

西太平洋暖池区第四纪钙质超微化石 氧碳同位素特征及意义

刘传联, 成鑫荣, 王汝建, 詹知湣, 吴晓光

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 对西太平洋暖池区 MD97—2140 柱状样 1.75 Ma 以来的钙质超微化石进行了氧碳同位素分析。结果表明超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 值在变化趋势和周期上都具有明显相似性。根据超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值也可以划分出 59 个氧同位素期, 1748 ka 到 900 ka 期间超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化周期以 41 ka 为主, 而 850 ka 到 6 ka 期间则以 100 ka 为主。这说明超微化石氧同位素分析可以像有孔虫氧同位素分析一样在大洋地层学和古海洋学、古气候学研究中发挥重要作用。超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化则呈现阶段性变化的特点, 以 900 ka, 480 ka 和 250 ka 时间面为界, 可分四大阶段。同时, MD97—2140 柱状样超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值的这种变化规律与邻近 ODP 807 站揭示的海水初级生产力变化趋势极为相似, 意味着超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值是反映海水初级生产力变化的一项重要指标。

关键词: 氧碳同位素; 钙质超微化石; 第四纪; 西太平洋暖池。

中图分类号: P53; P73

文章编号: 1000—2383(2005)05—0559—06

收稿日期: 2005—05—17

Oxygen and Carbon Isotope Records of Quaternary Calcareous Nannofossils from the Western Pacific Warm Pool and Their Palaeoceanographical Significance

LIU Chuan-lian, CHENG Xin-rong, WANG Ru-jian, JIAN Zhi-min, WU Xiao-guang

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

Abstract: Oxygen and carbon isotopic analyses have been carried out on calcareous nannofossils from core MD97-2140 in the Western Pacific warm pool. The results demonstrate that the $\delta^{18}\text{O}$ values of calcareous nannofossils for the past 1.75 Ma vary systematically with $\delta^{18}\text{O}$ values of planktonic foraminifer *Globigerinoides ruber* from the same core. The $\delta^{18}\text{O}$ records of calcareous nannofossils show a dominant 41 ka peak between 1478 and 900 ka and a 100 ka peak between 850 and 6 ka, and 59 isotope stages can be recognized. The similarity between $\delta^{18}\text{O}$ records of planktonic foraminifera and nannofossils implies that calcareous nannofossil $\delta^{18}\text{O}$ can also play an important role in stratigraphic and palaeoceanographic studies. The $\delta^{13}\text{C}$ records of nannofossils can be divided into four major stages respectively at the boundaries 900 ka, 480 ka and 250 ka. The trends of the nannofossil $\delta^{13}\text{C}$ records from MD97-2140 are similar to primary productivity variations at ODP site 807, also located in the Western Pacific warm pool, indicating that nannofossil $\delta^{13}\text{C}$ can be used as an indicator of sea surface palaeoproductivity.

Key words: oxygen and carbon isotope; calcareous nannofossils; Quaternary; Western Pacific warm pool.

钙质超微化石分析是古海洋学、古气候学研究的一个重要手段。传统研究方法主要是古生物学方面的内容, 即研究化石的属种组合、丰度、形态变化及各属种之间比值等。通过这些指标可以再造表层海水温度、上层水体结构和初级生产力的演化, 并进一步探讨古气候变化及机制(Molfino and McIntyre-

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40376019, 40331002, 40125015); 国家重点基础研究专项项目(G2000078502); 创新研究群体科学基金项目(No. 40321603)。

作者简介: 刘传联(1963—), 男, 教授, 主要从事钙质超微化石与古海洋学研究. E-mail: liucl@mail.tongji.edu.cn

re, 1990; Beaufort *et al.*, 1997; Baumann *et al.*, 1999). 除古生物学研究以外, 钙质超微化石地球化学研究及应用也是近年来蓬勃发展的新领域, 尤其是氧碳稳定同位素分析显示了重要的地层学和古海洋学意义。

