

南海 ODP1143 站底栖有孔虫 *Cibicoides* 与 *Uvigerina* 稳定氧碳同位素值的均衡试验

田 军, 汪品先, 成鑫荣

同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092

摘要: 从南海南部 ODP184 航次 1143 站上部合成深度 190.77 m 共 1992 个样品中, 由老到新挑选了 64 个样品, 测试了同一样品中底栖有孔虫 *Uvigerina peregerina* 与 *Cibicoides wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 结果表明 1143 站 *U. peregerina* 与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值的平均值约为 $(0.614 \pm 0.07) \times 10^{-3}$, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 差值的平均值约为 $(0.692 \pm 0.04) \times 10^{-3}$. 1143 站 *U. peregerina* 与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值与大西洋和东太平洋的标准差值 0.64×10^{-3} 比较接近, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值却比大西洋和东太平洋的标准差值 0.9×10^{-3} 轻 0.208×10^{-3} , 可能是由于南沙珊瑚礁区较低的生产力缩小了沉积物与海水之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 的差异而引起的. 该均衡试验为南海甚至西太平洋的古海洋学研究提供了上述 2 种底栖有孔虫氧碳同位素值转换的标准.

关键词: 南海; ODP1143 站; 底栖有孔虫; 同位素.

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2004)01-0001-06

收稿日期: 2003-07-11

Stable Isotope Equilibrium Test between Benthic Foraminifer *Cibicoides* and *Uvigerina* at ODP Site 1143, Southern South China Sea

TIAN Jun, WANG Pin-xian, CHENG Xin-rong

Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Stable oxygen and carbon isotope records from ODP Site 1143 ($9^{\circ}21.72'N$, $113^{\circ}17.11'E$, 2772 m) in the southern South China Sea (SCS) are presented for the benthic foraminifers *Cibicoides wuellerstorfi* and *Uvigerina peregerina* in 64 samples. The results show that the average $\delta^{18}\text{O}$ difference between *Cibicoides wuellerstorfi* and *Uvigerina peregerina* of 64 samples at Site 1143 is $(0.614 \pm 0.07) \times 10^{-3}$, close to 0.64×10^{-3} of the standard oxygen isotopic difference in the Atlantic and the east Pacific, whereas the average $\delta^{13}\text{C}$ difference of these two species at Site 1143 is $(0.692 \pm 0.04) \times 10^{-3}$, much lighter than 0.9×10^{-3} of the standard carbon isotopic difference in the Atlantic and the east Pacific. The lighter value of $\delta^{13}\text{C}$ difference at Site 1143 may be caused by the low productivity in reef areas which had decreased the $\delta^{13}\text{C}$ difference between the depositions and the sea water. This test at Site 1143 provides an adjustive standard of oxygen and carbon isotope values between benthic foraminifer *Cibicoides wuellerstorfi* and *Uvigerina peregerina* for the paleoceanographic study in the South China Sea and even in the west Pacific.

Key words: South China Sea; ODP Site 1143; benthic foraminifer; isotope.

1 均衡试验的意义

中的微体化石——有孔虫则是古环境研究利用最频繁的材料. 不同的有孔虫具有不同的生态环境. 有孔

深海沉积岩心是古海洋学研究的基础, 而岩心

虫的丰度、组合特征以及它的地球化学性质如同位

素值可以反映古海洋学和古气候学特征,如海水的温度、盐度、pH值、CO₂分压、水团性质、温跃层深度、营养跃层深度以及气候的冰期、间冰期旋回等。在深海沉积岩心的各种物理、化学性质中,底栖有孔虫的稳定氧碳同位素($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$)最能线性地反映气候变化,底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录了北半球冰盖的大小和新生代地球的冰期、间冰期旋回,而底栖有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 则反映了海洋碳储库的大小,是全球碳循环的一个重要环节(Ruddiman, 2000)。有孔虫特别是底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线还是比较精确的年代标尺,根据曲线划分的氧同位素期次,再结合生物地层和磁性地层,以地球轨道的斜率和岁差为调谐目标,可以建立以有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 为调谐对象的不同海区的天文年代标尺,如全球大洋平均的晚更新世 SPECMAP 天文年表(Imbrie *et al.*, 1984),东太平洋 ODP 677 站(Shackleton *et al.*, 1990)和 846 站(Shackleton *et al.*, 1995)天文年表,大西洋 ODP 659 站(Tiedemann *et al.*, 1994)天文年表以及西太平洋 1143 站(Tian *et al.*, 2002)500 万年以来的天文年表。

