

# 南海北部 BY1 钻孔沉积物元素地球化学特征及其古环境意义

刘坚<sup>1</sup>, 陆红锋<sup>1</sup>, 苏新<sup>2</sup>, 陈芳<sup>1</sup>, 陈道华<sup>1</sup>, 程思海<sup>1</sup>

1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

**摘要:** 南海北部 BY1 钻孔沉积物主、微量元素地球化学分析结果表明,  $\text{CaCO}_3$  含量呈现间冰期高、冰期低的稀释旋回, 而  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$  等含量变化与  $\text{CaCO}_3$  相反。沉积物中大多数主、微量元素的 Ti 标准化值变化与有孔虫氧同位素揭示的冰期—间冰期旋回有良好的对应关系, 呈现间冰期高、冰期低的变化特征, 反映了间冰期物源区化学风化增强, 指示了温暖、湿润的气候环境, 表明间冰期东亚季风夏季风的增强。

**关键词:** 元素地球化学; 化学风化; 古环境; 南海北部

中图分类号: P736.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)05-0006-06

## Element geochemistry of Core BY1 from the northern South China Sea and its paleoenvironmental implication

LIU Jian<sup>1</sup>, LU Hong-feng<sup>1</sup>, SU Xin<sup>2</sup>, CHEN Fang<sup>1</sup>, CHEN Dao-hua<sup>1</sup>, CHENG Si-hai<sup>1</sup>

1. Guangzhou Marine Geologic Survey, Guangzhou 510760, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** Sediment of Core BY1 from the northern South China Sea was measured for its major and minor element compositions. The results show that  $\text{CaCO}_3$  content follows the “Atlantic cyclicities” pattern: lower during glacial stages and higher during interglacial stages, whereas the variations of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  are reversed. Ti-normalized ratios of most elements are higher during interglacials and lower during glacials, reflecting stronger chemical weathering in interglacials than in glacials and warm and wet climate in the source area. This may be the result of an enhanced East Asian summer monsoon.

**Key words:** element geochemistry; chemical weathering; paleoenvironment; northern South China Sea

海洋沉积物主要由陆源和海洋生物成因物质组成, 以往古气候变化的地球化学研究大多集中于海洋生物成因化学组分, 如碳酸钙、生物硅等<sup>[1-2]</sup>。然而, 海洋沉积物中的大多数主、微量元素主要与陆源物质有关<sup>[3]</sup>, 特别是以陆源物质为主的边缘海(如南海)沉积物, 这些陆源组分主要是通过各种途径从大陆搬运来的陆壳风化产物<sup>[4]</sup>。近期的研究表明, 海洋沉积物中这些陆源化学组分的变化, 可能在一定程度上反映了海洋或沉积物源区的气候环境变化信息<sup>[2,5-12]</sup>。本文对南海北部陆坡区 BY1 钻孔顶部约

25m 的柱状沉积物样品的主量和部分微量元素进行了分析, 并探讨其变化与气候演变的相互关系及其控制因素。

### 1 材料与方法

BY1 钻孔位于南海北部陆坡区(图 1), 水深 1264m。其顶部在海底以下约 25m 厚的沉积层揭示了氧同位素期 MIS1 至 MIS12 的沉积序列, 沉积物比较均匀, 主要为粘土质粉砂, 富含钙质生物, 硅质生物含量较低。基于生物地层、 $^{14}\text{C}$  测年以及浮游有孔虫

收稿日期: 2011-08-30; 修订日期: 2012-03-06。林强编辑

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2009CB219502)

作者简介: 刘坚(1965—), 男, 湖南省攸县人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋地球化学研究。E-mail:liujian@hyd.z.cn

*Globigerinoides ruber* 氧同位素的地层时代和气候变化框架已经建立<sup>[13]</sup>, 沉积物的平均沉积速率为  $5.2\text{cm}\cdot\text{ka}^{-1}$ 。取样间隔为 20—25cm, 共采集 111 个样品进行元素地球化学分析, 平均时间分辨率约为 4.3ka。

