

南海 ODP1143 站上新世至更新世天文年代标尺的建立^{*}

田 军, 汪品先, 成鑫荣, 李前裕

同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092

摘要: 基于底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的精确的年代标尺是古海洋学研究的基础, 特别是长度超过 5 Ma, 分辨率小于 5 ka 的连续 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在全球大洋深海记录中更是凤毛麟角. 在大西洋和东太平洋已经建立起了类似的代表性剖面, 如大西洋 ODP659 站和东太平洋 ODP846 站, 但在对全球气候有着重要影响的“西太平洋暖池区”还没有建立起这样的剖面. 以南海大洋钻探 184 航次 1143 站底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 为材料, 建立了西太平洋地区跨越 5 Ma、分辨率达 2~3 ka 的天文年代标尺. 天文调谐的基本原理参照 Imbrie *et al.* (1984), 并将斜率周期上 8 ka 的相位差和岁差周期上 5 ka 的相位差从晚更新世扩展到 5 Ma; 调谐目标选用 Laskar (1990) 的斜率和岁差; 调谐方法采用了有别于 ODP659 站和 ODP846 站的自动轨道调谐方法 (Yu and Ding, 1998). 调谐结果显示, 1143 站 190.77 m、191 个冰期、间冰期的深海沉积记录了 5.02 Ma 的南海古海洋学历史; 1143 站布容/松山磁性反转事件的年龄为 0.78 Ma, 与前人研究结果一致; 15 个识别出的浮游有孔虫生物事件年龄部分与已经发表过的年龄相吻合, 部分为该生物事件在南沙海区的新年龄. 由年代标尺推导出的南海沉积特征显示, 2.9 Ma 是沉积速率的一个转折点, 在此之前, 平均线性沉积速率只有 39.5 m/Ma, 冰期、间冰期平均波动幅度为 50 m/Ma; 2.9 Ma 以后, 平均线性沉积速率猛然上升到 65.4 m/Ma, 冰期、间冰期平均波动幅度为 200 m/Ma. 此外, 南海的沉积速率还显示出冰期或间冰期中的亚冰阶沉积速率高, 而相邻的间冰期或亚间冰阶的沉积速率低, 这种特点在更新世尤为典型. 这可能与全球冰量变化带来的冰期、间冰期差异性风化剥蚀和搬运有关.

关键词: 南海; ODP1143 站; 上新世; 更新世; 天文年代标尺.

中图分类号: P534.6

文章编号: 1000-2383(2005)01-0031-09

收稿日期: 2004-11-26

Establishment of the Plio-Pleistocene Astronomical Timescale of ODP Site 1143, Southern South China Sea

TIAN Jun, WANG Pin-xian, CHENG Xin-rong, LI Qian-yu

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

Abstract: An accurate timescale derived from benthic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ is crucial to paleoceanographic studies. In global oceans, there are few continuous $\delta^{18}\text{O}$ records for the benthic foraminifers which span the past 5 Ma and have time resolution better than 5 ka. Such representative profiles have been established for ODP Site 659 in the Atlantic and ODP Site 846 in the east Pacific, but still have been absent in the “Western Pacific Warm Pool”, an area playing an important role in global climate changes. Based on the benthic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ of ODP Site 1143 in the southern South China Sea, we establish a 5 Ma astronomical timescale for the west Pacific Plio-Pleistocene, with a time resolution of ~2-3 ka. The phases are fixed at 8 ka and 5 ka for the obliquity and precession bands respectively, and have been applied throughout the whole records. Obliquity and precession are calculated and treated as the tuning targets. An automatic orbital tuning method has been applied in this study, which is more efficient than those used at ODP Site 659 and 846. The results show that the 190.77 m long deep sea sediments in the South China Sea have recorded

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40476027, 40306011, 4999560, 40321603); 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000078500).

作者简介: 田军 (1974-), 男, 讲师, 从事海洋地质学的科研与教学工作. E-mail: tianjun@mail.tongji.edu.cn

^{*} 本文英文版主要内容曾发表于 Tian *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. 中文版对天文调谐的原理和方法作了详细介绍, 另外增加了从该年代标尺推论出的南海冰期间、冰期沉积特征方面的内容.

a paleoceanographic history of ~ 5.02 Ma, corresponding to 191 glacial/interglacial cycles. The tuned Brunhes/Matuyama paleomagnetic polarity reversal agrees well with an age of 0.78 Ma dated previously. The tuned ages for several planktonic foraminifer bio-events also agree well with published dates, and new ages for some other bio-events in the South China Sea are also estimated. The sedimentation rates calculated from this new timescale indicate that 2.9 Ma is a threshold for the sedimentation rate in the location of Site 1143. Before this time, the average sedimentation rate is ~ 39.5 m/Ma, with a small amplitude of ~ 50 m/Ma. After this time, the average sedimentation rate jumped to ~ 65.4 m/Ma, with an amplitude as large as 200 m/Ma. In addition, the sedimentation rates in the southern South China Sea were higher during glacials or stadials but lower during interglacials or interstadials, especially in the late Pleistocene period. This feature might be related to the global ice volume changes, which caused different erosion, denudation and transportation during glacials and interglacials.

Key words: South China Sea; ODP Site 1143; Pliocene; Pleistocene; astronomical timescale.

