

西菲律宾海 190 ka 以来钙质超微化石的氧碳同位素记录

赵京涛^{1,2,3,4}, 李铁刚¹, 常凤鸣¹, 李 军^{3,4}

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

4. 国土资源部青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

摘要: 对西菲律宾海 Ph05-5 柱状样 190 ka 以来钙质超微化石进行了氧碳同位素分析。研究结果表明, 钙质超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值在末次间冰期(MIS 5e)和全新世明显低于末次冰期(MIS 5d~2)和倒数第二次冰期(MIS 6)。超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与浮游和底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值都呈明显的正相关关系, 但超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值比浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 平均值高 0.431×10^{-3} , 比 *Neogloboquadrina dutertrei* $\delta^{18}\text{O}$ 平均值低 0.410×10^{-3} , 而这三者又远远低于底栖有孔虫 *Cibicides wullerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值。超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化阶段性特征明显, 并与该孔超微化石绝对丰度变化趋势极为相似, 二者共同反映出西菲律宾海大约从 190 ka 到 110 ka 的 MIS 6 和大约 MIS 5e 期, 表层海水初级生产力相当稳定且显著低于其他各时期; 大约从 MIS 5d 期开始表层初级生产力显著上升, 初级生产力的这一高值一致持续到约 25 ka 左右的末次冰期; 在 25 ka 以来的 MIS 1、2 期, 表层初级生产力有所下降, 但仍高于 190 ka 到 110 ka 的 MIS 6 和 MIS 5e 期。

关键词: 西菲律宾海; 钙质超微化石; 氧碳同位素; 初级生产力。

中图分类号: P736.22; P597

文章编号: 1000-2383(2008)02-0183-07

收稿日期: 2007-07-08

Oxygen and Carbon Isotope Records of Calcareous Nannofossils from the West Philippine Sea during the Last 190 ka

ZHAO Jing-tao^{1,2,3,4}, LI Tie-gang¹, CHANG Feng-ming¹, LI Jun^{3,4}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

4. Qingdao Institute of Marine Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China

Abstract: The piston core Ph05-5 recovered from the West Philippine Sea (16.049°N, 124.344°E, water depth 3382 m) was used to study the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ variations of calcareous nannofossils. The $\delta^{18}\text{O}$ values of calcareous nannofossils were obviously lower in Holocene and the last interglaciation than those in the last and the penultimate glaciation. During the last 190 ka the nannofossil $\delta^{18}\text{O}$ values were positively correlated with those of planktonic and benthic foraminifera from the same core. But the average $\delta^{18}\text{O}$ value of nannofossils was 0.431×10^{-3} , higher than that of planktonic foraminifera *Globigerinoides ruber* and was 0.410×10^{-3} , lower than that of planktonic foraminifera *Neogloboquadrina dutertrei*. All the above three average $\delta^{18}\text{O}$ values were much lower than those of benthic foraminifera *Cibicides wullerstorfi*. The change of nannofossil $\delta^{13}\text{C}$ values showed similar trends with the absolute abundance of calcareous nannofossils in core Ph05-5 which also indicates the primary productivity variations in the West Philippine Sea. The primary productivity stayed at a stable but rela-

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(No. KZCX3-SW-233); 国家自然科学基金重点项目(No. 90411014); 国家自然科学基金面上项目(Nos. 40506013, 40506015); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2007CB815903); 中国科学院海洋研究所知识创新工程青年人才领域前沿项目(No. 2007-10)。

作者简介: 赵京涛(1980-), 男, 博士, 海洋地质专业, E-mail: zhaojingtao113@163.com

tively low level at MIS 6 and MIS 5e. There was an abrupt rise at the beginning of MIS 5d for the primary productivity which retained high value until 25 ka BP. The primary productivity showed a slight decline during MIS 2 and MIS 1, but still higher than that of MIS 6 and MIS 5e.

Key words: West Philippine Sea; calcareous nannofossils; oxygen and carbon stable isotopes; primary productivity.

