

渐新世初大冰期事件:南大西洋ODP1265站的记录

拓守廷, 刘志飞, 赵泉鸿, 成鑫荣

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 始新世—渐新世(E-O)过渡期间, 地球由两极无冰的“温室地球”进入到南极有冰的“冰室地球”, 其中以发生在早渐新世初的大冰期事件尤为意义重大。南大西洋ODP1265站氧碳稳定同位素在E-O过渡期间发生重大变化, 表明早渐新世全球气温迅速下降, 南极大陆东部首次出现大规模永久性冰盖, 同时全球碳储库发生重大改组, 这一结果与全球其他地区的记录一致。碳酸盐含量、粗组分、浮游有孔虫碎壳率以及碳酸钙软泥的粒度在E-O界线附近都发生了突变, 指示了海洋表层生产力的升高、碳酸盐补偿深度(CCD)的突然加深以及气候快速变冷对生物和碳酸盐沉积的影响。

关键词: 渐新世初大冰期事件; 南大西洋; ODP1265站; 始新世; 渐新世。

中图分类号: P736.22

文章编号: 1000-2383(2006)02-0151-08

收稿日期: 2005-09-23

The Earliest Oligocene Glacial Maximum: Records from ODP Site 1265, South Atlantic

TUO Shou-ting, LIU Zhi-fei, ZHAO Quan-hong, CHENG Xin-rong

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

Abstract: The most prominent cooling event of the Cenozoic earth surface during the long-term transition from a non-glaciated planet, or “green-house world”, to a polar glaciated planet, or “ice-house world”, is the earliest Oligocene glacial maximum (EOGM), immediately following the Eocene-Oligocene (E/O) boundary at about 33.7 Ma. This study analyzed benthic foraminiferal oxygen and carbon isotopes, carbonate content, coarse fraction, planktonic foraminiferal fragmentation, benthic foraminiferal percentage, and carbonate ooze grain size in samples from deep-water Site 1265, Ocean Drilling Program (ODP) Leg 208 on the Walvis Ridge, South Atlantic. The results show that the earliest Oligocene $\delta^{18}\text{O}$ values represent the magnitude of continental ice sheets on east Antarctica and indicate a large decrease in both surface and deep water temperatures of worldwide oceans during the Eocene-Oligocene transition. Carbonate content, coarse fraction, planktonic foraminiferal fragmentation, benthic foraminiferal percentage and grain size of ODP Site 1265 indicate that carbonate content increases rapidly across the E/O boundary, reflecting the increasing of ocean paleo-productivity, the abrupt deepening in the carbonate compensation depth (CCD) and their impacts on faunas and carbonate deposition.

Key words: earliest Oligocene glacial maximum; South Atlantic; ODP site 1265; Eocene; Oligocene.

0 引言

早始新世最适宜气候事件(52~50 Ma, Early Eocene climatic optimum)以来, 全球气候持续不断变冷(Zachos *et al.*, 2001), 地球由两极无冰的“温室地球”变为现今两极终年有冰的“冰室地球”, 经历

了多次冰盖扩张的变冷事件。其中最重大的变化阶段发生在距今约33.7 Ma的始新世—渐新世(E-O)界线附近, 底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值在渐新世最初(33.6 Ma)的约400 ka时间内快速增长了 1.4×10^{-3} , 底层水温骤降了至少 $3\sim4^\circ\text{C}$, 南极大陆东部开始出现永久性冰盖, 这段低温和大陆冰盖极其发

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40446003; 40321603; 40331002); 上海市青年科技启明星计划(No. 03QE14051); 国家重点基础研究发展规划项目(No. G2000078500); 教育部优秀青年教师资助计划和新世纪优秀人才支持计划。

作者简介: 拓守廷(1979—), 男, 博士生, 从事沉积与古环境研究。E-mail: tuost@163.com

育的时期被称之为“渐新世初大冰期事件(Earliest Oligocene glacial maximum, EOGM)”或“O_i-1 事件”(Zachos *et al.*, 1996)。

始新世—渐新世过渡期间,底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 发生大幅度正偏移(Zachos *et al.*, 1994, 1996; Diester-Haass, 1996; Salamy and Zachos, 1999; Diester-Haass and Zahn, 2001; Diester-Haass and Zachos, 2003; Nilsen *et al.*, 2003),显示全球碳储库发生重大改组。海洋作为地球上巨大的碳储库,在全球碳循环中起着巨大的作用,无论是碳同位素还是碳酸盐沉积,都是大洋碳循环和碳储库变化历史的载体(汪品先等,2003)。前人对始新世—渐新世过渡期碳同位素的研究较为详细,但对碳酸盐沉积所反映的碳循环变化却较少涉及(拓守廷和刘志飞,2003)。大洋钻探计划(ODP)第 208 航次在南大西洋沃尔维斯海脊钻取了连续、较高分辨率的新生代沉积物,为探讨始新世—渐新世界线的全球气候变化事件提供了良好的材料。本文利用 ODP1265 站底栖有孔虫氧碳稳定同位素、碳酸钙含量、粗组分、浮游有孔虫碎壳率和底栖有孔虫含量、粒度分析并结合颜色反射率和磁化率,讨论南大西洋始新世—渐新世过渡期间的全球变冷事件。

