

文章编号: 1000-0550(2009) 06-1155-08

# 三水盆地古近系下部湖相沉积的稀土元素地球化学特征及其古气候意义<sup>①</sup>

陈亮<sup>1</sup> 刘春莲<sup>1,2</sup> 庄畅<sup>1</sup> 车晓光<sup>1</sup> 吴洁<sup>1</sup>

(1. 中山大学地球科学系 广州 510275; 2 中国科学院边缘海地质重点实验室 广州地球化学研究所 广州 510640)

**摘要** 通过分析三水盆地古近系下部岩心的稀土元素丰度和分布模式,并结合其它地球化学指标(Fe Mn Mg/Ca),重建了古近纪早期的古气候条件。岩心中稀土元素总量( $\Sigma$  REE)变化于 7.06~230.01  $\mu\text{g/g}$  之间,平均值为 142.32  $\mu\text{g/g}$ 。接近全球平均大陆上地壳成分(UCC),略低于北美页岩。沉积物显示轻稀土相对富集、右倾斜型、Eu 中度亏损以及 Ce 异常不明显的稀土元素分布模式。岩心各深度处稀土元素分布模式非常相似,且与 UCC 的稀土元素分布模式基本一致。表明沉积物具有较为一致的物质来源和形成机理,而且源区具有大陆上地壳性质。岩心沉积时期古气候变化经历了较为干燥—温湿—温湿与干旱气候交替出现—以温湿气候条件为主的四个阶段。总体上显示明显的变湿趋势。

**关键词** 稀土元素 古气候 古近系下部 三水盆地

**第一作者简介** 陈亮 男 1980 年出生 博士研究生 沉积地球化学 E-mail: hnyhr001@163.com

**通讯作者** 刘春莲 E-mail: eeslc@mail.sysu.edu.cn

**中图分类号** P595 **文献标识码** A

由于电子排列的特殊性,稀土元素具有非常相似的地球化学性质,被广泛应用于地球化学研究中。湖相沉积物中的稀土元素的组成,应与其沉积过程中稀土元素组成相平衡,其纵向变化规律是湖水成分变化的反映,而湖水成分的变化又与古气候的变化密切相关<sup>[1]</sup>。因此,湖相沉积物中稀土元素的组成常被用于探讨湖泊沉积时期的古气候演变过程。如史基安等通过对青海湖 QH1 孔沉积物中稀土元素组成参数的分析,指出其变化对古气候具有良好的指示作用<sup>[1]</sup>。Kazuya Tanaka 等研究了 Baika 湖沉积物中稀土元素组成参数的分布特征<sup>[2]</sup>,表明其能有效的指示古气候变化。

广东三水盆地为一小型陆缘近海拉张型断陷盆地<sup>[3]</sup>。早古近纪时期盆地处于稳定沉降阶段,地层连续沉积,期间还曾多次遭受过海水入侵的影响<sup>[4-6]</sup>。在不直接受海洋影响的湖相沉积阶段,三水盆地可能是一周期性封闭型湖泊<sup>[4]</sup>。迄今对三水盆地古近纪气候变化的研究还很薄弱,利用稀土元素的地球化学特征来分析其古气候变化的工作尚未见报道。本文分析了三水盆地古近系莘庄组良坑段顶部至坭心组红岗段岩心地层的稀土元素地球化学特

征,并结合其它地球化学指标揭示岩心沉积时期的古气候变化。

## 1 材料与方 法

SB-01 孔位于广东省三水盆地西北部(图 1),孔深 89 m。约 72.7 m 处为坭心组与下伏莘庄组分界。莘庄组良坑段顶部(89~72.7 m)以灰色具交错层理的粉—细砂岩为主,夹灰黑色钙质泥岩、泥灰岩和油页岩。坭心组红岗段岩性自下而上为:72.7~51.8 m 以灰黑色粉砂质泥岩、灰色泥质粉砂岩为主,发育水平层理;51.8~41.3 m 为黑色泥岩与泥灰岩互层、并夹多层薄层石膏;41.3~30.6 m 以黑色泥岩为主,夹多层薄层石膏;30.6~0 m 以黑色泥页岩为主,部分层位纹层发育,偶夹石膏薄层。本次研究样品取自 4.5~89 m 岩心段,共采集 184 个样品。有机碳(TOC)含量在德国蒂宾根大学(University Tübingen)地球化学实验室采用 Vario EL 元素分析仪测试。REE 和 Mn 含量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测试。Al Fe Mg Ca Sr Ba 采用 PS-950 型 ICP-AES 测试。碳酸盐( $\text{CaCO}_3$ )含量用重量法测定。