钙质超微化石分析是古海洋学、古气候学重要研究手段之一,除传统的属种组合定量分析和形态分析以外,超微化石地球化学分析也是其重要内容之一,特别是超微化石氧、碳稳定同位素分析已经证明能像有孔虫一样在古海洋学、古气候学研究中发挥重要作用(Anderson and Cole, 1975; Margolis *et al.*, 1975; Dudley *et al.*, 1980; Dudley and Nelson, 1989; Stoll and Ziveri, 2002; Ziveri *et al.*, 2003; 苏新等, 2004)。

“西太平洋暖池”是当今古海洋学、古气候学研究的热点地区。这是因为它不仅能为中高纬度地区提供水汽和热量,而且与亚洲季风和南方涛动等密切相关(Webster *et al.*, 1998),对于调节全球气候有举足轻重的作用。近年来,关于西太平洋暖池成因机制及其冰期旋回中的稳定性已经成为古海洋研究者探讨的热点,但使用的替代指标多以有孔虫组合及其同位素为主(Lea *et al.*, 2000; 翦知湓等, 2003; Visser *et al.*, 2003; 蒋来宾等, 2004; 田军等, 2004)。刘传联等(2002, 2005)曾对位于暖池边缘的南海 ODP1143 孔,暖池核心区的 ODP807 孔和 MD97-2140 孔第四纪钙质超微化石氧碳同位素进行分析,证明超微化石同位素在海水上层结构变化和古生产力再造方面具有重要应用潜力。

本文以热带西太平洋暖池北缘的 Ph05-5 柱状样为材料,通过钙质超微化石和有孔虫氧同位素值的对比,探讨钙质超微化石氧同位素地层学在该区的应用价值;并结合钙质超微化石绝对丰度的变化,分析该区 190 ka 以来初级生产力的演化历史。

1 材料与方法

Ph05-5 岩心(16.0°N, 124.34°E, 样长 400 cm, 水深 3 382 m)由中国科学院海洋研究所于 2004 年 12 月取自西菲律宾海吕宋岛以东海区(图 1)。该岩心主要由褐黄—灰绿色粉沙质粘土组成,在 108 ~ 110 cm、156 ~ 158 cm、272 ~ 274 cm、292 ~ 294 cm 和 356 ~ 366 cm 之间为明显的火山灰层(图 2),镜下初步观察所含火山玻璃无色透明,形状不规则。岩心均

为连续沉积,未见明显的沉积间断和突变界限。本次研究按 4 cm 间隔进行钙质超微化石定量统计及超微化石和有孔虫的氧碳稳定同位素分析,共分析样品 100 个。

钙质超微化石绝对丰度的统计采用 Baumann *et al.* (1998)的自然沉淀法。用于钙质超微化石稳定同位素分析的样品处理方法参照 Dudley and Nelson(1989)和刘传联等(2005)。浮游和底栖有孔虫氧、碳同位素分析分别挑选 300 ~ 350 μm 的浮游有孔虫 *G. ruber*、*N. dutertrei* 和 150 ~ 250 μm 的底栖有孔虫 *C. wullerstorfi* 壳体各 20 ~ 30 枚。钙质超微化石和有孔虫壳体的氧、碳稳定同位素分析在中国科学院海洋地质与环境重点实验室 IsoPrime 质谱仪上进行,分析精度 $\delta^{18}\text{O}$ 为 0.05×10^{-3} , $\delta^{13}\text{C}$ 为 0.08×10^{-3} ,通过 NBS18 标准校正为 PDB 标准。Ph05-5 岩心的 4 个 AMS¹⁴C 年代,不同层位分别采用 > 150 μm 的单种浮游有孔虫 *Globigerinoides sacculifer*、*G. conglobatus* 和 *G. ruber* 壳体 18 ~ 20 mg 由美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)AMS¹⁴C 测试中心分析而得(表 1)。

