

印度尼西亚弗洛勒斯海 LGM 以来的古海洋学记录

丁旋¹, Guichard F.², Bassinot F.², 魏明军³

1. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083

2. Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Domaine du CNRS, France

3. 中石化中原油田采油工程技术研究院, 河南濮阳 457001

摘要: 弗洛勒斯海位于印度尼西亚穿越流通道上, 它的古海洋学特征对于理解 LGM 以来穿越流活动历史, 及其与全球气候变化的关系具有重要意义。通过对弗洛勒斯海 SHI9011 岩心 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、浮游有孔虫组合及碳酸盐含量等古海洋学记录的研究, 认为研究区沉积速率不高, 生物生产力却并不低于高沉积速率的近陆地区。冰期时海平面下降, 陆源物质输入量增加, 使得古生产力上升。冰消期终止期 I_a 海平面快速上升, 陆源营养物质供应减少, 同时穿越流活动增强, 抑制了下部水体向上运动, 古生产力开始下降。8~6 ka 前后, 强烈的东南季风使得研究区上升流活动增强。

关键词: 弗洛勒斯海; 末次冰期最盛期; 古海洋学; 穿越流; 东南季风; 上升流。

中图分类号: P53

文章编号: 1000-2383(2005)05-0565-08

收稿日期: 2005-05-17

Paleoceanography of the Last Glacial Maximum in the Flores Sea of the Indonesian Archipelago

DING Xuan¹, Guichard F.², Bassinot F.², WEI Ming-jun³

1. Faculty of Marine Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Domaine du CNRS, France

3. Petroleum Engineering Institute of Zhong Yuan Oil Field Branch, SINOPEC, Puyang 457001, China

Abstract: The Flores Sea is situated in the path of the Indonesian throughflow. Its paleoceanographical characteristic is very important for us to understand the throughflow actions during the last glacial maximum, and the relationship between the throughflow and global climate changes. Based on the study of the paleoceanographical record $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, planktonic foraminifer assemblage and CaCO_3 relation abundance of the core SHI9011 from the Flores Sea, the results are following: the sediment rate in the studied region was not high, but the productivity was not lower than the region nearby the land where sediment rate was high. The sea level dropped in the glacial, the mass of the terrigenous sediment increased, so that the paleoproductivity ascended. The sea level rose rapidly in the deglaciation termination, the terrigenous nutrition decreased, and the throughflow action enhanced, restraining the upwelling of the down water, the paleoproductivity descended. In around 8-6 ka, due to the strong southeast monsoon action, the upwelling action enhanced in the studied region.

Key words: the Flores Sea; LGM; paleoceanography; throughflow; southeast monsoon; upwelling.

0 引言

弗洛勒斯海位于印度尼西亚岛弧北侧、爪哇海和班达海之间, 是印度尼西亚多岛海众多的海盆之一。从望加锡海峡进入印度尼西亚的穿越流, 少部分

通过巴厘岛和龙目岛之间的龙目海峡直接进入印度洋, 大部分进入印度洋之前在弗洛勒斯海向东转向班达海, 之后经帝汶海进入印度洋混入向西流动的南爪哇流、南赤道流和沿澳大利亚西岸向南流动的 Leeuwin 流 (Hirst and Godfrey, 1993; Bray *et al.*,

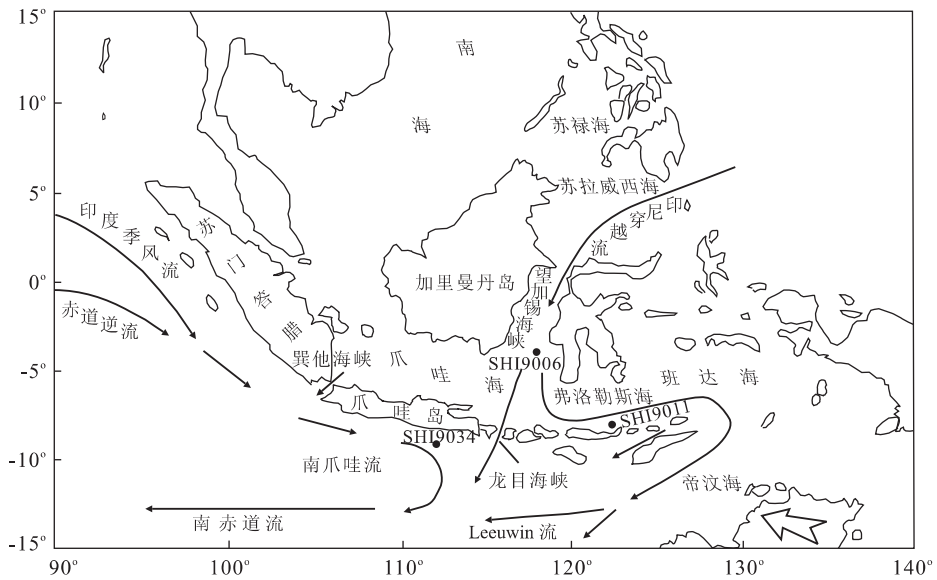


图 1 印尼海区现代八月表层洋流活动示意图和 SHI9011 岩心位置(Gingele *et al.*, 2002)

