

东北印度洋沉积岩芯热释光与古气候变化

刘海生¹ 侯胜利² 方念乔² 程业勋²

1 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

2 中国地质大学, 北京 100083

摘 要 孟加拉深海扇中扇的 MD77181 和下扇的 MD81345 岩芯沉积物天然热释光变化与古气候变化有明显的对应关系, 岩芯记录的时间跨度约 300 ka BP。将两支岩芯的热释光测量结果与 $\delta^{18}\text{O}$ 、 CaCO_3 含量和磁化率结果对比后发现, 热释光强度与磁化率变化存在显著的一致性。它们与间冰期和冰期气候变化的对应关系表现为: 间冰期, 风化作用减弱, 输入海洋的陆源性矿物减少, 对碳酸盐的稀释作用低于冰期, 热释光和磁化率同时降低。此时, 热释光强度随碳酸盐含量的增加而增大, 说明沉积物热释光主要来自于碳酸盐矿物的贡献, 表现为海进沉积环境特征。在冰期, 陆地风化作用加强, 输入海洋的陆源性矿物增加, 对碳酸盐的稀释作用增强, 热释光强度随陆源物的增多而增强, 热释光和磁化率同时增大。说明沉积物热释光主要来自陆源矿物, 表现为海退沉积环境特征。

关键词 热释光 古气候 磁化率 沉积物

文章编号 1006-9585 (2008) 01-0045-08 **中图分类号** P532 **文献标识码** A

Thermoluminescence and Paleoclimate Changement Using Sedimentary Cores in Northeast Indian Ocean

LIU Hai-Sheng¹, HOU Sheng-Li², FANG Nian-Qiao², and CHENG Ye-Xun²

1 *Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084*

2 *China University of Geosciences, Beijing 100083*

Abstract Natural thermoluminescence (NTL) has been carried out on sediment cores MD77181 and MD81345 from the Bengal fan of the Indian Ocean. The cores span the past 300 ka. The variation of TL and palaeomagnetic with core depth, i. e. with time, shows features which can reasonably be associated with climatic change. The nature of the obtained variation are discussed in relation to palaeoclimatic fluctuations impact on minerals of the sediment deposition of theglacial and other solar-terrestrial agents. The intensity of TL is closely correlated to the content of calcite in interglacial climatic cycles and results of TL and palaeomagnetic turn down at the same time. In glacial climatic cycles, due to dilution by the sediments, the content of calcite cut down, the intensity of TL is closely correlated to the sediments and results of TL and palaeomagnetic go up at the same time.

Key words thermoluminescence, paleoclimate, palaeomagnetic, sediment

1 引言

气候变化已为海洋沉积岩芯、冰芯、石笋、湖

泊沉积、黄土和孢粉等记录的 ^{14}C 、 ^{10}Be 、 ^{18}O ^[1,2]、 NO_3^- 和 ^{36}Cl 等指标所确证^[3]。过去数十年来,不少学者发现湖泊^[4,5]和海洋沉积物^[6]中放射性参

收稿日期 2006-12-29 收到, 2007-08-12 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40306017 和 40272074

作者简介 刘海生, 男, 1969 年出生, 博士, 高级工程师, 从事核技术探测及辐射防护研究。E-mail: haisl@mail. tsinghua. edu. cn

数,如 α 、 β 计数变化,海洋沉积物钻孔 γ 测井强度^[7,8],内陆盆地 γ 测井强度^[9,10],湖泊^[11]和海洋沉积物^[12,13]中U、Th及其同位素、海洋沉积物天然热释光^[14~20]随岩芯深度—沉积时间呈现规律性变化。有效记录的时间长度从距今数十年到数百万年不等,与反映古气候变化的有孔虫壳体中的 $\delta^{18}\text{O}$ 、磁化率等指标对比后发现,这种变化与太阳活动引起地球气候变化的相互作用密切相关。本文在东北印度洋赤道 90°E 海岭 MD81349 岩芯的天然热释光研究基础上^[19,20],继续对东北印度洋孟加拉深海扇中扇的 MD77181 及下扇的 MD81345 岩芯热释光剖面展开研究,目的是检验距今约 300 ka 时间范围内,在不同的海洋沉积环境下,岩芯天然热释光剖面能否对太阳活动影响地球气候变化做出理想的反应。