早在 20 世纪 70 年代中期, 学术界就已认识到超微化石同位素成分的古海洋学应用潜力 (Anderson and Cole, 1975; Margolis *et al.*, 1975)。20 世纪 80 年代, Dudley *et al.* (1980) 多次对现代颗粒藻进行室内饲养并测试其氧同位素成分, 以探讨颗粒藻同位素平衡问题及其与温度的关系。这期间, 其他学者对世界不同海区表层沉积和第四纪沉积超微化石同位素也做了许多工作 (Goodney *et al.*, 1980; Anderson and Steinmetz, 1981, 1983; Steinmetz and Anderson, 1984; Paull and Thierstein, 1987)。20 世纪 90 年代是超微化石同位素研究比较沉寂的 10 年, 只有 Steinmetz (1994) 进行了总结, 并没有实质性工作开展。近年来超微化石同位素分析又重新唤起了学术界的注视, 主要是在样品处理方法和对超微化石同位素分馏机理方面又取得了许多新的进展 (Ziveri *et al.*, 2000; Stoll and Ziveri, 2002; Ziveri and Stoll, 2002)。这些研究工作表明, 钙质超微化石氧碳同位素分析可以像有孔虫同位素分析一样, 在大洋地层学和古海洋学、古气候学研究方面具有重要的应用价值。

西太平洋暖池是当今古海洋学、古气候学研究的热点地区。到目前为止, 还未见该区第四纪钙质超微化石氧碳同位素方面的报道。本文以位于该区的 MD97-2140 柱状样第四纪沉积物为研究材料, 分析了钙质超微化石氧碳同位素特征, 并探讨了其地层学和古海洋、古气候学意义。

1 材料和方法

MD97-2140 是由法国的 Marion Dufresne 号 1997 年在赤道西太平洋钻取的。该柱状样位于 $2^{\circ}02.58'N, 141^{\circ}45.49'E$, 正处于西太平洋暖池的核心 (图 1)。柱状样水深为 2 547 m, 长度为 37.10 m。本次共取 256 个样品进行超微化石氧碳同位素分析, 除个别样品外, 15 m 以上样品间距是 10 cm, 15 m 以下样品间距是 20 cm。由于超微化石个体太小, 无法挑出单独个体进行分析, 所以参考国外同行的做法, 选用粒径 $4\sim25\mu\text{m}$ 之间的颗粒作为超微化

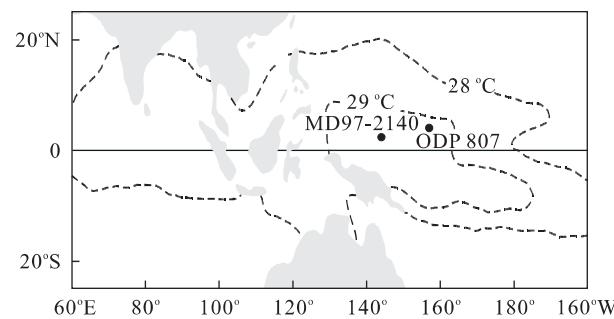


图 1 MD97-2140 柱状样和 ODP 807 站位置

Fig. 1 Location map of MD97-2140 and ODP site 807
28 °C 等温线内代表西太平洋暖池区的范围, 29 °C 等温线内则是暖池核心区

石组分来进行分析。样品处理方法和步骤如下:首先取一小块样品(约 5 mg)放在 100 mL 的烧杯中, 加入 pH 值为 9.4 的缓冲液 50 mL 浸泡 24 h; 之后把烧杯放在超声波仪中震荡 10 s, 用孔径 25 μm 的网筛和 pH 值为 9.4 的缓冲液冲洗过滤样品, 把小于 25 μm 沉积悬浮液冲洗到另一烧杯中; 接着把烧杯中的悬浮液沉淀 48 h, 把上面的清澈液体(小于 4 μm 的部分)用吸管吸掉剩下 4~25 μm 的部分; 最后把剩下的沉积物在 40 °C 下烘干供同位素分析。

稳定同位素分析在同济大学海洋地质国家重点实验室 Finnigan MAT252 质谱仪上进行。取烘干样品 1 mg 左右(视样品碳酸盐含量不同略有差异)放入样品瓶中, 在 70 °C 下经磷酸溶解后释放出 CO₂, 在稳定同位素比质谱仪上分析其中的氧、碳同位素比值 ($\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$)。分析精度用中国国家标准标样 GBW04405 检测, 标准偏差是: $\delta^{13}\text{C}$ 为 0.04×10^{-3} , $\delta^{18}\text{O}$ 为 0.07×10^{-3} , 与国际 PDB 尺度的衔接通过国际标样 NBS19 和 NBS18 进行。