1 材料和方法

ODP1265 站($28^{\circ}50.10'\text{S}, 2^{\circ}38.35'\text{E}$)位于沃尔维斯洋脊上水深 3 060 m 处,为 208 航次钻井剖面中间深度的站位,在整个新生代都位于碳酸盐补偿深度(CCD)之上(Shipboard Scientific Party, 2004),其钻探目的是为了建立高分辨率的古近纪连续剖面,从而重建关键时期大洋环流的演化。

本研究取 1265 站 167.03~199.96 mcd(合成深度 m)共 155 个样品,深度分辨率为 27 cm,时间分辨率为 50 ka。始新世—渐新世界线大致位于该站的 191.88 mcd。晚始新世的主要岩性为黄褐色含粘土钙质软泥,早渐新世为灰色含有孔虫钙质超微化石软泥,过渡层段约 40 cm(Shipboard Scientific Party, 2004)。该站样品的碳酸钙含量较高,含有丰富的有孔虫和钙质超微化石,保证了有孔虫氧碳同位素的分析测试。

碳酸钙含量测定采用气体定量分析技术(Jones and Kaiteris, 1983),精度 $>\pm 2\%$,该方法利用反应式: $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} = \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 为原理,采

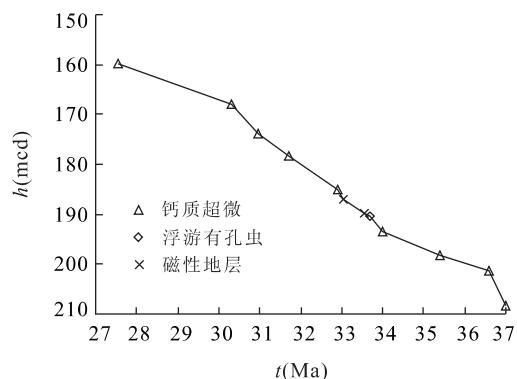


图 1 ODP1265 站始新世—渐新世过渡期的年龄—深度模式(据 Shipboard Scientific Party, 2004)

Fig. 1 Age model of the Eocene-Oligocene transition at ODP Site 1265

用法国 NEP18-508 碳酸钙分析仪,通过测量反应前后 CO_2 的体积差来计算样品中 CaCO_3 的含量。粒度分析使用 Coulter 全自动激光粒度分析仪,分析碳酸钙软泥全岩样品,粒径范围 $0.4\sim 2000 \mu\text{m}$ 。有孔虫氧碳稳定同位素选用底栖有孔虫 *Cibicidoides mundulus* ($>150 \mu\text{m}$)经清洗后,在 Finnigan MAT252 同位素比质谱仪上进行分析,结果转换为 PDB 标准,分析的标准偏差: $\delta^{18}\text{O}$ 为 0.07×10^{-3} , $\delta^{13}\text{C}$ 为 0.04×10^{-3} 。粗组分为 $>63 \mu\text{m}$ 粗颗粒占全岩质量的百分比,用于指示碳酸盐的保存状况。浮游有孔虫碎壳率在镜下统计浮游有孔虫碎壳和整壳个数($>150 \mu\text{m}$),根据一个有孔虫整壳破碎后平均形成 8 个碎片的假设,利用公式: 碎壳率 = (碎壳个数/8)/(整壳个数+碎壳个数/8) $\times 100\%$ (Le and Shackleton, 1992)计算得出,表示有孔虫的大致溶解程度。底栖有孔虫含量在镜下统计 $>150 \mu\text{m}$ 底栖有孔虫个数,利用公式: 底栖有孔虫含量 = (底栖有孔虫整壳个数)/(底栖有孔虫整壳个数+浮游有孔虫整壳个数) $\times 100\%$ (Salamy and Zachos, 1999)计算得出,也可以表示有孔虫的溶解程度。以上样品处理和分析均在同济大学海洋地质国家重点实验室进行。磁化率和颜色反射率分别由船上自动控制的 Bartington MS2 磁化率分析仪和 Minolta CM-2002 分光光度仪测定,测点分辨率都为 2.5 cm(Shipboard Scientific Party, 2004)。

本文采用航次后初步确定的年龄—深度模式(图 1)(Shipboard Scientific Party, 2004),这个年龄模式主要根据船上分析的钙质超微化石和有孔虫生物地层年龄,并结合磁性地层年龄来确定,平均误

差约±20 kyr。根据这个年龄模式,计算出35~30 Ma期间1265站平均沉积速率为0.66 cm/kyr。此外,有孔虫氧同位素地层也为我们建立可靠地层年龄提供了帮助。