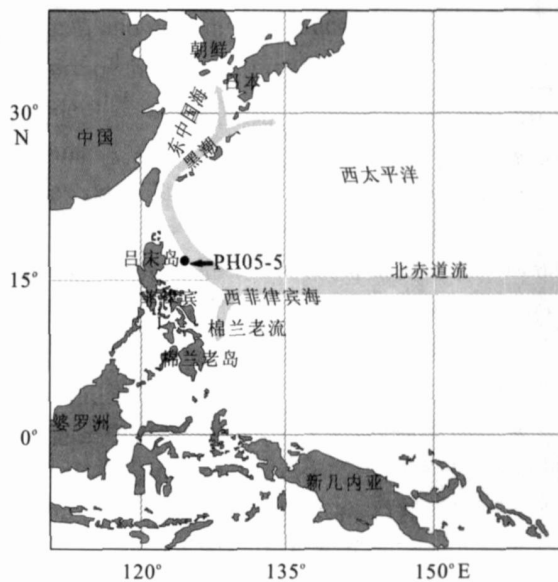


图 1 Ph05-5 岩心站位图, 箭头表示研究区内主要流系
Fig. 1 Location of core Ph05-5 used in this study. Arrows show the main ocean currents connected to this study

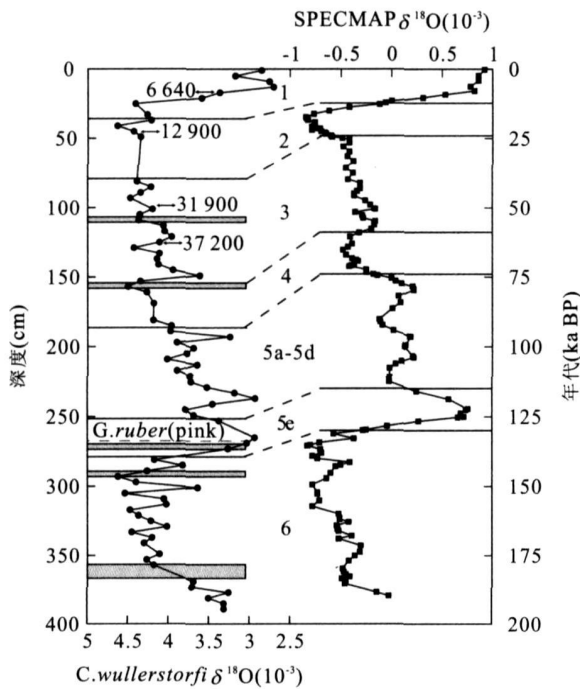


图 2 Ph05-5 岩心的 $\delta^{18}O$ 曲线与标准化的 $\delta^{18}O$ 曲线对比
 Fig. 2 Comparison between oxygen isotope curves core Ph05-5 and standardized curve

4 个年代数据均为 AMS¹⁴C 年代, 图中数字为对应的氧同位素期, 虚线代表粉红色拟孢球虫的绝灭界线, 灰色条带代表火山灰层

表 1 Ph05-5 柱状样 AMS¹⁴C 测年结果

Table 1 AMS¹⁴C ages of core Ph05-5

| 层位 (cm) | ¹⁴ C (a BP) | 测试材料 | 测试单位 |
|---------|------------------------|-----------------------|------------|
| 14~16 | 6 640±40 | <i>G. sacculifer</i> | Woods Hole |
| 46~48 | 12 900±65 | <i>G. sacculifer</i> | Woods Hole |
| 98~100 | 31 900±310 | <i>G. conglobatus</i> | Woods Hole |
| 122~124 | 37 200±350 | <i>G. ruber</i> | Woods Hole |

2 年龄模型

Ph05-5 岩心的氧同位素曲线显示了明显的冰期-间冰期旋回, 可很好地与 SPECMAP $\delta^{18}O$ 标准化曲线 (Martinson *et al.*, 1987) 进行对比. 因此该岩心的年龄模型依据 4 个 AMS¹⁴C 测年数据, 并结合 $\delta^{18}O$ 事件年代建立. 通过底栖有孔虫 *C. wullerstorfi* 的 $\delta^{18}O$ 曲线与 SPECMAP $\delta^{18}O$ 标准化曲线对比识别出一些特征的 $\delta^{18}O$ 事件, 据 Martinson *et al.* (1987) 地质年代表标定相应层位的年龄 (表 2). 以 4 个 AMS¹⁴C 年龄和 $\delta^{18}O$ 事件所确定的年龄为控制点, 通过线性内插和外延法建立整个岩心的年龄模型 (图 2). 结果显示 Ph05-5 岩心保存了氧同位

表 2 Ph05-5 柱状样的氧同位素地层

Table 2 Oxygen isotope stratigraphy of core Ph05-5

| 氧同位素期 | 底界年龄 (a) | 深度 (cm) |
|-------|----------|---------|
| 1 | 12 050 | 36 |
| 2 | 24 110 | 78 |
| 3 | 58 960 | 154 |
| 4 | 73 910 | 186 |
| 5 | 129 840 | 279 |

素 6 期以来, 大约 190 ka 以来的沉积记录. 此外, Ph05-5 岩心中浮游有孔虫 *G. ruber* (pink) 的绝灭层位在 268 cm 处, 该种在印度洋和太平洋的绝灭界线 (未现面) 为 120 ka (Thompson *et al.*, 1979), 与该年龄模型确定的年代一致.