1 全球底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 长序列

精确的深海底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 年代表是进行高分辨率古海洋学研究的基础. 在 ODP184 航次之前, 全球深海沉积剖面中只有少数几个 ODP 站位能够提供千年尺度上跨越 5 Ma 的连续底栖有孔虫的氧同位素记录, 其中 2 个来自东太平洋的 ODP846 站 (Mix *et al.*, 1995a; Shackleton *et al.*, 1995a) 和 849 站 (Mix *et al.*, 1995b), 一个来自北大西洋的 ODP659 站 (Tiedemann *et al.*, 1994). 南海大洋钻探 184 航次在南海南北部打了 6 个钻孔, 其中南部的 ODP1143 站第一次提供了西太平洋地区千年尺度上的深海同位素长序列剖面, 这是世界上第一个跨越 5 Ma 且同时具有底栖和浮游有孔虫同位素记录千年尺度的同位素剖面.

本文将详细讨论 ODP1143 站上新世至更新世天文年代标尺的建立过程. 以 1143 站的底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录为调谐材料, 以地球轨道的斜率和岁差 (Berger and Loutre, 1991; Laskar, 1990) 为调谐目标, 采用自动轨道调谐方法 (Yu and Ding, 1998), 根据 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在斜率和岁差上的滤波结果与地球轨道参数的最佳相关性, 给 1143 站上部 190.77 m 的合成深度赋予相应的年龄, 从而建立 1143 站的深度、年龄模式. 天文调谐的理论前提是: 底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化是地球轨道参数偏心率、斜率和岁差变化的响应, 即地球轨道参数的变化周期同样会反映到底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化周期中.

2 材料和方法

共 1 992 个样品用来测试了底栖有孔虫的稳定氧、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. 具体方法参照文献田军等 (2004).

在米兰科维奇理论的指导下 (Milankovitch, 1930), Imbrie *et al.* (1984) 开创了天文调谐的基本方法, 如下所示: (1) 选择调谐的目标曲线. 参照 Hays *et al.* (1976) 以及 Morley and Hays (1981) 的方法, 将斜率 (ϵ) 与岁差 ($\Delta e \sin \omega$) 的变化曲线与同位素曲线进行比较. (2) 确定轨道参数变化与气候响应之间的相位. 将线性气候系统的常量定为 $(17 \pm 3) \text{ ka}$, 这意味着 $\delta^{18}\text{O}$ 的最小值在斜率周期上滞后于北半球夏季辐射量的最大值 69° , 约 7.8 ka, 而在岁差周期上则滞后 78° , 约 5 ka. (3) 数据处理. 使用数字滤波从原始的同位素记录中分解出 41 ka 周期和 21 ka 周期的滤波曲线, 然后将滤波曲线与相位移后的地球轨道的斜率和岁差曲线相匹配. (4) 确定年龄控制点. 年龄控制点选在氧同位素曲线冰期与间冰期的转折点上. (5) 通过交叉频谱分析计算地球轨道参数 (ETP) 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录之间在斜率和岁差上的相关系数, 以评价年代表的精确性.

Imbrie *et al.* (1984) 的调谐过程包括地层分析、初始年代框架的建立、轨道调谐、建立深度年龄曲线和合成等 5 个步骤. 第 3 个步骤以初始的年代框架开始, 反复进行, 是轨道调谐的主要步骤. 有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 数字滤波的中心周期分别为 22 ka 和 41 ka, 将滤波曲线进行相位位移后与岁差和斜率曲线分别进行对比. 如果相位移后的滤波曲线与斜率或岁差曲线仍存在较大的相差, 则调整初始年代框架重复第 3 步, 直到相位位移后的滤波曲线与斜率或岁差曲线匹配到自己满意为止.

3 1143 站地层框架

3.1 磁性地层与生物地层

1143 站的布容/松山古地磁极性反转事件位于合成深度 43.2 m 处. 通常情况下, 海相记录中布容/嵩山古地磁极性反转事件位于氧同位素 19 期以内, 年龄约为 780 ka(Shackleton *et al.*, 1990). 航次后的研究在合成深度 190.77 m 以内鉴定有 15 个浮游有孔虫生物地层事件. 表 1 详细地列出了这 15 个生物地层事件及它们的位置. 表 1 中前人研究的各生物地层事件的年龄主要依据 Berggren *et al.* (1995a, 1995b).

3.2 氧同位素地层

氧同位素期次(MISs)的识别主要依据 1143 站底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线(图 1)与 Shackleton 最近合成的 6 Ma 的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线之间的直观对比. Shackleton 的曲线 0~0.34 Ma 使用太平洋 V19-30 孔的氧同位素数据(Shackleton *et al.*, 1983), 0.34~1.818 Ma 使用 ODP677 孔的氧同位素数据(Shackleton *et al.*, 1990), 1.818~6.0 Ma 使用 ODP846 孔的氧同位素数据(Shackleton *et al.*, 1995b). 氧同位素期次(MIS)采用 Shackleton *et al.* (1995b)和 Tiedemann *et al.* (1994)的命名法则命名. 1143 站 0~190.77 m 共识别出 191 个氧同位素期次, 从 MIS 1 到 MIS T1,

如图 2 所示, 调谐后年龄约 5.02 Ma, 比 184 航次的初始报告估算的年龄略老一些(Wang *et al.*, 2000). 尽管 1143 站的磁性地层、生物地层和氧同位素地层都能分别提供一个相对准确的年代标尺, 利用 1143 站底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 将它调谐到地球轨道参数的斜率和岁差上去以建立一个更加准确的天文年代标尺仍然是有必要的, 它将为在南海进行轨道尺度上的古海洋学研究打下坚实的基础.

