

孟加拉湾和东经 90°海岭 260 ka 以来的 古海洋学记录与印度季风的影响*

方念乔 陈学方 丁 旋 胡超涌 殷 勇 聂浩刚

(中国地质大学海洋地质学研究中心, 北京 100083)

摘要 通过相轮分析, 讨论了北印度洋孟加拉深海扇区和东经 90°海岭岭区的沉积记录部分环境指标间可能存在的相互联系. 60 kaBP 以来短周期的快速变化在扇区得到充分反映, 其中, 古生产力的变化与夏季季风的兴衰并非呈简单的线性关系. 与西北印度洋的替代性指标意义相反, 上升流种 *Globigerina bulloides* 的相对富集在研究区不是印度夏季季风增强反是其减弱的信号. 岭区记录在更长的时间范围内显示了与扇区记录基本对应的气候演化特征. 还初步讨论了发生于 165 kaBP 前后的重大海洋生态环境恶化事件, 认为其很可能亦是印度季风活动的产物.

关键词 东北印度洋 古海洋学 印度季风 260 ka 以来

迄今为止, 大部分有关印度季风的海洋记录来自南亚半岛的西侧即阿拉伯海和索马里海盆, 那里以 *Globigerina bulloides* 丰度为替代性指标的上升流强度的变化情况被视为印度季风兴衰的监视器^[1,2]. 其他如“季风花粉指数(MPI)”^[3,4]、风尘颗粒黏土矿物组成及磁化率等^[5-7]也是季风活动的有效判别依据. 而在南亚半岛的东侧诸如孟加拉湾等地, 从其沉积物中得到季风记录甚为有限. 比较著名的成果, 是根据包括这一地区在内的整个北印度洋 $\delta^{18}\text{O}$ 分布特征所推测的末次冰期以来印度西南季风控制下降水量的变化^[8].

印度季风的形成及兴衰在较长的衡量构造运动的时间尺度上与青藏高原的隆升有关^[9,10], 在米兰科维奇旋回的级别内则主要受控于地轴斜率和岁差章动所引起的太阳辐射量的变化^[11]. 在千年级及其以下的时间尺度上, 由于复杂的海、气相互作用过程充满很多不确定的因素, 其变化规律更显复杂^[12]. 孟加拉湾及其邻区是青藏高原剥蚀物的主要储库之一, 又是印度夏季季风的热源、策动中心和季风的重要通道, 那里的沉积记录所包含的信息对于认识印度季风的历史演化乃至动力机制可能发挥重要的作用.

1 材料和方法

本文选用的分析样品采自孟加拉深海扇和东经 90°海岭的活塞岩芯(表 1), 岩芯视研究需要, 采样间距自 2~10 cm 不等. 氧同位素测定在法国国家科研中心气候和环境科学实验室(LSCE)完成, 各岩芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线形态与 SPECMAP^[13]的对比是全部沉积记录阶段划分和年代标定的基础. “Toba”火山灰层(75 kaBP)、粉红色拟抱球虫在印度洋的绝灭(125 kaBP)以及

2001-02-21 收稿, 2001-07-27 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(G1998040800)和国家自然科学基金(批准号: 49672135)资助项目

“Blake”(120~108 kaBP)等地磁反转事件证明上述氧同位素地层记录的建立完全可靠^[14,15]。自相关、互相关、谱分析等数理统计工作则应用文献[16]开发的软件“AnalySeries”(1.1 版)完成。

表 1 研究岩芯的地理位置及长度

编号	长度/m	纬度(N)	经度(E)	水深/m	地理构造单元
MD77169	14.60	10°12′	95°03′	2360	安达曼海海山
MD77181	13.98	17°23′	90°29′	2271	孟加拉扇
MD77190	12.00	07°41′	87°49′	3742	孟加拉扇
MD81349	4.30	01°01′	89°22′	2505	东经 90°海岭