3 结果与讨论

3.1 超微化石氧同位素特征

Ph05-5 柱状样 190 ka 以来钙质超微化石、浮游有孔虫和底栖有孔虫 $\delta^{18}O$ 值变化如图 3 所示. 钙质超微化石 $\delta^{18}O$ 值在末次间冰期 (MIS 5e, 平均值为 -1.275×10^{-3}) 和全新世 (平均值为 -1.097×10^{-3}) 明显低于末次冰期 (MIS 5d~2, 平均值为 -0.704×10^{-3}), 和倒数第二次冰期 (MIS 6, 平均值为 -0.771×10^{-3}), 清晰地反映第四纪冰期-间冰期的气候波动. Ph05-5 柱状样 3 种单种有孔虫的 $\delta^{18}O$ 值也是在冰期时高、间冰期时低, 4 条曲线的变化趋势总体上近乎平行. 对钙质超微化石氧同位素值与 3 种单种有孔虫氧同位素值的相关性分析表明, 钙质超微化石氧同位素值与表层浮游有孔虫 *G. ruber*, 中层浮游有孔虫 *N. dutertrei* 和底栖有孔虫 *C. wullerstorfi* 氧同位素值的相关系数分别为 0.48, 0.63 和 0.59 (表 3), 都呈明显的正相关关系.

综合上述结果, 根据 190 ka 以来的钙质超微化石 $\delta^{18}O$ 值曲线, 同样可以划分出 6 个氧同位素期, 与浮游有孔虫氧同位素得出的结果一致, 而其氧同位素值的变化趋势也与冰期-间冰期气候旋回有很好的吻合性.

关于钙质超微化石氧同位素在古海洋学中的应用问题长期以来一直存有争议, 其焦点在于单种“生命效应”的影响和钙质超微化石单种的分离提取. 为此, Dudley 等人通过对 8 个现代颗石藻种的室内饲养试验, 测试出不同属种“生命效应”对氧同位素的

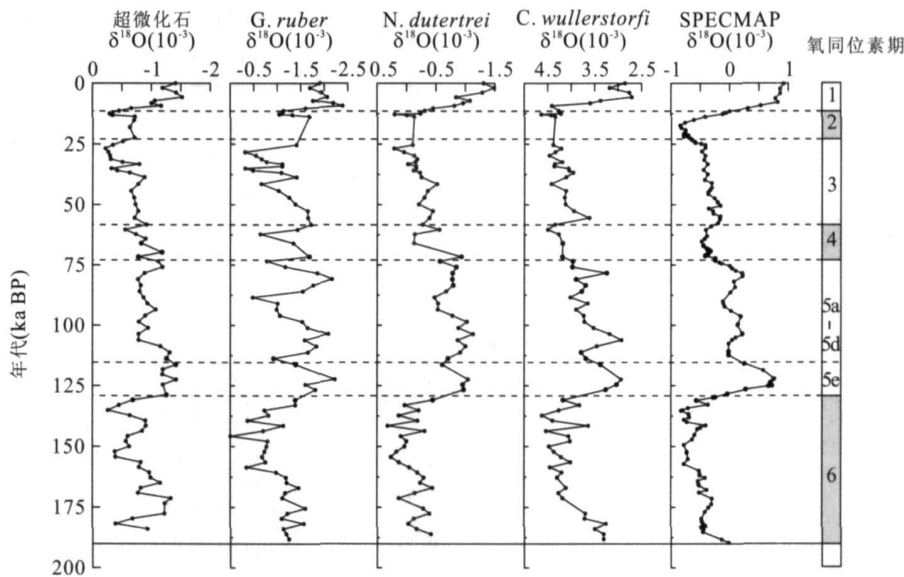


图 3 Ph05-5 柱状样 190 ka 以来钙质超微化石与浮游有孔虫和底栖有孔虫氧同位素曲线对比

Fig. 3 $\delta^{18}\text{O}$ records of calcareous nannofossils compared with those of planktonic foraminiferal (*G. ruber* and *N. dutertrei*) and benthic foraminiferal (*C. wullerstorfi*) during the last 190 ka from core Ph05-5