①国家自然科学基金项目(批准号:40872024)、中国科学院边缘海地质重点实验室和广州地球化学研究所开放研究基金(MSGL07-18)资助。

收稿日期:2008-09-22 收修改稿日期:2008-11-07

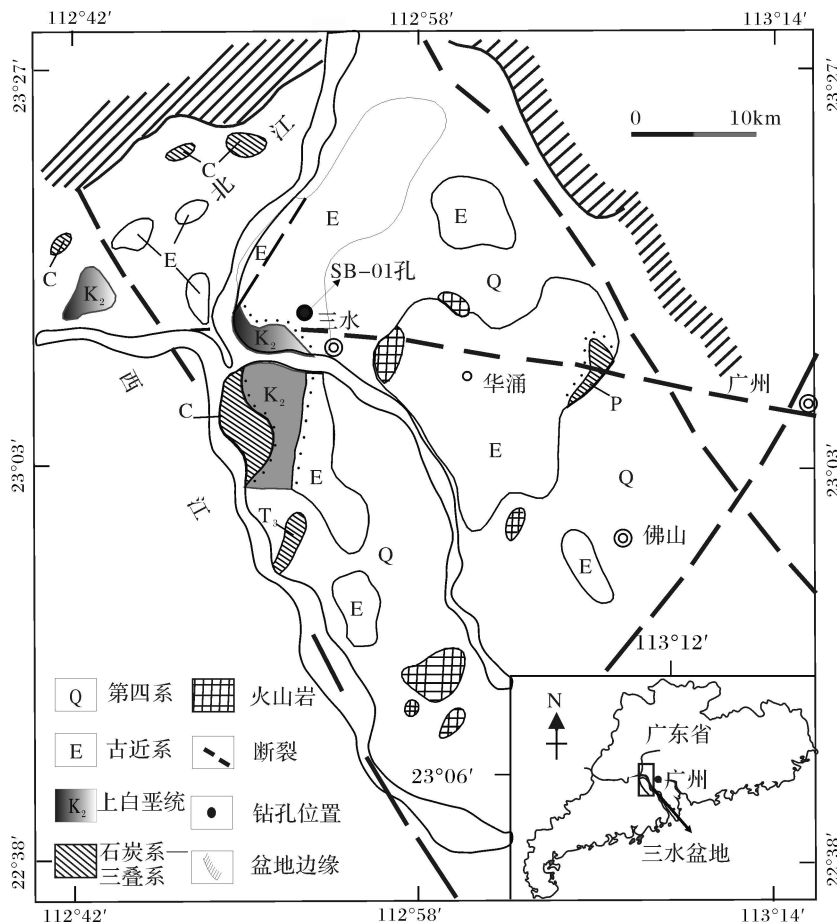


图 1 三水盆地地质背景及钻孔位置

Fig 1 Core site and geological setting of the Sanshui Basin

## 2 结果与讨论

### 2.1 稀土元素分布特征

SB-01孔岩心沉积物的稀土元素总量 ( $\Sigma\text{REE}$ ) 变化范围大, 分布范围为  $7.06 \sim 230.01 \mu\text{g/g}$  平均值为  $142.32 \mu\text{g/g}$  接近全球平均大陆上地壳成分 ( $\text{UCC}^{[7]}$ ), 略低于北美页岩 ( $\text{NASC}^{[8]}$ ) 的稀土总量 (分别为  $146.4 \mu\text{g/g}$  和  $173.2 \mu\text{g/g}$ )。其中轻稀土元素 ( $\Sigma\text{LREE} = \text{La} + \text{Ce} + \text{Pr} + \text{Nd} + \text{Sm} + \text{Eu}$ ) 较富集, 均值为  $127.40 \mu\text{g/g}$  占  $89.5\%$ ; 重稀土元素 ( $\Sigma\text{HREE} = \text{Gd} + \text{Tb} + \text{Dy} + \text{Ho} + \text{Er} + \text{Tm} + \text{Yb} + \text{Lu}$ ) 丰度较低, 均值为  $14.92 \mu\text{g/g}$  占  $10.5\%$ 。因此, 轻稀土元素含量的变化总体上决定了稀土总量的变化。由图 2 可知, 稀土元素含量在垂向上的变化趋势与  $\Sigma\text{REE}$ 、 $\Sigma\text{LREE}$  和  $\Sigma\text{HREE}$  非常相似, 表明其在纵向上的变化受相同因素的控制<sup>[9]</sup>。

根据 REE 含量及其组成参数在纵向上的变化特征并结合岩性变化规律, 将岩心分为四段 (图 2), 界线划在 72.7 m、51.8 m 和 30.6 m 三个稀土元素含量均很低的层位 (分别为  $15.7 \mu\text{g/g}$ 、 $7.06 \mu\text{g/g}$  和  $35.82 \mu\text{g/g}$ )。相应碳酸盐含量均很高, 分别为  $96.17\%$ 、 $97.34\%$  和  $85.13\%$ 。高碳酸盐含量可能与海水侵入有关, 有证据表明早古近纪三水盆地遭遇过间歇性海侵<sup>[4,6]</sup>。在相对干旱时期, 湖平面降低, 海水通过某种方式进入湖泊, 造成湖水盐度升高。加之干旱时期较强的蒸发作用, 促使了碳酸盐的沉积。

对沉积物稀土元素配分模式的研究可通过两个途径。一是以球粒陨石为标准进行标准化, 由于球粒陨石已被认为是地球的原始物质, 因此以其为标准能够反映样品相对地球原始物质的分异程度, 揭示沉积物源区特征; 二是以北美页岩为标准化, 了解沉积过程中的混合、均化的影响和分异程度。