Fig. 1 Today August currents in the Indonesian Archipelago and the location of the core SHI9011

1996; Gordon and Fine, 1996)(图 1)。

印度尼西亚穿越流是全球大洋环流体系在低纬地区的重要环节,它的强弱与全球气候变化密切相关。由于印尼穿越流特殊的地理位置,既位于西太平洋暖池区,又受亚洲季风活动和厄尔尼诺事件的影响(Gordon and Fine, 1996; Martinez *et al.*, 1997, 1998),因此穿越流活动的历史记录进一步放大了全球气候变化的信号。但印度尼西亚多岛海区地形复杂,受全球气候变化、海平面升降和亚洲季风以及厄尔尼诺事件的影响,洋流活动变化频繁,海区内不同的海盆对同一古海洋与古气候事件的反映各不相同。前期的研究成果反映(Ding *et al.*, 2002; 丁旋等, 2002, 2004),海区内不同位置的岩心同一时间段内的古海洋学记录差异很大,仅凭单个海盆、单根岩心很难完全理解穿越流的活动情况,所以拟通过印度尼西亚穿越流活动区的多个海盆、多根岩心的古海洋学研究,探索穿越流变化的详尽历史。弗洛勒斯海 SHI9011 岩心的古海洋学记录分析,便是这些研究的其中之一。

1 材料与方法

SHI9011 岩心是法国—印度尼西亚联合海洋地质调查小组 1990 年 2 月在印度尼西亚弗洛勒斯海采得,采样地位于 7.26917°S, 122.09833°E,水深 1750 m,心长 6.49 m,研究仅涉及上部 1.5 m。以

10 cm 间隔取样,共取得样品 16 个,经干燥、称重后,用孔径 150 μm 的铜筛筛洗。余留物再经 40 $^{\circ}\text{C}$ 烘干后,从中挑出个体大小在 250~315 μm 之间的 *Globigerinoides ruber* 10~15 个,置于甲醇溶液中用超声波清洗 10 s,在法国国家研究中心气候与环境科学实验室(Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, 简称 LSCE)用 Fannigan MAT-251 同位素质谱仪进行氧碳稳定同位素分析。由于该岩心所在位置沉积速率很低,故以 2 cm 间隔加密取样,共取得样品 65 个,用上述同样的标准微体古生物学方法处理后,余留物经缩分器缩分至每样不少于 300 个个体,鉴定并统计浮游、底栖有孔虫及碎片数,分别计算各属种的相对丰度和碎壳率。在此基础上,利用浮游有孔虫现代类比技术(Modern Analog Technique, 简称 MAT)估算年均表层海水古温度、古盐度。另外,用酸碱滴定法测定各样品 CaCO_3 百分含量,用激光粒度分析仪 Mastersizer2000 对各样品进行粒度分析。

2 结果与讨论

2.1 地层与沉积特点

SHI9011 岩心没有做绝对年龄测定,氧碳稳定同位素分析的样品间隔也较大,故将该岩心的氧同位素曲线与邻近的有定年数据的 SHI9034 岩心对比分析,以确保氧同位素地层划分正确(图 2)。

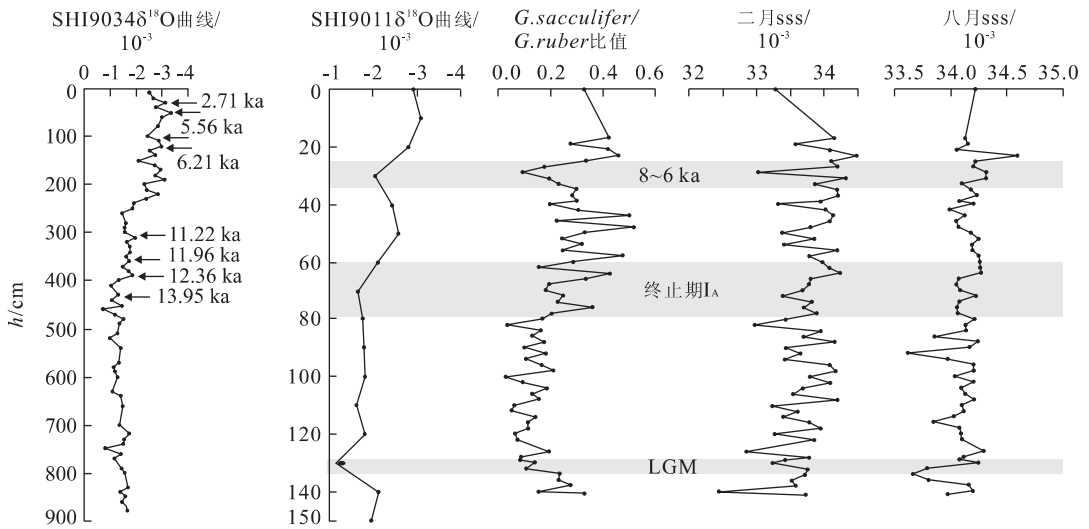


图 2 SHI9034, SHI9011 岩心氧同位素曲线, SHI9011 岩心二、八月 SSS 以及 *G. sacculifer*/*G. ruber* 比值变化曲线