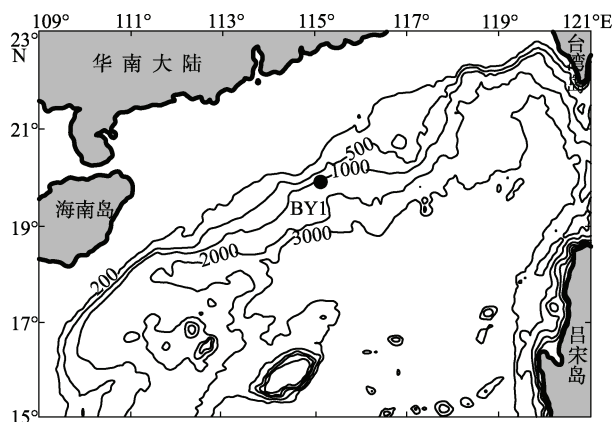


图 1 BY1 钻孔位置(●)

Fig.1 Sample location

样品在  $100^\circ\text{C}$  下烘干(6h), 碎至  $0.074\text{mm}$  混匀。 $\text{SiO}_2$  分析采用重量法: 样品用无水  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  熔融, 盐酸浸取后蒸发至湿盐状, 冷却后加浓  $\text{HCl}$ , 用动物胶凝聚硅酸, 过滤、灼烧、称重; 滤液中残余  $\text{SiO}_2$  采用 ICP-OES 测试。 $\text{CaCO}_3$  分析采用容量法: 样品用稀醋酸溶解, 过滤除去  $\text{CaF}_2$ , 以三乙醇胺( $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$ )掩蔽 Fe、Al 等干扰, 用 EDTA 标准溶液滴定。其余主、微量元素分析: 样品以  $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4 + \text{HF}$  分解, 蒸发后  $\text{HCl}$  提取, 制成酸度为 5% 的溶液, 在 Optima 4300DV 型 ICP-OES 上进行测

试。分析中使用沉积物国家标准物质 GBW07309、GBW07315、GBW07316 和空白样品进行监控, 主、微量元素(除 Cr 外)分析误差分别  $<3\%$  和  $<10\%$ , Cr 分析误差  $<15\%$ 。样品分析测试由广州海洋地质调查局实验测试所完成。

为了解沉积物中矿物组成, 判别沉积物中陆源和海洋自生物质组成, 对钻孔样品进行了沉积物 X 射线衍射分析。实验分析由北京大学科技园微构分析测试中心完成, 按约 1m 间隔取样 20g(共 25 个样品), 烘干后磨成粉末, 制成任意向粉末片, 用 D/max-MSAL 12kw 高功率粉末衍射仪进行测试。实验条件为:  $\text{CuK}\alpha$  射线波长  $1.5418\text{\AA}$ , 石墨单色器, 管电压  $40\text{kV}$ , 管电流  $100\text{mA}$ , 扫描方式为  $\theta/2\theta$  扫描, 扫描速度  $8^\circ(2\theta)\cdot\text{min}^{-1}$ , 采数步宽  $0.02^\circ(2\theta)$ ,  $2\theta$  角度扫描范围  $2.6^\circ\text{—}70^\circ$ 。矿物相相对含量的计算采用 K 值法。

## 2 结果

研究表明, 南海沉积物主要来源于陆源物质和海洋自生组分, 沉积物中各种元素含量的变化是这两种来源物质综合作用的结果<sup>[2,7]</sup>。主量元素(以氧化物形式表示)分析结果表明, BY1 钻孔沉积物中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$  含量变化表现出明显的冰期高、间冰期低的特征(图 2),  $\text{CaO}$  则相反,  $\text{MnO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  的变化略显冰期低、间冰期高的特点, 但并不十分明显。沉积物的主要化学成分表明, BY1 钻孔沉积物主要以陆源碎屑、黏土和海洋生物碳酸盐为主。