MD97-2140 柱状样的年代地层学格架已由 De Garidel-Thoron *et al.* (2005) 建立, 他们通过浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 氧同位素分析 (10 cm 一个样), 得出该孔底部年龄约为 1.75 Ma (氧同位素 59 期)。本次超微化石氧碳同位素分析样品与有孔虫氧同位素分析样品是对应的, 只是样品间距不同, 所以我们可以得到每一样品的年龄。

2 氧同位素特征及意义

MD97-2140 柱状样 1.75 Ma 以来超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 $(-2.679\sim0.030) \times 10^{-3}$, 平均值为

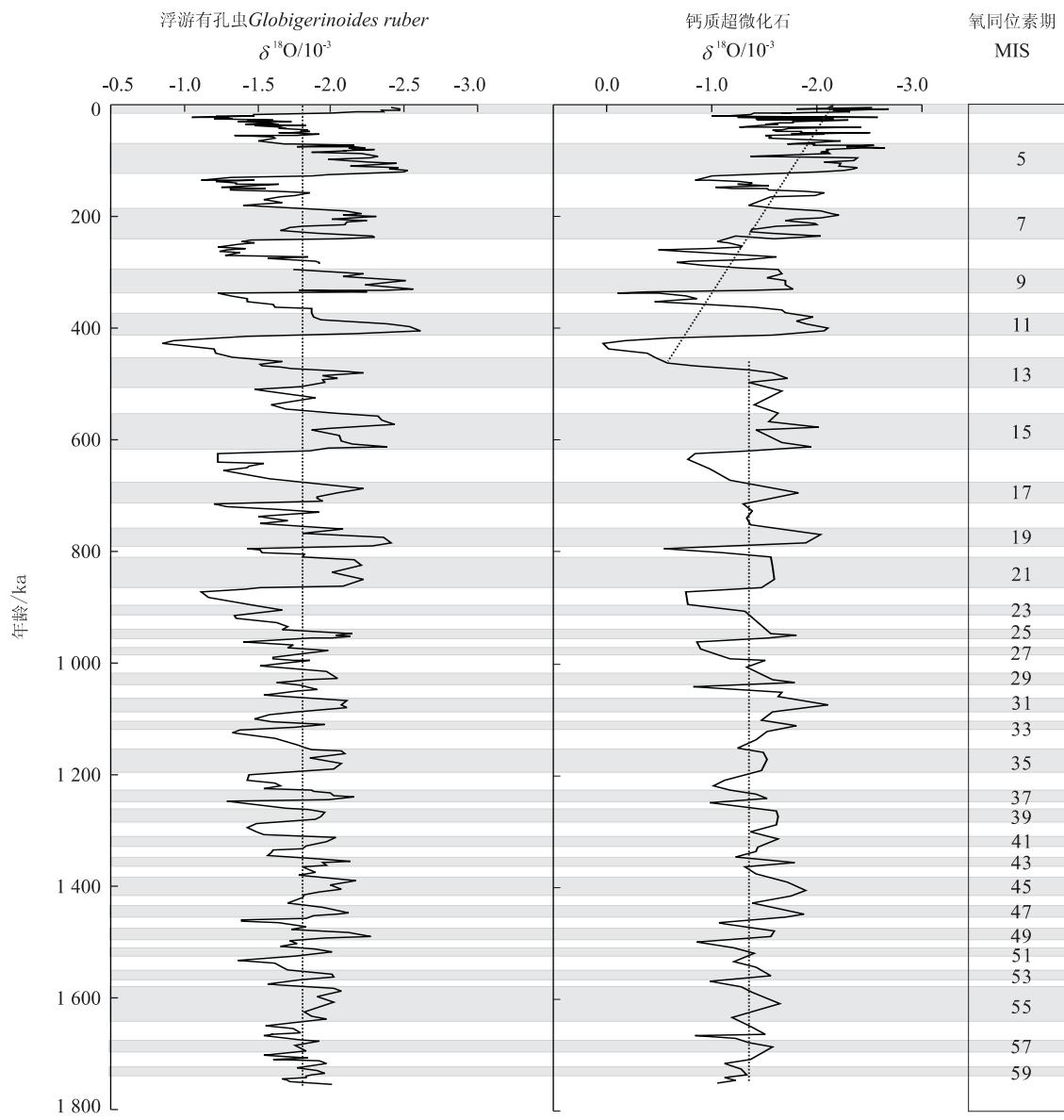


图2 MD97-2140柱状样1.75 Ma以来钙质超微化石与浮游有孔虫氧同位素曲线对比及氧同位素期划分

Fig. 2 Downhole variations in the $\delta^{18}\text{O}$ of calcareous nannofossils (this study) and planktonic foraminifera (De Garidel-Thoron *et al.*, 2005) over the past 1.75 Ma in MD97-2140