古海洋学研究一般利用单一的有孔虫属种的氧碳同位素值,浮游有孔虫通常选取 *Globigerinoides ruber* 或 *Globigerinoides sacculifer*, 底栖有孔虫通常选取 *Cibicidoides* 或 *Uvigerina*。然而,受样品量的限制,在一个连续的剖面中,很难在每一个样品里都挑选到数量足够的满足同位素测定要求的单一属种的有孔虫壳体化石,这样的样品只能选用其他的属种替代。古海洋学研究中通常选用底栖有孔虫 *Cibicidoides* 的氧碳同位素值,如果某些样品中的 *Cibicidoides* 不能满足同位素测定的需求或缺乏该属,则选取 *Uvigerina* 替代。对于一定壳径范围内的属种,有孔虫壳体在与海水发生差异均衡作用后,不同底栖有孔虫壳体的氧碳同位素值之间存在一定的偏差,因此在使用 *Uvigerina* 的氧碳同位素值之前,必须经过校正,消除它与 *Cibicidoides* 的氧碳同位素值之间的偏差。通常在某一海区的单个柱状样中选取一定数量的样品,在每个样品中挑选一定壳径范围的 *Cibicidoides* 和 *Uvigerina*,测定 2 个属种的稳定氧碳同位素值,然后计算出每个样品里的 2 个属种氧碳同位素之间的差值,利用数学统计方法确定最优值,该最优值即 *Cibicidoides* 和 *Uvigerina* 氧碳同位素值的偏差。在大西洋和东太平洋,目前被广泛采用的

标准是将 *Uvigerina* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值减去 0.64×10^{-3} 使之与 *Cibicidoides* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均衡(Shackleton, 1974),将 *Uvigerina* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值加上 0.9×10^{-3} 使之与 *Cibicidoides* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均衡(Duplessy *et al.*, 1984)。然而在西太平洋,由于古海洋学研究起步较晚,该项研究未系统展开。本文即利用南海 ODP 184 航次 1143 站的深海岩心,第一次在南海开展类似的工作。

2 材料和方法

南海大洋钻探 184 航次在南海南北部 6 个站位 (ODP1143 - 1148) 共钻取 17 个钻孔,其中只有 1143 站位于南海南部,并处于西太平洋暖池的范围之内,适合研究本区的热带作用过程(Wang *et al.*, 2000)。1143 站位于北纬 9°21.72'N, 东经 113°17.11'E, 水深 2 772 m, 如图 1 所示。在 1143 站近 500 m 合成深度的岩心中,只有上部的 200 m 采用高级活塞取心器钻取了 3 个钻孔,以保证建立连续完整、未受扰动的深海沉积岩心记录。这 3 个钻孔,即 1143A, 1143B 和 1143C, 通过各个钻孔之间高分辨(2 cm)的磁化率和其他物理性质的对比,建立了统一的岩心合成深度。更新世至晚上新世的沉积物主要为橄榄色、绿色、浅灰绿色和绿灰色的粘土状超微化石混合物,以及富含超微化石的粘土或粘土。

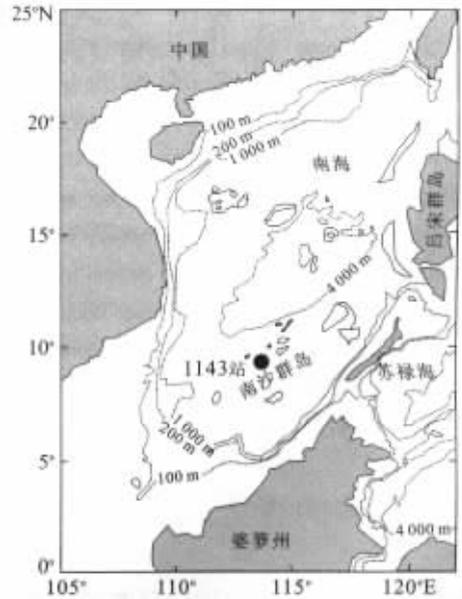


图1 南海 ODP1143 站站位示意图

Fig. 1 Location map of ODP Site 1143 in the South China Sea

1143 站用作同位素研究的样品按合成深度(mcd) 采自 3 个钻孔, 采样间距 10 cm, 时间分辨率约 2 ka.