2 讨论

2.1 沉积记录的轨道周期特征和相关的季风信息

至少自中更新世以来, 以 100 ka 为周期的冰川性海平面升降旋回对孟加拉扇沉积过程产生决定性的影响^[13,14]。虽然印度季风系统对孟加拉湾及其邻区的影响显而易见, 然而支配季风活动的 23 及 41 ka 周期在扇区各种沉积信号中与 100 ka 相比明显偏弱。

通过相关性计算可将沉积通量、粒度、碳酸钙含量等多种替代性指标与轨道强迫间的关系及指标间的相互关系在 ETP(地轨参数)相轮(phase wheels)上观察讨论。以扇区比较典型的 MD77181 岩芯为例, 由于记录的时间长度仅为 250 ka, 使得普遍出现的 110 ka 地轨偏心率周期在统计意义上存在严重缺陷。尽管如此, 仍有若干问题值得介绍。由图 1 可知, 在偏心率相轮(E)上, $-\delta^{18}\text{O}$ 对于地轨强迫仅有一个 13°的相位差即 3.5 ka 的滞后, 表明研究区的海水氧同位素组成确实受到地轨参数的控制且其变化发生于冰川气候事件之后, 与世界大多数地区的情况可以对比。 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线则与偏心率存在约 43 ka 的滞后。初步研究表明, 在东北印度洋区, $\delta^{13}\text{C}$ 在第 3 期中晚期至第 2 期(约 43~15 ka)的背景值和变化频率显著增大是一个可以广泛对比的现象, 这一指标应能代表研究区海洋生产力的发育程度^[16]。通过相关分析可以看到, 它

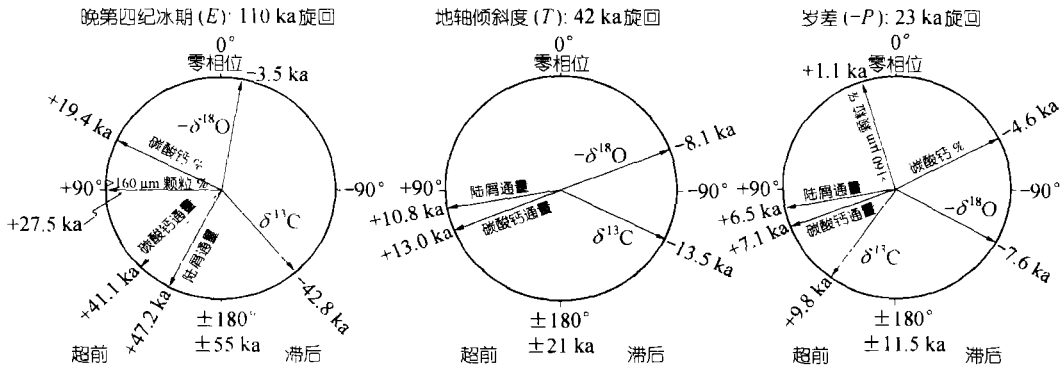


图 1 孟加拉扇 MD77181 岩芯各项替代性指标与地轨参数(ETP)的相位差

相轮在互相关频谱分析的基础上完成: 应用各替代性指标的变化曲线, 分别与 ETP 曲线(由地轨偏心率(E)、地轴倾斜度(T)和岁差秋分点(P)等三要素合成)进行卷积运算和快速 Fourier 变换, 观察和比较它们在不同周期带内的相位差并在相关的相轮上予以展现。ETP 的资料来源和互相关运算方法见参考文献[16]。各相轮的顶点即零相位是相关地轨参数的最大值(但根据北半球夏季日照量的变化, 规定我们对岁差秋分点相轮的顶点选最小值)。各替代性指标与相关地轨参数最大(小)值间的超前和滞后时间标于相轮外侧。因记录长度所限, 各指标在偏心率相轮上的特征仅供参考

的变化规律不受冰川事件和陆源物质输入量的直接影响。陆源输入通量在相轮上与 $-\delta^{18}\text{O}$ 形成大体上的对蹠关系,这是因为它直接接受冰川性海面升降的控制,其最大值基本对应于 $\delta^{18}\text{O}$ 的峰值而与其保持约 4 ka 的滞后。