浮游有孔虫氧同位素值及样品年龄据 De Garidel-Thoron *et al.* (2005)

-1.510×10^{-3} ;而浮游有孔虫 *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 $(-2.620 \sim -0.850) \times 10^{-3}$, 平均值为 -1.798×10^{-3} .因此,相比较而言,超微化石氧同位素值比浮游有孔虫氧同位素值稍高,平均高 0.288×10^{-3} .

MD97-2140柱状样1.75 Ma以来钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化的最大特征就是与浮游有孔虫 *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 值波动趋势一致,两者呈明显的正相关关系(图2). 钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值高时,浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值也高.因此,根据1.75 Ma以来的钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值曲线,同样可以划分出59个氧同

位素期,这与浮游有孔虫氧同位素期的划分一致,清晰地反映第四纪冰期—间冰期的气候波动.此外,在曲线形状与 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化幅度上,钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值也与浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值相似.如钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值曲线为“锯齿状”,即冰期向间冰期的过渡为快速变化,而间冰期向冰期则为逐渐过渡,在几个大的冰期如MIS6, 8和12期,钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线同样偏移幅度大.

频谱分析则进一步表明,钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与浮游有孔虫 *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 值在变化周期上也是

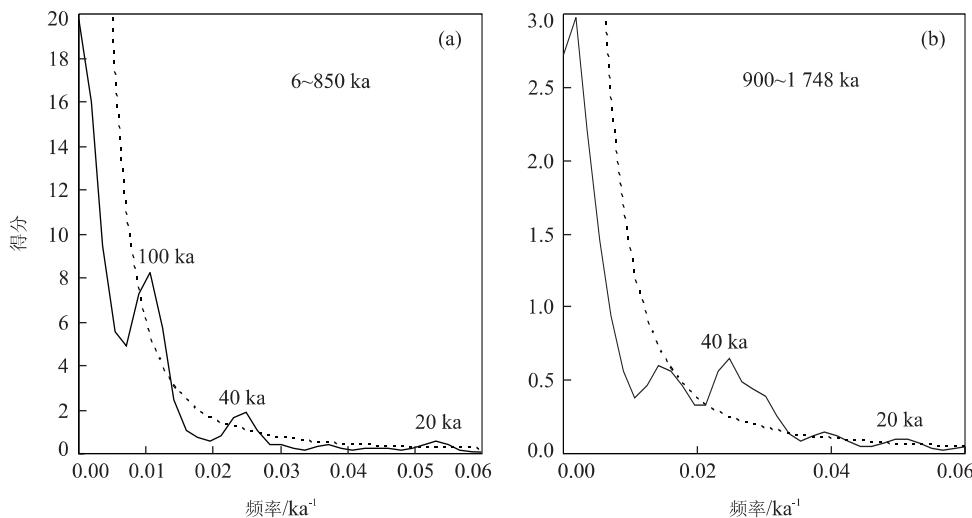


图3 MD97—2140 柱状样钙质超微化石氧同位素频谱分析

Fig. 3 Spectral analysis of $\delta^{18}\text{O}$ of calcareous nannofossils from MD97-2140

a. 6~850 ka; b. 900~1 748 ka; 点划线表示 90% 可信度

一致的。De Garidel-Thoron *et al.* (2005)的研究结果揭示出 MD97—2140 柱状样 1 748 ka 到 900 ka 期间 *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化周期以 41 ka 为主, 而 850 ka 到 6 ka 期间则以 100 ka 为主。即在“中更新世革命”前后古气候变化从地球轨道的斜率周期为主过渡为以偏心率周期为主。钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化周期同样显示了上述规律(图 3)。

MD97—2140 柱状样 1.75 Ma 以来超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与浮游有孔虫 *G. ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 值在波动趋势和周期上的相似性显示了其在大洋地层学和古气候学研究上的应用潜力。即根据超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值同样可以划分氧同位素期, 并通过与 SPECMAP 标准氧同位素曲线的对比得出地层年代格架。其次, 根据超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化的周期性可以揭示古气候变化的周期。超微化石同位素分析的方法步骤简单易行, 不具备微体古生物学专门知识的人员都可以进行分析, 所以这一方法在大洋地层学和古海洋学、古气候学研究中有极大推广价值。