Fig. 2 Curves of oxygen isotope of the cores SHI9034 and SHI9011, curves of the SSS of February and August and rate of *G. sacculifer*/*G. ruber*

SHI9011 岩心浮游有孔虫 *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线反映, 自深度 70~50 cm, $\delta^{18}\text{O}$ 迅速减轻, 由 $(-1.65 \sim -2.09) \times 10^{-3}$, 再减为 -2.58×10^{-3} PDB, 因此, 可将氧同位素 1/2 期界线置于 52 cm 处。130 cm 处 $\delta^{18}\text{O}$ 值最重, 为 -1.14×10^{-3} , 可认为该处代表末次冰盛期 (LGM)。据 Martinson *et al.* (1987) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 地质年代表可确定, 52 cm 处绝对年龄值约为 12.05 ka, 130 cm 处绝对年龄值为 18 ka (图 2)。由此推算, 该岩心所在位置全新世冰后期氧同位素 1 期的沉积速率仅为 $4.3 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$, 相较于望加锡海峡出口处的 SHI9006 岩心 (Ding *et al.*, 2002; 丁旋等, 2004) ($23.84 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$) 和龙目海峡出口处的 SHI9034 岩心 (Ding *et al.*, 2002) (平均约 $23 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$) 要低得多; 末次冰期氧同位素 2 期的沉积速率为 $13.1 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$, 也远远低于 SHI9006 岩心 ($62.18 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$) 和 SHI9034 岩心 (平均约 $63 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$)。后 2 支岩心位于由望加锡海峡直接进入印度洋的穿越流通道上, 虽不在同一海盆, 沉积速率却非常接近, 较 SHI9011 岩心均要高出 5~6 倍。这 3 支岩心的沉积速率变化趋势非常一致, 均表现为冰期时沉积速率高, 而间冰期时沉积速率低。

2.2 古海洋学特点

由于研究区特殊的地理位置, 位于近赤道低纬地区, 属于西太平洋暖池范围, 受印尼穿越流和东亚季风活动的影响, 又受陆源淡水输入的影响, 现代表层海水表现为二月温度高, 约 $28.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 盐度低, 约

33×10^{-3} ; 八月温度低, 约 $27 \text{ }^\circ\text{C}$, 盐度高, 约 34.2×10^{-3} 。但同一个海区的不同位置, 每年最高温度和最低温度并不都分布在二月和八月 (<http://www.ifremer.fr/sismer/references/climatologies/>), 可见表层海水温度、盐度变化非常复杂。

可能是受盐度变化对浮游有孔虫组合面貌的影响, 现代类比技术估算的研究区表层海水古温度没有表现出明显的冰期、间冰期差异。因此, 浮游有孔虫 *Globigerinoides sacculifer*/*G. ruber* 的比值变化用来印证研究区古水温变化, 生活在 50 m 以上浅层水中的 *G. sacculifer* 和 *G. ruber*, 其中前者指示较暖的水温, 后者偏凉, 两者的丰度比值可以近似地指示古水温 (汪品先等, 1986)。SHI9011 岩心 *G. sacculifer*/*G. ruber* 的比值曲线明显可见 (图 2), 冰期时水温较低, 80~60 cm (据沉积速率推算, 大约 14.2~12.7 ka), 即末次冰消期终止期 I_A 开始, 水温迅速上升, 但在 35~25 cm (据沉积速率推算, 大约 8~6 ka) 前后, 水温又有一次明显的下降。

MAT 估算的 SHI9011 岩心表层海水古盐度则显示出更为明显的冰期、间冰期变化特点 (图 2), 总体上二月盐度较低, 且波动幅度大, 八月盐度较高, 变化幅度较小。从二月盐度变化曲线上可以看出, LGM 时盐度最低, 推测是由冰期时海平面下降, 陆源淡水输入增加引起的, 在八月盐度变化曲线上也有表现。LGM 之后盐度略有增加, 80~60 cm 前后, 也即终止期 I_A, 盐度又有一次明显下降, 其后逐渐