表 3 Ph05-5 柱状样钙质超微化石与浮游有孔虫和底栖有孔虫氧同位素值之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between nannofossil $\delta^{18}\text{O}$ values and that of foraminifera

| 相关系数 | 钙质超微化石 |
|------------------------------|--------|
| 表层浮游有孔虫 <i>G. ruber</i> | 0.48 |
| 中层浮游有孔虫 <i>N. dutertrei</i> | 0.63 |
| 底栖有孔虫 <i>C. wullerstorfi</i> | 0.59 |

影响范围 (Dudley and Goodney, 1979; Dudley *et al.*, 1980; Dudley *et al.*, 1986), 并计算出颗石藻种间“生命效应”影响校正因子 (Dudley and Nelson, 1989). Ziveri *et al.* (2003) 对颗石藻种间“生命效应”的进一步探索证明存在一种固定的特定种同位素分馏, 而且不随细胞生理学因素变化. 因此, 只要在对混合种同位素进行分析时加入单种校正因子, 钙质超微化石同位素将为古海洋温度和海水化学的重建提供有力证据. 本研究的结果表明在热带西太平洋边缘海区, 可以在忽略“生命效应”的前提下进行钙质超微化石混合种的氧同位素分析, 并将所得结果应用于地层年代的划分.

此外, 从上面的结果来看, 超微化石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与其他 3 种有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间也存在着差异. 颗石藻在透光带生存和分泌壳体 (Okada and Honjo, 1973), 因此钙质超微化石的化学组成应该记录浅混合层的信号 (Dudley *et al.*, 1980; Goodney *et al.*,

1980; Dudley *et al.*, 1986). 大多数颗石藻生活的水体比浮游有孔虫浅, 所以颗石藻的 $\delta^{18}\text{O}$ 值应该比浮游有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低, 但是 Ph05-5 柱状样中超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值却介于表层浮游有孔虫 *G. ruber* 和中层浮游有孔虫 *N. dutertrei* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间, 平均比 *G. ruber* 高 0.431×10^{-3} , 比 *N. dutertrei* 低 0.410×10^{-3} (表 4), 而这 3 者又远远低于底栖有孔虫 *C. wullerstorfi*. 对于这种“异常”结果的一个候选解释是“生命效应”, 也就是由生理因素导致的同位素不平衡分馏. 在偏光显微镜下进行钙质超微化石属种统计表明, Ph05-5 柱状样 190 ka 以来沉积物中的钙质超微化石属种主要为 *Gephyrocapsa*, *Emiliania huxleyi* 和 *F. profunda*, 其中 *Gephyrocapsa* 和 *Emiliania huxleyi* 是氧同位素值较高的两个种 (Dudley and Goodney, 1979; Dudley *et al.*, 1980; Dudley *et al.*, 1986). *F. profunda* 主要生活在水深 60 ~ 80 m 的下透光带 (Okada and Honjo, 1973), 比表层浮游有孔虫 *G. ruber* 生活水体要深, 所以超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值比同一样品中表层浮游有孔虫 *G. ruber* 高, 但是中层浮游有孔虫 *N. dutertrei* 生活的水深远深于颗石藻, 所以超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值比同一样品中中层浮游有孔虫 *N. dutertrei* 低. 世界其他海区也有类似的情况, 邻近的如南海南部 ODP1143 站超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值平均比浮游有孔虫 *G. ruber* 高 1.869×10^{-3} (刘传联等, 2002),