采于 1143 站上部合成深度 190.77 m 的共 1992 个样品都用来测试底栖有孔虫和浮游有孔虫的稳定氧碳同位素. 样品的准备与测试均在上海同济大学海洋地质教育部重点实验室进行. 湿样先置于烘箱中在 60 °C 下烘烤 12 h, 再在自来水中浸泡 1~2 d, 之后用 63 μm 的筛子冲洗, 然后将冲洗好的湿样重新置于烘箱中在 60 °C 下烘干, 再用筛子筛选大于 150 μm 的有孔虫作稳定氧碳同位素分析. 用于同位素分析的有孔虫包括保存完整的底栖有孔虫 *Cibicidoides wuellerstorfi* (直径 0.3~0.9 mm, 2~8 枚个体, 合成深度 190.77 m 以上) 和 *Uvigerina peregerina* (长度 0.4~0.9 mm, 3~6 枚个体), 浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* (白色, 直径 0.3~0.36 mm, 8 枚个体, 合成深度 160.22 m 以上) 和 *Globigerinoides obliquus* (直径 0.3~0.36 mm, 8 枚个体, 合成深度 160.22~190.77 m) 以及次表层浮游有孔虫 *Pulleniatina obliquiloculata* (直径 0.3~0.36 mm, 8 枚个体, 合成深度 75.62 m 以上). 首先将有孔虫的个体用浓度大于 99.7% 的酒精在频率为 40 KHz 的超声波中洗涤 3 次, 每次持续时间 5~10 s. 洗涤完毕, 在 60 °C 的烘箱中干燥 5 h 之后转移到 Finnigan 自动碳酸钙制样装置中(Kiel III 型), 与原磷酸在 70 °C 下反应产生二氧化碳, 之后将收集的二氧化碳气体转移到 Finnigan MAT252 型稳定同位素质谱仪中测定氧碳同位素的比值. 精度标准参照中国国家碳酸钙标准(GBW04405) 和国际标准(NBS19). 2000 年 $\delta^{18}\text{O}$ 的标准偏差是 0.07×10^{-3} , $\delta^{13}\text{C}$ 的标准偏差是 0.04×10^{-3} . 最后, 遵循国际 NBS19 和 NBS18 标准将实验室测定的氧碳同位素值转换为国际 Pee Dee Belemnite (PDB) 标准.

3 结果与讨论

3.1 南海 ODP1143 站 *Cibicidoides* 与 *Uvigerina* 稳定氧碳同位素值之间的偏差

为了均衡底栖种 *Uvigerina peregerina* 与 *Cibicidoides wuellerstorfi* 之间的氧碳同位素值, 分别在 64 个样品中挑选底栖有孔虫 *U. peregerina* 和 *C. wuellerstorfi* 测试其氧碳同位素并计算差值. 统计结果显示, 南海南部 ODP1143 站 64 个样品中 *U. peregerina*

与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值的平均值约为 0.614×10^{-3} , 而 $\delta^{13}\text{C}$ 差值的平均值约为 0.692×10^{-3} . 直方图显示(图 2a, 2b) 64 个样品中 2 种底栖有孔虫的氧碳同位素差值均呈良好的正态分布, 差值的累积曲线呈标准的 S 形分布. 将 64 个样品的平均值作为 1143 站 2 种底栖有孔虫氧碳同位素相互转换的标准, 可知 1143 站 *U. peregerina* 与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值与大西洋和东太平洋的标准差值 0.64×10^{-3} 比较接近(Shackleton, 1974), 而 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值却比大西洋和东太平洋的标准差值 0.9×10^{-3} 轻 0.208×10^{-3} (Duplessy et al., 1984), 偏差较大. 南海较小的 *U. peregerina* 与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 差值可能是由于南沙珊瑚礁区较低的生产力缩小了沉积物与海水之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 的差异而引起的, 详细地澄清这个问题需要做进一步的工作.