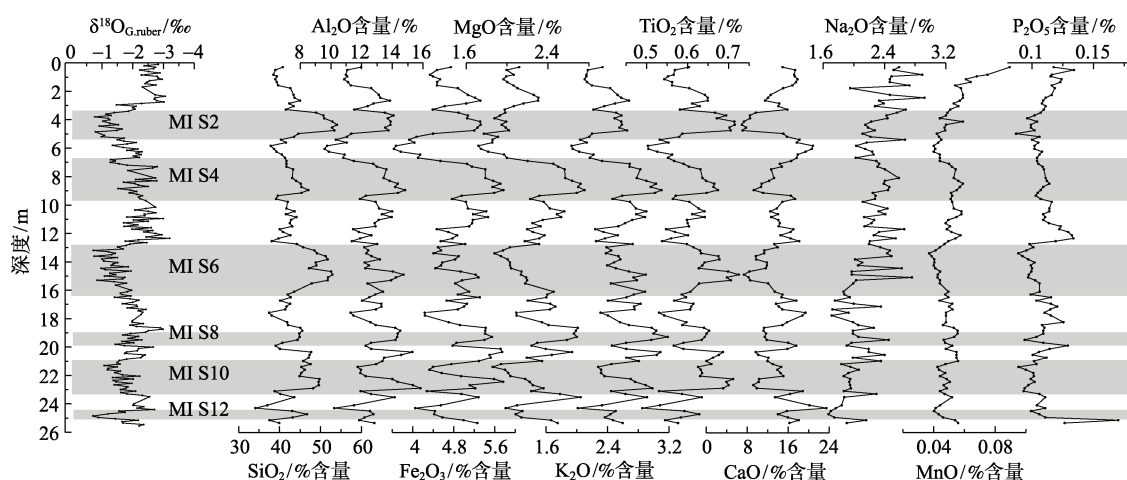


图 2 BY1 钻孔沉积物主量元素含量变化氧同位素结果(据陈芳等<sup>[13]</sup>), 阴影表示冰期

Fig. 2 Major elements' abundance profiles of Core BY1, Oxygen isotopic results are from Chen et al<sup>[13]</sup>, and the shading shows glacial stages

为了消除沉积物中海洋自生组分的影响, 用

$\text{TiO}_2$  含量对沉积物主、微量元素进行了标准化。一

一般来说,海洋沉积物中Ti元素主要来源于陆源碎屑,Ti 标准化比值可以减轻沉积物中海洋自生组分对元素的稀释作用<sup>[2, 7]</sup>,研究表明,在花岗闪长岩化学风化过程中,Ti 从黑云母、角闪石等矿物中被淋滤出来,随即以氧化物形式沉淀于矿物表面,在风化剖面中基本不发生迁移<sup>[14]</sup>,因此,常常被认为惰性元素,被用来追踪化学风化过程中元素的行为<sup>[7, 14]</sup>。一般认为,影响 Ti 元素标准化值的因素主要是沉积物源区的变化和沉积物源区的风化强度<sup>[7]</sup>。

## 2.1 主量元素

主量元素  $\text{TiO}_2$  标准化结果表明,  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  表现出明显的冰期高、间冰期低的特征;  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$  等的变化与  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  相反,呈现间冰期高、冰期低的变化趋势; $\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2$  的变化趋势并不十分明显。沉积物中的 Ca 主要来自于海洋自生生物碳酸钙,这里不作讨论。

## 2.2 微量元素

微量元素 Ti 标准化比值的变化表现为两种类型,一种是与氧同位素变化趋势相似,即间冰期高而冰期低,如与海洋生物碳酸盐有密切关系的元素 Sr,过渡金属元素 Cu、Co、Ni、Zn、V、Sc、Y 等,其

中,  $\text{Cu}/\text{TiO}_2$  和  $\text{Co}/\text{TiO}_2$  的变化幅度相对较小,与其他元素相比变化趋势不十分明显。另外一类元素如 Pb、Cr、Zr、Ga 等的 Ti 标准化比值没有明显的变化规律,与氧同位素曲线反映的冰期/间冰期变化无明显的对应关系。

