

东北印度洋区 BAR9427 岩心末次冰期以来的古季风活动记录

丁 旋, 方念乔

中国地质大学海洋学院, 北京 100083

摘要: 末次冰期旋回尤其是氧同位素 3 期气候明显不稳定, 南亚季风活动并不遵循冰期间冰期的规律. 通过东北印度洋区位于安达曼海南部、苏门答腊岛西北端格雷特海峡的 BAR9427 岩心的古海洋学研究, 并与相邻孟加拉湾地区的 MD77181 和 MD81349 二支岩心进行对比分析, 认识到末次冰期氧同位素 2 期时, 研究区东北冬季风增强, 上升流活跃, 古生产力较高, 同时近岸地区蒸发作用强烈, 海水盐度升高. 末次冰期大间冰阶氧同位素 3 期的早、晚期, 研究区西南夏季风活动强烈, 向东的西南季风流, 使得孟加拉湾中部盐度升高, 而北部由于季风降雨, 大量的淡水输入使得盐度大幅度下降, 且八月盐度远低于二月. 西南夏季风变化遵循 23 ka 的岁差周期, 在我国青藏高原、黄土与沙漠以及阿拉伯海等区都有表现.

关键词: 东北印度洋区; 末次冰期; 盐度; 季风活动; 岁差周期.

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2006)06-0765-08

收稿日期: 2006-08-06

Records of Paleo-Monsoon of Core BAR9427 in Northeastern Indian Ocean during Last Glaciation

DING Xuan, FANG Nian-qiao

Marine School, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The climate was obviously instable in the last glacial cycle, especially in the Marine Oxygen Isotope Stage 3. The South Asian monsoon activities conflict with the glaciation and interglaciation rule. The paleoceanographic study of the core BAR9427 from the south of the Andaman Sea, the Great Strait at the northwest terminal of the Sumatra Island in the northeastern Indian Ocean, and its comparison with that of the nearby cores MD77181 and MD81349 in the Bay of Bengal, reach the following conclusions: the northeastern monsoon was strong in intensity with the active upwelling and the relatively high paleoproductivity over the studied area in the MIS 2 of the last glaciation. Meanwhile, the sea surface salinity increased due to the strong evaporation near the shore region. The southwestern monsoon was strong over the studied area in the early and late MIS 3. The easterly southwestern monsoon current increased the salinity in the middle of the Bay of Bengal. However, the salinity decreased greatly in the north of the Bay of Bengal because of both the monsoon rain and the influx of a mass of fresh water. In addition, the salinity was lower in August than in February. The southwestern monsoon activities follow the 23 ka precession cycle, a phenomenon also discovered in the Tibetan plateau, the loess and desert fields of China, and the Arabian Sea.

Key words: Northeastern Indian Ocean; last glaciation; salinity; monsoon activity; precession cycle.

0 引言

北印度洋季风研究的经典地区是上升流活跃的阿拉伯海和索马里海盆, 那里以浮游有孔虫 *Glo-*

bigerina bulloides 丰度作为替代性指标的上升流强度的变化情况被视为印度季风盛衰的监视器 (Prell and Curry, 1981; Kroon *et al.*, 1991). 北印度洋东侧的孟加拉湾地区, 现代无明显的上升流活动, 季风

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40476022).

作者简介: 丁旋 (1964—), 女, 博士, 副教授, 主要从事古海洋学和微体古生物学研究. E-mail: dingx@cugb.edu.cn

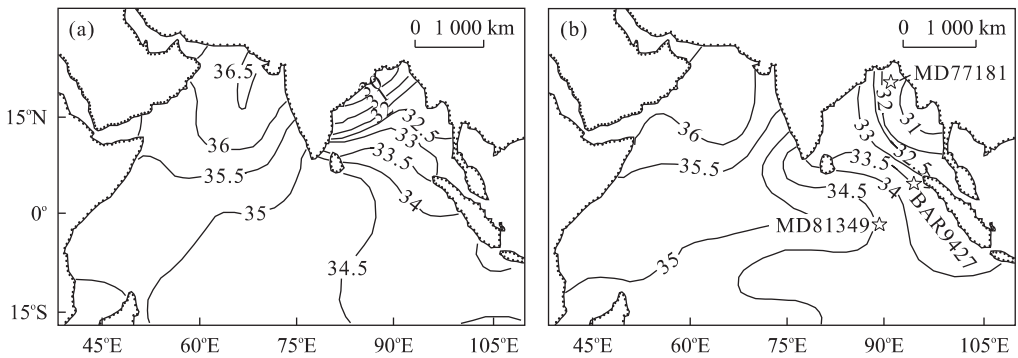


图 1 现代印度洋表层海水盐度分布(Cullen, 1981)