2 研究区地理概况

东北印度洋区主要包括孟加拉湾及邻近的安达曼海、 90°E 海岭和爪哇—巽他海沟及周边地带(图1)。新生代以来印度板块与欧亚板块碰撞,喜马拉雅及青藏高原的隆升是全球气候和环境变化影响最大的地质事件之一。青藏高原外围和喜马拉雅山系南部的东北印度洋区的海洋沉积物,是全球少有的包涵了大量新生代古气候与环境演化信息的物质记录,广阔的东北印度洋区是感受高原隆升环境效应的前缘地带。在这里,孟加拉深海扇和 90°E 海岭是最重要的两个地理环境和地质构造单元。孟加拉深海扇直接承纳了来自高原陆地的大量剥蚀物质,在沉积建造中所产生的边缘海效应“放大”了这一时期环境演化的丰富信号。这种独特的地理及地质构造位置,使之成为研究沉积记录对古气候、古环境变化响应的理想区域。东北印度洋同时又是典型的低纬地区近陆源的海域,独特的地理位置、海陆对峙的格局和大洋海水与大陆岩石热容量的差异造就了该地区特有的季风气候,持续的高原隆升改造着大气环流,强化了季风系统的复杂性。这里古气候与古环境的变化是海—陆—气相互作用最突出的表现,其深海沉积记录被视为进行高分辨率古气候学研究、亚洲季风活动研究、海气耦合机制研究和海陆对比研究的合适场所,对全球变化的研究有着十分

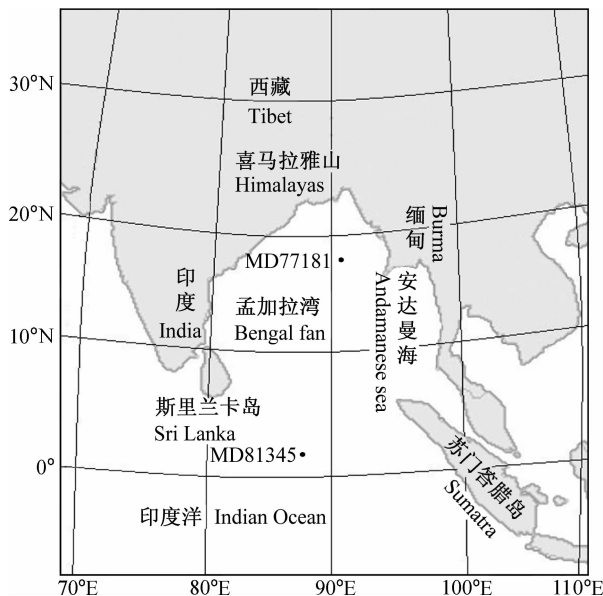


图1 采样地区及周边地理环境

Fig. 1 Location map of sampling and geography environment

重要的意义。

3 材料和方法

3.1 材料

MD77181 和 MD81345 岩芯由法国 Marion Dufresgne 号科考船分别在 1977 和 1981 年采集,目前保存于巴黎国立自然历史博物馆(MNHN)地质研究所的冷藏库。

MD77181 岩芯形成于孟加拉中扇非稳定沉积环境,全长约 13.98 m,采芯位置($17^\circ 23'\text{N}$, $90^\circ 29'\text{E}$),水深 2 271 m。岩芯天然热释光取样间隔 5~10 cm,共取样 301 个,连同顶部重力取芯(CP)段 9 个样,共完成全岩热释光测量点 310 个。在前期测量的基础上^[20],对有孔虫壳体又进行了加密测量,取样间隔 3~20 cm,共完成有孔虫热释光测量样 122 个。根据 *G. ruber* 壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线,可划分出 6 个氧同位素期(见图2)。

MD81345 岩芯位于孟加拉扇远源区靠近赤道的孟加拉湾下扇,采芯位置($1^\circ 36'\text{N}$, $87^\circ 09'\text{E}$),水深为 4 372 m,取样间隔 5 cm,连同 CP 段 15 个样,共完成全岩样热释光测量 96 个。对 MD81345 岩芯部分样品的鉴定结果发现该岩芯有孔虫属种较单调,以抗溶种为主,保存尚可,破碎严重,碎屑率高达 60%~70%。依据碳酸盐含

量和磁化率将岩芯分为 8 个期。

3.2 测量方法

热释光是结晶固体暴露在离子辐射环境下，晶体内产生自由电子和空穴，一部分自由电子和空穴被晶体内的陷阱俘获。当加热晶体时，被俘获的电子和空穴获得能量脱离陷阱回到基态，并以光子的形式把多余的能量释放出来。

在海洋地质学研究领域，磁化率等磁性参数测量是大洋钻探计划（Ocean Drilling Program, ODP）初始报告的基础数据之一。在深海沉积物中，主要由硅质或钙质微体化石骨骼组成的沉积物磁化率较低，而含有大量铁磁性矿物的陆源碎屑的磁化率较高。一般来说，磁化率随碳酸钙含量和有机碳总量的增加而减少，反之，碳酸钙含量低，则磁化率较高。