## 3 讨论

一般来说,南海沉积物主要由生物碳酸盐和陆源碎屑组成<sup>[7]</sup>,生物碳酸盐的化学成分主要为  $\text{CaCO}_3$ ,其余化学组分主要来源于陆源物质输入。因此,可以用  $\text{CaCO}_3$  含量反映沉积物中海洋生物碳酸盐和陆源物质的比例。结果表明,BY1 钻孔沉积物  $\text{CaCO}_3$  含量在 10%—40% 之间变化,表现出明显的间冰期高、冰期低的特征(图 3),体现了大西洋型稀释旋回的特征。海洋沉积物中可能存在自生生物硅,研究表明,同位于南海北部陆坡的 ODP1145 站位沉积物中仅含少量的生物硅( $< 10\%$ )<sup>[15]</sup>。镜下观察结果表明,BY1 钻孔沉积物中硅质生物含量较低( $< 5\%$ ),同时,沉积物中  $\text{SiO}_2$  含量与  $\text{TiO}_2$ 、Zr 等陆源组分具有良好的正相关性( $\gamma > 0.7$ )。因此,大致可以认为沉积物中  $\text{CaCO}_3$  之外的组分主要为陆源组分。

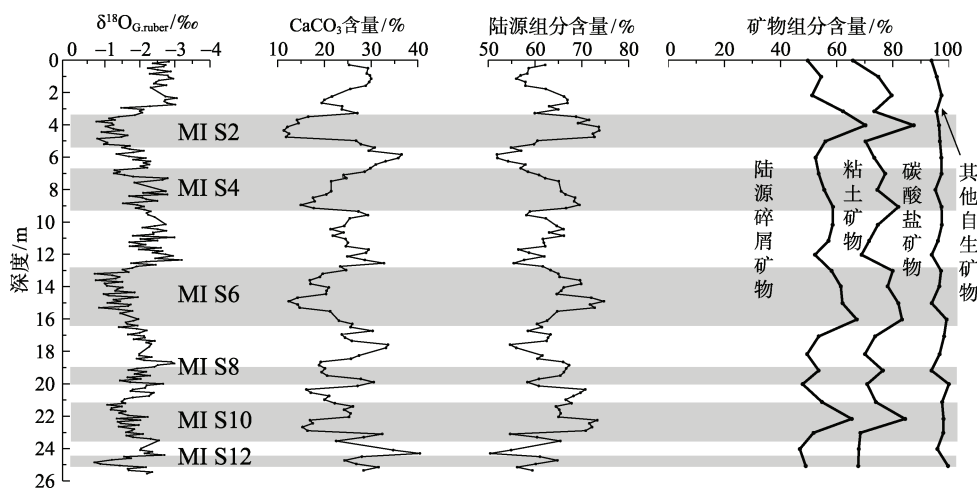


图 3 BY1 钻孔沉积物陆源组分与海洋碳酸盐含量变化

Fig. 3 Variation of terrigenous detritus and marine carbonate in the sediments of Core BY1

沉积物样品的 X 射线衍射分析表明,沉积物矿物组分主要为碎屑矿物、黏土矿物和碳酸盐矿物。碎屑矿物以石英、斜长石、正长石、白云母、角闪石等陆源碎屑矿物为主,还有少量黄铁矿、石盐等自生矿物,石盐推测主要是由于沉积物孔隙水中可溶盐在样品烘干过程中结晶形成的,这里不作讨论。黏土矿物为伊利石、绿泥石、高岭石、蒙脱石,

以伊利石为主。碳酸盐矿物绝大多数为方解石,少量白云石( $< 1\%$ )。从矿物组成来看,样品中海洋自生组分主要是以方解石为主的生物碳酸盐,含量为 9%—32%,与  $\text{CaCO}_3$  分析结果十分吻合(图 3),其他组分主要为陆源碎屑和黏土矿物,含量为 66%—88%,其变化明显具有冰期高、间冰期低的特点,与  $\text{CaCO}_3$  含量变化相反。研究表明,南海北部陆坡沉积物中陆

源碎屑主要来源于北部的陆壳风化产物<sup>[8,12,16]</sup>, 为了更直观地显示 BY1 钻孔沉积物中陆源组分和海洋自生组分的含量对比关系, 采用珠江河流沉积物的 Ti 的平均值<sup>[17]</sup> ( $Ti=5812\mu g\cdot g^{-1}$ ,  $n=28$ ) 作为背景值计算了陆源组分的含量, 计算公式见乔培军等<sup>[7]</sup>, 结果显示 50%—74% 为陆源组分, 其含量变化与  $CaCO_3$  相反, 表现为冰期高、间冰期低(图 3), 与沉积物陆源碎屑和黏土矿物的分析结果吻合。