2 个底栖有孔虫的氧碳同位素差值是否与气候变化相关呢? 比如是否与冰期、间冰期的变化相关, 或与海洋碳储库的大小变化相关. 本文总共测试了 64 个样品中的 2 种底栖有孔虫的氧碳同位素值, 64 个样品按一定的间距选取, 既有冰期的样品, 也有间冰期的样品. 通常, 冰期的氧同位素值比间冰期的氧同位素值要大得多, 因此将 64 个样品中的氧同位素值作为横坐标可以表示冰期、间冰期的变化, 即以一定的值为界限, 大于此值的样品可以看作是冰期的样品, 而小于此值的样品可以看作是间冰期的样品. 冰期的大洋水团性质与间冰期的水团性质存在明显的差异, 如果 2 个底栖有孔虫种的氧碳同位素差值与此相关, 例如假设冰期大, 而间冰期小, 那么在 64 个样品的氧同位素值(横坐标) 与氧碳同位素差值(纵坐标) 的投影图上可以发现这种线性的关系, 而这是我们不希望看到的, 我们希望能有一个统一的差值转换标准, 既适用于冰期, 也适用于间冰期, 不受气候的冰期或间冰期旋回的影响. 同理, 将 64 个样品中底栖有孔虫的碳同位素值作为横坐标, 将 2 个底栖有孔虫种的氧碳同位素差值作为纵坐标, 可以探讨 2 个种之间氧碳同位素差值与海洋碳储库变化的关系, 即当海洋碳储库变大或变小时, 2 个种氧碳同位素差值是否也会线性地变大或变小. 同理, 我们不希望看到这种线性关系的存在.

如图 2 所示(图 2c~2g), 没有明显的证据表明南海底栖有孔虫 *U. peregerina* 与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值随气候或地质时间的变化而发