天然热释光测定在中国地质大学（北京）辐射与环境实验室完成。仪器型号为 RGD-3 型积分式仪器及联机软件，参考 Carmichael 等^[21] 的报道，结合仪器的特点选定加热温度区间为 50~400 ℃，升温速率为 5 ℃·s⁻¹。滤光片为 BZ12，透过波长在 300~600 nm 范围内，属紫外到可见

光波段。由高灵敏的光电倍增管将光信号转化为电信号输出。测量结果为有孔虫壳体天然积累的热释光强度。对岩芯中的每一取样点的样品重复测量 3 次，数据的一致性偏差小于 10%，以 3 次平行测量结果的平均值代表一个取样点的天然热释光值。

MD77181 和 MD81345 岩芯氧、碳同位素在法国国家放射中心弱放射活动实验室完成，采用 PDB（北美拟箭石）标准。质谱测定采用英国的 OPTIMA 质谱计，测试精度为 0.5‰。磁化率和碳酸钙百分含量在中国地质大学（北京）海洋学院完成。

4 结果

MD77181 岩芯位于孟加拉扇的中扇和上扇的结合部位，岩芯的磁化率在冰期的氧同位素第 2 期、第 4 期和第 6 期较高；间冰期的氧同位素第 1 期、第 3 期和第 5 期磁化率降低。然而，在氧同位素第 6 期的早期和氧同位素第 7 期，MD77181 岩芯的磁化率明显偏低，且贫于变化（图 2）。

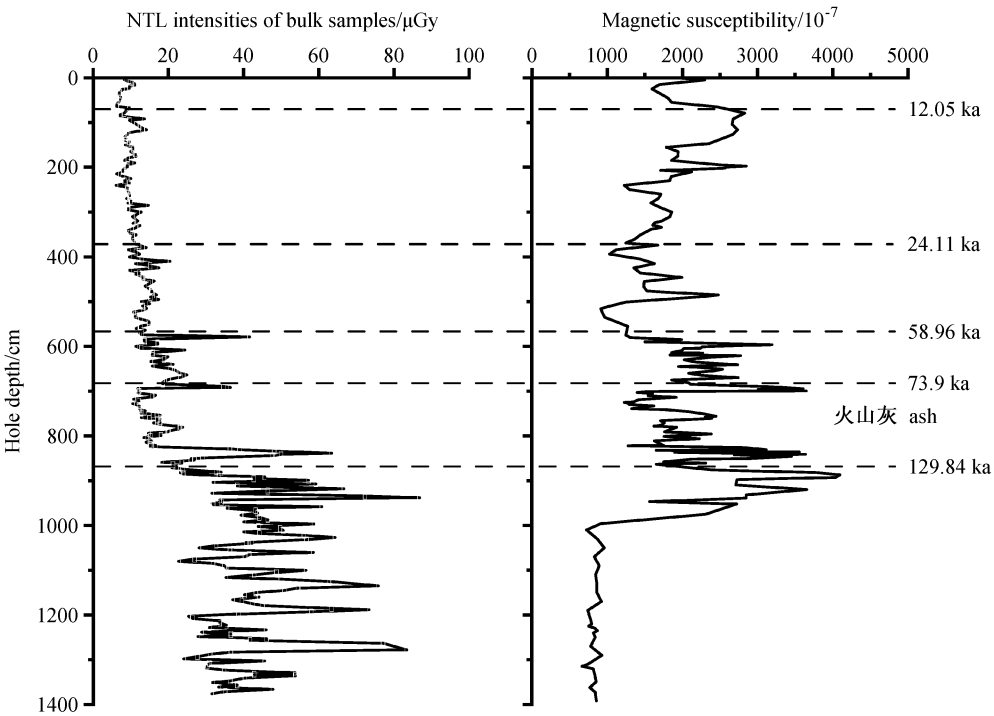


图 2 MD77181 岩芯全岩天然热释光（左）、磁化率（右）对比
Fig. 2 Comparison of the NTL intensities of bulk samples (left) and magnetic susceptibility (right) for core MD77181

根据 $\delta^{18}\text{O}$ 数据所对应的年龄, 将岩芯划分为 6 个期, 氧同位素 1/2 期界线可置于 69 cm 处, 年龄 12.05 ka; 氧同位素 2/3 期界线可置于 373 cm 处, 年龄 24.11 ka; 氧同位素 3/4 期界线可置于 563 cm, 年龄 58.96 ka; 氧同位素 4/5 期界线可置于 680 cm 处, 年龄 73.9 ka; 氧同位素 5/6 期界线可置于 869 cm 处, 年龄 129.84 ka。