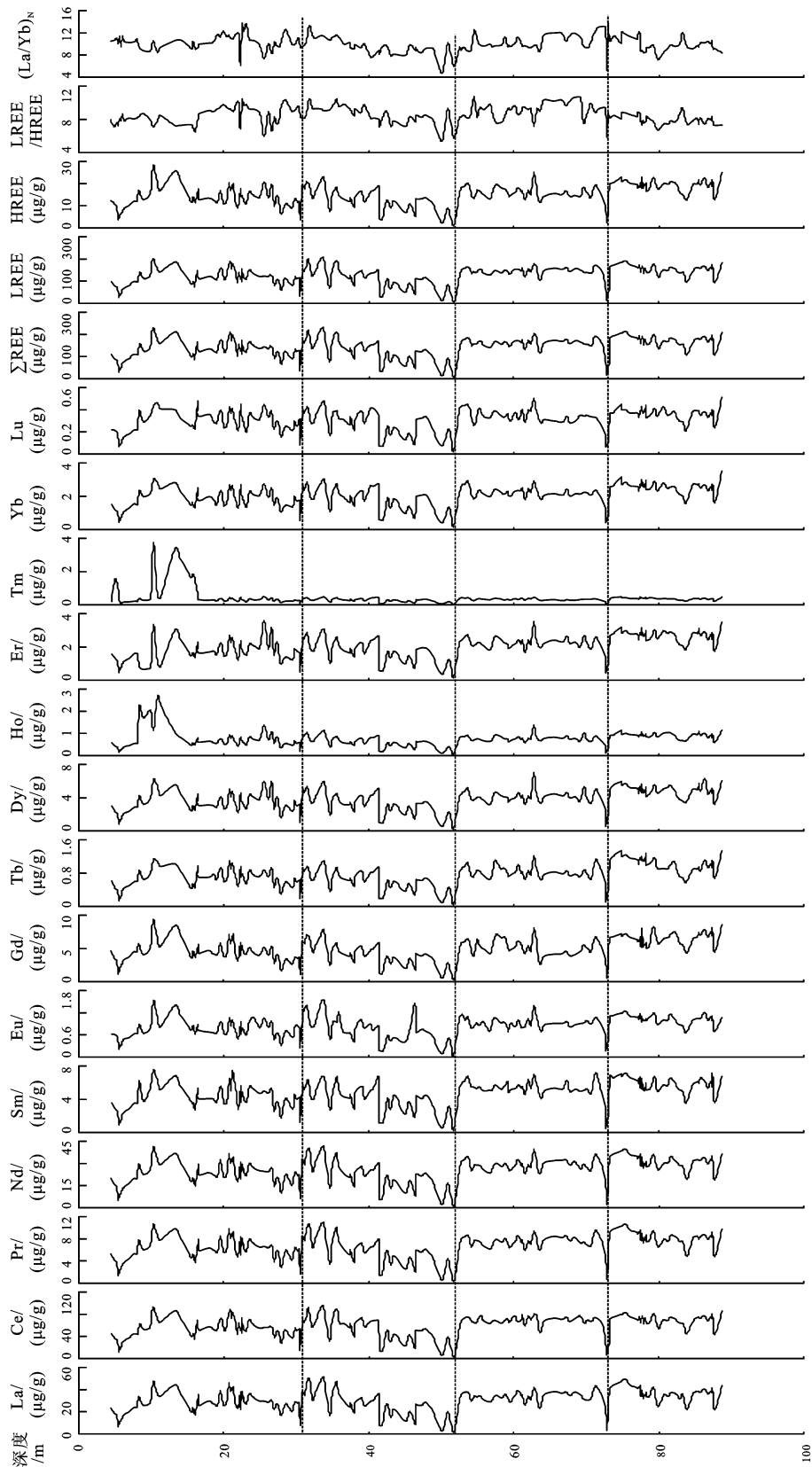


图 2 SB-01 钻孔稀土元素含量及其地球化学参数的垂直分布 (下标 N 表示相对球粒陨石标准化)

Fig 2 Vertical distribution of REE content and REE geochemical parameters in Core SB-01