3 碳同位素特征及意义

MD97—2140 柱状样 1.75 Ma 以来超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 $(-1.640 \sim -1.831) \times 10^{-3}$, 平均值为 0.262×10^{-3} 。由于我们未获得该柱状样有孔虫碳同位素分析数据, 所以无法进行两者之间的对比。

但与超微化石氧同位素曲线相比, MD97—

2140 柱状样 1.75 Ma 以来超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的最大特点就是阶段性明显(图 4)。以 900 ka, 480 ka 和 250 ka 时间面为界, 超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化可以分成 4 个阶段:首先从 1 478 ka 到 900 ka 期间, 超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值有逐渐升高趋势;到 900 ka 左右, 超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值急剧降低, 然后一段时间都保持相对稳定一直到 480 ka;480 ka 左右, 超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值再次升高, 一直到 250 ka;480 ka 到 250 ka 期间是该柱状样 1.75 Ma 以来超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高的时期;250 ka 左右, 超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值再次下降, 一直到 6 ka 都是超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低的时期。

有意思的是, MD97—2140 柱状样超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值的这种变化规律与邻近 ODP 807 站第四纪海水初级生产力的变化趋势极为相似(图 4)。ODP 807 站也位于西太平洋暖池核心区($3^{\circ}36'42''\text{N}, 156^{\circ}37'49''\text{E}$, 水深 2 803.8 m)(图 1)。笔者根据钙质超微化石 *Florisphaera profunda* 百分含量计算了 ODP 807 站 1.53 Ma 以来初级生产力的变化。发现该站初级生产力的变化也具有明显阶段性, 在 900 ka, 480 ka 和 250 ka 三个时间界面, 初级生产力的总体趋势曾发生剧烈变化。如在 900 ka 左右, 初级生产力值可以从 218 下降到 116 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。在 480 ka 左右, 初级生产力值则从 90 上升到 203 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。在 250 ka 左右, 初级生产力又从 191 下降到 73 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。这样 ODP 807 站 1.53 Ma 以来初级生产力的变化也可以划分成 4 个阶段:从 1 530~900 ka, 初级生产力值呈逐渐