正如前文指出,地轴倾斜度周期在受海平面变化影响较大的孟加拉扇区不甚明显。但是类似 37~39 和 29~30 ka 的周期信号较常出现,它们可以被视为一种准轨道周期,极有可能是地轴倾斜度的变化信号与其他区域环境信号叠加的结果。在地轴倾斜度相轮(T)上, $\delta^{13}\text{C}$ 的负值与陆源物质最大输入量的关系最为接近,表明导致表层水团 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 降低的陆源有机碳的输入可能在更大程度上与季风活动有关。与此相关的是,粗粒生物颗粒含量逼近以 23 ka 为周期的岁差相轮(-P)原点,这意味着季风对研究区表层生产力具有一定的控制作用。另外,碳酸盐通量与陆源通量的超前-滞后关系较诸 110 ka 相轮发生次序上的颠倒,它使我们有理由推测:在冰川性海面升降时段,是陆源输入量的变化引起钙质生物壳体生产和保存条件的改变;而在印度季风主导时段,是直接控制生产力的海洋条件改变在先,而输送陆源物质的大气或陆表水系条件的变化响应在后。

与海洋生产力关系密切的指标在岁差相轮上有明显反映。由于岁差周期在印度季风系统中显示度很高^[12],孟加拉扇生产力条件的变化可能与印度季风活动规律紧密相关。沉积物中由钙质壳体构成的粗粒组分靠近轮顶部,它表明壳体的发育(即壳体生产和溶解的相互抵消)也与岁差决定的最大日照量有关。

2.2 快速变化信号及相关季风信息

轨道尺度以下,古海洋学和古气候学的快速变化在孟加拉扇沉积记录中得到充分反映。MD77181 和 MD77190 岩芯均处于以泥质粉沙质堆积为主的远源相区,较大的陆屑输入量对高分辨率研究非常有利^[17-19]。

MD77190 岩芯由两类色调和组分具明显差别的黏土构成频繁交替的韵律互层,其中一种与第 2、4 期沉积物的性质相近,呈较浅的橄榄灰色(5Y4/1 或 5Y5/2),代表温凉气候条件下的产物;另一种颜色略深(10YR2/2),在碳酸盐含量、生物颗粒含量、黏土矿物组成乃至粒度特征上介于典型的冰期沉积物与间冰期沉积物之间,是不稳定的第 3 期温暖环境下的产物。它们交替出现的时段大致相当于氧同位素第 3 期和第 2 期早期(约 59~21 kaBP)。方念乔等人^[20,21]已据之详细讨论过该地区的快速气候变化和远程对比情况,本文拟就其包含的季风信息进一步给予说明(图 2)。

韵律记录大约以 37 ka 即 H4 事件为界,可依据沉积物特征和交替频率划分为两个部分,分别记以 I 和 II。I 区代表第 3 期早期,以暖温条件下形成的较深色沉积物为主,II 区即第 3 期晚期及第 2 期早期,深色沉积物在此阶段内逐渐减少,直至过渡到冰盛期(21~16 ka)由较浅色沉积物所完全取代。I 区内以 52~43 kaBP 阶段即我们记以 I b 的部分最具暖温气候特征,主要表现为沉积物中碳酸盐、有机碳、生物蛋白石乃至指示高生产力的底栖有孔虫 *Uvigerina* 含量均显著增大^[15,21]。我们推断,此时应为西南季风盛行期。东北印度洋区的地理特点决定其不可能像西北印度洋区那样以上升流的异常发育作为西南季风的显著特征,而应代之以充沛的降雨。沉积记录中 $\delta^{18}\text{O}$ 的降低和有机碳含量的增高很可能是强降雨量及其引起的陆源有机物