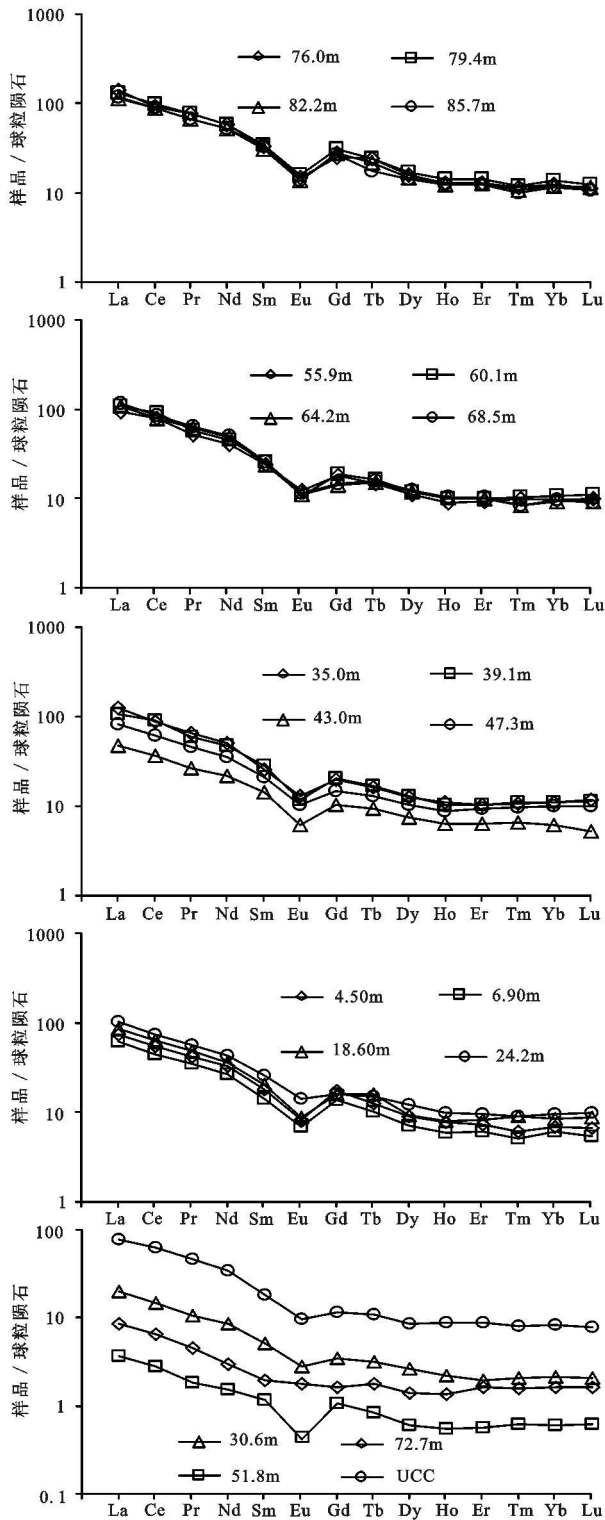


图 3 SB-01 孔中稀土元素分布模式

Fig 3 REE distribution patterns in Core SB-01

采用 Boynton<sup>[10]</sup> 推荐的球粒陨石标准值对稀土元素进行标准化, 岩心稀土元素分布模式见图 3。从图中可以看出, 除 72.7 m 深度处 Eu 不显示负异常以

外, 岩心各深度和界线处稀土元素分布模式非常相似, 并且与 UCC 对球粒陨石标准化稀土元素分布模式基本一致, 表明沉积物具有较为一致的物质来源和形成机理, 而且源区具有大陆上地壳的性质<sup>[11]</sup>。在 72.7 m 深度处, 稀土元素分布模式与 UCC 对球粒陨石标准化稀土元素分布总体趋势基本一致, 只是前者不显示 Eu 异常, 而后者表现为 Eu 的中度亏损, 说明该深度处沉积岩沉积时期物质来源没有变化, 也主要来自上地壳。该层位碳酸盐含量极高, 碳酸盐沉积常与生物直接或间接有关, 而有些生物化学因素可导致 Eu 的富集<sup>[12]</sup>。该深度处 Eu 不显示负异常可能与碳酸盐沉积时期的某些生物化学作用有关。 $(La/Yb)_N$  均值大于 10 (其均值为 10.14), 曲线右倾斜, 表明轻稀土相对富集。La—Eu 段较陡, 说明轻稀土元素之间的分馏程度较高。Eu—Lu 段较平缓, 重稀土元素之间的分馏程度较低。在 Eu 处呈“V”型, 显示中等程度的负 Eu 异常, Ce 异常不明显。

## 2.2 稀土元素组成参数和地球化学指标与古气候的关系

岩心沉积时期三水盆地虽不为一典型的封闭型湖泊, 但在不直接受海洋影响的湖相沉积阶段, 湖泊的封闭性可能较好。并且由岩心的稀土元素分布模式可知, 沉积物具有较为一致的物质来源和形成机理。因而, 稀土元素组成参数可反映古气候的变化。

从图 4A 可以看出,  $CaCO_3$  含量对  $\sum REE$  的稀释作用很明显, 两者成较好的负相关关系。用两者线性回归分析的拟合方程来校正岩心中的  $\sum REE$ , 校正过的  $\sum REE$  记为  $\sum REE_{校正}$ 。 $\sum REE_{校正}$  与 A 元素具良好的相关性 (图 4B)。在细碎屑岩中 A 元素主要集中于粘土矿物之中, 稀土元素与 A 的密切关系表明, 其主要来自陆源的输入。一般来说,  $\sum REE_{校正}$  的高值表明陆源输入大, 指示温湿的气候条件。 $\sum REE_{校正}$  的低值表明陆源输入少, 指示干旱的气候环境。

$(La/Yb)_N$  是表征轻重稀土之间分异程度的参数, 其高值代表轻稀土相对富集, 低值代表重稀土含量相对较高。在咸水湖中, 轻稀土优先被有机质、粘土碎屑等吸附进沉积物中, 而重稀土则形成稳定的络合物滞留在湖水中。此机制是导致咸水湖中轻重稀土分异的主要原因<sup>[13]</sup>。Sr/Ba 比值可反映水体的盐度变化。Sr/Ba 比值 > 1 指示水体盐度高, 其盐度水平与咸水湖相当。Sr/Ba 比值 < 1 标识水体盐度相对较低, 其盐度与淡水湖相当<sup>[14]</sup>。沉积物中 Sr/Ba 比值绝大多数在 1 以上, 小于 1 的值主要集中在红岗段

上部 (30.6~0 m) 的少数样品中, 其均值为 2.38 (图 5)。Sr/Ba 比值指示岩芯沉积期间水体盐度普遍较高, 绝大多数时期已达到了咸水湖的盐度水平。一般认为  $(La/Yb)_N$  与沉积时期的氧化还原环境相关<sup>[15]</sup>, 但在盐度较高 (与咸水湖相当) 的湖泊中, 轻重稀土的分异主要由沉积时期有机质和粘土碎屑等的输入量决定。有机质和粘土碎屑输入较多时,  $(La/Yb)_N$  表现为高值, 其低值与有机质和粘土碎屑输入较少时相对应。由于 Al 元素主要集中于粘土矿物之中, 岩心中 Al 元素的含量可以反映粘土碎屑的相对含量。一般认为, 湖泊沉积物中有机碳 (TOC) 含量与原始有机质生产力相一致。低有机碳含量与有机质以原地来源为主且生产力较低时期相对应, 高有机碳含量与陆源有机质来源丰富时期相对应<sup>[16]</sup>。气候变化是影响有机质生产力的主要因素。温暖的气候有利于植物的生长, 而寒冷的气候植物生长受到限制。干燥少雨的气候条件下, 入湖径流量小, 陆源有机质输入减少, 湖水营养矿物质含量降低, 使水生浮游生物生长受限制, 原始有机质生产力低下。而在潮湿多雨气候条件下, 入湖径流量大, 带来丰富的陆生植物和营养物质, 使水生浮游生物得以繁荣, 从而使有机质生产力提高<sup>[17]</sup>。因而, 沉积物中有机碳含量高时, 一般指示温暖潮湿的气候条件, 其低值一般与干燥或干冷的气候环境相对应。