Fig. 1 Surface salinity patterns in the northern Indian Ocean

a. 西南季风时期(5—10月); b. 东北季风时期(11—4月); ☆指示岩心位置图; 盐度等值线单位‰

强弱的变化常以浮游有孔虫壳体的氧同位素值反映的淡水输入量大小引起的盐度变化来指示(Duplessy, 1982; Cullen, 1981). 最近的研究指出, 孟加拉湾地区深海氧同位素 2、3 期存在着上升流活动引起的高生产力现象, 应是冬季风增强的表现(方念乔等, 1999; 丁旋等, 1999, 2003; Fang *et al.*, 2001). 但阿拉伯海氧同位素 3 期的底栖有孔虫化石组合及相关的地球化学特征指示, 氧同位素 3 期中期存在着明显的西南夏季风增强的特征(Otto and Hermelin, 1995). 孟加拉湾地区氧同位素值所反映的表层海水盐度变化, 也指示氧同位素 3 期确实存在着短暂的夏季风增强事件(丁旋等, 2000). 可见, 末次冰期旋回中南亚季风活动不仅仅是冰期冬季风增强夏季风减弱、间冰期夏季风增强冬季风减弱这么简单, 而是各自遵循特有的规律发生变化, 其中不乏交叉和重叠. 为了更全面地认识末次冰期旋回中的印度季风变化, 我们不妨将视角扩大, 因此, 东北印度洋区位于安达曼海南部、苏门答腊岛西北端格雷特海峡的 BAR9427 岩心(图 1)成为此次研究的重点.

1 材料与方法

BAR9427 岩心是由法国 BARAT RV Baruna Jaya I 1994 年在东北印度洋苏门答腊岛西部海域实施的海上科学考察采集的. 该岩心位于 5. 34N, 94. 30E, 水深 2 689 m, 心长 10. 45 m. 沉积物主体为灰色或橄榄灰色深海软泥, 该岩心所在位置受多次火山喷发活动影响, 中部含有多层浅灰色火山灰层. 本次研究间隔 10 cm 取样, 剔除火山灰含量较高的样品, 以免火山喷发活动对环境的影响造成生物组

合面貌的古气候指代意义失真.

样品经干燥、称重后, 用孔径 150 μm 的铜筛筛洗. 余留物经 40 $^{\circ}\text{C}$ 烘干后用缩分器缩分至每样不少于 300 个个体, 鉴定并统计浮游、底栖有孔虫及碎壳, 分别计算各属种的相对丰度和破碎壳与完整壳体的比率(碎壳率). 在此基础上, 利用浮游有孔虫现代类比技术(modern analog technique)软件 PaleoAnalog, version 2. 0 估算表层海水古温度、古盐度.

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. 选取 2 个样品, 挑出 *Globorotalia menardii* 300~400 个(30 mg), 在蒸馏水中经超声波清洗约 15 s, 在北京大学使用 Tandetron 加速器作 AMS¹⁴C 测年. 碳酸盐百分含量和生源蛋白石分析(Mortlock and Froelich, 1989)在中国地质大学(北京)海洋学院完成.

同时对我们前期已做过部分研究的、位于孟加拉湾地区的另外二支岩心 MD77181 (17. 23N, 90. 27E, 水深 2 271 m, 心长 13. 98 m)和 MD81349 (01. 01S, 89. 22E, 水深 2 505 m, 心长 4. 3 m)(丁旋等, 2003), 运用浮游有孔虫 MAT 方法估算表层海水古盐度用以对比分析. 各岩心位置分布见图 1.

2 古海洋学特点

2.1 地层

BAR9427 岩心 AMS¹⁴C 测年结果指出, 284. 5 cm

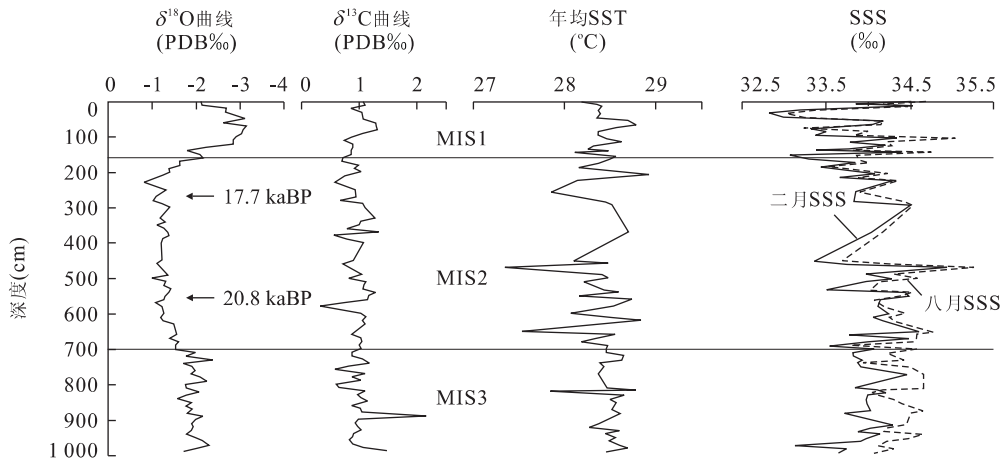


图 2 BAR9427 岩心氧碳稳定同位素, 表层水温和和盐度变化曲线

Fig. 2 Curves of oxygen, carbon isotope, the sea surface temperature and salinity of the core BAR9427