4 天文调谐的年代标尺

4.1 1143 站的调谐方法

本研究中, Laskar(1990)的斜率和岁差被用作天文调谐的目标曲线. 斜率和岁差周期上的相位差参照 Imbrie *et al.* (1984)的标准, 即假设在过去的 5 Ma 中, 底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 在斜率和岁差周期上分别滞后于 Laskar(1990)的斜率和岁差 8 ka 和 5 ka.

初始年龄控制点来自于 15 个浮游有孔虫事件的前人估算年龄, 通过初始年龄控制点之间的线性内插建立初始年代框架. 尽管布容/松山古地磁极性反转事件的年龄已被精确地定在 780 ka(Shackleton *et al.*, 1990; Tiedemann *et al.*, 1994), 该界限并没有被用作初始年龄控制点, 而是作为评价 1143 站天文年代表的一个标准. 为了提高工作效率, 本文采

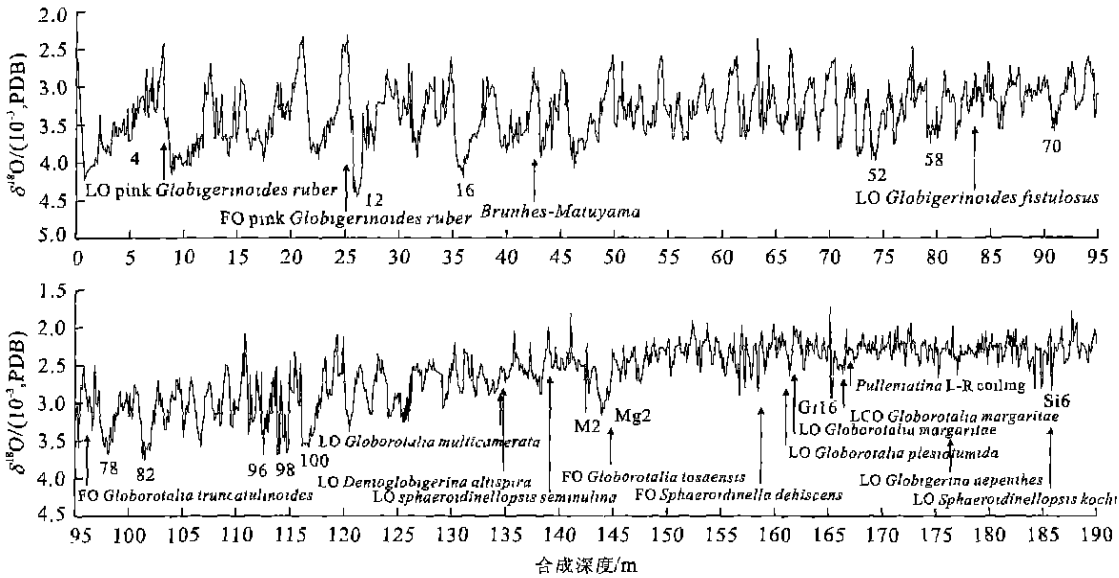


图 1 ODP1143 站底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 随合成深度的变化
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
Fig. 1 Benthic foraminifer $\delta^{18}\text{O}$ record from ODP Site 1143 plotted against the composite depth (mcd)
箭头指示布容/嵩山古地磁极性反转事件和浮游有孔虫事件. 数字代表选择的氧同位素期次

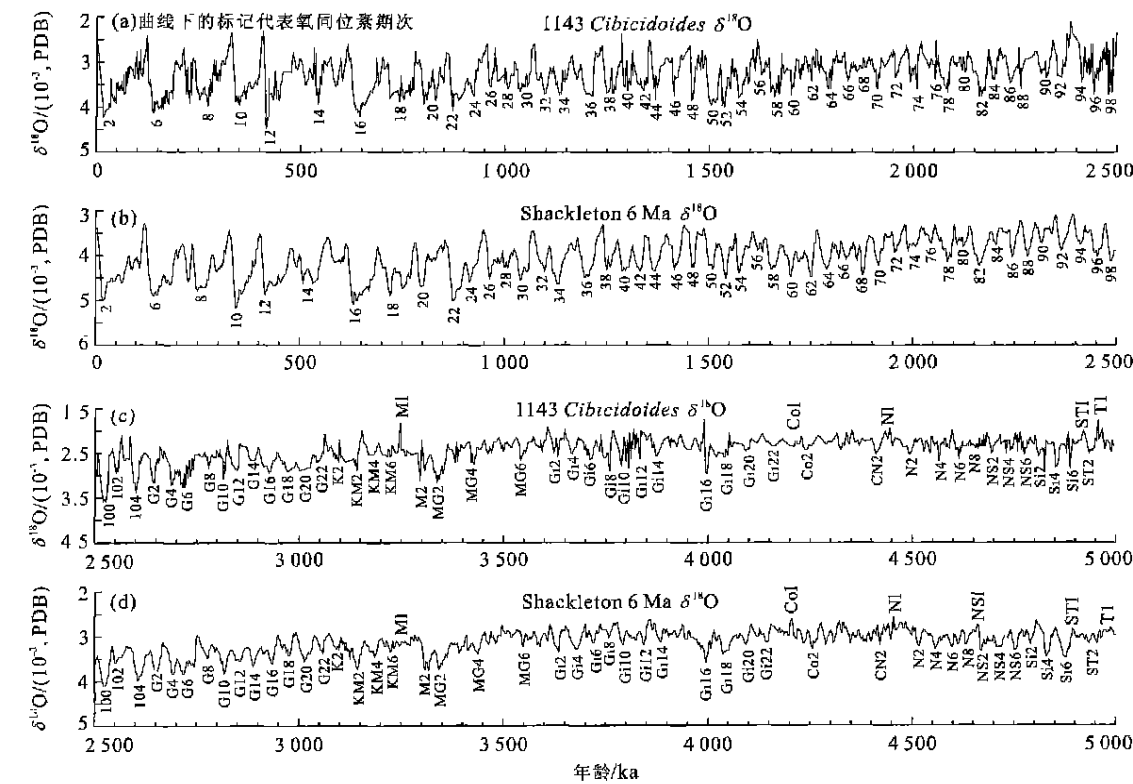


图 2 ODP1143 站底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 5Ma 天文调谐的年代表与 Shackleton 6 Ma 合成的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线(Shackleton *et al.*, 1983, 1990, 1995)