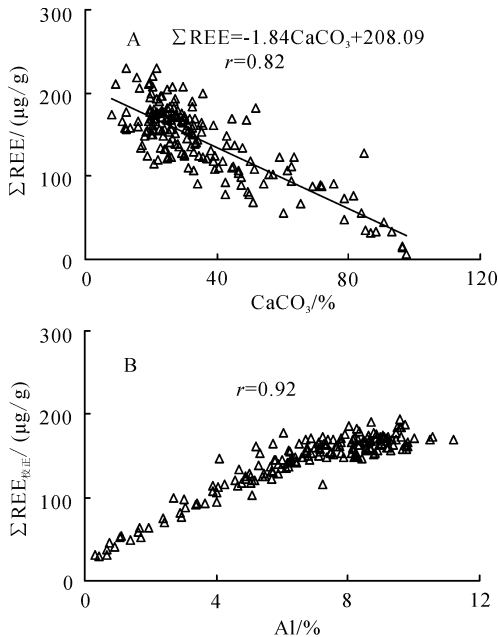


图 4 SB-01 孔中  $CaCO_3$  与  $\Sigma REE$  (A) 和 Al 与  $\Sigma REE_{校正}$  (B) 相关图

Fig 4 Plots of  $CaCO_3$  vs  $\Sigma REE$  (A) and Al vs

$\Sigma REE_{校正}$  (B) in Core SB-01

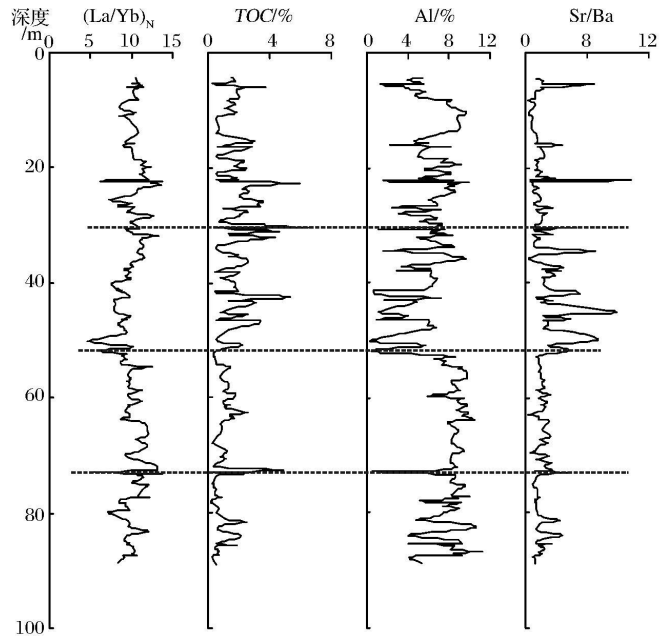


图 5 SB-01 孔中  $(La/Yb)_N$ , TOC, Al 和 Sr/Ba 比值垂直分布

Fig 5 Vertical distribution of  $(La/Yb)_N$ , TOC,

Al and Sr/Ba in Core SB-01

由图 5 可知, 莘庄组良坑段顶部 (89~72.7 m) 沉积时期, 偏低的  $(La/Yb)_N$  与低的有机碳含量和较高的 Al 元素含量相对应。由于湖盆处于稳定沉降的初期, 岩心所在位置可能离物源区相对较近, 使得 Al 元素含量较高。本段主要为粉—细砂岩沉积, 较粗的沉积粒度证实了这一点。因此, 本阶段应为较干燥的气候条件。与岩心中此阶段的古生物资料相一致<sup>[18]</sup>。红岗段下部 (72.7~51.8 m) 沉积阶段, 较高的  $(La/Yb)_N$  值与较低的有机碳含量和高的 Al 元素含量相对应。在半咸水和海洋环境中, 细菌的硫酸盐还原作用是缺氧条件下影响有机质保存的最有效的早期成岩作用<sup>[19]</sup>, 在此过程中降解的有机质可达 50% 以上<sup>[20]</sup>。有机质在沉积过程中可能遭受了较强的细菌硫酸盐还原作用, 在此过程中消耗了较多的有机质, 使得有机碳含量偏低。此阶段岩心中较高的硫含量应证了这一点, 也指示为温湿的气候条件。红岗段中上部沉积时期 (51.8~0 m),  $(La/Yb)_N$  的高值与有机碳和 Al 元素含量的高值相对应, 其低值对应于有机碳和 Al 元素含量的低值。因而, 在整个岩心沉积过程中,  $(La/Yb)_N$  的高值指示温湿的气候条件, 其低值表明较为干燥的气候环境。