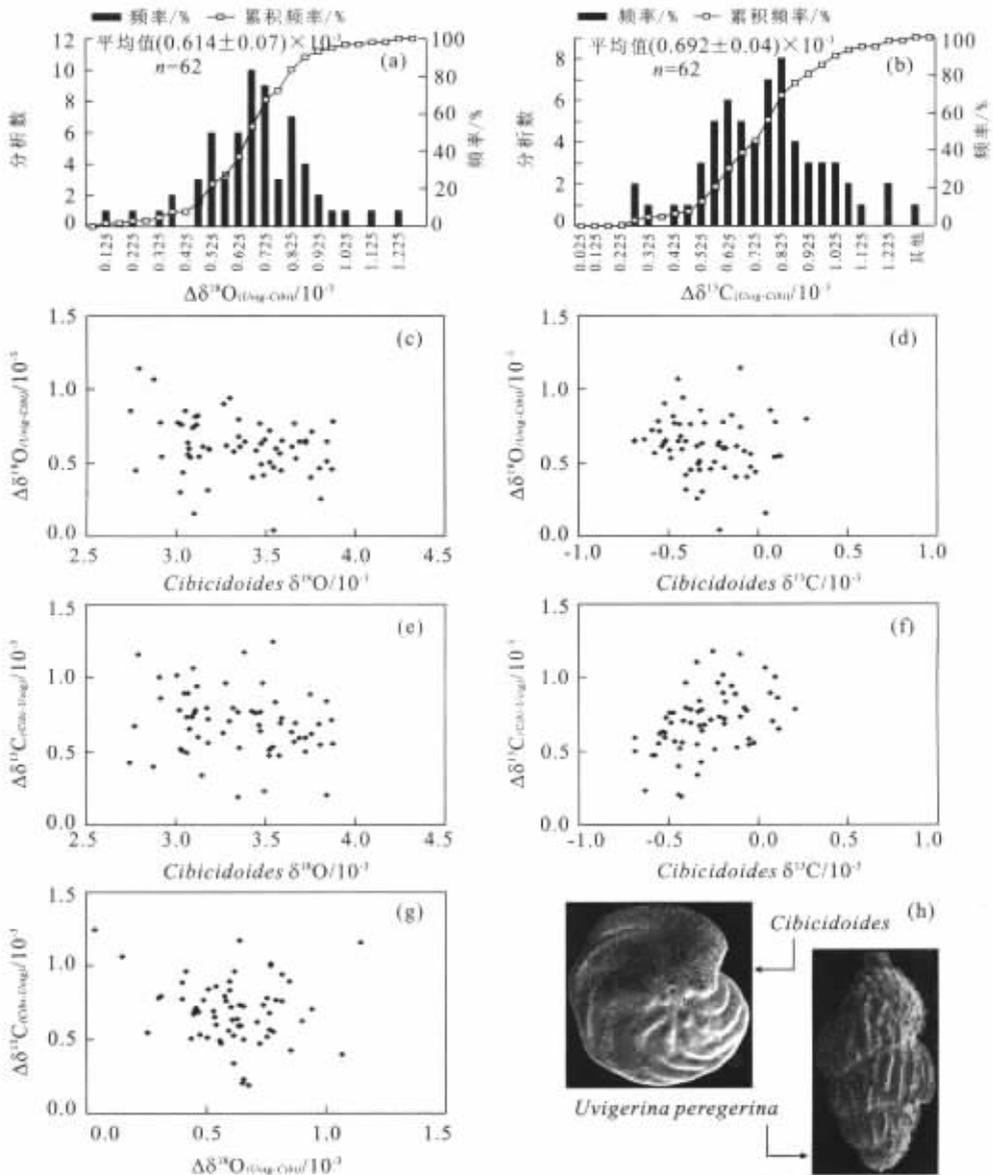


图2 a. 某一范围内底栖有孔虫 *Uvigerina peregerina* 和 *Cibicoides wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值与其出现频率的直方图 ;b. *Uvigerina peregerina* 和 *Cibicoides wuellerstorfi* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 差值与其出现频率的直方图 ;c. $\Delta\delta^{18}\text{O}_{(Uvig-Cibi)}$ 与底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系 ;d. $\Delta\delta^{18}\text{O}_{(Uvig-Cibi)}$ 与底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系 ;e. $\Delta\delta^{13}\text{C}_{(Cibi-Uvig)}$ 与底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系 ;f. $\Delta\delta^{13}\text{C}_{(Cibi-Uvig)}$ 与底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系 ;g. $\Delta\delta^{18}\text{O}_{(Uvig-Cibi)}$ 与 $\Delta\delta^{13}\text{C}_{(Cibi-Uvig)}$ 的关系 ;h. 本文中用作同位素分析的底栖有孔虫 *Cibicoides wuellerstorfi* 与 *Uvigerina peregerina* 的扫描照片

Fig. 2 a. Histogram of $\delta^{18}\text{O}$ offsets between *Uvigerina peregerina* and *Cibicoides wuellerstorfi* (mean value is 0.614×10^{-3} , $n = 62$); b. Histogram of $\delta^{13}\text{C}$ offsets between *Cibicoides wuellerstorfi* and *Uvigerina peregerina* (mean value is 0.692×10^{-3} , $n = 62$); c. $\Delta\delta^{18}\text{O}_{(Uvig-Cibi)}$ as a function of $\delta^{18}\text{O}$; d. $\Delta\delta^{18}\text{O}_{(Uvig-Cibi)}$ as a function of $\delta^{13}\text{C}$; e. $\Delta\delta^{13}\text{C}_{(Cibi-Uvig)}$ as a function of $\delta^{18}\text{O}$; f. $\Delta\delta^{13}\text{C}_{(Cibi-Uvig)}$ as a weak linear function of $\delta^{13}\text{C}$; g. $\Delta\delta^{18}\text{O}_{(Uvig-Cibi)}$ as a function of $\Delta\delta^{13}\text{C}_{(Cibi-Uvig)}$; h. photos of *Cibicoides wuellerstorfi* and *Uvigerina peregerina*