2 结果和讨论

2.1 有孔虫氧同位素记录的渐新世初大冰期事件

有孔虫氧同位素记录反映了全球气候的冷暖变化以及冰盖的消长。渐新世初底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值快速增长在世界大洋的深海沉积中都有记录,其高值的偏移期被定名为Oi-1或EOGM事件(Zachos *et al.*, 1994, 1996; Salamy and Zachos, 1999)。1265站35~30 Ma期间底栖有孔虫氧同位素,清晰地揭示出位于约33.7 Ma的始新世—渐新世界线及其稍晚的EOGM事件(图2), $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $0.6 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-3}$ 之间变化,33.7 Ma之前在 $0.6 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ 之间变化,在约33.7 Ma之后的<20 ka时间内从 1.2×10^{-3} 快速增长至 2.4×10^{-3} ,增幅达 1.2×10^{-3} 。在33.7~33.2 Ma间保持重值在 $2.2 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-3}$,此后开始逐渐变轻,在33.2~

30.0 Ma间 $1.2 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$ 之间变化,值得注意的是早渐新世段 $\delta^{18}\text{O}$ 值大大低于晚始新世段的水平,其波动较小,变化不大。

1265和522站底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化,记录了当时的全球气候变化事件,即冰量的增长和海水温度降低。根据Erez and Luz(1983)的有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 平衡方程:

$$T = 16.998 - 4.52 (\delta^{18}\text{O}_\alpha - \delta^{18}\text{O}_{sw}) + 0.028 (\delta^{18}\text{O}_\alpha - \delta^{18}\text{O}_{sw})^2. \quad (1)$$

式(1)中 $\delta^{18}\text{O}_\alpha$ 为有孔虫壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, $\delta^{18}\text{O}_{sw}$ 为海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, $\delta^{18}\text{O}_{sw}$ 由公式(2):

$$y = 0.576 + 0.041x - 0.0017x^2 + 1.35 * 10^{-5}x^3. \quad (2)$$

计算得出,式(2)中 y 代表 $\delta^{18}\text{O}_{sw}$, x 代表研究站位的纬度。

估算1265站海水温度的变化,结果表明在E-O界线的33.7 Ma时底层海水温度由4.3 °C降低至-0.8 °C(图2)。Zachos *et al.*(1996, 2001)计算出DSDP522站渐新世初的Oi-1事件从约5 °C降至约0 °C,这一结果与本文估算的结果相近,进一步表明在始新世—渐新世过渡期间,全球气温急剧下降,南极大陆东部出现永久性冰盖。

2.2 碳位移事件与生产力变化

1265站有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值在EOGM期间有重大变化,多在 $0.25 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$ 之间,在33.7 Ma时由 0.6×10^{-3} 迅速增加至 2.0×10^{-3} (图2),标志EOGM事件,此后开始缓慢降低,变化幅度较小,与 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势类似,晚始新世段变化幅度大而EOGM后的早渐新世变化幅度较小。与同一海区522站的 $\delta^{13}\text{C}$ 具有相同特征,早渐新世如此大幅度的碳位移是一个全球性的信息,在太平洋、大西洋和印度洋的底栖和浮游有孔虫的同位素记录中都有报道(Zachos *et al.*, 1994, 1996; Diester-Haass, 1996; Salamy and Zachos, 1999; Diester-Haass and Zahn, 2001; Diester-Haass and Zachos, 2003; Nilsen *et al.*, 2003)。

在古海洋学研究中,碳同位素的应用远不如氧同位素广泛。氧同位素的变化主要反映的是物理过程(水汽的蒸发与凝集),相对比较简单;碳同位素则主要受生物地球化学过程(有机质的合成与降解)控制,直接与碳循环联系(Mackensen and Bickert, 1999),因此要复杂得多。海水与无机碳酸盐中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均为0,当碳酸盐从海水中沉淀出来时,不会

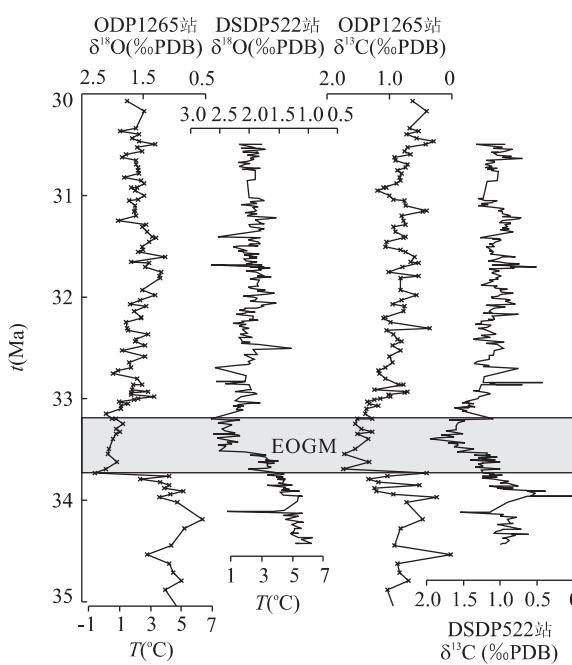


图2 ODP1265和DSDP522站氧碳稳定同位素及古温度对比(DSDP522站资料据Zachos *et al.*, 1996, 2001)