表 4 Ph05-5 柱状样钙质超微化石与浮游有孔虫和底栖有孔虫氧同位素值

Table 4 $\delta^{18}\text{O}$ values of nannofossils and foraminifers from core Ph05-5

| 属种 | $\delta^{18}\text{O}$ (10^{-3}) | $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 (10^{-3}) |
|------------------------------|-------------------------------------|---|
| 钙质超微化石 | -1.522 ~ -0.214 | -0.814 |
| 表层浮游有孔虫 <i>G. ruber</i> | -2.390 ~ -0.003 | -1.245 |
| 中层浮游有孔虫 <i>N. dutertrei</i> | -1.489 ~ -0.320 | -0.404 |
| 底栖有孔虫 <i>C. wullerstorfi</i> | 2.709 ~ 4.635 | 3.911 |

西太平洋暖池核心区 MD97-2140 站高 0.288×10^{-3} (刘传联等, 2005), 较远的如南大洋 (Margolis *et al.*, 1975) 和加勒比海 (Anderson and Steinmetz, 1981) 的钻孔, 超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值都比浮游有孔虫高。

3.2 超微化石碳同位素特征及其意义

Ph05-5 柱状样 190 ka 以来钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化如图 4 所示, 从 190 ka 到 110 ka, 钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低, 而且相对稳定, 平均值为 -0.049×10^{-3} ; 到 110 ka 左右, 钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值急剧升高, 由 -0.005×10^{-3} 升到 0.702×10^{-3} , 然后一直到 25 ka, 钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值都保持较高值, 平均值为 0.545×10^{-3} ; 25 ka 左右, 超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值又急剧降低, 从 1.034×10^{-3} 降到 0.122×10^{-3} , 然后保持相对较低至今。

对印度洋表层沉积物中颗石藻碳同位素的研究

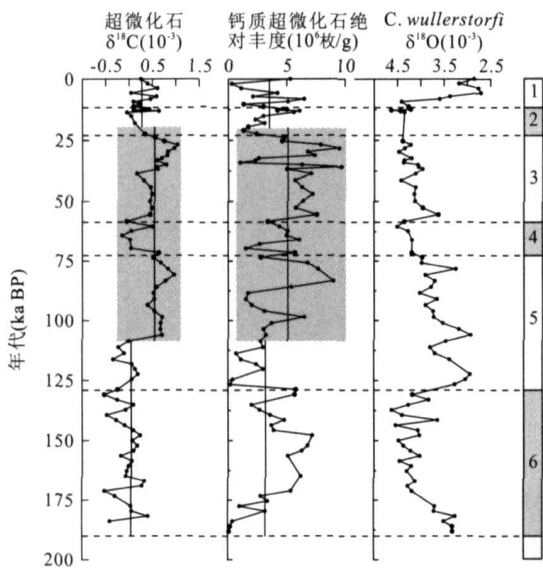


图 4 Ph05-5 柱状样 190 ka 以来钙质超微化石碳同位素变化曲线与绝对丰度变化曲线的对比

Fig. 4 Comparison between nannofossil carbon isotope records and absolute abundance records during the last 190 ka from core Ph05-5

表明, 虽然钙质超微化石与海水之间的碳同位素不平衡, 但钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要受海水初级生产力的控制 (Goodney *et al.*, 1980). 而南海南部近百万年来和西太平洋暖池核心区 1.75 Ma 来钙质超微化石碳同位素值的变化与从钙质超微化石种 *Florisphaera profunda* 相对丰度变化所提取的海水初级生产力变化的对应关系也表明钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值是表层海水初级生产力的一个良好指标 (刘传联等, 2002; 刘传联等, 2005), $\delta^{13}\text{C}$ 值高时, 初级生产力也高. 因此, Ph05-5 柱状样中钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化表明, 从 190 ka 到 110 ka, 大约在 MIS 6 和 MIS 5e 期, 表层海水初级生产力明显低于其他各个时期, 但期间表层初级生产力相当稳定; 大约从 MIS 5d 期, 约 110 ka 左右开始钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值急剧升高, 表明表层初级生产力显著提高, 初级生产力的这一高值一直持续到约 25 ka; 此后, 在 25 ka 以来的 MIS 1、2 期, 表层初级生产力又有所下降, 但仍高于 190 ka 到 110 ka 的 MIS 6 和 MIS 5e 期。