生系统性的变化。图2c 2e 显示了 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值与冰期或间冰期的关系(*Cibicoides* $\delta^{18}\text{O}$ 的重值指示冰期, 轻值指示间冰期), 而图2d 2f 则显示了 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值与海洋碳储库之间的关系(*Cibicoides* $\delta^{13}\text{C}$ 指示海洋碳储库)。图中随机分布的 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值表明它们不是气候状态(冰期、间

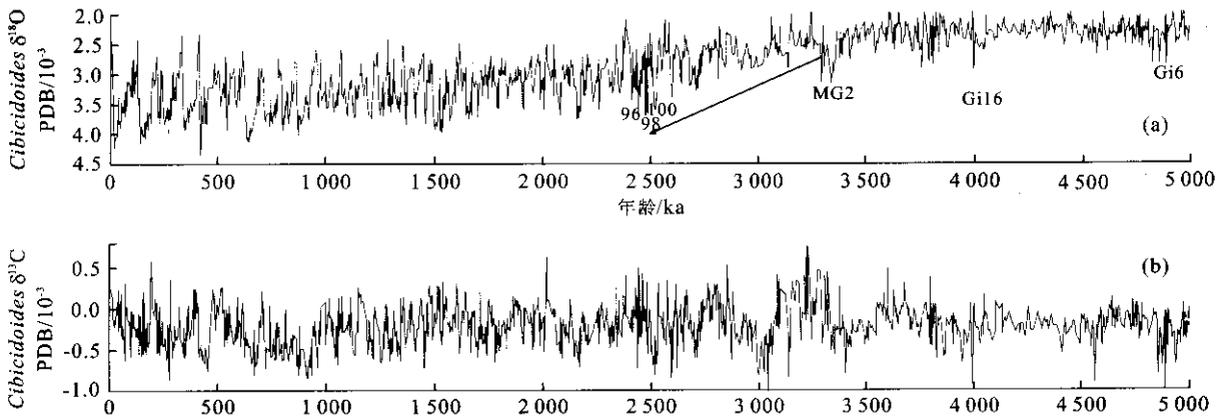


图3 南海南部 ODP1143 站 5 Ma 以来底栖有孔虫的氧碳同位素记录. a 中的阿拉伯数字代表某些特定的氧同位素期次, 箭头代表晚上新世全球逐渐变冷或北半球冰盖最终形成的过程

Fig. 3 Oxygen and carbon isotope records at ODP Site 1143 in the southern South China Sea for the past 5 Ma. The numbers below the curve a denote some marine isotope stages. The arrow indicates the late Pliocene global gradual cooling or the final forming process of the northern hemisphere ice sheet

冰期的变化, 海洋碳储库的变化)的函数, 同样, 图 2g 中也没有任何迹象表明 2 个种的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值之间存在任何函数关系. 但是如果仔细地观察图 2f, 似乎在 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 与 *Cibicoides* $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 之间存在微弱的线性关系, 即轻的 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 与轻的 $\delta^{13}\text{C}$ 对应. 这种线性关系可能暗示在营养物质丰富、 $\delta^{13}\text{C}$ 较低的底层海水中 *U. peregerina* 与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 差值较小, 而在营养物质匮乏、 $\delta^{13}\text{C}$ 较高的底层海水中 $\delta^{13}\text{C}$ 差值较大. 南海作为西太平洋最大的边缘海, 河流的输入量巨大. 与开放的东太平洋和大西洋相比, 大量从大洋表层沉降下来的低 $\delta^{13}\text{C}$ 的有机物不断地氧化导致了南海底层水的碳同位素值变得越来越轻, 这也许可以解释为什么相对于开放的太平洋和大西洋, 南海的底栖有孔虫 *U. peregerina* 与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 差值较小. 在 64 个样品中存在 2 个异常, 即 *U. peregerina* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值却高于 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 这种现象可能与生物扰动有关, 即上部地质年龄较轻的 *U. peregerina* (通常是间冰期的) 混入下部地质年龄较老的富含 *C. wuellerstorfi* (通常是冰期的) 的沉积物中 (Mix *et al.*, 1995), 由于无法对原始沉积岩心进行复查, 这种解释只是一种猜测, 但深海沉积岩心中普遍存在的生物扰动现象却是不可否认的.