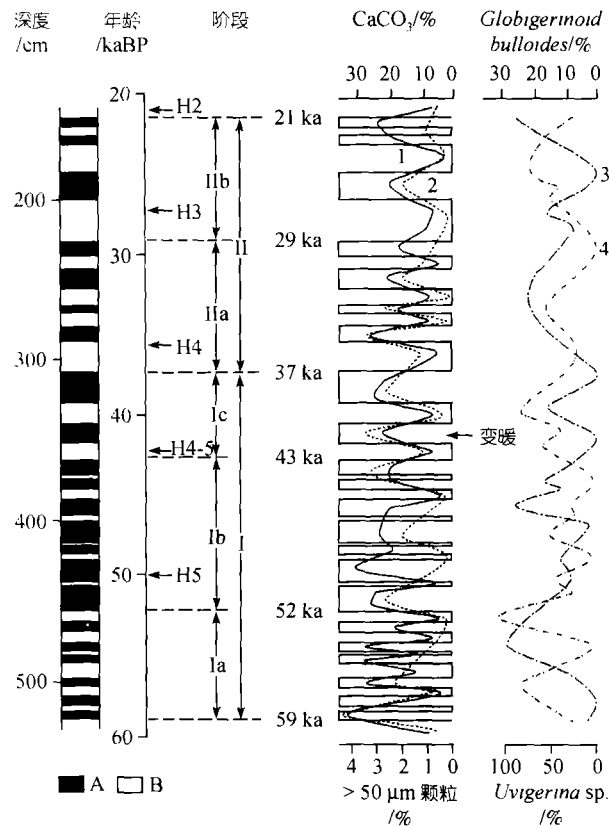


图 2 MD77190 孔岩芯第 2, 3 期的韵律沉积记录及主要生物、化学指标的变化特征

A: 深色沉积物; B: 浅色沉积物。曲线: 1. $\text{CaCO}_3/\%$; 2. $>50\ \mu\text{m}$ 颗粒/ $\%$; 3. *Uvigerina* sp.; 4. *G. bulloides*

输入量增大所致。大量的降雨还会使气溶胶、营养盐更多地加入水团, 从而刺激生产力显著增长。

43 kaBP 以后, 暖气候因素在研究区仍有较大优势, 但从云南得到的陆地记录则显示草原面积增加、森林面积减少、湖平面变浅即气候趋于寒冷和干旱¹⁾。深海记录中上升流种 *Globigerina bulloides* 的含量则持续增多。当印度夏季季风盛行时, 西南方向的气流及其引发的海洋向陆地的堆水作用从海、气两条路径对东北印度洋上升流及其诱发因素起到强烈的遏制作用。因此, 与西北印度洋情况相反, *G. bulloides* 的含量增加并非印度夏季季风增强反而可能是该季风减弱的信号。研究表明, 第 2 期及第 3 期的冷温阶段内孟加拉湾记录中的有孔虫组合均表现为 *G. bulloides* 含量明显增高, 甚至赤道附近的 MD81349 岩芯也出现相同的趋势(图 3)。

37~36 kaBP 是研究区重大的气候转折期, 所有标志温暖气候的替代性指标在此阶段发生跃降^[20]。姚檀栋等人^[22]据古里雅冰芯记录指出, 青藏高原在 38~32 kaBP 期间出现超过全新世的高温。聂浩刚^[21]通过研究云南中甸的湖泊记录, 亦指出 36~30 kaBP 期间存在一特殊的高温期。海洋记录中的暖温指标虽仍活跃, 但较之 H4(37 kaBP)事件之前, 夏季季风强度已明显衰