Fig. 2 Comparison of oxygen and carbon stable isotopes and estimated paleo-temperatures from ODP Site 1265 and DSDP Site 522

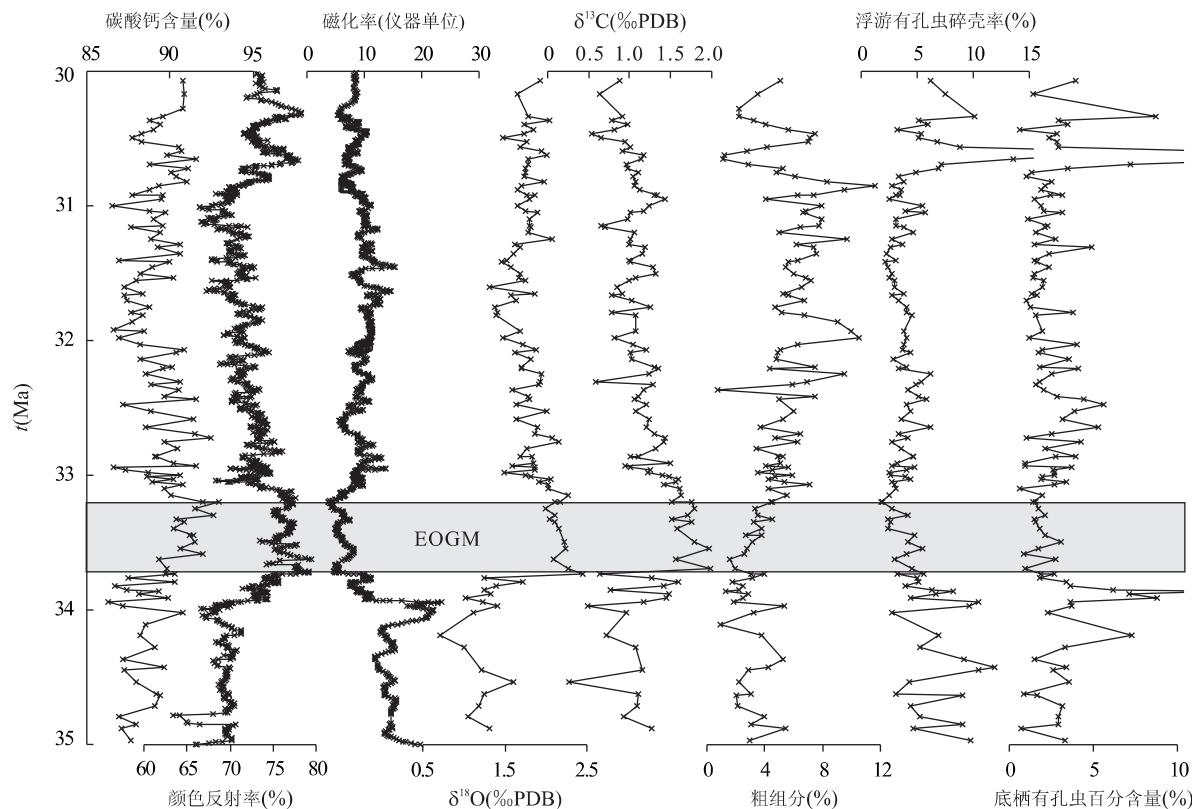


图 3 ODP1265 站碳酸盐溶解指标和氧碳稳定同位素对比(磁化率和颜色反射率据 Shipboard Scientific Party, 2004)

Fig. 3 Carbonate dissolution proxies and oxygen and carbon stable isotopes of ODP Site 1265

影响海水原先的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,即基本上不会引起碳同位素的分馏作用(同济大学海洋地质系,1989).但有机质中的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -25×10^{-3} ,与海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 相差很大,当有机质大量埋藏时,使得海水中 $\delta^{13}\text{C}$ 相对富集,造成有孔虫碳酸钙壳体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大幅正偏. 海洋 $\delta^{13}\text{C}$ 组成在很短的时间内发生这样大的变化,说明全球碳储库发生重要转型,而影响全球碳储库最重要的因素是有机碳和无机碳之间发生的交换作用(Zachos *et al.*, 1996). 由于有机碳储库的碳分馏作用很大(约 -22.7×10^{-3}),这样有机碳储库的增加就会驱使海洋 $\delta^{13}\text{C}$ 变高(刘志飞等,2004).