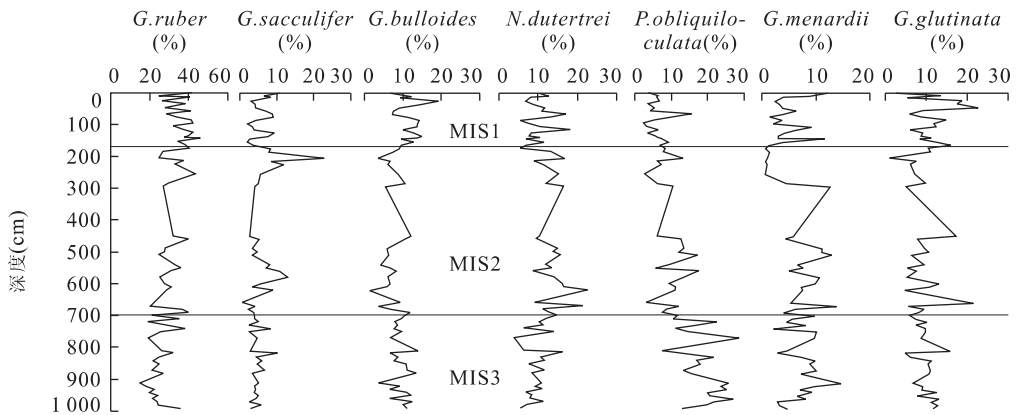


图 3 BAR9427 岩心浮游有孔虫重要属种丰度变化曲线

Fig. 3 Species relative abundances of important planktonic foraminifera of the core BAR9427

和 559.5 cm 处绝对年龄值分别为 17.7 kaBP 和 20.8 kaBP. 结合 $\delta^{18}\text{O}$ 值曲线, 将氧同位素 1/2 期界线置于 $\delta^{18}\text{O}$ 向轻值转化的过渡段, 大致位于 170 cm 处, 据 Martinson *et al.* (1987) 的时间表, 绝对年龄值应为 12.05 kaBP; 2/3 期界线大致位于 700 cm 处, 绝对年龄值为 24.11 kaBP (图 2). 据此推算, 该岩心各阶段沉积速率变化较大, 特别是氧同位素 2 期, 中部沉积速率达 88.7 cm/ka, 比其上部 20.3 cm/ka 和下部的 42.4 cm/ka 都要高出很多. 观察该段沉积物特性, 发现多次火山灰层堆积可能是该段高沉积速率的原因. $\delta^{18}\text{O}$ 值变化曲线显示, 该岩心底部未达 3/4 期界线 (图 2), 据其上氧同位素 2 期下部的沉积速率推算, 底部的年龄大致为 31 kaBP. 当然, 氧同位素 3 期较 2 期两极冰盖体积要小, 气候偏暖, 沉积速率应略低, 所以下部的实际年龄可能比我们估算的还要老一些.

2.2 表层水古温度、盐度

MAT 方法估算的 BAR9427 岩心末次冰期以来的年均表层水温变化不大, 大约在氧同位素 2 期末次冰盛期 1.8 kaBP, 温度略有下降, 其他阶段变化非常小 (图 2). 浮游有孔虫指温种相对丰度的变化也表现出类似的特点, 暖水种 *Globigerinoides sacculifer* 和 *Globorotalia menardii* (Bé, 1977; Fairbanks *et al.*, 1982; Thunell and Reynolds, 1984) 的百分含量冰期冰后期都没有表现出明显的变化 (图 3).

MAT 方法估算的 BAR9427 岩心末次冰期以来的表层海水盐度却有明显的变化, 表现为全新世冰后期氧同位素 1 期二、八月表层海水盐度均较低, 二月最高 34.53‰, 最低 32.83‰, 平均 33.72‰; 八月最高 35.04‰, 最低 33.03‰, 平均 34.01‰; 季节差异很小, 平均 0.29‰, 最大季节差为 0.70‰. 末次冰期氧同位素 2 期二、八月表层海水盐度都明显升高,