1) 殷勇. 57000 年来印度季风演化的陆地证据及海陆气候对比研究. 中国地质大学博士论文. 2000

2) 聂浩刚. 云南中甸纳帕海 58 kaBP 以来的沉积记录及其古气候演化. 中国地质大学硕士论文. 2000

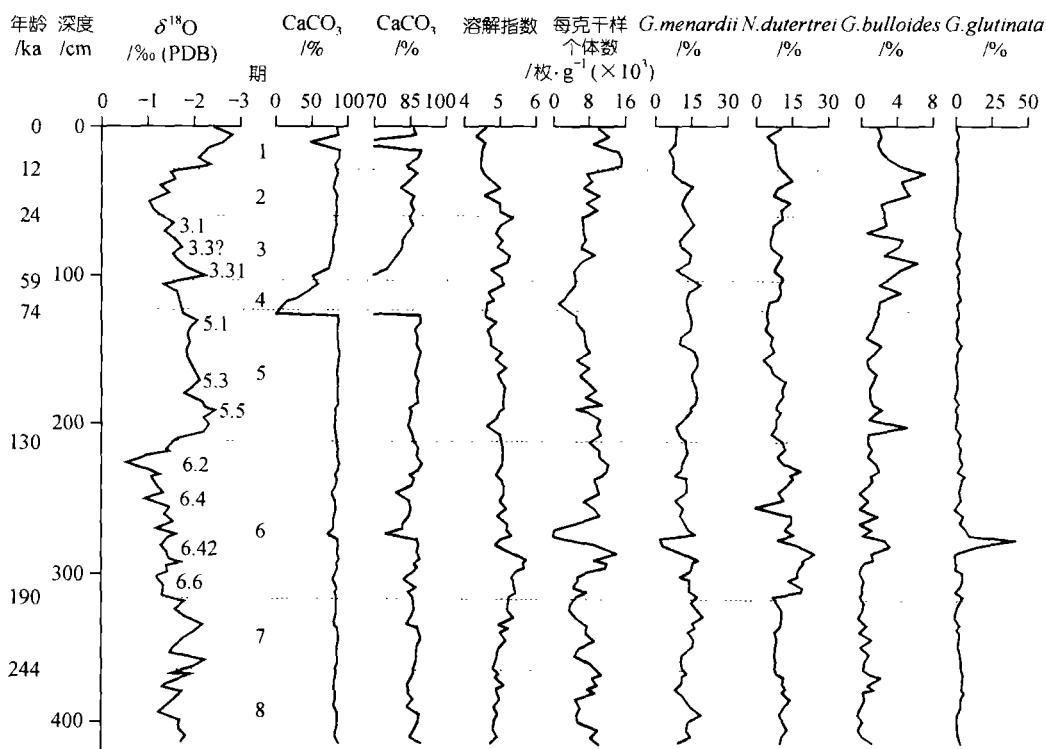


图 3 MD81349 岩芯的替代性指标的变化

本图年代坐标建立在 MD81349 岩芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 实测曲线与 SPECMAP(见文献[13])对比的基础之上。曲线右侧的阿拉伯数字代表氧同位素期、亚期和次亚期的序号。奇数表示间冰(亚)期,偶数表示冰(亚)期

退。海、陆对比的这种差异可能与高原气候系统的自身调控有关。从 MD77190 韵律序列来看,转折期后的高生产力记录依然时有出现,但伴随它们的指标已非上文提到的有机碳的异常增多和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的普遍偏低,而是与 *G. bulloides* 的发育基本同步。这一现象表明,控制海洋生产力的主导因素已由印度夏季季风(降水量增大)转为冬季季风(上升流活跃)。

2.3 东经 90°海岭记录及其对扇区记录的响应

MD81349 岩芯采自东经 90°海岭,主要由灰白色(N9 或 10YR8/2)钙质生物软泥组成。海岭沉积记录受海平面变化的影响远不如孟加拉深海扇那样强烈,但在季风活动的体系内与扇区记录包含的信号非常相似。例如, *G. bulloides* 含量的变化与扇区记录基本同步,支持了我们关于这一上升流种可以作为东北印度洋夏季季风相对减弱的判别标志的推论。图 3 表明,大约 260 kaBP 以来,印度夏季季风转弱的时期大致集中于 8.02(250~247 kaBP), 6.42(167~164 kaBP), 6.2(136~132 kaBP), 4(65~62 kaBP), 3(55~52 kaBP 及 41~29 kaBP)和 2(21~12 kaBP)等几个时期(惟一难以解释的是 *G. bulloides* 在 5.5 期的峰值)。特别值得提及的是,第 6.4 期(约 165~160 kaBP)伴随印度夏季季风的减弱,研究区发生重要的环境异常事件。在此事件之前即 188~165 kaBP,赤道海域的生产力似曾达到一个很高的水平。其主要标志是:(1)有孔虫每克干样个体数达到 10000~14500 枚;(2)反映海洋高生产力的 *Neogloboquadrina dutertrei* 含量达到 20%甚至更多;(3) *G. bulloides* 虽然含量仅为 3%~4%,但由于浮游有孔虫总量甚大,也可达到每克干样