1265 站 $\delta^{13}\text{C}$ 值的大幅度正偏指示了有机碳的大量埋藏,那么,有机碳埋藏速率为什么在渐新世初突然增加呢?一种解释是大洋表层生产力在这个海洋—大气系统发生转型时突然增加. 由于全球温度降低和南极冰盖的形成,温盐作用和大气环流随之加强,从而导致海洋生物量增加(Diester-Haass *et al.*, 1993). 在南大洋,由于来自极地的经向风持续加强,从而强化了表层洋流和上升流,并提供大量包括铁元素在内的营养物质(Diester-Haass, 1995; Zachos *et al.*, 1996). 另一种解释是生产力的时空

变化加强了有机碳的埋藏速率. 由于在有机碳颗粒流量大和沉积速率高的地区,碎屑有机物质容易脱离氧化环境,有机碳的埋藏特别是在上升流地区就会大大增加(Emerson and Hedges, 1988). 同样地,随着气温变冷,生产力变为更具季节性或呈现旺盛期,有机颗粒的粒径不断增加,从而加速其从表层海水中下沉的速率. 从生物泵的模式可以知道,有机碳泵通过浮游植物的光合作用吸收溶解的无机碳和营养物质,生产有机物,释放 O_2 ,降低 P_{CO_2} (Elderfield, 2002),从而造成有机碳的大量埋藏,使大气圈中的碳向大洋碳储库转移,有可能促使气候的快速变冷.

2.3 碳酸钙溶解与 CCD 变化

深海沉积中碳酸盐旋回的变化取决于地质历史时期大洋表层生产力、深海碳酸盐溶解和陆源物质的稀释作用. 1265 站碳酸钙含量相对较高,35~30 Ma 间在 86%~93% 之间波动,并显示一定的周期性. 在 33.7~33.2 Ma 间,碳酸钙相对较高,保持在 90%~93% 之间(图 3). 晚始新世段碳酸钙含量较早渐新世段低,表明当时大洋表层生产力或深海碳酸盐溶解可能发生重大变化. 1265 站粗组分几乎全部是有孔虫壳体,因此可以指示有孔虫的保存程

度。1265站粗组分($>63\text{ }\mu\text{m}$)、浮游有孔虫碎壳率以及底栖有孔虫含量具有相似的变化特征,在晚始新世段变化幅度较大,而进入渐新世后则趋于稳定,变化幅度很小,直到31 Ma后有2次强烈的变化。颜色反射率在晚始新世约为68%,在E-O界线附近发生突变,于早渐新世时增加到约78%,其变化与碳酸钙含量变化呈现很好的正相关关系,显示颜色反射率可以作为碳酸钙含量变化的间接指标(Balsam *et al.*, 1999)。磁化率的变化与碳酸钙含量的变化呈负相关,磁化率值反应了样品中陆源物质的含量,从晚始新世的约15仪器单位降低到早渐新世的约5仪器单位(图3)。

1265站碳酸钙含量在E-O界线后迅速增加,而深海碳酸盐旋回的变化取决于大洋表层生产力、碳酸盐溶解和陆源物质的稀释作用。E-O界线时1265站碳酸盐溶解指标粗组分、浮游有孔虫碎壳率以及底栖有孔虫百分含量并无大幅度变化,表明碳酸盐溶解作用没有明显变化,而在此期间陆源物质也无大量输入,因此,1265站碳酸钙含量的增加主要是由于大洋表层生产力突然加强的结果,可能是由于大洋环流的改变使得上升流发育带来大量的营养物质造成的。1265站碳酸钙含量、颜色反射率和磁化率在E-O界线时均有大幅度变化,表明在此期间CCD大幅度下降,与氧同位素记录的变冷事件几乎同步。而全球其他大洋CCD同时大幅度下降数百米甚至上千米(Coxall *et al.*, 2005),其中赤道太平洋变深达1 km,大西洋和印度洋变深也达0.5 km(Berger, 1973; Peterson and Backman, 1990)。

2.4 碳酸钙软泥的粒度分析

1265站岩心主要由灰白色钙质超微化石和有孔虫软泥组成,碳酸钙含量很高,在86%~93%之间变化,因此可以利用碳酸钙软泥的粒度分析数据区分钙质超微化石和有孔虫的不同变化趋势。

1265站粒度分析数据经标准偏差(把粒度看作一个随机变量,其取值相对于它的期望平均偏离程度称为标准偏差)分析后,得到碳酸钙软泥粒度的4个标准偏差峰值区间(图4):3.5~6.8 μm 、8~15 μm 、20~40 μm 、80~125 μm 。分别统计这4个粒级颗粒在样品中所占的体积百分含量及其变化趋势(图5)。根据扫描电镜抽样照片观察,3.5~6.8 μm 主要为钙质超微化石和少量粘土矿物,8~15 μm 主要为钙质超微化石,20~40 μm 主要为小有孔虫整壳和少量碎壳,80~125 μm 主要为有孔虫整壳(图