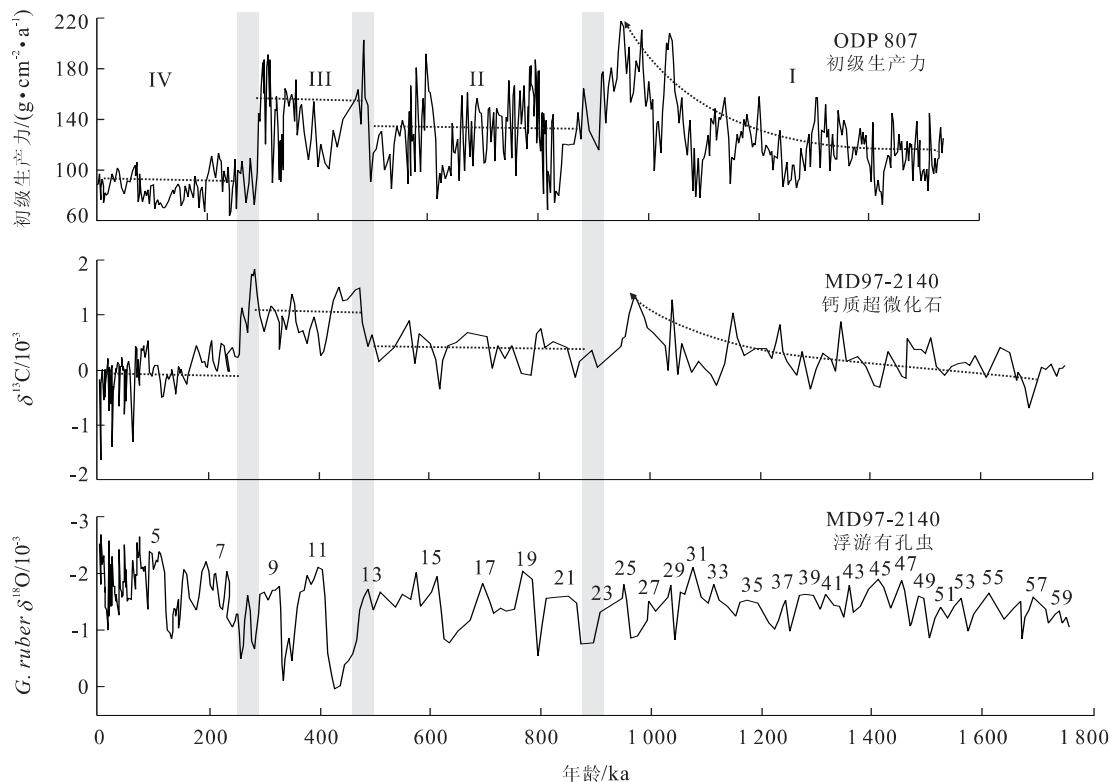


图 4 MD97—2140 柱状样 1.75 Ma 以来钙质超微化石碳同位素变化曲线与 ODP 807 站海水初级生产力变化曲线的对比

Fig. 4 Comparison between $\delta^{13}\text{C}$ variations of calcareous nannofossils in MD97-2140 and primary productivity variations in ODP site 807 over the past 1.75 Ma

增加趋势;然后在 900 ka 界限附近呈剧烈变化。经过短暂剧烈的变化,初级生产力值总体趋于稳定直到 480 ka。这一时间界面,初级生产力值开始升高,并一直到 250 ka;在 250 ka 左右,初级生产力急剧下降,自此以后,初级生产力保持较低水平,一直到现在。

MD97—2140 柱状样和 ODP 807 站两者相距甚近,同处在西太平洋暖池核心区。前者超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值与后者第四纪海水初级生产力变化曲线的相似性可能意味着超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值是反映海水初级生产力变化的一项重要标志。因此,根据钙质超微化石的碳同位素分析可以再造海水初级生产力的演变。

4 讨论与结论

如前所述,钙质超微化石同位素研究已有几十年的历史。但一直困扰其应用的有两大难题:一是钙质超微化石同位素与其生活的海水同位素不平衡,存在“生命效应”影响;二是钙质超微化石个体太小,无法分离出单个个体进行同位素测试。因此,超微化

石研究者纷纷探讨不同的研究方法,试图来消除这两者带来的影响。如首先通过对饲养颗粒藻同位素的测试来求出不同属种“生命效应”对氧同位素的影响范围(Dudley *et al.*, 1980; Dudley and Xlelson, 1989),再通过计算化石组合中各种的百分含量来校正混合样的氧同位素比值(Paull and Thierstein, 1987)。再如通过各种试验来建立分离单种超微化石的方法,然后分别测试不同属种的氧同位素值,以消除混合样带来的影响(Ziveri *et al.*, 2000; Stoll and Ziveri, 2002; Ziveri and Stoll, 2002)。

根据笔者对 MD97—2140 柱状样 1.75 Ma 以来超微化石氧同位素的研究,它们与同一样品浮游有孔虫氧同位素成分具有明显的相关性,无论在波动趋势和周期上两者都是一致的。这种相关性也见于世界其他海区超微化石氧同位素研究中。如 Anderson and Cole (1975) 对加勒比海和东太平洋更新世钻孔, Margolis *et al.* (1975) 对整个新生代剖面, Dudley and Nelson (1989) 对塔斯曼海南部 DS-DP593 站第四纪, Liu *et al.* (2002) 对南海南部近百

万年来钙质超微化石同位素的分析等。这说明虽然钙质超微化石与海水之间存在同位素不平衡, 虽然分析的是各属种混合样, 但超微化石氧同位素与浮游有孔虫氧同位素同步变化却是不争的事实。因此, 在应用超微化石氧同位素分析资料时, 我们完全可以忽略“生命效应”和“混合样”带来的影响, 用其来进行大洋地层学和古海洋学、古气候学研究。