MD81345 岩芯的 CaCO_3 含量在 0~66% 之间波动, 最大值为 66%。依据碳酸盐含量分期, 第 1 期和第 2 期的 CaCO_3 含量相似, 波动范围也相当。第 3 期的 CaCO_3 含量较 1 和 2 期稍低, 但波动幅度比前两期要大。受火山喷发带入的火山灰的影响, 第 4 期的 CaCO_3 含量相当低, 平均值仅为 20%, 如此低的 CaCO_3 含量可能与火山灰的掺混作用有关。第 5 期的 CaCO_3 含量与第 1~3 期相比稍低, 平均值为 39%, 最低值为 6%。6 期出现多次碳酸盐含量近乎为零的层段, 这是由于 6 期为冰期, 海平面下降导致大量的陆源物质进入扇区对 MD81345 岩芯稀释作用的结果。氧同位素 7 期的 CaCO_3 含量明显高于其他各期。

5 讨论

5.1 MD77181 岩芯天然热释光与磁化率对比

由图 2 可见, MD77181 全岩热释光的变化规律表现为冰期高而间冰期低, 尤其是氧同位素第 4 期和第 6 期最为突出。原因在于冰期气候干冷, 降雨减少, 海平面下降, 岩石风化作用加剧, 风化后的碎屑在河流的长距离搬运下, 陆源碎屑输入量增大, 带入新的发光晶体矿物, 使该时期的热释光增强。热释光的这一变化规律也与在法国 Bouchet 湖泊沉积物中的 α 和 β 的计数曲线及磁化率变化规律一致^[4, 22]。另一方面, 陆源物的大量输入对海洋碳酸盐起到稀释作用, 使结晶碳酸盐含量相对降低, 碳酸盐热释光在热释光总量中的份额降低。总体来看在冰期时全岩热释光略呈高值, 间冰期略有降低, 与磁化率变化规律一致(图 2)。热释光的另一个特点是在 800 cm 以后突然增大, 而磁化率曲线在 1 000 cm (约 152 ka BP) 以下突然表现为变化平稳, 说明该岩芯在 800 cm 以下岩性有突变。可以解释为在距今约 152 ka 的历史时期有一次大规模的环境演变过程。

5.2 MD77181 岩芯天然热释光与氧同位素对比

MD77181 岩芯中保存完整的有孔虫化石较少, 不同深度有孔虫的丰度有差异, 为了使不同取样点的测量结果在同一水平下比较, 测量时将清洗过的壳体经高精度电子天平称重, 天平精度为 0.1 mg。最后对数据进行重量归一化处理。MD77181 岩芯有孔虫壳体热释光强度变化曲线与氧同位素曲线对比结果见图 3。从总体趋势上观测, 有孔虫热释光 1~4 期与氧同位素曲线对应一致。将各期取平均值后(粗实线)可看出高值区对应于间冰期的氧同位素 1 和 3 期, 而低值区对应于冰期的氧同位素 2 和 4 期。受壳体数量及完整性的影响, 其结果远逊色于赤道 90°E 海岭 MD81349 岩芯的天然热释光结果^[20]。尤其是 5 期以后热释光与氧同位素曲线的测量结果波动较大, 对应效果不好, 与图 2 相比, 壳体热释光明显地消除了陆源物掺杂的影响, 与磁化率变化曲线也无法比较。结果显示全岩热释光对陆源物的输入敏感, 而壳体热释光与氧同位素具有可比性, 后者是磁化率指标所不及的。全岩和壳体热释光都可能对气候变化做出较好的反应。

5.3 MD81345 岩芯热释光与 CaCO_3 、磁化率对比

MD81345 岩芯位于 (1°36'N, 87°09'E) 的孟加拉深海扇的下扇, 远离陆源物质的供应区。但其较高的非 CaCO_3 物质含量反映了孟加拉深海扇的浊流活动和搬运作用极为突出, 说明 MD81345 岩芯虽然远离陆源区, 也能接受来自恒河三角洲的陆源沉积物。其陆源物质的来源由该区盛行的南亚季风搬运而来, 或者通过浊流作用或雾状层等水流搬运而来。MD81345 岩芯主要由硅质或钙质微体化石骨骼组成的沉积物, 磁化率变化曲线随 CaCO_3 含量的增加而减少。