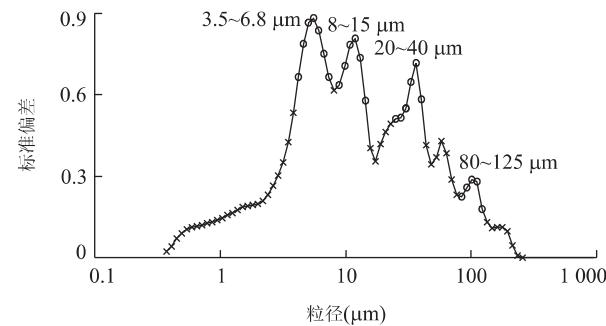


图4 ODP1265站碳酸钙软泥粒度分析的标准偏差分布
Fig. 4 Standard deviation of carbonate ooze grain size of ODP Site 1265

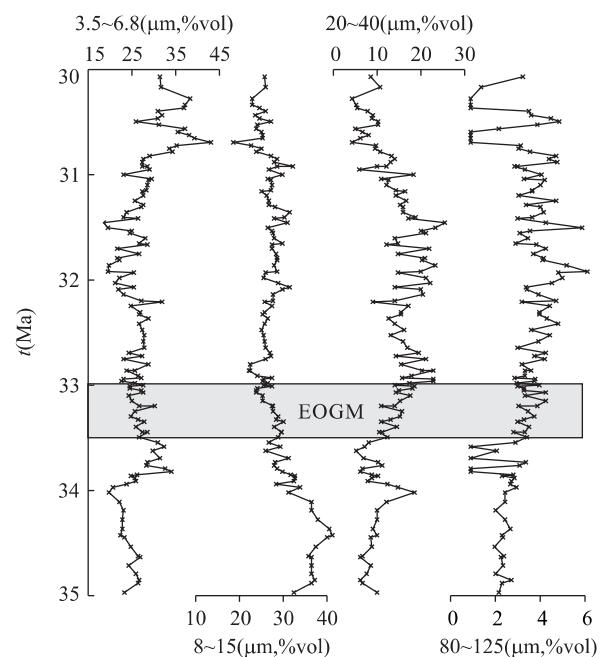


图5 ODP1265站粒度分析4个标准偏差峰值的粒度百分含量
Fig. 5 Grain size distribution of 4 standard deviation stages of ODP Site 1265

6)。我们选取了2个典型样品(A:深度193.68 mcd, 年龄34.104 Ma; B:深度188.6 mcd, 年龄33.345 Ma)的粒度分布模式(图6)发现,样品中沉积物的颗粒主要为10 μm 左右,结合2个典型样品的扫描电镜照片可以发现绝大多数是钙质超微化石,在EOGM期间钙质超微化石的含量大大增加,是大洋表层生产力增加的主要原因。显微镜下观察表明,在晚始新世段有孔虫主要是个体比较大的暖水型浮游有孔虫*Globigerinatheka index*,而到了早渐新世则主要是个体较小的冷水型浮游有孔虫*Chiloguembelinacubensis*,这可能表明个体较小的有孔虫更适