Mn 在湖水中常以  $Mn^{2+}$  稳定存在, 只有当湖水强烈蒸发而使  $Mn^{2+}$  浓度饱和时, 它才会大量沉淀, 从而

在岩石中显示高值。Fe在湖水中易以  $Fe(OH)_3$  胶体快速沉淀,因而沉积物中 Fe/Mn 比值的高值对应温湿气候,低值是干热气候的响应。Mg/Ca 比值的高值指示干热气候,低值反映温湿气候<sup>[21]</sup>。Fe/Mn 和 Mg/Ca 比值这两个地球化学参数虽都易受后生作用的影响而未必能客观的反映沉积时期的古气候古环境特征,但可尝试用之。如果这两个地球化学参数与其它指标指示的结果相一致,则说明其是有效的。

### 2.3 古气候解释

根据  $\Sigma REE_{校正}$  和  $(La/Yb)_N$  的波动性特征,并结合 Fe/Mn 和 Mg/Ca 比值的变化以及其它地质记录,SB-01 孔可划分四个主要古气候阶段,其间以三个显著的  $\Sigma REE_{校正}$  低值层位为界(图 6)。

阶段 I (89~72.7 m):  $\Sigma REE_{校正}$  表现为高值,且较为稳定。 $\Sigma REE_{校正}$  与本阶段 Al 元素含量的高值相似,由于源区离岩心所在位置相对较近,使得  $\Sigma REE_{校正}$  较高。 $(La/Yb)_N$  偏低,指示较为干燥的气候条件。该岩段含有较丰富的大型轮藻化石,如 *Pee-*

*kichara subpherica*, *Staphnochara kiangsuensis*, *Rhabdochara jiangduensis* 等。较丰富的大型轮藻化石的出现,表明湖盆当时总体水深较浅,水动力较强,底层水体含氧较为丰富<sup>[22]</sup>。相对偏低的 Fe/Mn 比值及较高的 Mg/Ca 比值也表明降水相对较少,指示了较为干燥的气候环境。

阶段 II (72.7~51.8 m):  $\Sigma REE_{校正}$  与阶段 I 相似,表现为高值且较为稳定,但  $(La/Yb)_N$  高于阶段 I。应指示温湿的气候条件。高而稳定的 Fe/Mn 比值和低且波动不大的 Mg/Ca 比值也支持这一推论。本阶段没有发现大型轮藻化石,仅含有少量小型轮藻化石,如 *Obusochara brevicylindrica*, *Grambastichara subcylindrica*, *Maedlerisphaera mtleensis* 等。小型轮藻的出现表明湖泊水体有一定的深度<sup>[5]</sup>。反映在温湿的气候条件下,三水盆地的水位上升,湖泊开始扩展。该段岩性以灰黑色粉砂质泥岩、灰色泥质粉砂岩为主,也证实了水深加大的沉积环境。

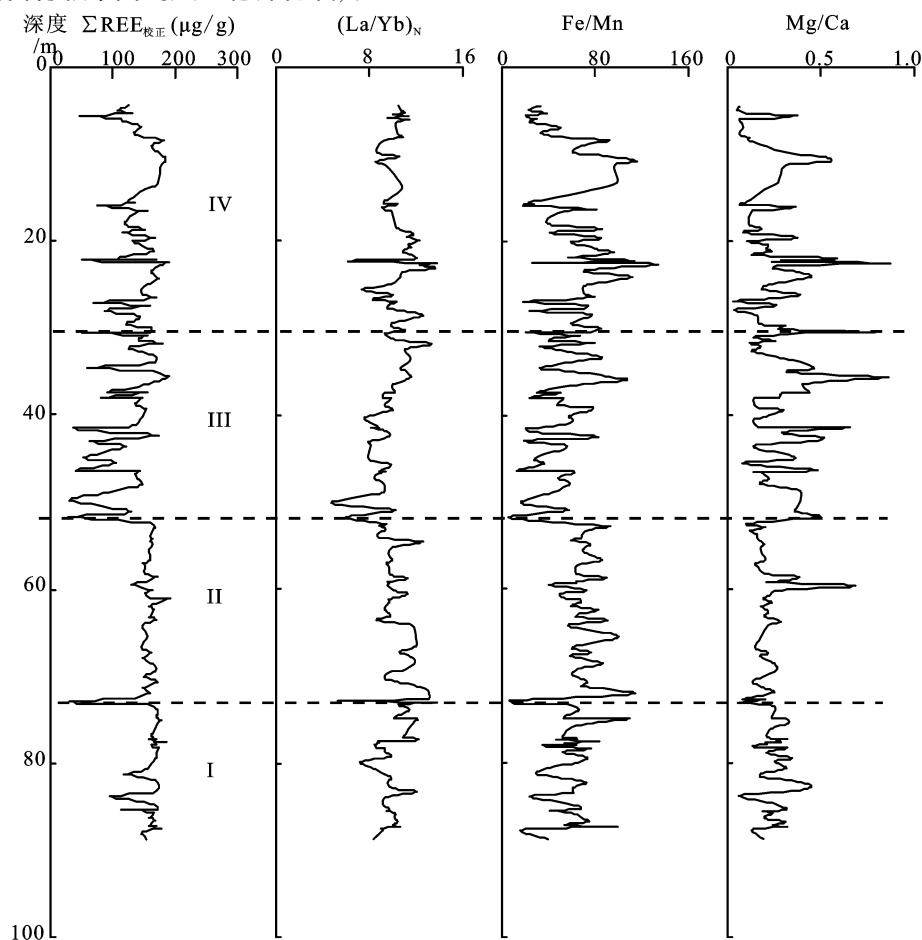


图 6 SB-01 孔中  $\Sigma REE$ 、 $(La/Yb)_N$ 、Fe/Mn 和 Mg/Ca 比值垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of  $\Sigma REE$ ,  $(La/Yb)_N$ , Fe/Mn and Mg/Ca in Core SB-01