MD81345 全岩热释光值明显高于 MD77181 岩芯的全岩热释光值, 平均在 500 μGy 。这与该岩芯距陆地比 MD77181 远, 主要由硅质或钙质微体化石骨骼组成, 陆源矿物经过长距离搬运, 组成较纯净, 较少受粘土矿物的影响有关。而磁化率平均值则是 MD77181 比 MD81345 高。受陆源物热释光信号的压制, 全岩热释光曲线在各个冰川旋回期与 CaCO_3 含量的对应关系不明显, 主要反应了陆源物所在的深度位置。 CaCO_3 含量低值点对应于磁化率和全岩热释光高值点。全岩热释

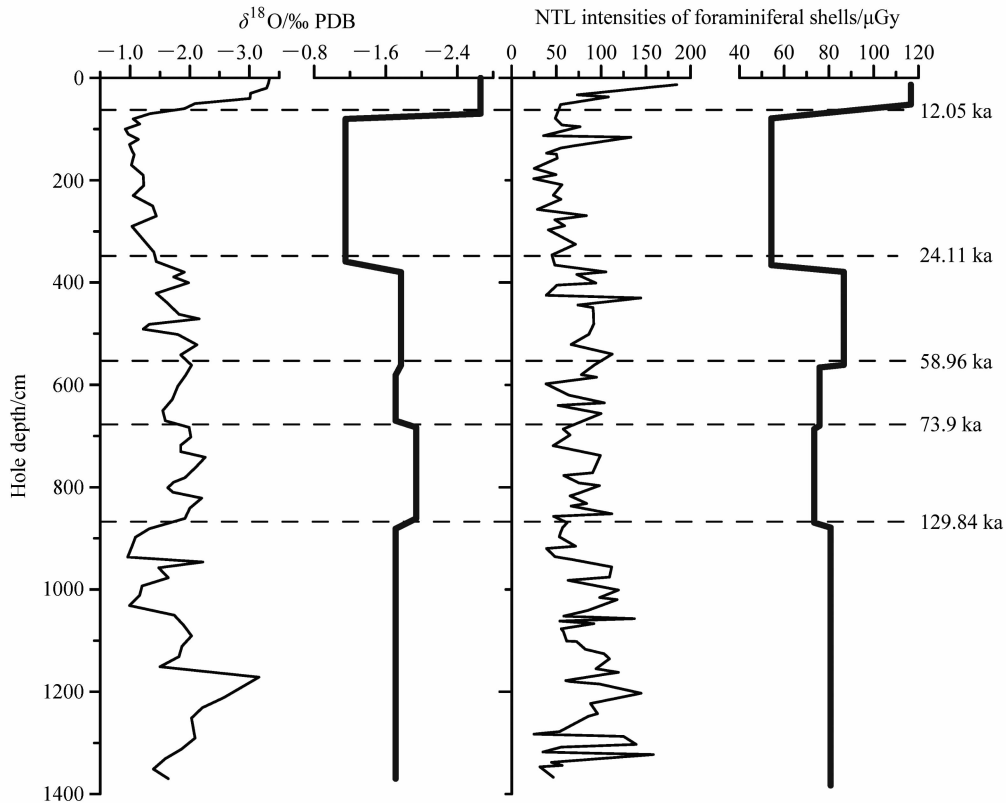


图 3 MD77181 岩芯有孔虫氧同位素与热释光对比
Fig. 3 Comparison of the $\delta^{18}\text{O}$ and NTL intensities of foraminiferal shells for core MD77181