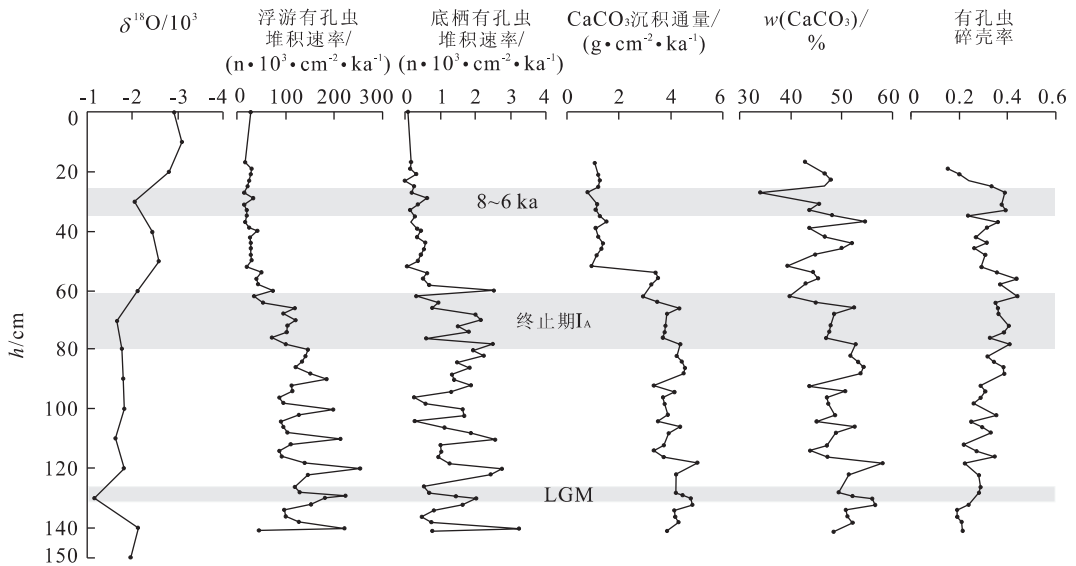


图 3 SHI9011 岩心氧同位素、浮游、底栖有孔虫和 CaCO_3 堆积速率、 CaCO_3 含量和有孔虫碎壳率变化曲线

Fig. 3 Curves of oxygen isotope, MAR of planktonic and benthic foraminifers and CaCO_3 , relative abundance of CaCO_3 , fragments of foraminifera of the core SHI9011

上升,至 35~25 cm 前后,为盐度最高的阶段,这个阶段在八月盐度变化曲线上表现更为明显。

由于研究区冰期、间冰期沉积速率差异较大,故有孔虫的绝对丰度、 CaCO_3 百分含量并不能真实地反映其沉积量的变化。为了避免稀释作用影响,本文估算了浮游及底栖有孔虫的堆积速率、 CaCO_3 堆积通量 (Herguera and Berger, 1991),据此分析研究区 LGM 以来的古生产力和碳酸盐溶解程度变化情况。

浮游及底栖有孔虫堆积速率曲线(图 3)反映,SHI9011 岩心末次冰期氧同位素 2 期浮游及底栖有孔虫堆积速率均较高,尤其是浮游有孔虫堆积速率,最高达 252×10^3 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$),平均 118×10^3 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$),高于望加锡海峡出口处 SHI9006 岩心,后者最高 131×10^3 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$),平均仅为 33×10^3 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$),底栖有孔虫堆积速率除个别样点外,这 2 支岩心相差不大。SHI9011 岩心冰后期氧同位素 1 期浮游及底栖有孔虫堆积速率均明显下降,浮游有孔虫堆积速率最高 32×10^3 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$),平均 25×10^3 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$),仍高于 SHI9006 岩心同期的浮游有孔虫堆积速率(最下部个别样点较高,最高 33×10^3 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$),平均仅为 9×10^3 个/($\text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$))(丁旋等,2004)。底栖有孔虫堆积速率这 2 支岩心仍相差不大,说明 SHI9011 岩心氧同位素 2 期相比 1 期具有较高的古生产力,且 SHI9011 岩心所在位置较 SHI9006 岩心所在位置古

生产力要高,虽然后者的沉积速率远高于前者。据此也可推测,这 2 支岩心沉积速率的差异主要由陆源物质供应量大小不同造成。

SHI9011 岩心的 CaCO_3 沉积通量(图 3)也明显地表现为末次冰期时较高、全新世冰后期时较低。浮游有孔虫种 *Globigerina bulloides* 是亚极区种,也普遍见于上升流和低纬度界线流区,指示高生产力 (Bé, 1977; Duplessy *et al.*, 1981a; Pflaumann *et al.*, 1996; Martinez *et al.*, 1998)。这个种在现代西太平洋暖池区明显缺失,含量不到 10% (Kawahata *et al.*, 2000),但在 SHI9011 岩心中表现出有意义的变化。*Neogloboquadrina dutertrei* 为热带—亚热带种,能适应较宽的温、盐范围,常发生在洋流活跃的地区,如大陆边缘、上升流区,是温跃层、富营养种,在暖水、低盐、高生产力的环境中此种的含量最丰富 (Bé, 1977; Thompson, 1981; Pflaumann *et al.*, 1996; Hilbrecht, 1997; Martinez *et al.*, 1998; Pflaumann and Jian, 1999),这个种是暖池区常见的高生产力种 (Kawahata *et al.*, 2000)。这 2 个种的相对丰度都表现为末次冰期时较高、全新世冰后期时较低。*G. bulloides* 的相对丰度表现为自冰期向冰后期逐渐下降,冰期时含量基本都在 10% 以上,最高 23.8%,冰后期含量大多低于 10%,平均仅 8.2%。而 *N. dutertrei* 的相对丰度在由冰期向冰后期下降的总趋势中,在 30~40 cm 深