综上所述, BY1 钻孔沉积物中海洋自生组分主要以海洋生物碳酸盐为主, 其他组分主要为陆源碎屑。

这些陆源碎屑主要来源于南海北部的陆壳风化产物<sup>[8,12,16]</sup>, 沉积物主、微量元素 Ti 标准化比值的变化主要反映了这些陆源物质在风化剥蚀、搬运和沉积过程中发生的化学成分变化<sup>[2,8,11-12]</sup>。考虑到 BY1 钻孔沉积物相对较细, 以细粉沙和黏土为主, 比较均匀, 粒度组分无明显变化, 因此, 主、微量元素 Ti 标准化比值的变化不太可能是由于搬运和沉积过程造成的<sup>[2,8]</sup>。研究表明, 晚上新世由于吕宋岛弧向北运动与华南大陆发生碰撞导致台湾隆起形成现代南海的格局, 第四纪以来南海北部构造格局没有明显的变化<sup>[18-19]</sup>, 南海北部海洋沉积物中陆源物质主要来源于北部地区<sup>[16,20-21]</sup>。同时, 距 BY1 钻孔仅数千米的 BY4 钻孔中更新世晚期以来沉积物硅酸盐相的 Nd 同位素分析结果表明,  $\epsilon_{Nd}(0)$  在 -11—-12 之间, 冰期、间冰期的平均值基本一致, 分别为 -11.58(13 个样品)和 -11.44(9 个样品), 表明冰期和间冰期物源无明显变化。因此, 主、微量元素 Ti 标准化比值随冰期、间冰期气候变化波动主要反映了物源区的风化剥蚀过程造成的沉积物化学成分变化。

BY1 钻孔沉积物元素地球化学分析表明, Al、Fe、Mg、K、Mn、P、Sr、Cu、Co、Ni、Zn、V、Sc、Y 等 Ti 标准化值具有间冰期高、冰期低的变化趋势(图 4), 除 Sr 主要是来源于海洋生物碳酸盐, 其变化与碳酸钙一致外, 其他元素的上述变化趋势与它们在风化过程中地球化学行为是密切相关的。元素 Al 在表生环境下比较稳定, 在风化过程中不容易被淋滤出来<sup>[14,21]</sup>, 但在强烈化学风化的条件下, 风化残余物中  $Al_2O_3/TiO_2$  增大<sup>[14]</sup>, 因此 Al 容易在风化产物中富集。Fe、Mn、P 在化学风化中的行为与 Ti 相近<sup>[14,22]</sup>, 在风化剖面中,  $Fe_2O_3/TiO_2$ 、 $MnO/TiO_2$ 、 $P_2O_5/TiO_2$  相对比较稳定, 变化并不十分显著<sup>[14]</sup>。在化学风化过程中, 大多数  $Fe^{2+}$  被氧化成  $Fe^{3+}$  并很快沉