阶段 III(51.8~30.6 m):  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$  变化频繁且幅度很大, 总体上体现出明显的升高趋势。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  波动较大, 亦表现出明显的增大趋势。 $\text{Fe}/\text{Mn}$  比值显示出与  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$  相似的变化规律, 只是增大的趋势不如  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$  明显。 $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$  与  $\text{Fe}/\text{Mn}$  比值的变化特征表明古气候条件的快速变化, 表现出温湿与干旱气候环境的交替出现, 且总体上有明显的变湿趋势。该段岩心沉积前期为黑色泥岩与灰岩频繁交替出现, 夹多层薄层石膏, 后期转为以黑色泥岩为主。显示出沉积环境的迅速变迁, 且后期转为较为湿润的气候条件。在湿润的气候条件下, 陆源输入量大,  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  和  $\text{Fe}/\text{Mn}$  比值均较高,  $\text{Mg}/\text{Ca}$  比值较低; 在间歇性干旱时期, 陆源输入减少,  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  和  $\text{Fe}/\text{Mn}$  比值明显较低,  $\text{Mg}/\text{Ca}$  比值显著升高。

阶段 IV(30.6~0 m):  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$  变化较为频繁, 但变化幅度相对阶段 III 小很多, 只是沉积后期变化幅度较大, 总体上含量较高。表明以温湿气候条件为主。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  在本段岩心沉积前期与  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$  的变化趋势较为一致, 后期略低, 且波动很小。指示了以温湿为主的气候条件。 $\text{Fe}/\text{Mn}$  比值表现出与  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$  几乎相同的变化规律, 也表明了温湿气候条件占主导地位。除两个高值时期外,  $\text{Mg}/\text{Ca}$  比值均保持较低值, 指示了以温湿气候条件为主。本段主要为暗色泥页岩沉积, 其岩性特征也显示了以温湿气候环境为主。在岩心沉积晚期经历了一个短暂的干旱时期。其时陆源输入较少,  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$  与  $\text{Fe}/\text{Mn}$  比值下降。与本段岩心沉积时期全岩碳酸盐的碳、氧同位素地球化学记录所指示的气候环境相一致<sup>[4]</sup>。

### 3 结论

SB-01 孔岩心沉积物的稀土元素总量 ( $\sum \text{REE}$ ) 变化范围大, 分布范围为 7.06~230.01  $\mu\text{g}/\text{g}$  平均值为 142.32  $\mu\text{g}/\text{g}$  接近全球平均大陆上地壳成分, 略低于北美页岩。沉积物属轻稀土相对富集、右倾斜型、Eu 中度亏损、且 Ce 异常不明显的稀土元素分布模式。在岩心不同深度处, 沉积物具有较为一致的物质来源和形成机理, 而且源区具有大陆上地壳性质。根据稀土元素的分布特征, 三水盆地早古近纪的古气候变化可分为四个阶段: 阶段 I 应为相对较为干燥的气候条件, 岩心所在位置离源区相对较近可能使得  $\sum \text{REE}_{\text{校正}}$  表现为较高值; 阶段 II 转为较温湿的气候环境; 阶段 III 表现出温湿与干旱气候环境的交替出

现, 且总体上有明显的变湿趋势; 阶段 IV 以温湿气候条件为主。

### 参考文献 (References)

- 史基安, 郭雪莲, 王琪, 等. 青海湖 QH1 孔晚全新世沉积物稀土元素地球化学与气候环境关系探讨 [J]. 湖泊科学, 2003, 15 (1): 28-34 [ Shi Ji'an, Guo Xuelian, Wang Qi, *et al*. Geochemistry of REE in QH1 sediments of Qinghai lake since Late Holocene and its paleoclimatic significance [J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15 (1): 28-34]
- Tanaka K, Akagawa F, Yamamoto K, *et al*. Rare earth element geochemistry of lake Baikal sediment: its implication for geochemical response to climate change during the Last Glacial/Interglacial transition [J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26: 1362-1368
- 唐忠驭. 三水盆地火山活动与油气的关系 [J]. 石油与天然气地质, 1984, 5 (2): 89-100 [ Tang Zhongyu. Relationship of oil and gas with volcanism in Sanshui Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1984, 5 (2): 89-100]
- 刘春莲, Frisch FT, 白雁, 等. 三水盆地古近系湖相沉积岩的氧、碳同位素地球化学记录及其环境意义 [J]. 沉积学报, 2004, 22 (1): 36-40 [ Liu Chunlian, Frisch FT, Bai Yan, *et al*. Paleogene environmental changes deduced from stable isotopic data from bulk carbonates in the Sanshui Basin, South China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22 (1): 36-40]
- 张显球, 周晓萍, 陈修奕. 三水盆地白垩—第三纪钻井地层划分对比图集 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993, 1-177 [ Zhang Xianqiu, Zhou Xiaoping, Chen Xiuyi. Atlas of Cretaceous to Tertiary Strata Classification and Correlation in the Sanshui Basin of South China [M]. Beijing: Marine Press, 1993, 1-177]
- 王将克, 李国藩, 汪晋三. 广东三水盆地白垩纪—早第三纪鱼类化石 [M]. 北京: 科学出版社, 1981, 1-90 [ Wang Jiangke, Li Guofan, Wang Jinsan. The Early Tertiary Fossil Fishes from Sanshui and Its Adjacent Basin, Guangdong [M]. Beijing: Science Press, 1981, 1-90]
- Taylor S R, Mcdennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Oxford-London: Blackwell Scientific Publications, 1985, 1-301
- Haskin M A, Haskin L A. Rare earth in European shales: a redetermination [J]. Science, 1966, 154: 507-509
- 李双林. 东海陆架 HY126EA1 孔沉积物稀土元素地球化学 [J]. 海洋学报, 2001, 23 (3): 127-132 [ Li Shuanglin. Geochemistry of rare earth element in sediments at HY126EA1 hole in the continental shelf of the East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23 (3): 127-132]
- Boynston W V. Geochemistry of the rare earth elements [C] // Hendersson P. Rare Earth Elements Geochemistry Developments in Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984, 63-114
- 曹军骥, 张小曳, 王丹, 等. 晚新生代风尘沉积的稀土元素地球化学特征及其古气候意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001,