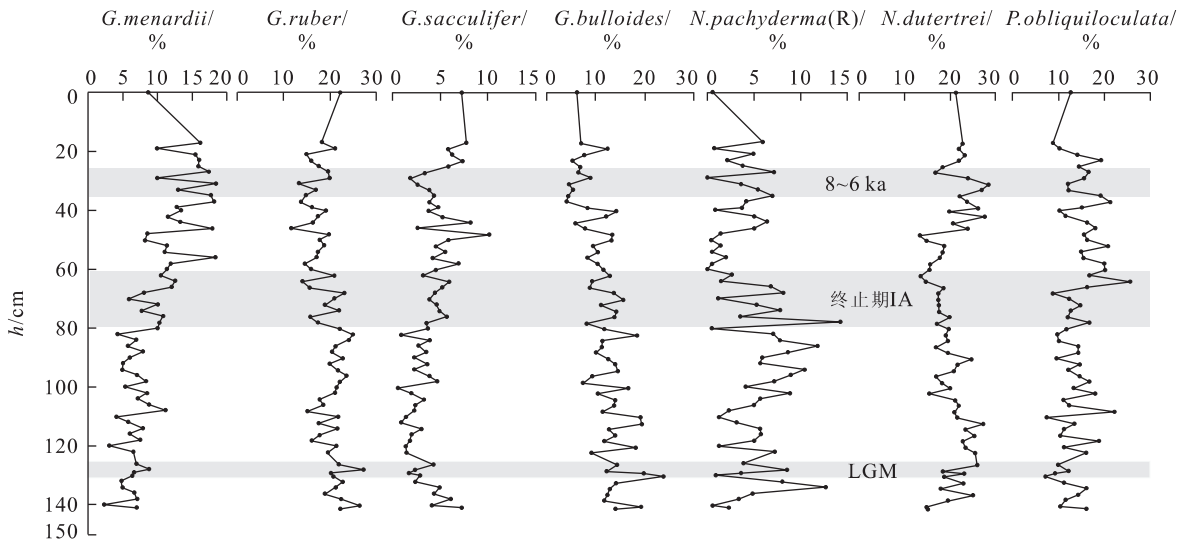


图 4 SHI9011 岩心浮游有孔虫重要属种百分含量变化曲线

Fig. 4 Species relative abundance of planktonic foraminifera of the core SHI9011

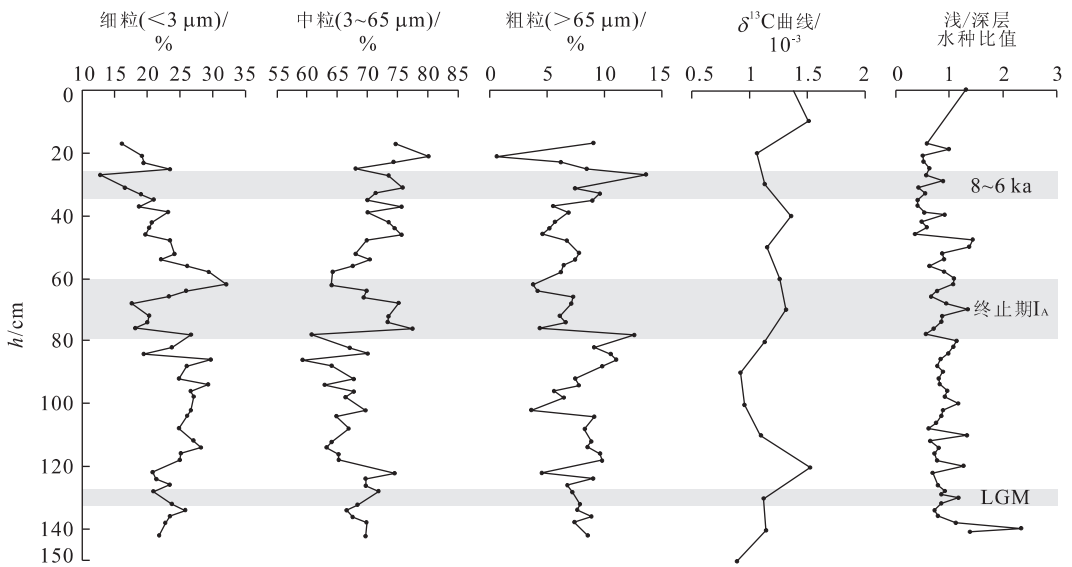


图 5 SHI9011 岩心粒度分布、碳同位素以及浮游有孔虫浅/深层水种比值变化曲线

Fig. 5 Grain size, carbon isotope and the rate of the planktonic foraminifer shallow-water species to deep-water species of the core SHI9011

处又有明显上升,其原因如下所述,应与季风引起的上升流活动有关(图 4)。

海洋中代表初级生产力的浮游植物进行光合作用时优先吸收较轻的¹²C,¹²C 随输出生产力离开表层水,在非上升流的高生产力地区,由于无上升流使^{δ13}C 再循环回返表层,势必引起表层水体的^{δ13}C 值明显升高,且在有陆源元素补给的近陆海区更为明显(Ganssen and Sarthein, 1983)。从 SHI9011 岩心浮游有孔虫^{δ13}C 曲线(图 5)上可以看出,该岩心^{δ13}C 值自冰期至冰后期变化不是很大,但冰期时波

动较强烈,末次冰期最盛期具有较高的^{δ13}C 值,说明当时古生产力较高。

SHI9011 岩心的碳酸盐百分含量曲线(图 3)反映,该岩心末次冰期氧同位素 2 期碳酸盐含量较高,冰后期氧同位素 1 期含量低,除部分段落外,呈现由冰期向冰后期逐渐下降的总趋势。而有孔虫的碎壳率曲线(图 3)则与碳酸盐含量曲线呈现良好的反相关,表现为冰期时碎壳率低,冰后期时碎壳率高。浮游有孔虫抗溶种 *Globorotalia menardii* 和 *Pulleniatina obliquiloculata* (Bé, 1977; Martinez et al.,

1998)的相对丰度与有孔虫的碎壳率变化一致,表现为冰期时含量较低而冰后期时含量明显增加(图4),当然,这2个种相对丰度的变化一部分是水温的作用,另一部分则是碳酸盐溶解作用的结果.从以上分析可知,研究区冰期时碳酸盐溶解度低,冰后期时碳酸盐溶解作用增强.