400~500 枚, 超过 100~200 枚的平均水平. 但在 165 kaBP 前后, 正常的生态环境遭到重大破坏, 有孔虫每克干样个体数从 10000 枚突降至 300~500 枚. 常见的浮游有孔虫如 *Globogerinoides ruber*, *G. succulifer*, *Globorotalia menardii*, *N. dutertrei* 等, 其每克干样个数均下降数倍至 10 余倍, 而一向不占重要地位但能抵御恶劣环境的广适性生态种 *Globigerinita glulinata* 的含量却跃升至浮游有孔虫总量的 20%~45% (一般仅 2%~3%), 构成整个记录中最具影响的环境事件(图 3). 据观测, 在这一事件中沉积物内混入较多的陆源非碳酸盐粉尘, 意味着事件的形成可能与大气环流存在密切的联系. 在孟加拉深海扇区, MD77181 岩芯揭示的沉积物磁学性质在 6.4 期发生重大转变^[19]. Colin^[23]则报道安达曼海 MD77169 岩芯的同期记录中存在 $\epsilon_{Nb}(t)$ 值增高的现象. 据羊向东等人^[24], 0.17 Ma 前后青藏高原因山体隆升发生重要的气候转型, 但在滇西北鹤庆盆地记录中表现并不明显. 如何将现有资料综合分析, 探讨它们之间的内在联系和成因机制, 还有待继续工作.

3 结论

(i) 孟加拉扇区的沉积作用与各项地轨参数有关, 除主要受控于冰川性海平面变化外, 相当于 42 和 23 ka 的周期或准周期亦较突出, 显示了与太阳辐射及季风活动的关系. 相关分析可阐明各环境指标间的相互联系, 其中, 海洋生产力与季风活动联系较为密切.

(ii) 得益于扇区较高的沉积速率, 可以识别出千年级乃至更高分辨率的环境信号. 东北印度洋区的夏季季风和冬季季风在适当条件下均可刺激海洋生产力的发展. 根据 60 kaBP 以来的半远洋沉积记录, 37~36 kaBP 是研究区季风活动特征的重大转折点.

(iii) 与西北印度洋区不同, *G. bulloides* 的发育应代表印度夏季季风的削弱而不是增强. 东经 90°海岭的远洋沉积记录显示, 印度夏季季风显著偏弱的时期基本集中于冰期或冰亚期. 165kaBP 前后曾发生重大的海洋生态环境恶化事件, 这一事件似与东北印度洋包括印度季风在内的海气环流系统不无联系.

参 考 文 献

1. Prell W L, Curry W B. Faunal and isotopic indices of monsoonal upwelling: Western Arabian Sea. *Oceanol Acta*, 1981, 4: 91~98
2. Kroon D, Steens T N F, Troelstra S R. Onset of monsoonal related upwelling in the western Arabian Sea as revealed by planktonic foraminifers. *Proceeding of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1991, 117: 257~263
3. Prell W L, Van Campo E. Coherent response of Arabian Sea upwelling and pollen transport to late Quaternary monsoonal winds. *Nature*, 1986, 323: 526~528
4. Van Campo E. Pollen transport into Arabian Sea sediments. *Proceeding of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1991, 117: 277~281
5. Hovan S A, Rea D K. Post-Eocene record of Eolian deposition at sites 752, 754, and 756, eastern Indian Ocean. *Proceeding of the Ocean Drilling Program. Scientific Results*, 1991, 117: 219~228
6. Debrabant P, Krissek L, Bouquillon A, et al. Clay mineralogy of Neogene sediments of the western Arabian Sea: Mineral abundances and paleoenvironmental implications. *Proceeding of the Ocean Drilling Program. Scientific Results*, 1991, 117: 183~196
7. De Menocal P, Bloemendal J, King J. A rock-magnetic record of monsoonal dust deposition to the Arabian Sea: Evidence for a shift in the mode of deposition at 2.4 Ma. *Proceeding of the Ocean Drilling Program. Scientific Results*, 1991, 117: 389~407