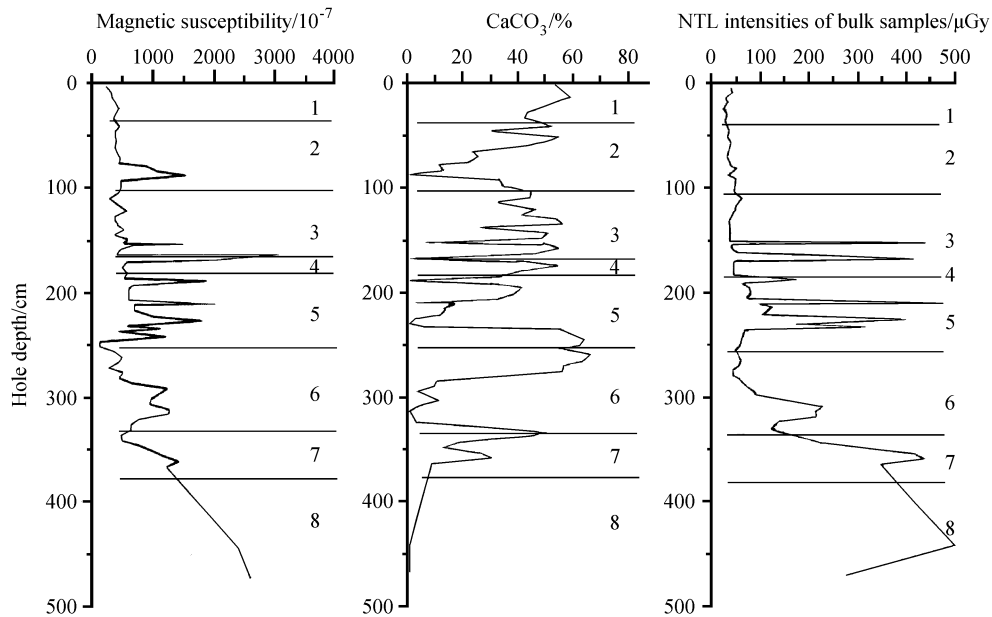


图 4 MD81345 岩芯磁化率、 CaCO_3 和全岩热释光对比
Fig. 4 Comparison of the magnetic susceptibility, CaCO_3 and NTL intensities of bulk samples and for core MD81345

光曲线与磁化率变化曲线极为相似,全岩热释光峰值对应磁化率峰值,全岩热释光低谷值对应磁化率低谷值点,与 MD77181 的结果一致。

5.4 天然热释光与古气候变化

Xanthakis 等^[4]对采自法国 Bouchet 湖的 B52 岩芯(长 5.86 m,距今 30 000 年)进行研究。 α 计数谱分析结果显示出 24 000、6 000、2 000、1 200、1 000、500、400 和 200 年的周期性变化。同样 β 计数谱分析结果显示出 24 000、8 000、4 000、3 000、1 000 和 400 年的结果,虽然由于样品所代表的时间精度在 300 年左右,使得 400 年和 200 年的谱成分不可靠。但上述周期中都含有 Eddy^{〔23,24〕}提出的与太阳活动有关的 1 000 年周期,揭示了太阳活动,即太阳风、耀斑和磁场的变化,引发了地球大气层和地表气候的变化,也即云层厚度、降雨量、温度、季风以及冰期/间冰期的交替出现等气候变化过程又带来了岩石的风化作用和沉积物的周期性变化。间冰期,降雨增多,植被发育,土壤中富含有机质,放射性核素 U、Th、K 倾向于在富含有机质的风化产物中富集。 α 、 β 计数来自于放射性核素 U、Th、K 衰变时放出的 α 、 β 射线。作为放射性核素 U、Th、K 载体的母岩和矿物颗粒随气候变化遵循着按比例搬运和再沉积成岩过程,最后在湖泊或海洋中沉积下来。因此,在间冰期沉积的地层中 α 、 β 计数增大,冰期 α 、 β 计数降低是 α 、 β 计数变化研究太阳活动—气候变化关联的根源。海洋沉积物中放射性核素一部分来自与海水交换带入和陆源补给两种来源。温孝胜等^[12]和刘韶等^[13]分析了中国南海柱状沉积物中自生铀、钍含量的变化后,发现铀含量高与冰期相对应,铀含量低与间冰期相对应,冰期海水补给量小于蒸发量,海水中的 U、Th 被浓缩,间冰期则相反。这种变化在其他大洋地区同样会出现^[25]。但值得注意的是,据 Liritzis 等^[5]报道,采自黑海的两支岩芯,其磁化率与 α 、 β 粒子计数的对应关系不佳,远逊色于 Xanthakis 等^[4]研究的湖泊沉积的 B52 岩芯。原因是缺少外源性含放射性 U、Th、K 等陆源风化剥蚀产物的补给,单纯依赖海洋沉积物中由海水交换代入的核素变化不足以产生显著的 α 、 β 粒子计数的变化。

矿物的天然热释光同样能反应沉积环境中放

射性强弱的变化,但与 α 、 β 计数变化不同,对热释光变化的解释不能机械地套用陆源放射元素的输入法则。MD77181 和 MD81345 岩芯研究结果表明:在边缘海和大陆扇地区,海洋沉积物热释光与陆源性矿物的输入密切相关,热释光变化主要反应了陆源矿物输入量的多寡,进而反映了全球气候变化框架下海水总量和陆地冰盖的变化。而在不受陆源性矿物输入影响的远洋深海地区,热释光变化主要来自海洋表层自生碳酸盐矿物(浮游有孔虫),其对冰川旋回的反应更加显著^[20]。在太阳活动强烈时期,海水温度变化影响到矿物结晶体的生长方式及有机质的含量^[19]。此外,太阳风、太阳质子、超高能的紫外线和高能 γ 射线到达地球时,大气飘尘中的矿物亦是天然的热释光探测器,它们存储太阳辐射能量后在远洋环境中沉积下来,这些矿物随后又成为有孔虫壳体生长的物质来源之一^[21]。这类天然热释光晶体与太阳活动—地球气候变化的相互关系亦是不少学者感兴趣的研究方向之一^{〔14~18〕},成为研究太阳—地球系统的新纽带。

