144
- 11 Mix A C. The oxygen-isotope record of glaciation. In: Ruddiman W F, Wright H E Jr, eds. North America and Adjacent Ocean During the Last Deglaciation. Colorado: Geol Soc Amer, 1988. 111 ~ 135
- 12 Fairbanks R. A 17 000 year glacial-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on Younger Dryas Event and deep-ocean circulation. *Nature*, 1989, 342: 637 ~ 642
- 13 Miao Q, Thunell R C. Glacial-Holocene carbonate dissolution and seasurface temperatures in the South China and Sulu seas. *Paleoceanography*, 1994, 9(2): 269 ~ 290
- 14 Broecker W S, Lao Y, Klas M, et al. A search for an early Holocene CaCO<sub>3</sub> preservation event. *Paleoceanography*, 1993, 8(3): 333 ~ 339
- 15 Rottman M L. Dissolution of planktonic foraminifera and pteropods in South China Sea sediments. *J Foraminiferal Res*, 1979, 9(1): 41 ~ 49
- 16 汪品先, 卞云华, 李保华, 等. 西太平洋边缘海的“新仙女木”事件. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(5): 452 ~ 460
- 17 周卫健, 李小强, 董光荣, 等. 新仙女木期沙漠/黄土过渡带高分辨率泥炭记录——东亚季风气候颤动的实例. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(2): 118 ~ 124