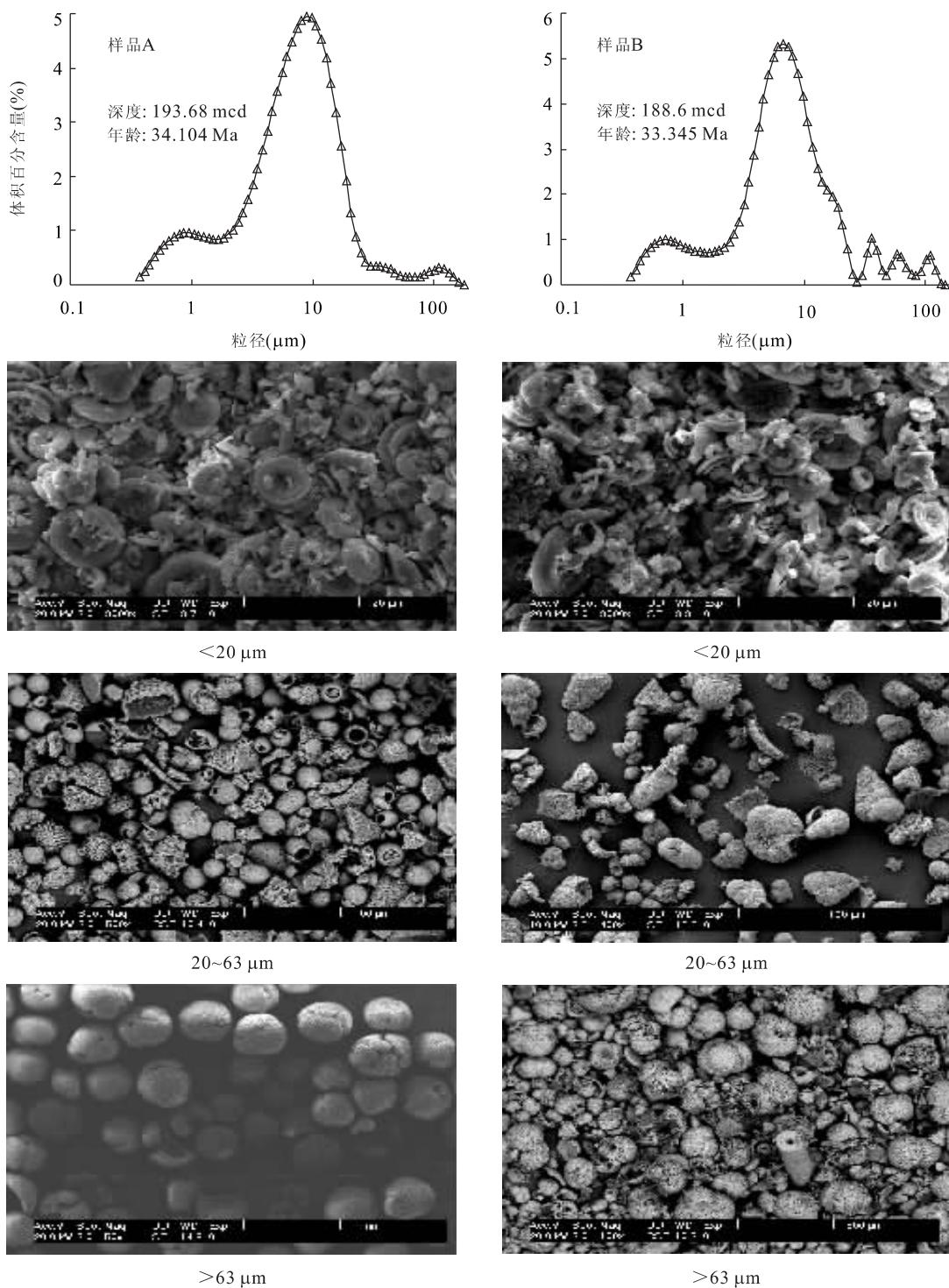


图 6 2 个典型样品的粒度分布模式和扫描电镜照片

Fig. 6 Grain size distribution and SEM micrographs of two selected samples

合在低温环境下生长(图 6)。

指示古生产力的指标一般有两大类:古生物学指标和地球化学指标。本次研究我们利用粒度分析的方法来区分不同粒度区间的沉积物,以此来探讨生产力的变化。由碳酸钙软泥粒度分析的结果可知,

钙质超微的百分含量在 EOGM 期间快速增加,而有孔虫壳体的百分含量却在 E-O 界线时急剧降低,可能是钙质超微的大量增加而造成有孔虫相对含量的减小,因此碳酸钙含量的增加主要是由于钙质超微化石的大量堆积造成的,由此也进一步证实了大洋

生产力在 EOGM 期间伴随着全球变冷而快速增强。

3 结论

ODP1265 站底栖有孔虫氧碳稳定同位素在 E-O 过渡期间发生重大变化,其中 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 E-O 界线 33.7 Ma 时由 1.2×10^{-3} 快速增加至 2.4×10^{-3} , $\delta^{13}\text{C}$ 值则由 0.6×10^{-3} 快速增加至 2.0×10^{-3} , 表明早渐新世全球气温迅速下降, 南极大陆东部首次出现大规模冰盖, 同时全球碳储库发生重大改组, 有机碳大量埋藏指示了生产力的加强。碳酸钙含量、粗组分、底栖有孔虫百分含量以及颜色反射率和磁化率在 E-O 界线附近发生突变, 指示了海洋表层生产力的升高以及 CCD 的突然加深。粒度分析的结果区分了钙质超微化石软泥和有孔虫软泥的分布特征, 揭示了碳酸钙含量的增加主要是由于钙质超微化石的大量堆积而造成的。通过显微镜观察发现在晚始新世—早渐新世过渡期, 浮游有孔虫也发生重大变化, 个体较大的暖水型种属灭绝, 而个体较小的种属因适合在低温环境下生长得以大量繁殖。

致谢: 李前裕教授参与有益讨论并对初稿提出许多宝贵意见; Luba Jansa 教授和 Maarten Prins 博士参与有益讨论, 夏佩芬高工帮助拍摄扫描电镜照片, 本文分析研究的样品及资料由国际大洋钻探计划(ODP)提供, 在此一并致谢。