6 结论

(1) 孟加拉中扇非稳定沉积环境的 MD77181 岩芯全岩热释光的变化规律总体来看在冰期时高于间冰期。反应了气候变化带入了较多的陆源物,对海洋碳酸盐矿物起到了稀释作用。该岩芯热释光的显著特点是从 800 cm 以后突然增大,而磁化率和磁化强度曲线均在 1 000 cm 以下突然失去变化,表明沉积环境发生了巨大变化。有孔虫壳体的热释光能够有效排除陆源物的影响,突出与氧同位素曲线的对应关系。

(2) 孟加拉下扇 MD81345 岩芯全岩热释光值明显高于 MD77181 岩芯的全岩热释光值,这与该岩芯的组成和地理位置有关。热释光在不同深度反复出现的峰值与磁化率的良好对应关系,印证了孟加拉深海扇的浊流活动和搬运作用极为突出,说明 MD81345 岩芯虽然远离陆源区,也能接受来自恒河三角洲的陆源沉积物。其陆源物质的来源由该区盛行的南亚季风搬运而来,或者通过浊流作用或雾状层等水流搬运而来。

(3) 两支岩芯具有共同的特点是全岩热释光

曲线与磁化率变化曲线极为相似，都存在陆源物对碳酸盐含量的稀释作用。具体表现为磁化率变化曲线随 CaCO_3 含量的增加而减少，反之， CaCO_3 含量降低，则磁化率升高。全岩热释光的特点是在远离陆源物补给的深海地区，具有对气候变化信号放大的特点，这是磁化率指标所不及的。

致 谢 MD77181 和 MD81345 岩芯样品由中国地质大学（北京）海洋学院提供，硕士研究生戴英协助完成了 MD81345 岩芯样品的热释光测量，谨致谢忱。

参考文献（References）

[1] Beer J, Oeschger H. Accelerator measurements of ^{10}Be : the 11 year solar cycle from 1180—1800 A. D. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1985, **10**/11: 415~418

[2] 程海. 全球气候突变研究：争论还是行动？科学通报，2004，**49**（13）：1339~1344
Cheng Hai. The changing of global climate: dispute or action? *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2004, **49**（13）：1339~1344

[3] 王宁练，姚檀栋，秦大河，等. ≈ 37 ka BP 大气中宇宙成因同位素含量增加的古里雅冰芯证据. 科学通报，1999，**44**（7）：765~769
Wang Ninglian, Yao Tandong, Qin Dahe, et al. Evidence for ≈ 37 kaBP of enhanced ^{10}Be deposition in Guliya ice core. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1999, **44**（7）：765~769

[4] Xanthakis J, Liritzis I, Galloway R B. Periodic variation in natural radioactivity of lake bouchet sediments. *Earth, Moon and Planets*, 1992, **59**: 191~200

[5] Liritzis I, Galloway R B, Kovacheva M, et al. Influence of climate on the radioactivity of lake and sea sediments. *Geophysics Journal International*, 1994, **116**: 68~687

[6] Liritzis I, Galloway R B, Lykousis B, et al. Towards a new chronostratigraphic method based on the marine sediment radioactivity variation. *Journal of Coastal Research*, 1999, **15**（4）：958~965

[7] Demenocal P B, Bristow J F, Stein R. Palaeoclimatic applications of downhole logs: Pliocene-pleistocene results from Hole 798B, Sea of Japan. In: *Proc. Ocean Drill, Prog., Sci. Res.* Vol. 127/128, part 1, 393~407, Pis-ciotto et al. Ed. College Station, Texas. 1992

[8] Johan H V, George P. Astronomically forced variations in gamma-ray intensity: Late Miocene hemipelagic successions in the eastern Mediterranean basin as a test case. *Geology*,

1996, **24**（1）：15~18

[9] 陈晔，袁林旺，周春林，等. 柴达木盆地第四纪古气候变化在自然伽马测井曲线上的记录. 古地理学报，2001，**3**（2）：29~37
Chen Ye, Yuan Linwang, Zhou Chunlin, et al. Quaternary palaeoclimatic changes recorded by natural gamma logging curve in qaidam basin. *Journal of Palaeogeography* (in Chinese), 2001, **3**（2）：29~37