Fig. 2 Correlation of ODP 1143 $\delta^{18}\text{O}$ data with Shackleton's 6 Ma composite $\delta^{18}\text{O}$ curve

用了自动轨道调谐方法(Yu and Ding, 1998).该方法使用了动态最优化处理技术,利用 2 个相关系数 (R_1 和 R_2)作为评价最后结果的标准.关于该方法详细的介绍请参照文献 Yu and Ding(1998).当初始年龄框架建立以后,自动轨道调谐法能将任何气候替代性记录自动地调谐到轨道参数上去.图 2 展示了 5 Ma 来 1143 站底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 随地质时间变化的曲线,即 1143 站 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的天文年代表.在更新世,1143 站的 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间变化的曲线与 Shackleton 6 Ma 的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线吻合得较好,而在新近世两者存在一些小的差异.

4.2 天文年代标尺的评价

4.2.1 $\delta^{18}\text{O}$ 与地球轨道参数 ETP 的交叉频谱分析
与目标曲线进行交叉频谱分析是评估年代标尺的简单而行之有效的办法.本研究中 ETP 被用来代表地球轨道的 3 个参数的整体性变化,并被用作目标曲线.ETP 采用 Laskar(1990)的地球轨道参数计算方案,是正交化的偏心率(E)、正交化的斜率(T)和负的正交化的岁差(P)的总和.

由图 3 可知,几乎在所有的时间段上,1143 站

底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 ETP 在 4.1 万年的斜率周期、2.3 万年的岁差周期以及 1.9 万年的岁差周期上都强烈相关,相关系数超过 95% 的检验标准,只是在 4~5 Ma 之间,相关系数的强度才由超过 95% 的检验标准下降至 80%~95% 的检验标准之间. $\delta^{18}\text{O}$ 记录中的 10 万年、2.3 万年和 1.9 万年周期的频谱强度随时间段由老向新而增加,在这些周期上 $\delta^{18}\text{O}$ 与 ETP 的相关系数也随着时间段由老向新而变大. $\delta^{18}\text{O}$ 记录中的 4.1 万年周期是所有周期中最稳定的,在此周期上 $\delta^{18}\text{O}$ 与 ETP 的相关系数也是各个时间段里所有周期上的相关系数中最大的,说明 4.1 万年的气候周期是最稳定且占据支配性地位的周期,可以做全球对比.从图 3 气候周期的频谱强度在不同时间段里的高低变化可以看出,最后的 1 Ma,主气候周期从 4.1 万年过渡到了 10 万年,即所谓的“中更新世革命”(Raymo *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 2001).图 3 清楚地显示出,10 万年的气候周期在 1 Ma 以前并不稳定,只是在最近的 1 Ma 里,才变得最为稳定和突出.在 1143 站 5 Ma 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中,2.3 万年和 1.9 万年周期的变化在各个时间段

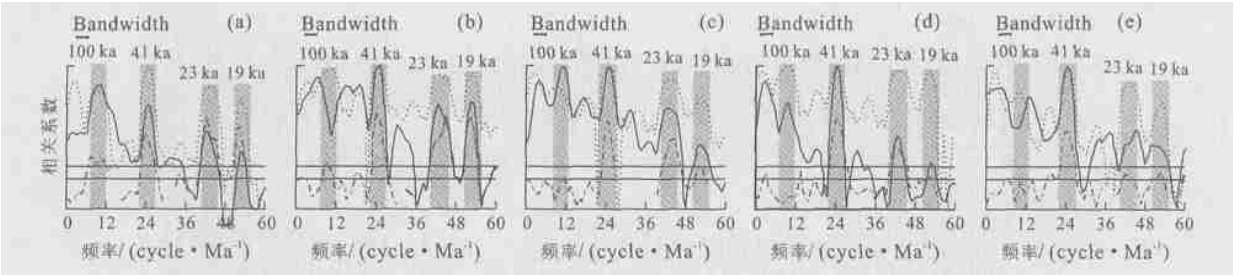


图 3 南海南部 ODP1143 站底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 与地球轨道参数 ETP 的交叉频谱分析

Fig. 3 Cross spectrum analyses of $\delta^{18}\text{O}$ with ETP for different time intervals

a. 0~1 Ma; b. 1~2 Ma; c. 2~3 Ma; d. 3~4 Ma; e. 4~5 Ma. 正交化后的频谱强度使用对数坐标(log). 实线代表 ETP 的频谱, 虚线代表同位素的频谱, 点划线代表相关系数(coherency)的频谱. 相关系数的频谱使用双曲线反切数坐标(hyperbolic arctangent). 上下的水平实线分别代表相关系数代表超过 95% 和 80% 的检验标准. 灰色的长方条分别代表 10 万年、4.1 万年、2.3 万年和 1.9 万年的米兰科维奇周期范围. ETP 是正交化后的偏心率、斜率和负岁差的总和. 采用 Laskar⁹⁰(1990)地球轨道计算方案

里都较突出, 而且各个时间段里 $\delta^{18}\text{O}$ 在这 2 个岁差周期上与 ETP 的相关系数也都较高. 在大西洋(Tiedemann *et al.*, 1994)、赤道东太平洋(Shackleton *et al.*, 1990, 1995b)和印度洋(Clemens *et al.*, 1991; Chen *et al.*, 1995)的有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录里也存在强烈的岁差信号. 这些都突出了热带地区岁差周期在全球气候变化中的重要性, 热带地区的气候变化主要按岁差周期传递到全球的气候系统中去.