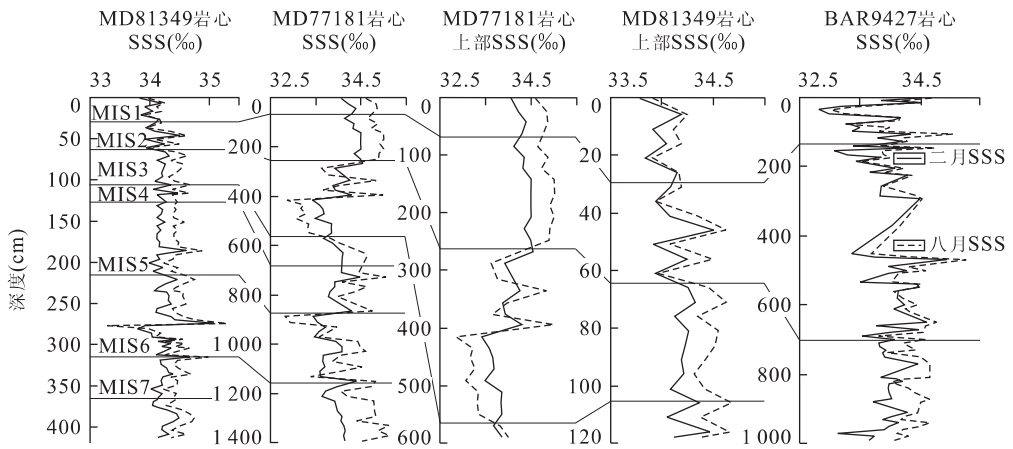


图 4 MD81349、MD77181 和 BAR9427 岩心二、八月表层海水盐度变化曲线

Fig. 4 Curves of the sea surface salinity of February and August from cores MD81349, MD77181 and BAR9427

二月自 33.37‰~34.94‰, 平均 34.06‰; 八月自 33.53‰~35.27‰, 平均 34.30‰; 部分层位见明显的盐度季节差, 平均仅 0.24‰, 最大可至 0.81‰。氧同位素 3 期上部二、八月盐度与 2 期下部接近, 二月自 33.14‰~34.47‰, 平均 33.94‰, 八月自 33.95‰~34.66‰, 平均 34.34‰, 但盐度季节差拉大, 平均 0.40‰, 最大可达 1.00‰, 八月盐度较二月盐度明显偏高(图 2)。浮游有孔虫高盐种 *Pulleniatina obliquiloculata* (徐建等, 2004; 郑范等, 2005) 在自氧同位素 3 期上部至 2 期下部也表现出明显的高含量(图 3)。

位于孟加拉湾地区北部的近岸岩心 MD77181, MAT 方法估算的 SSS 变化曲线波动很强烈, 表现为氧同位素 3 期和 6 期盐度明显降低。氧同位素 1 期二月平均 34.24‰, 八月平均 34.77‰, 较 BAR9427 岩心略高。2 期二八月平均分别为 34.40‰、34.88‰, 较 1 期变化不大, 仍较 BAR9427 岩心同期要高。3 期盐度下降, 二八月平均分别为 33.88‰、33.64‰, 且明显可分为三个阶段, 早期和晚期八月盐度低于二月, 与 BAR9427 岩心呈现相反的变化趋势, 而中期八月盐度高于二月, 盐度差小。MD77181 岩心在氧同位素 6 期上部再次出现与 3 期上部和下部类似的变化(图 4)。

东经 90° 海岭近赤道位置的 MD81349 岩心, MAT 方法估算的 SSS 变化曲线没有 MD77181 波动剧烈, 但上部氧同位素 1~3 期与 BAR9427 岩心有类似的变化趋势。氧同位素 1 期二月平均为 34.00‰, 八月平均为 34.10‰, 高于同期的 BAR9427 岩心, 低于 MD77181 岩心, 盐度季节差最

小。2 期二八月平均分别为 34.10‰、34.24‰, 较 1 期升高, 与同期 BAR9427 岩心接近, 较 MD77181 岩心低, 盐度季节差仍不大。3 期二八月平均分别为 34.21‰、34.46‰, 均高于同期 BAR9427 岩心和 MD77181 岩心, 与 BAR9427 岩心同样, 盐度季节差拉大(图 4)。该岩心氧同位素 6 期下部出现的盐度强烈波动, 应与浮游有孔虫组合反映的同位素 6.4 期时环境异常事件(方念乔等, 2004)有关。

2.3 古生产力与碳酸盐溶解作用

由于研究区位于近岸地区, 冰期海平面下降陆源物质供应量增加, 沉积速率会增大, 并且 BAR9427 岩心氧同位素 2 期存在着多次火山灰层堆积, 所以不同的时间段沉积速率差别较大, 每克干样的个体数不能精确地反映有孔虫的绝对丰度变化, 故在此运用浮游、底栖有孔虫以及生源蛋白石的堆积速率(Herguera and Berger, 1991)来讨论古生产力的变化情况。