[10] 杨平，陈晔，刘泽纯. 柴达木盆地自然伽玛曲线在古气候及沉积环境研究中的应用. 古地理学报，2003，**5**（1）：94~102
Yang Ping, Chen Ye, Liu Zechun. Application of gamma ray log to study on palaeoclimate and sedimentary environments of the Jurassic qaidam basin. *Journal of Palaeogeography* (in Chinese), 2003, **5**（1）：94~102

[11] Edgington D N, Robbins J A, Colman S M, et al. Uranium-series disequilibrium, sedimentation, diatom frustules, and paleoclimate change in Lake Baikal. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, **142**: 29~42

[12] 温孝胜，刘韶，张惠玲，等. 南海沉积物中 U、Th 分布特征及其古环境意义. 热带海洋，1997，**16**（3）：32~39
Wen Xiaosheng, Liu Shao, Zhang Huiling, et al. Distribution Characteristics and paleo-environmental significance of U and Th in sediments of South China Sea. *Tropic Oceanology* (in Chinese), 1997, **16**（3）：32~39

[13] 刘韶，温孝胜，余克服，等. 南沙群岛海区沉积物中铀含量与冰期关系初探. 海洋地质与第四纪地质，1999，**19**（2）：49~53
Liu Shao, Wen Xiaosheng, Yu Kefu, et al. Preliminary study on the Uranium concentration of the sediments from Nansha Islands and its relation to the glacial period. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 1999, **19**（2）：49~53

[14] Castagnoli G C, Bonono G, Della Monica P, et al. Record of thermoluminescence in sea sediments in the last millenia. *Nuovo Cimento C*, 1997, **20**（1）：1~8

[15] Castagnoli G C, Bonono G, Taricco C. The sunspot cycle recorded in the thermoluminezcence profile of the GT89/3 Ionian sea core. *Nuovo Cimento C*, 1997, **20**（6）：951~954

[16] Castagnoli G C, Bonono G, Della Monica P, et al. On the solar origin of the 200y Suess wiggles: Evidence from thermoluminescence in sea sediments. *Nuovo Cimento C*, 1998, **21**（2）：237~241

[17] Castagnoli G C, Bonono G, Taricco C. The global and persistent millennial-scale variability in the thermoluminescence profiles of shallow and deep Mediterranean sea cores. *Nuovo Cimento C*, 1998, **21**（4）：453~459

[18] Castagnoli G C, Sottile S, Taricco C. Evidence for a 1470-year regular cycle in the Mediterranean core CT85-5 TL-

- dose record over 20 ky BP. Geophysical research abstracts, Vol. 6, 01639, 2004. General Assembly of the European Geosciences Union, Nice (France), 25—30, Apr. 2004
- [19] 刘海生, 方念乔, 马万云, 等. 印度洋赤道海岭钙质软泥热释光变化特征与冰川旋回关系研究. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, **31** (1): 8~14
Liu Haisheng, Fang Nianqiao, Ma Wanyun, et al. Thermoluminescence change of carbonate oozes from the ninetyeast ridge of the Indian Ocean near the Equator and its relation to glacial cycles. *Journal of Chengdu University of Technology* (Science & Technology Edition) (in Chinese), 2004, **31** (1): 8~14
- [20] 刘海生, 方念乔, 艾星涛, 等. 深海碳酸盐岩芯天然热释光变化特征. 海洋学报, 2005, **27** (1): 78~83
Liu Haisheng, Fang Nianqiao, Ai Xingtao, et al. Natural thermoluminescence characteristics of carbonate in deep sea cores. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2005, **27** (1): 78~83
- [21] Carmichael L A, Sanderson D C W, Ni Riain S. Thermoluminescence measurement of calcite shells. *Radiation Measurements*, 1994, **23** (2/3): 455~463
- [22] Creer K M, Thouveny N, Blunk I. Climatic and geomagnetic influences on the Lac du Bouchet palaeomagnetic SV record through the last 110 000 years. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1990, **64**: 314~341
- [23] Eddy J A. The Maunder minimum. *Science*, 1976, **192**: 1189~1202
- [24] Eddy J A. Climate and the changing sun. *Climate Change*, 1977, **1**: 173~190
- [25] Rosenthal Y, Boyle E A, Labeyrie L, et al. Glacial enrichments of authigenic cadmium and uranium in subantarctic sediments; A climatic control on the elements' oceanic budge? *Paleoceanography*, 1995, **10** (3): 395~413