淀, 因此, Fe 也有在风化产物中富集的趋势<sup>[23]</sup>。在海洋沉积物中,  $Fe_2O_3/TiO_2$  和  $Al_2O_3/TiO_2$  往往具有良好的相关性, 在物源区化学风化强烈条件下表现出高值<sup>[24]</sup>。元素 Mg 和 K 在化学风化过程中很容易从原矿物中分离出来, 随后更倾向于被风化产物特别是黏土矿物所吸附, 因此, 这两种元素可在风化产物中富集<sup>[25]</sup>。Na 在化学风化过程中很容易被淋滤出来, 造成风化剖面中相对贫 Na<sup>[25]</sup>, 但在 BY1 钻孔沉积物中  $Na_2O/TiO_2$  并未表现出明显的随冰期/间冰期变化的趋势。过渡金属在化学风化过程中的行为尚不十分明确<sup>[2]</sup>, 根据 Nesbitt 等<sup>[14]</sup>对花岗闪长岩风化剖面的研究,  $Sc/TiO_2$ 、 $V/TiO_2$  在风化剖面中基本保持不变,  $Cu/TiO_2$ 、 $Ni/TiO_2$ 、 $Zn/TiO_2$ 、 $Y/TiO_2$  在化学风化增强的情况下有增大的趋势, 表明它们在强烈化学风化条件下可以在风化残余物中富集。BY1 钻孔沉积物  $Sc/TiO_2$ 、 $V/TiO_2$ 、 $Cu/TiO_2$ 、 $Ni/TiO_2$ 、 $Zn/TiO_2$  间冰期高、冰期低的变化特征与 Wei 等<sup>[2]</sup>对 ODP1144 站位沉积物的研究结果一致, 符合其在风化过程中的地球化学行为。因此, BY1 岩心沉积物中  $Al_2O_3/TiO_2$ 、 $Fe_2O_3/TiO_2$ 、 $MgO/TiO_2$ 、 $K_2O/TiO_2$ 、 $MnO/TiO_2$ 、 $P_2O_5/TiO_2$ 、 $Cu/TiO_2$ 、 $Co/TiO_2$ 、 $Ni/TiO_2$ 、 $Zn/TiO_2$ 、 $V/TiO_2$ 、 $Sc/TiO_2$ 、 $Y/TiO_2$  等间冰期高、冰期低的变化特征反映了间冰期物源区化学风化增强。

Pb、Cr、Zr、Ga 的 Ti 标准化比值变化与氧同位素曲线反映的冰期/间冰期变化无明显的对应关系(图 4)。研究表明, 在风化剖面中随着化学风化的增强,  $Pb/TiO_2$ 、 $Cr/TiO_2$  有增大的趋势<sup>[14]</sup>, 表明其在风化残余物中相对富集, 但 BY1 钻孔沉积物  $Pb/TiO_2$ 、 $Cr/TiO_2$  并未如其他过渡金属表现出与有孔虫氧同位素曲线一致的变化, Wei 等<sup>[2]</sup>对 ODP1144 站位沉积物的研究也表明  $Pb/TiO_2$  的变化无明显规律。Zr 主要存在于锆石等矿物中, 在化学风化过程中表现得非常稳定<sup>[7,14]</sup>, 在风化过程中不容易发生迁移。Ga 和 Zr 相似, 在风化剖面中  $Ga/TiO_2$  变化很小, 风化过程中不容易发生迁移<sup>[14]</sup>。因此,  $Zr/TiO_2$ 、 $Ga/TiO_2$  等变化未呈现冰期—间冰期周期变化的趋势是符合其在化学风化过程中地球化学行为的。但 Zr 在沉积物中含量明显表现出冰期高、间冰期低的变化趋势(图 4), 表明物源区化学风化对其影响较小, 主要反映了冰期陆源物质供给增加。

BY1 岩心沉积物元素的 Ti 标准化曲线变化反映了沉积物源区间冰期时化学风化相对较强, 冰期时

化学风化减弱。研究表明, 温度和湿度是影响化学风化的主要因素, 温暖、湿润的气候导致化学风化的增强<sup>[22]</sup>, 夏季风降雨量对硅酸盐的化学风化有明

显的控制作用<sup>[10]</sup>, 表明沉积物源区间冰期时气候相对温暖、湿润, 降雨相对丰富, 反映了间冰期东亚季风夏季风的增强<sup>[8]</sup>。