4.2.2 $\delta^{18}\text{O}$ 的滤波曲线与斜率和岁差的对比 检验年代标尺的另外一个行之有效的办法就是气候变量的数字滤波与目标曲线的对比. 将 1143 站底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在 4.1 万年和 2.1 万年周期上的滤波曲线与相位移后的斜率和岁差曲线进行叠加对比, 观察两者在振幅和相位上的吻合程度, 如图 4 所示. 基本上, 1143 站底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的滤波曲线与相位移后的斜率和岁差曲线在振幅和相位上吻合得较好, 除了在一些狭窄的时间段里存在一些偏差. 1143 站 $\delta^{18}\text{O}$ 的 4.1 万年的滤波曲线与相位移后的斜率曲线在振幅和相位上吻合得最好, 几乎呈同步变化. 从 0~2.8 Ma, $\delta^{18}\text{O}$ 的 2.1 万年周期上的滤波曲线与相位移后的岁差曲线在振幅和相位上吻合得很好, 几乎也呈同步变化, 除了在 400 ka 左右两者在振幅上差异较大, 即在氧同位素 12 期, 滤波曲线的振幅比岁差的振幅要大许多. 如图 4 所示, 在南海南部 ODP1143 站, 底栖有孔虫和浮游有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 在氧同位素 12 期均出现 5 Ma 来的最重值, 且超过了南海北部 ODP1146 和南海以外站位有孔虫记录的同期氧同位素的值, 指示了南沙南部一个最冷的冰期. 为什么底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 在 2.1 万年周期上的滤波曲线与相位移后的岁差曲线在振幅上存在

如此大的差异? 如果地球轨道参数变化是气候变动的唯一外部驱动力, 那么在氧同位素 12 期, 岁差较小的变化幅度怎么可能引起 $\delta^{18}\text{O}$ 在 2.1 万年周期上的滤波曲线如此大的振幅变化? 原因目前尚不清楚, 只能留待以后解决. 在一些短的时间段里, 如 2.8~2.9 Ma, 3.95~4.3 Ma 和 4.65~5.0 Ma, $\delta^{18}\text{O}$ 21 ka 的滤波曲线与相位移后的岁差曲线存在较大的相位移, 有时两者甚至反相. 这可能与调谐的方法有关, 在上新世, 2 条曲线在 4.1 万年周期上的匹配必然会影响到他们在 2.1 万年周期上的匹配效果. 滤波曲线与相位移后的斜率及岁差曲线的叠加比较显示, 似乎只有在更新世和晚上新世, 气候的 4.1 万年和 2.1 万年周期的滤波曲线才会与相位移后的斜率和岁差曲线在振幅和相位上都吻合得较好.

调谐之后, 自动轨道调谐方法的 2 个相关系数 (R_1 和 R_2) 分别达到了 9.148 和 9.188, 结合交叉频谱分析和滤波分析的结果, 说明 1143 站天文调谐的年代标尺是可靠的.

4.2.3 1143 站古地磁事件和浮游有孔虫事件年龄

1143 站的天文年代表显示, 合成深度 42.5 m 处的布容/松山古地磁极性反转事件的年龄为 780 ka, 与目前国际上广泛采用的年龄一致 (Shackleton *et al.*, 1990; Hall and Farrell, 1993; Tiedemann *et al.*, 1994). 这进一步证明了 1143 站天文调谐的年代标尺的可靠性.

表 1 列出了根据 1143 站天文年代表估算的 15 个浮游有孔虫事件的年龄, 基本上多数年龄与前人发表的年龄相吻合. 比如, 前人发表的红拟抱球虫 *Globigerinoides ruber* 的末现面年龄为 0.12 Ma (Thompson *et al.*, 1979), 本次研究估算的该事件