BAR9427 岩心浮游及底栖有孔虫堆积速率均表现为冰期高, 冰后期低的特点, 特别是氧同位素 2 期下部, 浮游及底栖有孔虫堆积速率均明显高于氧同位素 1 期, 3 期虽较 2 期略有下降, 但其均值仍明显高于 1 期。生源蛋白石的含量冰期冰后期没有太大的波动, 但蛋白石的堆积速率在氧同位素 2 期明显上升, 3 期虽较 2 期下降, 但明显高于冰后期氧同位素 1 期(图 5)。

浮游有孔虫高生产力种的相对丰度也可反映古生产力变化, BAR9427 岩心中低盐、高生产力种 *Neogloboquadrina dutertrei* (Bé, 1977; Thunell and Reynolds, 1984; Pflaumann and Jian, 1999) 的

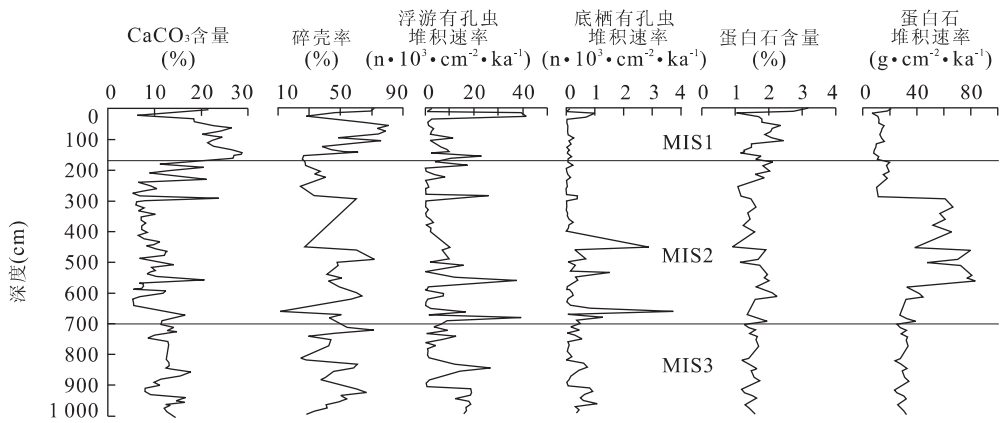


图 5 BAR9427 碳酸盐含量、碎壳率、浮游及底栖有孔虫堆积速率、蛋白石含量和蛋白石堆积速率变化曲线

Fig. 5 Curves of CaCO₃ content, fragments of foraminifera, opal content, MAR of planktonic and benthic foraminifera and opal of BAR9427

含量在氧同位素 2 期明显上升, 该种在氧同位素 3 期含量不高可能是受表层海水盐度升高的影响. 另一高生产力种 *G. bulloides* (Bé, 1977; Pflaumann and Jian, 1999) 在氧同位素 3 期含量较高, 而广适应性的高生产力种 *Globigerinata glutinata* (Thunell and Reynolds, 1984; Pflaumann and Jian, 1999) 在 2 期下部和 3 期都表现出较高的含量, 可这两个种在氧同位素 1 期上部含量也并不低, 所以浮游有孔虫高生产力种所反映的冰期冰后期古生产力变化并不明显(图 3). 我们在该岩心 $\delta^{13}C$ 的变化曲线上也发现类似的情况, 氧同位素 2 期和 3 期的 $\delta^{13}C$ 值较 1 期仅有略微的增重(图 2).

综合浮游、底栖有孔虫以及蛋白石堆积速率, 浮游有孔虫高生产力种百分含量以及 $\delta^{13}C$ 值变化情况, BAR9427 岩心所在位置古生产力在冰期氧同位素 2、3 期较冰后期氧同位素 1 期有所升高, 但变化的幅度不大.

BAR9427 岩心碳酸钙含量曲线表现为冰后期氧同位素 1 期时含量高, 冰期氧同位素 2、3 期时含量低, 而反映碳酸盐溶解作用强弱的有孔虫碎壳率曲线也表现出相同的变化趋势, 氧同位素 1 期时碎壳率高, 说明溶解作用较强, 氧同位素 2、3 期时碎壳率也较高, 但略低于 1 期, 说明溶解作用并不强于冰后期, 由此推测冰期时较低的碳酸钙含量并不是溶解作用造成的(图 5). 而氧同位素 1 期较低的古生产力也不应是造成该期碳酸钙高含量的原因. 所以冰期时陆源物质供应量增多, 和多次火山活动形成的高沉积速率产生的稀释效应, 应是这一阶段的碳酸钙含量下降的原因.

3 讨论

北印度洋及其紧邻的亚洲大陆, 由于海陆间的热力差异, 导致强烈的季风活动. 夏季风强烈时, 海洋上空蒸发的大量水汽随季风移至相邻大陆上, 形成强烈的季风降雨, 陆地径流将大量淡水带入孟加拉湾和安达曼海, 这造成该区表层海水盐度降低. 相对开放大洋, 作为环境控制因素, 该区盐度变化常常较温度变化更为重要(Duplessy, 1982; Cullen, 1981).