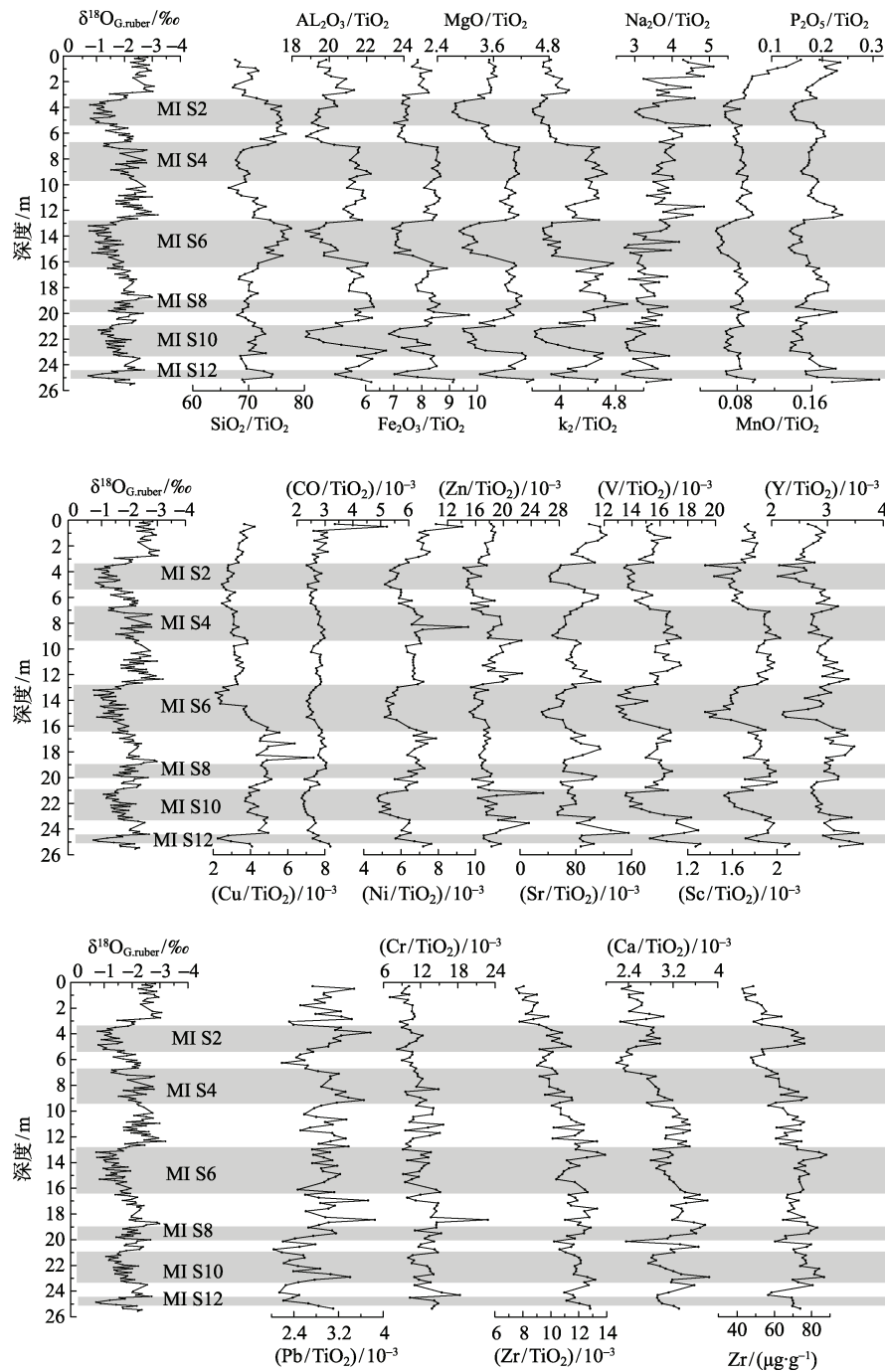


图4 BY1 钻孔沉积物主、微量元素 Ti 标准化曲线

Fig. 4 Ti-normalized ratios of major and minor elements in the sediments of Core BY1

#### 4 结论

BY1 钻孔沉积物的  $\text{CaCO}_3$  呈现间冰期高、冰期低的稀释旋回,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$  等则呈现相反的变化趋势。沉积物主、微量元

素的 Ti 标准化值变化表现出很好的气候控制变化特征,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cu}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Co}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Ni}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Zn}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Sc}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Y}/\text{TiO}_2$  等呈现间冰期高、冰期低的变化, 反映间冰期物源区化学风化增强,