此外, 除了上述一致性外, 超微化石与浮游有孔虫氧同位素在长期变化趋势上又表现出不同。De Garidel-Thoron *et al.* (2005) 认为 1.75 Ma 以来浮游有孔虫 $G. ruber$ $\delta^{18}\text{O}$ 值的长期变化趋势是稳定的, 并结合 Mg/Ca 比值认为第四纪暖池表层海水温度变化在长时间尺度上是稳定的。而超微化石氧同位素从 1748 ka 到 480 ka 相对保持稳定, 从 480 ka 到 6 ka 则有逐渐变轻的趋势(图 2)。如何来解释这一差异性? 如前所述, 480 ka 对于超微化石碳同位素变化也是一重要的时间界面, 指示这时海水初级生产力发生了显著变化。古生产力的变化又与上层海水结构变化有关。这是否意味着即使表层海水温度稳定, 上层海水结构的变化也会影响超微化石氧同位素? 这是很值得进一步探索的问题。

相对于氧同位素研究, 对超微化石碳同位素的讨论较少。Goodney *et al.* (1980) 曾对印度洋表层沉积中颗石藻碳同位素进行分析。他们认为虽然超微化石与海水之间碳同位素不平衡, 但超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 比值高低主要受表层海水生产力的控制。Liu *et al.* (2002) 对南海南部近百万年来钙质超微化石碳同位素的分析也表明, 超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化可以反映表层海水生产力的变化。本次研究则再一次证明超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值是指示海水初级生产力变化的一项标志。

综上所述, 可以得到如下结论: (1) MD97—2140 柱状样 1.75 Ma 以来钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与浮游有孔虫 $G. ruber$ $\delta^{18}\text{O}$ 值变化趋势和周期一致, 两者呈明显的正相关关系。因此, 超微化石氧同位素可以用来进行大洋地层学和古海洋学、古气候学研究。(2) MD97—2140 柱状样超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值与邻近该柱状样的 ODP 807 站第四纪海水初级生产力的变化趋势极为相似, 两者都呈现明显阶段性。超微化石碳同位素分析可以作为海水初级生产力再造的一项重要手段。

References

Anderson, T. F., Steinmetz, J. C., 1981. Isotopic and bios-

trigraphical records of calcareous nannofossils in a Pleistocene core. *Nature*, 294(5843):741—744.

- Anderson, T. F., Steinmetz, J. C., 1983. Stable isotopes in calcareous nannofossils: Potential application to deep-sea paleoenvironmental reconstructions during the Quaternary. In: Meulenkamp, J. E., ed., Reconstruction of marine paleoenvironments. *Utrecht. Micropal. Bull.*, 30: 189—204.
- Anderson, T. F., Cole, S. A., 1975. The stable isotope geochemistry of marine coccoliths: A preliminary comparison with planktonic foraminifera. *J. Foraminiferal Res.*, 5(3):188—192.
- Baumann, K. H., Čepel, M., Kinkel, H., 1999. Coccolithophores as indicators of ocean water masses, surface-water temperature, and paleoproductivity—Examples from the South Atlantic. In: Fischer, G., Wefer, G., eds., Use of proxies in paleoceanography: Examples from the South Atlantic. Springer-Verlag, 111—144.
- Beaufort, L., Lancelot, Y., Camberlin, P., et al., 1997. Insolation cycles as a major control of equatorial Indian Ocean primary production. *Science*, 278:1451—1454.
- 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(20):294—298.
- Dudley, W. C., Blackwelder, P., Brand, L., et al., 1986. Stable isotopic composition of coccoliths. *Mar. Micropaleontol.*, 10:1—8.
- Dudley, W. C., Duplessy, J. C., Blackwelder, P. L., et al., 1980. Coccoliths in Pleistocene-Holocene nannofossil assemblages. *Nature*, 285(5762):222—223.
- Dudley, W. C., Nelson, C. S., 1989. Quaternary surface-water stable isotope signal from calcareous nannofossils at DSDP Site 593, southern Tasman Sea. *Mar. Micropaleontol.*, 13:353—373.
- Goodney, D. E., Margolis, S. V., Dudley, W. C., et al., 1980. Oxygen and carbon isotopes of recent calcareous nannofossils as paleoceanographic indicators. *Mar. Micropaleontol.*, 5:31—42.
- Liu, C. L., Cheng, X. R., Zhu, Y. H., et al., 2002. Oxygen and carbon isotope records of calcareous nannofossils for the past 1 Ma in the southern South China Sea. *Chinese Sci. Bull.*, 47(10):798—803.
- Margolis, S. V., Kroopnick, P. M., Goodney, D. E., et al., 1975. Oxygen and carbon isotopes from calcareous nannofossils as paleoceanographic indicators. *Science*, 189: 555—557.

(下转 603 页)