钙质超微浮游植物是海洋中最重要的初级生产者之一, 它主要生长在上部透光带, 是海洋初级生产力的可靠记录者 (Molfinio and McIntyre, 1990). 深海沉积物中超微化石绝对丰度反映了表层海水钙质超微浮游植物的生产量, 所以可以用来指示表层海水生产力的高低 (Bollmann *et al.*, 1999; Kinkel *et al.*, 2000). Ph05-5 岩心钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化所反映表层海水初级生产力的上述演化特征在钙质超微化石绝对丰度变化上也可找到相应的证据 (图 4). 从 190 ka 到 110 ka 期间, 钙质超微化石绝对丰度保持相对稳定; 而在 110 ka 左右, 绝对丰度由 0.7 升至 6.5×10^6 枚/g, 然后一直到 25 ka, 都保持该柱状样 190 ka 以来的较高值; 25 ka 左右, 绝对丰度又骤然降低, 从 9.5 降至 1.3×10^6 枚/g, 然后保持相对较低水平至今. 钙质超微化石绝对丰度的这一演化过程同样表明, 大约从 190 ka 到 110 ka 的 MIS 6 和大约 MIS 5e 期, 表层海水初级生产力相当稳定且

显著低于其他各时期, 大约从 MIS 5d 期开始表层初级生产力显著上升, 初级生产力的这一高值一直持续到约 25 ka 左右的末次冰期; 在 25 ka 以来的 MIS 1、2 期, 表层初级生产力有所下降, 但仍高于 190 ka 到 110 ka 的 MIS 6 和 MIS 5e 期。

4 结论

(1) Ph05-5 柱状样 190 ka 以来钙质超微化石与浮游和底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化趋势一致, 且呈明显的正相关关系, 其氧同位素值的变化趋势也与冰期—间冰期气候旋回有很好的吻合性。在热带西太平洋边缘海区, 可以在忽略“生命效应”的前提下进行钙质超微化石混合种的氧同位素分析, 并将所得结果应用于地层年代的划分。

(2) Ph05-5 柱状样中超微化石 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于表层浮游有孔虫 *G. ruber* 和 中层浮游有孔虫 *N. duterrei* 之间, 平均比 *G. ruber* 高 0.431×10^{-3} , 比 *N. duterrei* 低 0.410×10^{-3} , 而这 3 者又远远低于底栖有孔虫 *C. wullerstorfi*。钙质微体浮游生物生理因素导致的同位素不平衡分馏可以为该柱状样中这种“异常”结果提供合理解释。

(3) Ph05-5 柱状样 190 ka 以来钙质超微化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化表明表层海水生产力变化阶段性明显, 大约从 190 ka 到 110 ka 的 MIS 6 和大约 MIS 5e 期, 表层海水初级生产力相当稳定且显著低于其他各时期; 大约从 MIS 5d 期开始表层初级生产力显著上升, 初级生产力的这一高值一直持续到约 25 ka 左右的末次冰期; 在 25 ka 以来的 MIS 1、2 期, 表层初级生产力有所下降, 但仍高于 190 ka 到 110 ka 的 MIS 6 和 MIS 5e 期。

致谢: 十分感谢同济大学刘传联老师, 他在超微化石同位素样品处理和具体实验方法方面都给予了耐心细致的指导, 成文后, 他又提出了许多建设性的意见, 作者在此深表谢意。

References

Anderson, T. F., Cole, S. A., 1975. The stable isotope geochemistry of marine coccoliths: A preliminary comparison with planktonic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, 5: 188–192.

Anderson, T. F., Steinmetz, J. C., 1981. Isotopic and biostratigraphical records of calcareous nannofossils in a

Pleistocene core. *Nature*, 294(5893): 741–744.

Baumann, K. H., Andruleit, H. A., Su, X., 1998. Comparison of different preparation techniques for quantitative nannofossil studies. *Journal of Nannoplankton Research*, 20(2): 75–80.

Bollmann, J., Brabec, B., Cortes, M. Y., et al., 1999. Determination of absolute coccolith abundances in deep-sea sediments by spiking with microbeads and spraying (SMS-method). *Marine Micropaleontology*, 38(1): 29–38.

Dudley, W. C., Blackwelder, P., Brand, L., et al., 1986. Stable isotopic composition of coccoliths. *Marine Micropaleontology*, 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., Goodney, D. E., 1979. Oxygen isotope content of coccoliths grown in culture. *Deep Sea Research I*, 26(5): 495–503.