2.3 讨论

末次冰期时海平面下降 120 m (Fairbanks *et al.* 1982),南海南部及暹罗湾、爪哇海浅海成陆,巽他海峡关闭,龙目海峡变狭窄,印度尼西亚穿越流仅能从印尼岛弧东端和帝汶海进入印度洋,当时穿越流活动微弱.东印度洋爪哇上升流区末次冰期时强烈的上升流活动 (Martinez *et al.*, 1999),也证明当时该区没有强烈的穿越流对上升流活动产生抑制.

由于末次冰期时海平面下降,研究区陆源物质输入量增加,虽然 SHI9011 岩心相较近陆的 SHI9006 和 SHI9034 岩心,沉积速率并不高,但末次冰期氧同位素 2 期时的沉积速率仍达到冰后期的 3 倍.从沉积物粒度分析曲线(图 5)上也可以看出,末次冰期氧同位素 2 期粗粒($>65 \mu\text{m}$)物质含量较高.推测由于较多的陆源物质输入带来丰富的营养物质,加之冰期时陡的温度梯度,强烈的东南季风活动 (Gingele *et al.*, 2002),使得海水混合作用强烈,可以从下部水体中带来大量营养物质,故表层海水肥力高,古生产力上升,浮游及底栖有孔虫及碳酸盐的堆积速率均较高,浮游有孔虫高生产力种相对丰度增加.

海底碳酸盐的含量取决于生产力(供应 CaCO_3)、溶解(减少 CaCO_3)与稀释(降低 CaCO_3 百分含量)3种作用的综合效应(汪品先,1995).由上述可知,研究区末次冰期时具有较高的生物生产力,较多的陆源输入物质迅速掩埋了沉降在海底的钙质生物壳体,使得碳酸盐溶解作用下降,但相较近陆地区陆源物质的输入量并不是很高,因此相对碳酸盐的稀释作用较弱,故末次冰期时具有较高的 CaCO_3 百分含量.

末次冰消期冰川消融、海平面上升、极锋后退呈现阶段性在世界许多海区多有报道 (Duplessy *et al.*, 1981a, 1986; Fairbanks *et al.*, 1982; Arnold and Maurice, 1987; Fairbanks, 1989). Duplessy *et al.* (1981b, 1986)根据 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线针对冰消期融冰情况,提出冰消期两步模式(two-step deglaciation model):快速消融的终止期 I_A (14~12 ka)、终止期 I_B (10~7 ka)和其间所夹的很少或几无冰盖消融的停顿.印

度尼西亚海区于 12.5 ka 和 9.5 ka 前后有 2 次 $\delta^{18}\text{O}$ 值快速变轻事件可与终止期 I_A 、终止期 I_B 相对应.特别是在终止期 I_A ,海平面迅速上升,望加锡海峡和龙目海峡通道突然变宽,暖而低盐的海水通过这 2 个海峡迅速涌入爪哇海和东印度洋 (Ding *et al.*, 2002a).

SHI9011 岩心 *G. sacculifer*/*G. ruber* 的比值曲线(图 2)显示,在 80~60 cm (大约 14.2~12.7 ka),也即终止期 I_A ,表层海水温度迅速上升,指示相对较低温环境的浮游有孔虫种 *Neoglobobulimina pachyderma* (R) (Bé, 1977; Pflaumann and Jian, 1999)的含量迅速下降,暖水种 *Glogiberinoides sacculifer* (Bé, 1977; Fairbanks *et al.*, 1982; Martinez *et al.*, 1998; Pflaumann and Jian, 1999)、*P. obliquiloculata* 和 *G. menardii* 的含量明显上升(图 4);同时现代类比技术估算的表层海水古盐度却明显下降(图 2).沉积物粒度分析曲线(图 5)显示,粗粒物质含量减少,中粒(3~6 μm)物质含量迅速增加.推测在终止期 I_A 研究区穿越流活动增强,可能带来大量暖而低盐的海水,海平面上升,粗粒沉积物供应量减少,而由穿越流远道带来的较细粒沉积物供应量增加.

来自北太平洋温跃层水的印尼穿越流,在形成的最初阶段,其中含有较丰富的营养物质,但由于沿途消耗,至弗勒洛斯海区,穿越流带来的营养物质已有限;强烈的穿越流活动,在海水表层形成一个暖而低盐的帽,抑制了下部水体向上运动,因而也减少了来自下部的营养物质的供应;而终止期 I_A 海平面上升,陆源营养物质的供应量也减少,因此,研究区于终止期 I_A 时古生产力开始下降.表现为浮游、底栖有孔虫堆积速率开始减少,浮游有孔虫碳同位素由重变轻,碳酸盐含量下降,有孔虫碎壳率上升,贫氧而适于浅层水居住的种 *G. sacculifer* 含量增加.