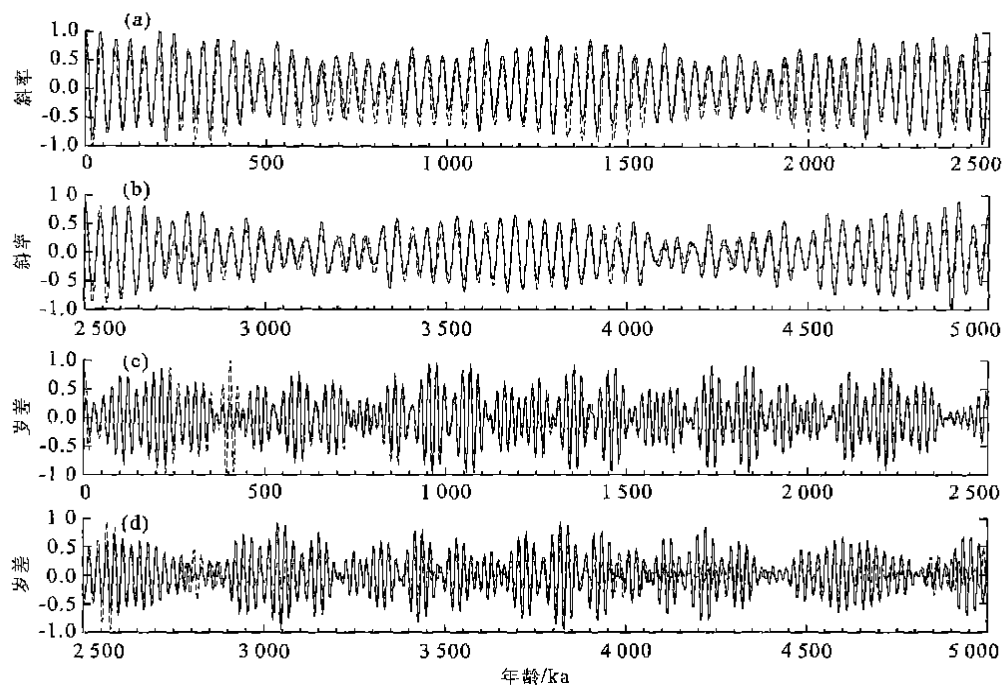


图 4 南海南部 ODP1143 站底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 在斜率和岁差上的滤波曲线与斜率(8 ka 滞后)和岁差(5 ka 滞后)的对比

Fig. 4 Site 1143 $\delta^{18}\text{O}$ record filtered at the obliquity (41 ka) and precession (23 ka) bands (solid lines) compared with orbital obliquity (8 ka lagged) and precession (5 ka lagged) (dashed lines)

实线为滤波曲线,虚线为斜率或岁差.斜率周期上的滤波中心频率为 $0.024\ 39\ \text{ka}^{-1}$,带宽为 $0.040\ \text{ka}^{-1}$,岁差周期上的滤波中心频率为 $0.047\ 62\ \text{ka}^{-1}$,带宽为 $0.015\ \text{ka}^{-1}$.采用 Turkey 滤波方法(Yu and Ding, 1998)

表 1 ODP1143 站浮游有孔虫事件的年龄

Table 1 Ages for ODP Site 1143 planktonic foraminifer bio-events

浮游有孔虫事件	合成深度/m	合成深度/m	估算年龄/Ma	可信度	前人估算年龄/Ma
LO <i>pink Globigerinoides ruber</i>	8.07	8.07	0.124	高	0.12(Thompson <i>et al.</i> , 1979)
FO <i>pink Globigerinoides ruber</i>	25.03	25.03	0.407	高	0.40(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
LO <i>Globigerinoides fistulosus</i>	83.40	83.40	1.729	高	1.77(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
FO <i>Globorotalia truncatulinoides</i>	96.09	96.09	2.031	高	2.00(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
LO <i>Globorotalia multicamerata</i>	134.71	134.76±0.05	3.038	中等	3.09(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
LO <i>Dentoglobigerina altispira</i>	134.81	134.86±0.05	3.041	高	3.09(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
LO <i>Sphaeroidinellopsis seminulina</i>	138.01	138.06±0.05	3.138	高	3.12(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
FO <i>Sphaeroidinella dehiscens</i>	158.35	158.36±0.05	3.800	高	3.25~5.54(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
FO <i>Globorotalia tosaensis</i>	144.39	144.34±0.05	3.348	高	3.35(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
LO <i>Globorotalia plesiotumida</i>	161.05	161.10±0.05	3.823	中等	3.77(Berggren <i>et al.</i> , 1995b)
LO <i>Globorotalia margaritae</i>	161.58	161.58	3.833	低	3.58(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
<i>Pulleniatina</i> left to right coiling	166.55	166.50±0.05	4.051	高	3.95(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
LCO <i>Globorotalia margaritae</i>	166.45	166.50±0.05	4.047	高	3.96(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
LO <i>Globigerina nepenthes</i>	176.32	180.75±4.43	4.586	低	4.20(Berggren <i>et al.</i> , 1995a)
LO <i>Sphaeroidinellopsis kochi</i>	185.78	190.80±5.02	4.887	低	4.53(Berggren <i>et al.</i> , 1995b)

FO: 初现面; LO: 末现面; LCO: 参考末现面. 浮游有孔虫事件低的可信度主要是由于样品中有孔虫个数较少或样品分析间距较大.

在南海南部的年龄为 0.124 Ma. 考虑到 1143 站底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的高分辨率, 本次研究对该事件的估算年龄应是更为精确. 然而, 对于较老的浮游有孔虫事件, 本次研究估计的年龄与前人发表的年龄存在较大分歧. 导致差异小于 5 万年的因素可能主要与样品分析的时间分辨率有关, 尽管我们有充分的理由相信 1143 站浮游有孔虫事件研究的时间分辨率比表 2 所引用的都要高. 导致差异大于 5 万