References

- Balsam, W. L., Deaton, B. C., Damuth, J. E., 1999. Evaluating optical lightness as a proxy for carbonate content in marine sediments cores. *Marine Geology*, 161:141–153.
- Berger, W. H., 1973. Deep-sea carbonates: Evidence for a coccolith lysocline. *Deep Sea Research*, 20:917–921.
- Coxall, H. K., Wilson, P. A., Palike, H., et al., 2005. Rapid stepwise onset of Antarctic glaciation and deeper calcite compensation in the Pacific Ocean. *Nature*, 433(6):53–57.
- Department of Marine Geology, Tongji University, 1989. Introduction to paleoceanography. Tongji University Press, Shanghai (in Chinese).
- Diester-Haass, L., Robert, C., Chamley, H., 1993. Paleoceanographic and paleoclimatic evolution in the Weddell Sea (Antarctica) during the Middle Eocene-Late Oligocene, from coarse sediment fraction and clay mineral data (ODP Site 689). *Marine Geology*, 114:233–250.
- Diester-Haass, L., 1995. Middle Eocene to Early Oligocene paleoceanography of the Antarctic Ocean (Maud Rise, ODP Leg 113, Site 689): Change from a low to high productivity ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 113:311–334.
- Diester-Haass, L., 1996. Late Eocene-Oligocene paleoceanography in the southern Indian Ocean (ODP Site 744). *Marine Geology*, 130:99–119.
- Diester-Haass, L., Zahn, R., 2001. Paleoproductivity increase at the Eocene-Oligocene climatic transition: ODP/DSDP sites 763 and 592. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 172:153–170.
- Diester-Haass, L., Zachos, J. C., 2003. The Eocene-Oligocene transition in the equatorial Atlantic (ODP Site 925): Paleoproductivity increase and positive $\delta^{13}\text{C}$ excursion. In: Prothero, D. R., Ivany, L. C., Nesbitt, E. A., eds., From greenhouse to icehouse: The marine Eocene-Oligocene transition. Columbia University Press, New York, 397–416.
- Elderfield, H., 2002. Carbonate mysteries. *Science*, 296:1618–1621.
- Emerson, S., Hedges, J. I., 1988. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments. *Paleoceanography*, 3:621–634.
- Erez, J., Luz, B., 1983. Experimental paleotemperature equation for planktonic foraminifera. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47:1025–1031.
- Jones, A., Kaiteris, P., 1983. A vacuum gasometric technique for rapid and precise analysis of calcium carbonate in sediments and soils. *Journal of Sedimentary Petrology*, 53:655–660.
- Le, J., Shackleton, N. J., 1992. Carbonate dissolution fluctuations in the western equatorial Pacific during the Late Quaternary. *Paleoceanography*, 7:21–42.
- Liu, Z. F., Tuo, S. T., Zhao, Q. H., et al., 2004. Deep sea-water earliest Oligocene glacial maximum in South Atlantic. *Chinese Science Bulletin*, 49(20):2190–2197.
- Mackensen, A., Bickert, T., 1999. Stable isotopes in benthic foraminifera: Proxies for deep and bottom water circulation and new production. In: Fischer, G., Wefer, G., eds., Use of proxies in paleoceanography: Examples from the South Atlantic. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 229–254.
- Nilsen, E. B., Anderson, L. D., Delaney, M. L., 2003. Paleoproductivity, nutrient burial, climate change and carbon cycle in the western equatorial Atlantic across the Eocene/Oligocene boundary. *Paleoceanography*, 18: doi:

- 10.1029/2002PA000804.
- Peterson, L. C., Backman, J., 1990. Late Cenozoic carbonate accumulation and the history of the carbonate compensation depth in the western equatorial Indian Ocean. *Proceeding Ocean Drilling Program Scientific Results*, 115:467—507.
- Salamy, K. A., Zachos, J. C., 1999. Latest Eocene-Early Oligocene climate change and southern Ocean fertility: Inferences from sediment accumulation and stable isotope data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 145:61—77.
- Shipboard Scientific Party, 2004. Leg 208 summary. In: Zachos, J. C., Kroon, D., Blum, P., et al., eds., Proc Ocean Drill Program Init. Repts. 208; College Station TX (Ocean Drilling Program), 1—112.
- Tuo, S. T., Liu, Z. F., 2003. Global climate event at the Eocene-Oligocene transition: From greenhouse to ice-house. *Advances in Earth Science*, 18(5):691—696 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Tian, J., Cheng, X. R., et al., 2003. Exploring cyclic changes of the ocean carbon reservoir. *Chinese Science Bulletin*, 48(23):2356—2548.
- Zachos, J. C., Stott, L. D., Lohmann, K. C., 1994. Evolution of Early Cenozoic marine temperatures. *Paleoceanography*, 9(2):353—387.
- Zachos, J. C., Quinn, T. M., Salamy, K. A., 1996. High-resolution (10^4 years) deep-sea foraminiferal stable isotope records of the Eocene-Oligocene climate transition. *Paleoceanography*, 11:251—266.
- Zachos, J. C., Pagani, M., Sloan, L., et al., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292:686—693.

附中文参考文献

- 刘志飞, 拓守廷, 赵泉鸿, 等, 2004. 南大西洋深水渐新世初大冰期事件. *科学通报*, 49(17): 1793—1800.
- 同济大学海洋地质系, 1989. 古海洋学概论. 上海: 同济大学出版社.
- 拓守廷, 刘志飞, 2003. 始新世—渐新世界线的全球气候事件: 从“温室”到“冰室”. *地球科学进展*, 18(5): 691—696.
- 汪品先, 田军, 成鑫荣, 等, 2003. 探索大洋碳储库的演变周期. *科学通报*, 48(21): 2216—2227.