- 21(1): 98-101 [Cao Junji Zhang Xiaoye, Wang Dan *et al* REE geochemistry of late Cenozoic eolian sediments and the paleoclimate significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(1): 98-101]
- 12 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989 1-496 [Wang Zhonggang Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua *et al* Rare Earth Element Geochemistry [M]. Beijing Science Press 1989: 1-496]
- 13 Johannesson K H, Berry W L, Bird D A, *et al* Rare earth element concentrations and speciation in alkaline lakes from the western USA [J]. *Geophysical Research Letters* 1994 21(9): 773-776
- 14 南京大学地质系. 地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1984 357-358 [Department of Geology of Nanjing University. Geochemistry [M]. Beijing Science Press 1984 357-358]
- 15 张沛, 郑建平, 张瑞生, 等. 塔里木盆地塔北隆起奥陶系—侏罗系泥岩稀土元素地球化学特征 [J]. *沉积学报*, 2005 23(4): 740-746 [Zhang Pei Zheng Jianping Zhang Ruisheng *et al* Rare earth element characteristics of Ordovician-Jurassic mudstone in Tabei Uplift Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2005 23(4): 740-746]
- 16 Wignall P B Black Shales [M]. Oxford: Clarendon Press, 1994 127
- 17 刘春莲, 杨建林, R L H J 等. 影响湖相沉积岩中有机碳分布的主要因素 [J]. *沉积学报*, 2001, 19(1): 113-116 [Liu Chunlian Yang Jianlin R L H J *et al* Factors influencing organic carbon distribution in lacustrine sediments [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2001, 19(1): 113-116]
- 18 谢叶彩, 刘春莲, 商建林, 等. 三水盆地古近纪早期微体生物群及其古环境意义 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2008, 47(2): 114-117 [Xie Yecai Liu Chunlian Shang Jianlin *et al* Early Paleogene microfossils and their paleoenvironmental implications in Sanshui Basin, South China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* 2008 47(2): 114-117]
- 19 Bertrand P, Lallier-Vergès E, Boussafir M. Enhancement of accumulation and anoxic degradation of organic matter controlled by cyclic productivity: a model [J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 22: 511-520
- 20 Thode-Andersen S, Jørgensen B B. Sulfate reduction and the formation of  $^{35}\text{S}$ -labeled  $\text{FeS}$ ,  $\text{FeS}_2$ , and S in coastal marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography* 1989, 34: 793-806
- 21 王随继, 黄杏珍, 妥进才, 等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义 [J]. *沉积学报*, 1997, 15(1): 65-70 [Wang Suiji Huang Xingzhen Tuo Jincan *et al* Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 1997, 15(1): 65-70]
- 22 胡济民, 曾德敏. 洞庭湖盆地白垩纪早第三纪的岩石地层与生物地层 [J]. *湖南地质*, 1996 15(4): 193-197 [Hu Jimin Zeng Demin. Petrostratigraphy and biostratigraphy of Cretaceous-Early Tertiary periods in Dongting Basin [J]. *Hunan Geology*, 1996 15(4): 193-197]

## Rare Earth Element Records of the Lower Paleogene Sediments in the Sanshui Basin and Their Paleoclimate Implications

CHEN Liang<sup>1</sup> LU Chun-lian<sup>1,2</sup> ZHUANG Chang<sup>1</sup> CHE Xiao-guang<sup>1</sup> WU Jie<sup>1</sup>

(1 Department of Earth Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275;

2 Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640)

**Abstract** The concentration of rare earth elements (REE) was determined in the Lower Paleogene core sedimentary rock from the Sanshui Basin. The  $\Sigma\text{REE}$  contents range from 7.06 to 230.01  $\mu\text{g/g}$  with an average value of 142.32  $\mu\text{g/g}$  close to that of Upper Continental Crust (UCC) and slightly depleted relative to North American Shale Chondrite-normalized REE patterns show little variation throughout the core and are consistent with the composition of UCC, with light REE enrichment, negative slopes, moderate Eu depletion and unobvious Ce anomaly. This indicates a relatively consistent sediment source and formation mechanism during the deposition of Lower Paleogene sediments in the Sanshui Basin. The REE records, combining with other geochemical proxies ( $\text{Fe/Mn}$ ,  $\text{Mg/Ca}$ ), suggest a general trend of getting more humidity during the core deposition and allow the recognition of four paleoclimate stages: stage I (89~72.7 m) with drier condition, stage II (72.7~51.8 m) with dominantly humid condition, stage III (51.8~30.6 m) with fluctuation of humid and dry condition and stage IV (30.6~0 m) with prevailing humid climate with intermittent dry condition.

**Key words** REE, paleoclimate, Lower Paleogene, Sanshui Basin