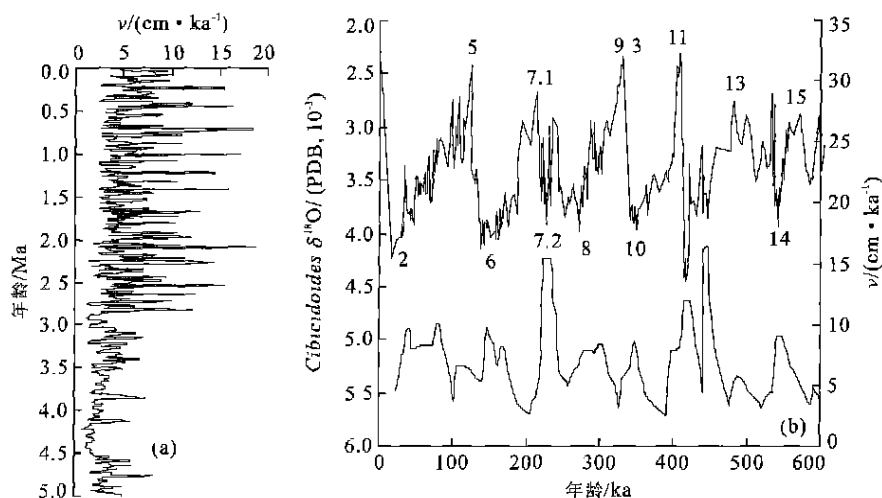


图 5 南海南部 ODP1143 站 5 Ma 来的线性沉积速率

Fig. 5 Sedimentation rate of ODP Site 1143 (0–5 Ma) after 5 points running smoothing

a. 5 Ma 以来 5 点平滑后的沉积速率; b. 上部曲线为 1143 站底栖有孔虫 *Cibicidoides* 的 $\delta^{18}\text{O}$, 下部曲线为 60 万年以来 5 点平滑后的沉积速率, 图中数字代表氧同位素期次

年的原因可能来自局部气候的影响, 比如南海南部的物理化学条件、溶解作用和化石保存条件, 以及对某一浮游有孔虫属种的定义标准上的差异. 此外, 阶段性的重现和灭绝对于浮游有孔虫来讲并不是孤立的现象, 特别是当它们来自于不同的生物地理分区时更是如此. 确定一个生物事件的新年龄需要有保存更好更连续的材料和更细致的工作. 因此, 一旦有了更好的发现, 一些已经建立的微体生物事件的年龄将被重新修改就不显得奇怪了. 参照 Berggren *et al.* (1995b) 的标准, *Globorotalia margaritae* 的末现面年龄为 3.4 Ma, 而参照 Berggren *et al.* (1995a) 的标准, 该事件的年龄为 3.58 Ma, 假如参照 Carter *et al.* (1999) 的标准, 该事件在南太平洋的年龄为 4.3 Ma. 在南海南部 1143 站, *Globorotalia margaritae* 在合成深度 166 m 以上含量较少, 它的末现面位于合成深度 161.58 m, 参照 1143 站天文调谐的年代表, 该事件在南海南部的年龄约为 3.833 Ma. *Globigerina nepenthes* 的末现面年龄参照 Berggren *et al.* (1995b) 的标准为 3.9 Ma, 参照 Berggren *et al.* (1995a) 的标准为 4.2 Ma, 在南海南部, 依据 1143 站天文年代表估计的该事件的年龄约为 4.586 Ma. 由于 1143 站合成深度 170 m 以上化石的保存状况不好以及样品分析的时间分辨率较小 (大于 5 ka, 表 1), 导致了一些事件年龄在南海南部的可信度降低.

4.2.4 南海南部线性沉积速率 如图 5 所示, 经 5 点移动平均后, 5 Ma 来平均线性沉积速率在 1143

站约为 57.2 m/Ma, 与 184 航次初始报告估计的沉积速率相近 (Wang *et al.*, 2000). 图 5a 清楚地显示出 2.9 Ma 是 1143 站线性沉积速率的一个转折点. 2.9 Ma 以前, 平均线性沉积速率只有 39.5 m/Ma, 冰期、间冰期平均波动幅度为 50 m/Ma; 2.9 Ma 以后, 平均线性沉积速率猛然上升到 65.4 m/Ma, 冰期、间冰期平均波动幅度为 200 m/Ma. 前人研究成果发现, 在南海, 冰期的沉积速率是毗邻的间冰期沉积速率的 2 倍 (Huang and Wang, 1998). 图 5b 清楚地展现了 60 万年以来, 南海南部冰期沉积速率高于毗邻的间冰期沉积速率的特点. 然而图 5b 也显示, 南海南部氧同位素 7.2 期的沉积速率几乎达到了冰期沉积速率的水平, 似乎与该特点不符. 为了解释这个异常, 我们先观察底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线. 同位素 7.2 期是间冰期中的一个冷期, 底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 接近 4×10^{-3} , 与同位素 4, 8 和 10 期等冰期的 $\delta^{18}\text{O}$ 值异常接近, 说明在南海同位素 7.2 期已经接近冰期的水平. 因此, 1143 站同位素 7.2 期高的沉积速率与南海冰期、间冰期沉积速率变化的基本规律并不矛盾. 图 6 展示了 1143 站底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 与对应的沉积速率之间的关系, 该图反映两者之间呈线性相关关系, 这进一步说明, 在南海冰期沉积速率高, 间冰期沉积速率低.

冰期期间, 裸露的陆架遭受侵蚀, 由此带来大量的陆源物质注入南海海盆, 因而提高了冰期南海南部的沉积速率. 冰期古巽它河流经印尼山脉和岛屿

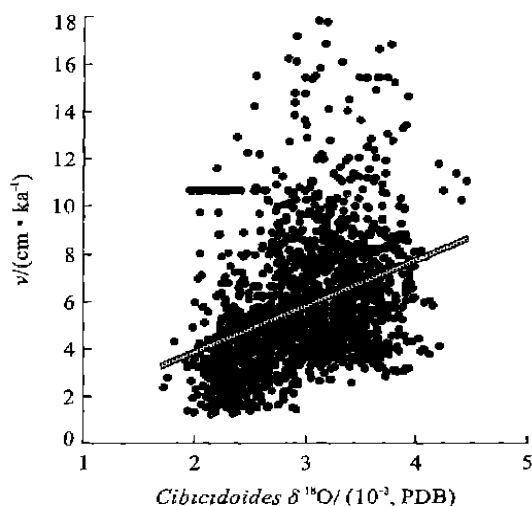


图6 南海南部 ODP1143 站 5 Ma 来沉积速率与底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值的关系