3.2 底栖有孔虫氧碳同位素记录

将 1143 站测试的底栖有孔虫 *U. peregerina* 的

$\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 值按照标准转化为 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 即将 *U. peregerina* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值减去 0.614×10^{-3} , 而将它的 $\delta^{13}\text{C}$ 值加上 0.692×10^{-3} , 从而与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值均衡. 转化后 1143 站底栖有孔虫的氧碳同位素记录如图 3 所示. 从图 3a 中可以清楚地识别出 191 个氧同位素期次, 其中从氧同位素 MIS MG2 期到 MIS 96 期, 1143 站的底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 有一个明显的变重趋势, 指示了北极冰盖的生长扩张. 此外, 北极冰盖形成之前的氧同位素期次 MIS Gi16 和 MIS Si6, 以及北极冰盖生长扩大阶段的 MIS 96, 98, 100 和 MG2, 都可以在图 3a 上被清楚地识别出来. 图 3b 展示了 1143 站 500 万年来底栖有孔虫的碳同位素记录. 1143 站第 1 次提供了 500 万年来 ka 尺度的西太平洋底栖有孔虫的氧碳同位素记录, 为研究上新世至更新世西太平洋的古海洋学打下了坚实的基础, 其中氧同位素记录更是为西太平洋第 1 个天文调谐的 500 万年的年代标尺提供了良好的材料 (Tian *et al.*, 2002).

4 结论

在南海南部, 底栖有孔虫 *U. peregerina* 与 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值约为 $(0.614 \pm 0.07) \times 10^{-3}$, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值约为 $(-0.692 \pm 0.04) \times 10^{-3}$, 即 *U. peregerina* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值重约 $(0.614 \pm 0.07) \times 10^{-3}$, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值则轻约 0.

$692 \pm 0.04) \times 10^{-3}$, 为西太平洋特别是南海地区利用底栖有孔虫的氧碳同位素研究古海洋学提供了一个可以参照的标准。

致谢: 分析研究的样品及资料由国际大洋钻探计划提供。

References

- Duplessy J. C., Shackleton N. J., Matthews R. K., et al., 1984. $\delta^{13}\text{C}$ record of benthic foraminifera in the last interglacial ocean: Implications for the carbon cycle and the global deep water circulation. *Quaternary Research* 21: 225–243.
- Imbrie J., Hays J. D., Martinson D. G., et al., 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger A., ed., Milankovitch and climate. D. Reidel, Norwell, Mass., 269–305.
- Mix A. C., Le J., Shackleton N. J., 1995. Benthic foraminiferal stable isotope stratigraphy of Site 846 0–1.8 Ma. In: Pisias N. G., Mayer L. A., Janecek T. R., et al., eds., Proc. ODP Sci. Results 138: 839–854.
- Ruddiman W. F., 2000. Earth's climate: Past and future. W. H. Freeman and Company, New York, 174–192.
- Shackleton N. J., 1974. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*: Isotopic changes in the ocean during the last glacial. *Les Meth. Quant. d'etude Var. Clim. an Cours du Pleist.* Coll. Int. C. N. R. S. 219: 203–209.
- Shackleton N. J., Berger A., Peltier W. R., 1990. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci.* 81: 251–261.
- Shackleton N. J., Hall N. J., Pate D., 1995. Pliocene stable isotope stratigraphy of Site 846. In: Pisias N. G., Mayer L. A., Janecek T. R., et al., eds., Proc. ODP Sci. Results 138: 337–355.
- Tian J., Wang P. X., Chen X. R., et al., 2002. Astronomically tuned Plio-Pleistocene benthic $\delta^{18}\text{O}$ records from South China Sea and Atlantic-Pacific comparison. *Earth and Planetary Science Letters* 203: 1015–1029.
- Tiedemann R., Sarnthein M., Shackleton N. J., 1994. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic $\delta^{18}\text{O}$ and dust flux records from Ocean Drilling Program Site 659. *Paleoceanography* 9: 619–638.
- Wang P. X., Prell W. L., Blum P., et al., 2000. Proceedings of the ocean drilling program, initial reports 184. Ocean Drilling Program College Station, TX, 15–18.