Dudley, W. C., Nelson, C. S., 1989. Quaternary surface-water stable isotope signal from calcareous nannofossils at DSDP Site 593, southern Tasman Sea. *Marine Micropaleontology*, 13(4): 353–373.

Goodney, D. E., Margolis, S. V., Dudley, W. C., et al., 1980. Oxygen and carbon isotopes of recent calcareous nannofossils as palaeoceanographic indicators. *Marine Micropaleontology*, 5: 31–42.

Jian, Z. M., Li, B. H., Wang, J. L., 2003. Formation and evolution of the western Pacific Warm Pool recorded by microfossils. *Quaternary Sciences*, 23(2): 185–192 (in Chinese with English abstract).

Jiang, L. B., Jian, Z. M., Cheng, X. R., 2004. Oxygen and carbon stable isotopic records of planktonic foraminifers from the Western Equatorial Pacific since the Last Glacial Maximum. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 24(2): 67–71 (in Chinese with English abstract).

Kinkel, H., Baumann, K. H., Cepek, M., 2000. Coccolithophores in the equatorial Atlantic Ocean: Response to seasonal and Late Quaternary surface water variability. *Marine Micropaleontology*, 39(1–4): 87–112.

Lea, D. W., Pak, D. K., Spero, H. J., 2000. Climate impact of late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science* 289: 1719–1724.

Liu, C. L., Cheng, X. R., Wang, R. J., et al., 2005. Oxygen and carbon isotope records of Quaternary calcareous nannofossils from the western Pacific Warm Pool and their paleoceanographical significance. *Earth Science—*

- Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 559—603 (in Chinese with English abstract).
- 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 South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 40(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.
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., et al., 1987. Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27: 1—29.
- Molino, B., McIntyre, A., 1990. Nutricline variation in the equatorial Atlantic coincident with the Younger Dryas. *Paleoceanography*, 5: 997—1008.
- Okada, H., Honjo, S., 1973. The distribution of oceanic coccolithophorids in the Pacific. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 20(4): 355—364.
- Stoll, H. M., Ziveri, P., 2002. Separation of monospecific and restricted coccolith assemblages from sediments using differential settling velocity. *Marine Micropaleontology*, 46(1—2): 209—221.
- Su, X., Ma, W. L., Cheng, Z. B., 2004. Calcareous nannofossil biostratigraphy for Co-rich ferromanganese crusts from Central Pacific Seamounts. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 141—147 (in Chinese with English abstract).
- Thompson, P. R., Be, W. H. A., Duplessy, J. C., et al., 1979. Disappearance of pink-pigmented *Globigerina ruber* at 12 000 000 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 *Cibicides* and *Uvigerina* at ODP Site 1143, Southern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Visser, K., Thunell, R., Stott, L., 2003. Magnitude and timing of temperature change in the Indo-Pacific Warm Pool during deglaciation. *Nature*, 421: 152—155.
- Webster, P. J., Magaña, V. O., Palmer, T. N., et al., 1998. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal of Geophysical Research*, 103(C7): 14451—14510.
- Ziveri, P., Stoll, H., Probert, I., et al., 2003. Stable isotope “vital effects” in coccolith calcite. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(1—2): 137—149.

附中文参考文献

- 翦知湆, 李保华, 王吉良, 2003. 从微体化石看西太平洋暖池的形成与演化. *第四纪研究*, 23(2): 185—192.
- 蒋来宾, 翦知湆, 成鑫荣, 2004. 赤道西太平洋末次盛冰期以来的浮游有孔虫氧碳稳定同位素记录. *海洋地质与第四纪地质*, 24(2): 67—71.
- 刘传联, 成鑫荣, 王汝建, 等, 2005. 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. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(5): 559—603.
- 刘传联, 成鑫荣, 祝幼华, 等, 2002. 南海南部近百万年来钙质超微化石氧、碳同位素记录. *科学通报*, 47(5): 330—335.
- 苏新, 马维林, 程振波, 2004. 中太平洋海山区富钴结壳的钙质超微化石地层学研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(2): 141—147.
- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 2004. 南海 ODP1143 站底栖有孔虫 *Cibicides* 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.