现在西南夏季风(5—10 月)活动时期, 80% 以上的季风雨降落在西南亚洲大陆上, 形成的淡水经由两条最大的河流——伊洛瓦底江和恒河—普特拉河输入孟加拉湾. 孟加拉湾地区西南夏季风时期是东北冬季风(11—4 月)时期淡水输入的五倍以上. 尽管淡水输入和降雨的季节性, 全年中, 低盐条件在研究区占主导地位, 并随远离河流入海口盐度逐渐增加(Cullen, 1981; Duplessy, 1982).

孟加拉湾表层水循环呈现季节性变化, 导致西南季风(5—10 月)时期和东北季风(11—4 月)时期低盐表层水的分布模式不同. 西南季风时期, 高盐水被向东的西南季风流带入孟加拉湾中部, 因此, 在孟加拉湾中部, 西南季风时期平均表层水盐度较东北季风时期要高. 然而, 在孟加拉湾北部正相反, 这造成了西南季风时期, 沿 90E 方向, 南北向的盐度梯度更陡(Cullen, 1981)(图 1).

BAR9427 岩心位于孟加拉湾东南端, 苏门答腊岛西北的格雷特海峡区, 是孟加拉湾、安达曼海连接的通道. 现代表层海水性质受印度季风流活动的影响, 盐度变化明显, 不是典型的上升流活动区. 八月西

南夏季风活动强烈时期,季风流和赤道逆流都表现为向岸堆水现象,生物生产率应不高;二月东北冬季风活动时期,离岸风的作用也应有沿岸上升流的活动。

末次冰期氧同位素 2 期时, BAR9427 岩心生物生产力较高,表现为浮游及底栖有孔虫堆积速率、生物蛋白石堆积速率均较高,高生产力种 *N. dutertrei* 和 *G. glutinata* 等的含量增加,应与当时东北季风增强形成较强烈的沿岸上升流活动有关。末次冰期冬季风增强在南海和中国陆地黄土的研究中多有报道(Ren *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 1999; 黄宝琦等, 2000), 由于西南季风减弱,加之海平面下降,德雷克海峡通道关闭,降雨量和淡水输入减少,二八月盐度较氧同位素 1 期均升高,八月较二月温度高蒸发强且无降水,盐度较二月升高更为明显,高盐种 *P. obliquiloculata* 也表现出高含量。

位于研究区中部的 MD81349 岩心也表现出与 BAR9427 岩心类似的变化,末次冰期氧同位素 2 期时二、八月 SSS 较 1 期均明显上升,它们又都低于最北部的 MD77181 岩心同期的 SSS(图 4),说明当时东北季风增强,近岸地区蒸发作用强烈,陆地径流输入减少,故由南向北盐度升高。氧同位素 2 期时强烈的东北季风活动,海水的垂直对流活动增强, MD77181 和 MD81349 二支岩心也表现出较高的古生产力(丁旋等, 2003)。

末次冰期大间冰阶的氧同位素 3 期,位于研究区北部的近岸岩心 MD77181 在 3 期的早、晚期盐度明显下降,低于氧同位素 1、2 期,且八月盐度低于二月,而同期位于研究区中部的 BAR9427 岩心和 MD81349 岩心盐度较 1、2 期均升高,且八月盐度大于二月,盐度季节差拉大,又以位于最南和最西的 MD81349 岩心盐度最高、盐度季节差最明显(图 4)。

氧同位素 3 期在东北印度洋阿拉伯海区普遍出现强烈的季风活动(Otto and Hermelin, 1995)。西昆仑山古里雅冰心记录(Shi *et al.*, 1999; 施雅风等, 2002)显示,在相当于末次冰期大间冰阶的氧同位素 3 期,呈现暖—冷—暖的气候演化序列,两个暖峰间存在一个历时 23 ka 的完整的岁差周期。54~44 kaBP 的 3 期中期为比现代温度低 5 °C 的冷期,降水较多与冷期降温抑制消融相结合,使冰川伸展范围都超过气候严寒而干燥的末次冰盛期(LGM)的冰川规模(施雅风和姚檀栋, 2002)。40~30 kaBP 的 3 期后期,青藏高原在岁差周期夏季高太阳辐射作用下,温度比现在高 2~4 °C,青藏高原接受的辐

射增强加大了高原与印度洋中南部的热力对比,形成一次特强的夏季风事件(Shi *et al.*, 1999; 施雅风等, 2002)。高原及邻区众多大湖的高湖面记录指示大范围降水丰沛,已有测年记录的冰心、湖泊沉积、孢粉与古生物、黄土与沙漠地区古土壤、石灰岩洞穴中石笋、古河道沉积、滨海地区海相沉积等多种记录指示我国各区域的湿润程度即降水量高于现代(施雅风和于革, 2003)。