SHI9011 岩心沉积物粒度分析曲线(图 5)显示,在 35~25 cm (大约 8~6 ka)处,粗粒物质含量突然增加,此阶段大致在终止期 I_B ,海平面再次迅速上升,因此,不可能是由于陆源物质输入量增加造成的,推测约 8 ka 前后增强的东南季风活动 (Sirocko *et al.*, 1993; Porter and An, 1995; Wang, *et al.*, 1999)从澳大利亚大陆带来的风尘沉积物,可能是造成此次粗粒物质含量增加的原因.

SHI9011 岩心 *G. sacculifer*/*G. ruber* 的比值曲线显示 35~25 cm 前后表层海水温度明显下降(图 2),同时,浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 增重,凉水种

N. pachyderma(R)的含量上升,暖水种 *G. sacculifer* 的含量下降(图 2,4)。而二、八月表层海水盐度曲线则显示此阶段 SSS 明显上升,特别是八月盐度上升更为明显(图 2)。反映温跃层深度变化的浅层水种/深层水种比值(Ravelo and Fairbanks, 1992)较之冰消期终止期 I_A 也明显下降(图 5)。推测可能是约 8 ka 东南季风增强,引起 SHI9011 岩心所在位置上升流活跃,表层海水温度下降、盐度上升,温跃层变浅,浅层水种含量减少。

SHI9011 岩心 35~25 cm 前后浮游、底栖有孔虫堆积速率只有微弱的增加,但略早于此阶段,浮游有孔虫高生产力种 *N. dutertrei* 明显增加, $\delta^{13}C$ 值变重。碳酸盐百分含量在此阶段则表现为大幅度下降,有孔虫碎壳率上升,抗溶种 *G. menardii* 和 *P. obliquiloculata* 丰度明显都较高。推测约 8 ka 前后东南季风活动引起水体强烈扰动,从下部带来较多的营养物质造成古生产力上升,但高生产力产生的大量有机质在降解过程中产生的有机酸具有很强的腐蚀性,而低的沉积速率不能迅速掩盖沉积下来的钙质壳体,所以产生高的溶解效应,加之此时的营养物质供应远不能和低海平面时期的陆源营养物质供应量相比,古生产力的增加也有限,所以钙质壳体的堆积速率增加并不明显。

3 结论

(1)研究区相较近陆地区沉积速率不高,但仍表现出受海平面升降陆源物质输入量变化影响,冰期时沉积速率高,间冰期时沉积速率低。(2)冰期时海平面下降,较多的陆源物质输入和海水垂向交换活跃,造成研究区古生产力上升,碳酸盐含量增加,溶解度较低。冰后期则古生产力下降,碳酸盐含量减少,溶解度升高。(3)冰消期终止期 I_A 海平面迅速上升,陆源营养物质供应减少,同时穿越流通道变宽,增强的穿越流带来大量暖而低盐的海水呈帽状覆盖在表层,抑制了上升流的活动,使得研究区古生产力开始下降。(4)大约 8~6 ka 前后,强烈的东南季风活动,引起研究区上升流活动增强,表层海水温度下降、盐度上升,生物生产力增高,碳酸钙溶解度增强。沉积物中风尘粗粒物质含量明显增加。

References

Arnold, B. E., Maurice, M. P., 1987. Retreat velocity of the

North Atlantic polar front during the last deglaciation determined by ^{14}C accelerator mass spectrometry. *Nature*, 328: 791—794.

Bé, A. W. H., 1977. An ecological, zoogeographical and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In: Ramasay, A. T. S., ed., *Oceanic micropaleontology*. Academic Press, London, 1—100.

Bray, N. A., Hautala, S., Chong, J., et al., 1996. Large-scale sea level, thermocline, and wind variations in the Indonesian throughflow region. *J. Geophys. Res.*, 101: 12239—12254.

Ding, X., Fang, N. Q., Guichard, F., et al., 2004. Indonesian throughflow actions during last glacial maximum. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 151—156 (in Chinese with English abstract).

Ding, X., Guichard, F., Bassinot, F., et al., 2002. Evolution of heat transport pathways in the Indonesian Archipelago during last deglaciation. *Chinese Science Bulletin*, 47(22): 1912—1917.

Ding, X., Guichard, F., Fang, N. Q., et al., 2002. The exhibition of the East Asian monsoon action in the Indonesian Archipelago in the Holocene. *Earth Science Frontiers*, 9(1): 154 (in Chinese with English abstract).

Duplessy, J. C., Arnold, M., Maurice, P., et al., 1986. Direct dating of the oxygen-isotope record of the last deglaciation by ^{14}C accelerator mass spectrometry. *Nature*, 320: 350—352.

Duplessy, J. C., Bé, A. W. H., Blanc, P. L., 1981a. Oxygen and carbon isotopic composition and biogeographic distribution of planktonic foraminifer in the Indian Ocean. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoeco.*, 33: 9—46.

Duplessy, J. C., Delibrias, G., Turon, J. L., et al., 1981b. Deglacial warming of the northeastern Atlantic Ocean: Correlation with the paleoclimate evolution of European continent. *Palaeog. Palaeocli. Palaeoeco.*, 35: 121—144.