Fig. 6 Relationship between the benthic $\delta^{18}\text{O}$ and sedimentation rate of ODP Site 1143 (0–5 Ma), southern South China Sea

灰线代表底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值的一元线性回归趋势线

的大部分区域,它带来的陆源沉积物应对冰期南海南部高的沉积速率产生很大的影响。冰期高的沉积速率只是相对间冰期而言,并不意味着冰期越冷,沉积速率越高。例如,同位素 12 期是南海底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中最冷的冰期,同位素 7.2 期是间冰期中的一个冷期,比 12 期要暖,但是 1143 站 12 期的沉积速率比 7.2 期的沉积速率还要低。因此,其他的一些因素,比如陆架的暴露程度以及河流的搬运能力也会影响冰期南海南部沉积速率的变化。

5 结论

本文以 1143 站底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 为调谐对象,以地球轨道的斜率(Laskar⁹⁰)为调谐目标,使用自动轨道调谐方法,建立了西太平洋地区 5 Ma 以来的天文年代标尺。调谐后,1143 站布容/松山磁性反转事件的年龄为 0.78 Ma,与前人研究结果一致;一些识别出的浮游有孔虫生物事件的年龄也与已经发表过的年龄相吻合;此外,本文还确定了南海南部部分浮游有孔虫生物事件的年龄。

致谢:分析研究的样品及资料由国际大洋钻探计划提供。

References

- Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quat. Sci. Rev.*, 10, 297–317.
- Berggren, W. A., Kent, D. V., Swisher III, C. C., et al., 1995a. A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In: Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M. P., et al., eds., *Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation. Spec. Publ. SEPM*, 54, 129–212.
- Berggren, W. A., Hilgen, F. J., Langereis, C. G., et al., 1995b. Late Neogene chronology: New perspectives in high-resolution stratigraphy. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107, 1272–1287.
- Carter, R. M., McCave, I. N., Richter, C., et al., 1999. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Initial Reports 181, Ocean Drilling Program, College Station, TX.
- Chen, J., Farrell, J. W., Murray, D. W., et al., 1995. Timescale and paleoceanographic implications of a 3.6 m.y. oxygen isotope record from the northeast Indian Ocean (Ocean Drilling Program Site 758). *Paleoceanography*, 10, 21–47.
- Clemens, S. C., Prell, W., Murray, D., et al., 1991. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon. *Nature*, 353, 720–725.
- Hall, C. M., Farrell, J. W., 1993. Laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age from ash D of ODP Site 758; Dating the Brunhes-Matuyama reversal and oxygen isotope stage 19. 1. *Eos Trans. AGU*, 74 (16), 110.
- Hays, J. D., Imbrie, J., Shackleton, N. J., 1976. Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 194, 1121–1132.
- Huang, W., Wang, P., 1998. A quantitative approach to deep-water sedimentation in the South China Sea. *Sci. in China (Series D)*, 41, 195–201.
- 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.
- Laskar, J., 1990. The chaotic motion of the solar system: A numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus*, 88, 266–291.
- Milankovitch, M., 1930. Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. In: Koppen, W., Geiger, R., eds., *Handbuch der Klimatologie*. Gebruder Borntraeger, Berlin, 1 (A), 1–76.
- Mix, A. C., Le, J., Shackleton, N. J., 1995a. 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.
- Mix, A. C., Pisias, N. G., Rugh, W., et al., 1995b. Benthic foraminifer stable isotope record from site 849 (0—5 Ma): Local and global climate changes. In: Pisias, N. G., Mayer, L. A., Janecek, T. R., et al., eds., Proc. ODP Sci. Results, 138, 371—412.
- Raymo, M. E., Oppo, D. W., Curry, W., 1997. The mid-Pleistocene climate transition: A deep sea carbon isotopic perspective. *Plaeoceanography*, 12, 546—559.
- Shackleton, N. J., Imbrie, J., Hall, M. A., 1983. Oxygen and carbon isotope record of East Pacific core V19—30: Implications for the formation of deep water in the late Pleistocene North Atlantic. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 65, 233—244.
- 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., 1995a. 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.
- Shackleton, N. J., Crowhurst, S., Hagelberg, T., et al., 1995b. A new late Neogene time scale: Application to Leg 138 sites. In: Pisias, N. G., Mayer, L. A., Janecek, T. R., et al., eds., Proc. ODP Sci. Results, 138, 73—101.
- Thompson, P. R., B  , A., 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.
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Stable isotope equilibrium test between benthic foraminifer *Cibicidoides* and *Uvigerina* at ODP Site 1143, southern South China Sea. *Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences*, 29(1), 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Tiedemann, R., Sarnthein, M., Shackleton, N. J., 1994. Astrochronic 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., Tian, J., Cheng, X., 2001. Transition of Quaternary glacial cyclicity in deep-sea records at Nansha, South China Sea. *Sci. in China (Series D)*, 44, 926—933.
- 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.
- Yu, Z., Ding, Z., 1998. An automatic orbital tuning method for paleoclimate records. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 4525—4528.

附中文参考文献

- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 2004. 南海 ODP1143 站底栖有孔虫 *Cibicidoides* 与 *Uvigerina* 稳定氧碳同位素值的均衡试验. 地球科学——中国地质大学学报, 29(1): 1—6.