从以上分析可知, MD77181、MD81349 和 BAR9427 三支岩心的盐度变化,是由于 3 期早、晚期强烈的西南夏季风活动,高盐水被向东的西南季风流带入孟加拉湾中部,使得位于孟加拉湾中部的 BAR9427 岩心和 MD81349 岩心盐度高于氧同位素 2 期,而在孟加拉湾北部正相反,由于淡水输入造成盐度下降,使得 MD77181 岩心较 2 期盐度大幅度下降,且八月盐度更低于二月。由于岩心取样分辨率不够高,尚不能判断它们之间在时间上是否严格对应。而孟加拉湾在氧同位素 3 期出现上升流种丰度上升、表层水古生产力升高、表层水温度下降、温跃层变浅等指示存在上升流活动的现象,说明当时该区也存在着比较强烈的东北冬季风活动(丁旋等, 2003),与 3 期中期气温下降,冰川规模增大有关,也很可能与 3 期时的北大西洋大规模冰筏沉积,即 Henrich 事件的影响,青藏高原气候不稳定有关。

从 MD77181 和 MD81349 岩心的盐度变化曲线上可以看出,氧同位素 6 期也出现类似同位素 3 期的盐度变化,说明虽然是冰期,也并不排斥可能出现另一次西南季风增强事件,与该期一突发的事件(方念乔等, 2004)密切相关,从时间上推测,与氧同位素 3 期西南季风增强同遵循 23 ka 的周期。

4 结论

(1)末次冰期氧同位素 2 期时,研究区东北冬季风增强,海水的垂直对流活跃,上升流活动增强,同时近岸地区蒸发作用强烈,陆地径流输入减少,表现为古生产力较高,表层海水盐度升高。(2)末次冰期大间冰阶氧同位素 3 期的早、晚期,强烈的西南夏季风活动,高盐水被向东的西南季风流带入孟加拉湾中部,使得孟加拉湾中部的盐度高于氧同位素 2 期,而北部由于季风降雨,大量的淡水输入造成盐度大幅度下降,且八月盐度远低于二月。西南夏季风变化遵循 23 ka 的岁差周期,在我国青藏高原、黄土与沙

漠以及阿拉伯海等区都有表现。(3) BAR9427 岩心冰期氧同位素 2 期时古生产力较高、碎壳率反映的溶解作用也不强, 而碳酸盐含量低, 是冰期时陆源物质供应量增多, 以及多次火山活动形成的极高的非碳酸盐物质沉积速率产生的稀释效应的结果。

References

- Bé, A. W. H., 1977. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In: Ramsay, A. T. S., ed., *Oceanic micropaleontology*. Academic Press, London, 1—100.
- Cullen, J. L., 1981. Microfossil evidence for changing salinity patterns in the Bay of Bengal over the last 20 000 years. *Paleogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 35: 315—356.
- Ding, X., Fang, N. Q., Chen, P., et al., 2003. Upwelling actions in the Bay of Bengal during marine isotope stages 2 and 3; Evidence for Indian winter monsoon. *Quaternary Sciences*, 23(1): 54—59 (in Chinese with English abstract).
- Ding, X., Fang, N. Q., Wan, X. Q., 1999. The study of the glacial-interglacial paleoproductivity evolution during Late Quaternary in the Bay of Bengal. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(3): 49—58 (in Chinese with English abstract).
- Ding, X., Fang, N. Q., Wan, X. Q., 2000. Monsoon climate and its paleoceanographic records of the Bay of Bengal during Late Quaternary. *Geoscience*, 14(3): 295—300 (in Chinese with English abstract).
- Duplessy, J. C., 1982. Glacial to interglacial contrasts in the Northern Indian Ocean. *Nature*, 295: 494—498.
- Fairbanks, R. G., Sverdrup, M., Free, R., et al., 1982. Vertical distribution and isotopic fractionation of living planktonic foraminifera from the Panama basin. *Nature*, 298: 841—844.
- Fang, N. Q., Chen, X. F., Ding, X., et al., 2001. Paleoceanographical records under impact of the Indian monsoon from the Bengal deep sea fan and Ninetyeast Ridge during the last 260 ka. *Science in China (Series D)*, 44 (Suppl.): 351—359.
- Fang, N. Q., Ding, X., Chen, X. F., et al., 1999. Rapid climatic change in oxygen isotope stage 3; Evidence from the rhythmic sedimentary record in core MD77190, Bengal Bay. *Quaternary Sciences*, 19(6): 511—517 (in Chinese with English abstract).
- Fang, N. Q., Ding, X., Hu, C. Y., et al., 2004. A significant paleoceanographic event taking place in northeastern Indian Ocean during oxygen isotope stage 6. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 127—134 (in Chinese with English abstract).
- Herguera, J. C., Berger, W. H., 1991. Paleoproductivity from benthic foraminifera abundance; Glacial to postglacial change in the west-equatorial Pacific. *Geology*, 19(1): 1173—1176.
- Huang, B. Q., Jian, Z. M., Lin, H. L., 2000. Late Quaternary changes of paleoproductivity in the northeastern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(2): 65—68 (in Chinese with English abstract).
- Kroon, D., Steens, T. N. F., Troelstra, S. R., 1991. Onset of monsoonal related upwelling in the western Arabian Sea as revealed by planktonic foraminifera. *Proceeding of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 117: 257—263.
- 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.
- Mortlock, R. A., Froelich, P. N., 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in the pelagic marine sediment. *Deep Sea Res.*, 36(9): 1415—1426.
- Otto, J., Hermelin, R., 1995. Impact of productivity events on the benthic foraminiferal fauna in the Arabian Sea over the last 150 000 years. *Paleoceanography*, 10(1): 85—116.
- Pflaumann, U., Jian, Z., 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. *Marine Geology*, 156: 41—83.
- Prell, W. L., Curry, W. B., 1981. Faunal and isotopic indices of monsoonal upwelling: Western Arabian Sea. *Oceanologica Acta*, 4: 91—98.
- Ren, J. Z., Ding, Z. L., Liu, D. S., et al., 1996. Climate changes on millennial time scales—Evidence from a high-resolution loess record. *Science in China (Series D)*, 39(5): 449—459.
- Shi, Y. F., Jia, Y. L., Yu, G., et al., 2002. Features, impacts and causes of the high temperature and large precipitation event in the Tibetan plateau and its adjacent area during 40—30 kaBP. *Journal of Lake Sciences*, 14(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. F., Liu, X. D., Li, B. Y., et al., 1999. A very strong summer monsoon event during 30—40 kaBP in the

- Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its relation to pre-cessional cycle. *Chinese Science Bulletin*, 44 (20): 1851—1858.
- Shi, Y. F., Yao, T. D., 2002. MIS3b (54—44 ka BP) cold period and glacial advance in middle and low latitudes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. F., Yu, G., 2003. Warm-humid climate and transgressions during 40—30 kaBP. and their potential mechanisms. *Quaternary Sciences*, 23(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Thunell, R. C., Reynolds, L. A., 1984. Sedimentation of Planktonic foraminifera; Seasonal changes in species flux in the Panama basin. *Micropaleontology*, 30(3): 243—262.
- Wang, L., Sarnthein, 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.
- Xu, J., Wang, P. X., Huang, B. Q., et al., 2004. Mid-Pleistocene revolution recorded by *Pullenitina obliquiloculata* in the southern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 7—14 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, F., Li, Q. Y., Chen, M. H., et al., 2005. Late Pleistocene paleoceanographic characteristics of the southwestern South China Sea since 500 ka. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 534—543 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 丁旋, 方念乔, 陈萍, 等, 2003. 孟加拉湾深海氧同位素 2、3 期上升流活动. *第四纪研究*, 23(1): 54—59.
- 丁旋, 方念乔, 万晓樵, 1999. 孟加拉湾晚第四纪冰期和间冰期古生产力演变研究. *海洋地质与第四纪地质*, 19(3): 49—58.
- 丁旋, 方念乔, 万晓樵, 2000. 孟加拉湾晚第四纪的季风气候及其古海洋学记录. *现代地质*, 14(3): 295—300.
- 方念乔, 丁旋, 陈学方, 等, 1999. 孟加拉湾 MD77190 柱状样第 3 期的韵律沉积记录及快速气候变化. *第四纪研究*, 19(6): 511—517.
- 方念乔, 丁旋, 胡超涌, 2004. 氧同位素第 6 期北印度洋的一次重大古海洋学事件. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(2): 127—134.
- 黄宝琦, 翦知湔, 林慧玲, 2000. 南海东北部晚第四纪古生产力变化. *海洋地质与第四纪地质*, 20(2): 65—68.
- 施雅风, 贾玉莲, 于革, 等, 2002. 40~30 kaBP 青藏高原及邻区高温大降水事件的特征、影响及原因探讨. *湖泊科学*, 14(1): 1—11.
- 施雅风, 姚檀栋, 2002. 中低纬度 MIS3b(54~44 kaBP)冷期与冰川前进. *冰川冻土*, 24(1): 1—9.
- 施雅风, 于革, 2003. 40~30 kaBP. 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨. *第四纪研究*, 23(1): 1—11.
- 徐建, 汪品先, 黄宝琦, 等, 2004. 南海南部普林虫与“中更新世革命”. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(1): 7—14.
- 郑范, 李前裕, 陈木宏, 等, 2005. 南海西南部晚更新世 500 ka 以来的古海洋学特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(5): 534—543.