指示温暖、湿润的气候环境,反映了间冰期东亚季风夏季风的增强。

## 参考文献

- [1] ELDERFIELD H. Tracers of ocean paleoproductivity and paleochemistry: An introduction[J]. *Paleoceanography*, 1990, 5:711-717.
- [2] WEI GANGJIAN, LIU YING, LI XIANHUA, et al. Major and trace element variations of the sediments at ODP Site 1144, South China Sea, during the last 230Ka and their paleoclimate implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 212: 331-342.
- [3] GOLDBERG E D, ARRHENIUS G O S. Chemistry of Pacific pelagic sediments[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1958, 13: 152-212.
- [4] WINDOM H L. Lithogenous materials in marine sediments[M]//RILEY J P, SKIRROW G. *Chemical Oceanography*. 2nd ed, Vol 5. London: Academic Press, 1976: 103-135.
- [5] SHIMMIELD G B, MOWBRAY S R. The inorganic geochemical record of the northwest Arabian Sea: a history of productivity variation over the last 400 Kyr from Sites 772 and 724[C]// SILVER E A, RANGIN C, VON BREYMAN M T. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results*. College Station, USA: Ocean Drilling Program, Publications Distribution Center, 1991, 117: 409-429.
- [6] SCHNEIDER R P, PRICE N B, MULLER P J, et al. Monsoon related variations in Zaire (Congo) sediment load and influence of fluvial silicate supply on marine productivity in the equatorial Atlantic during the last 200,000 years[J]. *Paleoceanography*, 1997, 12: 463-481.
- [7] 乔培军, 邵磊, 杨守业. 南海西南部晚更新世以来元素地球化学特征的古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 59-65.
- [8] 韦刚健, 刘颖, 邵磊, 等. 南海碎屑沉积物化学组成的气候记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 1-4.
- [9] WEHAUSEN R, BRUMSCK H J. Astronomical forcing of the East Asian monsoon mirrored by the composition of Pliocene South China Sea sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201: 621-636.
- [10] LIU ZHIFEI, COLIN C, TRENTESAUX A, et al. Erosional history of the eastern Tibetan Plateau since 190 kyr ago: clay mineralogical and geochemical investigations from the southwestern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2004, 209: 1-18.
- [11] WEI GANGJIAN, LIU YING, LI XIANHUA, et al. High-resolution elemental records from the South China Sea and their paleoproductivity implications[J]. *Paleoceanography*, 2003, 18(2): 1054-1065.
- [12] SUN YOUNBIN, WU FENG, STEVEN C, et al. Processes controlling the geochemical composition of the South China Sea sediments during the last climatic cycle[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257: 240-246.
- [13] 陈芳, 苏新, 周洋, 等. 南海北部陆坡神狐海域晚中新世以来沉积物中生物组分变化及意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(2): 1-8.
- [14] NESBITT H W, MARKOVICS G. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61(8): 1653-1670.
- [15] SHIPBOARD SCIENTIFIC PARTY. Site 1145[C] //WANG PIN XIAN, PRELL W L, BLUM P, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results*. College Station, USA: Ocean Drilling Program, Publications Distribution Center, 2000, 184: 1-63.
- [16] 邵磊, 李献华, 韦刚健, 等. 南海陆坡高速堆积体的物质来源[J]. *中国科学: D 辑*, 2001, 31(10): 828-833.
- [17] ZHANG CHAOSHENG, WANG LIJUN. Multi-element geochemistry of sediments from the Pearl River system, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 1251-1259.
- [18] HUANG CHYUE, WU WEIYU, CHANG CHUNGPAI, et al. Tectonic evolution of accretionary prism in the arc-continent collision terrane of Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 1997, 281: 31-51.
- [19] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(2): 1-13.
- [20] BOULAY S, COLIN C, TRENTESAUX A, et al. Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450 ky. Mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 228: 260-277.
- [21] 邵磊, 李献华, 汪品先, 等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录-ODP1148 站位深海沉积物中的证据[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 539-544.
- [22] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climate and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717.
- [23] PEURANIEMI V, PULKKINEN P. Preglacial weathering crust in Ostrobothnia, western Finland, with special reference to the Raudaskyla occurrence[J]. *Chem Geol*, 1993, 107: 313-316.
- [24] KRONBERG B I, NISBITT H W, LAM W W. Upper Pleistocene Amazon deep-sea fan muds reflect intense chemical weathering of their mountainous source lands[J]. *Chem Geol*, 1986, 54: 283-294.
- [25] NESBITT H W, MARKOVICS G, PRICE R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1980, 44: 1959-1966.