- 8 Duplessy J C. Glacial to Interglacial contrasts in the Northern Indian Ocean. *Nature*, 1982, 195: 494-498
- 9 Prell W L, Kutzbach J E. Sensitivity of the Indian monsoon to forcing parameters and implications for its evolution. *Nature*, 1992, 360: 647-652
- 10 Ruddiman W F, Kutzbach J E. Plateau uplift and climatic change. *Scientific American*, 1991, 3: 42-50
- 11 Clemens S C, Prell W L. One million year record of summer monsoon winds and continental aridity from the Owen Ridge (Site 722), Northern Arabian Sea. *Proceeding of the Ocean Drilling Program. Scientific Results*, 1991, 117: 365-388
- 12 Zonneveld K A F, Ganssen G, Troelstra S, et al. Mechanisms forcing abrupt fluctuations of the Indian Ocean summer monsoon during the last deglaciation. *Quaternary Science Reviews*, 1997, 16: 187-201
- 13 Martinson D G, Pisias W G, Hays J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice age development of a high resolution to 300,000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 1987, 27(1): 1-29
- 14 方念乔. 恒河深海扇东北区域晚第四纪气候和海平面变化对沉积作用的控制. *现代地质*, 1990, 4(1): 10-22
- 15 Paillard D, Labeyrie L, Yiou P. Macintosh program performs time-series analysis. *Eas Trans, AGU*, 1996, 77: 379
- 16 丁 旋, 方念乔, 陈学方. 孟加拉湾晚第四纪浮游有孔虫及其古海洋学意义. *现代地质*, 1999, 13(1): 37-42
- 17 Curry J R, Emmel F J, Moore D G, et al. Structure, tectonic and geological history of the northern Indian Ocean. In: Nairn A E, Stehli F G, eds. *The Ocean Basin and Margins*. New York: Plenum Press, 1982. 399-450
- 18 Pestiaux P, Van Der Mersch I, Berger A, et al. Paleoclimatic variability at frequencies ranging from 1 cycle per 10000 years to 1 cycle per 1000 years: Evidence for nonlinear behaviour of the climate system. *Climatic Change*, 1988, 12: 9-37
- 19 Fang N Q. Le controle climatique de la sedimentation quaternaire recente dans la region moyenne du Cone profond du Gange, Ocean Indien. *Académie de Paris Université Pierre et Marie Curie, Paris*, 1987. 158
- 20 Fang N Q, Chen X F, Hu C, et al. Rapid climatic change during past 60 ka recorded in the NE Indian Ocean and its correspondence from South China land. *Journal of China University of Geosciences*, 2000, 11(3): 252-258
- 21 方念乔, 丁 旋, 陈学方, 等. 6 万年以来孟加拉湾的快速气候变化记录及其与中高纬度地区记录的遥相关. *第四纪研究*, 1999, 6: 511-517
- 22 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(5): 447-452
- 23 Colin C. Reconstruction du régime de l' érosion des chaînes himalayenne et birmanes au cours des deux derniers cycles climatiques (300 derniers ka). *l'Université de Paris XI Orsay*, 1997, 272
- 24 羊向东, 王苏民, 童国榜, 等. 滇西北鹤庆盆地 1.0 Ma 以来构造抬升的植被与气候响应. *微体古生物学报*, 2000, 17(2): 207-217