Fairbanks, R. G., 1989. A 17 000-year glacio-eustatic sea level record; Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342: 637—642.

Fairbanks, R. G., Sverdrlove, M., Free, R., et al., 1982. Vertical distribution and isotopic fractionation on living planktonic foraminifera from the Panama basin. *Nature*, 198: 841—844.

Gingele, F. X., De Deckker, P., Girault, A., et al., 2002. History of the south Java current over the past 80 ka. *Palaeogeo. Palaeocli. Palaeoeco.*, 183: 247—260.

- Ganssen, G., Sarthein, M., 1983. Stable-isotope composition of foraminifers: The surface and bottom water record of coastal upwelling. In: Thiede, J., Suess, E., eds., Coastal upwelling: Its sediment record. Part A, Responses of the Sedimentary Regime to Present Coastal Upwelling. Plenum Press, New York, 99—121.
- Gordon, A. L., Fine, R. A., 1996. Pathways of water between the Pacific and Indian oceans in the Indonesian seas. *Nature*, 379: 146—149.
- Herguera, J. C., Berger, W. H., 1991. Paleoproductivity from benthic foraminifera abundance: Glacial to postglacial change in the West-Equatorial Pacific. *Geology*, 19: 1173—1176.
- Hilbrecht, H., 1997. Morphologic gradation and ecology in *Neogloboquadrina pachyderma* and *N. dutertrei* (planktonic foraminifera) from core top sediments. *Mar. Micropaleontol.*, 31(1—2): 31—44.
- Hirst, A. C., Godfrey, J. S., 1993. The role of Indonesian throughflow in a global ocean GCM. *J. Phys. Oceanogr.*, 23: 1057—1085.
- Kawahata, W., Nishimura, A., Gagan, M. K., 2000. Seasonal change in foraminiferal production in the western equatorial Pacific warm pool: Evidence from sediment trap experiments. *Deep-Sea Research II*, 49: 2783—2800.
- Martinez, J. I., De Dekker, P., Chivas, A. R., 1997. New estimate for salinity changes in the Western Pacific Warm Pool during the last glacial maximum: Oxygen-isotope evidence. *Mar. Micropaleontol.*, 32: 311—340.
- Martinez, J. I., De Deckker, P., Barrows, T. T., 1999. Palaeoceanography of the last glacial maximum in the eastern Indian Ocean: Planktonic foraminiferal evidence. *Palaeog. Palaeocl. Palaeoco.*, 147: 73—99.
- Martinez, J. I., Lynda, T., De Deckker, P., 1998. Planktonic foraminifera from the eastern Indian Ocean: Distribution and ecology in relation to the western Pacific warm pool (WPWP). *Mar. Micropaleontol.*, 34: 121—151.
- Martinson, D. G., Pisias, W. G., Hays, J. D., et al., 1987. Age dating and the orbital theory of the ice age: Development of a high resolution 0 to 300 000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27: 1—29.
- Pflaumann, U., Duprat, J., Pujol, C., 1996. SIMMAX: A modern analog technique to deduce Atlantic sea surface temperatures from planktonic foraminifera in deep-sea sediments. *Paleoceanography*, 11(1): 15—35.
- Pflaumann, U., Jian, Z. M., 1999. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and western Pacific: A new transfer technique to estimate regional sea-surface temperatures. *Mar. Geology*, 156: 41—83.
- Porter, S. C., An, Z., 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 375: 305—308.
- Ravelo, A. C., Fairbanks, R. G., 1992. Oxygen isotopic composition of multiple species of planktonic foraminifera: Records of the modern photic zone temperature gradient. *Paleoceanography*, 7(6): 815—831.
- Sirocko, F., Sarthein, M., Erlenkeuser, H., et al., 1993. Centuryscale events in monsoonal climate over the past 24 000 years. *Nature*, 364: 322—324.
- Thompson, P. R., 1981. Planktonic foraminifer in the western North Pacific during the past 150 000 years: Comparison of modern and fossil assemblages. *Palaeogrogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 35: 441—479.
- Wang, L., Sarthern, M., Erlenkeuser, H., et al., 1999. East Asian monsoon climate during the late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology*, 156: 245—284.
- Wang, P. X., 1995. The South China Sea during the last 150 ka. Tongji University Press, Shanghai (in Chinese).
- Wang, P. X., Min, Q. B., Bian, Y. H., et al., 1986. Planktonic foraminifera in the continental slope of the northern South China Sea during the last 130 000 years and their paleo-oceanographic implications. *Acta Geologica Sinica*, (3): 215—225 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁旋, 方念乔, Guichard F., 等, 2004. 印度尼西亚多岛海末次冰期最盛期以来的穿越流活动. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(2): 151—156.
- 丁旋, Guichard F., 方念乔, 等, 2002. 全新世东亚季风活动在印度尼西亚多岛海的表现. *地学前缘*, 9(1): 154.
- 汪品先, 1995. 十五万年来的南海. 上海: 同济大学出版社.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等, 1986. 十三万年来南海北部陆坡的浮游有孔虫及其古海洋学意义. *地质学报*, (3): 215—225.